

COMPARAÇÃO ENTRE DUAS CLASSES DE ROBÔS BRACEJADORES SUBATUADOS UTILIZANDO CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO NÃO-LINEAR

VINÍCIUS MENEZES DE OLIVEIRA,* WALTER FETTER LAGES†

**Departamento de Matemática
Fundação Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, RS, Brasil*

†*Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, RS, Brasil*

Emails: vinicius@ieee.org, w.fetter@ieee.org

Abstract— In this paper we present a comparative study of two actuation schemes for underactuated brachiation robots, using the nonlinear model based predictive approach. The main difference between the actuation schemes proposed is that in the first scheme the number of active variables is lower than the number of passive variables and in the second scheme we have more active variables than passive one. The robot used in our work has 3 links, i. e., two arms and a body. We adopt the MPC to control the underactuated brachiation robot due to its advantages, mainly the construction of an optimal control law and due to its ability to consider in a direct way the constraints into the optimization problem. At the end we present computational simulations with their respective results and we highlight some important considerations.

Keywords— Brachiation Robot, Nonlinear Control, Underactuated Systems, NMPC.

Resumo— Nesse artigo se apresenta um estudo comparativo entre duas configurações de atuação para um robô bracejador subatuado utilizando a estratégia de controle preditivo baseado no modelo não-linear. A principal diferença entre os dois esquemas de atuação propostos é que no primeiro caso, o número de variáveis de configuração ativas é menor que o número de variáveis passivas e, ao contrário, no segundo esquema o número de variáveis de configuração ativas é maior que o número de variáveis passivas. O robô utilizado nesse trabalho possui 3 elos, isto é, dois braços e um corpo. Emprega-se a estratégia MPC para o controle do sistema subatuado pela sua capacidade de tratar diretamente no procedimento de otimização as restrições tanto de estado quanto de entrada presentes, além de fornecer uma lei de controle ótima. Alguns resultados iniciais são apresentados juntamente com considerações sobre as configurações de atuação propostas.

Palavras-chave— Robô Bracejador, Controle Não-linear, Sistemas Subatuados, NMPC.

1 Introdução

Ao longo das últimas décadas tem se difundido o uso de sistemas robóticos em diversas atividades automatizadas, com perspectiva de se chegar a um milhão de robôs industriais em operação ao fim dessa década (UNECE, 2004). O setor produtivo que mais se beneficia do uso de robôs é a indústria automobilística, onde a maior parte das tarefas de montagem e soldagem é realizada por robôs manipuladores. Avanços tecnológicos nas áreas de sensores, controle e acionamento permitem a implementação de sistemas robóticos inteligentes para aplicação em outras áreas além da produção industrial. De acordo com a Federação Internacional de Robótica (*International Federation of Robotics, n.d.*), um robô de serviço é um robô que executa tarefas úteis ao bem-estar do Homem, operando de forma autônoma ou parcialmente autônoma. Podem ser robôs manipuladores, móveis ou uma combinação de ambos. Uma ampla apresentação sobre robôs de serviços pode ser encontrada em (Schraft and Schmierer, 2000).

Várias são as situações em que se pode utilizar robôs de serviço, dentre as quais salienta-se a tarefa de inspeção, a qual vem recebendo grande atenção. Tem-se como importante aplicação de robôs de serviço a inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica. Atualmente o procedimento adotado para a inspeção

das linhas de transmissão apresenta grande risco de morte para os técnicos envolvidos, o que por si só justifica o desenvolvimento de sistemas para a automação dessa tarefa. Além disso, os custos para a realização do procedimento são altos e exigem um longo intervalo de tempo para serem executados. A inspeção visual por operadores humanos em grandes extensões de cabos e de isoladores é uma tarefa de difícil execução, monótona e sem a garantia de bons resultados. Diante de tantas adversidades, vários trabalhos propõem a automação da tarefa de inspeção de linhas de transmissão utilizando robôs de serviço (ze Liang et al., 2005; Rocha and Siqueira, 2004; Campos et al., 2003; Peung-sungwal et al., 2001).

Originalmente em (Fukuda et al., 1991) uma nova classe de robôs móveis foi criada, os quais possuem a capacidade de se locomover por meio do balanço de seus braços e corpo, fazendo uso da ação da gravidade para tal, de maneira a imitar o modo dos macacos se movimentarem. Com o objetivo de melhor estudar essa classe de robôs, em trabalhos subsequentes se considera um robô com apenas dois elos e subatuado. Algumas estratégias de controle desenvolvidas são: CMAC (*Cerebellar Model Arithmetics Computer*) e rede neural hierárquica (Saito et al., 1994) e lógica *fuzzy* (Nakanishi et al., 1999).

Sistemas mecânicos subatuados possuem um número de entradas de controle menor que o número

de graus de liberdade se apresentam como interessantes problemas do ponto de vista de controle e, ao longo das últimas duas décadas têm recebido grande destaque (Siqueira and Terra, 2002). Exemplos de robôs manipuladores subatuados são o *Acrobot* (Spong, 1995), o *Pendubot* (Spong and Block, 1995) e o *V/STOL* (Hauser et al., 1992).

A característica (ou propriedade) de subatuação se deve a pelo menos uma das quatro razões a seguir: (i) dinâmica do sistema, (ii) por requisitos de projeto (redução de custo ou aspecto prático), (iii) eventual falha em um atuador ou (iv) por imposição para criar situação de ensaio (gerando sistemas não-lineares de baixa ordem complexos com o objetivo de adquirir conhecimento em controle de sistemas não-lineares de alta ordem). Do ponto de vista do controle os sistemas subatuados tornam-se interessantes pois na sua grande maioria, estão sujeitos a restrições não-holonômicas de segunda ordem (Oriolo and Nakamura, 1991; Luca and Iannitti, 2002).

O objetivo desse artigo é apresentar estudos preliminares sobre duas classes de robôs bracejadores subatuados, com distintas configurações de atuação. A primeira configuração (*classe I*) apresenta o robô com atuação somente na junta 2 (as juntas 1 e 3 não são atuadas) e a segunda configuração (*classe II*) apresenta o robô com atuação nas juntas 2 e 3 (somente a junta 1 não é atuada). É importante observar que na classe I o número de juntas ativas (diretamente atuadas) é menor que o número de juntas passivas (não atuadas diretamente). Já na classe II tem-se o oposto, isto é, o número de juntas ativas é maior que o número de juntas passivas.

Para o controle do robô bracejador utiliza-se a estratégia NMPC pela sua capacidade de tratar as restrições existentes (tanto na entrada quanto no estado) diretamente no procedimento de otimização e por gerar uma lei de controle ótima (de Oliveira, 1996; de Oliveira Kothare and Morari, 2000). O esquema de controle proposto não apresenta uma trajetória de referência explícita para as variáveis de junta e, sim, em função das coordenadas cartesianas da garra, uma vez que o robô deve atingir a linha horizontal o mais distante possível da origem. Ainda, tendo-se a idéia de fazer uso da gravidade durante o movimento, pode-se supor que a lei de controle ótima gerada utilizará efetivamente a gravidade.

Esse artigo está organizado como segue. Na seção 2 o modelo dinâmico para o robô bracejador e as correspondentes modificações para cada uma das classes propostas é desenvolvido e na seção 3 apresenta-se o esquema de controle preditivo baseado no modelo não-linear. Na sequência (seção 4) são apresentados os resultados de simulação obtidos, a partir de duas posições iniciais distintas, para as duas configurações propostas. Por fim, na seção 5, são apresentadas algumas considerações sobre os resultados obtidos para cada classe de robôs bracejadores subatuados e direções para trabalhos futuros.

2 Modelagem Dinâmica

Considere o robô bracejador (apresentado na Fig. 1) como um robô manipulador serial de cadeia aberta, sua dinâmica é genericamente dada por:

$$M(\theta)\ddot{\theta}(t) + V(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}(t) + G(\theta) = B\tau - F_v(\dot{\theta}) \quad (1)$$

onde $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ é o vetor com as coordenadas generalizadas, $M(\theta) \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ é uma matriz simétrica de inércia do sistema definida por¹:

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_1 + \alpha_2 + 2\alpha_3 c_2 + \alpha_4 + 2\alpha_5 c_3 & \alpha_2 + \alpha_2 c_2 & \alpha_4 + \alpha_5 c_3 \\ \alpha_2 + \alpha_3 c_2 & \alpha_2 & 0 \\ \alpha_4 + \alpha_5 c_3 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$V(\theta, \dot{\theta}) \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ é uma matriz com os termos de Coriolis e centrífugos:

$$V = \begin{bmatrix} -\alpha_3 \dot{\theta}_2 s_2 - \alpha_5 \dot{\theta}_3 s_3 & -\alpha_3 \dot{\theta}_2 s_2 - \alpha_3 \dot{\theta}_1 s_2 & -\alpha_5 \dot{\theta}_3 s_3 - \alpha_5 \dot{\theta}_1 s_3 \\ \alpha_3 \dot{\theta}_1 s_2 & 0 & 0 \\ \alpha_5 \dot{\theta}_1 s_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

e $G(\theta) \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ é o vetor com os termos gravitacionais, dado por²:

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_6 g c_1 + \alpha_7 g c_{12} + \alpha_8 g c_{13} \\ \alpha_7 g c_{12} \\ \alpha_8 g c_{13} \end{bmatrix} \quad (4)$$

e $F_v \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ é o vetor com os termos de atrito viscoso.

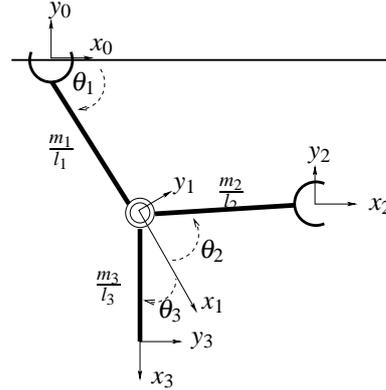


Figura 1: Robô bracejador subatuado.

As constantes são definidas a seguir:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\triangleq m_1 \frac{l_1^2}{4} + I_1 + m_2 l_1^2 + m_3 l_1^2 \\ \alpha_2 &\triangleq m_2 \frac{l_2^2}{4} + I_2 \\ \alpha_3 &\triangleq m_2 l_1 \frac{l_2}{2} \\ \alpha_4 &\triangleq m_3 \frac{l_3^2}{4} + I_3 \\ \alpha_5 &\triangleq m_3 l_1 \frac{l_3}{2} \\ \alpha_6 &\triangleq m_1 \frac{l_1}{2} + m_2 l_1 + m_3 l_1 \\ \alpha_7 &\triangleq m_2 \frac{l_2}{2} \\ \alpha_8 &\triangleq m_3 \frac{l_3}{2} \end{aligned}$$

¹A função $\cos(\theta_i)$ é indicada como c_i . O mesmo vale para a função $\sin(\cdot)$.

²O termo c_{ij} denota $\cos(\theta_i + \theta_j)$.

sendo l_i , m_i e I_i , respectivamente, o comprimento, a massa e o momento de inércia do elo i .

O robô utilizado nesse trabalho foi projetado como um sistema subatuado, ou seja, como um sistema em que o número de entradas de controle m é menor que o total de graus de liberdade n ($n > m$). Em outras palavras, a dimensão do vetor de entradas $\tau \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ é menor que a dimensão do vetor de coordenadas generalizadas $\theta \in \mathbb{R}^{n \times 1}$. A matriz B de seleção de entrada é uma matriz real de dimensão $(n \times m)$.

As equações da dinâmica do robô dadas por (1) podem ser reescritas de maneira mais conveniente sob a forma de espaço de estado:

$$\dot{q}(t) = f(q) + g(q)u \quad (5)$$

onde $q = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ é o vetor de estado,

$$f(q) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -M^{-1}(q) [V(q)\dot{\theta} + G(q) + F_v(q)] \end{bmatrix}$$

e

$$g(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(q)B \end{bmatrix}$$

Como já mencionado, nesse artigo considera-se duas diferentes configurações para o sistema de atuação, como apresentado na Fig. 2, a primeira com $m = 1$ entrada de controle (aplicada na junta 2) e a segunda com $m = 2$ entradas de controle (aplicadas nas juntas 2 e 3). A matriz de seleção e o vetor de entradas são definidos adequadamente para cada classe, respectivamente, como:

- classe I (somente junta 2 atuada):

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\tau = \tau_2$$

- classe II (juntas 2 e 3 atuadas):

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

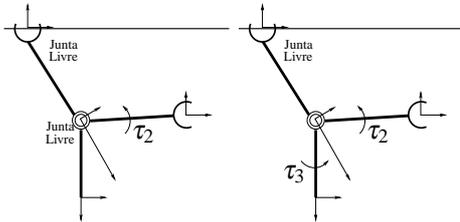


Figura 2: Representação das duas classes propostas.

3 Esquema de Controle NMPC

Nessa seção será apresentado o esquema NMPC proposto para o controle dos robôs bracejadores subatuados considerados nesse trabalho, como mostra o diagrama de blocos na Fig. 3.

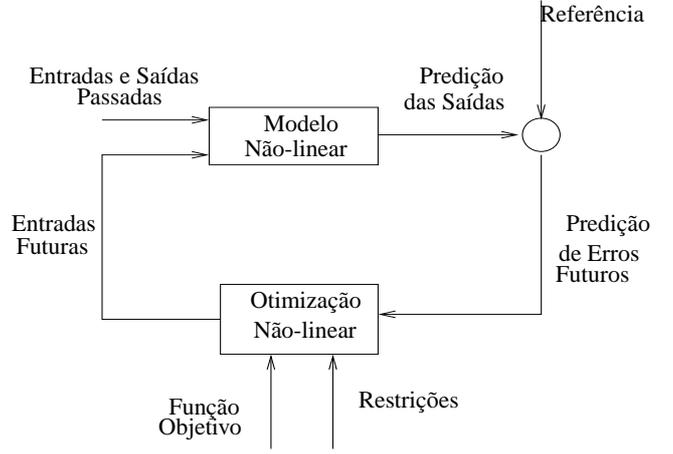


Figura 3: Esquema geral de controle preditivo baseado em modelo.

Os elementos básicos de um controlador preditivo baseado em modelo são: modelo não-linear de predição, procedimento de otimização não-linear e função objetivo. O modelo é utilizado para prever as saídas futuras da planta, a partir de valores anteriores e atuais e da ação otimizada de controle proposta. O procedimento de otimização é responsável pelo cálculo das ações futuras de controle, considerando a função objetivo, assim como as restrições existentes (Camacho and Bordons, 1999). A função objetivo define o critério a ser otimizado (geralmente envolvendo os erros futuros), a fim de que se gere uma seqüência de controle capaz de impor o comportamento desejado ao sistema.

Considere um modelo não-linear genérico, expresso por:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (8)$$

onde $x(t)$ é o vetor de estado e $u(t)$ é o vetor de entradas de controle. O modelo não-linear, agora descrito em tempo discreto, é dado por:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (9)$$

A função objetivo a ser minimizada assume, em geral, a seguinte forma:

$$\Phi(t) = \sum_{j=1}^N x^T(k+j|k) \mathbf{Q} x(k+j|k) + \sum_{j=1}^N u^T(k+j-1|k) \mathbf{R} u(k+j-1|k) \quad (10)$$

onde N é o horizonte de predição e de controle, $\mathbf{Q} \geq 0$ e $\mathbf{R} \geq 0$ são matrizes de ponderação que penalizam o erro de estado e o esforço de controle, respectivamente.

Levando-se em conta que todo sistema real está, na prática, sujeito a alguma restrição (por exemplo, limite dos atuadores), define-se a expressão genérica para as restrições, a saber:

$$x(k+j|k) \in \mathcal{X}, \quad j \in [1, N]$$

$$u(k+j|k) \in \mathcal{U}, \quad j \in [0, N]$$

onde \mathcal{X} é o conjunto de todos os possíveis valores x e \mathcal{U} é o conjunto de todos os possíveis valores de u . Supondo que tais restrições sejam lineares em relação a x e u , pode-se escrever:

$$\mathbf{C}x(k+j|k) \leq c, \quad j \in [1, N] \quad (11)$$

$$\mathbf{D}u(k+j|k) \leq d, \quad j \in [0, N] \quad (12)$$

Assim, o problema de otimização a ser resolvido a cada período de amostragem k consiste em encontrar a seqüência de controle u^* e a seqüência de estado x^* tal que minimize a função objetivo $\Phi(k)$ sob as restrições impostas, ou seja:

$$u^*, x^* = \arg \min_{u, x} \{\Phi(k)\} \quad (13)$$

sujeito a:

$$x(k|k) = x_0 \quad (14)$$

$$x(k+j|k) = f(x(k+j-1|k), u(k+j-1|k)), \quad j \in [1, N] \quad (15)$$

$$\mathbf{C}x(k+j|k) \leq c, \quad j \in [1, N] \quad (16)$$

$$\mathbf{D}u(k+j|k) \leq d, \quad j \in [0, N] \quad (17)$$

onde x_0 é o valor de x no instante k .

O problema de minimização (13) é resolvido a cada período de amostragem, gerando a seqüência ótima de controle:

$$u^* = \{u^*(k|k), u^*(k+1|k), \dots, u^*(k+N|k)\} \quad (18)$$

e a seqüência ótima de estado é dada por:

$$x^* = \{x^*(k+1|k), \dots, x^*(k+N|k)\} \quad (19)$$

com um custo ótimo $\Phi^*(k)$. Desse modo, a lei de controle definida pelo NMPC é implicitamente dada pelo primeiro termo da seqüência ótima de controle:

$$h(\delta) = u^*(k|k) \quad (20)$$

onde $h(\delta)$ é contínua durante o período de amostragem T . Portanto, pelo exposto acima, o sistema em malha fechada resulta em:

$$\dot{x}(\delta) = f(x(\delta), h(\delta)) \quad (21)$$

3.1 Controle do Robô Bracejador

De acordo com as equações do esquema NMPC apresentado, faz-se necessário descrever a dinâmica do sistema de forma discreta. Assim, o sistema dado por (5) pode ser discretizado empregando-se o método de Euler, sendo descrito sob a forma:

$$q(k+1) = q(k) + Tf(k) + Tg(k)u(k) \quad (22)$$

onde T é o período de amostragem.

A função objetivo considera a posição e a velocidade da garra do robô em coordenadas cartesianas, em vez de considerá-las descritas em coordenadas generalizadas. Tal consideração se deve ao fato de se querer que o robô alcance a linha horizontal (coordenada cartesiana $y_{ref} = 0$) o mais distante possível da origem (coordenada cartesiana $x_{ref} \rightarrow l_1 + l_2$), com velocidade nula independentemente da configuração das juntas. Assim, a função objetivo é dada por:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= \sum_{j=1}^N \tilde{\Psi}^T(k+j|k) \mathbf{Q} \tilde{\Psi}^T(k+j|k) \\ &+ \sum_{j=1}^N u^T(k+j-1|k) \mathbf{R} u(k+j-1|k) \end{aligned} \quad (23)$$

onde

$$\tilde{\Psi} = \begin{bmatrix} (x - x_{ref}) \\ (y - y_{ref}) \\ (\dot{x} - \dot{x}_{ref}) \\ (\dot{y} - \dot{y}_{ref}) \end{bmatrix}$$

A matriz \mathbf{Q} é uma matriz real de dimensão 4×4 e a matriz \mathbf{R} é também uma matriz real de dimensão 1×1 ou de dimensão 2×2 , de acordo com a classe de robô bracejador subatuado considerada.

As restrições do sistema descritas por (11) e (12) são consideradas sob a forma:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} \tau_{max} \\ \tau_{max} \end{bmatrix}$$

e

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} \theta_{max} \\ \theta_{max} \end{bmatrix}$$

sendo τ_{max} o torque máximo de cada atuador e $\theta_{max} = \pi$ o deslocamento angular máximo de cada junta.

4 Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em simulação para comparação entre as duas classes de robôs bracejadores subatuados propostas nesse trabalho. Na classe I tem-se que o número de variáveis ativas é menor que o número de variáveis passivas ($m < n - m$) e na classe II o número de variáveis ativas é maior que o número de variáveis passivas ($m > n - m$). Os parâmetros da dinâmica do robô utilizados nas simulações são mostrados na tabela 1

Tabela 1: Parâmetros da dinâmica do robô.

Parâmetro	Unidade	Junta 1	Junta 2	Junta 3
Massa	Kg	1,5	1,5	2,0
Comprimento	m	1,0	1,0	1,5
Atrito Visc.	N.m/s	0,1	0,1	0,1
Mom. Inércia	Kg.m ²	0,125	0,125	0,375

A simulação realizada consiste em analisar o movimento realizado pelo robô a partir da posição inicial $q_0 = [-\pi \ 0 \ \frac{\pi}{2} \ 0 \ 0 \ 0]^T$, estando o robô com os dois braços do robô alinhados na horizontal e o corpo na vertical para baixo. Os parâmetros do controlador utilizados na simulação são os seguintes:

- horizonte de predição e de controle $N = 5$;
- $\mathbf{Q} = \text{diag}(5, 0; 10, 0; 0, 01; 0, 01)$;
- $\mathbf{R} = 0, 01$ (classe I) ou
- $\mathbf{R} = \text{diag}(0, 01; 0, 01)$ (classe II);

e os valores das restrições são:

- deslocamento angular máximo de cada junta $q_{max} = \pi \text{ rad}$;
- velocidade angular máxima de cada junta $\dot{q}_{max} = 20 \text{ rad/s}$;
- torque máximo de cada atuador $\tau_{max} = 30 \text{ Nm}$.

Considerando o robô bracejador subatuado como sendo pertencente à classe I (somente a junta 2 atuada), a trajetória do efetuador final do robô é apresentada na Fig. 4. O torque necessário à execução do movimento pode ser analisado na Fig. 5. Na figura Fig. 6 apresenta-se o comportamento da função objetivo.

Os resultados referentes à classe II (com as juntas 2 e 3 atuadas) são apresentados nas figuras 7, 8 e 9. Na figura Fig. 7 observa-se a trajetória no plano cartesiano realizada pelo efetuador final do robô e é possível observar que o robô

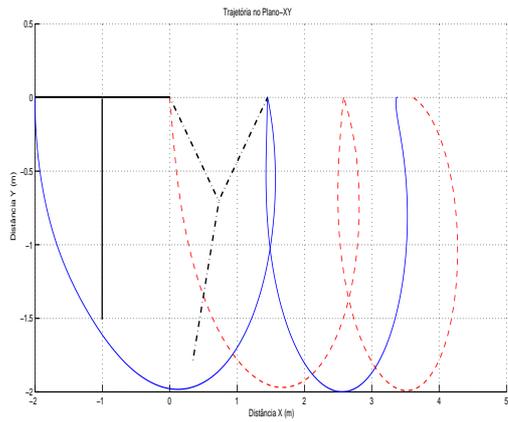


Figura 4: Trajetória no plano-XY – classe I.

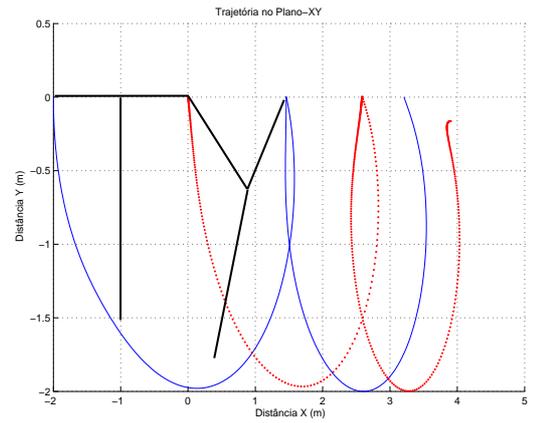


Figura 7: Trajetória no plano-XY – classe II.

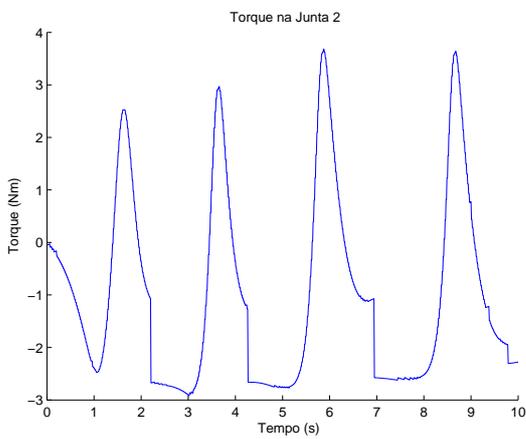


Figura 5: Torque aplicado na junta 2 – classe I.

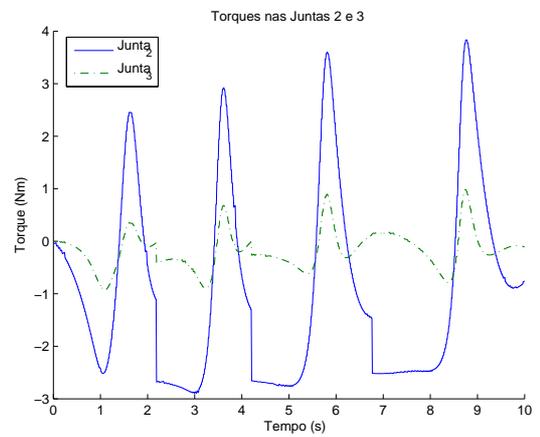


Figura 8: Torques aplicados nas juntas 2 e 3 – classe II.

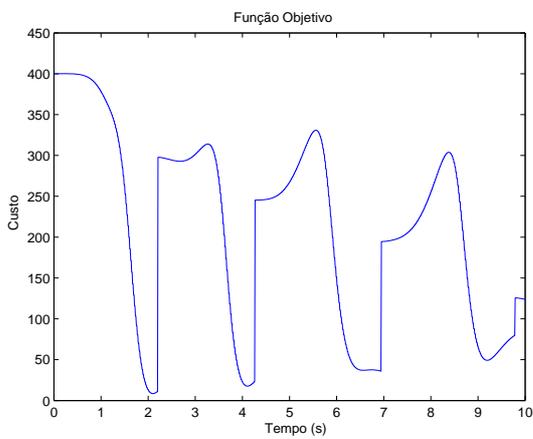


Figura 6: Função objetivo – classe I.

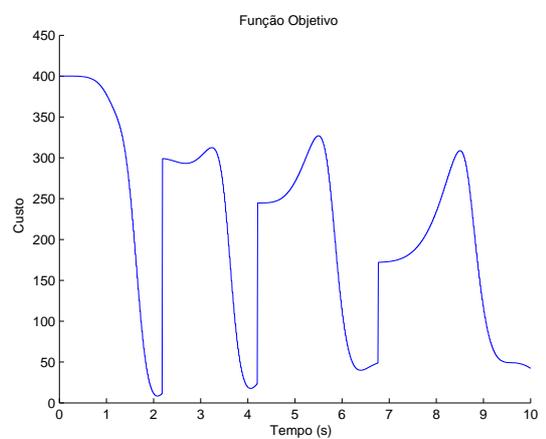


Figura 9: Função objetivo – classe II.

não conseguir completar o último movimento no tempo de simulação. Os torques aplicados ao robô em cada uma das juntas são apresentados na figura Fig. 8. Por fim, na figura Fig. 9, é apresentada a função objetivo.

A partir dos gráficos apresentados, é possível observar que o robô se desloca mais quando pertencente à classe I do que quando pertencente à classe II. Num primeiro momento, poderia se concluir que a configuração com somente um atuador é melhor que a configuração com dois atuadores, mas nenhuma conclusão genérica pode ser estabelecida até o momento.

Um dos próximos pontos a ser explorado é exatamente como demonstrar qual das classes é mais eficiente para a tarefa específica desse trabalho. Além disso, diferentes funções objetivo deverão ser propostas e analisadas.

5 Conclusão

Nesse trabalho aborda-se o controle de robôs bracejadores subatuados utilizando a estratégia NMPC, para duas classes diferentes de robôs, as quais apresentam diferentes configurações de atuação. A classe I se caracteriza por apresentar mais variáveis passivas do que ativas e a classe II, ao contrário, se caracteriza por apresentar mais variáveis ativas do que passivas. Sendo o sistema subatuado, é preciso considerar as restrições do sistema para calcular a ação de controle necessária para movimentar o robô. Essa é uma das razões para se adotar a estratégia NMPC.

Observou-se, por meio de simulações numéricas, que o controlador foi capaz de controlar o movimento de bracejamento do robô ao longo da linha horizontal, independentemente da classe do robô, satisfazendo às restrições não-holonômicas e respeitando os limites impostos (torque máximo, deslocamento e velocidade angular máximo).

Como continuidade desse trabalho tem-se o estudo mais formal para um melhor entendimento sobre as propriedades de cada uma das classes propostas. Além disso, para a posterior adequação desse trabalho a um protótipo real, é necessário abordar aspectos de robustez a erros de modelagem e a perturbações externas. Por fim, deve-se verificar a viabilidade deste esquema de controle ser utilizado na prática, devido ao grande esforço computacional requerido.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica) o suporte financeiro para a realização desse trabalho.

Referências

- Camacho, E. F. and Bordons, C. (1999). *Model Predictive Control*, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer-Verlag.
- Campos, M. F. M., Pereira, G. A. S., Vale, S. R. C., Bracarense, A. Q., Pinheiro, G. A. and Oliveira, M. P. (2003). A robot for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **18**(4): 1581–1582.
- de Oliveira Kothare, S. L. and Morari, M. (2000). Contractive model predictive control for constrained nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **45**(6): 1053–1071.
- de Oliveira, S. L. (1996). *Model Predictive Control for Constrained Nonlinear Systems*, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology.
- Fukuda, T., Hosokai, H. and Kondo, Y. (1991). Brachiation type of mobile robot, *International Conference on Advanced Robotics*, Vol. 2 of *Robots in Unstructured Environments*, pp. 915–920.
- Hauser, J., Sastry, S. and Meyer, G. (1992). Nonlinear control design for slightly non-minimum phase systems: Application to v/stol aircraft, *Automatica*.
- International Federation of Robotics (n.d.). <http://www.ifr.org>. Acessado em 18/08/2005.
- Luca, A. D. and Iannitti, S. (2002). A simple stlc test for mechanical systems underactuated by one control, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1735–1740.
- Nakanishi, J., Fukuda, T. and Koditschek, D. E. (1999). A hybrid swing up controller for a two-link brachiating robot, *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, USA, pp. 549 – 554.
- Oriolo, G. and Nakamura, Y. (1991). Control of mechanical systems with second-order nonholonomic constraints: Underactuated manipulators, *Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control*, pp. 2398–2403.
- Peungsungwal, S., Pungsiri, B., Chommongthai, K. and Okuda, M. (2001). Autonomous robot for a power transmission line inspection, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 2, pp. 121–124.
- Rocha, J. and Siqueira, J. (2004). New approaches for surveillance tasks, *5th IFAC/EURO Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*.
- Saito, F., Fukuda, T. and Arai, F. (1994). Swing and locomotion control for two-link brachiation robot, *IEEE Control Systems Magazine* **14**(1): 5–12.
- Schraft, R. D. and Schmierer, G. (2000). *Service Robots*, A. K. Peters.
- Siqueira, A. A. G. and Terra, M. H. (2002). Nonlinear \mathcal{H}_∞ control via quasi-lpv representation applied in a underactuated manipulator, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2169–2174.
- Spong, M. W. (1995). The swing up control problem for the acrobot, *IEEE Control Systems Magazine* **15**(1): 49–55.
- Spong, M. W. and Block, D. J. (1995). The pendubot: A mechatronic system for control research and education, *Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control*, pp. 555–556.
- UNECE (2004). Worldwide growth in the period 2004–2007, *Technical report*, United Nations Economic Commission for Europe - World Robotics.
- ze Liang, Z., Li, E. and Tan, M. (2005). Control of inspection robots for power transmission lines based on remote video over internet, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce – International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*, Vol. 1, pp. 877–882.