



Title: Control PID Basado en Odometría Visual Monocular a un Vehículo de Superficie Marino

Authors: MENDOZA-RUIZ, Francisco, REYES-DE COSS, José Cuauhtémoc, ALAZKI, Hussain y RULLÁN-LARA, Jose Luis

Editorial label ECORFAN: 607-8695
BCIERMMI Control Number: 2020-04
BCIERMMI Classification (2020): 211020-0004

Pages: 16
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Introducción

Los vehículos autónomos pueden realizar tareas que requieren la precisión para realizar un seguimiento de trayectorias indicadas, es por esto que es de gran importancia su estudio y desarrollo, no sólo para diversas tareas sino para diversos entornos como lo son el terrestre, aéreo y marítimo, por lo que estos últimos están siempre compitiendo en términos de las aplicaciones que pueden realizar.

- Los estudios e investigaciones realizados enfocados en los vehículos marinos no tripulados antes de la década de los 90 parecían limitarse a la operación remota de estos (Vaneck et al., 1996).
- Es después de la década de los 90 donde se encuentra un particular interés en ellos para realizar tareas de monitoreo y recolección de datos batimétrico (Manley y Marsh, 2000).
- Después de muchos años de desarrollo de los USV, también podemos encontrar investigaciones y experimentos sobre algoritmos para el seguimiento de trayectorias para este tipo de vehículos como se menciona en (Zizzari et al., 2009).
- Las aplicaciones para las que se han utilizado este tipo de vehículos son la caracterización visual y acústica del fondo marino en entornos costeros de aguas poco profundas mediante la adquisición combinada de ecogramas e imágenes de video (Zereik, Bibuli y Bruzzone, 2013), demostrando la efectividad de este tipo de plataformas robóticas.

Metodología

El objetivo es estudiar el comportamiento de un vehículo marino de superficie con un control basado en visión. Utilizamos un algoritmo DMVO (Odometría visual directa monocular) que se basa en la extracción de características de dos imágenes tomadas consecutivamente en dos instantes de tiempo continuos para estimar la posición de un vehículo marino, el cual fue modelado sin tomar en cuenta las perturbaciones externas para aplicar un control de tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) basado en visión con el fin de estudiar el comportamiento de este mediante simulaciones, haciendo uso de las herramientas computacionales necesarias para simular un escenario 3D y poder obtener la matriz que contiene la imagen tomada desde el marco de referencia inercial del vehículo.

Teniendo en cuenta que un escenario estático que contenga puntos de referencia es necesario para poder así aplicar el algoritmo de control basado en visión propuesto; el escenario virtual fue diseñado en el editor de mundos virtuales de MATLAB que nos permite agregar sensores, como lo son cámaras, y configurar sus parámetros para realizar el estudio, y simulaciones como el seguimiento de trayectorias.

Modelo dinámico del vehículo marino

Para aplicar control y estudiar el comportamiento de este, es necesario un modelo matemático de la dinámica del vehículo marino con ciertas características, en este caso un vehículo marino tipo Catamarán, cuyo comportamiento ha sido estudiado en (Velueta, 2019) tomando en cuenta no sólo incertidumbres en el modelo sino perturbaciones externas, aplicando SMC (Sliding Mode Control, por sus siglas en inglés) para rechazar las perturbaciones. Definiendo los siguientes vectores de estado mediante las dos ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}\eta &= [\eta_1 \ \eta_2]^T = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \\ v &= [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T\end{aligned}$$

Donde η es el vector de la posición y orientación del vehículo y v es el vector de velocidades lineal y angular.

el modelo completo que incluye la cinemática y la cinética se encuentra definido mediante las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\eta} = J(\eta_2)v$$

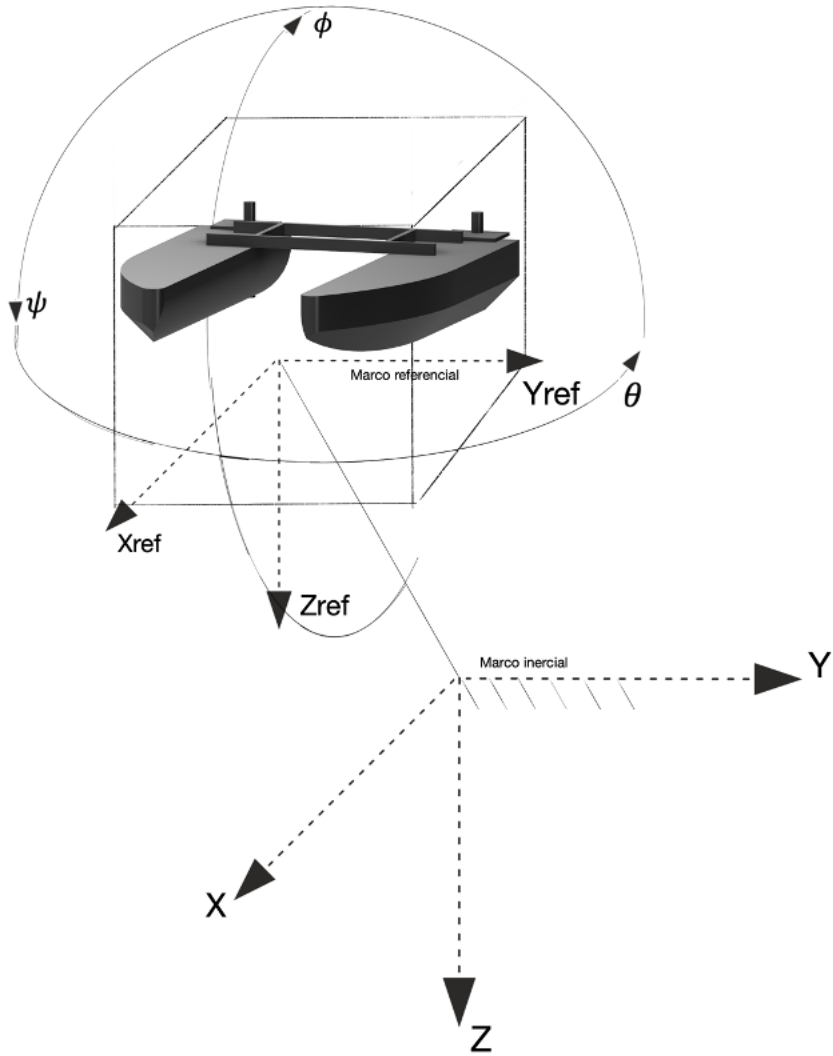
$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_E + \tau$$

Donde $\boldsymbol{\tau}$ es el vector de fuerzas externas y momentos que actúan sobre el cuerpo rígido, $\boldsymbol{\tau}_E$ son las fuerzas y momentos de las perturbaciones externas que para nuestro estudio $\tau_E = 0$, y $J(\eta_2)$ es una matriz diagonal compuesta por dos matrices de rotación $J1(\eta_2)$ y $J2(\eta_2)$, definidas como:

$$J_1(n_2) := \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi c_\theta \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\phi + s_\theta s_\phi s_\psi & c_\psi s_\phi + s_\theta s_\psi c_\phi \\ s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}$$

$$J_2(n_2) := \begin{bmatrix} 1 & s_\phi t_\theta & c_\phi t_\theta \\ 0 & c_\phi & s_\phi \\ 0 & \frac{s_\phi}{c_\theta} & \frac{c_\phi}{c_\theta} \end{bmatrix}$$

Donde $s_\gamma = \sin(\gamma)$, $c_\gamma = \cos(\gamma)$ y $t_\gamma = \tan(\gamma)$.



Otros parámetros del modelo completo son $M = M_{RB} + M_A$ y $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$, donde M_{RB} y C_{RB} son las matrices de inercia y fuerza centrípeta, y M_A y $C_A(v)$, son las matrices de masa añadida debido a la inercia del líquido que rodea el cuerpo rígido. $D(v)$ es la matriz de arrastre hidrodinámico que incluye términos cuadráticos y lineales dentro de ella.

Se puede notar en la matriz $J_1(n_2)$ que existe una singularidad en $\theta = \pm \pi/2$, que para los barcos no es un problema ya que el dominio de trabajo del ángulo Pitch es mucho menor que $\pm \pi/2$.

En la figura 1 se pueden apreciar el marco de referencia inercial y el marco referencial, así como el modelo del vehículo marino diseñado para realizar pruebas en tiempo real.

Figura 1 Marcos inerciales y referenciales.
Fuente: Elaboración propia

Algoritmo de control PID basado en visión

Para nuestro estudio utilizamos un control PID basado en visión, cuyo sistema está basado en la posición como señal de retroalimentación para la ley de control, cuya ventaja principal es que todo se encuentra en el espacio cartesiano. En la figura 2 podemos encontrar un diagrama representativo del sistema de control que utilizamos en este trabajo.

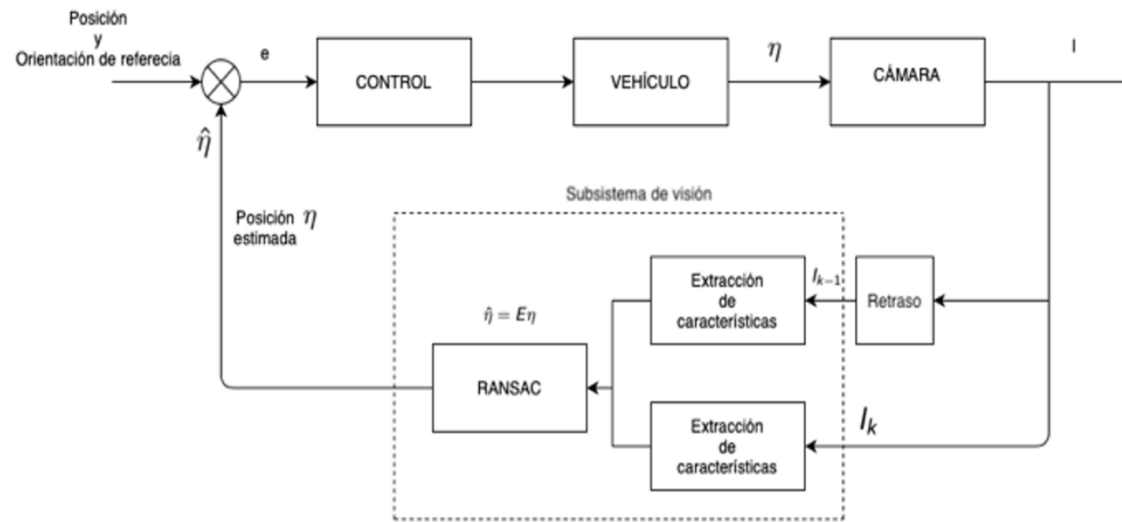
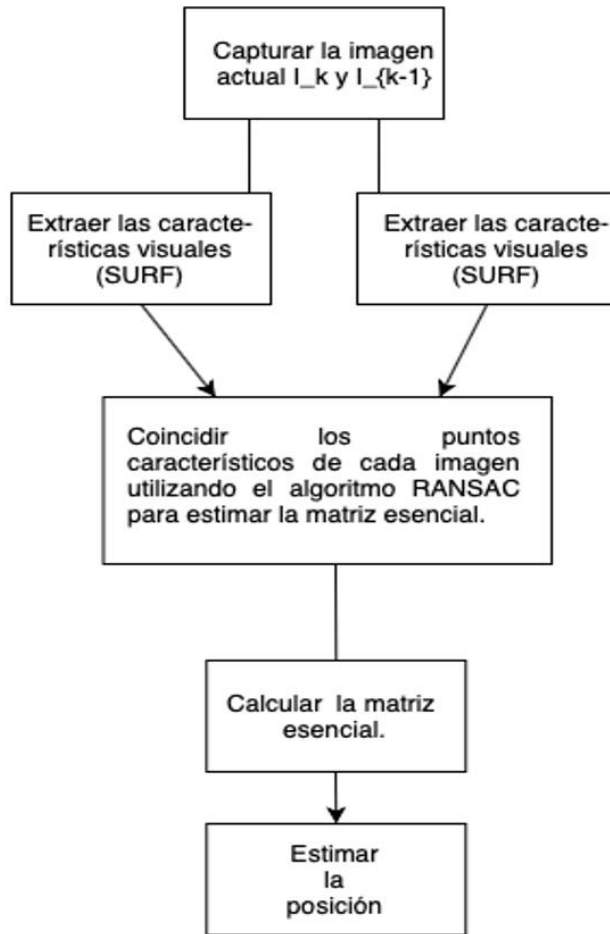


Figura 2 Esquema del sistema de control basado en visión.
Fuente: Elaboración propia.

Odometría visual monocular 2D-2D



El algoritmo para la estimación sigue el siguiente esquema encontrado en la figura 3, que se encarga de tomar una imagen en el tiempo t y $t - 1$, para así extraer características visuales mediante la técnica SURF (Spedded Up Robus Features), para utilizar el algoritmo RANSAC basado en los puntos extraidos y poder calcular la matriz esencial que nos permite estimar la posición actual del vehículo.

la tarea principal del algoritmo es estimar las transformaciones relativas entre las imágenes I_k y I_{k-1} , y aplicar estas a la posición inicial y así obtener la trayectoria de la cámara. Este mapeo entre el mundo 3D y el 2D se encuentra dado por la ecuación de proyección perspectiva:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = KX = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo de odometría visual monocular.

Fuente: Elaboración propia

Entonces, para calcular la correspondencia dada en transformaciones geométricas entre dos imágenes I_k y I_{k-1} de una cámara calibrada, es necesario calcular la llamada Matriz Escencial E, denotada por la siguiente ecuación:

$$E_k \cong \hat{t}_k R_k$$

Donde $t_k = [t_x \ t_y \ t_z]^t$ y:

$$\hat{t}_k = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$$

Donde el vector t_k representa las traslaciones en las tres dimensiones (t_x, t_y, t_z) , y R_k es una matriz ortogonal que contiene la orientación de la cámara en el instante k.

Resultados

Para realizar las simulaciones necesarias es necesario utilizar una herramienta de MATLAB llamada Editor de Mundos Virtuales, y así poder obtener una salida de nuestro sistema en términos de una matriz, que es nuestra imagen que utilizamos para estimar la posición mediante el algoritmo de odometría visual directa. En la figura 4 podemos visualizar dicho mundo virtual 3D diseñado, y que nos permite incluir sensores, como lo son cámaras, arreglo de cámara estéreo, sensores de distancia, sensores LIDAR, entre otros.

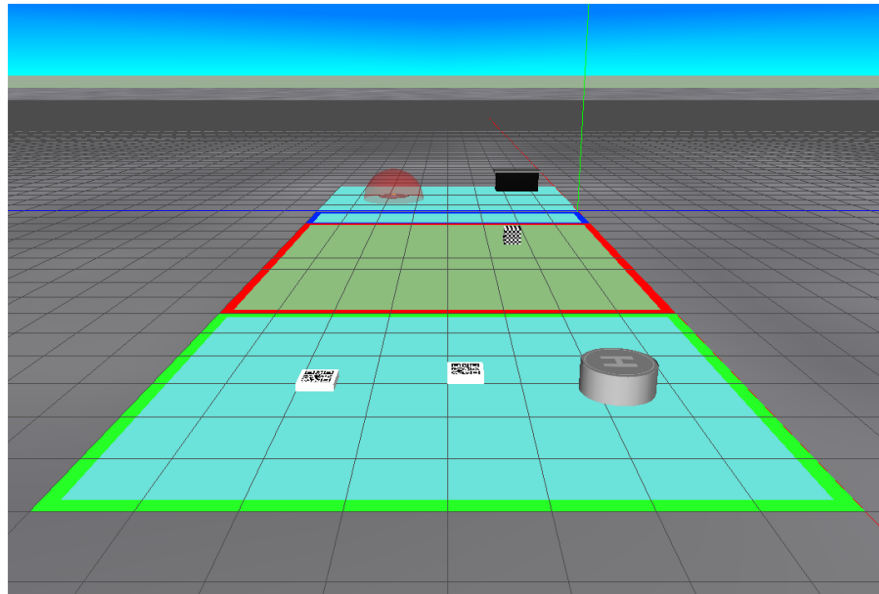
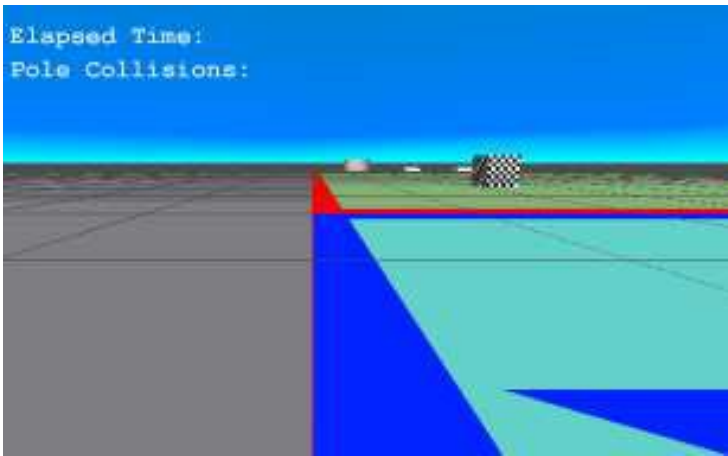
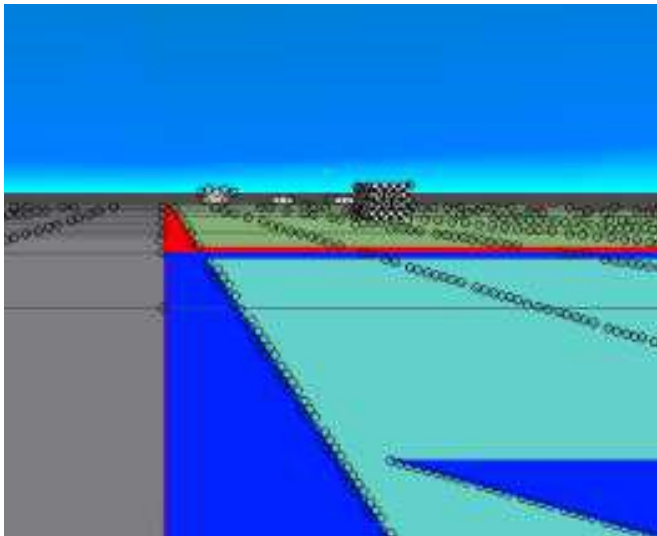


Figura 4 Diseño del mundo virtual creado en MATLAB.
Fuente: Elaboración propia.



En la figura 5 podemos ver la salida de nuestro sistema, que es una imagen tomada desde la perspectiva del vehículo

Figura 5 Salida de los sensores virtuales del sistema. Fuente: Elaboración propia.



la figura 6 después de extraer las características y agregar los marcadores en estos puntos, para así correlacionar los dos puntos y poder estimar la matriz esencial y aplicar un algoritmo de descomposición, actualizando la posición estimada y usándola como salida de retroalimentación para el control PID.

Figura 6 Salida de los sensores virtuales aplicando el extractor de características. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de constante	Valor
Proporcional	4.243
Integral	0.824
Derivativa	2.439

Tabla 1 Parámetros del controlador PID obtenidos por ajuste.

Fuente: Elaboración propia.

la tabla 1 contiene los parámetros del control PID, que se obtuvieron mediante prueba y error hasta alcanzar la respuesta deseada.

la matriz de arrastre hidrodinámico $D(v)$, que depende de la geometría del cuerpo rígido, que contiene una parte lineal y otra no lineal. La parte lineal determinada mediante SolidWorks.

$$D(v) = \begin{bmatrix} -0.5262 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.169 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0408 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0069 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0544 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0913 & 0 \end{bmatrix}$$

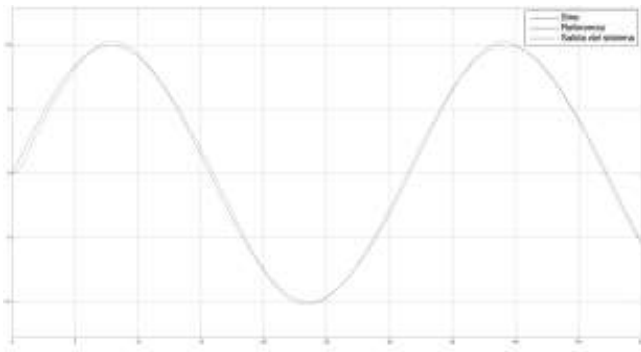


Figura 7 Referencia y salida del sistema.
Aplicando control PID basado en visión
Fuente: Elaboración propia.

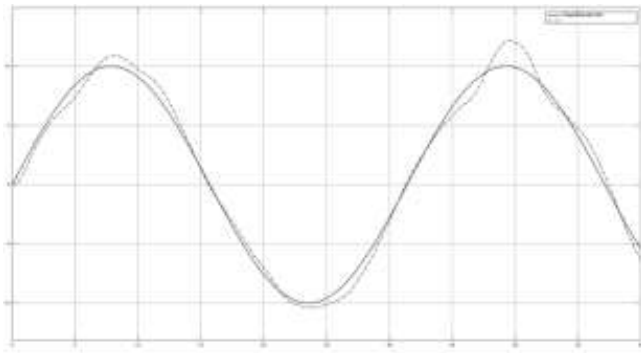


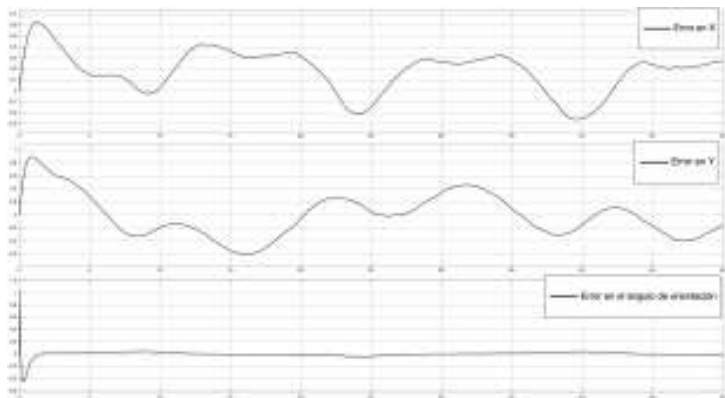
Figura 8 Referencia y salida del sistema.
Aplicando control PD convencional.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 podemos observar la salida del sistema y la referencia aplicando el control PID basado en visión, comportándose de una manera adecuada conforme al seguimiento de una trayectoria sinusoidal, definida mediante el siguiente vector de estados:

$$\eta_d = \left[t \quad 10\sin(0.2t) \quad \arctan\left(\frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d}\right) \right]^T$$

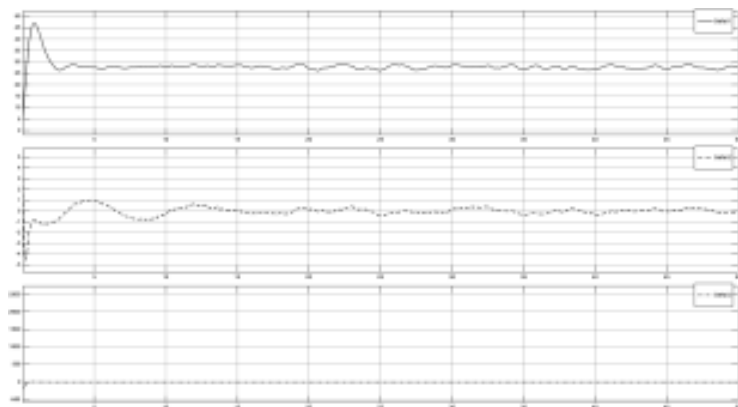
La figura 7 muestra la trayectoria deseada y la salida de nuestro sistema, en términos de la variable espacial “x” y “y”.

En la figura 8 se encuentra el error en cada variable de control, como o son la posición y un ángulo de orientación, estos con un valor menor que 1 para la posición, así como el error del ángulo de orientación el cual converge a cero.



En la figura 9 podemos observar cómo se comporta la señal de control para cada variable en el tiempo.

Figura 9 Error con respecto a la referencia dada.
Fuente: Elaboración propia.



En la figura 10 podemos observar cómo se ven las salidas del control PID.

Figura 10 Salidas del control PID.
Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se utilizó el modelo de un vehículo marino de superficie sin tomar en cuenta las perturbaciones externas con el fin de estudiar el desempeño al aplicar un control tipo PID basado en visión, llevando el modelo matemático a Simulink de MATLAB con el fin de obtener resultados mediante simulaciones, por lo que también se implementó el algoritmo de visión, y se observó un seguimiento de la trayectoria deseada lo que abre la posibilidad de incluir otro tipo de control con el fin de comparar su desempeño, así como implementar un mejor tipo de estimación basada en visión para mejorar los resultados, ya que el algoritmo MVO utilizado presenta una variación con respecto a la posición real del vehículo. Esto abre la posibilidad de poder implementar este tipo de control en tiempo real sobre un vehículo marino y estudiar su desempeño, sin embargo es necesario estudiar más tipos de control y visión para escoger el que tenga mejores resultados incluyendo perturbaciones para que su desempeño en tiempo real no se vea afectado.

Referencias

Bertram, V. (2008). Unmanned surface vehicles-a survey. Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark, 1, 1-14.

Manley, J. E., Marsh, A., Cornforth, W., & Wiseman, C. (2000, September). Evolution of the autonomous surface craft AutoCat. In OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158) (Vol. 1, pp. 403-408). IEEE.

Ferreira, H., Martins, R., Marques, E., Pinto, J., Martins, A., Almeida, J., ... & Silva, E. P. (2007, June). Swordfish: an autonomous surface vehicle for network centric operations. In Oceans 2007-Europe (pp.1-6). Ieee.

Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., Spirandelli, E., Veruggio, G., Stortini, A. M., & Capodaglio, G. (2005). Sampling sea surfaces with SESAMO: an autonomous craft for the study of sea-air interactions. IEEE robotics & automation magazine, 12(3), 95-105.

Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Caiti, A., & Di Lecce, N. (2010). A sliding mode based guidance system for vehicle following operations. IFAC Proceedings Volumes, 43(20), 342-347.

Bibuli, M., Caccia, M., & Lapierre, L. (2007). Path-following algorithms and experiments for an autonomous surface vehicle. IFAC Proceedings Volumes, 40(17), 81-86.

Zizzari, A. A., Indiveri, G., Bibuli, M., Bruzzone, G., & Caccia, M. (2009). Path following guidance control with bounded control effort: Application to the charlie unmanned surface vehicle. IFAC Proceedings Volumes, 42(18), 109-114.

Zereik, E., Bibuli, M., Bruzzone, G., & Caccia, M. (2013). Jacobian task priority-based approach for path following of unmanned surface vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 114-119.

Zereik, E., Sorbara, A., Bibuli, M., Bruzzone, G., & Caccia, M. (2015). Priority Task Approach for USVs' Path Following Missions with Obstacle Avoidance and Speed Regulation. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16), 25-30.

A. C. Sanderson and L. E. Weiss. Image based visual servo control using relational graph error signal. In *Proc. of the Int. Conf. on Cybernetics and Society*, pages 1074–1077, Cambridge, MA, October 1980.

S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12(5):651–670, October 1996.

Velueta, M. J., Rullan, J. L., Ruz-Hernandez, J. A., & Alazki, H. (2019). A Strategy of Robust Control for the Dynamics of an Unmanned Surface Vehicle under Marine Waves and Currents. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.

Fossen, T. I. *Nonlinear modelling and control of underwater vehicles*. Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og elektroteknikk, 1991.

Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press.

Nistér, D. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 26(6), 756-770.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)