

Indicador de rendimiento de una máquina de recantado basada en un robot paralelo

J. Corral Sáiz, Ch. Pinto, F.J. Campa Gómez y S. Herrero Villalibre

Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
j.corral@ehu.es

Tradicionalmente, las operaciones de mecanizado básicas se han realizado mediante grandes máquinas de mecanizado basadas en controles numéricos computarizados. Existen otras operaciones de mecanizado relacionadas con etapas de acabado de la pieza que pueden ser ejecutadas más eficientemente mediante otras arquitecturas de máquina. En concreto, en este trabajo se presenta un estudio de la adaptabilidad de una máquina de cinemática paralela a un proceso de acabado: el recantado. Para ello se realiza un estudio del rendimiento estructural del manipulador en su espacio de trabajo.

El estudio se basa en dos enfoques: el primero, se basa en la caracterización estática del manipulador en base al error de localización de superficie. Este parámetro se obtiene, a su vez, del estudio de rigidez del manipulador. El segundo se refiere a las características dinámicas estructurales del manipulador como son las frecuencias naturales y los modos propios de deformación. Teniendo en cuenta ambos enfoques y con un modelo de comportamiento del proceso se determina la adecuación del manipulador al proceso en base a la aparición de chatter. El chatter es un fenómeno de inestabilidad del proceso de mecanizado cuyas consecuencias van desde una mala calidad en el acabado de la pieza (errores dimensionales y ondulaciones en la superficie) hasta incluso el colapso de la máquina.

En base a estos dos enfoques se define el parámetro de rendimiento estructural que mide la adecuación del manipulador al proceso de recantado. Este rendimiento se calcula en el espacio de trabajo del manipulador de manera que se van a obtener unas regiones dentro de dicho espacio en las cuales se verifiquen distintos requisitos de calidad del proceso. De los resultados obtenidos se deduce que el rendimiento es función de la localización de la herramienta en el espacio de trabajo. Esta dependencia da lugar a la definición de distintas regiones óptimas de trabajo del manipulador.

1. INTRODUCCIÓN

La mejora de los índices de producción industrial de piezas de alto valor añadido como las del sector aeronáutico, espacial o de automoción está restringida por los exigentes controles de calidad a los que se ven sujetos estos sectores industriales. Por tanto, para aumentar la productividad se requiere un desarrollo simultáneo tanto de los procesos de fabricación como de los medios técnicos para llevar a cabo dichos procesos. Es precisamente aquí donde las tareas automatizadas mediante manipuladores robóticos juegan un papel determinante. La mayor parte de las aplicaciones industriales requieren robots con una precisión elevada, buena rigidez y unas características dinámicas adecuadas que aseguren que los posibles fenómenos vibratorios no influyan en el correcto desempeño de las tareas para las que se ha diseñado el robot. En este trabajo se propone un estudio de las características estructurales estáticas y dinámicas de un manipulador paralelo de 4 grados de libertad para aplicaciones de mecanizado en el sector aeronáutico. Para ello, se van a presentar modelos de comportamiento basados en enfoques analíticos, numéricos y experimentales. Se propone una comparativa entre las tendencias de variación de los parámetros estáticos estructurales de todos los enfoques y finalmente se optará por uno de ellos para definir los mapas de comportamiento. Estos mapas representan de manera intuitiva y clara cuál es el comportamiento del manipulador dentro de su espacio de trabajo. Cuando se conocen los requisitos estructurales de una determinada aplicación, por ejemplo, una rigidez mínima y un intervalo de frecuencias naturales de trabajo, es posible acotar los

mapas mencionados y obtener así los espacios de trabajo asociados a dichos requisitos. De esta manera, el espacio de trabajo máximo queda reducido a una subregión operativa en base a los requisitos de la aplicación concreta. Llegados a este punto se definirán unos espacios de trabajo en relación con los distintos requisitos: cinemáticos, estáticos y dinámicos. Para demostrar la utilidad del estudio se propone una caracterización del comportamiento estructural del manipulador ARABA I para una operación de mecanizado como es el recantado. Esta caracterización se realiza en base a dos parámetros que definen el comportamiento de una máquina de recantado. El primero se fundamenta en la rigidez estática y define la calidad de acabado que se puede lograr con este manipulador, se trata del error de localización de superficie que determina la distancia entre la línea teórica del mecanizado y la real, siendo esta diferencia debida a la elasticidad real de la máquina frente a la idealización de sólido rígido del caso ideal. El segundo se basa en la rigidez dinámica. Teniendo en cuenta los parámetros modales del manipulador, se determina la idoneidad del manipulador desde el punto de la estabilidad en el recantado, dependiendo de si se da o no el fenómeno de chatter.

La rigidez dinámica es un parámetro determinante cuando se exige un correcto funcionamiento de la máquina [1, 2]. Más concretamente, se deben tener en cuenta todas las características dinámicas estructurales del manipulador. De lo contrario, las excitaciones dinámicas como las provenientes de los accionamientos o de las herramientas montadas sobre el elemento terminal podrían dar lugar al fenómeno de resonancia mecánica en el manipulador [3, 4]. Para evitar este fenómeno no deseable, es necesario proveer al usuario final de la máquina de una herramienta sencilla y práctica. Esta herramienta debería permitir la evaluación de la adecuación de la máquina en términos de parámetros operativos del proceso (profundidad de corte, velocidad de avance, velocidad de corte, etc.) para la que ha sido diseñada y condiciones del proceso (espacio de trabajo, velocidad, aceleración, capacidad de carga y potencia en los actuadores, entre otros). Para verificar los desplazamientos máximos en el elemento terminal se debe realizar un análisis exhaustivo de la rigidez estática [5]. De lo contrario, los objetivos del proceso no se cumplirán adecuadamente: en términos de proceso de mecanizado, la calidad del acabado superficial podría no verificarse adecuadamente y en relación con tareas de pick and place, el resultado sería errores de localización en el posicionamiento de las piezas [6]. Para aplicaciones de mecanizado son varios los autores que han realizado estudios para analizar la influencia de la disposición de los accionamientos en manipuladores destinados a aplicaciones para el sector de la máquina herramienta.

En el trabajo presentado en [7] se presenta un modelo cinetostático de un manipulador de la familia Tripod para constatar que el modo de trabajo al que es más sensible la rigidez del manipulador es la flexión y que la rigidez es mayor en la dirección vertical, dirección según la cual los elementos del manipulador trabajan fundamentalmente bajo carga axial. Es bien conocido que la rigidez de los manipuladores paralelos depende de la configuración [8] y de la posición y orientación del elemento terminal por lo que es de esperar que el comportamiento vibratorio también lo sea. Por tanto, es necesario disponer de una herramienta para analizar el comportamiento vibratorio del manipulador en su espacio de trabajo. Esta herramienta consistiría en unos mapas que representen la evolución de las frecuencias naturales como función de la posición del elemento terminal en el espacio de trabajo. Además, existen algunas tareas como el pulido de superficies en las que las fuerzas actuantes no son tan elevadas pero en las que la excitación dinámica proveniente del giro de la herramienta puede dar lugar a excitaciones dinámicas que no pueden ser despreciadas [9]. El pulido de superficies es un proceso de acabado para homogeneizar la superficie de una pieza mecanizada mediante un abrasivo adherido a una rueda giratoria. La rueda se acciona habitualmente mediante un motor rotatorio que constituye una fuente de excitación dinámica que podría generar vibraciones no deseadas e incluso problemas de resonancia.

Para el propósito de este trabajo, primero, se considera el comportamiento estructural de un manipulador paralelo para una tarea de mecanizado. Se analizan las tendencias y los valores de rigidez, así como la respuesta vibratoria a través de las frecuencias naturales. Los resultados de este estudio se presentan en los mapas de rigidez y de frecuencias naturales.

Mediante la adición de algunos criterios particulares en cuanto a requisitos cinemáticos, estáticos y dinámicos, se definirán varios mapas útiles y dará lugar a la obtención del espacio de trabajo estructural del manipulador. Para demostrar la validez del estudio se presenta un caso práctico de mecanizado. Teniendo en cuenta los resultados del estudio se presenta la caracterización estructural del manipulador para una aplicación de mecanizado, el recantado. Se deducirán los resultados relativos a la precisión de mecanizado y la estabilidad del proceso. Se presenta también el espacio de trabajo estructural para una dirección de recantado en particular. Por último, se revelan las conclusiones más relevantes y se proponen las líneas futuras de trabajo.

2. PROCESO DE RECANTEADO

La operación de recantado es una operación habitual en la fabricación de componentes estructurales de espesor reducido en aluminio, titanio y composite para el sector aeronáutico, ver figura 1. Para realizar este tipo de piezas se parte de un tocho al cual se le elimina por fresado de alta velocidad hasta el 90-95% de material, siendo, en las últimas fases del mecanizado, el propio marco del bloque el que sustenta la pieza final. El recantado es la última operación de mecanizado por la cual una fresa de diámetro entre 10 y 16 mm penetra en la pieza atravesándola para ranurar el contorno de la misma. Si la pieza tiene un soporte adicional al que proporciona el marco, la fresa corta el contorno en su totalidad, pero si la pieza no tiene más soporte físico que el marco, se deja una serie de puntos de sujeción para que sean los operarios los que la extraigan posteriormente.

La operación de recantado que se va a considerar en este trabajo va a ser un recantado con una fresa frontal de metal duro de cuatro filos y diámetro 12 mm. Al tratarse de un ranurado, la profundidad radial a_e con la que se corta es igual al diámetro de la herramienta. La profundidad de corte axial a_p viene definida por el espesor de la pieza, que en este tipo de componentes es reducido, entre 0,5 mm y 5 mm. Así pues, en el caso de estudio de este trabajo se partirá de una operación tipo con una profundidad $a_p=1$ mm. El material de pieza considerado va a ser un Aluminio 7075-T6, típico del sector aeronáutico. Este material se mecaniza a altas velocidades de corte, por lo que la limitación en cuanto a velocidad de giro del husillo viene dada por la propia capacidad del husillo, de tamaño reducido con un rango de 2500 a 4000 rpm. El avance por filo f_z se fijará en 0,05 mm.

En la figura 1 se presenta un esquema de la operación de recantado. La flecha horizontal representa la dirección de avance de la herramienta, siendo el giro de la fresa en sentido horario. En este esquema se aprecia el corte en ranurado con una profundidad radial a_e igual al diámetro d , así como la profundidad axial de corte a_p , definida por el espesor de pieza. Estos dos parámetros van a ser determinantes en cuanto a la caracterización estática y dinámica del proceso. La profundidad de pasada axial será determinada para que las condiciones del ranurado sean las más eficientes en cuanto a precisión geométrica y acabado superficial desde el punto de vista estático y dinámico. En la ecuación (1) se presentan las expresiones de las componentes de la fuerza de corte en las direcciones tangencial, radial y axial.

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= k_{t_e} \cdot a_p + k_{t_c} \cdot h(\phi) \cdot a_p \\ F_r(\phi) &= k_{r_e} \cdot a_p + k_{r_c} \cdot h(\phi) \cdot a_p \\ F_a(\phi) &= k_{a_e} \cdot a_p + k_{a_c} \cdot h(\phi) \cdot a_p \end{aligned} \quad (1)$$

2.1. Modelo estático del proceso

A continuación se describen las hipótesis que definen el comportamiento estático del modelo. Se supone que la herramienta se deforma de forma estática, es decir, gira a una velocidad infinitamente lenta de tal modo que para cada ángulo girado por la herramienta, ésta se deforma hasta llegar a una posición de equilibrio. Dicha hipótesis es aceptable cuando la frecuencia de corte es lo suficientemente baja como para que la amplificación dinámica sea nula y, por tanto, la rigidez de la herramienta sea aproximadamente la

estática. Que estas condiciones se cumplan depende de las condiciones de corte que permita el material y la rigidez de la máquina. Las fuerzas generadas en el proceso de corte sean aproximadamente constantes, lo cual ocurre en fresado cuando se corta en ranurado con un número de filos superior a cuatro o cuando la profundidad axial es igual a la altura de la hélice dividida entre el número de filos [11]. Se considera que sólo la máquina es flexible y que la herramienta tiene una rigidez infinita a lo largo de todo el filo. Se ha considerado un modelo semiempírico para la fuerza de corte. Este modelo descompone la fuerza de corte sobre el filo en una componente tangencial, radial y axial dependientes de forma lineal de la profundidad de corte axial a_p , del espesor de viruta h y de los coeficientes de corte que caracterizan la resistencia del material a ser cortado [12].

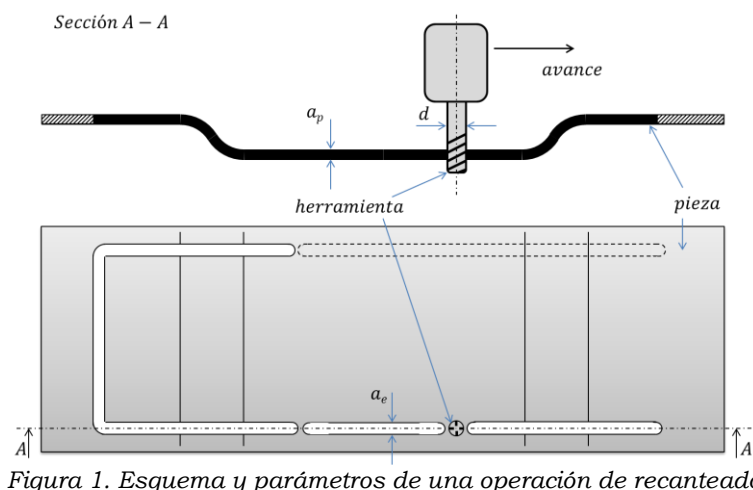


Figura 1. Esquema y parámetros de una operación de recorteado

En concreto, contempla dos aportaciones a la fuerza de corte, la debida a la cizalladura del material (K_{t_c} , K_{r_c} y K_{a_c}) y la debida al rozamiento del filo contra la pieza (k_{t_e} , k_{r_e} y k_{a_e}). Sumando la contribución de todos los filos en corte y proyectando sobre los ejes de la máquina es posible obtener la fuerza de corte total descompuesta en X , Y y Z . Conocidos los parámetros de corte, en cada posición angular de la herramienta se obtienen las fuerzas de corte F_x , F_y y F_z , expresadas en el sistema de referencia global, a partir del modelo semiempírico. Teniendo en cuenta la flexibilidad del manipulador, estas fuerzas inducen un desplazamiento en la punta de la herramienta. Como consecuencia de dicho desplazamiento, el espesor de viruta que realmente corta la herramienta cambia, así como la profundidad radial y axial. De este modo, para calcular la posición de equilibrio hay que seguir un proceso iterativo. Además, para computar el espesor de viruta es necesario tener en cuenta la superficie dejada por la herramienta en el paso anterior. Este proceso se resume en el siguiente diagrama de flujo representado en la figura 2.

Una vez obtenidos los desplazamientos que sufre el centro de la herramienta, se puede obtener la trayectoria real de los filos y deducir el error de localización de superficie (ELS) comparándola con la trayectoria teórica [13].

2.2. Modelo dinámico del proceso

Se pueden considerar distintas variantes de fenómeno de chatter: el chatter de máquina, el chatter de herramienta, el chatter de pieza y, además, distintas combinaciones de todos ellos acopladas. En este estudio se pretende caracterizar el manipulador paralelo para una operación de recorteado, por lo que la caracterización dinámica estructural se basará en el chatter de máquina. Es decir, se analizará cómo afecta al proceso considerado las propiedades estructurales del manipulador. La caracterización dinámica del proceso viene determinada por la aparición del fenómeno vibratorio del sistema de mecanizado que influye directamente en la calidad del acabado y que podría afectar incluso a la integridad de la máquina.

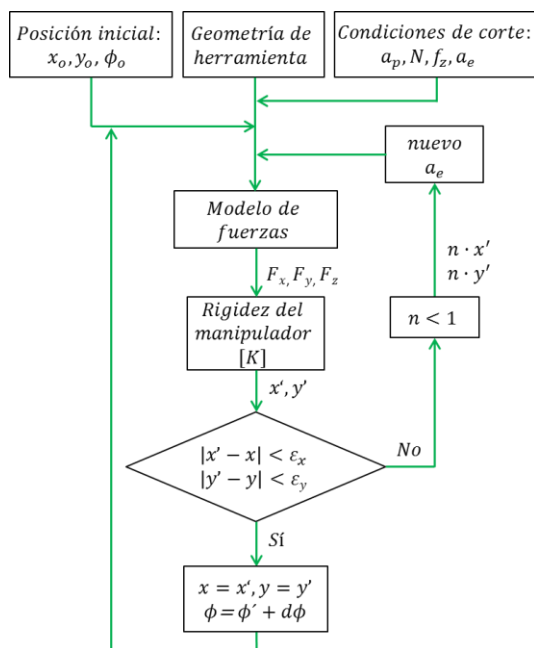


Figura 2. Esquema de programación del método en cada posición angular de la herramienta

En concreto, son las vibraciones de carácter autoexcitado, fenómeno conocido como chatter, y que tienen su origen en un proceso de interacción entre el sistema vibratorio de la estructura de la máquina y el propio proceso de corte, las que van a determinar esta caracterización. Aunque pueden ser varios los motivos por los que tienen lugar, en la mayoría de los casos éstas se deben al efecto de regeneración de viruta, por lo que también se denomina chatter regenerativo. En función de la profundidad de corte y del desfase entre la ondulación y la vibración del filo, el proceso puede excitar aún más los modos del sistema y generar una vibración creciente o puede estabilizarse.

El parámetro que determina la estabilidad del sistema es la anchura de viruta, de tal forma que si se corta por debajo una anchura conocida como crítica, el proceso de corte siempre es estable. Este valor depende de las características dinámicas de la máquina y la pieza, de la geometría y número de filos de la herramienta, y del material de la pieza. El siguiente parámetro de mayor importancia es el tiempo que transcurre desde que se genera una superficie hasta que se vuelve a mecanizar, ya que influye directamente sobre el desfase entre la ondulación de la superficie y la vibración de filo que da lugar al efecto regenerativo. Así, cuando se corta con una anchura superior a la crítica, existen ciertos valores de la velocidad de giro para los cuales el límite de estabilidad real es mayor que la anchura crítica. Para analizar la estabilidad del proceso de recantado, caso de la aplicación que aquí se describe, es necesario acudir a modelos que permitan evaluar el comportamiento del sistema de manera simplificada. En este trabajo se ha utilizado el modelo monofrecuencia desarrollado por [14]. De esta manera, el espesor dinámico cortado por un filo j orientado según un ángulo ϕ_j es:

$$h_d(t) = [(\Delta x(t) \cdot \sin \phi_j + \Delta y(t) \cdot \cos \phi_j) \cdot \sin \kappa - \Delta z(t) \cdot \cos \kappa] \cdot g(t) \quad (2)$$

donde $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$ y $\Delta z(t)$ son las variaciones de posición de la herramienta en coordenadas Cartesianas, ϕ_j es el ángulo de salida de la herramienta que también es función del tiempo ($\phi_j(t)$) y κ es el ángulo de posición de la plaquita y que en una herramienta de tipo frontal es 90° . Por su parte, $g(t)$ es una función tipo ventana que permite considerar el efecto dinámico durante el intervalo de tiempo que el filo está cortando material.

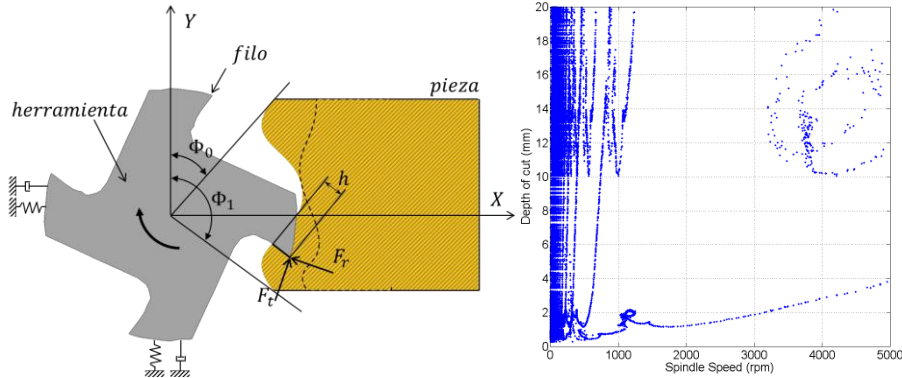


Figura 3. Fuerzas consideradas en el modelo y diagrama de lóbulos

Si se proyectan las fuerzas de corte (1) sobre el sistema de referencia XY de la herramienta se obtiene:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_x(\phi_j) \\ F_y(\phi_j) \\ F_z(\phi_j) \end{Bmatrix} &= [R] \cdot \begin{Bmatrix} F_t(\phi_j) \\ F_r(\phi_j) \\ F_a(\phi_j) \end{Bmatrix} = [R] \cdot K_{t_c} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ K'_r \\ K'_a \end{Bmatrix} \cdot a_p \cdot h(\phi_j) = \\ &= [R] \cdot K_{t_c} \begin{Bmatrix} 1 \\ K'_r \\ K'_a \end{Bmatrix} a_p \cdot \{ \sin \phi_j \sin \kappa \quad \cos \phi_j \sin \kappa \quad -\cos \kappa \} \cdot g(t) \cdot \Delta r(\phi_j) \end{aligned} \quad (3)$$

Agrupando ecuaciones, haciendo uso del modelo monofrecuencia y agrupando términos es posible llegar a la expresión final del problema en la forma:

$$\begin{Bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta y(t) \end{Bmatrix} = (1 - e^{-i\omega_c T}) \begin{bmatrix} G_{xx}(\omega_c) & G_{xy}(\omega_c) \\ G_{yx}(\omega_c) & G_{yy}(\omega_c) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} e^{-i\omega_c t} \quad (4)$$

Que debidamente identificada representa un problema de valores y vectores propios cuya resolución permite obtener los valores de la profundidad de pasada crítica a_{pc} y la velocidad de giro N a la que se producen. Representando cada los valores de a_{pc} en función de N se obtienen el diagrama de lóbulos del proceso que representa cuál es el valor máximo de la profundidad de pasada para una velocidad de giro manteniendo el proceso es estable.

3. CASO DE APLICACIÓN

El manipulador paralelo ARABA I pertenece a la familia de los de baja movilidad; posee 4 grados de libertad (gdl.) (figura 4). A continuación se van a presentar las características esenciales para entender adecuadamente el comportamiento estático del mismo, si bien se pueden consultar más detalles en [10]. Es un manipulador pensado para asistir en tareas de mecanizado y, por tanto, con los requerimientos de precisión y de rigidez propios de este tipo de tareas. La arquitectura de este manipulador consiste en una plataforma fija y una plataforma móvil o elemento terminal. Las guías que constituyen el elemento fijo no están perfectamente alineadas sino que tienen un offset de valor a . Conectando ambas plataformas se disponen cuatro patas idénticas que constan de varios elementos. En este caso la cadena cinemática básica de cada pata es la \underline{PRPaRR} , es decir, la conexión al elemento fijo, representado por las guías, es mediante un par prismático actuado; a continuación un par de rotación (B_i), un par paralelogramo articulado, y otros dos pares de rotación mutuamente perpendiculares en C_i y D_i respectivamente. Los parámetros geométricos fundamentales son: la longitud de la barra corta del paralelogramo articulado b , la longitud de la barra larga r , la longitud c del elemento $C_i D_i$ de conexión de las patas a la plataforma móvil y la longitud de la semidiagonal del rombo regular que constituye la plataforma móvil d .

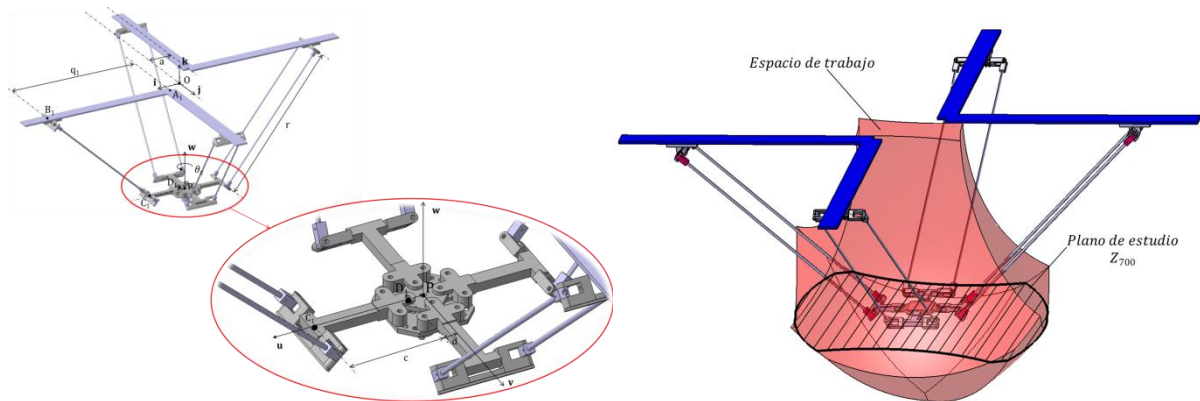


Figura 4. Manipulador ARABA I, espacio de trabajo y plano de trabajo

En trabajos anteriores ya se han presentado tanto la caracterización estática que puede ser consultada en [5] como la caracterización dinámica en base a las frecuencias naturales y modos propios presentada en [ref JCorral CIBIM]. Mediante estas dos caracterizaciones se obtienen la rigidez estática y la rigidez dinámica del manipulador que son los parámetros que deben alimentar a los modelos estático y dinámico del proceso introducidos en los apartados anteriores.

4. RESULTADOS

Mediante los modelos que caracterizan el comportamiento estático y dinámico del manipulador ARABA I aplicado al proceso de recantado se pueden obtener los valores del error de localización de superficie (ELS) y de la profundidad crítica de pasada (a_{pc}) para todos los puntos del espacio de trabajo. Puesto que el proceso resulta tanto mejor cuanto menor es el ELS y cuanto mayor es la profundidad de pasada con la que se puede mecanizar, se define el rendimiento estructural η_s del proceso:

$$\eta_s = \frac{ELS/a_{pcrit}}{\max(ELS/a_{pcrit})} \quad (5)$$

Con objeto de representar la variación de este rendimiento estructural se presentan los resultados sobre el plano de trabajo Z_{700} definido en la figura 4. Estos resultados se muestran en los mapas de rendimiento de la figura 5. Los mapas representan el valor del rendimiento estructural en función de la posición ocupada por la herramienta en el plano de trabajo. Además se representa el valor de la isolínea de profundidad crítica $a_{pcrit} = 1 \text{ mm}$ que delimita la zona del plano de trabajo en la que es posible mecanizar sin inestabilidad con dicho valor de la profundidad crítica. Debido a que el comportamiento dinámico estructural es dependiente de la dirección del avance del manipulador, se presentan dos casos de rendimiento estructural para un avance de herramienta en dirección X y otro mapa para el caso de avance de herramienta en dirección Y.

Como se puede apreciar en ambos casos, el rendimiento es función de la posición y de la dirección de avance de la herramienta. Existen zonas en las que este rendimiento alcanza valores por encima del 60% donde sería deseable llevar a cabo el proceso. Además estas zonas están comprendidas dentro de la región de $a_{pcrit} = 1 \text{ mm}$.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer la financiación recibida del Gobierno español a través del Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto DPI2011-22955) y el Gobierno Vasco a través del Departamento de Educación, Universidades e Investigación (Proyecto IT445-10).

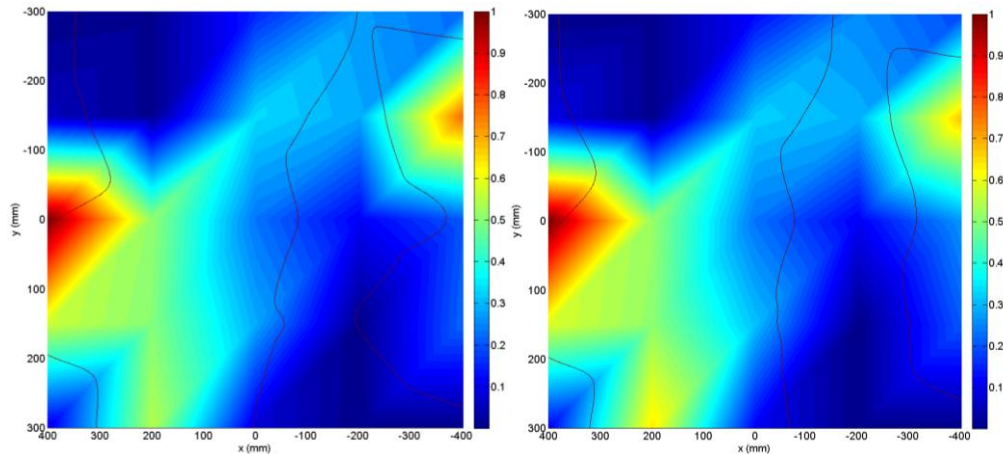


Figura 5. Rendimiento estructural para avance en X (izqda.) y en Y (dcha.)

6. REFERENCIAS

- [1] S.K. Dwivedy, P. Eberhard, Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review, *Mechanism and Machine Theory*, 41(2006) 749-777.
- [2] Y. Wang, H. Liu, T. Huang, D.G: Chetwynd, Stiffness modeling of the Tricept robot using the overall Jacobian matrix, *J. of Mechanisms and Robotics*, 1 (2) (2009). 021002-1-8
- [3] G.J. Wiens, D.S.Hardage, Structural dynamics and system identification of parallel kinematics machines, in *Proceedings of the ASME 2006 I. D. E. Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Pensilvania, (2006).
- [4] Y. Yiu et al., On the dynamics of parallel manipulators, in *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation ICRA'01*, 4, Seoul, (2001).
- [5] Ch. Pinto, J. Corral, O. Altuzarra, A. Hernández, A methodology for static stiffness mapping in lower mobility parallel manipulators with decoupled motions, *Robotica*, 28 , (2010) 719-735.
- [6] R. Rizk, M. Munteanu, J-Ch. Fauroux, G. Gogu, Stiffness analysis for a 3 and for 4 DOF parallel robots from the Isoglide family via the sub-structuring principle, in *Proceedings of the 12th IFToMM World Congress*, Besançon, (2007).
- [7] D. Zhang, F. Xi, C.M. Mechefske, S. Lang, Analysis of parallel kinematic machine with kinetostatic modelling method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20 (2004) 151-165.
- [8] J-P. Merlet, *Parallel Robots*. Ed. Springer. 2nd Edition, (2006).
- [9] Z. Li, J. Wang, X. Peng, S. Li, Z. Yin, Abrasive jet polishing and its applications in surface finishing. *Am. J. Nanotechnology*, 1 (2010) 86-93.
- [10] O. Salgado, Síntesis, análisis y diseño de manipuladores paralelos de baja movilidad. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Bilbao, (2008)
- [11] J. Tlusty, *Manufacturing processes and equipment*, Prentice Hall, (2000).
- [12] Y. Altintas, *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, (2000).
- [13] F.J. Campa, L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, E. Bilbao, A. Calleja, J. Peñafiel, Tool deflection on peripheral milling, in *The Annals of Dunarea de Jos. University of Galati fascicle V, Proceedings of the Technologies in Machine Bulinding*, (2009).
- [14] Altintas, Y., Budak, E.: Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44(1), (1995), 357 - 362.
- [15] J. Corral, C. Pinto, S. Herrero, O. Altuzarra, M. Ceccarelli, in *Proceedings of the X Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM 2011)*, Oporto, (2011).