

Seminário de Discussões Técnicas

Car Pursuit Problem under Measurement Packet Loss

Leonardo de Paula Carvalho

[Estudante de Mestrado | Professor Alim Pedro de Castro Gonçalves]
eng.leonardocarvalho@gmail.com

Advanced Computing, Control & Embedded Systems Laboratory
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

- 1 Motivação
- 2 Objetivo da Pesquisa
- 3 Métodos Empregados
 - Modelo do Carro
 - Modelo da Rede
 - MLJS
 - Norma H_∞ Markoviana
 - Controlador Dinâmico de Saída
 - Topologia
 - Sistemas Estendido
- 4 Resultados
 - Desvio Padrão
 - Erro Quadrático
- 5 Conclusão
- 6 Próximos Passos
- 7 Perguntas & Respostas
- 8 Referências

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro
Modelo da Rede
MLJS
Norma H_{∞}
Markoviana
Controlador
Dinâmico de Saída
Topologia
Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão
Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

- 1 Teste de esforço de carros
- 2 Estradas Inteligentes

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

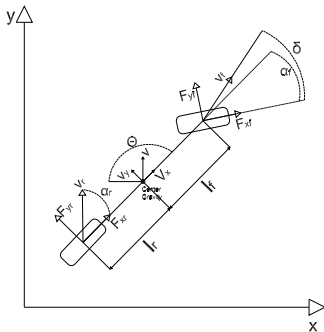
Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

- 1 **Objetivo Geral:** Gerar uma estratégia para o controle de comboio de carros com intercomunicação feita por canais reais(não ideais).
- 2 **Objetivo Específico:** Fazer estudo dos diferentes tipos de topologia
- 3 **Objetivo Específico:** Obter o modelos viáveis do veículo e da rede.
- 4 **Objetivo Específico:** Fazer comparação com as técnicas clássicas.

Entre vários modelos presentes na literatura o modelo "bicicleta" foi escolhido para o nosso estudo, a figura a baixo é uma representação do mesmo,



SDT

ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

O modelo cinemático do carro é mostrado a seguir,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ \frac{\tan(\delta)}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta, \quad (1)$$

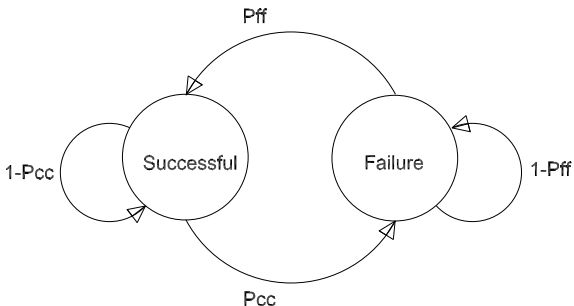
O modelo na forma espaço de estado do carro é mostrado a seguir,

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(c_r+cf)}{mv_x} & \frac{(c_r+cf)}{mv_x} - v_x \\ \frac{(l_r c_r - l_f c_f)}{J_v v_x} & -\frac{l_r^2 c_r + l_f^2 c_f}{J_v v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_f}{m} \\ \frac{l_f c_f}{m} \end{bmatrix} \delta \quad (2)$$

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Para a modelagem da rede utilizamos o modelo Gilbert.



Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}

Markoviana

Controlador

Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

Um sistema linear sujeito a saltos Markovianos é definido da seguinte maneira,

$$\mathcal{G} : \begin{cases} x(k+1) &= A(\theta_k)x(k) + B(\theta_k)u(k) + J(\theta_k)w(k), \\ y(k) &= C_y(\theta_k)x(k) + E_y(\theta_k)w(k), \\ z(k) &= C_z(\theta_k)x(k) + D(\theta_k)u(k) + E_z(\theta_k)w(k), \end{cases} \quad (3)$$

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro
Modelo da Rede
MLJS

**Norma H_∞
Markoviana**

Controlador
Dinâmico de Saída
Topologia
Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão
Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

A norma H_∞ Markoviana pode ser definida da seguinte forma,

$$\|\mathcal{G}\|_\infty^2 = \sup_{0 \neq w \in \mathcal{L}^2, \theta_0 \in \mathcal{K}} \frac{\|z\|_2^2}{\|w\|_2^2} \quad (4)$$

O controlador linear de ordem completa dependente do modo e sujeito a saltos markovianos pode ser definido da seguinte maneira,

$$\mathcal{C} : \begin{cases} x_c(k+1) & = A_c(\theta_k)x_c(k) + B_c(\theta_k)y(k) \\ u(k) & = C_c(\theta_k)x_c(k) + D_c(\theta_k)y(k) \end{cases}, \quad (5)$$

Theorem

Teorema: Existe um controlador dinâmico linear por realimentação de saída na forma 5 tal que $\|G_f\|_\infty^2 < \gamma$ se e somente se existirem matrizes simétricas X_i, Z_i , onde $X_{pi} = \sum_{j \in \mathcal{K}} p_{ij} X_j$, $i \in \mathcal{K}$ e $Z_{pi} = \sum_{j \in \mathbb{K}} p_{ij} Z_j$, $i \in \mathbb{K}$, e matrizes M_i, L_i, F_i, K_i, H_i com dimensões compatíveis que satisfaçam as LMIs,

$$\left(\begin{array}{cc} \begin{bmatrix} Y_i & \bullet & \bullet \\ I & X_i & \bullet \\ 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} & \begin{matrix} \Pi'_i(Z_i, X_i, M_i, \\ F_i, K_i, L_i) \end{matrix} \\ \begin{matrix} \Pi_i(Z_i, X_i, M_i, \\ F_i, K_i, L_i) \end{matrix} & \begin{bmatrix} H_i + H'_i - Z_{pi} & \bullet & \bullet \\ I & X_{pi} & \bullet \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \end{array} \right) > 0, \quad (6)$$

Theorem

A matriz Π_i é definida como:

$$\Pi_i = \begin{bmatrix} A_i Y_i + B_i L_i & A_i + B_i K_i C_{yi} & J_i + B_i K_i E_{yi} \\ M_i & X_{pi} A_i + F_i C_{yi} & X_{pi} J_i + F_i E_{yi} \\ C_{zi} Y_i + D_{zi} L_i & C_{zi} + D_{zi} K_i C_{yi} & E_{zi} + D_{zi} K_i E_{yi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

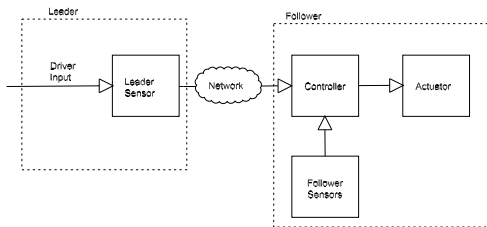
$$\begin{bmatrix} Z_{ij} & \bullet \\ H_i & Y_j \end{bmatrix} > 0 \quad (8)$$

sejam satisfeitas 6 e 8 a solução é dada por $U_i = Y^{-1} - X_i$ and $V_i = Y_i \forall i \in \mathcal{K}$. **Prova:** Consulte [6].

Caso o Teorema seja satisfeito as matrizes do controlador [5] pode ser obtido da seguinte forma,

$$\begin{bmatrix} A_{ci} & B_{ci} \\ C_{ci} & D_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{pi} & X_{pi}B_i \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} M_i - X_{pi}A_iY_i & F_i \\ L_i & K_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i' & 0 \\ C_{yi}Y_i & I \end{bmatrix}^{-1} \quad (9)$$

O posicionamento dos controladores e atuadores em relação a rede são os seguintes,



Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}

Markoviana

Controlador

Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

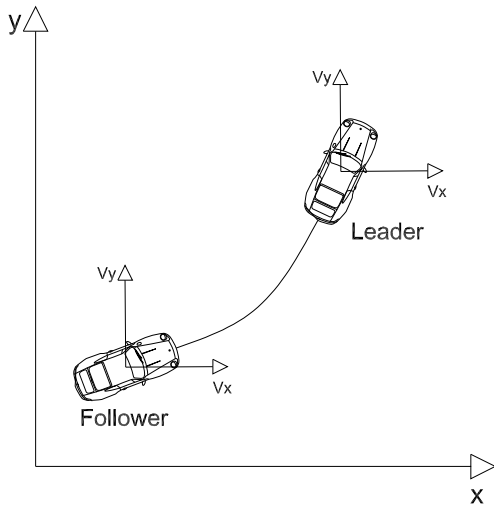
Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

O diagrama abaixo é uma representação gráfica do problema,



SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞

Markoviana

Controlador

Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &

A solução proposta consiste em projetar um controlador de dinâmico de saída de ordem completa para o seguinte sistema estendido,

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ B_d \end{bmatrix} u_2(k) + \begin{bmatrix} B_d & 0 & 0 \\ 0 & e_d B_d & 0 \end{bmatrix} \omega(k) \quad (10)$$

$$z(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_n \end{bmatrix} u_2(k) \quad (11)$$

...

Ambos Zero e Hold foram testados, a seguir temos as equações para a abordagem Zero,

$$y(k) = \begin{cases} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & e_n I \end{bmatrix} w(k), \text{ if } \theta(k) = \text{sucesss}, \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_n I \end{bmatrix} w(k), \text{ if } \theta(k) = \text{failure} \end{cases} \quad (12)$$

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro
Modelo da Rede
MLJS
Norma H_{∞}
Markoviana
Controlador
Dinâmico de Saída
Topologia
Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão
Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

Utilizamos os controladores que normalmente são utilizados para esse tipo de problema o Linear Quadratic Regulator, controlador H_{∞} clássico e fizemos a comparação com os controladores dinâmicos de ordem completa, o sinal de entrada no primeiro carro utilizado foi uma senoide, que tem valores de amplitude e frequência que respeitam os parâmetros físicos da planta. O resultados podem ser vistos no gráfico apresentados nos próximos slides. Plotamos o desvio padrão e o erro quadrático para a situação onde a velocidade em x é $v_x = 5\text{m/s}$.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

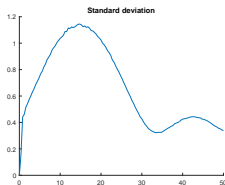
Desvio Padrão

Erro Quadrático

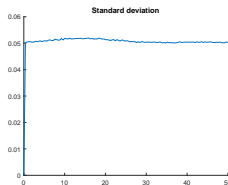
Conclusão

Próximos
Passos

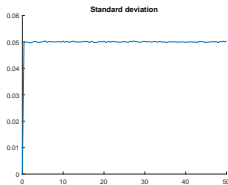
Perguntas &



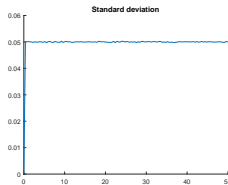
(a) LQR $v_x = 5\text{m/s}$



(b) Classic $v_x = 5\text{m/s}$



(c) Zero $v_x = 5\text{m/s}$



(d) Hold $v_x = 5\text{m/s}$

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

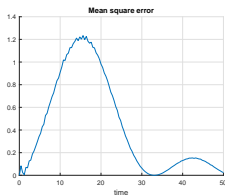
Desvio Padrão

Erro Quadrático

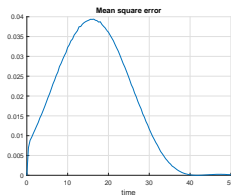
Conclusão

Próximos
Passos

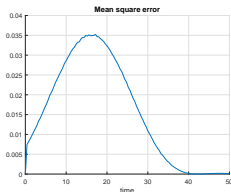
Perguntas &



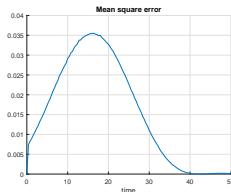
(e) LQR $v_x = 5\text{m/s}$



(f) Classic $v_x = 5\text{m/s}$



(g) Zero $v_x = 5\text{m/s}$



(h) Hold $v_x = 5\text{m/s}$

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro
Modelo da Rede
MLJS
Norma H_{∞}
Markoviana
Controlador
Dinâmico de Saída
Topologia
Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão
Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

Com os resultados preliminares é possível observar que a solução proposta é adequada para o problema em questão, entretanto ainda existem varias técnicas que podem aprimorar o desempenho do controlador e tornar as simulações mais próximas da realidade, como o a adição de incertezas nas LMIs que calculam o controlador. Apesar dos resultados serem favoráveis é necessário validar esses resultados em uma plataforma de simulação que garanta uma maior veracidade aos testes.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}

Markoviana

Controlador

Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

- 1 Adicionar incertezas ao modelo.
- 2 Adicionar delay ao projeto do controlador.
- 3 Fazer as simulações no gazebo.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}

Markoviana

Controlador

Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas

????????????????????????????????????

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas



O. Garcia, J. Ferreira, and A. Miranda Neto, “Design and simulation for path tracking control of a commercial vehicle using mpc,” in *Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol (SBR LARS Robocontrol), 2014 Joint Conference on*, pp. 61–66, IEEE, 2014.



O. G. Bedoya, J. V. Ferreira, and A. de Miranda Neto, “Dynamic model of a commercial vehicle for steering control and state estimation,”



B. Avak, “Modeling and control of a superimposed steering system,” 2004.



A. R. Fioravanti, A. P. Gonçalves, and J. C. Geromel, “Filter inputs with markovian lossy links: Zero or hold?,” in *Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on*, pp. 656–661, IEEE, 2011.



P. Seiler and R. Sengupta, “An hoo approach to networked control,” *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 3, pp. 356–364, 2005.



J. C. Geromel, A. P. Gonçalves, and A. R. Fioravanti, “Dynamic output feedback control of discrete-time markov jump linear systems through linear matrix inequalities,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 48, no. 2, pp. 573–593, 2009.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas



A. Fioravanti, J. Geromel, *et al.*, “Dynamic output feedback hoo control of discrete-time markov jump linear systems through linear matrix inequalities,” in *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on*, pp. 4787–4792, IEEE, 2008.



J.-P. Ebert, A. Willig, *et al.*, “A gilbert-elliott bit error model and the efficient use in packet level simulation,” 1999.



A. P. Gonçalves, A. R. Fioravanti, and J. C. Geromel, “Markov jump linear systems and filtering through network transmitted measurements,” *Signal Processing*, vol. 90, no. 10, pp. 2842–2850, 2010.



M. Brackstone and M. McDonald, “Car-following: a historical review,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 2, no. 4, pp. 181–196, 1999.



G. Baffet, A. Charara, and D. Lechner, “Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness,” *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 11, pp. 1255–1264, 2009.



T. Chung and K. Yi, “Design and evaluation of side slip angle-based vehicle stability control scheme on a virtual test track,” *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 224–234, 2006.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas



L. Schenato, “To zero or to hold control inputs with lossy links?,” *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 5, pp. 1093–1099, 2009.



N. H. T. S. Administration *et al.*, “National motor vehicle crash causation survey report to congress,” *National Highway Traffic Safety Administration Technical Report DOT HS*, vol. 811, p. 059, 2008.



A. F. S. I. R. Travel, “Annual global road crash statistics.”
<http://asirt.org/initiatives/informing-road-users/road-safety-facts/road-crash-statistics>, 1987.
“[Online; accessed 16-September-2015]”.



J. C. Geromel and R. Korogui, “Controle linear de sistemas dinâmicos,” *Editora Blucher, São Paulo, SP*, 2011.



J. M. Snider, “Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking,” *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08*, 2009.



K. Zhou, J. C. Doyle, K. Glover, *et al.*, *Robust and optimal control*, vol. 40. Prentice hall New Jersey, 1996.



D. S. Naidu, *Optimal control systems*. CRC press, 2002.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_∞
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &
Respostas



A. Leon-Garcia, "Probability and random processes," *Addison Wesley, Table*, vol. 3, pp. 126–127, 1989.



M. Buehler, K. Iagnemma, and S. Singh, *The DARPA Urban Challenge: Autonomous vehicles in city traffic*, vol. 56. springer, 2009.



O. L. V. Costa, M. D. Fragoso, and R. P. Marques, *Discrete-time Markov jump linear systems*. Springer Science & Business Media, 2006.

SDT
ACCES-Lab

Carvalho,
Leonardo

Motivação

Objetivo da
Pesquisa

Métodos
Empregados

Modelo do Carro

Modelo da Rede

MLJS

Norma H_{∞}
Markoviana

Controlador
Dinâmico de Saída

Topologia

Sistemas Estendido

Resultados

Desvio Padrão

Erro Quadrático

Conclusão

Próximos
Passos

Perguntas &

```
0100000101100100011101100110000010101110011000110110010  
101100100001000000100001101101111011011010111000001101  
0101110100011010010110111001100111001011000010000001000  
0110110111101101110011101000111001001101111011011000010  
00000100110001000000100010101101101011000100110011011  
001000110010001100101011001000010000001010011011100101  
110011011101000110010101101101011001100100000010011000  
110000101100010011011110111001001100000101101000110111  
0011001001111001
```

**Advanced Computing, Control &
Embedded Systems Laboratory** 

<http://www.fem.unicamp.br/~acceslab>