

ESTRUTURA ROBÓTICA APLICADA PARA REABILITAÇÃO DA MARCHA HUMANA ATUADA POR CABOS

Paulo Fernandes Dechichi, Universidade Federal de Uberlândia, paulo_fernands@yahoo.com.br

Rogério Sales Gonçalves, Universidade Federal de Uberlândia, rsgoncalves@mecanica.ufu.br

João Carlos Mendes Carvalho, Universidade Federal de Uberlândia, jcmendes@mecanica.ufu.br

Resumo. *O presente dispositivo tem como objetivo a reabilitação dos membros inferiores do corpo humano, a fim de auxiliar nas sessões de recuperação e treinamento dos movimentos dos membros inferiores do paciente em específico simulando a marcha humana, atuando nas articulações necessárias para o movimento. Neste trabalho será apresentada a modelagem matemática e computacional do dispositivo. O controle da estrutura para a sessão de reabilitação é feito sobre a técnica de “learning by demonstration”, que significa aprendizagem por demonstração. Tal controle também pode ser empregado em atletas que queiram aperfeiçoar o movimento de corrida ideal.*

Palavras chave: *Estrutura robótica, reabilitação, marcha humana, membros inferiores.*

1. INTRODUÇÃO

Nestes últimos anos, o avanço da robótica, proporcionou um aumento na área de atuação da mesma. Esta que tinha como principal utilização nas áreas industriais, geralmente em ambientes de trabalho agressivos para o homem, passou a atuar na área da saúde e reabilitação, auxiliando o trabalho dos médicos e terapeutas.

O trabalho dos profissionais durante as sessões de reabilitação de pacientes vítima de lesões, oriundas de acidentes, queda, acidente vascular cerebral (AVC) ou qualquer outro fator que comprometa a movimentação dos membros inferiores, é uma tarefa em que demanda, geralmente, muito esforço físico para a realização da atividade e muitas vezes necessitar de vários ajudantes para ser possível a simulação de uma caminhada, tornando uma tarefa muito complexa e cansativa.

Dispositivos robóticos são largamente utilizados na reabilitação de pacientes com alguma limitação no movimento dos membros inferiores, trabalhando na simulação da marcha humana.

Estes tipos de dispositivos podem ser observados, como exemplo, em que o paciente é direcionado a induzir movimentos de caminhada, desenvolver equilíbrio e treinar músculos, sendo ajustáveis a diferentes pacientes (Jorge Cadile, 2009). O pé do paciente é fixo em um par de barras que se deslocam fazendo a movimentação da passada, com o mesmo sendo suportado por um sistema com colete. Este entre outros muito semelhantes como: Einav et al (2009) e JianJuen Hu (2014), os quais utilizam também um sistema para suportar o peso do paciente e possuem uma plataforma para guiar o movimento da marcha.

Em Caitlyn Joyce Bosecker (2011) é apresentado um dispositivo no qual possui um assento, no lugar de um equipamento para suportar o peso, sendo o movimento da passada realizado por duas esteiras, as quais podem variar sua angulação com relação ao solo.

Outro dispositivo muito utilizado é o Lokomat (Riener et al. 2010), que apresenta uma estrutura com um exoesqueleto onde dois aparelhos ligados à perna possibilitam o paciente a realizar os movimentos. Seu sistema de controle é realizado por pequenos motores interligados e controlados por computador.

Um dispositivo que também utiliza de cabos para sua atuação é apresentado em Alamdari e Krovi (2015), o qual se utiliza de 4 cabos ligados à coxa, panturrilha e dois no pé, que fornecem o movimento da perna do paciente. Existem duas maneiras de se posicionar estes cabos, podendo trabalhar no plano sagital e frontal.

Outro dispositivo é o “CaLT” (Cable-driven Locomotor Trainer), Wu et al. (2010), que possui um sistema de cabos paralelos, o qual fornece o movimento dos membros inferiores. Este propõe um sistema robótico para treinamento locomotor baseado em cabos que fornecem força e resistência complementar para as pernas durante a caminhada, com a utilização de uma esteira. O sistema é formado por quatro cabos acionados por quatro motores e polias, usados para aplicar resistência e/ou assistência durante a fase de balanço do membro inferior, sensores e um computador para controlar os torques dos motores.

O dispositivo de reabilitação proposto neste trabalho, possui um sistema atuado por cabos aplicado à reabilitação da marcha humana, a fim de auxiliar nas sessões de recuperação de pacientes. A estrutura é capaz de simular o movimento da marcha humana, atuando nas articulações do quadril, joelho e tornozelo. Utiliza-se também um sistema para suportar o peso do paciente, para diminuir os esforços.

2. ESTRUTURA PROPOSTA

A estrutura proposta, representada na Fig. (1), possui um sistema para suporte do peso do paciente compacto e feito com barras de aço e cabos para elevar o paciente gradativamente, com a ajuda de um colete e um cabo tracionado por um motor. A movimentação dos membros inferiores será realizada pela plataforma em que o pé se fixará e por cabos conectados às plataformas. Os motores posicionados na estrutura metálica exercem a tração nos cabos, e com o auxílio de encoder e células de cargas é possível medir as tensões durante a execução do movimento.

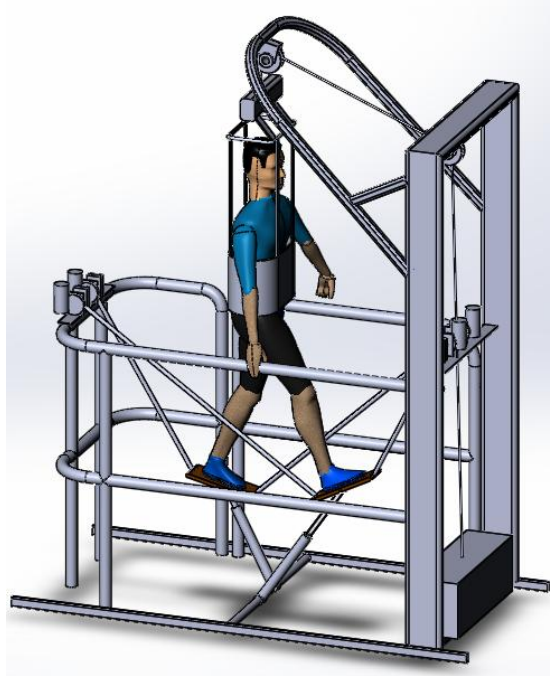


Figura 1 - Estrutura robótica aplicada para reabilitação da passada humana.

Para facilitar o trabalho do fisioterapeuta e diminuir esforços do paciente, faz-se uso de uma rampa de acesso facilitando a entrada do paciente. Com o intuito de posicionar o paciente cadeirante para utilizar o dispositivo é necessário abrir a porta de entrada aproximar a rampa, posicionar o paciente já com o colete na parte superior da rampa utilizando as travas da cadeira de rodas, encaixar as presas da peça adaptada ao colete. Assim suspende o corpo do paciente, podendo então retirar a cadeira de rodas, a rampa e fechar a porta de acesso.

Para o sistema de controle da estrutura, têm-se placas de controle e um computador/notebook para servir de interface gráfica para o profissional que utilizar o equipamento. O controle da estrutura para a sessão de reabilitação é feito sobre a técnica de “learning by demonstration”, que significa aprendizagem por demonstração, onde o profissional da saúde realizará o movimento da passada a ser repetido pelo paciente e o computador armazenará pontos da trajetória descrita e repetirá o movimento o número de vezes que for desejado.

Esta estrutura também pode ser empregada em atletas que queiram aperfeiçoar o movimento para uma corrida, repetindo o movimento ideal.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DA ESTRUTURA PROPOSTA

O cálculo do modelo geométrico foi realizado a partir das dimensões antropométricas do paciente (a = coxa, b = perna e c = pé) e das variações angulares das articulações do quadril (q_{1e}), joelho (q_{2e}) e tornozelo (q_{3e}), durante a marcha humana, conforme está representado na Fig. (2). Foi calculado o Modelo Geométrico Direto (MGD) para calcular a posição e orientação do pé do paciente. Para este modelo foi considerado o quadril como ponto fixo (Q), possuindo somente rotação em torno do eixo transversal, realizando o movimento de flexão e extensão. Foi utilizado o método de coordenadas Equipolentes para obter a orientação (θ) e posição (P) da ponta do pé do paciente, conforme as Equações (1), (2) e (3).

$$\theta = q_{1e} + q_{2e} + q_{3e} \quad (1)$$

$$P_x = a \cdot \sin(q_{1e}) + b \cdot \sin(q_{1e} + q_{2e}) + c \cdot \sin(q_{1e} + q_{2e} + q_{3e}) \quad (2)$$

$$P_y = a \cdot \cos(q_{1e}) + b \cdot \cos(q_{1e} + q_{2e}) + c \cdot \cos(q_{1e} + q_{2e} + q_{3e}) \quad (3)$$

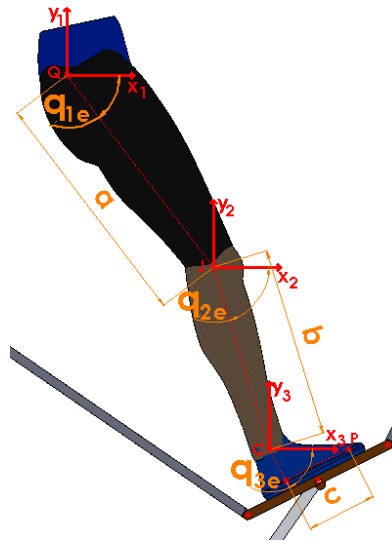


Figura 2- Representação dos parâmetros utilizados para calcular o MGD da marcha humana

Através do MGD do pé do paciente, foi obtida a posição e orientação da plataforma que irá condicionar a marcha humana. Assim é possível calcular qual deverá ser a variação dos cabos que irão conduzir a plataforma. Deste modo como a posição da estrutura já é conhecida (A_1 e A_2) e também se sabe a posição (B_1 e B_2) e orientação (θ) da plataforma, pelo método vetorial se pode calcular os comprimentos dos cabos (q_1 e q_2) e o comprimento do atuador fixado abaixo da plataforma (q_3), conforme está representado na Fig. (3).

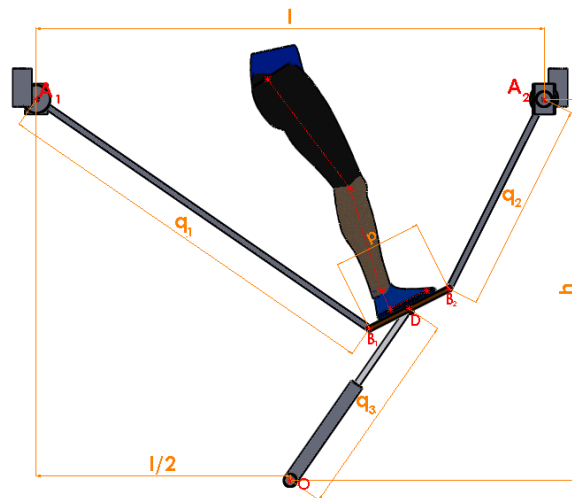


Figura 3 – Representação dos parâmetros da estrutura e atuadores

Assim, calculado a variação dos cabos foi possível obter um modelo, sendo neste as variações dos cabos como parâmetros de entrada. Desta maneira foi calculado o Modelo Geométrico Inverso (MGI) da perna do paciente, com os dados de entrada a posição (B_1 e B_2) e orientação (θ) da plataforma.

Para esta análise foi feita a resolução do sistema obtido através das equações (1), (2) e (3). Considerando a angulação da plataforma igual à do pé do paciente, é possível calcular a posição do calcanhar (C), dada por:

$$C_x = P_x - c \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

$$C_y = P_y - c \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

Assim obtém-se um sistema com duas incógnitas, q_{1s} e q_{2s} , que estão distribuídas de maneira semelhante à q_{1e} e q_{2e} , calculado através da análise vetorial entre o quadril e o calcanhar, obtém-se o sistema:

$$\begin{cases} C_x - Q_x = a \cdot \sin(q_{1s}) + b \cdot \sin(q_{1s} + q_{2s}) = k_x \\ C_y - Q_y = -a \cdot \cos(q_{1s}) - b \cdot \cos(q_{1s} + q_{2s}) = k_y \end{cases} \quad (6)$$

Deste modo, resolvendo a Eq. (6) foi possível calcular os valores de q_{2s} conforme:

$$q_{2s} = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + b^2 - k_x^2 - k_y^2}{2 \cdot a \cdot b} \right) \quad (7)$$

$$q_{2s}' = -q_{2s} \quad (8)$$

Lembrando que existirão duas possibilidades de respostas para q_{2s} , porém para o este caso a segunda solução não será interessante, pois esta levaria o joelho para uma angulação contrária à comum. Sabendo o valor de q_{2s} , é possível calcular o valor de q_{1s} :

$$\cos(q_{1s}) = \frac{-k_x \cdot b \cdot \sin(q_{2s}) - k_y \cdot (a - b \cdot \cos(q_{2s}))}{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(q_{2s})} \quad (9)$$

$$\sin(q_{1s}) = \frac{k_x \cdot (a - b \cdot \cos(q_{2s})) - k_y \cdot b \cdot \sin(q_{2s})}{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(q_{2s})} \quad (10)$$

Deste modo, para cada valor correspondente ao q_{2s} , é possível obter uma solução única para q_{1s} , dada por:

$$q_{1s} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(q_{1s})}{\cos(q_{1s})} \right) \quad (11)$$

4. RESULTADOS

As equações obtidas através das dimensões da estrutura e paciente foram analisadas utilizando o software *MatLab*®. Foi possível verificar se variando os cabos conforme calculado de acordo com as angulações das articulações, seria reproduzida a marcha humana.

A variação angular das articulações utilizadas é representada na Fig. (4)

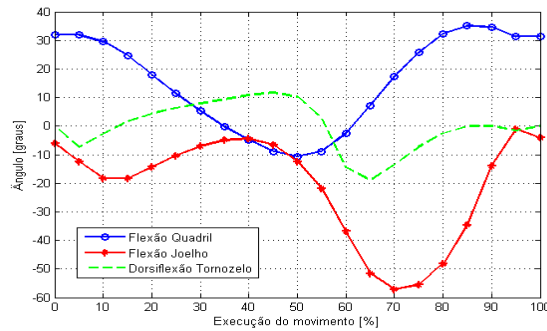


Figura 4 – Variação dos ângulos das articulações durante o passo, Barbosa (2013)

Após a simulação realizada é possível calcular a variação do comprimento dos cabos que vão atuar na plataforma, Fig. (5).

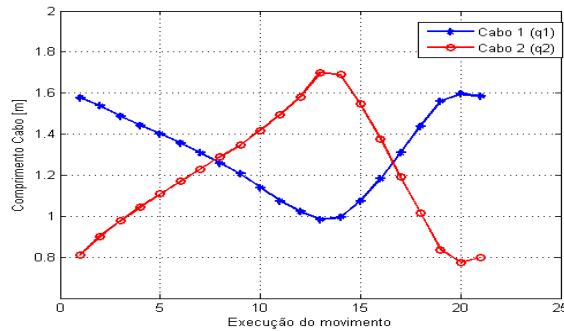


Figura 5 – Variação dos comprimentos dos cabos

Após o cálculo do comprimento dos cabos que farão o movimento da plataforma foi realizado uma simulação do movimento no software *SolidWorks*, utilizando as dimensões de uma pessoa na média populacional. Nesta animação variou somente o comprimento dos cabos e verificou a variação angular das articulações do paciente, analisando se o movimento é semelhante à marcha humana.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma nova estrutura robótica para reabilitação da marcha humana. Simulações numéricas e gráficas tridimensionais confirmam que a estrutura proposta poderá ser utilizada para auxiliar os profissionais da saúde na reabilitação da marcha humana.

Como trabalhos futuros estão sendo propostos: a construção do protótipo, realização de testes experimentais com um manequim e posteriormente com pacientes com disfunção na marcha humana.

6. REFERÊNCIAS

- Alamdari, A., Krovi, V., 2015, "Robotic Physical Exercise and System (Ropes): A Cable-Driven Robotic Rehabilitation System for Lower-Extremity Motor Therapy", Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference – DETC2015-46393
- Barbosa, A.M., 2013 "Desenvolvimento de um dispositivo robótico atuado por cabos para a reabilitação do membro inferior humano", Dissertação Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.
- Bosecker, C.J., Newtonville, H., Krebs, I., 2011, "Dynamic Lower Limb Rehabilitation Robotic Apparatus and Method of Rehabilitating Human Gait", Patente US 2011/0288455 A1
- Cadile, J., 2010, "Aparelho de Reabilitação de Pacientes que sofrem Disfunção Motora", Patente PI000960-4 A2
- Einav, O., Kfar-Monash, M., Hefer, E., Puckett, D.G., 2009, "Device and Method for Foot Drop Analysis and Rehabilitation", Patente WO 2009/125397 A2.
- Hu, J., Lim, Y., Bonato, P., Ding, J., 2014, "Lower Extremity Robotic Rehabilitation System", Patente US 2014/0100491 A1
- Riener, R., Lunenburger, L., Maier, I.C., Colombo, G., Dietz, V., 2010 "Locomotor Training in Subjects with Sensorimotor Deficits: An Overview of the Robotic Gait Orthosis Lokomat", Journal of Healthcare Engineering Vol. 1 No. 2 2010, Page 197–216
- Wu, M., Hornby, T.G., Landry, J.M. Roth, H., Shmit, B.D., 2010, "A cable-driven locomotor training system for restoration of gait in human SCI", Elsevier, Gait & Posture 2010, Page 256-260

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

8. ABSTRACT

The present device aims the rehabilitation of the lower limbs of the human body in order to assist in the recovery sessions and training the movements of the lower specific patient limbs simulating the human gait. This study will be presented the mathematical and computational modeling of the device. The control structure for the rehabilitation session is done on the technique of "learning by demonstration". Such control can also be used in athletes who want to reach the perfect running motion.

9. RESPONSABILIDADES PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho