

Aplicação de LIDAR em Redes Veiculares

Marcelo Maia Juvencio

20 de outubro de 2024

1 Introdução

Redes veiculares (Vehicular Ad-hoc Networks – VANETs) são projetadas para que os dispositivos se conectem de maneira dinâmica e sem a necessidade de uma infraestrutura fixa (Ad-hoc) e assim, fornecer comunicação entre veículos (Vehicle-to-Vehicle, V2V) e entre veículos e infraestrutura (Vehicle-to-Infrastructure, V2I). Os objetivos destas redes é promover segurança no trânsito, eficiência no transporte e melhorias em serviços de mobilidade, tanto para veículos autônomos quanto convencionais. Enquanto veículos autônomos se aproveitam dessas redes para operar de forma mais inteligente, veículos convencionais também podem se integrar e se beneficiar das informações trocadas, melhorando a experiência geral de condução e contribuindo para um trânsito mais seguro e eficiente.

A arquitetura das redes veiculares é composta por unidades a bordo dos veículos (OBUs, On-Board Units) e unidades de infraestrutura (RSUs, Road-Side Units). Essas unidades se comunicam utilizando tecnologias de comunicação sem fio, como DSRC (Dedicated Short-Range Communications, que utiliza o padrão IEEE 802.11p que é uma extensão do padrão IEEE 802.11, para ambientes que requerem baixa latência e alta mobilidade), 4G, 5G e, mais recentemente, o C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything, que utiliza a infraestrutura do 4G LTE e 5G para melhorar a conectividade e a cobertura).

Diante do que foi apresentado sobre VANETs e suas tecnologias de comunicação sem fio, vamos introduzir conceitos relacionados a veículos autônomos.

Os veículos autônomos desempenham um papel crucial nas redes veiculares ad hoc (VANETs). A integração de veículos autônomos em VANETs tem o potencial de revolucionar a mobilidade, a segurança e a eficiência do tráfego nas cidades.

Os veículos autônomos são equipados com sensores avançados, sistemas de navegação e algoritmos de inteligência artificial que permitem a tomada de decisões em tempo real. O conjunto de tecnologias utilizadas em veículos autônomos vai definir o grau de automação destes veículos. Assim, foram definidos níveis para classificar o grau de automação dos veículos autônomos que vai do nível 0 (nenhuma automação) ao nível 5 (automação total), conforme tabela 1. É importante notar que apenas no nível 5 o veículo é totalmente autônomo e capaz de operar em qualquer condição, sem a necessidade de intervenção humana.

Neste ponto podemos citar os veículos da Tesla, conhecidos como Autopilot. Estes veículos dependem principalmente de câmeras e software de visão computacional para a percepção do ambiente e dessa forma a intervenção humana pode ser necessária em cenários onde a visibilidade das câmeras é comprometida como, por exemplo, em uma tempestade ou uma nevasca. Essa abordagem levaria a uma classificação para os carros da Tesla de nível 2 ou 3, dependendo da situação, já que para nível 4, operando em áreas específicas como rodovias ou áreas urbanas com infraestrutura adequada, o cenário de pouca visibilidade ainda é possível.

Nível	Descrição	Exemplo de Funcionalidade
0	Sem automação (Controle humano total)	O motorista controla todas as funções do veículo.
1	Assistência ao motorista (Automação mínima)	Controle de cruzeiro adaptativo (ACC)
2	Automação parcial (Controle simultâneo de várias funções)	Manutenção de faixa e controle de velocidade ao mesmo tempo
3	Automação condicional (Automação em condições limitadas)	Condução autônoma em rodovias, com motorista pronto para intervir
4	Alta automação (Condução autônoma em condições específicas)	Veículo autônomo que opera sem intervenção em áreas específicas
5	Automação total (Condução totalmente autônoma)	Veículo que pode dirigir em qualquer condição sem intervenção humana

Tabela 1: Níveis de automação para veículos autônomos

As VANETs com as tecnologias, já citadas, C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) e o DSRC (Dedicated Short-Range Communications) são essenciais para a operação eficaz dos veículos autônomos, pois proporcionam uma percepção aprimorada do ambiente, permitindo que esses veículos tomem decisões assertivas em situações dinâmicas. A integração de sensores avançados, como LIDAR, câmeras e radares, junto com a comunicação em tempo real oferecida pelas VANETs, cria um cenário onde os veículos autônomos não apenas reagem a eventos em seu ambiente, mas também antecipam e colaboram com outros veículos para uma condução mais segura e eficiente.

O exemplo dos veículos autônomos da Tesla mostra a necessidade da integração de sensores avançados para superar o desafio da visibilidade das câmeras para chegar ao nível 5. É claro que para superar um desafio outros desafios são criados, como por exemplo o poder computacional necessário que deverá ser embarcado em um veículo para processar informações que garantam uma detecção e rastreamento de objetos em cenário dinâmico como uma cidade.

Neste trabalho será apresentada uma aplicação dos sensores LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) na detecção e rastreamento de objetos 3D integrado com câmeras para fornecer uma representação 3D fiel do espaço ao redor de veículos autônomos.

2 Detecção e rastreamento de objetos 3D

A detecção e rastreamento de objetos 3D é uma tecnologia essencial em sistemas autônomos, permitindo que veículos, drones, robôs e outras plataformas móveis percebam e interpretem seu ambiente tridimensional. Esse processo envolve a identificação de objetos em movimento ou estáticos ao redor da plataforma, determinando sua localização, forma e, em muitos casos, sua trajetória.

Em veículos autônomos, por exemplo, essa tecnologia é usada para identificar outros veículos,

pedestres, ciclistas, sinais de trânsito e obstáculos, garantindo navegação segura e eficiente. A detecção em 3D é realizada através de sensores avançados, como LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), câmeras estéreo (que funcionam de forma semelhante ao sensoramento 3D da visão humana - visão estéreo), e radares, que geram uma nuvem de pontos 3D ou imagens detalhadas do ambiente.

Para melhorar a precisão e a robustez desses sistemas, a fusão de dados de diferentes sensores é comum. Um dos métodos mais utilizados é a combinação do LIDAR com Unidades de Medição Inercial (IMU), que medem o movimento e a orientação do veículo, proporcionando um rastreamento preciso dos objetos detectados mesmo em situações dinâmicas e ambientes desafiadores.

2.1 LIDAR - Laser Imaging Detection and Ranging

O sensor LIDAR é um dispositivo que utiliza pulsos de laser para determinar a distância entre o sensor e objetos ao seu redor. Ele é amplamente usado em aplicações de mapeamento, veículos autônomos, robótica, agricultura de precisão, e redes veiculares, devido à sua precisão e capacidade de medir distâncias com rapidez. O sensor LIDAR emite pulsos de luz laser infravermelha ou visível em direção ao ambiente, quando o pulso de laser atinge um objeto, ele é refletido de volta para o sensor e o tempo que o pulso leva para retornar ao LIDAR é registrado. Com este tempo (chamado de tempo de voo ou ToF - Time of Flight) e conhecendo a velocidade da luz é possível calcular a distância até o objeto como segue:

$$\text{Distância} = \frac{\text{Velocidade da luz} \times \text{Tempo de voo}}{2} \quad (1)$$

Emitindo milhões de pulsos por segundo em todas as direções com um sistema de feixes giratórios, conforme a luz reflete em diferentes pontos ao redor do sensor, é possível criar um mapa 3D preciso do ambiente com um campo de visão de 360 graus. Esse mapeamento tridimensional é muitas vezes chamado de nuvem de pontos.

O LIDAR tem várias vantagens, como alta precisão, mas é sensível à presença de poeira, chuva e neblina, o que pode prejudicar a qualidade dos dados recebidos.

2.2 IMU - Inertial Measurement Unit

Uma IMU (Unidade de Medição Inercial) é um dispositivo que mede a aceleração linear, a velocidade angular e, em alguns casos, o campo magnético, permitindo determinar o movimento e a orientação de um sistema. Essas informações são obtidas através de um conjunto de sensores integrados: acelerômetros, giroscópios, e, em alguns modelos, magnetômetros. Portanto, uma IMU é composta por um Acelerômetro, um Giroscópio e, em alguns casos, um Magnetômetro.

A IMU trabalha capturando os dados dos acelerômetros e giroscópios para determinar a aceleração, rotação e, consequentemente, a orientação de um sistema no espaço tridimensional. Os magnetômetros, se presentes, são utilizados para corrigir a orientação relativa, proporcionando um ponto de referência absoluto.

A IMU é aplicada em Drones e Aeronaves, Realidade Virtual (VR) e Aumentada (AR), Jogos e Consoles e, em conjunto com o LIDAR, Veículos Autônomos como será apresentado, entre outras.

2.2.1 Acelerômetro

Mede a aceleração linear ao longo dos três eixos (x, y, z). Ele detecta mudanças na velocidade do sistema e pode ser usado para determinar inclinação, gravidade e movimento.

2.2.2 Giroscópio

Mede a velocidade angular ou rotação ao longo dos três eixos. Isso é crucial para determinar a orientação (pitch, yaw e roll) do sistema e acompanhar mudanças de direção através dos ângulos de Inclinação (Pitch), Guinada (Yaw) e Rolagem (Roll).

2.2.3 Magnetômetro

Mede o campo magnético da Terra, fornecendo uma referência para o norte magnético. É útil para determinar a orientação absoluta (bússola) do sistema.

2.3 Fusão de dados LIDAR e IMU

A integração de sensores LIDAR com sistemas referenciais inerciais, como as Unidades de Medição Inercial (IMU - Inertial Measurement Unit), já apresentados, é essencial para fornecer dados mais precisos e robustos em várias aplicações, especialmente em ambientes dinâmicos e em movimento, como veículos autônomos, drones, robótica, e redes veiculares. Quando o LIDAR é utilizado em sistemas móveis (como veículos, drones ou robôs), o sensor e a plataforma estão constantemente se movendo. Isso causa uma distorção nos dados de distância medidos pelo LIDAR, já que o movimento pode introduzir erros de alinhamento ou posicionamento. O referencial inercial (IMU) mede as acelerações lineares e rotações do sistema, permitindo compensar os efeitos desse movimento nos dados do LIDAR. Isso resulta em uma imagem mais estável e precisa do ambiente ao redor.

Em veículos autônomos, a combinação de LIDAR e IMU é vital. Enquanto o LIDAR gera um mapa detalhado em tempo real do ambiente ao redor, o IMU rastreia as pequenas mudanças de posição e movimento do carro. Se o veículo passa por uma lombada ou curva, por exemplo, o IMU ajusta as leituras do LIDAR para evitar erros na percepção da distância e orientação dos objetos.

3 Fusão de Câmera e LIDAR

Nesta seção vamos apresentar uma aplicação de sensor LIDAR em veículos autônomos. Vamos mostrar o funcionamento de um sistema apresentado em uma pesquisa que usa sensor LIDAR como base para o rastreamento no espaço 3D com detecção por câmera baseada em rede neural leve (ou "lightweight neural network"), menos complexa e mais eficiente em termos de recursos computacionais, como tempo de processamento, uso de memória e consumo de energia.

A aplicação é baseada em MODT (Multiple Object Detection and Tracking). MODT engloba tanto a detecção quanto o rastreamento de múltiplos objetos. Neste tipo de sistema, os objetos são detectados continuamente, e o sistema simultaneamente realiza o rastreamento desses objetos. Isso pode incluir a detecção de novos objetos que entram no campo de visão e o rastreamento contínuo de objetos já detectados. O MODT faz a detecção e o rastreamento em processos ou threads separadas, uma para LIDAR e outra para Câmera. Isto permite um processamento paralelo de detecção e rastreamento. É importante notar que tanto câmera como LIDAR são sensores destinados a detecção de objetos, no entanto nesta aplicação a câmera faz a detecção e o LIDAR, além da detecção, é a base do rastreamento. Mas isto será melhor explicado ao longo do trabalho.

3.1 Detecção de objetos

A detecção de objetos refere-se à capacidade do sistema de identificar e reconhecer a presença de objetos no ambiente ao redor do veículo. Ela envolve a localização inicial e a classificação desses objetos (por exemplo, carros, pedestres, ciclistas, sinais de trânsito, etc.). Sensores como LIDAR, câmeras e radares são amplamente utilizados para esta finalidade.

A detecção é feita com a configuração Visual-LIDAR. Visual-LiDAR são algoritmos que utilizam tanto informações visuais (imagens de câmeras) quanto dados de sensores LIDAR para detectar e identificar objetos em um ambiente tridimensional. O algoritmo combina informações de cor, textura e contornos dos objetos, presentes nas imagens ou vídeos do ambiente captados pelas câmeras, com dados geométricos precisos sobre a posição, forma e profundidade, presentes na nuvem de pontos 3D geradas pelo LIDAR. Esta combinação de dados da câmera com dados do LIDAR em sistemas Visual-LiDAR é denominada fusão de dados, que é a forma como as informações são combinadas para melhorar a detecção dos objetos. Existem três principais tipos de fusão: Fusão Precoce (Early Fusion), Fusão Tardia (Late Fusion) e Fusão Profunda (Deep Fusion). Esses esquemas determinam em que estágio da captação os dados dos dois sensores (câmera e LIDAR) são combinados para processar a informação e detectar objetos. Não é objetivo deste trabalho detalhar estes esquemas, mas em resumo temos:

- **Fusão Precoce:** Combina os dados logo no início, aproveitando ao máximo a complementaridade dos dois sensores desde o começo. Pode ser mais preciso, mas mais complexo.
- **Fusão Tardia:** Os dados são processados separadamente e combinados no final. É mais simples de implementar, mas pode perder detalhes cruciais.
- **Fusão Profunda:** Integra os dados ao longo de todo o processo usando aprendizado profundo. Oferece alta precisão, mas é mais exigente em termos de recursos computacionais e dados de treinamento.

A detecção de objetos em imagens e vídeos captados pelas câmeras usa a arquitetura YOLO v3 (You Only Look Once) versão 3. O YOLOv3 é um modelo de aprendizado profundo que realiza a detecção de objetos em tempo real, utilizando uma única rede neural convolucional (CNN) para prever as classes e as localizações dos objetos simultaneamente. O YOLOv3 é pré-treinado em conjuntos de dados Microsoft COCO. O Microsoft COCO (Common Objects in Context) é um grande conjunto de dados projetado para a detecção de objetos, segmentação de imagens e legendagem de imagens.

3.2 Rastreamento de objetos

O rastreamento de objetos vai além da simples detecção. Depois que o objeto é identificado, o sistema de rastreamento acompanha o movimento do objeto ao longo do tempo, monitorando sua trajetória, velocidade e direção. O rastreamento utiliza os dados de detecção em sequência para prever a futura posição do objeto, o que é essencial para a tomada de decisões e planejamento de rotas seguras.

O rastreamento é feito por um rastreador de objetos baseado em IMM-UKF-JPDAF, um sistema avançado de rastreamento de múltiplos objetos que combina várias técnicas para lidar com a complexidade de movimentos e incertezas em ambientes com muitos alvos. Cada uma dessas siglas refere-se a um componente específico do rastreador, IMM (Interacting Multiple Model), UKF (Unscented Kalman Filter) e JPDAF (Joint Probabilistic Data Association Filter) que juntos formam um algoritmo robusto e preciso. Não é objetivo deste trabalho apresentar detalhes dos algoritmos de rastreamento, mas em resumo temos:

- **IMM**: Lida com a incerteza do modelo de movimento, permitindo que o rastreador considere diferentes dinâmicas para prever o movimento de um objeto.
- **UKF**: Trata de prever e rastrear objetos que se movem de maneira não linear (como em curvas ou acelerações/desacelerações complexas).
- **JPDAF**: Resolve o problema de atribuir corretamente cada detecção de sensor a um objeto específico em cenários onde há múltiplos alvos presentes (por exemplo, rastrear vários veículos ou pedestres ao mesmo tempo em uma rua movimentada).

Como já mencionado, o LiDAR detecta objetos e constrói um mapa tridimensional do ambiente, mas não realiza rastreamento de objetos por si só. Ele fornece dados brutos (nuvens de pontos) sobre a posição dos objetos em tempo real. Um sistema de rastreamento, como o descrito com o IMM-UKF-JPDAF, processa essas nuvens de pontos para: Associar (IMM) as detecções em diferentes instantes de tempo a objetos específicos, permitindo o acompanhamento contínuo, Prever a trajetória (UKF) dos objetos ao longo do tempo e Lidar com múltiplos objetos (JPDAF) e determinar suas movimentações com precisão, mesmo que o ambiente seja dinâmico ou que haja ruído nos dados.

4 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado a aplicação de sensores LIDAR com base na pesquisa "Detecção e rastreamento de objetos 3D baseados em Visual-LiDAR para sistemas embarcados". A aplicação estudada na pesquisa mostra o uso do LIDAR na detecção e rastreamento de objetos em ambiente urbano de forma simultânea. Este trabalho mostrou que o LIDAR, apesar de ser uma tecnologia voltada para a detecção de objetos, pode fornecer dados a algoritmos de rastreamento robusto e preciso. A mesma aplicação ainda utiliza o LIDAR para fazer a detecção dos objetos em uma configuração Visual-LIDAR, onde os dados das câmeras são fundidos com a nuvem de pontos 3D geradas pelo LIDAR.

Assim, a pesquisa apresenta um sistema de veículo autônomo com percepção ambiental variável mais eficiente que fornece informações confiáveis usando pouco recurso computacional.