

Precisión en mecanizados aeronáuticos

Desarrollos de IK4-IDEKO para la fabricación de trenes de aterrizaje y los discos de turbina de motores

En los últimos años se ha detectado que los fabricantes orientados al segmento industrial de aplicación-pieza en sectores de alta exigencia son los que han soportado mejor la crisis. Por este motivo, este artículo plantea desarrollos que serán beneficiosos para el global de su oferta, pero se centran en tecnologías para acceder a aplicaciones concretas de gran impacto dentro del sector aeronáutico, como son la fabricación de trenes de aterrizaje y los discos de turbina de motores de aviación.

El artículo recoge el desarrollo de tecnologías en el ámbito de la fabricación y la máquina-herramienta y, en especial, en los procesos de torneado y fresado/mandrinado, con los cuales se consigue una gran precisión en un amplio margen de condiciones de operación. El objetivo es cubrir las elevadas exigencias del sector aeronáutico y, particularmente, las de los fabricantes de piezas de motor y elementos estructurales de fuselaje y tren de aterrizaje.

La primera aplicación que se ha definido tiene como objetivo la de fabricación de discos de turbina. Se trata de una pieza muy compleja y crítica para la eficiencia de los motores de aviación, que requiere de varias etapas de fabricación.

La segunda aplicación es la fabricación de componentes estructurales de avión, con especial interés en el tren de aterrizaje, que se compone de varias piezas con cada vez mayores exigencias de fabricación. Este es un elemento crítico de los aviones, por las exigencias mecánicas y por su elevado volumen y peso, por lo que el trabajo de mejorar su diseño es constante y los procesos de fabricación cada vez más exigentes. Se requieren máquinas capaces de realizar mandrinados y fresados en cinco ejes con la máxima precisión y son los líderes tecnológicos los que ofertan máquinas para estas aplicaciones.

El centro tecnológico IK4-IDEKO ha detectado la necesidad de avanzar en la mejora de la compensación de dilataciones térmicas y su integración en máquina. La precisión requiere soluciones complementarias para estos dos problemas.

Con esta estrategia, se conseguirán grandes mejoras en la precisión de la máquina. También se capacitará al usuario para verificar la precisión del equipo, siempre que lo estime necesario, y para recalibrarlo sin necesidad de recurrir a servicios externos. De esta forma se evitarán defectos en la fabricación por cambios con el tiempo, que son inevitables en cualquier máquina, y se ofrece una respuesta rápida que evite paradas de máquina.

El enfoque técnico del proyecto encaja con la tendencia internacional a aumentar las prestaciones de las máquinas añadiendo sistemas ciberfísicos, que combinan componentes mecánicos con controles que manejan la información adquirida por los sensores del sistema, con la misión de monitorizar y controlar las máquinas para mejorar su funcionamiento y añadir funcionalidades. La monitorización continua de la precisión de la máquina durante su vida útil encaja también dentro de la tendencia Industria 4.0 hacia el desarrollo de sistemas de fabricación más inteligentes.



Monitorización, calibración y compensación de errores térmicos



Sistema de medición de ejes giratorios (izquierda) ball bar (derecha) medidor sobre esfera

En las experiencias previas, IK4-IDEKO, ha identificado dos motivos por los que la compensación de errores no ha conseguido cambiar el paradigma de diseño para precisión en máquina herramienta, como ya lo hizo en las máquinas de coordenadas.

- *Menor repetitividad de la máquina durante su vida útil.* Las máquinas-herramienta varían su comportamiento más en el tiempo que las máquinas de coordenadas, debido principalmente al efecto de las fuerzas de corte, que producen desgastes de componentes. Por ello, una compensación de errores aplicada en la puesta a punto de las máquinas pierde efectividad con el tiempo.
- *Errores vinculados al calentamiento y a las dilataciones térmicas.* El esfuerzo de mecanizado en máquina-herramienta genera una cantidad variable de calor dentro de la máquina, produciendo variaciones y gradientes térmicos durante su procesamiento, generando dilataciones que son en general la principal fuente de error en máquina-herramienta. Estos efectos son compensables, pero necesitan de un conocimiento muy avanzado del comportamiento de la máquina para poder compensarlos. Este comportamiento también es variable durante la vida útil de la máquina, principalmente por desgaste de componentes, variación de precargas, etc.

FABRICACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE AVIACIÓN

Las piezas estructurales como el tren de aterrizaje y los discos de turbina tienen exigencias de máxima precisión en operaciones como el torneado, el fresado en cinco ejes y el mandrinado. Son piezas críticas en el funcionamiento y seguridad del avión, y cada vez se les añade más complejidad y exigencia, como la reducción de peso para el ahorro de combustible, que lleva a formas más complejas.

Existen varios fabricantes que ofrecen máquinas para este tipo de mecanizados. Todas ellas tienen arquitecturas de máqui-

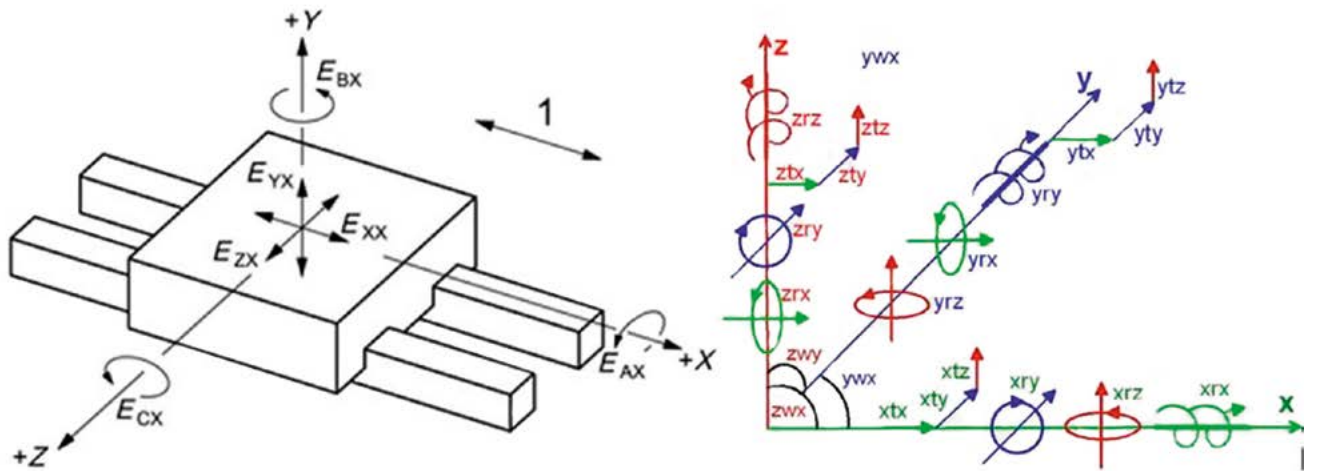
na similares, combinando fresado de cinco ejes y mandrinado en una sola máquina, e incorporan tecnologías avanzadas para asegurar la máxima precisión, como guiados hidrostáticos, rasquetado manual de superficies de guiado, estructuras simétricas, sistemas de refrigeración avanzados, etc. Estas tecnologías aseguran una alta precisión de máquina, pero requieren desarrollos e integración muy costosos.

La conclusión principal de este primer análisis es que los fabricantes de referencia en las aplicaciones objetivo han ganado esta posición al desarrollar máquinas que alcanzan altos niveles de precisión en base al uso de soluciones tecnológicas avanzadas, complejas y de alto coste, tales como los guiados hidrostáticos con controles activos para compensar deformaciones, los sistemas de refrigeración muy potentes para minimizar las variaciones térmicas en máquina o las arquitecturas de máquina que buscan la simetría, pero que requieren mucho más material, entre otras. Apuestan por tecnologías de alto coste de desarrollo e implantación, pero al no haber alternativa en ese nivel de precisión, el mercado acepta estos costes de máquina.

La mejora de la precisión en máquina-herramienta no solo se puede conseguir con soluciones complejas como las mencionadas anteriormente. Un enfoque alternativo es el de la compensación de los errores de la máquina (compensación por software), en el que se buscan máquinas en las que se admite un cierto nivel de error de precisión, pero en las que se busca la máxima repetitividad. Al ser los errores repetitivos, si se consiguen medir con precisión suficiente, se pueden implantar correcciones en el CNC y así conseguir mejoras importantes en la precisión de la máquina.

Este enfoque surgió primero en las máquinas de medición de coordenadas (MMC). Estas máquinas son en cierto modo similares a las máquinas-herramienta, solo que sin las exigencias derivadas de las fuerzas de corte, como la alta rigidez, el calor y las dilataciones generadas, pero con exigencias mayores de precisión.

Durante el siglo pasado, el desarrollo de estas máquinas estuvo basado en una continua mejora en la precisión mecánica



Izquierda errores de eje lineal, derecha 21 errores en máquina 3 ejes lineales

de la máquina, requiriendo estructuras más rígidas, guiados con menos rozamiento y accionamientos más precisos. Esto fue llevando a soluciones cada vez más complejas que incrementaban notablemente el coste de la máquina, con lo que surgió un enfoque alternativo, basado en la compensación de errores por software, que permitía diseños de máquina más sencillos gracias a la calibración y compensación de los errores de precisión en el control de movimientos de la máquina, llevando a máquinas de mayor precisión y menor coste.

Este enfoque se ha intentado trasladar a la máquina-herramienta adaptándose a sus requerimientos específicos. La principal diferencia es la relevancia que adquieren en máquina-herramienta las dilataciones térmicas, que son en general la principal fuente de error en estas máquinas. La compensación de dilataciones térmicas sigue el mismo enfoque que la de errores geométricos, pero su implantación es diferente, por lo que se analizan en el artículo por separado.

COMPENSACIÓN DE ERRORES TÉRMICOS

Los procesos de mecanizado requieren en general consumos altos de potencia para generar movimiento de piezas o herramientas y altas fuerzas de corte, con lo que parte de esa potencia se convierte en calor en rodamientos, engranajes, motores, etc., generando variaciones de temperatura en la estructura de la máquina, y con ello, dilataciones y variaciones en la posición de la herramienta.

Se distinguen tres estrategias para minimizar estos errores de origen térmico:

- Reducir variaciones de temperatura por medio de sistemas de refrigeración de máquina
- Minimizar dilataciones generadas por variaciones de temperatura, usando, por ejemplo, estructuras simétricas respecto a la herramienta para que las dilataciones se compensen.
- Compensar las dilataciones generadas por medio de modelos integrados en máquina.

Los fabricantes de referencia en precisión apuestan principalmente por las dos primeras estrategias, recurriendo a circui-

tos de refrigeración complejos integrados hasta las fuentes de calor, equipos de refrigeración potentes, estructuras simétricas que minimizan dilataciones, etc.

Como ya se ha comentado, esta solución permite obtener muy buenas precisiones de máquina, pero tiene un coste muy elevado, en cuanto a complejidad de diseño de máquina, coste de material añadido de estructura, equipos de refrigeración, etc.

La tercera opción, de compensación de las dilataciones estimadas, tiene el potencial de mejorar mucho la precisión de la máquina, y con un coste de desarrollo e implantación mucho menor, y es la que se pretende potenciar en este proyecto.

Al ser la principal causa de errores de precisión, ha habido un trabajo de investigación muy extenso para el desarrollo de soluciones de compensación de dilataciones, con muchas alternativas propuestas, aunque solo las más sencillas han llegado a la implantación industrial. El proceso general de la compensación se puede dividir en tres fases.

El artículo presenta dos aplicaciones: la primera tiene como objetivo la de fabricación de discos de turbina, pieza muy compleja y crítica para la eficiencia de los motores de aviación, que requiere de varias etapas de fabricación; la segunda es la fabricación de componentes estructurales de avión, con especial interés en el tren de aterrizaje, que se compone de varias piezas con cada vez mayores exigencias de fabricación

1. Monitorización

Como las dilataciones y las temperaturas que las originan varían de continuo durante la operación de la máquina, se han de monitorizar variables relevantes que permitan identificar el estado térmico de la máquina, para a partir de ahí estimar los errores. El enfoque más común es distribuir sensores de temperatura en la máquina, para conocer en tiempo real la temperatura de los elementos estructurales que se consideren críticos. También, en algunos casos, se ha propuesto el uso de parámetros del proceso, como la velocidad de giro del cabezal. El aspecto clave en este tema es identificar los puntos óptimos donde medir las temperaturas, que serán los que mejor correlacionados estén con las dilataciones que se midan.

2. Calibración

El punto central de la compensación es la obtención de un modelo matemático que relacione los datos de la monitorización de máquina con las dilataciones estimadas. Esto implica la selección de una estructura matemática que pueda correlacionar bien las dilataciones con las temperaturas, y la definición de uno o varios ensayos en máquina con los que identificar los parámetros del modelo.

En cuanto a la estructura matemática, se han propuesto una gran variedad de modelos, desde modelos de regresión múltiple, funciones de transferencia, redes neuronales, etc., alcanzando niveles de complejidad muy grandes en algunos casos.

La identificación de los parámetros del modelo se realiza en base a ensayos de máquina, normalmente realizados girando el cabezal en vacío a diferentes velocidades, que suele ser la principal fuente de calor, y midiendo las dilataciones y las temperaturas. La norma ISO 230-3 define ciertas condiciones de ensayo de máquina que pueden ser utilizables para estos ensayos de caracterización, aunque no tienen por qué ser las óptimas. La interacción con otros efectos como la temperatura ambiente, circuitos de refrigeración, etc. complican la selección de un ensayo apropiado, más aun considerando que los procesos térmicos son muy lentos y que las máquinas tardan horas en estabilizarse, con lo que la cantidad de pruebas a realizar estará limitada.

3. Compensación

Una vez generado un modelo matemático que simule la relación entre las temperaturas de máquinas y las dilataciones, el paso final es implementarlo en máquina de modo que se calculen las dilataciones estimadas de forma continua, y se aplique la corrección correspondiente en el posicionamiento de la máquina. Los principales fabricantes de CNCs incluyen ciertas funciones de compensación de dilataciones térmicas, pero se basan en modelos muy simples, por lo que no son útiles para el propósito de este proyecto. Es necesario implementar una función propia con la matemática del modelo, lo cual es posible gracias a nuevas herramientas de programación que han implementado los CNCs, que permiten que el usuario aplique funciones avanzadas propias en el control.

IK4-IDEKO viene trabajando en la compensación de dilataciones térmicas durante muchos años. Tras este trabajo se ha llegado a las siguientes conclusiones principales:

- El primer elemento clave para una buena compensación es acertar con la selección de los puntos donde se instalan sondas de temperatura. Se ha observado que cuanto mejor es la selección de posiciones, menor resulta la complejidad del modelo para conseguir una buena caracterización y mejores resultados se pueden obtener.
- Los modelos matemáticos más sencillos son los más robustos y los que mejor extrapolan el comportamiento entre el ensayo de caracterización y el funcionamiento real de la máquina, lo que resalta la importancia del punto anterior.
- Para aplicaciones de ultraprecisión no es suficiente con analizar la influencia del calor generado por el giro del cabezal y hay que considerar efectos como la temperatura ambiente o el circuito de refrigeración. Esto añade complejidad al ensayo de caracterización, ya que hay que conseguir analizar de forma independiente todos los efectos manteniendo un tiempo de ensayo reducido.
- La imposibilidad de cablear sondas de temperatura en los ejes giratorios presenta una limitación muy importante para la precisión, por lo que es necesario buscar alternativas, bien colocando sondas inalámbricas (complicado en ejes rápi-



Izquierda: Pieza de tren de aterrizaje, derecha disco de turbina de motor de aeronáutica

dos), bien con modelos que estimen estas temperaturas con datos de proceso, como las velocidades de giro o la potencia en el motor.

- El comportamiento térmico de las máquinas varía con el tiempo –por el desgaste de los componentes que incide en los niveles de precarga, principalmente– lo que puede llevar a que el modelo de compensación pierda eficacia. Por este motivo, en aplicaciones de ultraprecisión, es necesario un programa de recalibraciones de máquina periódicas.

COMPENSACIÓN DE ERRORES GEOMÉTRICOS

Los errores geométricos son considerados segundos en relevancia tras las dilataciones térmicas, aunque se vuelven dominantes cuando se controlan o se compensan las dilataciones térmicas. En el caso de mecanizados en cinco ejes los errores geométricos son más relevantes aún, ya que cualquier error en los ejes angulares se amplifica con la distancia a la herramienta generando desviaciones grandes.

Los errores geométricos se consideran variables únicamente con la posición de los ejes de la máquina, por lo que no es necesario monitorizar otras variables, como en el caso anterior con las temperaturas. La calibración de los errores geométricos suele considerar por separado los errores de los ejes lineales y de los ejes rotativos.

1. Errores geométricos de ejes lineales

Para la calibración de los errores en volumen de los ejes lineales se distinguen principalmente tres métodos de medición que se presentan a continuación. El modelo matemático es independiente de los sistemas de medición.

Patrones calibrados

Esta es la estrategia aplicada en el origen y la más común en máquinas de medición por coordenadas. Se basa en realizar mediciones con la máquina de diferentes características de una pieza, colocando ésta en diferentes posiciones repartidas por el espacio de trabajo de la máquina. Estas mediciones están afectadas por los errores de la máquina y, al compararlas con las

mediciones reales, se pueden extraer los errores de los ejes ajustando estos datos a un modelo matemático. Requiere un patrón muy estable y es normalmente un proceso lento y con mucha intervención de operario, pero puede alcanzar precisiones muy altas.

Ball bar

Se trata de un sistema de medición que une la mesa de trabajo con el cabezal, y genera diversos movimientos, normalmente circulares en los que en una máquina sin errores la longitud del ball bar no debiera variar, y se registra la variación en la longitud de este, que se utiliza como medida del error de la máquina y se puede ajustar a un modelo paramétrico de errores. La mayor limitación es que el volumen de trabajo analizable se limita a la longitud del ball-bar, que suele ser pequeño.

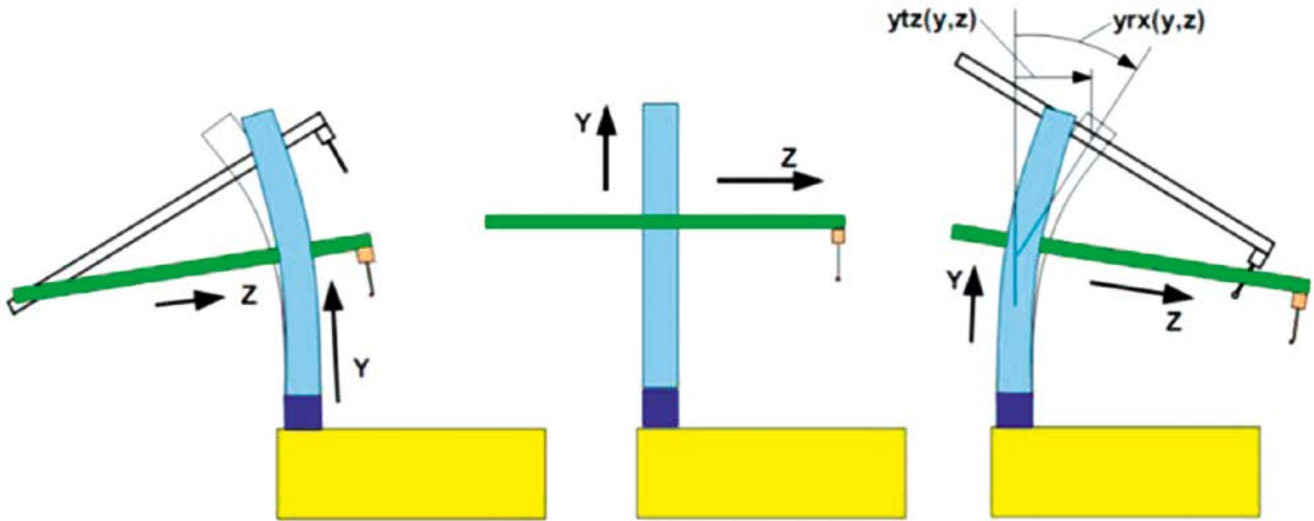
Laser tracker

Se han desarrollado sistemas de medición por interferómetro láser que hacen seguimiento automático de un reflector montado en la máquina. En el modo convencional de uso, se utiliza la medición del láser y de los ángulos de movimiento para el seguimiento, y se obtienen directamente las coordenadas de cada punto de medición. La precisión suele estar limitada a decenas de micras, pero se ha desarrollado un sistema de medición por multilateración que combina cuatro mediciones desde posiciones diferentes para evitar el uso de los ángulos, y que consigue precisiones cercanas a la micra, siempre que se controlen bien las condiciones ambientales que afectan al láser.

Prácticamente todas las aplicaciones de compensación de errores geométricos se basan en el mismo tipo de modelo, que coincide con lo propuesto en la norma ISO 230, en la que se definen seis componentes de error para cada eje (posicionamiento, rectitud y angular), y errores de perpendicularidad entre los ejes que se concatenan con matrices de transformación cinemática. El modelo es el mismo, aunque el modo de obtención es diferente en función del método de medida utilizado. Este modelo es además fácilmente implementable en el control de la máquina.



Calibración por patrones calibrados (izquierda), ball bar (centro), laser tracker (derecha)



Efecto de flexibilidad de máquina sobre errores geométricos

2. Errores geométricos de ejes rotativos

Los errores en ejes rotativos son especialmente relevantes en máquinas de dimensión media y grande, ya que su influencia en el error de la máquina se amplifica con la distancia. Por ello, también ha habido un amplio trabajo en la compensación de estos errores. También aquí hay alternativas en la medición, pero ajustando a un modelo común. En este caso, la norma de referencia para la medición de errores es la ISO 10791.

Ball bar

El mismo elemento mencionado para los errores geométricos también se está utilizando en los últimos años para la medición de ejes angulares, realizando movimientos de giro y comparando el radio medido con el esperado.

Medición sobre esfera

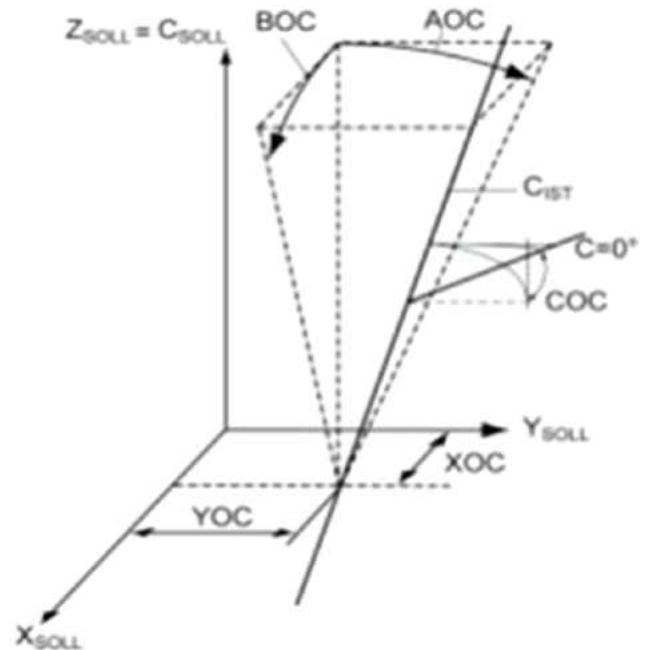
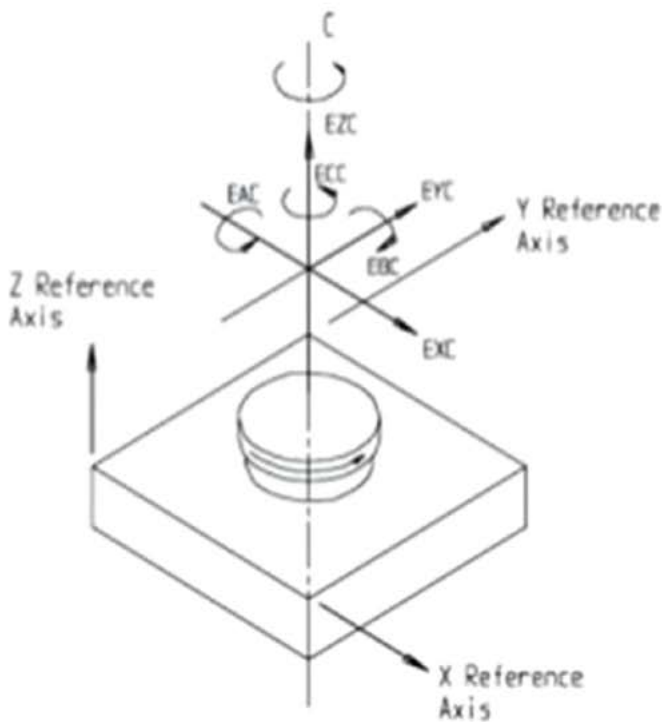
En este caso se realizan mediciones contra una esfera de precisión, realizando movimientos de los ejes giratorios, y midiendo la posición de la esfera con un medidor instalado en la máquina. Se utiliza típicamente el palpador que suelen incorporar las máquinas para medir la pieza, aunque por su lentitud están apareciendo soluciones de medición de esfera sin contacto que miden mucho más rápido.

El modelo para ejes giratorios se presenta a continuación, según se define en la ISO 230.

En las aplicaciones comerciales de calibración de ejes giratorios, hay que destacar que únicamente se corrigen errores en localizaciones de centros de giro, lo que corrige la mayor parte del error. Identificar y compensar el resto de errores requeriría un mayor número de puntos de medición y un ajuste más complejo.

IK4-IDEKO ha trabajado durante años en estos temas de compensación de errores geométricos, tanto a nivel de proyectos de investigación, como con implantaciones particulares en el mercado. Tras esta experiencia, estas son las conclusiones principales a las que se ha llegado:

- En la compensación de ejes lineales, las soluciones basadas en patrones calibrados y en láser con multilateración permiten cumplir las especificaciones en máquinas de ultraprecisión. Son sistemas que se pueden implementar en la puesta en marcha de la máquina, pero necesitan de equipos de muy alto coste (láser) y que requiere de personal especializado (en ambos casos), por lo que el usuario de la máquina nunca tiene medios de verificación y recalibración de la máquina, y le hace dependiente de servicios externos. Además, las soluciones existentes no son directamente integrables en máquina. Esto resulta en una solución que no es del gusto de los clientes, lo que ha frenado la aplicación de la compensación de errores en aplicaciones de ultraprecisión.
- Prácticamente todas las aplicaciones encontradas se basan en considerar los ejes de máquina como idealmente rígidos, lo que facilita el cálculo y es una buena aproximación, pero por la experiencia de los fabricantes, resulta en errores relevantes. Por lo tanto se considera necesario incluir el efecto de la flexibilidad de la columna por ejemplo para conseguir una mejor compensación de los errores en todo el espacio de trabajo.
- En la compensación de ejes giratorios, ya existen aplicaciones comerciales que realizan ajustes de errores de estos ejes, pero que se limitan básicamente a detectar el centro de giro real del eje, y no se tienen en cuenta otros errores, como los angulares. Se considera que esto es así por la necesidad de muchos puntos de medida para ajustar estos errores, lo que no es práctico con sistemas de medida como el palpador.
- En operaciones de torneado y mandrinado, las máquinas no tienen ejes controlados en todas las direcciones de movimiento en las que se podrían compensar errores, al no poder compensar errores angulares o de orientación de herramienta. Es necesario estudiar la relevancia de estos errores y desarrollar alternativas para compensar los errores que se sean relevantes.



Errores de eje rotativo

PRÓXIMOS OBJETIVOS TECNOLÓGICOS

Los objetivos tecnológicos que se han de cumplir para hacer realidad la mejora de precisión de las máquinas y competir en sectores estratégicos de máximo interés como el aeronáutico, son los siguientes.

El enfoque técnico del proyecto presentado encaja con la tendencia internacional a aumentar las prestaciones de las máquinas añadiendo sistemas ciberfísicos, que combinan componentes mecánicos con controles que manejan la información adquirida por los sensores del sistema, con la misión de monitorizar y controlar las máquinas para mejorar su funcionamiento y añadir funcionalidades

1. Desarrollo de sistemas de medición de errores geométricos y térmicos integrables en máquina

Desarrollo de equipos que permitan calibrar los errores de máquina con la precisión requerida, y que posibiliten su integración en máquina de modo que el operario pueda realizar verificaciones rápidas o recalibraciones completas de forma automática y con mínimo tiempo de ocupación de máquina.

2. Desarrollo de modelos matemáticos de estimación de errores geométricos y térmicos

Avanzar en el desarrollo de modelos matemáticos que permitan procesar de modo automático las mediciones de los ensayos de verificación y calibración. La mayor disponibilidad de mediciones en máquina se aprovechará para utilizar modelos que contemplen más errores de precisión, y por tanto puedan compensarlos con mayor precisión.

3. Implantación en máquina y CNC de los sistemas de verificación, calibración y compensación de errores para operación automatizada

Integración en máquina y desarrollo de los programas para la automatización de los ensayos, de su procesamiento y de la implementación de las compensaciones, de modo que se requiera la mínima intervención del operario, evitando así requerir personal especializado.

Grupo de Investigación de Diseño e Ingeniería de precisión
IK4-IDEKO