

TEXTOS EM APLICAÇÕES CIENTÍFICAS COMPUTACIONAIS

Nº 1/91

ANAIIS

**XIV REUNIÃO REGIONAL DA SOCIEDADE
BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA
E COMPUTACIONAL**

I SEMANA DA COMPUTAÇÃO



Editado por:

*José M. Balthazar, Maria Lucia L. Wodewotzki
e Hilda C. de Oliveira*

Rio Claro

1991

CONTROLE DE ROBÔS INDUSTRIAIS:
TÉCNICAS TORQUE-COMPUTADO E TORQUE α -COMPUTADO

Marco Antonio Leite Brandão
Dr. Paulo Seleglim

Grupo Dinâmica de Sistemas
Departamento de Engenharia Mecânica
Escola de Engenharia de São Carlos - USP
13560 São Carlos, SP

RESUMO

Procura-se neste texto apresentar resultados disponíveis na literatura (Craig, 1986), (Paul, 1982), (Tournassis et al, 1988), (Lee, 1982), (Luh, 1983, 1985) sobre controle de robôs industriais.

Exemplifica-se através das técnicas:

- I - Controle Torque Computado
- II - Controle Torque α -Computado

Palavras-Chave; Controle de Robôs, Torque Computado, Torque α -Computado

INTRODUÇÃO

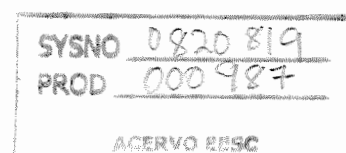
Nos atuais robôs consumidos em massa pelo parque industrial, essencialmente utilizaram-se técnicas de controle de posição. Nas aplicações em pintura, corte de chapas, etc., já exigem também um controle de velocidade e os robôs com controle de esforços/torques na garra começam a ter mais difusão.

Robôs industriais típicos possuem sensores que fornecem posição e velocidade das juntas.

As não-linearidades em especificações mais severas de projeto e seus efeitos na estabilidade e robustez são objetos de estudos e as técnicas de controle são mais sofisticadas.

O robô é um sistema mecânico multivariável, não-linear. Em sua evolução no volume de trabalho - sabe-se da mecânica - inércia, efeito da gravidade, binários de Coriolis e centrífugos, a estrutura do robô (links acoplados), etc., variam com a configuração e à medida que especificações de projeto como precisão, repetibilidade, estabilidade e flexibilidade tornam-se mais severas, a engenharia de controle, evidentemente, fica mais complexa.

Nos esquemas a seguir pode-se "visualizar" a complexidade exigida do controle, observando-se uma única junta, levando-se em conta os efeitos de acoplamento, Coriolis, gravidade, etc. (Luh [1], [2]).



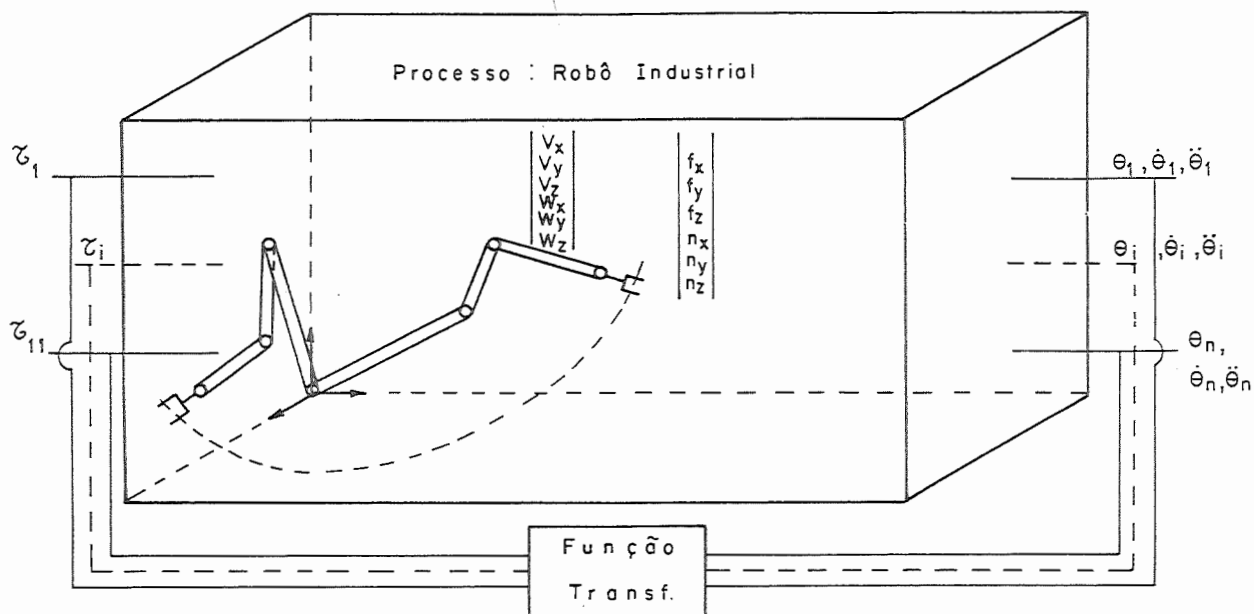


Figura 1.

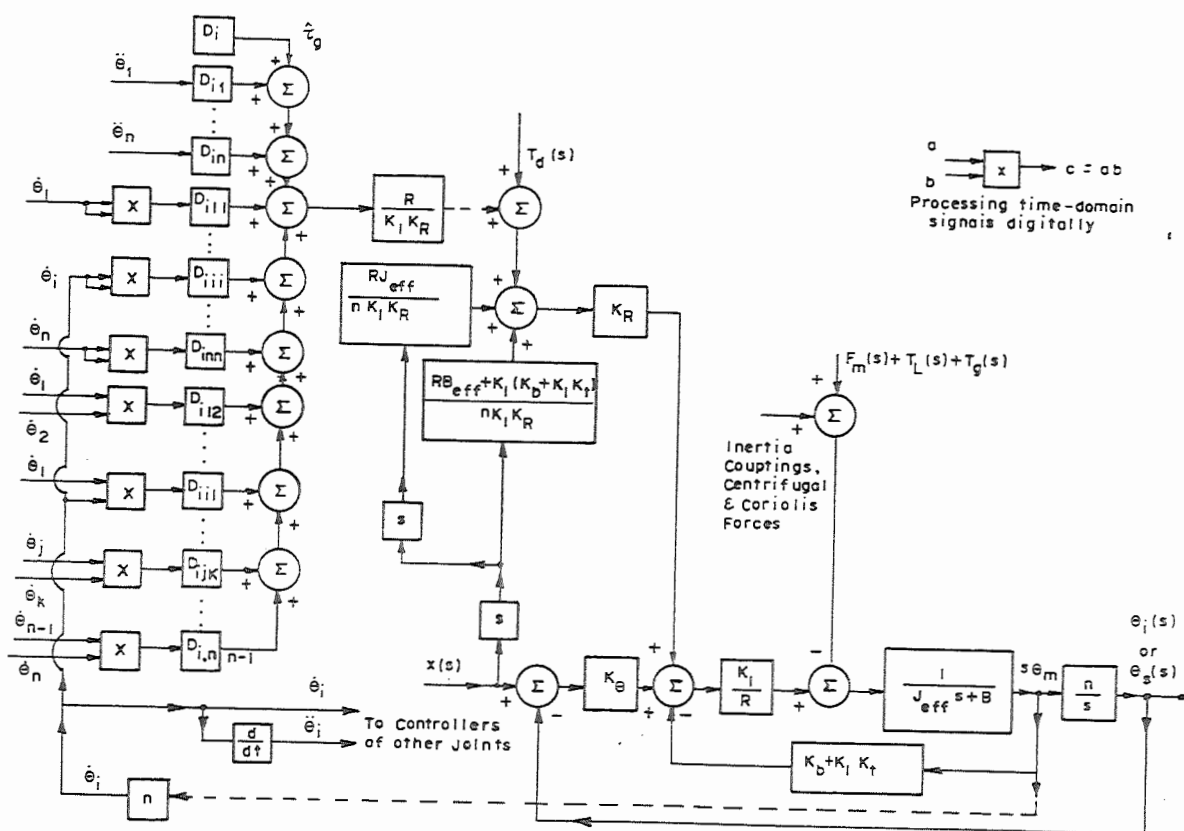


Figura 2. Note-se que o modelo do driver ainda é simplificado, senão teríamos ainda (Sweet et al [3]).

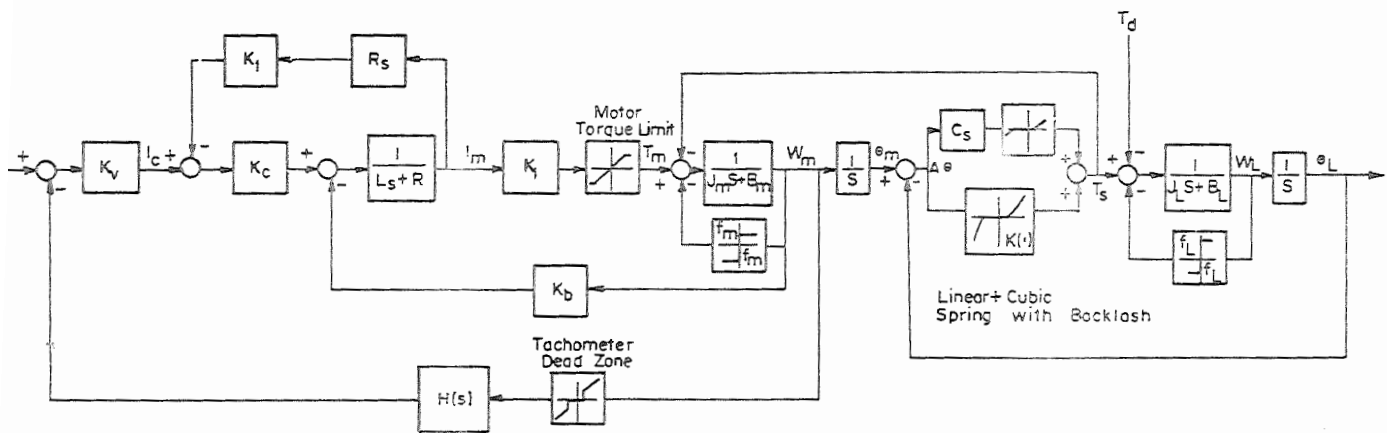


Figura 3. A complexidade do processo é bastante grande.

Outro problema adicional é que as variáveis controladas são as de juntas (θ_i) e a programação do usuário em coordenadas cartesianas de garra.

O Modelo Cinemático Inverso descreve numa situação de regime, as posições necessárias nas juntas para que a garra atinja situação especificada. Erros de regime, efeito de transitórios, esforços na mudança da posição das juntas, etc., são apreendidas pelo Modelo Dinâmico.

Os modelos matemáticos de cadeias articuladas são complexos e o respectivo cálculo, conseqüentemente, moroso. Por exemplo, a frequência de ressonância da generalidade dos robôs é da ordem de dezenas de hz. Na resolução das equações em tempo real, o cálculo atinge tempos inferiores a 20 ms, portanto com frequência superior a 50 hz (Ramos [4]).

A especificação do projeto de robô pode implicar em simplificações para redução de operações matemáticas.

O Jacobiano relaciona as velocidades nas juntas (θ_i) com as velocidades angular e linear na garra.

a) direto

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = [J(\theta)] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix}$$

b) inverso

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} = [J(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix}$$

$$p/n = 6$$

Um fato óbvio é que $\det [J(\theta)] = 0$. Estes pontos - singularidades - escapam ao controle pois exigiriam velocidade infinita nas juntas ($\theta_i \rightarrow \infty$) para determinada especificação de velocidade na garra.

PROCESSO: ROBÔ INDUSTRIAL

Ainda do Jacobiano obtém-se os esforços nos acionadores para que a garra exerça esforço/torque especificado.

$$\tau = [J(\theta)]^T F$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = [J(\theta)]^T \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

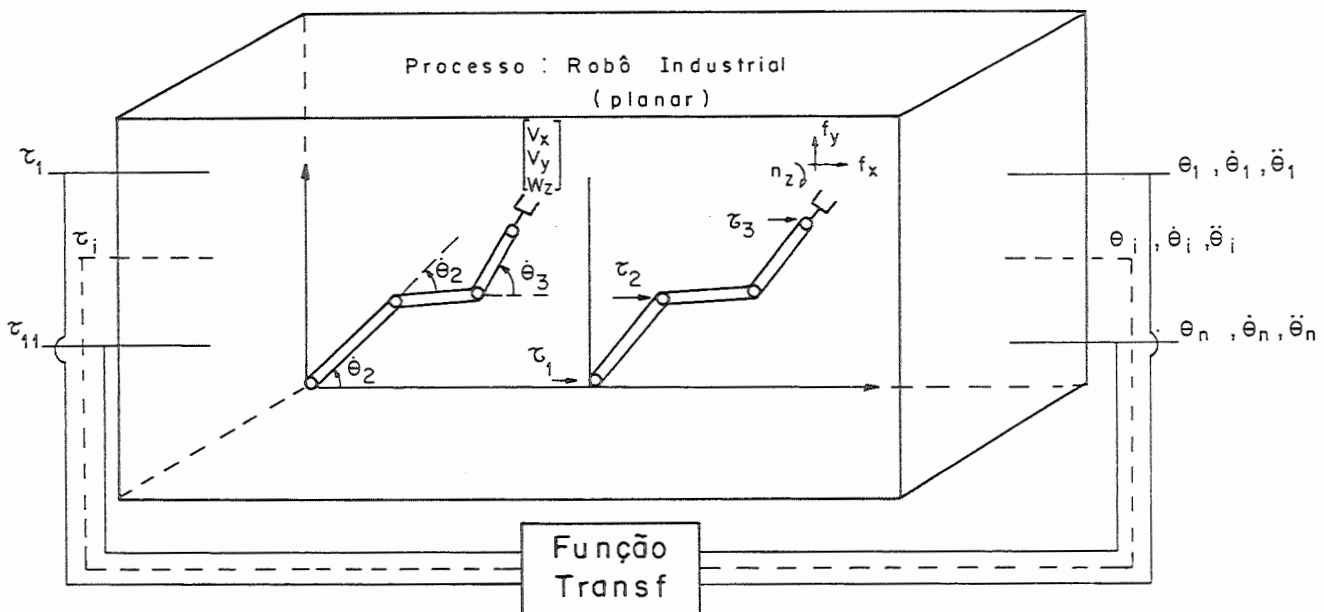


Figura 4.

Hollerbach [5] apresenta os seguintes dados:

Tabela 1. COMPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

MÉTODO	MULTIPLICAÇÕES	ADIÇÕES
Uicker/Kahn	$32 \frac{1}{2}n^2 + 86 \frac{5}{12}n^3 + 171 \frac{1}{2}n^2$ $+ 53 \frac{1}{2}n - 128$	$25n^4 + 66 \frac{1}{2}n^3 + 129 \frac{1}{2}n^2$ $+ 42 \frac{1}{2}n - 96$
Waters	$106 \frac{1}{2}n^2 + 620 \frac{1}{2}n - 512$	$82n^2 + 514n - 384$
Hollerbach (4x4)	$830n - 592$	$675n - 464$
Hollerbach (3x3)	$412n - 277$	$320n - 201$
Newton-Euler	$150n - 48$	$131n - 48$
Horn, Raibert	$2n^3 + n^2$	$n^3 + n^2 + 2n$

Comparação para $n = 6$

MÉTODO	MULTIPLICAÇÕES	ADIÇÕES
Uicker/Kahn	66.271	51.548
Waters	7.051	5.652
Hollerback (4x4)	4.388	3.586
Hollerback (3x3)	2.195	1.719
Newton-Euler	852	738
Horn, Raibert	468	264

Informa Lee [6] que numa simulação em Fortran do modelo Lagrangeano para se computar o movimento entre 2 pontos adjacentes requeria-se 8 segundos (Nota: o artigo é de 1982), portanto, inexecutável para uso em tempo real.

A deficiência no método de Newton-Euler advém do fato de se tratar de um algoritmo recursivo onde a "estrutura" do modelo dinâmico não permite "familiaridade" que é fundamental ao projeto de controle.

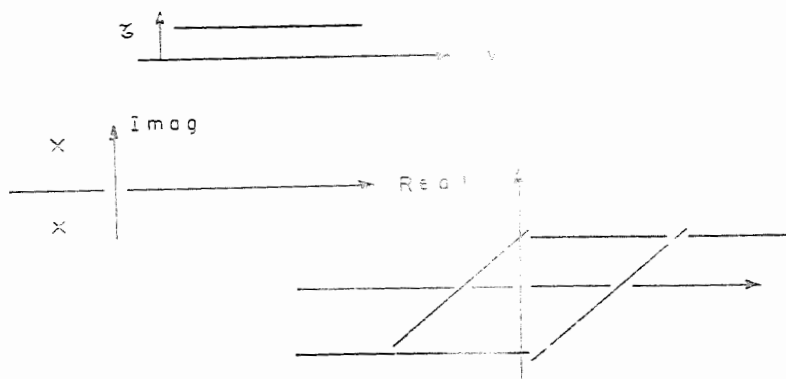
CONTROLE

Há diversos critérios e metodologias de controle de robôs em pesquisa, por exemplo: I) RMRC (Resolved Motion Rate Control); II) CMAC (Cerebellan Model Articulation Controller); III) NNIC (Near Time Minimum Control); IV) MRAC (Model Reference Adaptive Control); V) VSS (Variable Structure System); VI) as técnicas que comentamos neste texto (Controle Torque Computado e Controle Torque α -Computado); etc.

Alguns problemas básicos de controle são:

- 1) Parâmetros $J(\theta)$ que variam com configuração e carga
- 2) Atrito seco

- 3) Efeito de torção



- 4) Histerese

- 5) Limitação de corrente
- 6) Perturbações por torque de acoplamento

Algumas perspectivas são:

- a) minimização de 1 e 4 através do controle de torque com "Strain Gage"
- b) minimização de 3 através de estratégia de controle de sorte que os polos dominantes devam ser os de amortecimento
- c) estudo de técnicas de limitação, por exemplo, dessacoplamento,

Se o modelo é exato, $\hat{M} [\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e] = 0$, nota-se que:

1) $\hat{\theta}$ e θ entram no cálculo de controle o que torna o comportamento independente da configuração.

2) Com escolha adequada de K_v e K_p , diagonais, em MF as juntas ficarão desacopladas e de (3) a equação diferencial do erro é de segunda ordem e nossa escolha (K_v , K_p) permite fixar frequência natural e amortecimento.

3) Dado que o modelo não é real, tem-se que:

$$\ddot{\theta}_{ref} + K_v \dot{e} + K_p e = M^{-1}(\theta) \tau_p$$

e como $M(\)$ não é diagonal, as equações são acopladas e o comportamento de uma junta interfere nas outras.

Então:

$$\ddot{\theta} + K_v \dot{e} + K_p e = M^{-1}[(M - \hat{M})\ddot{\theta} + (H - \hat{H}) + (G - \hat{G}) + (F - \hat{F}) + \tau_p] \quad (4)$$

onde: M , H , G , F , correspondem ao processo real e

$\hat{M}$, $\hat{H}$, $\hat{G}$, $\hat{F}$, no modelo estimado.

Claro que na prática $M \neq \hat{M}$, $H \neq \hat{H}$, $G \neq \hat{G}$, $F \neq \hat{F}$ e as técnicas estudadas são:

1) "effective joint inertia" - inércia efetiva da junta

$$\hat{M} = I$$

$$\hat{H} = \hat{F} = \hat{G} = 0$$

2) "inercial decoupling" - desacoplamento inercial

$$\hat{M} = M$$

$$\hat{H} = \hat{F} = \hat{G} = 0$$

3) "computed torque control with reduced dynamics"

controle torque computado com dinâmica reduzida

$$\hat{H} = 0$$

$$F = \hat{F}$$

$$M = \hat{M}$$

$$G = \hat{G}$$

A implementação do algoritmo torque computado necessita uma rigorosa escolha de K_v e K_p e é nesse sentido que se desenvolvem simulações e estudos.

Esse controle não é robusto e um segmento nas juntas K_p e K_v pode levar a instabilização ou torná-lo mais sensível a ruídos já que altos ganhos de realimentação em malha fechada aumenta a "bandwidth" do sistema.

Na técnica do torque computado obtém-se o seguinte resultado (Tourassis [7]):

$$\frac{\theta_i(s)}{\theta_{id}(s)} = \frac{\ddot{\theta}_i + K_{vi} \dot{\theta}_i + K_{pi} \theta_i}{s^2 K_{vi} s + K_p} \quad \begin{array}{l} i = 1 \text{ a } n \\ n = \text{nº de links} \end{array}$$

K_{vi} e K_{pi} = matrizes diagonais

θ_d = posição especificada

logo, esta estrutura de controle introduz zeros que cancelam os polos do sistema em MF, indicando $\theta_i = \theta_d$ que é adequado para "tracking".

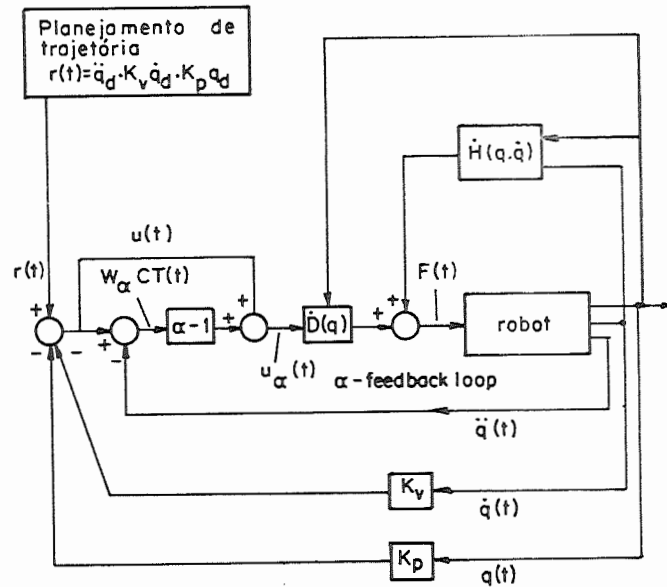
CONTROLE TORQUE α -COMPUTADO

Figura 6.

Da estrutura de controle verifica-se que:

- 1) Se $\alpha = 1$ tem-se o torque computado
- 2) Incorpora realimentação $\ddot{\theta}_1 [\ddot{\theta}_1(t)]$
- 3) Acrescenta um sinal de controle - feed-forward - de compensação Δu

$$a) U_\alpha(t) = U(t) + \Delta u(t)$$

$$b) U_\alpha(t) = U(t) + (\alpha - 1) [u(t) - \ddot{\theta}] = \alpha [u(t) - \ddot{\theta}] + \ddot{\theta}$$

logo

$$c) \Delta u(t) = (U - 1) [u(t) - \ddot{\theta}] = \left[\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right] [U_\alpha - \ddot{\theta}]$$

logo

$$4) W_{\alpha TC} = \frac{1}{\alpha} [\hat{M}(\theta)]^{-1} \{ [M(\theta) - \hat{M}(\theta)] \ddot{\theta} + [H(\theta) - \hat{H}(\theta)] + G(\theta) - \hat{G}(\theta) \}$$

Um resultado interessante é que

$$W_{\alpha TC}(t) \quad \left| \quad \theta \leftarrow \theta_d \equiv \frac{W_{TC}(t)}{\alpha} \right.$$

logo através do projeto de α há uma redução de efeito das fontes de erro (imprecisão do modelo, erro dos parâmetros, dinâmica não-modelada, etc.). Portanto, α torna-se dado de projeto e K_p , K_v são importantes para a resposta transiente do caso de "tracking".

As pesquisas no desenvolvimento da metodologia para determinação de α -ótimo e a extensão desses resultados para outras configurações de ro-

bôs (estes resultados são com modelos cilíndricos) são os passos seguintes no desenvolvimento desta técnica.

CONCLUSÃO

Neste texto procurou-se comentar alguns aspectos da modelagem de robôs industriais e apresentar resultados de algumas técnicas de controle (Torque Computado e Torque α -Computado) disponíveis na literatura [1-9].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUH, J. Y. Conventional Controller Design for Industrial Robots. A Tutorial. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. (1985).
- [2] LUH, J. Y. An Anatomy of Industrial Robots and Their Controls. Vol. 28, n. 2 (Feb.) (1983).
- [3] SWEET, L. M. & GOOD, M. C. Control Systems - Redefinition of the Robot Motion Control Problem. (1989).
- [4] RAMOS, H. D. Simulação do Controle Dinâmico do Manipulador de um Robô. Electricidade. Revista Portuguesa de Ciência e Tecnologia, n. 246 (Junho), 237-244, (1988).
- [5] HOLLERBACH, J. M. A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complecity. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 10, n. 11 (Nov.), (1980).
- [6] LEE, C. C. G. Robot Arm Kinematics, Dynamics and Control. Computer (Dec.), (1982).
- [7] TOURASSIS, V. D. & NEUMAN, C. P. Robust Non Linear Feedback Control for Robotic Manipulators. IEEE Proceedings. Vol. 132; n. 4 (Jul.), (1985).
- [8] CRAIG, J. J. Introduction to Robotics - Mechanics and Control. Addison Wisley Publishing Company.
- [9] PAUL, R. P. Robot Manipulators Mathematics, Programming and Control. MIT Press (1982).

SUMMARY

This work aims to present some results gathered in the literature (Craig, 1986), (Paul, 1982), (Tourassis et al, 1985), (Lee, 1982), (Luh, 1983, 1985) concerning the control of industrial robots.

We discuss the following techniques:

- I - Computed Torque Control
- II - α -Computed Torque Control

KEYWORDS: Control of Robots, Computed Torque, α -Computed Torque.