

SERVOCONTROLE PREDITIVO DE ROBÔS GUIADOS POR SENSORES

A. Bauchspiess

GRACO - Grupo de Automação e Controle

UnB - Depto. de Engenharia Elétrica - 70910-900 - Brasília / DF - BRASIL

e-mail: bauchspiess@ene.unb.br

Resumo: Este artigo apresenta um algoritmo para a otimização do rastreamento de trajetórias para manipuladores robóticos guiados por sensores e apresenta resultados experimentais da aplicação à um manipulador hidráulico guiado por câmera CCD. O critério de otimização é baseado em um *modelo gerador de trajetórias*, levando a um controlador FMP (Following Model Predictive Controller), que permite p.ex. obter erro de rastreamento nulo para trajetórias do tipo *spline*. Outros tipos de trajetórias são aproximadas por segmentos *spline* que o robô pode de fato seguir.

Palavras chave: Controle Preditivo, Robótica, Sensores, Rastreamento Ótimo de Trajetórias.

Abstract: This paper presents an algorithm for tracking optimization of robotic manipulators guided with sensors and shows experimental results of the implementation on a CCD-camera guided hydraulic robot. The optimization criteria is based on a *trajectory generator model*, resulting in a Following Model Predictive (FMP) controller design, which gives zero tracking error for *spline* trajectories. Other trajectories are approximated with *spline* segments that the robot can indeed follow.

Key words: Predictive Control, Robotics, Sensors, Tracking Optimization.

1. INTRODUÇÃO

A área de automação industrial está sendo repensada em função do grande desenvolvimento experimentando pelas técnicas digitais. Um aparato matemático adequado aliado a recursos digitais extremamente poderosos está permitindo p.ex. controlar manipuladores robóticos acionados hidráulicamente com a precisão exigida em processos de manufatura. Estes, que por muito tempo eram considerados “muito difíceis” de serem controlados devido ao seu caráter extremamente não linear, passaram novamente a ser alvo de pesquisas. A grande densidade de potência do acionamento hidráulico permite uma relação muito mais vantajosa entre peso próprio e carga útil (tipicamente 1:5 enquanto robôs acionados eletricamente apresentam uma relação de aprox. 1:100 [1]).

Técnicas de controle não linear [2], [3], [4] permitem o desacoplamento e a linearização das juntas de manipuladores robóticos. Desta forma cada junta pode ser considerada como um sistema linear SISO. Partindo-se deste modelo, o problema de rastreamento guiado por sensores pode ser tratado linearmente. Em particular a formulação como problema de controle ótimo com um critério apropriado de otimização permite inclusive uma solução analítica para o caso discreto. Este novo caminho dispensa a típica solução recursiva do controlador de Riccati. O critério de otimização aqui adotado é baseado em um *modelo gerador de trajetórias*, levando a um controlador denominado FMP (Following Model Predictive Controller) [5].

Manipuladores robóticos equipados com sensores permitem automatizar aplicações industriais de uma forma “inteligente”. Este sendo o objeto de intensas pesquisas em Inteligência Artificial (IA): construir máquinas que considerem de maneira adequada (inteligente) informações captadas do ambiente de produção em que o robô está inserido. É pressuposto que com o auxílio de sensores a trajetória de trabalho do robô é obtida dentro de um certo campo de visão, que é aqui utilizado como o horizonte de minimização do erro de trajetória.

O servocontrolador proposto foi implementado em um manipulador hidráulico guiado por uma câmera CCD, onde foi mostrado que a metodologia FMP permitiu praticamente eliminar o erro de rastreamento dinâmico.

2. RASTREAMENTO DINÂMICO

De acordo com as características do rastreamento de sistemas dinâmicos é usual a seguinte classificação de problemas: [6]:

- O Problema de Rastreamento (“tracking”):
A Trajetória de referência é uma determinada função (arbitrária) do tempo para $0 < t < T$.
- O Problema Servo:
O sistema deve ser controlado de tal forma que a variável controlada siga um sinal de referência, do qual só é conhecido o fato que pertence a uma certa classe de sinais, como p. ex. seqüências de degraus ou polinômios até uma certa ordem.
- O Problema do Seguidor de Modelo:

A saída do sistema servocontrolado deve seguir a saída de um *modelo gerador de trajetória*.

Para manipuladores robóticos guiados por sensores o problema a ser resolvido é o do rastreamento, já que não se pode, a priori, limitar o tipo de trajetória captada pelo sensor. Para o problema do seguidor de modelo é possível obter-se o *rastreamento ideal*, i.é. erro de rastreamento nulo em todos os instantes de tempo [7]. Apesar de rastreamento ideal não ser possível para manipuladores guiados por sensores, sua idéia básica será aqui aproveitada: *minimizar o erro entre a variáveis de estado do sistema servocontrolado e as variáveis de estado de um modelo gerador de trajetória*.

Um *modelo gerador de trajetórias* adequado a manipuladores robóticos é uma cadeia de integradores, que geram os tão utilizados polinômios *spline* [7]. É interessante observar que, se a trajetória apresentada à planta servocontrolada como aqui desenvolvido, for de fato um *spline*, então o erro de trajetória teórico será nulo.

3. O SERVOCONTROLADOR PREDITIVO BASEADO EM MODELO GERADOR DE TRAJETÓRIAS (CONTROLADOR FMP)

Seja o sistema escalar discreto controlável e observável descrito por:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}u_s(k); & \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \\ y(k) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (1)$$

onde $\mathbf{x}(k)$ é o vetor de estados $n \times 1$ no instante $t=kT$ (T - período de amostragem), $u_s(k)$ é a entrada e $y(k)$ é a saída do sistema.

O modelo (1) será aqui utilizado para descrever cada junta de manipuladores robóticos com um controle de juntas subjacente que garanta a linearização e o desacoplamento do sistema não linear multivariáveis. A cadeia de integradores que é obtida p.ex. pelo controlador não linear baseado no sistema inverso [2], [3] ou pelo controlador da mais alta derivada [4] é transformada em um sistema P-T_n através de um controlador linear de variáveis de estado [1]. Finalmente o modelo discreto (1) é obtido por uma Transformação Invariante ao Degrau [8]. O modelo (1) será aqui denominado de *modelo preditor*, por permitir a predição do comportamento dinâmico do robô para uma certa trajetória de referência.

3.1 Formulação do Problema:

Seja o sistema de ordem n descrito por (1). A trajetória de referência $w(k)$, $\dot{w}(k)$, ..., $w^{(n-1)}(k)$ é conhecida num horizonte futuro que se estende de $t=(k+1)T$, até $t=(k+m)T$. O atual estado do sistema é $\mathbf{x}(k)$. A posição $y(k)$, velocidade $\dot{y}(k)$, acelera-

ção $\ddot{y}(k)$, e derivadas de ordem mais alta da variável controlada correspondem aos estados do sistema para o particular $\mathbf{e}^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$. $\hat{y}(k+v)$, $\hat{\dot{y}}(k+v)$ e $\hat{\ddot{y}}(k+v)$ são estados correspondentes preditos por (1) para o instante futuro $k+v$. O problema consiste em calcular a seqüência de controle $u_s(k)$, $u_s(k+1)$, ..., $u_s(k+m-1)$, de tal forma a minimizar o seguinte **Crítério de Otimização**:

$$J = \sum_{i=0}^{n-1} \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \mathbf{Q}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i + \beta^T \mathbf{R} \beta. \quad (2)$$

Onde as matrizes de ponderação \mathbf{Q}_i e \mathbf{R} são simétricas positivas definidas. No caso mais geral estas matrizes podem ser dependentes do tempo. Os termos de erro $\boldsymbol{\varepsilon}_i$, são assim definidos:

$$\text{Erro de Posição: } \boldsymbol{\varepsilon}_0(k) := \mathbf{y}(k) - \mathbf{w}(k), \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(k) := \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1) \\ \hat{y}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+m) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}(k) := \begin{bmatrix} w(k+1) \\ w(k+2) \\ \vdots \\ w(k+m) \end{bmatrix},$$

$$\text{Erro de Velocidade: } \boldsymbol{\varepsilon}_1(k) := \dot{\mathbf{y}}(k) - \dot{\mathbf{w}}(k), \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{y}}(k) := \begin{bmatrix} \hat{\dot{y}}(k+1) \\ \hat{\dot{y}}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{\dot{y}}(k+m) \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{w}}(k) := \begin{bmatrix} \dot{w}(k+1) \\ \dot{w}(k+2) \\ \vdots \\ \dot{w}(k+m) \end{bmatrix}, \dots$$

Erro na derivada n-1:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n-1}(k) := \mathbf{y}^{(n-1)}(k) - \mathbf{w}^{(n-1)}(k), \quad (5)$$

$$\mathbf{y}^{(n-1)}(k) := \begin{bmatrix} \hat{y}^{(n-1)}(k+1) \\ \hat{y}^{(n-1)}(k+2) \\ \vdots \\ \hat{y}^{(n-1)}(k+m) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}^{(n-1)}(k) := \begin{bmatrix} w^{(n-1)}(k+1) \\ w^{(n-1)}(k+2) \\ \vdots \\ w^{(n-1)}(k+m) \end{bmatrix}.$$

O termo $\beta(k)$, a amplitude do sinal de entrada em relação ao sinal de referência é definido por:

$$\beta(k) := \mathbf{u}_s(k) - \mathbf{w}(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_s(k) = \begin{bmatrix} u_s(k) \\ u_s(k+1) \\ \vdots \\ u_s(k+m-1) \end{bmatrix}.$$

A seqüência de controle procurada é portanto descrita pelo vetor $\mathbf{u}_s(k)$. Cada termo do critério

abrange uma soma ponderada de erros quadráticos sobre o horizonte de m amostras. Os parâmetros \mathbf{Q}_i e \mathbf{R} permitem projetar a dinâmica do sistema em malha fechada.

O termo $\beta(k)$, a amplitude do sinal de controle em torno do atual ponto de trabalho, considera a limitação da energia. Assume-se que o ganho do sistema a ser servocontrolado seja unitário (estacionariamente $u_s(k)=w(k)$). Na literatura [9] a limitação do sinal do atuador também é feita utilizando-se $\beta'(k):=u_s(k)$, para plantas com caráter integrativo e para os outros casos por meio de $\beta''(k):=u_s(k+1)-u_s(k)$.

O critério de otimização (2) não minimiza somente o desvio médio entre a variável controlada $y(k)$ e o sinal de referência $w(k)$ considerando a limitação de energia, como usual na maioria dos algoritmos preditivos [9], [10], porém também considera termos adicionais (variáveis de estado) que permitem um dimensionamento mais flexível do servocontrolador. Estes graus de liberdade adicionais é que permitem projetar um servocontrolador que segue um *modelo gerador de trajetórias*.

3.2 Cálculo da seqüência ótima de controle

Partindo-se da descrição canônica controlável do sistema no domínio do espaço de estados (1), com

$$\begin{aligned} y(k) &= [1 \ 0 \ \dots \ 0] \mathbf{x}(k) = \mathbf{c}_0^T \mathbf{x}(k) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k), \\ \dot{y}(k) &= [0 \ 1 \ \dots \ 0] \mathbf{x}(k) = \mathbf{c}_1^T \mathbf{x}(k), \\ &\dots \\ y^{(n-1)}(k) &= [0 \ 0 \ \dots \ 1] \mathbf{x}(k) = \mathbf{c}_{n-1}^T \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (7)$$

é possível prever as “seqüências de saída” do sistema: $\mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}, \dots, \mathbf{y}^{(n-1)}$ abrangendo o intervalo de $k+1$ até $k+m$. As seguintes relações podem ser dadas:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k) &= \mathbf{G}_0 \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_0 \mathbf{u}_s(k), \\ \dot{\mathbf{y}}(k) &= \mathbf{G}_1 \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_1 \mathbf{u}_s(k), \dots \\ \mathbf{y}^{(n-1)}(k) &= \mathbf{G}_{n-1} \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_{n-1} \mathbf{u}_s(k), \end{aligned}$$

onde as matrizes $\mathbf{G}_\mu, \mathbf{H}_\mu$, com $\mu = 0, 1, \dots, n-1$, e com \mathbf{c}_μ^T como indicado em (7) são dadas por

$$\mathbf{G}_\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A} \\ \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A}^m \end{bmatrix}, \mathbf{H}_\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{b} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A} \mathbf{b} & \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{b} & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A}^{m-1} \mathbf{b} & \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{A}^{m-2} \mathbf{b} & \dots & \mathbf{c}_\mu^T \mathbf{b} \end{bmatrix}.$$

Utilizando-se as eqs. (3) até (6) é então possível expressar-se o critério J em função de $\mathbf{w}(k), \dot{\mathbf{w}}(k), \dots, \mathbf{w}^{(n-1)}(k), \mathbf{x}(k)$ e $\mathbf{u}_s(k)$:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=0}^{n-1} \left[\mathbf{G}_i \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_i \mathbf{u}_s(k) - \mathbf{w}^{(i)}(k) \right]^T \\ &\quad \cdot \mathbf{Q}_i \left[\mathbf{G}_i \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_i \mathbf{u}_s(k) - \mathbf{w}^{(i)}(k) \right] \\ &\quad + \left[\mathbf{u}_s(k) - \mathbf{w}(k) \right]^T \mathbf{R} \left[\mathbf{u}_s(k) - \mathbf{w}(k) \right]. \end{aligned}$$

Nesta igualdade aparecem, com exceção da seqüência de controle procurada, somente variáveis conhecidas. Pode-se assim calcular a seqüência $\mathbf{u}_s(k)$ que minimiza o critério (2). Igualando-se o vetor das derivadas parciais $\partial J / \partial \mathbf{u}_s(k)$ a zero obtém-se a seguinte equação vetorial:

$$\begin{aligned} &\left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{H}_i + \mathbf{R} \right] \mathbf{u}_s(k) + \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{G}_i \right] \mathbf{x}(k) \\ &- \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{w}^{(i)}(k) + \mathbf{R} \mathbf{w}(k) \right] = \mathbf{0}. \end{aligned}$$

De onde se obtém a seqüência de controle procurada:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s(k) &= \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{H}_i + \mathbf{R} \right]^{-1} \\ &\cdot \left\{ \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{w}^{(i)}(k) + \mathbf{R} \mathbf{w}(k) \right] - \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{G}_i \right] \mathbf{x}(k) \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Com exceção dos casos não admissíveis $\mathbf{Q}_i = \mathbf{R} = \mathbf{0}$, existe a matriz inversa. Com \mathbf{Q}_i também $\mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{H}_i$ é positiva definida, $i = 0, 1, \dots, n-1$, e assim, com \mathbf{R} sendo positiva definida a soma a ser invertida é positiva definida. Uma matriz positiva definida é também regular. Derivando-se a eq. (2) mais uma vez em relação a $\mathbf{u}_s(k)$, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \mathbf{u}_s^2(k)} = 2 \left[\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{H}_i + \mathbf{R} \right]. \quad (9)$$

Como esta matriz é positiva definida, $J(\mathbf{u}_s(k))$ possui um único mínimo (absoluto), dado pela eq. 8.

Para a aplicação do servocontrolador em robótica será considerado que a dinâmica de cada junta (eq. (1)) é de 3ª ordem (o que contempla a dinâmica do acionamento com uma e a do mecanismo com duas variáveis de estado).

A seqüência de controle (8) pode ser interpretada como uma pré-filtragem linear, periódica (com período m) variante no tempo do vetor de referência

$w(k)$, $\dot{w}(k)$ e $\ddot{w}(k)$ com uma realimentação de estados linear também *variante no tempo*. Isto pode ser visto mais claramente com a seguinte reformulação da eq. (8) para um sistema de 3ª ordem:

$$\mathbf{u}_s(k) = \mathbf{M}_w \mathbf{w}(k) + \mathbf{M}_{\dot{w}} \dot{\mathbf{w}}(k) + \mathbf{M}_{\ddot{w}} \ddot{\mathbf{w}}(k) - \mathbf{M}_x \mathbf{x}(k), \quad (10)$$

onde $\mathbf{M}_w, \mathbf{M}_{\dot{w}}$ und $\mathbf{M}_{\ddot{w}}$ são matrizes de ordem $m \times m$, e \mathbf{M}_x é $m \times 3$. Escrevendo-se cada linha desta equação vetorial obtém-se:

$$\begin{bmatrix} u_s(k) \\ u_s(k+1) \\ \vdots \\ u_s(k+v) \\ \vdots \\ u_s(k+m-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{w1}^T \\ \mathbf{m}_{w2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{wv}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{wm}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(k+1) \\ w(k+2) \\ \vdots \\ w(k+v) \\ \vdots \\ w(k+m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{\dot{w}1}^T \\ \mathbf{m}_{\dot{w}2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{\dot{w}v}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{\dot{w}m}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}(k+1) \\ \dot{w}(k+2) \\ \vdots \\ \dot{w}(k+v) \\ \vdots \\ \dot{w}(k+m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{\ddot{w}1}^T \\ \mathbf{m}_{\ddot{w}2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{\ddot{w}v}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{\ddot{w}m}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w}(k+1) \\ \ddot{w}(k+2) \\ \vdots \\ \ddot{w}(k+v) \\ \vdots \\ \ddot{w}(k+m) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{x1}^T \\ \mathbf{m}_{x2}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{xv}^T \\ \vdots \\ \mathbf{m}_{xm}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_3(k) \end{bmatrix}.$$

Nesta equação $\mathbf{m}_{\lambda i}^T$ representa a i -ésima linha da matriz \mathbf{M}_λ , $\lambda = w, \dot{w}, \ddot{w}, x$. As variáveis de estado do sistema foram aqui escritas explicitamente como $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$ e $x_3 = \ddot{y}$.

Assim é aparente, que o sinal de controle $u_s(k+v)$, i.e. o sinal no instante de tempo v dentro do horizonte de minimização $k \dots k+m-1$, é dependente apenas do estado no início do horizonte de minimização $\mathbf{x}(k)$ e de todos os valores da trajetória de referência $w(k), \dot{w}(k)$ e $\ddot{w}(k)$ neste horizonte de minimização ($\mathbf{w}(k), \dot{\mathbf{w}}(k)$ e $\ddot{\mathbf{w}}(k)$).

O cálculo da seqüência de controle através da eq. (10) não é conveniente. A superposição dos horizontes de minimização, o chamado horizonte flutuante, reduz o erro nos pontos de transição entre segmentos e tem a vantagem, importante em termos de controle, de que perturbações são reconhecidas mais cedo e podem assim ser compensadas já na próxima minimização.

A lei de controle para uma nova minimização a cada passo pode ser obtida utilizando-se o primeiro valor da minimização sobre m passos:

$$u_s(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \mathbf{u}_s(k). \quad (11)$$

Este sinal de controle corresponde à utilização da primeira linha da igualdade vetorial (10):

$$u_s(k) = \mathbf{m}_{w1}^T \mathbf{w}(k) + \mathbf{m}_{\dot{w}1}^T \dot{\mathbf{w}}(k) + \mathbf{m}_{\ddot{w}1}^T \ddot{\mathbf{w}}(k) - \mathbf{m}_{x1}^T \mathbf{x}(k)$$

ou mais explicitamente:

$$u_s(k) = \sum_{v=1}^m m_{w1}(v) w(k+v) + \sum_{v=1}^m m_{\dot{w}1}(v) \dot{w}(k+v) + \sum_{v=1}^m m_{\ddot{w}1}(v) \ddot{w}(k+v) - \sum_{v=1}^3 m_{x1}(v) x_v(k).$$

3.3 Velocidade e Aceleração de Referência

Geralmente ao guiar-se manipuladores com sensores onde somente a referência de posição está disponível (é capturada), a velocidade e a aceleração de referência, que são aqui necessárias, precisam ser calculadas a partir de amostras da referência de posição. Uma possibilidade é a utilização de coeficientes de polinômios regressores [5]. Uma outra possibilidade é a utilização da aproximação numérica. Uma aproximação conveniente para a velocidade e a aceleração de referência é dada por [11],

$$\dot{w}(k) = \frac{w(k-2) - 8w(k-1) + 8w(k) - w(k+2)}{12T} e$$

$$\ddot{w}(k) = \frac{-w(k-2) + 16w(k-1) - 30w(k) + 16w(k+1) - w(k+2)}{12T^2},$$

com um erro residual de $O\{w^5\}$ e $O\{w^6\}$, respectivamente. Estas equações garantem uma boa aproximação quando $w^{(5)}$, $w^{(6)}$, ... são pequenas. Erros maiores podem ocorrer somente em pontos em que a trajetória apresenta descontinuidades.

A diferenciação numérica pode ser incorporada ao filtro de entrada do servocontrolador, de onde resulta a seguinte forma compacta para a lei de controle:

$$u_s(k) = \sum_{v=-1}^{m+2} a_v w(k+v) - \sum_{v=1}^3 m_{x1}(v) x_v(k). \quad (12)$$

Um diagrama de blocos do *Servocontrolador FMP* (Following Model Predictive Controller) pode ser visto na Figura 1.

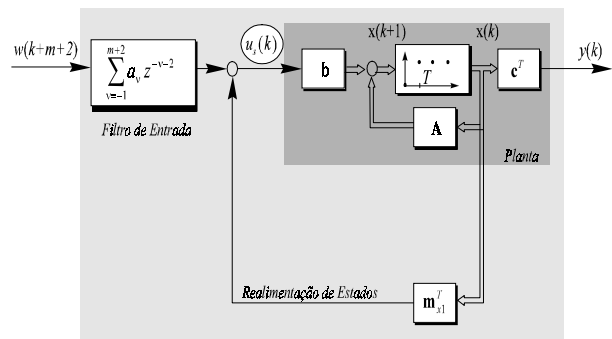


Figura 1 Servocontrolador preditivo FMP com a incorporação da diferenciação numérica.

3.4 Simulação para uma trajetória típica

A simulação do servocontrolador FMP para uma trajetória típica é mostrada na figura 2. O sinal de referência w e a saída da planta y praticamente se confundem na fig. 2-a. O pequeno erro residual pode ser visto na fig. 2-d. Como esperado, em pontos de descontinuidade da referência ocorre um erro um pouco maior.

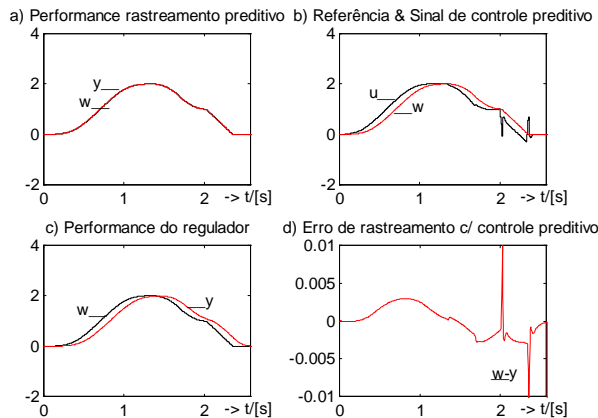


Figura 2 Simulação do servocontrolador preditivo FMP.

A utilização apenas do controlador não linear de juntas para o manipulador robótico (com uma dinâmica típica) gera um nítido erro de rastreamento, fig. 2-c. A fig. 2-b mostra que o servocontrolador FMP produz na realidade um sinal que “antevê” a dinâmica da planta, possibilitando assim a minimização do erro de trajetória. Esta significativa redução do erro de trajetória só é possível porque informações “futuras” da trajetória (via sensor) são utilizadas pelo controlador FMP. Controladores convencionais (e.g. PID) só utilizam informações presentes e passadas.

3.5 Comparação do Controlador FMP com o UPC

Para permitir uma avaliação mais objetiva o servocontrolador FMP será aqui comparado com o “Unified Predictive Controller”-UPC, que representa já uma generalização de diversos algoritmos preditivos [9].

Para o desenvolvimento do UPC é utilizado um critério que prevê filtros na forma de polinômios $P(q^{-1})$ para o sinal $y(t)$. A necessidade deste filtro no projeto de um controlador preditivo pode facilmente ser verificada. Sem estes o projeto do controlador forneceria como lei de controle a inversa da função de transferência da planta. E esta é instável para sistemas discretos a partir de terceira ordem e as frequências de amostragem usuais, devido aos zeros fora do círculo unitário da função de transferência discreta.

A utilização das derivadas de $w(t)$ e $y(t)$ no algoritmo FMP pode também ser vista como caso particular de filtros polinomiais diferenciadores. Uma filtragem de $w(t)$ não é porém prevista em [9]. Segundo [9] o filtro polinomial $P(q^{-1})$ para $y(t)$ é introduzido com o objetivo de estabilizar a malha de realimentação. Na maioria dos exemplos lá abordados não é utilizado nenhum polinômio, ou quando, então um de primeira ordem. No presente artigo a utilização de w, \dot{w}, \dots e $w^{(n-1)}$ no critério (2), implica a inclusão de um *modelo gerador de trajetórias splines* de ordem n que deve ser seguido pelo sistema considerando amostras futuras da trajetória de referência.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a verificação experimental dos resultados teóricos foi utilizado um manipulador hidráulico [1], guiado por uma câmera de vídeo CCD [5], [12], como mostrado esquematicamente na fig. 3:

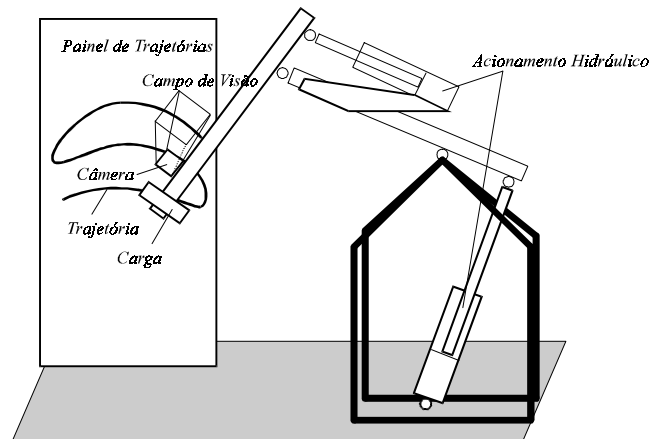


Figura 3 Manipulador hidráulico guiado por câmera CCD.

Para a implementação do controle não linear de juntas foi utilizado um processador de sinais DSP32C em um ‘host’ PC-486. O processamento de imagens, planejamento de trajetórias e servocontrole preditivo FMP foi implementado em um outro PC-486 com um DSP16A e um DSP32C.

4.1 Teste de Forma do Círculo

Para a caracterização da precisão de posicionamento e da repetibilidade em máquinas ferramenta e manipuladores industriais utiliza-se frequentemente o Teste de Forma do Círculo [13]. Com este teste os eixos são movimentados de tal forma que acoplamentos e efeitos oriundos de atrito, em particular para pequenas velocidades, podem ser ressaltados.

A figura 4 apresenta as medidas para o Teste de Forma do Círculo para o robô hidráulico guiado por

câmera CCD. A velocidade de referência aqui solicitada foi de $v_{ref} = 40 \text{ mm/s}$.

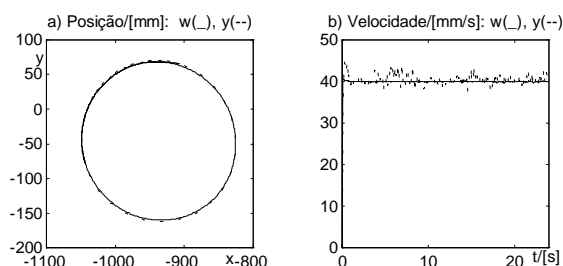


Figura 4 Manipulador guiado por sensor ;Teste de Forma do Círculo, $v_{ref} = 40 \text{ mm/s}$, $T=10\text{ms}$.

Os respectivos ângulos e sinais de erro podem ser vistos nas figuras 5-a a 5-d.

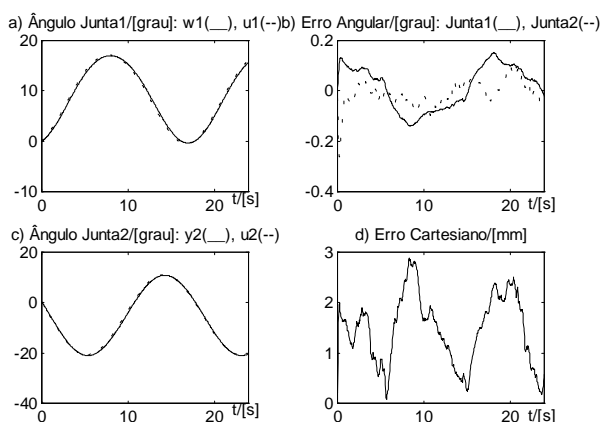


Figura 5 Manipulador guiado por sensor; Teste de Forma do Círculo. Junta 1 —, Junta 2 --.

5. CONCLUSÃO

O servocontrolador FMP representa, pela inclusão de um modelo gerador de trajetórias e da consideração dos instantes futuros da trajetória de referência, uma extensão dos algoritmos preditivos convencionais. Para robôs guiados por sensores, onde as juntas robóticas com controle não linear subjacente podem ser consideradas como sistemas de 3ª ordem, foi utilizado um modelo gerador de trajetórias *spline*. Se a trajetória capturada pelo sensor for de fato do tipo *spline* teoricamente o erro de rastreamento será nulo, pois este é o tipo de trajetória que robôs controlados digitalmente podem seguir idealmente. Para trajetórias genéricas, que devem ser consideradas em células de manufatura robotizadas, a abordagem apresentada representa uma minimização do erro de trajetória.

A implementação do servocontrolador proposto a um manipulador hidráulico guiado por uma câmera CCD, demonstrou a relevância prática do servocontrolador FMP. O erro de rastreamento

dinâmico, que costuma ser um fator limitante na qualidade dos processos de manufatura automatizados com robôs, foi drasticamente reduzido. O erro residual que se observou nas medidas em laboratório deve-se principalmente ao atrito observado nos cilindros hidráulicos. Este é um aspecto tecnológico deste tipo de acionamento que impõem medidas construtivas para a sua redução.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Erhard, N.: Sobre a construção de um manipulador hidráulico flexível e o seu controle utilizando métodos de linearização exata (em alemão). Tese de Doutorado, Universität Erlangen-Nürnberg, 1995
- [2] Freund, E.: Decoupling and Pole Assignment in nonlinear Systems, Electronic Letters 9, pp. 373-374, 1973
- [3] Isidori, A.: Nonlinear Control Systems, 2nd Edition, Springer Verlag, 1989
- [4] Sarytschewa, O.; Neumann, R.: Controle da mais alta derivada da variável controlada (em alemão). Messen Steuern Regeln (msr)-9 pp. 394-396, Berlin, 1986
- [5] Bauchspiess, A.: Guiagem preditiva por sensores de manipuladores robóticos (em alemão). Tese de Doutorado, Universität Erlangen-Nürnberg, 1995
- [6] Anderson, B.; Moore, J.: Optimal Control-Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall, Canberra, 1989
- [7] Wurmthaler, Ch.: Modelos de processos como base para conceitos modernos em controle (em alemão). Tese de Livre-Docência. Universität Erlangen-Nürnberg, 1994
- [8] Hippe, P.; Wurmthaler, Ch.: Controle no espaço de estados (em alemão), Springer-Verlag, Berlin, 1985
- [9] Soeterboek, R.: Predictive Control - A Unified Approach., Prentice Hall, London, 1992
- [10] Keyser, R.: Basic Principles of Model Predictive Control. European Control Conference, Grenoble, pp.1753-1758, 1991
- [11] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Manual de Matemática. (em alemão), 25a Edição, 1991
- [12] Lebender, J.: Implementação do rastreamento de bordas para um robô hidráulico com câmera CCD (em alemão). Projeto Final orientado pelo autor, Universität Erlangen-Nürnberg, 1994
- [13] Piechotka, U.; Grimm, W. M.; Berlin, F.; Becker, N.: Utilização de modelos de perturbação em controle (em alemão). Parte 1. at 11/94, pp.483-487, Parte 2. at 12/94, pp.525-532, 1994

7. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro na forma de uma bolsa de doutorado no exterior. À Universität Erlangen-Nürnberg pela utilização das instalações e em particular ao Prof. Dr.-Ing. W. Bär pela orientação.