

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314939

不同分布下红外主动目标特征点配准方法研究^{*}范帅鑫¹ 谷玉海¹ 邹志² 崔悦¹

(1. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192; 2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 北京 100095)

摘 要: 视觉测量中经常需要用到特征匹配来计算位姿信息,但尚无针对红外主动目标设计特征匹配可用的算法,为实现对不同分布红外主动目标的匹配,本文提出了一种通用的两阶段特征点匹配方法。第一阶段为粗配准,首先检测图像特征点集的凸包,获取最外围点;通过构建三角形特征集,并使用马氏距离进行相似三角形计算搜索实现快速粗配准。第二阶段为精匹配,首先通过粗匹配特征计算欧拉角避免匹配结果的 180° 旋转对称;针对粗配准后的可能存在的特征点缺失问题,采用极线约束精匹配策略,充分利用已匹配特征点的几何信息,有效实现对剩余点的精确匹配。理论分析与实验表明,在 13 个红外发光点组成的旋转对称点集及非旋转对称点集下,该方法在绝对大小 0°~40° 的旋转范围内能高效匹配,实验测试极限性能能够达到 50°,并对实际场景下特征点的遮挡等情况具有较好的鲁棒性,实验结果验证其适应性与稳定性,具有较高的实用价值。

关键词: 红外主动目标;点集匹配;仿射变换;旋转对称;对极约束;遮挡点

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on registration method of infrared active target
feature points under different distributionsFan Shuaixin¹ Gu Yuhai¹ Zou Zhi² Cui Yue¹

(1. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Feature matching is often used to calculate pose information in visual measurement, but there is no available algorithm for designing feature matching for infrared active targets. In order to achieve matching of infrared active targets with different distributions, this paper proposes a general two-stage feature Point matching method. The first stage is coarse registration. First, the convex hull of the image feature point set is detected to obtain the outermost points. Fast coarse registration is achieved by constructing a triangle feature set and using Mahalanobis distance to calculate and search for similar triangles. The second stage is precise matching. First, the Euler angle is calculated through coarse matching features to avoid the 180° rotational symmetry of the matching results. In order to solve the problem of possible missing feature points after coarse registration, the epipolar constraint fine matching strategy is adopted to make full use of the existing features. Match the geometric information of feature points to effectively achieve accurate matching of remaining points. Theoretical analysis and experiments show that under the rotational symmetry point set and the non-rotation symmetry point set composed of 13 infrared luminescent points, this method can efficiently match within the absolute rotation range of 0°~40°, and the experimental test limit performance can reach 50°, and has good robustness to the occlusion of feature points in actual scenes. The experimental results verify its adaptability and stability, and has high practical value.

Keywords: infrared active targets; point set matching; affine transformation; rotational symmetry; epipolar constraint; occlusion point

0 引 言

在大飞机、船舶和火箭等大型装备制造业中,大尺寸测

量技术起着关键作用,该技术用于精确测量大型物体或装配体的尺寸、形状和位置信息。常用的测量手段有激光跟踪仪^[1]和经纬仪^[2]、地面式激光扫描仪^[3]等,但这些设备使

收稿日期:2023-11-07

^{*} 基金项目:工业和信息化部民用飞机专项科研技术研究项目(MJ-2018-J-70)、北京市科技委促进高校内涵发展-学科建设专项资助项目(5112011015)、机电测控系统北京市重点实验室开放课题(KF20202223204)项目资助

用复杂且价格昂贵,无法满足所有测量场景的需求。使用视觉测量技术进行大尺寸测量开始兴起,但是实际应用中,目标物体通常形状不规则、体积较大且建模复杂,因而不便于直接进行特征提取和视觉测量^[4]。

红外主动目标是一种用于近景摄影测量的技术,其使用红外光源(如红外 LED)主动地发射红外辐射,以便在相机或传感器中进行探测和识别;在国外,摄影测量技术起步较早,典型的如 Leica 公司的 T-Probe 和加拿大 Creaform 公司的 Handy Probe 系统等^[5],挪威 Metronor 公司使用碳纤维和 LED 光源制作了光笔测量仪,使得该视觉测量系统空间测量精度达到微米级^[6],但该测量仪体型较大,针对单相机仅适用于坐标测量,无法实现姿态测量功能。在国内,温卓漫^[7]针对单目视觉测量设计了一种无源合作靶标,姿态角测量精度可达 0.015° ,但该种靶标在特征匹配时,通过靶标中直线加圆环的特殊设计进行识别,故仅适用于特定场合;张文^[8]设计了一种满足大视距测量的合作靶标,实现了大视距条件下的相机与靶标相对位姿测量,李振兴^[9]设计了一种红外发光二极管靶标,得到了较好的图像效果,但是这些方法中提取的特征点都在同一平面内,使用时容易导致算法的退化,林嘉睿等^[10]提出了一种基于合作靶标的分布式测量系统定向方法,但其使用光电接受单元和发射站来测量,成本较高。相比之下,视觉测量中的红外主动目标测量方法具有成本低、精度高和便携性好等优点,是三维姿态测量技术研究的热点^[6]。

在实际测量时,为了保证测量的普适性,根据目标物体的形状与体积不同,红外主动目标在物体上分布情况亦不相同。本文测量方法使用相机捕捉不同分布下多个红外标记点的图像,通过特征匹配以计算出不同姿态下的变换。与传统测量设备相比,该方法所需设备成本更低,更易进行标定,可同时测量多个物体并做到实时跟踪,且适合多种环境使用。为了保证测量的实时性与稳定性,需要研究一种新的在不同分布下的红外主动目标特征点匹配方法,有一些学者的近似研究可以借鉴分析;一种是基于向量的方法,黄卓等^[11]设计了一种基于连接向量特征匹配的配准方法,该方法为背景单一、灰度信息少以及配准速度要求较高的场景提供了思路;冯田等^[12]设计了一种基于特征向量提取的点云配准算法,使用了先粗后精的配准方法,具有一定借鉴作用;邹志等^[13]提出一种自描述向量用于改进传统的随机抽样一致性算法(random sample consensus, RANSAC),但其主要针对平面特征问题,即所有特征没有深度信息,而红外主动目标点安装一般不会在同一平面内,导致上述方法无法使用。基于深度学习方面,余雪飞等^[14]提出了基于边缘检测与注意力机制的立体匹配算法,但该类方法更加适合解决普通图像的匹配问题。基于几何约束上,李梦帅等^[15]提出了基于预筛选和局部单应性的图像匹配方法,采用了极线约束确定候选匹配点,并通过局部单应性确定了最终匹配点,该算法无法有效解决不同特征分布下主动红

外目标配准问题,但提供了一种使用极限约束解决问题的思路。

针对以上不足,本文提出了一种不同分布下皆适用的红外主动目标特征点配准算法,通过视图几何描述二维图像中的几何关系来完成匹配,如图像间的对应点、极线、本质矩阵等。该方法在处理不同位姿下的平面投影特征点匹配问题上具有很好的准确率和效率。通过实验验证,本文证明了提出的方法可以实现良好的匹配效果。

1 算法原理

1.1 相似特征寻找

红外主动目标特征点匹配首先要找到固定的一些特征点,对于不同分布情况的红外点来说,如何进行初步特征匹配是一个困难,针对此,本文提出了一种通用快速进行特征点粗匹配的方法,首先对红外点投影的二维图像特征点使用凸包算法,在二维特征点集中寻找最外部凸包点,凸包检测效果如图 1 所示,凸包是指能够包裹住给定点集的最小凸多边形,能确保选出来的点互相连接起来可以将其他点全部包围在内。

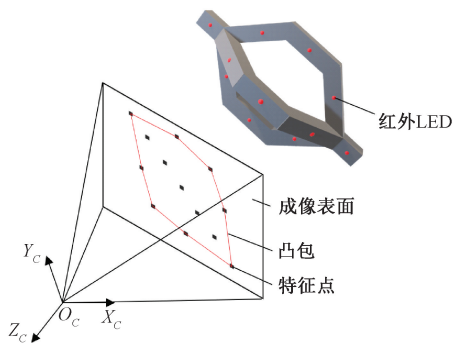


图 1 红外特征点成像及凸包寻找

之后按顺序将相邻 3 个凸包点视为一个三角形特征,然后对两幅图像中寻找到的三角形特征进行遍历匹配,通过计算两个三角形的相似度来确定是否为同一三角形。

在图 2 中,图 2(a)为位姿变化前后三角形特征对比,其中黑色点为特征点位姿变换前的源图像上的点,红色点为位姿变换后的待匹配图像特征点,图中仅展示出了较为明显的几组三角形特征,为了更直观展示,图 2(b)为在图 2(a)的基础上隐藏特征点效果。可以看出,在一定角度的位姿变换下,边缘点三角形特征是比较相似的,故可以通过该方法进行初步的匹配。

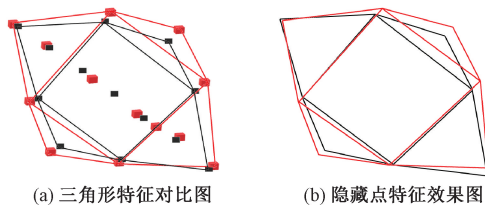


图 2 位姿变化特征对比图

1.2 特征相似度计算

针对相似三角形特征的寻找,本文提出了一种基于马氏距离的方法,用于分析两个三角形特征之间的相似度。

由于原始数据为特征点的坐标,需通过点坐标得到3个内角角度,三角形三个点坐标分别为 p_1, p_2, p_3 , 其中, p_2 为 θ 所在的点,则三角形计算内角 θ 方式如下:

$$\theta = \arccos((v_1, v_2) / |v_1| |v_2|) \quad (1)$$

其中, $\vec{v}_1 = p_1 - p_2, \vec{v}_2 = p_3 - p_2$ 。得到内角角度后,计算每个三角形内的内角差异向量,通过式(1)得到3个内角分别为 α, β, γ , 它们的差异向量表示为 $[\alpha', \beta', \gamma']$, 如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \alpha' &= \alpha - \beta \\ \beta' &= \beta - \gamma \\ \gamma' &= \gamma - \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

通过式(2)分别计算两个三角形特征的内角差异向量,记为 X_1 和 X_2 , 通过式(3)计算这两个向量的协方差矩阵 C_1 和 C_2 。

$$\begin{aligned} C_1 &= X_1 \cdot X_1^T \\ C_2 &= X_2 \cdot X_2^T \end{aligned} \quad (3)$$

通过式(4)计算协方差矩阵 C_1 和 C_2 的平均值 C_{avg} 。

$$C_{avg} = \frac{(C_1 + C_2)}{2} \quad (4)$$

得到了 C_{avg} 后,通过式(5)计算得到标准化协方差矩阵 S 。

$$S = \sqrt{C_{avg}^{-1}} \quad (5)$$

最后,使用标准化协方差矩阵 S 计算两个三角形的马氏距离 D , 如式(6)所示。

$$D = \sqrt{((X_1 - X_2)^T \cdot S \cdot (X_1 - X_2))} \quad (6)$$

较小的马氏距离表示两个三角形特征在对应内角差异方面更相似,进而可以表征两个特征相似度。通过嵌套的循环遍历两组特征点中提取出的每个三角形,对于源图像特征的每个三角形特征,在待匹配图像中逐个选取特征并计算两者相似度 D 。如果相似度满足设定阈值 Th , 则匹配完成,进行后续仿射变换粗匹配。

1.3 基于仿射变换的粗匹配

在获得了3对点(分别来自于1.2节中两个三角形的对应顶点)之间的匹配关系后,利用这3对匹配点,可以初步构建两幅图像之间的一个仿射变换矩。

根据3对匹配点,首先构建两幅图像之间的仿射变换矩阵 H 。然后利用矩阵 H , 将待变换源点集图像中的所有特征点根据矩阵运算转换到目标点集图像中。这个过程可以描述为:

$$p' = Hp \quad (7)$$

其中, p 和 p' 分别表示待变换源点集及变换到目标点集中的归一化点坐标。

通过矩阵 H 的变换,源图像的所有点被映射到目标点

集图像中,如图3所示,其中 image1 中黑色点为位姿变换前源图像红外特征投影点, image2 中红色点为位姿变换后待匹配图像红外特征投影点,黑色点则为经过仿射变换后的变换点。

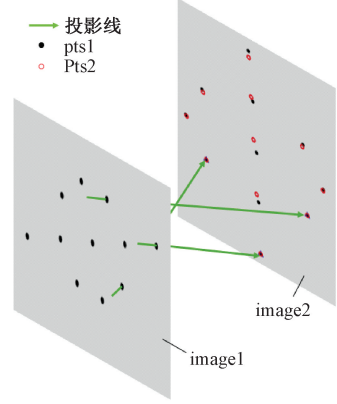


图3 基于仿射变换粗匹配过程图

之后需要在待匹配图像中对映射的所有点进行匹配,方法是计算这些点与待匹配图像中真实点的欧氏距离,选择距离最小的点作为粗匹配点,为了能够达到比较好的粗匹配效果,算法要求满足距离阈值要求的粗匹配点对达到总点数的一定比例,经测试,不小于0.6的比值能够满足需求,最终可获得两幅图像之间大量匹配的点对。

1.4 通过本质矩阵排除多解

通过1.3节得到了一个初步的粗匹配矩阵,但在红外匹配点排布为旋转对称时,会导致源图像特征点集与待匹配图像特征点集之间存在两种匹配结果,如图4(a)、(b)所示。为了解决多解问题,本文通过本质矩阵 E 来计算欧拉角的大小作为匹配结果判断的标准。

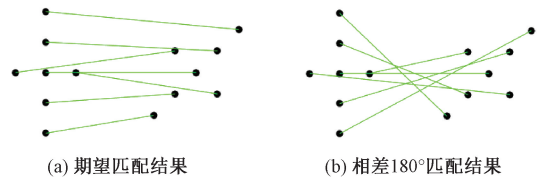


图4 多匹配结果示例图

在匹配点多解的情况下,使用粗匹配计算得到的两组匹配点集。将这两组点集进行归一化来计算本质矩阵 E 。设粗匹配后源图像中的粗匹配特征点集为 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 目标图像中的粗匹配特征点集为 $\{u'_1, u'_2, \dots, u'_n\}$, u_i 和 u'_i 代表两图像中对应的特征点。这些点是齐次坐标,转换为归一化坐标为式(8):

$$x_i = K^{-1} \cdot u_i \quad (8)$$

其中, K 为相机内参,基于式(8)得到了归一化特征点集 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $\{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$, E 矩阵满足式(9)的约束方程:

$$x_i'^T \cdot E \cdot x_i = 0 \quad (9)$$

其中, x_i 和 x'_i 分别表示齐次坐标 u_i 和 u'_i 的归一化坐标。根据式(9)采用最小二乘法来解出 $\mathbf{E}$, 采用 SVD 方法对 $\mathbf{E}$ 进行分解, 最后得到正确旋转矩阵 $\mathbf{R}'$ 。

得到旋转矩阵 $\mathbf{R}'$ 之后通过其计算出对应的欧拉角来表示两图像的相对旋转关系, 由于旋转矩阵有多种不同的定义方式, 因此计算欧拉角的公式也有所不同, 本文使用 XYZ 顺序计算欧拉角。

假定旋转矩阵 $\mathbf{R}'$ 为:

$$\mathbf{R}' = \begin{pmatrix} r'_{11} & r'_{12} & r'_{13} \\ r'_{21} & r'_{22} & r'_{23} \\ r'_{31} & r'_{32} & r'_{33} \end{pmatrix}$$

欧拉角则通过式(10)计算:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{atan2}(-r'_{23}, r'_{33}) \\ \beta &= \text{asin}(r'_{13}) \\ \gamma &= \text{atan2}(-r'_{12}, r'_{11}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, α, β, γ 分别表示绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴旋转的角度。在图 5 中详细展示了在位姿反转 180° 后欧拉角变化情况, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, 前后两图像中位姿相差 180° , 但最后图像中特征点坐标相同, 即姿态不同但最后都能够与原始特征点进行匹配, 两种不同匹配的本质矩阵 $\mathbf{E}$ 不同, 计算得到的欧拉角也不相同, 式(11)给出了两种匹配下欧拉角的异同。

$$\begin{aligned} \alpha &= -\alpha' \\ \beta &= -\beta' \\ \gamma &= \gamma' - \pi \end{aligned} \quad (11)$$

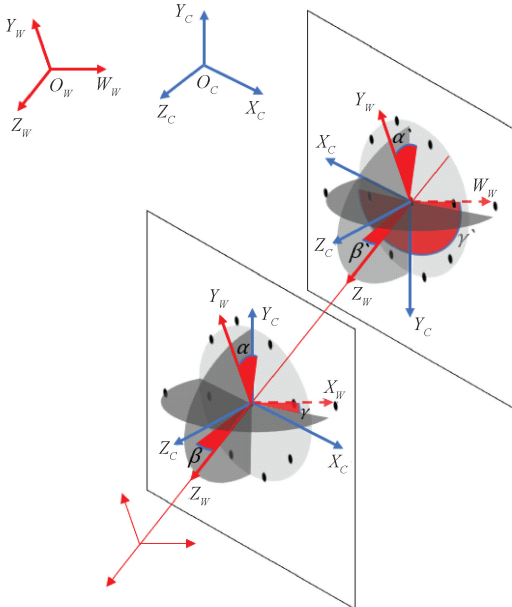


图 5 特征点对称时两种匹配情况下的欧拉角角度图

在实际图像特征点配准问题中, 两幅图像之间的相对运动通常比较小, 通过选择欧拉角大小较小的一组作为两幅图像真实的相对旋转, 也就是 γ 与 γ' 中较小的角度在几何上更加合理, 概率上也更加符合真实情况, 由此可以避免

在匹配过程中出现的多解情况。

1.5 对极约束精匹配

针对粗匹配后未被匹配的点, 以及个别点被遮挡时导致点数量不匹配问题, 本文通过寻找极线并设定搜索阈值进行精匹配。

首先根据 1.3 节中粗匹配的特征点来计算出两幅图片之间的基础矩阵 $\mathbf{F}$, 计算得到 $\mathbf{F}$ 矩阵后无需 SVD 分解, 本文通过 $\mathbf{F}$ 矩阵和待匹配特征点在另一幅图像中找到其对应的极线。对于原始图像中的一个特征点 u_i , 在通过与基础矩阵 $\mathbf{F}$ 计算后来计算出待匹配图像中对应的极线。计算过程为式(12):

$$[m, n, k]^T = \mathbf{F} \cdot u_i \quad (12)$$

其中, m, n, k 即为点 u_i 在待匹配图像中的对应极线方程 l' 的系数。

式(13)为将 l' 化为极线的一般形式:

$$m \cdot u' + n \cdot v' + k = 0 \quad (13)$$

该方程就是源图像点 u_i 在待匹配图像中的极线方程, 如图 6 所示, 源图像极线 l 上点 u_1 在待匹配图像中对应的极线为 l' , 则待匹配图像中对应正确匹配点 u'_1 一定在极线 l' 上或靠近该极线的位置, 图中其他空间 3D 点类似, 都能够在源图像的特征点中找到其在待匹配图像的极线。

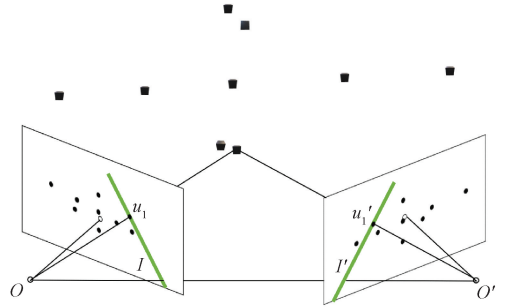


图 6 点 u_1 在图像中对应的极线

求得极线后, 便根据待匹配点与极线间的欧氏距离在局部搜索范围内由近到远顺序逐个进行匹配计算, 分别假设每一个候选点为该待匹配点的正确匹配, 并根据全部已匹配点重新计算本质矩阵 $\mathbf{F}'$ 。判断重新计算得到的 $\mathbf{F}'$ 矩阵是否满足所有匹配点对的极线几何约束。如果所有点都正确匹配的话, 本质矩阵 $\mathbf{F}$ 与匹配点之间满足式(14)的对极约束关系。

$$u'^T \cdot \mathbf{F} \cdot u = 0 \quad (14)$$

其中, u 和 u' 分别表示两幅图像中的匹配点。实际上, 由于特征点坐标检测存在的误差, 数据不会是完全精确的, 进而导致本应结果为 0 的式(14)往往会有一定的残差, 故设置一个残差阈值, 若最终计算在阈值内, 则选择该候选点作为正确的匹配。并在新寻找到匹配的基础上进行下一个未配对点的匹配寻找, 否则仍停留在该点选择下一候选匹配点, 重复此过程直到找到所有满足几何约束的未匹配点。

2 实验结果与分析

本文采用仿真与真实两种数据评估红外发光点匹配算法的性能。仿真数据由13个三维空间点构成,来表示红外主动目标点分布情况。真实数据来自实验室采集的红外图像,包含11个红外点。

与单一轴增加视角的方法相比,本文采用XYZ轴同步增加的方式来评估算法性能,可以更加真实地模拟实际目标移动中的多方向视角变化。在实验中同时增加XYZ3个轴的旋转角度,模拟实际情况下红外特征点在空间中的多方向移动。例如,第1组实验从 0° 开始,XYZ轴同时分别增加 7° ;第2组实验从 0° 开始,XYZ轴同时分别增加 14° ;以此类推,通过这种方式,可以全面考察算法在不同视角方向以及综合视角变化下的匹配性能。算法一直到配对失败或时间过长结束匹配。

2.1 模拟数据实验

模拟数据经过手动设置空间3D点,再通过相机的内参与外参计算不同姿态下的点投影情况,生成最终实验使用的2D点坐标。通过控制角度参数,可以生成丰富的数据集,覆盖较大角度变化范围,用于测试算法在最理想环境下的性能上限。实验分别在发光点旋转对称和随机分布的非旋转对称两种红外点分布情况下进行,每次实验重复20次取平均用时,通过当前角度下式(14)残差来验证当前匹配正确情况,残差在表中为误差一项,设置当误差值小于0.1时匹配正确。

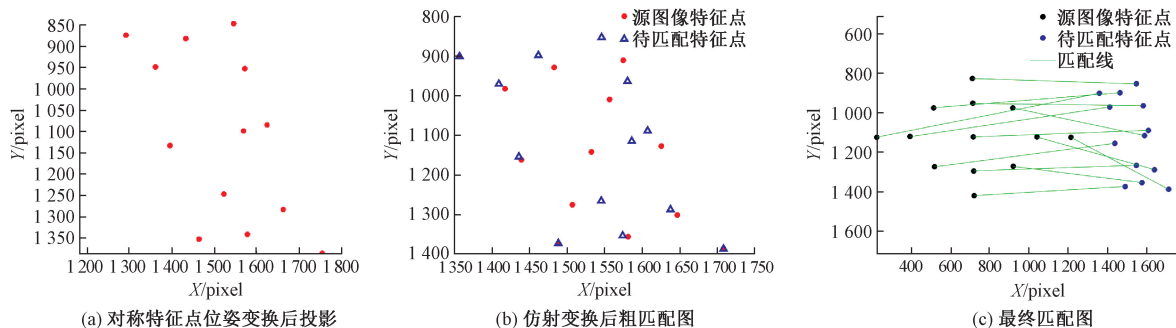


图8 仿真情况下对称特征点匹配过程

表1表示出了随视角增加,匹配用时的变化情况。从表中可以看出,在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 内,匹配时间趋于稳定, $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间耗时开始增加,在位姿旋转 56° 时达到极限值,在此角度下虽能够完成匹配,但是时间耗费也过高,此时角度再增加则无法很好的完成匹配。这证明算法在一定角度内能够准确快速的完成匹配,同时也说明匹配算法的计算复杂度随视角增大而上升。

对比反向一个位姿变化,同样设置变化幅度大小为 7° ,算法运行情况如表2所示,可知在角度为负的反向旋转下 -40° 以内都能正确匹配且耗时没有明显变化,在超过 -40° 之后时间开始逐步增长,在 -55° 时,算法达到极限,

首先测试旋转对称的特征点分布情况,从 0° 开始增加视角,每次增加 7° ,测试算法在对称点分布下的匹配性能。

仿真实验的特征点正对相机原始正投影产生的坐标及位置关系如图7所示,当点组中心绕相机光轴旋转 180° ,图像中特征点依然呈此分布,实验中算法选择小角度为正确匹配情况。

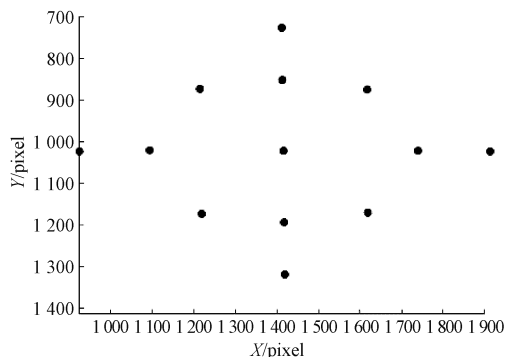


图7 仿真情况下对称特征点原始正投影

实验过程中采集图像之一,如图8所示,图8(a)为在XYZ轴都正方向旋转 49° 后特征点的投影,此时投影点较为杂乱,图8(b)为源图像特征点在根据相似三角特征进行仿射变换后的点分布情况,并和待匹配点对比,此时算法会根据两组点的距离先筛选一部分粗匹配点对,图8(c)为最终匹配结果,可以看出,算法能够准确地将位姿变换前后的点进行一个匹配。

表1 对称特征正方向增加角度下匹配用时及结果

角度/ $^\circ$	时间/ms	误差	匹配结果
7	93	6.05×10^{-4}	正确
14	90	4.14×10^{-4}	正确
21	87	1.22×10^{-4}	正确
28	90	3.41×10^{-4}	正确
35	96	2.25×10^{-2}	正确
42	106	5.19×10^{-3}	正确
49	325	5.65×10^{-3}	正确
56	403	0.205	错误

表 2 对称特征反方向增加角度的匹配用时及结果

角度/(°)	时间/ms	误差	匹配结果
—7	92	7.16×10^{-6}	正确
—14	102	9.39×10^{-6}	正确
—21	100	4.55×10^{-6}	正确
—28	123	2.31×10^{-4}	正确
—35	111	5.53×10^{-3}	正确
—42	114	2.23×10^{-5}	正确
—49	318	1.66×10^{-2}	正确
—54	321	6.47×10^{-3}	正确
—55	538	2.31	错误

相较于正向位姿变化,反向位姿可变化角度要小一些。

在模拟数据实验中,除旋转对称的发光点外,还测试了排列较为杂乱的非旋转对称的点分布情况。非旋转对称点分布不再中心对称,该情况用于模拟实际应用中发光点布置的非理想情况。同样从 0°开始增加视角,测试算法

在这种非对称点分布下的匹配性能。图像原始正投影如图 9 所示。

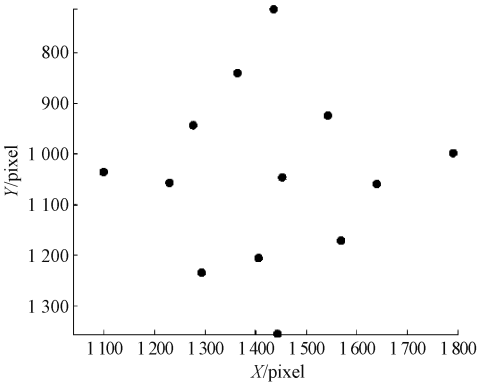


图 9 仿真情况下非对称特征点原始正投影

实验过程中采集图像如图 10 所示,与对称特征点的实验类似,分别为源图像位置在 XYZ 轴都正向旋转 49°后的待匹配图像、仿射变换粗匹配情况和最终的匹配结果。

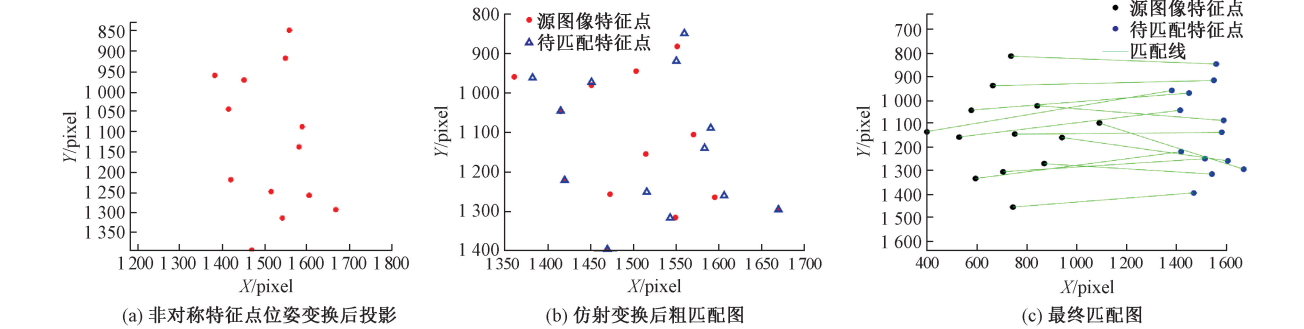


图 10 仿真情况下非对称特征点匹配过程

实验数据如表 3 所示。在 40°内,匹配时间比较稳定,当视角继续增大,导致特征提取匹配困难,两种情况下性能开始下降,在 50°内依旧能够完成匹配,这表明算法对随机情况下的非对称特征点亦具有良好的匹配效果,这与旋转对称点的实验结果一致。

围内,算法用时比较稳定,超过 40°后耗时开始上涨,在超过 50°时算法匹配达到极限。

表 4 非对称特征反方向增加角度下匹配用时及结果

角度/(°)	时间/ms	误差	匹配结果
—7	98	3.73×10^{-6}	正确
—14	92	8.22×10^{-6}	正确
—21	105	3.39×10^{-6}	正确
—28	90	1.02×10^{-4}	正确
—35	96	6.50×10^{-4}	正确
—42	98	4.31×10^{-6}	正确
—49	367	1.25×10^{-6}	正确
—56	1220	2.16	错误

与旋转对称点匹配结果相比,一方面非对称点匹配时间并没有因为特征点减少而变得更短,说明算法本身受点数量影响较小,主要仍是受到旋转角度即位姿变化的影响,另一方面也可得出非对称点整体性能下降的趋势与旋转对称相近。综合 4 个表格,无论特征点是否旋转对称,

表 3 非对称特征正方向增加角度的匹配用时及结果			
角度/(°)	时间/ms	误差	匹配结果
7	108	4.16×10^{-4}	正确
14	108	6.40×10^{-5}	正确
21	100	8.95×10^{-5}	正确
28	94	3.22×10^{-4}	正确
35	116	1.76×10^{-4}	正确
42	110	9.72×10^{-4}	正确
49	393	7.58×10^{-6}	正确
56	1184	1.81	错误

另一方面,类似对称点实验,非对称点同样设置一个反向位姿变化检验算法效果,由表 4 可知,在 0°~—40°范

其在位姿变化 $\pm 40^\circ$ 上下范围内算法能够稳定正常工作,超过 40° 后匹配用时逐步上升,但仍能正确匹配,超过 50° 时达到极限。

2.2 真实拍摄数据实验

使用模拟数据实验能很好说明问题体现出算法的极限性能,但无法真实模拟特征点缺失的情况,相比理想情况下全部特征点均可正常检测与匹配,部分特征点缺失会使匹配任务难度加大,但这也更加接近实际应用情景,故需采用真实拍摄的红外发光点组合验证特征点缺失情况下算法的效率。真实数据包含11个发光点,并考虑了部分点在不同视角下被遮挡的情况。该数据用于模拟实际应用中发光点布置和遮挡的效果,评估算法在复杂应用环境下的鲁棒性能。真实拍摄使用的红外辅助光标如图11所示,其中有11个红外发光点,设计时保证了所有的特征

点不在同一平面上,使用时只需将其固定到被测物上即可。

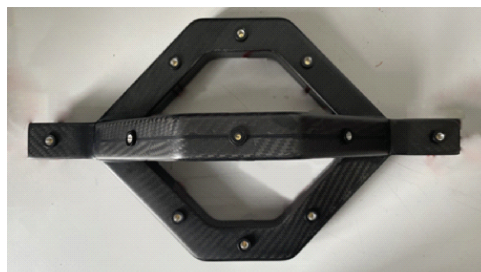


图11 实验用红外辅助光标实物图

实验随机设置了7组位姿,其中5组存在特征点遮挡情况,如图12所示,针对特征点缺失的图片,人眼较难分辨出具体缺失的点,基于此,用下述7个位姿条件下得到的图片进行发光点提取并进行匹配实验。



图12 真实拍摄存在部分红外特征点遮挡情况的图片

以上数据进行两两之间匹配,一共有21种匹配情况,经过算法匹配验证,其中有两种情况匹配失败,分别是图12中第1,3和3,7两组图片之间匹配出现问题,除此之外剩余的全部匹配成功,实验证明算法的匹配正确性较高,算法对于被遮挡点情况具有一定的鲁棒性。

上述实验大部分情况下发光点都能正确匹配,为全面评估算法,仍需针对没有成功匹配的情况进行分析,未匹配成功的情况中都有图12中第3幅图片,经检查,具体未正确匹配的点是该图片中从左往右第2个点,该点对应第1幅图中的中心点,究其原因,在被测物旋转过程中,其表面上的一个特征点被其本身遮挡,无法被摄像机成功检测。而此特征点在图像平面上的投影正好与另一个特征点极为接近甚至重合,导致算法无法区分这两个特征点,将它们误判为同一点,这种情况提高了匹配结果错误的几率,需要在使用时尽量注意避免这种极端情况。

3 结 论

为实现红外主动目标特征点集在任意两个姿态下的高效匹配,采用了一种分阶段的点集匹配方法。首先检测两幅图像的凸包获取最外围点,提取其中的三角形特征,然后基于马氏距离计算相似特征以初步匹配点对。利用这些点估计变换矩阵并投影原图像至待匹配图像实现粗匹配,采用欧拉角消除旋转对称影响,并用极线约束进行精细匹配。虚拟测试实验考虑了旋转对称与非旋转对称情况,验证了算法在最理想环境下的性能上限,即同时考虑3轴转动时,正确匹配理论上限能够达到 50° ,但考虑到算法效率,在旋转 40° 内使用是最为合适的。采用随机视

角的真实数据,模拟实际应用环境,验证了算法的适应性与稳定性,研究结果为算法的应用提供了参考,在存在遮挡点时存在的问题也为算法进一步改进提供了思路。总之,本文提出一种高效稳定的红外发光特征点匹配方法,理论推导与大量实验结果表明,该方法能够在不同姿态和视角下实现点集的快速准确匹配,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 胡常安. 基于激光干涉原理的大尺寸测量方法研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2022.
- [2] 杨谢柳,尹晨宇,方素平,等. 基于全站仪的大型三维形貌摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(10):316-324.
- [3] STENZ U, HARTMANN J, PAFFENHOLZ J A, et al. High-precision 3D object capturing with static and kinematic terrestrial laser scanning in industrial applications—Approaches of quality assessment[J]. Remote. Sens., 2020,12,290.
- [4] 王天宇,董文博,王震宇. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J]. 红外与激光工程,2017,46(4):153-160.
- [5] 张成龙. 基于单目视觉的光笔式三坐标测量系统测头标定技术的研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2022.
- [6] 于之靖,李泽川,李鑫,等. 基于旋转平台的全空间单目光笔测量方法[J]. 光学学报,2020,40(23):89-97.

[7] 温卓漫. 复杂场景下合作靶标的准确快速识别与定位[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.

[8] 张文. 基于视觉测量的微小卫星交会对接位姿测量技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2022.

[9] 李振兴. 基于红外视觉引导与激光测距的空间位置和姿态测量方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.

[10] 林嘉睿, 荆伟杰, 任永杰, 等. 基于合作靶标的分布式测量系统定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 10-16.

[11] 黄卓, 陈风东, 刘国栋, 等. 连接向量特征匹配的暗场图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 464-469.

[12] 冯田, 冯志辉, 南亚明, 等. 基于特征向量提取的点云配准算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 57-62.

[13] 邹志, 马骊群, 甘晓川, 等. 机车全动态包络线测量中的

目标点自动识别算法研究[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 43-47.

[14] 余雪飞, 顾寄南, 黄则栋, 等. 基于边缘检测与注意力机制的立体匹配算法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(11): 167-172.

[15] 李梦帅, 燕必希, 董明利, 等. 基于预筛选和局部单应性的风电叶片图像匹配方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 155-161.

作者简介

范帅鑫, 硕士研究生, 主要研究方向为大尺寸视觉摄影测量研究。
E-mail: fsx106@qq.com

谷玉海(通信作者), 博士, 研究员, 主要研究方向为智能检测与控制及仪器开发。
E-mail: guyuhai@bistu.edu.cn