

CONTROLE DE MANIPULADORES ROBÓTICOS COOPERATIVOS TRANSPORTANDO UMA CARGA COMUM

Caio Igor Gonçalves Chinelato, caio.chinelato@ifsp.edu.br¹

Luiz de Siqueira Martins-Filho, luiz.martins@ufabc.edu.br²

¹IFSP – Instituto Federal de São Paulo – Campus São Paulo, Rua Pedro Vicente, 625, Canindé, São Paulo, SP, 01109-010

²UFABC – Universidade Federal do ABC, Alameda da Universidade, Anchieta, São Bernardo do Campo, SP, 09606-045

Resumo: Neste trabalho é apresentado um estudo mostrando a modelagem e o controle de dois manipuladores robóticos cooperativos transportando uma carga em comum. Os dois manipuladores robóticos possuem dois graus de liberdade e juntas rotacionais. Um sistema deste tipo apresenta muitas vantagens em relação a um manipulador robótico individual, como transporte de cargas maiores, mais pesadas, destreza de movimentos intrincados, além de ter diversas aplicações. Trata-se de um sistema não-linear e, portanto, para um desempenho mais adequado tanto em regime transitório quanto em regime permanente, devem-se utilizar técnicas de controle mais avançadas. Foram propostas duas técnicas para o controle do sistema. A primeira técnica é o controle com estrutura variável e modos deslizantes e a segunda técnica é o controle SDRE (State-Dependent Riccati Equation). Para análise e verificação do desempenho das técnicas de controle, foram realizadas simulações com Matlab/Simulink. Analisando os resultados pode-se observar que o sistema robótico apresentou um bom desempenho com ambas as técnicas de controle, no entanto, o controle com estrutura variável e modos deslizantes apresentou melhor desempenho em regime transitório e permanente e melhor robustez.

Palavras-chave: Manipuladores Robóticos Cooperativos, Controle SDRE, Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes, Modelagem de Sistemas Dinâmicos, Controle Não-Linear.

1. INTRODUÇÃO

Manipuladores Robóticos Cooperativos é uma área de pesquisa que tem recebido muita atenção dos pesquisadores na área de robótica há algum tempo (Yun e Kumar, 1991). Sistemas robóticos deste tipo consistem de dois ou mais manipuladores robóticos que transportam ou manipulam uma carga em comum cooperativamente (Ghariblu e Javanmard, 2010). Atualmente a maioria das aplicações industriais e acadêmicas com manipuladores robóticos consistem de um manipulador robótico individual. Um sistema deste tipo apresenta muitas vantagens em relação a um manipulador robótico individual, como transporte de cargas maiores, mais pesadas e destreza de movimentos intrincados. Também existem várias aplicações para um sistema deste tipo como construção de estruturas, aplicações espaciais, submarinas, entre outras (Gheaieb, et al., 2007). Na Fig.1 é mostrado um exemplo deste sistema robótico.

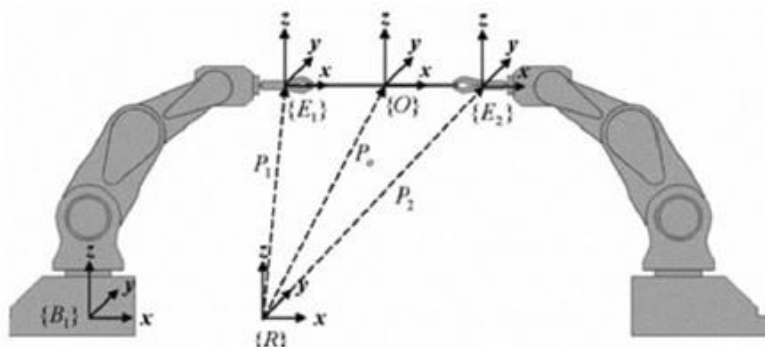


Figura 1. Dois manipuladores robóticos cooperativos (Deghat, et al., 2009).

O sistema analisado neste trabalho considera dois manipuladores robóticos cooperativos com dois graus de liberdade e juntas rotacionais cada. Considera-se que o terminal efetuator dos manipuladores são apenas apoios, como mostrado na Fig.2.



Figura 2. Manipuladores robóticos cooperativos com terminal efetuator na forma de apoios (Luo, et. al., 1993).

Um sistema deste tipo, trata-se de um sistema não-linear e, portanto, para um desempenho mais adequado tanto em regime transitório quanto em regime permanente, devem-se utilizar técnicas de controle mais avançadas. Em (Deghat, et al., 2009), (Jean e Fu, 1993) e (Subbarao, et al., 2001) são utilizadas técnicas de controle adaptativas. Em (Yale e Agrawal, 1998) utiliza-se a técnica de Lyapunov. Alguns trabalhos, como por exemplo (Ge, et al., 1998), são utilizadas técnicas inteligentes como redes neurais e Fuzzy. Em (Choi e Ro, 1994), utiliza-se um controle mestre/escravo, onde um dos manipuladores (mestre) realiza um controle de posição e o outro manipulador deve seguir o líder através de um controle de força. Neste trabalho são propostas duas técnicas para o controle do sistema. A primeira técnica é o controle com estrutura variável e modos deslizantes e a segunda técnica é o controle SDRE (State-Dependent Riccati Equation).

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Integrando a modelagem dinâmica dos manipuladores robóticos individuais e de carga manipulada, pode-se obter a modelagem dinâmica do sistema completo. Há duas formas de se considerar o sistema para a realização da sua modelagem. Na primeira forma, o sistema é modelado com uma equação, onde temos como entrada os torques aplicados nas juntas rotacionais dos manipuladores robóticos e como saída a coordenada cartesiana da carga manipulada. Na segunda forma, o sistema é modelado com duas equações, uma para cada manipulador. Nestas equações temos como entrada os torques aplicados nas juntas rotacionais dos manipuladores robóticos e como saídas as coordenadas generalizadas do manipulador robótico ou ângulos de junta. Foram obtidos resultados com as duas formas e pode-se observar resultados bastante parecidos. Neste trabalho será mostrada apenas a primeira forma.

A modelagem dinâmica de um manipulador robótico individual é dada por (Spong, et al., 2005):

$$M_i(\ddot{q}_i) + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) = \tau_i + J_i^T F_i \quad (1)$$

onde q_i são as coordenadas generalizadas do manipulador robótico ou ângulos de junta, M_i é a matriz de inércia, C_i é a matriz de termos Centrífugos e Coriolis, G_i é a matriz de termos gravitacionais, J_i é a matriz Jacobiana do manipulador, F_i são as forças de reação que a carga manipulada exerce no manipulador e τ_i são os torques de controle aplicados nas juntas dos manipuladores. O índice i indica o manipulador. No caso deste trabalho $i = 1, 2$.

A modelagem dinâmica da carga manipulada é dada por (Jean e Fu, 1993):

$$M_0(\ddot{p}_0) + G_0(p_0) = -A_1 F_1 - A_2 F_2 \quad (2)$$

no qual p_0 são as coordenadas cartesianas planares do centro de massa da carga manipulada, M_0 é a matriz de inércia da carga, G_0 é a matriz de termos gravitacionais da carga, A_1 e A_2 são as matrizes Jacobianas da carga manipulada em relação a cada manipulador e F_1 e F_2 são as forças de reação que a carga exerce no manipulador, como descrito anteriormente. Aqui é importante notar o sinal negativo pois as forças são de reação.

Considerando as Eqs. (1) e (2), as relações cinemáticas do sistema, e após uma série de manipulações algébricas que serão omitidas aqui, temos que a modelagem final do sistema é dada por:

$$[M_0 + J_1^{-T} M_1 J_1^{-1} + J_2^{-T} M_2 J_2^{-1}] \ddot{p}_0 + [J_1^{-T} M_1 \dot{J}_1^{-1} + J_1^{-T} C_1 J_1^{-1} + J_2^{-T} M_2 \dot{J}_2^{-1} + J_2^{-T} C_2 J_2^{-1}] \dot{p}_0 + [G_0 + J_1^{-T} G_1 + J_2^{-T} G_2] p_0 = J_1^{-T} \tau_1 + J_2^{-T} \tau_2 \quad (3)$$

3. TÉCNICAS DE CONTROLE

Neste trabalho são propostas duas técnicas para o controle do sistema. A primeira técnica é o controle com estrutura variável e modos deslizantes e a segunda técnica é o controle SDRE (State-Dependent Riccati Equation).

3.1. Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes

O controle com estrutura variável e modos deslizantes consiste em um conjunto de leis de controle que variam de acordo com uma lógica de chaveamento de alta frequência em resposta às mudanças dos estados do sistema (Khalil, 2002). O controle força a trajetória do sistema a se manter em uma superfície de chaveamento fazendo com que o sistema fique insensível a variação de certos parâmetros e distúrbios enquanto estiver na superfície de chaveamento (Utkin, 1977). Portanto é uma técnica de controle que tem como característica a robustez. Os modos deslizantes ocorrem quando o estado do sistema cruza repetidamente a superfície de chaveamento.

Considere o sistema analisado representado em variáveis de estado:

$$\dot{X}(t) = f(t, X, u) \quad (4)$$

onde t é o tempo, X são os estados do sistema e u são as entradas de controle.

A lei de controle com estrutura variável e modos deslizantes é dada por:

$$u(t, X) = \begin{cases} u^+(t, X), & \sigma(t, X) > 0 \\ u^-(t, X), & \sigma(t, X) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Onde $\sigma(t, X)$ é a superfície de chaveamento.

O procedimento de projeto consiste em duas etapas: determinar as superfícies de chaveamento $\sigma(t, X) = 0$ no espaço de estados, em que o controle é descontínuo e selecionar as funções de controle contínuas $u^+(t, X)$ e $u^-(t, X)$.

3.2. Controle SDRE

O controle SDRE (State-Dependent Riccati Equation) tem recebido bastante atenção da comunidade acadêmica na área de controle ao longo da última década (Çimen, 2008). Esta estratégia é bastante eficiente para a síntese de controladores não lineares com realimentação. A técnica de controle coloca o sistema não linear em uma (não única) estrutura linear que possui matrizes dependentes do estado e minimiza um índice de desempenho com estrutura quadrática (Kirk, 1970).

Considere o sistema analisado representado em variáveis de estado na forma não-linear:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u \quad (6)$$

O sistema é representado na forma linear:

$$\dot{X} = A(X)X + B(X)U \quad (7)$$

Deve-se encontrar uma lei de controle sub-ótima dada por (Kirk, 1970):

$$U = -R^{-1}(X)B^T(X)P(X)X \quad (8)$$

que minimiza o índice de performance (Abdallah e Cerone, 1995):

$$J = \int_0^\infty [X^T(t)Q(X)X(t) + U^T(t)R(X)U(t)]dt \quad (9)$$

Essencialmente $A(X)$, $B(X)$, $Q(X)$ e $R(X)$ são parâmetros de projeto do sistema e encontramos $P(X)$ resolvendo a equação algébrica de Riccati. Com $P(X)$ a lei de controle pode ser obtida. O algoritmo, então, busca resolver, em um dado ponto no espaço de estados, uma equação algébrica de Riccati e dependente dos estados, por isso o nome SDRE (State-Dependent Riccati Equation). O algoritmo é uma generalização do problema LQR (Linear Quadratic Regulator) (Abdallah e Cerone, 1995).

4. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Para análise e verificação do desempenho das técnicas de controle, foram realizadas simulações com Matlab/Simulink. O objetivo é implementar uma lei de controle que faça com que a carga transportada, partindo de uma posição inicial, atinja uma posição final desejada com o melhor desempenho em regime transitório e em regime permanente. Na Fig. 3, temos uma representação simplificada do sistema analisado. No cenário de simulação analisado, temos que a posição inicial do centro de massa da carga é $p_{0\text{inicial}} = (x_0 = 0.15 \text{ m}, y_0 = 0.15 \text{ m})$, a posição final desejada do centro de massa da carga é $p_{0\text{final}} = (x_0 = 0.25 \text{ m}, y_0 = 0.25 \text{ m})$ e $\theta_i = q_i$ são as coordenadas generalizadas dos manipuladores robóticos ou ângulos de junta, onde $i = 1, \dots, 4$. Como parâmetros de projeto temos que m_i são as massas dos links, l_i são os tamanhos dos links, L é distância entre os manipuladores, m_0 é a massa da carga, l_{c1} é a distância do centro de massa da carga ao terminal efetuator do manipulador 1 e l_{c2} é a distância do centro de massa da carga ao terminal efetuator do manipulador 2. No cenário de simulação consideramos que, $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 10 \text{ Kg}$, $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0.2 \text{ m}$, $L = 0.5 \text{ m}$, $m_0 = 15 \text{ kg}$, $l_{c1} = (0.05 \text{ m}, 0 \text{ m})$ e $l_{c2} = (0.05 \text{ m}, 0 \text{ m})$.

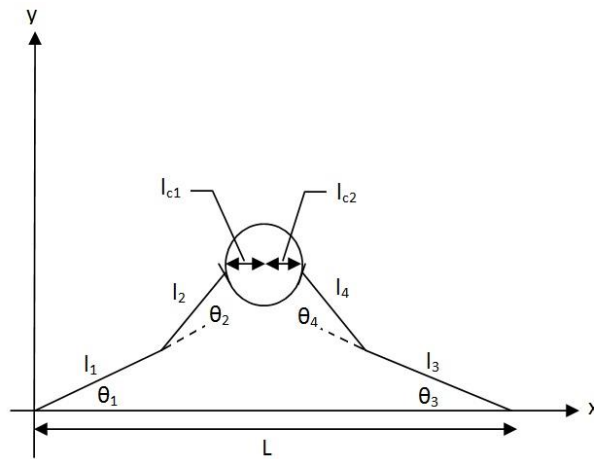
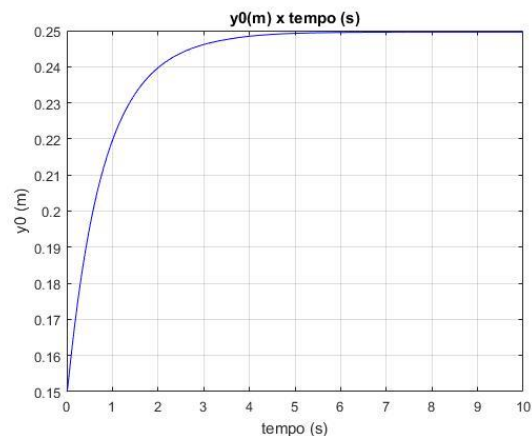
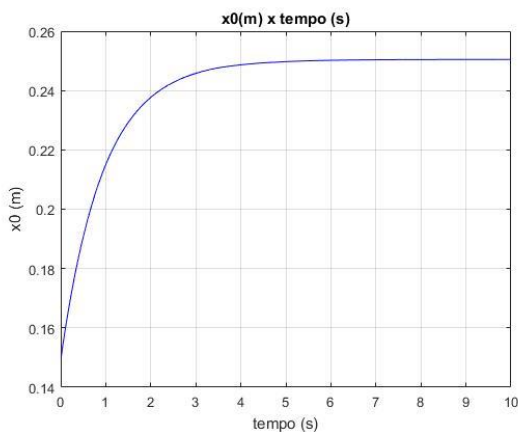


Figura 3. Representação simplificada do sistema analisado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar o comportamento do sistema foram implementadas as técnicas de controle com estrutura variável e modos deslizantes e SDRE (State-Dependent Riccati Equation), citadas anteriormente. Abaixo é mostrado o comportamento dinâmico da posição do centro de massa da carga transportada e das variáveis de junta para a aplicação das duas leis de controle nas Figs. 4 e 5.



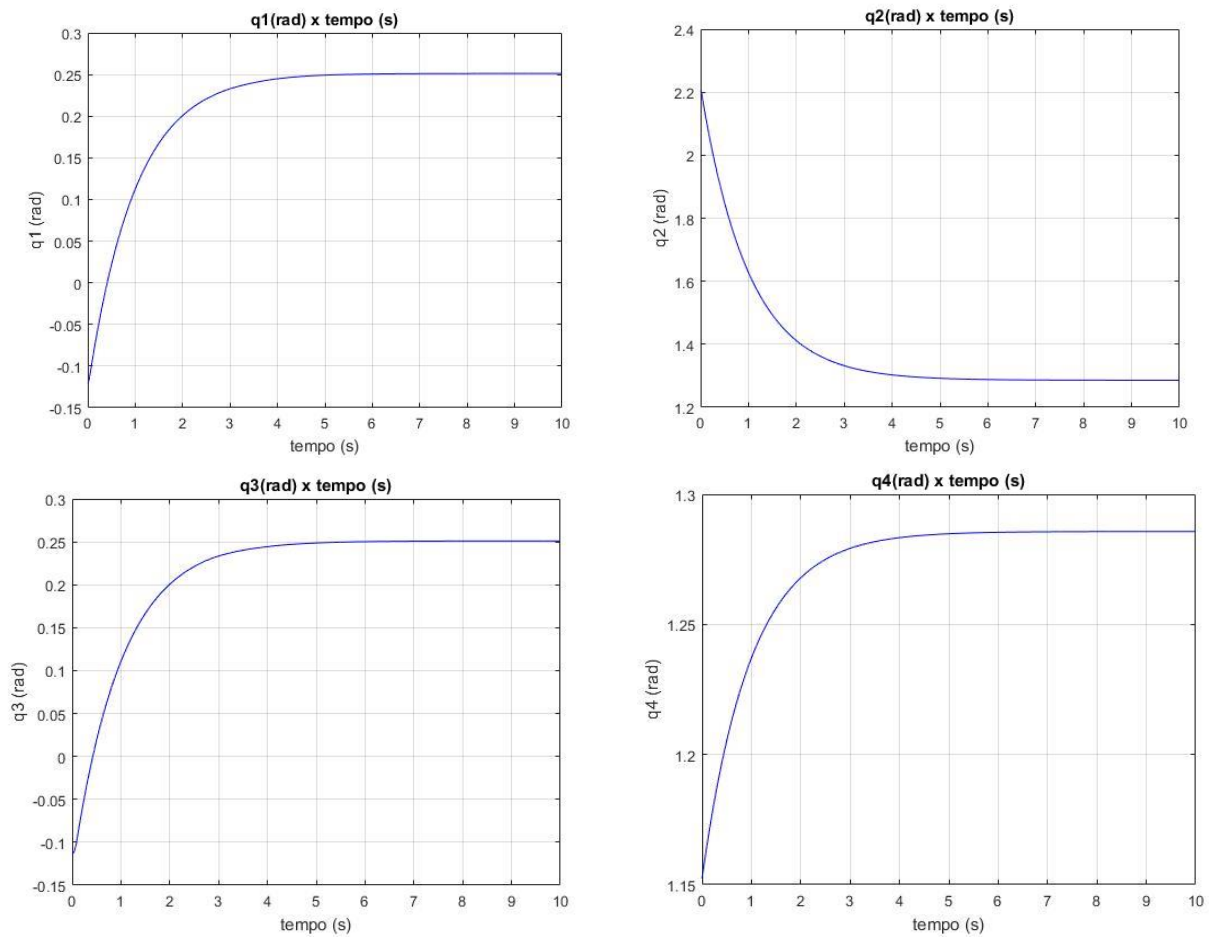
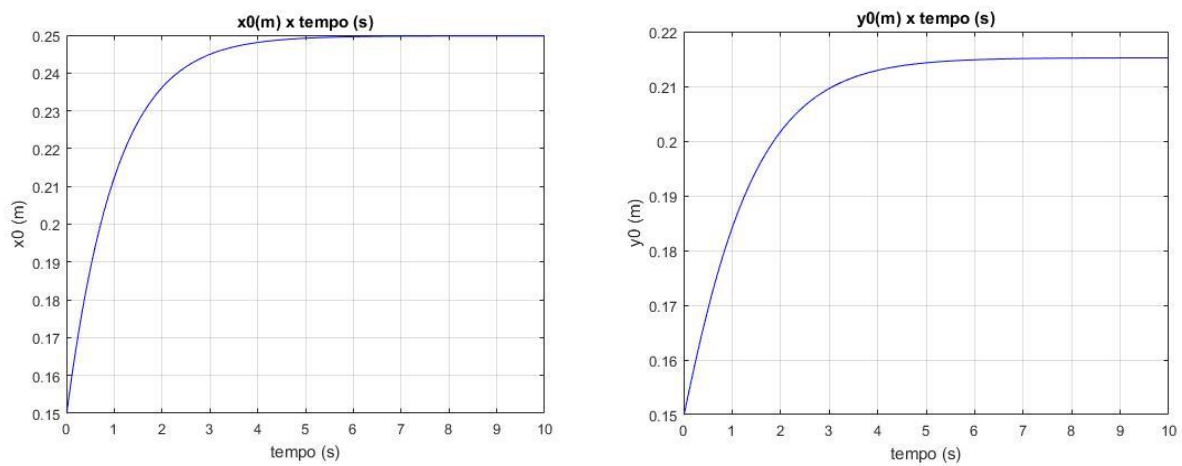


Figura 4. Comportamento dinâmico da posição do centro de massa da carga transportada e das variáveis de junta para a aplicação da lei de controle com estrutura variável e modos deslizantes.



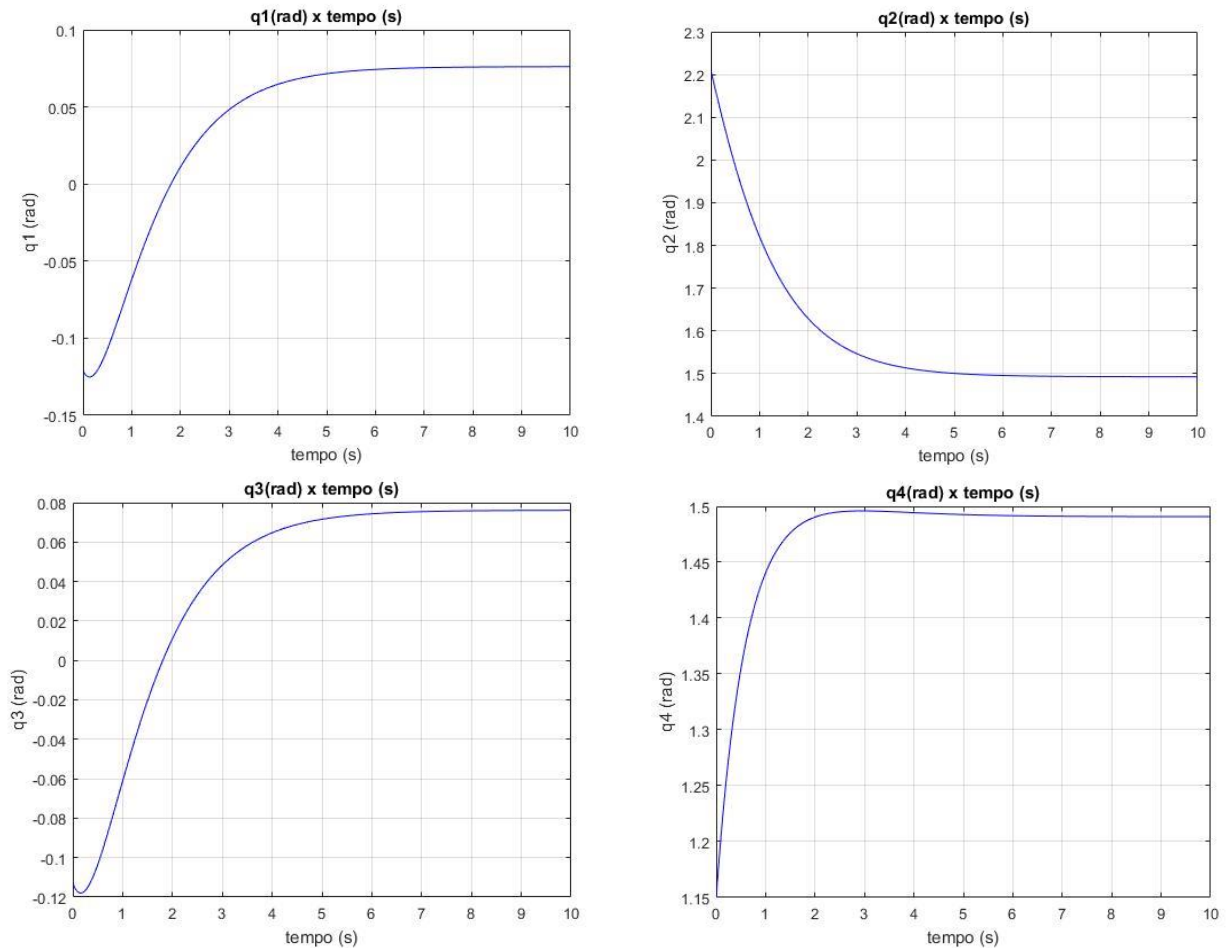
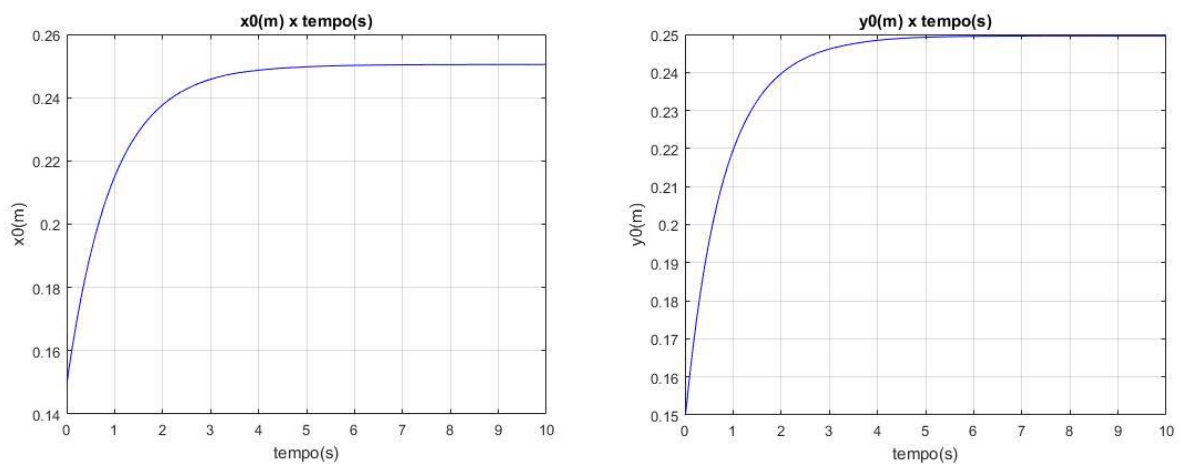


Figura 5. Comportamento dinâmico da posição do centro de massa da carga transportada e das variáveis de junta para a aplicação da lei de controle SDRE.

Analisando os resultados pode-se observar que na maioria dos casos a referência foi atingida adequadamente, com exceção da coordenada y_0 que teve um erro de regime permanente considerável com a aplicação do controle SDRE. Comparando as duas técnicas podemos perceber que a técnica de controle com estrutura variável e modos deslizantes apresentou um comportamento mais adequado tanto em regime transitório, com um tempo de acomodação um pouco menor, quanto em regime permanente, com um erro de regime permanente bem menor. A grande dificuldade encontrada no projeto do controle com SDRE foi a determinação das matrizes $Q(X)$ e $R(X)$ que otimizam e geram um melhor desempenho para o sistema.

Além disso, foram realizadas simulações com a massa dos links e da carga aumentadas em 30% para se verificar a robustez das técnicas de controle. Essas simulações são mostradas nas Figs. 6 e 7.



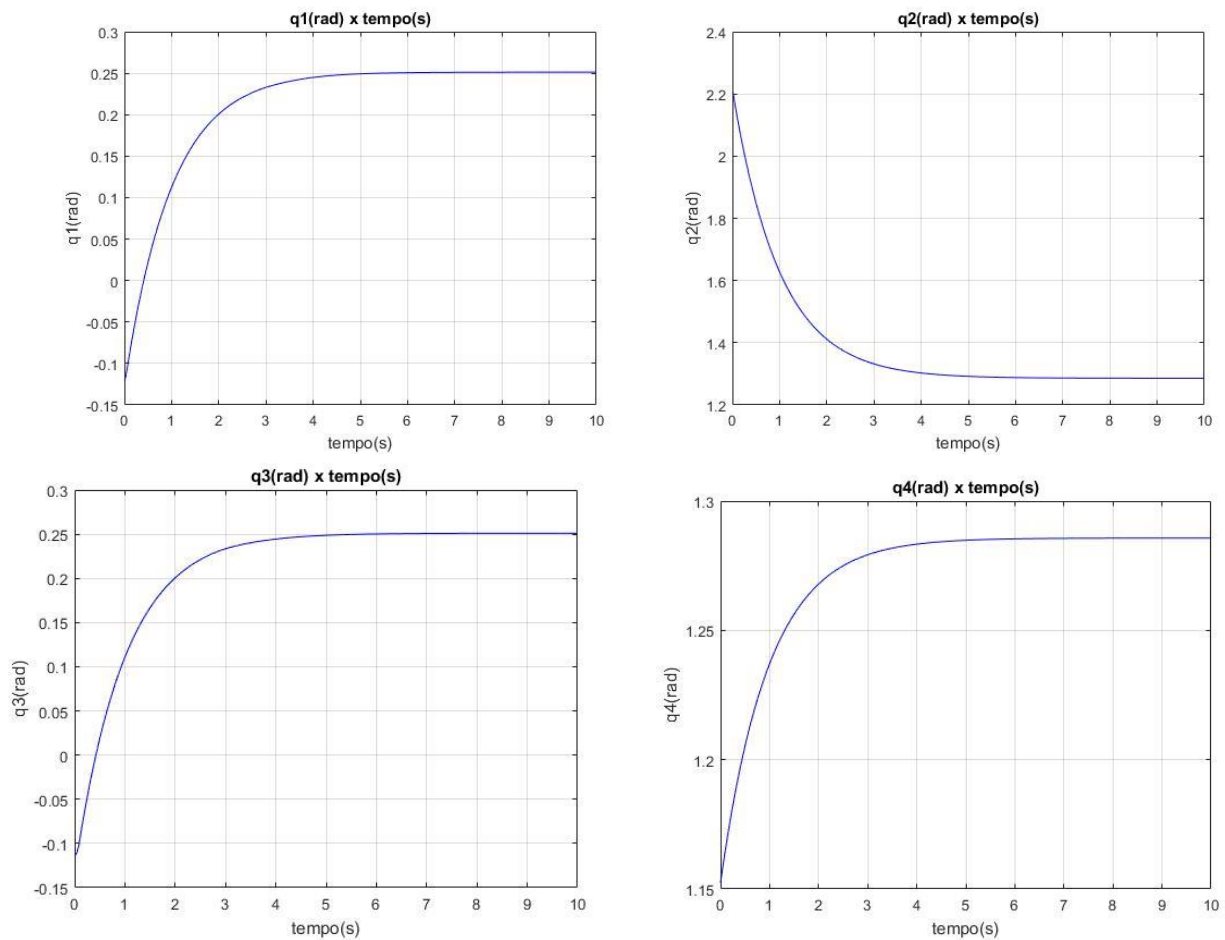
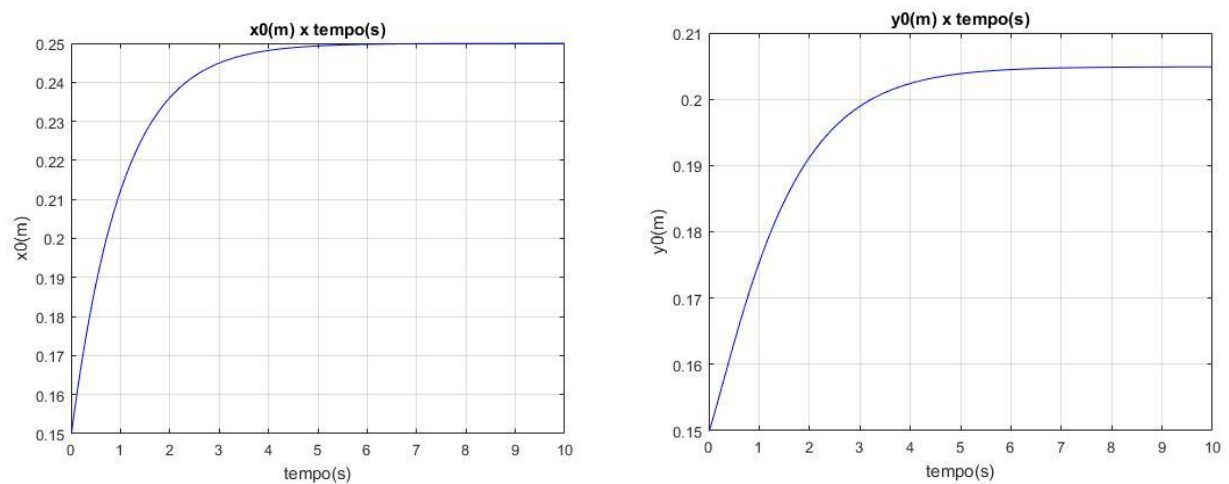


Figura 6. Comportamento dinâmico da posição do centro de massa da carga transportada e das variáveis de junta para a aplicação da lei de controle com estrutura variável e modos deslizantes – massas dos links e da carga aumentadas em 30%.



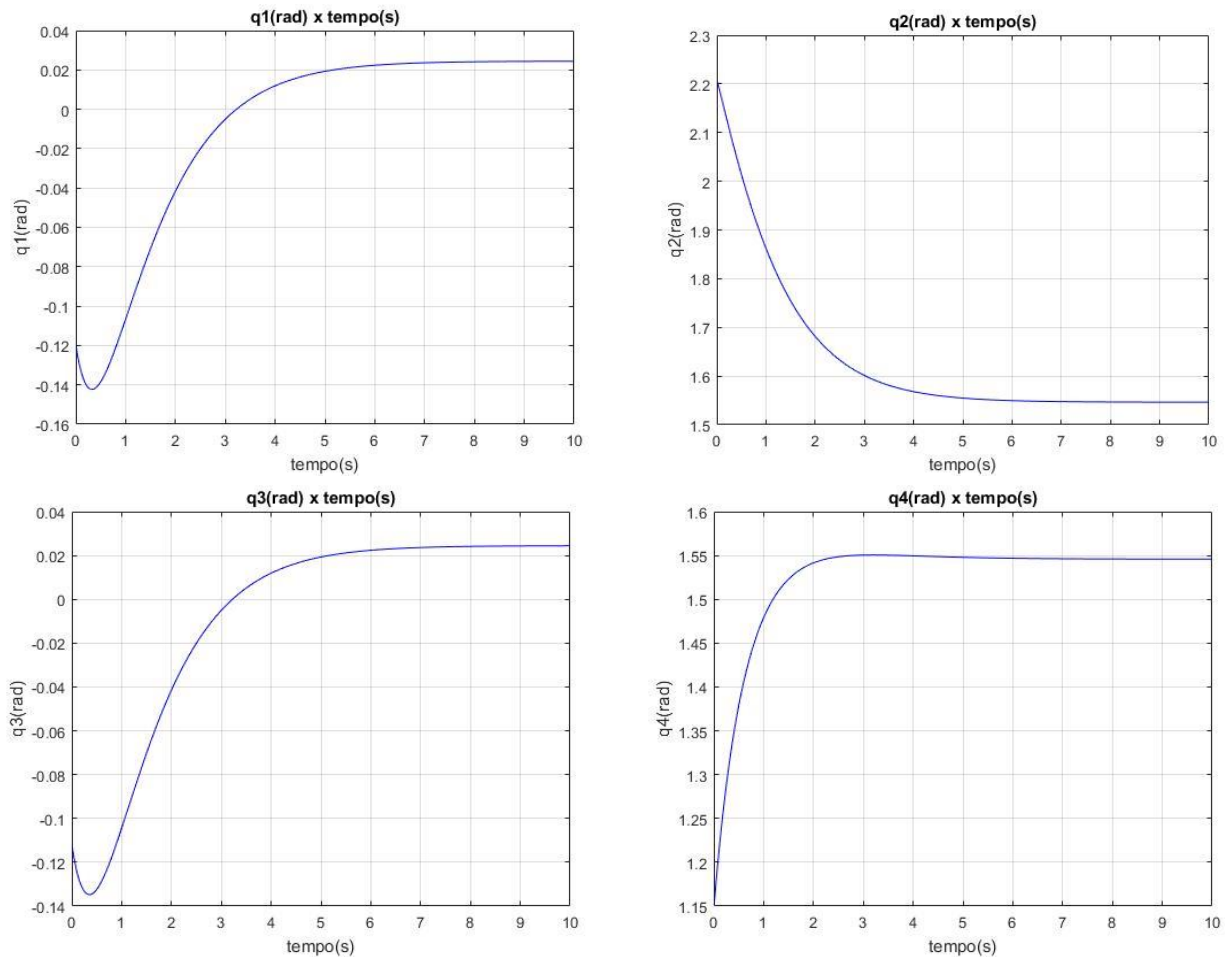


Figura 7. Comportamento dinâmico da posição do centro de massa da carga transportada e das variáveis de junta para a aplicação da lei de controle SDRE – massas dos links e da carga aumentadas em 30%.

Pode-se observar que ambas as técnicas apresentaram uma boa robustez, no entanto, a técnica de controle com estrutura variável e modos deslizantes foi um pouco mais robusta à variação de parâmetros que a técnica de controle SDRE. Nas simulações com controle com estrutura variável e modos deslizantes praticamente não houveram variações, demonstrando a robustez da técnica. Nas simulações com controle SDRE pode-se observar algumas variações em regime transitório e permanente.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um estudo mostrando a modelagem e o controle de dois manipuladores robóticos cooperativos transportando uma carga em comum. Foram propostas as técnicas SDRE e controle com estrutura variável e modos deslizantes para o controle do sistema. Após a descrição, elaboração da modelagem e aplicação das técnicas de controle no ambiente de simulação do Matlab/Simulink, pode-se observar que as técnicas de controle descritas são opções adequadas para que o sistema robótico composto por dois manipuladores robóticos cooperativos possa transportar uma carga comum com um bom desempenho. No entanto, o controle com estrutura variável e modos deslizantes apresentou melhor desempenho em regime permanente e transitório e melhor robustez que o controle SDRE.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por UFABC (Universidade Federal do ABC) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

8. REFERÊNCIAS

- Choi, H. and Ro, P., 1994, "A force/position control of two-arm motion coordination and its stability robustness analysis", KSME Journal, Vol. 8, No. 3, pp. 293-302.
 Çimen, T., 2008, "State-dependent Riccati equation (SDRE) control: A survey", Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, pp. 3761-3775.

- Deghat, M., Khayatian, A. and Eghtesad, M., 2009, "Experimental study of a robust-adaptive controller design for two cooperating RLED robot manipulators carrying a rigid payload", Proceedings of the 2009 IEEE international Conference on Mechatronics, Málaga, Spain.
- Abdallah, P. D. C. and Cerone, V., 1995, "Linear quadratic control – An introduction", Prentice Hall, New Jersey, USA, 205 p.
- Ge, S., Chen, X., Woon, L. and Xu, J., 1998, "Adaptive neural network control of coordinated manipulators", Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Florida, USA, pp. 963-964.
- Ghariblu, H. and Javanmard, A., 2010, "Maximum allowable load of two cooperative manipulators", Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Applications, Bali Island, Indonesia, pp. 566-570.
- Gheaieb, W., Karray, F. and Al-Sharnan, S., 2007, "A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 2, pp. 109-125.
- Jean, J. and Fu, L., 1993, "An adaptive control scheme for coordinated multimanipulator systems", IEEE International Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 2, pp. 226-231.
- Khalil, H., 2002, "Nonlinear Systems", Prentice Hall, New Jersey, USA, 750 p.
- Kirk, D., 1970, "Optimal control theory: An introduction", Dover Publications, Inc., New York, USA, 452 p.
- Luo, Z., Ito, K. and Ito, M., 1993, "Multiple Robot Manipulators' Cooperative Compliant Manipulation on Dynamical Environments", Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan, pp. 1927-1934.
- Spong, M., Hutchinson, S. e Vidyasar, M., 2005, "Robot Modeling and Control", John Wiley and Sons, New York, USA, 407 p.
- Subbarao, K., Verma, A. and Junkins, J., 2001, "Model reference adaptive control of constrained cooperative manipulators", Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, México City, México, pp. 553-558.
- Utkin, V., 1977, "Variable structure systems with sliding modes", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 22, No. 2, pp. 212-222.
- Yale, G. and Agrawal, B., 1998, "Lyapunov controller for cooperative space manipulators", Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 21, No. 3, pp. 477-484.
- Yun, X. and Kumar, V., 1991, "An approach to simultaneous control of trajectory and interaction forces in dual-arm configurations", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 5, pp. 618-625.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

CONTROL OF COOPERATIVE ROBOTIC MANIPULATORS TRANSPORTING A COMMON PAYLOAD

Caio Igor Gonçalves Chinelato, caio.chinelato@ifsp.edu.br¹
Luiz de Siqueira Martins-Filho, luiz.martins@ufabc.edu.br²

¹IFSP – Instituto Federal de São Paulo – Campus São Paulo, Rua Pedro Vicente, 625, Canindé, São Paulo, SP, 01109-010

²UFABC – Universidade Federal do ABC, Alameda da Universidade, Anchieta, São Bernardo do Campo, SP, 09606-045

Abstract. In this work is presented a study concerning the modelling and control of two cooperative robotic manipulators transporting a common payload. The two manipulators have two degrees of freedom and rotational joints. A system like this presents many advantages in comparison with a single robotic manipulator, like transport of bigger and heavier payloads, dexterity in intricate moves, besides several applications. The system analyzed is nonlinear, therefore for a more adequate performance in transient state and steady state, we should use advanced control techniques. Two techniques were proposed to control the system. The first technique is variable structure with sliding mode control and the second technique is SDRE (State Dependent Riccati Equation) control. For analysis and verification of control techniques performance, were realized simulations with Matlab/Simulink. Analyzing the results, we can see that the robotic system presents a good performance with both control techniques, however, variable structure with sliding mode control presented best performance in transient and steady state and best robustness.

Keywords: Cooperative Robotic Manipulators, SDRE Control, Variable Structure with Sliding Mode Control, Dynamic Systems Modelling, Nonlinear Control.