

Problemas Computacionais no Controlo de Robots

Parte 2

4. A Arquitectura Sequencial versus as Arquitecturas Paralelas

A utilização de arquitecturas com vários microprocessadores é uma possibilidade que foi estudada com alguma intensidade [6-9] e que se encontra ainda em aberto. No entanto, uma análise pragmática dos resultados conseguidos mostra que o aumento da frequência de cálculo está, por enquanto, muito aquém das expectativas. De facto, os estudos revelam que o cálculo de algoritmos complexos, como é o caso da cinemática e da dinâmica de robots, impõe relações intrincadas entre as variáveis envolvidas que condicionam fortemente o estabelecimento de um paralelismo e de uma sequenciação dos cálculos. Por esta razão, nos últimos anos poucos investigadores têm apostado nesta área e, nesta perspectiva, pode-se afirmar que a curto e médio prazo, um algoritmo de controlo centralizado será muito provavelmente desenvolvido num sistema monoprocessador.

5. Técnicas para Melhorar o Desempenho do Controlador

A melhoria da eficiência dos sistemas passa pelo desenvolvimento de técnicas complementares às quais frequentemente é dado pouco destaque, seja ao nível de textos didácticos seja em artigos de investigação. O carácter multifacetado dessas técnicas, envolvendo formulações distintas tais como o controlo, a algoritmia e a programação, leva a que sejam insuficientemente analisadas em cada uma dessas áreas curriculares. Nessa perspectiva, de seguida analisam-se as possibilidades da programação 'directa' de um algoritmo através da linguagem *Assembly*, da adopção de cálculos com baixa precisão, seja em *vf* seja através do uso de memória, e a aplicação de estratégias de cálculo por multifrequência.

5.1. Programação em Linguagem *Assembly*

A programação em *Assembly* [10] permite obter um código optimizado mas torna-se extremamente laboriosa para rotinas complexas pelo que esta técnica tem sido pouco adoptada no controlo de manipuladores robóticos. Assim, salvaguardando o caso de aplicações especiais (e.g. robótica espacial) onde os custos de desenvolvimento poderão ter menor relevância do que aspectos ligados à segurança e à fiabilidade, ao nível industrial não é de estimar que no futuro esta técnica venha a ser utilizada em algoritmos sofisticados de controlo.

5.2. Adopção de Precisão Finita

Uma segunda técnica que permite acelerar os cálculos consta na adopção de cálculos com baixa precisão. Nesta perspectiva, certos investigadores desenvolveram sistemas de controlo com cálculos efectuados em vírgula fixa [11]. No entanto, esta técnica tem sido pouco utilizada pois requer a elaboração de *software* específico. Por outro lado, devido à complexidade dos cálculos envolvidos, nesses sistemas não

foi efectuada qualquer análise dos erros finais. Assim, a falta de precisão no algoritmo de controlo pode conduzir, eventualmente, a desempenhos com baixa precisão.

Uma outra alternativa é o uso de memória [11-13] que consiste na substituição de certos cálculos pela pesquisa dos valores correspondentes numa tabela. Deste modo, evita-se um cálculo intensivo em tempo real já que a pesquisa dos valores em memória é muito rápida. Esta técnica é por vezes utilizada em associação com a programação em *Assembly* ou com o cálculo em vírgula fixa, tendo menos relevância a sua utilização com uma linguagem de programação de alto nível devido aos elevados erros de quantificação verificados.

A técnica de mais fácil utilização consiste na adopção de cálculos de baixa precisão com a representação dos números em *vf*. A Fig. 5 mostra a variação do tempo de computação no Transputer IMS T800@20MHz para várias operações em *vf* com oito e quatro bytes de precisão. Tal como seria de esperar verifica-se uma maior rapidez quando se utiliza uma menor precisão. No entanto, esta técnica deve ser utilizada com cautela, pois muitos dos compiladores existentes obtêm os cálculos de baixa precisão a partir da truncatura de resultados efectuados com uma precisão 'padrão'. Como é óbvio, neste caso não se consegue qualquer ganho de rapidez.

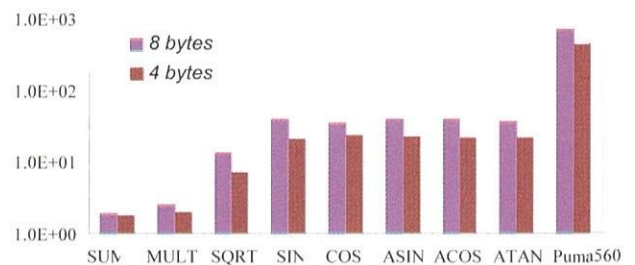


Fig. 5 - Tempo de cálculo de várias operações para o Transputer IMS T800@20MHz com precisão de 8 e de 4 bytes para a linguagem Occam 2.

Utilizando a linguagem Occam 2, para as equações simplificadas do robot PUMA 560 obtém-se, respectivamente, $f=1,4$ KHz ($\mu=72 \times 10^{-3}$) e $f=2,3$ KHz ($\mu=114 \times 10^{-3}$), para uma precisão de 8 e de 4 bytes, que corresponde a um factor de aceleração dos cálculos de 1,6.

Dentro deste tipo de estratégia há a referir o cálculo de operações trigonométricas através de aproximações polinomiais. Também neste caso é possível obter um ganho de velocidade através do uso de um polinómio de baixo grau que, em contrapartida, conduz a soluções com precisão inferior. Por exemplo, aproximando as funções Seno/Coseno através de polinómios de grau 9/10 e uma representação em *vf* com precisão de 32 bit (mantissa de 24 bit), as equações dinâmicas do robot PUMA 560 são calculadas no sistema dSPACE DS1002 com o processador TMS320C30@33 MHz e a linguagem TI C Vs. 4.40 a uma frequência $f=23$ KHz ($\mu=705 \times 10^{-3}$).

5.3. Adopção de Várias Frequências de Amostragem

O cálculo dos vários blocos constitutivos de um algoritmo de controlo pode ser efectuado a diferentes frequências de amostragem. A frequência a atribuir a cada bloco depende da largura de banda necessária em cada malha do diagrama de blocos. Assim, pode-se atribuir uma frequência baixa aos blocos com pouca influência no desempenho do sistema e uma frequência mais elevada aos blocos mais importantes e mais exigentes sob o ponto de vista dinâmico [14-15].

As Figuras 6 e 7 mostram a aplicação desta estratégia ao método de controlo por binário calculado (*computed torque method*) [16-19]. A versão de cálculo por multifrequência [15] situa-se a meio caminho entre o controlo por binário calculado e o controlo por avanço (*feedforward*) ao dividir a avaliação dos termos dinâmicos em duas partes. Os termos inerciais, J , são avaliados em tempo real pois a sua inserção na malha directa e o tratamento de sinais de aceleração implica exigências dinâmicas importantes. Os termos Coriolis/centrípetos, C , e os termos gravitacionais, G , da malha de realimentação, para compensação destas não-linearidades da dinâmica do *robot*, são avaliados em avanço para os valores de referência, pois colocam poucas exigências já que evoluem lentamente devido a envolverem somente as variáveis de posição e de velocidade.

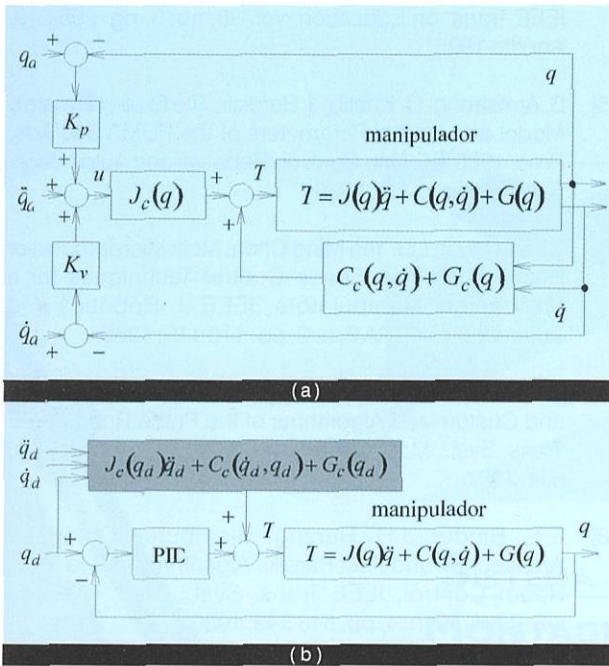


Fig. 6 - Algoritmos de controlo não-linear de robots através dos métodos de: a) controlo por binário calculado (*computed torque method*) b) controlo por avanço (*feedforward*)

Partindo do princípio que existe um algoritmo de planeamento de trajectórias com os valores de referência para as posições, as velocidades e as acelerações, esta estratégia apresenta as maiores vantagens dos dois métodos, nomeadamente ao estabelecer a possibilidade de:

- Adaptar em tempo real certos cálculos à evolução das variáveis, tal como no método do binário calculado. Neste caso, efectua-se o cálculo em tempo real somente dos termos inerciais que são os que representam menor carga computacional.

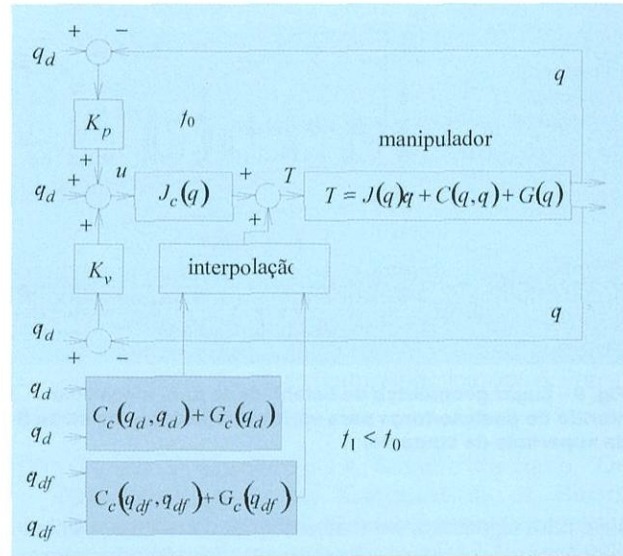


Fig. 7 - Algoritmo de controlo não-linear de manipuladores robóticos adoptando uma estratégia de controlo por multifrequência. A frequência f_1 de cálculo dos blocos $C_c + G_c$ é inferior à frequência f_0 de cálculo dos blocos J_c, K_v e K_p .

- Efectuar certos cálculos antecipadamente (*off-line*), tal como no método de controlo por avanço. Neste caso, alivia-se o cálculo em tempo real de algoritmos relativamente pesados como acontece com os termos Coriolis/centrípetos e gravitacionais.

Um segundo exemplo da adopção de multifrequência está representada na Fig. 8 relativa ao algoritmo de controlo híbrido [20], para manipuladores robóticos em aplicações envolvendo simultaneamente as variáveis de posição e de força (Y_{Cd} e F_d). Neste caso estabeleceram-se frequências de amostragem distintas para as malhas de controlo de posição e de controlo de força.

A Fig. 9 mostra o lugar geométrico de estabilidade do sistema em função das duas frequências e revela que, tal como por vezes é considerado de uma forma qualitativa, as duas malhas podem requerer frequências de amostragem distintas devido às diferentes exigências dinâmicas. Ao utilizar uma frequência inferior para uma das malhas resulta um peso computacional total inferior.

Uma outra alternativa para uma estratégia de cálculo por multifrequência, mais adaptada a situações onde o algoritmo não está inserido directamente num sistema de controlo, ou

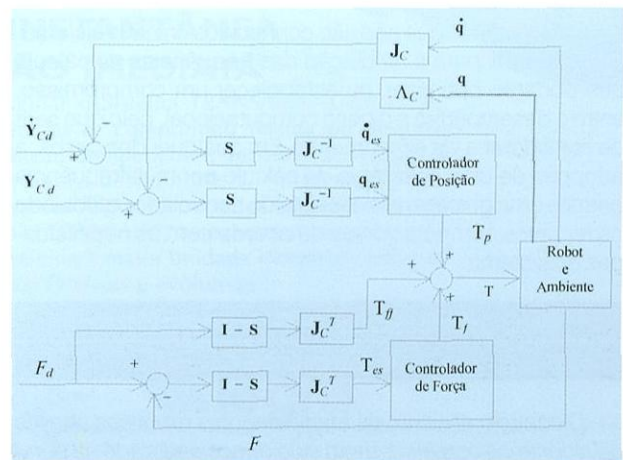


Fig. 8 - b) Diagrama de blocos do algoritmo de controlo híbrido de posição/força (S - matriz de selecção, J_c - jacobiano da cinemática).

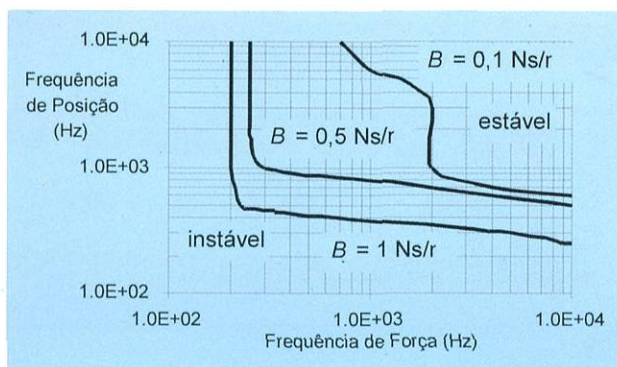


Fig. 9 - Lugar geométrico de estabilidade para o controlo híbrido de posição/força para vários coeficientes de atrito B da superfície de contacto.

seja, para algoritmos em malha aberta, consiste em atribuir frequências de cálculo sucessivamente mais elevadas para as variáveis e as correspondentes derivadas temporais [21-22]. Por exemplo, para um algoritmo de planeamento cinemático de trajetórias podem-se atribuir frequências de cálculo sucessivamente crescentes para as posições, as velocidades e as acelerações, devido à sua maior largura de banda.

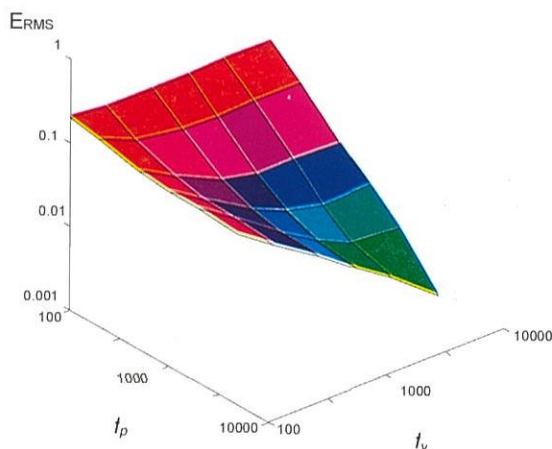


Fig. 10 - Percentil de 50% para o erro médio quadrático da velocidade do eixo 2 do robot 2R pelo método de multifrequência (f_p - frequência de cálculo dos termos dependentes de posições, f_v - frequência de cálculo dos termos dependentes de velocidades).

Deve notar-se que não são conhecidos critérios sistemáticos e gerais para a atribuição das frequências de cálculo que poderão otimizar, ou estabelecer um compromisso, entre o desempenho e o peso computacional, pelo que será de considerar a via experimental. Em qualquer dos casos, a adopção de uma estratégia de cálculo por multifrequência permite uma gestão mais eficiente do controlador, atribuindo os recursos computacionais de acordo com as necessidades do sistema.

6. Conclusões e Perspectivas de Evolução

O controlo eficiente de manipuladores robóticos através de algoritmos complexos tem sido pouco analisado na perspectiva da sua aplicação a sistemas reais. Este artigo estudou a carga computacional colocada por diversas operações matemáticas e as frequências de cálculo conseguidos para

vários sistemas informáticos. Os resultados revelam que, apesar dos progressos verificados, quer ao nível da arquitectura quer ao nível tecnológico, os algoritmos de controlo de robots requerem um poder de cálculo considerável. Consequentemente, o desenvolvimento de novos controladores passa pela adopção de técnicas alternativas de programação, cálculo e representação interna dos dados. Neste sentido, as conclusões apontam, também, para a concepção de novos algoritmos baseados em estruturas de informação mais próximas da arquitectura dos microcomputadores.

Bibliografia

- [1] "World Industrial Robots 1996", UN-United Nations and IFR-International Federation of Robotics, New York and Geneva, 1996.
- [2] RIA News, IEEE Robotics and Automation Magazine, Set. 1997.
- [3] J.A. Tenreiro Machado e J. L. Martins de Carvalho, "Microprocessor-Based Controllers for Robotic Manipulators". Capítulo 5 de "Microprocessors in Robotic and Manufacturing Systems", (editor: Spyro G. Tzafestas), Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [4] J.A. Tenreiro Machado e Alexandra M.S.F. Galhano, "Benchmarking Computer Systems for Robot Control", IEEE Trans. on Education, vol. 38, no. 3, pg. 205-210, Agosto 1995.
- [5] B. Armstrong, O. Khatib, J. Burdick, The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm, Proc. 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 1986.
- [6] Chang Huan Liu, Yen Ming Chen, Multi Microprocessor Based Cartesian Space Control Techniques for a Mechanical Manipulators, IEEE J. Robotics and Automation, vol. RA 2, n. 2, pp. 110 115, 1986.
- [7] C.P. Neuman, J.J. Murray, The Complete Dynamic Model and Customized Algorithms of the Puma Robot, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. vol. SMC 17, n. 4, pp. 635 644, 1987.
- [8] E.E. Binder, J.H. Herzog, Distributed Computer Architecture and Fast Parallel Algorithms in Real Time Robot Control, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC 16, n. 4, pp. 543 549, 1986.
- [9] T. Watanabe, M. Kametani, K. Kawata, K. Tetsuya, Improvement in the Computing Time of Robot Manipulators Using a Multimicroprocessor, J. Dynamic Syst. Measurement, Contr., Trans. ASME, vol. 108, pp. 190 197, 1986.
- [10] M.W. Spong, J.S. Thorp, J.M. Kleinwaks, Robust Microprocessor Control of Robot Manipulators, Automatica, vol. 23, pp. 373 379, 1987.
- [11] T. Suehiro, K. Takase, A Manipulation System Based on Direct Computational Task Coordinate Servoing, Robotics Research: The Second International Symposium, MIT Press, 1985.
- [12] J.S. Albus, A New Approach to Manipulator Control: The Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC), J.

- Dynamic Syst. Measurement, Contr., Trans. ASME, vol. 97, pp. 220-227, 1975.
- [13] M. H. Raibert, "A Model for Sensorimotor Control and Learning", Biological Cybernetics, vol. 29, pp. 29-36, 1978.
- [14] J.A. Tenreiro Machado, J.L. Martins de Carvalho, Engineering Design of a Multirate Non Linear Controller for Robot Manipulators, J. of Robotic Systems, vol. 6, n. 1, Fev., 1989.
- [15] J.A. Tenreiro Machado, J.L. Martins de Carvalho e Alexandra M.S.F. Galhano, "Analysis of Robot Dynamics and Compensation Using Classical and Computed Torque Techniques", IEEE Trans. on Education, vol. 36, no. 4, pp. 372-379, Nov. 1993.
- [16] Haruhiko Asada, Jean Jacques E. Slotine, Robot Analysis and Control, John Wiley & Sons, 1986.
- [17] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics & Control, Addison Wesley Publishing Co., second edition, 1989.
- [18] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence, McGraw Hill Book Co., 1987.
- [19] Tsuneo Yoshikawa, Foundations of Robotics: Analysis and Control, The MIT Press, 1990.
- [20] Abílio Azenha, J.A. Tenreiro Machado, "Dynamic Analysis in Variable Structure Position/Force Hybrid Control of Manipulators", SMC'97-1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pg. 4309-4314, 12-15/Out/1997, Orlando, Florida, USA.
- [21] M. Kircanski, M. Vukobratovic, N. Kircanski, T. Timcenko, A New Program Package for the Generation of Efficient Manipulator Kinematic and Dynamic Equations in Symbolic Form, Robotica, vol. 6, Part 4, pp. 311-318, 1988.
- [22] Carla S. M. Cordeiro e J.A. Tenreiro Machado, "On the Multifrequency Calculation of Robot Trajectories", INES'98-9th International Conference on Intelligent Engineering Systems, 17-19/Set/1998, Viena, Austria.

* Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto



SISTEMA TRANSAIR®
MONTAGEM INSTANTÂNEA
MODIFICAÇÃO IMEDIATA

Quem, senão a Legris, poderia imaginar o Sistema TRANSAIR®? Com efeito, este novo conceito de distribuição do ar comprimido resulta do domínio tecnológico da conexão instantânea. Componentes, racores, derivações e válvulas; de montagem imediata, desmontáveis, intercambiáveis, reutilizáveis, estão na base desta inovação. Conectados instantaneamente ao tubo calibrado de alumínio TRANSAIR®, asseguram a pressurização da rede. Da mais pequena oficina à maior unidade industrial, redes de ar comprimido instantâneas, flexíveis e evolutivas.

 **legris**

Legris, Lda.
Praça Evaristo Silva Duarte, n.º 24
4470 SANTA MARIA AVIOSO
Tel: 02-982 1922
Fax: 02-982 1924

GRUPE LEGRIS INDUSTRIES