

Victoria Leal Garcia de Souza

**Continuação da modelagem, construção e controle de
um monociclo auto-equilibrado**

Inspere

Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Pereira das Neves

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Brito de Novaes

São Paulo

2024

Sumário

1	PROPOSTA DE PROJETO	3
1.1	Introdução	3
1.1.1	Parte I: Controle Robusto	4
1.1.2	Parte II: Controle de <i>yaw</i>	4
1.2	Objetivos	5
1.3	Metodologia	6
1.4	Resultados Esperados	7
1.5	Cronograma	7
	 REFERÊNCIAS	 9

1 Proposta de Projeto

1.1 Introdução

Esta proposta tem o objetivo de pedir a extensão de um ano do projeto "Construção e projeto de controle de um monociclo autoequilibrado", cuja finalização está prevista para setembro de 2024, considerando a finalização da construção do robô (caso seja necessário) além do desenvolvimento do que é aqui proposto.

Um monociclo autoequilibrado consiste em um veículo que mantém a posição de equilíbrio apenas com uma roda em contato com o chão, utilizando outro sistema de atuação para controlar o ângulo de queda lateral. Conforme a literatura encontrada, há apenas dois tais monociclos na América Latina, sendo o primeiro originalmente construído em 2017 por um dos professores orientadores (NEVES, 2017) e o segundo uma réplica deste, ainda em desenvolvimento.

Ambos possuem dois ângulos controlados: *pitch* e *roll*. O controle de *pitch* é feito através da roda em contato com o chão, enquanto o ângulo de *roll* é controlado através de uma roda de inércia. Considerando a posição de equilíbrio do monociclo (na posição vertical), o *yaw* não é controlado pelas outras duas entradas, logo, é necessário introduzir um novo atuador para garantir a controlabilidade de todos os ângulos.

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, é apresentado na Figura 1. Na Tabela 1, podem ser encontrados os componentes principais do monociclo que estão indicados ao lado.

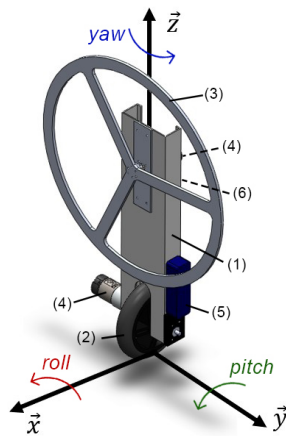


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo, adaptado de (NEVES, 2017).

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.

1.1.1 Parte I: Controle Robusto

Para ser considerado uma réplica fiel do monociclo-referência, seria necessário fazer para o monociclo-réplica um controlador robusto, visto que até a conclusão do projeto anterior ele terá um controlador linear (PID em cascata) e um controlador ótimo (LQR). Visto que no monociclo de 2017 há um controlador ótimo (LQR) que foi implementado na réplica, e um controlador robusto (por norma \mathcal{H}_2) que não foi implementado devido ao tempo limitado do projeto (além de outras justificativas mencionadas no relatório intermediário), a primeira proposta é, após a conclusão da construção do robô (caso seja necessário), o projeto e implementação de um controlador robusto para o monociclo-réplica.

Conforme (NEVES, 2017), se sabe que controladores não-lineares não são indicados para esta planta, visto que os acionadores operam muito próximo da saturação e portanto a região até onde ambos os monociclos conseguem voltar ao ponto de operação é muito limitada e próxima de 0° ($\pm 8^\circ$). No entanto, outros controladores robustos diferentes do controle por norma \mathcal{H}_2 que foi implementado na referência podem ser considerados opções viáveis para o controle do robô, como LQG/LTR (CRUZ, 1996) ou até a adição de um observador de estados (OGATA, 2010) e a adição de um filtro de Kalman (KALMAN, 1960) que também estime não-linearidades e erros de medição do sensor, que são os dois controladores vistos como mais viáveis no presente momento para implementação no robô.

Além de garantir o melhor funcionamento do que os controles linear e ótimo já projetados, e de poder fielmente replicar o monociclo-referência, incluir controle robusto na réplica apresenta uma série de desafios matemáticos e de controle que vão além do que é contemplado nas disciplinas ofertadas durante a graduação e, portanto, apresenta uma excelente oportunidade de aprendizado.

1.1.2 Parte II: Controle de *yaw*

Enquanto há literatura significativa a respeito do controle da estabilidade estática sobre uma roda, não há muita que retrate o controle de trajetórias. Algumas das soluções já existentes em monociclos autônomos para o controle dos graus de liberdade incluem o uso de giroscópios (MURATA, 2013), a adição de uma ou mais rodas de inércia (HO; RIZAL; CHEN, 2014; 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). No entanto, não foram implementadas estas soluções de maneira a controlar apenas o ângulo de *yaw* e tampouco são - com exceção da roda de inércia e *omniwheel* - soluções que tornam o controle dos ângulos independentes um dos outros. É de maior interesse verificar a possibilidade de utilizar um acionador que não tenha interferência na implementação do sistema já existente de controle dos ângulos, visto que o monociclo-referência e sua réplica têm os ângulos de *pitch* e *roll* perfeitamente

desacoplados.

Nesta segunda etapa do projeto, são inicialmente propostas três maneiras de controlar o ângulo de *yaw* a ser estudadas para o monociclo-réplica que está sendo desenvolvido, após o projeto e implementação do controlador robusto.

O primeiro método a ser testado, apresentado originalmente em (NEVES, 2017), é por meio de precessão giroscópica. Para controlar o *yaw* assim, é necessário usar a velocidade angular de ambas as rodas como referência para calcular se o raio de giração do monociclo é suficientemente pequeno para que seja possível o controlar pela precessão giroscópica. Um fator complicante é a relação inversa entre a controlabilidade usando precessão giroscópica e o torque necessário para mantê-lo equilibrado em *pitch* e *roll*, visto que exigiria uma velocidade angular alta para gerar precessão suficiente para o giro e, em condição de equilíbrio estático, a velocidade angular de ambas as rodas tende a zero.

O segundo acionador a ser testado seria a adição de duas pequenas hélices, usando propulsão diferencial. Tendo em mente que este seria um método de menor dificuldade de modelagem do que a precessão giroscópica, a dificuldade que este método apresenta é em saber se o par de hélices teria força o suficiente para vencer o atrito estático da roda em contato com o chão e girar o robô. Uma maneira de verificar isto seria empiricamente determinar a força mínima necessária para mover o monociclo neste ângulo por meio de experimentos com a réplica uma vez que sua construção esteja concluída. Se for possível controlar *yaw* desta forma, uma vantagem notável em relação às outras propostas é que as hélices permitem manter os ângulos desacoplados.

A terceira maneira proposta para controlar o ângulo de *yaw* seria a substituição da roda de inércia existente no monociclo por um par de rodas de inércia inclinadas a 45° em relação ao eixo x do robô. Esta não é vista como uma solução ideal por exigir mudanças muito maiores ao monociclo-réplica do que as propostas supracitadas.

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal projetar e implementar um controlador robusto para o monociclo-réplica em desenvolvimento, Para que isso seja viável, é possível que seja necessário primeiro terminar a construção dele.

O objetivo secundário é estudar como modificar o monociclo-réplica apresentado na introdução com a finalidade de controlar o terceiro ângulo de Euler (*yaw*), o que consiste em modelar e desenvolver um sistema atuador.

1.3 Metodologia

Caso seja necessário terminar a construção do monociclo em desenvolvimento, a metodologia a ser seguida inicialmente será a mesma apresentada na documentação referente ao projeto previsto para acabar até setembro de 2024.

Com a conclusão desta, sendo durante a vigência deste projeto ou do projeto anterior, será adotada a metodologia para a implementação do controle robusto no monociclo, que será a seguinte:

- Fazer uma revisão bibliográfica para determinar qual o melhor controlador robusto para implementar no monociclo;
- Projetar o controlador;
- Realizar testes em simulação do controle projetado, ajustando-o até que opere de maneira satisfatória;
- Implementar o controle no robô.

Sendo previsto que a conclusão da construção (se necessária) e o projeto e implementação do controlador robusto no monociclo-réplica não irão ocupar o período completo da bolsa, é proposto começar a estudar a implementação do controle do terceiro ângulo (*yaw*) durante o tempo remanescente. Assim, de maneira a controlar o ângulo de *yaw* do monociclo, a metodologia proposta é de inicialmente modificar o modelo simulado existente onde seja possível verificar tanto a parte referente ao modelo matemático quanto ao controle implementado no monociclo (ambos os quais deverão ser modificados para comportar o novo acionador). Para construir o modelo simulado, é proposto:

- Revisar a literatura publicada sobre o monociclo de referência e sua réplica para determinar qual das três formas propostas é a melhor para implementar;
- Readequar o modelo simulado disponível observando versões mais atuais do MATLAB® e Simulink®;
- Analisar as técnicas de controle aplicadas ao monociclo e modificá-las para comportar o novo acionador escolhido.

De forma a modificar a construção do monociclo o mínimo possível durante o projeto, serão verificadas as três propostas de controlador na ordem que foram apresentadas (precessão giroscópica, hélices com propulsão diferencial e rodas de inércia inclinadas) porque se acredita que haverá menos dificuldade na implementação dos acionadores seguindo esta ordem. O estudo para implementação de cada um dos acionadores irá requerir sua

própria revisão bibliográfica de material relevante, modificação do modelo matemático original e simulação para verificação antes da implementação.

Uma vez estabelecido o acionador a ser implementado e os componentes a serem usados, haverá necessidade de verificar a disponibilidade para compra dos componentes requeridos para que a manufatura e implementação do sistema de atuação seja possível. Os componentes comprados serão financiados sem o auxílio da instituição. Usando manufatura subtrativa, serão feitos os outros componentes no *TechLab* ou *FabLab*.

Por fim, é de fundamental importância a validação prática para verificar o funcionamento do novo acionador. A validação será composta de três testes: verificar se o monociclo consegue manter a estabilidade estática de forma autônoma, verificar se o monociclo consegue girar em torno do seu eixo z e voltar para sua posição original, e um teste de rejeição de perturbação.

1.4 Resultados Esperados

Tendo em vista os objetivos principais de concluir a construção do robô e implementar nele um controlador robusto, é esperado que seja possível concluir estes objetivos em até metade da vigência do projeto com sucesso.

O objetivo secundário é de estudar formas de adicionar um acionador para controlar o terceiro ângulo de Euler, então o primeiro dos resultados esperados é que seja possível encontrar um acionador que seja capaz de controlá-lo. É de se esperar que a etapa de maior risco para este objetivo seja a de modificação do modelo matemático, visto que esta irá determinar a viabilidade ou não da implementação dos três acionadores propostos. A determinação de qual acionador que permita ao monociclo girar já seria considerada um resultado aceitável para este projeto.

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.

A partir da conclusão do projeto, há interesse em apresentar o trabalho em congressos que aceitem projetos de Iniciação (exemplos: SIICUSP (USP), Congresso de Iniciação Científica (UNICAMP) e Cobenge). Com o tempo adicional do projeto seria possível também utilizar o monociclo construído para auxiliar no ensino da disciplina de Controle Moderno.

Atividade	1º semestre						2º semestre					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	x	x	x	x								
Projeto do controlador robusto		x										
Teste em ambiente de simulação do controlador robusto			x									
Implementação do controle robusto no robô				x								
Relatório intermediário					x	x						
Verificação dos acionadores para controlar o ângulo de <i>yaw</i>					x	x	x	x				
Alterar o controle implementado									x	x		
Compra de materiais e componentes										x	x	
Manufatura e construção											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

- CRUZ, J. J. d. *Controle Robusto Multivariável: O Método LQG/LTR*. [S.l.]: Edusp, 1996. 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.
- KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960. Citado na página 4.
- MURATA, T. *Development of the unicycle-riding robot*. 2013. <<https://corporate.murata.com/newsroom/news/company/csrtopic/2008/0923>>. Citado na página 4.
- NEVES, G. P. das. *Modeling, construction and control of a self-balancing unicycle*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2017. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/dissertacoes-teses/140601/modelagem-desenvolvimento-e-controle-de-um-monociclo-auto-e>>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 5.
- OGATA, K. In: _____. *Modern Control Engineering*. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado na página 4.
- 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.