

VEÍCULOS AUTÔNOMOS TERRESTRES – SISTEMAS DE CONDUÇÃO SEM INTERVENÇÃO HUMANA

Filipe M. S. de Campos – filipe.campos@poli.usp.br

Rafael Barbolo Lopes – rafael.barbolo@poli.usp.br

Rafael Ivan Garcia – rafael.ivan@poli.usp.br

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais

Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 n° 380

CEP 05508-970 – São Paulo – SP

***Resumo:** Este artigo tem o propósito de apresentar uma análise sobre o estado atual do desenvolvimento de veículos autônomos terrestres, isto é, veículos capazes de guiar sem intervenção humana. Assim, foram selecionados os três veículos mais bem colocados na competição DARPA Urban Challenge e serão discutidas as principais características e automatismos de cada um. Com base nestes estudos de caso, é possível vislumbrar o que o esperar para o futuro nesta área e discutir os pontos mais críticos para a evolução dos veículos autônomos, bem como a maneira com que estes robôs passarão a fazer parte da sociedade.*

***Palavras-chave:** Veículo Autônomo, DARPA Urban Challenge.*

1 INTRODUÇÃO

Veículos autônomos possuem a capacidade de guiar por conta própria sem qualquer tipo de intervenção humana na condução, isto é, sem condutor ou controle remoto. Para determinar as características do ambiente no qual ele está inserido, o veículo faz uso de uma série de sensores, computadores, elementos de controle e sistemas de posicionamento e, assim, consegue executar ações com o intuito de finalizar a tarefa a ele conferida.

Os veículos autônomos podem ser utilizados de várias formas, desde missões militares de alto risco, nas quais se deseja resguardar a vida de oficiais, até no cotidiano de pessoas comuns, que simplesmente desejam se deslocar de um ponto a outro da cidade de uma forma mais confortável e otimizada.

Os desafios tecnológicos existentes para se construir um robô com essas características ainda são diversos. Contudo, os avanços obtidos pelos veículos competidores do DARPA Urban Challenge são bastante significativos nesta área e, certamente, abrem novos horizontes para pesquisadores e empresas envolvidas desenvolverem tecnologias cada vez melhores para o progresso dos veículos autônomos.

2 DARPA URBAN CHALLENGE

O *Urban Challenge* é um programa de pesquisa e desenvolvimento de veículos autônomos promovido pela agência DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) do Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Neste programa, veículos autônomos

terrestres são inseridos em ambientes simulados de cidades para percorrer caminhos pré-estabelecidos, interagindo com o tráfego e lidando com os obstáculos existentes.

O principal foco do *Urban Challenge* é desenvolver e aplicar tecnologias na locomoção de veículos não-tripulados, de forma a aprimorar as capacidades militares de defesa do país. Porém, alguns dos avanços tecnológicos obtidos na área podem, no futuro, passar a fazer parte do dia-a-dia das pessoas e auxiliá-las a dirigir, seja para trazer mais conforto, segurança ou agilidade no trânsito.

A última edição do programa ocorreu no ano de 2007. Através de uma série de etapas de qualificação, foram definidos os veículos mais capacitados, três dos quais são os objetos de estudo deste artigo, para participar do evento final em Victorville, California.

Outras edições do programa foram realizadas nos anos de 2004 e 2005; nestas ocasiões, os veículos autônomos percorreram circuitos de, respectivamente, 142 e 132 milhas no deserto.

3 PROJETO VICTOR TANGO

A equipe *VictorTango* foi formada por membros da Universidade Virginia Tech e da TORC Technologies e desenvolveu o veículo denominado Odin, um Ford Escape 2005 híbrido modificado para operações autônomas. Esta equipe foi a terceira colocada na competição. A figura 1 abaixo mostra o veículo autônomo Odin.



Figura 1 - Visão externa do Odin, com indicação dos sensores.

De acordo com [1], a arquitetura do sistema implantado neste veículo foi dividida em três partes: percepção do ambiente, planejamento de decisões e plataforma base do veículo.

O sistema de percepção tem como função definir qual a posição do veículo em relação ao sistema de referência utilizado e monitorar e extrair informações relacionadas ao ambiente no qual o veículo se encontra. Através deste sistema, o Odin é capaz de identificar eventuais obstáculos fixos ou móveis, como outros veículos, no seu caminho e monitorar a sua posição em relação a faixa da pista em que ele trafega.

Para atingir todos os requisitos de percepção do ambiente, são utilizados múltiplos sensores, tais como: GPS, câmeras de vídeo e sensores de distância com laser, que executam varreduras para mapear o ambiente externo. Desta forma, este veículo é capaz de determinar a sua posição espacial com um erro menor que 0,1 metro, identificar veículos que estejam até 100 metros a sua frente ou 50 metros atrás ou dos lados. O componente de classificação de

objetos incorporado neste sistema possibilita a classificação de obstáculos como estáticos ou dinâmicos, sendo que esta última classe é composta pelos obstáculos capazes de movimento, ou seja, um veículo estacionado seria classificado como obstáculo dinâmico.

O sistema de planejamento do veículo recebe os estímulos do sistema de percepção e, com base nos pontos de partida e chegada, determina a melhor rota possível. Este sistema deve garantir que as regras de trânsito sejam respeitadas durante todo o percurso, premeditar as ações dos veículos próximos, avaliar as opções de movimentação existentes e gerar sequências de movimentos adequadas para deslocar o veículo com segurança. A interface entre o sistema e o veículo recebe estas informações e o conduz até o ponto de destino.

O veículo utilizado como plataforma base, um Ford Escape 2005 híbrido, provê numerosas vantagens para o projeto nos aspectos de geração de energia, confiabilidade e segurança. Além disso, os sistemas de direção, câmbio e aceleração deste veículo já são *drive-by-wire*, de forma que é possível controlá-lo apenas emulando os sinais de comando. Assim, não é necessário adicionar mais atuadores no veículo, diminuindo a complexidade do projeto e o potencial de falhas devidas a introdução de tais componentes.

Como vimos, o sistema desenvolvido para automatizar este robô é composto por uma série de sensores, atuadores, computadores e geradores de energia auxiliares, devido a grande quantidade de informação a ser processada e de tarefas a serem realizadas para que a condução do veículo seja correta e segura. Apesar muitos equipamentos terem sido inseridos no veículo, ele ainda dispõe de toda a capacidade original de passageiros.

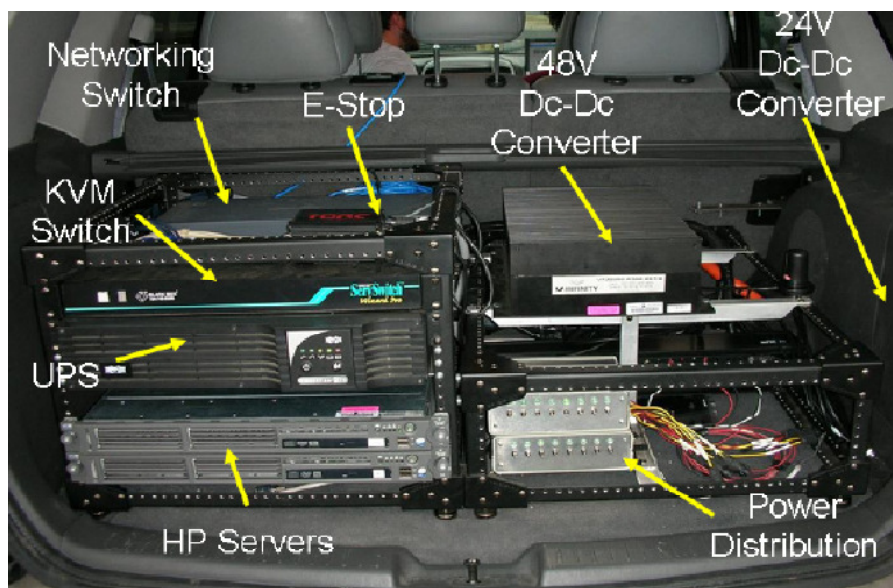


Figura 2 - Rack com os sistemas eletrônicos do Odin.

4 PROJETO STANFORD “JUNIOR”

O projeto *Junior* da Universidade de Stanford [2] é uma melhoria do projeto anterior chamado *Stanley*, que competiu no DARPA 2005. Este projeto obteve a segunda colocação na competição e conta com a participação de alunos, funcionários, professores e várias organizações afiliadas, principalmente a Volkswagen (responsável pela adaptação do veículo) e a Mohr Davidow Ventures (responsável pela comunicação e divulgação do projeto).

O Junior é baseado em um VW Diesel Passat Wagon padrão que era vendido na Europa na época do projeto. O controle automático do automóvel é feito através de interfaces eletrônicas já presentes no carro para o controle da parte elétrica, breque, acelerador e

marchas. Já para o controle da direção do veículo foi necessário um motor DC de baixo torque acoplado com a coluna de direção do Passat.



Figura 3 - Junior no campos de Stanford.

O carro é equipado com diversos sensores e também computadores. Todos os computadores que controlam o Junior foram instalados no porta-malas e consistem em dois PCs com processadores multi-core rodando Linux Redhat - FC6, além de diversos módulos de controles menores que servem de interface com os sensores instalados no veículo. O Passat possui um Applanix POS LV 420, que é um sistema de navegação usado para determinar a localização, orientação e velocidade do veículo, ou seja, seu estado. Para o sensoriamento externo, o Junior utiliza um dispositivo que varre o ambiente ao seu redor por meio de raios lasers chamado Velodyne HD LIDAR e também o sensor IBEO Alasca XT. Além disso, o automóvel conta com uma câmera de vídeo omni-direcional Ladybug que permite a criação de uma imagem panorâmica do cenário ao redor do veículo. Por fim, o veículo possui dois radares de longo alcance usados para detectar veículos a distâncias maiores e ocluídos por outros veículos ou objetos.

O software do sistema de controle do Junior possui uma arquitetura modular que compreende dezenas de módulos que processam e transmitem informações de forma assíncrona. Essa arquitetura utiliza o software Simmons's IPC (Inter-Process Communication) para realizar a comunicação entre os módulos.

Os dados recebidos pelos sensores são direcionados a um pipeline de múltiplos estados. Assim, o funcionamento do veículo decorre da seguinte sequência: interface com sensores, percepção e estimativa do estado do carro, planejamento, controle e interface com o veículo. O pipeline é executado em paralelo com todos os outros processos e o limite de atraso do processamento entre a aquisição de dados do sensor até o controle do veículo é no máximo de 300ms.

A principal função do sistema de câmera panorâmica é detecção das marcações da pista e uma localização mais precisa do automóvel que ocorrem em tempo real graças ao uso de uma GPU.

O passo inicial para esse processo é a correção de rotações do veículo que podem interferir no processo de localização. Com essas correções, pode-se retificar a imagem panorâmica em uma imagem plana. Nesta nova imagem, as marcações da pista estão na mesma referência geométrica que as marcações disponíveis nos arquivos RNDF (*Route Network Definition File*) da competição, que contém diversos tipos de informações sobre o

percurso a ser percorrido pelos veículos competidores. Então, a imagem pode ser analisada a procura dos locais e das cores das marcações da pista e, somando-se as as informações do Applanix POS LV 420, consegue-se chegar a uma precisão da localização do carro de poucos centímetros.

Além das faixas da pista, o sistema do Junior também procura pelo meio-fio das ruas. Para isso, foi criado um método de aprendizado de máquina que consegue identificar o meio-fio nos dados recolhidos pelo sensor Velodyne. As informações da presença do meio-fio são utilizadas tanto para evitar colisões, quanto para melhorar a precisão da localização do veículo.

Através dos dados dos sensores Velodyne e do IBEO, foram desenvolvidas rotinas para rastreamento de objetos em movimento ao redor do Passat. Para encontrar esses objetos, primeiro passa-se um filtro nos dados dos sensores para encontrar obstáculos verticais. Em seguida, representam-se os objetos encontrados com um ou mais retângulos 2D. Para objetos em movimento, além da posição, também é estimada a velocidade.

O Junior possui um sistema para planejar a rota global que deve ser seguida para se chegar ao destino desejado, o que isso é realizado em menos de 100ms. O planejador de rotas funciona atribuindo custos para todas as rotas possíveis que podem ser formadas até o ponto de destino. Essas rotas levam em conta todo o percurso definido pelo arquivo RNDF já explicado anteriormente, inclusive em que faixas da pista o carro deve percorrer a cada momento. Além do caminho a ser seguido, também é estimado o tempo total do percurso.

As informações da rota global em conjunto com os dados dos sensores podem ser combinadas para criar novas rotas (em tempo real), seja por obstáculos, bloqueios em pistas, trânsito lento ou algum outro fator que faça com que a mudança de rota seja uma escolha adequada.

Toda alteração de rota durante o percurso é calculada levando em conta três custos: custo local, custo global e custo de manobra. O custo local é calculado avaliando a disposição de obstáculos na pista, e estima quão rapidamente pode-se percorrer o percurso dentro do limite de velocidade e outras normas de trânsito.

O custo global é o menor valor encontrado para uma rota completa, e estima o tempo requerido para se chegar ao fim do trajeto a partir do ponto em que o veículo se encontra.

O custo de manobra leva em conta o perigo que cada manobra representa. Por exemplo, o veículo apenas deve mudar de faixa se a diferença entre os custos dos caminhos excede o custo da manobra. Juntos, esses critérios maximizam o progresso e tornam a viagem mais estável e de comportamento menos oscilatório.

É interessante ressaltar a diferença no comportamento do Junior quando ele se depara com um obstáculo parado na pista e um em movimento. Por segurança, ele nunca ultrapassa obstáculos em movimento, apenas modifica sua velocidade para que não ocorra uma colisão. Em contra partida, quando existe um obstáculo parado o Junior recalcula os custos do percurso e modifica sua rota desviando do obstáculo.

Para lidar com os cruzamentos das ruas, criou-se uma máquina de estados que percebe a chegada e saída de automóveis da área demarcada de cruzamento. Além disso, para o carro que estava esperando sua vez para atravessar no cruzamento, definiu-se um tempo aleatório de espera para não ocorrer o caso em que dois veículos em espera utilizem o cruzamento ao mesmo tempo quando ele for liberado.

Para testar o veículo autônomo, diversos experimentos foram realizados, tanto de forma simulada quanto com o carro real. Nos exemplos simulados, os desenvolvedores do projeto puderam economizar um tempo significativo e identificar diversas falhas nos módulos antes dos testes com o carro em ambiente real.

Os testes em ambiente real foram realizados em dois locais principais, a pista Moffett Field (administrado pela NASA Ames) e no próprio campus da universidade. A pista, que na

verdade eram duas pistas de duas milhas de comprimento, era usada aproximadamente a cada duas semanas para os testes, enquanto que para o campus foram realizados testes mais complexos como um percurso de dez milhas em que o Junior teve que lidar com trânsito, cruzamentos, faróis e curvas.

5 PROJETO TARTAN RACING

O *Tartan Racing* é o projeto que criou o veículo autônomo mais avançado apresentado em um programa DARPA: o robô conhecido por *Boss*, vencedor da competição do ano de 2007. Ele possui módulos para encontrar a melhor rota entre dois pontos, para se adaptar a mudanças no ambiente e a situações adversas, gerando novos caminhos percorráveis. Um módulo de percepção permite que ele reconheça objetos e pessoas no percurso, usando tecnologias de radares e sistemas de visão computacional.



Figura 4 - Boss, robô construído no projeto Tartan Racing em um chassi Chevrolet Tahoe.

Conforme a documentação técnica deste veículo autônomo [3], a arquitetura do robô pode ser dividida em cinco grandes blocos:

Planejamento de missão – O bloco de componentes responsável por computar o custo (tempo e risco) de todas as possibilidades de rotas entre o ponto em que o veículo está e o ponto onde ele deve chegar é o *Planejamento de missão*. O planejador de missão define uma rota ótima de maneira muito próxima à de um humano, comparando caminhos com base em conhecimentos de congestionamento, bloqueios ou limites de velocidade.

Geração de comportamento – Os componentes de comportamento formulam a definição de um problema que o *Planejamento de movimento* deve resolver com base nas informações estratégicas fornecidas pelo *Planejamento de missão*. Este bloco é implementado como uma máquina de estado que decompõe uma tarefa em um conjunto de comportamentos que quando executados concluem uma missão

Planejamento de movimento – O componente de *Planejamento de movimento* consiste de vários planejadores de movimento, cada um capaz de evitar obstáculos estáticos ou dinâmicos enquanto o veículo atinge um estado desejado.

Percepção e Modelagem de Mundo – O componente *Percepção e modelagem de mundo* interpreta informações de vários sensores com o objetivo de informar ao resto do sistema

como é o mundo onde o veículo está. O modelo do mundo compartilhado com todo o sistema possui mapas de obstáculos estáticos ou dinâmicos, condições de visibilidade, saúde e posição do veículo, e estrutura da via.

Mecatrônica – Os componentes elétricos e mecânicos compõe o bloco *Mecatrônica* e fornecem meios para que algoritmos de automação interajam com o mundo. O veículo robotizado, *Boss*, foi projetado para ser robusto e fornecer energia, resfriamento e atuação necessária para promover autonomia.

O chassi do veículo é um Chevrolet Tahoe que foi escolhido levando em conta suas interfaces eletrônicas integradas, seu teto alto onde podem ser colocados sensores com grande perspectiva de visão para detectarem outros veículos próximos, e seu grande espaço interno que consegue abrigar equipamentos eletrônicos e desenvolvedores.

Os componentes eletrônicos usados pelo robô foram escolhidos para fornecerem alta confiabilidade e funcionalidade para o sistema. Foram adicionados sistemas para automação do veículo, fonte de energia auxiliar, computadores e placas para colocação de sensores.

Existem sensores responsáveis por determinar a segurança de atravessar um cruzamento, determinar a segurança de passar perto de um veículo que se aproxima, detectar e localizar veículos no mundo, estimar formatos de vias e de suas pistas, e detectar obstáculos estáticos presentes em vias.

Testes com o veículo mostraram que ele é capaz de executar com segurança percursos consideravelmente grandes em uma cidade, conhecendo previamente seu mapa.

6 O QUE ESPERAR PARA O FUTURO

Hoje já existem veículos robotizados capazes de executar percursos sem intervenção humana, porém a inteligência desse tipo de robô ainda é pequena perto de quanto pode chegar. É esperado que nos próximos anos esses robôs integrem soluções de reconhecimento de voz e comandos, sistemas de visão computacional mais avançados que permitam melhorar a percepção do robô a respeito dos elementos presentes no mundo, avanços tecnológicos na área de sensoriamento que facilitarão tomadas de decisão, e poder computacional significativamente maior, permitindo que algoritmos mais complexos sejam executados e a precisão de um veículo robotizado seja maior.

Os custos de desenvolvimento e implementação de um veículo robotizado são muito altos devido principalmente à grande quantidade de componentes eletrônicos utilizados e à complexidade da tecnologia envolvida. Se um mercado de veículos robotizados surgir, os custos poderão ser diluídos e em poucos anos atingir preços acessíveis para serem usados por uma grande quantidade de pessoas ou organizações.

Entre as aplicações mais prováveis para esses robôs na área civil está a assistência a motoristas, auxiliando na prevenção de acidentes causados por colisões. As pessoas também podem se beneficiar usando o veículo com piloto automático, o que seria uma espécie de motorista particular. Alguns veículos atualmente já são comercializados com funções de estacionamento automático, isto é, o motorista não necessita mais executar balizas pois o sistema do carro é capaz de manobrá-lo automaticamente.

No ambiente empresarial ou industrial, os veículos robotizados poderão ser utilizados para transportar cargas ou buscar executivos em lugares remotos a qualquer horário. Eles poderão ser utilizados por empresas de entrega, incorporando sistemas de logística na escolha de melhores rotas de entrega.

Na área militar, esses veículos serão responsáveis por diminuir a quantidade de humanos no campo de batalha e em atividades de vigilância ou reconhecimento de local. Também poderão ser usados para missões de resgate ou de alto risco que envolvem transporte de pessoas ou cargas.

Esses veículos robotizados também têm potencial para diminuir a poluição do meio ambiente, já que executam rotas otimizadas e podem ser programados para usar o mínimo de energia. Além disso, surge um ramo de negócio no qual pode-se contratar fretamentos ou viagens com esse tipo de veículo, como se fossem táxis muito otimizados e mais baratos, com o mesmo veículo servindo a uma grande quantidade de pessoas. Um argumento muito forte para este negócio é que hoje os veículos ficam estacionados durante a maior parte do dia. Em um mundo com veículos robotizados, as pessoas não precisam ter seu próprio veículo e podem pagar um preço baixo apenas pelo tempo que usam o veículo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos três exemplos de veículos autônomos apresentados, é possível dizer que os avanços tecnológicos e as pesquisas nesta área caminham para a criação de robôs cada vez mais inteligentes e precisos, capazes de realizar condução de passageiros ou de carga sem intervenção humana, de forma segura e confiável. Para atingir este patamar, certamente ainda faltam avanços tecnológicos em diversas áreas para simplificar e baratear a implementação de um veículo autônomo comercial.

Outro problema que ainda precisa ser trabalhado, é a quantidade de equipamento adicional acrescentada ao veículo. Na parte externa, é extensivo o uso de sensores de tamanho considerável, ao passo que no interior ficam os sistemas computacionais, eletrônicos, de geração de energia e demais interfaces de integração com a plataforma base do veículo. Nos automóveis participantes do *DARPA Urban Challenge*, por exemplo, a capacidade de transporte de bagagem foi drasticamente prejudicada, e isso pode configurar um problema em um veículo autônomo comercial.

8 REFERÊNCIAS/CITAÇÕES

- [1] REINHOLTZ, C.; DARPA Urban Challenge Technical Paper. DARPA Urban Challenge, 2007.
- [2] AUTOR. Stanford's Robotic Vehicle "Junior": Interim Report, DARPA Urban Challenge, 2007.
- [3] URMSON, C.; Tartan Racing: A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge. DARPA Urban Challenge, 2007.
- [4] DARPA Urban Challenge website.
Disponível em: <<http://www.darpa.mil/grandchallenge/overview.asp>> Acesso em: 15 mar. 2010.

AUTONOMOUS GROUND VEHICLES – CONDUCTION SYSTEMS WITHOUT HUMAN INTERVENTION

Abstract: this paper aims to present an analysis on the current development state of autonomous ground vehicles, i.e., vehicles capable of driving without human intervention. Thus, the three best-placed vehicles on the DARPA Urban Challenge were selected and the main technical features and automatisms of each one will be discussed. Based on these case studies, it's possible to glimpse what to expect for the future in this area and discuss the most critical aspects for the evolution of autonomous vehicles, and the way these robots will become part of society.

Key-words: *Autonomous Vehicle, DARPA Urban Challenge.*