

ESTUDO DA NÃO LINEARIDADE DE FOLGA NAS JUNTAS DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Eduardo Padoin, eduardopadoin@bol.com.br¹

Odair Menuzzi, odair.menuzzi@ibest.com.br²

Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br³

¹UNIJUI, Caixa Postal 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

²UNIJUI, Caixa Postal 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

³UNIJUI, Caixa Postal 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

Resumo: *Este trabalho trata do estudo da não linearidade da folga em transmissões mecânicas compostas de engrenagens e utilizadas no acionamento de juntas rotativas de robôs manipuladores. Esses robôs são utilizados em muitas tarefas insalubres da indústria, nas mais diferentes aplicações em setores tais como indústria de transformação, construção, equipamentos agrícolas, equipamentos de transporte e manuseio de materiais, metalurgia, siderurgia, entre outros. Essas tarefas industriais realizadas requerem precisão e repetitividade nos movimentos desejados. Entretanto, há vários fatores que dificultam a obtenção de boas precisões com repetições, a folga nos trens de engrenagens é uma delas. Normalmente, o conceito de folga está associado com os trens de engrenagem e acoplamentos mecânicos similares. Este fenômeno vem dificultando o desempenho de sistemas de controle há vários anos, uma vez que folgas causam efeitos indesejáveis sobre a dinâmica de realimentação e sobre a performance do sistema de controle. Para isso, buscou-se o estudo desse fenômeno, avaliando computacionalmente o comportamento da folga em um trem de engrenagens e os parâmetros de controle para compensar a não linearidade devido à folga entre as partes.*

Palavras-chave: *não linearidade da folga, manipuladores robóticos, compensação de não linearidades*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do problema de modelagem matemática e simulação computacional da não linearidade de folga (*backlash*) em transmissões mecânicas do tipo trem de engrenagens com dentes retos, comuns no acionamento das juntas rotativas e prismáticas de robôs industriais (Hunt, 1983; Sciavicco e Siciliano, 1996; Cupido et al., 1996, Paatz, 2008).

Com o crescimento do consumo mundial, a ampliação da produção se fez necessária. Com o intuito de buscar uma solução para suprir essa necessidade, indústrias dos mais diferentes setores tais como transformação, construção, equipamentos agrícolas, equipamentos de transporte e manuseio de materiais, metalurgia, siderurgia, entre outros, montaram linhas de produção utilizando robôs no lugar da mão de obra humana para muitas tarefas insalubres nas mais diferentes aplicações nos setores industriais citados.

Essas tarefas industriais realizadas requerem precisão e repetitividade nos movimentos desejados. Entretanto, há vários fatores que dificultam a obtenção de boas precisões com repetições, a folga nos trens de engrenagens é uma delas. Normalmente, o conceito de folga está associado com os trens de engrenagem e acoplamentos mecânicos similares. Este fenômeno vem dificultando o desempenho de sistemas de controle há vários anos, uma vez que folgas causam efeitos indesejáveis sobre a dinâmica de realimentação e sobre o desempenho do sistema de controle.

Valdiero (2005) aponta a importância do estudo das não linearidades dos sistemas mecânicos, os quais causam limitações no desempenho do controle preciso, destacando-se a zona morta, o atrito, histerese e a folga (*backlash*). Dentro deste contexto, vários trabalhos (Nordin e Gutman, 2002; Dong e Tan, 2009; Vorös, 2009; Hägglund, 2007) têm tratado da modelagem, identificação e compensação da não linearidade de folga. Nordin e Gutman (2002) comentam que a folga é uma das mais importantes não linearidades que limitam o desempenho do controle de posição e velocidade em aplicações industriais e de robótica. A revisão bibliográfica realizada por estes autores indica ainda que existe muita pesquisa a ser feita para síntese e análise da compensação de folga no controle de sistemas mecânicos.

Vörös (2009) apresenta uma nova forma analítica de descrição do modelo matemático da não linearidade de folga que utiliza funções de chaveamento e mostra resultados de simulação computacional da identificação dos parâmetros.

Hägglund (2007) descreve um novo método para detecção e estimativa da não linearidade de folga em válvulas de controle que sofreram desgaste. Ele utiliza como modelo a função descritiva da folga e comenta que a facilidade de compensação desta não linearidade depende de sua inversa.

Selmic e Lewis (2001) apresentam um esquema de compensação para folgas com inversão da dinâmica utilizando a técnica do backstepping com redes neurais. Um modelo geral da folga é usado e permite assimetria.

Cazarez-Castro et al. (2009) apresenta uma combinação de lógica fuzzy e algoritmos genéticos na busca de resolver o problema de regulação da saída de servomecanismos com não linearidade de folga. Os dados para simulação foram obtidos a partir de uma bancada experimental de testes que envolve um motor DC ligado a uma carga mecânica por meio de uma transmissão por trem de engrenagens com folga.

Giri et al. (2008) apresenta proposições para a identificação de sistemas lineares com a presença da não linearidade de folga a partir da parametrização apropriada do sistema, a estimativa dos parâmetros pela técnica dos mínimos quadrados e a especificação de padrões de sinais de entrada.

Shahnazi et al. (2009) propõe um controlador adaptativo combinado com lógica fuzzy para melhorar a robustez do controle feedback de sistemas com a presença de não linearidades tais como sistemas mecânicos com folga no acionamento.

Da mesma forma que Morales-Velazquez et al. (2009) propõe melhorias do controle de máquinas, ferramenta com controle numérico computadorizado (CNC) utilizando plataformas de baixo custo e a identificação dos parâmetros do modelo do servo sistema. Dentro deste contexto, o propósito deste trabalho é apresentar uma proposta computacional de modelagem e simulação de folga em transmissões mecânicas do tipo trem de engrenagem para futuras aplicações de acionamentos de baixo custo no acionamento de robôs, incluindo-se a compensação desta não linearidade em seu sistema de controle.

Sendo assim, para melhor entendimento desse fenômeno o trabalho foi dividido nas seguintes seções: na seção 2 são descritas as transmissões mecânicas de manipuladores robóticos. Na seção 3, a descrição da não linearidade da folga, e em seguida, na seção, 4 são mostradas a modelagem matemática e a simulação computacional. Por fim, a seção 5 apresenta a discussão dos resultados e a seção 6 é a conclusão.

2. TRANSMISSÕES MECÂNICAS DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Atualmente há duas formas de acionamento das juntas de robôs industriais. Uma é o acionamento direto (*direct-drive*), onde o motor é montado diretamente no eixo da junta e que de acordo com Turner et al. (2001) não é o ideal para motores elétricos, pois a ausência de uma relação de redução do movimento leva à necessidade de motores elétricos especiais com menor rotação e maior torque, além de sujeitá-lo aos efeitos dinâmicos do acoplamento. A outra forma de acionamento, que é a mais tradicional e simples, é a utilização de transmissões por engrenagens entre os motores e as juntas, as quais possuem como vantagens a menor carga no motor, maiores rotações no motor e a facilidade de seu posicionamento deste no braço do robô. A desvantagem deste tipo de acionamento é a presença de atrito e a folga nas transmissões de engrenagem.

Os manipuladores robóticos podem apresentar diferentes anatomias em relação à cadeia cinemática, conforme descrito por Paatz (2008) e mostrado na Fig. (1).

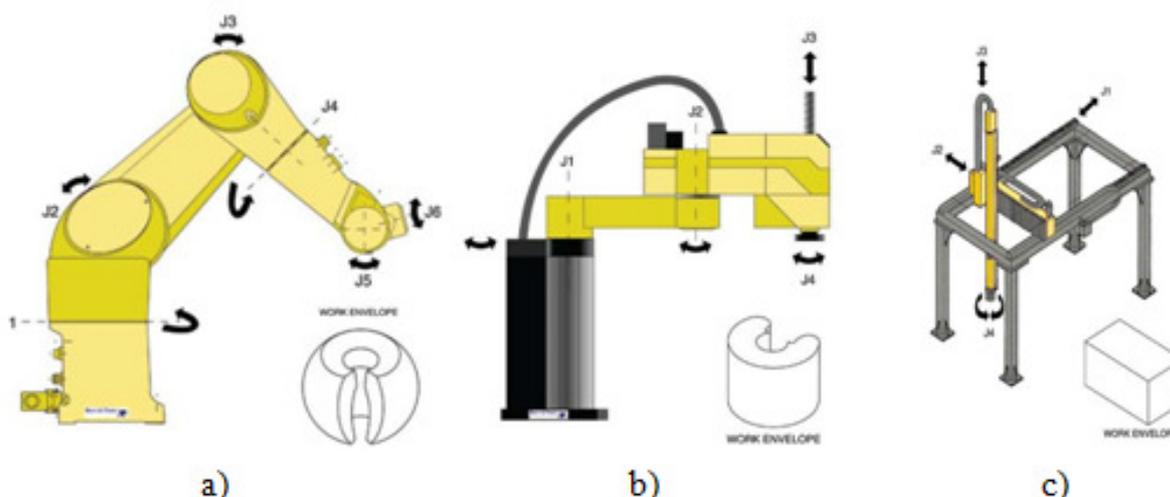


Figura 1. Tipos de estruturas de robôs industriais: a) robô articulado, b) robô SCARA, c) robô cartesiano.

Em ambas as estruturas de manipuladores robóticos, têm-se as juntas rotativas que precisam ser acionadas por motores.

Ao projetar e construir um robô industrial, vários componentes podem ser utilizados nas transmissões mecânicas. O objetivo de uma transmissão é levar a potência mecânica da fonte de potência até a carga. Ao optar por um tipo de transmissão mecânica, deve-se levar em conta a potência transmitida, os tipos de movimentos realizados e o posicionamento da fonte de potência em relação à junta rotativa ou prismática em questão. Além, é claro, de fatores como a rigidez do material, a eficiência e a relação custo por benefício.

De acordo com Ross et al. (2006), na seleção ótima de uma transmissão por engrenagens para aplicações em mecatrônica, a escolha do tipo depende de muitos fatores, onde os mais importantes são velocidade de entrada, folga, eficiência e custo. Em geral a transmissão de custo menor tem a maior folga, então ou se aumenta o custo ou se compensa a não linearidade de folga no esquema de controle. O importante é se chegar a uma solução de compromisso (*trade-off*), equilibrando os custos de fabricação e os custos de implementação de controle com a compensação das não linearidades.

As engrenagens são os componentes de transmissão mais utilizados. Engrenagens são rodas com dentes padronizados que servem para transmitir movimento e força entre dois eixos. Muitas vezes as engrenagens são usadas para variar o número de rotações e o sentido da rotação de um eixo para o outro, e suas partes podem ser vista na Fig. (2).

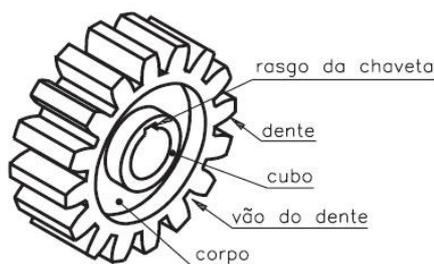


Figura 2. Partes de uma engrenagem.

Ao se optar por esse tipo de transmissão mecânica é necessário estabelecer a razão de transmissão, qual o tipo de engrenagem a ser utilizado, o suporte dos eixos das engrenagens, além a lubrificação e do controle da distância dos centros das engrenagens. Dentre os tipos de engrenagens utilizadas está a engrenagem com dentes retos que é o tipo mais comum de engrenagem e o de mais baixo custo, sendo utilizadas para a transmissão de rotação entre eixos paralelos ou para deslocamento linear de uma cremalheira. É mais empregada em movimentos de baixa rotação do que em altas rotações devido ao ruído que produz. Já as engrenagens que possuem dentes helicoidais são paralelas entre si, mas oblíquos em relação ao eixo, devido a isso trabalham mais suavemente que as com dentes retos, produzindo assim menos ruído. Em manipuladores robóticos frequentemente é necessário um trem de engrenagens que possua grandes reduções. As engrenagens em forma de tronco de cone, recebem o nome de cônicas. Podem ser compostas de dentes retos ou helicoidais, o ângulo de interseção entre duas engrenagens geralmente é de 90° , podendo ser maior ou menor. A engrenagem cônica é usada para mudar a rotação e a direção da força, em baixas velocidades. Já a do tipo cremalheira é uma barra provida de dentes e destinada a engrenar uma roda dentada, podendo assim transformar movimento de rotação em movimento retilíneo e vice-versa. A engrenagem harmônica é caracterizada pela alta relação de transmissão e eixos paralelos em série sendo por estas razões muito compacto. Outro tipo de engrenagem que permite alta redução de velocidade é a engrenagem planetária. Na Fig. (3) pode verificar a ilustração de alguns tipos de engrenagens. Este trabalho trata do estudo da não linearidade de folga num par de engrenagens cilíndricas de dentes retos, tal como na Fig. (3.a).

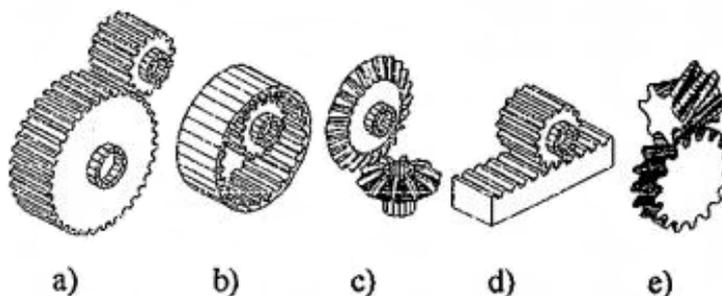


Figura 3. Vários tipos de engrenagens a) Dentes Retos, b) Dentes internos, c) engrenagens cônicas, d) cremalheira e roda dentada, e) Engrenagem com dentes Helicoidais.

3. DESCRIÇÃO DA NÃO LINEARIDADE DA FOLGA

Em manipuladores robóticos, as não linearidades tais como a zona morta, folga e histereses são consideradas comuns e típicas, pois elas estão onipresentes em componentes de sistemas mecânicos, hidráulicos, entre outros. Dentre essas, a folga objeto desse estudo, tem o seu conceito normalmente associado com os trens de engrenagem e

acoplamentos mecânicos, sua característica principal é o atraso do movimento, ou seja, atraso entre a ação de potência promovida na engrenagem motora e o receber dessa ação na engrenagem movida.

Esse atraso ou folga é um fenômeno que vem dificultando o desempenho de sistemas de controle há vários anos. Essa dificuldade se dá devido ao fato de que as tarefas realizadas por manipuladores robóticos nas mais diferentes tarefas da indústria requerem precisão e repetitividade nos movimentos desejados. Entretanto, a folga dificulta a obtenção de boas precisões com repetições. Essa situação causa efeitos indesejáveis sobre a dinâmica de realimentação e prejudica o desempenho do sistema de controle. Para melhor entendimento da folga é apresentado um desenho esquemático desta não linearidade na Figura (4) e em seguida descreve-se o fenômeno.

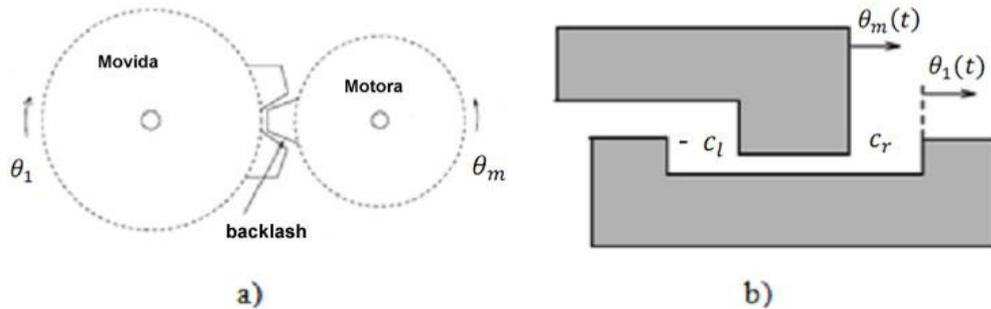


Figura 4. Esquema representativo da folga.

Um perfil L é dirigido até um perfil U com um espaço constante $c_r - c_l$. A entrada θ_m é a posição angular da engrenagem motora mostrada na Fig. (4 a) e representada pelo perfil L na Fig. (4 b). E a saída θ_1 é a posição angular da engrenagem movida da Fig. (4 a) e representada pelo perfil U da Fig. (4 b).

Com base na Fig. (4), tem-se $\theta_m = 0$ e $\theta_1 = c_r$ como condição inicial. Agora considere que θ_m inicie um movimento para a direita. Quando θ_m atingir θ_1 , tem-se $\theta_m = \theta_1 = c_r$ e o contato é estabelecido. Após esse momento a saída segue a entrada por uma curva de característica crescente. Se em algum momento algum ponto da entrada θ_m parar e iniciar um movimento no sentido contrário, ou seja, para a esquerda, a saída θ_1 permanecerá imóvel até que a entrada (perfil L) entre em contato com o ponto contrário do perfil U, o movimento durante esse período é representado por uma transição horizontal para a esquerda. Com base na Fig. (4), pode-se perceber que a duração desse segmento é $c_r - c_l$, uma vez que $c_l < 0$. Como descrito anteriormente o fim desse segmento é o contato com o lado esquerdo do perfil U. Após, θ_1 inicia o movimento para a esquerda juntamente com a entrada θ_m , formando assim uma curva de característica decrescente, certamente se a entrada parar e começar novamente um movimento para a direita o processo todo irá se repetir, sempre observando os novos contatos com os lados de perfil U.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo de folga estudado foi o proposto por Tao & Kokotovic (1996), com entrada $\theta_m(t)$ representando a posição angular da engrenagem motora e $\theta_1(t)$ é a saída que representa a posição angular da engrenagem movida. O modelo é caracterizado por duas linhas diretamente paralelas para cima à direita e para baixo a esquerda, o modelo matemático para o tempo discreto é dado por Eq. (1).

$$\theta_1(t) = \begin{cases} m(\theta_m(t) - c_l) & \text{se } \theta_m(t) \leq v_l \\ m(\theta_m(t) - c_r) & \text{se } \theta_m(t) \geq v_r \\ \theta_1(t-1) & \text{se } v_l < \theta_m(t) < v_r \end{cases} \quad (1)$$

sendo:

$$v_l = \frac{\theta_1(t-1)}{m} + c_l, \quad v_r = \frac{\theta_1(t-1)}{m} + c_r,$$

Onde $m, c_l < c_r$ são parâmetros constantes. Os valores de v_l e v_r são valores dos eixos das projeções das intersecções de duas paralelas linhas da rampa m com o segmento horizontal contendo $\theta_1(t-1)$.

A representação gráfica do modelo da não linearidade de folga é mostrada na Fig. (5), onde pode-se visualizar seus principais parâmetros.

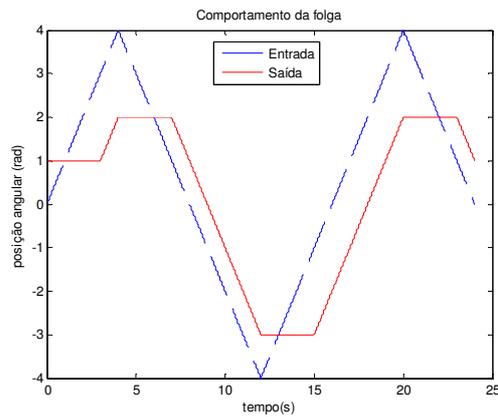


Figura 7. Comportamento da folga com os parâmetros $m=1$, $c_l=-1$ e $c_r=2$ e $\theta_{1i}=2$

Na Fig. (7), onde os parâmetros tiveram os valores de $m=1$, $c_l=-1$ e $c_r=2$, pode-se constatar algumas características dinâmicas da trajetória entre a entrada e a saída típicas da não linearidade de folga. Note o segmento horizontal que ocorre na trajetória de saída quando da mudança da direção da trajetória de entrada θ_m , este segmento horizontal representa a perda de movimento na saída θ_1 . No segundo teste, cujo resultado é apresentado na Fig. (8), pode-se observar um comportamento análogo para uma condição inicial diferente.

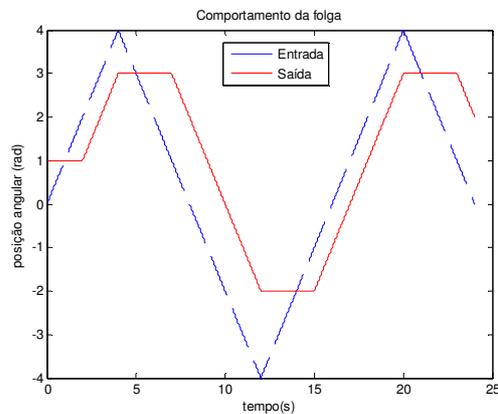


Figura 8. Comportamento da folga com os parâmetros $m=1$, $c_l=-2$ e $c_r=1$ e $\theta_{1i}=1$.

Comparando-se a Fig (7) e a Fig. (8), com a mudança do parâmetro θ_{1i} , pode-se perceber que houve uma mudança no atraso da trajetória de saída em relação à entrada. Mostrando que existe uma relação entre o atraso da saída em relação à entrada para a mesmo vão de contato da folga, mas com o valor diferente do parâmetro inicial θ_{1i} .

Nas Fig. (9) e Fig. (10), está representado um sistema com a entrada senoidal de amplitude 6 rad. Note novamente os efeitos de degradação da resposta de saída que são típicos da presença da não linearidade de zona morta: a perda do movimento na saída nas inversões do movimento da entrada e o atraso no tempo da resposta do sistema.

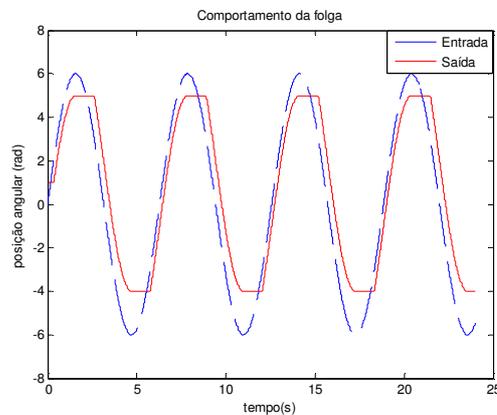


Figura 9. Comportamento da folga com os parâmetros $m=1$, $c_l=0$ e $c_r=3$ e $\theta_{1i}=3$.

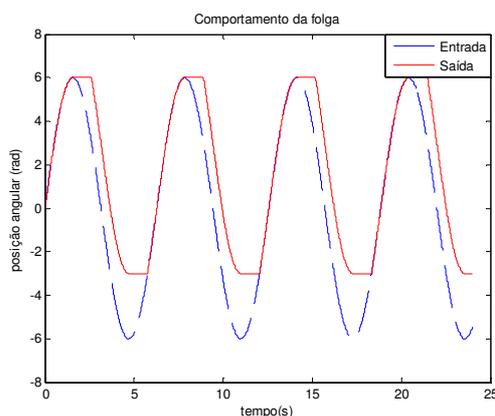


Figura 10. Comportamento da folga com os parâmetros $m=1$, $c_l=-3$ e $c_r=0$ e $\theta_1 i = 0$.

Na Fig. (10) foi utilizado novamente uma entrada senoidal, agora com alteração dos parâmetros, novamente pode-se perceber o comportamento típico da folga tal como o segmento horizontal. Nesse caso, pode-se observar que a não linearidade de folga é algo mais complexo do que se imaginava quando comparada a não linearidade de zona morta. A não linearidade de folga tem algo semelhante a uma memória e é dependente das condições iniciais do movimento.

Na Fig. (11) novamente foi simulado o sistema com a mudança da entrada para degrau, permanecendo os parâmetros da última simulação, nesse cenário a perda de movimento se faz presente com o segmento horizontal na parte inferior do degrau e o comportamento da saída é assimétrico.

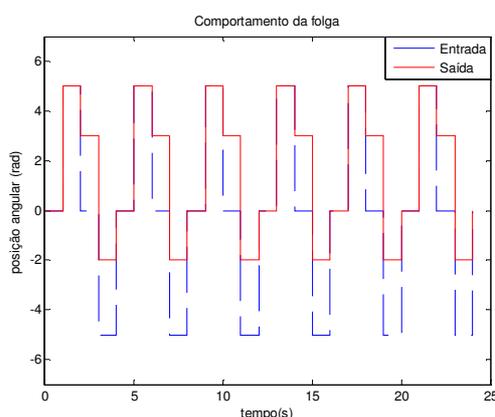


Figura 11. Comportamento da folga para entrada em degrau com os parâmetros $m=1$, $c_l=-3$ e $c_r=0$ e $\theta_1 i = 0$.

6. CONCLUSÕES

Como visto no estudo apresentado neste trabalho, a folga é uma não linearidade presente no acionamento de transmissões do tipo trem de engrenagens dos manipuladores robóticos de baixo custo. Esse fenômeno é um empecilho na busca de controle para movimentos que necessitam de precisão com repetitividade.

Foi realizada uma revisão bibliográfica em literatura internacional recente, onde se identificou diversos trabalhos de modelagem matemática e identificação de parâmetros, ambos trabalhos pesquisados são teóricos e apresentam apenas resultados de simulações computacionais, logo concluiu-se que ainda há muito campo para pesquisa em relação à identificação e compensação desta não linearidade em sistemas mecânicos com validação experimental em aplicações práticas da robótica industrial.

A partir de um modelo matemático da não linearidade de folga e do estudo de seus parâmetros, pode-se constatar os efeitos de degradação da folga por meio de simulações computacionais, o atraso entre a curva de entrada efetuada no sistema θ_m e a resposta obtida pela curva de saída e θ_1 é dependente da variação dos parâmetros base do modelo (m , c_l , c_r) e das condições iniciais do movimento.

Como perspectiva para os próximos trabalhos, tem-se como meta a construção de uma bancada para testes de validação experimental do modelo matemático da não linearidade de folga num trem de engrenagens de dentes retos, a inclusão da dinâmica da junta de um manipulador robótico, a formulação da inversa do modelo matemático da não linearidade de folga e sua utilização no controle com compensação para fins de redução dos efeitos de degradação na saída do sistema.

De uma forma geral, pode-se concluir que este trabalho contribuiu para o entendimento das não linearidades presentes em um manipulador robótico e ajuda na definição de estratégias para compensação destas.

7. REFERÊNCIAS

- BAVARESCO, D. ; VALDIERO, A. C. ; RAFIKOV, M. ; ANDRIGHETTO, P., 2006, “Modelagem matemática e controle linear por realimentação de um atuador pneumático”, em “Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional” (SBMAC - Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional), 29, Campinas.
- CUPIDO, A; SALA, R; MILANESI, S. ,1996 ,“Sistemi Ed Automazione Industriale”, Vol 3, Bologna.
- DONG, RUILI; TAN, YONGHONG., 2009, “A Gradient Based Recursive Identification of Mechanical Systems with Backlash-like Hysteresis”; 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10.
- ENDLER, L., 2009, “Modelagem da vazão mássica de uma servoválvula pneumática e sua aplicação no controle ótimo de um servoposicionador pneumático”, Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- HÄGGLUND, TORE., 2007, “Automatic on-line estimation of backlash in control loops”, Department of Automatic Control, Lund University, Journal of Process Control.
- HUNT, DANIEL V., 1983, “Industrial Robotics Handbook”, Estados Unidos.
- MIOTTO, F. E. M.; VALDIERO, A. C.; DILDA, V.; ANDRIGHETTO, P. L., 2008, “Modelagem e simulação computacional de um atuador hidráulico considerando o efeito do atrito dinâmico”, em XII ERMAC – Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, UNIOESTE, Foz do Iguaçu.
- NORDIN, M., & GUTMAN, P. O., 2002, “Controlling mechanical systems with backlash - A survey”, Magazine Automatica.
- PAATZ, Stirling., 2008 “Anatomy of a Robot”, Engineering & Technology. p. 42 – 44.
- RITTER, C. , 2009, “Modelagem matemática das características não lineares de atuadores pneumáticos”, Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- SELMIC, RASTKO R., LEWIS, FRANK L., 2001., “Neural net backlash compensation with Hebbian tuning using dynamic inversion”, Automatica.
- SCIAVICCO, LORENZO; SICILIANO, BRUNO. 1996, “Modeling And Control of Robot Manipulators”. Naples: McGraw-Hill.
- TAO, G. & KOKOTOVIC, P. V., 1996, “Adaptive control of systems with atuador and sensor nonlinearities”, New York: Wiley.
- VÖRÖS, J., 2009, “Modeling and identification of systems with backlash”. Journal Automatica.
- VALDIERO, A. C., 2005, “Controle de robôs hidráulicos com compensação de atrito”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

8. DIREITOS AUTORAIS

Todos os direitos reservados para Eduardo Padoin, Odair Menuzzi e Antônio Carlos Valdiero.

STUDY OF NONLINEARITIES OF BACKLASH IN JOINTS OF ROBOTIC MANIPULATORS

Eduardo Padoin, eduardopadoin@bol.com.br¹
Odair Menuzzi, odair.menzuzi@ibest.com.br²
Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br³

¹UNIJUI, Post Office Box 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

²UNIJUI, Post Office Box 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

³UNIJUI, Post Office Box 121, Av. Rudi Franke 540, CEP 98280-000, Panambi/RS, Brasil,

Abstract: *This paper deals with the study of nonlinearities of the backlash in power transmission consisting of gears and used to drive rotary joints of robot manipulators. These robots are used in many tasks unhealthy industry in many different applications in industries such as manufacturing industry, construction, farm equipment, transport equipment and materials handling, metallurgy, among others. These tasks industrial operations require precision and repeatability in the desired movements. However, there are several factors that make it difficult to get good precision with repetitions, the backlash in gear trains is one of them. Normally, the concept of backlash is associated with gear trains and mechanical engagements similar. This phenomenon has difficult the performance of control systems for several years, since backlash cause undesirable effects on the dynamics and feedback on the performance of the control system. To do this, we attempted to study this phenomenon, computationally evaluating the behavior of a backlash in gear train and the control parameters to compensate for the nonlinearity due the backlash between the parties.*

Keywords: Nonlinearities Of Backlash, Robotic Manipulators, Compensation Of Nonlinearities.