

ACONDICIONAMIENTO DE LA REFERENCIA UTILIZANDO MODOS DESLIZANTES EN APLICACIONES DE SEGUIMIENTO DE CAMINO EN VEHÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS

Juan Luis Rosendo¹, Benoit Clement², Fabricio Garelli³

¹⁻³CONICET y Universidad Nacional de La Plata, C.C.91 (1900), La Plata

²Lab-STICC, UMR CNRS 6585, ENSTA Bretagne, 29806 Cedex 9, Francia

e-mail: ¹juanluisrosendo@gmail.com, ²benoit.clement@ensta-bretagne.fr, ³fabricio@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de caminos es una tarea normal en robótica. El objetivo es seguir un camino con exactitud y tan rápido como sea posible, entre estos objetivos surge el problema de la sintonización del controlador.

En este tipo de aplicaciones las restricciones del sistema y la cota de error admisible definen la máxima velocidad de seguimiento. Considerando controles tradicionales, se encuentran tres enfoques:

1. Utilizar una velocidad de seguimiento fija, que nunca sature los actuadores del robot.
2. Utilizar una velocidad de seguimiento fija pero mayor a la anterior, esto implica que al menos en algún punto del camino seguido los actuadores se saturaran.
3. Utilizar una velocidad de seguimiento variable, calculada para cada punto del camino seguido tomando en consideración las restricciones del sistema.

Es claro que las primeras dos opciones no son óptimas: (1) no aprovecha al máximo los actuadores, y (2) resulta en un error innecesario en el seguimiento del camino. Por otro lado, la opción (3) se ve mas prometedora pero en general el calculo en tiempo real para cada punto no es simple.

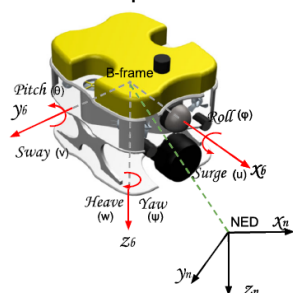


Figura 1: Marco-B y marco-NED de vehículos submarinos

| | |
|--------------------------|--|
| Tamaño | 0.525m (L) 0.406m (W) 0.395m (H) |
| Peso en el aire | 15.56kg (sin pesos ni flotadores) |
| Direcciones controlables | Surge, Sway, Heave and Yaw |
| Propulsión | 2 propelas verticales y 4 horizontales |
| Velocidad | 2 knots (Surge) y 1 knot (Sway, Heave) |
| Profundidad máxima | 50m |
| Autonomía | 2-4 horas |

Tabla 1: Características del Ciscrea

En este trabajo, una manera simple de implementar el enfoque (3) es experimentalmente probada. Esta idea fue presentada en [1] para un modelo cinemático, y aquí es expandida a un modelo dinámico. Para la demostración, la metodología es aplicada al vehículo submarino autónomo (AUV) Ciscrea, mostrado en la Fig. 1 y sus especificaciones pueden observarse en la Tabla 1.

2. DESARROLLO

En la técnica de acondicionamiento de la referencia a través de modos deslizantes (SMRC), un lazo auxiliar permite al sistema mantenerse en un área pre-especificada, cuando una restricción en el sistema esta a punto de ser violada. La Fig. 2 muestra este funcionamiento.

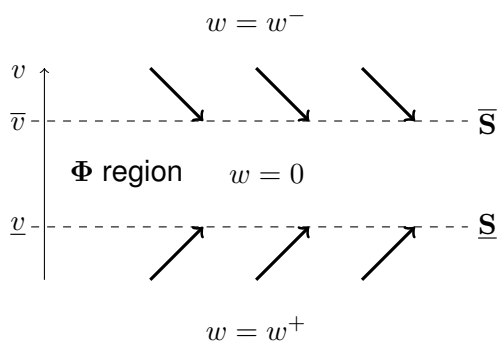


Figura 2: Interpretación gráfica de la ley de conmutación

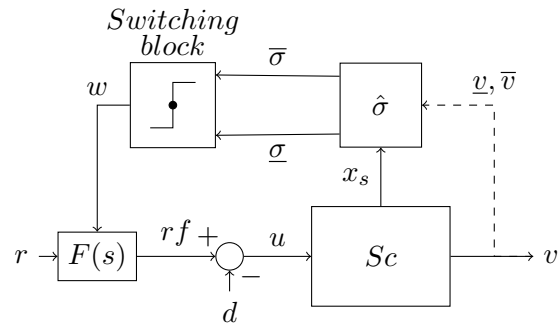


Figura 3: Diagrama en bloques de la técnica SMRC

Esta técnica ha sido desarrollada para ser aplicada en sistemas de estructura variable (VSS), y aprovecha de las no linealidades y restricciones de los mismos. Las ventajas de SMRC son: (i) solo depende del grado relativo del modelo, (ii) es robusta contra perturbaciones e incertidumbres, (iii) esta confinada al lado de baja potencia lo que facilita su implementación (ver [2] y [1] por detalles).

Considerando un sistema dinámico dado, estamos interesados en el comportamiento de una variable v , limitada por alguna restricción propia del sistema, en donde aplicaremos la técnica de SMRC. El sistema descrito por la Ec. 1 es representado por el bloque S_c en la Fig. 2.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_s = f(\mathbf{x}_s) + g(\mathbf{x}_s)u \\ v = h_v(\mathbf{x}_s) \end{cases} \quad (1)$$

donde v es una variable acotada que debe cumplir con las restricciones de diseño. Para especificar las cotas de v , el siguiente conjunto es definido:

$$\Phi(\mathbf{x}_s) = \{\mathbf{x}_s \mid \phi(v) \leq 0\} \quad (2)$$

Nota: S_c es generalmente un subsistema de todo el sistema de control con restricciones, y la variable v puede corresponder a cualquier variable del sistema sujeta a restricciones.

El objetivo es encontrar una entrada de control u la cual haga al sistema permanecer en la región Φ . Esto significa hacer Φ una región invariante. Para esto el lado derecho de la primer linea de la Ec. 1 debe apuntar hacia el interior de Φ en todos los puntos de la superficie limite:

$$\partial\Phi = \{\mathbf{x}_s \mid \mathbf{x}_s \wedge \phi(v) = 0\} \quad (3)$$

Esto puede ser garantizado por la política de conmutación del sistema dada por Ec. 4 (ver [1]).

$$u = \begin{cases} \leq u^\phi : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi > 0 \\ \geq u^\phi : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi < 0 \\ / \exists : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi = 0 \\ free : \mathbf{x}_s \in \Phi \setminus \partial\Phi \end{cases} \quad (4)$$

con:

- $L_f h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es la derivada direccional de Lie, la cual representa la derivada de un campo escalar $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ en la dirección de un campo vectorial $f(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) \quad (5)$$

- De este modo:

$$u^\phi = -L_f\phi / L_g\phi \quad (6)$$

- y donde $L_f\phi > 0$ fue asumido sin pérdida de generalidad.

De la Ec. 4 resulta que u puede ser libre dentro de la región Φ . Usualmente dos enfoques son posibles:

- $u = 0$: dejar que el sistema evolucione de manera autónoma, y la acción de control se activa solo cuando la restricción crítica es alcanzada.
- $u \neq 0$: forzar el sistema a alcanzar los límites de la región y trabajar sobre ellos.

Usando el caso trivial de limitaciones dado por Ec. 7, con \tilde{v} representando las restricciones sobre v , podemos interpretar gráficamente la ley de conmutación como Fig. 2, donde w es la señal discontinua generada por el lazo de SMRC.

$$\sigma(v) = v - \tilde{v} \quad (7)$$

Para lograr el régimen de deslizate en $\sigma(v) = 0$, es necesario implementar un bucle auxiliar con una función de conmutación. Esta debe considerar las restricciones del sistema, para generar una señal discontinua w , ver Fig. 2. Con el objetivo de suavizar la señal de comando se agrega un filtro de primer orden:

$$F(s) : \begin{cases} \dot{x}_f = \lambda_f x_f + w + r \\ r_f = -\lambda_f x_f \end{cases} \quad (8)$$

Donde r es la referencia original del sistema y $\lambda_f \in \mathbb{R}$ el autovalor del filtro. λ_f debe ser elegido de manera que el ancho de banda del filtro sea mayor al del sistema con restricciones, de forma que la respuesta del sistema no se deteriore cuando v se encuentra en su rango permitido.

Adicionalmente se debe mencionar que para que esta configuración funcione la salida auxiliar σ debe tener grado relativo unitario con respecto a la señal discontinua, es decir su primera derivada debe depender de w . Si por el grado relativo del sistema esto no se cumple se puede tomar estados extra del sistema x_s en la función de conmutación ϕ , de manera de cumplir con la condición.

3. PARTE EXPERIMENTAL

La técnica de SMRC es adaptada al robot Ciscrea para generar un seguimiento de referencia con velocidad variable compatible con los límites de sus actuadores.

Para esta aplicación particular nos ocuparemos de la dirección vertical (heave) de movimiento. El modelo (ver Ec. 9 y Tabla 2) y simulador utilizado para este trabajo fue desarrollado en [4], donde mayor detalle en los coeficientes del mismo pueden ser consultados.

$$(M + M_A)^* \ddot{\eta} + D^*(|\nu|)(\dot{\eta}) + g^*(\eta) = \tau_{pro} + \tau_{env} \quad (9)$$

Aquí comparando con la notación de la sección 2, S_c esta compuesto por el lazo cerrado formado por el controlador, la saturación sobre la variable de control y el robot.

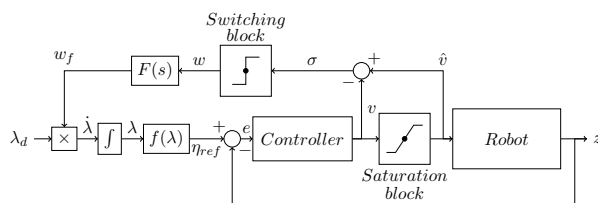
Adicionalmente, tenemos un filtro pasa bajos $F(s)$, y la parametrización del camino $f(\lambda)$. Una consideración importante es que suponemos que el camino es parametrizado en términos de un parámetro de movimiento y que su primera derivada es continua ([3]). Esto puede ser expresado como:

$$\eta_{ref} = f(\lambda) \quad \dot{\eta}_{ref} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} \dot{\lambda} \quad (10)$$

En este caso:

- restricciones por saturación son impuestas sobre el torque.
- la señal σ , definida como Ec. 7, tiene grado relativo uno respecto de la señal discontinua w , y una saturación directa es implementada.
- la ley de conmutación es definida como:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma = 0 \\ 0 & \text{if } \sigma \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$



| Parámetros | Descripción |
|--------------|--|
| η | Vector de posición del AUV |
| ν | Vector de velocidad del AUV |
| M | Matriz de masa e inercia de cuerpo rígido del AUV |
| M_A | Matriz de masa aumentada |
| $D(\nu)$ | Matriz de amortiguamiento |
| $g(\eta)$ | Vector de fuerzas y momentos de restauración |
| τ_{env} | Perturbaciones ambientales (viento, olas y corrientes) |
| τ_{pro} | Vector de fuerzas y momentos producidos por propelas |

Figura 4: SMRC propuesta para el seguimiento de caminos

Tabla 2: Nomenclatura del modelo AUV

Cuando no existe saturación la ley de conmutación hace que la señal discontinua w tome el valor 1. Luego de pasar por el filtro una versión suavizada de w es multiplicada por λ_d , y subsecuentemente integrada para generar un parámetro creciente λ . Este parámetro alimenta el bloque de referencia $f(\lambda)$ produciendo el camino de referencia para el controlador.

En pocas palabras, mientras no haya saturación el bucle auxiliar de SMRC permanece inactivo y la velocidad de la referencia esta fijada por λ_d . Cuando una saturación ocurre la señal w conmuta entre sus posibles valores (estableciendo un régimen de deslizamiento) forzando a disminuir la velocidad de referencia para que el controlador pueda reducir el error

de posición, finalmente cuando esta condición desaparece el bucle de SMRC regresa a su estado inactivo.

La sintonización de los distintos parámetros fue realizada a través de ensayos por simulación. Los valores usados son: $\lambda_d = 0,2$, la frecuencia de corte del filtro pasa bajos es $f_c = 0,2387$ Hz, y el controlador utilizado es un proporcional derivativo filtrado (PD) ($K_p = 541,43$, $K_d = 250$, $T_f = 2,3$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo es comparar el comportamiento de un control tradicional PD, aplicado en la dirección vertical (heave) del Ciscrea, considerando una velocidad fija de referencia contra la técnica de velocidad variable explicada en la sección 3.

El controlador PD fue sintonizado para que el robot este en el borde de saturar los actuadores para el camino propuesto. Por el otro lado la técnica SMRC fue sintonizada para obtener el mismo error de seguimiento que el controlador clásico PD, ver Fig. 6.

La Fig. 5 muestra la comparación entre ambas técnicas, junto con sus correspondientes señales de referencia. El camino propuesto es una referencia sinusoidal en el eje vertical, aquí es importante remarcar que nosotros estamos interesados en el resultado espacial (seguimos un camino, no una trayectoria). De esta figura es posible ver como la técnica SMRC completa el camino 13.5 s mas rápidamente, lo que representa una mejora del 15 %.

La Fig. 7, muestra las señales de la técnica SMRC medidas sobre el robot. Podemos remarcar que entre el tiempo 0 s y 20 s no existe saturación, por lo que el lazo de SMRC se encuentra inactivo y el sistema evoluciona a la velocidad fijada por λ_d . Durante el tiempo 20 s a 35 s el robot entra en una parte mas cerrada del camino donde la velocidad impuesta por λ_d no puede ser seguida, como resultado ocurre la saturación en los actuadores. En esta condición, el bucle auxiliar conmuta w para frenar la referencia, permitiendo al controlador reducir el error de posición. Esto puede verse en la Fig. 5 donde puede notarse un «golpe» en la referencia de SMRC. En esta ultima condición el lazo de SMRC hace avanzar a la referencia de camino a la máxima velocidad que respeta los límites de saturación (ver Fig. 8). Luego de que esta condición desaparece el lazo SMRC se desactiva hasta el tiempo 58 s donde la condición de saturación es repetida.

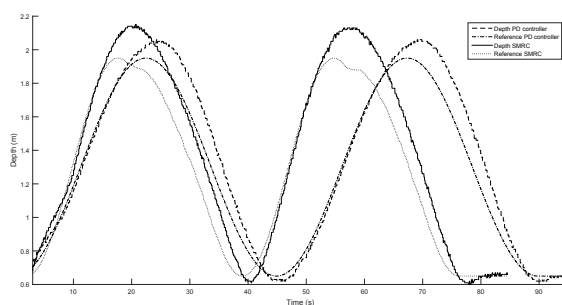


Figura 5: Comparación de caminos entre controlador PD y SMRC

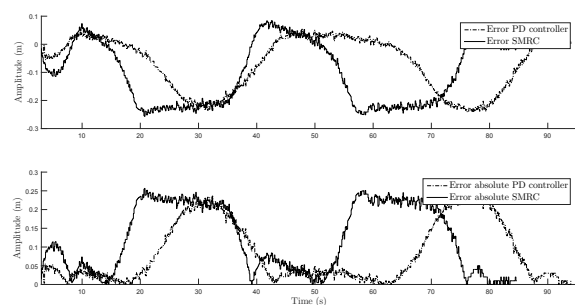


Figura 6: Comparación de error entre control PD y SMRC

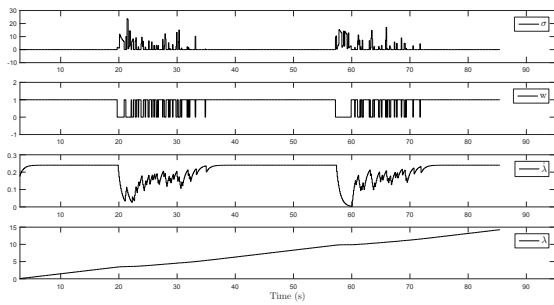


Figura 7: Señales de SMRC

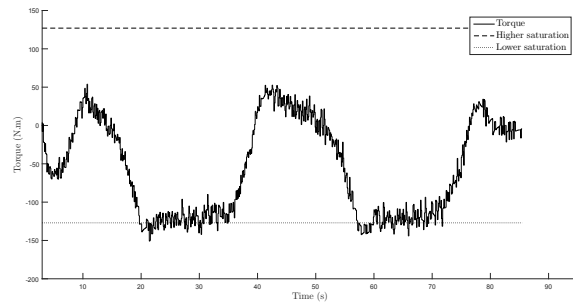


Figura 8: Torque con SMRC

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se probó que la técnica SMRC aplicada a un AUV en un marco de control dinámico, lo que constituye la principal novedad de este trabajo, funciona adecuadamente y reduce el tiempo de ejecución del camino. Sin embargo debe notarse que el sintonizado de los parámetros de la misma debe realizarse mas cuidadosamente que en un marco de control cinemático. Una cuestión que surge para futuros trabajos es la manera de compensar la dinámica lenta del sistema. Limitaciones sobre variables internas usando un esquema similar son soluciones parciales a explorar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue parcialmente financiado por el programa de becas EIFFEL del Gobierno de Francia, por CONICET (PIP0361 y 0237), MINCYT(PICT2394) y UNLP(I164), Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARELLI, F., GRACIA, L., SALA, A., AND ALBERTOS, P. Switching algorithm for fast robotic tracking under joint speed constraints. *18th Mediterranean Conference on Control & Automation* (2010).
- [2] GARELLI, F., MANTZ, R. J., AND BATTISTA, H. D. *Advanced Control for Constrained Processes and Systems*. IET Control engineering series 75. 2011.
- [3] NENCHEV, D. Tracking manipulator trajectories with ordinary singularities: a null space-based approach. *International Journal of Robotics Research* 14, no.4 (1995), 399–404.
- [4] ROSENDO, J. L., CLEMENT, B., AND GARELLI, F. Sliding mode reference conditioning for path following applied to an auv. *10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2016)* (2016).