

中图法分类号: TP317.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-0909-10

论文索引信息: 邵晓芳, 叶灵伟, 刘朝军, 蔡明娟. 轮廓组织研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 909-918

## 轮廓组织研究进展

邵晓芳<sup>1)</sup>, 叶灵伟<sup>1)</sup>, 刘朝军<sup>1)</sup>, 蔡明娟<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(海军航空工程学院青岛分院, 青岛 266041) <sup>2)</sup>(海军装备研究院标准所, 上海 200236)

**摘要:** 轮廓提取是图像信息处理、机器视觉等领域中的经典难题之一。轮廓组织, 即基于感知组织的轮廓提取技术为解决这一经典难题注入了新的活力。从轮廓提取与感知组织之间结合点出发, 按照时间顺序对轮廓组织的研究现状进行比较, 全面总结并分析现有方法的特点和不足, 最后指出了进一步研究的发展方向。  
**关键词:** 轮廓组织; 感知组织; 格式塔定律; 轮廓提取; 感知

### Survey of research work on contour grouping

Shao Xiaofang<sup>1)</sup>, Ye Lingwei<sup>1)</sup>, Liu Chaojun<sup>1)</sup>, Cai Mingjuan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041 China)

<sup>2)</sup> (Aeronautical Institute of the Naval Equipment Academy, Shanghai 200236 China)

**Abstract:** Contour extraction is one of the typical problems in image processing and computer vision. Contour grouping, which is a contour extraction technique based on perceptual organization, shows promising development trend. This paper addresses the research on contour organization. First, it puts forward the relationship between contour extraction and perceptual organization. Second, a comprehensive summary on related research work is given. Then their characteristics and shortcomings are analyzed. At last, further research directions are suggested.

**Keywords:** contour grouping; perceptual organization; gestalt law; contour extraction; perceptual

## 0 引言

目标物体的轮廓是自然的感知单元, 在目标感知和识别中具有不可替代的作用, 因而轮廓提取在图像处理 and 机器视觉中是一个基本问题, 但也是一个经典难题。目标轮廓的多样性和不确定性使得建立目标轮廓模型和相应的轮廓提取算法成为一项非常有挑战性的任务。轮廓组织<sup>[1]</sup>将感知组织的原理和方法引入到解决轮廓提取问题当中, 为解决轮廓提取这一经典难题注入了新的活力: 首先, 基于感知组织规律进行轮廓提取, 一方面可以提高算法的运行效率, 极大缩小搜索空间, 另一方面可以提高输

出轮廓的完整性, 改善轮廓提取的效果; 其次, 感知组织研究涉及人类视觉在轮廓提取中的感知修复能力, 如何使机器视觉具备这种能力一直是个难题, 因而这项研究不仅有助于解决机器视觉中的难题, 同时也是对认知科学的有益探索。

轮廓组织的研究与感知组织的研究是一脉相承的, 始于 19 世纪 20 年代, 以 Max 提出 Gestalt 定律<sup>[1]</sup>为标志。最初的 Gestalt 研究学者们经过多年的研究和积累, 逐步完善了 Gestalt 理论, 并成立了 Gestalt 理论与应用研究协会 (GTA, <http://www.gestalttheory.net/>); 1998 年 7 月 26 日 IEEE Computer Society 在 California 的 Santa Barbara 举办了第一次感知组织的专题学术讨论会, 标志着感知组织的研

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-17

基金项目: 山东省博士基金项目 (2009BSB02003)。

第一作者简介: 邵晓芳 (1977—), 女, 讲师。2006 年获国防科技大学电路与系统专业博士学位, 主要研究方向为计算机视觉与智能信息处理。E-mail: xiaoxiao\_0731@163.com。

究掀起了第二次高潮。由于 Gestalt 定律与轮廓感知有很大关系,因而自其提出之日起就对轮廓提取方法产生了影响。随着研究工作的一步步深入, Gestalt 定律中的邻近律、相似律、连续律、对称律、封闭律等在轮廓组织过程中相继获得了应用。目前,轮廓组织已成为当前的研究热点之一。

## 1 轮廓组织

轮廓提取在图像信息处理和机器视觉中的作用可以由图 1(a)来说明。在图像理解和分析的过程中,边缘、亮度等底层特征必须形成有一定组织的结构,如轮廓、纹理等,才能使上层的信息处理得以完成。而感知组织是人类所具有的按照一定结构规

律,获得相对的聚类 and 结构的能力。感知组织在图像处理 and 机器视觉中的作用如(b)所示。(a)(b)两图都是图像信息处理和机器视觉的分层模型,其中(a)是从处理的目标和数据转化的角度来说明,而(b)则是从处理的方法的角度进行分析,综合(a)(b)可以看出感知组织与轮廓提取在中层视觉中的结合点。中层视觉的主要任务是对底层视觉中提取出的边缘、角点等局部特征进行进一步的处理,形成有一定组织规律的结构特征,轮廓特征正是这种结构特征之一,感知组织则是一种提取这种结构特征的方法,是图像处理和机器视觉中层处理的必要步骤。从图 1 中就可以看出,感知组织作为当前机器视觉领域的研究热点之一,与轮廓提取有很好的结合点。

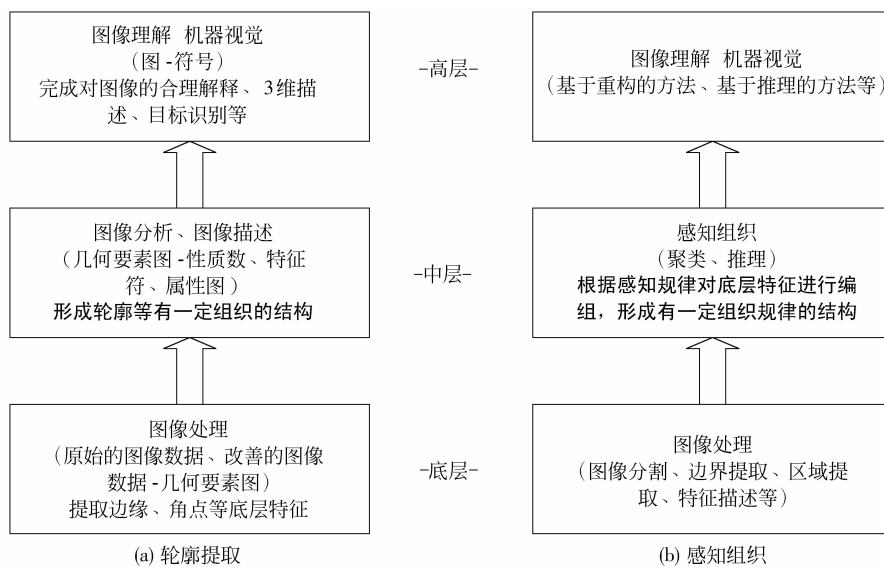


图 1 轮廓提取和感知组织在图像信息处理和机器视觉中的作用

Fig.1 The relationship between contour extraction and perceptual organization

感知组织与轮廓提取的结合便产生了轮廓组织这一轮廓提取方法,定义为:根据视觉感知规律,通过应用感知组织的原理和方法,将图像/图形中属于同一目标轮廓的边缘或线段组织到一起的一项轮廓提取技术。

## 2 相关研究现状及分析

### 2.1 分类标准

从感知组织角度来看,现有的轮廓提取方法都没有脱离感知组织规律,早期的轮廓提取方法也无

意识地应用了部分底层组织线索,因此,为便于全面描述,本文从感知组织的角度将现有的轮廓组织方法分为 4 类,分别进行概括,分类标准如表 1 所示。

### 2.2 相关研究现状

图 2 按照时间顺序简洁地描述了 Gestalt 定律提出之后轮廓组织方法的发展概况,图中各类方法的提出者和提出时间以其第一篇相关文献的第一作者和发表时间为准。总体说来,基于感知组织的轮廓提取方法的研究可以分为 3 个阶段:第 1 阶段的研究成果以 Montanari 提出的基于跟踪搜索的方法<sup>[2]</sup>为代表,在这一阶段感知组织还没有受到计算

机科学领域的学者们的重视,因而基于跟踪搜索的方法只是无意识地应用了 Gestalt 定律中的邻近律和相似律;第 2 阶段从 1987—2000 年,这一阶段 Lowe<sup>[3]</sup>指出了感知组织在机器视觉研究中的重要性,一些轮廓提取方法<sup>[4-7]</sup>被陆续提出;第 3 阶段从 2001 年开始,主要有 5 类方法得到进一步的研究和发展,即能量最小化的方法、基于特征显著性的方法、基于概率推理的方法、基于图论的方法、基于 CRF 的方法,2006 年以后主要是基于视觉生理模型的方法<sup>[8-12]</sup>得到进一步发展,基于轮廓显著性的方法<sup>[13]</sup>也是根据视觉感知特性设计的一种方法。

表 1 轮廓组织方法分类

Tab. 1 Classification of contour grouping methods

分类标准	应用的感知规律或组织线索	标示
加入局部组织线索	底层组织线索 邻近性/连续(平滑性)/共线性/相似性	类型 I
加入既具有全局特性又具有局部特性的组织线索	中层组织线索 对称性 平行性	类型 II
加入全局组织线索	凸性	类型 III
	封闭性	类型 IV

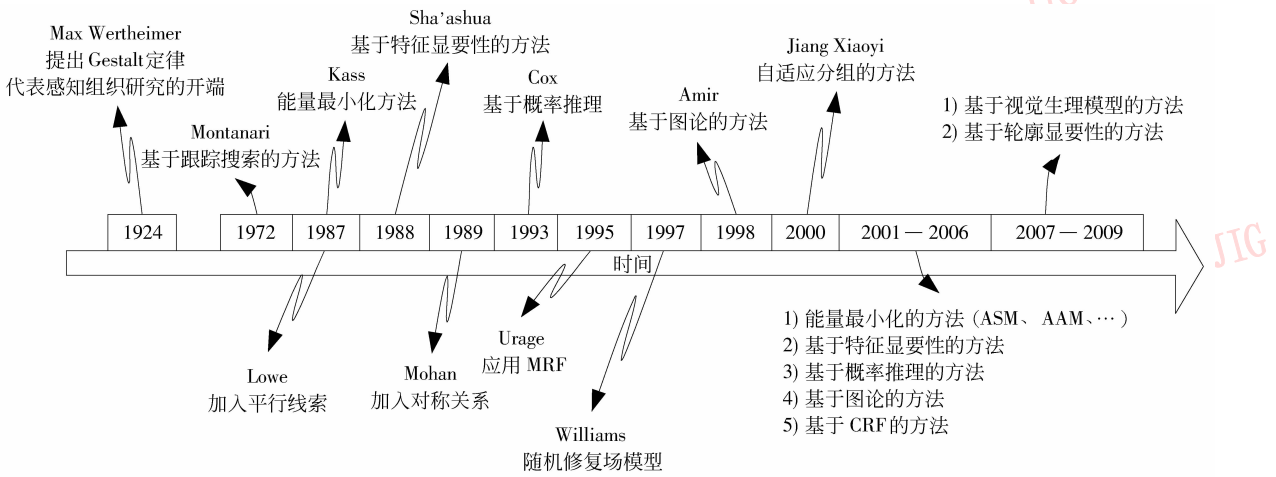


图 2 轮廓组织的发展概况

Fig. 2 The development chart of contour grouping

下面对各类方法进行具体描述。

2.2.1 类型 I

类型 I 的方法根据边缘之间的邻近性、平滑性、共线性和相似性等组织线索进行轮廓提取,主要包括基于跟踪搜索的方法<sup>[14-17]</sup>、基于概率推理的方法<sup>[18-21]</sup>、随机修复场模型<sup>[5]</sup>、基于 MRF (Markov random field) 的方法<sup>[6]</sup>、基于显著特征检测的方法<sup>[22-23]</sup>等。

基于跟踪搜索的方法一般首先进行图像分割提取边缘,然后通过曲线跟踪<sup>[14-16]</sup>、A\* 算法<sup>[2]</sup>或图搜索<sup>[24]</sup>提取轮廓,有些方法直接根据区域分割来提取轮廓<sup>[17]</sup>,有些方法还加入了曲线拟合<sup>[25]</sup>、边缘细化及连接<sup>[15-16]</sup>等步骤。

基于概率推理的方法中,Cox<sup>[18]</sup>是最早采用概率方法研究轮廓提取问题的,他采用多假设树 (MHT) 表示法,在贝叶斯理论框架下跟踪轮廓,算

法输出为对图像边缘的分割结果:一些边缘被标记构成轮廓,一些边缘被标记为噪声;Crevier<sup>[19]</sup>采用概率推理方法组织共线边缘,并扩展到这种方法使之可以处理曲线(圆弧);Elder<sup>[20]</sup>建立了轮廓提取的贝叶斯模型并在图像的统计规律方面做了大量工作;Tissainayagam<sup>[21]</sup>提出一种基于贝叶斯多假设跟踪的方法进行轮廓提取。这类方法的计算复杂度很高,却只是处理了一些底层线索,没有充分发挥概率推理的优势。

随机修复场模型<sup>[5]</sup>以图像平面的网格点上的“粒子”的随机行走作为边界形状的先验概率分布模型,“粒子”的随机移动体现 Gestalt 定律中的邻近性和连续性原则,运动轨迹的分布完全由所在点的位置和轮廓的方向决定,最后用两个格林函数的卷积计算修复场。这一模型没有引入任何限定条件,只是基于这样一个事实:一个“粒子”在连接两个边

界元素的轨迹上随机移动的概率可用两个矢量卷积的乘积来计算。但是经过复杂的计算,只能得到估计的修复区域,无法直接得到边界。Mahamud<sup>[26]</sup>类似随机修复场模型计算边缘之间被同一轮廓连接的转移概率,局部线索主要应用连续律,通过计算边缘之间转移概率矩阵的最大特征值对应的特征矢量计算与轮廓封闭性有关的显要性测度;Williams<sup>[27]</sup>以随机修复场模型为基础,将轮廓的分布定义为一个随机过程,通过神经网络实现轮廓增强过程,神经网络的输入与大脑 V1 区的外膝体细胞的输入一致。

基于 MRF (Markov random field) 的方法中,Urage<sup>[6]</sup>最早采用 MRF 进行轮廓提取,但只是采用了邻近和相似等底层线索。

基于特征显要性的方法根据边缘的连续性和长度计算局部特征的显要性测度,根据显要性测度增强轮廓上的边缘点,有些方法还加入了多尺度平滑准则<sup>[4,28]</sup>,将平滑性与尺度结合。Ullman 最先提出了一种称为显要性网络 (saliency network) 的算法,该算法采用迭代式神经网络计算图像边缘的显要性测度,显要性越强的边缘点组成轮廓的概率越大;Guy 和 Medioni 提出一种张量投票算法,该算法用张量表示图像数据,以张量之间非线性投票的方式实现数据之间的信息传递,增强轮廓上的边缘点的显要性测度;Toshiro 采用自适应松弛标记技术计算图像边缘点的显要性测度,并通过并行神经网络算法实现。

类型 I 的方法中,以张量投票方法比较突出,其主要思想是:曲线和曲面的插值都可以通过收集局部邻域及其取向信息来实现,不连续点和边界也可以通过邻域取向信息的一致性度量来检测。基于这一思想,张量投票方法的主要步骤包括以下 3 步:

- 1) 数据的张量表示;
- 2) 计算各输入张量的投票域;
- 3) 投票过程及其结果的解释。

在这 3 步中,投票过程及其结果的解释是该方法的核心,由于篇幅有限,下面只对这一步骤详细介绍。

以 2 维图像为例,设输入为  $\mathbf{I}$ ,可以是矢量图像或标量,设输出  $O$  为

$$O(i, j) = m_{u, v}^{i, j} = \begin{bmatrix} m_{20}^{i, j} & m_{11}^{i, j} \\ m_{11}^{i, j} & m_{02}^{i, j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

则定义输出为

$$m_{uv}^{x, y} = \sum_j \sum_i \| I(i, j) \|^2 \cdot [(R_{i, j}(T_{i, j}(\mathbf{EF})))_{x, y}^{x, y}]^u \cdot [(R_{i, j}(T_{i, j}(\mathbf{EF})))_{y, y}^{x, y}]^v \quad (2)$$

式中  $T$  和  $R$  分别为平移和旋转算子,作用于每个点  $(i, j)$  的投票域  $\mathbf{EF}$ 。得到输出张量后,为了解释张量投票的结果,需要对上述矩阵进行特征值分解:

$$\begin{bmatrix} m_{20} & m_{11} \\ m_{11} & m_{02} \end{bmatrix} = [EV_{\min} \quad EV_{\max}] \begin{bmatrix} \lambda_{\min} & \\ & \lambda_{\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} EV_{\min}^T \\ EV_{\max}^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

分解之后根据特征值的大小及关系来给出图像中具有某一特征的显著性测度,例如,在以往的文章中,一般都采用  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$  作为直线(或曲线)的显著性测度。

### 2.2.2 类型 II

类型 II 的方法主要是在类型 I 的方法所采用的一些底层组织线索的基础上,根据一些简单的几何关系识别更高一层的目标结构。这类方法一般都是加入平行、对称关系对边缘进行组织。

Lowe<sup>[3]</sup>最先提出非偶然性的概念,指出感知组织在机器视觉研究中的重要性,并在所开发的目标识别系统 SCERPO 中证明即使只增加平行、共线这类简单的关系也能极大地缩小搜索空间。与此类似,Rosin<sup>[29]</sup>采用圆弧逼近边缘,设置邻域距离门限确定可能被组织到一起的边缘曲线,然后判别这些边缘曲线是否连续、平行,根据判别结果提取轮廓。

Mohan<sup>[30]</sup>较早加入对称关系提取目标轮廓,他的方法首先根据邻近、共线、连续和对称等关系先检测出所有可能的特征分组,然后通过 Hopfield 神经网络施加约束条件,找到最合理的分组结构;Slivovsky<sup>[31]</sup>采用对称变换计算边缘点是否对称,然后将具有对称性的点或者曲线组织到一起。

基于概率推理的方法中,Castano 等人<sup>[32]</sup>建立分级概率模型,根据共线关系和双边对称关系提取轮廓。

基于 MRF (Markov random field) 的方法中,Murino 等人<sup>[33]</sup>采用 MRF 模型加入平行、共线等线索,然后通过模拟退火过程进行优化。

这类方法的优点是:1) 加入了平行、对称等组织线索,轮廓组织的鲁棒性更强;2) 根据一些简单的几何关系识别更高一层的目标结构,在一些应用领域中可以缩小搜索空间。但它们有一些共同的不足:1) 都是采用自底向上的串行化方法,容易造成误差的累积;2) 有可能把属于不同目标的边缘线组

织到一起;3)很多方法都没有区分对称、平行等中层组织线索与邻近性、平滑(连续)性等底层线索之间的关系,将它们等同对待,而实际上它们是不同的。

类型II的方法中以Lowe<sup>[3]</sup>的方法比较典型,其进行轮廓组织的过程中计算线段之间平行性的计算公式为

$$E = \left[ \frac{2sl_2D}{l_1^2} \right] \left[ \frac{2\theta}{\pi} \right] \quad (4)$$

式中, $l_1$ 为相对较短的线段的长度; $l_2$ 为相对较长的线段的长度; $s$ 为两线段之间的平均分离度,通过计算短线中点到长线的垂直距离获得; $D$ 为与尺度相关的常数, $D/l_1^2$ 是为了度量线段之间的相近性; $\theta$ 为两线段之间的角度差(以弧度为单位)。

而计算线段之间共线性的计算公式为

$$E = \left[ \frac{2s(l_1 + g)D}{l_1^2} \right] \left[ \frac{2\theta}{\pi} \right] \quad (5)$$

式中, $g$ 为两线段之间缺口的长度,其余符号含义与式(4)相同。

### 2.2.3 类型III

类型III的方法一般是在底层处理的基础上,采用搜索的方法寻找具有凸性结构的分组,主要用于目标识别<sup>[34-35]</sup>和运动分析<sup>[36]</sup>等。

Jacobs<sup>[37]</sup>最先研究了凸结构在轮廓组织中的作用,通过心理学实验证明人类视觉倾向于将分离的区域组成凸集,并提出一种在图像中搜索形成凸状区域的边缘结构的算法,该方法先用直线逼近边缘,然后采用后向搜索(backtracking)根据各直线段的取向判断邻近的直线段是否构成凸多边形;Huttenlocher<sup>[38]</sup>给出了凸结构的相关定义,首先确定边缘的邻域,然后采用连通元素聚合的方法(connected component aggregation)根据边缘的局部邻域特性搜索凸结构,这种算法的主要优点是计算效率高,但易受局部噪声的影响造成错误编组;Hoffman<sup>[39]</sup>提出可以将具有凹形结构的目标分解,从而扩展了利用凸性进行目标识别的应用范围;Biederman<sup>[40]</sup>也提出可以根据目标的组成部分及其关系中的不变量进行目标识别,而其组成部分也具有凸性结构。

这类方法扩充了Gestalt定律,通过实验证明了凸性这一组织线索在视觉识别过程中的重要性,并提出了计算复杂度较低的算法,对噪声和遮挡具有一定的鲁棒性,但是由于凸性既具有全局特性又具

有局部特性,尽管可以用部件理论的思想对目标进行分解以扩展这类方法的应用范围,但是如何分解也是个非常复杂的问题,而且目前还没有关于分解方法的研究;这类方法要求目标轮廓满足严格的凸性约束,限制了应用范围;另外,凸性的局部特性也使这类方法易受噪声和遮挡的影响,虽然Jacobs后来的改进工作部分克服了这一问题,但还是没有从根本上解决问题。

这类方法中以Jacobs提出的方法为代表。这一方法在边缘提取的基础上,用直线拟合边缘形成一个个直线段,然后根据距离和角度约束计算顺时针凸性和逆时针凸性:两线段 $s_k$ 和 $s_l$ 符合顺时针凸性/逆时针凸性的条件是,两线段交点不在线段上,从 $s_k$ 到 $s_l$ 的路径包含两次右/左转。

### 2.2.4 类型IV

类型IV主要包括一些基于模型能量的方法、基于图的方法、概率推理、自适应分组算法和基于视觉生理模型的方法,这类方法主要特点是在邻近性或平滑性的基础上加入封闭性这一全局线索。

Kass提出的主动轮廓模型(active contour model, snake)<sup>[41]</sup>代表了轮廓提取方法的一个研究方向——能量最小化方法。这类方法主要有主动轮廓模型<sup>[41]</sup>、几何活动轮廓模型(level set)<sup>[42]</sup>、弹性模板(deformable template)<sup>[43]</sup>、主动形状模型(ASM)<sup>[44]</sup>、智能剪刀(intelligent scissors)<sup>[45]</sup>、主动外观模型(AAM)<sup>[46]</sup>等。其中参数活动轮廓模型在医学图像处理、目标识别和跟踪等领域应用非常广泛,许多算法都在具体应用中对这一模型进行了改进<sup>[47-55]</sup>;几何活动轮廓模型实际上是参数活动模型的改进和扩展,文献[56-57]给出了几何活动轮廓模型的应用实例;弹性模板与参数活动轮廓模型的主要区别在于其初始轮廓更接近于具体目标轮廓的形状以及能量函数的定义更具体化,目前主要应用于人脸识别中的嘴唇轮廓提取;主动形状模型是将PDM(point distribution model)和迭代优化技术相结合的参数变形模型,能根据训练数据对于参数的调节加以限制,从而将形状的改变限制在一个合理的范围内;智能剪刀的主要特点是引入图搜索技术来定位目标边界,文献[58]对这种方法进行了全面的分析;主动外观模型也是在对训练数据进行统计分析的基础上建立模型,对目标对象变化程度的参数化描述,目前主要用于人脸识别。

基于图论的方法中,Amir和Lindenbaum<sup>[7]</sup>提出

将这一问题转化为图分割的问题,首先用图表示图像边缘之间的几何关系,然后搜索图中数据的最佳分组,具体实现过程采用了 SPRT 算法<sup>[59]</sup>; Estrada<sup>[60]</sup>根据几何关系定义边缘之间的亲和度,然后采用深度优先搜索,直至找到封闭轮廓为止; Elder 等人<sup>[61]</sup>在贝叶斯的理论框架下,根据邻近性和平滑性通过加权图表示边缘之间的关系,然后采用 Dijkstra 最短路径算法搜索组成轮廓的边缘。

概率推理的方法中,基于 MRF (Markov random field) 的方法中, Gerard<sup>[62]</sup>将多分辨神经网络与隐 Markov 模型相结合,目标轮廓的提取通过二阶隐 Markov 过程的识别来完成。Maßmann<sup>[63]</sup>基于 MRF 模型建立了一个分级模型,最底层根据共线性和邻近性进行分组,中层加入平行和对称线索,高层加入轮廓封闭性线索,通过 MRF 施加全局约束; Johnston<sup>[64]</sup>基于与 Elder 相似的概率模型通过隐 Markov 模型施加全局约束并采用 Baum-Welch 算法估计隐 Markov 模型的最佳参数。Sarkar<sup>[65]</sup>提出了分层贝叶斯网络的方法融合多种轮廓特征。

Jiang<sup>[66]</sup>提出一种自适应分组算法解决轮廓提取问题,该方法在假设检验的框架下,首先在细化的边缘图上检验区域分割的完整性,形成区域分割的完整性假设,然后对分割不完整的区域边缘进行膨胀处理,连接轮廓缺口。

基于视觉生理模型的方法中,Stephanie A 等人<sup>[8]</sup>研究了大脑视皮层对轮廓的感知修复规律; Tang 等人<sup>[10]</sup>提出一种基于图像内容之间的关联性的轮廓检测方法;文献[9, 12]等也在基于视觉生理模型的方法上进行了探索; James 等人<sup>[13]</sup>提出一种基于轮廓显著性的目标检测方法。

这类方法以 Sarker<sup>[65]</sup>和 Elder<sup>[61]</sup>的工作为代表。其中 Sarker 的 PIN(perceptual inference network) 方法的结构框图如图 3 所示。

Elder 的方法是在边缘提取的基础上,用向量表示边缘,然后采用贝叶斯推理推导向量之间的顺次连接关系。比如,向量  $t_1$  和  $t_2$  之间的连接概率为

$$p(t_1 \rightarrow t_2 | o) = \frac{p(o | t_1 \rightarrow t_2)p(t_1 \rightarrow t_2)}{p(o)} \quad (6)$$

式中,  $o = \{l_1, l_2, r, \theta_a, \theta_b, \Delta i_h, \Delta i_l\}$ , 而  $l_1, l_2$  表示两向量长度;  $r$  表示向量之间的最短距离;  $\theta_a, \theta_b$  分别标识两向量与最近端点连线之间的夹角;  $\Delta i_h, \Delta i_l$  分别代表两向量同侧的亮度。

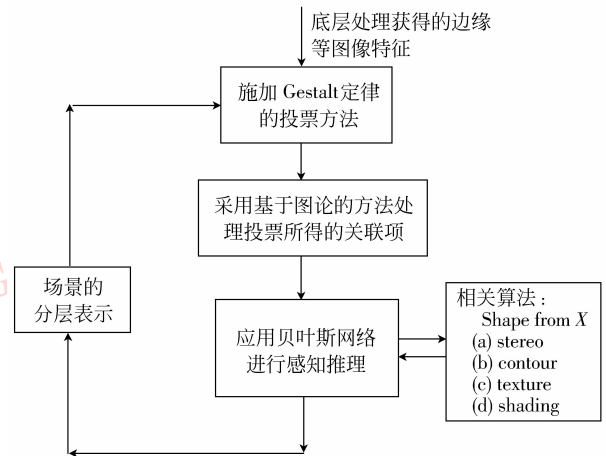


图 3 感知组织系统框图

Fig. 3 Perceptual organization system block diagram

### 2.3 现有研究的特点及不足

从上述国内外的相关研究现状来看,现有研究具有以下特点:

1) 普遍的解决思路是首先结合具体问题选取轮廓组织线索,然后以此为基础,采用相应的优化搜索算法进行求解。各类方法普遍应用了 Gestalt 定律中的部分定律,这一点既说明 Gestalt 定律的重要性,又在应用 Gestalt 定律方面给出了许多有益的启示;

2) 除了能量最小化方法之外,现有的方法基本都是在边缘提取的基础上进行的;

3) 各类方法的发展趋势表明,能够有效地综合图像局部特征和轮廓整体特征的方法更具研究价值和发展潜力。各类方法中,只应用一些具有局部特性的组织定律的方法,如基于跟踪搜索的方法,1998 年以后很少有人继续研究;而能够有效地综合图像局部特征和轮廓整体特征的方法,像能量最小化方法、基于特征显著性的方法、概率推理方法和基于图论的方法自提出以来就一直得到关注和发展;原始的随机修复场模型的发展趋势也是与概率推理方法相结合并加入整体约束条件;

4) 研究者 Lowe<sup>[3-4]</sup>、Sound<sup>[28]</sup>、Mohan<sup>[30]</sup>、Williams<sup>[5]</sup>、Shashua<sup>[22]</sup>、Francisco<sup>[60]</sup>、Maßmann<sup>[63]</sup>、Leigh<sup>[64]</sup>、Sarkar<sup>[65]</sup> 等人都指出了应用多个 Gestalt 定律的重要性:应用多个 Gestalt 定律可以极大地提高轮廓提取的鲁棒性,同时减小应用单个 Gestalt 定律的不确定性。

尽管轮廓组织已经取得了许多研究成果,但总

体说来,在以下方面仍然存在一些问题:

1) 现有的方法多是从某一技术角度或某一层面上研究轮廓提取问题,很多加入高层组织定律的方法都忽略底层处理机制而直接在具有一定结构的图像几何要素上操作,而且不同的方法应用了不同的 Gestalt 定律。轮廓组织尚缺乏一个统一的理论框架,以整合视觉底层、中层和高层的处理机制;

2) 虽然各类方法都普遍应用了 Gestalt 定律中的部分定律,但大量的研究工作都集中在邻近律、相似律和连续律等底层组织定律的应用上,对平行律、对称律和封闭律的应用研究相对较少。另外,在轮廓提取中各定律之间的层次关系、相互作用一直比较模糊;

3) 由于 Gestalt 定律只是定性的分析而非定量的计算方法,而且 Gestalt 研究者们迄今还没有令人信服地解答如何进行计算的问题,所以针对 Gestalt 定律的量化计算方法的研究必不可少,但是以往的相关研究中,只有 Agnes Desolneux 等人明确提出了 Gestalt 定律的量化计算问题,不过他们只是从统计的角度研究了像素点组成线的组织规律;

4) 大多数算法都是针对处理自然图像而设计的,但是其先验的统计规律却很少建立在自然图像的统计规律之上。显然,如果这些先验分布基于对自然图像的真实统计数据会更好。50 多年前, Brunswik 和 Kamiya<sup>[67]</sup> 指出经典的 Gestalt 定律应该与自然场景的统计数据相结合,然而他们的建议直到 1998 年才被采纳;随后尽管这方面已经有了一些研究工作<sup>[68-69]</sup>,机器视觉的研究中采用自然图像统计数据的算法还是很少;

5) 在许多实际应用中,有关目标轮廓的先验知识是可以获得的。目前只是有些研究成果<sup>[70-72]</sup> 证明了在人类视觉系统完成感知组织任务的时候是利用一些先验知识来提高效率简化问题的,在机器视觉中如何有效地加入这些先验知识仍是一个待研究解决的问题。

### 3 结 论

大量研究表明,视觉处理过程是知识组织和知识加工的过程,轮廓组织实际上是研究视觉处理过程中高层知识和感知特性加入的过程。根据我们对现有研究工作的总结和分析,轮廓组织未来的研究方向可以从以下几个方面考虑:

1) 轮廓组织一般是在边缘提取的基础上进行的,因而图像底层处理方法不容忽视。越来越多的研究证明边缘取向在后续处理过程中的重要性,因而设计一种有效的算法同时检测出边缘的位置和取向是非常有意义的;

2) 建立一个轮廓组织的理论框架,使之形成一个完整的体系结构,整合视觉底层、中层和高层的处理机制,并结合具体应用分析 Gestalt 定律之间的层次关系和相互作用,综合运用 Gestalt 定律,尤其是像平行律、对称律和封闭律这样与图像上下文关系紧密的定律;

3) Gestalt 定律的量化计算问题,即如何将这些定性的定律在图像处理中进行量化计算;

4) 尽量采用自然图像获取统计数据并进行试验验证;

5) 在目标轮廓的先验知识可以获取的情况下,如何有效地加入这些先验知识的问题,即进一步完善轮廓组织的理论框架,使之不但可以应用一些具普适性的定律,而且可加入一些高层知识。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Max Wertheimer. Source Book of Gestalt Psychology [ M ]. 2nd ed. New York: Gestalt Journal Press, 1997:15-19.
- [ 2 ] Montanari U. On the optimal detection of curves in noisy pictures [ J ]. Comm. ACM, 1972, 15(5): 335-345.
- [ 3 ] Lowe D G. Three dimensional object recognition from single two dimensional images [ J ]. Artificial Intelligence, 1987, 31(1): 355-395.
- [ 4 ] Lowe D G. Organization of smooth image ounal curves at multiple scales [ J ]. International Journal of Computer Vision, 1989, 3: 119-130.
- [ 5 ] Williams L, Jacobs D. Stochastic completion fields: a neural model of illusory contour shape and salience [ J ]. Neural Computation, 1997, 9(4): 837-858.
- [ 6 ] Urage S, Zerubia J, Berthod M. A markovian model for contour grouping [ J ]. Pattern. Recognition, 1995, 28(5): 683-693.
- [ 7 ] Amir A, Lindenbaum M. Quantitative analysis of grouping processes [ J ]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 168-185.
- [ 8 ] Stephanie A McMains, Sabine Kastner. Defining the units of competition: influences of perceptual organization on competitive interactions in human visual cortex [ J ]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2009, 19(1): 256-279.
- [ 9 ] Sang Nong, Tang Qiling, Zhang Tianxu. Contour detection based on inhibition of primary visual cortex [ J ]. Journal of Infrared and

- Millimeter Waves, 2007, 26(1): 47-51. [桑农, 唐奇伶, 张天序. 基于初级视皮层抑制的轮廓检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 47-51.]
- [10] Tang Qiling, Sang Nong, Zhang Tianxu. Contour detection based on contextual influences [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(8): 1282-1290.
- [11] La Cara G E, Ursino M. A model of contour extraction including multiple scales, flexible inhibition and attention [J]. Neural Networks, 2008, 21(5): 759-773.
- [12] Du Xiaofeng, Li Cuihua, Li Jing. Contour detection based on compound receptive field [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(7): 1630-1634. [杜晓凤, 李翠华, 李晶. 基于复合感受野的轮廓检测算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1630-1634.]
- [13] James W Davis, Vinay Sharma. Background-subtraction in thermal imagery using contour saliency[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 71(2): 161-181.
- [14] Li Dandan, Shen Yi, Liu Zhiyan. A new morphological algorithm for contour extraction on ultrasound image [C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Washington, USA: IEEE Computer Society Press, 2003: 2761-2764.
- [15] Venkateswar V, Chella R. Extraction of straight lines in aerial images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1111-1114.
- [16] Chen L T, Davis L S. Efficient parallel processing of image contours[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(1): 69-81.
- [17] Young D, Gray A J. Semi-automatic boundary detection for identification of cells in dic microscope images [C]//Sixth International Conference on Image Processing and Its Applications. Dublin, Ireland: Baker, 1997: 346-350.
- [18] Cox I J, Rehg J M, Hingorani S A. Bayesian multiple-hypothesis approach to edge grouping and contour segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 1993, 11(1): 5-24.
- [19] Crevier D. A probabilistic method for extracting chains of collinear segments [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 76(1): 36-53.
- [20] James H Elder, Richard M Goldberg. Ecological statistics of Gestalt laws for the perceptual organization of contours [J]. Journal of Vision, 2002, 2(1): 324-353.
- [21] Tissainayagam P, Suter D. Object tracking in image sequences using point features [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(1): 105-113.
- [22] Sha'ashua, A, Ullman S. Structural saliency: the detection of globally salient structures using a locally connected network [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Vision, Washington: IEEE Press, 1988: 321-327.
- [23] Gideon Guy, Gérard Medioni. Inferring global perceptual contours from local features [J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 20(1): 113-133.
- [24] Liu Xiangbin Zou Beiji, Sun Jianguang. A new algorithm for separating cell in bacteria image [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1056-1059. [刘相滨, 邹北骥, 孙家广. 菌群细胞图像分离算法研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1056-1059.]
- [25] Yu Xuejun, Peng Lizhong. An algorithm for getting the curve border from a black-white image [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(3): 272-275. [余学军, 彭立中. 二值图象曲线轮廓提取的新算法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(3): 272-275.]
- [26] Shyjan Mahamud, Lance R Williams, Karvel K Thornber, et al. Segmentation of multiple salient closed contours from real images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(4): 433-444.
- [27] Lance R Williams, John W Zweck. A rotation and translation invariant discrete saliency network [J]. Biol. Cybern, 2003, 88(1): 2-10.
- [28] Saund E. Labelling of curvilinear structure across scales by token grouping [C]//Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, USA: IEEE, 1992: 817-830.
- [29] Rosin P L. Grouping curved lines [J]. Machine Graphics and Vision, 1998, 7(3): 625-644.
- [30] Mohan R, Nevatia R. Using perceptual organization to extract 3D structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(11): 1121-1139.
- [31] Slivovsky L A, Kak A. Low level grouping by Symmetry [C]//IEEE Workshop on Perceptual Organization in Computer Vision. Santa Barbara: IEEE Press, 1998: 26-33.
- [32] Castano R L, Hutchinson S. A probabilistic approach to perceptual grouping [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 64(3): 399-419.
- [33] Murino V, Regazzoni C S, Foresti G L. Grouping as a searching process for minimum-energy configurations of labelled random fields [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1996, 64(1): 157-174.
- [34] Kalvin A, Scgonberg E, Schwartz J, et al. Two-dimensional, model-based, boundary matching using footprints [J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(4): 38-55.
- [35] Bergevin R, Levine M. Generic object recognition: building and matching coarse description from line drawing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(1): 19-36.
- [36] Sawhney H. Spatial and Temporal Grouping in the Interpretation of Image Motion [D]. Columbia Point peninsula: University of Massachusetts, 1992.
- [37] Jacobs D W. Robust and efficient detection of salient convex groups [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(1): 23-37.

- [38] Huttenlocher D P, Wayner P C. Finding convex edge groupings in an image [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(1):7-27.
- [39] Hoffman D, Richards W. *Visual Cognition* [M]. Cambridge: MIT Press, 1984:57-63.
- [40] Biederman I. Human image understanding: recent research and a theory[J]. *Computer Graphics, Vision and Image Processing*, 1985, 32(1):29-73.
- [41] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models[C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Computer Vision*. London: Computer Society Press, 1987:259-268.
- [42] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on hamilton-Jacobi formulation [J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1):12-49.
- [43] Wang S L, Lau W H, Leung S H. A new real-time lip contour extraction algorithm[C]//*2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Hong Kong SAR: IEEE Signal Processing Society, 2003, 3(1):217-223.
- [44] Cootes T F, Taylor C J, Cooper D H, et al. Active shape models—their training and application [J]. *Comput. Vision Image Understanding*, 1995, 61(1):38-59.
- [45] Mortensen E N, Morse B S, Barrett W A, et al. Adaptive boundary detection using “live-wire” two-dimensional dynamic programming [C]//*IEEE Proceedings of Computers in Cardiology*. Durham, North Carolina: IEEE Computer Society Press, 1992, 1(1):635-638.
- [46] Cootes T, Edwards G, Taylor C. Active appearance models[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(6):681-685.
- [47] Amini A A, Weymouth T E, Jain R C. Using dynamic programming for solving variational problem in vision[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(9):855-867.
- [48] Lai K F, Chin R T. Deformable contours: modeling and extraction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(11):1084-1090.
- [49] Cohen L D. On active contour models and balloons[J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1991, 53(2):211-218.
- [50] Xu C, Prince J L. Snakes, shapes and gradient vector flow[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(3):359-369.
- [51] Storvik G. A Bayesian approach to dynamic contours through stochastic sampling and simulated annealing [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(10):970-986.
- [52] Cen Feng, Qi Feihu, Zeng Wenjun. A new geodesic active contour based on attraction field regularization [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1):17-20. [岑峰, 戚飞虎, 曾文
- 珺. 基于边缘吸引力场正则化的短程线主动轮廓模型[J]. *电子学报*, 2003, 31(1):17-20.]
- [53] Ma Bo, Zhang Tianwen, Li Peihua. A multiscale snake algorithm based on improved external force [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(5):563-568. [马波, 张田文, 李培华. 基于改进外部力的多尺度蛇算法[J]. *计算机学报*, 2003, 26(5):563-568.]
- [54] Hou Zhiqiang, Han Chongzhao. Active contour models based on force field analysis [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(6):743-749. [侯志强, 韩崇昭. 基于力场分析的主动轮廓模型[J]. *计算机学报*, 2004, 27(6):743-749.]
- [55] Yang Gaobo, Yu Shengfa. Modified intelligent scissors and adaptive frame skipping for video object segmentation[J]. *Real-Time Imaging*, 2005, 11(4):310-322.
- [56] Chien Y P, Fu K S. A decision function method for boundary detection[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1974, 3(2):125-140.
- [57] Li Shuo, Thomas Fevens, Adam Krzyz'ak, et al. An automatic variational level set segmentation framework for computer aided dental X-rays analysis in clinical environments[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2006, 30(1):65-74.
- [58] Liang Jianming, McInerney Tim, Terzopoulos Demetri. United snakes[J]. *Medical Image Analysis*, 2006, 10(2):215-233.
- [59] Wald A. *Sequential Analysis* [M]. 3rd ed. Blackwell: Wiley Publications in Statistics, 1952:69-75.
- [60] Francisco J Estrada, Allan D Jepson. Perceptual grouping for contour extraction [C]//*Pattern Recognition, 17th International Conference on (ICPR'04)*. Cambridge UK: ICPR, 2004, 2:32-35.
- [61] Elder J H, Zucker S W. Computing contour closure [C]//*Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision*. New York: Springer Verlag, 1996, 1(1):399-412.
- [62] Gerard O, d'Alche-Buc F, Makram-Ebeid S, et al. Automatic contour extraction in images using a 2-D hidden markov model [C]//*Ninth International Conference on Artificial Neural Networks*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999, 1(1):455-460.
- [63] Maßmann A, Posch S, Sagerer G, et al. Using markov random fields for contour-based grouping[C]//*Proceedings International Conference on Image Processing*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997, II:207-210.
- [64] Leigh A Johnston, James H Elder. Efficient computation of closed contours using modified baum-welch updating [C]//*Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'04)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004:27-34.
- [65] Sarkar S, Boyer K L. Integration, inference, and management of spatial information using Bayesian networks: perceptual organization [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(1):256-274.

- [66] Jiang Xiaoyi. An adaptive contour closure algorithm and its experimental evaluation [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11) : 1252-1265.
- [67] Brunswik E, Kamiya J. Ecological cue-validity of "Proximity" and of other gestalt factors[ J ]. America. J. Psychology, 1953, 1(1) : 20-32.
- [68] Kruger N. Collinearity and parallelism are statistically significant second order relations of complex cell responses [ J ]. Neural Processing Letters, 1998, 8(1) :117-129.
- [69] Geisler W S, Perry J S, Super B J, et al. Edge co-occurrence in natural images predicts contour grouping performance[ J ]. Vision Research, 2001, 41( 6 ) : 711-724.
- [70] Rock I. The Logic of Perception[ M ]. Cambridge: MIT Press, 1983.
- [71] Cavanagh P. What's up in top-down processing [ C ]// Representations of Vision; Trends and Assumptions in Vision Research. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1991;295-304.
- [72] Cavanagh P. Top-down Processing in Vision[ M ] //Cavanagh P. MIT Encyclopedia of Cognitive Science. Cambridge: MIT Press, 1999 : 844-845.