

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN HOVERCRAFT DE RADIO CONTROL SUBACTUADO

**Joaquín Aranda Almansa, Carlos Hernández Cuesta, Sebastián Dormido Canto,
José Manuel Díaz Martínez, Rocío Muñoz Mansilla**
{jaranda, chernandez, sebas, josema, rmunoz}@dia.uned.es
U.N.E.D. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Dpto. Informática y Automática
C/Juan del Rosal, 16, 28040 Madrid.

Resumen

El hovercraft de R/C que se modela corresponde a uno de los sistemas que se dispone en el laboratorio de control de vehículos subactuados. Este sistema tiene unas características que lo hacen especialmente interesante como plataforma didáctica y de experimentación. Un problema interesante y difícil en general, es el control de vehículos subactuados. Este tipo de control tiene un gran interés en ciertos campos industriales, como puede ser el naval (ciertos tipos de barcos y plataformas que requieren posicionamiento dinámico), el aerospacial (por ejemplo el control de posición de satélites), etc.

El modelado se ha realizado de forma estructurada según los principios del modelado orientado a objetos con el fin de poder reutilizar el modelo cuando sea necesario. El objetivo es crear un entorno de simulación con el que poder estudiar el comportamiento del hovercraft y distintas estrategias de control.

Palabras Clave: Modelado orientado a objetos, transformación de coordenadas, ángulos de Euler, hovercraft de R/C, vehículo subactuado.

1 INTRODUCCIÓN

El control de posición de vehículos subactuados (vehículos con menos entradas de control independientes que grados de libertad a controlar), es en general un problema difícil. Por ejemplo, son difíciles el control de posición de vehículos como satélites, hovercraft o dirigibles, al menos que se tenga un número suficiente de propulsores y actuadores. En estos sistemas, además, por el rango de actuación que necesitan, tienen una dinámica inherentemente no lineal.

En las referencias [1] a [3] se pueden ver algunos ejemplos de diseño de control para estos sistemas subactuados.

Un sistema que se ha empezado a utilizar como banco de pruebas en laboratorio son maquetas de tamaño pequeño, como es el caso de un hovercraft de radio control. En [4] y [5] se observa algunos diseños de control para sistemas de este tipo.

Este es el interés que nos ha llevado a disponer de modelos adecuados para simulación de un sistema de estas características, que podemos disponer en nuestro propio laboratorio.

El entorno de simulación realizado es una herramienta potente y útil para el diseño y evaluación previo a la implementación en el sistema real.

Además el sistema es fuertemente no lineal y esto hay que tenerlo en cuenta tanto en el modelo como a la hora de diseñar las estrategias de control para controlar el hovercraft.

Este tipo de sistemas con valores discretos en las entradas pertenecen a una clase de sistemas híbridos que se están estudiando de forma activa en los últimos años (ver referencias [6] a [8])

La herramienta que se ha elegido para realizar el modelado es Simulink, que es un entorno de modelado gráfico en el cual el modelo se construye conectando bloques que pueden ser integradores, ganancias, funciones, etc., de forma adecuada para implementar las ecuaciones del sistema.

El tipo de modelo que se ha seguido para el hovercraft se basa en los principios físicos que rigen el comportamiento del sistema. Esto conlleva un conocimiento profundo de la física del sistema que se quiere modelar.

A la hora de realizar un modelo siempre es necesario hacer un estudio del sistema y establecer las hipótesis necesarias de funcionamiento teniendo en cuenta el efecto que puede causar a la dinámica del sistema cualquier factor que afecte al mismo. Hay que considerar la aplicación de forma que se simplifique el modelo dentro de lo que sea posible.

Cuando se implementa un modelo, y si se quiere aplicar los conceptos del modelado orientado a

objetos, es conveniente realizar un modelo general y lo más completo posible con vistas a su reutilización. Por ello también es conveniente permitir ajustar el modelo a las aplicaciones particulares en que se vaya a utilizar, es decir, permitir mediante parámetros desprestigiar algún efecto que no sea apreciable en la aplicación que se esté haciendo del modelo.

En los siguientes apartados del artículo se va a realizar una descripción del sistema a modelar en la que se va a indicar las características más importantes del hovercraft de R/C. Luego se procederá a explicar cómo se ha implementado el modelo en Simulink para finalizar con una serie de ejemplos que muestran que el modelo realizado concuerda con el comportamiento esperado.

2 SISTEMA A MODELAR.

El sistema que se va a modelar es un hovercraft de R/C (Taiyo Edge R/C) que se puede ver en la figura 1:



Figura 1: Hovercraft de R/C

El hovercraft tiene dos motores que se encuentran fijos en el cuerpo y que generan empuje únicamente con tres valores. En comparación con estudios anteriores aparecidos en la literatura, como por ejemplo [9], este hovercraft posee menos grados de libertad para actuación lo que produce que sea más difícil de controlar. Más aún, los valores discretos del empuje de los motores del hovercraft son asimétricos en el sentido de que el empuje de avance y el de retroceso no son iguales en magnitud. Por lo tanto, el control de orientación mediante el empuje en direcciones opuestas afecta a la posición invariablemente, lo cual hace el control de posición aún más complicado.

Los parámetros característicos del hovercraft se muestran en la tabla 1:

Masa	0.894 Kg
Momento de Inercia	0.0125 Kgm ²
Dimensiones	356x21x142 mm
F _{motores}	0.342,0, -0.121 N

Tabla 1: Parámetros del hovercraft

De esta tabla hay que destacar que la magnitud de las fuerzas que proporcionan los motores son valores discretos, es decir, permiten el avance, el retroceso y la parada.

Para trabajar con este sistema que es subactuado hay que tener en consideración que el entorno presenta poca fricción y el hovercraft se mueve en direcciones en las que no se está actuando, lo que produce que realizar el control del hovercraft sea complicado.

Se ha pretendido que el modelo del hovercraft fuera lo más general posible para facilitar la reutilización del modelo en otras situaciones. Por ello como representación del sistema se ha elegido la representación del sólido rígido con seis grados de libertad. Estos grados de libertad corresponden a los tres grados de traslación (x, y, z) y a los tres de rotación (ϕ, ψ, θ).

En nuestro sistema en particular no tenemos los seis grados de libertad, sino sólo tres que corresponden al movimiento en el plano (x, y) y a la rotación en torno al eje Z del hovercraft (θ).

Antes de implementar y ver cuáles son las ecuaciones del movimiento hay que tener en cuenta los sistemas de referencia que se van a considerar. En nuestro caso son dos sistemas de referencia: uno ligado al hovercraft y otro externo y fijo ligado a tierra (figuras 2 y 3).

El sistema ligado al hovercraft se denomina sistema ligado al cuerpo y es en este sistema de referencia en el que se va a expresar las fuerzas y momentos aplicados al hovercraft. En este sistema de referencia el eje x está orientado en el sentido de avance del vehículo, el eje Y hacia un lateral y el Z según la regla de la mano derecha.

El segundo sistema de referencia es el fijo ligado a tierra (ejes tierra) y externo al hovercraft. En este sistema de referencia es en el que se obtienen los datos del hovercraft, posición y velocidad. La orientación de estos ejes es: el eje X apunta hacia el norte geográfico, el eje Y hacia el este y el Z completando el sistema dextrógiro.

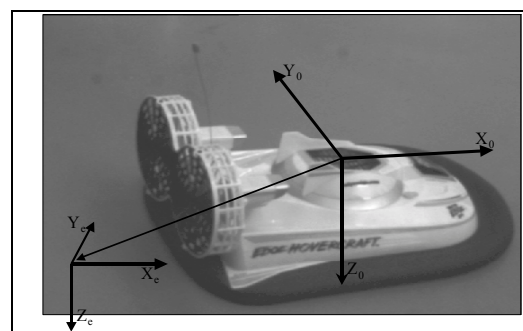


Figura 2: Esquema de los dos sistemas de referencia

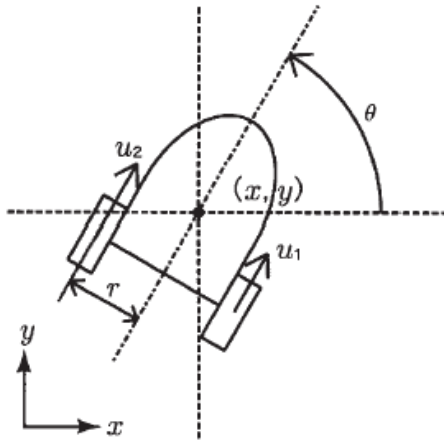


Figura 3 Modelo del hovercraft

Las ecuaciones del movimiento para el sistema se muestran en las ecuaciones (1)-(4).

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum \vec{F} \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{N} \quad (2)$$

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3)$$

$$\vec{J} = I\vec{\omega} \quad (4)$$

Se puede observar que las ecuaciones (1) y (3) son las ecuaciones que corresponden a la traslación e implementan la segunda ley de Newton, mientras que las ecuaciones (2) y (4) corresponden a la rotación.

En la ecuación (1) se deben insertar todas las fuerzas que se aplican al hovercraft que en nuestro caso son: las fuerzas que proporcionan los motores, la fuerza de rozamiento, las fuerzas de Coriolis (que en nuestra aplicación son despreciables) y las fuerzas externas que puedan afectar al hovercraft.

3 MODELADO EN SIMULINK

3.1 Consideraciones básicas

En la figura 4 se muestra el diagrama completo realizado en Simulink del modelo del hovercraft. En los siguientes apartados se va a ir haciendo una descripción de los módulos que aquí se presentan.

Se puede observar que Simulink es una herramienta que permite compactar en bloques las diferentes partes del modelo pero requiere asignar la causalidad computacional, es decir, es necesario determinar qué son entradas y qué son salidas en el modelo.

Existen otras herramientas de modelado en las que no es necesaria esa asignación, ya que la realiza la propia herramienta en tiempo de simulación en

función de la aplicación concreta que se esté simulando.

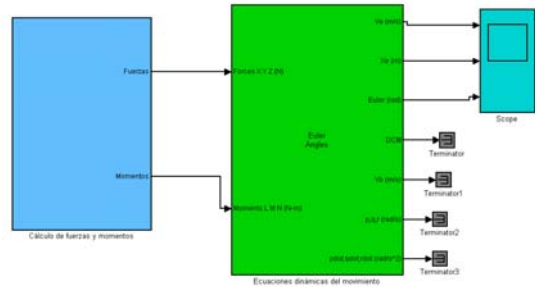


Figura 4: Diagrama en bloques del hovercraft

3.2 Ecuaciones del movimiento.

Las ecuaciones del movimiento son el elemento fundamental del modelado del hovercraft; en la figura 5 se muestra el bloque que implementa dichas ecuaciones del movimiento

Las entradas al módulo de las ecuaciones son las fuerzas y momentos que se aplican al hovercraft y sus salidas la posición, velocidad y orientación del mismo. Las fuerzas consideradas como entradas son las que aplican los motores al hovercraft o las externas sobre las que se puede actuar para realizar el control del sistema.

La fuerza de rozamiento y la de Coriolis se implementan dentro del bloque de las ecuaciones del movimiento porque son fuerzas que actúan siempre y cuyo valor no se ve influenciado por el exterior.

Las fuerzas y momentos son vectores de tres componentes pero que en nuestro caso sólo se tienen fuerzas en el eje X y momento en el eje Z. Además se puede observar que la fuerza de Coriolis se ha permitido que el usuario elija si las tiene en cuenta o no. Estas fuerzas actúan siempre pero para vehículos terrestres las fuerzas de Coriolis son despreciables.

De las ecuaciones del movimiento se puede observar que aparece la matriz DCM, que es la matriz de transformación de las coordenadas de la velocidad de ejes cuerpo a ejes tierra.

Para realizar cualquier simulación es necesario tener en cuenta las condiciones iniciales necesarias para resolver las ecuaciones dinámicas del sistema. Estas condiciones iniciales se han introducido en el modelo enmascarando el bloque de las ecuaciones y creando una interfaz al usuario para que en el momento de simular pueda determinar los parámetros iniciales del hovercraft (aquellas variables que no son fijas del sistema).

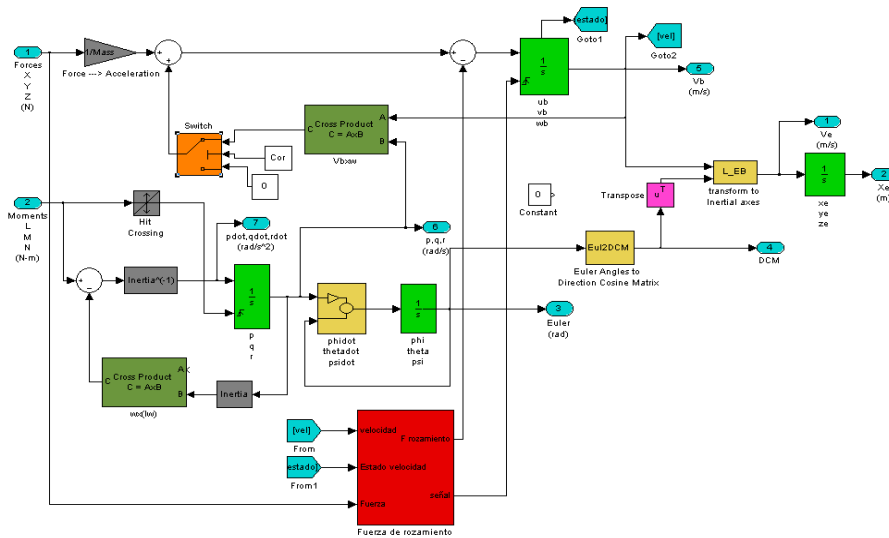


Figura 5: Ecuaciones del movimiento

3.3 Fuerzas y momentos del hovercraft

En la figura 6 se muestra el módulo que calcula la fuerza y los momentos que se aplican al hovercraft.

Las fuerzas que se aplican son las fuerzas de los motores y las fuerzas externas, que se calculan como la suma vectorial de todas ellas.

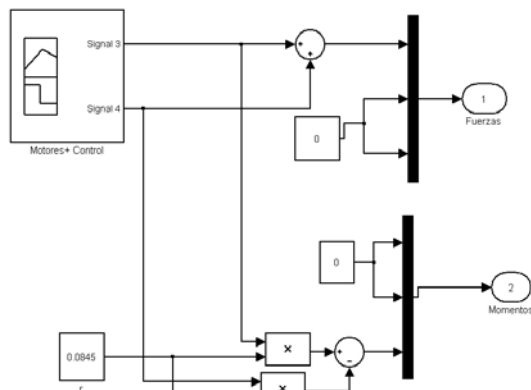


Figura 6: Cálculo de F y momentos

En cambio para el cálculo de momentos es necesario conocer el punto de aplicación de las fuerzas para calcular el momento según la ecuación (5)

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (5)$$

donde r es el vector de posición del punto de aplicación de la fuerza con respecto al centro de masas del hovercraft.

Para realizar las simulaciones hay que introducir las fuerzas y los instantes de tiempo en los que se aplican.

En los primeros ensayos, para introducir las fuerzas que se aplican al hovercraft producidas por los motores se ha utilizado un módulo generador de señales. Este generador de señales permite introducir las fuerzas aplicadas en función del tiempo. Un ejemplo de fuerzas aplicadas al hovercraft se puede observar en la figura 7.

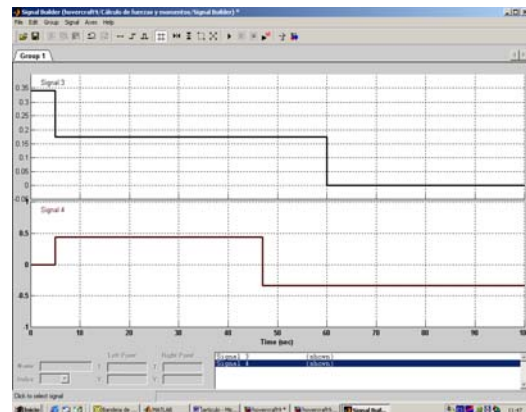


Figura 7: Generador de señales

Esta solución de introducir las fuerzas aplicadas al hovercraft se ha realizado para comprobar el modelo realizado. También se tiene como entradas las señales del controlador.

En el modelo final, este bloque generador de señales se ha sustituido por dos bloques que se representan en la figura 8.

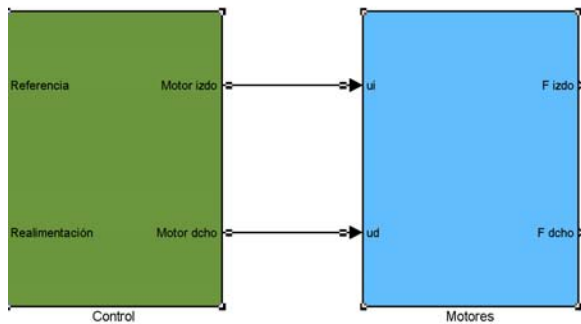


Figura 8: Estructura de control y motores.

El primer bloque corresponde a la implementación del algoritmo de control que necesita como entradas la señal de referencia y la señal de realimentación. Este bloque genera las señales de control que se deben aplicar al sistema para que el sistema se comporte adecuadamente.

Estas señales de control son discretas y representan las diferentes acciones que realizan los motores: empuje de avance, de retroceso o empuje nulo.

El segundo bloque representa el modelo de los motores que recibe como entradas las señales de control para cada motor y transforma esas señales (1,0,-1) en las fuerzas que se deben aplicar en cada momento al hovercraft.

De esta forma se consigue tener un modelo estructurado, con el cual diseñar diferentes estrategias de control es sencillo, al tener que modificar únicamente el módulo de control que es el que implementa el algoritmo de control.

4 RESULTADOS

En este apartado se pretenden mostrar los resultados que se obtienen con el simulador, realizando algunas simulaciones.

4.1 Ejemplo 1: Movimiento de avance y parada

En este primer ejemplo, simplemente le proporcionamos al hovercraft dos fuerzas iguales y de avance durante un cierto tiempo para luego desconectar los motores poniéndolos a cero para ver qué ocurre en la trayectoria del hovercraft. El resultado que se obtiene se muestra en la figura 9.

En la figura 9 tenemos que la gráfica superior izquierda se representa la velocidad del hovercraft en función del tiempo. La gráfica superior derecha representa la posición a lo largo del tiempo del hovercraft.

Se observa en la primera gráfica que en el momento en el que invertimos la fuerza de los motores la velocidad se vuelve negativa debido a la deceleración que se produce. Cuando paramos los motores se puede observar que la velocidad sigue disminuyendo, esta vez debido a la fuerza de rozamiento que al encontrarse en movimiento el hovercraft sigue actuando sobre él, hasta que finalmente se para totalmente.

Se puede comprobar cómo el hovercraft avanza hasta que la velocidad se hace nula. Se puede ver cómo en el momento en el que se invierte la fuerza de los motores el hovercraft se mueve más despacio.

La tercera gráfica es la inferior izquierda y corresponde a la orientación del hovercraft en función del tiempo, que en este caso es nula porque los dos motores ejercen la misma fuerza al sistema.

La última de las gráficas que es la inferior derecha corresponde con la trayectoria que sigue el hovercraft que en el ejemplo en el que se encuentra corresponde a una trayectoria rectilínea, al ser el momento total aplicado nulo.

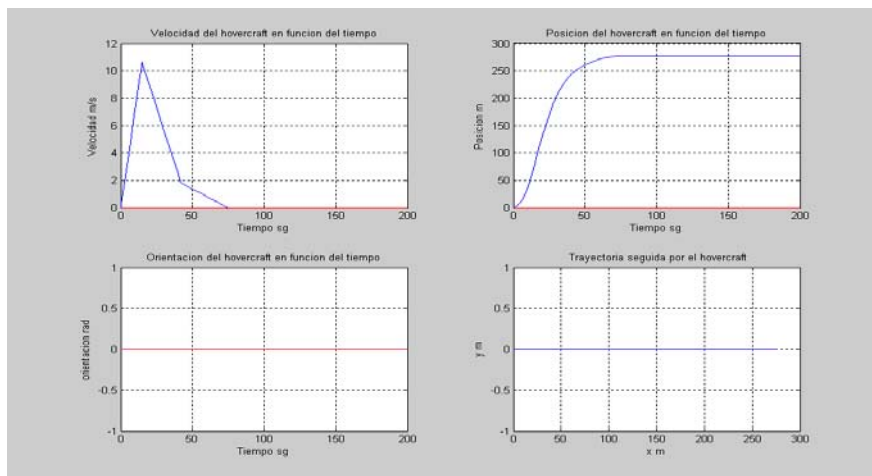


Figura 9: Resultados del ejemplo 1

4.2 Ejemplo 2: Movimiento de avance y retroceso.

En este ejemplo se quiere mostrar cómo el hovercraft modifica su sentido de movimiento si se deja suficiente tiempo invertido la fuerza de los motores de forma que el hovercraft se pare debida a la deceleración producida por el cambio de sentido de la fuerza aplicada al hovercraft.

La diferencia con el ejemplo anterior es precisamente que el hovercraft se para cuando todavía se le está aplicando una fuerza negativa (marcha atrás) al hovercraft.

Los resultados que se obtienen se pueden observar en la figura 10. En la figura 10 las diferentes gráficas tienen el mismo significado que en el ejemplo anterior.

Se puede observar cómo la velocidad del hovercraft disminuye debido al cambio de las fuerzas de los motores y cómo llega a pararse justo antes de cambiar el sentido de movimiento.

Este cambio en el sentido del movimiento del hovercraft se observa mejor en la gráfica de la posición porque en el momento en el que el hovercraft cambia de sentido de movimiento la gráfica muestra cómo retrocede.

4.3 Ejemplo 3: Rotación del hovercraft

En este tercer ejemplo vamos a comprobar el buen funcionamiento global de la simulación del hovercraft permitiendo que el momento angular total aplicado sea distinto de cero, para permitir que el hovercraft realice algún giro en su trayectoria.

Los resultados que se obtienen se muestran en la figura 11 y se puede observar cómo en el momento en el que las dos fuerzas de los motores no son iguales, existe momento angular distinto de cero y el hovercraft describe una trayectoria curva.

De la figura 11 se puede observar el comportamiento del hovercraft. La fuerza que se aplica al segundo motor es nula durante todo el tiempo de la simulación. Se puede observar cómo el hovercraft gira durante el tiempo que dura la aplicación del momento hasta que la fuerza aplicada se hace nula y el hovercraft mantiene la orientación.

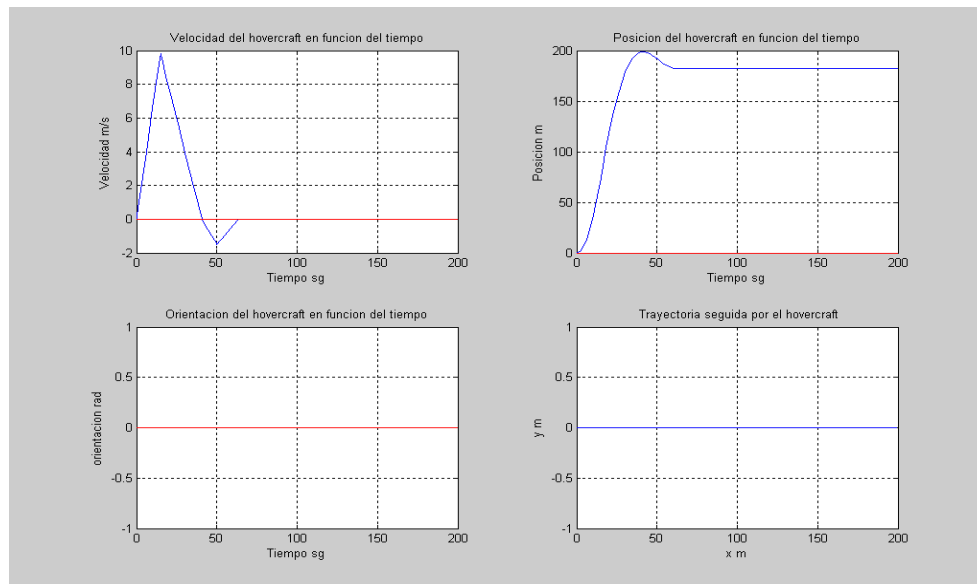


Figura 10: Resultados del ejemplo 2

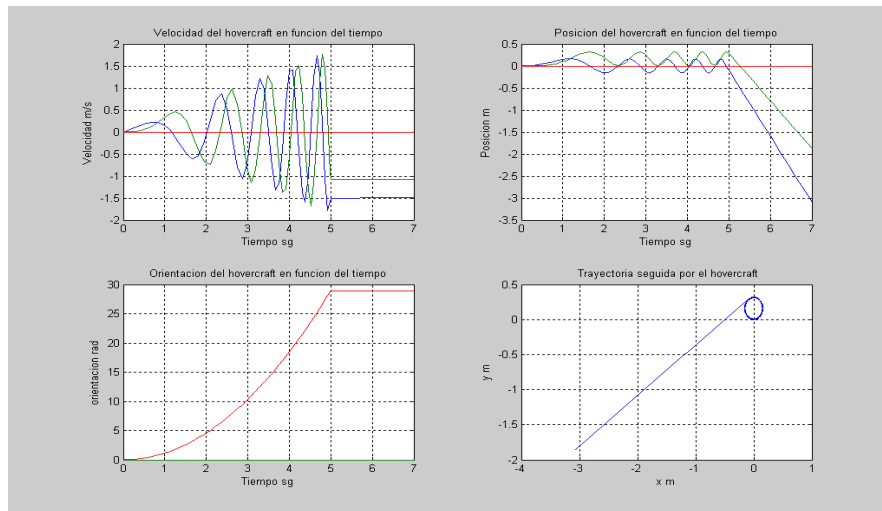


Figura 11: Resultados del ejemplo 3

5 CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el modelado de un hovercraft y cómo se ha implementado las ecuaciones del movimiento. El sistema tiene un especial interés tanto como plataforma didáctica, como de experimentación. Permitiendo la comparación de distintas estrategias de control.

El hovercraft es un sistema subactuado, fuertemente no lineal y sus actuadores generan tres valores discretos, empuje de avance, empuje de retroceso y no empuje.

Se ha empleado como herramienta de modelado Simulink. Pero no es la única herramienta de modelado que existe en el mercado Pero tiene como interés que su metodología de modelado está orientada a diagrama de bloques y que es una herramienta muy difundida.

Hay que añadir que Simulink está integrado en Matlab que tiene una gran cantidad de toolboxes para diseño y análisis.

Se está desarrollando el modelo del hovercraft en otros entornos en los que se aplican las técnicas de modelado orientado a objetos, con la finalidad fundamental de facilitar la reutilización de los modelos que se realicen. Una de estas herramientas es utilizar el lenguaje de modelado Modelica.

Agradecimientos

Hay que agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación y apoyo recibidos dentro del proyecto DPI2003-09745-C04-01.

Referencias

[1] Petersen K Y, Egeland O., Exponential stabilization of an underactuated surface vessel,

Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1996; pp. 967-971.

[2] Fossen T I, Godhavn J-M, Berge SP, Lindegaard K-P, Nonlinear control of underactuated ships with forward speed compensation.

[3] Fantoni I, Lozano R, Mazenc F, Pettersen KY, Stabilization of a nonlinear underactuated hovercraft, International Journal of Robust and nonlinear control, 2000; 645-654.

[4] H. Seguchi, T. Ohtsuka, (2002) Nonlinear Receding Horizon Control of an RC Hovercraft., Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications, Sept 2002, pp.1076-1081.

[5] H. Seguchi, T. Ohtsuka, (2003) Nonlinear Receding Horizon Control of an underactuated hovercraft, International Journal of robust and nonlinear control, 2003, pp. 381-398.

[6] Bemporad A, Morari M. Control of Systems integrating logic, dynamics and constraints, Automatica, 1999, 35(3):407-427.

[7] Tyler ML, Morari M, Proporcional logic in control and monitoring problems, Automatica, 1999, 35(4):562-582

[8] Elia N, Mitter SK, Stabilization of linear systems with limited information. IEEE Transactions in Automatic Control, 2001; 46(9):789-814.

[9] Hayashi R, Osuka K, Ono T, Trajectory control of an air cushion vehicle, Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on , Volume: 3 ,Sept. 1994 ,1906-1913.