

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR DE FORÇA EM UM ROBÔ INDUSTRIAL

JULIO GOLIN* AND RAUL GUENTHER*

**Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC*

Email: golin@das.ufsc.br, guenther@emc.ufsc.br

Abstract— This work presents the experimental results of a force controlled industrial robot under the task of following flat contour of unknown objects. In this algorithm, from the measured force in the contact between object and end-effector, the manipulator applies a normal force while a tangential velocity is generated in order to keep the contact while tracking the contour. The implementation is written Oberon-2 over the real-time operating system XO/2. The industrial robot is a SCARA configuration.

Keywords— Force control, contour tracking, robot control.

Resumo— Este trabalho apresenta os resultados experimentais preliminares de um controlador de força implementado em um robô industrial. O controle é utilizado em um algoritmo para o contorno de objetos de perfil desconhecido. Neste algoritmo, a partir da medição da força de contato entre ferramenta e meio, o manipulador aplica uma força normal enquanto gera uma velocidade tangencial à peça de modo a manter o contato e seguir o perfil do referido objeto. As implementações foram realizadas em Oberon-2 sobre o sistema operacional XO/2, que provê suporte à programação e execução de tarefas em tempo-real em um manipulador SCARA.

Keywords— Controle de força, seguimento de perfil, controle de robôs.

1 Introdução

Nas diversas aplicações da robótica, há tarefas em que os manipuladores devem ser capazes de interagir com o ambiente em que estão, também chamado meio. Exemplos típicos de tarefas dessa natureza são polimento, remoção de material (esmerilhamento, desbaste), reconhecimento de formas e superfícies, entre outras. Em qualquer destes casos ocorre um movimento restrito do manipulador e surgem forças de interação entre a ferramenta e o meio devido ao contato.

Uma estratégia de controle baseada unicamente na posição ou no movimento do manipulador interagindo com o meio requer que as trajetórias sejam planejadas com grande precisão e que a geometria do ambiente seja bem conhecida. O controlador, por sua vez, deve garantir que a ferramenta desvie o mínimo possível das posições desejadas. Entretanto, se um pequeno desvio é causado por um contato entre ferramenta e meio (em função de erro na modelagem geométrica, por exemplo) então surgem forças de interação ferramenta-meio. Ao mesmo tempo, o controlador de posição atua no sentido de compensar este desvio e, a fim de atingir a posição desejada, acaba incrementando a força de contato.

A partir desta situação pode-se perceber uma limitação dos controladores de posição neste tipo de aplicação e surge o interesse em buscar estratégias que controlem as forças resultantes desta interação no chamado *controle de força* (Sciavicco and Siciliano, 1999),(Gorinevsky, 1997).

Nesse sentido, diversas metodologias foram propostas nos últimos 20 anos, baseadas em di-

ferentes relações entre variáveis como posição, velocidade e força, a cinemática e a dinâmica do manipulador e também na modelagem do ambiente. Nelas, o controle pode ser executado *indiretamente* controlando-se a posição ou a dinâmica da ferramenta em relação ao meio e estimando-se a força de contato (como um sistema massa-mola, por exemplo); ou *diretamente* especificando-se uma força desejada e utilizando explicitamente medição e realimentação de força de contato. Uma revisão das estratégias clássicas de controle direto e indireto de força pode ser vista, por exemplo, em (Siciliano, 2000),(Schutter, 1997),(Zeng, 1997).

A capacidade de contornar o perfil de um objeto – geometricamente conhecido ou não – aplicando uma determinada força é pré-requisito em tarefas como as citadas anteriormente. Entretanto, se o seguimento puder ser executado de forma autônoma pelo manipulador, torna-se desnecessária a programação prévia de trajetórias, que dependem do conhecimento da geometria e que devem ser reprogramadas a cada mudança de *layout* do processo ou da tarefa. Com isso, em aplicações industriais, custos podem ser reduzidos e a produtividade aumentada (Ziliani, 2006).

Técnicas para seguimento de perfil utilizando controle de força são reportadas por diversos autores, com diferentes peças e materiais (madeira, metal, vidro, granulares), considerando ou não o atrito no contato. (Pires, 2007) implementa o seguimento quando ocorre colisão, contornando o obstáculo. O mesmo autor aplica a técnica para uma operação de esmerilhamento (Pires, 2002). Em (Baeten, 2002) o processamento de imagem, juntamente com controle de força, é utilizado

para tratar descontinuidades no perfil (quinas e chanfros). Em (Yu, 1999) é apresentada uma metodologia para o contorno de pilhas de materiais granulares, técnica a ser adotada em robôs móveis para limpeza. Em (Legnani, 2001) a tarefa de contorno de um objeto (conhecido) é utilizada na calibração do manipulador. Nestes trabalhos, diferentes controladores são apresentados (*e.g.* P, PI, neural), utilizando realimentação interna de velocidade ou posição.

Neste trabalho implementamos um controlador direto de força em um manipulador SCARA industrial. A partir da medição e controle da força, foi implementada como tarefa um algoritmo para a ferramenta seguir o contorno de um objeto de perfil desconhecido no plano xy . O controlador de força, o algoritmo de seguimento, a programação e interfaceamento com o sensor de força são descritos nas seções 2 e 3. Os resultados são apresentados na seção 4.

2 Controle de força e seguimento de perfil

Nas estratégias que utilizam controle direto as forças e torques de interação são medidos por um *sensor de força*, cujo sinal tipicamente é contaminado por ruídos de alta frequência. Uma ação derivativa da força não é, portanto, utilizada na prática. O amortecimento do sistema pode ser introduzido através de termos dependentes da velocidade e/ou da posição do efetuador (o controle é realizado no espaço operacional). Neste trabalho, a malha de controle de força gera uma referência para uma malha interna de controle de velocidade. O detalhamento é dado a seguir considerando-se a dinâmica do robô linearizada e desacoplada em função da tarefa se dar a velocidades suficientemente baixas e do uso de altas reduções nas transmissões mecânicas (Sciavicco and Siciliano, 1999). Assim, para um grau de liberdade no espaço, a dinâmica da interação meio-ferramenta pode ser representada por uma massa m sobre a qual atua uma força de contato f_c e de controle u :

$$m\ddot{x} = u - f_c \quad (1)$$

Realimentando a força f_c e a velocidade \dot{x} , a lei de controle pode ser dada por

$$u = f_s + k_v(\dot{x}_f - \dot{x}) \quad (2)$$

onde f_s é a força medida pelo sensor e considerada igual à força de contato, *i.e.* $f_s = f_c \equiv f$, k_v um ganho de velocidade e \dot{x}_f uma velocidade de referência. Se esta referência \dot{x}_f é dada em função do erro de força, com f_d a força desejada, então

$$\dot{x}_f = k_f(f_d - f). \quad (3)$$

e a malha fechada resulta

$$m\ddot{x} + k_v\dot{x} + k_vk_f(f - f_d) = 0. \quad (4)$$

Definido o método de controle, deve-se definir o método para seguimento de perfil. Para seguir o contorno, a ferramenta deve manter uma força na direção normal à peça enquanto produz uma velocidade numa direção tangencial. Estas direções são dadas, respectivamente, pelos vetores unitários $\vec{\eta}$ e $\vec{\tau}$, a serem determinados. A figura 1 ilustra um robô de configuração SCARA em que o efetuador-final está em contato com o ponto P da peça. Nesta figura, a força resultante medida pelo sensor tem uma componente na direção tangencial, dada em função do atrito no contato. Se o atrito não for significativo, *i.e.* se a componente tangencial da força for desprezível em relação à normal, pode-se considerar que a força medida é normal ao contato.

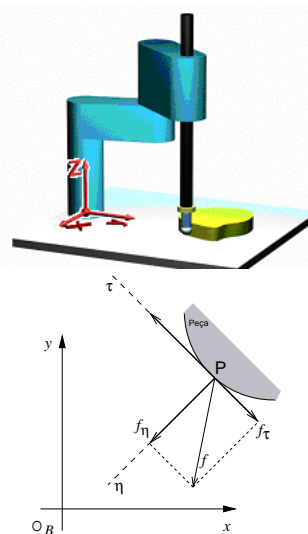


Figura 1: Manipulador em contato com um objeto (*em cima*) e projeção do contorno no plano xy (*embaixo*).

As direções instantâneas dos vetores $\vec{\eta}$ e $\vec{\tau}$ são determinadas a partir das componentes f_x e f_y da força medida f , já transformadas para o sistema de coordenadas da base do manipulador (O_B). O vetor tangencial é obtido pela ortogonalidade com $\vec{\eta}$, ou seja $\vec{\eta} \cdot \vec{\tau} = 0$:

$$\begin{aligned} \eta_x &= -\frac{f_x}{|f|} = -\frac{f_x}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}} & \Rightarrow & \tau_x = \eta_y \\ \eta_y &= -\frac{f_y}{|f|} = -\frac{f_y}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}} & & \tau_y = -\eta_x \end{aligned} \quad (5)$$

Se a força na direção normal f_η é controlada através de uma realimentação interna de velocidade como nas equações 2 e 3, então o controlador de força tem como saída uma velocidade \dot{x}_η normal à superfície. O movimento resultante do efetuador é especificado compondo-se esta velocidade à velocidade tangencial desejada \dot{x}_τ , previamente especificada para o seguimento do perfil:

$$\dot{\vec{x}}_d = \dot{\vec{x}}_\eta + \dot{\vec{x}}_\tau = \dot{x}_\eta \vec{\eta} + \dot{x}_\tau \vec{\tau} \quad (6)$$

A velocidade nas direções normal e tangencial ao contato é controlada com uma realimentação proporcional de velocidade:

$$\vec{u}_V = K_V(\dot{\vec{x}}_d - \dot{\vec{x}}) \quad (7)$$

onde $\dot{\vec{x}}$ é a velocidade instantânea e K_V a matriz (diagonal) de ganhos. As velocidades são especificadas no espaço operacional do manipulador e obtidas pela cinemática diferencial direta, *i.e* através da matriz Jacobiana.

A figura 2 apresenta o diagrama de blocos do controlador (Gorinevsky,1997). Também foi utilizado nos experimentos de (Visioli, 2006),(Ziliani, 2006),(Yu and Kieffer, 1999),(Kazanzides, 1989).

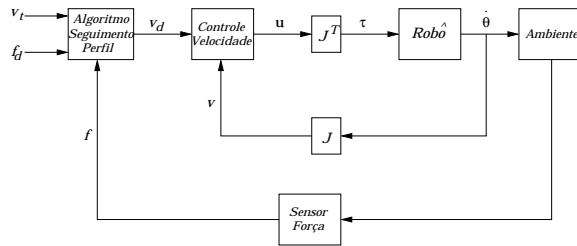


Figura 2: Diagrama de blocos do algoritmo para seguimento de contorno.

3 Implementação e aparato experimental

A implementação do controlador e do algoritmo de seguimento foi realizada em um manipulador industrial SCARA de arquitetura aberta. Este robô apresenta um sistema operacional de tempo-real e uma linguagem de programação desenvolvidos a partir de Oberon-2 conhecido como XO/2 não provendo, em sua versão original, uma implementação de controle de força. O sistema é executado em um processador PowerPC montado em um gabinete de controle onde também estão instaladas, em barramento VME, a placa watch-dog, uma interface de rede ethernet e o processador digital de sinais do sensor de força. O sensor de força (JR3 Inc.) é montado entre o punho e o efetuador e as medições são transmitidas na forma de pacotes de dados através de um cabo serial ao DSP. No gabinete estão ainda os conversores AD/DA e os amplificadores dos motores elétricos do manipulador.

A organização geral da implementação dos módulos (original e realizada) do robô é apresentada na figura 3. No nível mais baixo dessa hierarquia estão os módulos de comunicação com os periféricos do sistema (amplificadores, botão de emergência, sensores de fim de curso, encoders, etc.). Na outra ponta escreve-se a interface com o

usuário. Já a programação de novos controladores é feita em um nível hierárquico intermediário, que faz a comunicação entre a interface com o usuário, o sensor de força e os periféricos. Originalmente, o sistema apresentava um algoritmo PD para o controle de posição independente por juntas em conjunto com os módulos para geração de trajetórias.

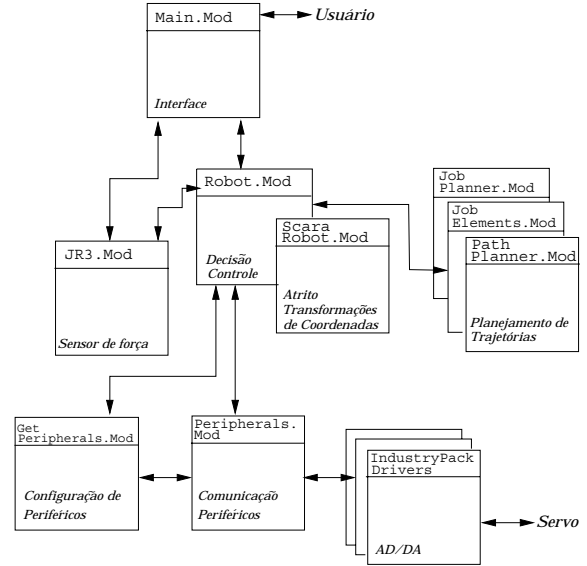


Figura 3: Estrutura de software do robô

As transformações de posição, velocidade e força e a matriz Jacobiana (e sua transposta) foram definidas no módulo ScaraRobot.Mod. O interfaceamento com o sensor de força – originalmente provendo comunicação em um canal – foi melhorado e definido em JR3.Mod. As estruturas de controle, decisão e segurança foram definidas em Robot.Mod. Os módulos de planejamento de trajetórias não são utilizados neste trabalho. Os módulos de interfaceamento com periféricos e conversão AD/DA são da distribuição original do sistema XO/2.

O algoritmo de controle de força e seguimento de perfil definido na seção 2 é executado por uma tarefa de tempo-real com período de 2ms (*thread* periódico). Este tempo foi determinado pela capacidade de disponibilização de dados do sensor de força.

A fim de verificar a implementação do algoritmo e seu desempenho, foram realizados experimentos sobre perfis de metal e borracha. As peças foram fixadas na bancada do robô de forma a obter amplitudes significativas na rotação das duas primeiras juntas (que na configuração SCARA geram os movimentos no plano xy), com o cuidado de não atingir singularidades. O contato ferramenta-peça é feito por um rolamento e com isso pode-se desconsiderar o atrito, conforme suposto na seção 2 e nos trabalhos de (Ziliani, 2006),(Visioli, 2006),(Baeten, 2002),(Gorinevsky,

1997),(Bossert,1996)¹. A figura 4 ilustra a montagem experimental do robô com um perfil linear.



Figura 4: Montagem experimental

A figura 5 apresenta a trajetória seguida no espaço de trabalho do robô com a peça linear – obtida via cinemática direta.

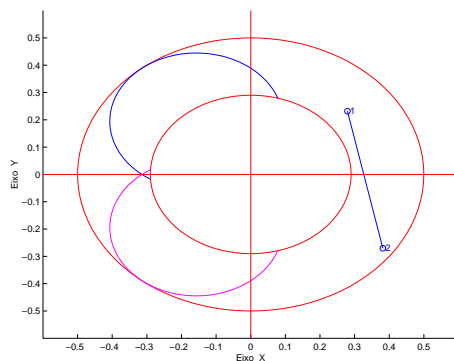


Figura 5: Trajetória executada via seguimento de perfil

4 Resultados

No algoritmo apresentado na seção 2 é necessário definir os ganhos de força e velocidade. Estes valores foram obtidos experimentalmente para referências de força de 15 a 25 N e velocidades tangenciais desejadas de 0,035 e 0,05 m/s. Para tanto, a partir de valores mínimos necessários para acionar os motores, foram observadas as características da resposta em malha fechada (tempo

¹A compensação do atrito depende, evidentemente, das características do contato e é feita portanto caso a caso. Na bibliografia citada, o atrito no contato foi considerado nos trabalhos de (Pires, 2007),(Pires, 2002),(Yin, 2004),(Yu and Kieffer, 1999)

de subida e amortecimento) e definidos os valores de $k_f = 0,025$ e $k_v = 2000$.

Deve-se ressaltar que a medição de força é contaminada por ruído. A fim de atenuar os efeitos do ruído na lei de controle, implementou-se um filtro de 1a. ordem no módulo do sensor de força (JR3.Mod). Verificou-se que uma frequência de corte de 40 Hz apresentou boa atenuação sem atraso significativo do sinal.

Cabe também comentar que, como as velocidades de trabalho são baixas, não é necessário considerar os efeitos do acoplamento dinâmico (Sciavico and Siciliano, 1999). Por outro lado, o atrito nas transmissões² é significativo e degrada o desempenho do manipulador. Este efeito pode ser parcialmente compensado por um observador de atrito. Neste trabalho utilizamos a compensação de atrito implementada em (Golin, 2002). Os sinais de torque de compensação entram como uma ação *feedforward* independente dos torques de acionamento do controle de força. A compensação do atrito é executada por uma tarefa de tempo-real à parte e foi escrita no módulo ScaraRobot.Mod.

As figuras 6 e 7 apresentam os resultados para o caso do perfil linear de metal com referências $f_d = 20$ N e $v_d = 0,05$ m/s.

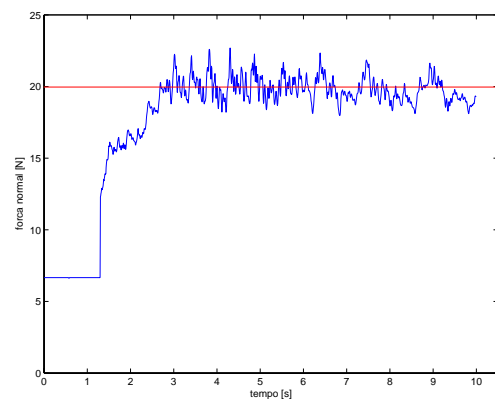


Figura 6: Força normal ao longo da peça

Foram também realizadas experiências com um perfil de borracha. Neste caso, percebemos que à medida que aumentamos o valor da força desejada ao mesmo tempo em que se diminuiu a referência para a velocidade tangencial, o seguimento piora. Isto ocorre em função da flexibilidade da borracha – a ferramenta deforma a peça tal que dificulta a execução da velocidade tangencial desejada.

Havendo um comprometimento entre as referências de força normal e velocidade tangencial há seguimento em torno das referências e os resultados são vistos nas figuras 8 e 9.

Por fim, a tabela 1 apresenta o desempenho computacional do sistema durante a execução do

²As transmissões nos dois primeiros elos são *harmonic-drives* com relação 100:1.

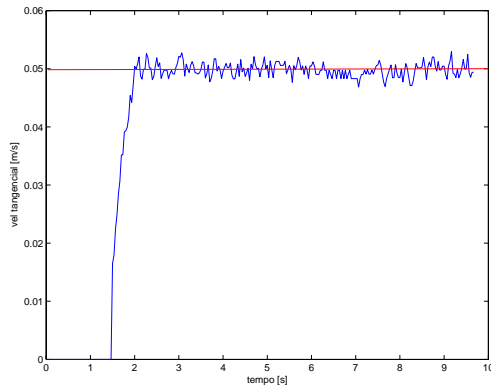


Figura 7: Velocidade tangencial ao longo da peça

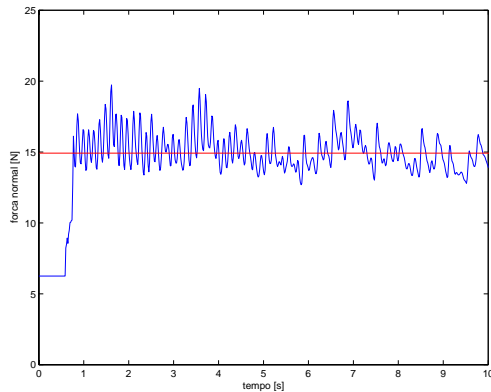


Figura 8: Força normal ao longo da peça

algoritmo de controle de força. Verificamos que as tarefas são cumpridas dentro do tempo de execução de 2ms. Na tabela, o campo Duração indica o tempo máximo de uso exclusivo do processador para a tarefa em questão (definido pelo programador), enquanto TMinP e TMaxP indicam, respectivamente, os tempos mínimo e máximo de processamento observados durante a execução da tarefa em vários ciclos.

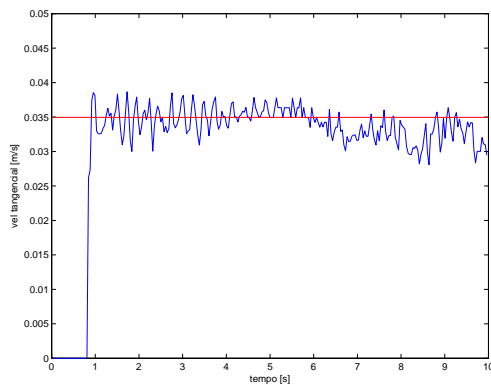


Figura 9: Velocidade tangencial ao longo da peça

Tarefa	ControlForceHdl
Tipo	Tempo crítico
Duração [ms]	0,2
Deadline [ms]	0,5
Período [ms]	2,0
TMinP [ms]	0,119
TMaxP [ms]	0,178
Amostras [ciclos]	25.383

Tabela 1: Desempenho computacional para a tarefa de controle de força

5 Conclusões

Este trabalho objetivou a implementação e verificação prática de um controlador de força com acomodação por velocidade e de um algoritmo para seguimento do perfil de objetos planos em um robô industrial. Os experimentos realizados com perfis de metal e borracha mostraram que o efetuador realiza a tarefa desejada, acompanhando o contorno das peças. As implementações, incluindo transformações, interfaceamento com o sensor de força, filtragem e interface foram realizadas no sistema XO/2, do robô. Este algoritmo funciona somente enquanto houver contato entre a ferramenta e a peça. Assim, para trabalhos futuros, é conveniente considerar a situação de perda de contato – que pode ocorrer em função de uma combinação entre geometria da peça (com chanfros ou cantos retos), força de contato pequena e grande velocidade tangencial. A fim de estender a aplicação a outras tarefas industriais (como acabamento e esmerilhamento, por exemplo), é necessário considerar o atrito no contato, buscando para tanto estratégias mais avançadas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil.

Referências

(n.d.).

Baeten, J. and Schutter, J. D. (2002). Hybrid vision/force control at corners in planar robotic contour following, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **7**(2).

Bossert, D., Li, U.-L. and Vagners, J. (1996). Experimental evaluation of a hybrid position and force surface following algorithm for unknown surfaces, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Brega, R. (1998). A real-time operating system designed for predictability and run-time

- safety, *Int. Conf. Motion and Vibration Control (MOVIC)*, Zurique.
- Brega, R., Tomatis, N. and Arras, K. (2000). The need for autonomy and real-time in mobile robotics: case study of xo/2 and pygmalion, *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Zurique.
- de Schutter, J., Bruyninckx, H., Zhu, W.-Z. and Spong, M. W. (1997). Force control: a bird's eye view, *Control problems in robotics and automation: future directions*.
- Golin, J. F. (2002). *Controle de força e compensação de atrito em um robô industrial: implementação e resultados experimentais*, Pos-MEC, EMC, UFSC.
- Golin, J. F., Weihmann, L. and Guenther, R. (2001). *Manual do usuário do robô Inter*, Laboratório de Robótica, UFSC.
- Gorinevsky, D. M., Formalsky, A. M. and Schneider, A. Y. (1997). *Force Control of Robotic Systems*, CRC Press, New York.
- Hueppi, R. and Gruener, G. (2001). *XO/2 Reference Manual*, IFR, ETHZ.
- Inc., J. (1996). *JR3 Reference Manual*.
- Jatta, F., Adamini, R., Visioli, A. and Legnani, G. (2002). Hybrid force/velocity robot contour tracking: an experimental analysis of friction compensation strategies, *Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, Washington.
- Kazanzides, P., Bradley, N. S. and Wollowich, W. (1989). Dual-drive force/velocity control: implementation and experimental results, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 92–97.
- Legnani, G., Adamini, R. and Jatta, F. (2001). Calibration of a scara robot by contour tracking of an object of known geometry, *Proc. Int. Symposium on Robotic, Seoul*.
- Pires, J. N. (2007). Force control experiments for industrial application: a test case using an industrial deburring example, *Assembly Automation* **27**(2).
- Pires, J. N., Ramming, J., Rauch, S. and Araujo, R. (2002). Force/torque sensing applied to robotic deburring, *Sensor Review* **22**(3).
- Sciavicco, L. and Siciliano, B. (1999). *Modeling and Control of Robot Manipulators*, Springer.
- Sciavicco, L. and Siciliano, B. (2000). *Robot Force Control*, Springer.
- Visioli, A., Ziliani, G., and Legnani, G. (2006). An interactive learning control algorithm for contour tracking of unknown objects, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Volpe, R. and Khosla, P. (1994). Computational considerations in the implementation of force control strategies, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **9**.
- Yin, Y., Hu, H. and Xia, Y. (2004). Active tracking of unknown surface using force sensing and control technique for robots, *Sensors and Actuators - A* **112**.
- Yu, K. and Kieffer, J. (1999). Robotic force/velocity control for following unknown contours of granular materials, *Control Engineering Practice* **7**.
- Zeng, G. and Hemami, A. (1997). An overview of force control, *Robotica* **15**.
- Ziliani, G., Visioli, A. and Legnani, G. (2006). Gain scheduling for hybrid force/velocity control in contour tracking task, *Int. Journal of Advanced Robotic Systems* **3**(4).