

基于图像尖锐度的角点匹配算法*

邢彩燕, 张志毅, 胡少军, 耿楠

(西北农林科技大学信息工程学院, 陕西 西安 712100)

摘要:从多角度拍摄同一物体所得不同视角图像中的关键点的匹配对图像三维重建至关重要。为了得到精准的角点匹配对,提出了基于图像尖锐度角点匹配的新算法。该算法分为 3 个步骤:第 1,为最大限度避免噪声的干扰,使用 Canny 算子先检测图像,进而使用 8 邻域轮廓追踪算法追踪边缘点得到边缘轮廓线。第 2,计算轮廓线的尖锐度获取图像中的关键角点。第 3,先粗匹配利用零均值归一化互相关法建立不同图像角点间一对多的关系,再进行精匹配采用优化后减少迭代次数的松弛迭代法得到一对一匹配点对。实验表明,该算法能够在提高运行效率的同时提高角点匹配的精准度,最终得到角点精匹配对。

关键词:边缘轮廓线;角点提取;零均值归一化互相关;松弛迭代

中图分类号:TP391.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-130X.2019.04.014

A corner matching algorithm based on image sharpness

XING Cai-yan, ZHANG Zhi-yi, HU Shao-jun, GENG Nan

(College of Information Engineering, Northwest A & F University, Xi'an 712100, China)

Abstract: It is crucial to 3D image reconstruction that matching the key points of the same object from multi-angle shots of images. We propose a new corner matching algorithm based on image sharpness to get precise corner matching pairs. The algorithm is divided into three steps. Firstly, the coarse edge information of image is gained by Canny operator. To minimize noise interference to the greatest extent, we then use the 8 neighborhood contour tracking algorithm to track the edge points to obtain the edge contour. Secondly, the sharpness of the contour lines is calculated to get the key corner points in the image. Thirdly, one-to-many matching relationships between corner points in different images are established through the zero-mean normalized cross-correlation method, thus coarse-matching of point pairs is achieved; and we adopt an optimized relaxation iteration method to reduce the number of iterations and obtain one-to-one precise-matching of point pairs. Experimental results show that the proposed algorithm is able to improve the running efficiency and accuracy of corner matching, thus realizing precise-matching of point pairs.

Key words: edge contour; corner extraction; zero-mean normalized cross correlation; relaxation iteration

1 引言

从不同角度对同一物体拍摄所得到的图像进

行匹配是利用计算机视觉来恢复物体三维模型的关键技术之一。图像匹配的目的是精确找出 2 幅图像中各像素之间的对应关系。图像匹配算法常被分为基于灰度的图像匹配算法和基于特征的图

* 收稿日期:2017-05-05;修回日期:2017-11-29

基金项目:国家 863 计划(2013AA10230402);国家自然科学基金(61303124)

通信作者:张志毅(815802490@qq.com)

通信地址:712100 陕西省西安市杨凌农业示范区西北农林科技大学信息工程学院

Address: College of Information Engineering, Northwest A & F University, Yangling Agricultural Hi-tech Industries Demonstration Zone, Xi'an 712100, Shaanxi, P. R. China

像匹配算法 2 大类。

基于灰度的图像匹配算法的特点是充分利用了图像所包含的信息,其计算复杂度高、运算量大、耗时长,导致实时性较差、对噪声敏感、精度较低。对于存在非线性几何畸变的图像,匹配效果差,如基于像素灰度值^[1,2]的平均绝对差算法 MAD (Mean Absolute Differences)^[3,4]、基于归一化自相关算法^[5,6]的序列相似性匹配算法 SSDA (Sequence Similarity Detection Algorithm)^[7]、归一化积相关算法 NCC (Normalized Cross Correlation)^[8]、互信息法 MI (Mutual Information)^[9]等。改进的互信息法将匹配精度提高到亚像素级^[10],如性能更稳定的归一化互信息熵测量匹配算法^[11]、采用图像金字塔思想提高速率的互信息算法^[12]等。

基于特征的图像匹配算法主要是通过提取图像显著局部特征信息,再对特征信息进行匹配,该类算法的鲁棒性较强,但存在计算复杂度较高的问题。目前应用最广泛的是由 Lowe^[13,14]于 1999 年提出的尺度不变特征变换 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法及其相应的加速改进算法。通常基于 SIFT 的图像匹配是对灰度图像进行匹配,同时也有基于彩色图像的 SIFT 算法^[15,16],不断改进的基于彩色图像的 SIFT 算法^[17,18]主要有基于颜色矩、颜色直方图和 SIFT 的算法这 3 类,但它们存在只能提取局部色彩、不能较好地显示空间分布信息等缺陷。另一个典型的算法是 Bay 等人^[19]于 2006 年提出稳健的图像识别和描述 SURF (Speeded Up Robust Features) 算法。后续一直优化的 SURF 算法^[20,21]是尺度不变特征变换算法 (SIFT) 的加速版,它主要是利用 Hessian 矩阵实现 SIFT 算法的加速。

杨通钰等人^[22]提出了基于 NCC 的图像匹配快速算法,在保证精度的前提下,降低了计算复杂度。刘兆英等人^[23]提出的基于感兴趣区域互信息的多模式图像配准方法,通过减少灰度级进而提升算法的配准精度及运行效率。韩冰等人^[24]以基准子图能量迭代优化了归一化积算法的图像匹配过程,降低了计算复杂度,提高了运算速度。程德志等人^[25]提出的基于改进 SIFT 算法的图像匹配方法,将描述子的相似性度量更替为准欧氏距离而非传统算法中的欧氏距离,提升了运行速率和匹配效率,从而达到了优化 SIFT 算法的目的。张开玉等人^[26]为了实现在较短的时间内达到高匹配检测率的效果,基于改进 SURF 的图像配准关键算法,

采用了增加特征矢量以及基于 KD (K-Dimensional) 树的 BBF (Best Bin First) 检索算法,然而该算法灰度匹配及特征匹配实时性和精准性还有待进一步提高。

本文采用计算图像目标物轮廓尖锐度的算法提取目标物角点,使用 Canny 算子先处理图像得到轮廓边缘点;为尽可能降低噪声的干扰,继续通过 8 邻域轮廓追踪算法追踪边缘点获取轮廓边缘线。通过计算轮廓边缘线上 2 点间弧线的尖锐度来提取角点。在匹配过程中,先基于零均值归一化互相关方法建立不同视角图像角点之间的一对多关系,最后利用优化后的松弛迭代法进行精匹配,能够有效删除误匹配,获得最终一对一关系的角点对。本算法旨在同时提高匹配精度和速度,以便通过匹配点来计算目标物的空间信息。

2 轮廓边缘线提取

2.1 图像预处理

图像目标物最基础且明显的特征是边缘,其在图像分析的特征提取、形状分析、目标识别等方面都具有十分重要的意义。边缘检测的效果直接影响特征点提取、形状分析以及目标识别结果的正确性。本文 Canny 边缘检测的算法步骤如下所示:

(1) 采用双边滤波对图像进行去噪处理,从而达到保边去噪的目的。

(2) 阈值分割,有效地将背景和前景进行分离。

(3) 利用 Canny 边缘检测算法得到目标物的边缘信息。

在上述步骤中,通过 Canny 算子检测到的边缘存在以下缺陷:(1) 边缘达不到单像素级,一个边缘出现多个响应;(2) 为了保留细节信息,在 Canny 边缘检测算法的高斯滤波器中选择较小的 σ 值,但是也保留了噪声的边缘信息;(3) 较大滞后阈值会使得检测到的边缘信息相对较少,本文在实验过程中设置的滞后阈值较小,尽管保留了所能连接的较多的边缘但也产生了假边缘。

2.2 基于 Canny 边缘检测的边缘轮廓线提取

因 Canny 算子的固有不足致使检测到的由单个像素点构成的目标物轮廓边缘中不仅有孤立像素点、虚假边缘,还存在噪声边缘,为了最大限度地弥补 Canny 边缘检测算法的缺陷,同时将独立的像素连成线,并且为了后续能够得到更好的角点检测结果,本文提出新的基于 Canny 边缘检测的边

缘轮廓线提取算法。该算法将 Canny 边缘检测算法与 8 邻域轮廓追踪算法的思想融合起来,追踪检测到的 Canny 边缘,从而得到较好的边缘轮廓线。如图 1 所示^[27]。

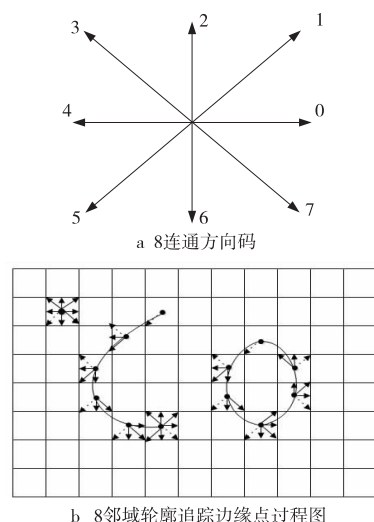


Figure 1 Schematic diagram of contour tracking based on Canny edge detection

图 1 基于 Canny 边缘检测轮廓线追踪示意图

基于 Canny 边缘检测的边缘轮廓线提取算法步骤如算法 1 所示:

算法 1 基于 Canny 边缘检测的边缘轮廓线提取算法

输入: Canny 算子处理图像所得到的边缘点图 *CannyImage*, 图像像素矩阵 *image*, 构成轮廓线坐标点个数的阈值 *thea*。

输出: 边缘轮廓线图。

步骤 1 定义存放轮廓线的数据结构 *nml*, 其表示集合;

步骤 2 While (! *bAllBpixel*) do
Canny 算子检测结果图中有无等于 0 的像素值; /* *bAllBpixel*: 图像中像素值全部为零标识 */

步骤 3 *startsePoint* = *FindSearchStartPoint* (*image*, *pstartsePoint*); /* 最开始追踪位置为边缘检测结果图中首个非零像素点的坐标, 使其入栈; *startsePoint*: 追踪轮廓线的起始坐标; *pstartsePoint*: 查找追踪点的起始坐标 */

步骤 4 While (! *bFindStartpoint* && ! *aroundSevenpixel*) do
/* 此时追踪点坐标不等于最开始追踪点坐标 && 该点相邻域

内 7 个方向有不为 0 像素值;
bFindStartpoint: 当前轮廓线追踪点坐标等于轮廓线追踪点的起始坐标标识; *aroundSevenpixel*: 当前追踪点 7 个邻域内像素值全为 0 标识 */

步骤 5 将 *dir*=5 方向的位置作为新的追踪点;

步骤 6 if (*CannyImage*[*i*][*j*] != 0)
将其作为当前追踪点压入栈中, 使 Canny 算子检测结果图中此点的其他方向点像素值及此时追踪点的像素值等于 0;

else

反之转换方向, 即逆时针方向更新 *dir*;

endif

步骤 7 如果前一次追踪方向 *dir* 是奇数, 则此时追踪方向 *dir* = (*dir* + 6) mod 8; 若 *dir* 是偶数, 则 *dir* = (*dir* + 7) mod 8, 继续追踪;

步骤 8 endwhile

步骤 9 if (*board.size()* > *thea*)
将栈中点坐标拷贝到轮廓线集合 *nml* 中;

else

board.pop();

endif

步骤 10 endwhile

在 Canny 算子检测的基础上融合 8 邻域轮廓追踪算法能够弥补 Canny 算子的不足, 避免检测到的边缘中还存在伪边缘、孤立像素点和噪声边缘等现象, 同时还可将孤立的像素点连成线, 为角点提取做铺垫。

3 角点的提取

角点对目标物形状起着决定性作用, 其位于图像明暗起伏较大区域或者是目标物边缘曲线的曲率极大值点。角点能够在保留图像图形重要特征的同时有效减少后期待处理信息的数据量, 从而满足实时性要求。通常图像配准的过程中提取角点的算法是 SUSAN (Smallest Univalve Segment Assimilating Nucleus) 算子, 但其在实际应用中, 由于图像的数字化的, 真正的圆形模板无法实现, 采

用近似圆代替圆形模板存在误差并且运算量较大^[28-30]。而本文在基于 Canny 边缘检测的边缘轮廓线追踪的基础上,选择简单而有效的基于轮廓尖锐度的角点检测算法^[31,32]。该算法以轮廓线上任意一点 $p_i(x(i), y(i))$ 为中心,选择前后相距 k 的 2 点 $p_{i-k}(x(i-k), y(i-k)), p_{i+k}(x(i+k), y(i+k))$, 近似为圆弧上 3 点构成支撑角,假设 $|p_i p_{i-k}| = |p_i p_{i+k}|$, 则 α 支撑角大小用式(1)表示为:

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{|p_{i-k} p_{i+k}| / 2}{|p_i p_{i-k}|} = \frac{|p_{i-k} p_{i+k}| / 2}{|p_i p_{i-k}| + |p_i p_{i+k}|}, 0 < \alpha < 180 \quad (1)$$

则有 $\sin(\alpha/2) \in [0, 1]$, 定义 $sharp = 1 - |p_{i-k} p_{i+k}| / (|p_i p_{i-k}| + |p_i p_{i+k}|)$ 为圆弧的尖锐度, $sharp$ 值越大,表明其角越尖锐。当 $sharp$ 值比设定的阈值 T 大时,将其作为候选角点。为了获取真正的角点,本文使用非极大值抑制算法对候选角点进行筛选,实验过程中设置候选角点的阈值 $T = 0.02$, 设置中间距 $k = 3$ 。

4 特征点匹配

4.1 角点粗匹配

零均值归一化互相关 ZNCC (Zero mean Normalized Cross Correlation) 算法在粗匹配的过程中对标准差和均值进行了归一化,因此在光照及对比度这两方面具有较强的鲁棒性。该算法可以建立图像 I_1 中与图像 I_2 角点间一对多的匹配关系。图像 I_1 中的角点 p_{1i} (坐标为 $p_{1i}(u, v)$) 对应图像 I_2 上的相似角点 q_{2j} 的坐标为 $q_{2j}(u', v')$, 其位于搜寻尺寸大小为 $(2d_u + 1) \times (2d_v + 1)$ 的区域内,其灰度相关值邻域尺寸为 $(2n + 1) \times (2m + 1)$ 。零均值互相关系数为:

$$Similar(p_1, q_1) = \left(\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m [I_1(u+i, v+j) - \overline{I_1(u, v)}] \times [I_2(u'+i, v'+j) - \overline{I_2(u', v')}] \right) / \left((2n+1)(2m+1) \sqrt{\sigma^2(I_1) \times \sigma^2(I_2)} \right) \quad (2)$$

其中, $\overline{I_k(u, v)}$ 是图像 I_k 中将角点 (u, v) 作为中心点的邻域大小为 $(2n+1)(2m+1)$ 的灰度平均值, $\sigma(I_k)$ 是标准偏差。式(2)中灰度平均值为:

$$\overline{I_k(u, v)} = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_k(u+i, v+j) / [(2n+1)(2m+1)], \text{ 灰度标准差为: } \sigma(I_k) =$$

$$\sqrt{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m (I_k(u, v) - \overline{I(u, v)})^2 / ((2n+1)(2m+1))},$$

通过化简可以发现 2 个角点区域内灰度越相近,式(2)的值越接近 1,进而能够确定 2 点之间的候选匹配关系。零均值互相关系数 $Similar$ 的取值为 $[-1, 1]$, 当 $Similar$ 大于设定的阈值时为候选匹配点,即 2 幅图像中角点之间形成一对多的对应关系。在实验过程中,设置相关窗口长宽为 $n = m = 3$, 将零均值互相关的阈值设定为 0.85。搜寻区域的宽 d_u 和高 d_v 分别是图像宽度和高度的 $1/4$ 。

4.2 匹配强度

角点粗匹配采用零均值归一化互相关法匹配,该算法仅仅是利用了像素点的灰度信息建立一对多的匹配,因此初始匹配点集中含有大量的模糊匹配点对和错误匹配点对。故需要进一步采用松弛迭代法进行精匹配,以建立角点间一对一匹配关系。

角点的粗匹配点对表示为 (p_{1i}, q_{2j}) , p_{1i}, q_{2j} 分别是图像 I_1 和 I_2 中的角点,以这两点为中心, R 为半径的邻域是 $N(p_{1i})$ 和 $N(q_{2j})$ 。若 p_{1i} 与 q_{2j} 正确地匹配,则其邻域 $N(p_{1i})$ 和 $N(q_{2j})$ 内一定有更多的正确匹配点对 (p_{1k}, q_{2f}) , 其中 $p_{1k} \in N(p_{1i})$, $q_{2f} \in N(q_{2j})$ 。满足计算匹配强度的 2 个条件为:

条件 1 只有匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 的邻域内的匹配点对 (p_{1k}, q_{2f}) 才对候选匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 产生影响。

条件 2 $p_{1i} p_{1k}$ 与 $q_{2j} q_{2f}$ 之间的夹角小于 90° 。

如果候选匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 和 (p_{1k}, q_{2f}) 满足以上 2 个条件,则匹配强度的计算公式为:

$$S_M = \sum_{p_{1k} \in N(q_{1i}), q_{2f} \in N(q_{2j})} \max [(Similar_{ij} Similar_{kf} \delta(p_{1i}, p_{1k}, q_{2j}, q_{2f})) / (1 + dist(p_{1i}, p_{1k}, q_{2j}, q_{2f}))] \quad (3)$$

其中, $Similar_{ij}$ 和 $Similar_{kf}$ 是候选匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 和 (p_{1k}, q_{2f}) 的灰度互相关值。 $dist$ 为角点对的平均距离。每一个候选匹配点对 (p_{1k}, q_{2f}) 对匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 的相似度贡献度表示为:

$$\delta(p_{1i}, p_{1k}, q_{2j}, q_{2f}) = \begin{cases} e^{-r/\epsilon_r}, & r < \epsilon_r \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其是以负的角点对相对距离偏差 r 为单调递减的幂函数。当 $r \rightarrow \infty$ 时,点对 (p_{1k}, q_{2f}) 被忽略,当 $r > 0$ 时,匹配点对 (p_{1i}, q_{2j}) 的相似度的贡献最大。 ϵ_r 是相对距离偏差的阈值,在本文实验中 $\epsilon_r = 0.3$ 。

4.3 松弛迭代精匹配

通过如下 3 步松弛迭代处理,直到正确的匹配点对集合不再变化为止。

第 1 步,计算每个候选匹配的角点对的匹配强度。

第 2 步,粗匹配的结果是一个角点存在多个候选匹配角点,从候选匹配点对中取匹配强度最强的角点对 $S_M(p_{1i}, q_{2j})$,和匹配强度第二的匹配角点对 $S'_M(p_{1i}, q_{2j})$,用式 $Sp(p_{1i}, q_{2j}) = 1 - S'_M(p_{1i}, q_{2j})/S_M(p_{1i}, q_{2j})$ 衡量角点匹配的唯一性, Sp 的值为 1 (明确) ~ 0 (模糊)。按照 $S_M(p_{1i}, q_{2j})$ 和 $Sp(p_{1i}, q_{2j})$ 分别排序全部匹配角点对,如果角点对都位于两者的前 60%,则该角点对是正确角点匹配对。

原松弛迭代法^[30]获取精匹配对是持续不断地去除误匹配点的过程,由于在零均值归一化互相关法粗匹配的过程中每一个角点有多个候选匹配点,故得到一对正确匹配点对需不断剔除误匹配点对,迭代效率低、耗时长。

第 3 步,为提取精匹配角点对,本文采用“胜者全取”WTA(Winner-Take-All)的思想。在每一步迭代中选择正确的匹配点对,从基于零均值互相关算法得到的匹配对中取正确的角点。进而按照唯一性约束,删除含有这 2 点中任意一点的候选匹配对,不断迭代剩下的候选匹配点对,直到不能再从粗匹配点对中获取到正确的匹配点对,停止迭代。

5 实验

为了验证本文算法的有效性,本节在 Windows 7 操作系统,处理器为 Intel(R)Core(TM) 2Quad CPU Q8400 @2.66 GHz 2.67 GHz,内存 4.00 GB 的计算机上,基于 Microsoft Visual Studio 2010 开发工具并配置图像处理库 Opencv 2.4.9 用 C/C++ 实现算法。

图 2 所示为不同角度拍摄的牙模原始图像,是用尼康 D90 单反相机拍摄的,图像的分辨率为 2464×1632 。

图 3a 和图 3b 为不同角度的牙模图像的 Canny 边缘检测结果图,图 3c 和图 3d 为不同角度的牙模图像在 Canny 边缘检测基础上继续 8 邻域轮廓追踪算法跟踪边缘点所得的轮廓追踪图。

图 4a 为牙模图 2a 到图 2b 的角点匹配结果图,图 4b 为牙模图 2b 到图 2a 的角点匹配结果图。

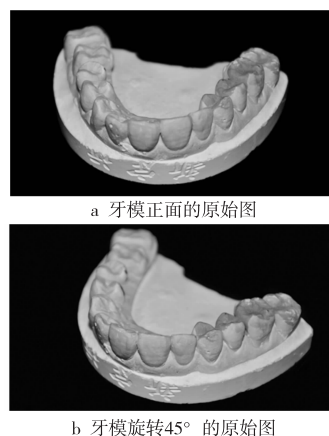


Figure 2 Original images of the tooth model
图 2 牙模原始图像

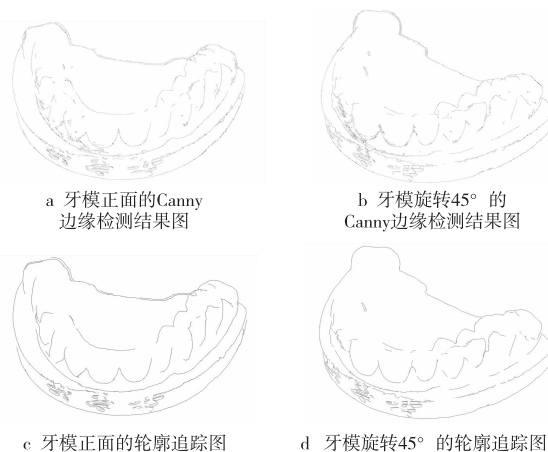


Figure 3 Images of edge detection of the tooth model
图 3 牙模图像边缘检测图

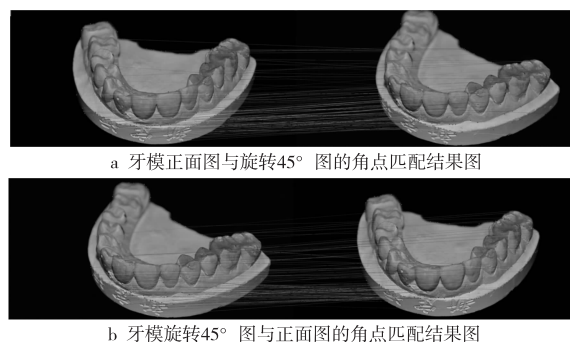


Figure 4 Corner matching results of the tooth model from different directions
图 4 不同方向牙模图像的角点匹配结果

图 5 为不同角度拍摄的杯子原始图。

图 6a 和图 6b 为不同角度的杯子图像的 Canny 边缘检测结果图,图 6c 和图 6d 为不同角度的杯子图像在 Canny 边缘检测基础上的边缘轮廓跟踪图像。

图 7a 为杯子图 5a 到图 5b 的角点匹配结果图,图 7b 为杯子图 5b 到图 5a 角点匹配结果图。



Figure 5 Original images of the cup
图 5 杯子原始图像

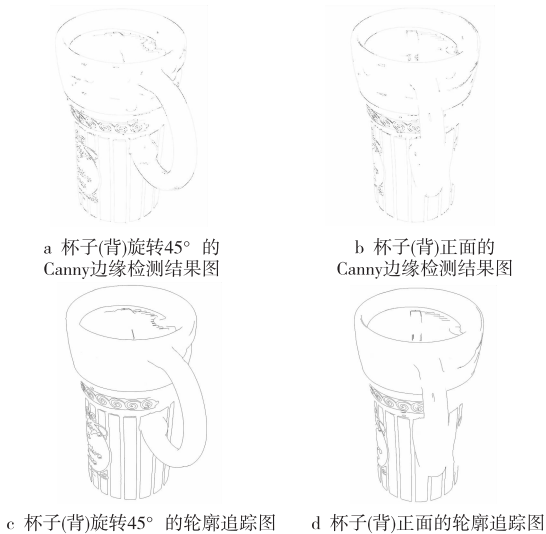


Figure 6 Images of edge detection of the cup
图 6 杯子的图像边缘检测图

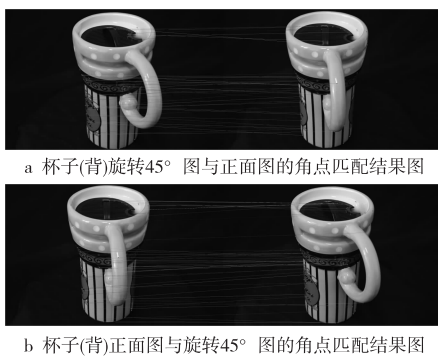


Figure 7 Corner matching results of the cup from different directions

图 7 不同方向杯子图像的角度匹配结果

图 8 为实验中普遍使用的不同视角的 Valbonne church 图像 (<http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/data/data-mview.htm>)。



Figure 8 Original images of the Valbonne church
图 8 Valbonne church 原始图像

图 9a 和图 9b 为不同角度的 Valbonne church 图像 Canny 边缘检测结果图,图 9c 和图 9d 为不同角度的 Valbonne church 图像在 Canny 边缘检测基础上的边缘轮廓跟踪图像。

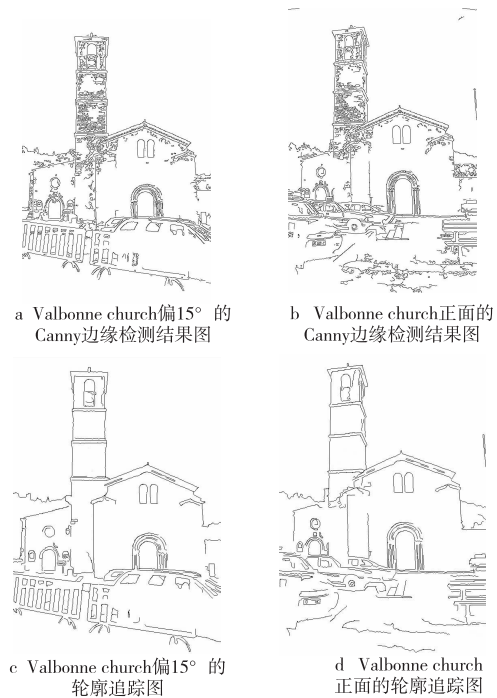


Figure 9 Images of edge detection of the Valbonne church
图 9 Valbonne church 的图像边缘检测图

图 10a 为图 8a 到图 8b 的角度匹配结果图,图 10b 为图 8b 到图 8a 角度匹配结果图。

图 3a、图 3b、图 6a、图 6b、图 9a 和图 9b 为 Canny 算子检测不同视角下 3 种模型的边缘图;图 3c、图 3d、图 6c、图 6d、图 9c 和图 9d 为提取不同视角下 3 种模型的边缘轮廓线图。提取的边缘轮廓线图与 Canny 算子检测图的比较表明,本文新提出的边缘轮廓线提取算法将 Canny 算子与 8 邻域轮廓跟踪算法融合,可有效避免 Canny 算子检测



a Valbonne church偏15° 图与正面图的角点匹配结果图



b Valbonne church正面图与偏15° 图的角点匹配结果图

Figure 10 Corner matching results of the Valbonne church from different directions

图 10 不同方向 Valbonne church 图像的角点匹配结果所造成的孤立噪点、伪边缘、噪声边缘以及一个边缘出现多个响应的现象。图 4、图 7 和图 10 为对 3 种模型不同方向图像进行角点匹配的结果,其表明本文算法在获取模型角点后可进行有效匹配,最终获得精匹配对,且不同方向匹配的精准性无明显差异。

在实验过程中将本文算法与双向 SIFT^[33]、SURF^[20]、高阶匹配算法 HOFASM (Fast and Scalable approximate Spectral Matching for Higher-Order graph matching)^[34]、松弛迭代算法^[30]、优化的松弛迭代算法进行匹配效率方面的比较,对比结果如表 1 所示。

由表 1 可知,本文算法相比于双向 SIFT 算法,在算法的速度上有一定的提升,但是匹配精度远不如双向 SIFT 的;与 SURF 算法相比,在匹配精度和时间上都有提升;与高阶匹配算法相比,在匹配精度上有提升,但是匹配时间相差较大;与原始的松弛迭代法相比,在保证精度的同时在匹配速度上得到了提升。

Table 1 Matching result comparison between our algorithm and other different matching algorithms

表 1 不同的匹配算法与本文算法匹配结果比较

	牙模			水杯			Valbonne church		
	匹配点对	匹配正 确率/%	匹配 时间/s	匹配点对	匹配正 确率/%	匹配 时间/s	匹配点对	匹配正 确率/%	匹配 时间/s
双向 SIFT 算法	20	95.00	33.346	44	95.45	66.872	32	93.75	46.228
SURF 算法	20	55.00	14.443	44	52.00	29.058	32	53.13	20.426
HOFASM 算法	20	46.55	1.125	44	47.68	4.658	32	46.88	2.826
松弛迭代法算法	20	80.00	18.137	44	81.81	32.256	32	81.25	25.663
本文算法	20	80.00	10.824	44	81.81	21.938	32	81.25	15.125

6 结束语

本文提出了新的基于图像尖锐度的角点匹配算法,在 Canny 边缘检测基础上融合 8 邻域轮廓追踪算法提取边缘轮廓线,进而采用基于图像尖锐度算法提取角点,然后对角点进行粗匹配和精匹配,建立 2 幅图像角点的一一对应关系,实现了同一物体从不同角度拍摄图像的角点匹配。本文创新之处为在 Canny 算子检测的基础上结合 8 邻域轮廓追踪算法,优化了 Canny 边缘检测结果,从而可以获取到更为清晰的边缘轮廓线,接着采用低复杂度的基于尖锐度的角点检测算法有效地获取角点,同时改进了松弛迭代法,在保证匹配精度的同时减少迭代次数,提高匹配速度。实验结果表明,本文算法在所得匹配对的精确性以及匹配时间上相对有较大的提升,能够较好地解决视觉处理的实时性问题,如基于图像三维重建等。但是,本文算法的匹配精度还有待提高,下一步可以结合基于极线约束特征点匹配的方法来提高特征点匹配的精度。

参考文献:

- [1] Jain A K, Zhong Y, Lakshmanan S. Object matching using deformable templates[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(3): 267-278.
- [2] Yu Li, Wang Run-sheng. Object detection and recognition based on multiscale deformable template[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(10): 1325-1330. (in Chinese)
- [3] Kuglin C D. The phase correlation image alignment method [C]//Proc of International Conference on Cybernetics Society, 1975: 163-165.
- [4] Dubuisson M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching[C]//Proc of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1994: 566-568.
- [5] Anuta P E. Spatial registration of multispectral and multite-

- mporal digital imagery using fast Fourier transform techniques[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1970, 8(4): 353-368.
- [6] Leese J A, Novak C S, Clark B B. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1971, 10(1): 118-132.
- [7] Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration[J]. IEEE Transactions on Computers, 1972, 21(2): 179-186.
- [8] Lewis J P. Fast normalized cross-correlation[J]. Circuits Systems & Signal Processing, 1995, 82(2):144-156.
- [9] Wells W M, Viola P A, Atsumi H, et al. Multi-modal volume registration by maximization of mutual information[J]. Medical Image Analysis, 1996, 1(1): 35-51.
- [10] Maes F, Collignon A M F, Vandermeulen D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187-198.
- [11] Studholme C, Hill D L G, Hawkes D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1): 71-86.
- [12] Thévenaz P, Unser M. Optimization of mutual information for multiresolution image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 2083-2099.
- [13] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proc of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999:1150-1157.
- [14] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [15] Verma A, Banerji S, Liu C J. A new color SIFT descriptor and methods for image category classification[C]//Proc of International Congress on Computer Applications and Computational Science, 2010: 4-6.
- [16] Wengert C, Douze M, Jégou H. Bag-of-colors for improved image search[C]//Proc of the 19th ACM International Conference on Multimedia, 2011: 1437-1440.
- [17] Rassem T H, Khoo B E. Object class recognition using combination of color SIFT descriptors[C]//Proc of 2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 2011: 290-295.
- [18] Tian X L, Jiao L C, Liu X L, et al. Feature integration of EODH and Color-SIFT: Application to image retrieval based on codebook[J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(4): 530-545.
- [19] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. Surf: Speeded up robust features[C]//Proc of the 9th European Conference on Computer Vision, 2006: 404-417.
- [20] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//Proc of 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011: 2564-2571.
- [21] Pang Y W, Li W, Yuan Y, et al. Fully affine invariant SURF for image matching[J]. Neurocomputing, 2012, 85: 6-10.
- [22] Yang Tong-yu, Peng Guo-hua. Fast algorithm for image matching based on NCC[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(22):107-109. (in Chinese)
- [23] Liu Zhao-ying, Zhou Fu-geng, Bai Xiang-zhi, et al. Multimode image registration based on mutual information of region of interests[J]. Aero Weaponry, 2011 (4): 7-12. (in Chinese)
- [24] Han Bing, Wang Yong-ming. Research of image matching based on a fast normalized cross correlation algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31 (2): 160-165. (in Chinese)
- [25] Cheng De-zhi, Li Yan-jun, Yu Rui-xing. Image matching method based on improved SIFT algorithm[J]. Computer Simulation, 2011, 28(7): 285-289. (in Chinese)
- [26] Zhang Kai-yu, Liang Feng-mei. Research on the key algorithm of image registration based on improved SURF[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(10): 2875-2879. (in Chinese)
- [27] He Dong-jian, Geng Nan, Zhang Yi-kuan. Digital image processing[M]. 2nd Edition. Xi'an: Xidian University Press, 2008. (in Chinese)
- [28] Wen Yang-tian, Li Zheng, Wu Zhong-guang. Image registration based on SUSAN algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26(10): 2380-2382. (in Chinese)
- [29] Ji Li-e, Shi Ji-sheng. Image registration based on SUSAN feature points[J]. Sensor World, 2013, 19(4): 7-9. (in Chinese)
- [30] Zhang Qian, Liu Zheng-kai, Pang Yan-wei, et al. Automatic registration of aerophotos based on SUSAN operator[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 245-250. (in Chinese)
- [31] Qian Wen-guang, Lin Xiao-zhu. Curvature calculation and corners extraction of image contour[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 63-68. (in Chinese)
- [32] Qian Wen-guang, Lin Xiao-zhu. Detection algorithm of image corner based on contour sharp degree[J]. Computer Engineering, 2008, 34(6): 202-204. (in Chinese)
- [33] An Ting, He Yi-min, Zhang Zhi-yi. An improved bidirectional SIFT feature matching algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2016, 38(1): 138-143. (in Chinese)
- [34] Park S Y, Park S K, Hebert M. Fast and scalable approximate spectral matching for higher order graph matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 36(3): 479-492.

附中文参考文献:

- [2] 余莉,王润生.基于多尺度变形模板的目标检测与识别[J].计算机研究与发展,2002,39(10):1325-1330.
- [22] 杨通钰,彭国华.基于NCC的图像匹配快速算法[J].现代电子技术,2010,33(22):107-109.
- [23] 刘兆英,周付根,白相志,等.基于感兴趣区域互信息的多模图像配准方法[J].航空兵器,2011(4):7-12.
- [24] 韩冰,王永明.基于一种快速归一化积相关算法的图像匹配研究[J].兵工学报,2010,31(2):160-165.

- [25] 程德志, 李言俊, 余瑞星. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配方法[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7): 285-289.
- [26] 张开玉, 梁凤梅. 基于改进 SURF 的图像配准关键算法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2875-2879.
- [27] 何东健, 耿楠, 张义宽. 数字图像处理[M]. 第 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [28] 文杨天, 李征, 吴仲光. 基于 SUSAN 算法的图像配准[J]. 计算机应用, 2006, 26(10): 2380-2382.
- [29] 纪利娥, 石继升. 基于 SUSAN 特征点的图像配准算法[J]. 传感器世界, 2013, 19(4): 7-9.
- [30] 张迁, 刘政凯, 庞彦伟, 等. 基于 SUSAN 算法的航空影像的自动配准[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 245-250.
- [31] 钱文光, 林小竹. 图像轮廓曲率计算与角点提取[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 63-68.
- [32] 钱文光, 林小竹. 基于轮廓尖锐度的图像角点检测算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(6): 202-204.
- [33] 安婷, 贺一民, 张志毅. 改进的双向 SIFT 特征匹配算法[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(1): 138-143.

作者简介:



邢彩燕(1992-), 女, 宁夏银川人, 硕士生, 研究方向为计算机图形学和虚拟技术。E-mail: 365257995@qq.com

XING Cai-yan, born in 1992, MS candidate, her research interests include com-

puter graphics, and virtual technology.



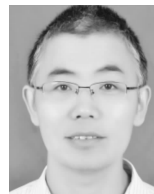
张志毅(1974-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, CCF 会员(E200033209M), 研究方向为计算机辅助设计和计算机图形学。E-mail: 815802490@qq.com

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



胡少军(1980-), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 研究方向为计算机图形学。E-mail: hsj@nwsuaf.edu.cn

HU Shao-jun, born in 1980, PhD, associate professor, his research interest includes computer graphics.



耿楠(1971-), 男, 陕西三原人, 博士, 教授, 研究方向为计算机图形学和虚拟现实。E-mail: nangeng@qq.com

GENG Nan, born in 1971, PhD, professor, his research interests include computer graphics, and virtual reality.