

Diseño mecatrónico de un manipulador de hojas de vidrio

Salazar Silva Gastón Hugo , Palma Marrufo Orlando

Torres Rosas Edgar Agustín, Pérez Pérez Carlos Andrés, Muñiz Mondragón Bernabe Alfonso

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas
del Instituto Politécnico Nacional
correo electrónico:ghsalazar@ipn.mx

Resumen

El presente trabajo muestra el desarrollo de un manipulador de uso industrial aplicado a la carga de material al proceso de corte. Se plantea el problema del diseño, se incluye el modelado del proceso y del mecanismo y, se explica el sistema de control.

1. Introducción

El diseño y construcción de equipamiento mecatrónico para la industria nacional de alto desempeño encuentra una importante zona de aplicación pues permiten eficientar la mano de obra. En este trabajo se presenta el desarrollo y modelado de un sistema de alimentación de hoja de vidrio aplicado al proceso de corte de este material.

El proceso de corte de hoja de vidrio consiste de las etapas de alimentación, corte, separación, pulido, lavado, secado y descarga de la línea. Por el número de pasos en el proceso se presta para que éste sea automatizado. En la actualidad esta operación es manual, manual asistida, realizada por mecanismos específicos, manipuladores programables o robots.

El sistema propuesto se integró de una base giratoria para colocar los paquetes de cristal. un manipulador de tres GDL y un sistema de centrado del cristal para la mesa de corte. En el presente trabajo se centra en el diseño del manipulador, pero es importante notar que existen los otros elementos del sistema, ya que afectan el diseño. Se determinó que se requieren cuatro GDL para llevar el vidrio desde la base giratoria hasta colocarlo en la posición de centrado en la mesa. Estos cuatro GDL se obtuvieron utilizando dos mecanismos distintos, uno de tres GDL, denominado manipulador, y el otro de un grado de libertad, llamado pistón de centrado.



Figura 1: Operación manual

Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Masa [kg]
1500	790	2	6
1970	630	3	10
1670	115	3	15

Cuadro 1: Dimensiones máximas y mínimas de las hojas de vidrio.

2. Problema

El diseño se puede ver como un problema de optimización, donde se deben seleccionar y organizar los componentes del sistema de tal manera que alcancen los objetivos planteados el diseño y la operación del equipo, así como satisfacer las restricciones impuestas a éste.

Los objetivos son automatizar la alimentación del proceso de corte de hoja de vidrio, reducir tiempo de alimentación y reducir el manejo del material, que es causa de daño en la superficie de los vidrios.

El proceso específico a automatizar es un ciclo que consiste en 1) separar una hoja de vidrio de su empaque, 2) llevar la hoja a la mesa de alimentación y 3) centrar la hoja para llevarla a la máquina de corte.

Las restricciones de diseño son que la solución

sea un manipulador, que sea de menor tamaño que los sistemas existentes comerciales y que sea capaz de manejar hojas de vidrio de las dimensiones señaladas en el Cuadro 1. Es importante notar que la geometría del movimiento del cristal implica que se requieren cuatro grados de libertad (GDL) para satisfacer el proceso y que el manipulador debe sacar el cristal de su empaque. Otras restricciones que se deben satisfacer aparecen en el Cuadro 2.

Concepto	Valor
Tiempo del ciclo	12.5 segundos.
Tipo de motor	Servomotores sin escobilla.
Tipo de automatización	Autómata programable (PLC).
Tensión de alimentación	440 voltios de corriente alterna.
Operación	No afectar la operación manual.
Mantenimiento	Fácilmente accesible el sistema.
Eficiencia en tiempo	99.5 % .

Cuadro 2: Restricciones del diseño.

3. Desarrollo de la propuesta

El sistema propuesto se integra de una base giratoria para colocar los paquetes de cristal. un manipulador de tres GDL y un sistema de centrado del cristal para la mesa de corte. En el presente trabajo se centra en el diseño del manipulador, pero es importante notar que existen los otros elementos del sistema, ya que afectan el diseño.

Se determino que se requieren cuatro GDL para llevar el vidrio desde la base giratoria hasta colocarlo en la posición de centrado en la mesa. Estos cuatro GDL se obtuvieron utilizando dos mecanismos distintos, uno de tres GDL, denominado manipulador, y el otro de un grado de libertad, llamado pistón de centrado.

El manipulador propuesto consta de tres articulaciones servo-actuadas. La primera es un mecanismo de desplazamiento lineal, la segunda es un mecanismo de rotación, así como también la tercera. El último eslabón contiene una matriz de copas de succión. A esta configuración se le conoce como prismática-rotacional-rotacional (PRR). Un esquema del mecanismo se aprecia en la Figura 4. Las dos primeras articulaciones permiten el posicionamiento en el plano del cristal, mientras la tercera articulación da la orientación.

3.1. Modelo del proceso

El proceso a ejecutar se puede modelar con redes de Petri [1, 2]. Las redes de Petri son una herramienta tanto gráfica como matemática, que permite modelar procesos de eventos discretos. Como herramienta gráfica, sirve para comunicar el modelo, tal como lo hacen un diagrama de flujo o un diagrama a blo-

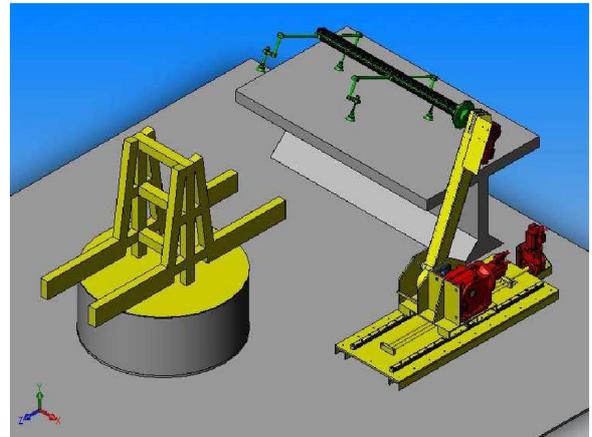


Figura 2: Concepto final del sistema de carga.

ques. Como herramienta matemática, permite describir el proceso por medio de ecuaciones y utilizar éstas para su análisis. Un trabajo de revisión sobre el tema es [3].

El modelado con redes de Petri se realiza de la siguiente manera: primero se identifica las actividades y recursos requeridos, después se ordenan actividades por relaciones de precedencia y finalmente se genera el grafo de la red de Petri.

Los recursos requeridos son la base giratoria (BG), la mesa de centrado (T), el efector final (MM), el sistema de vacío (MV), el eslabón 2 (ME), el eslabón 1 (MDL) y el pistón de centrado (PC).

Se identifican las siguientes actividades a ejecutar, ordenando por relaciones de precedencia. Primeramente se verifica si existe vidrio en la base giratoria (VBG). Después se realiza el movimiento del eslabón 2 y el efector final (M1), hacia la base giratoria. Luego el efector final toma un vidrio (M2). Posteriormente el eslabón 2 y el eslabón 3 se mueven hacia la mesa de centrado (M3). El efector final suelta el vidrio en la mesa de centrado (M4), si no existe un vidrio sobre ella (NOT). El pistón empuja el vidrio (M5). Finalmente se desplaza el eslabón 1 en dirección a la base giratoria (M6), reiniciando el ciclo.

A partir de esta información, se sintetiza la red de Petri de la Figura 3.

3.2. Modelo dinámico

El modelo dinámico del manipulador se obtuvo por medio de las ecuaciones de Euler-Lagrange [4, 5]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau, \quad (1)$$

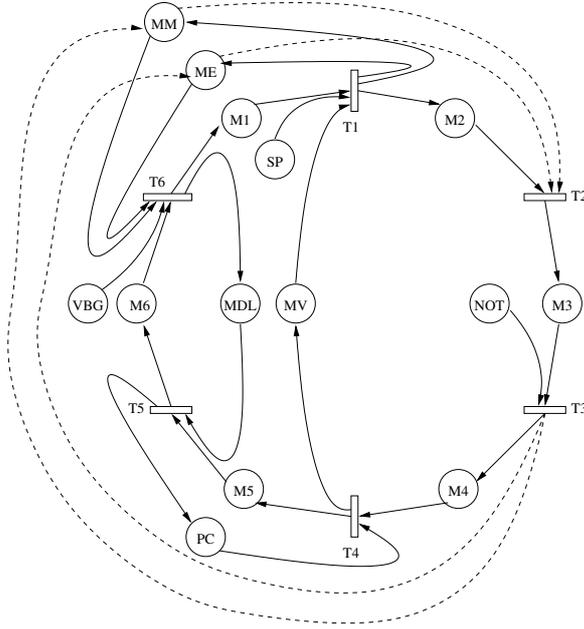


Figura 3: Red de Petri del proceso.

donde $q = (q_1, q_2, q_3)^T \in \mathbb{R}^3$ representa las coordenadas generalizadas, q_i es el desplazamiento del correspondiente a cada eslabón, \dot{q} denota la derivada con respecto al tiempo de q , $L(q, \dot{q})$ es el lagrangiano del sistema y $\tau \in \mathbb{R}^3$ son las fuerzas generalizadas.

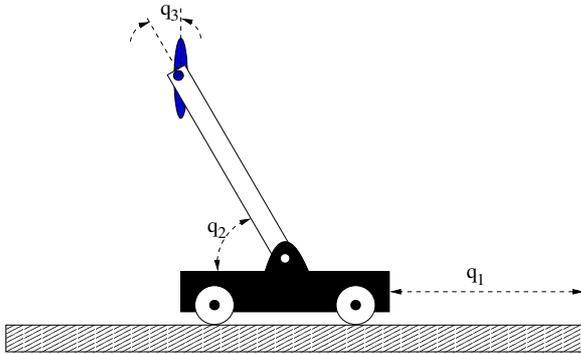


Figura 4: Modelo esquemático del manipulador.

El lagrangiano se define como

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - V(q) \quad (2)$$

donde $V(q) \in \mathbb{R}$ es la energía potencial del manipulador y $K(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}$ representa la energía cinética.

La energía cinética, K , esta dada por

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \quad (3)$$

donde n es el número de eslabones del manipulador, en este caso $n = 3$, y K_i es la energía cinética individual

de cada eslabón, la cual esta dada por

$$K_i = \frac{1}{2} \dot{r}_i^T \begin{pmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & I_i \end{pmatrix} \dot{r}_i \quad (4)$$

donde $r_i = (x_i, y_i, \alpha_i)^T$ denota la posición cartesiana y angular del centro de masa del i -ésimo eslabón y \dot{r}_i su derivada con respecto al tiempo.

Por otro lado, recordando que

$$\dot{r}_i = J_i(q) \dot{q} \quad (5)$$

donde J_i es la matriz Jacobiana del centro de masa del i -ésimo eslabón [5]. Entonces

$$K_i = \frac{1}{2} \dot{q}^T J_i(q)^T \begin{pmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & I_i \end{pmatrix} J_i(q) \dot{q} \quad (6)$$

donde m_i es la masa del eslabón correspondiente e I_i es su momento de inercia.

A partir de (7) y (6) se obtiene la siguiente expresión

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}, \quad (7)$$

donde $M(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ se denomina como la matriz de inercia del manipulador [5], que para este caso es

$$M(q) = \begin{pmatrix} m_3 + m_2 + \frac{1}{4}m_1 & -l_2(m_3 + \frac{1}{2}m_2) \sin(q_2) & 0 \\ -l_2(m_3 + \frac{1}{2}m_2) \sin(q_2) & l_2^2(m_3 + \frac{1}{4}m_2) + I_3 + I_2 & I_3 \\ 0 & I_3 & I_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

La energía potencial del manipulador esta dada por la ecuación

$$V(q) = \sum_{i=1}^n V_i(q) \quad (9)$$

por el efecto de la gravedad sobre los eslabones de los manipuladores

$$V_i = g^T r_i m_i \quad (10)$$

donde $g \in \mathbb{R}^3$ expresa la fuerza ejercida por la gravedad. Esto da como resultado la siguiente expresión

$$V(q) = gl_2 \left(m_3 + \frac{1}{2}m_2 \right) \sin(q_2) \quad (11)$$

Una vez obtenidas la energía cinética y la energía potencial, se puede encontrar el modelo dinámico del manipulador. Si sustituimos (2) y (7) en (1) se obtiene

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \frac{\partial}{\partial q} \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{\partial V}{\partial q} = \tau. \quad (12)$$

Esta ecuación se simplifica a

$$M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T \frac{\partial M}{\partial q}(q)\dot{q} + \frac{\partial V}{\partial q} = \tau \quad (13)$$

o en notación más compacta

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (14)$$

donde $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ se denomina *matrix de Coriolis* y se define como

$$C(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{q}^T \frac{\partial M}{\partial q}(q). \quad (15)$$

Para este caso, se tiene que

$$C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}m_1 + m_2 + m_3 & -l_2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\sin(q_2) & 0 \\ -l_2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\sin(q_2) & l_2^2(\frac{1}{4}m_2 + m_3) + l_2 + l_3 & l_3 \\ 0 & l_3 & l_3 \end{pmatrix}.$$

El vector $G(q) \in \mathbb{R}^3$ representa los efectos de la gravedad sobre el manipulador

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q}. \quad (16)$$

En este manipulador se tiene

$$G(q) = \begin{pmatrix} 0 \\ l_2(\frac{1}{2}m_2 + m_3)\cos(q_2) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

3.3. Sistema de control

El sistema de control se implanto por medio de un control lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés). La red de Petri determinada en la subsección 3.1 se programo por medio del lenguaje de diagrama de escalera.

Para las articulaciones se decidió utilizar como actuadores servomotores sin escobillas, que proporcionan mayor tiempo de operación sin mantenimiento. Estos servomotores incluyen como retroalimentación de posición resolucionadores analógicos (*resolvers*) con interfaz digital. Este tipo de sensor permite conocer en todo tiempo el estado del manipulador, sin requerir procedimientos de inicialización. Estos actuadores incluyen frenos electromecánicos, lo cual permite mantener la posición sin requerir la aplicación de par por parte de los servomotores, además de proporcionar mayor seguridad en caso de falla.

Se incluyo en los controles de los motores la opción de utilizar el bus de campo DeviceNet [6], lo cual permitió reducir el número de cables requeridos para la conexión y obtener una retroalimentación directa con el PLC.

4. Análisis de resultados

El resultado obtenido fue un manipulador mecatrónico que realiza la función para lo que fue diseñado. Como es de esperarse en un prototipo, se encontraron zonas de mejoramiento para una segunda versión, que gracias a la estructura del sistema podrán ser rápidamente implementadas.

Se verificó que el sistema estuviera dentro de la especificación impuesta por la empresa, ya que se debía tener en cuenta factores como la seguridad industrial y los métodos de trabajo de la planta misma y se hizo funcionar adecuadamente. Uno de los resultados más significativos fue que se superó por mas de 950 piezas la meta inicialmente establecida que fue al menos mantener el mismo ritmo de cadencia de carga que con la operación manual.

Se determinó que a costo de un número mayor actuadores se consiguió una sustancial autonomía y flexibilidad importantes toda vez que se permite la operación manual, es decir que en caso de necesidad, el operador puede seguir interactuando con la línea de corte sin más modificación que desmontar la matriz de ventosas.

En el diseño estructural para el movimiento de cargas de hasta 15 kg se logró desplazar con un equipo de 637 kg lo que representa 2.35 % peso comparativo por unidad lo que podría parecer un abuso, ya que practicamente el dispositivo se manejaría en vacío, pero este resultado significa que las perturbaciones son practicamente despreciables y el dispositivo trabaja a un régimen constante sin picos de carga.



Figura 5: Sistema operando.

5. Conclusiones

El diseño y construcción de equipamiento mecatrónico en la industria nacional de alto desempeño y exigidos niveles de calidad encuentra una importante zona de aplicación pues como fue en este caso, se obtienen mejoras sensible al procedimiento habitual, permitiendo al operador avocarse a otras tareas que no interfieren directamente con el proceso. Se analizó el problema de diseño de un manipulador de tres GDL aplicado a alimentar hojas de vidrio en un proceso de corte. En el diseño se modelo el proceso a ejecutar a través de sistemas a eventos discretos con redes de Petri y se obtuvo el modelo dinámico del mecanismo a través de la ecuaciones de Euler-Lagrange. En cuanto la implantación, se mostró la metodología utilizada.

Indudablemente el sistema tiene varios puntos que pueden ser mejorados, los cuales pueden ser la reducción del costo para el control utilizando una computadora personal ya que podríamos prescindir del PLC y sus módulos, se podría mejorar su interacción con el ambiente usando sensores exteroceptivos como visión artificial entre otros, para que el prototipo pueda detectar la presencia de vidrio ó que este se encuentra en malas condiciones, se podría reducir el peso de la estructura utilizando materiales más ligeros, logrando en consecuencia disminuir el tiempo del ciclo de trabajo, la utilización de sensores inteligentes para la reducción de errores y cableado.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo recibido de la empresa Crinamex S.A. de C.V. durante la realización de este proyecto.

Referencias

- [1] Petri, C. A. *Kommunikationen mit Automaten*. Tesis Doctoral, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.
- [2] Petri, C. A. *Communication with automata*. Informe Técnico RADC-TR-65-377, vol 1, Suppl. 1, Griffiss Air Force Base, 1966.
- [3] Murata, T. *Petri nets: Properties, analysis and applications*. *Proceedings of the IEEE*, tomo 77, 4, páginas 541–580, abril 1989.
- [4] Craig, J. J. *Introducción to robotics: mechanics and control*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [5] Mark W. Spong y M. Vidyasagar. *Robot dynamics and control*. John Wiley & sons, 1989.

- [6] Allen-Bradley. *DeviceNet Home*. Página web: <http://www.ab.com/networks/devicenet.html>. Revisado por ultima vez en abril de 2004.