

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Nome A. Sobrenome<sup>1</sup>

Nome A. Sobrenome<sup>2</sup>

Nome A. Sobrenome<sup>3</sup>

Orientador: Fulano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>2</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>3</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

<sup>4</sup>Instituição/Empresa xxx, E-mail: yyy;

**FINAL PAPER TITLE IN ENGLISH**

**Resumo:** O resumo deve ser digitado em fonte Times New Roman / Arial tamanho 12, itálico, e dentro desta área. O texto deve ser justificado. O resumo deve conter o objetivo e justificativa do trabalho, sua importância e as principais conclusões. Não deve ultrapassar 250 palavras. Vide NBR 6028

**Palavras-Chaves:** *deve ter no mínimo 3 palavras chaves e no máximo 5 palavras separadas por ponto e vírgula;*

**Abstract:** O resumo deve ser digitado em fonte Times New Roman / Arial tamanho 12, itálico, e dentro desta área. O texto deve ser justificado. O resumo deve conter o objetivo e justificativa do trabalho, sua importância e as principais conclusões. Não deve ultrapassar 250 palavras. Vide NBR 6028

**Keywords:** *deve ter no mínimo 3 palavras chaves e no máximo 5 palavras separadas por ponto e vírgula;*

# 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da robótica, robôs móveis estão, cada vez mais, tomando espaço em setores chave da economia como o comercial, industrial e militar. Os robôs terrestres que se locomovem com pernas tem se mostrado mais eficientes quanto a locomoção em terrenos irregulares, inclinados e escorregadios e quanto à superação de obstáculos (1). Quando comparado com robôs com rodas, robôs quadrúpedes ainda possuem melhor mobilidade e manobrabilidade em ambientes complexos, possibilitando transitar por caminhos não necessariamente contínuos.

O BigDog, desenvolvido pela Boston Dynamics em 2004, foi um dos primeiros robôs quadrúpedes robustos a navegar em superfícies diversas, incluindo trilhas e solos com neve ou lama. Desde então, as atuais soluções disponíveis no mercado apresentam alta maturidade, como por exemplo o Spot, um robô quadrúpede para missões indoor e outdoors, fabricado pela Boston Dynamics. Ele é capaz de alcançar uma velocidade de até 1.6 m/s e se equilibrar dinamicamente em ambientes incertos carregando até 14 kg **Fonte: [bostondynamics.com/products/spot](https://www.bostondynamics.com/products/spot)**. Na mesma linha de robôs cachorros de médio porte, encontra-se o AnyMal, desenvolvido pela AnyRobotics para atuar de forma autônoma em ambientes difíceis. Este equipamento possui 70 cm de altura apresenta um range de payload que comporta simples sensores até complexos braços robóticos **Fonte: [ANYmal A unique quadruped robot conquering harsh environments](#)**

Entre os robôs com pernas, os robôs quadrúpedes vêm ganhando destaque por apresentarem maior estabilidade e uma estrutura mais simples que os bípedes e hexápodes (2). Além disso, conseguem realizar vários tipos de passadas, as quais podem lhe fornecer mais estabilidade, velocidade ou eficiência energética.

O uso de uma plataforma com quatro pernas requer um controle de locomoção

robusto que envolve o controle de equilíbrio da plataforma, o controle das juntas do robô e o planejamento de marchas. A locomoção de robô quadrúpedes é um tema bastante amplo e que pode ser abordado de várias perspectivas, sendo essas as mais comuns e presentes em várias aplicações desse tipo de sistema robótico. Para poder aplicar todos esses conceitos e desenvolver aplicações reais com robôs quadrúpedes, é fundamental estudar a estrutura física, a cinemática, os tipos de passo e os métodos de controle de movimentação desses robôs.

O objetivo deste projeto é desenvolver um sistema robótico do tipo quadrúpede capaz de realizar uma caminhada de forma teleoperada e estável, o que envolve o estudo da cinemática, design mecânico e controle de locomoção deste tipo de robô. Para isso, o modelo do protótipo é simulado de forma a embasar a construção de um protótipo físico. O protótipo físico é de pequeno porte, possui 3 DOFs (graus de liberdade) por perna e é atuado servomotores. Ele possui a habilidade de se locomover de maneira estável em marcha XXX por ambientes planos e irregulares *indoor* e *outdoor*. Além disso, o robô é capaz de superar pequenos obstáculos e transportar cargas de até X kg.

—

- Requisitos devem estar aqui?

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico do projeto Carmelo consiste em uma síntese abordando as características de um robô quadrúpede - quanto ao design, os atuadores e os subsistemas de processamentos que podem ser utilizados. Além disso, é apresentado também sobre o planejamento dos movimentos de marcha e quanto ao controle de locomoção de robôs quadrúpedes, utilizando um modelo cinemático baseado nas considerações de Denavit-Hartenberg.

## 2.1 O robô quadrúpede

### TO-DO

- Breve introdução ao tópico

### 2.1.1 Apresentação e conceito geral

O robô quadrúpede é um sistema robótico móvel que se locomove com a ajuda de pernas. Robôs móveis podem ser divididos em três grupos, relacionados aos seus sistemas de locomoção: robôs com rodas, com esteiras e com pernas. Quando comparado aos dois primeiros, o último grupo apresenta diversas particularidades que os confere muitas vantagens quanto a mobilidade, robustez a diferentes terrenos e superação de obstáculos (3). Robôs com rodas e esteiras apresentam boa performance em terrenos planos e conseguem navegar de forma autônoma pelo espaço, desde que haja um caminho contínuo entre os pontos de origem e destino. Robôs com pernas, por outro lado, são capazes de escolher os melhores pontos de suporte no terreno para apoiar seus pés, o que permite uma navegação em caminhos discretos (com obstáculos de grande inclinação e variação de altura) (4). Essa capacidade de se adaptar de terrenos desnivelados amplia bastante a lista de aplicações às quais esse tipo de sistema pode ser designado: industriais, militares, missões de inspeção, resgate, entre várias outras. Por outro lado, essas vantagens vêm a custo de uma maior complexidade de controle e menor estabilidade. Isso influencia no custo final do sistema, o que pode ser um impeditivo para sua aplicabilidade prática.

Robôs com pernas também apresentam diversas diferenças entre si, majoritariamente ligadas à quantidade de pernas que possuem. Entre eles, destacam-se os bípedes, os quadrúpedes e os hexápodes (que podem ser considerados robôs com múltiplas pernas, abrangendo todos com mais de quatro pernas). A quantidade de pernas de um robô

está diretamente relacionada a sua estabilidade, capacidade de locomoção e eficiência. Os bípedes possuem baixa estabilidade, visto que se apoiam em apenas uma perna para poder andar e, portanto, necessitam de sistemas de controle complexos para poder de mover. Em contrapartida, os com múltiplas pernas possuem maior estabilidade, afinal conseguem manter pelo menos três (muitas vezes até quatro) pontos de apoio enquanto realizam um passo. Contudo, cada perna apresenta um adicional de juntas e atuadores no sistema, diminuindo a eficiência do sistema como um todo. Os quadrúpedes conseguem unir vantagens dos dois anteriores, ao apresentar um balanço entre estabilidade e eficiência. Eles possuem uma estabilidade passiva, quando estáticos, pois se apoiam em quatro pontos. Além disso, também são capazes de navegar de forma estável em baixas velocidade, movendo uma perna por vez, enquanto as outras três permanecem no solo, o que elimina a redundância e complexidade dos robôs com múltiplas pernas e aumenta sua eficiência (4).

### 2.1.2 Estrutura e design

Por conta das vantagens que apresentam, os robôs quadrúpedes se tornaram um grande foco de pesquisa nos últimos anos. Muitos tipos diferentes de designs já foram testados, variando o tipo de perna, modelo de estrutura e número de graus de liberdade (degree of freedom (DOF)) por perna. Alguns designs de quadrúpedes com diferentes tipos de perna e modelos de estrutura podem ser vistos na figura 1.

Figura 1: Título da Figura



Fonte: XXX SCOUT-II / SPOT / TITAN-XIII

O SCOUT-II, assim como outros robôs

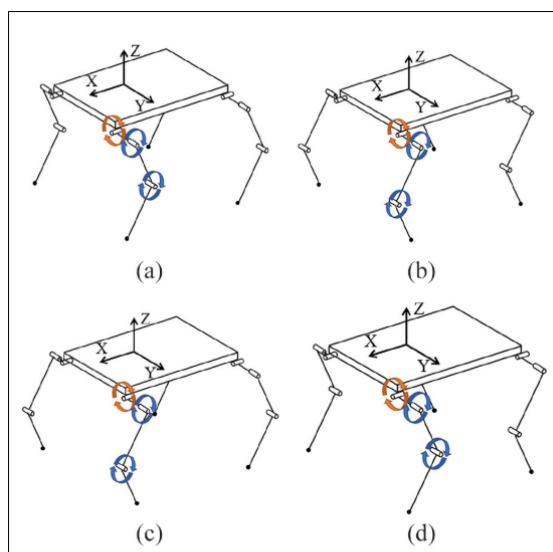
que foram alvo de pesquisa na década de 80 por Raibert (5), utilizam pernas prismáticas, ou lineares. Isto é, a perna possui apenas uma junta rotativa que a conecta ao corpo e uma junta prismática responsável por aumentar ou diminuir seu comprimento (6). Essa junta prismática pode ser ativa ou passiva. Juntas ativas podem utilizar pistões ou mecanismos parafusados. Já os de junta passiva, como o SCOUT-II, possuem uma mola com amortecedor, possibilitando a locomoção do robô com base em um movimento oscilatório (7).

O modelo de estrutura do TITAN-XIII é chamado de *sprawling type*, que pode ser traduzido para tipo amplo, devido a grande amplitude de abertura das pernas. Já o modelo do Spot, da Boston Dynamics, pode ser chamado de *mammal type* ou tipo mamífero, por ser inspirado da postura de mamíferos quadrúpedes como cachorros e cavalos. Ambos possuem pernas articuladas com juntas rotativas, podendo variar a quantidade de juntas por perna, a depender do robô. Kitano et al., em (8), cita algumas vantagens de cada um desses dois modelos de estrutura. O modelo mamífero é capaz de alcançar maiores velocidades, por possuir duas juntas no plano sagital. Além disso, ele também é mais eficiente, pois seus atuadores utilizam menos torque para sustentar o robô, devido à sua estrutura mais compacta, que diminui o braço de alavança sobre o qual a força peso do robô atua. Isso também lhes permite navegar em ambientes estreitos, onde um robô do tipo *sprawling* teria dificuldades de acessar. Este último, por sua vez, possui uma estrutura que o permite abaixar seu centro de gravidade, dando-lhe mais estabilidade de movimentação e causando menos danos ao robô em caso de quedas, o que é uma vantagem de segurança e confiabilidade. Sua estrutura larga também o permite alcançar pontos de apoio no solo mais distantes do corpo, aumentando seu polígono de suporte. Esse é o polígono paralelo ao solo, cujos vértices são os pés de apoio do robô e sobre o qual o centro de gravidade do sistema deve estar, a fim de garantir estabilidade de movimento. Uma

outra vantagem de mobilidade desse tipo de quadrúpede é poder utilizar seu corpo como uma quinta perna, em algumas ocasiões.

O modelo de estrutura de robô abordado neste trabalho será do tipo mamífero. Entre os robôs quadrúpedes que utilizam esse modelo, eles também se diferenciam quanto ao número de DOF por perna, tipos de atuadores nas juntas e configuração das pernas. Quanto à configuração das pernas, existem quatro tipos, ilustrados na figura abaixo.

Figura 2: Titulo da Figura



**Figure 9.** Joint-configuration styles of the quadruped robot: (a) all-elbow configuration, (b) all-knee configuration, (c) outward-pointing configuration, and (d) inward-pointing configuration.

Fonte: XXX

Entre eles destacam-se o *full-elbow* e o *elbow-knee*. Robôs como o Spot, MIT Cheetah e Stanford Pupper utilizam a configuração *full-elbow*, enquanto outros como o ANYmal, StarlETH e BigDog adotam a configuração *elbow-knee*. **Yao et al.** acreditam que a configuração *elbow-knee* possibilita maior estabilidade, mas as características de movimento da configuração *full-elbow* podem ser superiores.

O número de juntas nas pernas, que coincide com a quantidade de DOF do robô também é um dos aspectos estudados sobre os quadrúpedes. A maioria apresenta 3 DOF por

perna, o que é suficiente para que o robô consiga mover seus pés em três dimensões e realíze diversos tipos de marchas. A fim de simplificar a estrutura e consequentemente o controle, alguns robôs utilizam apenas 2 DOF por perna, eliminando a junta no corpo que movimenta a perna no plano frontal. Outros buscam performances mais semelhantes ao andar de animais reais, o que aumenta a flexibilidade de movimento, justificando acrescentar uma quarta junta na perna. No entanto, como já mencionado, isso aumenta a complexidade do controle e acrescenta mais atuadores ao robô, o que prejudica a eficiência.

Essa perda de eficiência se dá porque mais atuadores significa mais consumo de energia e também mais massa. A massa do robô quadrúpede deve ser a menor possível. Quanto mais leve for o sistema, menos torque será demandado dos motores e maior sua eficiência. Além disso, a distribuição de massa do robô também deve ser considerada. A massa deve ser localizada majoritariamente no corpo, enquanto as pernas devem possuir baixa inércia. Isso as permite se mover rapidamente, sem alterar de forma significativa o centro de gravidade do robô, o que melhora a estabilidade e requer menos complexidade de controle. Possuir baixa inércia significa possuir baixa massa, porém as pernas devem ser resistentes o suficiente para suportar o peso do robô além de vários distúrbios causados pelo impacto dos pés com o chão durante a movimentação, o que pode demandar um aumento de massa. Um balanço entre massa e resistência deve ser buscado, o que reforça a necessidade de se diminuir a massa total do sistema (6).

### 2.1.3 Atuadores

Robôs quadrúpedes também podem ser categorizados com base no tipo de atuadores que utilizam em suas juntas. O tipo de atuador exerce uma enorme influência na performance de movimento do robô, massa total

e capacidade de *payload*, assim como no sistema de controle que será utilizado das juntas. Em um estudo sobre atuadores de robôs quadrúpedes (4), *Yao et al.* abordam diferentes tipos de atuadores e analisam a performance de robôs quadrúpedes que os utilizam. Os três tipos principais são: hidráulicos, atuadores elásticos em série (*series elastic actuators, SEA*) e motores elétricos com redução. Robôs com atuadores hidráulicos normalmente possuem mais massa e, consequentemente, maior *payload* (kg), embora sua capacidade de *payload* (%) seja mais baixa. Esse tipo de atuador possui alta potência e uma performance rápida e estável. Em contrapartida, robôs com atuadores eletromagnéticos apresentam melhor movimentação e mais agilidade, sendo capazes de realizar mais tipos de marchas. Os SEAs são formados por motores elétricos e elementos elásticos como molas, a fim de eliminar picos de torque, permitir o melhor controle do torque nas juntas e ainda aumentar seu compliance. Entre os robôs analisados, os com SEAs apresentaram maior capacidade de *payload*. Os atuadores com redução são altamente utilizados com a função de aumentar o torque nas juntas, a custo de uma perda de velocidade. Eles também possuem uma performance de controle de torque satisfatória. Na comparação realizada, os robôs com esse tipo de atuador apresentaram capacidade de *payload* equiparada a daqueles com atuadores hidráulicos e, em geral, menor velocidade, com exceção do Cheetah 2, que está muito acima da média nesse quesito, sendo, hoje em dia, um dos quadrúpedes mais rápidos do mundo.

Um outro tipo de atuador utilizado em robôs quadrúpedes são os servomotores: motores DC equipados com uma caixa de redução e *encoder*. Esses motores são menos adaptáveis a diferentes condições do terreno, pois fornecem baixo compliance nas juntas, e possuem baixa velocidade, limitando a agilidade do robô. No entanto, produzem alto torque e permitem um preciso controle de posição. Também são mecanismo simples, leves e de baixo custo, o que os torna adequa-



dos para projetos de pesquisa e voltados para educação. O protótipo desenvolvido nesse trabalho utiliza servomotores, pois este era o recurso disponível mais facilmente.

#### 2.1.4 Processamento

O subsistema de processamento é o responsável por processar os dados demandados por todas as funcionalidades implementadas no robô, desde as mais fundamentais como controle das juntas e de locomoção até tarefas de mais alto-nível, como inspeção ou navegação autônoma.

Dentre os robôs que tinham seus dados de hardware reportados no review realizado por Biswal [Fonte: **Development of quadruped walking robots: A review**], a maioria utiliza sistemas operacionais (SO) baseados em RT-Linux (*real-time linux*) ou outros tipos de SOs de tempo real. Sistemas em tempo real são importantes, especialmente, para robôs que embarcam os controladores das juntas nos computadores de bordo, pois eles conseguem garantir o tempo execução de todo o processamento necessário para o loop de controle, o que melhora a performance e pode ser crucial para a segurança do robô e de seus operadores. Outra solução é embarcar o controle de baixo-nível em um sistema microncontrolado que se comunica com um PC para tarefas de nível mais alto, como é feito no TITAN-XIII (8).

Tratando-se do processamento necessário para realizar o controle de locomoção de robôs quadrúpedes, o controle das juntas, normalmente, é o que possui a frequência de operação mais alta, pois sua estabilidade é crítica para a operação do robô. O controle das juntas do ANYmal opera a 400 Hz [ANYmal - **A Highly Mobile and Dynamic Quadrupedal Robot**], o do HyQ e o do TITAN-XIII a 1 kHz [Fontes: **Design of HyQ -A hydraulically and electrically actuated quadruped robot**, **TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and**

**energy-efficient walking**] e o do LittleDog a 500 Hz [Fontes: **A Controller for the LittleDog Quadruped Walking on Rough Terrain**]. Tarefas de mais alto nível são realizadas em frequências menores, pois possuem menor criticidade e maior custo computacional. Alguns robôs como o TITAN-XIII, o HyQ e o LittleDog executam essas tarefas em um computador externo, com uma conexão sem fio com o computador de bordo. Isso diminui a complexidade do sistema embarcado no robô e também sua massa total, porém aumenta o risco de erros de comunicação assim como a latência. O frequência de execução dessas tarefas também varia bastante para cada robô, afinal dependem do método de controle implementado em cada um. O LittleDog executa seu loop de mais alto-nível a 100 Hz [Fontes: **AA Controller for the LittleDog Quadruped Walking on Rough Terrain**], o TITAN-XIII a 50 Hz (8) e o HyQ a 200 Hz [Fontes: **Design of HyQ -A hydraulically and electrically actuated quadruped robot**].

#### 2.2 Movimentação por marchas

Robôs quadrúpedes se movimentam conforme uma sequência de movimentos coordenados de suas pernas que compõe uma marcha (*gait*, em inglês). Em uma descrição mais detalhada, Song and Waldron (1989) afirma que:

“Uma marcha é definida pelo tempo e local de colocação e levantamento de cada pé, coordenado com o movimento do corpo em seus seis graus de liberdade, para mover o corpo de um lugar para outro”.

Planejar a marcha de forma robusta é um aspecto fundamental para garantir que um robô com pernas caminhe por terrenos variados de forma eficiente e estável (9). Esta sequência de passos pode ser classificada nas seguintes categorias: periódica e aperiódica, simétrica e assimétrica. Uma marcha é chamada de periódica quando o robô segue uma sequência fixa de movimentos, de acordo com

um padrão pré-planejado e considerando que todos os posicionamentos dos pés são válidos. Enquanto que durante uma marcha aperiódica, a sequência dos passos, o posicionamento dos pés e os movimentos do corpo são planejados de forma não fixa e flexível, em função da trajetória e das características do solo **Fonte: chapter :Generation of Non-periodic Gaits, Quadrupedal Locomotion**. De forma geral, marchas periódicas são limitadas a trajetórias pré-definidas e são ineficientes em terrenos muito irregulares (9). Quanto à simetria, marchas são classificadas como simétricas quando os passos dos pés dianteiros e dos pés traseiros são espaçados uniformemente no tempo. Quando algum dos pares se movimentam de forma desigual, a marcha é chamada de assimétrica **[Fonte: M Hildebrand Analysis of the symmetrical gaits of tetrapods Fol. Biomech., 6 (1966), pp. 9-22]**.

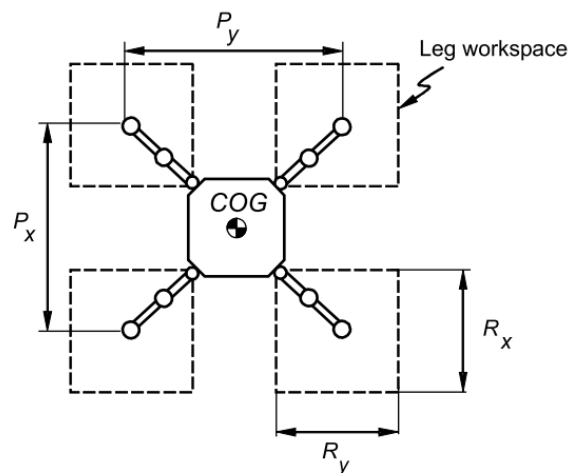
No campo da locomoção com pernas, as marchas são divididas em duas fases, stance e swing - apoio e balanço respectivamente. Durante a fase stance, ou support, as pernas se tensionam, fixando-se no solo e impulsionam o robô para frente, movendo também o centro de massa do sistema, e o peso do robô é dividido entre as pernas de apoio. Enquanto que no swing, ou flight, as pernas de balanço se movem até os novos pontos da trajetória. Além disso, outros parâmetros são utilizados para caracterizar as marchas. O período da marcha é o tempo necessário para realizar um ciclo de movimento, ou seja, para que o robô saia da fase de suporte, movimente suas pernas e retorne à fase de suporte. O *duty factor*,  $\beta_i$ , é a fração do ciclo do movimento em que uma perna se mantém no solo. A diferença de fase entre as pernas do robô,  $\Phi_i$ , é a diferença temporal normalizada entre o movimento realizado por uma perna  $i$  em relação a perna de referência. Por exemplo, uma marcha que move uma perna por vez possui diferença de fase de um quarto de ciclo. *Leg stroke*,  $R$ , é o parâmetro que expressa a distância do pé em relação ao corpo do robô durante a fase de suporte, conforme demonstra a Figura 3. En-

quanto que o *stroke pitch*, é a distância entre os pés adjacentes,  $P_x$  é a distância entre os centros do curso das pernas colaterais e  $P_y$  é a distância entre os centros do curso das pernas contralaterais. Por fim, tem-se que o comprimento da passada,  $\lambda$ , de uma marcha é a distância percorrida pelo centro de gravidade do corpo ao longo de um ciclo de locomoção. Sendo que, se a marcha for periódica essa distância é definida pela relação 1.

$$\lambda = \frac{R}{\beta} \quad (1)$$

Estas variáveis são definidas para cada aplicação, de forma a atender o objetivo específico da marcha, seja possuir maior ou menor velocidade ou ser mais ou menos estável.

Figura 3: Definições geométricas de uma marcha



Fonte: **quadrupedal locomotion**

As marchas desenvolvidas para robôs quadrúpedes são originalmente inspiradas na movimentação de animais. *Walk, trot, pace, gallop* são exemplos de marchas comumente utilizadas, as quais se diferenciam de forma geral pela ordem das passadas e pela duração das fases de apoio e balanço (10). Dentre estas marchas, o trote é a mais utilizada dado sua simplicidade e eficiência em uma ampla faixa de velocidade de corrida. Neste movimento as pernas diagonais se movem em conjunto enquanto as outras duas sustentam o corpo e se

movem para trás (11). Durante o trote é observado também uma boa estabilidade, pois a linha de apoio entre os pés passa diagonalmente por debaixo do corpo **Fonte: The Mechanics of and Robotic Design for Quadrupedal Galloping**. O galope, diferente das demais, é uma marcha assimétrica e é a que confere maior velocidade aos animais, utilizada por exemplo por guepardos e cavalos. É caracterizada por mover os pares dianteiros sequencialmente e em seguida os traseiros, porém, o movimento possui uma diferença de fase entre as duas patas dianteiras maior do que as patas traseiras, de forma que dois pés não tocam o chão ao mesmo tempo **Fonte: M. Hildebrand. The adaptive significance of tetrapod gait selection. American Zoologist, 20:97–103, 1977..** A marcha pace consiste em mover o par de pernas do mesmo lado em fase e é geralmente observada em animais quadrúpedes de pernas longas, como girafas e camelos, pois impede que as pernas colidam durante o movimento **Fonte: Pace Running of a Quadruped Robot Driven by Pneumatic Muscle Actuators: An Experimental Study**. Assim como o trote, a diferença de fase é metade de um ciclo, porém é menos estável, uma vez que desloca a linha de apoio para as extremidades do robô. Já durante a marcha walk, ou crawl, três pernas se mantêm em contato com o solo e uma se movimenta, assim como fazem as tartarugas, de modo que a diferença de fase entre as pernas é um quarto de ciclo (12). Esta movimentação confere maior estabilidade, porém reduz a velocidade da caminhada. **Citar o polígono de suporte aqui, para explicar a estabilidade, dar um destaque maior já que iremos utilizar.**

## 2.3 Controle de locomoção

### TO-DO

- Breve introdução ao tópico

### 2.3.1 Modelo cinemático

Um modelo cinemático descreve a relação entre as variáveis de juntas e a posição e orientação do end-efector. Durante a análise cinemática de um robô quadrúpede, é afirmado que o sistema consiste em um corpo rígido composto por quatro pernas com três graus de liberdade **[Fonte: p]**. A fim de mover este corpo por uma dada trajetória, é necessário um movimento coordenados das juntas **[q]**. Logo, o modelo cinemático descreve a relação entre as variáveis de juntas, a posição do pé e suas derivadas. Considerando que as juntas são rotacionais, a variável de junta é definida como o ângulo entre os elos ligados por tal junta.

O modelo cinemático de um corpo articulado em malha aberta pode ser dividido em dois problemas: cinemática direta e cinemática inversa. Durante a análise de cinemática direta, as variáveis das juntas fornecem a posição do *end-efector*, enquanto que a cinemática inversa é o processo de encontrar os valores das juntas de acordo com a posição e orientação do end-efector. Para mover o pé do robô quadrúpede até uma posição desejada, é necessário determinar os valores rotacionais das juntas das pernas com análise de cinemática inversa.

O corpo inteiro do robô é levado em consideração na modelagem, as coordenadas do seu centro de massa, assim como os parâmetros de comprimento e da largura do robô e os comprimentos dos elos, são utilizados para descrever a posição de cada perna. Percebe-se que as pernas estão em orientações diferentes mas possuem a mesma estrutura, logo é suficiente analisar a cinemática inversa de uma perna [x]. Neste processo, é frequentemente utilizado os parâmetros de Denavit-Hartenberg como uma forma sistemática de escrever a cinemática direta, a fim de obter as matrizes de transformação requeridas para a realizar cinemática inversa.

A análise cinemática inversa é frequentemente realizada por meio de métodos



analítico, como em [Fonte: p], mas pode ser empregado uma abordagem geométrica. As equações que expressam a posição angular das juntas são, entretanto, não lineares e não são todas as expressões que possuem uma solução física possível. Além disso, pode haver mais de um conjunto de posições dos pés que forneçam a mesma posição final [Fonte: p].

Além disso, pode haver mais de uma configuração de ângulos de juntas que fornece a mesma posição final [Fonte: p].

### Denavit-Hartenberg

#### TO-DO

- Para a versão final, acho que cabe a gente colocar uma imagem aqui com um exemplo dos frames e indicando o que são essas 4 variáveis. Pode ser um exemplo com 2 DOF só, apenas para facilitar o entendimento.

Jacques Denavit e Richard Hartenberg introduziram em 1995 [1] uma convenção para descrever sistematicamente a posição e a orientação relativa de um conjunto de elos e juntas consecutivos. Trata-se de uma análise difundida na robótica de manipuladores e é empregada de forma análoga em estudos de cinemática de robôs com pernas, considerando que as pernas funcionam como um manipulador, de forma que o pé representa o end-effector.

No processo, as juntas são consideradas como frames no espaço 3D e, observando a geometria da perna do robô, é possível alcançar relações de translações e rotações entre estes frames, que são independentes do movimento da perna. Dessa forma, concatenar as equações entre os frames consecutivos resulta em uma matriz homogênea que transforma as coordenadas do pé, junta  $n$ , até a junta de quadril, junta 0.

Durante o procedimento de D-H, inicialmente, é definido um sistema de coordenadas, então todas as juntas são localizadas para

determinar a direção do eixo  $z$ , que deve coincidir com o eixo de rotação da junta. Em seguida são definidas as posições dos frames e posicionados os eixos  $x$  e  $y$ , por meio da regra da mão direita. Com esta convenção são utilizadas apenas quatro variáveis:  $a_i$ , distância em módulo entre os eixos, ao longo do eixo  $x$ ;  $\alpha_i$ , ângulo entre os eixos, medido em torno do eixo  $x$ ;  $d_i$ , distância entre os eixos ao longo do eixo  $z$ ; e  $\theta_i$ , ângulo entre os eixos em torno do eixo  $z$ .

O resultado consiste em um poderoso e confiável procedimento analítico pois são baseados em matrizes algébricas consistentes.

### 2.3.2 Etapas do controle e conceitos gerais

A locomoção de robôs quadrúpede, em geral, segue uma sequência de passos. Essa sequência depende fortemente do design do robô e do tipo de marcha que será utilizada. Raibert, em uma das publicações mais marcantes para a pesquisa de robôs com pernas (5), propõe um método de controle baseado em três etapas: controle de salto, controle de velocidade e controle de postura do corpo. Essa pesquisa foi desenvolvida com robôs de pernas rígidas, semelhantes ao SCOUT-II, que utilizam uma junta prismática nas pernas e uma rotativa junto ao corpo. Esse sistema de controle baseava-se na implementação independente de três controladores que, agindo em conjunto, controlariam a locomoção do robô de forma estável, a partir da velocidade, a altura de salto do robô e o ângulo do corpo. Essa estratégia de controle foi utilizada para controlar robôs com uma, duas e quatro pernas, tanto no espaço 2D quanto 3D. Sua premissa básica era a de que apenas uma perna estaria em *stance* ou em *swing* por vez. A fim de satisfazer essa premissa para robôs com mais duas pernas, foi proposto o conceito de pernas virtuais. Isto é, um conjunto de pernas deve realizar igual comportamento quando em *swing* e *stance* e as fases de *swing* e *stance* de cada conjunto devem ser alternadas. Dessa forma, é possível

modelar o robô como possuindo apenas duas pernas virtuais, cada uma representando um dos dois conjuntos de pernas físicas em igual movimento. Tratando-se do quadrúpede, essa premissa pode ser satisfeita considerando duas pernas como uma perna virtual. O ponto de conexão dessa perna virtual no corpo do robô é localizado no centro da reta unindo ambos os pontos de conexão com o corpo das pernas físicas. Utilizando esse conceito, pode-se utilizar marchas simétricas como o *trot*, *pace* e *bound*.

A estratégia de controle em três etapas proposta por Raibert foi responsável por locomover robôs com pernas rígidas de maneira simples, porém esses robôs não tinham autonomia de energia (eram alimentados por um cabo umbilical a uma fonte externa) e apenas operavam no terreno plano e controlado do laboratório. A fim de possibilitar a operação de robôs com pernas em terrenos desnivelados e de difícil mobilidade, os robôs quadrúpedes passaram por modificações de design e estratégias de controle. Outro marco nessa área de pesquisa foi o robô BigDog, cujo trabalho foi publicado por Raibert et al. [Fonte: BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot]. O BigDog é um robô quadrúpede com 4 DOFs por perna movido por atuadores hidráulicos. Essa maior flexibilidade de movimentação das pernas permite controlar a locomoção do robô sem que este precise saltar, sendo possível, então, dividir o controle de locomoção em duas etapas principais: controle de stance e controle de swing. Assim, a velocidade do robô, postura do corpo e altura do corpo em relação ao chão, que é equivalente ao controle de altura do salto, seriam estados controlados por esses dois controladores, o de stance e o de swing.

O controle de stance é responsável por controlar o comportamento das pernas na fase de stance, cuja responsabilidade é utilizar a tração com o terreno para manter o corpo em equilíbrio e direcioná-lo na direção desejada de locomoção. Enquanto isso, o con-

trole de swing é responsável por controlar as pernas em swing, de forma que os pés (*end-effectors*) sigam a trajetória de um passo até o próximo ponto de apoio no chão. Para robôs quadrúpedes, ambos os controladores operam simultaneamente, mas em pernas diferentes, seguindo o princípio, muitas vezes, das pernas virtuais. A marcha utilizada pelo robô é dada por quando e quais pernas estão em cada fase: pernas diagonais em stance ou swing, ao mesmo tempo, caracterizam a marcha *trot*, por exemplo. Portanto, deve-se ser capaz de coordenar o comportamento das pernas entre ambas as fases. O componente do sistema de controle com essa responsabilidade é o planejador de marchas (*gait planner* ou *gait scheduler*).

Como cada perna se comporta durante cada fase é algo que varia com o método de controle utilizado por cada robô, mais ainda é possível elencar semelhanças gerais. Na fase de swing, calcula-se o local do próximo ponto de apoio dos pés, com base na velocidade desejada para o robô, e uma trajetória de passo até esse ponto. Essa trajetória pode ser uma curva senoidal (11), triangular [Fontes: [github.com/mike4192/spotMicro](https://github.com/mike4192/spotMicro) /[stanfordroboticsclub/StanfordQuadruped](https://stanfordroboticsclub.com/StanfordQuadruped)], de Bezier [Fonte: [hackaday.io/project/171456-diy-hobby-servos-quadruped-robot](https://hackaday.io/project/171456-diy-hobby-servos-quadruped-robot)], cicloidal (2) (13), entre outras, e o componente encarregado por calculá-la é o planejador de trajetórias. Uma consideração comum é a de que as trajetórias das pernas em cada fase são independentes, de tal forma que o estado do pé no momento em que toca o solo se torna um dos pontos chave para a estabilidade do robô (11). Nesse sentido, a trajetória cicloidal ganha destaque, porém outras curvas podem ser utilizadas para gerar diferentes perfis de aceleração e velocidade dos pés durante uma passada. Curvas como a de Bezier, por exemplo, possuem grande flexibilidade, o que permite se criar várias trajetórias distintas que podem ser geradas em tempo-real, como é feito em [Fonte: [Dynamics and Domain Randomized Gait Modulation with Bezier Curves for Sim-to-Real Legged Locomotion](#)].

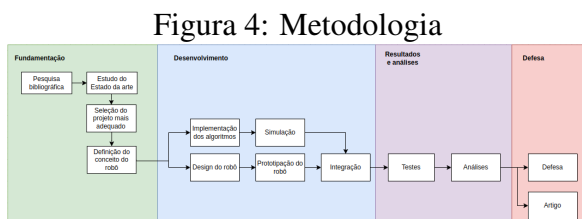
Já na fase de *stance*, as pernas devem manter o robô em equilíbrio ao mesmo tempo que direcionam o corpo na direção de locomoção desejada. Para isso, alguns trabalhos utilizam trajetórias de um formato fixo para os pés, assim como na fase de *swing*, porém, não necessariamente com o mesmo formato de curva usado nesta última (11) (13). Além disso, controladores de equilíbrio também podem ser implementados. Esses controladores visam estabilizar o pitch e roll do robô (2) [Fontes: [hackaday.io/project/171456-diy-hobby-servos-quadruped-robot](https://hackaday.io/project/171456-diy-hobby-servos-quadruped-robot), [Stanford-Quadrupedm notspot-sim-cpp](#)] ou até mais graus de liberdade, como em (14) (1) (15). Eles podem ser baseados na leitura de sensores inerciais ou no equilíbrio das forças de contato com o solo que atuam em cada perna, por exemplo.

### 2.3.3 Métodos de controle

## 2.4 Benchmarking

## 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto, foi criada uma metodologia própria a ser seguida, composta por quatro fases sequenciais, conforme ilustrado na figura 4 e detalhado a seguir. **Colocar como apêndice?**



Fonte: Proprio autor

### 3.1 Fundamentação

A primeira fase da metodologia tem como objetivo buscar referências que possam

embasar o estudo e servir de padrão para o design e desenvolvimento do projeto.

Durante essa fase de Fundamentação, o primeiro a ser feito são pesquisas bibliográficas, com o intuito de selecionar artigos úteis e correlatos ao projeto. **Para isso, foi utilizado o Método Bili.**

A partir dessas pesquisas, é possível realizar um Estudo do Estado da Arte, selecionando, a partir de um **Benchmarking** realizado com robôs quadrúpedes, projetos que possam servir de referência para o desenvolvimento, definindo os **conceitos, funcionalidades e design** que o projeto deverá ter.

### 3.2 Desenvolvimento

Durante esta etapa da metodologia, ocorre o desenvolvimento do robô propriamente dito. Inicialmente, duas etapas ocorrem de forma paralela, sendo elas a implementação e simulação dos algoritmos (em ambiente computacional) e a definição e prototipação do design do robô.

Durante a implementação de algoritmos e simulação, são inicialmente elaborados o diagrama de blocos do sistema e a arquitetura de software do controlador, de forma a padronizar e documentar o desenvolvimento do projeto. A partir disso, os algoritmos de cinemática e controle podem ser implementados e testados em simulação. Para auxiliar e possibilitar o desenvolvimento do projeto, algumas ferramentas e *Softwares* serão utilizados. O ROS - Robot Operating System é um conjunto de bibliotecas e ferramentas de *software Open Source* que auxiliam no desenvolvimento de aplicações robóticas. O ROS Humble, nativo para Ubuntu 22.04, será utilizado, por possuir boa documentação e comunidade ativa, além de possuir pacotes muito úteis para o desenvolvimento do robô.

Em paralelo com o desenvolvimento de software, a prototipação e construção do robô é realizada, através da elaboração

dos desenhos mecânicos e projetos eletro-eletrônicos. Esta etapa inclui também a impressão 3D das partes mecânicas projetadas, teste dos atuadores e sensores e configuração e comunicação entre o processador e os servomotores Dynamixel **modelo?** que serão utilizados, culminando na montagem física do protótipo funcional. Os Softwares OnShape e XXXX serão utilizados para o desenvolvimento do CAD do robô e para seu projeto elétrico, respectivamente.

Após essas etapas, é possível realizar a integração dos algoritmos no protótipo físico, de forma a validar o desenvolvimento realizado em ambiente computacional em um robô no mundo real.

### 3.3 Resultados e Análises

A etapa de resultados e análises tem como objetivo inicial realizar testes a fim de coletar dados para a análise de performance dos algoritmos implementados no robô. Durante essa etapa, será feita também uma análise comparativa entre os resultados obtidos em ambiente de simulação e no mundo real. **Detalhamento de quais testes serão feitos?**

### 3.4 Defesa

Esta é a última etapa da metodologia, que consiste na finalização e revisão do artigo e na apresentação de defesa do trabalho perante a banca avaliadora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa de resultados e análises tem como objetivo realizar testes e coletar dados para a análise de performance dos algoritmos implementados no robô. Durante essa etapa, será analisada a performance do robô no mundo real de forma estatística, por meio de três testes. O primeiro consiste em observar a capacidade do protótipo em mover o pé por

uma dada trajetória. No segundo teste é analisado se o robô atende a uma velocidade solicitada, utilizando dois terrenos diferentes e observando a oscilação de estabilidade do corpo ao longo da trajetória. Por fim, foi analisado a performance do Caramelo caminhando por terrenos inclinados e sua capacidade de ultrapassar pequenos obstáculos.

### 4.1 Cinemática Inversa

A obtenção da Cinemática Inversa foi feita de forma analítica, e é descrita no Memorial de Cálculo. As variáveis  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  expressam a posição angular de cada uma das juntas de uma perna do robô, calculadas com auxílio das equações 2 a 7, a partir da posição  $(x, y, z)$  desejável para sua pata e dos comprimentos  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ .

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - \arctan\left(\frac{L_1}{a}\right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{a}{z}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1-A^2}}{A}\right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sqrt{1-B^2}}{B}\right) \quad (4)$$

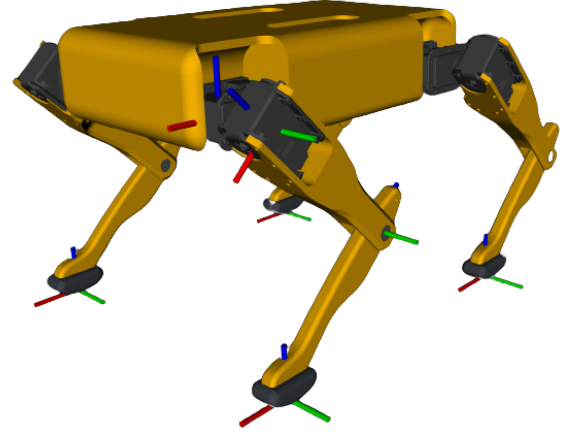
$$a = \sqrt{x^2 + y^2 - L_1^2} \quad (5)$$

$$A = \frac{a^2 + z^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (6)$$

$$B = \frac{a^2 + z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \quad (7)$$

Essas equações são úteis para o cálculo da posição de uma única perna, mas são insuficientes para realizar a cinemática do corpo do robô. Para isso, o *base\_link* é utilizado como referência, e uma matriz  $T_m$  (eq. 8) é utilizada para realizar a cinemática do corpo, a partir das translações  $(x_c, y_c, z_c)$  e rotações  $(\alpha, \beta, \gamma)$  desejadas, sendo possível controlar cada um dos 6 graus de liberdade. Para isso, as transformações  $T_{FR}$ ,  $T_{FL}$ ,  $T_{BL}$  e  $T_{BR}$  de cada um dos ombros em relação ao *base\_link* são necessárias.

Figura 5: Titulo da Figura



Fonte: XXX

$$T_m = \begin{bmatrix} & & x_c \\ R_{xyz} & & y_c \\ & & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

O cálculo das angulações de cada perna então é feito utilizando como entrada os valores  $(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik})$  resultantes de cada uma das transformações, conforme a equação 10. O mesmo cálculo é feito para as demais pernas, utilizando  $T_{FL}$ ,  $T_{BL}$  e  $T_{BR}$ .

$$\begin{bmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \\ z_{ik} \\ 1 \end{bmatrix} = (T_m \cdot T_{FR})^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

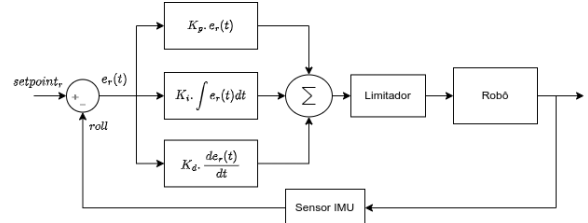
Desta forma, a Cinemática Inversa é capaz de computar as angulações  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  de cada uma das pernas a partir da posição  $(x, y, z)$  das patas em relação ao link central do robô e às translações  $(x_c, y_c, z_c)$  e rotações  $(\alpha, \beta, \gamma)$  desejadas para o corpo. Entretanto, em muitos casos é mais conveniente realizar o cálculo dos ângulos passando como entrada as posições  $(x, y, z)$  das patas em relação à sua posição *default*, ou seja, a posição do seu link quando o robô está em seu estado de repouso (figura 5). Para isso, é possível realizar, previamente ao cálculo das angulações, mais uma transformação, desta vez do *base\_link* para cada uma das posições *default* das patas (equação 11).

$$\begin{bmatrix} x_{ik} \\ y_{ik} \\ z_{ik} \\ 1 \end{bmatrix} = (T_m \cdot T_{FR})^{-1} \cdot (F_{FR} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}) \quad (11)$$

## 4.2 Controle de Rotação

Para realizar o controle de rotação do corpo, foram utilizados dois controladores PID, sendo um responsável por controlar a rotação em  $X$  do robô (*roll*, figura 6) e o outro a rotação em  $Y$  (*pitch*), idêntico ao primeiro. Os controladores atuam de forma paralela e independente, de forma que é possível controlar simultaneamente a rotação do corpo em ambos os eixos.

Figura 6: Titulo da Figura



Fonte: XXX

O Sensor IMU é responsável por realizar as medições de rotação do robô, realimentando o sistema. As saídas dos controles são



enviadas para a cinemática do corpo, e o limitador existe para evitar que sejam enviados valores que extrapolam os limites do robô.

### 4.3 Análise de trajetória

Durante este teste, o corpo do protótipo está estático e suspenso por um suporte e então é solicitado que o pé do robô percorra duas trajetórias curvilíneas calculadas pelo algoritmo proposto, até os pontos  $x_1, y_1$  e  $x_2, y_2$ , detalhados na tabela X.

APRESENTAR TABELA E  
CONSIDERAÇÕES

### 4.4 Controle de velocidade

Para o teste do controle de velocidade, foi enviado um comando de velocidade linear, na direção x, e medido o tempo que o robô levou para alcançar 1,5 m, dessa forma, obteve-se a velocidade média do robô. Neste experimento parte dos testes aconteceram utilizando o controle de estabilidade proposto e a outra parte sem, a fim de analisar a contribuição deste método no equilíbrio do robô ao desempenhar uma trajetória. Os testes ocorreram com os mesmos parâmetros de passo do teste anterior, e em dois terrenos distintos, um terreno regular, feito de concreto e outro irregular, composto por pequenas pedras, como demonstra a imagem W.

APRESENTAR TABELA E  
CONSIDERAÇÕES

### 4.5 Teste 3

## 5 CONCLUSÃO

Neste documento foram descritas as normas que deverão ser observadas por todos os autores para publicação dos artigos. Observadas estas normas, o artigo deve ser enviado através do link a ser definido e informado posteriormente.

## Referências

- 1 ZHANG, X. et al. The quadruped robot locomotion based on force control. **Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 5440–5445, 2015.
- 2 SHI, Y. et al. Structural design, simulation and experiment of quadruped robot. **Applied Sciences (Switzerland)**, MDPI, v. 11, 2021.
- 3 BISWAL, P.; MOHANTY, P. K. **Development of quadruped walking robots: A review**. [S.l.]: Elsevier, 2021. 2017-2031 p.
- 4 YAO, L.; YU, H.; LU, Z. Design and driving model for the quadruped robot: An elucidating draft. **Advances in Mechanical Engineering**, SAGE Publications Inc., v. 13, 2021.
- 5 RAIBERT, M. **Legged robots that balance**. [S.l.]: MIT Press, 1986. 235 p. ISBN 9780262181174.
- 6 ZHONG, Y. et al. **Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review**. [S.l.]: SAGE Publications Inc., 2019.
- 7 TALEBI, S. et al. Quadruped robot running with a bounding gait. **Experimental Robotics VII**, p. 281–289, 2007.
- 8 KITANO, S. et al. Titan-xiii: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. **ROBOMECH Journal**, Springer International Publishing, v. 3, p. 1–16, 2016.
- 9 ZHANG, S. et al. A free gait generation method for quadruped robots over rough terrains containing forbidden areas. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Korean Society of Mechanical Engineers, v. 29, p. 3983–3993, 2015.

- 10 YAN, W. et al. Whole-body kinematic and dynamic modeling for quadruped robot under different gaits and mechanism topologies. **PeerJ Computer Science**, PeerJ Inc., v. 7, 2021.
- 11 JUMANTORO, E.; ALASIRY, A. H.; HERMAWAN, H. Stability optimization on quadruped robot using trajectory algorithm. **Proceedings IES-ETA 2017 - International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 2017-Decem, p. 93–98, 2017.
- 12 LI, J. et al. Gait planning and stability control of a quadruped robot. **Computational Intelligence and Neuroscience**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2016, 2016.
- 13 LIU, D. et al. Stable walking control of parallel wheel-foot robot based on zmp theory. **Chinese Control Conference, CCC**, IEEE Computer Society, p. 6620–6625, 2017.
- 14 CHEN, G. et al. Virtual model control for quadruped robots. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 8, p. 140736–140751, 2020.
- 15 ZHANG, G. et al. Torso motion control and toe trajectory generation of a trotting quadruped robot based on virtual model control. **Advanced Robotics**, Robotics Society of Japan, v. 30, p. 284–297, 2016.