

NAVEGAÇÃO SEGURA DE UM CARRO AUTÔNOMO UTILIZANDO CAMPOS VETORIAIS E O MÉTODO DA JANELA DINÂMICA

DANILO ALVES DE LIMA*, GUILHERME AUGUSTO SILVA PEREIRA*

**Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos, Escola de Engenharia,
Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6626, 31270-901,
Belo Horizonte, MG, Brasil.*

Emails: daniloalvesdelima@yahoo.com.br, gpereira@ufmg.br

Abstract— This work presents a safe navigation approach for a car-like robot. It is based on a Velocity Vector Field along with a Dynamic Window Approach for avoiding unmodeled obstacles. The vector field is associated to a controller whose outputs are validated, and eventually modified, by the Dynamic Window Approach and then applied as control inputs for the car. Experiments show that the vehicle was able to track the vector field and avoid obstacles in its way.

Keywords— Safe navigation, Car-like robot, Vector Field, Dynamic Window Approach.

Resumo— Este trabalho aborda o problema de navegação segura de um carro autônomo. Para tanto, é utilizado um planejamento de movimento por meio de Campos Vetoriais de Velocidade aliado ao Método da Janela Dinâmica para o desvio de obstáculos não modelados. Basicamente, o campo vetorial é associado a um controlador cujas saídas são validadas, e eventualmente modificadas, pelo Método da Janela Dinâmica e aplicadas como entradas de controle do carro. Resultados experimentais mostraram que a metodologia foi capaz de guiar um carro autônomo pelo campo vetorial, fazendo-o desviar de obstáculos em seu caminho.

Palavras-chave— Navegação segura, Carro autônomo, Campo Vetorial, Método da Janela Dinâmica.

1 Introdução

Recentemente, diversos grupos no Brasil e no exterior tem trabalhado na pesquisa e desenvolvimento de automóveis autônomos ou semi-autônomos (Honório et al., 2010; Fernandes et al., 2010; Thrun et al., 2006; Atreya et al., 2006). Um dos objetivos destes grupos é desenvolver tecnologias que possam ser integradas a veículos comerciais, dotando-os de sistemas que aumentem o conforto e a segurança de seus motoristas e passageiros.

Para permitir que um carro autônomo se mova com segurança, é necessário que este possua um sistema completo de navegação. A navegação é responsável por realizar um planejamento de movimento que guie o carro de uma origem a um destino e garanta segurança com a detecção e o desvio de possíveis obstáculos em seu ambiente de trabalho. Durante todo este processo, o carro, também deve conhecer sua localização no mundo e controlar seu movimento.

Existem diversas composições de técnicas para realizar a navegação de um carro autônomo. Dentre elas, as mais comuns utilizam metodologias para criar caminhos que posteriormente são seguidos com o auxílio de um controlador específico (Thrun et al., 2006; Braid et al., 2006). No entanto, como as entradas de controle de veículos autônomos são normalmente velocidades, o planejamento de movimento e o desvio de obstáculos por meio de comandos de velocidade podem eliminar a necessidade de controladores específicos e simplificar a solução por meio da integração entre planejamento de movimento e controle na mesma

técnica.

A solução proposta neste trabalho foi concebida tendo como princípio utilizar técnicas que fornecessem comandos de velocidade para o controle baixo nível de um carro. Neste caso, optou-se pela união de duas técnicas: (i) um Campo Vetorial de Velocidades (Pereira et al., 2009) e (ii) o Método da Janela Dinâmica (Fox et al., 1997). A primeira técnica é responsável pelo planejamento prévio do movimento do veículo por meio da associação de vetores de velocidade a cada configuração possível para o veículo. Este planejamento inicial não é alterado no decorrer do movimento. Já a segunda técnica, realiza a validação das velocidades fornecidas pelo Campo de acordo com os obstáculos detectados ao redor do veículo em cada instante de tempo e, caso seja necessário, fornece novas velocidades para permitir o desvio dos obstáculos. Deve ser observado que não existe replanejamento do movimento.

Para tanto, a solução foi segmentada nas etapas de percepção do ambiente e controle de navegação, de acordo com o diagrama da Figura 1. A percepção do ambiente é a etapa responsável por garantir ao controle de navegação, o conhecimento constante do ambiente explorado, etapa realizada com a detecção de obstáculos e a criação de uma grade de ocupação (Elfes, 1989). No controle de navegação estão os passos necessários para gerar os comandos de atuação do carro autônomo, respeitando-se os obstáculos detectados pela percepção do ambiente.

A validação desta solução de navegação foi realizada no Carro Autônomo Desenvolvido na UFMG (CADU), a qual contou com a integra-

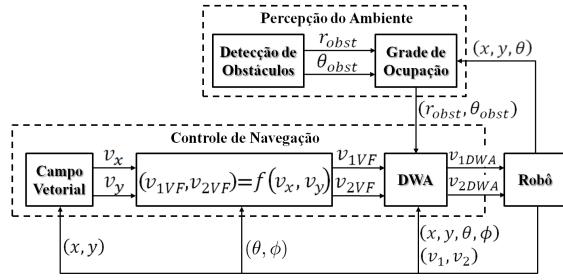


Figura 1: Diagrama da solução adotada para realizar a navegação segura de um veículo autônomo.

ção dos recursos de atuação, controle de velocidade e localização já existentes no carro (Freitas et al., 2009; Santos, 2009). Assim, pretende-se fornecer ao CADU a capacidade de perceber o ambiente e realizar um movimento seguro de um ponto de início a um de destino.

Este artigo está dividido em 6 seções. Na Seção 2 é feita uma breve apresentação do modelo cinemático considerado para o veículo. Nas Seções 3 e 4 são discutidas as etapas da Figura 1. Detalhes de implementação e alguns resultados experimentais que validam a solução estão na Seção 5. Finalmente, a Seção 6 apresenta algumas considerações e perspectivas para trabalhos futuros.

2 Modelo do veículo

O primeiro passo para se controlar um robô é conhecer o modelo que descreve sua cinemática. Este modelo deve associar as entradas com as variáveis que descrevem a sua postura (*pose*). Como o carro autônomo utilizado neste trabalho é um veículo com tração nas rodas dianteiras, considera-se o seguinte modelo cinemático (Luca et al., 1998):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi \\ \sin \phi / l \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2, \quad (1)$$

onde a configuração do veículo é expressa por (x, y, θ, ϕ) , sendo (x, y) a posição do seu referencial $\{\mathcal{R}\}$, θ o ângulo entre esse referencial e o referencial do mundo $\{\mathcal{O}\}$ e ϕ o ângulo de esterçamento das rodas dianteiras, que pode ser obtido pela média dos ângulos de cada uma das rodas dianteiras, segundo o modelo de Ackerman (Luca et al., 1998). As entradas deste modelo são as velocidades linear das rodas dianteiras v_1 e da variação angular do esterçamento destas rodas v_2 . A constante l é a distância entre os eixos traseiro e dianteiro. A Figura 2 ilustra estas variáveis. Ao centro do eixo dianteiro pode ser visualizada a roda virtual gerada pelo modelo de Ackerman, com a média do ângulos das rodas frontais. É importante frisar que v_1 é diferente da velocidade linear do veículo, dada por $v_1 \cos \phi$.

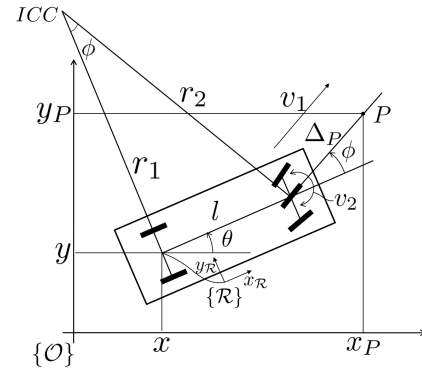


Figura 2: Diagrama descritivo do modelo cinemático do veículo (1), onde estão representadas sua configuração (x, y, θ, ϕ) e suas entradas v_1 e v_2 . Neste modelo, o veículo se move por trajetórias circulares definidas pelo centro de curvatura instantâneo (ICC). O ponto $P = (x_P, y_P)$ é a projeção necessária para realizar a linearização por realimentação estática. O tamanho desta projeção é definido por Δ_P .

A partir do modelo cinemático apresentado é possível descrever o movimento do veículo em situações ideais. Isto é feito por meio das equações de movimento (2). Com elas é possível determinar como serão as mudanças na configuração do veículo para um pequeno intervalo de tempo Δt .

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \dot{x}(t), \\ y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t \dot{y}(t), \\ \theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \Delta t \dot{\theta}(t), \\ \phi(t + \Delta t) = \phi(t) + \Delta t \dot{\phi}(t). \end{cases} \quad (2)$$

3 Percepção do ambiente

Para que um veículo navegue em segurança é necessário que este seja capaz de perceber o ambiente a sua volta por meio de sensores. De acordo com a Figura 1, a percepção do ambiente foi dividida em duas etapas: (i) a detecção de obstáculos e (ii) a construção da grade de ocupação local. Estas etapas são brevemente detalhadas nesta seção.

3.1 Detecção de obstáculos

Para a detecção de obstáculos pelo CADU foi proposto a utilização de uma câmera de visão estereó direcionada para a região frontal do veículo. Baseado nesta configuração, em (Lima and Pereira, 2010) foi implementada uma técnica que utilizava o Mapa de Disparidade “V” para detectar obstáculos de uma cena. Com o Mapa de Disparidade “V” foi possível aproximar nuvens de pontos obtidas com o sistema de visão estereó por planos com diferentes inclinações. Com estes planos, a tarefa de detecção de obstáculos resumiu-se a definir quais deles são trafegáveis ou não. Pelo sucesso desta metodologia na detecção dos obstáculos, ela também foi utilizada no presente trabalho.

Para facilitar a manipulação dos dados de obstáculos reconhecidos, estes foram convertidos em informação de distância e ângulo (r_{obst} , θ_{obst}) em relação ao referencial do carro. Por fim, estes dados são enviados para a grade de ocupação para serem devidamente tratados.

3.2 Grade de ocupação local

A grade de ocupação (Elfes, 1989) é uma técnica probabilística utilizada na reconstrução de ambientes por meio de dados sensoriais coletados no movimento de um robô. Com ela, é possível verificar, por exemplo, onde estão localizados os obstáculos do ambiente em relação ao robô, filtrar dados sensoriais ruidosos e combinar dados provenientes de vários sensores em uma informação única. O mapa do ambiente é armazenado na forma de uma matriz de dados (grade), onde cada célula representa a probabilidade de se ter ou não um obstáculo em uma determinada célula.

No entanto, representar uma grade de ocupação para ambientes muito grandes, tais como os externos, pode ser muito custoso computacionalmente. A solução adotada neste trabalho foi reduzir a grade a uma pequena região ao redor do veículo. Esta solução, chamada de Grade de Ocupação Local, pode ser resumida ao problema de se encontrar a probabilidade *a posteriori* de uma célula do mapa a partir de uma série de dados, de acordo com:

$$p(m_i | z_{1:t}, x_{1:t}), \quad (3)$$

onde m_i é a célula da grade com índice i , $z_{1:t}$ é o conjunto de medidas sensoriais até o tempo t e $x_{1:t}$ é o caminho realizado pelo veículo.

Para um carro navegando apenas com o sistema de visão estéreo proposto em (Lima and Pereira, 2010), onde o campo de visão (FOV) é reduzido apenas à região frontal do veículo, a grade de ocupação local pode aumentar a informação sensorial contida em uma leitura com a utilização dos dados passados. Para o melhor funcionamento deste método, duas considerações foram feitas neste artigo:

- Todo obstáculo, para ser reconhecido na grade de ocupação local, precisa ter sido reconhecido em algum momento por algum dos sensores instalados no veículo (neste caso somente uma câmera); e
- O movimento dos obstáculos que estejam na região monitorada pela grade de ocupação deve ser considerado nulo, pois não serão consideradas técnicas para detectar o movimento dos mesmos.

Para exemplificar o uso da grade de ocupação local para a leitura sensorial, a Figura 3 apresenta um automóvel equipado com um sensor visual com FOV de 43° trafegando, com auxílio de

um campo vetorial (setas), em um ambiente de simulação. Nesta mesma figura, à esquerda, está a correspondente grade de ocupação local obtida pelo movimento deste veículo, juntamente com a representação de uma leitura sensorial expandida para toda a dimensão do carro. É interessante observar que o obstáculo próximo ao carro continua a ser percebido pela grade, mesmo quando está fora do FOV do sensor.

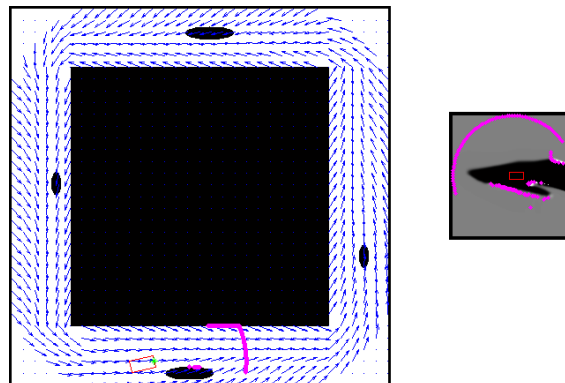


Figura 3: Exemplo de um automóvel trafegando em um ambiente de simulação com um sensor de FOV limitado (à esquerda) e sua correspondente grade de ocupação local (à direita). Os pontos em rosa representam as leituras sensoriais em ambas situações e as setas azuis representam o campo vetorial que guia o veículo. Na figura da direita as regiões escuras e as bordas da figura representam obstáculos ao movimento. Na figura da esquerda, regiões escuras representam a probabilidade nula da presença de obstáculos e as regiões brancas a certeza de encontrá-los.

4 Controle de Navegação

Controlar a navegação de um carro autônomo é permitir que este realize seu movimento previamente planejado de forma segura. Esta seção tem por objetivo, apresentar o controle de navegação da Figura 1. O princípio adotado é o de um controlador híbrido, com uma etapa inicial deliberativa, constantemente validada por uma etapa final reativa.

4.1 A etapa de controle deliberativo

O controle deliberativo é uma estratégia de controle clássica na robótica, onde as ações do robô são planejadas. A técnica deliberativa escolhida para o controle de navegação do carro autônomo deste trabalho é aquela de Campos Vetoriais apresentada em (Pereira et al., 2009). Seu planejamento ocorre antes de qualquer movimento pela definição de um campo vetorial contínuo que forneça comandos de velocidade (v_x , v_y) para todos os pontos do domínio. Para tanto, é necessário que o sistema de localização do carro (Santos, 2009)

forneça sua posição (x, y) a cada instante. Ao final, o carro deve ser guiado pela região do campo por meio das velocidades retornadas. A seta azuis na Figura 3 representam um exemplo de campo de velocidade utilizando esta técnica. Nesta figura, o campo não considerou os obstáculos ovais pequenos. Observe por esta figura que o campo foi construído sobre o espaço de trabalho do veículo, e não sobre seu espaço de configurações. Assim, as dimensões do veículo não são consideradas nesta etapa, sendo levadas em conta somente na etapa reativa descrita na próxima seção.

Como os comandos de velocidade (v_x, v_y) não podem ser instantaneamente aplicados a um robô não-holonômico, como o carro em questão, a solução adotada neste trabalho foi passar as velocidades por uma função $f(v_x, v_y)$, que fornecesse as velocidades de atuação (v_{1VF}, v_{2VF}) a serem atribuídas ao carro. Esta função implementa a técnica de Linearização por Realimentação Estática de Estados (FBL) (Luca et al., 1998) e é responsável por guiar o veículo no campo vetorial. A técnica utiliza a projeção definida pelo ponto $P = (x_P, y_P)$ na Figura 2 para realizar os cálculos da FBL. O tamanho desta projeção, definido por Δ_P , interfere diretamente na suavidade com que o veículo seguirá o campo vetorial. Além das velocidades, ela recebe como entrada os dados de orientação do veículo (θ) , fornecido pelo sistema de localização, e ângulo de esterçamento do volante (ϕ) . Um detalhamento da técnica é mostrado em (Lima, 2010).

4.2 A etapa de controle reativo

A proposta de controle deliberativo, apresentada anteriormente, não garante segurança ao movimento do veículo uma vez que o planejamento de movimento inicial não considera a dinâmica do ambiente e as dimensões do robô para ser construído. Por isso, ao se acompanhar o diagrama da solução (Figura 1), percebe-se que as velocidades (v_{1VF}, v_{2VF}) não são diretamente aplicadas ao robô. Elas passam por um processo de “validação das velocidades”. Este processo foi composto por uma solução de controle reativo para o desvio de obstáculos que utiliza as informações da percepção do ambiente, postura (*pose*) e velocidades atuais do robô.

Neste trabalho, o controle reativo foi combinado com o deliberativo por meio do Método da Janela Dinâmica (DWA) (Fox et al., 1997), porém adaptado para um carro autônomo¹. Neste sentido, uma contribuição importante foi apresentada em (Rebai et al., 2007), onde o DWA foi aplicado a um veículo autônomo com tração nas rodas trasei-

¹Para garantir a completude foi utilizado o mesmo princípio abordado por (Brock and Khatib, 1999), onde combinou-se um planejamento de movimento global (no caso *Wavefront*) com o DWA e foi provado que a solução final era global.

ras. Devido à esta semelhança, muitos princípios utilizados aqui podem ser encontrados no trabalho (Rebai et al., 2007). Nele, a janela dinâmica foi definida para a velocidade linear v ($v_1 \cos(\phi)$) para veículos com tração na dianteira) e angular ω ($\dot{\theta}$) do carro, semelhante à proposta original do método (Fox et al., 1997). Porém, ω não é uma velocidade diretamente aplicável no carro, pois ela depende não linearmente do ângulo de esterçamento do volante ϕ e da velocidade v_1 , segundo a seguinte equação, extraída do modelo cinemático do carro (Equação (1)):

$$\dot{\theta} = \omega = v_1 \frac{\sin \phi}{l}. \quad (4)$$

Assim, por esta ser uma relação não-linear diferente das entradas de controle do carro (v_1, v_2) , a janela dinâmica (DW) foi definida para v_1 e ϕ .

Resumidamente, a metodologia constrói em cada intervalo de tempo Δt um espaço (DW) com todos os pares válidos de v_1 e ϕ que o veículo consegue alcançar. Estes pares devem respeitar a Equação (2), que descreve o movimento do veículo e também os obstáculos detectados (no presente trabalho, representados pela grade de ocupação local apresentada na Subseção 3.2).

A integração das etapas deliberativa e reativa consiste, inicialmente, em transformar as velocidades (v_{1VF}, v_{2VF}) calculadas como resultado do campo vetorial em um par v_1 e ϕ (Lima, 2010). É então verificado se este par é válido por meio da DW. Caso o par seja válido, (v_{1VF}, v_{2VF}) é diretamente aplicado ao veículo. Por outro lado, caso seja detectado que o par é inválido, um outro par é escolhido por meio de uma função objetivo G a ser maximizada. Esta função representa a soma ponderada de outras subfunções que medem o direcionamento do veículo em relação ao campo vetorial (*vf1*), sua velocidade (*velocity*) e a desobstrução (*dist*) do caminho em relação ao obstáculos:

$$G(v_1, \phi) = \alpha \cdot vf1(v_1, \phi) + \beta \cdot dist(v_1, \phi) + \gamma \cdot velocity(v_1, \phi), \quad (5)$$

onde α , β e γ são os pesos destas subfunções. A escolha adequada destes parâmetros favorece que o veículo realize seu movimento sempre seguindo o campo vetorial com a maior distância possível dos obstáculos e maior velocidade de translação. Sejam os valores ótimos obtidos pela maximização de $G(v_1, \phi)$ iguais a (v_{1otm}, ϕ_{otm}) , eles devem ser convertidos em entradas de controle para o carro iguais a (v_{1DWA}, v_{2DWA}) . A conversão desses valores pode ser realizada por:

$$\begin{cases} v_{1DWA} = v_{1otm}, \\ v_{2DWA} = \frac{\phi_{otm} - \phi_a}{\Delta t}. \end{cases} \quad (6)$$

Na próxima seção serão apresentados alguns resultados experimentais realizados que ilustram a solução aqui proposta.

5 Resultados

Para avaliar a solução apresentada anteriormente foi utilizado o carro autônomo que está em desenvolvimento na Universidade Federal de Minas Gerais, o CADU. Para os testes, foi adotada a configuração computacional apresentada na Figura 4, a qual utiliza:

- Uma câmera estéreo Bumblebee2 conectada a um *hub Firewire* pelo barramento IEEE1394. O *hub* é necessário para a alimentação da câmera;
- Um computador portátil com processador Intel Pentium Core II Duo de 1.83GHz e 4G de memória RAM rodando Windows Vista que executa os algoritmos de detecção de obstáculos utilizando imagens da câmera recebidas pelo barramento IEEE1394;
- Um segundo computador portátil equipado com Intel Pentium Core II Duo de 1.66GHz e 2G de memória RAM rodando Windows Vista que recebe os dados de obstáculos do primeiro computador via *Ethernet*, implementa todas as demais tarefas da Figura 1 e atua nos dispositivos do CADU via portas USB e Serial.

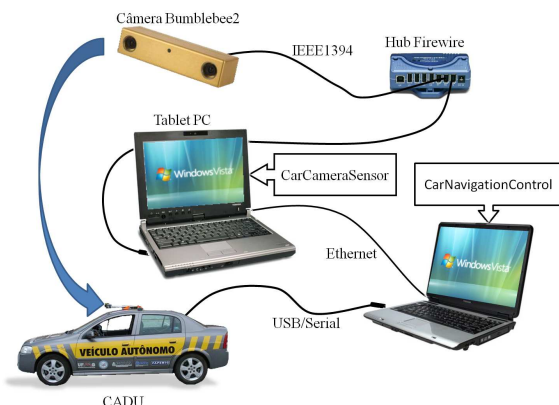


Figura 4: Configuração computacional adotada nos experimentos com CADU.

Os experimentos no CADU foram realizados em um campo vetorial elipsoidal que inicialmente não considera a presença de obstáculos. No primeiro experimento, nenhum obstáculo foi adicionado, o que gerou o caminho observado na Figura 5(a). Este caminho, como era de se esperar, ocorreu sem desvios na trajetória, com o carro seguindo o campo vetorial. Resultado diferente daquele apresentado na Figura 5(b), onde um obstáculo foi propositalmente adicionado ao caminho do CADU. Neste experimento, apesar de se utilizar o mesmo campo vetorial para guiar o CADU, foi necessário utilizar os recursos de detecção e desvio de obstáculos para garantir uma trajetória

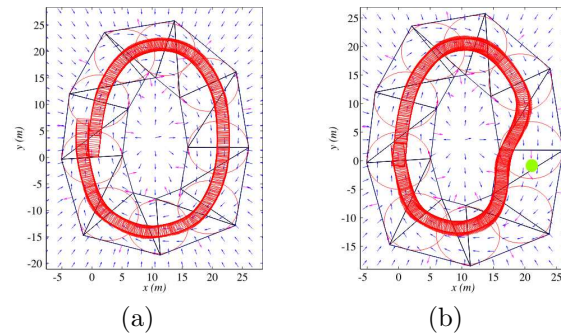


Figura 5: Caminho realizado pelo CADU para o mesmo campo vetorial, livre (a) ou não (b) de obstáculos. O início do caminho ocorre na posição $x = y = 0$ e o movimento ocorre no sentido horário. A postura do veículo durante a simulação está representada por retângulos vermelhos em ambos os casos. Em (b) a posição aproximada do obstáculo está destacada de verde.

segura ao veículo. Este último resultado mostra que o veículo tende sempre a seguir o campo vetorial com uma trajetória suave, mesmo quando está desviando de um obstáculo.

Para melhor visualização dos resultados aqui apresentados, vídeos deste e de outros experimentos estão disponíveis em <http://coro.cpdee.ufmg.br/>.

6 Considerações Finais

Este artigo apresentou um método para a navegação segura de veículos autônomos baseado em Campos Vetoriais de Velocidade e no Método da Janela Dinâmica (DWA). A solução proposta foi constituída de etapas simples e bem conhecidas na literatura, mas que combinadas, resultaram em um sistema de navegação completo e eficiente para um veículo autônomo terrestre em ambientes com obstáculos.

O sistema de navegação foi composto pelas etapas de localização, planejamento e controle. A localização foi responsável por fornecer a *pose* estimada do veículo no mundo. A etapa de planejamento foi responsável por definir um campo vetorial que considerava somente obstáculos estáticos. Como este foi desenvolvido para fornecer vetores de velocidades para guiar um robô holonômico e puntual no mundo, um controlador de baixo nível foi necessário. Para concepção deste, foi utilizado o método de Linearização por Realimentação Estática (FBL). A saída do FBL, já no formato das entradas permitidas para o carro, foi então validada e, eventualmente, alterada pelo DWA.

Para percepção do ambiente e construção da janela dinâmica, foi desenvolvida a grade de ocupação local que armazena um mapa probabilístico do entorno do veículo. Esta grade foi atualizada a cada nova leitura sensorial. A grade de ocupação local expandiu as leituras sensoriais do veículo e

permitiu o reconhecimento de obstáculos em regiões antes sem informação sensorial.

Os resultados atuais indicam que o CADU, com os recursos que dispõe e a adição de alguns sensores de obstáculos, teria capacidade necessária para participar de um desafio no deserto similar ao do *DARPA Grand Challenge* (DARPA, 2005). No entanto, muito ainda deve ser feito para que o veículo possa se deslocar em ambientes mais complexos contendo obstáculos móveis, por exemplo. Assim, como trabalhos futuros, pretende-se incorporar mais sensores ao atual sistema, afim de ampliar FOV sensorial do carro e a sensibilidade a pequenos obstáculos. Além disso, procurar-se-á criar novas subfunções para o DWA que agreguem funcionalidades que permitam ao veículo mover-se em segurança em ambientes urbanos, inclusive respeitando as leis de trânsito vigentes.

Agradecimentos

Este projeto é financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Durante a realização do projeto, Danilo A. Lima foi bolsista de mestrado da CAPES. Guilherme A. S. Pereira é bolsista do CNPq.

Referências

- Atreya, A. R., Cattle, B. C., Collins, B. M., Esenburg, B., Franken, G. H., Saxe, A. M., Schiffres, S. N. and Kornhauser, A. L. (2006). Prospect eleven: Princeton university's entry in the 2005 DARPA Grand Challenge, *Journal of Field Robotics* **23**(9): 745–753.
- Braid, D., Broggi, A. and Schmiedel, G. (2006). The TerraMax autonomous vehicle, *Journal of Field Robotics* **23**(9): 693–708.
- Brock, O. and Khatib, O. (1999). High-speed navigation using the global dynamic window approach, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 341–346.
- Elfes, A. (1989). Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer* **22**(6): 46–57.
- Fernandes, L. C., Dias, M. A., Osório, F. and Wolf, D. F. (2010). A driving assistance system for navigation in urban environments, *Proceedings of the Ibero-American Conference on Artificial Intelligence*.
- Fox, D., Burgard, W. and Thrun, S. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance, *IEEE Robotics and Automation Magazine* **4**: 23–33.
- Freitas, E. J. R., Vinti, M. N. W., Santos, M. M., Iscold, P., Tôrres, L. A. B. and Pereira, G. A. S. (2009). Desenvolvimento de automação embarcada para um robô móvel baseado em um carro de passeio, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente* **9**: 1–6.
- Honório, L. M., Vermaas, L. L. G., Gonçalves, L. M. and Vidigal, M. (2010). Uma metodologia para aprendizado supervisionado aplicada em veículos inteligentes, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1028–1035.
- Lima, D. A. (2010). *Navegação segura de um carro autônomo utilizando campos vetoriais e o método da janela dinâmica*, Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em <http://coro.cpdee.ufmg.br>.
- Lima, D. A. and Pereira, G. A. S. (2010). Um sistema de visão estéreo para navegação de um carro autônomo em ambientes com obstáculos, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 224–231.
- Luca, A. D., Oriolo, G., De, A. and Samson, C. (1998). *Robot Motion Planning and Control*, Vol. 229, Springer Berlin / Heidelberg, chapter Feedback Control Of A Nonholonomic Car-Like Robot, pp. 171–253.
- Pereira, G. A. S., Pimenta, L. C. A., Chaimowicz, L., Fonseca, A. R., de Almeida, D. S. C., de Q. Corrêa, L., Mesquita, R. C. and Campos, M. F. M. (2009). Robot navigation in multi-terrain outdoor environments, *The International Journal of Robotics Research* **28**(6): 685–700.
- Rebai, K., Azouaoui, O., Benmami, M. and Larabi, A. (2007). Car-like robot navigation at high speed, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2053–2057.
- Santos, M. M. (2009). *Desenvolvimento de um sistema de localização para um veículo terrestre*, Master's thesis, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em <http://coro.cpdee.ufmg.br>.
- DARPA (2005). DARPA Grand Challenge web site, <http://www.darpa.mil/grandchallenge05/>. Acesso em 16 Jan. 2010.
- Thrun et al. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge, *Journal of Field Robotics* **23**(9): 661–692.