



## Ensamblaje automático de piezas con desviaciones dimensionales

Javier Gámez García\*, Alejandro Sánchez García, Silvia Satorres Martínez, Juan Gómez Ortega

Grupo de Robótica, Automática y Visión por Computador de la Universidad de Jaén, 23071 Jaén, España.

### Resumen

Dentro de la automatización del proceso de ensamblaje de piezas, de cara a obtener un producto final que cumpla con unas expectativas dimensionales, existe una problemática asociada cuando los elementos a ensamblar presentan variaciones geométricas dimensionales apreciables. Estos errores dimensionales de los componentes pueden suponer unos sobre costes de producción al desechar el producto final obtenido por no cumplir las especificaciones, e incluso un deterioro de la imagen de la empresa fabricante. La contribución de este trabajo consiste en el desarrollo de una nueva metodología para el ensamblaje de piezas con desviaciones dimensionales. Se propone un sistema automático que compense dinámicamente la posición de los componentes a ensamblar, es decir, que mida durante el ensamblaje las dimensiones de las piezas y ajuste las posiciones de éstas, dentro del rango de movimiento permitido, para que al ensamblarse se consiga un producto final que cumpla las dimensiones requeridas en su conjunto.

Para la validación experimental se ha desarrollado un prototipo de máquina de ensamblaje de faros de vehículo el cual ha sido implantado y validado en una línea de producción industrial. De esta forma se ha demostrado, a nivel de empresa, que la metodología propuesta presenta una mejora de su competitividad ya que reduce notablemente el número de productos finales defectuosos motivados por las desviaciones dimensionales de sus componentes. Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

### Palabras Clave:

Ensamblaje automático. Fabricación flexible. Sistemas Expertos.

En una economía tan evolucionada y competitiva como la actual, la optimización de los procesos de fabricación resulta crucial si se quiere aspirar a ser competitivo. Una forma de reducir costes y mejorar la calidad final de los productos manufacturados consiste en introducir nuevos materiales, ya sean más económicos o con mejores propiedades, o bien en mejorar el propio proceso productivo (Groover, 2008). Sin embargo, esto puede suponer una serie de inconvenientes. Por ejemplo, en piezas plásticas estilizadas con una baja relación peso-tamaño, la variación dimensional que presentan tras ser inyectadas puede imposibilitar su uso. En este contexto, la automatización avanzada del proceso de ensamblaje puede permitir no sólo que éste pueda llevarse a cabo de forma automática, si no también resolver problemas de fabricación como es la variación dimensional de los componentes a ensamblar (Gamez-García et al., 2009). Un ejemplo representativo de este problema aparece en la fabricación de faros de automóvil, donde una de las tareas principales consiste en el ensamblaje del protector transparente

(o cristal, como se le conoce habitualmente aunque actualmente sea de policarbonato), sobre una carcasa semirígida fabricada en polipropileno. El resto de los componentes: reflector, sistema de iluminación, embellecedor, etc., están ubicados dentro de dicha carcasa (Fig. 1). Tras ensamblar el faro, el cliente final, que es un fabricante de vehículos, requiere que el elemento en su conjunto garantice unas medidas dimensionales predefinidas. Esta validación se suele realizar a partir de la medición dimensional en una serie de puntos de control distribuidos por todo el faro.

En este trabajo se propone una nueva solución para el ensamblaje de piezas con desviaciones dimensionales que hagan que el producto final, en este caso faros de automóvil, sea desechar por superar las tolerancias dimensionales máximas exigidas por el cliente. En particular, se ha propuesto un sistema automático que compensa dinámicamente la posición de los componentes externos del faro durante el proceso de ensamblaje, midiendo para ello las dimensiones de las piezas durante el proceso de ensamblaje para, posteriormente, ajustar las posiciones de éstas de forma que se consiga un producto final que cumpla las dimensiones requeridas en su conjunto. Finalmente, para estudiar la viabilidad de la propuesta se ha construido

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: [jggarcia@ujaen.es](mailto:jggarcia@ujaen.es) (Javier Gámez García), [asgarcia@ujaen.es](mailto:asgarcia@ujaen.es) (Alejandro Sánchez García), [satorres@ujaen.es](mailto:satorres@ujaen.es) (Silvia Satorres Martínez), [juango@ujaen.es](mailto:juango@ujaen.es) (Juan Gómez Ortega)



Figura 1: Ejemplo de piezas a ensamblar para la construcción de un faro de automóvil (de atrás hacia delante): carcasa, embellecedor y cristal. Las tres piezas son fabricadas de distintos materiales plásticos.

un prototipo siendo validado en una línea de producción de la fábrica.

La validación de la metodología de ensamblaje propuesta se ha llevado a cabo mediante la construcción de un prototípico industrial ubicado inicialmente en un laboratorio de investigación y posteriormente en una línea de producción del faro del Opel Corsa. En total se han realizado más de 5000 ensamblajes (en la fase de pruebas), comprobándose por tanto la viabilidad industrial de la propuesta desarrollada en este trabajo. Sin duda, la utilización de esta solución tecnológica permitiría a la industria manufacturera aumentar su competitividad productiva pues, además de reducir el número de productos ensamblados defectuosos, mejora la imagen de la empresa desde un punto de vista de aseguramiento de la calidad; consiguiéndose éste de forma activa, y no reactiva, con el consiguiente ahorro económico.

La distribución de este artículo es la siguiente: en la sección primera se presenta el objetivo de control formulado desde un punto de vista matemático. El apartado segundo describe el hardware seleccionado tras realizar una evaluación técnica de los posibles sistemas de actuación y de medición utilizables en el prototípico. En la tercera se propone el algoritmo de control desarrollado para el ensamblaje dinámico de piezas, así como su particularización al ensamblaje de faros de automóvil. La sección cuarta muestra los resultados experimentales obtenidos, y que permiten validar esta metodología, mientras que, por último, en el apartado quinto se resumen las conclusiones propias de este trabajo.

## 1. Formulación del Problema

Hoy en día, los fabricantes de faros exigen que las dimensiones del faro, ya montado, estén dentro de unos valores de tolerancias dimensionales que actualmente se fijan por debajo

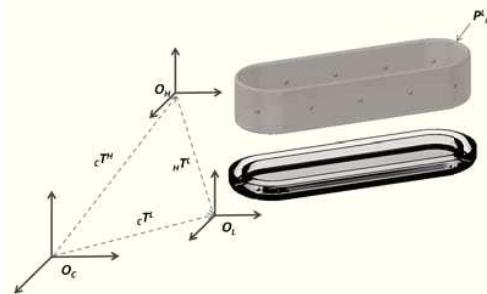


Figura 2: Sistemas de referencia definidos para representar el proceso de ensamblaje.

de varias décimas de milímetro, y que deben ser garantizadas en al menos un conjunto de seis a diez puntos (dependiendo del modelo de faro) ubicados en el perímetro del mismo y definidas por cada fabricante de vehículos. La tecnología actual de ensamblaje se basa en la inclusión de un canal—denominado canal de cola—alrededor del perímetro de la carcasa sobre el que se deposita una cola de unión y sellado que, una vez fraguada, une herméticamente ambas piezas: cristal y carcasa. Hasta ahora, para conseguir que el conjunto ensamblado tenga las dimensiones exigidas por el cliente se incluyen distribuidos a lo largo del canal de cola una serie de cuñas y elementos fijadores que permiten, mediante presión, posicionar el cristal sobre la carcasa. Este procedimiento es impreciso en gran parte de las ocasiones pues no se tiene en cuenta la desviación dimensional de las piezas fabricadas durante el posicionamiento.

Cuando se quiere llevar a cabo el ensamblaje de una pieza sobre otra existiendo interacción entre ellas, una estrategia adecuada para formular el problema, desde un punto de vista matemático, consiste en definir una serie de sistemas de referencia asociados a las piezas que se quieren unir. Posteriormente se haría coincidir los sistemas de referencia reales, estimados a partir de la medición de la posición de las piezas, con los deseados. Esta formulación es conocida como formulación mediante sistemas de referencia de la tarea (Bruyninckx and de Schutter, 1996). Aplicando esta metodología a nuestro problema, se ha definido, a partir de la figura 2, los siguientes sistemas de referencia:  $O_L X_L Y_L Z_L$ , representando la pieza móvil que se quiere ensamblar, es decir, el cristal;  $O_H X_H Y_H Z_H$  define la pieza base o carcasa, la cual es fija y sobre la que se realizará el ensamblado; y por último, se define  $O_C X_C Y_C Z_C$  como sistema mundo. Un punto  $P_i$  ( $P \in \mathbb{R}^4$ ) referenciado con respecto a  $O_L$  se define como  $P_i^L$ ,

$$P_i^C = {}^C T_L P_i^L = {}^C T_H {}^H T_L P_i^L \quad (1)$$

donde  ${}^C T_H$  es constante. En nuestro caso,  $P_i$  equivale al punto de control, o de medición, en el cristal de la carcasa. Como ya se comentó al inicio de esta sección, el objetivo es, localizando la posición de la pieza a ensamblar, hacer que ésta tienda a su posición objetivo definida como  ${}^H T_L$ . Esta posición es aquella que minimizará los errores dimensionales de la pieza ensamblada, por lo que se obtendrá a partir de la minimización de la suma cuadrática de los errores de posición obtenidos en los pun-

tos de control. Estos últimos son definidos a partir de la pieza a ensamblar tomando como referencia la pieza base. Entonces, para hallar  ${}^H T_L$ , debemos aplicar la siguiente transformación  $P_i^H = ({}^C T_H)^{-1} P_i^C$ , quedando la Eq. (1) como:

$$P_i^H = {}^H T_L P_i^L \quad (2)$$

A continuación definimos  $n = (r_{11}, r_{21}, r_{31})^T$ ,  $o = (r_{12}, r_{22}, r_{32})^T$ ,  $a = (r_{13}, r_{23}, r_{33})^T$  y  $d = (d_x, d_y, d_z)^T$ ,  ${}^H T_L$  puede ser calculada como:

$${}^H T_L = \begin{pmatrix} n & o & a & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Puesto que  ${}^H T_L$  es una matriz ortogonal, y basándonos en la siguiente propiedad (Johansson, 1993):

$$a = n \times o \quad (4)$$

tenemos

$$\begin{pmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & (r_{21}r_{32} - r_{31}r_{22}) & d_x \\ r_{21} & r_{22} & (r_{11}r_{32} - r_{31}r_{12}) & d_y \\ r_{31} & r_{32} & (r_{11}r_{22} - r_{21}r_{12}) & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

El error de posición para un punto  $i$  lo definimos como

$$\vec{e}_i = P_i^L - P_{i_m}^L \quad (6)$$

donde  $P_{i_m}^L$  representa el punto de control  $i$  medido por el sensor respectivo. Este dato se obtiene a partir de

$$P_{i_m}^L = x_{s_i} \vec{u}_i \quad (7)$$

donde  $x_{s_i}$  es la medida de distancia realizada por un sensor ubicado en el punto de control  $i$  y el vector  $\vec{u}_i$  es la normal de dicho sensor. Definiendo el error cuadrático total  $\vec{E}^2$ , para un número  $n$  de puntos de control, como

$$\vec{E}^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (8)$$

la posición objetivo del objeto a ensamblar  ${}^H T_{L_m}$  puede calcularse minimizando  $\vec{E}^2$ . Para ello, definimos las siguientes ecuaciones, para cada variable a calcular  $k_i$ , como

$$\frac{\partial \vec{E}^2}{\partial k_i} = 0 \quad (9)$$

donde, por ejemplo, para el caso de  $r_{11}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{E}^2}{\partial r_{11}} &= 2(r_{11} \sum_{i=1}^n x_i^L + r_{12} \sum_{i=1}^n y_i^L \\ &+ (r_{21}r_{32} - r_{31}r_{22}) \sum_{i=1}^n z_i^L d_x - x_{i_m}^L) \sum_{i=1}^n x_i^L \\ &+ 2(r_{21} \sum_{i=1}^n x_i^L + r_{22} \sum_{i=1}^n y_i^L \\ &+ (r_{11}r_{32} - r_{31}r_{12}) \sum_{i=1}^n z_i^L d_y - y_{i_m}^L) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Por último, utilizando la ecuación (9), podemos obtener  ${}^H T_{L_m}$  que minimice los errores de posición de la pieza a ensamblar sobre la pieza base. Esta matriz de transformación será la que defina los comandos de control, de forma global, del sistema de actuación.

## 2. Descripción del Hardware

El objetivo de esta sección es la descripción del proceso de selección del hardware que se utilizaría para llevar a cabo el ensamblaje de las piezas. Este hardware ha de permitir la compensación dinámica del cristal sobre la carcasa, por lo que ha de poder medir la posición y dimensión del cristal con las particularidades que presenta: elemento transparente, radios de curvatura variable, etc., y además ha de poder llevar a cabo su corrección en posición de forma efectiva.

Con respecto a los *sistemas de actuación*, estos han de satisfacer ciertos requerimientos como son: permitir el movimiento en los 6 grados de libertad, que pueda realizar movimientos precisos para pequeños desplazamientos (no dañando la pieza en ningún momento), que puedan deformar la pieza de forma local; y por último, que sea lo suficientemente robusto para ser incorporado en una cadena industrial. Bajo estas premisas, se han evaluado distintas tecnologías —como por ejemplo robots manipuladores, diferentes tipos de actuadores lineales, etc.—, obteniendo las siguientes conclusiones:

- **Robot Industrial con realimentación de esfuerzos:** Para que el ensamblaje de piezas utilizando robots manipuladores pueda ser operativo en un proceso industrial, es necesario que estos sean lo suficientemente precisos (Gámez et al., 2009b); sin embargo, la precisión en el movimiento de un robot es baja si se compara con las repetitividades que son capaces de obtener (Liu et al., 2009).

Por otro lado, para evaluar la fuerza/par ejercidos por el manipulador, se observó inicialmente que era necesario llevar a cabo un control de la fuerza/par (f/p) ejercida por el robot si se quería modificar el posicionamiento de la pieza a ensamblar ya que ésta, al ensamblarse con la pieza base, contactaría en algunas zonas limitando su movimiento. Esta situación sólo sería detectable y controlable si colocásemos un sensor de f/p en la muñeca del robot y realimentásemos esta medida al sistema de control, por tanto se implementó un control de fuerza-par en un robot industrial de la marca Stäubli. Este controlador se basó en el trabajo presentado en (Gamez et al., 2009a),(Gamez et al., 2008), y (Blomdell et al., 2005). Básicamente, el procedimiento utilizado fue implementar en el lazo de control de posición el efecto de la medida obtenida por un sensor de fuerza/par colocado en la muñeca del robot, evitando de esta forma modificar el controlador original del fabricante (Lopes and Almeida, 2008). Posteriormente, similar a los trabajos presentados en (Gamez et al., 2009a) y (Lopes and Almeida, 2008), se utilizaba un controlador de fuerza/par externo que modificaba la consigna de posición/velocidad del robot de forma que obtuviese una fuerza/par, o bien una impedancia, deseada.



Figura 3: Evaluación de un robot manipulador como elemento actuador. En la figura se muestra un robot ABB con realimentación de fuerza (utilizado para realizar el estudio), un sensor láser Keyence LK-G y un robot Stäubli. Estos dos últimos son utilizados como sensor de medida y posicionamiento, respectivamente.

Pero para llevar a cabo el ensamblaje controlado de la pieza, no basta con controlar las fuerzas y pares de contacto, sino que también es necesario determinar el punto de contacto entre las piezas a ensamblar e inferir si se está en una superficie límite de movimiento, o no, y el margen de maniobrabilidad de la pieza para ensamblar. Otro de los inconvenientes que presentaba esta metodología de actuación es que no permitía la deformación local de ciertas zonas del cristal del faro, ya que la composición del movimiento se realizaba considerando el cristal como un único elemento y además rígido. Estos dos problemas motivaron que se desechara finalmente esta opción de actuación, pasando a trabajar con actuadores lineales repartidos estratégicamente a lo largo y ancho del faro.

- **Actuadores Lineales sin posibilidad de movimiento forzado externo:** Correspondría a motores con transformación de movimiento giratorio a lineal mediante husillo donde la tangente del ángulo de la hélice sea menor que el coeficiente de fricción viscosa. También en mecanismos de piñón-cremallera con reductora de alto valor de transformación y donde la fricción estática sea considerable. Este tipo de actuador, en general, ofrece un par mayor a la vez que una mayor precisión; sin embargo, presenta el inconveniente de un rendimiento inverso negativo y una menor velocidad lineal (Pawlak, 2007). Este rendimiento negativo implicaría que el eje del actuador ofrecería un par resistente que impediría su movimiento, haciendo de tope para movimientos desde otros actuadores. Para solventar este inconveniente se podría integrar un sensor para medir directamente el par ejercido por el motor (y no a través de la intensidad de inducido). De esta forma sería posible hacer avanzar o retroceder el actuador para disminuir ese par. Si la medida es a través de la intensidad, esto no sería posible y habría que separar el actuador cuando no vaya a compensar.

- **Actuadores Lineales con posibilidad de movimiento forzado externo.** Correspondría a motores con transformación a movimiento lineal mediante husillo de accionamiento directo sin reductora o bien con reductora de bajo valor de transformación y fricción estática reducida. También corresponde a mecanismos piñón cremallera de alto ángulo de hélice. En ambos casos, la velocidad lineal es elevada, el par proporcionado es pequeño y la resolución grande (Bishop, 2008). Este tipo de actuadores ofrecían una cierta resistencia al movimiento (mayor o menor), por lo que sería necesario tenerla en cuenta durante la compensación de la posición de la pieza a ensamblar.

Dentro de este tipo de actuadores también encontraríamos los denominados motores magnéticos lineales, los cuales fueron finalmente elegidos para la construcción del prototipo. La ventaja que presentaría este actuador, a parte de no contar con ningún tipo de engranaje interno que impidiese movimientos forzados externos, es la posibilidad de deformar localmente el cristal del faro de forma que se garantice que el sensor de posición más cercano está dentro de rango, pero sin apenas perturbar la acción del resto de los sensores. En nuestro caso particular, se ha elegido los actuadores lineales LinMot con un recorrido de 25 cm y una precisión de 0.1 mm. Presentan un comportamiento lineal y tienen internamente un controlador PID de ajuste de posición. Esta posición puede verse modificada a partir de la fuerza que se desarrolle sobre el actuador, modificando su impedancia mecánica.

Con respecto a los *sistemas de medición*, el problema es identificar la posición y orientación del cristal sobre la carcasa, y una vez que se encuentra en una posición válida, proceder al enclavamiento del primero sobre el segundo. Posteriormente, se bloquearía el movimiento del cristal mediante grapas metálicas que atraviesan el canal de cola de la carcasa. La posición del cristal se estima a partir de una serie de puntos de medición que se reparten sobre el contorno del cristal. Para el ejemplo que nos ocupan, el faro del Opel Corsa, tendríamos 8 puntos de control con una tolerancia máxima de unas décimas de milímetro. Indicar que estos puntos son siempre definidos por el fabricante de vehículos, y que por lo tanto su posición y orientación son fijas.

Para el sistema de medición se han evaluado, por un lado, aquellos sensores que pueden realizar una medida de la posición sin tener que contactar con la pieza; y por otro, se han estudiado aquellos que necesitarían contactar con la pieza para medir su posición. En cuanto a la primera opción se ha estudiado la viabilidad de las siguientes tecnologías de medición: por ultrasonidos, utilizando sensores capacitivos, inductivos, visión por computador, infrarrojos, por cromatografía y sensores láser. De este estudio se concluye que la tecnología más adecuada de medición sin contacto era la medición por láser, aunque si bien es cierto que esta solución debía ser estudiada con más profundidad.

Como principales ventajas cuenta con que las precisiones logradas con estos sensores alcanzan los micrómetros, y que los rangos de medida, aunque pequeños, son lo suficientemente

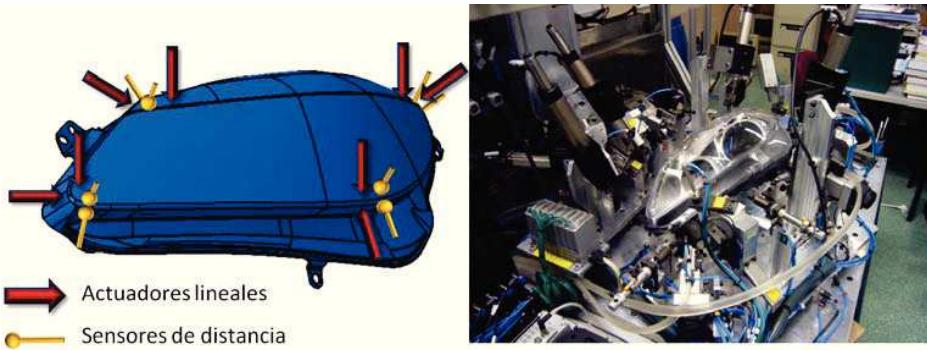


Figura 4: Solución adoptada: a la izquierda se representa la distribución física de los sensores y actuadores; mientras que a la derecha se muestra una fotografía del prototipo construido. Obsérvese cómo los sensores y actuadores están repartidos por el contorno del faro y en también en el eje z de forma que el faro pueda posicionarse en los tres ejes de movimiento.

amplios como para medir la variación de la posición de la pieza a ensamblar. Sin embargo, el principal inconveniente de esta tecnología es el hecho de que para el caso de piezas transparentes, o semitransparentes, se producen múltiples reflexiones del haz láser que dan lugar a medidas falsas.

Para comprobar la viabilidad de este tipo de sensores a la hora de medir distancias a objetos total o parcialmente transparentes con unas características determinadas: índices de reflexión variables según la zona de medida, variación brusca de los radios de curvatura de la pieza, zonas con distintos acabados superficiales, etc., se ha utilizando un robot manipulador Stäubli de 6 grados de libertad y un sensor láser LK-G137 de Keyence. El sensor, colocado en el extremo del robot (Fig. 3), ha sido referenciado con respecto a éste y una vez ubicado el sensor perpendicular a la superficie del punto de medida, y teniendo en cuenta la información aportada por el fabricante, se ha realizado diferentes pruebas de medida variando la orientación del sensor con respecto al cristal del faro. Cuando la distancia a medir es hacia una pieza transparente, se comprueba que existen dos picos de energía que corresponderían a la parte anterior y posterior de dicha pieza. Para evitar este problema es necesario disponer de un sensor láser que sea capaz de discernir entre estos picos y obtener la medida real de distancia al objeto. También se realizaron pruebas de orientación en el sensor láser y se ha observado que para aquellos puntos de medición que se encuentran ubicados sobre zonas de elevada curvatura de la pieza a ensamblar, la medida del láser no es adecuada pues el haz no se refleja correctamente. Por tanto, la conclusión que se obtiene es que los sensores láser son viables como sensores de medida siempre y cuando el punto de medida de la pieza a ensamblar no tenga una curvatura pronunciada.

En cuanto a la opción de los *sensores de contacto* o palpadores, su principal ventaja es su coste económico—frente a los sensores láseres—, y que también son relativamente precisos. Sin embargo, el principal inconveniente que plantean en ciertos puntos de medida es que el propio palpador puede hacer de tope mecánico al movimiento de la pieza a ensamblar (ya que su movimiento está restringido a exclusivamente su grado de libertad). Para el estudio de viabilidad de estos sensores y llegar

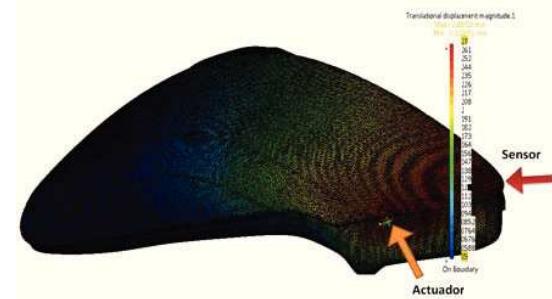


Figura 5: Simulación del comportamiento del cristal cuando éste es empujado por una fuerza lineal. El punto y dirección de empuje son realizados por el 'actuador' mientras que la respuesta es recogida en el punto denominado 'sensor'.

a la conclusión anterior se han utilizado palpadores neumáticos de la marca Solartron.

Finalmente mencionar que la solución propuesta para la construcción del prototipo ha consistido en el uso compartido de sensores de medición con contacto para aquellos puntos en los que no existía riesgo de bloqueo en el movimiento por encontrarse el punto de medida en una superficie plana; mientras que se han utilizado láser en las zonas que podía existir riesgo de bloqueo. La figura 4 muestra un CAD del cristal del faro con la situación y distribución de los actuadores y sensores además de una fotografía del prototipo.

Los puntos de control de posicionamiento del cristal están definidos por el comprador del faro, siendo en este caso Opel. En cuanto a la posición y orientación de los actuadores, éstas han sido seleccionadas utilizando herramientas de simulación dinámica de esfuerzos mediante elementos finitos. En particular, tal y como se muestra en la figura 5, para cada punto de control se ha evaluado la posición y orientación de un actuador para que su acción repercutiese directamente sobre la medida del sensor. El problema se ha simplificado considerando únicamente la relación actuador-sensor, y no varios actuadores empujando a la vez, ya que sería un problema extraordinariamente complejo al existir una gran cantidad de combinaciones.

También se desecha esta opción porque se considera que no aportaría una ventaja sustancial. En dicha figura se indica las variaciones de posición para todo el cristal para una fuerza tipo de 30 N aplicada en el punto denominado 'actuador'.

### 3. Algoritmo de control para el ensamblaje dinámico de piezas

El problema a controlar es el siguiente: tras medir la posición de la pieza a ensamblar, además de sus desviaciones dimensionales, conocer qué actuador/actuadores han de realizar el movimiento de compensación, y en qué magnitud, y posteriormente llevarlo a cabo. Recordemos que el objetivo del posicionamiento es el de colocar la pieza de forma que no supere unos errores umbrales, y no buscar la solución óptima. Esta relajación se aplica para reducir el tiempo invertido por componente a ensamblar.

Debido a la complejidad de la tarea de control, ya que se presenta un sistema altamente no lineal que depende de factores como es el punto de empuje sobre la pieza, la geometría de la pieza, las restricciones de movimiento o la flexibilidad de la propia pieza, etc., es necesario utilizar una metodología de control que cumpla con las siguientes condiciones: (1) que sea adaptable al tipo de pieza a ensamblar, y no aplicable exclusivamente al faro de experimentación; (2), que pueda recoger el conocimiento experto de los técnicos que conocen la problemática del ensamblaje de la pieza en estudio; y (3), adaptable al número de sensores y actuadores. En este sentido, el control borroso, o fuzzy, (Mandani, 1974), ofrece una potente herramienta para manejar sistemas no-lineales (Lam and Ling, 2008) y además, como algoritmo de control, es capaz de recoger el conocimiento experto mediante la utilización de reglas de conocimiento y mecanismos de inferencia (Chen and Wong, 2002), (Kubica et al., 2005).

En este trabajo presentamos una metodología de control, basada en la utilización de inteligencia artificial (IA), válida para identificar y controlar el ensamblaje de piezas con variaciones dimensionales. Referente a la identificación, existen distintas posibilidades para caracterizar el comportamiento de un sistema: redes semánticas, sentencias, reglas de producción, mapas cognitivos lógicos o difusos (FCM), etc. (Papageorgiou et al., 2009). En nuestro caso, se han utilizado los mapas cognitivos difusos, o fuzzy cognitive maps (FCM) (Novak and Munsoda, 1991), (Ross, 2004), por las posibilidades de representación y sintetización de las variables de estado de un sistema dinámico así como sus interrelaciones. Estas interrelaciones son cuantificadas mediante uniones, que indican causa y efecto, y posteriormente ponderadas mediante cuantificadores borrosos, pesos, palabras, etc. (Kosko, 1990).

En el modelo propuesto, el mapa cognitivo obtenido se utiliza para representar y procesar el proceso de compensación del ensamblaje, emulando así el proceso de decisión de un operador humano. Aunque normalmente se necesitan dos procesos secuenciales para que el mapa cognitivo borroso funcione adecuadamente: (1) construcción, fuera de línea, del mapa (generando la arquitectura de éste y sus valores iniciales) y (2) sintonización del mapa (ajustando los valores relacionales), en

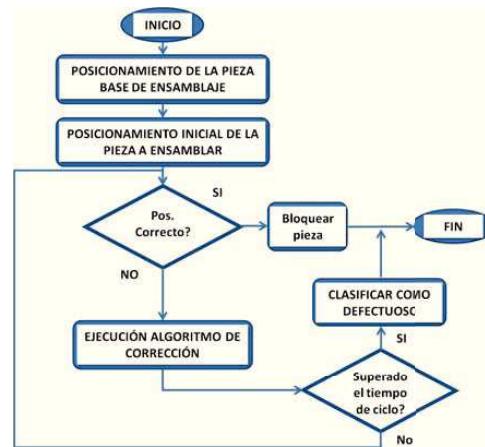


Figura 6: Diagrama de flujo del proceso de ensamblaje.

nuestro caso sólo se aplicaría el primero ya que las propiedades dinámicas del proceso de ensamblaje no varían.

#### 3.1. Identificación de la base de reglas

En general, los controladores convencionales trabajan correctamente siempre y cuando la dinámica del proceso sea conocida, o fácilmente identificable. Sin embargo, en la práctica esto no es lo habitual (Haber and Alique, 2007). En el caso del ensamblaje de piezas, la identificación del modelo dinámico o relacional, además de sus parámetros, puede llegar a ser extraordinariamente complejo por diferentes motivos: puntos de contacto, restricciones en el movimiento, deformaciones, etc. Esto nos lleva a considerar al proceso como una caja negra cuyas variables internas, en vez de definirse a partir del modelado matemático de éste, se obtengan experimentalmente utilizando algún procedimiento de identificación (Wei and Hirzinger, 1998).

La idea principal de cara a realizar esta identificación es excitar cada actuador, o bien un único actuador pero en diferentes direcciones según la maniobrabilidad requerida (como por ejemplo la excitación mostrada en la figura 5), y utilizar la información obtenida para definir el mapa cognitivo borroso del sistema mostrado en la figura 7. Esto es, para un actuador en particular, o bien el grado de libertad de un actuador, el objetivo es identificar qué sensores son los más influenciados por su acción. Nótese que sólo estamos interesados en la correlación actuador-sensor, y no en la correlación actuador-actuador. Entonces, para un número de actuadores  $m$  y un número de sensores  $n$ , definimos la matriz  $C$  ( $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ) como una matriz que contiene asociado a cada componente la relación normalizada entre el actuador  $k$  y el sensor  $j$  (Fig. 7). Esto es:

$$C = \begin{pmatrix} c(1, 1) & c(1, 2) & \dots & c(1, n) \\ c(2, 1) & c(2, 2) & \dots & c(2, n) \\ \dots & & & \\ c(m, 1) & c(m, 2) & \dots & c(m, n) \end{pmatrix} \quad (11)$$

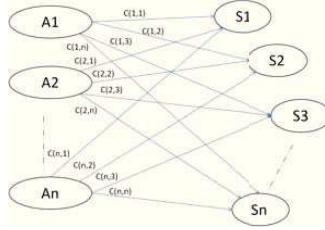


Figura 7: Mapa cognitivo difuso para el modelado de la dinámica del ensamblaje de piezas.

donde  $m$  es el número de actuadores y  $n$  es el número de sensores. El valor de cada coeficiente  $c(k, j)$ , donde  $k = 1..m$  y  $j = 1..n$ , se obtiene aplicando el coeficiente de correlación de Pearson (Ljung, 1999):

$$c(k, j) = \frac{\text{Coef}P(k, j)}{\text{Coef}P_{\max}(j)} \quad (12)$$

donde

$$\text{Coef}P(k, j) = \frac{\sum_{i=1}^Z (a_{ki} - \bar{a}_k)(p_{ji} - \bar{p}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^Z (a_{ki} - \bar{a}_k)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^Z (p_{ji} - \bar{p}_j)^2}} \quad (13)$$

siendo  $k = 1..m$  y  $j = 1..n$ .  $Z$  es el número de muestreos,  $a_{ki}$  es la medida  $i$  del actuador  $k$ ,  $p_{ji}$  es la medida del sensor  $i$  y  $\bar{a}$  es la media de  $a$ . Finalmente,  $\text{Coef}P_{\max}(j)$ , definido en la ecuación (12), es el máximo valor, para  $j$  y  $k = 1..m$ , de  $\text{Coef}P_{\max}(k, j)$ . Para estimar  $c(k, j)$ , cada actuador  $k$  debe excitarse independientemente y al mismo tiempo recoger la respuesta de todos los sensores.

### 3.2. Estructura del controlador borroso

Consideremos el siguiente conjunto de reglas, las cuales relacionan su antecedente—desviación del sensor  $j$ —con su consecuente  $i$ —señal comandada para el actuador  $k$ :

$$\begin{aligned} R(k, j) : & \text{ Si } E_{pal_j} \text{ es } D_1(k, j) \text{ y } \Delta E_{pal_j} \text{ es } D_2(k, j) \\ & \text{Entonces } u_{k,j} \text{ es } D_3(k, j) \end{aligned} \quad (14)$$

donde  $E_{pal_j}$  representa el error de posición ( $E_{pal_j} = p_j - p_{rj}$ ) siendo  $p_{rj}$  la posición nominal de la pieza en el punto de medida  $j$  mientras que  $p_j$  es la medida real de posición del sensor  $j$ .  $\Delta E_{pal_j}$  representa la variación del error e  $i = 1..5$  debido al número de conjuntos borrosos.

Definida la base de reglas, el universo de discurso ha de basarse también en el conocimiento previo y en los resultados experimentales. Por este motivo, las funciones de pertenencia para un conjunto borroso genérico  $D$  se describen como

$$D_{(k,j)}(d_1(k, j), d_2(k, j), d_3(k, j), d_4(k, j); x_i) = \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 & x_i < d_1(k, j) \text{ or } x_i > d_4(k, j) \\ \frac{x_i - d_1(k, j)}{d_2(k, j) - d_1(k, j)} & d_1(k, j) \leq x_i \leq d_2(k, j) \\ 1 & d_2(k, j) \leq x_i \leq d_3(k, j) \\ \frac{d_4(k, j) - x_i}{d_4(k, j) - d_3(k, j)} & d_3(k, j) \leq x_i \leq d_4(k, j) \end{array} \right. \quad (16)$$

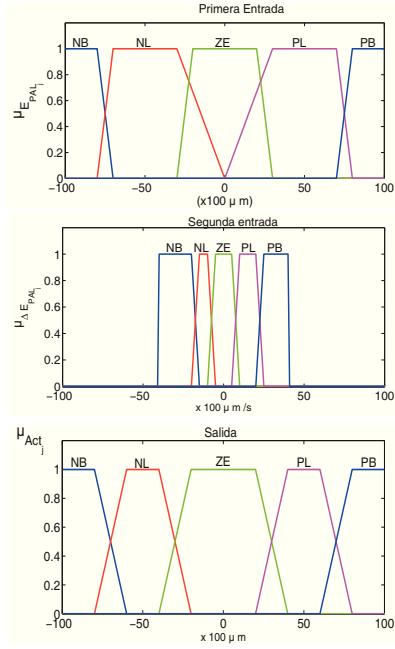


Figura 8: Funciones de pertenencia correspondientes a la primera entrada  $E_{pal_j}$ , la segunda entrada  $\Delta E_{pal_j}$  y la salida  $u_{k,j}$ .

donde la forma trapezoidal de las funciones de pertenencia se determinan mediante los parámetros  $d_1(k, j), d_2(k, j), d_3(k, j)$  y  $d_4(k, j)$ . Se definen cinco conjuntos difusos siendo: negativo grande(NB), negative bajo (NL), cero (ZE), positivo bajo (PL) y positivo alto (PB). En la figura (8) se muestra las particiones borrosas resultantes.

Los conjuntos borrosos se han seleccionado de forma trapezoidal ya que el sistema resultante es la suma de un controlador global no lineal (para la parte estática) y un controlador PI no lineal local para la parte dinámica (la cual cambia constantemente dependiendo de las entradas) (Ying, 1999). Este comportamiento no lineal sería sin duda adecuado para el sistema a controlar. Finalmente, de definen un total de  $(mn)$  reglas.

El siguiente paso a decidir es definir qué estrategia de desemborronamiento es la más adecuada para nuestro problema. Sabemos que este proceso es una parte importante de la teoría de conjuntos borrosos y que éste sirve para transformar la información de los conjuntos borrosos a salidas nítidas numéricas (Roychowdhury and Pedrycz, 2001). Básicamente podemos encontrar cuatro mecanismos de desemborronamiento: el máximo, el centro de gravedad, el centro de las medianas y el punto medio de una área de procedimiento (Kosko, 1992) (Klir and Folger, 1988). Fundamentalmente, estos métodos se basan en el cálculo de áreas geométricas no existiendo un razonamiento fundado de su validez (Roychowdhury and Pedrycz, 2001). El método del máximo genera una respuesta pobre en régimen estacionario y una respuesta temporal menos suave si se compara con el método del centro de gravedad; sin embargo, el méto-

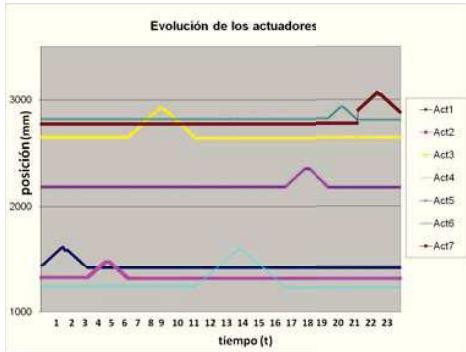


Figura 9: Excitación de los actuadores y valores medidos de posición de cada uno de ellos. Utilizando un faro de automóvil normalizado, y colocado en el prototipo construido, en esta gráfica se muestra el perfil de variación de cada uno de los actuadores empujando, de forma independiente, en su zona del faro. De esta gráfica se observa, por ejemplo, que el primer actuador en empujar el faro (y por tanto en desplazarse hacia delante), es el nº 1. Esta actuación se realiza durante los tres primeros segundos, tras los cuales volverá a su posición de reposo y pasaría a empujar hacia dentro del faro el actuador nº 2.

do del centro de gravedad produce un menor error cuadrático medio que el primero.

En nuestro caso se ha elegido como estrategia de desembonamiento el centro de gravedad por dos motivos: una respuesta adecuada en régimen estacionario y por ser considerado como el método estándar en controladores industriales y de experimentación (Haber and Alique, 2007). Por tanto, las salidas nítidas, las cuales indican los comandos de movimiento de cada uno de los actuadores, se obtienen a partir de:

$$\bar{u}_{k,j} = \frac{\sum_{i=1}^Q u_{k,j}(i)\mu_{k,j}(i)}{\sum_{i=1}^Q \mu_{k,j}(i)} \quad (17)$$

donde,  $U$  se define como:

$$U = \begin{pmatrix} \bar{u}(1, 1) & \bar{u}(1, 2) & \dots & \bar{u}(1, n) \\ \bar{u}(2, 1) & \bar{u}(2, 2) & \dots & \bar{u}(2, n) \\ \dots & & & \\ \bar{u}(m, 1) & \bar{u}(m, 2) & \dots & \bar{u}(m, n) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Utilizando las ecuaciones (18) y (11), los comandos de los  $m$  actuadores (o de un sólo actuador con  $m$  grados de libertad de movimiento)  $M = [m_1, m_2, \dots, m_8]^T$  se obtienen como:

$$M = UC^T \quad (19)$$

Nótese que la acción de control final, generada para cada instante de muestreo, se multiplica por un factor de escala  $C$  que se definió previamente en la ecuación 11. Este factor se obtiene experimentalmente y define de forma cuantitativa la relación que existe entre el actuador  $k$  y el sensor  $j$ .

### 3.3. Programación del algoritmo de control

El algoritmo de control planteado en la sección 3 es un algoritmo genérico basado en un controlador borroso tipo Mandani. Para particularizarlo al ensamblaje del faro de vehículo en cuestión, lo primero es llevar a cabo el proceso de identificación de

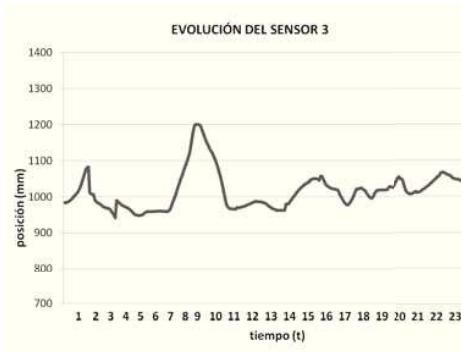


Figura 10: Respuesta obtenida por el sensor 3 al ser excitado por los actuadores según se muestra en la figura 9.

las relaciones actuador-sensor, o como se mencionó anteriormente, identificar y cuantificar las relaciones causales del mapa cognitivo. Para ello aplicamos una excitación a los elementos actuadores tal y como se muestra en la figura 9. En ella se observa cómo sólo se mueve un actuador cada vez; esto se debe a que, para simplificar el proceso de identificación, sólo empujaría un actuador por vez. Finalmente, tras haber empujado todos los actuadores en su zona correspondiente del faro, estando el faro colocado en la máquina prototipo, pasaríamos a analizar todas las medidas de posición recogidas por los sensores de posición colocados por todo el faro. El objetivo sería poder relacionar qué sensores de posición se han visto más influenciados con la acción de cada actuador.

Por ejemplo, en la figura 10 se muestra la respuesta del sensor definido como '3', frente a la excitación de los actuadores definida en la figura 9. Podemos observar cómo la máxima respuesta se consigue entre los instantes 7-11 segundos, por lo que si vemos la evolución de los actuadores, este momento corresponde a la actuación del elemento 3. En este caso, el actuador 3 tendría una mayor acción sobre el sensor 3, por lo que el valor de  $c_{3,3}$  sería el máximo para el sensor 3.

## 4. Resultados Experimentales

La validación del prototipo desarrollado, y por tanto de la metodología de ensamblaje propuesta, se ha llevado a cabo en dos fases: la primera de ellas en laboratorio mientras que la segunda en la línea de producción del faro del Opel Corsa. En total se han ensamblado más de 5000 faros obteniendo desviaciones de posición, para cada uno de los puntos de control, en su mayoría inferiores a los 0.7 mm exigidos. Es importante destacar que el error dimensional del cristal del faro al inyectarse podía superar en muchos casos los 2 mm.

Por un lado, la figura 11 muestra el tiempo invertido en el proceso de ensamblaje de más de 500 faros utilizando esta metodología. De esta forma se comprueba que se cumple con una de las restricciones impuestas por el fabricante de faros: una alta cadencia productiva. Por otro lado, en la figura 12 se muestra la evolución del error total cuadrático  $e_T$  de todos los puntos de

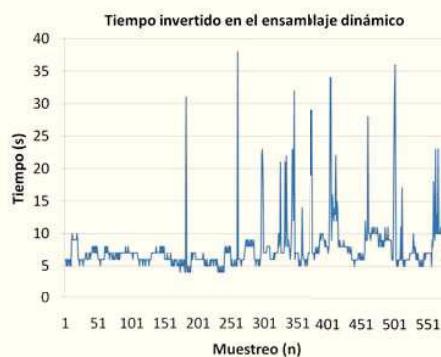


Figura 11: Gráfico con los tiempos invertidos en el proceso de ensamblaje con la metodología propuesta. La muestra realizada supera los 500 ensamblajes de faros.

control del ensamblaje, es decir:

$$e_T = \sum_{i=0}^n (p_j - p_{j_n})^2 \quad (20)$$

donde  $n$  es el número total de sensores,  $p_j$  es el valor de posición del sensor  $j$  y  $P_{j_n}$  es el valor nominal para dicho sensor. Se puede observar que el comportamiento del sistema es altamente no-lineal, por lo que a veces ocurre que el error cuadrático total incremente en lugar de reducirse (Fig. 12). Esto se debe a la saturación de la cola dentro del canal de estancamiento.

## 5. Conclusiones

La contribución de este trabajo ha consistido en el desarrollo de una nueva metodología para el ensamblaje de piezas plásticas con desviaciones dimensionales que hagan inviable su ensamblaje. En particular, se propone un sistema automático que compense dinámicamente la posición de los componentes a ensamblar, es decir, que mida durante el ensamblaje las dimensiones de las piezas y ajuste las posiciones de éstas, dentro del rango de movimiento permitido, para que al ensamblarse se consiga un producto final que cumpla las dimensiones requeridas en su conjunto.

Para ello, se ha llevado a cabo, por un lado, un análisis de los distintos sistemas de actuación y medición que sería viables para la solución propuesta; mientras que por otro, se ha propuesto como controlador un algoritmo genérico adaptable al ensamblaje de cualquier tipo de pieza. Este algoritmo se fundamenta en la utilización de un controlador borroso, junto con mapas cognitivos, que identifiquen y modelen las relaciones de los actuadores frente a los sensores.

La validación de la metodología de ensamblaje propuesta se ha llevado a cabo mediante la construcción de un prototipo industrial ubicado inicialmente en un laboratorio de investigación y posteriormente en una línea de producción del faro del Opel Corsa. En total se han realizado más de 5000 ensamblajes (en la fase de pruebas), comprobándose por tanto la viabilidad industrial de la propuesta de ensamblaje dinámico desarrollada en

este trabajo. Actualmente, el prototipo construido se encuentra en fase de estudio para su industrialización.

Sin duda, la utilización de este tipo de metodologías permite a la industria aumentar su competitividad pues, además de reducir el número de productos finales defectuosos, mejora la imagen de la empresa desde un punto de vista de la calidad, ya que los productos fabricados cumplen con los requerimientos dimensionales exigidos por el cliente. Este aseguramiento se consigue de forma activa y en la misma línea de producción, frente a otras soluciones reactivas que obviamente incurirían en gastos superiores.

## English Summary

### Automatic Assembly of Parts with Dimensional Variations.

#### Abstract

The automatic assembly of parts can create some problems because of the dimensional variations of the elements to be assembled (mainly because of mechanical inconsistencies). A representative example of this kind of assembly problem can be found in the production of vehicle headlamps, where one of the main stages is the assembly of the cover lens, which is made of polycarbonate, over a black housing made of polypropylene. This process is currently done statically and does not consider possible size variations of the plastic parts, thus resulting in headlamps with dimensional errors.

This paper introduces a new methodology of dynamic assembly for an industrial application that requires an adaptive positioning of the parts that are to be assembled. In addition, this work presents a successful example of an industrial prototype where different technologies, which aim to solve different problems, have to be analysed and tested. In particular, different approaches were studied: surface measurement sensors for transparent and deformable objects, actuation systems that could modify the assembly position of the parts, and control algorithms that could carry out this adaptive assembly automatically. A robust industrial prototype for vehicle headlamp assembly has been designed and built. It has been validated in both a research lab and in the assembly line of a vehicle headlamp factory. The new prototype solves the problem of assembling vehicle headlamps, achieving a final product with minimum dimensional errors and offering an example of a solution to the problem of the assembly of pieces with dimensional errors.

#### Keywords:

Automatic Assembly, Flexible Manufacturing Systems, Expert Systems.

## Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento a las empresas Valeo Iluminación (Martos) y WIP Ingeniería (Valladolid). También a las subvenciones parciales recibidas a través de los proyectos *Flush and Gap*, DPI2011-27284, TEP2009-5363 y P10-AGR-6616.

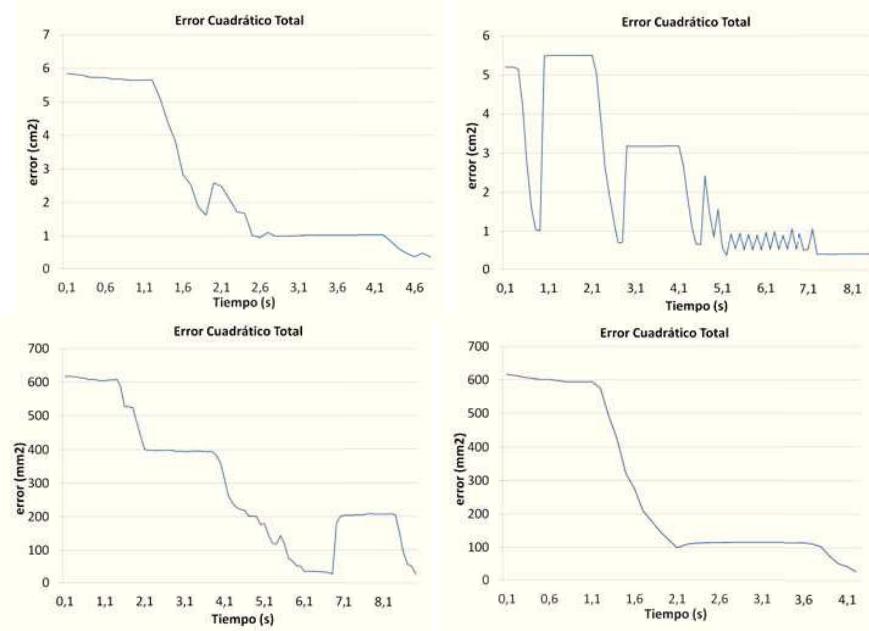


Figura 12: Evolución del error cuadrático total para cuatro ensamblajes diferentes. Los datos obtenidos en las dos gráficas superiores vienen dados en centímetros cuadrados, mientras que las dos gráficas inferiores lo hacen en milímetros cuadrados. El valor del error cuadrático se calcula mediante la ecuación (20). Obsérvese la no linealidad del comportamiento del sistema.

## Referencias

- Bishop, R. H., 2008. Mechatronic systems, sensors, and actuators: fundamentals and modeling. CRC Press.
- Blomdell, A., Bolmsjö, G., Brogårdh, T., Cederberg, P., Isaksson, M., Johansson, R., Haage, M., Nilsson, K., Olsson, M., Olsson, T., Robertsson, A., Wang, J., September 2005. Extending an industrial robot controller—Implementation and applications of a fast open sensor interface. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 12(3), 85–94.
- Bruyninckx, H., de Schutter, J., 1996. Specification of force-controlled actions in the task frame formalism—a synthesis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (4), 581 – 589.
- Chen, C., Wong, C., 2002. Self-generating rule-mapping fuzzy controller design using a genetic algorithm. In: *IEE Proc. Control theory applications*. Vol. 149(2). pp. 143–148.
- Gamez, J., Gomez Ortega, J., Sanchez Garcia, A., Satorres Martinez, S., 2009a. Robotic software architecture for multisensor fusion system. *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 56(3), 766–777.
- Gamez, J., Robertsson, A., Gomez Ortega, J., Johansson, R., 2008. Sensor fusion for compliant robot motion control. *IEEE Trans. on Robotics* 24(2), 430–441.
- Gamez, J., Robertsson, A., Gomez Ortega, J., Johansson, R., 2009b. Self-calibrated robotic manipulator force observer. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 25(2), 366–378.
- Gamez-Garcia, J., Gómez-Ortega, J., Satorres-Martinez, S., Sanchez-Martinez, A., 2009. High-accuracy automatic system to assemble vehicle headlamps. In: *Proceedings of the IEEE Int. Conf. On Emerging Tech. And Factory Automation (ETFA)*.
- Groover, M. P., 2008. Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Haber, R., Alique, J. R., 2007. Fuzzy logic-based torque control system for milling process optimization. *IEEE Trans. on Systems, man and Cybernetics* 37(5), 941–950.
- Johansson, R., 1993. System Modeling and Identification. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Klir, G., Folger, T., 1988. Fuzzy sets, information and uncertainty. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Kosko, B., 1990. Fuzzy Thinking: The new science of Fuzzy Logic. Flamingo Press/Harper Collins, London.
- Kosko, B., 1992. Neural networks and fuzzy systems. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Kubica, E., Madill, D., Wang, D., 2005. Designing stable mimo fuzzy controllers. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on* 35(2), 372–380.
- Lam, H., Ling, W., 2008. Sampled-data fuzzy controller for continuos nonlinear systems. *IEEE Control Theory Appl.* 2(1), 32–39.
- Liu, Z., Yang, J., Wang, M., 2009. Research of kinematics parameter calibration for robot manipulator based on measuring method. In: *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*. pp. 2735 – 2740.
- Ljung, L., 1999. System Identification - Theory For the User. 2nd ed, PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Lopes, A., Almeida, F., 2008. A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (3), 299 – 309.
- Mandani, E., 1974. Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic process. In: *Proc. Inst. Electr. Eng. Vol. 121*. pp. 1585–1588.
- Novak, J. D., Musonda, D., 1991. A twelve-year longitudinal study of science concept learning. *American Educational Research Journal* 28(1), 117–153.
- Papageorgiou, E., Markinos, A., Gemtos, T., 2009. Application of fuzzy cognitive maps for cotton yield management in precision farming. *Expert systems with Applications* 36, 12399–12413.
- Pawlak, A. M., 2007. Sensors and actuators in mechatronics: design and applications. CRC Press.
- Ross, T., 2004. Fuzzy logic with engineering applications. 2nd Ed. Chichester, Wiley, UK.
- Roychowdhury, S., Pedrycz, W., 2001. A survey of defuzzification strategies. *Int. Journal of Intelligent Systems* 16, 679–695.
- Wei, G. Q., Hirzinger, G., 1998. Active self-calibration of hand-mounted laser range finders. *IEEE Trans. Robotics and Automation* 14(3), 493–497.
- Ying, H., 1999. Analytic structure of a typical fuzzy controller employin trapezoidal input fuzzy sets and nonlinear control rules. *Journal on Inf. Sci.* 116, 177–203.