

SAMUEL DA SILVA GOMES¹, SEBASTIÃO CÍCERO PINHEIRO GOMES².

1. *Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Campus Camaquã
Rua Ana Gonçalves da Silva, 901
E-mail: samuel.gomes@camaqua.ifsul.edu.br*

2. *Universidade Federal do Rio Grande
E-mail: sebastiao.gomes@furg.br*

Abstract— This article deals with the dynamic modeling and control of a gearmotor robotic actuator, with special emphasis on modeling of friction. After the development of the dynamic model, simulations were performed in order to verify the robustness of the controller to parametric variations. The results showed a better performance of the sliding mode control with integral surface (EVI) with respect to sliding mode control with simple surface (EVS). The controller in its two versions was implemented in a harmonic-drive actuator and experimental results also showed superiority control EVI regarding EVS in a reference position tracking.

Keywords— Sliding mode control, robotic actuators, friction, modeling.

Resumo— O presente artigo aborda a modelagem dinâmica e o controle de um atuador robótico do tipo moto-reductor, com ênfase especial à modelagem do atrito. Após o desenvolvimento do modelo dinâmico, projetou-se um controle de posição baseado em estrutura variável em duas versões, com superfícies simples e integral. Simulações foram realizadas a fim de se verificar a robustez do controlador a variações paramétricas. Os resultados mostraram que o controle estrutura variável com superfície integral (EVI) apresentou um desempenho superior ao verificado com o controle estrutura variável com superfície simples (EVS). O controlador em suas duas versões foi implementado em um atuador *harmonic-drive* e os resultados experimentais mostraram uma superioridade do controle EVI com relação ao EVS.

Palavras-chave— Controle com estrutura variável, atuador robótico, atrito, modelagem.

1 Introdução

A modelagem de atuadores robóticos constitui um desafio permanente devido à complexidade da dinâmica interna, principalmente em razão dos atritos não lineares (Gomes, 1995), fato que motivou o surgimento de diversos trabalhos na literatura sobre a modelagem matemática do atrito. O atuador utilizado no presente artigo é o *harmonic-drive*. Esse tipo de atuador robótico possui vantagens importantes como baixo peso, tamanho pequeno, jogo angular praticamente nulo, além da alta capacidade de transmissão de torque em razão do grande número de dentes das engrenagens em contato. Porém, a existência de uma zona morta em torque significativa (em torno de 10% a 20% de seu torque máximo) pode degradar o desempenho de leis de controle projetadas. Essa zona morta existe devida ao atrito interno (Machado, 2007).

O controle baseado em estrutura variável é conhecido por apresentar bom comportamento no transitório, além de uma efetiva capacidade de rejeitar dinâmicas não modeladas (Utkin, 1978), sendo por estas razões que se investigou, neste artigo, a aplicação deste tipo de controle na dinâmica não linear de um atuador robótico.

O presente artigo traz um estudo sobre a modelagem do atuador do tipo moto reductor com o modelo de atrito de Gomes (Gomes *et al.*, 2006) e também apresenta o controle de atuadores robóticos (simulações e experimentos), a partir de duas estratégias diferentes, para fins comparativos, utilizando-se o

modelo dinâmico proposto em (Gomes, 2003). As seções 2 e 3 apresentam uma rápida discussão sobre o atuador robótico, sua utilidade e modelagem. Na seção 4 é apresentado o modelo de atrito de Gomes. A seção 5 traz o controle de posição baseado em estrutura variável com superfícies simples e integral, aplicadas ao modelo dinâmico do atuador. Por fim, nas seções 6 e 7, apresentam-se os resultados das simulações (realizadas no Matlab) com e sem variação paramétrica, bem como resultados experimentais em malha fechada, estando as conclusões na seção 9.

2 O atuador robótico

Os atuadores elétricos do tipo moto-reductor *harmonic-drive* têm grande utilização na robótica. Eles estão presentes, por exemplo, em humanóides, veículos aéreos, subaquáticos e terrestres e nas juntas rotacionais de manipuladores robóticos. Essa utilização se justifica em razão do seu jogo angular praticamente nulo e ainda, da sua grande capacidade de ampliação do torque (Gomes, 2003). Porém, este tipo de atuador possui uma relevante zona morta em torque, ou seja, qualquer torque inferior ao atrito estático não passa para a estrutura a ser controlada.

O *harmonic-drive*, comparado a moto-redutores convencionais, apresenta excelentes características como alta relação de redução de velocidade, jogo angular mínimo, alta precisão, pequeno porte, alta capacidade de torque, operação silenciosa e sem vibração e alta eficiência (Sunada, 2007).

O atuador que serviu de base para a determina-

ção do modelo dinâmico para o estudo apresentado neste trabalho possui zona morta em torque equivalente a aproximadamente 10,8% do seu torque máximo.

3 Modelo do atuador

O modelo dinâmico do atuador é baseado no modelo proposto por (Gomes, 2003). A Tabela 1 mostra a constante de inércia e o torque máximo do atuador modelado.

Tabela 1: Parâmetros do atuador

Parâmetro	Valor
Inércia do rotor (I)	0.0133 kg.m ²
Torque máximo	1.74 N.m

A equação (1) apresenta uma aproximação rígida e linear para a dinâmica do atuador:

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} = T_m \quad (1)$$

Em forma matricial tem-se o seguinte modelo:

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -c/I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/I \end{pmatrix} T_m = \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + BT_m$$

Considerando a não-linearidade do sistema relacionada ao atrito, a equação (1) é reescrita na forma:

$$I\ddot{\theta} = T_m + T_a \quad (3)$$

onde T_a é o torque de atrito não linear.

4 Modelo de atrito

Em um sistema robótico, o atrito é um dos grandes problemas a ser estudado e entendido, especialmente devido à sua complexidade e ao crescente aumento da procura por processos que exigem alta precisão de posicionamento e manipulação. O atrito pode aparecer em várias partes que compõem o robô, como, por exemplo, os rotores, as transmissões, os mancais de sustentação, etc. Com o objetivo principal de estudar os efeitos causados pelo atrito e buscar alternativas de compensá-lo, surgiram ao longo dos anos diversas técnicas para reproduzir um comportamento preciso do fenômeno. Sendo assim, será apresentado o modelo de atrito de Gomes (Gomes *et al.*, 2006).

Dentre os fenômenos que serão observados na modelagem estão o efeito de pré-deslizamento em pequenos deslocamentos, onde verificam-se a dependência na forma de histerese da força de atrito em relação ao deslocamento, o efeito de ruptura, que é a força necessária para vencer o atrito estático e iniciar o movimento (Casanova, 2007), os modos *stick-slip* (fenômeno associado a atritos não lineares e acontece para baixas velocidades, podendo gerar ciclos limites em torno de uma referência numa estratégia de controle em malha fechada) e o efeito Stribeck para baixas velocidades, efeito descrito como a redução contínua da força de atrito com o aumento de veloci-

dade (Gomes, 2003).

O modelo de Gomes, proposto originalmente em (Gomes, 1995) se diferencia dos modelos clássicos em razão de sua representação do atrito. Neste modelo, o atrito não é representado nas equações diferenciais como um torque externo, mas como parte integrante da dinâmica própria do sistema.

Uma das principais contribuições do modelo é a representação do fenômeno *stick-slip* (Gomes, 2003), um comportamento não-linear comum em atuadores robóticos operando em baixas velocidades. *Stick-slip* significa um efeito prende-desliza, no qual a velocidade rotor vai a zero quando o torque resultante da articulação é inferior ao atrito estático, permanecendo assim até o momento em que o torque sai da zona morta e faz com que a velocidade atinja um certo limite, a partir do qual ocorrerá o deslizamento.

O estudo do modelo Gomes começa com a obtenção da curva característica estática do atrito. Diversos torques foram aplicados ao rotor do atuador com o objetivo de medir a velocidade após o regime estacionário. O torque de atrito é igual ao torque motor aplicado para cada velocidade estacionária, já que não existem outros torques externos além do motor.

Para interpolar os pontos em cada um dos sentidos de rotação, foram utilizados dois polinômios considerando que o índice i pode ser para velocidade positiva (p) ou negativa (n). A equação do torque de atrito, para cada sentido de rotação, fica assim definida:

$$T_{at} = f_i + f_{vi}\dot{\theta} + c_i\dot{\theta}^2 \quad (4)$$

Onde:

f_i é o coeficiente de atrito seco (velocidade positiva ou negativa);

f_{vi} é o coeficiente de atrito viscoso (velocidade positiva ou negativa);

c_i é o coeficiente de atrito de segunda ordem (velocidade positiva ou negativa). A equação do torque de atrito é escrita da seguinte forma, considerando f_v^* como o coeficiente de atrito viscoso variável e $\dot{\theta}$ como a velocidade do rotor:

$$T_{at} = f_v^* \dot{\theta} \quad (5)$$

Conforme a equação do atuador com aproximação rígida, apresentado na equação (1), a dinâmica pode ser posta em forma matricial e o modelo de Gomes fica representado pela equação (6). O coeficiente f_v^* depende da velocidade angular $\dot{\theta}$ e do torque motor T_m . Em (Gomes, 2006) existe um algoritmo para a geração do f_v^* .

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-f_v^*(\dot{\theta}, T_m)}{I} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/I \end{pmatrix} T_m = \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = A(\mathbf{x}, T_m)\mathbf{x} + BT_m$$

A equação (6) mostra que a não linearidade devida ao atrito pertence à dinâmica própria do sistema.

5 Controle de posição para o atuador robótico baseado em estrutura variável

Esta sessão traz o desenvolvimento do controle não linear a modos deslizantes (Slotine, 1991).

Inicialmente considera-se o sistema na forma de estado. Assim, a ideia principal é projetar o controle de modo que todas as trajetórias do sistema convirjam para a superfície de controle e nela permaneçam indefinidamente. Na superfície definida, as trajetórias descritas pelo vetor de estado deslizam assintoticamente para os valores desejados (*set points* ou valores de referência), justificando assim o nome controle por modos deslizantes.

Antes de se obter a lei de controle é necessário relembrar algumas equações importantes para a dedução do controle de posição para o atuador robótico utilizando estrutura variável por modos deslizantes com superfícies simples e integral. O modelo dinâmico simplificado do atuador pode ser descrito pela seguinte equação (Gomes, 2006):

$$\ddot{\theta} = \frac{-c}{I}\dot{\theta} + \frac{T_m}{I} \quad (7)$$

onde I é a inércia do rotor, c é o coeficiente de atrito e T_m é o torque motor. Para o controle com superfície variável, considera-se um modelo dinâmico que pode ser não linear, descrito pela seguinte equação geral:

$$\dot{x} = f(X) + b(X)u \quad (8)$$

onde X é o vetor de estados do sistema $X = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{n-1}]^T$, x é a saída de interesse, u é a entrada de controle e as funções genéricas $f(X)$, $b(X)$ são conhecidas, mas com uma faixa de incertezas em relação aos seus parâmetros.

Sendo X_d a referência desejada para os estados, o erro do seguimento da trajetória é dado por:

$$\tilde{X} = X_d - X \quad (9)$$

Portanto, o projeto deve ser feito para que os estados X sigam X_d , ou seja, que tenham um erro de rastreamento zero.

5.1 Superfície Simples

Definindo-se $\tilde{x} = x_d - x$ (erro em posição), a superfície de deslizamento simples $s(X, t)$ no espaço R^n é definida a partir da seguinte equação (Slotine, 1991):

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (10)$$

Para $n = 2$, por exemplo:

$$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x} \quad (11)$$

sendo λ uma constante positiva. Derivando-se (11) apenas uma vez aparece o termo x^n , o qual é substituído em (8), possibilitando determinar a entrada u (sinal de controle).

Considera-se um sistema de segunda ordem dado por:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t) + u(t) \quad (12)$$

A superfície é definida por $s(X, t) = 0$, obtida em (10) com $n=2$. Derivando-se (11) em relação ao tempo e após substituindo-se em (12) tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{x}_d - \ddot{x} + \lambda\dot{\tilde{x}} = \\ -f - u + \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Na ausência de erros de modelagem e de perturbações o controle teria a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} \quad (14)$$

onde \hat{f} e \hat{u} são estimativas de f e u respectivamente. Para se lidar com essas incertezas do modelo, acrescenta-se um termo descontínuo, que é função do sinal da superfície s :

$$u = \hat{u} + k(x, \dot{x}, t)\text{sinal}(s) \quad (15)$$

onde k representa o ganho do termo chaveado:

$$\text{sinal}(s) = \begin{cases} 1, & \text{se } s > 0; \\ 0, & \text{se } s = 0; \\ -1, & \text{se } s < 0. \end{cases} \quad (16)$$

Define-se uma “camada limite” de largura ϕ da superfície s , para suavizar a função sinal (16) e evitar assim o fenômeno de *chattering*, o qual corresponde a oscilações ou transições do sinal do controle em torno do valor zero. Assim, utiliza-se:

$$u = \hat{u} + k(x, \dot{x}, t)\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \quad (17)$$

onde:

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} \text{sinal}(s), & \text{se } \left|\frac{s}{\phi}\right| > 1; \\ \frac{s}{\phi}, & \text{se } \left|\frac{s}{\phi}\right| \leq 1; \end{cases} \quad (18)$$

Aplicando-se o modelo do atuador (7) em (13) e (14) e adotando-se:

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{\tilde{\theta}}, \quad \ddot{\tilde{x}} = \ddot{\tilde{\theta}}, \quad \ddot{\tilde{x}}_d = \ddot{\tilde{\theta}}_d, \quad (19)$$

$$u = T_m$$

$$\hat{u} = \hat{T}_m \text{ e } f = -c\dot{\theta} \quad (20)$$

obtem-se duas equações, para \dot{s} e \hat{T}_m , respectivamente:

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d + \frac{c}{I}\dot{\theta} - \left(\frac{1}{I}\right)T_m + \lambda\dot{\tilde{\theta}} \quad (21)$$

$$\hat{T}_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + I\lambda\dot{\tilde{\theta}} \quad (22)$$

ficando o sinal de controle final suavizado sob a forma:

$$T_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + I\lambda\dot{\tilde{\theta}} + k\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \quad (23)$$

5.2 Superfície Integral

Para a superfície integral, o raciocínio é o mesmo, mas a superfície $s(t)$ assume a seguinte forma:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \left(\int_0^t \tilde{x} dr\right) \quad (24)$$

Para $n=3$, por exemplo:

$$s = \dot{\tilde{x}} + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{x} dr \quad (25)$$

Derivando-se (25) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\dot{s} = \ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (26)$$

sendo que, neste caso, a função do controle estimado assume a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (27)$$

Por fim, aplica-se (7) nas equações (26) e (27), usam-se as relações (19) e (20) e obtém-se o controle estimado e a superfície integral do modelo:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_d + \frac{c}{I}\dot{\theta} - \left(\frac{1}{I}\right)T_m + 2\lambda\dot{\tilde{\theta}} \\ &\quad + \lambda^2\tilde{\theta} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\hat{T}_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + 2I\lambda\dot{\theta} + I\lambda^2\theta \quad (29)$$

ficando o sinal de controle final com a função de suavização sob a forma:

$$T_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + 2I\lambda\dot{\theta} + I\lambda^2\theta + k\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \quad (30)$$

6 Simulações para o atuador robótico

A seguir, são apresentadas simulações realizadas no Matlab. Os resultados obtidos ilustram o comportamento do atuador robótico do tipo *harmonic-drive* com a aproximação rígida de 1 *dof*, considerando a dinâmica não linear do modelo. Foram aplicados os controles EVS (estrutura variável com superfície simples) e EVI (estrutura variável com superfície integral). A trajetória a ser seguida foi gerada adotando-se um perfil de velocidade trapezoidal, com posição inicial de 0 *rd*, posição final igual a 4 *rd* e passo de integração de 0.000651s (idêntico ao passo de discretização utilizado nos experimentos). A trajetória trapezoidal consiste em dividir o tempo de simulação do controle em três partes iguais: primeiramente com aceleração positiva, em seguida com aceleração nula e, por fim, com aceleração negativa. O objetivo da trajetória era chegar até a posição final em 5 segundos e lá se manter por mais 5 segundos. Nos gráficos tem-se a referida trajetória de referência em vermelho, enquanto que a posição angular de saída está em azul. Das janelas gráficas a seguir (figuras 1-4), o gráfico superior esquerdo mostra a posição angular, o superior direito a velocidade angular, o inferior esquerdo o erro em posição e o inferior direito o torque motor de controle. É importante ressaltar que os projetos de controle foram realizados considerando-se o modelo nominal com a dinâmica linear de atrito (proporcional a velocidade) igual à planta física e, neste caso, todas as técnicas de controle têm desempenhos aproximadamente iguais e, por esta razão, foram omitidas no presente artigo. As simulações mostradas a seguir foram realizadas com os controladores utilizando o modelo nominal linear, mas a dinâmica simulada considerou o modelo da planta física não linear e, portanto, procuram ressaltar qual controlador consegue manter o bom desempenho sem comprometer a estabilidade, mesmo em presença de dinâmicas não modeladas (não consideradas no modelo nominal) e variações paramétricas.

6.1 Simulação 1 (sem variação no torque de atrito)

Observa-se que no sistema de controle EVS (Fig. 1), houve uma perda de desempenho no seguimento da trajetória de referência, gerando um erro de estado estacionário significativo. O torque motor de controle teve um aumento aproximado de 29% (com relação à simulação com o modelo nominal linear) em razão da lei de controle tentar superar as não linearidades do modelo. Ressalta-se que em nenhum momento houve saturação do controle. Observa-se ainda que o erro de estado estacionário presente deva-se especifi-

camente às não linearidades da dinâmica, em razão ao atrito interno do atuador.

A simulação do controle com EVI é mostrada na (Fig. 2). Esse controle obteve um resultado muito bom no seguimento da trajetória de referência, evidenciando um desempenho próximo do obtido com a simulação sobre a dinâmica linear. Houve também um acréscimo do torque motor de controle (com relação ao caso linear), mas este não chegou ao limite da saturação.

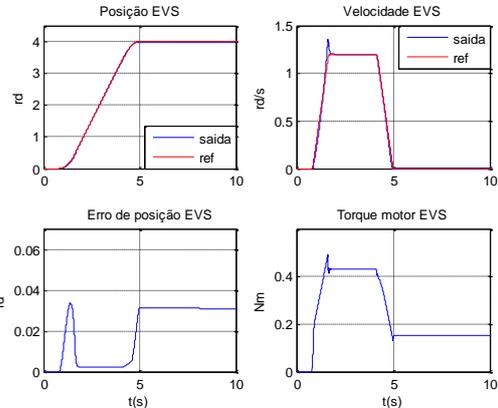


Fig. 1. Simulação do controle a estrutura variável com superfície simples

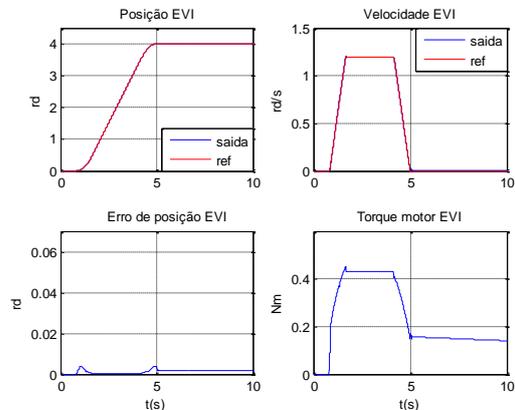


Fig. 2. Simulação do controle a estrutura variável com superfície integral

6.2 Simulação 2 (com variação paramétrica)

Após diversas simulações para avaliar os efeitos das variações paramétricas nos parâmetros do modelo, observou-se que o atrito é crítico para a dinâmica do atuador, principalmente os parâmetros relativos aos atritos seco e estático, os quais limitam a zona morta em torque do atuador. Nas simulações realizadas a seguir, adotou-se para esses parâmetros uma variação 15% maior que na planta física, com relação ao modelo nominal.

Nota-se que com o controle EVS, (Fig. 3), a velocidade do atuador se altera em relação à simulação realizada sem variação paramétrica (Fig. 1) de maneira a não conseguir acompanhar a velocidade de referência, acarretando uma perda considerável de desempenho, gerando um erro de estado estacionário muito grande, inviabilizando a utilização dessa lei de controle.

Na simulação realizada com o EVI (Fig. 4), observa-se que, mesmo com a variação paramétrica, a trajetória de referência foi seguida quase com exatidão. Assim, verifica-se que, o desempenho do sistema com o controle EVI é satisfatório.

Vale ressaltar para todas as leis de controle que, apesar da variação de 15% dos parâmetros considerados críticos e ainda, da necessidade de superar uma zona morta em torque de aproximadamente 10,8% do seu torque máximo, o torque motor sofre um acréscimo em relação à simulação sem variação paramétrica em torno de 12%, mas em nenhum momento satura (saturação estimada em 1.74 N.m), permanecendo sempre dentro de uma faixa normal de operação ((Fig 3) e (Fig 4)) (Gomes, 2011).

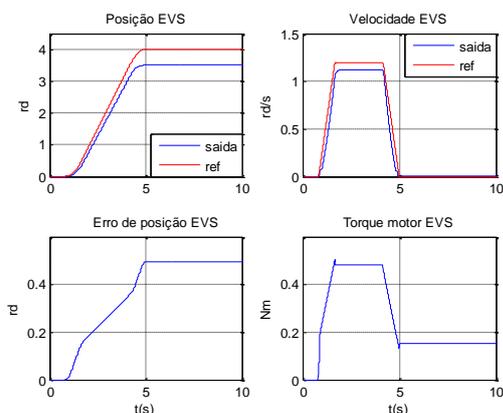


Fig. 3. Simulação do controle a estrutura variável com superfície simples

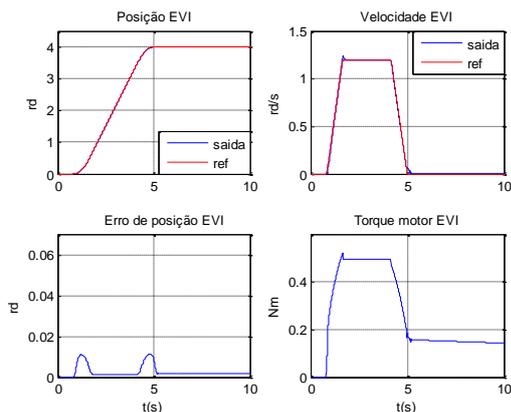


Fig. 4. Simulação do controle a estrutura variável com superfície integral

7 Resultados experimentais

A seguir mostram-se os resultados experimentais obtidos nas mesmas condições das simulações (seção 6) com as leis de controle EVS (Fig 5) e EVI (Fig 6). Os gráficos mostrados a seguir mantêm o mesmo formato dos anteriores (Figuras 1 a 4) e os ganhos experimentais dos controles também foram os mesmos utilizados nas simulações.

Pode-se notar, que os projetos dos ganhos das leis de controle feitos e testados em simulação ((Fig 1), (Fig 2), (Fig 3) e (Fig 4)) mostraram-se satisfató-

rios também nos resultados experimentais ((Fig 5) e (Fig 6)), tendo desempenho razoável para o EVS (Fig. 5) e desempenho superior para o EVI (Fig. 6).

Percebe-se, quanto ao erro de estado estacionário, que o controle EVI foi o que obteve melhor resultado e que também foi muito superior ao do controle EVS. Em nenhum momento os torques motores experimentais saturaram.

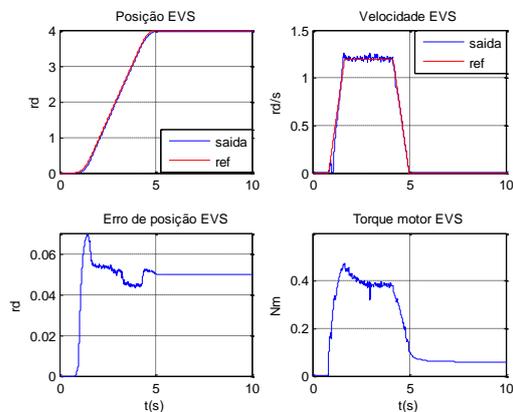


Fig. 5. Experimento do controle a estrutura variável com superfície simples.

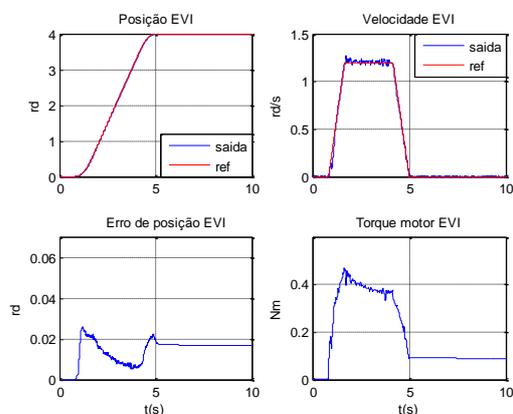


Fig. 6. Experimento do controle a estrutura variável com superfície integral.

8 Conclusões

Este artigo tratou da modelagem e do controle de atuadores robóticos. Utilizou-se o modelo de Gomes de atrito, o qual se diferencia dos modelos clássicos pelo fato do atrito ser representado diretamente na dinâmica própria do sistema (não é considerado um torque externo) e por ter uma fácil identificação de parâmetros, o que tornou sua implementação mais simples. Além de não utilizar o acréscimo de equações diferenciais na dinâmica do atuador, possui uma excelente representação do fenômeno *stick-slip*, comum em atuadores operando em baixas velocidades. Este modelo considera o atrito diferente nos dois sentidos de rotação, horário (positivo) e anti-horário (negativo).

Depois o trabalho abordou o problema do con-

trole de atuadores robóticos do tipo *harmonic-drive*, considerando o atrito não-linear e avaliando o desempenho de controladores a estrutura variável (modos deslizantes), considerando-se variações paramétricas nas simulações.

Foram desenvolvidos dois tipos de controle que utilizam modos deslizantes: um com superfície simples e outro com superfície integral. Em ambos os casos o objetivo foi o de efetuar o controle em posição do atuador robótico.

Percebeu-se que o controle com superfície integral é robusto às diferenças entre modelo nominal e planta e à zona morta em torque na dinâmica de atuadores. Verificou-se ainda que o controle com superfície simples mostrou uma grande perda de desempenho e seus resultados foram inferiores aos obtidos com o controle com superfície integral.

Comparar técnicas de controle é sempre uma tarefa difícil porque os resultados são muito dependentes dos projetos de controle. No entanto, essas leis de controle foram projetadas para fornecer aproximadamente o mesmo desempenho quando o modelo nominal é considerado idêntico à planta física, de forma que os resultados experimentais e as simulações com variações paramétricas evidenciaram bem a superioridade do controle com superfície integral.

Referências Bibliográficas

- Casanova, C. C.(2007). Modelagem e compensação de atrito em robôs manipuladores com flexibilidades nas juntas: identificação, análise e resultados experimentais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Florianópolis.
- Gomes, S. C. P.(1995). Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores. *In XIII COBEM*, CD-ROM, Belo Horizonte.
- Gomes, S. S., Gomes, S. C. P.(2011). Analysis of Control Laws for Unmanned Underwater Vehicles. ABCM Symposium Series in Mechatronics, v. 4, p. 1-10.
- Gomes, S. C. P., Rosa, V. S.(2003). A new approach to compensate Friction in robotic actuators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003)*, Taipei, Taiwan.
- Gomes, S. C. P., Rosa, V. S. and Albertini, B. C.(2006). Active control to flexible manipulators. *IEEE/ASME, Transactions on Mechatronics*, 11 (1), USA.
- Gomes, S. S., Zeilmann, A. P., Terres, M. A. S., Soares, L. B., Gomes, S. C. P. (2010). Controle baseado em estrutura variável aplicado em atuadores robóticos. *Argentina Computational Mechanics Association*, Buenos Aires, v. XXIX, págs. 2345-2364 (ISSN 1666-6070).
- Gomes, S. S. (2011). Modelagem e controle de atuadores robóticos e veículos subaquáticos não tripulados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande.
- Groover, Mikell P., Weiss, M., Nagel, R. N., Odrey, N. G.(1988). *Robótica: tecnologia e programação*. McGraw-Hill. São Paulo.
- Machado, C. C.(2007). Modelagem matemática e controle ativo de um manipulador com um elo flexível. Porto Alegre. 152 p. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Slotine, W. Li. (1991) *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 461 p.
- Sunada, M. M. (2007). Acionamento de um posicionador linear de ultra-precisão empregando uma redução Harmonic-Drive com controle de velocidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- Utkin, V.I. (1978). *Sliding Modes and their Application to Variable Systems*. MIR Publishers, Moscow.