

MULTIPROCESSAMENTO APLICADO AO CONTROLE EM TEMPO REAL DE
MANIPULADORES COM REALIMENTAÇÃO DE VISÃO

Max B. David Elder M. Hemerly

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
CTA - ITA - IEEE
12228 - 900 - São José dos Campos - SP

RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma arquitetura multiprocessadora baseada em dois DSP's para processamento de algoritmos utilizados no controle de manipuladores com realimentação visual, empregando o método da realimentação de posição do objeto e o algoritmo de determinação de posição baseado na fotogrametria. Realiza-se simulações para verificar o desempenho da arquitetura com dois DSP's, no que se refere ao tempo de processamento. Avalia-se os tempos de processamento das implementações serial e paralela de algoritmos utilizados neste problema de controle e compara-se estes tempos com aqueles obtidos empregando-se microcomputadores IBM-AT.

ABSTRACT

This paper describes a DSP-Based architecture for implementing algorithms used in manipulator control with visual feedback, based on the position-based feedback method and the photogrammetric method for position determination. Simulations are performed to assess the processing times of both serial and parallel implementations, which are then compared with those obtained with serial implementation in IBM-PC computers.

1 - INTRODUÇÃO

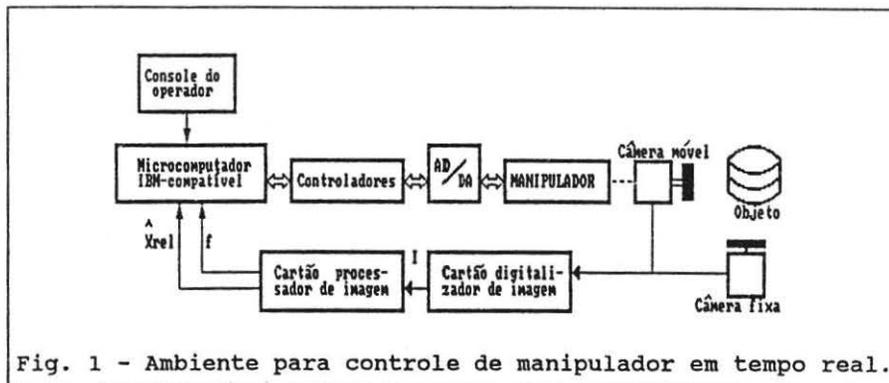
A expansão da automação industrial vem requerendo a utilização de manipuladores robóticos mais autônomos e versáteis. Para alcançar estes objetivos emprega-se sistemas de controle de manipuladores com realimentação visual. Basicamente as câmeras de TV são empregadas para identificar objetos e determinar a posição destes no ambiente. Estas informações visuais são utilizadas em uma malha de realimentação externa para o controle do manipulador. Vários métodos de controle de manipuladores com realimentação visual foram desenvolvidos, vide David e Hemerly [1], Weiss et al [2], Koivo e Houshangi [3] e Chau e Wei [4]. Dentre os mais importantes estão os métodos da realimentação de atributos de imagem, realimentação de posição do objeto e realimentação híbrida de visão. Em David e Hemerly [5] e David [6] foi apresentada uma aplicação do controle de manipulador com realimentação visual. Esta aplicação consiste no emprego de um manipulador com realimentação visual para rastrear um objeto móvel. Além disso, em David e Hemerly [5] e David [6] foi proposto um ambiente para controle de manipuladores em tempo real que incorpora a realimentação de visão.

Neste artigo faz-se um resumo do ambiente para controle em tempo real de manipuladores com realimentação de visão descrito em David e Hemerly [5] e David [6] e a seguir investiga-se a utilização de uma arquitetura com dois DSP's, Santos e Hemerly [7-8], para implementar os algoritmos descritos em David [6]. Adicionalmente, calcula-se o número de operações dos principais algoritmos, o que possibilita estimar o tempo de processamento e o *speedup* obtido em relação a uma implementação serial. São efetuadas simulações para analisar o desempenho em relação ao tempo de processamento da arquitetura com dois DSP's.

2 - AMBIENTE PARA CONTROLE EM TEMPO REAL

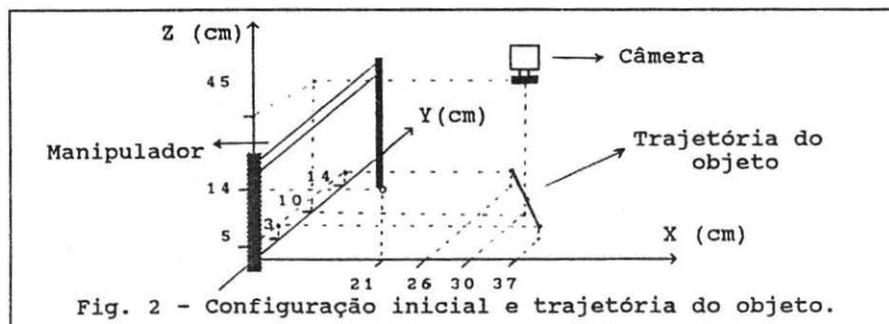
O ambiente proposto em David e Hemerly [5] e David [6] é apresentado na Fig. 1. A câmera utilizada é a mini-câmera Sony HVM-302 [9]. O cartão digitalizador de imagem é do tipo DT 2851-60 [10]. O cartão processador de imagem, tipo i860-CSPI [11], encarregar-se-á das operações de reconhecimento de objetos, extração de atributos de imagem, extração de pontos

característicos e determinação da posição do objeto.



O microcomputador gerencia todos os recursos de *hardware* e *software* e possui um banco de dados com os diversos algoritmos de controle que podem ser empregados. Emprega-se um microcomputador AT-386/25Mhz com coprocessador numérico.

Neste trabalho emprega-se uma seqüência de imagens reais relativas ao movimento de um objeto, geradas *off-line*, para determinar as posições do objeto pelo método da fotogrametria. A seguir, estas posições são utilizadas como se estivessem sendo adquiridas a cada instante de visão, em um programa que simula a dinâmica do manipulador ITA-IEMP, Witkoski [12], com realimentação visual rastreando o objeto móvel. A Fig. 2 ilustra a configuração inicial do manipulador, a trajetória seguida pelo objeto móvel e a posição da câmera no ambiente.



O método de controle com realimentação visual utilizado

nas simulações baseia-se na realimentação da posição do objeto. Neste método emprega-se a posição do objeto, obtida através do processamento de imagem, diretamente na malha de controle. As posições do objeto são determinadas pelo método da fotogrametria simplificado. Este método emprega uma única imagem do objeto, na qual as coordenadas de alguns pontos na imagem são relacionados com pontos pré-definidos do objeto, formando um sistema de equações não-lineares cuja solução é obtida pelo método de Newton. O sistema de equações não-lineares utilizado no algoritmo da fotogrametria tem a forma

$$F(B) = \begin{bmatrix} B^T (P_2^{-1} R_y)^T (P_2^{-1} R_y) B - 1 \\ B^T (P_2^{-1} R_z)^T (P_2^{-1} R_z) B - 1 \\ B^T (P_2^{-1} R_y)^T (P_2^{-1} R_z) B \\ B^T [M_{y1} \ M_{z2}^T \ - M_{y2} \ M_{z1}^T] B - 1 \\ (P_2^{-1} R_x) B \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde o vetor B de dimensão 3 é a solução do sistema, cujo valor permite obter a posição do objeto.

Considera-se que o processamento de imagem produz um atraso nos valores da posição do objeto, obtidos pelo método da fotogrametria. Este atraso é contornado empregando-se a predição da posição do objeto. A predição da posição do objeto é realizada considerando-se que durante os intervalos de amostragem de visão a velocidade estimada do objeto permanece constante. A velocidade estimada do objeto é obtida empregando-se um modelo de velocidade auto-regressivo e um estimador tipo mínimos quadrados.

Os períodos de amostragem de visão e de controle adotados foram 0.14s e 0.01s respectivamente.

Para estimação dos parâmetros do manipulador utiliza-se um modelo de velocidade da forma

$$Vr(Kc) = ac + Ac Vr(Kc-1) + Bc U(Kc-1) + w(Kc) \quad (2)$$

onde Vr é o vetor de velocidades das juntas do manipulador, Kc representa um determinado instante de controle, w é um ruído

gaussiano, U é o vetor de sinais de controle e ac , Ac e Bc são as matrizes de parâmetros do manipulador. Estes parâmetros são obtidos via estimador tipo mínimos quadrados cujas equações são

$$\Phi(Kc-1) = [1 \quad Vr(Kc-1)^T \quad U(Kc-1)^T]^T \quad (3)$$

$$\psi(Kc-1) = [ac \quad Ac \quad Bc]^T = [\psi_1 \quad \dots \quad \psi_3] \quad (4)$$

$$Vr(Kc) = \psi(Kc-1)^T \Phi(Kc-1) = [Vr_1 \quad \dots \quad Vr_3]^T \quad (5)$$

$$\hat{\psi}_1(Kc) = \hat{\psi}_1(Kc-1) + P(Kc) \Phi(Kc-1) \{ Vr_1(Kc) - \hat{\psi}_1(Kc-1)^T \Phi(Kc-1) \} \quad (6)$$

$$P(Kc) = \frac{1}{\mu} [P(Kc-1) - \frac{P(Kc-1) \Phi(Kc-1) \Phi(Kc-1)^T P(Kc-1)}{\mu + \Phi(Kc-1)^T P(Kc-1) \Phi(Kc-1)}] \quad (7)$$

onde μ é o fator de esquecimento e $\hat{\psi}_1$ é uma coluna da matriz de parâmetros estimados.

Após a estimação dos parâmetros do manipulador, calcula-se o sinal de controle utilizando um controlador de mínima variância do tipo

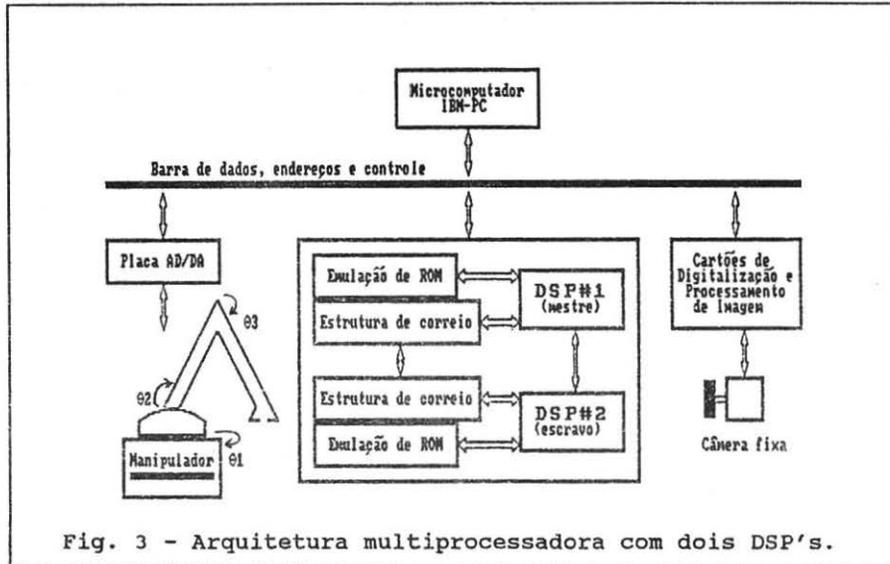
$$U(Kc) = [\mathcal{R} + \hat{Bc}^T \cdot Q \cdot \hat{Bc}]^{-1} \cdot \hat{Bc}^T \cdot Q \left\{ Vr_d(Kc+1) - \hat{Ac} \cdot Vr(Kc) - \hat{ac} + \gamma [er_d(Kc+1) - er(Kc) - Vr(Kc) \cdot Tc] \right\} \quad (8)$$

onde er é o vetor de ângulos das juntas do manipulador, er_d e Vr_d são os vetores de ângulos e velocidades desejadas para as juntas do manipulador, Tc é o período de amostragem de controle e \mathcal{R} , γ e Q são parâmetros de projeto.

No experimento apresentado em David [6], considera-se que os pontos da imagem do objeto estão disponíveis antes de iniciar a simulação. Esta simulação é realizada empregando-se um microcomputador AT-386/25Mhz que realiza, dentre outras operações, a determinação da posição do objeto pelo método da fotogrametria, a estimação de parâmetros e o controle do manipulador de modo serial. Analisando-se os algoritmos de estimação de parâmetros do manipulador, controle do manipulador e determinação da posição do objeto, verifica-se que os dois primeiros são independentes do terceiro. Conseqüentemente, estes poderiam operar em paralelo em uma arquitetura multiprocessadora, o que resultaria uma redução dos tempos de processamento.

3 - ARQUITETURA BASEADA EM DSP'S

Nesta seção investigamos a utilização de uma arquitetura com dois DSP's tipo TMS320C30 da Texas Instruments, vide Santos e Hemerly [7-8], para implementar os algoritmos descritos na seção anterior. A estrutura básica do módulo com dois DSP's é apresentada na Fig. 3.



O objetivo do emprego desta arquitetura é principalmente a redução do tempo de processamento dos algoritmos descritos anteriormente. Assim, o período de amostragem de visão pode ser reduzido, eliminando os problemas de atraso na determinação da posição do objeto, e também tornando o processo de predição desnecessário, com conseqüente aumento da precisão.

Dois fatores colaboram para a redução do tempo de processamento. O primeiro consiste no processamento paralelo de algoritmos que anteriormente eram processados de forma serial. O outro fator é a maior velocidade de processamento dos DSP's em relação ao microcomputador utilizado.

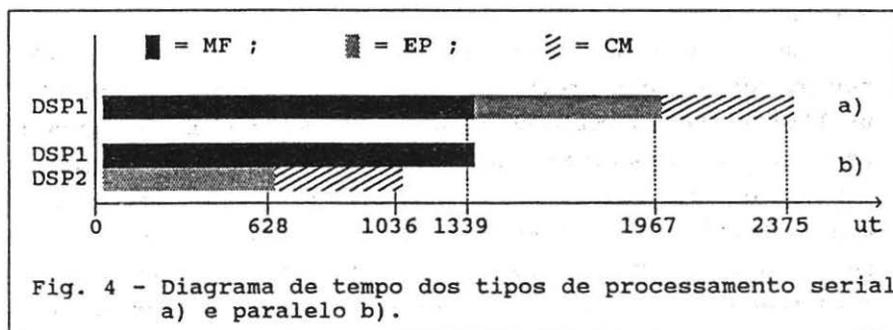
4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção realizamos simulações empregando a) uma arquitetura com dois DSP's e b) dois microcomputadores para

avaliar o tempo de processamento dos principais algoritmos mencionados anteriormente. No que se refere aos DSP's, avalia-se também o *speedup* obtido com a implementação paralela dos algoritmos. Os desempenhos obtidos com DSP's e microcomputadores são comparados e é feita uma análise destes tempos para aplicação em tempo real.

Os principais algoritmos utilizados nas simulações são os de determinação de posição por fotogrametria (MF), estimação dos parâmetros do manipulador (EP) e controle do manipulador (CM), conforme mencionado na seção 2. Analisando o programa fonte destes algoritmos, calculamos o número de operações efetuadas e obtivemos os valores aproximados de 1339 para MF, 628 para EP e 408 para CM. Visto que o tempo de processamento de cada algoritmo é proporcional ao número de operações efetuadas, definimos que cada operação corresponde a uma unidade de tempo ut , o que é sensato supondo-se processadores homogêneos. Deste modo o tempo total de processamento dos algoritmos empregando apenas um DSP que efetua as operações em serie é de 2375 ut .

Empregando a arquitetura com dois DSP's, podemos efetuar o processamento dos algoritmos EP e CM em paralelo com o algoritmo MF. Deste modo é possível reduzir o tempo total de processamento em 1036 ut . A Fig. 4 apresenta o diagrama de tempo dos tipos de processamento serial e paralelo.



Considerando-se que o algoritmo MF é o mais complexo, vide Fig. 4, ele será usado para avaliar a velocidade real de processamento utilizando-se os seguintes equipamentos:

- a) Microcomputador AT-286 12MHz com coprocessador.
- b) Microcomputador AT-386SX 25MHz com coprocessador.
- c) Arquitetura com dois DSP's mostrada na seção 3, sendo o MF implementado no DSP1, conforme Fig. 4b.

Os tempos de processamento obtidos foram:

- 1) 30ms com AT-286 12MHz.
- 2) 9ms com AT-386SX 25MHz.
- 3) 320 μ s com DSP1 da arquitetura da Fig. 3.

Analisando os tempos de processamento obtidos empregando os microcomputadores, conclui-se que efetivamente o período de amostragem de visão deve ser maior do que os 10ms empregados na amostragem de controle em David [6]. Isto ocorre porque além do processamento do algoritmo MF devem ser executadas outras operações dentro do período de visão. Deste modo o emprego isolado de um microcomputador exige a utilização de períodos de amostragem de visão múltiplos do período de controle. Note-se agora que no caso (b) da Fig. 4 o algoritmo MF, executado pelo DSP1, é o mais demorado e que o *speedup* para este algoritmo é de 28 em relação ao AT-386. Desta forma o emprego da arquitetura da Fig. 3 permite a utilização de um período de amostragem de visão da mesma ordem do período de amostragem de controle referido anteriormente, minimizando assim os problemas de atrasos na determinação de posição.

5 - CONCLUSÕES

Os algoritmos utilizados no controle em tempo real de manipuladores com realimentação visual são complexos e a utilização de um microcomputador AT-386 requer o emprego de períodos de amostragem de visão múltiplos dos períodos de amostragem de controle. Em contrapartida, a utilização de arquitetura com dois DSP's tipo TMS320C30 permite a redução dos períodos de amostragem de visão para valores da mesma ordem da amostragem de controle, elevando assim a precisão do rastreamento. Esta redução no tempo de execução dos algoritmos se deve ao processamento em paralelo nos DSP's e à maior velocidade de processamento do DSP TMS320C30 em relação ao microcomputador AT-386/25MHz.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro, via processo 91/4094-9.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] David, M. B. e Hemerly, E. M.- "Controle de Manipuladores Incorporando Realimentação de Visão", 9^o Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, ES, 1992.
- [2] Weis, L. E.; Sanderson, A. and Neuman, C. P.- "Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback", *IEEE J. Rob. Automat.*, vol. RA-3, No. 5, october 1987.
- [3] Koivo, A. J. and Houshangi, N.- "Real-Time Vision Feedback for Servoing Robotic Manipulator with Self-Tuning Controller", *IEEE Trans. on Systems Man. and Cybernetics*, vol. 21, No. 1, january/february 1991.
- [4] Chau, J. L. and Wei, S. L.- "A Hybrid Method of Visual Guiding for Eye-in-hand Robot", *ECC 91*, july 1991.
- [5] David, M. B. e Hemerly, E. M.- "Ambiente para Controle em Tempo Real de Manipuladores com Realimentação de Visão", *XV CNMAC*, São Carlos, SP, 1992.
- [6] David, M. B.- "Controle Dinâmico de Manipuladores com Realimentação Visual", Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1992.
- [7] Santos, W. A. e Hemerly, E. M.- "Implementation and Performance Evaluation of DSP-Based Architectures for Filtering and Control Applications", *System Science XI*, Poland, 1992.
- [8] Santos, W. A. e Hemerly, E. M.- "Arquitetura Multiprocessadora Heterogênea Aplicada ao Controle Adaptativo de Manipuladores Robóticos", *Jornada EPUSP/IEEE em Sistemas de Computação de Alto Desempenho*, São Paulo, março 1991.
- [9] Sony *HVM-302*, Manual de instruções, São Paulo, 1992.
- [10] *DT 2851-60*, User Manual, Data Translaction Inc., U.S.A., 1990.
- [11] *Supercard-1/AT i860*, User Manual, C.S.P. Inc., U.S.A., 1990.
- [12] Witkoski, N. A. - "Instrumentação de um Manipulador com

Três Graus de Liberdade", Trabalho de Graduação,
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos
Campos, SP, 1988.