

基于直线 Hough 变换的图像配准方法

曲智国¹ 谭贤四¹ 林 强¹ 王 红¹ 高颖慧²

(空军预警学院二系 武汉 430019)¹ (国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)²

摘 要 为了有效解决不同传感器、不同视角和不同时相条件的图像配准问题,提出了一种基于直线极坐标参数在 Hough 空间求解图像变换参数的图像配准算法。先提取图像中直线极坐标特征参数,形成匹配特征空间;然后在 Hough 空间逐步求解 RST 图像变换的旋转、尺度和平移参数;最后利用实际图像对算法的性能进行了分析与验证。实验结果表明,该方法不需进行复杂的匹配空间搜索,具有适应性强、配准精度高的优点。

关键词 图像配准,直线极坐标参数 Hough 变换,旋转尺度平移变换

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Image Registration Method Based on Straight-line in Hough Parameter Space

QU Zhi-guo¹ TAN Xian-si¹ LIN Qiang¹ WANG Hong¹ GAO Ying-hui²

(Department No. 2, Air Force Early-Warning Academy, Wuhan 430019, China)¹

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)²

Abstract In order to solve the image registration problem of different sensors under different view obtained at different time, a novel image registration algorithm based on straight-lines was presented in this paper. Firstly, we transformed the straight lines in the image space into points in the Hough parameter space by using Hough transform. Then we proposed an approach that simultaneously determines the correspondences between the points and solves for the parameters involved in the registration transformation function in Hough space. Experiments were conducted on real-world images. The experimental results reveal that the algorithm is robust and efficient for most images with rich line features.

Keywords Image registration, Line log-polar parameter hough transform, RST transform

1 引言

图像配准是计算机视觉与图像处理领域中的基础问题,在遥感图像分析、视觉导航、医学图像处理、数据融合等领域有着十分重要的应用^[1,2]。图像配准的任务是通过特征匹配,寻找实时传感器图像与参考图像中同名点之间的对应关系,并计算实时图和参考图间的变换参数。

图像配准包括特征选择、相似性测度和匹配搜索策略等几个要素,各要素相互作用、相互影响。在特征选择方面,主要有区域特征^[3]、点特征^[4]、线特征^[5-8]等,近年来,以 SIFT 和 MSER 为代表的局部特征成为研究的热点;在相似性测度方面,主要有归一化积相关(NProd)、平均绝对差(MAD)、图像互信息、Hausdroff 距离测度等;在同名点匹配搜索策略方面,主要有最小二乘估计(LS)、迭代临近点算法(ICP)、随机抽样一致性(RANSAC)、相干点漂移(CPD)等。

图像配准的实时图和参考图往往是来自不同传感器类型、不同视角和不同时相的图像。因此需要选择实时图和参考图都存在的不变性特征,同时选择良好的相似性测度和合适的搜索策略,使图像配准达到最优效果。

图像配准采用的各类特征中,直线特征表征了地面景物的边缘过渡信息,具有良好不变性,同时还包含方向和尺度信息,可有效应用于不同传感器、不同视角和不同时相情况下的图像配准中。R. Istenic^[9]采用直线特征进行红外/可见光图像配准,不过要求旋转和平移较小,且图像不能有尺度缩放。Shubin Zhao^[10]采用 Hough 变换提取直线,并基于直线参数进行匹配搜索,但仅考虑了角度变换,没有考虑图像的尺度和平移变换问题。

本文提出了一种基于直线极坐标特征参数在 Hough 空间进行匹配搜索(SLHT)的图像配准方法,即先提取图像中的直线并得到直线极坐标特征参数集,构建匹配特征空间,然后基于旋转、缩放和平移(RST)图像变换模型,在 Hough 空间逐步求解同名直线(即实时图和参考图中对应的直线)之间的旋转、缩放和平移参数。该图像配准方法适应性强,且克服了一般图像配准算法需要分步搜索的缺点,可达到较高的图像配准精度。

2 直线极坐标表示特征参数求取

直线极坐标与直角坐标之间的转换方程为:

本文受空军重点科研项目(KJ2011192),国家自然科学基金(61103082)资助。

曲智国(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为图像处理、预警监视等,E-mail:green20001@sina.com;谭贤四(1967-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为预警监视装备体系建设与运用等;林 强(1972-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为空管雷达建设;王 红(1962-),女,教授,硕士生导师,主要研究方向为预警监视装备体系建设与运用等;高颖慧(1976-),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理、目标识别等。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

其中, ρ 表示原点到直线的距离, θ 表示直线的角度, 其取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。图像中每条直线均可用参数 (ρ, θ) 唯一确定。

提取直线时, 通常需要首先检测边缘, 这里采用 Canny 算子提取边缘, 以到达最优的边缘提取效果。提取边缘后, 通过最小二乘直线拟合或 Hough 变换类方法即可得到直线参数 (ρ, θ) 。

将提取出来的直线特征参数采用集合表示, 可得到图像的直线极坐标参数特征空间。对于图像匹配的实时图 I_S 和参考图 I_R , 其特征点集分别用 $P_S = \{(\rho_S^1, \theta_S^1), \dots, (\rho_S^M, \theta_S^M)\}$ 和 $P_R = \{(\rho_R^1, \theta_R^1), \dots, (\rho_R^N, \theta_R^1)\}$ 表示, 其中 M 和 N 分别表示实时图和参考图中的直线数目。

3 基于 SLPHT 的旋转、尺度和平移参数计算

3.1 图像变换模型

由于图像配准的实时图和参考图来自不同视角和不同传感器, 图像之间存在变换。这里采用旋转、尺度和平移(RST)变换模型来描述图像之间的这种变换。直角坐标系中的 RST 变换公式为

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, ϕ, s 和 $(\Delta x, \Delta y)$ 分别为旋转、尺度和平移参数。

根据式(1)和式(2), 实时图和参考图中同名直线之间的关系为:

$$\begin{aligned} \rho_R &= f(x_R, y_R, \theta_R) = x_R \cos \theta_R + y_R \sin \theta_R \\ &= s [x_S \cos(\theta_R - \phi) + y_S \sin(\theta_R - \phi)] + \Delta x \cos \theta_R + \Delta y \sin \theta_R \\ &= s \cdot f(x_S, y_S, \theta_R - \phi) + f(\Delta x, \Delta y, \theta_R) \end{aligned} \quad (3)$$

将上式两边都用极坐标表示:

$$\begin{cases} \rho_R = s \cdot \rho_S + \rho_\Delta \\ \theta_R = \theta_S + \phi \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \rho_\Delta &= f(\Delta x, \Delta y, \theta_S + \phi) \\ &= \Delta x \cos(\theta_S + \phi) + \Delta y \sin(\theta_S + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

同名直线在实时图和参考图坐标系中的映射关系如图 1 所示。图中 l_s 与 l_r 为同名直线。根据式(4)所确定的实时图和参考图中同名直线之间的映射关系, 利用不同图像中的直线参数可以求解图像变换模型中的旋转参数 ϕ 、尺度参数 s 和平移参数 $(\Delta x, \Delta y)$ 。

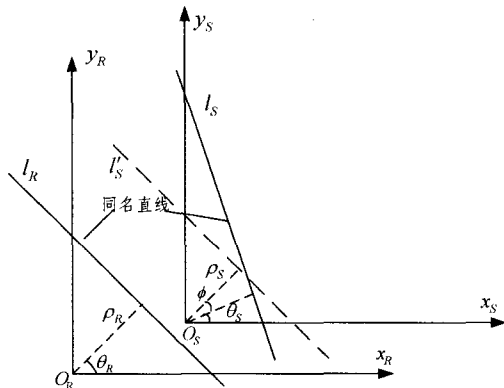


图 1 实时图与参考图同名直线对应关系

3.2 基于直线 Hough 变换(SLHT)的 RST 模型参数计算

3.2.1 旋转参数计算

设同名直线 l_k 和 l'_k 在实时图和参考图中的极坐标角度参数分别为 θ_k^r 和 θ_k^s , 由式(4)有

$$\phi_{ij} = \theta_k^r - \theta_k^s \quad (6)$$

实际上, 待配准的实时图和参考图之间的旋转参数与各

同名直线之间的角度差一致, 即有: $\phi_r = \phi_{ij}, i=1, \dots, M, M$ 为同名直线数目。

由式(6), 理论上一条同名直线即可求得旋转参数 ϕ_r 。但由于实时图和参考图之间的同名直线对是未知的, 往往要通过复杂的计算才能得到其对应关系。根据式(6), 可采用 Hough 变换的思路, 将参数求解过程映射到 Hough 空间, 通过参数累积的方法求取真实的 ϕ_r 值。具体实现思路如下:

(1) 初始化参数累积单元 $A_r(\phi)$, 每个单元的间隔为 $\Delta\phi = 1^\circ$;

(2) 对于实时图和参考图中任意两条直线, 计算其角度差 $\phi_{ij} = (\theta_k^r - \theta_k^s + 180) \% 180, i=1, \dots, N, j=1, \dots, M$ (7)

对 ϕ_{ij} 进行四舍五入取整并累加, 即令 $A_r(\phi_{ij}) = A_r(\phi_{ij}) + 1$;

(3) 完成所有累积计算后, 寻找最大的 $A_r(\phi)$ 值, 得到实时图和参考图之间的旋转参数 $\phi_r = \arg \max A_r(\phi)$, 如果 $\phi_r > T_\phi$ (T_ϕ 为设定阈值), 则认为其是两帧图像之间的旋转参数值;

(4) 根据确定的 ϕ_r 值, 判定实时图像参数集和参考图像参数集中直线的对应关系, 确定同名直线, 得到同名直线关系矩阵:

$$C_r(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\theta_k^r - \theta_k^s + 180) \% 180 = \phi_r \\ 0, & \text{if } (\theta_k^r - \theta_k^s + 180) \% 180 \neq \phi_r \end{cases} \quad (8)$$

旋转角 ϕ_r 确定后, 将参考图中的直线 l_R 逆时针旋转 ϕ_r , 得到与 l_S 平行的直线 l'_R 。相应地, 待匹配的实时图点集也变为 $P'_S = \{(\rho_S^1, \theta_S^1 + \phi_r), \dots, (\rho_S^N, \theta_S^N + \phi_r)\}$ 。

3.2.2 尺度参数计算

在对参考图直线逆时针旋转 ϕ_r 并对参考图点集角度进行修正后, 实时图和参考图中同名直线 l_S 和 l'_R 之间的关系变为:

$$\begin{cases} \rho_R = s \cdot \rho_S + \rho_\Delta' \\ \theta_R = \theta_S' \end{cases} \quad (9)$$

由式(6), 尺度参数 s 和平移参数 ρ_Δ' 都只影响直线到原点的距离 ρ , 单靠一条同名直线的 ρ_R 和 ρ_S 值无法求取, 因此需要利用多条同名直线进行计算。

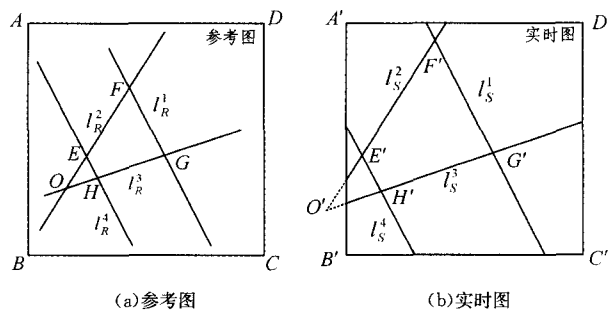


图 2 尺度参数估计示意图

1) 直线平行情况

如果实时图中存在两条平行线, 且在参考图中均有同名直线, 如图 2 所示的直线 l_k 和 l'_k , 其在实时图中对应的同名

直线分别为 l_k^s 和 l_k^r , 根据式(9)可得:

$$\begin{cases} \rho_k = s\rho_k^s + \rho_\Delta \\ \rho_k = s\rho_k^r + \rho_\Delta \end{cases} \quad (10)$$

则尺度参数 s 可以表示为

$$s = (\rho_k^r - \rho_k^s) / (\rho_k^s - \rho_\Delta) \quad (11)$$

2) 直线不平行情况

当图像中的直线不平行时, 三条直线之间都存在交点, 且构建成一个三角形, 如图 2 所示的三角形 FOG 和 $F'O'G'$ 。根据 RST 图像变换模型, 参考图和实时图中的同名相似三角形各边之比即为尺度参数 s , 且面积之比为 s^2 , 由此则有:

$$s = \frac{OF}{O'F'} = \frac{FG}{F'G'} = \frac{GO}{G'O'} \quad (12)$$

实际情况下, 图像中往往同时存在直线平行和不平行两种情况。当图像中存在多条平行线时, 由式(8)确定的同名直线矩阵中, 实时图和参考图中的同名直线间的对应存在多义性, 从而无法直接根据式(11)和式(12)计算出尺度参数。因此, 我们将尺度参数 s 的计算映射到 Hough 空间, 通过参数累积方式求解。具体实现步骤如下:

(1) 初始化参数累积单元 $A_r(s)$, 每个单元的间隔为 $\Delta s = 0.1$;

(2) 将实时图参数集 $P_s = \{(\rho_k^s, \theta_k^s), \dots, (\rho_k^M, \theta_k^M)\}$ 和参考图参数集 $P_r = \{(\rho_k^r, \theta_k^r), \dots, (\rho_k^N, \theta_k^N)\}$ 在 θ_s 方向上聚类, 将角度方向一致的直线聚类到一起, 并将参数集划分成多个平行直线参数子集;

(3) 根据同名直线关系矩阵 $C_r(i, j)$, 对每个角度方向一致的实时图和参考图平行直线子集, 按式(11)两两计算尺度参数 s_{ij}^p , 并按单元间隔进行累加, 即令 $A_r(s_{ij}^p) = A_r(s_{ij}^p) + 1$;

(4) 在 3 个不平行的平行直线参数子集上选择一条直线, 构成三角形, 按式(12)计算尺度参数 s_{ij}^n , 并按单元间隔进行累加, 即令 $A_r(s_{ij}^n) = A_r(s_{ij}^n) + 1$;

(5) 完成所有累积计算后, 寻找最大的 $A_r(s)$ 值, 得到实时图和参考图之间的尺度参数 $s_r = \arg \max A_r(s)$, 如果 $s_r > T_s$ (T_s 为设定阈值), 则认为其是两帧图像之间的尺度参数值。

3.2.3 平移参数计算

求得尺度参数后, 可将式(4)和式(5)改写为

$$\begin{cases} \rho_\Delta = \rho_R - s \cdot \rho_s \\ \Delta x = \rho_\Delta \cdot \cos \theta_R \\ \Delta y = \rho_\Delta \cdot \sin \theta_R \end{cases} \quad (13)$$

由于平行直线所导致的名同直线多义性, 因此无法根据式(4)和式(5)直接求解平移参数 $(\Delta x, \Delta y)$, 同样基于式(4), 我们将平移参数的求解映射到 Hough 空间, 通过参数累积方式求解。式(5)中参数 ρ_Δ 与直线角度参数有关, 因此在 Hough 空间内需要直接求解 $(\Delta x, \Delta y)$, 具体实现步骤如下:

(1) 初始化参数累积单元 $A_r(\Delta x, \Delta y)$, 每个单元的间隔为 $\Delta x = 1, \Delta y = 1$;

(2) 根据同名关系矩阵 $C_r(i, j)$, 按式(13)计算 $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$, 并按单元间隔进行累加, 即令 $A_r(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) = A_r(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) + 1$;

(3) 完成所有累积计算后, 寻找最大的 $A_r(\Delta x, \Delta y)$ 值, 得到实时图和参考图之间的尺度参数 $(\Delta x_r, \Delta y_r) = \arg \max A_r(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$, 如果 $\Delta x_r > T_{\Delta x}, \Delta y_r > T_{\Delta y}$ ($T_{\Delta x}, T_{\Delta y}$ 为设定阈值), 则认为其是两帧图像之间的平移参数值 $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ 。

4 实验结果与分析

这里采用两组不同的地面场景数据对上述图像配准算法进行验证。由于直线参数提取属于图像处理中较为成熟的问题, 因此我们重点考虑如何基于直线的极坐标特征参数来求取图像 RST 变换中的各个参数。

图 3 所示为待匹配的参考图和实时图。分别提取参考图和实时图的边缘, 通过最小二乘直线拟合或 Hough 变换方法提取实时图和参考图中的直线特征参数, 得到参考图特征点集 $P_R = \{(\rho_k^r, \theta_k^r), \dots, (\rho_k^N, \theta_k^N)\}$ 和实时图直线特征点集 $P_s = \{(\rho_k^s, \theta_k^s), \dots, (\rho_k^M, \theta_k^M)\}$ 。基于直线特征参数集, 在 Hough 空间分别求取旋转、尺度和平移参数, 过程如图 4 所示。

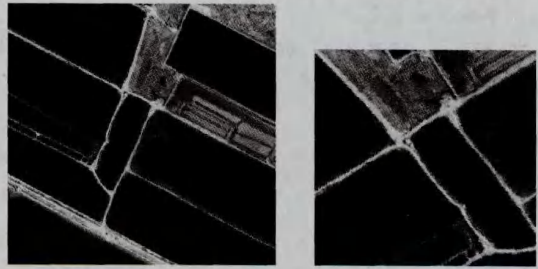


图 3 实验图像 1

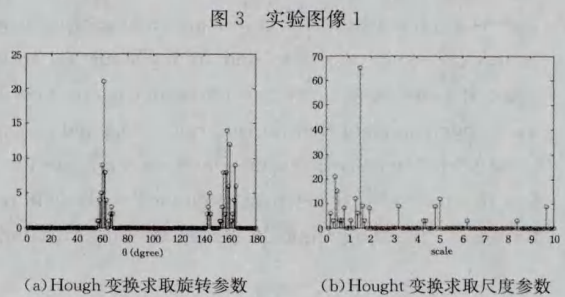


图 4 求取旋转、尺度和平移参数的 Hough 空间累积值

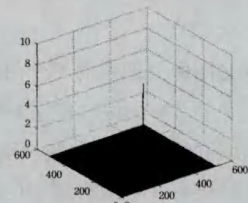


图 4(c) Hough 变换求取平移参数

选择最大累积值所对应的参数为待求取的参数, 可得参考图和实时图 RST 变换参数分别为: $\phi_r = 63^\circ, s_r = 1.5, (\Delta x_r, \Delta y_r) = (336, 328)$ 。利用求得的 RST 变换参数对实时图进行坐标变换, 得到如图 5 所示参考图与实时图的配准结果, 其配准精度达到 1 个像素以内。



图 5 基于 SLPHIT 的图像配准结果(实验图像 1)

(下转第 132 页)

automatically selected features[C]//Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008;1-8

- [5] Berretti S, Del Bimbo A D, Amor B B, et al. A Set of Selected SIFT Features for 3D Facial Expression Recognition[C]//2010 International Conference on Pattern Recognition(ICPR'2010), 2010;4125-4129
- [6] Maalej A, Ben Amor B, Daoudi M, et al. Local 3D Shape Analysis for Facial Expression Recognition[C]//2010 International Conference on Pattern Recognition(ICPR'2010), 2010;4129-4133
- [7] Lipman Y, Tel-Aviv U, Israel, et al. Differential Coordinates for Interactive Mesh Editing[C]//Proceedings of Shape Modeling International, IEEE Society Press, 2004;179-188
- [8] Beslp J, Mckay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2);239-256
- [9] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variant of the ICP algorithm

[C]//Proceedings of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001;145-152

- [10] Salvi J, Matabosch C, Fofi D, et al. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(5);578-596
- [11] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient Variants of the ICP Algorithm[C]//Proceedings of the International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 2001;145-152
- [12] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155
- [13] Duchon J. Splines minimizing rotation invariant seminorms in sobolev spaces[J]. Constructive theory of functions of several variables, 1976;85-91
- [14] Wright J, Yang A, Ganesh A, et al. Robust face recognition via sparse representation[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2);210-227

(上接第 109 页)

为了进一步验证本算法的环境适应能力,采用了不同相条件下获取的参考图和实时图。图 6 所示为实验图像和配准结果,其中图(a)为参考图,图(b)为实时图,图(c)为匹配结果。利用求得的 RST 变换参数对实时图进行坐标变换,其配准精度达到 1 个像素以内。



(a)参考图

(b)实时图

(c)匹配结果

图 6 实验图像 2 及匹配结果

结束语 本文提出了一种基于直线在 Hough 空间进行匹配求解配准参数的图像配准算法。由于直线特征良好的不变性和定向性,该算法可有效解决不同传感器、不同视角和不同时相条件的图像配准问题。同时基于 Hough 变换思想逐

步求解图像变换参数,大大降低了参数搜索的复杂度,能达到较高的图像配准精度。

参考文献

- [1] Brown L G. A Survey of Image Registration Techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24;226-376
- [2] Zitova B, Flusser J. Image Registration Methods: A Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21;977-1000
- [3] Lee H J, et al. Region Matching and Depth Finding for 3D Objects in Stereo Aerial Photographs [J]. Pattern Recognition, 1990, 23(2);81-93
- [4] Boardman D, Dowman I J, Chamberlain A, et al. An automated image registration system for SPOT data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31(4): 128-133
- [5] Habib A, Al-Ruzouq R. Line-based modified iterated Hough transform for automatic registration of multi-source imagery [J]. Journal of Photogrammetric Record, 2004, 19(105);5-21
- [6] Gong Dan-chao, Tang Xiao-tao, Li Shi-zhong, et al. Image Registration of high resolution remote sensing based on straight line feature[C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008;1819-1823
- [7] Fu Zhong-liang, Sun Zhi-qun. An Algorithm of straight line features matching on Aerial imagery[C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008;97-102
- [8] 席学强, 王润生. 基于直线特征的图像-模型匹配算法[J]. 国防科学技术大学学报, 2000, 22(6);70-74
- [9] Istenic R, Heric D, Ribaric S, et al. Thermal and Visual Image Registration in Hough Parameter Space[C]//14th International Workshop On Systems, Signals and Image Processing, Maribor, 2007;106-109
- [10] Zhao Shu-bin. Hough-Domain Image Registration by Metaheuristics[C]//International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 2006;5-8