

序贯一维型边缘检测新算法*

吕 言

摘要

本文提出一种既可用于从图象上提取具有某种用途的一维边缘，又可用于提取具有多种用途的二维边缘的序贯一维型边缘检测新算法。由于构成该算法重要组成部分的基础算子的作用，以及将二维问题化为一维问题求解而使其明显具有简单、快速、有效的特点。该算法还具有Abdou^[1]等所建议的边缘检测算子应具有的两个特性。

【关键词】 图象；边缘检测；核线匹配；数字摄影测量；阈值；滤波

引 言

图象的边缘信息无论对于人类视觉或机器视觉均有着重要意义。边缘具有勾绘轮廓、局部定义以及传递信息等优点，因此在数字图象处理和机器视觉中，边缘检测应用很广，如模式识别，机器人景物分析，图象编码，图象分割，图象匹配等，它常被视为处理许多复杂问题的关键。自70年代初期以来，计算机界不少学者致力于边缘检测的研究，比较著名的边缘检测算子计有Hueckel算子^[6]，Haralick算子^[4]，Marr—Hildreth算子^[5]等。近年来人们仍在继续不断地探索^[7, 13, 14]。在摄影测量学界，随着从解析时代向数字时代的转变，边缘检测这个向来被视为属于数字图象处理或机器视觉学科范畴的问题亦越来越受到关注。尤其在为实现摄影测量全自动化而进行的关键课题——数字影象匹配的研究中，传统的区域匹配正在被特征匹配，关系匹配(或称结构匹配)或其与区域匹配相结合的方案所取代，我们知道，无论特征匹配还是关系匹配，特征提取均是必不可少的环节，而以往用于影象匹配的特征提取多限于点特征提取^[2, 3, 8, 11]。点特征一般具有较高的匹配精度，但孤立的特征点匹配亦可能出现多义性。此外，当已知获取图象的摄影机方位时，可方便地利用摄影测量理论引进核线约束，此时与核线正交或近似正交的边缘特征不仅可达到相当高的匹配精度，同时可用作核线与核线之间匹配信息的传递媒介，即将已成功匹配的核线上的边缘信息沿着边缘传递

收稿日期1988—07—16

* 本文系作者在瑞士苏黎世高工进修期间所著文[9]之基础上扩充改写而成。

到待匹配的核线^[15]，从而达到提高核线匹配的精度、速度和可靠性的目的。本文提出一种序贯一维型算法，其基本思想是首先采用一个形式极为简单的基础算子对数字图象逐象元计算以筛选掉不含边缘信息的区域，然后仅对含边缘信息的区域作进一步处理。该算法既可用于提取图象的一维边缘，亦可用于提取图象上全方位的二维边缘。由于基础算子的作用以及无论对于一维边缘或二维边缘提取均只须采用一维方式处理，而使该算法明显具有简单快速的优点。此外，该算法还具有 Abdou等所建议的边缘算子应具有的两个特性：1) 相对于边缘方位不变；2) 对于锐边缘可以一个象元的宽度将其精确定位。对实际图象进行一维和二维边缘提取的结果表明，本文所提出的新算法是一种简便而快速有效的边缘提取算法。

1 边缘及其检测概念

边缘通常定义为在局部区域内图象的差别，表现为图象上的不连续性，例如在图象上局部区域呈现出灰度级突变，纹理结构突变等。图 1 为两个典型的理想边缘例：原始图象中仅包含两个灰度级，其灰度截线呈阶跃状态。边缘检测的任务在于设计一种算法对原始图象进行运算而得到如图 1 下粗体黑线所示之边缘。事实上，在自然界的实际图象中理想边缘是不存在的。就图 1 a 所示的情形而言，两个灰度等级之间往往存在一个平缓的过渡区域，其灰度截线由理想边缘的阶跃状态变为如图 2 a 所示之曲线，在摄影学中称之为刀刃曲线。大多数情况下，由于噪声的影响，灰度曲线并不是十分平滑的（图 2 b）。对这种非理想的边缘进行检测则是要检测出曲线上灰度变化最大的点，即所谓一阶导数最大或二阶导数为零的点。对数字图象而言则分别采用一阶差分最大和二阶差分为零的点替代之。

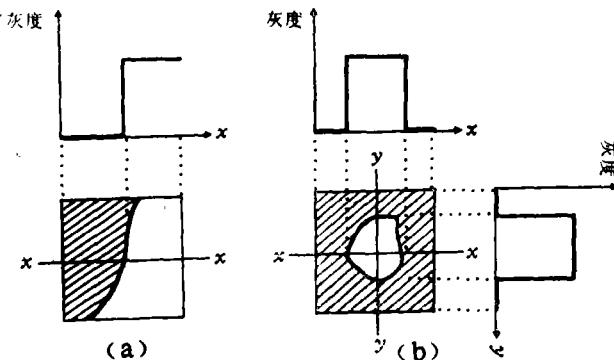


图 1 理想边缘及其灰度截线

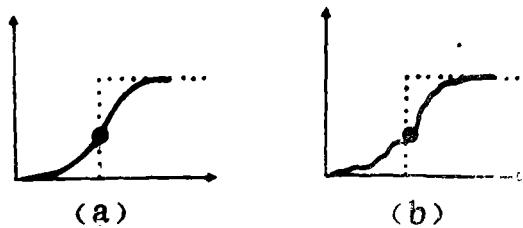


图 2 非理想边缘之灰度截线

2 用于边缘检测的新算法

从信息论的观点看，图象总是可以区分为信息含量丰富的区域和不含或含有微量信息的所谓信息贫乏区域。含边缘的象元必然位于前一种区域中。显然区分两种区域无需涉及复杂的运算，仅采用能反映灰度变化的简单算法即足。为此，本文提出一种序贯算法，即首先采用一个简单的基础算子从整个图象 I 中提取信息丰富区域 E ，然后再从 E 中提取边缘所在的象元。若将边缘所在象元构成的集合记作 TE ，即有 $TE \subset E \subset I$ 。具体步骤如下：

第一步：从集合 I 中提取其子集 E

用式（1）所示之基础算子，以 1×3 为窗口，按数字图象阵列的某一方向，例如图 3 所示之 y 方向，或核线方向，对整个图象逐象元进行计算并判断该象元是否属于集合 E 。

基础算子：

$$E = \{P_{i,j} | \max(|\Delta G_{i,j}|, |\nabla G_{i,j}|) > T\} \quad (1)$$

式中 $G_{i,j}$ 代表象元 $P_{i,j}$ 之灰度值； Δ 和 ∇ 分别表示向前差分和向后差分，即 $\Delta G_{i,j} = G_{i,j+1} - G_{i,j}$ ， $\nabla G_{i,j} = G_{i,j} - G_{i,j-1}$ ；阈值 T 为经验值，若对含有噪声的图象用简单的低通滤波器，例如局部平均或加权局部平均进行了预处理，则在 256 级量化的情况下 T 的推荐值为 8~15，否则为 5~10（详见本文 4.1）。

这一步的作用在于仅用最简单的算法筛选掉大量不可能含有边缘信息的象元，从而减少许多不必要的计算消耗。表 1 示出一维情况下用基础算子对若干实际图象块进行运算后得到的集合 E 所含象元数及其占总象元数之百分比。所用 8 个象块取自国际摄影测量与遥感学会第 15 届大会第 III 委员会 III/4 工作组于 1986~1988 年组织的数字影象相关试验 24 张象片（以下简称 ISPRS 象片）中之正直象片，其 y 方向即为核线方向。所有象块均为 $240 \times 240 (= 57600)$ 象素。由表可见，随着各图象所含信息多寡不同，在取经验值下限 $T = 5$ 的情况下，各象块经过这一步运算所去掉的象元百分数为 32~83% 不等。换言之，仅占集合 I 全部元素之 17~68% 的子集合 E 便已充分包含了原图象中垂直于或近似垂直于核线方向的含边缘象素，这一点由图 8 (ISPRS 象片 19 和象片 20) 取用 $T = 6$ 时所得之边缘提取结果清楚可见。

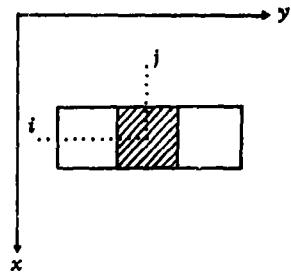


图 3 提取 x 方向一维边缘

表 1 一维情况下 E 集之象元含量 ($T = 5$)

象片 (57600象元)	1	2	7	8	13	14	19	20
E 集之象元数	34792	38931	9749	12446	30078	36302	22016	19322
占 I 集象元之 百分比	60	68	17	22	52	63	38	34

第二步：从集合 E 中提取其子集 TE

在第一步所得集合 **E** 的基础上，以 **E** 集各象元之权值为依据抑制局部非最大，从而精选出边缘。

首先按式 (2) 确定各象元之权值 W

$$W_{i,j} = \begin{cases} 0 & P_{i,j} \notin E \\ |\Delta G_{i,j}| + |\nabla G_{i,j}| & P_{i,j} \in E \end{cases} \quad (2)$$

然后将 **E** 集合中各象元之权值与其在一维方向上最邻近的四个象元相比较，若为最大，则该象元为边缘所在象元，属子集 **TE**，否则为非边缘。如图4所示，先按 1×3 窗口与邻近二象元比较，判断其是否为最大，如遇其与某一邻元有相同权值，则视具有低值灰度者为最大。如某象元之权值在 1×3 窗口中为最大，则再按 1×5 窗口与次邻近二象元比较。在抑制局部非最大过程中被判断为非边缘象元之权值一律赋零。



图 4 抑制局部非最大

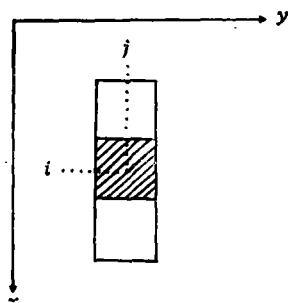
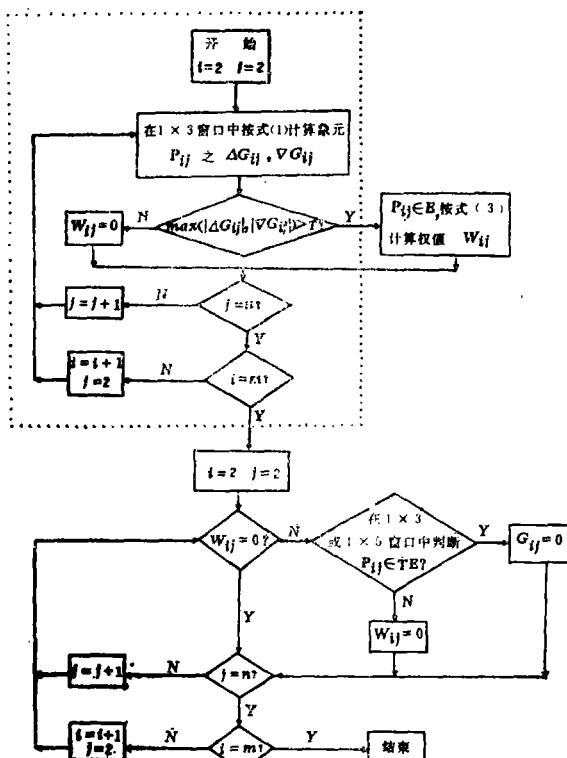


图 5 提取 y 方向一维边缘

至此便得到了所需方位的一维边缘。如欲提取具有全方位性的二维边缘，则只需沿着与上述方向垂直的另一方向，例如图 5 中之 x 方向，按相同方法再运行一次本算法即可。

综上述，本算法是按序贯方法从集合 **I** 之中顺次提取子集 **E** 和 **TE** ($\text{TE} \subset \text{E} \subset \text{I}$)，而且无论提取一维还是二维边缘，本算法均按一维方法求解，因此我们将其称为序贯一维型算法。

图 6 示出用本算法提取一维边缘的编程框图，对于二维边缘，则在另一方向上按类似框



虚线内：提取 $E \subset I$ ，虚线外：提取 $TE \subset E$

图 6 新算法一维应用之框图

图再执行一次即可。图 7 以一简单图象为例示意性绘出用新算法对其运算所得结果。

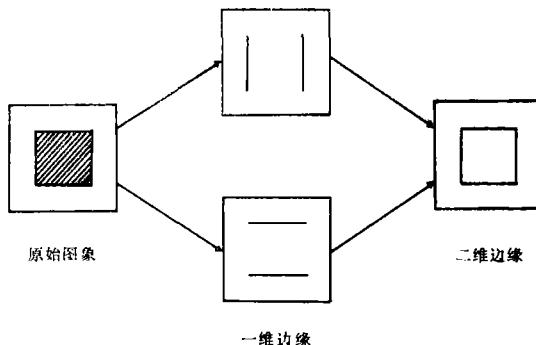


图 7 用新算法提取边缘图象示意

3 实验

图8~11是用本文算法提取一维或二维边缘的几个实例。其中图8取自 ISPRS 数字相关试验之第10象对(象片19,20)，该象对为正直象对，沿核线方向运行本算法得到正交或近似正交于核线的边缘。图9示出图8之一条灰度曲线及其所选出的边缘点。不难看出，用这些边缘点进行核线匹配不仅可达到高的匹配精度，同时可沿着所提取的边缘将前面已成功匹配的核线上的边缘特征信息顺次向待匹配的核线传递，从而提高核线匹配的速度和可靠性^[15]。图10为 ISPRS 第3象对(象片5, 6)，原始图象为非正直摄影，先沿核线进行一维重采样^[10]，然后用本文的一维算法提取出供核线匹配用的一维边缘。图8和图10之ISPRS图象均为 240×240 象元，先元尺寸为 $18 \times 19\mu\text{m}^2$ ，因此象块实际大小仅 $4.3 \times 4.6\text{mm}^2$ 。图11包括一张西门子星(SIEMENS STAR)图象和一张小女孩头象以及用本文所述之算法提取出的各自用二值图象表示的二维边缘。表2给出了在计算机SUN3/280上运行本算法所耗之CPU时间。



图 8 ISPRS 象片 No.19 (左) 和 No.20(右)

上：原象片（采石场墙壁）

下： 3×3 局部平均滤波后用本文算法提

取的一维边缘 ($T = 6$)

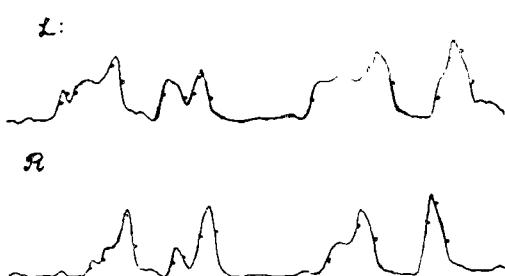


图 9 与图 8 (下)相应的一条灰度曲线
(上左下右)及所选之边缘上的点

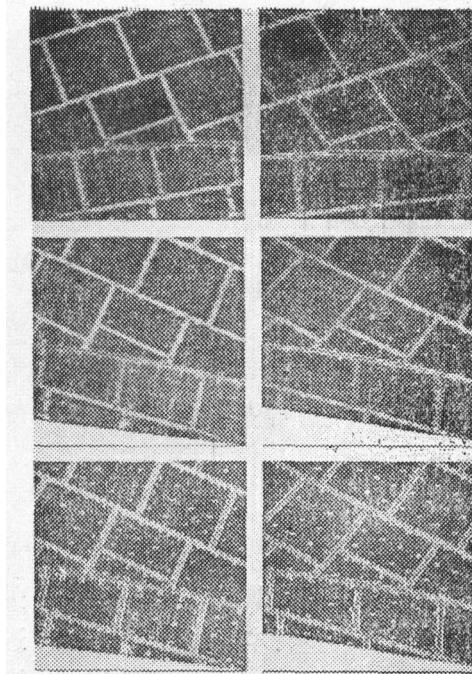


图10 ISPRS象片No. 5(左)和No. 6(右)
上: 原象片(慕尼黑奥林匹克村帐篷之顶棚)
中: 沿核线一维重采样之结果
下: 3×3 局部平均滤波后用本文算法提取的一维边缘($T = 6$)

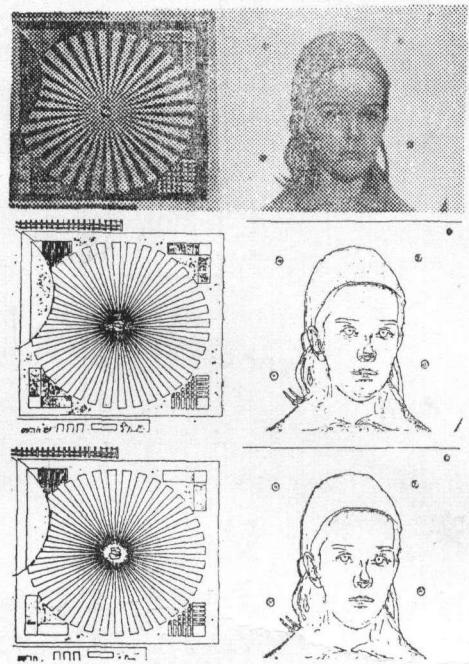


图11 上: 原象片一左: 西门子星, 右: 小女孩
中: 不滤波, 用本文算法提取的边缘
(左: $T = 15$, 右: $T = 6$)
下: 3×3 局部平均滤波后用本文算法
提取的边缘(左: $T = 15$, 右:
 $T = 5$)

表 2 在计算机SUN3/280上运行新算法的CPU时间消耗

情形	一维		二维					
	ISPRS 5	ISPRS19	SIEMENS	女孩	ISPRS 5	ISPRS11	ISPRS23	
尺寸	240×240	240×240	512×512	512×512	240×240	240×420	240×240	
T	8	6	15	5	8	8	5	
CPU(秒)	1.1	1.4	13.84	12.71	2.96	2.86	2.73	

4 討論

4.1 閾值和滤波

几乎所有边缘检测算法都含有一个或多个经验阈值或经验参数，其恰当确定往往不是一件十分容易的事情。试验表明，本文所提算法在其基础算子部分所含之唯一的阈值 T (见式

(2) 具有较小的波动范围, 比较易于确定。一般而言, 在事先不对图象进行任何预处理的情况下, T 位于 8~15 之间, 然而, 由于种种因素的影响, 实际图象不同程度含有噪声, 其存在常导致无法找到最佳阈值 T , 而使边缘提取结果或出现噪声与边缘相混杂, 或出现丢失边缘的情况。为了解决这一问题, 在用本算法对含有噪声的图象进行处理前, 应当采用适当的滤波去图象所含之高频噪声。例如采用直接在空间域上对图象进行平滑处理的局部平均法或加权局部平均法^[1,2], 图11下便是经过这种方法预处理之后的边缘提取结果。据经验, 经过这种简便快速的滤波处理后, 阈值 T 仅在 5~10 之间波动。

通常认为, 局部平均或加权局部平均滤波会在滤去噪声的同时亦使边缘信息衰减, 表现为图象变模糊, 特别是黑白交界处轮廓变得不清晰。图12左面是一张仅含两个灰度等级的理想边缘的数字图象, 右面是经过 3×3 窗口局部平均的结果。显然, 由边缘附近各象元的灰度级可见原来清晰的边缘轮廓变模糊了。如果采用本文算法对此二图象进行处理则可发现, 由于所采用的计算权值的方法及抑制局部非最大的措施, 所提取的边缘结果(图12晕线部分)二者相差无几。由此可见, 局部平均或加权局部平均滤波与本算法联合既滤去了噪声, 从而使阈值更易于确定, 同时又避免了边缘信息的衰减。图11的边缘提取结果表明了滤波器滤去噪声的作用以及本算法抑制其衰减边缘信息的功能。

4.2 全方位性

边缘检测算法应当具备的一个重要特点是相对于边缘的方位具有不变性, 换言之, 应能检测出具有任意方位的边缘。在提取二维边缘时, 本文算法在图象的两个正交方向上(例如扫描方向及其垂直方向)相继两次运行一维算法提取 $\text{TE} \subset \text{E} \subset \text{I}$ 。由于基础算子在两个方向上都是逐象元运算, 因而在两个方向上提取的结果实际上包含了图象上所有方位的边缘。图11对 SIEMENS 星和女孩头象进行边缘提取的结果清楚地表明了本算法所具有的这种全方位性特点。

4.3 边缘定位之精度

由于本文算法所采用的权值及抑制局部非最大的措施, 所提取的边缘总是以一个象元的宽度定位在灰度级不连续处。对于图12所示之无噪声污染的含理想边缘的图象, 本算法能完全准确地提取出位于边缘处一个象元宽度的低值象元作为边缘(见图12所示之粗体线)。对于经过局部平均滤波的图象, 所提取的边缘有时不是位于原始图象上边缘交界处的低值象元而是高值象元, 但仍以一个象元宽度位于灰度不连续处。因此可以说, 本算法提取边缘的精度至少是一个象元。

本算法对于提取边缘所具有的全方位性以及提取之精度恰恰满足 Abdou 等所提出的边缘算子应具有的两个特性。

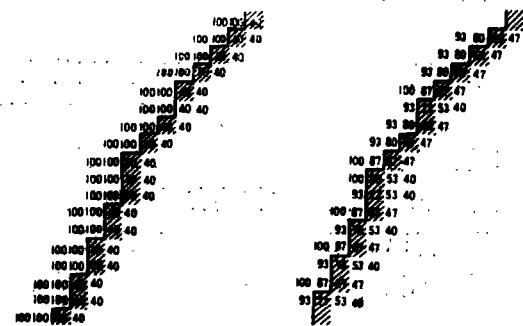


图12 新算法对用 3×3 局部平均前(左)后(右)之图象提取边缘结果比较

5 結 論

本文提出的序贯一维型边缘检测新算法既可从数字图象上提取具有某种用途的一维边缘，例如沿着核线方向运行该算法提取用于核线匹配的与核线正交或近似正交的边缘，又可提取具有多种用途的二维边缘。所提取的一维或二维边缘可以一个象元的宽度精确定位，而且该算法相对于边缘方位具有不变性；由于采用先运行基础算子首先从集合 I 中提取其子集 E，然后再以 E 集合各象元之权值为依据抑制局部非最大从集 E 中提取其子集 TE 的序贯算法，以及无论对于提取一维或二维边缘均采用一维算法，而使该算法明显具有简单快速的特点，该算法所含之唯一的阈值具有相对固定的范围，比较易于确定；对于含噪声的图象仅需采用简单的局部平均或加权局部平均进行预处理滤去高频噪声之后再运行本算法便可获得令人满意的边缘提取结果。对若干实际图象提取边缘的结果表明了本算法的能力和功效。

至于对于不同图象最佳阈值 T 的自动确定以及加权局部平均滤波的权值选定等问题尚待进一步研究。

谨以此文献给引导我步入数字摄影测量领域的导师王之卓教授！

參 考 文 献

- [1] Abdou I E , Pratt W K. Quantitative Design and Evaluation of Enhancement/Thresholding Edge Detectors. Proc. , IEEE, 1979, 67(5).
- [2] Föstner W. A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching . Int. Arch. of Photogrammetry, Rovaniemi : 1986, 26(3).
- [3] Hannah M J. Computer Matching of Areas in Stereo Imagery. Ph. D. Dissertation , Computer Science Department , Stanford University , Stanford , California ; 1974.
- [4] Haralick R M. Digital Step Edges from Zero Crossings of Second Directional Derivatives. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. , 1984, 6(1).
- [5] Hildreth E C. The Detection of Intensity Changes by Computer and Biological Vision Systems. Comput. Graphics Image Processing, 1983, 22 : 1~27.
- [6] Hueckel M H. An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures, J. ACM , 1971, 18(1).
- [7] Kundu A , Mitra S K. A New Algorithm for Image Edge Extraction Using a Statistical Approach. IEEE Trans. Patteren Anal. Machine Intell. , 1987 , 9(4)
- [8] Lü Yan. Interest Operator and Fast Implementation. Int. Arch. of the 16th ISPRS Congr. , Comm. III , Kyoto : 1988.
- [9] Lü Yan. A Simple Algorithm for Edge Detection. Int. Arch. of the 16th ISPRS Congr. , Comm. III , Kyoto : 1988 .
- [10] Lü Yan , Zhang Zuxun. Fast Implementation for Generating Epipolar Images with

- One-Dimensional Resampling. Int. Arch. of the 16th ISPRS Congr., Comm. III, Kyoto : 1988.
- [11] Moravec H. Visual Mapping by a Robot Rover. Proc. 6th Int. Joint Conf. Artificial Intell., Tokyo, 1979, 1: 598~600.
 - [12] Rosenfeld A, Kak A. Picture Processing by Computer. New York : 1982.
 - [13] Schenk A. Stereo Matching Using Line Segments of Zero Crossings. Int. Arch. of Photogrammetry, Rovaniemi; 1986, 26(3).
 - [14] Tabatabai A J, Mitchell O R. Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery. IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., 1984, 6(2).
 - [15] Zhang Zuxun. A New Approach of Epipolar-Line Image Matching for Improving the Performance of SODAMS System. IGP Bericht, ETH, Zuerich : 1988 (145) .

A New Algorithm for Edge Extraction in Digital Image

Lü Yan

Abstract

A new sequential 1-D algorithm is presented in this paper. This new algorithm can be used for extracting not only 1-D edges for a certain purpose but also 2-D edges with multipurpose applications. Because of the use of a "ground operator", which is an important component in this algorithm and also the use of 1-D method instead of 2-D, the algorithm is very simple, effective, and the performance is very fast. Besides, this algorithm also possesses the two desirable characteristics of an edge detector as suggested by Abdou et al.

[Key words] digital image, edge extraction, epipolar line matching, digital photogrammetry, threshold, filtering