

## 8

### Conclusões e Sugestões

Neste Capítulo são discutidos o desempenho do robô virtual e dos controladores projetados, bem como o desempenho do dispositivo háptico construído para a manipulação do elemento terminal do robô. São sugeridos, também, trabalhos futuros.

#### 8.1

##### Conclusões do Trabalho

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema háptico de 5 graus de liberdade, capaz de prover a um teleoperador as sensações de força e torque sofridas por um sistema escravo controlado. O sistema foi implementado a partir da conexão de 2 interfaces hápticas comerciais de 3 graus de liberdade "Novint Falcon", que possuem baixo custo e uma resolução e frequência suficientes para as tarefas propostas. O sistema foi modelado cinemática e estaticamente, e um controle de compensação de gravidade foi implementado para evitar que efeitos gravitacionais interferissem nas sensações de força pelo usuário.

Seu desempenho foi testado em ambientes gráficos tridimensionais especialmente desenvolvidos para essa Dissertação, utilizando bibliotecas de programação dentro do ambiente CHAI3D. No primeiro ambiente implementado, foram criados uma caixa virtual contendo um orifício central e uma esfera para fazer o papel de avatar. O objetivo do experimento foi testar a eficiência de um teleoperador em comandar a esfera para inseri-la e atravessa-la pelo orifício, que possui folgas muito pequenas e visualmente imperceptíveis, utilizando a interface com a realimentação de força ligada ou desligada. Testes com 5 usuários comprovaram que a realimentação de força permitiu uma diminuição significativa nas magnitudes das forças de colisões entre a esfera e o orifício, além de diminuir o tempo de execução da tarefa. A sensação de toque transmitiu informação rica e detalhada sobre o objeto com o qual o usuário interagiu. Quando combinada com outros sentidos, especialmente a visão, o torque aumentou dramaticamente a quantidade de informação enviada ao cérebro para processamento. O aumento na informação reduz erros do usuário, como foi

observado, permite a redução do tempo de execução.

Um ambiente virtual mais elaborado também foi desenvolvido, implementando a modelagem e controle de um manipulador virtual. O manipulador virtual utilizado na teleoperação foi o Schilling Titan IV, cujos modelos cinemáticos e dinâmicos foram obtidos e apresentados em detalhe. O controle local do manipulador virtual foi implementado utilizando técnicas PD, de Torque Computado, e por Modos Deslizantes baseado no erro mínimo. Simulações demonstraram que as 2 últimas técnicas, por serem não lineares, resultaram em menores erros de posicionamento e seguimento de trajetórias.

O ambiente virtual inclui também diversos objetos para treinamento de teleoperação, e em tese pode comportar qualquer outro manipulador, desde que seu modelo seja introduzido no software desenvolvido. Este ambiente de simulação pode vir a ter um papel importante no planejamento e execução de operações reais de robótica, além de poder ser utilizado em treinamento e planejamento de tarefas teleoperadas em ambientes inóspitos.

## 8.2

### Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma fonte de erro na realimentação de força do sistema desenvolvido vem da limitação da biblioteca CHAI3D, que permite enviar os comandos de força apenas de forma indireta aos atuadores do Falcon. Seria mais eficiente comanda-los de forma direta, evitando assim eventuais erros de calibragem na cinemática do Falcon. Recentemente, a empresa Novint Technology liberou uma biblioteca chamada HDAL, que permite controlar diretamente os atuadores, abrindo totalmente o acesso ao hardware interno do dispositivo. Trabalhos futuros poderiam migrar as rotinas desenvolvidas em CHAI3D para HDAL, melhorando a precisão das forças de feedback.

Para melhorar o software do ambiente virtual desenvolvido, poderiam também ser incluídos outros algoritmos de colisões, outros algoritmos para controladores de força, e principalmente a otimização do código para permitir uma maior modularização das rotinas.

Os problemas tecnológicos de atrasos de comunicações entre mestre e escravo foram estudados para os possíveis esquemas de controle bilateral, através do ambiente virtual simulado. No entanto, a migração do sistema desenvolvido para um ambiente real iria requerer um maior estudo destes efeitos, incluindo perturbações ou atrasos não modelados.

Neste trabalho não se utilizou um controle de impedância para o dispositivo háptico construído. Seria recomendável implementar estes tipos de controladores para obter um melhor desempenho na teleoperação e em espe-

cial melhorar a relação de inércias mestre-escravo.

Finalmente, notou-se que a rigidez da estrutura dos Falcon não era alta o suficiente para não interferir na sensação de força do usuário. O uso de outros dispositivos mais rígidos - mas também de custo mais elevado - como o PhantomOmni seria uma sugestão para futuras implementações.