

结合 Harris 算子和极线约束改进的 SIFT 立体匹配算法^①

杨伟姣^② 杨先海^③

(山东理工大学机械工程学院 淄博 255049)

摘 要 针对尺度不变特征变换(SIFT)算法在双目立体视觉匹配过程中提取的特征点数量多、计算量大和耗时长的问题,本文提出一种结合 Harris 算子和极线约束改进的 SIFT 立体匹配算法。该算法通过 Harris 算子提取左图像特征点代替 SIFT 算法中的极值点,并引入极线约束来限定搜索范围获取右图像特征点,从而缩短特征点的提取时间并提高了准确率。实验结果表明,本算法在双目立体匹配过程中可实现较好的效果,有效地提高了匹配实时性和精度。

关键词 双目视觉;立体匹配;Harris;极线约束;尺度不变特征变换(SIFT)

0 引 言

双目立体视觉在视觉领域的应用越来越广泛^[1,2],其中最重要的部分就是特征提取和立体匹配^[3],这也是双目立体视觉中研究的热点和重点。

目前应用较广泛的立体匹配算法是尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法^[4]。SIFT 算法具有良好的稳定性,优于其他算法,一直是立体匹配算法研究的热点,但也存在一些不足,SIFT 算法提取的特征点多导致计算量大、耗时长,实时性不足,且易出现误匹配。对此,曹彤等人^[5]提出了一种基于 SIFT 算法的标记点自动定位新方法提高匹配定位精度。许钢等人^[6]提出结合余弦相似度改进 SIFT 算法减少误匹配。李兰等人^[7]通过角点精确定位和降低 SIFT 特征维度的方法缩短匹配时间。宋佳乾等人^[8]结合无下采样 contourlet 变换(nonsubsampled contourlet transform, NSCT)改进 SIFT 算法,应用于遥感图像的配准。以上改进方法单方面提高了匹配精度或缩短了匹配时间,但无法在保证精度的同时缩短匹配时间,本文提出了一种基于 SIFT 改进的匹配算法。

1 尺度不变特征变换算法

SIFT 算法是 Lowe^[4]在 2004 年提出的一种局部特征描述算子,采用极值点检测获取大量特征点,并确定每个关键点的位置、尺度和方向,使算法在目标旋转、缩放、平移、噪声等方面具有良好的稳定性,能更好地完成双目视觉匹配。其核心思想包括:

(1) 构建尺度空间进行极值点检测

尺度空间最早出现在计算机视觉领域,其目的是模拟图像数据的多尺度特征^[9]。利用高斯模糊来实现尺度空间,并通过高斯微分函数来计算潜在特征点。

由式(1)计算二维高斯核:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

其中 σ 为高斯正态分布方差。

由式(2)卷积计算不同尺度下的空间表示:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \quad (2)$$

建立 DOG 金字塔,由不同尺度的高斯差分核与图像卷积在 DOG 金字塔内进行极值检测,如式(3)所示:

① 山东省自然科学基金(ZR2016EL19)资助项目。
② 女,1993 年生,硕士生;研究方向:机器视觉及图像处理;E-mail: 1961572959@qq.com
③ 通信作者,E-mail: yxh@sdu.edu.cn
(收稿日期:2019-04-10)

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \\ &\quad \times I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 关键点定位

利用 DOG 函数的二次泰勒展开式 $D(X)$ 对极值点进行插值:

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (4)$$

为得到稳定的特征点,采用海森矩阵 H 去除边缘响应,如式(5)所示:

$$H = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

(3) 确定特征点方向

以邻域梯度主方向为特征点方向,获得图像特征点后计算图像像素点的梯度大小 $m(x, y)$ 和方向 $\theta(x, y)$ 。

$$m(x, y) =$$

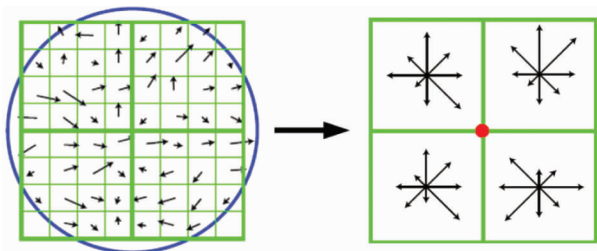
$$\sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \left[\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{(L(x+1, y) - L(x-1, y))} \right] \quad (7)$$

其中 L 代表特征点所在空间。

(4) 生成特征点描述子

为保证匹配的准确性,以特征点为中心取 16×16 的邻域作为采样窗口,并最终形成 128 维的特征描述子。图 1 为 SIFT 特征描述子生成过程。



关键点周围区域图像梯度

SIFT 特征描述子

图 1 SIFT 特征描述子生成过程

2 改进的 SIFT 双目视觉匹配算法

为解决 SIFT 算法在匹配过程实时性差的问题,

提出了一种基于 SIFT 改进的匹配算法,该算法将 Harris 算子、极线约束与 SIFT 算法有效地结合在一起,在保留 SIFT 算法原有优势的基础上减少了特征点的数量和搜索时间,从而提高了匹配效率和精度。算法主要步骤如图 2 所示。

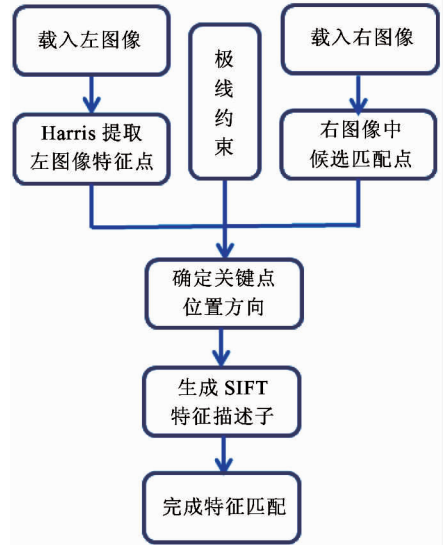


图 2 改进 SIFT 算法原理图

(1) 载入图像并提取左图像特征点

实现双目立体视觉匹配,提取有效的特征点是前提。特征点提取方法很多,常用的有 Harris 算子^[10]和 Susan 算子^[11]。因为 Harris 算子计算简单,可定向提取特征点且特征点提取均匀,故本文选用 Harris 算子提取特征点,代替 SIFT 算法中的极值点。

Harris 算子核心原理是检测小窗口内平均像素灰度值的变化,图像窗口平移 $[u, v]$ 产生的灰度变化为

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in W} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2 \quad (8)$$

其中, (x, y) 为窗口中心, $w(x, y)$ 为窗口函数, $I(x, y)$ 为灰度函数。

Harris 角点响应函数为

$$R = \text{Det}(\mathbf{M}) - k \text{Trace}^2(\mathbf{M}) = \lambda_1 \lambda_2 + k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} I_u^2(x) & I_{uv}(x) \\ I_{uv}(x) & I_v^2(x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$Det(\mathbf{M})$ 为矩阵的行列式, $Trace(\mathbf{M})$ 为矩阵直迹, k 为常数值, 取值范围通常为 $0.04 \sim 0.06$, 当 R 取值大于设定的阈值时则确认该点为特征点。

(2) 引入极线约束, 搜索右图像的候选匹配点
在立体匹配过程中也经常采用约束来限定搜索, 以减少搜索时间、提高搜索准确性。

如图 3 所示, 在世界空间中有一个 3 维坐标点 P , O_1 和 O_2 为双目摄像机的两光学中心点, O_1O_2 为摄像机基线 B , I_1 和 I_2 为两投影平面, P_1 和 P_2 分别是坐标点 P 在 I_1 和 I_2 两平面上的投影点, 光线 O_1P 和 O_2P 构成极线平面 (epipolar plane) π , 基线与投影平面的交点 e_1 、 e_2 为外极点, 极线平面与投影平面的交线为点 P 的极线 (epipolar line)。

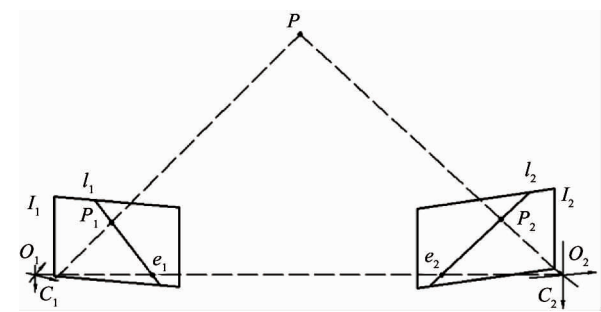


图 3 极线约束原理

根据图 3 所示极线约束原理计算左图特征点在右图上的极线, 取极线上下 10 像素 (即最大视差为 10 像素) 范围内的角点作为右图像的特征点。极线约束原理将特征点的搜索空间由 2 维降为 1 维, 可以有效提高搜索效率。

(3) 确定关键点位置方向
根据特征点局部图像的梯度方向, 分配给每个

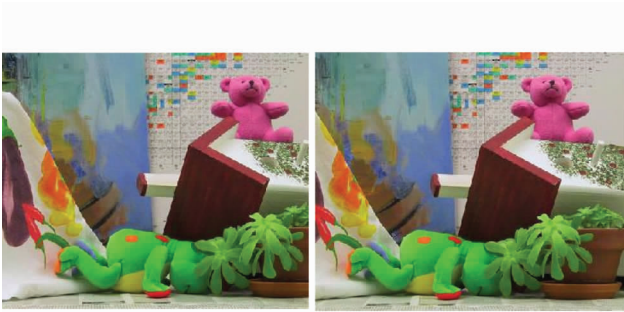
关键点位置一个或多个方向。
(4) 生成特征点的特征描述子, 并完成匹配
为提取的左右图像特征点建立特征描述子, 计算每个特征点的特征向量, 并采用特征向量的欧氏距离^[12]作为匹配原则进行特征匹配。

3 实验结果与分析

本文分别对改进的 SIFT 匹配算法与原 SIFT 算法进行图像匹配实验, 并分析实验结果。实验硬件处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU@ 3.4 GHz, 内存 16 G, 显卡为 AMD R7-200, 实验软件为 Visual Studio 2013 和 Matlab(R2016)。选用 Middlebury 大学提供的双目匹配图 Picture(图片 1) 和自行采集的 Book(图片 2) 2 组图像进行实验。结果如图 4 所示, 图 4(a) 为 2 组图像原图; 图 4(b) 为 SIFT 算法图像匹配结果; 图 4(c) 为本文算法图像匹配结果。

表 1 为 SIFT 算法与本文改进算法匹配结果的对比, 由匹配结果可知, 本文算法在一定程度上解决了 SIFT 算法提取特征点过多且耗时长的问题。本文算法选用 Harris 算子对图像进行特征提取代替 SIFT 算法中空间极值点的检测, 去除了大量伪角点, 减少了匹配计算量。通过引入极线约束搜索右图像中的待匹配点, 计算左图特征点在右图上的极线, 通过限定特征点搜索范围来提高搜索效率, 并在一定程度上为图像的正确匹配提供了可能。

以上数据显示, 本文改进的 SIFT 算法特征点数量减少了约 86.0%, 匹配对数也随之减少, 匹配时间缩短了 60.0% 以上, 正确匹配率平均提高了 6.9%,



图片1



图片2

(a) 原图

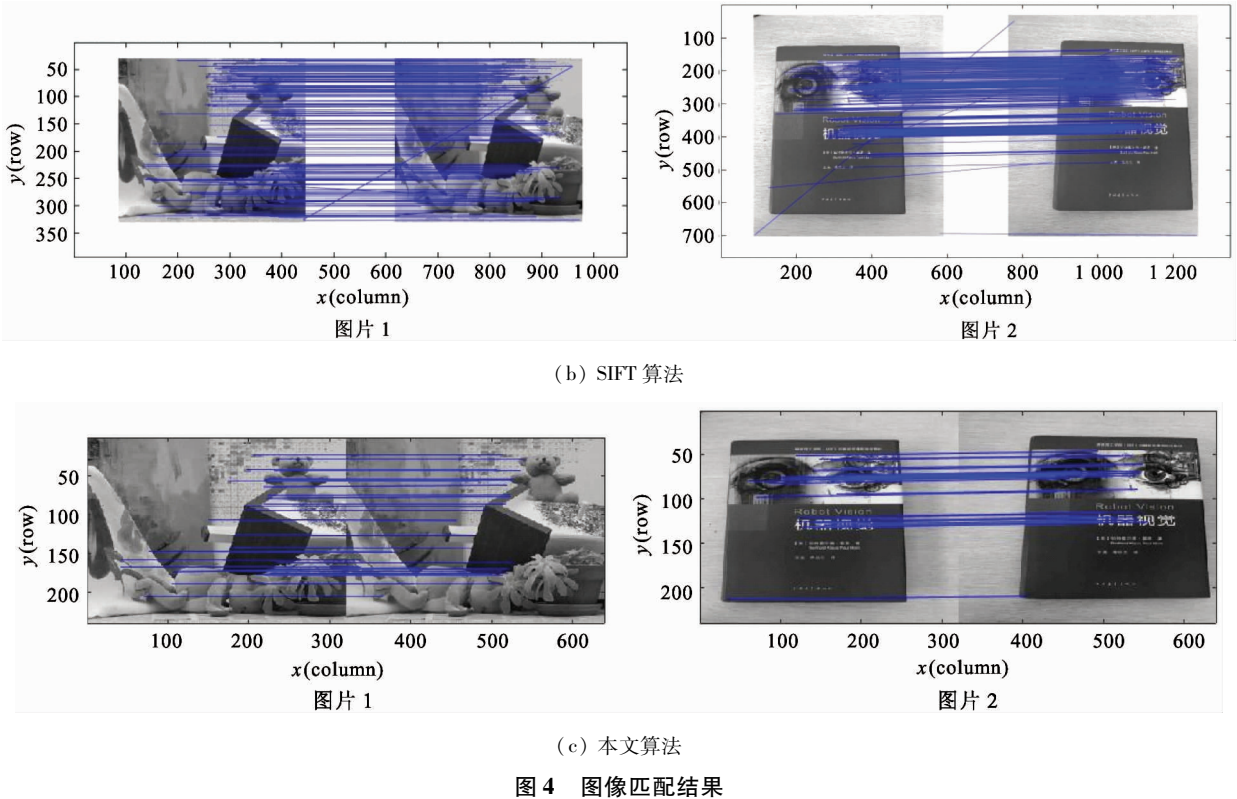


表 1 SIFT 算法与本文算法匹配结果对比

匹配算法	SIFT 算法		本文算法	
	图片 1	图片 2	图片 1	图片 2
特征点总数(左/右)	695/662	920/981	97	127
匹配对数	180	302	39	41
匹配时间/s	9.60	10.20	2.86	3.52
正确匹配对数	164	272	38	40
正确匹配率	91.1%	90.1%	97.4%	97.6%

此数据清晰地表明本文改进算法不仅提高了图像的正确匹配率,还缩短了算法运行时间,提高了算法的实时性。

4 结 论

本文针对双目立体视觉系统中对图像特征提取、特征匹配准确性和实时性的要求,提出了一种结合 Harris 算子和极线约束改进的 SIFT 立体匹配算法,通过引入 Harris 角点检测算子和极线约束原则,准确高效地提取出左右图像特征点,为 SIFT 算法实现图像匹配打下了良好的基础。实验结果表明,本

文提出的改进算法有效地提高了特征点质量,减小计算冗余和特征点的误匹配,同时提高了图像匹配效率和精度,实现了在保证匹配精度的条件下提高匹配效率,尽可能满足了双目视觉过程中对图像匹配的实时性要求。

参考文献

[1] 王鑫,王向军. 大视场双目视觉定位系统中多目标稀疏匹配[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7):302-307

[2] 邵暖,刘乐. 基于双目视觉的多智能体机器人分布式包含控制[J]. 高技术通讯, 2017, 27(11-12):948-957

[3] 苍岩,尹凤鸣,毕晓君. 改进的双目立体视觉算法及其

- 应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(3), 465-470
- [4] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariantkey point [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110
- [5] 曹彤,王烁,倪自强,等. 基于 SIFT 算子的脑立体定向手术标记点自动定位方法[J]. 高技术通讯, 2014, 24(2):165-170
- [6] 许钢,林园胜,江娟娟,等. 改进型 SIFT 立体匹配算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6):134-138
- [7] 李兰,谢勤岚. 一种改进 Harris-SIFT 算子的图像匹配算法[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4):32-34
- [8] 宋佳乾,汪西原. 改进 SIFT 算法和 NSCT 相结合的遥感图像匹配算法[J]. 测绘通报, 2018(9):34-38
- [9] Mikolajczyk K, Schmid C. Indexing based in scale invariantinterest points[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, 2001: 525- 531
- [10] Harris C G, Stephens M. A combined corner and edge detector[C] //Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, Manchester, England, 1988:147-152
- [11] Smith S M, Brady J M. SUSAN: a new approach to low level image processing[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23 (1):45-78
- [12] Arya S, Mount D M, Netanyahu N S, et al. An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching[J]. *Association for Computing Machinery Journal*, 1998, 45(6): 891-923

Improved SIFT stereo matching algorithm combining harris operator and polar constraint

Yang Weijiao, Yang Xianhai

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049)

Abstract

Aiming at the problem that scale invariant feature transform (SIFT) algorithm extracts many feature points with high computational complexity and long time in binocular stereo vision matching process, this paper proposes an improved SIFT stereo matching algorithm combined with Harris operator and epipolar constraint. This algorithm extracts the left image feature points by the Harris operator instead of the extreme points in the SIFT algorithm, and introduces the epipolar constraint to define the search range to obtain the right image feature points, thus shortening the extraction time and increasing the accuracy of the feature points. The experimental results show that the proposed algorithm can achieve better results in the binocular stereo matching process, which effectively improves the real-time matching and accuracy.

Key words: binocular vision, stereo matching, Harris, epipolar constraint, scale invariant feature transform (SIFT)