

Sistemas de Navegação e Controle para Veículos Autônomos

Prof. Dr. Valdir Grassi Junior

Depto. de Engenharia Elétrica e de Computação (SEL)

Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)

Universidade de São Paulo (USP)



Introdução

Propósito

Desenvolvimento de sistemas de navegação autônoma e controle de veículos e robôs manipuladores com o propósito de melhorar a segurança e qualidade de vida das pessoas;

- Percepção, planejamento de movimento, e controle;
- Carros e caminhões autônomos;
- Robôs manipuladores;

Por que veículos autônomos?

- Redução no número de acidentes;
- Cidades inteligentes com melhoria na eficiência do trânsito;
- Economia de combustível;
- Veículos de serviço:
 - Agricultura, mineração, transporte de carga, etc;

Plataformas Robóticas

Carro Autônomo



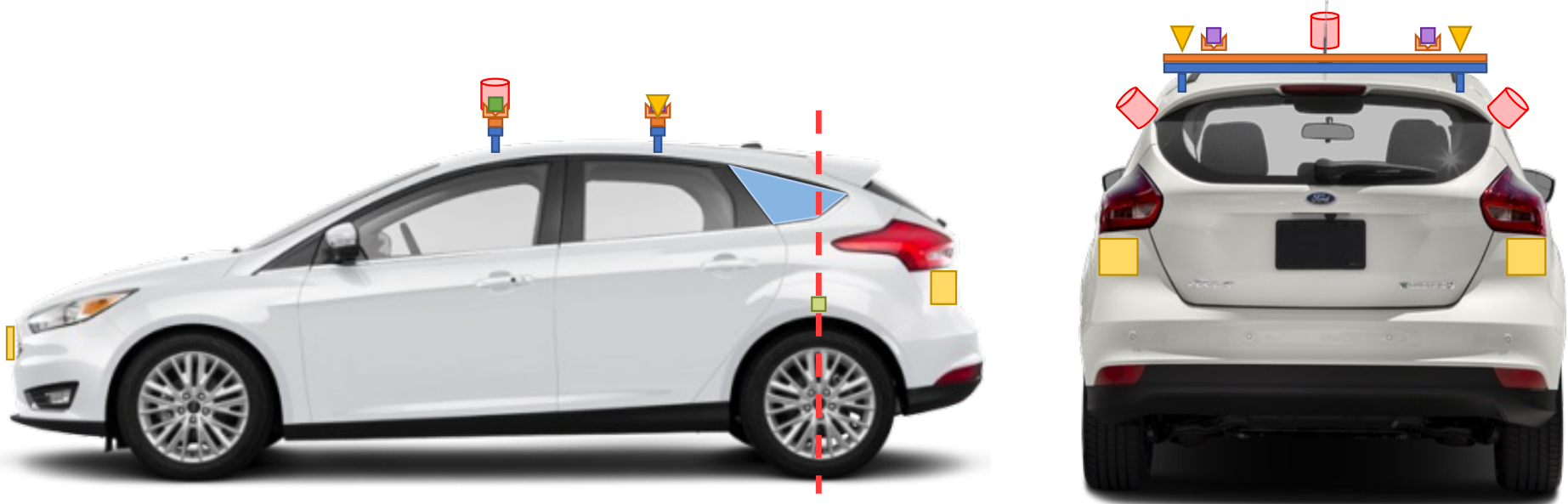
*Projeto Carina II
(desde 2012)*



Nova plataforma em desenvolvimento no InSAC

Projetos com colaboração do LRM - Laboratório de Robótica Móvel (ICMC/USP)

Carro Autônomo



- | | | | |
|-------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| Rack de Teto | Câmera Frontal | LiDAR | IMU |
| Trilho | Câmera Traseira | RADAR | Eixo Traseiro |
| Suporte de Câmera | Antenas RTK GPS | Placa de Alumínio | |

Caminhão Autônomo



Convênio de Pesquisa
USP / Scania Latin America
(2013-2014)



Projetos com colaboração do LRM - Laboratório de Robótica Móvel (ICMC/USP)

Caminhão Autônomo



Convênio de Pesquisa
USP / Vale S.A (2016-2018)



Projetos com colaboração do LRM - Laboratório de Robótica Móvel (ICMC/USP)

Níveis de Automação

SAE Internacional

Níveis de Automação - SAE



Figura extraída de “O futuro da mobilidade com carros autônomos”, Revista FAPESP, n. 315, maio 2022.
<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-futuro-da-mobilidade-com-carros-autonomos/>

Níveis de Automação - SAE



Nível 3

Carro conta com sensores avançados e gerencia a direção, mas o motorista precisa estar apto a assumir o comando quando o automóvel estiver diante de tarefas que não está preparado a executar



Nível 4

Alto estágio de automação. O veículo dispensa intervenção humana, mas só trafega em velocidades baixas por áreas previamente mapeadas



Nível 5

Automação total. Veículos dispensam volantes, aceleradores e freios. O passageiro só precisa inserir um destino no sistema de navegação, o que poderá ser feito por comando de voz. Não há ainda modelos no mercado

Figura extraída de: “O futuro da mobilidade com carros autônomos”, Revista FAPESP, n. 315, maio 2022.

<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-futuro-da-mobilidade-com-carros-autonomos/>

Sistemas de Navegação e Controle

Sistemas de Navegação e Controle



Principais sensores:

- Câmeras;
- RADARs;
- LiDARs;
- IMUs;
- GPS;

Tipos de planejamento:

- Rota Global;
- Tarefas ou comportamentos;
- Rota Local;

Controle:

- Execução do movimento;
- Baseado em modelo do veículo;
- Baseado em aprendizado;
- Sensor-motor;

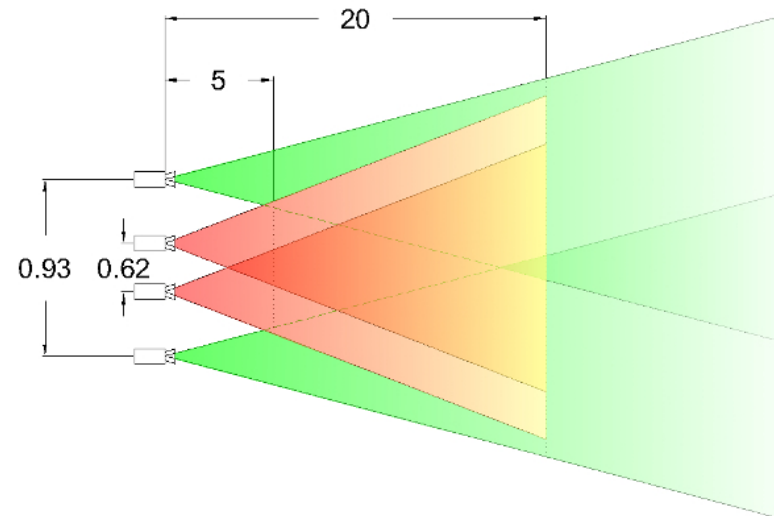
Percepção Robótica

Detecção de Pedestres



Distância focal – 8,5 mm
Baseline - 93 cm

Distância focal - 4,5 mm
Baseline - 62 cm



NAKAMURA, A. T. M.; HORITA, L. R. T.; GRASSI JR., V. A stereo cameras setup for pedestrian detection enhancement. In: **2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)**. IEEE, 2017.

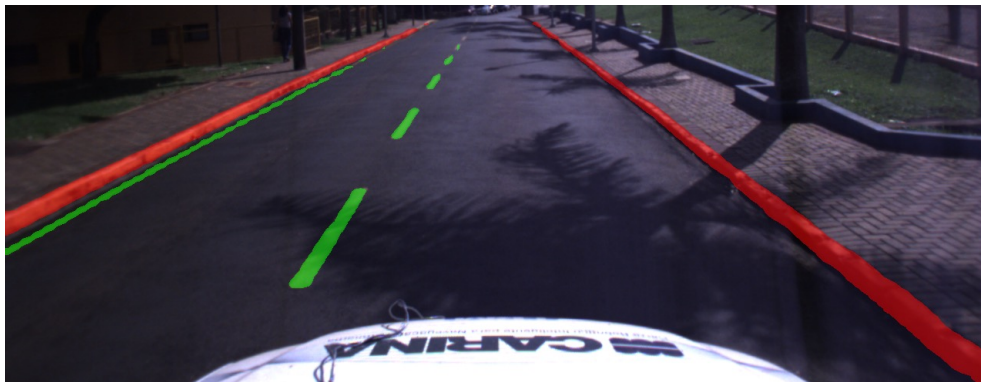
Detecção de Pedestres



NAKAMURA, A. T. M.; HORITA, L. R. T.; GRASSI JR., V. A stereo cameras setup for pedestrian detection enhancement. In: **2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)**. IEEE, 2017.

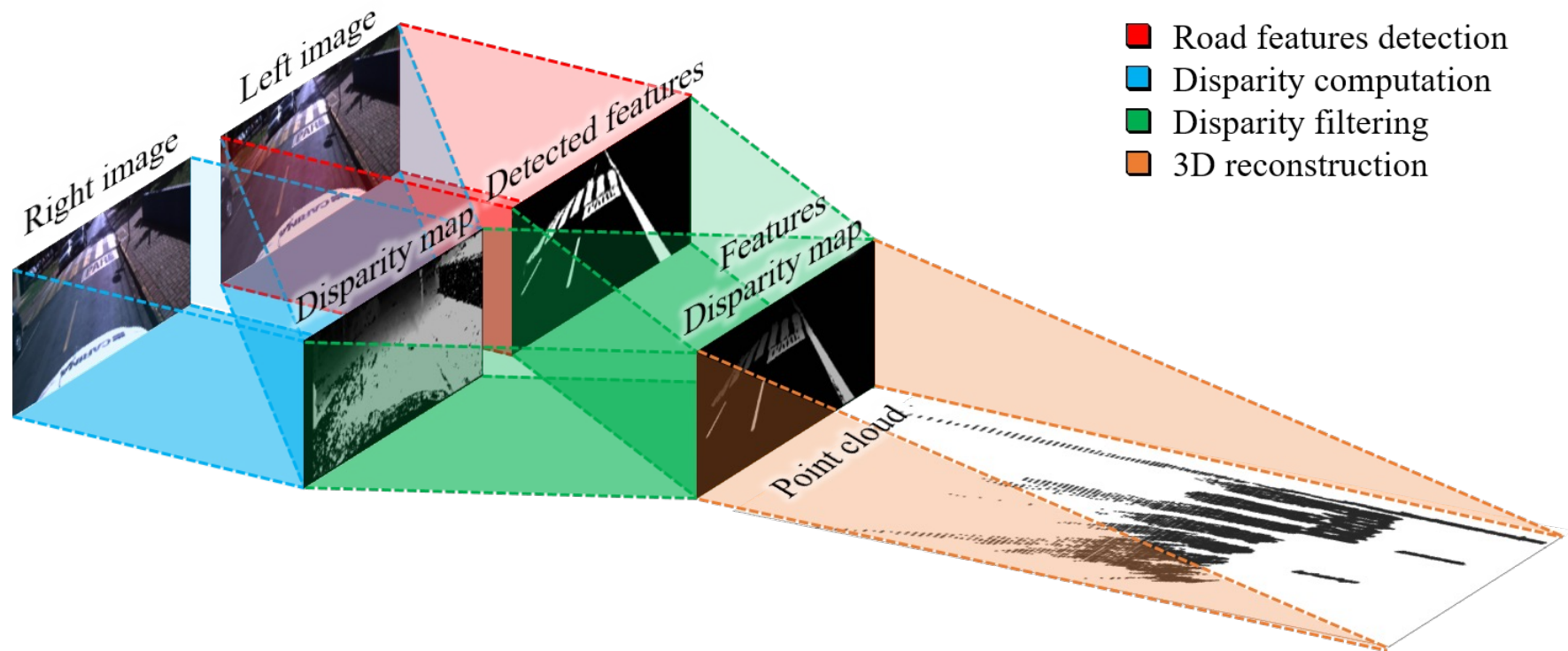
Segmentação de Sinalização Horizontal

- Deep Learning para segmentação de sinalização horizontal
- Aplicação em localização para veículos autônomos



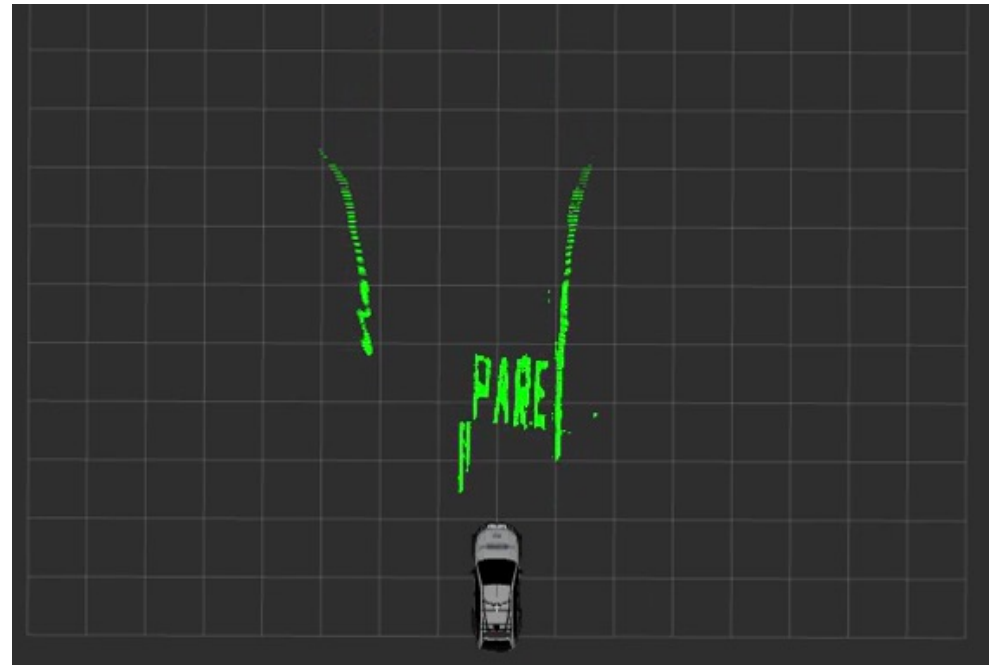
HORITA, L. R. T.; GRASSI JR, V. Employing a fully convolutional neural network for road marking detection. In: **2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)**. 2017.

Detecção de Sinalização Horizontal



HORITA, L. R. T.; GRASSI JR, V. Employing a fully convolutional neural network for road marking detection. In: **2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)**. 2017.

Detecção de Sinalização Horizontal



HORITA, L. R. T.; GRASSI JR, V. Employing a fully convolutional neural network for road marking detection. In: **2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)**. 2017.

Odometria Visual

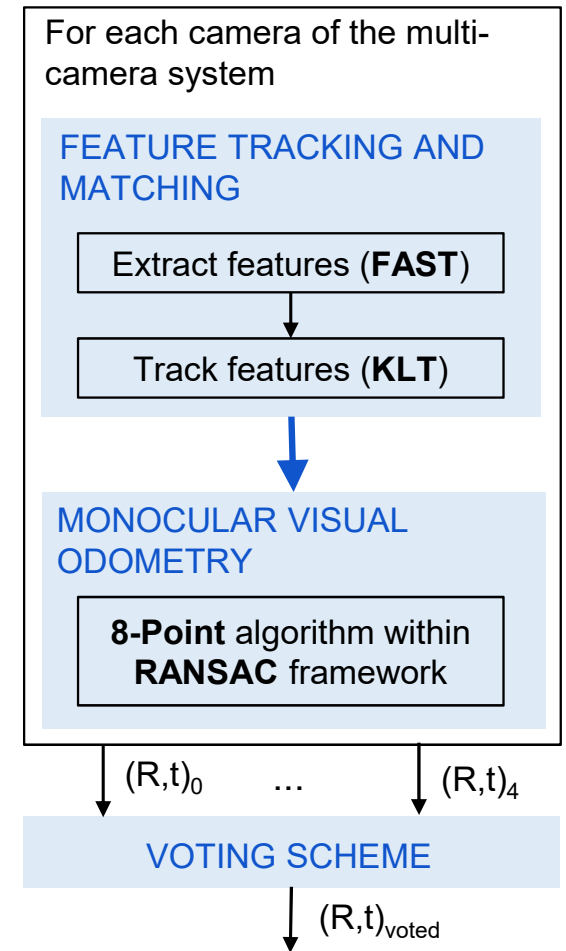
- Sistema omnidirecional multi-câmeras;
- Resultados de comparação com visão estéreo;



PointGrey Ladybug 2



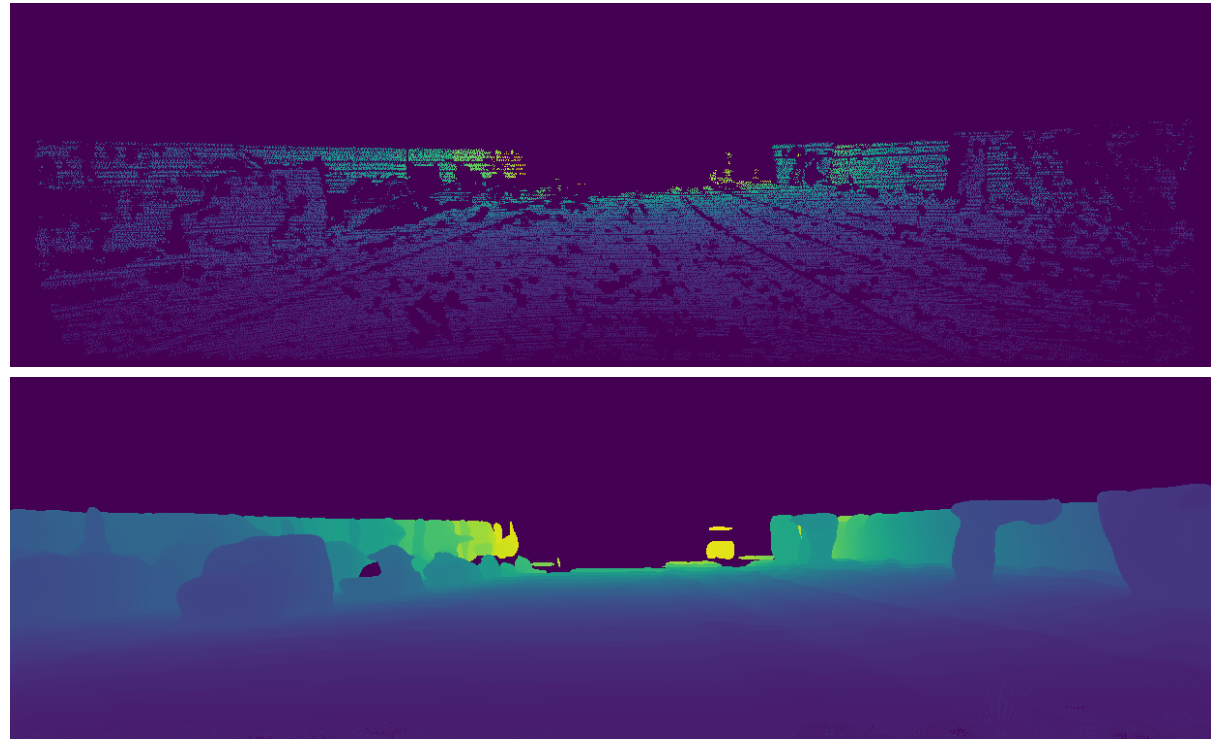
PointGrey Bumblebee XB3



PEREIRA, A. R.; GRASSI JR, V.; ARAUJO, H. Visual Odometry with an Omnidirectional Multi-Camera System. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**. Porto Alegre, RS, 2017.

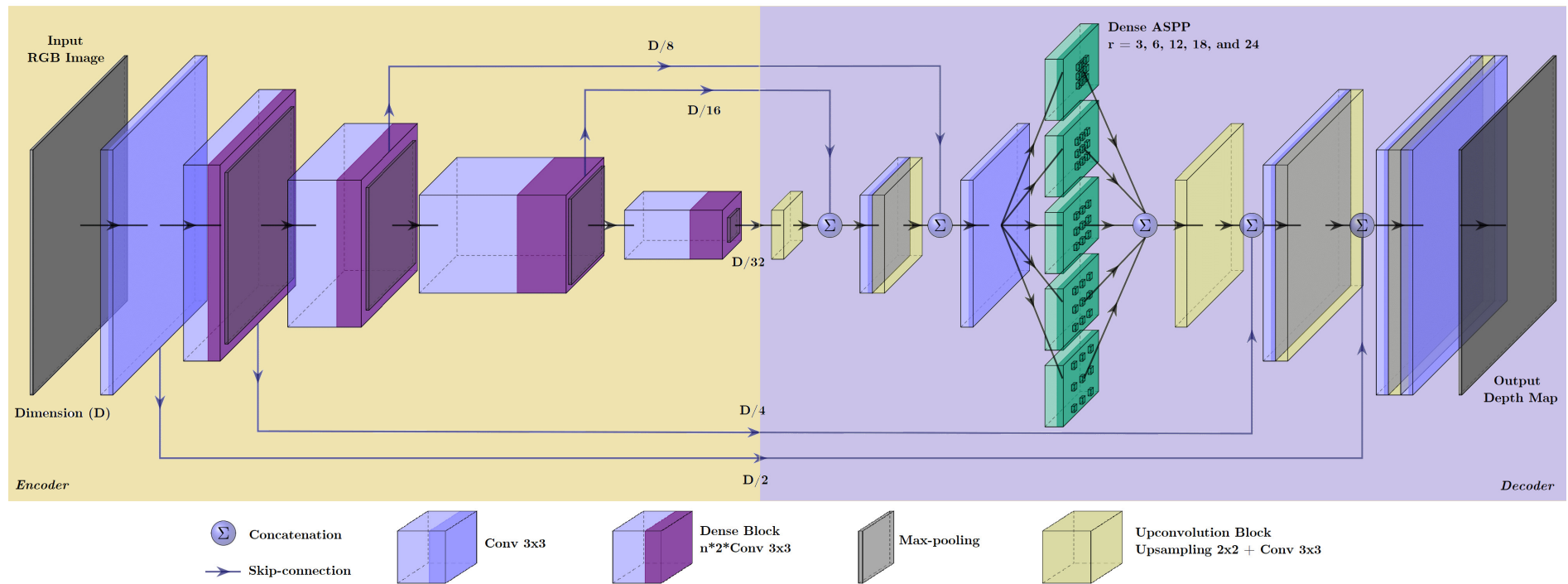
Estimativa Monocular de Profundidade

- Densificação de mapas de profundidade utilizando mapas de ocupação;
- Treinamento supervisionado de rede baseada na ResNet para estimação monocular de profundidade;
- Resultados indicam benefícios da densificação;



ROSA, N. S.; GUIZILINI, V.; GRASSI JR., V. Sparse-to-Continuous: Enhancing Monocular Depth Estimation using Occupancy Maps. In: **Proc. of the 2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. IEEE, 2019.

Estimativa Monocular de Profundidade



MENDES, R. d. Q.; RIBEIRO, E. G.; ROSA, N. S.; GRASSI JR., V. On deep learning techniques to boost monocular depth estimation for autonomous navigation. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 136, p. 103701, 2021

Estimativa Monocular de Profundidade

- Aprendizado profundo supervisionado para estimativa monocular de profundidade;
- Arquitetura proposta: DenseSIDENet;
- Parâmetros de treinamento: 2M até 12M;
- Predição entre 32fps a 88fps;
- Capaz de estimar profundidade e normal de superfícies;



Imagem de câmera embarcada no veículo

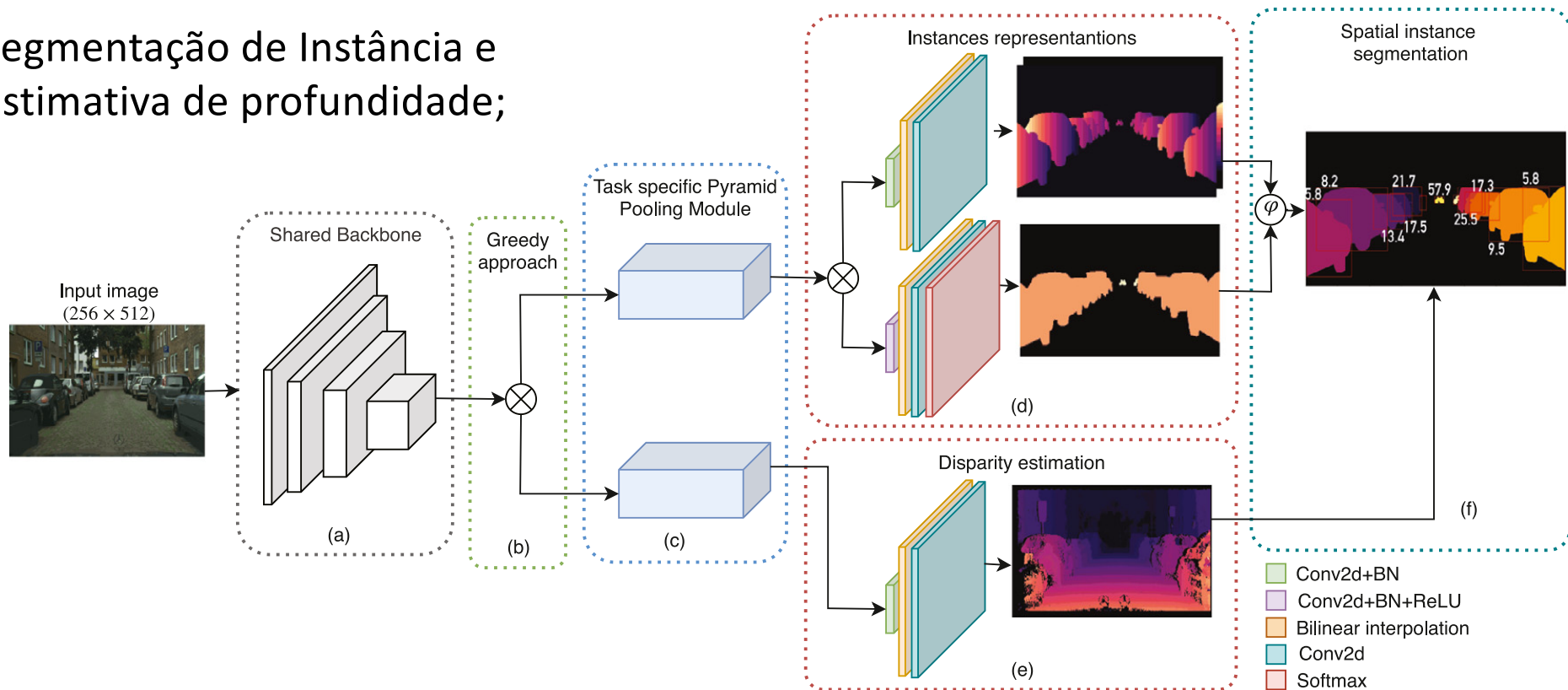


*Resultado de estimativa de profundidade.
Cores quentes indicam objetos mais próximos da câmera.*

MENDES, R. d. Q.; RIBEIRO, E. G.; ROSA, N. S.; GRASSI JR., V. On deep learning techniques to boost monocular depth estimation for autonomous navigation. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 136, p. 103701, 2021

Aprendizado Simultâneo de Múltiplas Tarefas

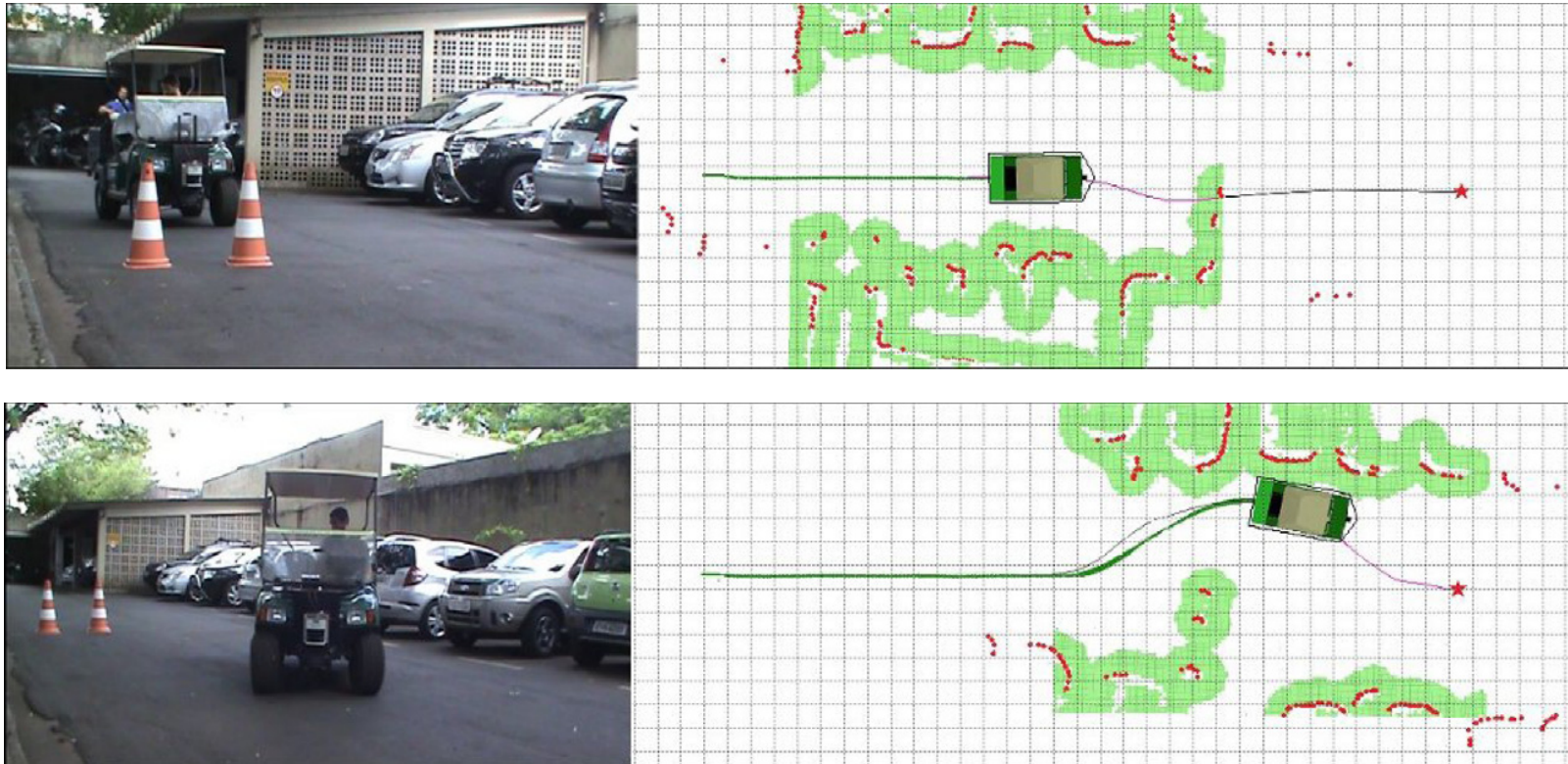
Segmentação de Instância e estimativa de profundidade;



NAKAMURA, A. T. M.; GRASSI JR., V.; WOLF, D. F. An effective combination of loss gradients for multi-task learning applied on instance segmentation and depth estimation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 100, p. 104205, 2021.

Planejamento de Movimento

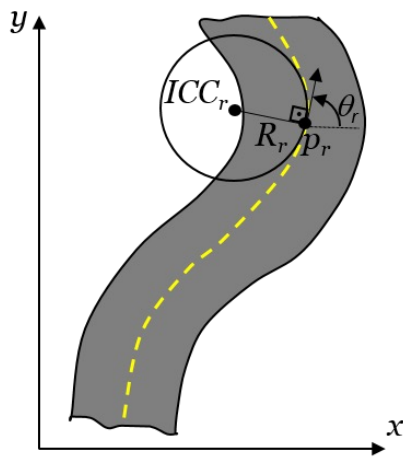
Replanejamento Local: Lattice State Space



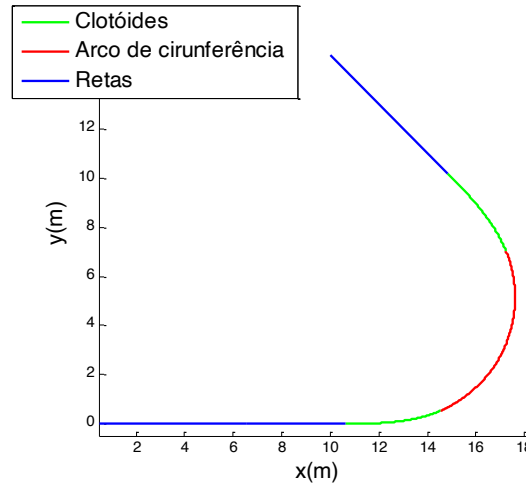
MAGALHÃES, A. C.; PRADO, M.; GRASSI JR, V.; WOLF, D. F. Autonomous vehicle navigation in semi-structured urban environment. **8th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV)**, Golden Coast, Australia, 2013.

Representação e Planejamento de Rota

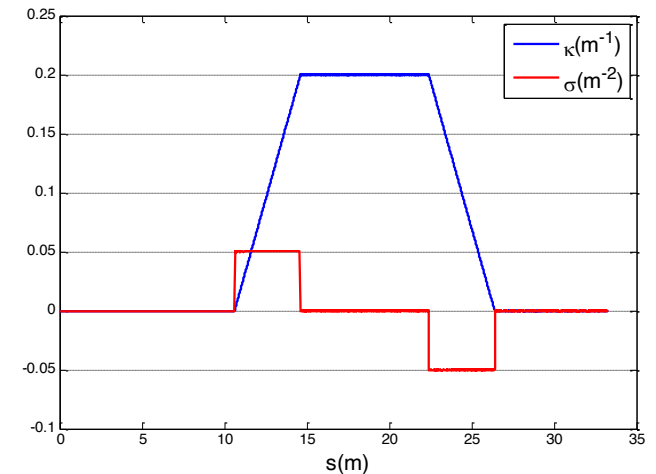
- Trechos de clotóides com variação linear da curvatura



Estados considerados no planejamento: localização (p_r), orientação (θ_r) e curvatura (κ_r).



Exemplo de um caminho com curvatura linear por partes.

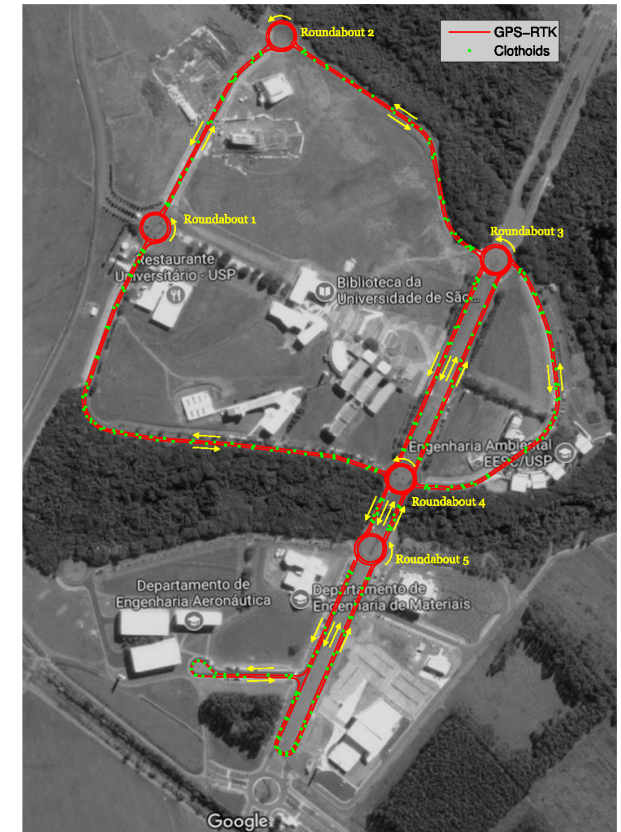
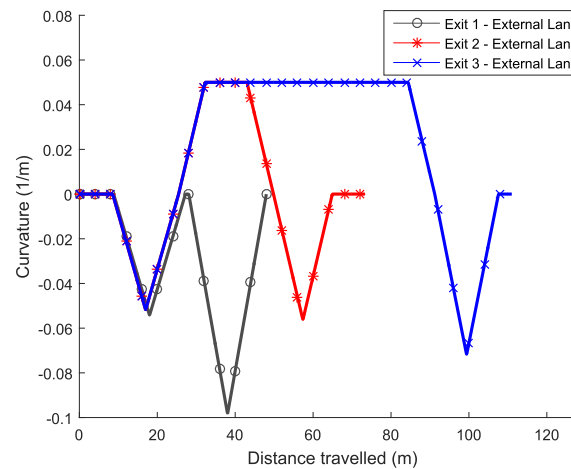
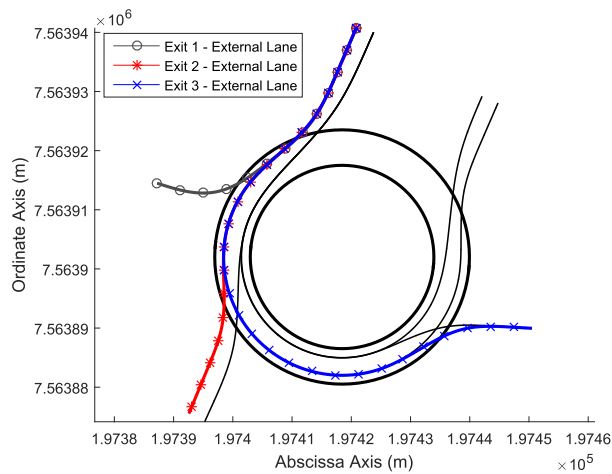


Curvatura (κ_r) e sua derivada (σ_r) em função da distância percorrida (s).

SILVA, J. A. R. da; PACH, I.; WOLF, D. F.; GRASSI JR., V. Sparse Road Network Model for Autonomous Navigation Using Clothoids. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, p. 1–14, 2020.

Representação e Planejamento de Rota

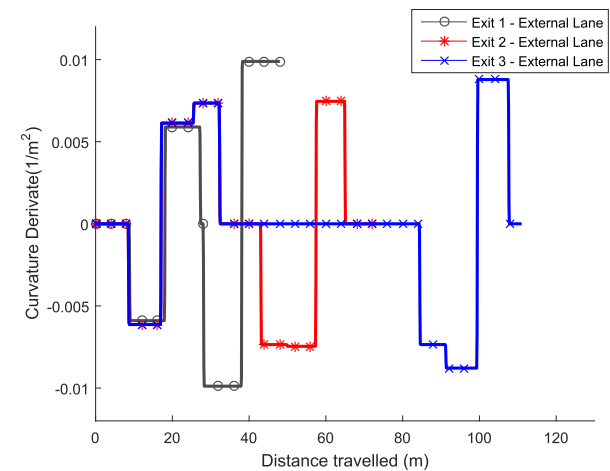
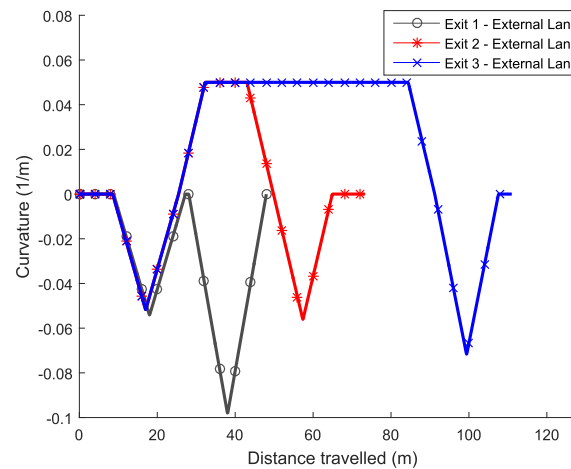
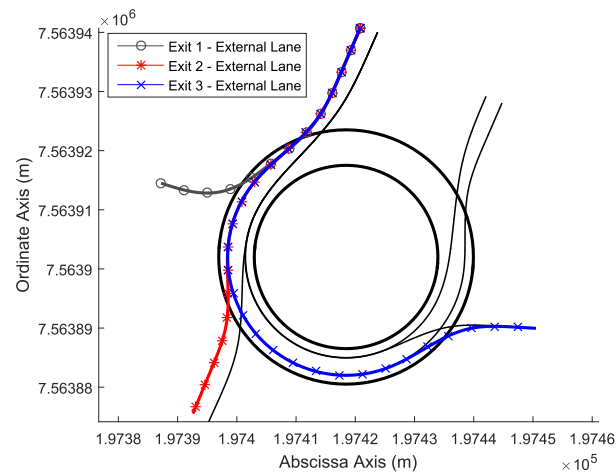
- Trechos de clotóides com variação linear da curvatura



SILVA, J. A. R. da; PACH, I.; WOLF, D. F.; GRASSI JR., V. Sparse Road Network Model for Autonomous Navigation Using Clothoids. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, p. 1–14, 2020.

Representação e Planejamento de Rota

- Trechos de clotóides com variação linear da curvatura



SILVA, J. A. R. da; PACH, I.; WOLF, D. F.; GRASSI JR., V. Sparse Road Network Model for Autonomous Navigation Using Clothoids. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, p. 1–14, 2020.

Planejamento de Rota e Controle



SILVA, J. A. R. da; PACH, I.; WOLF, D. F.; GRASSI JR., V. Sparse Road Network Model for Autonomous Navigation Using Clothoids. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, p. 1–14, 2020.

Tomada de Decisão

- Aprendizado por Reforço Inverso para controle de velocidade longitudinal;
- Observação do estado e distância do semáforo a frente;
- Observação da distância e velocidade de outros veículos a frente;
- POMPD contínuo para lidar com incerteza na transição de estados;
- Intenção dos outros veículos é parcialmente observada;



SILVA, J. A. R. da; GRASSI JR., V.; WOLF, D. F. Continuous Deep Maximum Entropy Inverse Reinforcement Learning using online POMDP. In: Proc. of the **2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. IEEE, 2019.

Controle

Processos Gaussianos / Otimização Bayesiana

- Modelo caixa-preta de um caminhão utilizando Processos Gaussianos;
- MPC utilizando modelo aprendido;

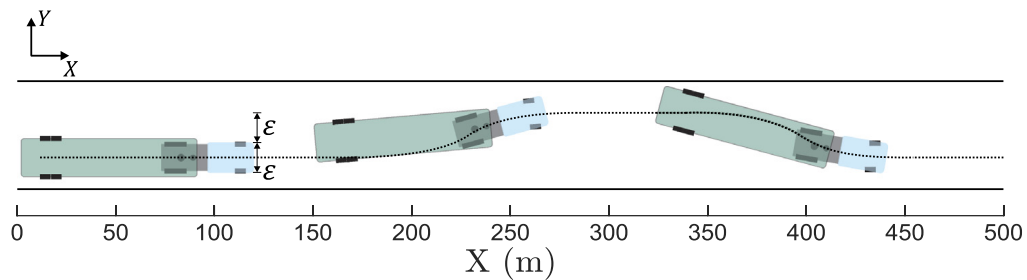


ROCHA, F. H. M.; GRASSI JR, V.; WOLF, D. F. Identificação do Modelo Longitudinal de um Veículo de Grande Porte Utilizando Processos Gaussianos. In: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI). Natal, RN, 2015.

ROCHA, F. H. M. D.; GRASSI JR., V.; GUIZILINI, V. C.; RAMOS, F. Model Predictive Control of a Heavy-Duty Truck Based on Gaussian Process. In: Proceedings - 13th Latin American Robotics Symposium and 4th Brazilian Symposium on Robotics, LARS/SBR 2016. IEEE, 2016.

Controle Lateral Robusto

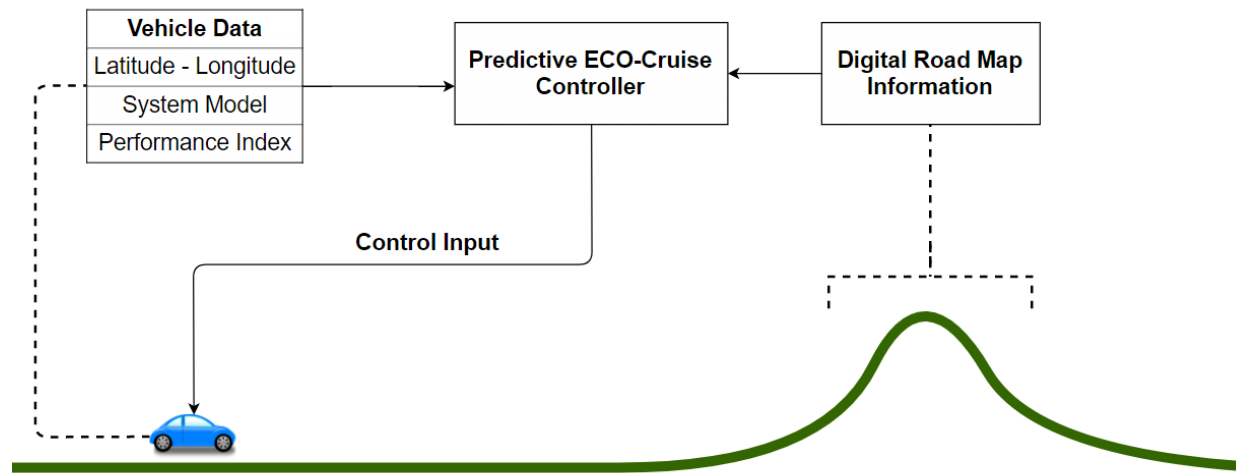
- Transporte de cargas por caminhões;
- Incertezas no modelo do veículo;
- Caminhões articulados e não-articulados;



BARBOSA, F. M.; MARCOS, L. B.; SILVA, M. M. da; TERRA, M. H.; GRASSI JR., V. Robust path-following control for articulated heavy-duty vehicles. **Control Engineering Practice**, v. 85, p. 246–256, 2019.

Controle Longitudinal Preditivo (MPC)

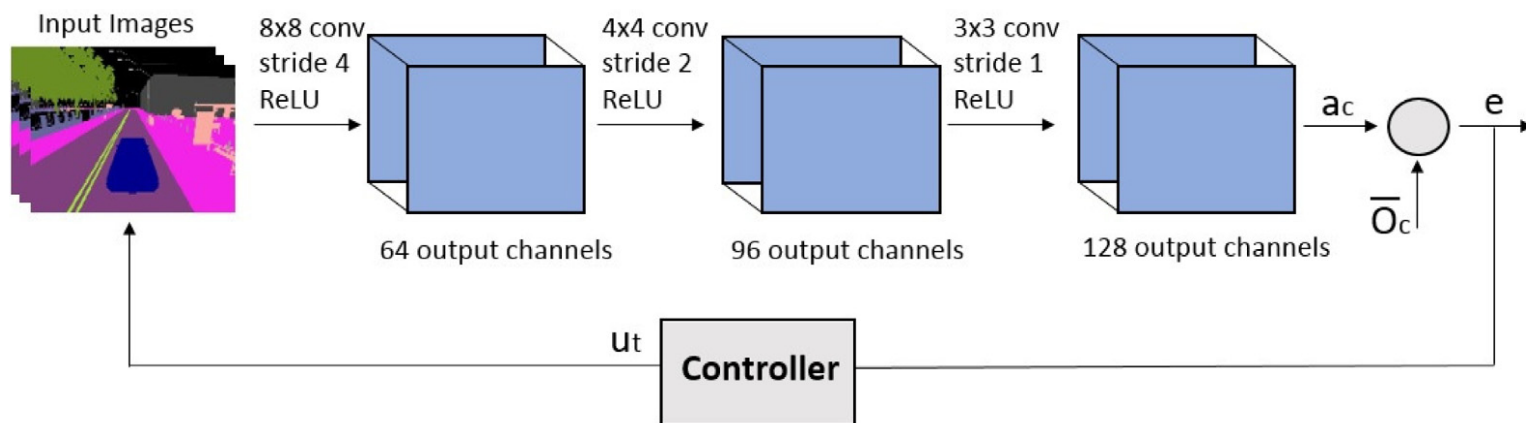
- Controle de velocidade longitudinal para economia de combustível;
- Considera o perfil de elevação da pista e modelo dinâmico do veículo;



CALDAS, K. A. Q.; GRASSI JR., V. Eco-cruise NMPC Control for Autonomous Vehicles. In: Proc. of the **2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. IEEE, 2019

Aprendizado Profundo por Reforço

- Controle robusto combinado com aprendizado profundo por reforço;
- Aplicado no controle lateral de um veículo autônomo;



MORAIS, G. A. de; MARCOS, L. B.; BUENO, J. N. A.; RESENDE, N. F. de; TERRA, M. H.; GRASSI JR., V. Vision-based robust control framework based on deep reinforcement learning applied to autonomous ground vehicles. **Control Engineering Practice**, v. 104, p. 104630, 2020.

Conclusão

Sistemas de Navegação e Controle

PERCEPÇÃO

DETECÇÃO E SEGMENTAÇÃO VISUAL

(OKAMOTO JR. et al, 2012), (NAKAMURA; HORITA; GRASSI JR., 2017a), (NAKAMURA; HORITA; GRASSI JR., 2017b), (HORITA; GRASSI JR, 2017), (RIBEIRO; GRASSI JR, 2019), (RIBEIRO; MENDES; GRASSI JR., 2021), (NAKAMURA; GRASSI JR; WOLF, 2021)

ESTIMAÇÃO DE PROFUNDIDADE

(ROSA; GUIZILINI; GRASSI JR., 2019), (MENDES et al., 2020), (MENDES et al., 2021)

ODOMETRIA VISUAL

(PEREIRA; GRASSI JR; ARAUJO, 2017)

APRENDIZADO SIMULTÂNEO

(NAKAMURA; GRASSI JR; WOLF, 2021)

PLANEJAMENTO

PLANEJAMENTO GLOBAL DE ROTA

(SILVA; GRASSI JR., 2017), (SILVA; GRASSI JR., 2018), (SILVA et al, 2020)

TOMADA DE DECISÃO COMPORTAMENTAL

(SILVA; GRASSI JR; WOLF, 2019), (HORITA; WOLF; GRASSI JR, 2020),

PLANEJAMENTO DE ROTA LOCAL

(PARIKH et al., 2004), (PARIKH et al., 2005), (PARIKH et al., 2007), (VAZ; INOUE; GRASSI JR, 2010), (MAGALHÃES et al, 2013), (PRADO et al, 2013), (VIEIRA; GRASSI JR, 2014), (BENEVIDES; GRASSI JR, 2015), (SERRANTOLA; GRASSI JR, 2019), (SILVA et al, 2020)

CONTROLE

PARAMÉTRICO BASEADO EM MODELO

(OKAMOTO JR; GRASSI JR, 2002), (OKAMOTO JR et al, 2012), (BEZERRA, 2015), (BUENO et al, 2016), (NAKAI et al, 2018), (BARBOSA et al, 2017), (BARBOSA et al, 2019), (CALDAS; GRASSI JR, 2019)

BASEADO EM APRENDIZADO

(ROCHA; GRASSI JR; WOLF, 2015), (ROCHA et al, 2016), (OLIVEIRA et al, 2018)

BASEADO EM MODELO & APRENDIZADO

(MORAIS et al, 2020)

Pesquisa em andamento e trabalhos futuros

- Estimação de intenção de movimento de pedestres e outros veículos;
- Aprendizado profundo para odometria visual e SLAM considerando incertezas;
- Aprendizado profundo para estimação de incertezas;
- Planejamento local de trajetórias e controle utilizando MPC;
- Tomada de decisão utilizando método de aprendizado profundo por reforço;

Parcerias e agradecimento



Obrigado!

Contato:
vgrassi@usp.br

