

一种用于人工视觉弥补的计算成像模型及其评价

李若楠 张旭东

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 本文基于正在起步的人工视觉技术,在人工视觉成像模型研究以及模拟评价实验开展的基础上,提出一种基于显著性局部特征生成的像素化成像模型,并设计主观评价打分模拟实验来考察这一模型的性能。实验结果初步证实,这一模型能够向受试者优先呈现原始图像中的特征显著区域,因而使受试者主观感受到更加丰富的视觉信息。从而,该模型能够为这一新兴领域的发展提供参考。

关键词 人工视觉 像素化视觉 显著性特征 主观评价实验

中图分类号: TP391.41 R318.18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)10-1480-07

A Computational Imaging Model and Experimental Assessment for Artificial Visual Prosthesis

LI Ruo-nan, ZHANG Xu-dong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The newly risen research of artificial visual prosthesis is summarized. Based on the research on the imaging model of the visual prosthesis as well as the simulated experiment, a novel imaging model based on the selection of local prominent features is proposed, and a mean-option-score-based subjective assessment is designed to evaluate the performance of the model. The results of the experiment reveal that the imaging scheme can accentuate the areas with prominent features in the original image, so as to give observers a subjective perception of rich visual information. Thus, the model will provide a new approach for future research.

Keywords visual prosthesis, pixelized vision, prominent feature, subjective assessment

1 引言

帮助视觉障碍者恢复或改善视觉是人类多年的梦想,也是科技工作者长期致力研究方向。其中,人工视觉弥补 (artificial visual prosthesis) 技术近年来取得了巨大的进展^[1,2]。视觉障碍一般是由视觉通路中的某些部位如视网膜受损而引发,人工视觉弥补的基本方法是在视觉神经通路中植入微型芯片,由其产生一定的电信号来刺激视觉神经细胞,引起其兴奋而产生神经动作电位并被传递至初级视皮层和高级视觉中枢,诱发人的视觉感受。

人工视觉弥补的成功,有赖于对视觉机制的深入认识,但是对视觉机制的了解还十分有限。因此,人工视觉弥补技术还无法精确全面地复现正常视觉,现实的目标是为视觉障碍者传递尽量丰富的信息^[3]。当前,人工视觉主要采用光幻视 (phosphene) 来传递视觉信息^[4,5]。光幻视是指在电刺激下,视觉障碍者体会到的不规则点阵状的视觉感受。事实上,光幻视可以视为图像中的像素阵列,通过施加某种模式的电刺激,视觉障碍者的视场中将产生特定的光点形象,从而获得视觉信息。这种利用光幻视点阵成像来传递图像信息的方法称为像素化视觉 (pixelized vision)^[6]。

收稿日期:2004-12-20;改回日期:2005-08-24

第一作者简介:李若楠(1981~),男。清华大学信息与通信工程专业硕士研究生。研究方向为图像与视觉计算、智能信号处理。

E-mail:liroonan00@mails.tsinghua.edu.cn

基于光幻视方法的初步研究结果表明,为能够有效地向视觉障碍者传达基本的视觉信息,应该在视觉神经系统中植入约 625“像素”的电极阵列^[6];同时,受电子工艺、生物材料及临床水平的限制,植入电极数量不能进一步增加。从而,如何使用数目严重不足的数百个像素实施成像,以表达尽量多的图像信息,是人工视觉弥补面临的重大挑战^[7,8]。另一方面,由于植入式原型人体实验的可靠性和生理兼容性尚未充分证实而不能全面展开,必须通过模拟手段,通过对正常视觉者实施主观评价实验,以评估所设计的成像模型性能^[9,10]。

在当前人工视觉成像系统设计及模拟评价实验的研究基础上,提出了一种基于显著性局部特征生成的像素化成像模型,并设计基于主观评价得分方法的模拟评价实验来分析这一模型的性能,以期为该领域的后续研究提供参考。

2 人工视觉成像和模拟评价研究现状

如何设计成像方案以最大限度地传递视觉信息,正在开始受到信号处理与图像图形学领域的极大关注。Boyle 等人最先指出,如何用数百个像点来对百万多像素的原始图像进行的取样表达是设计成像模型的关键^[7],同时考察了分辨率、灰度级、对比度、边缘、深度等一系列影响成像性能的基本因素。Boyle 定义了一个“重要性”量度来指示对原始图像进行预分割后各分割出区域对视觉障碍者的重要程度,这个“重要性”量度主要考虑已分割区域的对比度、尺寸、形状、位置及前景/背景属性,但没有给出该量度与像素化过程的关系。Dowling 等人相继提出,对原始图像的分析应该着力于给出那些能增进视觉障碍者“灵活运动”能力的图像目标^[8],但尚未完成对这一概念的具体实现。

自人工视觉弥补研究工作开展之始,模拟实验就独立于植入原型实验自成一体系展开。Cha 和 Normann 早期通过模拟实验考察了人工视觉弥补所必需的光幻视像素阵列的属性^[6]。Boyle 等人也通过由正常视觉受试者观察低分辨率点阵来尝试评估其视觉性能^[7]。文献[9]、[10]报道了 Hayes 和 Humayun 等人最新的人工视觉弥补模拟实验现状。前者,受试者使用头戴式显示器接受测试,成像使用简单的方形及经过 Gaussian 滤波的阵列;后者,受试者被要求从普通计算机显示屏上直接辨认一些“像

素化”的人脸图像。Fu、Cai 等人最近则在国内首先实现了低分辨率条件下阅读性能的模拟测试^[11,12]。如前所述,模拟实验源于人体实验受限;既有的视觉生理心理学证据则已指出,正常视觉者和视觉障碍者在视感觉和认知方面存在具有共性的高层视觉行为,为模拟实验提供了可行性依据。

3 基于局部显著性特征生成的像素化成像模型

研究结果显示,原始图像自身存在一些视觉机构感兴趣的局部结构特征,它们无需经过分类、抽取、识别等高层视觉行为,即可对人眼产生“吸引”^[13]。这些吸引性能明显的局部区域是“显著”区,其对眼睛的“激励”给人以该区域富含视觉信息的感受。一方面,虽然“显著区”的结构形式各异,但都能为视觉感知所注意;另一方面,视觉感受单元之间存在“侧抑制”作用而对激励信号存在具有一定空间分布“感受野”^[14]。基于此,一个基于局部显著性特征生成的像素化成像模型框架如图 1 所示。

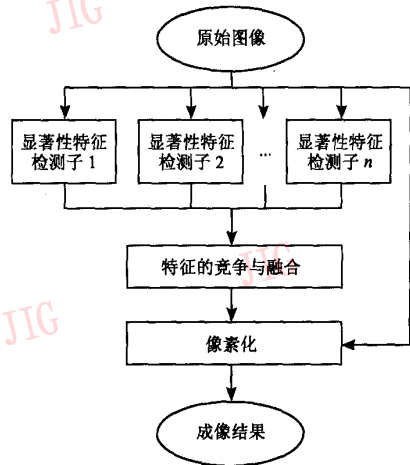


图 1 基于局部显著性特征生成的像素化成像模型框架

Fig. 1 Framework of the pixelization model based on local prominence detection

这个模型对输入原始图像的处理流程包括:

- (1) 使用若干显著性特征检测子提取出原始图像的各种局部显著性结构映射;
- (2) 对每一映射实施“竞争”以重现视觉感受野的增强与抑制作用,然后对所有特征映射进行“融

合”以获得最终的显著性映射；

(3)以最终特征映射为依据,对原始图像实施多分辨率化而亚采样至数百个像素,显著性特征较强的区域给予较细的分辨率,反之给予较粗的分辨率。通过这个成像过程,主观上富含视觉信息的强显著性区域被优先呈现给受试者,从而达到传递尽量多视觉信息的效果。

3.1 局部显著性特征检测子

文献[13]研究了多种基本的图像局部特征,包括对称性、小波变换系数、边缘密度、熵、DCT系数、对比度等。该文献通过视线追踪实验指出,高对比度区域、对称性突出区域和高边缘密度区域能够有效地反映视觉敏感区域。其他研究还指出,方向性差异也是吸引视线的重要因素^[15]。在本模型中,选用这4项作为局部显著性特征。由于模型的可扩展性,随着研究的深入,可以有更多的特征被纳入进来。

首先需要获得对比度显著性映射。一个局部区域相对于周边区域的对比度,可以用所谓 Michaelson 对比度^[16]来给出定量描述。像素位置 (x, y) 的 Michaelson 对比度为

$$C(x, y) = \frac{|L_m - L_M|}{L_m + L_M} \quad (1)$$

其中, L_m 为 (x, y) 的一个 7×7 领域的灰度均值, L_M 则为全图像灰度均值。

其次需要获得边缘密度显著性映射。边缘密度描述了原始图像单位区域内有效边缘的强度。首先需要选用合适的边缘提取方法获得有意义的边缘,然后分别计算各区域内的边缘强度。一个能有效检测重要边缘并抑制噪声,且对边缘精确定位的算子是 Canny 算子。给出一个 Gaussian 滤波器 G ,用下式估计局部边缘的单位法向量

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla(G \otimes I)}{\|\nabla(G \otimes I)\|} \quad (2)$$

边缘所在的位置满足

$$\frac{\partial^2}{\partial n^2} G \otimes I = 0 \quad (3)$$

边缘的强度就等于式(2)的分母。对检测的结果取阈值以去除微弱响应,并进行边缘综合得到有意义的边缘。

然后需要获得方向性差异显著性映射。所谓方向性差异可以用图 2(a)示例。在这幅具有纹理属性的原始图像中,大部分基元接近水平指向,而有 4

个基元与之相异,因此以这 4 个基元为中心的区域显示出与周围的方向性差异。当观看这幅图像时,视线将会受到 4 个与周围相异的基元的吸引,因此,这些方向性与周边相异的区域属于感兴趣的显著性特征区域。

选取的方向性差异检测算子使用 2 维 Gabor 滤波器

$$Ga(x, y) = \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\} \cos(2\pi f(x\cos\theta + y\sin\theta)) \quad (4)$$

用适当中心频率的 Gabor 滤波器,方向角 θ 取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个值对图 2(a)实施检测,结果如图 2(b)~(e)所示,在所关心的 4 个局部区域内,响应效果与周围总是不同。综合 4 幅响应结果,可以得到图 2(f)所示的方向性差异显著性映射,在关心的 4 个局部区域内的高亮表示其与周围有显著的方向性差异。

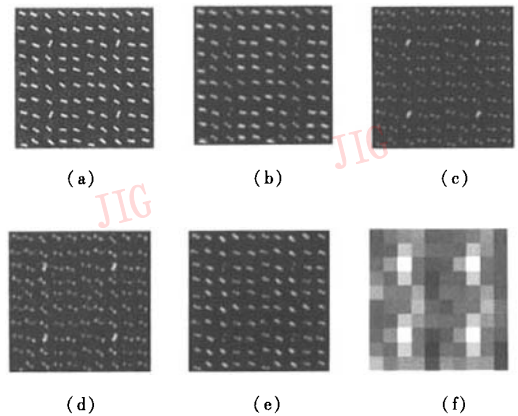


图 2 方向性差异示例及 Gabor 滤波器检测结果

Fig. 2 An illustration to orientation distinction and the detection result by Gabor filter

最后需要获得对称性显著性映射。在文献[17]的基础上,定义像素位置 $(x + u, y + v)$ 和 $(x - u, y - v)$ 对中心 (x, y) 的对称性贡献为

$$S_{x,y}(u, v) = 1 - \left| \frac{p_n(x + u, y + v) + p_n(x - u, y - v)}{\|p_n(x + u, y + v) + p_n(x - u, y - v)\|} \cdot \frac{q(u, v)}{\|q(u, v)\|} \right| \quad (5)$$

其中,用 $p_n(m, n)$ 表示在原始图像 (m, n) 处的归一化灰度梯度向量,而 $q(u, v)$ 表示的是连接 $(x + u, y + v)$ 和 $(x - u, y - v)$ 两点的方向矢量。点 (x, y) 处的最终对称性量度为

$$S(x, y) = \sum_u \sum_v \|p(x + u, y + v)\| \cdot$$

$$\|p(x-u, y-v)\| \cdot S_{x,y}(u, v) \quad (6)$$

通过上述诸显著性特征检测子对原始图像的作用,可分别获得原始图像的对比度、边缘密度、方向性差异和对称性特征的显著性映射。

3.2 特征映射的竞争与融合

在使用上述诸检测子对原始图像实施作用时,图像中非均匀灰度区总会有响应,因此整个显著性映射中会呈现出强、弱响应及散布的噪声状响应。视觉系统的感兴趣区是有限的,人工视觉系统的成像分辨率是受限的,因此只有某些显著性集中且达到一定强度的区域才能视为真正有意义的特征显著区域。竞争步骤对聚集的显著性强的响应加以保留,对其他响应加以削弱以得到有限的显著区域。

将早期 Hartline 和 Rodieck 等人对“侧抑制”和“感受野”的建模^[14]和近期视觉生理心理学研究的结果^[18-21]予以提炼和归纳,视觉系统对特征激励的反应有如下特点:

- (1) 对大片的强度相近的刺激反应不明显;
- (2) 对一个在弱刺激簇拥之中的强刺激有增强反应;
- (3) 在这个强刺激周围的弱刺激将受到抑制而进一步削弱。

若在 $(0,0)$ 处和 t_0 时刻具有一个单位强度的特征激励,则在 (x,y) 处和 t 时刻感受到的增强反应可以表示为

$$r_1(x, y, t) = c_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) (1 + be^{-a(t-t_0)}) \quad (7)$$

在 (x,y) 处和 t 时刻感受到的抑制反应可以表示为

$$r_2(x, y, t) = -c_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right) (1 + be^{-a(t-t_0)}) \quad (8)$$

基于上述表示式,略去时间因素并将两式相加,即可得到综合的反应表示式

$$R(x, y) = c_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) - c_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (9)$$

使用这一模板与诸显著性特征映射进行卷积,即可近似地表征视觉系统对这些特征的增强和抑制效果,亦即特征的“竞争”效果,其中参数 $c_1, \sigma_1, c_2, \sigma_2$ 决定了“竞争”区域的形状和大小。

在基于主观实验的模拟人工视觉弥补中,还可以进一步用 Laplacian of Gaussian 模板

$$LoG(x, y) = \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

来对上式加以定性近似。该模板只有一个参数需要

调整,对基于主观模拟实验的成像简单易行。

上述“竞争”环节将生成若干有效的单特征映射,最终的特征映射是这些有效映射结果的融合。记通过第 n 种检测子作用并完成上述竞争步骤后 (x,y) 处的显著性映射为 $F_n(x,y)$,要将它们融合为统一的显著性映射 $F(x,y)$ 。在进一步的视觉生理心理证据产生之前,将各个 $F_n(x,y)$ 进行线性加权求和,即

$$F(x, y) = \sum_{n=1}^N w_n F_n(x, y) \quad (11)$$

$F(x,y)$ 作为成像模型前两步的生成结果,将用于指导对原始图像实施多分辨率化即亚采样的过程。权值 w_n 的确定取决于各种局部显著性结构对人眼的激励性能,恰当的权重需要通过实验反馈来获得。

3.3 像素化

在图像分割算法中,分裂合并算法的分裂步骤易于与以光幻视阵列为目标的成像模型相对应。分裂合并方法需要确定一个均匀性准则,如果图像中的某一方块不满足该准则,则将其再分为4个方块。常用的均匀性准则是灰度方差阈值准则,亦即如果某方块内灰度方差小于某一阈值,则认为其已经均匀。在人工视觉弥补的像素化过程中,将“均匀性”准则修正为显著性程度准则,亦即显著性低于某一阈值的方块认为无需再分,并将该方块视为一个光幻视像点,用该方块内的平均灰度代表该像点的成像结果,否则继续一分为四。这样,显著性强的方块区域将以更高的分辨率呈现给观察者。

在人工视觉成像模型使用区域分裂的像素化过程中,必须在算法的适应性和人工视觉弥补系统特有的约束之间取得折中。一方面,不可能实现高分辨率的像点,对于 256×256 原始图像,分裂为 16×16 或 8×8 的小块可与预计的像点数目限制取得一致;另一方面,原型实验显示,光幻视点在视场中的呈现形式是无规则的^[4,5],这给予我们相应的自由度来支配光幻视的区域、尺寸和形状,提供了多种分裂块并存的可能性。在更多研究结果产生之前,限制分裂为两种分辨率是既从现实出发,又能利用好显著性特征的选择。

4 主观模拟评价实验

为了检验上述成像模型的性能与效果,按照通行手段,请正常视觉者观看像素化结果,并对这些结

果进行打分的主观模拟评价实验。

4.1 单特征实验

首先实施的是单特征实验。其目的是,通过对对比度、边缘密度、方向性差异和对称性每一特征的逐个测试,考察它们在视觉感知机能方面所发挥的效果,并为特征融合式(11)的权系数选择提供依据。

为区别各特征对于不同场景类别所发挥的效果,将待成像的原始图像分为人脸、典型物体、室内场景和室外场景 4 个场景类别组,每一组包括 12 幅 256×256 灰度图像。对于每组的每幅图像,按照成像模型,分别提取对比度、边缘密度、方向性差异和对称性诸显著性特征,并完成特征的“竞争”;由于考察对象是单一特征,不实施“融合”步骤,而是将“竞争”之后的显著性映射直接作为像素化的准则,同时控制每一幅分裂后的结果尽量接近 400 个小块(像素)。这样,对每幅原始图像,得到反映了各个显著性特征的 4 幅成像结果,它们成为受试者测评的对象。

9 名高校本科生和研究生作为受试者参加了实验。受试者从计算机显示屏上直接用肉眼观察各个成像结果,并与原始图进行比照。受试者被要求对每一幅原始图像的各个成像结果按 1 至 5 分打分,高分代表了优秀的成像结果。受试者被告知,优秀的成像结果向观察者传达了更丰富的信息,其是否完整地重构了原始图像的细节则并不重要。此外,受试者被要求对每一组成像结果的打分合理分布到 1 至 5 之间,以避免由于受试者个人习惯不同带来的打分参差不齐。

表 1 给出了 4 种场景类型下,各特征成像结果的得分统计。不难看出,不同的局部特征标志着原始图像的不同局部属性,视觉系统对其的敏感程度不尽相同。突出高对比度区域的成像结果得分占优,表明对比度强烈的区域优先为视觉系统所关注。

表 1 单特征主观评分结果统计(均值 \pm 标准差)

Tab. 1 Statistics for single-feature subjective assessment (mean \pm standard deviation)

特征	对比度	边缘密度	方向性差异	对称性
人脸	2.77 \pm 0.42	3.02 \pm 0.51	2.12 \pm 0.22	2.51 \pm 0.24
典型物体	3.30 \pm 0.43	2.95 \pm 0.55	2.20 \pm 0.27	2.70 \pm 0.10
室内场景	2.95 \pm 0.21	2.56 \pm 0.25	2.12 \pm 0.15	0.41 \pm 0.17
室外场景	3.17 \pm 0.21	2.40 \pm 0.12	2.52 \pm 0.18	2.57 \pm 0.14

突出高边缘密度区域的成像结果得分紧随其后,验证了边缘在视觉信息理解方面的重要地位。方向性奇异区域和对称区域在前 3 组场景中效果一般,但在室外场景中比边缘密度大的区域更加突出。

为了定量考察不同的局部特征对成像的效果有无明显的区别,将反映 4 种局部特征的成像结果作为 4 个总体。将对每个成像结果的评分作为各总体样本,实施单因子方差分析,相应的零假设(四特征成像结果无明显区别)概率值如表 2 所示。在显著性水平 0.005 下,各组场景下的零假设均被拒绝,认为不同的局部显著性特征在视觉信息的传达功能上具有明显的差别。

表 2 单特征成像结果单因子方差分析结果

Tab. 2 Results of the analysis of variance for single-feature imaging

	场景类型			
	人脸	典型物体	室内场景	室外场景
零假设概率	3.8×10^{-3}	3.3×10^{-4}	4.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}

上述实验结果表明,在不同的场景类型下,不同的局部显著性特征对成像结果的影响效力不同,在视觉信息传达方面具有各自的独特属性,并受到场景类型的制约。从而证明了用若干局部特征检测子分别提取显著性特征的必要性。像素化之后各特征的得分比例,为特征融合步骤的权系数选取提供了依据。

4.2 完整模型实验

在本实验中,每幅原始图像首先使用灰度方差作为均匀性准则实施像素化产生一幅待测图,用于与经过模型的完整处理流程产生的成像结果对照。然后经过模型的完整处理流程、实施特征融合步骤产生两幅成像结果,其中一幅各特征显著性融合时取均值,即在式(11)中取诸加权系数 w_k 为 0.25;另一幅的权值依据上一实验的打分结果产生,即若第 k 个特征的平均得分为 S_k ,则第 k 个特征的加权系数为

$$w_k = \frac{S_k}{\sum_l S_l} \quad (12)$$

在本实验中,原始图像的选取、数量、分组方式和呈现界面均与上一实验没有区别。受试者也没有发生变化。受试者没有获得关于前一次实验结果的任何数据,也对本次实验的待测图像产生方式没有任何

了解。受试者被要求为每幅原始图像的 3 幅成像结果打分,其中必须包含一个 0 分、一个 1 分和一个 2 分,高分意味着成像结果传达了更丰富的信息。

由于每一组场景类型的总得分为固定的 36 分,考察每一种成像结果在总得分中所占的比例,人脸、典型物体、室内场景、室外场景的评分结果依次如图 3(a)~(d) 所示。其中白色表示按灰度方差准则实施像素化的得分比例,黑色表示特征平均像素化的得分比例,灰色则为按照上一实验结果进行特征加权后像素化的得分比例。不难看出,在任何一种场景类型中,依照显著性加权求和得到的特征映射实施像素化过程后,其得分比例均占优。

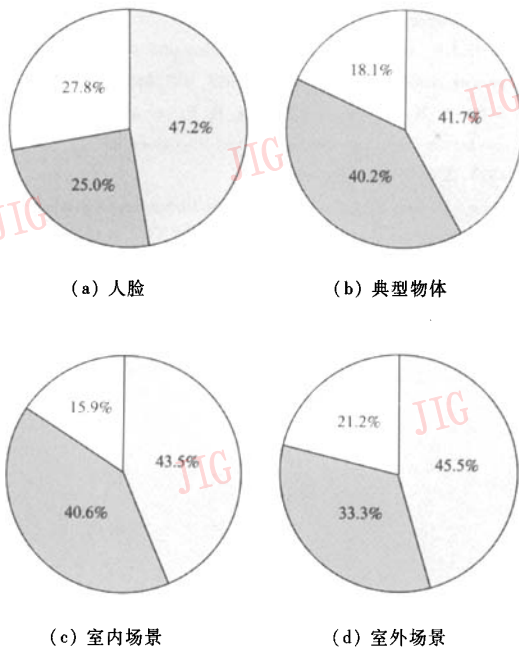


图 3 完整模型实验得分比例

Fig. 3 Score rates for experiments with complete model

进一步考察,依照显著性加权求和得到的特征映射实施像素化过程后,其所得到的 2 分、1 分和 0 分的频数。结果如图 4 所示,其中黑色柱、灰色柱和白色柱分别表示 2 分、1 分和 0 分的平均次数。可以看到,得 2 分的平均次数明显居多。这一结果表明,使用显著性特征作为区域分裂过程的准则,将能够为视觉系统提供主观上更丰富的视觉信息。用特征加权求和实施融合得到的成像结果比其他成像结果更为成功。

以上模拟主观评价实验在一定程度上验证了成

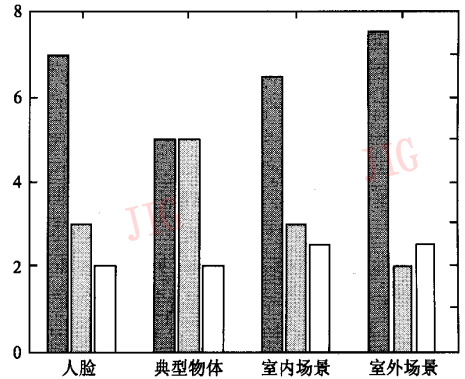


图 4 依显著性加权成像结果平均得分次数

Fig. 4 Average counts of scores for imaging with prominence weighting

像模型的合理性和有效性。

5 结 论

基于刚刚起步的人工视觉弥补成像研究及模拟评价实验的开展,提出了一种基于显著性局部特征生成的像素化成像模型,并设计基于主观评价得分的模拟评价实验来考察这一模型的性能。实验结果证实,这一模型能够向受试者优先呈现原始图像中的特征显著区域,从而使受试者主观感受到更加丰富的视觉信息。因此,本文对进一步开展人工视觉弥补成像技术的研究有参考价值。

致谢:本论文工作受到清华大学基础研究基金(JC2003063)资助,在此表示感谢!

参考文献 (References)

- 1 Dagnelie G, Massof R W. Toward an artificial eye [J]. IEEE Spectrum, 1996, 33(5): 21~29.
- 2 Weiland J D, Humayun M S. Past, present, and future of artificial vision [J]. Artificial Organs, 2003, 27(11): 961~962.
- 3 Maynard E M. Visual prostheses [J]. Annual Review of Biomedical Engineering, 2001, 3(1): 145~168.
- 4 Humayun M S, Weiland J D, Fujii G Y, et al. Visual perception in a blind subject with a chronic microelectronic retinal prosthesis [J]. Vision Research, 2003, 43(24): 2573~2581.
- 5 Dobbelle W H. Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex [J]. ASAIJ Journal, 2000, 46(1): 3~9.
- 6 Cha K, Horch K W, Normann R A. Mobility performance with a pixelized vision system [J]. Vision Research, 1992, 32(7): 1367~

- 1372.
- 7 Boyle J R, Maeder A J, Boles W W. Challenges in digital imaging for artificial human vision[A]. In: Proceedings of SPIE: Electronic Imaging 2001[C], San Jose CA, USA, 2001, **4299**:533 ~ 543.
 - 8 Dowling J, Maeder A J, Boles W W. Mobility enhancement and assessment for a visual prosthesis[A]. In: Proceedings of SPIE: Medical Imaging[C], San Jose CA, USA, 2004, **5369**:780 ~ 791.
 - 9 Hayes J S, Yin V T, Piyathaisere D, *et al.* Visually Guided Performance of Simple Tasks Using Simulated Prosthetic Vision[J]. Artificial Organs, 2003, **27**(11):1016 ~ 1028.
 - 10 Thompson R, Barnett G, Humayun M, *et al.* Facial recognition using simulated prosthetic pixelized vision[J]. Investigative Ophthalmology & Vision Science, 2003, **44**(11):5035 ~ 5042.
 - 11 Fu Lin, Cai Shan-qing, Zhang Hui, *et al.* Psychophysics of reading with a limited number of pixels: Towards the rehabilitation of reading ability with visual prosthesis[J]. Vision Research, 2006, **46**(8-9): 1292 ~ 1301.
 - 12 Cai Shan-qing, Fu Lin, Zhang Hui, *et al.* Prosthetic visual acuity in irregular phosphene arrays under two down-sampling schemes: a simulation study[A]. In: Proceedings of the 27th Annual Conference of IEEE/EMBS[C], Shanghai, China, 2005: 5223 ~ 5226.
 - 13 Privitera C M, Stark L W. Algorithms for defining visual region-of-interest: comparison with eye fixations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, **22**(9):970 ~ 981.
 - 14 Bai Jing. Simulation and Modelling of Physiological Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. [白净. 生理系统的仿真与建模[M]. 北京:清华大学出版社, 1994.]
 - 15 Itti L, Koch C. A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention[J]. Vision Research, 2000, **40**(10-12): 1489 ~ 1506.
 - 16 Mannan S K, Ruddock K H, Wooding D S. The relationship between the locations of spatial features and those of fixations made during visual examination of briefly presented images[J]. Spatial Vision, 1996, **10**(3): 165 ~ 188.
 - 17 Reissfeld D, Wolfson H, Yeshurun Y. Context free attentional operators: The generalized symmetry transform[J]. International Journal of Computer Vision, 1995, **14**(2): 119 ~ 130.
 - 18 Gilbert C D, Wiesel T N. Columnar specificity of intrinsic horizontal and corticocortical connections in cat visual cortex[J]. Journal of Neuroscience, 1989, **9**(7): 2432 ~ 2442.
 - 19 Levitt J B, Lund J S. Contrast dependence of contextual effects in primate visual cortex[J]. Nature, 1997, **387**(6628): 73 ~ 76.
 - 20 Sillito A M, Grieve K L, Jones H E, *et al.* Visual cortical mechanisms detecting focal orientation discontinuities[J]. Nature, 1995, **378**(6556): 492 ~ 496.
 - 21 Zenger B, Sagi D. Isolating excitatory and inhibitory nonlinear spatial interactions involved in contrast detection[J]. Vision Research, 1996, **36**(16): 2497 ~ 2513.