



## **SISTEMA DE TELECOMANDO DE MANIPULADOR REDUNDANTE BASEADO EM VISÃO COMPUTACIONAL**

### **Wedson Torres de Almeida Filho**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

### **Patricia Nishimura Guerra**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

### **Pablo Javier Alsina**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

### **Anfranserai Morais Dias**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
xamd@dac.ufrn.br

**Resumo.** *Este artigo apresenta um sistema de telecomando de baixo custo, baseado em visão computacional, para um robô manipulador redundante planar de quatro graus de liberdade. O sistema é composto por uma interface de telecomando amigável que captura por meio de uma câmera de vídeo a imagem atual da mão do operador. Esta imagem é processada usando técnicas de visão computacional de modo a obter a pose (posição e orientação) da mão, que é passada como referência para um controlador cinemático convencional para robôs redundantes baseado em matriz pseudo-inversa. O controlador cinemático fornece, por sua vez, as referências em espaço de juntas para o servo controlador do robô manipulador, que desta maneira, acompanha os movimentos realizados pelo operador. Este pode acompanhar visualmente a resposta do braço através da sua imagem (real ou captada por uma câmera), assim como através de uma simulação gráfica do robô em um computador pessoal que serve de console de operação. Neste artigo, descreve-se a interface de telecomando proposta, as técnicas de visão computacional utilizadas para capturar a pose da mão do operador, bem como esquema de controle cinemático utilizado. Resultados experimentais demonstram o desempenho do sistema de telecomando proposto.*

**Palavras-chave:** *Sistema de Telecomando, Visão Computacional, Manipulador Redundante, Controle, Cinemática.*

# 1 INTRODUÇÃO

Muitas tarefas perigosas ou insalubres para os seres humanos podem ser desempenhadas de maneira segura através de teleoperação de robôs. Sistemas robóticos teleoperados vêm sendo utilizados em aplicações as mais diversas: desde aplicações de manipulação fina, como, por exemplo, em telecirurgias; passando pela manutenção de instalações petrolíferas off-shore; até na exploração de ambientes hostis, tal como na exploração vulcânica, submarina ou planetária (Yoon et al., 2001). Assim, devido às novas e potenciais aplicações que podem se beneficiar deste tipo de soluções, a teleoperação de robôs vem se tornando um florescente campo de pesquisas.

A medida em que os dispositivos teleoperados se tornam mais complexos, equipamentos tais como teach-pendant ou Joysticks de três graus de liberdade (como os usados atualmente para controlar o sistema de manipulação remoto -RMS - canadense do ônibus espacial) não são adequados para teleoperação intuitiva e não fatigante. Sistemas mestre-escravo de telecomando de robôs, (Silveira Filho and Alsina, 1999), vêm sendo aplicados desde 1960 (Goertz, 1964) e, desde então, teleoperação continua sendo o modo de controle primário em aplicações robóticas, despertando um crescente interesse nos pesquisadores desta área.

Muita pesquisa tem sido realizada visando controlar um braço escravo remotamente usando um braço mestre, o qual é usado pelo operador como interface háptica. Aspectos relacionados a modelagem (Yokokohji and Yoshikawa, 1994), realimentação de força (Lee et al., 1999), atrasos de comunicação (Chong et al., 2000) e limitações de banda passante (Belousov et al., 2001), vêm sendo estudados extensivamente. Frequentemente, nestes sistemas, dispositivos externos de captura de movimento ou sensores de ângulos de junta são usados para gerar comandos de posição do mestre para o escravo e diversos tipos de sinais são realimentados no sentido inverso. Na arquitetura do tipo Posição-Posição, a posição do mestre é passada como referência ao servo controlador do escravo e a posição do escravo é realimentada ao mestre. Por outro lado, para fazer o mestre sentir a força exercida pelo escravo, algum tipo de realimentação de força é necessária, tornando-se importante para um controle preciso ao lidar com ambientes desconhecidos. Neste caso, a arquitetura utilizada é do tipo Posição-Força, a qual, embora mais precisa, requer que o braço mestre seja dotado, além dos sensores de posição, de atuadores capazes de "refletir" no mestre a força exercida pelo braço escravo (Lee et al., 1999), (Kim et al., 2001). O uso apropriado de canais de sensores de força e posição nas duas direções é de importância crítica em aplicações de telepresença de alto desempenho (Lauwrence, 1993).

O alto custo inerente ao uso de um manipulador mestre como interface háptica, têm encorajado o desenvolvimento de novos dispositivos de interface homem-máquina, tais como sistemas capazes de processar e reconhecer sinais mio-elétricos obtidos dos membros do operador, (Farry et al., 1996), ou ciber-luvas, (Lee and Xu, 1996). Para atender a necessidade de interfaces mais transparentes, que permitam ao operador se concentrar mais na tarefa a ser realizada e menos nos mecanismos e protocolos de interação, novas técnicas e soluções vêm sendo propostas, incluindo, desde sistemas baseados em múltiplas modalidades sensoriais, (Jain et al., 2000), simulação em realidade virtual, (Chong et al., 2000), até sistemas de reconhecimento de gestos (Lee and Xu, 1996).

Neste artigo apresenta-se um sistema de telecomando baseado em visão computacional para um robô manipulador redundante planar de quatro graus de liberdade. Na presente implementação o braço mestre é substituído pelo próprio braço do operador humano, cuja pose é capturada através de técnicas de visão computacional. O operador pode acompanhar a posição do escravo através de imagens reais e simuladas do mesmo, fechando a malha de controle. Assim, a arquitetura do sistema proposto enquadra-se no tipo Posição-Posição, com a vantagem de dispensar o uso de um braço mestre, o que resulta em substancial redução de custo. Um

diagrama esquemático do sistema desenvolvido é mostrado em Fig. (1). Neste artigo, a Seção 2, a seguir, descreve o subsistema responsável pela obtenção da pose a partir da imagem, através da transformada KLT associada a procedimentos heurísticos. Na Seção 3, resultados experimentais mostram o desempenho do sistema de proposto para telecomando do robô manipulador de quatro graus de liberdade. A Seção 4 apresenta as conclusões finais e as perspectivas de continuidade deste trabalho.

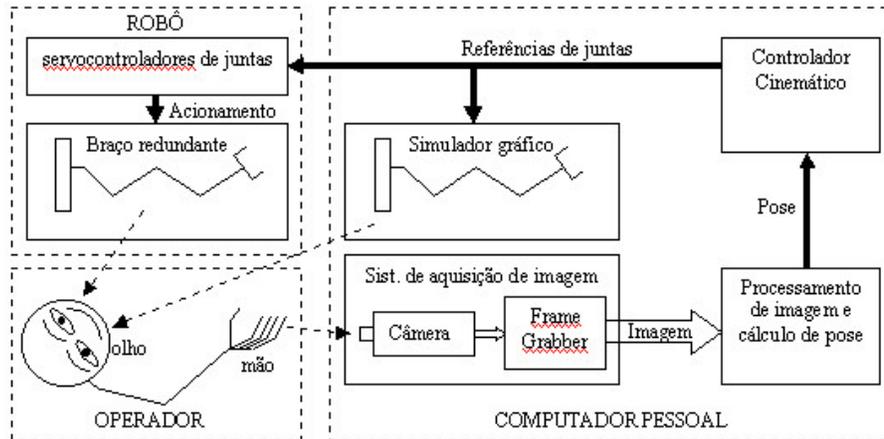


Figura 1: Diagrama Esquemático do Sistema de Telecomando Desenvolvido.

## 2 Processamento das Imagens

O processamento das imagens foi realizado em três etapas: (1) A imagem é segmentada de forma a determinar quais são os pontos que fazem parte das cruzes que servem como referência para a determinação da posição e orientação do braço do operador e do braço do robô. Para isto, foi utilizada a técnica de limiarização (ou *thresholding*). (2) Os pontos que foram segmentados na primeira etapa são utilizados para a determinação da posição e direção das cruzes, o que foi possível utilizando a matriz que seria usada para aplicar a transformada de Hotteling aos pontos. (3) O pontos segmentados na primeira etapa e a posição e direção determinadas na segunda etapa são utilizadas por uma variante do algoritmo de traçado de retas de Bresenham para a determinação do sentido das cruzes. O procedimentos serão detalhados no restante da seção.

### 2.1 Limiarização

Para a determinação dos pontos de interesse, primeiramente a imagem foi dividida em duas partes: a mais à esquerda, que contém a parte referente ao braço do operador e uma cruz branca de referência; e a mais à direita, que contém a parte referente ao braço robótico e uma cruz vermelha de referência. Em ambos a cor utilizada ao fundo é preta.

Para a separação da parte esquerda da figura, como o fundo é preto e a cruz é branca, há um grande contraste. Contudo que o operador não utilize roupa branca, um limiar simples baseado na componente azul de cada pixel pode ser utilizado para separar a cruz dos demais elementos da imagem.

Para a separação da parte direita da figura, como fundo é preto, o robô branco e a cruz vermelha, foi constatado que não há contraste suficiente para a limiarização baseada apenas

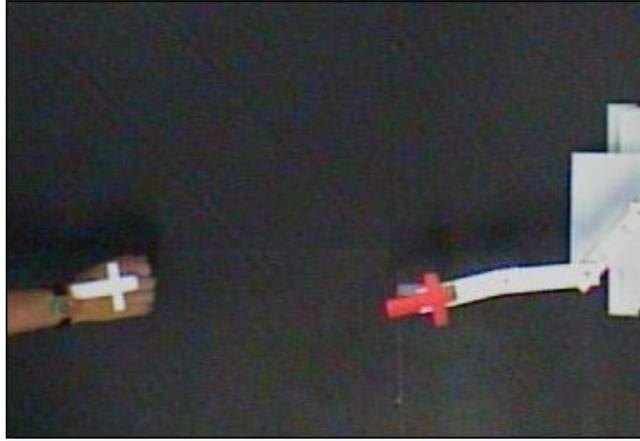


Figura 2: Exemplo de Imagem Captada.

em uma componente de cor. A solução utilizada, então, foi baseada em duas componentes de cor: a componente verde e a vermelha. As partes mais escuras da imagem tendem a ter as três componentes de cor com valores baixos, as partes mais claras tendem a ter as três componentes de cor com valores alto, mas em ambos os casos são valores bem próximos. Para o caso da cruz vermelha isso não se aplica, pois como ela é vermelha e escura, a componente vermelha sempre apresenta um valor elevado enquanto as outras duas um valor reduzido. Com isso, a diferença entre o vermelho e o verde (ou mesmo azul) apresenta-se como um fator de diferenciação entre as partes de imagem.

## 2.2 Determinação da Posição e Direção

Para a determinação da posição  $(x, y)$  da cruz, é suficiente o cálculo das médias das coordenadas  $x$  e  $y$  dos pontos que fazem parte das cruzes. Entretanto, a determinação da direção é um pouco mais complicado e foi utilizada parte da formulação da transformada de Hotelling, também comumente chamada de *autovetor*, *componente principal* ou *transformada discreta de Karhunen-Loève*. Na sua forma geral, a transformada é definida da seguinte forma: dado um conjunto de vetores do tipo

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix},$$

o *vetor médio* do conjunto é definido como

$$\mathbf{m}_x = E\{\mathbf{X}\},$$

onde  $E\{\cdot\}$  é o operador estatístico que significa o valor esperado do argumento. A *matriz de covariância* do conjunto de vetores é definida como

$$\mathbf{C}_x = E\{(\mathbf{x} - \mathbf{m}_x)(\mathbf{x} - \mathbf{m}_x)^T\}.$$

Para  $M$  amostras de vetores de um conjunto aleatório, o vetor médio e a matriz de covariância podem ser aproximados a partir de amostras por

$$\mathbf{m}_x = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{X}_k \quad (1)$$

e

$$\mathbf{C}_x = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T - \mathbf{m}_x \mathbf{m}_x^T. \quad (2)$$

Como  $\mathbf{C}_x$  é real e simétrica, é sempre possível encontrar um conjunto de  $n$  autovetores ortonormais. Sejam  $\mathbf{e}_i$  e  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , os autovetores e autovalores correspondentes de  $\mathbf{C}_x$ , arranjados (por conveniência) em ordem crescente de modo que  $\lambda_j \geq \lambda_{j+1}$  para  $j = 1, 2, \dots, n-1$ . Seja  $\mathbf{A}$  uma matriz cujas linhas são formadas a partir dos autovetores de  $\mathbf{C}_x$ , ordenados de modo que a primeira linha de  $\mathbf{A}$  é o autovetor correspondente ao maior autovalor, e a última linha é o autovetor correspondente ao menor autovalor.

Supondo que  $\mathbf{A}$  é uma matriz de transformação que mapeia os  $\mathbf{x}$  em vetores denotados por  $\mathbf{y}$ , como segue:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{m}_x). \quad (3)$$

O conjunto de vetores  $\mathbf{y}$  será totalmente descorrelacionado, ou seja,  $\mathbf{C}_y$  será uma matriz diagonal. Para que isto seja possível, a matriz de transformação  $\mathbf{A}$  precisa rotacionar os vetores de entrada de forma que o  $n$ -ésimo eixo de maior variância se alinhe com o  $n$ -ésimo eixo canônico.

Por se tratar de uma cruz, o eixo de maior variância é o eixo que determina a direção do braço do operador ou o braço do robô. Portanto, para a determinação da direção calcula-se a matriz de transformação  $\mathbf{A}$  como se fosse fazer com que a cruz se alinha-se com os eixos canônicos, então extrai-se de  $\mathbf{A}$  a componente responsável pela rotação do eixo principal e este vetor será a direção da cruz.

Este algoritmo funciona muito bem para a determinação da direção, entretanto ele não proporciona informação alguma sobre o sentido do eixo principal. Para isso outra deve ser executada, que será descrita a seguir.

### 2.3 Determinação do Sentido

A cruz foi escolhida porque desta forma a média no eixo principal tende a ficar abaixo do metade do mesmo, ou seja, após calculado o ponto médio da cruz, ele estará sempre deslocado do centro do eixo principal, pois o segundo eixo principal tende a deslocar o centro de massa da cruz para perto de si.

Portanto, sabendo-se o centro de massa da cruz e a direção do eixo principal é possível encontrar o sentido partindo do centro de massa e seguindo na direção do eixo principal primeiramente em um sentido e depois no outro até que o final da cruz seja encontrado. O sentido que estiver mais distante é o sentido correto.

O algoritmo de Bresenham permite que retas sejam traçadas de um dado ponto  $(x_i, y_i)$  para outro ponto  $(x_f, y_f)$  sem a necessidade de operações envolvendo ponto flutuante. Esta formulação foi utilizada para a determinação do sentido. O ponto inicial foi o centro de massa da cruz e o ponto final foi um ponto seguindo um sentido no eixo principal e depois seguindo o outro eixo.

### 3 RESULTADOS

Para obtenção dos resultados foi utilizado o algoritmo de controle cinemático baseado em matriz pseudo-inversa, responsável por gerar as referências para os servo controladores das juntas do robô, sobre um manipulador redundante planar de quatro juntas.

O sistema de controle implementado parte do pressuposto que o modelo cinemático inverso disponível do robô é exato. Quanto mais impreciso é este modelo, menor é a garantia de que a ferramenta será controlada adequadamente, apesar de que um erro nulo seja garantido no controle dos ângulos de junta. Assim, em esquemas de controle deste tipo, a posição da garra é, em última instância, controlada em malha aberta. Este erro pode ser observado em Fig. (3) que ilustra os valores de posição para o eixo  $x$ , da referência e da ferramenta do manipulador, obtidos pela visão computacional. A Figura (4) que ilustra os valores de posição para o eixo  $y$ . A Figura (5), ilustra os valores de posição para a orientação da ferramenta.

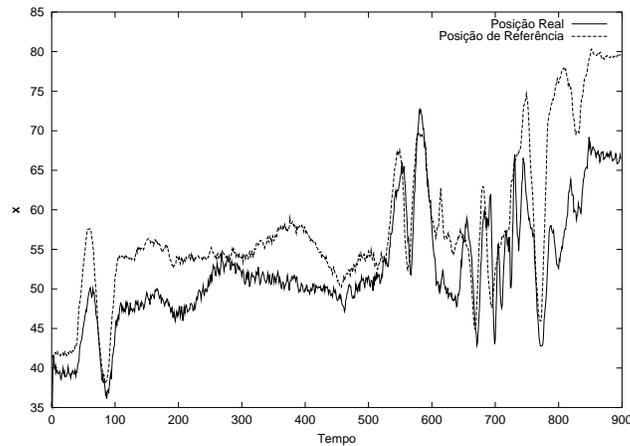


Figura 3: Gráfico Comparativo das Posições - Eixo  $x$ .

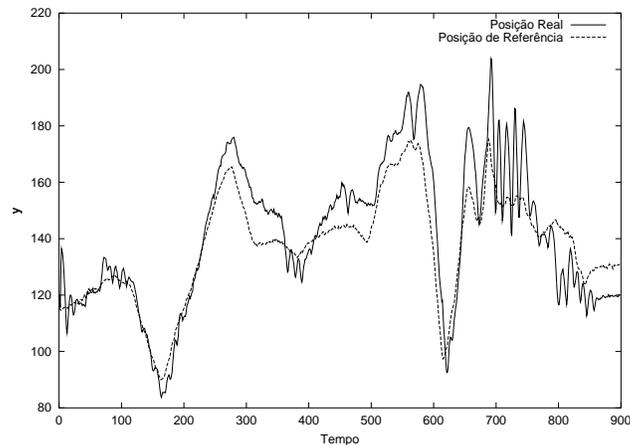


Figura 4: Gráfico Comparativo das Posições - Eixo  $y$ .

A Figura (6) contém uma tela captada durante a execução do programa de telecomando, ilustrando a interface com o usuário. Do lado superior esquerdo têm-se a imagem captada pela câmera sem nenhum tratamento, do lado superior direito a imagem foi processada, aplicado

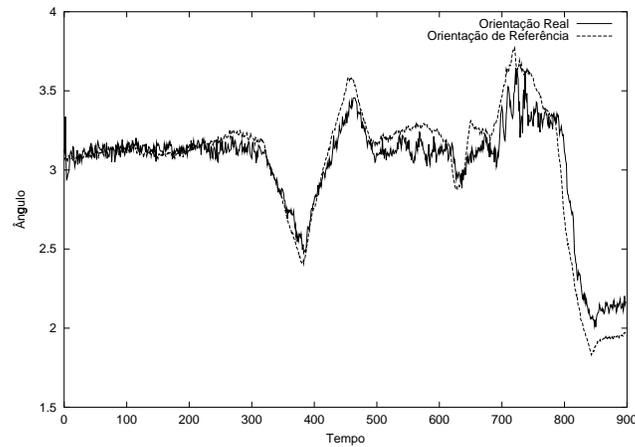


Figura 5: Gráfico Comparativo das Orientações.

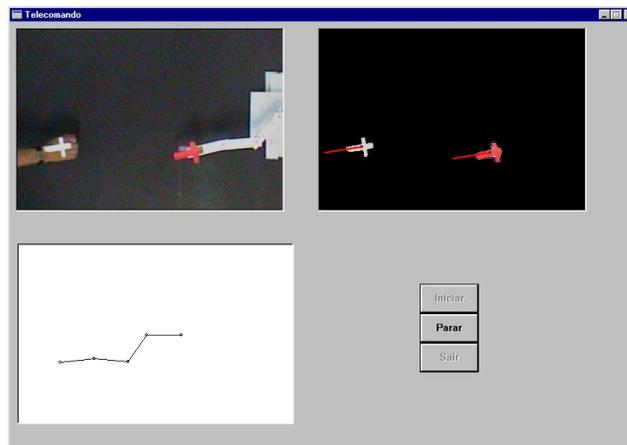


Figura 6: Imagem da Interface Captada do Programa de Telecomando.

o algoritmo de limiarização e feita a determinação de posição e orientação. Do lado inferior esquerdo existe uma representação do manipulador, ela é usada para testes com o manipulador desligado do sistema, esta imagem pode ser usada caso o manipulador controlado esteja vinculado a uma outra máquina, desde modo não há necessidade de transmitir toda imagem do manipulador, apenas os valores de posição e orientação.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um novo sistema para telecomando para braços manipuladores baseado na arquitetura Posição-Posição. O sistema implementado apresenta a vantagem de dispensar o uso de um braço manipulador mestre, sendo este substituído pelo braço do próprio operador, cuja pose é capturada por meio de um sistema de visão simples. A eliminação da necessidade de um braço mestre resulta em uma grande economia, uma vez que este representa uma boa percentagem do custo total do sistema.

Testes experimentais preliminares demonstraram a viabilidade do sistema proposto. Conforme mostrado nos resultados experimentais, o braço escravo responde razoavelmente aos comandos do braço do operador, embora ruídos de medição inerentes ao sistema de visão deteriorem um

pouco o desempenho. O uso de filtros passa baixa apropriados, capazes de fornecer trajetórias mais suaves parece ser um caminho promissor para a minimização deste problema.

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento um novo protótipo de sistema de telecomando, baseado na mesma arquitetura, capaz de fornecer referências de posição e orientação em espaço cartesiano tridimensional, permitindo a sua aplicação a qualquer classe de robô manipulador, contornando a limitação do sistema atual, que só é aplicável a robôs manipuladores planares.

## Referências

- Belousov, I. R., Chellali, R. and Clapworthy, G. J.: 2001, Virtual reality tools for internet robotics., *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, ICRA'2001, Vol. 2*, pp. 1878–1883.
- Chong, N. Y., Kotoku, T., Ohba, K., Sasaki, H., Komoriya, K. and Tanie, K.: 2000, Use of coordinated on-line graphics simulator in collaborative multi-robot teleoperation with time delay., pp. 167–172.
- Farry, K. A., Walker, I. D. and Baraniuk, R. G.: 1996, Myoelectric teleoperation of a complex robotic hand., *IEEE Transactions On Robotics and Automation*. **12**(5), 775–788.
- Goertz, R.: 1964, Manipulator systems development at anl., *Proceedings of the 12th Conference on Remote Systems Technology, American Nuclear Society, Vol. 12*.
- Jain, T., Dash, S. K., Agrawal, N., Sem, S. and Mukerjee, A.: 2000, Unified multiple media interface for robot teleoperation., *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME'2000, Vol. 1*, pp. 199–202.
- Kim, Y. S., Lee, S., Cho, C., Kim, M. and Lee, C. W.: 2001, A new exoskeleton-type master-arm with force reflection based on the torque sensor beam., *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, ICRA'2001, Vol. 1*, pp. 407–412.
- Lauwrence, D. A.: 1993, Stability and transparency in bilateral teleoperation., *IEEE Transactions On Robotics and Automation*. **9**(5), 624–637.
- Lee, C. and Xu, Y.: 1996, Online, interactive learning of gestures for human/robot interfaces., *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'96, Vol. 4*, pp. 2982–2987.
- Lee, S., Lee, J., Chung, W., Kim, M. and Lee, C. W.: 1999, A new exoskeleton-type master arm with force reflection : Controller and integration., *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'99 IEEE/RSJ, Vol. 3*, pp. 1438–1441.
- Silveira Filho, G. F. d. and Alsina, P. J.: 1999, Tele-comando de braços manipuladores robóticos utilizando configuração mestre-escravo., *Anais do X Congresso de Iniciação Científica da UFRN, Natal, Brasil (em CD-ROM)*, pp. ET–227.
- Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T.: 1994, Bilateral control of master slave manipulators for ideal kinesthetic coupling - formulation and experiment., *IEEE Transactions On Robotics and Automation*. **10**(5), 605–620.
- Yoon, W. K., Goshozono, T., Kawabe, H., Kinami, M., Tsumaki, Y., Uchiyama, M., Oda, M. and Doi, T.: 2001, Model based teleoperation of a space robot on ets-vii using a haptic interface., *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, ICRA'2001, Vol. 3*, pp. 2628–2633.

# REDUNDANT MANIPULATOR TELE-OPERATED SYSTEM BASED IN COMPUTER VISION

## **Wedson Torres de Almeida Filho**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

## **Patricia Nishimura Guerra**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

## **Pablo Javier Alsina**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
pablo@dac.ufrn.br

## **Anfranserai Morais Dias**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, DCA - CT - UFRN,  
Lagoa Nova, Natal - RN, Cep.: 59072-970  
xamd@dac.ufrn.br

**Abstract.** *This article presents a low-cost tele-operated system, based on computer vision, for a planar redundant manipulator robot with four degrees of freedom. The system is composed of a friendly tele-operation interface that captures, using a frame grabber, the image of the operator's hand. This image is processed using computer vision techniques in order to obtain the operator's hand pose (position and orientation), which is passed as the reference to a redundant robot conventional kinematic controller based on pseudo-inverse matrix. The kinematic controller, in turn, gives the references in joint-space to the robot's servo-motors, which mimics the operator's movement. The operator, in turn, can visually trace the robot's response using its image (real or captured by the camera), as well as using a graphical simulation of the robot in a personal computer that serves as the operation console. In this article, it is described the proposed tele-operation interface, as well as the kinematic control scheme used. Experimental results demonstrate the proposed tele-operation system's performance.*

**Index Terms:** *Tele-operated System, Computer Vision, Redundant Manipulator, Control, Kinematics.*