

# DETECÇÃO DE FALHAS DO TIPO JUNTA PASSIVA E RECONFIGURAÇÃO DE CONTROLE EM ROBÔS COOPERATIVOS

RENATO TINÓS, MARCO H. TERRA

*Lab. de Sist. Inteligentes, Depto. de Eng. Elétrica, USP, C. P. 359, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil*  
{tinós} terra@sel.eesc.sc.usp.br

MARCEL BERGERMAN

*Genius Instituto de Tecnologia, Av. Assaí, 875, Bloco E, 69075-904, Manaus, AM, Brasil*  
mbergerman@genius.org.br

**Resumo**— Um sistema para tolerância a falhas do tipo junta passiva em robôs manipuladores cooperativos é apresentado. O sistema é composto de duas partes principais. Primeiro, a falha é detectada e isolada. A seguir, os freios dos robôs são aplicados e o sistema de controle é reconfigurado. A detecção e isolamento das falhas é realizada através de duas redes neurais artificiais. Por fim, os robôs com falhas são controlados através de um controle híbrido de movimento e esmagamento do objeto projetado para que os robôs operem com juntas passivas. Simulações com dois robôs são apresentadas demonstrando a eficácia do sistema de tolerância a falhas.

**Abstract**— The problem of fault tolerance in cooperative manipulators with passive joints is addressed. The faults are first detected by a fault detection and isolation system based on two artificial neural networks. After the isolation of the fault, brakes are applied and the control system is reconfigured. The hybrid control of the motion and squeeze of the object is used. Simulations with two robots are presented, indicating the effectiveness of the system.

**Key Words**— Fault Tolerance, Fault Isolation, Robotic Manipulators, Neural Networks, Co-operation

## 1 Introdução

A disseminação do uso de robôs em medicina, ambientes não-explorados, ambientes perigosos, domicílios e outros ambientes não-estruturados tem aumentado significativamente. Nestes ambientes, robôs têm sido utilizados para evitar que seres-humanos sejam submetidos a situações de risco ou devido a maior confiabilidade na execução de certas tarefas. No entanto, considera-se que os robôs sejam livres de falhas que possam comprometer a tarefa a ser executada.

Ná prática, falhas em robôs têm sido comuns devido à alta complexidade de tais sistemas (Dhillon, 1991). Robôs estão sujeitos a diversas falhas que podem originar-se nos sistemas eletrônicos, elétricos, pneumáticos, hidráulicos, de programação, mecânicos, entre outros (Visinsky et al., 1994). Como exemplo, pode-se citar que o tempo médio entre falhas registrado em robôs industriais varia entre 500 e 2500 horas (Dhillon e Fashandi, 1997). Em ambientes não-estruturados e/ou perigosos, como aqueles citados anteriormente, espera-se que o número de falhas aumente devido a fatores externos. Assim, existem boas razões para se pesquisar sistemas de detecção e isolamento de falhas (DIF) para robôs.

Em muitos ambientes, devido a distância, a periculosidade ou a necessidade de se executar rapidamente uma tarefa, prover os robôs somente com sistemas DIF não é suficiente. Por exemplo, um robô que desarma explosivos ou desenvolve tarefas em prospecção de petróleo, não pode

esperar por reparos após a ocorrência de falhas. Já em robôs com falhas em ambientes perigosos ou distantes, é difícil ou impossível enviar seres-humanos para os reparos necessários. Assim, é necessário que, após a DIF, o robô se reconfigure para continuar trabalhando na presença de falhas.

Infelizmente, DIF e tolerância a falhas em robôs não têm recebido a devida atenção da comunidade científica. Devido ao crescente aumento de aplicações de robôs nas mais diferentes áreas, falhas em sistemas robóticos tendem a aumentar proporcionalmente. Se pouca atenção tem sido dada ao problema de falhas em robôs manipuladores individuais, quase nenhuma tem sido direcionada ao problema de falhas em robôs manipuladores cooperativos. De acordo com o conhecimento dos autores, o problema DIF em sistemas cooperativos foi apenas tratado muito recentemente (Tinós et al., 2001). Já o problema de controle dos robôs cooperativos com juntas passivas foi tratado apenas em (Liu et al., 1999) e outros trabalhos dos mesmos autores. No entanto, robôs manipuladores cooperativos vêm recebendo atenção crescente tanto dos meios industriais como dos meios acadêmicos (Caccavale, 1997).

Similarmente ao caso humano, no qual o uso de dois braços ou várias pessoas representa uma nítida vantagem na realização de diversas tarefas, dois ou mais manipuladores podem executar tarefas que seriam difíceis ou mesmo impossíveis para um único robô. Podem ser citados como exemplos, as tarefas de manipulação de objetos

grandes e/ou pesados, e a montagem ou manipulação de cargas que envolvam objetos flexíveis ou que possam escorregar de um único efetuador. Além disso, sistemas robóticos cooperativos apresentam um alto grau de redundância de atuação já que o número de atuadores é em geral maior que o número de graus de liberdade na carga. Esta característica torna o uso de robôs cooperativos em ambientes não-estruturados e/ou perigosos bastante atraente. Contudo, a presença de sistemas tolerantes a falhas nestes ambientes é vital.

Neste trabalho, um sistema completo para tolerância a falhas do tipo junta passiva em robôs manipuladores cooperativos conectados rigidamente à carga é apresentado. O sistema é composto de duas partes principais. Primeiro, a falha é detectada e isolada por um sistema DIF. A seguir, os freios dos robôs são aplicados e o sistema de controle é reconfigurado. A DIF é realizada através de duas redes neurais (Tinós et al., 2001). Já o controle dos robôs com juntas passivas é desenvolvido a partir do controlador híbrido de movimento e esmagamento da carga para o sistema sem falhas (Wen e Kreutz-Delgado, 1992).

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 discute a dinâmica e o controle do sistema cooperativo sem falhas; o sistema de tolerância a falhas é discutido na seção 3; a seção 4 apresenta o sistema DIF; o controlador para o sistema com juntas passivas é apresentado na seção 5; os resultados da simulação de dois robôs cooperativos são apresentados na seção 6; e, finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 7.

## 2 Manipuladores Cooperativos

Considere  $m$  robôs rigidamente conectados a um objeto. Adotando  $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1^T \mathbf{q}_2^T \dots \mathbf{q}_m^T]^T$ , sendo  $\mathbf{q}_i$  o vetor dos ângulos das juntas do manipulador  $i$  e ignorando, por simplicidade, os torques friccionais, pode-se escrever a dinâmica dos robôs do sistema cooperativo como

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}[\boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{h} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - \mathbf{C}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}] \quad (1)$$

na qual  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1^T \dots \tau_m^T]^T$  é o vetor dos torques aplicados nas juntas dos robôs,  $\tau_i$  é o vetor dos torques aplicados nas juntas do robô  $i$ ,  $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_1^T \dots \mathbf{g}_m^T]^T$  é o vetor dos torques gravitacionais nas juntas dos robôs,  $\mathbf{h}(t) = [\mathbf{h}_1^T \dots \mathbf{h}_m^T]^T$  é o vetor das forças e momentos aplicados pelos efetuadores no objeto,  $\mathbf{J}$  é formada pelas Jacobianas que relacionam as velocidades nas juntas com aquelas nos efetuadores,  $\mathbf{M}$  é formada pelas matrizes de inércia dos manipuladores, e  $\mathbf{C}$  é formada pelas matrizes dos termos centrífugos e de Coriolis dos robôs. Já a dinâmica do objeto é dada por

$$\ddot{\mathbf{x}}_o = \mathbf{M}_o^{-1}[-\mathbf{J}_o(\mathbf{x}_o, \mathbf{q})^T \mathbf{h} - \mathbf{b}_o(\mathbf{x}_o, \dot{\mathbf{x}}_o)] \quad (2)$$

na qual  $\mathbf{x}_o$  é o vetor das posições do centro de gravidade (CG) e orientações do objeto,  $\mathbf{b}_o$  é o

vetor dos termos centrífugos, de Coriolis e gravitacionais do objeto,  $\mathbf{M}_o$  é a matriz de inércia do objeto, e  $\mathbf{J}_o$  relaciona as velocidades do objeto com aquelas dos efetuadores.

Usando as equações (1) e (2) e as restrições geométricas impostas pela cinemática do sistema cooperativo, é possível calcular o vetor de forças e momentos  $\mathbf{h}(t)$  (Carignan e Akin, 1988). Nota-se que este vetor é função dos torques, posições e velocidades nas juntas. Assim, considerando uma taxa de amostragem suficientemente pequena, a dinâmica dos robôs sem falhas é dada por

$$\dot{\mathbf{q}}(t + \Delta t) = \mathbf{f}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \tau(t)) \quad (3)$$

na qual  $\mathbf{f}(\cdot)$  representa a função dinâmica do sistema livre de falhas. Quando ocorre uma falha  $\phi$ , a dinâmica dos robôs torna-se

$$\dot{\mathbf{q}}(t + \Delta t) = \mathbf{f}_\phi(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \tau(t)) \quad (4)$$

na qual  $\mathbf{f}_\phi(\cdot)$  representa a função dinâmica do sistema com a falha  $\phi$ .

### 2.1 Controle do Sistema sem Falhas

O problema de controle de manipuladores cooperativos é uma tarefa complexa. Devido as interações dinâmicas entre os robôs e as restrições cinemáticas presentes no sistema cooperativo, o controle dos manipuladores deve ser feito de maneira coordenada. Deve-se notar que nem toda força aplicada pelo manipulador no objeto contribui para a execução do movimento. As forças e momentos que não contribuem para o movimento são chamadas de forças de esmagamento e, se não forem minimizadas, podem causar danos ao objeto e aos robôs. Já aquelas que contribuem para o movimento do objeto são chamadas de forças de movimento e são ortogonais às forças de esmagamento (Wen e Kreutz-Delgado, 1992).

Várias soluções surgiram para tratar o problema do controle de manipuladores sem falhas conectados a objetos rígidos. O controle híbrido do movimento e esmagamento do objeto desenvolvido em (Wen e Kreutz-Delgado, 1992) é particularmente interessante por tratar independentemente os controles de movimento e esmagamento. É interessante também por sua simplicidade e robustez a erros de modelagem, já que não exige o conhecimento detalhado do modelo dinâmico do sistema cooperativo. Nota-se que, para o sistema cooperativo, o controle de esmagamento não influencia o movimento, mas o controle de movimento influencia o esmagamento. Isto ocorre devido à força inercial d'Alembert. Assim, em (Wen e Kreutz-Delgado, 1992), projeta-se primeiro um controlador de movimento estável com compensação dos termos gravitacionais ignorando-se o esmagamento. Então, projeta-se um controlador de esmagamento considerando a força inercial como

uma perturbação. Tal sistema de controle é utilizado aqui no sistema cooperativo sem falhas e, sua filosofia será utilizada para o controle do sistema cooperativo com falhas do tipo junta passiva.

### 3 Sistema de Tolerância a Falhas

Falhas do tipo junta passiva se caracterizam por uma perda de atuação na junta. Este tipo de falha pode ser causada, por exemplo, por perda de potência elétrica em atuadores elétricos, falha nos atuadores ou perda de pressão em sistemas hidráulicos (English e Maciejewski, 1998). Em função da inércia, da gravitação e do acoplamento dinâmico entre as juntas, falhas do tipo junta passiva podem levar os robôs a rapidamente se chocarem com o chão ou outros objetos no ambiente de trabalho. Podem também, se o controlador desenvolvido para o sistema sem falhas não for projetado para trabalhar com o sistema com falhas, fazer com que as forças de esmagamento cresçam demasiadamente e danifiquem a carga ou levem à instabilidade do sistema. Portanto, é necessário que o sistema de tolerância detecte rapidamente este tipo de falha.

O sistema de tolerância a falhas proposto neste trabalho pode ser visto na figura 1. Os sinais de posições, velocidades e torques nas juntas alimentam o sistema DIF (Seção 4), que fornece um sinal indicativo da operação sem falhas dos robôs ou da junta em que ocorreu a falha. Este sinal serve para configurar o sistema de controle. No caso da operação sem falhas, o controlador híbrido do movimento e esmagamento desenvolvido em (Wen e Kreuz-Delgado, 1992) é utilizado. No caso da operação com falhas, o controlador apresentado na seção 5 é utilizado, sendo antes configurado de acordo com o tipo de falha isolada. Após a detecção da falha, os freios pneumáticos são aplicados por um pequeno instante de tempo para evitar que o sistema cooperativo com falhas desenvolva velocidades muito altas decorrentes da inércia e das forças gravitacionais.

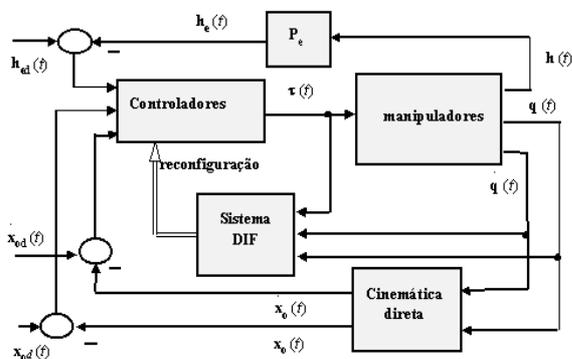


Figura 1. Sistema de tolerância a falhas. A matriz  $P_e$  transforma as forças medidas nas forças de esmagamento. O subscrito  $d$  representa os valores desejados.

### 4 Detecção e Isolação de Falhas

A maioria dos sistemas DIF para manipuladores individuais utiliza o modelo matemático do robô sem falhas para a geração de resíduos (Visinsky et al., 1994). Os resíduos são gerados através da diferença entre os estados medidos nos robôs e as estimativas destes. A seguir, as falhas são detectadas através da análise dos resíduos. No entanto, erros de modelagem podem causar alarmes falsos ou esconder os efeitos das falhas. Em (Terra e Tinós, 2001), os resíduos são gerados utilizando-se um *perceptron* multicamadas (*multilayer perceptron* - MLP). Então, tais resíduos são classificados através de uma rede com função de base radial (*radial basis function* - RBF). Em (Tinós et al., 2001), este sistema DIF é adaptado para o sistema cooperativo. Este é o sistema DIF utilizado neste trabalho.

Primeiro, a dinâmica do sistema sem falhas é reproduzida pelo MLP (figura 2). As saídas do MLP reproduzem as velocidades do sistema sem falhas (eq. 3) e, quando comparadas com as velocidades medidas, gera o vetor de resíduos  $\hat{r}_\phi$ . Quando não existem falhas, este vetor é quase nulo. Já quando existe uma falha detectável do tipo  $\phi$ , a dinâmica do sistema é dada pela (eq. 4) e o vetor de resíduo assume valores distintos de zero. Este vetor deve assumir diferentes comportamentos para as falhas nas diferentes juntas. Tais comportamentos são conhecidos como assinaturas das falhas e possibilitam a isolamento da falha através de classificação. Aqui, a classificação é feita através de uma rede RBF treinada pelo Mapa Auto-Organizável de Kohonen (Tinós e Terra, 2001). O esquema de classificação dos resíduos pode ser visto na figura 3.

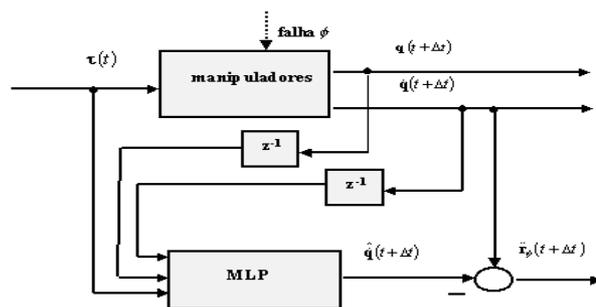


Figura 2. Geração de resíduos.

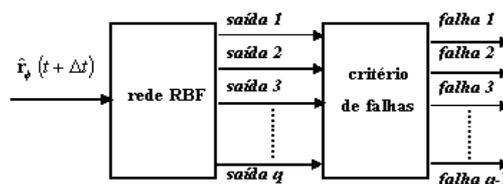


Figura 3. Análise de resíduos.

## 5 Controle do Sistema com Falhas

Em (Liu et al., 1999), dois manipuladores em um sistema cooperativo com um número de juntas passivas ( $n_p$ ) igual ou menor ao número de graus de liberdade da carga ( $k$ ) são controlados através de um método torque calculado modificado. Para isso, a matriz Jacobiana que transforma as velocidades das juntas ativas nas velocidades do objeto, chamada de matriz  $\mathbf{Q}$ , é calculada. Se  $n_a > k$  ( $n_a$  é o número de juntas ativas do sistema cooperativo), então  $n_a - k$  componentes das forças/momentos nos efetuadores podem ser controladas. Note que o as forças/momentos nos efetuadores são controladas ao invés das forças de esmagamento. No entanto, as forças/momentos nos efetuadores são responsáveis também pelo controle de movimento e o movimento afeta o esmagamento. Além disso, o equacionamento da matriz  $\mathbf{Q}$  não permite o uso de mais de dois robôs e o controlador necessita do conhecimento de todo o modelo dinâmico do sistema cooperativo.

Será proposta aqui uma lei de controle baseada em (Wen e Kreutz-Delgado, 1992) em que trata-se independentemente o controle de movimento e o de esmagamento. Além disso, será desenvolvida uma nova matriz  $\mathbf{Q}$  que permite o uso de mais de dois manipuladores. Espera-se que tal controle seja mais robusto a erros de modelagem já que não necessita do conhecimento de todo o modelo dinâmico do sistema.

Primeiro a nova matriz  $\mathbf{Q}$  será calculada para  $m > 1$ . A seguir, um controlador de movimento estável será desenvolvido. Então, o controle do esmagamento será tratado. Como é possível calcular as posições e orientações do objeto conhecendo as posições das juntas de qualquer robô, pode-se escrever a seguinte restrição cinemática

$$\mathbf{x}_o = \varphi_1(\mathbf{q}_1) = \varphi_2(\mathbf{q}_2) = \dots = \varphi_m(\mathbf{q}_m) \quad (5)$$

na qual  $\varphi_i(\mathbf{q}_i)$  é o vetor de posições e orientações do objeto calculado a partir da posições das juntas do robô  $i$ . Da eq. (5), pode-se escrever que

$$m\mathbf{x}_o = \varphi_1(\mathbf{q}_1) + \varphi_2(\mathbf{q}_2) + \dots + \varphi_m(\mathbf{q}_m). \quad (6)$$

Derivando a eq. (6) e particionando entre as variáveis relacionadas às juntas passivas e ativas,

$$m\dot{\mathbf{x}}_o = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \varphi_i(\mathbf{q}_i)}{\partial \mathbf{q}_a} \dot{\mathbf{q}}_a + \sum_{i=1}^m \frac{\partial \varphi_i(\mathbf{q}_i)}{\partial \mathbf{q}_p} \dot{\mathbf{q}}_p = \mathbf{D}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{D}_p \dot{\mathbf{q}}_p \quad (7)$$

na qual o índice  $a$  refere-se às quantidades relativas às juntas ativas e o índice  $p$  àquelas relativas às juntas passivas,  $\mathbf{q}_a$  é o vetor contendo as posições das juntas ativas do sistema e,  $\mathbf{q}_p$  é o vetor contendo as posições das juntas passivas.

Examinando novamente a eq. (5), pode-se

considerar dois casos. Considerando-se  $m$  par,

$$\sum_{i=1}^m (-1)^{i+1} \varphi_i(\mathbf{q}_i) = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Derivando a eq. (8) e particionando entre as variáveis relacionadas às juntas ativas e passivas,

$$\mathbf{R}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{R}_p \dot{\mathbf{q}}_p = \mathbf{0} \quad (9)$$

que dá a relação entre as velocidades das juntas ativas e das juntas passivas quando  $m$  é par. É interessante notar que tal relação não pode ser encontrada em um robô individual (Liu et al., 1999). Já quando  $m$  é ímpar

$$\sum_{i=1}^m (-1)^{i+1} \varphi_i(\mathbf{q}_i) = \mathbf{x}_o \quad (10)$$

e, derivando a eq. (10) e particionando entre as variáveis relacionadas às juntas ativas e passivas,

$$\mathbf{R}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{R}_p \dot{\mathbf{q}}_p = \dot{\mathbf{x}}_o \quad (11)$$

que dá a relação entre as velocidades das juntas ativas e das juntas passivas quando  $m$  é ímpar.

Utilizando as eq. (7), (9) e (11) pode-se escrever a relação entre as velocidades do objeto e as velocidades nas juntas ativas como

$$\dot{\mathbf{x}}_o = \mathbf{Q} \dot{\mathbf{q}}_a \quad (12)$$

na qual

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{m} (\mathbf{D}_a - \mathbf{D}_p \mathbf{R}_p^\# \mathbf{R}_a) \quad (13)$$

se  $m$  é par ( $\#$  denota a pseudo-inversa), e

$$\mathbf{Q} = (m\mathbf{I} - \mathbf{D}_p \mathbf{R}_p^\#)^{-1} (\mathbf{D}_a - \mathbf{D}_p \mathbf{R}_p^\# \mathbf{R}_a) \quad (14)$$

se  $m$  é ímpar, sendo  $\mathbf{I}$  a matriz identidade.

Agora, será projetado um controle de movimento estável baseado na matriz  $\mathbf{Q}$ . Existindo juntas passivas no sistema cooperativo, pode-se dividir a eq. dinâmica dos robôs (1) como

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ap} \\ \mathbf{M}_{pa} & \mathbf{M}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_a \\ \ddot{\mathbf{q}}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a \\ \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{q}}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_a \\ \mathbf{g}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_a^T \\ \mathbf{J}_p^T \end{bmatrix} \mathbf{h}. \quad (15)$$

Considere agora a seguinte função de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}_o^T \mathbf{M}_o \dot{\mathbf{x}}_o + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}_o^T \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{x}_o \quad (16)$$

na qual os dois primeiros termos representam as energias cinéticas no objeto e nos robôs respectivamente,  $\Delta \mathbf{x}_o = (\mathbf{x}_{od} - \mathbf{x}_o)$  é o erro de posição/orientação do objeto, a matriz diagonal  $\mathbf{K}_p$  é positiva,  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{q}}_a^T \ \dot{\mathbf{q}}_p^T]^T$  e

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{aa} & \mathbf{M}_{ap} \\ \mathbf{M}_{pa} & \mathbf{M}_{pp} \end{bmatrix}.$$

Derivando a eq. (16), tem-se

$$\dot{V} = \dot{\mathbf{x}}_o^T \mathbf{M}_o \ddot{\mathbf{x}}_o + \dot{\mathbf{q}}^T \bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{\bar{\mathbf{M}}} \dot{\mathbf{q}} + \Delta \mathbf{x}_o^T \mathbf{K}_p \Delta \dot{\mathbf{x}}_o. \quad (17)$$

Substituindo as eq. (2) e (15) na eq. (17) e considerando que  $(\bar{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C})$  é anti-simétrica, então

$$\dot{V} = -\dot{\mathbf{x}}_o^T \mathbf{b}_o - \dot{\mathbf{q}}_a^T \mathbf{g}_a - \dot{\mathbf{q}}_p^T \mathbf{g}_p + \dot{\mathbf{q}}_a^T \tau_a + \Delta \mathbf{x}_o^T \mathbf{K}_p \Delta \dot{\mathbf{x}}_o. \quad (18)$$

Tendo em vista a eq. (18), propõe-se aqui a utilização da seguinte lei para o controle do movimento

$$\tau_m = \mathbf{Q}^T (\mathbf{K}_v \Delta \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{x}_0) \quad (19)$$

sendo  $\mathbf{K}_v$  uma matriz diagonal com termos positivos, e de uma lei para compensação dos termos gravitacionais

$$\tau_g = \mathbf{g}_a - (\mathbf{R}_p^\# \mathbf{R}_a)^T \mathbf{g}_p + \mathbf{Q}^T \mathbf{b}_o \quad (20)$$

se  $m$  é par, e

$$\tau_g = \mathbf{g}_a - (\mathbf{R}_p^\# (\mathbf{Q} - \mathbf{R}_a))^T \mathbf{g}_p + \mathbf{Q}^T \mathbf{b}_o \quad (21)$$

se  $m$  é ímpar. Substituindo as eq. (19)-(21) na eq. (18) e considerando que um set-point degrau para as posições, então

$$\dot{V} = -\dot{\mathbf{x}}_o^T \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{x}}_o \leq 0. \quad (22)$$

Resta, portanto, a lei de controle do esmagamento quando o número de juntas ativas ( $n_a$ ) é maior que o número de graus de liberdade da carga ( $k$ ). Como  $k$  atuadores são necessários para o controle das  $k$  componentes de movimento, então somente  $(n_a - k)$  componentes da força de esmagamento podem ser controlados simultaneamente. Para o controle das  $(n_a - k)$  componentes da força de esmagamento deve-se aplicar torques nas juntas ativas que provoquem a anulação destas no subespaço de esmagamento. Se uma arquitetura com realimentação for utilizada, ou seja, medindo as forças nos efetadores, calculando a força de esmagamento, e aplicando componentes proporcionais a esta, não se garante estabilidade já que a componente inercial afeta o esmagamento. Além disto, critérios como desempenho durante transiente, taxa de convergência e erro em regime estacionário ficam comprometidos. Reconhecendo que o problema é causado pela realimentação das forças/momentos aplicados no objeto, (Wen e Kretz-Delgado, 1992) sugerem o pré-processamento destas através de um filtro linear estritamente próprio, como por exemplo, um integrador. Assim, a lei de controle do esmagamento quando  $(n_a > k)$  é

$$\tau_e(t) = -\mathbf{\Gamma} \mathbf{E}_a (\mathbf{q}_a(t))^T \left( \mathbf{h}_{oe_d}(t) + \mathbf{K}_i \int_{s=t_0}^{s=t} (\mathbf{h}_{oe_d}(s) - \mathbf{h}_{oe}(s)) ds \right) \quad (23)$$

na qual a matriz  $\mathbf{E}_a$  é formada na diagonal principal pelas matrizes Jacobianas de transformação entre as velocidades das juntas ativas de cada manipulador e as velocidades do objeto ( $\mathbf{D}_{ai}$ ) e por zeros nas demais posições, a matriz de ganho  $\mathbf{K}_i$  tem elementos positivos na diagonal principal e zeros nas outras posições e, a matriz  $\mathbf{\Gamma}$  é formada por zeros e uns e seleciona quais componentes da força de esmagamento devem ser controlados.

Portanto, a lei de controle para o sistema cooperativo com juntas passivas é dada por

$$\tau_a = \tau_m + \tau_g + \tau_e \quad (24)$$

na qual os termos do lado direito são definidos pelas eq. (19), (20), (21) e (23).

## 6 Resultados

Dois manipuladores planares rigidamente conectados a um objeto foram simulados para teste do sistema de tolerância a falhas. As redes neurais do sistema DIF foram treinadas e o sistema conseguiu detectar e isolar corretamente falhas do tipo junta passiva nos robôs. Para maiores detalhes sobre o sistema cooperativo simulado, treinamento das redes neurais e estatísticas do sistema DIF veja (Tinós et al., 2001). A figura 4 mostra as forças de esmagamento em uma trajetória em que ocorre falha na junta 1 do robô 1 em 0,1s. Note que quando ocorre a falha, as forças de esmagamento crescem rapidamente. A figura 5 mostra as saídas

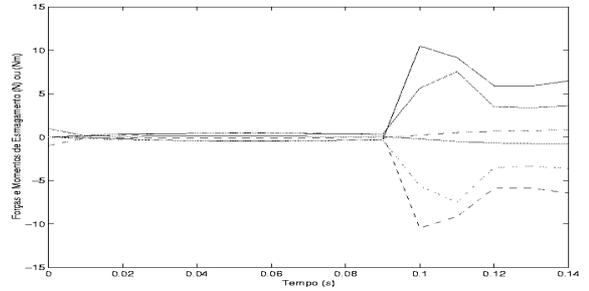


Figura 4. Forças de esmagamento para uma trajetória com falha na junta 1 do robô 1.

RBF utilizadas para a DIF na mesma trajetória. Note que antes da ocorrência da falha, a saída responsável pela indicação da operação sem falhas é maior que as outras saídas. Quando ocorre a falha, a saída responsável pela detecção da falha na junta 1 do manipulador 1 é maior que as outras saídas. Após a detecção e isolamento da falha, os freios são aplicados e o controlador é modificado para trabalhar com o sistema com falha na junta 1 do manipulador 1. As figuras 6 e 7 mostram as posições do objeto e as forças de esmagamento no objeto após a reconfiguração do controle. Nestes gráficos,  $t = 0$  corresponde ao instante que o sistema foi reconfigurado e os freios foram liberados. Note que o objeto é controlado de modo

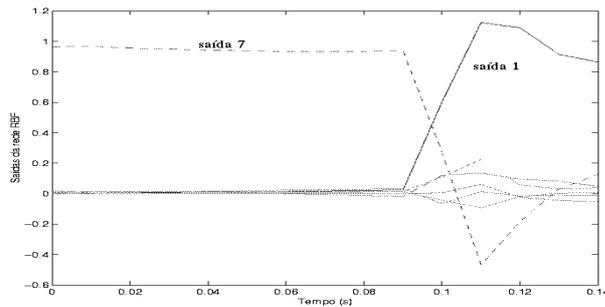


Figura 5. Saídas da rede RBF para a trajetória com falha. A saída 1 corresponde à falha na junta 1 do manipulador 1 e a saída 7 à operação sem falhas.

satisfatório com erro pequeno nas posições e orientações. Neste caso, o controlador do esmagamento foi configurado para controlar as componentes horizontais e verticais de esmagamento (figura 7).

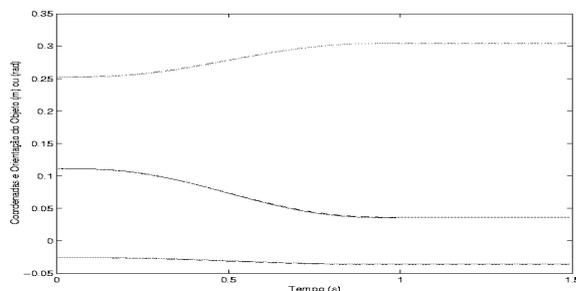


Figura 6. Posição e orientação do objeto após a reconfiguração do controle. Os valores desejados são representados pelas linhas tracejadas.

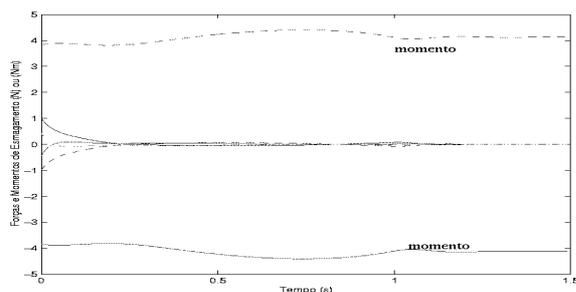


Figura 7. Forças de esmagamento após a reconfiguração do controle.

## 7 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um sistema de tolerância a falhas do tipo junta passiva em robôs cooperativos. As falhas são primeiro detectadas através de um sistema DIF baseado em redes neurais. A seguir, os robôs são controlados através de um controlador projetado para tratar do sistema com juntas passivas. Aqui, um novo controlador para o sistema com juntas passivas baseado no

controle híbrido movimento/esmagamento foi desenvolvido. Em trabalhos futuros, o problema da aplicação em robôs reais será tratado.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio (projetos 97/13384-7, 98/15732-5 e 99/10031-1).

## Referências Bibliográficas

- Caccavale, F. (1997). Task-space regulation of cooperative manipulators, *Prisma lab. technical report 97-04*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy.
- Carignan, C. R. e Akin, D. L. (1988). Cooperative control of two arms in the transport of an inertial load in zero gravity, *IEEE Journal of Robotic and Automation* 4(4): 414–419.
- Dhillon, B. S. (1991). *Robot reliability and safety*, Springer Verlag, New York, U. S. A.
- Dhillon, B. S. e Fashandi, A. R. M. (1997). Robotic systems probabilistic analysis, *Microelectronics and Reliability* 37(2): 211–224.
- English, J. D. e Maciejewski, A. A. (1998). Fault tolerance for kinematically redundant manipulators: anticipating free-swinging joint failures, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14(4): 566–575.
- Liu, Y. H., Xu, Y. e Bergerman, M. (1999). Cooperation control of multiple manipulators with passive joints, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15(2): 258–267.
- Terra, M. H. e Tinós, R. (2001). Fault detection and isolation in robotic manipulators via neural networks - a comparison among three architectures for residual analysis, *Journal of Robotic Systems* 18(7): 357–374.
- Tinós, R. e Terra, M. H. (2001). Fault detection and isolation in robotic manipulators using a multilayer perceptron and a rbf network trained by kohonen's self-organizing map, *Revista Controle e Automação* 12(1): 11–18.
- Tinós, R., Terra, M. H. e Bergerman, M. (2001). Fault detection and isolation in cooperative manipulators via artificial neural networks, *Proc. of IEEE Conf. on Control Applications*.
- Visinsky, M. L., Cavallaro, J. R. e Walker, I. D. (1994). Robotic fault detection and fault tolerance: a survey, *Reliability Engineering and Systems Safety* 46: 139–158.
- Wen, T. e Kreutz-Delgado, K. (1992). Motion and force control for multiple robotics manipulators, *Automatica* 28(4): 729–743.