



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

王登苗夺谦 著

监测脑活动

——EEG解码及其应用研究

Brain Activity Monitoring: EEG Decoding and
Its Application Research



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

王登 苗夺谦 著

监测脑活动

——EEG解码及其应用研究

Brain Activity Monitoring: EEG Decoding and
Its Application Research



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要基于脑电 EEG,围绕运动想象脑—机接口、癫痫自动检测、隐蔽信息挖掘和感知预测四个方面对监测脑活动进行了比较深入的研究,详细考究了各自的研究历史与现状,结合机器学习与模式识别的方法,提出了相应的预处理,特征抽取/特征选择,模式分类的处理框架及算法,并分别从五个真实数据集中成功地验证了所提出方法的有效性,初步建立了一个基于电生理信号 EEG 的监测脑活动及基本架构。

图书在版编目(CIP)数据

监测脑活动: EEG 解码及其应用研究 / 王登,苗夺谦著.

—上海: 同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 6962 - 9

I. ①监… II. ①王…②苗… III. ①脑电图—研究

IV. ①R741.044

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093360 号

监测脑活动——EEG 解码及其应用研究

王 登 苗夺谦 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 朱 勇 卢元姗

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10

字 数 200 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6962 - 9

定 价 51.00 元



本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

人脑是整个宇宙中最为神秘的器官,解码人脑活动规律以探索智慧和生命的奥秘令无数科学家心驰神往。随着全球脑研究的持续升温,特别是 2013 年欧美先后启动具有战略意义的人脑研究计划,脑相关的科学研究对于提升人类健康水平、带动相关产业发展、刺激经济发展和促进社会进步势必带来革命性的意义。

从人的头皮采集到的脑电(electroencephalogram, EEG)信号作为大脑信息处理过程中所发生的电生理活动的一个直观而无损的反映,因其独特的属性(无创、高时间分辨率、使用简便等)而日益成为相关脑研究中必不可少的研究手段,特别为监测脑的研究提供了一种重要的技术支持。EEG 解码技术涉及神经科学、认知心理学和智能信息处理等领域,它是从原始 EEG 信号中获取与任务相关的模式,解码脑的不同任务状态,旨在揭示人脑认知思维活动模式,建立脑活动的意向与行为之间的关联,达到认识脑、保护脑和开发脑的目的。本书的主要研究总结如下:

(1) 为了准确地提取 EEG 信号的特征信息,提高脑思维任务的分类精度,在研究小波包变换的基础上,提出了一种改进小波包分解 EEG

特征的抽取方法。该方法首先进行小波包分解,然后结合能反映 EEG 信号在时域与频域上的能量分布特征的小波熵概念,从小波包库中选择最优小波包基,最后利用不同脑思维任务下脑区活动的非平衡性,对不同导联 EEG 信号求取不对称率来构成特征向量。实验采用一个 5 类不同脑思维任务 EEG 数据集,结果表明该方法具有较高的平均分类精度。本研究为脑思维任务下 EEG 信号的特征抽取提供了新的思路。

(2) EEG 信号是脑—机接口 (brain-computer interface, BCI) 一个重要的信号来源。为了更有效和可靠地对原始 EEG 信号进行解码,我们针对基于 EEG 的运动想象 BCI 多任务分类问题,提出了一套新的具有鲁棒性的处理框架。该框架可以直接处理带有噪声的原始 EEG 信号,而不用领域专家对信号伪迹进行手工标注和剔除。同时,该框架能够自动选择与任务相关联的 EEG 通道,从而减少计算复杂度。我们采用最新的竞赛数据集 dataset 2a - BCI Competition IV 验证了所提出的框架及其相关处理算法,结果证实了对于原始包含伪迹的运动想象 EEG 信号,该处理框架及算法比竞赛公布的前 3 名具有更好的分类性能。

(3) 针对基于 EEG 的癫痫自动检测问题,我们提出了一种基于 EEG 信号的带有最小置信度约束的癫痫自动检测与分类处理系统。在保证系统有较高分类精度的前提下,基于最优基的小波包熵特征抽取后,通过有监督的学习,积累知识并构造出一个具有层次结构的知识库。最后把“自信度”的定量表示融入分类决策阶段,对于在给定最小置信度约束下的可分类的样本给出分类精度,对于不可分类的样本则给出拒绝率。该处理系统成功地应用在一经典癫痫 EEG 数据库的检测中,采用交叉验证方法下可以取得近乎 100% 的正确率来区分癫痫患者和正常人。

(4) EEG 信号含有人脑大量的记忆信息,被认为是挖掘隐蔽信息最有效的工具之一。本书提出了一种基于客观脑生理电信号 EEG 的快速而有效的隐蔽信息检测处理框架。该框架在考虑时间和精度双因素的基础上,提出了包括带时间约束的层次化知识库构建算法和带时间和最小置信度约束的测试算法,并给出针对原始 EEG 信号的预处理方法,最后成功地应用在一隐蔽信息挖掘试验范式中。同时,对其中的 11 个受试者的个人出生年份信息能够在很短的时间内给出较高的检测精度。

(5) 为了探索基于 EEG 信号的空间感知预测,设计了基于视觉、触觉、视-触觉刺激空间位置一致和空间位置不一致的眼动反应实验。通过对 256 通道高密度 EEG 信号预处理和数据分析,可以依据 EEG 信号在刺激呈现 500 毫秒内较为准确地预测受试者意识到自己是否感知到了外部刺激,在什么位置,从而为推断受试者可能的行为反应提供辅助支持,也为基于空间位置刺激感知的反应式脑-机接口(reactive brain-computer interface, rBCI)的开发与应用提供了一个新的模式。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 EEG 解码相关问题、研究现状与进展	6
1.2.1 EEG 产生机理及其基本特征	6
1.2.2 EEG 的优势	8
1.2.3 EEG 信号分析处理方法	9
1.2.4 EEG 解码的应用研究	11
1.3 研究内容、创新点及组织结构	13
1.3.1 研究内容概述	13
1.3.2 创新点	15
1.3.3 组织结构	17

第 2 章 基于 EEG 的运动想象分类及其 BCI 应用研究	19
2.1 引言	19
2.2 研究历史与现状	21
2.2.1 基于侵入式 EEG 的 BCI 研究	22
2.2.2 基于非侵入式 EEG 的 BCI 研究	26
2.2.3 应用前景	33
2.2.4 涉及的关键问题与挑战	34
2.3 处理框架与算法	35
2.3.1 处理框架	35
2.3.2 相关算法	36
2.4 实验数据描述及分析	45
2.4.1 数据集 1 简介	46
2.4.2 数据集 2 简介	47
2.4.3 数据分析	48
2.5 实验结果与讨论	49
2.6 本章小结	56
第 3 章 基于 EEG 的癫痫自动检测与分类研究	57
3.1 引言	58
3.2 研究历史与现状	60
3.3 检测与分类算法描述	65
3.3.1 特征抽取算法	65
3.3.2 KNN 分类器	66
3.3.3 系统描述	67
3.4 实验及结果与讨论	69
3.4.1 数据描述	69

3.4.2	评价指标	69
3.4.3	结果与讨论	70
3.5	本章小结	75
第4章	基于 EEG 的隐蔽信息挖掘研究	77
4.1	引言	77
4.2	研究历史与现状	79
4.3	检测框架与算法	82
4.3.1	检测框架	82
4.3.2	学习与测试算法	83
4.4	实验验证	87
4.4.1	数据采集	87
4.4.2	任务与过程	87
4.4.3	结果与讨论	88
4.5	本章小结	93
第5章	基于 EEG 的感知预测研究	95
5.1	前言	95
5.2	研究历史与现状	96
5.3	实验设计与数据采集	99
5.3.1	受试者	99
5.3.2	实验设备	100
5.3.3	实验任务与过程	101
5.3.4	数据采集	102
5.4	数据分析	102
5.4.1	预处理	102

5.4.2 EOG 和 EEG 特征抽取	103
5.5 实验结果与讨论	104
5.5.1 行为数据评估	104
5.5.2 基于 EEG 的 TF 分析与分类	108
5.6 本章小结	112
 第 6 章 结论与展望	 113
6.1 工作总结	113
6.2 进一步的工作展望	115
 参考文献	 117
 后记	 138