

MPC with Conditional Penalty Cost applied to Remotely Operated Vehicle

A. Molero, J. Cappelletto, and G. Fernández-López

Resumen—Se describe el modelado cinemático y el modelado dinámico del robot submarino PoseiBoT, considerando los efectos físicos, hidrodinámicos y restaurativos. El amortiguamiento (*lift* y *drag*) fue despreciado debido a que su contribución es muy baja. Se utilizó la estrategia de Control Predictivo con Penalidades Condicionales en la Función de Costo basada en el Modelo de Espacio de Estado Linealizado para gobernar la posición y orientación del PoseiBoT. El desempeño del Control Predictivo se compara respecto a un Controlador Proporcional midiendo el esfuerzo de control, el error de seguimiento y el valor pico de los propulsores.

Index Terms—Controlador Predictivo, Controlador Proporcional, MSE, Esfuerzo de Control, Trayectorias Deseadas.

I. INTRODUCCIÓN

LA Mecatrónica consiste en la integración y el desarrollo de sistemas de adquisición de datos, con su respectivo procesamiento y emisión de una respuesta por medio de actuadores, siguiendo una referencia a través de una estrategia de control, considerando los efectos físicos propios del sistema a estudiar, para generar los movimientos o acciones sobre el sistema en el que se va a actuar. Ejemplos de sistemas mecatrónicos son los robots, las máquinas controladas digitalmente, los vehículos operados remotamente, los vehículos guiados autónomamente, etc. En la figura 1 se muestran las diferentes áreas de estudio y su interacción en la Mecatrónica.

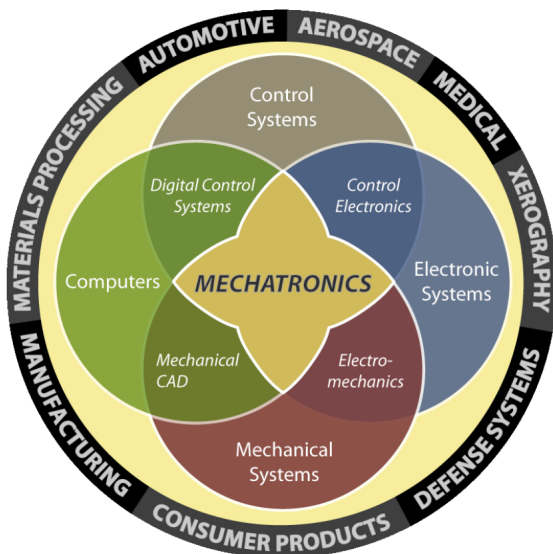


Figura 1. La Mecatrónica y sus áreas de interacción
Fuente: <http://multimechatronics.com/>

En la Universidad Simón Bolívar existe un grupo de Mecatrónica donde uno de sus proyectos de investigación consiste en diseñar y probar distintos esquemas de navegación y control de un robot submarino llamado PoseiBoT. El PoseiBoT fue el segundo prototipo de submarino, que presenta mucho más robustez, un sistema de adquisición de datos y una mayor autonomía que su antecesor (ERSUB).

En [1] y [2] se discuten los subsistemas que componen el funcionamiento del submarino: dinámica del submarino, control, navegación, sensores y potencia. También se puede incluir un subsistema de manipuladores dentro del submarino. Las estrategias de control utilizadas hasta ese momento son: deslizante, no-lineal, adaptativo, neuronal y difuso.

En la Universidad Simón Bolívar se trabajó en el diseño y construcción de un sistema de instrumentación y control para el PoseiBoT (submarino tipo ROV) [3]. En los trabajos realizados en el PoseiBoT se consideraron los siguientes aspectos: estructura mecánica (armazón, flotabilidad, navegación), sensores (profundidad, dirección, inclinación, temperatura, presencia de agua y presión interna), actuadores (torpedos), potencia (baterías), comunicaciones y control básico (PID).

El problema de la obtención del modelo dinámico de un robot es uno de los temas más complejos en la robótica, lo que ha llevado a ser obviado en numerosas ocasiones [4], [5], [6]. Sin embargo, el modelo dinámico es imprescindible para conseguir los siguientes fines:

1. Simulación del movimiento del robot
2. Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot
3. Dimensionamiento de los actuadores
4. Diseño y evaluación del control dinámico del robot.

El último ítem es evidentemente de gran importancia, ya que la precisión y la velocidad de los movimientos del robot depende de la calidad del control dinámico. En el presente trabajo se realiza el Modelado Cinemático y Dinámico del PoseiBoT, considerando los efectos físicos (inercia y coriolis), hidrodinámicos (masa añadida y amortiguamiento) y restaurativos (gravedad y flotación). El tensor de inercia y el Centro de Gravedad del PoseiBoT se determinó por medio de un software CAD en 3D, siendo necesaria la caracterización de cada uno de los elementos que componen el robot. Para calcular los términos de masa añadida se aproximó el PoseiBoT a un elipsoide achatado. El amortiguamiento (*lift* y

drag) fue despreciado debido a que su contribución es muy baja en bajas velocidades [8], [9]. Dado que los modelos (cinemático y dinámico) son inherentemente no lineales se realizó un proceso de linealización en variables de estado. Se utilizó la estrategia de Control Predictivo con Penalidades Condicionales [7] en la Función de Costo basada en el Modelo de Espacio de Estado Linealizado para gobernar la posición y orientación del PoseiBoT. El desempeño del Control Predictivo se compara respecto a un Controlador Proporcional midiendo el esfuerzo de control, el error de seguimiento y el valor pico de los propulsores. Los resultados serán mostrados por simulaciones y por implementación de la estrategia de control en el PoseiBoT.

El algoritmo de control predictivo que se va a implementar es novedoso, una estrategia diseñada especialmente para sistemas con dinámicas rápidas. Esta sería la primera prueba de ese algoritmo en simulación completa y su validación hecha de forma experimental. Finalmente se podrá fijar un precedente sobre la estrategia de control implantada, evaluando el desempeño de otras estrategias de control en un futuro sobre el PoseiBoT.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe el modelado cinemático y dinámico para un ROV. La sección III presenta el control predictivo utilizado. La sección IV se muestra la simulación del comportamiento del submarino utilizando diferentes trayectorias en x , z y $pitch$. En la sección V se valida el modelo y el correcto funcionamiento de la estrategia de control (predictivo). Finalmente, la sección VI se concluye sobre el trabajo realizado.

II. MODELADO CINEMÁTICO Y DINÁMICO

La importancia del Modelado Cinemático y del Modelado Dinámico es determinar una expresión matemática que suministre información acerca de los movimientos X , Y y Z (fuerzas) y rotaciones sobre los ejes x (K), eje y (M) y eje z (N) (momentos). En [8], [9] se describe la notación mas usada en Vehículos Marinos (SNAME¹).

Para realizar el Modelado Cinemático y el Modelado Dinámico se utiliza un modelo matemático de 6 Grados de Libertad (*Degrees Of Freedom* - DOF) que son necesarios para determinar la posición y orientación del cuerpo rígido (Robot Submarino). Las primeras tres coordenadas y sus derivadas temporales son usadas para definir la posición y los movimientos traslacionales a lo largo de los ejes x , y y z mientras que las 3 últimas coordenadas y sus derivadas temporales son usadas para describir la orientación y los movimientos rotacionales. Para vehículos marinos los 6 movimientos diferentes son convenientemente definidas como: *Surge*, *Sway*, *Heave*, *Roll*, *Pitch* y *Yaw* [8], [9].

¹Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME): Es la Sociedad de Arquitectos e Ingenieros Navales, que proporciona un foro para el avance de la profesión ingenieril aplicada al ámbito marino.

II-A. Cinemática

Cuando se analiza el movimiento de vehículos submarinos en 6 DOF es conveniente definir dos sistemas de coordenadas como se muestra en la figura 2. El Sistema de Coordenadas Móvil $x_b y_b z_b$ es fijado al vehículo y es llamado Sistema de Referencia Adherido al Cuerpo (*Body-Fixed*). El origen b del sistema de referencia adherido al cuerpo es usualmente escogido para que coincida con el Centro de Gravedad (CG) del vehículo (cuando el CG esta en el principal plano de simetría o puede ser en otro punto conveniente si este no es el caso).

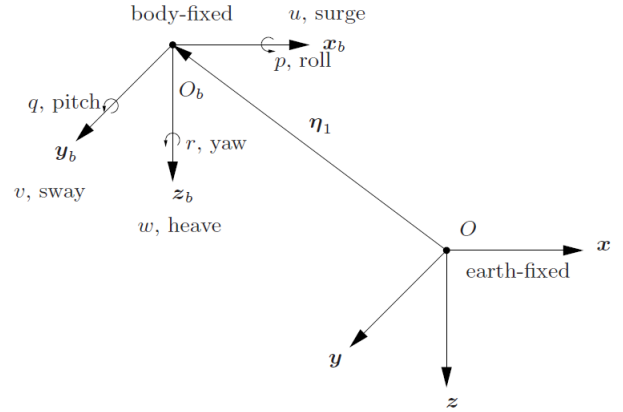


Figura 2. Sistema de Referencia Adherido al Cuerpo (body-fixed) y Sistema de Referencia Fijado a la Tierra (earth-fixed)

Fuente: ANTONELLI G., et. al..

Para vehículos marinos, los ejes del cuerpo x_b , y_b y z_b deben coincidir con los ejes principales de inercia, definidos usualmente como:

- x_b : eje longitudinal
- y_b : eje transversal
- z_b : eje normal (con dirección desde el tope hasta el fondo)

El sistema de referencia fijado a la tierra (*Earth-Fixed*) se considera inercial. Basado en esta notación SNAME, el movimiento general de un vehículo marino de 6 DOF pueden ser descrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= [x, y, z]^T, \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \\ \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \\ \nu_1 &= [u, v, w]^T, \nu_2 = [p, q, r]^T \\ \nu &= [\nu_1^T, \nu_2^T]^T \\ \tau_1 &= [X, Y, Z]^T, \tau_2 = [K, M, N]^T \\ \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T\end{aligned}$$

Donde η es el vector posición (η_1) y orientación (η_2) con coordenadas en el sistema de referencia inercial fijado en la tierra, ν es el vector velocidad lineal (ν_1) y angular (ν_2) en el sistema de coordenadas adherido al cuerpo y τ es el vector de fuerzas (τ_1) y momentos (τ_2) que actúan sobre el

submarino en el sistema de referencia adherido al cuerpo.

La transformación de velocidad entre los sistemas de referencia se expresa en dos partes:

- Transformación de velocidad lineal ($J_1(\eta_2)$)

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\phi + c_\psi c_\phi s_\theta \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\phi + s_\psi s_\theta s_\phi & -c_\psi s_\phi + s_\theta s_\psi c_\phi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde c es la función coseno y s es la función seno. Utilizando la expresión $J_1(\eta_2)$ se tiene

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) \nu_1 \quad (2)$$

Donde $J_1(\eta_2)$ (expresada en ángulos de Euler: *Pitch*, *Roll*, y *Yaw*) es la matriz de transformación entre el vector de velocidad lineal ν_1 y el vector de tasa de cambio de posición $\dot{\eta}_1$.

- Transformación de velocidad angular

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s_\phi t_\theta & c_\phi s_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi / c_\theta & c_\phi / c_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde t es la función tangente. Utilizando la expresión anterior se tiene que

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) \nu_2 \quad (4)$$

Donde $J_2(\eta_2)$ es la matriz de transformación entre el vector de velocidad angular ν_2 y el vector de tasa de cambio de Euler $\dot{\eta}_2$.

Agrupando las expresiones de $J_1(\eta_2)$ y $J_2(\eta_2)$ en $J(\eta)$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Resultando finalmente

$$\dot{\eta} = J(\eta) \nu \quad (6)$$

donde $O_{3 \times 3}$ es una matriz nula de dimensión 3×3 . Con la expresión 6 se define la cinemática de un submarino

II-B. Dinámica

La ecuación dinámica (directa) no lineal que rige el comportamiento de un robot viene dado por la siguiente expresión:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (7)$$

donde

- $M \triangleq$ es la matriz de inercia del robot (incluyendo el efecto de masa añadida en el caso de Robots Submarinos)
- $C(\nu) \triangleq$ es la matriz de coriolis y términos centrífugos (incluyendo el efecto de masa añadida en el caso de Robots Submarinos)
- $D(\nu) \triangleq$ es la matriz de amortiguamiento (Damping)
- $g(\eta) \triangleq$ es el vector de fuerzas y momentos restaurativos: gravitacional (y flotación, en el caso de Robots Submarinos)

En [8], [9] se describe con mayor detalle las características físicas (referentes al cuerpo rígido y a la hidrodinámica) de cada uno de los términos de la ecuación 7.

II-B1. Efectos Físicos:

- Inercia: Es una propiedad de los cuerpos de resistir al cambio del movimiento o reposo, es decir, es la resistencia al efecto de una fuerza que se ejerce sobre ellos. La inercia es uno de los principios fundamentales que se usan para describir el movimiento de la materia [10].

Para un cuerpo rígido que es libre de moverse en tres dimensiones existen infinitos ejes posibles de rotación. En el caso de rotación alrededor de ejes arbitrarios, se necesita caracterizar la distribución de masa de un cuerpo rígido. Por ende, se hace necesario introducir el término tensor de inercia, formulándose como la generalización escalar del momento de inercia² de un objeto [11]. En efecto, el tensor suele ser definido de la siguiente manera:

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para un cuerpo rígido cuyo centro del sistema de referencia adherido al cuerpo coincida con el CG, la matriz de inercia se define según [8] de la siguiente manera:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde m es la masa del cuerpo.

- Coriolis: Coriolis es una fuerza inercial que actúa perpendicular a la dirección de movimiento del cuerpo. Esto es causado por la rotación de la tierra y de la inercia de la masa que experimenta este efecto (en este caso, el robot submarino). En efecto, las leyes de Newton fueron descritas inicialmente en un sistema de referencia inercial. Cuando estas leyes se transforman para que sean válidas en un sistema de referencia que rote, tanto las fuerzas centrípetas como centrífugas aparecen [10].

La aparición de este efecto permite la aplicación de las leyes Newtonianas a un sistema de rotación. Dicho de otra manera, la fuerza de coriolis es una fuerza de corrección que no existe en un sistema inercial no acelerado [11].

Para un cuerpo rígido cuyo centro del sistema de referencia adherido al cuerpo coincida con el CG, la matriz de Coriolis se define según [8] de la siguiente manera:

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -m\nu \\ 0 & 0 & 0 & m\nu \\ 0 & m\nu & -m\nu & 0 \\ -m\nu & 0 & m\nu & I_{yz}q + I_{xz}p - I_zr \\ m\nu & -m\nu & 0 & -I_{yz}r - I_{xy}p + I_yq \end{bmatrix}$$

²Muestra la distribución de masa de un cuerpo (o de un sistema de partículas) en rotación, respecto a un eje de giro.

$$\begin{bmatrix} mw & -mv \\ 0 & mu \\ -mu & 0 \\ -I_{yz}q - I_{xz}p + I_zr & I_{yz}r + I_{xy}p - I_yq \\ 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_xp \\ I_{xz}r + I_{xy}q - I_xp & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

II-B2. Efectos Hidrodinamicos:

- Masa Añadida: Cuando un cuerpo rígido se esta moviendo en un fluido, se considera una inercia adicional del fluido que rodea el cuerpo (que es acelerado por el movimiento del cuerpo). Este efecto es llamado Masa Añadida [9].

El fluido que rodea el cuerpo es acelerado con el cuerpo en sí, por ende, una fuerza es necesaria para lograr esta aceleración; el fluido ejerce una fuerza de reacción que es igual en magnitud y opuesta en dirección. Esta fuerza de reacción es la contribución de la masa añadida. La masa añadida es función de la geometría de la superficie del cuerpo [9].

Se puede definir la expresión de energía cinética del fluido (T_A) de forma cuadrática en función de la velocidad del cuerpo, es decir:

$$T_A = \frac{1}{2} \nu^T M_A \nu \quad (11)$$

donde M_A es la matriz de inercia de masa añadida, definida según [8], [9] como

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

con $Z_{\ddot{u}} = \frac{\partial Z_A}{\partial \ddot{u}}$, Z_A es la fuerza hidrodinámica de masa añadida a lo largo del eje z debido a la aceleración \ddot{u} en la dirección x y así sucesivamente con el resto de los 35 elementos de la matriz M_A .

Si el robot tiene 3 planos de simetría (es decir, el robot es simétrico) y se mueve a baja velocidad implica que la contribución de los elementos fuera de la diagonal pueden ser despreciados [8], resultando:

$$M_A = -diag \begin{pmatrix} X_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{pmatrix} \quad (13)$$

De la misma forma, si el cuerpo es simétrico y la velocidad es baja entonces la matriz de coriolis de masa añadida se define según [8] de la siguiente manera:

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\ddot{w}}w & Y_{\ddot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\ddot{w}}w & 0 & X_{\ddot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\ddot{v}}v & -X_{\ddot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\ddot{w}}w & Y_{\ddot{v}}v & 0 & -N_{\ddot{r}}r & M_{\ddot{q}}q \\ Z_{\ddot{w}}w & 0 & -X_{\ddot{u}}u & N_{\ddot{r}}r & 0 & -K_{\ddot{p}}p \\ -Y_{\ddot{v}}v & X_{\ddot{u}}u & 0 & -M_{\ddot{q}}q & K_{\ddot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

II-C. Dinámica Inversa

?

III. CONTROL PREDICTIVO

?

IV. SIMULACIONES

V. VALIDACIÓN

VI. CONCLUSIONES

?

REFERENCIAS

- [1] YUH J. Development in Underwater Robotics. [en línea]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [Nagoya, Japón]: 1995.
- [2] YUH J. Underwater Robotics. [en línea]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation [California, Estados Unidos]: 2000.
- [3] CABRERA M.E and RUELLA C. Diseño y construcción de un sistema de instrumentación y control para la plataforma robótica PoseiBoT. Tutor: Gerardo Fernández. Universidad Simón Bolívar, Departamento de Electrónica y Circuitos, 2008.
- [4] SPONG M., HUTCHINSON S. and VIDYASAGAR M. (2005). *Robot Modeling and Control*. [en línea] John Wiley & Sons. ed. 1, [Illinois, Estados Unidos]: 2006
- [5] SICILIANO B., SCIAVICCO L., VILLANI L. and ORIOLO G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. [en línea] Springer. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. ed. 1, [Napoles y Roma, Italia]: 2009
- [6] BARRIENTOS A. and PEÑIN L. *Fundamentos de Robótica*. Mc-Graw Hill ed. 1, [Madrid, España]: 1996.
- [7] DUNIA R. and FERNÁNDEZ G. *MPC with Conditional Penalty Cost*. IECON 2009 "The 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society" [Porto, Portugal]: 2009.
- [8] FOSSEN T. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd. [Noruega]: 1994.
- [9] ANTONELLI G. *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems* [en línea]. Springer Tracts in Advanced Robotics ed. 2, [Berlín, Alemania]: 2006.
- [10] RESNICK R., HALLIDAY D. y KRANE K. *Physics*. John Wiley & Sons Ltd. [Estados Unidos]: 2001.
- [11] CRAIG J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison Wesley Longman ed. 2. [Estados Unidos]: 1989.