

Robótica Assistiva: Planejamento de Trajetória Robótica para Reabilitação de Membros Superiores

Sibyla Andreuchetti Vioto e Silva, Alice Tissot Garcia and André Luiz da Silva Kelbouscas *
Victor Barros Coch ** Mateus Borges de Oliveira Pinto ***
Vinicius Menezes de Oliveira ****

* Graduate Student in Computer Engineering Graduate Program at the Federal University of Rio Grande (FURG), Rio Grande (RS), Brazil, (e-mail: sibylaavs@gmail.com, alicetissotgarcia@gmail.com, andrekelbouscas@gmail.com)

** Undergraduate Student of Automation and Control Engineering at the Federal University of Rio Grande (FURG), Rio Grande (RS), Brazil, (e-mail: victorbarroscoch@gmail.com)

*** Undergraduate Student of Mechanical Engineering at the Federal University of Rio Grande (FURG), Rio Grande (RS), Brazil, (e-mail: mateusbdop@gmail.com)

**** Associate Professor at Federal University of Rio Grande (FURG), Rio Grande (RS), Brazil, (e-mail: vinicius@ieee.org)

Abstract: The recovery of functional use of the upper extremity in patients with hemiparesis has been a longstanding struggle for patients and therapists. Assistive and robotic therapies are proving to be tools with great potential to assist in the rehabilitation process of patients. With respect to traditional rehabilitation interventions, robotic systems can provide more intensive physiotherapy and new interventions have come to be used to aid the rehabilitation of patients with certain movement restrictions, especially after stroke. The present work aims to show a study on trajectory planning of a robotic arm, which will be suggested to the patient in order to perform the movement for rehabilitation. The methodology consists of using CO-PTP type training tasks, with the difference of being in 3D space and the analysis of the robot workspace, the patient and the training space, where the task will be performed. In addition, it is intended that the trajectory can be updated in real time to better meet the patient's movement requirements and restrictions. In view of the requirement to generate trajectory in real time, there is a need for a simple model of the manipulator's workspace to be used as limit and boundary condition for the task space. In parallel, there is the development of a prototype of the REHABOT robot, using parts of the Cyton Gamma 1500 robot as a base.

Resumo: A recuperação do uso funcional da extremidade superior em pacientes com hemiparesia tem sido uma luta de longa data para pacientes e terapeutas. Terapias assistivas e robóticas vêm se mostrando ferramentas com grande potencial para auxiliar no processo de reabilitação de pacientes. Com respeito a intervenções tradicionais de reabilitação, os sistemas robóticos podem fornecer fisioterapia mais intensiva e novas intervenções passaram a ser utilizadas no auxílio da reabilitação dos pacientes com determinadas restrições de movimento, principalmente pós AVE. O presente trabalho tem como o intuito de apresentar um estudo sobre planejamento de trajetória de um braço robótico, a qual será sugerida ao paciente com a finalidade de realizar o movimento para a reabilitação. A metodologia consiste na utilização de tarefas de treinamento do tipo CO-PTP, com o diferencial de ser no espaço 3D e a análise do espaço de trabalho do robô, do paciente e do espaço de treinamento, local onde a tarefa se realizará. Além disso, pretende-se que a trajetória possa ser atualizada em tempo real para melhor atender aos requisitos e restrições de movimento do paciente. Visto o requisito de geração de trajetória em tempo real, há a necessidade de um modelo simples do espaço de trabalho do manipulador, a ser utilizado como limite e condição de contorno para o espaço de tarefas. Em paralelo há o desenvolvimento de um protótipo do braço robótico REHABOT, baseado no projeto de código aberto do robô Reachy, utilizando peças do robô Cyton Gamma 1500 como base.

Keywords: Robotics; Rehabilitation; Restrictions; Manipulator; Patients; Physiotherapy; Trajectory; Movement.

Palavras-chaves: Robótica; Reabilitação; Restrições; Manipulador; Pacientes; Fisioterapia; Trajetória; Movimento.

1. INTRODUÇÃO

Em 2013 o AVE (Acidente vascular encefálico) foi a segunda causa de morte mais comum no mundo (11.8% de todas as mortes) e a terceira causa mais comum de deficiência, representando 4.5% da DALYs (Demofonti et al., 2021), a qual, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, é a soma dos anos perdidos de vida potencial devido à mortalidade prematura e anos de vida produtiva perdidos por invalidez (Organization, 15 de março de 2021.). Entre as deficiências pós-AVE estão aquelas que afetam o membro superior contra-lesional, que inclui perda de movimento, coordenação, sensação e destreza (Lencioni et al., 2021).

A recuperação do uso funcional da extremidade superior em pacientes com hemiparesia tem sido uma luta de longa data para pacientes e terapeutas. Após o AVE, a maioria dos pacientes têm deficiências motoras residuais nos membros superiores, levando à limitações de longo prazo, o que impacta na qualidade de vida (Duret et al., 2015). Cerca de 80% dos sobreviventes de AVE sofrem uma redução na capacidade de usar seu membro superior parético e é recorrente que os indivíduos pós-AVE subutilizem o braço parético e compensem isso com o uso excessivo do braço não parético (Bakhti et al., 2017).

Com respeito a intervenções tradicionais de reabilitação, os sistemas robóticos podem fornecer fisioterapia mais intensiva com a implementação de várias estratégias interativas (Fonseca et al., 2018). Além disso, a utilização da robótica como ferramenta de auxílio no processo de fisioterapia permite obter uma série de outras informações que antes não era possível, ou seja, a partir da utilização dos modelos dos pacientes, da captação das informações dos sensores e da realização do movimento terapêutico adequado, será possível realizar um exame mais preciso para o processo de reabilitação com a medição de novos parâmetros como pico máximo de hipertonía/rigidez, área sob a curva de espasticidade, relação de hipertonía, entre outros (Fonseca et al., 2018; Hagenhuber and Vogel, 2018). Ademais, a terapia de reabilitação robótica pode oferecer treinamento de alta dosagem e alta intensidade, tornando-a útil para pacientes com distúrbios motores causados por AVE ou doença da medula espinhal (Chang and Kim, 2013).

A fim de contextualizar o presente trabalho no âmbito em que ele ocorre, primeiramente é necessário destacar que a mesma pertence ao grupo Robótica Assistiva da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - REHABOT em parceria com a Universidade Carlos III de Madri (UC3M), que busca desenvolver ferramentas nas áreas de robótica e computação visando auxiliar pacientes que possuam quaisquer tipos de necessidades relacionadas a reabilitação de membros superiores pós-AVE.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Em (Miao et al., 2018) é apresentado um novo método de geração de trajetória em três estágios. Utilizando análise de interferência, que possui o princípio básico de garantir que cada elo do robô não interfira com outros durante a operação. O trabalho aborda o treinamento bilateral dos membros superiores devido ao seu potencial para aplicações clínicas. Para tal, foram utilizados dois robôs universais comerciais (UR5 e UR10 da Universal Robots S/A) junto com duas garras customizadas. A geração da trajetória considera a interseção entre o espaço de trabalho das mãos humanas e o espaço de trabalho do robô, o que torna o caminho de treinamento seguro para os usuários com uma velocidade apropriada. O trabalho faz o uso direto dos diversos espaços de trabalho existentes (robô, usuário e de treinamento) e a geração de trajetórias que sejam seguras ao usuário.

Terapia assistida por robô pode permitir reabilitação passiva, ativa e passiva-ativa (também chamada auxiliar quando necessário). Diversos controladores auxiliares conforme necessário já foram propostos para terapia auxiliada por robô, porém o nível de deficiência motora é pouco considerada nos esquemas de controle. Pensando nisso, Luo et al. (Luo et al., 2018) apresenta um estudo de um controlador conforme necessário para reabilitação de membros superiores. O controle utiliza uma rede de função de base radial gaussiana (RBF) com a finalidade de aprender a capacidade motora do paciente no espaço de trabalho. Para fornecer o treinamento de reabilitação para os pacientes utilizou-se o CASIA-ARM, um robô planar com 2 GDLs de baixa inércia, o qual pode fornecer adução/abdução do ombro e flexão/extensão do cotovelo. O dispositivo inclui um mecanismo de cinco elos paralelos acionados por dois motores elétricos. Além disso, um sensor de força/torque é fixado no efector final para medir as forças de interação entre o paciente e o robô.

Para o processo de reabilitação, tarefas de treinamento são apresentadas numa tela e o paciente deve realizar o movimento. Importante destacar que para o sistema de controle proposto foram desenvolvidos modelos de níveis de restrição de movimento, a partir de um sistema de *feedback* o nível pode ser alterado durante o processo de treinamento para cada nível de restrição do paciente. Foram realizados testes em pacientes sem restrição de movimento e os resultados mostram que o sistema tem potencial de promover envolvimento ativo aos pacientes e responder às mudanças no desempenho de suas tarefas.

A proposta do presente trabalho difere do trabalho de (Miao et al., 2018) por não ter como foco o treinamento bilateral e também por apresentar uma proposta de trajetória tridimensional, porém se relaciona quanto ao estudo dos espaços de trabalho do paciente e do robô para garantir a realização das tarefas de forma segura para o paciente. Em relação ao trabalho apresentado por (Luo et al., 2018)

tem-se também a diferença da trajetória não ser realizada no plano, mas sim no espaço e o *feedback* da restrição de movimento do paciente não tem como finalidade alterar o nível da tarefa de treinamento, mas sim se adequar à restrição apresentada e tentar diminuir o movimento de compensação de tronco.

Desta forma, este trabalho tem como proposta central desenvolver a trajetória robótica que será sugerida ao paciente com a finalidade de realizar o movimento para a reabilitação, utilizando diferentes métodos de interpolação. Além disso, pretende-se que a trajetória possa ser atualizada em tempo real para melhor atender aos requisitos e restrições de movimento do paciente, bem como reduzir movimentos compensatórios oriundos de outras articulações, com foco no tronco.

3. METODOLOGIA

3.1 Trajetória para Reabilitação Assistida por Robô

Terapias assistidas por robôs fazem uso de algumas tarefas de avaliação que trabalham com a ideia de *center-out point-to-point* (CO-PTP) (Nordin et al., 2014). A tarefa consiste basicamente em levar os pacientes de um ponto central, alcançar um alvo, retornar ao ponto central e ir para o próximo alvo e assim por diante até que se complete o círculo (figura geométrica mais usada), tudo dentro do plano horizontal.

Um ponto considerável é a suavidade do movimento, que é dependente do perfil da trajetória. É importante destacar que, sabendo das distintas fases de recuperação do AVE, a proposta encontra-se localizada em terapias aplicadas em pacientes crônicos, devido a significantes resultados apresentados em atividades PTP imperturbada e resistiva (Zollo et al., 2011), CO-PTP (Conroy et al., 2011) e PTP multi-nível (Coderre et al., 2010).

Assim, a ideia central é que o paciente realize o movimento, direcionando sua mão a cada alvo da tarefa, gerando o movimento terapêutico no membro parético. Porém, a tarefa será realizada no plano 3D. Ao invés de se ater somente ao plano horizontal como na lógica anteriormente apresentada, de movimento do tipo CO-PTP. A representação do movimento sugerido pode ser vista na Figura 3(a).

Ademais, é necessário levar em consideração a restrição de movimento do paciente para a realização da tarefa, isto é, os limites de movimento do membro parético que cada paciente possui irá alterar em sua capacidade de realização da tarefa. Desta forma, espera-se que o paciente não consiga realizar o movimento perfeito do cubo, mas sim um cubo “deformado”, dependendo da sua restrição de movimento e dos limites de cada paciente. Sendo assim, a ideia consiste em analisar os cubos gerados por cada um dos pacientes e compará-los com o cubo original, para que assim se possa adaptar os movimentos para cada paciente, visando minimizar a compensação oriunda do movimento de outras articulações, com foco na compensação de tronco. Para melhor visualização da proposta, tem-se a Figura 3(b). Importante destacar que a geração da trajetória considera a interseção entre o espaço de trabalho das mãos humanas e o espaço de trabalho do robô, o que torna o caminho de

treinamento seguro para os usuários com uma velocidade apropriada.

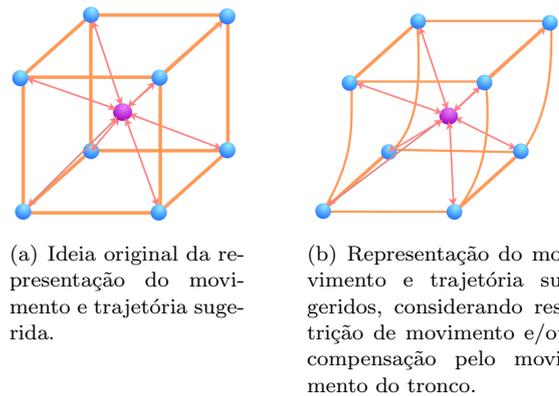


Figura 1. Representação dos movimentos e trajetórias sugeridos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Espaço de Trabalho

Para tornar possível a geração de trajetórias em tempo real é necessário obter uma forma de verificação simples dos limites de ação do manipulador. A fim de cumprir este critério, foi decidido modelar o espaço de trabalho ou *Workspace*, que engloba todas as posições cartesianas tangíveis ao efetuador final do robô.

O método desenvolvido para esta tarefa se resume em um mapeamento randômico do espaço de juntas, através da cinemática direta, seguido da redução dimensional, identificação de perímetro e, finalmente, a construção da malha tridimensional volumétrica aproximada do espaço.

Primeiramente, é imprescindível obter o modelo cinemático do manipulador. Visto isso, a partir da documentação (Robotics, 2021), foi construída a tabela 1 de parâmetros clássicos de Denavit-Hartenberg. Esta estrutura permite então obter as extensas expressões trigonométricas que transformam um conjunto de sete coordenadas no espaço de juntas \mathbf{q}_i para três coordenadas (x_i, y_i, z_i) no espaço \mathcal{R}_3 .

Junta	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$q_1 + 90^\circ$	-0.19	0	90°
2	q_2	0	0	-90°
3	$q_3 + 90^\circ$	-0.28	0	90°
4	q_4	0	0	-90°
5	q_5	-0.25	0	90°
6	$q_6 + 90^\circ$	0	0	-90°
7	q_7	0	-0.0325	90°
8	0	-0.01	-0.075	0°

Tabela 1. Parâmetros de Denavit-Hartenberg do braço direito do Reachy

Com este conhecimento, uma questão importante é a escolha da distribuição do conjunto de ângulos. Para este propósito, (Cao et al., 2011) elege a distribuição *Beta*, descrita nas equações 1 e 2, como uma boa alternativa à distribuição uniforme, pois ela mapeia o espaço de juntas de forma mais consistente, reduzindo o número de pontos necessários e tornando a aproximação mais precisa.

$$Beta(\alpha, \beta) : prob(x|\alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad (1)$$

Onde:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1} dt \quad (2)$$

Para otimizar os parâmetros α e β , (Cao et al., 2011) também recomenda utilizar a seguinte relação experimental, onde δ é a amplitude máxima de cada junta:

$$\alpha_i = \beta_i = \begin{cases} 0.4, & 0 < \delta_i < \frac{\pi}{2} \\ \frac{1}{53\pi} \delta_i + 0.3, & \frac{\pi}{2} \leq \delta < \pi \\ \frac{5\pi}{2} \delta_i - 0.1, & \pi \leq \delta < \frac{3\pi}{2} \\ \frac{5\pi}{2} \delta_i + 0.2, & \frac{3\pi}{2} \leq \delta < 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta_i = |\max(q_i) - \min(q_i)| \quad (4)$$

A figura 2 representa um conjunto de 10×10^6 pontos, gerados pela aplicação da cinemática direta em uma distribuição *Beta* de ângulos de juntas. É notável que o tamanho e complexidade desse conjunto impede a utilização direta de um algoritmo de reconstrução de superfície. (Cao, 2011) sugere a redução de dimensão através da análise iterativa de conjuntos de pontos, pertencentes a planos perpendiculares ao eixo vertical da estrutura, coloquialmente chamados de “fatias”.

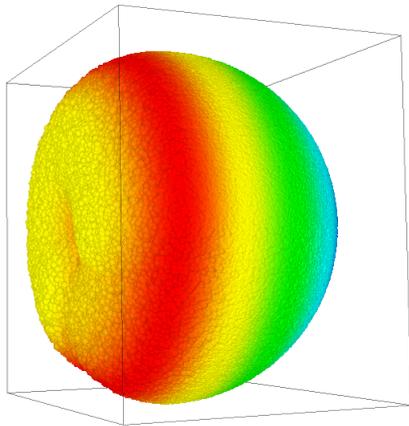


Figura 2. Nuvem de pontos densa do espaço de trabalho (vista externa)

Para realizar a identificação de borda e segmentação das fatias, foi utilizado o conceito Casco Côncavo 2D, também conhecido como *Alpha Shape* (Asaeedi et al., 2017), em contraponto ao algoritmo tradicional de Casco Convexo, que ignora *features* mais complexas ou formas ocas. O método resulta em uma estrutura de dados contendo os vértices dos perímetros interno e externo da fatia, além dos segmentos de reta que conectam estes pontos. Por conseguinte, foi gerada uma série de 64 fatias, identificando os limites do volume tridimensional. Logo após, pela necessidade de transformar esta nuvem de pontos reduzida em uma superfície, ou malha, bem definida, o conjunto

de vértices foi importado para o *MeshLab*, *software* livre para manipulação de malhas. Condizente com (Wiemann et al., 2013), foi selecionado o algoritmo de *Ball-Pivoting* (BPA) para fins de construção da malha a partir dos vértices. Adicionalmente, aplicando um filtro Laplaciano de alisamento, o resultado final foi obtido, representado na Figura 3.

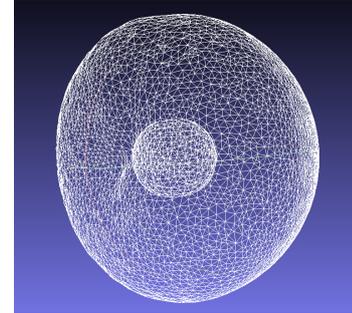


Figura 3. Malha final do espaço de trabalho

4.2 Aquisição de dados

Como dito anteriormente, o presente trabalho faz parte de um grupo de pesquisa onde uma das vertentes é a aquisição de dados dos movimentos de pacientes para análise de amplitude de movimento e de movimentos compensatórios do tronco. Optou-se pela utilização do Kinect[®], desenvolvido pela Microsoft, como ferramenta de captura de movimento. Tal escolha foi feita tendo em vista que o Kinect[®] se trata de um sensor com grande potencial para reconhecimento de pessoas e suas articulações em um ambiente em três dimensões Kitsunezaki et al. (2013), além disso, o Kinect[®] conta com duas versões de sensor, onde a segunda versão foi a escolhida para ser utilizada neste trabalho, uma vez que este apresenta mais pontos de captura que a primeira versão.

Este sensor conta com a biblioteca SDK 2.0 para Windows que já possui previamente todos os pontos capturados pelo sensor. Assim, a partir da utilização desta biblioteca e algumas modificações/adaptações pode-se utilizar o Kinect v2[®] como o sensor de captura de amplitude de movimentos dos membros superiores e também movimentos compensatórios, visto que a partir dela torna-se possível obter informações acerca dos ângulos das articulações dos pacientes.

Os testes foram realizados por 10 voluntários entre 24 e 82 anos, sendo que 9 (4 sexo masculino e 5 do sexo feminino) não apresentavam nenhum tipo de restrição de movimento e 1 (sexo masculino e idoso), apresentava restrição de movimento devido ao AVE leve que sofreu. Foram realizados quatro movimentos: adução horizontal, extensão horizontal e dois tipos de movimento de alcance ao alvo: um localizado na frente do voluntário e outro localizado ao lado oposto do braço que realizou o movimento. Cada movimento foi realizado 10 vezes por cada voluntário.

A fim de validar o uso do robô *Reachy* como ferramenta para robótica assistiva foram feitas algumas simulações utilizando os dados de voluntários obtidos com o Kinect v2[®], ou seja, verificar se o robô consegue replicar os

movimentos dos voluntários. Esse resultado torna-se importante devido ao fato de que é necessário ter o entendimento da movimentação dos membros superiores de um ser humano para que a trajetória seja segura para o paciente, além disso tal tem-se também verificação de restrições de movimento do robô para alterações no projeto do protótipo.

A Figura 4 mostra o movimento realizado pelo ombro direito de um dos voluntários ao realizar o movimento de adução horizontal, o qual, de acordo com os manuais de goniometria Marques (1997) tem uma amplitude de 0° a 40° podendo variar de pessoa para pessoa, além disso a própria ferramenta pode apresentar um erro de leitura.

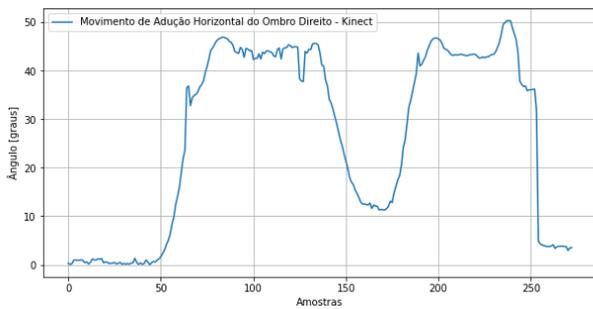


Figura 4. Movimento de adução horizontal do ombro direito de um dos voluntários capturado pelo Kinect v2[©]

Ao tentar replicar o movimento com o robô Reachy foi possível notar que tal movimento não é possível de ser realizado pelo módulo do braço direito. Tal problema surgiu da restrição da junta responsável por este movimento (*shoulder_roll*), a qual apresenta uma amplitude de movimento de 10° a -180° . Por outro lado, apenas com o propósito de comprovar que com restrições de junta diferentes é possível replicar o movimento, os testes foram refeitos, desta vez com a junta correspondente do braço esquerdo do robô, a qual possui amplitude de movimento contrária de -10° a 180° . A Figura 5 apresenta então o movimento replicado em comparação com o realizado pelo Kinect v2[©] e a Figura 6 mostra o erro entre os movimentos, o qual surge devido a inexactidões provenientes da modelagem cinemática do robô e dos motores.

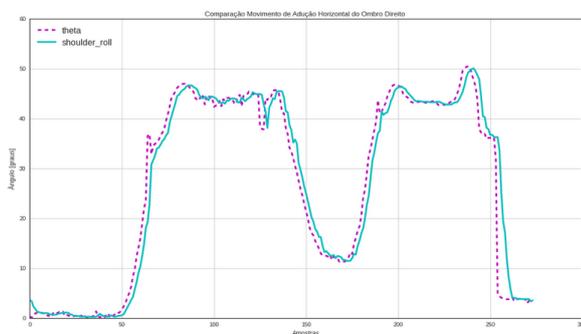


Figura 5. Movimento de adução horizontal do ombro direito capturado pelo Kinect v2[©] comparado com o movimento replicado pelo braço esquerdo do robô Reachy.

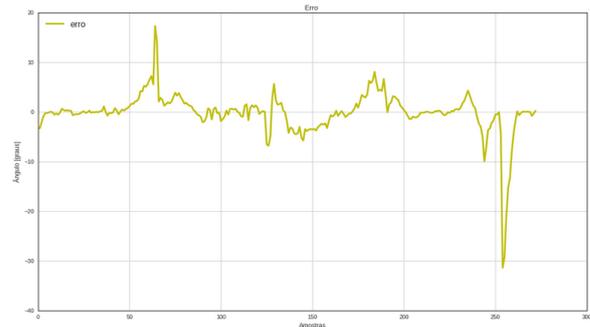


Figura 6. Erro entre o movimento de adução horizontal do ombro direito capturado pelo Kinect v2[©] e o movimento replicado pelo do braço esquerdo do robô Reachy

4.3 Protótipo REHABOT

O REHABOT é um robô manipulador em desenvolvimento destinado para trajetórias de reabilitação e se dá através de dois robôs base. Em primeiro tem-se o Reachy, robô humanóide de código aberto, modular, totalmente personalizável e criado com o objetivo de fornecer uma ferramenta para colaborar em desafios científicos em IA (inteligência artificial) e robótica. Ele foi desenvolvido pela *startup* Pollen Robotics, a qual constrói robôs interativos de código aberto baseados em IA (Robotics, 2021).

O segundo robô é o Cyton Gamma 1500, robô comercial da Robai (Robai, 2015). Este robô foi descontinuado pela empresa e a utilização do mesmo se dá pela sua disponibilidade no laboratório de pesquisa do grupo e a feliz coincidência de possuir motores em comum com os do Reachy.

Como dito anteriormente, para o presente trabalho somente o módulo do braço direito é utilizado. As peças do protótipo foram impressas exclusivamente com material ABS, material comumente utilizado na impressão de objetos como próteses, EPI's (Equipamentos de proteção individual), ferramentas, peças e acessórios em geral. A impressora 3D utilizada é do modelo Zortrax M200, a qual possui o *software* próprio Z-Suite para as configurações de impressão. As peças foram ajustadas com preenchimento de 70% a 80%, variando de acordo com o esforço mecânico.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Quando se fala em robótica assistiva uma das principais preocupações deve ser a segurança do paciente, desta forma o estudo do espaço de trabalho é de extrema importância para análise dos movimentos realizados pelo robô. Como trabalhos futuros tem-se a validação do modelo do espaço de trabalho gerado e a geração do espaço de trabalho de um braço humano, bem como a intersecção entre estes espaços para a geração do espaço de tarefa, espaço o qual irão se realizar o planejamento da trajetória proposta e, como consequência, as tarefas de treinamento realizadas pelos pacientes. Ademais, soluções para diminuir o erro entre os dados provenientes do Kinect[©] v2 e o movimento realizado pelo robô.

Quanto ao protótipo tem-se como próximos passos a aquisição dos motores que o Cyton Gama 1500 não possui, além

de alterações necessárias no protótipo para a utilização dos mesmos, considerando o estudo de alterações no projeto do protótipo para definir da onde surge as restrições de movimento de cada junta para que assim sejam feitas as alterações necessárias para que o protótipo tenha ao menos as amplitudes de movimento de um braço humano. Em paralelo, estudos quanto a utilização dos motores disponíveis bem como testes da utilização de flanges impressos em termoplásticos também estão em andamento. Além disso, a possibilidade do uso de reforços axiais, isto é, uma espécie de “anel de reforço” capaz de oferecer resistência aos esforços de tração provenientes dos esforços mecânicos aplicados durante os movimento do braço robótico. Por outro lado também existe a possibilidade de utilizar além do termoplástico ABS, caso este não suporte as cargas aplicadas durante durante as trajetórias, optando assim por outras alternativas de materiais para as peças do protótipo, como outros polímeros ou até mesmo alumínio e ligas metálicas.

REFERÊNCIAS

- Asaeedi, S., Didehvar, F., and Mohades, A. (2017). α -concave hull, a generalization of convex hull. *Theoretical Computer Science*, 702, 48–59. doi:10.1016/j.tcs.2017.08.014. URL <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2017.08.014>.
- Bakhti, K. et al. (2017). Proximal arm non-use when reaching after a stroke. *neuroscience letters*. In v. 657, 91–96. Elsevier.
- Cao, Y. (2011). An engineering-oriented method for the three dimensional workspace generation of robot manipulator. *Journal of Information and Computational Science*, 8, 51–61.
- Cao, Y., Lu, K., Li, X., and Zang, Y. (2011). Accurate numerical methods for computing 2d and 3d robot workspace. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8(6), 76. doi:10.5772/45686. URL <https://doi.org/10.5772/45686>.
- Chang, W.H. and Kim, Y.H. (2013). Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation. *Journal of stroke*, 15, 3.
- Coderre, A.M., Abou Zeid, A., Dukelow, S.P., Demmer, M.J., Moore, K.D., Demers, M.J., Bretzke, H., Herter, T.M., Glasgow, J.I., Norman, K.E., et al. (2010). Assessment of upper-limb sensorimotor function of subacute stroke patients using visually guided reaching. *Neuro-rehabilitation and neural repair*, 24(6), 528–541.
- Conroy, S.S., Whitall, J., Dipietro, L., Jones-Lush, L.M., Zhan, M., Finley, M.A., Wittenberg, G.F., Krebs, H.I., and Bever, C.T. (2011). Effect of gravity on robot-assisted motor training after chronic stroke: a randomized trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 92(11), 1754–1761.
- Demofonti, A., Carpino, G., Zollo, L., and Johnson, M. (2021). *ffordable robotics for upper limb stroke rehabilitation in developing countries: a systematic review*. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics.
- Duret, C. et al. (2015). *Use of a robotic device for the rehabilitation of severe upper limb paresis in subacute stroke: Exploration of patient/robot interactions and the motorrecovery process*. ioMed Research International, v.
- Fonseca, L., Bó, A., Guiraud, D., Navarro, B., Gélis, A., and Azevedo-Coste, C. (2018). *Investigating upper limb movement classification on users with tetraplegia as a possible neuroprosthesis interface.*, volume 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (pp. 5053-5056). IEEE.
- Hagengruber, A. and Vogel, J. (2018). *Functional tasks performed by people with severe muscular atrophy using an semg controlled robotic manipulator*. IEEE, 40th annual international conference of the ieee engineering in medicine and biology society (embc) (pp. 1713-1718) edition.
- Kitsunezaki, N., Adachi, E., Masuda, T., and Mizusawa, J.i. (2013). Kinect applications for the physical rehabilitation. In *2013 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, 294–299. IEEE.
- Lencioni, T., Fornia, L., Bowman, T., Marzegan, A., Caronni, A., Turolla, A., and Ferrarin, M. (2021). A randomized controlled trial on the effects induced by robot-assisted and usual-care rehabilitation on upper limb muscle synergies in post-stroke subjects. *Scientific Reports*, 11(1), 1–15.
- Luo, L., Peng, L., Wang, C., Hou, Z., and Wang, W. (2018). An assist-as-needed controller for robotic rehabilitation therapy based on rbf network. In *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1–7. IEEE.
- Marques, A.P. (1997). *Manual de goniometria*. Editora Manole.
- Miao, Q., McDaid, A., Zhang, M., Kebria, P., and Li, H. (2018). A three-stage trajectory generation method for robot-assisted bilateral upper limb training with subject-specific adaptation. *Robotics and Autonomous Systems*, 105, 38–46.
- Nordin, N., Xie, S.Q., and Wünsche, B. (2014). Assessment of movement quality in robot-assisted upper limb rehabilitation after stroke: a review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 1–23.
- Organization, W.H. (15 de março de 2021.). *Dalys/ylds definition*. URL https://www.who.int/mental_health/management/depression/daly/en/.
- Robai (2015). *Cyton gamma 1500 arm specifications*. URL <https://www.cdiweb.com/datasheets/robai/cyton-gamma-1500-arm-specifications-2015.pdf>. [Online; acessado em 1 de março de 2021].
- Robotics, P. (2021). *Discover reachy, a robotic platform based on ai*. URL <https://www.pollen-robotics.com/reachy/#development>. [Online; acessado em 18 de março de 2021].
- Wiemann, T., Annuth, H., Lingemann, K., and Hertzberg, J. (2013). An evaluation of open source surface reconstruction software for robotic applications. In *2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. IEEE. doi:10.1109/icar.2013.6766566. URL <https://doi.org/10.1109/icar.2013.6766566>.
- Zollo, L., Rossini, L., Bravi, M., Magrone, G., Sterzi, S., and Guglielmelli, E. (2011). Quantitative evaluation of upper-limb motor control in robot-aided rehabilitation. *Medical & biological engineering & computing*, 49(10), 1131–1144.