

CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE UM VEÍCULO ROBÓTICO DE EXTERIOR EM TERRENOS COMPLEXOS, VIA ABORDAGEM LQR BIOINSPIRADA

RAFAEL A. CORDEIRO*, JOSÉ R. AZINHEIRA†, ELY C. DE PAIVA*, SAMUEL S. BUENO‡

**Universidade Estadual de Campinas – FEM/UNICAMP*
Rua Mendelejev, 200 – 13083-970
Campinas – SP – Brasil

†*Instituto Superior Técnico – IDMEC/IST*
Av. Rovisco Paes, 1 – 1049-001
Lisboa – Portugal

‡*Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – DRVC/CTI*
Rod. D. Pedro I, km 143,6 – 13081-970
Campinas – SP – Brasil

Emails: rcordeiro@fem.unicamp.br, jraz@dem.ist.utl.pt, elypaiva@fem.unicamp.br, samuel.bueno@cti.gov.br

Abstract— Complex terrains - uneven and slippery - present challenges to trajectory control of outdoor vehicles. Using a dynamic model already presented by the authors, this paper formulates and analyzes, in simulation, the control of a robotic vehicle in a complex terrain. An LQR approach is adopted and, to enhance the controller, a pseudo-control strategy is proposed, inspired by human driver behavior in anticipation of curves, thus reducing the lateral error along the way.

Keywords— Outdoor robotics, dynamic vehicle models, trajectory control, LQR controllers

Resumo— Terrenos complexos - irregulares e escorregadios - apresentam desafios para o controle de trajetória de veículos terrestres. Usando um modelo dinâmico já apresentado pelos autores, este trabalho formula e analisa, em simulação, o controle de um veículo robótico em terrenos complexos. Adota-se uma abordagem LQR e, para aprimorar o controlador, propõe-se uma estratégia de pseudocontrole inspirada no comportamento humano na antecipação de curvas, resultando em uma redução considerável do erro lateral durante o trajeto.

Palavras-chave— Robótica de exterior, modelos dinâmicos, controle de trajetória, controladores LQR

1 Introdução

Veículos terrestres é uma das áreas de grande interesse da robótica (Siegwart et al., 2011). Dentro dela, ganharam atenção especial nos últimos anos os estudos focados em veículos autônomos (Simon, 2010; Snider, 2009; Morin and Samson, 2008; Lenain et al., 2003). Esses estudos se beneficiaram dos grandes avanços na computação e na instrumentação nas duas últimas décadas, que permitiram uma grande velocidade de cálculo atrelada a uma maior precisão e um menor custo no sensoriamento (Li et al., 2009).

Um das razões do interesse em veículos autônomos está na sua vasta aplicação, possibilitando desde o desenvolvimento de ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*, ou Sistemas Avançados de Auxílio ao Condutor, instalados nos veículos urbanos para evitar situações perigosas como derrapagens e capotamentos) até o desenvolvimento de técnicas de controle de trajetória para veículos do tipo todo-terreno, que trafegam sobre superfícies complexas (irregulares e escorregadias). Modelos puramente cinemáticos, como os apresentados em (Morin and Samson, 2008), não são suficientes para representar o comportamento do veículo nestas condições de maior complexidade, sendo necessária a utilização de modelos dinâmicos do veí-

culo, como os apresentados em (Doumiati, 2009) e (Lenain et al., 2003).

Este trabalho tem como contexto o veículo todo-terreno do projeto VERO (VEículo RObótico de exterior), idealizado pelo CTI e seus colaboradores, dentre eles a UNICAMP e o IST de Lisboa (Bueno et al., 2009). O projeto VERO visa o desenvolvimento de estratégias substancialmente autônomas para a plataforma robótica da Figura 1, que conta com direção Ackerman nas rodas frontais, propulsão nas rodas traseiras realizada por dois motores elétricos independentes e suspensão independente nas quatro rodas.

Cordeiro et al. (2012) apresentaram um modelo dinâmico tridimensional para o veículo e avaliaram seu comportamento num terreno plano a partir dos resultados obtidos por um controlador LQR de trajetória. Dando continuidade aos trabalhos, no presente artigo os autores abordam o controle LQR do veículo em condições de terreno irregular e aderência variável. Além disso, uma abordagem bioinspirada é acrescentada para melhorar a resposta lateral do controlador.

Assim, este artigo apresenta de forma sucinta o modelo matemático do simulador (seção 2) e o controlador LQR (seção 3) abordados por Cordeiro et al. (2012). Uma proposta de melhoria



Figura 1: Veículo robótico do projeto VERO.

ao controlador – denominada PAB (Pseudocontrole Antecipativo Bioinspirado) – é introduzida na seção 4. A seção 5 apresenta a simulação proposta, destacando o terreno complexo e o circuito realizado, e analisa o desempenho obtido pelo controlador LQR e pela adição do PAB. Por fim são expostas as conclusões finais dos autores.

2 Modelo Dinâmico Tridimensional

Para simular o comportamento do veículo, Cordeiro et al. (2012) propõem um modelo tridimensional de seis graus de liberdade onde o veículo é tratado como um corpo planar com quatro suspensões do tipo mola-amortecedor verticais a ele (ver Figura 2).

Na figura são apresentados os referenciais utilizados, sendo um referencial global Γ^G , um referencial local Γ^L – centrado no CG do veículo e coincidente com sua orientação – e os referenciais de cada roda: Γ^{DE} (Dianteira-Esquerda), Γ^{DD} (Dianteira-Direita), Γ^{TE} (Traseira-Esquerda) e Γ^{TD} (Traseira-Direita), alinhados com as orientações das mesmas.

Realizando uma análise cinemática e dinâmica – através das equações de Newton-Euler – do veículo (Cordeiro et al., 2012), é possível determinar o movimento do mesmo a partir das equações (1)-(4).

$$\frac{d}{dt}\vec{P} = \mathbf{S}^t \vec{V} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\vec{\Phi} = \mathbf{R}^{-1} \vec{\omega} \quad (2)$$

$$m \frac{d}{dt}\vec{V} = -m (\vec{\omega} \times \vec{V}) + \sum_R \vec{F}^R + m \mathbf{S} \vec{g} + \vec{F}_{AV} \quad (3)$$

$$\mathbf{J} \frac{d}{dt}\vec{\omega} = -(\vec{\omega} \times \mathbf{J} \vec{\omega}) + \sum_R \vec{T}^R + \vec{T}_{Aw} \quad (4)$$

Nas equações: \vec{P} e $\vec{\Phi}$ são as posições linear e

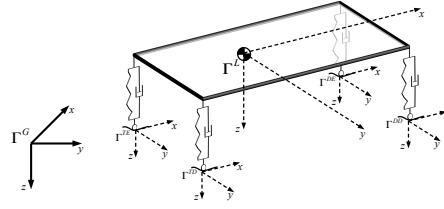


Figura 2: Modelo tridimensional do veículo.

angular, respectivamente; \vec{V} e $\vec{\omega}$ são as velocidades linear e angular; \mathbf{S} é a matriz de rotação do referencial Γ^G para o Γ^L e \mathbf{R} a matriz de transformação da velocidade angular nos ângulos de Euler; m e \mathbf{J} são, respectivamente, a massa e o tensor de inércia do veículo; \vec{F}^R e \vec{T}^R são as forças e torques atuantes no veículo (provenientes da interação pneu-solo); \vec{g} é a aceleração da gravidade; e por fim, \vec{F}_{AV} e \vec{T}_{Aw} são forças e torques aerodinâmicos quadráticos, dependentes de \vec{V} e $\vec{\omega}$ respectivamente. Todos os vetores são representados em Γ^L , com exceção de \vec{g} , dado no referencial global e rotacionado ao referencial local pela matriz \mathbf{S} .

As forças e torques aplicados sobre o veículo são definidos por três componentes do modelo veicular: a direção, a propulsão e as forças de interação entre o pneu e o solo.

O sistema de direção é responsável pelo direcionamento das forças aplicadas sobre os pneus frontais, considerando-se a dinâmica do esterçamento (aproximação de primeira ordem) e os fenômenos de histerese e zona morta. A relação entre o ângulo de direção equivalente do veículo (δ) e o ângulo apresentado em cada roda é dado por (5) através da geometria Ackerman, onde a , b e c são, respectivamente, as distâncias do CG até a frente, a traseira e a lateral do modelo veicular proposto.

$$\delta_{DE} = \frac{(a + b) \operatorname{tg}(\delta)}{a + b - c \operatorname{tg}(\delta)} \quad (5a)$$

$$\delta_{DD} = \frac{(a + b) \operatorname{tg}(\delta)}{a + b + c \operatorname{tg}(\delta)} \quad (5b)$$

A propulsão é fornecida por motores elétricos DC independentes nas rodas traseiras e interligados por um diferencial eletrônico que objetiva simular os efeitos de um diferencial mecânico do tipo “aberto”. Os motores serão considerados aqui como motores RL típicos e equacionados por (6), onde o torque fornecido (T_M) é proporcional à corrente de armadura.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + k_{\Omega v} \Omega_M \quad (6a)$$

$$T_M = k_{iT} i_a \quad (6b)$$

A direção das rodas e o torque obtido pela propulsão são utilizados para determinar a dinâmica de rotação da roda. Aplicando-se as equações de Newton-Euler para a rotação obtém-se:

$$J_R \dot{\Omega}_R = T_M - F_x^R r_R - T_{A\Omega} \quad (7)$$

onde J_R é a inércia de rotação da roda (inércia equivalente resultante da adição das inércias da roda, da transmissão e do motor), r_R é o raio da roda e $T_{A\Omega}$ é uma resistência aerodinâmica quadrática em função de Ω_R .

Finalmente, são definidos os elementos de força provenientes da interação pneu-solo. Estes elementos surgem a partir dos fenômenos de escorregamento (longitudinal) e derrapagem (lateral), sendo eles mensurados pela taxa de escorregamento e pelo ângulo de derrapagem (Cordeiro et al., 2012), obtidos por (8) e (9) respectivamente.

$$\sigma = \frac{V_x^R - r_R \Omega_R}{V_x^R} \quad (8)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{V_y^R}{V_x^R}\right) \quad (9)$$

Estes parâmetros são utilizados na obtenção da forças longitudinais – $F_x^R(\sigma)$ – e laterais – $F_y^R(\alpha)$ – e dos momentos de autoalinhamento – $M_z^R(\alpha)$ – a partir do Modelo de Pacejka (Pacejka, 2002):

$$Y(X) = D \sin[C \arctan(B\zeta)]$$

$$\zeta = (1 - E)X + \frac{E}{B} \arctan(BX) \quad (10)$$

onde os parâmetros são obtidos empiricamente e dependentes das forças verticais F_z^R e do coeficiente de atrito μ entre o pneu e o solo. As forças verticais são obtidas pela equação (11) através do modelo de suspensão (mola-amortecedor) e da deformação d_z dela.

$$F_z = c_s \frac{d}{dt} d_z + k_s d_z \quad (11)$$

As equações apresentadas foram implementadas em software MATLAB/SIMULINK[®], constituindo um ambiente de simulação para o veículo. Informações mais detalhadas sobre esta modelagem são encontradas em (Cordeiro et al., 2012).

3 Controlador LQR

O simulador descrito é uma plataforma capaz de representar o movimento completo de um veículo. Agora deseja-se criar um controlador de trajetória para que o veículo seja capaz de executar automaticamente trajetórias pré-definidas.

Para o desenvolvimento do controle, este simulador é utilizado com dois propósitos: o primeiro consiste em prover uma plataforma de testes para validar o controle, e o segundo consiste em utilizá-lo para obter modelos lineares simplificados – aplicados na síntese dos controladores.

Em (Cordeiro et al., 2012) os autores apresentaram dois métodos para obtenção de modelo lateral do veículo a partir da simplificação e linearização do seu modelo completo. Dentre eles, destacou-se com melhores resultados um modelo de três estados denominado de modelo “cinemático”. Este modelo é baseado numa representação do tipo “bicicleta” do veículo e é composto de três estados: as posições lateral (y) e angular (ψ) – obtidas pelas equações cinemáticas – e a velocidade angular (r) – proveniente de uma aproximação de primeira ordem. Assim, a equação (12) representa o modelo “cinemático” em espaço de estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & u_{ref} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_r \end{bmatrix} \delta_{cmd} \quad (12)$$

Além deste modelo lateral, um modelo longitudinal foi adicionado baseado no mesmo modelo “bicicleta”. Sua representação em espaço de estados é dada em (13), sendo a posição longitudinal (x) dada pelas equações cinemáticas e a velocidade (u) aproximada por uma função de primeira ordem cuja entrada é o comando de velocidade (u_{cmd}) enviado para o regulador de velocidade dos motores baseado na cinemática proveniente da geometria Ackerman (Martins et al., 2011).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_u \end{bmatrix} u_{cmd} \quad (13)$$

A partir de (12) e (13), um controlador LQR é sintetizado. O método LQR tem como objetivo criar um controlador que seja capaz de minimizar um função de custo dada pela ponderação quadrática dos erros dos estados e dos esforços de controle. Esta ponderação é realizada pelas matrizes de ponderação (\mathbf{Q}_{LQR} e \mathbf{R}_{LQR}).

Para o caso aqui descrito, δ_{cmd} e u_{cmd} são os esforços de controle. Os erros dos estados (x_e , u_e , y_e , ψ_e e r_e) são obtidos pela diferença entre os estados atuais do veículo e os estados de um veículo de referência que realiza o trajeto de forma ideal com uma velocidade constante u_{ref} .

4 Pseudocontrole Antecipativo Bioinspirado

A resposta de posição lateral do veículo é um parâmetro fortemente ligado à segurança na condução pois na grande maioria dos locais de locomoção existem limitações no terreno. Resultados obtidos por Cordeiro et al. (2012) mostram que os grandes

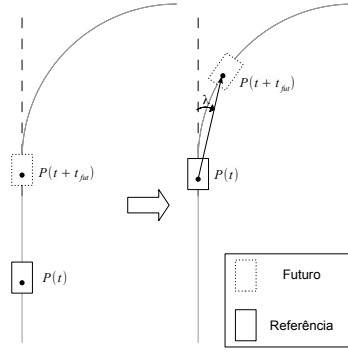


Figura 3: Proposta de redução de velocidade antes das curvas.

erros de posição lateral ocorrem nas entradas das curvas. Para melhorar o desempenho nestas situações, este trabalho se inspirou no comportamento humano ao conduzir um veículo.

Um motorista apresenta duas reações típicas ao se aproximar de curvas: 1) Reduz a velocidade do veículo e 2) inicia a curva alguns metros antes dela ocorrer de fato, aproveitando ao máximo a largura da faixa pela qual transita. Baseado nestas observações, propõe-se aqui uma atuação na referência do veículo a partir da antecipações das curvas. A este processo deu-se o nome de Pseudo-controlre Antecipativo Bioinspirado (PAB).

Para possibilitar que o veículo reduza a velocidade antes da curva, considera-se a referência do veículo e uma referência futura (t_{fut} segundos à frente), como representado na Figura 3. Dada a diferença angular λ entre a orientação do veículo de referência atual com o veículo futuro, se esta for nula, então o veículo futuro continuará no mesmo segmento de reta e, portanto, não haverá uma curva à frente. Já se λ não for nulo, então o veículo futuro estará realizando uma curvatura onde λ será tão maior quanto for a curvatura.

A partir de λ , a velocidade do veículo de referência é reduzida para \hat{u}_{ref} , que é fornecida por (14), onde k_λ é uma constante de proporcionali-

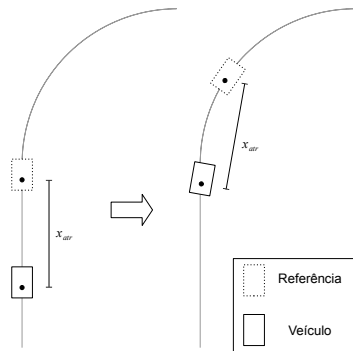


Figura 4: Atraso para permitir início antecipado da curva.

dade para ajustar a influência de λ na nova velocidade de referência.

$$\hat{u}_{ref} = u_{ref} \cos(k_\lambda \lambda) \quad (14)$$

Para a outra reação humana observada, como o controle de trajetória é feito pelo seguimento de um veículo de referência, para iniciar a curva alguns instantes antes basta que o veículo esteja sempre alguns metros atrás do veículo de referência (x_{atr}). Assim, como mostra a Figura 4, se a referência iniciar a curva, o veículo também a iniciará, apesar de estar alguns metros atrás.

5 Simulação e Resultados

O controlador LQR proposto é implementado junto ao simulador desenvolvido, onde as matrizes de ponderação \mathbf{Q}_{LQR} e \mathbf{R}_{LQR} priorizam minimizar os erros de velocidade e o esforço de controle da direção. Seu comportamento é avaliado durante a execução de uma trajetória em condições de terreno irregular com variação de aderência, cujas irregularidades são dadas pela sobreposição de senoides de $2cm$ de amplitude ($4cm$ pico a pico) e período de $40cm$. A Figura 5 apresenta um espaço de $5m \times 5m$ do terreno idealizado.

A representação do terreno no simulador é feita por uma grelha de pontos discretizada em quadrados de $10cm \times 10cm$, onde cada célula possui uma cota e um coeficiente de atrito associado.

O trajeto proposto é apresentado na Figura 6. Ele inicia no ponto $(0,0)$ e segue em linha reta por $125m$. Então, uma curva de meia circunferência (raio de $40m$) é realizada no sentido horário e continuada por uma circunferência completa (raio de $20m$) no sentido anti-horário. Para finalizar o circuito em “oito”, uma circunferência completa (raio de $40m$) é realizada no sentido horário. Ao fim do “oito” segue uma reta de $125m$ e, então, inicia-se uma curva fechada à direita – um quarto de circunferência (raio de $15m$), seguindo em linha reta até o início de uma última curva igual à anterior, retornando ao ponto $(0,0)$ e repetindo o trajeto de $125m$ em linha reta.

A velocidade de referência para a execução do trajeto é de $8m/s$, sendo que o veículo inicia alinhado com a pista e na velocidade desejada, mas com um erro lateral inicial de $2m$. Na Figura 6, a área em branco representa um terreno de grama

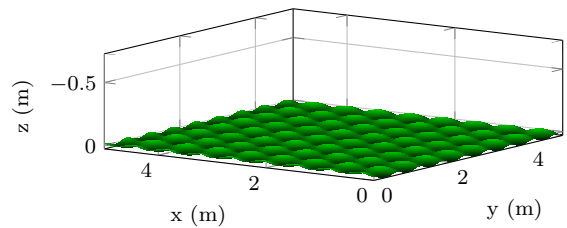


Figura 5: Amostra do tipo de terreno utilizado.

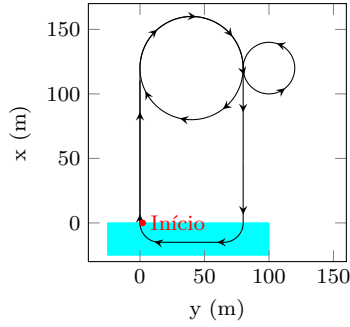


Figura 6: Trajetória proposta para simulação.

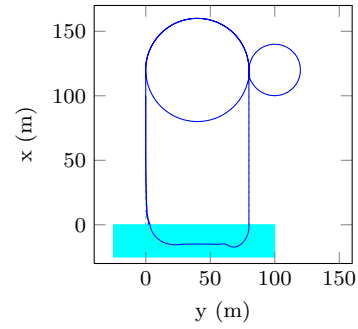
seca ($\mu = 0.6$) e a área em azul claro representa uma região de grama úmida ($\mu = 0.4$). A resposta obtida pelo controlador LQR nestas condições é apresentada na Figura 7.

Pode-se ver da figura que os erros (laterais e longitudinais) obtidos em grama seca são baixos. Nestas condições os escorregamentos e derrapagens encontram-se na faixa onde as forças de interação solo-pneu são lineares (Cordeiro et al., 2012). Além disso, o terreno irregular cria variações nas forças verticais, alterando os escorregamentos e derrapagens. Ademais, o terreno irregular afeta a trajetória realizada, sendo necessário ajustes na direção (pequenas oscilações).

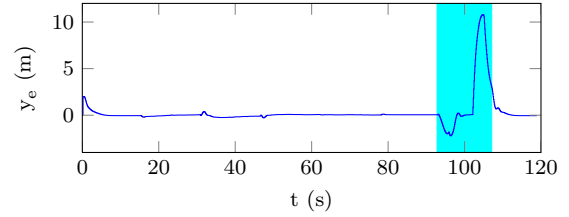
Já quando o veículo se encontra na zona de aderência reduzida (durante as curvas mais fechadas), os efeitos de escorregamento e derrapagem são muito acentuados, resultando em altos erros longitudinais e laterais. Nestes condições o acoplamento entre forças longitudinais e laterais afeta ainda mais a resposta. Durante a execução da curva tem-se altos valores de escorregamentos e derrapagens simultaneamente, o que causa uma forte desaceleração do veículo pois as forças longitudinais são insuficientes para manter a velocidade. Essas forças só voltam a ser suficientes no fim das curvas – quando a derrapagem diminui – permitindo a aceleração do veículo até a velocidade de referência.

Buscando diminuir o erro lateral, adiciona-se o PAB ao controlador LQR. A Figura 8 compara os erros longitudinal e lateral obtidos com e sem o pseudo-controle.

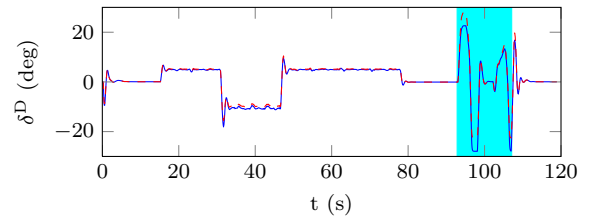
Analisando as respostas, é possível observar que a adição do PAB reduziu o pico de erro lateral, sendo que a resposta de erro na última curva foi reduzida abruptamente (redução superior a 80%). Em contrapartida, a resposta longitudinal é inferior à obtida pelo LQR puro, sendo que sua utilização causa um acréscimo de 2.4s ao tempo final do circuito. Entretanto, é interessante ressaltar que a utilização do PAB apresentou uma melhor utilização das forças de interação durante as curvas fechadas, resultando numa melhor resposta longitudinal nas condições de altos escorregamentos e derrapagens simultâneos.



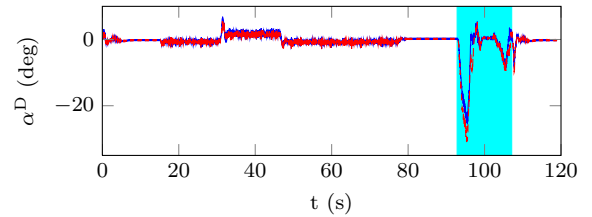
(a) Trajeto Realizado.



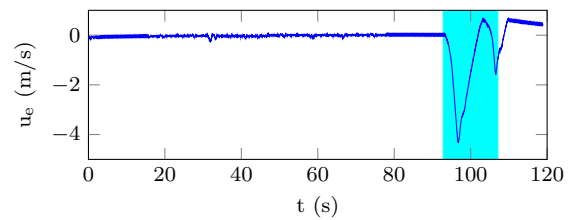
(b) Erro de posição lateral.



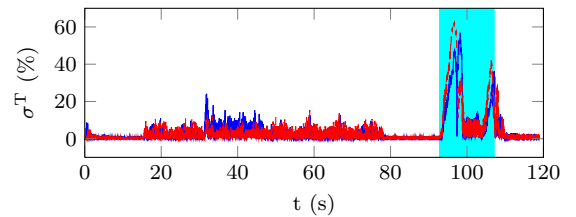
(c) Esterçamento. Rodas DE (—) e DD (- - -).



(d) Ângulo de derrapagem. Rodas DE (—) e DD (- - -).

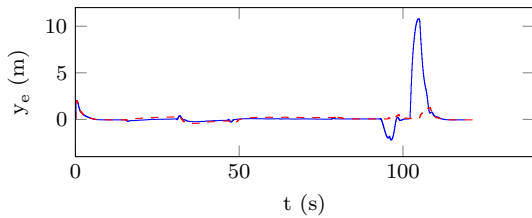


(e) Erro de velocidade longitudinal.

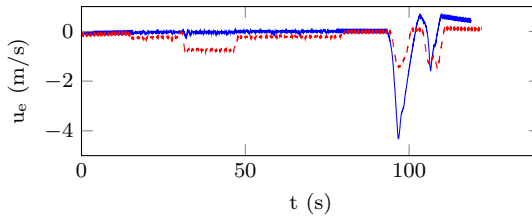


(f) Taxa de escorregamento. Rodas TE (—) e TD (- - -).

Figura 7: Respostas obtidas pelo veículo com controlador LQR (sem PAB) a 8m/s.



(a) Erro de posição lateral.



(b) Erro de velocidade longitudinal.

Figura 8: Comparação entre os erros obtidos pelo LQR (—) e pelo LQR+PAB (- - -).

6 Conclusões

O simulador proposto pelos autores mostrou-se capaz de representar o movimento do veículo navegando sobre terrenos complexos, mostrando o efeito da variação da distribuição de forças nas rodas e a alta variação de escorregamentos e derrapagens em condição de baixa aderência.

O controlador LQR foi capaz de executar a trajetória neste tipo de terreno. Entretanto, por ser baseado em um modelo cinemático e desacoplado, mostrou dificuldades em situações de altos escorregamentos e derrapagens.

A adição do PAB possibilitou uma melhora significativa na resposta lateral do veículo e proporcionou um melhor acoplamento entre os modelos longitudinal e lateral. Apesar de afetar a performance longitudinal, é uma solução útil, considerando a relevância do controle lateral na segurança durante a navegação.

Na sequência dos trabalhos, as estratégias aqui apresentadas serão implementadas e validadas experimentalmente na plataforma VERO. Posteriormente, serão abordadas estratégias de controle não linear baseadas na estimação de características dinâmicas do veículo, objetivando um controle eficiente sobre as forças de interação pneu-solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem os financiamentos da FAPESP (Mestrado 2010/14295-4 e BEPE 2011/22964-6) e dos projetos NAGUIVA (490722/2010-5 - CNPq/FCT - Portugal) e INCT-SEC (573963/2008-8 - CNPq e 08/57870-9 - FAPESP).

Referências

- Bueno, S., Azevedo, H., Mirisola, L., De Paiva, E., Ramos, J., Victorino, A. and Azinheira, J. (2009). Uma plataforma para pesquisa e desenvolvimento em robótica terrestre de exterior, *IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Brasília, DF*.
- Cordeiro, R., Azinheira, J., de Paiva, E. and Bueno, S. (2012). Efeitos da dinâmica tridimensional no controle de trajetória de um veículo robótico terrestre de quatro rodas, *XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012)*, Campina Grande, PB.
- Doumiati, M. (2009). *Embedded estimation of vehicle's vertical and lateral tire forces for behavior diagnoses on the road*, PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, France.
- Lenain, R., Thuilot, B., Cariou, C. and Martinet, P. (2003). Rejection of sliding effects in car like robot control: application to farm vehicle guidance using a single rtk gps sensor, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2003). Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on*, Vol. 4, pp. 3811–3816 vol.3.
- Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K. and Yokoyama, S. (2009). Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* **2**(3): 1–16.
- Martins, R. J., Bueno, S. S., Mirisola, L. G., de Paiva, E. C. and Ferreira, P. A. V. (2011). Cinemática e localização em robótica terrestre usando múltiplos encoders, *X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, São João del Rei, MG*.
- Morin, P. and Samson, C. (2008). Motion control of wheeled mobile robots, *Handbook of Robotics*, Springer Verlag, chapter 34.
- Pacejka, H. B. (2002). *Tire and Vehicle Dynamics*, Butterworth-Heinemann, Oxford. 697p.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. and Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*, Intelligent Robotics and Autonomous Agents Series, Mit Press.
- Simon, S. (2010). Autonomous navigation in rubber plantations, *Machine Learning and Computing (ICMLC), 2010 Second International Conference on*, pp. 309–312.
- Snider, J. M. (2009). Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking, *Technical Report CMU-RI-TR-09-08*, Robotics Institute, Pittsburgh, PA.