

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VIBRACIONES AUTO-EXCITADAS (CHATTER) EN PROCESOS DE MECANIZADO, BASADO EN UN SENSOR ACÚSTICO.

Federico Fernández G., Rodolfo Haber H., Salvador Ros T.,

Instituto de Automática Industrial (CSIC)
Desvío Km. 22'800 N-III, La Poveda
28500, Arganda del Rey, Madrid.
Tel. (91)9711900, Fax (91)8717050

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más frecuentes en los varios procesos de mecanizado, tales como fresado, torneado, taladrado, etc., es la aparición de las vibraciones auto-excitadas que en la literatura se conocen como "chatter". Este fenómeno se origina con el paso del borde afilado de la herramienta de corte a través del material de la pieza que se está mecanizando, pudiendo alcanzar unos niveles de intensidad tales que se acelere el desgaste o provoque la rotura de la herramienta. Por otro lado, esto hace que el mecanizado de la pieza tenga un mal acabado, disminuyendo la productividad y la calidad. Por todas estas razones, cuando se aspire a niveles elevados de productividad se hace necesario dotar al sistema de sensores capaces de detectar la aparición de este fenómeno indeseable. Este trabajo muestra nuestras experiencias en la elección y ensayos de varios de tales sensores, con resultados muy satisfactorios en el uso de micrófonos para la detección del chatter.

LAS VIBRACIONES AUTO-EXCITADAS (CHATTER) Y SU DETECCIÓN

Aparición del chatter

Dos de las principales razones para la aparición del chatter en el fresado son la llamada regeneración de ondulaciones y la vibración forzada resonante [4], [6], [8]. La primera es la causa principal de las vibraciones auto-excitadas en el fresado. Como puede inferirse de la figura 1, cada diente de la fresa que pasa a través del corte, encuentra la superficie producida por el diente precedente. Dependiendo de la fase existente entre las ondulaciones sucesivas producidas por los desplazamientos de los dientes, la amplitud de la vibración puede aumentar o disminuir. Haciendo algunas suposiciones para simplificar, es posible desarrollar analíticamente un diagrama expresando la profundidad axial de corte a la cual el sistema es inestable (chatter) en función de la velocidad de giro, el así llamado diagrama del lóbulo de estabilidad, como es conocido entre los investigadores del corte de metales (figura 2). Puede probarse [6] que el valor límite para la profundidad axial de corte, está dado en la expresión (1)

$$b = -1/2.K_s \cdot \Re[G] \quad (1)$$

donde, b: profundidad axial de corte en el límite de estabilidad,

K_s : "rigidez de corte" para el material de la pieza de trabajo.

$\Re[G]$: parte real de la llamada función de transferencia orientada del sistema.

y la frecuencia de las vibraciones, f, puede calcularse según la expresión (2)

y la frecuencia de las vibraciones

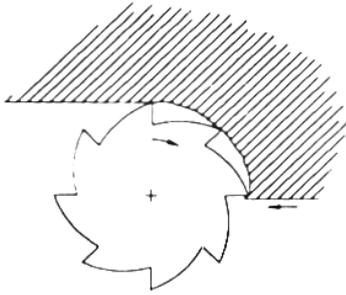


Fig. 1 Fresado

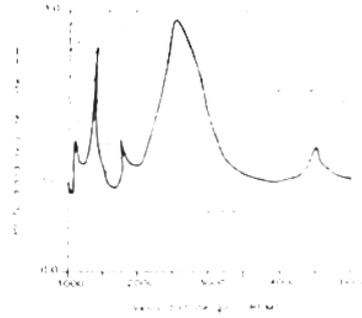


Fig. 2 Diagrama de lóbulo de estabilidad

$$f / nm = N + \epsilon / 2\pi \tag{2}$$

donde, n: velocidad de giro,

f: frecuencia de las vibraciones (chatter).

m: número de dientes de la fresa.

ϵ : desfase entre superficies de vibración sucesivas,

N: entero tal que $\epsilon/2\pi < 1$.

En tanto que, las vibraciones forzadas ocurren cuando la frecuencia de paso del diente se acerca a la frecuencia natural de las vibraciones del sistema formado por la máquina herramienta. Con el fin de evitarlo se han desarrollado técnicas para elegir la mejor velocidad de giro para alcanzar un compromiso entre estabilidad, chatter y la tendencia a producir vibraciones forzadas, pero en dicha selección se ha comprobado que presenta una fuerte dependencia de la configuración de la máquina, requiriendo personal muy calificado y un equipamiento muy costoso.

Detección del chatter

Las primeras investigaciones se orientaron al uso de sensores de esfuerzo especialmente aquellos cuyos funcionamiento se basa en principios piezoeléctricos [2]. Estos sensores tienen la ventaja de ser muy precisos, muy fiables y de gran resolución. Pero son de coste elevado y además interfieren con el proceso de mecanizado, ya que la pieza a mecanizar y la profundidad de corte, deben guardar ciertas proporciones respecto a la plataforma del sensor, sobre la que tiene que fijarse. Otra limitación es que su ancho de banda es relativamente limitado (<2 KHz).

Una alternativa al sensor de esfuerzo son los sensores de vibración o acelerómetros, mucho más baratos y de fácil implementación. Las prestaciones del acelerómetro son muy similares en cuanto a precisión, fiabilidad, e incluso interfiere mucho menos con el proceso, además de que su ancho de banda es bastante mayor, pudiendo llegar hasta los 30 KHz, pero tiene la desventaja de que se le debe ubicar en un cierto punto modal del conjunto pieza de trabajo-herramienta de corte, ya que la precisión de las medidas varía de un punto a otro. Además introduce señales procedentes de otras fuentes de vibraciones que se encuentran cerca del punto de medida, como rodamientos, engranajes, etc. Para mediciones apropiadas con los acelerómetros son necesarios al menos dos sensores orientados en dirección a dos ejes ortogonales en el plano de corte, ya que la herramienta puede vibrar en cualquier dirección.

Las investigaciones más recientes consideran el uso del sensor acústico como una alternativa adicional a los dos anteriores, ya que se considera que el sonido que se origina en el par pieza-herramienta de corte puede ser un indicador de la vibración en un proceso de corte [9], [2]. El micrófono tiene las mismas ventajas que los anteriores en cuanto a respuesta plana, sensibilidad, precisión, además de contar con la ventaja adicional de no interferir con el proceso a medir y ser independiente de la posición de los nodos modales. Sin embargo, los problemas asociados con el micrófono se refieren a fenómenos como la reverberación y el campo cercano.

EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Instalación experimental

El esquema de nuestra instalación experimental se muestra en la figura 3. El sistema consta de un centro de mecanizado vertical de consola fija modelo ANAK-MATIC-2000-CNC fabricado por la casa ANAYAK. Su cabezal tiene una potencia de 5,8 Kw con velocidades continuamente variables entre 70 y 5000 R.P.M. y posibilidad de cambio automático de herramientas. La velocidad de avance puede programarse desde los 5 hasta los 2000 mm./min. Este centro de mecanizado vertical está controlado por un control numérico CNC-8020M de la casa FAGOR.

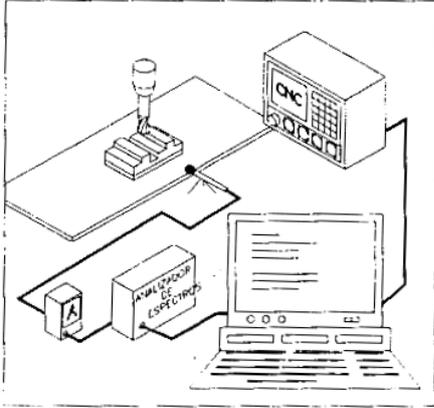


Fig. 3 Instalación de laboratorio

La monitorización del proceso es realizado usando un ordenador personal PC - AT compatible, a 50 MHz. Este PC controla un sistema de adquisición y procesamiento de datos con su correspondiente software de operación. El sistema de adquisición de datos es capaz de adquirir y procesar los datos en tiempo real en cuatro canales simultáneamente hasta 512 KHz, incluido el cálculo de las correspondientes Transformadas de Fourier y salidas gráficas para respuestas temporales y frecuenciales. Su ancho de banda es de 50 KHz lo que resulta totalmente adecuado, dado que incluye la banda de audio, 0 - 20 KHz, donde se sitúa el espectro de la señales frecuenciales de datos obtenidos en condiciones de mecanizado con la presencia de vibraciones.

El micrófono utilizado para realizar las mediciones es un BRUEL&KJAER modelo 4165 con su preamplificador 2639, es de 1/2" de diámetro del tipo de campo libre. Se ha elegido éste porque su respuesta es plana dentro de la gama audible y los micrófonos de este tamaño representan un excelente compromiso en términos de sensibilidad, rango de frecuencia y tamaño. Para los ensayos se conectaron además y de forma simultánea una plataforma de esfuerzos, dotada de sensores piezoeléctricos para los 3 ejes espaciales (incluidos los respectivos amplificadores) y un acelerómetro, situado en la mordaza de la máquina.

Experimentos y resultados

Nuestro grupo desarrolló ensayos masivos (más de 100), con diferentes condiciones de mecanizado (velocidades de avance, de giro y profundidades de corte). También se usaron diferentes herramientas de corte: diámetros 20 y 25 mm., con 2,3,4,5 y 6 dientes. El material mecanizado ha sido duraluminio y el tipo de mecanizado ha sido el ranurado. Con el fin de discriminar el ruido del chatter de otras fuentes como la estructura de la máquina o ciertas partes móviles de la misma. Se ha realizado el promediado lineal de la señal, en tiempo real. La trama de señal está compuesta de 4096 puntos y se utilizó una ventana tipo Hanning.

En la figura 4 se muestran dos de las respuestas típicas para ambas condiciones. obtenidas por medio del sistema antes descrito. Merece destacarse que la amplitud en volts de las oscilaciones es 5 veces superior cuando hay chatter.

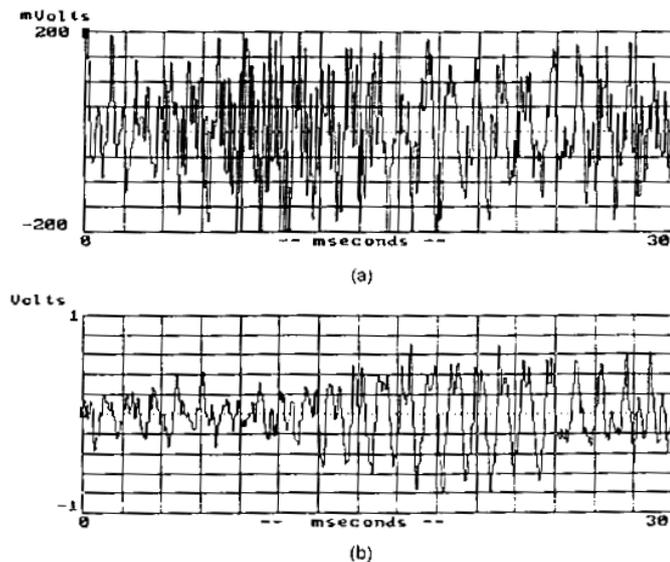


Fig. 4 Respuestas temporales de la señal acústica: (a) sin chatter, (b) con chatter

ESPECTROS DE FRECUENCIA

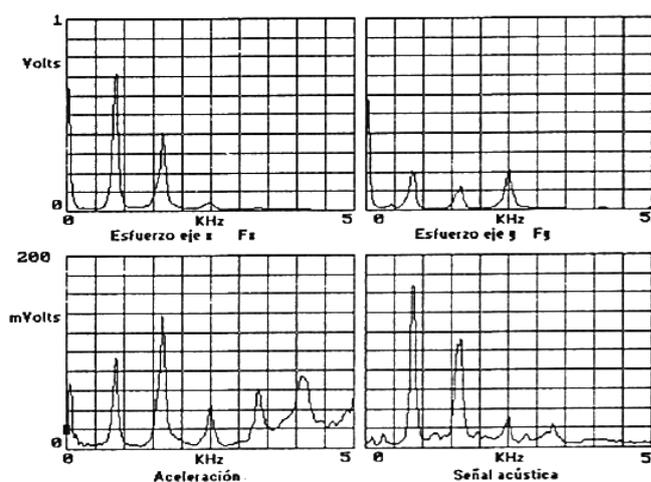


Fig. 5 Espectros de frecuencia de las señales de los sensores de esfuerzo, acelerómetro y acústica

flexibilidad en su instalación, muy propios para condiciones reales industriales. La frecuencia del modo natural principal de las vibraciones, obtenido en los ensayos resultó ser de 781,25 Hz. En la Figura 5 se muestran los espectros de frecuencia correspondientes a las señales de salida de los 3 sensores: esfuerzo (ejes x e y), acelerómetro y micrófono.

Evaluamos por tanto de satisfactorios los resultados del empleo del micrófono en calidad de sensor y nos disponemos a incluirlo dentro de los medios de medición del sistema jerárquico de control del proceso de mecanizado, tarea principal de nuestro grupo. Particularmente prevemos su empleo en la determinación de la aparición (existencia e intensidad) del chatter, así como la adopción automática de acciones correctoras sobre las variables del proceso, a fin de erradicarlo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]Y. Altintas, P. K. Chan, "In-Process Detection and Suppression of Chatter in Milling". Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, N° 3, pp. 329 - 347, 1992.
- [2]T. Delio, J. Tlusty, S. Smith, "Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control". Journal of Engineering for Industry. Vol. 114, pp. 146 - 157, May 1992.
- [3]R. Du, M. A. Elbestawi, B. C. Ullagaddi, " Chatter Detection in Milling Based on the Probability Distribution of Cutting Force Signal", Mechanical Systems and Signal Processing, 1992, pp. 345 - 362.
- [4]R. I. King, "Handbook of high speed machining technology", Ed. Chapman and Hall, New York, 1985.
- [5]S. C. Lin, M. R. Hu, "Low Vibration Control System In Turning", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 32, N° 5, pp. 629 - 640, 1992.
- [6]S. Smith, J. Delio, "Update on High Speed milling dynamics", Intelligent Manufacturing. ASME, WAM, 1987, pp. 153 - 165.
- [7]S. Smith, T. Delio, "Sensor-Based control for Chatter-Free Milling by Spindle Speed Selection", Symp. on Control Issues in Manufacturing. DSC - Vol. 18, 1989, ASME, WAM, pp. 107-114.
- [8]J. Tlusty, F. Ismail, "Special aspects of chatter in milling", Journal of vibration. acoustics, stress, and reliability in design. Vol. 105, pp. 24 - 32, January 1983.
- [9]E. J. Weller, B. Weichbrodt, "Listen To Your Tools-They're Talking To You". The Tool and Manufacturing Engineer. July 1967, pp. 24 - 28.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Dado que se incluyeron ensayos con otros dos tipos de sensores, pudimos comparar su rendimiento. Al menos en principio, todos han mostrado respuestas similares en la detección de las vibraciones del centro de mecanizado. También se hicieron patentes las ventajas y desventajas de cada uno, antes mencionadas. Puede mencionarse, por su interés, la flexibilidad en la ubicación física del acelerómetro, con la mejor solución en la base de la mordaza. Por su parte, el micrófono no presentó ningún problema a la hora de realizar las mediciones. Los fenómenos de interés: la existencia, intensidad y frecuencia propia del chatter, fueron detectados con absoluta nitidez y sin diferencia con los otros dos sensores. La comparación favorece, con mucho, al micrófono, por su reducido coste, además de la simplicidad, robustez y