

MODELAGEM DE UMA MM3C POR MEIO DA ANÁLISE GEOMÉTRICA

Vanessa Aparecida de Oliveira Rosa, Universidade Federal de Uberlândia, vanessaproduc@hotmail.com

José Eduardo Silveira Leal, Universidade Federal de Uberlândia, zeduardoleal@yahoo.com.br

Rosenda Valdés Arencibia, Universidade Federal de Uberlândia, arvaldes@mecanica.ufu.br

Resumo. Este trabalho teve como objetivo determinar as contribuições dos erros geométricos em cada uma das direções preferenciais de movimento da máquina de medir a três coordenadas, bem como as equações das componentes do erro volumétrico, utilizando-se a análise geométrica. Para tanto, foram identificados os erros translacionais, rotacionais e de ortogonalidade. Foi efetuada uma análise geométrica nos planos XZ, XY e YZ para determinar a contribuição destes erros em cada direção preferencial de movimento e posteriormente foram obtidas as equações das componentes do erro volumétrico para cada direção. Conclui-se que a componente Ez do erro volumétrico é afetada por um número menor de erros que as outras componentes.

Palavras chave: máquina de medir a três coordenadas, erros geométricos, análise geométrica.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação de produtos com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades levou à necessidade de desenvolver meios de controle de qualidade mais rápidos e eficazes. Neste contexto surgiram as Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs), como sistemas de medição precisos, versáteis e confiáveis, com a capacidade de medir coordenadas cartesianas dentro de um volume de trabalho delimitado por suas características físicas e geométricas (Cardoza, 1995). Antes da introdução das MM3Cs na indústria, por volta de 1960, a inspeção das peças era efetuada separadamente por dimensão, forma, posição dos elementos geométricos e características da superfície, sendo necessária a utilização de vários sistemas de medição para efetuar o controle dimensional e geométrico das mesmas. Com o advento das MM3Cs, diversas propriedades metrológicas de uma peça podem ser verificadas. Ainda, em consequência de sua simplicidade de operação, da flexibilidade e da elevada exatidão, estas máquinas permitem a medição de estruturas complexas com extrema rapidez e precisão.

Apesar de suas vantagens, o desempenho das MM3Cs fica limitado devido à existência de diversas fontes de erros que afetam o resultado da medição. Dentre elas, podem-se citar a presença dos braços de Abbé, a dificuldade de montagem de três eixos, teoricamente ortogonais, e as imperfeições decorrentes dos processos de fabricação que se apresentam nos diversos elementos mecânicos que compõem a mesma. Estes fatores atuam de maneira conjunta, combinando-se de forma complexa no volume de trabalho da máquina, gerando os erros volumétricos (Valdés, 2002).

Este trabalho tem como objetivo efetuar a análise geométrica de uma MM3C do tipo ponte móvel, a fim de identificar as contribuições dos erros geométricos em cada uma das direções preferenciais de movimento, para posterior determinação das equações das componentes do erro volumétrico.

2. ERROS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

A estrutura de uma MM3C é composta por três guias de deslizamento de alta qualidade, cada qual destinada a materializar um grau de liberdade de um sistema cartesiano de coordenadas (Abackerli; Orrego, 2001), sendo permitido apenas um movimento unidimensional ao longo de cada um desses eixos. Este movimento é descrito baseado na cinemática do corpo rígido (Hocken, 1977), que considera que um corpo rígido no espaço possui seis graus de liberdade, correspondentes a três movimentos de translação e três movimentos de rotação.

No entanto, quando um carro se desloca sobre uma guia linear este não se movimenta somente em uma direção, mas sofrerá movimentos indesejáveis nas direções não preferenciais, originando os denominados erros geométricos. Segundo a ASME B89.4.1 (1997), durante o movimento de um carro em uma determinada direção, como por exemplo na direção X (Fig. 1a), a leitura na escala do eixo X não indica o valor exato do deslocamento experimentado pelo carro, originando o denominado erro de posição, que caracteriza a limitação da máquina de se posicionar ao longo da direção preferencial de movimento. Este é tido como um grau de liberdade adicional na direção do movimento. Já os movimentos de translação não desejados que o carro X experimenta nas direções dos eixos Y e Z são, respectivamente, os chamados erro de retitude na direção Y, devido à translação no eixo X, e erro de retitude na direção Z, devido à translação no eixo X.

Por sua vez, os erros de rotação (Fig. 1a) são movimentos angulares indesejáveis em torno de cada um dos três eixos de referência. São chamados de *roll*, se este for em torno do eixo X (*roll* de X), *pitch*, se em torno do eixo Y (*pitch* de X), e *yaw* quando for em torno do eixo Z (*yaw* de Z). Estes erros rotacionais, assim como os erros de retitude nos planos XY e XZ, representam graus de liberdade adicionais em direções diferentes às do movimento preferencial.

Portanto, durante a translação de um dos carros ocorrem seis erros geométricos, sendo um erro de posição, dois erros de retitude e três erros de rotação, totalizando dezoito erros geométricos para aquelas máquinas com o número de eixos igual a três.

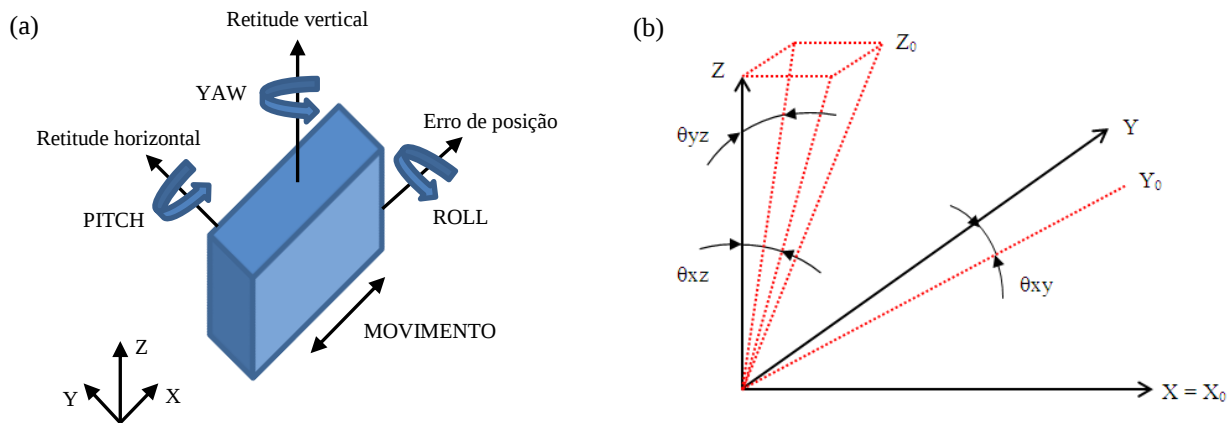


Figura 1. (a) Os seis erros geométricos para o eixo X de uma MM3C (ASME B89.4.1, 1997);
(b) erros de ortogonalidade de uma MM3C (Di Giacomo, 1986).

Porém, somam-se a estes outros três erros decorrentes da impossibilidade da montagem de eixos perfeitamente ortogonais, originando os erros de ortogonalidade (Fig. 2b). Tomando-se o eixo X como referência, $X = X_0$, define-se como erro de ortogonalidade entre X_0 e Y_0 o ângulo formado entre os eixos Y e Y_0 . O erro de ortogonalidade entre os eixos X e Z é dado pelo ângulo observado entre a projeção do eixo Z_0 no plano XZ e o eixo Z. Por fim, o erro de ortogonalidade entre os eixos Y e Z será o ângulo formado entre o eixo Z e a projeção de Z_0 no plano ZY.

Portanto, tem-se um total de 21 erros geométricos que influenciam o desempenho das MM3C. O resultado da combinação destes 21 erros nas direções preferenciais X, Y e Z origina as componentes do erro volumétrico E_x , E_y e E_z , respectivamente. Conhecidas estas componentes, o erro volumétrico, denotado de E_v , pode ser calculado pela Eq. 1.

$$E_v = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (1)$$

A modelagem das MM3Cs tem crescido na sua importância, pois por meio de modelos matemáticos é possível determinar a grandeza e o comportamento dos erros, com o objetivo de compensá-los. Durante muitos anos, tem-se dedicado tempo e esforço a este tema e técnicas variadas têm sido utilizadas para este fim, dentre elas: análise vetorial (Zhang *et al.*, 1985), transformadas homogêneas (Hocken *et al.*, 1977), análise geométrica (Valdés, 2002) e análise estatística (Guye, 1978).

3. ANÁLISE GEOMÉTRICA DA MÁQUINA DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

A MM3C do Laboratório de Metrologia Dimensional da Universidade Federal de Uberlândia é do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, manual, com resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm³, para os eixos X, Y e Z, respectivamente. As medições são realizadas com pontas que possuem esfera de rubi em sua extremidade, podendo ter diversos diâmetros (1, 2, 3 ou 4 mm). O *software* dedicado à máquina é o MCosmos 3.0[®].

A análise geométrica é efetuada em duas etapas. Na primeira são analisados os erros translacionais de posição e de retitude, pois o entendimento das contribuições destes erros é simples, não havendo necessidade de uma análise detalhada dos mesmos. Na Tabela 1 é apresentada a nomenclatura destes erros e sua contribuição.

Tabela 1. Contribuição dos erros translacionais.

Erro	Contribui em
Posição do eixo X ($Pos(x)$)	E_x
Posição do eixo Y ($Pos(y)$)	E_y
Posição do eixo Z ($Pos(z)$)	E_z
Retitude na direção do eixo Y devido ao movimento em X ($R_x(y)$)	E_y
Retitude na direção do eixo Z devido ao movimento em X ($R_x(z)$)	E_z
Retitude na direção do eixo X devido ao movimento em Y ($R_y(x)$)	E_x
Retitude na direção do eixo Z devido ao movimento em Y ($R_y(z)$)	E_z
Retitude na direção do eixo X devido ao movimento em Z ($R_z(x)$)	E_x
Retitude na direção do eixo Y devido ao movimento em Z ($R_z(y)$)	E_y

Na segunda etapa são analisados os erros rotacionais. O entendimento destes erros e de suas contribuições em cada direção preferencial de movimento é uma tarefa complexa e, por isso, é preciso uma análise detalhada para os três planos que materializam o volume de trabalho da máquina (XY, XZ e YZ). Como exemplo é apresentada a análise para o plano XZ (Fig. 2), o qual é afetado por rotações em torno do eixo Y. Estas rotações provocam um erro de *pitch* em X, um erro de *roll* em Y, um erro de *yaw* em Z e alteram o erro de ortogonalidade entre os eixos X e Z.

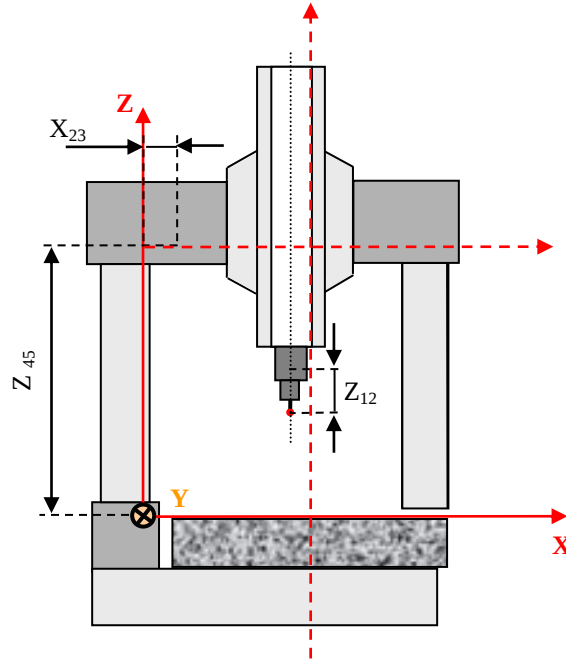


Figura 2. Representação do plano XZ.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os erros decorrentes da rotação em torno do eixo Y e as parcelas de contribuição na direção preferencial do eixo X, em cada caso. Para determinação do sinal de cada parcela de contribuição é utilizada a regra da mão direita.

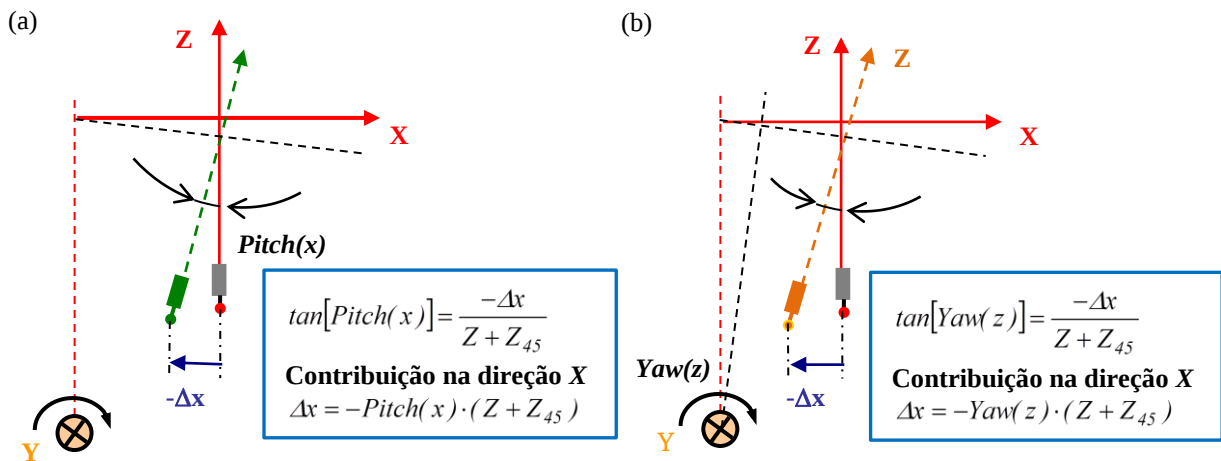


Figura 3. (a) Representação do *pitch* em X (*Pitch(x)*) e (b) *yaw* em Z (*Yaw(z)*) e suas contribuições.

Nas Figuras 3 e 4, X, Y e Z representam as coordenadas do ponto do volume de trabalho que está sendo analisado, enquanto que X_{23} , Z_{12} e Z_{45} (Fig. 2) são os braços de Abbé. Os braços de Abbé representam a distância entre a origem do sistema de coordenadas e as escalas X, Y e Z. Um quarto braço de Abbé (Y_{34}) é também observado na análise do plano YZ.

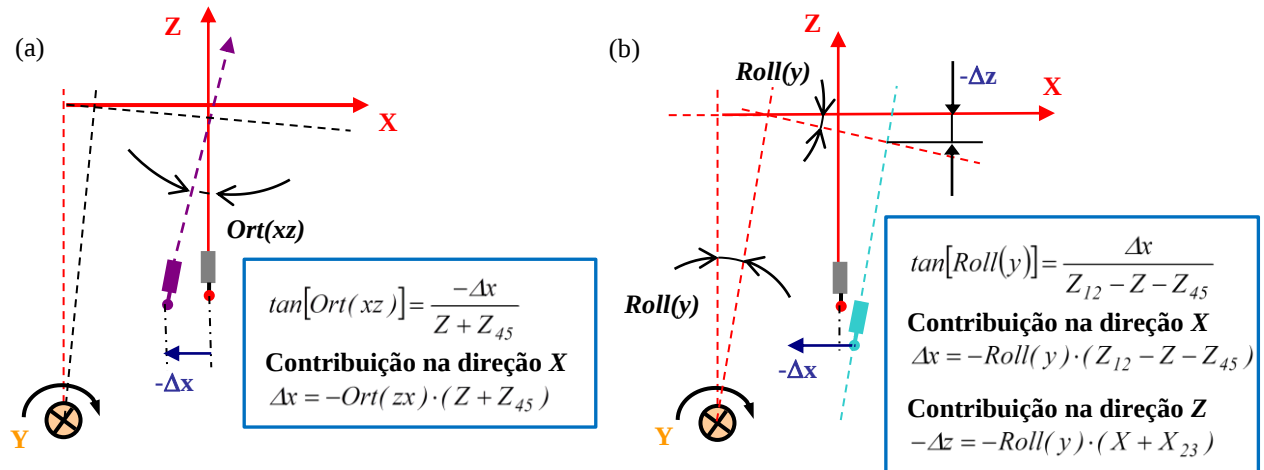


Figura 4. (a) Representação do erro de ortogonalidade entre os eixos X e Z ($Ort(xz)$) e (b) roll em Y ($Roll(y)$) e suas contribuições.

De forma similar foi efetuada uma análise nos planos XY e YZ. Como resultado foi possível escrever as equações das componentes do erro volumétrico (Eq. 2, 3 e 4).

$$Ex = Pos(x) + Ry(x) + Rz(x) + [Ort(xy) + Yaw(y)] \cdot Y_{34} + [Ort(xz) + Pitch(x) + Yaw(z) + Roll(y)] \cdot (-Z - Z_{45}) + Roll(y) \cdot Z_{12} \quad (2)$$

$$Ey = Pos(y) + Rx(y) + Rz(y) + [Ort(xy) + Yaw(y)] \cdot (X_{23} + X) - Pitch(y) \cdot Z_{12} + [Ort(yz) + Roll(x) + Pitch(z)] \cdot (-Z - Z_{45}) \quad (3)$$

$$Ez = Pos(z) + Rx(z) + Ry(z) - Roll(y) \cdot (X_{23} + X) - [Roll(x) + Pitch(y)] \cdot Y_{34} \quad (4)$$

Pode-se observar que cada componente do erro volumétrico da MM3C é expressa como sendo a soma de várias parcelas, que representam os erros de translação, os erros rotacionais e os erros de ortogonalidade multiplicados pelos seus respectivos braços de Abbé.

4. CONCLUSÕES

Uma análise das equações anteriores destaca que a componente Ez do erro volumétrico é afetada por um número menor de erros que as outras componentes.

5. REFERÊNCIAS

- Abackerli, A.J., Orrego, R.M.M., 2001, "Uma Macrovisão sobre a Modelagem Cinemática de Máquinas de Medir por Coordenadas", Revista de Ciência & Tecnologia, Vol.8. pp. 31-43.
- ASME B89.4.1, 1997, "Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines". New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Cardoza, J.A.S., 1995, "Máquinas Virtuais de Medir a Três Coordenadas", Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Di Giacomo, B., 1986, "Computer Aided Calibration and Hybrid Compensation of Geometric Errors in Coordinate Measuring Machines", PhD Thesis, The Victoria University of Manchester.
- Guye, J. J., 1978, "Metrological Inspection of Machining Centers, Jig Boring Machines and Measuring Machines through a Statistical Approach", Société Genovise d'Instruments de Physique, Geneva.
- Hocken, R. et al., 1977, "Three Dimensional Metrology", Annals of the CIRP, Vol.26, pp. 403-408.
- Valdés, R.A., 2002, "Projeto: Estudo do Comportamento dos Erros Termicamente Induzidos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas", Relatório de Atividade Nº 3, FAPESP, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Zhang, G.; Veale, R.; Charlton, T.; Borchard, B.; Hocken, R., 1985, "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines", Annals of the CIRP, Vol.34, pp. 445-448.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.