

Jornadas de Automática

Generación de movimientos oceánicos para pruebas sistemáticas con Plataforma Stewart

Silva-Muñiz, D.^{a,*}, Garrido, J.^a, Riveiro, E.^a, Rivera-Andrade, J.^a

^aGrupo en Ingeniería Eficiente y Digital (EN.EDI), Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, C/ Maxwell, nº 9, 36310, Vigo, España

To cite this article: Silva-Muñiz, D., Garrido, J., Riveiro, E., Rivera-Andrade, J. 2024. Wave motion generation for systematic testing using a Stewart Platform. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10785>

Resumen

En esta investigación se emplea una plataforma Stewart desarrollada por el grupo de investigación con el fin de poder emular condiciones oceánicas para realizar pruebas sistemáticas. Específicamente, se generan los movimientos oceánicos basándose en el espectro de energía de las olas JONSWAP y el modelo armónico simple de la superficie marina derivado del espectro, como superposición de ondas regulares. De esta forma se obtiene una ola irregular. La contribución también incluye la implementación utilizando únicamente los recursos disponibles en un controlador industrial, sin usar *software* externo. En la fase de resultados, se muestran dos movimientos generados y se comparan con los obtenidos con un sensor MRU y la cinemática directa calculada en el propio controlador industrial. Como trabajo futuro, se plantea expandir la generación a espectros bidimensionales.

Palabras clave: Robótica, Sistemas de control de movimiento, Mecatrónica, Automatas programables, Robots manipuladores

Wave motion generation for systematic testing using a Stewart Platform

Abstract

This research uses a Stewart platform developed by the research group to emulate oceanic conditions for systematic testing. Specifically, ocean motions are generated based on the JONSWAP wave energy spectrum and the simple harmonic model of the sea surface derived from the spectrum, as a superposition of regular waves. Thus, an irregular wave is obtained. The contribution also includes the implementation using only the resources available in an industrial controller, without using external *software*. The results phase shows two generated movements and compares them with those obtained using an MRU sensor and the direct kinematics calculated in the industrial controller itself. As future work, it is proposed to use a two-dimensional spectrum model.

Keywords: Robotics technology, Motion Control Systems, Mechatronics, Programmable logic controllers, Robots manipulators

1. Introducción

La plataforma Stewart es uno de los robots de tipo paralelo más conocidos. De forma general, una plataforma Stewart se basa en el uso de dos cuerpos rígidos (base y móvil), que están conectados, generalmente, por seis patas con articulaciones esféricas en sus extremos inferior y superior (denominadas configuraciones SPS, *Spherical-Prismatic-Spherical*) (Chen et al., 2024) o con una articulación universal en un extremo y una articulación esférica en el otro (denominadas UPS, *Universal-Prismatic-Spherical*) (Arconada et al., 2023). Estas patas pueden basarse en actuadores lineales extensibles (Wali-

ca and Noskievič, 2024) o en manivelas giratorias (Wei, 2021). La Figura 1 muestra la plataforma Stewart desarrollada en esta investigación, hecha con cilindros eléctricos (actuadores lineales) y de tipo UPS.

Su uso se extiende a múltiples aplicaciones, como simuladores de vuelo y movimiento de vehículos (Arconada et al., 2023), aislamiento de vibraciones y estabilizadores (Chen et al., 2024), etc. Una aplicación habitual en el ámbito marítimo es el uso de estas plataformas para la emulación de movimientos oceánicos, tanto para realizar olas regulares (simples, sinusoidales) como irregulares (también llamadas reales). Pa-

*Autor para correspondencia: diego.silva.muniz@uvigo.gal
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

ra este primer caso, (Chuan et al., 2018) utilizaron una plataforma Stewart para reproducir el movimiento oceánico de un modelo de barco que transfiere datos sobre el movimiento de las olas por radiocomunicación, aunque usando un modelo simple de las olas. (Wei et al., 2019) utilizaron olas simples para generar la perturbación oceánica externa sobre un sistema para probar el cálculo de la cinemática inversa con algoritmos difusos.

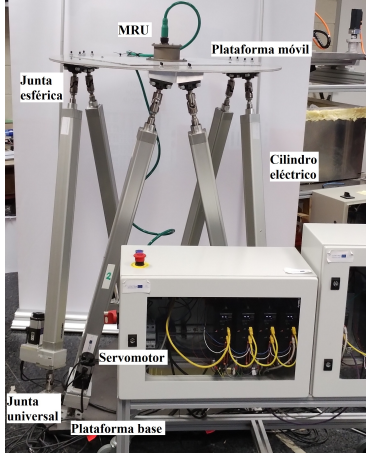


Figura 1: Plataforma Stewart desarrollada.

Para el caso de la generación de olas irregulares, es común el uso combinado de la plataforma Stewart con el espectro JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Por ejemplo, (Yazid et al., 2021) y (Cai et al., 2021) utilizaron el espectro JONSWAP de la *toolbox* de Marine System Simulator (MSS) de MATLAB para generar las perturbaciones oceánicas de manera sistemática. (Han and Chen, 2021) desarrollaron un modelo de simulación del movimiento del barco en las olas para un banco de pruebas hidráulico de seis grados de libertad, empleando técnicas de CFD y DFBI y resolviendo la superficie libre con el *software* STAR-CCM+.

Sin embargo, estos estudios anteriores no se centran en la utilización de solamente un controlador industrial (sin emplear entornos de terceros (por ejemplo MATLAB, ADAMS, etc.) para realizar los cálculos y el control para generar movimientos oceánicos simples y complejos según el espectro de JONSWAP. De este modo, la plataforma Stewart propuesta proporciona una forma sistemática y controlada de emular los movimientos oceánicos.

2. Plataforma Stewart

2.1. Cinemática inversa

La Tabla 1 resume los parámetros geométricos de la plataforma Stewart desarrollada. Para resolver las cinemáticas de este robot, se emplea el método vectorial de lazo cerrado (Figura 2). La cinemática inversa calcula la longitud absoluta de cada cilindro para lograr una determinada pose espacial, que incluye tanto la posición como la orientación en el espacio. La ecuación (1) muestra la cinemática inversa utilizada en la plataforma Stewart,

$$l_i = \|\vec{L}_i\| = \|R\vec{P}_i + \vec{X}_i - \vec{B}_i\| - l_0, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

donde, \vec{X}_i representa el vector de posición objetivo desde el sistema de coordenadas de la plataforma móvil hasta el sistema de coordenadas de la base. \vec{P}_i y \vec{B}_i son los vectores que conectan los puntos de cada cilindro con las plataformas móviles y la base, en relación con su sistema de coordenadas correspondiente. R es una matriz de rotación *Roll-Pitch-Yaw* y l_0 es la longitud mínima (en reposo) del cilindro.

Tabla 1: Parámetros geométricos de la plataforma Stewart

Parámetro	Variable	Valor
Radio plataforma base	r_b	470.45 mm
Radio plataforma superior	r_p	388.95 mm
Altura inicial entre plataformas	h_0	1374.00 mm
Altura inicial cilindro	l_0	1192.63 mm
Altura juntas universales inf.	h_b	95.00 mm
Altura juntas universales sup.	h_p	-115.00 mm
Ángulo ensamble platf. base	φ_b	24.07 °
Ángulo ensamble platf. móvil	φ_p	103.60 °

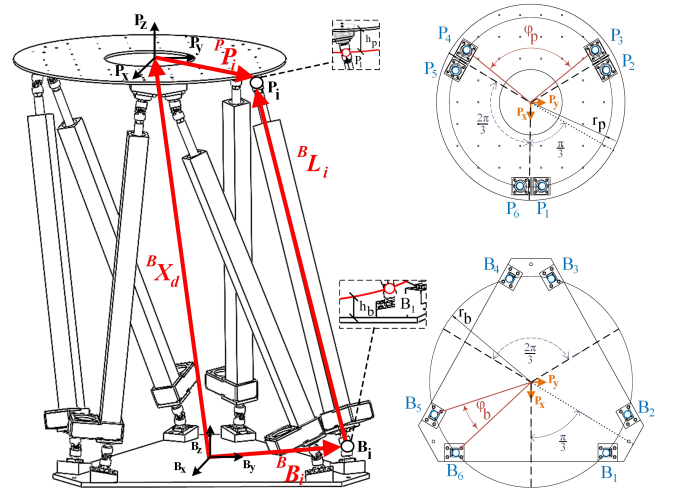


Figura 2: Esquema en bucle cerrado de una pata de la Plataforma Stewart y ubicaciones de las articulaciones de la plataforma móvil y base.

El valor de los vectores \vec{P}_i y \vec{B}_i vienen determinados por el diseño de la plataforma base y la móvil, representados por (2) y (3) respectivamente. El diseño implementado siguió el criterio de un círculo único, utilizando una configuración simétrica para distribuir la carga de manera uniforme alrededor del centro de la plataforma (Madsen and Kristensen, 2012). Para ello se definen los radios de la plataforma base y móvil (r_b y r_p) y los ángulos formados por los dos puntos consecutivos de montaje del actuador de ambas plataformas (θ_i y ϕ_i) que aseguran una simetría y espaciado angular igual entre las uniones de los actuadores, detallados en (4) utilizando parámetros de la Tabla 1 y mostrados en la Figura 1.

$${}^B\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(\theta_i) \\ r_b \sin(\theta_i) \\ h_b \end{bmatrix}, \quad i = 1 \dots 6 \quad (2)$$

$${}^P\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p \cos(\phi_i) \\ r_p \sin(\phi_i) \\ h_p \end{bmatrix}, \quad i = 1 \dots 6 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \theta_i = \frac{2i\pi - 3\varphi_b}{6}, & \phi_i = \frac{2i\pi - 3\varphi_p}{6}, & i = 1, 3, 5 \\ \theta_i = \theta_{i-1} + \varphi_b, & \phi_i = \phi_{i-1} + \varphi_p, & i = 2, 4, 6 \end{cases} \quad (4)$$

2.2. Cinemática directa

La obtención de la pose en este tipo de robot paralelo implica encontrar una solución de forma cerrada a seis ecuaciones no lineales simultáneas con seis variables desconocidas. Para resolver este problema, se optó por utilizar el método numérico iterativo de Newton-Raphson. La ecuación (5) muestra el método de Newton-Raphson aplicado al caso de la cinemática directa,

$$a_{n+1} = a_n + \Delta\varepsilon = a_n - J^{-1}(a_n) \left(l_i^2(a_n) - L_{im}^2 \right) \quad (5)$$

donde a_n representa el valor de la pose actual, a_{n+1} es la posición de la siguiente iteración, y $\Delta\varepsilon$ es el incremento de posición entre las iteraciones, que representa el umbral en el algoritmo de Newton-Raphson. Cuando este umbral sea menor que un valor predefinido, el algoritmo dejará de calcular nuevas posiciones y el resultado de la cinemática directa será el último calculado. Para calcular $\Delta\varepsilon$ se necesitan los parámetros de $l_i(a_n)$, que es el desplazamiento calculado del cilindro i -ésimo para la pose de la iteración actual, L_{im} que es el desplazamiento real medido a través de los *encoders* del cilindro i -ésimo, y $J^{-1}(a_n)$ que es la matriz jacobiana inversa evaluada en la pose actual del algoritmo.

3. Generación de movimiento oceánico

La teoría de ondas regulares se utiliza en sistemas donde las olas se modelan con una altura y período específicos, lo que simplifica el análisis para predecir respuestas de sistemas en condiciones extremas. En cambio, las olas oceánicas irregulares se caracterizan mediante un espectro de densidad energética, que refleja la energía y su distribución en un rango de frecuencias. Este método es más realista y es usado para ajustes y validaciones (Zhang et al., 2022).

3.1. Ola irregular

3.1.1. Densidad Espectral de Energía

Las olas irregulares se describen normalmente mediante parámetros estadísticos. Existen varias fórmulas de espectro que se utilizan en el diseño de estructuras marinas, donde los modelos más usados son el Pierson-Moskowitz y el JONSWAP. Estas fórmulas se derivan de las propiedades observadas de las olas oceánicas y por lo tanto son empíricas por naturaleza.

JONSWAP es una función de densidad espectral de energía definido por (Hasselmann et al., 1973) tras analizar los datos de olas marinas limitadas por el *fetch* (longitud de arrastre) recolectados durante 1968 y 1969. Este espectro es una modificación del espectro de Pierson-Moskowitz, aunque considerando el efecto del *fetch* y se usa para representar olas generadas por el viento que aún están en proceso de desarrollo. Un ejemplo de espectro de JONSWAP se puede consultar en la sección de Resultados. El espectro JONSWAP, que es

considerado como el espectro oceánico estándar internacional (Zhang et al., 2022), se define como (6) en (Xu et al., 2022),

$$S = \left(\frac{\alpha \cdot g^2}{\omega^5} \right) \cdot \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right) \cdot \gamma \exp \left(\frac{(\omega - \omega_p)^2}{-2\sigma^2 \omega_p^2} \right) \quad (6)$$

donde S representa el espectro de energía de las olas, describiendo la distribución de energía a lo largo de diferentes frecuencias. El coeficiente de pico α (constante de Phillips) determina la altura absoluta del pico espectral. ω representa la frecuencia angular de las olas y ω_p la frecuencia angular pico. La aceleración de la gravedad, g , representa la influencia gravitacional en la formación y comportamiento de las olas. Finalmente, el parámetro de forma/pico, γ , ajusta la forma del espectro de energía influyendo en la concentración de energía alrededor de la frecuencia pico. En (Sun et al., 2023) se recomienda utilizar para el factor de forma el valor de 3.3 unidimensional de manera general. Si este valor se reduce a 1.0, se consigue un espectro de tipo Pierson-Moskowitz. Sin embargo, este también puede ser calculado siguiendo (7) aunque es importante resaltar que para obtener un modelo razonable debe ser usado con cuidado fuera del intervalo ($3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$), como se indica en (Det Norske Veritas, 2011). Finalmente, σ indica la desviación estándar de la distribución de la energía en el espectro alrededor del pico, calculada a partir de (8).

$$\begin{cases} \gamma = 5, & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \\ \gamma = \exp \left(5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right), & 3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \\ \gamma = 1, & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \geq 5 \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{if } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (8)$$

Al describir estos espectros, se necesitan varios parámetros de entrada que influyen directamente en la manera de calcular α y ω . Principalmente hay dos formas de especificar los parámetros de entrada, a partir de:

1. La altura significativa de la ola (H_s) y el período de pico de la ola (T_p), que resultan en (9) (Chakrabarti, 2005). Esta opción es la utilizada en el artículo.
2. La velocidad de la ola medida a 10 m y la distancia horizontal sobre la cual el viento interactúa con el mar (Hasselmann et al., 1973).

$$\begin{cases} \alpha = (1 - 0,287 \ln \gamma) \cdot 5,058 \cdot \left(\frac{H_s}{T_p^2} \right)^2 \\ \omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \end{cases} \quad (9)$$

3.1.2. Modelado de la superficie marina

El estado del mar se representa con mayor realismo a través de las olas irregulares, visualizando el océano como una superposición de ondas regulares armónicas simples, ya sean ondas seno o coseno, en línea con el modelo de (Longuet-Higgins, 1952). Este método utiliza el espectro de densidad de energía de olas oceánicas para representar la complejidad del entorno marino. La formulación matemática no sólo proporciona un registro de la elevación de la superficie del mar a lo largo del tiempo, sino que también captura la energía acumulada de todas las ondas individuales, como se detalla en (10).

Así, la amplitud de cada onda se relaciona directamente con la función de densidad espectral según (11), y el espectro JONSWAP se utiliza para descomponer en segmentos N con intervalos de $\Delta\omega$ como en (12), lo que permite obtener una ola irregular superponiendo aleatoriamente estos componentes mediante la serie de Fourier.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \eta_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \epsilon_i) \quad (10)$$

donde $\eta(t)$ representa la superficie marina en cada instante, A_i es la energía de cada armónica simple, ω_i es la frecuencia de cada armónica simple, y ϵ_i es la fase aleatoria en el rango de 0 a 2π . Debido a la existencia de este parámetro aleatorio ϵ_i , el proceso de generación de olas irregulares consigue una naturaleza aleatoria similar a la ola oceánica real, como se menciona en (Tabeshpour and Belvasi, 2023).

$$A_i = \sqrt{2 \cdot S(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{N} \quad (12)$$

Al usar el método de superposición de ondas para simular olas irregulares, es crucial la selección del rango de frecuencias para incluir la mayoría de la energía del espectro simulado. En (Sun et al., 2023) se recomienda que el rango de la frecuencia de corte esté entre 0.5 (ω_{min}) y 4 veces (ω_{max}) la frecuencia espectral pico ω_p . Además, se indica que el número de divisiones (N) generalmente no debería ser inferior a 150, ya que este valor afecta significativamente a los resultados de la simulación.

3.2. Ola regular

En esta investigación se consideran las olas como oscilaciones armónicas simples temporales de la superficie del mar. Es decir, sin la propagación espacial de una ola oceánica y solo la variación temporal de la amplitud en un punto fijo. Por lo tanto, la ola regular es un caso particular de (10) de una sola componente, donde solo es necesario especificar la amplitud y el período de la sinusoides.

4. Arquitectura de automatización

La arquitectura de automatización implementada en la plataforma Stewart corresponde a la presentada en la Figura 3. Se resaltan las tareas principales que intervienen en esta arquitectura: tarea de usuario (principal), tarea NC (control numérico), tarea de comunicaciones en tiempo real (RTC), y tarea del servoamplificador. La tarea principal del controlador se encarga, en cada ciclo, de gestionar las maniobras de la máquina, la gestión del estado de los servomotores, la generación de trayectorias, el cálculo de cinemáticas, generación de consignas para los servomotores, etc. Cada nueva consigna de posición de los servomotores se envía directamente a los servoamplificadores desde la tarea principal a través de la tarea NC. 'MC_SyncMoveAbsolute' (OMRON Corporation, 2019b) es el recurso implementado por el fabricante del controlador de movimiento que permite transferir a los servoamplificadores la posición (en milímetros) calculada en el programa de usuario a comando de pulsos. Esta consigna es enviada a través

de EtherCAT (tarea RTC) desde el controlador industrial a los servoamplificadores. Finalmente, en un ciclo rápido, el servoamplificador implementa de fábrica un bucle de control en cascada para regular la corriente entregada al servomotor y alcanzar la posición de comando.

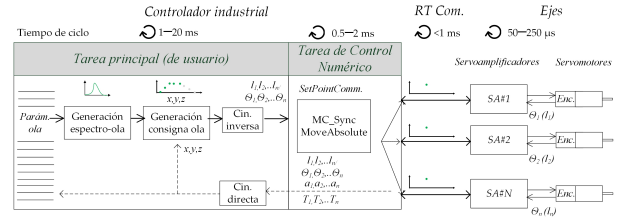


Figura 3: Arquitectura de automatización de referencia.

Concretamente, el hardware utilizado en la plataforma consiste en: unos cilindros eléctricos 'PNCE-50-BS-2010-600-S' de la marca UNIMOTION, seis servoamplificadores 'R88D-1SN04H-ECT', seis servomotores 'R88M-1M40030(H/T)' y un controlador de movimiento 'NJ501-1300', todos ellos de la marca OMRON. Los algoritmos, así como la secuencia del proceso y la generación de movimiento, entre otros, se implementaron en el controlador siguiendo el lenguaje de programación Structured Text, estandarizado por IEC 61131-3.

El proceso implementado para la generación de la ola irregular es el siguiente. Considerando la especificación inicial de los parámetros de entrada (H_s , T_p , w , γ , N , N_{sel}), se genera el espectro. Para ello se aplica el grupo de ecuaciones (6)-(9) y (11)-(12). De esta forma se obtienen tres matrices unidimensionales que contienen la información del espectro: S , W , y A . Tras lo cual, se procede a escoger las parejas de frecuencias y amplitudes que más representativas. Esto se realiza ordenando la matriz S de mayor a menor (utilizando la función 'RecSort' (OMRON Corporation, 2019a)) y quedándose con los N_{sel} en una matriz auxiliar S_{aux} . A continuación se realiza una búsqueda cruzada del valor de cada elemento de la matriz ordenada en la matriz original para obtener el índice que tiene cada valor en la matriz original S (utilizando la función 'RecSearch' (OMRON Corporation, 2019a)). Con estos índices, se extraen los valores seleccionados en las matrices A y W . Esta parte del proceso (ordenar vectores, extraer índices y obtener la pareja de amplitudes y frecuencias más contribuyentes, 'Generación espectro-ola' en Figura 3) es previo a la generación de la ola.

El siguiente paso es generar una fase aleatoria para los N_{sel} valores seleccionados. Si se especifica un valor de semilla, se puede conseguir la misma generación aleatoria de fases para repetir las mismas pruebas sistemáticamente. De esta forma, ya se tiene toda la información de cada sinusoidal que corresponden al movimiento de la ola irregular, ('Generación consigna-ola' en Figura 3). Al iniciar el movimiento, se aplica (10) en cada ciclo del controlador industrial, donde el parámetro t , es un parámetro incremental con el ciclo del controlador para ir generando los nuevos puntos. A cada nuevo punto de la ola se le aplica la cinemática inversa y se obtiene el conjunto de valores para desplazar los cilindros. Paralelamente, se aplica una curva envolvente para suavizar el proceso de arranque y paro de la generación de puntos de la ola, y se ejecuta la

cinemática directa para obtener una realimentación de la pose de la plataforma Stewart.

4.1. Curva envolvente para suavizar el proceso de arranque y paro

Estos cilindros se controlan por posición, es decir, se le envía una nueva consigna en cada ciclo. Para prevenir a los servomotores de picos en la demanda de par en los instantes iniciales del movimiento (y de valores altos en la aceleración), se aplica una función envolvente a la que rige el movimiento principal, como se muestra en 13.

$$M(t) = E(t) \cdot \eta(t) = \frac{1}{1 + e^{-x_1 \cdot (t-x_2)}} \cdot \eta(t) \quad (13)$$

donde $E(t)$ es la función envolvente (para esta aplicación una sigmoide), $M(t)$ representa la función resultante de aplicarle la envolvente a la ecuación de la ola irregular $\eta(t)$, t representa el tiempo de ejecución de la trayectoria, x_1 es una constante que determina la pendiente de la sigmoide, x_2 un parámetro que acerca a la función a 0 para valores de t menores que 0. Los valores usados para x_1 y x_2 son: 0.5 y 10 para el proceso de arranque, y -0.5 y 10 para el de parada. En la Figura 4 se puede observar el funcionamiento de esta estrategia a la hora de ir generando las consignas de posición.

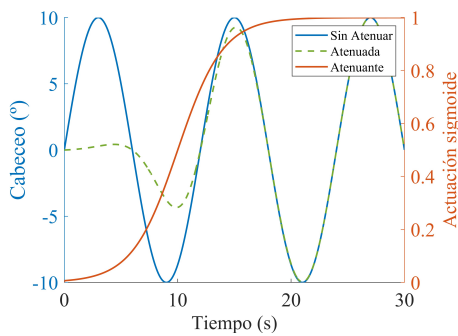


Figura 4: Ejemplo de funcionamiento con aplicación de curva envolvente.

5. Resultados

Se realizaron dos experimentos para comprobar la generación de olas regulares e irregulares en la plataforma Stewart. Para ello, se posicionó una unidad de medición inercial (SMC-IMU-008 (Ship Motion Control, 2024)) en el centro de la Plataforma Stewart para obtener así una realimentación del movimiento, como se puede ver en la Figura 1. Utilizando un script de python, se obtuvieron los datos del sensor a través de consultas de tipo HTTP-GET con una frecuencia de 1 dato cada 8 ms aproximadamente.

El primer experimento se centró en inclinar la plataforma sobre el eje Y (cabecceo) con una amplitud de 10 ° y un período de 12 s. La Figura 5 muestra el movimiento comandado, el obtenido con el sensor inercial y el resultado del cálculo de la cinemática directa.

Para el segundo experimento se generó un espectro de JONSWAP con los parámetros de 0.2 m de altura significativa, 4.5 s de período pico, 3.3 el factor de forma, y las 50 frecuencias que más contribuían al espectro generado con 200 frecuencias.

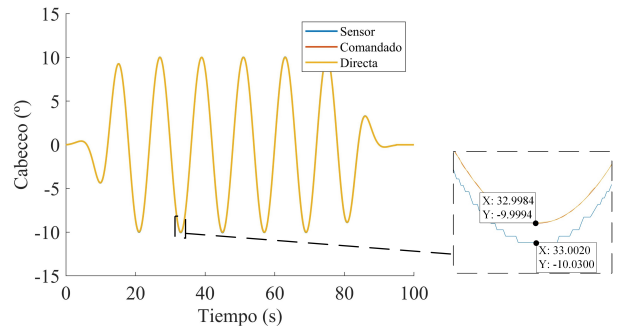


Figura 5: Ola simple generada para el movimiento de cabecceo (rotación eje Y, pitch). Se amplía la mayor diferencia entre medición del MRU y la consigna.

El movimiento resultante fue escalado para que no superase el intervalo de inclinación [-15 °, 15 °]. Con este espectro, se generó un perfil de ola irregular para inclinar la plataforma sobre el eje X y el eje Y, balanceo y cabecceo respectivamente. La Figura 6 muestra el espectro generado, mientras que en la Figura 7 se puede observar el movimiento comandado en ambos ejes, el obtenido con el sensor inercial y el resultado del cálculo de la cinemática directa.

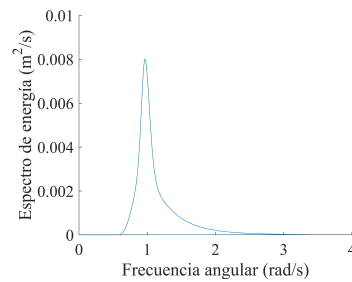


Figura 6: Densidad espectral de energía del espectro JONSWAP generado

Para favorecer la comparación visual, se han superpuesto las tres señales y se muestra en detalle ampliado la mayor diferencia entre la medición del MRU y la consigna. Como se puede ver en las Figuras 5 y 7, la plataforma Stewart es capaz de realizar el movimiento según lo comandando, como se puede comprobar a través del sensor y de la cinemática directa. Se puede ver también que la medida del sensor no coincide exactamente con la obtenida de la cinemática directa y la comandada (detalles en las Figuras 5 y 7), aunque se obtienen los valores prácticamente a los comandados. Esto se debe a que el sensor cuenta con una precisión media en el cálculo del ángulo de 0.20 ° RMS, y que aumenta a 0.25 ° RMS cuando realiza movimientos simultáneos de balanceo y cabecceo de amplitudes de 5 °, como es el caso del segundo experimento.

6. Conclusiones

Cuando se requiere emular movimientos complejos con plataformas Stewart, es habitual apoyarse en software de terceros, lo que dificulta la arquitectura de implementación.

Este artículo, sin embargo, propone como novedad utilizar únicamente los recursos proporcionados por el controlador industrial, sin utilizar software externos que dependen de comunicaciones entre los sistemas. De esta forma se permite expandir la industrialización de este tipo de plataformas para este ámbito.

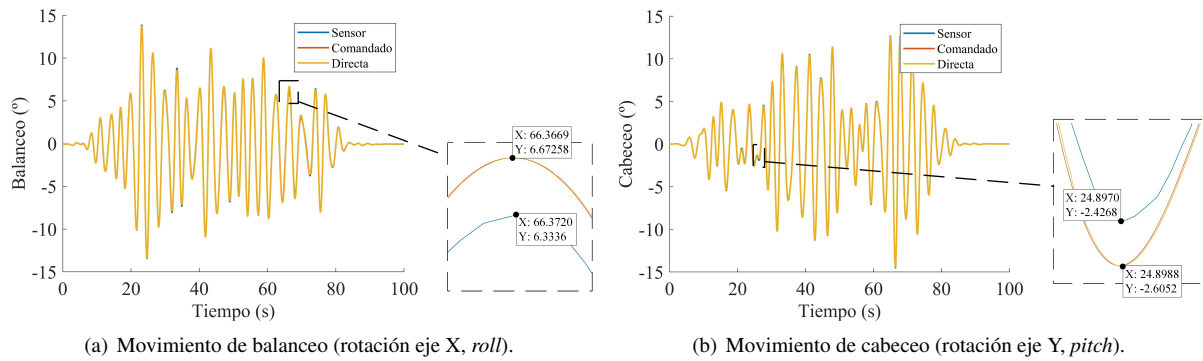


Figura 7: Olas irregulares generadas simultáneamente. Se amplia la zona con mayor diferencia entre la medición del MRU y la consigna.

Para ello, se utiliza una plataforma Stewart como generador de olas y se realizan dos experimentos inclinando la plataforma: el primero una inclinación sencilla de ola regular, y el segundo una inclinación compleja en dos orientaciones basada en un perfil de ola irregular que proviene de un espectro JONSWAP generado en el controlador industrial.

Como trabajo futuro se plantea expandir el espectro generado a un espectro bidimensional que tiene en cuenta la coexistencia de oleaje de viento y de fondo (*wind sea* y *swell*). Esto se puede implementar utilizando el Espectro de Guedes-Soares, que se basa en la superposición de dos espectros JONSWAP.

Agradecimientos

Diego Silva-Muñiz agradece a la Universidade de Vigo por su beca predoctoral (00VI 131H 6410211-2023).

Referencias

- Arconada, V. S., García-Barruetaña, J., Haas, R., 2023. Validation of a ride comfort simulation strategy on an electric Stewart Platform for real road driving applications. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 42 (1), 368–391.
DOI: 10.1177/14613484221122109
- Cai, Y., Zheng, S., Liu, W., Qu, Z., Zhu, J., Han, J., 2021. Sliding-mode control of ship-mounted Stewart platforms for wave compensation using velocity feedforward. *Ocean Engineering* 236, 109477.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109477
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Ocean Environment*. In: Chakrabarti, S. K. (Ed.), *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier, Illinois, USA, Ch. 3, pp. 79–131.
- Chen, W., Du, C., Tong, J., Liu, F., Men, Y., 2024. Dynamics Solution and Characteristics Analysis of a 6-SPS Passive Vibration Isolator Based on MS-DT-TMM. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 12 (3), 4463–4482.
DOI: 10.1007/s42417-023-01131-z
- Chuan, W., Huafeng, D., Lei, H., 2018. A dynamic ocean wave simulator based on six-degrees of freedom parallel platform. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 232 (20), 3722–3732.
DOI: 10.1177/0954406217739647
- Det Norske Veritas, 2011. *Modelling and analysis of marine operations. Prácticas Recomendadas DNV-RP-H103*, Det Norske Veritas.
URL: https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/DNV/rp-h103_2011-04.pdf
- Han, B., Chen, N., 2021. Simulation of Ship Trajectory in Waves Based on STAR-CCM+. *Bulletin of Science and Practice* 7 (4), 267–275.
DOI: 10.33619/2414-2948/65/30
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, A., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A Nr. 12*.
- Longuet-Higgins, M., 1952. On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. *Journal of Marine Research* 11 (3).
- Madsen, A. L., Kristensen, SG., 2012. *Design of Stewart Platform for Wave Compensation*. Aalborg University, Aalborg, Denmark.
URL: https://vbn.aau.dk/ws/files/63502229/EMSD415a_Final.pdf
- OMRON Corporation, 2019a. *NJ/NX-Series Instructions Reference Manual*. Kyoto, Japan.
URL: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v4/w502_nx_nj-series_instructions_reference_manual_en.pdf
- OMRON Corporation, 2019b. *NJ/NX-Series Motion Control Instructions Reference Manual*. Kyoto, Japan.
URL: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v2/w508_nx_nj-series_motion_control_instructions_reference_manual_en.pdf
- Ship Motion Control, 2024. *MRU IMU-008 Roll/Pitch/Heave*.
URL: <https://www.store.shipmotion.eu/smc-imu-008-roll-pitch-heave-surface-mru>
- Sun, L., Yang, X.-Q., Bu, S.-X., Zheng, W.-T., Ma, Y.-X., Jiao, Z.-L., 2023. Analysis of FPSO Motion Response under Different Wave Spectra. *Journal of Marine Science and Engineering* 11 (7), 1467.
DOI: 10.3390/jmse11071467
- Tabeshpour, M. R., Belvasi, N., 2023. Ocean waves time-series generation: Minimum required artificial wave time-series for wave energy converter analysis. *Journal of Marine Engineering & Technology* 22 (6), 273–283.
DOI: 10.1080/20464177.2023.2197280
- Walica, D., Noskiewicz, P., 2024. Multibody Simulation Model as Part of Digital Twin Architecture: Stewart Platform Example. *IEEE Access* 12, 3700–3717.
DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3349247
- Wei, M.-Y., 2021. Design and Implementation of Inverse Kinematics and Motion Monitoring System for 6DoF Platform. *Applied Sciences* 11 (19), 9330.
DOI: 10.3390/app11199330
- Wei, Y., Wang, A., Han, H., 2019. Ocean wave active compensation analysis of inverse kinematics for hybrid boarding system based on fuzzy algorithm. *Ocean Engineering* 182, 577–583.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.059
- Xu, Y., Liang, S., Sun, Z., Xue, Q., 2022. A new spectral parameter to predict dominant wave breaking based on the JONSWAP spectrum. *Ocean Engineering* 243, 110332.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110332
- Yazid, E., Mirdanie, M., Ardiansyah, R. A., Rahmat, Ristiana, R., Sulaeman, Y., 2021. Inverse Kinematics Model for a Ship Mounted Two-DoF Manipulator System. In: *2021 IEEE Ocean Engineering Technology and Innovation Conference (OETIC)*. IEEE, Jakarta, Indonesia, pp. 50–56.
DOI: 10.1109/OETIC53770.2021.9733723
- Zhang, Q., Wang, X.-y., Zhang, Z.-z., Zhou, F.-n., Hu, X., 2022. Wave Heave Compensation Based on An Optimized Backstepping Control Method. *China Ocean Engineering* 36 (6), 959–968.
DOI: 10.1007/s13344-022-0084-x