



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

IDENTIFICAÇÃO CAIXA CINZA DOS PARÂMETROS DO MODELO ARMAX DE ELASTOMASSAS MEMS, USANDO ESTIMADOR MQE E DISCRETIZADOR ZOH¹

Andre Luiz Bedendo²; Manuel Martín Perez Reibold³; Airam Sausen⁴, Rômulo Antônio Trentin Kohler⁵

¹ Descrição do trabalho: Trabalho resultante de atuação de bolsista em projeto de dissertação do Mestrado em Modelagem Matemática da UNIUI

² Estudante do Curso do Mestrado em Modelagem Matemática e bolsista CNPq do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIUI; E-mail: andreebedendo@bol.com.br

³ Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIUI ; E-mail: manolo@unijui.edu.br

⁴ Professora do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIUI ; E-mail: airam@unijui.edu.br

⁵ Estudante do Curso de Engenharia Elétrica e bolsista PIBIC/CNPq do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da UNIUI; E-mail: romuloatkohler@hotmail.com

Resumo

Este trabalho consiste em propor um novo modelo matemático comportamental das elastomassas MEMS, e avaliar a influência do discretizador *Zero Order Hold (ZOH)* na transformação do desempenho analógico para o discretizado. Para isso utilizou-se técnicas de identificação de sistemas, especificamente a modelagem “Caixa Cinza”. Esta técnica utiliza dados experimentais, sinais de entrada e saída, obtidos através de simulações na plataforma experimental construída no aplicativo ANSYS[®]. Também é utilizado o conhecimento *a priori* das elastomassas. O modelo estimado obedece à representação autoregressiva com média móvel e entradas exógenas (ARMAX). Seus parâmetros são obtidos através do estimador de mínimos quadrados estendidos (MQE) em batelada. Os resultados para a topologia Ponte Simples e Ponte Dupla mostram compatibilidade entre as dinâmicas do modelo estimado e o modelo experimental real. As técnicas utilizadas se mostram válidas na identificação do modelo de dispositivos microscópicos.

Palavras-chave: Identificação de Sistemas, Caixa Cinza, Discretizador ZOH, MEMS.

Introdução

A tecnologia dos Microsistemas torna-se interessante pelas suas características de portabilidade, miniaturização, confiabilidade e economia quanto ao consumo de energia. Em especial os sistemas microeletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) ou MEMS, revelam-se como uma das tecnologias promissoras para atender as necessidades da sociedade moderna. Esta tecnologia consiste na integração de microssoensores, microatuadores e microeletrônica implantada em um único *chip*, através de técnicas de microusinagem. O principal fator que acelera o progresso desta tecnologia é o interesse industrial e o volume de



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

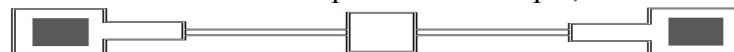
investimentos envolvidos. Este crescente interesse do mercado mundial sobre os MEMS tem sido ocasionado, talvez, pela saturação na evolução dos circuitos digitais [Ribas, 2001]. MEMS podem ainda ser definidos como microtransdutores que desempenham funções como sensoriamento e atuação [Chavarette *et al.*, 2009]. Estas funções gerenciadas por algoritmos matemáticos tornam estes microssistemas atrativos em aplicações industriais e bens de consumo de dimensões micrométricas, que desempenham funcionalidades inteligentes, apresentam alto nível de desempenho, e preço acessível.

Com o crescimento desta tecnologia, a modelagem e simulação destes microssistemas tornam-se uma área emergente que vem ganhando interesse. A caracterização dos dispositivos MEMS, assegurando a qualidade e o baixo custo, é fundamental nestes projetos. No entanto, o conhecimento de todos os fenômenos que se manifestam nos MEMS não é trivial. Desafios em etapas de modelagem, manipulação e análise das características dinâmicas destes microdispositivos são questões que merecem uma investigação mais apurada. Estes desafios afetam a qualidade operacional do dispositivo, e ao mesmo tempo dificultam a obtenção do modelo analítico comportamental destes transdutores. Logo, a obtenção deste modelo é essencial na caracterização do dispositivo, pois através da comparação entre o desempenho comportamental de projeto e, o obtido após encapsulamento pode-se constatar se o dispositivo fabricado apresenta condições corretas de funcionamento. Ao mesmo tempo converte-se num fator preponderante para diminuir o tempo e os custos de produção [LIN; WANG, 2006]. Neste sentido, as técnicas de identificação de sistemas tornam-se uma alternativa eficiente para superar estas dificuldades, pois esta área do conhecimento estuda maneiras de modelar e analisar sistemas a partir de observações, ou seja, dados [Aguirre, 2004].

Com base nisso, o objetivo deste trabalho consiste em propor através da modelagem matemática “Caixa Cinza”, um novo modelo que descreva o desempenho das elastomassas, as quais são responsáveis pela frequência de ressonância de vários dispositivos MEMS. Tal modelo é obtido com base nos dados experimentais dos sinais de entrada e saída e do conhecimento *a priori* dos mesmos. O método de discretização *ZOH* é também avaliado de forma que a transformação do modelo analógico em discreto seja exata.

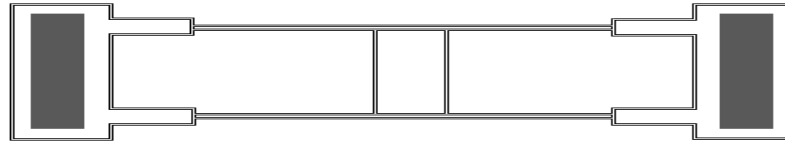
Modelagem Caixa Cinza

O processo de modelagem caixa cinza é dividido em cinco etapas principais: testes dinâmicos e coleta de dados, escolha da representação matemática, determinação da estrutura do modelo, estimação dos parâmetros e validação do modelo [Aguirre, 2004]. As topologias das elastomassas estudadas são Ponte Simples e Ponte Dupla, conforme Figura 1.



(a)

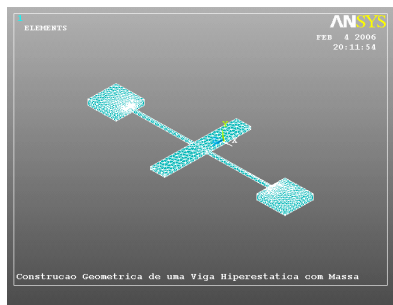
Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa



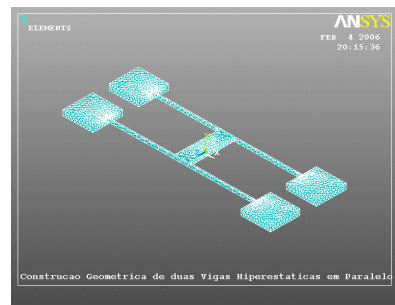
(b)

Figura 1. Elastomassas MEMS (a) Ponte Simples; (b) Ponte Dupla

A coleta de dados é realizada a partir da plataforma de testes desenvolvida no aplicativo computacional ANSYS®, utilizando modelagem de elementos finitos e as propriedades e geometrias dos materiais de cada estrutura. As estruturas Ponte Simples e Ponte Dupla foram desenvolvidas e simuladas através de elementos finitos, como apresentado na Figura 2. Nesta plataforma aplicasse uma força com forma degrau, e coletam-se os dados do deslocamento.



(a)



(b)

Figura 2. Plataforma experimental. (a) Ponte simples; (b) Ponte Dupla

A representação matemática para o modelo selecionado (conforme equação 1 ou 2) é a ARMAX, que considera a modelagem do ruído correlacionado,

$$(1)$$

$$(2)$$

onde \dots , \dots são os polinômios que contém, respectivamente, os pólos e os zeros do sistema; \dots os pólos e zeros que afetam o ruído; \dots é o operador de atraso; \dots , \dots e \dots os maiores atrasos dos polinômios \dots , \dots e \dots respectivamente, e \dots os instantes discretos. O modelo ARMAX pertence à classe de modelos de *erro na equação*. Neste caso, o erro na equação é modelado como um processo de média móvel (MA) [Aguirre, 2004].

Com base no conhecimento *a priori* do modelo analítico clássico, a representação escolhida para descrever o desempenho das elastomassas MEMS é de segunda ordem, o qual é definido pela equação diferencial ordinária não-homogênea (3),



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

(3)

onde m é a massa do corpo de “vai e vem” em kg, c é o amortecimento causado pelo meio em kg/s, e k é a coeficiente de elasticidade em N/m e F é a força aplicada em N

A estimação dos parâmetros do modelo é realizada pelo método MQE em batelada. Neste processo os dados de entrada e saída são medidos e computados de uma única vez. A escolha se justifica pela sua facilidade de implementação e eficiência na estimação de sistemas lineares. Supondo que o sistema possa ser escrito conforme a equação (4),

(4)

onde X é o vetor de regressores, e é o erro do modelo, e θ é o vetor que contém os parâmetros da elastomassa a serem identificados, os quais são obtidos pela equação (5),

(5)

A partir do erro residual dos parâmetros e dos regressores, uma nova matriz estendida é construída, de forma iterativa. A simples solução da equação (5) causa polarização dos parâmetros. Por fim, a validação do modelo é realizada através da comparação entre as dinâmicas do modelo estimado e o real. O modelo estimado também é testado em outro conjunto de dados observados.

Resultados e Discussão

A escolha do método de discretização adequado garantirá o melhor desempenho do modelo estimado em comparação com o desempenho real. Neste caso, o discretizador *ZOH* tem como função em reter o último valor amostrado de $x(k)$. O *ZOH* fornece uma aproximação em escada para $x(t)$. Logo, a saída do sistema é uma sequência de funções degrau cuja amplitude é $x(k)T$ no instante de amostragem, ou seja, $x(k)T$. A Função de Transferência (FT) descreve como o sinal de entrada do sistema é dinamicamente “transferido” para a saída. Sendo $X(s)$ a FT da equação (3) que resulta na expressão (6),

(6)

(7)

ao aplicar-se a transformada Z tem-se a representação discreta obtida pelo processo *ZOH*, a partir de (7), com a construção da matriz estendida a qual modela o erro correlacionado é



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

possível encontrar o vetor de regressão φ da representação ARMAX, conforme a equação (8),

(8)

Para realizar a coleta de dados são adotados convenientemente o valor de amplitude, e a forma degrau. Os valores dos parâmetros do modelo calculados pelo estimador dos mínimos quadrados estendidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valor dos parâmetros estimados para as elastomassas.

Parâmetros Estimados	Ponte Simples	Ponte Dupla
θ_1	-1.109189476348707	-1.113025305397220
θ_2	0.967013079701904	0.973891929164163
θ_3	0.771975606952880	0.701982227258853
θ_4	0.697295229230475	0.035191037745435
θ_5	-0.555150395913245	1.214953962853997
θ_6	1.819391732844451	-0.505413549676632
θ_7	-0.991773686974739	-2.170965561621870
θ_8	0.626653265650702	0.670282377327567

A partir da comparação entre o desempenho real e o modelo estimado, tanto no regime transitório, quanto no regime permanente (conforme Figura 3) para ambas as topologias, o sinal de entrada na forma de degrau gera um movimento oscilatório no início do deslocamento, caracterizando o regime transitório do processo. Especialmente para a topologia de formato Ponte Dupla, no período inicial de processamento dos dados o modelo estimado apresentou oscilações mais dispersas em relação à dinâmica real. No entanto, mesmo na existência destes erros mais acentuados, os modelos estimados conseguem acompanhar a dinâmica do sistema real, reproduzindo a instabilidade inicial. À medida que o sistema converge para o regime permanente, com o erro entre os modelos tendendo a zero. Outra forma de validar a eficiência dos modelos consiste em verificar se estes respondem da mesma forma que o modelo medido a diferentes dados daqueles utilizados na estimação [Correa, 2001]. Portanto, as respostas das elastomassas a um sinal sinusoidal com amplitude de \dots são apresentadas na Figura 4,

(a)

(b)

Figura 3. Comparação entre as dinâmicas do modelo real e o estimado. (a) Ponte simples; (b) Ponte Dupla



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

(a) (b)
Figura 4. Resposta de ambos os modelos submetidos a sinal sinusoidal. (a) Ponte simples; (b) Ponte Dupla logo, a aplicação do sinal sinusoidal as estruturas permite concluir que os valores preditos pelo modelo discreto e os valores experimentais demonstram que a representação encontrada por, *ZOH* prediz de forma satisfatória a dinâmica do processo.

Conclusões

O modelo ARMAX, o estimador MQE, e o discretizador *ZOH* satisfazem o novo modelo matemático proposto para caracterizar o desempenho da elastomassa MEMS tipo Ponte Simples e Ponte Dupla. A modelagem caixa cinza permite combinar as vantagens dos procedimentos caixa preta e caixa branca como alternativa eficiente nas técnicas de identificação. Os principais pontos a favor da identificação caixa cinza são: (i) diminuição do número de parâmetros nos modelos, (ii) maior capacidade de reproduzir características fora dos dados de identificação, (iii) maior robustez, e (iv) maior adequação para o desenvolvimento de sistemas de controle [Correa, 2001]. Neste trabalho, os coeficientes relacionados com o erro, não tiveram correlação acentuada nos dados de aquisição. Neste sentido, verifica-se a validade da técnica utilizada, mostrando-se interessante, uma vez que permite obter o modelo comportamental das elastomassas MEMS sem alterar as propriedades intrínsecas das mesmas e do meio em que se encontram inseridas. Portanto, é uma técnica não invasiva, prática e eficiente, uma vez que os parâmetros do modelo não são extraídos na plataforma de testes, e sim estimados através do tratamento dos dados dos sinais de entrada e saída. Desta forma, a precisão alcançada nos resultados deste trabalho é satisfatória.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq, à UNIJUI pelo curso de Mestrado em Modelagem Matemática, e à comissão organizadora deste evento.

Referências

AGUIRRE, L. A. *Introdução a Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004.

CHAVARETTE, F. R; BALTHAZAR, J. M; GUILHERME, I. R; FELIZ, J. L. P; PONTES Jr, B. R. de; RAFIKOV, M. *Introdução à Micro (MEMS) Ciências: Modelagem, Tecnologia e*





Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: 2011 JP - XVI Jornada de Pesquisa

Inovação de Futuro. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS, 8, 2009, Bauru.

Correa, M. V. *Identificação caixa cinza de sistemas não-lineares utilizando representações NARMAX racionais e polinomiais*. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

LIN, R. M.; WANG, W. J. Structural dynamics of microsystems – current state of research and future directions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. v. 20, p. 1015 - 1043, 2006.

RIBAS, Renato Perez. *Microsistemas Integrados (MEMS)*. Universidade Estadual de Campinas, 2000. Disponível em: <<http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap14.pdf>>. Acesso em: 10 set 2009.

Projeto: Modelagem Matemática e Estratégias de Controle para a Navegação de Macro e Micro RMAs (Robôs Móveis Autônomos) e Inteligentes.