

## MICROMÁQUINAS: Uma Introdução ao Tema

**André Mendeleck**

**Douglas Eduardo Zampieri**

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Mecânica Computacional  
Cx. P. 6122 – 13083-970 - Campinas, SP, Brasil

**Resumo.** Neste artigo apresentamos uma revisão sobre micromáquinas, suas características, formas construtivas, atuadores, efetadores, formas de controle e aplicações. Dentro da diversificada gama de aplicações o enfoque principal será em microrrobótica.

**Palavras-chave:** robótica, micromáquinas, nanotecnologia

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos atuadores, novas técnicas de controle, novos materiais, novas técnicas construtivas e as exigências do mercado consumidor na soluções de problemas cada vez mais complexos estão propiciando o surgimento de sub-áreas do conhecimento, cada vez mais especializadas, junto a grande área chamada mecatrônica. Uma destas sub-áreas é a micromecatrônica, cujo interesse são as micromáquinas.

Micromáquinas são equipamentos (hardware mecânico) com dimensões reduzidas, frequentemente referenciadas com dimensões abaixo de 1 milímetro. Para Ishihara (Ishihara 1996), "micromecatrônica é a integração sinérgica entre elementos mecânicos e elétricos baseada no efeito de escala em um micromundo (microambiente)". No entanto, este termo pode ser associado a um número maior de elementos mecânicos e elétricos. Micromáquinas geralmente estão associadas ao elementos com dimensões na ordem de nanômetros, manufaturados a partir de tecnologia utilizada na fabricação de circuitos integrados. Este conceito deve ser ampliado a um número maior de máquinas, englobando as máquinas em miniatura.

Podemos classificar as micromáquinas utilizando os mais variados parâmetros, por exemplo, suas dimensões gerais, as dimensões dos elementos manipulados as dimensões dos seus elementos constituintes, a fonte de energia dos atuadores ou a forma operacional dos atuadores (Hayashi 1992). A definição mais coerente, nessa concepção, é a baseada nas dimensões físicas do mecanismo. Assim, "micromáquinas são dispositivos mecânicos com dimensões na ordem de milímetros ou menos". Podemos classificá-las em três categorias segundo parâmetros dimensionais e construtivos: miniaturas, micromáquinas e nanomáquinas.

As miniaturas são máquinas com dimensões inferiores a 500 milímetros e superiores a 50 milímetros. As técnicas de projeto, manufatura e controle são semelhantes às utilizadas em máquinas maiores.

As micromáquinas são equipamentos com dimensões inferiores a 50 milímetros e superiores a 500 micrômetros. Devido às dimensões reduzidas, técnicas especiais de projeto, manufatura e controle devem ser utilizadas. Enquanto para as máquinas maiores, a massa e a inércia são grandezas fundamentais no dimensionamento de qualquer dispositivo, para as micromáquinas, em função das dimensões reduzidas, viscosidade, atrito, forças eletromagnética e eletrostática, tensão superficial, forças de Van der Waals, e mais, temperatura, acabamento superficial, forma estrutural, umidade e, características e comportamento físico dos materiais devem ser considerados no projeto de micromáquinas.

As nanomáquinas são equipamentos com dimensões inferiores a 500 micrômetros. Devido às dimensões reduzidas, para a sua manufatura utiliza-se técnicas desenvolvidas para a confecção de circuitos integrados e os problemas construtivos encontrados em micromáquinas tornam-se preponderantes em nanomáquinas.

A abordagem tradicional divide o projeto de uma máquina em sete grandes áreas: a estrutura, os materiais, as fontes de energia, os atuadores, os sensores, os efetadores e os sistemas de controle. Este tipo de abordagem, onde os elementos são concebidos e manufaturados isoladamente, pode ser empregada no projeto de miniaturas, mas a partir das micromáquinas, algumas destas partes fundem-se formando um único elemento. Por exemplo, as nanomáquinas tem os atuadores, a unidade de controle e a fonte de energia incorporados à estrutura do mecanismo formando um único elemento. Com estas dimensões, a energia dissipada nos fios que conduzem eletricidade da bateria para o atuador pode inviabilizar o seu funcionamento ou reduzir substancialmente o tempo operacional da máquina.

A fonte de energia para o funcionamento dos elementos da máquina é um ponto importante que deve ser considerado no desenvolvimento de micromáquinas. A utilização de baterias químicas (Níquel-Cádmio, Lítio, Óxido de Prata) são as mais utilizadas mas de difícil (e cara) miniaturização, além de ter a sua capacidade de carga muito reduzida, pois a potência disponível neste tipo de bateria é função do seu volume. Opções alternativas estão sendo estudada com a utilização de armazenadores temporários recarregados por indução ou auto-carga. Nestes casos as principais fontes de energia são os campos magnéticos externos que induzem corrente elétrica na micromáquina, a luz ambiente captada por coletores luminosos ou indutores externos de ultra-som. Apesar dos atuadores utilizarem as mais variadas formas de conversão de energia (elétrica, magnética, térmica, luminosa, química, sonora) em movimento, a energia elétrica continua sendo a forma básica de energia utilizada em micromáquinas. Pelo menos, o hardware de controle (microprocessadores e microcontroladores) utiliza este tipo de energia.

Outro fator importante, em se tratando de máquinas com dimensões reduzidas, é a forma de interação entre o usuário-operador e a máquina, principalmente pelo fato de não se ver a olho nu o objeto manipulador e a própria máquina.

## **2. ATUADORES PARA MICRO E NANOMÁQUINAS**

Os principais atuadores utilizados em micro e nanomáquinas empregam tecnologias baseadas nas características físicas dos materiais que são constituídos. Em uma máquina com dimensões na ordem de 1 mm, a utilização de elementos construtivos tradicionais, como servo motores elétricos, motores de corrente contínua com escova, motores “brushless” ou motores de passo, inviabiliza a sua manufatura. Assim, utilizam-se novas formas de acionamento

baseados no comportamento físico de alguns materiais como por exemplo, materiais piezoelétricos, termomecânicos, eletromagnéticos, ligas com memória de forma, que ao serem submetidos a uma fonte externa de energia produzem algum tipo de deslocamento. O desenvolvimento de atuadores e sensores baseados nestes materiais é que viabilizou a construção de máquinas cada vez menores.

Um atuador é um dispositivo conversor de energia. Em micromáquinas e miniaturas, os atuadores mais utilizados baseiam-se na transformação de energia elétrica em mecânica (motores elétricos) e na transformação de pressão de fluidos em deslocamento linear (pistões pneumáticos e hidráulicos).

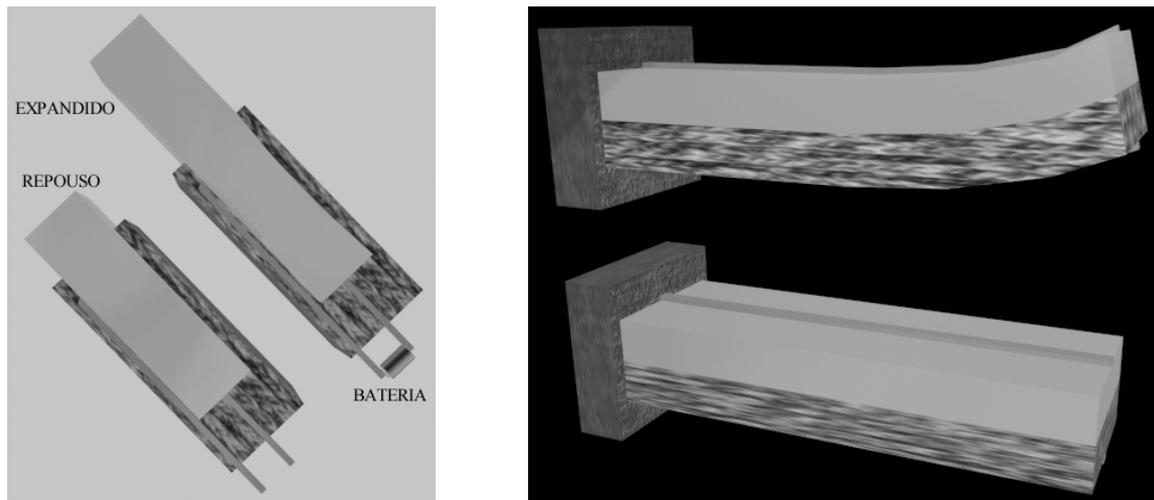


Figura 1 – a) Atuador termo-mecânico. b) Atuador termo-mecânico bimórfico.

Para micro e nanomáquinas, o atuador mais simples do ponto de vista construtivo e operacional é o termo-mecânico (Figura 1a). Quando submetido à variação de temperatura, uma liga metálica pode dilatar-se ou contrair-se. O pequeno deslocamento, comparado com as dimensões diminutas do hardware, é suficiente para o acionamento do mecanismo. Este tipo de atuador geralmente converte energia elétrica em térmica provocando a dilatação do metal. Os inconvenientes deste tipo de atuador são: a quantidade de calor gerada e o tempo de resposta que dificulta o controle, pois o ciclo de aquecimento-resfriamento (inércia do ciclo) pode ser longo. Além disso há o limite da capacidade de dissipação de energia do mecanismo e a influência da temperatura externa do ambiente e da máquina.

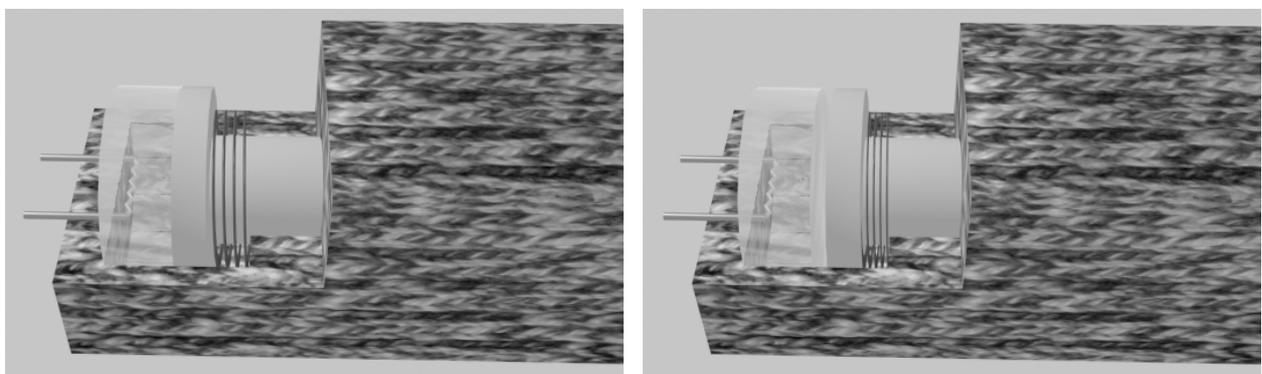


Figura 2 – a) Cilindro na posição de repouso.

b) O gás se expande o cilindro se desloca (mola comprimida).

Benecke (Benecke, 1989) demonstrou a aplicação deste tipo de atuador utilizando, por exemplo, uma haste de ouro de 500 micrometros sobre silício. Quando submetida a uma potência de 200 mW, a haste dilatou 100 micrometros .

Baseado no mesmo princípio de funcionamento, pode-se utilizar gás como elemento para acionamento de micro pistões (Figura 2). A expansão do gás pelo aquecimento pode deslocar o êmbolo. Confinado em uma cavidade na base da haste, o gás ao expandir-se pela troca de calor com uma resistência aquecida pela eletricidade desloca o êmbolo produzindo um movimento linear. O gás, pode ser substituído por parafina ou cera que também apresentam alto coeficiente de dilatação.

Atuadores piezoelétricos também são muito utilizados em micromáquinas. O princípio operacional baseia-se nas propriedades físicas do material constituinte, geralmente cerâmicas ou polímeros cristalinos. Quando submetidos a uma tensão elétrica ou a um campo elétrico, estes materiais sofrem alteração na sua estrutura, deformando-se (alongando ou contraindo-se) e, retornando ao estado inicial assim que cessa a fonte de energia. Processo inverso também pode ser obtido, aplicando-se uma tensão externa (compressão ou tração): o material produz uma diferença de potencial elétrico. Na sua forma natural, os materiais piezoelétricos geralmente não apresentam esta propriedade pois a sua estrutura atômica não está devidamente organizada. Alguns tipos de cerâmicas por exemplo, após aquecimento (acima do ponto de Curie onde os materiais perdem as suas características ferro-eletro-magnéticas) e submetidas a um forte campo magnético, tem a sua estrutura cristalina reorganizada (artificialmente polarizada) que permanecerá com o resfriamento, fazendo surgir a propriedade piezoelétrica. As cerâmicas piezoelétricas apresentam alta resistência elétrica ( $\sim 10^{12} \Omega$ ). Eletrodos metálicos são acrescentados ao material permitindo a melhor distribuição de eletricidade por toda a superfície operacional. A deformação resultante dependerá do posicionamento dos eletrodos em relação à orientação cristalina, do corte do material e da sua forma. A Figura 3 mostra alguns tipos de deformações obtidas com cerâmicas piezoelétricas.

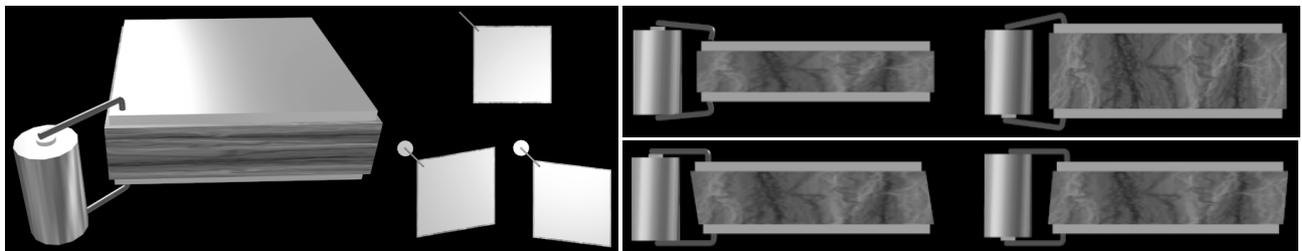


Figura 3 – Deformações de um cristal piezoelétrico

A tensão elétrica para manipulação de cerâmicas piezoelétricas é relativamente alta, superior a 100 V<sup>1</sup>. Contudo, permite um suave deslocamento com alta precisão de posicionamento (ordem de nm) e grande disponibilização de força ( 1kN/cm<sup>2</sup> ). O deslocamento obtido é da ordem de 0.1% a 5% da dimensão do cristal e apresentam baixa inércia de movimento, respondendo rapidamente à ação da eletricidade.

Alguns materiais que apresentam estas características são o dióxido de silício, titanato de bário, óxido de zinco, tantalato de lítio, niobato de lítio e o PVDF (Polyvinylidene fluoride).

O PVDF é um polímero semicristalino composto por cadeias desordenadas de  $CH_2 - CF_2$ . Este estado (estado alfa) é obtido após a solidificação do material fundido e não apresenta características piezoelétricas. Após passar por processos especiais de manufatura,

<sup>1</sup>Existem cerâmicas que possibilitam o uso de tensões menores,  $\sim 20$  V .

onde o material é esticado (extrusão) e seus átomos de carbonos organizados em cadeias paralelas, o material adquire a característica piezoelétrica (fase beta). Para proteção e melhora da performance (melhorar a distribuição de eletricidade), duas finas camadas metálicas são utilizadas para revestir o polímero piezoelétrico.

O PVDF é um polímero flexível, com grande resistência à fadiga e à abrasão podendo ser conformado em finas lâminas ou em filamentos. Se submetido a uma tensão contínua, o PVDF alonga-se, expande-se e tem a espessura diminuída. Retirada a tensão elétrica, o material retorna à configuração inicial. Quando submetido à pressão mecânica ou tracionado, o PVDF gera uma tensão elétrica (variando de 0 a 40V dependendo das dimensões da lâmina e da pressão aplicada) proporcional. O mesmo comportamento é observado quando o material é submetido à luz infravermelha.

O comportamento piezoelétrico é observado enquanto a força externa estiver variando. Para força constante a tensão gerada é zero.

A sensibilidade dinâmica do PVDF está entre  $10^{-8}$  a  $10^6$  N/m permanecendo estável a temperaturas superiores a 80°C.

O PVDF também pode ser utilizado como membrana captadora de som em microfone ou para instrumentos musicais acústicos. Pode atuar como um alto-falante, como membrana sensível de teclados. Em microrrobôs, o PVDF é utilizado como atuador devido a sua resposta mecânica à ação de uma tensão elétrica.

Os atuadores piezoelétricos são do tipo linear sendo utilizados em aplicações onde o curso de deslocamento é relativamente pequeno; exige-se alta precisão de posicionamento; grande força atuando e suavidade de movimento. Para a grande maioria das cerâmicas piezoelétricas, o deslocamento é linear em função da tensão aplicada (O'Connor, 1994), apesar da pequena histerese (Zhang, 1997). Para aumentar o curso de deslocamento, vários cristais são remontados e acionados independentemente. Estes atuadores são utilizados em micro válvulas, no posicionamento linear de mesas tipo X-Y, em pequenos mecanismos articulados e atualmente estão sendo realizadas pesquisas para aplicações em robótica.

Os Elementos termo contráteis (ETC) são ligas metálicas que sofrem contração na presença de eletricidade. São conhecidos como Muscle Wire (fios musculares) ou SMA (Shape-Memory Alloy - Ligas com Memória de Forma), pois, são comercializados como finos fios. O seu comportamento eletro-mecânico é semelhante ao encontrado nas fibras musculares biológicas. Como os músculos, ao serem estimuladas, geralmente pelo calor, sofrem contração. Essas fibras podem ser associadas formando feixes (a semelhança com os músculos biológicos), o que permite a manipulação de uma carga maior. A liga mais conhecida é a de níquel-titânio (NiTi), chamada de nitinol. Além dela, ligas de alumínio-níquel, ferro-manganês-silício e zinco-alumínio também apresentam estas características.

Essas fibras são condutoras de eletricidade. Quando submetidas a uma diferença de potencial (voltagem), a fibra aquece e reduz as suas dimensões, disponibilizando um pequeno diferencial de força que pode ser utilizado para deslocar algum mecanismo. Essa contração é produzida com o aquecimento da fibra, que, após ser resfriada, volta às dimensões originais. A taxa típica de contração é de 5% a 10%. Outra característica destas ligas é a memória de forma. Quando aquecida a uma temperatura crítica, a liga pode ser moldada (fase austenítica), mas quando resfriada (fase martensítica), a liga sofre contração (mas o volume permanece constante). Quando aquecida novamente volta a sua forma original (a transformação é reversível). A liga pode permanecer no estado martensítico indefinidamente. Além da variação da temperatura, é necessário aplicar uma certa tensão para que ocorra a transformação.

As fibras são leves, resistentes, podem operar na ordem de Hz a KHz, permitem o acionamento por corrente contínua ou alternada, apresentam baixo consumo de energia (miliwatts), baixa resistência (10-30 ohms) e permite um controle linear de posição e força.

Para aumentar a força disponível basta associar várias fibras em paralelo. A força varia com o diâmetro da fibra, quanto mais grossa maior a força disponível.

Os elementos magneto expansíveis (EME) são ligas metálicas que alteram a sua forma na presença de um campo magnético. Por exemplo, o Terfenol-D (liga de terbium, dysprosium e ferro -  $Tb_x Dy_{1-x} Fe_y$ ) quando submetido a um campo magnético deforma-se, alongando. Ele é um cristal que apresenta rápida resposta quando submetido ao campo magnético, podendo atingir uma frequência de trabalho na faixa de 200Hz a 3000Hz. A sua performance melhora com a pureza do cristal. O alongamento é função da seção transversal e do comprimento, mas é possível atingir a medida de 3000 ppm. Na faixa linear, a força produzida pelo Terfenol-D é proporcional a área da seção transversal, à variação no comprimento e inversamente proporcional ao comprimento inicial. A tensão de operação varia de 10V a 100V, solicitando até 3A de corrente. Contudo, o Terfenol-D pode sofrer a interferência da variação de temperatura, apresentando baixa frequência de ressonância e histerese.

Atuadores que utilizam a eletricidade estática como fonte de energia tem sido desenvolvido nos últimos anos, sendo genericamente denominados micro motores eletrostáticos. As dimensões reduzidas das micromáquinas propiciam a utilização deste tipo de energia. Os micro motores são um exemplo de aplicação. Com princípio de funcionamento semelhante ao dos motores elétricos convencionais, os micro-motores utilizam a eletricidade estática para gerar a rotação do rotor. Em escala sub-milimétrica, a força eletrostática é preponderante sobre a força eletro-magnética, gravitacional e inercial. Quanto menor o motor, menor será a massa e suas dimensões físicas, conseqüentemente, as forças devido à gravidade e à inércia do mecanismo serão menor. Dimensionalmente, a força eletromagnética é proporcional ao quadrado dos parâmetros de distância, enquanto a força eletrostática é "dimensionalmente neutra".

Vários métodos podem ser empregados na manufatura de micro motores. Os principais estão baseados em técnicas utilizadas na produção de circuitos integrados, como por exemplo, o processo SLIGA . O processo consiste na superposição de várias camadas de elementos, sendo algumas delas chamadas de camadas de sacrifício, pois serão removidas quimicamente ou por radiação.

Micro atuadores que utilizam a força eletromagnética para gerar movimento são utilizados em relógios há muitos anos. Conhecidos como micro motores eletromagnéticos, seu desenvolvimento voltado para novas aplicações propiciou o aumento da demanda por este tipo de atuador.

Um exemplo desse tipo de aplicação é o "mecanismo de catraca", composto por um micro solenóide (voice coil) cuja haste, ao deslocar-se, traciona uma catraca (engrenagem com deslocamento em um único sentido). A cada movimento de avanço e

retrocesso da haste, um dente da engrenagem é tracionado e o movimento de rotação produzido. A Figura 4 mostra este mecanismo.

Teshigahara (Teshigahara, 1995) e colaboradores, desenvolveram um micro motor de

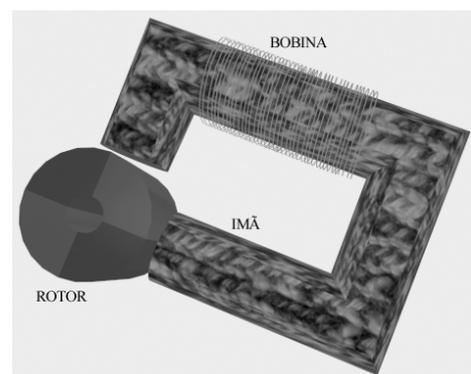


Figura 4 – Layout do motor desenvolvido por Teshigahara (Teshigahara, 1995)

passo utilizando a força eletromagnética para gerar o movimento de rotação do rotor. O rotor é um imã<sup>2</sup> permanente com quatro polos. Suas dimensões são: tubo de 1.0 mm de diâmetro com um eixo de 0.25 mm. O campo magnético é gerado pela ação da corrente passando pela bobina<sup>3</sup> do estator. O torque do motor varia com o ângulo do polo magnético do rotor em relação ao estator, podendo atingir  $\approx 10^{-6}$  Nm (3 V e 20 mA).

Atuadores que utilizam a força eletromagnética para gerar movimento são muito eficientes em macro-escala, mas, com a redução dimensional dos elementos, problemas construtivos inviabilizam a sua manufatura.

### 3. ALGUMAS APLICAÇÕES EM MICROMÁQUINAS E ROBÓTICA

MINIMAN (MINIaturized MANipulation) é um exemplo de micro robô, desenvolvido por S. Fatikow (Fatikow, 1997) e equipe, utilizando atuadores piezoelétricos. O micro robô é composto por uma haste (com função de perna) cujo movimento produz o deslocamento do robô, três atuadores piezoelétricos e um link de sustentação, como mostrado na figura 5. Os atuadores estão acoplados a um link de união que suporta a haste. Este conjunto está apoiado no link de sustentação através de uma esfera. O lento deslocamento sincronizado dos atuadores produz a inclinação da haste na direção do movimento. Como o movimento é lento, a força devido ao atrito estático da haste com o solo é suficiente para manter o robô na mesma posição (o centro de gravidade do robô sofre um deslocamento na direção da inclinação). Revertendo rapidamente o deslocamento dos atuadores, a haste volta a sua posição inicial. Como esse movimento reverso é muito rápido, o atrito dinâmico não é suficiente para prender a parte da haste em contato com o solo, resultando no deslocamento do robô. Durante o movimento, o centro de gravidade é movido para cima, retornando à posição inicial de repouso. O mecanismo tem 3 cm x 3 cm x 3.5 cm aproximadamente. Foram utilizados três atuadores piezoelétricos multicamada acionados com  $\pm 150$  V produzindo um deslocamento máximo de 36  $\mu$ m e mínimo de 0.142  $\mu$ m. A máxima velocidade obtida em movimento de translação foi de 0.9 mm/s.



Figura 5 – Layout do micro robô desenvolvido por S. Fatikow (Fatikow, 1997).

**MICRO-ROBÔ PARA COLONOSCOPIA.** A colonoscopia é um procedimento médico utilizado principalmente no diagnóstico e em terapias relacionados com a região do colo (sistema digestivo). Trata-se de um procedimento de mínima invasão, cuja redução da área orgânica manipulada conduz a uma rápida recuperação do paciente reduzindo-se traumas e infecções. É um procedimento complexo e pode causar desconforto ao paciente. Atualmente os endoscópios apresentam um alto grau de flexibilidade mas não o suficiente para atingir áreas profundas do sistema digestivo. Várias pesquisas (Ikuta, 1998) tem sido realizadas com o objetivo de substituir o endoscópio por micro robôs semi ou totalmente autônomos capazes de deslocar-se pelo colo e sistema digestivo, com a capacidade de realizar pequenas

<sup>2</sup>Isotropic barium ferrite magnet.

<sup>3</sup>Fios de cobre com diâmetro de 25  $\mu$ m. A bobina tem 1000 voltas.

intervenções, como por exemplo, a coleta de tecidos e materiais. Dário (Dário, 1997) desenvolveu uma micromáquina capaz de navegar pelo sistema digestivo transportando dois micro manipuladores. Os deslocamentos do mecanismo são do tipo "inchworm", semelhante a uma sanfona. Um sistema de micro válvulas<sup>4</sup> controlam a alongação e a contração do corpo, e a sua fixação nas paredes do intestino através de um sistema de ventosas atuando por sucção. Dois manipuladores estão posicionados na parte frontal da micromáquina. Os micro manipuladores são acionados por atuadores tipo SMA. Um conduz uma câmera CCD e o outro conduz uma micro ferramenta (uma pinça por exemplo). A micromáquina está conectada ao meio externo por um fino e flexível duto que fornece ar aos sistemas pneumáticos, permite o controle dos atuadores e o envio de dados da câmera para os sistemas de controles externos. O primeiro protótipo, em operação não incorpora os micro manipuladores e tem 18 mm de diâmetro e comprimento variando de 50 mm (contraído) a 80 mm (elongado).

#### **4. CONCLUSÃO**

Uma das formas de se medir o interesse por um assunto é o número de pesquisadores e instituições que estão se dedicando ao assunto. Com relação às micromáquinas, existe um interesse crescente das grandes universidades americanas e empresas relacionadas à micro-eletrônica pois enxergam um futuro promissor para aplicações médicas e militares.

Contudo, aplicações médicas<sup>5</sup> é um dos campos mais promissores para o desenvolvimento de micro-máquinas e micro-robôs. Os atuadores de micromanipuladores podem ser utilizados como micro válvulas servo controladas para fins médicos. Por exemplo, podem controlar o fluxo sanguíneo, o fluxo de esperma no canal seminal, interferir na pressão cerebral através do controle de fluxo do líquido amniótico para os canais linfáticos.

Operações de inspeção e manutenção em ambiente de dimensões reduzidas ou que incorpore algum risco físico, podem ser realizadas com micro posicionadores. Este tipo de micromáquina caracteriza-se pela capacidade de navegação, posicionamento e realização de uma operação específica, por exemplo, estancar o vazamento de tubulações e tanques de armazenamento. Neste caso, o próprio corpo da máquina é o elemento de vedação. Este mesmo equipamento pode transportar micro manipuladores e micro efetadores atuando na desobstrução de tubulações ou na caça de insetos e roedores que ficam escondidos em áreas muitas vezes inacessíveis.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

Arai, F.; Fukuda, T., 1997, "Adhesion-Type Micro Endeffector for Micromanipulation". Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation v 2, Piscataway, NJ, USA, pp. 1472-1477.

Aoyama, H.; Iwata, F.; Sasaki, A., 1995, "Desktop Flexible Manufacturing System by Movable Miniature Robots - Miniature Robots with Micro Tool and Sensor". Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation v 1, Piscataway, NJ, USA, pp. 660-665.

---

<sup>4</sup>As válvulas utilizam atuadores tipo SMA que controlam o fluxo de ar.

<sup>5</sup>ou veterinárias.

- Awabdy, B. A.; Shih, W. C.; Auslander, D. M., 1998, "Nanometer Positioning of a Linear Motion Stage Under Static Loads". IEEE/ASME Trans.on Mechatronics, v 3, n° 2, pág.113-119.
- Benecke, W.; Riethmueller, W., 1998, "Applications of Silicon-Microactuators Based on Bimorph Structures". Proc.IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Salt Lake City, UT, USA, pp. 116.
- Borden, T.,1991, "Shape-Memory Alloys: Forming a Tight Fit". Mechanical Engineering, pp. 67-72.
- Carlisle, B. H., 1986, "Piezoelectric Plastics Promise New Sensors". Machine Design, pp. 105-110.
- Dário, P.; et alli,1997, "Micro Robotic System for Colonoscopy". Proc.1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, v 2, Piscataway, NJ, USA, pp. 1567-1572.
- Fatikow, S.; et allii, 1997, "Flexible piezoelectric micromanipulation robots for a microassembly desktop station". Proc. 8th Int.Conf. on Advanced Robotics, Monterey, CA, USA, pp. 241-246.
- Gilbertson, R. G.; Busch, J. D., 1994, "Practical Robotic Interstellar Flight: Are We Ready?" Conference: A Survey of Micro-Actuator Technologies for Future Spacecraft Missions, New York University.
- Hayashi, T., 1992, "Micro Mechanisms". J.of Robotics and Mechatronics, v 3, n° 1, pp. 2-7.
- Hameyer, K.; Belmans, R., 1997, "Design of Very Small Electromagnetic and Electrostatic Micro Motors". Proc.1997 IEEE Int. Electric Machines and Drives Conference, Piscataway, NJ, USA, pp. TB2 11.1-11.3.
- Ikuta, K., 1988, "The Application of Micro/Miniature Mechatronics to Medical Robotics" Proc. of IROS'88, Tokyo, Japan, pp. 9-14.
- Ikuta, K.; Tsukamoto, M.; Hirose, S., 1988, "Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance FeedBack and Application for Active System Active Endoscope". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, USA, pp. 24-29.
- Ikuta, K., 1992, "Micromachine - Its Current State and Future". J.of Robotics and Mechatronics, v 3, n° 1, pp. 60-64.
- Ishihara, H.; Arai, F.; Fukuda, T., 1996, "Micro Mechatronics and Micro Actuators", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, v 1, n° 1, pp. 68-79.
- Johnson, A. D.; Shahoian, E. J., 1995, "Recent Progress in Thin Film Shape Memory Microactuators". Proc.1995 IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Piscataway, NJ, pp. 216-220.
- Johansson, S., 1995, "One Approach Towards The Fabrication of A Microrobot System". Materials Science & Engineering C: Biomimetic Materials, Sensors and Systems v 2, n° 3, pp.141-149.
- Johansson, S., 1997, "Technology for Microassembling". Materials for Mechanical and Optical Microsystems Materials Research Society Symposium Proceedings v 444, Pittsburgh, PA, USA, pp. 3-13.
- Lin, L.; Pisano, A. P.; Lee, A. P., 1991, "The Microbubble Powered Actuator". Proc.IEEE Conf.on Solid-State Sensors and Actuators, San Francisco, CA, USA, pp. 1041.
- Menciassi, A.; et allii, 1997, "Workstation for Manipulation of Micro Objects". Proc. 8th Int. Conf. on Advanced Robotics, Piscataway, NJ, USA, pp. 253-258.
- Nakamura, Y.; et alli, 1996, "Micromachining Process for Thin-Film SMA Actuators". Proc. 1996 IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, Piscataway, NJ, USA, pp. 493-497.

- Nakamura, Y.; Nakamura, S.; Buchaillot, L.; Fujita, H., 1997, "Three-Dimensional Shape Memory Alloy Loop Actuator". Proc. of the 1997 10th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Piscataway, NJ, USA, pp. 262-266.
- Nishimura, H.; Funaki, K., 1998, "Motion Control of Three-Link Brachiation Robot by Using Final-State Control with Error Learning". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v 3, n° 2, pp.120-127.
- O'Connor, L., 1994, "Steam Engines on a Microscopic Scale". Mechanical Engineering, pp. 76-78.
- O'Connor, L., 1994, "Micromachines Tap Actuating Principles". Mechanical Engineering, pp. 58-60.
- Pan, M.-J.; Yoshikawa, S., 1996, "Design Factors in Multilayer Actuators". Mechanical Engineering, pp. 74-76.
- Shimoyama, I., 1995, "Scaling in Microrobots". Proc.of the 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, NJ, USA, pp. 208-211.
- Takamori, T., 1992, "Recent Trends in the Development of New Actuators". Journal of Robotics and Mechatronics, v 3, n° 1, pp. 18-27.
- Teshigahara, A.; et alli, 1995, "Performance of a 7-mm Microfabricated Car". Journal of Microelectromechanical Systems, v. 4, n° 2, pp. 76-80.
- Zhang, Z. ; Zhenqui, Z., 1997, "Developing a Linear Piezomotor With Nanometer Resolution and High Stiffness". IEEE/ASME Trans.on Mechatronics, v 2, n° 1, pp. 22-29.

## **MICROMACHINES: An Introduction**

***Abstract.** In this article we presented a review on micromachines, its characteristics, constructive forms, actuators and control forms and applications. Inside of the diversified range of applications the main focus will be in microrobotics.*

***Key-words:** robotics, micromachines, nanotechnology.*