

Relatório de Atividade

Teoria de Conjuntos Nebulosos

Débora Oliveira
Prof Antonio Marcus, Automação Inteligente 20.3

26 de novembro de 2020

Esse documento tem por objetivo descrever a implementação de um controlador de lógica nebulosa para um robô de tração diferencial (RTD) que navega em um ambiente não-mapeado. Primeiramente, foram construídos quatro comportamentos conforme uma lógica fuzzy: busca do alvo (*Goal Seeking*), desvio de obstáculos (*Obstacle Avoidance*), rastreo de corredores (*Tracking*) e solução de impasse (*Deadlock*). Em seguida, foi implementado um controlador de integração para definir qual dessas ações deverá ser simulada para o robô Pioneer 3-DX em um ambiente desconhecido na plataforma CoppeliaSim. Para finalizar os estudos sobre lógica nebulosa, foram implementados e simulados quatro controladores em lógica fuzzy referente aos veículos de Braitenberg *fear*, *agresion*, *love* e *curious*.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A navegação de robôs móveis autônomos em ambientes desconhecidos é fundamentada na odometria. A partir da distância entre o robô e um obstáculo é possível refinar a trajetória planejada entre a posição atual do RTD e a posição do alvo. Esse controle é efetuado a partir da velocidade linear v e angular ω do robô.

Tendo em vista que a ação de controle é baseada integralmente sobre a odometria, fica clara a necessidade de minimizar as perturbações por ruídos de medição. A teoria de conjuntos nebulosos é capaz de tratar essa incerteza por meio de regras linguísticas.

Este estudo de um controlador de lógica nebulosa para um robô de tração diferencial é fundamentado na arquitetura descrita por Bao et al. (2009). Cada conjunto de normas (*Goal Seeking*, *Obstacle Avoidance*, *Tracking* e *Deadlock*) operam em paralelo e especificam comportamentos pré-determinados. Dessa forma, é preciso um controlador integrador que arbitre os conflitos de controle simultâneo do atuador por múltiplos conjuntos de regras.

Analogamente, este estudo finaliza a discussão sobre controladores fuzzy apresentando a implementação de quatro veículos de Braitenberg: *fear*, *agresion*, *love* e *curious* (RAÑÓ, 2012). Cada um desses comportamentos representa atração ou repulsão suave ou agressiva do robô RTD em relação a uma fonte de luz.

1.1 MODELOS SIMULADOS

O modelo de RTD utilizado para simular o controlador fuzzy foi o Pioneer 3-DX. Esse robô possui 16 sensores de ultrassom, os quais fornecem as distâncias entre o RTD e os obstáculos localizados no ambiente não-mapeado.

Foram selecionados três conjuntos de sensores:

- Lateral esquerdo: composto pelo sensor 1, informa a distância D_L entre o RTD e o obstáculo a esquerda;
- Lateral direito: composto pelo sensor 8, informa a distância D_R entre o RTD e o obstáculo a direita;
- Frontal: composto pelos sensores 4 e 5, informa a distância $D_F = \min(d_4, d_5)$ entre o RTD e o obstáculo a frente do robô;

Por sua vez, para a simulação dos veículos de Braitenberg, foram acoplados dois sensores de visão às conexões superiores 3 e 5 do P3DX. Esses sensores foram rotacionados 180 graus para apontar corretamente para a fonte luminosa.

1.2 VARIÁVEIS DE CONTROLE

Em um ambiente simulado, são conhecidas a pose $[x, y, \theta]$ do robô e a posição $[x_g, y_g]$ do alvo em relação ao sistema de coordenadas universal fixo no mundo. A partir desses dados é possível determinar a distância D e ângulo ϕ entre o RTD e o alvo:

$$D = \sqrt{(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2} \quad (1)$$

$$\phi = \arctan \frac{y - y_g}{x - x_g} - \theta \quad (2)$$

A partir de D e ϕ são determinados ν e ω . Para os veículos de Braitenberg, ν e ω são determinados conforme a intensidade da luz detectada por cada sensor de luminosidade.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 NAVEGAÇÃO EM AMBIENTE NÃO-MAPEADO

Conforme supracitado, são quatro os controladores desenvolvidos de lógica difusa para navegação em ambiente desconhecido. Cada uma das ações de controle traduzem os resultados da odometria D_F , D_R e D_L em valores linguísticos. Em seguida, são identificadas as regras que se aplicam e computados os valores linguísticos de saída. Por fim, esses valores são traduzidos em representação numérica ν e ω .

Essas transformações entre valores reais e linguísticos são realizadas por funções de pertinência (*membership function*). Essas funções relacionam uma grandeza qualquer (D , ϕ , D_R , D_L , D_L , ν , ω ou intensidade luminosa) com uma variável μ , $\forall \mu \in \mathbb{R} \subset [0, 1]$.

As saídas de todos os controladores são ν e ω , cujas funções de pertencimento estão ilustradas na Fig. 1a e Fig. 1b, respectivamente.

Na Fig. 1b, as variáveis linguísticas são traduzidas conforme o seguinte código:

- L, esquerda (*left*) e R, direita (*right*);
- S, pequeno (*small*); M, médio (*medium*) e B, grande (*big*);
- ZE, zero.

Os comportamentos pré-definidos e o controlador integrador (árbitro) descritos em Bao et. al. (2009) são tratados nas subseções a seguir.

2.1.1 GOAL SEEKING

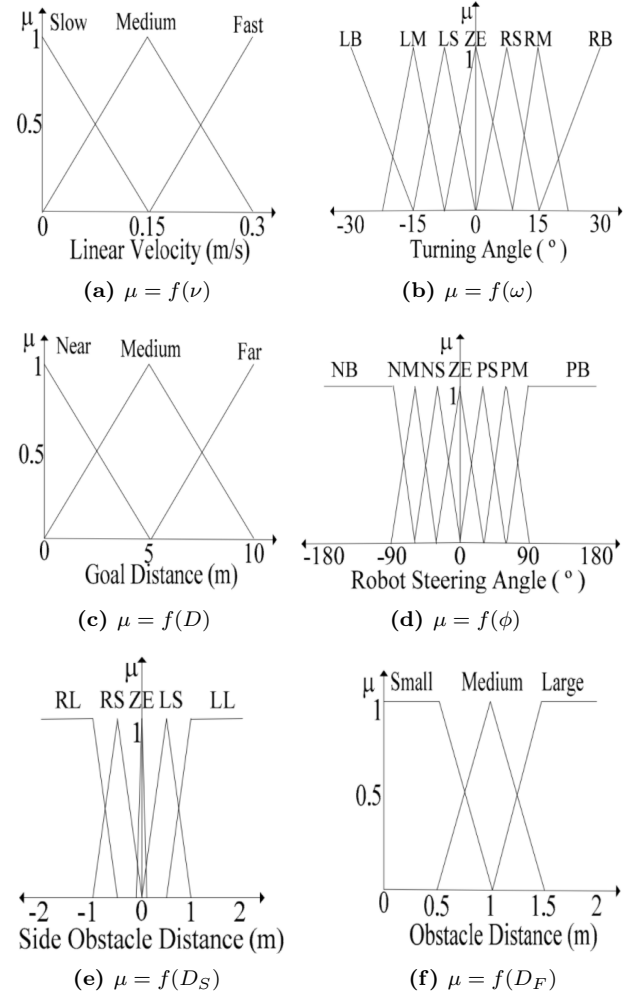
Esse conjunto de regras define o comportamento de busca ao alvo. As entradas da ação de controle são D e ϕ , cujas funções de pertencimento estão ilustradas na Fig. 1c e Fig. 1d, respectivamente. Na Fig. 1d, as variáveis linguísticas são traduzidas conforme o seguinte código:

- N, negativo e P, positivo;
- S, pequeno (*small*); M, médio (*medium*) e B, grande (*big*);
- ZE, zero.

O comportamento *goal seeking* é determinado pelas seguintes regras:

- O RTD segue para o alvo virando a esquerda ($\phi < 0$), direita ($\phi > 0$) ou para frente ($\phi = 0$);

Fig. 1. Funções de pertinência do controlador de lógica fuzzy para navegação de um robô de tração diferencial em um ambiente não-mapeado.



Fonte: BAO ET. AL. (2009).

- Se ϕ é pequeno, médio ou grande, ω deve ser pequeno, médio ou grande, respectivamente;

- Se D é pequeno, médio ou grande, ν deve ser devagar, médio ou rápido, respectivamente.

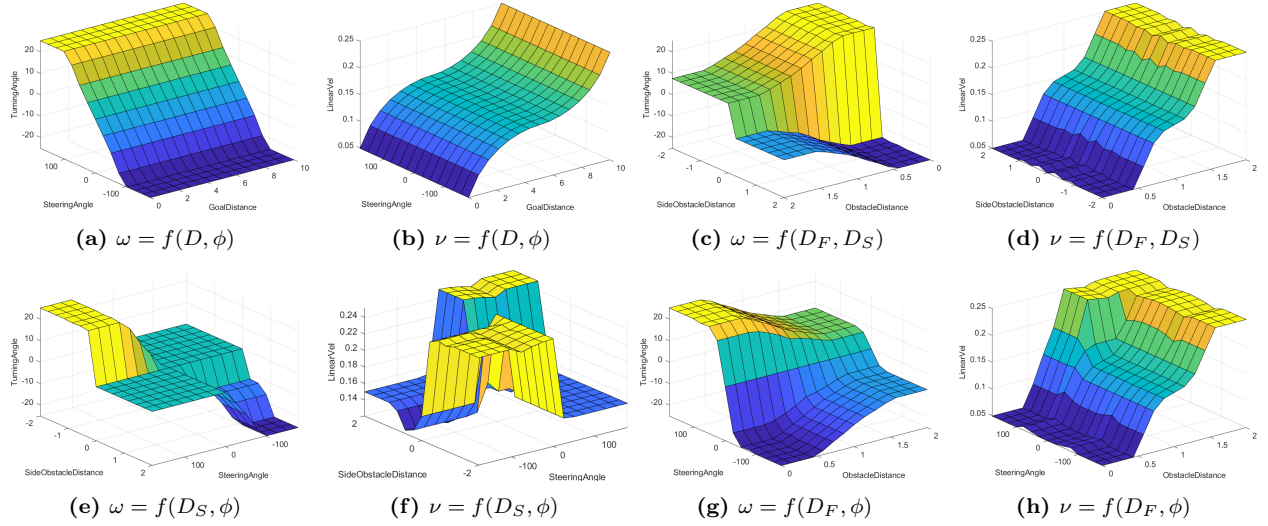
A superfície de pertencimento relacionando D e ϕ e as variáveis controladas ν e ω estão ilustradas na Fig. 2b e Fig. 2a, respectivamente.

2.1.2 OBSTACLE AVOIDANCE

Esse conjunto de regras define o comportamento de desvio de obstáculos. As entradas da ação de controle são D_F e D_S , cujas funções de pertencimento estão ilustradas na Fig. 1f e Fig. 1e, respectivamente. O valor D_S é definido como

$$D_S = \begin{cases} -D_R, & D_R < D_L \\ D_L, & D_R \geq D_L \end{cases} \quad (3)$$

Fig. 2. Superfície de pertinência do controlador de lógica fuzzy para navegação de um robô de tração diferencial em um ambiente não-mapeado.



Fonte: Autoria própria.

Na Fig. 1e, as variáveis linguísticas são traduzidas conforme o seguinte código:

- L, esquerda (*left*) e R, direita (*right*);
- S, pequeno (*small*) e L, grande (*large*);
- ZE, zero.

O comportamento *obstacle avoidance* é determinado pelas seguintes regras:

- O RTD desvia do obstáculo virando a esquerda ($D_S < 0$ ou $D_S < D_F < 2$) ou direita ($D_S > 0$);
- Se D_F é pequeno, médio ou grande, ω deve ser grande, médio ou médio e ν deve ser devagar, médio ou rápido, respectivamente.

A superfície de pertinência relacionando D_F e D_S e as variáveis controladas ν e ω estão ilustradas na Fig. 2d e Fig. 2c, respectivamente.

2.1.3 TRACKING

Esse conjunto de regras define o comportamento de rastreamento de corredores. As entradas da ação de controle são ϕ e D_S , cujas funções de pertinência estão ilustradas na Fig. 1d e Fig. 1e, respectivamente. O comportamento *tracking* é determinado pelas seguintes regras:

- O RTD segue em frente ($\omega = 0$), caso o alvo (ϕ) e o obstáculo (D_S) estejam na mesma direção;
- Se o RTD se move em direção ao alvo, sua ν é rápido. Caso contrário, ν é médio.

A superfície de pertinência relacionando ϕ e D_S e as variáveis controladas ν e ω estão ilustradas na Fig. 2f e Fig. 2e, respectivamente.

2.1.4 DEADLOCK

Esse conjunto de regras define o comportamento de solução de impasse. As entradas da ação de controle são ϕ e D_F , cujas funções de pertinência estão ilustradas na Fig. 1d e Fig. 1f, respectivamente. O comportamento *deadlock* é determinado pelas seguintes regras:

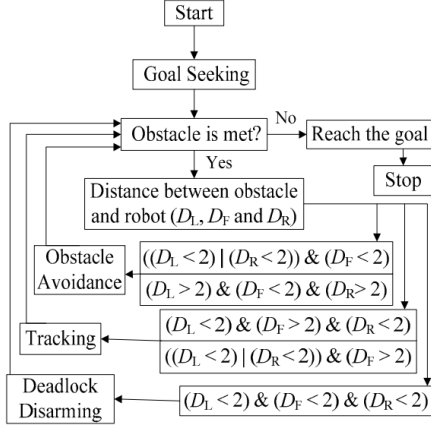
- O RTD deverá rotacionar na direção do alvo (ϕ);
- Se D_F é pequeno, médio ou grande, ω deve ser grande, médio ou médio e ν deve ser devagar, médio ou rápido, respectivamente.

A superfície de pertinência relacionando ϕ e D_S e as variáveis controladas ν e ω estão ilustradas na Fig. 2h e Fig. 2g, respectivamente.

2.1.5 CONTROLADOR ÁRBITRO

O diagrama das decisões do controlador que decide qual comportamento irá comandar o RTD está ilustrado na Fig. 3. O comportamento padrão é *Goal Seeking*. Conforme as distâncias capturadas pela odometria entre o robô e os obstáculos D_F , D_R e D_L , é definido qual comportamento terá prioridade sobre as saídas controláveis ν e ω .

Fig. 3. Diagrama de controle integrador e prioridade das ações de controle.



Fonte: BAO ET. AL. (2009).

2.2 VEÍCULOS DE BRAITENBERG

As saídas dos controladores são ω_R e ω_L , referentes à velocidade de rotação da roda direita e esquerda do RTD, respectivamente. A função de pertencimento da velocidade angular está ilustrada na Fig. 4b. O limite foi experimentalmente definido em 2 rad/s, uma vez que o robô derrapa para maiores velocidades.

As entradas da ação de controle são as intensidades de luz λ ($\forall \lambda \in \mathbb{R} \subset [0, 1]$) recuperadas pelos sensores de luminosidade à esquerda e à direita da plataforma. A função de pertencimento da intensidade luminosa está ilustrada na Fig. 4a. Os limites foram experimentalmente definidos em 0.3 e 0.9, os quais representam a intensidade luminosa longe e diretamente abaixo do foco de luz, respectivamente.

Os comportamentos representados dos veículos de Braitenberg são tratados nas subseções a seguir.

2.2.1 FEAR (2A)

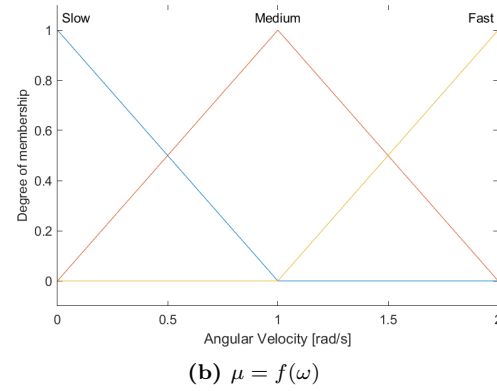
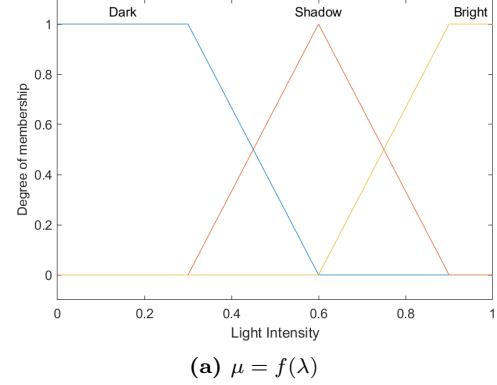
Esse conjunto de regras define o comportamento de repulsão à luz. O veículo acelera em áreas iluminadas e desacelera em áreas escuras. A resposta de intensidade luminosa é diretamente proporcional ao motor do respectivo lado, conforme ilustrado na Fig. 5a.

A superfície de pertencimento relacionando a intensidade luminosa e as variáveis controladas ω_R e ω_L estão ilustradas na Fig. 6a.

2.2.2 AGRESSIVE (2B)

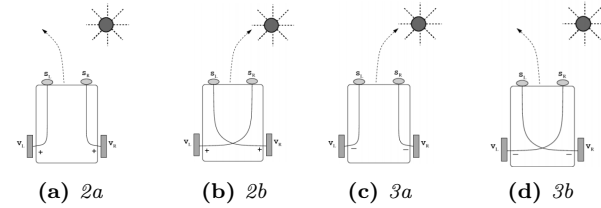
Esse conjunto de regras define o comportamento de atração pela luz. O veículo acelera em áreas iluminadas e desacelera em áreas escuras. A resposta de intensidade luminosa é diretamente proporcional ao motor do lado oposto, conforme ilustrado na Fig. 5b.

Fig. 4. Funções de pertinência do controlador de lógica fuzzy para veículos de Braitenberg.



Fonte: Autoria própria.

Fig. 5. Esquema da relação entre os sensores de luz e a velocidade das rodas para dos veículos de Braitenberg *Fear* (2a), *Agression* (2b), *Love* (3a) e *Curious* (3b).



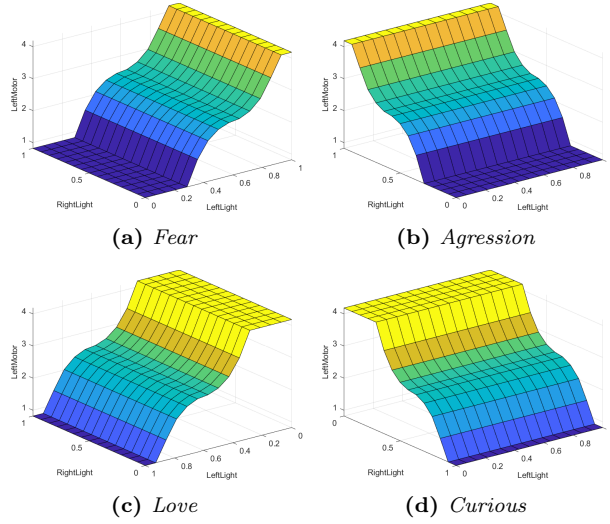
Fonte: RAÑÓ (2012).

A superfície de pertencimento relacionando a intensidade luminosa e as variáveis controladas ω_R e ω_L estão ilustradas na Fig. 6b.

2.2.3 LOVE (3A)

Esse conjunto de regras define o comportamento de repulsão à luz. O veículo acelera em áreas escuras e desacelera em áreas iluminadas. A resposta de intensidade luminosa recuperada por cada sensor é inversamente proporcional ao motor do respectivo lado, conforme ilustrado na Fig. 5c.

Fig. 6. Superfície de pertinência do controlador de lógica fuzzy para veículos de Braitenberg.



Fonte: Autoria própria.

A superfície de pertencimento relacionando a intensidade luminosa e as variáveis controladas ω_R e ω_L estão ilustradas na Fig. 6c.

2.2.4 CURIOUS (3B)

Esse conjunto de regras define o comportamento de atração pela luz. O veículo acelera em áreas escuras e desacelera em áreas iluminadas. A resposta de intensidade luminosa recuperada por cada sensor é inversamente proporcional ao motor do lado oposto, conforme ilustrado na Fig. 5d.

A superfície de pertencimento relacionando a intensidade luminosa e as variáveis controladas ω_R e ω_L estão ilustradas na Fig. 6d.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 NAVEGAÇÃO EM AMBIENTE NÃO-MAPEADO

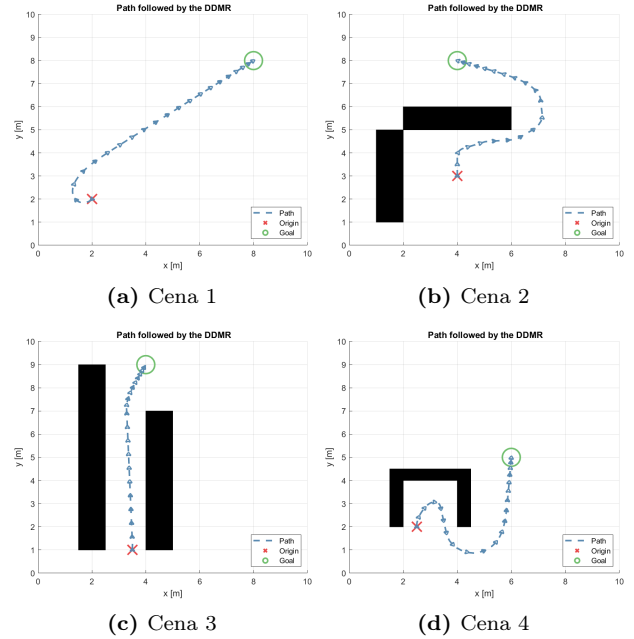
Para testar os controladores fuzzy implementados, foram construídas cinco cenas de teste: uma cena de teste para cada controlador *Goal Seeking*, *Obstacle Avoidance*, *Tracking* e *Deadlock* e um labirinto para verificar o chaveamento entre as ações de controle. As cenas foram construídas e simuladas utilizando blocos prismáticos no CopeliaSim. Todas as simulações foram realizadas de forma síncrona entre o servidor e o cliente MATLAB.

A primeira cena não contém obstáculos. Dessa forma, a única ação de controle é realizada pelo controlador *Goal Seeking*. A segunda cena contém dois obstáculos para provocar o acionamento da ação de controle *Obstacle Avoidance*. A terceira contém dois

obstáculos em forma de corredor, com o intuito de provocar a ação de controle *Tracking*. Por fim, a quarta cena contém três obstáculos em formato de U para acionar o comportamento *Deadlock*.

A trajetória percorrida pelo robô simulado, a posição do alvo e inicial do RTD para as cenas 1 a 4 estão ilustradas na Fig. 7. Fica claro que os controladores estão corretamente sintonizados, uma vez que guiam o robô ao alvo ao passo que desviam dos obstáculos presentes no ambiente não-mapeado.

Fig. 7. Trajetória percorrida em simulação das cenas de teste do controlador de lógica fuzzy para navegação de um RTD em um ambiente não-mapeado.



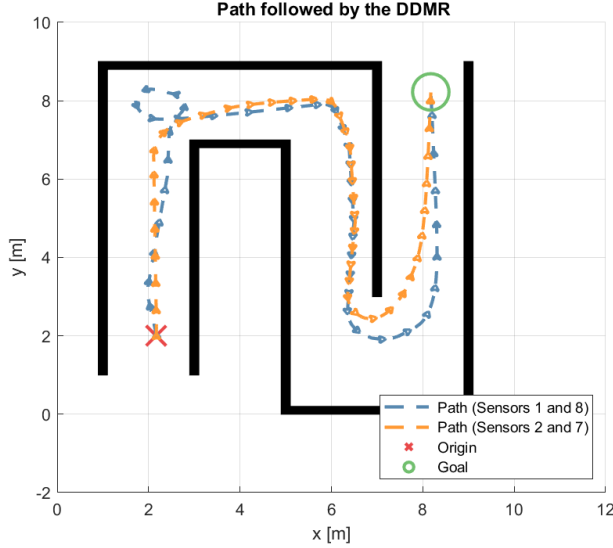
Fonte: Autoria própria.

A última cena é composta por um labirinto. Os blocos prismáticos justapostos para a representação de paredes provocaram a reflexão do ultrassom e, conseqüentemente, erros de medição da odometria. Dessa forma, foi utilizada uma cena finalizada (NÓ-BREGA, 2020) para teste do controlador integrador de comportamentos.

A trajetória percorrida pelo robô simulado, a posição do alvo e inicial do RTD para a cena 5 está ilustrada na Fig. 8. É evidente que o robô não é capaz de realizar as curvas no sentido correto utilizando o conjunto de sensores 1 e 8. Esse problema é corrigido substituindo-os, respectivamente, pelos sensores 2 e 7, os quais direcionam para “frente-esquerda” e “frente-direita”. Observando a trajetória percorrida por esse novo conjunto de medições, fica claro que chaveamento entre as ações de controle está sendo realizada corretamente, tendo em vista que o robô

simulado rastreia as paredes do corredor, realiza as curvas no sentido correto e finaliza ao atingir o alvo.

Fig. 8. Trajetória percorrida em simulação da cena do labirinto do controlador árbitro para navegação de um RTD em um ambiente não-mapeado.



Fonte: Autoria própria.

3.2 VEÍCULOS DE BRAITENBERG

Para testar os controladores fuzzy para os veículos de Braitenberg, foi construída uma cena de teste na qual há uma fonte de luz na origem do sistema de coordenadas a 75cm da superfície. As simulações foram realizadas de forma síncrona.

A trajetória percorrida pelo robô simulado, a posição do inicial e final do RTD, a posição do foco de luz e o raio do foco de luz no solo para cada comportamento estão ilustrados na Fig. 9.

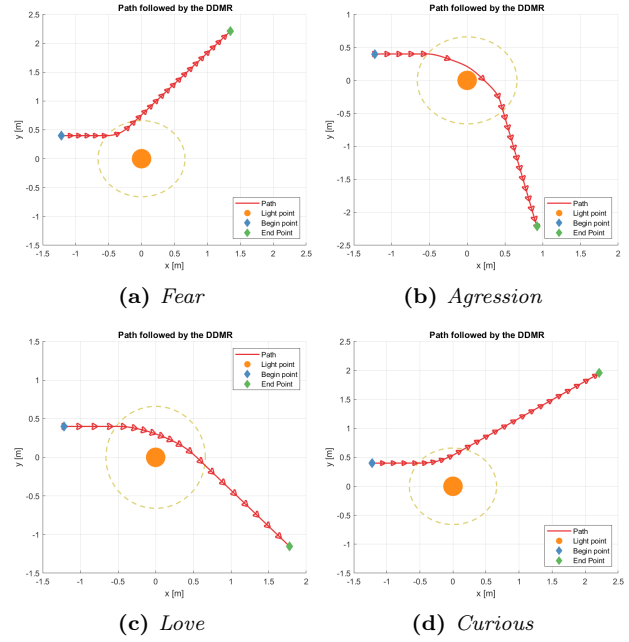
Observando os comportamentos simulados e comparando-os com as regras definidas na seção anterior, fica evidente que:

- O comportamento *Fear* desvia e acelera quando próximo ao ponto luminoso;
- O comportamento *Agression* segue em direção e acelera quando próximo ao ponto luminoso;
- O comportamento *Love* segue em direção e desacelera quando próximo ao ponto luminoso;
- O comportamento *Curious* desvia e desacelera quando próximo ao ponto luminoso.

4 CONCLUSÕES

Esse relatório descreve a implementação e análise de dois controladores de lógica nebulosa para robôs de tração diferencial: a navegação em um ambiente não-mapeado e o comportamento de atração e repulsão à luz dos veículos de Braitenberg.

Fig. 9. Trajetória percorrida em simulação das cenas de teste do controlador de lógica fuzzy para veículos de Braitenberg *Fear* (2a), *Agression* (2b), *Love* (3a) e *Curious* (3b).



Fonte: Autoria própria.

Observando os resultados obtidos nas cenas não-mapeadas simuladas com o Pioneer P3DX controlado por lógica nebulosa, é evidente que a ação de controle implementada é tão eficiente quanto controladores obtidos a partir das estratégias de sintonia clássica. O robô é capaz de seguir para um alvo e, simultaneamente, desviar de obstáculos e guiar-se por corredores. Entretanto, a odometria coletada poderia ser refinada utilizando um conjunto de dois ou mais sensores para a detecção de obstáculos laterais. Essas medições também poderiam ser otimizadas utilizando um filtro.

Por sua vez, os comportamentos de atração ou repulsão à focos luminosos referente aos veículos de Braitenberg 2 e 3 apresentam resultados equivalente à teoria discutida. As cenas de teste poderiam ser ampliadas empregando fontes luminosas cores diferentes. Dessa forma, seria necessário adicionar seis entradas ao controlador fuzzy, referentes a intensidade luminosa de cada canal RGB dos dois sensores.

5 REFERÊNCIAS

- [1] BAO, Qing-yong; LI, Shun-ming; SHANG, Wei-yan; AN, Mu-jin. **A Fuzzy Behavior-Based Architecture for Mobile Robot Navigation in Unknown Environments.** IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Shanghai, 2009.

[2] RAÑÓ, Iñaki. **A model and formal analysis of Braitenberg vehicles 2 and 3**. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, 2012.

[3] NÓBREGA, Stayner. **Atividade 7: Teoria de conjuntos nebulosos**. Disciplina de Automação Inteligente, jun. 2020.