

MONITORIZACIÓN DE FUERZAS DE MECANIZADO CON UN ROBOT UR3e

Guillermo Elvira Soler, Juliana Manrique Córdoba, José María Vicente Samper,
José María Sabater Navarro*

Universidad Miguel Hernández, Elche – España

*Autor para correspondencia: j.sabater@umh.es

Resumen

En el proceso de mecanizado de una pieza es importante disponer de un sistema de monitorización de fuerzas para encontrar los parámetros óptimos para un fresado correcto. También en el caso de trayectorias 3D complejas en el espacio. En este artículo se presenta una propuesta de implementación de un sistema de control de la velocidad y posición de una herramienta de mecanizado y monitorización a través de ROS de las fuerzas de mecanizado. Además, se presenta un breve estudio al mecanizar un material plástico de poliuretano de baja densidad (EVA). La solución presentada consta de una fresa montada en un robot colaborativo de 6 grados de libertad. El objetivo final de este trabajo es realizar estudios de fresado óptimo en trayectorias complejas, como pueda ser el fresado quirúrgico de huesos o la fabricación de plantillas 3D podológicas de EVA.

Palabras clave: Mecanizado, Robótica Colaborativa, Fuerzas, Torques.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnologías de mecanizado por control numérico (CNC) ha incrementado la eficiencia de los procesos productivos, así como el nivel de automatización. Estas tecnologías acortan los tiempos de trabajo y cuentan con una alta precisión y fiabilidad en operaciones repetitivas, pero por otra parte, requieren de un alto nivel de experiencia para encontrar los parámetros de mecanizado adecuados para cada material. Para ello es importante conocer las fuerzas y pares que se producen en el mecanizado, así como otras variables como puedan ser el calor generado por fricción o las deformaciones que pueden suceder en los materiales blandos y deformables. En este sentido, el mecanizado de materiales deformables es un campo abierto de investigación.

En los últimos años, los robots colaborativos o cobots han ido incrementando su presencia en la industria de producción y manufactura. A diferencia de los robots industriales, los cobots ofrecen un incremento en la producción, flexibilidad, versatilidad y seguridad [1]. Este tipo de robots pueden ser utilizados en tecnologías de producción no convencional, donde los robots implementan diferentes tipos de efectores

finales, entre ellas el corte por agua, manufactura por adición, impresión 3D, etc. Estas soluciones aprovechan la capacidad de los 6 grados de libertad que ofrecen los robots, posibilitando describir movimientos en curvas espaciales complicadas [2].

Los avances en la tecnología están generando una revolución de métodos de manufactura, siendo necesario mejorar la cantidad de efectores finales para la implementación en robótica [5-6]. Para sobrepasar las limitaciones encontradas en las máquinas de mecanizado CNC, considerando las ventajas que ofrece la implementación de diferentes tecnologías aplicables a la robótica, se propone el acople de una herramienta de mecanizado a un brazo robótico UR3e, del cual se puede obtener información correspondiente a las fuerzas y torques ejercidos en la punta de la herramienta, permitiendo conocer el estado del material que se está mecanizando. Este trabajo detalla la implementación de las comunicaciones con el robot para poder disponer de un sistema de monitorización de fuerzas de mecanizado en trayectorias complejas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 HERRAMIENTA DE MECANIZADO

Dado que el objetivo final que se pretende con estos trabajos es realizar micromecanizados en materiales deformables, como puedan ser plantillas ortopédicas de EVA o mecanizado de huesos, se ha considerado utilizar una máquina herramienta de tamaño reducido y que se ajuste a las necesidades de estas aplicaciones. Se ha seleccionado como herramienta de fresado una Dremel 4000, la cual se compone por un motor y un cabezal flexible que facilita su posicionamiento en el espacio, esta tiene una velocidad ajustable entre 5000 y 35000 rpm, así como una potencia de 175 W, suficiente para el material a mecanizar, en este artículo, EVA de diferentes densidades.

El UR3e puede aguantar una carga máxima de hasta 3 kg, por lo que un montaje directo del motor en el extremo no es aconsejable, y por tanto se ha optado por utilizar el eje flexible y colocar el motor de la herramienta fijado a una estructura fija. La cabeza de fresa seleccionada tiene la referencia P8056.3X3.0, expuesta en la figura 1. Esta cabeza es usada en la industria para fresado de materiales de similares

características, por lo que se elige para experimentación.



Figura 1: Cabeza de la fresadora elegida [7]

2.1.1 Diseño del soporte

Como primer paso se diseña un enganche para el extremo del eje transmisor de la herramienta de fresado (figuras 2 y 3), con objeto de asegurar que la punta no se mueve excesivamente y reducir las vibraciones. En una primera fase, se realizaron medidas del extremo del eje transmisor para realizar un modelo 3D del mismo en un software CAD para, seguidamente, diseñar el soporte y realizar una diferencia entre sólidos.

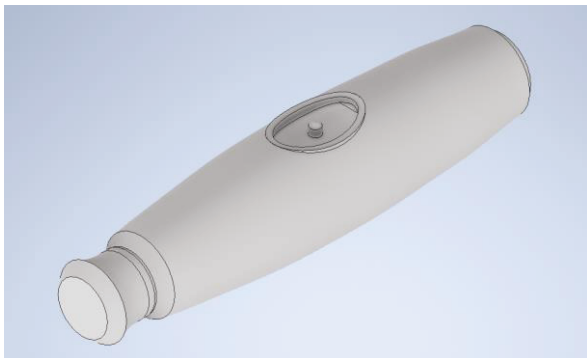


Figura 2: Modelo 3D del eje transmisor



Figura 3: Eje flexible original

La siguiente fase consistió en diseñar una pieza de soporte para el cabezal de la fresa (figura 4). Se respetó el botón para montar y desmontar la cabeza de la fresa, y también una distancia de un diámetro respecto de los orificios de los tornillos de sujeción para asegurar integridad estructural.

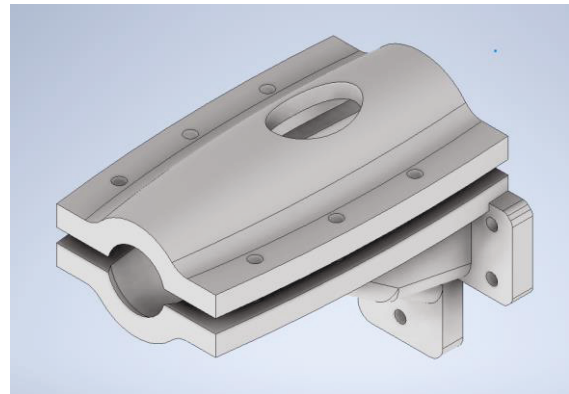


Figura 4: Enganche del extremo transmisor

Por último, la figura 5 ilustra el diseño de la pieza de enganche que sujeta la pieza del extremo transmisor (figura 4) al extremo del robot UR3e.

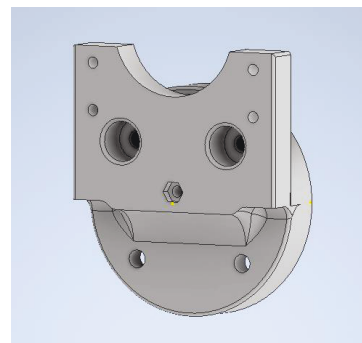


Figura 5: Enganche al UR3e

Una vez realizado el diseño, se procede con el prototipado, dado que este se realiza en impresión 3D se debe considerar la tolerancia de las piezas a imprimir de 0,4 mm. En la figura 6 se muestra el montaje de las piezas diseñadas.

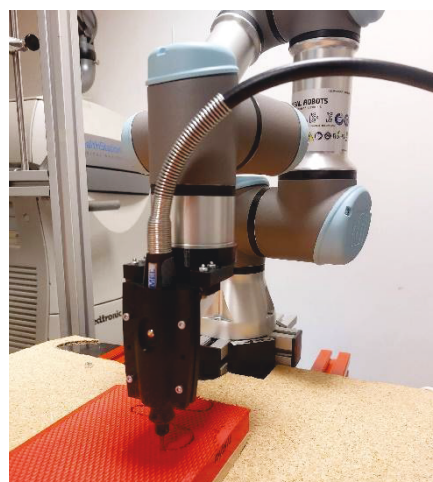


Figura 6: Montaje final de las piezas

2.1.2 Ajuste para el control de velocidad

Como funcionalidad adicional de la fresa, resulta interesante poder controlar la velocidad de rotación de

la fresadora de forma remota. Se trata de un motor de 175 W guiado por un controlador de velocidad, que a su vez, lleva integrado un potenciómetro de serie. Se extrajo la placa del controlador de velocidad y se conectó el motor directamente a los cables de fase. Haciendo uso de un switch y un regulador de tensión se conecta la salida como se ilustra en la figura 7.

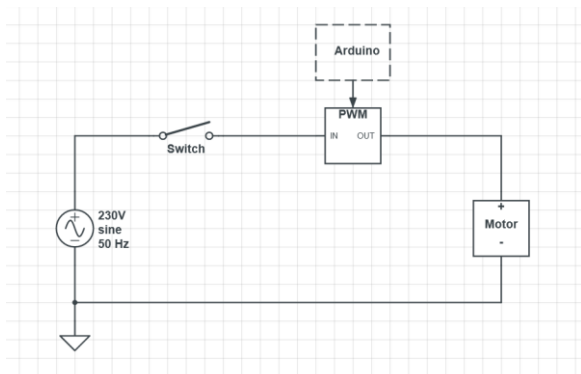


Figura 7: Esquemático de las conexiones

2.2 INTEGRACIÓN DE LAS COMUNICACIONES

2.2.1 Control de velocidad

El regulador de tensión del que se ha hecho uso precisa de una señal PWM para controlar el voltaje de salida, esta señal se envía desde un microprocesador, en nuestro caso un Arduino Nano.

El Arduino Nano envía la señal PWM desde uno de sus pines habilitados para tal fin, más un pin de alimentación de 5V y otro de GND. Cabe destacar que la frecuencia de funcionamiento del regulador de tensión y del Arduino ha de ser la misma, ya que, en caso de no serlo, la lectura de la señal PWM no será interpretada de forma correcta.

En lo que a comunicaciones respecta, se hace uso del puerto serie para enviar las velocidades deseadas en tiempo real. Esto se realiza desde una interfaz, que publica a un nodo en ROS, que enviará por el mismo puerto la velocidad en bytes. Previamente se ha de cargar el sketch de Arduino de la figura 8, que se encargará de leer los datos que llegan por el puerto y cargarlos por el pin PWM.

```

pwm_control$
int val; //Variable para leer
const int pinLED=13; //Para iluminar el led
const int pwm_out=3; //Pin de salida de la señal PWM

void setup() {
  pinMode(pwm_out, OUTPUT); //Inicializacion pines y comunicacion Serie
  pinMode(pinLED, OUTPUT); //
  Serial.begin(9600); //
}

void loop() {
  if (Serial.available()>0)
  {
    val=Serial.parseInt(); //Tomamos el entero del string que recibimos

    digitalWrite(pinLED, HIGH); //Comprobamos recepcion de datos
    delay(100); //con el LED integrado
    digitalWrite(pinLED, LOW); //
    delay(100); //

    analogWrite(pwm_out, val); //Mandamos al potenciómetro
    delay(50);
  }
}
    
```

Figura 8: Sketch de Arduino usado para generar la señal PWM

2.2.2 ROS – UR

La comunicación del robot y la interfaz se caracteriza por 2 nodos: el nodo de la interfaz, desde el que publicamos toda la información, y el nodo del UR3e, que recibe todos los comandos.

El envío de datos se realiza mediante el driver *ur_robot_driver* de ROS. Este driver cuenta con un *topic* preestablecido llamado *script_command* en el cual se publicarán los comandos *ur_script* del robot. La información para enviar al UR3e está formada por programas completos de tipo URscripts, los cuales contienen todos los puntos a recorrer, así como velocidades y aceleración deseadas. Adicionalmente, existen palabras clave que se usan como, por ejemplo, se implementa *halt*, que realiza una parada de emergencia.

2.2.3 Real Time Data Exchange Protocol

El robot UR3e cuenta con un sensor de fuerzas integrado en su extremo final con el cual resulta posible tomar datos y realizar análisis de cómo afectan distintas velocidades de avance y fresado al resultado sobre el material a mecanizar, esto provee una retroalimentación del proceso realizado.

La lectura de fuerzas del sensor del robot (figura 9) se realiza por medio del protocolo de intercambio de datos en tiempo real, RTDE por sus siglas en inglés. Para hacer uso de este se debe instalar la librería que permite la comunicación con el robot. Se debe configurar los datos de interés en el archivo *record_configuration.xml*, incluyendo las variables con las que se vaya a trabajar y el tipo de dato de dichas variables. Adicionalmente se crea un nodo ROS con el que se inicializará la lectura de datos en el momento que se envíe el URscript con los comandos al robot, dicho archivo de lectura de datos se crea a partir del archivo *read_rtde.py*.

Finalmente se ha utilizado la librería *matplotlib* de *python* para graficar las lecturas de fuerzas y pares, permitiendo una visualización del estado del proceso, además de almacenar los datos en un archivo de tipo *.txt*.

```

def callback(self):
    thread = threading.Thread(target=force_reading(self))
    thread.start()

def force_reading(self):
    pub = rospy.Publisher('/rtde_data', Float32MultiArray, queue_size=50)

    # parameters
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument('--host', default='192.168.0.80', help='name of host to connect to')
    parser.add_argument('--port', type=int, default=30004, help='port number (30004)')
    parser.add_argument('--samples', type=int, default=0, help='number of samples to record')
    parser.add_argument('--frequency', type=int, default=125, help='the sampling frequency')
    parser.add_argument('--config', default='record_configuration.xml', help='data configur')
    parser.add_argument('--verbose', help='increase output verbosity', action='store_true')
    parser.add_argument('--buffered', help='Use buffered receive which doesn't skip data', action='store_true')
    parser.add_argument('--binary', help='save the data in binary format', action='store_true')
    args = parser.parse_args()
    
```

Figura 9: fichero .py para la configuración de lectura de fuerzas

2.3 GESTIÓN DE DATOS

Como se menciona en el apartado anterior, se almacenan los datos de las fuerzas y pares generados a partir de la librería RTDE, así como de las velocidades en todos los ejes, para realizar un estudio de la evolución del proceso durante la experimentación. En concreto, se tomarán lecturas de la siguiente información:

- Timestamp: Tiempo transcurrido desde la puesta en marcha de la controladora del UR (milisegundos).
- Velocidades lineales en ejes X, Y, Z (m/s)
- Velocidades angulares en ejes X, Y, Z (rad/s)
- Fuerzas en ejes X, Y, Z (N)
- Pares en ejes X, Y, Z (Nm)

Una vez almacenados los datos, estos se procesan en Matlab®.

2.3.1 Protocolo de pruebas

Se presenta las primeras pruebas de fresado de un material deformable como es la EVA expandida. Se programaron 3 trayectorias diferentes, a distintas velocidades de avance y fresado, así:

La trayectoria 1 (figura 10) es una trayectoria rectilínea en la cual tiene aproximadamente 20 cm de avance sobre el eje Y, con un tramo de aceleración previo al ingreso al material y una salida del material hacia arriba al final de esta.

La trayectoria 2 (figura 11) se trata de un recorrido compuesto por 2 curvas de 40 mm de radio que recorren 90° cada una, de forma que la fresa entra y sale del material por el mismo lateral. Al igual que con la primera trayectoria, cuenta con un tramo de aceleración previo.

La trayectoria 3 (figura 12) tiene forma de “S” y recorre unos 10 cm en línea recta, con tramo de aceleración y una salida vertical al igual que la primera trayectoria.

Las velocidades de fresado oscilarán entre las 18.000 rpm y 25.000 rpm. Para el material dispuesto, es frecuente el uso de 20.000 rpm, por lo que valores entorno a este darán los mejores resultados.



Figura 10: Trayectoria 1, a 18000rpm y 5mm/s de avance

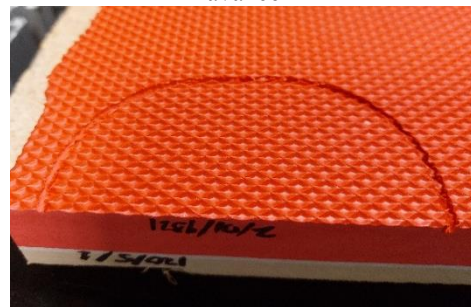


Figura 11: Trayectoria 2, a 18000 rpm y 10 mm/s de avance



Figura 12: Trayectoria 3, a 18000rpm y 10mm/s de avance

3 RESULTADOS

3.1 PRUEBAS

3.1.1 Trayectoria 1

- Velocidad de avance 5 mm/s.

En las figuras 13 y 14 se puede apreciar cómo a menores revoluciones, el robot necesita aportar mayores fuerzas. También es posible apreciar una

gran oscilación en los ejes Y y Z, debida sobre todo a la baja densidad del material.

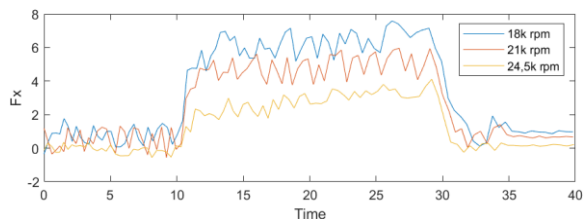


Figura 13: Fuerzas en el eje X a 5 mm/s

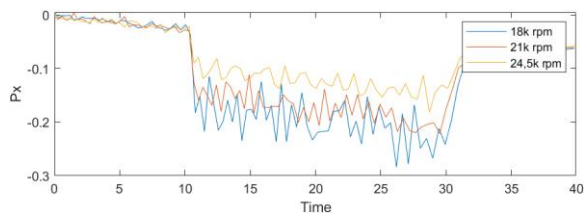


Figura 14: Pares en el eje X a 5mm/s

- Velocidad de avance 10 mm/s.

Al igual que con la velocidad de avance en 5 mm/s, en la figura 15 se puede apreciar un aumento de la fuerza, aunque, en la figura 16, el par debido al avance se mantiene.

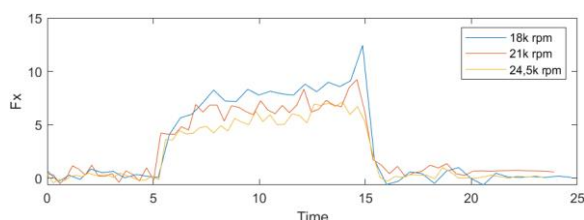


Figura 15: Fuerzas en el eje X a 10 mm/s

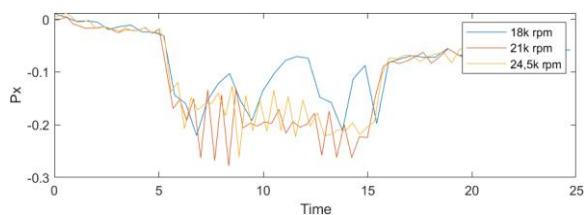


Figura 16: Pares en el eje X a 10 mm/s

- Velocidad de avance 15 mm/s.

Las últimas gráficas (figuras 17 y 18) muestran los mismos resultados, de mayor magnitud, con las mismas oscilaciones.

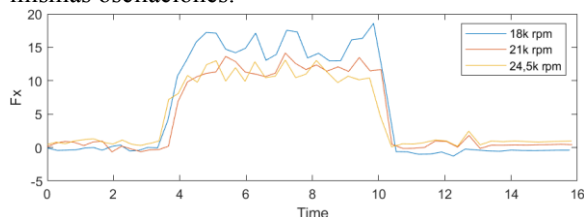


Figura 17: Fuerzas en X a 15mm/s

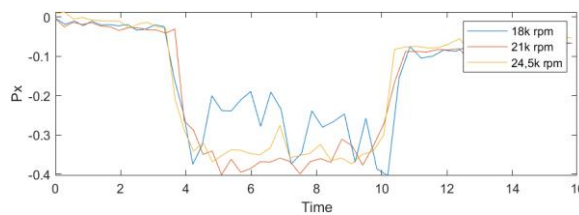


Figura 18: Pares en el eje X a 15 mm/s

3.1.2 Trayectoria 2

En las figuras de la 19 a la 24, se puede apreciar la trayectoria 2 con sectores circulares. Se grafican todos los componentes en fuerzas y pares.

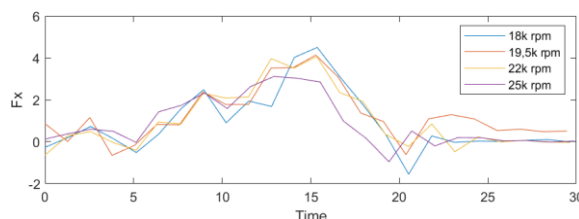


Figura 19: Fuerzas en el eje X a 10 mm/s

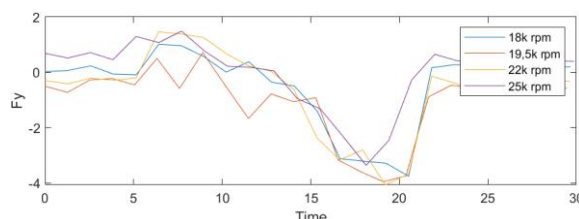


Figura 20: Fuerzas en el eje Y a 10 mm/s

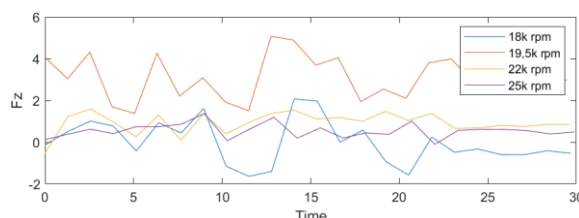


Figura 21: Fuerzas en el eje Z a 10 mm/s

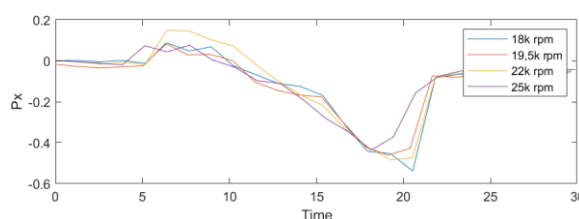


Figura 22: Pares en el eje X a 10 mm/s

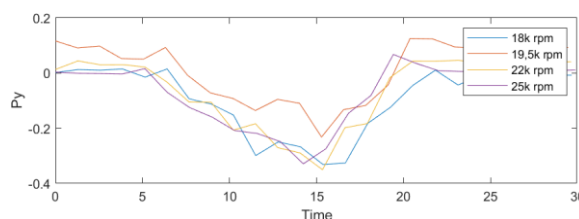


Figura 23: Pares en el eje Y a 10 mm/s

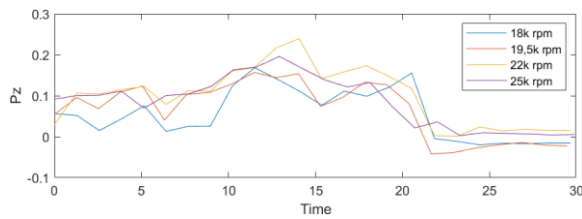


Figura 24: Pares en el eje Z a 10 mm/s

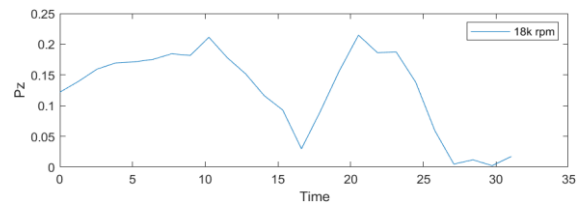


Figura 30: Pares en el eje Z a 10 mm/s

3.1.3 Trayectoria 3

Por último, las figuras 25 a la 30 exponen los resultados de la tercera trayectoria en forma de “S”. Se puede observar que la forma que describen las lecturas de fuerzas y pares han cambiado significativamente, pudiendo apreciar la forma de la trayectoria actual en las gráficas.

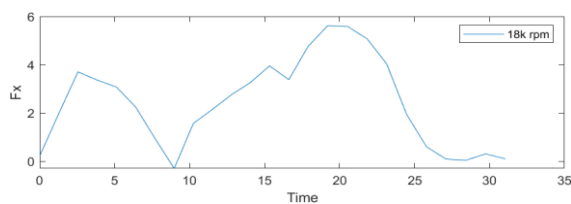


Figura 25: Fuerzas en el eje X a 10 mm/s

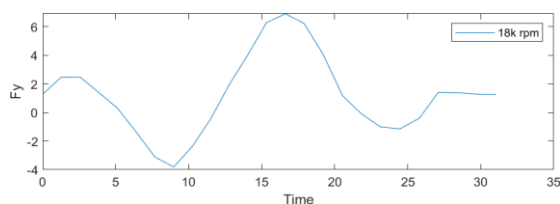


Figura 26: Fuerzas en el eje Y a 10 mm/s

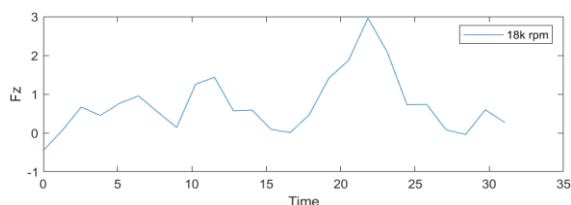


Figura 27: Fuerzas en el eje Z a 10 mm/s

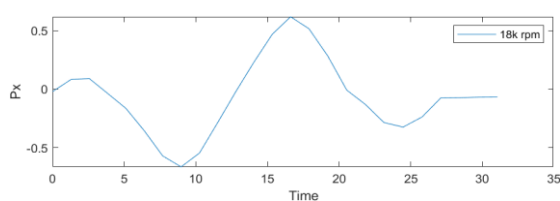


Figura 28: Pares en el eje X a 10 mm/s

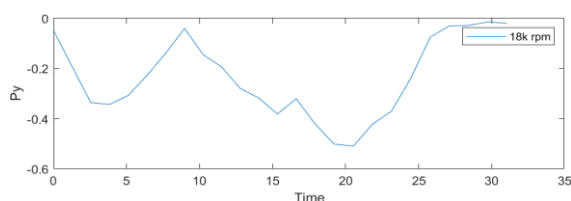


Figura 29: Pares en el eje Y a 10 mm/s

4 DISCUSIÓN

Al analizar los resultados, surgen diversas cuestiones, entre ellas establecer un modelo para la oscilación presente mayoritariamente en las fuerzas del eje Z, considerando que este es el sentido de entrada vertical al fresado del material, y que es debida a la deformación del material debido a las fuerzas de mecanizado. Como se ha mencionado antes, el material que usamos es un plástico blando para pruebas de fresado. Al tratarse de un material blando, este se puede deformar, y son, precisamente, estas deformaciones lo que causa una vibración en todos los ejes, pero donde más se nota es en el eje Z.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados se puede concluir que una mayor velocidad de fresado reduce las fuerzas experimentadas en la punta, y una mayor velocidad de avance, en contra, las aumenta. Un buen fresado será dictaminado por la relación que tengamos entre ambas velocidades.

Como se observa en las gráficas, a partir de 20.000 rpm las fuerzas se estabilizan y se obtienen menos efectos negativos de un fresado menos eficaz. Sin embargo, no sería correcto asumir que, a más revoluciones, el resultado del mecanizado va a ser mejor, ya que un aumento de fricción aumenta la temperatura lo cual no es admisible en diferentes materiales, como por ejemplo en el mecanizado de hueso vivo para evitar la necrosis térmica. La posibilidad de disponer de las fuerzas reales permitirá modelar el proceso de mecanizado para incluir la simulación térmica y desarrollar un optimizador en cada procedimiento. La mejor solución será entonces un término medio, permitiéndonos fresar de forma segura y eficaz, sin riesgo a quemar el material o a sobrecargar la fresadora con unas revoluciones insuficientes.

Es posible asegurar que un estudio de los distintos efectos y fuerzas que generan las velocidades tanto de fresado como de avance sobre los materiales resulta vital para poder determinar qué condiciones serán las mejores para cada proyecto, creando un entorno seguro, eficaz y optimizado en el que se facilite trabajar cómodamente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del proyecto PID 2019-111023RB-C32 y por el proyecto RitaDiab; Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Referencia: 220RT0004

English summary

MONITORING OF MACHINING FORCES WITH A UR3e ROBOT

Abstract

In the machining process of a part, it is important to have a force monitoring system to find the optimal parameters for correct milling. Also, in the case of complex 3D trajectories in space. This paper presents a proposal for the implementation of a system to control the speed and position of a machining tool and monitoring through ROS of the machining forces. In addition, a brief study is presented when machining a low-density polyurethane (EVA) plastic material. The presented solution consists of a milling cutter mounted on a collaborative robot with 6 degrees of freedom, and the final objective of this work is to carry out studies of optimal milling in complex trajectories, such as surgical milling of bones or the manufacture of 3D podiatric templates. of EVA.

Keywords: Machining, Collaborative Robotics, Forces, Torques.

Referencias

- [1] F. Sherwani, M. M. Asad y B. S. K. K. Ibrahim, «Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0),» *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*, pp. 1-5, 2020.
- [2] D. Reyes-Uquillas y T. Hsiao, «Compliant human-robot collaboration with accurate path-tracking ability for a robot manipulator,» *Applied Sciences*, vol. 11, nº 13, p. 5914, 2021.
- [3] L. D. Evjemo, S. Moe, J. T. Gravdahl, O. Roulet-Dubonnet y L. T. Gellein, «Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results,» de *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, IEEE, 2017, pp. 1-8.
- [4] K. Afsari, S. Gupta, M. Afkhamiaghda y Z. Lu, «Applications of collaborative industrial robots in building construction,» de *54th ASC Annual International Conference Proceedings*, 2018, pp. 472-479.
- [5] P. Poór, T. Broum y J. Basl, «Role of collaborative robots in industry 4.0 with target on education in industrial engineering,» de *2019 4th international conference on control, robotics and cybernetics (CRC)*, IEEE, 2019, pp. 42-46.
- [6] M. Z. Silva, T. Brito, J. Lima y M. F. Silva, «Industrial Robotic Arm in Machining Process Aimed to 3D Objects Reconstruction,» de *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, 2021, pp. 1100-1105.
- [7] Otelo SA, «Otelo Industrial Tooling Expert,» [En línea]. Available: <https://www.otelo.fr/>. [Último acceso: Junio 2022].
- [8] Universidad de La Coruña, «Laboratorio de Ingeniería Mecánica,» Universidad de La Coruña, [En línea]. Available: <https://lim.ii.udc.es/docencia/din-proind/docs/respuestas/p75.htm>. [Último acceso: Junio 2022]



© 2022 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).