

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PARA UM CARRO DE PASSEIO AUTÔNOMO

VITOR B. SABBAGH, ELIAS J. R. FREITAS, GUILHERME M. M. CASTRO, MICHELLE M. SANTOS, MAURÍCIO F. BALEEIRO, TIAGO M. DA SILVA, PAULO ISCOLD, LEONARDO A. B. TORRES E GUILHERME A. S. 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.

Email: pdva@ufmg.br

Abstract— This work presents the stage of development of an autonomous car in construction at the Universidade Federal de Minas Gerais, including the integration of a localization system and a steering controller for path following. The vehicle is equipped with mechanisms for automatic braking, acceleration, gear shifting, and steering control. It also has a sensor fusion system that provides position and orientation information, taking into account data from four sensor systems: GPS, IMU (Inertial Measurement Unit), steering wheel angle, and velocity of the front wheels. A software integrates control and sensor systems with a closed-loop control module that controls the vehicle's position and orientation. The system was validated in field tests where the car drove itself through determined geographic coordinates without any human intervention.

Keywords— Autonomous Vehicles, Mobile Robotics, Steering Control.

Resumo— Este artigo apresenta o estágio atual de desenvolvimento de um carro autônomo em construção na Universidade Federal de Minas Gerais, incluindo a integração de um sistema de localização a um controlador de direção para seguimento de caminhos. O veículo conta atualmente com mecanismos de controle automático de frenagem, aceleração, câmbio e direção. Possui também um sistema de fusão sensorial que provê informações sobre a posição e orientação do carro a partir de quatro sistemas sensoriais: GPS, IMU (Unidade de Medição Inercial), medição do ângulo do volante e medição da velocidade das rodas dianteiras. Um *software* integra os sistemas de controle e sensoriais por meio de um módulo que controla a posição e atitude do veículo. Para a validação do sistema foram realizados experimentos onde o carro percorre um conjunto determinado de coordenadas geográficas sem nenhuma intervenção humana.

Palavras-chave— Veículo Autônomo, Robótica Móvel, Controle de Direção.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de veículos autônomos tem despontado grande empenho no campo da robótica, como visto, por exemplo, nas competições promovidas pela DARPA — *Defense Advanced Research Projects Agency* — nos Estados Unidos, desde 2004 (Dar, 2008). Com o evento, diversos grupos de pesquisas envolvendo empresas e universidades se formaram com o objetivo de desenvolver sistemas veiculares robustos e seguros para aplicações comerciais e militares (McBride, J. R. et al., 2008). O número de participantes a cada edição do desafio aumentou, refletindo o crescente interesse e progresso na área de pesquisa e desenvolvimento de veículos autônomos.

Apesar da lenta convergência dos esforços realizados nesta área de pesquisa em direção a uma eventual produção em massa de veículos autônomos, os estudos e progressos realizados proporcionam avanços no setor automobilístico no que se refere, principalmente, a aspectos ergonômicos e de segurança. Também pode ser proporcionado ao motorista maior conforto, a partir do desenvolvimento de sistemas de localização do veículo facilitando a condução do mesmo, e também, permitindo acessibilidade para usuários com necessidades especiais.

Veículos autônomos também podem ajudar a resolver problemas atuais. Em diversas metrópoles brasileiras, por exemplo, o tráfego de automóveis já excede a capacidade para a qual foram projetadas, resultando em trânsito lento nas vias principais. Segundo Thrun (2006), a utilização de veículos autônomos poderia aumentar a capacidade dessas vias em cerca de 100%, considerando que os mesmos utilizariam melhor o espaço da pista, mantendo menor distância dos carros vizinhos.

Desde 2007, vem sendo desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos da UFMG (PDVA/UFMG) o CADU (Carro Autônomo Desenvolvido na UFMG), que é um veículo autônomo baseado em um automóvel de passeio. Neste contexto, este artigo apresenta o estado atual de desenvolvimento do veículo. A principal novidade do artigo em relação ao último resultado apresentado pelo grupo (Freitas et al., 2009) é a integração dos sistemas de localização a um controlador para a direção, implementado no *software* de operação do veículo e posteriormente validado em experimentos práticos. Foi utilizado um controlador proporcional não-linear similar àquele proposto em (Hoffmann et al., 2007) onde, dado um caminho, o ângulo desejado das rodas para que o caminho seja seguido é calculado.

A próxima seção apresenta os sistemas de au-

tomação integrados ao veículo comercial para permitir o seu controle. A Seção 3 apresenta o *software* de controle desenvolvido, incluindo o sistema de controle de direção. Na Seção 4 são apresentados resultados de experimentos onde o veículo é comandado a seguir caminhos sem a intervenção de um operador humano. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2 AUTOMAÇÃO DO VEÍCULO

O carro de passeio no qual este trabalho foi desenvolvido é um Chevrolet Astra Sedan retratado na Figura 1. O mesmo possui motor com 16 válvulas, 130 cavalos de potência, câmbio automático e direção eletro-hidráulica.



Figura 1: Automóvel Chevrolet Astra com o qual este trabalho foi desenvolvido.

Desde o início do projeto de pesquisa em 2007, este veículo vem sendo equipado com a instrumentação necessária para a implementação do sistema cognitivo e de controle do mesmo. Atualmente, acredita-se que este já possui instrumentação suficiente para que seja atingido um nível intermediário de autonomia, tal que seria possível, por exemplo, trafegar em ruas vazias, onde não haja trânsito de veículos ou pessoas. Esta seção descreve brevemente os sistemas de controle e sensoriais presentes no veículo. Mais detalhes podem ser encontrados em (Freitas et al., 2009).

2.1 Sistemas de atuação

Para cada um dos quatro mecanismos de condução básicos do veículo foram desenvolvidos sistemas de acionamento que permitem a operação dos mesmos por *software*. Uma foto do interior do veículo mostrando alguns destes mecanismos pode ser vista na Figura 2. Por sua vez, um diagrama que mostra o sistema de automação do veículo pode ser visto na Figura 3. Cada um dos blocos deste diagrama é detalhado a seguir.

2.1.1 Câmbio

Para a automatização do câmbio foi empregado o atuador linear modelo MTrack01 da fabricante Warner (WarnerLinear, 2007). O mesmo possui



Figura 2: Visão interna do veículo com os elementos de atuação, o painel chaves, o computador e o joystick.

capacidade de carga de até 25 libras-força (aproximadamente 110 Newtons), velocidade máxima de 1,75 polegada/segundo, tensão de alimentação de 12V e extensão de atuação de 20cm. Ainda possui, internamente, um potenciômetro cuja resistência é proporcional à posição do atuador, servindo como realimentação para o controle de posição, e chaves de fim de curso. Este atuador é acionado por uma ponte-H, que por sua vez é alimentada pela bateria do veículo e controlada por um microcontrolador PIC18F2550, o que permite comunicação USB com um computador, por meio da emulação de uma porta serial. Foi desenvolvido um protocolo de comunicação próprio para a operação do acionamento.

2.1.2 Freio

Até o presente momento foram desenvolvidas duas soluções para a automação do freio do veículo. A primeira solução, mostrada na Figura 2, é constituída por um motor de corrente contínua acoplado a uma caixa de redução e, em seguida, a uma alavanca que pressiona o pedal do freio. No entanto, o controle de corrente implementado para o motor não se refletiu adequadamente no torque provido pela alavanca, devido ao elevado atrito estático presente na caixa de redução.

Na segunda solução, que se mostrou mais viável, um atuador linear modelo LA12 da fabricante LINAK baseado em um motor de corrente contínua substituiu o sistema descrito anteriormente. Um controlador de posição foi implementado no microcontrolador PIC18F2550, que possui uma interface USB para comunicação com o computador semelhante a do câmbio. O microcontrolador de controle do freio também possui uma interface com o sistema de emergência do veículo, informando ao computador se a emergência do veículo for acionada.

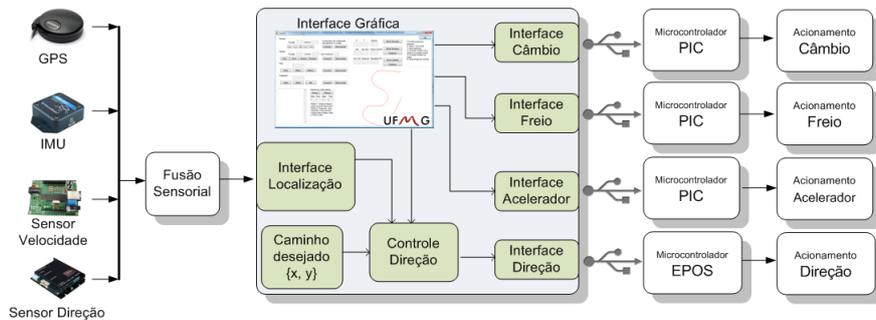


Figura 3: Arquitetura de *hardware* e *software* do sistema.

2.1.3 Direção

Para o controle da direção das rodas dianteiras do veículo, foi utilizado um motor de corrente contínua Maxon RE40 acoplado a uma caixa de redução. Foram acopladas ao volante e ao motor coroas dentadas conectadas por uma corrente de redução 2:1. Este motor é controlado pelo controlador digital EPOS 24/5, que é capaz de controlar a posição, velocidade e corrente do motor, e comunicar serialmente com um computador.

2.1.4 Aceleração

A aceleração é controlada mediante atuação direta sobre o sistema eletrônico *drive-by-wire*, interno ao veículo. Este sistema é controlado por uma Unidade de Comando Eletrônico (UCE) responsável pelo avanço da ignição, controle da mistura ar/combustível e ventilador de arrefecimento. Em modo automático, um microcontrolador PIC18F2550 envia à UCE um sinal PWM filtrado correspondente à aceleração desejada. Em modo manual, o controle de aceleração é devolvido ao veículo, sendo o sinal elétrico referente à aceleração desejada traduzido pelo sensor de posição do pedal do acelerador.

2.2 Sistemas Sensoriais

O sistema de localização do CADU, detalhado em (Santos, 2009), consiste na fusão das informações fornecidas por um conjunto de sensores, usando filtragem de Kalman. As informações de posição e atitude do veículo são obtidas a partir da fusão dos dados fornecidos por quatro sistemas sensoriais distintos: GPS, IMU, sensor de velocidade das rodas e sensor de posição do volante, descritos a seguir.

2.2.1 GPS

O CADU é equipado com um GPS modelo GPS 18 PC (Garmin, 2005), da fabricante Garmin. Esse instrumento fornece informações a uma taxa de amostragem de 1Hz, com uma incerteza típica de 15 metros, podendo este valor ser menor de acordo

com o número de satélites ao alcance do receptor. O receptor disponibiliza as medidas por meio de uma saída serial sob o protocolo de comunicação RS-232. A essa saída serial é conectado um conversor USB/Serial que possibilita que o sensor seja conectado a uma porta USB do computador.

2.2.2 IMU

O Sistema de Medições Inerciais (SMI ou IMU) utilizado neste trabalho é um instrumento eletrônico que informa medidas de velocidade angular, orientação e aceleração linear utilizando uma combinação de acelerômetros e girômetros. O instrumento utilizado no CADU, modelo 3DM-GX1 da fabricante Microstrain (MicroStrain, 2006), combina três girômetros com três acelerômetros ortogonais, três magnetômetros ortogonais, um multiplexador, um conversor AD de 16 bits e um microcontrolador embarcado para comunicar serialmente as medidas a uma frequência de até 350Hz.

2.2.3 Sensor de orientação das rodas dianteiras

A orientação das rodas dianteiras do veículo é medida a partir do ângulo do volante. A medida deste ângulo é fornecida pelo mesmo equipamento utilizado para o acionamento do volante, o controlador EPOS 24/5. Um *encoder* é responsável por medir o deslocamento angular do volante a partir do momento que o equipamento é ligado. A comunicação entre este dispositivo e o computador é feita serialmente por meio do protocolo RS-232.

2.2.4 Sensor de velocidade das rodas

A velocidade das rodas dianteiras do veículo é medida por um sensor já existente no sistema de freios ABS no veículo. Este sensor fornece um sinal em uma frequência proporcional à velocidade angular da roda. Foi desenvolvido um circuito que realiza a conversão do sinal do sensor para um sinal de tensão proporcional à frequência. O sinal de tensão fornecido pelo circuito de conversão é então lido por um microcontrolador PIC18F2550, que por sua vez se comunica serialmente com o

computador responsável pela localização do veículo.

3 SISTEMAS DE OPERAÇÃO E CONTROLE DO VEÍCULO

A condução automática do veículo depende de um sistema capaz de operar simultaneamente todos os atuadores do veículo. Para tanto, fez-se necessário o desenvolvimento de um *software* único com o poder de controlar os quatro sistemas de atuação. Conforme mostrado na Figura 3, o programa possui no total seis interfaces, sendo quatro interfaces de comunicação serial com os sistemas atuadores, uma de comunicação TCP com o sistema de localização e uma interface gráfica de comunicação com o usuário.

3.1 Modelagem do veículo

O modelo utilizado para o movimento do veículo é o modelo cinemático de Ackerman, descrito em (Choset et al., 2005), onde o veículo é representado por um volume retangular sobre quatro rodas. As rodas traseiras são fixas e as rodas dianteiras são atuadas por meio do volante. A tração do veículo é dianteira e as velocidades das rodas dianteiras são conhecidas por meio de sensores. É assumido que o veículo possui inércia desprezível, permitindo o projeto de um controlador cinemático de direção globalmente estável em baixas velocidades.

No modelo de Ackerman, o ângulo da roda $\delta(t)$ é representado por uma roda virtual localizada no meio das duas rodas dianteiras e o ângulo dessa roda virtual é dado pela média dos ângulos das duas rodas (que são diferentes entre si). A velocidade $v(t)$ dessa roda virtual também é dada pela média das velocidades das duas rodas. A distância entre os eixos, L , deve ser considerada na estimação da orientação do veículo.

Os estados do modelo são as posições $x(t)$ e $y(t)$, a velocidade linear $v(t)$ e a orientação absoluta do veículo ψ_T no plano horizontal. A velocidade do ponto médio entre as rodas dianteiras $v(t)$ e o ângulo das rodas dianteiras $\delta(t)$ (em relação ao veículo) são utilizados como entradas do modelo. Assim, as derivadas dos estados deste modelo, considerando o movimento em duas dimensões, podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= v(t) \cdot \cos(\psi_T(t) - \delta(t)), \\ \dot{y}(t) &= v(t) \cdot \sin(\psi_T(t) - \delta(t)), \\ \dot{\psi}_T(t) &= \frac{v(t)}{L} \cdot \sin(\delta(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

Considerando um caminho definido sobre o referencial da terra composto por pontos espaçados de aproximadamente 5cm, em um determinado ponto do caminho, sua orientação é dada por $\psi_C(t)$, equivalente ao ângulo absoluto formado

pela direção da reta tangente à curva no ponto em questão, conforme mostrado na Figura 4. Em outras palavras, $\psi_C(t)$ é a orientação absoluta do caminho em um determinado segmento formado por dois pontos consecutivos do caminho, sendo o primeiro ponto o mais próximo da posição do veículo no tempo t . Foi definido então o ângulo de guinada do veículo em relação ao caminho $\psi(t)$, descrito por

$$\psi(t) = \psi_C(t) - \psi_T(t). \quad (2)$$

3.2 Controlador de Posição e Orientação

Esta seção detalha as leis de controle da direção, que possuem como entradas as variáveis de estado do veículo e o caminho desejado, e como saída o ângulo de giro do volante δ a uma taxa de 10Hz. O sistema de fusão sensorial fornece as variáveis de estado: localização $x(t)$ e $y(t)$, orientação $\psi_T(t)$ em relação ao referencial da terra e a velocidade do veículo.

O controlador utilizado neste trabalho é proporcional não-linear, sendo o mesmo similar ao apresentado em (Hoffmann et al., 2007). A equação para o controle da direção do CADU é

$$\delta(t) = \psi(t) + \text{atan} \left(\frac{k_1 \cdot e(t)}{v(t) + k_2} \right), \quad (3)$$

onde $e(t)$ é o erro de distância transversal das rodas dianteiras e k_1 e k_2 são constantes positivas. A constante k_2 é incluída na expressão originalmente proposta por (Hoffmann et al., 2007) para se obter melhor desempenho em baixas velocidades e para prevenir que o argumento da função arco-tangente se torne muito grande. Além disso, o atraso entre o envio do comando e o alcance do ângulo de direção desejado pode causar oscilações. Para evitar este problema, uma saturação na taxa de variação de $\delta(t)$ é adicionada. Além disso, o ângulo das rodas $\delta(t)$ é limitado mecanicamente à $-\delta_{max} < \delta < \delta_{max}$. No caso do veículo Astra que foi utilizado, $\delta_{max} = 29,5^\circ$.

Para uma avaliação preliminar do controlador, o mesmo foi implementado em ambiente Matlab e teve seu resultado simulado para posições diversas no espaço próximo a um determinado caminho. Esta simulação está representada na Figura 5 em forma de um campo vetorial. Cada vetor no espaço representa a direção em que estariam apontadas as rodas dianteiras do veículo caso o mesmo se encontrasse na posição marcada pela base do vetor. O referido campo vetorial assumiu a velocidade constante de 2m/s e pode variar para outras velocidades.

O primeiro passo para o cálculo da variável manipulada desta malha de controle, o ângulo das rodas $\delta(t)$, consiste em comparar a posição atual do veículo ao caminho desejado. O segmento do caminho mais próximo à posição atual do veículo

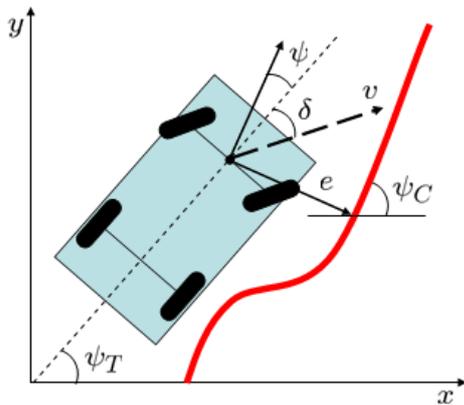


Figura 4: Descrição da variáveis relacionadas ao ângulo do veículo em relação ao caminho.

deve ser encontrado. O caminho é representado neste sistema por um conjunto de posições $\{C_x, C_y\}$. Utilizar métodos convencionais para encontrar o segmento mais próximo da posição atual seria computacionalmente caro. Foi utilizado então o Método da Seção Áurea, para busca de mínimo de uma função.

O intervalo da busca pelo segmento mais próximo ao longo do caminho $\{C_x, C_y\}$ é dinâmico. A cada iteração do ciclo de controle, este segmento é procurado em uma faixa do caminho, sendo a mesma determinada pelo segmento encontrado na iteração anterior. Isso permite que o caminho passe pela mesma posição no espaço duas ou mais vezes, isto é, partes do caminho podem se cruzar sem o risco de o veículo escolher o caminho errado no momento do cruzamento. Além disso, o método utilizado para a busca do segmento mais próximo requer que a função a ser minimizada seja unimodal, sendo portanto necessário haver somente um mínimo no intervalo. Pelo fato de a velocidade do veículo ser limitada e a frequência das iterações ser suficientemente alta, pode-se afirmar que o veículo nunca passará para um segmento do caminho distante daquele calculado na iteração anterior.

O cálculo da variável manipulada (o ângulo das rodas) é feito a partir de duas componentes: uma proporcional à orientação do ponto mais próximo do caminho em relação à orientação do veículo, e outra proporcional (não-linearmente) à distância do veículo até o caminho (Equação 3). Acredita-se que a limitação da velocidade de atuação no ângulo das rodas e o atraso provocado pela baixa frequência de execução das iterações, sendo o mesmo de aproximadamente 100ms, afeta a segunda componente da referida equação. Com o carro em movimento, ao ser calculado a orientação do segmento mais próximo do caminho, o veículo já se encontra em outra posição, cuja orientação já é consideravelmente diferente daquela calculada no mesmo ciclo, caso o veículo esteja

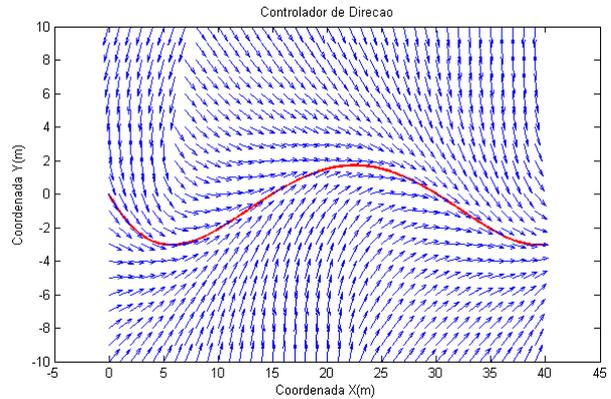


Figura 5: Simulação do controlador com $v(t) = 2\text{m/s}$ e ganhos $k_1 = 1$ e $k_2 = 3$.

em uma curva. Sendo assim, o cálculo da componente proporcional à tangente do caminho foi modificado, de forma a considerar não mais o segmento mais próximo, mas sim alguns segmentos à frente. Em outras palavras, foi feita uma previsão do caminho para o cálculo da segunda componente da Equação 3 de controle.

4 EXPERIMENTOS

Para a integração dos sistemas atuadores e de localização foi necessária a criação de um *software*, descrito em (Sabbagh, 2009), que englobasse interfaces de comunicação para a operação dos sistemas atuadores e de localização e o módulo de controle da direção.

Para a validação do sistema de controle implementado, é avaliado o erro de seguimento do caminho pré-definido. Realizou-se um experimento em um local aberto, onde o veículo seguiu um caminho de 240 m de extensão, retornando a um ponto próximo ao seu ponto de origem. Esta área é coberta por terra e grama, estando o carro mais propício ao escorregamento lateral, fator não levado em conta no modelo utilizado neste trabalho. Um vídeo deste experimento pode ser visto em (CORO, 2009). Primeiramente, um motorista humano conduziu o carro e gravou o caminho descrito pela curva tracejada da Figura 6. Em seguida, o carro usou como referência o caminho tracejado e percorreu um caminho similar, mostrado na mesma figura em linha contínua. Percebe-se uma anomalia em um certo trecho da curva, onde a mesma apresenta descontinuidades. Esta anomalia foi resultado da correção realizada pelo GPS no sistema de localização do veículo e não representa o verdadeiro comportamento do mesmo. O veículo CADU seguiu de forma completamente autônoma o caminho previamente definido do início ao fim com um erro médio (RMS) de 0,51 m e um erro máximo de 1,65 m, conforme mostrado na Figura 7. Outros caminhos foram testados com resultados similares.

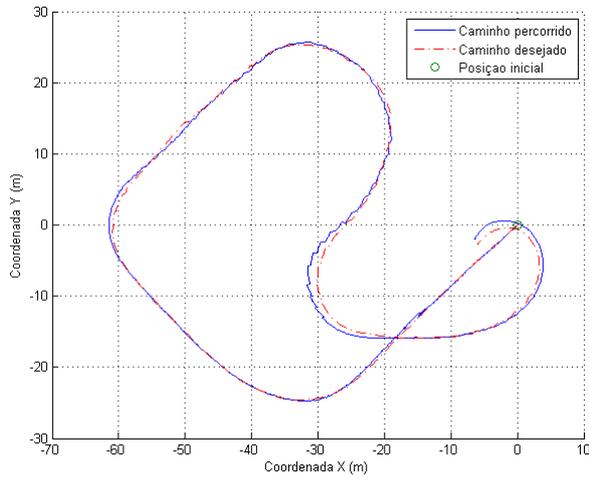


Figura 6: Comportamento do veículo em um experimento realizado em um caminho de 240m de extensão.

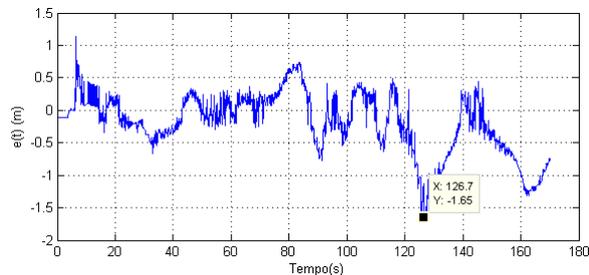


Figura 7: Erro de distância obtido em um caminho de 240m de extensão coberto por terra e grama.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo mostrou o estágio atual de desenvolvimento do veículo autônomo CADU. Os sistema de atuação do freio, aceleração, direção e câmbio foram integrados, centralizando as interfaces de operação em um *software* de controle unificado. Um módulo de controle de direção foi projetado, simulado e implementado no *software* de operação. O veículo operou autonomamente, a partir do controle da orientação de suas rodas dianteiras.

As próximas etapas do projeto visam aumentar o nível de autonomia do veículo CADU. Já está em andamento a criação de um módulo de planejamento de caminho assistido por um sistema de detecção de obstáculos. Com a implementação desse sistema, o veículo se torna menos dependente de um sistema de localização de grande precisão, uma vez que o sistema de detecção de obstáculos seria o responsável pelo ajuste fino do controle de direção, mantendo o veículo no centro de uma estrada, por exemplo. Outro trabalho já em andamento é a criação de uma rede de instrumentação no veículo com o objetivo de substituir a comunicação USB atual entre os microcontroladores PIC e o compu-

tador, com o intuito de aumentar a robustez do sistema.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Paulo Iscold, Leonardo Torres e Guilherme Pereira são bolsistas do CNPq, ao qual agradecemos o apoio. Elias Freitas é bolsista PET/CAPES.

Referências

- Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L. E. e Thrun, S. (2005). *Principles of Robot Motion*, The MIT Press.
- CORO (2009). Laboratório de Sistemas de Computação e Robótica, <http://coro.cpdee.ufmg.br>. acessado em 01/2010.
- Dar (2008). Darpa grand challenge, <http://www.darpa.mil/grandchallenge05>. acessado em 02/2009.
- Freitas, E. J. R., Vinti, M. N. W., Santos, M. M., Iscold, P., Tôrres, L. A. B. e Pereira, G. A. S. (2009). Desenvolvimento de automação embarcada para um robô móvel baseado em um carro de passeio, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI'09)*.
- Garmin, I. I. (2005). *GPS 18 Technical Specifications*. Accessed on November 9th, 2009.
- Hoffmann, G., Tomlin, C., Montemerlo, M. e Thrun, S. (2007). Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing, *Proceedings of the 26th American Control Conference* pp. 2296–2301.
- McBride, J. R. et al. (2008). A perspective on emerging automotive safety applications, derived from lessons learned through participation in the darpa grand challenges, *Journal of Field Robotics* **25**(10): 808–840. Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge.
- MicroStrain (2006). *3DM-GX1® Product Datasheet*, MicroStrain Inc.
- Sabbagh, V. B. (2009). Desenvolvimento de um sistema de controle para um veículo autônomo. Projeto Final de Curso. Belo Horizonte, Brasil. Disponível em <http://coro.cpdee.ufmg.br>.
- Santos, M. M. (2009). Desenvolvimento de um sistema de localização para um veículo terrestre. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, Brasil. Disponível em <http://coro.cpdee.ufmg.br>.
- Thrun, S. (2006). Winning the darpa grand challenge, *Google TechTalks*.
- WarnerLinear (2007). *Electric Actuators and Actuator Controls*, Warner Linear.