

Aumento de la precisión de posicionado de células robóticas en aplicaciones de mecanizado

J. Larrañaga Amilibia^{1a}, A. Lizarazu Suárez¹, J. Urrutia García², N. Agirre Jaka², M. Izquierdo Ortiz de Landaluce¹, I. Ulacia Garmendia¹, I. Inziarte Hidalgo²

¹Dpto. de Mecánica y Producción Industrial. Mondragon Unibertsitatea, Arrasate-Mondragón, España.
jlarranaga@mondragon.edu, aintza.lizarazu@alumni.mondragon.edu, mizquierdo@mondragon.edu,
iulacia@mondragon.edu

²Aldakin R+D, Pol. Ind. Isasia, Nave 1G, 31800 Alsasua, España
jurrutia@aldakin.com, n.agirre@aldathink.com, i.inziarte@aldathink.com

En las últimas décadas han incrementado las aplicaciones de los robots industriales aumentando también la demanda en la precisión de posicionado. Sin embargo, los robots industriales se caracterizan por ser muy repetitivos y poco precisos en el posicionado. Los errores de posicionado de un robot industrial son debidos principalmente a los errores geométricos, las fuerzas externas, la baja rigidez de las articulaciones del robot dado que se prima la flexibilidad de posicionado a la rigidez del sistema.

La precisión de los robots industriales puede mejorar mediante la compensación de las trayectorias originales. Para ello, es necesario desarrollar un modelo cinemático – dinámico del robot y nutrirlo de las rigideces de las articulaciones y las fuerzas del proceso. La compensación se realiza calculando primero las desviaciones de la trayectoria original, para luego modificarlas definiendo las nuevas trayectorias compensadas.

El presente trabajo analiza la validez de las metodologías de compensación en aplicaciones de mecanizado. Para ello se ha definido una operación básica de mecanizado, donde se han captado las fuerzas del proceso y compensado las trayectorias. Finalmente, se han medido las probetas mecanizadas y se ha analizado la validez de dichos métodos de compensación, así como la calidad de las piezas finales.

1. Introducción

Los robots se están implementando ampliamente en la industria, desde que su precisión ha mejorado y su coste ha disminuido. En comparación con un centro de mecanizado CNC, los robots industriales tienen un bajo coste, muestran una gran flexibilidad y poseen un amplio espacio de trabajo, por lo que se han popularizado gradualmente en la industria manufacturera [1,2]. Aunque los robots industriales tienen ventajas, la característica baja rigidez pueden causar deformaciones y vibraciones no deseadas durante el proceso de mecanizado [3]. Los resultados experimentales indican que la rigidez estática de los robots industriales está en el rango de 105~106 N/m [4-5]. Además, la rigidez de los robots cambia a medida que cambia la pose o postura del robot, dándose una distribución no lineal de la rigidez del robot en todo el espacio de trabajo y aumento así la imprecisión de posicionado [6]. Es por ello que, la mayoría de los robots industriales operan en espacios de trabajo reducidos, con requisitos de precisión bajos y sin fuerzas de contacto externas.

La rigidez de los robots industriales depende de diversos factores, como la geometría y las propiedades mecánicas de las articulaciones, los eslabones de conexión, los actuadores y otros componentes de transmisión de los robots. Sin embargo, la baja rigidez rotacional de las articulaciones es la causa de la mayoría de los errores de posicionado. Sometido a una fuerza externa, a una fuerza inercial o a su propio peso un cada eslabón del robot se deforma elásticamente, añadiendo una desviación angular a la pose deseada. La suma de todas las desviaciones angulares, crecentado por la gran longitud del brazo mecánico, provoca graves errores de posicionado en la punta del robot (TCP). Es por ello, que la mayoría de las investigaciones han ignorado otras deformaciones y se han centrado únicamente en la deformación de la articulación.

Los errores de posicionado de un robot bajo cargas externas pueden compensarse con un modelo de rigidez estática. Este tipo de modelo, considera un manipulador robótico, como una serie de eslabones rígidos conectados en serie donde se modeliza la flexibilidad mediante muelles de torsión. Para realizar la compensación, primero es necesario adquirir las fuerzas de proceso mediante sensores externos al robot, calcular las desviaciones causadas por las fuerzas y calcular la trayectoria modificada, para que, una vez aplicadas las fuerzas de proceso a la trayectoria modificada, el robot realice la trayectoria deseada [6]. La exactitud de los modelos de compensación recae tanto en los datos constructivos del robot (longitudes, rigidez de las articulaciones, peso, inercias y otros), como en las suposiciones en el cual se ha construido el modelo de compensación.

En relación a los datos constructivos del robot, en la mayoría de los casos los fabricantes de robots industriales no proporcionan datos de rigidez de las articulaciones, ni otros que puedan influenciar en la exactitud de los modelos de compensación. Es por ello, que en la mayoría de casos es necesario realizar ensayos experimentales de caracterización tanto de la rigidez articular [7], como de las propiedades geométricas (longitudes y desviaciones de las articulaciones) y dinámicas (masas inercias y centros de gravedad) [8].

En lo que respecta, a los modelos de compensación de errores de posicionado, en los últimos años se ha realizado una intensa investigación en el modelado de rigidez de manipuladores robóticos en serie, y se han desarrollado varios modelos, los cuales han ido ganando complejidad. Salisbury [9] fue el primero que derivó el modelo de rigidez convencional tomando en cuenta las flexibilidades del actuador y propuso un modelo de compensación. Una serie de trabajos posteriores analizaron el efecto de las cargas externas en la matriz de rigidez del robot, demostrando la necesidad de considerar las desviaciones causadas por las cargas externas en ella y describiendo las bases de los modelos de compensación [11-14]. Sin embargo, la mayoría de los modelos de compensación de desviaciones de robots industriales, no tiene en cuenta la influencia del peso del eslabón ni del compensador de gravedad, ya que para considerar estos, es necesario el cuantificar una serie de propiedades que normalmente no son proporcionados por los fabricantes de los robots.

La mayoría de los análisis de rigidez asumen que los pesos de los componentes móviles son despreciables y sus efectos son ignorados [15-17]. Esta suposición es poco realista para robots industriales de gran tonelaje. Algunos trabajos relacionados simplificaron los pesos de los eslabones como pares externos constantes. Por ejemplo, Cheng et al. [18] y Lian et al. [19] realizaron análisis de rigidez de diferentes robots paralelos, donde las masas de los componentes se consideraron como fuerzas externas aplicados en el TCP.

El compensador de gravedad es otro componente importante que influye significativamente en la desviación del efector final. La técnica de modelado de la rigidez desarrollada por Klimchik et al. [20] se aplicó a robots industriales pesados con compensadores de gravedad basados en muelles [21,22] y compensadores de gravedad neumáticos. utilizando el modelo de rigidez convencional, Yang et al. [23] presentaron un método para la identificación de la rigidez de las articulaciones de un robot industrial pesado con un compensador de gravedad neumático [24]. Sin embargo, este modelo solo consideraba deformaciones en condiciones estáticas, no considerando ninguna fuerza inercial.

Son muchos y muy diversos los modelos desarrollados para la compensación de errores de posicionado en aplicaciones de mecanizado, sin embargo, todavía son escasos los modelos que toman en cuenta el efecto de las masas de los eslabones y las fuerzas inerciales en los modelos de compensación. Es por ello que el objetivo del

presente trabajo es analizar la viabilidad del método de compensación de desviaciones de posicionado en células robóticas en una aplicación de mecanizado, considerando las fuerzas de mecanizado, el propio peso y las fuerzas inerciales. Para ello se desarrolla un modelo cinemático - dinámico del robot, donde se compensan las desviaciones causadas por las fuerzas de corte, las fuerzas inerciales y el peso del robot. Finalmente, se realizan ensayos de mecanizado donde se comparen la validez de diferentes técnicas de compensación

2. Compensación de errores de posicionado

2.1. Modelo de compensación

El modelo de compensación de errores de posicionado ha sido desarrollado en el entorno Matlab y utilizando el Robotic Toolbox de Peter Corke [25]. El modelo ha sido desarrollado para realizar compensaciones fuera de línea (sin control activo) y modifica las trayectorias originales del robot para minimizar las desviaciones causadas por las fuerzas externas. Las desviaciones de la punta se atribuyen a la baja rigidez de las articulaciones en comparación con los eslabones, por lo que estos últimos se consideran totalmente rígidos. La compensación de las trayectorias se realiza en 5 etapas, comenzando por la introducción de los parámetros geométricos y las posiciones articulares del robot, se introducen las fuerzas de proceso y se calculan las desviaciones. Una vez calculada la trayectoria desviada, se aplica el método de compensación (método espejo) y se calcula la trayectoria corregida. En la Figura 1 se muestran las etapas que sigue el modelo de compensación.

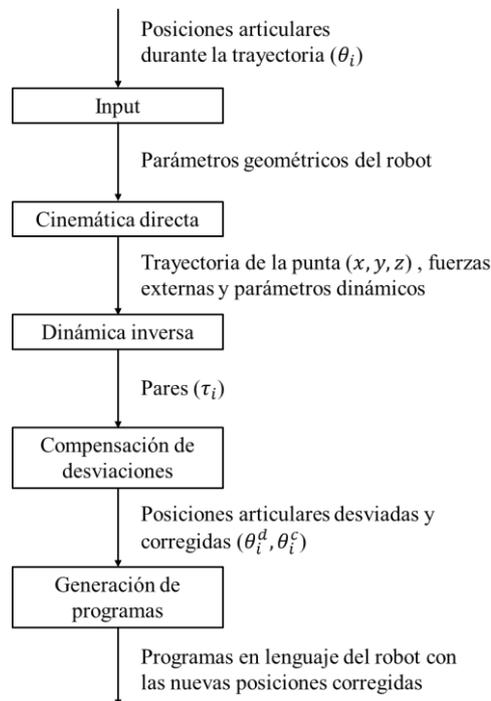


Figura 1: Esquema de las etapas del programa de compensación de errores

Etapa 1: Definición de datos básicos del robot y trayectoria a corregir

En esta etapa se definen los datos básicos de la geometría del robot según la convención de Denavit-Hartenberg (DH) para cada una de las articulaciones (θ_i^{offset} , α_i , d_i , a_i). Después, se introduce la trayectoria que se desea realizar con el robot, definiendo la posición angular respecto al tiempo de cada una de las articulaciones a lo largo de toda la trayectoria (θ_i). En este caso, la cinemática inversa de la trayectoria inicial se ha realizado mediante un software externo, el cual se describe en el apartado 3.1.

Etapa 2: Modelo cinemático del robot

El siguiente paso es la definición del modelo cinemático del robot. Los parámetros geométricos descritos en el apartado anterior se utilizan para construir las matrices de transformación homogénea que relacionan las posiciones angulares de las articulaciones con las posiciones en coordenadas cartesianas de cada eslabón, ver ecuación (1). Estas matrices también son necesarias en el cálculo de los pares de los eslabones.

$${}^{i-1}T_i(\theta, \alpha, d, a) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En esta etapa también se calculan las velocidades ($\dot{\theta}_i$) y aceleraciones angulares ($\ddot{\theta}_i$) de cada articulación.

Etapa 3: Modelo dinámico del robot

Una vez se conoce el movimiento del robot, se calculan los pares necesarios en las articulaciones para responder a esa cinemática con el modelo dinámico. Esos pares se determinan a través de la formulación de Euler-Lagrange ver ecuación (2). Además, a ese cálculo se le añaden otros 2 factores: por un lado, las fuerzas externas generadas en la herramienta en el proceso de mecanizado, las cuales se aplican en la punta del robot y, por otro lado, el par aplicado por el compensador de gravedad en la articulación 2.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) + \tau_{F_{ext}}(\theta) + \tau_{Compensador}(\theta_2) \quad (2)$$

Siendo:

- θ : vector de posición de las articulaciones $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$
- T : vector de pares de las articulaciones $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$
- M : matriz de inercias
- C : términos de Coriolis
- g : vector de gravedad
- $\tau_{F_{ext}}$: vector de pares de las articulaciones causado por las fuerzas externas
- $\tau_{Compensador}$: par ejercido por el compensador en la articulación 2

El compensador de gravedad consiste en un cilindro neumático-hidráulico cerrado acoplado a un extremo de la articulación 2, cuyo volumen de gas depende de la posición articular. En este caso se ha utilizado la modelización del compensador descrita en [23]. A partir del volumen, suponiendo un proceso isotérmico ($PV = T = cte$), se obtiene la presión del gas. De ahí, mediante el área efectiva del cilindro, se calcula la fuerza aplicada por el compensador. Finalmente, a través de las relaciones trigonométrica de la ecuación (3) se calcula el par ejercido por el compensador en la articulación 2.

$$s^2 = a^2 + L^2 + 2 \cdot a \cdot L \cdot \cos(\alpha + \theta_2)$$

$$P(\theta_2) = \frac{4P_0V_0}{\pi(d_{pistón}^2 - d_{vástago}^2)\sqrt{s_0^2 - s^2} + 4V_0} \quad (3)$$

$$\tau_{Compensador} = P(\theta_2) \cdot \frac{\pi}{4}(d_{pistón}^2 - d_{vástago}^2) \cdot L \cdot \frac{a}{s} \cdot \sin(\alpha + \theta_2)$$

Etapa 4: Cálculo de las desviaciones y compensación de la trayectoria

Una vez calculados los pares soportados por las articulaciones el siguiente paso es calcular las desviaciones de la trayectoria y su posterior compensación. La desviación de cada articulación (θ_i^k) depende del par que esta soporta y su rigidez y se calcula según la ecuación 5.

$$\theta_i^k = \frac{\tau_i}{k_i} \quad (4)$$

Así, se calculan las trayectorias corregidas aplicando el método espejo según la ecuación (5).

$$\theta_i^d = \theta_i + \theta_i^k \quad (5)$$

$$\theta_i^c = \theta_i - \theta_i^k$$

Donde θ_i^k es la desviación de la articulación, k_i la rigidez de la articulación, θ_i^d la articulación desviada y θ_i^c la articulación corregida. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de efecto espejo, tanto aplicado en la articulación como trasladado a la trayectoria de la punta del robot.

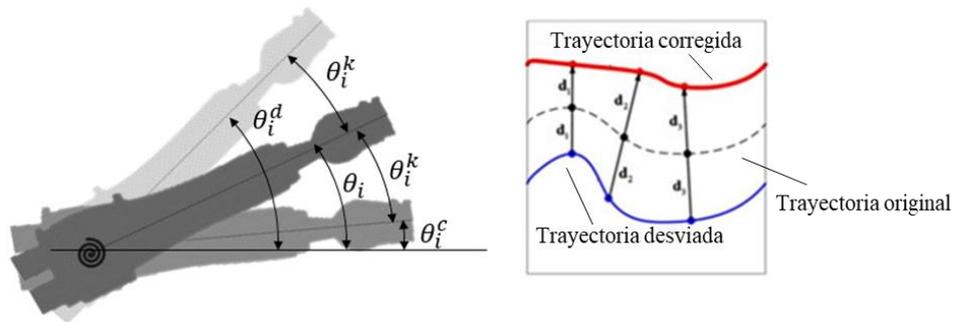


Figura 2: Errores de posicionamiento [26]

Etapa 5: Generación de las trayectorias compensadas

Por último, las trayectorias compensadas se les da un formato legible por el robot. En este caso se ha optado por utilizar el comando PTP (*Point To Point*) definiendo las posiciones de las articulaciones y especificando la velocidad de ejecución de la trayectoria.

2.2. Compensación de errores de Kuka KR270 R2700 Quantec Ultra

Tras desarrollar el modelo de compensación de errores, éste se ha aplicado en el robot Kuka KR270 Quantec Ultra. En la Figura 3 se puede ver una imagen del robot. El robot consta de seis eslabones y seis articulaciones rotatorias. Además, entre el eslabón 2 y 3 se posiciona el compensador de gravedad.

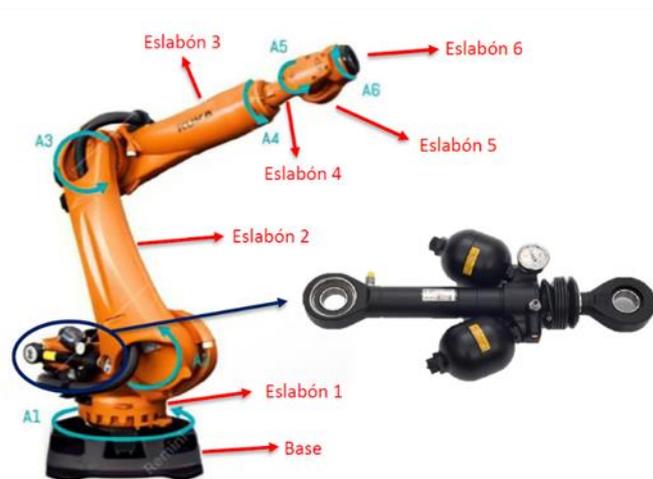


Figura 3: Robot Kuka KR270 Quantec Ultra y detalle de compensador de gravedad en la articulación 2

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de DH necesarios para definir la geometría del robot, a través de las cuales se construyen las matrices de transformación que relacionan las articulaciones entre sí.

Tabla 1: Parámetros DH del robot Kuka KR270 Quantec Ultra

Eje	θ_i [rad]	α_i [rad]	d_i [mm]	a_i [mm]
1	0	$\pi/2$	435.286	350.436
2	$\pi/2$	0	0	1150.78
3	0	$-\pi/2$	0	40.824
4	0	$\pi/2$	1200.462	0
5	0	$-\pi/2$	0	0
6	0	0	240.198	0
Cabezal y herramienta	0	0	93	263

A continuación, para el cálculo dinámico, se deben introducir los parámetros dinámicos (masas, inercias y posición de los centros de gravedad) correspondientes al robot de estudio, los cuales se muestran en las Tabla 2 y Tabla 3. Cabe mencionar, que los valores empleados de estos parámetros se han obtenido de modelos CAD que solamente son representativos de la geometría del robot. Por lo tanto, a falta de obtener valores más precisos, los resultados dependientes de estos pueden inducir a resultados erróneos.

Tabla 2: Masas y centros de gravedad de los eslabones

Eslabón	m [kg]	CG_x [m]	CG_y [m]	CG_z [m]
1	536.8	-0.364	-0.220	-0.009
2	691.4	0.718	-0.003	-0.068
3	449.2	-0.014	-0.312	-0.022
4	25.1	0	-0.123	-0.001
5	82.8	0	0.038	0.167
6	5	0	0	-0.014

Tabla 3: Inercias de los eslabones

Eslabón	I_x [kg·m ²]	I_y [kg·m ²]	I_z [kg·m ²]	I_{xy} [kg·m ²]	I_{yz} [kg·m ²]	I_{xz} [kg·m ²]
1	44.441	99.877	131.134	43.98	0.444	-0.317
2	15.850	475.593	470.876	-1.286	0.086	-20.983
3	96.378	5.143	97.316	0.428	0.796	0.385
4	0.648	0.061	0.652	0	-0.001	0
5	3.684	3.154	0.979	0.0002	-0.717	-0.0001
6	0.016	0.016	0.030	0	0	0

También, para poder aplicar el modelo del compensador de gravedad, se deben introducir los parámetros correspondientes al compensador acoplado al robot de estudio (Tabla 4).

Tabla 4: Parámetros del compensador de gravedad

a [mm]	α [°]	L [mm]	$d_{pistón}$ [mm]	$d_{vástago}$ [mm]	P_0 [bar]	V_0 [l]
806.79	85.08	203.01	52	30	169.64	1.19

Por último, para calcular las posiciones desviadas de las articulaciones a partir de los pares obtenidos, se necesita la rigidez de cada una de ellas Tabla 5. Estas rigideces han sido derivadas siguiendo el procedimiento descrito por los autores en [27].

Tabla 5: Rigidez de las articulaciones

Eje	k_i [N·m/rad]·10 ⁶	Eje	k_i [N·m/rad]·10 ⁶
1	122	4	1.271
2	8.5683	5	2.185
3	4.449	6	0.9687

3. Procedimiento experimental

3.1. Trayectorias de mecanizado y probetas de mecanizado

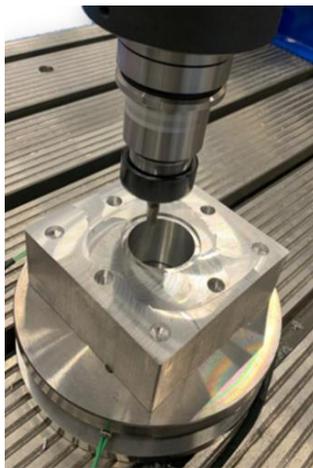
La operación de mecanizado seleccionado para el estudio es un contorneado interior circular (ver Figura 4a). La operación de contorneado es de 25 mm de radio. Este tipo de operación, aunque sencilla es muy útil, ya que durante la trayectoria circular las fuerzas de mecanizado soportados por el robot, van cambiando de dirección. Este cambio de dirección, acentúan las desviaciones inerciales y debidas a las holguras de las articulaciones.

La generación de la trayectoria inicial se ha definido utilizando el software MasterCam – RobotMaster. Para ello, primero se han definido las herramientas y trayectorias de mecanizado con el programa de CNC MasterCam, para luego generar las trayectorias (cinemática inversa) del robot con el software RobotMaster. Con el objetivo de mejorar la calidad del mecanizado y evitar choques, se han realizado trayectorias de entradas y salidas tangentes en el contorneado. La herramienta seleccionada para realizar el mecanizado es una fresa de acero rápido helicoidal de 10 mm de diámetro, el cual consta de 7 filos de corte.

Las probetas iniciales de aluminio (Al 2011) se han mecanizado mediante medios convencionales CNC con el objetivo de aumentar la repetitividad de los ensayos y minimizar las incertidumbres.

3.2. Medición de la calidad de las piezas mecanizadas

Las probetas mecanizadas han sido medidas en una máquina de medir por coordenadas tipo Mitutoyo Crysta Apex S 7106 y un cabezal de medición Renishaw tipo PH10MQ con un palpador de 1 mm de diámetro (ver Figura 4b). Se han escaneado los contorneados mecanizados y posteriormente se han calculado el radio medio (R_m) y el error de cilindricidad (ξ_{circ}) de dichas superficies. La geometría inicial de las probetas ha mostrado un radio medio inicial de 24.006 mm con un error de redondez máximo de 0.024 μm .



(a)



(b)

Figura 4: Mecanizado de probeta (a) y medición en del contorneado en máquina de medir por coordenadas (b)

3.3. Medición de las trayectorias del robot

Con el objetivo de determinar la calidad de las trayectorias del robot en vacío y sin la influencia de fuerzas externas, se han medido las trayectorias utilizando un láser tracker Leica AT930 (precisión = $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$). El reflector se ha posicionado en la puntal del cabezal, sustituyendo la herramienta de corte.

3.4. Adquisición de las fuerzas de mecanizado y posiciones del robot

La medición de las fuerzas de mecanizado ha sido realizada mediante 3 sensores tri-axiales del tipo 9317C de Kistler. Los sensores han sido posicionados, a 120° bajo la probeta de mecanizado, de modo que de la suma de las reacciones se deriva las fuerzas realizadas por la fresa de mecanizado.

Las fuerzas de mecanizado han sido captadas con una frecuencia de muestreo de 1 kHz mediante un sistema de adquisición CompactDaq. Una vez adquiridas las fuerzas de mecanizado en los 3 ejes del espacio, estos han sido filtradas utilizando un filtro de promedio paso bajo con un ancho de banda correspondiente a 0.333 segundos. Dado que el muestreo de las fuerzas puede no corresponder con el muestreo de la posición del robot, los datos intermedios han sido derivados mediante interpolación lineal.

4. Resultados

4.1. Fuerzas de mecanizado

En la Figura 5 se muestran las fuerzas de mecanizado adquiridas y filtradas, las cuales representan una media entre las 9 repeticiones realizadas.

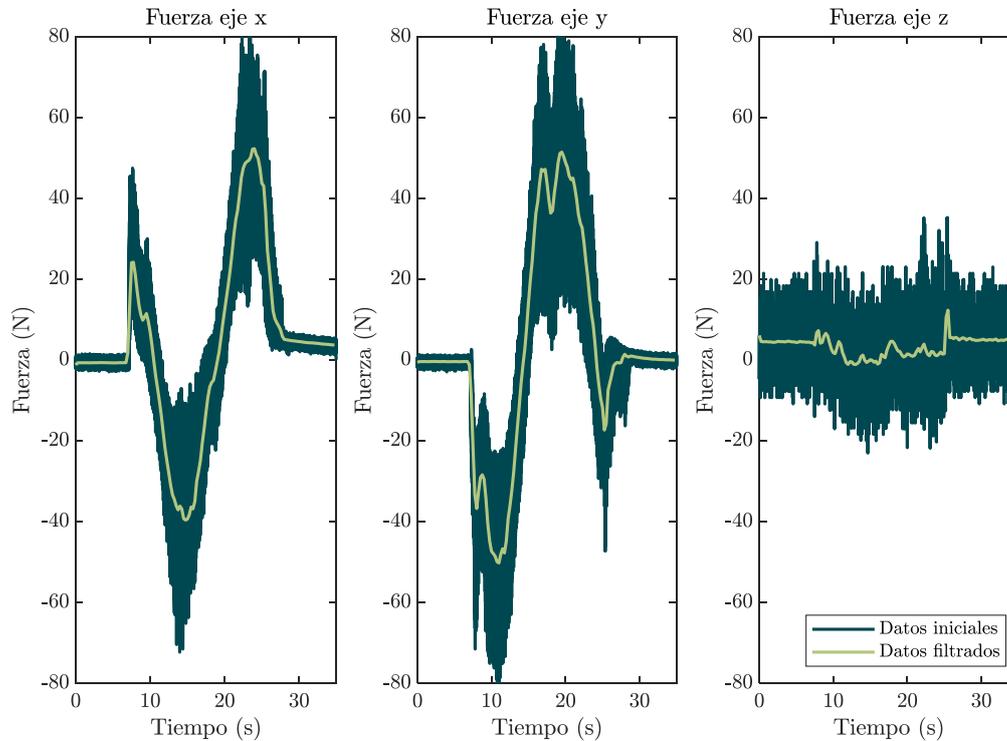


Figura 5: Adquisición de fuerzas de mecanizado y su filtrado

En los resultados presentados es posible observar 3 fases o etapas, donde la segunda de ellas es la que muestra las fuerzas de mecanizado. La primera y la tercera se podrían clasificar como fases de transición, durante las cuales la herramienta se posiciona para el mecanizado (sin entrar en contacto con la pieza), siendo las fuerzas prácticamente nulas.

Por otro lado, el eje Z presenta fuerzas muy bajas en relación con las captadas en los demás ejes, lo cual era de esperar al tratarse de un contorneado donde el mecanizado se realiza en el plano XY. Por lo tanto, se ha optado por despreciar esas fuerzas. Además, también tal y como era de esperar, ya que el mecanizado sigue una trayectoria circular, las fuerzas en los ejes X e Y presentan una forma sinusoidal.

4.2. Resultados de las trayectorias sin compensar

En la Figura 6 a se muestran por una parte, la trayectoria de la punta del robot medida con el láser tracker al realizar un círculo en vacío y en la figura 6b muestra el perfil medido de las piezas mecanizadas sin compensar. En estas figuras también se detallan el radio medio de la trayectoria, R_m , indicado en amarillo en las figuras, y el error de circularidad, ξ_{Circ} , indicado como zona sombreada en las figuras.

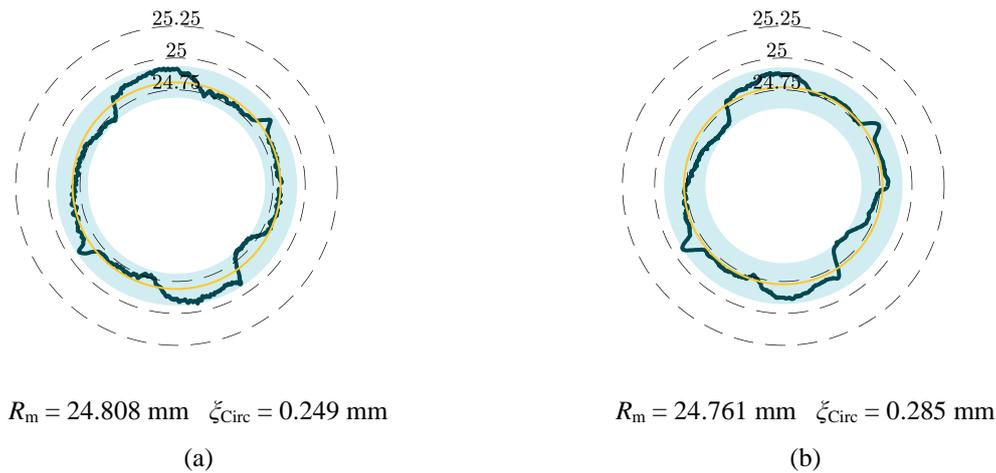


Figura 6: a) Trayectoria circular sin fuerzas externas y b) perfil medido en probetas sin compensar

La trayectoria medida sin aplicar fuerzas muestra un error del radio medio de 0.192 mm y un error de circularidad de 0.249 mm, a pesar de que no se ha aplicado ninguna fuerza externa. Los errores de circularidad se atribuyen mayoritariamente a la baja rigidez de las articulaciones y a los picos característicos de *backlash* presentes en los resultados. El perfil medido después de realizar la trayectoria sin compensar, muestra una forma similar de perfil con un R_m ligeramente menor a la trayectoria sin compensar. Está bajada en el radio medio se atribuye al efecto de las fuerzas de mecanizado, los cuales desvían la punta del robot radialmente hacia el centro del contorneado.

4.3. Resultados de las trayectorias compensadas.

En las Figuras 7 se muestran las trayectorias desviadas calculadas con el modelo de compensación. El radio medio como el error de circularidad van aumentando conforme se consideran el peso propio y las fuerzas inerciales. Sin embargo, Comparando los errores obtenidos por el modelo y los datos sin compensar (Figura 6), se puede apreciar que el modelo subestima los errores de R_m y circularidad. Esta diferencia en la predicción de errores, se atribuye tanto a la baja precisión de los datos dinámicos utilizados en modelo como al efecto de no considerar el *backlash* en el modelo de compensación.

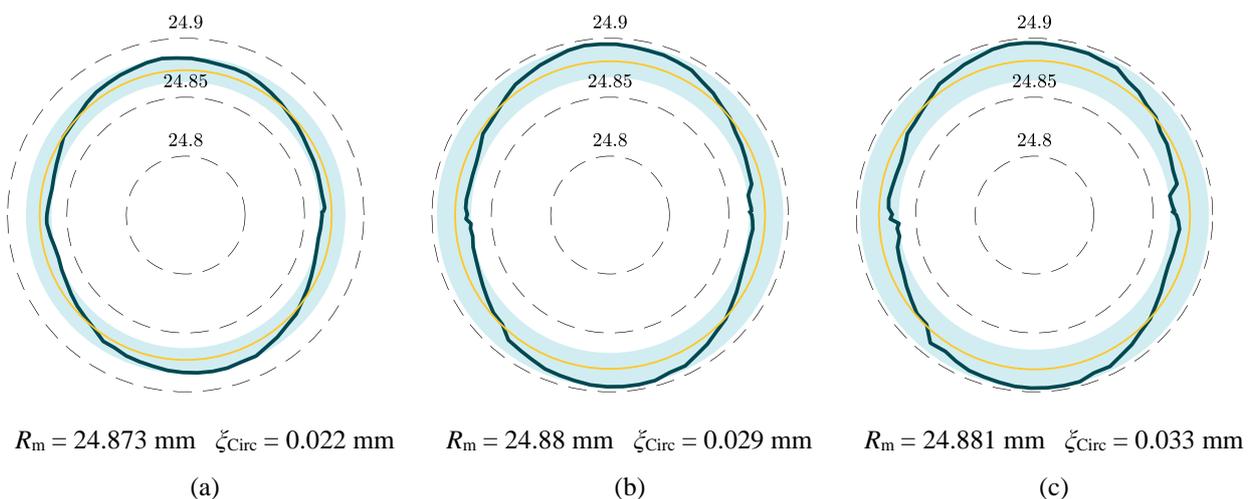


Figura 7: Trayectorias desviadas extraídas de la simulación del modelo considerando: a) fuerzas de mecanizado, b) fuerzas de mecanizado y peso propio y c) fuerzas de mecanizado, peso propio e inercias

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de mecanizado aplicando los métodos de compensación para las fuerzas de mecanizado, mecanizado y peso propio y mecanizado, peso propio y fuerzas inerciales. En este caso se observa una disminución clara en el error del radio medio para todos los casos. Sin embargo, el error de circularidad experimenta un aumento.

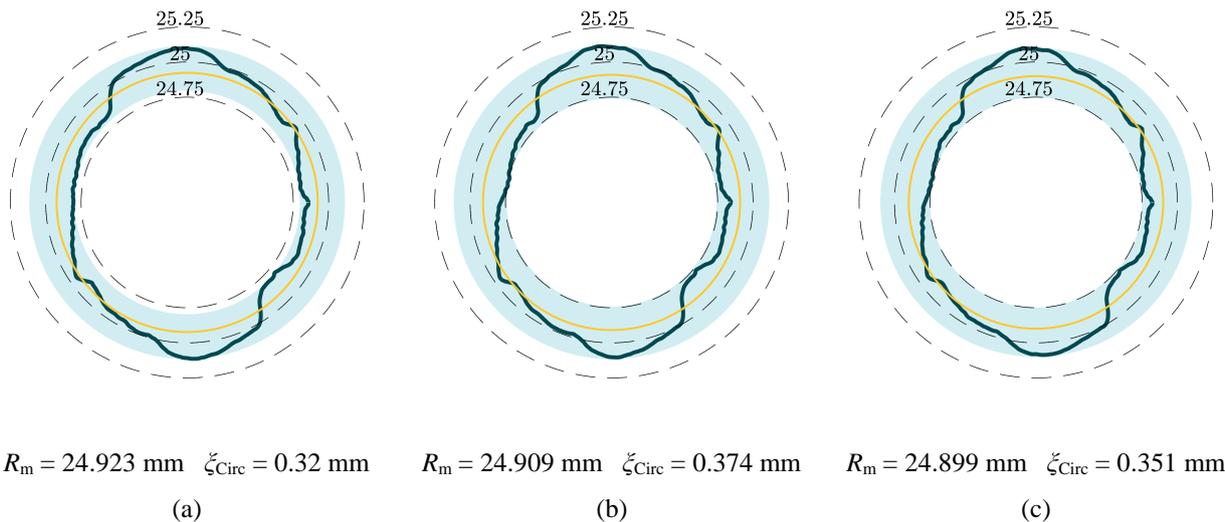


Figura 8: Resultados de los ensayos introduciendo la trayectoria compensada considerando: a) fuerzas de mecanizado, b) fuerzas de mecanizado y peso propio y c) fuerzas de mecanizado, peso propio e inercias

Por último, si se comparan los tres casos compensados, no se puede ver una tendencia clara en la disminución o aumento de los errores, ya que a diferencia de las fuerzas externas que han sido medidas, los parámetros dinámicos del robot (masas, centros de gravedad e inercias) adoptan valores aproximados, como ya se ha mencionado anteriormente.

5. Conclusiones

Se ha generado un modelo cinemático-dinámico del robot, donde se compensan las desviaciones debidas a las fuerzas de mecanizado, las fuerzas inerciales y al propio peso. Sin embargo, hay muchos parámetros del robot relevantes para la compensación cuyos valores presentan incertidumbres. Estos tendrán que ser determinados mediante diferentes metodologías en el futuro para una mayor precisión de la corrección.

Se han realizado ensayos de mecanizado donde se han medido las fuerzas de mecanizado y se han compensado los errores geométricos de las piezas. En el caso donde se han compensado solo las fuerzas de mecanizado, se han mejorado la calidad del mecanizado. No obstante, cuando se han introducido las masas e inercias no se ha logrado mejorar aún más esa compensación, probablemente debido a la imprecisión en la definición de los parámetros dinámicos.

6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Tecnocin por el soporte técnico y la cesión de las licencias de MasterCam y Robotmaster. Los autores también desean mostrar su agradecimiento al programa Bikaintek del departamento de educación del Gobierno Vasco (Beca N°. 020-B2/ 2020).

7. Referencias

- [1] Kainrath, M., Aburaia, M., Stuja, K., Lackner, M., Markl, E., “Accuracy Improvement and Process Flow Adaption for Robot Machining“ Springer International Publishing: Cham, Switzerland, (2020)
- [2] Chen, Y., Dong, F., “Robot machining: Recent development and future research issues“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. **66** 1489–1497 (2012)
- [3] Alici, G., Shirinzadeh, B., “Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators“, *IEEE Transactions on Robotics* **21** 554–564 (2005)
- [4] Xiong, G., Ding, Y., Zhu, L., “Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **55** 19–28 (2018)
- [5] Celikag, H., Sims, N.D., Ozturk, E., “Cartesian Stiffness Optimization for Serial Arm Robots“, *Procedia CIRP* **77** 566–569 (2018)
- [6] Roth, Z., Mooring, B., Ravani, B., “An overview of robot calibration“, *IEEE Journal on Robotics and Automation* **3**, 377–385 (1987)

- [7] Klimchik, A., Ambiehl, A., Garnier, S., Furet, B., Pashkevich, A., “Efficiency evaluation of robots in machining applications using industrial performance measure“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **48**, 12–29. (2017)
- [8] Leboutet, Q., Roux, J., Janot, A., Guadarrama-Olvera, J.R., Cheng, G., “Inertial Parameter Identification in Robotics: A Survey“, *Applied Sciences* **11**, 4303. (2021)
- [9] Salisbury, J.K., “Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates“, *Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, 95–100 (1980)
- [10] Abele, E., Weigold, M., Rothenbücher, S., “Modeling and identification of an industrial robot for machining applications“, *CIRP Annals* **56**, 387–390 (2007)
- [11] Chen, S.-F., Kao, I., “Conservative congruence transformation for joint and Cartesian stiffness matrices of robotic hands and fingers“, *The International Journal of Robotics Research* **19**, 835–847 (2000)
- [12] Alici, G., Shirinzadeh, B., “Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators“, *IEEE Transactions on Robotics* **21**, 554–564 (2005).
- [13] Dumas, C., Caro, S., Garnier, S., Furet, B., “Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **27**, 881–888 (2011).
- [14] Dumas, C., Caro, S., Cherif, M., Garnier, S., Furet, B., “Joint stiffness identification of industrial serial robots“, *Robotica* **30**, 649–659 (2011).
- [15] Lin, Y., Zhao, H., Ding, H., “Posture optimization methodology of 6R industrial robots for machining using performance evaluation indexes“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. **48**, 59–72 (2017).
- [16] Guo, Y., Dong, H., Ke, Y., “Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. **35**, 69–76 (2015).
- [17] Xiong, G., Ding, Y., Zhu, L., “Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **55**, 19–28 (2019).
- [18] Cheng, G., Xu, P., Yang, D. Liu, H., ”Stiffness analysis of a 3CPS parallel manipulator for mirror active adjusting platform in segmented telescope“ *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. **29**, 302–311 (2013).
- [19] Lian, B.B., Sun, T., Song, Y.M., Jin, Y., Price, M., “Stiffness analysis and experiment of a novel 5-DoF parallel kinematic machine considering gravitational effects“, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **95**, 82–96 (2015).
- [20] Klimchik, A. et al., “Compensation of Tool Deflection in Robotic-Based Milling“ *9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 113-122 (2012).
- [21] Klimchik, A., Wu, Y., Caro, S., Furet, B., Pashkevich, A., “Accuracy improvement of robot-based milling using an enhanced manipulator model: Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators“, Springer, pp. 73–81.
- [22] Klimchik, A., Caro, S., Wu, Y., Chablat, D., Furet, B., Pashkevich, A., “Stiffness modeling of robotic manipulator with gravity compensator“, *Computational Kinematics*, Springer, pp. 185–192 (2014)
- [23] Yang, K., Yang, W., Cheng, G., Lu, B., “A new methodology for joint stiffness identification of heavy duty industrial robots with the counterbalancing system“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. **53**, 58–71 (2018)
- [24] Klimchik, A. et al., “Calibration of industrial robots with pneumatic gravity compensators“ *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* 285–290, Rome (2017)
- [25] Corke, P.I., “Robotics, Vision & Control“, *Springer Cham* (2017)
- [26] Agirre, N. et al., “Simulación de trayectorias de un robot industrial considerando la rigidez de las articulaciones“, *Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 184-192, Madrid (2018)