

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412926

# 基于惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计方法

李岳, 孙长库, 王大为, 王鹏, 付鲁华

(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

**摘要:**针对特征点对应关系未知的姿态估计问题,提出了1种基于惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计方法。与利用惯性信息在数据处理层面优化先验位姿选取的方法不同,该方法在数据采集层面融合图像信息和惯性信息,从而提高了姿态估计和特征点匹配的准确性和稳健性。本文提出了1种融合特征点跟踪和运动矢量约束跟踪的混合跟踪新方法,构建了二维和三维点集的初始匹配权重矩阵。基于该匹配权重矩阵建立优化目标函数,并利用改进软分配算法交替优化姿态估计和二维/三维点集匹配关系。利用二维精密转台搭载合作立体靶标进行算法性能测试,结果表明:在方位角/俯仰角为 $\pm 50^\circ$ 内,该方法的成功率为99%,姿态估计精度优于 $0.15^\circ$ ,单次测量耗时约17 ms,并且在视觉遮挡情况下仍可保持较高的成功率。

**关键词:**单目视觉;姿态估计;未知对应;惯性辅助跟踪。

中图分类号: TH741 TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## An attitude estimation method with inertial aid tracking from unknown correspondences

Li Yue, Sun Changku, Wang Dawei, Wang Peng, Fu Luhua

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** An attitude estimation method in the presence of unknown correspondences is proposed by utilizing inertial aid tracking. Unlike methods that optimize prior pose selection using inertial information at the data processing level, this approach combines image and inertial information at the data acquisition level, which could enhance the accuracy and robustness of attitude estimation and feature point matching. The proposed method introduces a new hybrid tracking approach that combines feature point tracking and motion vector constraint tracking. And an initial matching weight matrix for two-dimensional and three-dimensional point sets is established. An optimization objective function is formulated based on this weight matrix, and an improved soft assignment algorithm is employed to iteratively optimize the estimation of attitude and the correspondences between the 2D/3D point sets. Algorithm performance is tested by using a 2D precision turntable with cooperative stereo targets. The results show that the success rate of this method is 99% when the yaw/pitch angle is  $\pm 50^\circ$ , and the error of attitude estimation is less than  $0.15^\circ$ . The single measurement time is approximately 17 ms, and the method maintains a high success rate even in visual occlusion.

**Keywords:** monocular vision; attitude estimation; unknown correspondences; inertial aid tracking

## 0 引言

基于视觉的合作靶标姿态估计问题又称为 $n$ 点透视成像(perspective- $n$ -point, PnP)问题。PnP问题的解决方案在虚拟现实和增强现实<sup>[1-2]</sup>、头盔瞄准具<sup>[3]</sup>、无人机视觉引导着陆<sup>[4]</sup>和自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)对接<sup>[5]</sup>等各个领域都有广泛的

应用。传统的PnP问题的解决方案是建立于三维空间点与二维图像点之间的对应关系已知的前提下。然而在实际场景中,对应关系通常是未知的,这会给姿态估计任务带来极大的挑战。

为了应对未知对应问题,需要采用特征点匹配方法建立对应关系。匹配方法通常可分为两类:依赖图像纹理信息的方法和同步位姿估计和对应点匹配(simultaneous pose and correspondence determination,

SPCD)方法。目前,视觉测量领域对前一个方法的研究较为广泛,包括依赖环境纹理的特征描述方法,如ORB<sup>[6]</sup>和DSCNet<sup>[7]</sup>等;依赖人工特征的方法,如环形编码等图像编码方式<sup>[8-9]</sup>。这些方法的性能受成像质量的影响较大,并且非常依赖特征点的纹理信息。然而,在一些特殊应用场景中,如激光跟踪仪的视觉靶标<sup>[10]</sup>和飞行员头盔瞄准具<sup>[3]</sup>通常采用红外LED作为特征点。纹理信息的缺失会导致特征匹配的严重错误,甚至失效。因此,此类应用场景只能引入SPCD方法来解决对应关系确定问题。

SPCD问题的解决方案中,以SoftPosit算法<sup>[11]</sup>为代表的局部优化方法是主流的解决方案。受其启发,SoftSI<sup>[12]</sup>和SoftOI<sup>[13]</sup>相继被提出,提升了测量精度和成功率。但是,局部优化方法的性能在很大程度上取决于可靠的先验位姿<sup>[14]</sup>,而这通常是难以获取的。因此,为了获取可靠的先验位姿,Moreno-Noguer等<sup>[15]</sup>提出了BlindPnP方法。该方法采用混合高斯模型构建先验位姿集合,提升了算法的成功率。Yang等<sup>[16]</sup>利用遗传算法生成有利的先验位姿,加快了匹配过程。当前,采用分支定界技术的全局优化方法<sup>[17]</sup>逐渐成为研究热点。该类方法的成功率通常可以达到100%<sup>[18]</sup>,并且不需要提供先验位姿。遗憾的是,该类方法的计算速度较慢<sup>[19]</sup>,仅能适用于实时性要求不高的场景。随着低成本惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)在姿态估计任务中的广泛应用,结合惯性传感器的局部优化方法的竞争力逐渐增强。Li等<sup>[20]</sup>将基于IMU辅助的先验位姿生成器引入SoftOI算法,并且利用不确定性加权的马氏距离重构目标函数。该算法改善了估计精度的同时显著提升了计算速度。然而,该算法中的各个模块是独立运行的,信息的耦合仅停留于数据处理层面。因此,如何将惯性和图像信息紧密集成是本文的核心思想。

当前,Guan等<sup>[21]</sup>提出一种IMU辅助特征点跟踪(IMU-aided feature points tracking, IFPT)综合框架,该框架将惯性信息融合至特征点跟踪层面。随后的研究进一步改进IFPT<sup>[22]</sup>,并与深度学习技术结合提高跟踪性能<sup>[23]</sup>。不过,这些算法仅利用跟踪模块缩小匹配窗口,仍需依赖图像纹理进行匹配<sup>[24]</sup>。目前,将IFPT框架集成至SPCD问题的解决方案的研究较少,这也是推动本文方法提出的直接动力。

基于以上思路,本文在SPCD问题中集成1种融合特征点跟踪和运动矢量约束跟踪的混合跟踪方法。利用SoftMax技术构建匹配权重矩阵,并将其引入目标函数,从而实现数据采集层与数据处理层的贯通。利用改进软分配方法对新的目标函数进行快速迭代优化,实现同步位姿估计和对应点匹配。

## 1 惯性辅助的未知对应姿态估计问题描述

如图1所示,在假设相机内参数和相机/IMU外参数皆已标定的情况下,设一组坐标已知的三维点 $\{{}^T\mathbf{P}_i\}_{i=1}^M$ 表示合作立体靶标模型,其在相机的像平面的投影为 $\{\mathbf{p}_j\}_{j=1}^N$ ,且2个点集之间的对应关系未知。此外,由于遮挡或噪声干扰的原因,三维点集和二维点集的大小是不等的,即 $M \neq N$ 。未知对应姿态估计问题的目标是对相机与靶标之间的位姿进行估计的同时确定二维点集与三维点集之间的对应关系。

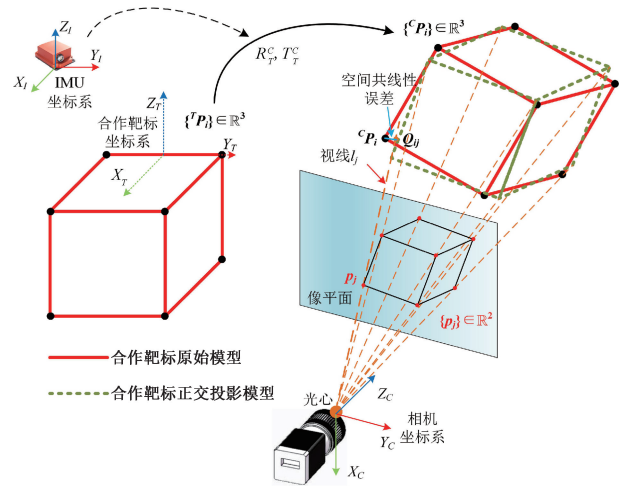


图1 未知对应姿态估计问题描述

Fig. 1 Description of the unknown corresponding pose estimation problem

基于相机正交投影模型<sup>[13]</sup>,目标函数可以表示为:

$$e^2(\mathbf{R}_T^C, \mathbf{T}_T^C) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left\| m_{ij} \cdot \left( \frac{|\mathbf{C}\mathbf{P}_i - \mathbf{Q}_{ij}|}{\mathbf{r}_3 \cdot \mathbf{T}_i + t_z} - \alpha \right) \right\|^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left\| m_{ij} \cdot \left( \frac{|\mathbf{I}_3 - \mathbf{V}_j| \cdot (\mathbf{R}_T^C \cdot \mathbf{T}_i + \mathbf{T}_T^C)}{\mathbf{r}_3 \cdot \mathbf{T}_i + t_z} - \alpha \right) \right\|^2 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}_{ij}$ 被定义为第*i*个三维点 $\mathbf{T}_i$ 在由第*j*个二维点 $\mathbf{p}_j$ 所确定的视线 $l_j$ 上的正交投影点,其中 $\mathbf{V}_j = \mathbf{p}_j \mathbf{p}_j^T / \mathbf{p}_j^T \mathbf{p}_j$ 是视线 $l_j$ 的投影矩阵; $\mathbf{R}_T^C = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3]^T \in SO(3)$ 和 $\mathbf{T}_T^C = [t_x, t_y, t_z]^T$ 表示靶标坐标系 $\{T\}$ 到相机坐标系 $\{C\}$ 的旋转矩阵和位移向量; $m_{ij}$ 和 $\alpha$ 分别为表示匹配关系的权重系数和误差阈值,具体定义可参考文献[13]。此外,安装于合作靶标上的IMU可以通过外参数计算获取合作靶标的相对位姿信息。

## 2 惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计算法

### 2.1 混合跟踪算法

#### 1) 特征点跟踪算法

IMU 的采集速度远大于相机,因此两帧序列图像  $v$ ,  $v+1$  之间存在多帧 IMU 惯性数据。通过预积分和坐标转换<sup>[21]</sup>可得两帧图像对应的合作靶标相对运动增量  $\Delta R_{T(v)}^{T(v+1)}$ ,  $\Delta T_{T(v)}^{T(v+1)}$ 。根据相机透视成像模型,可通过将三维点  $P_i$  映射至像平面,实现特征点预测:

$${}^{(v+1)}\tilde{p}_i = {}^{C(v+1)}z_i \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{W}_{T(v+1)}^C T(v+1) \tilde{P}_i \quad (2)$$

式中:  $T(v+1)\tilde{P}_i$  表示  $i$  点在与合作靶标坐标系下  $v+1$  时刻的齐次坐标,且是已知的。 ${}^{(v+1)}\tilde{p}_i$  是  $i$  点在图像平面的预测点的齐次像素坐标。 ${}^{C(v+1)}z_i$  是三维点的深度。 $\mathbf{K}$  是相机内参矩阵。 $\mathbf{W}_{T(v+1)}^C$  表示  $v+1$  时刻的坐标转换矩阵:

$$\mathbf{W}_{T(v+1)}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{T(v+1)}^C & \mathbf{T}_{T(v+1)}^C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\{T(v)\}$  与  $\{T(v+1)\}$  之间的转换关系如下:

$$\mathbf{W}_{T(v+1)}^C = \mathbf{W}_{T(v)}^C \begin{bmatrix} \Delta R_{T(v)}^{T(v+1)} & \Delta T_{T(v)}^{T(v+1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \mathbf{W}_{T(v)}^C \cdot \mathbf{W}_{T(v)}^{T(v)} \quad (4)$$

显然,将(4)代入(2)即可实现对  $v+1$  时刻的像平面下的二维图像点  ${}^{(v+1)}\tilde{p}_i$  的预测。而后搜寻距离预测点欧式距离最小的  $v+1$  时刻的图像点即可实现追踪。

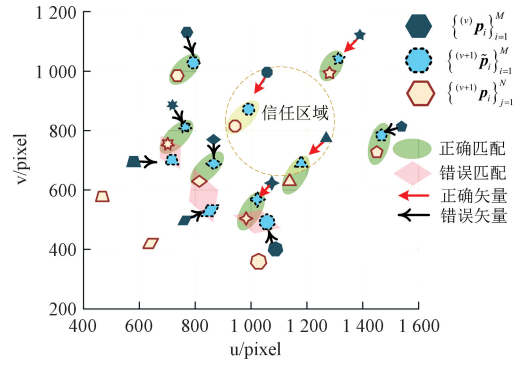
#### 2) 运动矢量约束跟踪算法

特征点跟踪算法示意如图 2(a) 所示。从图中可看出,依据最小欧式距离准则对特征点进行跟踪会出现错误匹配情况。其原因是当视觉测量受到干扰导致连续两帧图像之间的间隔变长时,累积的惯性误差会使预测点位置出现偏差。

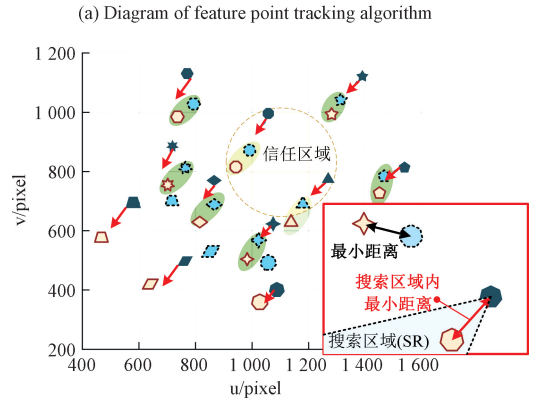
因此,本文提出运动矢量约束跟踪算法来解决这个问题。在本文中,运动矢量被定义为由预测点与  $v$  时刻的图像点形成的矢量。然而,运动矢量同样存在错误矢量。从图 2(a) 中可以观察到,距离相机光心较近的区域,运动矢量是准确的。这一现象与文献[22]中的理论分析结果是一致的。因此,引入以相机光心为中心的“信任区域”(trust region, TR),并将该区域中的运动矢量的平均值  $AM$  作为整体运动矢量,如下:

$$AM = \frac{1}{\sum_{i \in TR}} \frac{{}^{(v+1)}\tilde{p}_i - {}^{(v)}p_i}{\|{}^{(v+1)}\tilde{p}_i - {}^{(v)}p_i\|} \quad (5)$$

式中:  $\sum$  表示“信任区域”中运动矢量的数量。而后,可以根据运动矢量和  $v$  时刻的图像点构建夹角为  $\gamma$  的搜索区域 (search region, SR)。通过计算搜索区域内与  $v$  时刻的图像点的最小欧式距离即可实现运动矢量约束的追踪,如图 2(b) 所示。



(a) 特征点跟踪算法示意图



(b) 运动矢量约束跟踪算法示意图

(b) Diagram of motion vector constrained tracking algorithm

图 2 混合跟踪算法示意图

Fig. 2 Diagram of the hybrid tracking algorithm

#### 3) 构建初始匹配权重矩阵

本小节的主要任务是建立两种追踪算法结果之间的联系,并以此构建初始匹配权重矩阵。首先特征点跟踪算法和运动矢量约束跟踪算法的评估参数分别可表述如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} \min \| {}^{(v+1)}\tilde{p}_i - {}^{(v+1)}p_j \|, & (i, j) \in \text{Match} \\ \| {}^{(v+1)}\tilde{p}_i - {}^{(v+1)}p_j \|, & (i, j) \notin \text{Match} \end{cases} \quad (6)$$

$$d_{ij}^{AM} = \begin{cases} \| {}^{(v+1)}p_i - {}^{(v)}p_j \|, & j \in SR_i \\ 1\ 000, & j \notin SR_i \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $SR_i$  表示第  $i$  个  $v$  时刻图像点的运动矢量构建的搜索区域。当  $v+1$  时刻的图像点  $j$  在搜索区域内,则评估参数为两个时刻的图像点的距离;反之,则评估参数统一设置为 1 000 pixel。两种算法的混合评估参数  $d_{ij}^H$  可表示为:

$$d_{ij}^H = (1 - \alpha) \times d_{ij} + \alpha \times d_{ij}^{AM} \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为调整参数,用于调整两种算法的占比,由于后者在数值上一般要高于前者,因此可取 0.2~0.4。利用 SoftMax 对混合评估参数组成的矩阵进行处理,得到权重矩阵  $\{d_{ij}^H\}_{M' \times M}$ 。其中,  $M'$  为  $v$  时刻的图像点个数。将该权重矩阵拓展至  $N \times M$  即可得到初始匹配权重矩阵,如

图3所示。需要注意的是,与 $v$ 时刻的图像点不存在对应关系的三维点(即遮挡点),在初始匹配权重矩阵中将其对应元素设置为0。

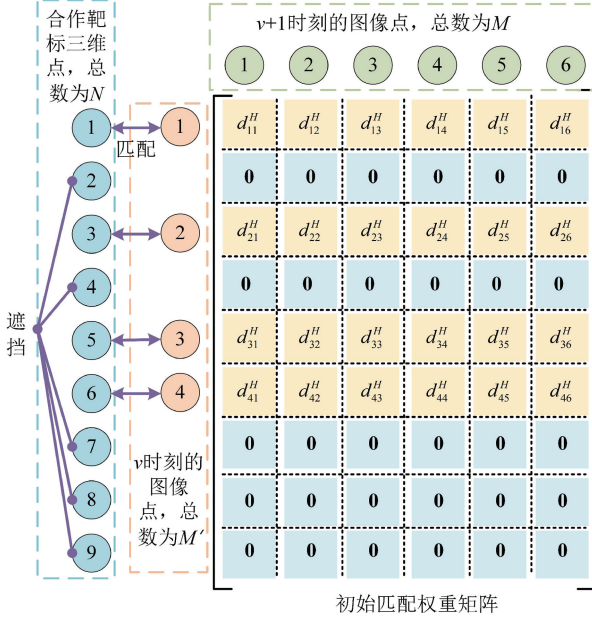


图3 构建初始匹配权重矩阵示意图

Fig. 3 Diagram of the constructed initial matching weight matrix

## 2.2 姿态估计算法

首先构建基于初始匹配权重矩阵的目标函数:

$$e^2(\mathbf{R}_T^C, \mathbf{T}_T^C) =$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left\| (d_{ij}^H)^{(k)} \cdot m_{ij} \cdot \left( \frac{|{}^C \mathbf{P}_i - \mathbf{Q}_{ij}|}{\mathbf{r}_3 \cdot {}^T \mathbf{P}_i + t_z} - \alpha \right) \right\|^2 \quad (9)$$

$$(d_{ij}^H)^{(k)} = (d_{ij}^H)^{(k)} + \xi^{(k)} [\max(d_{ij}^H)^{(k)} - (d_{ij}^H)^{(k)}] \quad (10)$$

需要注意的是,式(10)中为初始匹配权重矩阵添加了遗忘因子:

$$\xi^{(k)} =$$

$$\begin{cases} 2.21 \cdot \exp(-0.6 \cdot \|error^{(k)}\|^2), & error^{(k)} > 1.32 \\ 1, & error^{(k)} \leq 1.32 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $k$ 表示迭代次数。其作用在于:在目标函数求解初期,由于匹配关系尚不明朗,总体误差偏大,遗忘因子接近0,如图4所示。因此求解过程依赖初始匹配权重矩阵提供的匹配关系。随着总体误差的减小,利用指数函数特性,遗忘因子逐渐增大直至1,目标函数求解会更多的依赖软分配矩阵。

为了在求解目标函数的过程中提升计算速度,本文将动态调整方法引入软分配矩阵 $\mathbf{M} = \{m_{ij}\}_{N \times M}$ 的构建,实现了对传统软分配算法的改进,如图5所示。在软分

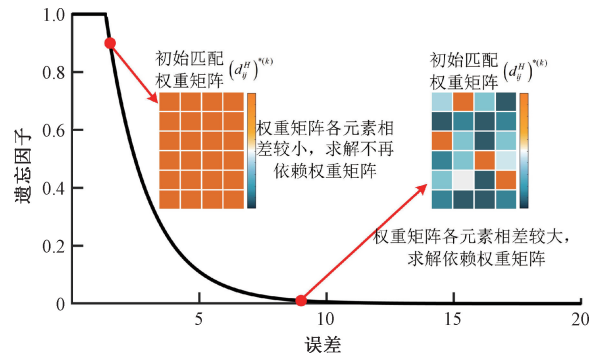


图4 遗忘因子示意图

Fig. 4 Diagram of the forgetting factor

配方法中,为了应对离群点,通常会为软分配矩阵设置松弛行和松弛列。当松弛行或松弛列中对应元素超过0.5时<sup>[11]</sup>,则证明在该次迭代中该元素对应的三维或二维点处于未匹配状态。因此,在检测到当前循环中总体误差若小于上次循环中的总体误差,则动态清除未匹配点所在的行或列,达到提升计算速度的效果。同时,初始匹配权重矩阵也随之调整。

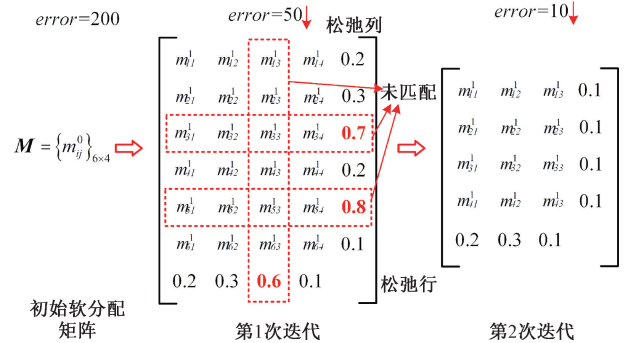


图5 改进软分配方法示意图

Fig. 5 Diagram of the improved soft allocation method

惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计算法的算法框架如图6所示。需要注意的是:在数据处理层中,目标函数的求解方法采用期望最大化方法进行迭代优化求解<sup>[12-13]</sup>。

## 3 实验验证

为了评估本文提出算法的有效性,本文搭建了如图7所示的实验系统进行实际实验测试。该系统利用高精度二维转台提供精确的运动参考。合作靶标上安装了30个坐标已知的红外LED和1个IMU(型号为MTI-100)。通过红外相机拍摄合作靶标的图像如图7(b)所示,仅有LED光斑可供提取。因此,基于图像纹理信息进行匹配的方法在这种测量环境下是无法使用的。相机、IMU和高精度转台的参数如表1所示。本文中所有

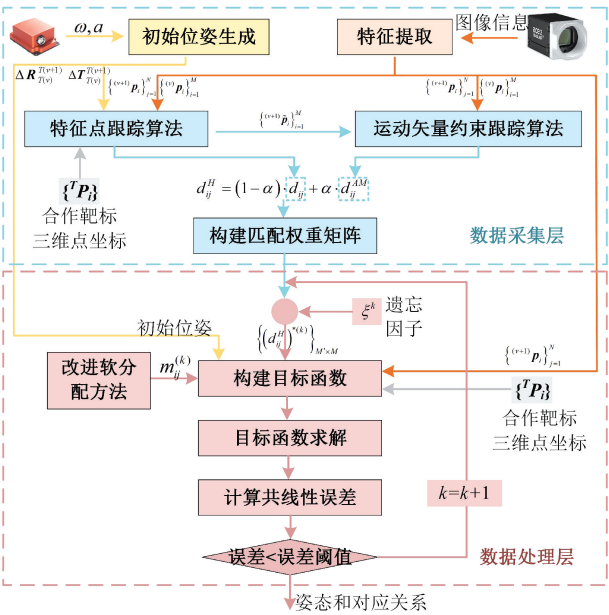
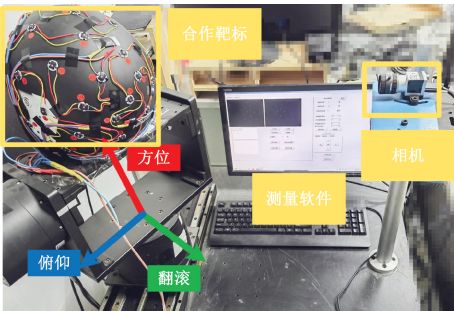
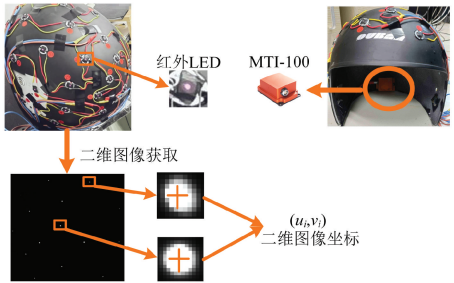


图 6 本文算法框架

Fig. 6 Algorithm framework of this article



(a) 测量系统  
(a) Measuring system



(b) 合作靶标组成及红外LED成像示意图

(b) Cooperative target composition and infrared LED imaging diagram

图 7 测量系统

Fig. 7 Measuring system

表 1 实验设备参数

Table 1 Experimental equipment parameters

| 设备   | 参数    | 数值                                         |
|------|-------|--------------------------------------------|
| 陀螺仪  | 零偏稳定性 | 10 deg/h                                   |
|      | 噪声密度  | 0.01 deg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$             |
| 加速度计 | 零偏稳定性 | 15 $\mu\text{g}$                           |
|      | 噪声密度  | 60 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$          |
| 相机   | 像元尺寸  | 3.45 $\mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ |
|      | 有效像素  | 2 048 px $\times$ 1 536 px                 |
| 转台   | 精度    | 10"                                        |

3.1 混合跟踪算法性能测试

将本文提出的混合跟踪算法与 IMU 辅助特征点跟踪 (IFPT) 方法进行对比。主要对比内容包括:评估两种算法在不同情况下的跟踪精度和计算效率。使用匹配率来表示跟踪成功率:

匹配率 =  $\frac{\text{正确匹配点数量}}{\text{点总数量}} \times 100\%$  (12)

为了充分测试跟踪算法的性能,本次测试中设置了不同的视觉采样间隔,用以模拟相机遮挡情况。具体实验结果如图 8 和表 2 所示。

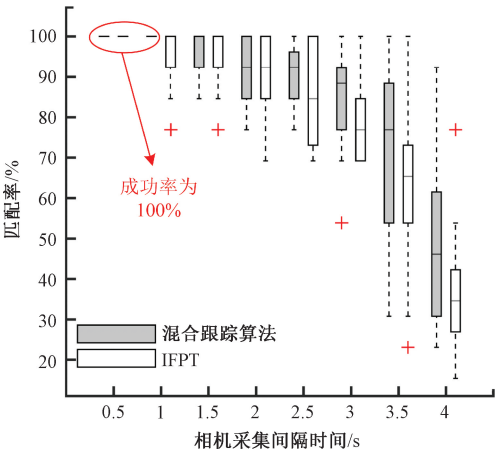


图 8 不同方法的追踪精度

Fig. 8 Tracking accuracy of different methods

表 2 不同追踪方法的耗时

Table 2 The time of different tracking methods

| 算法名称   | 平均运行时间/ms |
|--------|-----------|
| 混合跟踪算法 | 0.45      |
| IFPT   | 0.38      |

由图 8 可看出,两种方法的匹配率均随着相机遮挡时间(也可称采集间隔)的增加而降低。然而,由于引入了运动矢量约束,本文提出的混合跟踪算法表现出比

算法均在配备 2.3Ghz Intel Core i7-12700H CPU 的计算机上运行。

本文所有实验均在上述测量系统上进行,主要包括跟踪算法和 SPCD 算法的性能测试。

IFPT 算法更高的跟踪精度。在采集间隔时间高于 1.5 s 的情况下,混合跟踪算法的优越性尤为明显。但正因为引入了额外的约束模块,混合跟踪算法在耗时上要高于 IFPT,不过平均耗时仍然控制在 1 ms 以内。

3.2 SPCD 算法性能测试

为了确保公平性,本文将惯性辅助的初始位姿生成器用于为 SoftPosit 算法和 BlindPnP 算法提供良好的初始位姿。将其分别称为 IA-SoftPosit 和 IA-BlindPnP。本次测试主要对比本文算法和 IA-SoftPosit 算法、IA-BlindPnP 算法以及 IA-UW-SoftOI 算法<sup>[20]</sup>在不同旋转角度下的成功率、在不同相机遮挡时间下的成功率以及连续测量下的姿态估计精度。需要说明的是,本文仅将相对姿态估计误差在 10% 以下的估计结果认定为匹配成功。

1) 不同旋转角度下的成功率测试

在此测试中,主要研究 4 种 SPCD 算法在不同旋转角度下的匹配成功率。控制二维转台在  $[-60^{\circ}, 60^{\circ}]$  范围内沿着两个轴连续旋转来提供不同的旋转角度条件。各算法的匹配成功率如图 9 所示。本文算法的成功率在所有旋转范围内基本保持在 95% 左右,除了旋转角度在  $55^{\circ}$  左右的情况。相比之下,另外 3 种算法仅在旋转角度范围较小的情况下才能保持 95% 左右的成功率。IA-UW-SoftOI 和 IA-BlindPnP 的性能接近,均在  $[-30^{\circ}, 36^{\circ}]$  范围内保持 90% 左右成功率。其中 IA-BlindPnP 在大旋转角度的情况下性能表现更好。IA-SoftPosit 仅在  $[-5^{\circ}, 5^{\circ}]$  范围内的成功率超过 80%。

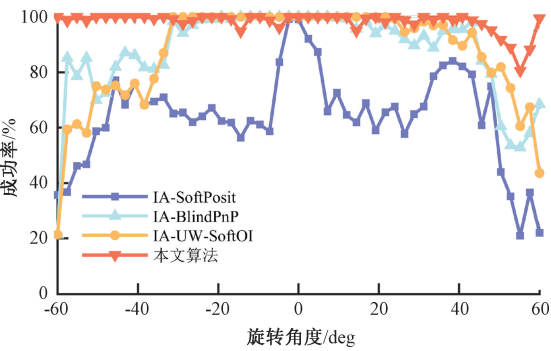


图 9 不同旋转角度下 SPCD 算法的成功率

Fig. 9 The success rate of each SPCD algorithm under different rotation angles

此外,表 3 列出了各算法的计算时间。3 种基于软分配的算法 (IA-BlindPnP 除外) 的运行时间量级相同,其中由于引入了改进软分配方法,本文算法的运行时间相对较短。

2) 不同相机遮挡时间下的成功率测试

为了验证各算法对惯性传感器误差的鲁棒性,本文设置了不同的相机遮挡时间。相机遮挡时间 (视觉采

表 3 不同 SPCD 算法的耗时

Table 3 Time consuming for different SPCD algorithms

| 算法名称         | 最大运行时间/ms     | 平均运行时间/ms    |
|--------------|---------------|--------------|
| IA-SoftPosit | 120. 71       | 21. 17       |
| IA-BlindPnP  | <b>77. 73</b> | <b>6. 65</b> |
| IA-UW-SoftOI | 126. 74       | 25. 63       |
| 本文算法         | 96. 42        | 16. 73       |

样间隔) 越长,预积分时间越长,相应的惯性误差会越大。因此,本次测试在如图 10 所示的运动轨迹的基础上进行了多次实验,每次实验的相机遮挡时间逐次增,实验结果如图 11 所示。

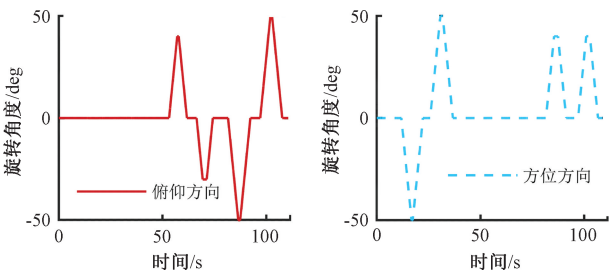


图 10 不同相机遮挡时间测试中的转台运动轨迹

Fig. 10 Motion trajectory of turntable in different camera occlusion time test

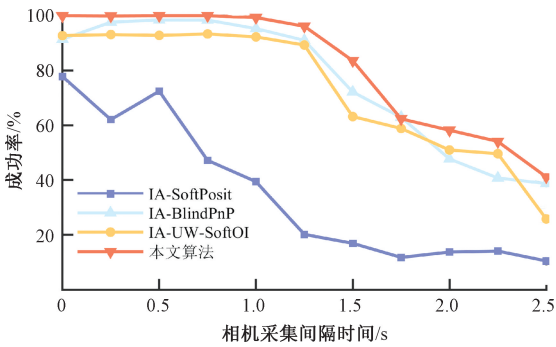


图 11 不同相机遮挡时间下 SPCD 算法的成功率

Fig. 11 The success rate of SPCD algorithm under different camera occlusion time

其中,IA-SoftPosit 算法对相机遮挡时间的变化最为敏感,匹配成功率下降明显。另外 3 种算法的匹配成功率变化较为相似,均在遮挡时间为 1.5 s 时大幅下降。其中本文算法在不同间隔时间下均优于其它算法。

3) 姿态估计精度测试

为了充分测试各算法的姿态估计精度,设置了包括单轴/双轴往返运动和单轴/双轴阶梯运动在内的多种运动模式 (如图 12 所示),并在运动过程中随机设置了 0~1.2 s 的相机遮挡时间。需要注意的是,由于转台仅有两

个自由度,因此此次测试主要关注俯仰和方位方向的姿态估计精度。

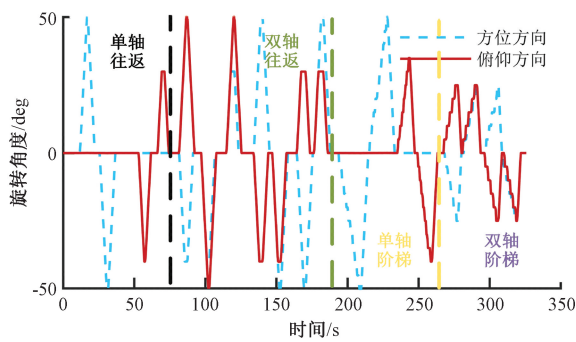


图 12 姿态估计精度测试中的转台运动轨迹  
Fig. 12 Motion trajectory of turntable in attitude estimation accuracy test

如图 13 所示展示了各算法姿态估计误差的概率分布。本文算法在保持较高的成功率的同时,也有着最高的姿态估计精度,如图 13 (d)。图 13 (b) 显示 IA-BlindPnP 算法虽然也有着较高的成功率,但有相当一部分误差落于 $[-0.2^{\circ}, 0.2^{\circ}]$ 区间之外,相比于其它算法的姿态估计精度较低。从图 13 (c) 看出 IA-UW-SoftOI 姿态估计精度与本文算法相当,但成功率较低。图 13 (a) 表现出 IA-SoftPosit 算法相比于其它算法总体性能较弱。由此可见,混合追踪算法和改进软分配方法的引入提高了未知对应关系的姿态估计算法的成功率的同时,还保证了较高的姿态估计精度。

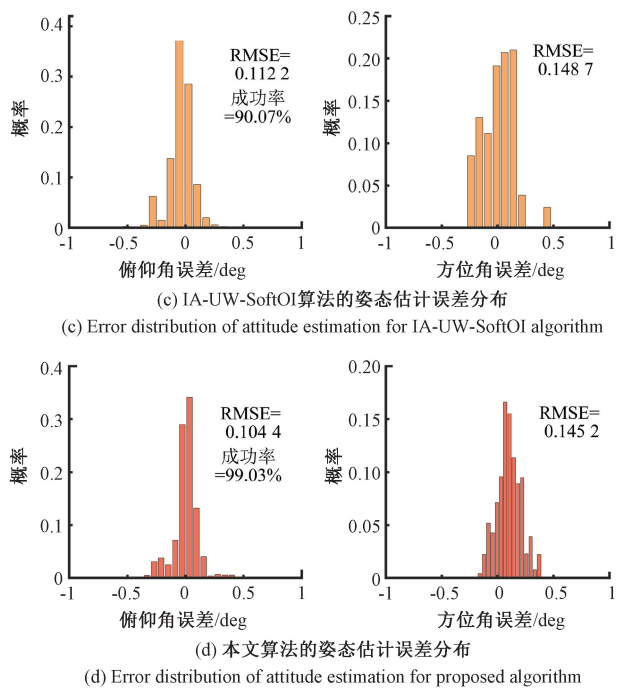


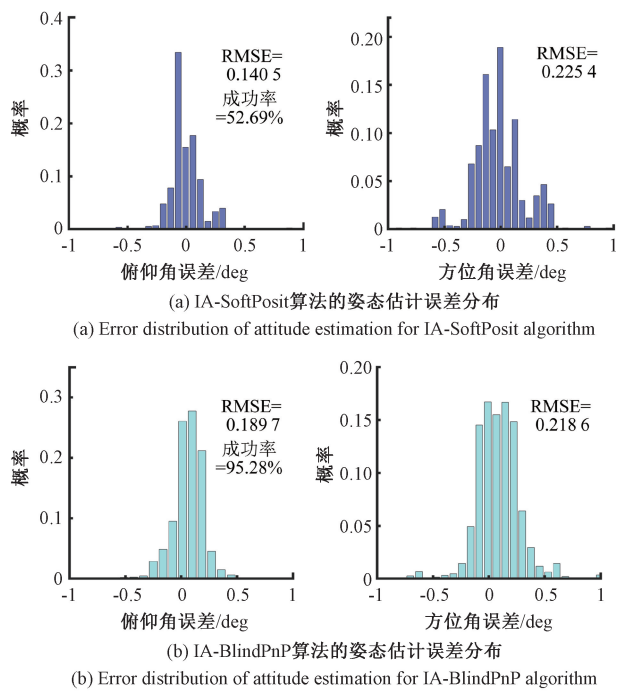
图 13 姿态估计误差的概率分布  
Fig. 13 Probability distribution of attitude estimation error

4 结 论

本文针对特征点对应关系未知的姿态估计问题,提出了 1 种基于惯性辅助跟踪的未知对应姿态估计方法。该方法利用惯性信息和序列图像信息提出了 1 种混合跟踪方法,在数据采集层面构建了二维和三维点集的初始匹配关系。而后基于该匹配关系建立优化目标函数,并结合改进软分配方法实现点集匹配和姿态估计的同时获取。实际实验数据表明,本文算法在保持较高姿态估计精度的同时具有 99% 的成功率。并且在不同姿态下和不同相机遮挡时间下均具有较高的稳定性,能够满足不同使用情况的需求。

参考文献

[ 1 ] 刘佳,徐闯,陈大鹏,等. 基于 Marker-SLAM 的视触觉增强现实交互算法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(8): 26-38.  
LIU J, XU CH, CHEN D P, et al. Visuo-haptic augmented reality interaction algorithm based on Marker-SLAM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(8): 26-38.  
[ 2 ] DONADI I, PRETTO A. KVN: Keypoints voting network with differentiable ransac for stereo pose estimation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(4):



- 3498-3505.
- [ 3 ] 孙长库,何晶晶,王鹏,等. 动载体目标物姿态视觉与双惯性组合测量方法综述[J]. 电光与控制,2023,30(2):1-7.
- SUN CH K, HE J J, WANG P, et al. A survey on vision and dual inertial sensors integration based attitude measurement of target on mobile carrier[J]. Electronics Optics & Control, 2023,30(2):1-7.
- [ 4 ] 陶孟卫,姚宇威,元海文,等. 无人机自主降落视觉标识设计及位姿测量方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(5):155-164.
- TAO M W, YAO Y W, YUAN H W, et al. Visual target design and pose measurement method for UAV autonomous landing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(5):155-164.
- [ 5 ] REN R ZH, ZHANG L CH, LIU L, et al. Two AUVs guidance method for self-reconfiguration mission based on monocular vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(8):10082-10090.
- [ 6 ] YUAN J, ZHU SH H, TANG K T, et al. ORB-TEDM: An RGB-D SLAM approach fusing orb triangulation estimates and depth measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:5006315.
- [ 7 ] LI L, WANG P, WANG L R, et al. DSCNet: Lightweight and efficient self-supervised network via depthwise separable cross convolution blocks for speckle image matching[J]. Optics Express, 2024, 32(6):107105-10731.
- [ 8 ] 孙丽君,李石,陈天飞. 基于仿射变换和均值像素法的环状编码点鲁棒识别[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):71-80.
- SUN L J, LI SH, CHEN T F. Robust recognition of circular coded point based on affine transformation and average pixel method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(9):71-80.
- [ 9 ] 胡浩,魏斌,梁晋,等. 大视场远距离视觉测量系统的分步标定[J]. 光学精密工程,2022,30(4):478-488.
- HU H, WEI B, LIANG J, et al. Two-step calibration for vision measurement system with large field of view and high depth[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(4):478-488.
- [ 10 ] 高豆豆,董登峰,邱启帆,等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. 光学精密工程,2024,32(7):976-986.
- GAO D D, DONG D F, QIU Q F, et al. Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2024,32(7):976-986.
- [ 11 ] DAVID P, DEMENTHON D, DURAISWAMI R, et al. SoftPOSIT: Simultaneous pose and correspondence determination[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(3):259-284.
- [ 12 ] ZHOU H Y, ZHANG T, LU W N. Vision-based pose estimation from points with unknown correspondences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(8):3468-3477.
- [ 13 ] DONG H, SUN CH K, ZHANG B SH, et al. Simultaneous pose and correspondence determination combining softassign and orthogonal iteration[J]. IEEE Access, 2019, 7:137720-137730.
- [ 14 ] MIN ZH, WANG J L, PAN J, et al. Generalized 3-d point set registration with hybrid mixture models for computer-assisted orthopedic surgery: From isotropic to anisotropic positional error[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(4):1679-1691.
- [ 15 ] MORENO-NOGUER F, LEPETIT V, FUA P. Pose priors for simultaneously solving alignment and correspondence[C]. 10th European Conference on Computer Vision (ECCV), 2008:405-418.
- [ 16 ] YANG H W, WANG F, LI ZH, et al. Simultaneous pose and correspondence estimation based on genetic algorithm[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(11):828241.
- [ 17 ] 王平,付辉,徐贵力. 基于旋转搜索的相机位姿估计和对应点匹配[J]. 航空学报,2023,44(2):296-307.
- WANG P, FU H, XU G L. Camera pose estimation and corresponding points matching based on rotation search[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(2):296-307.
- [ 18 ] WANG CH, LIU Y L, WANG Y R, et al. Efficient and outlier-robust simultaneous pose and correspondence determination by branch-and-bound and transformation decomposition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 44(10):6924-6938.
- [ 19 ] LI X Y, LIU Y L, XIA Y, et al. Fast and deterministic (3+1) DOF point set registration with gravity prior[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 199:118-132.

[20] LI Y, SUN CH K, DONG H, et al. IMU-assisted uncertainty-weighted attitude estimation algorithm from noncorresponding points [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6) :8281-8292.

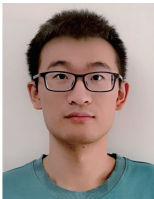
[21] GUAN Q, WEI G L, WANG L CH, et al. A novel feature points tracking algorithm in terms of IMU-aided information fusion [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(8) :5304-5313.

[22] ZHU Y Z, CAO Z Y, YANG J H, et al. Fast multi-feature tracking method based on tightly coupled sensors [ J ]. Measurement, 2023, 221 :113528.

[23] JIANG X Y, LI H, CHEN CH Q, et al. DDIO-mapping: A fast and robust visual-inertial odometry for low-texture environment challenge [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 20(3) :4418-4428.

[24] GUAN Q, WEI G L, WANG Y, et al. A dual-mode automatic switching feature points matching algorithm fusing IMU data [ J ]. Measurement, 2021, 185 :110043.

作者简介



李岳,分别于 2018 年、2021 年于天津大学获得学士学位和硕士学位,现为天津大学博士研究生,主要研究方向为视觉惯性融合姿态测量。  
E-mail: liyue\_2021@tju.edu.cn

Li Yue received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Tianjin University in 2018 and 2021,

respectively. He is currently a Ph.D. candidate at Tianjin University. His main research interest is vision-inertial fusion attitude measurement.



孙长库,1989 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994 年于俄罗斯圣彼得堡精密机械与光学学院获得博士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为激光及光电测试技术和三维数字化测量技术。  
E-mail: sunck@tju.edu.cn

Sun Changku received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1989, and received his Ph.D. degree from Saint Petersburg Precision Mechanics and Optics Institute, Russia in 1994. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include laser and photoelectric testing technology and three dimensional digital measurement technology.



王鹏(通信作者),分别在 2004 年、2008 年于天津大学获得学士学位和博士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为激光及光电测试技术和三维数字化测量技术。  
E-mail: wang\_peng@tju.edu.cn

Wang Peng (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Tianjin University in 2004 and 2008, respectively. Now he is a professor at Tianjin University. His main research interests include laser and photoelectric testing technology and three dimensional digital measurement technology.