

Victoria Leal Garcia de Souza

Modelagem, construção e controle de um monociclo auto-equilibrado

Inspere

Engenharia Mecatrônica

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Brito de Novaes

Coorientador: Dr. Gabriel Pereira das Neves

São Paulo

2023

Sumário

1	PROPOSTA DE PROJETO	3
1.1	Introdução	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Metodologia	5
1.4	Resultados Esperados	6
1.5	Cronograma	7
	REFERÊNCIAS	8

1 Proposta de Projeto

1.1 Introdução

Um monociclo auto-equilibrado consiste em um veículo que mantém a posição de equilíbrio apenas mantendo uma roda em contato com o chão, utilizando outro sistema de atuação para controlar o ângulo de queda lateral. Conforme a literatura até então publicada, há apenas um tal monociclo na América Latina, originalmente construído em 2017 (NEVES, 2017) por um dos professores orientadores. Ele possui dois graus de liberdades controlados: os ângulos de *pitch* e *roll*. O controle do primeiro ângulo é feito através da roda em contato com o chão, enquanto o controle do ângulo de *roll* é feito através de uma roda de reação (NEVES; ANGÉLICO; AGULHARI, 2020). Atualmente o sistema não possui controle no ângulo de *yaw*.

Os ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* são os ângulos em torno dos eixos y , x e z , respectivamente. O desenho esquemático do monociclo, juntamente com o sistema de coordenadas de referência, são apresentados na Figura 1. Na Tabela 1, podem ser encontrados os componentes principais do monociclo que estão indicados ao lado.

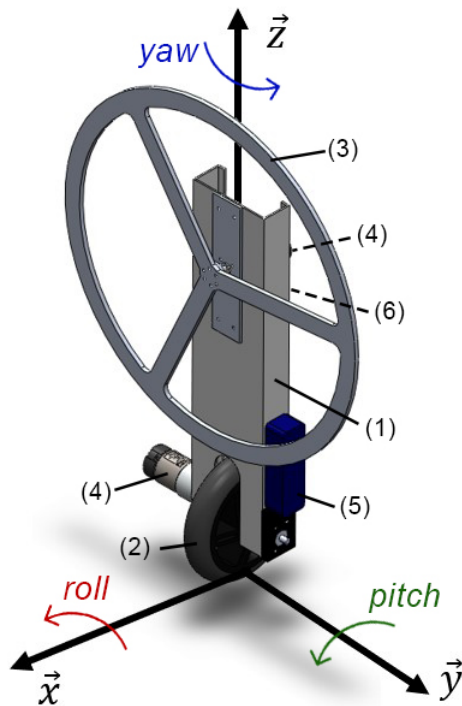


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo.

Peça	Nome	Quantidade
1	Corpo	1
2	Roda de contato	1
3	Roda de inércia	1
4	Motor	2
5	Bateria	1
6	Componentes eletrônicos	-

Tabela 1 – Componentes do monociclo.

(GAB: estou considerando adicionar uma revisão bibliográfica porque a joice su-

geriu que eu vou precisar provar que eu sei do que eu tou falando ou correr o risco de não aprovarem por acharem que você ou o carlinhos tenham escrito por mim a proposta. ignorando esse parágrafo em rosa, eu tenho 1pg ainda ent é razoável botar a revisão. ps: como eu cito a sua dissertação? eu tenho a citação certinha dela comentada no .bib mas não soube como fazer o template do latex.) - ADD: refs for filter, lqr, h2, ref @ conclusion, rephrase yaw parapraph? is 2 in h2 subscript?

O sensoramento dos ângulos de *pitch* e *roll* é feito usando o acelerômetro e giroscópio presentes no IMU (*Inertial Measurement Unit*) localizado em (6) da Figura 1, cujos sinais são passados por um filtro de Kalman FIND A REF FOR KALMAN igual para ambos os ângulos. O filtro de Kalman é um estimador ótimo para ruído branco, e portanto muito aplicável para os sinais do IMU. Estes sinais são interpretados pelo microcontrolador, que aciona um ou ambos os motores conectados às rodas ((2) e (3)) de forma que a posição do monociclo volte para a posição de equilíbrio vertical.

A modelagem do monociclo foi feita usando a mecânica de Lagrange, inicialmente o considerando como um pêndulo invertido para obter as equações de movimento. O modelo não-linear obtido pela equação de Euler-Lagrange foi linearizado para permitir a aplicação de controle para que o sistema seja capaz de se manter equilibrado. O LQR (*Linear Quadratic Regulator*) REF OGATA HERE YOU COWARD, que é um caso particular de um controlador projetado por norma \mathcal{H}_2 da resposta de impulso do sistema PROB ANOTHER OGATA HERE LMAOA, é uma técnica de controle de estado por *feedback*. A diferença principal entre um LQR e um caso genérico de controlador projetado por norma \mathcal{H}_2 , neste caso, é que o controlador genérico pode ser calculado por um sistema linear de inequações matriciais e pode comportar incertezas de parâmetros. Conforme a literatura publicada (NEVES, 2017), ambas as técnicas são capazes de estabilizar a planta rapidamente e usam algoritmos similares.

Quanto ao acionador escolhido para o controle dos graus de liberdade, há literatura significativa a respeito do controle da estabilidade estática sobre uma roda. Algumas das soluções já existentes em monociclos autônomos incluem o uso de giroscópios (DEVELOPMENT..., 2013), a adição de uma (HO; RIZAL; CHEN, 2014) ou mais rodas de inércia (GEIST et al., 2022), o uso de força magnética (RUAN et al., 2012), massas móveis afim de mudar o centro de massa (GUO; HE; SONG, 2016) ou o uso de uma *omniwheel* (SHEN; HONG, 2020).

Enquanto o sistema de acionamento de escolha para o controle de estabilidade estática não é um tema pouco explorado, é importante considerar como o monociclo autônomo poderia comportar outros acionadores afim de controlar o ângulo responsável por fazer curvas - o de *yaw*, em torno de *z* - para poder, posteriormente à construção de um tal monociclo, o fazer seguir trajetórias.

Um fator relevante na escolha do acionador é considerar o grau de complexidade

atrelado à implementação do mesmo e do controle, o que favorece muito a escolha da roda de inércia ao invés de outros acionadores citados. O controle de um monociclo por meio de uma roda de inércia é um conceito recente que tem sido progressivamente mais explorado na última década. Ademais, replicar um monociclo onde já é conhecido o sistema de atuação traz vantagens no âmbito de melhorias na construção do mesmo.

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal replicar o monociclo autônomo apresentado na introdução. Para tal, foram estabelecidos objetivos intermediários:

- Verificar possíveis melhorias que podem ser feitas ao modelo matemático existente;
- Estudar as técnicas de controle avançado já implementadas e avaliar a implementação de outras técnicas;
- Otimizar a construção da réplica com técnicas de manufatura subtrativa.

Os objetivos secundários deste projeto são relacionados a melhorias de problemas apontados com a modelagem e construção do monociclo de referência, como incertezas relacionadas aos momentos de inércia, a posição exata do centro de massa e o atrito viscoso da roda de inércia. Outras melhorias para iterações futuras mencionadas que seriam de interesse averiguar são: *backlash* das rodas devido ao acoplamento delas e ambos os acionadores chegarem muito próximos do nível de saturação com o controle implementado neles.

1.3 Metodologia

De maneira a atingir o objetivo primário de construir uma réplica do monociclo autônomo apresentado, a metodologia proposta é de inicialmente construir um modelo simulado onde seja possível verificar tanto a parte referente ao modelo matemático quanto ao controle robusto usando norma \mathcal{H}_2 implementados no monociclo a ser reproduzido. Para construir o modelo simulado, é proposto:

- Revisar a literatura publicada sobre o monociclo de referência;
- Conferir o modelo matemático existente e fazer quaisquer possíveis readequações necessárias;
- Analisar o controle aplicado ao monociclo e verificar a necessidade de implementar outras técnicas;

Para que seja possível cumprir os objetivos secundários de minimizar as incertezas paramétricas do primeiro monociclo, seria necessário realizar experimentos práticos que permitiriam obter os dados apontados como incorretos. Referente ao problema das rodas gerando folga nos pinos após um certo tempo, seria possível investigar melhores maneiras de acoplá-las ao corpo principal. O problema da saturação dos motores poderia ser resolvido buscando motores de maior potência que sejam capazes de estabilizar a planta com um intervalo maior que $\pm 15^\circ$ em relação à posição de equilíbrio do monociclo.

Uma vez estabelecidos os parâmetros da réplica, haverá necessidade de verificar a disponibilidade para compra dos componentes requeridos para que a manufatura e implementação do sistema de atuação seja possível.

Por fim, é de fundamental importância a validação prática para verificar o funcionamento da réplica. A validação será composta dos mesmos testes que foram feitos com o monociclo original - verificar se consegue manter a estabilidade estática e rejeição de perturbação - de forma que seja possível comparar ambos os monociclos.

1.4 Resultados Esperados

Como o objetivo principal é construir uma réplica de um monociclo autônomo com os ângulos *pitch* e *roll* controlados, o primeiro dos resultados esperados é que seja possível replicá-lo seguindo a literatura publicada a respeito da referência. É de se esperar que a etapa de maior risco para este objetivo seja a de manufatura, especialmente no que diz respeito às implicações para o nível de precisão que é necessário para algumas peças. A construção de uma réplica de mesma escala e funcionamento igual seria considerada satisfatória para este projeto.

Enquanto é posto como um objetivo intermediário a possibilidade de modificar o controle presente no monociclo, é esperado que a técnica de controle implementada na literatura publicada sobre o monociclo estudado seja suficientemente ótima para um primeiro protótipo. O mesmo vale para o modelo matemático.

É reconhecido que os objetivos relacionados às incertezas paramétricas sejam, naturalmente, mais complexos de serem atingidos. Como eles são dependentes de resultados experimentais, eles também são, portanto, dependentes de equipamento disponível na instituição para realizar tais experimentos. É possível que não haja como obter dados mais acurados do que os já testados, porém qualquer melhoria ou confirmação quanto às incertezas poderia resultar em uma performance muito melhor da planta.

1.5 Cronograma

O cronograma proposto na Tabela 2 é composto das atividades delimitadas na seção de metodologia, dividido por mês e semestre visando ter uma melhor organização do tempo.

Atividade	1º semestre						2º semestre					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	x	x	x									
Conferir o modelo matemático	x											
Conferir o controle implementado		x	x									
Elaboração do modelo simulado		x	x	x								
Compra de materiais e componentes				x	x	x						
Relatório intermediário					x	x						
Manufatura e construção					x	x	x	x	x	x	x	
Experimentos para validar dados							x	x				
Testes práticos								x	x	x	x	x
Validação										x	x	x
Relatório final											x	x
Revisão do cronograma	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 2 – Cronograma proposto para o trabalho.

Referências

- DEVELOPMENT of the unicycle-riding robot. 2013. <<https://corporate.murata.com/newsroom/news/company/csrtopic/2008/0923>>. Citado na página 4.
- GEIST, A. R. et al. The wheelbot: A jumping reaction wheel unicycle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 7, n. 4, p. 9683–9690, 2022. Citado na página 4.
- GUO, L.; HE, K.; SONG, Y. Design of the sliding mode controller for a kind of unicycle robot. *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, p. 1432–1437, 2016. Citado na página 4.
- HO, M.-T.; RIZAL, Y.; CHEN, Y.-L. Balance control of a unicycle robot. In: *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1186–1191. Citado na página 4.
- NEVES, G. P. *Modeling, construction and control of a self-balancing unicycle*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- NEVES, G. P.; ANGÉLICO, B. A.; AGULHARI, C. M. Robust \mathcal{H}_2 controller with parametric uncertainties applied to a reaction wheel unicycle. *International Journal of Control*, Taylor Francis, v. 93, n. 10, p. 2431–2441, 2020. Citado na página 3.
- RUAN, X. et al. Lateral stabilization of a single wheel robot applying electromagnetic force. In: *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 3675–3680. Citado na página 4.
- SHEN, J.; HONG, D. Omburo: A novel unicycle robot with active omnidirectional wheel. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 8237–8243. Citado na página 4.