

采用 SIFT 的末制导图像匹配技术

邸 男, 李桂菊, 魏雅娟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 图像匹配技术作为末制导图像处理器的关键技术具有重要的理论意义和实用价值。近年来, SIFT 算法以其优秀的匹配性能在图像匹配领域受到广泛的关注。针对传统的及现有的改进 SIFT 算法计算复杂、难于实际应用的问题, 使用 VC++ 对各种 SIFT 的改进算子进行仿真实验, 对比不同算子的实验性能, 提出一种更加快速稳定的 SIFT 算法。在尺度空间极值检测和建立特征点描述符方面进行改进, 与现有方法相比, 不但保持了特征的丰富性, 同时大大简化了计算量, 提高了运算速度。目前, 算法已经植入工程硬件平台。实验表明: 改进的 SIFT 算法能够在图像发生缩放、旋转、平移等变化, 并受到噪声、光照变化和拍摄条件不同图像内容细微变化的条件下, 准确识别目标; 通过双 DSP 并行等优化方法, 算法可以满足实际工程要求的小于 200 ms 的捕获时间指标。

关键词: 图像匹配; 改进的 SIFT; 尺度空间; 特征检测

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)08-1589-05

Image matching technology based on SIFT for terminal-guiding system

Di Nan, Li Guiju, Wei Yajuan

(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In the terminal-guiding system, image matching as a key technology is valuable in theory and practicality. Recent years, wide attention has been paid to SIFT for its excellent performance in the image matching area. Due to the complexity of the traditional and improved SIFT, lots of improved SIFT methods were simulated with VC++ and a fast and stable SIFT with improvements was proposed in scale-space extremum detection and key point descriptor. Compared with the existing methods, the improved SIFT not only kept the character of abundance, but also reduced the computation cost considerably. Recently, the algorithm was applied in the hardware system. Experiments on lots of images show that the improved SIFT can overcome variations of the scale, rotation, translation, blur and the small distinction between the images due to the different condition to detect the object exactly. The time of the algorithm is less than 200 ms and satisfies the practical need through using two DSP parallel computing.

Key words: image matching; improved SIFT; scale-space; character detection

收稿日期: 2010-12-22; 修订日期: 2011-01-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2006AA703405F); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 邸男(1981-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事图像匹配、目标自动识别方面的研究。Email: dinan0620@yahoo.com.cn

0 引言

近些年爆发的多起大规模战争充分表明,精确制导武器以其精度高、隐身性强、突防能力强、杀伤力大等特性对战争的结局起着关键性的作用。图像匹配技术作为精确制导图像处理器的关键技术具有重要的理论意义和实用价值。由于导弹中预装的基准图与弹载相机拍摄的实时图之间存在的诸多差异,使得图像匹配的复杂性骤然增大。目前,图像匹配领域的很多研究集中在基于局部特征^[1-3]的图像匹配算法,取得了很大的进展。Low^[4]于 2004 年提出一种新的点特征提取算法——SIFT 算法,能够适应图像缩放、旋转、平移等变化,并能克服噪声光照变化的影响,而且特征点数量多,可分辨性高,成为近些年的研究热点,它的缺陷是计算量很大,难以满足武器系统的实时性要求。国外学者针对 SIFT 提出了很多改进算法,例如 PCA-SIFT^[5]、GLOH^[6]、SURF^[7]算法等等,力图在保持算法性能的同时,提高运算速度。国内也有许多学者针对 SIFT 算法进行了一系列的研究,杨小敏改进了 SIFT 的特征点匹配方式,提高了匹配准确度^[8]。纪华将全局信息引入 SIFT 特征向量,降低了图像误匹配率^[9]。总的来说,大部分研究多是集中在改进 SIFT 性能方面,算法复杂性仍然很高,难于实际应用。文中通过比较研究各种 SIFT 改进算法的性能,提出了一种更加快速稳定的 SIFT 算法,不但保持了特征的丰富性,同时大大提高了运算速度,具有较高的工程实际应用价值。

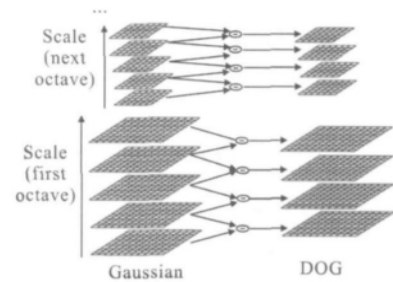
1 SIFT 算法的原理

SIFT 算法分为 4 个步骤:尺度空间极值点检测、关键点方向分配、关键点特征描述符的生成、关键点特征向量集的匹配。下面简略介绍该算法的 4 个步骤。

1.1 尺度空间极值检测

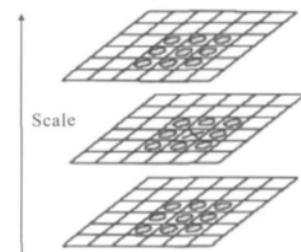
SIFT 算法不同于以往单一尺度的特征检测算子,引入了多尺度空间概念,不但大大提高了特征点的数量,同时特征点带有尺度信息,解决了匹配图像间的大尺度变化问题。它采用差分高斯函数(DOG)近似 Laplacian-Gaussian 检测算子,检测的极值点能够最丰富地反映图像特征。将相邻 3 层 DOG 图像的

极值点确定为关键点,计算过程如图 1 所示。



(a) 高斯模糊图像和差分图像

(a) Gaussian images and DOG images



(b) 相邻 3 层差分图像的极值点检测

(b) Extrema detection in the current and adjacent 3 DOG images

图 1 尺度空间极值检测过程

Fig.1 Scale-space extrema detection

1.2 关键点方向分配

提取关键点后,在关键点的周围区域对采样点统计梯度方向直方图。直方图的峰值记作该关键点的方向。至此,每个特征点有 3 个信息:位置、尺度、方向,由此可以确定一个 SIFT 特征区域。

1.3 关键点特征描述符的生成

将关键点邻域绕关键点方向旋转,按关键点的尺度缩放,可以确保生成的描述符对于旋转和缩放保持不变。

以关键点为中心取 16×16 的窗口。图 2 左图中圆的圆心为当前关键点的位置,每个小格代表关键点邻域内的一个像素,小格中的箭头长度表示梯度模值,箭头方向表示梯度方向。图中灰色的圈为高斯加权窗。在每 4×4 的小块上计算 8 个方向的梯度方向直方图,绘制每个梯度方向的累加值,即可形成一个种子点,如图 2 右图所示。此图中一个关键点由 4×4 共 16 个种子点组成,每个种子点有 8 个方向向量信息。这样就生成了关键点对应的 $16 \times 8 = 128$ 维 SIFT 特征向量。进一步将特征向量归一化,可以使特征向量对于光照变化保持不变。

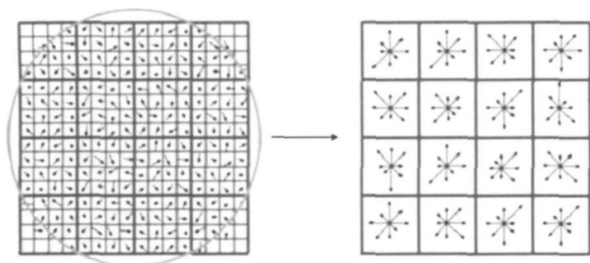


图 2 由关键点邻域梯度和方向信息生成特征向量

Fig.2 Feature vector is created by the neighbour hood grade magnitude and orientation of the key point

1.4 关键点特征向量集的匹配

当两幅图像的 SIFT 特征向量生成后,使用关键点特征向量的欧式距离度量两幅图像中关键点的相似性。采用 k-d 树算法,大大提高了特征向量集的匹配速度。然后使用 RANSAC 算法对特征匹配结果进行筛选,剔除误匹配点,从而确定准确的仿射模型,实现图像间的精确匹配。

2 对SIFT 算法的改进

文中通过参阅大量参考文献,研究并比较 PCA-SIFT, GLOH, SURF 等改进的 SIFT 算法的性能,在尺度空间极值检测和建立关键点描述符方面进行改进,提出一种更加快速稳定的 SIFT 算法。下面详细介绍一下改进的内容,对不同算法使用 VC++ 进行仿真实验,选取的基准图为卫星图像,大小为 200×200;实时图为基准图经过旋转、缩放、增加噪声处理后的图像,大小为 320×256。

2.1 尺度空间极值检测的改进

传统的 SIFT 算法逐渐缩小图像,形成金字塔空间,对每级金字塔图像使用不同尺度的高斯函数进行平滑。假设分为 6 阶金字塔,使用 5 个尺度,则需要计算 6×5=30 幅图像。对于硬件实现来说,无论是速度还是存储空间都难以满足要求。文中尝试使用 1 阶金子塔(即原图)产生 5 个尺度下的高斯平滑图像。传统的 SIFT 检测的特征点会减少很多,甚至匹配点数不足以确定仿射模型。图 3 为传统 SIFT 算法分 6 阶金字塔的匹配结果,共有 183 个匹配点对。图 4 为 1 阶金字塔的匹配结果,共有 5 个匹配点对。

经过仔细研究发现,在检测极值点阶段,通过比

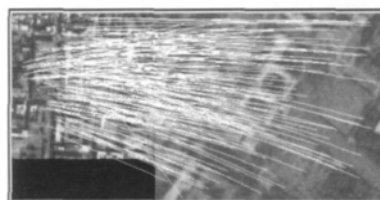


图 3 传统 SIFT 算子 6 阶金字塔匹配结果

Fig.3 Traditional SIFT with 6 octaves

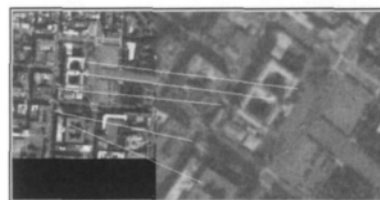


图 4 传统 SIFT 算子 1 阶金字塔匹配结果

Fig.4 Traditional SIFT with 1 octave

较采样点在 3 层 DOG 图像的 26 邻域确定极值点。在同一层内,极值点的性质是不变的;而在不同层内,由于高斯模板的尺度不同,产生的 DOG 图像不是统一尺度,因此,应该对每个 DOG 图像做归一化后再比较。改进后的 DOG 图像计算公式为:

$$DOG = (DOG - \min(DOG)) / (\max(DOG) - \min(DOG))$$

经过该公式归一化后的差分图像在尺度上达到了统一,极值点数量变化不大,但两幅图像的相似点对大大增多,减少计算量的同时增加了匹配的稳定性。图 5 为改进后的 SIFT 算法 1 级金字塔的匹配结果,共 39 个匹配点对。

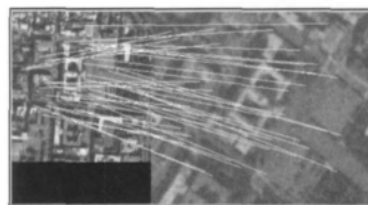


图 5 改进的 SIFT 算子 1 阶金字塔匹配结果

Fig.5 Improved SIFT with 1 octave

参考文献[10]使用差分均值滤波近似差分高斯滤波大大加速了传统 SIFT 算法,文中在改进的算法中尝试使用该方法的近似方法,结果发现基准图仅有 4 个特征点,实时图仅 25 个特征点,得到 0 个匹配点对,匹配失败。原因在于均值滤波过于平坦缺乏高斯滤波的曲度,导致极值点难于检测。受 SUR 思想启发,使用盒子滤波器近似高斯滤波器(见图6),盒

子滤波器只需要计算一次积分图像, 就可以得出任一点的滤波值, 而与盒子滤波器的大小无关, 从而大大减化了计算量, 并且保持了特征点丰富的性能, 仿真结果如图 7 所示, 共 17 个匹配点对。

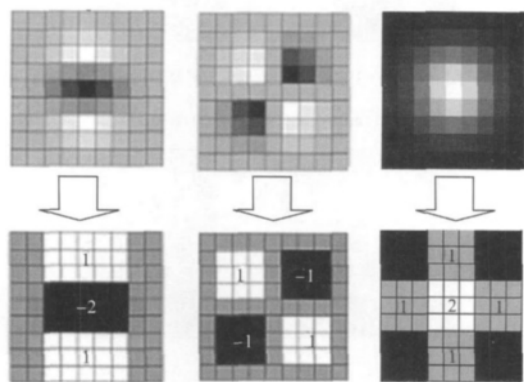


图 6 盒子滤波器
Fig.6 Box filter

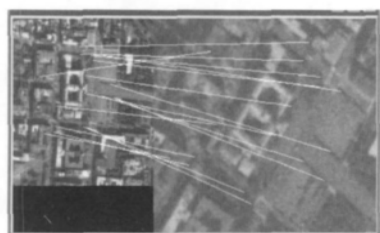


图 7 应用盒子滤波器后的加速 SIFT 算子
Fig.7 Improved SIFT with box filter

表 1 为传统高斯滤波和文中盒子滤波的计算量比较。

表 1 传统高斯滤波和文中盒子滤波的计算量比较(单个像素)

Tab.1 Computation cost comparison between Gaussian filter and box filter(single pixel)

	Addition times	Plus times
Gaussian filter	$2n-2$	$2n+1$
Box filter	17	2

2.2 建立关键点描述符的改进

根据参考文献 [6] 对各种局部检测算子的评估可以看出: PCA-SIFT 和 GLOH 算法在众多检测算子中表现优秀, 具有近似 SIFT 的性能, 与传统 SIFT 在尺度空间极值检测方面相同, 仅在建立描述符向量方面使用统计中常用的主成分分析方法, 该方法

需要计算由关键点特征向量组成矩阵的特征值和特征向量。在实际应用过程中, 由于关键点个数常为几百甚至上千个, 特征向量矩阵的存储空间很大并且难以确定, 同时, 计算如此大的矩阵的特征值和特征向量也需要很大的计算量, 因此, 该方法很难应用于工程实践。

文中采用积分直方图^[10]加快传统 SIFT 计算梯度直方图的速度, 积分直方图的计算与积分图像的计算类似, 只需要计算一次, 运算的消耗不依赖于区域的大小, 适用于硬件实现。

3 实验结果

针对不同的目标场景进行了大量实验, 基准图为使用 Google Earth 软件截取的卫星图片, 实时图为工程实验实际拍摄的图片, 大小都为 220×220 。对于图 8 所示的机场目标, 实时图与基准图之间存在 12.4° 的旋转变化, 2° 的俯仰变化和一定的缩放变化, 同时由于卫星图像与实际图像拍摄的时间不同, 图像内容发生了很多变化, 但应用改进后的 SIFT 算法仍得到了稳定的匹配效果, 共 13 个匹配点对 (图中+表示目标识别位置)。而传统的 SIFT 算法得到 11 个匹配点对, 其中包括 5 个误匹配点对, 最终定位的目标识别位置偏差较大。图 9 所示的水塔目标, 实时图与基准图之间存在 13° 的旋转变化, 4° 的俯仰变化和一定的缩放变化, 文中算法得到 16 个匹配点对, 传统算法仅得到 5 个匹配点对。

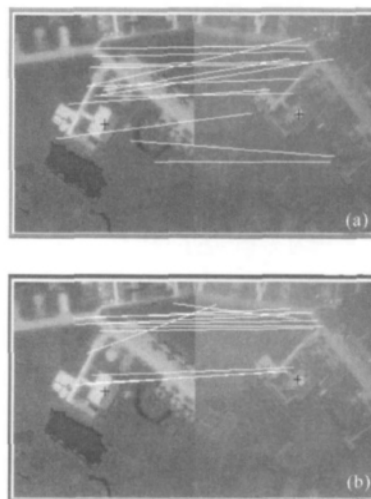


图 8 基准图与实时图

Fig.8 Original image and real-time image

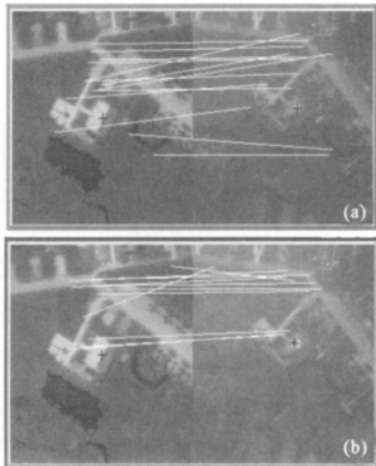


图 9 基准图与实时图

Fig.9 Original image and real-time image

4 时间性能分析

该算法已经植入基于 32 bit 定点, 1 GHz 时钟的 DSP TMS320C6416 硬件环境中, 采用双 DSP 并行方式执行; 传统的 SIFT 算法由于时间和空间复杂度很高, 无法植入 DSP 硬件环境, 在 VC++ 环境下执行, 表 2 给出了两种算法各个阶段耗费的时间对比。

表 2 文中算法与传统 SIFT 算法各阶段耗费时间对比

Tab. 2 Comparison of the time cost between improved SIFT and traditional SIFT

	Difference image	Extremum detection	Generation of charater descriptor	Character matching
Improved SIFT/ms	8.3	28.7	64.5	90.2
Traditional SIFT/s	0.8	0.4	0.6	1.1

从表 2 可以看出: 改进后的算法通过使用积分图像和积分直方图近似计算高斯卷积和梯度直方图; 整数运算优化以及应用双 DSP 并行执行方式, 使得总的计算时间约为 $8.3+28.7+64.5+90.2=191.7$ ms, 满足实际工程中捕获时间小于 200 ms 的指标要求。而传统的 SIFT 算法大约需要 $0.8+0.4+0.6+1.1=2.9$ s。

5 结论

改进的 SIFT 算法将差分图像归一化, 使得相邻三层差分图像在统一的尺度下比较, 极值点的数量变化不大, 但匹配点对增加了。同时使用盒子滤波器和积分直方图近似计算高斯卷积和梯度直方图, 大大简化了

计算量。与传统算法相比, 性能更稳定、实时性更好。但由于改进算法不再对图像进行金字塔采样, 与传统算法相比, 对于图像间超过 2 倍的大尺度变化, 匹配性能有所下降, 接下来重点研究特征匹配方法的优化。

参考文献:

- [1] Di Nan, Zhu Ming, Wang Yinan. Real-time detection of airport runway by extracting line feature [J]. *Opt and Precision Eng*, 2009, 17(9): 2336-2341. (in Chinese)
邱男, 朱明, 王毅楠. 提取直线特征实现机场跑道实时检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2336-2341.
- [2] Wang Huifeng, Liu Shangqian, Wang Dabao, et al. Video camera rotation compensation algorithm based on feature matching of sequence image frames [J]. *Opt and Precision Eng*, 2008, 16(7): 1330-1334. (in Chinese)
王会峰, 刘上乾, 汪大宝, 等. 基于序列图像特征配准的摄像机旋转补偿算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1330-1334.
- [3] Wang Xin, Ma Yan, Yang Jian, et al. Implementation and improvement of area-based stereo matching algorithm[J]. *Opt and Precision Eng*, 2008, 16(10): 2002-2007. (in Chinese)
王昕, 马岩, 杨剑, 等. 区域立体匹配算法的实现及改进[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 2002-2007.
- [4] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *Int'l J Computer Vision*, 2004, 2(60): 91-110.
- [5] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C]//Proc Conf Computer Vision and Pattern Recognition, 2004: 511-517.
- [6] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005(27): 1615-1630.
- [7] Herbert B, Tinne T, Luc V G. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [8] Yang Xiaomin, Wu Wei, Qing Linbo, et al. Image feature extraction and matching technology [J]. *Opt and Precision Eng*, 2009, 17(9): 2276-2282. (in Chinese)
杨小敏, 吴炜, 卿琳波, 等. 图像特特征点提取及匹配技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2276-2282.
- [9] Ji Hua, Wu Yuanhao, Sun Honghai, et al. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt and Pre Eng*, 2008, 17(2): 439-444.
纪华, 吴元昊, 孙洪海, 等. 基于全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 17(2): 439-444.
- [10] Michael G, Helmut G, Horst B. Fast approximated SIFT [C]//Asian Conference on Computer Vision, 2006: 918-927.