

文章编号 2097-1842(2023)02-0305-13

基于航空单目相机的目标定位技术

王 鑫¹, 李玉芳^{2*}, 任 航¹, 韩松伟¹, 刘立刚¹, 孙明超¹, 宋 策¹
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国第一汽车集团有限公司研发总院, 吉林 长春 130013)

摘要: 为了提升无人机机载光电吊舱在特殊工况条件下的自主侦察能力, 本文结合实际工程项目研发了适用于机载光电吊舱的目标定位技术, 并在嵌入式 GPU (Graphics Processing Unit, 型号为 Jetson-TX2i) 上实现了功能验证。首先, 提出一种改进的 SURF (Speeded Up Robust Features) 算法与 GPU 加速数字图像处理方案, 对不同焦距下获取的两幅图像进行实时特征检测与匹配。接着, 利用几何交比不变性校正图像边缘畸变特征点的位置信息。最后, 使用最小二乘法估计目标深度信息并结合四元数空间模型确定目标姿态信息, 从而实现目标定位。实验结果表明, 改进的 SURF 算法在特征匹配方面, 精度和速度都优于经典的 SURF 算法。若角点特征位置误差控制在一个像素以内, 深度误差不超过 2%, 方位角、俯仰角和滚转角的角度误差分别小于 4°, 5° 和 2°, 这一误差满足机载光电吊舱的目标定位准确性需求。此外, 处理一组 (两帧) 分辨率为 1080P 的图像, 利用 GPU 加速可以将处理时间提升至 74 ms, 这一速度满足机载光电吊舱数据处理的实时性需求。

关键词: 特征提取; 特征匹配; 目标定位技术; 姿态

中图分类号: TP752.2 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0147

Targeting technology based on aerial monocular camera

WANG Xin¹, LI Yu-fang^{2*}, REN Hang¹, HAN Song-wei¹, LIU Li-gang¹, SUN Ming-chao¹, SONG Ce¹
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Research and Development Institute, China FAW Group Corporation, Changchun 130013, China*)
** Corresponding author, E-mail: 910341666@qq.com*

Abstract: In order to improve the autonomous detection ability of the airborne optronics pod of a UAV under special working conditions, this paper developed a targeting technology suitable for the airborne optronics pod in an actual engineering project, and realized the functional verification on the embedded GPU (Graphics Processing Unit, Jetson-TX2i platform model). Firstly, we proposed an improved SURF (Speeded Up Robust Features) algorithm and GPU-accelerated digital image processing scheme to detect and match the real-time features of two images acquired at different focal lengths. Secondly, geometric cross-ratio invariance was used to correct the position information of distorted feature points at image edges. Finally, we used

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 62175233); 吉林省科技发展计划 (No. 20200403057SF)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62175233); Science and Technology Development Program of Jilin Providence (No. 20200403057SF)

the least square method to estimate the depth information of the target and combines the quaternion space model to determine the attitude information of the target to determine its position. Experimental results show that the improved SURF algorithm is superior to the classical SURF algorithm in feature matching accuracy and speed. If the corner characteristic position error is controlled within one pixel, the depth error is no more than 2% and the angle errors of azimuth, pitch and roll angles are less than 4° , 5° and 2° , respectively. This error meets the target positioning accuracy requirements of the airborne optronics pod. In addition, when processing a set of images (two frames) at 1080 P resolution, the processing time can be increased to 74 ms through GPU acceleration, which meets the real-time demand for data processing in the airborne optronics pod.

Key words: feature extraction; feature matching; targeting technology; attitude

1 引言

随着智能化机械的发展^[1],目标定位方式正由传统的人工操作转变为以光学和图像处理相结合的机器视觉技术^[2]。影像测量是基于机器视觉技术,从图像中获取有用信息来实现测量、检测等目的。机器视觉技术融合了光学技术、计算机技术和图像处理技术,通过光学相机将空间的三维被测物转换为图像上的二维信息,然后对所得图像进行处理与解析,进而获得物体的尺寸、距离、位置、姿态等几何量信息。机器视觉技术的应用领域越来越广泛,分布于工业、农业、国防、交通、医疗、金融以及体育、娱乐行业^[3]。

无人机在执行侦察任务时,在某些特殊条件下,会遇到无法获取 BDS(BeiDou Navigation Satellite System)定位、导航服务或自身惯导系统异常等情况。在这些特殊工况条件下,如能借助外部目标辅助无人机定位,必将大大提升无人机的稳定性。考虑到军用无人机负载能力有限以及光电吊舱的隐蔽性需要,光电吊舱携带的可见光相机往往只有一个,无法使用传统的多目视觉技术。为解决这一问题,本文基于实际工程项目,使用单目相机针对同一场景在不同焦距下进行拍摄,对获取的图像进行特征匹配和畸变矫正,使用四元数计算实现目标物的深度、姿态测量,提升了无人机在特殊工况下的作战侦察能力。单目相机是结构最为简单的相机模型,可简化为人们熟悉的针孔模型,单孔成像对远近距离信息没有尺度,在深度距离的测算上没有确定性,需要前后帧间产生相对运动才能进行深度估算^[4-5],对算法应用提

出了挑战。

本文首先研究了适合实际工程项目的局部特征检测。在众多图像特征中,角点包含的数据量最少,且具备很高的稳定性,这使角点检测成为特征提取的重要方向^[6]。角点特征提取的方法一般分为基于轮廓曲率、基于梯度变化、基于灰度分布三类^[7]。使用轮廓曲率的典型方法是“非线性点特征检测方法”,使用梯度变化的典型方法是“Harris 算法”和“SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)算法”,使用灰度分布的典型方法是“SUSAN(Small Univalued Segment Assimilating Nucleus)算子”和“FAST(Features from Accelerated Segment Test)算法”^[8]。其中 Harris 算法具有旋转和对比度不变性,不受光照影响,在无人机遍历场景过程中对尺度变化的要求不高,且该算法的运算速度很高,因此本文使用该算法提取角点特征。

尽管 Harris 算法在角点检测方面具有很多优点,但由于其不具备尺度不变性,提取的特征点没有相关的特征描述符,使得 Harris 角点检测算法与 SIFT 和 SURF 相比显得不够完善,同时当图像尺度、光照及噪声变化较大时,Harris 缺乏鲁棒性。针对上述问题,本文结合 Harris 角点检测算法的稳定性和 SURF 算法的抗尺度、亮度、噪声等变化的特性,提出一种新的角点检测算法,该算法将 Harris 提取的角点与 SURF 算法提取的特征点合并,剔除重复点获得新的特征点集,为每个特征点定义主方向并生成特征描述。继而对光电吊舱输出的图像进行基于交比不变性的畸变校正,目的是获取更准确的特征点坐标位置。ZHANG 等^[9]研究了不同规格标定板。ZHANG 等^[10]利用基于 BP(Back Propagation)神经网络的近似连续

函数算法得到理想图像和畸变图像之间的坐标变换函数,实现了光学畸变校正。这些方法要么畸变模型复杂,参数众多,计算量大,要么依赖于系统其他参数,标定过程较复杂。这些不足制约了畸变参数的标定速度和精度,因此需要寻找一种操作简单、计算简单、要求先决条件少、快速又准确的标定方法来标定镜头的畸变参数^[1]。基于此,本文提出一种改进的基于交比不变性的畸变特征点校正方法,目的在于简化算法、节约计算资源,同时不提高误差。基于交比不变性的畸变校正方式不再使用多帧图像组合进行计算,而是专注于一帧图像,结合特征点几何投影关系计算镜头畸变参数。之后针对固定场景,通过调整机载光电吊舱可见光相机焦距并结合图像畸变校正的方式计算特征靶标的深度信息。最后引入四元数建立图像坐标系、相机坐标系、世界坐标系之间的数学关系模型,计算出特征靶标的姿态信息,实现目标定位。

2 目标定位原理

本文使用的硬件是英伟达公司生产的型号为 Jetson-TX2i 的 GPU, 目标定位流程如图 1 所示。

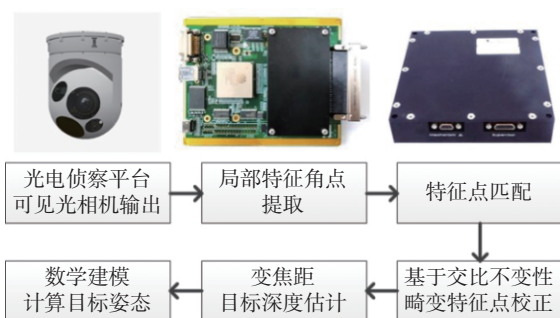


图1 获取目标位姿流程图

Fig. 1 Flowchart of obtaining target depth and attitude

2.1 改进的实时图像特征检测与匹配

本文提出一种改进的 SURF 算法与 GPU 加速数字图像处理方案。在并行计算过程中, GPU 执行整个程序中的密集计算模块。完成图像的积分、Hessian 矩阵行列式计算、构造多尺度空间、特征点和特征点方向计算并生成特征点描述子。在 SURF 算法中合理利用 GPU 的计算优势, 提高图像检测速度。基于 GPU 的 SURF 特征提取流程如图 2 所示。

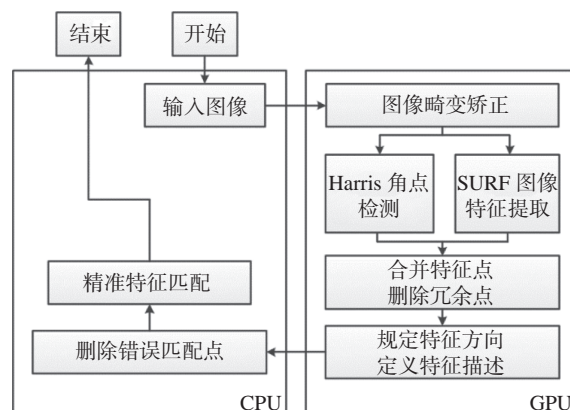


图2 特征实时匹配流程图

Fig. 2 Flowchart of real-time feature matching

本文用一个移动的检测窗口去扫描待检测图像, 通过评估窗口内像素灰度值梯度来检测角点, 检测窗口分别沿特定方向计算梯度变化, 并通过如下方式进行区域判定: (1) 平滑区: 沿任意方向移动窗口, 灰度变化均很小; (2) 边界区: 沿某一方向移动, 灰度变化很小, 但是沿另一方向移动, 灰度变化明显; (3) 角点区: 沿着任意方向移动, 灰度变化均较大。

考虑到运算的实时性和检测的准确性, 本文设定检测窗口 W 的尺寸为 4×4 , 对于区域内任一点 $P(u, v) \in W$, 用下式表示检测窗口位移引起的梯度变化:

$$\begin{aligned} \Delta G &= \sum_{(u,v) \in W} [g(u + \Delta u, v + \Delta v) - g(u, v)]^2 \approx \\ &= \sum_{(u,v) \in W} [\Delta u g_u - \Delta v g_v]^2 = \\ &= \begin{bmatrix} \Delta u & \Delta v \end{bmatrix} \left(\sum_{(u,v) \in W} \begin{bmatrix} g_u^2 & g_u g_v \\ g_u g_v & g_v^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{t}_w^T \mathbf{M} \mathbf{t}_w, \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $\mathbf{t}_w = (\Delta u, \Delta v)^T$ 为检测窗口的位移向量, $g(u, v)$ 为检测窗内 P 点的灰度值, g_u 和 g_v 分别表示 P 点在 u 方向和 v 方向上的梯度, 满足 $g_u = \partial g / \partial u$, $g_v = \partial g / \partial v$, 称 \mathbf{M} 矩阵为协方差矩阵。为判定检测区域是否为角点, 构造如下评价函数:

$$\begin{cases} \det(\mathbf{M}) = \lambda_1 \lambda_2 \\ \text{trace}(\mathbf{M}) = \lambda_1 + \lambda_2 \\ R = \det(\mathbf{M}) - \alpha [\text{trace}(\mathbf{M})]^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式(2)中 α 为经验值, 依据实际工程项目经验, 一般取 $0.04 \sim 0.06$, λ_1 、 λ_2 为矩阵 \mathbf{M} 的特征值, 若 $R > 0$, 则该检测区域为角点, 若 $R < 0$, 则该检测区为边缘区, 若 $\delta \geq R \geq 0$, 则该区域为平滑区。在图像

I_1 和 I_2 进行特征匹配前,可通过判定 R 值获取若干角点 $P_i^{(1)} \in I_1$ 和 $P_j^{(2)} \in I_2$,将其作为待处理的局部特征点,其中 $1 \leq i, j \leq N$ 。

由于两幅图像 I_1 、 I_2 是在不同相机焦距 f_1 、 f_2 下获取的,且在实际使用时,机载光电吊舱无法做到绝对静止,导致两幅图像存在比例、清晰度和旋转等差异,因此本文选用效率更高、鲁棒性更好的 SURF 图像匹配算法(以下简称 SURF 法)^[12]进行特征匹配。

为了节省计算资源,保证机载光电吊舱能够进行实时计算处理,需要对 SURF 法进行如下改进:

(1) 选取特征点邻域内的有效像点 P , P 的灰度值满足 $g(P) \geq 150$ 或 $g(P) \leq 45$,且 $|PP_i^{(m)}| \leq 6k^{(m)}$,本文定义 $f_2 > f_1$, $m \in \{1, 2\}$, $k^{(1)} = 1$, $k^{(2)} = f_2/f_1$;

(2) 以特征点 $P_i^{(m)}$ 为扇形的顶点,规定扇形角度为 60° ,扇形半径为 $6k^{(m)}$,详见图 3。

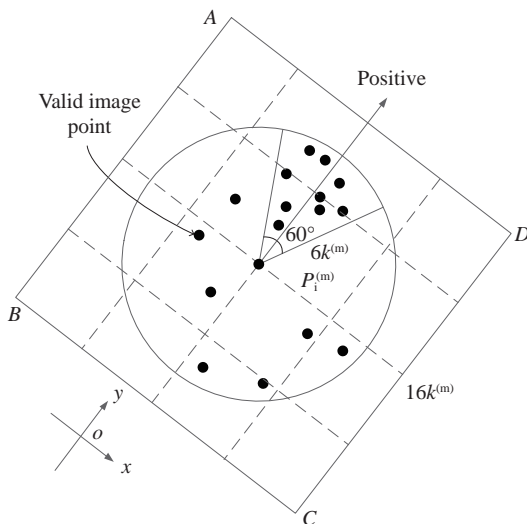


图 3 特征描述示意图

Fig. 3 Schematic diagram of feature description

(3) 令扇形以步长 $\Delta\theta = 5^\circ$ 旋转,每次旋转都要将扇形内有效像点的横向、纵向哈尔小波响应累加成一个局部向量 $S^{(m)}$ 。遍历整个圆形区域,当 $S^{(m)}$ 的模长达到最大值时,定义此刻 $S^{(m)}$ 的方向为特征点 $P_i^{(m)}$ 的正方向;

(4) 以特征点 $P_i^{(m)}$ 为中心,沿其正方向构造边长为 $16k^{(m)}$ 的正方形区域 ABCD,并将其等分成 16 个子区域,沿着横向与纵向计算第 n 个子区域的哈尔小波响应值,分别记作 $d_{x,n}^{(m)}$ 和 $d_{y,n}^{(m)}$ ^[13],并用高斯窗口函数对响应值赋予权重系数来构造 4 维向量 $v_n^{(m)}$,最后将 16 个特征向量 $v_n^{(m)}$ 归一化处理得到 4×16 维的特征向量 $V^{(m)}$,如式(3)所示:

$$\begin{cases} v_n^{(m)} = \left(\sum d_{x,n}^{(m)}, \sum d_{y,n}^{(m)}, \sum |d_{x,n}^{(m)}|, \sum |d_{y,n}^{(m)}| \right)^T \\ v_1^{(m)}, v_2^{(m)}, \dots, v_{16}^{(m)} \rightarrow V^{(m)} = \left(x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, \dots, x_{64}^{(m)} \right)^T \end{cases} \quad (3)$$

其中 $n \in \{1, 2, \dots, 16\}$;

(5) 通过比对 I_1 、 I_2 两幅图像中不同特征点的特征向量 $V^{(m)}$ 的欧式距离,找出匹配的特征点对,如式(4)所示:

$$D = \sqrt{(x_1^{(1)} - x_1^{(2)})^2 + (x_2^{(1)} - x_2^{(2)})^2 + \dots + (x_{64}^{(1)} - x_{64}^{(2)})^2}; \quad (4)$$

(6) 将 Harris 检测出的角点集与 SURF 算法提取的特征点合并,剔除部分重复点及对尺度变化不稳定的特征点,形成初始特征点集;

(7) 确定初始特征点集的主方向,并为每个特征点生成 64 维的特征描述;

(8) 分别对参考图像和待配准图像使用上述方法提取特征点,并进行特征点匹配。

获得特征点相关信息(位置、尺度、主方向及特征向量)后,使用特征向量的最近邻匹配法可以找出图像潜在的匹配对。一般采用欧氏距离、马氏距离等函数作为特征的相似性度量。本文采用欧氏距离作为两幅图像间的相似性度量,在待配准图像中找到与原图欧几里德距离最近的前两个关键点,记这两个关键点的欧氏距离分别为 d_1 、 d_2 。

在这两个关键点中,如果最近的距离 d_1 与次近的距离 d_2 的比值小于某个阈值 τ (本文取值 0.6),则接受这一对匹配点。降低这个比例阈值,匹配点数会减少,但产生的匹配点对更加稳定可靠。经过上述特征点匹配后,可以找出所有匹配的特征点对,包括正确的与错误的点对。为了提高图像的配准精度,对初始特征点对利用 RANSAC (Random Sample Consensus) 方法剔除错误匹配点对进一步提纯,得到精确匹配点集。最终确定待配准图像与参考图像间的关系变换模型。

2.2 基于交比不变性的畸变特征点位置校正

机载光电吊舱的成像镜头带有一定程度的畸变,主要类型是径向畸变^[14],导致获得的图像与真正的透视投影图像间存在差异^[15]。为保证后续图像处理和分析的准确性,必须计算出畸变参数。

机载光电吊舱使用远景线阵相机,图像内的任一特征点 P 的位置由其远景投影决定。若从远景投影考虑,图像中的这些特征点具有相同的比

例或者约束关系, 如图 4 所示。本文提出的交比不变法将利用这一比例关系, 获取图像内发生畸变的特征点的正确位置。

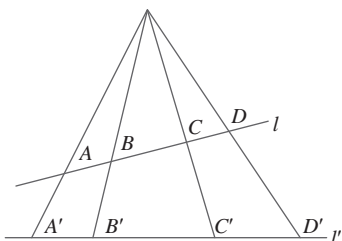


图 4 射影变换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of projective transformation

选取直线 l 上的 3 个点 A, B, C , 并以 C 作为参考点, 把点 A, B 与点 C 间的距离比值记作 $sv(A, B, \bar{C})$, 同理可得 $sv(A, B, \bar{D})$, 如式 (5) 所示。选直线 l 上的 4 个点 A, B, C, D , 并以 C, D 作为参考点, 本文将 $sv(A, B, \bar{C})$ 和 $sv(A, B, \bar{D})$ 的比值定义为交比 $cr(A, B, \bar{C}, \bar{D})$, 如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} sv(A, B, \bar{C}) = AC/BC \\ sv(A, B, \bar{D}) = AD/BD \end{cases}, \quad (5)$$

$$cr(A, B, \bar{C}, \bar{D}) = sv(A, B, \bar{C}) / sv(A, B, \bar{D}) = AC \cdot BD / (AD \cdot BC) \quad (6)$$

在以点 S 作为远景投影点的条件下, 空间中公共线的 4 个点 A, B, C, D 存在 4 个对应点 A', B', C', D' , 于是可得该 4 点基于 C', D' 的交比, 如式 (7) 所示:

$$cr(A', B', \bar{C}', \bar{D}') = sv(A', B', \bar{C}') / sv(A', B', \bar{D}') = AC' \cdot BD' / (AD' \cdot BC') \quad (7)$$

A, B, C, D 4 点在直线 l 上, 对应的 A', B', C', D' 4 点在直线 l' 上, 易证明 $cr(A, B, \bar{C}, \bar{D}) = cr(A', B', \bar{C}', \bar{D}')$, 即点 A, B, C, D 的交比在远景投影下, 保持不变。对平面标定模板内任意共线的 4 点 $P_1: (x_1, y_1)$ 、 $P_2: (x_2, y_2)$ 、 $P_3: (x_3, y_3)$ 和 $P_4: (x_4, y_4)$ 来说, 可得到它们基于 P_3, P_4 的交比, 如下:

$$\begin{cases} cr(P_1, P_2, \hat{P}_3, \hat{P}_4) = d_{13}d_{24}/(d_{23}d_{14}) \\ d_{ij} = |P_i P_j| = \rho \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2} \end{cases}, \quad (8)$$

其中 ρ 为像元尺寸。由于棋盘格有统一的格式, 交比通常是一个定值, 因此, 平面模板的所有共线点均有一个固定规则的分布, 如图 5 所示。图像内

任一观测特征点 $P_{kl}: (u_{kl}, v_{kl})$, 其对应的未畸变点 $\bar{P}_{kl}: (\bar{u}_{kl}, \bar{v}_{kl})$ 。如选定未畸变的点进行校正, 则点 \bar{P}_{kl} 满足交比不变性。

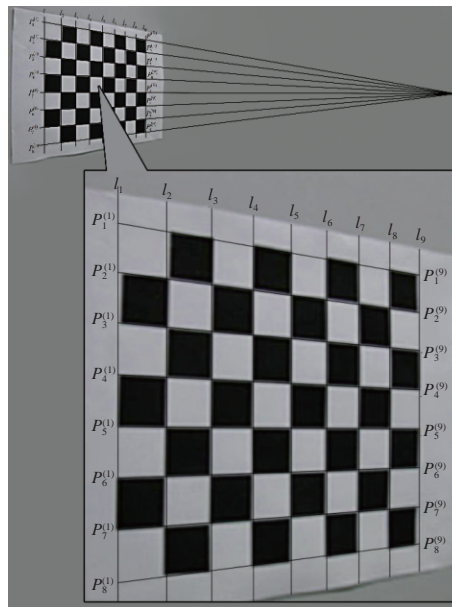


图 5 棋盘格投影示意图

Fig. 5 Schematic diagram of checkerboard projection

为找到任一畸变点 $\tilde{P}_k^{(n)}$ 的校正点 $\bar{P}_k^{(n)}$, 本文预先选取分布在视场中心的、在直线 l_n 上的未畸变点 $\bar{P}_m^{(n)}, \bar{P}_{m+1}^{(n)}, \bar{P}_{m+2}^{(n)}, \bar{P}_{m+3}^{(n)}$ 用于计算交比基准值 \bar{c} , 并用最小二乘法拟合直线 l_n , 如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} a_l^{(N)} = \frac{\sum_{k=m}^{m+3} (u_k^{(N)})^2 \sum_{k=m}^{m+3} v_k^{(N)} - \sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} \sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} v_k^{(N)}}{4 \sum_{k=m}^{m+3} (u_k^{(N)})^2 - \left(\sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} \right)^2} \\ b_l^{(N)} = \frac{4 \left(\sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} v_k^{(N)} \right) - \sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} \sum_{k=m}^{m+3} v_k^{(N)}}{4 \sum_{k=m}^{m+3} (u_k^{(N)})^2 - \left(\sum_{k=m}^{m+3} u_k^{(N)} \right)^2} \\ P_k^{(n)} (u_k^{(n)}, v_k^{(n)})_{k=m}^{m+3} \in l_n: y = a_l^{(n)} + b_l^{(n)} x \end{cases} \quad (9)$$

直线 l_n 确定后, 由平行关系知, 其余直线的斜率也为 $b_l^{(n)}$ 。选取这些直线上的未畸变特征点 $\bar{P}_k^{(n)}$, 再次使用最小二乘法计算 $a_l^{(n)}$, 确定每条直线的参数。最后在点 $P_k^{(n)}$ 的 δ 邻域内构建评价标准值 V , 如式 (10) 所示:

$$\begin{cases} A^{(n)} = \sum_{k=m}^{m+3} [a_k^{(n)} + b_k^{(n)} u_k^{(n)} - v_k^{(n)}]^2 \\ B^{(n)} = \sum_{k=m}^{m+3} [c r_k^{(n)} - \bar{c} r]^2 \\ V = \sum_{n=1}^9 [A^{(n)} + B^{(n)}] \\ c r_k^{(n)} = c r(P_k^{(n)}, P_{k+1}^{(n)}, \bar{P}_{k+2}^{(n)}, \bar{P}_{k+3}^{(n)}) \\ \bar{c} r = c r(\bar{P}_m^{(N)}, \bar{P}_{m+1}^{(N)}, \bar{P}_{m+2}^{(N)}, \bar{P}_{m+3}^{(N)}) \end{cases} \quad (10)$$

本文使用非线性回归 Levenberg-Marquardt 法 (LM) 求解 V 的极小值, 进而获取畸变特征点 $\bar{P}_k^{(n)}$ 的修正特征点 $\bar{P}_k^{(n)}$ 。最后, 根据式 (11) 的图像畸变模型^[16] 确定径向畸变参数 k_1, k_2, k_3 和切向畸变参数 p_1, p_2 。

$$\begin{cases} \tilde{u}_k^{(n)} = \bar{u}_k^{(n)} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \bar{u}_k^{(n)} + [2p_1 \bar{v}_k^{(n)} + p_2 (r^2 + \bar{u}_k^{(n)2})] \\ \tilde{v}_k^{(n)} = \bar{v}_k^{(n)} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \bar{v}_k^{(n)} + [2p_2 \bar{u}_k^{(n)} + p_1 (r^2 + \bar{v}_k^{(n)2})] \end{cases} \quad (11)$$

2.3 确定目标物位姿

2.3.1 目标物深度估计

本文通过调整机载光电吊舱的相机焦距, 对同一场景采集前后两张不同的图像, 由于光学系统经过严格标校, 这些图像的中心点几乎都指向同一点。变焦距系统深度估计原理图如图 6 所示。

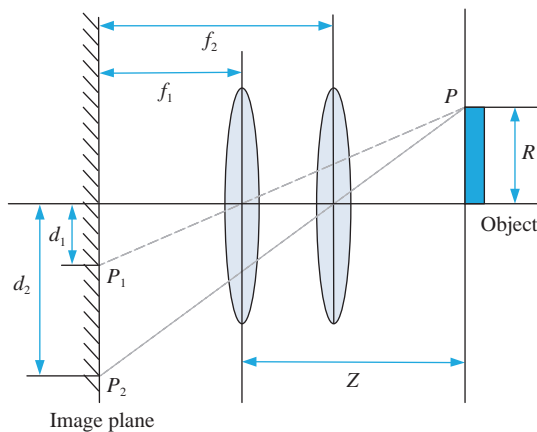


图 6 变焦距系统深度估计原理图

Fig. 6 Schematic of zoom system depth estimation

定义 $P_1(u_1, v_1), P_2(u_2, v_2)$ 是同一空间特征点在焦距 f_1, f_2 下的成像点, 因焦距 f_1, f_2 和像元尺寸 ρ 已知, 可得 P_1, P_2 对应的矢量位移模长 d_1, d_2 , 如

式 (12) 所示:

$$\begin{cases} d_1 = \rho \sqrt{\bar{u}_1^2 + \bar{v}_1^2} \\ d_2 = \rho \sqrt{\bar{u}_2^2 + \bar{v}_2^2} \end{cases}, \quad (12)$$

式 (12) 中的 $(\bar{u}_1, \bar{v}_1), (\bar{u}_2, \bar{v}_2)$ 为 P_1 点、 P_2 点的畸变校正位置 (此处参考式 (11) 的畸变校正模型)。最后结合图 6 中的几何模型, 可得深度 Z 的表达式如式 (13) 所示:

$$Z = d_2 f_1 (f_2 - f_1) / (d_2 f_1 - d_1 f_2) = \frac{f_1 (f_2 - f_1)}{f_1 - f_2 d_1 / d_2} \quad (13)$$

考虑到实际情况, 机载光电吊舱的伺服控制系统因陀螺仪和编码器存在误差而无法做到绝对静止, 导致光学系统始终按一定频率振动^[17]。为了补偿这一误差, 本文设定两幅图像中匹配点存在如式 (14) 所示空间变换模型:

$$p_2 = s \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} p_1 + \Delta p, \quad (14)$$

其中 $\Delta p = (\Delta u, \Delta v)^T$ 为两幅图像的平移矢量, $p_1 = (\bar{u}_1, \bar{v}_1)^T, p_2 = (\bar{u}_2, \bar{v}_2)^T, \theta$ 为机载光电吊舱的光轴转角, s 为两幅图像的比例系数。使用 SURF 法进行图像特征匹配获取 N 对特征点, 经畸变校正后得到特征向量 $p_{1k} = (\bar{u}_{1k}, \bar{v}_{1k})^T, p_{2k} = (\bar{u}_{2k}, \bar{v}_{2k})^T$, 结合式 (14) 建立如下方程组:

$$\begin{cases} u_2 = \begin{bmatrix} 1 & \bar{u}_{11} & \bar{v}_{11} \\ 1 & \bar{u}_{12} & \bar{v}_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \bar{u}_{1N} & \bar{v}_{1N} \end{bmatrix} \beta_1 = A \beta_1 \\ v_2 = \begin{bmatrix} 1 & \bar{u}_{11} & \bar{v}_{11} \\ 1 & \bar{u}_{12} & \bar{v}_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \bar{u}_{1N} & \bar{v}_{1N} \end{bmatrix} \beta_2 = A \beta_2 \end{cases}, \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} u_2 = (\bar{u}_{21} \ \bar{u}_{22} \ \cdots \ \bar{u}_{2N})^T \\ v_2 = (\bar{v}_{21} \ \bar{v}_{22} \ \cdots \ \bar{v}_{2N})^T \\ \beta_1 = (\Delta u \ s \ -s\theta) \\ \beta_2 = (\Delta v \ s\theta \ s) \end{cases} \quad (16)$$

定义权重矩阵 $W = \text{diag}(w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_N)$,

其中 $\sum_{i=1}^N w_i = 1$, 将式(15)左乘 \mathbf{W} 后记为:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{u}}_2 = \tilde{\mathbf{A}}\boldsymbol{\beta}_1 \\ \tilde{\mathbf{v}}_2 = \tilde{\mathbf{A}}\boldsymbol{\beta}_2 \end{cases} \quad (17)$$

通过调整匹配点对的数量 N 和权重矩阵 \mathbf{W} 的元素值, 使得残差满足 Gauss-Markov 条件, 然后利用多元线性回归最小二乘法计算参数 s 、 θ 、 Δu 和 Δv , 可以得到 $\boldsymbol{\beta}_1$ 和 $\boldsymbol{\beta}_2$ 的估计值, 如式(18)所示:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\beta}}_1 = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{u}}_2 = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{u}_2 \\ \hat{\boldsymbol{\beta}}_2 = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{v}}_2 = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{v}_2 \end{cases} \quad (18)$$

在实际项目应用中, P_1 是在短焦距 f_1 下获取的成像(特征)点, 因更靠近视场中心, 存在畸变的可能性更小, 受到伺服控制系统的扰动也 smaller, 所以本文默认 P_1 点的位置 (u_1, v_1) 是准确的, 结合式(18)对 P_2 点的位置进行二次修正, 修正结果如式(19)所示。

$$\begin{cases} \bar{u}_2 = s\bar{u}_1 \cos\theta - s\bar{v}_1 \sin\theta + \Delta u \\ \bar{v}_2 = s\bar{u}_1 \sin\theta + s\bar{v}_1 \cos\theta + \Delta v \end{cases} \quad (19)$$

2.3.2 目标物姿态估计

如图 7 所示, 本文定义 3 种坐标系如下:

(1) 世界坐标系 $x^w - y^w - z^w$: 可依据目标物特征点的位置关系设定。

(2) 图像坐标系 $u - o_i - v$: 以光轴和像平面的交点为原点, 其与相机坐标系原点间的距离为焦距 f , 单位为像素。

(3) 相机坐标系 $x^c - y^c - z^c$: 以光心为原点, x_c 轴、 z_c 轴分别与图像坐标系的 u 轴、 v 轴平行, 且 y_c 轴与光轴重合。

定义特征点 S_i 在世界坐标系下的特征向量为 $\mathbf{s}_i^w = (x_i^w \ y_i^w \ z_i^w)^T$, 在相机坐标系下的特征向量为 $\mathbf{s}_i^c = (x_i^c \ y_i^c \ z_i^c)^T$ 。可根据欧式变换得到 \mathbf{s}_i^w 和 \mathbf{s}_i^c 关系, 如式(20)所示:

$$\mathbf{s}_i^c = \mathbf{R}\mathbf{s}_i^w + \mathbf{t}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (20)$$

其中 \mathbf{R} 为旋转矩阵, $\mathbf{t} = (t_x \ t_y \ t_z)^T$ 为平移向量。本文用四元数 $\mathbf{q} = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k}$ 表示世界坐标系和相机坐标系间的相对姿态, 旋转矩阵 \mathbf{R} 可转化为:

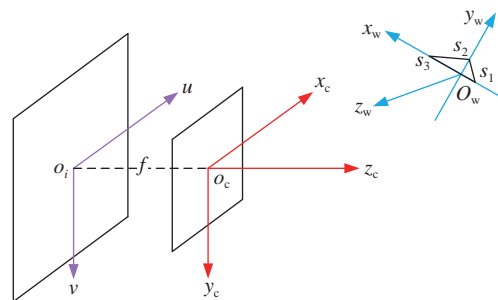


图 7 三种坐标系示意图

Fig. 7 Schematic diagram of three coordinate systems

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, 单位四元数的 4 个参数满足如式(22)所示的约束方程:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (22)$$

按图 7 规定的方式建立世界坐标系, 取靶标上的 3 个特征点, 这 3 个特征点对应的特征向量如式(23)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{s}_1^w = (x_1^w \ y_1^w \ z_1^w)^T = (-a \ 0 \ 0)^T \\ \mathbf{s}_2^w = (x_2^w \ y_2^w \ z_2^w)^T = (0 \ b \ 0)^T \\ \mathbf{s}_3^w = (x_3^w \ y_3^w \ z_3^w)^T = (c \ 0 \ 0)^T \end{cases} \quad (23)$$

其中 $a > 0, b > 0, c > 0$ 。特征点 S_i 的相机坐标 (x_i^c, y_i^c, z_i^c) 与图像坐标 (u_i, v_i) 存在投影变换关系, 如式(24)所示:

$$\begin{cases} z_i^c u_i \rho = x_i^c f \\ z_i^c v_i \rho = y_i^c f \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (24)$$

实际项目中, 机载光电吊舱的相机与目标物之间的距离远大于特征点 S_i 之间的深度差^[18], 故将上述方程做近似处理, 如式(25)所示:

$$\begin{cases} t_z u_i \rho = x_i^c f \\ t_z v_i \rho = y_i^c f \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (25)$$

其中 t_z 为平移矩阵 \mathbf{t} 在 z 方向上的分量, ρ 为像元尺寸, 然后将式(21)、式(25)带入式(20)得:

$$\begin{aligned}
 S_1: & \begin{cases} x_1^c = -a(1 - 2q_2^2 - 2q_3^2) + t_x \\ y_1^c = -2a(q_1q_2 + q_0q_3) + t_y \\ z_1^c = -2a(q_1q_3 - q_0q_2) + t_z \end{cases}, \\
 S_2: & \begin{cases} x_2^c = -2b(q_1q_2 - q_0q_3) + t_x \\ y_2^c = -b(1 - 2q_1^2 - 2q_3^2) + t_y \\ z_2^c = -2b(q_2q_3 + q_0q_1) + t_z \end{cases}, \\
 S_3: & \begin{cases} x_3^c = 2c(q_1q_3 + q_0q_2) + t_x \\ y_3^c = 2c(q_2q_3 - q_0q_1) + t_y \\ z_3^c = c(1 - 2q_1^2 - 2q_2^2) + t_z \end{cases}, \quad (26)
 \end{aligned}$$

再将式(26)带入式(25),整理得:

$$\begin{cases} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 = k_1t_z \\ q_1q_2 + q_0q_3 = k_2t_z \\ q_1q_2 - q_0q_3 = k_3t_z \\ 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 = k_4t_z \end{cases}, \quad (27)$$

其中:

$$\begin{cases} k_1 = (u_3 - u_1)\rho/[f(a+c)] \\ k_2 = (v_3 - v_1)\rho/[2f(a+c)] \\ k_3 = (2u_2 - u_1 - u_3)\rho/(4bf) + k_1(c-a)/(4b) \\ k_4 = (2v_2 - v_1 - v_3)\rho/(2bf) + k_2(c-a)/b \end{cases} \quad (28)$$

参照 2.3.1 节中的深度估计法,可求得 3 个特征点的深度 z_i^c ,按下式计算位移分量 t_z 。

$$t_z = (z_1^c + z_2^c + z_3^c)/3 \quad (29)$$

于是可得平移矩阵 t 的另外两个分量如下:

$$\begin{cases} t_x = t_z(u_1 + u_2 + u_3)\rho/(3f) \\ t_y = t_z(v_1 + v_2 + v_3)\rho/(3f) \end{cases} \quad (30)$$

由相机和目标物的拍摄位置决定,目标物的旋转角度 ϕ 一定满足 $|\phi| < 90^\circ$,故有 $q_0 > q_1$,本文设定 $q_0 > 0$,定义:

$$\begin{cases} m = 0.5(k_2 + k_3)t_z \\ n = 0.5(k_1 - k_4)t_z \end{cases}$$

于是可通过解式(25)方程组解得四元数分量如下:

$$\begin{cases} q_1 = \sqrt{0.5n + \sqrt{0.25n^2 + m^2}} \\ q_2 = 0.5(k_2 + k_3)t_z/q_1 \\ q_3 = \sqrt{0.5 - q_2^2 - 0.5k_1t_z} \\ q_0 = 0.5t_z(k_2 - k_3)/q_3 \end{cases} \quad (31)$$

根据欧拉角与旋转矩阵的转化关系,可结合式(32)得到目标物相对 $x_c o_c y_c$ 平面的俯仰角 θ 、方位角 φ 和横滚角 ψ ,如下式所示:

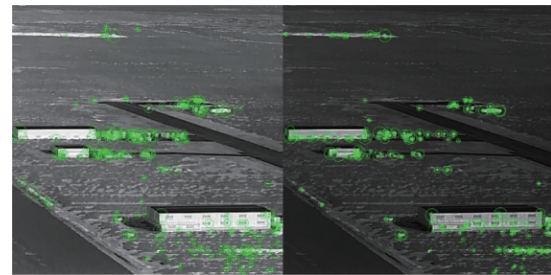
$$\begin{cases} \theta = \arcsin[2(q_0q_2 - q_1q_3)] \\ \varphi = \arctan[2(q_0q_1 + q_2q_3)/(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)] \\ \psi = \arctan[2(q_0q_3 + q_1q_2)/(q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)] \end{cases} \quad (32)$$

至此,目标物相对于机载光电吊舱的位姿已经完全确定。

3 测量实验与结果

3.1 改进的特征匹配算法的性能验证

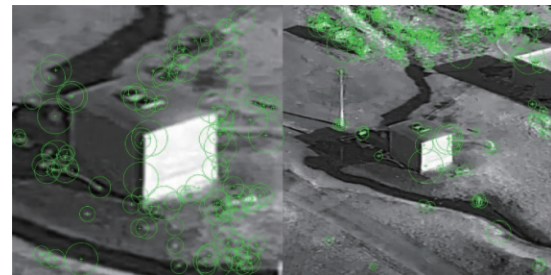
分别选择 4 组具有旋转、尺度、光照及噪声变化的不同遥感图像,进行了多组实验,提取的特征点用绿色十字表示,实验结果如图 8(彩图见期刊电子版)所示。实验结果表明,本文使用的算法提取的特征点大部分是角点,且在图像上分布十分均匀。



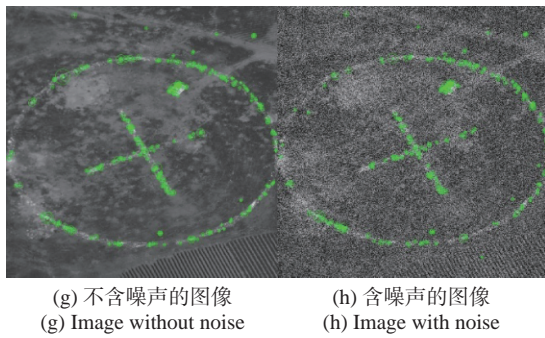
(a) 正常亮度的图像 (b) 颜色变暗的图像
(a) Image with normal brightness (b) Image with dark color



(c) 正常角度的图像 (d) 顺时针旋转 30° 的图像
(c) Image with normal angle (d) Image with 30° rotation



(e) 缩小前的图像 (f) 缩小后的图像
(e) Image before reduction (f) Image after reduction

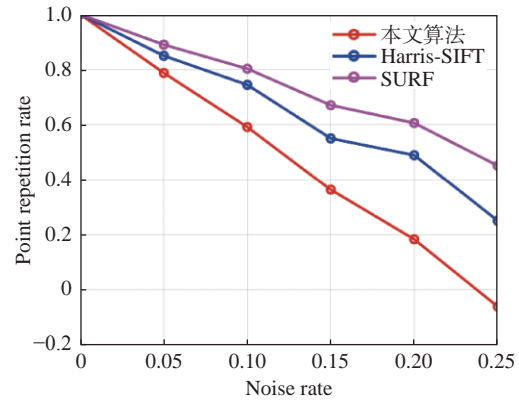
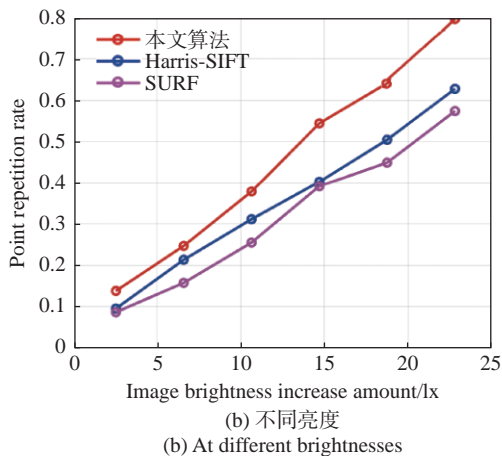
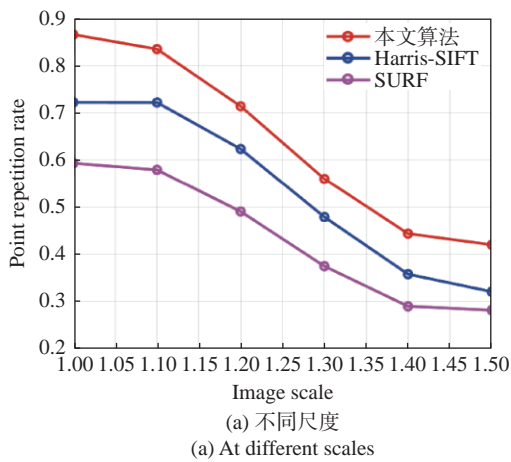


(g) 不含噪声的图像 (g) Image without noise
(h) 含噪声的图像 (h) Image with noise

图 8 本文算法在不同条件下的特征提取结果

Fig. 8 Feature extraction results obtained by the proposed algorithm under different conditions

为了测试本文使用的算法相较于 SURF 算法和 Harris-SIFT 算法在尺度不变和抗噪等方面的性能改进情况, 分别给出图像发生尺度、光照及噪声情况下的点重复率。实验结果如图 9(彩图见期刊电子版)所示。由图 9 可知, 随着图像尺度、亮度及噪声的变化, 本文所用算法的角点提取重复率均高于其他两种算法, 同时前者的角点重复率变化相对于后者趋于平稳, 说明本文算法对尺度、光照及噪声具有较好的鲁棒性。



(c) 不同噪声率 (c) At different noise rates

图 9 3 种算法在不同条件下的角点检测重复率

Fig. 9 Corner detection repetition rates obtained by three algorithms under different conditions

对具有旋转、尺度、光照及噪声变化的遥感图像, 分别使用本文算法、SURF 算法和 Harris-SIFT 算法进行特征提取, 正确匹配率 r_c 和处理时间 t 如表 1 所示。

由表 1 可知, 本文的算法在特征匹配方面, 精度和速度都略高于 SURF 算法。此外, 本文算法和 Harris-SIFT 算法相比, 匹配精度接近, 但处理时间更快。

表 1 3 种算法的正确匹配率和处理速度

Tab. 1 Correct matching rates and processing speeds of the three algorithms (Unit: ms)

图像	本文算法		SURF		Harris-SIFT	
	r_c	t	r_c	t	r_c	t
1	6.17	7.17	3.01	11.83	6.17	10.60
2	74.85	9.28	76.89	30.26	51.33	39.25
3	50.15	8.87	51.50	20.27	34.39	26.30
4	28.44	7.82	29.21	11.49	19.51	14.92
5	62.13	9.01	63.82	25.67	46.26	35.27
6	39.67	8.32	40.75	13.67	27.94	20.82

3.2 图像畸变校正精度测试

为了测试基于交比不变性的畸变特征点校正效果, 本文在相同环境下, 与传统的张方法进行对比, 结果如表 2 所示。

实验使用的目标物为 8×7 的平面棋盘格模板, 每格边长为 26 mm, 如图 10 所示。机载光电吊舱焦距 $f = 26 \text{ mm}$ 保持不变, 通过移动设备基座和控制伺服系统进行手动跟踪以调整朝向目标物的角度, 期间逐次进行 50 次数码拍照, 得到图像

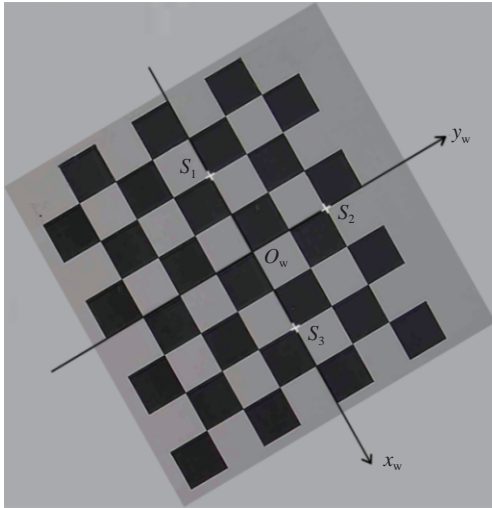


图 10 实验用的靶标与坐标系

Fig. 10 The target and coordinate system used in the experiment

表 2 两种相机标定算法的结果对比

Tab. 2 Comparison of the results obtained by two camera calibration algorithms

参数	本文			张方法
使用图像	I_1	I_{25}	I_{49}	I_1, I_2, \dots, I_{50}
$k_1/\times 10^{-3}$	3.132	3.131	3.132	3.129
$k_2/\times 10^{-3}$	3.227	3.225	3.226	3.225
$k_3/\times 10^{-3}$	0.002	0.001	0.001	0.002
p_1	-0.0001	-0.00009	-0.00008	-0.0001
p_2	0.0001	0.0001	0.0003	0.0001

I_1, I_2, \dots, I_{50} 。先使用张方法结合图像 I_1, I_2, \dots, I_{50} 进行相机标定, 然后任选 3 张图片, 用本文方法进行畸变校正。由于靠近图像边缘的畸变系数最大, 本文在实验时选取靠近图像边缘的共线特征点完成畸变校正。本文定义 k_1, k_2, k_3 为径向畸变参数, 定义 p_1, p_2 为切向畸变参数。

本文方法的畸变校正精度与张方法相当, 但基于交不变性的图像畸变校正只依赖单幅图片, 具有更好的稳定性。

3.3 目标物深度误差估计实验

实验借助激光测距仪严格保证光学镜头与棋盘格之间的深度真值 $Z_m = 20$ m, 然后在两个焦距 $f_1 = 100$ mm、 $f_2 = 300$ mm 下进行数码拍照获取 I_1, I_2 。由于光学系统经过严格标定, 焦距误差为 3%, 可以忽略不计。选取图像 I_1, I_2 中的任一特征点对 P_1, P_2 , 定义特征点 P_1 的误差为 (e_u, e_v) , 于是对应的修正模值为:

$$\bar{d}_1 = \rho \sqrt{\bar{u}_1^2 + \bar{v}_1^2} = \rho \sqrt{(u_1 + e_u)^2 + (v_1 + e_v)^2} \quad (33)$$

结合式(20), 可得特征点 P_2 的修正模值为:

$$\begin{cases} \bar{d}_2 = \rho \sqrt{\bar{u}_2^2 + \bar{v}_2^2} \\ \bar{u}_2 = s\bar{u}_1 \cos \theta - s\bar{v}_1 \sin \theta + \Delta u \\ \bar{v}_2 = s\bar{u}_1 \sin \theta + s\bar{v}_1 \cos \theta + \Delta v \end{cases} \quad (34)$$

那么以此产生的深度估计误差为:

$$\Delta Z = \left| \frac{f_1(f_2 - f_1)}{f_1 - f_2 \bar{d}_1 / \bar{d}_2} - Z_m \right| \quad (35)$$

在 I_1, I_2 中选取 10 组特征点对, 依据式(17)计算出:

$$\begin{cases} s = 3.01998 \\ \theta = 0.12166 \text{ (rad)} \\ \Delta u = 0.33288 \\ \Delta v = 0.56757 \end{cases}$$

s 是 I_1, I_2 间的尺度比例系数, θ 和 $(\Delta u, \Delta v)$ 是伺服引起的旋转平移变化量, 在此基础上, (e_u, e_v) 和 ΔZ 的拟合图如图 11 所示。由图 11 知, 若 $|e_u|$ 和 $|e_v|$ 同时趋于 0, 那么深度误差几乎为 0; 若 $|e_u| \leq 4$ 和 $|e_v| \leq 4$ 同时成立, 那么深度误差不超过 $0.8/20 = 4\%$ 。

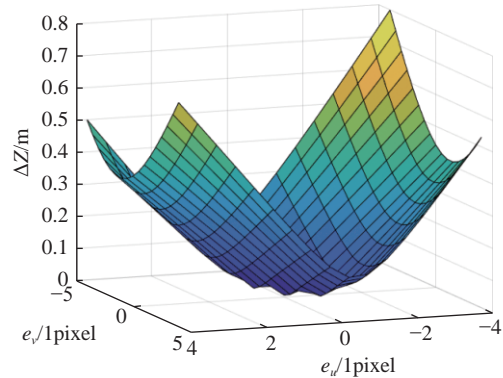


图 11 特征点偏差引起的深度误差

Fig. 11 Depth error caused by feature point deviation

3.4 目标物姿态误差估计实验

使棋盘格平面垂直于机载光电吊舱的光轴, 并按照图 10 的方式建立世界坐标系, 于是有特征点(单位为毫米):

$$\begin{cases} S_1^w: (-52 \ 0 \ 0) \\ S_2^w: (0 \ 52 \ 0) \\ S_3^w: (52 \ 0 \ 0) \end{cases}$$

由于相机坐标系 $x_c o_c y_c$ 平面和棋盘格平面的相对姿态一致, 故有 $q_0 = 1, q_1 = q_2 = q_3 = 0$ 。

顺时针旋转靶标60°(规定逆时针方向为正方向),如图 10 所示。可见光探测器的像元尺寸 $\rho = 2.8 \mu\text{m}$,调整焦距至 $f = 22 \text{ mm}$,然后对机载光电吊舱输出的图像进行畸变矫正(具体方法参照 2.3 节),获得修正后的图像坐标,如下:

$$\begin{cases} \bar{S}_1^i: (-93 & 160) \\ \bar{S}_2^i: (160 & 93) \\ \bar{S}_3^i: (93 & -160) \end{cases}$$

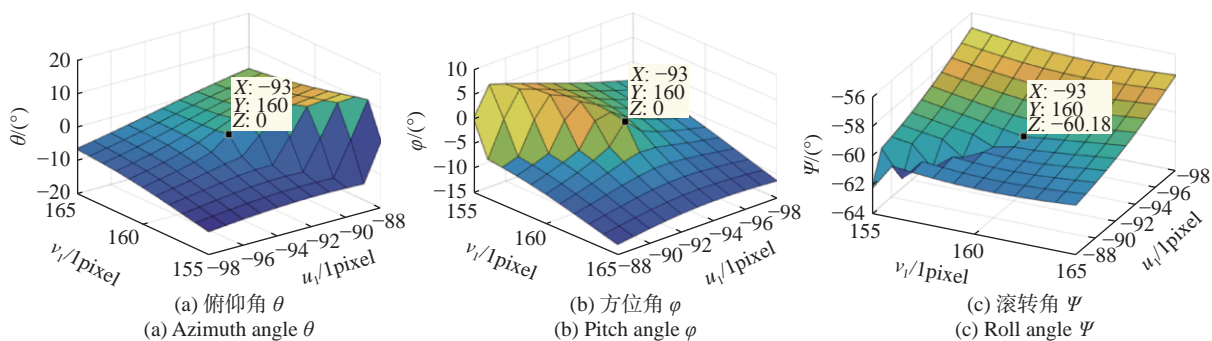


图 12 特征点定位精度与解算姿态角的关系

Fig. 12 The relation between position accuracy of feature point and calculated attitude angle

由图 12 知,若点 S_1 的坐标分别满足 $u_1 = -93$ 、 $v_1 = 160$ 时,目标的俯仰角为 0° ,方位角为 0° ,滚转角为 -60.18° ,可以认定是没有偏差的准确状态。当 u_1 和 v_1 出现 ± 5 个像素的定位误差时,会引起俯仰角产生 $\pm 17^\circ$ 的偏差、方位角产生 $\pm 15^\circ$ 的偏差以及横滚角产生 $\pm 4^\circ$ 的偏差。若定位误差控制在一个像素以内,则 3 个角度的偏差分别降低为 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 2^\circ$,这一偏差满足机载光电吊舱确定目标姿态的精度需求。

3.5 实时性验证

为准确评估基于 GPU 加速的目标定位算法的提速能力,本文进行了传统 CPU 方案与 GPU 加速方案的实验比较。当前集成的开发环境为 VS2017,并以 CUDA Toolkit 3.4.3 及 NVIDIA GPU Computing SDK 作为开发工具,实验开发详细环境配置:GPU 为 NVIDIA TX2i,内存为 8 GB;CPU 为 InterCorei5 6300HQ,内存为 4 GB。

表 3 列出了不同分辨率图像的检测结果(每组图片 2 张,共 500 组,时间为平均耗时),可以得出,基于 GPU 的目标定位速度远远高于基于普通 CPU 的定位速度。随着图像分辨率的提高,

根据式(32)可计算出靶标的姿态角如下:

$$\begin{cases} \theta = 0^\circ \\ \varphi = 0^\circ \\ \psi = -60.1815^\circ \end{cases}$$

下面分析采集误差对姿态角的影响,令 $S_1^i: (u_1, v_1) \in \{S \mid \|S - \bar{S}_1^i\| < 5\}$, $S_2^i = \bar{S}_2^i$, $S_3^i = \bar{S}_3^i$ 。根据 S_1^i 的坐标值变化,绘制目标物的姿态角变化,如图 12(彩图见期刊电子版)所示。

GPU 的图像处理速度的提高愈发明显。在本实验中,线程块设置的线程较小,若能确保 GPU 被足够的活动线程调度,发挥 GPU 并行运算能力,可以极大地提高处理速度。处理速度对比结果如表 3 所示。

表 3 两种方案在不同分辨率条件下的处理速度

Tab. 3 The processing speeds of the two algorithms at different resolutions (Unit: ms)

图像分辨率	处理时间	
	CPU方案	GPU方案
640×320	84	17
640×512	161	32
1024×768	304	52
1920×1080	596	74

4 结 论

为了提升无人机机载光电侦察设备的目标自主定位能力,本文结合实际工程项目,在机载嵌入式平台实现了目标的深度估计和姿态估计。实验结果表明,若目标特征点的位置误差控制在一个

像素以内,其深度估计误差不超过 2%,同时方位角、俯仰角和横滚角的角度误差估计的绝对值分别小于 4°、5°和 2°。这一误差指标满足机载光电吊舱的目标自主定位需求。由于本文使用的图像畸变校正策略和特征匹配策略不涉及复杂计算,结合 GPU 强大的浮点运算能力,以增加部分冗余

计算为代价,降低数据之间的依赖,优化内存的访问,较之基于 CPU 的方案,处理速度提高达 4 倍以上,满足实时性需求。同时,只利用现有的光学系统完成对目标的深度和姿态估计,而不依托于设备的惯导系统,满足机载光电吊舱的侦察任务需求,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 张金隆, 吴珊, 龚业明. 中国智能机械制造评价及发展研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(4): 451-458.
ZHANG J L, WU S H, GONG Y M. Research on evaluation and development of intelligent machinery manufacturing in China[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(4): 451-458. (in Chinese)
- [2] WEI M S, XING F, YOU ZH. A real-time detection and positioning method for small and weak targets using a 1D morphology-based approach in 2D images[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 18006.
- [3] YUAN X Y, JI M Q, WU J M, *et al.*. A modular hierarchical array camera[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 37.
- [4] PINIES P, LUPTON T, SUKKARIEH S, *et al.*. Inertial aiding of inverse depth SLAM using a monocular camera[C]. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, IEEE, 2007: 2797-2802.
- [5] 张中, 黄俊杰, 汪明明. 一种基于实时视频的位姿估计方法: 中国, 112419409A[P]. 2021-02-26.
ZHANG ZH, HUANG J J, WANG M M. A pose estimation method based on real-time video: CN, 112419409A[P]. 2021-02-26. (in Chinese)
- [6] 丁国坤, 乔延利, 易维宁, 等. 基于光谱图像空间的改进SIFT特征提取与匹配[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(2): 192-199.
DING G SH, QIAO Y L, YI W N, *et al.*. Improved SIFT feature extraction and matching based on spectral image space[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(2): 192-199. (in Chinese)
- [7] LESHCHENKO V E, KESSEL A, JAHN O, *et al.*. On-target temporal characterization of optical pulses at relativistic intensity[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 96.
- [8] 左威健, 胡立华, 刘爱琴, 等. 基于动态拓展的特征匹配方法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(3): 778-785.
ZUO W J, HU L H, LIU A Q, *et al.*. Feature matching method based on dynamic expansion[J]. *Computer Engineering and Design*, 2022, 43(3): 778-785. (in Chinese)
- [9] ZHANG ZH Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] ZHANG Y, DU SH Q, HIRAKAWA K. Deep-nanometer-scale terahertz spectroscopy using a transistor geometry with metal nanogap electrodes[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 460-472.
- [11] 王月, 李阳, 金映谷, 等. 拼接图像的径向畸变矫正技术[J]. 大连民族大学学报, 2021, 23(3): 228-231.
WANG Y, LI Y, JIN Y G, *et al.*. Radial distortion correction technology of image mosaic[J]. *Journal of Dalian Minzu University*, 2021, 23(3): 228-231. (in Chinese)
- [12] HAJANO S, NAZ B, TALPUR S. Area and feature based image registration using template matching and SURF algorithm[C]. *INCCST'20 Second International Conference*, 2021: 109-113.
- [13] 雒福佐. 基于小波分析与RANSAC匹配的雷达图像拼接研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(2): 199-203,208.
LUO F Z. Research on radar image mosaic based on wavelet analysis[J]. *Automation & Instrumentation*, 2022(2): 199-203,208. (in Chinese)
- [14] 杨建柏, 赵建, 孙强. 基于交比不变性的投影仪标定[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 320-328.
YANG J B, ZHAO J, SUN Q. Projector calibration based on cross ratio invariance[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 320-328. (in Chinese)
- [15] LI Q, ZENG Y A, JIU ZH X, *et al.*. Distortion correction of optical system based on neural network and automated generation of reference points[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7283: 72831R.
- [16] HARTLEY R, KANG S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(8): 1309-1321.

- [17] 陈天择, 葛宝臻, 罗其俊. 重投影优化的自由双目相机位姿估计方法[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1400-1409.
CHEN T Z, GE B ZH, LUO Q J. Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1400-1409. (in Chinese)
- [18] 杜明鑫, 闫钰锋, 张燃, 等. 基于透镜阵列的三维姿态角度测量[J]. 中国光学, 2022, 15(1): 45-55.
DU M X, YAN Y F, ZHANG R, et al.. 3D position angle measurement based on a lens array[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 45-55. (in Chinese)

作者简介:



王 鑫(1993—), 男, 黑龙江肇东人, 硕士, 助理研究员, 2016年于哈尔滨工业大学获得控制工程专业硕士学位。现就职于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 14S104020@hit.edu.cn



李玉芳(1994—), 女, 黑龙江肇东人, 硕士, 中级工程师, 2017年于哈尔滨工业大学获得机械设计及理论专业硕士学位。现就职于中国第一汽车集团有限公司, 主要从事汽车设计方面的研究。E-mail: 910341666@qq.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com