6

Conclusões

O presente trabalho abordou o problema de controle de impacto durante o período de transição de contato de manipuladores robóticos. A literatura sobre o tema é escassa e somente nos últimos anos a pesquisa na área começa a aparecer diante da necessidade crescente de execução de tarefas cada vez mais rápidas e mais eficientes. No capítulo 2, foi analisado através de modelos simplificados de manipuladores robóticos a estabilidade e o desempenho dos controladores de força durante o processo da transição. A análise linear da estabilidade revelou, no caso do manipulador rígido, um limite inferior para o ganho proporcional do controlador de força que assegura a estabilidade. No caso do manipulador flexível, além do limite inferior foi encontrado um limite superior para o ganho proporcional do controlador de força, pela primeira vez em forma analítica. A relação obtida está em concordância com as observações numéricas e experimentais reportadas na literatura. Segundo esta relação, a flexibilidade no manipulador pode causar instabilidade quando o contato é feito com um meio de trabalho muito mais rígido do que a estrutura do manipulador. Também foi realizada uma análise de estabilidade não-linear, considerando as perdas de contato na equação de movimento. Neste caso, a equação de movimento resultante é um sistema linear por partes e devido a isto a estabilidade dinâmica teve que ser analisada usando ferramentas como a teoria de Estabilidade de Lyapunov e o teorema de LaSalle. O limite de estabilidade encontrado foi o mesmo o obtido na análise linear. Logo, concluiu-se que as perdas de contato, mesmo que podem deteriorar o desempenho na fase pré-transiente, não podem originar instabilidade. Posteriormente, também usando os modelos simplificados, foi estudado o desempenho dos controladores de força quando o contato inicial acontece com impacto. Uma análise adimensional mostrou que o amortecimento do sistema joga um papel fundamental no desempenho durante a fase crítica. Quanto maior a velocidade de impacto e maior a rigidez do contato é necessário amortecer mais o sistema. Uma condição adimensional para perda de contato também foi deduzida,

a qual é nova na literatura e foi utilizada para inferir a influência de cada parâmetro do sistema de controle no desempenho. No caso de manipuladores flexíveis foi demonstrado que o amortecimento da junta somente não é capaz de amortecer todos os modos do sistema e portanto deduzimos que um amortecimento da parte flexível também é necessária. No capítulo 3, com a finalidade de ter um modelo mais completo para testar os controladores de impacto que foram desenvolvidos neste trabalho, foi deduzida a equação de movimento de um manipulador robótico incluindo flexibilidade no elo e pastilhas piezoelétricas coladas ao longo da parte flexível. O modelo foi obtido usando as equações de Lagrange, o Método dos Modos Supostos e equações constitutivas para materiais piezoelétricos. No capítulo 4 os modelos de contato/impacto foram revisados, incluindo o Método de Balanço de Momentum e o Método do Elemento de Contato. Além de ilustrar com exemplos alguns destas abordagens, os resultados da literatura foram estendidos, através de uma combinação das equações do Método de Balanço de Momentum e o Método do Elemento de Contato. Isto permitiu obter uma expressão analítica para o perfil da força de contato durante o impacto de sistemas multicorpos em geral, a qual pode ser obtida sem simulação a partir de valores da velocidade de impacto, rigidez de contato e a massa efetiva de impacto. O resultado foi validado através de um exemplo onde considera-se o impacto de um manipulador robótico de dois elos impactando contra uma parede. Uma simulação numérica mostrou que as expressões deduzidas proporcionam uma excelente estimativa do perfil da força de contato. Foi discutido o uso potencial desta expressão para a identificação em tempo real da rigidez do contato. No capítulo 5, considera-se o projeto de três novos tipos de controladores de impacto, os quais foram criados inspirados pelos resultados da análise do capítulo 2. O primeiro controlador é projetado especificamente para controlar manipuladores rígidos que impactam devido a incertezas na posição da superfície de colisão ou a obstáculos inesperados. Baseia-se na seguinte idéia: detetar o instante em que acontece o primeiro impacto identificando a posição da superfície de colisão. Uma vez que o manipulador encontra-se livre após o impacto, a trajetória que o manipulador deverá seguir é reformulada para que possa atingir novamente a superfície de contato (cuja posição foi identificada no passo prévio) mas com uma velocidade mínima, evitando assim os próximos impactos. O projeto deste controlador é feito usando a teoria geral de controle ótimo. Este controlador, o qual foi chamado Controlador de Recontato, foi testado em um manipulador rígido, e os resultados obtidos mostraram claramente um melhor desempenho durante a fase crítica quando compa-

rado a um controlador de força convencional. O segundo controlador foi projetado especificamente para evitar impactos em manipuladores flexíveis quando a posição da superfície de colisão é conhecida com precisão. Este usa a idéia da linearização do movimento do manipulador flexível ao redor do movimento do manipulador considerado como 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, é projetado especificamente para lidar com a fase pré-transiente de contato em manipuladores flexíveis, quando o contato inicial acontece com impacto. Através deste controlador, os modos de vibração do manipulador são amortecidos ativamente usando as pastilhas piezoelétricas (atuadores e sensores) coladas ao longo da parte flexível. Desta maneira, a resposta pré-transiente de contato é melhorada. O fundamento para isto está na análise da seção 2.5, onde foi mostrado que amortecimento do sistema joga um papel importante na fase de pré-transição do contato, mas que infelizmente, no caso de manipuladores flexíveis, o amortecimento da junta não é suficiente para aumentar o amortecimento do sistema, sendo necessário amortecer o elemento flexível também. Devido aos problemas associados com o fenômeno de derramamento de modos (Spillover) que pode acontecer em estruturas flexíveis pela excitação dos modos residuais, foi optado por um controle do tipo estrutural para assim proporcionar ao controlador robustez na estabilidade. Os parâmetros deste controlador foram otimizados através de um algoritmo de programação não-linear. O controlador projetado foi testado no manipulador flexível do capítulo 3, sendo que os resultados obtidos demonstraram a eficácia do controlador durante o período de transição.