#### 文章编号: 1672-2892(2012)02-0196-05

# 基于直线空间结构特征的图像匹配方法

王兵学<sup>1</sup>,雍 杨<sup>2</sup>,黄自力<sup>2</sup>

(1.总装备部 重庆军事代表局,重庆 400042; 2.兵器工业集团 西南技术物理研究所,四川 成都 610054)

摘 要:直线匹配在图像配准、目标识别等领域有重要应用。提出利用直线空间结构特征进行匹配的方法,算法采用粗精两级匹配的思路,粗匹配阶段用四参数仿射变换模型对待匹配图像进行粗步校正,精匹配阶段利用反映直线空间结构分布特征的直线交点方位角直方图,把直线匹配映射成两个点集的匹配,结合随机抽样共识(RANSAC)算法和参数迭代一致性方法剔除错配点对,实现图像的自动匹配。实验结果表明,本文方法能够取得较高的匹配精度。

关键词:直线匹配;直线交点;交点方位角直方图;随机抽样共识算法

中图分类号: TN911.73; TP317.4 文献标识码: A

## An image registration algorithm based on space structure features of line

WANG Bing-xue<sup>1</sup>, YONG Yang<sup>2</sup>, Huang Zi-li<sup>2</sup>

(1.Chongqing Military Deputy Bureau, General Armament Department, Chongqing 400042, China; 2.Southwest Institute of Technical Physics, China South Industries Group Corporation, Chengdu Sichuan 610054, China)

**Abstract:** Line matching plays an important role in image registration, object recognition, and other applications. This paper presents an image registration algorithm based on space structure features of line. The four-parameter affine transformation model is used in coarse registration. The line matching problem is converted into a point-matching problem through construction of azimuth histogram which reflects the space structure features of line distribution in fine registration. The RANdom SAmple Consensus(RANSAC) method and parameter iteration consistency method are used to delete the error matching points. Experimental results show that the proposed algorithm is provided with high registration accuracy.

Key words: line matching; intersection of line; azimuth histogram of intersection; RANSAC algorithm

直线匹配是计算机视觉中的一个关键技术和经典问题,在三维重建、目标识别和图像配准等诸多领域有重要应用。近些年来,点匹配、形状匹配和区域匹配等方法都取得了较大进展,但受诸多因素的制约,对于直线匹配的研究长期以来进展缓慢。目前常见的直线匹配方法有单直线匹配和组直线匹配 2 种思路。单直线匹配的方法包括:用直线的位置、方向、长度等特征进行匹配<sup>[1-2]</sup>,但现有的直线提取方法很难保证直线的长度和端点位置的准确性,因此这类方法只适用于比较理想的情况;用极线几何约束对直线匹配搜索区域进行限制<sup>[3-4]</sup>,但在实际情况中参考图像与待匹配图像之间的极线约束关系通常是未知的;用直线支撑区域的灰度特征进行匹配<sup>[5]</sup>,这种方法在图像的光照发生变化时会完全失效。组直线匹配则利用两组直线间的整体关系(旋转、平移或关系图)从整体角度寻找最佳同名影像线,如用感知分组的方法对直线进行聚类,利用聚类区域中直线的总体特征进行匹配,或用一个区域内直线的角度特征进行匹配<sup>[6-7]</sup>,但组直线匹配的运算量通常比较大。

高精度图像匹配的要求需要计算出参考图像与待匹配图像之间的数学变换模型,目前常用的方法是在2幅图像中找到若干对相互匹配的控制点对,用最小二乘拟合的方法求出2幅图像的数学变换模型。按照这种思路,直线匹配就必须要实现点到点的匹配,而前面所述的各种方法,即使实现了同名直线的匹配,但如果直线端点位置不准确,仍然会影响求取数学变换模型的精度。相比直线而言,直线交点具有更好的稳定性,它的定位不需要精确地求出直线的端点,这就大大降低了对直线连续性的要求,此外多个交点分布的方位特征对旋转和光照变化具有不变性,能很好地反映直线的空间结构分布特征。因此,本文提出了利用直线空间结构特征进行匹配的方法,算法采用粗精两级匹配的思路,粗匹配阶段用四参数仿射变换模型对待匹配图像进行初步校正;精匹配阶段利用

收稿日期: 2011-05-18; 修回日期: 2011-06-16 基金项目: 中国科学院国防创新基金资助项目(CXJJ-259); 总装预研基金资助项目(9140A01060108DZ02) 直线交点与其邻域内其他交点的方位特征建立方位角直方图,把直线匹配转换成直线交点的匹配,结合 RANSAC 算法和参数迭代一致性方法剔除错配点对,最终实现了图像的自动匹配。

## 1 算法描述

#### 1.1 直线提取

Canny 算子是一种常用的边缘提取算子,它定位精度高,能得到图像的单像素边缘。但 Canny 算子得到的边 缘是连续的,为了从边缘中分离出直线,本文对边缘线段进行跟踪扫描,在曲率较大的地方断开,这样就得到了 若干近似直线的边缘线段。最后对这些边缘点进行最小二乘拟合,求出每条直线的斜率和截距。这种直线提取方 法可靠性高,定位准确,不会出现过连接或伪直线的情况。

#### 1.2 粗匹配

在实际工程应用中,最常见的需求是参考图像已知,然后对传感器捕获的实时图像进行匹配,参考图像和实时图像之间存在的变化可以用六参数仿射变换来表示。但在粗匹配阶段,由于对匹配的精度要求不高,可以采用 四参数的仿射变换模型。四参数仿射变换模型由尺度因子 *s*、旋转角度 θ 及平移参数 *t<sub>x</sub>*和 *t<sub>y</sub>*决定。在此变换模型 下,参考图像中的点 (*x*,*y*)与其在待匹配图像中的对应点 (*X*,*Y*)满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$$
(1)

设参考图像为 $I_{ref}(x, y)$ ,待匹配的实时图像为 $I_{real}(x, y)$ ,它们的粗匹配步骤为:

1) 尺度因子估计。为了简化问题,对待匹配图像做如下假设:根据先验知识,对待匹配图像已进行了尺度 调整,使2幅图像具有大致相同的分辨率。因此尺度因子 *s* 可以近似为 1。

2)旋转角度估计。直线的长度和端点特征都是极不稳定的,但直线的倾角却不受直线长度的影响,是一个稳定的特征,它在图像中的分布是有一定规律的:对于平移和缩放变化,边缘直线的倾角基本保持不变;对于旋转变化,边缘直线的倾角在全图以一个常数变化。本文以10°为间隔,对图像中每条直线与 x 轴的倾角进行直方图统计,得到直线倾角直方图。

若 2 幅图像中存在大面积相似的内容,利用它们直线倾角直方图可以求出 2 幅图像的旋转角度<sup>[8]</sup>。设图像 *P* 中的直线 *p<sub>i</sub>* 与图像 *Q* 中的直线 *q<sub>j</sub>* 的角度差表示为 *θ<sub>ij</sub>* = *A*(*p<sub>i</sub>*) - *A*(*q<sub>j</sub>*),得到 *θ<sub>ij</sub>* 后取整,并使其的变化范围在 0° ~ 359° 之间,对 *θ<sub>ij</sub>* 进行统计,得到 2 幅图像的倾角差值直方图,由于非匹配直线的角度差是随机分布的,而匹配直线的角度差会集中分布在真正的旋转角度附近,所以该直方图峰值处的 *θ* 就是 2 幅图像之间的旋转角度。图 1 是用旋转角度为 30° 的 2 幅图像得到的倾角差值直方图,可以看到在 30° 的地方有明显的峰值。该方法的优点在于对 2 幅图像间的旋转角度的估计来自所有直线共同表决的结果,直线检测的误差、端点位置的不准确、某条直线的缺失等不会对结果产生太大的影响,具有较强的鲁棒性。但该方法

的前提是2幅图像具有相当比例的重叠部分。

通常,比较长的直线能更精确地体现图像的旋转信息,而一 些零散琐碎的小边缘直线在不同图像间的稳定性不够好,因此, 为了更好地获得2幅图像旋转角度,使它们接近真实的估计值, 可以设一个长度阈值,阻止零散琐碎的短直线参加对角度直方图 的贡献。



3) 平移参数估计

如前所述,直线的交点比直线具有更好的稳定性,而交点在 x 轴、 y 轴的投影不受直线检测的影响,能较好 地反映直线发生的平移变化。因此,可以对 2 幅图像中的直线交点在 x 轴、 y 轴的坐标投影曲线进行相关运算, 获取图像的平移参数。

在得到了旋转角度和平移参数后,就可以对待匹配图像进行校正,以实现2幅图像的初步配准。

## 1.3 精匹配

在经过了粗匹配的图像校正后,参考图像与待匹配图像的角度和平移差异已得到了基本校正,但两个直线集 合并不是完全的一一对应,参考图像中的某些直线由于预处理过程中的差异可能会在待匹配图像中发生缺失,同 样,待匹配图像中也可能出现参考图像中没有的直线。因此,它们产生的交点集合也不是每个点都能找到对应的 匹配点,即待匹配图像的交点集合中会有少点和出格点的情况出现。为了应对2个点集中各点分布情况的不确定 性,采用方位夹角直方图的形式对每个交点生成特征描述量。对每个交点建立方位夹角直方图的具体方法为:以 每个交点为中心,求在一定邻域内的每个交点与该交点的方位夹角,建立直方图,直方图以逆时针方向划分为 36个区域。

用统计特征对交点的方位关系进行描述的优点是提高了特征描述量的鲁棒性,在有少点或出格点时,直方图 某个区域内的具体数值会有变化,但对直线交点总体分布情况的影响比较小。在匹配时以最大概率相似的点对为 匹配点对。

为了提高匹配的鲁棒性,除了交点的方位角直方图之外,还可以利用直线交点其他2个特征量:

1) 交点的位置。待匹配图像经过旋转角度校正后,2 幅图像中的直线交点位置差异已经大为减小,因此可 以限定某个交点在参考图像中的匹配交点应该是在它的一定邻域之内;

2) 构成交点的 2 条直线的倾角。不同倾角的直线,可能构成夹角相同的交点,通过判断直线的倾角,可以 减少误配点的数目。

在实际的匹配中, *I*<sub>ref</sub>(*x*, *y*)与*I*<sub>real</sub>(*x*, *y*)之间的差异通常是很复杂的,与上述理想情况相差甚远,因此,难以避免地会出现错配的点对。为了提高配准的精度,就一定要对错配的点对进行剔除。本文采用三方面的策略对错配点对进行剔除:

1) 综合 3 个特征量,构建交点匹配时的相似度函数。在前面所述的 3 个特征量中,交点的位置差异越小,构成交点的 2 条直线的倾角差越小,2 个点的角度直方图相似度越大,这 2 个点匹配的可能性就越大。为了改善匹配的效果,可将这三方面的特征量综合起来,构造交点相似度函数如下:

$$F = \exp(-\frac{s_1^2 + s_2^2}{2\pi\sigma^2})g_{s_3}$$
(2)

式中:  $s_1 \ge I_{ref}(x, y)$ 中的点与  $I_{real}(x, y)$ 中匹配点的位置差异;  $s_2 \ge$ 构成交点的 2 条直线的倾角差;  $s_3 \ge 2$  个交点的角度直方图相似度。 F 越大,表示 2 个交点匹配的程度越高。

2) 用 RANSAC 方法剔除大偏差错配。随机采样一致性估计是占优势的一致样本上的最优估计,它能应付大比例的野值数据,是一种很好的鲁棒估计算法。

3) 迭代一致性参数估计。为了降低统计次数, RANSAC 通过 4 对匹配点计算变换参数剔除错配, 精度有限, 因此用于剔除大比例、大偏差的错配。而小偏差的错配或定位误差较大的正确匹配对, 通过迭代一致性来剔除。 具体方法是选取 N 个(此处 N=10)匹配点对由最小二乘法计算仿射参数, 再按该仿射参数计算各匹配对的定位误 差; 如果最大误差大于某阈值, 将该最大误差的匹配对由其他匹配对替换, 重新仿射参数; 直到最大误差小于某 阈值, 接受该仿射参数。迭代一致性剔除错配对大比例和大误差的错配效果很差, 因此与 RANSAC 协同使用, 获得很好的效果。

#### 2 实验结果与分析

参与匹配的图像是1幅航拍的公路图像,图中具有明显的直线特征,待匹配图像是对原图像进行了旋转、光照和少许平移变化得到的。图2(a)中用白色十字标出了利用本文方法进行粗精两步匹配后得到的控制点对,其中, 左边为参考图像,右边为待匹配图像,从图像可以看出这些控制点对的位置还是很准确的。图2(b)中用黑色十字 标出了控制点对在原图中的位置。图3是选取了部分控制点对,绘出了它们的方位角直方图,虽然它们在每个范 围内的数值有所差异,但整个直方图的分布趋势非常相近。为了对本文方法的精度进行衡量,选取了18个控制 点对,对比其在参考图和待匹配图中的真实位置 *P<sub>i</sub>*,以及用匹配求得的数学变换模型计算得到的预测位置 *T*(*P<sub>i</sub>*), 计算匹配误差。每对控制点对的匹配误差计算公式为:

$$ror(i) = ||P_i - T(P_i)||$$
 (3)

整幅图像匹配的总体误差由均方根误差(Root of Mean Square Error, RMSE)决定,具体数据如表1所示,可 以看出,所有控制点对的匹配误差均小于2个像素,整体匹配 RMSE为1.42个像素。传统的直线匹配方法,由 于没有加入精确的控制点对,难以达到像素级的匹配精度,大多只能找到与参考模板最相似的区域,误差比较大。 试验结果表明,本文在精匹配阶段利用直线交点的方位关系构建的方位角直方图特征,充分利用了直线的空间结 构特征,能在粗匹配的基础上显著提高直线匹配的精度。



Fig.2 Matched intersections based on space structure features of line 图 2 基于直线空间结构特征匹配得到的控制点对

同时,也不难看出直线匹配的精度与一些好的点特征 匹配方法(如 SIFT 算法<sup>[8]</sup>)相比还是要差一些,如表 1 中部 分控制点的误差就比较大,最大的有 1.99 个像素。这是因 为直线特征虽然是比点特征更为高级的特征,但得到直线 的过程却要经过多个环节。首先,直线的提取依赖于边缘 检测,而边缘的定义是图像灰度发生跃变的地方,因此, 不同场景下灰度辐射特征的变化以及图像的旋转、缩放等 因素都会影响到边缘提取的精度;其次,在对边缘线段进 行最小二乘拟合、直线交点求取等一系列的后续处理步骤 中,都难以避免地会产生误差。所有环节的误差经过不断 的累积和放大,最终影响到匹配的精度。虽然目前直线匹 配的精度还不够高,但直线匹配有自己独特的优势,例如 在对缺乏纹理的图像或不同传感器的图像进行匹配时,基 于点特征的方法可能无法提取出可靠的控制点,但直线匹



Fig.3 Azimuth histogram of intersections 图 3 交点方位角直方图

配是利用目标的空间结构特征来进行匹配的,因此仍然可以取得良好的匹配效果。 表1 控制点对的匹配精度

Table1 Matching accuracy of control points and overall RMSE							
No.	Ref X	Ref Y	Real X	Real Y	Predict X	Predict Y	error
1	210	73	172	75	171.67	76.43	1.46
2	212	80	178	80	176.87	80.91	1.45
3	202	75	167	82	167.44	82.30	0.53
4	204	81	171	85	172.17	86.16	1.65
5	213	116	197	110	198.33	111.48	1.99
6	170	86	144	106	143.85	107.12	1.13
7	53	103	51	179	50.88	178.09	0.92
8	53	108	54	183	55.11	181.42	1.81
9	59	106	58	179	58.07	177.55	1.45
10	219	115	201	107	202.16	108.11	1.61
11	251	75	209	56	210.25	56.11	1.25
12	254	68	208	48	206.62	47.82	1.39
13	142	97	125	129	126.34	128.78	1.36
14	232	153	231	133	230.54	133.30	0.55
15	222	157	225	141	223.38	140.90	1.62
16	157	164	172	180	172.31	178.45	1.58
17	43	120	51	199	51.75	199.54	0.92
18	27	152	53	234	52.98	235.76	1.76
overall							1.42

为了验证本文所提出方法的效果,对多幅图像进行了实验。图 4 是用 Google Earth 上的卫星图像进行的实验 结果,待匹配图像与参考图像之间存在大角度的旋转以及灰度变化,图 4(a)和图 4(b)分别是匹配的直线交点在原 图中的位置,为了显示得更清楚,2 幅图像分别用白色十字和黑色十字标识交点位置,匹配精度为 1.56 个像素。





(a) intersections in reference image
 (b) intersections in real image
 Fig.4 Matched points in satellite image
 图 4 卫星图像中求得的匹配点对

信息与电子工程

提出的图像匹配方法利用反映直线空间结构特征的交点,建立交点方位角直方图,实现了从直线匹配到点 匹配的映射。直线交点有明确的几何意义,能很好地体现直线的分布特征,其方位角直方图具有很好的可分性。 在求交点的时候,可以通过设定一个交点与两条相交直线端点的距离阈值,来控制求交点的范围,因此其数量可 以人为控制。而匹配过程中通过对其交点位置和相

交直线倾角的控制,更可以缩小匹配范围,加速了 匹配过程。实验均在 ADSP TS201 平台上进行,通 过大量实验,统计得到各个运算环节的运行时间, 具体数据如表 2。

表 2 匹配算法各运算环节时间开销(单位: ms)								
Table2 Time consumption of the proposed registration algorithm(unit: ms)								
Canny edge detection	line matching	image matching						
195	19	44						

从表 2 的数据看出,整个算法的主要耗时是在 Canny 边缘检测这一环节,如果通过合理的算法优化,运算 速度应该能进一步得到提高。

## 3 结论

将直线交点引入现有的直线匹配方法,将2个直线集合的匹配转换为2个点集的匹配,实验表明,这种方法 能取得较高的匹配精度。该方法具有几个特点:1)采用粗精两步匹配的思路,利用四参数仿射变换模型对待匹 配图像进行初步校正,精匹配阶段用直线交点作为控制点,有效改善了粗匹配阶段的精度;2)构建了一种新的 直线交点特征——交点方位角直方图,该特征是从直线空间分布结构中提取得到,具有良好的可分性;3)以直 线特征为主进行的图像匹配,对于缺乏纹理或灰度辐射特征相差较大的多传感器图像匹配而言,是一种有效补充。

#### 参考文献:

- Bay H,Ferrari V,Gool L V. Wide-Base line stereo matching with line segments[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego:[s.n.], 2005:329-336.
- [2] Thacker N A, Riocreux P A, Yates R B. Assessing the completeness properties of pairwise geometric histograms[J]. Image and Vision Computing, 1995,13(5):423-429.
- [3] 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):115-120. (FU Dan,WANG Chao, XU Yida. A New Algorithm of Matching of Line Segments[J]. Journal of National university of Defense Technology, 2008,30(1): 115-120.)
- [4] Woo D M,Park D C. Stereo Line matching based on the combination of geometric and intensity data[C]// IEEE 24th International Symposium on Computer and Information Sciences, 2009. Guzelyurt:Middle East Technical University, 2009: 581-585.
- [5] Wang Z H,Liu H M,Wu F C. HLD:A robust descriptor for line matching[J]. Pattern Recognition, 2009,42(5):941-953.
- [6] 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. (WANG Kunpeng,SHANG Yang,YU Qifeng. 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.)
- [7] 聂烜,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. (NIE Xuan,ZHAO Rongchun,KANG Baosheng. 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.)
- [8] 吕文涛,吕高焕. SIFT 算法在雷达图像匹配中的应用[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):388-392. (LV Wentao,LV Gaohuan. Application of Scale Invariant Feature Transform to SAR image matching[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):388-392.)

#### 作者简介:



**王兵学**(1975-),男,甘肃省静宁县人,在 读博士研究生,工程师,主要研究方向为自动 目标跟踪、模式识别.email:yy-min@163.com. **雍** 杨(1978-),女,成都市人,博士,讲师, 主要从事图像处理、目标识别与跟踪等研究.

**黄自力**(1967-),男,成都市人,硕士,研究员,研究方向为信号处理、目标探测与识别.