

UM ESTUDO DE DESEMPENHO DO CONTROLE DE IMPEDÂNCIA PARA TAREFAS DE CONTATO UTILIZANDO ROBÔS INDUSTRIAIS

LEONARDO MARQUEZ PEDRO*, GUILHERME FERNANDES†, WILIAN MIRANDA DOS SANTOS†, ADRIANO ALMEIDA GONÇALVES SIQUEIRA†, GLAUCO AUGUSTO DE PAULA CAURIN†

*UFSCar - Universidade Federal de São Carlos
CCET - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
SP - 310, Rodovia Washington Luís, km 235 - São Carlos - SP, Brasil

† USP - Universidade de São Paulo
EESC - Escola de Engenharia de São Carlos
Rua do Trabalhador Sancarlense, 400 - São Carlos - SP, Brasil

Emails: lmpedro@ufscar.br, gfernandes@usp.br, wiliamnds@sc.usp.br, siqueira@sc.usp.br, gcaurin@sc.usp.br

Abstract— Stability in the establishment and loss of contact (changes between manipulation phases) of a robot and its environment is one of the challenges of robotic manipulation. The stability depends on several factors from the control law and its implementation to environmental measurement errors. This study considers the execution of manipulation tasks with contact establishment between robot and environment using only one control law: the impedance control. The scientific innovation consists of a manipulation system implemented with a single control law in contrast with most proposed systems which use switching between controllers as it has several disadvantages instability and oscillations. Experiments using an industrial robot with high passive impedance were conducted to evaluate the effects of the impedance parameters (rigidity, damp and inertia) on the contact establishment stability measured based on dynamic transient response characteristics as settling time, oscillations and overshoot. The results show that with proper impedance parameters it is possible to establish contact without dynamic instabilities and the most important characteristic: without the need for changing controllers.

Keywords— methods in control, collision handling, impedance control

Resumo— A estabilidade no estabelecimento e perda de contato (mudanças de fase de manipulação) entre robô e ambiente é um dos desafios da manipulação robótica. Ela depende de diversos fatores desde a lei de controle e detalhes de sua implementação a precisão de medidas do meio ambiente. O estudo deste trabalho considera a execução de tarefas de manipulação com estabelecimento de contato entre robôs de elevada impedância e ambiente utilizando apenas uma lei de controle, o controle de impedância. A inovação científica consiste em um sistema multifuncional implementado com uma única lei de controle em contraste com os sistemas já existem que utilizam chaveamento entre controladores que apresenta diversas desvantagens como instabilidade e oscilações. Experimentos utilizando um robô industrial de elevada impedância passiva foram conduzidos para avaliar os efeitos dos parâmetros de impedância no estabelecimento de contato. Os resultados obtidos mostram que com parâmetros de impedância adequados é possível estabelecer contato sem instabilidades e sem a necessidade de troca de controladores.

Palavras-chave— métodos em controle, tratamento de colisão, controle de impedância

1 Introdução

Nas aplicações industriais o ambiente de manipulação robótica é estático ou muito pouco dinâmico, normalmente do espaço de trabalho do robô e a geometria dos objetos manipulados são bem conhecidas. Elas também são caracterizadas pela minimização de problemas de incertezas de posicionamento e de erros de medida pelo uso de sensores de elevada precisão e repetibilidade. Por todas estas características, estes sistemas permitem o uso de controladores e planejadores simplificados, como por exemplos controle PIDs de posição associados a trajetórias ponto-a-ponto no espaço de junta, ponto-a-ponto por segmento de retas, ou combinações de arcos de circunferência com segmentos de retas.

Nas demais aplicações onde não há controle total do ambiente, como na manipulação em ambientes não estruturados, os planejadores indus-

triais não são adequados, e outros tipos de controladores tem sido utilizados como controle de força (Siciliano and Villani, 2000), controle híbrido de força e posição (Raibert and Craig, 1980), *kinestatic control* (Griffis., 1991), *compliant control* (H. Kazerooni and Houpt., 1986). Os esforços destas propostas são concentrados no desenvolvimento de controladores para as etapas da manipulação em que o robô está em contato com o objeto. Poucas propostas consideram as demais etapas e na mudança de condição de contorno como estabelecimento e perda do contato.

Alguns autores adotam estratégias que utilizam troca da lei de controle em função do estado do robô (Hyde et al., 1997; Okamura et al., 2000). Por exemplo, pode-se utilizar controle de posição na movimentação livre e controle de força durante a manipulação. A troca entre controladores deve considerar algumas características dinâmicas do estabelecimento e perda de contato. Antes do

contato o robô movimenta-se livre, sem restrições.

No instante do contato há uma colisão com consequente transferência de energia entre garra e objeto juntamente com a imposição de restrições cinemáticas e novas condições dinâmicas. Após o contato, a dinâmica do sistema é diferente daquela anterior. Esta nova dinâmica pode ser diferente entre objetos, ou pode ser variável para um objeto heterogêneo, como objeto com densidade variável ou flexível. Assim, a troca de controle deve ser sincronizada com a mudança de fase da manipulação, que pode ser realizada pela detecção da colisão utilizando sensores de força, ou previsão da colisão utilizando sistemas de visão.

As duas estratégias citadas apresentam várias desvantagens. Na detecção com sensores de força é necessário que a colisão tenha ocorrido para ser detectada, ou seja, o estabelecimento do contato ocorre com o robô operando em controle para movimentação livre, o que pode desestabilizar ou provocar falhas do sistema. Na previsão do contato por sensores de visão é necessário reduzir erros de medida existente nos sensores e também ter um modelo detalhado do ambiente de trabalho, o que demanda muito poder computacional.

O controle de impedância tem sido utilizado como alternativa para o problema de chaveamento entre estados (Goldenberg, 1988), (Schneider and Cannon, 1992), (Bonitz and Hsia, 1996), (Moosavian and Papadopoulos, 1998), (Okamura et al., 2000), (Xu and Li, 2008), (Lippiello et al., 2007), e (Schlegl et al., 2001),

O Controle de Impedância foi proposto por (Hogan, 1985) com objetivo de estabelecer uma lei de controle capaz de controlar sistemas robóticos de interação física com o ambiente em diferentes condições de trabalho: movimentação livre no espaço; estável no estabelecimento e perda de contato; e interação com objetivo rígidos ou flexíveis. O conceito geral desta abordagem não está concentrada no controle da posição ou no controle da força, mas na relação destas duas variáveis.

O comportamento de impedância pode ser conseguido atribuindo ao controlador propriedades dinâmicas de um sistema: inércia, rigidez e amortecimento. Desta forma, o manipulador pode trabalhar desde movimentação livre na qual as forças com o meio ambiente são próximas de zero ($\partial W = F\partial x \approx 0$) até caso em que o trabalho realizado pelo robô sobre o ambiente não é zero ($\partial W = F\partial x \neq 0$). Modificando os parâmetros de impedância é possível ajustar a dinâmica do acoplamento entre robô e objeto conforme a necessidade.

Com base na capacidade de controlar a relação entre força e deslocamento, o controlador é capaz de estabelecer e perder contato de forma estável pois efeitos dinâmicos como oscilações, tempo de resposta e tempo de acomodação deixam de ser indesejáveis e evitáveis e passam a fazer parte do

comportamento do sistema. O controle de impedância também evita a troca entre controladores para diferentes condições de trabalho do robô.

2 Controle de Impedância

Esta lei de controle estabelece uma relação entre forças externas e deslocamentos do robô:

$$F_{ext} = M\ddot{x} + B(\dot{x} - \dot{x}_0) + K(x - x_0) \quad (1)$$

em que: F_{ext} são as forças externas; x é o deslocamento; M é a inércia; B é o amortecimento; K é a rigidez.

De forma generalizada, quando um robô está em movimentação e em contato com o ambiente por meio de forças externas o equacionamento dinâmico de um robô é dado por:

$$I(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \tau_{act} - J^T(\theta)F_{ext} \quad (2)$$

em que: $I(\theta)$ é a inércia do sistema; $C(\theta, \dot{\theta})$ são os termos de Coriolis e forças centrípetas; τ_{act} são os torques dos atuadores sobre os elos (após redução); J^T é o jacobiano transposto.

Fazendo $\tau_{act} = J^T F_{act}$ e substituindo em 2, tem-se:

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = J^T(F_{act} - F_{ext}) \quad (3)$$

A dependência de I , C e J em função de θ e suas derivadas foi suprimida para simplificar a notação.

Isolando $\ddot{\theta}$:

$$\ddot{\theta} = I^{-1}(J^T(F_{act} - F_{ext}) - C\dot{\theta}) \quad (4)$$

Se a relação entre as velocidades das juntas $\dot{\theta}$ e as velocidades do robô no espaço cartesiano \dot{x} é dada por:

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \quad (5)$$

Então a relação entre as acelerações \ddot{x} e $\ddot{\theta}$ é dada por:

$$\ddot{x} = J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta} \quad (6)$$

Substituindo $\ddot{\theta}$ por 4:

$$\ddot{x} = JI^{-1}J^T(F_{act} - F_{ext}) - JI^{-1}C\dot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta} \quad (7)$$

O termo $JI^{-1}J^T$ é denominado como tensor de mobilidade do robô e denotado por W , assim:

$$W = JI^{-1}J^T \quad (8)$$

Para resolver a lei de controle, isola-se a força necessária nos atuadores, assim:

$$F_{act} = W^{-1}(\ddot{x} + JI^{-1}C\dot{\theta} - \dot{J}\dot{\theta}) + F_{ext} \quad (9)$$

A aceleração \ddot{x} requerida para o comportamento de impedância é obtida manipulando a equação 1:

$$\ddot{x} = M^{-1}(K(x_0 - x) - B(\dot{x} - \dot{x}_0) - F_{ext}) \quad (10)$$

Substituindo 10 em 9, tem-se:

$$F_{act} = W^{-1}M^{-1}(K(x_0 - x) - B(\dot{x} - \dot{x}_0)) \\ + W^{-1}(JI^{-1}C\dot{\theta} - \dot{j}\dot{\theta}) + (1 - W^{-1}M^{-1})F_{ext} \quad (11)$$

Transformando de F_{act} para τ_{act} com a relação $\tau_{act} = J^T F_{act}$ tem-se:

$$\tau_{act} = J^T W^{-1}M^{-1}(K(x_0 - x) - B(\dot{x} - \dot{x}_0)) \\ + J^T W^{-1}(JI^{-1}C\dot{\theta} - \dot{j}\dot{\theta}) + J^T(1 - W^{-1}M^{-1})F_{ext} \quad (12)$$

Finalmente, o termo x pode ser descrito em função das coordenadas θ s das juntas pela cinemática direta $x = L(\theta)$, e o termo \dot{x} pode ser substituído por $\dot{x} = J\dot{\theta}$. Assim, tem-se:

$$\tau_{act} = J^T W^{-1}M^{-1}(K(x_0 - L(\theta)) - B(J\dot{\theta} - \dot{x}_0)) \\ + J^T W^{-1}(JI^{-1}C\dot{\theta} - \dot{j}\dot{\theta}) + J^T(1 - W^{-1}M^{-1})F_{ext} \quad (13)$$

Dadas medidas de posição e velocidade das juntas do robô e da força de interação do robô com o ambiente é possível controlar os torques nos motores para que o robô apresente um comportamento dinâmico de interação com o sistema em função de M , K e B desejados.

O controle de impedância apresenta as seguintes características: (a) Parâmetros de impedância podem ser mudados dinamicamente; (b) Não há necessidade de cálculo de cinemática inversa; (c) Medida de forças externas não é mandatório.

3 Ambiente experimental

Um robô do tipo SCARA de quatro graus de liberdade foi selecionado para os experimentos deste trabalho. O robô, original da IBM modelo 7545, passou por um processo de *retorffiting* no qual seus sensores (*encoders* e fins de cursos) e *drivers* de potência foram atualizados.



Figura 1: Robô SCARA retrofitado.

O robô possui elevadas reduções em seus atuadores e conseqüentemente apresenta elevada impedância passiva, e por essa característica, torna-se obrigatório o uso de retroalimentação de força

através de um sensor intrínseco posicionado no seu TCP.

Nestas condições, existem diversas técnicas de implementação do controle de impedância: com controle interno de força (Eppinger and Seering, 1992); com controle interno de posição (Pelletier and Doyon, 1994); com controle interno de velocidade (Pratt et al., 2004); e por torque calculado a partir de modelo matemático (Hogan, 1985). A implementação selecionada para os experimentos foi a baseada em controle interno de posição (Pelletier and Doyon, 1994).

4 Experimento de estabilidade de contato

Neste experimento as impedâncias foram selecionadas empiricamente. Experimentos de estabelecimento de contato foram conduzidas para diversos valores de impedância. A resposta do robô ao contato (perfil de posição e forças no tempo) foi utilizada para avaliar o desempenho do controlador. Como o fenômeno do contato pode ser modelado como um sistema de segunda ordem resultante do acoplamento entre robô e objeto, a análise foi realizada segundo parâmetros de análise de estabilidade de resposta de sistemas de segunda ordem: amortecimento (crítico, super ou subamortecido) tempo de resposta, tempo de estabilização e sobressinal.

No experimento, o robô foi movido em linha reta na direção x do sistema de referência fixo à sua base em direção ao centro do pote (objeto selecionado para o experimento) de forma a provocar estabelecimento do contato ortogonal à sua superfície, assim as reações de contato são restritas à apenas uma direção. Estas simplificações simplificam e facilitam a análise dos resultados pois forças e movimentos ocorrem em apenas uma direção.

O robô foi programado para executar a trajetória de forma a estabelecer o contato com velocidade constante e aceleração nula. A resposta de cada experimento é representada em termos da posição e da força ao longo do tempo. Para a força é apresentada a resultante da aplicação de um filtro passa-baixa, que é o sinal utilizado pelo sistema de controle de impedância. Nos experimentos foram variados os termos de impedância I , K e B .

A figura 2 apresenta os resultados para $I = 5kgm^2$, $K = 6N/m$ e $B = 100Ns/m$. Figura 2(a) apresenta a posição no tempo. Figura 2(b) apresenta a força no tempo. A partir dos resultados é possível verificar a instabilidade do estabelecimento do contato pelas oscilações sem que o regime seja atingido.

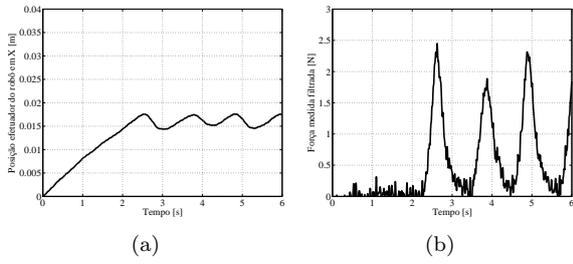


Figura 2: Resposta de Experimento 1 de estabelecimento de contato.

Nos experimentos de 2 a 6 os parâmetros I e K foram mantidos constantes, enquanto os valores de B foram progressivamente aumentados para se verificar a influência do amortecimento na resposta do estabelecimento do contato. Os valores de amortecimento do experimento 2 ao 6 foram respectivamente: $500Ns/m$; $750Ns/m$. $1000Ns/m$; $2000Ns/m$; e $3000Ns/m$. É possível verificar que o contato torna-se estável com o aumento de B e também o aumento do amortecimento da resposta e melhoria dos parâmetros de análise de sistemas de segunda ordem como sobressinal e tempo de acomodação.

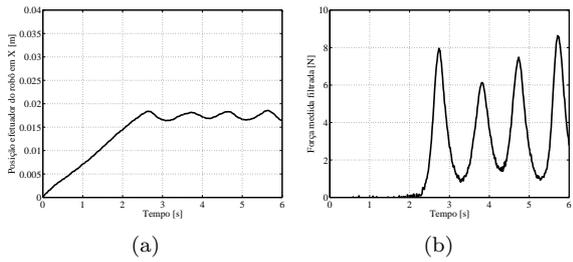


Figura 3: Resposta de Experimento 2.

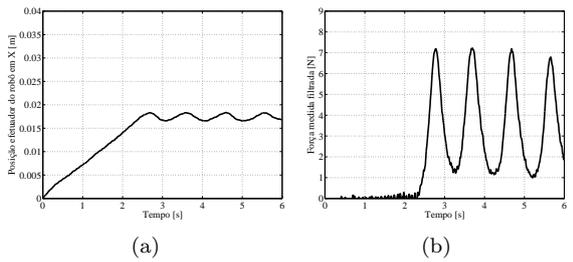


Figura 4: Resposta de Experimento 3.

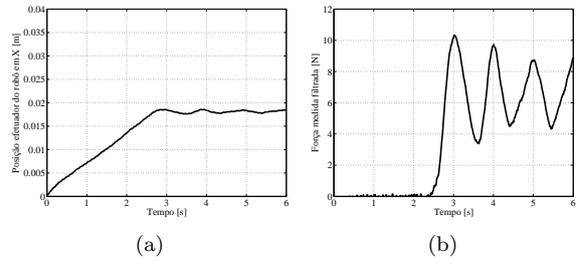


Figura 5: Resposta de Experimento 4.

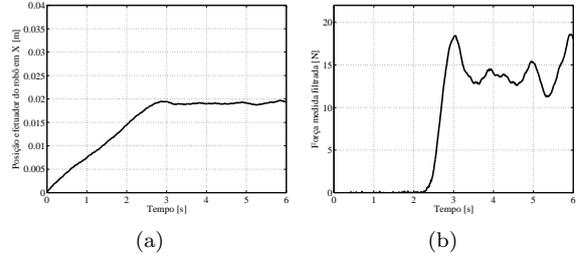


Figura 6: Resposta de Experimento 5.

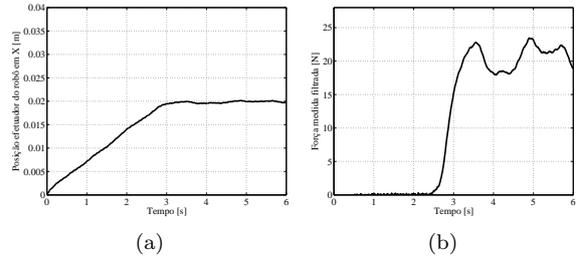


Figura 7: Resposta de Experimento 6.

A influência do parâmetro de rigidez K também foi investigada. A análise foi realizada aumentando-se a rigidez da impedância testada no experimento 2 devido a possibilidade de observação de mudanças na resposta. Lembrando, os parâmetros de impedância do experimento 2 são $I = 5kgm^2$, $K = 6N/m$ e $B = 500Ns/m$. Para os experimentos de 7 a 9 os novos valores de rigidez foram, respectivamente: $10N/m$; $20N/m$; e $30N/m$.

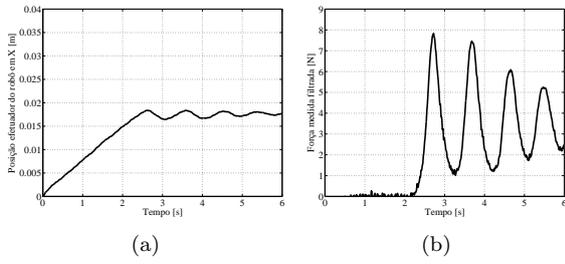


Figura 8: Resposta de Experimento 7.

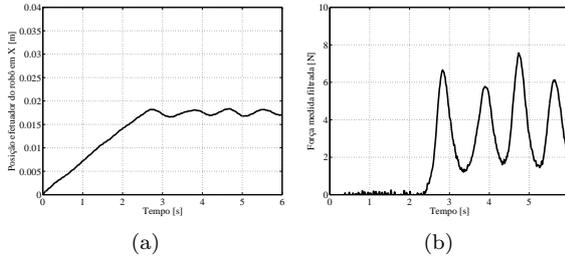


Figura 9: Resposta de Experimento 8.

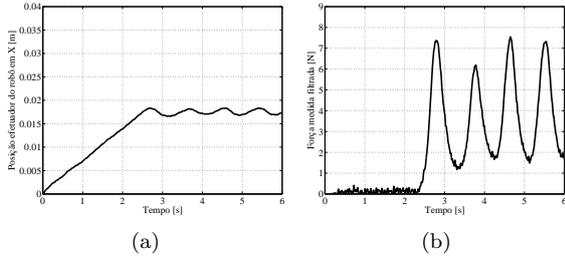


Figura 10: Resposta de Experimento 9.

Modificações na rigidez alteram a frequência natural do sistema, contudo, as modificações realizadas foram pequenas quando comparadas com a rigidez do objeto, assim alterações não foram perceptíveis.

Por fim a influência da inércia no estabelecimento do contato foi observado. Nestes casos, os valores de inércia foram modificados a partir da impedância do experimento 2, a saber, $I = 5kgm^2$, $K = 30N/m$ e $B = 500Ns/m$. A figura 11 apresenta a resposta para $I = 10kgm^2$, e a figura 12 para $I = 0,1kgm^2$.

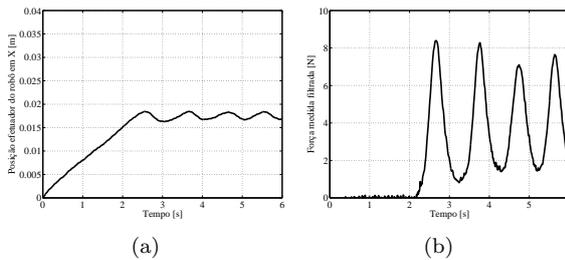


Figura 11: Resposta de Experimento 10.

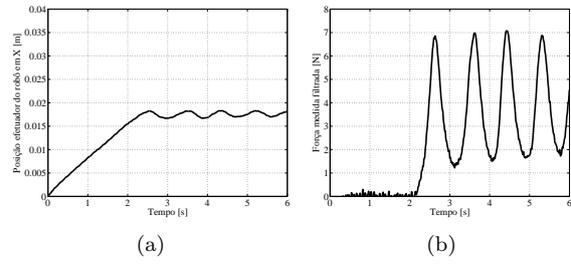


Figura 12: Resposta de Experimento 11.

5 Discussão dos resultados

Na colisão, o controle de impedância proporciona ao robô um comportamento dinâmico que relaciona o desvio de posição da trajetória desejada (e suas derivadas) com a força externa aplicada no mesmo. Os parâmetros podem ser ajustados em tempo de execução uma vez que o comportamento é obtido através da implementação em *software*. Apesar de não existirem componentes reais de inércia, rigidez e amortecimento, o robô reage fisicamente ao contato e ao acoplamento dinâmico com o objeto como se estes componentes existissem.

No estabelecimento do contato, a velocidade relativa entre robô e objeto e a inércia virtual exercem influência direta: quanto maior a energia cinética maior é o impulso e maior é a energia transferida do robô para o objeto. De forma geral, quanto maior a velocidade do impacto, menor deverá ser a inércia e maior deverá ser o amortecimento da impedância virtual. Uma inércia reduzida diminui a energia do impacto e o amortecimento evita oscilações posteriores à colisão.

Outro fator que deve ser levado em consideração para análise da resposta do robô e do objeto à colisão é o período de ciclo de realimentação. Para manipuladores com alta impedância passiva, um comportamento dinâmico de baixa impedância só pode ser obtido com o uso de realimentação de força (além do de posição ou velocidade), assim, existe uma latência entre o instante da colisão e a resposta do sistema a partir da realimentação. Durante este intervalo, a impedância virtual não tem efeito sobre a colisão, sendo que a efetiva é a impedância passiva do robô.

Conclui-se que um sistema com um período longo de realimentação demora a responder a um impacto e apresenta instabilidade para elevadas velocidades mesmo com inércia baixa e amortecimento elevado. Conseqüentemente, a diminuição do período de ciclo do controle pode permitir contatos mais estáveis com maiores velocidades na colisão.

Após a ocorrência da colisão, o sistema dinâmico formado pelo acoplamento entre robô e objeto apresenta resposta dinâmica de segunda ordem. Em primeiro lugar, a resposta de segunda

ordem no contato não é função somente da impedância virtual do robô, mas também de parâmetros do objeto. O coeficiente de amortecimento sofre maior influência do amortecimento da impedância e do objeto, porém, para objetos de elevada inércia e rigidez a amortecimento da impedância B deve ser elevado para diminuir oscilações.

A inércia da impedância M pode ser elevada para diminuir a frequência natural no caso de objetos de elevada rigidez. Contudo, o aumento de M aumenta os efeitos indesejados no momento da colisão, principalmente para os casos em que o objeto apresenta elevada rigidez e baixa inércia. Para estes casos faz-se necessário o uso de recobrimento do TCP com material de baixa rigidez para diminuir a aquela aparente do objeto, o que permite, conseqüentemente, diminuir M .

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de estabilidade de mudança de fases da manipulação utilizando uma única lei de controle: o controle de impedância. O estudo tem relevância em tarefas de manipulação robótica (interação física de robô objetos) em aplicações realizadas em ambientes não estruturados, cuja característica diferenciadora em relação às aplicações industriais é a constante e imprevisível modificação do ambiente, a existência de erros de medida, de posicionamento e diversidade de objetos a serem manipulados.

Neste contexto, experimentos de estabelecimento de contato com um objeto foram realizados para avaliar o desempenho do controlador, avaliando utilizando critérios de estabilidade de resposta de segunda ordem. Ressalta-se que os resultados são puramente experimentais e que simplificações e hipóteses simplificadoras normalmente utilizadas em modelagem matemática para simulações não foram consideradas com o objetivo de avaliar o desempenho do controlador em condições reais.

Os resultados obtidos mostram que é possível estabelecer contato de forma estável, ou seja, com rápido tempo de resposta, sem oscilações e com pequeno sobressinal. A estabilidade é atingida com valores de impedância adequados, sendo que a característica da resposta depende, além da impedância do controlador, das características dinâmicas do objeto.

Como trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de um sistema para estimar as propriedades dinâmicas do objeto a ser manipulado, possivelmente em função de dados obtidos com sistemas de visão, para ajuste automático dos parâmetros de impedância estabilidade de estabelecimento de contato.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro. Processos CNPq: 301417/2007-5, 143124/2009-9 e 130222/2012-7; e processo FAPESP 2008/09530-4.

Referências

- Bonitz, R. G. and Hsia, T. C. (1996). Internal force-based impedance control for cooperating manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **3**: 944–949.
- Eppinger, S. D. and Seering, W. P. (1992). Three dynamic problems in robot force control, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* **8**(6): 751–758.
- Goldenberg, A. A. (1988). Implementation of force and impedance control in robot manipulators, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 1626–1632.
- Griffis, M. W. (1991). *Kinesthetic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement.*, PhD thesis, University of Florida, Gainesville, USA.
- H. Kazerooni, H. S. and Houpt., P. (1986). Robust compliant motion for manipulators, part i: The fundamental concepts of compliant motion., *J. Robot. Automat.* **2**(2): 83–92.
- Hogan, N. (1985). Impedance control - An approach to manipulation. I - Theory. II - Implementation. III - Applications, *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control B* **107**: 1–24.
- Hyde, J. M., Tremblay, M. R. and Cutkosky, M. R. (1997). An object-oriented framework for event-driven dextrous manipulation, *The 4th International Symposium on Experimental Robotics IV* pp. 53–61.
- Lawrence, D. A. (1988). Impedance control stability properties in common implementations, pp. 1185–1190.
- Lippiello, V., Siciliano, B. and Villani, L. (2007). A position-based visual impedance control for robot manipulators, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 2068–2073.
- Moosavian, S. A. A. and Papadopoulos, E. (1998). Multiple impedance control for object manipulation, *Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on* **1**: 461–466.

- Okamura, A. M., Smaby, N. and Cutkosky, M. R. (2000). An overview of dexterous manipulation, *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on* **1**: 255–262 vol.1.
- Pelletier, M. and Doyon, M. (1994). On the implementation and performance of impedance control on position controlled robots, pp. 1228–1233.
- Pratt, G. A., Willisson, P., Bolton, C. and Hoffman, A. (2004). Late motor processing in low impedance robots: Impedance control of series-elastic actuators.
- Raibert, M. H. and Craig, J. J. (1980). Hybrid position/force control of manipulators, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control* **102**(2): 126–133.
- Schlegl, T., Buss, M., Omata, T. and Schmidt, G. (2001). Fast dextrous re-grasping with optimal contact forces and contact sensor-based impedance control, *Proceedings 2001 ICRA IEEE International Conference on Robotics and Automation* **1**(3-4): 103–108.
- Schneider, S. A. and Cannon, R. H. (1992). Object impedance control for cooperative manipulation: theory and experimental results, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* **8**(3): 383–394.
- Siciliano, B. and Villani, L. (2000). *Robot Force Control*, 1 edn, Springer Int. Series Eng. Comput. Sci.
- Xu, J. and Li, Z. (2008). A kinematic model of finger gaits by multifingered hand as hybrid automaton, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* **5**(3): 467–479.