

Esquema de la presentación

- Objetivos y aportaciones de la tesis
- Máquinas-Herramientas masivas
- Máquinas-Herramientas ligeras
- Conclusiones

Objetivo General de la tesis

- Objetivo general: drástica reducción (70 %) de la masa en componentes estructurales de máquinas-herramientas
- reducción del consumo de energía, alrededor del 30 %,
- cambio de paradigma: pasar del actual mecanismo rígido y masivo, con un alto consumo de energía, a la estructura ligera elástica.
- máquinas con control de flexibilidad y, por tanto, con necesidades de energía mucho más bajas.
- un 80 % de la masa total de una máquina herramienta tiene como función obtener precisión, mientras que sólo el 20 % restante es masa útil para cumplir los requisitos de la cinemática de la máquina.

- Primera vez en considerar un diseño de una Máquinas-Herramienta para reducir el consumo energético
- Tesis dentro del proyecto Europeo NMP2 [1, Ecofit]. Por primera vez se va a fabricar una máquina diseñada considerando flexibilizar , eliminar masa, en ciertos componentes.
- Esta tesis estudia controladores necesarios para Maquinas-Herramienta ligeras.
- Existen antecedentes de manipuladores tipo Gantry, robot flexibles, y maquinaria especial.
- Primera Máquinas-Herramientas ligera destinada a cortar piezas metálicas
- Se van a validar distintos procedimientos de control aplicados en otro tipos de robots y manipuladores y a diseñar un controlador en concreto que se aplicará a la máquina-herramienta que se esta fabricando



Figura: Axia

- Fresadora comercial de columna móvil
- Rediseño en los husillos para la reducción de inercia
- Motores menos potentes
- En el carnero se emplearan materiales más ligeros: (hormigones poliméricos, sandwich)

- Considerando el consumo eléctrico para una movimiento patrón
- Intensidad de la vibración residual
- Robustez frente a cambios en las frecuencias naturales
- Respuesta frente a perturbaciones

Vibraciones en el acoplamiento motor carga

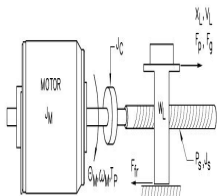


Figura: Dibujo de un husillo

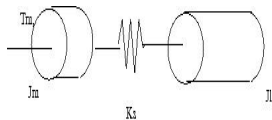


Figura: Acoplamiento motor y carga

- La unión entre motor y carga se es similar a un acoplamiento de dos inercias equivalentes y una rigidez equivalente.



$$\begin{aligned} T_m &= J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} - K_s (\theta_m - \theta_l) \\ 0 &= J_l \frac{d^2 \theta_l}{dt^2} + K_s (\theta_m - \theta_l) \end{aligned} \quad (1)$$

- oscilación en función de la relación de K_s con respecto a T_m , J_m y J_l
- Vibraciones

Caracterización de las vibraciones

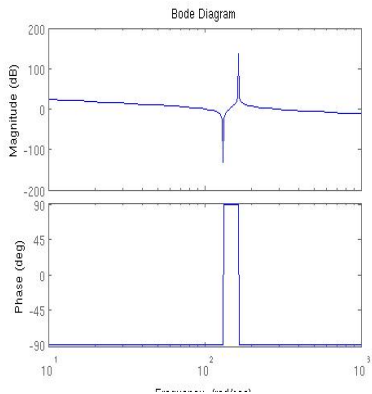


Figura: Diagrama de Bode Velocidad Par

- Teorema de bode: Para un sistema lineal con una entrada a una frecuencia dada la respuesta estacionaria tiene la misma frecuencia, pero distinta fase y amplitud
- Con una entrada de par y la salida velocidad se obtiene el diagrama que representa la vibración.
- se observan vibraciones: resonancia y anti-resonancia

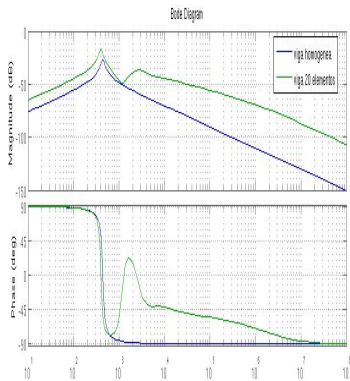


Figura: Flexibilidad de una Viga

- Las vibraciones también se deben a la flexibilidad de los materiales con los que se construye la máquina-herramienta
- Debido a la flexibilidad del material surgen resonancias a la frecuencia natural de la viga
- Las características varían con las propiedades locales de los materiales

Enfoques del control de flexibilidad

- Se deben considerar tanto la arquitectura de control como la complejidad del sistema
- Complejidad del sistema
 - número de elementos
 - importancia de la contribución no lineal
- Arquitecturas de control
 - comando lazo abierto
 - control en lazo cerrado

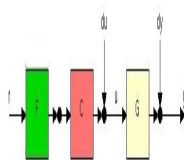


Figura: lazo abierto

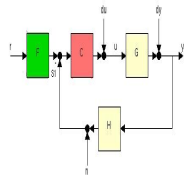


Figura: Lazo cerrado

Tratamiento de las vibraciones en las máquinas herramienta comerciales

- Se cancelan las vibraciones mediante un control el lazo cerrado
- Un controlador C genera la inversa de la función de transferencia
- Problemas:
 - Energeticamente no es viable, requiere un par muy grande a alta frecuencia
 - Mecanizado produce vibraciones no modeladas a altas frecuencias sumarían a la acción de control
 - Poco robusto: si la resonancia no se modela adecuadamente

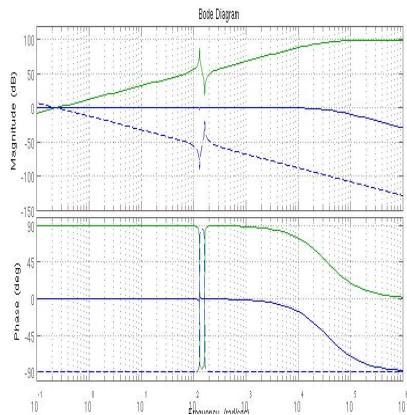


Figura: Diagrama de Bode ancho banda grande

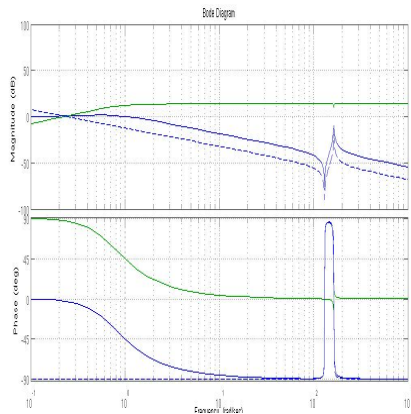


Figura: Diagrama de Bode Velocidad Par

- No tiene los Problemas del gran ancho de banda
 - Energeticamente viable produce par pequeño a alta frecuencia
 - Robusto en el Mecanizado
 - Robusto frente a la incertidumbre paramétrica en la máquina
- Baja respuesta dinámica de la máquina
- Requiere limitar en frecuencia las consignas de entrada

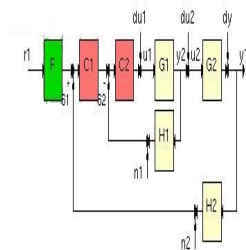
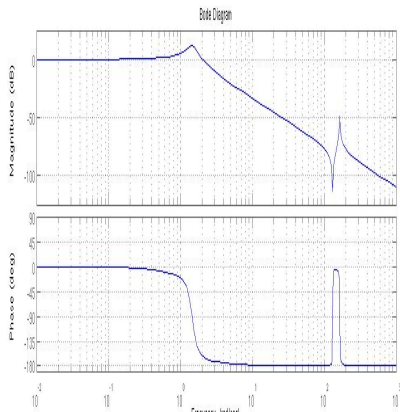


Figura: Doble lazo en cascada

- Se añade un lazo exterior para controlar la posición
- La configuración es la siguiente
 - G1 acoplamiento motor carga
 - G2 encoder medida de la posición
 - C1 controlador Velocidad
 - C2 controlador Posición

Diagrama de frecuencia del control de posición



- Surge un pico de resonancia antes que la anti-resonancia
- Se mantiene la resonancia anti-resonancia del acoplamiento motor carga
- Frecuencia máxima limitada por la primera resonancia

Figura: Diagrama de Bode del controlador de posición

Generar la trayectoria con bajo ancho de banda

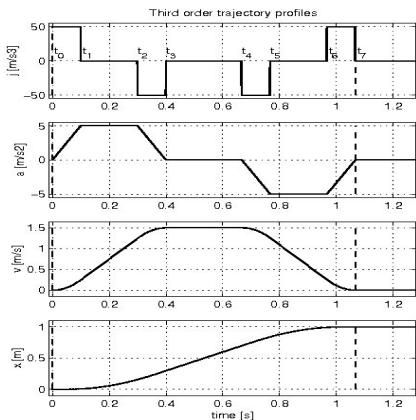


Figura: Diagrama de Bode del controlador de posición

- Se genera la trayectoria utilizando el jerk, derivada de la aceleración, en lugar de la aceleración
- una esquinase descompone en frecuencia con contribuciones a todas las frecuencias
- el perfil de posición es muy suave
- se utiliza una frecuencia rango de frecuencia es útil

Limitación del contenido en frecuencia de la entrada

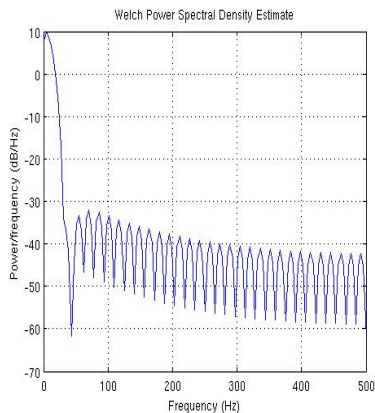


Figura: espectro de un perfil de

- mediante generación del perfil de aceleración limitado en el contenido en frecuencia
- La extensión a un curva de 3D por medio de trayectorias paramétricas $r = r(s)$ deforma que $\dot{r} = \dot{s}\nabla r$
- - velocidad del camino limitado en el contenido en frecuencia
 - trayectoria 3D descrita por splines con continuidad de C2
- Las aristas inducen vibraciones, por lo que se necesitan trayectorias de unión de 2 tramos que no inducen vibraciones

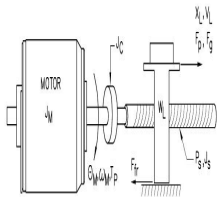
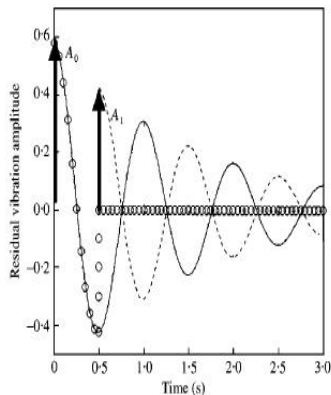


Figura: Husillo

- objetivo obtener mejor respuesta a los efectos del mecanizado o poder utilizar aceleraciones más altas
- desplazar la frecuencia de anti-resonancia y resonancia
- dado $w_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{K}{J}\right)}$
- Para incrementar w_a se necesita incrementar K y o reducir J
- Pero incrementar K significa incrementar J .
- Por tanto, se obtiene un incremento de w_r a costa de incrementar J
- Se incrementa la energía



- lazo abierto, sin control del movimiento que se comanda
- Efectivo para eliminar vibraciones, [2, Smith] Posicast pulsos intercalados en el tiempo
- Solución más robusta a la incertidumbre en frecuencia de resonancia 1989 Singer and Seering
- Posteriormente se desarrolla la teoría de los Time delay Filters
- No es adecuado para el mecanizado se necesita más robustez para anular los efectos de las fuerzas de corte

Figura: Principio del Input Shapping

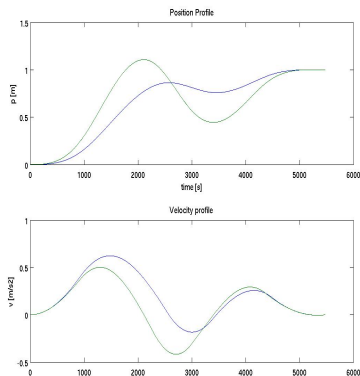


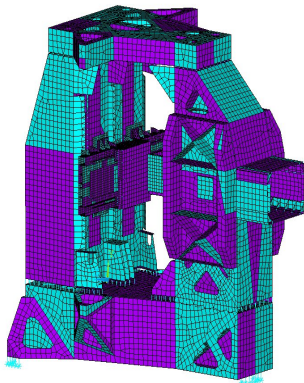
Figura:

- se plantea como un problema de optimización del par requerido
- Como la superposición de N funciones escalón con variable independiente la amplitud escalón A_i y el tiempo de aplicación t_i
- $u(t) = \sum_{i=0}^N A_i S(t - t_i)$
- Si el par $u(t)$ se aplica sobre el sistema mecánico G se cumple con las restricciones de
- se alcanza la posición deseada $x(t_f) = x_f$
- las vibración residual se estabiliza $v(t_f) = 0$

- lazo cerrado, propiedad de reaccionar a la incertidumbre por considerar medidas de la respuesta del sistema
- la robótica flexible se basa en el conocimiento del modelo y la adecuación del modelo con la técnica de control
- técnicas de control: Control robusto, control adaptivo, control según modelo interno, control de estructura variable[4].
- modelización de flexibilidad, fundamentalmente analítico
- se han obtenido buenos resultados para robots flexibles simples, pero el método no es extensible a complejos

1

ELEMENTS



- modelización por elementos finitos (FEM) y modelos multi-cuerpo
- Método numérico de difícil interpretación
- No es manejable numéricamente en un controlador

Figura: FEM de una máquina

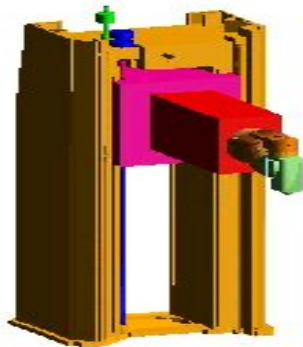


Figura: Multi cuerpo de Axia

- técnica de control feed-forward con el inverso de la planta cancela las vibraciones
- si la reducción de masa es grande la inversa es inestable
- separación de la parte estable e inestable
- se trunca el modelo en los modos de vibración más importantes obtenidos en el modelo FEM
- la adaptación se realiza con medidas adicionales de aceleración
- la dependencia del conocimiento

Generación de una trayectoria de baja excitación

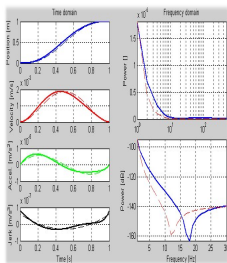


Figura: Perfiles de baja excitación

- Una trayectoria descrita por una spline orden 3
- Problema de optimización
 - Optimiza tiempo de ejecución
 - el espacio de búsqueda: J_i, t_i
 - 2N coeficientes
 - restricciones: el punto final, punto inicial, sin vibración residual

Arquitectura	Consumo	V. Residual	Robustez
lazo abierto Inversa baja excitación			

- La viabilidad de las máquinas flexibles se restringe a la reducción de la inercia de los husillos
- La reducción de emisión de CO_2 es un tema reciente que puede tener gran importancia en el futuro



Ecofit.



O.J.M. Smith.

Posicast control of damped oscillatory systems.

Proceedings of the IRE, 45:1249–1255, 1957.



Michael Kenison and William Singhose.

Concurrent design of input shaping and proportional plus derivative feedback control.

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 124:398–405, 2002.



H.-H. [1] Lee and J. [1] Prevoost.

A coupled sliding-surface approach for the trajectory control of a flexible-link robot based on a distributed dynamic model.

International Journal of Control, 78:629–637, June 2005.