



Estudo da passividade no ambiente de interação humano-robô
na articulação do joelho em um robô exoesqueleto

Relatório Parcial

JOÃO LUCAS FERREIRA ZULIANI - 11316490

Professor Orientador:

PROF^o DR^o THIAGO BOAVENTURA CUNHA

10 de dezembro de 2022

Conteúdo

| | | |
|----------|-----------------------------|----------|
| 1 | Introdução | 3 |
| 2 | Objetivos | 3 |
| 3 | Trabalhos Realizados | 3 |
| 4 | Conclusão | 5 |

1 Introdução

Conforme descrito na proposta de projeto apresentada antes do início dos trabalhos, o propósito deste é analisar e estudar os critérios de passividade do sistema para garantir a estabilidade de um exoesqueleto utilizado na reabilitação de lesões em membros inferiores, ou seja, uma órtese de joelho.

Nesse exoesqueleto é realizado o controle de força e impedância para garantir a estabilidade do sistema e, por sua vez, a segurança do indivíduo que estiver usando-o e interagindo com ele. Considerando que a dinâmica da interação não é linear, precisamos desenvolver um controlador que varie de acordo com o movimento realizado pela pessoa, obtendo uma relação entre a zona de passividade e o desempenho do controlador.

2 Objetivos

Relembrando os objetivos do projeto:

- Implementar a metodologia de identificação de sistemas via simulações;
- Validar o modelo identificado do robô exoesqueleto;
- Determinar uma zona de passividade para controladores de força e impedância implementados no robô;
- Implementar melhorias no controlador do robô com base nas análises feitas.

3 Trabalhos Realizados

Considerando as etapas descritas na proposta, esses 3 primeiros meses foram focados mais em estudos, aprimorando e revisando conceitos já conhecidos na área, reforçando conceitos não tão bem aprendidos na graduação e conhecendo conceitos novos na área de estudo.

A primeira etapa foi começar uma simulação do modelo de estudo no Simulink/-Simscape, criando um diagrama de blocos com os componentes presentes na junta estudada do exoesqueleto (atuador, transmissão, mola torsional, inércia), o controlador, uma carga variável e os parâmetros de cada um deles, porém ainda faltam detalhes para serem concluídos na simulação.

Após isso, foi dado início ao estudo de uma literatura mais aprofundada sobre a área do projeto e de conceitos importantes para a total compreensão do problema proposto. Foram utilizados 4 artigos, 1 curso online, 1 vídeo aula e 1 material de referência de minicurso.

O primeiro artigo estudado foi dos Santos et al. [2015], no qual encontramos os parâmetros do exoesqueleto e entendemos o processo de estudo, pesquisa e criação de uma mola torsional customizada para cumprir os requisitos necessários para a órtese

cumprir sua função do jeito correto. Nesse artigo também encontramos detalhes sobre o funcionamento do robô, o design mecânico do SEA (series elastic actuator) e o controle realizado nele.

À partir disso, verificamos os seguintes parâmetros dos componentes do atuador: motor DC Maxon Motor RE40 de 150W, transmissão M1-150 da HPC Gears International Ltd. com uma razão de redução de 150 : 1 e a mola torsional customizada (testada com 3 diferentes massas e K_s), além de rolamentos e 2 encoders, resultando em uma massa total de 2.5Kg e conseguindo entregar, com a estratégia de controle correta (controle H_∞), um torque contínuo de 5Nm, com uma frequência de 9.6Hz. O exoesqueleto é atuado, para nosso projeto, apenas no joelho, com o quadril e tornozelo sendo passivos, com o controle e sensores sendo analisados por um computador externo e com lógica de programação na linguagem C++.

O segundo artigo estudado foi Escalante et al. [2020], onde é apresentado outra visão de controle e modelagem do movimento e atuação do exoesqueleto. Nesse trabalho ele considera a mola torsional com uma constante $K_s = 95Nm/rad$, além de todos os outros parâmetros já citados anteriormente. É feita a modelagem do sistema considerando a posição da junta do joelho, uma inércia equivalente do sistema, uma matriz dependente da velocidade e uma matriz gravitacional, a fim de estabelecer uma relação entre o torque realizado pelo robô e o torque realizado pela perna humana.

Após isso, é feita a modelagem do caminhar humano como um padrão quase cíclico, dividido o caminhar em 5 fases, com 5 fases de transição entre elas, e, a partir disso, ele utiliza Cadeias de Markov para modelar a dinâmica do processo, considerando o sistema humano-exoesqueleto como um DMJLS ("discrete-time Markovian jump linear system") e modela todo o controle de torque e impedância do sistema baseado nisso, desenvolvendo um novo regulador robusto que garanta a estabilidade e a performance do controle da interação.

O terceiro trabalho estudado foi Shime et al. [2022], onde encontramos uma nova visão do "benchmarking" de controle de força, por meio de uma nova forma de modelagem de um sistema de controle, considerando um controlador, uma transmissão, 2 atuadores e tendo como entrada a velocidade da carga V_L .

Além de apresentar o diagrama de blocos do modelo, ele simplifica a malha de controle dividindo o sistema em 2 novos subsistemas: um bloco G_L , que representa a dinâmica do movimento realizado pela carga, e um bloco G_b , que representa a dinâmica do sistema bloqueado. Após isso, ele apresenta novas métricas para o benchmarking do sistema, com destaque para a **passivity phase margin (PPM)**, que é o foco principal do artigo.

Com essa margem ele busca encontrar a condição de estabilidade do sistema e apresenta novas funções de transferência para o sistema acoplado, além das fórmulas para o cálculo da PPM e da PPM complementar. Ele aplica essa nova métrica em 3 controladores PID e conclui dizendo que **quanto maior o PPM, melhor a estabilidade do controlador**.

O quarto e último artigo estudado foi Calanca et al. [2017] onde são apresentadas novas análises e modelagens do controle de impedância de atuadores elásticos em série e da passividade deles, observando por uma ótica de robôs de reabilitação, como o que estamos utilizando no projeto. Ainda não foi concluída a leitura do artigo, porém foi possível entender alguns conceitos novos apresentados nele.

Como foram sentidas dificuldades no entendimento de alguns conceitos que não foram tão bem consolidados ao longo da graduação, dei início a um curso de controle do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, disponível na plataforma online "Coursera", visando reforçar e relembrar a teoria de Controle necessária para compreender e desenvolver o projeto proposto. Pretendo seguir assistindo outros cursos ministrados pelo instituto na plataforma que aprofundam em outras áreas de controle.

Além disso, assisti a uma videoaula do MATLAB, disponível online no YouTube, onde pude aprender e entender melhor novos conceitos sobre controle de impedância e admitância, além de conceitos sobre estabilidade e passividade de sistemas de controle.

Por último, encontrei materiais de estudo sobre Cadeias de Markov (Golmakani et al. [2014]), utilizado em um minicurso sobre o tema na VII Bienal da Sociedade Brasileira de Matemática. Busquei esse material para aprender como funcionam as cadeias de Markov e os markovianos e entender um dos artigos lidos que utilizam esse conceito. Porém, ainda não consegui estudar e utilizar o material.

4 Conclusão

Esses três primeiros meses foram mais focados em estudo e aprofundamento de conhecimentos para a plena realização do projeto. Acredito que o foco agora seja trabalhar para colocar o que foi aprendido em prática e seguir com o planejamento pensado na proposta para concluir o projeto.

Referências

- Andrea Calanca, Riccardo Muradore, and Paolo Fiorini. Impedance control of series elastic actuators: Passivity and acceleration-based control. *Elsevier*, 1, 2017.
- Willian M. dos Santos, Glauco A. P. Caurin, and Adriano A. G. Siqueira. Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary series elastic actuator. *Elsevier*, 1, 2015.
- Felix M. Escalante, Juan C. Pérez-Ibarra, Jonathan C. Jaimes, Adriando A. G. Siqueira, and Marco H. Terra. Robust markovian impedance control applied to a modular knee-exoskeleton. *Elsevier*, 1, 2020.
- Ali Golmakani, Ayane Adelina da Silva, Emanuel Mateus dos Santos Freire, Myrla Kedylna Barbosa, Pedro Henrique Gomes de Carvalho, and Victor de Lima Alves. Cadeias de markov, 2014.
- Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Introdução ao Controle de Sistemas. <https://www.coursera.org/learn/controle/home/welcome>. Online, acesso em 1 de novembro de 2022.
- MATLAB. Passivity-Based Control to Guarantee Stability — Control Systems in Practice. <https://www.youtube.com/watch?v=yFS5PSmlp6E>. Online, acesso em 7 de dezembro de 2022.
- Victor Shime, Elisa Vergamini, Andrea Calanca, and Thiago Boaventura. A novel approach to force control benchmarking. 1, 2022.