



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 auxílio 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 vascular cerebral (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 cotidianas, 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 dessas 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 *backdriver*, 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:



1. INTRODUÇÃO

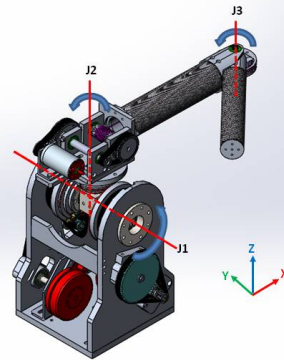
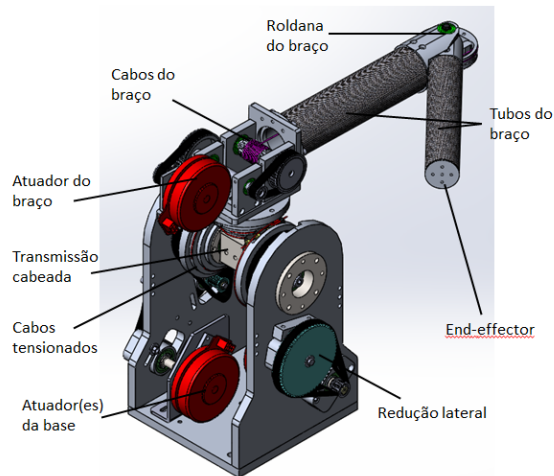


Figura 1. Principais componentes do robô e seus eixos de movimento, Rezende and Caurin (2018)

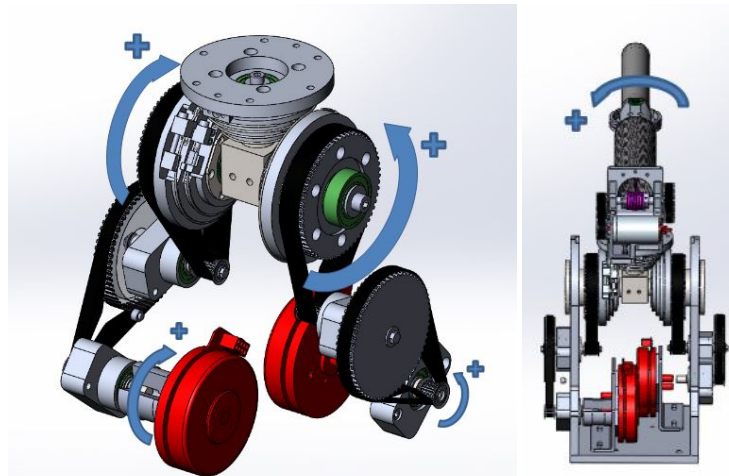


Figura 2. Apresentação dos graus de liberdade e a convenção de rotação associada com esses graus.

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

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 análise dos resultados.

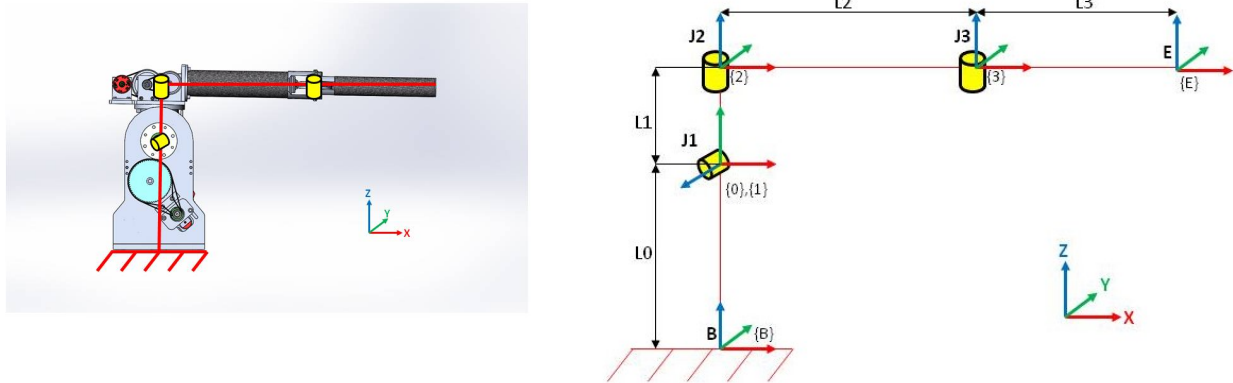


Figura 3. Explicitação do modelo equivalente do robô por conta do seu diferencial, Rezende et al. (2018)

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

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

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 uma 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 efetuator manualmente através da trajetória desejada e durante a execução do movimento os valores dos transdutores são armazenados. No momento de execução da movimento 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

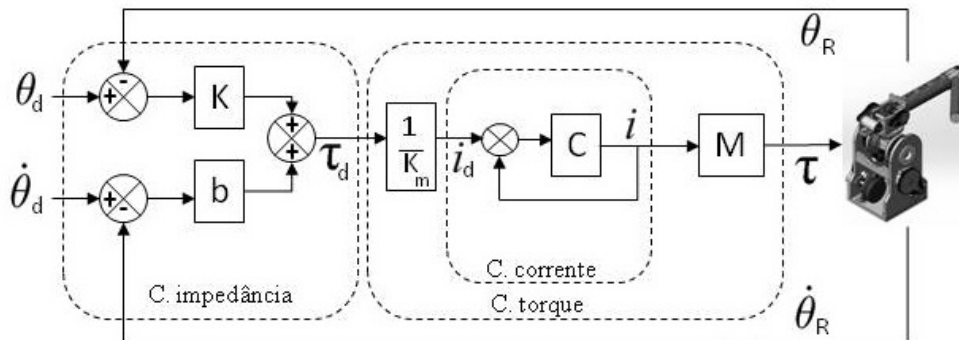


Figura 4. Diagrama do *loop* de controle utilizado no robô, Rezende et al. (2018).

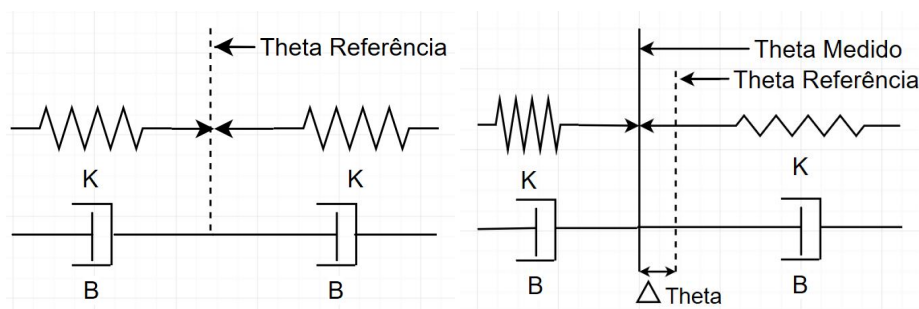


Figura 5. O desvio $\Delta\theta$ da posição de referência gera a força de restituição apresentada na Eq. 8.

O desenvolvimento de exosqueletos e dispositivos robóticos que são dedicados à reabilitação tem aumentado significativamente com o avanço da robótica e informática. Um dos pontos críticos 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 cotidiano, 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 voluntário 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 voluntário e pacientes a sequência 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 sequência de pontos é pré programada no jogo. Sendo um total de 20 pontos escolhidos para a sequência 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 voluntário saudável segurando o efetuar pela manopla, que simula uma alça de cafeteira, deve posicioná-la sobre o alvo o qual a luz está acesa. (indicado pelo número 2 e 3 na figura 6)
- O voluntário 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 voluntário saudável que deve executar uma sequência de movimentos sequenciais. 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 uma trajetória de referência e posteriormente reproduzidas no mesmo intervalo.

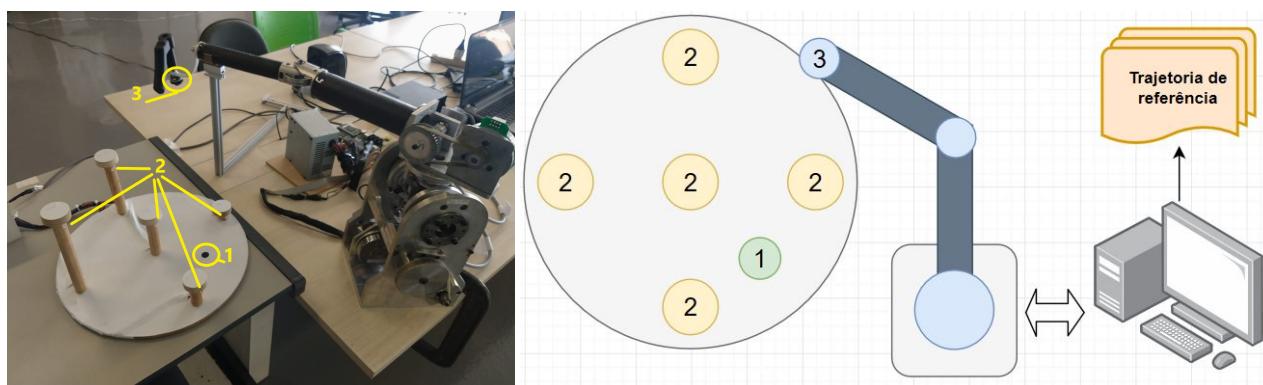


Figura 6. Apresentação do jogo e do método de gravação da trajetória

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 ângulo 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 análise individual de cada θ com o τ de saída.

A relação entre o erro do ângulo 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 inércia 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 inércia 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.

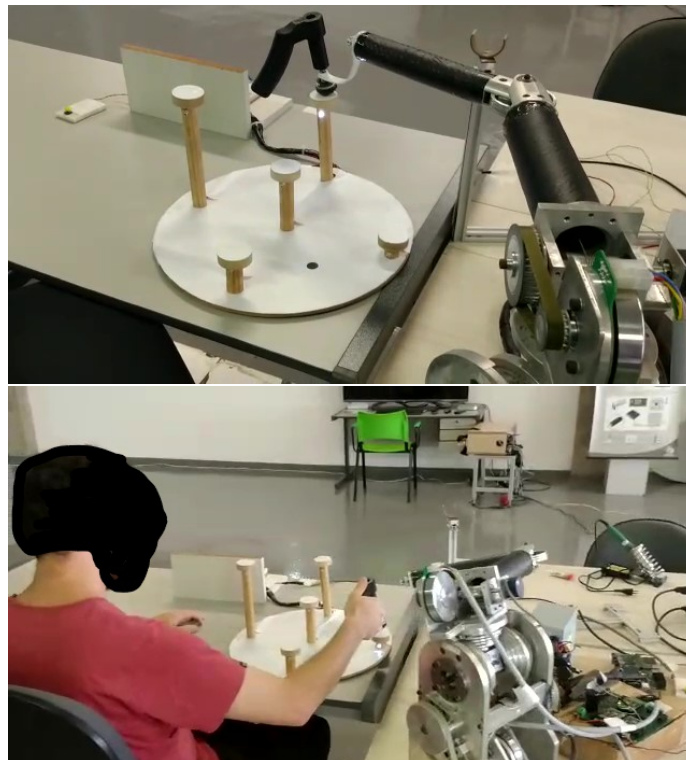


Figura 7. Teste da gravação da trajetória de referência e da trajetória com o voluntário, ambas com controle de força ativado.

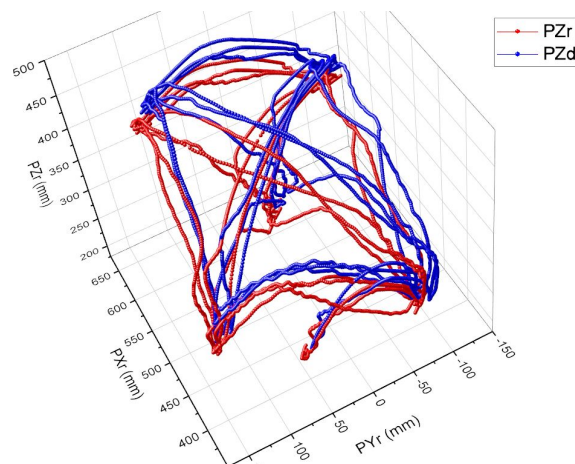


Figura 8. A trajetória de referência indicada em vermelho e a trajetória realizada pelo voluntário em azul.

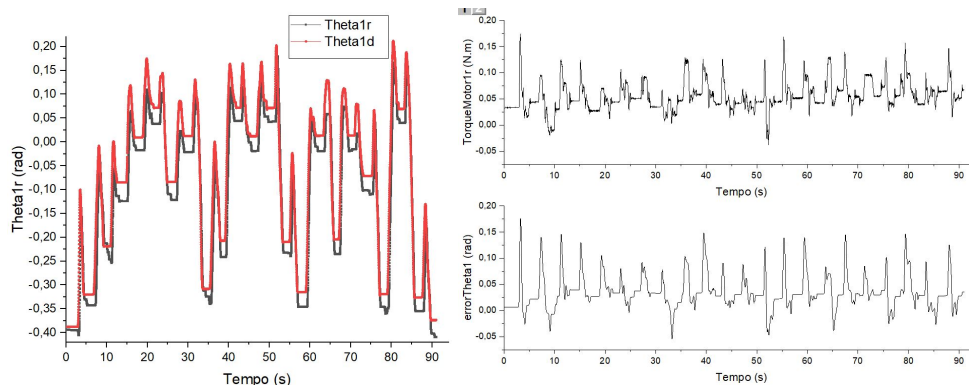


Figura 9. Relação entre os erros de $\theta_{Direita}$ de entrada e os torques de saída $\tau_{Direita}$.

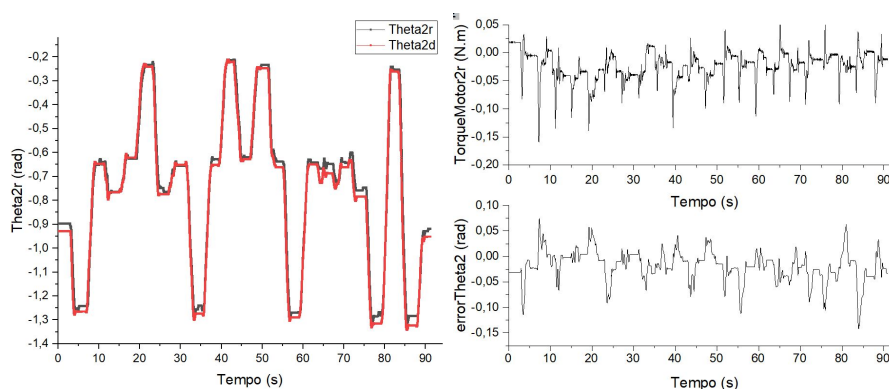


Figura 10. Relação entre os erros de $\theta_{Esquerda}$ de entrada e os torques de saída $\tau_{Esquerda}$.

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 ângulo que não necessita transformação adicional é o θ_3 , pois o ângulo do *encoder* coincide com o ângulo 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

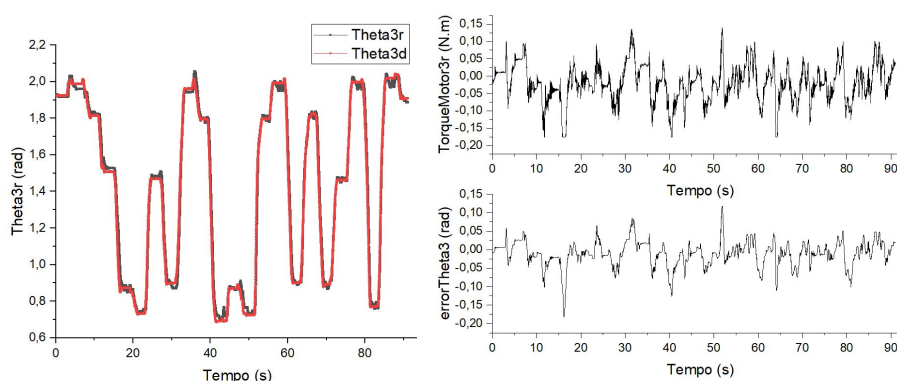


Figura 11. Relação entre os erros de θ_3 de entrada e os torques de saída τ_3 .



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 graus 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.