

基于向量相似度匹配准则的图像配准与拼接

秦 佳^{1,2}, 杨建峰¹, 薛 彬¹, 卜 凡^{1,2}

(1 中国科学院 西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 针对图像配准与拼接中存在的特征点误匹配问题, 提出了基于向量相似度的特征匹配准则. 首先在尺度空间检测 SIFT(Scale Invariant Feature Transformation)特征点, 生成包含特征点信息的 SIFT 向量. 采用向量相似度方法进行特征点匹配, 并通过互映射原理进一步筛选, 删除误匹配点对. 然后用随机抽样一致性算法计算初始投影变换矩阵, 并用 Levenberg-Marquardt(L-M)算法对矩阵求精. 最后通过图像融合实现了图像拼接. 实验结果表明该准则提高了特征点匹配精度, 能处理存在投影变换的图像配准与拼接.

关键词: 图像拼接; 特征匹配; 尺度不变特征变换; 向量相似度; 互映射原理

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)06-0022-04

Image Registration and Mosaic Based on Vector Similarity Matching Principle

QIN Jia^{1,2}, YANG Jian-feng¹, XUE Bin¹, BU Fan^{1,2}

(1 Key Laboratory of Spectrum Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To resolve the mismatching problem in image registration and image mosaic, this paper proposes an improved feature matching principle based on vector similarity. First, by detecting feature points in scale space, SIFT (Scale Invariant Feature Transformation) vectors, which represent local properties, are computed; the feature points are matched by using vector similarity method and mismatching point couples are further deleted with the application of mutual mapping theory. And then, the transform matrix is calculated by random sample consensus algorithm. Furthermore, it is optimized by Lenvenberg-Marquardt (L-M) algorithm. Finally, through image fusion, image mosaic is realized. The experimental results indicate new principle improves the matching precision. The method can deal with image registration and mosaic with projective transformation.

Key words: image mosaic; feature matching; scale invariant feature transformation; vector similarity; mutual mapping theory

1 引言

探月工程二期将首次实现我国地外天体的软着陆, 使我国掌握深空探测和空间科学领域的核心技术, 获得月球及地月空间的科学数据. 全景相机作为着陆探测器的重要载荷之一, 将和其他载荷互相配合, 共同完成月表形貌与地质构造调查的科学目标.

其中一项重要的任务是对巡视区进行全景成像^[1-2]. 全景成像是将拍摄获得的具有重叠区域的月表图像, 在不降低图像分辨率的条件下, 拼接成单幅大视场图像. 全景成像有效地扩展了单幅图像的场景范围, 为后续的科学研究的奠定了基础^[3-4].

图像配准与图像融合是图像拼接技术的两个关键步骤. 图像配准方法一般可分为基于区域的方法

收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60808028)

和基于特征的方法,其中采用最多的是基于图像特征的配准方法.尺度不变特征变换(SIFT)^[5]算法可以处理两幅图像之间发生平移,旋转,仿射变换,光照变换,视角变化情况下的匹配问题,是目前被广泛采用的算法.研究者针对基于 SIFT 特征的图像配准与拼接进行了大量的探索,但是在特征匹配方面大部分采用的是基于距离的匹配方法.由于 SIFT 描述符向量维度高,传统基于距离的匹配方法^[6]判定匹配关系将产生较大偏差.同时,由于曝光、光照、拍摄角度等差异,误匹配可能比正确的匹配具有更近距离,进而导致误匹配.本文从向量相似度角度,提出了基于向量相似度的特征匹配准则,并结合互映射原理进一步提高了特征匹配精度,成功实现了图像拼接,验证了准则的有效性.

2 SIFT 特征匹配算法简介

SIFT 配准算法^[2]由 David G. Lowe 于 1999 年提出,2004 年完善总结.该算法利用图像关键点的 SIFT 特征向量进行匹配,是国内外特征点配准领域的研究热点.

2.1 检测尺度空间极值点

一幅二维图像在不同尺度下的尺度空间表示可由图像与高斯核卷积得到:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

式中, $G(x, y, \sigma)$ 为高斯卷积核.要提取稳定的具有尺度无关的特征点,需在二维平面空间和 DOG (Difference of Gaussian) 尺度空间中同时检测局部极值点.其中每一个像素要跟同一尺度周围邻域 8 个像素和相邻尺度对应位置周围邻域 9×2 个像素总共 26 个像素进行比较,仅保留极值点进行后续计算.

2.2 确定关键点位置和尺度

极值点的搜索是在离散空间中进行的,检测到的极值点并不是真正意义上的极值点,需使用子像素插值得到连续空间极值点.通过拟合三维二次函数以精确定位关键点的位置和尺度,同时剔除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点,提高特征点的抗噪声能力.

2.3 分配关键点方向

利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性,在以关键点为中心的邻域窗口内采样,并用直方图统计邻域像素的梯度方向,梯度直方图范围为 $0 \sim 360^\circ$,分为 36 个柱,每 10° 一个柱.直方图的峰值代表了该特征点处邻域内图像梯度的主方向,为了提

高算子鲁棒性,取大于等于主峰值 80% 能量的方向为辅方向.

2.4 生成特征向量

将坐标轴旋转为关键点方向,然后以特征点为中心取 16×16 个像素的窗口,分成 16 个 4×4 的子区域,在每个子区域上计算 8 个方向的梯度直方图,一个 4×4 的子区域可以得到 8 维的描述符,则 16 个子区域可以得到 128 维的方向描述符,即形成一个 128 维的 SIFT 特征向量.

2.5 特征向量匹配

生成图像的 SIFT 特征向量后,采用相似性判定准则进行匹配判断,得到满足准则的 SIFT 匹配点对.目前经常被采用的是最近邻距离比值方法 (NNDR),其主要思想在于当采用高维度空间的特征描述符进行欧氏距离度量时,误匹配点对间可能具有相同或相似距离,正确匹配相比误匹配有着明显小的距离.另外归一化互相关 (NCC) 算法及 KLT 追踪算法也是常用的匹配算法.

3 向量相似度匹配准则

3.1 向量相似度准则

相似度是指两个对象之间的相似程度.根据研究对象的不同,出现了多种相似度的细化概念,如向量相似度、系统相似度、形状相似度等等.相似性函数是用函数的方法来表征两向量相似的程度,根据向量中元素的不同,相似性函数可分为二元向量的相似性函数和一般向量的相似性函数^[7].由于 SIFT 特征点描述符为 128 维向量,所以采用一般向量的相似性函数判定相似性.这样寻找匹配点就转化为判定向量相似问题了.从向量方向和角度的角度综合表征向量间的相似程度.设向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 向量相似度为 γ , 定义如下:

定义 1 向量 $\mathbf{X}$ 与 $\mathbf{Y}$ 的范数相似度 α 为

$$\alpha = 1 - \frac{\|\mathbf{X}\| - \|\mathbf{Y}\|}{\|\mathbf{X}\|} \quad (2)$$

式中, $\|\mathbf{X}\|$, $\|\mathbf{Y}\|$ 分别为向量 $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$ 的向量范数.

定义 2 向量 $\mathbf{X}$ 与 $\mathbf{Y}$ 的方向相似度 β 为

$$\beta = 1 - \frac{\theta}{90^\circ} \quad (3)$$

$$\theta = \arccos \frac{[\mathbf{X}, \mathbf{Y}]}{\|\mathbf{X}\| \times \|\mathbf{Y}\|} \quad (4)$$

式中, $[\mathbf{X}, \mathbf{Y}]$ 为向量 $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$ 的向量内积.

定义 3 向量相似度 γ 为向量范数相似度 α 与向量方向相似度 β 的乘积,即:

$$\gamma = \alpha \times \beta \quad (5)$$

进一步分析可知,若向量 X 与 Y 为归一化向量,当 $0 < \theta < 90^\circ$ 时, $\gamma \in (0, 1)$, γ 取值越大,两向量越接近.具体应用时,判断特征点匹配就是比较特征向量的向量相似度与阈值的关系.

3.2 互映射匹配

为进一步剔除误匹配点对,引入了互映射理论.根据互映射原理,即匹配点对之间映射关系的对称性.对分别位于参考图像和待配准图像上的匹配点对 p, q 可以表示为 $\{p \leftrightarrow q\}$,匹配映射时应存在两点间的对应关系 $\{p \rightarrow q\}$ 和 $\{q \rightarrow p\}$.具体计算时若两点映射仅是单向映射关系,则剔除该点对,若是双向映射关系则保留点对.最终的匹配结果为参考图像与待配准图像的匹配点对集合与待配准图像与参考图像的匹配点对集合的交集.

4 实验结果与分析

为了验证基于向量相似度的匹配准则,提取图像的 SIFT 特征点^[8],在不同阈值下进行特征匹配实验,并与传统基于距离的匹配准则作对比分析,如图表 1 所示.在 Pentium(R) 2.95 GHz,内存 1 GB 的 PC 机上采用 Matlab 7.0 软件平台实现.本文准则的最佳阈值为 0.99,传统基于距离的匹配准则的最佳阈值为 David G. Lowe 推荐的 0.6.

基于本文匹配准则下不同阈值的对比如表 1 所示.阈值的微小改变(从 0.98 到 0.99),消除了误匹配点对,说明了本文准则较高的灵敏度.

表 1 中 2(a), (b) 是传统基于距离的匹配准则与本文提出准则的对比实验结果.均取最佳阈值时,本文准则在没有明显减少匹配点对的情况下误匹配率由 5.6% 降至 0,提高了匹配精度,保证了图像配准的准确性.本文提出的匹配准则,考虑了向量各维度间的差异,即向量方向间的重合度,也就是方向相似度.同时也考虑了向量整体数值差异,即范数相似度.体现了向量同时具有方向和大小的本质,更加真实地反映了向量的相似程度,在判别条件上要比基于距离的匹配准则苛刻,因此匹配精度更高.

表 1 中 3(a), (b) 是基于本文准则下加入互映射匹配前后的实验结果对比.可以看出,加入互映射匹配后,误匹配点对被剔除,误匹配率由 3.7% 下降到 0.8%.加入互映射匹配使由传统的单向匹配判别,增加为双向匹配判别,提高了判别的稳定性以及重复性,降低了误匹配率.大量实验表明,当存在较多误匹配点对时,互映射匹配能更好地消除误匹配

点对.

本文算法与传统算法的对比分析如表 1 所示.

表 1 本文匹配准则与传统匹配准则的对比

	1(a)	1(b)	2(a)	2(b)	3(a)	3(b)
匹配算法	本文算法	本文算法	传统算法	本文算法	本文算法	本文算法
阈值	0.98	0.99	0.6	0.99	0.98	0.98
匹配点数	190	73	143	122	269	255
误匹配点数	4	0	8	0	10	2
误匹配率	2.1	0	5.6	0	3.7	0.8

5 投影矩阵计算

本文采用鲁棒性的随机样本一致性算法(RANSAC)迭代求精,对匹配点对进行提纯,得到内点集合,并结合最小二乘法计算两幅图像的变换关系,最后得到初始投影矩阵.

由于特征点检测的误差以及线性解法的结果往往不稳定,因此就要通过上一步得到的内点集合对投影矩阵进行非线性优化,本文采用了 L-M(Levenberg-Marquardt)算法优化投影矩阵,得到了精度较高的投影矩阵.

6 图像融合

由于拍摄时间或者相机曝光时间等拍摄参数的不同,使采集到的图像间存在较大的亮度差异,直接拼接会产生明显的亮度差异以及拼缝.在拼接前,本文先进行了亮度调整,首先对两幅待拼接图像匹配的特征点求邻域亮度平均值,然后使用最小二乘法拟合出亮度差异函数,调整图像亮度,减小待拼接图像的亮度差异,满足人眼视觉特性.

其中两图像亮度间的关系可以表示为

$$I = aI' + b \quad (6)$$

式中, I, I' 为两图像亮度函数, a, b 为变换参数.

采用渐入渐出法消除拼缝,重叠区域像素的权重与像素点到重叠区域边界距离有关,公式为

$$I(x, y) = wI_1(x, y) + (1-w)I_2(x, y) \quad (7)$$

为了验证该准则,使用全景相机拍摄得到若干幅图像,对图像进行配准,拼接,得到了如图 1 所示的拼接图像,图像无明显拼缝,过渡自然.

本文图像拼接算法流程如图 2 所示.

7 结束语

应用向量相似度准则及互映射原理匹配 SIFT 特征点,利用匹配点对得到了两幅图像之间的亮度变换关系,最后通过重采样实现了图像拼接.特征点

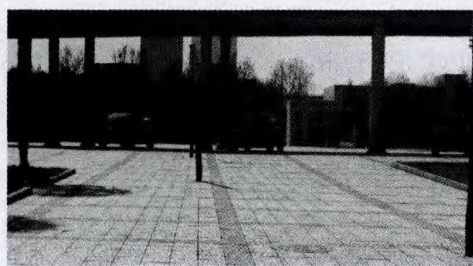


图1 两幅室外图像的拼接结果



图2 本文算法流程图

匹配实验表明,本文准则克服了传统基于距离匹配方法只衡量特征向量整体差异而忽略向量各分量差异的弊病,有效地剔除了误匹配点对,利用互映射原理对匹配点进行双向判断,进一步剔除了误匹配点,两次匹配有效地提高了匹配精度,据此实现了效果良好的图像配准与拼接。实际上,SIFT向量各维度对描述该特征点信息的重要程度是不同的,而本文并没有考虑各个分量的权重关系,如果能按照一定规则赋予向量各维度以不同的权重,理论上将会有更高的匹配精度。

参考文献:

- [1] 曾丹,史浩,张琦. 多相似内容图像的特征匹配[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2011, 23(10): 1725-1733.

(上接第21页)

- [5] Krawczyk H. HMQV: a high-performance secure Diffie-Hellman protocol[C]//Crypto 2005, LNCS. Berlin: Springer, 2005(3621): 546-566.
- [6] 潘操,丁辉,王洪元. 一种新的三方认证密钥协商协议[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(7): 143-145.
- [7] 周四方. 一种新的双方认证密钥协商协议的安全性分析[J]. 计算机应用, 2011, 31(11): 2994-2996.
- [8] 赵建杰,谷大武. eCK模型下可证明安全的双方认证密钥协商协议[J]. 计算机学报, 2011, 34(1): 47-54.

- [2] 易盟,郭宝龙,张旭. 基于复合 Zernike 矩相角估计的图像配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1117-1125.
- [3] 张锐,张昌芳,李杰. 利用特征点序列截断的图像匹配判决算法[J]. 中国图像图形学报, 2011, 16(6): 1051-1056.
- [4] 郝志成,朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 702-707.
- [5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [6] Beis J S, Lowe G. Shape indexing using approximate nearest-neighbor search in high dimensional spaces [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference On Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1997: 1000-1006.
- [7] 张宇,刘雨东,计钊. 向量相似度测度方法[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 532-536.
- [8] Szeliski R. Video mosaics for virtual environment [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1996, 16(2): 22-30.

作者简介:



秦佳男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为图像处理和计算机视觉.

杨建峰男, (1969-), 研究员. 研究方向为空间光学、光谱成像技术等.

作者简介:



王天成(1971-), 硕士, 副教授. 研究方向为代数组与密码学.