

6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1.

Conclusões

Neste trabalho estudou-se um sistema de acompanhamento de alvos do tipo “pan-tilt” atuado por motores de corrente contínua e fixo em um corpo em movimento. Para tal montou-se uma bancada de testes no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC, descrita no Capítulo 5, e, paralelamente, implementou-se um programa de simulação em Matlab[®], descrito nos capítulos 2 e 3. O programa teve por finalidade permitir a análise de situações de difícil reprodução em um ambiente de laboratório e a simulação de sistemas que fazem uso de sensores de alto custo, não disponíveis para a bancada de testes. A modelagem foi feita no domínio do tempo, permitindo a utilização de equações bastante complexas para representar o sistema, o que não é possível quando se faz uma modelagem no domínio da frequência.

No modelo apresentado, as equações de movimento foram mantidas na sua forma não-linear. Apesar de se assumir a hipótese de que o sistema é composto por corpos rígidos, flexibilidades e amortecimentos estruturais devido aos redutores de velocidades foram incluídos no modelo. Além disso, considerou-se também folgas nos redutores, atritos seco e viscoso, limites de saturação para as correntes e tensões nas armaduras dos motores. Um método para a inclusão dos atrasos de tempo para atualização dos sinais de controle e dados obtidos pelos sensores (principalmente o sensor de visão) durante a integração numérica das equações de movimento foi apresentado. Erros aleatórios nos sensores também foram incluídos no programa de simulação. No caso dos sensores de posição angular o programa permite escolher entre sensores que possuem erros aleatórios, como potenciômetros, ou erros determinísticos, como encoders óticos. Foi apresentado um método para a modelagem dos erros determinísticos dos encoders óticos.

Os movimentos do alvo e do corpo no qual o sistema de acompanhamento de alvos é montado, chamado de corpo 0, foram considerados prescritos, devendo ser definidos pelo usuário do programa antes do início da simulação. Nas simulações apresentadas neste trabalho foram escolhidas quatro situações diferentes de movimento para o alvo e o corpo 0. Na primeira considerou-se o corpo 0 e o alvo fixo. Na segunda o corpo 0 fixo e o alvo movendo-se à sua frente com movimentos circulares. Na terceira considerou-se o alvo fixo e o corpo 0 movendo-se como se fosse um veículo trafegando numa pista com ondulações. Na quarta considerou-se o alvo e o corpo 0 movendo-se, como se fossem um míssil (corpo 0) perseguindo um avião em manobra circular (alvo).

No Capítulo 3 foram descritos os controladores utilizados. Optou-se por controles que independem do modelo matemático do sistema, evitando, assim, uma reprogramação do algoritmo de controle contido no programa toda vez que um sistema diferente é simulado. Além disso, utilizou-se um controlador para cada atuador. Três tipos diferentes de arquitetura de controle foram propostas. A complexidade delas aumenta a medida que mais sensores estão disponíveis no sistema.

O tipo mais simples, chamada de arquitetura de controle do tipo 1, é utilizada quando se possui apenas o sensor de visão. Neste caso, a realimentação para as malhas de controle é feita apenas pelo sensor de visão e as variáveis de realimentação são os erros angulares de azimute e elevação. Também conhecido como controle servo-visual direto, esta é a configuração mais simples para o sistema. Sua maior desvantagem é que as tensões de controle são atualizadas somente após a obtenção dos referidos erros angulares, um processo realizado em frequências relativamente baixas, devido ao processamento de imagem requerido. O maior tempo para a atualização dos sinais de controle torna o controlador menos eficiente. Estes sinais são obtidos por meio de controladores PID (proporcional-Integral-Derivativo), PI (proporcional-integral) ou P (proporcional). Como não se utiliza o modelo do sistema nos controladores, os ganhos foram obtidos pelo método experimental da resposta em frequência desenvolvido por Ziegler-Nichols.

Quando o sistema também possui sensores para medir os ângulos relativos de rotação do corpo 1 e do corpo 2, é possível utilizar uma arquitetura de controle mais eficiente, uma vez que estes sensores conseguem realizar as medições com

freqüências mais altas do que o sensor de visão. Esta arquitetura, chamada de tipo 2, permite a atualização das tensões de controle mais rapidamente do que o tempo de atualização dos dados fornecidos pelo sensor de visão. Para isso fez-se uso de duas malhas de controle, uma externa e outra interna. Na malha externa, com os erros angulares de azimute e elevação, obtidos pelo sensor de visão e com os valores dos ângulos relativos dos corpos obtidos pelos sensores, calculam-se os valores que os ângulos devem ter para que o eixo central aponte para o alvo (ângulos desejados). As malhas internas, bem mais velozes do que a externa, utilizam controladores PID, PI ou P. Tais controladores, alimentados pelos erros obtidos a partir da diferença entre os valores dos ângulos desejados e os medidos pelos sensores, fornecem tensões de controle para os motores elétricos. Os ganhos dos controladores foram ajustados pelo método de Ziegler-Nichols.

Quando o sistema possui girômetros para medir as componentes da velocidade angular inercial do corpo 2 uma outra arquitetura de controle, chamada de tipo 3, pode ser empregada. Nela utilizam-se duas malhas em cada controlador, com os girômetros nas malhas internas e o sensor de visão nas externas. Nas malhas externas, com os erros angulares fornecidos pelo sensor de visão, obtêm-se as componentes desejadas da velocidade angular inercial do corpo 2 de modo que o eixo central mantenha-se perseguindo o alvo eficazmente. As referidas componentes são obtidas por meio de controladores de lógica fuzzy do tipo Mamdani desenvolvidos neste trabalho. As entradas para cada controlador são: o erro angular obtido pelo sensor de visão, a derivada deste erro e o nível de saturação da tensão do motor. A saída é um incremento para o valor da componente desejada da velocidade angular inercial.

Nas malhas internas, que são mais velozes que as externas, busca-se manter as componentes da velocidade angular inercial do corpo 2 nos valores desejados. Para isso sinais de erros, compostos pelas diferenças entre os valores desejados e os valores obtidos pelos girômetros, são enviados para controladores PID, ou PI ou P, cujas saídas são as tensões de controle. Os ganhos destes controladores são obtidos pelo método de Ziegler-Nichols.

Nas simulações apresentadas no Capítulo 4 constatou-se que o aumento nos erros dos sensores e, principalmente, o aumento das folgas nos redutores e dos atrasos de tempo para atualização das tensões de controle prejudicam o desempenho do sistema.

Nas simulações apresentadas no Capítulo 4 e nos testes feitos com a bancada experimental, no Capítulo 5, ficou evidente a superioridade da arquitetura de controle do tipo 2 em relação ao tipo 1. Em sistemas onde as folgas nos redutores são bem pequenas a arquitetura de controle do tipo 3 é bem mais eficiente do que as demais, conforme se pôde constatar nas simulações apresentadas no Capítulo 4. Esta arquitetura de controle não foi implementada na bancada experimental, pois não havia a disponibilidade de girômetros adequados no laboratório.

Nas comparações entre simulações e testes realizados com a bancada experimental, apresentadas no Capítulo 5, constatou-se que os resultados numéricos ficaram coerentes com os experimentais, evidenciando a adequabilidade do modelo numérico. Ocorreram pequenas diferenças entre os resultados numéricos e os experimentais, no entanto, há de se ressaltar que no modelo numérico:

- i) não se considerou os parafusos e porcas no cálculo das massas e inércias dos corpos;
- ii) considerou-se o motor 2 como um ponto de massa concentrada (no seu centro de massa) no cálculo do tensor de inércia do corpo 1;
- iii) não se considerou os cabos (que são elementos flexíveis) no cálculo das massas e inércias dos corpos,
- iv) não se considerou os torques de atrito que podem aparecer quando os cabos deslizam sob alguma superfície;
- v) não se consideraram eventuais não-linearidades que podem ocorrer nos circuitos amplificadores de potência;
- vi) foram utilizados modelos simplificados de atrito e não se levou em conta a possibilidade de haver alterações nos parâmetros destes modelos com a variação da temperatura e posição angular dos rotores;
- vii) não se levou em conta a possibilidade da alteração dos parâmetros dos motores com a temperatura;
- viii) não se considerou as inércias das engrenagens dos redutores;
- ix) utilizaram-se valores de flexibilidade e amortecimento estrutural dos redutores disponíveis na literatura, não tendo sido feitos experimentos para obtê-los; e

x) considerou-se que o sensor de visão é perfeitamente calibrado, não havendo, portanto, erros devidos à distorção ótica causada pela lente. O programa implementado em Labview[®] permite ajustar o número de pixels por radiano em função da localização do alvo na imagem capturada. Porém, este ajuste não elimina completamente os erros devido à distorção ótica.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se aprimoramentos tanto no modelo numérico como na bancada experimental.

Para a bancada sugere-se implementar a arquitetura de controle do tipo 3. A utilização de outros tipos de atuadores, como motores piezoelétricos, motores C.C. do tipo “brushless” ou motores de passo, também possui um papel importante, pois vai permitir verificar a variação do desempenho do sistema quando diferentes tipos de atuadores são utilizados. Poder-se-ia tentar, ainda, utilizar atuadores mais potentes que dispensassem o uso de redutores de velocidade, com isso as folgas entre os rotores e os corpos seriam eliminadas.

Em relação ao programa de simulação poder-se-ia aumentar a sofisticação do modelo como, por exemplo, considerar flexibilidade nos corpos 1 e 2 e erros de alinhamento na montagem dos corpos. Com os erros de alinhamento, os eixos de rotação, elevação e central não se interceptariam obrigatoriamente num ponto. Os eixos de rotação e elevação não permaneceriam obrigatoriamente perpendiculares entre si e o eixo central não permaneceria obrigatoriamente num plano perpendicular ao eixo de elevação. Variações dos parâmetros utilizados nos modelos dos motores e dos torques de atrito com a temperatura também deveriam ser implementados. Prevendo a utilização de outros tipos de atuadores na bancada experimental, seria recomendável incluir os seus respectivos modelos no programa de simulação.

Outros métodos experimentais, além do método de Ziegler-Nichols, poderiam ser utilizados para se ajustar os ganhos dos controladores PID presentes, por sua vez, em todas as arquiteturas de controle descritas neste trabalho.