

文章编号: 0253-2239(2010)04-0989-05

基于系统论匹配准则的尺度不变特征变换的 图像自动拼接研究

何建伟^{1,2} 杨建峰¹ 薛彬¹ 陈潇^{1,2} 闫佩佩^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 基于特征点的图像拼接不仅不易受光照、旋转等因素影响,而且还有利于提高速度,是目前图像拼接的主流方向。尺度不变特征变换(SIFT)是目前比较成熟的一种角点检测算法,但是其特征点匹配问题仍然没有得到很好的解决。从系统相似的角度出发,提出了基于系统相似论的匹配准则,并将新匹配准则与传统的匹配准则进行了对比,指出了传统匹配准则存在的问题,测试了新准则匹配的精度和速度,分析了新准则能够取得更高精度的原因,并根据新准则成功地检测了待拼接图像中的匹配角点,然后用改进的样本一致性算法计算出仿射变换的投影矩阵,并用 Levenberg-Marquardt (L-M)算法对其求精,最终实现了图像的自动拼接。最后给出了全景相机图像的拼接结果,并对新的匹配准则给出了进一步的分析讨论。

关键词 图像处理;图像拼接;尺度不变特征变换(SIFT);系统相似度;匹配准则

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103004.0989

Reserch on the Automatic Stitching of Panorama Camera Image Based on System Similarity Matching Principle

He Jianwei^{1,2} Yang Jianfeng¹ Xue Bin¹ Chen Xiao^{1,2} Yan Peipei^{1,2}

(¹ Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The image stitching based on feature point is not only invulnerable to the light, rotation and other factors, but also helpful to increase efficiency. It has become one of the most attended methods. Scale invariant feature transform (SIFT) is a better coner extraction algorithm, but there are still some problems in the matching step. A new matching principle based on system similarity theory was proposed, and then it was compared with the traditional matching principle. The problems with tradtional matching principle was pointed out, and also the precision and speed of the new principle was tested, and the reason why the new principle get higher precision was analysed. By the new principle the matching features were detected successfully. And then, the transform matrix was calculated by the progressive sample consistency algorithm. Further more, it was optimized by the Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm, and finally automatic image stitching was realized. At last, the stiching result of panorama camera image was given, further discussion about the new matching principle was also given in the end of the paper.

Key words image processing; image stitching; scale invariant feature transform (SIFT); system similarity; matching principle

收稿日期: 2009-05-18; 收到修改稿日期: 2009-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(60808028)资助课题。

作者简介: 何健伟(1984—),男,硕士研究生,主要从事图像处理和计算机视觉方面的研究。

E-mail: Jewell.he@googlemail.com

导师简介: 杨建峰(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间光学、观测技术和光谱成像技术等方面的研究。

E-mail: yangjf@opt.ac.cn

1 引 言

在我国未来航天活动中将可能实现探测器的月球软着陆与巡视探测。作为探测器的重要载荷之一的全景相机将和其他载荷共同完成月表形貌与地质构造调查的科学目标。它利用人眼的双目立体成像原理,在获得目标高清晰图像的同时,还可以求出目标的距离。具有全景成像、立体成像对获取及辅助导航等多种功能。其中的全景成像是将拍摄的有一定重叠的图像拼接成具有较大场景的图像,可以有效扩展单幅图像的场景范围,帮助人们全面认识月面。研究如何实现全景图像功能,将“双眼”拍摄的多幅图像拼接成为大场景的图像,并据此为全景相机的设计提供参数指导显得非常有现实意义。

图像拼接是近年来研究比较多的图像处理技术,其中图像的匹配是难点,基于特征点的匹配是目前主流的方法,研究者提出的其他匹配方法有分别基于混沌遗传算法的匹配^[1]、色彩不变量的匹配^[2]、灰度曲面的匹配^[3]、兴趣点的匹配^[4]和子线段的匹配^[5]等。

尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法是由 D. G. Lowe^[6]提出的一种稳健的算法,它在多尺度空间检测特征点,在图像存在较大缩放的情况下,仍能稳定提取特征点;具有较强的旋转不变性;对光照变化也有适应性;甚至对仿射变化以及三维视点的改变也保持一定的不变性^[7]。由于这些优点,近年来它得到了广泛的应用^[8~10],很多研究者提出了基于此特征的图像拼接方法,他们对特征的匹配都进行了有意义的探索,但是在特征匹配方面基本上没有脱离传统的距离匹配方法。本文从系统论的角度考虑匹配的问题,提出了基于系统相似的特征匹配判据,成功地实现了特征点的高精度匹配,实现了图像的自动拼接。

2 SIFT 特征匹配算法简介

SIFT 特征匹配算法包括两个阶段,第一阶段是 SIFT 特征的生成,第二阶段是 SIFT 特征向量的匹配。

2.1 SIFT 特征向量的生成

一幅图像 SIFT 特征向量的生成包括 4 步

- 1) 尺度空间极值检测;
- 2) 通过拟合三维二次函数精确确定关键点的位置和尺度;
- 3) 利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性为每个关键点指定方向参数;

4) 生成 SIFT 特征向量。

2.2 SIFT 特征向量的匹配

常用的特征点匹配算法有^[11]:最近邻距离比值(nearest-neighbor with distance ratio, NNDR),归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)和 Kanade-Lucas-Tomasi(KLT)追踪。为了提高匹配精度有研究者提出了 Harris_Affine 和 SIFT 特征结合的匹配^[12]以及结合全局信息的匹配^[13]等。

3 基于系统相似的特征匹配准则

3.1 理论基础

系统是由相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的事物或过程组成的具有整体功能和综合行为的统一体^[14]。所谓集合就是具有某种性质的,确定的,彼此可以区分的元素的汇总^[15]。SIFT 特征从广义上看也属于集合的范畴,不同的是向量还具有有序性,这样找匹配的特征点就转化为系统相似的问题。

3.2 系统相似函数

设 A 系统由 k 个要素组成, B 系统由 l 个要素组成,相似的要素有 n 个,反映每一相似要素的相似程度用相似元值 $q(u_i)$ 大小表示,系统相似度为 Q 。则可得相似系数的数学模型^[5],如图 1 所示。

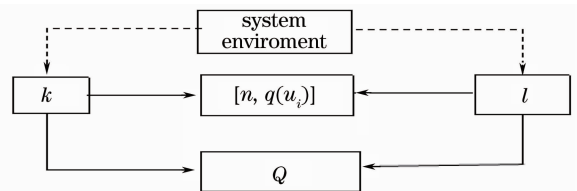


图 1 相似系统的数学模型

Fig. 1 Mathematical model of similar system

从上述数学模型可知,系统相似度是多元函数,可进一步表示为

$$Q = f[k, l, n, q(u_i)] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中 $1 \leq n \leq \min(k, l)$, $(k, l, n) \in (1, 2, \dots, N)$ 。

文献[16]中给出 Q 还应满足的单调性条件:

- 1) Q 是关于相似元要素权重的增函数;
- 2) Q 是关于非相似元要素权重的减函数;
- 3) Q 是关于相似元相似度的增函数;
- 4) Q 是关于相似元个数的增函数;
- 5) Q 是关于非相似元的个数的减函数。

并据此给出了系统的相似函数定义:

$$Q(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i x_i^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p \mu_i^2 x_i^2 + \sum_{i=p+1}^n y_i^2}}, \quad (2)$$

式中 $\mu_i (1 \leq i \leq p)$ 为各相似元的相似度。

更进一步的讨论可得(2)式所定义的系统相似函数可以视为 $N (N > m + n)$ 维向量

$$\mathbf{A} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m, 0, \dots, 0)_N$$

$$\text{and } \mathbf{B} = (x_1\mu_1, x_2\mu_2, x_3\mu_3, \dots, x_p\mu_p, 0, \dots, 0, y_{p+1}, y_{p+2}, \dots, y_n)_N$$

的夹角的余弦值 $\cos \alpha$ 。这样在具体的计算时可以先将要比较的两向量分别按(2)式扩展,然后求其夹角即为两向量的相似度量。

4 具体应用

为了计算的方便,把整个向量看做是一个没有子系统的系统。在本文中用两向量对应分量的较小

的与较大的比值度量其相似度,当其大于设定的阈值时认为是一对相似元,本文的阈值取为 0.8,然后应用(2)式计算两向量的相似度,当其大于设定阈值(0.98),则认为两向量对应的特征点为匹配特征点,需要指出的是此处的阈值不宜设置的太小,否则误匹配的概率较大。下面给出

1) 两幅不同阈值下本文算法的匹配结果,如图 2 所示;

2) 都能获得正确拼接结果的原 SIFT 算法和新匹配准则下的匹配结果对比,如图 3 所示。

与 2) 中所取阈值相同的情况下,匹配结果比较,如图 4 所示。

结果分析如表 1 所示。

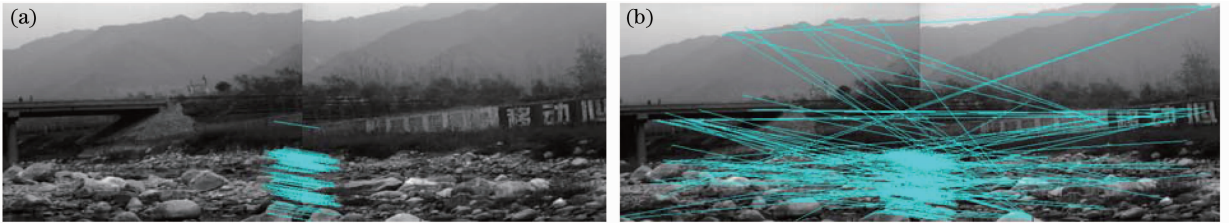


图 2 阈值为(a)0.98,(b)0.85
Fig. 2 Threshold is (a) 0.98, (b) 0.85

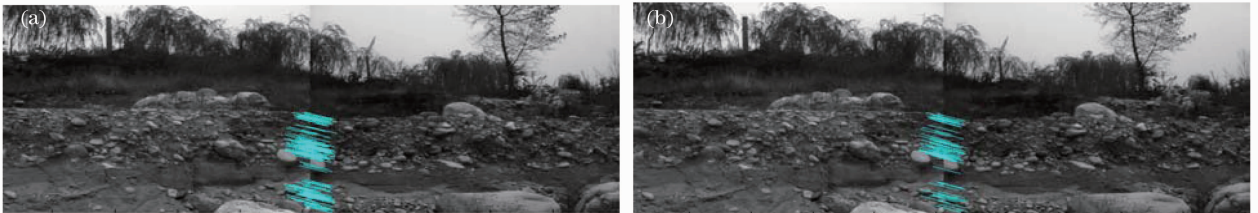


图 3 (a)原 SIFT1,(b)本文算法匹配结果
Fig. 3 Matching result of (a) classic SIFT1, (b) new algorithm

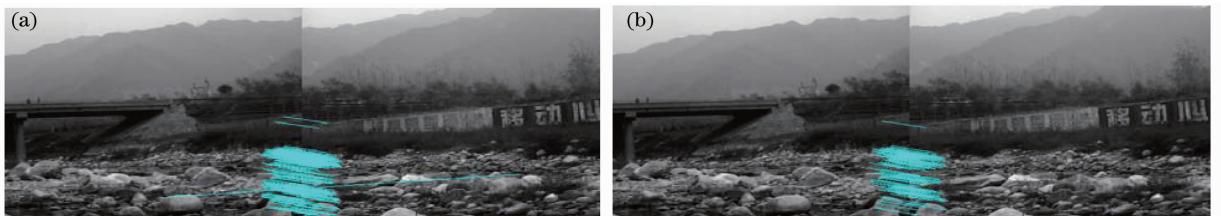


图 4 (a)原 SIFT2,(b)本文算法匹配结果
Fig. 4 Matching result of (a) classic SIFT2, (b) new algorithm

表 1 本文算法与经典 SIFT 算法的对比分析

Table 1 Comparison of classic SIFT and new algorithm

	Fig. 2(a)	Fig. 2(b)	Fig. 3(a)	Fig. 3(b)	Fig. 4(a)	Fig. 4(b)
Algorithm	This text	This text	Classic SIFT	This text	Classic SIFT	This text
Threshold	0.98	0.85	0.6	0.98	0.6	0.98
Matching point couple	132	483	141	71	246	132
Wrong matching rate	None wrong matching	Many wrong matching	None wrong matching	None wrong matching	Existing wrong matching	None wrong matching

1) 匹配精度的对比

SIFT 算法的阈值均选用 D. G. Lowe^[6] 推荐的比值 0.6。

提出的匹配准则对阈值的设定要求比较高,如图 2(a)和图 2(b)的比较所示,建议设置在 0.95 以上,取 0.98 的时候匹配效果已经比较好,在要求匹配精度比较高的场合,可以调高此阈值。

当高阈值时本文算法检测出来的匹配特征点数目要低于原 SIFT 算法,说明在设置的精度下,本文算法对匹配的要求更高,精度更好一些,如图 3(a)和图 3(b)所示。

在原 SIFT 算法较好匹配阈值下出现的误匹配(例如最长的那条匹配线对应的匹配点),本文的算法中可将其消除,如图 4(a)和图 4(b)所示。

匹配精度对比分析:传统的基于距离的匹配准则最大的问题在于其把 SIFT 向量当做是一个整体来考虑其相似的问题,两向量的距离表现的是整个向量的特性,忽略了向量各个分量以及各个分量的顺序在相似度量中所起的作用,例如向量 $A(30,40,50)$ 与向量 $B(20,75,100)$, $C(40,5,150)$ 具有相同的欧式距离,但其第一,第二和第三维的分量却有相当大的差别,而所讨论的两个匹配 SIFT 向量由于其描述的是同一个点在不同情况下的描述,所以其各个分量也应该具有相似性,并且其各个分量是具有一定的顺序的。很明显这种传统的基于距离的匹配准则没有把这些问题考虑进去,它用向量整体所表现出来的距离特性来近似地表达了两向量的相似程度,所以从理论上讲它对向量的相似描述是比较粗糙的。

提出的基于系统论的匹配准则,对两向量的匹配问题进行了深入一步的考察,在出发点上就考虑了向量各个分量的匹配及其度量,不但对各个分量的匹配程度分别进行了考察,而且据此考察了整体向量的匹配程度,所以其更能反映两个向量真实的相似程度,基于此思想给出了计算两向量相似度的度量公式即(2)式,并通过大量的实验验证了此准则的可行性,最后给出了匹配的结果,注意事项和以此为基础实现的图像自动拼接。需要进一步指出的是在实验时相对传统的距离匹配在只添加两 SIFT 向量各个分量的相似性,没有考虑各个分量顺序性的情况下就已经给出了令人满意的结果,在最后的展望中将进一步讨论计算两向量匹配时考虑其各个分量顺序性的这种思路,在要求更高精度的场合,可以将其考虑进去,将会得到有更好的匹配结果。

2) 匹配时间分析

为了消除其它因素的影响,单独对基于系统论的匹配准则进行了时间分析,所用计算机基本配置为 CPU AMD3000+,内存 512 MB。单独取出待匹配的两个 SIFT 特征点在 VC6.0 平台下,其匹配时间为 0.00004 s,对 500 个特征点的待匹配图来说其总共计算时间就为 10 s,在实际应用中是对后续的图像进行的处理,其主要要求是自动拼接的正确性,完全满足实际的需要。

5 图像变换矩阵的计算

1) 改进的样本一致性(Progressive sample consensus, PROSAC)^[17],是一种稳健的数据拟合算法,它可以对含有较多错误的数据进行拟合。本文用 PROSAC 确定内点集合和初始变换矩阵。

2) L-M 算法又称为阻尼最小二乘法,是解决非线性最小二乘法的有力工具。对初始变换矩阵以及较符合单应性矩阵的 n 对匹配点,使用 L-M 算法求得精度较高的单应性矩阵。

6 图像融合

采用后向映射法,对两图的重合部分,采用了文献[18]所提出的基于人的视觉模型的高斯模型进行渐入渐出的平滑过度,平滑公式为^[8]

$$I(x, y) = \omega_1 I_1(x, y) + \omega_2 I_2(x, y), \quad (3)$$

式中

$$\omega_2 = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\}, \quad (4)$$

$$\omega_1 = 1 - \omega_2, \quad (5)$$

本文算法流程如图 5 所示。

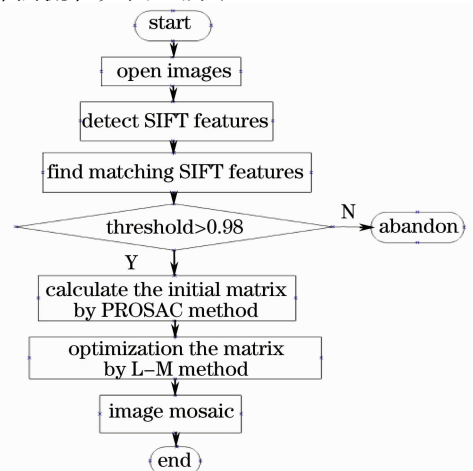


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of algorithm

为了尽可能的仿真月球环境,拍摄了室内和室

外两组图像,拼接结果如图 6 所示。



图 6 (a)室外,(b)室内三幅图像的拼接结果

Fig. 6 Stitching result of 3 images (a) outdoor (b) indoor images matched

7 结 论

用基于系统论的向量匹配准则,对 SIFT 生成的向量进行匹配,在 VC6.0 环境下编写了相应的程序,实现了图像的自动拼接。值得进一步讨论的是本文只是简单的把 SIFT 向量看做是一个没有子系统的系统,直接计算了其相似度,而实际上 SIFT 向量除了各个分量具有大小和方向外,其各个分量还是按一定的顺序组成的,而在计算其匹配度的时候并没有考虑向量各个分量的顺序性,如果在匹配的准则中把向量各个分量的顺序性也考虑进去,理论上将会有更高的匹配精度,一种可行的思路是把所有的分量按一定的规则分组组成子系统,先对子系统进行相似性的判断,然后再对子系统组成的整个系统进行相似度判断,当然也可以先从整体粗判断,然后再分子系统进一步判断,例如比本文所用的 128 维的 SIFT 向量,可以前 64 维和后 64 维分别组成子系统,然后递归的实现整个向量的匹配判断。

参 考 文 献

- 1 He Renfang, Wang Cheng, Yang Wenbing. Image matching based on chaos-genetic algorithms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1): 13~16
何仁芳,王承,杨文兵. 基于混沌遗传算法的图像匹配[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(1): 13~16
- 2 Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui *et al.*. Study on color image registration technique based on CSIFT [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2097~2103
张锐娟,张建奇,杨翠等. 基于 CSIFT 的彩色图像配准技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2097~2103
- 3 Yuan Weiqi, Xu Lu, Lin Zhonghua. Iris identification method based on gray surface matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1537~1542
苑玮琦,徐露,林忠华. 基于灰度曲面匹配的虹膜识别方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1537~1542
- 4 Yang Zhanlong, Guo Baolong. Image mosaic technique based on pseudo-Zernike moments of interest points [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1548~1552
杨占龙,郭宝龙. 基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1548~1552
- 5 Li Haibin, Zhang Qiang. A new stereo matching Algorithm based on sub-line segment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 907~912
李海滨,张强. 一种新的基于子线段的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 907~912
- 6 D. G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant

- features [C]. *International Conference on Computer Vision*, 1999, **2**: 1150~1157
- 7 D. G. Lowe. Distinctive image features from scale invariant keypoints [J]. *J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 8 Xie Fan, Qin Shiyin. Wide baseline stereo vision matching approach for monocular mobile robot based on SIFT[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(11): 2247~2252
谢凡,秦世引. 基于 SIFT 的单目移动机器人宽基线立体匹配[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(11): 2247~2252
- 9 Wu Huilan, Liu Guodong, Liu Bingguo *et al.*. Study on the circle center fast accurate locating technique based on the SIFT[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(11): 1512~1515
吴慧兰,刘国栋,刘炳国. 基于 SIFT 算法的圆心快速精确定位技术研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(11): 1512~1515
- 10 Liu Xiaojun, Yang Jie, Sun Jianwei *et al.*. Image registration approach based on SIFT[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 156~160
刘小军,杨杰,孙建伟等. 基于 SIFT 的图像配准方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 156~160
- 11 Jonathan Klippenstein, Hong Zhang. Quantitative evaluation of feature extractors for visual SLAM [C]. *Proceedings of the Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 2007, 157~164
- 12 Li Lingling, Li Cuihua, Zeng Xiaoming *et al.*. An automatic image registration method based on SIFT and Harris-Affine features matching [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Technol. (Natural Science Edition)*, 2008, **36**(8): 13~16
李玲玲,李翠华,曾晓明. 基于 Harris-Affine 和 SIFT 特征匹配的图像自动配准[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(8): 13~16
- 13 Ji Hua, Wu Yuanhao, Sun Honghai. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 439~444
季华,吴元浩,孙宏海. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2): 439~444
- 14 Zhou Suoyu. *System Science Guide* [M]. Beijing: Earthquake Press, 1988
周所宇. *系统科学导引* [M]. 北京: 地震出版社, 1988
- 15 Zhou Meili. *Similar System* [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994. 19~22
周美丽. *相似系统论* [M]. 北京: 科学与技术文化出版社, 1994. 19~22
- 16 Guan Yi, Wang Xiaolong, Wang Qiang. Measurement of system similarity [C]. *Proc. of the 8th National Conference on Computational Linguistics*, 2005, 1~7
关毅,王晓龙,王强. 论系统相似度的度量 [C]. 全国第八届计算语言学联合学术会议, 2005, 1~7
- 17 O. Chum, J. Matas. Matching with PROSAC progressive sample consensus [C]. *Proc. CVPR*, 2005, **1**: 20~25
- 18 Gao Chao, Zhang Xin, Wang Yunli *et al.*. Automatic stitching approach of aerial image sequence based on SIFT features [J]. *Computer Applications*, 2007, **27**(11): 2789~2792
高超,张鑫,王云丽等. 一种基于 SIFT 特征的航拍图像序列自动拼接方法[J]. *计算机应用*, 2007, **27**(11): 2789~2792