

# 六角网格中三维物体模式识别算法<sup>\*</sup>)

汤浩钧<sup>1</sup> 陈明<sup>2</sup> Richard W. Stimets<sup>3</sup>

(上海交通大学计算机科学系 上海 200030)<sup>1</sup> (同济大学运输与工程学院 上海 200092)<sup>2</sup>

(College of Arts and Sciences, University of Massachusetts Lowell, USA 01854)<sup>3</sup>

**摘要** 提出一些算法,这些算法预期成为在六角网格中实现对三维物体快速、并行的模式识别的整体方案的一部分。这些算法包括在7-像素六角邻域之内基于灰度差值的边缘检测、局部边缘减薄和基于7-点六角掩模的特征提取。通过串行计算机模拟,这些算法对诸如方体等一些简单物体的真实六角网格数字图像的实验性验证已经显示了在快速识别三维物体轮廓的关键性特征方面的成功。

**关键词** 六角网格,掩模技术,边缘检测,特征提取,子像素测定,计算机视觉

## Algorithms for Pattern Recognition of 3-D Objects on a Hexagonal Grid

TANG Hao-Jun<sup>1</sup> CHEN Ming<sup>2</sup> Richard W. Stimets<sup>3</sup>

(Department of Computer Science, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)<sup>1</sup>

(College of Transportation and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)<sup>2</sup>

(College of Arts and Sciences, University of Massachusetts Lowell, USA 01854)<sup>3</sup>

**Abstract** In this contribution, we bring up several algorithms, which are expected to become part of an overall scheme for achieving rapid pattern recognition of 3-D objects based on parallel computation architecture on a hexagonal pixel grid. These algorithms include edge detection using gray-level differences within a seven-pixel hexagonal neighborhood, local edge thinning, and feature extraction using seven-point hexagonal masks. Experimental tests of these algorithms by serial computer simulation on real hexagonal-array digital images of some simple objects such as a cube have shown success at rapidly recognizing essential features of the objects skeletons.

**Keywords** Hexagonal grid, Masking technique, Edge detection, Feature extraction, Sub-pixel estimation, Computer vision

## 1 引言

早期计算机视觉研究中,一个重要课题是标签线条图形,也就是通过对图形的边线和顶点贴加标签的方法来识别二维线条图形,作为对三维场景中的一个或多个物体的透视。由于这是计算机视觉研究的中心任务,加上在当时计算资源条件下所具有的可操作性,这个课题得到了近20年(从20世纪60年代初到80年代初)的强烈关注。然而,此项早期的研究并没有覆盖从摄取图像到充分识别场景这样一个全过程,而是简单地把图形顶点与连线的二维坐标输入到特定的计算机程序中。

随着Roberts<sup>[1]</sup>和Guzman<sup>[2]</sup>等研究工作的初步成功,Huffman<sup>[3]</sup>和Clowes<sup>[4]</sup>对允许发生在三面体上的顶点加以归类,并且表明对于三种边缘类型:凹形的、凸形的和闭合的,所发生的16种顶点可以分成4大类。Waltz<sup>[5]</sup>扩展Huffman-Clowes类型,增加了破裂和阴影边缘,他编写的计算机程序可以在几秒内对许多场景生成唯一的标签化解释。Waltz并且引进了并行处理的重要概念,原则上,对于某个叠代过程中的每一步,分析可以在所有顶点并行地执行,而相继的叠代过程可以串行地进行,因此在速度上得到了多倍的提高。虽然

Waltz不得不在他的串行计算机上模拟部分的并行规程,但是并行处理运用在场景的不同部分显著缩短了处理时间。这一重要概念引导我们思索目前的研究工作。

其他的研究者进一步扩展线条图形分析,补充了折纸物体<sup>[6]</sup>、曲形物体<sup>[7]</sup>、残缺线条图形<sup>[8]</sup>和更一般的场景<sup>[9,10]</sup>,但是如何从真实世界的噪声图像中获取可靠的线条图形的基本问题一直未能解决。20世纪90年代中期有一些研究者试图开发一个可以完全地自动处理从图像到解释的系统,Trytten和Tuceryan<sup>[11]</sup>总结了这一完整的机器视觉系统的设计尝试,他们的系统分成一系列阶段进行,在后一阶段借助反馈来修正前一阶段所发生的错误,从而提高了系统的鲁棒性。该系统对被测的22个图像大多取得了成功,但典型地需要100s至几百秒时间才能完成正确的分析。其中,大多数时间花费在初始阶段的薄膜边缘检测算法上。

尽管计算机视觉研究超过了三十年,在今天仍然不存在任何的机器视觉系统能够在通用和速度的统一上接近人眼视觉系统,可预见到的处理器速度的提高不会起多大作用。适用于定点工业监测或者活动机器人、能够在子秒内识别不同场景的、未来的实际机器视觉系统极可能不得不采用和当今有根本不同的硬件和软件架构。

<sup>\*</sup>)上海博士后科学基金资助(编号:05R214146)。汤浩钧 美国麻省大学博士,主要研究方向:分层六角网格中的形图像处理与模式识别、应用语音识别技术的E-Learning课件与系统、网格计算的算法、验证与模型研究;陈明 博士后,主要研究方向:工程智能CAD技术、多媒体技术、计算机支持的协同工作;Richard W. Stimets MIT博士,麻省大学罗威尔分校教授,主要研究方向:图像处理与模式识别、光学。

在此项研究中,我们考查了一个设计中的机器视觉系统的多个方面,认为该系统需结合下面的一般特征:六角像素网格;局部层面的并行处理;伴随反馈的并行/串行算法,以金字塔式分层网格来组合局部特征和综合整体模式。在本文中,我们提出边缘检测、边缘减薄、特征提取的算法和这些算法的实验验证结果。我们的目标不是模仿生物的结构或变化过程,而是尝试设计一种机器视觉系统,该系统在速度和鲁棒度方面都要比现有的在根本上更高一级。本文第2节描述了基本的六角网格几何,并且和方形网格做了比较。第3节介绍了实验仪器和实验过程。第4节提出了实现三维物体模式识别的一些算法以及应用这些算法所得到的实验结果。最后给出了此项研究的结论和进一步的工作。

## 2 六角网格几何

我们设想中的机器视觉系统的核心是一个并行处理视网膜,由二维的光电传感器的网格组成,每个光电传感器都附接一个简单的处理器。这些处理器是一些定点单元,带有少量的存储空间,甚至不要求乘除运算。每个处理器被连接到它周围的所有最邻近处理器和一些有选择的较远的处理器上,整个网格又与更大、更复杂的用于执行计算和决定更高层次图像分析的中央处理器相连接。

我们的视网膜阵列选用六角网格几何。六角网格中的并行处理由 Golay<sup>[12]</sup> 首先提出,由 Deutsch<sup>[13]</sup> 进一步地加以详尽阐述。六角网格实际地出现在苍蝇的视网膜内,曾被尝试构建硅视网膜<sup>[14]</sup>。六角几何在许多领域的应用已经取得了良好的效果<sup>[15]</sup>。在六角网格中用于我们图像分析的基本单元是7-像素六角邻域,如图1所示。图中标明了六条主轴及12个方向,A、B、C、A'、B'、C'为中央像素的棱边。边缘点以强度和方向描述,强度表示灰度差值,方向指向更高的灰度数值(在棱边上向内或向外,在中心有12个可能的方向),既可以位于像素的中心,也可以位于像素的棱边。当连接在一起时,这些边缘点会生成场景中物体的轮廓。

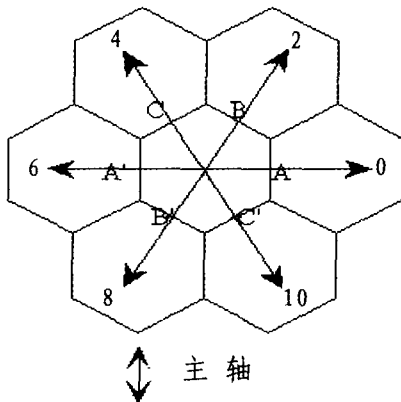


图1 标明主轴及其方向的六角邻域

假设有一条清晰的边缘穿过一个像素的中心,沿着垂直于边缘的轴,这个像素与它的两个相邻像素间的灰度差值是相等的,两个差值的比率为1。当此边缘移向这个像素的棱边时,比率会趋于无限。当此边缘移至中途时,这个比率大约等于3。因此,采用 Stimets 等<sup>[16]</sup> 所使用的子像素边缘测定方法,沿轴灰度差值的比率可以用来确定边缘的位置,误差范围在半个像素单位以内。

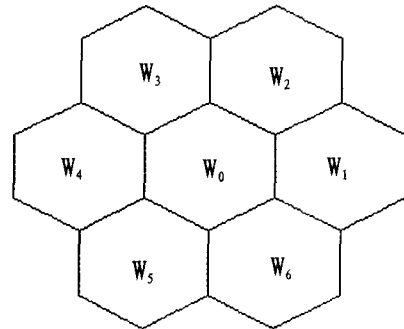
六角像素网格与用于成像硬件和图像分析的传统方形网

格相比,其理论上的优越性可以概括于如下的表1。

表1 六角网格与方形网格的特征比较

比较内容	六角网格	方形网格
主轴的数目	3	2
偏离轴线的最大角度	30°	45°
邻接像素	6个对等的	4个轴向的、4个对角的
边缘点位置构成的点阵	规则的三角形	缺角的四边形
基本边缘元素长度的变差	13.4%	41.4%

我们的图像处理实验室对各种物体轮廓的研究表明,具有对等像素数目的两类网格,六角网格确实在实验中再现了更加精确的原始物体轮廓。



W<sub>i</sub> 加权系数

图2 7-像素六角邻域的掩模形式

## 3 仪器及实验过程

我们的图像处理系统如图3所示,其基本组成包括一只具有 768×512 像素分辨率的 Hamamatsu CCD 摄像机、一台 21 英寸 NEC 视频显示器和一个运转于 DEC PDP-11 微机内的 CRS 图像处理器。实验样品被放置在铺有黑色柔布的可移动平台上,黑色柔布提供了良好的黑色背景,便于精确地控制样品的位置。两个鹅颈台灯可调节,以得到最佳的图像对比度。显示器可实时地完整展现样品的模拟或数字化图像。计算机终端可以有选择地打印图像尺寸为 25×25 部分的灰度数值(0~15 范围)。



图3 用于摄取六角网格数字图像的 CRS 系统

在此项实验中,摄像机被架设在可移动平台上方光轴垂直高度 66cm 处,方体、楔子和圆筒等形状的无光表面样品是由木料切割而成的,与光轴成一定角度摆放,以便获得全景透视。由于目前的 CCD 摄像机不支持六角点阵结构<sup>[17]</sup>,为了模拟一个真实六角像素网格中的图像,我们创新地添加了可

移动平台这个构件。样品图像的偶数行先数字化,然后平台被精确地平移半个像素,奇数行再数字化。这一过程虽然在垂直方向上使图像压缩了 13.4%<sup>[18]</sup>,但对于随后分析的影响是可以忽略不计的。

模拟的六角网格灰度值数组被存储于微机内,一个用 C 语言编写的程序基于这些数据执行边缘检测、边缘减薄和特征提取,输出的结果绘图如图 4 所示。

#### 4 处理算法和实验结果

下面我们特征性地概括在此项研究中所设计和经过验证的处理算法。

##### 4.1 边缘检测(灰度差值的阈值 $T=3$ ,也就是整个范围的 20%)

1) 依次沿着三条主轴:

IF 两个灰度差值的符号相反,即中间像素的灰度高于或低于两个相邻像素的灰度

THEN

放置边缘点在差值大于  $T$  的像素棱边上;

ELSEIF 两个灰度差值的符号相同,即中间像素的灰度介于两个相邻像素灰度之间

THEN

IF 差值大于  $T$  THEN 放置暂时的边缘点于该像素棱边上;

IF 差值总和大于  $T$  THEN 放置暂时的边缘点于该像素的中心。

2) IF 沿主轴具有最大总灰度变化的两个灰度变化的比率大于  $T$

THEN

选择边缘点在棱边上;

ELSE

消去棱边上的边缘点,置放单个边缘点在像素的中心,其强度与方向是沿三条主轴求得的中心边缘点的平均值。

3) 最终的棱边上的边缘点应该由共享棱边的两个像素来确定。

##### 4.2 边缘减薄

IF 相邻像素各有一个边缘点位于中心且两边缘点与其中一条主轴的夹角都小于  $30^\circ$

THEN

IF 一个边缘点的强度小于另一个的强度的  $3/4$

THEN 消去强度较弱的边缘点;

ELSE

消去这两个边缘点,在共享的棱边上插入一个新的边缘点,其强度等于被消去的两个边缘点强度的平均值,方向垂直于棱边。

##### 4.3 特征提取

掩模技术已经在图像处理和计算机视觉邻域内得到了广泛的应用,其基本思想可以在许多有关此主题的标准文档中查索到。对于一个 7-像素六角邻域,掩模的一般形式如图 2 所示,掩模的正交组可以由 7 个元素组成。这里我们所要引入的并不是掩模的正交组,而是一个扩大的组合,这个组合的元素更加接近于物体边界上出现的通常特征。表 2 列出了这 34 种掩模类型的系数。掩模组与另一个掩模和与一个图像中的 7-点部分的相关系数会在下面的讨论中举例加以说明。

表 2 34 种 7-点六角掩模的系数

掩模类型	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
点( $\pm 1$ )	6	-1	-1	-1	-1	-1	-1
线( $\pm 3$ )	4	4	-3	-3	4	-3	-3
顶( $\pm 6$ )	5	-2	-2	-2	5	-2	-2
角( $\pm 6$ )	4	-3	-3	4	4	-3	-3
中心边缘 1( $\pm 3$ )	0	-1	-1	1	1	1	-1
中心边缘 2( $\pm 3$ )	0	-1	0	1	1	0	-1
侧面边缘 1( $\pm 6$ )	-1	-1	-1	0	4	0	-1
侧面边缘 2( $\pm 6$ )	-2	-2	-2	5	5	-2	-2

1) 掩模  $W$  的相关系数  $C$

A) 与另一个掩模  $W'$

$$C = \frac{\sum_{i=0}^6 W_i W'_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^6 W_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^6 W_i'^2}} \quad (1)$$

B) 与一个图像的 7-点部分

$$C = \frac{\sum_{i=0}^6 W_i f_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^6 W_i^2} \sqrt{\sum_{i=0}^6 f_i^2}} \quad (2)$$

2) 不同掩模类型的  $\sqrt{\sum_{i=0}^6 W_i^2}$  值

A) 点:  $\sqrt{6^2 + 6 * (-1)^2} = \sqrt{42}$

B) 线:  $\sqrt{3 * 4^2 + 4 * (-3)^2} = \sqrt{84}$

C) 顶:  $\sqrt{2 * 5^2 + 5 * (-2)^2} = \sqrt{70}$

D) 角:  $\sqrt{3 * 4^2 + 4 * (-3)^2} = \sqrt{84}$

E) 中心边缘:  $\sqrt{6 * 1^2} = \sqrt{6}$

F) 侧面边缘:  $\sqrt{4^2 + 4 * (-1)^2} = \sqrt{20}$

3) 列举一个掩模  $W$  对另一个掩模  $W'$  的相关系数

对于线 1 - 线 2,

例如:

$$\begin{array}{ccc} -3 & -3 & \text{与} & -3 & 4 \\ 4 & 4 & & -3 & 4 & -3 \\ & 3 & -3 & & 4 & -3 \end{array}$$

$$\sum_{i=0}^6 W_i W'_i = (4 * 4) + (4 * (-3)) + (-3 * 4) + (-3 * (-3)) + (4 * (-3)) + (-3 * 4) + (-3 * (-3)) = -12$$

$$\text{相关系数 } C = \frac{-12}{\sqrt{84} \sqrt{84}} = -0.14$$

对于点 - 线 1,

例如:

$$\begin{array}{ccc} -1 & -1 & \text{与} & -3 & -3 \\ -1 & 6 & -1 & 4 & 4 & 4 \\ -1 & -1 & & -3 & -3 \end{array}$$

$$\sum_{i=0}^6 W_i W'_i = (6 * 4) + (-1 * 4) + (-1 * (-3)) + (-1 * (-3)) + (-1 * 4) + (-1 * (-3)) + (-1 * (-3)) = 28$$

$$\text{相关系数 } C = \frac{28}{\sqrt{42} \sqrt{84}} = 0.47$$

4) 一个掩模应用于一个数字图像 7-点部分的强度

$$S = \frac{\sum_{i=0}^6 W_i f_i}{W} \quad (3)$$

式(3)中的  $W$  是一个比例因子(等于一个或多个加权系数  $W_i$  的总和),所以一个模式的单位振幅具有的强度为 1。

例如:

-3	-3	应用于	0	0
4	4	4	1	1
-3	-3		0	0

应该生成  $S=1$ ,所以比例因子  $W=12$ 。表 3 列出了点、线、顶、角和各边缘对应的比例因子  $W$ 。

表 3 不同种掩模类型的比例因子

掩模类型	比例因子 $W$	掩模类型	比例因子 $W$
点	6	中心边缘(偶方向)	3
线	12	中心边缘(奇方向)	2
顶	10	侧面边缘(偶方向)	4
角	12	侧面边缘(奇方向)	10

基于上述讨论,边缘检测和边缘减薄之后的特征提取可以并行地对图像中的边缘点像素执行下面的算法:

- 1) 应用方程式(2)计算 34 种掩模的每一个相关系数  $C$
- 2) IF 某些  $C$  值  $\geq$  阈值  $T$  THEN

RETURN 对应最大的  $C$  绝对值的掩模特征

ELSE

RETURN 没有特征

以上给出的边缘检测的算法既说明了平衡这些算法的串、并行操作的重要性,也说明了通过实验验证使之达到极致的必要性。在初始版本的边缘检测的算法中,边缘点置放在像素中心或者在像素棱边的决定与每一条主轴无关,这一方法导致了一些边缘点的缺失和一些边缘点的方向错误,这里给出的修订版本明显更胜一筹。

把上述算法应用于一个三维方体的六角网格数字图像的实验结果如图 4 所示。六角像素内的数字表示灰度,边缘点以箭头表示。边缘减薄已经消去了大多数但不是全部的多余边缘点,由边缘点构成的方体的外形轮廓十分清晰。基于掩模方法的特征提取共找到了 102 个点、13 条线、5 个顶、12 个角和 10 条边缘,正确率在 70% 以上。对楔子、方体和圆筒等一些数字图像的验证表明以上的实验结果是典型的。

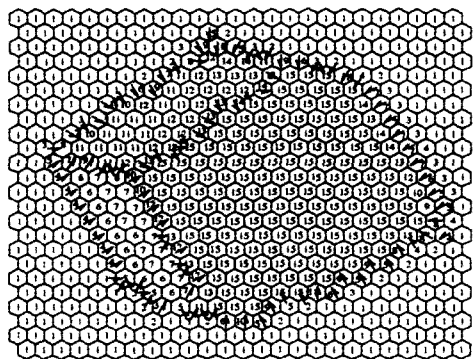


图 4 显示边缘点与顶点、边缘减薄后的三维方体的数字图像

**结论与建议** 此项研究的独特性在于这是首次详细地分析摄取于 CRS 系统的六角网格数字图像。在本文中,我们已经提出了基于六角网格并行处理的计算机视觉系统的一些基本理念和处理算法,应用这些算法于真实数字图像的实验结果是乐观的。实验结果表明,由六角几何提供的增进的简单性与精确性的联合和由并行操作带来的速度的极大提高,可

以引导通向快速且可靠的机器视觉目标的重大进展。除此以外,此项六角几何的研究工作势必贡献于改进的图像分析的准确度和速度,这类图像分析的领域包括扫描电子显微镜、无线移动结构、医学图像、卫星图像和工业检验等。

此项研究的不足之处在于基于掩模技术的特征提取要求乘法的算术操作,因而影响了运算速度,我们相信六角网格中的图像处理和模式识别的所有算法可以不用乘法而实现。另外,7-像素六角邻域内的线性独立的掩模数目只有 7 个,虽然通过掩模组合这个数目可以有所增加,但是仍然有碍于特征的可识别性。弥补这些缺陷的途径是使用基于边缘链接的特征提取方案。

### 参考文献

- 1 Roberts L G. Machine perception of three-dimensional solids. In: Tippet J T, et al. eds. Optical and Electrooptical Information Processing, The MIT Press, Cambridge, Mass, 1965. 159~197
- 2 Guzman A. Computer recognition of three-dimensional objects in a visual scene: [MAC-TR-59]. Project MAC, Cambridge, Massachusetts, 1968
- 3 Huffman D A. Impossible objects as nonsense sentences. In: Meltzer B, Michie D M, eds. Machine Intelligence 6, Edinburgh University Press, 1971. 295~323
- 4 Clowes N B. On seeing things. Artificial Intelligence, 1971, 2(1): 79~116
- 5 Waltz D. Understanding line drawings of scenes with shadows. In: Winston P H, ed. The Psychology of Computer Vision. New York: McGraw-Hill, 1975. 19~91
- 6 Kanade T. A theory of origami world. Artificial Intelligence, 1980, 13(6): 279~311
- 7 Malik J. Interpreting line drawings of curved objects. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(1): 73~103
- 8 Falk G. Interpretation of imperfect line data as a three-dimensional scene. Artificial Intelligence, 1972, 3(2): 101~144
- 9 Sugihara K. Machine Interpretation of line drawings. In: The MIT Press Series in Artificial Intelligence, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1986
- 10 Chakravarty I. A generalized line and junction labeling scheme with applications to scene analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1979, PAMI-1(2): 202~205
- 11 Trytten D A, Tuceryan M. The construction of labeled line drawings from intensity images. Pattern Recognition, 1995, 28(2): 171~198
- 12 Golay M J E. Hexagonal parallel pattern transformations. IEEE Transactions on Computers, 1969, C-18(8): 733~740
- 13 Deutsch E S. Thinning algorithms on rectangular, hexagonal and triangular arrays. Communications of the ACM, 1972, 15(9): 827~837
- 14 Mahowald M A, Mead C. The silicon retina. Scientific American, 1991, 264(5): 76~82
- 15 Hu Xiaohong, Guo Yihua, Liu Dehua, et al. Hexagonal subdivision surfaces algorithms introduction. Computer Applications and Software, 2004, 8(43)
- 16 Stimets R W, Wu Li Ying, Rajasekharan K. Rapid recognition of object outlines in reduced resolution images. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 21~33
- 17 Baronti S, et al. On detector shape in hexagonal sampling grids. SPIE, 2001(4540): 354~365
- 18 Liu Yongkui, Shi Jiaoying. Display of Graphics on Hexagonal Grids. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(3): 331~336