



## ESTUDO INICIAL DOS ERROS CÍCLICOS NAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

BENEDITO DI GIACOMO, MÁRCIA KIMIE NAKAZATO,  
ROSENDA VALDÉS ARENCIBIA

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Trabalhador São Carlense 400 - Bairro Centro – CEP: 13566-590, São Carlos, SP, Brasil

*(Recibido 3 de abril de 2004, para publicación 8 de octubre de 2004)*

**Resumo** – O propósito deste trabalho é fazer um estudo inicial sobre os novos métodos de avaliação dos erros cíclicos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs). Para atingir este objetivo, foi realizado um procedimento de medição de erros cíclicos e aplicação de Análise de Fourier. A medição da distância entre as linhas consecutivas da régua móvel da MM3C também foi realizada e os resultados comprovaram a existência dos erros de fabricação e sugeriram erros de subdivisão eletrônica. A determinação do período cíclico possibilita que seja realizada uma estratégia para minimização da interferência cíclica no levantamento dos erros de posição. A análise dos dados confirmou a existência de um período cíclico de quatro milímetros. Assim, uma comparação com os erros de posição sem estratégia e com estratégia foi feita e os resultados mostraram que o desvio padrão diminui em aproximadamente sessenta e cinco por cento.

### 1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de projeto e de fabricação das Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) evoluíram muito desde a sua criação, em 1954. Porém, é impossível fabricar equipamentos livres de erros.

Os erros presentes em uma MM3C podem ser classificados quanto ao comportamento como aleatórios e sistemáticos. Os erros aleatórios resultam de influências externas e internas, não controladas, que provocam o aparecimento de erros não repetitivos. Os erros sistemáticos são aqueles que se reproduzem tanto em grandeza quanto em sinal, quando as condições de ensaios são mantidas constantes. Eles são compostos basicamente por erros cíclicos, erros progressivos e histerese. O erro cíclico é qualquer componente que se repete em pelo menos uma vez ao longo do eixo de uma máquina [1, 2, 3]. O erro progressivo é um erro não cíclico, que pode ser crescente ou decrescente. A histerese é definida como sendo o valor da diferença entre os erros médios do trajeto de ida e do trajeto de volta [1, 2].

Poucos estudos têm sido publicados com o objetivo de conhecer as características, grandezas e fontes dos erros cíclicos, para assim poder minimizar seus efeitos. Se analisados os trabalhos publicados sobre erros cíclicos nota-se que estes têm sido mais direcionados aos erros de passo nos fusos de avanço das máquinas ferramentas.

Os parafusos utilizados nos mecanismos de avanço das máquinas ferramentas são elementos importantes na determinação da acuracidade de posicionamento das máquinas [4]. No caso onde “encoders” rotacionais são utilizados em conjunto com os fusos de movimento, o erro cíclico é usualmente sincronizado ao passo do parafuso [3, 5, 6]. A medição dos erros cíclicos deve ser feita separadamente, em distâncias curtas e utilizando pequenos passos incrementais [7, 8]. Durante a usinagem de parafusos, um polígono de 12 lados permite que uma avaliação dos erros cíclicos seja feita [9].

Portanto, o estudo dos erros cíclicos nas MM3Cs representa um tema de grande atualidade devido a pouca disponibilidade de trabalhos nesta área e nenhuma sugestão quanto ao tratamento para compensação.

## 2. ERROS CÍCLICOS NAS MM3CS

O sistema de leitura da MM3C utiliza escalas ópticas dispostas em cada uma das três guias. Estas escalas utilizam o princípio das Franjas de Moiré que consiste de um sistema optoeletrônico composto de emissor, escala móvel, escala fixa e receptor. O movimento relativo entre a escala fixa e a escala móvel, proporciona uma variação de intensidade de luz no receptor que é medida pelo número de franjas de Moiré e interpretada como deslocamento.

Há uma forte relação entre o desenvolvimento da MM3C e seu sistema de leitura. Assim, uma das principais preocupações dos fabricantes se concentra na melhoria da fabricação das escalas. Recentemente, Israel et al [10] apresentaram os resultados dos trabalhos interlaboratoriais do Japão e Alemanha feitos com escalas lineares ópticas da MITUTOYO Corporation and DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, onde propõem a utilização desses artefatos como padrão de transferência. Pode-se dizer que, a acuracidade do sistema de medição de uma MM3C depende principalmente da qualidade da régua e da graduação. Esta, por sua vez, depende da acuracidade e largura de suas linhas, qualidade das arestas, densidade e tamanho das imperfeições, além da homogeneidade das características ópticas como grau de reflexão, transmissão e absorção.

Os erros cíclicos podem ter um efeito maior na parcela do erro sistemático e por isso acabam interferindo na qualidade dos resultados obtidos na medição da peça e também do erro de posição [1]. Um dos fatores que contribuem para a ocorrência dos erros cíclicos é a acuracidade limitada dos métodos utilizados na fabricação de escalas. As MM3Cs utilizam escalas desenhadas e fabricadas por métodos fotográficos ou riscadas em máquinas tipo “step and repeat”. Ambos os métodos produzem um erro sistemático entre traços sucessivos. Desta forma, a medida que o número de traços aumenta as parcelas do erro sistemático somam-se e quando atingem um determinado valor este erro é compensado. Esta correção é feita a cada distância cujo valor corresponde ao de um período cíclico de baixa frequência e o processo repete-se até que toda a escala seja totalmente riscada.

Outro fator que contribui para a existência dos erros cíclicos origina-se da resolução exigida pela MM3C, que é sempre bastante alta e ultrapassa as capacidades existentes atualmente para fabricação de escalas. O que se faz para lidar com o problema da resolução é subdividir eletronicamente o espaço entre traços consecutivos da escala. Esta divisão eletrônica está associada a um sinal seno gerado pela observação das franjas de Moiré. A digitalização e subdivisão deste sinal geram erros periódicos, também conhecidos como erros cíclicos de alta frequência.

Como pode ser observado nas máquinas de medir estão presentes dois tipos de erros cíclicos. O primeiro tipo, decorrente do processo de fabricação, é denominado erro cíclico de baixa frequência. O outro tipo, ocasionado pela subdivisão eletrônica é chamado de erro cíclico de alta frequência.

## 3. TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais dos erros cíclicos foram divididos em duas etapas: medição dos passos da escala e levantamento do erro cíclico de baixa frequência.

As escalas da MM3C são constituídas de uma seqüência repetitiva de linhas escuras e claras. Um par formado por uma linha escura e uma linha clara adjacente denomina-se passo, Fig.1. Com base neste fato, foi realizada a medição da distância entre as linhas consecutivas de aproximadamente 10mm da escala móvel da MM3C. As medições foram feitas sobre a mesa de deslocamento de um microscópio digital BUEHLER.

O levantamento dos erros cíclicos, por meio do método de calibração direta, foi conduzido em uma MM3C do tipo Ponte Móvel, pertencente ao Laboratório de Máquinas Ferramentas da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. O instrumento utilizado na determinação dos erros cíclicos foi o interferômetro laser linear da Hewlett Packard, modelo HP5528A.

O banco de ensaios composto de sistema de medição da MM3C, sistema interferométrico e microcomputador permaneceu isolado em uma sala com temperatura de 20°C . Para a minimização dos braços de Abbè, o sistema interferométrico foi alinhado com o eixo de medição da escala Y e colocado próximo a ela.

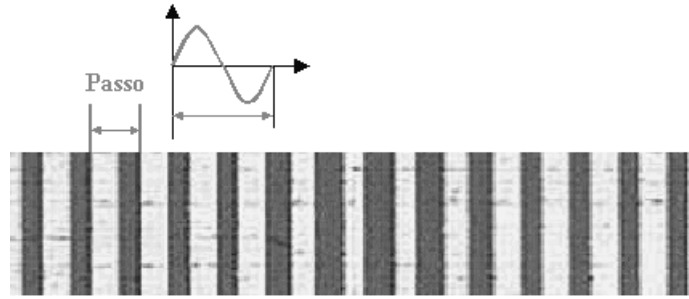


Fig. 1. Fotografia da escala da MM3C e representação do passo.

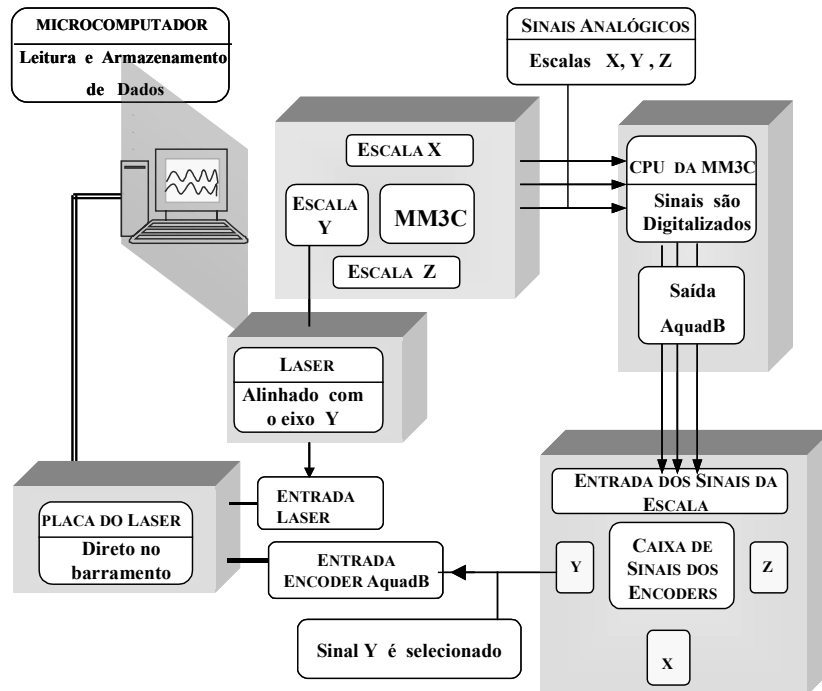


Fig. 2. Representação do sistema utilizado no levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência.

No levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência os pulsos do encoder da máquina serviram como posição referência capacitando a execução de medidas “on-the-fly”, em que a máquina não pára e faz a medição quando a posição programada, com passos igualmente espaçados, é atingida.

Na Fig.2, está apresentado o esquema do sistema utilizado para o levantamento do erro cíclico de baixa frequência.

Inicialmente, os sinais analógicos das régua X, Y, Z da MM3C entram na CPU da máquina onde são transformados em sinais digitais e depois passam pela saída AquadB. Em seguida, eles entram na caixa de sinais dos “encoders” pela entrada da régua. O sinal da régua de interesse, no caso Y, é selecionado eletronicamente e prossegue pela saída AquadB do “encoder” Y. Por meio da placa HP 10887 PC Calibrator Board, conectada ao microcomputador, este sinal é introduzido na CPU do laser. Nesta mesma placa também entra o sinal do canhão laser. A função desta placa é o gatilhamento e congelamento dos sinais (AquadB e canhão laser) para que posteriormente o computador possa ler e armazenar os dados. As leituras da máquina e do laser são comparadas e a diferença entre elas é apresentada pelo “software” HP 10747A, instalado no microcomputador. Os dados da medição podem ser transferidos para uma pasta de arquivos e analisados através de planilhas eletrônicas ou arquivos de texto.

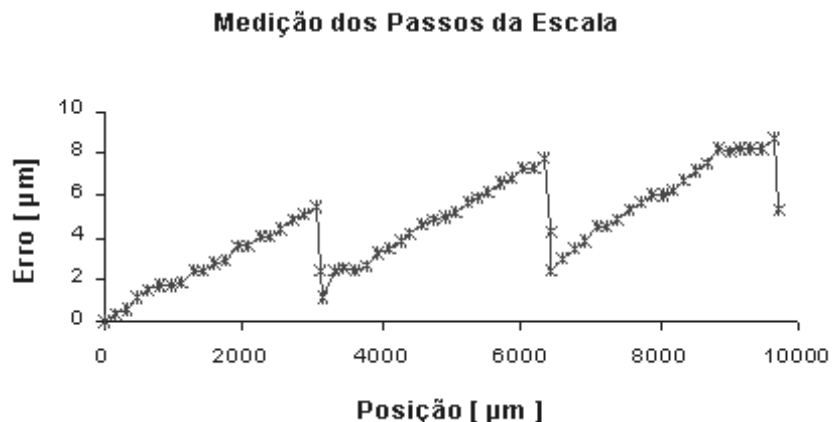


Fig. 3. Gráfico resultante da medição dos passos da escala da MM3C.

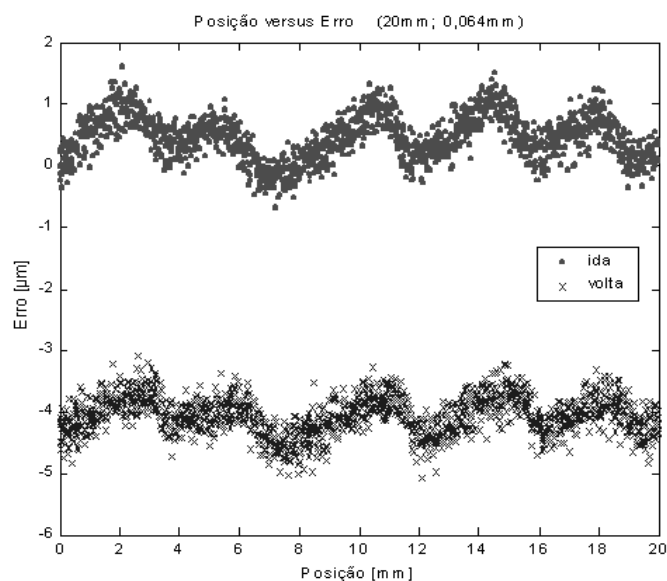


Fig. 4. Gráfico Posição versus Erro.

O levantamento do erro cíclico foi feito ao longo de 20mm da parte central da régua Y, com passo incremental de 0,064mm, no modo bidirecional com cinco trajetos de ida e cinco de volta. Foi obtido um arquivo de dados contendo valores da posição, em milímetros, e erros de posicionamento, em micrometros.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na medição dos passos da escala, o valor esperado para o passo é de aproximadamente 16  $\mu\text{m}$ , porém, a medição por meio de microscópio apresentou valores diferentes, como mostrado na Fig.3.

Através deste gráfico, Fig.3, foi possível verificar que a compensação do erro cíclico, decorrente do processo de fabricação das linhas da escala, ocorre realmente. Observa-se também a presença de um erro progressivo originado dos resíduos de compensação. Além disso, a fotografia das linhas da escala medida, Fig.1, sugere que no momento da compensação as linhas escuras tornam-se mais grossas e as claras mais finas.

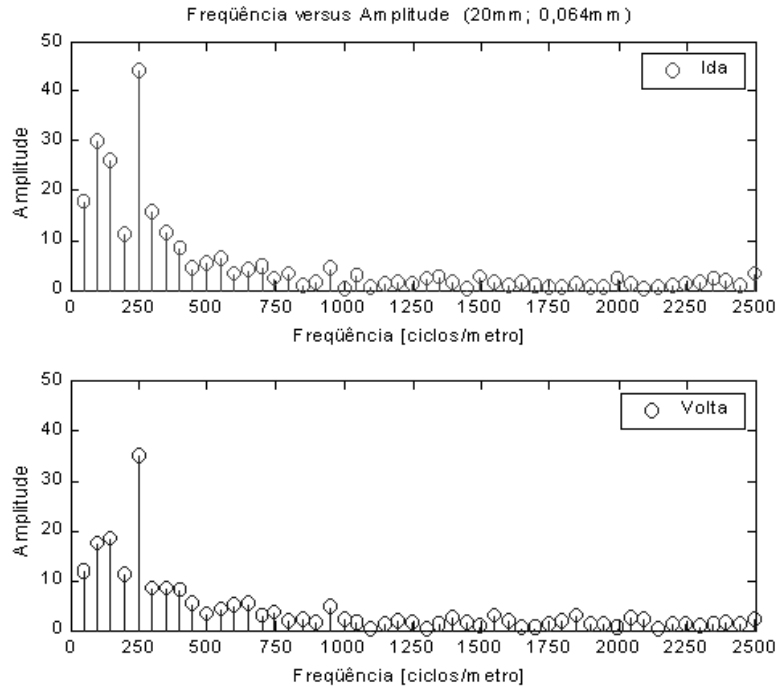


Fig. 5. Gráfico Frequência versus Amplitude.

Com o conjunto de dados obtido do levantamento dos erros cíclicos, por meio de interferometria laser, foi construído o gráfico no domínio do espaço, Fig.4. Este gráfico mostra a presença de um período cíclico de 4 mm e amplitude de erro de aproximadamente  $2\mu\text{m}$ . Observa-se também, erro progressivo pequeno em ambos os trajetos e histerese de aproximadamente  $4,5\mu\text{m}$ .

Para verificar exatamente quais frequências compõem a forma de onda observada no domínio do espaço, foi construído o gráfico Frequência versus Amplitude, Fig.5.

O cálculo da transformada de Fourier discreta dos valores do erro foi feito pelo algoritmo “Fast Fourier Transform” (FFT). Esta ferramenta matemática foi escolhida porque os dados da medição foram obtidos em passos incrementais igualmente espaçados. Além disso, os cálculos bem como os gráficos podem ser facilmente obtidos por meio de programas simples feitos em ambiente MatLab®, versão 6.0. Os valores do eixo da amplitude foram obtidos pelo cálculo do valor absoluto de cada número complexo produzido pela aplicação da FFT. A unidade ciclos/metro foi utilizada na apresentação das frequências. Assim, o critério utilizado para a verificação do período cíclico baseou-se na observação da frequência com maior amplitude no gráfico espectral, na presença do respectivo período dessa frequência no gráfico Posição versus Erro e na definição de erro cíclico, apresentada por [1, 2, 3].

De acordo com o gráfico Frequência versus Amplitude, a frequência 250 ciclos/m apresenta maior amplitude. Além disso, o período correspondente a esta frequência, ou seja, 4mm, encontra-se presente no gráfico Posição versus Erro, Fig. 4. Portanto, este teste confirma a existência do período cíclico de 4mm com amplitude de aproximadamente  $2\mu\text{m}$ .

Os erros cíclicos podem influenciar a medição dos erros de posição. Na calibração, geralmente, os erros de posição da MM3C são coletados em pontos espaçados 25mm um do outro. Uma estratégia utilizada para minimizar o efeito cíclico é a tomada de leituras também na vizinhança destes pontos. Para estabelecer o tamanho dessa largura de vizinhança o período do erro cíclico deve ser levado em consideração. O valor do erro de posição em um ponto é determinado, neste caso, como sendo a média aritmética dos valores coletados neste ponto e em sua vizinhança. Assim, o erro de posição do eixo Y foi medido sem a estratégia e em seguida, com a estratégia. Observa-se na Fig. 6 que o desvio padrão diminuiu bastante, devido à estratégia de medição adotada, e assim o efeito dos erros cíclicos foi minimizado em, aproximadamente, 65%.

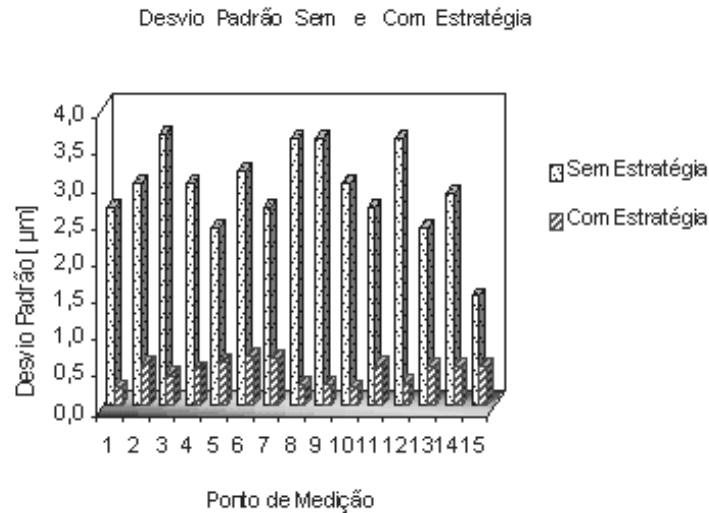


Fig. 6. Desvio padrão sem e com estratégia.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas.

A literatura sobre o assunto enfatizou a necessidade de uma avaliação mais detalhada dos erros cíclicos nas MM3Cs para que estratégias de minimização de erros possam ser elaboradas.

A compensação do erro cíclico decorrente do processo de fabricação das linhas da escala ocorre realmente, mas não isenta a máquina de grandes erros dentro do período.

O sistema utilizado para o levantamento dos erros cíclicos de baixa frequência permite que as medições sejam feitas de modo simples, necessita de pouco tempo de medição e assim reduz o custo desta atividade.

A análise por meio do gráfico espectral, gerado pelo algoritmo FFT, é bastante simples e rápida. Assim, a Análise de Fourier é muito eficiente na verificação de erros cíclicos de baixa frequência.

A medição em 20 mm de comprimento do eixo Y da MM3C utilizando um incremento de 0,064mm possibilitou a visualização do período cíclico de 4mm com amplitude de 2µm.

A grande vantagem da estratégia para minimizar o efeito cíclico na medição do erro de posição é a diminuição do desvio padrão dos resultados em aproximadamente 65%.

Estratégias semelhantes podem ser aplicadas durante o processo de medição de peças minimizando assim o efeito dos erros cíclicos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] C.P. Hemingray, A.Cowley, M.Burdekin, "Positioning accuracy of numerically controlled machine tools", *Proceedings of the International Machine Tool Design and Research Conference*, 319-324, London, Macmillan (1971).

- [2] B. Di Giacomo, "Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines", PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, Manchester (1986).
- [3] ASME B89.4.1/97, "Methods goes performance evaluation of Coordinate Measuring Machines", American Society of Mechanical Engineers, New York, 2-31 (1997).
- [4] A. Butterworth, "Computer aided accuracy assessment", Master's Thesis, The Victoria University of Manchester, Manchester (1984).
- [5] A. Yamamoto, J. Otsuka, "The study on precision thread grinding with numerically controlled compensation", *Bulletin of the JSME* **13**, No.57, 447-453 (1970).
- [6] I. Ioshimoto, "Pitch error presentation and positional tolerancing", *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* **13**, No.1, 41-42 (1979).
- [7] M. Burdekin, C. Voutsadopoulos, "Computer aided volumetric calibration of coordinate measuring machines", NELEX82, Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, 1-11 (1982).
- [8] J. Tlustý, F. Koenigsberger, "Specifications and tests of metal cutting machine tools", *Proceedings of the Conference Manchester*, 34-49, Revell and George Limited, Manchester (1970).
- [9] A. Butterworth, M. Burdekin, "A computer aided system goes kinematic error calibration on lathes and thread grinding machines", Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, 86-91 (1987).
- [10] W. Israel et al, "An international length comparison at an industrial level using a photoelectric incremental encoder as transfer standard", *Precision Engineering* **27**, 151-156 (2003).

## **INITIAL STUDY OF CYCLIC ERRORS IN COORDINATE MEASURING MACHINES**

**Abstract** – The purpose of this work is to start a study about new evaluation methods of the cyclic errors in Coordinate Measuring Machines (CMMs). In order to achieve this objective, a measuring procedure of cyclic errors and application of Fourier analysis to the testing data were accomplished. Measurement of distance between consecutive lines of the scale was also obtained and the results have shown the existent manufacturing errors and suggested errors of electronic division. The determination of the period of the cyclic errors makes possible the use of strategies to minimize cyclic effects during measurements and positioning error calibration. A cyclic period of four millimeters was confirmed in the tests. So, a comparison of the cyclic errors influence during calibration of the positioning errors with and without a compensation strategy was made and the results have shown that the standard deviation decreases approximately sixty five percent.

