

MODELAGEM LINEAR E IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DE UM ROBÔ MÓVEL COM ACIONAMENTO DIFERENCIAL

*, *, *

*

Emails: , ,

Abstract— This paper presents a discret model for a wheeled mobile robot. The proposed dynamic model is linear, using the variable l which is the distance traveled by the robot, instead of absolut position x and y . As a linear model, it could be identified using any classic method, for example least squares method. The parameter estimation is validated using simulations once the discret model is multi-variable and not-minimum.

Keywords— Model identification, mobile robots.

Resumo— Este artigo apresenta uma metodologia de modelagem e identificação de modelo discreto para um robô móvel dotado de rodas. O modelo dinâmico proposto é linear, utilizando a grandeza l , distância percorrida pelo robô, ao invés de x e y , posicionamento absoluto. Por ser linear, o modelo discreto pode ser identificado utilizando-se qualquer método clássico, como por exemplo os mínimos quadrados recursivos. A estimativa de parâmetros é validada através de simulações, já que o modelo discreto é multivariável e não mínimo.

Palavras-chave— Identificação de modelo, robôs móveis.

1 Introdução

Normalmente, modelos matemáticos realísticos são obtidos através das leis físicas analíticas que regem o comportamento dos robôs. Abordagens alternativas, empregando, por exemplo, técnicas de inteligência artificial juntamente com a coleta de dados de entrada e saída do sistemas, também são utilizadas. Diversos tipos de modelo foram desenvolvidos para robôs móveis não-holonômicos. Modelos LTI (*linear time invariant*) são obtidos normalmente através da linearização de Taylor sobre um único ponto de operação do sistema. Em Economou, Tsourdos e White (2002) é apresentado um modelo do tipo QLPV (*quasi-linear parameter-varying*) para um robô do tipo carro.

Ao contrário das técnicas de identificação de robôs manipuladores, já bastante discutida na literatura (Poignet e Gautier, 2000; Efe, Kaynak e Rudas, 1999), a identificação de robôs móveis tem sido menos estudada. Em Pereira (2000) e Pereira, Campos e Aguirre (2000) é realizada uma identificação do modelo dinâmico de micro-robôs utilizando o método dos mínimos quadrados recursivos. Como o modelo a ser identificado através do LMS é não-linear, é utilizada uma simplificação: a orientação $\theta(t)$, variante no tempo, é considerada constante em cada intervalo de amostragem.

Neste trabalho é proposto um modelo dinâmico linear equivalente ao modelo dinâmico não-linear normalmente utilizado para robôs móveis não-holonômicos (?). Nossa modelo utiliza a grandeza l , distância percorrida pelo robô a partir de um instante inicial, ao invés da posição absoluta (x , y). O fato de l ser não mensurável é contornado utilizando-se uma outra grandeza Δl , que também não pode ser medida através de um sistema de visão, mas pode ser calculada. Dessa

forma, usamos $\widetilde{\Delta l}$, que é uma estimativa da distância percorrida pelo robô em um intervalo de amostragem. A identificação desse modelo dinâmico discreto é realizado utilizando um método clássico de identificação, os mínimos quadrados recursivos. É importante notar que, ao contrário das técnicas comumente utilizadas em sistemas robóticos não-lineares, onde o modelo identificado é um modelo linearizado, aqui o modelo encontrado é nativamente linear.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. A próxima seção descreve o robô e sua modelagem matemática. A seção 3 mostra como foi estimado um valor numérico para a grandeza imensurável $\widetilde{\Delta l}$. Na quarta seção são discutidos aspectos da estimação paramétrica propriamente dita e na quinta seção são mostrados alguns resultados simulados. Finalmente, na seção 6, os resultados obtidos são discutidos e as conclusões e perspectivas futuras são apresentadas.

2 Modelagem do Robô

Esta seção apresenta a modelagem matemática do robô considerado neste trabalho. Trata-se de um pequeno robô móvel com acionamento diferencial, muito usado em competições de futebol de robôs. Este robô possui um formato cúbico com 75mm e é acionado por dois motores de corrente contínua independentes, controlados através de um computador remoto via rádio. O sensor utilizado nesse sistema (figura 1) é uma câmera CCD, que captura imagens a uma taxa de 30 quadros/s, a partir das quais é possível determinar a posição e orientação absolutas do robô. A descrição detalhada do robô pode ser encontrada em Vieira, Alsina e Medeiros (2001).

Na figura 2 é apresentado um diagrama esque-

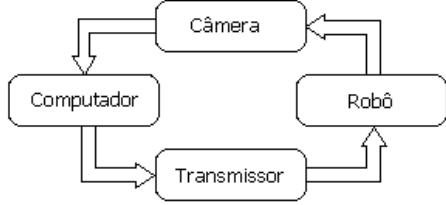


Figura 1: Arquitetura do sistema

mático do robô. Sua configuração é representada pela posição do centro do corpo do robô no espaço cartesiano (x e y) e por sua orientação θ (ângulo entre o vetor de orientação do robô e o eixo das abscissas).

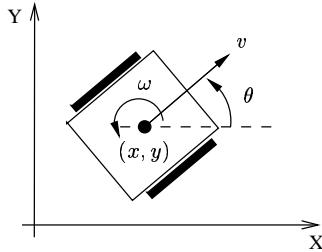


Figura 2: Modelagem do robô

2.1 Modelo Cinemático

O modelo cinemático relaciona posição e orientação do robô com suas velocidades, sem levar em conta as causas desse movimento.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w \quad (1)$$

O robô modelado está sujeito a restrições não-holonômicas, isto é, restrições nas possíveis velocidades que pode assumir, devido ao fato de não poder se movimentar lateralmente. Dessa forma, o robô só pode se movimentar na direção em que está orientado.

2.2 Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico é derivado a partir das leis físicas que governam o comportamento dos diversos subsistemas do robô, incluindo a dinâmica dos atuadores (resposta elétrica e mecânica dos motores), atrito e dinâmica do robô (equações de movimento) (Yamamoto, Pedrosa, Medeiros e Al-sina, 2003). O modelo dinâmico é dado pela equação 2:

$$Ku = M\dot{v} + Bv \quad (2)$$

onde K é a matriz que transforma os sinais elétricos u , a serem aplicados aos motores, em forças a serem geradas pelas rodas do robô. M ($M = M^T > 0$) é a matriz de inércia e B é a matriz de atrito viscoso. Os vetores $v = [v \ w]^T$

e $u = [e_d \ e_e]^T$ representam as velocidades linear e angular do robô e os sinais elétricos para cada motor (direito e esquerdo), respectivamente.

2.3 Modelo Linear Equivalente

O modelo descrito acima pode ser representado em forma de equações de estado da seguinte maneira

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}B & : \mathbf{0} \\ \dots & \dots \\ \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1}K \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$

Este modelo é utilizado nas simulações do robô, pois representa realmente o comportamento do robô, sendo $y(t)$ obtido através do sistema de visão global utilizado no sistema. Porém, não procuraremos identificar este modelo, já que é uma representação não-linear, o que nos impedia de utilizar métodos clássicos de estimativa de parâmetros. Reescreveremos este modelo, transformando-o em uma representação linear do robô. Para isso, devemos realizar uma mudança de variáveis: a configuração do robô não será mais descrita através de sua posição x e y e sua orientação θ , sendo agora expressa em termos do deslocamento linear l e angular θ . Como pode ser observado abaixo, a nova equação de estado permanece com os mesmos parâmetros dinâmicos. Devendo-se frisar que para se chegar ao modelo equivalente linear não foi realizada nenhuma simplificação, sendo esse modelo uma representação exata e realmente equivalente à representação (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \dot{l} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}B & : \mathbf{0} \\ \dots & \dots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ l \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1}K \\ \dots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \\ l \\ \theta \end{bmatrix}$$

Para o micro-robô construído em nosso labo-

ratório, temos que:

$$\begin{aligned} -M^{-1}B &= \begin{bmatrix} -0.54358 & -0.0001379 \\ -3.0272 & -7.819 \\ 0.129 & 0.12729 \\ 66.91507 & -65.30455 \end{bmatrix} \\ M^{-1}K &= \end{aligned} \quad (5)$$

2.4 Discretização do modelo

O modelo que gostaríamos de identificar é o modelo discreto do robô, já que o robô real será controlado através de um computador. Para isso devemos transformar a representação no espaço de estados para a representação em função de transferência. Como o sistema é multivariável, obtemos uma matriz de funções de transferência.

$$\begin{bmatrix} L(s) \\ \theta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_2(s) \\ G_3(s) & G_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d(s) \\ E_e(s) \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde cada $G(s)$ possui a seguinte estrutura

$$G_i(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{k_1 s + k_2}{s(s^2 + k_3 s + k_4)}$$

com $D(s)$ igual para as quatro funções de transferências. Observa-se que são necessários, portanto, dez parâmetros para que o modelo seja descrito apropriadamente.

A fim de obtermos $L(z)$ e $\theta(z)$ calculamos as quatro funções de transferência discretas $G_i(z)$ utilizando um período de amostragem de $T = 33,33ms$.

$$\begin{bmatrix} L(z) \\ \theta(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(z) & G_2(z) \\ G_3(z) & G_4(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d(z) \\ E_e(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde cada $G(z)$ possui a seguinte estrutura

$$G_1(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{\beta_1 z^2 + \beta_2 z + \beta_3}{z^3 + \alpha_1 z^2 + \alpha_2 z + \alpha_3}$$

com $D(z)$ igual para todas as quatro funções de transferência. Nesta estrutura são utilizados quinze parâmetros para descrever o robô. Percebe-se que há um excesso de parâmetros, não sendo essa a forma mínima.

A fim de chegarmos a parametrização adequada para a implementação digital transformamos as funções de transferência em equações de diferenças.

$$\begin{aligned} l_k &= -\alpha_1 l_{k-1} - \alpha_2 l_{k-2} - \alpha_3 l_{k-3} + \\ &\quad + \beta_1 e_{d,k-1} + \beta_2 e_{d,k-2} + \beta_3 e_{d,k-3} + \\ &\quad + \gamma_1 e_{e,k-1} + \gamma_2 e_{e,k-2} + \gamma_3 e_{e,k-3} \\ \theta_k &= -\alpha_1 \theta_{k-1} - \alpha_2 \theta_{k-2} - \alpha_3 \theta_{k-3} + \\ &\quad + \delta_1 e_{d,k-1} + \delta_2 e_{d,k-2} + \delta_3 e_{d,k-3} + \\ &\quad + \varepsilon_1 e_{e,k-1} + \varepsilon_2 e_{e,k-2} + \varepsilon_3 e_{e,k-3} \end{aligned} \quad (8)$$

A dificuldade inerente a essa representação é o fato de que a grandeza l é imensurável. Isso torna impossível utilizar essa representação na prática.

Devemos, então, realizar uma modificação algébrica que não alterará os valores dos parâmetros

$$\begin{aligned} \Delta l_k &= -\alpha_1 \Delta l_{k-1} - \alpha_2 \Delta l_{k-2} - \\ &\quad - \alpha_3 \Delta l_{k-3} + \beta_1 \Delta e_{d,k-1} + \\ &\quad + \beta_2 \Delta e_{d,k-2} + \beta_3 \Delta e_{d,k-3} + \\ &\quad + \gamma_1 \Delta e_{e,k-1} + \gamma_2 \Delta e_{e,k-2} + \\ &\quad + \gamma_3 \Delta e_{e,k-3} \\ \Delta \theta_k &= -\alpha_1 \Delta \theta_{k-1} - \alpha_2 \Delta \theta_{k-2} - \\ &\quad - \alpha_3 \Delta \theta_{k-3} + \delta_1 \Delta e_{d,k-1} + \\ &\quad + \delta_2 \Delta e_{d,k-2} + \delta_3 \Delta e_{d,k-3} + \\ &\quad + \varepsilon_1 \Delta e_{e,k-1} + \varepsilon_2 \Delta e_{e,k-2} + \\ &\quad + \varepsilon_3 \Delta e_{e,k-3} \end{aligned} \quad (9)$$

onde $\Delta l = l_k - l_{k-1}$ é distância percorrida em um passo de amostragem, $\Delta \theta = \theta_k - \theta_{k-1}$ é a distância angular, $\Delta e_d = e_{d,k} - e_{d,k-1}$ e $\Delta e_e = e_{e,k} - e_{e,k-1}$ são os novos sinais de entrada da planta (diferenças de tensão nos motores direito e esquerdo).

Para o robô descrito por (5), os parâmetros calculados são os seguintes:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = -2.77 & \alpha_2 = 2.55 & \alpha_3 = -0.778 \\ \beta_1 = 5.77 \times 10^{-5} & \beta_2 = 1.16 \times 10^{-5} & \beta_3 = -4.55 \times 10^{-5} \\ \gamma_1 = 5.70 \times 10^{-5} & \gamma_2 = 1.17 \times 10^{-5} & \gamma_3 = -4.48 \times 10^{-5} \\ \delta_1 = 0.028 & \delta_2 = -0.00165 & \delta_3 = -0.0254 \\ \varepsilon_1 = -0.027 & \varepsilon_2 = 0.0016 & \varepsilon_3 = 0.0247 \end{array}$$

3 Estimação de Δl

A grandeza l é imensurável pois não existe maneira de medirmos, através de um sistema de visão global, a distância percorrida pelo robô desde um instante inicial. Seguindo o mesmo critério, torna-se impossível também medirmos Δl , distância percorrida pelo robô em um período de amostragem. Podemos, porém, calcular um valor plausível para esta grandeza nos baseando em heurísticas.

A metodologia desenvolvida para se calcular $\widetilde{\Delta l}$ consiste nos seguintes passos:

1. cálculo da distância percorrida $|\widetilde{\Delta l}|$
2. cálculo da direção do movimento, ou seja, o sinal de $|\widetilde{\Delta l}|$

3.1 Obtenção da Distância Percorrida

Possuindo duas imagens consecutivas do robô em seu campo de trabalho, podemos obter com razoável precisão sua configuração (x , y e θ) nestes dois instantes de tempo. Não podemos ter certeza sobre qual caminho o robô percorreu para ir de uma configuração a outra. Poderíamos utilizar a distância euclidiana entre os dois pontos como medida da distância percorrida, supondo, neste caso, que o período de amostragem de $33,33ms$ é suficientemente pequeno (figura 3).

Neste trabalho foi utilizado uma curva paramétrica de 2° grau para se calcular $|\widetilde{\Delta l}|$, respeitando, dessa forma, as restrições não-holonômicas

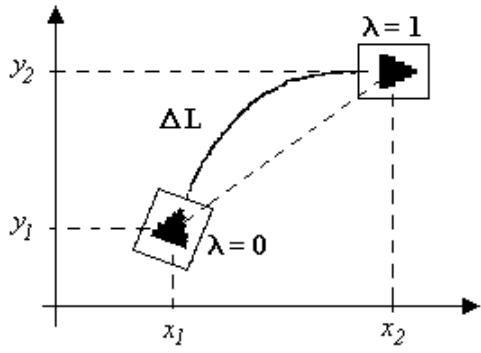


Figura 3: Diagrama para o cálculo de $|\widetilde{\Delta l}|$

do robô.

$$\begin{cases} x(\lambda) = a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 \\ y(\lambda) = b_2\lambda^2 + b_1\lambda + b_0 \\ \tan[\theta(\lambda)] = d(\lambda) = \frac{dy/d\lambda}{dx/d\lambda} = \frac{2b_2\lambda + b_1}{2a_2\lambda + a_1} \end{cases} \quad (10)$$

Para se calcular o comprimento desta curva utilizamos

$$|\widetilde{\Delta l}| = \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dx}{d\lambda}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\lambda}\right)^2} d\lambda \quad (11)$$

Substituindo $\frac{dx}{d\lambda}$ e $\frac{dy}{d\lambda}$ em (11) obtemos

$$|\widetilde{\Delta l}| = \int_0^1 \sqrt{A\lambda^2 + B\lambda + C} d\lambda \quad (12)$$

onde

$$\begin{cases} A = 4a_2^2 + 4b_2^2 \\ B = 4a_1a_2 + 4b_1b_2 \\ C = a_1^2 + b_1^2 \end{cases} \quad (13)$$

Devemos, então, encontrar os valores de A , B e C . Para isso utilizamos nosso conhecimento sobre o problema. Sabemos que

$$\begin{aligned} x(0) &= x_1 &= a_0 \\ y(0) &= y_1 &= b_0 \\ x(1) &= x_2 &= a_2 + a_1 + a_0 \\ y(1) &= y_2 &= b_2 + b_1 + b_0 \\ d(0) &= \tan(\theta_1) &= \frac{b_1}{a_1} \\ d(1) &= \tan(\theta_2) &= \frac{2b_2 + b_1}{2a_2 + a_1} \end{aligned} \quad (14)$$

o que nos leva a seguinte solução geral

$$\begin{cases} a_0 = x_1 \\ a_1 = \frac{2[\tan(\theta_2)(x_2 - x_1) - y_2 + y_1]}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \\ a_2 = x_2 - x_1 - a_1 \\ b_0 = y_1 \\ b_1 = a_1 \tan(\theta_1) \\ b_2 = y_2 - y_1 - b_1 \end{cases} \quad (15)$$

Soluções particulares foram encontradas para os casos singulares, em que θ_1 ou θ_2 possuem valores próximos de $|\frac{\pi}{2}|$.

Utilizando a solução analítica para a integral da equação (12) podemos encontrar uma estimativa para a distância percorrida pelo robô em um período de amostragem.

$$\int \sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c} d\lambda = \frac{(2a\lambda + b)\sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c}}{4a} + \left(\frac{4ac - b^2}{8a}\right) \int \frac{dx}{\sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c}} \quad (16)$$

onde

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c}} = \frac{1}{\sqrt{a}} \ln(2\sqrt{a}\sqrt{a\lambda^2 + b\lambda + c} + 2a\lambda + b)$$

3.2 Obtenção da Direção do Movimento

Para obtermos o sinal da distância, ou seja, para sabermos se o robô realizou um movimento para frente ou para trás (marcha-ré) em relação a sua orientação θ , calcula-se o valor da coordenada x da configuração atual (ponto 2) no sistema de coordenadas com origem na posição do robô no passo anterior (ponto 1). Se o valor obtido nesse cálculo for positivo, o robô terá se movimentado para frente e $\widetilde{\Delta l} > 0$. Caso contrário, o robô terá se movimentado de marcha-ré e $\widetilde{\Delta l} < 0$. Isso pode ser feito considerando-se que o robô não é capaz de inverter sua orientação em um passo de amostragem.

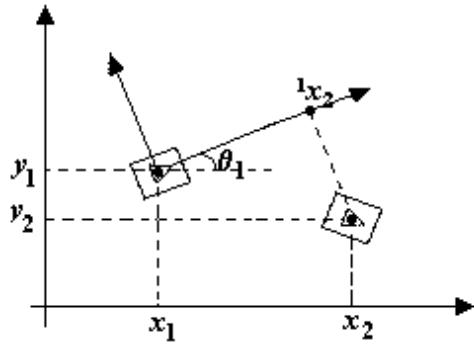


Figura 4: Diagrama para o cálculo do sinal de $\widetilde{\Delta l}$

Para o cálculo do sinal foi utilizada uma equação matricial simples bastante conhecida em robótica (Craig, 1986), que realiza a transformação da descrição de um ponto em um sistema de coordenadas para outro. Podemos, portanto, encontrar a coordenada x da posição atual do robô em relação ao sistema de coordenadas {1} facilmente através de (17). Se ${}^1x_2 > 0$ teremos $\widetilde{\Delta l} > 0$ e, caso contrário, teremos $\widetilde{\Delta l} < 0$.

$${}^1x_2 = x_2 \cos \theta_1 + y_2 \sin \theta_1 - x_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1 \quad (17)$$

3.3 Validação do Cálculo de $\widetilde{\Delta l}$

Nesta etapa foram realizados testes para validarmos a estimativa de Δl . Simulamos o sistema linear descrito pela equação (4) e o sistema não-linear descrito pela equação (3) com os mesmos

valores de entrada (e_d e e_e), obtendo como saídas $y_{linear} = [l \ \theta]^T$ e $y_{não-linear} = [x \ y \ \theta]^T$. Em seguida, plotamos os valores de $\Delta l = l_k - l_{k-1}$ para o sistema linear e o cálculo descrito nesta seção para o sistema não-linear. Pode ser observado na figura 4 que $\tilde{\Delta l}$ (valor estimado) se encontra bastante próximo às distâncias realmente percorridas pelo robô (Δl). A média percentual do erro possui um valor próximo de zero (0,058%). O desvio-padrão do erro foi de 0,274%.

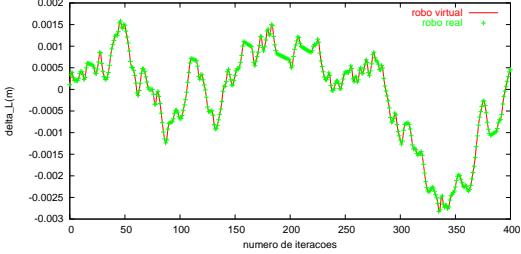


Figura 5: $\tilde{\Delta l} \times \Delta l$

4 Estimação de Parâmetros

Para estimar os parâmetros do modelo (9) foi utilizado o método dos mínimos quadrados recursivos (Aström e Wittenmark, 1997), um método baseado na minimização da soma dos quadrados dos erros. Em nossos experimentos foi utilizado um fator de esquecimento $\lambda = 0,995$.

Para excitar o sistema foram utilizados sinais pseudo-aleatórios que podiam assumir um dos três valores 1, 0 e -1 (figura 7), já que devem ser utilizados sinais ricos em freqüência e persistentemente excitantes como entradas para a planta. As saídas da planta (x , y e θ) não foram utilizadas diretamente pelo estimador. Em seu lugar, como já foi explicado na seção 3, foram utilizados $\tilde{\Delta l}$ e $\tilde{\Delta \theta}$.

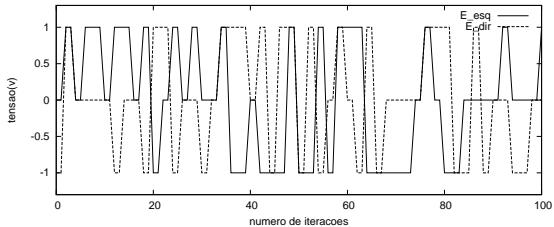


Figura 6: Exemplo dos sinais de excitação (e_d e e_e) do sistema

Como o sistema possui um excesso de parâmetros, várias combinações de valores podem descrevê-lo bem. Todas as diversas combinações de parâmetros encontrados pelo estimador se mostraram adequadas durante a simulação discreta. Um exemplo do conjunto de valores estimados é o

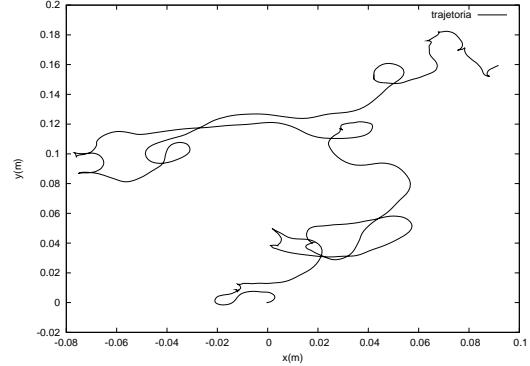


Figura 7: Exemplo da trajetória de saída do sistema

seguinte:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = -1.105 & \alpha_2 = -0.436 & \alpha_3 = 0.541 \\ \beta_1 = 4.38 \times 10^{-5} & \beta_2 = 8.94 \times 10^{-5} & \beta_3 = 4.58 \times 10^{-5} \\ \gamma_1 = 4.35 \times 10^{-5} & \gamma_2 = 8.92 \times 10^{-5} & \gamma_3 = 4.58 \times 10^{-5} \\ \delta_1 = 0.027 & \delta_2 = 0.045 & \delta_3 = 0.018 \\ \varepsilon_1 = -0.026 & \varepsilon_2 = -0.044 & \varepsilon_3 = -0.018 \end{array}$$

A figura 8 mostra um exemplo da variação de alguns dos parâmetros estimados.

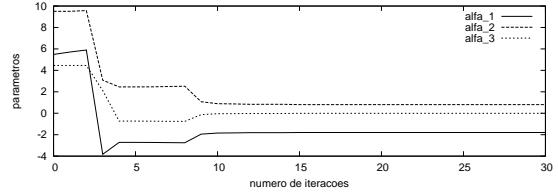


Figura 8: Variação de alguns parâmetros

5 Resultados Simulados

Os resultados deste trabalho foram obtidos utilizando-se um simulador dinâmico do sistema descrito na seção 2 (Yamamoto, Pedrosa, Medeiros e Alsina, 2003). Este simulador recebe como entrada as tensões e_d e e_e e nos disponibiliza a configuração do robô (x , y e θ), a cada período de amostragem ($T = 33,33ms$). Ele representa de forma bastante realística o comportamento do sistema, incluindo ruídos de quantização modelagem de colisões. Um simulador discreto (utilizando o modelo da equação 9) também foi implementado, pois como os parâmetros estimados não necessariamente tendem para os valores esperados, devemos realizar simulações e comparações para validar nossa abordagem.

Nas figuras 9 estão mostradas a simulação do sistema discreto e a simulação contínua do sistema.

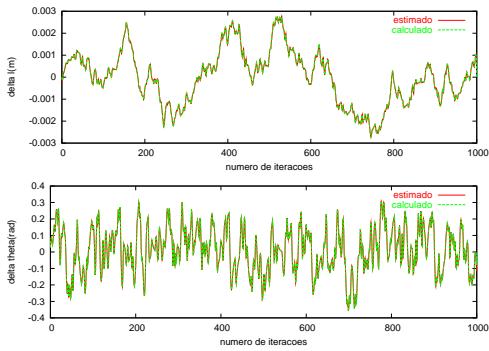


Figura 9: Comparação entre simulação discreta com parâmetros estimados e simulação contínua

6 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo dinâmico discreto para um micro-robô móvel dotado de rodas. A estrutura do modelo foi escolhida baseada nas características físicas do robô. Uma metodologia muito simples foi utilizada na estimativa de parâmetros, fornecendo, apesar disso, resultados adequados. Frisando-se que vários melhoramentos podem ser adicionados ao estimador propriamente dito (Sun, Xi, Tan e Wan, 2002).

Em nosso laboratório foi desenvolvido também um controlador dinâmico para o robô móvel descrito na seção (2) utilizando o modelo linear equivalente apresentado neste artigo. Este trabalho (Vieira, Medeiros e Alsina, 2003) apresenta resultados bastante bons no controle de posição e de trajetória do micro-robô.

Deve ser observado que a partir do modelo linear equivalente discreto (equação 9) pode-se obter a representação em espaço de estados do modelo contínuo não-linear (3). Para isso deve-se recorrer aos seguintes passos: estima-se os parâmetros da equação (9), transforma-se diretamente as equações de diferenças em funções de transferência ($G(z)$), realiza-se, então, a transformação da matriz de funções de transferência discretas para o espaço de estados discreto e, finalmente, do espaço discreto para o espaço de estados contínuo, obtendo o modelo da equação (4). A partir daí torna-se trivial a obtenção do modelo não-linear (equação 3).

Na próxima etapa deste trabalho serão realizados testes em um sistema real, utilizando a plataforma descrita na seção 2. Um outro trabalho a ser desenvolvido será a utilização deste estimador (com seus melhoramentos) em um controlador adaptativo em tempo real.

Referências

- Aström, K. J. e Wittenmark, B. (1997). *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*, Prentice Hall.
- Craig, J. J. (1986). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison-Wesley.
- Economou, J. T., Tsourdos, A., e White, B. A. (2002). *Takagi-Sugeno model synthesis of a quasi-linear parameter varying mobile robot*, Proceedings of the 2002 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Leusanne, Switzerland.
- Efe, M. O., Kaynak, O e Rudas, I. J. (1999). *A novel computationally intelligent architecture for identification and control of nonlinear systems*, Proceedings of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan.
- Pereira, G. A. S., Campos, M. F. M. e Aguirre, L. A. (2000). *Modelo dinâmico para predição da posição e orientação de micro-robôs móveis observados por visão computacional*, Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automação, Florianópolis, SC.
- Pereira, G. A. S. (2000). *Identificação e controle de micro-robôs móveis*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Poignet, Ph. e Gautier, M. (2000). *Comparison of weighted least squares and extended kalman filtering methods for dynamic identification of robots*, Proceedings of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, São Francisco, CA.
- Sun, Y., Xi, N., Tan, J. e Wang, Y. (2002). *Interactive model identification for nonholonomic cart pushed by a mobile manipulator*, Proceedings of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington, DC.
- Vieira, F. C., Alsina, P. J. e Medeiros, A. A. D. (2001). *Micro-robot soccer team - mechanical and hardware implementation*, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasil, pp. 534-540.
- Vieira, F. C., Medeiros, A. A. D. e Alsina, P. J.. (2003). *Dynamic stabilization of a two wheeled differentially driven nonholonomic mobile robot*, submetido ao XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, SP.
- Yamamoto, M. M., Pedrosa, D., Medeiros, A. e Alsina, P. (2003). *Simulador dinâmico para futebol de robôs*, submetido ao XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, SP.