



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JEAN CARLOS FERNANDES DA SILVA

MODELAGEM CINEMÁTICA E PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA NO
CONTEXTO DO FUTEBOL DE ROBÔS

PAU DOS FERROS

2023

JEAN CARLOS FERNANDES DA SILVA

**MODELAGEM CINEMÁTICA E PLANEJAMENTO DE
TRAJETÓRIA NO CONTEXTO DO FUTEBOL DE ROBÔS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Petrócio Ricardo
Tavares De Medeiros- UFERSA

PAU DOS FERROS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D111 Da Silva, Jean Carlos Fernandes.
586 Modelagem cinemática e planejamento de
m trajetória no contexto do futebol de robôs / Jean
Carlos Fernandes Da Silva. - 2023.
39 f. : il.

Orientador: Petrúcio Ricardo Tavares De
Medeiros.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. modelagem cinemática. 2. robótica. 3.
futebol de robôs. 4. planejamento de trajetória. I.
De Medeiros, Petrúcio Ricardo Tavares, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JEAN CARLOS FERNANDES DA SILVA

MODELAGEM CINEMÁTICA E PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA NO CONTEXTO DO
FUTEBOL DE ROBÔS

Monografia apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em Interdis-
ciplinar em Ciência e Tecnologia.

Aprovada em: 20/05/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Petrúcio Ricardo Tavares De
Medeiros (Orientador)
UFERSA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gurgel Da Silva Segundo
UFERSA

Prof. Dr. Cecilio Martins De Sousa Neto
UFERSA

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, que esteve presente em todos os momentos da minha vida. Sem a presença divina em minha jornada, não teria a força e a perseverança necessárias para continuar, especialmente durante a fase difícil da pandemia de Covid-19. No entanto, Ele sempre esteve ao meu lado, fornecendo conforto e esperança para superar os desafios.

Agradeço a minha família, por sempre me apoiar e incentivar em minha jornada acadêmica. Em particular, quero agradecer à minha mãe e à minha namorada por todo o apoio e ajuda que me proporcionaram. Mesmo à distância, elas sempre se fizeram presentes em minha vida e isso significa muito para mim. Minha eterna gratidão a vocês. Obrigado. Amo vocês.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros, por todo o auxílio prestado neste projeto. Ele dedicou seu tempo para expandir minha área de conhecimento e sempre esteve disponível para tirar minhas dúvidas, independentemente do conteúdo. Meus sinceros agradecimentos pela sua orientação valiosa e comprometimento com meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço a Banca Examinadora pelo interesse e disponibilidade em avaliar meu trabalho. Também gostaria de agradecer a todas as pessoas envolvidas, diretamente ou indiretamente, que contribuíram para que este projeto se tornasse realidade. Meus sinceros agradecimentos pelo apoio e incentivo em minha jornada acadêmica.

Agradeço aos meus amigos que conheci na UFERSA, tanto os antigos quanto os novos. Sou imensamente grato pelo impacto que cada um de vocês causou em minha vida. Agradeço por sempre estarem presentes, seja para estudar, conversar ou até mesmo jogar juntos. Seu apoio e companheirismo significaram muito para mim e sempre serão lembrados com carinho.

RESUMO

O futebol de robôs é uma competição anual com propósito de ampliar as pesquisas científicas e tecnológicas na área de robótica. No futebol de robôs, o controle é um desafio que requer a coordenação de vários robôs em tempo real e a tomada de decisões em ambientes dinâmicos. Existem vários modelos de controles que podem ser usados no futebol de robôs, como por exemplo o controle PID. Neste trabalho, propomos a construção de um planejamento de trajetória que atenda às necessidades do robô. Para atingir este objetivo, foi necessário realizar a modelagem cinemática dos robôs considerando a geometria e a movimentação deles. Essa modelagem é usada para projetar trajetórias e estratégias no jogo de futebol de robôs, determinando a posição, velocidade e aceleração. Um planejamento de trajetória foi implementado no simulador Vrep Coppelias usando a modelagem cinemática dos robôs. Com esse sistema, é possível coordenar vários robôs em tempo real e tomar decisões rápidas em um ambiente dinâmico, proporciona uma experiência intensa e emocionante aos participantes do jogo de futebol de robôs.

Palavras-chave: modelagem cinemática; robótica; futebol de robôs; planejamento de trajetória.

ABSTRACT

Robot soccer is an annual competition with the purpose of expanding scientific and technological research in the field of robotics. In robot soccer, control is a challenge that requires coordinating multiple robots in real time and making decisions in dynamic environments. There are several control models that can be used in robot soccer, such as the PID control. In this work, we propose the construction of a trajectory planning that meets the needs of the robot. To achieve this goal, it was necessary to perform the kinematic modeling of the robots considering their geometry and movement. This modeling is used to design trajectories and strategies in the robot soccer game, determining position, velocity and acceleration. A trajectory planning was implemented in the simulator Vrep Coppelias using the kinematic modeling of the robots. With this system, it is possible to coordinate multiple robots in real time and make quick decisions in a dynamic environment, it provides an intense and exciting experience to the participants of the robot soccer game.

Keywords: kinematic modeling; robotics; robot soccer; trajectory planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cenário do futebol de robôs	9
Figura 2 – Imagem do modelo do robô da Ufersa	12
Figura 3 – Imagem do campo de futebol de robôs	13
Figura 4 – Demonstração de pênalti durante uma partida de futebol de robôs	14
Figura 5 – Demonstração de um tiro livre de uma partida de futebol de robôs	15
Figura 6 – Definição dos sistemas de coordenadas	18
Figura 7 – Imagem de um robo da futVAST	19
Figura 8 – Trajetória por campo univetor	22
Figura 9 – Movimentos do robô no plano cartesiano	23
Figura 10 – Decomposição dos vetores V e W	25
Figura 11 – Trajetória de segmento de reta e arco de circunferência	29
Figura 12 – Fluxograma mostrando o sistema de planejamento de trajetórias	30
Figura 13 – Robô pioneerP3DX	31
Figura 14 – Código de planejamento de trajetória	32
Figura 15 – Código de planejamento de trajetória	33
Figura 16 – Código de planejamento de trajetória	34
Figura 17 – Imagem do início da simulação	35
Figura 18 – Imagem do meio da simulação	35
Figura 19 – Imagem do final da simulação	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Problemática	10
1.2	Justificativa	10
1.3	Objetivos	10
1.3.1	<i>Objetivos Gerais</i>	10
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	11
1.4	Organização do trabalho	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Futebol de robôs	12
2.2	Modelagem cinemática	16
2.3	Planejamento de trajetória	17
2.4	Trabalhos relacionados	17
3	METODOLOGIA	23
4	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS	31
4.1	Implementação	31
4.2	Resultados	34
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A modelagem cinemática e planejamento de trajetórias são áreas de pesquisa no campo da robótica. Elas têm sido amplamente estudadas na literatura devido à sua importância para o desenvolvimento de robôs autônomos mais eficientes e precisos, capazes de se movimentar em diferentes ambientes e desempenhar uma ampla gama de tarefas.

Segundo (FAHIMI, 2009), "a modelagem cinemática descreve o movimento de um robô sem levar em consideração as forças que o afetam". Ou seja, a modelagem cinemática se concentra na descrição do movimento do robô em relação ao seu ambiente, sem se preocupar com as forças externas que atuam sobre ele.

O controle de robôs tem sido um campo de estudo e desenvolvimento em constante evolução, de acordo com (BROOKS, 1999), "O controle de robôs não é mais sobre o controle de robôs, mas sim sobre o controle de sistemas complexos." Essa citação destaca a complexidade e a importância de se ter um controle preciso e eficiente sobre as ações dos robôs. Para isso, são aplicadas técnicas avançadas, como algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina, a fim de garantir que os robôs executem suas tarefas de forma segura e eficaz.

Com a crescente importância dos robôs autônomos em diversos setores, a modelagem cinemática e controle de agentes autônomos continuam sendo áreas de pesquisa ativa, com novas técnicas e abordagens sendo desenvolvidas constantemente para melhorar o desempenho dos robôs em diferentes ambientes e tarefas.

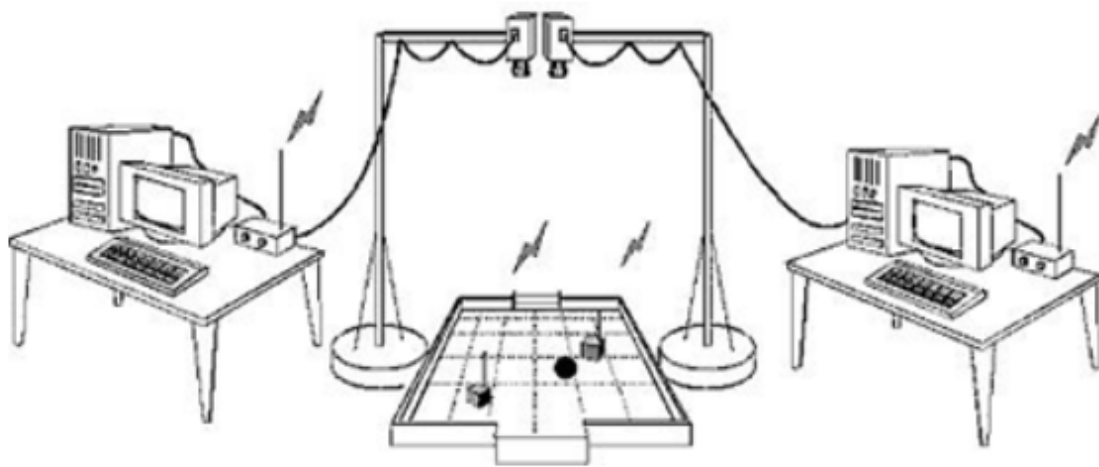
O planejamento de trajetória desempenha um papel fundamental na execução eficiente e precisa de sistemas dinâmicos. O objetivo do planejamento de trajetória é determinar uma sequência de ações e comandos que permitam que um sistema atinja um estado desejado, levando em consideração as restrições e características específicas do sistema e do ambiente em que ele está inserido.

O planejamento de trajetória desempenha um papel crucial no campo do futebol de robôs, uma competição em que equipes de robôs autônomos competem para jogar futebol em um ambiente controlado. Nesse contexto, o planejamento de trajetória envolve o desenvolvimento de estratégias e algoritmos que permitem aos robôs mover-se de forma eficiente e coordenada pelo campo, a fim de alcançar os objetivos do jogo.

O futebol de robôs é uma área de pesquisa que a cada dia vem ganhando espaço nas universidades e instituições federais, com objetivo de desenvolver robôs autônomos capazes de jogar futebol sem intervenção humana. Para alcançar esse objetivo, é necessário que esses robôs

sejam capazes de executar movimentos precisos e rápidos em campo, o que requer sistemas de controle eficientes e robustos. Na categoria IEEE *Very Small Size Soccer* (VSSS) são utilizados três robôs com dimensões de $7,5\text{ cm}^3$ em cada time com o objetivo de fazer o gol, onde cada robô pode ter várias funções no jogo, por exemplo: um atacante, um defensor e um goleiro, que a partir da estratégia de jogo eles revezam para melhor desempenho do time. Na Figura 1 mostra a estrutura de um jogo de futebol de robôs, que contém 5 dispositivos: robôs, bola, sistema de visão, computador e o campo.

Figura 1 – Cenário do futebol de robôs



Fonte: Instituto de Engenharia (2010)

De acordo com (INATEL, 2023), os robôs usados na categoria IEEE *Very Small Size Soccer* (VSSS) são pequenos e têm dimensões limitadas, já a bola usada na (VSSS) é uma bola de golfe laranja. O sistema de visão empregado nessa modalidade de jogo utiliza um suporte para posicionar a câmera a uma altura de 2 metros, permitindo que toda a movimentação dos jogadores e da bola em campo seja capturada em tempo real. Para identificar os times e cada jogador, etiquetas coloridas são utilizadas, enquanto a bola é laranja. Com o auxílio da câmera, um computador processa a imagem e, a partir das informações coletadas, é capaz de calcular a navegação e o posicionamento de cada jogador do time e da bola. O campo utilizado tem as mesmas marcações que tem o campo do futebol de humanos.

1.1 Problemática

Quando se trata de fazer com que um robô saia de uma posição inicial e alcance uma posição final, há vários desafios e problemas a serem considerados. Alguns desses problemas incluem imprecisões devido a erros de medição, incertezas nas características do ambiente, atrito e efeitos não lineares nos componentes do robô, entre outros.

O robô pode encontrar limitações físicas ao tentar se deslocar de uma posição inicial para uma posição final. Restrições como obstáculos no caminho, limitações de espaço e restrições de movimento podem dificultar a execução do movimento desejado.

1.2 Justificativa

O trabalho proposto pretende estudar, mostrar e levantar questões relacionadas à questão de planejamento de trajetória. O planejamento de trajetória é um grande desafio a ser enfrentado pelos arquitetos de robôs.

Dessa forma, pretende-se, neste trabalho, mostrar a construção de um planejamento de trajetória para o futebol de robôs, a partir da modelagem cinemática que fornece uma base sólida e precisa para a criação de trajetórias eficientes e otimizadas, levando em consideração as restrições físicas dos robôs e os objetivos do jogo.

Portanto, o uso da modelagem cinemática no planejamento de trajetória para futebol de robôs resulta em um desempenho melhorado dos robôs durante as partidas, permitindo que o robô saia de uma configuração inicial e alcance uma configuração desejada, onde essa configuração é a posição e orientação do robô.

1.3 Objetivos

Nesta seção, serão apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste projeto é realizar um estudo sobre modelagem cinemática e planejamento de trajetórias para o futebol de robôs.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre modelagem cinemática e planejamento de trajetórias;
- Realizar um estudo sobre futebol de robôs;
- Implementar um planejamento de trajetória a partir do aplicativo Vrep coppelia.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, é realizada uma fundamentação teórica sobre futebol de robôs. Neste capítulo é apresentada a modelagem cinemática, o planejamento de trajetórias e discutido os trabalhos relacionados. No Capítulo 3, é mostrado a metodologia empregada para a construção do trabalho. No Capítulo 4, é descrito como foi feita a implementação e mostra os resultados obtidos. No Capítulo 5, é apresentado a conclusão e os trabalhos futuros.

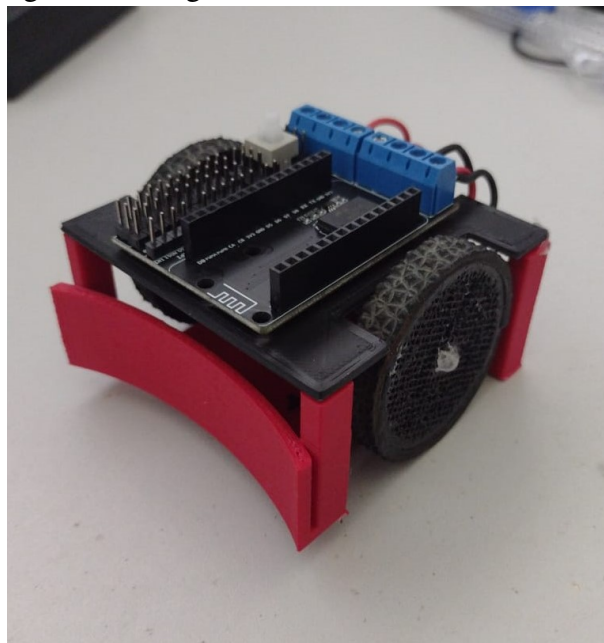
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, serão abordados maiores detalhes sobre o futebol de robôs, modelagem cinemática e controle de malha aberta.

2.1 Futebol de robôs

O futebol de robôs é uma competição anual com propósito de ampliar as pesquisas científicas e tecnológicas na área de robótica, que já vem acontecendo há décadas, de acordo com (PINTO ADAM, 2023), uma partida requer a participação de dois times, compostos por, no máximo, três robôs cada. Durante o jogo, somente três membros de cada time podem estar presentes no campo de competição. É necessário designar um dos membros como capitão, responsável por solicitar tempo, desafios ou interagir com o juiz. Cada equipe pode utilizar um único computador, especialmente dedicado ao processamento visual e reconhecimento de posições, e a partir disso executar a melhor estratégia definida. O jogo só é interrompido quando: um robô tem que ser substituído; um robô caiu de maneira a bloquear o gol; foi marcado um gol ou uma falta; o juiz marcou pênalti, chute livre, bola livre ou tiro de meta. Na Figura 2 temos o robô construído na Ufersa.

Figura 2 – Imagem do modelo do robô da Ufersa



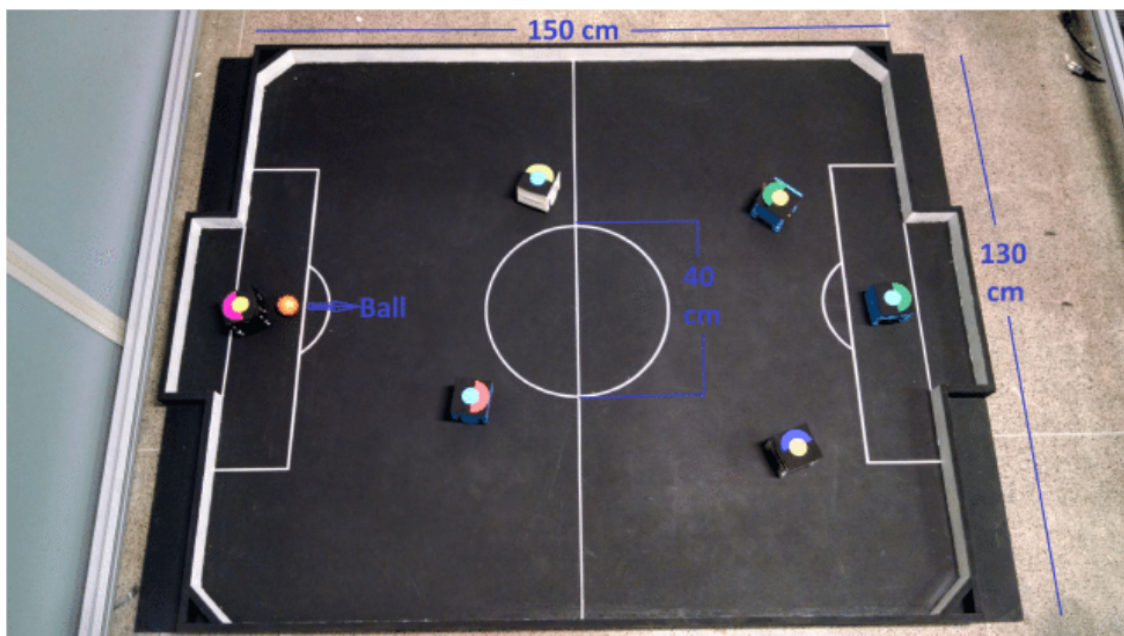
Fonte: Autor (2023)

Cada partida será composta por dois períodos de duração de 5 minutos, seguidos por um intervalo de meio tempo de 8 minutos. A duração da partida e do intervalo podem ser modificados em acordo entre as equipes e a direção, dependendo das condições do campeonato.

Para realizar a identificação dos robôs e da bola em campo, é colocada uma câmera em uma altura de 2 metros, a qual desempenha a função de sistema de visão, a câmera deve ser fixada em cima do meio de campo, incluindo a linha central, de modo que não precise ser movimentada após a trocar o lado no intervalo.

De acordo com (SANTOS G. C; MERCES, 2015), os elementos relevantes para o sistema de visão no ambiente são os seguintes: o campo, que é predominantemente preto com marcações de linhas brancas; a bola, que é completamente laranja; e os robôs, que totalizam seis unidades. Cada robô possui um marcador utilizado para sua identificação. Esses marcadores são compostos por duas cores, sendo uma obrigatoriamente azul ou amarela, representando o time, e a outra cor pode ser escolhida pela equipe, exceto laranja, azul ou amarelo, para permitir a identificação individual de cada robô. Na Figura 3 temos a demonstração de um campo de futebol de robôs com suas medidas, dos robôs e da bola utilizada.

Figura 3 – Imagem do campo de futebol de robôs

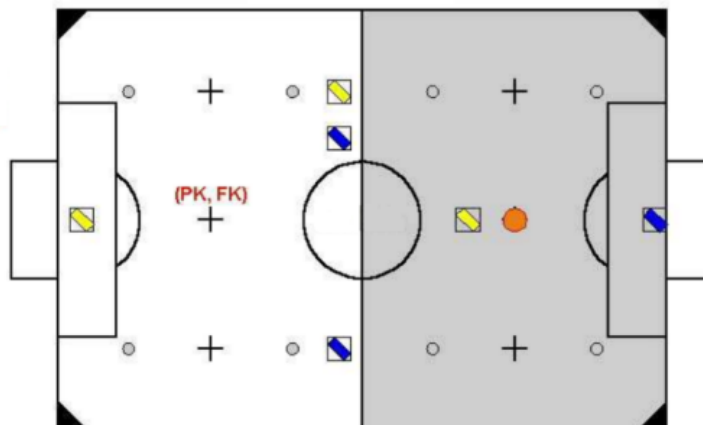


Fonte: SANTOS G. C (2015)

Os robôs devem ter um tamanho máximo de $7,5 \text{ cm}^3$, excluindo a antena de radiofrequência. Eles podem usar uniformes, desde que o tamanho final com o uniforme não exceda 8 cm^3 . O uniforme não pode ser parte integrante do robô, ou seja, o robô deve ser capaz de participar do jogo mesmo sem o uniforme. A bola usada é laranja e tem diâmetro de $4,27 \text{ cm}$ e massa de 46 g , já o campo mede $150 \text{ cm} \times 130 \text{ cm}$.

Em situações de cobrança de pênalti durante o jogo, a bola será colocada na posição apropriada no campo para a cobrança. O robô encarregado de realizar a cobrança deve ser posicionado atrás da bola. Durante a cobrança, pelo menos um dos lados do goleiro deve estar completamente em contato com a linha do gol. O goleiro tem liberdade para se posicionar em qualquer direção. Os outros robôs podem estar posicionados livremente a partir da linha do meio. Após o sinal do árbitro, o jogo é reiniciado normalmente, onde todos os robôs podem se mover. O robô que realiza a cobrança de pênalti pode driblar a bola ou chutá-la. Na Figura 4 mostra como é o posicionamento e uma execução de pênalti durante uma partida de futebol de robôs.

Figura 4 – Demonstração de pênalti durante uma partida de futebol de robôs



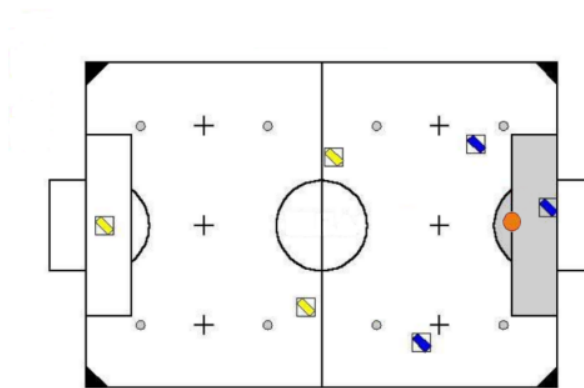
Fonte: Pinto, H, A. (2023)

Em caso de uma disputa de pênaltis após uma prorrogação, somente um jogador de cada equipe será posicionado na arena, enquanto os demais permanecerão fora do campo.

As equipes têm permissão para escolher qualquer um de seus jogadores para participar da disputa, não havendo necessidade de utilizar robôs diferentes para ataque e defesa.

A parte superior dos robôs não pode conter as cores laranja, branco ou cinza, nem ser colorida com cores diferentes da cor preta, a cor do time e as cores definidas pela organização. Uma cor, escolhida entre azul e amarelo pelos organizadores, será usada para identificar times diferentes e deverá ser posicionada em uma região do topo do robô. Na figura 5 vemos a forma de um campo de futebol de robôs e como é batido um tiro livre na partida, onde só pode ter um robô dentro da área do gol.

Figura 5 – Demonstração de um tiro livre de uma partida de futebol de robôs



Fonte: Pinto, H, A. (2023)

Os robôs devem seguir as diretrizes de posicionamento e distribuição de cores, garantindo a padronização das cores utilizadas pelas equipes. As cores oficiais serão distribuídas no início do evento.

A cor de identificação de cada time pode ser alterada a cada partida, portanto, a etiqueta usada para identificar a cor deve ser removível. Quando os times estiverem com as etiquetas com as cores definidas (azul ou amarelo), os robôs não devem ter nenhuma etiqueta com a cor do time adversário.

2.2 Modelagem cinemática

A modelagem cinemática é uma área importante na robótica, que se dedica à análise e descrição do movimento dos robôs. Uma das ferramentas mais importantes para a modelagem cinemática é a utilização de matrizes de transformações homogêneas. Essas matrizes são importantes porque permitem a representação da posição e orientação dos corpos rígidos no espaço tridimensional.

De acordo com (CRAIG, 2006), a matriz homogênea é uma ferramenta fundamental para a modelagem cinemática em robótica, onde a matriz homogênea pode ser usada para representar a transformação espacial de um corpo rígido em relação a outro. O autor destaca que as matrizes homogêneas são uma abordagem conveniente para descrever a transformação espacial de um objeto rígido em relação a outro, sendo, portanto, amplamente empregadas na modelagem cinemática em robótica.

Além disso, as matrizes homogêneas são usadas na cinemática direta e inversa de braços robóticos. Na cinemática direta, as matrizes homogêneas são usadas para calcular a posição e orientação da garra final do robô, a partir das coordenadas das juntas do robô. Já na cinemática inversa, as matrizes homogêneas são usadas para calcular as coordenadas das juntas a partir da posição e orientação desejada do efetuador final do braço robótico.

A matriz homogênea desempenha um papel essencial na modelagem cinemática aplicada à robótica. Essa ferramenta possibilita a representação precisa da posição e orientação de corpos rígidos em um espaço tridimensional. Além disso, as matrizes homogêneas são amplamente empregadas na resolução dos problemas de cinemática direta e inversa em robôs, bem como na modelagem cinemática de robôs móveis. Ao utilizar essas matrizes, é possível obter uma modelagem dos movimentos dos robôs de forma precisa e eficiente.

A partir disso, pode-se começar a implementar as matrizes homogêneas na modelagem cinemática para ter uma representação que descreve os movimentos do robô a partir de sua velocidade e orientação, sem considerar as forças atuantes, por exemplo, a força gravitacional, normal, centrípeta, centrífuga, atrito entre outras. Uma vez que se controla o modelo criado, o modelo real poderá ser manipulado da mesma forma.

2.3 Planejamento de trajetória

O planejamento de trajetórias tem despertado interesse desde a década de 1970 e tem sido amplamente aplicado na resolução de problemas em diversos domínios. Esses problemas variam desde o simples planejamento de percursos espaciais até a seleção de sequências adequadas de ações necessárias para alcançar objetivos específicos. O planejamento de trajetórias pode ser empregado em ambientes conhecidos, parcialmente conhecidos ou até mesmo em ambientes desconhecidos (KARUR K.; SHARMA, 2021).

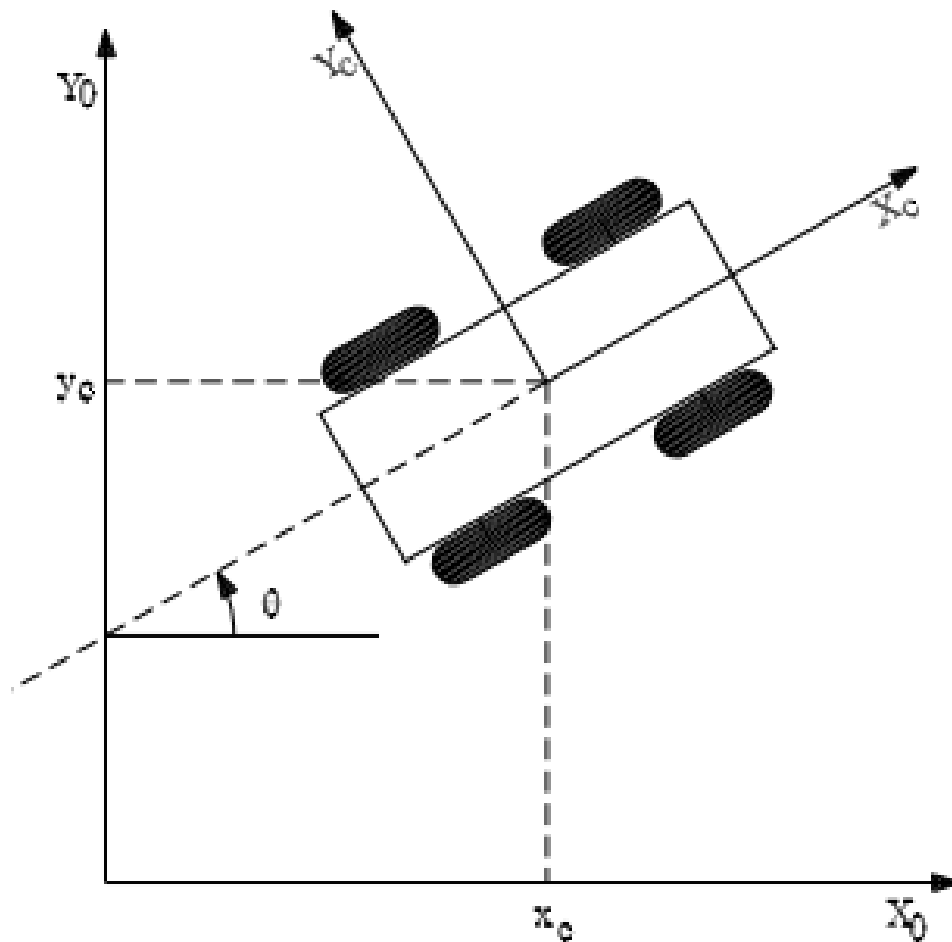
De acordo com (KARUR K.; SHARMA, 2021), os algoritmos de planejamento de trajetórias são diferenciados com base no nível de conhecimento disponível sobre o ambiente. Frequentemente, o robô só possui um conhecimento parcial do ambiente. O planejamento de trajetórias pode ser classificado como local ou global. O planejamento global de trajetórias busca encontrar uma trajetória ótima com base em informações ambientais abrangentes, sendo mais eficiente quando o ambiente é estático e totalmente conhecido pelo robô. Nesse caso, o algoritmo de planejamento de trajetórias gera um caminho completo do ponto de partida até o ponto final antes que o robô comece a seguir a trajetória planejada. O planejamento global de movimento é responsável pelo controle ao nível superior para a navegação pelo ambiente.

Por outro lado, o planejamento local de trajetórias é geralmente realizado em ambientes desconhecidos ou dinâmicos. O planejamento local de trajetórias é realizado enquanto o robô se move, coletando dados dos sensores locais. Nessa situação, o robô é capaz de criar uma nova trajetória em resposta às mudanças no ambiente. Os obstáculos, se existentes, podem ser estáticos ou dinâmicos, eles são estáticos quando sua posição e orientação em relação a um quadro de coordenadas fixo são invariantes no tempo. Já os obstáculos dinâmicos são quando a posição, orientação ou ambos mudam em relação ao quadro de coordenadas fixo.

2.4 Trabalhos relacionados

No artigo Modelagem Cinemática e Dinâmica, a modelagem cinemática é uma das técnicas mais importantes na área de robótica, sendo fundamental para o desenvolvimento de sistemas de controle e navegação de robôs móveis. Segundo (LAGES, 2012), a modelagem cinemática permite descrever o movimento de um robô móvel em termos de sua posição, velocidade e aceleração.

Figura 6 – Definição dos sistemas de coordenadas



Fonte: Lages, W. F. (2012)

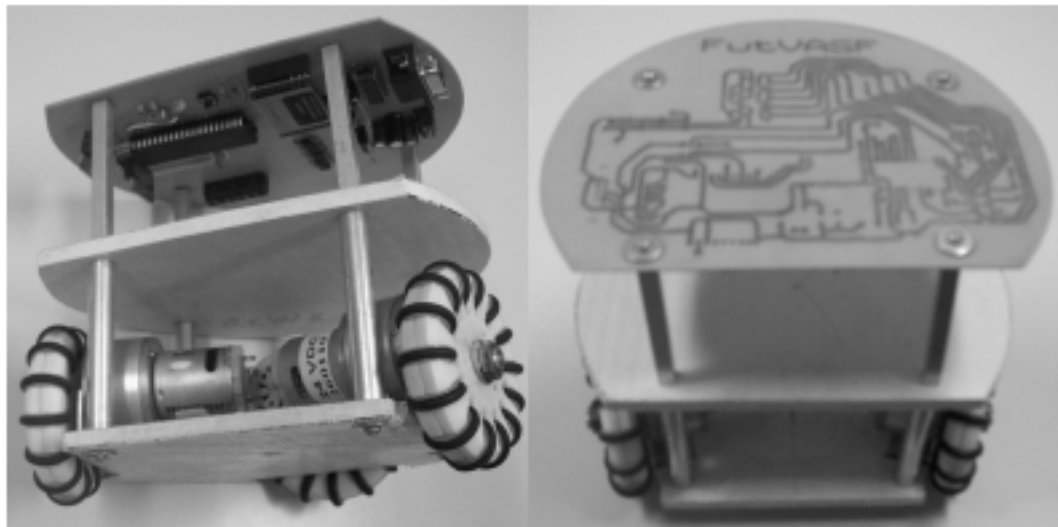
De acordo com (LAGES, 2012), considera um robô móvel composto por um corpo rígido, cujas rodas não sofrem deformação, e que se move no plano horizontal. A posição e a orientação do robô são descritas em relação a um sistema inercial (X_0, Y_0, θ_0) . Um sistema de coordenadas (X_c, Y_c, θ_c) é atribuído ao corpo do robô, conforme explicado na Figura 6.

Um exemplo de aplicação da modelagem cinemática é na criação de modelos para robôs diferenciais. Esses robôs possuem duas rodas que podem girar no mesmo sentido ou em sentidos opostos, permitindo que o robô se mova em linha reta ou realize curvas. Para modelar o movimento desse tipo de robô, é necessário levar em conta a velocidade de cada roda e a distância entre elas. Com base nesses parâmetros, é possível calcular a velocidade linear e angular do robô, bem como sua posição em relação a um ponto de referência.

Outro exemplo apresentado no artigo é a modelagem de robôs holonômicos. Para esses robôs, é necessário levar em conta não apenas a velocidade de cada roda, mas também a direção em que cada roda está apontando. Com base nesses parâmetros, é possível calcular a velocidade linear e angular do robô, bem como sua posição em relação a um ponto de referência. (LAGES, 2012)

No artigo de descrição do time de futebol de robôs da Universidade Federal do Vale do São Francisco(FutVASF) relata que o módulo de controle desempenha um papel fundamental, uma vez que os robôs deslocam-se de forma omnidirecional por meio de três rodas. Nesse sentido, é necessário converter as informações de velocidade e direção em três vetores de velocidades angulares, correspondentes a cada uma das rodas. Obter esses vetores é o objetivo principal desse módulo.(SOARES S. A. F; LINDER, 2010)

Figura 7 – Imagem de um robo da futVAST



Fonte: Soares, S. A. F (2010)

Para determinar a velocidade de cada roda, é preciso projetar o vetor de velocidade resultante do robô (U), nos vetores unitários perpendiculares aos eixos das rodas (F1, F2 e F3). É importante observar que:

$$F1 = [-1, 0] \quad (2.1)$$

$$F2 = [\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}] \quad (2.2)$$

$$F3 = [\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}] \quad (2.3)$$

Segundo (SOARES S. A. F; LINDER, 2010), essa abordagem se baseia na disposição das rodas em ângulos de 120° e no sistema de coordenadas padrão do robô. Caso haja mudanças nos ângulos entre os eixos das rodas, os valores desses vetores devem ser ajustados. Dessa forma, a velocidade angular de cada roda pode ser calculada através do produto interno entre o vetor U e o vetor perpendicular correspondente a cada roda, onde (r) é o raio da roda. como mostrado na Equação 2.4

$$W_j = \frac{UF_j}{r} \quad (2.4)$$

Além disso, é possível controlar a velocidade angular do robô reescrevendo essa Equação 2.4, onde (d) é a distância entre o centro de cada roda e o centro do robô e W representa a velocidade angular do robô. E, a partir da Equação 2.5 podemos obter velocidade angular de cada roda do robô.

$$W_j = \frac{UF_j + dW}{r} \quad (2.5)$$

Segundo (SOUZA J. D. T; ARAÚJO, 2020), foi construído um planejamento de trajetória utilizando o algoritmo RRT para fazer que o robô atinja uma posição desejada sem a colisão com outros robôs durante o caminho. Onde para um robô seguir a trajetória definida pelo algoritmo de planejamento de trajetória, é necessário efetuar o controle da velocidade de cada roda. Desse modo, o controle da posição do robô não se baseia exclusivamente em sua velocidade linear, mas também depende da orientação angular do robô em cada instante durante o deslocamento na trajetória. Para determinar o deslocamento linear e angular do robô é utilizado a modelagem cinemática. Portanto, as velocidades angulares das rodas direita e esquerda é definida utilizando as Equações 2.6 e 2.7:

$$W_r = \frac{(2V + LW)}{2R} \quad (2.6)$$

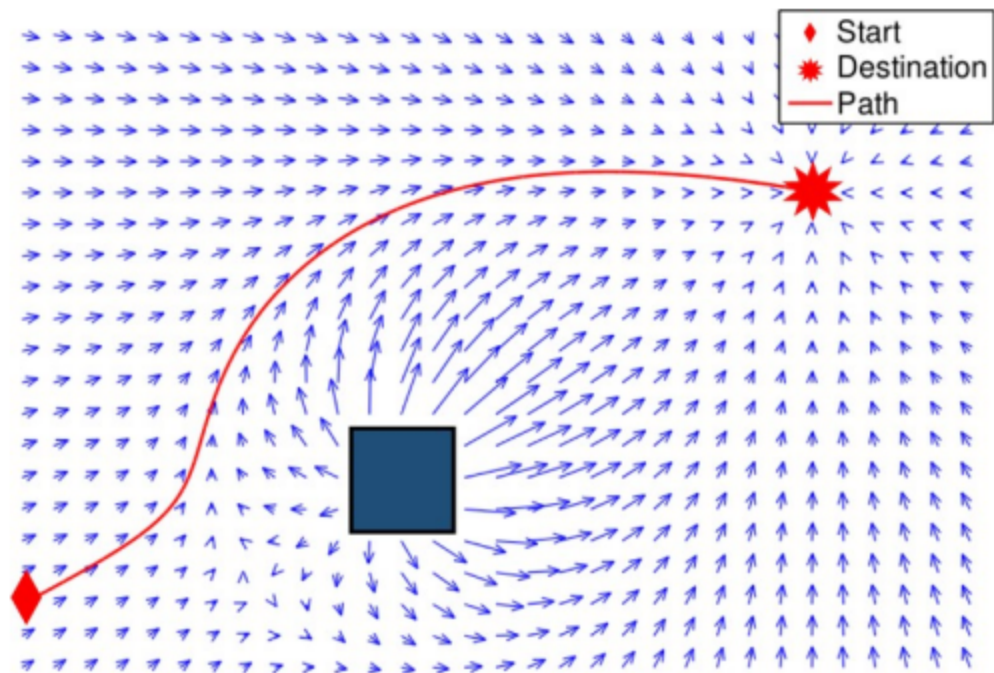
$$W_l = (W_r - L \frac{W}{R}) \quad (2.7)$$

No artigo de descrição do time PinguimBots, descreve o planejamento de trajetória a partir de coordenadas cartesianas, o módulo de controle realiza a conversão para o sistema de coordenadas polares. Isso resulta no cálculo do ângulo do robô, que indica sua direção, e na determinação da distância em linha reta até a bola.

De acordo com (ROSSETTO A. C. J; GRESSLER, 2020), o processamento desses dados, é estabelecido um modelo cinemático com o controle de Lyapunov. Esse modelo permite estabelecer relações matemáticas entre os atuadores e as variáveis controláveis, garantindo estabilidade mesmo quando as relações entre essas variáveis não são lineares. Dessa forma, é possível controlar a trajetória do robô até a bola e, posteriormente, até o gol, quando o robô estiver em posse da bola.

No artigo de descrição da equipe do ITAndroids, é relatado que o planejamento de trajetórias é realizado por meio de um campo vetorial unitário ilustrado na Figura 8, no qual apenas o ângulo desejado é controlado. Esse campo é criado ao estabelecer forças atrativas em relação ao destino desejado e forças repulsivas em relação aos obstáculos presentes no caminho(YAMANE K. S; CYSNE, 2020).

Figura 8 – Trajetória por campo univetor



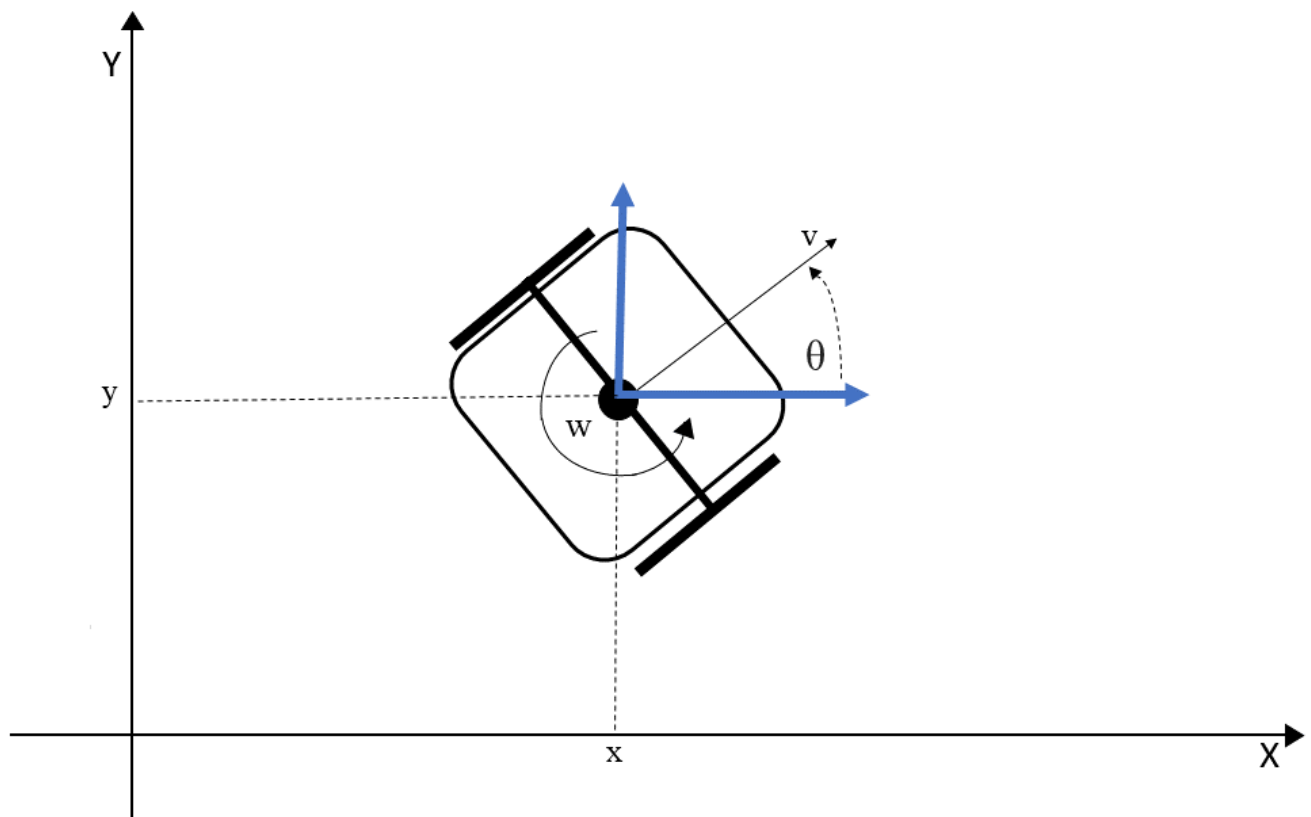
Fonte: Yamane, et al.(2020)

3 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico com palavras chaves relacionadas a modelagem cinemática e planejamento de trajetórias. A pesquisa explorou artigos científicos, livros e publicações em diversos periódicos como IEEEExplore e Portal de periódicos da CAPES. O objetivo é obter uma base sólida de conhecimentos teóricos e práticos sobre modelagem cinemática e planejamento de trajetória voltado para o futebol de robôs e mostrar alguns trabalhos na área.

Posteriormente foi utilizado a modelagem cinemática para obter ter um planejamento de trajetórias a partir das equações encontradas. Como pode-se visualizar na Figura 9, a obtenção das equações que descrevem o movimento do robô será com base em um sistema de coordenadas fixo no plano cartesiano, a fim de descrever sua posição e orientação, tomando como referencial o centróide do corpo.

Figura 9 – Movimentos do robô no plano cartesiano



Fonte: Autor (2023)

Assumindo que as rodas do robô não sofrem deformações e se movimentam no plano horizontalmente, a posição e orientação do corpo podem ser escritas em relação ao sistema de coordenadas $[x, y, \theta]'$. A projeção dos componentes x e y serão realizadas com base na decomposição de vetores, onde o vetor velocidade linear (V) expressa pela razão entre a variação da posição e a variação do tempo, parte do centro do corpo, como mostrado na Figura 9, e está rotacionado em relação ao eixo z devido a sua angulação. Fazendo a projeção horizontal do vetor v em relação ao eixo x e a projeção vertical do mesmo vetor associado ao eixo y , pode-se calcular o módulo dos componentes, partindo das definições de seno e cosseno e a variações do ângulo (θ) formado entre o vetor velocidade e o eixo x , temos as Equações 3.1: e 3.2:

$$V_x = V \cos(\theta) \quad (3.1)$$

$$V_y = V \sin(\theta) \quad (3.2)$$

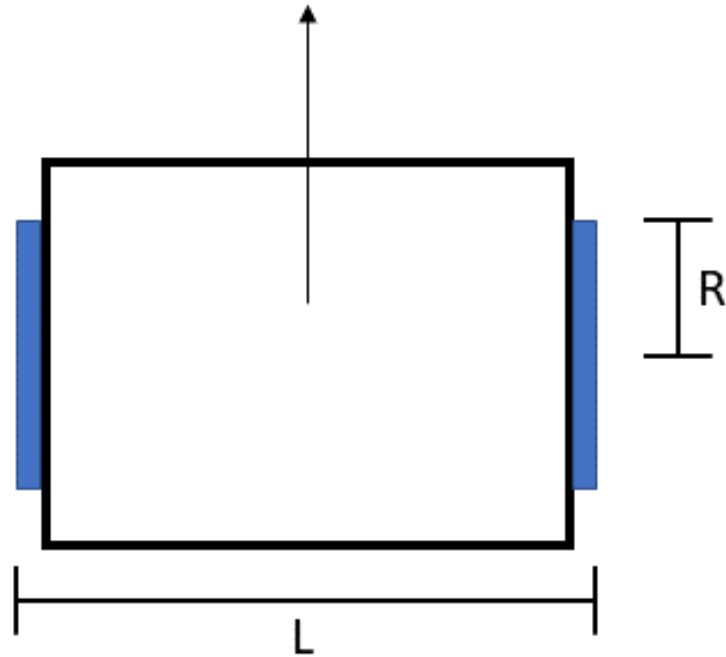
Em relação à velocidade angular (W), que expressa o valor da medida do arco de circunferência descrito por um objeto em um intervalo de tempo, não haverá componentes em x e y , porque a rotação é realizada em torno do próprio eixo. Portanto, derivando as componentes da posição, pode-se fazer uma relação entre as de rotação com relação ao sistema de coordenadas inercial, temos a Equação 3.3:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ W \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

De acordo com a Equação 3.3, temos a posição e orientação do corpo escritas em relação ao sistema de coordenadas $[x, y, \theta]$.

Para a descrição das velocidades angulares das rodas, consideraremos a seguinte Figura 10.

Figura 10 – Decomposição dos vetores V e W



Fonte: Autor (2023)

Sabendo que na cinemática o robô é tratado como uma partícula no espaço, já que não considera as forças atuantes, temos que o vetor da velocidade angular pode ser escrito da seguinte forma.

$$V = \frac{D}{T} \quad (3.4)$$

$$W = \frac{V}{R} \quad (3.5)$$

$$V = WR \quad (3.6)$$

Onde R é o raio do movimento angular que o robô realiza em torno de seu eixo, a modelagem só terá significado caso seja levada em consideração se os raios das duas rodas forem iguais. Aplicando a equação da velocidade linear acima para as duas rodas, na velocidade linear da roda direita (V_r) vamos ter a Equação 3.7 e na velocidade linear da roda esquerda (V_l) vamos ter a Equação 3.8.

$$Vr = RWr \quad (3.7)$$

$$Vl = RWl \quad (3.8)$$

Considerando que a distância da metade de uma roda até o centróide do robô é $L/2$, podemos reescrever as Equações 3.9 e 3.10, segue-se então que,

$$Vr = W(R + L/2) \quad (3.9)$$

$$Vl = W(R - L/2) \quad (3.10)$$

Utilizando as relações das velocidades lineares e angulares nas rodas para deduzir a velocidade angular na roda direita(Wr) e esquerda(Wl), obtemos as Equações 3.11 e 3.12.

$$Wr = Vr / (R + L/2) \quad (3.11)$$

$$Wl = Vl / (R - L/2) \quad (3.12)$$

A movimentação do robô depende da combinação das velocidades angulares das rodas do robô. Podemos combinar essas velocidades através da soma das velocidades angulares obtidas nas Equações 3.11 e 3.12. De forma similar, podemos encontrar velocidades angulares distintas nos atuadores robóticos e para representar isso podemos combinar as velocidades através da diferença como pode ser observado nas Equações 3.13 e 3.14.

$$W = \frac{(Vr - Vl)}{(R + L/2) - (R - L/2)} \quad (3.13)$$

$$W = \frac{R(Wr - Wl)}{L} \quad (3.14)$$

Da mesma forma que subtraímos, faremos a adição, relacionado 3.15 para achar a Equação 3.16

$$W = \frac{Vr + Vl}{(R + L/2) + (R - L/2)} \quad (3.15)$$

$$W = \frac{R(Wr + Wl)}{2R} \quad (3.16)$$

Considerando a equação 3.16 em função de V temos, lembrando que $V = W \cdot R$, por substituição, obtemos a Equação 3.17

$$V = \frac{R(Wr + Wl)}{2} \quad (3.17)$$

Dessa forma, temos as equações lineares do comportamento dos pontos das rodas externas do robô. Recordando o modelo cinemático de V , podemos substituir a velocidade encontrada anteriormente na decomposição de x e y . Logo, temos a representação matricial 3.18. Considerando que $W = R(Wr - Wl)/L$.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r \cos(\theta)}{2} & \frac{r \cos(\theta)}{2} \\ \frac{r \sin(\theta)}{2} & \frac{r \sin(\theta)}{2} \\ \frac{r}{L} & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Wr' \\ Wl' \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Para encontrar as velocidades angulares de cada roda, utilizaremos as Equações de velocidade angular, 3.5 e velocidade linear, 3.6, vistas anteriormente.

$$W = \frac{R(Wr - Wl)}{L} \quad (3.19)$$

$$WL = RWr - RWl \quad (3.20)$$

Reorganizando as Equações 3.19 e 3.20 obtemos as Equações 3.21 e 3.22.

$$RWr = WL + RWl \quad (3.21)$$

$$RWl = RWr - WL \quad (3.22)$$

Substituindo os valores de RWr e RWl na equação de velocidade linear 3.6, teremos a velocidade angulares das rodas.

$$Wr = \frac{(2V + WL)}{2R} \quad (3.23)$$

$$Wl = \frac{(2V - WL)}{2R} \quad (3.24)$$

Portanto, temos as equações que definem o comportamento das velocidades angulares na roda direita (Wr) é a Equação 3.23 e na roda esquerda (Wl) é a Equação 3.24. Essas duas equações são geradas através da velocidade linear e velocidade angular de movimentação do robô, bem como do comprimento do robô e do raio das rodas.

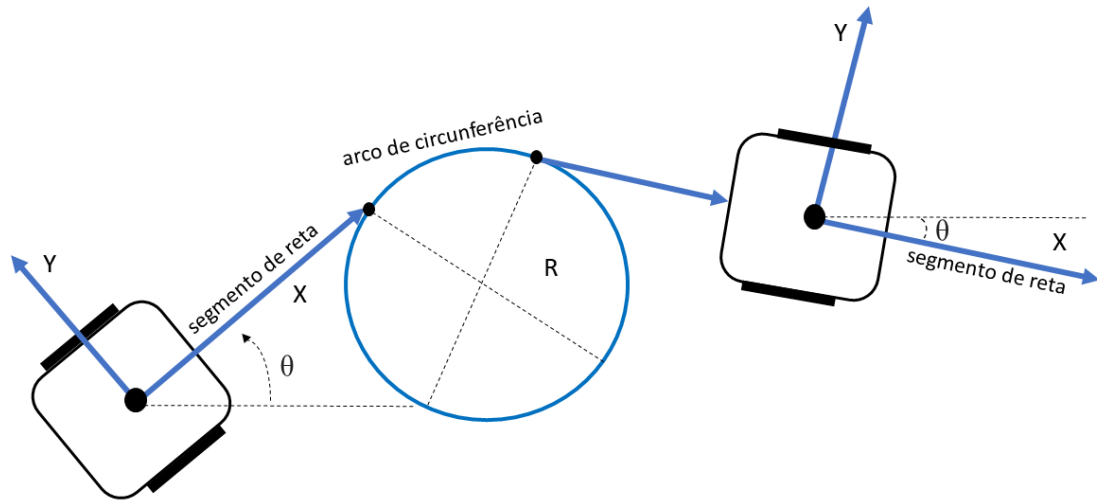
A partir das equações encontradas vamos utilizá-las para construir um código e implementá-lo, para fazer o robô sair de uma posição e orientação e chegar em outra posição e orientação desejada, utilizando segmentos de retas e arcos de circunferência para gerar a trajetória.

O segmento de reta é frequentemente utilizado para descrever trajetórias retilíneas, representando a rota mais curta entre dois pontos no espaço, permitindo especificar a posição de destino que o sistema deve alcançar. Ao definir um segmento de reta como parte da trajetória desejada, é possível enviar comandos para guiar o sistema ao longo dessa linha reta, alcançando assim o objetivo desejado.

Por sua vez, o arco de circunferência desempenha um papel crucial na descrição de trajetórias curvas. onde o arco de circunferência é utilizado para criar curvas suaves e definir caminhos curvilíneos para o sistema. Ao especificar um arco de circunferência como parte da trajetória desejada, é possível planejar e enviar comandos que direcionam o sistema ao longo desse arco, permitindo alcançar a posição desejada de forma suave e precisa.

A combinação de segmentos de reta e arcos de circunferência permite criar trajetórias complexas e controlar o sistema de forma eficiente. Por exemplo, é possível planejar uma trajetória composta por uma sequência de segmentos de reta e arcos de circunferência, permitindo ao sistema percorrer diferentes caminhos e atingir várias posições de destino. Um exemplo é na figura 11.

Figura 11 – Trajetória de segmento de reta e arco de circunferência



Fonte: Autor (2023)

Para fazer o cálculo dos segmentos de reta e arco de circunferência utilizaremos as variáveis: raio do arco de circunferência (R), velocidade linear das rodas do robô (V), velocidade angular das rodas do robô (W), deslocamento (D), comprimento da circunferência (C) e o tempo (T). A partir das variáveis temos as seguintes Equações 3.25 , 3.26. e 3.27

$$T = \frac{D}{V} \quad (3.25)$$

$$C = \frac{2\pi R}{4} \quad (3.26)$$

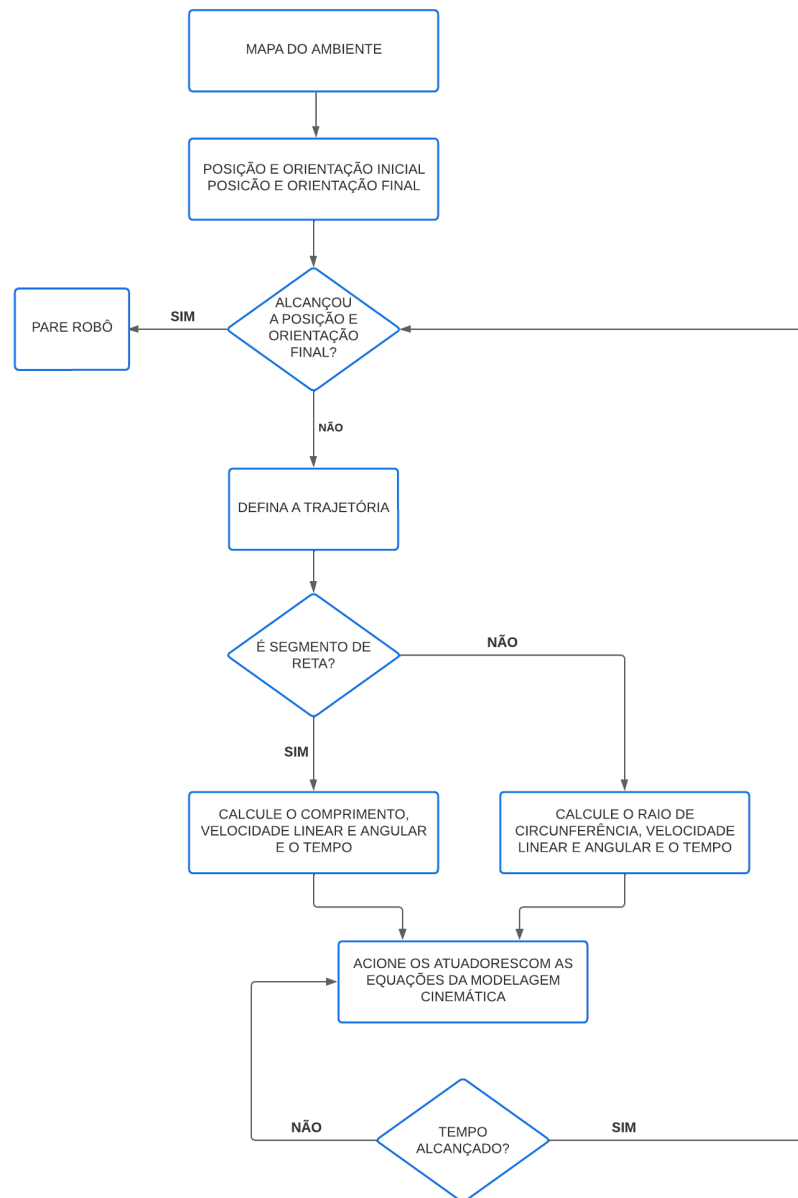
$$W = \frac{V}{R} \quad (3.27)$$

onde no segmento de reta só vai utilizar a Equação 3.25, já no arco de circunferência vai ser utilizado todas as equações.

Espera-se que o sistema funcione da seguinte maneira: o sistema vai traçar um planejamento de trajetórias, dizendo quais caminhos vão ser utilizados, se o robô vai utilizar um segmento de reta ou um arco de circunferência, e a partir da escolha ele vai pedir as variáveis

que serão usadas em cada um dos caminhos e traçar a melhor trajetória até chegar ao ponto final. Como podemos ver na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma mostrando o sistema de planejamento de trajetórias



Fonte: Autor (2023)

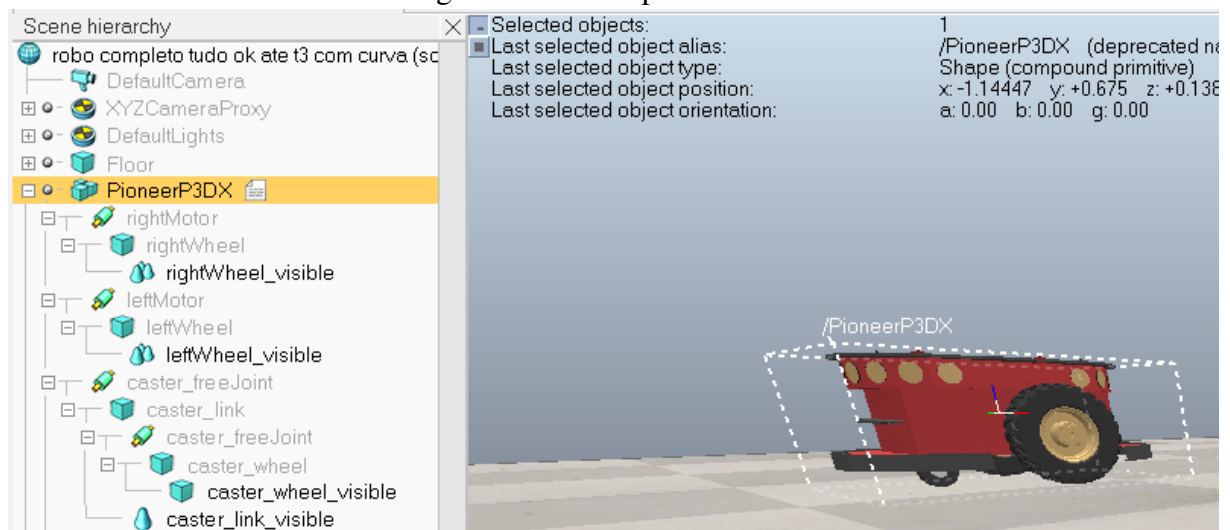
Para a elaboração do projeto foram empregados os conhecimentos teóricos adquiridos na modelagem cinemática, para desenvolver um sistema de planejamento de trajetórias para o futebol de robôs. Foi fundamental realizar a seleção criteriosa das variáveis relevantes, estabelecendo as equações de trajetórias para implementação do sistema em um ambiente simulado e realizar testes para avaliar sua eficácia.

4 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

4.1 Implementação

A Implementação do sistema de planejamento de trajetórias foi realizada no robô Pioneer3DX no *Virtual Robot Experimentation Platform* (V-REP), também conhecido como CoppeliaSim, é uma plataforma de simulação robótica amplamente utilizada na pesquisa e desenvolvimento de sistemas autônomos. Com sua interface intuitiva e recursos avançados, o V-REP proporciona um ambiente virtual realista para modelar e simular robôs, ambientes e interações complexas. Na Figura 13, demonstra o robô pioneer3DX no V-REP.

Figura 13 – Robô pioneer3DX



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 14, é apresentado o início do código utilizado para planejamento de trajetória na linguagem Lua. Inicialmente, foi empregada a função "iniciar" da segunda à sétima linha para criar o objeto robô e seus motores, nomeadamente o motor direito e esquerdo. Posteriormente, o comando para determinar o tempo inicial foi utilizado, e, por último, a função foi encerrada com o comando "end".

Figura 14 – Código de planejamento de trajetória

```

1  function sysCall_init()
2      local robot=sim.getObject('.')
3      local obstacles=sim.createCollection(0)
4      sim.addItemToCollection(obstacles,sim.handle_all,-1,0)
5      sim.addItemToCollection(obstacles,sim.handle_tree,robot,1)
6      motorLeft=sim.getObject("./leftMotor")
7      motorRight=sim.getObject("./rightMotor")
8      start_time = sim.getSimulationTime()
9  end
10
11 function sysCall_cleanup()
12
13 end
14
15 function sysCall_actuation()
16     --deslocamento em metros.
17     deslocamento = 4
18     --velocidade linear em m/s.
19     velocidade = 3
20     --tempo em s.
21     tempo1 = deslocamento/velocidade
22     atual_time = sim.getSimulationTime()
23     if ( atual_time - start_time < tempo1 ) then
24         sim.setJointTargetVelocity(motorLeft,velocidade)
25         sim.setJointTargetVelocity(motorRight,velocidade)
26     else
27         --deslocamento em metros.

```

Fonte: Autor (2023)

A terceira função é a função de atuação, onde é fornecido um deslocamento desejado e uma velocidade. Ao dividir o deslocamento pela velocidade, obtém-se o tempo1. Em seguida, é utilizado um comando para armazenar o tempo atual. Dessa forma, foi empregada uma estrutura de repetição "if" para verificar se a diferença entre o tempo atual e o tempo inicial é menor que o tempo1. Caso essa condição seja verdadeira, o valor da variável "velocidade" é adicionado aos motores. Ambos os motores terão a mesma velocidade devido à variável mencionada, resultando no movimento retilíneo do robô até alcançar o ponto desejado.

Figura 15 – Código de planejamento de trajetória

```

27  --deslocamento em metros.
28  c2= 2
29  --raio em metros.
30  r2 = 5
31  -- velocidade linear em m/s.
32  v2 = 1
33  --distancia entre o centro de cada roda e o centro do robo em metros.
34  L2 = 0.1
35  -- tempo em s.
36  tempo2 = c2/v2
37  -- velocidade angular em rad/s.
38  w2 = v2 / r2
39  -- velocidade angular do motor esquerdo em rad/s.
40  wL2 =(2 * v2 - w2 * L2)/2 * r2
41  -- velocidade angular do motor direito em rad/s.
42  wR2 = (2 * v2 + w2 * L2)/2 * r2
43
44  if (atual_time - start_time - tempo1 < tempo2)then
45      vLeft=wL2
46      vRight=wR2
47  else
48      --deslocamento em metros.
49      c3= 5
50      --raio em metros.
51      r3 = 5
52      --velocidade linear em m/s.
53      v3 = 0.6
54      --distancia entre o centro de cada roda e o centro do robo em metros.
55      L3 = 0.1
56      -- tempo em s.
57      tempo3 = c3/v3
58      -- velocidade angular em rad/s.
59      w3 = v3 / r3
60      -- velocidade angular do motor esquerdo em rad/s.

```

Fonte: Autor (2023)

Quando a diferença entre o tempo atual e o tempo inicial for igual ou maior que o tempo1, a opção "else" será ativada, conforme ilustrado na Figura 15. Nessa situação, serão fornecidas novas coordenadas, como deslocamento, raio, velocidade linear e angular, novo tempo, bem como a velocidade dos motores direito e esquerdo.

Dentro da estrutura de decisão "if", se a diferença entre o tempo atual, o tempo inicial e o tempo1 for menor que o tempo2, a velocidade angular do motor esquerdo será enviada para o motor esquerdo e a velocidade angular do motor direito será enviada para o motor direito. Quando o tempo2 for igual ou menor que a condição mencionada, a opção "else" será ativada, fornecendo novos valores de deslocamento, raio, velocidade linear e angular, tempo, bem como a velocidade angular dos motores direito e esquerdo.

Figura 16 – Código de planejamento de trajetória

```

60      -- velocidade angular do motor esquerdo em rad/s.
61      wL3 =(2 * v3 - w3 * L3)/2 * r3
62      -- velocidade angular do motor direito em rad/s.
63      wR3 = (2 * v3 + w3 * L3)/2 * r3
64
65      if (atual_time - start_time - tempo1 - tempo2 < tempo3)then
66
67          vLeft=wL3
68          vRight=wR3
69
70      else
71          vLeft=0
72          vRight=0
73      end
74  end
75  sim.setJointTargetVelocity(motorLeft,vLeft)
76  sim.setJointTargetVelocity(motorRight,vRight)
77  end
78
79
80  end

```

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 16, encontramos outro bloco condicional "if", no qual a condição é estabelecida pela diferença entre o tempo atual, o tempo inicial, o tempo1 e o tempo2, que deve ser menor que o tempo3. Se essa condição for satisfeita, os motores receberão as velocidades angulares correspondentes a cada um. Caso contrário, ou seja, se a condição não for atendida, os motores receberão o valor zero, indicando que o robô parou. Por fim, todos os blocos "end" presentes no código são fechados.

4.2 Resultados

A partir do sistema de planejamento de trajetórias projetado e implementado no aplicativo V-REP Coppelia, foi criado um ambiente de simulação realista para o futebol de robôs e avaliar o desempenho do sistema em um contexto prático.

Como podemos ver na Figura 17, o início da simulação do planejamento de trajetória que parte de uma posição e orientação e tem como objetivo passar entre 3 obstáculos, sem bater em nenhum para chegar em outra posição e orientação.

Figura 17 – Imagem do início da simulação



Fonte: Autor (2023)

A presente Figura 18, retrata o robô posicionado no centro de uma simulação, após ter realizado uma manobra de desvio à esquerda de um obstáculo. Essa manobra foi efetuada mediante as velocidades angulares dos motores direito e esquerdo.

Figura 18 – Imagem do meio da simulação



Fonte: Autor (2023)

Por fim, o robô executa uma rotação para a direita a fim de contornar os outros dois obstáculos e chega na posição e orientação desejada, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Imagem do final da simulação



Fonte: Autor (2023)

Para avaliar o desempenho do planejamento de trajetória implementado no VREP Coppelia, foram conduzidos testes e análises abrangendo retas e curvas. Nessa simulação foi feita inicialmente uma reta, posteriormente uma curva para esquerda e depois uma curva para a direita.

Com base nos resultados obtidos, será elaborada uma conclusão sobre a eficácia do planejamento de trajetória no contexto do futebol de robôs, bem como recomendações para estudos futuros e aprimoramentos do sistema.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa científica abordou a questão da modelagem cinemática e planejamento de trajetórias no contexto do futebol de robôs. Neste trabalho, o autor buscou mostrar a implementação de um planejamento de trajetórias para o futebol de robôs através da modelagem cinemática.

Tendo em vista toda a discussão sobre a modelagem cinemática e planejamento de trajetórias para o futebol de robôs, fica evidente que a implementação desse modelo pode trazer avanços significativos para a capacidade dos robôs em jogar futebol com autonomia e competitividade. Esses avanços, por sua vez, podem impulsionar o desenvolvimento tecnológico na área da robótica e automação.

Em pesquisas futuras, pretendemos aprimorar o sistema e também propor outras implementações de métodos de planejamento de trajetórias e comparar com os resultados obtidos com esse método que utiliza a modelagem cinemática.

A integração de um sistema de controle adequado para o planejamento de trajetória utilizado, para melhorar a coordenação dos robôs no campo de futebol, como posicionamento, troca de passes eficientes e a realização de jogadas de ataque coordenadas.

REFERÊNCIAS

- BROOKS, R. A. **Cambrian intelligence: The early history of the new AI**. Boston: MIT Press, 1999. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=btvRZ5rj51EC&oi=fnd&pg=PR7&dq=BROOKS,+R.+Cambrian+Intelligence:+The+Early+History+of+the+New+AI.+Cambridge,+MA:+MIT+Press,+1999.&ots=eYSmq1W-2e&sig=bHubMBKmVzeVxkBrBx2rKwe8YV8&redir_esc=y#v=onepage&q=BROOKS%2C%20R.%20Cambrian%20Intelligence%3A%20The%20Early%20History%20of%20the%20New%20AI.%20Cambridge%2C%20MA%3A%20MIT%20Press%2C%201999.&f=false.>. Acesso em: 15 fev. 2023.
- CRAIG, J. J. **Introduction to robotics**. Boston: Pearson Education, 2006. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=hRzOp_qdxG8C&oi=fnd&pg=PR5&dq=CRAIG,+John+J+livro+robotica&ots=fR8d9_XzYp&sig=2hxdfLeXI3214ZjhRUU-V-bJByI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- FAHIMI, F. **Autonomous robots**. Boston: Springer, 2009. Disponível em <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-09538-7>>. Acesso em: 20 fev. 2023.
- INATEL. **Futebol VSSS**. [S.l.], 2023. Disponível em <<https://www.inatel.br/robotica/categorias/futebol-vss>>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- KARUR K.; SHARMA, N. C. S. J. A survey of path planning algorithms for mobile robots. **Vehicles**, 2021. Disponível em <<https://doi.org/10.3390/vehicles3030027>>. Acesso em: 1 mar. 2023.
- LAGES, W. F. Modelagem cinemática e dinâmica. **UFRGS**, 2012. Disponível em <<https://ModelagemCinemáticaeDinâmica>>. Acesso em: 5 abr. 2023.
- PINTO ADAM, H. M. **Regras IEEE Very Small Size Soccer (VSSS) - Série A**. [S.l.], 2023. Disponível em <<https://www.cbrobotica.org/wp-content/uploads/2023/04/regrasVSS23.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- ROSSETTO A. C. J; GRESSLER, C. e. a. Descrição da equipe pinguimbots - categoria very small size soccer 2020. 2020. Disponível em <<https://github.com/VSSSLeague/vss/blob/master/tdp/TDP2020/pinguimBots.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- SANTOS G. C; MERCES, R. P. F. S. F. e. a. Evoluindo o projeto de robôs para liga de futebol very smallsize soccer. 2015. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/281287548_Evoluindo_o_projeto_de_robos_para_liga_de_futebol_Very_Small_Size_Soccer>. Acesso em: 06 abr. 2023.
- SOARES S. A. F; LINDER, M. e. a. Artigo de descrição do futvasf: time de futebol de robôs da universidade federal do vale do são francisco. **UFRGS**, 2010. Disponível em <<http://www.univasf.edu.br/~brauliro.leal/pesquisa/Soares-1.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2023.
- SOUZA J. D. T; ARAÚJO, J. E. A. e. a. Maracatronics vss team description paper for larc 2020. 2020. Disponível em <<https://github.com/VSSSLeague/vss/blob/master/tdp/TDP2020/maracatronics.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2023.
- YAMANE K. S; CYSNE, N. S. e. a. Itandroids very small size soccer team description paper for larc 2020. 2020. Disponível em <<https://github.com/VSSSLeague/vss/blob/master/tdp/TDP2020/itandroids.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2023.