

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Carlos Eduardo Ingar Valer**

**Controle de impacto em manipuladores  
robóticos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Rubens Sampaio

Rio de Janeiro  
Junho de 2004



**Carlos Eduardo Ingar Valer**

**Controle de impacto em manipuladores  
robóticos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Rubens Sampaio**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Hans I. Weber**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Edson Cataldo**

Departamento de Matemática Aplicada - UFF

**Prof. Marcelo A. Trindade**

Departamento de Engenharia Mecânica - USP

**Prof. Hamilton Leckar**

Departamento de Matemática Aplicada - UFF

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico -  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Junho de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Carlos Eduardo Ingar Valer**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) em Lima-Perú como o primeiro lugar da turma de 1994. Trabalhou em projetos de engenharia nas plantas mineiras de Southern Perú Cooper Corporation e Minero Perú, e participou do desenvolvimento de sistemas de automação na planta de motocicletas Honda del Perú S.A. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 1999 definindo a partir de então a sua linha de pesquisa na área de Controle de Sistemas Dinâmicos e Análise de Vibrações em Estruturas Flexíveis.

#### Ficha Catalográfica

Ingar Valer, Carlos Eduardo

Controle de impacto em manipuladores robóticos / Carlos Eduardo Ingar Valer; orientador: Rubens Sampaio. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

161 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Impacto. 3. Manipuladores robóticos. 4. Controle de sistemas dinâmicos. 5. Estruturas flexíveis I. Sampaio, Rubens. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para mi padre, Eduardo.

## Agradecimentos

A minha família pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador, professor Rubens Sampaio, pela confiança e pela inestimável contribuição na minha formação.

À PUC-Rio e à FAPERJ, pelos auxílios concedidos.

Ao professor Fernando Rochinha pelas discussões e trocas de idéias que foram muito valiosas para a elaboração do presente trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Aos meus colegas da PUC-Rio, pela amizade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio de sempre.

## Resumo

Ingar Valer, Carlos Eduardo; Sampaio, Rubens. **Controle de impacto em manipuladores robóticos**. Rio de Janeiro, 2004. 161p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é abordado o problema do controle durante o período de transição de contato em manipuladores robóticos. Tipicamente é o controlador de força que deve atuar durante o período transiente, no entanto esse controlador não está preparado para lidar com o fenômeno altamente não-linear que representam os impactos e as perdas de contato. No trabalho, inicialmente é feita uma análise do desempenho e estabilidade dos controladores de força convencionais durante a transição de contato. Essa análise é baseada em modelos simplificados: um de manipulador rígido e outro de flexível. É mostrado que os impactos não originam instabilidade dinâmica mas podem deteriorar severamente o desempenho do sistema. Posteriormente, com a finalidade de obter modelos mais realistas que validassem a efetividade de novos controladores, é desenvolvido um modelo para um manipulador rígido-flexível de dois elos em que se colocam pastilhas piezoelétricas coladas ao longo do braço flexível. Também são estudados modelos de contato. Finalmente, são apresentados três novos controladores que são projetados especificamente para lidar com os impactos e perdas de contato que aparecem na transição de contato. A idéia do primeiro controlador é detectar o primeiro impacto e a partir dele reformular a trajetória que a extremidade do manipulador deverá seguir para atingir a superfície do meio com velocidade mínima, evitando assim outros impactos. O projeto deste controlador é feito usando a teoria de controle ótimo. O segundo controlador baseia-se na linearização do movimento de um manipulador flexível em torno do movimento do manipulador considerado rígido. A equação resultante é usada para projetar um controlador de posição de alta precisão que permite evitar, ou diminuir, a severidade do impacto inicial. A idéia do terceiro controlador é amortecer ativamente a parte flexível do manipulador através das pastilhas piezoelétricas que funcionam como atuadores e sensores colocados de maneira a garantir estabilidade em presença de dinâmica residual. O projeto do controlador é formulado como um problema de otimização que é resolvido através de técnicas de programação não-linear.

### Palavras-chave

Impacto; manipuladores robóticos; controle de sistemas dinâmicos; estruturas flexíveis.

## Abstract

Ingar Valer, Carlos Eduardo; Sampaio, Rubens (Advisor). **Impact control of robotic manipulators**. Rio de Janeiro, 2004. 161p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work it is considered the problem of control during the contact transition period in robotic manipulators. Typically it is the force controller that acts during the transient period, however that controller is not prepared to deal effectively with impacts and losses of contact. In this work, it is initially performed an analysis of the stability and performance of conventional force controllers working during the contact transition. The analysis is based on simplified models for rigid and flexible manipulators. It is proved that the impacts do not cause dynamic instability, but they can severely degrade the system performance. Later, with the purpose of getting more realistic models to validate the effectiveness of new controllers, a model of a two-link rigid-flexible manipulator is developed considering glued piezoelectric sheets along the flexible arm. Contact models are also studied. Finally, three new controllers are presented which are designed to specifically deal with impacts and losses of contact during the contact transition period. The main idea of the first controller is to identify the first and unavoidable impact and then to reformulate the trajectory that the endeffector will follow to approach the collision surface with a minimum velocity, thus preventing new impacts. The controller is designed by using the theory of optimal control. The second controller is based on the equation of the motion of a flexible manipulator linearized around the motion of the manipulator when all the links are considered rigid. The obtained equation is used to design a high precision position controller to prevent or lessen the severity of the initial impact. The idea of the third controller is to actively damp the flexible part of the manipulator through the piezoelectric sheets that act as collocated actuators and sensors, this way the stability in presence of residual dynamics is guaranteed. The controller design is formulated as an optimization problem that is solved through nonlinear programming techniques.

## Keywords

Impact; robotic manipulators; control of dynamical systems; flexible structures.

## Sumário

1	Introdução	<b>14</b>
1.1	Objetivos de um Controlador de Impacto	19
1.2	Revisão Bibliográfica	20
1.3	Organização do Trabalho	29
2	Análise do Controle de Força durante a Transição de Contato	<b>31</b>
2.1	Modelo Dinâmico de Manipuladores Rígidos	31
2.2	Modelagem Simplificada de Manipuladores Flexíveis	35
2.3	Controle de Força	39
2.4	Análise da Estabilidade do Controle de Força	51
2.5	Desempenho do Controle de Força em Presença de Impacto	61
3	Modelagem de um Manipulador Robótico Rígido-Flexível	<b>71</b>
3.1	Energia Cinética e Potencial dos Elos do Manipulador	72
3.2	Trabalho feito pelos Atuadores/Sensores Piezoelétricos	78
3.3	Trabalho feito pelos Motores Atuadores nas Juntas do Manipulador	82
3.4	Trabalho feito pelas Forças de Contato	82
3.5	Equação de Movimento do Sistema	83
4	Modelagem de Impacto	<b>88</b>
4.1	Método do Balanço de Momentum	88
4.2	Método do Elemento de Contato	92
4.3	Aplicação: Manipulador Flexível com Impacto	105
5	Novos Controladores de Impacto	<b>113</b>
5.1	Controlador de Impacto para Manipuladores Rígidos	113
5.2	Controladores de Impacto para Manipuladores Flexíveis	127
6	Conclusões	<b>147</b>
	Referências Bibliográficas	<b>150</b>

## Lista de Figuras

1.1	Manipulador robótico fazendo contato com uma superfície.	15
1.2	Exemplo de forças de impacto/contato experimentadas por um manipulador robótico durante a transição de contato.	16
1.3	Impacto devido à dificuldade de posicionamento em manipuladores robóticos flexíveis.	17
1.4	Elementos flexíveis em manipuladores robóticos. (a) Elos flexíveis. (b) Juntas flexíveis. (c) Outros elementos de transmissão flexíveis.	18
1.5	Fase de pré-transição e transição do contato.	19
2.1	Manipulador robótico em contato com o meio de trabalho.	32
2.2	<b>Modelo Simplificado 1.</b> Manipulador rígido de um grau de liberdade fazendo contato com um meio de trabalho elástico (a força $f_e$ é consequência do contato com o meio).	35
2.3	Manipuladores robóticos flexíveis. (a) Devido a uma junta flexível. (b) Devido à elasticidade no braço do manipulador.	35
2.4	Manipulador robótico com braço flexível.	37
2.5	<b>Modelo Simplificado 2.</b> Manipulador robótico flexível fazendo contato com um meio de trabalho elástico (a força $f_e$ é consequência do contato com o meio).	38
2.6	Estrutura geral dos controladores explícitos de força.	40
2.7	Estrutura do controlador de impedância.	47
2.8	Resposta dinâmica sem impacto sob controle de força explícito proporcional com alimentação direta unitária para dois materiais diferentes do meio de trabalho (linha azul: $K_e = 1 \times 10^3 N/m$ , linha verde: $K_e = 1 \times 10^4 N/m$ ). Parâmetros do controlador: $K_{pf} = 1$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 10N$ .	48
2.9	Resposta dinâmica sem impacto sob controle de força explícito integral para dois materiais diferentes do meio de trabalho (linha azul: $K_e = 1 \times 10^3 N/m$ , linha verde: $K_e = 1 \times 10^4 N/m$ ). Parâmetros do controlador: $K_{fi} = 0.5$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 10N$ .	48
2.10	Resposta dinâmica sem impacto sob controle de impedância para dois materiais diferentes do meio de trabalho (linha azul: $K_e = 1 \times 10^3 N/m$ , linha verde: $K_e = 1 \times 10^4 N/m$ ). Parâmetros do controlador: $M^d = 1 Kg$ , $B^d = 10 N - s/m$ , $K^d = 10 N/m$ , $x^d = 0.11 m$ .	49
2.11	Resposta dinâmica com impacto sob controle de força explícito proporcional com alimentação direta unitária para diferentes velocidades de impacto $v_0$ . Parâmetros do controlador: $K_{pf} = 1$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 10N$ . $K_e = 1 \times 10^4 N/m$ .	49
2.12	Resposta dinâmica com impacto sob controle de força explícito integral para diferentes velocidades de impacto $v_0$ . Parâmetros do controlador: $K_{fi} = 0.5$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 10N$ . $K_e = 1 \times 10^4 N/m$ .	50

2.13	Resposta dinâmica com Impacto sob controle de impedância para diferentes velocidades de impacto $v_0$ . Parâmetros do controlador: $M^d = 1 \text{ Kg}$ , $B^d = 10 \text{ N-s/m}$ , $K^d = 10 \text{ N/m}$ , $x^d = 0.10 \text{ m}$ . $K_e = 1 \times 10^4 \text{ N/m}$ .	50
2.14	Diagrama do lugar geométrico das raízes para um manipulador rígido controle explícito de força proporcional, variando $K_{pf}$ de $-1$ até $5$ .	54
2.15	Diagrama do lugar geométrico das raízes para um manipulador flexível controle explícito de força proporcional, variando $K_{pf}$ de $-1$ até $K_m/K_e$ .	57
2.16	Resposta dinâmica da força de contato para um manipulador flexível com controle explícito de força proporcional (linha contínua: $K_{pf} = 0$ , linha pontilhada: $K_{pf} = 3 K_m/K_e$ ).	58
2.17	Função não-linear $g(\tilde{x})$ para $K_{pf} > -1$ .	60
2.18	Força de contato adimensional $\phi^c$ depois de um impacto em $t = 0$ . (a) Para diferentes valores da velocidade de contato inicial adimensional $\nu_C$ . (b) Para diferentes valores do fator de amortecimento $\zeta$ .	64
2.19	Situação limite para perda de contato.	65
2.20	Condição para perda de contato em manipuladores rígidos sob controle de força explícito proporcional (a) Superfícies de nível para a função $\Delta(\nu_C, \zeta)$ . (b) Valores críticos para a velocidade de impacto adimensional: $\nu_C(\zeta)$ , para o manipulador de um grau de liberdade sob controle explícito de força com alimentação direta unitária.	66
2.21	Trajetória durante a perda de contato de uma manipulador rígido para diferentes velocidades de perda de contato adimensional $\nu_{PC}$ . (a) Sob controle de força proporcional. (b) Sob controle de força integral.	67
2.22	Velocidade de recontato adimensional $\nu_{RC}$ como função da velocidade de perda de contato adimensional $\nu_{PC}$ . (a) Sob controle de força proporcional. (b) Sob controle de força integral.	68
2.23	Diagrama do lugar geométrico das raízes para o manipulador flexível do <i>Modelo Simplificado 2</i> . (a) Para o caso $K_m/K_e = 1$ , variando o amortecimento da junta $B_1$ de $0$ até $400$ . (b) Para o caso $K_m/K_e = 1 \times 10^{-2}$ , variando o amortecimento da junta $B_1$ de $0$ até $200$ . Parâmetros usados em ambos os casos : $M_1 = 1 \text{ Kg}$ , $M_2/M_1 = 3$ e $K_e = 1 \times 10^5$ .	69
3.1	Manipulador robótico rígido-flexível com dois elos.	71
3.2	Pastilha piezoelétrica colada numa sub-estrutura flexível.	78
4.1	Colisão de um par de corpos rígidos.	89
4.2	Deformação de dois corpos elásticos na região de contato. (a) Justo antes do contato. (b) Durante o contato..	93
4.3	Impacto de um manipulador robótico de dois elos.	98
4.4	Comparação da força de impacto estimada (sem simulação, via eqs.(4-33),(4-36) e (4-41) ), e a força de impacto obtida via simulação, para o caso de um manipulador robótico de dois elos.	99

4.5	Modelo de impacto com amortecimento.	100
4.6	Força de impacto produzida na colisão de duas esferas usando modelo com amortecimento não-linear e para diferentes valores das velocidade de aproximação entre as esferas ( $e = 0,7$ , $m_1 = m_2 = 1kg$ ). (a) Variação da força de impacto no tempo. (b) Relação força-deformação.	102
4.7	Força de impacto produzida na colisão de duas esferas usando modelo com amortecimento não-linear e para diferentes valores do coeficientes de restituição ( $v = 0,1m/s$ , $m_1 = m_2 = 1kg$ ). (a) Variação da força de impacto no tempo. (b) Relação força-deformação.	103
4.8	Lei de Hertz modificada para considerar deformações plásticas.	103
4.9	Força de impacto produzida na colisão de duas esferas usando modelo de Hertz com deformações elásticas e elásticas-plásticas ( $v = 0,1m/s$ , $m_1 = m_2 = 1kg$ ). (a) Variação da força de impacto no tempo. (b) Relação força-deformação.	104
4.10	Braço flexível de robô sujeito a impacto.	105
4.11	Sistemas de referências usados na modelagem do braço flexível de robô.	106
4.12	Forças de impacto no braço de robô.	107
4.13	Deflexão da ponta do braço robô no sistema de coordenadas relativas.	108
4.14	Velocidade da ponta do braço normal ao plano de impacto.	109
4.15	Deslocamento angular do eixo.	110
4.16	Trajatória descrita pela ponta do braço de robô.	111
4.17	Velocidade angular do eixo.	111
4.18	Redistribuição da energia em cada modo de vibração devido aos impactos do manipulador flexível.	112
5.1	Trajatória ótima de recontato da extremidade do manipulador (após um impacto).	115
5.2	Manipulador rígido de um elo com contato/impacto.	118
5.3	Sinal de controle ótimo adimensionalizado $u^*/(v_0 M/t_f)$ para uma trajetória de recontato ótimo.	122
5.4	(a) Trajetória ótima de recontato após um impacto (adimensionalizada) $z^*(t)/(v_0 t_f)$ . (b) Velocidade durante a fase de recontato após um impacto (adimensionalizada) $\dot{z}^*(t)/v_0$ .	123
5.5	Implementação do controlador de recontato.	123
5.6	Trajatória da extremidade de um manipulador antes e depois de um impacto em $t = 0,6$ s. Linha vermelha: Com controle de recontato. Linha azul: Com controle explícito de força proporcional. Linha verde: Trajetória de referência para o controle de de posição antes do impacto.	124
5.7	Detalhe da trajetória seguida pela extremidade do manipulador após experimentar um impacto.	125
5.8	Valores da força de contato/impacto experimentadas por um manipulador. Linha vermelha: Com controlador de recontato. Linha azul: Sem controlador de recontato.	126

5.9	Trajetórias ótimas de recontato para várias velocidades de perda de contato.	127
5.10	Controle de um manipulador flexível linearizado em relação ao movimento do manipulador rígido.	131
5.11	Estrutura do controlador de força com amortecimento ativo no elo flexível do manipulador.	141
5.12	Distribuição das pastilhas piezoelétricas ao longo da viga flexível. Azul: Viga. Vermelho: Atuadores. Verde: Sensores.	142
5.13	Localização dos pólos em malha aberta para a parte flexível do manipulador (sem amortecimento estrutural).	143
5.14	Localização dos pólos em malha aberta (azul) e malha fechada (vermelho) para a parte flexível do manipulador.	144
5.15	Trajetória da extremidade do manipulador antes do primeiro impacto em $t = 0,6$ s e depois deste. Linha vermelha: Controle explícito de força com amortecimento estrutural na viga (piezoelétricos). Linha azul: Controle explícito de força sem amortecimento estrutural. Parâmetros do controlador de força: $K_{pf} = 0$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 20$ N.	144
5.16	Detalhe da trajetória seguida pela extremidade do manipulador antes do primeiro impacto em $t = 0,6$ s e depois deste. Linha vermelha: Controle explícito de força com amortecimento estrutural na viga (piezoelétricos). Linha azul: Controle explícito de força sem amortecimento estrutural. Parâmetros do controlador de Fforça: $K_{pf} = 0$ , $K_v = 10$ , $f_e^d = 20$ N.	145
5.17	Valores da força de contato/impacto experimentadas pelo manipulador. Linha vermelha: Com amortecimento ativo. Linha azul: Sem amortecimento ativo.	146
5.18	Movimento do manipulador flexível durante a fase de transição de contato. Verde: Antes de começar o movimento ( $t = 0$ ). Vermelho: Posição final com $f_e = 20$ N.	146

## Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros usados na simulação do impacto de um manipulador robótico flexível.	106
4.2	Valores da força de impacto para o caso do impacto de manipulador robótico rígido.	108
4.3	Valores da força de impacto para o caso do impacto de um manipulador robótico flexível.	108
5.1	Principais parâmetros do manipulador do exemplo do controlador de força com amortecimento estrutural na viga (unidades no S.I.).	141
5.2	Parâmetros das pastilhas piezoelétricas usadas no exemplo do controlador de força com amortecimento estrutural na viga (unidades no S.I.).	141
5.3	Características do sistema flexível em malha aberta (sem amortecimento estrutural) e malha fechada (com amortecimento estrutural, sendo que o ganho do controlador foi determinado através do procedimento de otimização).	142