

文章编号:1007-130X(2016)01-0138-06

改进的双向 SIFT 特征匹配算法*

安 婷,贺一民,张志毅

(西北农林科技大学信息工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:以基于图像序列摄像机自标定为基础,针对尺度不变特征转换 SIFT 算法误匹配率高且运行效率低的问题,提出一种改进的双向 SIFT 特征匹配算法。在去除误匹配方面,首先采用双向匹配消除部分误匹配点对,然后结合视差梯度约束算法和随机抽样一致性 RANSAC 算法提纯匹配点对;在提高运行速度方面,首先在初匹配中采用 K 邻近算法,其次调整视差梯度约束迭代条件,都通过减少迭代次数来降低算法耗时。实验表明,改进后的算法在去除了大部分误匹配的基础上,保留了足够的匹配点对以用于摄像机空间位置和姿态的自动标定,且相较 SIFT 算法在运行速度上有了较大的改进。

关键词:SIFT;双向匹配;视差梯度;RANSAC 算法

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-130X.2016.01.023

An improved bidirectional SIFT feature matching algorithm

AN Ting, HE Yi-min, ZHANG Zhi-yi

(College of Information Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract:Based on camera self-calibration of image sequence, we propose an improved bidirectional SIFT feature matching algorithm to solve the problems of high mismatching rate and low operation efficiency of the SIFT algorithm. To remove the mismatching, two steps are to follow. First, the SIFT bidirectional matching algorithm is leveraged to eliminate part of the mismatching. Second, disparity gradient constraint and the RANSAC algorithm are used to purify the matching points. Regarding the speed improvement, we utilize the K nearest algorithm at the beginning of matching, and disparity gradient constraints are also adjusted, reducing the iteration count to lower the time consumption. Experimental results show that the proposed algorithm removes most of the mismatching and retains enough matching points to automatically calibrate the position and orientation of the cameras in the space, and it can effectively reduce the execution time.

Key words:SIFT;bidirectional matching;disparity gradient;RANSAC algorithm

1 引言

利用未标定的图像序列进行三维重建是当下的热门研究领域之一^[1],其中摄像机标定是其重要内容,介于传统摄像机标定在在线标定和场合约束的不足,通常采用摄像机的自标定方法,即通过序列图像得到的匹配点对计算摄像机内、外参数。匹

配点对的精确性对摄像机标定的准确性至关重要,故本文提出改进的双向 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征匹配算法。选取 SIFT 算法是基于该算法对图像旋转、尺度变化和亮度变化具有不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也同样有很好的稳定性,使得该算法在基于图像序列的三维重建方面有显著优势。SIFT 算法是 Lowe 在 1999 年提出的基于特征的特征匹配算法,后来又做了进

* 收稿日期:2015-01-07;修回日期:2015-03-11

基金项目:国家 863 计划(2013AA10230402);中央高校西北农林科技大学基本科研业务费(QN2013054)

通信作者:张志毅(815802490@qq.com)

通信地址:712100 陕西省杨凌西北农林科技大学信息工程学院

Address:College of Information Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, P. R. China

一步的改进^[2,3]。由于 SIFT 算法的尺度不变性,其被广泛应用于三维重建、立体视觉、遥感图像分析等诸多领域。在基于图像序列的三维重建方面, Hu 等人^[4]提出利用图像序列结合手持摄像机实现三维重建,采用 SIFT 算法提取特征点。Nguyen 等人^[5]提出利用无约束且无标定的图像结合手持摄像机实现三维重建,首先采用 SIFT 算法检测并匹配特征点,然后估算投影矩阵,从而实现三维点云的重建,以表示输入图像特征点的几何位置。在匹配精度和算法效率方面,国内外对 SIFT 算法进行了深入的研究与改进。针对匹配精度低问题,吴楚等人^[6]提出了基于极限约束的 SIFT 特征匹配算法,通过极限约束基本矩阵有效提高了匹配精度。刘焕敏等人^[7]利用 SIFT 特征向量匹配对的唯一性约束,提出了双向 SIFT 匹配策略,有效降低了误匹配率。李刚等人^[8]则在双向 SIFT 匹配的基础上,结合视差梯度约束和特征点筛选方法进一步降低误匹配率;针对算法运行效率,龚声蓉等人^[9]提出了基于视差梯度约束的匹配点提纯算法,在不改变匹配精度的前提下,提高了算法效率。

本文提出的匹配算法将用于摄像机空间位置和姿态的自动标定,匹配点对的准确度会影响投影矩阵和三维点的准确性,为尽可能多地去除误匹配点对,同时提高算法的运行效率,本文结合多种 SIFT 改进方法提出了改进的双向 SIFT 特征匹配算法。误匹配通常有三种:一对多匹配;非匹配对因欧氏距离符合而误配;个别特征点无对应匹配点。针对上述三种误匹配,本文采用双向匹配的策略,利用 SIFT 匹配的不对称性,去除第一种和第二种误匹配。在双向匹配的基础上,为了进一步提高匹配准确性,本文采用视差梯度约束去除双向匹配结果中的误匹配,然后利用 RANSAC(RANdom SAmple Consensus)方法估计出基础矩阵,最后通过极限约束在初始匹配点集中引导匹配。

2 匹配算法

利用 SIFT 算法在三维重建方面的优势,并为了降低算法的错配率,以准确实现空间位置和姿态的自动标定,本文提出一种改进的 SIFT 双向匹配算法,主要包括图 1 中的四个部分。算法分别通过 SIFT 双向匹配中匹配阈值的选择、视差梯度约束以及 RANSAC 算法逐步降低算法错配率;同时,为了提高算法速度,分别在双向匹配中采用 K 邻近算法减少匹配用时,在视差梯度约束中采用改进

的方法通过减少算法迭代次数来减少用时。

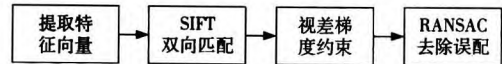


Figure 1 Basic steps of the algorithm

图 1 本文算法基本步骤

2.1 SIFT 特征向量的提取

SIFT 算法提取的 SIFT 特征向量对旋转、尺度缩放、亮度变换保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定的稳定性。因此,本文采用 SIFT 算法提取特征向量。

SIFT 特征向量提取包含四个步骤:

(1)空间极值检测:在高斯差 DoG(Difference of Gaussian)尺度空间极值检测,以初步确定关键点的位置和所在尺度。DoG 算子定义为两个不同尺度的高斯核的差分与图像 $I(x,y)$ 的卷积,如式(1)所示:

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

其中,高斯核 $G(x,y,k\sigma) = \frac{1}{2\pi k^2 \sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2k^2 \sigma^2}$ 。

通过 $L(x,y,k\sigma) = G(x,y,k\sigma) * I(x,y)$ 可生成高斯卷积图像,如式(2)所示:

$$G(x,y,\sigma) = L(x,y,k\sigma) - L(x,y,\sigma) \quad (2)$$

(2)精确确定关键点的位置和尺度:通过拟合三维二次函数以确定关键点的位置和尺度,同时去除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点。

(3)指定关键点方向: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,使算子具备旋转不变性。

(4)生成 SIFT 特征向量:首先将坐标轴旋转为关键点的方向,以确保旋转不变性。然后取以特征点为中心的 16×16 像素区域,将其分为 4×4 的子块,每个像素计算 8 个方向上的向量信息,即可得到 128 维的 SIFT 特征向量。

2.2 双向匹配

SIFT 特征向量匹配算法采用关键点特征向量的欧氏距离作为两幅图像中关键点的相似性判定度量。假设匹配两幅图像图 A 和图 B。传统的 SIFT 匹配策略是取图 A 中的某个关键点,然后在图 B 中找到欧氏距离最短的两个点,即找到它的最邻近 NN(Nearest Neighbor)和次邻近 SCN(Second Closest Neighbor),如果 $NN/SCN \leq radio$ (radio 为匹配阈值),则表示图 A 中的这个关键点和图 B 中欧氏距离最小的关键点是一对匹

配点。本文采用 K 邻近算法来得到每个关键点在另一幅图像中的欧氏距离最短的两个点,即 NN 和 SCN ,通过采用 K 邻近算法可减少 SIFT 匹配耗时。

这里称图像 A 到图像 B 的匹配是 SIFT 单向匹配。传统的 SIFT 匹配(本文称其为单向 SIFT)容易产生误匹配。为了提高匹配的精度,需要对匹配策略进行相应改进。

本文对多组每组两幅的图像进行了单向匹配测试,首先采用单向 SIFT 对组内两幅图像进行匹配实验,接着采用同样的算法对组内两幅图像进行相反方向的图像匹配。下面给出了其中一组图片的匹配结果,如图 2 所示,将图中两幅图像分别记为 $Pic1$ 和 $Pic2$,图 2a 是 $Pic1$ 到 $Pic2$ 的单向匹配结果,图 2b 是 $Pic2$ 到 $Pic1$ 的单向匹配结果。同时,实验对该组图片通过设置不同的匹配阈值,得到了表 1 中匹配结果与匹配方向、匹配阈值的对应关系。



Figure 2 Unidirectional matching results of the algorithm
图 2 本文算法单向匹配结果

通过表 1 结合其他组图像的匹配结果可知道,两个匹配方向得到的结果没有明显的优劣。通常情况下,匹配阈值越小,得到的匹配对数越少,但其错匹配对数也越少;匹配阈值越大,得到的匹配对数越多,但其错匹配对数也会大幅增加。

通过对现有 SIFT 匹配算法的单向匹配的分析,本文提出通过采用双向匹配,即取两次单向匹配结果的交集作为匹配点集,从而提高匹配的精确度,这对于利用匹配点对实现空间姿态和位置的自

Table 1 Corresponding relationship of matching results, matching directions and matching thresholds

表 1 匹配结果与匹配方向、匹配阈值的对应关系

匹配阈值	$Pic1$ 到 $Pic2$ 的单向匹配对数	$Pic1$ 到 $Pic2$ 的单向匹配错配对数	$Pic2$ 到 $Pic1$ 的单向匹配对数	$Pic2$ 到 $Pic1$ 的单向匹配错配对数
0.3	38	0	37	1
0.4	96	0	106	3
0.5	195	9	177	7
0.6	293	25	287	23
0.7	351	38	380	39
0.8	456	69	463	65
0.9	502	88	498	92

动标定尤为重要。本文对多组图片分别进行的单向匹配,并采用表 1 的形式对组内图片不同阈值下的单向匹配对数和单向错匹配对数进行了比较。结合多组不同阈值下图像匹配的结果,本文在双向匹配时取匹配阈值为 0.4。

2.3 基于视差梯度约束的 RANSAC 提纯

2.3.1 视差梯度约束

由于图像亮度、环境条件或图像中相似特征的影响,SIFT 匹配得到的匹配点集中存在一定数量的误匹配。视差梯度约束是立体视觉中常用的一种去除误匹配的方法,该方法利用视差梯度作为两对对应点匹配之间相容程度的一种测度。具体过程如下:

(1)根据公式(3)计算匹配点集中对应匹配点的视差梯度,并对所有视差梯度求和。视差梯度 G_d 计算公式如下:

$$G_d = \frac{|d_p - d_q|}{d(p_m, q_m)} \quad (3)$$

其中, $d_p = p_1 - p_2$, $d_q = q_1 - q_2$, p_1 和 p_2 , q_1 和 q_2 分别是匹配目标图像 1 和图像 2 中的对应匹配点。 p_1 和 p_2 的连线中点记作 p_m , q_1 和 q_2 的连线中点记作 q_m , 则 $d(p_m, q_m)$ 为 p_m 与 q_m 的连线矢量。

(2)为得到的视差梯度和排序,将最大和最小视差梯度和分别记作 d_{\max} 和 d_{\min} 。

(3)若 $d_{\max}/d_{\min} > 3$, 则去掉最大视差梯度和对应的点对,重复迭代,直到 $d_{\max}/d_{\min} < 3$ 。

上述视差梯度算法,在误匹配点较多时,迭代次数过多,算法耗时增加。为减少算法迭代次数,本文将第(3)步中“去掉最大视差梯度和对应的点对”改为“去掉所有视差梯度和大于最小视差梯度和 3 倍对应的点对”。改变后,每次迭代可去除多个误匹配点对,减少迭代次数,算法的耗时也减少。

通过视差梯度约束,可能会删除掉少量正确的匹配点对,但对于整体结果影响并不大,而且降低了误匹配率,使得匹配的准确性大大提高。

2.3.2 RANSAC 去除误配

RANSAC 算法是最有效的模型参数估计算法之一,被广泛用于图像误匹配去除。本文采用 RANSAC 算法估计基本矩阵,并根据基本矩阵去除误匹配。但是,RANSAC 效率不高,误匹配的存在直接影响 RANSAC 采样次数,进而影响 RANSAC 算法的效率,并且误匹配对于基本矩阵的估计也有较大的影响。本文通过双向匹配和视差梯度约束得到了一个精度较高的匹配点集合,降低了误匹配对基本矩阵估计的影响。

对于基本矩阵的估计,本文通过迭代随机抽取最小点集来找到使内点(本文指精确匹配点)所占比例最高的最小点集,用此最小点集和内点共同进行非线性优化,得到最终的基本矩阵估计值,记为 F 。得到基本矩阵 F 后,本文利用极限约束去除误匹配。

去除误匹配时,输入得到的匹配点集,然后根据公式(4)来剔除。

$$\begin{bmatrix} u'_i & v'_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

其中, F 为 3×3 矩阵, $(u'_i \ v'_i \ 1)$ 和 $(u_i \ v_i \ 1)^T$ 分别为匹配目标图像匹配点的齐次坐标。如果匹配点对不满足公式(4),则认为该匹配点对为误匹配,直接去除。

通过上述过程,去除误匹配的同时最大程度地保留正确匹配点,得到最终的匹配点集合。

3 算法与实验

本文在已有 SIFT 算法的基础上,进行了双向匹配,并通过视差梯度约束和 RANSAC 算法对双向匹配得到的匹配集合做了进一步的提纯。下面是本文的具体算法:

算法 1 改进的双向匹配算法

输入:两幅彩色图像 I_1, I_2 。

输出:图像 I_1, I_2 的匹配对集合 C 。

步骤 1 提取 I_1, I_2 的特征向量,记作 T_1, T_2 ;

步骤 2 SIFT 算法计算 I_1 到 I_2 的单向匹配对集合 P_1 ,及 I_2 到 I_1 的单向匹配对集合 P_2 ;

步骤 3 求 P_1 和 P_2 交集,即为双向匹配的匹配对集合,记作 A ;

步骤 4 对集合 A 进行视差梯度约束,得到新的匹配对集合 B ;

步骤 5 利用 RANSAC 算法,结合集合 B 得到基本矩阵 F ;

步骤 6 利用 F 去除 P_1 中的误匹配,得到最终匹配对集合 C 。

为验证算法对获取精确匹配对的有效性,本文进行了大量的实验。实验环境为 Windows 7 操作系统,PC 配置为 Intel® Core™ i5 CPU M480 @ 2.67 GHz 2.66 GHz,开发工具选用 Microsoft Visual Studio 2010,开发语言为 C/C++ 以及 OpenCV2 版本的图像处理库。

为了对改进后的算法与原 SIFT 算法进行对比,选取了多幅在实际应用中具有代表性的图片,对其分别利用 SIFT 算法和本文算法进行了匹配。图 3 是在室内照明条件下微突起做成的图像,通过与 SIFT 匹配图像对比,可以看出本文算法在 SIFT 匹配基础上将匹配点的数量控制到了一定范围内,并且不受光照强度的影响,同时对一些微小的突起有着较高的匹配性。

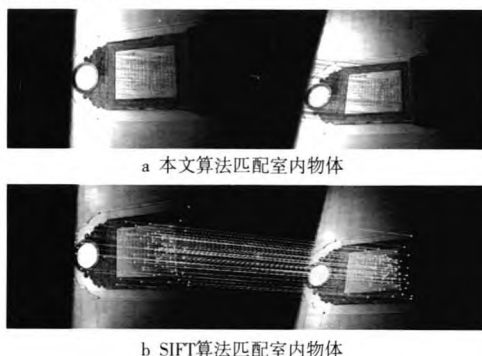


Figure 3 Comparison of matching results of indoor objects

图 3 室内物体的匹配结果对比

图 4 是在自然光下拍摄的建筑物,通过匹配结果得出本文算法基本不受光照强弱的影响,保持了较高的准确性。

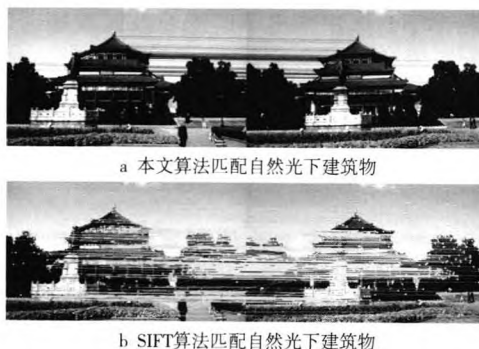


Figure 4 Comparison of matching results of the building in natural light

图 4 自然光下建筑物匹配结果对比

图5是树干图,图形和色彩较为简单,但是具有较多的相似纹理,特征点提取难度较大,且相似点较多,易出现误匹配。从匹配结果可以看出,本文算法较好地完成了匹配,并保证了较高的准确性。

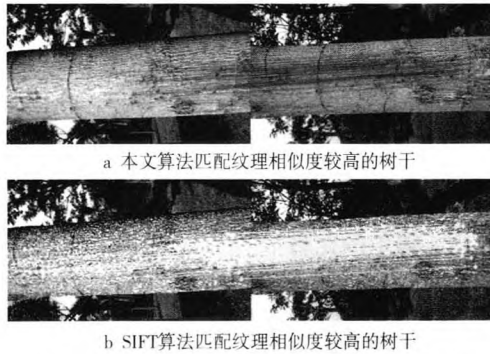


Figure 5 Comparison of matching results of the trunk with similar textures

图5 纹理相似度较高的树干匹配结果对比

图6是色彩较为复杂的灌木冠层图,从色彩的角度进行特征点提取对比。从匹配结果可看出,本文算法得到的匹配对数较少,但保证了较高的准确性。通过四幅图的对比,充分体现了本文算法的稳定性和鲁棒性。

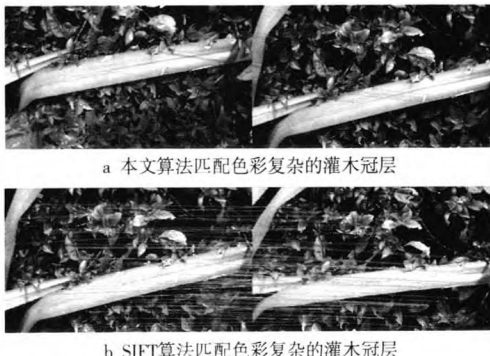


Figure 6 Comparison of matching results of the shrub canopy with complex color

图6 色彩复杂的灌木冠层匹配结果对比

表2给出了SIFT算法和本文算法的具体匹配结果,SIFT算法给出了匹配对及匹配用时,本文算法则分别给出了两次单向匹配对数、双向匹配对数、视差梯度约束匹配对数、RANSAC剔除的外点数和最终匹配点对内点数,以及各个阶段耗时和算法总耗时。

由表2可知,本文算法相比SIFT算法:在匹配点对数量上,通过一系列提纯步骤,在去除大部分误匹配点的基础上保留了足够的匹配点对以用于摄像机空间位置和姿态的自动标定;在运行时间上,本文算法对各组图像均有较大提高,实时性也得到了提高。

Table 2 Comparison of matching results between the SIFT and our algorithm

表2 SIFT方法与本文方法匹配结果比较

	图3	图4	图5	图6	
SIFT	匹配对	168	642	257	58
	匹配用时/s	18.215	78.012	175.132	43.954
本文方法	左至右匹配点对数	170	627	299	59
	右边匹配点对数	164	660	260	64
	双向匹配对数	138	516	218	46
	视差梯度约束后匹配点对数	138	306	184	34
	内点个数	127	493	151	29
	外点个数	11	23	67	17
	模板图特征向量提取时间/s	8.349	19.289	29.335	15.917
	实时图特征向量提取时间/s	7.951	19.289	30.603	13.970
	K邻域查找时间/s	0.779	33.747	109.364	12.448
	最邻近比约束时间/s	0.025	0.138	0.242	0.091
双向匹配时间/s	0.165	3.495	3.654	0.181	
视差梯度约束时间/s	0.022	0.306	0.059	0.002	
RANSAC约束时间/s	0.001	0.001	0.003	0.001	
总用时/s	17.292	76.265	173.26	42.610	

4 结束语

本文以图像序列的摄像机自动标定为基础,提出了一种改进的双向SIFT特征匹配算法,基于SIFT算法,采用双向匹配理论,并通过基于视差梯度约束的RANSAC对匹配点对进行了提纯。文中选取了在实际应用中具有代表性的四组图像进行了实验验证。实验结果表明,本文算法在去除误匹配和提高匹配运行速度上相对SIFT算法都有较大的改进。下一步的研究则是采用本文的匹配结果进行摄像机的空间位置和姿态的标定,同时也进一步考察本文匹配结果的准确性。

参考文献:

- [1] Wu Qing-shuang, Fu Zhong-liang, Meng Qing-xiang. New camera self-calibration method based on image sequences[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(11): 3010-3014. (in Chinese)
- [2] Han H, Han Q, Li X, et al. Hierarchical spatial pyramid max pooling based on SIFT features and sparse coding for image classification[J]. Computer Vision, IEF, 2013, 7(2): 144-150.

- [3] Lowe G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-100.
- [4] Hu S, Qiao J, Zhang A, et al. 3D reconstruction from image sequence taken with a handheld camera[J]. The International Archives of the Photogrammetry, 2008, XXXVII(B4).
- [5] Nguyen M H, Wunsche B, Delmas P, et al. Modeling of 3D objects using unconstrained and uncalibrated images taken with a handheld camera[C]// Proc of VISIGRAPP, 2013:86-101.
- [6] Wu Chu, Liu Shi-rong, Yang Fan, et al. Research on SIFT feature matching based on epipolar constraint[C]// Proc of China Process Control Conference, 2011:1173-1178. (in Chinese)
- [7] Liu Huan-min, Wang Hua, Duan Hui-fen. A bidirectional matching SIFT algorithm[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(6):89-91. (in Chinese)
- [8] Li Gang, Zeng Rong-sheng, Han Jian-tao, et al. Stereo matching on uncalibrated images based on bidirectional SIFT[C]//Proc of the 4th National Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Application, 2010:253-257. (in Chinese)
- [9] Gong Sheng-rong, Zhao Wan-jin, Liu Chun-ping. Matched points purify algorithm based on gradient of disparity constraint[C]//Proc of the 8th CCVRV'08, 2008:407-410. (in Chinese)
- [8] 李刚, 曾荣盛, 韩建涛, 等. 基于双向 SIFT 的未标定图像的立体匹配[C]//第四届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集, 2010:253-257.
- [9] 龚声荣, 赵万金, 刘纯平. 基于视差梯度约束的匹配点提纯算法[C]//第8届全国虚拟现实与可视化学术会议, 2008:407-410.

作者简介:



安婷(1990-), 女, 陕西榆林人, 硕士生, 研究方向为图形学与虚拟技术。E-mail: xiaowanyiat@126.com

AN Ting, born in 1990, MS candidate, her research interests include graphics, and virtual technology.



贺一民(1990-), 女, 内蒙古包头人, 硕士生, 研究方向为图形学与虚拟技术。E-mail: 1113014692@qq.com

HE Yi-min, born in 1990, MS candidate, her research interests include graphics, and virtual technology.



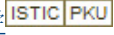
张志毅(1974-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, CCF 会员 (E200033209M), 研究方向为计算机辅助设计与图形学。E-mail: 815802490@qq.com

ZHANG Zhi-yi, born in 1974, PhD, associate professor, CCF member (E200033209M), his research interests include computer aided design, and computer graphics.

附中文参考文献:

- [1] 吴庆双, 付仲良, 孟庆祥. 基于序列图像的摄像机自标定方法[J]. 计算机应用技术, 2011, 31(11):3010-3014.
- [6] 吴楚, 刘士荣, 杨帆. 基于极线约束的 SIFT 特征匹配算法研究[C]//中国过程控制会议, 2011:1173-1178.
- [7] 刘焕敏, 王华, 段慧芬. 一种改进的 SIFT 双向匹配算法[J]. 兵工自动化, 2009, 28(6):89-91.

改进的双向SIFT特征匹配算法

作者: [安婷](#), [贺一民](#), [张志毅](#), [AN Ting](#), [HE Yi-min](#), [ZHANG Zhi-yi](#)
作者单位: [西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌, 712100](#)
刊名: [计算机工程与科学](#) 
英文刊名: [Computer Engineering and Science](#)
年, 卷(期): 2016, 38(1)

引用本文格式: [安婷](#). [贺一民](#). [张志毅](#). [AN Ting](#). [HE Yi-min](#). [ZHANG Zhi-yi](#) 改进的双向SIFT特征匹配算法[期刊论文]-[计算机工程与科学](#) 2016(1)