

Oponentský posudek dizertační práce Ing. Lukáše Vařeky

"Methods for Signal Classification and Their Application to the Design of Brain-Computer Interfaces"

Analýza biomedicínských signálů patří v současnosti mezi velmi důležité metody sloužící pro podporu rozhodovacích procesů jak v diagnostice, tak v terapii. V některých lékařských oborech se analýza signálů stává téměř nutností. Neurologie a neurofyziologie patří mezi takové obory již dlouhodobě. Velmi důležitou oblastí je řešení rozhraní mozek-počítač, které má význam jak pro základní, tak aplikovaný výzkum. Předkládaná dizertační práce se zabývá otázkou návrhu a využití algoritmů založených na neuronových sítích. Autor navrhuje modifikace vybraných algoritmů a také online BCI pro testování v reálném čase. Navržené metody a postupy byly implementovány a otestovány na reálných datech.

Práce je členěna do deseti kapitol, obsahuje seznam obrázků a tabulek a celkem 91 referencí.

Celkové hodnocení práce

Aktuálnost zvoleného tématu

Zvolené téma dizertační práce má interdisciplinární charakter a je aktuální nejen z vědecko-výzkumného, ale i praktického hlediska. Zároveň je to téma velmi náročné. Otázka rozhraní mozek-počítač je sice již dosti dlouho v centru pozornosti výzkumu, ale dosud není zcela uspokojivě vyřešena. Velká část výzkumu se zaměřuje na evokované potenciály, kde je hlavním úkolem jejich přesná a rychlá klasifikace. Dizertace je příspěvkem k metodám předzpracování, extrakce příznaků a klasifikace ERP, zejména komponenty P300. Každý příspěvek k co nejlepší klasifikaci lze tak považovat za velký přínos.

Cíl dizertace

Cíle dizertace jsou explicitně, ale dosti stručně uvedeny v úvodu, detailně pak až v kapitole 6.4, což je poněkud netradiční z formálního pohledu. Celkem si autor stanovil 5 základních cílů: návrh metod předzpracování a extrakce příznaků s cílem maximalizovat odstup signálu od šumu; výběr vhodné samoučící se neuronové sítě pro učení s extrahovanými příznaky; správná identifikace odezvy (target, non-target) v EEG signálu pomocí naučené neuronové sítě; verifikace tohoto přístupu pomocí navrženého online BCI systému a testování na více subjektech; porovnání s existujícími metodami. Práce postupuje od popisu problémové oblasti a rešerše literatury, přes návrhy metod, jejich implementace až po testování navržených řešení a diskusi dosažených výsledků. Navržené metody byly experimentálně ověřeny na reálných datech. Autor své výsledky analyzoval velmi detailně. Všechny uvedené cíle autor splnil.

Zvolené metody zpracování

Práce je vedena metodicky správně. Po úvodu následují kapitoly 2 a 3, které stručně uvádějí do relevantních partií elektroencefalografie a rozhraní mozek-počítač (BCI), vysvětlující různá paradigmatata pro BCI. Čtvrtá kapitola se věnuje problematice předzpracování a extrakce příznaků pro BCI využívající komponentu P300. Pátá kapitola prezentuje metody klasifikace pro P300 BCI. Šestá kapitola je souhrnem předchozích teoretických částí a následně navrhuje cíle dizertace a způsob evaluace navržených metod. Za klíčové považují kapitoly 7, 8 a 9, které popisují návrh experimentu, získání dat, jejich analýzu, návrh a evaluaci neuronových sítí a implementaci a testování BCI. V závěrečné kapitole 10 jsou shrnuty výsledky ve vztahu k formulovaným cílům a jsou uvedena doporučení pro další rozvoj.

Výsledky dizertace a její hodnocení

Předložená dizertační práce je dobře strukturovaná a má správný metodický postup. Autor vede postup řešení jak ve vědecké, tak i implementační části jasně a správně. Hlavní přínos práce spatřuji v tom,

že autor identifikoval základní problémy analýzy a klasifikace ERP, nutné pro jejich využití pro BCI. Navrhl metodický postup extrakce příznaků, klasifikace a následné evaluace klasifikačních modelů. Navržené metody implementoval a otestoval na reálných datech. Bylo tak prokázáno, že nově navržená metodika a implementované metody jsou vhodné.

Práce je i po stránce formální na velmi dobré úrovni. Oceňuji, že je napsána v anglickém jazyce.

Význam pro praxi a další rozvoj vědy

Práce je bezpochyby přínosná nejen pro oblast návrhu a implementace metod pro zpracování biomedicínských signálů, u kterých často dochází k zašumění originálního signálu. Dalším přínosem práce je ověření možnosti využít navržené metody pro online BCI. Navržená metodika byla ověřena v praxi, takže též může být do budoucna využívána pro podobné úlohy. O přínosu práce svědčí i publikované práce doktoranda, zejména časopisecké články.

Připomínky

K práci mám následující připomínku:

- Postrádám samostatnou kapitolu definující cíle dizertace. Explicitně jsou vyjádřeny ve velmi stručné podobě v úvodu a následně až v kapitole 6.4. Toto strukturování je poněkud netradiční a nechává čtenáře v napětí, pokud nechce číst kapitoly na přeskáčku.

Dotazy do diskuse

- Jaká je interpersonální variabilita v P300 odpovědi?
- Zkoumal jste také intrapersonální variabilitu?
- Nakolik je Vámi navržený postup odolný vůči šumu v signálu a odchylkám způsobeným variabilitou reakce subjektu?

Závěr

Přes výše uvedenou připomínku mohu konstatovat, že předložená práce svědčí o cílevědomém a systematickém přístupu doktoranda ke zpracování dané problematiky jak z hlediska vědeckého přístupu, tak z hlediska praktického využití. Doktorand jednoznačně prokázal, že ovládá vědecké metody a disponuje potřebnou hloubkou teoretických vědomostí a praktických zkušeností.

Práce splňuje podmínky samostatné tvůrčí vědecké práce, obsahuje původní výsledky a odpovídá tak požadavkům k udělení akademického titulu PhD. Mohu tak konstatovat, že **práci doporučuji k obhajobě před příslušnou komisí.**



Doc. Ing. Lenka Lhotská, CSc.

V Praze dne 4.7.2018

Posudek oponenta na disertační práci

Doktorand: Ing. Lukáš Vařeka, FAV ZČU Plzeň

Název práce: Methods for Signal Classification and their Application to the Design of Brain-Computer Interfaces

Oponent: Doc. Dr. Ing Vlasta Radová, FAV ZČU Plzeň

Vyjádření k významu práce pro obor:

Hlavním cílem práce bylo zhodnotit možnosti použití neuronových sítí pro klasifikaci reakcí mozku na stimuly v rozhraní mozek-počítač (BCI) založeného na komponentě P300. Přestože otázka vhodného rozhraní mozek-počítač je studována již nějakou dobu, jedná se stále o téma velice aktuální a potřebné. Jakýkoli pokrok v této oblasti by byl mimořádným přínosem zejména pro pacienty, kteří nemohou se svým okolím komunikovat běžným způsobem. Předložená práce sice nepřináší žádné převratné výsledky, nicméně jsou v ní zkoumány přístupy, které dosud zkoumány nebyly.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění cílů:

Doktorand si ve své práci stanovil 5 konkrétních cílů:

- předzpracovat signál a extrahovat příznaky tak, aby byl maximalizován odstup signál-šum;
- Zvolit vhodnou samoučící se neuronovou síť a natrénovat ji pomocí extrahovaných příznaků;
- identifikovat cílové a necílové odezvy natrénované neuronové sítě, a to buď na základě expertních znalostí, nebo pomocí automatické procedury;
- verifikovat navržený přístup pomocí navrženého on-line BCI systému a otestovat navrženou neuronovou síť na různých subjektech;
- porovnat navržený klasifikační přístup s aktuálními klasifikačními technikami, např. Linear Discriminant Analysis, nebo Support Vector Machines.

Cíle považuji za disertabilní. Z předložené práce vyplývá, že doktorand pro jejich splnění prostudoval velké množství literatury a provedl celou řadu experimentů. Bohužel však získané znalosti a provedené experimenty nedokázal dostatečně dobře „prodat“. Práce místy působí povrchně, použité algoritmy nejsou vždy popsány dostatečně podrobně tak, aby je bylo jednoduše zopakovat, proměnné použité ve vzorcích nejsou vždy vysvětleny. Přesto však mohu konstatovat, že použité metody odpovídají stanoveným cílům a že tyto cíle byly splněny.

Vyjádření k výsledkům disertační práce a k přínosu doktoranda:

Za největší přínos doktoranda považuji kapitolu 8, ve které doktorand navrhl a otestoval několik neuronových sítí. Přestože dosažené výsledky nepřekonal výsledky jiných známých metod, otestoval doktorand přístupy, které dosud zkoumány nebyly.

Vyjádření systematické, přehlednosti, formální a jazykové úpravě práce:

Disertační práce ing. Lukáše Vařeky má celkový rozsah 120 stran. Z hlediska uspořádání je práce psána systematicky. Po úvodní kapitole je v kapitolách 2 až 5 zpracován teoretický přehled. Je v nich stručně popsán EEG signál, rozhraní člověk-počítač, metody předzpracování signálu a extrakce příznaků zaměřené na komponentu P300 a klasifikační metody vhodné pro rozhraní využívající

komponenty P300. V šesté kapitole je uveden souhrn aktuálních metod, včetně předběžných experimentů doktoranda pro ověření navrženého konceptu. V této kapitole jsou též uvedeny konkrétní cíle práce. V kapitole 7 je stručně popsán způsob získávání dat a jejich analýza, v osmé kapitole návrh a vyhodnocení neuronových sítí pro detekci komponenty P300 a v deváté kapitole implementace a testování konkrétního příkladu rozhraní člověk-počítač. Po závěru následuje seznam použité literatury a seznam publikovaných prací doktoranda.

Práce je psaná slušnou a srozumitelnou angličtinou. Z hlediska formální a jazykové úrovně nemám k práci vážnější připomínky. Přesto se mi nečetla úplně lehce. Doktorand totiž často místo popisu konkrétního postupu, metody či dat volí odkaz na své publikace, což činí práci relativně nepřehlednou. Nejvíce markantní je to zřejmě na str. 101, kde je uvedena věta *However, using the proposed feature extraction, neither SOM-based, nor ARTbased methods reached the performance achieved in [Author6]*. Jaké výsledky byly dosaženy v publikaci [Author6] však už v disertační práci uvedeno není.

Vyjádření k publikacím doktoranda:

V seznamu svých publikací doktorand uvádí 15 prací souvisejících s tématem disertační práce, 6 z nich je časopiseckých, 9 bylo publikováno na konferencích. U jedné práce je doktorand jediným autorem, dalších 6 publikoval se svým školitelem, zbytek pak je publikován v širším autorském kolektivu. Dle mého názoru je publikační aktivita doktoranda velmi dobrá.

Závěr:

Přes výše uvedené výhrady jsem přesvědčena, že předložená disertační práce splňuje veškeré požadavky kladené na tento typ kvalifikační práce. Práci proto doporučuji k obhajobě.

Otázky do diskuse:

- Na str. 12 úplně dole uvádíte *Some ERPs are associated with any type of visual or audible events (e.g. the N100 component), the others are triggered only by the events following some semantic pattern (e.g. the P300 or the N400 component)*. Můžete toto prosím vysvětlit podrobněji (pro laika)? Znamená to, že v signálu se nikdy nemůže objevit odezva, která by nastala 100 ms po stimulu, měla zápornou polaritu a byla způsobena něčím jiným, než nějakým vizuálním či sluchovým vjemem?
- Na straně 71 v kapitole 7.4 uvádíte, že po účastnících experimentu bylo požadováno, aby se snažili omezit mrkání. Není tento požadavek v případě, že sezení trvá 20 minut, příliš omezující? Nemůže se tento požadavek nějak negativně projevit na získaných výsledcích?
- Na str. 72 v kapitole 7.7 uvádíte, že data jste rozdělil na trénovací a testovací tak, že trénovací data byla od jiných osob než data testovací. Jako důvod uvádíte, že jste chtěl ověřit, zda je možné vytvořit univerzální klasifikátor bez nutnosti trénovat ho pro každého nového uživatele. Jakkoli tuto motivaci chápu, nebylo by z hlediska následného použití (tj. pro pacienty, kteří nemohou komunikovat jinými způsoby) vhodnější natrénovat klasifikátor přímo pro konkrétního člověka?
- Paralyzované osoby mohou komunikovat s okolím i bez BCI, např. pomocí mrkání očí. Proč má tedy podle vás smysl se tematikou BCI zabývat?

Oponentský posudek na disertační práci

Doktorand: Ing. Lukáš Vařeka, FAV ZČU v Plzni
Název práce: Methods for Signal Classification and their Application to the Design of Brain-Computer Interfaces
Oponent: doc. Ing. František Zbořil, CSc., FIT VUT v Brně

Předložená disertační práce je přepracovanou verzí práce, jejíž původní verzi jsem posuzoval v loňském roce. Má celkem 120 stran, a to včetně obsahu a odkazů na literaturu. Prvních šest kapitol je věnováno úvodu do problematiky a přehledu současného stavu: encefalografii, rozhraní mozek-počítač (BCI - Brain-Computer-Interface), předzpracování signálů, extrakci příznaků pro BCI založené na komponentě P300 (P300 BCI) a klasifikačním metodám pro P300 BCI. V šesté kapitole jsou explicitně uvedené cíle disertační práce. V dalších kapitolách je pak postupně popsáno plnění vytyčených cílů, a to získávání dat a jejich analýza, návrh neuronových sítí pro detekci komponenty P300, jejich implementace a testování. Poslední kapitolou práce je závěr.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Disertační práce se zabývá problematikou rozhraní mozek-počítač. Vlastní přínos doktoranda lze spatřovat v návrzích BCI založených na neuronových sítích a v ověřování vhodnosti (praktické aplikovatelnosti) těchto přístupů. Zvolené téma práce lze považovat za velmi aktuální, ale vzhledem k dosaženým výsledkům, přestože jsou srovnatelné s výsledky získanými jinými publikovanými metodami, nebude význam posuzované práce pro obor příliš významný.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění stanoveného cíle

Ing. Lukáš Vařeka si v kapitole 6.4 stanovil pět cílů své práce:

1. Předzpracovat signál a extrahovat příznaky maximalizující poměr signál/šum.
2. Vybrat vhodnou neuronovou síť s učením bez učitele (unsupervised) a trénovat ji na extrahované příznaky.
3. Pomocí této sítě identifikovat cílové a mimocílové (target/nontarget) odezvy, a to buď automaticky, nebo na základě expertních znalostí.
4. Ověřit navržený přístup návrhem on-line BCI a testováním natrénované sítě na různých subjektech.
5. Porovnat navržený přístup s aktuálními klasifikačními technikami, např. s LDA (Linear Discriminant Analysis), nebo SVM (Support Vector Machines).

Z textu práce je zřejmé, že doktorand má velký přehled v problematice zpracování EEG signálů, především komponenty P300, i v problematice návrhů BCI, a že prostudoval velké množství relevantní literatury. Je však také zřejmé, že není příliš pečlivý při uvádění matematických vztahů a použitých algoritmů. V řadě rovnic používá symboly, jejichž význam nikde neuvádí, a proto jsou tyto rovnice nejasné. Algoritmy pak buď úplně chybí, nebo jsou popisovány vágně a prakticky nepoužitelně. Práci by také velmi prospěla ukázka konkrétních dat, která by umožnila přesnější představu o obtížnosti řešeného problému a jeho řešení (maximalizaci poměru signál/šum). Podotýkám, že poznámku na str. 103 „Both the data used [Author5] and related Matlab algorithms [73] are publicly available“ jsem nepřehlédl, ale v publikaci [Author5] žádná konkrétní data uvedena nejsou.

Ing. Vařeka si ve své práci vybral ke zkoumání a k plnění posledních tří cílů dvě známé neuronové sítě s učením bez učitele, a to samoorganizující se mapy (Self-Organizing Map, SOM) a síť založenou na adaptivní rezonanční teorii (Adaptive Resonance Theory, ART), a dále dvě sítě s učením s učitelem, a to asociativní síť s využitím samoorganizace (Learning ASsociations by Self-Organization, LASSO) a zřetěžené autoenkodéry (Stacked Autoencoders, SAE). V průběhu práce pak navrhl úpravu SOM na dvě sítě učící se s učitelem, které nazval SOM1 a SOM2. Přestože tyto sítě nesplňují přesné znění textu druhého cíle, lze jejich návrh a následné použití zcela akceptovat. Na druhé straně však nemohu souhlasit s tvrzením doktoranda (str. 81), že použití lineární aktivační funkce povede k omezení problému mizejícího gradientu. Na straně 85 pak autor dokonce uvádí, a to na rozdíl od první verze práce, že pro všechny vrstvy SAE použil lineární aktivační funkce a střední kvadratickou chybu. Toto je ale v rozporu s obr. 8.36, na kterém má ukázaná síť v posledních dvou vrstvách neurony s nelineárními aktivačními funkcemi – z principu však tato síť není zřetěženým autoenkodérem, ale obyčejným perceptronem s jedinou skrytou vrstvou.

Přes výše uvedené výtky mohu konstatovat, že vytčené cíle práce byly splněny.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu

Výsledky posuzované disertační práce lze hodnotit pouze obtížně. Úspěšnost navržených sítí pro klasifikaci P300 BCI je poměrně nízká a je srovnatelná s jinými známými metodami. Jak jsem již uvedl výše, v práci chybí jasné matematické vztahy a algoritmy a někdy také není zcela zřejmé, co je vlastní prací doktoranda a co bylo odněkud převzato. Původní konkrétní přínos práce proto hodnotím jako malý.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni práce

Předložená disertační práce je napsána v angličtině a její jazyková úroveň i formální úprava jsou dobré. Z hlediska návaznosti kapitol lze práci hodnotit jako systematickou, totéž však nelze říci o přehlednosti – v práci je příliš mnoho informací uvedených bez potřebného bližšího vysvětlení, na které se autor pouze odkazuje (a to včetně odkazů na vlastní publikace), a proto je obtížně čitelná. Podobně jako k první verzi práce mám i nyní celou řadu dalších drobnějších konkrétních připomínek, které uvádím samostatně na přiloženém listu.

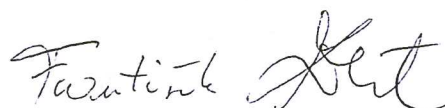
Vyjádření k publikacím doktoranda

Seznam publikovaných prací Ing. Lukáše Vařeky obsahuje 15 položek, z nichž všechny se přímo vztahují k disertační práci. Jde o 9 příspěvků na konferencích a 6 časopiseckých publikací. Celkově proto hodnotím publikační aktivitu doktoranda jako velmi dobrou.

Závěr

Přes uvedené výtky a připomínky doporučuji předloženou disertační práci k obhajobě.

V Brně 20. 6. 2018



Otázky k obhajobě:

1. Máte představu o tom, jaké shluky tvoří obrazy reprezentující signál P300, a proč jste se proto rozhodl pro jejich klasifikaci pomocí neuronových sítí SOM a ART?
2. Můžete vysvětlit, co rozumíte pod pojmy vektory příznaků a vektory vah v obrázcích 6.26 a 6.27 ?

Dodatek k posudku – poznámky a připomínky:

- Popisky obrázků nejsou v souladu s jejich názvy v seznamu obrázků uvedeném na straně 5 a často obsahují i informace, které by měly být v textu práce.
- Na obrázku 2.3 jsou u osy y nezdůvodněně nestandardní hodnoty.
- Na obrázku 2.4 je u osy y nesprávně označená jednotka.
- Na konci první věty kapitoly 3.1.3 zůstalo z první verze práce označení (μ).
- V horním levém rohu obrázku 4.11 je zřejmě zapomenuté písmeno A.
- Význam obrázku 4.13 není pro neodborníka v dané problematice zřejmý.
- Totéž platí i pro obrázek 4.15, obzvláště pak při srovnání s obr. 2.1.
- Význam některých symbolů uvedených na str. 32 není vysvětlen, a proto není ani jasný význam vztahů, v nichž jsou tyto symboly použity.
- Obrázek 5.17 ukazující průběh známé funkce je zcela zbytečný.
- Popis metody Backpropagation (str. 44) je vzhledem k popisu okolních částí vícevrstvého perceptronu neakceptovatelně stručný.
- Ve vzorci 5.26 je použit nevysvětlený symbol E .
- Na obrázku 5.21 jsou symboly Y označeny neurony, v rovnici 5.28 pak výstupní hodnoty těchto neuronů.
- Není jasné, jak se určí relativní vzdálenost p_i na straně 54.
- V rovnici 5.29 není zřejmý význam symbolu y , a tudíž ani význam této rovnice.
- Není zřejmé, proč je na obrázku 5.23 naznačeno schéma sítě ART2, když se nikde v práci tato síť nepoužívá.
- Popis Fuzzy ARTMAP v kapitole 5.5.4 je příliš stručný a ukázka algoritmu pro jeden vzorek (obrázek 5.24) je nedostatečná.
- „Recent review“ z roku 2011 (str. 59) nelze považovat za aktuální v roce 2018.
- Kapitola 6.2 nepatří do přehledu současného stavu problematiky a měla být zahrnuta do části vlastní práce doktoranda.
- Diagram na obrázku 6.25 měl být v textu řádně vysvětlen (především číselné údaje pod jednotlivými bloky)
- Na straně 63 se s odkazem na publikaci [70] uvádí, že rozměr mapy byl automaticky nastaven na 18 x 20, ale ve zmíněné publikaci jsem podobnou informaci nenalezl.
- Obrázek 6.26 by měl ukazovat extrakci vektoru příznaků, ale žádný vektor na tomto obrázku ukázán není.
- Podobně na obrázku 6.27 by mělo být ukázáno 360 váhových vektorů, ale není na něm ukázán ani jeden vektor.
- Z popisu tabulky 6.1 není zřejmé, proč bylo vybráno právě uvedených šest subjektů.
- Význam obrázku 6.28 není bez uvedení rovnice pro výpočet korelace jasný.
- K diagramu na obrázku 7.30 mám podobnou připomínku, jako k diagramu na obrázku 6.25 výše.
- Není zřejmé, proč počínaje kapitolou 7.8 se pracuje s Pz kanálem (s výjimkou trojice kanálů Fz, Cz a Pz na str. 91), když v kap. 6.2 se uvádí, že pro následné zpracování byl použit pouze kanál Cz. Navíc na str. 25 s odkazem na publikaci [20] se uvádí, že dostatečným je teprve výběr osmi kanálů.
- Na obrázku 7.32 je ukázána tabulka s p-hodnotami, ale nikde v textu není uvedeno, co se pod pojmem p-hodnota skrývá.
- V algoritmu pro SOM2, který je uveden na str. 79 dole, není jasný význam symbolů C , C_T a C_N , ani jejich počáteční nastavení.
- Na obrázku 8.34 chybí údaj *recall* u sítě 4x4.
- Význam vztahu 8.32 není zřejmý.

- V textu není vysvětleno, proč byly pro zobrazení výsledků na obrázcích 8.38, 8.39 a 8.40 vybrány právě uvedené datasety a ne jiné.
- Na str. 99 patří Nesterov místo Nestorov.
- Z algoritmu lze pouze tušit, že podněty pro P300 signály jsou tentokrát asi číslice, vlastní algoritmus jako takový však není opět zcela jasný.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Kut', located in the lower right quadrant of the page.