

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904777

# 基于单目视觉里程计的纯姿态测量算法设计\*

唐伟杰, 陈松林

(哈尔滨工业大学航天学院控制与仿真中心 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对不适用编码器等接触式旋转角度测量器件的场景设计一种基于单目视觉里程计的纯姿态测量算法,具有成本低、精度较好、不漂移的优点。为解决纯旋转条件下的应用问题,以经典单目视觉里程计算法为基础,通过给定深度,直接初始化,修改姿态的计算和优化算法,解决了其在纯旋转条件下无法工作的问题;针对摄像头无法精确安装于被测物体旋转中心的实际问题,建立了安装偏置模型,改进姿态测量算法,有效地解决安装偏置问题,同时提出一种离线测量方案,实现了对安装偏置参数的辨识。用高精度两轴转台验证算法的有效性。实验结果表明该算法在使用低成本摄像头时仍具有良好的综合性能,多自由度周角动态测量误差在 $0.5^\circ$ 以内。

**关键词:**视觉测量;姿态测量;视觉里程计;纯旋转;安装偏置

**中图分类号:** TP391 O439 TH72      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design of pure attitude measurement algorithm based on monocular visual odometer

Tang Weijie, Chen Songlin

(Control and Simulation Center, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Aiming at the scenes where contact rotation angle measurement devices such as decoding device are not applicable, a pure attitude measurement algorithm based on monocular visual odometer is designed, which possesses the advantages of low cost, good precision and no drift. In order to solve the application problem in pure rotation condition, based on the classical monocular visual odometer algorithm, adopting the methods of assuming depth, direct initialization, modifying attitude calculation and optimizing algorithm, the problem that the camera cannot work in pure rotation condition is solved. Aiming at the practical problem that the camera cannot be accurately installed on the rotation center of the measured object, an installation bias model is established and the attitude measurement algorithm is improved, which effectively solve the installation bias problem. Meanwhile, an off-line measurement scheme is proposed, with which the installation bias parameter identification is achieved. The effectiveness of the algorithm was verified with a high-precision two-axis turntable. The experiment results show that the proposed algorithm still possesses good comprehensive performance even using low-cost cameras. The multi-degree-of-freedom dynamic angle measurement error is within  $0.5$  degree.

**Keywords:** visual measurement; attitude measurement; visual odometer; pure rotation; installation bias

## 0 引言

姿态测量广泛应用于机械、光学、航空、航天、航海等各个领域。根据需求可以为分静态测角与动态测角;按照测角范围可分为整周角测量与小角度测量;按照装置安装要求可分为直接方法与间接方法。直接方法主要包

括机械式、电磁式和光学式,光栅、光电编码器、感应同步器等是常用的测角装置,不过在气浮转台等无轴设备上无法安装使用。间接方法将陀螺仪、磁力计、倾角传感器、差分GPS等传感器安装在被测物体上随之旋转,利用计算机解算物体姿态,但这几种传感器误差较大。史露强等<sup>[1]</sup>、杜瑾等<sup>[2]</sup>用多传感器融合方法设计的低成本姿态测量系统,都难以将误差控制在 $1^\circ$ 以内。

收稿日期:2019-02-26      Received Date:2019-02-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(61427809)项目资助

随着摄像机性能的提高、成本的降低和计算机运算能力的提高,利用视觉进行角度测量越来越受欢迎。传统的视觉姿态测量有两种思路:1)摄像机固定,拍摄被测物体;2)摄像机安装在被测物体上随之转动,拍摄环境中的固定靶标。第1类方法如中科院长春光机所<sup>[3]</sup>在两个观测站安装的已标定在世界坐标系中位姿的两台高速摄像机测量导弹中轴线的俯仰角和方位角,测量误差在 $0.2^\circ$ 以内。室内应用中,哈工大<sup>[4]</sup>基于双目视觉对火箭喷管模型进行姿态测量,三轴姿态角误差在 $0.4^\circ$ 内。苏建东等<sup>[5]</sup>、劳达宝等<sup>[6]</sup>将标定好的靶标(棋盘格/立体靶标)安装在被测物体上,用位姿已知的固定相机拍摄靶标解算物体姿态,取得了 $0.5^\circ/0.8^\circ$ 内的精度;但在物体上安装靶标限制了这种方法的应用,且角度较大时相机难以拍到靶标正面。哈工大仿真中心<sup>[7]</sup>在运动目标上安装光束,利用高速摄像机记录光束投影光斑在接收平面上的位置,根据光束在世界坐标系和目标体坐标系中的方向向量求解目标姿态,测量误差小于 $1'(1\sigma)$ 。这种方法巧妙地放大了姿态变化,实现了较高的精度,但对设备、场地和标定有较高的要求。第2类方案应用较少。美国JPL实验室<sup>[8]</sup>通过在室内屋顶建立LED星图来确定姿态。该类方法存在环境设置要求,且对相机品质和标定参数准确度要求很高。此外,视觉与惯性<sup>[9]</sup>或激光<sup>[10]</sup>融合测姿也被应用。

随着机器人学中实时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术和自动驾驶技术的发展,视觉里程计的研究受到了越来越多的关注<sup>[11]</sup>。视觉里程计(visual odometer, VO)是SLAM的核心,它通过分析相机在运动中拍摄的若干帧图像,利用相同路标在不同图像上投影点的位置解算出相机的位姿运动和路标点相对相机的坐标。20世纪80年代,斯坦福的Moravec<sup>[12]</sup>提出了视觉里程计的流程:特征检测、特征匹配、运动估计。Nistér等<sup>[13]</sup>使用随机采样一致性方法消减误匹配点在几何计算中的影响,并给出了可实时处理的单目/双目视觉里程计实现方案,成为特征点法视觉里程计的基本结构。2015年Mur-Artal等<sup>[14-15]</sup>提出了开源的单目ORB-SLAM(oriented FAST and rotated BRIEF-SLAM),并于2016年拓展为支持双目相机和深度传感器的ORB-SLAM2,它是目前综合性能最好的视觉SLAM系统之一,本文是以ORB-SLAM为算法框架。视觉里程计相比于传统的视觉方法的优点是利用的视觉信息更多,有利于减小误差;而且它只需要一个摄像头,不需要设计周围标志物和额外的机构;它还有利用多传感器或已知环境信息的拓展<sup>[16]</sup>。视觉里程计的缺点是计算量较大,且没有针对纯姿态运动的设计。由于通用视觉里程计需要相机平移产生视差来计算路标点深度,所以无法用于相机纯姿态运动情况,相机运动范围不大时也不适用。

目前用视觉里程计进行纯姿态测量的研究较少。Labrosse<sup>[17]</sup>基于全景相机用视觉里程计方法测量单自由度旋转。Montiel等<sup>[18]</sup>基于单目相机用视觉里程计测量旋转,徐伟平<sup>[19]</sup>等对其进行了改进,但是他们的方法没有考虑相机安装偏置问题和绝对姿态获取方法,也没有对其精度进行有效的检验。

本文根据实际需求,基于视觉里程计技术设计了一种动态全方向整周角低成本间接测量方案,解决视觉里程计无法用于纯姿态运动的问题,解决安装偏置问题,可应用于气浮转台姿态测量、火箭喷管方向测量等诸多场景。

## 1 纯姿态测量算法设计

### 1.1 问题描述及总体方案设计

本文研究的对象是某一点受约束的刚体运动测量问题,该刚体上的某一点不发生位移(如受球形轴承,万向节等结构约束的刚体),刚体只能绕该点做3个姿态的旋转运动,该点即为旋转中心。这种情况下通常只关心刚体的姿态测量问题,因为刚体上任意一点的平移,都可以由姿态信息解算出来。被测物体作纯姿态运动,且不便使用接触式测量,需要求解其相对零位坐标系的姿态。可将相机安装在被测物体上随之旋转,分析所拍摄的环境图像序列来计算相机位姿变化,从而计算被测物体姿态。相机可能无法安装在物体旋转中心上,且其相对旋转中心的位置和姿态通常无法直接测量。为解决以上问题本文设计了如下姿态测量方案,其具体工作流程如图1所示。方案核心为姿态测量算法,考虑到实际使用需求,设计了从初次使用开始的一系列流程和算法。

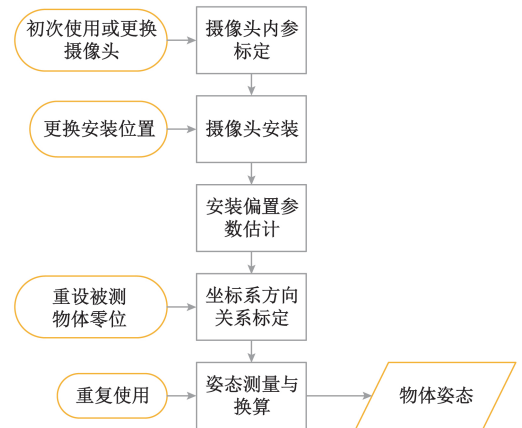


图1 姿态测量方案

Fig.1 Attitude measurement scheme

其中,姿态测量算法采用基于优化的特征点法视觉里程计。所采用的视觉里程计通过ORB特征确定相同

路标点在不同图像中的对应像素,用多组对应关系解算出路标点相对相机的坐标和相机的位姿变换。调整相机位姿与路标点坐标让各点与像素点尽可能满足投影关系,使各路标点投影到图像上的像素坐标与对应的特征点的像素坐标的均方误差最小,从而得到最优的相机位姿。即求解如下非线性优化问题:

$$\operatorname{argmin}_{T_j, P_i} \frac{1}{2} \sum_j \sum_i \left\| \mathbf{u}_{ji} - \frac{1}{z_{ji}} \mathbf{K} T_j \mathbf{P}_i \right\|^2 \quad (1)$$

式中:  $T_j$  为第  $j$  帧时相机的位姿;  $P_i$  为第  $i$  个路标点在世界坐标系(首帧相机坐标系)下的坐标;  $\mathbf{u}_{ji}$  为第  $i$  个路标点在第  $j$  帧图像中的对应像素;  $z_{ji}$  为第  $i$  个路标点相对第  $j$  帧时相机的深度;  $\mathbf{K}$  为相机内参矩阵。本文相机采用针孔模型。

为应用单目视觉里程计技术实现纯姿态的测量,还需要改进初始化方法和目标函数,并针对摄像头安装位置不在旋转中心的问题给出相应的解决方法。还要设计处理更改摄像头安装位置的方法,若需要绝对姿态,还要设计相机测量数据向被测物体坐标系投影的方法。

## 1.2 基于单目视觉里程的纯姿态测试算法设计

为方便推导,首先假设相机安装于被测物体旋转中心,即相机的光心与旋转中心重合,或物体单自由度旋转而相机光心在转轴的轴线上。

### 1) 帧间旋转估计

纯旋转情况下视觉里程计算法初始化时,由于不存在视差,故不适用对极约束。考虑到纯旋转情况下,单应性矩阵退化为旋转矩阵,因此可以用单应性约束估计初始旋转。已知初始两帧匹配好的像素点对  $(U_1, U_2)$ , 求解两帧间相对旋转矩阵  $\mathbf{R}$ :

$$\mathbf{P}_{e1} = \mathbf{R} \mathbf{P}_{e2} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{P}_{e_j} = [x_{e_j} \ y_{e_j} \ z_{e_j}]^T$  为同一物点在两幅图像的相机坐标系中的坐标。

然后将  $\mathbf{P}_{e_j}$  先后转换到归一化图像坐标系  $\mathbf{X}_i([x \ y \ 1]^T)$ 、像素坐标系  $\mathbf{U}_i([u \ v \ 1]^T)$ , 再将一帧图上用于计算的所有特征点的像素坐标归一化,即经过线性变换  $N_i$  得到均值为 0 方差为 1 的坐标序列(便于超定方程的计算), 最终得到式(7)。相应的变换关系为:

$$z_{e1} \mathbf{X}_1 = \mathbf{R} z_{e2} \mathbf{X}_2 \quad (3)$$

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{U}_1 = \lambda \mathbf{R} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{U}_2, \quad \lambda = z_{e2}/z_{e1} \quad (4)$$

$$N_1 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{U}_1 = \lambda \mathbf{R} N_2 \mathbf{K}^{-1} \mathbf{U}_2 \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_1 = \lambda \mathbf{R}' \mathbf{U}_2, \quad \mathbf{R}' = \mathbf{K} N_1^{-1} \mathbf{R} N_2 \mathbf{K}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{U}_1 \times \mathbf{R}' \mathbf{U}_2 = 0 \quad (7)$$

匹配的点多于五对就能组建一个超定方程,用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)求解  $\mathbf{R}'$ 。再根据  $\mathbf{R}' = \mathbf{K} N_1^{-1} \mathbf{R} N_2 \mathbf{K}^{-1}$  关系获取旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 。求解过程中

$\mathbf{R}$  的正交性没有约束,需要再对  $\mathbf{R}$  进行 SVD 分解,把奇异值矩阵替换为单位阵,重组为  $\mathbf{R}$ , 使  $\mathbf{R}$  为正交矩阵。 $-\mathbf{R}$  也是方程的解,若路标点坐标经旋转矩阵变换到相机坐标系的  $Z$  坐标为负,说明解出的为  $-\mathbf{R}$ , 需对解取反。

### 2) 姿态测量优化

与通用的视觉里程计的优化类似,定义纯姿态运动下的目标函数为:

$$\operatorname{argmin}_{R_j, P_i} \frac{1}{2} \sum_j \sum_i \left\| \mathbf{u}_{ji} - \frac{1}{z_{ji}} \mathbf{K} \mathbf{R}_j \mathbf{P}_i \right\|^2 \quad (8)$$

其中  $\mathbf{R}_j$  为第  $j$  帧时相机的姿态。优化变量为点的世界坐标  $P$  和相机姿态对应的旋转李代数  $\phi$ , 第  $i$  点与第  $j$  帧对应的误差项  $\mathbf{e}_{ij}(P_i, \phi_j) = \mathbf{u}_{ji} - \frac{1}{z_{ji}} \mathbf{K} \mathbf{R}_j(\phi_j) P_i$ 。需要  $\mathbf{e}$  关于  $P$  和  $\phi$  的偏导数组建 Jacobi 矩阵(对  $\phi$  采用左乘扰动的微分方法), 求解方法与通用视觉里程计相似, 此处仅给出结论:

$$\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \delta \phi} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial \delta \phi} = - \begin{bmatrix} \frac{f_x}{z_c} & 0 & -\frac{f_x x_c}{z_c^2} \\ 0 & \frac{f_y}{z_c} & -\frac{f_y y_c}{z_c^2} \end{bmatrix} (-P_c^\wedge) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial P_w} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial P_w} = - \begin{bmatrix} \frac{f_x}{z_c} & 0 & -\frac{f_x x_c}{z_c^2} \\ 0 & \frac{f_y}{z_c} & -\frac{f_y y_c}{z_c^2} \end{bmatrix} \mathbf{R} \quad (10)$$

式中:  $^\wedge$  表示向量的反对称矩阵表示;  $[f_x \ f_y]$  为相机焦距;  $P_c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$  为该误差项中点在相机坐标系下的坐标。

由 Levenberg-Marquardt 法解出  $P$  和  $\phi$  的迭代增量。纯旋转姿态优化时相机坐标系下原点指向  $P$  的方向会被优化但深度不会被调整。具体算法如下:初始化产生首批路标点,构建初始地图,路标点的世界坐标系坐标设为其在初始帧的归一化图像坐标系坐标(即设深度为 1 的相机坐标系坐标);路标点在后续帧的投影计算方法设为旋转投影;地图扩展,新的关键帧与之前关键帧的匹配特征若无对应路标点,直接建立新路标点,其世界坐标定义为  $P_w = \mathbf{R}_{c1}^{-1} \mathbf{X}_c$ ,  $\mathbf{X}_c$  为在新的关键帧的归一化图像坐标系坐标。具体的算法流程如图 2 所示。

### 1.3 考虑安装偏置的改进算法

实际应用中,在相机安装时无法保证相机光心与被测物体的旋转中心重合。当两者距离相比于环境尺度较小时,1.2 节算法也适用,但当两者距离不可忽略,如光心与物体旋转中心相距 0.1 m 而环境为室内(3 m 左右)时,测量误差较大。因此有必要设计一种能够适应实际情况的测量方案。

#### 1) 考虑相机安装偏置的旋转测量建模

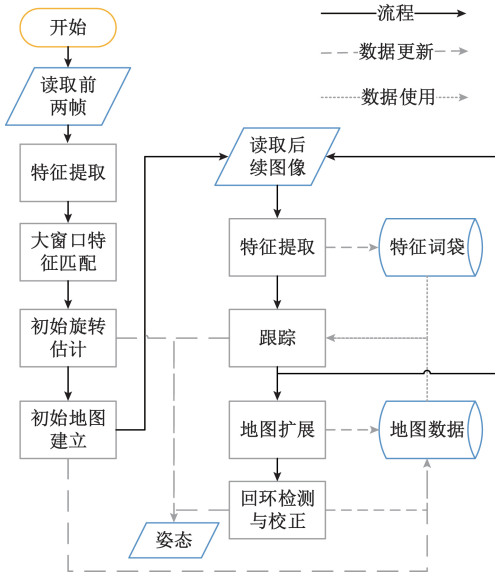


图2 视觉里程计旋转测量算法

Fig.2 Rotation measurement algorithm of visual odometer

如果相机光心与被测物体旋转中心不重合,在被测物体做纯旋转运动时,相机则同时会做旋转和平移运动。不过由于相机与被测物体固连,其平移运动完全是受限的,完全可以由三个旋转运动参数描述。

经分析,利用旋转运动参数和相机坐标系中被测物体旋转中心坐标可以完全描述该受约束运动。如图3所示,相机坐标系原点为 $O_c$ ,被测物体旋转中心为 $O_r$ ,三维向量 $d(O_r, O_c)$ 作为约束参数。在被测物体旋转过程中,两个坐标系同时旋转,但相对位置关系不变,即 $d$ 为固定参数(此处规定被测物体坐标系定义为与相机坐标系方向相同,并非物体零位坐标系)。

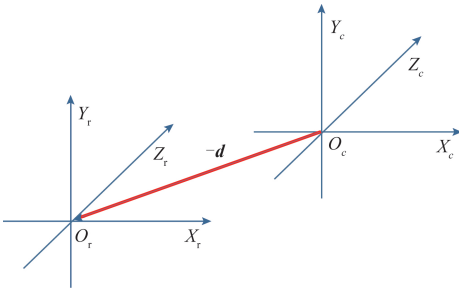


图3 坐标系和安装偏置定义

Fig.3 Definition of the coordinate system and installation bias

推导该约束下的相机位姿变换关系, $P_r, P_c$ 分别为被测物体坐标系和相机坐标系下同一物点的坐标,数字下标表示前后两帧, $R$ 为被测物体的旋转矩阵:

$$P_{r,1} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ \theta^T & I \end{bmatrix} P_{r,2} \quad (11)$$

$$P_{r,1} = \begin{bmatrix} I & d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} P_{c,1}, P_{r,2} = \begin{bmatrix} I & d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} P_{c,2} \quad (12)$$

$$P_{c,1} = \begin{bmatrix} R & (R-I)d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} P_{c,2} \quad (13)$$

以第1帧相机坐标系为世界坐标系,可用式中的矩阵表示后续帧的位姿矩阵。

类似的,有约束情况下求解如下非线性优化问题:

$$\operatorname{argmin}_{\phi_i, P_i} \frac{1}{2} \sum_j \sum_i \left\| u_{ji} - \frac{1}{z_{ji}} K T(\phi_j, d) P_i \right\|^2 \quad (14)$$

推导 Jacobi 矩阵,设当被测物体旋转矩阵左乘扰动 $\Delta R$ 即 $R_2 = \Delta R R_1, \Delta R = R_2 R_1^T$ 时,相应的相机位姿变换矩阵扰动为 $\Delta T$ ,有:

$$T_2 = \Delta T T_1$$

$$\Delta T = \begin{bmatrix} R_2 & (R_2 - I)d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^T & (R_1^T - I)d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \Delta R & (\Delta R - I)d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(15)用李代数表示,再求导可得:

$$\Delta T = \begin{bmatrix} \exp(\delta\phi^\wedge) & (\exp(\delta\phi^\wedge) - I)d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} \approx$$

$$\begin{bmatrix} I + \delta\phi^\wedge & \delta\phi^\wedge d \\ \theta^T & I \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial \delta\phi} = \lim_{\delta\phi \rightarrow 0} \frac{\Delta T T P_w - T P_w}{\delta\phi} =$$

$$\lim_{\delta\phi \rightarrow 0} \frac{\begin{bmatrix} \delta\phi^\wedge & \delta\phi^\wedge d \\ \theta^T & \theta \end{bmatrix} T P_w}{\delta\phi} =$$

$$\lim_{\delta\phi \rightarrow 0} \frac{\begin{bmatrix} \delta\phi^\wedge P_c + \delta\phi^\wedge d \\ \theta^T \end{bmatrix}}{\delta\phi} = - (P_c + d)^\wedge \quad (17)$$

其中 $P_c + d$ 恰与被测物体坐标系中物点坐标相等。于是 Jacobi 矩阵的位姿部分:

$$\frac{\partial e}{\partial \delta\phi} = \frac{\partial e}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial \delta\phi} = - \begin{bmatrix} \frac{f_x}{z_c} & 0 & -\frac{f_x x_c}{z_c^2} \\ 0 & \frac{f_y}{z_c} & -\frac{f_y y_c}{z_c^2} \end{bmatrix} (-P_c - d)^\wedge \quad (18)$$

Jacobi 矩阵的路标点部分 $\left(\frac{\partial e}{\partial P_w}\right)$ 与1.2节中算法一致。该情况下路标点深度也会被优化但因视差小而不精确。

算法需要事先获取参数 $d$ ,修改路标点在后续帧的投影计算方法为考虑 $d$ 的旋转投影(式(13));地图扩展时,新的关键帧与之前关键帧的匹配特征若无对应路标点,直接建立新路标点,其坐标定义为 $P_w = z_w R_{cw}^{-1} X_c +$

$(\mathbf{R}_{cw}^{-1} - \mathbf{I})\mathbf{d}$ , 其中  $z_m$  为人为估计的场景平均深度。算法其余部分与 1.2 节及图 2 一致。

2) 安装偏置的估计

由于被测物体旋转中心与摄像头光心都难以直接测量, 因此希望能用摄像头采集的视觉信息计算出安装偏置参数。考虑引入靶标, 离线估计安装偏置参数如图 4 所示。

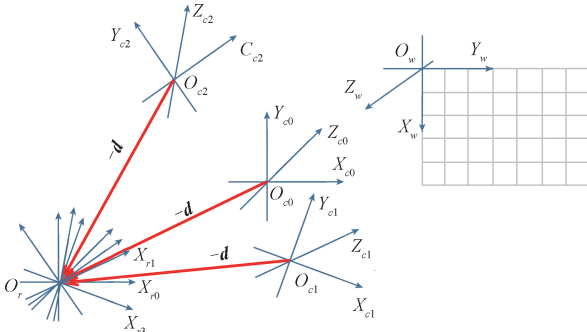


图 4 安装参数估计方法示意图

Fig.4 Schematic diagram of installation parameter estimation method

类似于式 (15), 帧间相对位姿矩阵也满足

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & (\mathbf{R} - \mathbf{I})\mathbf{d} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

的形式。固定一个标定板, 以标定板坐标系为世界坐标系, 有:

$$\mathbf{T}_{c1,w} \mathbf{T}_{c2,w}^{-1} = \mathbf{T}_{c1,c2} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{1,2} & (\mathbf{R}_{1,2} - \mathbf{I})\mathbf{d} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (19)$$

若已知各帧对标定板坐标系的位姿, 可计算其相对

位姿矩阵, 设为  $\mathbf{T}_{c1,w} \mathbf{T}_{c2,w}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{v} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix}$ , 则有:

$$(\mathbf{M} - \mathbf{I})\mathbf{d} = \mathbf{v} \quad (20)$$

$$[\mathbf{M} - \mathbf{I} \quad \mathbf{v}] \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

利用多幅图像建立超定方程并求解, 即可获取安装参数  $\mathbf{d}$ 。注意需要至少 2 次不同自由度的旋转, 否则矩阵将退化。

具体步骤如下: 相机安装后, 设定被测物体在一定角度范围内旋转 (2 自由度以上), 将标定板置于适当距离, 使标定板在相机旋转过程中保持在视场内。多次观测, 检测棋盘格, 用多点透视算法 (perspective n point, PnP) 计算相机相对标定板的位姿矩阵, 计算多帧之间的相机相对位姿矩阵, 建立超定方程求解。

本实验中标定板长 0.3 m, 使用归一化焦距 840 pixel、分辨率 640×480 的相机, 距离标定板 1.5 m, 作 40° 范围的旋转, 能保证标定板在相机旋转过程中在视场内。采集了不同姿态下的 20 幅图像。

1.4 坐标系关系辨识

视觉里程计算法获得的姿态是相机相对于初始帧相机坐标系的姿态。如果需要绝对姿态, 即定义物体的某个姿态为零位, 并定义坐标轴, 求物体旋转后相对于零位坐标系的姿态, 那么需要确定初始相机坐标系与零位坐标系的关系。

1.3 节辨识出的安装参数是相机与旋转中心的关系, 安装之后不变; 而坐标轴方向的关系会因为被测物体零位的重新定义而改变, 故安装之后及每次改变被测物体零位定义之后都需要重新计算初始相机坐标系与零位坐标系之间的关系。

定义以旋转中心为原点, 零位时被测物体三轴方向为坐标轴方向, 建立固连于被测物体上的坐标系  $X_c$ , 在零位时与被测物体零位坐标系相同, 随被测物体转动。只考虑旋转角度测量, 对于无穷远点  $\mathbf{P}$ , 有:

$$\mathbf{P}_{z0} = \mathbf{R}_{z0,z1} \mathbf{P}_{z1} \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_{c0} = \mathbf{R}_{c0,c1} \mathbf{P}_{c1}$$

式中:  $\mathbf{R}_{z0,z1}$  为被测物体自身测量的旋转矩阵;  $\mathbf{R}_{c1,c0}$  为相机测算的旋转矩阵。而点在物体坐标系和相机坐标系上的坐标满足:

$$\mathbf{P}_{ci} = \mathbf{R}_{ci} \mathbf{P}_{zi} \quad (22)$$

$$\mathbf{R}_{c0,c1} \mathbf{R}_{cz} = \mathbf{R}_{cz} \mathbf{R}_{z0,z1} \quad (23)$$

用四元数表示为:

$$\mathbf{q}_{c0,c1} \circ \mathbf{q}_{cz} = \mathbf{q}_{cz} \circ \mathbf{q}_{z0,z1} \quad (24)$$

$$[\mathbf{M}_L(\mathbf{q}_{c0,c1}) - \mathbf{M}_R(\mathbf{q}_{z0,z1})] \mathbf{q}_{cz} = \mathbf{0}$$

式中:  $\mathbf{M}_L, \mathbf{M}_R$  分别代表四元数的左乘矩阵和右乘矩阵。建立多组关系, 解得物体零位坐标系和相机初始坐标系的相对姿态  $\mathbf{q}_{cz}$ 。

2 实验验证

实验使用 640×480 pixels, 帧率 30 Hz 的 SUNTECH 摄像头, 如图 5 所示。为了评估算法的精度, 将摄像头固定在二轴转台上进行测试。转台角度测量采用增量码盘, 增量信号为 36 000 线, 测量频率 2 kHz, 作为真实值用于对比。

为了评估算法精度, 需要将算法获取的姿态投影到转台零位坐标系, 分解到转台转轴上, 与转台的精确角度数据进行比较。因此使用 1.4 节方法进行坐标系方向对齐, 其中转台姿态由转台指令获取, 相机姿态由视觉里程计获取。在实际应用中, 如果需要绝对姿态, 可让被测物体绕零位坐标系不同的坐标轴进行几次小幅度旋转, 用旋转指令 (或其他方式测角结果) 与视觉里程计结果计算坐标系关系。



图5 实验设备与环境

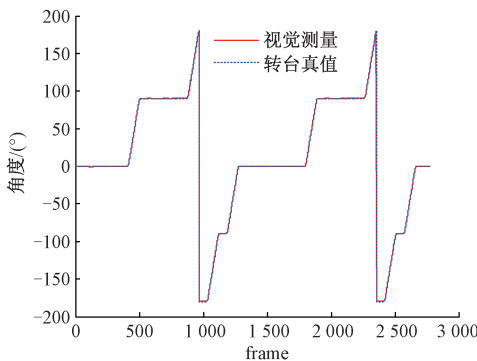
Fig.5 Experiment equipment and environment

转台缓慢旋转一定角度后静止,视觉里程计的测角结果与真值对比如表1所示,前三行测量为单自由度测角实验,误差在 $0.2^\circ$ 以内;后三行为二自由度测试,误差在 $0.5^\circ$ 内。我们分析认为,单自由度旋转时旋转中心可设为转轴上任一点,因此可直接测量安装偏置参数 $d$ ,而多自由度旋转时安装偏置需要用1.3节方法估算,用1.4节方法进行坐标系的对齐,因此增加了误差。

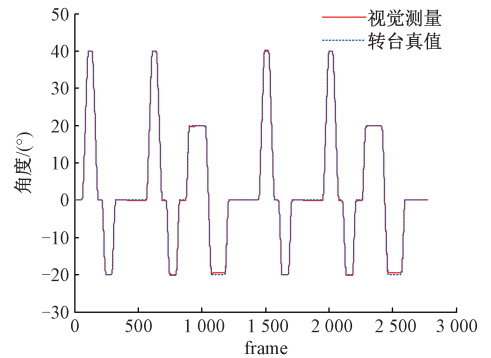
表1 静态测量测试  
Table 1 Static measurement (°)

	视觉测量	转台真值
单自由度	-90.015 1	-89.999 8
单自由度	179.870 6	180.000 0
单自由度	89.978 9	90.000 0
主轴//俯仰轴	89.743 1//39.876 2	90.000 0//40.003 7
主轴//俯仰轴	90.385 7// -20.173 1	89.999 9// -19.992 7
主轴//俯仰轴	-179.518 0//19.830 2	-179.999 9//20.004 7

再测试动态测量的精度。将摄像头固定在二轴转台上,随转台作二自由度旋转,重复运动,实验结果如图6、7所示,显示了换算到两轴上的姿态测量误差。相机数据投影到转台坐标系上;横轴为帧序号,时间间隔约60 ms。



(a) 主轴角度测量  
(a) Main axis angle measurement



(b) 俯仰轴角度测量  
(b) Pitch axis angle measurement

图6 角度测量值与真实值对比

Fig.6 Comparison of angle measurement values and ground truth values

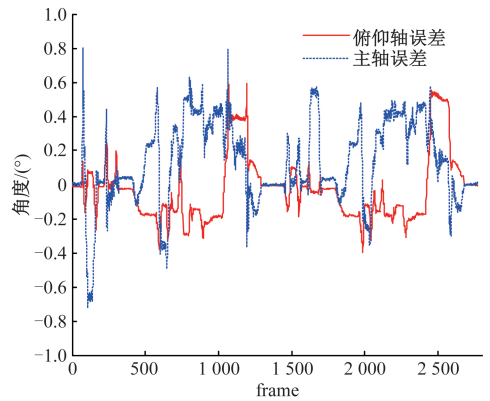


图7 角度测量的绝对误差

Fig.7 Absolute errors of angle measurement

可以看出,误差无漂移,重复测量的精度比首次测量高,重复测量时误差小于 $\pm 0.5^\circ (2\sigma)$ 。这是因为经过后端优化的姿态和路标点位置比首次测量即时输出的更精确。

为了检验误差的稳定性,提供角速度信息,有时需要对连续测角结果进行差分。图8所示为运动较快的主轴上角度的差分,当运动最快时,帧间角度差 $1.1^\circ$ ,对应角速度 $18^\circ/s$ ,此时视觉测角的差分有最大 $0.1^\circ$ 的误差,对应 $1.6^\circ/s$ 以内的角速度误差。静止时也有最大 $0.05^\circ$ 的帧间差分误差。我们分析由于图像品质不稳定和灯光闪烁,即使静止时每帧提取特征点坐标也不一定相同,从而误差不稳定;运动较快时图像的模糊会增加误差的不稳定性。因此在要求误差稳定的场合有必要对测量结果进行滤波处理。

综合以上实验,分析认为测角误差对安装偏置误差和坐标系对齐误差比较敏感。另外,由于路标点深度无法确定,算法本身也有一定的误差。这是低视差情况下

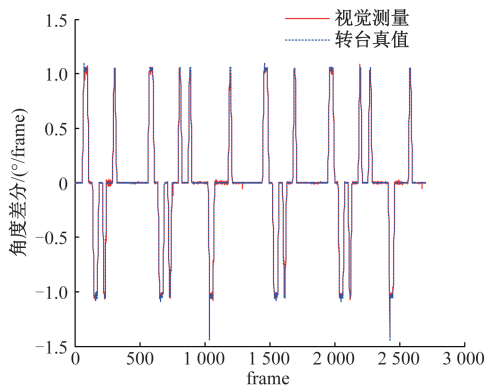


图8 角度差分的测量值与真实值对比

Fig.8 Comparison of angle difference measurement value and ground truth value

难以避免的。场景的动态、相机获取图像的质量也会产生影响。本实验中转台测量和相机测量时间均采用转台计算机时间,相机帧率未作控制,取获取图像时的系统时间所对应的转台测量角度作基准。相机为卷帘快门且未控制曝光时间。时间同步和曝光时间在高速运动情况下会对测量精度产生影响,如果要进一步提高精度需要对其作控制。

### 3 结 论

本文基于特征点法 SLAM 针对纯姿态运动设计了单目视觉测量方案,相比于固定靶标方法达到了较好的精度,误差不随时间漂移。实验所用的摄像头为 480 pixel 的网络摄像头,与引言所述视觉方法使用的工业摄像机的精度、帧率和成本有较大差距,本方法具有成本低的优势,而相比非视觉的间接方法(低成本惯性测量单元+磁力计滤波方法)精度更好,尤其在长时测量和重复运动时更有优势。而且有更大的精度提高空间。相比于相机固定而拍摄旋转物体的方法,本方法固定于被测物体上拍摄环境,实质上将姿态变化造成的物点移动从被测物体尺度放大到环境尺度,在同等硬件条件下能提供更高的测量精度。

除了图像质量等因素,分析和实验还发现了一些本文方法可能的误差来源,可供进一步研究,主要包括归一化焦距  $f_x$  的标定误差  $\Delta f_x$  会在相机坐标系  $Y$  方向的转角测量上产生系数为  $-\Delta f_x/f_x$  的比例误差,  $f_y$  的标定误差在  $X$  方向产生类似效果。若相机实际安装位置比算法估测的安装位置偏差了  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, X, Y$  方向上测量扩大  $\Delta Z/Z_m$  倍( $Z_m$  为平均景深),  $\Delta X, \Delta Y$  会造成有一定随机性但有限的误差,在相机向未建图区域旋转时会带来累积误差。若物体零位坐标系与相机初始坐标系的相对姿态标定不准确,假设有误差  $\Delta R$ , 则转换到零位坐标系的

姿态  $R$  被误算为  $\Delta R^T R \Delta R$ , 投影到转轴欧拉角上会产生一个正弦型误差,零位时为 0, 在主要旋转方向的欧拉角误差幅值小,垂直于主要旋转方向的误差幅值大。在需要绝对姿态的场合有较大影响。综上采用更准确的标定方法或改进安装偏置测量方法、坐标系对齐方法能提高测量精度。

方法仍有如下问题需要继续解决:1) 摄像头内参标定使用了张正友标定法,但是实测内参标定结果很不稳定,不同条件下的标定结果相差很大,这对位姿测量和参数辨识的准确性造成很大的影响,因此,有必要选取稳定性更好的标定方法。2) 安装参数的估计精确度不高,如果在线同时优化旋转矩阵与安装参数,则对系统本身的精度要求很高,超过了通用的视觉里程计算法,这是一个难点。增加靶标以扩大安装参数估计时的旋转范围是提高标定精度的一个思路。

### 参考文献

- [1] 史露强, 何怡刚, 罗旗舞, 等. 基于传感器数据融合的倾斜角度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1683-1689.  
SHI L Q, HE Y G, LUO Q W, et al. Research on the measurement method of tilt angle based on sensor data fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1683-1689.
- [2] 杜瑾, 赵华超, 郑哲, 等. 捷联惯导互补滤波姿态融合算法设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10):91-96.  
DU J, ZHAO H CH, ZHENG ZH, et al. Design of attitude fusion algorithm based on complementary filter for low-cost strapdown inertial navigation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 38(7):1683-1689.
- [3] 张原, 王志乾, 乔彦峰, 等. 导弹发射姿态测量方法研究[J]. 中国光学, 2015, 8(6):997-1003.  
ZHANG Y, WANG ZH Q, QIAO Y F, et al. Attitude measurement method research for missile launch [J]. Chinese Optics, 2015, 8(6):997-1003.
- [4] 李蒙蒙. 基于双目视觉的火箭喷管运动姿态测量系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.  
LI M M. Rocket nozzle motion measurement system study based on binocular vision [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. 光学学报, 2017, 38(8):218-228.  
SU J D, QI X H, DUAN X SH. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 38(8):218-228.
- [6] 劳达宝, 张慧娟, 熊芝, 等. 基于单目视觉的姿态自

- 动测量方法[J]. 光子学报, 2019, 48(3):0315001.
- LAO D B, ZHANG H J, XIONG ZH, et al. Automatic measurement method of attitude based on monocular vision [J]. ACTA Photonica Sinica, 2019, 48 (3): 0315001
- [7] 霍炬, 杨宁, 杨明. 基于光束向量的空间运动目标姿态测量[J]. 光子学报, 2015, 44(7):1-6.
- HUO J, YANG N, YANG M. Attitude measurement of spatial moving object based on vectors of light beams[J]. ACTA Photonica Sinica, 2015, 44(7):1-6.
- [8] KIM J W, CRISTI R, AGRAWAL B N. Attitude determination for nps three-axis spacecraft simulator[C]. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, 2014.
- [9] 孙长库, 黄璐, 王鹏, 等. 运动平台双IMU与视觉组合姿态测量算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(09): 69-76, 80.
- SUN CH K, HUANG L, WANG P, et al. Fused pose measurement algorithm based on double IMU and vision relative to a moving platform [J]. Chinese Journal Of Sensors And Actuators, 2018, 31(09):69-76, 80.
- [10] 何珍, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 多目视觉与激光组合导航AGV精确定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11):2830-2838.
- HE ZH, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology for AGV based on multi-object vision and laser integrated navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (11): 2830-2838.
- [11] 丁文东, 徐德, 刘希龙, 等. 移动机器人视觉里程计综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(3):385-400
- DING W D, XU D, LIU X L, et al. Review on visual odometry for mobile robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3):385-400
- [12] MORAVEC H P. Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover[M]. Palo Alto: Stanford University, 1980.
- [13] NISTÉR D, NARODITSKY O, BERGEN J. Visual odometry[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004.
- [14] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDÓS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 31(5):1147-1163.
- [15] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5):1255-1262.
- [16] 孙曼晖, 杨绍武, 易晓东, 等. 基于GIS和SLAM的机器人大范围环境自主导航[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3):586-592.
- SUN M H, YANG SH W, YI X D, et al. Autonomous navigation of robot in large-scale environments based onGIS and SLAM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3):586-592
- [17] LABROSSE F. The visual compass: performance and limitations of an appearance-based method[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 23(10):913-941.
- [18] MONTIEL J M M, DAVISON A J. A visual compass based on SLAM [C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2006.
- [19] 徐伟杰, 李平, 韩波. 一种改进的视觉罗盘姿态测量方法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(12):1728-1733.
- XU W J, LI P, HAN B. A modified visual compass attitude estimation method [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(12):1728-1733.

## 作者简介



**唐伟杰**, 2018年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现为哈尔滨工业大学硕士研究生, 主要研究方向为视觉定位与导航、三维重建。

E-mail: tangweijie\_hit@163.com

**Tang Weijie** received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2018. Now he is a M. Sc. candidate in Harbin Institute of Technology. His main research interests include visual localization and navigation, 3D reconstruction.



**陈松林**(通信作者), 分别在1999年和2002年于哈尔滨理工大学获得学士学位和硕士学位, 2006年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学航天学院控制与仿真中心副教授, 主要研究方向为机器人控制、飞行器半实物仿真技术。

E-mail: songlin@hit.edu.cn

**Chen Songlin** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 1999 and 2002, Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2006, respectively. Now he is an associate professor in Control and Simulation Center, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology. His main research interests include robot control and hardware-in-the-loop simulation technology for aircraft.