

基于颜色和形状任务的脑区功能连接的研究*

邢桂阳, 董云云, 邓红霞, 李海芳[†]

(太原理工大学 计算机科学与技术学院, 太原 030024)

摘要: 针对视感知中的特征捆绑问题主要通过以下三个方面进行研究:首先,构建静息态和任务态的脑网络,利用堆结构贪婪算法进行模块划分;其次,计算视觉脑区之间的 Z 值;再次,计算视觉脑区之间的连接度。实验证明了视觉信息加工的两条通路、脑网络动态平衡特性以及参与绑定的重要脑区。研究视觉特征捆绑认知过程,有助于计算机视觉建模,为提高图像识别技术奠定基础。

关键词: 脑网络; 模块划分; Z 值; 连接度; 特征捆绑

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)04-1276-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.078

Research of function connection of brain based on color and shape

XING Gui-yang, DONG Yun-yun, DENG Hong-xia, LI Hai-fang[†]

(College of Computer Science & Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to research feature binding of visual perception, this paper used three different methods as follows. Firstly, constructed brain networks in resting state and tasking state, and divided them into some modules by use of CNM. Secondly, computed Z values between visual regions. Thirdly, computed the degrees of connection between different visual brain regions. Experiments confirm the two pathways of visual information processing, dynamic equilibrium characteristics of brain network and the important brain areas of visual feature binding. By means of studying cognitive processes of visual feature binding, these will help contribute to computer visual modeling process and improve the technology of image recognition.

Key words: brain network; module division; Z values; degree of connection; feature binding

0 引言

近年来,功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)在现代科学尤其是认知科学领域得到了广泛的应用,在精确定位脑功能区、发现脑认知网络、区别正常人和病人脑网络的工作中起到了无可替代作用。早期的fMRI研究多在任务状态下进行,主要显示任务相关脑区的激活范围和激活强度的变化,其中以手运动任务开展最为广泛。后来的研究发现,即使在清醒闭眼的静息状态下,人脑也存在功能脑网络^[1-5]。目前研究证实不仅运动功能存在相应的脑网络,视觉、听觉、语言等均存在各自的脑功能网络^[6-8]。最近有一些研究用图论的方法去探索哺乳动物^[9]和健康人的功能脑网络模块结构^[10,11]。另外,有许多形式的层次聚类分析陆续地应用于人脑静息态的fMRI数据中^[12,13]。之后,He等人^[14]用fMRI数据研究人脑网络的社区结构,并得出人脑结构性网络具有模块结构的实验结论。本课题组王艳群等人^[15]利用fMRI数据研究脑网络社团划分,也得出了人脑网络具有模块性的结论。

本文重点比较和分析了视觉绑定任务态和静息态下脑功能网络的属性特征。通过对fMRI图像提取相关脑区的时间序列,利用皮尔逊偏相关求得相关脑区的相关系数,构建静息态

和任务态下的功能脑网络;利用图论中复杂网络的属性相关分析方法分析了静息态和任务态下脑功能网络,比较了视觉捆绑任务下和静息态下脑功能网络的连接的区别,通过脑网络模块划分的方法,对视觉任务态下颜色和形状的绑定机制进行研究。

1 数据采集及分析方法

1.1 fMRI 数据采集

实验对象为28名健康志愿者(其中女性15名,男性13名,被试年龄范围为17~51岁)和9名在校大学生志愿者(5名男生,4名女生,平均年龄为22岁,均为右利手),进行了行为学实验和fMRI实验。受试对象无色盲,确认双眼无器质性病变,视力正常或矫正后正常,且经询问无其他特殊疾病及精神异常史,体内无金属异物残留后入选组。所有受试者自愿参加实验,并签署相关知情同意书。

本文中设计的实验,刺激材料为规则的几何图形,每个图形包括两种基本的特征——颜色特征和形状特征。颜色特征有三种,包括红、绿、蓝;形状特征也有三种,包括圆形、方形和三角形。本实验设计任务分为四种,每种任务为两幅对比的图像:任务1为颜色相同形状相同;任务2为颜色相同形状不同;任务3为形状相同无颜色;任务4为形状相同颜色不同。实验设计的四种任务的对比图像示例如图1所示。

收稿日期: 2013-05-14; 修回日期: 2013-06-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61070077,61170136);山西省自然科学基金资助项目(2011011015-4)

作者简介: 邢桂阳(1987-),男,山东泗水人,硕士,主要研究方向为智能信息处理;董云云(1988-),女,山西人,硕士,主要研究方向为智能信息处理;邓红霞(1976-),女,山西人,讲师,博士研究生,主要研究方向为智能信息处理、图像识别;李海芳(1963-),女(通信作者),山西人,教授,博导,主要研究方向为智能信息处理、脑认知模型与脑机接口技术、视听觉信息计算和情感计算(sxlhf123@163.com)。

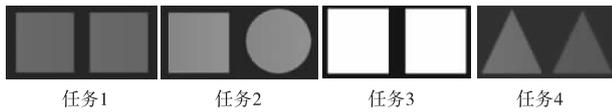


图 1 实验任务

1.2 构建时间序列的脑功能网络

为了从整体上来研究视觉绑定任务下大脑的工作机制以及静息状态下脑功能网络的对比,首先利用 AAL (anatomical automatic labeling)^[16] 模板,将脑区定义为 90 个节点(左、右半球分别为 45 个)。

由于脑区时间序列同步性可以表示脑区间的功能关系,所以需要求出每个脑区中所有体素的平均时间序列,利用多元线性回归分析,去除协变量。最后计算两个脑区之间的皮尔逊偏相关系数。最终获得 90 × 90 时间序列相关矩阵 R 。

对 9 名视觉任务态被试和 28 名静息态被试,均按照以上的方法求得每一名被试的时间序列相关矩阵,最后对任务态和静息态的结果均计算平均值,获得任务态和静息态下的 90 × 90 的脑功能网络。由此从整体上来研究视觉绑定任务态下的脑功能机制,为脑功能网络模块划分奠定了基础。

1.3 脑功能网络模块划分算法

实现脑功能网络模块划分的算法,目前有很多种,主要有基于优化的方法和启发式方法两大类。基于优化的方法主要有:谱方法^[17]、Kernighan-Lin 算法^[18]和快速 Newman 算法(FN 算法)^[19]。FN 算法是 Newman 在 2004 年提出的一种基于模块度^[20](又称 Q 函数)优化的方法,但是这种方法的一个缺点就是对于大规模的复杂网络而言不适用。后来,Clautet 等人^[21]利用堆结构对 FN 算法进行改进,算法复杂度已接近于线性,并且适用于大规模复杂网络。因此,采用基于堆结构的模块度的贪婪算法(CNM)进行模块划分。一般来说,模块划分的结果具有模块内的节点联系紧密而模块间的节点联系较为稀疏的特点。

对于网络划分的好坏,使用模块度(modularity)来衡量。模块度的定义为

$$Q = \frac{1}{2m} \left(\sum_r e_{rr} - \frac{a_r^2}{2m} \right) \quad (1)$$

其中: e_{rr} 表示模块 r 内部边的条数; a_r 为

$$a_r = \sum_s e_{rs} \quad (2)$$

表示模块 r 内部节点发出的边; $2m$ 为

$$2m = \sum_r a_r = \sum_{rs} e_{rs} \quad (3)$$

CNM 算法要用到三种数据结构:模块度增量矩阵 ΔQ_{ij} 、最大堆 H 、普通向量 \mathbf{a} 。具体算法如下:

a) 数据初始化。模块度增量矩阵定义为

$$\Delta Q_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2m} + \frac{k_i k_j}{(2m)^2} & \text{社团 } i \text{ 与 } j \text{ 相连} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中: k_i 为社团 i 的度, m 为网络的总边数,并且

$$a_i = \frac{k_i}{2m} \quad (5)$$

计算初始化矩阵 ΔQ_{ij} 和向量 \mathbf{a}_i ,用最大堆 H 保存矩阵 ΔQ 的每一行的最大元素值。

b) 选择社团 i 和社团 j 合并。从最大堆 H 里选择一个最大的 ΔQ_{ij} ,合并相应的社团 i 和 j ,合并后社团标记为 j ,并且更新模块度增量矩阵 ΔQ_{ij} 、最大堆 H 、辅助向量 \mathbf{a}_i 。

c) 重复执行步骤 b),直到整个 Q 值不发生变化,此时算法终止,得到最大 Q 值。

1.4 Fisher's Z 变换

连接系数表征脑功能网络中两个节点的功能连接情况,能够由此来研究网络连接的稀疏情况。

由于研究的目的是视觉绑定任务态下的脑功能机制,需要从与视觉有关的脑区上进行分析,以研究具体的工作机制。与视觉有关的脑区如下:距状裂周围皮层、楔叶、舌回、枕上回、枕中回、枕下回、梭状回、顶上回、颞下回。根据上一节计算得到的 90 个脑区的相关系数矩阵,可得到任务态下和静息态下与视觉有关脑区的相关系数的矩阵,如图 2 所示。可以看出(a)中深蓝色(见电子版)的较多而(b)中深蓝色较少,因此可知静息态下脑功能网络较任务态而言连接相对稀疏。

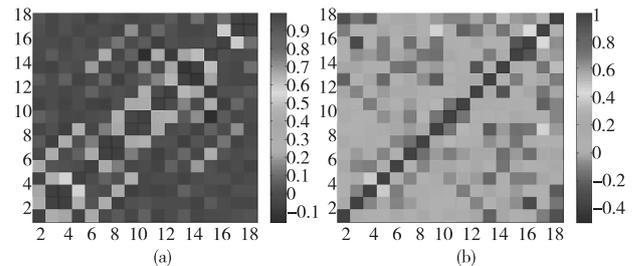


图 2 脑功能网络二值矩阵

图中纵横坐标为与视觉有关的脑区。(a)表示静息态下与视觉有关的脑区的相关系数的彩色图示,(b)表示任务态下与视觉有关的脑区的相关系数的彩色图示,颜色从深蓝一直到深红,表示相关系数等级值。

为了进一步证实上述的结论,使得连接系数的数据分布符合正态分布,需要将系数作 Z 变换, Z 值越大,表示两节点之间连接越紧密。具体公式为

$$Z = \frac{1}{2} \log \frac{1+r}{1-r} \quad (6)$$

其中: r 为相关系数(coefficient of correlation)。

1.5 连接度

连接度表示脑网络中某一个节点具有的有效功能连接个数,反映了该节点在网络中的影响度。因此用连接度来表示节点在网络中的作用并且可以表征网络的动态变化。根据获得的相关系数,来计算连接度(connectivity degree)。具体公式为

$$\eta_{ij} = e^{-\xi d_{ij}} \quad (7)$$

其中: ξ 为常数,表征着两个节点之间的连接强度随着两点之间的距离改变程度,其值通常取为 $2^{[22]}$; d_{ij} 表示两个节点之间的距离,具体公式为

$$d_{ij} = (1 - r_{ij}) / (1 + r_{ij}) \quad (8)$$

其中: r_{ij} 为两个节点之间的相关系数。对于脑网络中的任何一个节点来说,该节点与全脑网络中其他节点连接度的总和即为此节点的总连接度,其公式表示为

$$\Gamma_i = \sum_{j=1}^n \eta_{ij} \quad (9)$$

对其进行标准化,公式为

$$\Gamma_i = \frac{\Gamma_i}{\sum_{j=1}^n \Gamma_j} \quad (10)$$

2 实验结果

2.1 静息态和任务态脑功能网络模块划分结果

静息态脑功能网络被划分成六个模块,与视觉有关的脑区

被划分在了第五个模块当中,如图 3(a)所示。包括的脑区有:距状裂周围皮层、楔叶、舌回、枕上回、枕中回、枕下回、梭状回、顶上回、颞下回。在 AAL 模板中的编号分别为 43~56、59、60、89、90。顶叶主要负责参与颜色和形状的捆绑,而梭状回主要负责颜色和形状的处理。

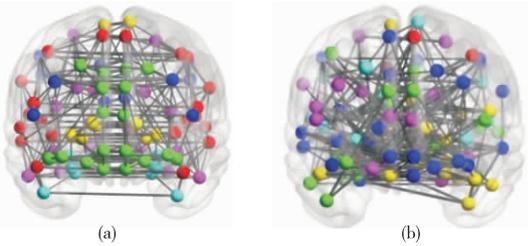


图 3 静息态和任务态全脑功能连接

图 3 中(a)为静息态模块划分结果,划分了六个模块;(b)为任务态模块划分结果,划分了七个模块。线越粗表示两个脑区之间相关性越强。相同的颜色的节点表示在同一个模块中。任务态脑功能网络划分成七个模块,与视觉有关的脑区被划分在了第二、三、四、五、六个模块当中,如图 3(b)所示。具体划分结果如表 1 所示。

表 1 静息态和任务态下视觉脑区模块划分结果

节点编号	脑区	静息态模块号	节点编号	脑区	任务态模块号
43	CAL. L	5	44	CAL. R	2
44	CAL. R	5	54	IOG. R	2
45	CUN. L	5	56	FFG. R	2
46	CUN. R	5	90	ITG. R	2
47	LING. L	5	52	MOG. R	3
48	LING. R	5	45	CUN. L	4
49	SOG. L	5	46	CUN. R	4
50	SOG. R	5	48	LING. R	4
51	MOG. L	5	49	SOG. L	5
52	MOG. R	5	50	SOG. R	5
53	IOG. L	5	53	IOG. L	5
54	IOG. R	5	59	SPG. L	5
55	FFG. L	5	60	SPG. R	5
56	FFG. R	5	43	CAL. L	6
59	SPG. L	5	47	LING. L	6
60	SPG. R	5	51	MOG. L	6
89	ITG. L	5	55	FFG. L	6
90	ITG. R	5	89	ITG. L	6

2.2 视觉脑区相关系数的 Z 值

静息态下 18 个脑区之间共 162 条边,其中经过 *t* 检验后,总共有 84 条边为正连接。当 $|Z| \geq 0.2$ 时,共有 23 条;当 $0.2 > |Z| \geq 0.15$ 时,共有 3 条;当 $0.15 > |Z| \geq 0.1$ 时,共有 6 条;当 $0.1 > |Z| \geq 0.05$ 时,共有 13 条,即当 $|Z| \geq 0.05$ 时,总共有 45 条,如图 4(a)所示。图中横坐标表示 18 个与视觉相关脑区之间功能连接边数,纵坐标表示 *z* 值。

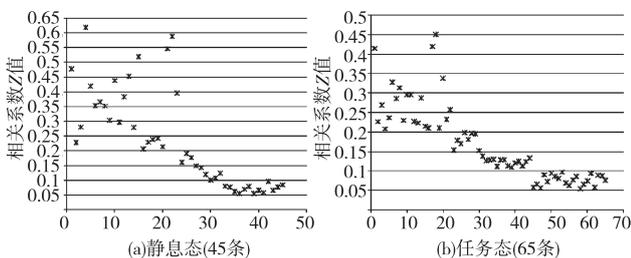


图 4 相关系数 Z 值对比

任务态下 18 个脑区之间共有 162 条边,其中经过 *t* 检验

后,总共有 86 条边为正连接。当 $|Z| \geq 0.2$ 时,共有 22 条;当 $0.2 > |Z| \geq 0.15$ 时,共有 8 条;当 $0.15 > |Z| \geq 0.1$ 时,共有 14 条;当 $0.1 > |Z| \geq 0.05$ 时,共有 21 条,即当 $|Z| \geq 0.05$ 时,总共有 65 条,如图 4(b)所示。横纵坐标意义同图 4(a)。

2.3 视觉脑区的连接度

连接度是指脑网络中的其中一个节点具有的有效功能连接的个数,表示了该节点在网络中的重要程度。为了使用节点的连接度来衡量其在网络中的作用,并用来表示网络的动态变化,因此需要计算连接度来详细阐明颜色和形状绑定任务态相关脑网络的特性。

静息态下与视觉相关的脑区连接度,由大到小的排列顺序为:L. MOG 区、L. LING 区、R. FFG 区、L. SOG 区、L. IOG 区、R. CUN 区、R. SOG 区、L. CAL 区、L. CUN 区、R. LING 区、R. ITG 区、R. MOG 区、R. IOG 区、L. FFG 区、R. CAL 区、L. SPG 区、R. SPG 区、L. ITG 区。其中, L. MOG 区的连接度最大为 0.0621; L. LING 区次之,度为 0.0601。

任务态下与视觉相关的脑区的连接度,由大到小的排列顺序为:R. SPG 区、L. MOG 区、L. LING 区、R. MOG 区、R. CUN 区、R. SOG 区、L. SOG 区、L. IOG 区、L. CAL 区、R. IOG 区、L. CUN 区、R. ITG 区、L. SPG 区、L. FFG 区、R. CAL 区、R. LING 区、R. FFG 区、L. ITG 区。其中, R. SPG 区的连接度最大为 0.0684; L. MOG 区次之,度为 0.0653。两种状态下相关脑区连接度对比如图 5 所示。纵坐标表示连接度,横坐标表示脑区,浅色为静息态,深色为任务态。

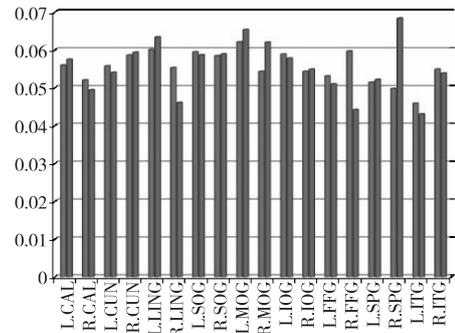


图 5 视觉有关脑区的连接度对比

3 讨论

3.1 静息态和任务态相关模块分析

在静息状态下,与视觉有关的脑区全部被划分在了第五个模块中。这也就表明功能相似的脑区在静息态下连接相对较为紧密,而功能不同的脑区在静息态下连接相对较为稀疏。这也就证实了不仅听觉、语言等存在各自脑功能网络,视觉也存在自己的脑功能网络^[6-8]。

在任务状态下,首先分析第二、第五、第六个模块。目前,有很多事实证实大脑有处理视觉信息的四个平行系统:司理视觉运动信息的 V5 位于颞叶中区(MT);司理视觉颜色信息的 V4 位于枕叶 18 区(梭状回);司理视觉形状信息的有两个,对动态形状起反应的 V3 也位于 18 区;对静态形状起反应的位于 V4 内。第二个模块中右侧大脑的距状裂周围皮层作为初级视觉皮层的 V1 区,主要功能是接收外部的信息,并把信息传递给高级视觉皮层;右半球枕下回司理颜色加工;右半球梭状回主要司理颜色信息和静态形状信息;右半球颞下回主要司

理高级视觉加工。第六个模块中的脑区分别为左半脑距状裂周围皮层、左半脑舌回、左半脑枕中回、左半脑梭状回、左半脑颞下回,其脑区的功能与第二个模块中左侧的相似。第五个模块包括左右半脑的枕上回、左半脑的枕下回、左右半脑的顶上回。由此可见,第二、六个模块可以证实与物体颜色和形状加工有关的腹侧通路,沿着大脑皮层的枕颞叶分布。由第五个模块可以证实与运动和空间位置特征加工有关的背侧通道,沿着枕顶叶分布。

3.2 视觉脑区的 Z 值分析

研究结果证实大脑在不执行任何与视觉有关的任务静息状态下也存在一个复杂的视觉相关的脑网络。

本文研究结果显示与视觉相关脑网络 18 个节点总共有 162 对功能连接,在静息态下,总共有 84 对正连接,而任务态下,总共有 86 对正连接。当取定最低阈值为 0.05 时,静息态下只有 45 对正连接,而任务状态下却有 65 对正连接。说明静息态下与视觉有关的脑网络连接较为稀疏,而任务态下与视觉有关的脑网络连接较为紧密。

本文研究结果进而证实了脑网络的动态平衡特性,即在静息态下以相对稀疏的连接方式保持执行任务的潜能。但是在执行与视觉相关的任务时,脑功能网络立即由疏松变为紧密状态,通过调用更多功能相似的脑区,加强它们之间的功能连接,逐步执行视觉任务的计划、启动、协作,实现颜色和形状的处理,并最终实现颜色和形状的绑定。

3.3 视觉脑区连接度的分析

研究结果显示,不论是在静息状态还是任务状态,左侧枕中回、左侧舌回连接度均较高,从静息态向任务态转变时,其排列顺序仅出现微妙变化(静息态左侧枕中回度最大,左侧舌回度其次,而任务态下分别排在 2、3 位),因此认为这两个节点是视觉相关脑网络中重要而稳定的节点。

视觉特征的捆绑是通过空间位置的注意来实现的,对同一位置的注意,能使该位置的视觉成分被捆绑起来。在特征捆绑双阶段理论中,物体的颜色和形状等表面特征的捆绑属于双阶段理论的第二个阶段,该阶段的捆绑需要注意的参与,而顶叶在该阶段起到关键作用。一些研究证明,顶叶与空间注意有关^[23-25]。在静息状态转换为任务状态时,左右侧的顶叶的连接度变大,这是因为在执行颜色和形状的绑定任务时,顶叶的作用就是参与颜色和形状的捆绑,因此需要汇集多个脑区传来的信息,并进行处理,因此顶叶的连接度在由静息态转换为任务态时,顶叶的连接度增大。

现在有大量的研究表明,梭状回主要司理颜色信息,并且过滤掉其他多余的信息,同时,一些静态的形状的处理也是由梭状回来处理的。而颞下回主要是司理形状信息的,而且过滤掉一些无用的信息,以便将形状信息传输到高级的视觉区域。如大脑损伤的研究发现猴的下颞叶皮层(GTI)的损伤或人的梭状回损伤(GF)将导致形状的认识障碍^[26,27],采用各种脑认知成像技术(MEG、PET、fMRI等)等多项研究表明,与形状知觉有关的脑区主要定位在颞下回^[28-30]。由于在颜色和形状绑定实验中,与静息态相比,其任务特定化,主要负责颜色和形状的处理,而且还负责把其他与任务无关的信息过滤,与其他脑区联系不再那么紧密,只与处理视觉信息的高级脑区相联系,最后把信息传递给更高级的脑区。因此,与静息态相比,任务态下梭状回和颞下回的连接度降低。

4 结束语

本文利用静息态和任务态下 fMRI 数据进行脑网络的构建,对于构建好的网络使用基于堆结构的模块划分算法进行模块划分。首先,对得到的模块进行分析得到视觉区域通过两条通路进行信息加工和传送:一条与物体的颜色和形状等特征加工有关的腹侧通路,沿着大脑的枕颞叶分布;一条与运动和空间位置特征加工有关的背侧通道,沿着大脑的枕顶叶分布。第二,由于本实验是与视觉有关的实验,因此,单独地对视觉区域进行研究,通过计算与视觉有关的 18 个脑区的相关系数的 Z 值,可以得到静息态下以相对稀疏的连接方式保持执行任务的潜能,而在任务态下脑功能网络立即由稀疏变为紧密的连接方式,因而印证了脑网络的动态平衡性。第三,通过计算与视觉有关脑区的连接度,发现顶叶在颜色和形状的捆绑中发挥着重要的作用,而梭状回和颞下回在颜色和形状的加工和处理中发挥着不可替代的作用。通过研究视觉特征捆绑的认知过程,推动视觉认知的计算机建模过程,为提高图像识别技术奠定了基础。

参考文献:

- [1] SONG J, DESPHANDE A S, MEIER T B, *et al.* Age-related differences in test-retest reliability in resting-state brain functional connectivity[J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(12):0049847.
- [2] YU Qing-bao, ALLEN E A, SUI Jing, *et al.* Brain connectivity networks in schizophrenia underlying resting state functional magnetic resonance imaging[J]. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 2012, 12(21):2415-2425.
- [3] LIANG Xia, WANG Jin-hui, YAN Chao-gan, *et al.* Effects of different correlation metrics and preprocessing factors on small-world brain functional networks: a resting-state functional MRI study[J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(3):0032766.
- [4] 张增强,周波,安宁豫,等. 静息态功能磁共振成像观察阿尔茨海默病患者大脑自发活动特点[J]. *中国神经科杂志*, 2012, 45(5):297-301.
- [5] SEO E H, LEE D Y, LEE J M, *et al.* Whole-brain functional networks in cognitively normal, mild cognitive impairment, and alzheimer's disease[J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(1):0053922.
- [6] 王小娟,杨剑锋. 视觉词汇加工的动态神经网络及其形成[J]. *心理科学进展*, 2013, 21(2):199-204.
- [7] 李晶,杨明,刘斌,等. 静息态功能磁共振成像观察正常人听觉皮层功能[J]. *中国医学影像技术*, 2012, 28(3):431-434.
- [8] YUAN Yi-xuan, JIANG Xi, ZHU Da-jiang, *et al.* Meta-analysis of functional roles of DICCCOLs[J]. *Neuroinform*, 2013, 11(1):47-63.
- [9] HILGETAG C C, BURNS G A P C, O'NEILL M A, *et al.* Anatomical connectivity defines the organization of clusters of cortical areas in the macaque monkey and the cat[J]. *Philos Trans on R Soc Lond B*, 2000, 355(1393):91-110.
- [10] FERRARINI L, VEER I M, BAERENDS E, *et al.* Hierarchical functional modularity in the resting-state human brain[J]. *Human Brain Mapping*, 2009, 30(7):2220-2231.
- [11] MEUNIER D, ACHARD S, MORCOM A, *et al.* Age-related changes in modular organization of human brain functional networks[J]. *Neuroimage*, 2009, 44(3):715-723.
- [12] CORDES D, HAUGHTON V, CAREW J D, *et al.* Hierarchical clustering to measure connectivity in fMRI resting-state data[J]. *Mag-*

- netic Resonance Imaging, 2002, 20(4): 305-317.
- [13] SALVADOR R, SUCKLING J, COLEMAN M, *et al.* Neurophysiological architecture of functional magnetic resonance images of human brain[J]. *Cerebral Cortex*, 2005, 15(9):1332-1342.
- [14] HE Yong, WANG Jin-hui, WANG Liang, *et al.* Uncovering intrinsic modular organization of Spontaneous brain activity in humans[J]. *PLOS ONE*, 2009, 4(4):0005226.
- [15] 王艳群,李海芳,郭浩,等. 静息态脑功能网络的社团结构研究[J]. *计算机应用*, 2012, 32(7):2044-2048.
- [16] TZOURIO-MAZOYER N, LANDEAU N, PAPANASSIOU D, *et al.* Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain[J]. *NeuroImage*, 2002, 15(1):273-289.
- [17] WHITE S, SMYTH P. A spectral clustering approach to finding communities in graphs[C]//Proc of the 5th SIAM International Conference on Data Mining. [S.l.]: SIAM, 2005: 76-84.
- [18] NEWMAN M E J. Detecting community structure in networks[J]. *European Physical Journal*, 2004, 38(2): 321-330.
- [19] NEWMAN M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 066133.
- [20] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 026113.
- [21] CLAUSET A, NEWMAN M E J, MOORE C, *et al.* Finding community structure in very large networks[J]. *Phys Rev E*, 2004, 70(6): 066111.
- [22] NAIR D G, PURCOTT K L, FUCHS A, *et al.* Cortical and cerebellar activity of the human brain during imagined and executed unimanual and bimanual action sequences: a function MRI study[J]. *Cognitive Brain Research*, 2003, 15(3):250-260.
- [23] HAXBY J V, GRADY C L, HORWITZ B, *et al.* Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1991, 88(5):1621-1625.
- [24] MAROIS R, CHUN M M, GORE J C. Neural correlates of the attentional blink[J]. *Neuron*, 2000, 28(1):299-308.
- [25] HUMPHREYS G W, CINEL C, WOLFE J, *et al.* Fractionating the binding process: neuropsychological evidence distinguishing binding of form binding of surface features[J]. *Vision Research*, 2000, 40(10):1569-1596.
- [26] WALSH V, BUFFER S R. The effects of visual cortex lesions on the perception of rotated shapes[J]. *Behavior Brain Research*, 1996, 76(1):127-142.
- [27] MERIGAN W, FREEMAN A, MEYERS S P. Parallel processing streams in human visual cortex[J]. *NeuroReport*, 1997, 8(18): 3985-3991.
- [28] KRAUT M, HART J J R, SOHER B J, *et al.* Object shape processing in the visual system evaluated using functional MRI[J]. *Neurology*, 1997, 48(5):1416-1420.
- [29] KOURTZI Z, KANWISHER N. Cortical regions involved in perceiving object shape[J]. *Neuroscience*, 2000, 20(9): 3310-3318.
- [30] OKUSA T, KAKGI R, OSAKA N. Cortical activity related to cue-invariant shape perception in humans[J]. *Neuroscience*, 2000, 98(4):615-624.

(上接第1266页)

表1 划痕定量测量

测量对象及方法	长度	宽度	长度误差	宽度误差
标准	1220	18	0	0
断续划痕	1140	20	80	2
膨胀方法	1215	48	5	30
本文方法	1215	20	5	2

由表1可知,若不将划痕断续处进行连接而直接测量其长度,势必导致划痕长度的计算出现较大偏差,影响光学元件的分类。因图6(a)中的划痕贯穿整幅图像,故用膨胀方法连接后的划痕长度并无太大误差,但宽度却加大很多,严重偏离了划痕的实际宽度;本文方法能真实地反映出划痕的长度,且所连边界光滑清晰,由于是单像素相连,故并未对划痕整体宽度的计算产生干扰,从而保证了定量测量的准确性。因人工测量主要是通过人工目视经验判断,而本文方法是根据划痕轮廓的最小外接矩形特征参数进行计算,相比较而言,后者的结果更稳定。

5 结束语

针对光学图像中因划痕断续而导致其长度无法准确测量的问题,本文提出了一种基于斜率控制的不连续划痕连接方法。该方法可有效避免边界变形,降低误连接概率,得到完整连续的目标区域。同时,对断点间距较大的划痕,能取得比常用断点连接方法更好的效果。其单像素的连接方式,保证了划痕的原始宽度,为后续划痕特征信息的精确测量提供了保障。除光学图像外,本文所提出的方法对其他涉及到断点连接的图像也具有较好的处理效果。

参考文献:

- [1] 黄雪莲,胡鹏,白轶多. 一种改进的等高线断点连接方法[J]. *测绘科学*, 2006, 31(1): 111-114.
- [2] 潘永强,刘鹏. 光学元件表面划痕的可视化检测[J]. *西安工业大学学报*, 2012, 32(6): 447-450.
- [3] 陆春华. 基于机器视觉的大口径精密表面疵病检测系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [4] TIAO Hong-jiu, LIU Jian. Remote sense image edge detection based on small scale mathematical morphology [J]. *Journal of WUT*, 2001, 23(4): 19-22.
- [5] DEBAYLE J, PINOLI J C. Multiscale image filtering and segmentation by means of adaptive neighborhood mathematical morphology [J]. *Image Processing*, 2005, 3(11): 537-540.
- [6] 张南. 图像分析仪系统中几个关键技术的研究[D]. 成都:四川大学, 2005.
- [7] 孙继平,吴冰,刘晓阳. 基于膨胀/腐蚀运算的神经网络图像预处理方法及其应用研究[J]. *计算机学报*, 2005, 28(6): 985-990.
- [8] 罗以宁,李毅,杨凯. 金相图像分析中一种改进的断点连接方法[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2002, 39(6): 1027-1031.
- [9] 高岩,王博亮. 改进的区域生长算法及其在肾实质自动分割中的应用[J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2012, 51(4): 701-703.
- [10] 陆剑锋,林海,潘志庚. 自适应区域生长算法在医学图像分割中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(10): 2168-2169.
- [11] 付英杰,张剑,邹翎,等. 基于改进水平集和区域生长的轮廓提取方法[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(7): 2770-2772.
- [12] 谭洪波,侯志强,刘荣. 基于人类视觉模型的区域生长图像分割[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(9): 1352-1356.