

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES EN UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE MECANISMOS

Fabián M. Camusso* y Alberto Cardona†

Grupo de Tecnología Mecánica (GTM)

Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC)

Güemes 3450, 3000, Santa Fe, Argentina

Resumen

El programa *Mecano* ha sido concebido para el análisis de mecanismos y de estructuras no lineales, es decir el estudio del sistema a lazo abierto. Para analizar problemas de control es necesario un trabajo adicional: para cerrar el lazo el usuario emplea el *elemento utilizador*. Este permite la creación de elementos con varios nodos e introducir una ley de fuerzas en función del tiempo, desplazamientos, velocidades, y/o aceleraciones nodales. Permite, además, el almacenamiento de posiciones, velocidades, aceleraciones y fuerzas internas y externas de muestreos pasados. En base a ello es posible definir controladores y verificar su funcionamiento por simulación. En este trabajo se implementan leyes de control para mecanismos que presentan comportamiento no lineal y se evalúa en un ejemplo de aplicación.

Abstract

Mecano is a code conceived for nonlinear mechanisms and structures analysis in open loop systems. In control problems, we need an additional work: the user must close the loop using a special element called *user element*. It allows to create multinode elements and introduce time varying nodal forces, displacements, velocities and/or accelerations. It is possible to store positions, velocities, accelerations and internal and external forces from past samples. In this way, we can define controllers and verify its performance by simulation. In this work we implement control laws for mechanism with nonlinear behavior and evaluate an application example.

1 Introducción

En estos últimos años han sido desarrollados numerosos programas de simulación de mecanismos basados en el método de elementos finitos, entre los que se encuentra el programa

*Becario CONICET.

†Profesor UNL e Investigador CONICET.

Mecano [12]. Con este programa es posible modelar y analizar sistemas mecánicos altamente complejos a lazo abierto.

Empleando el *elemento utilizador* es posible cerrar el lazo con una ley de control definida. Este permite la creación de elementos con varios nodos e introducir una ley de fuerzas en función del tiempo, desplazamientos, velocidades, y/o aceleraciones nodales.

Otra alternativa, en la que se está trabajando [11], es la de emplear la caja de herramientas de control del programa *Matlab* como un *elemento utilizador*. Esto es posible a través del desarrollo de una interfaz que permite comunicar ambos programas en una ejecución en paralelo integrando las funcionalidades propias de cada uno. Para ello se transmiten los estados generados por el simulador para que el programa de control genere las acciones correctivas necesarias y comunicar luego éstas al simulador, a fin de obtener las respuestas deseadas.

En este trabajo se verifican algunas técnicas de control utilizando un programa de simulación de mecanismos. El modelo a controlar presenta un comportamiento no lineal, por lo tanto se emplean técnicas de linealización exacta para obtener un modelo lineal equivalente. Posteriormente se incorpora un lazo externo con controladores lineales para lograr la respuesta deseada.

Los controladores son desarrollados teniendo una idea aproximada de la planta, luego se emplea un modelo más aproximado a la realidad, utilizando los elementos disponibles en el programa *Mecano*, donde se evalúa de manera rigurosa la ley de control definida.

El trabajo está organizado de la siguiente manera : en la Sección 2 se describen sintéticamente las técnicas de control lineal y no lineal que serán aplicadas en la sección posterior, la sección 3 muestra un ejemplo de aplicación industrial, y en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

2 Técnicas de Control Lineal y no Lineal

En esta sección se describen de manera resumida algunas de las teorías de control implementadas en el programa de simulación, para luego evaluarlas en un ejemplo de aplicación.

2.1 Controlador Lineal PID

Consideremos el controlador ideal continuo PID [1]

$$p(t) = \bar{p} + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t') dt' + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

donde K_c , τ_I y τ_D son los parámetros de control. La forma discreta de la ecuación (1) puede ser obtenida empleando aproximación por diferencias finitas

$$\int_0^t e(t') dt' \approx \sum_{k=1}^n e_k \Delta t \quad (2)$$

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t}$$

siendo Δt el intervalo de muestreo y e el error.

La ecuación del controlador PID puede ser escrita de dos maneras : empleando el algoritmo de posición o el de velocidad. Si se sustituye la ecuación (2) en la ecuación (1), se obtiene

el algoritmo de posición

$$p_n = \bar{p} + K_c \left[e_n + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{k=1}^n e_k + \frac{\tau_D}{\Delta t} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (3)$$

La forma del algoritmo de velocidad es una opción interesante ya que elimina el cálculo de la sumatoria. Considerando como constante el valor nominal \bar{p} , tenemos

$$\Delta p_n = p_n - p_{n-1} = K_c \left[e_n - e_{n-1} + \frac{\Delta t}{\tau_I} e_n + \frac{\tau_D}{\Delta t} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right] \quad (4)$$

La función de transferencia puede ser obtenida utilizando la transformada z . Sea $p'_n = p_n - \bar{p}$ la desviación y $P'(z)$ su transformada z . La función de transferencia $D(z)$ del controlador resulta :

$$D(z) = \frac{P'(z)}{E(z)} = K_c \left[1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} \left(\frac{1}{1-z^{-1}} \right) + \frac{\tau_D}{\Delta t} (1-z^{-1}) \right] \quad (5)$$

El algoritmo de velocidad (4) es el que se implementa en el programa *Mecano*. Los parámetros de control k_c , τ_I y τ_D son seleccionados empleando algún criterio de optimización [2] y la fuerza de control Δp_n es aplicada al sistema mecánico como una fuerza interna.

2.2 Linealización Exacta

Consideremos el sistema no lineal

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \sum_{i=1}^m p_i(x)d_i \quad (6)$$

$$y = h(x)$$

donde u es la entrada de control, x son los estados del sistema, y representa la salida y p_i las perturbaciones. Sea $L_f^k h(x)$ la k -ésima derivada de Lie de $h(x)$ respecto a $f(x)$, luego :

Definición 1 : Se dice que el sistema (6) tiene grado relativo r en x_0 si

- $L_g L_f^k h(x) = 0 \quad \forall x \in E(x_0, \delta), k < r - 1$
- $L_g L_f^r h(x) \neq 0$

Definición 2 : El grado relativo de la salida $y(t)$ respecto a la perturbación p_i estará definido como el menor entero ρ_i para el cual se verifica

$$L_{p_i} L_f^{\rho_i - 1} h(x) \neq 0$$

El grado relativo caracteriza cuan directamente las entradas afectan la salida. Un grado relativo pequeño implica que la entrada afecta en forma más directa a la salida. Para comparar el efecto relativo de la manipulada y las perturbaciones sobre la salida, las perturbaciones pueden clasificarse en [3] :

$$d_A \hat{=} \{d_i : \rho_i > r\}$$

$$d_B \hat{=} \{d_i : \rho_i = r\}$$

Como afectan a la salida menos directamente que la manipulada, las perturbaciones d_A pueden desacoplarse con la realimentación, mientras que las perturbaciones d_B y la manipulada afectan la salida en igual manera, por lo que pueden desacoplarse con una ley de control feedback/feedforward.

Un sistema no lineal del tipo (6) de grado relativo finito r puede ser transformado en un sistema lineal y controlable desde el punto de vista entrada/salida por la ley de realimentación [4]

$$u = \frac{v - L_f^r h(x) - \sum L_{p_i} L_f^{r-1} h(x) d_i}{L_g L_f^{r-1} h(x)} \quad (7)$$

en función de la entrada externa v , las perturbaciones d y los estados x .

Para la aplicación de esta teoría es necesario tener un conocimiento aproximado de la planta. Por lo tanto es necesario un trabajo previo empleando algún programa de algebra simbólica, por ejemplo, para determinar las ecuaciones de movimiento [5] y operar para llevarlas a la forma de la ecuación (7). Una vez definido el controlador se lo emplea en el programa *Mecano* para definir la ley de control que será aplicado al sistema mecánico como una fuerza interna.

3 Ejemplo de Aplicación

El ejemplo utilizado para evaluar las teorías de control descriptas en las secciones previas es el control de posición del cabezal de una cosechadora. El modelo matemático y el diseño de los controladores por linealización exacta fue presentado en [7]. En el trabajo citado se empleó un modelo matemático simplificado (el problema original fue restringido a un sistema con dos grados de libertad) y sobre éste se diseñaron los controladores.

En este trabajo se evalúan las leyes de control ya desarrolladas, pero aplicadas en un modelo más aproximado a la realidad. Este modelo fue definido empleando los elementos disponibles en la biblioteca del programa *Mecano* para definir la cosechadora y el cabezal.

3.1 Descripción del problema

La mayor parte de las pérdidas en la cosecha de cereales y oleaginosas se deben a la cosechadora. A fin de mejorar el rendimiento es deseable que el cabezal se mantenga paralelo al terreno por el cual se desplaza, esto significa que el cabezal deberá rotar en su punto de giro para 'copiar' de la mejor manera al suelo mientras la cosechadora avanza.

3.2 Empleo de Técnicas de Linealización Exacta

Para determinar las ecuaciones de movimiento del sistema, el problema original fue restringido a uno con dos grados de libertad, la rotación del cabezal y el desplazamiento vertical del sistema, mientras que el resto de los desplazamientos y rotaciones se asumieron como perturbaciones no medibles. A partir del modelo obtenido, se linealizó el sistema utilizando un cambio de coordenadas, se realizó una realimentación de estados para estabilizarlo y se aplicó una estrategia de control lineal al sistema resultante [7].

En el modelo analizado el grado relativo de la manipulada coincide con la dimensión del sistema, por lo tanto las perturbaciones pudieron ser desacopladas a través de una ley de control feedback/feedforward [4]. La ley (7) desarrollada transforma el sistema no lineal original en uno lineal y controlable, en relación a la entrada v . Para estabilizar el

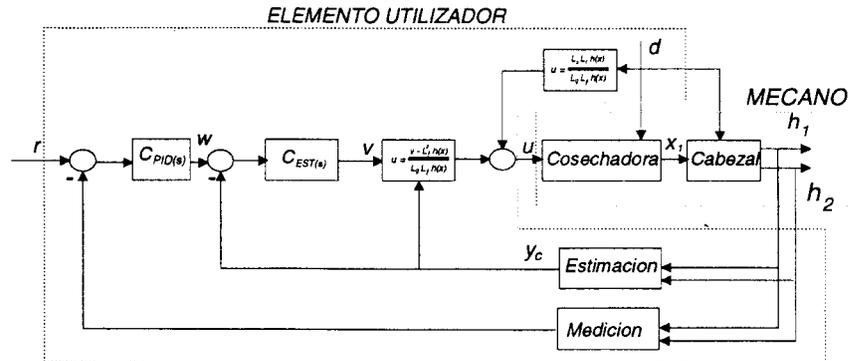


Figura 1: Configuración del sistema a lazo cerrado por linealización exacta

sistema y obtener la performance deseada se empleó un controlador lineal PID. La Figura 1 muestra la estructura de control utilizada, donde w y v son las salidas del controlador PID y estabilizante, d son las perturbaciones, u es el control aplicado al cabezal y h_1 y h_2 son las salidas (distancias del extremo del cabezal al suelo).

3.2.1 Modelo de la Cosechadora y del Cabezal

La cosechadora está modelada por elementos de cuerpo rígido, definidos por dos nodos de 6 grados de libertad cada uno, en los cuales se incorporan los principales momentos de inercia y masa. Para la simulación de los neumáticos se emplearon elementos que permiten introducir fuerzas elásticas y de amortiguamiento a través de dos nodos (6 grados de libertad por nodo). El vínculo entre la cosechadora y el cabezal está definido por una unión rotoidal. El cabezal está definido por un elemento de masa rígido en el que se introduce la masa y los principales momentos de inercia.

La figura 2 muestra el modelo empleado para la verificación de la ley de control desarrollada. Los datos geométricos y físicos de la cosechadora y del cabezal fueron obtenidos de [8].

Sobre el cabezal se aplica una fuerza implementada, resultante de la ley de control, que adopta la consigna de mover a éste para que se mantenga paralelo al suelo. Este elemento permite que la carga pueda ser expresada como función explícita del tiempo y de las posiciones de los grados de libertad seleccionados junto con las primeras derivadas (posición y velocidad).

3.2.2 Simulación del sistema

La simulación se realiza mediante el movimiento angular del elemento que representa el suelo. El terreno fue modelado empleando una descripción aleatoria del perfil de suelos supuestos de acuerdo a [9].

Para simular de las vibraciones ocasionadas por el avance se introdujeron movimientos en los elementos que modelan los neumáticos de la cosechadora teniendo en cuenta las distancias entre éstos y el cabezal, la velocidad de avance del vehículo y la forma del

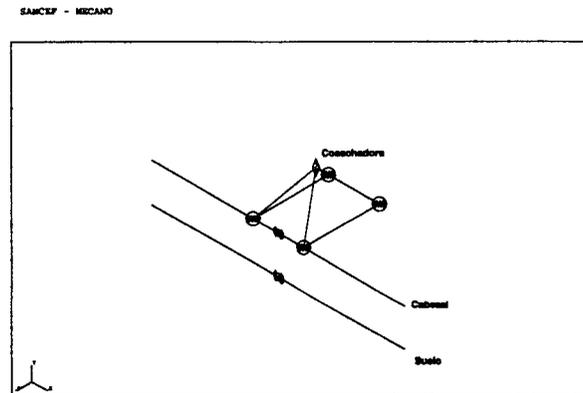


Figura 2: Modelo detallado de la cosechadora con el cabezal

terreno. En la Figura 3 se observa el seguimiento de un extremo del cabezal con el suelo.

4 Conclusiones

En este trabajo se presentaron algunas leyes de control ya conocidas que fueron aplicadas en un programa de simulación de mecanismos, en donde se tienen en cuenta efectos no considerados en el modelo, para verificar la performance de la ley de control desarrollada. El empleo de programas tales como *Mecano*, proveen de herramientas eficaces para facilitar la descripción de modelos de plantas complejas y considerar efectos despreciados en el modelo. Permiten una aproximación más exacta de la realidad para evaluar en forma rigurosa la ley de control desarrollada.

Referencias

- [1] Rolf Isermann. *Digital Control Systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1981.
- [2] L. A. Gould G. C. Newton and J. F. Kaiser. *Analytical design of Linear Feedback Controls*. John Wiley & sons, 1957.
- [3] P. Daoutidis and C. Kravaris. Synthesis of feedforward/satate feedback controllers for nonlinear processes. *Ind. Eng. Chem.*, 35:1602-1616, 1989.
- [4] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems*. 2 edition, 1989.
- [5] F. M. Camusso y A. Cardona. Determinación de las ecuaciones de movimiento y análisis de la estabilidad de un sistema péndulo invertido. *Mecánica Computacional*, XV:459-468, 1995.

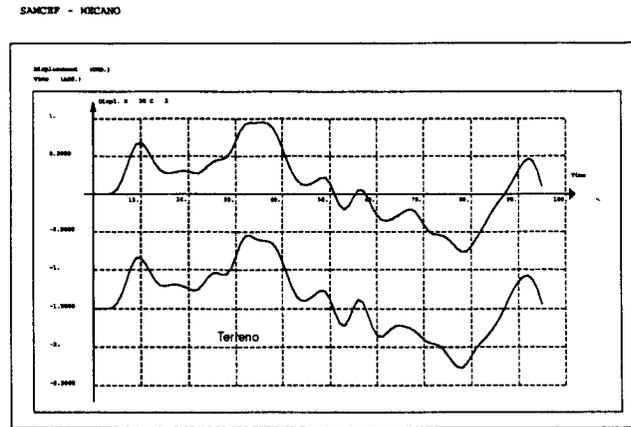


Figura 3: Seguimiento del cabezal con el terreno

- [6] R. W. Lim. Convergent systems. *IEEE Trans. Aut. Control*, 13(4):384-391, 1968.
- [7] L. Giovanini, F. M. Camusso, A. Cardona y J. Marchetti. Aplicación de linealización exacta al control de posición del cabezal de una cosechadora. *AADECA*, XV:459-468, 1996.
- [8] A Complete Guide to All-New Features, Options and Attachments for Maximizer Combines. John Deere Co., 1995.
- [9] J. D. Robson. Road surface description and vehicle response. *Int. J. of Vehicle Design*, 1:25-35, 1979.
- [10] M. Morari and E. Zafiriou. Robust Process Control. *Prentice Hall*. 1989.
- [11] F. Camusso, L. Giovanini, A. Cardona y J. Marchetti. Desarrollo de una Interfaz entre Programas de Simulación y Control. *Informe interno GTM - INTEC*. 1997.
- [12] A. Cardona and M. Géradin. *SAMCEF - Module d'Analyse de Mechanismes MECANO (Manuel d'Utilisation)*. Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Lieja. 1987.

