

Interface Cérebro Máquina híbrida não invasiva usando padrões cortico-musculares para controle de uma prótese virtual

Diego de Sá Dias¹; Jean Faber (Orientador)²

¹ Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). (diego.sa.dias@unifesp.br).

² Departamento de Neurologia e Neurocirurgia- Divisão de Neurociência da Escola Paulista de Medicina- Federal de São Paulo (UNIFESP). (jean.faber@unifesp.br).

Resumo: Entre as milhões de pessoas com amputação no Brasil, muitas optam por não usar ou usam esporadicamente próteses e órteses, sobretudo devido ao alto custo, estética desfavorável, ergonomia inadequada, funcionalidade limitada e baixa incorporação neurocognitiva. Os fatores de ergonomia, funcionalidade e incorporação estão fortemente ligados à etapa de pré-protetização e ao tipo de controle oferecido: quando o controle é pouco fluido, pouco natural ou desconfortável, a experiência tende a ser negativa e a adesão diminui. Embora existam abordagens terapêuticas e tecnologias assistivas, ainda é um desafio obter um controle motor contínuo que seja ao mesmo tempo robusto e capaz de favorecer a integração funcional do dispositivo. Nesse contexto, interfaces cérebro-máquina (ICMs) não invasivas têm potencial por se conectarem a mecanismos corticais associados ao planejamento e execução do movimento, mas abordagens baseadas apenas em EEG sofrem com ruído, baixa resolução espacial e dificuldades para extração robusta de características, frequentemente limitando graus de liberdade e desempenho. Por outro lado, abordagens baseadas apenas em EMG podem ser afetadas por variabilidade do sinal muscular, interferência de movimentos involuntários e limitações na especificidade do recrutamento muscular. Assim sendo, este projeto, em desenvolvimento, propõe a validação de uma Interface Cérebro-Máquina Híbrida (ICMH) não invasiva em que a coerência cortico-muscular (CCM) é a principal característica para classificar intenções motoras, integrando dinamicamente sinais de EEG e EMG para controlar um membro inferior em um ambiente de realidade virtual (RV), usado como feedback visual para fechamento do ciclo de controle. A validação será conduzida inicialmente com 5 a 8 voluntários hígidos, recrutados conforme critérios de inclusão/exclusão, com registros de EEG de superfície e EMG de superfície em músculos da coxa, durante tarefas de flexão/extensão de joelho e um protocolo de imagética motora. O processamento contempla etapas no domínio do tempo e da frequência: filtragens, remoção de artefatos, extração de características espectrais e análise tempo-frequência (com transformada wavelet para EEG), além do cálculo da CCM a partir de densidades espectrais cruzadas, visando capturar diretamente o acoplamento neurofisiológico entre córtex motor e músculos efetores. Para decodificação das intenções, serão empregados classificadores de aprendizado de máquina, com ênfase em SVM e Redes Neurais Artificiais, comparando desempenhos de modelos unimodais (EEG ou EMG) versus o modelo híbrido baseado em CCM. A etapa de teste em tempo real integra o classificador ao ambiente de RV por meio do Lab Streaming Layer (LSL), permitindo avaliar, sob níveis progressivos de dificuldade, métricas de desempenho do controle do avatar e acompanhar a evolução da CCM ao longo de sessões. Espera-se que a CCM

aumente a robustez e a fluidez do controle do membro virtual e funcione como métrica dinâmica para monitorar o progresso do controle motor, apoiando o desenvolvimento de protocolos terapêuticos e de pré-protetização mais eficazes.

Palavras-chave: Coerência cortico-muscular; EEG; EMG; Reabilitação; Próteses.

Non-Invasive Hybrid Brain–Machine Interface Using Corticomuscular Patterns for Virtual Prosthesis Control

Diego de Sá Dias¹; Jean Faber (Orientador)²

¹ Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP). (diego.sa.dias@unifesp.br).

² Departamento de Neurologia e Neurocirurgia- Divisão de Neurociência da Escola Paulista de Medicina- Federal de São Paulo (UNIFESP). (jean.faber@unifesp.br).

Abstract: Among the millions of people living with amputation in Brazil, many choose not to use—or use only sporadically—prostheses and orthoses, mainly due to high cost, unfavorable aesthetics, poor ergonomics, limited functionality, and low neurocognitive embodiment. Ergonomics, functionality, and embodiment are strongly linked to the pre-prosthetic stage and to the type of control provided: when control is not smooth, not natural, or uncomfortable, the user experience tends to be negative and adherence decreases. Although therapeutic approaches and assistive technologies exist, achieving continuous motor control that is both robust and capable of promoting functional integration of the device remains challenging. In this context, non-invasive brain–machine interfaces (BMIs) are promising because they engage cortical mechanisms associated with movement planning and execution; however, EEG-only approaches suffer from noise, low spatial resolution, and difficulties in robust feature extraction, often limiting degrees of freedom and performance. Conversely, EMG-only approaches can be affected by variability in residual muscle signals, interference from involuntary movements, and limited specificity of muscle recruitment. Therefore, this project, currently under development, proposes validating a non-invasive hybrid brain–machine interface (hBMI) in which corticomuscular coherence (CMC) is the main feature used to classify motor intentions, dynamically integrating EEG and EMG signals to control a lower limb in a virtual reality (VR) environment, used as visual feedback to close the control loop. Validation will initially be conducted with 5 to 8 healthy volunteers, recruited according to inclusion/exclusion criteria, using surface EEG recordings and surface EMG from thigh muscles during knee flexion/extension tasks and a motor imagery protocol. Signal processing includes time- and frequency-domain steps: filtering, artifact removal, spectral feature extraction, and time–frequency analysis (using wavelet transforms for EEG), in addition to computing CMC from cross-spectral densities to directly capture the neurophysiological coupling between the motor cortex and effector muscles. To decode motor intentions, machine-learning classifiers will be employed—particularly SVM and artificial neural networks—comparing unimodal models (EEG or EMG) against the CMC-based hybrid model. The real-time testing stage integrates the classifier with the VR environment via Lab Streaming Layer (LSL), enabling evaluation—under progressively increasing difficulty levels—of avatar-control performance metrics and tracking changes in CMC across sessions. CMC is expected to increase the robustness and smoothness of virtual-limb control and to serve as a dynamic metric for monitoring motor-control

progress, supporting the development of more effective therapeutic and pre-prosthetic training protocols.

Keywords: Corticomuscular Coherence; EEG; EMG; Rehabilitation; Prosthesis.