



# ESTUDO DE PADRÕES DE FRANJAS INTERFEROMÉTRICAS APLICADAS A SISTEMAS DE POSICIONAMENTO DE ALTA PRECISÃO

**Luciana Montanari**  
**Jaime Gilberto Duduch**  
**Arthur José Vieira Porto**

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos,  
Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense,  
CEP 13566-590, São Carlos, SP

## Resumo

Esse trabalho visa estudar um método para a identificação da posição de um microposicionador angular rotativo (MAR) construído para usinagem de ultraprecisão. O método usado para a identificação de posição é baseado em reconhecimento de padrões de franjas interferométricas, tendo como classificador de padrões um algoritmo baseado em redes neurais artificiais. Os padrões de franjas representam posições que podem ser obtidas a partir de equações cinemáticas provenientes de uma modelagem matemática do sistema. Dentre as principais características a serem alcançadas pelo algoritmo idealizado está a habilidade de identificar a posição de uma superfície sobre o sistema microposicionador angular e, assim, permitir maior rapidez de processamento das informações, possibilitando seu emprego em sistemas de controle em tempo real. A aplicação desta técnica foi avaliada por meio de simulação e apresenta resultados significativos para incentivar pesquisas envolvendo padrões de franjas interferométricas.

*Palavras-chave:* microposicionador, ultraprecisão, franjas interferométricas, redes neurais artificiais.

## Introdução

A capacidade de produzir superfícies com qualidade óptica sem o emprego de processos posteriores, como lapidação e polimento, fez do torneamento de ultraprecisão uma das tecnologias de fabricação óptica mais empregada nas últimas duas décadas (Zhou & Ngoi, 2003). O torneamento de ultraprecisão pode ser definido como o processo que emprega uma ferramenta de diamante monocristalino em uma máquina-ferramenta com elevada rigidez e controle com alto nível de repetitividade e resolução de posicionamento (Jasinevicius, 1998), possibilitando, por exemplo, a obtenção de superfícies anesféricas complexas, assim como tolerâncias de forma e acabamento da ordem de nanômetro (Jasinevicius *et al.*, 2003).

Em geral, a forma das peças usinadas é determinada pela posição relativa entre a ferramenta de corte e a peça durante o processo de usinagem. Dessa forma, para alcançar melhores resultados na usinagem, a posição relativa entre a peça e a ferramenta de corte deve ser controlada com compatível grau de precisão, resolução e repetitividade.

Diversos autores estão atentos à resolução do problema do controle da posição relativa ferramenta/peça em processos de usinagem de alta precisão. Soluções variam desde a inclusão de microposicionadores em máquinas já existentes até a concepção e desenvolvimento de novas máquinas aplicando as mais modernas tecnologias e avançados conceitos de projeto, como, por exemplo, em Corbett *et al.* (1999) e Weck & Day (2002).

O uso de microposicionadores aplicados à usinagem de ultraprecisão permite a obtenção do perfil desejado, podendo-se alterar a posição relativa ferramenta/peça pela movimentação da própria peça, possibilitando a obtenção de formas complexas, as quais dificilmente poderiam ser efetuadas com métodos tradicionais, aumentando, assim, a flexibilidade do processo. Outro meio de obter o perfil desejado é pela correção do movimento diretamente na ponta cortante da ferramenta.

No intuito de alcançar resoluções de posicionamento submicrométricas e com rapidez de resposta suficientemente alta, vários pesquisadores têm optado por soluções que

usam diversas geometrias, tipos de acionamento, sensores de posicionamento e algoritmos de controle em máquinas-ferramenta de alta precisão e/ou equipamentos de medição.

Kikuri *et al.* (1988) apud Mizuno (1993) apresentaram um posicionador angular usando um sistema de alavanca para posicionamento de substratos para fabricação de circuitos integrados. Embora fornecendo resolução de 0,3 graus, a rigidez e o comportamento dinâmico não se mostraram satisfatórios para usinagem de ultraprecisão.

Yonezawa *et al.* (1990) apud Jesus (1999) mostraram ensaios realizados em uma mesa de posicionamento de alta precisão e alta velocidade, que possuía dois mecanismos de acionamento complementares e dupla malha de controle. Um Laser interferométrico, cuja resolução era de 5 nm, foi usado para obter realimentação de posição no sistema de controle e um *encoder* foi acoplado ao motor de modo que a velocidade angular pudesse ser usada para compensação de atrito.

Já Zhong & Nakagawa (1992) mostraram uma mesa de posicionamento angular com três graus de liberdade, isto é, movimento na direção axial e inclinação em torno de dois eixos perpendiculares, com resolução de 10 nm, para experimentos de retificação, especificamente para obtenção de superfícies não planas. A mesa era apoiada em três pontos por molas espirais que eram acionadas por três atuadores piezelétricos e seu controle foi feito com base na teoria de controle  $H_{\infty}$ .

Por sua vez, Mizuno (1993) propôs um posicionador com três graus de liberdade, que possuía três atuadores piezelétricos. O sistema de controle de posição empregava sensores de fibras ópticas.

Tomita *et al.* (1994) desenvolveram um posicionador angular com estrutura paralela com seis graus de liberdade de posicionamento e resolução de 10 nm. Entretanto, não

foi possível controlar a posição da peça com o eixo-árvore em movimento, devido a sua baixa rigidez e largura de banda.

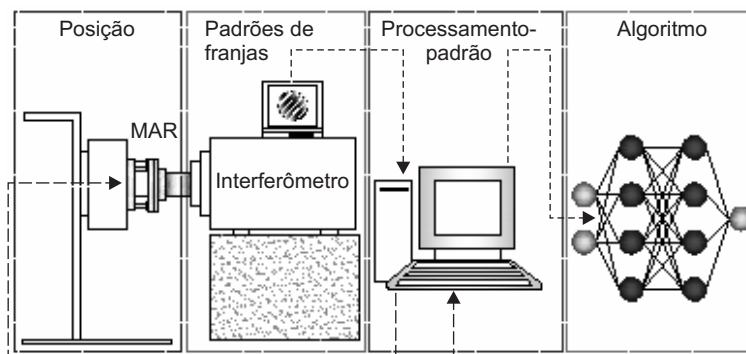
Lee & Gweon (2000) estudaram um sistema de microposicionamento angular com três graus de liberdade (um deslocamento linear e dois angulares) que usava três atuadores eletromagnéticos e mancais aerostáticos. O sistema foi montado sobre outro plano de movimento que possuía três graus de liberdade, resultando num sistema com seis graus de liberdade.

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho é estudar um método para a identificação da posição de um microposicionador angular rotativo (MAR), construído para usinagem de ultraprecisão. O método usado para a identificação de posição é baseado em reconhecimento de padrões de franjas interferométricas, tendo como classificador de padrões um algoritmo baseado em redes neurais artificiais.

## Metodologia

A Figura 1 mostra um esquema do sistema proposto.

De modo geral, como pode ser observado pela Figura 1, o MAR encontra-se numa posição conhecida e o interferômetro faz a leitura da superfície usinada colocada sobre o MAR. Então são vistas franjas interferométricas que, de acordo com a posição e quantidade, representam determinada posição do MAR. As franjas interferométricas são produzidas por milhares de pontos, formando uma única imagem. Daí, uma placa de aquisição acoplada em um computador faz a captura dessas imagens, processando-as e transformando-as em vetores de entrada da rede neural artificial, cuja função é o reconhecimento e a identificação da posição do MAR.



**Figura 1** Esquema que caracteriza o sistema.

A associação entre reconhecimento de imagens, redes neurais e uso de métodos ópticos apresenta-se como uma inovação aplicada a projetos de ultraprecisão, em particular a sistemas de posicionamento de alta precisão.

A Figura 2 mostra o princípio de funcionamento mecânico do MAR, o qual é composto, basicamente, por uma base rígida (inferior) e uma base flexível (superior) ligadas por dois atuadores piezelétricos ((P410.30) da Physik Instrumente®) e um ponto fixo, dispostos a 120 graus, a uma distância  $r$  do centro. Essas partes são perfeitamente solidárias, sendo que o movimento angular da mesa superior é originado pelo movimento linear de atuadores piezelétricos que estão fixados à mesa inferior. Os elementos constituintes geram um sistema de microposicionamento angular de alta rigidez e ampla largura de banda, capaz de posicionar uma superfície com resolução inferior a  $4 \cdot 10^{-5}$  graus, tal que este sistema posicionador será encarregado de modificar a posição relativa ferramenta/peça durante a usinagem de ultraprecisão.

Através de modelagem matemática, aplicando matrizes de transformação homogênea foi possível obter um conjunto de equações ((1), (2) e (3)) que relacionam o deslocamento individual de cada atuador e a variação angular desencadeada na plataforma (Montanari, 1999).

$$dA = -d - r \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 + r \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$dB = -d + r \sin \theta_1 \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$dC = -d - r \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 - r \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (3)$$

em que:

$d$ : translação do ponto central do posicionador na direção Z;

$r$ : distância do atuador até o centro do MAR;

$\theta_1$ : giro com relação ao eixo X;

$\theta_2$ : giro com relação ao eixo Y;

$dA$ ,  $dB$ ,  $dC$ : deslocamento dos atuadores A, B e C, respectivamente.

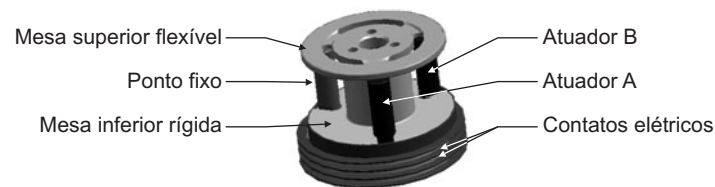
Portanto, as equações (1), (2) e (3) podem ser usadas para encontrar as entradas de controle necessárias  $dA$ ,  $dB$  e  $dC$  a fim de alcançar determinada posição do MAR, isto é, é possível identificar as rotações e translações presentes na cinemática do sistema posicionador, observando-se que para as equações (1), (2) e (3) existe uma correspondência única das saídas com relação às entradas.

Quando se aplicam tensões nos atuadores piezelétricos, por seu efeito, são produzidos deslocamentos, os quais são as entradas do sistema de equações anterior. Esses deslocamentos ocasionam diferentes posições da parte superior flexível do MAR, as quais são as saídas do sistema de equações. Para cada posição existe um padrão de franjas interferométricas.

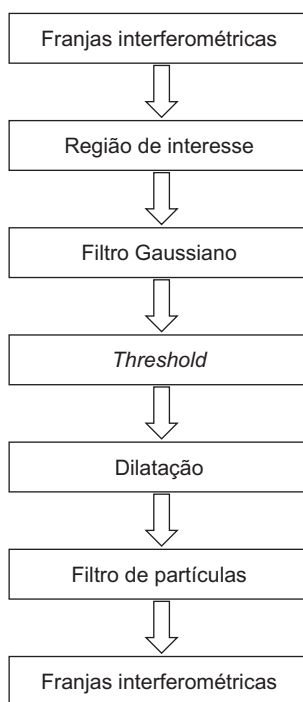
Sabendo-se a relação existente entre tensão e deslocamento angular, pôde-se mapear o problema por meio dos padrões de franjas interferométricas obtidos para cada condição de contorno. Para tanto, foram aplicadas tensões predeterminadas, a saber: de 0 V a 600 V para o atuador A e de 0 V a 450 V para o atuador B, com variação de 50 V.

Os padrões de franjas interferométricas foram obtidos a partir do interferômetro de Fizeau, que funciona como sensor de medição e gerador de imagens, capaz de produzir sinais de entradas referentes à inclinação do sistema analisado. A escolha do sistema a Laser se deve à facilidade de montagem, seguindo o princípio de Abbé, além de ter como característica principal alta resolução ( $31,6 \text{ nm}$ ,  $\lambda/20$  com  $\lambda = 632 \text{ nm}$ ) (Wyko® 6000, 1989), e ainda apresenta um sistema de medição com estrutura metrológica independente.

Os padrões de franjas interferométricas foram pré-processados a fim de minimizar os ruídos e/ou funções contendo informações significativas que não são essenciais à classificação do processo. Os passos do pré-processamento são apresentados no fluxograma, como mostra a Figura 3.



**Figura 2** Modelo do MAR.



**Figura 3** Fluxograma do pré-processamento da imagem.

A imagem, após o pré-processamento, foi transformada no vetor de entrada de um algoritmo baseado em redes neurais artificiais competitivas, mais precisamente Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (Kohonen, 2001). Dentre as principais características a serem alcançadas pelo algoritmo idealizado está a habilidade de identificar a posição de uma superfície sobre o MAR e, assim, permitir maior rapidez de processamento das informações, possibilitando seu emprego em sistemas de controle em tempo real. Alguns dos principais motivos que levaram a essa escolha foram:

- Apropriada para trabalhar com imagens.
- Algoritmo robusto, permitindo a obtenção de bons resultados, mesmo com falhas nos dados de entrada.
- Possibilidade de trabalhar com atributos binários.

O método de processamento usado foi o de comparação *pixel* por *pixel*. Tal método foi escolhido por apresentar características favoráveis ao estudo, como compatibilidade de processamento em tempo real e necessidade de baixa quantidade de dados para classificação da imagem (Fageth *et al.*, 1996). Além disso, pesquisas apontam para o uso de redes auto-organizáveis quando se deseja comparar *pixels* de imagens armazenadas com *pixels* de imagens inéditas.

## Resultados e Discussões

Foi efetuado um mapeamento do comportamento do MAR, cobrindo amplamente o domínio do problema, permitindo o uso dos Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen para identificação do sistema.

Os vetores de entrada da rede neural são referentes às imagens, caracterizando os padrões de franjas interferométricas, obtidas a partir da variação de cada atuador. A arquitetura do algoritmo usado consiste numa função topológica hexagonal com 20 neurônios. Esses neurônios competem entre si segundo o critério de distância Euclidiana, realizando 1000 iterações. Como é uma rede competitiva, cada neurônio vencedor deve caracterizar uma tensão correspondente ao atuador acionado, que, por sua vez, corresponde a um padrão de franjas interferométricas, ou seja, os neurônios de saída da rede neural competem entre si para ser ativado e somente um neurônio de saída ou um neurônio por grupo é ativado, representando um padrão de franjas interferométricas. Foram apresentados três conjuntos de dados à rede neural com imagens pré-processadas, geradas por tensões diferentes, aplicadas nos dois atuadores piezelétricos. Dessa forma, para a obtenção de um bom desempenho do sistema, espera-se que o algoritmo seja capaz de identificar qual atuador é o responsável pela imagem gerada e qual a tensão atuante. A Tabela 1 mostra a relação dos três conjuntos de amostras e o neurônio vencedor.

Segundo o princípio de interferometria, quando a superfície em teste está perfeitamente plana e paralela com o plano óptico, não são observadas franjas. Se a superfície está plana, porém ligeiramente inclinada em relação ao plano óptico, são observadas uma família de franjas. Os espaçamentos das franjas são proporcionais à inclinação da superfície em relação ao plano óptico e a mudança de direção de acordo com a posição angular, dando a impressão de que as franjas se movimentam

(Duduch, 1993). Entretanto, ainda confunde as imagens geradas por tensões muito próximas, tanto no atuador A quanto no atuador B. Portanto, como se observa na Tabela 1, a rede separou, com eficiência, os atuadores acionados. Entretanto, ainda confunde as imagens geradas por tensões muito próximas, tanto no atuador A quanto no atuador B. A Tabela 2 mostra o percentual de acerto para cada tensão atuante, bem como os neurônios vencedores.

**Tabela 1** Neurônios vencedores – atuadores A e B.

Tensão [V]	Neurônios vencedores					
	Atuador A			Atuador B		
	I	II	III	I	II	III
50	20	20	20	16	16	16
100	3	20	20	1	1	14
150	11	4	4	5	5	5
200	11	4	4	15	15	15
250	7	7	11	13	13	13
300	6	11	11	17	17	17
350	19	19	19	17	17	17
400	12	12	12	2	2	2
450	10	10	10			
500	8	8	14			
550	3	3	3			
600	9	9	9			

**Tabela 2** Acertos da rede neural.

Tensão [V]	Neurônios vencedores		Porcentagem de acerto [%]	
	Atuador A	Atuador B	Atuador A	Atuador B
50	20	16	100	100
100	20	1	67	67
150	4	5	67	100
200	4	15	67	100
250	7	13	67	100
300	11	17	67	100
350	19	17	100	100
400	12	2	100	100
450	10		100	
500	8		67	
550	3		100	
600	9		100	

Apesar da percentagem mínima de acerto estar na ordem de 67 para o atuador A, nota-se que a rede reconheceu eficientemente qual atuador estava acionado. Quanto às imagens geradas por tensões muito próximas, ainda há certa confusão na identificação. Provavelmente, se fosse apresentado maior número de vetores de entrada, o resultado seria melhor. Além disso, a criação de regiões de interesse faz com que apareçam problemas nessas regiões, assim, apesar de o mapa auto-organizável ser um algoritmo robusto e tolerante a falhas, como é uma comparação por meio de *pixels*, pode ter havido perda de informações necessárias nessas regiões, e, ainda, durante a captura da imagem pode ter havido interferência de ruídos mecânicos e/ou acústicos. No entanto, os resultados apresentados já se mostram significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

Nota-se que, para o atuador B, houve maior eficiência na identificação dos padrões de imagens. Todavia, verifica-se que as equações (1), (2) e (3) também são diferentes para os atuadores A e B. A variação angular do atuador B é mais acentuada que a do atuador A, logo, as imagens geradas pelo atuador B para tensões muito próximas são mais distintas. Isso pode ser visto mais detalhadamente em Montanari (2004). No entanto, os resultados apresentados já se mostram significativos para incentivar pesquisas envolvendo imagens interferométricas.

A aplicação de redes auto-organizáveis em interferometria vai além da identificação de planicidade da superfície em estudo ou verificação de sua concavidade ou convexidade. Ela se estende às superfícies sujeitas às irregularidades, ou, ainda, a outros tipos de imagens interferométricas que tenham padrões definidos, além de imagens geradas por outros meios, não necessariamente pelo processo de interferometria. Para isso, basta mapear amplamente o problema, conhecendo todas as suas características, e, assim, organizar uma base de dados que servirá de referência a outros padrões apresentados.

## Conclusões

De fato, o sistema proposto possui qualidades notáveis, dentre as quais cabe destacar a simplicidade, quer na fabricação dos dispositivos opto-mecânicos, quer na obtenção da curva característica tensão/posição, uma vez que a calibração do sistema posicionador é realizada por meio de um modelo matemático sobre o qual pesam poucas hipóteses restritivas, o que acarreta, portanto, um modelo computacional compacto que permite ao usuário, para cada aplicação, deduzir com alta confiabilidade a função que estabelece a correspondência entre tensão do atuador e posição da peça a ser usinada ou a função inversa, posição da peça e tensão do atuador.

Constatou-se que o emprego de mapas auto-organizáveis para identificação de imagens interferométricas, bem como o processamento de imagens, apresentam-se como técnicas

promissoras na área de projeto de ultraprecisão, permitindo identificar a superfície em estudo e relacioná-la a padrões preestabelecidos. Enfim, os resultados validam o sistema na forma como foi sintetizado e comprovam a viabilidade do uso de imagens interferométricas em sistemas de posicionamento. Além disso, outra aplicação com esse tipo de resultado seria, por exemplo, na identificação de superfícies côncavas e convexas, já que nas imagens geradas por esse tipo de superfícies a formação de franjas sempre se apresentaria em direção contrária.

Em suma, a interferometria, como metodologia de medição em sistemas de posicionamento de alto desempenho, gera bons resultados e, dessa forma, deve ser incluída no elenco das técnicas convencionais já consagradas na área de nanotecnologia da engenharia mecânica.

## Agradecimentos

Ao CNPq e FAPESP, pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- CORBETT, J.; STEPHENSON, D.; SWEET, J.; WILLS-MOREN, W. An ultra precision machine tool demonstrating a novel vibration resistant structure. INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY, 1., 1999. *Annals...* 1999. p. 159-162.
- DUDUCH, J. G. *Some critical aspects of machine design and performance for the machining of brittle materials*. 1993. 155 f. Tese (Ph.D) – Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield.
- FAGETH, R.; ALLEN, W. G.; JÄGER, U. Fuzzy logic classification in image processing. *Fuzzy sets and systems*, v. 82, p. 265-278, 1996.
- JASINEVICIUS, R. G. *Influência da transição de fase sobre os limites de ductilidade observados no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino*. 1998. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – EESC- USP, São Carlos.
- JASINEVICIUS, R. G.; CAMPOS, G. P.; MONTANARI, L.; TSUKAMOTO, R.; GARCIA, J. P.; CAMARGO, R.; DUDUCH, J. G.; PORTO, A. J. V. Influence of the mechanical and metallurgical state of the Al-Mg alloy on the surface integrity in ultraprecision machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, v. 25, n. 3, p. 222-228, Jul. 2003.
- JESUS, G. A. R. *Uma contribuição para o desenvolvimento e controle de sistemas de posicionamento submicrométrico*. 1999. 193 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps*. 3 ed. Springer-Verlag, 2001. 501 p.
- LEE, S. Q.; GWEON, D. G. A new 3-DOF Z-tilts micropositioning system using electromagnetic actuator and air bearings. *Precision Engineering*, v. 24, p. 24-31, 2000.
- MIZUNO, H. *Micro-tilt controlled rotating face-plate stage for single-point diamond turning*. 1993. 133 f. Thesis (Ph.D) – Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield.
- MONTANARI, L. *Técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um microposicionador angular*. 1999. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – EESC-USP, São Carlos.
- MONTANARI, L. *Reconhecimento de imagens interferométricas aplicado a sistemas de posicionamento de alta precisão*. 2004. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – EESC-USP, São Carlos.
- TOMITA, Y.; KOYANAGAWA, Y.; SATOH, F. A surface motor driven precise positioning system. *Precision Engineering*, v. 16, n. 3, p. 184-191, Jul, 1994.
- WECK, M.; DAY, M.. Machine concepts for microcutting with diamond tools. *Industry Diamond Review*, v. 62, n. 594, p. 162-169, 2002.
- WYKO® 6000. *WYKO CORPORATION*. Manual, 1989.
- ZHONG, Z.; NAKAGAWA, I. Development of a microdisplacement table for ultra-precision machining and grinding for curved surfaces by use of it. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v. 26, n. 2, p. 102-107, 1992.
- ZHOU, M.; NGOI, B. K. A. Factor affecting form accuracy in diamond turning of optical components. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 138, p. 586-589, 2003.