



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Doctoral en Control de Sistemas

Navegación de Vehículos Autónomos
Subacuáticos
basados en Control por Visión

Carlos Enrique Berger

Bahía Blanca

Argentina

Año 2014

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Control de Sistemas, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras y el Instituto Argentino de Oceanografía, durante el período comprendido entre el 30 de Junio del 2009 y el 28 de Febrero de 2014, bajo la dirección de Dr. Mario Alberto Jordán, Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur (DIEC-UNS) e Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Carlos Enrique Berger



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/....../....., mereciendo la calificación de(.....)

Agradecimientos

Primeramente quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Mario A. Jordán, quien ha aportado sus ideas y su experiencia para la dirección de mi Tesis, guiando mi labor y definiendo el camino para alcanzar los resultados que aquí se presentan.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por la Beca Doctoral destinada al financiamiento de mis estudios de Posgrado.

Al Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) por el lugar de trabajo otorgado para llevar a cabo mis tareas diarias de investigación.

A mis compañeros del Grupo de Control Adaptivo en Ingeniería Oceánica (GCAIO), en especial al Dr. Jorge Bustamante y al Ing. Emanuel Trabes, por su gran colaboración durante la etapa experimental de la Tesis.

A la Universidad Nacional del Sur, en particular al Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, donde realicé mi formación de grado como Ingeniero Electrónico y aspiro a obtener el título de Doctor en el área de Control de Sistemas.

Al Departamento de Matemática, donde desarrollo la actividad docente que complementa mi formación profesional junto a mis compañeros de trabajo del Área I, con quienes tengo la posibilidad de transmitir los conocimientos adquiridos en la Universidad.

A Natalia, por su invaluable compañía día a día y por haber estado a mi lado aún en los momentos más difíciles.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, por el cariño de siempre y por el gran esfuerzo que realizaron para apoyar mis estudios.

Resumen

La presente tesis tiene como principal objetivo el estudio de factibilidad del uso de cámaras de video como elemento sensor para el soporte de sistemas de control abocados al seguimiento de trayectorias con vehículos del tipo denominado AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Este sensor basado en visión permite determinar el posicionamiento relativo del vehículo con respecto a un determinado objeto en el fondo, generando una estimación de estados que puede ser empleada en diversos tipos de controladores.

Como particularidad adicional se describe el seguimiento de líneas con patrones regularmente distribuidos a lo largo de ésta, lo que permite estimar también la velocidad lineal y angular del vehículo.

La hipótesis que sustenta el objetivo es que la línea presenta un contraste adecuado respecto al fondo y que exista un grado de transparencia del agua suficientemente alto para la detección de patrones de la misma.

Como parte de la verificación experimental de la presente Tesis se construye un vehículo prototípico con los grados de libertad necesarios para ilustrar los resultados obtenidos. Con este planteo, el objetivo de control primordial es reducir los errores de desplazamiento lateral y rumbo respecto a la línea, y simultáneamente forzar la navegación a una determinada velocidad crucero.

A partir de técnicas digitales de procesamiento de imágenes, se desarrollan algoritmos para extracción de características del segmento de línea encuadrado en el video en cada instante. Inicialmente, el desplazamiento respecto al centro de la imagen y el ángulo respecto a la vertical sirven como medidas geométricas para la descripción de errores de seguimiento de línea. A su vez, las diferencias de posiciones de determinados puntos visibles (patrones) en dos fotogramas consecutivos define el campo de velocidades de la línea en la imagen.

Por otro lado, mediante un modelo matemático de la cámara y el entorno, se elabora un sistema de ecuaciones que permite relacionar las métricas en el plano 2D de la imagen con el espacio 3D en el que se desplaza el vehículo. La transformación de coordenadas obtenida representa una estimación de variables de estados respecto a sistemas de referencia fijos a la línea o al vehículo en una métrica Euclideana. Los parámetros constantes del modelo son estimados en una única calibración de la cámara.

Con el fin de incrementar la robustez del sensor ante perturbaciones del video debido a la mala calidad de la imagen o turbidez del agua, se realiza un estudio de propiedades estadísticas del histograma de una región particular de la imagen para determinar la presencia o ausencia de la línea en dicha región, a la vez que se obtiene una indicación cualitativa de la calidad de imagen. La selección de la región para el análisis se efectúa dinámicamente y es actualizada en cada imagen. De los resultados del análisis se desprende una señal que alerta al controlador en caso de ausencia de la línea o mala calidad de imagen.

Seguidamente se proponen y diseñan sistemas de control basados en visión pura a través de los datos del sensor. Los diseños conllevan la distorsión del entorno visible acorde a la métrica de la cámara. La estructura general de un sistema de control propuesto consiste en una cascada de controladores cinemáticos y dinámicos. A los fines de disponer de criterios de comparación para los análisis de estabilidad y performance de control, se diseñan controladores más familiares como los del tipo PID y de dinámica inversa. No obstante, su utilización en un sistema de control, donde el sensor principal es una cámara, requiere de adaptaciones que aseguren acciones de control que mantengan al vehículo en posiciones dentro del campo de visión. De esta manera, se describe el diseño de controladores híbridos capaces de operar con el sensor de visión empleando para ello transformaciones de estados 2D del plano de la imagen a estados 3D de métrica Euclideana según el modelo de cámara. Adicionalmente, se presenta un controlador cinemático basado en imagen en el cual sólo es necesaria la estimación de estados en el plano de la imagen para generar las referencias de velocidad. Las salidas de éste pueden ser utilizadas en diversos tipos de controladores dinámicos para efectuar el seguimiento de velocidades.

El desempeño de los sistemas de visión y control es analizado mediante numerosas simulaciones y pruebas experimentales de laboratorio y en piletta bajo diversas condiciones del medio. En la práctica puede observarse que la hipótesis de la existencia de cierto nivel de contraste mínimo entre el suelo y la línea se manifiesta aproximadamente a pesar de las altas perturbaciones de turbidez del agua y ondas cáusticas debido al oleaje y los rayos luminosos pasantes hacia el fondo.

Las conclusiones de la tesis indican que el sensor basado en visión es apto para tareas de seguimiento en donde la distancia del vehículo al fondo es relativamente baja (menos

de 10 metros según la visibilidad), y su inclusión en un sistema de control es posible mediante controladores de características de razonamiento lógico o difuso. Se hace hincapié que en los diseños de controlador abordados con imágenes en tiempo real, no es necesario un modelo de la dinámica del sistema, sólo se necesita una calibración de la cámara y el relevamiento de curvas características de la relación entre métrica de visión y Euclídeana. En particular, se demuestra que con ciertas adaptaciones, en su combinación con controladores del tipo PID se llega a sistemas de control de mejor prestación para alcanzar mejor los objetivos propuestos.

Abstract

The main objective of this Thesis is the feasibility study of video cameras as sensor element in control systems for path-tracking with AUVs (Autonomous Underwater Vehicle). This vision-based sensor allows to determine the relative positioning of the vehicle with respect to an object on the sea bottom. It generates a states estimation which could be employed by different types of controllers.

As additional particularity one describes the path-following of lines with regularly distributed patterns, which also allows to estimate the linear and angular velocities of the vehicle. The hypothesis behind the goal is that the line presents a suitable contrast with the background and enough water transparency exists in order to detect its patterns.

The experimental verification in this Thesis included the building of a prototype of underwater vehicle with the necessary degrees of freedom to illustrate the obtained results. Under the described suppositions, the main control goal is to reduce the lateral and orientation path errors with respect to the line, simultaneously forcing the navigation at a certain cruise speed.

Digital image processing techniques were used for feature extraction of the visible line stretch in each frame. Initially, the displacement of the stretch with respect to the frame center and its angle with respect to the vertical axis serve as geometric measures for the path errors description. At the same time, the position differences between identified line patterns of two consecutive frames provide a velocity field of the image.

On the other side, by the help of a mathematical camera model and an environment model, an equation system is constructed in order to connect the metrics in the 2D image plane with the 3D space in where the vehicle navigates. The obtained coordinate transformation represents a state variable estimation with respect to a coordinate system which is fixed to the line or to the vehicle in an Euclidean metrics. The constant parameters of the model are estimated by a single camera calibration.

With the purpose to increase the sensor robustness against video perturbations like bad image quality or water turbidity, a study of statistic properties of the histogram of a particular image region is accomplished. This study determines the presence or absence of the line in this region and, in addition, an indication of the image quality is obtained. The region selection for the analysis is performed dynamically and updated in every frame. As

result, an alarm is generated to alert the controller in case of line absence or bad quality of the image.

Subsequently, vision-based control systems that uses the data of camera sensor are proposed and designed. The designs involve the distortion of the visible environment according to the camera metrics. The proposed general control structure consists in a cascade of dynamic and kinematic controllers. In order to provide comparison criteria for the stability and performance analysis of the control, more familiar controllers like the PIDs and inverse dynamics controllers are designed. A second control objective is to achieve control actions that can ensure to maintain the vehicle continuously in positions inside the vision zone. For that reason, particular designs that combine both types of controllers are presented. These are able to operate with the vision sensor, employing state transformation from 2D image plane to states in the 3D Euclidian space. Additionally a vision-based kinematic controller is presented, in which it is only necessary to measure features in the image plane in order to generate rate references. These references can be applied in different types of dynamic controllers for performing rate following.

The performance of the vision-based sensor and control systems is analyzed through numerous simulations and experimental tests in laboratory and pools, under variations of environmental conditions. In the praxis it can be observed that the work hypothesis related to the existence of a minimum level of contrast between line and sea background is properly fulfilled despite of perturbations of water turbidity and caustic waves due to the surface swell and the light rays overstepping towards the bottom.

The conclusions in this Thesis indicate that the developed vision-based sensor is suitable for application in cases where the distance from the vehicle to the sea bottom is short (till 10 meters, depending on turbidity). Its inclusion in the control system is possible for controllers that possess certain fuzzy characteristics or logical reasoning. It emphasizes that in the addressed controller designs with real-time images a model of the system dynamics is not necessary, just a camera calibration and survey of characteristic curves of the relationship between vision and Euclidean metric is needed. In particular, it is demonstrated that with certain adaptations, the combination of the developed sensor with a PID-type controller arrives to a better system performance in order to achieve appropriately path-tracking of lines upon a vision basis.

Glosario

VARIABLES Y CONSTANTES

Capítulo 2: Modelo Dinámico

O : origen del sistema de referencia inercial

\mathbf{P} : punto del espacio de coordenadas (X, Y, Z) en el sistema de referencia inercial

X : coordenada de \mathbf{P} en la dirección del eje X del sistema de referencia inercial

Y : coordenada de \mathbf{P} en la dirección del eje Y del sistema de referencia inercial

Z : coordenada de \mathbf{P} en la dirección del eje Z del sistema de referencia inercial

O_V : origen del sistema de referencia fijo al vehículo

X_V : coordenada en la dirección del eje X del sistema de referencia del vehículo

Y_V : coordenada en la dirección del eje Y del sistema de referencia del vehículo

Z_V : coordenada en la dirección del eje Z del sistema de referencia del vehículo

ϕ : rolido o “*roll*” respecto del eje X del sistema de referencia inercial

θ : cabeceo o “*pitch*” respecto del eje Y del sistema de referencia inercial

ψ : rumbo o “*yaw*” respecto del eje Z del sistema de referencia inercial

$\boldsymbol{\eta}$: vector de posición del vehículo en el sistema de referencia inercial

$\boldsymbol{\eta}_1$: vector de desplazamiento del vehículo en el sistema de referencia inercial

$\boldsymbol{\eta}_2$: vector de rotación del vehículo en el sistema de referencia inercial

p : velocidad de rotación alrededor del eje X_V

q : velocidad de rotación alrededor del eje Y_V

r : velocidad de rotación alrededor del eje Z_V

u : velocidad en la dirección del eje X_V

v : velocidad en la dirección del eje Y_V

w : velocidad en la dirección del eje Z_V

- $\boldsymbol{\nu}$: vector de velocidades del vehículo en el sistema de referencia del vehículo
- $\boldsymbol{\nu}_1$: vector de velocidades de traslación en el sistema de referencia del vehículo
- $\boldsymbol{\nu}_2$: vector de velocidades de rotación en el sistema de referencia del vehículo
- $\boldsymbol{\nu}_c$: vector de velocidades del medio acuoso en el sistema de referencia del vehículo
- $J(\boldsymbol{\eta})$: matriz de rotación del sistema de referencia del vehículo con respecto al inercial
- L : Lagrangiano
- T : energía cinética del vehículo
- T_{RB} : energía cinética del cuerpo rígido
- T_A : energía cinética del fluido
- V : energía potencial del vehículo
- P_d : energía disipativa
- $\boldsymbol{\tau}_\eta$: vector de fuerza generalizada aplicada en el punto O_V del vehículo con respecto al sistema de referencia inercial
- D_η : matriz de arrastre generalizada con respecto al sistema de referencia inercial
- \mathbf{g}_η : vector de fuerza de flotabilidad generalizada con respecto al sistema de referencia inercial
- M_η : matriz de inercia generalizada con respecto al sistema de referencia inercial
- C_η : matriz generalizada de fuerzas centrípetas y de Coriolis con respecto al sistema de referencia inercial
- $\boldsymbol{\tau}$: vector de fuerza generalizada aplicada en el punto O_V del vehículo con respecto al sistema de referencia del vehículo
- D : matriz de arrastre generalizada con respecto al sistema de referencia del vehículo
- \mathbf{g} : vector de fuerza de flotabilidad generalizada con respecto al sistema de referencia del vehículo
- C : matriz generalizada de fuerzas centrípetas y de Coriolis con respecto al sistema de referencia del vehículo
- M : matriz de inercia generalizada con respecto al sistema de referencia del vehículo
- M_A : componente de masa aditiva de la matriz de inercia
- M_{RB} : componente de cuerpo rígido de la matriz de inercia
- C_A : matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis correspondiente a las componentes de masa aditiva
- C_{RB} : matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis correspondiente a la inercia del cuerpo

- (X_G, Y_G, Z_G) : coordenadas del centro de masa respecto a O_V
 m_{aij} : valores de masa aditiva en cada modo de movimiento
 g : aceleración de la gravedad
 m : masa del vehículo
 I_{ij} : momentos de inercia respecto a los ejes principales
 W_{AUV} : peso del vehículo
 W_w : flotabilidad del vehículo
 (X_B, Y_B, Z_B) : coordenadas del metacentro respecto a O_V
 $\boldsymbol{\tau}_a$: vector de fuerza generalizada del modelo simplificado
 D_a : matriz de arrastre generalizada del modelo simplificado
 \mathbf{g}_a : vector de fuerza de flotabilidad generalizada del modelo simplificado
 C_a : matriz generalizada de fuerzas centrípetas y de Coriolis del modelo simplificado
 M_a : matriz de inercia generalizada del modelo simplificado

Capítulo 3: Sistema de Visión

- O_C : centro de proyección de la cámara
 \mathbf{P}_C : punto del espacio de coordenadas $(X_C, Y_C, Z_C)^T$ en el sistema de referencia de la cámara
 f : distancia focal
 \mathbf{p} : de coordenadas $(x, y)^T$ en el plano de imagen
 \mathbf{p}^h : representación homogénea del punto \mathbf{p}
 \mathbf{P}_C^h : representación homogénea del punto \mathbf{P}_C
 M_C : matriz de proyección de la cámara
 \mathbf{I} : matriz identidad
 $\mathbf{0}$: vector nulo
 p_x : coordenada del punto principal en el eje horizontal del plano de imagen
 p_y : coordenada del punto principal en el eje vertical del plano de imagen
 K : matriz de calibración de la cámara
 R : matriz de orientación del marco de coordenadas de la cámara
 \mathbf{C} : centro de la cámara en el marco de coordenadas del espacio
 \mathbf{t} : vector de traslación de la cámara

\mathbf{p}_{dist} : distorsión del punto \mathbf{p}

k_1, k_2 : coeficientes de distorsión radial

q_1, q_2 : coeficientes de distorsión tangencial

Δ : posición del punto medio del segmento estimado respecto al centro de la imagen

Δ_x : coordenada de Δ en el eje horizontal

Δ_y : coordenada de Δ en el eje vertical

α : ángulo del segmento estimado con respecto a la vertical

F_{RGB} : imagen en formato *RGB*

W : ancho de la imagen (resolución en píxeles del eje horizontal)

H : alto de la imagen (resolución en píxeles del eje vertical)

D_f : dominio de la imagen

I : imagen en escala de grises (matriz de intensidades)

I_B : imagen con aumento de brillo

I_C : imagen con mejora de contraste

I_S : imagen suavizada

I_T : imagen binarizada

I_E : imagen erosionada

I_D : imagen dilatada

C_{I_D} : contornos de la imagen I_D

b : elemento estructural para operaciones morfológicas

D_b : dominio del elemento estructural

γ : parámetro de ajuste de contraste de imagen

w_f : ancho del filtro de suavizado de imagen

ε : umbral de binarización

(x_{qk}, y_{qk}) : coordenadas del q -ésimo punto que conforma el k -ésimo contorno

\mathbf{c}_k : punto de coordenadas (x_k, y_k) del centroide del k -ésimo contorno

n_k : número de píxeles que conforman el k -ésimo contorno

N_C : número de contornos en C_{I_D} luego de filtrar por tamaño

\mathbf{z} : zona de confianza (certidumbre) para selección de contornos

a_z : ancho de la zona de confianza

L_1, L_2 : bordes laterales de \mathbf{z}

$L_m(x_k), L_M(x_k)$: cotas para selección del k -ésimo contorno

$\rho(k)$: bandera lógica de selección del k -ésimo contorno respecto a la zona de confianza

λ : factor de olvido

$\hat{\alpha}_{T_i}$: valor filtrado de la estimación α en el instante T_i

$\hat{\Delta}_x$: valor filtrado de la estimación Δ_x en el instante T_i

$\hat{\Delta}_y$: valor filtrado de la estimación Δ_y en el instante T_i

L_{T_i} : línea estimada en el instante T_i

C_r : punto de intersección en el plano de imagen entre dos líneas estimadas consecutivamente

θ_{rot} : ángulo entre dos líneas estimadas consecutivamente

$(x_{c_{r_i}}, y_{c_{r_i}})$: coordenadas del punto C_r en el instante T_i

H_i : conjunto de vértices $\{H1_i, H2_i, H3_i, H4_i\}$ de la región de interés en el instante T_i

$R(C_r, \theta_{rot})$: transformación de vértices entre regiones de interés en imágenes consecutivas

$R_{\theta_{rot}}$: matriz de rotación entre regiones de interés en imágenes consecutivas

M_{T_i} : matriz de extracción de la región de interés en el instante T_i

$H(I)$: histograma de la ROI de la imagen I en escala de grises

δ_{ROI} : densidad alrededor del máximo de $H(I)$

σ_{ROI} : desviación estándar respecto al máximo de $H(I)$

δ_{MAX} : densidad máxima alrededor del máximo para un $H(I)$ de patrón

σ_{MIN} : desviación estándar mínima respecto al máximo para un $H(I)$ de patrón

ρ_{ROI} : bandera lógica del resultado de la supervisión de la ROI

Capítulo 4: Estimación de Estados

\mathbf{V}_C : vector de velocidades $(V_X, V_Y, V_Z)^T$ de traslación de la cámara con respecto a O_C

$\mathbf{\Omega}_C$: vector de velocidades $(\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z)^T$ de rotación de la cámara con respecto a O_C

d : distancia entre los puntos O_C y O_V

β : ángulo de inclinación de la cámara con respecto al eje X_V

h : altitud del vehículo con respecto al fondo

\mathbf{V}_{O_C/O_V} : velocidad del punto O_C con respecto a O_V

\mathbf{V}_V : vector de velocidades $(\dot{X}_V, \dot{Y}_V, \dot{Z}_V)^T$ de traslación de la cámara con respecto a O_C

$\mathbf{\Omega}_V$: vector de velocidades $(\Omega_{X_V}, \Omega_{Y_V}, \Omega_{Z_V})^T$ de rotación de la cámara con respecto a O_C

π : plano de fondo

\vec{n}_π : vector normal de π

\mathbf{P}_0 : punto sobre π en el sistema de referencia de la cámara

O_M : origen del sistema de referencia en el centro de masa del AUV

O_I : origen del sistema de referencia inercial en un punto de la línea

\mathbf{P}_{om}^i : traslación del centro de masas del vehículo respecto al sistema fijo

R_m^v : matriz de rotaciones respecto al centro de masas

\mathbf{P}_{oc}^v : traslación del centro de la cámara respecto al sistema del vehículo

R_v^c : matriz de rotaciones respecto al sistema de la cámara

\mathbf{P}_t : vector de traslación relativa del centro de masa del vehículo con respecto a la línea

Y_t : desplazamiento lateral físico del vehículo con respecto a la línea

x_L : punto de intersección entre la línea proyectada y el eje x del plano de imagen

s_1, s_2, s_3, s_4 : coeficientes del sistema de ecuaciones para estimación de posición

ζ : vector de características de línea en el plano de la imagen

Capítulo 5: Sistema de Control para Seguimiento de Líneas

α_{LIM_n} : n -ésima curva límite del campo de visión en el plano (x_L, α)

p_1, p_2, p_3, p_4 : coeficientes del sistema de ecuaciones inversas para estimación de parámetros de línea

$\alpha_{y0}(x_L)$: curva de nivel $Y_t = 0$ en el plano (ψ, Y_t)

$\alpha_{\psi0}(x_L)$: curva de nivel $\psi = 0$ en el plano (ψ, Y_t)

E_r : parámetro constante de la curva de nivel $\alpha_{y0}(x_L)$

E_t : parámetro constante de la curva de nivel $\alpha_{\psi0}(x_L)$

$\alpha_{MIN}, \alpha_{MAX}$: valores límite del ángulo α en el plano (x_L, α)

S_1 : configuración de posicionamiento relativo correspondiente a $\psi < 0, Y_t < 0$

S_2 : configuración de posicionamiento relativo correspondiente a $\psi > 0, Y_t < 0$

S_3 : configuración de posicionamiento relativo correspondiente a $\psi > 0, Y_t > 0$

S_4 : configuración de posicionamiento relativo correspondiente a $\psi < 0, Y_t > 0$

Y_{tLIM_n} : n -ésima curva límite del campo de visión en el plano (ψ, Y_t)

W_{1n}, W_{2n} : parámetros constantes de la curva Y_{tLIM_n}

ψ_{MIN}, ψ_{MAX} : valores límite del ángulo ψ en el plano (ψ, Y_t)

\mathbf{h}_k : punto de coordenadas (x_{Lk}, α_k) en el plano (x_L, α)

- \bar{d}_R : distancia exacta entre \mathbf{h}_k y la curva de nivel $\alpha_{y0}(x_L)$
- \bar{d}_T : distancia exacta entre \mathbf{h}_k y la curva de nivel $\alpha_{\psi0}(x_L)$
- d_R : distancia aproximada entre \mathbf{h}_k y la curva de nivel $\alpha_{y0}(x_L)$
- d_T : distancia aproximada entre \mathbf{h}_k y la curva de nivel $\alpha_{\psi0}(x_L)$
- \mathbf{h}_{mR} : punto de coordenadas $(x_{LmR}, \bar{\alpha}_{mR})$ que determina la distancia mínima entre \mathbf{h}_k y $\alpha_{y0}(x_L)$
- \mathbf{h}_{mT} : punto de coordenadas $(x_{LmT}, \bar{\alpha}_{mT})$ que determina la distancia mínima entre \mathbf{h}_k y $\alpha_{\psi0}(x_L)$
- $C_f(\mathbf{h}_k)$: configuración de posición del vehículo para el punto \mathbf{h}_k
- u_{nom} : velocidad nominal de avance del vehículo
- u_{ref} : velocidad de referencia de traslación
- r_{ref} : velocidad de referencia de rotación
- K_c : ganancia de la ley de control para generación de u_{ref}
- ψ_d : ángulo deseado para compensar el error de desplazamiento lateral
- k_y : ganancia del controlador para corrección de traslación
- k_ψ : ganancia del controlador para corrección de rotación
- d_{T_d} : valor deseado de d_T para compensar el error de desplazamiento lateral (casos 1 y 3)
- α_{CRIT} : valor de α crítico para la subdivisión de regiones del plano (x_L, α)
- x_{LCRIT} : valor de x_L crítico para la subdivisión de regiones del plano (x_L, α)
- δ_R : tolerancia admisible en la distancia d_R
- d_D : posición del punto \mathbf{h}_k con respecto a la recta $|x_L| = x_{LCRIT}$ más cercana
- d_I : posición del punto \mathbf{h}_k con respecto a la curva α_{LIM} más cercana
- \hat{d}_{T_d} : valor deseado de d_T para compensar el error de desplazamiento lateral (caso 2)
- k_r : ganancia para la generación de \hat{d}_{T_d}
- τ_u : acción de control sobre los propulsores de avance/retroceso
- τ_r : acción de control sobre los propulsores de giro
- \tilde{u} : error de seguimiento de velocidad de traslación
- \tilde{r} : error de seguimiento de velocidad de rotación
- K_{av} : ganancia del controlador CBI para seguimiento de velocidad de traslación
- K_{rot} : ganancia del controlador CBI para seguimiento de velocidad de rotación
- ζ_d : objetivo de control en el plano de imagen

- $\boldsymbol{\nu}_{ad}$: vector de referencias de velocidades con componentes $[u_{ref}, r_{ref}]^T$
- $\hat{\boldsymbol{\nu}}_a$: vector de velocidades estimadas con componentes $[\hat{u}, \hat{r}]^T$
- $\boldsymbol{\eta}_a$: vector de posición relativa con componentes $[X_t, Y_t, \psi]^T$
- $\boldsymbol{\tau}_u$: vector de acciones de control con componentes $[\tau_u, \tau_r]^T$
- $\tilde{\boldsymbol{\nu}}$: vector de errores de seguimiento de velocidades con componentes $[\tilde{u}, \tilde{r}]^T$
- \mathbf{h}_k' : punto de coordenadas (ψ_k, Y_{t_k}) en el plano (ψ, Y_t)
- d_{L1} : distancia de un punto \mathbf{h}_k' en la región S_1 hasta la curva $Y_{t_{LIM_1}}(\psi)$
- d_{L4} : distancia de un punto \mathbf{h}_k' en la región S_3 hasta la curva $Y_{t_{LIM_4}}(\psi)$
- δ_{Y_i} : tolerancia admisible para el error de desplazamiento relativo
- δ_d : margen de tolerancia en la distancia d_{L1}
- K_m : ganancia del controlador para el error de distancia en d_{L1} y d_{L4}
- ψ_{CRIT} : valor de ψ crítico para la subdivisión de regiones del plano (ψ, Y_t)
- K_{pu}, K_{pr} : ganancias proporcionales del controlador PID-híbrido
- T_{iu}, T_{ir} : ganancias integrales del controlador PID-híbrido
- T_{du}, T_{dr} : ganancias derivativas del controlador PID-híbrido
- K_{inv} : matriz diagonal de ganancias del controlador CDI-híbrido
- $\boldsymbol{\tau}_c$: vector de acciones de control del controlador CDI-híbrido

Operadores

- $c \cdot$: $\cos(\cdot)$
- $s \cdot$: $\text{sen}(\cdot)$
- $tg \cdot$: $\tan(\cdot)$
- $\text{mín}(a, b)$: menor valor entre los números a y b
- $\text{máx}(a, b)$: mayor valor entre los números a y b
- \ominus : erosión de imagen
- \oplus : dilatación de imagen
- $\|\cdot\|$: norma del vector
- $|\cdot|$: valor absoluto

Abreviaturas

AUV : Autonomous Underwater Vehicle (Vehículo Subacuático Autónomo)

ROV : Remotely Operated Vehicle (Vehículo Operado Remotamente)

RGB : Red-Green-Blue (Rojo-Verde-Azul)

PID : Proporcional-Integral-Derivativo

CBI : Control Basado en Imagen

CDI : Control por Dinámica Inversa

SFM : Structure From Motion

Índice general

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Tema de Investigación | 1 |
| 1.2. Problema Seleccionado | 2 |
| 1.3. Motivación | 3 |
| 1.4. Hipótesis de Trabajo | 3 |
| 1.5. Estado del Arte y Originalidad | 4 |
| 1.6. Metodología | 6 |
| 1.7. Contenido | 6 |
| 2. Modelo Dinámico | 9 |
| 2.1. Introducción | 9 |
| 2.2. Modelo Dinámico General | 10 |
| 2.2.1. Sistemas de Referencia | 10 |
| 2.2.2. Dinámica de un Vehículo Submarino | 12 |
| 2.2.3. Matriz de Inercia | 14 |
| 2.2.4. Fuerzas Centrípetas y de Coriolis | 15 |
| 2.2.5. Fuerza de Amortiguamiento | 16 |
| 2.2.6. Fuerza de Flotabilidad | 16 |
| 2.3. Simplificaciones en la Dinámica | 17 |
| 2.3.1. Dinámica del Centro de Masa | 17 |
| 2.3.2. Ejes de Simetría | 18 |
| 2.4. Modelo Dinámico de un AUV Prototipo | 19 |
| 3. Sistema de Visión | 21 |
| 3.1. Introducción | 21 |
| 3.2. Modelo de Cámara | 22 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1. Modelo Ideal | 22 |
| 3.2.2. Modelo General | 23 |
| 3.2.3. Calibración | 25 |
| 3.3. Medición de Características de Imagen | 26 |
| 3.4. Estimación del Campo de Velocidades en Imagen | 35 |
| 3.5. Calidad de las Estimaciones | 41 |
| 4. Estimación de Estados | 47 |
| 4.1. Introducción | 47 |
| 4.2. Modelo Cinemático de Imagen en Movimiento | 48 |
| 4.3. Estimación de Velocidad de un AUV | 50 |
| 4.4. Superficie Plana | 52 |
| 4.5. Estimación de Posición Relativa de un AUV | 53 |
| 4.6. Resultados | 57 |
| 4.6.1. Estimación de Posición en el Plano de Imagen | 58 |
| 4.6.2. Estimación del Campo de Velocidades en la Imagen | 60 |
| 4.6.3. Análisis de Calidad de Estimaciones | 64 |
| 4.6.4. Desempeño del Sensor en Diferentes Condiciones de Operación | 67 |
| 4.7. Conclusiones del Capítulo | 74 |
| 5. Sistemas de Control para el Seguimiento de Líneas | 75 |
| 5.1. Introducción | 75 |
| 5.2. Rango de Visión | 76 |
| 5.3. Control Basado en Imagen (CBI) | 81 |
| 5.3.1. Consideraciones Previas | 81 |
| 5.3.2. Estrategia de un Seguimiento Basado en Visión | 84 |
| 5.3.3. Diseño de un Controlador Para Seguimiento Basado en Visión | 86 |
| 5.3.4. Ley de Control | 89 |
| 5.4. Control PID Híbrido (PID-h) | 92 |
| 5.4.1. Diseño del Controlador | 92 |
| 5.4.2. Ley de Control | 93 |
| 5.5. Control Dinámica Inversa Híbrido (CDI-h) | 96 |
| 5.5.1. Diseño del Controlador | 96 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6. Simulaciones | 99 |
| 6.1. Introducción | 99 |
| 6.2. Seguimiento de Líneas | 100 |
| 6.2.1. Simulación 1 - Control Basado en Imagen en Configuración Inicial Favorable | 100 |
| 6.2.2. Simulación 2 - Control basado en Imagen en Configuración Inicial Desfavorable | 103 |
| 6.2.3. Simulación 3 - Control PID Híbrido en Configuración Inicial Favorable . . | 106 |
| 6.2.4. Simulación 4 - Control PID Híbrido con Orientación en Zona Crítica . . . | 108 |
| 6.2.5. Simulación 5 - Control con Dinámica Inversa | 110 |
| 6.2.6. Simulación 6 - Control con Dinámica Inversa e Incertidumbre de Modelo . | 112 |
| 6.2.7. Simulación 7 - Control Basado en Imagen con Ruido de Medición | 115 |
| 6.3. Conclusiones del Capítulo | 117 |
| 7. Resultados Experimentales | 119 |
| 7.1. Introducción | 119 |
| 7.2. Condiciones Experimentales | 120 |
| 7.3. Seguimiento de una Línea sin Perturbaciones | 122 |
| 7.3.1. Experimento 1: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua media, iluminación media | 123 |
| 7.3.2. Experimento 2: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua media, iluminación media | 127 |
| 7.3.3. Experimento 3: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja | 130 |
| 7.4. Seguimiento de una Línea con Perturbaciones | 133 |
| 7.4.1. Experimento 4: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua baja, iluminación baja, perturbaciones de curvatura | 134 |
| 7.4.2. Experimento 5: Controlador CBI, línea curva, turbidez del agua baja, iluminación media, perturbaciones de curvatura | 138 |
| 7.4.3. Experimento 6: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de posición | 141 |
| 7.4.4. Experimento 7: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de velocidad axial | 144 |
| 7.4.5. Experimento 8: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de posición | 146 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.4.6. Experimento 9: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de velocidad axial | 149 |
| 7.4.7. Experimento 10: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de torque | 152 |
| 7.5. Conclusiones del Capítulo | 155 |
| 8. Conclusiones | 157 |
| 8.1. Conclusiones Generales | 157 |
| 8.2. Trabajos futuros | 161 |

Índice de figuras

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Sistemas de referencia inercial y fijo al vehículo | 10 |
| 3.1. Modelo de cámara pinhole | 22 |
| 3.2. Visualización de la línea real en la imagen | 26 |
| 3.3. Algoritmo para identificación de la línea en el plano de imagen | 27 |
| 3.4. Ejemplo de mejora de histograma | 30 |
| 3.5. Punto de intersección de líneas sucesivas | 36 |
| 3.6. Descripción del algoritmo para estimación del campo de velocidades en la imagen | 38 |
| 3.7. Ejemplos de asociación con método de alineación | 39 |
| 3.8. Ejemplos de asociación con método de distancias | 40 |
| 3.9. Algoritmo para estimación del campo de velocidades en la imagen | 40 |
| 3.10. Histogramas característicos | 42 |
| 3.11. Selección de la región de interés para calcular el histograma | 43 |
| 3.12. Algoritmo para supervisión de estimaciones | 44 |
| 3.13. Sensor de visión | 45 |
| 4.1. Modelo cinemático de una cámara pinhole | 48 |
| 4.2. Sistemas de referencia para estimación de velocidad de un AUV | 50 |
| 4.3. Sistemas de referencia para estimación de posición relativa | 53 |
| 4.4. Estimación de características de imagen. | 59 |
| 4.5. Estimación del campo de velocidades en la imagen, ejemplo 1 | 61 |
| 4.6. Estimación del campo de velocidades en la imagen, ejemplo 2 | 63 |
| 4.7. Análisis de calidad de estimaciones. | 66 |
| 4.8. Desempeño del sensor en condiciones regulares | 68 |
| 4.9. Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 1 | 69 |
| 4.10. Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 2 | 71 |
| 4.11. Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 3 | 73 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Límite de visión | 76 |
| 5.2. Campo de visión en el plano (x_L, α) | 78 |
| 5.3. Configuraciones de posición relativa | 79 |
| 5.4. Campo de visión en el plano (ψ, Y_t) | 81 |
| 5.5. Ejemplos de trayectorias en el plano (x_L, α) | 82 |
| 5.6. Ejemplos de trayectorias en vista superior sin perspectiva del AUV | 83 |
| 5.7. Ejemplos de trayectorias en el plano (ψ, Y_t) | 83 |
| 5.8. Distancias de un punto a las curvas de nivel en el plano (x_L, α) | 85 |
| 5.9. Subdivisiones del plano (x_L, α) para definir la estrategia de control basada en imagen | 88 |
| 5.10. Esquema del controlador basado en imagen | 92 |
| 5.11. Trayectoria deseada para el caso 1) de la estrategia de control | 94 |
| 5.12. Subdivisiones del plano (ψ, Y_t) para definir la estrategia de control PID híbrido | 95 |
| 5.13. Esquema del controlador PID híbrido | 96 |
| 5.14. Esquema del controlador de dinámica inversa híbrido | 97 |
| 6.1. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 1 | 102 |
| 6.2. Representación de la trayectoria de la simulación 1 en diferentes planos | 103 |
| 6.3. Secuencias de imágenes de la simulación 1 | 103 |
| 6.4. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 2 | 104 |
| 6.5. Representación de la trayectoria de la simulación 2 | 105 |
| 6.6. Secuencias de imágenes de la simulación 2 | 105 |
| 6.7. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 3 | 106 |
| 6.8. Representación de la trayectoria de la simulación 3 en diferentes planos | 107 |
| 6.9. Secuencias de imágenes de la simulación 3 | 108 |
| 6.10. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 4 | 109 |
| 6.11. Representación de la trayectoria de la simulación 4 en diferentes planos | 110 |
| 6.12. Secuencias de imágenes de la simulación 4 | 110 |
| 6.13. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 5 | 111 |
| 6.14. Representación de la trayectoria de la simulación 5 en diferentes planos | 111 |
| 6.15. Secuencias de imágenes de la simulación 5 | 112 |
| 6.16. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 6 | 113 |
| 6.17. Representación de la trayectoria de la simulación 6 en diferentes planos | 114 |
| 6.18. Secuencias de imágenes de la simulación 6 | 115 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.19. Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 7 | 116 |
| 6.20. Representación de la trayectoria de la simulación 7 en diferentes planos | 117 |
| 6.21. Secuencias de imágenes de la simulación 7 | 117 |
| 7.1. Modelo CAD del AUV utilizado en los experimentos | 121 |
| 7.2. Vistas del vehículo en pileta de pruebas | 122 |
| 7.3. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 1 | 125 |
| 7.4. Representación de la trayectoria del experimento 1 en diferentes planos. | 126 |
| 7.5. Secuencias de imágenes del experimento 1 | 127 |
| 7.6. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 2 | 128 |
| 7.7. Representación de la trayectoria del experimento 2 en diferentes planos | 129 |
| 7.8. Secuencias de imágenes del experimento 2 | 130 |
| 7.9. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 3 | 131 |
| 7.10. Representación de la trayectoria del experimento 3 en diferentes planos | 131 |
| 7.11. Secuencias de imágenes del experimento 3 | 133 |
| 7.12. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 4 | 136 |
| 7.13. Representación de la trayectoria del experimento 4 en diferentes planos | 137 |
| 7.14. Secuencias de imágenes del experimento 4 | 138 |
| 7.15. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 5 | 139 |
| 7.16. Representación de la trayectoria del experimento 5 en diferentes planos | 139 |
| 7.17. Secuencias de imágenes del experimento 5 | 140 |
| 7.18. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 6 | 142 |
| 7.19. Representación de la trayectoria del experimento 6 en diferentes planos | 142 |
| 7.20. Secuencias de imágenes del experimento 6 | 143 |
| 7.21. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 7 | 145 |
| 7.22. Representación de la trayectoria del experimento 7 en diferentes planos | 145 |
| 7.23. Secuencias de imágenes del experimento 7 | 146 |
| 7.24. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 8 | 147 |
| 7.25. Representación de la trayectoria del experimento 8 en diferentes planos | 147 |
| 7.26. Secuencias de imágenes del experimento 8 | 148 |
| 7.27. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 9 | 150 |
| 7.28. Representación de la trayectoria del experimento 9 en diferentes planos | 150 |
| 7.29. Secuencias de imágenes del experimento 9 | 151 |
| 7.30. Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 10 | 153 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.31. Representación de la trayectoria del experimento 10 en diferentes planos | 153 |
| 7.32. Secuencias de imágenes del experimento 10 | 154 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Tema de Investigación

Esta Tesis versa sobre Sistemas de Guía, Navegación y Control basados en visión orientados a sistemas autónomos submarinos no tripulados. El área de investigación tratada en la Tesis se enmarca dentro de la Robótica Subacuática y los Sistemas de Control.

Los vehículos subacuáticos no tripulados representan artefactos generalmente empleados en la exploración marina y asistencia en numerosas tareas de las actividades ingenieriles bajo el mar. Su construcción se caracteriza por su forma tubular y perfil longitudinal delineado para ofrecer poca resistencia al movimiento. Poseen sensores y propulsores propios que le permiten desplazarse libremente dentro del mar. Su sistema de control lo faculta para seguir trayectorias predeterminadas en la columna de agua o por sobre el fondo marino, o bien su propia trayectoria de navegación generada en base a una estrategia de búsqueda (optimizada o sistemática) o por último, realizar el seguimiento de un cuerpo móvil o de un ducto sobre el lecho marino.

La clase de vehículo analizada posee autonomía energética limitada y un poder de decisión autónomo en el marco de una estrategia de navegación predefinida, la cual es conocida como misión. Están contruidos para navegar con un desplazamiento dominante de avance y rotación para seguir un rumbo, aunque también se determina una profundidad constante o variable. Otros movimientos conocidos como rolido o cabeceo, son menos importantes en la navegación y por lo general son considerados perturbaciones indeseadas del movimiento. Además, el cabeceo controlado puede darse como una forma de descen-

so/ascenso rápido. Finalmente, el movimiento de retroceso no es típico aunque sí puede incorporarse mediante un actuador que influya en acciones de frenado.

El empleo de submarinos no tripulados en las aplicaciones mencionadas es creciente y está motivado por el avance incesante de la tecnología subacuática en comunicaciones, procesamiento, propulsión, sonares y materiales, entre otras. A su vez, su empleo amplio propone nuevos desafíos en sus necesidades tecnológicas y diseños, impulsados por la acometida intensa y persistente del hombre en el mar. Esta intervención humana es estimulada fundamentalmente por la búsqueda de conocimiento y del aprovechamiento de los recursos marinos que representan aún el 93 % en estado virgen. Este escenario plantea problemas que representan en definitiva motivaciones científicas en múltiples disciplinas y campos, particularmente en la Ingeniería y Robótica Subacuática, en donde se desarrolla esta Tesis Doctoral.

1.2. Problema Seleccionado

La navegación subacuática de un vehículo no tripulado es propiciada por un complejo sistema de guía y de control de características autónomas. Por un lado, el curso y velocidad a seguir son determinadas a partir de la visualización del entorno del mismo submarino. Este entorno es en muchos casos el lecho marino, un laberinto, una caverna, un objetivo móvil o un ducto o cable emplazados sobre el fondo. Cualquiera sea el caso, el entorno es identificado por un Sistema de Guía (SG), el cual define un rumbo a seguir con una velocidad determinada en base a las características morfológicas del entorno y del movimiento relativo entre el submarino y éste. Esta navegación cumple las especificaciones de una misión definida previamente por un operario según objetivos de la aplicación. El rumbo y velocidad de referencia del SG son empleadas por el Sistema de Control (SC) para dirigir el vehículo en forma precisa a través de la trayectoria espacial que se establece en tiempo real. La captación del entorno y de sus características se logra mediante un Sistema de Navegación (SN) que realimenta esta información tanto al SG como al SC.

El principio físico empleado para la visualización del entorno es comúnmente la propagación de ultrasonido en el agua basado en el efecto Doppler. En menor medida se emplea la visión de cámara debido al menor horizonte de visibilidad lo cual aumenta la posibilidad de colisión del vehículo con eventuales obstáculos del entorno. No obstante, un sistema de

cámara posee mayor resolución y menor tiempo de actualización de imagen.

La concatenación de estos tres sistemas: SG, SC y SN en uno solo, posibilita la navegación del vehículo y la toma de decisiones autónomamente para el seguimiento de trayectorias u objetivos móviles.

1.3. Motivación

Esta Tesis está dedicada específicamente al seguimiento de trayectorias de submarinos del tipo denominado AUV (Autonomous Underwater Vehicle), el cual es dominante en las aplicaciones científicas e ingenieriles, y además yace en el centro de interés actual de los grupos de investigación internacionales dedicados a la Robótica Subacuática. La motivación principal en el tema se origina en los trabajos científicos y desarrollos de la tecnología subacuática llevados a cabo por el Grupo de Control en Ingeniería Oceánica, con asiento en el Instituto Argentino de Oceanografía del CONICET en Bahía Blanca.

Asimismo esta Tesis tiene su inicio tras un Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la UNS, llevado a cabo por el mismo Autor de Tesis y bajo la supervisión del mismo Director. Dicho proyecto se basó en la intención de resolver de manera original problemas de control en la Robótica Subacuática con empleo de cámaras incorporadas en un vehículo móvil teleoperado y también cámaras externas ayudando a la navegación del mismo hacia un destino prefijado. Estas ideas preliminares sirvieron de base para una formulación más profunda del problema e hipótesis de esta Tesis en un tema similar.

1.4. Hipótesis de Trabajo

Particularmente, el desarrollo de sistemas de control por visión con sensor de cámara orientada hacia el terreno para la navegación de sistemas autónomos aéreos o subacuáticos describe un problema actual y en muchos aspectos presenta desafíos y soluciones abiertas.

Fundamentalmente existen dos grandes desafíos adheridos al problema de la navegación subacuática. El primero es tecnológico y se traduce por lo general en la existencia de soportes adecuados para la implementación de métodos que demandan grandes capacidades de cálculo y captación de imágenes nítidas con hardware dedicado y orientado a procesamiento de videos en tiempo real. El segundo desafío concierne a los desarrollos de

metodologías propias de la inteligencia artificial con características algorítmicas difusas y de razonamiento lógico. Ambos desafíos conjugados deben poder plantear una Hipótesis de Trabajo que posea suficiente innovación por sobre el estado del arte y a la vez bastante asidero práctico y raciocinio en vistas de una utilidad futura.

Se define por tanto la Hipótesis de Trabajo para esta Tesis como la viabilidad de la navegación autónoma por visión pura asistida por una cámara como único sensor dentro de un submarino no-tripulado adosado a su proa enfocando el fondo, con el fin de satisfacer el seguimiento de una línea a velocidades deseadas sobre un fondo marino con eventuales elevaciones suaves, cambios de contraste y diferentes condiciones de visibilidad. Evidentemente este objetivo comprende el diseño de una estructura de control en el submarino que conjuga a un SG, un SN y un SC, todos conectados al sensor de visión y, además, un escenario subacuático que incluye un circuito con una línea sobre el lecho marino. Una condición *sine qua non* es que la línea considerada y su fondo deben diferenciarse en algún grado por contraste. Claramente, una Hipótesis de Trabajo como la planteada ha de evaluarse a un nivel experimental como última instancia en la Tesis.

1.5. Estado del Arte y Originalidad

El escenario descrito en esta Hipótesis de Trabajo es la conceptualización de una de las aplicaciones más actuales y crecientes en importancia en el campo de la Robótica Subacuática que atañe al seguimiento de ductos con fines de inspección y mantenimiento mediante submarinos no-tripulados [12,47,48].

La creación de los primeros submarinos autónomos (AUVs) comienza hace casi 50 años a un nivel experimental y en un estadio muy primario en comparación a las capacidades encontradas en los desarrollos actuales [32]. Muchos de ellos están protegidos bajo patente y nacen de proyectos disparadores del tipo denominado "spin-offs" para su comercialización inmediata. En muchos casos actuales, y pese a su protección de patente, sólo es posible avizorar sus mecanismos de funcionamiento a través de sus habilidades especificadas en la unidad comercial. Por ello, frente a tal sofisticación y grado de protección, resulta en muchos casos difícil determinar por comparación de resultados inéditos e incluso identificar la metodología para obtenerlos. Un punto de referencia significativo en el análisis del estado del arte lo constituye la sofisticación de habilidades de un AUV para

resolver problemas complejos, en los cuales, más allá de los avances tecnológicos, subyace el desarrollo de una teoría sólida en los sistemas de control para sistemas con dinámica incierta y perturbada, sobre todo a través de razonamiento difuso e inteligente.

El problema del seguimiento de ductos y cables submarinos tiene un destacado interés actual en el que se manifiestan los grandes desarrollos tecnológicos de unidades prototípicas con intención comercial en serie aunque aún en una etapa experimental de gran sofisticación [44]. Aún cuando la demanda es muy significativa, el mercado es tan estrecho y selecto que se resume a poco más de 10 proveedores mundiales. Así se destacan entre ellos los grandes consorcios entre empresas y universidades con proyectos "spin-offs", que convergen al desarrollo de unidades experimentales. Los elementos indispensables en las aplicaciones están dados fundamentalmente por el uso de sonares y magnetómetros para detección de fondo y línea.

Usualmente la guía y el control de un vehículo AUV provee las trayectorias de referencias y acciones de control respectivamente, las cuales están construidas a partir de un sistema de navegación. La literatura es vasta en innovaciones de diseños de controladores y sistemas de supervisión, véase por ejemplo los adelantos descritos en [12] y en particular una clase prometedora de control adaptivo en vehículos subacuáticos [17]. Al adoptar sistemas de visión bajo el agua, se debe lidiar con problemas latentes de pobre visibilidad debido a la turbidez por lluvia de partículas biológicas o las perturbaciones de la luz solar infiltrada en aguas relativamente poco profundas sobre el lecho, conocida como ondas cáusticas en concordancia con el movimiento del agua en la superficie [35]. Partiendo de estos escenarios, los controles basados en visión entran en consideración dentro de la aplicación cuando la altitud del submarino al fondo es relativamente moderada (menor a 20mts). Esta especificación impone habilidades particulares al sistema de control para poder evitar posibles obstáculos y a su vez imprimir altas velocidades crucero para un objetivo de seguimiento. En las aplicaciones de seguimiento de línea mediante sonares, el sensor de visión aparece como segunda alternativa [11,36]. Una combinación de técnicas de reconocimiento de patrones y flujo óptico es una manera divulgada en sensores de visión para la estimación de posición y velocidad absolutas [4,42,46]. Otras dificultades que se originan del escenario borroso es el de las estimas inciertas a través de las imágenes que, de no tratarse explícitamente dentro del sistema de control como incertidumbres de

sensor, pueden ocasionar inestabilidad o caída de performance en la navegación [8].

En la literatura existente el sensor de visión queda por ahora rezagado a un segundo plano por ser la presencia del elemento sonar más conveniente para distancias más significativas entre el submarino el ducto. Estas distancias podrían acortarse dentro de los límites de seguridad anticolidión para muestrear la línea con una cámara aprovechando el flujo mucho más elevado de información. Para ello las exigencias en la performance de control deberían ser más eficientes para sortear obstáculos en forma segura.

Estos planteos preliminares que se juzgan a través de la bibliografía ayudan a consolidar la Hipótesis de Trabajo. A juzgar por los sondeos bibliográficos más actuales que se obtienen de los congresos internacionales más destacados en la actualidad, este enfoque y esta Hipótesis de Trabajo son considerados originales.

1.6. Metodología

La metodología empleada para la investigación en la Tesis consistió en el estudio bibliográfico existente, el desarrollo de las ideas propias enmarcadas en la hipótesis de trabajo y en el estado del arte con la justificación formal necesaria en la teoría, la simulación como herramienta primaria de desarrollo, el diseño y la creación de infraestructura para experimentos y finalmente la obtención de resultados experimentales que verifican la Hipótesis de Trabajo.

1.7. Contenido

La descripción de la Tesis está organizada en ocho capítulos. Tras esta introducción, se presenta el modelo dinámico general de un vehículo subacuático, y luego se describe el modelo correspondiente a un vehículo experimental construido durante la Tesis. A continuación se aborda el problema del modelo matemático de cámara para visión y la vinculación métrica de una imagen 2D a espacios tridimensionales de una manera general y luego se particulariza al campo de la Robótica Subacuática.

Posteriormente se describe el escenario de seguimiento de una línea con patrones uniformes a lo largo de ella, en donde se generan errores de apartamiento y orientación del vehículo respecto a la línea visualizada. En el siguiente capítulo se encara la estimación

de la cinemática del vehículo calculada a través del movimiento de imagen. Tanto la estimación de posición relativa del vehículo como la de velocidad absoluta son verificadas con numerosos experimentos de campo con un vehículo experimental desarrollado durante y para esta Tesis.

Luego el diseño de sistemas de control por visión es tratado en la sección final, analizando tanto controladores basados en modelo de cámara y dinámico del submarino, como un controlador fundado únicamente en visión. Se comparan todas las propiedades del control a través de análisis de performance y estabilidad de los distintos desarrollos. Se verifican tanto por simulación como experimentalmente en ensayos dedicados de seguimiento de línea con submarino prototipo. Las conclusiones y el análisis de trabajos afines a esta investigación finalizan esta Tesis.

Capítulo 2

Modelo Dinámico

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza una descripción general de las ecuaciones que dominan el comportamiento dinámico de un vehículo subacuático. El desarrollo parte de la consideración del movimiento de un cuerpo rígido, y se establecen las convenciones para la notación y definición de los sistemas de referencia.

Desde un enfoque Lagrangiano, la energía cinética y potencial del vehículo son utilizadas para la deducción de las ecuaciones de movimiento del vehículo respecto a un sistema de referencia inercial. Diversas consideraciones, especialmente sobre la geometría del vehículo, producen simplificaciones del modelo completo para la mayoría de los vehículos que se construyen.

La última sección presenta un vehículo experimental construido en el Instituto Argentino de Oceanografía. De acuerdo a los grados de libertad suficientes para llevar a cabo el objetivo planteado en la tesis, las ecuaciones correspondientes resultan de una simplificación del modelo general descrito en primera instancia. Las pruebas realizadas durante la Tesis fueron llevadas a cabo con este vehículo.

2.2. Modelo Dinámico General

2.2.1. Sistemas de Referencia

Las ecuaciones de movimiento se plantean a partir de dos sistemas de referencia. El primero de ellos es inercial y se establece fijo a tierra, con centro O y ejes X , Y y Z , y el restante es fijo al vehículo con centro O_V y ejes X_V , Y_V , y Z_V . Los ángulos de rotación sobre los ejes del sistema inercial se identifican como ϕ , θ y ψ . El vector de coordenadas que define la posición del vehículo resulta:

$$\boldsymbol{\eta} = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi]^T,$$

con $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$. Con los sistemas de referencia elegidos como muestra la Fig. 2.1, las coordenadas tienen los siguientes significados: X (desplazamiento frontal o “surge”), Y (desplazamiento lateral o “sway”), Z (desplazamiento vertical o “heave”), ϕ (rolido o “roll”), θ (cabeceo frontal o “pitch”) y ψ (rumbo o “yaw”). En ocasiones resulta útil expresar las coordenadas de posición y rotación por separado, de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\eta}_1 = [X, Y, Z]^T, \boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T,$$

con lo cual $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T$.

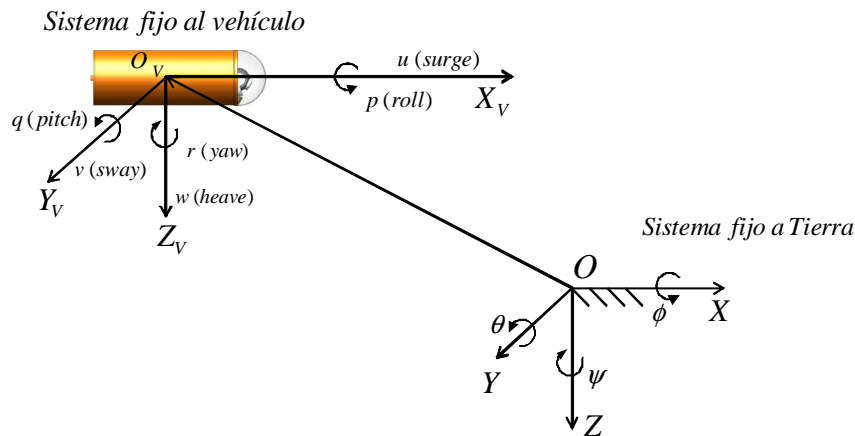


Figura 2.1: Sistemas de referencia inercial y fijo al vehículo.

La velocidad del vehículo subacuático respecto al sistema de coordenadas fijo al mismo

se define por el vector

$$\boldsymbol{\nu} = [u, v, w, p, q, r]^T,$$

donde $\boldsymbol{\nu} = \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, o en la forma disociada:

$$\boldsymbol{\nu}_1 = [u, v, w]^T, \boldsymbol{\nu}_2 = [p, q, r]^T.$$

La relación de velocidades entre los dos sistemas de referencia está dada por:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta}) (\boldsymbol{\nu}),$$

y si se considera $\boldsymbol{\nu}$ como una velocidad relativa del vehículo respecto al flujo en el que se mueve, puede suponerse que el medio acuoso se desplaza a una velocidad $\boldsymbol{\nu}_c$ debido a la corriente, con lo cual en forma general se tiene:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta}) (\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\nu}_c),$$

donde $J(\boldsymbol{\eta})$ es la matriz de rotación. El movimiento relativo del submarino respecto al flujo circundante es apropiado en la práctica para algunos sensores de tipo corredera magnética que miden esta composición de vectores proyectada en la dirección de avance.

Particularmente, es común expresar $J(\boldsymbol{\eta})$ en la forma:

$$J(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} J_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & J_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix}.$$

La matriz $J_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ se obtiene componiendo las rotaciones individuales en cada eje, es decir:

$$J_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix},$$

donde se ha utilizado la notación $s \cdot = \text{sen}(\cdot)$ y $c \cdot = \text{cos}(\cdot)$.

Como caso particular, si es posible medir $\boldsymbol{\nu}_c$ desde el sistema fijo a tierra, entonces puede realizarse la siguiente transformación:

$$\boldsymbol{\nu}_c = J^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}}_c,$$

donde $\dot{\boldsymbol{\eta}}_c$ es el vector de velocidad de la corriente respecto al sistema fijo a tierra.

2.2.2. Dinámica de un Vehículo Submarino

La descripción de la dinámica del vehículo en 6 grados de libertad se desarrolla comúnmente desde un enfoque Lagrangiano (ver [7]). Por lo tanto, se consideran la energía cinética y potencial del vehículo, denominadas T y V respectivamente, para la deducción de las ecuaciones de movimiento del vehículo respecto al sistema inercial. De esta manera, el Lagrangiano del sistema será:

$$L = T - V.$$

Aplicando la ecuación Lagrangiana se tiene que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}} + \frac{\partial P_d}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} = \boldsymbol{\tau}_\eta, \quad (2.1)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_\eta$ es la fuerza generalizada aplicada en el punto O_V del vehículo y P_d es la energía disipativa. Esta última se relaciona con la fuerza de arrastre a través de la ecuación:

$$\frac{\partial P_d}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} = D_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}},$$

donde D_η es la matriz de arrastre generalizada con respecto al sistema fijo a tierra. Para el sistema fluido-vehículo, el Lagrangiano está dado por:

$$L = T_{RB} + T_A - V, \quad (2.2)$$

donde T_{RB} es la energía cinética del cuerpo rígido, T_A es la energía cinética del fluido y V es la energía potencial definida implícitamente por:

$$\frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{\eta}} = \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}), \quad (2.3)$$

siendo \mathbf{g}_η la fuerza de flotabilidad generalizada. Además, la energía cinética total en (2.2) puede ser expresada como:

$$T = T_{RB} + T_A = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T M_\eta(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}}, \quad (2.4)$$

siendo M_η la matriz de inercia generalizada con respecto al sistema de coordenadas fijo a tierra. Por lo tanto:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} = M_\eta(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}} - \frac{\partial V}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} = M_\eta(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} \right) = M_\eta(\boldsymbol{\eta}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}}.$$

Empleando (2.2), (2.3) y (2.4), se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}} = \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\eta}} - \frac{\partial V}{\partial \boldsymbol{\eta}} = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \frac{\partial M_\eta(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}} \dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}).$$

Además:

$$\dot{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}) = \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \frac{\partial M_\eta(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}}.$$

De esta manera, (2.1) puede ser reescrita como:

$$M_\eta(\boldsymbol{\eta}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \frac{1}{2} \dot{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + D_\eta(v, \boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_\eta. \quad (2.5)$$

En esta expresión puede reconocerse la matriz generalizada de Coriolis y centrípeta:

$$C_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta}) = \frac{1}{2} \dot{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}).$$

Finalmente, las ecuaciones de movimiento respecto al sistema de coordenadas fijo al cuerpo pueden obtenerse de (2.5):

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}} + C(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + D(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (2.6)$$

siendo M , C , D , \mathbf{g} y $\boldsymbol{\tau}$ las matrices y vectores generalizados consideradas para la matriz de inercia, la matriz de Coriolis y centrípeta, la matriz de arrastre, la flotabilidad y la fuerza de los propulsores, respectivamente, todos ellos con respecto al sistema de coordenadas fija al vehículo.

2.2.3. Matriz de Inercia

La matriz de inercia $M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ es una matriz no diagonal, definida positiva. Como el vehículo se desplaza en un medio líquido, esta matriz se compone por la suma de una matriz de inercia del cuerpo y una matriz de componentes de masa aditiva (inercia de la masa de líquido circundante) como:

$$M = M_{RB} + M_A.$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mZ_G & -mY_G \\ 0 & m & 0 & -mZ_G & 0 & mX_G \\ 0 & 0 & m & mY_G & -mX_G & 0 \\ 0 & -mZ_G & mY_G & I_X & -I_{XY} & -I_{XZ} \\ mZ_G & 0 & -mX_G & -I_{YX} & I_Y & -I_{YZ} \\ -mY_G & mX_G & 0 & -I_{ZX} & -I_{zy} & I_Z \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

donde m es la masa del vehículo, I_{ij} son los momentos de inercia respecto a los ejes principales i, j y X_G, Y_G y Z_G son las coordenadas que determinan la distancia entre el centro de masa G y el centro de referencia O_V . Por otro lado, la matriz M_A es una matriz en $\mathbb{R}^{6 \times 6}$ definida como:

$$M_A = (m_{a_{ij}}), \text{ para } i, j = 1, \dots, 6,$$

donde los elementos $m_{a_{ij}}$ son valores constantes de masa aditiva en cada modo de movimiento simple y cruzado. Estos elementos son dependientes de la forma del vehículo en cada dirección principal y direcciones combinadas. Pueden calcularse o determinarse experimentalmente.

2.2.4. Fuerzas Centrípetas y de Coriolis

Las fuerzas centrípetas y de Coriolis están caracterizadas por las matrices componentes $C_{RB}(\boldsymbol{\nu})$ y $C_a(\boldsymbol{\nu})$ que se expresan de la siguiente manera:

$$C_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(Y_G q + Z_G r) \\ 0 & 0 & 0 & -m(Y_G p + w) \\ 0 & 0 & 0 & -m(Z_G p - v) \\ -m(Y_G q + Z_G r) & m(Y_G p + w) & m(Z_G p - v) & 0 \\ m(X_G q - w) & -m(Z_G r + X_G p) & m(Z_G q + u) & I_{YZ}q + I_{XZ}p - I_{ZZ}r \\ m(X_G r + v) & m(Y_G r - u) & -m(X_G p + Y_G q) & -I_{YZ}r - I_{XY}p + I_{YY}q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} -m(X_G q - w) & -m(X_G r + v) \\ m(Z_G r + X_G p) & -m(Y_G r - u) \\ -m(Z_G q + u) & m(X_G p + Y_G q) \\ -I_{YZ}q - I_{XZ}p + I_{ZZ}r & I_{YZ}r + I_{XZ}p - I_{YY}q \\ 0 & -I_{XZ}r - I_{XY}q + I_{XX}p \\ I_{XZ}r + I_{XY}q - I_{XX}p & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_A(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{3i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{2i}} v_i \\ \sum_{i=1}^6 m_{a_{3i}} v_i & 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{1i}} v_i \\ -\sum_{i=1}^6 m_{a_{2i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{1i}} v_i & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{3i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{2i}} v_i \\ \sum_{i=1}^6 m_{a_{3i}} v_i & 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{1i}} v_i \\ -\sum_{i=1}^6 m_{a_{2i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{1i}} v_i & 0 \\ 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{6i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{5i}} v_i \\ \sum_{i=1}^6 m_{a_{6i}} v_i & 0 & -\sum_{i=1}^6 m_{a_{4i}} v_i \\ -\sum_{i=1}^6 m_{a_{5i}} v_i & \sum_{i=1}^6 m_{a_{4i}} v_i & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.5. Fuerza de Amortiguamiento

Debido a la forma oblonga de un vehículo AUV como de su movimiento significativo sobre todo en rotaciones, las fuerzas de arrastre no dependen en general linealmente de su velocidad sino más bien lo hacen siguiendo una ley no lineal. Una aproximación polinómica que contenga los términos lineal y cuadrático permite caracterizar la fuerza de amortiguamiento como:

$$D(|\boldsymbol{\nu}_r|) = D_l + D_q(|\boldsymbol{\nu}_r|),$$

donde:

$$D_l = (d_{lij}), \text{ para } i, j = 1, \dots, 6$$

$$D_q(|\boldsymbol{\nu}_r|) = \sum_{i=1}^6 D_{q_i} |v|,$$

con d_{lij} elementos escalares y D_{q_i} matrices en $\mathbb{R}^{6 \times 6}$.

2.2.6. Fuerza de Flotabilidad

La fuerza de flotabilidad neta está dada por el peso del vehículo y el empuje que el fluido ejerce sobre el mismo, es decir:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W_{AUV} - W_w) s\theta \\ -(W_{AUV} - W_w) c\theta s\phi \\ -(W_{AUV} - W_w) c\theta c\phi \\ -(W_{AUV} Y_G - W_w Y_B) c\theta c\phi + (W_{AUV} Z_G - W_w Z_B) c\theta s\phi \\ (W_{AUV} X_G - W_w X_B) c\theta c\phi + (W_{AUV} Z_G - W_w Z_B) s\theta \\ -(W_{AUV} X_G - W_w X_B) c\theta s\phi - (W_{AUV} Y_G - W_w Y_B) s\theta \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

donde W_{AUV} es el peso del vehículo y W_w su flotabilidad, mientras que X_B , Y_B y Z_B representan las coordenadas del metacentro con respecto a O_V .

2.3. Simplificaciones en la Dinámica

Ciertos parámetros físicos del vehículo pueden ser considerados constantes en determinados casos, lo cual permite llevar a cabo simplificaciones en las matrices que caracterizan su dinámica. En [7] se describen detalladamente estas simplificaciones, y a continuación se presentan en forma resumida las más importantes.

2.3.1. Dinámica del Centro de Masa

Si se considera conocido el centro de masa G , se puede observar que las matrices M_{RB} , $C_{RB}(\boldsymbol{\nu})$ y $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ (dadas por (2.7), (2.8) y (2.9)) se simplifican notablemente con la elección de O_V en el punto G , es decir:

$$(X_G, Y_G, Z_G) = (0, 0, 0)^T.$$

En consecuencia:

$$C_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -mw \\ 0 & 0 & 0 & mv \\ 0 & mw & -mv & 0 \\ -mw & 0 & mu_r & I_{YZq} + I_{XZp} - I_{Zr} \\ mv & -mu & 0 & -I_{YZr} - I_{XYp} + I_{Yq} \\ & mw & & -mv \\ & 0 & & mu \\ & -mu & & 0 \\ -I_{YZq} - I_{XZp} + I_{Zr} & & I_{YZr} + I_{XZp} - I_{Yq} & \\ & 0 & & -I_{XZr} - I_{XYq} + I_{Xp} \\ I_{XZr} + I_{XYq} - I_{Xp} & & & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{XX} & -I_{XY} & -I_{XZ} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{YX} & I_{YY} & -I_{YZ} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{ZX} & -I_{zy} & I_{ZZ} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W_{AUV} - W_w) s\theta \\ -(W_{AUV} - W_w) c\theta s\phi \\ -(W_{AUV} - W_w) c\theta c\phi \\ W_w Y_B c\theta c\phi - W_w Z_B c\theta s\phi \\ -W_w X_B c\theta c\phi - W_w Z_B s\theta \\ W_w X_B c\theta s\phi + W_w Y_B s\theta \end{bmatrix}.$$

Esta consideración es veraz en vehículos AUV dado que estos en general no representan plataformas de transporte y por lo tanto no adicionan más peso que el que fue concebido en el diseño.

2.3.2. Ejes de Simetría

Desde el punto de vista constructivo de un AUV, las condiciones de simetría del mismo permiten también simplificaciones en las matrices que representan la dinámica. En particular, para el caso de un vehículo con simetría en los tres planos $X_V Z_V$, $Y_V Z_V$, $X_V Y_V$, las matrices de masa y de Coriolis y fuerza centrípeta resultan:

$$M_{RB} = \text{diag}(m, m, m, I_X, I_Y, I_Z)$$

$$C_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_Z r & -I_Y q \\ -mw & 0 & mu & -I_Z r & 0 & I_X p \\ mv & -mu & 0 & I_Y q & -I_X p & 0 \end{bmatrix}.$$

Las mismas condiciones de simetría geométrica permiten considerar que la matrices M_A y $C_A(\boldsymbol{\nu})$ conservan iguales características estructurales que las matrices M_{RB} y $C_{RB}(\boldsymbol{\nu})$ respectivamente. Además, por una propiedad física, se cumple que:

$$M = M_A + M_{RB} > 0. \quad (2.10)$$

En forma similar, las propiedades de simetría de la matriz completa D deben ser iguales a las de M en (2.10), en correspondencia con las características físicas disipativas de sistemas pasivos.

Finalmente, si los movimientos de los vehículos pueden restringirse a modos simples de comportamiento (o direcciones dominantes de movimiento), entonces las ecuaciones de la dinámica suelen simplificarse teniendo en cuenta dichos modos. Esto sucede, por ejemplo, en operaciones de ascenso y descenso, o en el caso de vehículos que se desplazan con una coordenada Z constante y con $\theta = 0$, es decir, sin cabeceo frontal.

2.4. Modelo Dinámico de un AUV Prototipo

El vehículo experimental desarrollado en el Instituto Argentino de Oceanografía posee dos grados de libertad que permiten su navegación en el plano XY . Para ello, está provisto de un sistema de actuadores con los que se controlan su velocidad de avance (en la dirección del eje X_V) y su velocidad de giro (respecto al eje Z_V). El modelo dinámico correspondiente resulta una simplificación de (2.6). Los estados de velocidad en el marco fijo al vehículo, $\boldsymbol{\nu}_a$, y los estados de posición en el marco inercial, $\boldsymbol{\eta}_a$, son representados en los vectores:

$$\boldsymbol{\nu}_a = [u, r]^T, \boldsymbol{\eta}_a = [X, Y, \psi]^T.$$

De esta manera:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_a = J_a(\boldsymbol{\eta}_a) \boldsymbol{\nu}_a = \begin{bmatrix} c\psi & 0 \\ s\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}.$$

El modelo dinámico reducido se describe en la forma:

$$M_a \dot{\boldsymbol{\nu}}_a + C_a(\boldsymbol{\nu}_a) \boldsymbol{\nu}_a + D_a(\boldsymbol{\nu}_a) \boldsymbol{\nu}_a + \mathbf{g}_a(\boldsymbol{\eta}_a) = \boldsymbol{\tau}_a, \quad (2.11)$$

donde:

$$M_a = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_Z \end{bmatrix}, C_a = C_{Aa} + C_{RBa} = \begin{bmatrix} 0 & a_2 \\ -a_2 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -mX_G r \\ mX_G r & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_a = - \begin{bmatrix} X_u & 0 \\ 0 & N_r \end{bmatrix}, \mathbf{g}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\tau}_a = \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_r \end{bmatrix},$$

con: $a_2 = m_{a_{26}} r$, $X_u = d_{l11} + D_{q1} u$, $N_r = d_{l66} + D_{q6} r$ y el vector $\boldsymbol{\tau}_a$ contiene las acciones de control sobre los propulsores de avance y giro.

Capítulo 3

Sistema de Visión

3.1. Introducción

La navegación guiada de un vehículo submarino sobre una línea basada en un sistema de guía y control requiere disponer de variables de estado de posición y velocidad relativa para que el controlador pueda corregir los errores en el curso. Como un sistema de navegación provee inicialmente sólo los estados del movimiento relativo en el plano de la imagen, una transformación de dichos estados a un sistema de referencia absoluto resulta una técnica aparentemente apropiada para definir las entradas al controlador. La otra alternativa implica utilizar directamente las estimaciones de estados en píxeles o píxeles/segundo en el controlador. El presente capítulo aborda esta segunda alternativa.

Las secciones siguientes presentan los modelos empleados en el sistema de visión y las estimaciones de estados que se obtienen a partir de una cámara a bordo del submarino como único sensor. Inicialmente se analiza el modelo ideal de una cámara y sus diferencias con un modelo real. Se describe el conjunto de parámetros que define la proyección del espacio en 3D al plano de la imagen para ambos modelos. En la segunda parte, se detallan los algoritmos desarrollados para la extracción de características de la imagen, las cuales incluyen variables de posición y de velocidad. Los valores obtenidos con dichos algoritmos constituyen las salidas del sistema de visión referidas al plano de la imagen.

3.2. Modelo de Cámara

3.2.1. Modelo Ideal

Un modelo de cámara pinhole proporciona una descripción simple de una cámara proyectiva, en la cual la vista de una escena se forma proyectando puntos en 3D sobre el plano de la imagen utilizando una transformación de perspectiva (Fig. 3.1). En particular, el modelo se presenta a partir de la proyección de un punto \mathbf{P}_C del espacio con coordenadas $(X_C, Y_C, Z_C)^T$, en un sistema cuyo origen O_C se denomina *centro de proyección*, sobre un plano $Z_C = f$ denominado *plano de imagen* o *plano focal*. A su vez, f es la distancia focal de la cámara. El mapeo de \mathbf{P}_C sobre el plano de la imagen corresponde al punto de intersección $\mathbf{p} = (x, y)^T$ entre el plano focal y la línea que une a \mathbf{P}_C con O_C .

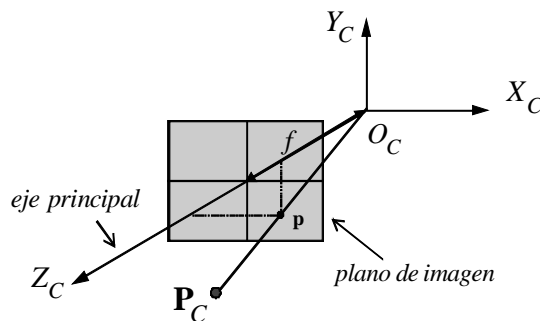


Figura 3.1: Modelo de cámara “pinhole”. El sistema de coordenadas tiene su origen en el centro de proyección O_C y el plano de la imagen se ubica a la distancia focal f .

Por semejanza de triángulos, las coordenadas del punto proyectado sobre el plano de imagen serán $(fX_C/Z_C, fY_C/Z_C, f)^T$. Ignorando la última componente, se puede escribir:

$$(X_C, Y_C, Z_C)^T \mapsto (fX_C/Z_C, fY_C/Z_C)^T. \quad (3.1)$$

Esta expresión representa la proyección de un espacio Euclídeo \mathbb{R}^3 a un espacio Euclídeo \mathbb{R}^2 .

De acuerdo a la literatura existente (véase por ejemplo [10,34,43]), O_C es llamado *centro de la cámara* o también *centro óptico*. La línea desde el centro de la cámara perpendicular al plano de la imagen es conocida como el *eje principal* o *rayo principal* de la cámara, y el punto donde el eje principal interseca al plano de la imagen es el *punto*

principal. Finalmente, el plano perpendicular al plano de la imagen que incluye a O_C es denominado *plano principal* de la cámara.

Todos los puntos \mathbf{P}_C que se proyectan en un único punto de imagen \mathbf{p} pueden ser descritos por vectores equivalentes relacionados entre sí por un factor de escala. Por ello se utiliza comúnmente una representación con vectores homogéneos. La conversión de un vector expresado en notación homogénea a su equivalente en notación no-homogénea está dada mediante la división por la tercer coordenada, es decir:

$$\mathbf{p}^h = \begin{bmatrix} fX_C \\ fY_C \\ Z_C \end{bmatrix} \implies \mathbf{p} = \begin{bmatrix} fX_C/Z_C \\ fY_C/Z_C \end{bmatrix}.$$

En este caso, (3.1) puede expresarse en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} fX_C \\ fY_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Empleando la notación homogénea \mathbf{p}^h para el punto \mathbf{p} y \mathbf{P}_C^h para el punto \mathbf{P}_C , se define la matriz de proyección de la cámara M_C , de manera que en forma compacta resulta:

$$\mathbf{p}^h = M_C \mathbf{P}_C^h, \quad (3.2)$$

con $M_C = \text{diag}(f, f, 1)[\mathbf{I}, \mathbf{0}]$, donde $\text{diag}(f, f, 1)$ es una matriz diagonal y $[\mathbf{I}, \mathbf{0}]$ representa una matriz dividida en un bloque de 3x3 (la matriz identidad \mathbf{I}), más un vector columna nulo.

3.2.2. Modelo General

Para una cámara real, el punto principal generalmente no coincide con el origen de coordenadas del plano de la imagen. Definiendo las coordenadas del punto principal como

$(p_x, p_y)^T$, el modelo se puede ampliar en la forma

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} fX_C + Z_C p_x \\ fY_C + Z_C p_y \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix},$$

y definiendo

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

se obtiene la expresión compacta

$$\mathbf{p}^h = K[\mathbf{I}, \mathbf{0}]\mathbf{P}_C^h. \quad (3.3)$$

donde la notación del vector homogéneo \mathbf{P}_C^h indica que la cámara se ubica en el origen de un sistema de coordenadas Euclídeo cuyo eje principal apunta en la dirección de Z_C . A dicho sistema se lo denomina *marco de coordenadas de la cámara*.

Por otro lado, los puntos en el espacio comunmente se expresan en un sistema diferente, denominado *marco de coordenadas del espacio*. De esta manera, los dos sistemas se pueden relacionar mediante una composición de rotación y traslación. Si R (3×3) es la matriz que representa la orientación del marco de coordenadas de la cámara y \mathbf{C} contiene las coordenadas del centro de la cámara en el marco de coordenadas del espacio, la relación se puede expresar como $\mathbf{P}_C = R(\mathbf{P} - \mathbf{C})$, o equivalentemente en notación homogénea:

$$\mathbf{P}_C^h = \begin{bmatrix} R & -R\mathbf{C} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R\mathbf{C} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}^h = R[\mathbf{I}, -\mathbf{C}]\mathbf{P}^h.$$

Bajo esta relación, (3.3) resulta:

$$\mathbf{p}^h = KR[\mathbf{I}, -\mathbf{C}]\mathbf{P}^h, \quad (3.4)$$

y esta ecuación representa en forma general el mapeo producido en una cámara *pinhole*.

3.2.3. Calibración

La ecuación (3.4) tiene nueve grados de libertad: 3 para K , 3 para R , y 3 para \mathbf{C} . La matriz K se denomina matriz de calibración de la cámara, y contiene los llamados parámetros internos de la cámara (f, p_x, p_y), mientras que los de R y \mathbf{C} son llamados parámetros externos de la cámara. En la práctica, resulta conveniente no considerar en forma explícita el centro de la cámara, y utilizar la relación $\mathbf{P}_C = R\mathbf{P} + \mathbf{t}$, con $\mathbf{t} = -R\mathbf{C}$.

En cámaras reales, usualmente se producen fenómenos de distorsión, cuyas principales propiedades se pueden describir simplídicamente como la combinación de una distorsión radial y otra tangencial. Teniendo en cuenta esto, el modelo general se puede extender en la forma:

$$\mathbf{p}^h = KR[\mathbf{I}, -\mathbf{C}]\mathbf{P}^h = [x^h, y^h, z^h]^T \longmapsto \mathbf{p} = [x, y]^T = [x^h/z^h, y^h/z^h]^T,$$

$$\mathbf{p}^{dist} = \begin{bmatrix} x_{dist} \\ y_{dist} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2q_1 xy + q_2 \cdot (r^2 + 2x^2) \\ y \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + q_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2q_2 xy \end{bmatrix},$$

donde:

- $r^2 = x^2 + y^2$,
- k_1, k_2 : coeficientes de distorsión radial,
- q_1, q_2 : coeficientes de distorsión tangencial.

Los coeficientes de mayor orden no son considerados dado que su efecto es despreciable. Además, los coeficientes de distorsión no dependen de la escena, por lo que comunmente se los llama parámetros intrínsecos, junto a los parámetros internos definidos previamente.

A partir del modelo extendido, la determinación de los parámetros intrínsecos se realiza en una etapa de calibración de la cámara, previamente a su uso en la práctica. Para esto existen diversas técnicas bien conocidas, las cuales no se describen en esta tesis, y pueden ser consultadas en [10, 38]. Sin pérdida de generalidad, en las secciones y capítulos siguientes se considera que la cámara ya ha sido calibrada y se han compensado los efectos

de distorsión. Luego de esta compensación, es válido utilizar el modelo ideal presentado en (3.2).

3.3. Medición de Características de Imagen

Para una tarea de seguimiento, se propone una escena del fondo marino que contiene una línea con un patrón regular como el ilustrado en la Fig. 3.2. A partir de la imagen proveniente de la cámara, se debe detectar el segmento de línea presente en la misma. La ubicación del segmento se define por medio del parámetro $\Delta = (\Delta x, \Delta y)^T$, que indica el desplazamiento del punto medio del segmento respecto al centro de la imagen. A su vez, la orientación α define el ángulo respecto a una línea paralela a los bordes laterales de la imagen.

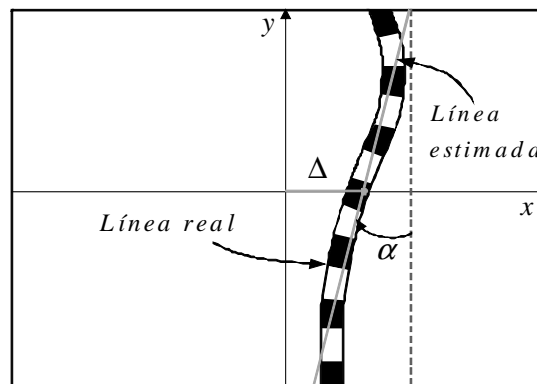


Figura 3.2: Visualización de la línea real en la imagen. El patrón de marcas se utiliza para identificar la posición de la línea, definida por los parámetros α y Δ .

Para la estimación de posición relativa de la cámara respecto a la línea, se desarrollaron algoritmos de procesamiento de la imagen. Éstos se integran en un módulo, el cual se divide en tres grupos, representados gráficamente en la Fig. 3.3.

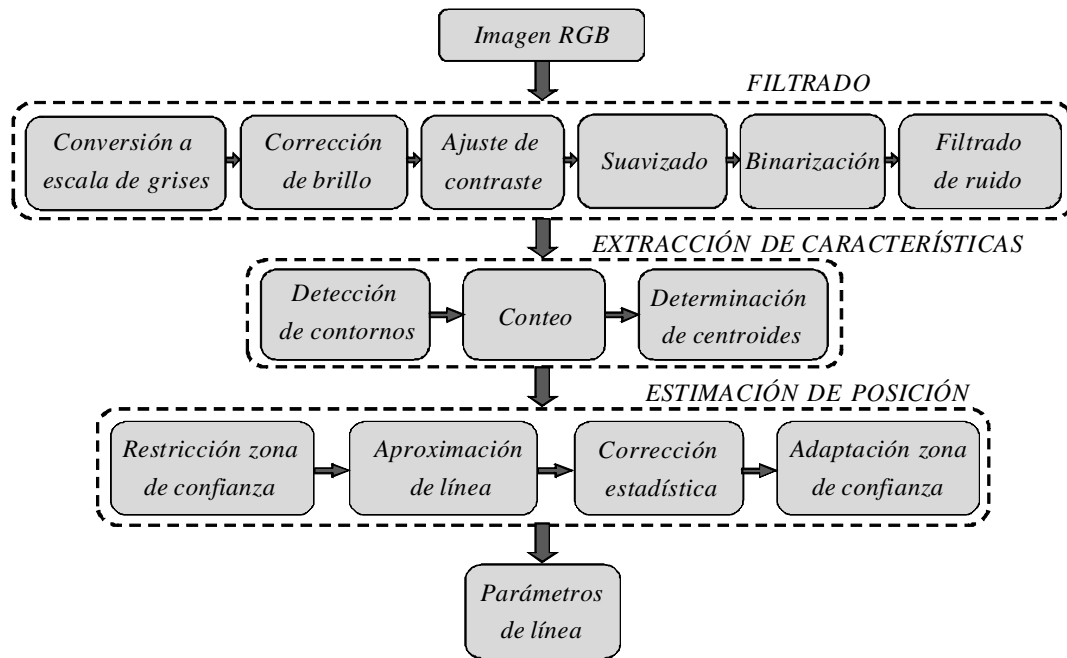


Figura 3.3: Algoritmo para identificación de la línea en el plano de imagen. Se compone de tres módulos interconectados: filtrado, extracción de características y estimación de posición.

El primer grupo tiene la finalidad de mejorar la imagen original para aumentar el contraste entre las marcas del patrón y el fondo, hasta conseguir una segmentación de esas regiones. Inicialmente, la imagen es generada en la cámara en formato RGB (*Red-Green-Blue*) y representada por una matriz tridimensional F_{RGB} . Las dimensiones $W \times H$ (ancho y alto, respectivamente) determinan la *resolución* y representan el dominio de la imagen:

$$D_f = \{(x, y) : 0 \leq x \leq H - 1, 0 \leq y \leq W - 1\}$$

siendo (x, y) las coordenadas de un píxel en la imagen, que definen su posición en columna y fila de la misma. En tanto, cada color primario es almacenado en un *canal* particular de F_{RGB} , es decir:

$$F_{RGB}(x, y, 1) = R(x, y),$$

$$F_{RGB}(x, y, 2) = G(x, y),$$

$$F_{RGB}(x, y, 3) = B(x, y).$$

Debido a que la estimación de posición no hace uso explícitamente de información de color, resulta conveniente una conversión a escala de grises, que produce una matriz reducida a la forma:

$$I(x, y) = 0,3 \cdot R(x, y) + 0,59 \cdot G(x, y) + 0,11 \cdot B(x, y), \quad \forall (x, y) \in D_f.$$

De esta manera se logra conservar la información de luminancia de la imagen, al tiempo que se reduce tres veces la cantidad de datos debido a que I es ahora una matriz bidimensional de $W \times H$ píxeles. A partir de este punto, en lo siguiente se hace referencia a I como la matriz de intensidad.

A diferencia de las imágenes obtenidas en un medio aéreo, las correspondientes a un medio líquido presentan comúnmente un alto nivel de difuminación debido a la presencia de partículas, en general microscópicas, dispersas en el agua. Esto implica que los bordes de los objetos en la escena no se visualicen con claridad, lo cual es equivalente a un filtrado de altas frecuencias. Adicionalmente, en la práctica es común operar sobre imágenes digitalizadas con 8 bits por píxel por canal (8 bits de profundidad), lo cual brinda un rango limitado de 256 valores de intensidad. Si bien existen cámaras de mayor profundidad, el aumento en la cantidad de información tiene asociado un incremento en el costo de procesamiento, lo cual no es deseable en aplicaciones de tiempo real. El mismo efecto es producido con un incremento en la resolución de la imagen, con lo cual se presenta una relación de compromiso entre el tiempo de cómputo vs. la calidad de la imagen. Claramente, es de esperar que esta última mejore a mayor resolución de imagen y profundidad de datos.

Con el fin de extraer propiedades de la representación en la imagen en futuros análisis, se emplean usualmente parámetros y funciones que condensan la información matricial de la imagen I en una forma compacta. Un primer análisis cualitativo de la información presente en I se puede obtener a través de su histograma. El operador de histograma computa la cantidad total de píxeles de I que tienen el mismo nivel de intensidad, para cada uno de los valores posibles en el rango. Así, un histograma con máximos locales bien diferenciados corresponde a una escena en la que los objetos son fácilmente distinguibles en la imagen de escala de grises. Por el contrario, un histograma sin máximos locales notables corresponde a una escena donde los objetos presentes no se visualizan o distinguen con

facilidad. Esta diferencia en los niveles de intensidad es lo que se denomina *contraste* de la imagen. Una condición necesaria en el diseño de la línea para lograr mejor contraste, es la combinación alternada de marcas de color muy claro con marcas muy oscuras. Otra condición para ello es disponer de un lecho marino más bien oscuro.

Como se mencionó anteriormente, las imágenes subacuáticas son en general difusas, lo cual indica que el contraste es por lo general bajo. Adicionalmente, la ausencia o bajo nivel de luz natural en el fondo requiere el uso de iluminación artificial y/o técnicas que permitan mejorar la imagen. En consecuencia, si ésta es mayormente oscura, se incrementa linealmente el nivel de intensidad adicionando una constante c a I , de manera que:

$$I_B(x, y) = I(x, y) + c, \quad \forall(x, y) \in D_f.$$

Este incremento regular se determina previamente considerando una intensidad mínima requerida, y se adapta dinámicamente en cada imagen de modo que al menos un determinado número de píxeles alcance el valor máximo definido. Así se logra un desplazamiento del histograma de la imagen hacia la derecha, con un aumento significativo del brillo total. En las experiencias realizadas, se obtuvieron buenas correcciones cuando se permite que entre el 0.5% y el 1% de los píxeles alcance el color blanco (es decir, el máximo valor en el rango de intensidades).

Seguidamente, el aumento de contraste se logra a partir de una función exponencial de la forma:

$$I_C(x, y) = (I_B(x, y))^\gamma, \quad \forall(x, y) \in D_f,$$

donde γ es un parámetro real positivo. Para regiones sustancialmente claras, se utiliza un valor grande de γ ($2 \sim 10$) y, por el contrario, un valor pequeño para regiones oscuras ($0,1 \sim 0,7$). Para cuantificar un valor de intensidad en el histograma que represente el límite entre las regiones oscuras y las claras, se emplea el punto que define aproximadamente el valle del mismo. De esta manera se elige γ apropiadamente.

En la Fig. 3.4 se ilustra el efecto producido por las operaciones anteriores. En a) se muestra un histograma $H(I)$ de una imagen oscura y con dos máximos locales cercanos. En b), el histograma se desplaza hacia la derecha mediante un incremento c . Puede notarse la acumulación de píxeles en el extremo derecho del rango, ocasionado por el truncamiento

de los valores que exceden al mismo. Por último, en c) se ejemplifica el incremento de contraste, cuyo efecto es extender el histograma nuevamente hacia la izquierda pero sin modificar la presencia de dos puntos de mayor intensidad.

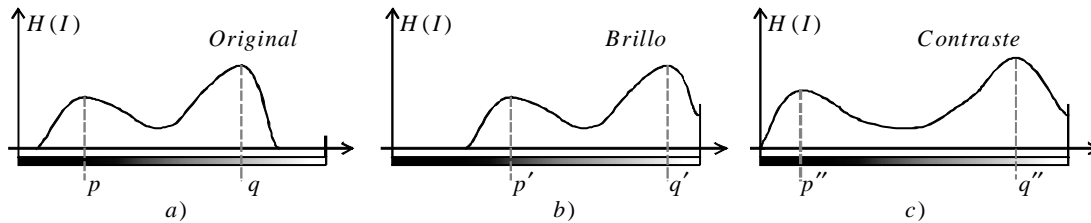


Figura 3.4: Ejemplo de mejora de histograma. a) Histograma de imagen original. b) El aumento de brillo produce un desplazamiento hacia la derecha. c) El incremento de contraste expande la distancia entre máximos locales.

Luego de realizar el ajuste de contraste, los píxeles de fondo (es decir, los que no pertenecen a ninguna de las marcas del patrón), aparecen típicamente con intensidades aleatorias de alta frecuencia, tanto espacial- como temporalmente en la secuencia de imágenes de video. Ante este fenómeno, se aplica un filtro de suavizado para reducir el ruido en las imágenes procesadas. Dicho filtro se define como:

$$I_S(x, y) = \frac{1}{(2w_f + 1)^2} \sum_{i=-w_f}^{w_f} \sum_{j=-w_f}^{w_f} I_C(x + i, y + j),$$

donde w_f define la extensión de la zona en la que actúa el filtro alrededor de cada píxel. El tamaño de la zona es $(2w_f + 1) \times (2w_f + 1)$.

Las mejoras en la calidad de la imagen tienen como objetivo incrementar las diferencias visuales entre el fondo y la línea, pero no determinan a cual de ambos corresponde cada píxel de la imagen. En procesamiento de imágenes, este proceso de establecer dicha correspondencia se denomina *segmentación* objeto-fondo. Existen diversas técnicas de segmentación, entre las que se destacan las basadas en umbralización (Otsu [45], entropía [27,28,13]), las basadas en color (K-means [9]), los métodos de transformadas (algoritmo watershed [3]), las basadas en texturas (filtros de textura [31]), entre otras. No obstante, no se reconoce una técnica universal que funcione adecuadamente en todo tipo de imágenes, y a mayor complejidad del algoritmo, mayor es la demanda computacional requerida para realizar la segmentación.

Teniendo en cuenta la necesidad de procesar en tiempo real, el algoritmo desarrollado en la Tesis utiliza un proceso de binarización simple sobre el dominio de la imagen D_f que conduce a la transformación:

$$I_T(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } I_S(x, y) < \varepsilon \\ 1 & \text{si } I_S(x, y) \geq \varepsilon, \end{cases} \quad \forall (x, y) \in D_f, \quad (3.5)$$

donde ε es el umbral de corte que define la separación del fondo y el patrón. De esta manera, I_T es una imagen con regiones blancas (correspondientes a las marcas detectadas y eventuales manchas del lecho marino) con fondo negro (el lecho oscuro detectado). Aunque ε puede ser determinado adaptivamente en una fase de calibración de acuerdo a las condiciones de iluminación y transparencia del agua, es deseable dar un valor prefijado o un valor de condición inicial, por ejemplo igual a la mitad del máximo nivel de intensidad.

Debido a que un objeto iluminado de la escena puede reflejar luz (aún cuando no pertenezca al patrón empleado), el mismo aparecerá incluido en I_T en forma de manchas blancas. Las manchas exógenas pequeñas pueden ser eliminadas mediante operaciones morfológicas si se tiene en cuenta que su tamaño es menor en comparación con las marcas del patrón. Para lograrlo, se utilizan dos erosiones sucesivas con un elemento estructural b de dimensión típica 3×3 . La operación correspondiente es:

$$I_E(x, y) = I_T \ominus b = \min \{ I_T(i + x, j + y) - b(i, j) : (i + x, j + y) \in D_f, (i, j) \in D_b \},$$

donde D_b es el dominio de b definido por:

$$D_b = \{(i, j) : -1 \leq i \leq 1, -1 \leq j \leq 1\}.$$

Las operaciones anteriores generalmente eliminan las manchas que se desean, pero al mismo tiempo reducen el tamaño de las marcas del patrón. Por lo tanto, se necesita una dilatación para recuperar el tamaño original de las marcas detectadas. Aún así, manchas

grandes indeseadas, todavía pueden seguir presentes en I_E . La dilatación se define como:

$$I_D(x, y) = I_E \oplus b = \text{máx} \{I_E(i + x, j + y) + b(i, j) : (i + x, j + y) \in D_f, (i, j) \in D_b\}.$$

El segundo grupo representado en la Fig. 3.3 tiene la finalidad de extraer las características de la imagen.

Del paso anterior se obtienen las regiones que corresponden a las marcas del patrón, pero con éstas pueden aparecer simultáneamente manchas espúreas del mismo orden de dimensión que las marcas. Dado que los procesos subsiguientes para estimación de posición y velocidad son de mayor complejidad y en consecuencia insumen mayor tiempo de cómputo, es extremadamente necesario simplificar la imagen a tratar. Esto se puede lograr comenzando con una identificación de contornos sobre I_D , determinados como la diferencia morfológica entre la dilatación y la erosión de dicha imagen, es decir:

$$C_{I_D} = (I_D \oplus b) - (I_D \ominus b).$$

En lugar de continuar con un procesamiento sobre C_{I_D} , es adecuado describir los contornos mediante una representación de arreglos de coordenadas correspondientes a los puntos que lo componen a fin de minimizar la complejidad del procesamiento posterior.

En caso de no detectarse contornos en C_{I_D} , no es posible realizar estimaciones y, en consecuencia, se debe adquirir una nueva imagen de la cámara para comenzar nuevamente con el proceso. En caso de tener éxito, se procede a eliminar eventualmente a los contornos pequeños (en general, los formados con cerca de 8 píxeles, es decir el más pequeño posible que encierre al menos un píxel blanco). En este paso, se usa un valor mínimo estipulado para definir el tamaño de corte.

Luego de ello, se cuenta el número N_c de contornos que quedan. Si $N_c \leq 1$, no hay suficiente información para determinar la línea, por lo que debe continuarse sobre una nueva imagen.

La reducción final de características de la imagen se logra reemplazando cada contorno

por su centroide:

$$\mathbf{c}_k = (x_k, y_k) = \frac{1}{n_k} \sum_{q=1}^{n_k} (x_{qk}, y_{qk}),$$

donde n_k es el número de píxeles y (x_{qk}, y_{qk}) son las coordenadas del q -ésimo punto que conforman el k -ésimo contorno, respectivamente.

De esta manera se alcanza al tercer grupo de la Fig. 3.3, encargado de generar los parámetros de posición de la línea. De todos los centroides calculados, sólo son tenidos en cuenta aquellos que estén incluidos en una región denominada zona de confianza, la cual se denota como \mathbf{z} . Esta zona es una banda delimitada por dos rectas paralelas, $L_1(x)$ y $L_2(x)$ a ambos lados de la línea detectada en el paso anterior. La primera ubicación de esta zona es llevada a cabo en una fase de calibración, y luego se adapta en cada fotograma. Así, en cada tiempo de muestreo existe una zona de confianza que procede de la imagen previa.

El grupo de centroides que son considerados como parte de la línea son, entonces, aquellos que quedan incluidos en \mathbf{z} . La selección de éstos se implementa mediante una bandera lógica de la forma:

$$\rho(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } L_m(x_k) \leq y_k \leq L_M(x_k) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases},$$

donde las cotas para y_k son $L_m(x_k) = \min(L_1(x_k), L_2(x_k))$ y $L_M(x_k) = \max(L_1(x_k), L_2(x_k))$. Cuando $\rho(k) = 1$, esto indica que \mathbf{c}_k pertenece a \mathbf{z} .

Si en la selección no se obtiene al menos un par de \mathbf{c}_k incluidos en \mathbf{z} , se adquiere una nueva imagen. En caso contrario, se determina la ecuación de una línea que mejor aproxime la alineación de los centroides seleccionados, por ejemplo, en un sentido de mínimos cuadrados. Entonces, el vector de parámetros que define la posición de la línea estimada resulta:

$$\boldsymbol{\zeta} = (\alpha, \Delta_x, \Delta_y)^T, \quad (3.6)$$

donde Δ_x y Δ_y constituyen los errores de posición, y $\boldsymbol{\Delta} = (\Delta_x, \Delta_y)^T$ (ver Fig. 3.2).

Ante la presencia de perturbaciones, como manchas dentro de \mathbf{z} , se pueden generar estimaciones incorrectas de $\boldsymbol{\zeta}$. Además, una mala calidad de la imagen puede provocar el

desplazamiento de los centroides de sus posiciones reales. En consecuencia, con la finalidad de limitar la influencia de dichos factores y brindar una evolución suave de ζ , se introducen algunas correcciones estadísticas. La contribución de estas correcciones mediante un filtrado aumenta también la robustez del algoritmo frente a perturbaciones.

El filtro mencionado tiene en cuenta los resultados de los ciclos previos. Aquí, el empleo de un factor de olvido λ resulta más eficiente en comparación con la alternativa de promediar varias estimaciones. Usando un factor de olvido en el rango $0 < \lambda < 1$, el filtro tiene la siguiente expresión:

$$\hat{\alpha}_{T_i} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N+1} \lambda^k} \left(\lambda \alpha_{T_i} + \sum_{k=1}^N \lambda^{k+1} \hat{\alpha}_{T_{i-k}} \right),$$

donde $\hat{\alpha}$ es la salida del filtro, T_i es el tiempo en que se adquiere la muestra actual y N el número de estimaciones previas utilizadas. Lo mismo se realiza para Δ_x y Δ_y con estimaciones $\hat{\Delta}_x$ y $\hat{\Delta}_y$, respectivamente. De esta manera, la influencia de datos pasados distantes de desvanece a medida que pasa el tiempo. Cuanto menor es λ , más rápido es el descarte de muestras previas. Según la experiencia acumulada en simulaciones y experimentación previa, λ se puede seleccionar alrededor de 0,9 o 0,8.

Antes de proseguir con un nuevo fotograma, es importante adaptar la zona de confianza \mathbf{z} para el próximo ciclo de acuerdo a la posición estimada de la línea. La nueva \mathbf{z} se determina a partir de la línea identificada, desplazándola hacia sus laterales en una cantidad $a_z/2$, donde $a_z = W/15$ es el ancho de \mathbf{z} que se define inicialmente en la fase de calibración. Las fracciones anteriores fueron elegidas como adecuadas de acuerdo a diversos análisis experimentales.

Cuando eventualmente varía la altura del vehículo con respecto al fondo durante una tarea de seguimiento, a_z puede ser ajustada apropiadamente con un nuevo valor fijo. Si la altura es demasiado grande de modo que la curvatura de la línea se hace notable en la imagen, es posible definir la línea y los bordes $L_1(x)$ y $L_2(x)$, pero cada uno con un punto de quiebre de acuerdo a la curvatura. Tanto las líneas como los puntos de quiebre deben ser actualizados regularmente. En tal caso, a_z podría definirse como la distancia entre éstos últimos.

3.4. Estimación del Campo de Velocidades en Imagen

Durante el movimiento de seguimiento de una línea con patrones regulares es de esperar una situación ideal en donde cada marca detectada aparezca por la parte superior, siga su trayectoria hacia abajo, hasta desaparecer. El rastro de ella debería ser detectado en cada fotograma durante su paso. Debido a los diversos factores que afectan a la calidad de la imagen, es posible que en la etapa de segmentación del algoritmo presentado anteriormente se produzcan intermitencias en la identificación de algunas marcas del patrón, es decir que puedan desaparecer y aparecer ocasionalmente. Esto significa que para intentar asociar un determinado centroide con su correspondiente en la imagen anterior es necesario tener en cuenta dicha intermitencia espacial. Dado que las marcas del patrón están ubicadas sobre un cuerpo rígido, la separación entre ellas es constante en el tiempo. Tales intermitencias generan huecos en la secuencia de centroides. En consecuencia, el primer paso en esta etapa consiste en completar el conjunto de centroides en cada imagen una vez detectada la eventual intermitencia. En otras palabras, se rellenan los espacios entre cada par de centroides consecutivos cuya distancia es mayor a un valor medio predefinido.

La asociación de puntos no es una tarea trivial dado que las marcas de la línea no son diferenciables entre ellas y la nueva posición depende de la velocidad de la cámara la cual es una variable a estimar. Contando en general con una alta velocidad de fotogramas, es razonable asumir que, en el transcurso de dos fotogramas, una marca puede avanzar una distancia menor que la separación entre marcas. Esto garantiza una condición necesaria para una asociación correcta.

El paso siguiente constituye la operación más crítica del algoritmo, y consiste en reconstruir el rastro de las marcas, es decir, establecer la asociación de pares. La idea principal del algoritmo propuesto es utilizar el punto de intersección de las líneas estimadas en dos imágenes consecutivas como referencia en un plano extendido. Este punto es denominado C_r , y al ángulo entre las líneas se lo denomina θ_{rot} .

Para ilustrar esta idea se consideran dos escenarios distintos que se dan comúnmente en el seguimiento de línea (ver Fig. 3.5). El primero corresponde a un punto de intersección alejado y por encima del centro de la imagen, de modo que el movimiento de la cámara

es principalmente una traslación. Por el contrario, si C_r está ubicado cerca del centro de la imagen y por debajo de éste, entonces el movimiento se corresponde principalmente a una rotación. Así, C_r es tomado como punto de referencia para rotar $L_{T_{i-1}}$ (la línea en la imagen previa) sobre L_{T_i} (la línea en la imagen actual), lo cual luego presenta ventajas para la asociación de pares.

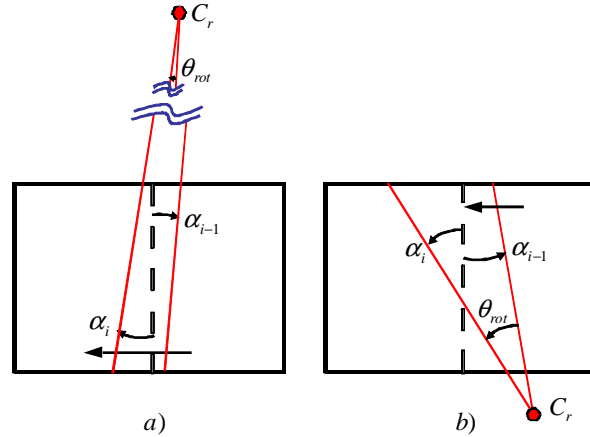


Figura 3.5: Punto de intersección de líneas sucesivas. a) El movimiento corresponde a una traslación. b) El movimiento corresponde a una rotación.

Definiendo la ecuación de la línea como:

$$L_{T_i}(x) = \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} (x - x_{a_i}) + y_{a_i},$$

donde $\mathbf{p}_{a_i} = (x_{a_i}, y_{a_i})$ es un punto de la línea, el punto C_r será:

$$C_{r_i} = L_{T_i} \cap L_{T_{i-1}} = (x_{c_{r_i}}, y_{c_{r_i}}).$$

Resolviendo la intersección se obtiene:

$$x_{c_{r_i}} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{i-1})\operatorname{tg}(\alpha_i)}{\operatorname{tg}(\alpha_i) - \operatorname{tg}(\alpha_{i-1})} \times \left(y_{a_i} - y_{a_{i-1}} + \frac{x_{a_{i-1}}}{\operatorname{tg}(\alpha_{i-1})} - \frac{x_{a_i}}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} \right), \quad (3.7)$$

$$y_{c_{r_i}} = L_{T_i}(x_{c_{r_i}}).$$

Existen ciertos casos particulares que producen singularidades en la solución de (3.7). Los mismos se describen a continuación.

a. Caso 1: $\alpha_i = 0, \alpha_{i-1} \neq 0$

$$\text{Solución: } \begin{cases} x_{c_{r_i}} = x_{a_i}, \\ y_{c_{r_i}} = \frac{1}{\text{tg}(\alpha_{i-1})} (x_{c_{r_i}} - x_{a_{i-1}}) + y_{a_{i-1}}, \\ \theta_{rot} = \alpha_{i-1}. \end{cases}$$

b. Caso 2: $\alpha_{i-1} = 0, \alpha_i \neq 0$

$$\text{Solución: } \begin{cases} x_{c_{r_i}} = x_{a_{i-1}}, \\ y_{c_{r_i}} = \frac{1}{\text{tg}(\alpha_i)} (x_{c_{r_i}} - x_{a_i}) + y_{a_i}, \\ \theta_{rot} = \alpha_i. \end{cases}$$

c. Caso 3: $\alpha_{i-1} = \alpha_i$

$$\text{Solución: } \begin{cases} x_{c_{r_i}} = x_{a_i}, \\ y_{c_{r_i}} = y_{a_i}, \\ \theta_{rot} = 0. \end{cases}$$

A partir de la ubicación de C_r , el paso siguiente consiste en proyectar cada punto sobre la línea estimada en cada imagen, a saber: los actuales centroides sobre L_{T_i} y los anteriores sobre $L_{T_{i-1}}$. Luego de ello, se rota $L_{T_{i-1}}$ sobre L_{T_i} y se realiza la asociación de pares posibles a través de la minimización de distancias entre pares. Una vez obtenida la asociación, es posible calcular el desplazamiento de los centroides c_k 's de $L_{T_{i-1}}$ hacia sus homólogos en L_{T_i} . De esta manera, las velocidades de los centroides se establecen en el plano de la imagen, y se consigue una estimación del campo de velocidades en esos puntos particulares.

Todos los pasos del algoritmo desarrollado se describen en la Fig. 3.6.

Es importante destacar que con el método de segmentos alineados la asociación resulta más precisa que con otras técnicas probadas, las cuales calculan distancias mínimas entre pares de puntos en ambas líneas. Principalmente cuando θ_{rot} es grande, el problema de asociación sin alinear los segmentos es mayor teniendo en cuenta las potenciales ambigüedades que se presentan, por ejemplo en las intermitencias. Por el contrario, con el método descrito se establece un orden lógico en los pares, que es también unívoco.

La figura 3.7 muestra dos ejemplos de aplicación de la técnica propuesta. Se consideran dos casos comunes con diferentes distribuciones de centroides. En ambos casos, la asociación es correcta.

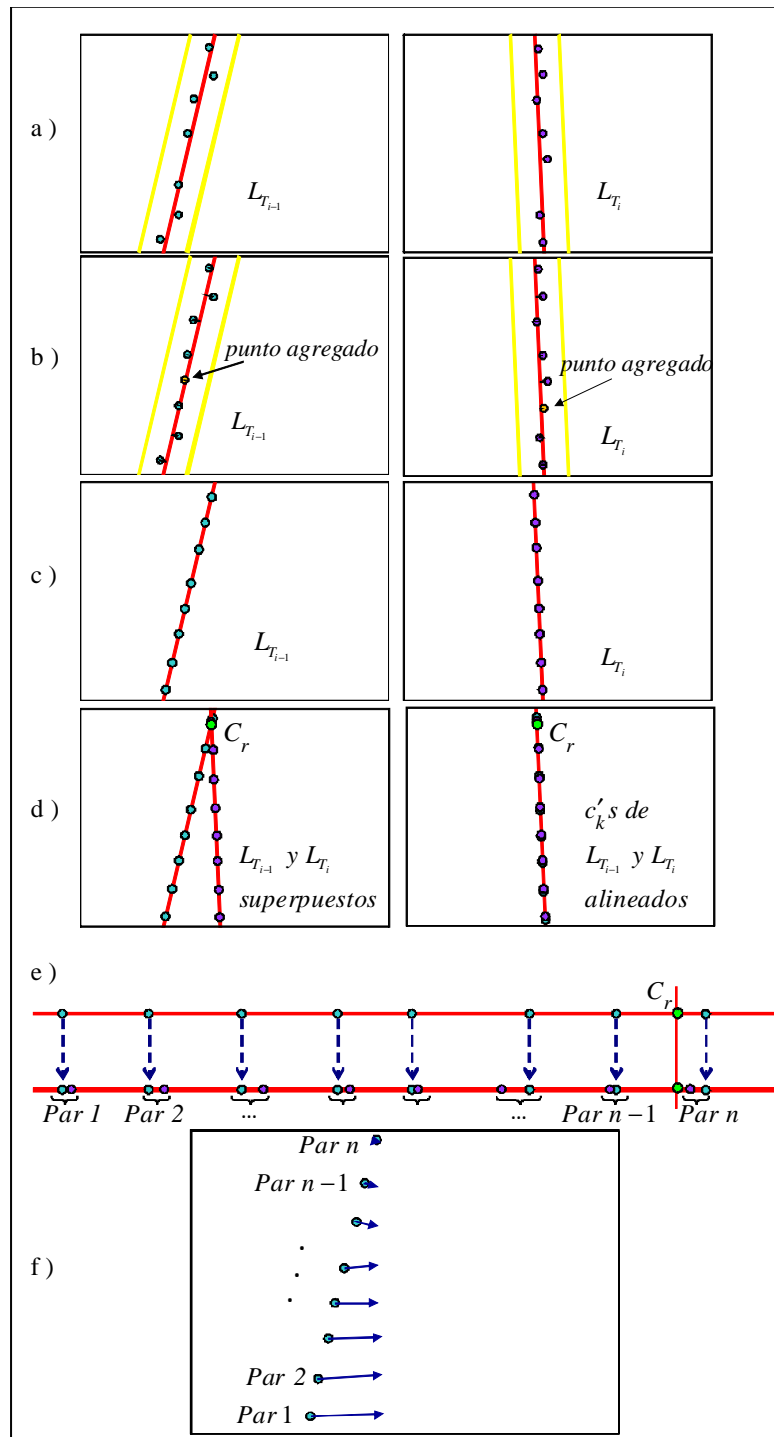


Figura 3.6: Descripción del algoritmo para estimación del campo de velocidades en la imagen.

- a) Líneas estimadas en imágenes sucesivas. b) Completamiento de centroides no detectados. c) Proyección de centroides. d) Superposición de centroides y posterior alineación de segmentos. e) Asociación de puntos. f) Campo de velocidades obtenido.

Comparativamente, en la Fig. 3.8 se muestran ejemplos de asociación con diferentes ángulos θ_{rot} , en los cuales se obtienen resultados ambiguos en el mismo escenario presentado en Fig. 3.7-a) pero empleando una técnica alternativa de minimización de distancias. En el método propuesto, luego de la alineación de segmentos, la asociación se implementa mediante la medición de proximidad entre centroides. De esta medición, el resultado final puede ser una de las siguientes opciones: 1) dos centroides se agrupan y forman un par, 2) un centroide tiene vecindad nula o 3) un centroide no se considera como posible par. El segundo caso hace referencia a los puntos que, al ser alineados, no se ubican en una posición en la que sean consecutivos de un centroide correspondiente al conjunto opuesto. Por otro lado, un centroide puede no ser asociado a un par cuando, aún teniendo vecindad no nula, el centroide más cercano del conjunto opuesto se asocia a otro par más cercano.

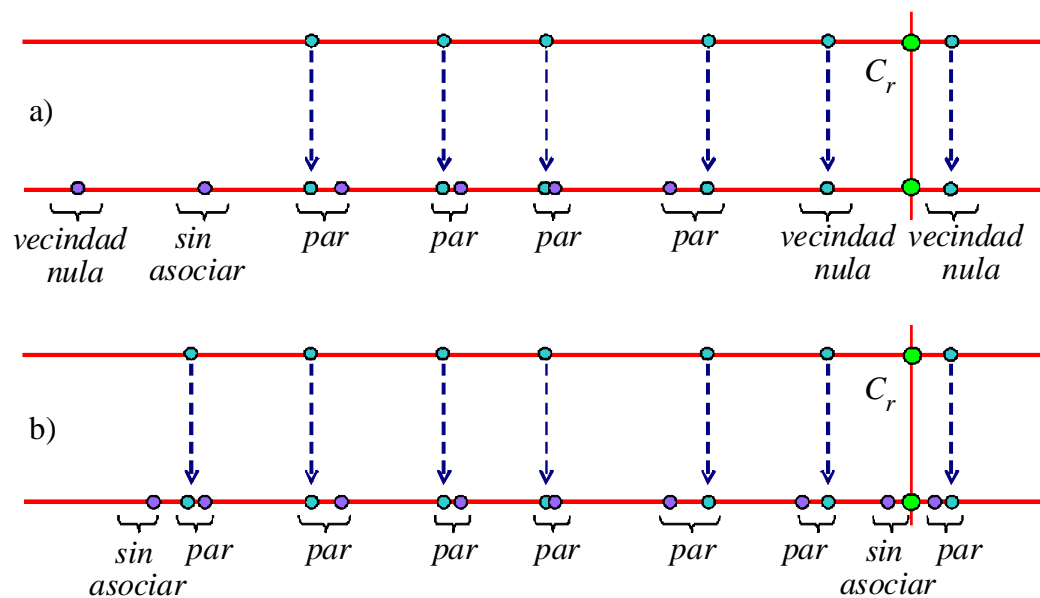


Figura 3.7: Ejemplos de asociación con método de alineación. a) Los centroides extremos de un conjunto no son asociados. b) En uno de los conjuntos existe mayor cantidad de centroides que en el otro.

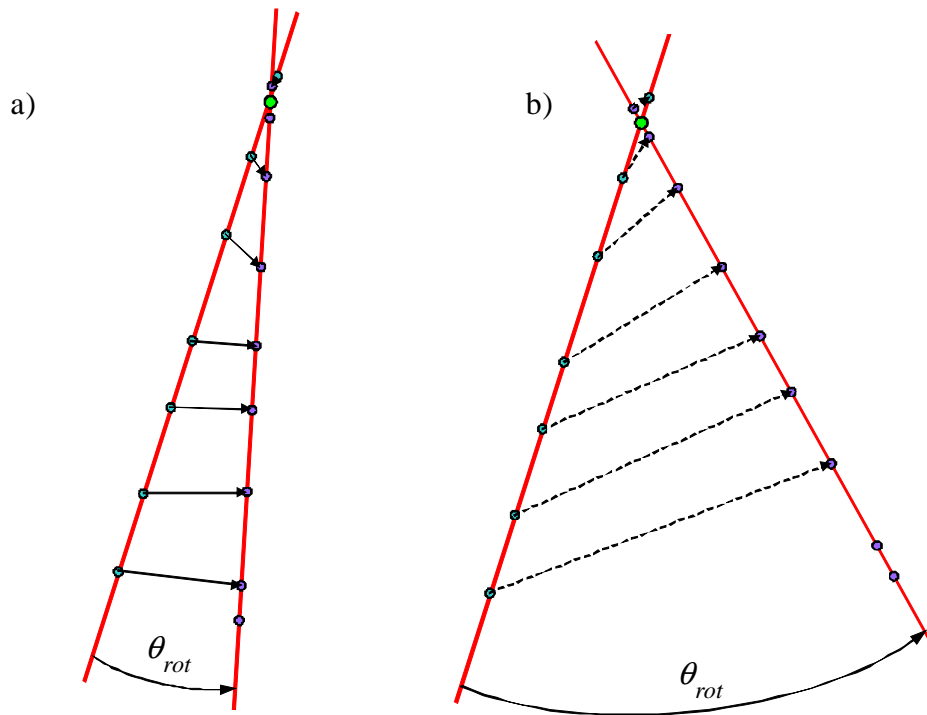


Figura 3.8: Ejemplos de asociación con método de distancias. a) Con ángulos pequeños se obtienen resultados similares al método de alineación propuesto. b) Con ángulos grandes existen ambigüedades en la asociación.

El algoritmo completo para estimación cinemática se resume en la Fig. 3.9.

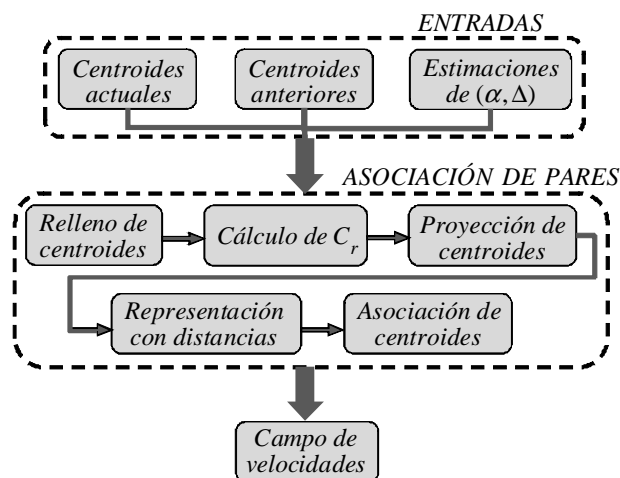


Figura 3.9: Algoritmo para estimación del campo de velocidades en la imagen. El módulo principal consiste en la asociación de pares de centroides.

Al conjunto de puntos que componen el campo de velocidades se lo denota ν_{IMG} , y

contiene las coordenadas de los centroides considerados, junto con sus respectivos vectores de velocidad.

3.5. Calidad de las Estimaciones

Para aplicaciones de control, es importante que el sensor pueda brindar una cierta medida sobre la calidad de las mediciones que realiza. Uno de los problemas que se abordan en su diseño es determinar si el patrón es visible dentro de la zona de confianza cuando, por ejemplo, la línea se mueve rápidamente en la imagen. Esto puede ocurrir, sobre todo, cuando perturbaciones dinámicas del medio afectan al sistema de control y las acciones de control no pueden evitar que la línea se aparte bruscamente del centro de la imagen. Ante esta situación, es muy probable que en la identificación, el algoritmo detecte marcas falsas producidas por el lecho marino dentro de la zona de confianza. Obviamente, este problema no se genera en el sensor. No obstante, es deseable que el sensor descubra tal situación y alerte al controlador sobre la mala estimación de velocidad.

A fin de brindar una indicación sobre la calidad de los resultados obtenidos en las etapas descritas anteriormente, se incluye un procesamiento adicional denominado supervisión. Sobre la región de confianza se analiza una región de interés (ROI) en la que el histograma brinda características estadísticas que pueden emplearse para determinar la presencia o ausencia de marcas del patrón en esa región (ver Fig. 3.10). Particularmente, el histograma de una región incluyendo un sector de la línea es típicamente bimodal, y con una extensión amplia en el rango de intensidades debido al contraste de las marcas blancas y negras. En cambio, una región de fondo tiene un rango de intensidades menor, generalmente con un único máximo local, con poco contraste. Estas características también se observan en imágenes borrosas, aún cuando se visualice el patrón. Por esto último, la falta de transparencia del agua tergiversa las propiedades estadísticas de un patrón nítido. De acuerdo a las diferencias estadísticas indicadas, es posible detectar la presencia o ausencia del patrón en la zona de confianza y analizar la calidad de la imagen.

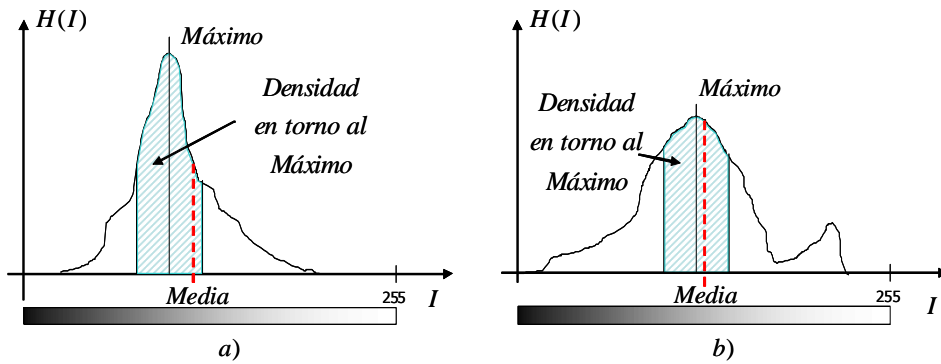


Figura 3.10: Histogramas característicos. a) Histograma del fondo, con bajo contraste y un máximo local bien marcado. b) Histograma del patrón, de mayor contraste y dos máximos locales.

La selección de la región de interés para la supervisión debe realizarse apropiadamente, y es necesario actualizarla en cada imagen. Una ubicación adecuada resulta en la zona de confianza. En consecuencia, para elegir la región se utilizan el punto C_{r_i} y el ángulo θ_{rot} . Durante la etapa de calibración se establece la posición inicial de la ROI, y luego se realiza la actualización en cada fotograma. Una vez que se determina θ_{rot} , la ROI se traslada y alinea con L_{T_i} , como se ilustra en la Fig. 3.11.

Analíticamente, el método se describe como sigue. Los vértices de la región de interés en la imagen del instante T_{i-1} conforman el conjunto $H_{i-1} = \{H1_{i-1}, H2_{i-1}, H3_{i-1}, H4_{i-1}\}$ y sus posiciones luego de una rotación en un ángulo θ_{rot} con respecto a C_{r_i} son $H_i = \{H1_i, H2_i, H3_i, H4_i\}$. La relación entre ambos conjuntos está dada por la transformación $R(C_r, \theta_{rot})$, de manera que:

$$H_i = R(C_r, \theta_{rot})\{H_{i-1}\},$$

donde cada vértice se calcula como:

$$H_j = R_{\theta_{rot}} \cdot (H_{j-1} - C_{r_i}) + C_{r_i}, \quad j = 1, 2, 3, 4,$$

con:

$$R_{\theta_{rot}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{rot}) & -\sin(\theta_{rot}) \\ \sin(\theta_{rot}) & \cos(\theta_{rot}) \end{bmatrix}.$$

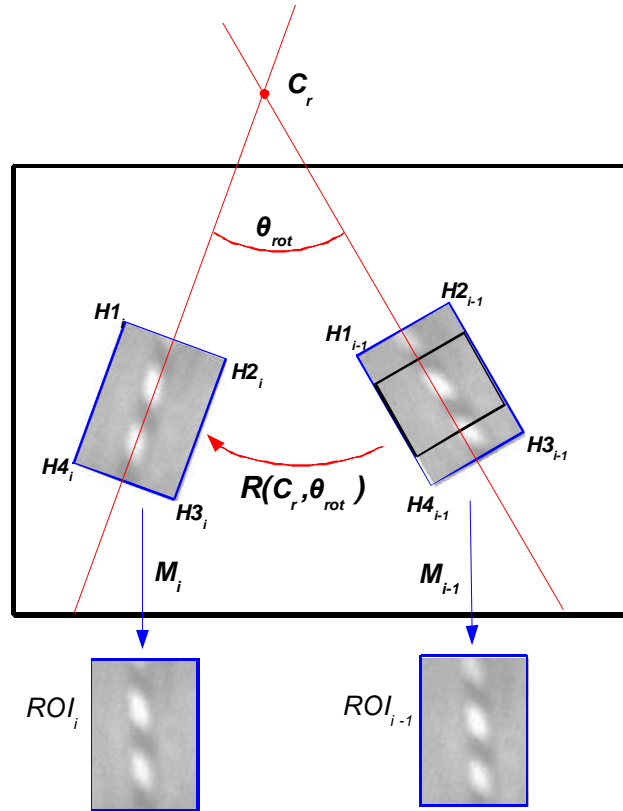


Figura 3.11: Selección de la región de interés para calcular el histograma. Se utilizan el punto C_r y el ángulo θ_{rot} que definen la transformación $R(C_r, \theta_{rot})$

Luego de hallar el conjunto de puntos H_i , se determina la matriz de transformación M_{T_i} que permite reubicar la ROI correspondiente a H_i en una nueva ROI que está rotada y alineada de acuerdo al movimiento de la línea (ver Fig. 3.11). Si el ancho y el alto de esta región se denotan como R_w y R_h , respectivamente, M_{T_i} satisface:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T &= M_{T_i} \cdot [H1_i | 1], \\ \begin{bmatrix} R_w & 0 & 1 \end{bmatrix}^T &= M_{T_i} \cdot [H2_i | 1], \\ \begin{bmatrix} R_w & R_h & 1 \end{bmatrix}^T &= M_{T_i} \cdot [H3_i | 1], \\ \begin{bmatrix} 0 & R_h & 1 \end{bmatrix}^T &= M_{T_i} \cdot [H4_i | 1]. \end{aligned}$$

Por medio de la matriz inversa M_i^{-1} se obtiene la ROI sobre la que se calcula el

histograma. En caso de que algún vértice exceda los límites de la imagen, la región se reubica al centro de la imagen, generando adicionalmente un aviso como salida de alarma del sensor de que la línea se encuentra cerca del borde de la imagen. El algoritmo completo se describe en la Fig. 3.12.

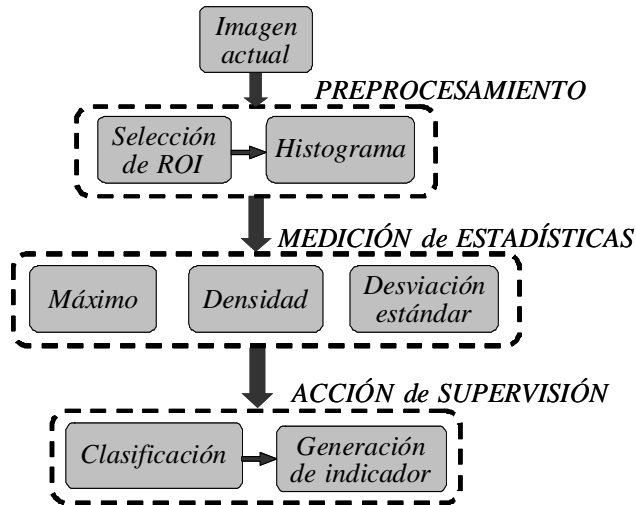


Figura 3.12: Algoritmo para supervisión de estimaciones. La clasificación de los resultados se realiza en base a las características del histograma de una región de interés sobre la zona de confianza.

La etapa final del método consiste en la clasificación de la región de acuerdo a las estadísticas de su histograma. En particular, las medidas de densidad alrededor del máximo y desviación estándar son las que permiten distinguir adecuadamente imágenes típicas de fondo marino o de patrón de línea. Para el fondo, la densidad debe resultar alta y la desviación estándar baja. Lo contrario debe ocurrir en imágenes de la línea. Definiendo los valores críticos δ_{MAX} y σ_{MIN} , la clasificación se implementa a través de un indicador booleano:

$$\rho_{ROI} = \begin{cases} 1 & \text{si } \delta_{ROI} < \delta_{MAX} \text{ y } \sigma_{ROI} > \sigma_{MIN}, \\ 0 & \text{en caso contrario,} \end{cases}$$

donde δ_{ROI} y σ_{ROI} son los valores obtenidos del histograma de la región analizada. En consecuencia, si $\rho_{ROI} = 1$ la medición se califica como confiable, y si $\rho_{ROI} = 0$, entonces se activa una alarma indicando al controlador que existen posibles perturbaciones que afectan las mediciones. Para este último caso, el sensor entrega las estimaciones realizadas pero

el controlador debe ser el encargado de efectuar las acciones correspondientes teniendo en cuenta las perturbaciones. Los valores de δ_{MAX} y σ_{MIN} son determinados en la etapa de calibración inicial.

El esquema completo del sensor de visión para estimar características de posición y velocidad en el plano de la imagen se resume en la Fig. 3.13.

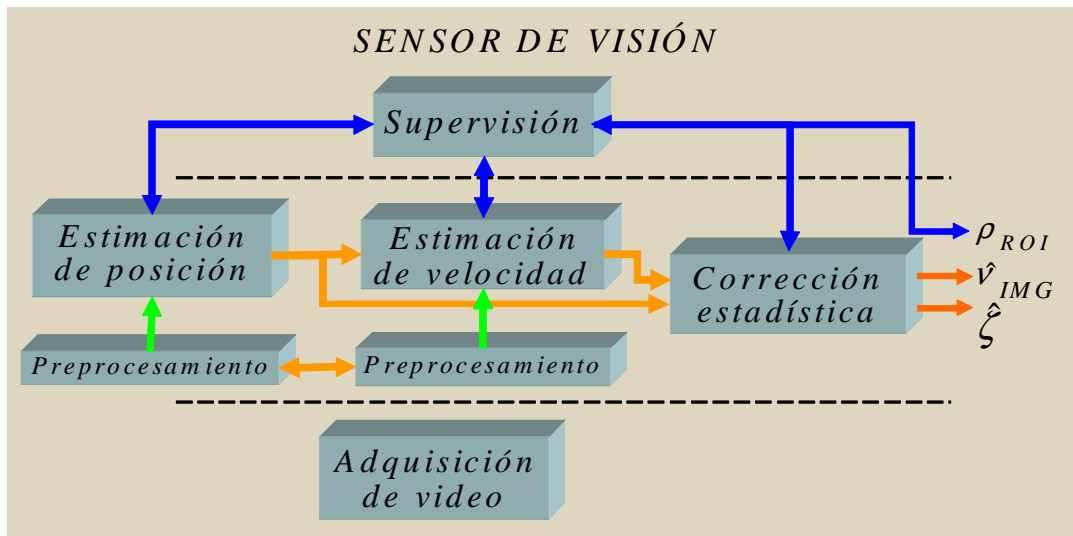


Figura 3.13: Sensor de visión. A partir de la adquisición de un video, los módulos intermedios estiman la posición de la línea y el campo de velocidades en la imagen, mientras que el módulo de supervisión opera en forma global sobre los anteriores indicando la calidad de los valores obtenidos.

Capítulo 4

Estimación de Estados

4.1. Introducción

La estimación de estados de posición y velocidad descritas en el capítulo anterior está referida a medidas sobre el plano de la imagen. Este espacio de estado no obedece a una métrica euclidiana sino a una de visión, en cuya relación con el mundo físico intervienen leyes de perspectiva y de óptica de la cámara. En consecuencia, la inclusión del sensor de visión dentro de un lazo de control en tales condiciones sólo puede realizarse si el controlador es capaz de generar sus acciones en base a ese tipo de mediciones y arribar al punto de equilibrio físico correcto. En cambio, si se establece una relación entre las estimaciones en el plano de la imagen y el espacio físico en el cual opera el vehículo, el universo de aplicación del sensor se expande a otros tipos de controladores que deberán converger al mismo punto de equilibrio mencionado anteriormente.

En este capítulo, el modelo cinemático de una imagen en movimiento es empleado para definir una transformación general con la que se obtienen las velocidades de traslación y rotación en el marco de coordenadas de la cámara. En base a dicha transformación, se describe una particularización al campo de la Robótica Subacuática. De esta manera, el campo de velocidades de la imagen hallado con el sensor de visión permite la estimación de estados de velocidad de un AUV.

Análogamente, definiendo en forma adecuada un conjunto de sistemas de referencia, se presentan las ecuaciones que determinan el posicionamiento relativo de un vehículo con respecto a una línea. En particular, se focaliza el desarrollo en la estimación del

desplazamiento lateral y la orientación relativa.

4.2. Modelo Cinemático de Imagen en Movimiento

Considerando el modelo ideal de cámara *pinhole*, el movimiento relativo de la cámara con respecto al marco de coordenadas del espacio se puede describir a partir de los vectores de velocidades de traslación $\mathbf{V}_C = (V_X, V_Y, V_Z)^T$ y de rotación $\boldsymbol{\Omega}_C = (\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z)^T$ con respecto a O_C (Fig. 4.1). Específicamente, la velocidad de un punto $\mathbf{P}_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ se determina de acuerdo a:

$$\dot{\mathbf{P}}_C = (\dot{X}_C, \dot{Y}_C, \dot{Z}_C)^T = -\mathbf{V}_C - \boldsymbol{\Omega}_C \times \mathbf{P}_C = \begin{cases} \dot{X}_C = -V_X - \Omega_Y Z_C + \Omega_Z Y_C \\ \dot{Y}_C = -V_Y - \Omega_Z X_C + \Omega_X Z_C \\ \dot{Z}_C = -V_Z - \Omega_X Y_C + \Omega_Y X_C \end{cases} \quad (4.1)$$

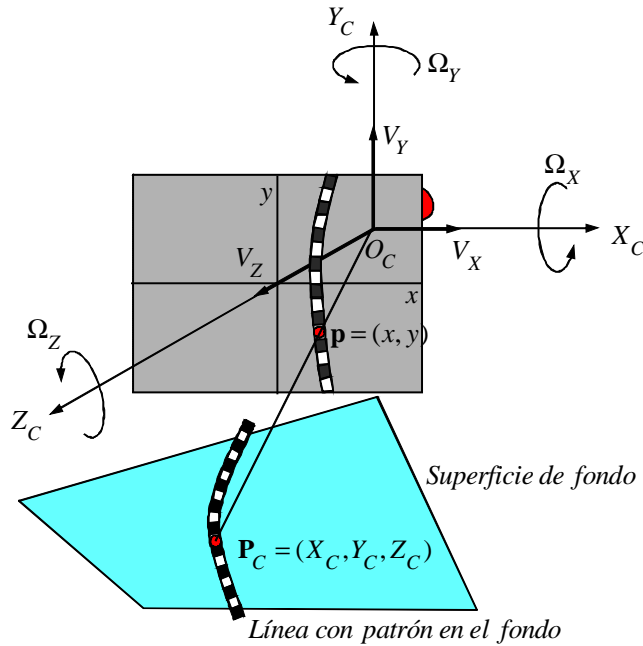


Figura 4.1: Modelo cinemático de una cámara pinhole montada en un AUV.

Recordando que la proyección del punto \mathbf{P}_C está dada por el punto $\mathbf{p} = (x, y)^T$ en el plano de la imagen a través de:

$$x = \frac{fX_C}{Z_C}, \quad y = \frac{fY_C}{Z_C}, \quad (4.2)$$

derivando para obtener $\dot{\mathbf{p}}=(\dot{x}, \dot{y})^T$ resulta:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f \left(\frac{\dot{X}_C Z_C - X_C \dot{Z}_C}{Z_C^2} \right) = f \left(\frac{\dot{X}_C}{Z_C} - \frac{X_C \dot{Z}_C}{Z_C^2} \right), \\ \dot{y} &= f \left(\frac{\dot{Y}_C Z_C - Y_C \dot{Z}_C}{Z_C^2} \right) = f \left(\frac{\dot{Y}_C}{Z_C} - \frac{Y_C \dot{Z}_C}{Z_C^2} \right).\end{aligned}\quad (4.3)$$

Reemplazando (4.1) en (4.3) se obtiene en forma matricial:

$$\dot{\mathbf{p}} = \frac{f}{Z_C} \begin{bmatrix} -1 & 0 & \frac{x}{f} \\ 0 & -1 & \frac{y}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} + f \begin{bmatrix} \frac{xy}{f^2} & -\left(1 + \frac{x^2}{f^2}\right) & \frac{y}{f} \\ \left(1 + \frac{y^2}{f^2}\right) & -\frac{xy}{f^2} & \frac{-x}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_X \\ \Omega_Y \\ \Omega_Z \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

El conjunto $(Z_C, \mathbf{V}_C, \boldsymbol{\Omega}_C)$ representa las incógnitas. Puede observarse que si Z_C es conocida o estimada previamente, entonces (4.4) es lineal con 6 incógnitas. Por el contrario, si no se conoce Z_C , el sistema resulta no lineal con 7 variables. Este problema de determinar el movimiento relativo de la cámara a partir de un conjunto de imágenes monoculares ha sido estudiado por diversos autores y es conocido por su expresión en inglés como *Structure From Motion* (SFM). Para un movimiento de cámara en 6 grados de libertad (*Degrees of Freedom*, DoF) sin restricciones, el mínimo número requerido de correspondencias entre puntos de la imagen para resolver el sistema es cinco. La primera demostración en 1913 (ver [29]) indicaba que existían como máximo 11 soluciones en tal caso. Recién en 1990 se logra una mejora del estudio llegando a demostrar la existencia de 10 soluciones como máximo [6]. Una implementación eficiente del algoritmo para resolver el sistema fue presentado por Nistér [33], y un estudio meritorio que comprende una comparación de diversos métodos puede encontrarse en [41].

No obstante, en caso de vehículos con menos grados de libertad el problema se simplifica. Alternativamente, ciertas características particulares de la superficie pueden ser consideradas para resolver (4.4). Por ejemplo, para aplicaciones de cámaras montadas en un vehículo, las restricciones no holonómicas del mismo son útiles para obtener tales simplificaciones. Un ejemplo detallado de uso de restricciones puede encontrarse en [37].

4.3. Estimación de Velocidad de un AUV

A continuación se presenta el caso de un AUV con dos modos dominantes: el avance X_V y el rumbo ψ . Estos grados de libertad son comunes para vehículos simples. Así, el sistema (4.4) puede simplificarse ubicando el origen de coordenadas O_V en el punto de rotación, es decir el punto sobre el cual el AUV puede efectuar un movimiento de rotación pura ante una fuerza transversal al vehículo en el plano de navegación (Fig. 4.2). De esta manera, las rotaciones alrededor de Z_V pueden superponerse con traslaciones en la dirección del eje X_V , ambas forzadas independientemente por propulsores transversales y longitudinales respectivamente.

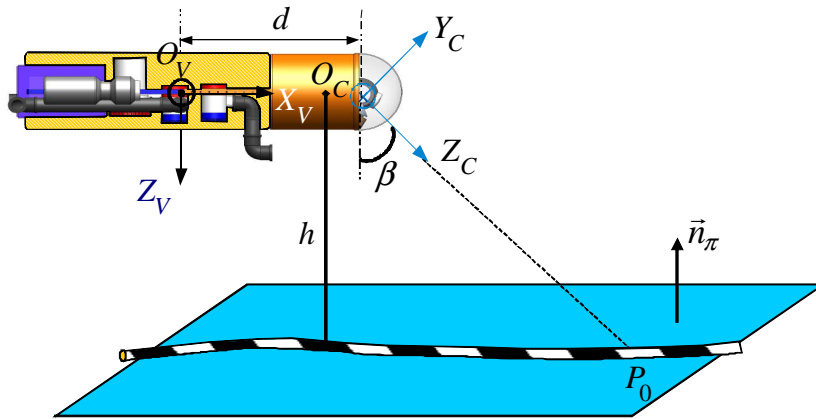


Figura 4.2: Sistemas de referencia para estimación de velocidad de un AUV. El origen de coordenadas del vehículo se ubica en el centro de masas, mientras que la superficie plana del fondo se describe a través de su normal \vec{n}_π y un punto P_0 .

La relación entre los sistemas de coordenadas queda definida por la distancia $\overline{O_C O_V}$, llamada d , y el ángulo de inclinación de la cámara con respecto a la vertical, indicado como β . Entonces:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c\beta & 0 & -s\beta \\ s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_V - d \\ Y_V \\ Z_V \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

y la relación de velocidades relativa resulta:

$$\mathbf{V}_{O_C/O_V} = \boldsymbol{\Omega}_V \times \mathbf{d} + \mathbf{V}_V,$$

donde $\mathbf{V}_V = (\dot{X}_V, \dot{Y}_V, \dot{Z}_V)^T$ y $\boldsymbol{\Omega}_V = (\Omega_{X_V}, \Omega_{Y_V}, \Omega_{Z_V})^T$ son los vectores de variables cinemáticas respecto de O_V y \mathbf{d} es un vector de módulo d alineado con el eje X_V . De acuerdo a la notación establecida en el Capítulo 2, se tiene $\mathbf{V}_V = (u, v, w)^T$ y $\boldsymbol{\Omega}_V = (p, q, r)^T$. Como sólo se consideran dos grados de libertad, resulta que:

$$v = w = p = q = 0.$$

Por lo tanto:

$$\mathbf{V}_{O_C/O_V} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ dr \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Finalmente, combinando (4.5) y (4.6) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \\ \dot{Z}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dr \\ uc\beta \\ us\beta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Omega_X \\ \Omega_Y \\ \Omega_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -rs\beta \\ rc\beta \end{bmatrix}.$$

En consecuencia, el sistema (4.4) se transforma en:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \frac{f}{Z_C} \begin{bmatrix} -1 & 0 & \frac{x}{f} \\ 0 & -1 & \frac{y}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dr \\ uc\beta \\ us\beta \end{bmatrix} + f \begin{bmatrix} \frac{xy}{f^2} & -\left(1 + \frac{x^2}{f^2}\right) & \frac{y}{f} \\ \left(1 + \frac{y^2}{f^2}\right) & -\frac{xy}{f^2} & \frac{-x}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -rs\beta \\ rc\beta \end{bmatrix},$$

y en forma compacta:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z}d + f\left(1 + \frac{x^2}{f^2}\right)\sin(\beta) + y\cos(\beta) & \frac{x}{Z}\sin(\beta) \\ \frac{xy}{f}\sin(\beta) - x\cos(\beta) & \frac{-f}{Z}\cos(\beta) + \frac{y}{Z_C}\sin(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Claramente, el sistema simplificado está formado con dos ecuaciones para determinar dos incógnitas. En consecuencia, asumiendo β y Z_C (o h) conocidas, sólo se requiere la medición o estimación de un par $(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}})$ para resolver el mismo.

4.4. Superficie Plana

A continuación se analiza el caso en el que un AUV sigue una línea a altitud constante y sobre una superficie plana, donde se encuentra una línea con patrones regulares. La descripción de un escenario y tarea similares se pueden ver en [5]. El plano de fondo π queda definido por su vector normal $\vec{n}_\pi = (0, s\beta, -c\beta)^T$ y un punto \mathbf{P}_0 del mismo (ver Fig. 4.2).

La ecuación de π es:

$$\overrightarrow{\mathbf{P}_0\mathbf{P}_C} \cdot \vec{n}_\pi = 0.$$

Tomando el punto $\mathbf{P}_0 = \left(0, 0, \frac{h}{c\beta}\right)^T$ resulta:

$$Y_C s\beta - Z_C c\beta + h = 0,$$

donde $\mathbf{P}_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ es un punto genérico en π , con coordenadas expresadas en el sistema de referencia de la cámara. Reemplazando Y_C de (4.2) y despejando Z_C se obtiene:

$$\frac{yZ_C}{f}s\beta - Z_C c\beta + h = 0 \quad \therefore Z_C = \frac{fh}{fc\beta - ys\beta}.$$

Esta última expresión representa una forma de estimar la distancia en la dirección del eje focal de la cámara en cualquier punto de la imagen, y en particular es muy útil para simplificar (4.7). Entonces se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Kd + f \left(1 + \frac{x^2}{f^2}\right) s\beta + yc\beta & xs\beta\frac{K}{f} \\ -xK\frac{h}{f} & -Kc\beta + K\frac{y}{f}s\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix},$$

donde

$$K = \frac{f}{Z_C} = \frac{fc\beta - ys\beta}{h}.$$

Es importante notar que la altitud h no sólo se establece para alcanzar buenas condiciones de visibilidad, sino que también debe ser adecuada para visualizar un segmento de la línea con curvatura suave.

Una vez que se determina el campo de velocidades de la imagen, en particular el de los centroides detectados, se utiliza una técnica de optimización (por ejemplo, mí-

nimos cuadrados) para resolver (4.7). Se debe destacar que cada desplazamiento de centroides corresponde a dos imágenes consecutivas, por lo cual sus unidades son de píxeles/imagen ($[px/img]$), con lo cual se estiman inicialmente las velocidades en unidades de metros/imagen ($[m/fr]$) y radianes/imagen ($[rad/img]$), para u y r respectivamente. Por lo tanto, la solución obtenida brinda u en metros por segundo ($[m/seg]$) y r en radianes por segundo ($[rad/seg]$) luego de escalar los resultados midiendo el tiempo de procesamiento consumido $[seg/img]$.

4.5. Estimación de Posición Relativa de un AUV

Como se mencionó anteriormente, en la Sección 3.2, el modelo de cámara *pinhole* establece la relación entre un espacio Euclídeo \mathbb{R}^3 y un espacio Euclídeo \mathbb{R}^2 . En su forma general, la relación se define por medio de la orientación relativa y el vector de traslación a través de R y \mathbf{t} , respectivamente (ver Subsección 3.2.3). Sin embargo, resulta conveniente asociar el marco de coordenadas del espacio a un cierto punto de la línea a fin de obtener una transformación más simple y clara.

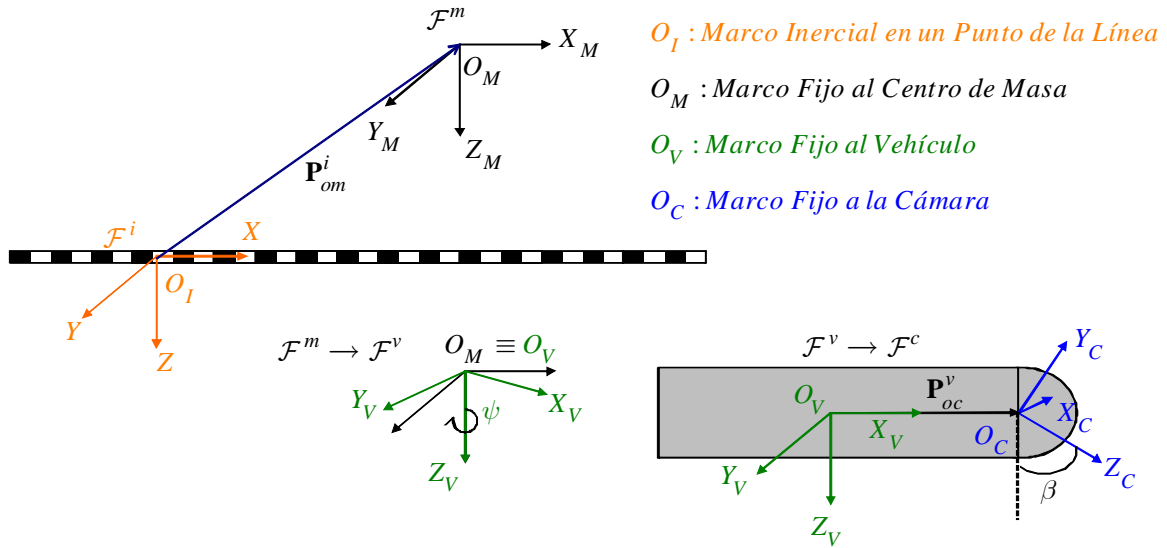


Figura 4.3: Sistemas de referencia para estimación de posición relativa. El marco inercial se asocia a un punto de la línea para definir la dirección del eje X. Sobre el centro de masa se ubican dos marcos: uno para definir la traslación del centro de masa respecto al origen del marco inercial sobre la línea, y otro fijo al vehículo que sigue las rotaciones respecto al anterior.

Una elección adecuada de los sistemas de coordenadas se muestra en la Fig. 4.3. De acuerdo a esta Figura, uno de los sistemas fundamentales está asociado a la cámara y otro a un punto de la línea, que no necesariamente debe ser conocido. En forma adicional y con el objetivo de lograr la claridad en la transformación, se agregan dos sistemas auxiliares: uno que tiene como origen al centro de masa del vehículo pero está orientado al sistema inercial del punto de la línea y otro que tiene igual centro, pero está fijo al vehículo y sigue las rotaciones respecto al anterior. Mediante esta elección, se pueden establecer las siguientes observaciones sobre los sistemas:

- las coordenadas de un punto están dadas por $\mathbf{P}_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$ y $\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T$ en el sistema de la cámara y el inercial (línea), respectivamente.
- la traslación del centro de masas del vehículo respecto al sistema fijo está dada por el vector \mathbf{P}_{om}^i .
- las rotaciones respecto al centro de masas quedan definidas por la matriz R_m^v .
- la traslación del centro de la cámara respecto al sistema del vehículo está dada por el vector \mathbf{P}_{oc}^v .
- las rotaciones respecto al sistema de la cámara quedan definidas por la matriz R_v^c .

De esta manera, la transformación de coordenadas completa para un vehículo de dos grados de libertad resulta:

$$\mathbf{P}_C = R_v^c [R_m^v (\mathbf{P} - \mathbf{P}_{om}^i) - \mathbf{P}_{oc}^v], \quad (4.8)$$

$$\mathbf{P}_C = R_X^\beta R_Z^{-\frac{\pi}{2}} \left[R_Z^\psi \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right],$$

donde:

$$R_X^\psi = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_Z^{-\frac{\pi}{2}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_X^\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\beta & -s\beta \\ 0 & s\beta & c\beta \end{bmatrix},$$

y el vector $\mathbf{P}_t = \mathbf{P} - \mathbf{P}_{om}^i = (X_t, Y_t, h)^T$ representa las coordenadas relativas del centro de masas del vehículo respecto al punto fijo de la línea. Teniendo en cuenta que dicho punto puede ser no conocido (es decir: la línea no posee puntos localizados odométricamente), X_t no constituye una medida significativa, por lo que sólo el desplazamiento lateral Y_t es considerado para definir la posición relativa, y el ángulo ψ para definir la orientación relativa.

Desarrollando (4.8) se obtiene:

$$\mathbf{P}_C = \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_t c\psi + X_t s\psi \\ hs\beta + c\beta \cdot (X_t c\psi - d + Y_t s\psi) \\ hc\beta - s\beta(X_t c\psi - d + Y_t s\psi) \end{bmatrix}.$$

Con esta notación, las coordenadas del punto proyectado en el plano de la imagen son:

$$i_x = f \frac{X_C}{Z_C}, \quad i_y = f \frac{Y_C}{Z_C},$$

y entonces resulta:

$$i_x = \frac{-f \cdot (Y_t c\psi - X_t s\psi)}{hc\beta - s\beta(X_t c\psi - d + Y_t s\psi)},$$

$$i_y = \frac{f \cdot (hs\beta + c\beta \cdot (X_t c\psi - d + Y_t s\psi))}{hc\beta - s\beta(X_t c\psi - d + Y_t s\psi)}.$$

Luego, una línea recta vista desde la cámara generará la proyección de una línea recta sobre el plano de la imagen, la cual puede expresarse en la forma:

$$i_y = m \cdot i_x + b.$$

El valor de X_t para el cual $i_x = 0$ es:

$$X_{t_x0} = X_t |_{i_x=0} = Y_t \frac{c\psi}{s\psi}.$$

Con este resultado se puede calcular la ordenada al origen de la recta, hallando el valor de i_y cuando $i_x = 0$, es decir:

$$b = i_y |_{i_x=0} = i_y |_{X_t=X_{t_x0}} = \frac{f \cdot (hs\beta s\psi + Y_t c\beta - dc\beta s\psi)}{hc\beta s\psi + ds\beta s\psi - Y_t s\beta}.$$

Por otro lado, la condición sobre X_t para que $i_y = 0$ es:

$$X_{t_y0} = X_t |_{i_y=0} = \frac{-(hs\beta - dc\beta + Y_t c\beta s\psi)}{c\beta c\psi},$$

y como:

$$m = \frac{-b}{i_x |_{X_t=X_{t_y0}}},$$

se obtiene finalmente la pendiente de la recta proyectada:

$$m = \frac{hfc\psi}{fhc\beta s\psi + dfs\beta s\psi - fY_t s\beta}. \quad (4.9)$$

El resultado anterior permite establecer una relación entre las variables de posición relativa (Y_t, ψ) y los parámetros de la línea estimada (α, Δ) . Más precisamente, si se considera el punto x_L de la línea que corta al eje x del plano de la imagen, se tiene que:

$$x_L = i_x |_{i_y=0} = tg\alpha \cdot \Delta_y + \Delta_x,$$

y se puede despejar el desplazamiento lateral físico a la línea:

$$Y_{ts} = Y_t |_{i_x=x_L} = Y_t |_{i_y=0} = \frac{-(hx_L c\psi - dfc\beta s\psi + fhs\beta s\psi)}{fc\beta}. \quad (4.10)$$

Reemplazando (4.10) en (4.9) se obtiene una nueva expresión equivalente para la pendiente:

$$m_s = \frac{fc\beta c\psi}{fs\psi + x_L c\psi s\beta}.$$

De la estimación de parámetros de posición de la línea se sabe que la pendiente de la recta proyectada en la imagen debe ser $1/tg\alpha$, es decir:

$$m_s = \frac{1}{tg\alpha},$$

y en consecuencia

$$\frac{1}{tg\alpha} = \frac{fc\beta c\psi}{fs\psi + x_L c\psi s\beta},$$

de donde se logra una estimación de la orientación relativa entre el vehículo y la línea en

el espacio físico:

$$tg\hat{\psi} = -c\beta tg\alpha - \frac{x_L s\beta}{f}. \quad (4.11)$$

Se puede notar de (4.11) que cuando $fc\beta tg\alpha = -x_L s\beta$, la rotación del vehículo es nula, pero la rotación de la línea en la imagen existe y corresponde a una línea que corta a la línea vertical en un punto central alejado adelante.

Ahora, reemplazando (4.11) en (4.10) se obtiene la estimación del desplazamiento lateral físico relativo:

$$\hat{Y}_t = \frac{-(hx_L c\hat{\psi} - d f c\beta s\hat{\psi} + f h s\beta s\hat{\psi})}{f c\beta}. \quad (4.12)$$

Para simplificar la notación, las ecuaciones (4.11) y (4.12) se reescriben en forma compacta como el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \hat{Y}_t = s_1 s\hat{\psi} + s_2 x_L c\hat{\psi} \\ tg\hat{\psi} = s_3 tg\alpha + s_4 x_L \end{cases}, \quad (4.13)$$

con:

$$s_1 = d + htg\beta, \quad s_2 = \frac{-h}{f c\beta}, \quad s_3 = -c\beta, \quad s_4 = \frac{s\beta}{f}.$$

Claramente, la calidad de las estimaciones de posicionamiento relativo dependerá de la medida en la que se puedan medir o estimar los parámetros fijos involucrados en las ecuaciones anteriores. De todos ellos, el más crítico es la distancia focal, que debe ser estimada con técnicas de calibración de cámaras y varía en cada modelo. Los restantes representan parámetros constructivos (d y β) y de navegación (h), que pueden medirse con mayor facilidad. Por último, la calidad de las estimaciones de posición dependerá también de la constancia de la altitud durante la navegación además de la ausencia de movimientos de rolido y cabeceo frontal.

4.6. Resultados

La evaluación experimental del sensor se llevó a cabo en una pileta con empleo de una línea de patrones regularmente espaciados, depositada en el fondo, y del vehículo

subacuático experimental, cuya dinámica fue presentada en el Capítulo 2 y los detalles constructivos que son descriptos en el Capítulo 7. En esta instancia, la tarea de seguimiento fue realizada mediante teleoperación, con el fin de analizar el desempeño del sensor para su posterior inclusión en un lazo de control autónomo. Las aptitudes del sensor tanto para la teleoperación como para el control automático basado en visión pura, son idénticas, por lo que esta etapa de pruebas revela la propiedades genuinas de su funcionamiento en ambientes reales.

A continuación se presentan las pruebas experimentales que ilustran los resultados correspondientes al desarrollo teórico presentado en los Capítulos 3 y 4. Las mismas han sido seleccionadas de entre varias corridas y condiciones del agua y de la luz solar. Estos ejemplos representan escenarios y casos usuales pero también algunos excepcionales del seguimiento de línea por visión con los métodos descriptos anteriormente.

Cada figura está dividida en secciones que representan las etapas involucradas en los algoritmos correspondientes, y han sido comentadas en detalle al pie de las mismas. Para una mayor claridad, los resultados se muestran en diferentes subsecciones de acuerdo a los módulos que componen el sensor. Comenzando con la estimación de la posición del segmento de línea visible en la imagen, se continúa luego con el campo de velocidades en el plano de la misma y posteriormente el análisis de calidad de estimaciones efectuado por el módulo de supervisión. El capítulo concluye con la presentación de ciertos casos excepcionales donde el sensor puede verse afectado en caso de perturbaciones en la imagen capturada por la cámara.

4.6.1. Estimación de Posición en el Plano de Imagen

La primera información generada por el sensor es la estimación de la posición del segmento de línea visible en el plano de la imagen capturada por la cámara de a bordo del AUV. Las etapas correspondientes que conducen a ese resultado se ejemplifican en la Fig. 4.4. En a), sobre la imagen original en RGB (arriba-izquierda) convertida a escala de grises se aplica un filtrado de imagen con mejoras en brillo, contraste y suavizado (arriba-derecha). Esta imagen filtrada es la que luego se umbraliza y corrige con operaciones morfológicas, hasta obtener una imagen segmentada en la cual se visualizan en forma aislada las marcas del patrón y regiones espúreas de la imagen que no corresponden a la

línea (abajo-izquierda).

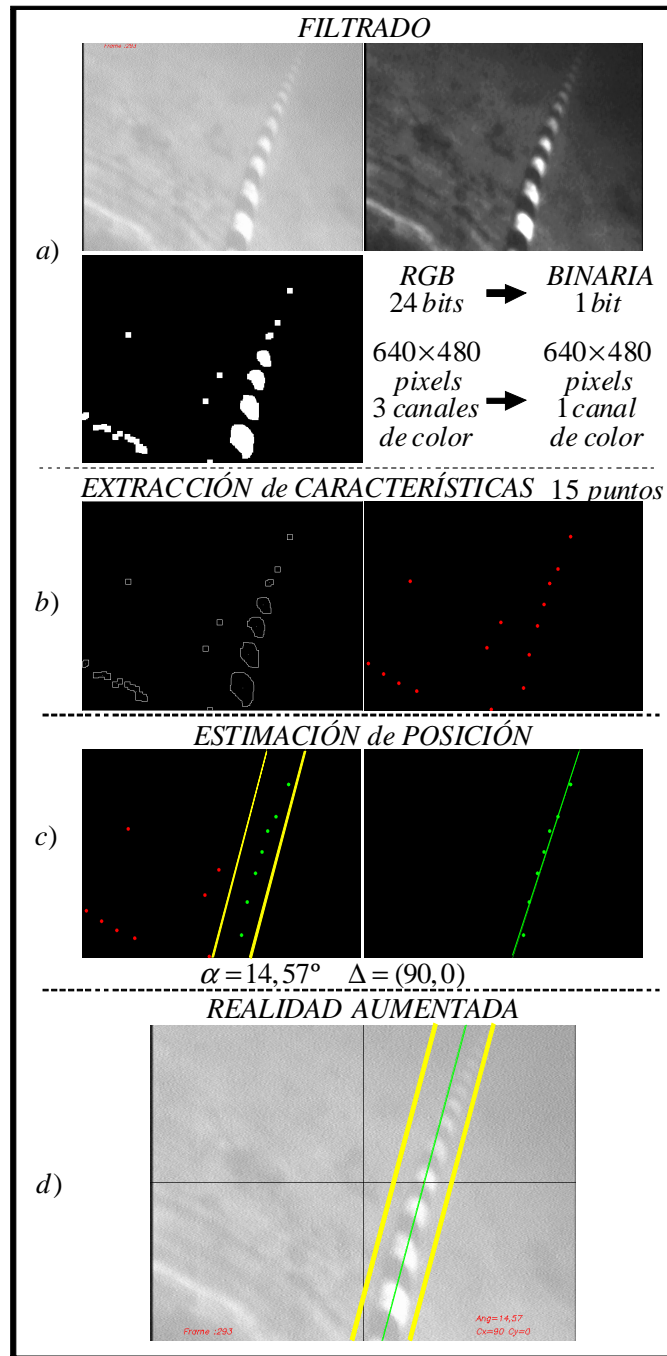


Figura 4.4: Estimación de características de imagen. a) Imagen original, ajuste de contraste y brillo y binarización. b) Extracción de contornos y sus respectivos centroides. c) Selección de centroides en la zona de confianza y estimación de parámetros de línea. d) Realidad aumentada, obtenida mediante la superposición de la línea estimada sobre la imagen original.

Con este procesamiento, la cantidad de información que en la imagen original es repre-

sentada en una matriz tridimensional con datos de 8 bits, es reducida a una matriz bidimensional de 1 bit por dato. Independientemente de la resolución de la imagen (en la cámara utilizada es de 640x480 píxeles), se logra una reducción de 24x3 veces la cantidad de bits requeridos para almacenar la información gráfica útil.

Una vez obtenida la segmentación, la extracción de características comprende los pasos ilustrados en b). Cada una de las regiones de la imagen segmentada se representa a través de su contorno (izquierda), para luego calcular el promedio de coordenadas de los puntos que componen a cada uno de ellos y hallar sus centroides (derecha). El conjunto de características obtenidas está compuesto entonces por estos centroides, de manera que la información visual puede ser representada empleando sólo un punto por cada región segmentada.

Finalmente, en c) se muestran los pasos que permiten completar la estimación de la posición. Del conjunto de características hallado en el paso anterior, se seleccionan únicamente aquellos centroides que se ubican dentro de la zona de confianza definida por la posición de la línea determinada para la imagen previa (izquierda). Con las coordenadas de los puntos seleccionados se estima la ubicación de la línea que minimiza el error de proyección de los puntos sobre la misma, en un sentido de mínimos cuadrados (derecha). El ángulo respecto a la vertical y las coordenadas del punto medio del segmento visible representan los parámetros estimados.

Si bien la visualización de resultados no es un requerimiento para el funcionamiento del sensor, la misma es útil para la evaluación cualitativa durante su diseño e intentos de mejoras. En d), la superposición de la línea estimada y la zona de confianza actualizada para la imagen siguiente superpuestas sobre la original, representan una imagen de realidad aumentada que permite validar la ubicación de la estimación sobre la línea real. En forma adicional, ciertos valores, como el tiempo de procesamiento o los parámetros estimados, son incluidos en la visualización.

4.6.2. Estimación del Campo de Velocidades en la Imagen

El segundo módulo del sensor de visión brinda un conjunto de velocidades de puntos de la imagen. En particular, los puntos mencionados corresponden a los centroides de marcas de patrón identificadas en dos imágenes sucesivas.

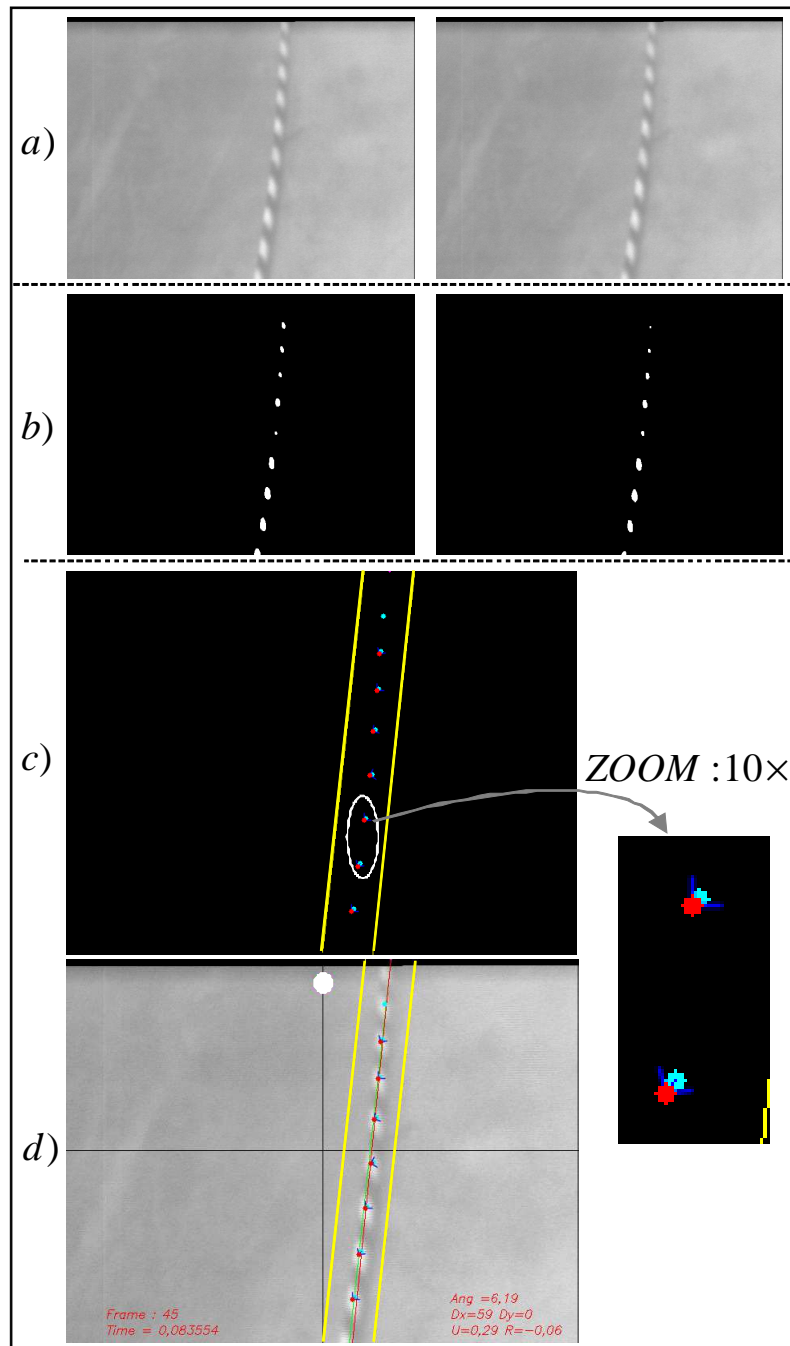


Figura 4.5: Estimación del campo de velocidades en la imagen, ejemplo 1. a) Imágenes originales consecutivas. b) Segmentación de las imágenes luego de ser filtradas. c) Asociación de pares de centroides que determinan los vectores del campo de velocidades. d) Realidad aumentada, obtenida mediante la superposición de la línea y el campo de velocidades sobre la imagen original.

La Fig. 4.5 muestra un ejemplo de los pasos ejecutados en el algoritmo para la cinemática. Para realizar la estimación, se parte de dos imágenes de cámara como las mostradas

en a), con la premisa de que sean capturadas en un intervalo de tiempo lo suficientemente corto para que el desplazamiento entre ambas no sea excesivo. Utilizando los resultados del primer módulo, cada una de estas imágenes es filtrada y segmentada como se muestra en b), para luego calcular los centroides de cada marca.

Teniendo aislados los grupos de centroides de cada imagen, la asociación de pares se lleva a cabo mediante la implementación del algoritmo de agrupamiento presentado anteriormente en el Capítulo 3. De esta manera se llega al campo de velocidades ilustrado en c). Con la premisa mencionada sobre el tiempo de captura, los desplazamientos de cada punto deben ser pequeños. Para cuantificar esta observación, se puede decir que el algoritmo brindará asociaciones correctas cuando el desplazamiento real de cada punto en la imagen no exceda la distancia en píxeles que se visualiza entre dos marcas consecutivas del patrón.

Nuevamente, una imagen de realidad aumentada como la que se muestra en d) sirve para analizar los resultados en forma cualitativa, a través de la visualización de los vectores de velocidad superpuestos sobre la segunda imagen, de modo que cada flecha representa el desplazamiento de cada centroide respecto de su posición en la imagen previa. También los valores hallados pueden visualizarse en dicha figura, donde además se imprime el tiempo requerido para completar el procesamiento. La medición de este tiempo es necesaria para escalar adecuadamente las estimaciones realizadas. Más precisamente, en la asociación de puntos sólo se establece un desplazamiento en píxeles, de manera que la estimación de velocidades tiene unidades de píxeles/frame. Conociendo el tiempo transcurrido entre la adquisición de dos fotogramas, que en tiempo real coincidirá con el tiempo de procesamiento, se puede llevar las estimaciones a unidades de píxeles/segundo.

Otro ejemplo del desempeño del sensor se presenta en la Fig.4.6. Para este caso, las condiciones de visibilidad son muy pobres, debido a la presencia de ondas cáusticas que afectan notablemente la calidad de las imágenes originales mostradas en a). Aún así, el primer módulo consigue detectar algunas de las marcas del patrón, las que son segmentadas correctamente en b). Puede notarse que ciertas marcas intermedias no son detectadas (véase por ejemplo la imagen a la izquierda en b), ante lo cual el algoritmo de completamiento de centroides agrega los puntos que se consideran necesarios en ambos conjuntos.

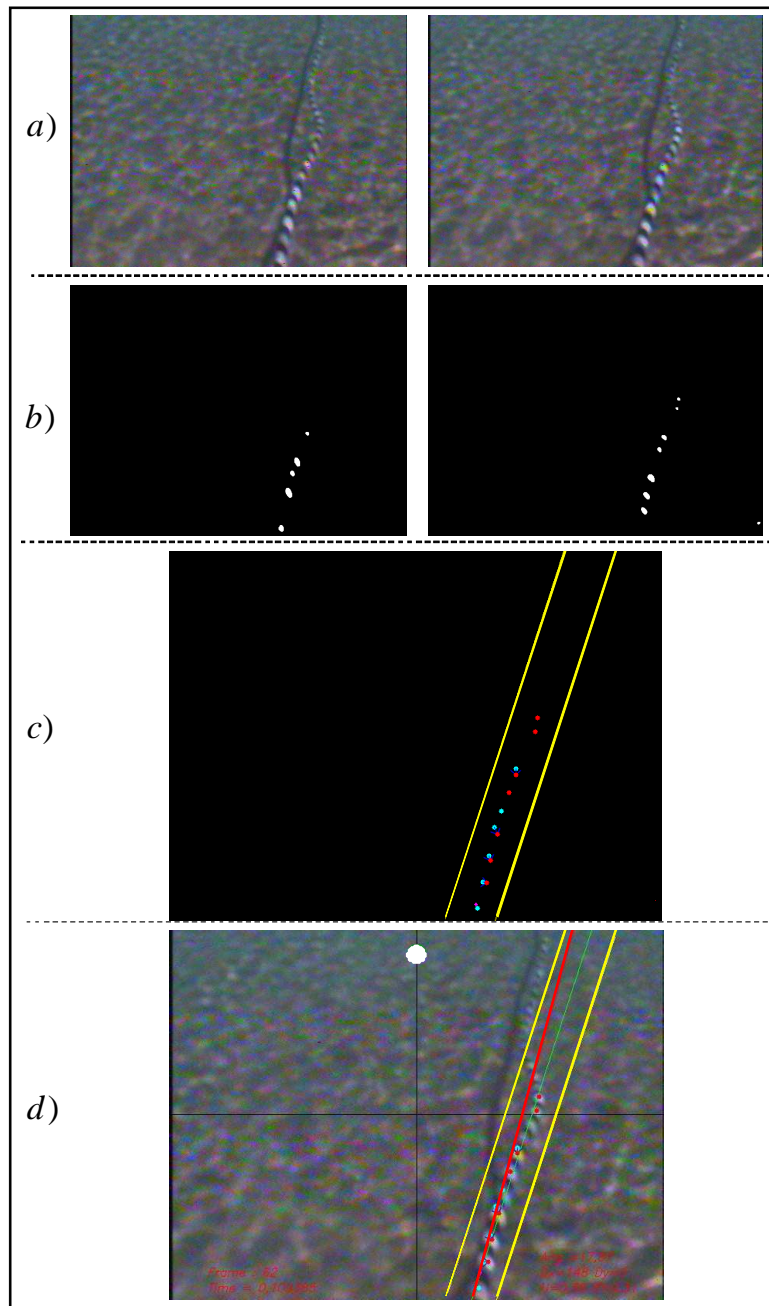


Figura 4.6: Estimación del campo de velocidades en la imagen, ejemplo 2. a) Imágenes originales consecutivas. b) Segmentación de las imágenes luego de ser filtradas. c) Asociación de pares de centroides que determinan los vectores del campo de velocidades. d) Realidad aumentada, obtenida mediante la superposición de la línea y el campo de velocidades sobre la imagen original.

Aunque la distribución de centroides en cada imagen antes del completamiento no es favorable para la asociación (debido a sus irregularidades), ésta puede lograrse en forma correcta llegando al resultado que se ilustra en c). Este es un ejemplo donde algunos

centroides de los extremos tienen vecindad nula, al mismo tiempo que uno intermedio no es asociado a ningún par. Por último, en d), la imagen de realidad aumentada muestra que el campo de velocidades hallado es consistente con un movimiento predominante de rotación (véase las dos líneas estimadas sucesivamente que se intersectan), ya que el punto de intersección de las líneas se ubica en la mitad inferior del cuadro de la imagen.

4.6.3. Análisis de Calidad de Estimaciones

El último módulo del sensor realiza una evaluación de propiedades estadísticas en una ROI determinada de la imagen. Para una operación en tiempo real, esta ROI es ubicada dentro de la zona de confianza. No obstante, a fin de poder validar esta elección de la ROI, en esta sección se eligen otras posiciones de manera arbitraria de la región y se comparan finalmente. Los resultados se presentan aplicando el algoritmo sobre dos imágenes extraídas de videos correspondientes a condiciones de operación y visibilidad notablemente distintas.

La Fig. 4.7 sintetiza la aplicación del algoritmo en cuatro ROIs de cada imagen. El primer caso corresponde a una condición de operación en la cual el AUV navega a una altura relativamente baja respecto de la línea, y la imagen obtenida desde la cámara es clara y no presenta mayores perturbaciones. Para este caso, la imagen original es mostrada en a) (izquierda), y se pueden observar además las cuatro posiciones para las ROIs en las que se aplica el algoritmo. Como las operaciones realizadas son favorecidas en imágenes de alto contraste, se trabaja sobre la imagen filtrada (derecha), que es obtenida en el módulo de estimación de posición.

En cada región de interés se calculan los histogramas correspondientes que se visualizan en b). A partir de las características estadísticas distintivas entre ellos (densidad alrededor del máximo, desviación estándar y distribución bimodal), la conclusión del algoritmo acerca de la presencia o ausencia de la línea se visualiza en el color de borde de cada ROI: un recuadro blanco indica que las características del histograma coinciden con las del patrón de la línea, mientras que un recuadro negro indica que el histograma posee características típicas de una región de fondo. Como puede observarse, las ROI 1 y 2 están ubicadas sobre la línea y son recuadradas en blanco, mientras que las ROI 3 y 4 ubicadas sobre el fondo se ven recuadradas en negro. En consecuencia, la determinación

de ausencia o presencia de la línea es correcta en todas las regiones indicadas.

Por otro lado, se analiza un caso en donde la navegación se realiza a gran altitud con presencia de ondas cáusticas que afectan la calidad de imagen (ver c), izquierda). Ante estas perturbaciones, el filtrado con ajuste de brillo y contraste no permite una clara diferenciación entre las marcas del patrón y ciertas regiones donde el reflejo de las ondas cáusticas provoca niveles de intensidad y contraste altos en la imagen obtenida (derecha). De manera similar al caso b), se extraen las regiones de interés y se calculan sus histogramas, como puede verse en d). Aquí las ROI 1 y 2 ubicadas sobre la línea son recuadradas correctamente en blanco, mientras que la ROI 4 sobre el fondo es recuadrada en negro. Sin embargo, la ROI3 que está ubicada en una región de fondo se ve afectada por la intensidad de las ondas, las cuales generan una dispersión en el histograma aumentando el contraste. Por este motivo, la ROI3 es recuadrada incorrectamente en color blanco.

Es importante aclarar que a pesar del error observado en el último caso, las perturbaciones producidas por las ondas cáusticas son intermitentes dado que los picos de intensidad lumínica que éstas generan se desplazan de manera no uniforme y a velocidades mayores que las del propio vehículo. Por el contrario, las marcas del patrón se desplazan de acuerdo a la velocidad del vehículo y se distribuyen de manera uniforme, únicamente afectadas por la perspectiva que genera el ángulo de inclinación de la cámara.

Este hecho permite entrever que a pesar de observar estadísticas similares, las ondas cáusticas en la imagen poseen una Transformada de Fourier con líneas espectrales ubicadas en altas frecuencias, propiciando este hecho un descarte más certero. Sin embargo esta propiedad no fue explotada en el algoritmo desarrollado. Por el contrario, el algoritmo de esta Tesis realiza la elección de una manera más simple y eficiente. Dado que la zona de confianza queda definida principalmente por las marcas que mantienen la alineación en imágenes sucesivas, una ROI incorrecta supone un error en la determinación de la zona de confianza, el cual será corregido al producirse la intermitencia en las perturbaciones lumínicas.

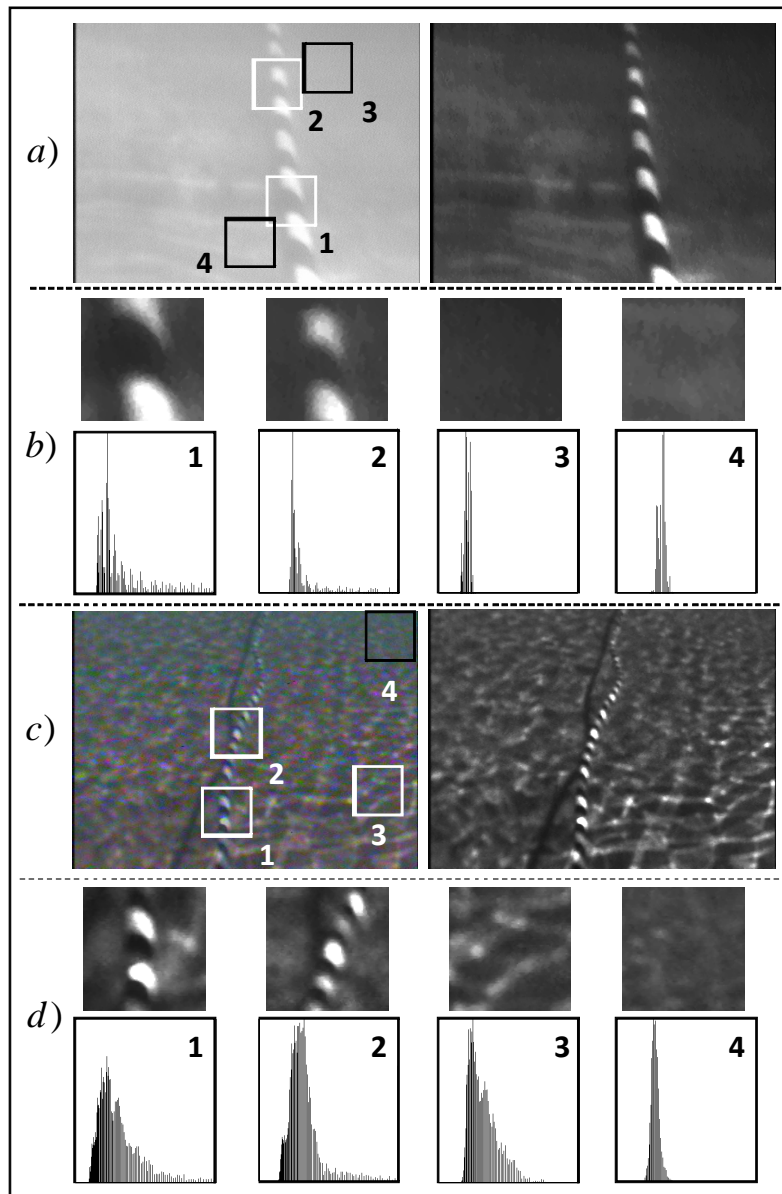


Figura 4.7: Análisis de calidad de estimaciones. a) Izquierda, imagen original del ejemplo 1, con regiones de interés sobre la línea y fuera de ella. Derecha, ajuste de brillo y contraste. b) Arriba, ROIs extraídas de la imagen mejorada. Abajo, histogramas normalizados de cada ROI. c) Izquierda, imagen original del ejemplo 2, con regiones de interés sobre la línea y fuera de ella. Derecha, ajuste de brillo y contraste. d) Arriba, ROIs extraídas de la imagen mejorada. Abajo, histogramas normalizados de cada ROI.

4.6.4. Desempeño del Sensor en Diferentes Condiciones de Operación

Los ejemplos que se describen a continuación ilustran los resultados obtenidos en varias situaciones de teleoperación. Cada uno de los ejemplos se presenta por medio de cuatro imágenes, compuestas de la siguiente manera: arriba a la izquierda se ubica la imagen de realidad aumentada, donde se superponen la línea estimada, la zona de confianza, la región de interés, un círculo indicando el resultado de la supervisión, y algunos de los valores estimados; hacia la derecha, se ubica la imagen filtrada, con los ajustes de brillo y contraste; a la izquierda y abajo, la imagen segmentada; y abajo a la derecha se muestran, en forma conjunta, la ROI seleccionada y su histograma.

En primer lugar, se muestra una serie de situaciones habituales que se producen la mayor parte del tiempo en la navegación. Teniendo en cuenta que estos resultados se obtuvieron procesando fuera de línea un video obtenido mediante teleoperación, se han seleccionado tramos de un mismo video donde se observan varias de estas situaciones. Las mismas se resumen en la Fig. 4.8. Primeramente se ejemplifica con una escena bien iluminada; la imagen original y los resultados del sensor se muestran en a). Aquí puede notarse la claridad de la imagen y una segmentación correcta que sólo incluye algunas manchas espúreas que no son tenidas en cuenta en la estimación de la línea por hallarse fuera de la zona de confianza.

En b) se muestra una escena donde la iluminación es mayor hacia un lado de la línea. Allí se aprecia que si bien la imagen original no revela notablemente las diferencias lumínicas, éstas se hacen visibles al aumentar el contraste, lo cual es motivo de la detección de gran cantidad de manchas espúreas en la segmentación. No obstante, la elección de centroides dentro de la zona de confianza permite distinguir correctamente las marcas que pertenecen al patrón de la línea.

En ocasiones, la turbidez del agua puede ocultar las marcas o afectar la segmentación, obteniéndose menos centroides de los que se esperaría, como se ejemplifica en c). Ante esta situación, el algoritmo de completamiento de puntos responde adecuadamente y se logra continuar con la estimación de velocidades. Si la falencia en la detección de marcas se produce sobre la mitad superior de la imagen, no se agregan nuevos puntos y se estima la línea como en el caso mostrado en d).

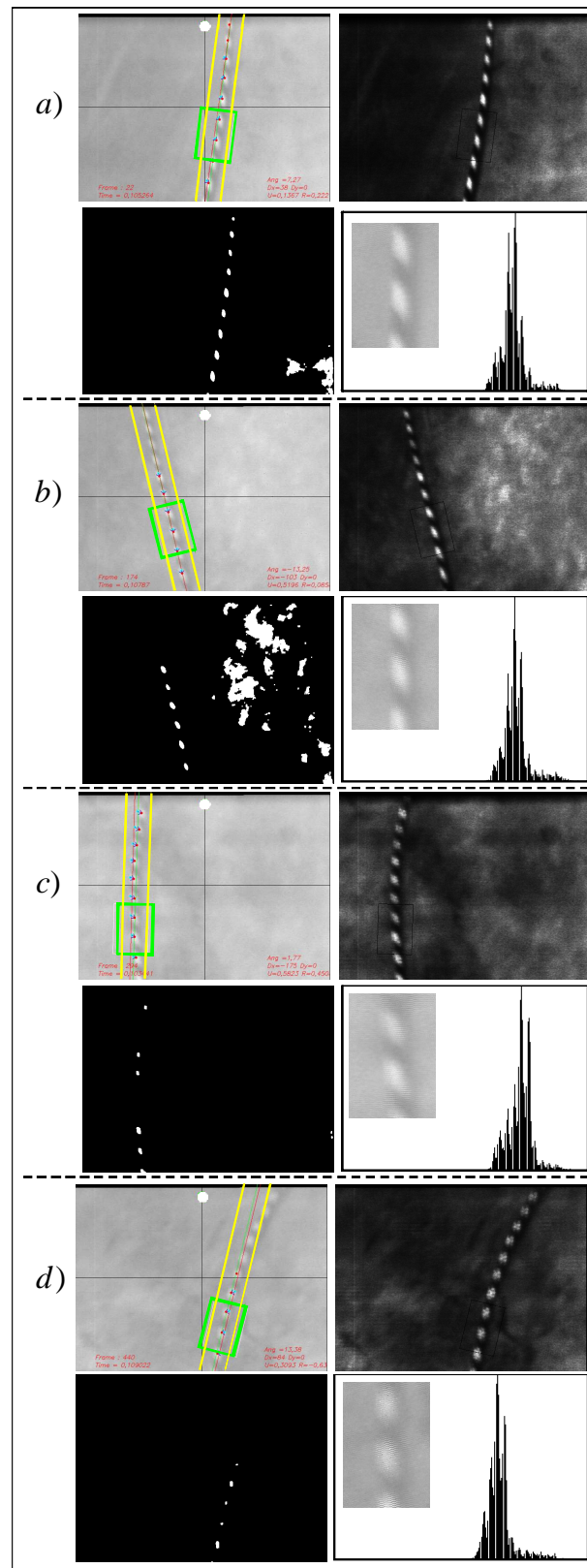


Figura 4.8: Desempeño del sensor en condiciones usuales de estado del agua, luz y navegación. a) Escena bien iluminada. b) Diferencia de iluminación a ambos lados de la línea. c) Estimación a partir de pocos centroides, con huecos. d) Estimación a partir de pocos centroides, sin huecos.

Debido a que en las situaciones descriptas no se produce la pérdida de la línea y la ROI ubicada en la zona de confianza siempre corresponde a una región del patrón, el algoritmo de supervisión funciona de manera correcta indicando que las estimaciones son confiables por medio del círculo en color blanco en la parte superior. Esta misma información será realimentada a un controlador como se ilustrará en el Capítulo 5.

Por otro lado, existen diversas situaciones excepcionales en las cuales se presenta alguna particularidad respecto a la escena visualizada o en el desplazamiento del vehículo, las cuales representan, por lo general, un alto grado de dificultad tanto para el sensor como para la supervisión de la calidad. Primeramente se muestran en la Fig. 4.9 dos casos donde el sensor brinda información correcta.

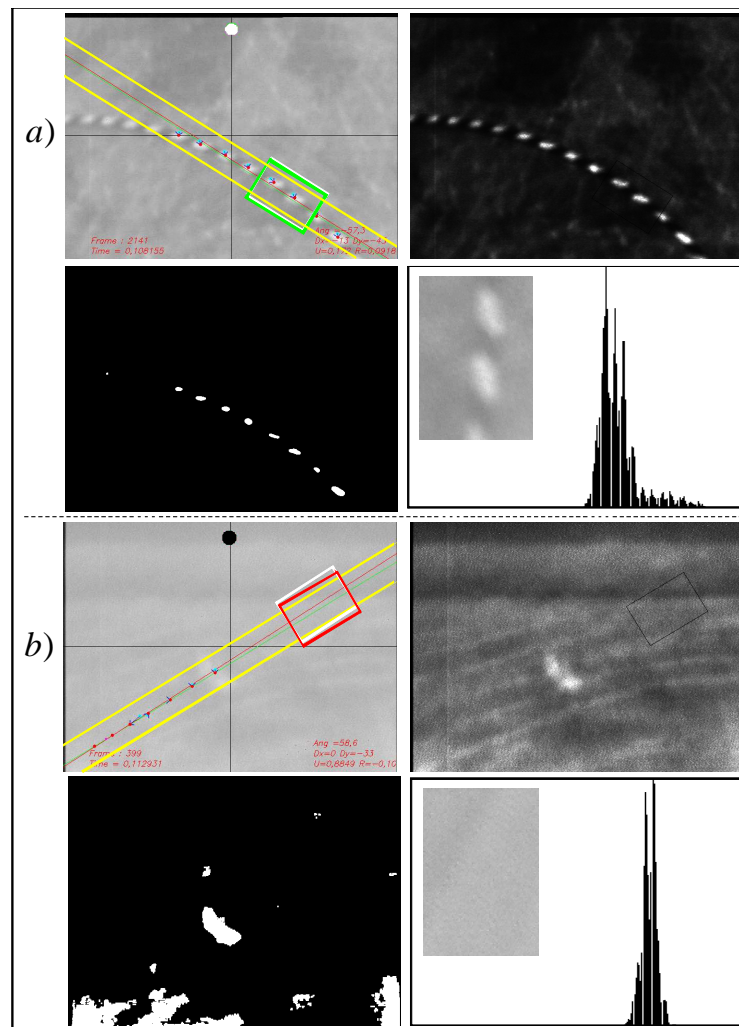


Figura 4.9: Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 1. a) Línea con curvatura muy notable. b) Línea fuera de la imagen.

En a), se describe el caso en el que la línea presenta una curvatura ostensible y no es posible representar su ubicación exacta por medio de un segmento de recta. Cuando esto ocurre, es probable que ciertas marcas del patrón (generalmente las de la parte superior) no queden incluidas en la zona de confianza, por lo que son descartadas al estimar los parámetros de la línea. A pesar de ello, el resultado obtenido continúa siendo una aproximación aceptable para la navegación mientras la ROI quede ubicada sobre la línea y la supervisión valide las estimaciones halladas. Por el contrario, si las características estadísticas de la ROI se asemejan a las de una región de fondo, el sensor brinda una alerta (visualizada por el círculo en color negro) que indica que si se han generado estimaciones, las mismas no son confiables. Tal es el caso que se ilustra en b), donde la línea real no está presente en la imagen pero un conjunto de marcas espúreas produce un número de centroides a partir de los cuales es posible aproximar una línea. Aunque se complete la estimación de posición y velocidades, el algoritmo de supervisión detecta la anomalía en dicha situación y genera una variable de alarma. Claramente, estos son escenarios supeditados al sistema de control o a la teleoperación, en donde no fue posible reducir los errores de seguimiento antes de la ceguera del sensor.

Otra situación excepcional se da cuando la línea se acerca a los bordes de la imagen, haciendo que el sensor funcione en su límite de operación en cuanto a la medición. En la Fig. 4.10 se detalla esta situación por medio de dos fotogramas sucesivos. En a) se muestra el momento en el que la línea se está acercando al borde y la ROI puede ubicarse sobre la zona de confianza pero con uno de sus extremos localizado a unos pocos píxeles de dicho borde. Hasta ese momento se obtienen las estimaciones correctas de la posición y del campo de velocidades, validadas además por el algoritmo de supervisión. Sin embargo, en el fotograma siguiente que se muestra en b), el desplazamiento de la línea aún más cerca del borde hace que no sea posible ubicar correctamente la ROI sin exceder los límites del plano de la imagen. Por tal motivo, las estimaciones de posición y campo de velocidad son correctas pero no son completamente aprobadas en la supervisión ya que la ROI debe reiniciarse como una imagen vacía (en la implementación del algoritmo, una imagen vacía se representa por medio de una completamente en color negro), y se ajusta su posición en el centro de la imagen para el siguiente fotograma. De esta manera, se calcula el histograma sobre una ROI en color negro e indefectiblemente éste presenta un máximo en

el nivel de menor intensidad, con lo cual no cumple las condiciones estadísticas requeridas. En consecuencia, esta situación excepcional es detectada por el sensor, a pesar de que su ocurrencia es ajena al mismo.

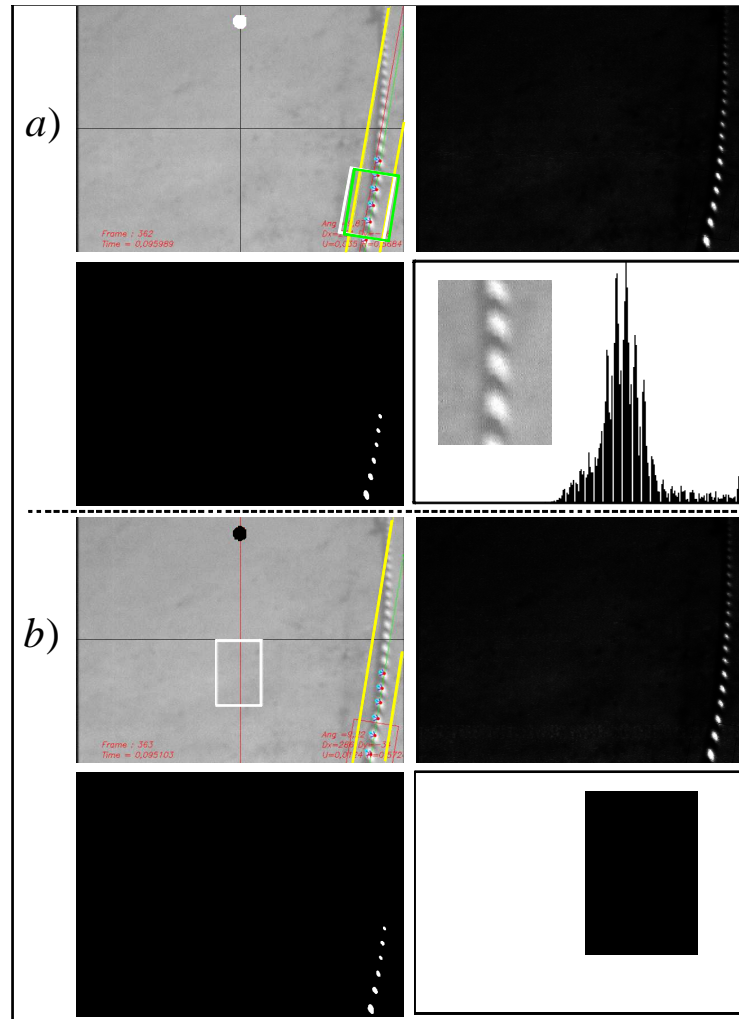


Figura 4.10: Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 2. a) Selección de ROI para una línea cerca del borde de la imagen. b) No se puede ubicar una ROI sobre la línea, se activa una alarma para el controlador.

Existen además otros casos particulares donde aparecen perturbaciones que pueden degradar el desempeño del sensor bajo ciertas condiciones de luz. Específicamente, las perturbaciones lumínicas persistentes son las que mayormente afectan al sensor teniendo en cuenta el principio de funcionamiento de éste. Como ejemplo se presentan las situaciones de la Fig. 4.11. Los casos a) y b) corresponden a imágenes sucesivas donde se puede notar un reflejo producido por una marca de suciedad en el cristal frontal del vehículo,

la cual se produjo durante la navegación y por lo tanto es tomada en cuenta para este análisis. Una perturbación de este tipo se mantendrá presente hasta efectuar la limpieza, y por lo tanto su presencia es observada en la misma posición en ambas imágenes. En tal caso, la perturbación será filtrada por la zona de confianza mientras el vehículo navegue correctamente manteniendo la línea verticalmente en el centro. Sin embargo, para el ejemplo seleccionado, la inclinación real de la línea visualizada hace que las regiones espúreas detectadas en la segmentación queden comprendidas en dicha zona. Al cumplir este requisito, las marcas son consideradas para la estimación de la posición del segmento, afectando en principio el resultado del primer módulo del sensor. Adicionalmente, al mantenerse en dos fotogramas sucesivos, estas manchas producen un completamiento de puntos entre su posición y la región del patrón más cercana detectada, tal como se observa en ambas imágenes de realidad aumentada. Luego, la existencia de estos puntos afecta al algoritmo de estimación del campo de velocidades, extendiendo la perturbación al segundo módulo del sensor.

Finalmente, otra situación inapropiada para el sensor es la presencia de objetos luminosos o muy reflectivos en el fondo. Para el caso mostrado en c), un objeto blanco cuyo tamaño es muy superior al de las marcas del patrón hace que el ajuste de contraste tome como referencia los valores de intensidad que el mismo produce. Así, en la imagen filtrada la línea es prácticamente imperceptible, con lo cual la zona de confianza se ajusta a las regiones segmentadas sobre tal objeto. Como la perturbación no desaparece rápidamente, su presencia afecta tanto al módulo de estimación de posición como al de velocidades, y al generar un contraste notable respecto al fondo, tampoco es detectada por el algoritmo de supervisión.

Este último caso no es habitual en la estructura de suelo pretendida en la aplicación, en donde la línea presenta un contraste dominante en la imagen. Por otro lado, este ejemplo surgió de experimentaciones con una líneas reflectiva como lo es el objeto que aparece en la figura c). Posteriormente se propuso otro diseño de línea compuesta de puntos emisores de luz regularmente espaciados como se verá en el Capítulo 7. Con tal diseño, la ocurrencia de este caso es menos probable.

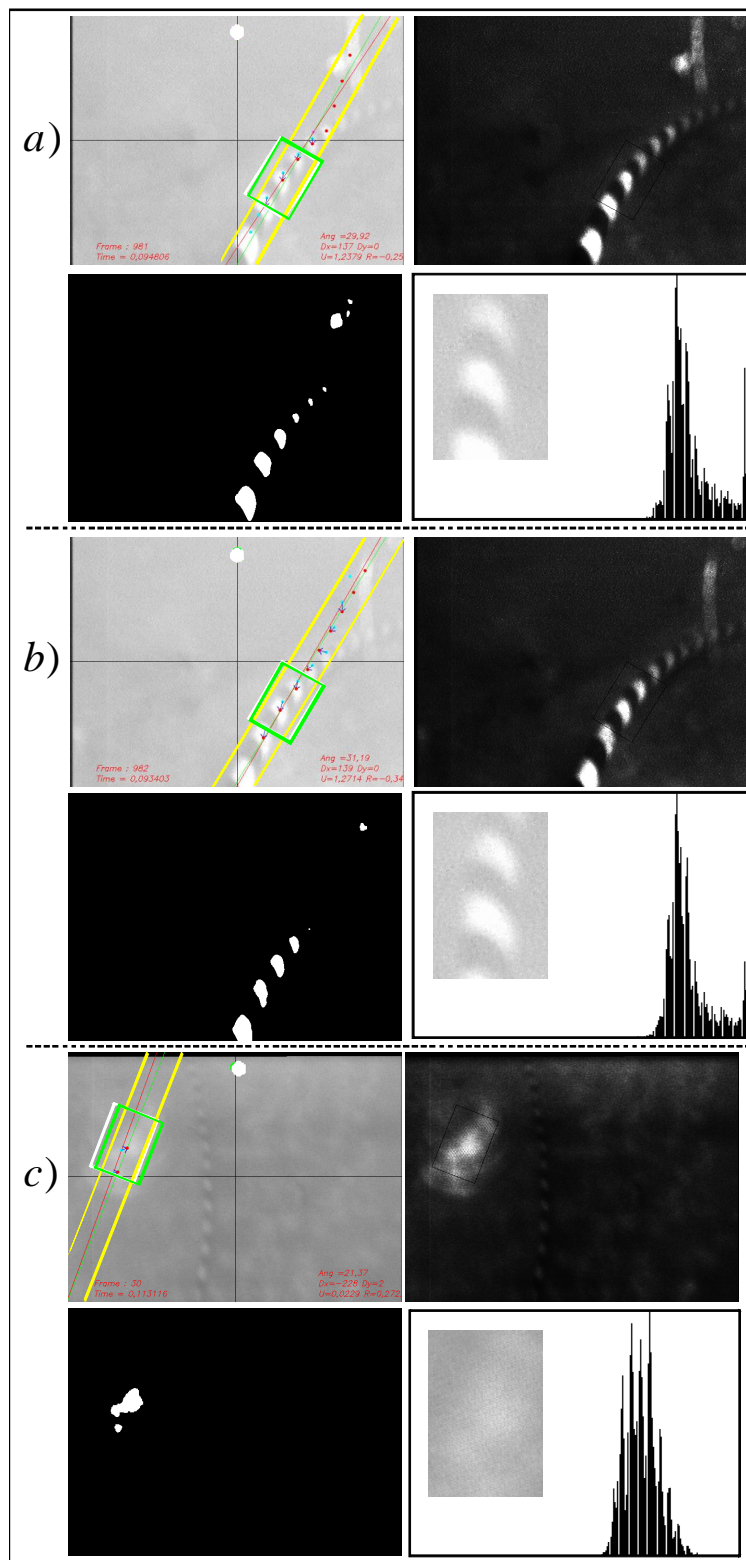


Figura 4.11: Desempeño del sensor en condiciones excepcionales, ejemplo 3. a), b) Imágenes consecutivas de buena calidad pero con perturbaciones dentro de la zona de confianza. c) Perturbaciones de intensidad dominante lejos de la línea.

4.7. Conclusiones del Capítulo

A partir de los resultados observados, se puede concluir que el desempeño del sensor es correcto mientras se opere en condiciones adecuadas. Particularmente, los inconvenientes descritos tienen su origen en factores ajenos al mismo, como el mal desempeño del controlador, la turbidez del agua o las ondas cáusticas, entre otras. Estos factores generan en sí perturbaciones sobre el principio de funcionamiento basado en la necesaria visualización de la línea para llevar a cabo estimaciones precisas.

De los ejemplos presentados, se destaca que la estimación de posición no resulta afectada notablemente por las posibles intermitencias en la detección de centroides, a diferencia del impacto negativo que las mismas pueden tener en la estimación de velocidad. No obstante, este impacto se minimiza con las etapas de completamiento de centroides y filtrado de estimaciones en el algoritmo correspondiente, con lo cual puede ser calificado como ruido de medición que afecta al sensor de visión y se mantiene en un orden de magnitud acotado. En consecuencia, ante la presencia de situaciones excepcionales que actúen en forma moderada, se considera que el sensor posee las funcionalidades apropiadas para hacer posible su inclusión en un lazo de control autónomo, lo cual se aborda en el capítulo siguiente.

Capítulo 5

Sistemas de Control para el Seguimiento de Líneas

5.1. Introducción

El presente capítulo aborda el diseño de controladores empleando el sensor de visión descrito en los capítulos previos para realizar el objetivo de seguimiento de línea. En primer lugar, se describen las especificaciones del sensor en cuanto al campo de visión. Así el rango de visión debe ser considerado en el diseño, generando un objetivo de control adicional que consiste en mantener la línea dentro de los límites de la imagen cuando eventualmente los desplazamientos laterales del submarino sean muy amplios.

Dada la capacidad del sensor para realizar estimaciones de estados en el plano 2D o en el espacio físico, se proponen técnicas de control que emplean una o ambas alternativas combinadas. Como primer desarrollo se encuentra un controlador basado en imagen, diseñado a partir de los errores de posición en el plano de la imagen. Seguidamente, se presenta una adaptación de estructuras de control del tipo PID y dinámica inversa que permiten su aplicación con el sensor de visión. En cada caso se describe la estrategia para definir las trayectorias. En base a esta última se establecen las leyes de control que hacen posible su implementación superponiendo ambos objetivos, es decir, el seguimiento de línea y evitar que la línea se escape del cuadro de imagen visible ante perturbaciones significativas.

5.2. Rango de Visión

Claramente, el sensor posee un rango de visión con límites concretos que debe tenerse en cuenta al momento de diseñar un controlador. Este último debe ser capaz de alcanzar el objetivo de control primario para la tarea de seguimiento, pero a su vez debe asegurar que las acciones de control no generen movimientos que posicionen al sensor fuera de dicho rango, por ejemplo ante la aparición de perturbaciones rápidas.

Los límites de visibilidad de la línea en el plano de la imagen quedan establecidos por la relación entre α y x_L cuando la línea se observa sobre un vértice de la imagen, como se ilustra en la Fig. 5.1. El rectángulo sombreado representa el tamaño del fotograma visible, mientras que la proyección de la línea sobre el plano de la imagen se ve dibujada en el límite del cuadro a modo descriptivo.

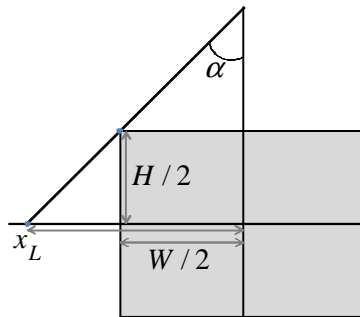


Figura 5.1: Límite de visión. La ubicación de la línea tocando un vértice de la imagen determina una relación límite entre α y x_L . El área sombreada respresenta el tamaño del fotograma visible.

En tal condición, se tiene que:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{x_L - W/2}{H/2}.$$

Extendiendo el resultado anterior a cada vértice, se obtienen los límites de visibilidad en el plano de características (x_L, α) :

$$\alpha_{Lim} > \operatorname{arctg}\left(\frac{|x_L| - W/2}{H/2}\right) \quad \text{ó} \quad \alpha_{Lim} < -\operatorname{arctg}\left(\frac{|x_L| - W/2}{H/2}\right), \quad \text{con } |x_L| > W/2. \quad (5.1)$$

Por otro lado, una línea recta que en la imagen se vea horizontal (es decir, cuando $\alpha = \pm\frac{\pi}{2}$ y $x_L = \pm\infty$) genera ambigüedades en la determinación del sentido de orientación y la posición relativa. En consecuencia, es deseable que el controlador evite esta condición.

Así se imponen límites adicionales para el campo de visión manteniendo:

$$-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}.$$

Habiendo establecido las limitaciones del sensor, a continuación se detalla una serie de factores y consideraciones que serán útiles para el diseño de los controladores.

A partir de (4.13) se pueden obtener las ecuaciones inversas que definen la proyección de la línea de acuerdo a las condiciones de posicionamiento del vehículo descritas por (ψ, Y_t) (es decir, el ángulo de orientación y el desplazamiento lateral del baricentro del vehículo relativos a la línea), de modo que:

$$\begin{cases} x_L = p_1 \frac{Y_t}{c\psi} + p_2 tg\psi \\ tg\alpha = p_3 tg\psi + p_4 x_L \end{cases}, \quad (5.2)$$

con:

$$p_1 = \frac{-fc\beta}{h}, \quad p_2 = \frac{fdc\beta + fhs\beta}{h}, \quad p_3 = \frac{-1}{c\beta}, \quad p_4 = \frac{tg\beta}{f}.$$

Estas ecuaciones permiten determinar dos curvas de nivel importantes sobre el plano (x_L, α) . Este plano es muy ilustrativo para el análisis de trayectorias generadas en ambas coordenadas: las de visión y las físicas propiamente dichas. En particular los puntos de equilibrio de ambas trayectorias coinciden en el origen.

La primera de las curvas de nivel corresponde al desplazamiento lateral nulo ($Y_t = 0$):

$$Y_t = 0 \Rightarrow x_L = p_2 tg\psi \Rightarrow tg\alpha = \frac{p_3}{p_2} x_L + p_4 x_L,$$

y definiendo:

$$E_r = \frac{p_3}{p_2} + p_4,$$

resulta:

$$\alpha_{y0}(x_L) = arctg(E_r x_L).$$

La segunda curva de nivel es la correspondiente a un ángulo de orientación relativa

nulo ($\psi = 0$), y en ese caso:

$$\psi = 0 \Rightarrow \operatorname{tg}\alpha = p_4 x_L.$$

Definiendo:

$$E_t = p_4,$$

se llega a:

$$\alpha_{\psi 0}(x_L) = \operatorname{arctg}(E_t x_L).$$

La Fig. 5.2 ejemplifica el campo de visión representado en el plano (x_L, α) para una resolución de imagen de 640×480 píxeles y el conjunto de parámetros empleados en algunas experimentaciones:

$$f = 700, \beta = \frac{\pi}{4} \operatorname{rad}, h = 100 \operatorname{cm}, d = 30 \operatorname{cm}.$$

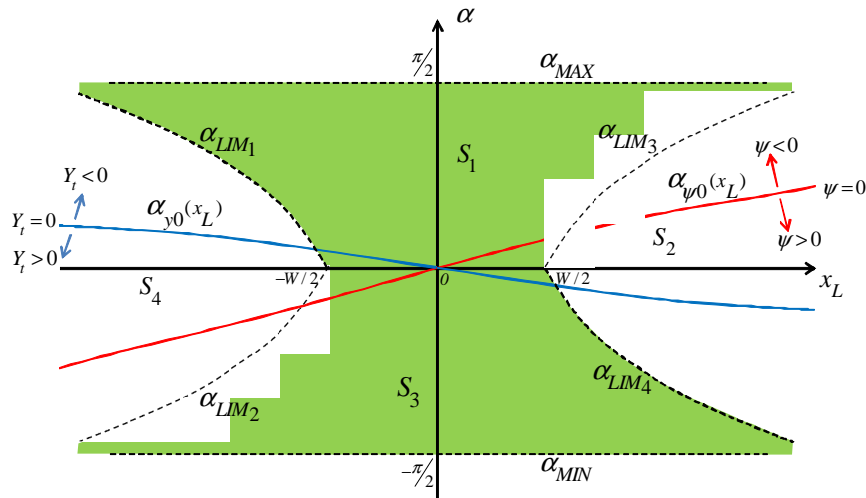


Figura 5.2: Campo de visión en el plano (x_L, α) . Las curvas α_{LIM} , α_{MAX} y α_{MIN} determinan los límites, mientras que $\alpha_{y0}(x_L)$ y $\alpha_{\psi 0}(x_L)$ corresponden a las curvas de nivel.

En la figura se pueden apreciar las curvas de nivel $Y_t = 0$ y $\psi = 0$ en azul y rojo respectivamente, y en líneas punteadas cada una de las restricciones detalladas previamente: α_{LIM1} , α_{LIM2} , α_{LIM3} y α_{LIM4} correspondientes a los límites de visión en los extremos de

la imagen y α_{MIN} , α_{MAX} correspondientes a los límites para evitar ambigüedades en la determinación del sentido de orientación. En resumen, si la línea es visible en la imagen, sus parámetros se representan por un punto en el interior del campo de visión sombreado en la Fig. 5.2.

Como puede observarse, la intersección de las curvas de nivel define el objetivo de control, es decir, alcanzar el punto de equilibrio del sistema de seguimiento de línea, el cual coincide con el origen del sistema de coordenadas en el plano de visión. En otras palabras, se verifica que el posicionamiento del vehículo en forma paralela a la línea y con su centro de masas exactamente por encima de ésta corresponde a la visualización de la línea en forma vertical y en la mitad de la imagen. En un entorno pequeño de este punto de equilibrio, las trayectorias en coordenadas de visión y físicas son proporcionales. Más allá de este entorno la discrepancia se hace perceptible.

A partir de las curvas de nivel, el plano queda dividido en cuatro sectores. Cada uno de ellos se asocia a una configuración específica de posicionamiento relativo, como se muestra en la Fig. 5.3. En las posiciones denotadas por S_1 y S_3 , un movimiento de avance implica un acercamiento a la línea, por lo que ambas son denominadas configuraciones favorables. Por el contrario, cuando el movimiento de avance produce un apartamiento de la línea, las configuraciones se consideran no favorables, como los casos S_2 y S_4 .

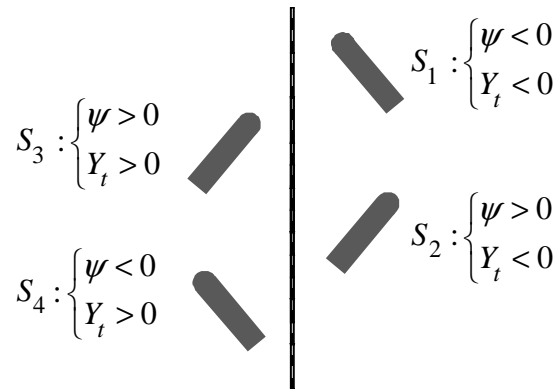


Figura 5.3: Configuraciones de posición relativa. Se clasifican como favorables aquellas que permiten un acercamiento a la línea (S_1 y S_3) y como no favorables en caso contrario (S_2 y S_4).

Por otro lado, es posible analizar el campo de visión sobre el plano de características físicas (ψ, Y_t) , mediante la transformación de las curvas descritas por (5.1). Esta ecuación define las cuatro opciones de posición límite, que en forma general también pueden ex-

presarse como:

$$tg\alpha = \frac{x_L - w_{2j}}{w_{1i}}, \quad \text{con } w_{1i} = (-1)^i H/2, \quad w_{2j} = (-1)^j W/2, \quad i, j = 1, 2.$$

Reemplazando esta expresión en la segunda línea de (5.2) se obtiene:

$$\frac{x_L - w_{2j}}{w_{1i}} - p_4 x_L = p_3 tg\psi \Rightarrow x_L = \left(p_3 tg\psi + \frac{w_{2j}}{w_{1i}} \right) \left(\frac{1}{w_{1i}} - p_4 \right).$$

Igualando con la primera ecuación de (5.2):

$$p_1 \frac{Y_t}{c\psi} + p_2 tg\psi = \left(p_3 tg\psi + \frac{w_{2j}}{w_{1i}} \right) \left(\frac{1}{w_{1i}} - p_4 \right).$$

Despejando Y_t :

$$Y_t = \frac{1}{p_1} \left[s\psi \left(\frac{p_3}{\left(\frac{1}{w_{1i}} - p_4 \right)} - p_2 \right) + c\psi \frac{w_{2j}}{1 - w_{1i}p_4} \right].$$

Si se definen las constantes:

$$W_{1n} = \frac{1}{p_1} \left(\frac{p_3}{\left(\frac{1}{w_{1i}} - p_4 \right)} - p_2 \right), \quad W_{2n} = \frac{1}{p_1} \left(\frac{w_{2j}}{1 - w_{1i}p_4} \right),$$

resulta:

$$Y_{t_{LIM_n}}(\psi) = W_{1n}s\psi + W_{2n}c\psi, \quad (5.3)$$

donde el subíndice n identifica cada curva de acuerdo a:

$$n = \begin{cases} 1 & \text{si } i = 1, j = 1 \\ 2 & \text{si } i = 2, j = 1 \\ 3 & \text{si } i = 2, j = 2 \\ 4 & \text{si } i = 1, j = 2 \end{cases},$$

y de esta manera se puede analizar el campo de visión en el plano (ψ, Y_t) . La Fig. 5.4 muestra las curvas obtenidas para las mismas condiciones del ejemplo anterior.

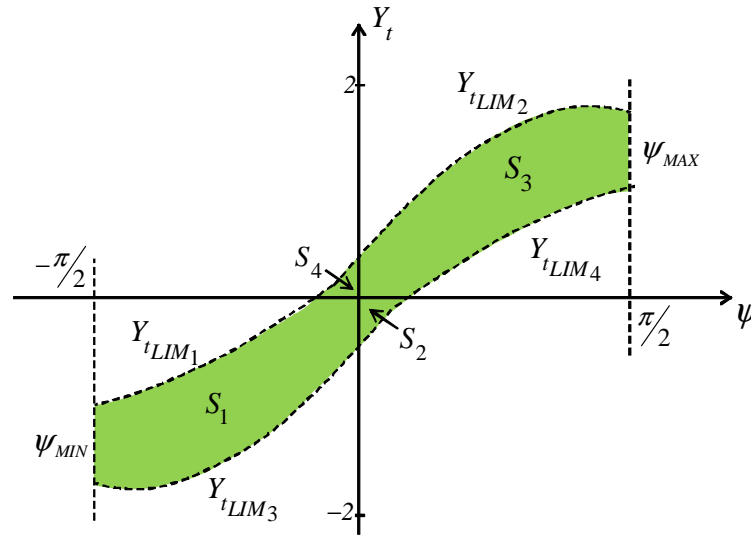


Figura 5.4: Campo de visión en el plano (ψ, Y_t) . Las curvas Y_{tLIM} , ψ_{MIN} y ψ_{MAX} determinan los límites de visión.

En este caso, los límites impuestos en los extremos de la imagen se transforman en las curvas Y_{tLIM_1} , Y_{tLIM_2} , Y_{tLIM_3} , Y_{tLIM_4} , donde el subíndice numérico indica la correspondencia con las curvas α_{LIM} del ejemplo en el plano (x_L, α) . Los límites impuestos al ángulo para evitar ambigüedades son ahora los valores $\psi_{MIN} = -\frac{\pi}{2}$ y $\psi_{MAX} = \frac{\pi}{2}$. Al mismo tiempo, se identifican nuevamente las configuraciones de posicionamiento relativo, cuya ubicación es claramente más directa en este plano al pertenecer cada una de ellas a un cuadrante distinto. Finalmente, las regiones S_2 y S_4 son más pequeñas que las otras en ambos planos de coordenadas, debido a la orientación de la cámara hacia adelante.

5.3. Control Basado en Imagen (CBI)

5.3.1. Consideraciones Previas

Es importante observar que, a pesar de que el objetivo de control coincide con el origen de coordenadas en el plano (x_L, α) , la ley de control no debe necesariamente alcanzar ese punto en forma directa, sin que esto signifique una pérdida de performance. En particular, para las configuraciones S_2 y S_4 , el acercamiento al origen de coordenadas representa un movimiento de retroceso y un giro simultáneo si se define una trayectoria lineal en dicho plano. La Fig. 5.5 muestra una serie de ejemplos con diferentes trayectorias posibles

del vehículo partiendo de las distintas configuraciones iniciales. Las trayectorias son el resultado del empleo de controladores estabilizantes para el seguimiento de línea, cuyos diseños se describirán más adelante en este capítulo. Existe además una dinámica de acercamiento, la cual no está reflejada en el plano (x_L, α) . Por lo tanto, el punto de equilibrio representa a la alineación perfecta, es decir: $x_L = \alpha = 0$.

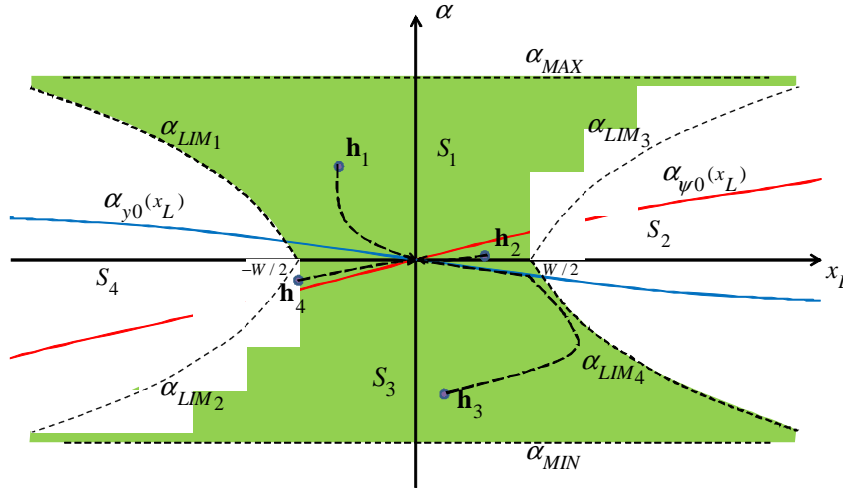


Figura 5.5: Ejemplos de trayectorias en el plano (x_L, α) . Partiendo de distintas configuraciones iniciales de posicionamiento relativo, las trayectorias representan movimientos de avance ($\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_3$) o de retroceso ($\mathbf{h}_2, \mathbf{h}_4$).

Para el caso de la posición marcada como \mathbf{h}_1 , la trayectoria combina movimientos de traslación y rotación simultáneos, siempre acercándose al origen. Debido a que la configuración es favorable en el sentido de posicionamiento relativo, la traslación corresponde a un movimiento de avance. Por el contrario, para las posiciones \mathbf{h}_2 y \mathbf{h}_4 , el movimiento también es combinado pero resulta en un retroceso del vehículo. En el caso particular de \mathbf{h}_4 , como éste se encuentra muy cerca de la curva de nivel $\alpha_{\psi 0}(x_L)$ (es decir: el vehículo se pasó de la línea pero se encuentra casi paralelo a ella), el ángulo relativo es pequeño y en consecuencia el desplazamiento lineal requerido para compensar Y_t es mayor que en los demás casos. Así, esta última trayectoria resulta también la más lenta y se interpreta como que el vehículo vuelve a un punto anterior de la línea antes de continuar con el seguimiento. El caso totalmente opuesto se ejemplifica a partir de la posición \mathbf{h}_3 , ubicada en una configuración favorable y con un ángulo relativo mayor. La trayectoria mostrada corresponde nuevamente a un movimiento combinado, pero consiste en un avance rápido

sin reducir bruscamente el ángulo hasta acercarse al límite de visión. Desde allí se disminuye ψ , avanzando en forma más lenta hasta lograr $Y_t = 0$. Finalmente, el vehículo gira sobre su centro de masas para compensar el ángulo. En la Fig. 5.6 se representan los movimientos desde una vista superior del vehículo, mientras que en la Fig. 5.7 los mismos se representan en el plano (ψ, Y_t) .

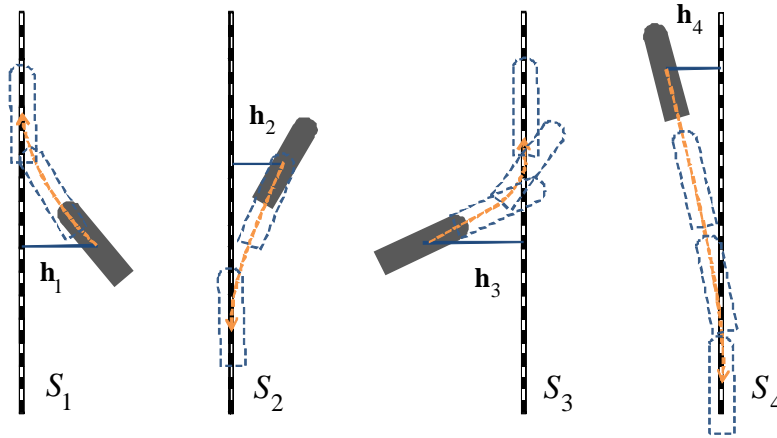


Figura 5.6: Ejemplos de trayectorias en vista superior sin perspectiva del AUV. La figura del AUV pintada de gris corresponde a su posición inicial. En todos los casos, el movimiento corresponde a un acercamiento al origen de coordenadas en el plano (x_L, α) .

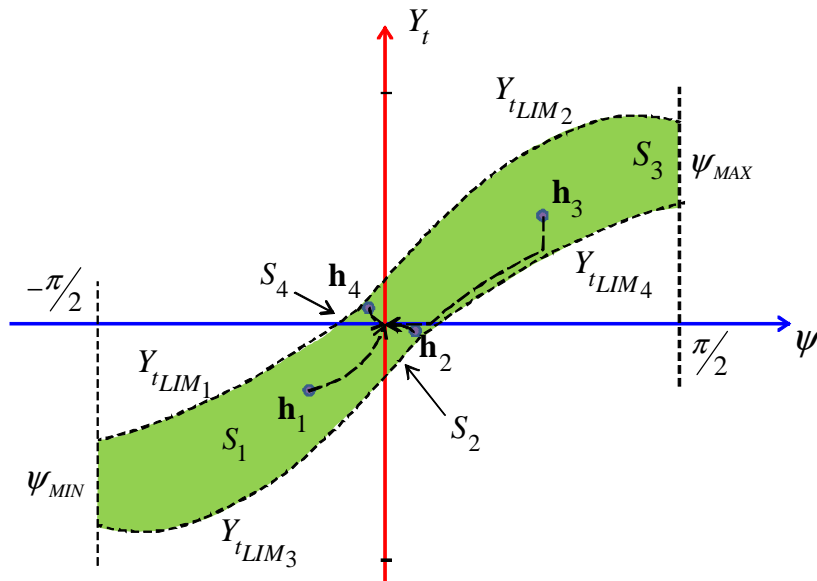


Figura 5.7: Ejemplos de trayectorias en el plano (ψ, Y_t) . En todos los casos, el movimiento conduce al origen de coordenadas.

El caso de \mathbf{h}_3 muestra una trayectoria que no implica un acercamiento significativo al origen en todo instante. Particularmente, la estrategia de este seguimiento consiste en un avance con un ángulo dado hasta los límites del campo de visión, lo cual permite una velocidad mayor en la reducción del error de desplazamiento lateral. Una vez corregido este último, se efectúa un giro puro para compensar el error de ángulo. Esta estrategia constituye la base para el diseño de un controlador basado en imagen, que no requiere la estimación de las variables de estado (ψ, Y_t) y por ende ningún modelo inverso de cámara para establecer el cambio de variables.

5.3.2. Estrategia de un Seguimiento Basado en Visión

Para describir el comportamiento del sistema de control de seguimiento en base a la ilustración de ejemplos previos, se considera un punto \mathbf{h}_k del plano cuyas coordenadas (x_{L_k}, α_k) son estimadas mediante el sensor de visión. En primer lugar, es necesario determinar a que configuración corresponde ese punto y definir una medida del error que se debe compensar.

Sean \bar{d}_R y \bar{d}_T las distancias entre \mathbf{h}_k y las curvas de nivel $\alpha_{y0}(x_L)$ y $\alpha_{\psi0}(x_L)$, respectivamente (ver la Fig. 5.8). Estas distancias determinan una medida indirecta de las variables Y_t y ψ , aunque no se corresponden de manera exacta dada la distorsión de los segmentos lineales del plano (x_L, α) reflejados en el plano (ψ, Y_t) . No obstante, pueden ser empleados como una medida adecuada si el punto \mathbf{h}_k no está excesivamente alejado del origen. La observación anterior se justifica teniendo en cuenta que es posible obtener buenas aproximaciones lineales de las curvas $\alpha_{y0}(x_L)$ y $\alpha_{\psi0}(x_L)$ cerca de $(0, 0)$.

En particular, sea $\mathbf{h}_{mR} = (x_{L_{mR}}, \bar{\alpha}_{mR})$ el punto que determina la distancia mínima entre \mathbf{h}_k y $\alpha_{y0}(x_L)$ (ver Fig. 5.8). Por lo tanto:

$$\bar{\alpha}_{mR} = \text{arctg}(E_r x_{L_{mR}}).$$

Utilizando una aproximación lineal de la curva en x_{L_k} , resulta:

$$\bar{\alpha}_{mR} \approx \text{arctg}(E_r x_{L_k}) + \frac{E_r}{1 + (E_r x_{L_k})^2} (x_{L_{mR}} - x_{L_k}).$$

Si se verifica $\frac{E_r}{1 + (E_r x_{L_k})^2} \ll 1$, entonces $\bar{\alpha}_{mR} \approx \alpha_{mR} = \text{arctg}(E_r x_{L_k})$. Claramente,

también la aproximación es más ajustada para $x_{L_{mR}} \approx x_{L_k}$, y en consecuencia:

$$\bar{d}_R \approx d_R = |\alpha_k - \alpha_{mR}| = |\alpha_k - \arctg(E_r x_{L_k})|.$$

En forma similar, para hallar la distancia mínima entre \mathbf{h}_k y $\alpha_{\psi 0}(x_L)$ se define el punto $\mathbf{h}_{mT} = (x_{L_{mT}}, \bar{\alpha}_{mT})$ y se utiliza la aproximación $\bar{\alpha}_{mT} \approx \alpha_{mT} = \arctg(E_t x_{L_k})$. Entonces se obtiene:

$$\bar{d}_T \approx d_T = |\alpha_k - \arctg(E_t x_{L_k})|.$$

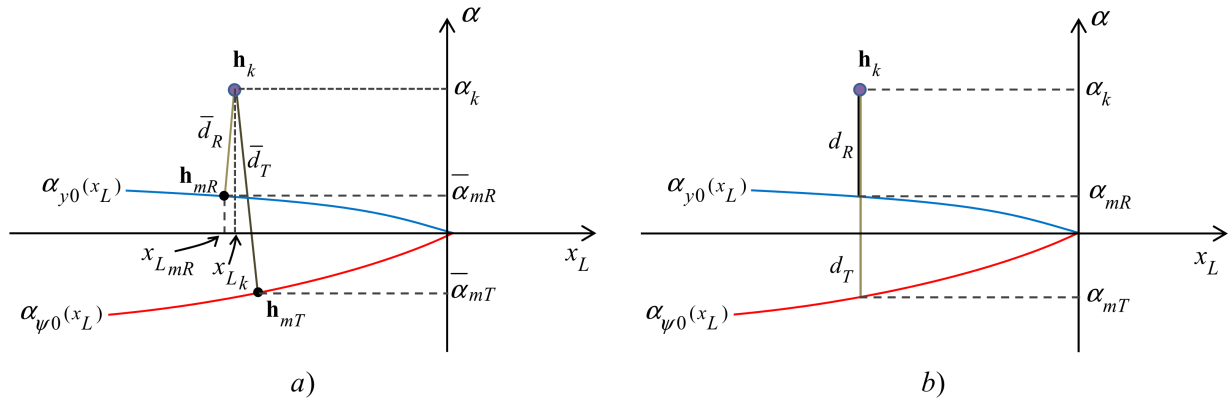


Figura 5.8: Distancias de un punto a las curvas de nivel en el plano (x_L, α) . a) Distancias exactas \bar{d}_T y \bar{d}_R . b) Aproximaciones d_T y d_R .

Además de indicar una medida del posicionamiento relativo, d_R y d_T permiten determinar la configuración de la posición del vehículo en el punto \mathbf{h}_k . Específicamente, si no se aplica el valor absoluto en las expresiones anteriores, se pueden considerar las medidas con signo:

$$d_R = \alpha_k - \arctg(E_r x_{L_k}), \quad d_T = \alpha_k - \arctg(E_t x_{L_k}),$$

y la configuración se determina de la siguiente manera:

$$C_f(\mathbf{h}_k) = \begin{cases} S_1 & \text{si } d_R > 0 \text{ y } d_T > 0 \\ S_2 & \text{si } d_R > 0 \text{ y } d_T < 0 \\ S_3 & \text{si } d_R < 0 \text{ y } d_T < 0 \\ S_4 & \text{si } d_R < 0 \text{ y } d_T > 0 \end{cases}.$$

Otro factor importante a tener en cuenta es la dirección del movimiento lineal. Obviamente, durante un seguimiento de trayectoria no es apropiado efectuar maniobras que generen trayectorias como los ejemplos de los puntos \mathbf{h}_2 y \mathbf{h}_4 mostrados anteriormente. Para evitar estas situaciones, se propone un controlador cuyo primer objetivo es ubicar al vehículo en una de las configuraciones favorables, es decir en S_1 o en S_3 . Si la configuración inicial es en S_2 , entonces se debe efectuar un movimiento que logre posicionar al vehículo en S_1 . En tanto, se debe llevar a S_4 si el punto está ubicado en S_3 (ver Fig. 5.6). Observando el campo de visión en el plano (ψ, Y_t) , puede apreciarse que estos cambios de configuración son posibles mediante un giro sin traslación, de manera que se invierte el signo de ψ .

5.3.3. Diseño de un Controlador Para Seguimiento Basado en Visión

Considerando el vector $\boldsymbol{\eta}_a = [X_t, Y_t, \psi]^T$ que define la posición y orientación del vehículo con respecto al marco inercial fijo a un punto de la línea, el modelo cinemático de un AUV está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_t \\ \dot{Y}_t \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} uc\psi \\ us\psi \\ r \end{bmatrix},$$

y se propone inicialmente la ley de control cinemática:

$$u_{ref} = \frac{u_{nom}}{c\psi}, \quad (5.4)$$

donde u_{nom} es la velocidad nominal de avance del vehículo. Entonces, para un seguimiento ideal de velocidades:

$$\dot{X}_t = \frac{u_{nom}}{c\psi} c\psi = u_{nom}.$$

Sin embargo, (5.4) genera valores de referencia con velocidades mayores que la nominal, que tienen a aumentar cuando el ángulo de orientación se acerca a $\frac{\pi}{2}$, es decir cuando el vehículo se mueve perpendicularmente a la línea. Por el contrario, la velocidad menor, es decir la nominal, se alcanza en el alineamiento perfecto. La idea que subyace en la

elección de esta ley es que el camino a recorrer es mayor durante un apartamiento de la línea, por lo que el vehículo debe ser forzado a apurarse para alcanzar la alineación correcta. A pesar de que esta observación indica que en esa situación el vehículo avanzaría rápidamente para alcanzar la línea, se requerirían acciones de control bruscas para evitar cruzar la misma por efecto de la inercia. Por ello, se puede considerar una ley de control más conservadora de la forma:

$$u_{ref} = \frac{u_{nom}}{(1 + K_c \psi^2)}, \quad (5.5)$$

con $K_c > 0$. Con esta modificación, la velocidad de referencia toma ahora su valor máximo igual a la velocidad nominal cuando $\psi = 0$, en tanto que disminuye al incrementarse el error de orientación respecto a la línea.

Por otro lado, el ángulo deseado para compensar el error de desplazamiento lateral puede definirse como:

$$\psi_d = \arcsen \left(\frac{\dot{Y}_{t_d} - k_y(Y_{t_d} - Y_t)}{u_{ref}} \right), \quad (5.6)$$

donde los valores deseados $Y_{t_d} = \dot{Y}_{t_d} = 0$ indican que el vehículo debe avanzar sobre la línea sin apartarse lateralmente de la misma. Además, $k_y < 0$ es la ganancia del controlador involucrada en la corrección de traslación. En consecuencia, se propone la ley de control:

$$r_{ref} = \dot{r}_d - k_\psi(\psi_d - \psi), \quad (5.7)$$

donde la ganancia del controlador $k_\psi < 0$ influye en la corrección de orientación.

De este modo, a lazo cerrado se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{\psi} = r_{ref} = \dot{r}_d - k_\psi(\psi_d - \psi) &\Rightarrow -\dot{\tilde{\psi}} + k_\psi \tilde{\psi} = 0, \\ \dot{Y}_t = u_{ref} s \psi_d = u_{ref} \left(\frac{\dot{Y}_{t_d} - k_y(Y_{t_d} - Y_t)}{u_{ref}} \right) &\Rightarrow \dot{Y}_t - \dot{Y}_{t_d} - k_y(Y_{t_d} - Y_t) = 0 \\ -\dot{\tilde{Y}}_t + k_y \tilde{Y}_t &= 0, \end{aligned}$$

de manera que los errores $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ e $\tilde{Y}_t = Y_{t_d} - Y_t$ tienden a cero asintóticamente.

Como se detalló previamente, las medidas d_T y d_R son empleadas como aproximaciones

de ψ e Y_t , respectivamente, con lo cual las ecuaciones del controlador cinemático basado en imagen resultan:

$$u_{ref} = \frac{u_{nom}}{(1 + K_c d_T^2)}, \quad (5.8)$$

$$d_{T_d} = \arcsen\left(\frac{\dot{d}_{R_d} - k_y(d_{R_d} - d_R)}{u_{ref}}\right),$$

$$r_{ref} = \dot{d}_{T_d} - k_\psi(d_{T_d} - d_T),$$

con $d_{R_d} = \dot{d}_{R_d} = \dot{d}_{T_d} = 0$.

Sin embargo, las acciones de control deben estar condicionadas a mantener al vehículo en una posición dentro del campo de visión. Para ello, es necesario definir un indicador que establezca la posición del punto \mathbf{h}_k con respecto a las curvas que delimitan dicho campo. Debido a que una consideración de este tipo conlleva a leyes de control condicionales o lógicas, es importante determinar adecuadamente las restricciones sobre las que se aplica cada una. El fundamento para definir restricciones en las variables de estado x_L y α yace en la necesidad de contrarrestar la inercia del vehículo cuando éste se acerca a zonas límites del campo de visión con velocidad considerable. Consecuentemente, las 4 zonas S_i del plano de visión deben subdividirse apropiadamente marcando zonas críticas.

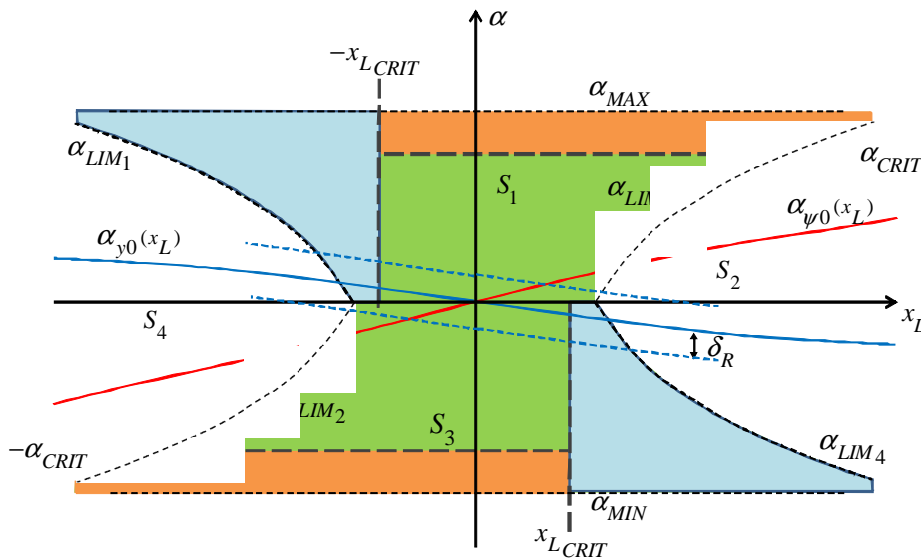


Figura 5.9: Subdivisiones del plano (x_L, α) para definir la estrategia de control basada en imagen. La división se genera a partir de los valores α_{CRIT} y x_{L_CRIT} .

Considerando las curvas α_{LIM} , α_{MAX} y α_{MIN} , se establecen los valores $\alpha_{CRIT} > 0$ y $x_{LCRIT} > 0$ que generan la subdivisión de regiones del plano (x_L, α) como se indica en la Fig. 5.9. Puede observarse la simetría de las regiones con respecto a la recta $\alpha = x_L$. A su vez, el valor δ_R define la tolerancia admisible en la distancia d_R .

5.3.4. Ley de Control

Los valores críticos son elegidos para establecer una estrategia de control. Primeramente considérese un punto genérico de posición \mathbf{h}_k de coordenadas (x_{L_k}, α_k) . Luego se define el siguiente algoritmo:

- 1) Si $|\alpha_k| > |\alpha_{CRIT}|$, la ley de control debe generar un movimiento de rotación para lograr un acercamiento a la curva $\alpha_{\psi 0}(x_L)$.
- 2) Si $\mathbf{h}_k \in \{S_1, S_3\}$, $|x_{L_k}| > |x_{LCRIT}|$ y $|d_R| > \delta_R$ la ley de control debe generar un movimiento que permita un acercamiento a la curva $\alpha_{\psi 0}(x_L)$, al mismo tiempo que la curva α_{LIM} más cercana actúe como repulsora del movimiento.
- 3) Si no se cumplen las condiciones anteriores, se utiliza la ley de control definida por (5.8).

Particularmente, para el caso 1), la acción de control se obtiene haciendo $d_{Td} = 0$, con lo cual:

$$u_{ref} = \frac{u_{nom}}{(1 + K_c d_T^2)},$$

$$r_{ref} = \dot{d}_{Td} - k_\psi(0 - d_T).$$

Para el caso 2), se definen adicionalmente las medidas d_D que representa una indicación de la posición del punto \mathbf{h}_k con respecto a la recta $x_L = x_{LCRIT}$ si $x_L > 0$ ó a $x_L = -x_{LCRIT}$ si $x_L < 0$, y d_I con respecto a la curva α_{LIM} más cercana (α_{LIM1} en S_1 y α_{LIM4} en S_3). En consecuencia:

$$d_D = ||x_{L_h}| - x_{LCRIT}|,$$

$$d_I = \begin{cases} ||x_{L_h}| + \frac{H}{2} \operatorname{tg} \alpha - \frac{W}{2}| & \text{si } \mathbf{h}_k \in S_3 \\ ||x_{L_h}| - \frac{H}{2} \operatorname{tg} \alpha - \frac{W}{2}| & \text{si } \mathbf{h}_k \in S_1 \end{cases}.$$

De acuerdo a estas medidas, la ley de control para el caso indicado está dada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\hat{d}_{T_d} &= k_r \left(1 + \frac{d_I - d_D}{d_I + d_D} \right) d_T, \\ d_{T_d} &= \text{máx}(\text{mín}(\hat{d}_{T_d}, \alpha_{CRIT}), -\alpha_{CRIT}), \\ u_{ref} &= \frac{u_{nom}}{(1 + K_c d_T^2)}, \\ r_{ref} &= \dot{\hat{d}}_{T_d} - k_\psi (d_{T_d} - d_T),\end{aligned}$$

donde $0 < k_r < 1$. Más precisamente, la elección indicada para obtener \hat{d}_{T_d} se basa en el siguiente análisis. Por un lado, el cociente $(d_I - d_D)/(d_I + d_D)$ resulta en un valor en el intervalo $[-1, 1]$. El menor valor corresponde al caso en que $d_I = 0$, es decir que el punto se ubica exactamente sobre el límite del rango de visión. En consecuencia, se impone $\hat{d}_{T_d} = k_r (1 - 1) d_T = 0$, y la acción de control produce un giro con la potencia necesaria para mover \mathbf{h}_k hacia la curva de nivel $\alpha_{\psi_0}(x_L)$. Por otro lado, cuando $d_D = 0$ el cociente toma su valor mayor, de modo que la referencia resulta $\hat{d}_{T_d} = k_r 2d_T$. De esta manera, el cambio en la acción de control al ingresar a esta zona no es excesivamente brusco, sino que se incrementa en forma gradual para detener primero el movimiento de giro previo, para luego efectuar el cambio de signo en la referencia. En particular, si se utiliza $k_r < 0,5$, se logra que $k_r \left(1 + \frac{d_I - d_D}{d_I + d_D} \right) < 1$ y $|\hat{d}_{T_d}| < |d_T|$, de modo que la referencia produce una repulsión continua desde la curva límite hacia la zona interior de $|x_{L_k}| < |x_{LCRIT}|$.

Finalmente, para el caso general indicado en 3), se utiliza (5.8) aplicando una saturación en d_{T_d} para evitar que las trayectorias se desplacen en la zona definida por la condición $|\alpha| > \alpha_{CRIT}$, es decir:

$$\begin{aligned}u_{ref} &= \frac{u_{nom}}{(1 + K_c d_T^2)}, \\ \hat{d}_{T_d} &= \text{arcsen} \left(\frac{\dot{d}_{R_d} - k_y (d_{R_d} - d_R)}{u_{ref}} \right), \\ d_{T_d} &= \text{máx}(\text{mín}(\hat{d}_{T_d}, \alpha_{CRIT}), -\alpha_{CRIT}), \\ r_{ref} &= \dot{\hat{d}}_{T_d} - k_\psi (0 - d_T).\end{aligned}$$

Claramente, el punto \mathbf{h}_k resulta repelido de las zonas críticas en cualquiera de los 3 casos descritos siempre y cuando las constantes del controlador sean elegidas de la manera indicada. Luego, al ingresar el punto \mathbf{h}_k a las regiones no-críticas, la convergencia al punto de equilibrio está garantizada como se demostró mediante la ley desarrollada en (5.5). Las aproximaciones de d_T y d_R a ψ e Y_t , respectivamente, son cada vez más exactas lo que lleva a la convergencia de los errores $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ e $\tilde{Y}_t = Y_d - Y_t$ a cero asintóticamente.

Finalmente, las referencias generadas por el controlador cinemático basado en imagen quedan definidas por el vector $\boldsymbol{\nu}_{ad} = [u_{ref}, r_{ref}]^T$. El seguimiento de estas referencias de velocidad se puede lograr con un controlador dinámico conectado en cascada con el controlador de posicionamiento definido anteriormente. Si las acciones de control que actúan sobre el propulsor de avance y de giro se denominan τ_u y τ_r respectivamente, las ecuaciones del controlador se definen en base a los errores de seguimiento calculados a partir de las estimaciones de velocidad \hat{u} y \hat{r} obtenidas en el sensor de visión, es decir:

$$\tau_u = K_{av}\tilde{u},$$

$$\tau_r = K_{rot}\tilde{r},$$

con $\tilde{u} = u_{ref} - \hat{u}$, $\tilde{r} = r_{ref} - \hat{r}$, y $K_{av} > 0$, $K_{rot} > 0$ son las ganancias del controlador que definen el tenor de las acciones de control sobre los actuadores basadas en los errores cinemáticos.

Teniendo en cuenta que el control cinemático se utiliza para la generación de velocidades de referencia, el esquema completo del CBI se ilustra en la Fig. 5.10. La notación vectorial empleada en la figura se resume a continuación:

- $\boldsymbol{\zeta} = [x_L, \alpha]^T$: características de la línea en el plano de imagen,
- $\boldsymbol{\zeta}_d = [0, 0]^T$: objetivo de control en el plano de imagen,
- $\boldsymbol{\nu}_{ad} = [u_{ref}, r_{ref}]^T$: velocidades de referencia,
- $\hat{\boldsymbol{\nu}}_a = [\hat{u}, \hat{r}]^T$: vector de velocidades estimadas,
- $\boldsymbol{\eta}_a = [X_t, Y_t, \psi]^T$: vector de posición relativa,
- $\boldsymbol{\tau}_C = [\tau_u, \tau_r]^T$: acciones de control.

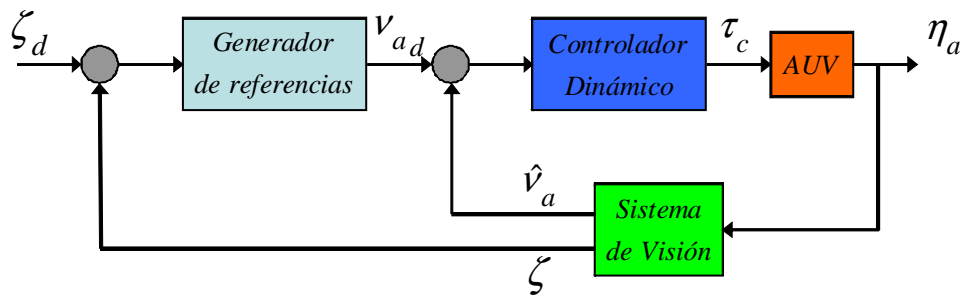


Figura 5.10: Esquema del controlador basado en imagen.

5.4. Control PID Híbrido (PID-h)

No sólo con fines comparativos, sino como aporte adicional de la Tesis, se presenta una modificación de la estructura interna del sistema de control basado en visión, mediante el empleo de un controlador PID. Con el objeto de explorar los cambios de performance en el seguimiento de línea ante esperadas incertidumbres en las estimaciones cinemáticas, se plantea aquí una simple y consabida estructura robusta de acción proporcional, integral y derivativa de los errores de seguimiento físicos, estimados desde la imagen.

5.4.1. Diseño del Controlador

Para este controlador, el seguimiento de velocidades se plantea a través de una estructura PID clásica, en tanto que la generación de referencias cinemáticas requiere las consideraciones referidas al campo de visión. Por este motivo, el diseño tiene un enfoque basado en un esquema híbrido.

La etapa de generación de referencias se construye en base a las acciones de control definidas en las ecuaciones (5.5), (5.6) y (5.7). Sobre ellas se aplican las restricciones para el campo de visión.

Análogamente al controlador basado en imagen existen zonas críticas en la frontera del campo de visión que demandan una acción de control más enérgica que en zonas cercanas al punto de equilibrio. Por ello es necesario definir aquí medidas que establezcan una indicación de la posición de un punto \mathbf{h}_k' en el plano (ψ, Y_t) respecto a las curvas que determinan los límites. Como se mencionó previamente, para las regiones S_2 y S_4 , la acción de control debe generar un cambio de signo en el ángulo de orientación relativa a fin

de lograr una dirección que corta a la línea. En consecuencia, cada punto de esas regiones será desplazado en el plano (ψ, Y_t) en forma horizontal hacia la región que corresponda, con lo cual las curvas $Y_{t_{LIM_1}}$ e $Y_{t_{LIM_4}}$ son las fronteras de dichos desplazamientos a tenerse en cuenta para el diseño del controlador.

Partiendo de (5.3), reescrita aquí para facilitar la lectura, se calcula la derivada de la expresión con respecto a ψ :

$$Y_{t_{LIM_n}}(\psi) = W_{1n}s\psi + W_{2n}c\psi,$$

$$\frac{dY_{t_{LIM_n}}(\psi)}{d\psi} = W_{1n}c\psi - W_{2n}s\psi.$$

Si $\mathbf{h}_k' = (\psi_k, Y_{t_k})$, la ecuación anterior se puede aproximar:

$$\Delta Y_{t_{LIM_n}} = (W_{1n}c\psi - W_{2n}s\psi) \Delta\psi, \quad (5.9)$$

con $\Delta\psi = \psi - \psi_k$, $\Delta Y_{t_{LIM_n}} = Y_{t_{LIM_n}}(\psi) - Y_{t_{LIM_n}}(\psi_k)$.

Además sea:

$$d_{L1} = |Y_{t_{LIM_1}}(\psi_k) - Y_{t_k}|,$$

la distancia de un punto \mathbf{h}_k' en la región S_1 hasta la curva $Y_{t_{LIM_1}}(\psi)$. Se define el margen de tolerancia $\delta_d > 0$ que representa la distancia d_{L1} mínima, la cual no debe traspasarse a fin de garantizar la visión de al menos una porción pequeña de la línea. De forma similar, la distancia de un punto \mathbf{h}_k' en la región S_3 a la curva $Y_{t_{LIM_4}}(\psi)$ está dada por:

$$d_{L4} = |Y_{t_{LIM_4}}(\psi_h) - Y_{t_k}|,$$

Se define además el valor $\delta_{Y_t} > 0$ como la tolerancia admisible para el error de desplazamiento relativo.

5.4.2. Ley de Control

De acuerdo a las definiciones previas, la estrategia de control se plantea como sigue:

- 1) Si $|Y_{t_k}| > \delta_{Y_t}$ y $d_{L1} < \delta_d$, la ley de control debe alejar al punto \mathbf{h}_k' de la curva $Y_{t_{LIM_1}}(\psi)$ (trayectoria horizontal hacia la derecha en el plano (ψ, Y_t)),

- 2) Si $|Y_{t_k}| > \delta_{Y_t}$ y $d_{L4} < \delta_d$, la ley de control debe alejar al punto \mathbf{h}_k' de la curva $Y_{t_{LIM4}}(\psi)$ (trayectoria horizontal hacia la izquierda en el plano (ψ, Y_t)),
- 3) Si no se cumplen las condiciones anteriores, se utiliza la ley de control definida por las ecuaciones (5.5), (5.6) y (5.7).

Para el caso 1), el movimiento se genera por medio de una rotación. La aproximación lineal dada por (5.9) se utiliza para hallar el valor del ángulo deseado ψ_d para el cual la distancia a la curva aumenta hasta δ_d (ver Fig. 5.11). Analíticamente resulta:

$$\psi_d = \psi_k + K_m \frac{\delta_d - d_{L1}}{W_{11}c\psi - W_{21}s\psi},$$

con $K_m > 0$ un parámetro de diseño que actúa como ganancia para el error de distancia $\delta_d - d_{L1}$.

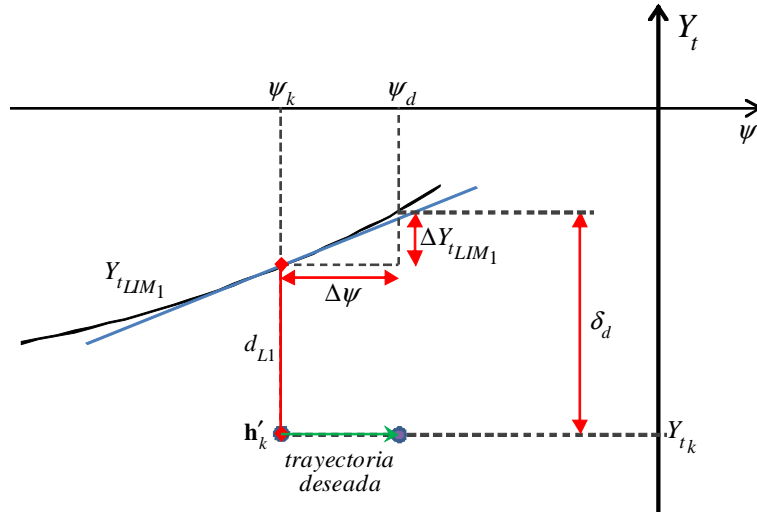


Figura 5.11: Trayectoria deseada para el caso 1) de la estrategia de control. El cálculo de ψ_d se realiza empleando una aproximación lineal de la curva $Y_{t_{LIM1}}$.

Para el caso 2) se emplea una aproximación similar para $y_{t_{LIM4}}(\psi)$, con lo cual:

$$\psi_d = \psi_k + K_m \frac{\delta_d - d_{L4}}{W_{14}c\psi - W_{24}s\psi}.$$

El último caso, definido en 3), utiliza una versión con saturación de (5.6) para evitar acercamientos a la línea con ángulos cercanos a los límites permitidos. Por lo tanto:

$$\hat{\psi}_d = \arcsen \left(\frac{\dot{Y}_d - k_y(Y_d - Y_t)}{u_{ref}} \right),$$

$$\psi_d = \max(\min(\hat{\psi}_d, \psi_{CRIT}), -\psi_{CRIT})$$

donde $\psi_{CRIT} > 0$, junto con δ_{Y_t} y δ_d definen las regiones del plano (ψ, Y_t) que se muestran en la Fig. 5.12. En particular, la saturación en ψ_d es necesaria en la región definida por $|\psi| > \psi_{CRIT}$, para efectuar una trayectoria principalmente horizontal en este plano.

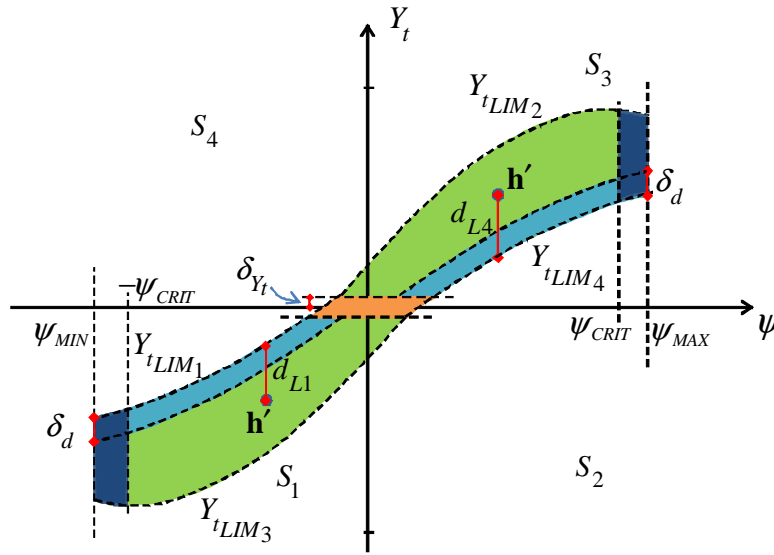


Figura 5.12: Subdivisiones del plano (ψ, Y_t) para definir la estrategia de control PID híbrido. La subdivisión del plano se genera a partir de los valores ψ_{CRIT} , δ_{Y_t} y δ_d .

Las referencias de velocidades resultan entonces:

$$u_{ref} = \frac{u_{nom}}{(1 + K_c \psi^2)},$$

$$r_{ref} = \dot{r}_d - k_\psi(\psi_d - \psi).$$

A partir de las estimaciones obtenidas por el sensor de visión, un controlador dinámico genera las acciones de control necesarias para el seguimiento de velocidades a partir de una estructura PID clásica. Específicamente, la expresión en forma discreta para la k -ésima

muestra resulta:

$$\tau_{u_k} = K_{pu} \left(\tilde{u}_k + \frac{T}{T_{iu}} \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{u}_i + \frac{T_{du}}{T} (\tilde{u}_k - \tilde{u}_{k-1}) \right),$$

$$\tau_{r_k} = K_{pr} \left(\tilde{r}_k + \frac{T}{T_{ir}} \sum_{i=0}^{k-1} \tilde{r}_i + \frac{T_{dr}}{T} (\tilde{r}_k - \tilde{r}_{k-1}) \right),$$

donde \tilde{u} y \tilde{r} son las diferencias entre velocidades de referencia y las estimaciones, además K_{pu} , K_{pr} , T_{iu} , T_{ir} , T_{du} y T_{dr} son las ganancias del controlador, mientras que el tiempo de muestreo T queda definido por el tiempo de procesamiento de cada imagen en el sensor.

El esquema completo del controlador PID híbrido se ilustra en la Fig. 5.13. Claramente, los estados Y_t y ψ se obtienen de la transformación de coordenadas a partir de la estimación de estados cinemáticos provenientes del sistema de visión.

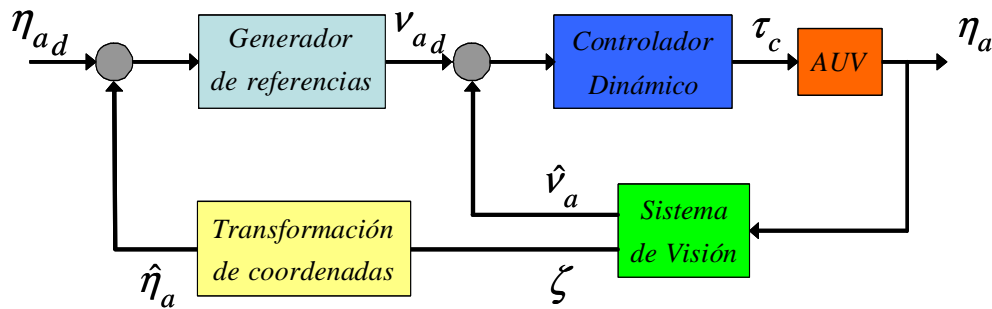


Figura 5.13: Esquema del controlador PID híbrido.

5.5. Control Dinámica Inversa Híbrido (CDI-h)

5.5.1. Diseño del Controlador

Con la finalidad de lograr una comparación de los dos desarrollos anteriores, con otro tipo de sistema de control basado en un modelo dinámico del submarino AUV, se procede a continuación con el análisis de un controlador de dinámica inversa [1,43].

De manera similar al caso anterior, este controlador presenta un esquema híbrido para considerar el campo de visión de la cámara. Las ecuaciones para la generación de referencias cinemáticas coinciden con las desarrolladas para el controlador PID. La diferencia respecto a este último radica en el controlador dinámico.

Recordando aquí (2.11), que representa el modelo dinámico del AUV con dos grados de libertad:

$$M_a \dot{\boldsymbol{\nu}}_a + C_a(\boldsymbol{\nu}_a) \boldsymbol{\nu}_a + D_a(\boldsymbol{\nu}_a) \boldsymbol{\nu}_a + \mathbf{g}_a(\boldsymbol{\eta}_a) = \boldsymbol{\tau}_a,$$

se propone la siguiente ley de control basada en dinámica inversa:

$$\boldsymbol{\tau}_c = M_a \mathbf{L} + C_a(\hat{\boldsymbol{\nu}}_a) \hat{\boldsymbol{\nu}}_a + D_a(\hat{\boldsymbol{\nu}}_a) \hat{\boldsymbol{\nu}}_a + \mathbf{g}_a(\hat{\boldsymbol{\eta}}_a),$$

donde $\mathbf{L} = \dot{\boldsymbol{\nu}}_{a_d} - K_{inv} \tilde{\boldsymbol{\nu}}$, y K_{inv} es una matriz diagonal de elementos positivos. Aquí se utiliza la notación matricial $\hat{\boldsymbol{\nu}}_a = [\hat{u}, \hat{r}]^T$, $\boldsymbol{\nu}_{a_d} = [u_{ref}, r_{ref}]^T$, y $\tilde{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{\nu}_{a_d} - \hat{\boldsymbol{\nu}}_a$.

De esta manera, a lazo cerrado se obtiene:

$$M_a \dot{\boldsymbol{\nu}}_a - M_a \mathbf{L} = M_a \left(\dot{\tilde{\boldsymbol{\nu}}} + K_{inv} \tilde{\boldsymbol{\nu}} \right) = \mathbf{0},$$

con lo cual el error $\tilde{\boldsymbol{\nu}} \rightarrow \mathbf{0}$ asintóticamente.

El esquema completo del controlador de dinámica inversa se ilustra en la Fig. 5.14.

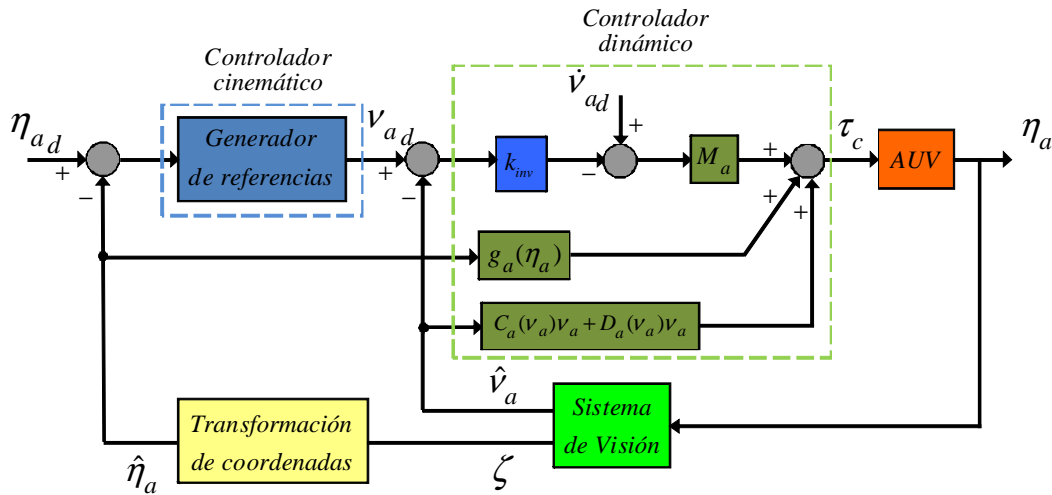


Figura 5.14: Esquema del controlador de dinámica inversa híbrido.

En el capítulo siguiente se empleará este tipo de control en simulaciones con el objetivo de comparar la performance junto a los demás sistemas de control. Finalmente se discutirán las posibilidades de implementación práctica en el seguimiento de línea a la luz de las pruebas experimentales llevadas a cabo.

Capítulo 6

Simulaciones

6.1. Introducción

En primera instancia, el estudio de estabilidad y performance de los sistemas de control para seguimiento de línea propuestos en el capítulo anterior se lleva a cabo mediante simulaciones. La tarea consiste en el seguimiento de una línea recta, en donde el sensor de visión se modela como un sistema con función de transferencia unitaria. De esta manera, el estudio se enfoca principalmente al sistema de control, aunque con las observaciones necesarias acerca de la factibilidad de uso de una cámara a bordo como único sensor.

El modelo dinámico empleado del submarino es el descrito por (2.11), correspondientes a un vehículo con dos grados de libertad, con actuadores de avance y giro que permiten su navegación en el plano XY . Las simulaciones abarcan los tres diseños de controladores presentados previamente, operando a partir de una variedad de condiciones iniciales y perturbaciones de modelo y ruido de medición que permiten describir los detalles más relevantes en las estrategias de control propuestas.

6.2. Seguimiento de Líneas

6.2.1. Simulación 1 - Control Basado en Imagen en Configuración Inicial Favorable

Para el primer caso, se analizan los resultados de simulación empleando el controlador basado en imagen (CBI), es decir en visión pura, el cual no requiere la transformación de características de línea en imagen a estados del vehículo. La condición inicial define una de las configuraciones denominadas favorables, de modo que un movimiento de avance implica un acercamiento del AUV hacia la línea.

Si bien el controlador establece la acción de control con variables de imagen, la performance del sistema de control se ilustra a través de la evolución temporal de las variables de estado (ver Fig. 6.1). En la primera fila se observan los estados que definen el posicionamiento relativo, es decir, el desplazamiento lateral Y_t y el ángulo de orientación con respecto a la línea ψ . Luego, en la segunda fila, se ubican los gráficos de los estados de velocidad del vehículo, que comprenden la velocidad axial y la velocidad de rotación con respecto al eje Z . Por último, en la tercer fila, se muestran las acciones de control requeridas.

Contémplese ahora las subdivisiones del plano (x_L, α) de la Fig. 6.2, sobre las cuales se desarrolló la estrategia de control. Observando la condición inicial del vehículo se nota que $Y_t < 0$ y $\psi < 0$, que corresponden a la configuración S_3 , fuera de las zonas críticas demarcadas por x_{LCRIT} y α_{CRIT} . Por lo tanto, la estrategia de control indica que se puede incrementar el ángulo de orientación para que el acercamiento a la línea requiera un menor desplazamiento en la dirección paralela a la línea, al mismo tiempo que se debe evitar exceder los límites del campo de visión. En consecuencia, en este caso el controlador cinemático genera las referencias de velocidad de acuerdo al mencionado criterio en el intervalo de 0 a 5seg. A continuación, el cambio de signo en r se corresponde con la restricción del campo de visión, la cual indica que la línea se coloca cerca de los bordes de la imagen y por ello la magnitud del ángulo ψ debe comenzar a reducirse.

A partir del gráfico de u se puede apreciar la variación de la velocidad de referencia de acuerdo a la ley de control establecida por (5.5). Inicialmente, esta referencia toma valores decrecientes por debajo de la velocidad nominal, en coincidencia con el intervalo de

incremento en la magnitud de la orientación relativa. Luego, cuando esta última variable se reduce al tomar en cuenta el campo de visión, la referencia de velocidad de avance comienza a aumentar.

Una vez alcanzado el margen de tolerancia en el desplazamiento lateral, las acciones de control conmutan nuevamente para responder al último paso en la estrategia de control propuesta. Específicamente, la estrategia plantea la corrección final de la orientación, que se inicia aproximadamente en $t=10$ seg.

Por otro lado, las distintas etapas del control pueden ser observadas con mayor claridad mediante la representación de la trayectoria en los planos de características de línea en la imagen, es decir (x_L, α) , o en los planos de variables de estado del vehículo, por su posicionamiento relativo definido por (ψ, Y_t) o por la vista superior que describe el movimiento sobre el plano (Y_t, X_t) (ver Fig. 6.2). En el primero de ellos, el cambio entre las etapas es claramente notable: desde la condición inicial se incrementa el ángulo (alejamiento de la curva de nivel $\alpha_{\psi_0}(x_L)$) y se avanza hacia la línea (acercamiento a la curva de nivel $\alpha_{\psi_0}(x_L)$), luego se evita abandonar el campo de visión (alejamiento de la curva límite α_{LIM_1}), y finalmente se corrige la orientación (acercamiento al origen luego de ingresar al margen de tolerancia δ_R).

Sobre el plano (ψ, Y_t) las etapas se distinguen mediante la analogía con la descripción anterior. Al inicio, el aumento de ángulo se produce en el tramo de la trayectoria que se mueve a la izquierda de la condición inicial (alejamiento del eje vertical, es decir el eje $\psi=0$). Cuando el movimiento cambia de sentido hacia la derecha, se corresponde al recorrido que evita exceder el campo de visión (es decir, no se intersecta a la curva Y_{tLIM_1}). La tercera etapa se identifica por el punto de quiebre en el cual la trayectoria cambia de pendiente en forma notable, al acercarse a la zona que establece el margen de tolerancia en el error de desplazamiento lateral, para comenzar a corregir la orientación. Cabe aclarar que la conmutación en la ley de control no se produce exactamente al intersectar la línea punteada que representa dicho margen, debido a que el control CBI sólo tiene en cuenta la tolerancia correspondiente en el plano (x_L, α) sobre el que define los errores de seguimiento (es decir, las aproximaciones d_R y d_T).

La representación en el plano (Y_t, X_t) constituye la visualización más directa del movimiento real del AUV. Si bien las etapas mencionadas anteriormente no se pueden identi-

ficar con facilidad, este plano permite observar la trayectoria en forma global, incluyendo las marcas triangulares cuyo vértice superior apunta en el sentido correspondiente al ángulo de orientación en cada muestra. Asimismo, estas marcas ilustran las condiciones de posicionamiento en instantes equiespaciados en tiempo. De esta manera, la separación espacial entre las mismas está relacionada directamente con la velocidad del vehículo en cada intervalo. Para esta simulación, la densidad de marcas concentrada al comienzo del recorrido se debe a la baja velocidad del AUV para corregir el desplazamiento lateral de acuerdo a la condición inicial en la orientación.

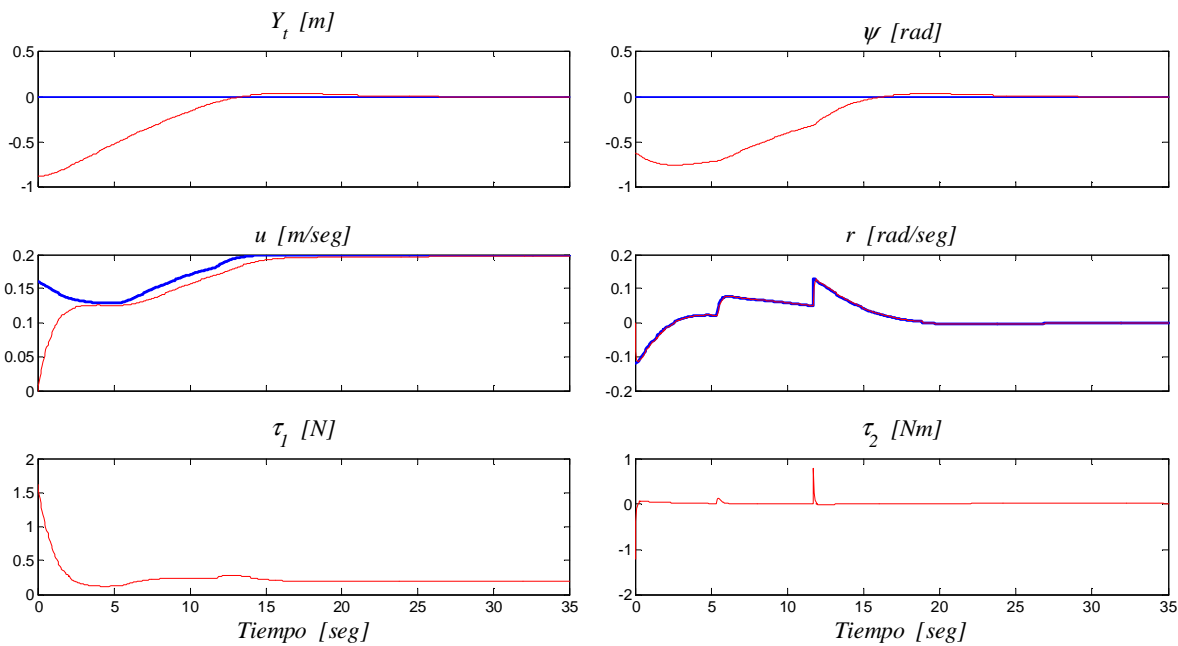


Figura 6.1: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 1. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

El análisis se completa con una secuencia de imágenes de la cámara de a bordo en varios instantes, presentadas en la Fig. 6.3. Primero, el segmento visible de la proyección de la línea se ubica hacia el vértice superior izquierdo del fotograma. Como el vehículo avanza con un ángulo de orientación grande, la proyección se desplaza notablemente hacia el vértice opuesto. En consecuencia, al llegar a $t=6$ seg, se aplica la restricción del campo de visión para reducir dicho ángulo y mantener las condiciones de visibilidad similares a las del fotograma tomado en $t=12$ seg. Durante la última etapa, la rotación final del AUV produce el desplazamiento del punto medio del segmento hacia el centro de la imagen y

simultáneamente su verticalidad respecto al borde lateral.

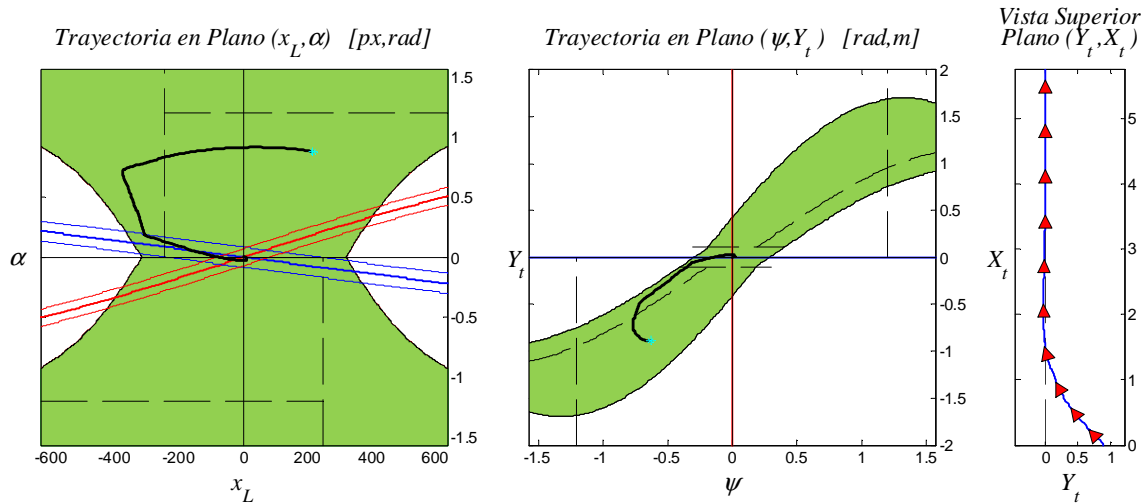


Figura 6.2: Representación de la trayectoria de la simulación 1 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

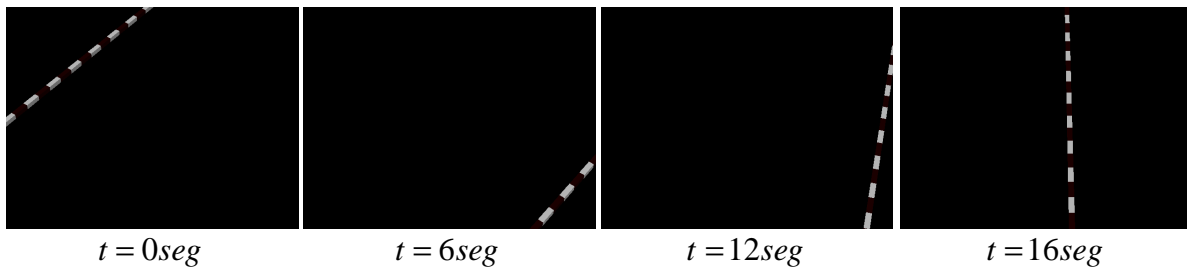


Figura 6.3: Secuencias de imágenes de la simulación 1.

6.2.2. Simulación 2 - Control basado en Imagen en Configuración Inicial Desfavorable

En un segundo ejemplo se presenta la simulación para el mismo controlador anterior pero partiendo de una condición inicial en la configuración desfavorable S_4 . La evolución de las variables de estados correspondientes se muestran en la Fig. 6.4. De acuerdo a la estrategia planteada, las acciones de control deben realizar, en primer lugar, un cambio de configuración para poder reducir el error de desplazamiento al avanzar. Esto se logra

a través de la inversión de signo en el ángulo ψ , que ocurre aproximadamente en $t=2 \text{ seg}$.

Puede notarse que el ángulo de orientación se incrementa para favorecer el acercamiento a la línea mientras se avanza, lo cual concierne a la segunda etapa de la estrategia. Luego, cuando el desplazamiento relativo es reducido por debajo del límite de tolerancia admisible, se conmuta la ley de control a fin de efectuar la corrección de orientación.

Comparadas con el caso anterior, las referencias de velocidades presentan curvas más suaves, y esto sucede debido a que la trayectoria en el plano (x_L, α) no se acerca en ningún momento a las regiones donde se aplican las restricciones del campo de visión, como se desprende de la Fig. 6.5. También en el plano (ψ, Y_t) la trayectoria muestra una forma más simple que la de la simulación 1.

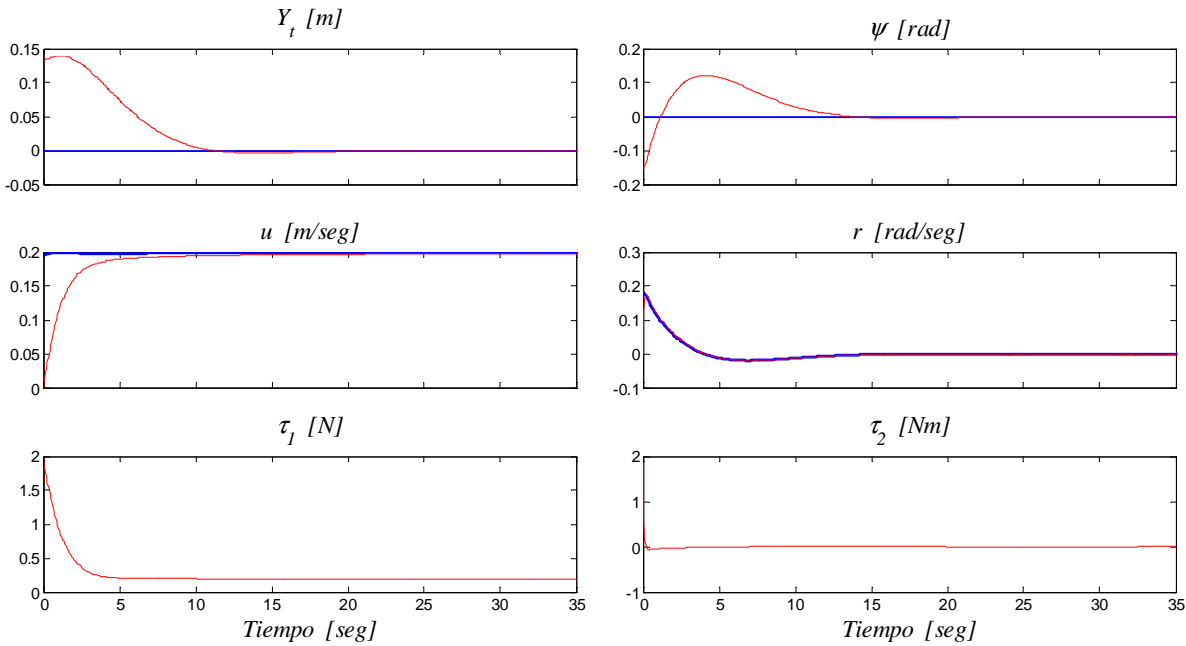


Figura 6.4: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 2. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

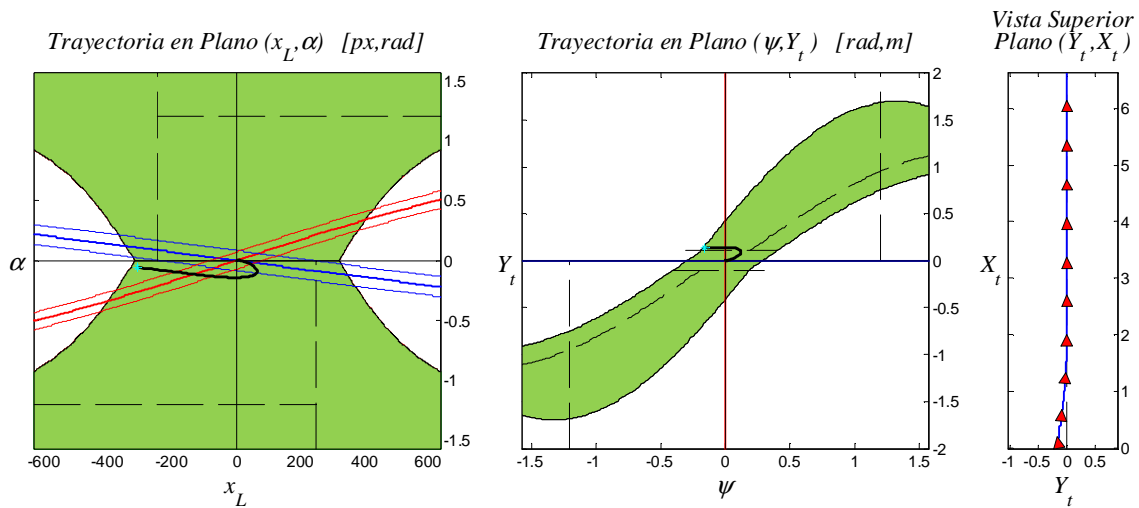


Figura 6.5: Representación de la trayectoria de la simulación 2 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

Por último, la secuencia de imágenes de la Fig. 6.6 describe las condiciones de visualización de la línea en cuatro puntos del recorrido. La condición inicial ubica a la proyección de la línea cerca del borde lateral derecho del fotograma, pero no actúan las restricciones del campo de visión ya que el cambio de signo en la orientación relativa implica un acercamiento de dicha proyección hacia el centro de la imagen. A través de los fotogramas en $t=6$ seg y $t=14$ seg se puede apreciar la rapidez en la respuesta del controlador.

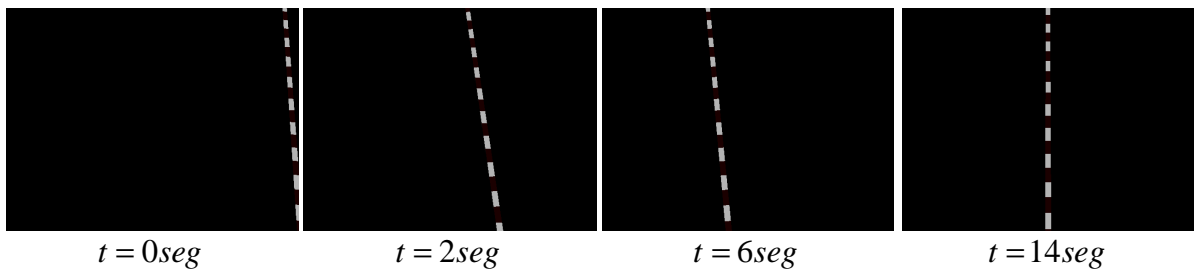


Figura 6.6: Secuencias de imágenes de la simulación 2.

6.2.3. Simulación 3 - Control PID Híbrido en Configuración Inicial Favorable

A continuación se describen los resultados teóricos obtenidos en simulación con el controlador PID-híbrido diseñado. La condición inicial se ubica en una configuración favorable, pero con orientación opuesta a la del ejemplo 1. Por lo tanto, el vehículo se encuentra al comienzo en la configuración S_1 , con $Y_t > 0$ y $\psi > 0$.

Los gráficos de evolución temporal de las variables de estado se presentan en la Fig. 6.7, en donde se puede observar la similitud con las curvas del primer ejemplo, a pesar de que las acciones de control se obtienen en base a distintas variables en cada caso.

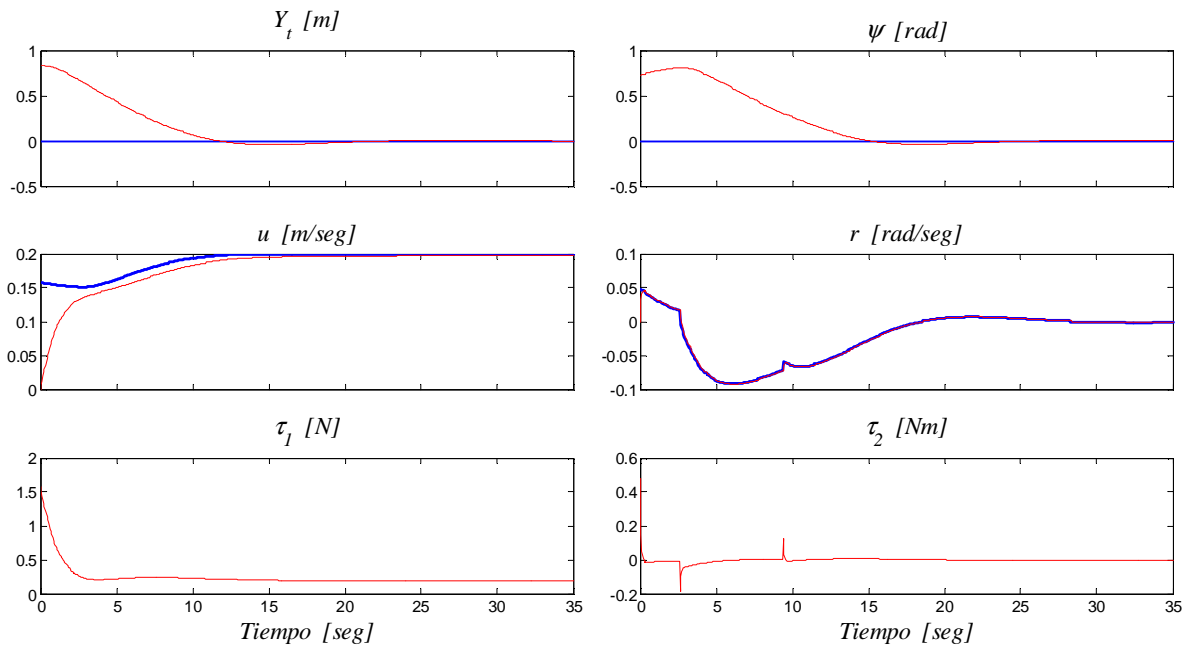


Figura 6.7: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 3. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

En particular, el controlador PID opera en base a la trayectoria en el plano (ψ, Y_t) (ver Fig. 6.8). Entonces, partiendo de una condición inicial en S_1 , la primera etapa consiste en un incremento leve del ángulo de orientación, combinado con un movimiento de avance para el acercamiento a la línea. Dicho movimiento implica un acercamiento a la curva límite $Y_{t_{LIM4}}$ del campo de visión. Por este motivo, se toma en cuenta una restricción para evitar intersectar a la misma, lo cual se asocia a la reducción de ψ en el intervalo de 2.5

seg a 9 seg. Durante ese tiempo, el vehículo continúa avanzando hacia la línea. Obsérvese además los picos en τ_2 que generan el torque correctivo en estos instantes extremos de la restricción.

En el momento en que el error de desplazamiento toma valores por debajo del margen de tolerancia δ_R , se realiza la conmutación a la ley de control que penaliza en mayor medida la corrección de giro. Con el ajuste de ganancias adecuado (sobre todo de la ganancia derivativa), el sobrepico en esta corrección puede mantenerse acotado de manera que la trayectoria presenta una forma de espiral alrededor del origen, mostrando la convergencia a cero de los errores de posicionamiento relativo. En la vista superior del plano (Y_t, X_t) se observa la magnitud moderada del sobrepico mencionado.

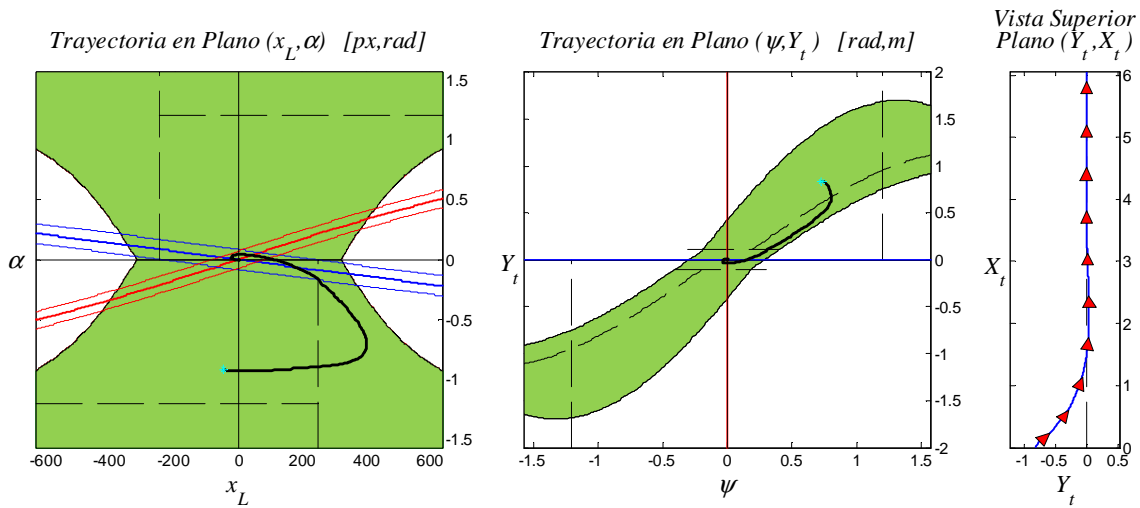


Figura 6.8: Representación de la trayectoria de la simulación 3 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

Finalmente, la secuencia de imágenes de la Fig. 6.9 completan el análisis del control y la factibilidad de uso del sensor en el lazo. Al principio, la visualización del segmento de línea se asemeja a una reflexión horizontal de la observada en el primer caso, debido a la condición inicial en la configuración opuesta.

Las imágenes restantes, en $t=4$ seg, $t=10$ seg y $t=17$ seg, muestran las condiciones en que se visualiza la línea durante el recorrido. Nuevamente, la similitud con el primer ejemplo se hace notable, viendo en primer lugar el enderezamiento de la línea y la poste-

rior reducción del error de desplazamiento hasta acercarse al límite de visión. Luego, la corrección de giro coloca al segmento visible hacia el centro de la imagen.

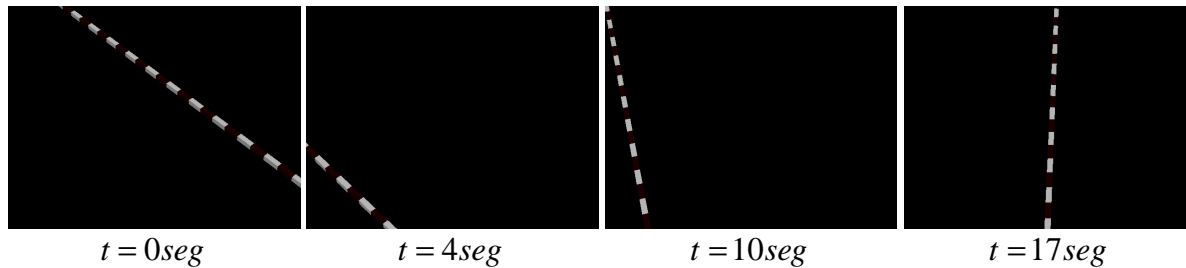


Figura 6.9: Secuencias de imágenes de la simulación 3.

6.2.4. Simulación 4 - Control PID Híbrido con Orientación en Zona Crítica

Para este ejemplo, se selecciona una condición inicial muy alejada del objetivo de control, utilizando el controlador PID. Los gráficos de las variables de estado correspondientes se presentan en la Fig. 6.10. Particularmente, la estrategia de control en este caso tiene en cuenta la ambigüedad que se puede producir en la determinación del sentido de avance si el ángulo ψ se acerca al valor $\pi/2$. Entonces, al comienzo se reduce dicho ángulo para evitar ese inconveniente, pero la reducción no es excesiva ya que un alto valor de ψ es favorable para el acercamiento a la línea con el menor recorrido posible.

A partir de la representación de la trayectoria en los distintos planos, es posible notar cuatro etapas en el recorrido (ver Fig. 6.11). La primera etapa consiste básicamente en forzar la salida de una zona crítica. Inicialmente, el punto de comienzo de la trayectoria se ubica en la región definida por el ángulo crítico, es decir que $\psi < -\psi_{CRIT}$. Por lo tanto, la acción de control de torque reduce la magnitud de dicho ángulo, con lo se produce un desplazamiento hacia la derecha en el plano (ψ, Y_t) .

Luego, la corrección de desplazamiento hace que el gráfico efectúe un acercamiento a la recta $Y_t=0$. Esta acción continúa hasta que se llega al margen de tolerancia en la distancia a la curva $Y_{t_{LIM1}}$, y allí se inicia una nueva etapa que mantiene la proyección de la línea dentro del rango de visión del sensor.

La última etapa se inicia en el momento que la trayectoria ingresa al margen de tolerancia en el desplazamiento lateral, y en consecuencia se da mayor peso a la corrección

de orientación, lo que define un acercamiento a la recta $\psi=0$ sobre el plano. Para este ejemplo, casi la totalidad de la trayectoria se realiza en la configuración S_1 , y sólo el último tramo se recorre pasando por las demás configuraciones a causa del leve sobrepico que se produce en las variables de estado con el conjunto de ganancias utilizadas.

Para completar el análisis, se consideran las condiciones de visualización que se muestran en la Fig. 6.12. La imagen inicial ilustra un segmento visible, casi en posición horizontal, que sugiere un valor alto en el ángulo de orientación relativa. En segundo lugar, cuando $t=3,5$ seg, la visualización permite interpretar un acercamiento a la línea, al mismo tiempo que se ha reducido dicho ángulo. A continuación, en $t=7$ seg se puede observar el instante en que se utiliza la restricción del campo de visión para evitar que el segmento salga del cuadro de la imagen. Al entrar en la etapa de corrección de orientación, la situación cambia rápidamente para lograr la verticalidad del segmento, cuyo punto medio se desplaza hacia el centro de la imagen en el tramo final.

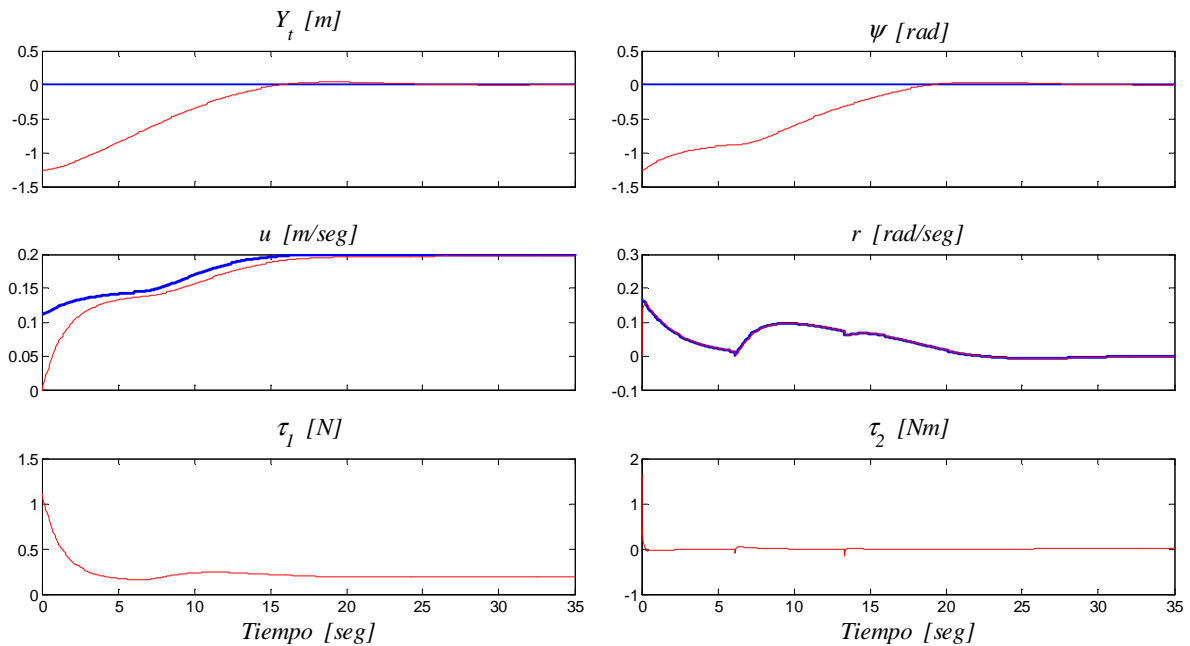


Figura 6.10: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 4. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

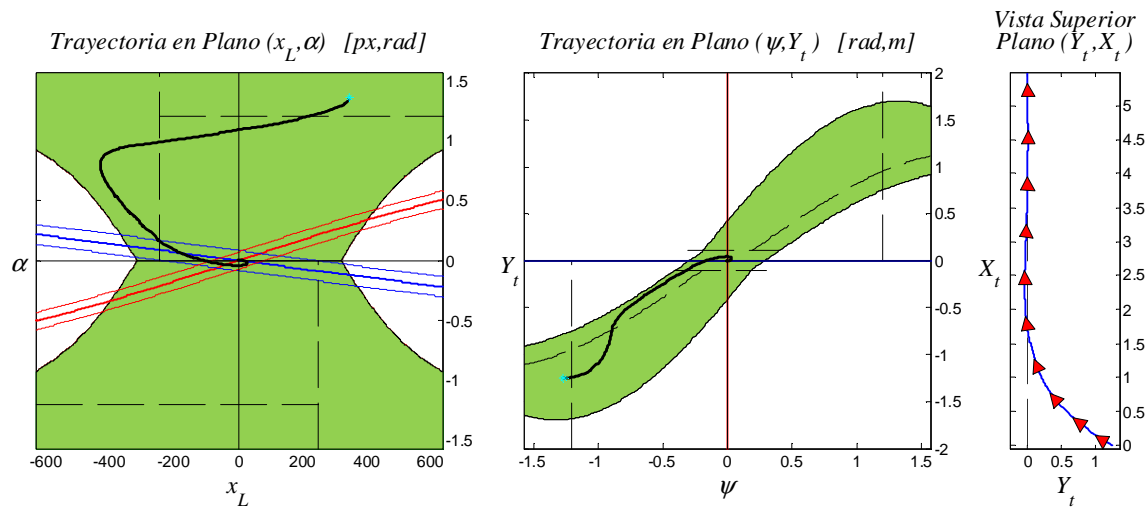


Figura 6.11: Representación de la trayectoria de la simulación 4 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

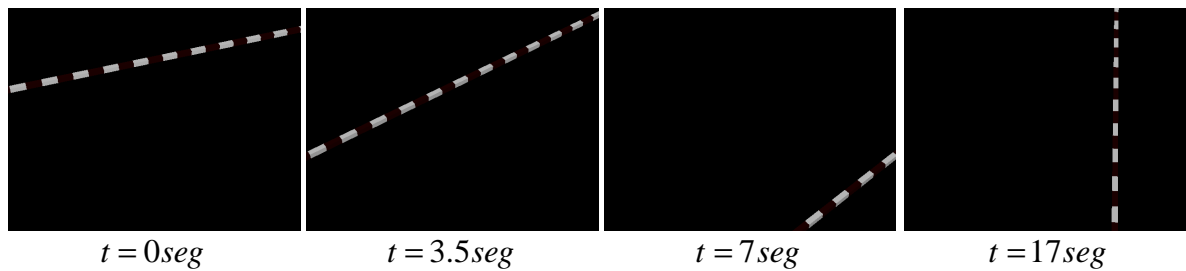


Figura 6.12: Secuencias de imágenes de la simulación 4.

6.2.5. Simulación 5 - Control con Dinámica Inversa

Seguidamente se presenta una simulación con el controlador de dinámica inversa, produciendo los resultados que se muestran en la Fig. 6.13. La condición inicial elegida ubica al vehículo a una distancia de la línea al límite de la imagen menor que en el ejemplo anterior, nuevamente en la configuración S_1 . La diferencia en la cercanía al límite de visión definido por la curva $Y_{t_{LIM_3}}$ deja una porción de segmento de línea visible más corto (ver Figs. 6.14 y 6.15). Ante esta situación, la navegación comienza con un incremento en la magnitud del ángulo ψ , que a su vez es necesario para el acercamiento a la línea en un recorrido menor.

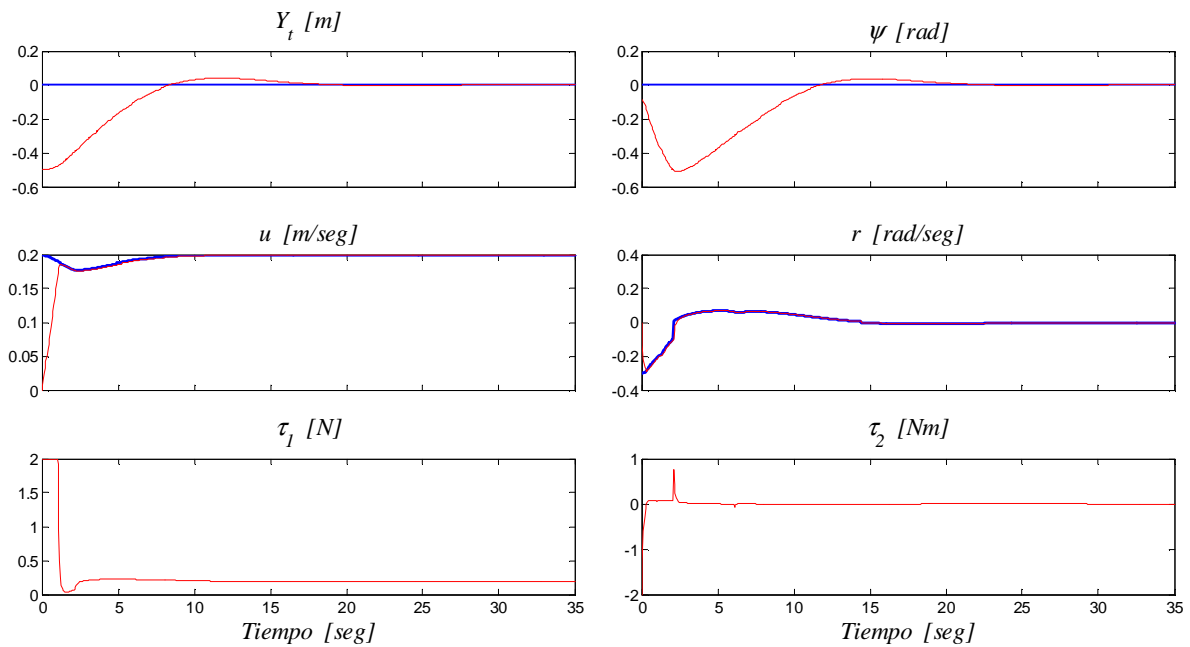


Figura 6.13: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 5. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

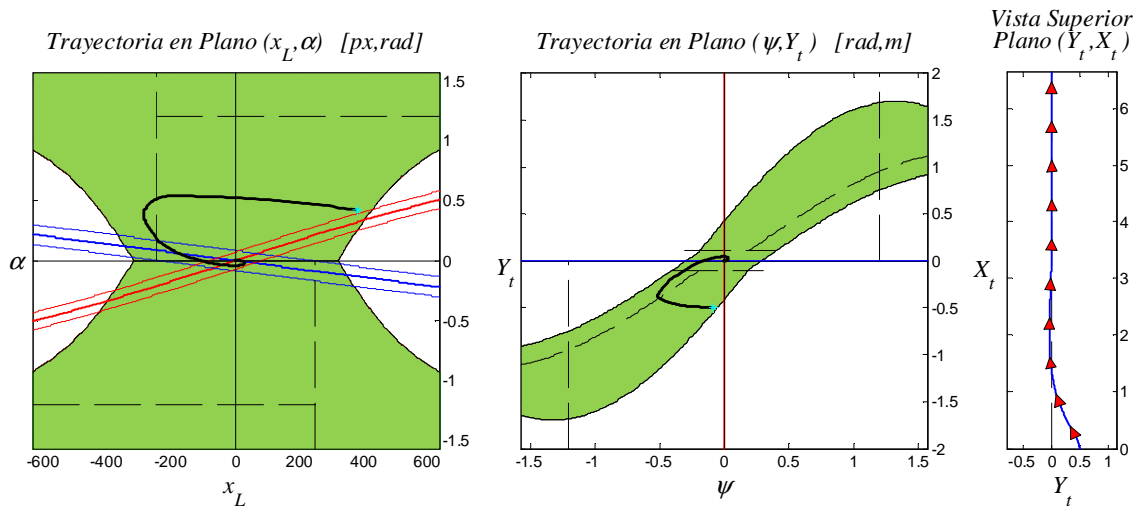


Figura 6.14: Representación de la trayectoria de la simulación 5 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

El cambio rápido en la orientación implica la conmutación a la etapa de acercamiento

respetando la curva límite $Y_{t_{LIM_1}}$, y a partir de allí la trayectoria presenta características similares a las simulaciones equivalentes con los otros controladores. Nuevamente, el recorrido se realiza en etapas definidas por los límites de operación del sensor y los márgenes de tolerancia de errores.

Por otro lado, el compromiso respecto al rango de visión en la condición inicial queda reflejado por la primera imagen de la secuencia presentada en la Fig. 6.15. Esta situación revela la importancia de las restricciones impuestas en los controladores para hacer factible la utilidad del sensor de visión. Las dos imágenes siguientes de la secuencia representan el movimiento combinado de avance y giro, que también es realizado sin exceder el límite de visión en el vértice opuesto. Ya en la última etapa, la visualización cambia al observar un segmento de línea ubicándose en la posición vertical, y al mismo tiempo acercándose al centro del fotograma.

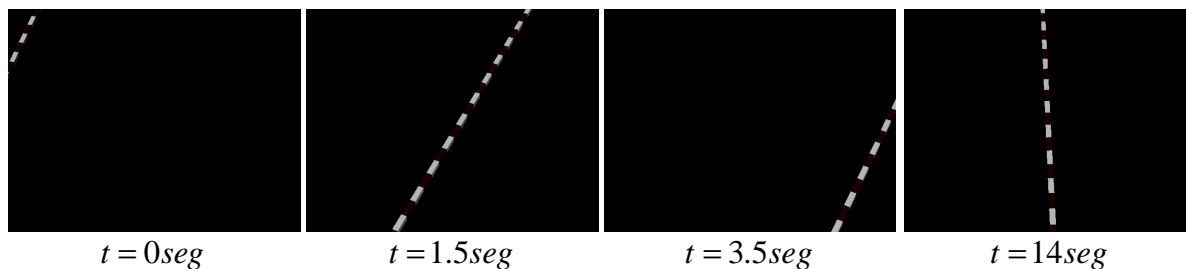


Figura 6.15: Secuencias de imágenes de la simulación 5.

6.2.6. Simulación 6 - Control con Dinámica Inversa e Incertidumbre de Modelo

En los ejemplos anteriores, se observa como característica común que el seguimiento de velocidades se realiza en forma adecuada en todos los casos. Obviamente, estos resultados dependen de la correcta elección en las ganancias utilizadas, las cuales han sido ajustadas en las simulaciones sin mayores dificultades. Además, es posible seleccionar un conjunto de ganancias que resulta adecuado en un amplio rango de simulaciones con diferentes condiciones iniciales.

Sin embargo, el controlador de dinámica inversa requiere un modelo del sistema que no es simple de obtener. Los parámetros de mayor importancia en el mismo pueden ser estimados mediante técnicas de identificación de sistemas o pruebas en laboratorio, con

lo cual la precisión obtenida puede no ser la apropiada.

Para ilustrar la sensibilidad del control por dinámica inversa frente a incertidumbres en el modelo del AUV, se presenta en este caso una simulación en la que se aplica una distorsión del 20% sobre los valores de la matriz M_a que describe al sistema (ver (2.11)). Los gráficos de evolución temporal son mostrados en la Fig. 6.16. La condición inicial corresponde a una configuración favorable en S_3 , y la ubicación del vehículo es similar a la del ejemplo 3.

En líneas generales, la respuesta del sistema se describe de manera similar a las anteriores. Primero, un leve incremento en el ángulo de orientación permite que el AUV se acerque a la línea en un tramo de menor recorrido. Luego, el ángulo y el desplazamiento se reducen en forma simultánea respetando el campo de visión. Finalmente, la corrección de giro se realiza al ingresar a la zona de tolerancia en el error de desplazamiento lateral.

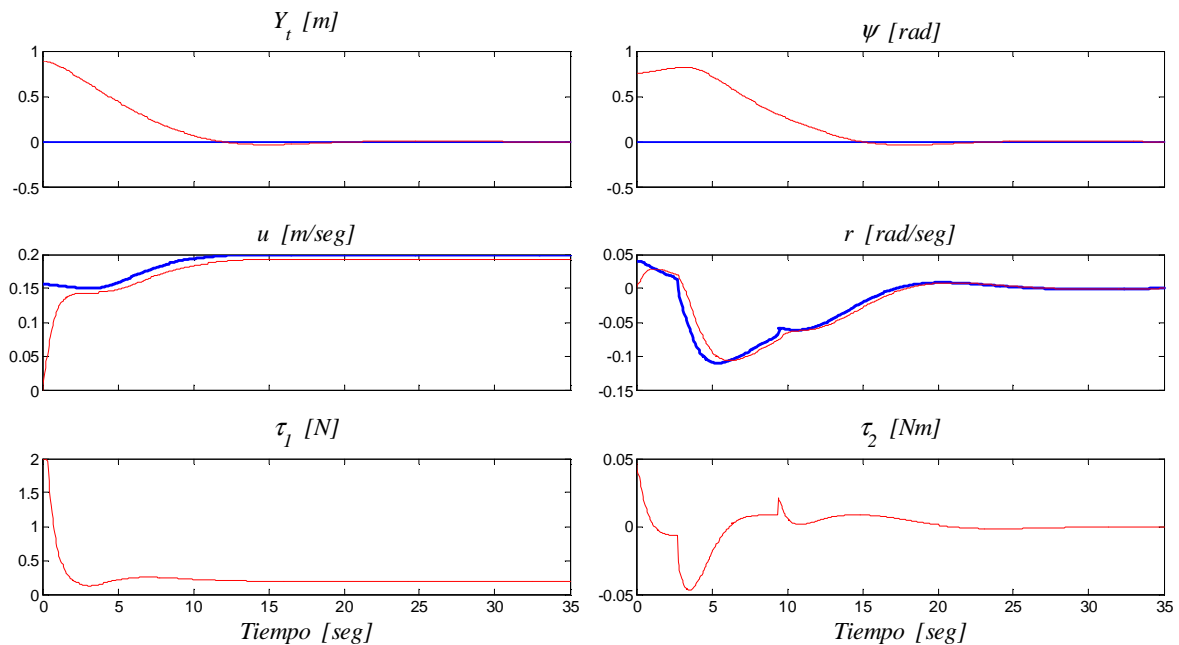


Figura 6.16: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 6. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

La diferencia se hace visible al analizar los gráficos de velocidades. Si bien las referencias tienen la apariencia esperada, el seguimiento de ellas no se realiza con la misma calidad de los casos anteriores. Es decir, la incertidumbre incluida en las ecuaciones del modelo afecta a esta etapa.

Si se analizan ahora los gráficos de trayectoria de la Fig. 6.17, el efecto resulta notable respecto al campo de visión. Más precisamente, la trayectoria en el plano (ψ, Y_t) se acerca excesivamente a la curva Y_{tLIM3} , aumentando el riesgo de cegar al sensor durante la navegación. En estas condiciones, las perturbaciones que no han sido incluidas en la simulación podrían producir el cruce de la curva límite aún cuando las mismas sean de magnitud leve.

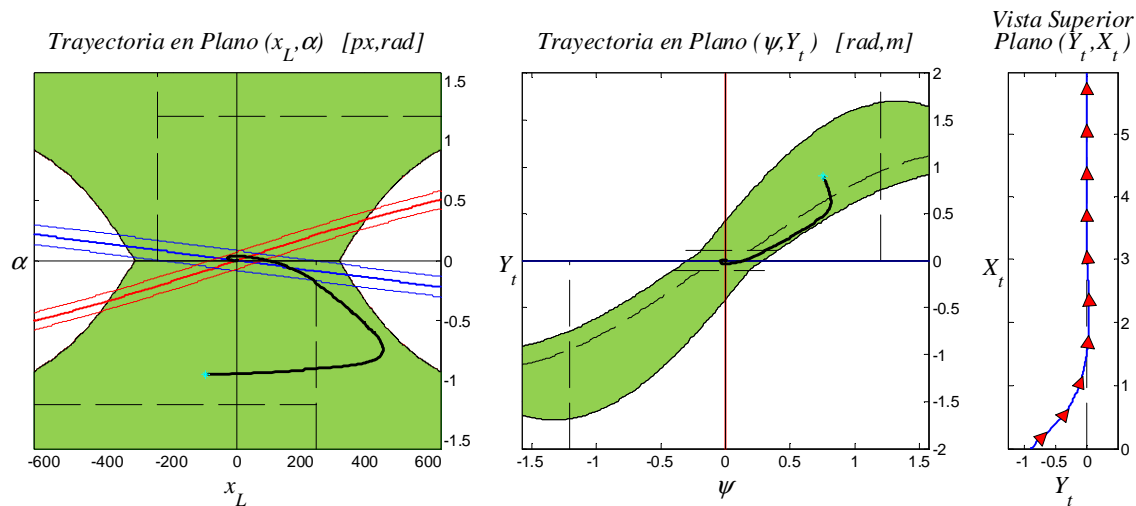


Figura 6.17: Representación de la trayectoria de la simulación 6 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

La secuencia de imágenes en la Fig. 6.18 permite apreciar el riesgo que se menciona. Inicialmente, las condiciones de posición y orientación son adecuadas para la visualización. Al comenzar el movimiento, la proyección de la línea se desplaza hacia el vértice inferior izquierdo como se propone en la estrategia de control, hasta llegar al margen de tolerancia permitido, lo cual sucede en $t=3$ seg según la conmutación visible en las acciones de control. Sin embargo, la imagen en $t=4$ seg muestra que la línea continúa desplazándose hacia el mismo vértice, y se acerca aún más en $t=6$ seg, donde sólo se llega a visualizar una única marca del patrón. En este punto, la simulación es posible ya que el sensor se modela con función de transferencia unitaria y no se realiza el procesamiento de la imagen, pero en el caso real un único centroide no sería suficiente para estimar la posición de la línea. Estas condiciones mejoran recién en $t=9,5$ seg, donde el segmento visible comienza

a intersectar el borde superior del cuadro de imagen.

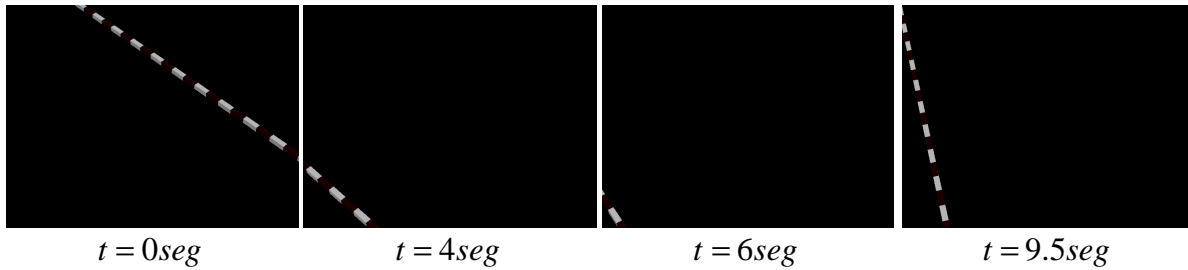


Figura 6.18: Secuencias de imágenes de la simulación 6.

Es importante destacar que estos resultados podrían mejorarse con un nuevo ajuste de ganancias. En particular, un aumento en los márgenes de tolerancia impondría las restricciones del campo de visión en un área mayor del plano (ψ, Y_t) , y al mismo tiempo el seguimiento de velocidades sería favorecido con un incremento en las ganancias de la matriz K_{inv} . No obstante, mientras la primera opción supone movimientos más conservadores, la segunda opción implica acciones de control de mayor energía, con lo cual se llega a una relación de compromiso entre ambas.

Aún así, como se mencionó inicialmente, en las simulaciones previas no ha sido incluido el procesamiento de imagen que brinda las estimaciones del sensor. En consecuencia, tampoco han sido considerados los ruidos de medición que tienen su impacto en el desempeño de los controladores. Para este caso del controlador de dinámica inversa con incertidumbre en el modelo, este ruido podría causar la pérdida de visibilidad en los intervalos donde se navega muy cerca de los límites del campo de visión.

6.2.7. Simulación 7 - Control Basado en Imagen con Ruido de Medición

La observación anterior respecto al ruido de medición da origen a una nueva simulación en la que se analiza su efecto sobre el controlador basado en imagen. Se aplica un ruido gaussiano sobre las salidas del sensor, con los siguientes parámetros de media y varianza:

- $\mu_{x_L} = 10, \sigma_{x_L} = 1$: ruido en la estimación x_L de característica de línea,
- $\mu_{\alpha} = 0,05, \sigma_{\alpha} = 0,001$: ruido en la estimación α de característica de línea,

- $\mu_u = 0, \sigma_u = 0,001$: ruido en la estimación u de velocidad del AUV,
- $\mu_r = 0, \sigma_r = 0,001$: ruido en la estimación r de velocidad del AUV.

Con una condición inicial en la configuración S_1 y con un valor $x_L < -x_{LCRIT}$, los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 6.19. A simple vista, el nivel del ruido aplicado tiene un efecto notable en las estimaciones de velocidades y en las acciones de control. Sin embargo, su transmisión en la transformación de coordenadas no se llega a apreciar con facilidad en los gráficos de Y_t y ψ .

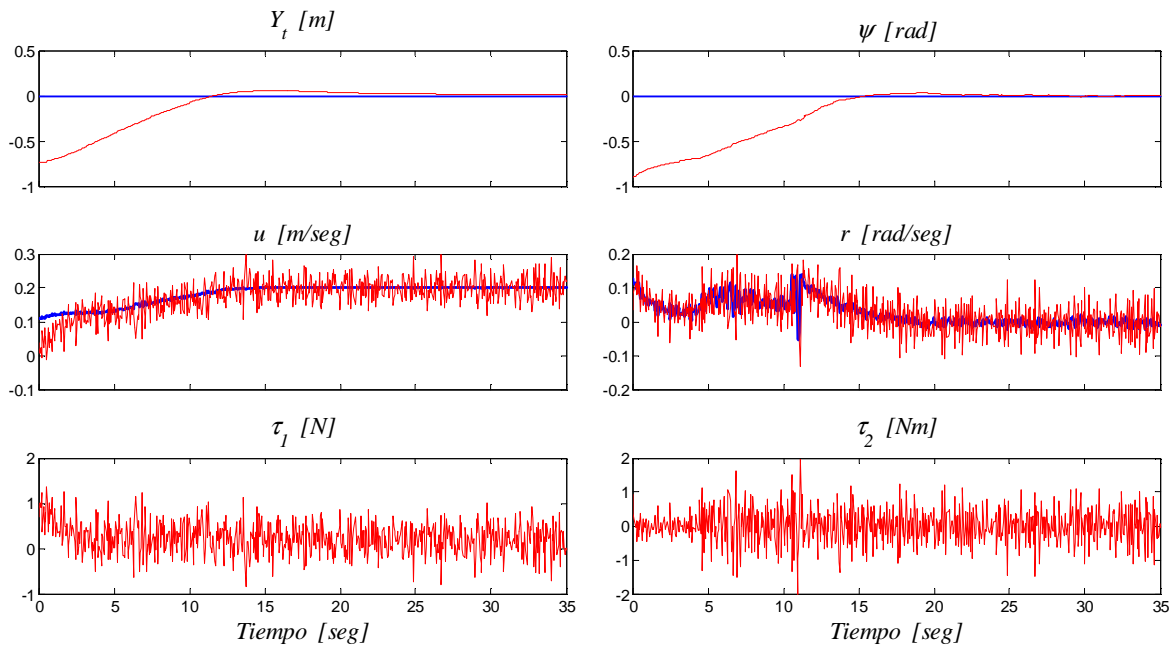


Figura 6.19: Gráficos de evolución temporal de los estados en la simulación 7. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

Por otro lado, el ruido en la estimación de las características de línea se puede distinguir a partir de las trayectorias de la Fig. 6.20, en particular sobre el plano (x_L, α) . A modo comparativo, se ha superpuesto la trayectoria simulada sin ruido. A pesar de comenzar en la misma condición, el punto inicial de ambas trayectorias se ve levemente desplazado debido a la fuente de error.

El efecto más importante que se destaca en este ejemplo es que, si bien la dinámica del vehículo filtra en gran medida las componentes de alta frecuencia de las acciones de control, el movimiento perturbado incrementa las posibilidades de exceder el campo de

visión durante la navegación. El acercamiento a las curvas límite en esta simulación es más notable en la trayectoria del plano (ψ, Y_t) , mientras que las imágenes de la cámara se muestran en la Fig. 6.21 para homogeneizar la presentación de los resultados, pero no permiten una interpretación adicional por sí mismas.

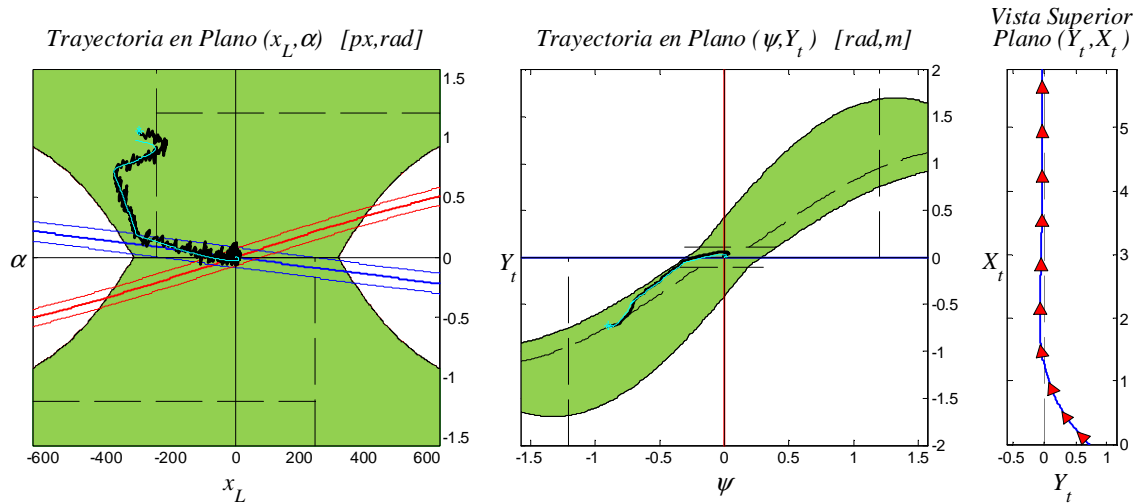


Figura 6.20: Representación de la trayectoria de la simulación 7 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior con indicación de la orientación a través de marca triangular.

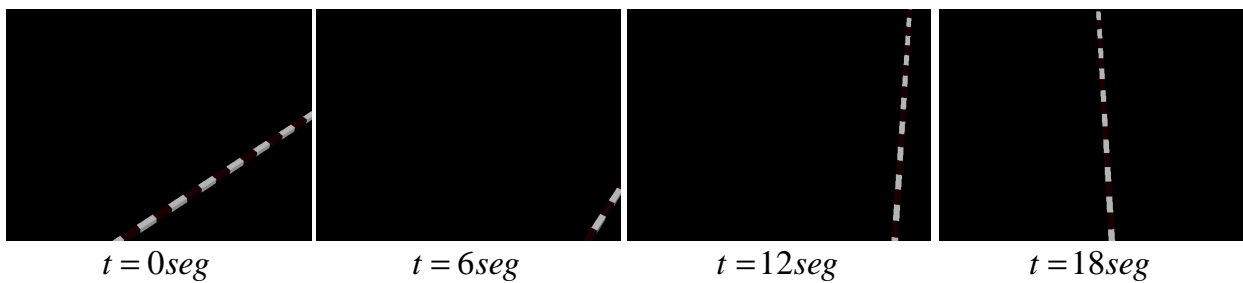


Figura 6.21: Secuencias de imágenes de la simulación 7

6.3. Conclusiones del Capítulo

En base a los resultados teóricos obtenidos en las simulaciones descritas previamente, el capítulo finaliza con la conclusión de que el sensor de visión desarrollado en la Tesis

puede ser utilizado en un sistema de control autónomo para seguimiento de líneas, teniendo en cuenta que las leyes de control deben considerar las restricciones correspondientes para mantener la visibilidad de la línea en la imagen. A modo general, los resultados muestran el grado de coincidencia en las respuestas de los distintos controladores empleados ante condiciones de navegación similares.

Con respecto al ajuste de ganancias, se logran características satisfactorias en las respuestas del sistema sin mayores variaciones en cada controlador. Cabe aclarar que las mismas se obtienen a partir de un modelo dinámico simplificado, el cual no abarca la totalidad de parámetros que describen el comportamiento exacto del vehículo, sino una aproximación de éste mediante los coeficientes de modelo de mayor orden. Particularmente, en los ejemplos presentados puede notarse una mejor respuesta en el seguimiento de velocidad de rotación, en comparación con la velocidad de avance. Esto se debe a que las simulaciones han sido realizadas incluyendo una saturación en los actuadores, la cual actúa principalmente en el movimiento de traslación dada la inercia del sistema.

De las observaciones en el análisis en simulación, se deduce que las perturbaciones de modelo y ruido de medición son factores que tienen influencia principalmente en la viabilidad del uso del sensor de visión. Por un lado, las primeras afectan al controlador de dinámica inversa, por ser éste un diseño basado en el modelo del sistema, a diferencia de los controladores basados en visión o PID. Por otro lado, el ruido de medición (que tiene su origen desde la cuantización en unidades enteras de píxel en la imagen y se puede incrementar luego por errores numéricos en los algoritmos empleados, así como por las deficiencias producidas al procesar una imagen de mala calidad) está asociado directamente al diseño del sensor de visión y su efecto se transmite en cualquier controlador que se utilice.

No obstante, la verificación de los diseños se completó también de manera experimental, con los resultados en condiciones mucho más cercanas a la realidad, los cuales se describen en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Resultados Experimentales

7.1. Introducción

El presente capítulo resume los resultados obtenidos en el seguimiento de líneas empleando el sensor de visión y los controladores presentados en esta Tesis. Inicialmente se describen las condiciones experimentales, incluyendo algunos detalles del vehículo construido ex-profeso durante la Tesis, así como el escenario donde han sido realizados los experimentos.

Luego se ilustran los resultados observados más relevantes, con pruebas efectuadas en diferentes condiciones del entorno y de operación, incluyendo variaciones en la turbidez del agua, luz natural, viento, altitud del vehículo respecto a la línea, entre otras. En principio, el ajuste de ganancias de los controladores se llevó a cabo en tareas de seguimiento de líneas rectas sin perturbaciones externas (excepto las del propio medio). En segundo lugar, las pruebas siguientes incluyeron perturbaciones inducidas de fuerza y torque, además de imperfecciones en la recta logradas con segmentos de distinta curvatura.

Para cada caso se presenta un análisis de la evolución temporal de las variables de estados estimadas, seguida de un conjunto de imágenes de cámara que aportan detalles para la evaluación del sensor de visión y el sistema de control de seguimiento.

7.2. Condiciones Experimentales

Las pruebas de navegación con control autónomo basado en visión fueron realizadas en una pileta de natación de 8 m de ancho por 15 m de largo en declive. Sobre el extremo de ella se alcanza una profundidad máxima de 0,85m aproximadamente. Dado que la tarea propuesta impone el seguimiento de una línea a altitud constante, los experimentos se efectuaron en sentido transversal al largo de la pileta, a fin de evitar la variación de profundidad debida al declive. Esto fue además necesario debido a que el prototipo experimental empleado no cuenta con actuadores que permitan sumergirlo, de modo que posee flotabilidad positiva y únicamente opera en la superficie. No obstante, la cámara está ubicada levemente por debajo de la línea de flotabilidad y los empujes de olas superficiales y de viento actúan como parte de las perturbaciones no controladas sobre la imagen.

Por otro lado, el vehículo cuenta con un receptáculo sellado donde se ubican la cámara, el circuito transmisor de video y una batería que alimenta a ambos dispositivos. La transmisión de video en tiempo real es necesaria para realizar el procesamiento de imágenes en una notebook externa, la cual recibe el video por medio de un receptor inalámbrico cuya señal es digitalizada empleando una placa capturadora USB (frame grabber). Debido a que este vínculo de transmisión requiere una línea de visión directa y aérea entre las antenas de ambos equipos, la antena del AUV se encuentra montada en la proa y se mantiene fuera del agua en todo momento.

Los movimientos del AUV se logran a través de un conjunto de propulsores eléctricos del tipo bomba de desagüe (ver Fig. 7.1), y éstos son alimentados externamente con una batería de automóvil a través de un cable umbilical. La variación de velocidad se consigue con un circuito PWM asociado a cada propulsor, cuya señal de referencia es la generada por el controlador seleccionado que se implementa en la notebook. Así, las vías de comunicación existentes entre el AUV y una computadora externa son necesarias debido a las características constructivas del vehículo. Se debe destacar que si el equipo en el que se procesa el video y la fuente de alimentación de los propulsores se montan en el propio vehículo, el mismo es capaz de operar en forma totalmente autónoma con la estructura propuesta, sin necesidad de intervención de un operador.

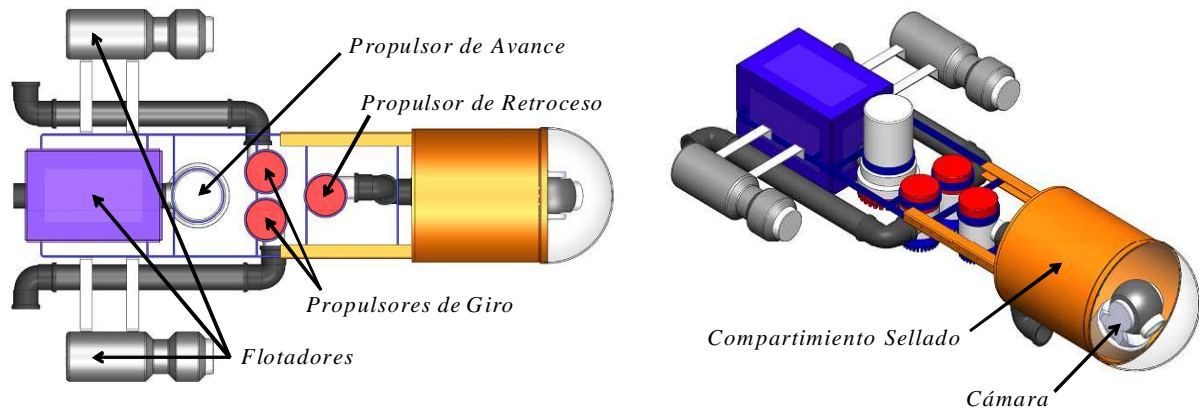


Figura 7.1: Modelo CAD del AUV utilizado en los experimentos. Un conjunto de propulsores permiten movimientos de avance, retroceso y giro del vehículo. La cámara y los circuitos electrónicos se ubican en un compartimiento sellado (Desarrollo en el IADO-CCT-BB-CONICET).

Respecto a la línea, se utilizó una manguera de luces equiespaciadas a 3 *cm* aproximadamente, cuya intensidad variable permitió evaluar el desempeño del sensor en diferentes condiciones del entorno (ver Fig. 7.2). Con el empleo de luces se incrementa el rango de visibilidad con respecto a la turbidez del agua. Aquí es importante destacar que la navegación en agua completamente limpia no constituye una condición de visibilidad óptima. Ciertamente, la transparencia del agua en días de viento da origen a la formación de ondas cáusticas sobre el fondo, cuyo reflejo en movimiento afecta en gran medida a las operaciones de ajuste de brillo y contraste que se aplican en el sensor. En consecuencia, los experimentos que se presentan a continuación fueron llevados a cabo en agua limpia en días sin viento, en días ventosos y nublados, luego de la puesta del sol, o en agua cuyo nivel de turbidez no dió lugar a la visualización de ondas cáusticas.

Para compensar la flotabilidad de la manguera, ésta se sujeta a una estructura de metal que al mismo tiempo sirve para dar forma a la trayectoria deseada. Particularmente, la estructura permite eliminar los efectos de torsión de la manguera y lograr desde una línea recta hasta otras con determinadas curvaturas en distintos puntos.

La calibración de la cámara fue realizada a priori, donde se dió mayor énfasis a la precisión en la estimación de la longitud focal, por ser ésta muy utilizada en las ecuaciones que modelan al sensor. Al mismo tiempo, no se observa una deformación fuerte en las imágenes obtenidas, con lo cual los parámetros de distorsión son de menor importancia.

En referencia a los tipos de controladores diseñados, debe mencionarse que el control

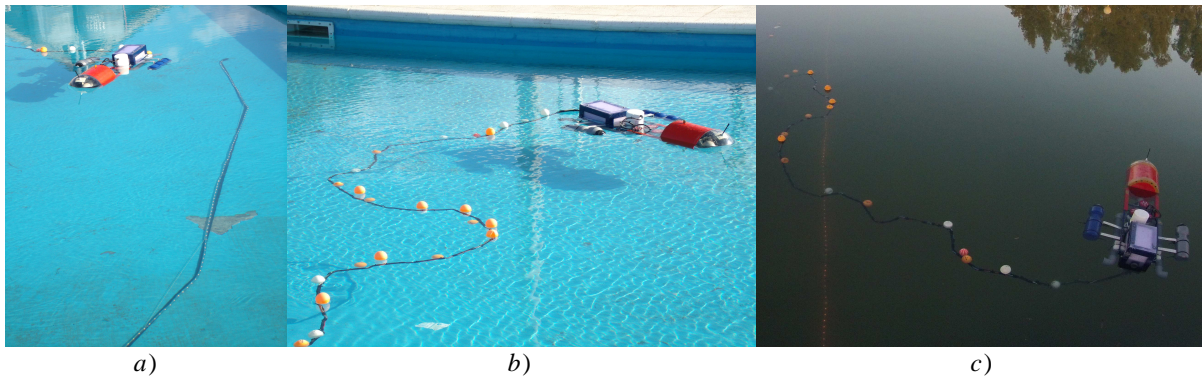


Figura 7.2: Vistas del vehículo en pileta de pruebas. a) La manguera se une a una estructura de metal para darle la forma deseada y mantenerla en el fondo. b) Vista de ondas cáusticas en agua limpia generadas por las condiciones de viento e iluminación. c) Vista en condiciones de día nublado, sin viento y notable turbidez del agua.

basado en imagen es el de mayor interés por su originalidad con respecto a los demás. Por este motivo, las pruebas realizadas se enfocaron principalmente en el desempeño del CBI, aunque se ilustran además los resultados del controlador PID-híbrido. En particular, con el control por dinámica inversa no se alcanzaron resultados satisfactorios para ser presentados en la Tesis, y se reconoce que la causa de una mala performance radica en el empleo de un modelo dinámico deficiente, muy difícil de identificar experimentalmente.

Con la potencia máxima del propulsor de avance, el vehículo alcanza una velocidad máxima de 0.5 m/seg . Sin embargo, debido a la profundidad de la pileta y la distancia de separación entre las luces de la manguera, se debe definir una velocidad nominal para el seguimiento de línea con un valor menor al indicado. Esto es necesario para cumplir con la hipótesis establecida en el diseño del sensor para estimación de velocidades, referida al desplazamiento de píxeles correspondientes en dos imágenes sucesivas. De acuerdo a esta restricción, luego de algunas pruebas se estableció una velocidad nominal de 0.2 m/seg para operar adecuadamente con la infraestructura disponible.

7.3. Seguimiento de una Línea sin Perturbaciones

La primera serie de experimentos tuvo como objetivo la tarea de navegación siguiendo una línea recta en forma autónoma. Sólo existieron en estos casos las perturbaciones

propias del medio, como las olas generadas por el movimiento del vehículo o el viento. Durante estas pruebas se realizó una sintonización adecuada de ganancias de los controladores.

Para mantener la consistencia en la presentación de los experimentos con los resultados del capítulo anterior, cada uno de ellos es ilustrado mediante 3 figuras con la siguiente estructura. En primer lugar, se ubican los gráficos de estimación de posicionamiento relativo, es decir desplazamiento lateral y orientación con respecto a la línea. Simultáneamente, en la misma figura, las velocidades de referencia generadas en el controlador cinemático y las velocidades estimadas en el sensor de visión se grafican en forma superpuesta. En ambos casos, los gráficos de valores de referencia/deseados se dibujan en trazo de mayor espesor para diferenciar de los gráficos de valores estimados. Las acciones de control requeridas son presentadas en la parte inferior de la figura.

Por otro lado, en una segunda figura del experimento, se grafican las trayectorias en el plano (x_L, α) y en el plano (ψ, Y_t) , mientras que una representación en vista superior del movimiento del AUV aporta mayor claridad en la interpretación del posicionamiento relativo. Específicamente, en los casos que la trayectoria definida es una recta, este gráfico reproduce en forma directa la ubicación del AUV mediante una marca sobre la línea durante todo el experimento. Para los casos en que la trayectoria es curva, esta gráfica representa la línea enderezada con el mismo avance odométrico de la marca y del submarino. Sin embargo, continúa siendo útil para describir aproximadamente el posicionamiento relativo en cada instante y observar el comportamiento global del sensor y el controlador.

Finalmente, una tercer figura agrupa una serie de imágenes para visualizar el procesamiento llevado a cabo en el sensor. En ésta se incluyen: la imagen de realidad aumentada, la segmentación de regiones y la ROI seleccionada con su histograma correspondiente. A su vez, cada grupo de dichas imágenes se asocia a un determinado punto de la trayectoria, de modo que se observan en total 4 puntos en el recorrido completo.

7.3.1. Experimento 1: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua media, iluminación media

El caso que se describe a continuación corresponde a condiciones de seguimiento de una línea recta empleando el controlador PID-híbrido. La experiencia se llevó a cabo en

horas de la tarde, en horario previo a la puesta de sol, mientras que la turbidez del agua se encontraba en un nivel intermedio que permitía visualizar la manguera con las luces encendidas al 50 % de su potencia.

Las estimaciones de posición relativa se ilustran en la Fig. 7.3. En la misma se contempla que tanto el desplazamiento como la orientación tuvieron un sobrepico al comenzar el experimento, causado por la inicialización de variables en el sensor y la aceleración inicial requerida para lograr la velocidad de referencia. Esto puede observarse a partir del gráfico de la velocidad u , donde la referencia calculada a partir de (5.4) sólo presentó variaciones leves respecto al valor nominal, y la misma se alcanzó aproximadamente a los 5 *seg.* Luego de ello se produjo un aumento de velocidad angular para la corrección de orientación, que generalmente es acompañado de una suave reducción o subestimación de la velocidad lineal, lo cual no se puede distinguir exactamente dado que no se dispone del valor real de esta velocidad. La evolución de las fuerzas generadas por los propulsores son muy irregulares, aunque justamente son sus componentes de baja frecuencia las que dominan en la excitación de una dinámica con gran inercia del submarino. La irregularidad de las fuerzas se debe al ruido generado en el sensor de velocidad inducido en el procesamiento de imagen.

Por otro lado, en el gráfico del plano (ψ, Y_t) de la Fig. 7.4 se puede notar el acercamiento al origen luego del sobrepico, después de lo cual la trayectoria marca un giro en torno a dicho punto. En la práctica, no se consigue lograr una convergencia al origen en todo instante, debido al ruido en las estimaciones del sensor y perturbaciones del medio, como las olas generadas por el movimiento propio del AUV. La trayectoria en el plano (x_L, α) no fue considerada en las leyes de control para este caso, mientras que la vista superior ilustra con mayor claridad la tarea realizada. Dado que el seguimiento de velocidad axial se logró con un margen de error reducido, la separación espacial de las marcas que representan la posición y orientación del vehículo en este último gráfico resulta mayormente uniforme. Sobre el final del recorrido, se alcanzó el borde de la pileta y con ello el final de la manguera, lo cual inevitablemente ocasiona la pérdida de visibilidad de la línea. En consecuencia, en este caso y algunos otros de los presentados a continuación, estos efectos de borde se desvinculan de la buena performance alcanzada por el control en el trayecto rectilíneo.

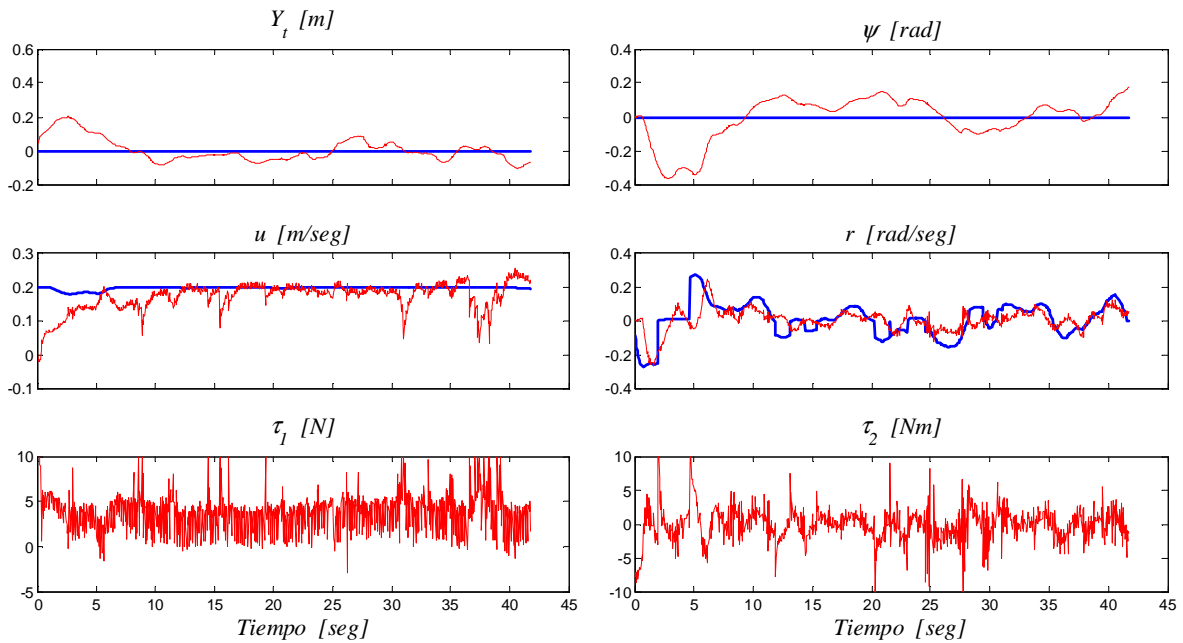


Figura 7.3: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 1. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

En la Fig. 7.5 se muestra la serie de imágenes que intervinieron en el sensor para cuatro instantes significativos del recorrido. El grupo de imágenes de la primer columna corresponde al tiempo $t=1 \text{ seg}$, donde se observa un muy buen funcionamiento del conjunto de operaciones destinadas a la mejora de la imagen, ya que las marcas del patrón se detectaron sin inconvenientes. Debido a que la visualización de las marcas en la parte superior de la imagen de cámara es notablemente borrosa en la mayoría de los casos, esta zona no es considerada en la extracción de características, por lo que se anula a partir de las imágenes mejoradas que se ubican en la segunda fila de la figura. De acuerdo a la proyección de la línea vista desde la cámara, en ese momento el AUV se encontraba hacia la derecha de la misma y con la orientación favorable para reducir el error de desplazamiento relativo en un movimiento de avance.

Dentro de la segunda columna, las imágenes corresponden al tiempo $t=5 \text{ seg}$, donde se produjo el sobrepico en el gráfico de orientación relativa. Comparando con el instante anterior, se puede notar que el movimiento impuesto por el controlador durante ese intervalo de tiempo consistió en las acciones necesarias para avanzar hasta posicionarse por encima de la línea sin efectuar correcciones mayores en la orientación, tal cual fue propuesto en la

estrategia de control. Una vez alcanzado ese posicionamiento, la misma estrategia supone un movimiento de giro para corregir orientación, que se verifica correctamente mediante las imágenes de la tercer columna tomadas en el instante $t=9 \text{ seg}$. Como observación adicional, en la imagen de realidad aumentada en $t=5 \text{ seg}$ se visualiza un tramo del cable de alimentación del AUV, que a pesar de tener partes de alto contraste, no afectó la estimación de posición gracias a las operaciones de ajuste automático de brillo y contraste. Incluso si estas mejoras sobre la imagen no hubieran sido suficientes, la restricción de considerar las marcas sólo dentro de la zona de confianza actuaría como filtro para evitar errores de estimación de posición de la línea.

Por último, en la cuarta columna, las imágenes asociadas al tiempo $t=30 \text{ seg}$ muestran que los errores visibles en los gráficos de desplazamiento y orientación relativos son aceptables dentro de un margen de tolerancia adecuado para la visualización de la línea. La cuarta fila de imágenes comprende las regiones de interés y sus correspondientes histogramas. De aquí se puede concluir que en este experimento, el estudio de propiedades estadísticas de cada región brindó información adecuada para afirmar la confiabilidad de las estimaciones para su uso en el controlador.

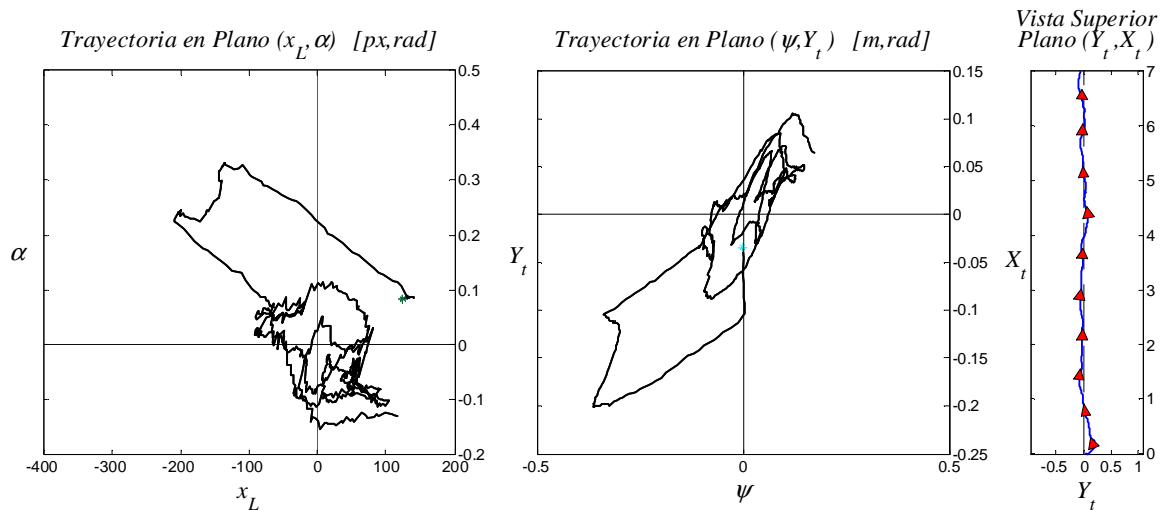


Figura 7.4: Representación de la trayectoria del experimento 1 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α). Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t). Derecha: plano (Y_t, X_t), vista superior.

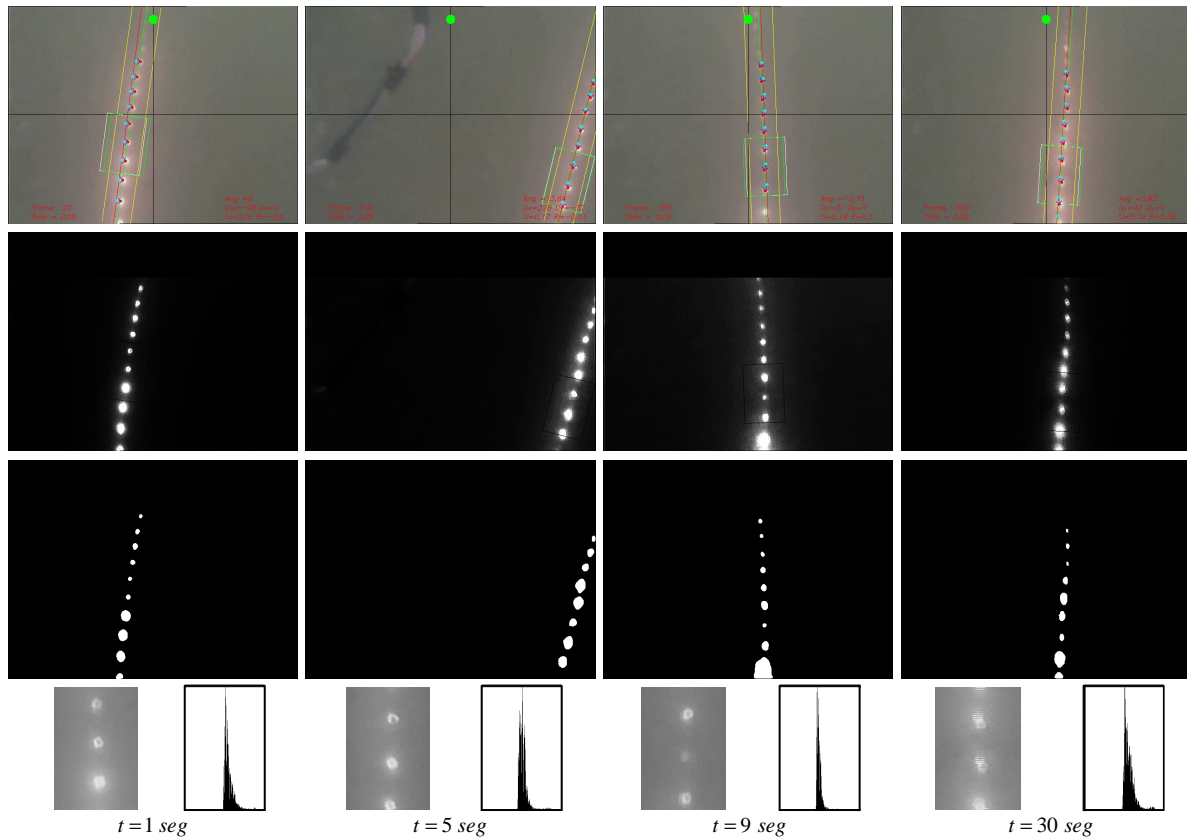


Figura 7.5: Secuencias de imágenes del experimento 1. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

7.3.2. Experimento 2: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua media, iluminación media

En este segundo experimento se navegó sobre la línea con la misma trayectoria del caso anterior, cambiando el controlador empleado y usando el CBI. Comenzando por los gráficos de desplazamiento y orientación del AUV en la Fig. 7.6, se distingue rápidamente una respuesta oscilatoria subamortiguada del sistema controlado. Si bien las oscilaciones fueron más pronunciadas y duraderas que las producidas con el controlador PID-híbrido, se obtuvo una mejora notable con respecto a la convergencia, logrando errores de estado estacionario mucho más reducidos. La misma observación puede realizarse sobre el gráfico en vista superior, mientras que las trayectorias en los planos (ψ, Y_t) y (x_L, α) de la Fig. 7.7 revelan una forma en espiral con centro en el origen, consistente con la respuesta

subamortiguada.

Las estimaciones de velocidades en este experimento presentaron un nivel de ruido considerable, produciendo oscilaciones de mayor frecuencia en los estados de posición, que se observan en superposición con la señal oscilatoria dominante. Dicho ruido también se aprecia en los gráficos de las acciones de control en la Fig. 7.6.

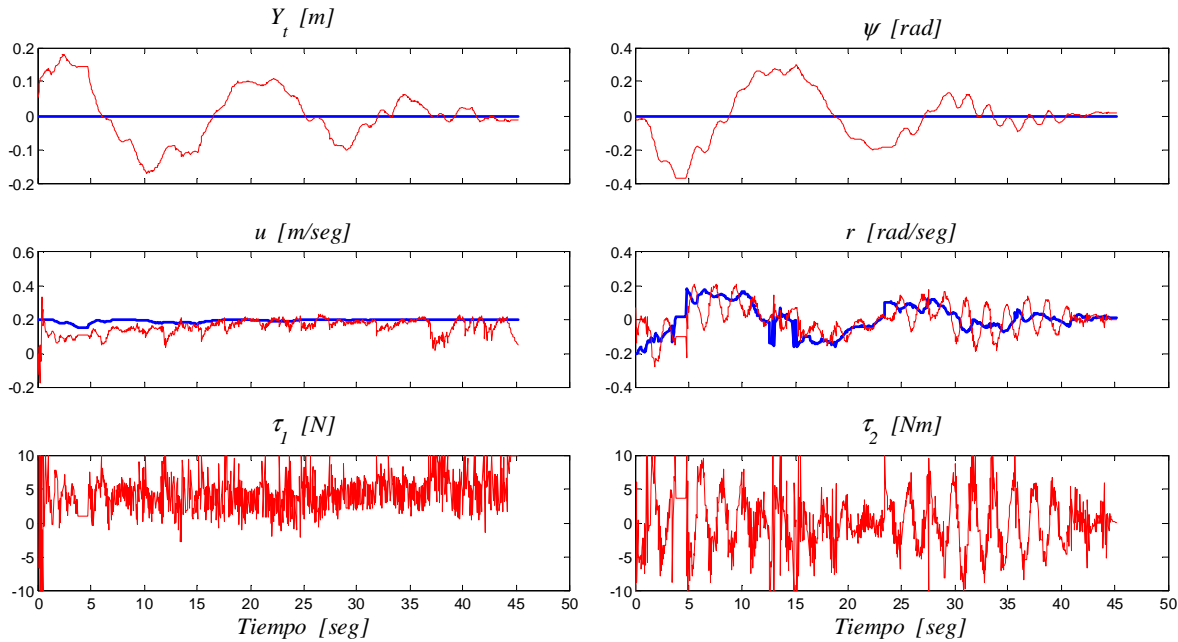


Figura 7.6: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 2. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

Para el análisis del desempeño del sensor, las secuencias de imágenes se muestran en la Fig. 7.8. En este caso, durante los primeros segundos del experimento existió un reflejo de luz en el fondo que no pudo ser eliminado completamente en el filtrado de la imagen. Por este motivo, en la segmentación aparecieron regiones espúreas alejadas del patrón, que no afectaron la estimación de posición por encontrarse fuera de la región de confianza. La segunda columna de imágenes corresponde a $t=10$ seg de navegación, en un instante donde los gráficos de desplazamiento y orientación relativa en la Fig. 7.6 indican cambios de signo en ambas cantidades con respecto a las condiciones del inicio. Sin embargo, en la visualización de la línea sólo se produjo un cambio de signo en el ángulo α , no así en x_L pues el centro de masa se encuentra por detrás del origen de coordenadas de la cámara.

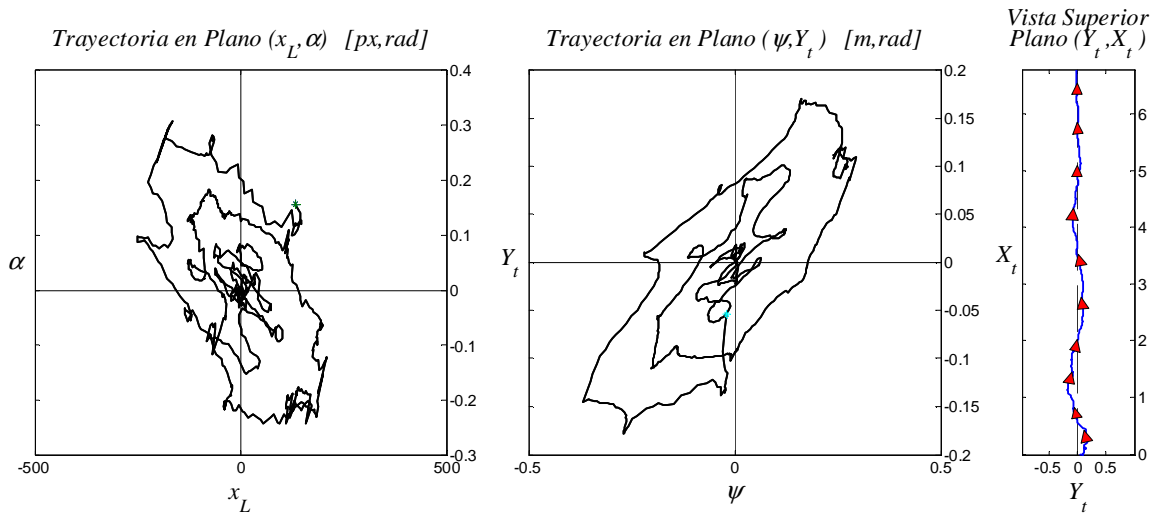


Figura 7.7: Representación de la trayectoria del experimento 2 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α). Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t). Derecha: plano (Y_t, X_t), vista superior.

Cuando las oscilaciones se redujeron, la línea comenzó a proyectarse en forma vertical y su desplazamiento respecto al centro de la imagen disminuyó, como se observa mediante la comparación de la tercera y cuarta columna de imágenes tomadas en $t=30$ seg y $t=39$ seg, respectivamente. Mediante una corrección de brillo y ajuste de contraste en estos dos instantes por parte del algoritmo para la identificación de la línea, se logró aumentar la visibilidad de las marcas del patrón con respecto al fondo, pero en contrapartida no fue posible segmentar correctamente algunas de ellas. Esto se observa en las últimas dos imágenes de la tercer fila, donde la región segmentada se extendió uniendo dos o tres marcas simultáneamente. Como consecuencia de ello, la estimación del campo de velocidades se vió afectada por no tener la cantidad correcta de centroides. No obstante, el número de asociaciones establecidas fue suficiente para hallar los valores de velocidades del AUV.

Si bien el experimento se realizó con pocos minutos de diferencia con el presentado anteriormente, en general puede notarse una variación en cuanto a la calidad de las imágenes de cámara y el nivel de visibilidad. La causa de esta diferencia está dada principalmente por el aumento en la turbidez del agua que se produce al remover la misma causada por la turbulencia de los propulsores, además de una disminución en la intensidad aparente de las luces que debe ser compensada por el ajuste de brillo y contraste. Los histogramas

y las regiones de interés mostradas en la última fila ilustran el cambio en la visualización de la línea, donde la ubicación de las luces fue más difusa y consecuentemente esta incertidumbre adicionó ruido en las salidas del sensor.

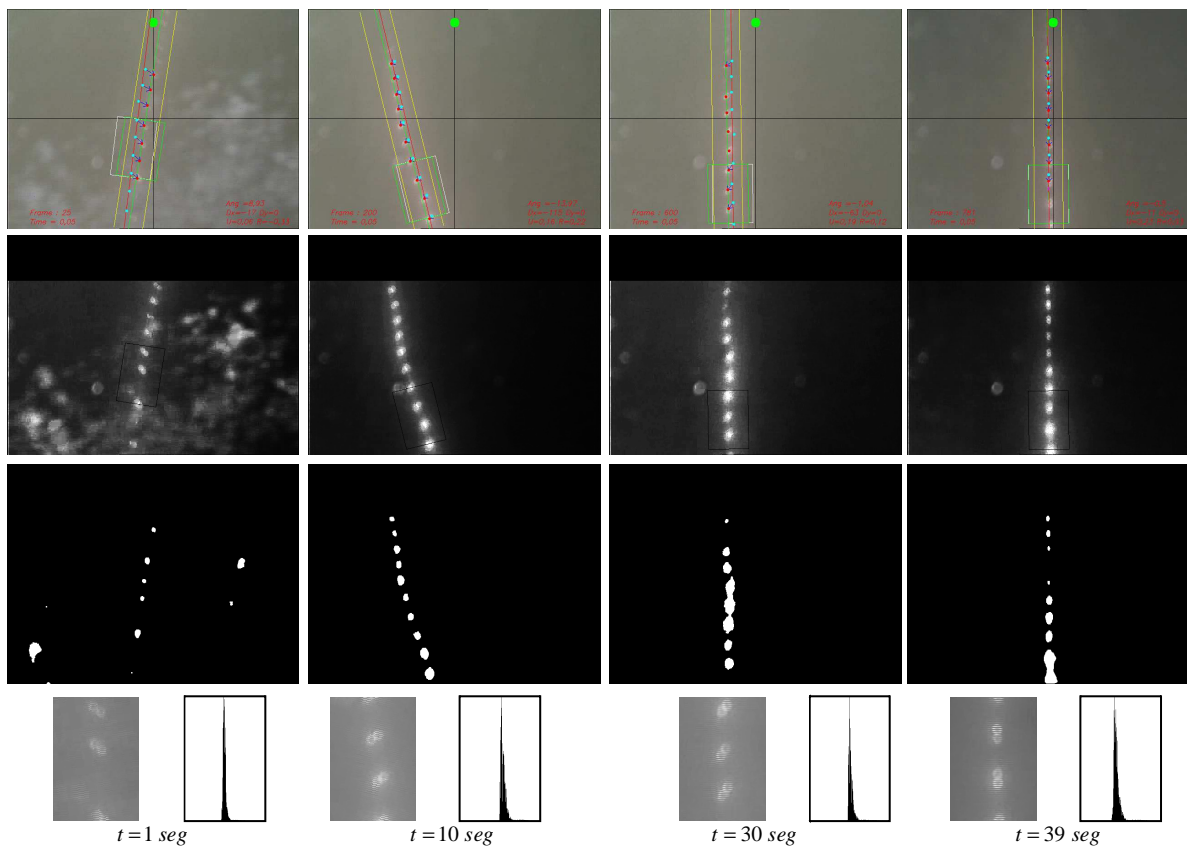


Figura 7.8: Secuencias de imágenes del experimento 2. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

7.3.3. Experimento 3: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja

Luego de la puesta de sol, las condiciones de iluminación del entorno se reducen casi completamente y aumenta el contraste de las luces del patrón con respecto al fondo. Por ello es menester reducir la potencia de las luces de la línea, de lo contrario estas se difuminan, aumentando su tamaño hasta unirse en la imagen. Por este motivo, el nivel de energía suministrado a la manguera en este caso fue menor que en horas de la tarde. Se debe destacar que estas condiciones de iluminación se asimilan en mayor medida a las reales del fondo submarino.

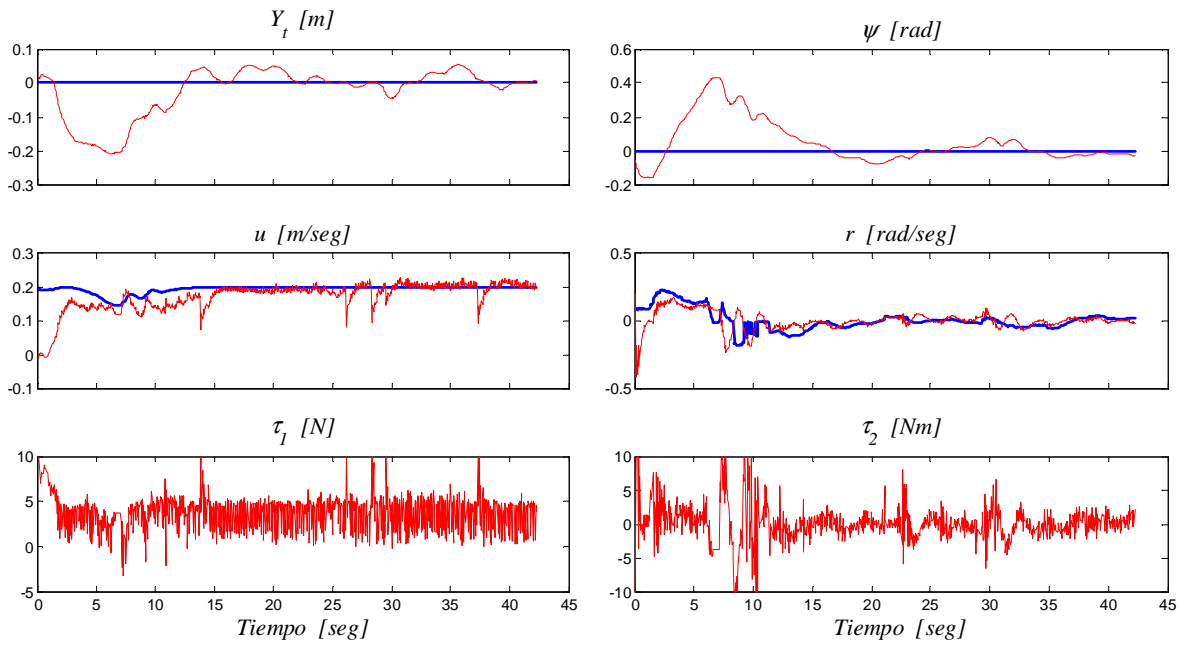


Figura 7.9: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 3. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

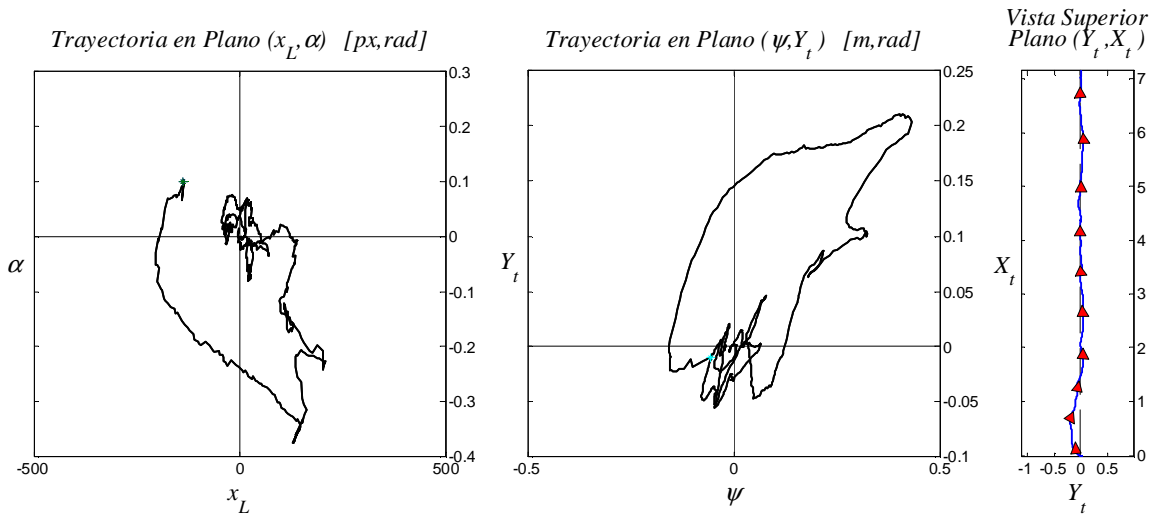


Figura 7.10: Representación de la trayectoria del experimento 3 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

Inicialmente, el vehículo se posicionó estáticamente en una de las configuraciones definidas como no favorable, por lo que el movimiento de avance al comienzo causó un

apartamiento de la línea. No obstante, en esas condiciones el CBI generó la acción de control correcta para provocar el cambio de signo en el ángulo de orientación, que se observa claramente en el gráfico de ψ en la Fig. 7.9. Tanto este gráfico como el de posicionamiento relativo luego de la corrección del signo se aproximaron a una forma exponencial, mostrando mejores resultados en relación a la convergencia de los errores. La afirmación anterior puede verificarse además por la forma de la trayectoria visualizada en el plano (x_L, α) (ver Fig. 7.10) y desde la vista superior del AUV. Nuevamente, en este experimento con el control CBI, el acercamiento paulatino de la trayectoria de estados a una proximidad del origen marca una calidad satisfactoria de la performance del seguimiento.

Las condiciones de visibilidad para este experimento fueron notablemente distintas de los anteriores, como se puede apreciar en la primer fila de imágenes de realidad aumentada en la Fig. 7.11. Debido a la oscuridad sobre el fondo, las luces se visualizan con mayor facilidad. En consecuencia, las imágenes con ajuste de brillo y contraste y las segmentaciones brindaron resultados precisos sobre la ubicación de las marcas del patrón, lo cual se observa en la segunda y tercera fila, respectivamente. Por el mismo motivo, las regiones de interés en cada instante abarcaron sectores con las características estadísticas adecuadas para avalar las estimaciones con un alto grado de confianza. Particularmente, los histogramas mostraron un contraste elevado en cada región, además de un segundo pico hacia la derecha del máximo, correspondiente a los píxeles de mayor intensidad sobre las luces.

Cada uno de los instantes indicados se seleccionó a partir de las condiciones de posición y orientación correspondientes. Para $t=1$ *seg*, la visualización de la línea se muestra en el momento en que el AUV no abandona todavía la configuración no favorable. A partir de allí, la acción de control tuvo como objetivo el giro adecuado para el cambio a una configuración favorable, que vista desde la cámara consistió en llevar la visualización de la línea hacia la izquierda de la imagen. Las restricciones para mantener el rango de visión comenzaron a actuar en $t=7$ *seg*, cuando la ROI se ubicó cerca del vértice inferior izquierdo de la imagen. Desde esa condición, el control combinó acciones de avance y giro para acercar el AUV a la línea reduciendo al mismo tiempo la orientación relativa.

Si se observan en detalle los gráficos de la Fig. 7.9 en el intervalo de 7 a 11 *seg*, se distinguen dos oscilaciones en la evolución temporal de ψ y r , lo cual se debe a correcciones

rápidas de torque que fueron necesarias mientras se operó cerca de la condición descripta. Luego de ello, las acciones de control se volvieron más suaves hasta lograr la visualización en el centro de la imagen, como se muestra en $t=25 \text{ seg}$. Como particularidad adicional en este experimento, en los instantes $t=1 \text{ seg}$ y $t=11 \text{ seg}$, pueden notarse leves imperfecciones en la curvatura de la manguera, que son consideradas en mayor detalle en las pruebas siguientes.

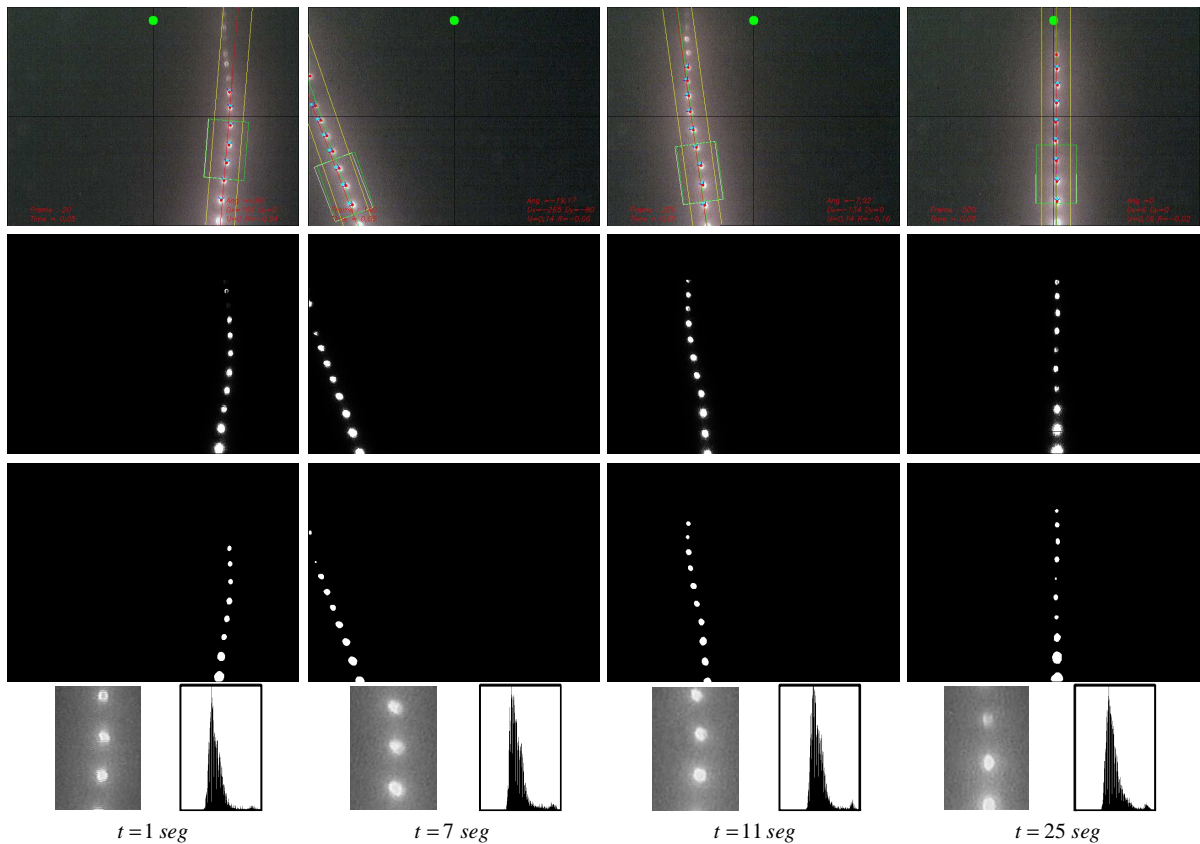


Figura 7.11: Secuencias de imágenes del experimento 3. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

7.4. Seguimiento de una Línea con Perturbaciones

Luego de seleccionar apropiadamente los conjuntos de ganancias que permitieron obtener los resultados de la sección anterior, se procedió con una segunda serie de experimentos en los cuales se indujeron perturbaciones del entorno y de fuerza/torque sobre el vehículo.

Por un lado, se consideró como perturbación del entorno a la variación de curvatura a lo largo de la manguera. Este tipo de pruebas se orientó al análisis de factibilidad de uso de un sensor de visión para el seguimiento de circuitos arbitrarios. Claramente, la curvatura no fue considerada explícitamente en las ecuaciones de estimación de estados, con lo cual estas pruebas brindaron resultados que reflejaron la sensibilidad de las ecuaciones con respecto a la curvatura de la línea. Se define como perturbaciones de curvatura a cambios de pendiente de la línea en forma aleatoria con separación entre puntos de inflexión del orden de la longitud del segmento visible en la imagen. También puede extenderse esta definición para comprender los cambios de pendiente de manera sostenida en forma de arco cuyo radio de curvatura sea mayor al segmento visible. Dado que la manguera es aproximadamente rectilínea, la primera definición es la que se adapta a esta configuración del experimento. No obstante, más adelante se presenta también un caso de estudio con una línea curvada en forma de “U”, la cual es interpretada como caso de la segunda definición. Los experimentos 4 y 5 corresponden a este análisis.

Por el otro lado, las perturbaciones de fuerza/torque se utilizaron para intervenir el movimiento del AUV mientras se realizaba el recorrido. Como éstas tuvieron influencia sobre una o más variables de estado, los experimentos correspondientes se enfocaron al estudio de desempeño de los controladores, aunque también afectaron las condiciones de operación del sensor. La descripción comprende a los experimentos 6,7,8,9 y 10.

7.4.1. Experimento 4: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua baja, iluminación baja, perturbaciones de curvatura

Como punto de partida para observar el comportamiento del sistema ante perturbaciones, se definió una trayectoria cuya forma puede ser aproximada por una línea recta, pero con imperfecciones en puntos intermedios acorde a la definición. De esta manera se obtienen perturbaciones de curvatura que permiten estudiar principalmente el desempeño del sensor de visión. Se hace énfasis en el sensor ya que éste ha sido diseñado con el fin de obtener los parámetros de una línea que aproxime la ubicación de un conjunto disperso de marcas. En consecuencia, se espera que las variaciones leves de curvatura sean filtradas en el mismo y no afecten excesivamente al controlador. La influencia negativa de estas perturbaciones en el sistema de control puede ilustrarse en el ejemplo de una curva

sostenida. Aquí puede suceder que el submarino esté en la parte convexa de la curva y corrija el curso para salir de una configuración desfavorable. Luego de cruzar la línea y encontrarse en la parte cóncava puede caer nuevamente en otra configuración desfavorable. Este efecto inesperado no se encuentra contemplado directamente en la estrategia de control descrita en el Capítulo 5.

Es importante destacar que la interpretación de los gráficos de evolución temporal en este caso no es exactamente la misma que en los experimentos sobre líneas rectas sin imperfecciones. Si bien las variables brindan una descripción de la ubicación relativa entre el AUV y la línea, no se pueden definir las medidas exactas de cada error. Específicamente, los conceptos de desplazamiento lateral y orientación, requieren de un punto de referencia sobre la línea que es considerado para establecer la manera en que éstos se cuantifican. Cuando la línea es recta, dicho punto es elegido como aquel que determina la intersección de una recta perpendicular a ella y que pasa por el centro de masa del vehículo. Para el caso de líneas curvas, el punto puede elegirse como aquel que determina la distancia mínima entre la misma y el AUV, aunque esta definición no es la única posible y pueden emplearse otras que consideren la curvatura u otra característica de interés.

Teniendo en cuenta que el sensor aproxima inicialmente un segmento de recta en base a las marcas dispersas sobre el patrón, y que la estimación de posición se efectúa luego a partir de un conjunto de ecuaciones modeladas con la proyección de una recta del espacio sobre el plano de la imagen, el punto de referencia queda establecido en el modelo con la primera definición mencionada anteriormente. Como no es posible indicar exactamente la posición de esta referencia sobre la línea real con curvatura, resulta conveniente el empleo del CBI por sobre el PID-híbrido ya que el primero utiliza leyes de control basadas directamente en la visualización de la línea en la imagen, mientras que en el segundo se requiere una transformación para obtener las variables de estados del AUV que se verá afectada por esta incertidumbre. Habiendo mencionado este factor, en lo que sigue las estimaciones del sensor son consideradas como medidas que permiten una cuantificación aproximada del movimiento real del vehículo.

El experimento que se describe a continuación se llevó a cabo en agua con niveles muy bajos de turbidez e iluminación. La condición inicial ubicó al vehículo alejado de la línea pero con el signo de la orientación necesario para una configuración favorable. Empleando

la referencia de velocidad definida por (5.5), el movimiento comenzó con un avance suave por debajo de la velocidad nominal y correcciones menores de orientación (ver Fig. 7.12). Luego de alcanzar el posicionamiento sobre la línea, el avance continuó siguiendo una referencia de valor cercano al nominal.

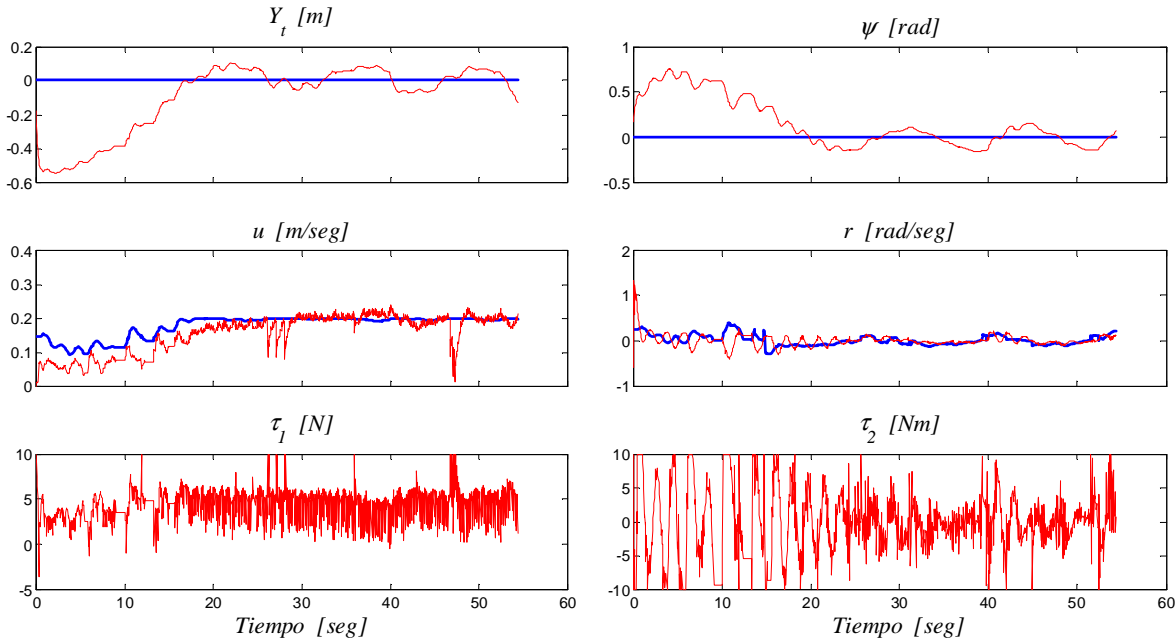


Figura 7.12: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 4. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

Por otro lado, en el ángulo de orientación fueron necesarias correcciones de torque cada vez que se encontró un punto de curvatura notable, lo cual tiene la apariencia de oscilaciones en el gráfico de ψ . Acorde a esta observación, las acciones de control indican un mayor gasto energético para realizar la tarea. A pesar de ello, el seguimiento fue llevado a cabo hasta el final del recorrido. El conjunto residual dentro del cual la trayectoria queda circunscripta en el plano, es mayor que en los casos de estudio descritos para líneas rectas, no obstante el sistema de control muestra la capacidad de regular el curso y la velocidad de forma aceptable.

La trayectoria en el plano (x_L, α) mostró un acercamiento gradual desde la condición inicial hacia el origen, aunque la apariencia en el plano (ψ, Y_t) sugiere que inicialmente el vehículo se apartó de la línea aún más que en el comienzo (ver Fig. 7.13). La razón de esto es un transitorio originado en la inicialización del sensor.

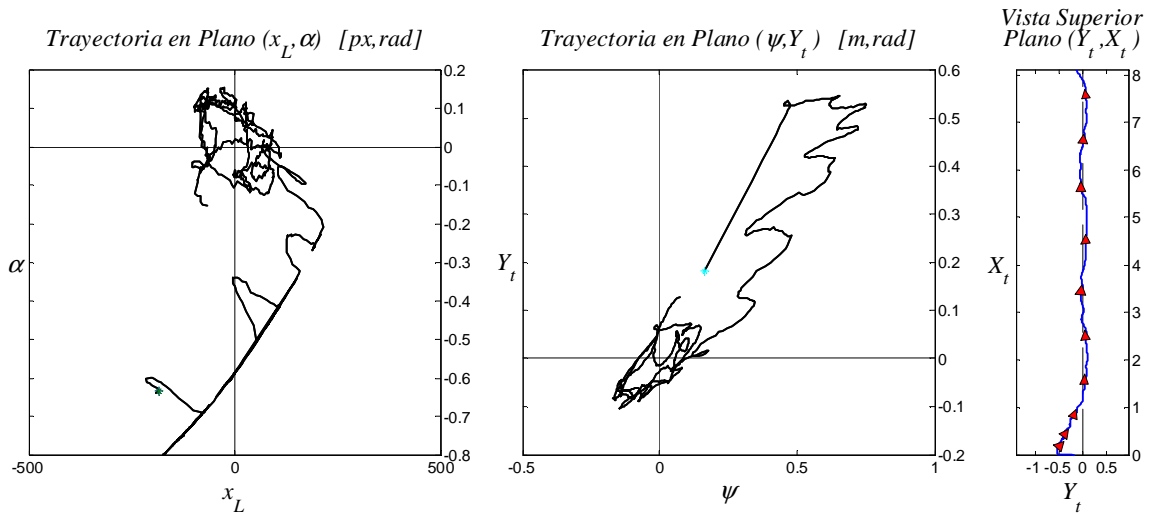


Figura 7.13: Representación de la trayectoria del experimento 4 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α). Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t). Derecha: plano (Y_t, X_t), vista superior.

Si bien las condiciones de iluminación fueron similares a las del experimento 3, la visibilidad estuvo favorecida por un menor nivel de turbidez en el agua, como puede apreciarse en la Fig. 7.14. En la primer columna, las imágenes correspondientes a $t=1$ seg muestran la línea al inicio del recorrido, donde la ROI capturó una zona muy nítida del patrón debido a que los primeros movimientos se realizaron a baja velocidad. Lo contrario sucedió en $t=11$ seg, cuando una rotación más rápida para compensar el ángulo de orientación dió origen a una imagen difusa en la ROI seleccionada. Aún así, la estimación de velocidad fue posible al considerar únicamente el centroide de cada marca detectada, además de que el desplazamiento en píxeles de los centroides entre dos imágenes sucesivas se mantuvo por debajo del valor admisible. En la tercer columna, en $t=30$ seg, el vehículo se ubicó sobre la línea con un pequeño error de ángulo, mientras que una situación similar pero con signo opuesto se observó en $t=40$ seg (cuarta columna), que también puede deducirse a partir del gráfico de ψ .

Las variaciones suaves de curvatura son visibles en las últimas tres muestras elegidas, donde los segmentos de recta estimados muestran que la aproximación por mínimos cuadrados resultó adecuada para representar las distribuciones de marcas visibles no alineadas en cada imagen. Como conclusión adicional, se puede ver que el valor medio del ángulo de orientación luego de los 20 seg tomó un valor positivo, coincidente con el signo

de orientación inicial, y entonces en la vista superior del AUV las marcas apuntan en una dirección dominante.

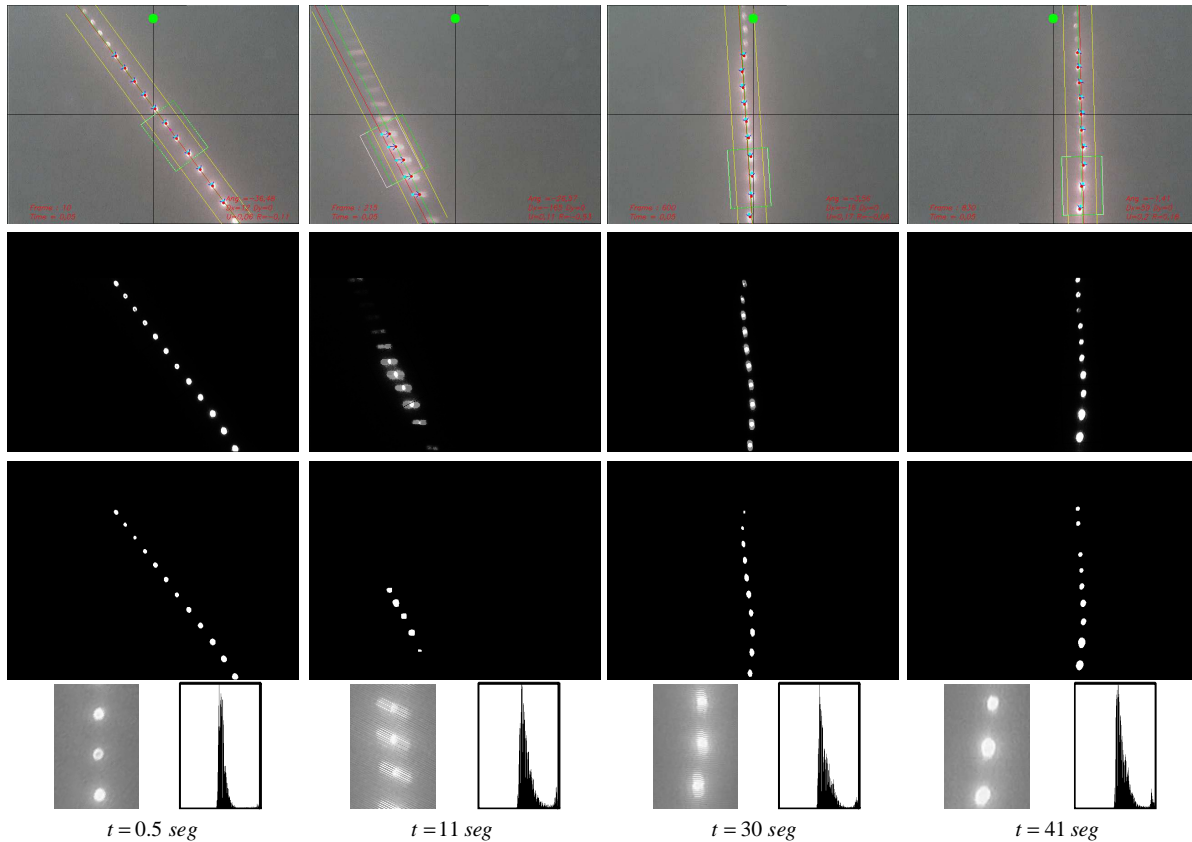


Figura 7.14: Secuencias de imágenes del experimento 4. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

7.4.2. Experimento 5: Controlador CBI, línea curva, turbidez del agua baja, iluminación media, perturbaciones de curvatura

Mediante una trayectoria en forma de “U” se consigue una condición que puede ser interpretada como la tarea de seguimiento de una línea recta con perturbaciones en determinados sectores. En otras palabras, la trayectoria se compone básicamente de tres tramos suaves cuyas uniones presentan una curvatura notable. Los resultados que se describen en este punto corresponden a dicho recorrido, en una prueba realizada con iluminación media (en horario de tarde) y con bajo nivel de turbidez del agua.

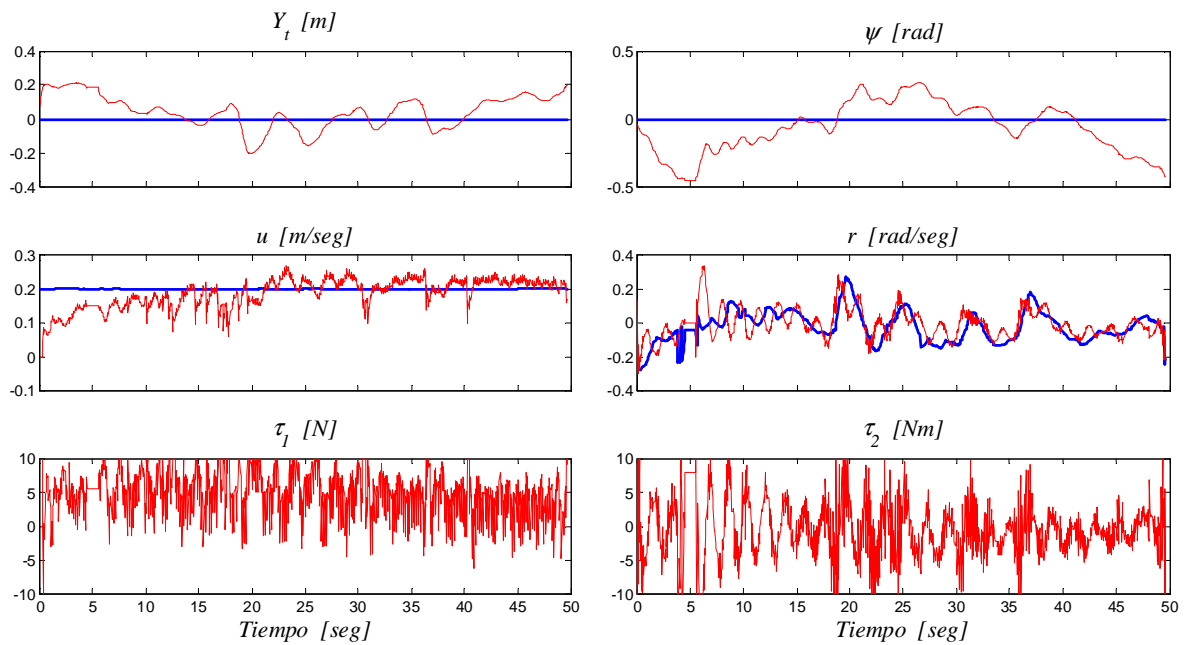


Figura 7.15: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 5. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

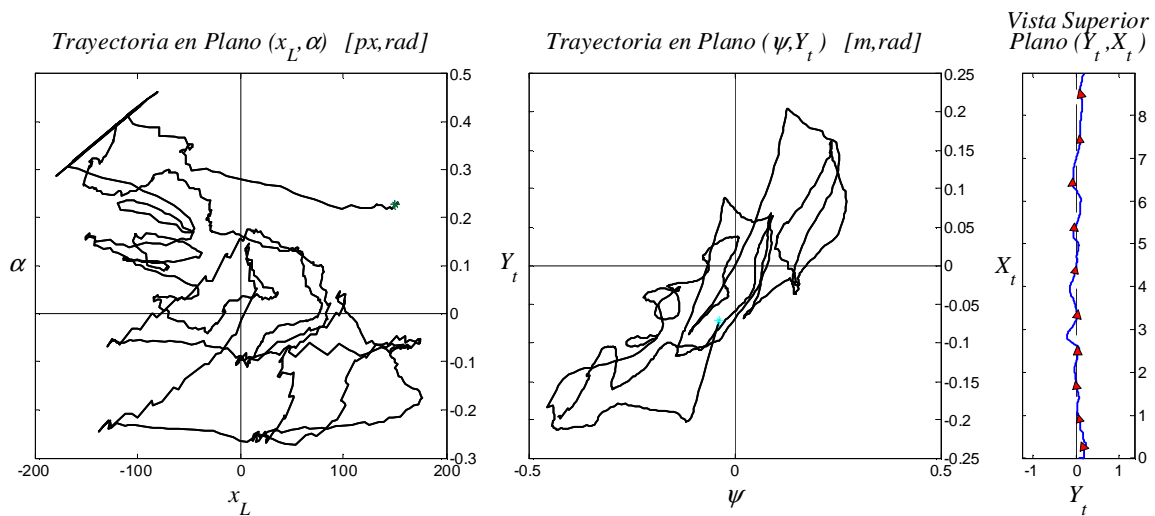


Figura 7.16: Representación de la trayectoria del experimento 5 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

A partir de la Fig. 7.15, se puede distinguir que la condición inicial fue favorable para el acercamiento a la línea mediante un movimiento de avance pero con un ángulo

bajo de orientación, por lo que el controlador realizó un aumento del mismo para luego efectuar el acercamiento de manera más rápida. Allí también se observa que los errores de seguimiento y orientación fueron reducidos a valores satisfactorios aproximadamente en $t=15 \text{ seg}$, aunque luego comenzó una serie de oscilaciones en todas las variables de estados graficadas. La vista superior del AUV muestra un cambio brusco de posición relativa seguido por dichas oscilaciones. En este caso, los gráficos de las trayectorias en los planos (x_L, α) y (ψ, Y_t) en la Fig. 7.16 no permiten una clara comprensión del recorrido realizado.

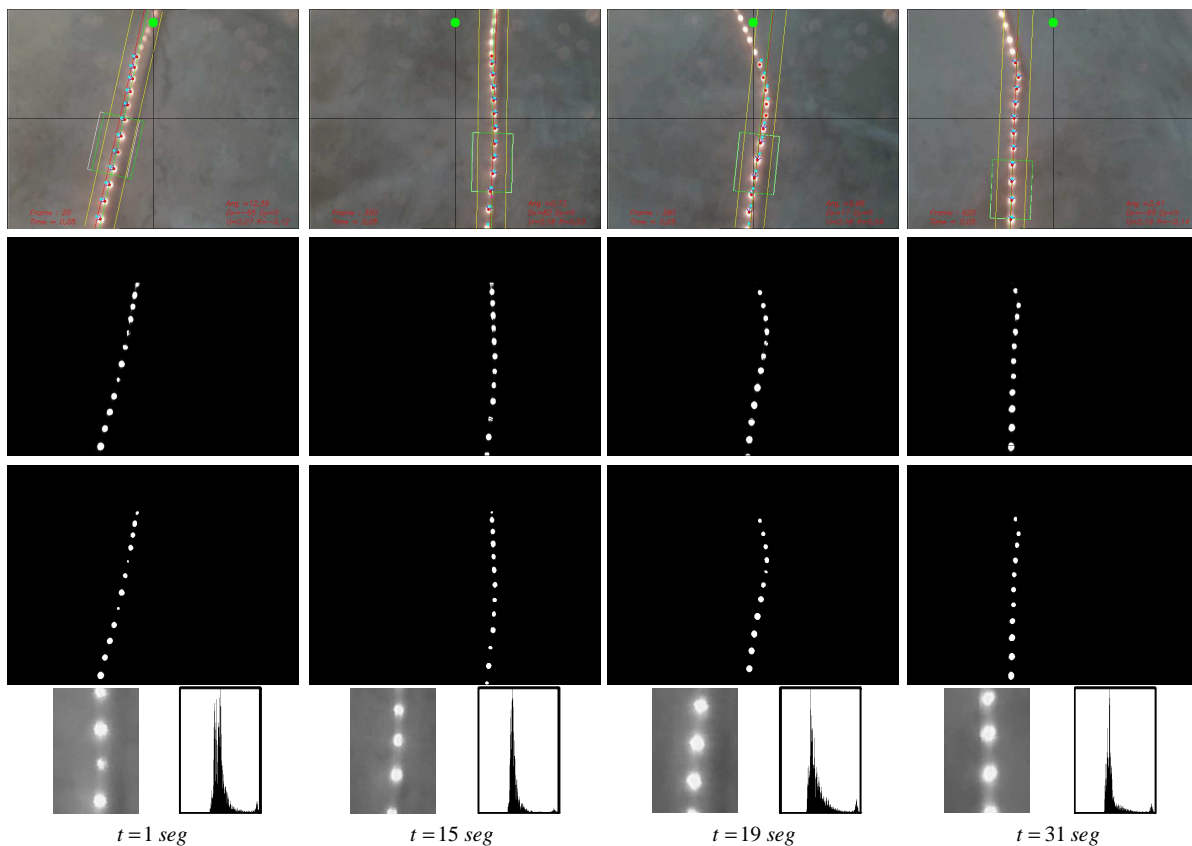


Figura 7.17: Secuencias de imágenes del experimento 5. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

Para explicar la causa de este comportamiento del AUV, se puede recurrir a las secuencias de imágenes presentadas en la Fig. 7.17. En la columna de $t=1 \text{ seg}$ se observa la condición inicial de visualización de la línea, y se verifica que los errores de seguimiento y orientación se redujeron en $t=15 \text{ seg}$, y es cerca de esa posición que finaliza el primer

tramo de la línea. Sobre la tercer columna de imágenes, se muestra cómo comenzó a visualizarse el primer punto de quiebre del recorrido, aproximadamente en $t=19$ seg. Este hecho justifica los cambios bruscos en las estimaciones de desplazamiento y orientación visibles en los gráficos de evolución temporal, y las oscilaciones representan los intentos del controlador para responder ante esta situación.

Antes de recuperar correctamente las condiciones de navegación previas a la perturbación, en $t=31$ seg se visualizó el segundo punto de quiebre, que define el comienzo del tercer tramo. A diferencia del punto anterior, este se alcanzó durante un movimiento con oscilaciones notables, incluidas variaciones importantes de las velocidades de referencia. Por este motivo, las acciones de control finales no fueron lo suficientemente adecuadas para cumplir el objetivo de control.

7.4.3. Experimento 6: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de posición

A partir del presente caso se ejemplifican situaciones en las que el vehículo recibió un impulso/pulso de fuerza o torque externo y se evalúa la capacidad del sistema para recuperar el posicionamiento correcto.

Este primer ejemplo fue llevado a cabo con las siguientes particularidades. El controlador empleado fue el PID-híbrido, siguiendo una línea recta en agua turbia y con baja iluminación del entorno. El vehículo comenzó la navegación hasta alcanzar su objetivo de control dentro del margen de tolerancia, y luego se le aplicó una fuerza externa aproximadamente en su centro de masa en dirección transversal a su avance. Esta perturbación produjo un apartamiento lateral con respecto a la línea.

En la Fig. 7.18 se puede observar la evolución temporal de los estados durante el experimento. Tras producirse un sobrepico inicial, el sistema se acercó satisfactoriamente a la posición correcta de seguimiento en $t=20$ seg. Unos segundos después, la fuerza externa aplicada causó un apartamiento notable de dicha posición, ante la cual el controlador respondió con una disminución de la velocidad lineal de referencia. En el intervalo de tiempo de $t=22$ seg a $t=33$ seg aproximadamente, las salidas del sensor mostraron valores constantes en ciertos subintervalos, lo cual indica que las estimaciones realizadas no contaron con el aval del algoritmo de supervisión.

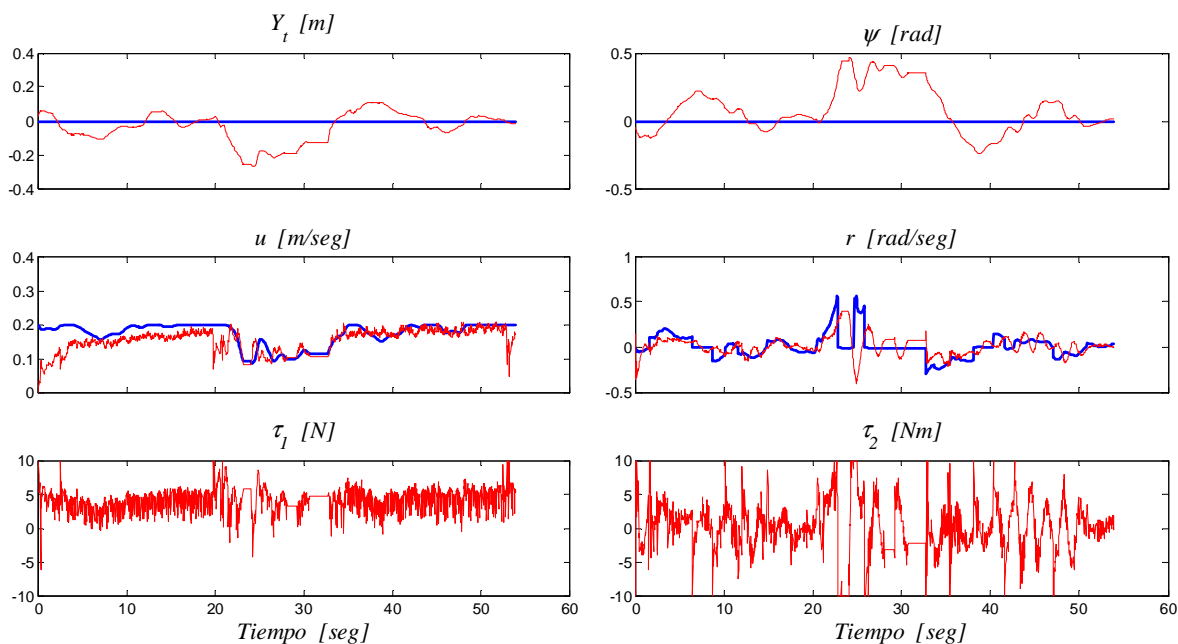


Figura 7.18: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 6. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

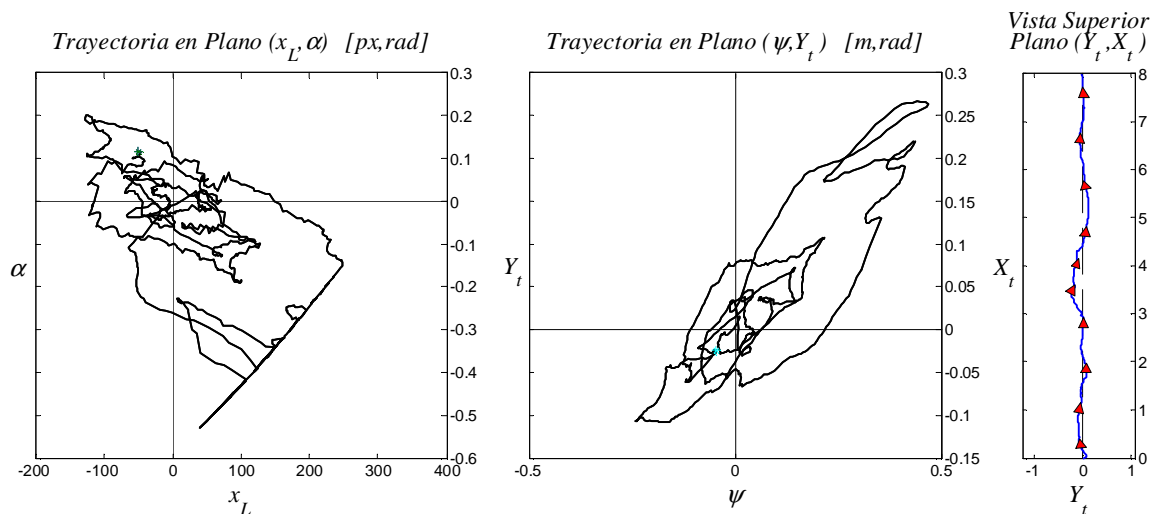


Figura 7.19: Representación de la trayectoria del experimento 6 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

Ante la ceguera del sensor, el algoritmo de control reacciona congelando los últimos valores de fuerza aplicados antes de este síntoma. Al abrir el lazo de control, el vehículo

acusas el mayor apartamiento de la línea. Analizando la trayectoria en el plano (x_L, α) se pueden asociar estos intervalos a los tramos más alejados del origen en el plano, es decir, el módulo de supervisión no calificó como adecuadas a las estimaciones porque las mismas se realizaron en un rango muy reducido del límite de visión (ver Fig. 7.19).

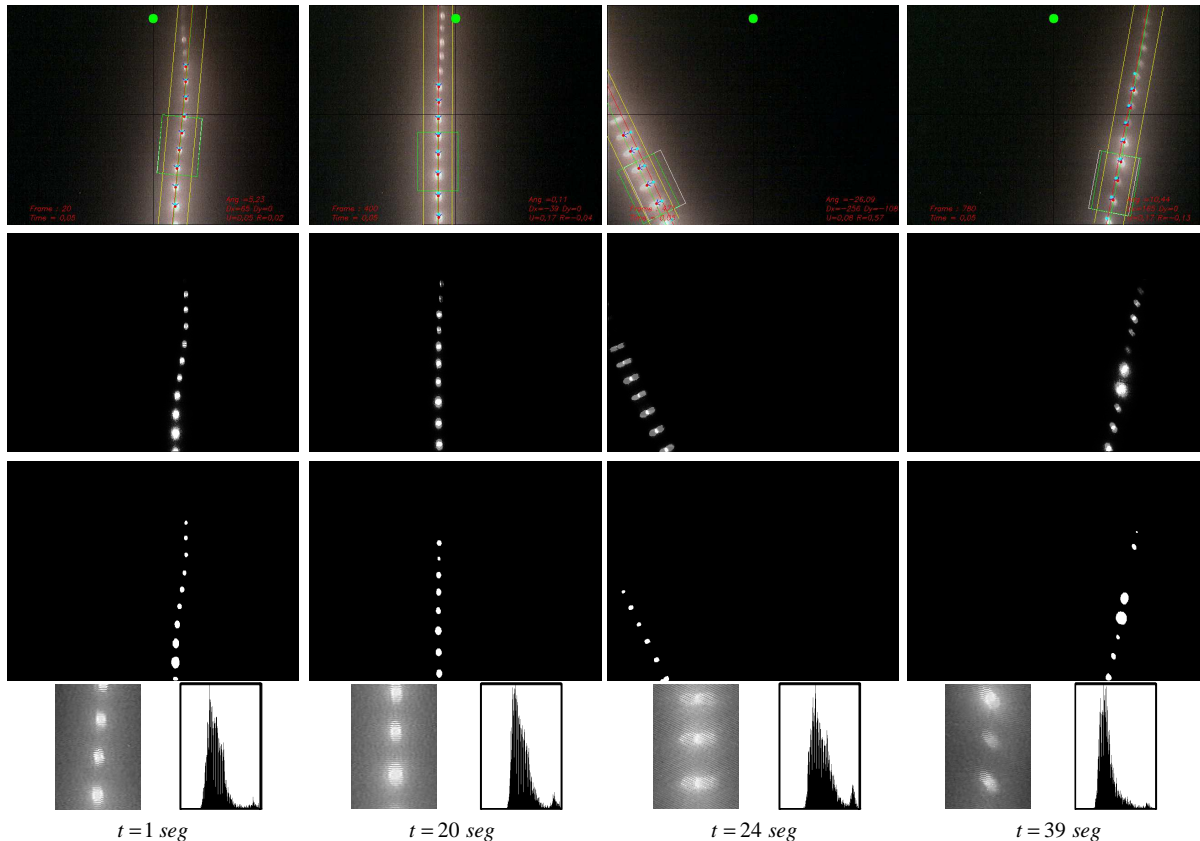


Figura 7.20: Secuencias de imágenes del experimento 6. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

El análisis anterior es apoyado por las secuencias de imágenes de la Fig. 7.20, donde se ilustra la condición inicial en $t=1\text{seg}$ (primer columna) y la visualización del segmento visible de la línea en $t=20\text{seg}$ (segunda columna). Luego, la tercer columna muestra la situación correspondiente a $t=24\text{seg}$, operando cerca del límite de visión como se afirmó anteriormente. Si bien en ese instante las estimaciones fueron aceptadas al analizar una ROI que incluyó al patrón, la falta de nitidez y un campo de velocidades con valores altos son indicativos de una situación propensa a perder confiabilidad en los fotogramas siguientes. Finalmente, para $t=39\text{seg}$, la imagen describe el sobrepico en el instante a

partir del cual el control corrigió adecuadamente la posición y la orientación para concluir el experimento.

7.4.4. Experimento 7: Controlador PID, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de velocidad axial

Continuando con el controlador PID-híbrido, se reiteró un experimento similar al anterior, modificando la perturbación producida. La diferencia radicó en el sentido de aplicación de la fuerza externa, que para esta prueba se efectuó en la dirección del eje X del vehículo en un momento en que este acusaba una casi completa alineación con la manguera, causando una desaceleración en el movimiento de avance.

Así, el AUV inició el recorrido desde una configuración que requirió un cambio de signo en el ángulo de orientación para el acercamiento a la línea (ver Fig. 7.21). La velocidad de referencia para el avance se ajustó al error de orientación, de manera que el movimiento de avance fue realizado lentamente, abarcando un tiempo de aproximadamente 16 *seg* para un posicionamiento adecuado. Luego, antes de los 20 *seg* se provocó la perturbación con una fuerza externa que detuvo el avance del vehículo, lo que se puede apreciar en el gráfico de velocidad lineal. Como en ese instante el error de orientación no había sido corregido completamente, la acción de control de torque no se anuló mientras se aplicaba la fuerza externa. En consecuencia, el error en el ángulo aumentó rápidamente. Este hecho, combinado con la aceleración lineal que impone el controlador al desaparecer la fuerza externa para recuperar la velocidad de referencia, provocó un alejamiento de la línea luego de la perturbación. No obstante, se logró corregir el error de seguimiento.

Tras la restauración de la velocidad, se aplicó una segunda perturbación con las mismas características en $t=38$ *seg*, la cual produjo también un frenado súbito. La recuperación en este caso se obtuvo antes de finalizar el recorrido. En la Fig. 7.22, la trayectoria en el plano (ψ, Y_t) revela dos alejamientos del origen, uno correspondiente al sobrepico inicial y otro en el momento de la segunda perturbación. Para este ejemplo, en la vista superior, las marcas con menor separación espacial corresponden a los tramos recorridos a menor velocidad. Esto ocurrió al comienzo de la prueba y antes de llegar a los 4 *m* de la línea, cuando se aplicó la primera perturbación.

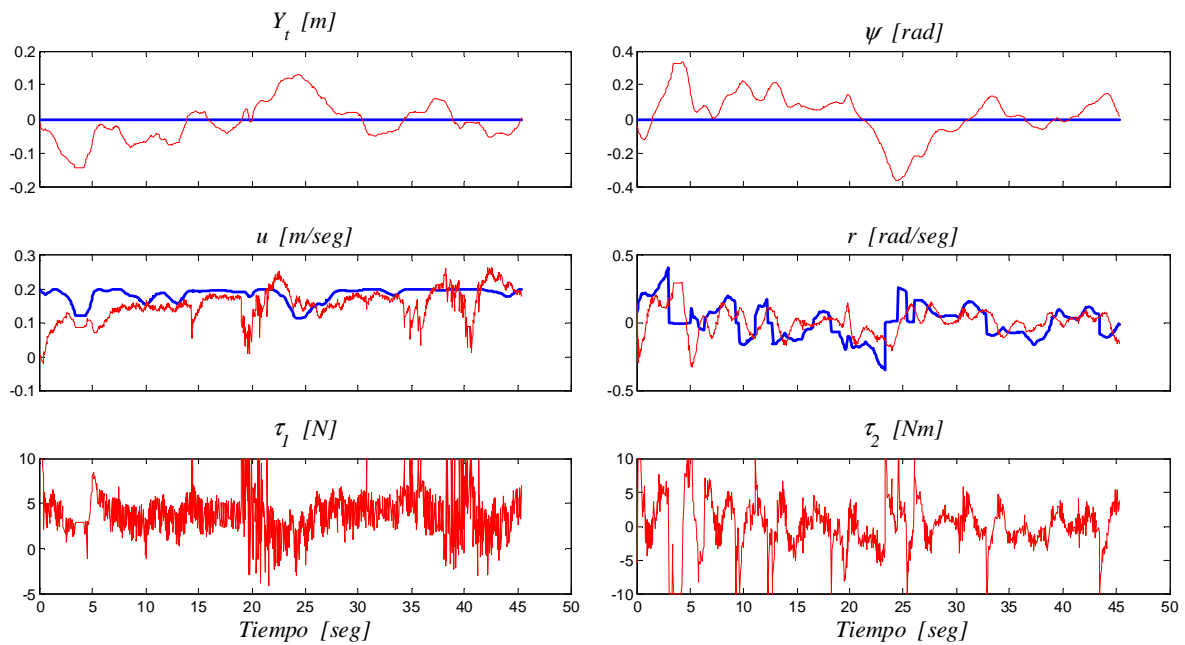


Figura 7.21: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 7. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

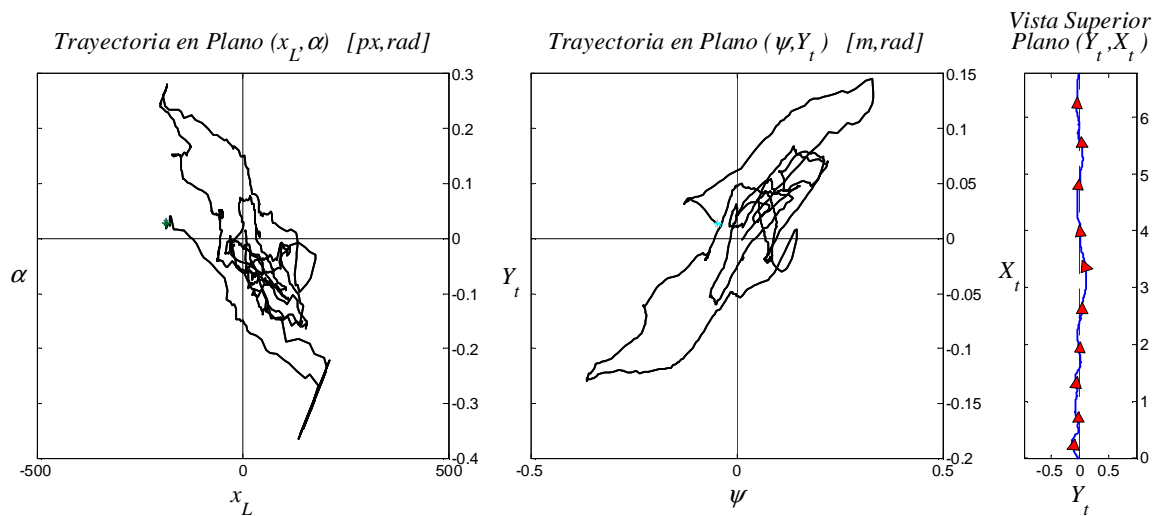


Figura 7.22: Representación de la trayectoria del experimento 7 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

Nuevamente, las secuencias de imágenes se seleccionaron para dar consistencia a las observaciones anteriores. En primer lugar, la columna correspondiente a $t=1$ seg de la

Fig. 7.23 ilustra la condición inicial, mientras que en $t=16,5 \text{ seg}$ aún no se había centrado correctamente la línea en la imagen. Luego, la primera perturbación llevó al sensor a operar cerca del límite de visión, como se observa en la tercer columna ($t=21 \text{ seg}$). Por último, el tramo final del recorrido se completó con la visualización adecuada de la línea verticalmente centrada en el fotograma, después de haber recuperado el objetivo de control tras la segunda perturbación externa.

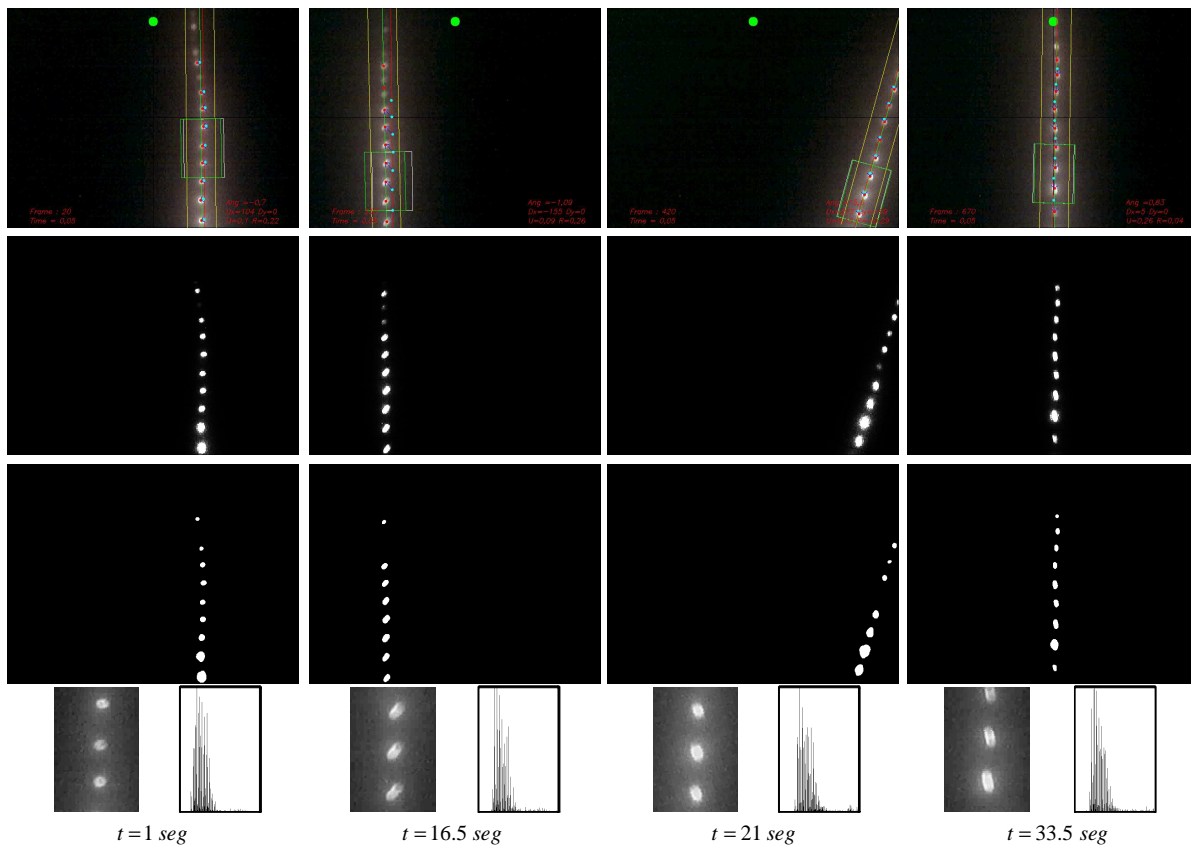


Figura 7.23: Secuencias de imágenes del experimento 7. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

7.4.5. Experimento 8: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de posición

A fin de obtener una comparación de desempeño de los controladores, en esta prueba se repitieron las condiciones de navegación del experimento 6, pero con el controlador CBI. Entonces, la tarea consistió en el seguimiento de una línea recta con la aplicación de un pulso de fuerza lateral externa a mitad del recorrido.

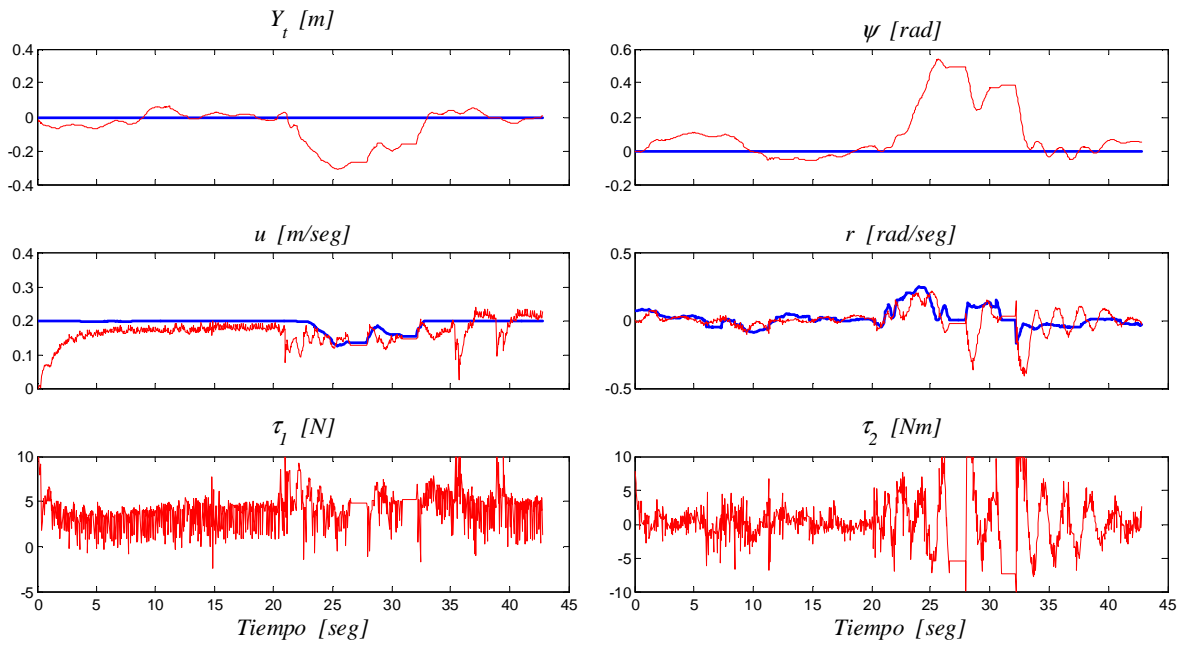


Figura 7.24: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 8. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

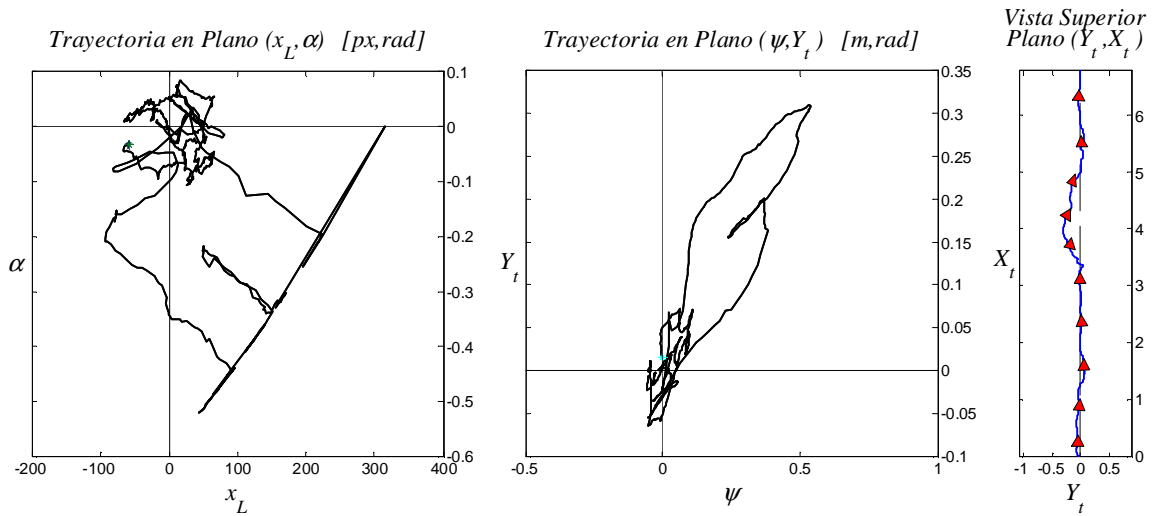


Figura 7.25: Representación de la trayectoria del experimento 8 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α). Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t). Derecha: plano (Y_t, X_t), vista superior.

Desde una condición inicial con poco error de posicionamiento, la navegación comenzó con correcciones suaves tanto en desplazamiento como orientación, aumentando gradual-

mente la velocidad de avance (ver Fig. 7.24). La perturbación de fuerza lateral se generó aproximadamente en $t=21\text{seg}$, con una duración de 2seg . Los gráficos de variables de estados indican que los sobrepicos luego de la perturbación se produjeron a los 26seg . Si bien estos sobrepicos indican que el vehículo se alejó y giró notablemente hacia la línea, el controlador pudo superar la situación a pesar de que el sensor operó al límite del rango de visión durante unos instantes (es decir, las estimaciones de las variables de estados mostraron tramos constantes). La última parte del recorrido se completó con errores de seguimiento en los rangos tolerables para la misión.

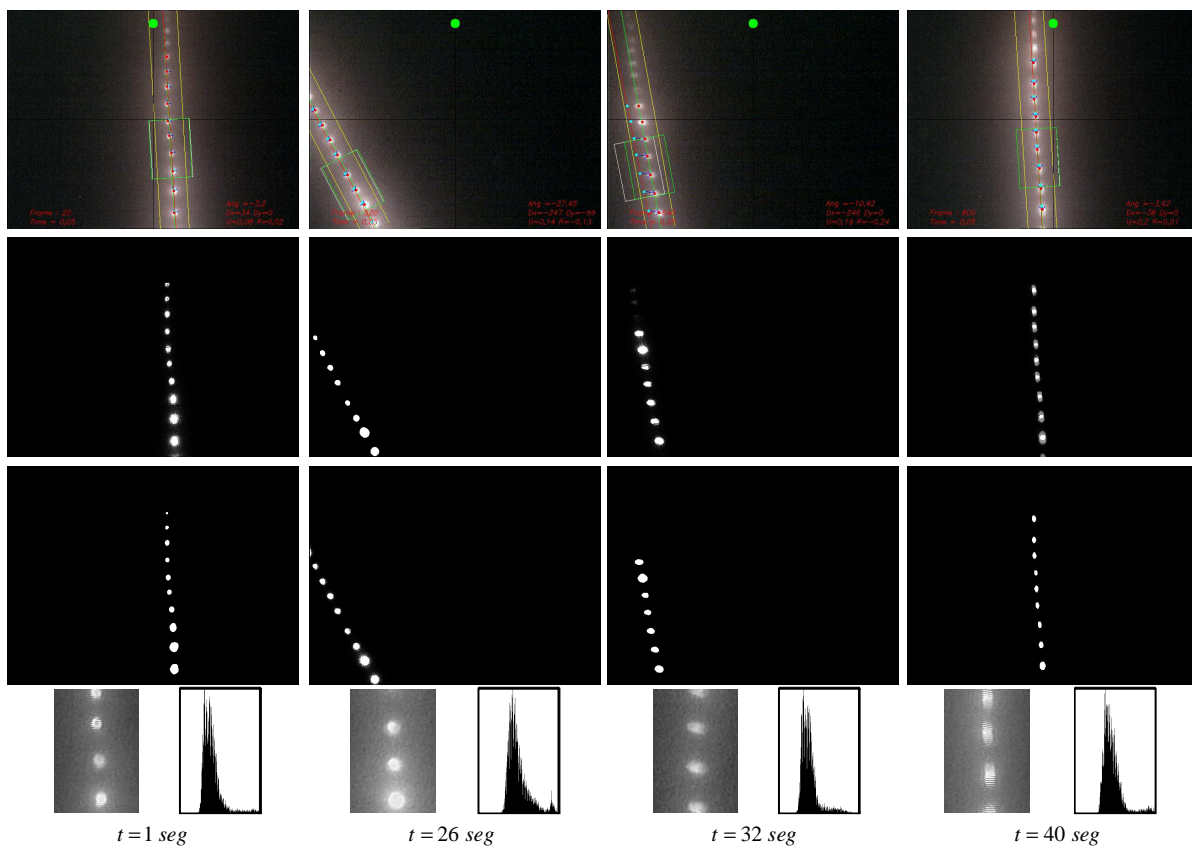


Figura 7.26: Secuencias de imágenes del experimento 8. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

En este caso, a partir de las trayectorias tanto en el plano (x_L, a) como en (ψ, Y_t) , se nota claramente que la perturbación afecta al control por un momento, pero la mayor parte del experimento tuvo errores de seguimiento reducidos ya que las mismas se concentraron cerca del origen (ver Fig. 7.25). La vista superior del AUV resume el recorrido completo

y el efecto de la perturbación.

Tomando como referencia las secuencias de imágenes de la Fig. 7.26, se puede completar la interpretación de los resultados del experimento. Al comenzar, la condición inicial fue favorable ya que la línea se pudo visualizar muy cerca de la posición deseada (primera columna, en $t=1 \text{ seg}$), en tanto que el efecto de la perturbación visto desde la cámara de a bordo causó un acercamiento del segmento de línea visible hacia el extremo inferior izquierdo del fotograma (segunda columna, en $t=26 \text{ seg}$). A pesar de ello, el controlador respondió adecuadamente para continuar con el seguimiento, dando importancia también a las restricciones para no abandonar el campo de visión. De esta manera, en $t=32 \text{ seg}$ pudo apreciarse un punto intermedio de la recuperación que luego se completó hacia el final de la prueba, como se muestra en la última columna ($t=40 \text{ seg}$).

7.4.6. Experimento 9: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de velocidad axial

Este experimento describe los resultados obtenidos en condiciones similares a las del experimento 7 modificando la elección del controlador. Partiendo de una condición inicial con errores de desplazamiento y orientación pequeños, los gráficos de la Fig. 7.27 muestran que el AUV comenzó la navegación aumentando su velocidad de avance suavemente y se produjo un leve apartamiento de la línea hasta realizar la corrección de giro.

La primera perturbación fue aplicada a los 17 seg , y a pesar de haber reducido de manera notable la velocidad de avance, el incremento en los errores de posicionamiento fue relativamente menor a los sobrepicos observados en el tramo inicial. Así, el sistema respondió con rapidez recuperando la velocidad nominal y la visualización correcta de la línea en unos pocos segundos.

Luego de alcanzar la velocidad de referencia nuevamente, una segunda perturbación de magnitud similar pero de mayor duración fue inducida en $t=32 \text{ seg}$, y se pudo observar una diferencia en el comportamiento del sistema. Más precisamente, los errores de posicionamiento no se incrementaron en exceso durante la misma, con lo cual en este caso el vehículo quedó prácticamente en las mismas condiciones iniciales. Tal como se debía esperar, la respuesta fue entonces muy similar a la producida durante el primer tramo.

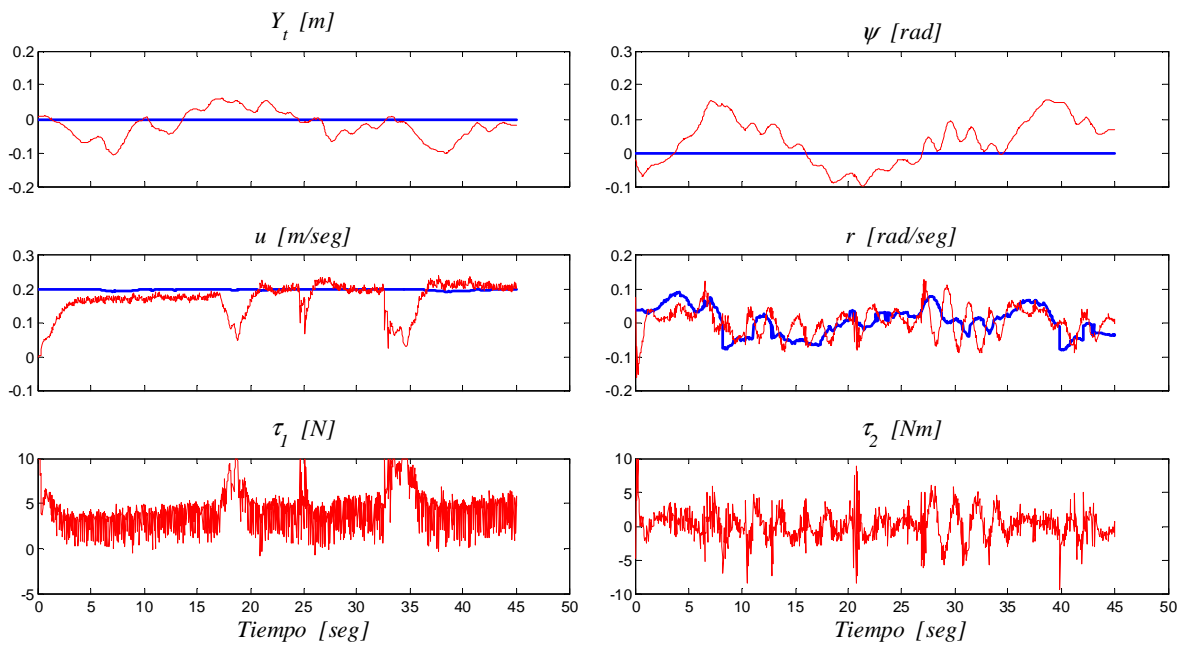


Figura 7.27: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 9. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

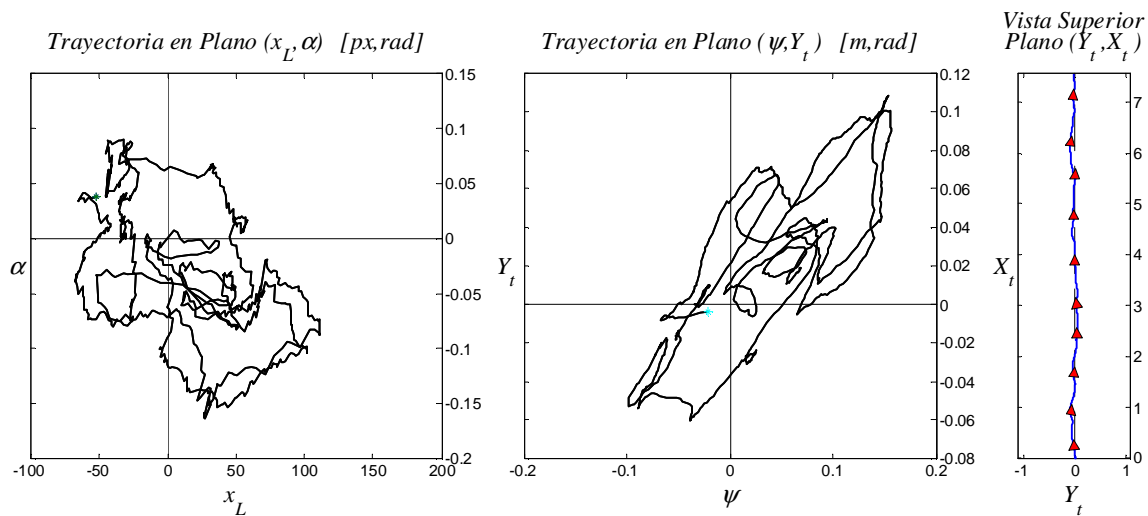


Figura 7.28: Representación de la trayectoria del experimento 9 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

La vista superior del AUV ilustra esta similitud de la performance del control entre el tramo comprendido en los primeros $1.5m$ y el intervalo de $5.5m$ a $7m$. Comparando con el

mismo experimento realizado con el controlador PID-híbrido (Fig. 7.22), las trayectorias en los planos de la Fig. 7.28 pueden inscribirse en una elipse cuyo eje mayor queda determinado por los instantes en los cuales se produjeron las perturbaciones.

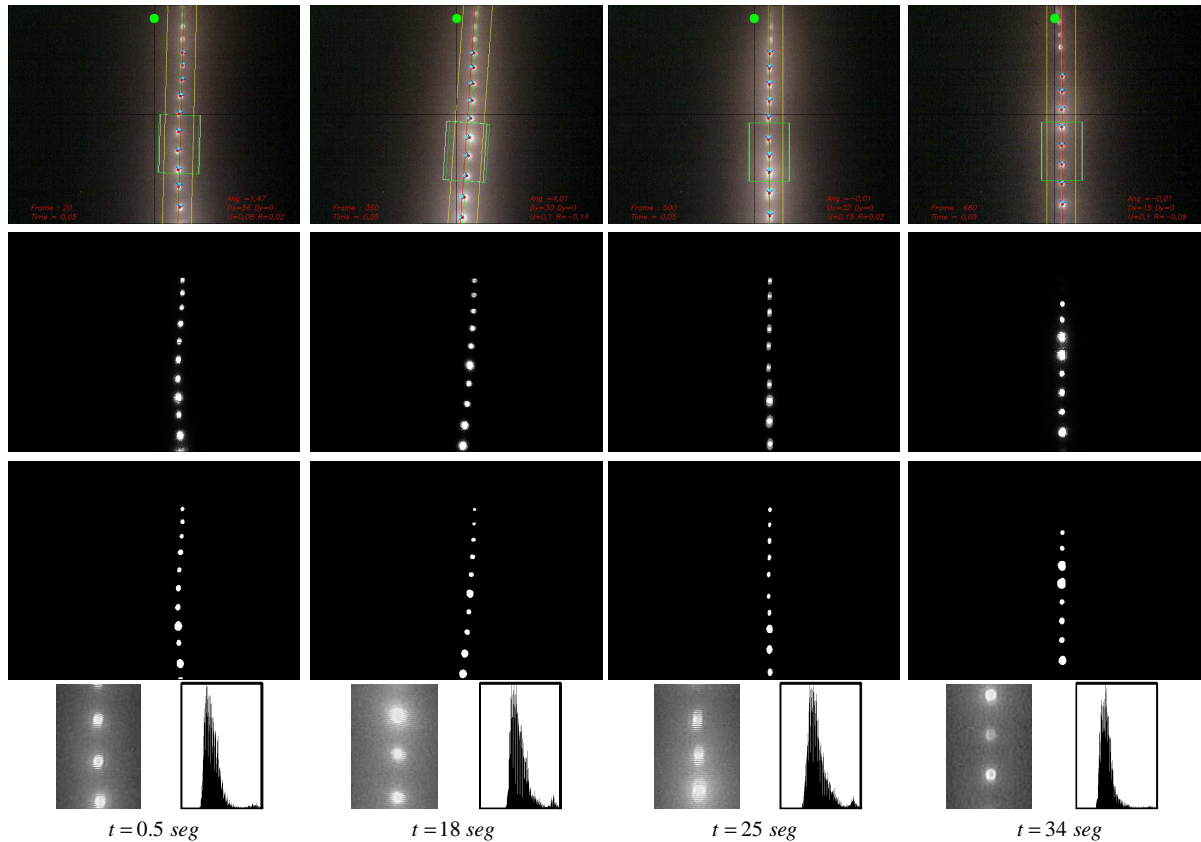


Figura 7.29: Secuencias de imágenes del experimento 9. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

Por último, la descripción de los resultados en este experimento se completa con la secuencia de imágenes del sensor en la Fig. 7.29. Las dos primeras columnas muestran las condiciones de visualización en el tramo inicial y durante la primera perturbación, en $t=0,5\text{seg}$ y $t=18\text{seg}$, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, la recuperación en este caso fue rápida y la línea se pudo visualizar nuevamente en forma vertical en la imagen en $t=25\text{seg}$, con un leve desplazamiento de su punto medio respecto al centro de la misma, lo que se corrige unos instantes después. Sobre la última columna, se puede verificar la observación sobre la similitud de la evolución tras las condiciones iniciales, con una línea visualizada en forma vertical y cerca del centro, al mismo tiempo que el

campo de velocidades representados con vectores de módulo pequeño se corresponde con la disminución de velocidad causada a través de la segunda perturbación.

7.4.7. Experimento 10: Controlador CBI, línea recta, turbidez del agua alta, iluminación baja, perturbaciones de torque

Finalmente se presenta un ejemplo de perturbación de torque durante el seguimiento de una línea recta empleando el controlador CBI. Debido a que este tipo de fuerza externa provoca un movimiento rápido en el marco de la visualización con la cámara de a bordo, la posibilidad de superar los límites del campo de visión es más elevada que la existente ante otros tipos de perturbaciones. Por este motivo, en la magnitud de los torques aplicados se intentó no provocar un giro excesivamente rápido.

La navegación comenzó con el vehículo detenido, con lo cual la aceleración hasta alcanzar la velocidad lineal de referencia determinó un intervalo en el cual el vehículo se alejó temporalmente de la línea, lo que luego fue corregido con rapidez en $t=9 \text{ seg}$ (ver Fig. 7.30). A continuación se permitió que el AUV avance durante unos segundos más, y se aplicó la perturbación de torque. Los gráficos del ángulo de orientación y de velocidad angular estimada permiten reconocer con facilidad el efecto de la misma, aproximadamente en $t=22 \text{ seg}$.

Ante este giro brusco del vehículo, el controlador cinemático generó una referencia de velocidad angular de signo opuesto para efectuar la compensación necesaria, que pudo ser realizada con éxito en un lapso de 10 seg . Habiendo superado esta prueba en el tiempo adecuado, fue posible aplicar una segunda perturbación de mayor intensidad. Sin embargo, el efecto producido fue un giro de similar magnitud al anterior pero más veloz, lo cual resultó excesivo para el sensor y no se logró una corrección satisfactoria antes de completar el recorrido. Los gráficos de trayectorias no brindan la claridad necesaria para la interpretación de la respuesta en este experimento (ver Fig. 7.31), mientras que la vista superior muestra principalmente que el error de desplazamiento lateral se mantuvo acotado y que el efecto de las perturbaciones no tuvo su mayor influencia sobre esta medida. El hecho de que la restauración del curso demore excesivamente luego de un disturbio de torque, se ve fundado por el hecho de que la velocidad lineal de referencia es ambiciosamente alta y alimenta el apartamiento de la línea. A la luz de los experimentos

8 y 10, se resalta comparativamente la circunstancia de que un disturbio de giro causa transitorios más prolongados que un disturbio lateral.

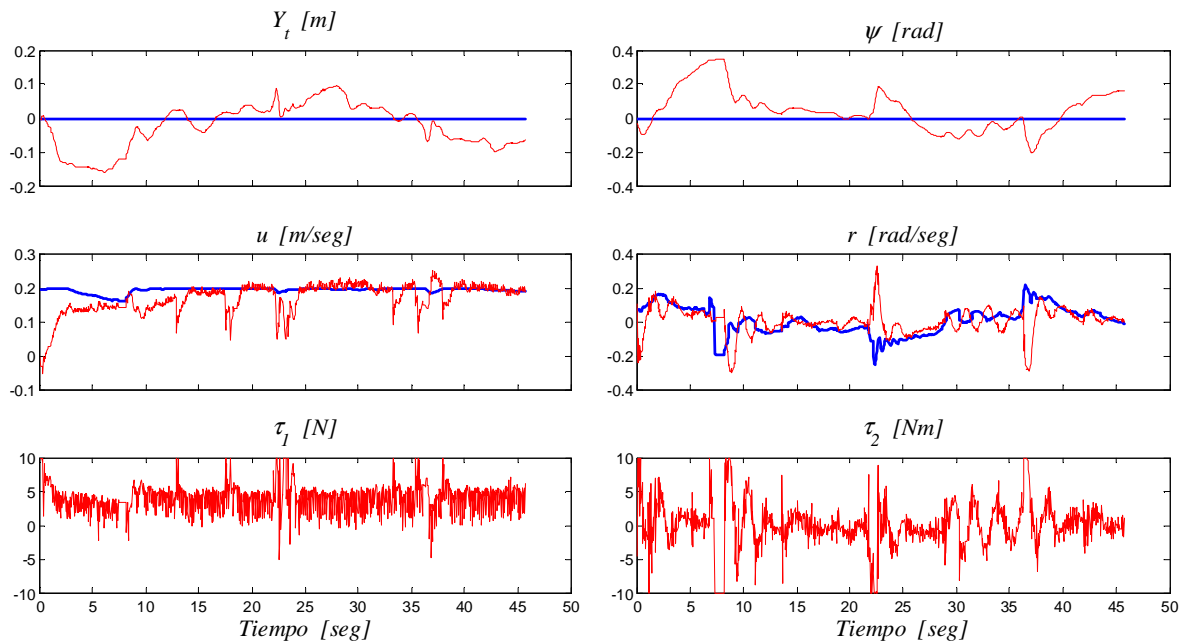


Figura 7.30: Gráficos de evolución temporal de los estados en el experimento 10. Arriba: desplazamiento lateral Y_t y orientación relativa ψ . Centro: velocidades de referencia (azul) y estimadas (rojo). Abajo: acciones de control de propulsión de avance y giro.

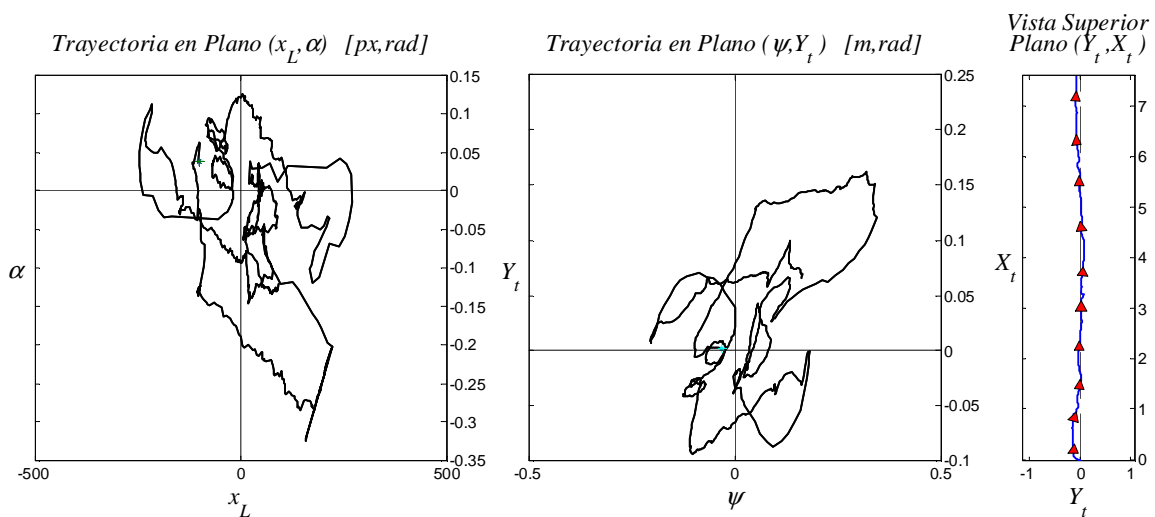


Figura 7.31: Representación de la trayectoria del experimento 10 en diferentes planos. Izquierda: plano de características de imagen (x_L, α) . Centro: plano de errores de seguimiento (ψ, Y_t) . Derecha: plano (Y_t, X_t) , vista superior.

En el inicio, la visualización de la línea desde la cámara se aprecia en la columna de $t=1 \text{ seg}$ en la Fig. 7.32. De acuerdo al análisis previo, se produjo un giro rápido ante la aparición de la perturbación, y esto se verifica observando las imágenes correspondientes a $t=21,5 \text{ seg}$. Allí la ROI seleccionada muestra una imagen muy borrosa a causa de dicho movimiento, aunque la misma conservó las características estadísticas adecuadas para dar confianza sobre las estimaciones efectuadas, a pesar de no haber detectado completamente la cantidad de marcas visibles del patrón.

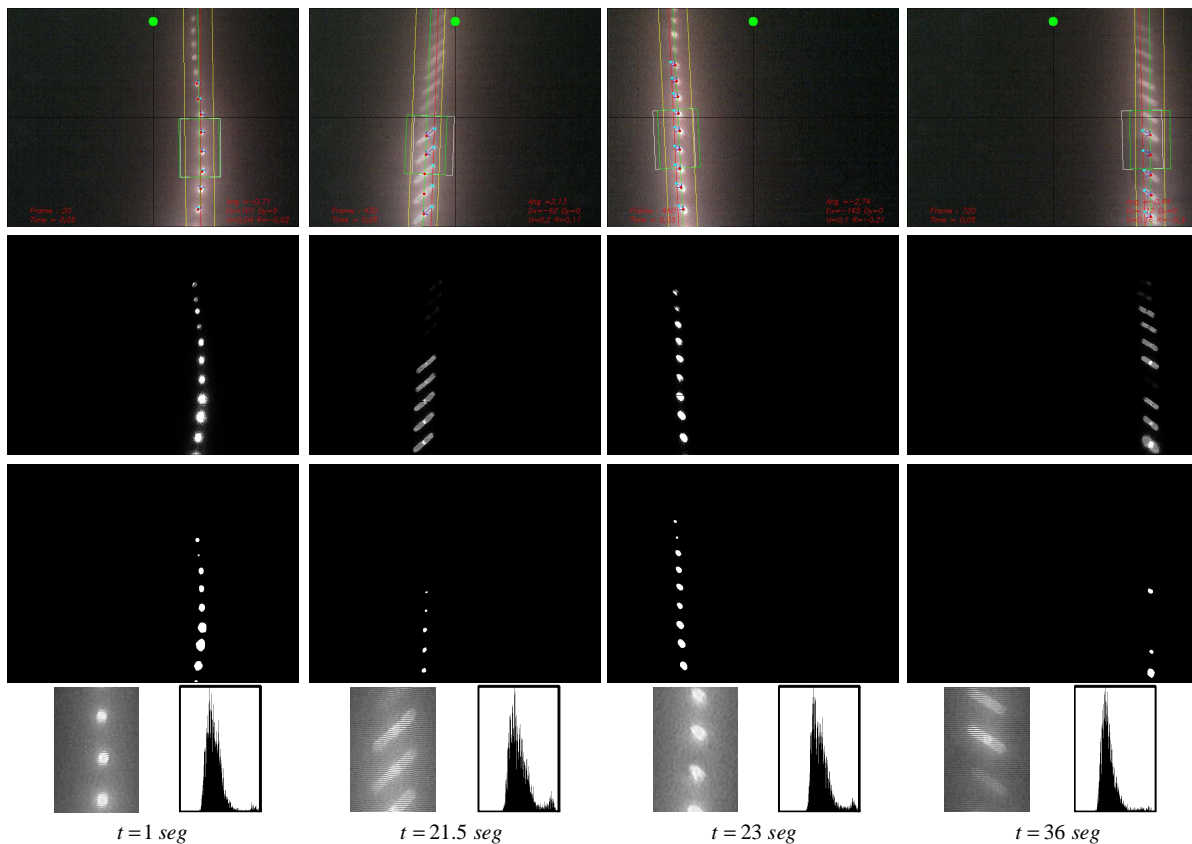


Figura 7.32: Secuencias de imágenes del experimento 10. Primera fila: imágenes de realidad aumentada. Segunda fila: imágenes con corrección de brillo y contraste. Tercera fila: imagen segmentada. Cuarta fila: ROI y su correspondiente histograma.

Luego de la respuesta del controlador ante la perturbación, la navegación continuó a velocidades apropiadas para obtener buenas condiciones de visibilidad, con la apariencia visual de las imágenes mostradas en la tercer columna ($t=23 \text{ seg}$). El campo de velocidades representado en la imagen de realidad aumentada se ve compuesto de vectores apuntando hacia abajo y a la derecha, indicando que las acciones de control en ese instante fueron

correspondientes a un movimiento combinado de avance y rotación que llevaría la línea al centro de la imagen.

Cuando se aplicó la segunda perturbación, las imágenes en $t=36$ *seg* muestran cómo la línea se desplazó velozmente hacia el lateral derecho de la zona visible. De esta manera, el sensor fue obligado a trabajar en los límites de su rango de operación, tanto por la velocidad del movimiento como por la ubicación de la línea cerca del borde. Más aún, la segmentación sólo brindó tres marcas para construir el campo de velocidades. Consecuentemente, las estimaciones obtenidas en el sensor se realizaron en condiciones desfavorables que afectaron a la precisión de las mismas, e incluso en algunos intervalos no contaron con el aval del algoritmo de supervisión. Por este motivo, se llegó al final del recorrido con errores de seguimiento fuera de los rangos tolerables.

7.5. Conclusiones del Capítulo

Debido a la oscuridad de fondo y a que el vehículo se encontraba detenido al comenzar el seguimiento, no se produjeron inconvenientes para llevar a cabo las estimaciones en el sensor. Este hecho se puede considerar como una característica común a todos los experimentos realizados, y en particular se debe destacar que fue comprobada la capacidad de operación del sensor si se cumple adecuadamente la hipótesis del desplazamiento acotado de centroides entre dos imágenes sucesivas. Con respecto a las condiciones de visibilidad, pudo observarse una buena respuesta del sensor en diferentes niveles de turbidez del agua, la cual mostró un incremento notable durante los días en que fueron realizadas las pruebas.

En todos los experimentos, se verificó que la sensibilidad de la respuesta controlada en el posicionamiento ante disturbios de torque, es más alta que en los disturbios laterales o cinemáticos. Esto se debe a que un cambio de torque afecta directamente al desalineamiento, no así un cambio lateral donde no se pierde el paralelismo a la línea.

En general se evidenció una buena performance alcanzada en los sistemas de control desarrollados para el seguimiento de línea, aún bajo perturbaciones de distintas procedencias e intensidad. Todos mostraron una habilidad para controlar la línea dentro del cuadro visual y forzar el vehículo a una alineación satisfactoria en tiempos relativamente cortos, sin perder la velocidad crucero impuesta al submarino. Puede afirmarse además a grandes rasgos, que el control basado en imagen evidencia una mejor performance que el control

PID-híbrido, sobre todo logra un mejor ajuste en la alineación en estado estacionario. Finalmente, a falta de un buen modelo de la dinámica del submarino, el control de dinámica inversa desarrollado en el Capítulo 5 y comparado en la simulaciones del Capítulo 6, no pudo ser evaluado exitosamente en esta serie experimental debido a la alta incertidumbre paramétrica y estructural del modelo. Por el contrario, los dos primeros sistemas de control no requieren de tal modelo dinámico. Son justamente estos dos controles los que reivindican la originalidad de esta tesis junto al sensor desarrollado.

Para cerrar el capítulo, la siguiente Tabla resume las condiciones particulares que caracterizaron cada experimento.

| Experimento N° | Controlador | Trayectoria | Perturbación | Turbidez del Agua | Horario |
|-------------------|-------------|-----------------------------|--------------|----------------------|---------|
| 1 | PID | Recta | No | Media | Tarde |
| 2 | CBI | Recta | No | Media | Tarde |
| 3 | CBI | Recta | No | Alta | Noche |
| 4 | CBI | Recta con imperfecciones | Curvatura | Media | Noche |
| 5 | CBI | Curva en 'U' | Curvatura | Baja | Noche |
| 6 | PID | Recta | Fuerza axial | Alta | Noche |
| 7 | PID | Recta | Fuerza axial | Alta | Noche |
| 8 | CBI | Recta | Fuerza axial | Alta | Noche |
| 9 | CBI | Recta | Fuerza axial | Alta | Noche |
| 10 | CBI | Recta | Torque | Alta | Noche |

Tabla 7.1: Detalle de condiciones de la serie de experimentos presentados.

Se adjunta a esta Tesis un link de donde se puede acceder a los los videos correspondientes a esta serie experimental.

Ver en: <https://www.dropbox.com/sh/84woaxb5bklkboo/qeW3SoEjwf>

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Conclusiones Generales

En esta Tesis se desarrolló un sistema combinado de Guía, Navegación y Control basado en un sensor de visión para un submarino no-tripulado dedicado al seguimiento de líneas sobre el lecho marino. A los fines de validar los diseños propuestos se construyó la infraestructura de prueba consistente en un pequeño vehículo no-tripulado del tipo AUV de dos grados de libertad con cámara montada en la proa. Adicionalmente, se planificó el montaje de experimentos en pileta con una línea sobre el fondo, y finalmente se desarrollaron programas especiales junto a un hardware dedicado para análisis a-posteriori, teleoperación, supervisión en tiempo real y control automático. Muchas simulaciones y numerosos experimentos fueron realizados, registrados y filmados para documentación de la Tesis.

A la luz de los resultados tanto teóricos como prácticos, se demuestra en la Tesis la habilidad del sensor de visión para proveer toda la información necesaria de posición y velocidad para realimentar a un sistema de control automático y a su vez generar trayectorias de referencia cinemática adecuadas para un seguimiento rápido.

El primer resultado se obtuvo en el diseño del sensor de visión para la estimación en tiempo real de la posición relativa y velocidad absoluta de un AUV con respecto a una línea con patrones uniformemente distribuidos a lo largo de ella. El sensor fue diseñado interactivamente con experimentos basados en teleoperación y análisis a posteriori sobre los videos. La primera hipótesis asumida fue la existencia de cierto nivel de contraste

mínimo entre el suelo y la línea, la cual se manifestó en la práctica satisfactoriamente aún en los casos de altas perturbaciones en la turbidez del agua y de ondas cáusticas debido al oleaje y a los rayos luminosos pasantes hacia el fondo. La segunda hipótesis asumida fue la medición del movimiento relativo a través de patrones uniformes sobre la línea la que fue diseñada *ad hoc* para cumplirla. Si bien esta última es una condición más bien atípica y más académica, sirvió para dar origen a un método de identificación sistemática de patrones y detección de un campo de velocidades de marcas estimadas.

Los resultados de estimación de posición relativa a la línea resultan de una sucesión de operaciones necesarias de procesamiento de la imagen en tiempo real. Estas transformaciones involucran filtrados especiales (adaptación automática de brillo y contraste, binarización y filtro de ruido) hasta operaciones morfológicas de reconocimiento de patrones para aislar las marcas y determinar sus baricentros. De este módulo se extraen la línea tangente y apartamiento de ésta respecto al centro de la imagen en cada instante, las cuales representan las variables de estado geométricas en un espacio de visión no-Euclideano. Adicionalmente se determina una zona de certidumbre dinámica en donde el tramo de la línea visualizado se encuentra circunscripto en todo instante.

Estos estados de la línea son determinados a partir de la imagen y aún cuando conllevan intrínsecamente los efectos de la distorsión de la cámara y de la perspectiva propia de la visión, pueden ser usados por el sistema de control directamente como errores de posición en la métrica de visión. No obstante, también puede emplearse el modelo inverso de la cámara y rescatarse las variables de estado en una métrica Euclideana. Los puntos de equilibrio en el espacio de estado de las variables geométricas de la línea (posición y orientación) coinciden con ambas métricas y también los espacios de estado tienden a concordar aproximadamente en un entorno suficientemente pequeño de estos.

Como segundo paso en el desarrollo del sensor de visión se diseñó el módulo de estimación cinemática y generación de alarma. Este módulo opera sobre la zona de confianza determinando desplazamiento de patrones entre frames consecutivos con el propósito de calcular un campo de velocidades para las marcas. Para este fin se desarrolló un método de segmentos alineados para superposición de centroides de marcas conduciendo a la asociación más óptima de pares en imágenes sucesivas. El mismo resultó más preciso que otras técnicas divulgadas que calculan distancias mínimas y generan potenciales ambigüedades

con asociaciones no-unívocas en ángulos de orientación pronunciados. El resultado es la estimación de velocidad lineal y rotación en la métrica de visión. Por medio de un algoritmo de supervisión se juzga la calidad de estas estimas y de acuerdo a esto se traspasa o no los valores cinemáticos al controlador ante alarmas.

La detección de desplazamientos de los patrones de la línea en imágenes sucesivas es necesaria para imponer control de velocidad aunque no para el seguimiento de línea. Como alternativa sería suficiente la medición o estimación de un estado interno del submarino (como la potencia de los propulsores) a fin de instaurar una velocidad de avance aunque pueda resultar indeterminada a causa de eventuales corrientes en el agua. Esto último no se implementó debido al objetivo de un único sensor basado en visión. Por el contrario, el seguimiento de línea siempre puede establecerse y de manera precisa teniendo en cuenta que los errores de apartamiento y orientación dependen sólo del contraste de línea-suelo que es más natural.

A partir de los resultados observados, se puede concluir que el desempeño del sensor es correcto mientras se opere en condiciones adecuadas. Particularmente, las situaciones anómalas tienen su origen en factores ajenos al mismo, como el mal desempeño del controlador, la turbidez del agua o las ondas cáusticas entre otras. Estos factores generan en sí perturbaciones sobre el principio de funcionamiento basado en la necesaria visualización de la línea para llevar a cabo estimaciones precisas. Ante la presencia de situaciones excepcionales que actúen en forma moderada, se considera que el sensor posee las funcionalidades apropiadas para permitir su inclusión en un lazo de control autónomo.

En la etapa subsiguiente se desarrollaron algoritmos de guía y control. En líneas generales, la Tesis enfoca fundamentalmente a una clase de controladores basados en visión. No obstante se estableció una comparación con otros tipos de controladores basados en modelo dinámico del submarino. A fin de constituir este modelo, se realizaron experimentos *ad hoc* en pileta de laboratorio excitando al sistema en sus modos principales y usando una estructura fenomenológica simple del modelo basado en fuerzas de inercia, flotabilidad y fricción.

En principio el control de visión se desarrolla sobre un plano de estados sectorizado, definiendo 4 zonas o configuraciones posibles del submarino y subdivisiones que marcan zonas críticas y zonas próximas al punto de equilibrio. El fundamento para definir res-

tricciones en las variables de estado yace en la necesidad de contrarrestar la inercia del vehículo cuando éste se acerca a zonas límites del campo de visión con velocidad considerable. Particularmente ante una perturbación, la estrategia de seguimiento consiste en un avance con un ángulo dado hasta los límites del campo de visión, lo cual permite tiempos menores en la reducción del error de desplazamiento lateral. Una vez corregido este último, se efectúa un giro puro para compensar el error de ángulo pasando eventualmente por subdivisiones del plano hasta alcanzar el punto de equilibrio. Se muestra además la estabilidad del mecanismo de control basado en esta estrategia. Este mecanismo puede implementarse en cualquiera de las métricas desarrolladas, sólo que la métrica pura de visión no adolece de imperfecciones del modelo de la cámara como es el caso de la métrica Euclideana.

Por otro lado, el sistema de guía desarrollado propone referencias cinemáticas cuya determinación también está sectorizada en el espacio de estados. La referencia cinemática axial depende de una velocidad nominal atenuada por el error de ángulo en el espacio de visión, de tal forma que el vehículo desarrolla plena velocidad crucero en la alineación y es cauto en los apartamientos respecto a la línea. Por otro lado, la referencia cinemática de giro depende de errores de ángulo y apartamiento, y su implementación imprime giros suaves hasta la alineación perfecta. Claramente, en las zonas críticas junto a los límites de visión, los errores son penalizados más intensamente, repeliendo el vehículo a zonas favorables.

Otra estructura del sistema de control alternativo consiste en una cascada de controladores cinemáticos y dinámicos. Entre los controladores diseñados, se encuentran los del tipo PID y de dinámica inversa los cuales requieren de un modelo dinámico. No obstante, se propone su utilización en un sistema de control donde el sensor principal es una cámara, y esto requiere de adaptaciones que aseguren que las acciones de control mantengan al vehículo en posiciones dentro del campo de visión, lo cual constituye un segundo objetivo de control similar al de visión pura. De esta manera, se describe el diseño de controladores híbridos capaces de operar con el sensor de visión.

El desempeño de los sistemas de visión y control es analizado mediante un amplio rango de simulaciones y pruebas experimentales de laboratorio y en piletta bajo diversas condiciones del medio. En la práctica puede observarse que la hipótesis de la existencia

de cierto nivel de contraste mínimo entre el suelo y la línea, se manifiesta medianamente bien a pesar de las altas perturbaciones de turbidez del agua y ondas cáusticas debido al oleaje y los rayos luminosos pasantes hacia el fondo.

Las conclusiones de la Tesis indican que el sensor basado en visión es apto para el objetivo de seguimiento práctico cuando la distancia del vehículo al fondo es relativamente baja (menos de 10 metros dependiendo de la visibilidad), y su inclusión en un sistema de control es posible mediante controladores de características de razonamiento lógico o difuso. Su justificación teórica está bien fundamentada en la Tesis.

En vista de los múltiples estudios experimentales realizados, puede concluirse que ante la alta incertidumbre de un modelo dinámico del submarino y de la cámara, el control de visión pura cumple el objetivo de seguimiento satisfactoriamente. También su reacción ante perturbaciones de fuerza de viento, luz y oleaje, es satisfactoria. En tanto las incertidumbres de modelo puedan acotarse apropiadamente incluyendo la interacción entre el vehículo y la masa de agua circundante, otros tipos de sistemas de control basados en modelo podrían acoplarse perfectamente al sistema de visión desarrollado.

8.2. Trabajos futuros

Esta Tesis abre una oportunidad para la continuación de este trabajo en dos temas afines a la Línea de Investigación, los cuales pueden ser abordados sin mayores modificaciones, empleando el mismo soporte con que cuenta el Grupo GCAIO del IADO-CCT-CONICET.

El primer tema de investigación se orienta al seguimiento de objetivos móviles con separación fija y movimiento en tándem o de mínima distancia, o alternativamente con intención de contacto. En ambos casos las predicciones de trayectoria futura del objetivo de sus cambios de velocidad son parte de una estrategia de guía y control. El principio sensorico básico del sistema de navegación sería la visión de cámara o un sonar de cono o ambos, los cuales podrían brindar no sólo las dimensiones principales y formas del objeto 3D sino también sus coordenadas y distancias de profundidad. Este tema es actual y más allá de sus implicaciones en temas de defensa militar, existen aplicaciones potenciales en pesquería (al menos como Hipótesis de Trabajo) para el seguimiento y monitoreo de cardúmenes o especímenes biológicos de gran tamaño.

El siguiente tema de investigación está referido a la generación de trayectorias de navegación por aprendizaje sobre un terreno desconocido sin conocimiento previo de su topología ni de sus características de contraste. La base de conocimiento del universo inicialmente vacía se va construyendo y expandiendo por pruebas sistemáticas de reconocimiento de patrones y memorizado, de tal manera que este universo de navegación o bitácora pueda expandirse constantemente. Aquí también, el sensor para el control de visión es únicamente una cámara orientada hacia el fondo. Dentro del mismo, es posible una navegación entre cualquier par de puntos conocidos con sorteo de eventuales obstáculos. También este tema de investigación es de interés actual y tiene repercusiones importantes dentro de la geología marina, prospección de suelo y subsuelo marítimo y ecología submarina de suelo entre otras.

La consecución de resultados en dichos temas de investigación básica bajo condiciones de experimentación representaría un valioso aporte para este campo de la Robótica Subacuática.

Bibliografía

- [1] Bayo, E. (1987). A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot. *In Journal of Robotic Systems*, Vol. 4, Issue 1, pp. 63–75.
- [2] Berger, C.E., Sarapura, J., Jordán, M.A. y Carelli, R. (2012). Control Servovisual de un Cuadrirotor en Seguimiento de Líneas. *En VII Jornadas Argentinas de Robótica, JAR'12*, Olavarría, Argentina.
- [3] Beucher, S. and Meyer, F. (1993). The morphological approach to segmentation: the watershed transformation. *In Mathematical Morphology in Image Processing*, pages 433–481.
- [4] Caimi, F. M., Kocak, D.M., Dagleish, F., and Watson, J. (2008). Underwater imaging and optics: Recent advances. *In OCEANS'08*, Quebec, pp. 1-9.
- [5] Dar, T.; Joskowicz, L. and Rivlin, E. (1999). Understanding mechanical motion: From images to behaviors. *In Artificial Intelligence 112*, 147–179.
- [6] Faugeras, O. and Maybank, S (1990). Motion from Point Matches: Multiplicity of Solutions. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 4, Issue 3, pp. 225-246.
- [7] Fossen, T.I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley&Sons, New York.
- [8] Garcia-Aracil, N.M., Azorin Poveda, J.M., Sabater Navarro, J.M., Perez Vidal, C. and Saltaren Pazmino, R. (2006). Visual Control of robots with changes of visibility in image features. *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 4, Issue 1, pp. 27-33.
- [9] Hartigan, J. A.; Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C* 28 (1): 100–108.
- [10] Hartley, R. I. and Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, ISBN: 0521540518.
- [11] Huster, A., Frew, E.W., Rock, and S.M. (2002). Relative position estimation for AUVs by fusing bearing and inertial rate sensor measurements. *In OCEANS'02*, Mississippi, USA, Vol. 3, pp. 1863-1870.
- [12] Inzartev A.V.(Ed.) (2009). *Underwater vehicles*, InTech, Vienna, Austria.

- [13] Johansen, G. and Bille, J. (1982). A threshold selection method using information measures. Proceedings of the 6th International Conference of Pattern Recognition, pp.140 -143.
- [14] Jordán, M.A., Berger, C.E., Domini, S. y Orsi, J. (2008) Comparación de desempeño en vehículos subacuáticos teleoperados mediante visión – Estudio de caso simulado. *In XXI Congreso Argentino de Control Automático*, Buenos Aires, Argentina.
- [15] Jordán, M.A., and Berger, C.E (2008). Vision-Based Teleoperation of Subaquatic Vehicles. *In 37 Argentine Symposium of Technology, JAIIO'08*, Santa Fe, Argentina.
- [16] Jordán, M.A., Berger, C.E., Domini, S. y Orsi, J. (2008). Performance Comparison in Vision-Based Teleoperation of Subaquatic Vehicles. A Simulated Case Study. *In V Jornadas Argentinas de Robótica, JAR08*, Bahía Blanca, Argentina.
- [17] Jordán, M. A. and Bustamante, J. L. (2008). Guidance of Underwater Vehicles with Cable-Tug Perturbations under Fixed and Adaptive Control Modus. *In IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 33, Issue 4, pp. 579-598.
- [18] Jordán, M.A., Berger, C.E., Bustamante, J.L. and Hansen, S. (2010a). Two Vision-based Algorithms for Image-Properties Extraction in the Path Tracking of *Underwater-Vehicle* Navigation. *In XXII Congreso Argentino de Control Automático*, Buenos Aires, Argentina.
- [19] Jordán, M.A., Berger, C.E., Bustamante, J.L. and Hansen, S. (2010b). Path Tracking in Underwater Vehicle Navigation - On-Line Evaluation of Guidance Path Errors via Vision Sensor. *49th IEEE Conf. on Decision and Control*. Atlanta, USA.
- [20] Jordán, M.A., Bustamante, J.L and Berger, C.E. (2010c) Modeling of Teleoperator Control Performance in Guidance of ROVs Under Strong Perturbations Employing Inboard and External Cameras. *In IEEE/OES South America International Symposium*, Buenos Aires, Argentina.
- [21] Jordán, M.A., Bustamante, J.L and Berger, C.E. (2010d). Adams-Bashforth Simple-data Models for Perturbed Underwater-Vehicle Dynamics. *In IEEE/OES South America International Symposium*, Buenos Aires, Argentina.
- [22] Jordán, M.A., Bustamante, J.L and Berger, C.E. (2010e). Evaluation of Human Control in Teleoperation of Underwater Vehicles – Comparative Study in Time and Frequency Domains. *In 39 Argentine Symposium of Technology, JAIIO'10*, Buenos Aires, Argentina.
- [23] Jordán, M.A., Berger, C.E. and Bustamante, J.L. (2011a). Design of a Robust Vision-Based Sensor of Position and Rate for the Guidance of Autonomous Underwater Vehicles. *In American Control Conference, ACC 2011*, San Francisco, California, USA.
- [24] Jordán, M.A., Berger, C.E. and Bustamante, J.L. (2011b). A Vision-based Sensor of Position and Rate for Path Tracking of Autonomous Underwater Vehicles in Environments

- with Regular Patterns. *In 5th International Scientific Conference on Physics and Control, PHSYCON 2011*, León, España.
- [25] Jordán, M. A., Bustamante, J.L. (Ed.) (2012). *Discrete Time Systems*, InTech, Rijeka, Croatia.
- [26] Jordán, M.A., Bustamante, J.L and Berger, C.E. (2012). Adaptive Control of Unmanned Underwater Vehicles with Time-Delayed Control Communications. *In XXIII^o Congreso Argentino de Control Automático*, Buenos Aires, Argentina.
- [27] Kapur, J.N., Sahoo, P.K. and Wong, A.K.C. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Volume 29, Issue 3, p.p. 273-285, ISSN 0734-189X.
- [28] Kittler, J. and Illingworth, J. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern Recognition*, vol. 19, pp.41 -47.
- [29] Kruppa, E. (1913). Zur ermittlung eines objektes aus zwei perspektiven mit innerer orientierung. *Sitzungsberichte der Mathematisch Naturwissenschaftlichen Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Vol. 122, pp. 1939-1948.
- [30] Mahmoud, M. S. (Ed.)(2012). *Advances in Discrete Time Systems*, InTech, Rijeka, Croatia.
- [31] Malik, J., Belongie, S., Leung, T. and Shi, T.J. (2001). Contour and Texture Analysis for Image Segmentation. *International Journal of Computer Vision*. June 2001, Volume 43, Issue 1, pp 7-27.
- [32] Narimani, M., Nazem, S. and Loueipour, M. (2009). Robotics vision-based system for an underwater pipeline and cable tracker. *In OCEANS'09*, Bremen, Germany, 1-6.
- [33] Nister, D. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. In *Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'03)*.
- [34] Prince, S. (2012). *Computer Vision: Models Learning and Inference*. Cambridge University Press.
- [35] Sattar, J. and Dudek, G. (2006). On the performance of color tracking algorithms for underwater robots under varying lighting and visibility. *In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, Orlando, USA, pp. 3550-3555.
- [36] Sattar, J., Dudek, G., Chiu, O., Rekleitis, I., Giguere, P., Mills, A., Plamondon, N., Prahacs, C., Girdhar, Y., Nahon, M. and Lobos, J.-P. (2008). Enabling autonomous capabilities in underwater robotics. *In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*, Nice, France, pp. 3628-3634.

- [37] Scaramuzza, D (2011). 1-Point-RANSAC Structure from Motion for Vehicle-Mounted Cameras by Exploiting Non-holonomic Constraints. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 95, Issue 1, pp 74-85.
- [38] Liu Shinang, Sun Jiancheng and Dang Jianwu (2008). A Linear Resection-Intersection Bundle Adjustment Method. *Information Technology Journal*, Vol. 7, Issue 1, pp. 220-223.
- [39] Song, D., Lee, H., Yi, J. and Levandowski, A. (2007). Vision-based motion planning for an autonomous motorcycle on ill-structured roads. *Autonomous Robots*, Vol. 23, Issue 3, pp. 197-212.
- [40] Spong, M.W. and Ortega, R. (1990). On adaptive inverse dynamics control of rigid robots. *In IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 35, pp. 92-95.
- [41] Stewenius, H., Engels, C., and Nister, D. (2006). Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 60, pp. 284–294.
- [42] Sun, Changming (2002). Fast optical flow using 3D shortest path techniques. *In Image and Vision Computing 20*, 981–991.
- [43] Sutton, M., Orteu, J. and Schreier, H. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer US. ISBN: 9780387787466.
- [44] The World AUV Market Report 2012-2016, Douglas-Westwood, 4th Edition.
- [45] Otsu, N. (1979). A threshold selection method from grey level histograms. *In IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. New York 1979, pp.62–66. ISSN 1083-4419
- [46] Van der Zwaan, S. and Santos-Victor, J. (2001). Real-time vision-based station keeping for underwater robots. *In OCEANS'01*, Honolulu, USA, Vol.2, pp. 1058-1065.
- [47] Wadoo, S. and Kachroo, P. (2010): *Autonomous Underwater Vehicles - Modeling, Control Design and Simulation*, CRC Press.
- [48] Wang, Y. and Hussein, I.I. (2007). Cooperative Vision-Based Multi-Vehicle Dynamic Coverage Control for Underwater Applications. *In IEEE Int. Conf. on Control Applications (CCA 2007)*, Singapore, pp. 82-87.