



Aplicação de controle de impedância no espaço de juntas para um robô de reabilitação de membros superiores com 3 gdl usando aprendizagem por demonstração

Paulo Henrique Polegato, SEM-EESC-USP, 11343549@usp.br
Matheus Bizinotto Rezende, SEM-EESC-USP, matheus.rezende@usp.br
Tiago Boaventura, SEM-EESC-USP, boaventura@usp.br
Glauco Augusto De Paula Caurin, SAA-EESC-USP, gcaurin@usp.br

Resumo. Este trabalho busca aplicar um controle de impedância no espaço das juntas para um robô com três graus de liberdade. O robô foi construído para auxilio a reabilitação de membros superiores utilizando-se da técnica de aprendizagem por demonstração. Uma trajetória de referência é criada por um voluntário saudável e posteriormente um controle de impedância é utilizado para que o paciente com dificuldades de movimentação siga a trajetória desejada. O amortecimento e a mola do controlador ajudam a compensar de forma ajustável as dificuldades e evolução dos pacientes. Sendo possível através de um simples jogo de posicionamento testar as características desta aplicação.

Palavras-chave: reabilitação, controle de impedância, espaço de juntas, cinemática direta, manipulador robótico.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Reabilitação

A reabilitação e a recuperação de movimentos em pacientes que tenham sofrido acidentes vasculares cerebrais (AVC) e outras doenças que impactam no mal funcionamento de zonas motoras do cérebro passam por um trabalho intenso de repetição e reaprendizado dos movimentos, Magdum et al. (1982). É necessário ao paciente, através da repetição de movimentos de tarefas diárias, a reaprendizagem do movimento valendo-se da plasticidade cerebral e do reforço muscular para que a reutilização desses movimentos torne-se natural e o paciente retome totalmente ou parcialmente a qualidade de vida.

O nível de esforço do membro enfraquecido é obtido graças à implantação dinâmica da relação entre a posição do efetuador e a força exercida no mesmo, mais do que o controle individual de somente um desses variáveis Hogan (1982), Hogan (1985a). Um controle de impedância nas juntas permitiria um ajuste através dos parâmetros de ganho e de constante elástica na interação com o paciente e assim otimizando a recuperação.

O uso do controle no espaço das juntas é sempre assumido como a trajetória desejada representada em termos de uma sequência temporal de valores das posições das juntas (Siciliano et al. (2009)). Desta forma, o erro aplicado ao controlador de impedância é expresso no espaço dos transdutores.

1.2 O robô para reabilitação com 3 gdl

O manipulador robótico utilizado apresenta 3 graus de liberdade e é totalmente *backdrivable*, ou seja, ele pode reproduzir o movimento de ombro e cotovelo do paciente ao mesmo tempo que pode ser movido pelo paciente sem grande esforço físico. Esta característica viabiliza mesmo ao paciente debilitado o movimento do manipulador conforme apresentado na Fig. 1 e Fig. 2. Outra vantagem do robô ser *backdrivable* é simplificação da concepção do controlador de força, pois ele permite uma primeira aproximação do controlador de impedância à um controlador tipo PD em posição, Hogan (1985b), Featherstone (2014).

O robô em questão é construído com um sistema de transmissão por diferencial, Fig. 2, e transmissão por cabos. Uma estratégia para lidar com esse acoplamento das variáveis $\theta_{Direita}$ e $\theta_{Esquerda}$ se estabelece por meio das relações apresentadas em Eq. 1 e Eq. 2.

$$\theta_1 = (\theta_{Direita} - \theta_{Esquerda})/2 \quad (1)$$

$$\theta_2 = -((\theta_{Direita} + \theta_{Esquerda})/2) * f_{tr} \quad (2)$$

Partindo que o torque é dado por:

Portal de Eventos Científicos da Escola de Engenharia de São Carlos



1. INTRODUÇÃO

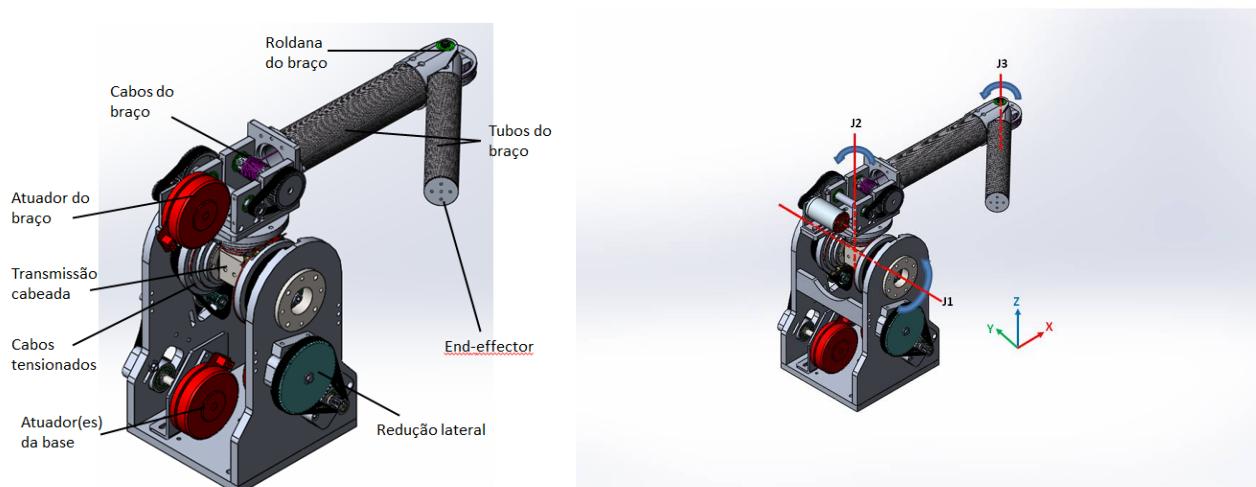


Figura 1. Principais componentes do robô e seus eixos de movimento, Rezende and Caurin (2018)

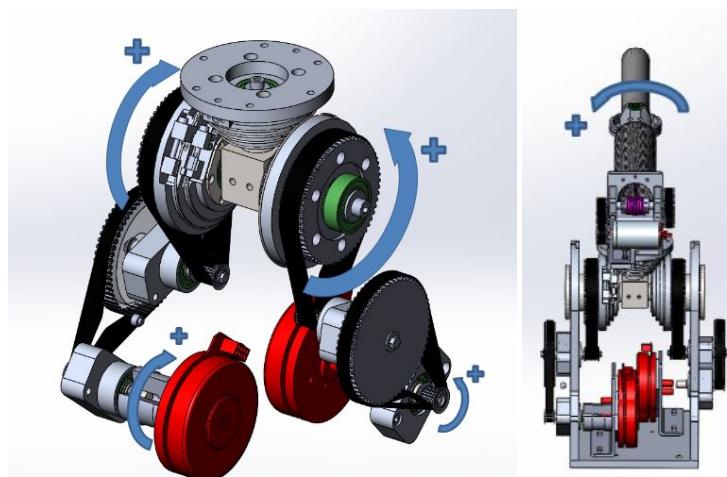


Figura 2. Apresentação dos graus de liberdade e a convenção de rotação associada com esses graus.

$$\tau_n = I_n * \ddot{\theta}_n \quad (3)$$

Sendo $I_{Direita} = I_L = I_{Esquerda} = Constante$ devido a construção ser de características mecânicas iguais e montados de forma simétrica, podemos extrapolar o resultado para que a saída da transmissão do lado direito, $Trans_{Direita}$, e lado esquerdo, $Trans_{Esquerda}$ são iguais. Pode-se através de manipulação de Eq.3 com 1 e 2 chegar ao conjunto de equações:

$$\tau_1 = (I_1/I_E) * (\tau_{Direita} - \tau_{Esquerda})/2 \quad (4)$$

$$\tau_2 = (I_2/I_E) * (\tau_{Direita} - \tau_{Esquerda}) * (f_{TR}/2) \quad (5)$$

Logo $\theta_1 \propto \tau_1$, onde f_{TR} é o fator de redução equivalente à 1 : 36 . Levando em conta a proporcionalidade entre o torque e o angulo no sistema diferencial, o controle em θ_1 e θ_2 pode ser aplicado sem prejuízo como proporcional à τ_1 e τ_2 . O único o angulo cujo espaço de juntas coincide com o espaço dos atuadores é o θ_3 que é diretamente relacionado com τ_3 , vide Fig. 3.

A cinemática do robô é explicitada através das Eq. 6 e Eq. 7 e sera usada usada à posteriori na analise dos resultados.

Portal de Eventos Científicos da Escola de Engenharia de São Carlos

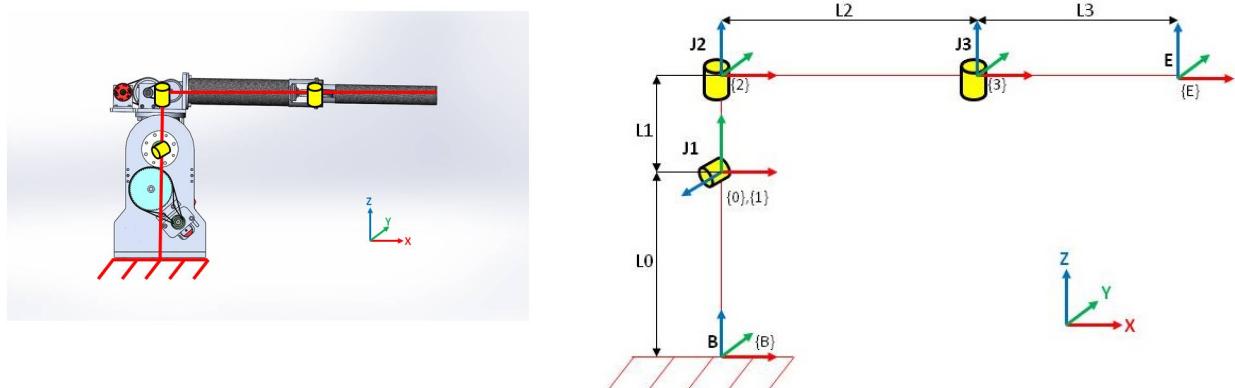


Figura 3. Explicação do modelo equivalente do robô por conta do seu diferencial, Rezende et al. (2018)

$$T_{BE} = \begin{bmatrix} c(\theta_1).c(\theta_2).c(\theta_3) - c(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) & -c(\theta_1).c(\theta_2).s(\theta_3) - c(\theta_1).c(\theta_3).s(\theta_2) & -s(\theta_1) & Px \\ c(\theta_2).s(\theta_3) + c(\theta_3).s(\theta_2) & c(\theta_2).c(\theta_3) - s(\theta_2).s(\theta_3) & 0 & Py \\ c(\theta_2).c(\theta_3).s(\theta_1) - s(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) & -c(\theta_2).s(\theta_1).s(\theta_3) - c(\theta_3).s(\theta_1).s(\theta_2) & c(\theta_1) & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$P_E = \begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L2.c(\theta_1).c(\theta_2) - L3.(c(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) - c(\theta_1).c(\theta_2).c(\theta_3)) - L1.s(\theta_1) \\ L3.s(\theta_2 + \theta_3) + L2.s(\theta_2) \\ L0 - L3.(s(\theta_1).s(\theta_2).s(\theta_3) - c(\theta_2).c(\theta_3).s(\theta_1)) + L1.c(\theta_1) + L2.c(\theta_2).s(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 Controle de impedância

Em sistemas de interação, como acontece com os dispositivos dedicados à reabilitação, é fundamental que o robô não seja tratado como um sistema isolado mas como um sistema em interação entre o robô e o ambiente. O controle de força permite uma interação controlada em função da força e da posição do manipulador ao momento da trajetória, Hogan (1982).

Queremos com o controlador desenvolvido se adapte e auxilie o paciente em suas dificuldades de repetir uma trajetória pré-estabelecida, produzindo um força auxiliar que o ajude a executar a trajetória da forma mais próxima da trajetória desejada. O comportamento de mola-amortecedor, ilustrado de forma unidimensional na Fig. 5, que cria uma força restauradora em direção a trajetória de referência foi implementado de forma tridimensional no espaço das juntas. A equação desta força é Eq. 8:

$$\tau = K * (\theta_D - \theta_R) + B * (\dot{\theta}_D - \dot{\theta}_R) \quad (8)$$

O diagrama de controle do robô exposto na Fig. 4 é composto por 3 malhas de controle. Duas controladas pela eletrônica embarcada e fora do escopo deste trabalho, são elas a malha de controle de torque, **C torque**, e a malha de controle de corrente **C corrente**. A terceira malha fechada, **C impedância** foco neste trabalho. Observe que para o controle trabalharemos com θ_d , ângulo desejado, θ_R ângulo registrado, bem como $\dot{\theta}_d$ velocidade desejada e $\dot{\theta}_R$ velocidade medida e como saída, temos o valor de τ_d , ou torque desejado. A compensação de gravidade é feita de forma interna ao robô Rezende and Caurin (2018).

1.4 Aprendizado por repetição

A técnica de criação de trajetória por repetição faz parte da primeira geração de técnica de programação em robótica, Siciliano et al. (2009) e apresenta vantagens relativas a construção de trajetórias complexas de forma simples e eficaz. O operador guia o efetuador manualmente através da trajetória desejada e durante a execução do movimento os valores dos transdutores são armazenados. No momento de execução da movimentação pelo robô, o mesmo recupera e repete a trajetória já gravada. Neste caso, o controle de posição pode ser realizado diretamente sobre o valor do transdutor.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

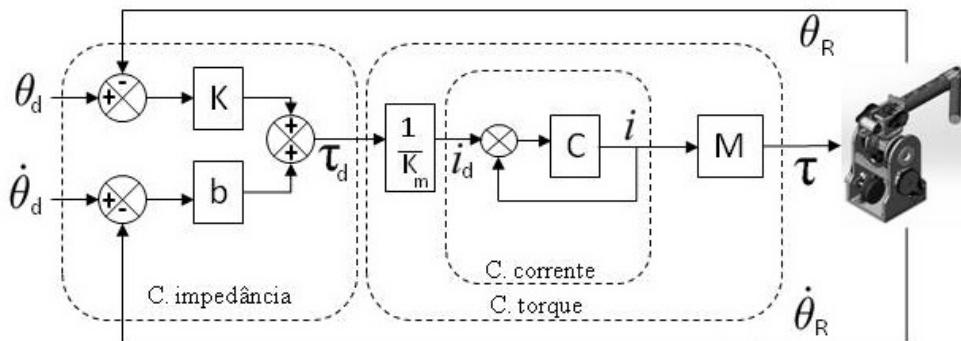


Figura 4. Diagrama do *loop* de controle utilizado no robô, Rezende et al. (2018).

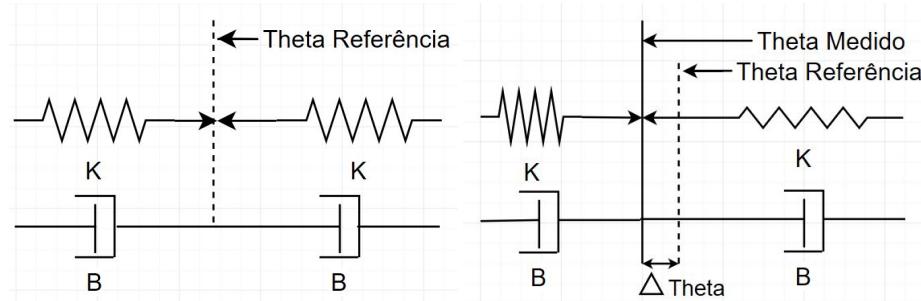


Figura 5. O desvio $\Delta\theta$ eta da posição de referencia gera a força de restituição apresentada na Eq. 8.

O desenvolvimento de exosqueletos e dispositos robóticos que são dedicados à reabilitação tem aumentado significativamente com o avanço da robótica e informática. Um dos pontos criticos é a repetição de movimentos e a criação de movimentos os quais sejam relevantes para o paciente, ou seja, ele deve treinar um movimento útil para seu quotidiano, por exemplo, pegar um copo, levantar um jarra de suco, pegar um garfo e etc.

Devido as configurações mecânicas e cinemáticas do braço humano, essas trajetórias não são perfeitamente lineares as quais possam ser representadas por uma reta do ponto A ou ponto B como exposto em Morasso (1981), Hogan (1985b), Hogan (1982), a forma a qual o ser humano controla o movimento é o reconhecimento que o ser humano é um sistema auto-otimizado e adaptativo.

A estratégia de se executar o movimento com um paciente saudável e de criar um movimento natural, justifica-se por poder colaborar para uma acelerada recuperação dos movimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Organização do experimento

O experimento é dividido em algumas partes:

- **O robô:** cujo papel é o de gerar a trajetória de referência com o voluntario saudável e em um segundo momento repetir a trajetória utilizando-se do controle de impedância.
- **O jogo:** um conjunto de 5 pontos de referência a diferentes alturas e posições, os quais através dos LEDs no seu corpo indica ao voluntario e pacientes a sequencia de posicionamento a ser realizada, ver Fig. 6.
- **Computador:** utilizado para aquisição e geração dos dados, além controle do robô.

2.2 Gravação da trajetória

Um sequencia de pontos é pré programada no jogo. Sendo um total de 20 pontos escolhidos para a sequencia de testes.

- A calibragem do robô é feita colocando o robô na posição zero dos odômetros. Em seguida o efetuador é posicionado na posição zero do jogo (indicado pelo numero 1 na figura 6).

- O programa que gera a sequência a ser seguida, a gravação das medidas das juntas e a compensação de gravidade do robô são todas lançados ao mesmo tempo.
- O voluntario saudável segurando o efetuar pela manopla, que simula uma alça de cafeteira, deve posiciona-la sobre o alvo o qual a luz esta acesa. (indicado pelo numero 2 e 3 na figura 6)
- O voluntario segue a sequência até que as 5 luzes estejam acesas ao mesmo tempo, indicando que ele deve retornar ao ponto inicial.

No contexto deste trabalho, a trajetória desejada é obtida por meio de um voluntario saudável que deve executar uma sequencia de movimentos sequencias. Em seguida, com o uso de um controle de impedância nos transdutores, permitir ao paciente ter uma tolerância, controlada, na trajetória pré estabelecida e treinar o movimento de referência. Em uma aplicação real, o controlador do experimento, ou fisioterapeuta, poderá controlar parâmetros como a rigidez da mola virtual e do amortecedor virtual de acordo com o grau de perda de movimentos e evolução do paciente. Nesse trabalho não serão abordados os efeitos fisiológicos e médicos. Nos atemos aqui a construção, aplicação e teste, em ambiente controlado, dos aspectos de controle e robótica.

Para o experimento utilizado neste trabalho, o valor das posições dos atuadores do robô, representados na cinemática como $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, são gravados em um trajetória de referência e posteriormente reproduzidas no mesmo intervalo.

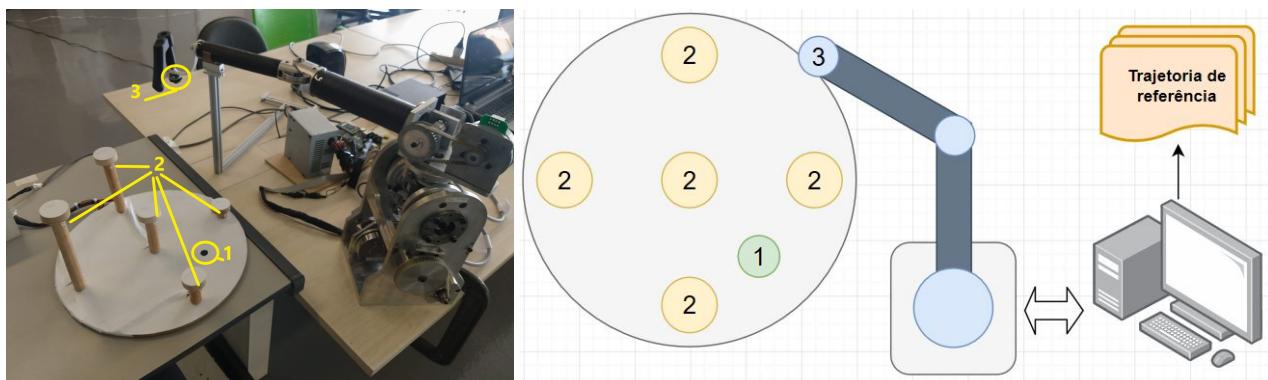


Figura 6. Apresentação do jogo e do método de gravação da trajetória

2.3 Escolha dos valores de K e B para o controlador

Os valores de K e B foram obtidos de forma experimental por tentativa e erro. Observa-se que na tabela 1 para θ_3 este valor é menor, pois foi observado nos experimentos que o angulo θ_3 apresenta maior variação com relação aos outros na realização da trajetória e apresentava um maior conforto de utilização.

	θ_1	θ_2	θ_3
K	40	40	15
B	4	4	0,5

Tabela 1. Coeficientes K e B para os 3 ângulos diferentes.

Esses parâmetros aplicados à Eq. 8, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\tau_1 = 40 * (\theta_{1d} - \theta_{1r}) + 15 * (\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_{1r}) \quad (9)$$

$$\tau_2 = 40 * (\theta_{2d} - \theta_{2r}) + 15 * (\dot{\theta}_{2d} - \dot{\theta}_{2r}) \quad (10)$$

$$\tau_3 = 15 * (\theta_{3d} - \theta_{3r}) + 0,5 * (\dot{\theta}_{3d} - \dot{\theta}_{3r}) \quad (11)$$



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se da Eq. 7 e do conjunto de dados: θ_{1d} , θ_{2d} , θ_{3d} e θ_{1r} , θ_{2r} , θ_{3r} obtemos a Fig. 8. Os gráficos expostos a seguir, concentram a analise individual de cada θ com o τ de saída.

A relação entre o erro do angulo θ com o torque τ de aplicado ao robô, apesar de ser visualmente seguir bem o sinal, observa-se os picos no torque devem ser originários do rompimento da inercia do do robô.

Um pequeno atraso de reação na Fig. 5 aparece entre o erro de θ_2 o torque motor τ_2 , esse atraso pode devido a um valor de inercia maior nesse eixo, pois todo o trabalho do robô se da com a mecânica do robô à esquerda do centro de simetria do robô conforme pode ser observado na Fig. 7. Um experimento seria realizar o mesmo experimento mas com o robô à esquerda do jogo para se ter certeza da observação deste atraso.

A composição tridimensional dos três ângulos pode ser encontrado na Fig. 8.

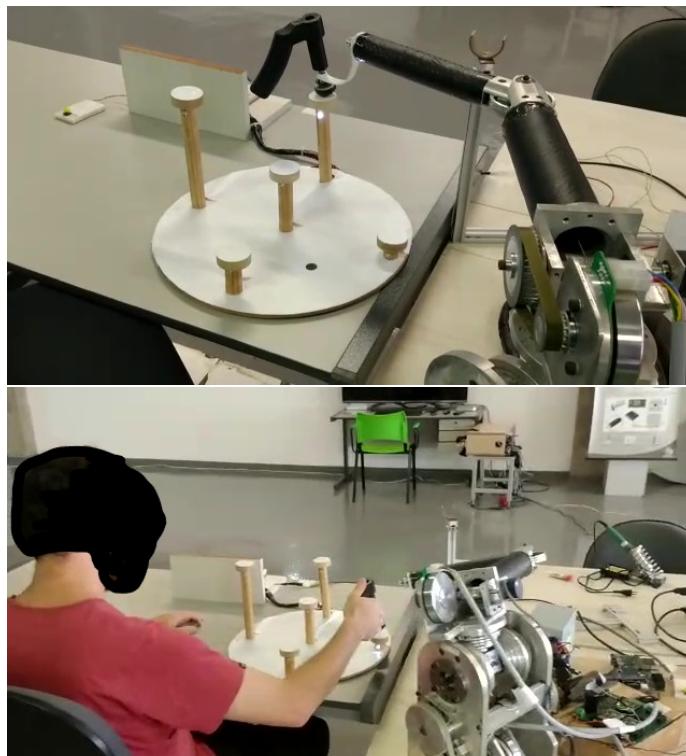


Figura 7. Teste da gravação da trajetória de referência e da trajetória com o voluntario, ambas com controle de força ativado.

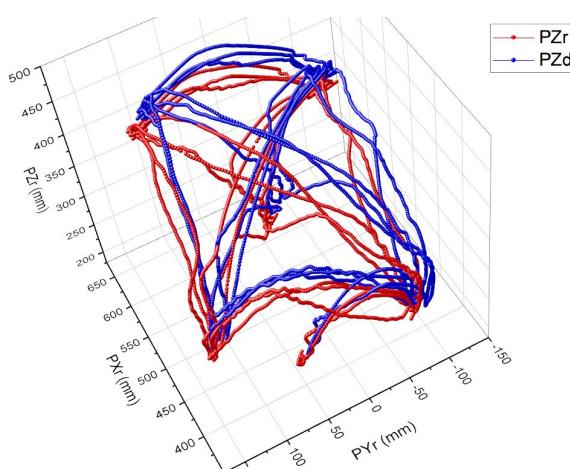


Figura 8. A trajetória de referência indicada em vermelho e a trajetória realizada pelo voluntario em azul.

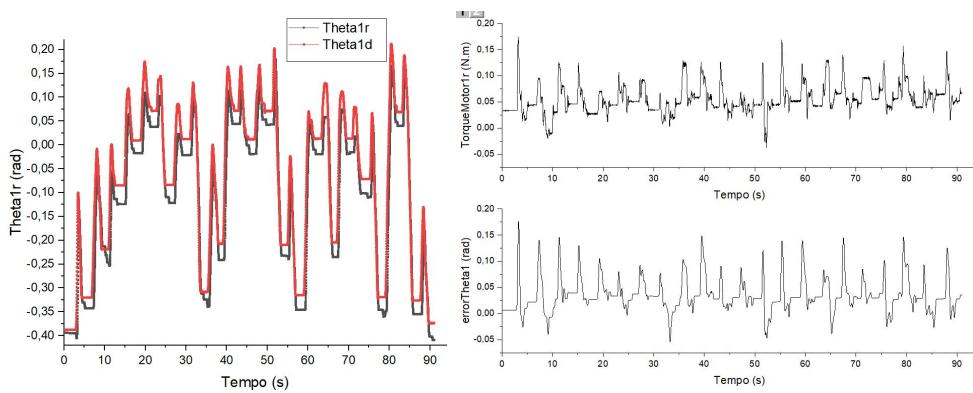


Figura 9. Relação entre os erros de $\theta_{Direita}$ de entrada e os torques de saída $\tau_{Direita}$.

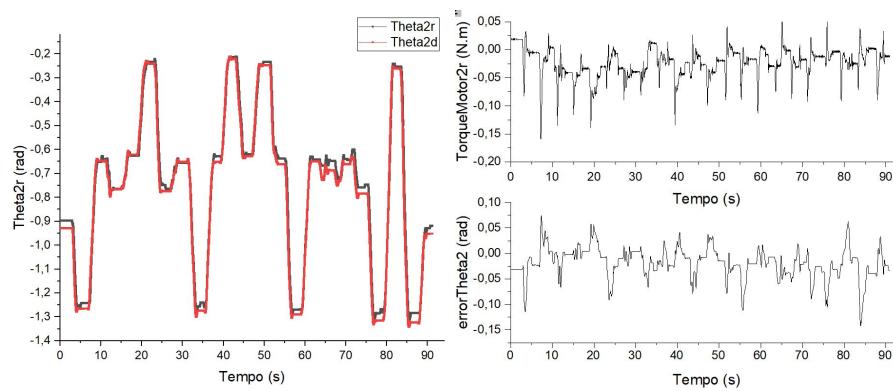


Figura 10. Relação entre os erros de $\theta_{Esquerda}$ de entrada e os torques de saída $\tau_{Esquerda}$.

4. CONCLUSÃO

A utilização do método de criação de trajetória por repetição, apesar de sua estratégia simples, se mostrou efetiva em uma aplicação que exija rápida criação de uma trajetória complexa e não linear. Evitamos desta forma a necessidade da cinemática inversa, da dinâmica inversa do robô e de controladores complexos para se conseguir criar o controle de impedância necessário a reabilitação. Tal abordagem é judiciosa em robôs de geometria não trivial, como o utilizado, com transmissão por diferencial e cabos o qual o único angulo que não necessita transformação adicional é o θ_3 , pois o angulo do *encoder* coincide com o angulo do atuador. Adicionalmente, favorece-se a criação de um programa mais simples de ser criado e mantido. Um trabalho futuro, seria o refinamento da aplicação atual, procurando uma trajetória mais precisa e robusta. Além da comparação do método utilizado com um método que transformada inversa do robô.

O ajuste dos parâmetros K e B feitos de forma empírica para o teste inicial observando somente um retorno qualitativo de conforto com relação ao robô sem o uso do controlador, um usuário saudável e um segundo debilitado foram usados

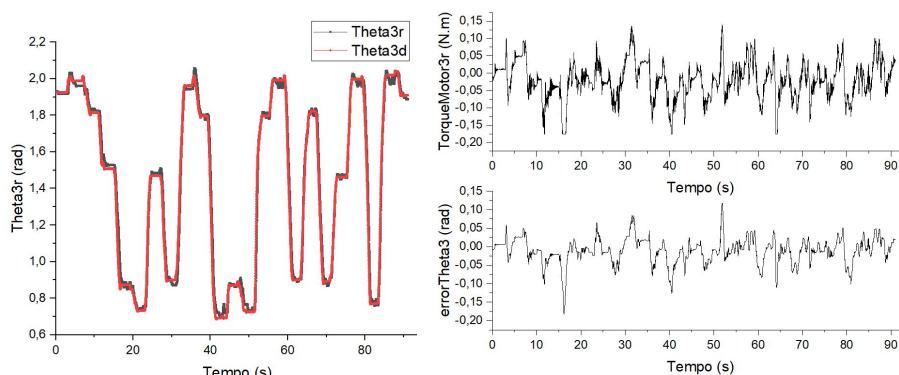


Figura 11. Relação entre os erros de θ_3 de entrada e os torques de saída τ_3 .



REFERÊNCIAS

para se encontrar o parâmetro de conforto para os dois. Seria interessante para um trabalho futuro, a ajuste desses parâmetros de forma quantitativa com o apoio de fisioterapeutas e analisar os diferentes resultados em uma evolução temporal com diferentes pacientes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio para a realização desse trabalho.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Referências

- R. Featherstone. *Rigid body dynamics algorithms*. Springer, 2014.
- N. Hogan. Prostheses should have adaptatively controllable impedance. *IFAC Control Aspects of Prosthetics and Orthotics*, 1982.
- N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Part 1 - theory. *Transactions of the ASME*, 107(MARCH): 1–7, 1985a.
- N. Hogan. Impedance control: An approach to manipulation: Part 2 - implementation. *Transactions of the ASME*, 107 (MARCH):8–16, 1985b.
- S. Magdum, H. Satpalkar, S. and Wadekar, A. V., and A. Muley. Development of upper limb assistive robotic device for arm functionality rehabilitation - a review. *IFAC Control Aspects of Prosthetics and Orthotics*, 1982.
- P. Morasso. Research note : Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, 1(42):223–227, 1981.
- M. Rezende and G. Caurin. Desenvolvimento de um dispositivo robótico interativo com três graus de liberdade para reabilitação de membros superiores. 3º SiPGEM, 2018.
- M. Rezende, G. Chiqueti, and G. Caurin. Modelagem cinemática de um manipulador robótico de três gaus de liberdade utilizando vetores espaciais. 3º SiPGEM, 2018.
- B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. *Robotics : Modeling, Planning and Control*. Springer-Verlag London Limite, 2009.