

OPTIMIZACIÓN LEY DE CONTROL PARA UN AUV FUNCIONANDO CON UN ÚNICO MOTOR

Cristina Cerrada, Dictino Chaos, David Moreno-Salinas y Joaquín Aranda
Departamento de Informática y Automática, UNED,
e-mail: {criscerrada,dchaos,dmoreno,jaranda}@dia.uned.es

Resumen

En este artículo se plantea el problema de optimización de una ley de control para minimizar el error al conducir un AUV actuado con un único motor desde un punto de partida hasta una zona de recuperación deseada. Así mismo se muestran dos posibles soluciones de control y se discute su implementación en el vehículo. La primera utiliza algoritmos genéticos para proporcionar la acción de control óptima en cada instante, es decir, se optimiza la ley de control muestreada en función del tiempo. La segunda, por su parte, emplea los algoritmos genéticos para obtener una acción de control óptima en función de la orientación del vehículo a partir de una ley de control aproximada con una serie de Fourier.

Palabras clave: AUV, fallo crítico, operaciones de emergencia, control de fallo, optimización, algoritmos genéticos, series de Fourier.

1 INTRODUCCIÓN

Las profundidades de los océanos están repletas de zonas por explorar, recursos naturales por descubrir y de diversidad de especies que preservar. Con el fin de explotar las posibilidades ofrecidas por los océanos, intentando minimizar el impacto del ser humano, es preciso utilizar las herramientas adecuadas.

Los AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*, vehículos autónomos submarinos) se han convertido en unos de los vehículos más utilizados en los últimos años en el mar, tanto a nivel comercial como de investigación. La flexibilidad, autonomía, fiabilidad, sostenibilidad y relativo bajo coste que presentan estos vehículos hace que sean capaces de desarrollar tareas de inspección, exploración, mapeo, localización y seguimiento de objetivos de manera efectiva y precisa, pudiendo sustituir a los ROVs (*Remotely Operated Vehicles*, vehículos operados remotamente) o incluso a los humanos en múltiples misiones en el mar. Su autonomía y flexibilidad les permite también realizar tareas colaborativas o misiones complejas como se muestra en

los trabajos [6], [8] y [4].

El buen funcionamiento de los AUVs es crucial para el éxito de las misiones que desempeñan. En el momento que se produce una avería en el sistema o los actuadores, se pone en riesgo la integridad del vehículo pudiéndose llegar a perder el AUV o poniendo en riesgo a personas, animales o el medio ambiente. Por tanto, el análisis de fallos, que comprende la detección, el aislamiento y la determinación de las acciones o controles a realizar en caso de fallo, es un tema de especial interés dentro de este campo. Este trabajo se enmarca dentro la determinación de acciones en caso de fallo.

En la literatura, hay una gran cantidad de trabajos previos que han tratado diferentes enfoques y soluciones para determinar acciones de control ante fallos, se puede consultar [2] para más referencias. Mayoritariamente, estos trabajos estudian el problema del control tolerante a fallos sobre vehículos sobreactuados, es decir, vehículos con motores suficientes para que en caso de avería de uno de ellos, se pueda reorganizar el reparto de fuerzas entre los motores restantes y el vehículo pueda continuar en movimiento sin perder ningún grado de libertad.

Cabe destacar el trabajo realizado en [3], donde al contrario que en los casos anteriores, se considera la situación extrema de tener que controlar un AUV con un único motor funcionando para conducirlo hasta una zona de recuperación deseada. Al contar con un único motor para mover el vehículo, éste ve disminuidos sus grados de libertad al extremo y por tanto, limitada su movilidad. La solución proporcionada consiste en una acción de control para realizar una trayectoria de tipo espiral orientada hacia la zona de recuperación del vehículo. Este problema planteado se selecciona como punto de partida del presente trabajo.

La principal contribución de este trabajo es la formulación del problema de optimización, que encuentra la acción de control que minimiza el error cuadrático integral, para conducir un AUV actuado con un único motor desde un punto de partida hasta una zona de recuperación deseada siguiendo el camino óptimo. Para este fin, se con-

sideran dos algoritmos diferentes de optimización, mostrándose en simulación la capacidad de ambos esquemas y comparando las soluciones que proporcionan. El primero trata de encontrar la acción de control óptima en cada instante de tiempo, mientras que el segundo consiste en conseguir la acción de control óptima en función de la orientación del vehículo a partir de una ley de control basada en la serie de Fourier. En ambos casos se utilizan los algoritmos genéticos como herramienta de optimización.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta la formulación del problema, incluyendo notación y modelo del vehículo, así como las soluciones estudiadas. Los resultados se muestran en la Sección 3 y finalmente, las conclusiones y trabajos futuros aparecen en la Sección 4.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este trabajo se considera un AUV denominado MEDUSA [1], compuesto de dos cuerpos con forma de torpedo, dos motores frontales encargados del control de la velocidad de avance (*surge speed*) y de la velocidad de giro (*yaw rate*), y dos motores verticales para el control de la profundidad y el ángulo roll, como se muestra en la Figura 1. La configuración de los motores produce que el vehículo sea sub-actuado. El AUV está diseñado con flotabilidad positiva, de tal forma que, en caso de fallo, el vehículo emerge a la superficie sin necesidad de acciones de control adicionales, por esta razón, el control de emergencia en la superficie se estudia en un plano 2D horizontal.



Figura 1: AUV MEDUSA

2.1 NOTACIÓN Y MODELO DEL VEHÍCULO

Se emplean dos sistemas de referencia que siguen la convención estándar SNAME [9]: el sistema

de referencia centrado en el cuerpo (*body-frame*) y el sistema de referencia inercial. Ver figura 2. El origen del sistema de referencia centrado en el cuerpo se encuentra en el centro de masas del AUV y las velocidades referidas a este sistema son $\boldsymbol{\nu} = [u; v; r]^T$, donde u es la velocidad de avance (*surge speed*), v es la velocidad lateral (*sway speed*), y r es la velocidad angular de giro (*yaw rate*). Por otra parte, las velocidades en el sistema de referencia inercial son $\mathbf{V} = [\dot{x}; \dot{y}; \dot{\psi}]^T$, donde el punto indica la derivada temporal de una variable de modo que \dot{x} es la velocidad a lo largo del eje \mathbf{X} , \dot{y} es la velocidad a lo largo del eje \mathbf{Y} , ψ es el ángulo que forma la orientación del vehículo con el eje \mathbf{X} y $\dot{\psi}$ es la velocidad angular de guiñada.

Partiendo de las consideraciones anteriores, el modelo cinemático del AUV queda definido como:

$$\dot{x} = u \cdot \cos(\psi) - v \cdot \sin(\psi) \quad (1)$$

$$\dot{y} = u \cdot \sin(\psi) + v \cdot \cos(\psi) \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (3)$$

Considerando un funcionamiento normal en el escenario 2D, el vehículo es controlado por los dos motores frontales, con entradas a_s y a_p , la referencia de velocidad angular del motor a estribor (*starboard*) y a babor (*port*), respectivamente, siendo éstas comandos de referencia normalizados para el controlador interno de las hélices en el rango [-100 100]. Cada hélice produce una fuerza proporcional al cuadrado de su propia velocidad angular, que es positiva (empuja hacia delante) si la acción de control es positiva y negativa (empuja hacia atrás) si la acción de control es negativa. De este modo, la fuerza producida como respuesta a la acción de control se define con las ecuaciones (4) y (5).

$$F_s(a_s) = K \cdot |a_s| \cdot a_s \quad (4)$$

$$F_p(a_p) = K \cdot |a_p| \cdot a_p \quad (5)$$

donde K es la constante proporcional que relaciona las acciones de control con la fuerza producida. La fuerza total es el resultado de la suma de las fuerzas de ambos motores, los cuales producen también el momento $\tau_M = L \cdot (F_p(a_p) - F_s(a_s))$, donde L es la distancia de cada motor al eje de simetría del vehículo.

El caso de estudio, sin embargo, no considera un funcionamiento normal, sino un funcionamiento con el motor de estribor averiado y que deja de funcionar. Por tanto, la acción de control recae sólo en el motor disponible, reduciendo la fuerza total y el momento a $F = F_p(a_p)$ y $\tau_M = L \cdot F_p(a_p)$, respectivamente, y permite únicamente un control parcial de la velocidad de avance y del ángulo de giro. De acuerdo con [5] y teniendo en

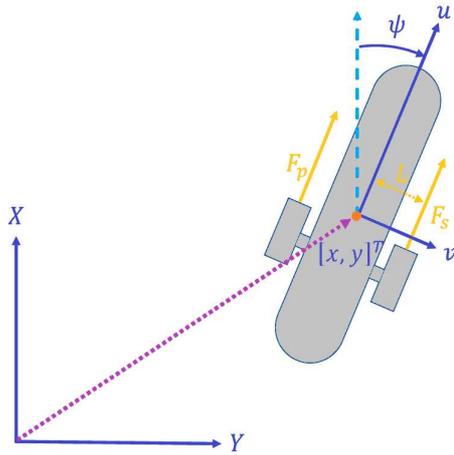


Figura 2: Ejes de coordenadas

cuenta las particularidades del caso de estudio, el modelo dinámico resulta:

$$m_u \cdot \dot{u} - m_v \cdot v \cdot r + D_u \cdot u = F = F_p(a_p) \quad (6)$$

$$m_v \cdot \dot{v} + m_u \cdot u \cdot r + D_v \cdot v = 0 \quad (7)$$

$$m_r \cdot \dot{r} - m_{uv} \cdot u \cdot v + D_r \cdot r = \tau = L \cdot F_p(a_p) \quad (8)$$

donde m_u , m_v y m_r son las constantes de masa y de inercia (se considera la masa del vehículo más la masa añadida por la interacción con el agua de alrededor), y $m_{uv} = m_u - m_v$. Debido a la rotación del sistema de referencia del cuerpo, aparecen los términos de Coriolis $v \cdot r$, $u \cdot r$, y $u \cdot v$. Por último, los términos $D_u = -X_u - X_{|u|} \cdot |u|$, $D_v = -Y_v - Y_{|v|} \cdot |v|$, y $D_r = -N_r - N_{|r|} \cdot |r|$ son producidos por las fuerzas disipativas del agua, siendo $X_u, X_{|u|}, Y_v, Y_{|v|}, N_r, N_{|r|}$ los coeficientes hidrodinámicos, que por convención son negativos, siendo por lo tanto D_u, D_v y D_r positivos.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS LEYES DE CONTROL

En [3] se diseñó la ley de control (9) y (10) para que el sistema convergiera a un entorno del origen desde cualquier condición inicial, de tal forma que el AUV pudiera ser conducido empleando un único motor hasta una zona deseada (de recuperación).

$$\psi_r = \text{atan2}(y_r - y, x_r - x) \quad (9)$$

$$a_p = a_0 + \Delta a \cdot \text{sign}(\sin(\psi + \Delta\psi - \psi_r)) \quad (10)$$

donde ψ_r es la dirección deseada, definida por las coordenadas del punto de destino $[x_r, y_r]$ y por las coordenadas de la posición del vehículo $[x, y]$, a_0 es un valor constante de la señal de control, Δa es el valor que varía la señal de control respecto a a_0 , con un valor tal que a_p siempre sea positiva, y $\Delta\psi$ es una corrección que se aplica al ángulo para que

el vehículo se dirija de la forma más recta posible a la referencia.

Partiendo de este trabajo presentado en [3], se plantea el problema de optimización formulado en (11), que pretende encontrar la ley de control que minimice la función de coste definida por el error cuadrático integral de la trayectoria entre el punto inicial y la zona de recuperación.

A modo de simplificación en la notación, se agrupan las siguientes variables en el vector de estados $\chi = [x, y, \psi, u, v, r]$, cuya derivada temporal es $\dot{\chi} = f(\chi, a_p)$ definida por las ecuaciones (1 - 8). De esta forma (11) resulta:

$$\theta^* = \underset{\theta}{\text{arg min}} J(\theta)$$

sujeta a :

$$J(\theta) = \sum_{i=0}^n (x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 \quad (11)$$

$$t_i = i \cdot \Delta T$$

$$\chi_i = \chi(t_i)$$

$$\chi_{i+1} = \chi_i + \Delta T \cdot f(\chi, a_p)$$

$$a_p = g(\chi, \theta)$$

$$\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$$

siendo θ^* la parametrización óptima de la ley de control $g(\chi, \theta)$, J la función de coste, x_i y y_i las coordenadas en t_i , ΔT el período de muestreo, i el número de muestra y n el número final de muestras fijado como la división entre un tiempo de fin de muestreo definido en 600s y $\Delta T = 0.1s$. La elección de dicho tiempo final se basa en el tiempo utilizado en las simulaciones del artículo [3], con el objetivo de poder comparar los resultados.

Al enfrentar el problema se observa que la función de coste posee múltiples mínimos locales. Por tanto, los métodos tradicionales de optimización convexa, como los algoritmos de punto interior [12], no son capaces de obtener el mínimo global y es necesario utilizar métodos más complejos que permitan ampliar el espacio de búsqueda de soluciones, como el algoritmo de simulated annealing [11] o los algoritmos genéticos. Tras probar dichos algoritmos, se decide trabajar con los algoritmos genéticos por ser los que proporcionan mejores resultados.

Los algoritmos genéticos [7] son un método para resolver tanto problemas de optimización con restricciones como sin ellas. Están basados en la selección natural, en el proceso que dirige la evolución biológica. Los algoritmos generan una población de puntos en cada iteración. El mejor punto de la población se acerca a la solución

óptima. Además, los algoritmos seleccionan la siguiente población considerando una componente aleatoria a partir de la población actual, que permite salir de los mínimos locales, sin perder la mejor solución encontrada hasta el momento.

En este trabajo los algoritmos genéticos se usan para resolver un problema de optimización con restricciones, en el que se establece un límite superior de valor 60, que es un valor seguro para el funcionamiento de los actuadores y corresponde con el 60% de la velocidad de giro máxima de las hélices del motor.

2.2.1 Parametrización en función del tiempo

Con intención de mejorar la ley de control (10), se prueba en primer lugar una parametrización en función del tiempo, cuyo objetivo es encontrar el valor óptimo para cada paso de la simulación, de la forma (12):

$$a_p(t_i) = \theta_i, \forall i \in (1, n) \quad (12)$$

Se utilizan algoritmos genéticos en la búsqueda del mejor valor del parámetro θ para cada paso, fijando el valor de $\theta_{max} = 60$, para garantizar que la ley de control no va a superar en ningún caso este valor y se va a trabajar en la zona segura de los actuadores. En el caso de θ_{min} se analizan dos límites diferentes: $\theta_{min1} = 0$ para limitar la ley de control a valores positivos y $\theta_{min2} = -60$ para permitir valores negativos. El resto de características seleccionadas son una población inicial formada por 1000 componentes, un número de generaciones máximo de 10^4 y un valor de tolerancia de 10^{-20} . Finalmente, se obtiene y representa la ley de control óptima para cada instante de tiempo entre el punto inicial y final.

A pesar de que el método anterior permite obtener trayectorias más directas y que mejoran la función de coste con respecto a la ley de control (10), el hecho de optimizar con una parametrización temporal discreta hace que la señal óptima pueda resultar discontinua, oscilando rápidamente entre los valores máximo y mínimo en un periodo de muestreo ΔT . Esto no es deseable para el funcionamiento de los actuadores, pudiendo provocar el deterioro de los mismos.

Otro inconveniente es que la optimización tarda demasiado tiempo para ser usado en tiempo real, alrededor de 150 minutos, ya que para implementar la estrategia anterior en lazo cerrado sería necesario recalcular la acción de control en cada periodo de muestreo lo que no es factible en la práctica.

No obstante es útil para explorar soluciones que

mejoren lo máximo posible el desempeño del vehículo y que sirvan como base de comparación con otras estrategias factibles, como se puede comprobar en la Sección 3.

Esta situación plantea la necesidad de encontrar una solución alternativa que además de mejorar la función de coste, proporcione una ley de control sencilla y capaz de ser implementada en el vehículo real.

2.2.2 Parametrización de los coeficientes de serie de Fourier

En segundo lugar, se analiza una ley de control en función de la orientación del vehículo, definida mediante el ángulo $\alpha = \psi - \psi_r$, y que aproxima a partir de una serie de Fourier, parametrizando sus coeficientes, con el propósito de crear un control suave frente al tiempo, que pueda ser utilizado en el AUV.

La serie de Fourier se genera como una suma de cosenos y senos [10] siguiendo la ecuación (13):

$$h(\alpha) = \frac{b_0}{2} + \sum_{j=1}^N (b_j \cdot \cos(j \cdot \alpha) + c_j \cdot \sin(j \cdot \alpha)) \quad (13)$$

donde, N es el número de orden de la serie y b_0 , b_j y c_j son los coeficientes que tienen que optimizarse.

En este caso, los algoritmos genéticos se utilizan para encontrar los coeficientes óptimos que generen la ley de control que conduzca al AUV desde el punto inicial al deseado minimizando la función de coste J . Por tanto, θ deja de ser la acción de control óptima para cada instante de tiempo, como ocurría en la parametrización en función del tiempo, y pasa a ser un vector de coeficientes óptimos con los que generar una ley de control que determine las acciones de control en función del ángulo α . Consecuencia de esto, la parametrización θ no garantiza directamente que los valores de la acción de control tengan los mismos límites que antes: $\theta_{min1} = 0$ ó $\theta_{min2} = -60$ y $\theta_{max} = 60$. Así que, es necesario poner ese límite directamente en la ley de control (15) en función del ángulo (14) para que sea aplicable:

$$\psi_r = \text{atan2}(y_r - y, x_r - x) \quad (14)$$

$$a_p = \min(\theta_{max}, \max(\theta_{min2}, h(\psi - \psi_r))) \quad (15)$$

Además, en la optimización con algoritmos genéticos se ha tenido en cuenta un número de generaciones máximo de 10^4 y un valor de tolerancia de 10^{-25} .

Finalmente, se consigue el objetivo de una ley de control sencilla, que pueda ser utilizada en el

vehículo real y que mejore la función de coste con respecto a la ley de control (10), como se muestra en la Sección 3. Otra ventaja es que aunque la optimización lleva mucho tiempo como en el caso anterior, sólo es necesario realizarla una vez, porque al conocer los parámetros óptimos en función de la orientación del vehículo respecto a la referencia, la ley de control puede aplicarse de forma directa y rápida, no hay que recalcular los coeficientes a medida que el vehículo avanza, lo que favorece su implementación en el AUV.

3 RESULTADOS

Con el fin de comparar fácilmente las diferencias obtenidas entre las distintas leyes de control analizadas y probar las mejoras conseguidas, se muestra la simulación de las trayectorias realizadas por el AUV para cada ley de control y las propias leyes de control bajo las siguientes condiciones: punto inicial [-20 -20]m, punto final [0 0]m y tiempo final de simulación de 600s.

Además, para comparar mejor las soluciones se define el siguiente indicador:

$$Mejora = \frac{J_{ref} - J_{sol}}{J_{ref}} \cdot 100\% \quad (16)$$

donde J_{ref} es el resultado de la función de coste definida en (11) para la ley de control de referencia mostrada en las ecuaciones (9) y (10), con los parámetros $a_0 = 45$, $\Delta a = 15$ y $\Delta\psi = -63^\circ$ utilizados en los primeros ejemplos de [3], y J_{sol} es el resultado de la función de coste que optimiza las otras leyes de control propuestas como solución. El resumen de estos resultados se muestra en la Tabla 1.

En las Figuras 3 y 4 se muestran la trayectoria de referencia y su correspondiente ley de control.

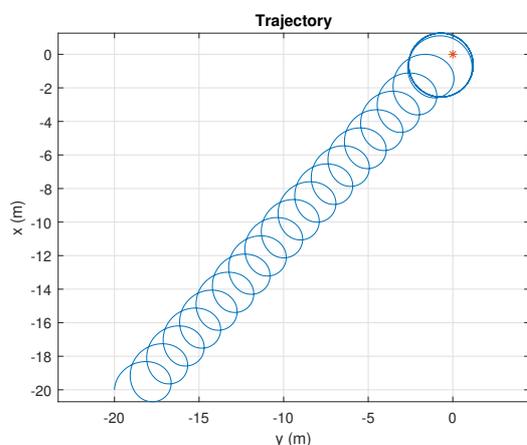


Figura 3: Trayectoria de referencia

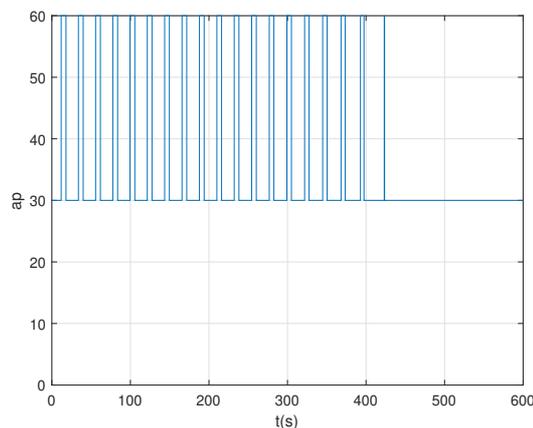


Figura 4: Ley de control de referencia

3.1 PARAMETRIZACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

El resultado óptimo encontrado mediante el método de algoritmos genéticos para la ley de control parametrizada en función del tiempo (12) puede encontrarse en la Figura 6. Este resultado se ha obtenido para $\theta \in [0, 60]$, es decir, el mejor resultado se encuentra en el rango donde todas las acciones de control a_p son siempre positivas. La función de coste es un 26.47% mejor que la obtenida en [3], según el criterio en (16). Si se compara su trayectoria en la Figura 5 con la de referencia en la Figura 3, se ve como avanza de forma más directa hacia el punto final.

Por otra parte, en la Figura 7 se observa, tanto en el eje \mathbf{X} como en el \mathbf{Y} , como los desplazamientos producidos por la ley de control parametrizada en función del tiempo (en color verde) alcanzan antes un entorno cercano al punto de destino (línea roja) que los producidos por la ley de control de referencia (en azul), en concreto, para la ley de control en función del tiempo se alcanza aproximadamente para $t=300s$ y para la ley de control de referencia en $t=400s$. Por tanto, la simulación de la parametrización en función del tiempo pasa más tiempo conmutando alrededor del punto de destino, aunque la conmutación no alcanza un valor estable como en el caso de la ley de control de referencia.

El principal problema que surge en esta ley de control es que presenta cambios bruscos en cortos espacios de tiempo, como se ve en la Figura 6 y que no conmuta hacia un valor estable, por lo que no es adecuada para ser implementada en el vehículo real.

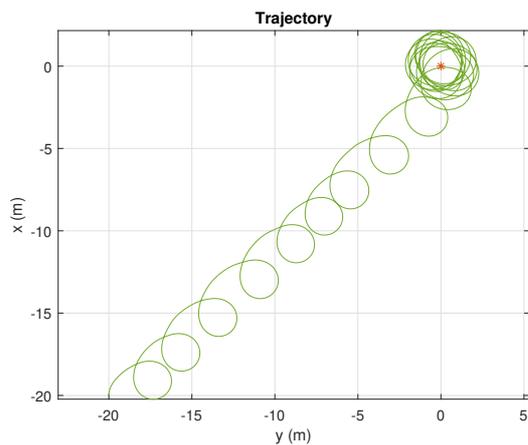


Figura 5: Trayectoria para control parametrizado en función del tiempo

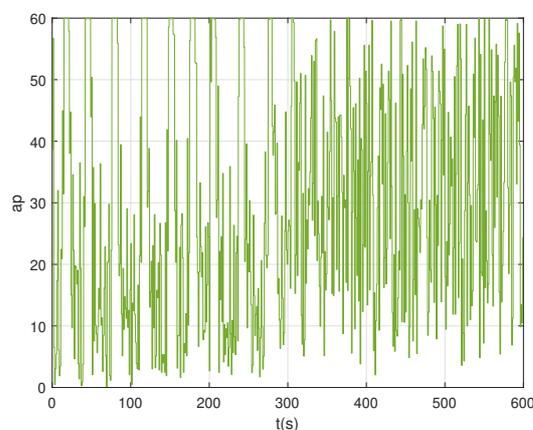


Figura 6: Ley de control parametrizada en función del tiempo

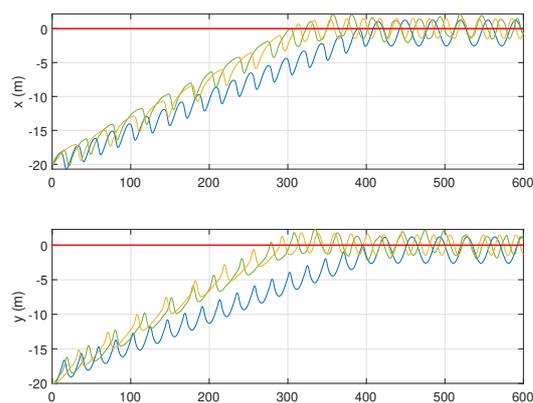


Figura 7: Gráficas comparativas del avance en el eje X, y en el eje Y frente al tiempo para la ley de control de referencia (en azul), la ley de control parametrizada en función del tiempo (en verde) y la ley de control parametrizada en función del ángulo (en amarillo). La línea roja representa las coordenadas del punto de destino

Tabla 1: J y Mejora para los distintos controles

Control	J	Mejora
Referencia	$1.0870 \cdot 10^6$	0%
Parametrización tiempo	$7.9929 \cdot 10^5$	26.47%
Parametrización ángulo	$7.9811 \cdot 10^5$	26.56%

3.2 PARAMETRIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE SERIE DE FOURIER

El resultado que optimiza a la vez que suaviza la señal de control se ha obtenido mediante algoritmos genéticos para una serie de Fourier de orden $N=5$, calculada según la ecuación (13). La ley de control en función del ángulo se genera, por tanto, mediante las ecuaciones (13), (14) y (15) y los coeficientes óptimos que aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2: Coeficientes óptimos serie Fourier $N=5$

$b_0 = 98.38$	$b_1 = 29.02$	$c_1 = -9.59$
$b_2 = -5.88$	$c_2 = -3.12$	$b_3 = 3.679$
$c_3 = -0.47$	$b_4 = -0.93$	$c_4 = -6.08$
$b_5 = -4.40$	$c_5 = -2.87$	

La función de coste en este caso mejora un 26.56% la de referencia, que es un resultado similar e incluso mejor que el conseguido por la parametrización en función del tiempo. Este resultado es importante ya que significa que la acción de control en función del tiempo no está consiguiendo encontrar el mínimo global sino un mínimo local. Obsérvese que la parametrización en el tiempo contiene como caso particular la secuencia de control de la Figura (9), luego el mínimo global no puede ser superior al J del control parametrizado en función del ángulo.

Al observar la trayectoria en la Figura 8, se aprecia un comportamiento parecido a la trayectoria de la Figura 5 en cuanto a un avance más directo hacia el punto de destino, sin embargo, la trayectoria en la Figura 8 presenta un comportamiento mucho más suave. Si se superpusieran las trayectorias, podría verse como la trayectoria de referencia (en azul) en cada vuelta se desplaza en promedio un poco hacia el punto final, la trayectoria de la parametrización en función del tiempo (en verde) alterna desplazamientos largos y cortos (eso sugiere también que es subóptima) y la trayectoria de la parametrización de los coeficientes de la serie de Fourier (en amarillo) tiene desplazamientos largos.

Si se observa la Figura 7, se comprueba que, efectivamente, los desplazamientos producidos por la ley de control en función del ángulo con los coefi-

cientes parametrizados (en color amarillo) alcanzan un entorno cercano al punto de destino (línea roja) alrededor de $t=300s$, al igual que sucede con la ley de control en función del tiempo (en verde), por esta razón ambas trayectorias presentan un avance más directo hacia el destino que la de la ley de control de referencia.

Por otra parte, en la Figura 9 se ve como la señal de control presenta cambios suaves en el tiempo. La señal de control tiene un comportamiento cualitativo similar a los de la señal de control de referencia en la Figura 4 y como a partir de $t=300s$, que es donde alcanza el entorno del punto de destino, comienza a conmutar hacia un valor estable de 40.36. Todo esto confiere homogeneidad a la ley de control (15) y permite que sea implementada en el vehículo real.

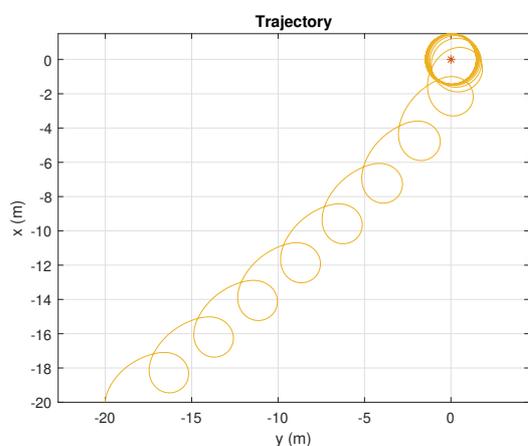


Figura 8: Trayectoria para control en función de la orientación del vehículo aproximado por serie de Fourier

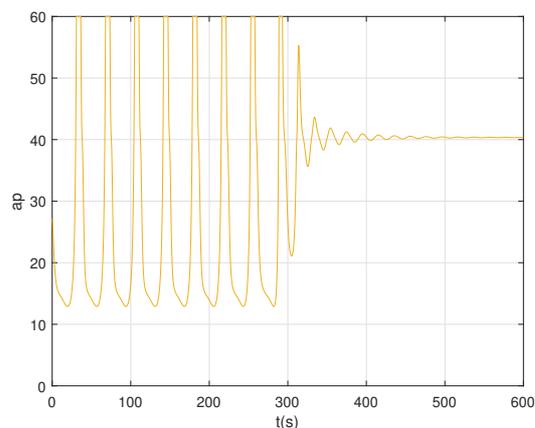


Figura 9: Ley de control en función de la orientación del vehículo aproximada por serie de Fourier

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha estudiado el problema de optimización de la ley de control que minimiza el error cuadrático integral de la trayectoria producida al conducir un AUV, denominado MEDUSA, actuado con un único motor desde un punto inicial hasta una zona de recuperación determinada.

Para abordar este problema se ha partido de la solución presentada en [3], donde la ley de control oscila entre dos valores fijos positivos en función de la posición y orientación del vehículo, y se han propuesto dos mejoras: una ley de control en función del tiempo y una ley de control basada en el ángulo parametrizada como una serie de Fourier. En ambos casos se han empleado los algoritmos genéticos para determinar los valores óptimos de los controles.

En vista de los resultados obtenidos, la ley de control en función del tiempo, a pesar de obtener una trayectoria más directa y mejorar la función de coste respecto a la solución de partida, presenta un comportamiento discreto con variaciones bruscas de un intervalo a otro. Por tanto, se concluye que no es adecuada para los actuadores del vehículo, ni apta para el tiempo real por el elevado tiempo de cálculo de la optimización.

Por otro lado, la ley de control basada en el ángulo parametrizada como una serie de Fourier consigue optimizar la ley de control propuesta en [3] y es suficientemente suave y sencilla para poder implementarse en el control del vehículo real sin problema para los actuadores.

Una línea interesante de trabajo futuro sería optimizar también el consumo energético de la solución que minimiza el error de la trayectoria para que haya un compromiso entre el rendimiento y el consumo.

Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto con referencia PID2020-112502RB-C44 y por el proyecto con referencia 096-034095 (ILTraDos) de UNED.

English summary

CONTROL LAW OPTIMIZATION FOR AUV USING A SINGLE THRUSTER

Abstract

The present paper presents a optimization problem for a control law to minimize the error produced by driving an AUV using a single thruster from a start point to a desired recovery area. In addition, two possible control solutions are studied and their implementation in the real vehicle is discussed. In the first solution, genetic algorithms are employed to obtain the optimal control action each moment in time, i.e., a control law versus time is optimized. The second solutions also uses genetic algorithms, in this case, to obtain an optimal control action versus orientation of vehicle as of a control law based on Fourier series.

Keywords: AUV, critical failure, emergency operations, fault-tolerant control, optimization, genetic algorithm, Fourier series.

Referencias

- [1] ABREU, P. C., BOTELHO, J., GÓIS, P., PASCOAL, A., RIBEIRO, J., RIBEIRO, M., RUFINO, M., SEBASTIÃO, L., AND SILVA, H. The MEDUSA class of autonomous marine vehicles and their role in EU projects. In *OCEANS 2016 - Shanghai* (Apr. 2016), pp. 1–10.
- [2] AMIN, A. A., AND HASAN, K. M. A review of Fault Tolerant Control Systems: Advancements and applications. *Measurement* 143 (2019), 58–68.
- [3] CHAOS, D., MORENO-SALINAS, D., AND ARANDA, J. Fault-Tolerant Control for AUVs Using aSingle Thruster. *IEEE Access* (2022), 18.
- [4] CRASTA, N., MORENO-SALINAS, D., PASCOAL, A. M., AND ARANDA, J. Multiple autonomous surface vehicle motion planning for cooperative range-based underwater target localization. *Annual Reviews in Control* 46 (2018), 326 – 342.
- [5] FOSSEN, T. I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics AS, Trondheim, 2002.
- [6] GHABCHELOO, R., AGUIAR, A. P., PASCOAL, A., SILVESTRE, C., KAMINER, I., AND HESPANHA, J. Coordinated Path-Following in the Presence of Communication Losses and Time Delays. *SIAM Journal on Control and Optimization* 48, 1 (2009), 234–265. eprint: <https://doi.org/10.1137/060678993>.
- [7] KRAMER, O. *Genetic Algorithm Essentials*, 1 ed., vol. 679 of *Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2017.
- [8] MORENO-SALINAS, D., PASCOAL, A., AND ARANDA, J. Optimal Sensor Placement for Acoustic Underwater Target Positioning With Range-Only Measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 41, 3 (2016), 620–643.
- [9] SNAME. Nomenclature for Treating the Motion of a Sumerged Body Through a Fluid. Tech. rep., The Society of naval Architects and Marine Engineers, 1950. Series: Technical and research bulletin N^o 3-47.
- [10] TOLSTOV, G. P., AND SILVERMAN, R. A. *Fourier Series*. Dover Publications, Inc., June 1976.
- [11] VAN LAARHOVEN, P. J. M., AND AARTS, E. H. L. Simulated annealing. In *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Springer Netherlands, Dordrecht, 1987, pp. 7–15.
- [12] YE, Y. *Interior Point Algorithms: Theory and Analysis*. John Wiley & Sons, Oct. 2011.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).