

AVALIAÇÃO DOS ERROS DINÂMICOS EM MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Benedito Di Giacomo

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: bgiacomo@sc.usp.br
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, São Carlos –SP, Cep: 13566-590

Roberto Hideaki Tsunaki

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: rtsunaki@sc.usp.br

Alexandre Machado Ferraz

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: amferraz@sc.usp.br

Resumo. *O propósito do presente trabalho é reunir num único material o que há publicado nos meios de divulgação científica sobre erros dinâmicos nas MM3Cs e relatar como os autores vêm tratando esse problema. O levantamento mostra que há poucos autores trabalhando no assunto. Verifica-se que tipos distintos de comportamentos podem ser estudados. Durante as medições a máquina experimenta excitações fruto das acelerações e desacelerações sobre as massas dos elementos móveis da máquina que modificam o posicionamento do apalpador. As velocidades de busca da posição de medição e as velocidades de recuo são sempre altas, enquanto as velocidades de aproximação são baixas. Assim, pode-se dizer que a movimentação a baixas velocidades exige respostas de controle nos limites de atuação do sistema. Os erros chamados de varredura que são caracterizados pela presença simultânea de acelerações nas três direções. Portanto, em função das características do processo de medição, a fim de garantir que a MM3C tenha o melhor desempenho possível, deve-se estabelecer um compromisso entre estes fatores, determinado pelo compromisso entre exatidão e repetibilidade com o tempo gasto na medição.*

Palavras chaves: *Erros dinâmicos, máquinas de medir coordenadas e metrologia dimensional*

1- INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea com uma economia cada vez mais globalizada traz um acelerado desenvolvimento tecnológico, tendo como consequência a evolução dos processos produtivos. Assim, há a necessidade de inserir junto do processo produtivo, na área de inspeção, sistemas de controle da qualidade mais rápidos, precisos, flexíveis e confiáveis.

A introdução das Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs), como meios de inspeção, tem permitido avanços muito grandes, pois possibilita a automação das atividades de inspeção e a integração entre os vários setores da empresa. Suas vantagens referem-se a características como flexibilidade e produtividade, uma vez que são empregadas para medição dos mais variados tipos de peças, reduzindo o tempo de medição e minimizando os erros de operação (Bosch, 1995). O emprego das MM3Cs, torna possível a avaliação de diversas propriedades metrológicas de uma peça numa única montagem (Kunzmann e Wäldele, 1988). Pode-se afirmar também que a exatidão destas máquinas é muito grande, podendo chegar até alguns décimos de microns, o que permite a substituição de um grande número de instrumentos de metrologia convencional.

As MM3Cs são sistemas complexos de medição que possuem a capacidade de medir coordenadas cartesianas em um determinado volume de trabalho. Os eixos do sistema cartesiano

são simulados através de um sistema de guias com mancais aeroestáticos e escalas opto-eletrônicas. A determinação das coordenadas dos pontos das superfícies das peças é feita através de apalpadores, e as características geométricas e dimensionais calculadas através de programas computacionais.

Como todo instrumento de medição as máquinas são suscetíveis a erros, sendo os erros geométricos e térmicos os que mais mereceram atenção no passado recente.

Todo movimento indesejável nas direções preferenciais e não preferenciais durante uma translação quasi-estática são causados por imperfeições de escala e na geometria dos componentes individuais que formam a estrutura das MM3Cs. Essas imperfeições derivam dos processos de fabricação de cada componente da máquina, portanto esses erros dependem da exatidão dos componentes e dos ajustes da máquina durante a instalação e manutenção da mesma (Weck, 1984).

Métodos e sistemas de compensação de erros tem sido motivo de pesquisa, uma vez que a compensação de erros é um meio efetivo e econômico para melhorar a exatidão de medição. Pelo uso dos mais variados métodos de compensação, os erros podem ser eliminados ou minimizados. Até então, a compensação de erros das MM3Cs está principalmente concentrada nos erros quasi-estáticos.

As MM3Cs são amplamente utilizadas nas indústrias como instrumentos de alta exatidão. Com uma demanda por medições cada vez mais rápidas, as máquinas anteriormente projetadas para alcançar alta exatidão em baixas velocidades passam a ser também solicitadas a alcançar alta exatidão em altas velocidades, sendo em muitos casos estes os mais importantes requisitos: velocidade e eficiência. Com o aumento da(s) velocidade(s) de medição pode ser observada uma outra classe de erros, os chamados erros dinâmicos que têm suas contribuições aumentadas consideravelmente, devido ao aumento da velocidade. O que anteriormente não era considerado torna-se agora preponderante.

As abordagens sobre erros dinâmicos das MM3Cs encontradas na literatura são limitadas, particularmente as desenvolvidas para uso em sistemas de compensação de erros (Mu e Ngoi, 1999). Diante deste fato, testes experimentais vem sendo realizados numa MM3C tipo ponte móvel, no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia – USP São Carlos, visando desenvolver um modelo matemático para previsão do comportamento do erro dinâmico da máquina de medir e estabelecer estratégias de medição que eliminem ou diminuam os erros dinâmicos para uso em um sistema de compensação de erros.

O propósito do presente trabalho, é o de reunir, num único material, os principais artigos que estão servindo de referência para a realização dos estudos e propostas que estão sendo desenvolvidos no laboratório de Metrologia da EESC-USP. As aplicações de cada abordagem são discutidas, bem como, suas vantagens e desvantagens, são também apresentadas as conclusões dos respectivos autores sobre os erros dinâmicos.

2- ERROS DINÂMICOS DAS MÁQUINAS DE MEDIR A TRÊS COORDENADAS

Os erros dinâmicos são entendidos como todos aqueles que acontecem ou são amplificados devido a variações de velocidade e aceleração durante um processo de medição. O aumento da velocidade de medição degrada a exatidão e a repetibilidade das MM3Cs, entretanto há uma demanda quase que natural pela diminuição dos tempos dos ciclos de medição.

Muitos são os fatores que influenciam o tempo gasto durante um processo de medição e devem ser analisados devido aos seus vínculos com a exatidão e a repetibilidade da medição. Dentre os fatores que mais influenciam o desempenho metrológico de uma MM3C, pode-se incluir a aceleração da estrutura da máquina, a distância de aproximação do apalpador, a velocidade de aproximação do apalpador, a estratégia de medição, as massas dos componentes do sistema de apalpamento e o comprimento da haste para apalpadores, todos provocando os aqui chamados erros dinâmicos (Jones e Ulsoy, 1995; Phillips, *em Bosch*, 1995).

Uma proposta para minimizar os erros dinâmicos durante as medições das MM3Cs é a compensação de erros. Através da modelagem matemática do comportamento dinâmico da

máquina. Outra proposta é projetar uma estrutura menos sensível a vibração. Testes de sensibilidade podem ser realizados na fase de desenvolvimento de um novo equipamento.

No estudo dos erros dinâmicos cinco tipos distintos de comportamentos indutores de erros dinâmicos podem ser observados: “*hunting*” do sistema de controle, comportamento dinâmico do apalpador de medição, modos de vibrar da máquina, comportamento dinâmico da máquina na medição por varredura, acelerações e desacelerações sobre os elementos móveis da máquina.

Na sequência estão apresentados separadamente trabalhos sobre cada um dos comportamentos citados anteriormente e a visão que os autores tem do problema, testes, resultados e discussões que fizeram nos respectivos artigos.

2.1- “Hunting”, flutuação do sistema de controle das MM3Cs

Durante o processo de medição as máquinas de medir experimentam ciclos diferentes de velocidades. Os ciclos são planejados com o objetivo de otimizar o desempenho da máquina durante a medição diminuindo o tempo gasto no processo, mas mantendo exatidão e repetibilidade convenientes.

Os vários níveis de velocidade utilizados nos processos de medição têm módulos diferentes para os diferentes tipos de máquinas, entretanto eles guardam entre si algumas características comuns. As velocidades de busca da posição de medição e as velocidades de recuo são sempre altas, enquanto as velocidades de aproximação são baixas.

Observando o problema a que está submetido exclusivamente o sistema de controle pode-se dizer que independentemente do tipo de máquina, a movimentação a baixas velocidades, exige respostas de controle nos limites de atuação do sistema. Nestas condições as integrações e as derivações são feitas sobre os sinais de controle nos seus limites de resolução causando muitas vezes instabilidades na atuação. Este problema de instabilidade, muito comum nos sistemas que utilizam retroação, é chamado de “*hunting*”.

Katebi, Lee e Grimbale (1994), desenvolvem um controlador otimizado, por realimentação avançada, para MM3C, que simultaneamente satisfaz requisitos conflitantes: maximizar a velocidade mantendo a mesma exatidão da posição, enquanto, mantém a robustez e a estabilidade.

No projeto do controlador, Katebi et al (1994), separam o sistema em três sub-sistemas menores onde uma ordem hierárquica é mantida entre eles. É então mostrado através de uma extensa modelagem e simulação que o problema de controle MIMO pode ser desacoplado em três problemas de controle SIMO. Um controlador ótimo de dois DOF é então desenvolvido para controlar a posição do apalpador e a vibração do braço. O controlador por realimentação é automaticamente gerado introduzindo-se o perfil da peça no projeto do diagrama do sistema de controle.

Ao comparar o desvio da posição do apalpador, para três controladores: PID, LQG com peso constante e LQG com peso variável; Katebi et al (1994), encontram uma deflexão máxima do apalpador para uma faixa de frequências abaixo de 13 rad/s, para o controlador PID. O “*overshoot*” observado é maior para o controlador PID quando comparado com os dos controladores LQG.

Resultados simulados e experimentais mostram que o controlador ótimo deve reduzir significativamente o desvio da posição do apalpador e também minimizar o tempo de posicionamento usando somente um servo atuador para altas velocidades para cada braço.

Como pode ser observado não há referência aos problemas de controle em baixas velocidade que talvez no caso de MM3Cs é o mais importante.

2.2- Comportamento dinâmico de apalpadores

O desempenho do apalpador, em termos de repetibilidade e suas características sistemáticas, pode exercer uma influência real sobre todo o desempenho do sistema de medição, Di Giacomo (1986).

Nawara e Kowalski (1984), apresentam resultados experimentais de testes dinâmicos com apalpadores dos tipos analógico e “touch trigger”. Duas fontes de erros foram consideradas nos testes: elasticidade dos elementos mecânicos e as propriedades eletromecânicas do contato. A força máxima e o tempo de duração do impacto são determinados. A equação de movimento é integrada levando-se em conta a deformação local: deflexão da haste, deformação da ponta do apalpador e da peça tocada. Foram investigados, a dependência da força e dos erros em função da velocidade de impacto, sendo o apalpador do tipo analógico avaliado somente no modo ponto a ponto. Como esperado, os resultados mostram que a força e os erros crescem com a velocidade. Na medição de uma peça circular o apalpador exibiu um erro máximo de 4 μ m para uma velocidade de 4mm/s, sendo que para uma velocidade de 8mm/s o erro máximo aumenta para 9 μ m.

Johnson, Yang e Butler (1998), discutem as características do erro dinâmico de um apalpador tipo “touch trigger” utilizado em MM3Cs. Durante a investigação, um número de parâmetros importantes foram identificados: velocidade de medição, distância de aproximação, coordenadas da posição do apalpador, comprimento e diâmetro da haste, orientação do apalpador, modo de operação, “pitch” da varredura, força de pré-tensão nas molas (força de calibração), tipo do apalpador e o ângulo de aproximação da superfície.

Os resultados conduzem a algumas recomendações úteis para a redução dos erros dinâmicos devido ao apalpador de medição. Algumas destas recomendações inclui: a seleção da velocidade ótima de medição, a montagem da força de pré-tensão e a escolha do tipo de apalpador.

2.3- Modos de Vibrar das MM3Cs

A análise dos modos de vibrar é de grande interesse dos fabricantes, pois estas informações são de extrema importância para a melhoria do projeto destas máquinas. Por exemplo, na fase de desenvolvimento da máquina, a identificação dos modos de frequência naturais mais baixos possibilita projetar uma estrutura menos sensível à vibração.

Nijs, et al (1988), utilizam um método teórico simplificado para obter as frequências naturais dos primeiros modos de vibrar de duas MM3Cs. Baseados no método de Lagrange e na redução de Guyan, descrevem como uma estimativa das menores frequências naturais pode ser obtida. O comportamento dinâmico do sistema é descrito pelas equações de movimento. Para determinar estas equações de movimento, a energia cinética total e a energia potencial total do sistema são calculadas e substituídas na equação de Lagrange. Os resultados teóricos foram verificados por análise modal experimental para as duas MM3Cs. Um acelerômetro é colocado no apalpador e a estrutura da máquina é excitada em vários pontos. O sinal da aceleração é medido e as frequências naturais dos modos numa faixa até 60Hz são identificadas para ambas as máquinas.

Os resultados obtidos para a primeira máquina mostram a existência de modos de vibrar nas frequências de: 5,8Hz, 15,7Hz, 34Hz, 24,4Hz e 57,7Hz. Devido as hipóteses simplificadoras, o método teórico não prevê o modo com frequência de 34Hz, sendo este obtido apenas experimentalmente. Os dois primeiros modos de vibrar estão relacionados com as baixas rigidezes relativa dos carros nas guias x e y respectivamente. Os outros três modos estão relacionados à massa do contra-peso. Para a outra máquina analisada, tipo portal, onde a estrutura e a posição dos motores são diferentes, os resultados mostram que as frequências mais baixas são também causadas pelas baixas rigidezes relativas dos carros nas guias e pela massa do contra peso.

O método se mostrou eficiente para a identificar as frequências naturais mais baixas dos modos de vibrar. Conclui-se que uma estrutura mais rígida pode ser projetada com o aumento da rigidez dos mancais e um balaceamento melhor do sistema de contra-peso. Isto aumentaria as frequências naturais mais baixas, evitando um erro dinâmico muito grande, para a máquina poder operar em altas velocidades com alta exatidão.

Okubo, N. e Toi, T. (1989), analisam a exatidão de uma máquina de medir devido à esforços dinâmicos, resultantes da movimentação da estrutura da máquina e dos motores. Utilizam um interferômetro laser integrado a um sistema para análise modal de uma MM3C tipo ponte móvel. O sistema detecta a vibração do apalpador com alta resolução mesmo com a coluna em movimento.

No estado estacionário foram identificados os modos de 16Hz, 33Hz, 37Hz e 45Hz. O modo de 16Hz muda para 10Hz quando o pórtico se movimenta. Os resultados mostram que a velocidade de movimentação é um fator muito importante para evitar uma ressonância da máquina, causando grandes vibrações, implicando em medições com um erro dinâmico muito grande. Quando a frequência devido ao acionamento dos motores coincide com a frequência natural da máquina, ocorrem os maiores erros dinâmicos.

O uso do interferômetro laser integrado ao sistema de análise modal mostrou ser mais adequado para detectar vibrações quando comparado com o uso de sistemas com acelerômetros para este tipo de máquina. A representação tridimensional da exatidão obtida para cada modo de vibrar no espaço de trabalho da máquina, pode ser utilizada para um procedimento mais apropriado de medida das coordenadas ou também para realizar modificações estruturais que podem diminuir os erros encontrados.

2.4- Comportamento dinâmico das MM3Cs nas medições por varredura

As máquinas de medir com capacidade de medição por varredura podem alcançar velocidades bastante altas e por isso são sempre candidatas a ocupar posições onde há demanda por alto desempenho. Entretanto, é de conhecimento geral, que a velocidade de medição é um fator limitante do processo pois degrada substancialmente características como exatidão e repetibilidade.

A velocidade de varredura impõe sobre a medição os chamados erros de varredura que são caracterizados pela presença simultânea de acelerações nas três direções.

Pereira, (2001), fez diversos testes em uma máquina de medir por varredura e propôs um modelo que calcula os erros ocorridos durante o processo de varredura de uma peça circular. Anéis de diâmetros diferentes foram medidos a diferentes velocidades. Adicionalmente foram conduzidos ensaios para se medir a força e foram realizados testes de desempenho por varredura sem contato. O modelo, colocado no computador de uma MM3C, pode compensar os erros de varredura quando círculos são medidos.

Foram usados anéis de diâmetros variando de 25,4 a 165 mm, com rugosidade superficial menor do que $0,4\mu\text{m}$. A densidade nominal de aquisição foi de 20 pontos/mm de distância percorrida pelo centro da ponta do apalpador. Os anéis foram medidos com as mesmas velocidades e aceleração linear constante, as velocidades variaram de 5 até 50 mm/s. Os dados adquiridos através das medições dos anéis, a força e varredura foram analisados utilizando-se série de Fourier, cada conjunto de dados foram ajustados por série de Fourier em seno e cosseno até cinco termos. O erro de varredura foi considerado o resultado devido a varredura menos o erro quasi-estático e menos o erro de circularidade.

2.5- Acelerações e desacelerações sobre os elementos móveis das MM3Cs

Durante as medições os elementos móveis que pertencem à máquina de medir sofrem acelerações e desacelerações nas direções preferenciais para levar o apalpador até o ponto de contato na peça. É conveniente que a aproximação seja feita de forma bastante lenta para evitar choques e eventuais danos ao apalpador ou à peça. Depois de tocar a superfície o apalpador deve recuar rapidamente e então iniciar um novo ciclo de medição. Neste processo a máquina experimenta excitações fruto destas acelerações sobre as massas dos elementos móveis da máquina que modificam o posicionamento do apalpador.

Phillips, *em Bosch*, 1995, analisa a influência da distância de aproximação e do número de pontos adquiridos por medição sobre os Erros Dinâmicos. Erros devido ao comportamento dinâmico da máquina podem produzir resultados inesperados como visto na Fig. (1b) em relação ao comprimento medido de um bloco padrão como função do número de pontos adquiridos.

A Figura (1a) mostra que o erro dinâmico é fortemente dependente da distância de aproximação do apalpador. Esta figura mostra uma variação aparente na posição da superfície de referência em função da distância de aproximação do apalpador. Os ensaios foram realizados para uma velocidade

de aproximação de 8mm/s, para uma MM3C utilizando um apalpador tipo “touch trigger”. Em velocidades de medição baixas, para distâncias de aproximação grandes, permite-se que as vibrações da estrutura da máquina adquiridas durante o posicionamento do apalpador sejam amortecidas ou até mesmo eliminadas, antes do contato do apalpador com a peça, possibilitando assim, a aquisição de pontos de medição num regime mais estável. Adicionalmente, deve ser encontrado o apalpador adequado para a realização da medição.

A Figura (1b) mostra que o erro na medida do comprimento do bloco padrão, cresce sistematicamente com o número de pontos medidos. Nessa medida todos os pontos foram obtidos utilizando uma distância de aproximação de 2,5mm, esta distância está na região de oscilações significantes da MM3C, como pode ser verificado na Fig. (1a). Desde que o (passo) comprimento do bloco padrão esteja fixado (25 mm), quando pontos adicionais de medida são tomados, a distância entre estes pontos decresce, como mostra a Fig. (1b), com dez pontos em cada superfície de referência, os pontos estão separados uns poucos milímetros, assim, a pequena distância entre pontos medidos, combinada com a pequena distância de aproximação, não permite tempo suficiente para a oscilação da MM3C se extinguir. Consequentemente, com pontos adicionais incluídos na medição, os efeitos do comportamento dinâmico da máquina tornam-se mais pronunciados.

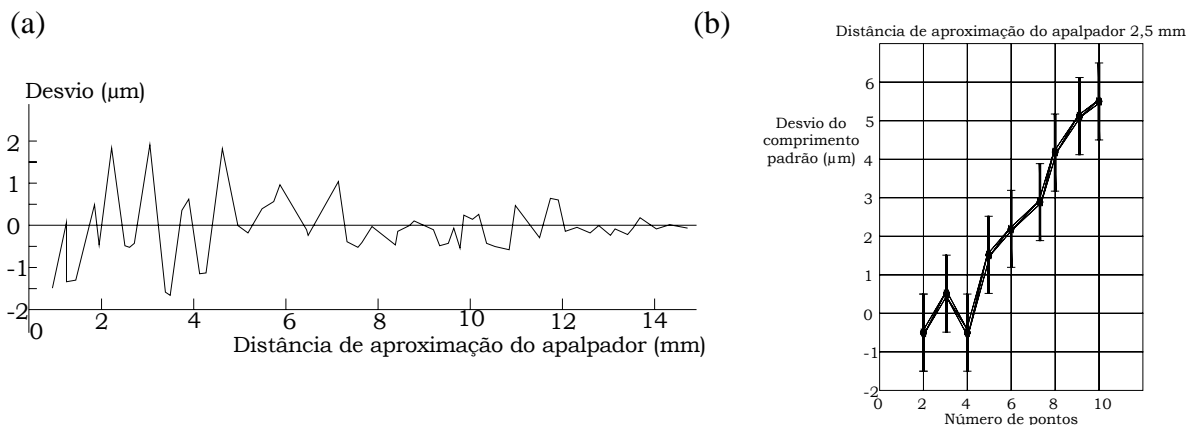


Figura 1. (a) Desvio em função da distância de aproximação; (b) do número de pontos medidos.

Jones e Ulsoy (1995a), quantificam e ilustram os efeitos da velocidade na qualidade da medida, das MM3Cs, Fig. (2). Foi utilizada uma MM3C tipo braço horizontal equipada com uma cabeça articulada e um apalpador tipo “touch trigger”. Através de um estudo por Análise de Variância (ANOVA) foram avaliados os efeitos da aceleração, da distância de aproximação e da velocidade de aproximação, em medições rápidas.

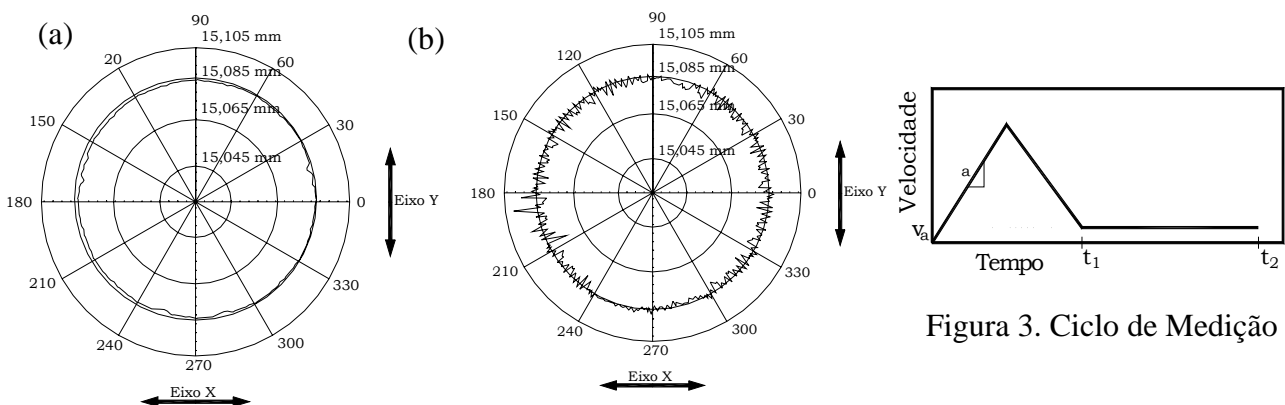


Figura 2. Medidas radiais de uma esfera padrão. (a) Baixa velocidade de operação; (b) alta velocidade de operação

A análise mostra que para um aumento da velocidade de operação há um decréscimo da qualidade da medida e para cada eixo individual há uma reação diferente. Também verificou-se um

compromisso entre o tempo de medida e a qualidade da medida, indicando a existência de uma velocidade ótima de operação para valores pré-estabelecidos de qualidade obtidas nas medições. Na Figura (3) pode ser visto o ciclo de medição.

Reconhecido o fato de que mudanças na configuração da máquina resultam em mudar características dinâmicas, tais como: frequência natural e razão de amortecimento, e que estas características não são bem conhecidas. Para uso em estratégias de otimização um modelo é desenvolvido para descrever a relação entre a velocidade e a qualidade da medida.

Uma aproximação de natureza dinâmica da MM3C envolve modelar cada eixo da máquina como sendo um sistema de dois graus de liberdade: massa, mola e amortecedor.

Jones e Ulsoy (1995b), apresentam uma estratégia para obter velocidades de operação que minimizem o tempo de medição da MM3C. A estratégia envolve minimizar o tempo de medida e os vínculos em termos de um problema de programação não linear que estão na qualidade das medições, na potência útil do motor e outras características específicas da máquina. A formulação do problema de otimização para um eixo pode ser estendida para movimentos em mais de um eixo.

Utilizando a estratégia acima citada, um estudo de sensibilidade também é apresentado, para determinar o quanto o projeto de uma MM3C afeta toda produtividade. São obtidos resultados experimentais utilizando trajetórias ótimas, calculadas para movimentos num único eixo e movimentos em mais de um eixo.

Uma aplicação é apresentada para demonstrar a implementação da estratégia de otimização numa medição. Uma haste é medida em três velocidades: velocidade definida pela máquina, uma velocidade limitada pela potência útil do motor e uma velocidade limitada pela qualidade da medição. Os resultados mostram uma redução de 27 por cento no tempo para a velocidade otimizada comparada com a velocidade definida pela máquina para uma qualidade da medida de $0,77\mu\text{m}$.

No modelo proposto por Jones e Ulsoy, (1995a), através da função objetivo e suas restrições modeladas para uso em estratégias de otimização, vê-se a possibilidade de construção de futuros modelos, mais complexos, para uso em sistemas de compensação de erros.

Segundo Weekers e Schellekens (1997), quando se está referindo ao apalpamento rápido em oposição ao apalpamento normal, não se está somente pretendendo uma MM3C com velocidade maior, mas genericamente, uma redução do tempo total do ciclo de medição para uma característica específica. Existem muitos fatores que influenciam o tempo de um ciclo de medição e devem ser vistos do ponto de vista da exatidão da medida. Estes fatores incluem: velocidade de posicionamento, de medida, aceleração, desaceleração e distância de aproximação. A relação entre os fatores e a exatidão depende de cada medida específica: dimensão ou perfil da medida; do conjunto de pontos medidos: ponto a ponto ou varredura. No caso da medição ponto a ponto, usando um apalpador tipo “touch trigger”, as mudanças de velocidades durante o movimento devem ser repetidas a cada ponto, para resultar num apalpamento correto. O caminho percorrido durante o movimento afeta grandemente o tempo do ciclo de uma medida específica, assim como, a exatidão. No esquema mostrado na Figura (4) o movimento é descrito, indicando a aceleração, velocidade e o erro de posição de um apalpador como função do tempo. Independentemente de qual tarefa é executada e de qual tipo de apalpador está sendo usada, o tempo do ciclo de uma medição específica está relacionado ao comportamento dinâmico da estrutura mecânica da MM3C.

Weekers e Schellekens (1997), analisam o comportamento dinâmico de uma MM3C identificando as deformações significantes. Para medir erros significativos “on-line” são colocados adequadamente sensores indutivos à MM3C. Baseado nos valores medidos e na modelagem cinemática das relações entre estes erros, os erros não medidos foram estimados. Os erros paramétricos são os erros medidos combinados com os erros estimados. Um modelo cinemático é usado para calcular o efeito dos erros paramétricos na posição do apalpador. O valor do erro calculado na posição do apalpador, durante um processo de medição específico, é utilizado num programa de compensação de erros.

Os erros, aqui chamados de paramétricos, descrevem o efeito combinado de várias fontes de erros que influenciam no posicionamento das partes da estrutura da MM3C envolvidas na medida, incluindo as juntas. Todas estas partes formam uma cadeia cinemática ou uma malha estrutural.

Utilizando um interferômetro a laser mais as óticas lineares, os erros de deslocamentos da posição do apalpador são medidos diretamente. Para obter os erros de posição do apalpador, é feita a diferença da leitura do laser com a leitura da escala do eixo y da MM3C.

Os resultados mostram o erro dinâmico comparado principalmente com os erros quasi-estáticos.

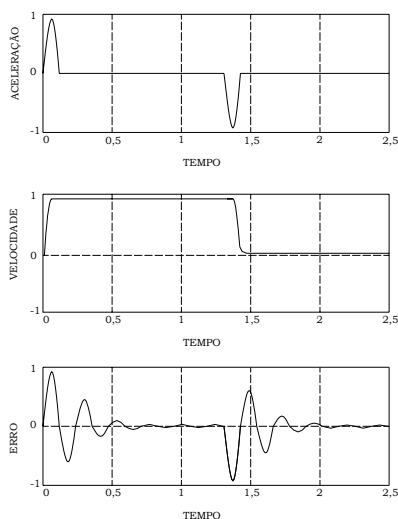


Figura 4. Variação da aceleração, velocidade e do erro dinâmico.

A diferença entre o erro estimado e medido fornece um resíduo máximo de $2,5\mu\text{m}$, que é aceitável, considerando que a amplitude do erro quasi-estático é igual ou melhor do que $4\mu\text{m}$. Comparado com o erro máximo encontrado, o resíduo é aproximadamente de 10%. O erro dinâmico, neste caso, pode ser compensado em 90%, utilizando o método de compensação baseado nos sensores de posição.

No caso de uma MM3C controlada por “joystick”, o erro dinâmico depois de uma repentina desaceleração é maior do que no caso anterior. O resíduo também é muito maior, é de aproximadamente $5\mu\text{m}$, em que todo o erro relativo é de aproximadamente 10%.

Destes dois resultados obtidos, fica claro que no mínimo para um eixo de movimento da MM3C testada, os erros dinâmicos podem ser muito bem compensados.

Mu e Ngoi (1999), desenvolvem um modelo para o erro dinâmico usando análise por elementos finitos. O modelo feito para uma MM3C tipo ponte móvel foi testado (simulado) para diferentes valores e direções de aceleração em diferentes posições do apalpador. Foram consideradas as forças de inércia causadas pela massa do carro y, incluindo o braço z e as partes correlacionadas.

O método para o cálculo dos erros dinâmicos é apresentado para o movimento de translação da ponte, ao longo do eixo x. Um ajuste polinomial foi estabelecido pelo método dos mínimos quadrados e o erro em qualquer posição x ao longo do eixo, para qualquer aceleração a_x pode ser obtido. Obter alta exatidão com este modelo torna-se difícil, entretanto, a análise teórica pode ser combinada com resultados experimentais. Assim, os erros dinâmicos de rotação da máquina, na posição do apalpador, foram medidos por interferometria a laser. Para o maior erro dinâmico encontrado de $25,5\mu\text{m}$ tem-se uma previsão teórica de $26\mu\text{m}$, portanto um erro menor que 2%.

A substituição dos elementos barras por elementos sólidos para as partes da estrutura da máquina e um maior refinamento da malha combinada com equações para o comportamento dinâmico fornece um resultado teórico mais exato. Apesar de algumas simplificações, mais a adição do ajuste polinomial, os erros dinâmicos da MM3C podem ser estimados e compensados.

Chensong, et al, (2002), modelaram os erros dinâmicos de uma MM3C, tipo ponte móvel, que utiliza um apalpador do tipo “touch trigger”. O processo de apalpamento foi analisado, os erros dinâmicos foram medidos e utilizando uma nova formulação, foi possível prevê-los e compensá-los.

Inicialmente observaram que os erros dinâmicos são causados, principalmente, pela rotação dos componentes da máquina. As medições dos erros rotacionais foram realizadas com um interferômetro a laser. Os resultados indicaram que para movimentos na direção x, onde o carro y

está posicionado no extremo oposto ao carro x, encontram-se, os maiores valores de “yaw”, os erros dinâmicos nesta direção foram foco de estudo.

Uma formulação, através de redes neurais, foi utilizada para prever os erros dinâmicos. Os parâmetros envolvidos nesta formulação foram: velocidade e aceleração de posicionamento, velocidade e aceleração de medida, distância de aproximação e distância de retração. Os erros dinâmicos exibiram uma relação complexa e não linear com estes parâmetros. O modelo pode ser usado para prever e compensar os erros dinâmicos das MM3Cs. Os resultados experimentais foram satisfatórios. Quando a velocidade de posicionamento é de 50mm/s, velocidade de medição de 5mm/s e para uma distância de aproximação de 2mm, usando este modelo, quando a aceleração de posicionamento é de 100mm/s², o erro dinâmico é reduzido de 6,5 para 1,5µm.

As relações existentes entre os parâmetros envolvidos no estudo realizado no trabalho de Chensong, et al, (2002) são de grande utilidade para a obtenção de modelos matemáticos de MM3Cs para uso em sistemas de compensação de erros. Verifica-se a possibilidade de encontrar relações matemáticas lineares, ou não lineares, entre estes parâmetros, que colocadas nos modelos matemáticos destas máquinas, podem prever o erro dinâmico de forma direta.

3- CONCLUSÕES

Testes experimentais através do uso da interferometria laser, permitem um entendimento melhor dos parâmetros envolvidos no comportamento dinâmico das MM3Cs.

Testes em peças circulares são de grande interesse e grande aplicação industrial.

Os parâmetros envolvidos num ciclo de medição: aceleração, velocidade de posicionamento, desaceleração, distância de aproximação, velocidade de medição, velocidade e aceleração/desaceleração de recuo, podem ser otimizados. A obtenção experimental das relações existentes entre estes parâmetros pode permitir, de forma indireta, a predição dos erros dinâmicos.

Os efeitos das velocidades e das acelerações nas medições, utilizando MM3Cs, estão fortemente ligados ligados ao entendimento das relações existentes entre os parâmetros envolvidos num ciclo de medição aliado a uma correta análise geométrica dos erros quasi-estáticos destas máquinas.

Os métodos utilizados até o presente momento não podem prever todos os erros dinâmicos nas MM3Cs, diante do fato que são realizadas simplificações para o entendimento do comportamento dinâmico destas máquinas.

4- BIBLIOGRAFIA

- Bosch, J. A. (1995). Evolution of Measurement. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, editor Bosch, J. A., pub. Marcel Dekker, cap.1.
- Chensong Dong; Chuck Zhang; Ben Wang; Guoxiong Zhang (2002). Prediction and Compesation of Dynamic Errors for Coordinate Measuring Machines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 124, p. 509-514, aug.
- Di Giacomo, B., (1986). Computer Aided Calibration and Hybrid Compensation of Geometric Errors in Coordinate Measuring Machines. *Ph. D. Thesis – The Victoria University of Manchester Institute of Science and Technology, England* 1-418.
- Johnson, R. P.; Yang, Q. P. and Butler, C. (1998). Dynamic Error Characteristics of Touch Trigger Probes Fitted to Coordinate Measuring Machines. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 47(5), p. 1168 – 1172, oct.
- Jones, S. D. and Ulsoy, A. G. (1995 a, b). An optimization strategy for maximizing coordinate measuring machine productivity. Part 1: quantifying the effects of operating speed on measurement quality. Part 2: problem formulation, solution, and experimental results.. *Journal of Engineering for Industry – Transactions of the ASME*, v.117, p. 601 – 618.
- Katebi, M. R.; Lee, T.; Grimble, M. J. (1994). Total control of fast coordinate measuring machines. *IEE – Proceedings: - Control – Theory – and – Applications* – 141 – 6, p. 373-384.

- Kunzmann, H. & Wäldele, F. (1988). Performance of CMMs. *Annals of the CIRP*, v. 39/2, p. 633 – 640.
- Mu, Y., H.; Ngoi, B., K. (1999). Dynamic Error Compensation of Coordinate Measuring Machines for High-Speed Measurement. *The International Advanced Manufacturing Technology*, 15, p. 810-814.
- Nawara, L.; Kowalski, M. (1984). The Investigations on Selected Dynamical Phenomena in the Heads of Multi-Coordinate Measuring Devices. *Annals of the CIRP*, v. 33/1.
- Nijs, J. F. C.; Lammers, M. G. M.; Schellekens, P. H. J.; van der Wolf, A. C. H. (1988). Modelling of a Coordinate Measuring Machine for Analysis of Its Dynamic Behavior. *Annals of the CIRP*, v.37/1.
- Okubo, N. e Toi, T. (1989). Spatial Dynamic Accuracy of 3-Dimensional Coordinate Measurement Machine Using Laser Interferometer. *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, Las Vegas, NV.
- Pereira, P. H. (2001). “Characterization and Compensation of Dynamic Errors of a Scanning Coordinate Measuring Machine”. *Ph.D. Thesis, University of North Carolina at Charlotte*.
- Phillips, S. D. (1995). Performance Evaluations. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, editor Bosch, J. A., pub. Marcel Dekker, cap.7.
- Weck, M. (1984). Handbook of Machine Tools, volume 4: Metrological Analysis and Performance Test, John Wiley & Sons, London.
- Weekers, W. G.; Schellekens, P. H. J. (1997). Compensation for dynamic errors of coordinate measuring machines. *Measurement*, v. 20, n. 3, p. 197-209.

EVALUATION OF DYNAMIC ERRORS IN COORDINATE MEASURING MACHINES

Benedito Di Giacomo

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: bgiacomo@sc.usp.br
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, São Carlos –SP, Cep: 13566-590

Roberto Hideaki Tsunaki

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: rtsunaki@sc.usp.br

Alexandre Machado Ferraz

Escola de Engenharia de São Carlos - USP e-mail: amferraz@sc.usp.br

Abstract. *The purpose of this work is to gather information concerning dynamic errors on CMMs from scientific publications and to report how authors focus on this problem. It is known that there are't many authors working on the theme. Different types of behaviour can be studied. During measurements, moving elements on the CMM undergo to acceleration to take the probe to the point of contact on the part. In this process, the CMM undertake excitations over the masses of its moving elements that modify the probing positioning point. CMMs are often submitted to different measuring cycles where velocities are high to put the probe close to the part, whilst very low when triggering points. Moving at low velocities requires control feedback on their limits, what can also severely damage the measuring accuracy. Scanning type measurement, which is characterized by the simultaneous presence of accelerations in several directions are limited in accuracy and repeatability by the same reasons above. In general it can be said that velocity influences accuracy and repeatability of CMM's measurement and determines the time consumed in the process, therefore, a compromised solution must be taken to ensure better performance levels.*

Keywords. *Dynamic errors, coordinate measuring machines and dimensional metrology.*