

TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DE ERROS PARA APLICAÇÃO EM METROLOGIA DIMENSIONAL

Benedito Di Giacomo

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590
bgiacomo@sc.usp.br

Fabricio Tadeu Paziani

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – fpaziani@sc.usp.br

Rita de Cássia Alves de Magalhães

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – ritamec@bol.com.br

***Resumo:** O desenvolvimento de melhores instrumentos de medição possibilitou aos pesquisadores e à indústria mecânica desenvolverem seus produtos dentro de tolerâncias cada vez menores. Esta condição impulsionou o desenvolvimento de instrumentos de medição capazes de proporcionar melhor acuracidade. Entretanto, os erros apresentados pelos instrumentos de medição tornaram-se não mais negligenciáveis se comparados aos erros presentes nas peças a serem medidas, dada a atual equivalência de suas grandezas. Técnicas de separação de erros viabilizam o desacoplamento dos erros apresentados pelo sistema de medição daqueles apresentados pelos mensurandos. Este trabalho apresenta uma classificação das técnicas de separação de erros para metrologia dimensional com relação aos campos de aplicação e natureza da medição. As técnicas mais utilizadas são os métodos de reversão e as técnicas de redundância. Os métodos de reversão são caracterizados pela manipulação mecânica de um grau de liberdade do sistema. Métodos de medição com redundância de dados requerem configurações multisensoriais. Os dados devem ser coletados ao longo da peça com certo grau de sobreposição. A utilização de vários transdutores permite a separação dos erros da peça daqueles do sistema de medição. Tanto na medição de erro de retilidade quanto circularidade, estas técnicas variam quanto ao número e configuração dos sensores.*

***Palavras-chave:** Separação de erros, técnicas de reversão e redundância de dados.*

1. INTRODUÇÃO

Grande parte das indústrias hoje existentes tendem a produzir componentes mecânicos dentro de tolerâncias cada vez mais estreitas. Para garantir a qualidade dimensional dos produtos é necessário o investimento na pesquisa e desenvolvimento de sistemas de medição que satisfaçam os níveis de precisão desejados. Cada vez mais esmerados, os processos de fabricação requerem alta acuracidade de medição.

Instrumentos normalmente utilizados em procedimentos de medição, como réguas-padrão e padrões de calibração, apresentam erros sistemáticos (Whitehouse, 1976). Igualmente, o próprio processo de medição é influenciado por erros aleatórios devidos a mudanças ambientais, vibração e influência do operador.

Por exemplo, uma restrição natural observada na medição de erro de circularidade é a acuracidade da rotação de referência, ou seja, do eixo que comporta o sensor ou da mesa rotativa onde é posicionada a peça. Entretanto, a necessidade da obtenção de menor incerteza de medição

pode ser substituída pela necessidade de menor incerteza de repetibilidade, se os erros sistemáticos forem determinados. Uma vez definidos, os erros sistemáticos podem ser compensados e o erro de circularidade poderá ser calculado.

A introdução da tecnologia das máquinas de medir a três coordenadas (MM3C) permitiu a medição de partes complexas em curtos períodos de tempo. Outra vantagem da utilização das MM3Cs é a redução da diversidade de instrumentos convencionais de medição nos laboratórios de metrologia. Entretanto, em ensaios de medição repetitiva de peças relativamente simples, as MM3Cs podem não ser tão eficazes e adequadas quanto instrumentos dedicados de medição. Neste caso, a conveniência e adequação das MM3Cs pode ser questionada, levando-se em conta o número de peças a serem medidas (Bosch, 1995). Estas dificuldades serviram de estímulo para o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas multisensoriais e de múltipla orientação para desacoplamento de erros sem uma referência mecânica.

Contribuições de Tlustý (1957) e Bryan (1967) estabeleceram o ponto inicial no desenvolvimento de métodos específicos para a medição de erro de batida radial, como pode ser observado nas Fig. 1(a) e (b). Estas técnicas são até hoje utilizadas pela indústria de máquinas-ferramenta. Arora et al (1977) apresentaram uma abrangente compilação de técnicas para a avaliação de erro de batida radial em eixos-árvore de máquinas-ferramenta, incluindo os métodos implementados por Tlustý e Bryan.

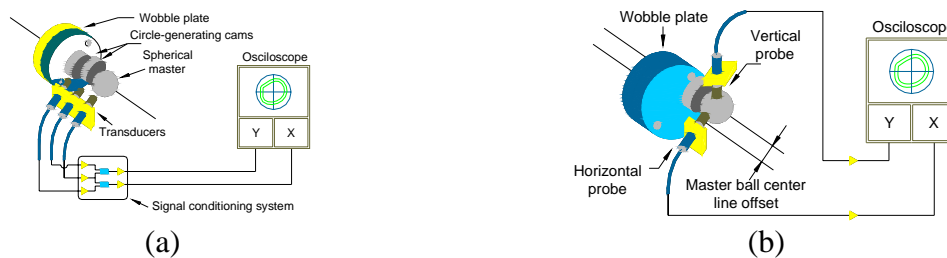


Figura 1. Técnicas de medição de erro de batida radial em eixos-árvore

2. MÉTODOS DE MÚLTIPLA ORIENTAÇÃO

Técnicas de múltipla orientação, comumente conhecidas como métodos de reversão, são caracterizadas pela manipulação mecânica de um grau de liberdade do sistema, exceto a direção de sensibilidade do transdutor utilizado. Esta operação inverte o sinal de uma componente do erro (Evans et al, 1996).

O método da reversão da régua padrão é provavelmente a mais conhecida técnica de separação de erros. Esta técnica requer a realização de duas medições envolvendo normalmente uma régua padrão e as guias de uma máquina-ferramenta. O objetivo é inverter o sinal do erro da guia, permitindo seu desacoplamento do erro da régua, sempre presente no sistema.

A primeira medição é conduzida como segue: um transdutor de deslocamento é afixado ao porta-ferramentas que é movimentado ao longo da guia e da régua. O transdutor fornece uma leitura que corresponde à soma dos erros individuais da régua e da guia, como ilustrado na Fig. 2(a).

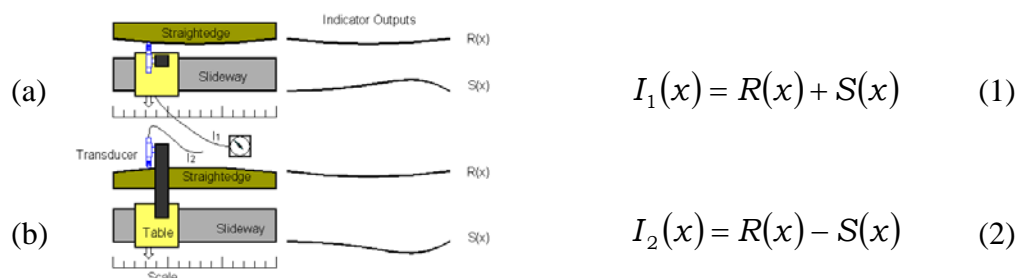


Figura 2. Reversão da régua padrão

Seja $S(x)$ o erro de retilineidade da guia e $R(x)$ o erro de retilineidade da régua, a primeira leitura do indicador pode ser escrita conforme a Eq. (1). Em seguida, régua e transdutor devem ter suas posições invertidas com relação à posição inicial e uma segunda medição é realizada, como mostrado na Fig. 2(b).

O sistema composto pelas equações (1) e (2) pode ser resolvido e os erros da régua e da guia podem ser obtidos separadamente.

$$R(x) = \frac{I_1(x) + I_2(x)}{2} ; S(x) = \frac{I_1(x) - I_2(x)}{2} \quad (3)$$

As leituras I_1 e I_2 dos transdutores podem ser expandidas na forma polinomial:

$$I_n(x) = A_n + B_n x + Cx^2 + \dots \quad (4)$$

O primeiro termo representa o deslocamento inicial registrado pelo sensor e o segundo termo representa o desalinhamento entre a régua e a guia. Ambos podem ser removidos através de técnicas de ajuste de curvas, os quais sempre introduzem incertezas. Na prática, entretanto, a maior fonte de incerteza na reversão da régua surge de efeitos ambientais, tais como temperatura e vibração (Evans et al, 1996).

A reversão pode também ser empregada para verificar erros de batida em eixos-árvore de máquinas-ferramenta. A reversão da esfera, proposta por Donaldson (1972) é exatamente análoga à reversão da régua.

Esta técnica consiste da manipulação de um arranjo experimental tal como ilustrado na Fig. 3(a). Uma posição arbitrária inicial entre o sensor e a referência é estabelecida. O conjunto (eixo e referência) é rotacionado de 360° e a indicação do sensor de deslocamento é registrada. A indicação corresponde ao erro de batida radial dado por $e(\theta)$, somado ao erro da referência, $r(\theta)$.

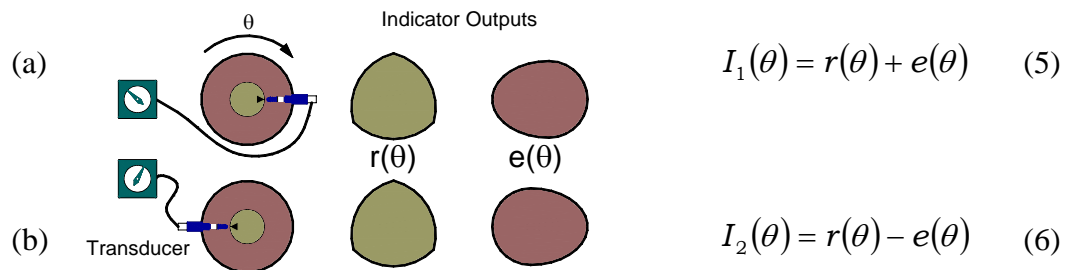


Figura 3. Reversão da esfera padrão

A segunda configuração requer que o sensor e a referência sejam rotacionados de 180° em torno do eixo de rotação da máquina e uma nova leitura do transdutor é tomada.

As saídas dos transdutores são dadas pelas Eq. (5) e (6).

Desta forma, o erro de batida radial do eixo e o erro de circularidade da referência podem ser obtidos separadamente:

$$r(\theta) = \frac{I_1(\theta) + I_2(\theta)}{2} ; e(\theta) = \frac{I_1(\theta) - I_2(\theta)}{2} \quad (7)$$

Deve ser salientado que, em ambas as medições, a indicação do erro da referência permanece constante se o erro apresenta repetibilidade. O erro de batida radial do eixo é invertido após a reversão, permitindo assim a separação dos erros.

Este método simples apresenta algumas limitações. Talvez a mais significativa seja a manipulação durante a reversão. Também é necessário interromper a rotação do eixo durante o experimento.

Duas abordagens alternativas ao método de Donaldson podem ser traçadas. A análise de Fourier pode ser aplicada aos sinais medidos tal que deficiências no conteúdo harmônico da saída sejam descritas. Um algoritmo que proporcione o tratamento adequado do sinal pode compensar deficiências harmônicas e sintetizar os resultados da medição do erro de circularidade.

A primeira maneira de lidar com esta questão é utilizar simultaneamente dois transdutores diametralmente opostos ao redor do eixo. A indicação dos sensores será:

$$I_1(\theta) = s(\theta) + e(\theta) ; I_2(\theta) = s(\theta - \pi) - e(\theta) \quad (8)$$

Se os sinais dos transdutores forem decompostos em componentes harmônicas discretas ($n=0, 1, 2, \dots$) onde $n=1$ corresponde a uma ondulação por circunferência da peça, os resultados da análise de Fourier para I_1 , I_2 , e e s são F_1 , F_2 , F_e e F_s , respectivamente:

$$F_1(n) = F_s(n) + F_e(n) ; F_2(n) = F_s(n)e^{-jn\pi} - F_e(n) \quad (9)$$

A partir da equação (9) é possível eliminar a componente relativa ao erro e . Considerando $I=I_1+I_2$, tem-se que:

$$F_I(n) = F_s(n)(1 + e^{-jn\pi}) \quad (10)$$

O termo $(1 + e^{-jn\pi})$ é uma função ponderadora e apresenta grandeza $2 \cos(n\pi/2)$. Esta característica permite somente a identificação de harmônicos pares.

A segunda abordagem demanda duas orientações da peça em relação ao eixo de rotação, e um sensor somente é utilizado. As orientações configuram 180° ao redor do eixo. As indicações dos transdutores são:

$$I_1(\theta) = s(\theta) + e(\theta) ; I_2(\theta) = s(\theta - \pi) + e(\theta) \quad (11)$$

As transformadas de Fourier associadas são:

$$F_1(n) = F_s(n) + F_e(n) ; F_2(n) = F_s(n)e^{-jn\pi} + F_e(n) \quad (12)$$

A eliminação de $e(\theta)$ pode ser conseguida, fornecendo:

$$F_I(n) = F_s(n)(1 + e^{-jn\pi}) \quad (13)$$

A função de ponderação tem magnitude $2 \sin(n\pi/2)$, e somente informações sobre harmônicos ímpares podem ser obtidas (Whitehouse, 1976). Informações adicionais sobre outras aplicações das técnicas de reversão podem ser encontradas em Evans et al, 1996.

3. MÉTODOS MULTISENSORIAIS

Métodos multisensoriais para separação de erros são também extensivamente empregados na indústria, principalmente nos casos onde é necessária a medição *in situ*. Normalmente não é conveniente remover peças volumosas da máquina-ferramenta para serem submetidas a procedimentos de medição. Nestas circunstâncias surge um problema, isto é, medir a peça sem uma referência mecânica formal, como uma esfera padrão. Ainda, a peça deverá ser rotacionada de uma

forma relativamente grosseira, e variações originadas desta manipulação podem ser consideradas como movimentos aleatórios do eixo de rotação com relação ao aparato de medição.

Para medição de erro de circularidade, deve ser definida uma configuração sensorial adequada tal que quaisquer movimentos aleatórios da peça não são detectados e não deterioram o sinal medido. Segundo Mitsui (1982), o método mais elementar para a verificação dos erros de batida radial é a medição do movimento a peça presa ao eixo-árvore de uma máquina-ferramenta utilizando um transdutor de deslocamento. Entretanto, o sinal de saída do transdutor leva em conta não apenas o erro de batida radial do eixo-árvore, mas também o erro de circularidade da peça.

Se o erro de circularidade é conhecido na seção transversal onde a medição é realizada, então é possível desacoplar o erro de batida radial.

Um dispositivo que contenha três transdutores de deslocamento pode ser construído, e o *Método dos Três Pontos* pode ser aplicado para detectar o erro de circularidade e as componentes ortogonais do erro de batida radial, simultaneamente.

Os sensores são posicionados de tal forma que o sensor central é a referência para os outros, localizados a ângulos α e β da referência, como mostrado na Fig. 4.

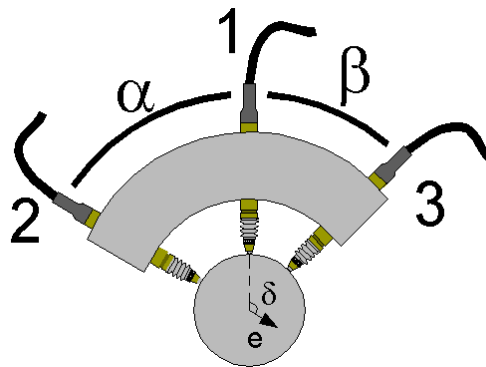


Figura 4. Método dos três pontos

Este arranjo multisensorial fornece as seguintes leituras:

$$\begin{aligned} I_1(\theta) &= s(\theta) + e \cos \delta \\ I_2(\theta) &= s(\theta + \alpha) + e \cos(\delta + \alpha) \\ I_3(\theta) &= s(\theta - \beta) + e \cos(\delta - \beta) \end{aligned} \quad (14)$$

onde θ é o ângulo de referência do sensor 1, e é a excentricidade imposta à peça e δ é o ângulo que determina sua direção. O erro devido à movimentação da peça pode ser removido através de uma combinação adequada dos sinais de modo que os termos em e e δ sejam levados a zero. Esta condição pode ser satisfeita se os sensores forem dispostos a 120° uns dos outros, ao redor da peça. Entretanto, esta configuração é desvantajosa, pois a peça estaria completamente circundada pelos sensores, tornando difícil o acesso à peça. Mover a peça nesta configuração espacial afeta pelo menos dois transdutores em sentidos opostos. Logo, se um sensor for deslocado em 180° da sua posição original e a sua direção de sensibilidade invertida, resultados equivalentes podem ser obtidos, e a peça permanece acessível. Este arranjo é indicado para a medição de erro de circularidade de eixos relativamente grandes e de difícil acesso (Whitehouse, 1976).

Mitsui (1982) construiu um aparato experimental para implementar o método dos três pontos. Foram utilizados três transdutores capacitivos de deslocamento, rigidamente fixos ao porta-ferramentas de um torno. A utilização de um encoder rotativo de 2048 pulsos por volta, fixo à outra extremidade do eixo-árvore permitiu a detecção do posicionamento angular. As maiores frequências que podem ser detectadas pelos sensores de deslocamento atingem a marca de 100 kHz. Dado que a extremidade do sensor que toca a peça apresenta um diâmetro de 8 mm, componentes de erro de

circularidade de comprimento de onda relativamente curto, como a rugosidade superficial, são filtrados e não compõem o sinal.

Experimentos compararam os resultados obtidos com o método dos três pontos contra aqueles obtidos utilizando-se uma esfera padrão. A esfera foi fixa à extremidade de um eixo de aço de 50 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. A rotação foi estabelecida em 600 rpm e a medição foi conduzida utilizando os dois métodos simultaneamente. A análise dos resultados demonstrou que o método dos três pontos é menos susceptível a efeitos de vibração.

Uma análise das componentes em frequência do sinal mostrou que os picos relacionados aos efeitos vibratórios apresentaram amplitude muito menor quando utilizado o método dos três pontos e os picos relativos ao erro de circularidade do padrão esférico não estavam presentes. Entretanto, estes foram detectados pelo método convencional. Em outras palavras, o erro de batida radial pôde ser mais precisamente avaliado através do método dos três pontos, enquanto a medição utilizando a esfera padrão foi influenciada pelo seu erro de circularidade.

Shinno et al (1987) aplicaram o método dos três pontos à medição do erro de circularidade em mancais aerostáticos de ultraprecisão. Três transdutores capacitivos de deslocamento foram empregados, e a rotação do eixo foi medida com um encoder fotoelétrico. Os pulsos de saída do encoder foram utilizados para acionar um conversor A/D e adquirir os dados. Os valores obtidos para o erro de circularidade variaram de 13 nm a 17 nm.

Gao et al (1996) apresentaram um método multisensorial alternativo para a avaliação de erro de circularidade, especificamente, o *Método Misto*. A Fig. 5 ilustra o método misto.

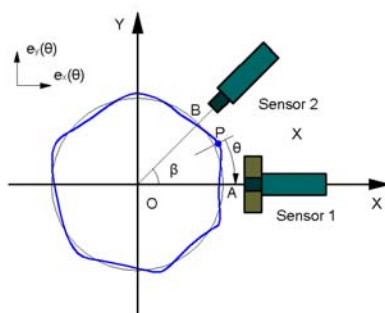


Figura 5. Método misto

Este método requer dois transdutores de deslocamento e um transdutor angular para separar o erro de circularidade do erro de batida radial e para detectar componentes de frequência mais alta. A saída diferencial dos transdutores cancela o erro de batida e a manipulação dos dados diferenciais fornece o erro de circularidade. Entretanto, os sensores empregados nesta aplicação consistem de aparatos ópticos, como fontes de luz Laser, espelhos e lentes que limitam o desempenho operacional em ambientes inadequadamente controlados.

O método misto sofreu melhorias posteriores. Gao et al (1997) verificaram que o arranjo dos sensores fornecia melhor resposta em frequência se o sensor de deslocamento fosse posicionado em um ângulo reto com relação ao sensor angular. Logo, um sensor de deslocamento foi removido da configuração original. O novo arranjo é referido como o *Método Misto Ortogonal*. Similarmente à técnica anterior, sensores ópticos foram utilizados.

Outra técnica multisensorial derivada do método dos três pontos é o *Método dos Quatro Pontos*, proposto por Zhang e Wang (1993). Os autores consideraram que o ângulo entre os sensores no método dos três pontos poderia produzir coeficientes de transferência extremamente baixos para algumas componentes harmônicas. Uma vez estabelecida a configuração dos sensores, também é determinado o coeficiente de transferência do processo. Se a disposição dos sensores for insatisfatória para a detecção de certos componentes harmônicos, a adição de outro sensor permite a detecção na faixa de frequência deficiente através do aumento da sensibilidade da função transferência.

Para medição do erro de retilidade, entretanto, uma representação em termos de coeficientes de Fourier não é a mais adequada para representar variações aleatórias que devem ser removidas. Variações podem ocorrer das seguintes maneiras: variações da distância linear entre peça e referência, variações na inclinação entre ambos e variações de curvatura relativa. Whitehouse (1976) discutiu uma configuração generalizada de sensores para medição de erro de retilidade.

Considerando as variações acima mencionadas, a distância y entre a peça e a referência pode ser expressa como uma variável aleatória no tempo. Assim,

$$y = d(t) + m(t)x + c(t)x^2 \quad (15)$$

onde d , m e c são variáveis que representam a separação média, a inclinação e a curvatura, respectivamente, e x representa a distância. Para eliminar estas três variáveis, no caso geral, quatro transdutores são necessários. Os sensores teriam sensibilidades 1 , a , b e c , posicionados a distâncias l_1 , l_2 , l_3 e l_4 a partir do centro do sistema de medição, como ilustrado na Fig. 6.

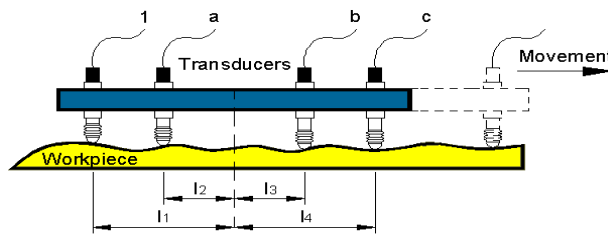


Figura 6. Configuração generalizada de sensores

Três equações devem ser satisfeitas neste caso:

$$1 + a + b + c = 0 \quad (16)$$

$$-l_1 - al_2 + bl_3 + cl_4 = 0 \quad (17)$$

$$l_1^2 + al_2^2 + bl_3^2 + cl_4^2 = 0 \quad (18)$$

A equação (16) refere-se à separação média, a equação (17) leva em conta a inclinação e a equação (18) considera os termos quadráticos. Os termos negativos na equação (17) são devidos à anti-simetria com relação ao ponto central do suporte dos sensores. A resolução das equações (16), (17) e (18) mostra que algoritmos de diferenciação numérica podem ser utilizados em sistemas multisensoriais de medição. Considerando o caso em que $l_1 = -2h$, $l_2 = -h$, $l_3 = h$ e $l_4 = 2h$, dadas estas restrições, o sinal da combinação dos sensores que satisfaz as equações (16), (17) e (18) é:

$$S = V_1 - 2V_2 + 2V_3 - V_4 \quad (19)$$

e $a = -2$, $b = 2$, $c = 1$. A equação (19) corresponde à terceira derivada numérica nas quais as ordenadas medidas f_1, f_2 , etc foram substituídas por transdutores. Desta forma,

$$h^3 f''' = \frac{1}{2} (f_{+2} - 2f_1 + 2f_{-1} - f_{-2}) \quad (20)$$

Neste caso, há uma distância de $2h$ entre V_2 e V_3 , e h corresponde ao espaçamento entre os sensores. Se os sensores forem dispostos de maneira equidistante, será observado que $a = -3$, $b = 3$ e $c = 1$, que reduz a distância total de $4h$ para $3h$. Segundo Di Giacomo et al (1997), entretanto, os termos de segunda ordem da componente do erro, avaliado em uma máquina-ferramenta, são

irrelevantes e não provocam variação significativa do erro. Desta forma, torna-se desnecessária a utilização de quatro sensores para estimar o erro de retilinearidade.

O método *TSP* (*Two Successive Points*) foi proposto por Tanaka et al (1981) para a medição de erro de retilinearidade, e utiliza deslocamentos relativos entre ferramenta e peça. Dois sensores de deslocamento do tipo *eddy current* são movimentados ao longo da direção de avanço do carro principal da máquina-ferramenta. Os sinais dos transdutores são coletados em intervalos regulares que correspondem à distância entre os sensores.

Uma estimativa do erro de retilinearidade pode ser obtida através de um algoritmo em termos dos deslocamentos relativos. Uma vantagem do método TSP sobre os métodos interferométricos Laser é a obtenção simultânea dos erros tanto da máquina-ferramenta quanto da peça.

Estimativas confiáveis do erro de retilinearidade são especialmente necessárias para a construção de guias de máquinas. Tanaka et al (1981) aplicaram o método TSP para avaliar o erro de retilinearidade das guias de uma grande fresadora e para avaliar os aspectos práticos da implementação da técnica. Os transdutores são fixos ao porta-ferramentas, que percorre a peça na direção de avanço, como indicado na Fig. 7.

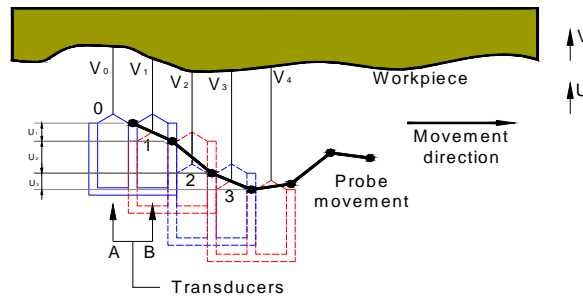


Figura 7. Método TSP

Após a medida inicial, o porta-ferramentas é sucessivamente movimentado da mesma distância entre os sensores, e um conjunto de deslocamentos relativos em dois pontos é obtido.

O erro de retilinearidade do movimento dos sensores é designado por U_1, U_2, U_3, \dots e o erro de retilinearidade da peça é dado por V_1, V_2, V_3, \dots . O deslocamento relativo entre os transdutores e a peça é fornecido pelos sensores *A* e *B*, como segue:

$$\begin{aligned}
 D_{0,B} - D_{0,A} &= V_1 \\
 D_{1,A} - D_{0,A} &= V_1 - U_1 \\
 D_{1,B} - D_{0,B} &= (V_2 - V_1) - U_1 \\
 D_{2,A} - D_{0,A} &= V_2 - U_2 \\
 D_{2,B} - D_{0,B} &= (V_3 - V_1) - U_2
 \end{aligned} \tag{21}$$

As equações gerais podem ser determinadas:

$$\begin{aligned}
 D_{(i-1),B} - D_{0,B} &= (V_i - V_1) - U_{i-1} \\
 D_{i,A} - D_{0,A} &= V_i - U_i
 \end{aligned} \tag{22}$$

Assim, o erro de retilinearidade U_i na i -ésima posição do porta-ferramentas devido aos deslocamentos relativos medidos é dado por:

$$\begin{aligned}
 U_i &= U_{i-1} + D_{(i-1),B} - D_{(i,A)} \\
 V_i &= U_i + D_{i,A} - D_{0,A}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Assumindo $U_0 = V_0 = 0$, séries de U_i e V_i podem ser determinadas, fornecendo os erros de retilidade da peça e do movimento do porta-ferramentas. Uma variação do método TSP é discutida por Gao e Kiyono (1996).

Tanto os métodos de múltipla orientação quanto os multisensoriais, entretanto, apresentam restrições às suas aplicações. Para os métodos de múltipla orientação, os fatores ambientais devem ser fortemente considerados. É necessário que temperatura, correntes de ar e vibrações sejam controladas no espaço de trabalho. Também deve ser observada a acuracidade do posicionamento das orientações axial e angular.

As técnicas multisensoriais são inerentemente mais susceptíveis à instrumentação que aos fatores ambientais. Por exemplo, todos os transdutores devem tocar a peça na mesma linha de ação, fato difícil de ser assegurado. Ainda, todos os sensores devem apresentar uma saída válida, ou a compensação instantânea proporcionada pela técnica não ocorrerá.

4. CONCLUSÃO

Este artigo visou promover uma revisão abrangente de técnicas de separação de erros, salientando vantagens e dificuldades que podem ocorrer durante as aplicações práticas.

Alguns aspectos ainda requerem investigação cuidadosa, como a melhor qualificação de componentes de alta frequência na medição do erro de circularidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, financiadora deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

- Arora, G.K.; Mallanna, C.; Anantharaman, B.K.; Babin, P. 1977. Measurement and evaluation of spindle running error. *International Journal Of Machine Tool Design And Research*, v.17.
- Bryan, J.; Clouser, R.; Holland, E. 1967. Spindle accuracy. *American Machinist*, n. 612, p 149-164.
- Di Giacomo, B.; Sato, D.P.V.; Orrego, R.M.M. 1997. Second order terms influence in mathematical models of machine tools. *Proceedings of the 12th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, p.53-56.
- Donaldson, R.R. 1972. A simple method for separating spindle error from test ball roundness error. *Annals of CIRP*, v. 21, n. 1, p. 125-126.
- Evans, C.J.; Hocken, R.J.; Estler, W.T. 1996. Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and "absolute testing". *Annals of the CIRP*, v.45/2.
- Gao, W.; Kiyono, S. 1996. High-accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method. *Measurement*, v.19, n.1, p.55-64.
- Gao, W.; Kiyono, S.; Nomura, T. 1996. A new multiprobe method of roundness measurements. *Precision Engineering*, v.19, p. 37-45.
- Gao, W.; Kiyono, S.; Sugawara, T. 1997. High-accuracy roundness measurement by a new error separation method. *Precision Engineering*, v.21, p.123-133.
- Hocken, R.J. in: Bosch, J.A. 1995. *Coordinate measuring machines and systems*. Marcel Dekker, Inc, New York. Cap. 13, p. 391-412.
- Mitsui, K. 1982. Development of a new measuring method for spindle rotation accuracy by the three points method. *Proceedings of the 23rd International MTDR Conference*, p.115-121.
- Shinno, H.; Mitsui, K.; Tatsue, Y. 1987. A new method for evaluating error motion of ultra precision spindle. *Annals of the CIRP*, v.36/1, p.381-384.
- Tanaka, H.; Tozawa, K.; Sato, H.; O-Hori, M.; Sekiguchi, H. 1981. Application of a new straightness measurement method to large machine tool. *Annals of the CIRP*, v.30, n.1.
- Thrust, J. 1957. Systems and methods of testing machine tools. *Microtechnic*, n.13, p.162.

- Whitehouse, D.J. 1976. Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology. Journal of Physics E: Scientific Instruments 9, p.531-536.
- Whitehouse, D.J. 1994. Handbook of surface metrology. Institute of Physics Publishing, Bristol.
- Zhang, G.X.; Wang, R.K. 1993. Four-point method of roundness and spindle error measurements. Annals of the CIRP, v.42/1, p.593-596.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ERROR SEPARATION TECHNIQUES FOR DIMENSIONAL METROLOGY APPLICATION

Benedito Di Giacomo

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Av. Trabalhador Sãocarlense, 400 – 13566-590
bgiacomo@sc.usp.br

Fabricio Tadeu Paziani

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – fpaziani@sc.usp.br

Rita de Cássia Alves de Magalhães

Escola de Engenharia de São Carlos – USP – ritamec@bol.com.br

Abstract: *The development of better measurement instruments has granted researchers and mechanical industry the possibility of working their products within extremely small tolerances. This condition impelled the development of measuring instruments to achieve better accuracy. However, errors presented by instruments have become not negligible if compared to parts error, given the current equivalence of their magnitudes. Error separation techniques allow decoupling measurement system errors from part errors. This paper aims to classify error separation techniques for dimensional metrology use with regard to application fields and nature of measurement. The most widely used error separation techniques are the reversals and redundancy methods. The reversals are characterized by the mechanical manipulation of one degree of freedom of the system. Alternatively, data redundancy measurement methods require multiple sensorial configurations. Data must be collected along the part in a certain degree of overlapping. The utilization of several transducers allows decoupling between part and measuring process errors. Both in straightness and roundness measurements, these techniques present varied number and configuration of sensors.*

Keywords: *Error separation, reversals, multi-probe systems.*