



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象学报

2014

09

VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第19卷第9期（总第221期）

2014年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

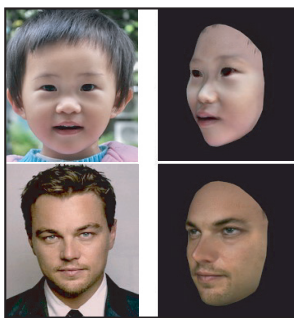
国内定价 50.00元



自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法(第1268页)



加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪算法(第1316页)



结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建(第1349页)

综述

能量泛函正则化模型在图像恢复中的应用分析

李旭超, 刘海宽, 宋博 1247

图像处理和编码

融合最小化失真与模型保持的隐写算法

高瞻瞻, 汤光明, 张伟伟 1260

自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法

刘婧, 干宗良, 崔子冠, 陈昌红, 朱秀昌 1268

基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

郭从洲, 秦志远, 时文俊 1282

分块策略实现图像椒盐噪声密度估计

林亚明, 李佐勇, 林叶郁 1288

图像分析和识别

Dempster-Shafer证据融合金字塔韦伯局部特征的表情识别

王晓华, 金超, 任福继, 胡敏 1297

运动捕捉数据中足迹的谱聚类检测方法

刘晓平, 陆劲挺, 谢文军 1306

加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪

王飞, 房胜 1316

面向瓦当文字识别的改进水平集骨架提取

邓茜芸, 周明全, 武仲科, 王醒策 1324

改进复杂网络模型的形状特征提取

阮瑞, 江波, 汤进, 罗斌 1332

几何特性二元关系的直线匹配

胡海霞, 李钢 1338

图像理解和计算机视觉

结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建

张剑, 何骅, 詹小四, 肖俊 1349

利用背景加权和选择性子模型更新的视觉跟踪算法

黄安奇, 侯志强, 余旺盛, 刘翔 1360

计算机图形学

对可控Bézier曲线的改进

严兰兰, 韩旭里 1368

医学图像处理

结合区域生长与灰度重建的CT图像肺气管树分割

彭双, 肖昌炎 1377

检测肺结节的3维自适应模板匹配

高婷, 龚敬, 王远军, 聂生东, 孙希文 1384

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models(P1268)



Visual tracking based on discriminative dictionary and weighted local features (P1316)



Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation (P1349)

Review

- Application analysis of regularization model of energy functional to image restoration
Li Xuchao, Liu Haikuan, Song Bo 1247

Image Processing and Coding

- Steganographic method combining minimum embedding distortion and model preservation
Gao Zhanzhan, Tang Guangming, Zhang Weiwei 1260
- Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models
Liu Jing, Gan Zongliang, Cui Ziguan, Chen Changhong, Zhu Xiuchang 1268
- TV image denoising model based on energy functionals and HVS
Guo Congzhou, Qin Zhiyuan, Shi Wenjun 1282
- Image salt-and-pepper noise estimation based on partitioning strategy
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu 1288

Image Analysis and Recognition

- Research on facial expression recognition based on pyramid Weber local descriptor and the Dempster-Shafer theory of evidence
Wang Xiaohua, Jin Chao, Ren Fuji, Hu Min 1297
- Foot plant detection based on spectral clustering algorithm for motion capture data
Liu Xiaoping, Lu Jintong, Xie Wenjun 1306
- Visual tracking based on the discriminative dictionary and weighted local features
Wang Fei, Fang Sheng 1316
- Skeleton extraction using improved level set methods in eaves' text recognition
Deng Qianyun, Zhou Mingquan, Wu Zhongke, Wang Xingce 1324
- Improved shape feature extraction using complex network model
Ruan Rui, Jiang Bo, Tang Jin, Luo Bin 1332
- Line matching based on binary relations of geometric attributes
Hu Haixia, Li Gang 1338

Image Understanding and Computer Vision

- Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation
Zhang Jian, He Hua, Zhan Xiaosi, Xiao Jun 1349
- Visual object tracking method based on weighted background and selective sub-model update strategy
Huang Anqi, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng, Liu Xiang 1360

Computer Graphics

- Improvement of the modifiable Bézier curves
Yan Lanlan, Han Xuli 1368

Medical Image Processing

- Segmentation of pulmonary airway tree in CT images by combining region growing and grayscale reconstruction algorithms
Peng Shuang, Xiao Changyan 1377
- Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection
Gao Ting, Gong Jing, Wang Yuanjun, Nie Shengdong, Sun Xiwen 1384

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)09-1338-11

论文引用格式: Hu H X, Li G. Line matching based on binary relations of geometric attributes[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(9): 1338-1348. [胡海霞, 李钢. 几何特性二元关系的直线匹配[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(9): 1338-1348.] [DOI: 10. 11834/jig. 20140911]

几何特性二元关系的直线匹配

胡海霞¹, 李钢²

1. 宜春学院理工学院, 宜春 336000; 2. 宜春学院数计学院, 宜春 336000

摘要: 目的 针对直线编组匹配方法数据处理量大、耗时长,且易受阈值选择变化影响,提出一种几何特性二元关系的直线匹配算法。**方法** 利用线段二元关系计算出参考线段对与待匹配线段对的局部相似度,并用阈值对局部相似度进行初步过滤,然后采用分步笛卡儿积运算、逐步过滤递推得到候选线段集,最后在计算出所有候选线段集的全局相似度的基础上,综合考虑局部相似度和全局相似度得到最终的匹配结果。**结果** 该算法具有良好的旋转、缩放和平移不变性,对直线的端点和长度变化不敏感,且阈值选择对匹配结果影响小,具有较好的鲁棒性,同时充分考虑直线方向问题,提高了匹配的准确率。**结论** 通过算法分析和实验结果分析,证明了该算法的合理性、高效性和可靠性。

关键词: 直线匹配; 二元关系; 几何特性; 笛卡儿积

Line matching based on binary relations of geometric attributes

Hu Haixia¹, Li Gang²

1. Physical Science and Technology College of Yichun University, Yichun 336000, China;

2. Mathematics and Computational Science of Yichun University, Yichun 336000, China

Abstract: **Objective** A new method for line matching is presented in this paper. **Method** It utilizes binary relations of geometric attributes. Four procedures are introduced in sequence as follows. First of all, it's necessary to define a series of binary relations between two segments and calculate the local similarity of two line segment pairs respectively from two images. The second step is to filter preliminarily out the local similarity with threshold values and get the candidate segment sets by stepwise Cartesian product operation. Thirdly, the global similarities of all of candidate segment sets need to be calculated. Finally, the final matched line segment sets can be obtained based on the local and global similarities. **Result** The method is insensitive to the changing of line segment's endpoint position and length and the selection of two threshold values. Also it's robust and invariant to rotation, scaling and translation. In the meanwhile, it takes line segment's directions into full consideration, thus improving the matching accuracy. **Conclusion** Algorithmic analysis and experimental results have proved that the method is reasonable, efficient and reliable.

Key words: line matching; binary relation; geometric attribute; cartesian product

0 引言

在图像众多特征中,直线特征常用于3维重建、图像识别和图像配准等研究领域的图像分析和图像

理解阶段^[1-3]。这主要是由于直线特征具备良好的稳定性、精确性^[4]及直线特征包含了物体结构的大量信息等优点。但是直线的匹配一直是个难点,其原因有两点^[5]:一是直线段提取得到的线段端点不够准确,一些线段之间的拓扑关系也往往在分割过

收稿日期:2013-12-30;修回日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(61165011);江西省科技计划项目(20112BBG70092);宜春学院校级科研课题(XJ1315)

第一作者简介:胡海霞(1978—),女,讲师,2009年于南昌航空大学获信号与信息处理专业硕士学位,主要研究方向为计算机视觉与图像处理。E-mail: xiaoyue_new@163.com

程中丢失;二是极线约束几乎不能为直线匹配直接提供有效的位置约束^[6]。

现有的直线匹配方法总体上可分为两类^[5]:一类是图像间单一直线匹配^[7-10],另一类是图像中直线编组后以组为单位在图像间匹配^[11-15]。单一直线匹配通常是利用直线的几何特性(如方向、长度、梯度等)、直线附近的纹理信息等进行,有利于跟踪物体运动轨迹^[5],但常依赖预知图像间的几何关系,或要求视点的改变范围很小。直线编组匹配则考虑每组内部直线之间的几何特性关系来构造几何不变量,对相机位置变化不敏感,但算法设计复杂,计算量较大^[5],故有些算法结合其他特征进行,如文献^[15]在算法设计中利用了点特征。

文献^[11]提出了一种基于特征向量的直线编组匹配方法,匹配过程的计算量较树形结构的搜索方法^[16]有很大改善,匹配效率得到很大提高,且受物体形变或输入图像噪声的影响很小,具有2维旋转、尺度、平移不变性和较好的鲁棒性。但该方法匹配过程中生成的候选模型容易受阈值选择变化的影响,数量较大,且对单个候选模型做精匹配时的计算方法复杂,耗时长。

针对直线匹配的难点及上述直线编组匹配方法存在的问题,提出一种基于几何特性二元关系的直线编组匹配方法:1)定义一系列的线段二元关系;2)根据二元关系计算出参考线段对与待匹配线段对的局部相似度;3)先用阈值对局部相似度初步过滤,然后分步采用笛卡儿积运算、逐步过滤递推的方法得到候选线段集;4)计算出所有候选线段集的全局相似度;5)综合考虑局部相似度和全局相似度得到最终的匹配线段集。

1 线段的几何特性二元关系

从图像中提取直线特征共 M 条,将这些直线特征(线段)组成一个有序集合,即

$$S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_M\}, 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

式中, s_i 表示第 i 条线段。

定义 线段几何特性二元关系:线段有序集合中任意两个元素(线段)所形成的长度关系或角度关系。

1.1 两线段之间的夹角和到角

两条线段之间形成的角度分夹角和到角两种,

如图1所示,线段 s_{AB} 和 s_{CD} 分别位于直线 l_{AB} 和 l_{CD} 上,直线的斜率分别用 k_{AB} 和 k_{CD} 表示。

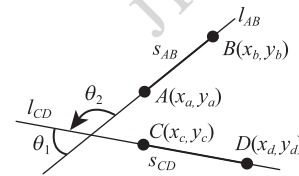


图1 线段的二元角度关系

Fig. 1 Angle-based binary relations between a pair of line segments

两条线段之间的夹角大小取值为直线 l_{AB} 与 l_{CD} 的夹角,用 $\theta_1(s_{AB}, s_{CD})$ 表示;两条线段之间的到角大小取值为直线 l_{AB} 到 l_{CD} 的角,即直线 l_{AB} 以两直线交点为中心按逆时针旋转到直线 l_{CD} 重合位置时, l_{AB} 所旋转的角度数,用 $\theta_2(s_{AB}, s_{CD})$ 表示。

$$\theta_1(s_{AB}, s_{CD}) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & (x_b - x_a)(x_d - x_c) + (y_b - y_a)(y_d - y_c) = 0 \\ \arctan(|V_{\tan}|) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_2(s_{AB}, s_{CD}) = \begin{cases} \arctan(V_{\tan}) & (x_b - x_a)(x_d - x_c) + (y_b - y_a)(y_d - y_c) > 0 \\ \frac{\pi}{2} & (x_b - x_a)(x_d - x_c) + (y_b - y_a)(y_d - y_c) = 0 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan(V_{\tan}) & (x_b - x_a)(x_d - x_c) + (y_b - y_a)(y_d - y_c) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $V_{\tan} = \frac{k_{CD} - k_{AB}}{1 + k_{CD} \times k_{AB}} = [(x_b - x_a)(y_d - y_c) - (x_d - x_c)(y_b - y_a)] / [(x_b - x_a)(x_d - x_c) + (y_b - y_a)(y_d - y_c)]$, 为直线 l_{AB} 与 l_{CD} 夹角的正切值。

1.2 线段的长度二元关系

线段长度二元关系用 R_L 表示,4种取值分别为

$$\begin{aligned} R_{L_1}(s_{AB}, s_{CD}) &= (\overline{AC} + \overline{AD})/d \\ R_{L_2}(s_{AB}, s_{CD}) &= (\overline{BC} + \overline{BD})/d \\ R_{L_3}(s_{AB}, s_{CD}) &= (\overline{AC} + \overline{BC})/d \\ R_{L_4}(s_{AB}, s_{CD}) &= (\overline{AD} + \overline{BD})/d \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $R_{L_i}(s_{AB}, s_{CD})$ ($i=1, 2, 3, 4$) 表示第 i 种线段长度二元关系; $d = \overline{AB} + \overline{CD} + \overline{AC} + \overline{AD} + \overline{BC} + \overline{BD}$; $\overline{AB}$ 、 $\overline{CD}$ 、 $\overline{AC}$ 、 $\overline{AD}$ 、 $\overline{BC}$ 和 $\overline{BD}$ 分别表示线段 s_{AB} 、 s_{CD} 、 s_{AC} 、 s_{AD} 、 s_{BC} 和 s_{BD} 的长度。

1.3 线段的角度二元关系

线段角度二元关系用 R_A 表示, 4 种取值分别为

$$\begin{aligned} R_{A_1}(s_{AB}, s_{CD}) &= \frac{\theta_1(s_{AC}, s_{CB}) + \theta_1(s_{AD}, s_{DB})}{\pi} \\ R_{A_2}(s_{AB}, s_{CD}) &= \frac{\theta_1(s_{AD}, s_{DB}) + \theta_1(s_{CA}, s_{AD})}{\pi} \\ R_{A_3}(s_{AB}, s_{CD}) &= \frac{\theta_1(s_{CA}, s_{AD}) + \theta_1(s_{CB}, s_{BD})}{\pi} \\ R_{A_4}(s_{AB}, s_{CD}) &= \frac{\theta_1(s_{CB}, s_{BD}) + \theta_1(s_{AC}, s_{CB})}{\pi} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $R_{A_i}(s_{AB}, s_{CD}) (i=1, 2, 3, 4)$ 表示第 i 种线段角度二元关系。

1.4 线段集的中点连线和中点连线有序集合

设集合 S 中 M 条线段的中点分别为 $E_1, \dots, E_M$, 将所有线段的中点用直线段连接起来, 可以得到 $K = \frac{M(M-1)}{2}$ 条中点连线段, 用 S' 表示这些中点连线段组成的有序集合, 即

$$S' = \{s'_1, \dots, s'_k, \dots, s'_K\} \quad (6)$$

式中, $k = (i-1)(M-1) + j, (1 \leq i, j \leq M)$; $s'_k (k=1, \dots, K)$ 表示 S' 中由 E_i 和 E_j 所连成的直线段, 即 $s'_k = s'_{E_i E_j}$ 。

1.5 中点连线有序集合的关系

集合 S' 中各线段关系的取值分为长度和角度两种:

1) 长度关系, 用 R_{ML} 表示为

$$R_{ML}(s'_k) = E_i E_j / L_{\text{SUM}} \quad (7)$$

式中, $k = (i-1)(M-1) + j, i \neq j (1 \leq i, j \leq M)$; $E_i E_j$

$$\begin{cases} S_L(a_m, a_n, b_s, b_t) = \frac{1}{8} \sum_{r,m,n,s,t} \left[\left(\frac{1}{1 + \frac{|R_{L_r}(a_m, a_n) - R_{L_r}(b_s, b_t)|}{R_{L_r}(a_m, a_n)}} \right) + (1 - |R_{A_r}(a_m, a_n) - R_{A_r}(b_s, b_t)|) \right] \\ m \neq n \text{ 且 } 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq M, s \neq t \text{ 且 } 1 \leq s \leq N, 1 \leq t \leq N, r = 1, \dots, 4 \\ 0 \text{ 其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, R_{L_r} 和 R_{A_r} 分别表示第 $r (r=1, 2, 3, 4)$ 种线段长度二元关系和线段角度二元关系。

$S_L(a_m, a_n, b_s, b_t)$ 的值越大, 表明线段对 (a_m, a_n) 与线段对 (b_s, b_t) 的相似程度越大。当 $S_L(a_m, a_n, b_s, b_t)$ 为 1.0, 则认为线段对 (a_m, a_n) 与线段对 (b_s, b_t) 完全相似。

2.2 进行粗匹配, 生成候选线段集集合

2.2.1 相容矩阵, 相容测度值

线段 a_m 与 b_s 之间相似程度, 用 a_m 与 b_s 之间相容测度值 $C(m, s)$ 来度量, 其计算过程如下:

表示 $s'_k(s'_{E_i E_j})$ 的长度; L_{SUM} 为所有中点连线的长度总和。

2) 角度关系, 用 R_{MA} 表示为

$$R_{MA}(s'_i, s'_j) = \frac{\theta_2(s'_i, s'_j)}{\pi}, i, j = 1, \dots, K \quad (8)$$

式中, 在 K 条线段的 S' 中, $R_{MA}(s'_i, s'_j)$ 的取值共 $K(K-1)$ 个。

2 基于二元关系的线特征匹配

本文匹配所涉及的两幅图像分别称为参考图像和待匹配图像, 两幅图像提取的线段特征组成有序线段集合分别用 S_A 和 S_B 表示, 其元素(线段)数量分别为 M 和 $N (M < N/2)$, 则

$$\begin{cases} S_A = \{a_1, \dots, a_M\} \\ S_B = \{b_1, \dots, b_N\} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到线段方向问题, 在组成 S_B 时, 将待匹配图像线段特征中的任一线段(设端点为 A, B)分别用 s_{AB} 和 s_{BA} 表示成方向相反的两条不同线段, 即 $b_i (i \leq N/2)$ 可以表示成 b_i 和 $b_{i+N/2}$ 两条方向相反的线段。因此, S_B 中的元素数量为待匹配图像线段特征数量的两倍。

2.1 计算局部相似度

为确定线段对 (a_m, a_n) 与线段对 (b_s, b_t) 的相似程度, 同时降低直线段端点提取不准确对算法的影响, 在定义局部相似度测试函数 $S_L(a_m, a_n, b_s, b_t)$ 时, 使用了全部的 8 种二元关系, 有

首先, 以所有局部相似度值为基础, 针对线段 a_m 与 b_s 建立一个相容矩阵

$$C_{ms} = \begin{bmatrix} c_{ms}(1, 1) & \dots & c_{ms}(1, N) \\ \vdots & c_{ms}(i, j) & \vdots \\ c_{ms}(M, 1) & \dots & c_{ms}(M, N) \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (11)$$

式中, $c_{ms}(i, j) = S_L(a_m, a_i, b_s, b_j), 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。

然后, 求 $C'_{ms} (m \times s)$ 矩阵, 其元素表达式为

$c'_{ms}(i, j) = \begin{cases} 1 & c_{ms}(i, j) - Th \geq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$, Th 为过滤量 (将在后面计算)。通过判断 C'_{ms} 中是否存在行向量为零向量, 若存在, 则认为线段 a_m 与 b_s 不相似, 否则相似。为了简化这一过程, 只需求出一个能判断 a_m 与 b_s 是否相似的临界值——相容测度值 $C(m, s)$, 当 $C(m, s) \geq Th$ 时, 则认为 a_m 与 b_s 相似, 相似度为 $C(m, s)$ 。因此, 可省略计算 C'_{ms} 矩阵, 而直接求 a_m 与 b_s 的相容测度值, 即

$$C(m, s) = \min[\max(c_{ms}(1, j)), \dots, \max(c_{ms}(i, j)), \dots, \max(c_{ms}(M, j))] \quad (12)$$

式中, $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。

2.2.2 相容测度有序集合

确定所有相容测度值 $C(m, s)$ 后, 将 $C(m, s)$ 值、 m 值和 s 值共同组成有序三元组 $(C(m, s), m, s)$, 再将所有有序三元组按 $C(m, s)$ 值的降序排列, 并组成一个有序集合, 即相容测度有序集合

$$C_c = \left\{ (c_c(k), i, j) \mid \begin{cases} c_c(k) = C(m, s), \\ c_c(k) \geq c_c(k+1) \end{cases} \right\} \quad (13)$$

式中, $1 \leq m \leq M, 1 \leq s \leq N; k = 1, \dots, MN - 1, k$ 为 C_c 中元素的序号, 第 1 个元素的 $k = 1$, 第 2 个元素的 $k = 2$, 以此类推。

2.2.3 阈值、候选线段序号集合、匹配参数

本文匹配方法用到两个阈值, 分别记为 t_1 和 t_2 ($0 < t_2 \leq t_1 < 1$), t_1 和 t_2 是两个百分比值, 并不直接用来过滤相似度, 也不直接参与匹配过程, 而是用来计算以下数据:

1) 从 C_c 中筛选出满足 t_1 条件的所有元素, 以生成候选线段序号集合 U_m ($1 \leq m \leq M$), 即

$$U_m = \{j \mid (c_c(k), m, j) \in C_c, k \leq MNt_1\} \quad (14)$$

式中, $1 \leq j \leq N$, U_m 中的每个元素值 j 表示线段 a_m 与线段 b_j 是候选匹配的。

2) 计算匹配参数 p_1 和 p_2 , 用于计算候选线段集时过滤掉不满足条件的线段集, 即

$$\begin{cases} p_1 = c_c(\text{int}(MNt_1)) \\ p_2 = c_c(\text{int}(MNt_2)) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $c_c(\text{int}(MNt_1))$ 的取值为有序集合 C_c 的第 $\text{int}(MNt_1)$ 个元素 (三元组) 中的第 1 个数据项; $c_c(\text{int}(MNt_2))$ 的取值类似。

2.2.4 候选线段组集合

生成候选线段组集合时, 如果直接对所有候选线段序号集合 $U_1, \dots, U_M$ 进行笛卡儿积运算, 计算

量巨大。为减少生成候选线段组集合的计算量及候选线段组数量, 本文采用分步笛卡儿积运算, 逐步过滤生成候选线段组。整个分步过程为

$$\begin{aligned} U_1 &= D'_1 \Rightarrow D'_1 \otimes U_2 = D_2 \xrightarrow{\text{过滤}} D'_2 \Rightarrow \\ D'_2 \otimes U_3 &= D_3 \xrightarrow{\text{过滤}} D'_3 \Rightarrow \dots \Rightarrow \\ D'_{k-1} \otimes U_k &= D_k \xrightarrow{\text{过滤}} D'_k \Rightarrow \dots \Rightarrow \\ D'_{M-1} \otimes U_M &= D_M \xrightarrow{\text{过滤}} D'_M \end{aligned}$$

D_k 和 D'_k ($2 \leq k \leq M$) 为

$$\begin{aligned} D_k &= D'_{k-1} \otimes U_k = \\ \{(u_1, \dots, u_k) \mid (u_1, \dots, u_{k-1}) &\in D'_{k-1}, u_k \in U_k\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$D'_k = \left\{ (u_1, \dots, u_k) \mid \begin{cases} (u_1, \dots, u_k) \in D_k, \\ S_A(k, u_1, \dots, u_k) \geq Th \end{cases} \right\} \quad (17)$$

式中, $2 \leq k \leq M$, 函数 $S_A(k, u_1, \dots, u_k) = \frac{1}{k(k-1)} \times$

$\sum_{1 \leq i, j \leq k} S_L(a_i, a_j, b_{u_i}, b_{u_j})$, Th 为过滤量。

计算 Th 时, 要求所有 $S_L(a_m, a_n, b_s, b_t)$ 的平均值必须不小于 p_1 , 可分 3 种情况讨论:

1) 已知的 $k(k-1)$ 个 S_L 的平均值为 $x_1 = S_A(k, u_1, \dots, u_k) \geq p_1$ 。

2) 由于未知的 $M(M-1) - k(k-1)$ 个的 S_L 值不能计算, 为避免遗漏潜在的相似线段集, 设它们是完全相似的, 即设其平均值为 $x_2 = 1.0 > p_1$ 。

3) 全部 $M(M-1)$ 个 S_L 的平均值为 $x_3 = \frac{k(k-1)x_1 + (M(M-1) - k(k-1))x_2}{M(M-1)} \geq p_1$ 。但由

于 $x_2 = 1.0$ 时常导致 x_3 远大于 p_1 , 而起不到过滤作用, 故使用匹配参数 p_2 ($\geq p_1$), 即 $x_3 \geq p_2$ 。

由情况 1) 3) 可得 x_1 的表达式为

$$x_1 = S_A(k, u_1, \dots, u_k) \geq \max\left(1 - \frac{(1-p_2)M(M-1)}{k(k-1)}, p_1\right)$$

因此, 令 $Th = \max\left(1 - \frac{(1-p_2)M(M-1)}{k(k-1)}, p_1\right)$ 即可。

2.2.5 候选线段集集合

将 D'_M 中的每个元素转换成有序的线段集合, 从而得到候选线段集集合

$$S_D = \{\{v_1, \dots, v_i, \dots, v_j, \dots, v_M\}, v_i \neq v_j\} \quad (18)$$

式中, $1 \leq i < j \leq M$, 由于接下来的精匹配阶段只用到线段的中点, 不需考虑线段的方向, 故 $v_i =$

$$\begin{cases} u_i & u_i \leq N/2 \\ u_i - N/2 & u_i > N/2 \end{cases}, (u_1, \dots, u_i, \dots, u_M) \in D'_M \circ$$

S_D 中第 k 个元素(候选线段集)用 $S_D(k)$ 表示,即

$$S_D(k) = \{v_{1k}, \dots, v_{Mk}\}, \{v_{1k}, \dots, v_{Mk}\} \in S_D \quad (19)$$

此时,候选线段集 $S_D(k)$ 的局部相似度测度为与 $\{v_{1k}, \dots, v_{Mk}\}$ 对应的所有候选线段组的局部相似度测度值中的最大值,用 $S_{A_MAX}(M, v_{1k}, \dots, v_{Mk})$ 表示。

2.3 进行精匹配,计算全局相似度,生成最终的匹配线段集集合

由于 S_D 中的每个元素(候选线段集)的相似度是根据线段对之间的局部相似测度数据计算得到,不能充分说明 S_D 中的每个元素(候选线段集)就是最终要得到的匹配线段集。因此,本文利用线段集的中点连线有序集合及其关系定义了全局相似测度函数。

设 S_A 对应的中点连线有序集合用 S'_A 表示; $S_D(k)$ 对应的中点连线有序集合用 S'_{Dk} 表示,有

$$\begin{cases} S'_A = \{a'_1, \dots, a'_K\} \\ S'_{Dk} = \{b'_1, \dots, b'_K\} \end{cases}, K = M(M-1)/2 \quad (20)$$

因此,求集合 S_A 与 $S_D(k)$ 之间的全局相似测度值转化为求集合 S'_A 与 S'_{Dk} 之间的全局相似测度值,即计算全局相似测度函数

$$\begin{aligned} S_G(S_A, S_D(k)) &= S_G(S'_A, S'_{Dk}) = \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{K} \sum_s \left(\frac{1}{1 + \frac{|R_{ML}(a'_s) - R_{ML}(b'_s)|}{R_{ML}(b'_s)}} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{K(K-1)} \sum_{m \neq n} \left(1 - \left| \frac{R_{MA}(a'_m, a'_n) - R_{MA}(b'_m, b'_n)}{R_{MA}(b'_m, b'_n)} \right| \right) \right] \quad (21) \end{aligned}$$

式中, $K = M(M-1)/2, 1 \leq s \leq K, 1 \leq m \leq K, 1 \leq n \leq K$ 。

最后,利用 p_2 过滤得出最终的匹配线段集集合

$$S_M = \{v_{1k}, \dots, v_{Mk} | S_{WA}(S_A, S_D(k)) \geq p_2\} \quad (22)$$

式中, $S_D(k) = \{v_{1k}, \dots, v_{Mk}\}, \{v_{1k}, \dots, v_{Mk}\} \in S_D$,

$$S_{WA}(S_A, S_D(k)) = \frac{1}{3} \left(S_{A_MAX}(M, v_{1k}, \dots, v_{Mk}) + 2S_G(S_A, S_D(k)) \right)$$

3 算法分析与实验分析

3.1 算法时间复杂度分析

以计算单个线段二元关系所耗时间作为单位时间,本文直线匹配方法时间复杂度主要分为 3 个部分:

1) 计算局部相似测度阶段,时间复杂度为

$$\begin{aligned} T_L(M, N) &= O(M(M-1) \times \\ &8 + N(N-1) \times 8 + M(M-1) \times \\ &N(N-1) \times 8) = O(M^2 N^2) \quad (23) \end{aligned}$$

2) 粗匹配阶段,时间复杂度为 T_C 。计算候选线段组集合时,一是计算全部相容测度值的时间复杂度

$$T_{CC} = M(M-1) \times N(N-1) \quad (24)$$

二是用到 p_1 和 p_2 两个匹配参数,需要确定计算 $D'_i (2 \leq i \leq M)$ 由哪个参数起到过滤作用。当 $1 - \frac{(1-p_2)M(M-1)}{i(i-1)} \leq p_1$ 时,取 $j = \max(i)$ 。因此,

计算 D'_i 的计算量 $C_i (2 \leq i \leq M)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} C_i(N, t_1, t_2, j) &= \\ &\begin{cases} (Nt_1)(Nt_1 \times t_1)^{i-1} = N^i t_1^{2i-1} & i \leq j \\ (Nt_1)(Nt_1 \times t_1)^{j-1} \times (Nt_1 \times t_2)^{i-j} \leq N^i t_1^{2i-1} & i > j \end{cases} \quad (25) \end{aligned}$$

最后可以得到生成候选线段集集合的时间复杂度

$$\begin{aligned} T_C &= O(M(M-1) \times N(N-1)) + \\ &O(C_2 + \dots + C_M) \leq O(M^2 N^2) + \\ &O(N^2 t_1 + \dots + N^M t_1^{2M-1}) = \\ &\frac{O(M^2 N^2 + N^2 t_1(1 - N^{M-1} t_1^{2M-2}))}{(1 - N t_1^2)} \quad (26) \end{aligned}$$

3) 精匹配阶段,生成匹配线段集集合的时间复杂度

$$\begin{aligned} T_G &= O(C_M \times (K^2 - K)) \leq \\ &O(M^4 N^M t_1^{2M-1}) \quad (27) \end{aligned}$$

式中, $K = M(M-1)/2$ 。

3.2 实验与分析

采用合成图像和真实图像各一组进行实验。程序编码采用 Matlab 2011B 实现,实验所用计算机环境主要配置如下:操作系统版本为 Windows7 (64 位)旗舰版;CPU 型号为 Inter 酷睿 i2120;内存容量为 16 GB。

为验证本文算法的匹配效果,实验中将本文算法与文献[11]算法进行比较。文献[11]算法与本文算法主要存在以下区别:1)前者只计算“局部相似度”和“全局不相似度”;2)前者在粗匹配阶段不考虑线段方向,故其算法中待匹配线段数量只是本文算法的一半(即为 $N/2$);3)在生成候选模型集

时,前者只对具有重复特征(线段)的不合理模型进行过滤。

3.2.1 实验1 合成图像(128×128 像素)

实验1图像如图2(a)(b)所示。图2(a)是参考图像,图2(b)是待匹配图像,图2(c)~(e)图像中粗黑线标注表示两种算法匹配得到的线特征。表1给出了图2(c)~(e)中3组线特征匹配的各相似度情况。

实验中, $M=6$, $N=160$,阈值的选择如表2、表3所示。表2、表3列出了实验1粗匹配过程中各 U_i 的元素数量及总数和候选线段集集合的元素数量。表4、表5列出了实验1匹配过程中各阶段所耗时间、实际时间复杂度。

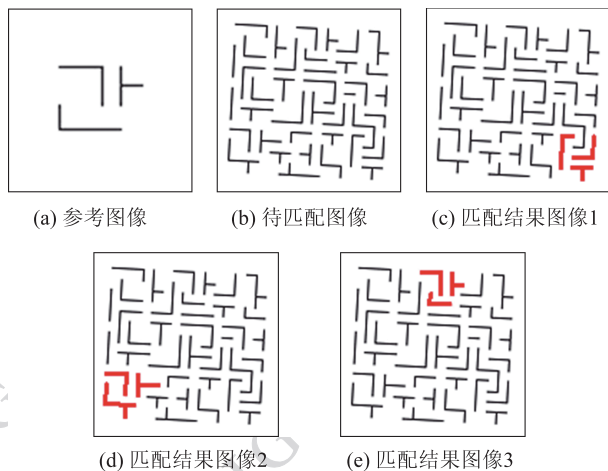


图2 合成图像匹配结果

Fig. 2 Synthetic matching test

表1 图2(c)~(e)中3组线特征匹配的相似度

Table 1 Similarities of three groups of line segments in Fig. 2(c)~(e)

匹配的线特征图像	算法	局部相似度	全局相似度	匹配相似度	全局不相似度
图2(c)	本文	1.000 000	1.000 000	1.000 000	—
	文献[11]	1.000 000	—	—	0.000 000
图2(d)	本文	0.940 871	0.916 126	0.924 374	—
	文献[11]	0.719 623	—	—	0.178 935
图2(e)	本文	0.953 456	0.900 311	0.918 026	—
	文献[11]	0.669 663	—	—	0.225 649

表2 本文算法粗匹配过程中部分数据的元素数量

Table 2 Elements number of parts of data in our method procedure of matching crudely

阈值 t_1, t_2	各 $U_i (i=1, \dots, 6)$ 的元素数量及总数	直接笛卡儿积运算的元素数量	候选线段集集合的元素数量
0.20, 0.06	$47 + 24 + 15 + 14 + 38 + 54 = 192$	486 077 760	163
0.16, 0.06	$42 + 21 + 14 + 13 + 28 + 36 = 154$	161 808 192	114
0.12, 0.06	$37 + 13 + 14 + 13 + 17 + 21 = 115$	31 252 494	81
0.08, 0.06	$25 + 7 + 12 + 10 + 12 + 11 = 77$	2 772 000	28
0.28, 0.05	$49 + 25 + 23 + 22 + 70 + 80 = 269$	3 471 160 000	198
0.24, 0.05	$47 + 24 + 22 + 21 + 53 + 63 = 230$	1 740 073 104	167
0.20, 0.05	$47 + 24 + 15 + 14 + 38 + 54 = 192$	486 077 760	120
0.16, 0.05	$42 + 21 + 14 + 13 + 28 + 36 = 154$	161 808 192	85
0.12, 0.05	$37 + 13 + 14 + 13 + 17 + 21 = 115$	31 252 494	64
0.08, 0.05	$25 + 7 + 12 + 10 + 12 + 11 = 77$	2 772 000	23
0.28, 0.04	$49 + 25 + 23 + 22 + 70 + 80 = 269$	3 471 160 000	151
0.24, 0.04	$47 + 24 + 22 + 21 + 53 + 63 = 230$	1 740 073 104	134
0.20, 0.04	$47 + 24 + 15 + 14 + 38 + 54 = 192$	486 077 760	97
0.16, 0.04	$42 + 21 + 14 + 13 + 28 + 36 = 154$	161 808 192	73
0.12, 0.04	$37 + 13 + 14 + 13 + 17 + 21 = 115$	31 252 494	55
0.08, 0.04	$25 + 7 + 12 + 10 + 12 + 11 = 77$	2 772 000	22

表 3 文献[11]算法粗匹配过程中部分数据的元素数量

Table 3 Elements number of parts of data in the reference[11] mehod procedure of matching crudely			
阈值 t_1, t_2	各 $U_i(i=1, \cdots, 6)$ 的元素数量及总数	直接笛卡儿积运算的元素数量	候选线段集集合的元素数量
0.60,—	$2+1+5+1+1+3=13$	30	30
0.55,—	$3+1+10+1+3+7=25$	630	621
0.50,—	$15+2+18+1+6+9=51$	29 160	25 401
0.45,—	$31+15+27+3+10+18=104$	6 779 700	5 420 883
0.40,—	$49+27+34+6+18+29=163$	140 883 624	119 632 360

表 4 本文算法匹配过程中各阶段所耗时间、时间复杂度和实验结果

Table 4 Used time, time complexity and experiment results of various matching stages using our method						
阈值 t_1, t_2	所耗时间/ms				时间复杂度/ 10^4	实验结果
	局部相似度	粗匹配阶段	精匹配阶段	总耗时		
0.20,0.06	740	542	19	1 301	765	图 2(c) (d)(e)
0.16,0.06	722	343	17	1 082	728	
0.12,0.06	759	271	17	1 047	716	
0.08,0.06	741	216	19	976	709	
0.28,0.05	722	1 354	36	2 112	903	
0.24,0.05	741	758	36	1 535	799	
0.20,0.05	758	487	19	1 264	752	
0.16,0.05	759	343	19	1 121	727	
0.12,0.05	741	271	17	1 029	715	
0.08,0.05	705	235	17	957	709	
0.28,0.04	722	1 102	36	1 860	859	
0.24,0.04	722	686	19	1 427	782	
0.20,0.04	722	433	19	1 174	743	
0.16,0.04	722	325	19	1 066	725	
0.12,0.04	722	252	19	993	715	
0.08,0.04	741	216	19	976	709	
平均值	734	490	22	1 246	754	
百分比/%	58.9	39.3	1.8	100.0		

表 5 文献[11]算法匹配过程中各阶段所耗时间、时间复杂度和实验结果

Table 5 Used time, time complexity and experiment results of various matching stages using reference[11] method						
阈值 t_1, t_2	所耗时间/ms				时间复杂度/ 10^4	实验结果
	局部相似度	粗匹配阶段	精匹配阶段	总耗时		
0.60,—	90	416	36	542	159	图 2(c)
0.55,—	90	434	433	957	255	
0.50,—	90	433	16 683	17 206	4 287	
0.45,—	90	1 608	3 542 370	3 544 068	882 181	
0.40,—	90	37 483	79 993 721	80 031 294	19 465 451	图 2(c) (d) (e)
平均值	90	8 075	16 710 649	16 718 814	4 070 467	
百分比%	0.0	0.0	100.0	100.0		

3.2.2 实验2 真实图像(256×256 像素)

实验2 真实图像如图3(a)(b)所示,图3(a)是参考图像,图3(b)是待匹配图像,图3(c)(d)分别是图3

(a)(b)的线特征图像。图3(e)一(h)图像中粗黑色标注表示两种匹配算法得到的线特征。表6 给出了图3 中(e)一(h)4 组线特征匹配的各相似度情况。

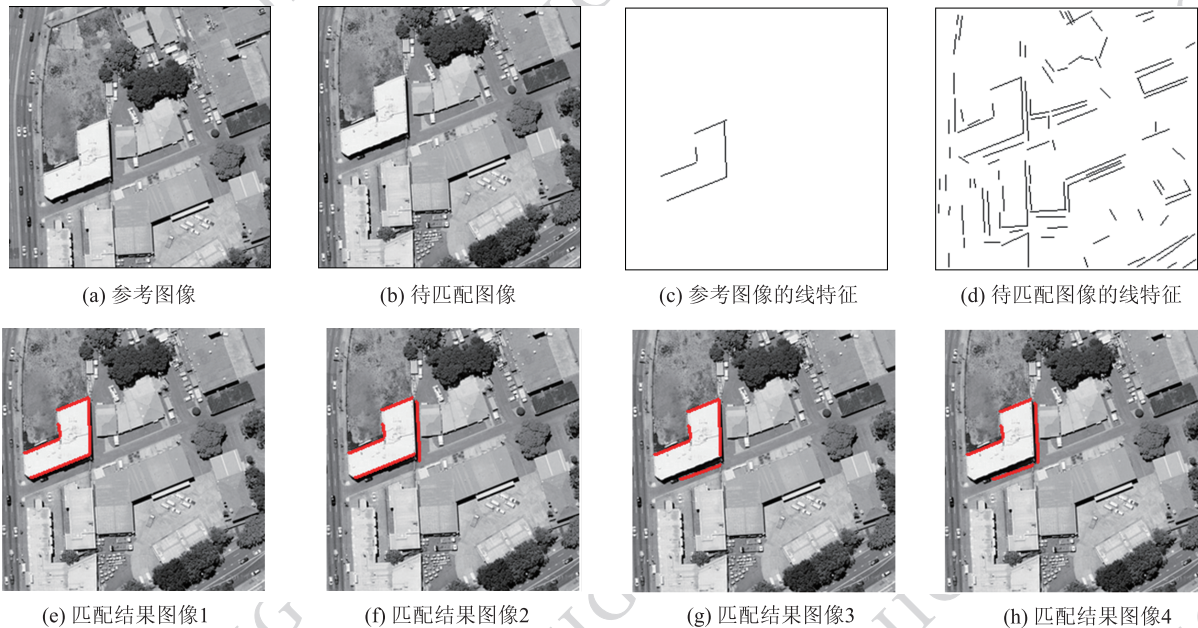


图3 真实图像匹配实验图像

Fig.3 Aerial matching test

表6 图3(e)一(h)中4组线特征匹配的相似度

Table 6 Similarities of four groups of line segments in Fig.3 (e)一(h)

匹配的线特征图像	算法	局部相似度	全局相似度	匹配相似度	全局不相似度
图3(e)	本文	0.970 116	0.988 090	0.982 098	—
	文献[11]	0.874 444	—	—	0.010 426
图3(f)	本文	0.970 082	0.939 477	0.939 586	—
	文献[11]	0.838721	—	—	0.011 868
图3(g)	本文	0.939 806	0.988 090	0.982 098	—
	文献[11]	0.802 119	—	—	0.049 937
图3(h)	本文	0.923 693	0.939 477	0.939 586	—
	文献[11]	0.766 396	—	—	0.038 219

实验中, $M=5$, $N=198$ 。阈值的选择如表7所示。表7列出了实验2粗匹配过程中各 U_i 的元素数量及总数和候选线段集集合的元素数量。表8、表9列出了实验2匹配过程中各阶段所耗时间、时间复杂度和实验结果。

3.2.3 实验结果分析

1)上述两个实验说明本文算法适用于合成图像和真实图像。实验结果表明本文算法具有良好的旋转、缩放和平移不变性,对直线的端点和长度变化

不敏感,具有较好的鲁棒性。

2)对比表2、表3(或表7)中本文算法的“直接笛卡儿积运算的元素数量”和“候选线段集集合的元素数量”两项数据,显然,在粗匹配阶段采用分步过滤运算后,大大减少了候选线段集数量;另外,比较表3(或表6)中两种不同算法,在保证较好匹配结果的前提下,本文算法的粗匹配阶段所耗时间随阈值改变变化不大。这充分说明本文粗匹配阶段采用的分步过滤运算方法效果较好,提高了整个匹配算法运算的效率。

表 7 粗匹配过程中部分数据的元素数量

Table 7 Elements number of parts of data in the procedure of matching crudely

本文算法 文献 [11] 算法	阈值 t_1, t_2	各 $U(i=1\cdots 6)$ 的元素数量及总数	直接笛卡儿积运算的元素数量	候选线段集集合的元素数量
	0.16,0.05	$29+51+42+10+26=158$	16 150 680	113
	0.12,0.05	$23+40+31+8+17=119$	3 878 720	59
	0.08,0.05	$18+21+25+5+10=79$	472 500	41
	0.16,0.04	$29+51+42+10+26=158$	16 150 680	90
	0.12,0.04	$23+40+31+8+17=119$	3 878 720	53
	0.08,0.04	$18+21+25+5+10=79$	472 500	39
	0.28,0.03	$46+96+73+18+44=277$	255 315 456	114
	0.24,0.03	$41+79+63+16+39=238$	127 331 568	104
	0.20,0.03	$35+62+52+14+35=198$	55 291 600	90
	0.16,0.03	$29+51+42+10+26=158$	16 150 680	73
	0.12,0.03	$23+40+31+8+17=119$	3 878 720	43
	0.08,0.03	$18+21+25+5+10=79$	472 500	32
	0.60,—	$1+1+1+1+1=5$	1	1
	0.55,—	$2+2+1+3+1=9$	12	12

	0.50,—	$5+5+4+3+1=18$	300	288
	0.45,—	$11+13+11+6+3=44$	28 314	21 359
	0.40,—	$14+39+22+10+4=89$	480 480	367 754

表 8 本文算法匹配过程中各阶段所耗时间、时间复杂度和实验结果

Table 8 Used time, time complexity and experiment results of various matching stages using our method

阈值 t_1, t_2	所耗时间值/ms				算法复杂度/ 10^4	实验结果
	局部相似度	粗匹配阶段	精匹配阶段	总耗时		
0.16,0.05	705	378	19	1 102	750	图 3(e)~(h)
0.12,0.05	685	289	19	993	738	
0.08,0.05	668	252	19	939	735	
0.16,0.04	686	380	17	1 083	750	
0.12,0.04	686	271	19	976	738	
0.08,0.04	686	252	19	957	735	
0.28,0.03	686	1 968	19	2 673	950	
0.24,0.03	686	1 119	19	1 824	838	
0.20,0.03	685	650	19	1 354	784	
0.16,0.03	685	380	19	1 084	750	
0.12,0.03	668	289	19	976	738	
0.08,0.03	668	252	19	939	735	
平均值	683	540	19	1 242	770	
百分比/%	55.0	43.5	1.5	100.0		

表9 文献[11]算法匹配过程中各阶段所耗时间、时间复杂度和实验结果

Table 9 Used time, time complexity and experiment results of various matching stages using reference [11] method

阈值 t_1, t_2	所耗时间值/ms				算法复杂度/ 10^4	实验结果
	局部相似度	粗匹配阶段	精匹配阶段	总耗时		
0.60,—	187	477	27	691	159	图3(e)
0.55,—	192	485	38	715	160	
0.50,—	181	485	269	935	184	
0.45,—	185	487	13 708	14 380	1 989	图3(e)—(h)
0.40,—	181	542	231 292	232 015	31 658	
平均值	185	495	49 067	49 747	6 830	
百分比/%	0.4	1.0	98.6	100.0		

3)在精匹配阶段,表1中本文算法数据显示,尽管图2(d)的局部相似度小于图2(e)的局部相似度,但精匹配运算后得到的图2(d)的匹配相似度反而大于图2(e)的匹配相似度,这个匹配结果正好与文献[11]算法结果一致,说明本文精匹配算法是行之有效的;再者,比较表4、表5(或表8、表9)中两种不同算法,本文算法精匹配阶段所耗时间明显比文献[11]算法少,说明本文精匹配算法运算效率高。

4)在阈值选择对算法结果的影响方面,与文献[11]算法相比,表2、表3(或表7)中本文算法的多组阈值都可以得到较好的匹配结果,且算法总耗时变化不大,对阈值选择不敏感,说明本文算法采用百分比值作为阈值的选择范围,可轻松选择到合适的阈值,并得到较好匹配结果。

4 结 论

本文提出了一种基于几何特性二元关系的直线匹配方法,通过实验进一步验证了该方法的有效性。该方法不仅适用于合成图像和真实图像,具有良好的旋转、缩放和平移不变性,对直线的端点和长度变化不敏感,而且阈值选择对匹配结果影响小,具有较好的鲁棒性。由于该方法充分考虑了直线匹配时的方向问题,使得匹配的准确率得到提高。另外,由于序列图像的匹配中两幅相邻图像间的直线差异度小,故本文方法可用于序列图像间直线特征匹配,为实现基于序列图像的运动估计和结构重建建立了基础。

本文方法主要是采用了分步笛卡儿积运算、逐步过滤的方法得到候选线段集,因而大大减少了候

选线段集数量,提高了匹配效率。但局部相似度计算时间占整个匹配算法用时比例仍较大,优化几何特性二元关系及降低二元关系的计算复杂度将是下一步有待解决的问题。

参考文献(References)

- [1] Tang A W K, Ng T P, Hung Y S, et al. Projective reconstruction from line-correspondences in multiple uncalibrated images [J]. Pattern Recognition, 2006, 39(5):889-896.
- [2] Aider O A, Hoppenot P, Colle E. A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 52(2-3): 229-246.
- [3] Shi F H, Wang J H, Zhang J, et al. Motion segmentation of multiple translating objects using line correspondences [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC:IEEE, 2005: 315-320.
- [4] Ma S D, Zhang Z Y. Computer Vision-Elements of the Computation Theory and Algorithm [M]. Beijing: Science Press, 2003: 169-171. [马颂德,张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础 [M]. 北京:科学出版社, 2003:169-171.]
- [5] Schmid C, Zisserman A. Automatic line matching across views [J]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, 17(19):666-671.
- [6] Deng Y, Lin X Y. A fast line segment based dense stereo algorithm using tree dynamic programming [C]// Proceeding of the 9th European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 201- 212.
- [7] Xi X Q, Wang R S. An algorithm of image-model matching based on straight line features [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(6): 70-74. [席学强,王润生. 基于直线特征的图像-模型匹配算法 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(6):70-74.]
- [8] Huang L M, Peng L Z, Chen M D. Matching and estimating mo-

- tion of line model using geometric algebra[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(3):270-274. [黄良明, 彭立中, 程民德. 利用几何代数进行线段模型匹配和运动估计[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(3):270-274.] [DOI: 10.11834/jig.20010365]
- [9] Bay H, Ferrari V, Van G L. Wide-baseline stereo matching with line segments[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Deigo:IEEE, 2005: 329-336.
- [10] Fu D, Wang C, Xu Y D, et al. A new algorism of matching line segments[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1):115-119. [傅丹, 王超, 徐一丹, 等. 一种直线段匹配的新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):115-119.]
- [11] Park S H, Leeb K M, Lee S U. A line feature matching technique based on an eigenvector approach[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 3(77): 263-283.
- [12] Nie X, Zhao R C, Kang B S. A precise image registration method by utilizing the geometric feature of edges[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(12): 1668-1675. [聂焱, 赵荣椿, 康宝生. 基于边缘几何特征的图像精确匹配方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(12):1668-1675.]
- [13] Wen G J. A global algorithm for straight line stereo matching based on feature grouping[J]. Journal of Software, 2006, 16(12):2471-2484. [文贡坚. 一种基于特征编组的直线立体匹配全局算法[J]. 软件学报, 2006, 16(12):2471-2484.]
- [14] Wang K P, Shang Y, Yu Q F. An image matching approach based on the invariant moment of slope angle histogram[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(3):389-393. [王鲲鹏, 尚洋, 于起峰. 影像匹配定位中的直线倾角直方图不变矩法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3): 389-393.]
- [15] Elaksher A F. Automatic line matching across multiple views based on geometric and radiometric properties[J]. Applied Geomatics, 2011, 3(1):23-33.
- [16] Grimson W E L, Lozano-Perez T. Localizing overlapping parts by searching the interpretation tree[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1987, 9(4): 469-482.