

Ajudas Computacionais para a Tele-operação de um Manipulador Robótico

Filipe M. Silva, Francisco Vaz*, João G.M. Gonçalves**

*Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro

**Comissão das Comunidades Europeias, JRC - Ispra (ITÁLIA)

Resumo - Neste trabalho apresenta-se uma experiência da utilização de tecnologias robóticas na realização de operações de verificação remota em áreas de armazenamento de materiais físséis. Neste sentido, faz-se uma descrição dos aspectos funcionais do sistema e das ajudas computacionais desenvolvidas. O sistema é constituído por um braço manipulador operado remotamente a partir de uma estação local de controlo. A operação remota pressupõem a necessidade de cooperação entre o homem e a máquina baseada em estruturas gráficas apropriadas. A *interface* homem-máquina implementada apresenta novos conceitos em relação às arquitecturas clássicas na área, devido à integração num único écran de toda a informação relevante para o operador do sistema: *interfaces* gráficas de controlo, visualização de sinais vídeo e de ambientes virtuais.

Abstract - This work presents an experience in using robotics technologies to perform remote verification tasks inside a fissile material storage area. In this sense, it is described the functional aspects of the system and the developed computer aids. The system is composed of a manipulator arm remotely operated from a local system's operator console. The remote operation assumes the need of cooperation between man and machine based on appropriated graphical structures. The human-machine interface presents new concepts in comparison with more classical techniques in the area, due to the complete integration into a single screen of all relevant information needed by the system's operator: control interfaces, visualisation of video signal and virtual environments.

I. INTRODUÇÃO

A necessidade de armazenamento de grandes quantidades de material fissil, associado ao desenvolvimento da tecnologia electrónica e dos computadores, veio justificar os esforços efectuados para a aplicação de tecnologias robóticas na assistência de operações remotas de verificação e inspecção. O projecto SAOV [1,2,3] visa o desenvolvimento de um sistema integrado de robótico móvel capaz de realizar autonomamente tarefas de verificação (e.g., inspecção

visual, medições e leituras) remota em áreas de armazenamento de materiais radioactivos. O sistema robótico pode ser dividido em duas partes distintas: (1) a parte móvel que opera remotamente, constituída por um veículo móvel que suporta um braço articulado, sensores (e.g., câmaras TV, ultra-sons, *laser range finder*) e outro equipamento associado (e.g., unidades de *pan-and-tilt*, lentes motorizadas de *zoom* e focagem); e (2) a estação gráfica de controlo localizada fora da área de armazenamento.

Este artigo descreve o trabalho relacionado com o desenvolvimento das ajudas computacionais para a operação remota do braço manipulador, com especial destaque para os esquemas de controlo do manipulador e para o desenvolvimento da *interface* homem-máquina. O sistema manipulador será operado manualmente com base na informação visual presente na estação local. Procura-se demonstrar a combinação de um sistema de manipulação multi-sensorial com uma *interface* homem-máquina que permita obter um desempenho aceitável dadas a especificidade da aplicação. O desenvolvimento deste trabalho é baseado na utilização de *standards* industriais, tal como linguagem C, Unix, X-Window (X11R5+PEX), Motif, PHIGS. Para além de uma razão de custos, o uso de *standards* tem a vantagem de encorajar futuros desenvolvimentos e facilitar substancialmente a portabilidade do sistema.

II. ARQUITECTURA DO SISTEMA

O sistema de manipulação é constituído pelos seguintes módulos funcionais:

- a consola de operação:
 - estação gráfica SunSPARC10/41 (Unix, NFS, X11, Motif, PHIGS).
- o braço manipulador:
 - 6 graus de liberdade (Robosoft GT-6A), pinça, codificadores ópticos incrementais (um para cada eixo), computador 68020 num sistema VME, sistema operativo tempo real - Albatros.
- o sistema vídeo:
 - duas câmaras TV, unidades de *pan-and-tilt* e lentes motorizadas de *zoom* e focagem.

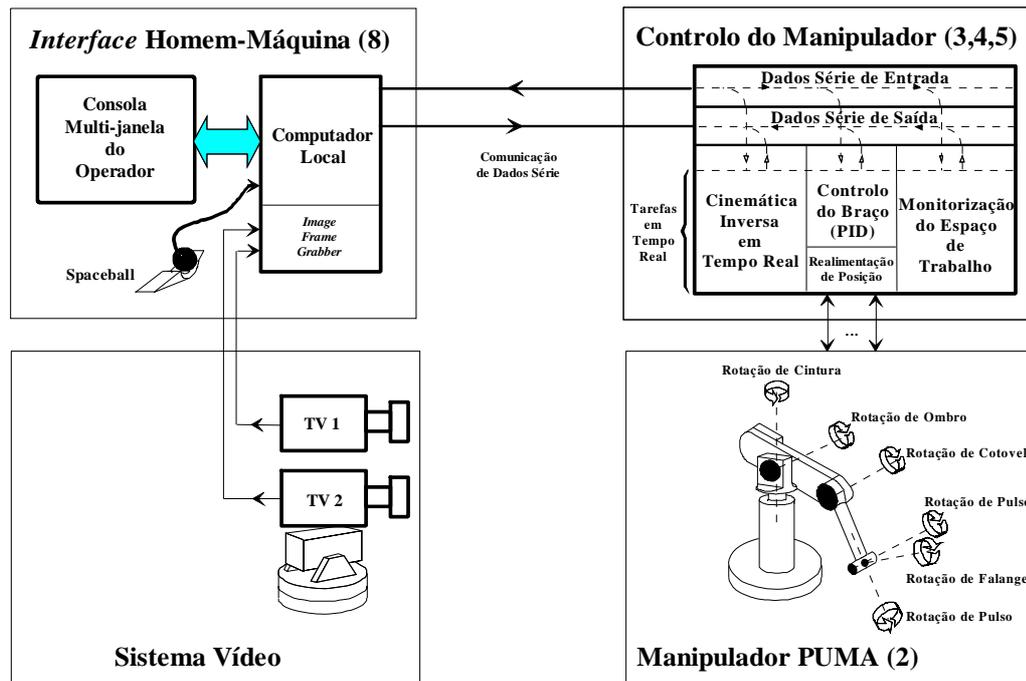


Fig. 1 - Arquitectura do Sistema.

A arquitectura do sistema está representada na figura 1. O sistema foi projectado assumindo que todas as operações a realizar são directamente controladas pelo operador com base em realimentação visual sempre disponível. Isto significa que o operador pode considerar-se incluído dentro do ciclo de controlo (*Man-in-the-Loop*). Numa fase posterior será de esperar a inclusão de operações semi-automáticas e automáticas. Neste contexto, autonomia significa que o ciclo de controlo se fecha através do computador do sistema remoto, dos seus sensores e actuadores. Em qualquer das situações é importante o conceito de controlo supervisionado em que o operador continuamente monitora e interactivamente modifica a operação do sistema, permitindo a intervenção humana em tempo real.

A. Características Geométricas e Mecânicas do Braço

O manipulador robótico é constituído por diversos elos mecânicos, supostamente rígidos, interligados por articulações rotacionais (proporcionam movimentos de rotação em torno do seu eixo - símbolo R). No tocante ao número de articulações, a sua estrutura integra seis eixos através de dois subsistemas principais: o braço (três primeiros eixos) e o punho (três eixos finais). Neste caso, o braço permite aceder a qualquer ponto do espaço operacional, enquanto que o punho permite orientar a mão. A figura 1 ilustra a geometria do manipulador utilizado neste trabalho. A estrutura adoptada, do tipo 6R, revela-se a estrutura com mais potencialidades e que conduz a um volume de trabalho máximo. As juntas

articuladas são actuadas por motores DC (tensão nominal de 48V) acoplados a redutores de engrenagens.

B. Sistema Controlador

O controlador robótico consiste num computador VME equipado com um processador 68020 correndo Albatros, um sistema operativo multi-tarefa e tempo real. O esquema de controlo implementado no manipulador é o método proporcional-integral-derivativo (controlador PID) de eixos individuais. Esta técnica de controlo refere-se ao espaço das juntas articuladas e não toma em consideração aspectos dinâmicos do braço manipulador. A um nível mais alto, o sistema operativo proporciona o controlo independente da posição e velocidade de cada junta articulada.

C. Sensores

O sistema robótico incorpora os seguintes sensores:

- **odómetros:** cada junta articulada tem acoplado um codificador óptico incremental. Os codificadores e os contadores associados constituem a base dos odómetros. Os dados odométricos, que consistem na quantificação dos deslocamentos angulares dos seis eixos, estão disponíveis na execução dos processos internos de controlo e como informação de realimentação na reconstrução da sua representação virtual na estação local.
- **câmaras TV:** duas câmaras montadas sobre unidades de *pan-and-tilt* estão equipadas com lentes motorizadas para focagem e *zoom* automático. Torna-se possível obter uma visão

global da operação do sistema, sem perda de detalhes importantes.

D. Interface Homem-Máquina

O operador humano está envolvido no controlo e supervisão do sistema remoto assumindo a existência de realimentação visual. Esta característica torna a *interface* homem-máquina uma peça fundamental do sistema. Deste modo, a *interface* homem-máquina foi preparada com o objectivo de proporcionar um controlo supervisionado realista e intuitivo, e que permita ao operador:

- monitorar continuamente a operação usando visualização de sinais vídeo ou ambientes virtuais.
- interactivamente intervir e modificar os objectivos pela aplicação de comandos de controlo, quer operando a Spaceball quer usando o rato na *interface* gráfica.

Todos os esforços foram concentrados na integração num único écran de toda a informação relevante ao operador (e.g., informação visual das câmaras TV, módulos gráficos de controlo, modelos virtuais 3D animados). Os objectivos principais a alcançar com esta implementação são:

- procurar que o próprio operador se sinta dentro do ambiente remoto (tele-presença);
- dar uma visão integrada do estado dos diferentes dispositivos e sensores remotos;
- permitir que o operador em cada momento seleccione os módulos que julgue relevantes.
- maximizar a participação do operador no controlo e monitorização do sistema remoto.

E. Arquitectura do Software

A descrição da arquitectura do sistema torna claro que algumas das tarefas são executadas na estação central enquanto outras usam o computador do braço robótico. Esta arquitectura a dois processadores leva a questionar a sua eficiência e quais as estratégias a adoptar com vista à sua optimização. Foram quatro os critérios usados para estabelecer o modo de agrupar e localizar os processos nos dois sistemas físicos [2]:

- 1) as tarefas orientadas para a *hardware* ou próximas dos sensores executam no computador do robot, enquanto as aplicações orientadas para a aplicação, incluindo a *interface* homem-máquina, correm na estação de operação local.
- 2) minimizar o tráfego através do canal de comunicações;
- 3) minimizar o atraso no ciclo de controlo;
- 4) proporcionar um nível de modularidade e expansibilidade de acordo com futuras exigências.

Estes critérios deram origem à arquitectura representada no diagrama de blocos da figura 2. Uma tarefa que pode

parecer excepção é a que se relaciona com os processos de cinemática que, embora sejam orientados para a aplicação, são muito influenciados pelos sensores e pela interacção com o operador. Quando executados na estação central, estas características dão origem a um grande tráfego no canal de comunicações, com consequentes atrasos no ciclo de controlo e fortes limitações no desempenho global do sistema.

Toda a comunicação entre a consola do operador e o braço robótico é obtida através do Communications Server [4]. Este processo é composto de duas tarefas: uma correndo ao nível da estação local e a outra ao nível do sistema remoto de manipulação. Para além disso, existem tarefas em *background* que monitorizam o estado das comunicações entre o robot e a estação local. Quando ocorre uma perda de comunicação (e.g., devido a interferência rádio), o sistema remoto pára imediatamente e entra num estado de *standby*. Em tal situação, o operador do sistema é imediatamente informado.

Do lado da estação local, o operador do sistema usa um dispositivo de entrada com seis graus de liberdade, a Spaceball [5], para controlar o braço manipulador baseando-se somente em informação de realimentação visual - conceito de *Man-in-the-Loop*. Os comandos entre a estação de operação e o computador do braço são transmitidos via ligação RS232 (cabo ou rádio). Estes comandos são interceptados pelo Communications Server, a correr no computador do robot, que os redirecciona para a tarefa de destino. Os processo no

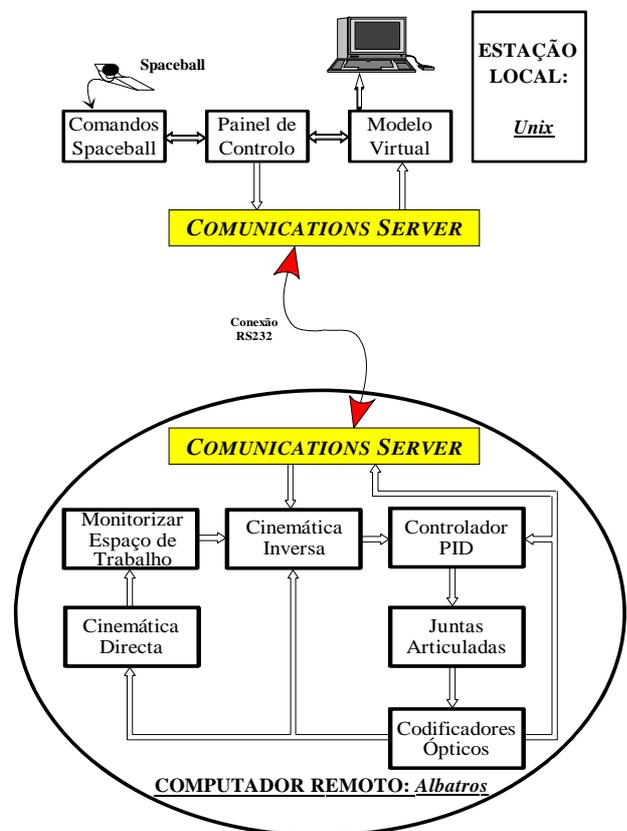


Fig. 2 - Diagrama de blocos do sistema robótico.

sistema robótico são executadas concorrentemente pelo Albatros, o sistema operativo em tempo real [6].

Os comandos da Spaceball são transformados em coordenadas do braço robótico e aplicados à tarefa de cinemática inversa que corre no sistema computacional multi-tarefa do manipulador. O algoritmo de cinemática inversa calcula os deslocamentos de cada junta articulada que correspondem ao movimento desejado para a extremidade do braço. Estes deslocamentos são os dados de entrada para os seis controladores de PID (um para cada junta articulada), forçando o deslocamento de cada junta articulada para a posição/velocidade desejada. O sinal de realimentação usado ao nível do controlo dos PID é obtido por meio de codificadores ópticos incrementais acoplados aos servo-motores em cada junta articulada. Periodicamente (todos os 250 ms), a estação central inquire o sistema robótico e actualiza as coordenadas posicionais. As ferramentas gráficas usam estas coordenadas para modificarem dinamicamente a representação gráfica 3D do braço manipulador.

III. CINEMÁTICA DO MANIPULADOR ROBÓTICO

A cinemática de braços robóticos trata do estudo analítico da geometria do movimento, em particular, as relações entre as coordenadas no espaço das juntas articuladas $q = [q_1, \dots, q_n]$ e as coordenadas no espaço operacional $r = [r_1, \dots, r_m]$. As relações matemáticas que se podem estabelecer entre os dois sistemas, consoante o sentido da transformação de coordenadas, tomam o nome de cinemática directa e inversa. A cinemática directa corresponde a uma transformação não linear do tipo:

$$r = f(q) \quad (3.1)$$

a qual tem sempre uma solução, e conduz à relação diferencial:

$$\dot{r} = \left(\frac{\partial f}{\partial q} \right) \cdot \dot{q} \quad (3.2)$$

Por outro lado, a cinemática inversa consiste no estabelecimento das relações inversas da forma:

$$q = f^{-1}(r) \quad (3.3)$$

Esta equação pode ter ou não solução e, no caso afirmativo, existem ainda duas possibilidades a saber: uma única solução ou uma infinidade de soluções. As relações diferenciais são também mais complexas que no caso anterior e resultam:

$$\dot{q} = \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)^{-1} \cdot \dot{r} \quad (3.4)$$

Pelo facto das últimas três juntas articuladas do robot partilharem a mesma origem, o movimento cartesiano

pode ser separado em movimento de translação e rotação, simplificando os cálculos envolvidos [7]. Deste modo, o problema da cinemática é dividido em dois subproblemas de menor dimensão ($n = m = 3$): (1) análise dos três primeiros eixos que constituem o braço e que permitem posicionar a mão no espaço tridimensional; e (2) análise dos três últimos eixos que constituem o punho e permitem orientar a mão [8]. A arquitectura do sistema robótico, ao nível mais baixo, proporciona o controlo independente da posição e velocidade de cada junta articulada. O propósito do controlador de posição é actuar os diferentes motores de modo que o deslocamento angular da junta siga o deslocamento angular desejado. Este tipo de movimento discreto entre dois pontos no espaço cartesiano é conhecido por movimento ponto-a-ponto, e é usado para colocar a ponta do braço (ou *end-effector*) numa posição e orientação arbitrária dentro do espaço de trabalho. Quando as juntas do manipulador são actuadas em velocidade o manipulador é capaz de executar movimentos contínuos ao longo de um dado caminho no espaço cartesiano. Este tipo de controlo, movimento diferencial, é usado para implementar o modo interactivo privilegiado de operação em que o utilizador do sistema, actuando sobre a Spaceball, manipula o robot ao longo do espaço de trabalho. Em qualquer dos casos, as transformações entre o espaço cartesiano e o espaço das juntas consomem uma parte considerável do tempo de processamento. Contudo, o controlo de velocidade exige transformações em tempo real, tornando esta tarefa computacionalmente muito intensiva e dando origem a maiores intervalos de controlo.

A. Redundância

Com base na geometria do braço, podem ser identificadas várias configurações para o manipulador. Para o manipulador tipo PUMA, com seis eixos, existem quatro soluções possíveis para a configuração dos primeiros três eixos (figura 3) e para cada uma destas soluções existem mais duas soluções possíveis para os três últimos eixos (figura 4). Manipuladores com seis graus de liberdade apresentam, frequentemente, redundância visto a tarefa particular a ser realizada requerer menos graus de liberdade do que os disponíveis no manipulador.

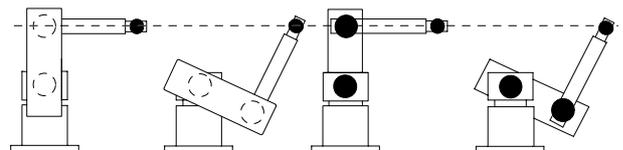


Fig. 3 - Configurações redundantes do braço.

B. Singularidades

As singularidades cinemáticas ou configurações singulares surgem quando a matriz jacobiana do manipulador $J_r(q)$, que relaciona as velocidades das juntas com a velocidade do *end-effector*, é singular. Nestas configurações, o robot degenera e perde um ou mais graus de liberdade, isto é, existe uma redução no número de linhas e colunas linearmente independentes da matriz. Em termos práticos, o mecanismo robótico não permite velocidades do *end-effector* nas chamadas direcções singulares. Isto embaraça severamente o controlo da trajectória desejada porque velocidades arbitrárias do *end-effector* não podem ser asseguradas. Trajectórias que passem perto de singularidades cinemáticas são também difíceis de efectuar porque o mau condicionamento da matriz jacobiana origina velocidades para as juntas articuladas que não são fisicamente realizáveis (embora de valor limitado).

Para o manipulador em estudo, com pulso esférico, as configurações singulares podem ser classificadas em duas partes: singularidade fronteira e singularidade interior. As singularidades fronteira podem ser evitadas restringindo a área de trabalho. Por sua vez, as singularidades interiores podem ocorrer virtualmente em qualquer lugar dentro do espaço de trabalho quando dois ou mais eixos do robot são colineares. Dada a estrutura cinemática do manipulador, todas as suas configurações singulares podem ser encontradas resolvendo a equação $\det[J_r(q)] = 0$ [7]. O manipulador tipo PUMA tem três singularidades (ver figura 5): (1) a singularidade de alinhamento, quando o pulso está tão próximo do eixo da primeira junta quanto é possível; (2) a singularidade de cotovelo, quando este se encontra completamente estendido; e (3) a singularidade de pulso, quando os eixos quatro e seis estão alinhados.

C. Arquitectura do Sistema Robótico

Todas as tarefas relacionadas com o braço manipulador são executadas no computador do robot equipado com um processador 68020. As tarefas são executadas concorrentemente sobre Albatros, um sistema operativo multi-tarefa em tempo real. O sistema operativo implementa um *scheduler* de prioridades com um período de amostragem de 7.5 ms. Os processos do sistema são tarefas de baixo nível geridas pelo *kernel* do Albatros, às

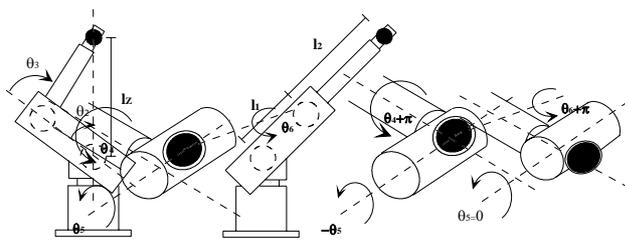


Fig. 5 - Configurações Singulares: (a) alinhamento; (b) cotovelo; (c) pulso.

quais estão reservadas as prioridades superiores. A tarefa associada aos controladores de PID compreende um gerador de trajectórias de referência e os ciclos individuais de controlo de baixo nível. O gerador de trajectória calcula os pontos intermédios das juntas articuladas de modo a sincronizar os seis eixos. A saída dos controladores de PID comandam os actuadores, forçando o deslocamento de cada junta articulada. A realimentação necessária ao controlo do movimento é obtido por meio de codificadores ópticos incrementais acoplados aos servo-motores em cada eixo individual. Uma placa controladora de eixos (*bus VME*) lê estes dados que permanecem disponíveis para os outros processos sob pedido (e.g., as tarefas de cinemática directa e inversa).

IV. INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

O operador do sistema está envolvido no controlo e supervisão do sistema através da consola de operação e da correspondente *interface* homem-máquina. A principal característica da *interface* desenvolvida é a integração de toda a informação necessária à operação do sistema num único écran, incluindo a exibição de imagens vídeo, modelos virtuais, e *interfaces* gráficas para o controlo (figura 6). A *interface* homem-máquina foi preparada com o objectivo de proporcionar um controlo supervisionado realista e intuitivo que permita:

- monitorar continuamente a operação via *displays* baseados em vídeo ou ambientes virtuais.
- interactivamente intervir e modificar os objectivos pela aplicação de comandos de controlo enquanto opera a Spaceball ou o rato na *interface* gráfica.

A informação visual de realimentação que permite conduzir e monitorar a operação do sistema é fornecida pelo sistema vídeo e pelo exibição visual do ambiente virtual a três dimensões. Um sistema robótico baseado em ambientes virtuais gerados por computador é uma alternativa a *displays* baseados em vídeo. Neste caso, um sinal de menor largura de banda, que consiste na informação dos ângulos das juntas articuladas, é enviado para o sistema local que constrói a representação virtual. O Modelo Virtual representa o sistema robótico a três dimensões. Os dados de posição necessários para a actualização visual são fornecidos pelo sistema sensorial do manipulador. Estes dados permanecem disponíveis ao nível do Communications Server, sendo inquiridos todos os 250 ms. Esta taxa de actualização representa o compromisso entre a taxa de *display* e a sua correspondência física, e o tempo de atraso relacionado com as comunicações (comandos do operador do sistema e dados posicionais de realimentação), assegurando deste modo a efectividade da representação. A velocidade computacional e de interpretação do sistema gráfico determinam esta taxa de modificação [9].

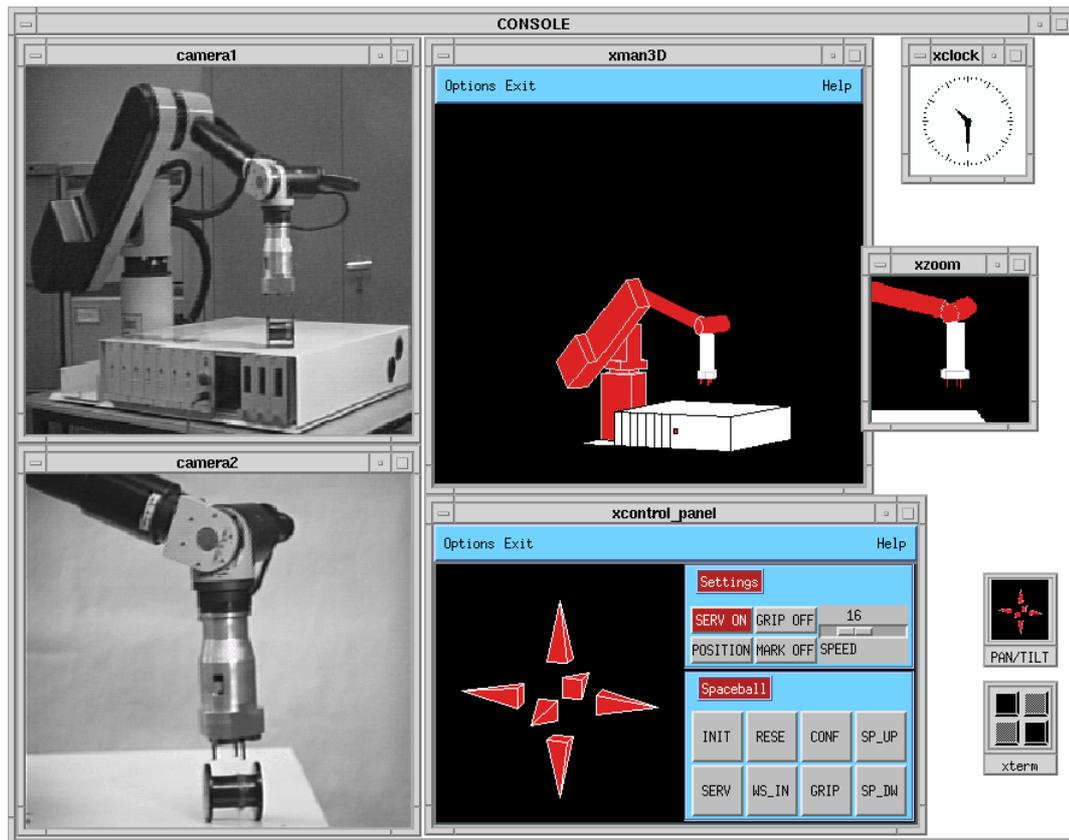


Fig. 6 - Vista integrada da *interface* gráfica do utilizador.

O uso de duas câmaras TV proporciona a realimentação visual para o operador do sistema, complementando a animação 3D em tempo real do braço manipulador. As duas câmaras são montadas em duas unidades de *pan-and-tilt* controladas por computador. Uma das câmaras tem uma lente grande angular permitindo uma vista global do ambiente de operação. A segunda câmara está equipada com lentes motorizadas com *zoom* e focagem automática favorecendo a exibição de detalhes. Uma descrição completa do sistema de visão pode ser encontrada em [10].

O operador interactivamente intervém no controlo do sistema pela aplicação de comandos quer operando a Spaceball quer usando o rato na *interface* Painel de Controlo. O módulo Painel de Controlo é uma janela interactiva que implementa facilidades de controlo para o braço manipulador. Esta *interface* gráfica proporciona os meios para activar as funções de controlo do robot e monitorar o seu estado corrente. Em adição, o painel de controlo funciona como *interface* de entrada dos comandos de movimento gerados pela Spaceball. Foram implementados dois modos de controlo do braço:

- modo target - o utilizador interactivamente selecciona a posição e/ou orientação final do *end-effector* (movimento ponto-a-ponto).
- modo interactivo - o operador usa um dispositivo de entrada, Spaceball ou rato, para controlar interactivamente os movimentos do *end-effector* (movimento diferencial).

V. DISCUSSÃO

O trabalho descrito não pode ser considerado completo, sendo antes um primeiro passo no desenvolvimento de um sistema de manipulação para a realização de operações de verificação remota. Nesta perspectiva, os objectivos futuros passam por duas fases importantes: (1) a integração no sistema robótico global (robot móvel e braço manipulador); e (2) o teste e avaliação a efectuar pelos utilizadores finais. O sistema é baseado em conceitos de modularidade e expansibilidade e, por isso, não são esperadas grandes dificuldades para a integração completa [2]. Por outro lado, a reacção dos utilizadores finais é difícil de prever, nomeadamente ao nível da *interface* homem-máquina. Na verdade, o desempenho do sistema depende, principalmente, da sincronização do ciclo de operação, incluindo o operador.

O controlador PID mostra-se adequado para o tipo de operações pretendidas: movimentos suaves e sem restrições de tempo. Contudo, em combinação com o sistema de engrenagens, apresenta uma reduzida velocidade de resposta, originando vibrações desnecessárias e limitando a precisão. Assim, o movimento da extremidade do braço é afectado pelas repetidas acelerações e desacelerações à volta do caminho seleccionado e por pequenas vibrações resíduais que produzem oscilações.

Aumentar a potência de cálculo é fundamental para deixar mais tempo computacional para outros algoritmos, como por exemplo, planeamento de trajectórias, detecção de obstáculos para evitar colisões, e etc. O operador humano encontra-se dentro do ciclo de realimentação a um nível muito alto mas com pequena largura de banda, enquanto o ciclo sensorial de baixo nível está perto do robot com grande largura de banda. Assim, o objectivo futuro é usar uma técnica de controlo supervisionado que permita passar cada vez mais autonomia para o robot, sem alterar a estrutura básica e permitindo a intervenção humana em tempo real.

VI. CONCLUSÕES

A arquitectura do sistema manipulador, tanto ao nível do *hardware* como do *software*, é bastante flexível para os tipos de operações envolvidas: movimento suave e sem restrições no tempo de execução. A filosofia de sistema aberto, com ênfase no uso de standards industriais (X11R5, Motif, PHIGS), é uma vantagem para a portabilidade do *software* para outros sistemas. A arquitectura a dois processadores permite uma distribuição flexível das tarefas de acordo com as suas características intrínsecas. Assim, as aplicações baseadas nos sensores ou orientadas para o *hardware* são executadas no computador do robot, enquanto as aplicações do utilizador orientadas para o controlo do sistema são executadas na estação gráfica em ambiente Unix.

Pode dizer-se que a *interface* gráfica é fácil de usar, proporcionando ao operador toda a informação necessária para a tele-operação do braço manipulador. A integração de várias janelas num único écran apresenta vantagens em relação a sistemas clássicos (em geral, incluem um grande número de monitores e consolas de operação), a principal das quais a de estimular a participação do operador dum modo mais activo.

A utilização de modelos virtuais permite, para além da complementaridade de informação, a implementação dum sistema de controlo local, isto é, em vez dos comandos serem transmitidos para o sistema remoto são usados por um modelo local. A informação visual adquirida poderá então ser usada para tarefas de treino de operadores ou como sistema de predição antes de efectuar uma dada tarefa.

REFERÊNCIAS

- [1] J.G.M. Gonçalves et. al., "Computer Aided Tele-Operation Applied to Safeguards", Proceedings of the 31st. Annual Meeting of the INMM, pg. 566-571, 1990.
- [2] J.G.M. Gonçalves et. al., "Mobile Robotics for the Surveillance of Fissile Materials Storage Areas: Sensors and Data Fusion", no livro *Data Fusion Applications*, editado por S. Pfleger, J.G.M. Gonçalves e D. Vernon, pg. 214-245, Springer-Verlag, 1993.
- [3] J.G.M. Gonçalves et. al., "Mobile Robotics Applied to the Remote Verification of Storage Areas", 15th ESARDA Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, pg. 817-827, 1993.
- [4] V. Sequeira, J.G.M. Gonçalves, "Communications Server for a Mobile Robotic System", JRC Technical Note, 1993.
- [5] *Spaceball: Application Developers' Reference*, Spatial Systems Inc, 1989.
- [6] *Albatros Reference Manual*, Robosoft Inc, 1989.
- [7] K.S. Fu, R.C. Gonzalez and C.S.G. Lee, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, 1987.
- [8] F.M. Silva, "Sistema de Tele-operação dum Manipulador Robótico", Tese de Mestrado, 1995.
- [9] F.M. Silva, J.G.M. Gonçalves, "A Graphical Tool for the Tele-operation of a Manipulator Arm", Proc. of COMPUGRAPHICS'92, pg. 346-354, 1992.
- [10] V. Sequeira, J.G.M. Gonçalves, "Control and Navigation of a Mobile Robot", JRC Technical Note, 1993.