

Patrones de Diseño para Sistemas Ciber Físicos (SCF): Patrón para control de movimiento.

Ricardo Garro †, Leo Ordínez ‡, Mariano Scasso * EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas" – INTA,*
DIEC-UNS, ‡DIEC-UNS-CONICET † rgarro@anguil.inta.gov.ar– ‡ lordinez@uns.edu.ar – *
mariano.scasso@uns.edu.ar

Resumen—Los Sistemas Ciber Físicos (SCF) son un nuevo campo de conocimiento, que involucra a la ingeniería eléctrica, electrónica, informática, control y comunicaciones, e interactúa con los procesos físicos. Esto, lleva a un dominio de gestión conjunta, donde deben considerarse tanto la cibernética como la física, para decidir las acciones a seguir. Por lo tanto, un aspecto fundamental en el desarrollo de sistemas ciber físicos, es la comprensión del problema, el medio ambiente y de las entidades involucradas. En este sentido, y a fin de realizar aportes a la comprensión del problema, en el presente trabajo se propone el diseño del subsistema de movimiento de un robot móvil pulverizador para invernaderos. El abordaje de este subsistema se realiza desde el punto de vista de los patrones de diseño, y específicamente, desde tres componentes conceptuales: software, hardware y control.

Patrones de Diseño, Sistemas Ciber Físicos, Robot diferencial, Invernadero.

I. INTRODUCCIÓN

La mecatrónica y la robótica son disciplinas de carácter horizontal que, en la actualidad, intervienen en la práctica en casi la totalidad de los sectores. Uno de estos sectores, es el agrícola, que en los últimos años ha experimentado un importante auge en la implementación de desarrollos y productos con aportes de estas disciplinas. Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación -relacionadas con la mecatrónica y la robótica-, que se han incorporado y se introducen progresivamente al sector agrícola, así como las técnicas de control específicas, posibilitan un desempeño diferencial de los sistemas que constituyen entornos agrícolas automatizados. En este contexto, se aborda la problemática de la construcción de un prototipo de una plataforma móvil multipropósito –en este caso un robot pulverizador-, para producciones intensivas bajo cubierta. desde el enfoque de Patrones de Diseño para Sistemas Ciber Físicos (SCF).

El paradigma de SCF, es relativamente nuevo [1], [2] y surge frente a la necesidad de modelar la interacción entre el mundo físico y el computacional de manera conjunta. Desde esta perspectiva, consideramos conveniente aprovechar los beneficios proporcionados por los patrones de diseño, para aproximarse a la complejidad del desarrollo de software y hardware para un sistema ciber físico, aplicado a la robótica móvil en el contexto de agricultura de precisión. Cabe señalar que para tal fin, el presente artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe el Diseño del Sistema de la plataforma móvil; en la Sección III, se aborda la problemática desde el punto de vista de los patrones de diseño del subsistema de

movimiento de la plataforma móvil. La Sección IV expone las conclusiones del trabajo.

II. DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema del robot móvil, está compuesto por varios subsistemas. Aquí se enfatiza, específicamente, en el desarrollo de patrones de diseño para el subsistema de movimiento que se presenta a continuación:

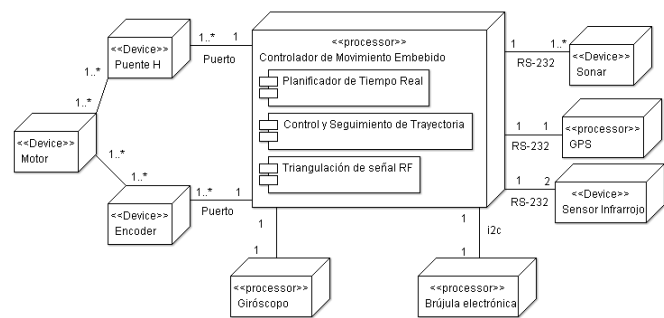


Figura 1. Diagrama de Despliegue - Subsistema de movimiento

Una de las tareas más importantes que realizar este subsistema, es la de interrogar, con la frecuencia establecida por el planificador de tiempo real, a diferentes sensores -Giróscopo de dos ejes, encoders, Sensores Infrarrojos, Brújula electrónica y el Modulo ultrasónico-. Estos datos, son enviados al coordinador central, el cual realiza los cálculos de trayectoria. Con los datos devueltos, se ejecuta el algoritmo de control y seguimiento de trayectoria. El seguimiento de la trayectoria, se logra actuando con una señal de control sobre los Puentes H, indicando la dirección e intensidad de rotación de cada motor de manera individual.

III. PATRONES DE DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE MOVIMIENTO

En el apartado anterior, se presentó el subsistema de movimiento con múltiples sensores: giróscopo, encoders, sensores infrarrojos, brújula electrónica y el modulo ultrasónico. En el presente trabajo sólo se exponen las soluciones obtenidas para el giróscopo, dos encoders y una brújula electrónica. Estos sensores, posibilitan que el robot pueda realizar una trayectorias de manera controlada.

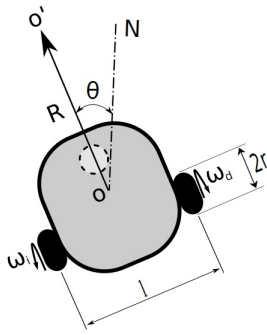


Figura 2. Esquema robot diferencial

III-A. Patrón de Diseño para el control de un robot diferencial.

Se tomará como modelo para presentar la estructura de los patrones de diseño, la propuesta realizada por Pont [3]

- **CONTEXTO:** Controlar la trayectoria de un robot móvil diferencial dentro de un invernáculo.
- **PROBLEMA:** Debido a que la forma elegida para la dirección del robot es diferencial, una de las principales dificultades que presenta esta configuración, es la de lograr que ambas ruedas se muevan de manera controlada para poder asegurar que el desplazamiento sea de manera rectilínea o siguiendo una curva determinada. El objetivo de este patrón, es dar respuesta a esta problemática concreta.
- **BACKGROUND:** La Figura 1, muestra el esquema a partir del cual se plantea el modelo cinemático del robot diferencial [4]. Como sistema de coordenadas, se utilizan las denominadas polares, ya que permiten simplificar las expresiones matemáticas. Sean v_d y v_i las velocidades tangenciales de la rueda izquierda y la derecha respectivamente; y w_d y w_i sus velocidades angulares. De esta manera, es posible definir la velocidad lineal del robot como:

$$V = \dot{R} = \frac{v_d + v_i}{2} = \frac{w_d + w_i}{2} r$$

Donde r es el radio de la rueda; V es la velocidad lineal de avance; y R es la distancia radial del robot respecto de la posición inicial. La velocidad de rotación del robot, será proporcional a la diferencia de las velocidades angulares de las ruedas. Se expresa como:

$$\dot{\theta} = \frac{(w_d - w_i)r}{l}$$

Donde l es la separación entre las ruedas.

De lo expuesto anteriormente, se puede observar que si las velocidades angulares de la rueda izquierda w_i y derecha w_d , son iguales, el robot seguirá una trayectoria rectilínea. De existir una diferencia, se presentará un desvío hacia uno de los lados de manera proporcional a la diferencia de las velocidades angulares.

Para obtener la medición de la velocidad angular, se utilizaron diferentes sensores: Giróscopo, encoders y brújula electrónica. A continuación, se presentarán tres posibles SOLUCIONES al problema de control, donde cada una es presentada

desde tres componentes conceptuales: a) **HARDWARE**, b) **CONTROL**, c) **SOFTWARE**.

SOLUCIÓN 1 - Sistema implementado con un giróscopo:

Aquí se presenta la solución más simple de implementar, dado que se ha utilizado un giróscopo analógico como sensor. Sólo puede garantizar que el robot diferencial se desplace siguiendo una trayectoria rectilínea. Con un solo sensor de este tipo, no es posible determinar la distancia radial del robot respecto de la posición inicial. Para ello, es necesario contar con otra variable a medir. La solución tres, presentada en este mismo trabajo, aborda la problemática agregando al subsistema una brújula digital.

a) **HARDWARE** : En la Figura 3, se observa el esquema de hardware del subsistema de movimiento en el que se destacan tres componentes principales: microprocesador, giróscopo y etapa de potencia (Puente H).

Para las mediciones de velocidad angular, se utilizó un giróscopo analógico [5], el cual es muestreado periódicamente utilizando un convertor A/D del micro-controlador. Con la señal obtenida, el micro-controlador realiza los cálculos implementado un controlador proporcional, integrador y derivativo (PID), para determinar la señal PWM necesaria, la cual es enviada a la etapa de potencia. La etapa de potencia, es la encargada de adecuar las tensiones en bornes de cada uno de los motores en base a la señal de control recibida.

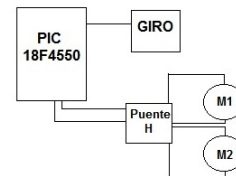


Figura 3. Hardware Subsistema de movimiento con giróscopo

b) **CONTROL**:: Siguiendo el modelo cinemático planteado en el BACKGROUND, es posible estimar los valores de w_d y w_i a partir de la medición de la velocidad angular $\dot{\theta}$ proveniente del giróscopo.

En la Figura 4, se observa el esquema de un controlador PID, el cual toma como señal de referencia θ_{ref} una tensión predeterminada. En base a esta referencia y la diferencia con la señal obtenida del sensado (giróscopo), se obtiene el error, el cual irá convergiendo hacia el valor de referencia deseado -en nuestro caso es cero-. Cuando el error es cero, significa que w_d y w_i son iguales y, en consecuencia, la trayectoria del robot es rectilínea.

Esta convergencia, se obtiene modificando las velocidades angulares individuales de los motores por medio del puente H, utilizando para tal fin una señal de PWM correspondiente.

c) **SOFTWARE**: : En la Figura 5, se presenta el diagrama de estado implementado en el micro-controlador. Se puede observar que, una vez inicializada las variables propias del micro-controlador -como las del PID-, se realiza el sensado del giróscopo utilizando los puertos A/D del micro-controlador, así como se acondiciona la señal por medio de un filtro digital pasa-bajos. Una vez que la señal ha sido filtrada, se compara

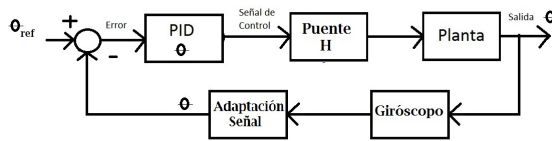


Figure 4. Control PID

con la señal de referencia del controlador PID y se calcula el error. Con este error se genera la señal de control PWM, y se actúa sobre los motores utilizando el puente H como driver.

Como ya se explicó el objetivo del PID, es igualar las velocidades angulares de las ruedas para garantizar la trayectoria rectilínea

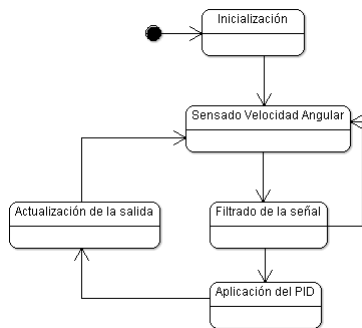


Figure 5. Diagrama de estados

SOLUCIÓN 2 - Sistema implementado con encoders: A diferencia de la solución anterior, que utiliza dos encoders, no sólo se puede determinar la velocidad angular, sino también la distancia radial del robot respecto de la posición inicial. Para esto, es necesario conocer cuánto se desplaza linealmente cada rueda por cada pulso registrado por el encoder. Por lo tanto, se debe transformar el desplazamiento angular del eje en desplazamiento lineal de la rueda. La ecuación para calcular el desplazamiento lineal es:

$$c_m = \frac{2\pi r}{n * C_e} \quad (1)$$

Donde n es la reducción eje rueda. En nuestro caso, los encoders están solidarios a las ruedas por lo que $n=1$;

C_e resolución del encoder en nuestro caso 500

Con estos datos, es posible calcular la velocidad angular de cada una de las ruedas y el desplazamiento lineal.

a) **HARDWARE** : En la Figura 6, se puede observar el subsistema de movimiento, en el que se destacan tres componentes principales: un microprocesador, dos encoders y la etapa de potencia. Los encoders presentes en cada una de las ruedas, generan un pulso, el cual es detectado por una interrupción a nivel de hardware. Estos pulsos permiten medir la velocidad angular y el desplazamiento lineal, según lo planteado en la ecuación (1). Con la señal obtenida, el micro-controlador realiza los cálculos necesarios y define la señal PWM, que es enviada a la etapa de potencia. Dicha etapa, es la encargada de adecuar las tensiones en bornes en los motores utilizando como driver el puente H.

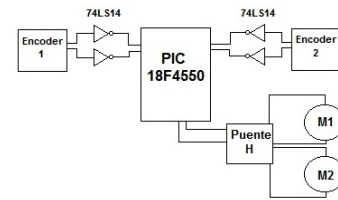


Figura 6. Hardware Subsistema de movimiento con encoders

b) **CONTROL**:: A partir del modelo cinemático planteado en el BACKGROUND, y conociendo los valores de w_d y w_i obtenidos de las mediciones de los encoders, en la Figura 7 se presenta la solución, utilizando un controlador PID. Se determinan dos variables de referencia (ángulo: θ_{Ref} ; distancia radial R_{Ref}). El objetivo del controlador, es determinar la velocidad angular y distancia de desplazamiento de radio R . En otras palabras, si la diferencia de la medición de velocidad angular determinada por el sensado de los encoders es igual a cero, el robot se estará desplazando de manera rectilínea. Caso contrario, realizará una corrección proporcional a la diferencia medida. Esta corrección, se traduce en un envío de una señal PWM hacia la etapa de potencia para realizar el ajuste a la trayectoria prevista. De igual manera, efectúa los cálculos necesarios para determinar la distancia radial del robot respecto de la posición inicial

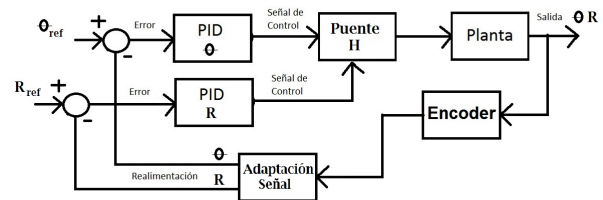


Figure 7. Control PID

c) **SOFTWARE**:: En la Figura 8, se presenta el diagrama de estado implementado en el micro-controlador. Una vez inicializada las variables propias del micro-controlador y las del PID, aquí se puede apreciar cómo se realiza el sensado de los pulsos generados de los dos encoders por medio de interrupciones de hardware. El software, realizará el cálculo de la velocidad angular y distancia recorrida de cada una de las ruedas en base a lo descrito en la ecuación (1). Tomando las señales de referencia θ_{ref} , R_{ref} y la diferencia con las variables sensadas, se determina el error. El error, irá convergiendo en una velocidad angular, como en la distancia radial del robot respecto de la posición inicial, de acuerdo a las señales de referencia. La convergencia, se da por acción del PIC a través de la salida de control PWM generada, que actúa sobre los motores utilizando como driver el puente H.

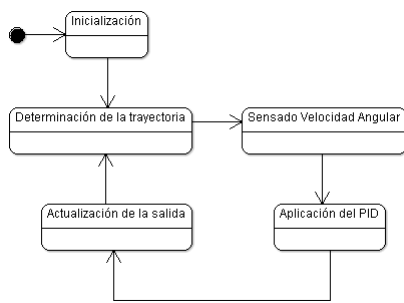


Figure 8. Diagrama de estado

SOLUCIÓN 3 - Sistema implementado con Giróscopo y Brújula: Al igual que en el sistema implementado en la solución anterior, con este diseño de hardware, software y control se puede determinar la velocidad angular y la distancia radial del robot respecto de la posición inicial [6]

a) **HARDWARE** : En la Figura 9, se observa el esquema de hardware del subsistema de movimiento en el que se destacan cuatro componentes principales: microprocesador, giroscopio, brújula electrónica y etapa de potencia (Puente H).

La velocidad angular, se sensa utilizando un giróscopo analógico [5] que es muestreado, periódicamente, utilizando un conversor A/D del microcontrolador. Sin embargo, esta medición no es suficiente para determinar la distancia radial de robot respecto a la posición inicial. Por lo tanto, se adiciona una brújula digital que, entre otros parámetros, transmite al micro-controlador la posición angular media en grados respecto al norte magnético [7]. Con los parámetros recibidos, el micro-controlador realiza los cálculos definidos en el modelo de control con variables de estados -que se presentan en el siguiente apartado-, la señal PWM necesaria, la cual es enviada a la etapa de potencia. Dicha etapa de potencia, es la encargada de adecuar las tensiones de cada uno de los motores en base a la señal PWM recibida, hecho que se manifiesta en las velocidades angulares w_d y w_i de los motores.

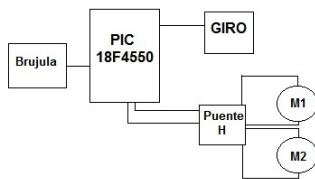


Figura 9. Hardware Subsistema de movimiento con brújula y giróscopo

b) **CONTROL** : Continuando con lo presentado en el BACKGROUND, es necesario agregar, que para realizar el control del modelo cinemático con variables de estado y alcanzar las ecuaciones diferenciales (2) debemos despreocupar la inductancia interna del motor, en el cual k_1 y k_3 son constantes propias del motor que relacionan la aceleración con la tensión (v_1 y v_2) en bornes. Finalmente k_2 y k_4 representan los coeficientes de fricción en las ruedas.

$$\begin{cases} w_d = k_1 v_1 - k_2 w_d \\ w_i = k_3 v_2 - k_4 w_i \\ \dot{R} = \frac{w_d + w_i}{2} r \\ \dot{\theta} = \frac{(w_d - w_i)r}{l} \end{cases} \quad (2)$$

Luego, seleccionando como variables de estado a w_d, w_i y θ , y a v_1 y v_2 como las entradas del sistema, se obtiene la siguiente representación matricial del espacio de estados.

$$\dot{x} = Ax + bu,$$

Donde:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_d \\ w_i \\ \theta \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_4 & 0 \\ r & -r & 0 \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}.$$

Las constantes k_i se relacionan con las características electromecánicas de los motores, pero también se ven afectadas por cuestiones mecánicas tales como el sistema de transmisión o el coeficiente de rozamiento entre las ruedas y la superficie de desplazamiento. Por estos motivos se determinan mediante un procedimiento experimental. Con esto queda definido el modelo de control en variables de estado que será implementado en el software del micro-controlador.

c) **SOFTWARE** : En la Figura 10, se presenta el diagrama de estado implementado en el micro controlador. Se puede observar que, una vez inicializada las variables propias del micro controlador como las del PID, se realiza el sensado de las velocidad angular del giróscopo, así como la desviación en grados respecto al norte magnético de la brújula digital

En base a los datos obtenido de los dos sensores, el micro controlador realizará el calculo de la velocidad angular y la distancia recorrida de cada una de las ruedas, según lo definido en el modelo. Finalmente, se genera una señal de control PWM, que actúa sobre los motores, utilizando como driver el Puente H. Esta acción, posibilita que el sistema converja en la velocidad angular, y en la distancia radial del robot respecto de la posición inicial deseada

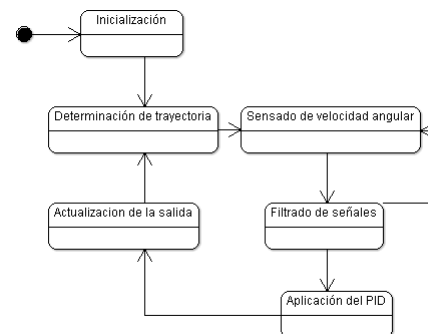


Figura 10. Diagrama de estados

IV. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que los sistemas ciber físicos, aportan una perspectiva más amplia e integral que los sistemas embebidos, por lo que se evalúan como una alternativa altamente viable y funcional para aplicaciones en la robótica móvil destinada al dinámico sector agroindustrial -tanto intensivo como extensivo-. Paralelamente, se puede inferir también, que es posible abordar la construcción de un robot móvil desde que sus elementos constitutivos y enfocados desde el concepto de SCF. A su vez, es factible la posibilidad de encontrar o desarrollar patrones de diseño, mecánicos, computacionales, electrónicos, de comunicación, etc. para su aplicación en los SCF y, de manera particular, para un robot móvil que realice tareas específicas en la agricultura de precisión. La dificultad que se presenta, es la naturaleza de los SCF. Puesto que contemplan el tiempo y la concurrencia como elementos fundamentales de su constitución.

Este nivel de abstracción deseable, puede llevar a tener que modificar o adaptar los patrones de diseño existentes o, incluso, a la creación de una nueva generación de patrones de diseño. La ventaja fundamental de poder utilizar patrones de diseño en los SCF, es la de aprovechar soluciones bien probadas. Respuestas que, en contextos específicos de diseño, atiendan problemáticas recurrentes que puedan presentarse.

REFERENCIAS

- [1] Lee, E. A, and S. A Seshia. "Introduction to Embedded Systems-A Cyber-Physical Systems Approach." Lee & Seshia. (2010)
- [2] Krogh, B. H., E. Lee, I. Lee, A. Mok, R. Rajkumar, L. R. Sha, A. S. Vincentelli, et al. "Cyber-Physical Systems, Executive Summary." CPS Steering Group, Washington DC.(2008)
- [3] Pont, M. J. "Patterns for time-triggered embedded systems: Building reliable applications with the 8051 family of microcontrollers." ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. (2001)
- [4] Yongoug Chung; Chongkug Park; Harashima, F. "A position control differential drive wheeled mobile robot," Industrial Electronics, IEEE Transactions. (Aug, 2001)
- [5] WebSite Pololu, <http://www.pololu.com/catalog/product/127> (Julio, 2012)
- [6] Scasso, M, Garro, R, Ordinez, L. y Alimenti. O. "Diseño e Implementación de un Sistema Embebido de Control Moderno: una Experiencia Práctica"
- [7] WebSite Pololu, <http://www.pololu.com/catalog/product/1265> (Marzo, 2012)