

MOŽNÁ VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ A SIMULACE V BRAIN-COMPUTER INTERFACE SYSTÉMECH

POSSIBLE USES OF MODELING AND SIMULATION IN BRAIN-COMPUTER INTERFACE SYSTEMS

Ing. Martina Žabčíková

*Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Nad Stráněmi 4511 760 05, Zlín, Česká republika
Kontakt: zabcikova@utb.cz*

Ing. Zuzana Koudelková

*Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Nad Stráněmi 4511 760 05, Zlín, Česká republika
Kontakt: koudelkova@utb.cz*

prof. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.

*Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Nad Stráněmi 4511 760 05, Zlín, Česká republika
Kontakt: jasek@utb.cz*

ABSTRAKT

Článek se zabývá modelováním a simulací v Brain-Computer Interface (BCI) systémech. Hlavním cílem BCI je pomoci lidem s těžkým zdravotním postižením, avšak tato oblast může sloužit i lidem zdravým. BCI vytváří přímé propojení mezi mozkem a externím zařízením jako je počítač, robotická ruka, neuroprotéza, exoskeleton, invalidní vozík a mnoho dalších. Systémy BCI můžeme rozdělit na invazivní a neinvazivní. Dále můžeme systémy dělit pomocí typu získávání signálů. V této práci jsme se zaměřili na modelování a simulaci neinvazivních BCI systémů, které pro snímání mozkové aktivity využívají metodu Elektroencefalografie (EEG).

Klíčová slova: Brain-Computer Interface, BCI, Elektroencefalografie, EEG, Modelování, Simulace

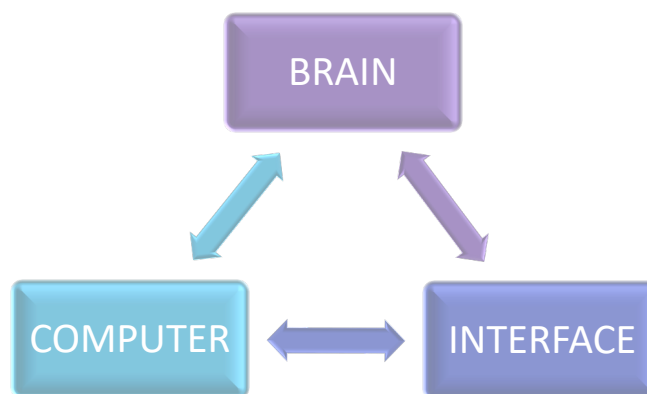
ABSTRACT

The article deals with modeling and simulation in Brain-Computer Interface (BCI) systems. The main goal of BCI is to help people with severe disabilities, but this area can also serve healthy people. BCI creates a direct communication between the brain and external devices such as a computer, robotic arm, neuroprosthesis, exoskeleton, wheelchair, and others. BCI systems can be divided into invasive and non-invasive. Furthermore, we can divide the systems using different types of signal acquisition. In this work, we focused on modeling and simulation of non-invasive BCI systems that use the Electroencephalography (EEG) method to detect brain activity.

Keywords: Brain-Computer Interface, BCI, Electroencephalography, EEG, Modeling, Simulation

1 ÚVOD

V této době jsou systémy Brain-Computer Interface (BCI) velmi atraktivní oblastí výzkumu a celosvětovým trendem. BCI systém je definován jako kombinace hardwaru a softwaru, který nasnímáním signálů z mozku umožňuje provádět vnější aktivitu. BCI převádí vzorce mozkové aktivity uživatele do příkazů pro interaktivní aplikaci. Získaná aktivita je poté měřena a zpracována pomocí systému. BCI lze využít k mnoha účelům v mnoha oblastech, jako např. v medicíně, robotice, komunikaci a kontrole, zábavě, rehabilitaci a dalších. Tyto systémy mohou být použity v různých aplikacích na pomoc jak zdravotně postiženým tak i zdravým lidem. Vzhledem k významnému pokroku v BCI, můžeme předpokládat, že tyto systémy nejsou příliš vzdálené od skutečných aplikací. Navzdory této skutečnosti však existuje velké množství výzev, které je třeba překonat. [1] [3]



Obr. 1 Obecný model BCI

Výzkum BCI vyžaduje hodně pozornosti a úsilí. Jelikož jsou BCI systémy multidisciplinárním oborem, tak by se do jeho výzkumu měli zapojit jak vědci v oblasti BCI, tak i lékaři, psychologové, matematici, inženýři apod. Mezi další vědecké disciplíny, které se využívají k tvorbě a zkoumání BCI systémů jsou neurovědy a neuroinformatika. Neurověda se pokouší o nalezení biofyzikálního modelu, který je vhodný k modelování neuronů a neuronových sítí. V neuroinformatice se jedná o systematický vývoj databáze pro shromažďování dat získaných o mozku a dále se zabývá vývojem nástrojů pro modelování s cílem se co nejvíce přiblížit emulaci mozkové činnosti. [1] [18]

Nedávné studie dosáhly značného pokroku ve vývoji velkého počtu aplikací v různých oblastech výzkumu, jako je medicína, komunikace, kontrola, zábava, rehabilitace, asistenční technologie, letectví, doprava, terapie, vzdělávání, bezpečnost, trénink a další. Jednou z nejvýznamnějších výzev v této oblasti je umožnit lidem se zdravotním postižením návrat do jejich každodenního života. [1] [18]

V této práci se zaměříme na modelování a simulaci neinvazivních BCI systémů, které pro snímání elektrické aktivity mozku využívají metodu Elektroencefalografie (EEG).

2 METODY

Nejčastějším rozdělením systémů je na invazivní a neinvazivní. Invazivní metody vyžadují chirurgický zákrok a elektrody jsou zde umístěny přímo do kortexu. Neinvazivní metody, na druhou stranu, nevyžadují chirurgický zákrok a elektrody jsou zde umístěny na povrchu hlavy. Z tohoto důvodu jsou neinvazivní systémy více využívány ve výzkumu, i přes nižší kvalitu signálu. Systémy BCI využívají různé metody pro získávání elektrických signálů. Může se jednat například o signály EEG (elektroencefalografie), EMG (elektromyografie), EOG (Elektrookulografie), EKG (Elektrokardiografie), ECoG (Elektrokortikografie), fNIRS (Funkční blízká infračervená spektroskopie), či fMRI (Funkční magnetická rezonance). V této práci se zaměříme na mozkovou aktivitu uživatele, která může být měřena pomocí EEG. [1] [3]

2.1 Elektroencefalografie (EEG)

Elektroencefalografii (EEG) můžeme definovat jako záznam změn polarizace neuronů v průběhu času v CNS (centrální nervová soustava). Povrchové elektrody poté detekují změny v již zmíněné polarizaci neuronů. Jedná se o bioelektrické projevy mozkových procesů a reakce na vnější podněty. Zjednodušeně slouží EEG k monitorování aktivity mozku. Pokroky v oblasti vědy o mozku a výpočetní techniky v posledním desetiletí vedly k významnému rozvoji BCI. Nedávné technologické pokroky, jako je bezdrátový záznam, levné zesilovače, časové rozlišení v reálném čase, analýza strojového učení a pokročilá metodologie analýzy signálů ukázaly, že systémy BCI založené na EEG jsou nyní přístupnější vědcům v mnoha vědeckých oblastech. Přenosná náhlavní souprava EEG pomáhá porozumět dynamice mozku, která je základem integrace percepčních funkcí mozku v různých scénářích. Zdrojový model jednotlivých oblastí mozku můžeme zrekonstruovat pomocí správného uspořádání elektrod na povrchu hlavy. Tento model poté můžeme využít k velmi omezené a ne zcela určité představě toho, v jakém stavu se nachází mysl daného uživatele. BCI založené na EEG se v posledních letech staly důležitým nástrojem pro analýzu mozkové činnosti v reálném čase. [2] [18]

3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE BCI SYSTÉMŮ

Pochopení funkčnosti lidského mozku můžeme zařadit mezi největší výzvy lidstva. Proto je nezbytné se zabývat výzkumem spojeným s analýzou a funkčností mozku a vytvářet různé modely a simulace pro přiblížení se ke zjištění, jak přesně lidský mozek funguje. Nyní v době moderních technologií je možno jeho funkčnost zkoumat například vytvářením modelů, které představují průběh reálných procesů naší nervové soustavy. K monitorování mozkové aktivity můžeme využít různé metody. Zde se zaměříme na snímání mozkových signálů pomocí EEG. Pomocí metody EEG můžeme zkoumat aktivitu mozku a různé vzory chování jedince, které nám mohou pomoci např. při diagnostice a zkoumání nervových onemocnění. Modelování a simulaci využíváme z důvodu reprodukce vzoru chování. Za předpokladu, že mozek umožňuje výpočet pomocí množin vstupů, výstupů a vnitřních stavů, můžeme jeho funkčnost

modelovat pomocí adaptivních algoritmů. K ověření správnosti modelu poté využíváme simulaci. Pro modelování funkčnosti mozku můžeme využít například umělou inteligenci (neuronové sítě). [9]

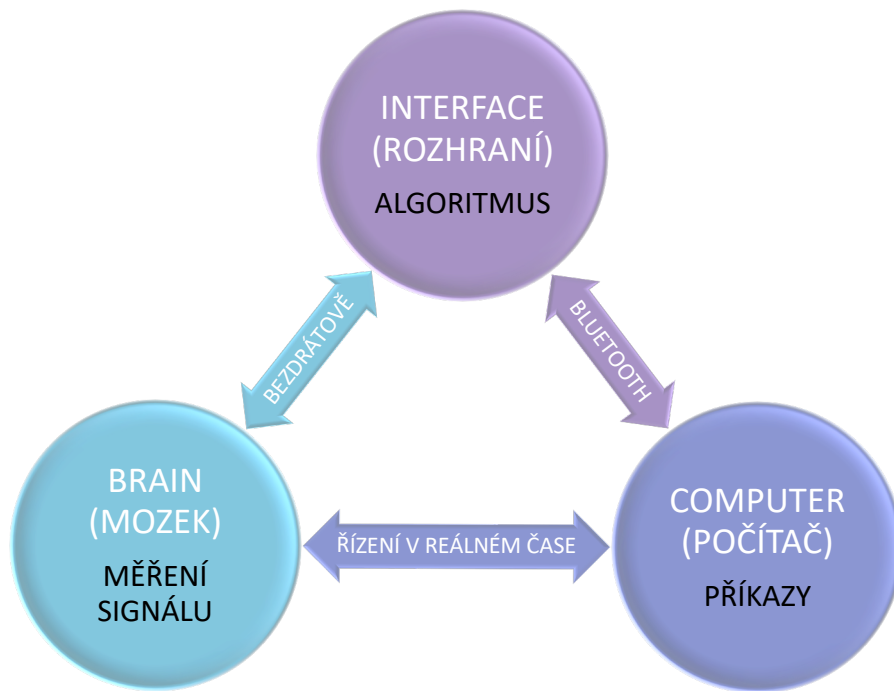
Při studiu a zjišťování, jak jednotlivé systémy fungují, nám může pomoci právě modelování a simulace. Modelování a simulace nám umožňuje získat nový pohled na problémy, vytvářet a testovat různé hypotézy o funkčnosti systémů, mohou nám také pomoci při návrhu nových systémů či nám mohou předpovědět budoucí vývoj sledovaných systémů. Modelování nás nutí přemýšlet o tom, co máme zahrnout do daného modelu a co vynechat, jak máme formulovat dané vztahy mezi jednotlivými částmi systému atd. Simulace nám poté ukazuje různé spojitosti a výsledky. [8]

3.1 Modelování

Model můžeme definovat jako zjednodušený popis objektu akumulující informace a umožňující kvantifikaci a predikci. Model originálu můžeme označit jako reálný objekt (systém), který je izomorfní (jeden je modelem druhého) s originálem. Snažíme se tedy vytvořit tzv. abstraktní model reálného objektu. [6]

3.1.1 Architektura BCI modelu

Architektura BCI modelu musí fungovat v reálném čase a být bezdrátová. Dle dané architektury viz *Obr. 2*, můžeme vidět propojení jednotlivých komponent modelu. Propojení mezi mozkiem a rozhraním bývá v systémech BCI založených na EEG prováděno bezdrátově. Snímání mozku je většinou provedeno pomocí nějaké bezdrátové náhlavní soupravy, např. Emotiv EPOC+, Emotiv Insight, Neurosky, a mnoha dalších. Propojení mezi rozhraním a počítačem je uskutečněno pomocí Bluetooth, které má daná náhlavní souprava vestavěné. Obecně BCI systémy slouží k propojení mozku a externího zařízení. Externím zařízením tedy nemusí být pouze počítač, ale může se jednat o jakékoli zařízení, které chceme řídit pomocí mozkových signálů, jako např. robotickou ruku, dron, invalidní vozík, neuroprotézu atd. Rozhraní můžeme brát jako algoritmus, který nám převádí dané mozkové signály do příkazů pro externí zařízení. Propojení mezi mozkiem a počítačem musí reagovat v reálném čase, tedy co nejrychleji s co nejmenší odezvou. [18]



Obr. 2 Architektura BCI modelu

3.2 Simulace

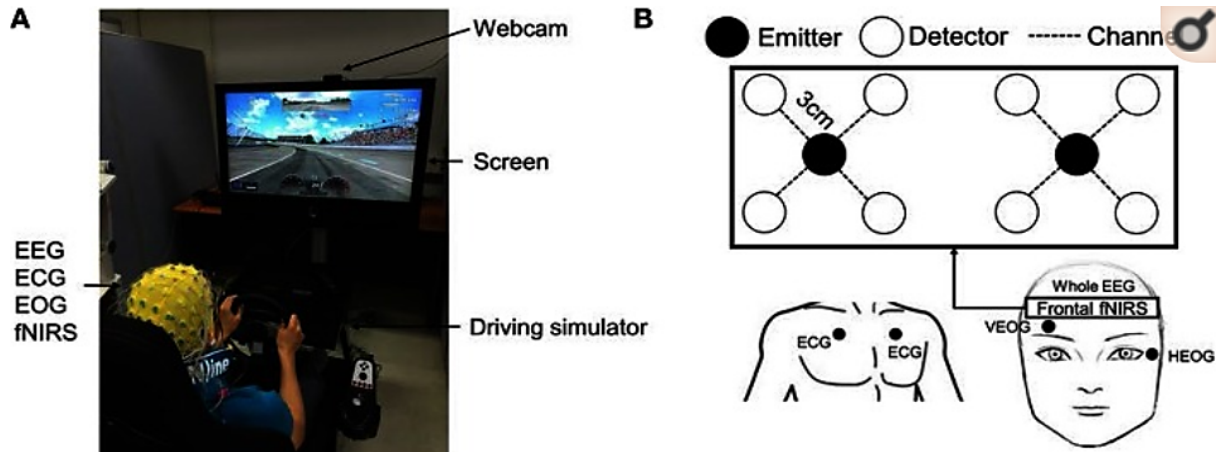
Pojem simulace úzce souvisí s pojmem model. V simulaci se jedná o řízené pozorování na modelu. Modely a simulaci využíváme k usnadnění práce, jelikož manipulace a experimentování s nimi je jednodušší, méně nákladné, bezpečnější a v některých případech také dostupnější, než s originálem. Simulace je velmi důležitou součástí ve výzkumu v mnoha oblastech. Ačkoli pro testování a ověření jsou v konečném důsledku zapotřebí skutečné experimenty, je simulace užitečná při získávání hypotéz o studovaných systémech, z důvodu náročných a nákladných provedení reálných experimentů. [5] [6]

4 PŘÍKLADY MODELOVÁNÍ A SIMULACE BCI SYSTÉMŮ

V této části si ukážeme příklady využití modelování a simulace v systémech BCI. Existuje mnoho různých způsobů, které nám umožňují zjednodušení práce se systémy pomocí tvorby modelů a simulací, místo tvorby reálných objektů, či provedení reálných situací. Simulace nám tedy umožňují nasimulovat situace, u kterých by bylo provádění na originálu příliš nebezpečné či nákladné. Jedno z největších využití je pro různé řídicí a letecké simulátory, řízení inteligentních vozidel, herní simulace, využití virtuální reality, modelování a simulace robotických zařízení apod. Dále se může jednat např. o sledování zdrojů týmu během operace a mnoho dalších. V následující části jsou ukázány možné příklady využití již vytvořených modelů a simulací v oblasti BCI. [4] [6]

4.1. Příklad – simulátor řízení

Mnoho vědců se zaměřilo na různé simulace řízení, kde mohou monitorovat mentální únavu řidiče, detekovat pozornost, předvídat únavu řidiče a spánkovou deprivaci během jízdy, či vytvářet тренаžéry pro řidiče silničních vozidel simulující chování reálných zařízení. [4] [6] [15] [17]



Obr. 3 Měření mentální únavy řidiče během simulace jízdy [10]

4.2 Příklad – letecká simulace

Někteří vědci pracují s různými simulátory, jako je letecká simulace, či simulace letové kabiny, pro monitorování kognitivních výkonů a zapojení pilotů během simulovaného letu, výcvik pilotů letounů, řízení letového provozu pomocí indexu duševní zátěže atd. [4] [6] [16] [21]



Obr. 4 Letecké simulace [16] [21]

4.3 Příklad – inteligentní vozidlo

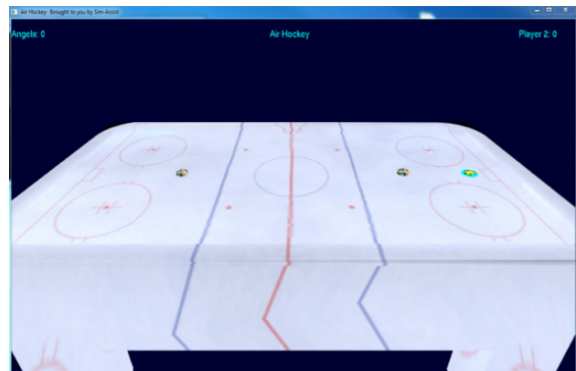
Dále se může jednat např. o detekci brzdného záměru během simulované jízdy pro tvorbu inteligentního vozidla. [11]



Obr. 5 Detekce brzdného účinku během simulované jízdy [11]

4.4 Příklad – herní simulace

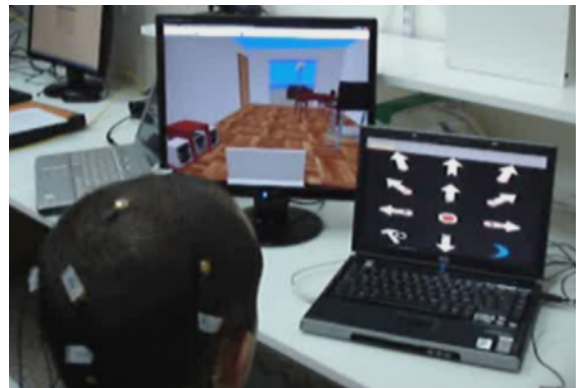
V oblasti zábavy byly také vytvořeny různé herní simulace. [1] [12]



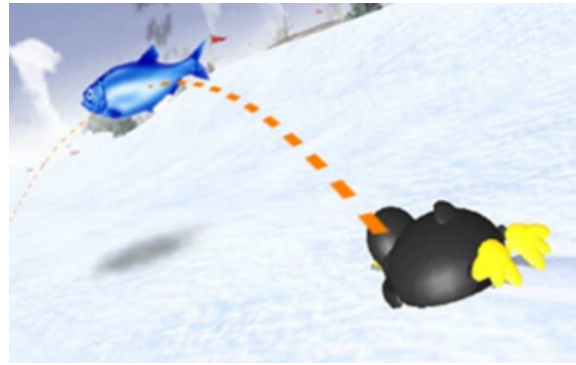
Obr. 6 Ovládání 3D herní simulace [12]

4.5 Příklad – virtuální realita

Další z nejvíce využívaných je aplikace virtuální reality pro různé tvorby simulací. [13] [20]



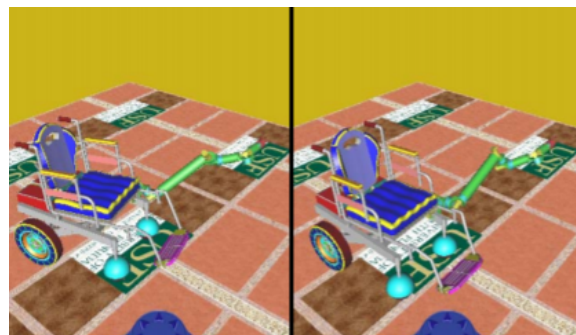
Obr. 7 Ovládání simulovaného invalidního vozíku ve virtuálním prostředí [20]



Obr. 8 Ovládání objektu ve virtuálním prostředí [13]

4.6 Příklad – simulace virtuální končetiny

Další využití je v oblasti medicíny, např. simulace operace, simulace virtuální končetiny atd. [4] [21]



Obr. 9 Ovládání robotické ruky pomocí simulace v Matlabu [21]

4.7 Příklad – model robota

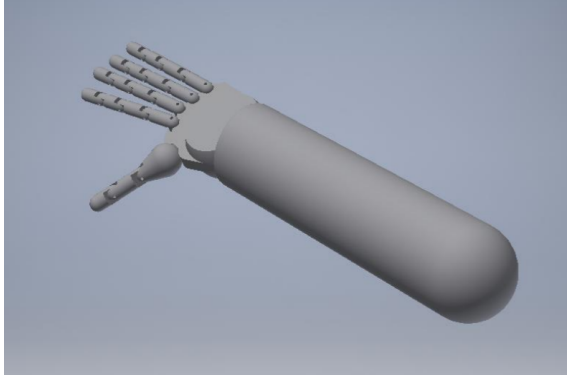
V diplomové práci, která byla vytvořena na Fakultě Aplikované Informatiky, UTB ve Zlíně, byl vytvořen robotický model pomocí stavebnice LEGO Mindstorms EV3. Jedná se o variabilní robotickou stavebnici, které má všestranné využití právě pro účely simulací a výzkumného testování. Cílem práce bylo ovládání technických zařízení a robota sestaveného pomocí inteligentních prvků robotické stavebnice. Model robota byl ovládán mozkovými vlnami EEG snímanými pomocí zařízení Emotiv EPOC. [7]



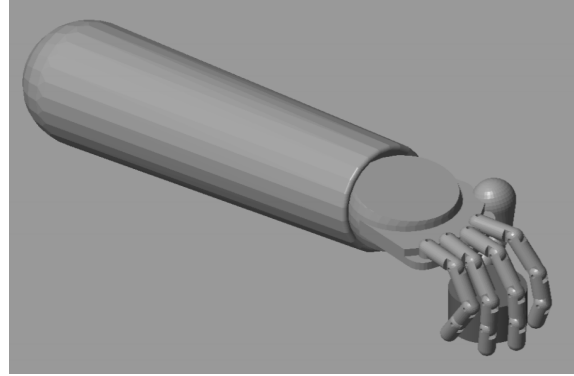
Obr. 10 Řízení robota pomocí mozkových vln [7]

4.8 Příklad – model a simulace robotické ruky

Dalším z příkladů využití simulace v systémech BCI může být např. tvorba simulace řízení robotické ruky. Jako první se vytvoří model robotické ruky, který se poté převede do prostředí Matlabu, kde bude vytvořena následná simulace. [19]



Obr. 11 Model robotické ruky v prostředí Autodesk Inventor [19]



Obr. 12 Simulace robotické ruky provedená v softwaru Matlab Simulink [19]

5 DISKUSE

Navzdory skutečnosti, že bylo napsáno mnoho článků a bylo vytvořeno několik praktických aplikací, stále existuje mnoho problémů a omezení v systémech BCI. Doporučení pro zlepšení účinnosti těchto systémů zahrnují spolupráci s vědci z jiných oborů, používání databází s již změřenými signály, či vytváření hybridních systémů využívajících kombinaci více technologií a dalších přístupů BCI.

Celkové výsledky ukazují, že BCI je stále celosvětovou oblastí výzkumu. Navzdory několika úspěchům však dosud nebylo vytvořeno vhodné zařízení, které by v reálném čase mohlo rychle, spolehlivě a bezpečně zachytit mozkovou aktivitu a ovládat tak externí zařízení. Bez ohledu na omezení těchto systémů tyto pokroky ukazují na velkou užitečnost v mnoha oblastech. Jelikož je pochopení funkčnosti lidského mozku jedním z největších výzev lidstva, musíme se zabývat výzkumem spojeným s analýzou a funkcí mozku a vytvářet různé modely a simulace. Modelování a simulace nám mohou umožnit zjednodušení práce se systémy BCI. Mohou nám pomoci například při tvorbě modelů či nasimulování situací, u kterých by bylo provádění na originálu příliš nebezpečné či nákladné. Dále je nezbytné pokračovat v práci s těmito systémy a spolupracovat s vědci z jiných oborů, aby se vytvořily robustnější, nezávislé, bezdrátové, levné, a spolehlivé systémy pracující v reálném čase. [1] [2] [4]

ZÁVĚR

V posledních desetiletích se systémy Brain-Computer Interface (BCI) staly celosvětovou oblastí výzkumu. BCI poskytuje přímou komunikaci mezi mozkem a externím zařízením. Tyto systémy lze použít v různých aplikacích. Nejčastěji se používají pro klinické účely, lze je však použít také v jiných oblastech, jako je zábava, školení, bezpečnost, terapie, vzdělávání, nebo komunikace a kontrola. Nejběžnější rozdělení systémů BCI je na invazivní a neinvazivní metody. Neinvazivní metoda je

nejrozšířenější a nejbezpečnější z těchto metod. Přestože bylo napsáno mnoho článků a bylo vytvořeno několik praktických aplikací, v systémech BCI stále existuje mnoho výzev a omezení. BCI systémy mohou mít obrovský dopad na náš každodenní život. V rámci tohoto článku, bylo cílem popsat základní funkčnost systémů BCI, základní principy modelování a simulace a poté nastínit možná využití modelování a simulace v BCI systémech při zpracování EEG signálů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen za podpory Interní grantové agentury (IGA) Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně v rámci projektu č. IGA/CebiaTech/2021/005.

LITERATURA

- [1] NAM, Ch. S., NIJHOLT, A. a F. LOTTE. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 788 s, 2018.
- [2] ABIRI, R., BORHANI, S., SELLERS, E. W., JIANG, Y. a X. ZHAO. *A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms*. Journal of Neural Engineering, 16(1), 2019.
- [3] LOTTE, F., BOUGRAIN, L., CICHOCKI, A., CLERC, M., CONGEDO, M., RAKOTOMAMONJY, A. a F. YGER. *A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update*. Journal of Neural Engineering, 15(3), 2018.
- [4] ARICÒ, P., BORGHINI, G., Di FLUMERI, G., SCIARAFFA, N. a F. BABILONI. *Passive BCI beyond the lab: current trends and future directions*. Physiol. Meas., 2018.
- [5] LINDGREN, J., MERLINI, A., LÉCUYER, A., a F. ANDRIULLI. *SimBCI - A Framework for Studying BCI Methods by Simulated EEG*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 26 (11), 30 s., 2018.
- [6] ŠTECHA, J. a V. HAVLENA. *Teorie dynamických systémů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 248 s, 2005.
- [7] NEHODOVÁ, R. *Řízení externích malých robotických systémů pomocí EEG signálů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav informatiky a umělé inteligence, 70 s., 2016. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/38440>.
- [8] PELÁNEK, R. *Modelování a simulace komplexních systémů*. Brno: Masarykova univerzita, 236 s., 2011. ISBN 978-80-210-5318-2.
- [9] VOLNÝ, A. *Modelování a simulace mozkové aktivity*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 52 s., 2016. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/38820>
- [10] AHN, S., NGUYEN T., JANG H., KIM J. G. a S. C. JUN. *Exploring Neuro-Physiological Correlates of Drivers' Mental Fatigue Caused by Sleep Deprivation Using Simultaneous EEG, ECG, and fNIRS Data*. Front Hum Neurosci. 2016.

- [11] KIM, J., KIM, I., HAUFE S. a S. LEE. *Brain-computer interface for smart vehicle: Detection of braking intention during simulated driving*. 2014 International Winter Workshop on Brain-Computer Interface (BCI). Jeongsun-kun. 15 s., 2014. DOI: 10.1109/iww-BCI.2014.6782549
- [12] CHAN, A. T., GAMINO, A., HARRIS, F. C., a S. DASCALU. *Integration of Assistive Technologies into 3D Simulations: An Exploratory Study*. Latifi S. (eds) Information Technology: New Generations. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 448. Springer, Cham. 2016.
- [13] LEEB, R., LANCELLE, M., KAISER, V., FELLNER, D. W. a G. PFURTSCHELLER. *Thinking Penguin: Multimodal Brain-Computer Interface Control of a VR Game*. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, vol. 5, no. 2, 12 s., 2013. DOI: 10.1109/TCIAIG.2013.2242072
- [14] PALANKAR, M., De LAURENTIS, K. J., ALQASEMI, R., VERAS, E., DUBEY, R., ARBEL, Y., a E. DONCHIN. *Control of a 9-DoF Wheelchair-mounted robotic arm system using a P300 Brain Computer Interface: Initial experiments*. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2009. DOI: 10.1109/robio.2009.4913028
- [15] AHN, S., NGUYEN, T., JANG, H., KIM, J. G., a S. C. JUN. *Exploring Neuro-Physiological Correlates of Drivers' Mental Fatigue Caused by Sleep Deprivation Using Simultaneous EEG, ECG, and fNIRS Data*. Front. Hum. Neurosci. 2016.
- [16] ARICÒ, P., BORGHINI, G., Di FLUMERI, G., COLOSIMO, A., BONELLI, S. a další. *Adaptive Automation Triggered by EEG-Based Mental Workload Index: A Passive Brain-Computer Interface Application in Realistic Air Traffic Control Environment*. Front. Hum. Neurosci. 2016.
- [17] LIU, Y.-T., LIN, Y.-Y., WU, S.-L., CHUANG, C.-H. a C.-T. LIN. *Brain Dynamics in Predicting Driving Fatigue Using a Recurrent Self-Evolving Fuzzy Neural Network*. IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2016.
- [18] ŽÁK, R. *Řízení systémů pomocí aktivizace mozkových center*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav informatiky a umělé inteligence, 61 s., 2013. ISBN 978-80-7454-685-3. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/41570>.
- [19] POLÁČEK, L. *Simulace robotické ruky pro automatizaci testování sensoru gest*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Strojní, 95 s., 2017. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73353/F2-DP-2017-Polacek-Lukas-Diplomova-prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] GENTILETTI, G. G., GEBHART, J., ACEVEDO, R., YÁÑEZ-SUÁREZ, O., a V. MÉDINA-BAÑUELOS. *Command of a simulated wheelchair on a virtual environment using a brain-computer interface*. IRBM 30. 8 s. 2009.
- [21] VECCHIATO, G., BORGHINI, G., ARICÒ, P. a spol. *Investigation of the effect of EEG-BCI on the simultaneous execution of flight simulation and attentional tasks*. Med Biol Eng Comput, 11 s., 2016.