

1

Introdução

Muitas aplicações industriais e aeroespaciais envolvem sistemas mecânicos que durante suas operações estão sujeitos a impactos. Apenas para citar alguns exemplos podemos mencionar: mecanismos com folgas, máquinas de forja ou similares, impressoras, interruptores e conectores elétricos, e satélites sujeitos a impactos de pequenos escombros ou de acoplamento com outras estruturas espaciais [2][45][69][99][8][30][31]. Em particular, os manipuladores robóticos também podem estar sujeitos a impactos durante as suas operações. Exemplos são os manipuladores usados para capturar bolas num jogo de beisebol, jogar tênis, capturar um objeto estacionário de uma mesa, martelar um prego ou capturar escombros enquanto está acoplado a um veículo espacial [48][19][29]. No entanto, existe outro tipo de operação dos manipuladores robóticos que envolve impacto, que é importante e acontece freqüentemente em aplicações industriais, mas que a pesquisa sobre o tema tem sido amplamente ignorada por muitos anos pelos pesquisadores na área de robótica. Esta operação é a transição de um movimento livre a um movimento restringido, e será a motivação principal do presente trabalho. Para entender melhor este processo que origina impacto, a continuação será feita uma descrição detalhada do problema.

Existem basicamente dois modos de operação para os manipuladores robóticos: movimento no espaço livre e movimento restringido por um meio de trabalho. No primeiro modo de operação o objetivo é posicionar a extremidade livre do manipulador através de um Controlador de Posição [4]. Este modo de operação é utilizado para realizar tarefas como: pintura de superfícies, soldagens, transporte de objetos de uma posição a outra, etc. O segundo modo de operação é utilizado para a execução de tarefas mais complexas, entre elas: usinagem, polimentos e montagens [113][80]. Durante estas operações o manipulador tem que interagir com o meio de trabalho (i.e. a peça sendo usinada, a superfície a ser polida, as peças que estão sendo montadas). Neste modo de operação, a força de interação na região de contato tem que ser controlada tanto para evitar valores excessivos que

possam danificar os componentes mecânicos envolvidos, assim como manter um valor mínimo que garanta o contato. Este controle é realizado através de um Controlador de Força (também chamado de Controlador de Interação) [88].

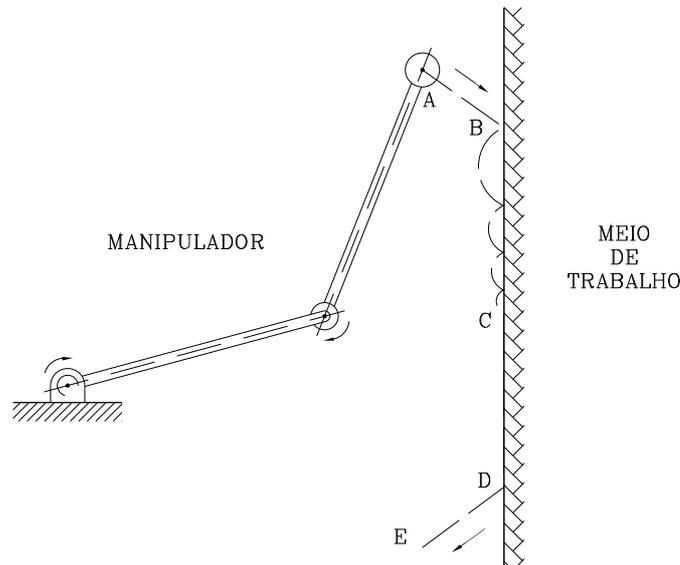


Figura 1.1: Manipulador robótico fazendo contato com uma superfície.

Obviamente o manipulador tem que cambiar de um modo de operação a outro rapidamente. Usualmente, o câmbio do modo de movimento restringido ao modo de movimento livre não apresenta problemas. Já o contrário, ou seja cambiar de um modo de movimento livre ao um modo de movimento restringido, tem o problema crítico das forças de impacto. Uma vez que o primeiro contato é detectado, o controlador de força é acionado e é então este controlador que tem que lidar com a transição do contato (i.e. do movimento livre ao movimento restringido) [76]. É importante enfatizar que os controladores de força são projetados sob a hipótese que o contato nunca é perdido mas esta hipótese é válida somente se a aproximação do manipulador com o meio de trabalho acontece com uma velocidade suficientemente pequena. Em geral, os controladores de força não estão preparados para lidar com impactos e por isso no passado os manipuladores robóticos têm sido controlados para se movimentar lentamente no modo livre e assim desta maneira evitar impactos (ou diminuir a intensidade desses ao máximo). Mas, com a crescente necessidade de alta velocidade na execução de tarefas dos manipuladores o impacto muitas vezes resulta inevitável [114]. Um fator que aumenta a possibilidade de impacto é a incerteza na posição do meio de trabalho pois na maioria das aplicações, temos um conhecimento limitado da dinâmica e localização da superfície de colisão [22]. Existe também

a possibilidade de haver obstáculos inesperados, os quais não podem ser preditos de antemão [127][75]. Nesses casos, o que acontece é que após o contato inicial, a elasticidade natural dos corpos impactantes provoca a perda do contato fazendo que o manipulador fique livre novamente e, em presença de controle de força, o comportamento resulta oscilatório e as vezes até instável [117] (fig. 1.1). Mesmo que o período de transição seja curto, os múltiplos impactos que acontecem são indesejáveis pois podem ocasionar dano tanto no manipulador como no meio de trabalho. Um exemplo das forças experimentadas por um manipulador robótico durante a fase de transição é apresentada na fig. 1.2. Pode se observar que no caso de acontecer um contato inicial com impacto a transição apresenta múltiplos impactos e múltiplas perdas de contato, o que não ocorre no caso de se ter um primeiro contato suave e sem impacto. Hoje em dia, o desenvolvimento de técnicas de controle específicas para manipuladores robóticos sujeitos a impacto durante a transição do contato está se tornando indispensável e representa uma área de pesquisa desafiante cujos resultados poderão afetar consideravelmente aplicações avançadas de robôs na indústria incrementando a eficiência e produtividade. Contudo, nos últimos anos, ainda poucas tentativas têm sido feitas para tornar aplicáveis as técnicas de controle neste problema que continua em aberto.

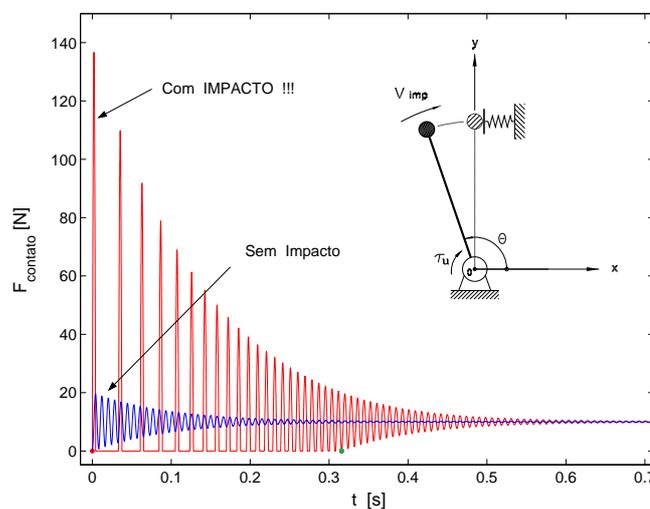


Figura 1.2: Exemplo de forças de impacto/contato experimentadas por um manipulador robótico durante a transição de contato.

Um fator que faz ainda mais complexo o fenômeno transiente de contato é a presença de elementos flexíveis nos manipuladores robóticos. As forças de impacto contêm altas componentes de frequência e podem excitar

facilmente os modos flexíveis da estrutura do manipulador provocando micro impactos entre outros fenômenos [123][107].

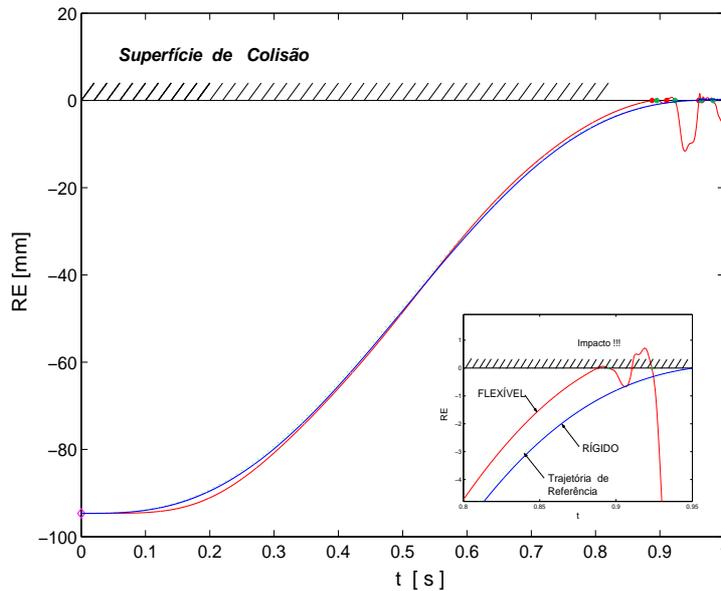


Figura 1.3: Impacto devido à dificuldade de posicionamento em manipuladores robóticos flexíveis.

Uma complicação adicional que os manipuladores flexíveis acarretam diante do problema de impacto é a dificuldade de posicionamento preciso. Mesmo que se conheça com exatidão a posição da superfície de colisão, um controle de posição que leve a extremidade do manipulador até ela com velocidade de aproximação quase nula é difícil de conseguir [9]. A fig. 1.3 apresenta um exemplo onde um controle de posição é aplicado tanto a um manipulador rígido como a um manipulador flexível. Como pode ver-se, é mais fácil para um manipulador rígido atingir a superfície de contato com velocidade quase nula do que para o manipulador flexível, principalmente devido a presença de oscilações e à ultrapassagem (sobrevalor) na resposta dinâmica deste último. O controle de impacto em manipuladores robóticos flexíveis é quase inexistente na literatura.

Em alguns casos, o grau de flexibilidade dos elementos pode ser desprezível e portanto os manipuladores podem ser considerados rígidos, mas em outras situações o grau de flexibilidade é alto e não pode ser ignorada. A fig. 1.4 apresenta três tipos de elementos flexíveis. A tendência atual de redução da inércia dos elos (ou braços) dos manipuladores robóticos, com a finalidade de diminuir a potência de acionamento e permitir movimentos mais rápidos, faz que os elos sejam fabricados tão esbeltos que a flexibilidade tenha que ser considerada, não sendo mais possível usar a hipótese de rigidez. Isto é mais comum nos manipuladores das aplicações espaciais (veja

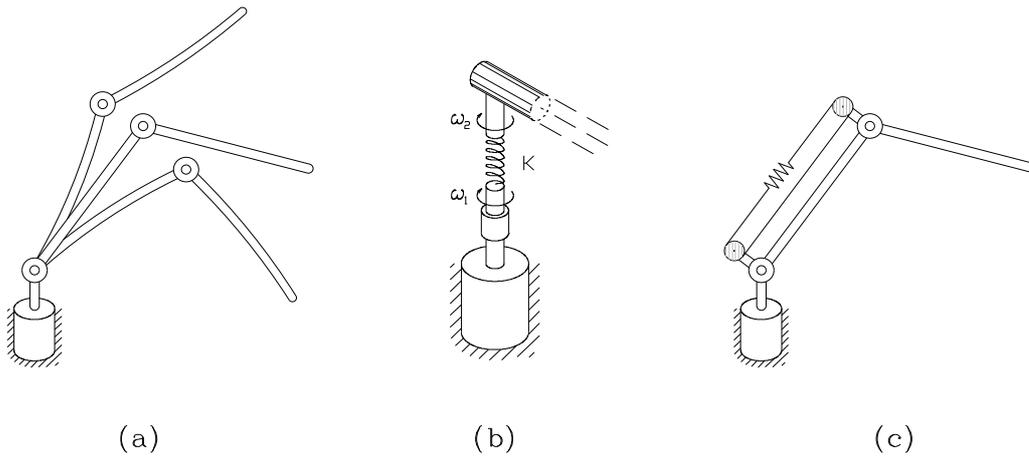


Figura 1.4: Elementos flexíveis em manipuladores robóticos. (a) Elos flexíveis. (b) Juntas flexíveis. (c) Outros elementos de transmissão flexíveis.

a fig. 1.4-a). Outros elementos flexíveis são encontrados nos mecanismos transmissão de torque. Para multiplicar o torque e aumentar a precisão dos movimentos, uma caixa de transmissão é incluída no sistema de acionamento dos manipuladores. Dependendo da sua construção, essas caixas introduzem pequenas ou grandes deformações elásticas. Isto é especialmente evidente em redutores de acionamento-harmônico já que a elasticidade é uma propriedade essencial para sua operação [53] (veja a fig. 1.4-b). Um outro tipo de elemento flexível aparece em sistemas nos quais, com a finalidade de reduzir os efeitos do peso dos motores de acionamento das juntas, os motores são localizados perto da base do robô ao invés de ficar nas próprias juntas. Logo, o motor localizado longe da junta tem que transmitir torque e movimento até a junta correspondente e isto é feito através de correntes ou faixas de transmissão que são elementos elásticos (veja a fig. 1.4-c).

O objetivo da presente do presente trabalho é estudar o fenômeno de impacto em manipuladores robóticos (rígidos e flexíveis) e projetar um controle que atuará durante o período de transição de contato (trajetória $B - C$ na fig. 1.1), ou seja durante a tentativa de contato do manipulador com o meio de trabalho, analisando as condições para a estabilidade e o bom desempenho do controlador. Para isto é necessário primeiro definir os objetivos que deverá atingir um controlador de impacto.

1.1 Objetivos de um Controlador de Impacto

A fig. 1.5 apresenta um diagrama típico do valor das forças experimentadas na extremidade de um manipulador que tenta fazer contato com o meio de trabalho. Considera-se o sistema sob controle de força a partir do primeiro contato que acontece (ponto ① na fig. 1.5).

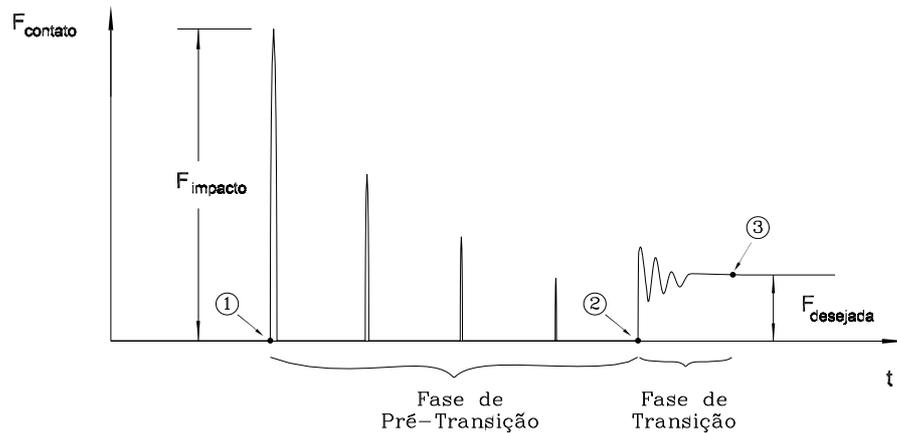


Figura 1.5: Fase de pré-transição e transição do contato.

Infelizmente, como pode-se observar da figura, um contato estável não é conseguido instantaneamente. O contato é perdido algumas vezes antes de que o contato com o valor da força desejada seja atingido. Baseados nesta na fig. 1.5, podemos dividir o processo em três fases: uma *fase de pré-transição* (região ① – ②), durante a qual o manipulador e o meio de trabalho experimentam forças de interação impulsivas, uma *fase de transição* (região ② – ③) durante a qual o valor da força de contato ainda não é mantida no valor desejado devido à dinâmica transiente do sistema de controle, e por último a *fase de contato* propriamente dita (região de ③ em diante), na qual o valor da força de contato é mantida no valor desejado. Dessas três fases, é a fase de pré-transição a que é comumente ignorada no projeto de controladores, mas é durante esta fase que, devido à grande magnitude das forças impulsivas, tanto o manipulador como o meio de trabalho podem resultar danificados. Na maioria das aplicações, a perda de contato depois do contato inicial é indesejada mas se houver, o ideal é manter a magnitude das forças de impacto abaixo de certo nível e também que a duração total da fase de pré-transição seja curta. Baseado nestas observações, pode-se estabelecer os objetivos que deverá atingir um controlador de impacto para manipuladores robóticos. Este são:

- Limitar o valor das forças impulsivas para evitar dano
- Evitar ao máximo as perdas de contato (descolamento)
- Minimizar que a duração do período pré-transiente
- Garantir a estabilidade do contato

Logicamente, devido à velocidade inicial de aproximação dos corpos impactantes e/ou ao desconhecimento da posição exata do meio com o qual o manipulador impactará, o primeiro impacto pode ser impossível de evitar mas o que se tentará é melhorar a qualidade do contato após o primeiro impacto.

1.2

Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentado o levantamento bibliográfico dos trabalhos encontrados na literatura técnica que estão relacionados ao tema da tese.

1.2.1

Controle de Força em Manipuladores Rígidos

Embora os manipuladores robóticos tenham sido estudados intensamente nas últimas duas décadas, este estudo tem sido focado principalmente ao Controle de Posição [53]. No entanto, a crescente demanda de execução de tarefas cada vez mais complexas - entre elas: usinagem, polimentos e montagens - criou a necessidade de controlar a força de interação entre a extremidade do manipulador e o meio com o qual esta deve fazer contato, i.e. um Controle de Força. Como consequência, a pesquisa na área incrementou-se de maneira que na literatura podemos encontrar trabalhos sobre Controle de Força com diversas abordagens.

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para controlar força é o Controle de Rigidez, o qual regula a força de interação indiretamente através de um controle baseado puramente em posição das juntas, i.e. sem medir a força de contato. Neste tipo de controle, o controlador atua nas juntas através de uma realimentação proporcional de posição de maneira a criar no robô uma rigidez aparente e com isto acomodar as forças de interação [119][28]. Este tipo de controle é mais adequado durante a execução de tarefas envolvendo movimentos lentos ou estáticos [4]. O conceito de Controle de Rigidez foi estendido por Hogan [44] no denominado Controle de Impedância. Este controle regula a “impedância mecânica” da

extremidade, ou seja, a relação dinâmica entre a posição da extremidade e as forças de interação que atuam sobre ela. Esta relação dinâmica é definida em termos de uma matriz de inércia, amortecimento e rigidez que devem ser especificadas pelo projetista [88]. Então, o controle da força é realizado implicitamente através de uma referência para a posição da extremidade e a impedância.

O maior problema do Controle de Rigidez e Controle de Impedância é a sensibilidade destes controladores a erros na posição e características mecânicas (por exemplo rigidez) do meio de trabalho [89]. Isto devido a que estes métodos não utilizam realimentação da força de contato para a avaliar o erro de controle. Por outro lado, as estratégias de Controle Explícito de Força utilizam medições da força de contato para avaliar o erro entre as forças medidas e as forças desejadas e, através de uma lei de controle escolhida (por exemplo P, PD, PI ou PID), os atuadores são comandados para diminuir este erro [110]. Tipicamente, as medições da força de interação são obtidas através de sensores de pulso, localizados pouco antes da extremidade do manipulador [28][88].

Uma outra estratégia de controle é o Controle Híbrido de Força/Posição que foi desenvolvida por Raibert e Craig [84] para manipuladores que têm que realizar tarefas envolvendo contato numa direção e movimento livre em outra. Esta abordagem está baseada na observação que quando um manipulador encontra-se em contato com o meio de trabalho, o espaço das coordenadas da extremidade do manipulador pode ser decomposto em um “sub-espaço de posição” e um “sub-espaço de força”; estes dois sub-espaços correspondem às direções nos quais a extremidade se encontra, livre para se movimentar e restringido pelo meio, respectivamente. Então o controlador aplica um controle de posição no sub-espaço de posição e de força no sub-espaço de força. Na formulação matemática original de Raibert e Craig [84] existia um erro em relação ao uso do Jacobiano inverso, mas esta formulação foi posteriormente modificada e corrigida por Fisher e Mujtaba [39].

Outras abordagens que encontramos na literatura são basicamente modificações das anteriores. Seraji e Colbaugh [89], usando técnicas de controle adaptativo, modificam o Controlador de Impedância para dotar este da capacidade de rastrear forças de referência e e assim proporcionar ao controlador robustez diante de incertezas do meio. No trabalho de Lu e Goldenberg [63] temos uma abordagem que usa a teoria de controle do Modo-Deslizante (Sliding-Mode) [94] para formular um controlador de impedância robusto. Xu, *et. al.* [120] usa uma lei de controle Proporcional-

Derivativa Não-Linear (NPD) em um controlador explícito de força para melhorar o desempenho do controlador e a rejeição de distúrbios externos. Siciliano e Villani [92] projetam um Controlador Híbrido de Força/Posição adaptativo para um manipulador com incertezas nos seus parâmetros onde o controle na direção restringida é feito através de uma lei de Controle Explícito de Força Proporcional-Integral-Derivativa (PID) e, através do método de Lyapunov, é demonstrado que a estabilidade do sistema, o acompanhamento de trajetórias na direção não restringida e a regulação de forças na direção restringida é garantida. Outras abordagens incluem o uso da Lógica Nebulosa [67], Algoritmos Genéticos [77] e Redes Neurais [55].

1.2.2

Controle de Posição em Manipuladores Flexíveis

Provavelmente o primeiro trabalho que abordou o problema do Controle Posição em manipuladores robóticos com elos flexíveis foi o de Cannon e Schmitz [13]. Neste trabalho, considerando somente um elo flexível, foi projetado um controlador Linear Quadrático Gaussiano (LQG) para o controle da posição da extremidade onde, além de medições de deslocamento e velocidade angular da junta rotativa e um motor atuador na junta (como no caso do controle de manipuladores rígidos) foi usado um sensor ótico para a medir diretamente a posição da extremidade. O objetivo foi executar movimentos do robô tão rápidos como possível sem vibrações residuais na viga. Nos resultados obtidos foi observado um movimento inicial da extremidade em sentido oposto à rotação do eixo de acionamento o que é característica de sistemas não-colocados, os quais, matematicamente resultam em sistemas de fase não-mínima [105].

Desde então, muitos pesquisadores tem abordado o problema de controle de posição da extremidade de manipuladores flexíveis usando diferentes estratégias de controle e sensores. Li *et.al.* [59][61][62], apresentam uma metodologia de controle onde a posição da extremidade é obtida através de medições de aceleração da extremidade e um observador de estado. Esta abordagem tem a vantagem de evitar o uso de sensores óticos de posição os quais requerem de alto custo computacional para processar informação visual em tempo real. Em Luo *et.al.* [64][65][66], também para o caso de um manipulador de um elo flexível, considerou-se o uso de sensores de deformação na viga para obter informação dos modos flexíveis e mostrou-se que a realimentação direta destas deformações pode controlar a vibração residual satisfatoriamente. Soares *et.al.* [95] usaram medições de deformação

e a teoria de controle LQG/LTR [105] para projetar um controlador de vibração em um sistema formado por vigas flexíveis rotativas. Ge *et.al.* [40], usando o Método Direto de Lyapunov [94], projetaram um controlador baseado nas medições de deformação o qual mostrou uma melhora significativa no desempenho quando foi comparado a um controlador simples Proporcional-Derivativo (PD) da junta [33]. Usando também sensores de deformação na viga, Tso *et.al.* [103] projetaram um controlador do tipo de Lyapunov para a posição da extremidade, onde foi usado um modelo não-linear e acoplado para um manipulador flexível de um elo. Rossi *et.al.* [86] encontraram uma função de transferência passiva para o manipulador de um elo flexível e esta foi usada para projetar um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) que proporciona excelentes resultados. Um controlador baseado em Lógica Nebulosa foi projetado para um elo flexível no artigo de Kubica e Wang [54]. Uma outra estratégia encontrada na literatura, mas ainda pouco explorada, é o uso de realimentação direta da aceleração da extremidade do manipulador. No artigo de Tiemin *et.al.* [102] é feito um estudo comparativo experimental entre duas estratégias: a realimentação de deformação da viga e a realimentação direta da aceleração da extremidade, sendo que ambas as estratégias apresentaram um desempenho satisfatório. Aoustin *et.al.* [1], também para o caso de um manipulador de um elo flexível, usando medições de deformação na viga, fizeram uma comparação experimental entre cinco estratégias de controle: Proporcional-Derivativo (PD), Regulador Linear Quadrático (LQR), Linearização via Realimentação, Perturbações Singulares e a técnica de controle robusto do Modo-Deslizante [94].

Todas as estratégias acima mencionadas estão baseadas em realimentação. Uma estratégia de controle que não utiliza como base a realimentação é chamada de controle por alimentação direta. A Dinâmica Inversa [88] provê uma metodologia para a determinação de controladores por alimentação direta. Através desta técnica são determinadas as forças de controle que levam a extremidade do manipulador por uma trajetória específica desejada. Para isto, resolve-se a equação de movimento do sistema considerando como incógnita as forças de controle e como variáveis conhecidas a posição da extremidade, num certo intervalo de tempo. Para o caso de um manipulador rígido a solução da Dinâmica Inversa é simples, fácil de implementar e os resultados obtidos muito bons. Mas, no caso de um manipulador flexível, a solução da equação de movimento para as forças de controle é complexa e envolve termos não-causais o que limita a sua aplicação a manipuladores simples [9][6][32]. O artigo de DeLuca [34] apre-

senta uma comparação entre estratégias de controle por realimentação e por alimentação direta.

Controladores de posição para manipuladores flexíveis de mais de um elo também foram projetados. Yigit e Usloy [122] fazem uma comparação entre estratégias de controle para um manipulador robótico de dois elos rígido-flexível enfatizando a importância de usar modelos dinâmicos sem desprezar o acoplamento entre o movimento rígido e a vibração devida à parte flexível. No artigo de Choura e Yigit [26] é considerado o problema de controlar um manipulador de dois elos rígido-flexível com uma massa móvel na extremidade, usando realimentação da junta Proporcional-Derivativa. Esta metodologia garante estabilidade, mas o desempenho não é muito satisfatório. Shin e Choi [87] utilizam pastilhas piezoelétricas como sensores e também como atuadores, distribuídas ao longo da parte flexível de um manipulador de dois elos rígido-flexível. O projeto do controlador de posição é feito através da técnica de controle robusto Sliding-Mode e os resultados obtidos mostram um excelente desempenho do controlador. Em Zhan *et.al.* [126], foi projetado um controlador de vibração usando a técnica de controle robusto \mathcal{H}_∞ e pastilhas piezoelétricas como sensores e atuadores.

O problema de controle de posição de manipuladores com juntas flexíveis também tem sido abordado na literatura. Um dos artigos clássicos é o do Spong [96] onde, considerando manipuladores com uma ou mais juntas flexíveis, são projetados controladores através de duas estratégias: Linearização via Realimentação e controle não-linear baseado em Perturbações Singulares. No trabalho de Tahboub [100] é apresentada uma estratégia que usa um observador Proporcional-Integral (PI) para estimar e compensar efeitos não lineares. Ider e Özgören [46], usam a metodologia da Dinâmica Inversa e Subudhi e Morris [98], usando o método das Perturbações Singulares projetam um controlador de posição para um manipulador com juntas e elos flexíveis.

1.2.3

Controle de Força em Manipuladores Flexíveis

A área de controle de força em manipuladores flexíveis não está tão estabelecida como a de controle de posição em manipuladores flexíveis ou a de controle de força em manipuladores rígidos. No entanto, existem já alguns bons artigos na área. No trabalho de Chiou e Shahinpoor [20][21] é pesquisado a influência da flexibilidade na estabilidade. Considerou-se um manipulador com um elo flexível e um sensor de força montado na

extremidade e não foram consideradas medições de deformação na viga. Foi usado um controlador de força do tipo Proporcional-Derivativo e mostrou-se através de simulações e experiências que aumentar o ganho proporcional do controlador ou aumentar a rigidez da meio de contato conduz a um ciclo limite e logo instabilidade. Foi concluído que o retardo existente entre a atuação nas juntas e as mudanças no valor da força de contato na extremidade causa problemas. Ferreti *et al.* [38], usando um modelo simplificado para um manipulador flexível, provam que no caso de usar um controlador com ação integral, a estabilidade pode aumentar com o aumento da rigidez da superfície de contato. No trabalho de Choi e Krishnamurthy [23] é derivado um conjunto de equações lineares e variantes no tempo para um robô flexível restringido pelo seu meio de trabalho e usando este modelo é projetado um controlador de força através da metodologia LQG/LTR. Esta abordagem requer que a posição do objeto de contato seja conhecida de antemão. No trabalho de Borowiec e Tzes [10] é considerado uma abordagem similar através de um controlador de realimentação LQR e um controlador de alimentação direta para um manipulador com dois elos rígido e flexível. Uma compensação no domínio da frequência é utilizada para evitar efeitos indesejáveis associados com o derramamento de modos (Spillover) de controle e observação [105]. Matsuno e Kasai [72], usando o modelo de um manipulador com um elo flexível projetam um controlador de força \mathcal{H}_∞ para dar ao controlador a propriedade de filtro passa-baixa e assim compensar efeitos de instabilidade do Spillover. Uma outra abordagem é apresentada no trabalho de Choi *et. al.* [25] onde o modelo e o controlador para um manipulador de dois elos flexíveis e restringido é derivado através do princípio de Hamilton. Siciliano e Villani [93] apresentam um algoritmo para derivar as deformações dos elos flexíveis e deslocamentos juntas para uma dada posição da extremidade de um manipulador flexível em contato. Este algoritmo é chamado no artigo de “cinemática inversa em malha fechada”. As variáveis computadas são usadas para fazer uma realimentação simples Proporcional-Derivativa dos deslocamentos das juntas. Choi e Lee [24], e posteriormente em um trabalho similar Yin e Singh [125], projetam um controlador robusto para o controle de força em uma garra robótica flexível que é modelada como viga flexível engastada. Para isto usam uma teoria de controle robusto Sliding-Mode e um piezoelétrico atuador ao longo da viga. Os resultados obtidos para o desempenho e a robustez do sistema de controle são muito bons.

1.2.4 Modelagem de Contato e Impacto

A modelagem de contato e impacto é um aspecto importante para a simulação dinâmica de manipuladores robóticos que executam tarefas envolvendo interação com seu meio de trabalho. O impacto refere-se ao fenômeno físico que acontece quando um corpo colide com outro, tendo como características: uma duração muito curta atingindo altos níveis de forças de interação, troca e dissipação rápida de energia e, grandes acelerações e desacelerações dos corpos envolvidos. A palavra contato é mais ambígua ou mais geral e na literatura é freqüentemente trocada com impacto, mas é mais adequada para descrever situações onde dois corpos se tocam em presença de forças de interação limitadas.

Revisando a literatura, encontramos duas abordagens diferentes usadas para modelar impacto/contato. A primeira abordagem supõe que interação entre os corpos acontece em um período de tempo tão curto que pode ser considerado como um evento instantâneo e que a configuração dos corpos impactantes justo antes e depois deste evento é a mesma [11]. Para modelar o impacto são usadas as equações de balanço da quantidade de movimento em combinação com coeficientes de restituição [14][15][16][17]. Na literatura, esta abordagem é referenciada como o Método do Balanço de Momentum e devido à hipótese do impacto instantâneo resulta em uma formulação matemática simples com uma solução numérica computacionalmente eficiente. Em Pfeiffer e Glocker [82] encontramos diversas aplicações deste método a sistemas de multi-corpos. No trabalho de Brogliato *et. al.* [12] é usado para a modelagem de impacto em sistemas mecânicos discretos e, em Wee e Walker [115], para modelar impacto em manipuladores robóticos com elementos rígidos.

O Método do Balanço de Momentum, embora tenha sido desenvolvido basicamente para sistemas de corpos rígidos, também tem sido aplicado em sistemas de corpos flexíveis. Em Yigit *et. al.* [123][124] o Método do Balanço de Momentum é utilizado para estudar a dinâmica de uma viga rotativa sujeita a impacto. Em Margaritu e Diaconescu [70], o método é utilizado para modelar impactos repetitivos em um sistema flexível com rotação contínua. Em Cyril *et. al.* [30][31] foi usado para modelar os impactos que acontecem durante o acoplamento de dois satélites flexíveis, e em Izumi e Zhou [48] para modelar impacto de um robô-martelo cujo braço é flexível. No trabalho de Escalona *et. al.* [37], é feito um estudo crítico do uso do Método do Balanço de Momentum em sistemas de multicorpos flexíveis, chegando à conclusão que o número de modos elásticos utilizados para descrever

a flexibilidade e o intervalo de tempo de integração são dois fatores que essencialmente influenciam a simulação dinâmica do processo de impacto.

A segunda abordagem para modelagem de impacto é baseada no fato que as forças de interação atuam de maneira contínua durante o impacto. Logo, estas forças podem ser determinadas através de algum modelo de contato (modelos de Kelvin-Voight, de Hertz, etc) [85][49], e adicionadas às equações de movimento durante os períodos em que estas atuam. Esta abordagem, a qual será referenciada neste trabalho como o Método do Elemento de Contato, permite uma descrição mais realista do comportamento de um sistema embora computacionalmente seja um pouco mais pesada comparada ao Método do Balanço de Momentum pois é preciso integrar a equação de movimento muitas vezes durante o período de contato. Em compensação, através desta abordagem é possível determinar a magnitude das forças de contato/impacto o que não é possível com a primeira abordagem [107]. Além disso, quando tem que se modelar a fase do pré-transiente e transiente de contato em manipuladores robóticos (ver fig. 1.5), onde podem acontecer impactos ou um contato num tempo relativamente longo, esta abordagem é a mais adequada de ser utilizada. Nos trabalhos de Lankarani e Nikravesh [57] e, Marhefka e Orin [71], são desenvolvidos modelos para a força de contato e impacto considerando dissipação de energia através de um amortecimento não-linear. Thornton [101] deduz uma expressão para o coeficiente de restituição para a colisão de duas esferas com choque central, utilizando um modelo de contato com deformações plásticas. Christoforou e Yigit [27], usando modelos de contato contínuos com dissipação de energia, estudam o efeito da flexibilidade durante o impacto de uma placa ortotrópica e uma esfera.

1.2.5 Controle de Impacto em Manipuladores

O problema do controle de impacto durante a fase de pré-transição de contato em manipuladores robóticos tem sido ignorado por muitos anos. A atenção que este problema tem recebido por parte dos pesquisadores é muito pouca em comparação ao Controle de Força. No entanto, com a demanda de execução de tarefas cada vez mais rápidas sem deteriorar a qualidade dos produtos, espera-se que a tendência a desenvolver técnicas específicas para controlar impactos cresça. Hoje em dia, a área de Controle de Impacto (ou Controle da Transição) em manipuladores robóticos ainda representa um problema em aberto.

Na literatura, têm sido propostas algumas técnicas de controle para diminuir os efeitos do impacto em manipuladores robóticos, cada uma das técnicas tem vantagens e desvantagens. Algumas destas são técnicas de controle passivo. Uma delas consiste em diminuir a rigidez do contato através do uso de materiais moles (seja na extremidade do manipulador ou no meio de trabalho) [117]. Esta técnica baseia-se no fato que o desempenho durante o impacto pode ser melhorado através de dois mecanismos: uma menor rigidez de contato pode reduzir a severidade do impacto (e com isso a magnitude das forças impulsivas) e, com um amortecimento maior a energia do impacto pode ser dissipada muito mais rapidamente [68][90]. No entanto, nas aplicações industriais um controle deste tipo pode ser inaceitável, como por exemplo no caso de operações de usinagem onde o contato metal-metal é inevitável [80]. Outra abordagem é amortecer a junta de acionamento do manipulador. O amortecimento na junta pode ser implementado de maneira ativa ou passiva [78]. Quando implementado de forma ativa, existe o problema da obtenção da velocidade da junta através de sensores de deslocamento angular (encoders), por exemplo, no caso de manipuladores rígidos fazendo contato com superfícies muito rígidas, os deslocamentos angulares detetados durante o contato são quase imperceptíveis através dos sensores, mesmo tendo estes alta resolução. Isto limita o grau de amortecimento que pode se obter ativamente. Através de amortecimento passivo nas juntas pode-se evitar os problemas que carrega o amortecimento ativo [79] mas, para isto precisa-se da construção física de um mecanismo de amortecimento passivo, o que pode resultar um impedimento em algumas aplicações. No trabalho de Volpe e Khosla [111], através de uma equivalência entre o controle de força explícito proporcional com alimentação direta e o controle de impedância, mostrou-se que em manipuladores rígidos com controle explícito de força proporcional, um ganho perto de -1 pode resultar em um valor ótimo para a fase de pré-transição do contato, aumentando o amortecimento no sistema e desta maneira evitando as perdas de contato e também limitando as forças máximas durante o contato. No, entanto, este tipo de controle implica que o manipulador deverá exercer forças iguais e opostas às forças de contato as quais podem ser grandes durante a fase de pré-transição. Logo, a saturação dos atuadores das juntas poder ser um problema. No trabalho de Li [60], considera-se o uso da realimentação da velocidade da extremidade do manipulador (obtida através da integração do sinal de um acelerômetro) para amortecer os pólos do sistema e assim conseguir amortecer a resposta ao impacto. No trabalho de Xu *et. al.* [121] é utilizado o sinal de aceleração diretamente na malha de realimentação

para dotar de robustez ao controlador de força durante a transição do contato com meios de diferentes materiais. Uma estratégia interessante é apresentada no trabalho de Gertz *et. al.* [41] para o caso de manipuladores rígidos redundantes, onde a idéia é determinar a melhor configuração do manipulador para minimizar a severidade do impacto. Weng e Young [118] projetam um controlador de impacto baseado em Lógica Nebulosa, usando regras empíricas sendo que os resultados obtidos não foram muito satisfatórios.

1.3

Organização do Trabalho

Este trabalho começou com uma introdução sobre o problema que os impactos representam durante a transição de contato em manipuladores robóticos, descrevendo também a complicação adicional que representa a flexibilidade estrutural. Foram definidos os objetivos que um controlador de impacto deve atingir e foi apresentado o levantamento bibliográfico da literatura que está relacionada ao tema da tese. No capítulo 2, utilizando modelos simplificados para manipuladores rígidos e flexíveis, é feita uma análise teórica do desempenho e da estabilidade dos controladores de força convencionais operando na fase de pré-transição. Na literatura não existe uma análise deste tipo e o autor percebeu a necessidade de um melhor entendimento da dinâmica da transição sob controladores de força já que na prática são estes os controladores que tem que lidar com o fenômeno transiente. Assim, entendendo melhor os fatores que influenciam o processo, poderemos ser capazes de especificar melhor os valores dos parâmetros de projeto do controlador de força que melhoram o desempenho deste durante o período que envolve impactos e perdas de contato. No capítulo 3, é desenvolvida a modelagem dinâmica de um manipulador de dois elos rígido-flexível com pastilhas piezoelétricas coladas ao longo da parte flexível. Este modelo será usado para testar os novos controladores desenvolvidos na presente tese. Para obter as equações de movimento do sistema foram usadas as equações de Lagrange junto com o Método dos Modos Supostos. As pastilhas piezoelétricas foram incluídas para serem posteriormente utilizadas como elementos atuadores e sensores dentro dos sistemas de controle. O capítulo 4 revisa os modelos de impacto e estende alguns resultados da literatura. Como um exemplo de aplicação é considerado o impacto do manipulador robótico flexível já modelado no capítulo anterior. No capítulo 5 são propostos e desenvolvidos três novos tipos de controladores de impacto

para a fase de pré-transição do contato. A idéia do primeiro controlador é a identificação on-line da posição do meio de trabalho após o primeiro impacto, a qual será usada para projetar uma nova trajetória que permita atingir a superfície do meio com velocidade mínima evitando assim os próximos impactos. O projeto deste controlador é feito usando a teoria de controle ótimo. O segundo controlador usa a idéia da linearização do movimento do manipulador flexível em torno ao movimento de um manipulador rígido. Esta linearização é usada para projetar um controlador de posição de alta precisão evitando ou diminuindo assim a severidade do impacto inicial. O terceiro controlador usa a idéia do controle estrutural através das pastilhas piezoelétricas coladas ao longo da parte flexível do manipulador. O projeto deste controlador é otimizado através de um algoritmo de programação não-linear e a estabilidade em presença de dinâmica residual é garantida. Finalmente, no capítulo 6, são discutidas as principais conclusões da tese.