



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA ROBÓTICA PARALELA ATUADA POR CABOS PARA REABILITAÇÃO DOS MOVIMENTOS DO OMBRO

Rogério Sales Gonçalves, rsgoncalves@mecanica.ufu.br
João Carlos Mendes Carvalho, jcmendes@mecanica.ufu.br

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia – MG – Brasil.

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma nova estrutura robótica paralela atuada por cabos para reabilitação/recuperação dos movimentos do ombro humano. A estrutura robótica é composta por quatro cabos que permitem a realização dos movimentos de flexão-extensão vertical, abdução-adução e flexão-extensão horizontal com diferentes limites de movimentação e velocidades. O desenvolvimento deste dispositivo robótico justifica-se pela grande quantidade de pessoas com problemas nos ombros. Estes problemas têm como principais causas o AVC (acidente vascular cerebral), poliomielite, artrose, recuperação de acidentes, além de poder ser aplicado em movimentos fisioterápicos de recuperação e em atletas olímpicos e para-olímpicos. Primeiramente é apresentado os estudos envolvendo as estruturas robóticas para reabilitação. Após é definido os movimentos do ombro, a estrutura robótica proposta e as simulações gráficas realizadas.

Palavras-chave: Ombro, Reabilitação, Estruturas robóticas atuadas por cabos.

1. INTRODUÇÃO

A medicina física e de reabilitação pretende tratar ou atenuar as incapacidades causadas por doenças crônicas, seqüelas neurológicas ou lesões derivadas da gestação e do parto, acidentes de trânsito e de trabalho. A reabilitação é um processo global e dinâmico orientado para a recuperação física e psicológica da pessoa portadora de deficiência, tendo em vista a sua reintegração social.

É necessária a aplicação da medicina física e de reabilitação nas doenças crônicas devido aos avanços médicos-cirúrgicos que promoveram a melhoria das condições de vida e elevaram a longevidade das pessoas com o progressivo aumento das pessoas de terceira idade. Paradoxalmente ampliou-se também o número de doenças crônicas freqüentemente com características incapacitantes. Também existe a necessidade de tratamentos de reabilitação de crianças que sobrevivem após lesões derivadas da gestação e do parto. Outro fator é que a evolução tecnológica e as alterações nos estilos de vida têm levado ao surgimento de um elevado número de deficientes, vítimas de acidentes de trânsito, de trabalho e de doenças cardiovasculares em uma faixa de pacientes cada vez mais jovens e em fase produtiva.

No processo de reabilitação as estruturas robóticas podem atuar na coadjuvação e apoio das diferentes ações médicas-cirúrgicas; facilitação e estímulo dos processos de recuperação e regeneração natural; e finalmente o estímulo, maximização e compensação das capacidades residuais. Estas etapas do processo muitas vezes envolvem movimentos repetitivos que devem ser executados diversas vezes em várias amplitudes.

Desta forma este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento robótico atuado por cabos que seja utilizado para reabilitação/recuperação dos movimentos do ombro humano. O uso de cabos é devido ao fato dos pacientes já estarem adaptados a terapias que utilizam cordas. A estrutura do ombro humano é formada por um complexo de vinte músculos, três articulações ósseas e três superfícies móveis que são as articulações funcionais (Bellia, 1996). A maior mobilidade entre todas as articulações do corpo é encontrada no ombro (Kapanji, 2000). A articulação do ombro realiza os movimentos cinesiológicos de flexão e extensão vertical, abdução e adução, flexão e extensão horizontal, rotação interna e externa. Desta forma o equipamento deve permitir a simulação dos movimentos do ombro, dentro de certos limites, possibilitando a alteração dos limites de movimentação e a variação da velocidade.

O desenvolvimento deste dispositivo robótico tem como justificativas a grande quantidade de pessoas com problemas nos ombros. Estes problemas têm como principais causas o AVC (acidente vascular cerebral), poliomielite, artrose, recuperação de acidentes, além de poder ser aplicado em movimentos fisioterápicos de recuperação e em atletas olímpicos e para-olímpicos.

Assim, neste trabalho é apresentada primeiramente uma descrição das estruturas paralelas atuadas por cabos e as estruturas robóticas utilizadas na reabilitação do membro superior. Após é apresentada a fisiologia do ombro descrevendo os seus movimentos e limites de movimentação. Posteriormente é descrita a formulação matemática das estruturas paralelas atuadas por cabos e apresentada a estrutura robótica paralela proposta neste trabalho. Finalmente foram realizadas simulações gráficas para validar a estrutura proposta.

2. ESTRUTURAS PARALELAS ATUADAS POR CABOS

A configuração típica das estruturas paralelas consiste em uma cadeia cinemática fechada onde os segmentos (ou conjunto de segmentos articulados) unem-se, simultaneamente, a base ao elemento terminal (plataforma móvel). Sendo que, em várias formas construtivas, os acionadores podem ser instalados em uma base fixa, tornando-a mais leve e sem componentes de transmissão mecânica de movimentos tais como correntes, correias, entre outros. Estas arquiteturas despertam grande interesse porque podem apresentar grande rigidez aliada à acuracidade e possuem capacidade de carga maior que as tradicionais arquiteturas seriais (Gonçalves, 2009). Além disso, podem operar a grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais.

A grande desvantagem das estruturas paralelas clássicas é seu espaço de trabalho limitado, principalmente pela limitação do curso dos atuadores lineares e pela possibilidade de colisões entre os segmentos (Hiller, 2009). Desta forma em 1985 foi proposta por Landsberger e Sheridan a substituição dos atuadores lineares e ou segmentos por cabos (ou por tendões, fios) nas plataformas de Stewart.

Estruturas robóticas paralelas atuadas por cabos são sistemas robóticos compostos por uma plataforma fixa e um elemento terminal ligados por múltiplos cabos que podem se estender ou retrair. A principal diferença entre os manipuladores paralelos atuados por cabos e os robôs seriais e paralelos clássicos é que o elemento terminal é operado em paralelo por vários cabos os quais o conectam. Eles podem ser atuados por muitos tipos de motores e diferentes arranjos geométricos. Uma estrutura robótica paralela atuada por cabos pode mover o elemento terminal pela mudança de comprimento dos cabos enquanto previne-se que qualquer cabo torne-se frouxo. Desta forma a plataforma móvel pode apenas puxar o elemento terminal, mas não empurrá-lo. Além disso, a tensão deve ser limitada para evitar forças excessivas o que podem causar deformações ou falhas nos cabos (Hiller, 2009).

Estas estruturas possuem como vantagens, quando comparadas com as estruturas paralelas tradicionais, um espaço de trabalho maior, poucas peças móveis e massas pequenas em movimento. Estas características tornam as viáveis para aplicações que requerem altas velocidades e acelerações (Melchiorri, 2005). Outras características são: elevada taxa peso manipulado/peso da estrutura, transportabilidade; construção econômica e modular permitindo a re-configuração da estrutura pela modificação da posição dos pontos de conexões dos cabos e/ou dos atuadores (Merlet, 2004). O sistema mecânico é simples e de fácil fabricação e de baixo custo (Barrette e Gosselin, 2005), (Merlet, 2004). As principais desvantagens das estruturas robóticas paralelas atuadas por cabos são devidas a natureza dos cabos como a possibilidade de colisões entre estes, entre a carga, elemento terminal e base fixa, o qual é um importante problema em sistemas espaciais redundantes, entretanto eficientes algoritmos de detecção de colisões estão prontos (Merlet, 2004). Além disso, os cabos apenas podem puxar e não empurrar e conseqüentemente devem-se manter tensionados enquanto o manipulador estiver operando.

3. ESTRUTURAS ROBÓTICAS APLICADAS À REABILITAÇÃO

Diferentes arquiteturas robóticas têm sido desenvolvidas e aplicadas na reabilitação. O exemplo mais bem sucedido de um robô projetado para neuro reabilitação provavelmente é o MIT-Manus (Krebs et al., 2004), desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT). O MIT-Manus é constituído por um robô serial de dois segmentos que pode orientar ou interagir com o braço do paciente (2 graus de liberdade), ao longo de um plano de trabalho. Apesar da eficácia do MIT-Manus ter sido comprovada por testes clínicos este robô não pode providenciar todos os tipos de movimento requeridos pela terapia convencional, especialmente as fora do plano, além do custo elevado de US\$ 60.000.

Um espaço de trabalho espacial é usualmente obtido por meio de robôs seriais de múltiplos graus de liberdade. Alguns exemplos são: o ARM (Assisted Rehabilitation and Measurement), desenvolvido no Rehabilitation Institute of Chicago e pela Universidade da Califórnia. Apesar deste robô permitir movimentos espaciais sua estrutura é pesada e a qualidade dos movimentos é afetada pela alta inércia do sistema (Kahn et al., 2006); o MIME (Mirror-Image Movement Enabler) é um robô Puma modelo 562 de 6 graus de liberdade o qual é fixado ao braço do paciente movimentando-o em trajetórias pré-determinadas (Lum et al., 2002) mas devido a sua característica de produzir altas forças e altas velocidades e a necessidade de um operador os robôs industriais não representam uma ferramenta viável para reabilitação assistida, além do alto custo; o ARMin é um exoesqueleto com 6 graus de liberdade (Nef e Riener, 2005) capaz de fixar-se em volta do braço do paciente providenciando todos os movimentos necessários para fisioterapia; as principais desvantagem deste robô consiste na complexidade de ajustar os parâmetros do braço para diferentes pacientes e construção complexa devido ao alto número de componentes mecânicos; outro sistema robótico aplicado à reabilitação é REHAROB (Rehabilitation Robot), um sistema robótico baseado em dois robôs industriais da ABB (Fazekas et al., 2007) que permitem movimentos tridimensionais movimentando o antebraço e o braço mas este sistema possui como desvantagens a impossibilidade de transporte e o custo proibitivo em torno de R\$ 300 mil.

Estas estruturas robóticas seriais são máquinas pesadas que não são facilmente transportáveis, possuem preços elevados, apresentam riscos aos pacientes de fraturas, mas a sua maior desvantagem é a resistência dos pacientes para utilizar estes sistemas.

Em função dos problemas apresentados na utilização de estruturas seriais no tratamento de reabilitações podem-se utilizar estruturas robóticas paralelas atuadas por cabos. Devido a sua arquitetura, conforme descrito no item 2, estas estruturas possuem como vantagens, quando comparadas com as estruturas paralelas tradicionais, um espaço de trabalho maior, poucas peças móveis e massas pequenas em movimento tornando-as viáveis para aplicações que requerem altas velocidades e acelerações permitindo elevada taxa peso manipulado/peso da estrutura,

transportabilidade; construção econômica e modular permitindo a re-configuração da estrutura pela modificação da posição dos pontos de conexões dos cabos e/ou dos atuadores. A seguir são descritas algumas destas estruturas.

O CALOWI (CASSino Low-cost Wire robot) desenvolvido em Cassino, Itália (Cannella et al., 2008) possui arquitetura 4-4, isto é, quatro cabos conectados ao elemento terminal em quatro pontos diferentes com sistema de transmissão por polias. Os cabos são atuados por quatro motores de corrente contínua os quais podem estender e retrain os cabos. Esta estrutura tem como objetivo ser de baixo custo de fabricação com diferentes propósitos de aplicações como: ajudar pessoas idosas ou pacientes com problemas nos membros inferiores em operações de sentar-se e levantar-se; resgates em áreas de desastre, ou na locomoção de pessoas nos quartos de hospitais.

Mayhew et al. (2005) desenvolveram o MACARM (Multi-Axis Cartesian-based Arm Rehabilitation Machine), que é um robô atuado por cabos para reabilitação de membros superiores de seres humanos. É composto por oito motores fixos nos vértices de um cubo possuindo 6 graus de liberdade.

O NeReBot (NEuroREhabilitation roBOT) foi projetado e desenvolvido no Department of Innovation in Mechanics and Management, Universidade de Pádua, Itália (Fanin et al., 2003; Rosati et al., 2005). Este robô possui três graus de liberdade e foi desenvolvido para reabilitação de pacientes com problemas nos membros superiores. O seu princípio de funcionamento é simples: uma vez o antebraço do paciente fixado na tala (ou ortese) a máquina pode produzir estímulos nos membros superiores puxando-se três fios de nylon. A trajetória do braço é selecionada pelo terapeuta através de um simples procedimento de "teaching-by-showing" permitindo a execução de alguns exercícios de terapia. Comparados com outros robôs para reabilitação o NeReBot oferece a vantagem de ser de baixo custo de construção mecânica intrinsecamente seguro graças a utilização de cabos, de alta aceitação por parte do paciente que não se sente constrangido com o uso de um robô serial industrial, transportabilidade por poder ser facilmente colocado do lado de uma cama hospitalar e ou de uma cadeira de rodas e de fácil controle devido ao número de graus de liberdade, mostrando-se eficiente em reabilitações. A grande desvantagem desta estrutura é a limitação da quantidade de movimentos possíveis. MariBot (MARIsa roBOT) é uma evolução do NeReBot possuindo cinco graus de liberdade. É um robô híbrido formado por um manipulador serial plano de 2 graus de liberdade, utilizado para posicionar o mecanismo no plano, e uma estrutura paralela atuada por cabos de 3 graus de liberdade que permite a movimentação do membro superior de pacientes em tratamentos de reabilitação (Rosati et al., 2005).

Com exceção do MariBot e NeReBot os robôs com cabos são pesados e não podem ser transportados dentro da clínica ou para reabilitação doméstica, pois requerem estruturas complexas estáveis para suportar os cabos. Além disso, eles não podem ser utilizados para fornecer assistência terapêutica adequada para pacientes com AVC (pós-acidente vascular cerebral) que necessitam continuar na cama (Rosati et al., 2005).

Desta forma, devido as suas características: estrutura adaptativa, segurança de operação, pois os cabos são leves e flexíveis e além do mais são amigáveis ao ser humano e seguros (Homma et al., 2002), as estruturas paralelas atuadas por cabos têm sido estudadas para o uso em aplicações médicas de reabilitações.

4. FISILOGIA DO OMBRO E SEUS MOVIMENTOS

O ombro é a articulação proximal do membro superior que possui três graus de liberdade. É a articulação do corpo humano de maior mobilidade que permite orientar o membro superior em relação aos três planos do espaço (Kapanji, 2000): plano A – Sagital; plano B – Frontal e plano C – Horizontal, Fig. (1a), em relação a três eixos principais: Eixo transversal (1); Eixo ântero-posterior (2) e Eixo Vertical (3), Fig. (1b).

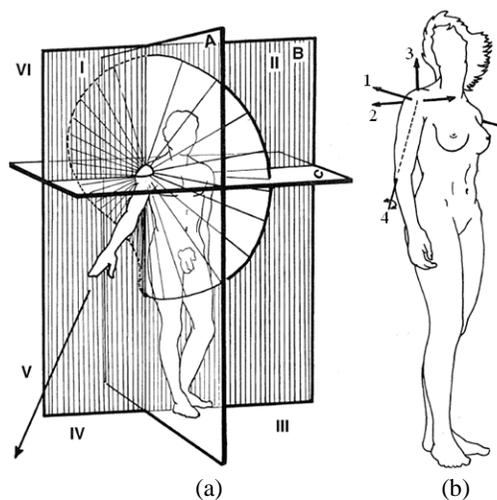


Figura 1. (a) Planos de análise dos movimentos do ombro; (b) eixos de movimento do ombro (Kapanji, 2000).

A posição de referência (início) é definida a partir do membro superior pendente ao longo do corpo, verticalmente, de forma que o eixo longitudinal do úmero (4) coincida com o eixo vertical (3), Fig. (1b). Na posição de abdução a 90°, o eixo longitudinal (4) coincide com o eixo transversal (1). Na posição de flexão a 90°, ele coincide com o eixo ântero-posterior (2), Fig. (1b).

O Eixo transversal (1) permite os movimentos de flexão-extensão vertical, Fig. (2), executados dentro do plano sagital, plano A. A extensão vertical, Fig. (2a), é um movimento de pequena amplitude com variação de 0° a 45°/ 50° e a flexão vertical é um movimento de grande amplitude variando de 0 a 180°, Fig. (2b).

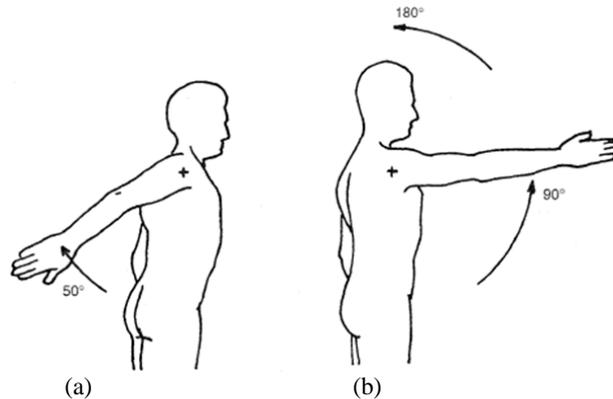


Figura 2. (a) Movimento de extensão vertical; (b) Movimento de flexão vertical (Kapanji, 2000).

O Eixo ântero-posterior (2), contido no plano sagital, permite os movimentos de abdução (o membro superior afasta-se do plano de simetria do corpo) e adução (o membro superior se aproxima do plano de simetria) efetuados no plano frontal, plano B, Fig. (3).

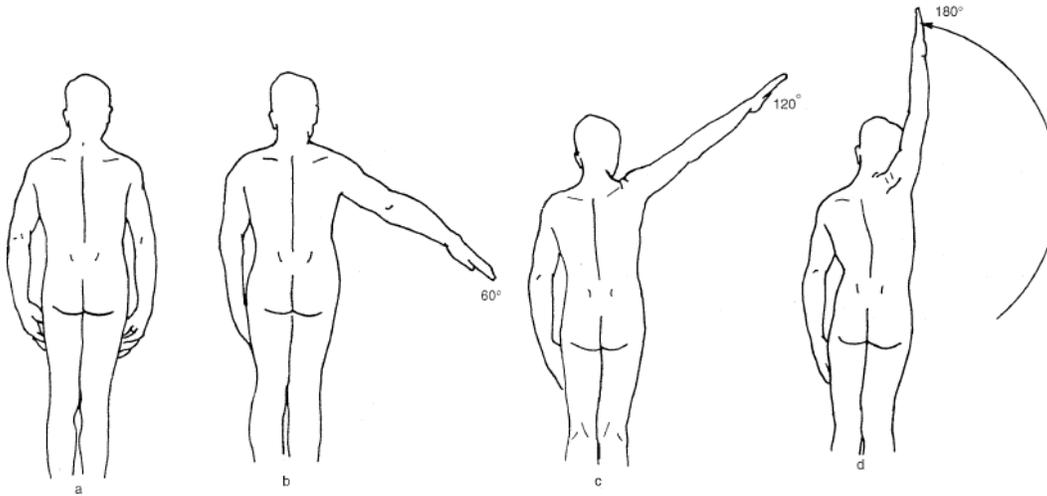


Figura 3. (a) Posição de repouso; (b) movimento de abdução de 0° a 60°; (c) movimento de abdução de 60° a 120°; (d) movimento de abdução de 120° a 180° (Kapanji, 2000).

O Eixo Vertical (3), determinado pela intersecção do plano sagital e do plano frontal permite os movimentos de flexão e de extensão executados no plano horizontal, Plano C, Fig. (1a), Na Figura (4a) o braço encontra-se na posição anatômica, configuração inicial da flexão-extensão horizontal, com uma abdução de 90° no plano frontal. A Figura (4b) representa a flexão de 0° a 140° e a Fig. (4c) mostra a extensão horizontal com uma amplitude de 0° a 30-40°.

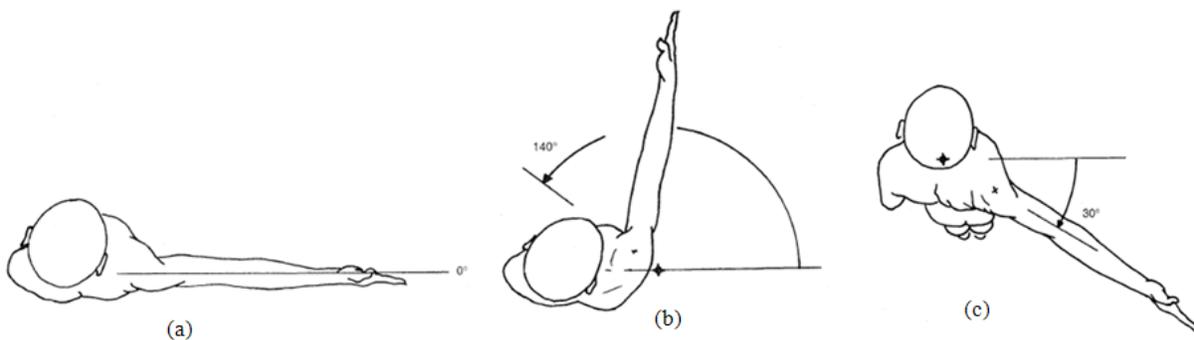


Figura 4. (a) Posição anatômica da flexão-extensão horizontal; (b) Flexão horizontal; (c) Extensão horizontal (Kapanji, 2000).

Resumindo o ombro é uma articulação de três eixos principais com três graus de liberdade com o eixo do úmero podendo coincidir com um deles ou situar-se numa posição intermediária qualquer para permitir o movimento de rotação externa/interna. Os limites de movimentação do ombro são: flexão vertical de 0° a 180°; extensão vertical de 0° a 45 /50°; abdução de 0° a 180°; adução de 180° a 0°; flexão horizontal de 0° a 140° e extensão horizontal de 0° a 30-40°

5. MODELAGEM GERAL DE UM MECANISMO ESPACIAL ATUADO POR CABOS

O modelo geométrico da estrutura robótica paralela atuada por cabos é obtido da mesma forma ao das estruturas paralelas tradicionais (Côté, 2003). O modelo geométrico inverso permite em função da configuração (posição e orientação) do elemento terminal determinar o comprimento dos cabos necessários para atingir a configuração dada.

Da Figura (5) pode-se escrever:

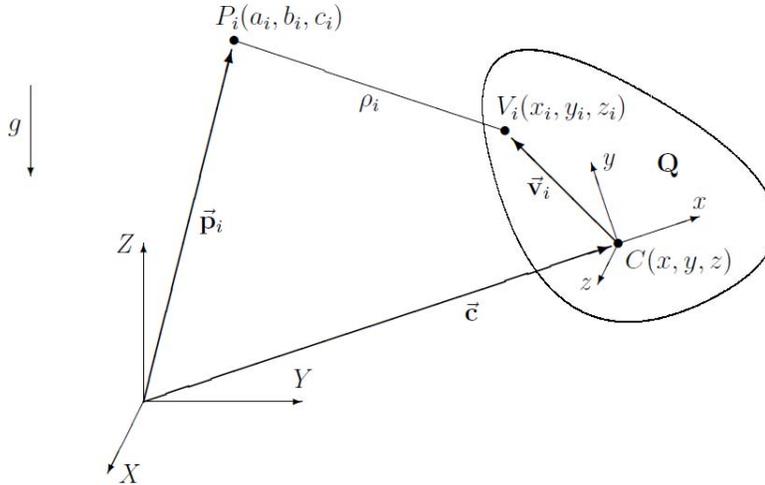


Figura 5. Parâmetros do modelo geométrico inverso.

$$\begin{aligned} \rho_i &= \|c + Qv_i - p_i\| \\ \rho_i^2 &= (c + Qv_i - p_i)^T (c + Qv_i - p_i) \\ \rho_i^2 &= c^T c + 2c^T Qv_i - 2c^T p_i + v_i^T v_i - 2p_i^T Qv_i + p_i^T p_i \end{aligned} \quad (1)$$

Com i variando de 1 a n (número de cabos), sendo: p_i o vetor posição do ponto P_i com componentes a_i , b_i e c_i em relação ao referencial fixo; v_i o vetor posição do ponto V_i com componentes x_i , y_i e z_i em relação ao referencial móvel; c o vetor posição do centro de gravidade, origem do referencial móvel em relação ao referencial fixo; Q é a matriz de rotação entre o referencial móvel e o referencial fixo e ρ_i é distancia entre os pontos P_i e V_i (comprimento do cabo i).

5.1. Estrutura Robótica 4-2 para Reabilitação dos Movimentos do Ombro

A estrutura robótica 4-2, proposta neste trabalho, é formada por quatro cabos dispostos em uma estrutura rígida (plataforma fixa) possuindo dois pontos de fixação na tala, Fig. (6a). Os cabos são representados pelos comprimentos ρ_1, ρ_2, ρ_3 e ρ_4 que são ligados a motores acoplados a polias nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 respectivamente. Os pontos $v_1 = v_3$ e $v_2 = v_4$ correspondem aos pontos de conexão dos cabos $\rho_1, \rho_3, \rho_2, \rho_4$ na tala (plataforma móvel) respectivamente. Para realização da modelagem geométrica serão utilizados dois referenciais o referencial fixo P_iXYZ , colocado na estrutura fixa e sua origem coincidente com o ponto P_i e o referencial móvel xyz colocado no centro de gravidade da tala, Fig. (6a).

Da Equação (1) pode-se obter o modelo geométrico inverso que permite obter os comprimentos dos cabos em função da configuração (posição e orientação) da plataforma móvel.

$$\rho_1 = \sqrt{c^T c + 2c^T Qv_1 - 2c^T p_1 + v_1^T v_1 - 2p_1^T Qv_1 + p_1^T p_1} \quad (2)$$

$$\rho_2 = \sqrt{c^T c + 2c^T Qv_2 - 2c^T p_2 + v_2^T v_2 - 2p_2^T Qv_2 + p_2^T p_2} \quad (3)$$

$$\rho_3 = \sqrt{c^T c + 2c^T Qv_3 - 2c^T p_3 + v_3^T v_3 - 2p_3^T Qv_3 + p_3^T p_3} \quad (4)$$

$$\rho_4 = \sqrt{c^T c + 2c^T Qv_4 - 2c^T p_4 + v_4^T v_4 - 2p_4^T Qv_4 + p_4^T p_4} \quad (5)$$

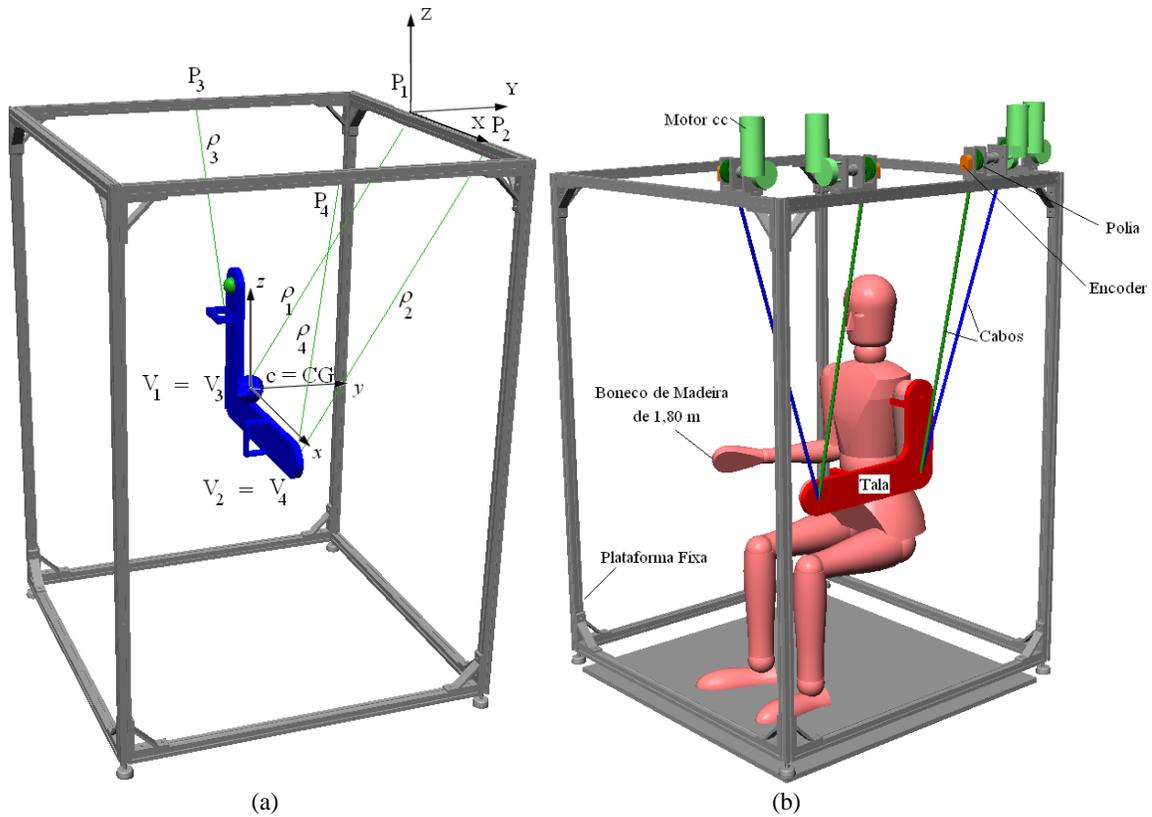


Figura 6. (a) Parâmetros da estrutura paralela 4-2; (b) Esquema da estrutura paralela 4-2.

As distancias entre os pontos P_1 e P_2 , V_1 e V_2 são ajustáveis em função do tamanho do braço do paciente.

A estrutura robótica 4-2 proposta permite o movimento tridimensional do braço a partir de uma trajetória desejada.

Neste trabalho é apresentada em detalhes a obtenção de dois movimentos básicos do ombro: movimento de abdução-adução e flexão-extensão vertical.

5.1.1. Movimento de Abdução-Adução da Estrutura robótica 4-2

A estrutura proposta para reabilitação dos movimentos do ombro permite realizar o movimento de abdução-adução com variação do ângulo θ de 0° a 120° , conforme Fig. (7). Esta trajetória é obtida considerando-se o movimento de abdução-adução como uma trajetória circular de raio R (Kapanji, 2000), no plano YZ , do braço fixo a tala (plataforma móvel) com o centro do arco coincidente com o ombro, ponto P_5 , conforme esquema da Fig. (7b) que mostra a trajetória do centro de gravidade da tala.

Na resolução do modelo geométrico inverso são conhecidas as coordenadas iniciais da posição do centro de gravidade da tala, y_1, z_1 com $x = x_1$ constante, com os valores de x, y e z (vetor c) calculados através das Eqs. (6) a (8), Fig. (7b), e a matriz de rotação Q entre o referencial móvel e o referencial fixo é dada por uma rotação em torno do eixo x , conforme Eq. (9).

$$x = x_1 \quad (6)$$

$$y = -y_1 + R \text{sen}(\theta) \quad (7)$$

$$z = -z_1 + [R - R \cos(\theta)] \quad (8)$$

$$Q(\theta, x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ 0 & \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Substituindo os valores das Eqs. (6) a (9) nas Eqs. (2) a (5) é possível calcular os comprimentos dos cabos necessários para realização do movimento de abdução-adução.

Nas vistas, obtidas na Fig. (7), da Fig. (6a) foram omitidos os cabos ρ_3 e ρ_4 para melhor visualização.

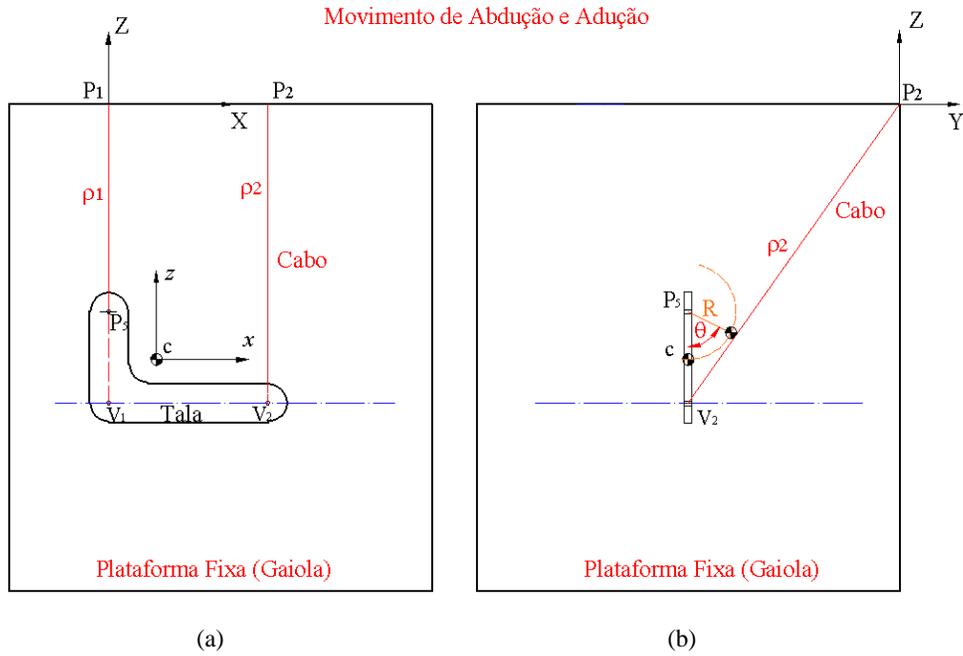


Figura 7. Esquema do Movimento de Abdução-Adução da Estrutura Robótica 4-2, (a) Vista lateral; (b) Vista frontal.

5.1.2. Movimento de Flexão-Extensão Vertical da Estrutura robótica 4-2

O movimento de flexão-extensão vertical da estrutura robótica 4-2 é realizado considerando-se um movimento circular plano (Kapanji, 2000), conforme Fig. (8), movimento no plano XZ com rotação em torno do eixo Y. Este protótipo inicial permite a movimentação do braço em flexão vertical com variação do ângulo β de 0° a 100° , Fig. (8a).

A Figura (8a) mostra o movimento de flexão vertical. Para facilitar a visualização os cabos ρ_1 e ρ_2 foram omitidos e os cabos ρ'_3 e ρ'_4 representam os comprimentos dos cabos 3 e 4 após uma rotação β em torno do eixo y.

Na resolução do modelo geométrico inverso, para o movimento de flexão vertical, as coordenadas da posição do vetor c são calculadas pelas Eqs. (10) a (12), Fig. (8a). A matriz de rotação Q entre o referencial móvel e o referencial fixo é dada por uma rotação em torno do eixo y, conforme Eq. (13).

$$x = R \text{sen}(\beta) \quad (10)$$

$$y = -y_1 \quad (11)$$

$$z = -z_1 + [R \cos(\beta_0) - R \cos(\beta)] \quad (12)$$

$$Q(\beta, y) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\text{sen}(\beta) & 0 \\ \text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde β_0 é o ângulo correspondente a configuração de repouso, conforme Fig. (8b).

Substituindo os valores das Eqs. (10) a (13) nas Eqs. (2) a (5) é possível calcular os comprimentos dos cabos necessários para realização do movimento de flexão vertical.

Já na Figura (8b) é mostrado o movimento de extensão vertical. Esta estrutura proposta permite um movimento de extensão vertical com variação do ângulo β_1 de 0° a -50° , Fig. (8b). Neste caso as coordenadas da tala, x, y e z e a matriz de rotação Q são dados por:

$$x = x_1 - R \text{sen}(\beta_1) \quad (14)$$

$$y = -y_1 \quad (15)$$

$$z = -z_1 - [R \cos(\beta_0) - R \cos(\beta_1)] \quad (16)$$

$$Q(\beta_1, y) = \begin{bmatrix} \cos(\beta_1) & -\text{sen}(\beta_1) & 0 \\ \text{sen}(\beta_1) & \cos(\beta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Deve-se destacar que movimentos tridimensionais podem ser obtidos com a combinação de rotações sucessivas em torno de dois eixos.

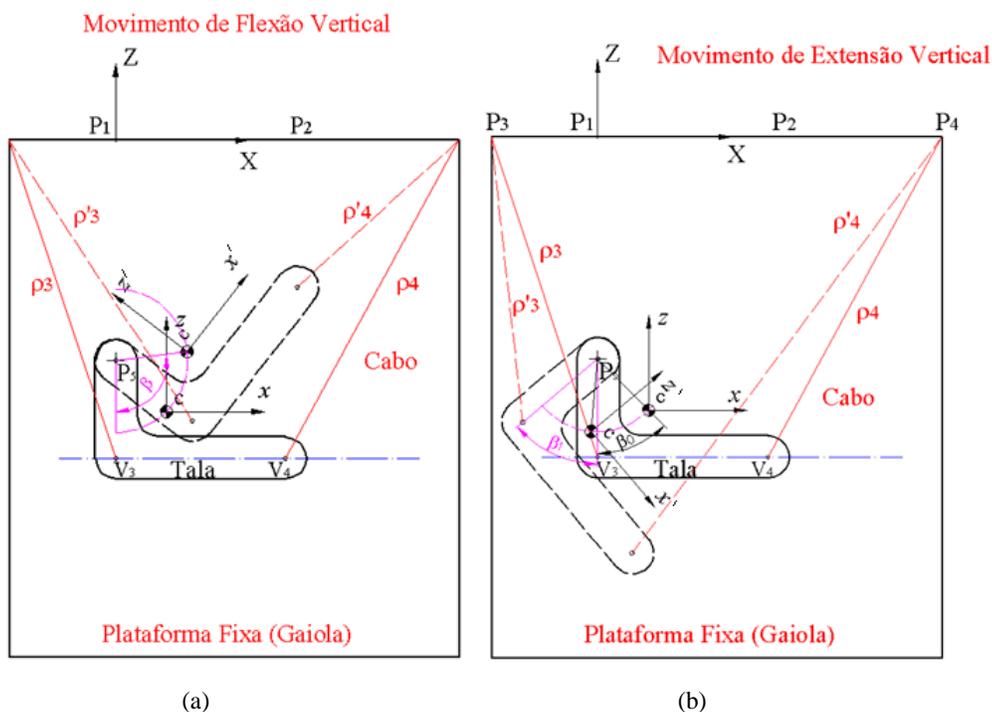


Figura 8. Esquema do Movimento de Flexão e Extensão Vertical da Estrutura Robótica 4-2, (a) Flexão vertical; (b) Extensão vertical.

6. SIMULAÇÕES GRÁFICAS

Foi desenvolvido um modelo gráfico da estrutura paralela atuada por cabos 4-2, com a implementação do sistema de controle conforme as Eqs. (3) a (9), utilizando-se dos softwares SolidWorks e VisualNastran 4D[®]. Este programa permite o controle da variação dos comprimentos dos cabos permitindo a simulação da estrutura proposta. A Figura (6b) mostra os elementos da estrutura paralela 4-2, composta por quatro conjuntos formados de motor de corrente contínua de 24 volts com torque de 45Nm, encoder de 500 pulsos por revolução e polia. A Figura (9) representa a seqüência de movimentos de abdução para o ângulo θ variando de 0° a 90° . As dimensões utilizadas e os equipamentos presentes nesta simulação são os mesmos que estão sendo utilizados para construção do protótipo. Nesta primeira etapa para realização das simulações gráficas e futuramente dos testes experimentais será utilizado um boneco antropométrico de madeira de 1,80 m que simula as articulações do corpo humano, Figs. (6b) e (9).

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma nova estrutura paralela atuada por cabos para reabilitação dos movimentos do ombro tendo como principais características a adaptabilidade em função do paciente, segurança de operação e amigável ao ser humano.

O desenvolvimento deste dispositivo robótico justifica-se devido à grande quantidade de pessoas com problemas nos ombros causados por AVC (acidente vascular cerebral), poliomielite, artrose, acidentes, além de poder ser aplicado em movimentos fisioterápicos de recuperação e em atletas olímpicos e para-olímpicos.

Esta estrutura paralela 4-2, formada por quatro cabos que interligam a plataforma fixa e a plataforma móvel (tala), permite a realização dos principais movimentos do ombro: flexão-extensão vertical; abdução-adução e flexão-extensão horizontal.

Neste trabalho foi apresentado o modelo geométrico inverso da estrutura proposta e detalhado os movimentos de abdução-adução e flexão-extensão vertical.

Simulações gráficas utilizando um software comercial de simulação de sistemas multicorpos foram apresentadas demonstrando a utilização da estrutura proposta.

As próximas etapas deste trabalho envolvem a construção da estrutura proposta, testes experimentais em um boneco antropométrico de madeira e finalmente testes em seres humanos.

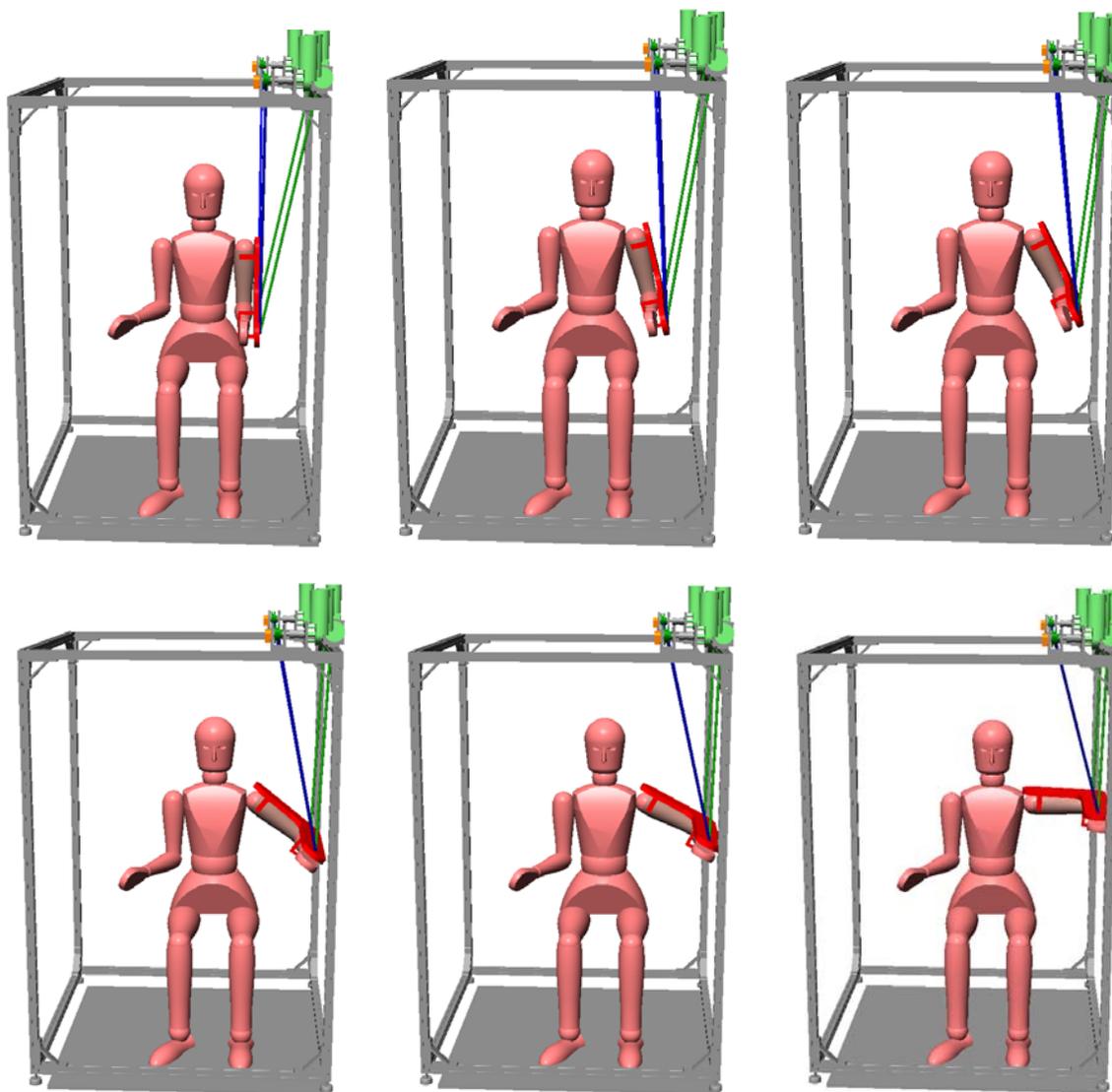


Figura 9. Seqüência de movimentos de Abdução utilizando-se da estrutura paralela 4-2.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento concedido pelo CNPQ pelo processo 471968/2009-9 a PROPP/UFU e a FAPEMIG. Pedido de patente pendente.

9. REFERÊNCIAS

- Barrette, G., Gosselin, C. M., 2005 "Determination of the Dynamic Workspace of Cable Driven Planar Parallel Mechanisms", *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 127, No 2, pp. 242-248.
- Bellia, Y.L.C., 1996, "Instabilidade do ombro: reabilitação através de exercícios", *Medicina Desportiva*, n.08, p.18-21.
- Cannella, G.; Ottaviano, E.; Castelli, G., 2008, "A Cable-Based System for Aiding Elderly People in Sit to Stand Transfer", *MUSME 2008, The International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*, San Juan (Argentina), 8-12.
- Cote, G., 2003, *Analyse et Conception de Mécanismes Parallèles Actonnés par Câbles*, dissertação de mestrado, 135f, em Francês.
- Fanin, C., Gallina, P., Rossi, A., Zanatta, U., Masiero, S., 2003, "Nerebot: a wire-based robot for neurorehabilitation", in *Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Rehabilitation Robotics ICORR2003*, Daejeon, Republic of Korea.
- Fazekas, G., Horvath, M., Troznai, T., Toth, A., 2007, "Robot-Medated Upper Limb Physiotherapy for Patients with Spastic Hemiparesis: A preliminary Study", *Journal of Rehabil Med*, V. 39, p. 580-582.

- Gonçalves, R. S., 2009, “Estudo de Rigidez de Cadeias Cinemáticas Fechadas”, 239f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Hiller, M., Hirsch, K., Bruckmann, T., Brandt, T., Schramm, D., 2009, “Common Aspects in Methods for the Design of Mechatronic Systems - Applications in Automotive and Robotic Systems U. of Duisburg-Essen”, Germany, XII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, Angra dos Reis, RJ.
- Homma, K., Fukuda, O., Nagata, Y., 2002, “Study of a wire-driven leg rehabilitation system”, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, Lausanne, Switzerland, pp. 1451–1456.
- Kahn, L. E., Zygmant, M. L., Rymer, W. Z., Reinkensmeyer, D. J., 2006, “Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled pilot study”, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, pp. 1-13.
- Kapandji, A. I., 2000, “Fisiologia Articular – Membro Superior”, 5ª edição, Editorial Médica Panamericana.
- Krebs, H. I., Finley, M. A., Dipietro, L., Ohlhofer, J., Whitall, J., Bever, C. T., 2004, “Does MIT-MANUS Upper Extremity Robot Testing Create a Learning Effect in Healthy Adults?”.
- Landsberger, S.E., Sheridan, T.B., 1985, “A new design for parallel link manipulator”, In *International Conference on Cybernetics and Society*, pages 812–814, Tucson, Arizona.
- Lum, P.S., Burgar, C.G., Shor, P.C., Majmundar, M., Van der Loos, M., 2002, “Robot assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke”. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 83(7):952-959.
- Mayhew, D., Bachrach, B., Rymer, W. Z., Beer, R. F., 2005, “Development of the MACARM – a Novel Cable Robot for Upper Limb Neurorehabilitation”, *Proceedings of the 2005 IEEE, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Chicago, USA.
- Melchiorri C., 2005, “Design and application of advanced haptic interface: soft contact, multi point, and multimodal integration (AIDA)” (in Italian), *Progetto dell’Unità di Ricerca dell’Università degli Studi di Bologna*.
- Merlet, J-P., 2004, “Analysis of the Influence of Wires Interference on the Workspace of Wire Robots”, *On Advances in Robot Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, pp. 211-218.
- Nef, T., Riener, R., 2005, “ARMin: Design of a novel arm rehabilitation robot”, in *Proc. IEEE 9th Int. Conf. Rehabilitation Robotics ICORR2005*, Chicago, IL, Jun. 2005, pp. 57–60.
- Rosati, G., Gallina, P., Masiero, S., Rossi, A., 2005, “Design of a new 5 d.o.f. wire-based robot for rehabilitation”, *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Chicago, USA.

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

DEVELOPMENT OF A CABLE DRIVEN PARALLEL STRUCTURE FOR REHABILITATION OF SHOULDER MOVEMENTS

Rogério Sales Gonçalves, rsgoncalves@mecanica.ufu.br
João Carlos Mendes Carvalho, jcmendes@mecanica.ufu.br

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brasil

Abstract. *This paper presents a new parallel robotic structure actuated by cables for rehabilitation of the movements of the human shoulder. The robotics structure consists of four cables that allow the movement of vertical flexion- extension, abduction-adduction and horizontal flexion-extension with different limits of movement and speed. The development of this robotic device is justified by the large number of people with shoulder problems. These problems are the main causes of stroke, polio, arthritis, disaster recovery, and can be applied to movements of physical therapy. First is presented the studies involving robotic structures for rehabilitation. After the movements of the shoulder, the new structure proposed and graphical simulations are described.*

Keywords: *Shoulder, Rehabilitation, Cable driven parallel structures.*