光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.023

基于特征点识别的位姿测量数据处理方法研究

刘 岩[1,2]，雷柏平[1*]，杜俊峰[1]，刘 盾[1]

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 视觉测量具有结构简单、成本低、非接触式测量的优点，利用视觉位姿测量结果对空间展开机构进行定位具有良好的应用前景。实际应用中需要将视觉测量数据转换到物空间坐标系从而对定位系统的控制量提供指导。针对相机外参数标定操作繁琐、需要额外设备、不利于在轨实现等缺点，提出了一种利用运动样本空间构建坐标系转换关系的数据处理方法，根据取样空间内构建的补偿方程，可以将各自由度的视觉测量数据转换到控制器坐标系上，同时能够校正由于安装、配准等导致的系统误差，从而实现高精度的空间目标定位。实验结果表明，在 1.7 m 的测量距离下，所搭建单相机测量系统的位置与转角测量精度可达 0.02 mm 和 0.003°，验证了所研究方法的有效性和实用性。

关键词： 视觉测量；位姿测量系统；空间定位；数据处理；误差补偿

中图分类号： TP242 **文章编号：** 1001－5868(2021)04－0568－06

Research on Pose Measurement Data Processing Method Based on Feature Point Recognition

LIU Yan[1,2], LEI Boping[1], DU Junfeng[1], LIU Dun[1]

(1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Visual measurement is a promising approach for locating the space deployment mechanism due to simple structure, low cost, and noncontact. Visual measurement data needs to be converted to object space coordinate system in practice, therefore providing guidance for the control quantity of the positioning system. In this paper, a data processing method is proposed by using motion sample data space to construct coordinate system transformation, which eliminates the cumbersome operation of external parameter calibration in on-orbit implementation. After correction by the compensation equation, the positioning accuracy of the single-camera measurement system can reach 0.02 mm and 0.003° under the measurement distance of 1.7 m.

Key words: vision measurement; pose measurement system; spatial positioning; data processing; error compensation

0 引言

视觉位姿测量技术作为一种非接触式测量方法，在交会对接、碎片清理、飞行器在轨维护等方面有着广泛应用[1-3]。受机械误差等因素影响，空间展开机构实际展开的位置和姿态与理想状态会产生一定偏移。为将空间物体定位到理想的展开状态，需要对在轨目标进行空间六自由度信息的准确测量，从而指导控制器调整被测物达到理想的空间位置。

基于特征点识别的位姿测量方法，利用点特征提供空间约束信息，将测量问题转换为 n 点透视的 PnP(Perspective-n-Point)问题以进行位姿信息解算。视觉测量得到的数据是被测物相对相机的位置姿态信息，而展开机构的位置和姿态由机械臂等六自由度控制器提供，将相机坐标系下的测量数据转

收稿日期：2021－04－25.
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFB0500201).
* 通信作者：雷柏平

换到控制器坐标系上，是测量精度分析以及目标定位实现的关键。对此通常有三种解决方法：一是利用机械结构限制相机与控制器之间的位置姿态关系，以利用先验的坐标系转换关系将测量数据转换到控制器坐标系，但该方法精度较低且成本较高，一般不适用于远距离测量场合的使用；二是利用更高精度的第三方设备如激光跟踪仪、全站仪对相机坐标系和控制器坐标系之间的位置姿态关系进行精确标定[4]，该方法精度高但操作繁琐且依赖第三方的标定设备，每当外部环境发生变化，就需要重新进行标定，难以满足在轨展开实验的需要；三是利用坐标系配准的方法，通过测量前的位姿调整来保证被测物在相机坐标系与操作器坐标系下的位姿信息相等效，进而直接以相机测量信息来反映被测物在操作器坐标系下的空间位姿状态，该方法不需要繁琐的相机外参数标定，也不需要额外的机械结构，具备良好的可行性。

典型的坐标系配准方法利用相机视轴和控制器 z 轴的偏移量来进行坐标系配准，如张慧娟等[5]通过将被测靶标转动一周并观察特征点在像面的轨迹是否为规则圆来进行姿态配准判定，进而利用精密转台的真实姿态角对测量精度进行验证；陈启军等[6]在手眼系统（Eye-in-Hand）中分别绕机械臂关节和相机中心旋转相机，根据旋转轨迹拟合中心的距离标定相机坐标系与机械臂末端的相对位置关系。上述坐标系配准方法操作简单但都没有建立完整的位姿配准状态，旋转一周的方法对精密控制器的行程也提出了要求。

利用坐标系配准进行测量数据转换的缺点是配准精度容易受到机械误差、安装误差、图像处理误差等因素的影响，实际应用中难以得到理想的坐标系配准关系，当存在一定的初始姿态角还会在测量结果中引入额外误差[7]，这些误差对测量结果的影响可以看作系统误差。对于测量数据中存在的系统误差，可以通过数据处理的方式进行校正。沈姗姗等[8]通过构建线性拟合方程以对原始测量数据进行校正的方式消除了光子计数深度获取系统的系统误差；王腾等[9]针对振镜激光扫描测量系统的非线性系统误差，通过对各角度的转动误差进行标定来获得完整的误差曲线，从而得到任意角度处的系统误差以补偿校正原始数据；乔中坤等[10]分析了无人机航磁系统的空间转向误差，利用无人机沿四个方向转动的真实值作为取样空间，结合测量值得到了系统误差的线性校正模型。本文针对视觉位姿测量系统，将被测物沿各自由度的运动数据作为取样空间，利用相机测得值和精密控制器提供的真实值，构建数据补偿模型，从而在校正系统误差的同时将视觉测量数据转换为被测物在操作器坐标系下的位姿信息。

本文主要对视觉位姿测量数据的坐标系转换方法进行研究，针对传统相机外参数标定操作繁琐、需要额外设备、不利于在轨实现等缺点，提出了一种在坐标系初步配准的基础上，利用运动样本空间构建校正方程的数据处理方法，以将视觉测量结果准确地反映在控制器坐标系上。搭建了测量系统并进行了完整的测量实验，利用精密六自由度控制器对测量精度进行了验证。实验结果表明，该数据处理方法可以将视觉测量数据有效转换为被测物在操作器坐标系下的六自由度信息，由于补偿了安装、配准等环节引入的系统误差，测量精度较高。

1　基于特征点识别的位姿测量系统

1.1　测量模型

视觉测量问题的核心是对空间坐标系的转换关系进行解算，主要涉及被测物坐标系、相机坐标系和图像坐标系，实际系统中还涉及控制器坐标系。利用点特征信息可以将位姿测量问题转换为物空间到像空间的 3D-2D 坐标转换问题。以单目视觉测量为例，测量模型如图 1 所示。

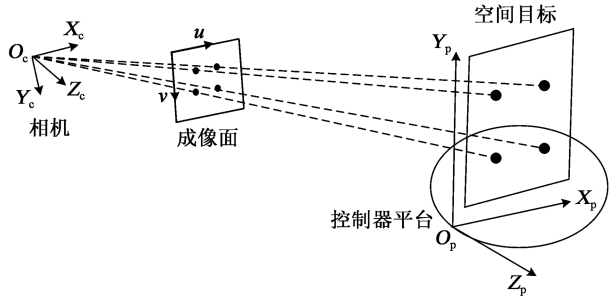


图 1　单目视觉测量模型

相机坐标系是以相机光心为原点的三维坐标系，图像坐标系是以像主点为原点的二维坐标系[11]，特征点坐标在相机坐标系到图像坐标系的转换关系可以借助相机内参数建立：

$$\lambda\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}f_x & 0 & u_0\\0 & f_y & v_0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{M}}\begin{bmatrix}x^c\\y^c\\z^c\end{bmatrix}\tag{1}$$

其中，λ 表示图像深度信息，f_x，f_y 是相机焦距沿两个方向的像素长度，(u_0, v_0) 为像主点的像素坐标，相机内参数矩阵 $\boldsymbol{M}$ 可以通过相机标定得到。式(1)实现了特征点 3D-2D 的坐标信息转换，进一步引入旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和位移向量 $\boldsymbol{t}$ 可以将位姿测量问题表示为 3D-3D 的坐标系转换问题：

$$\begin{bmatrix} x^{c} \\ y^{c} \\ z^{c} \end{bmatrix} = \boldsymbol{R} \cdot \begin{bmatrix} x^{w} \\ y^{w} \\ z^{w} \end{bmatrix} + \boldsymbol{t} \tag{2}$$

利用 PnP 算法对 n 个($n \geqslant 3$)特征点提供的 3D-2D 几何约束进行解算，就可以得到被测物相对相机的位置和姿态信息[12]。

1.2 误差分析

测量误差可以分为随机误差和系统误差。随机误差一般由电路噪声、环境扰动等因素引起，典型的处理方法是以重投影误差[13]作为目标函数，采用高斯-牛顿法、Levenberg-Marquardt 法等非线性算法对原始测量数据进行优化，以得到更新后的位姿参量：

$$\{\boldsymbol{R}^{*}, \boldsymbol{t}^{*}\} = \underset{\{\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}\}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left\| p_i - \boldsymbol{M}[\boldsymbol{R}][\boldsymbol{t}] P_i^{w} \right\|^2 \right\} \tag{3}$$

其中，p_i 表示测得的特征点像素坐标，P_i^{w} 表示点特征在被测物坐标系下的空间坐标。迭代计算可以得到高斯噪声影响下的最大似然估计，以有效消除随机噪声的影响[14]，但通常难以有效抵消系统误差的影响。

系统误差的主要来源有相机内参数标定误差、对准误差和安装误差，对准误差存在于被测物坐标系与相机坐标系之间，安装误差存在于被测物与控制器坐标系之间，两者对测量系统的影响均表现为非正交误差。

非正交误差对测量系统的影响如图 2 所示，此时控制器的实际转动轴与被测物坐标轴之间存在一定的夹角，当控制器沿某一自由度转动被测物时，被测物在相机坐标系上将有不止一个自由度的信息发生变化。

考虑被测物坐标系和控制器坐标系之间的初始位姿关系，可以将控制器设置的转台位姿状态 B_c 与被测物相对于转台的真实位姿信息 B_t 之间的关系表示为

$$B_t = c \cdot B_c + z \tag{4}$$

其中，c 表示转台转动轴与被测物坐标轴之间的非正交关系所引入的姿态偏差，z 表示转台实际旋转中心 O'_p 与被测物坐标系中心 O_p 不一致所导致的零偏误差。在相机坐标系与被测物坐标系之间存在配准误差时也会构成如图 2 所示的非正交误差，通过式(5)可以看出系统中存在的非正交误差符合线性误差的特性，下面结合实物实验数据对误差校正方法进行研究。

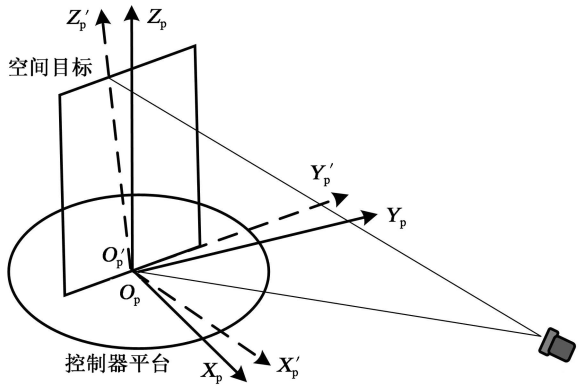


图 2 非正交误差示意图

1.3 系统搭建

本文搭建了完整的单目视觉位姿测量系统，实物如图 3 所示。以合作式靶标作为被测物，固定在精密六自由度转台上，六自由度平台选择 Symetrie 公司的 PUNA LA，其位置和姿态定位精度可达微米级和微拉德级；成像 CCD 选择大恒 MER-200-20GM/C-P，分辨率为 1 628×1 236，像元尺寸为 4.4 μm×4.4 μm；相机镜头选择大恒 HN-2514-2M-C2/3X，焦距为 25 mm；测量靶标使用独立设计的多点式靶标，位置加工精度为 0.05 mm。

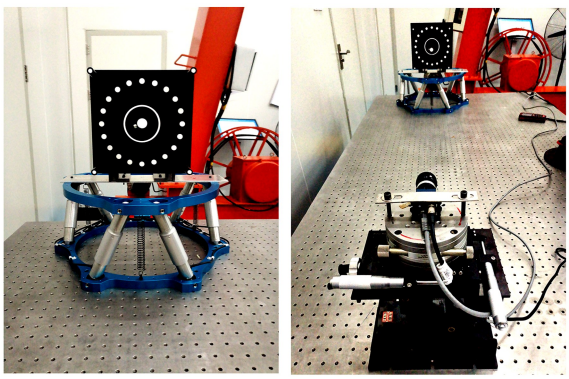


图 3 合作式靶标与测量系统

将靶标平面中心定义为被测物坐标系的原点，在安装时使靶标坐标系的坐标轴与转台坐标系的坐标轴相互正交。通过在靶标中心设置立柱与圆环相配合的坐标系配准结构，实时观察立柱与圆环在像

面上的拟合中心坐标，调整靶标与相机的相对姿态至两中心重合即可完成视轴与靶面坐标系竖轴的对准。在得到相机坐标系和被测物坐标系的零位配准状态后，就可以保证靶标沿各自由度的变化信息都能在相机坐标系的对应自由度上发生同步变化，进而进行测量系统的精度验证。

2　实验

2.1　相机内参数标定

采用机器视觉软件 Halcon 作为软件开发环境，选择大恒 GQ-H200-12.5 点阵标定板进行相机内参数标定实验。标定板识别效果如图 4 所示。

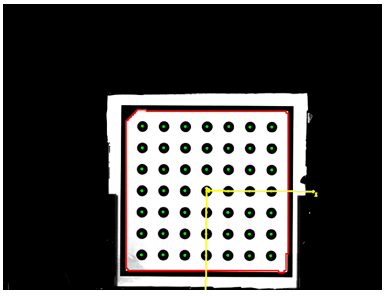


图 4　标定板识别效果图

标定结果如表 1 所示，其中 S_x，S_y 表示两个方向上的像元尺寸，(C_x, C_y)为相机光心的像素坐标，k_1，k_2 分别表示径向 2 阶、4 阶畸变参数。标定结果的重投影误差为 0.012 9 像素。

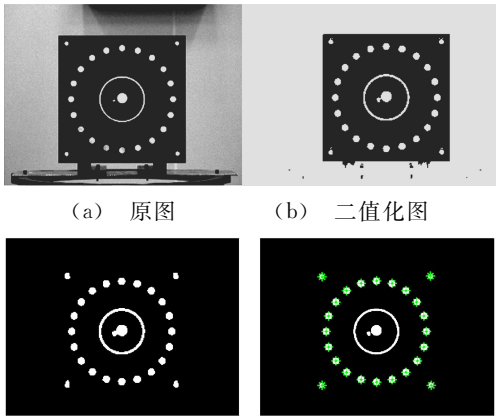
表 1　相机内参数标定结果

S_x/μm	S_y/μm	f/mm	C_x/pixel	C_y/pixel	k_1/m^{-2}	k_2/m^{-2}
4.4	4.4	26.11	805.1	628.5	231.2	149.1

2.2　特征点识别

图像特征点的准确提取和定位是影响位姿测量系统精度的关键因素[15]。为准确识别特征点所在的区域，首先利用大津法对原始图像进行二值化处理，再利用漫水填充法构建如图 5(c)所示的蒙版图像，以白色区域表示特征可能存在的区域。通过将蒙版图像与原始图像进行位运算，就可以得到去除背景后的靶标图像，有效降低图像特征点的提取难度。进一步对所得图像进行连通域分析，利用连通域的面积、周长、圆度等作为阈值条件可进一步滤除噪声区域的影响，最终得到仅包含特征信息的有效区域，图 5(d)表示特征识别结果。

每个特征区域的质心位置即为特征点的像素坐标，采用亚像素质心提取算法可以提高定位精度。本文采用灰度加权质心法计算特征点中心坐标。



(a)　原图　　(b)　二值化图

(c)　蒙版图　　(d)　特征识别结果

图 5　靶标图像处理与特征识别

为保证位姿解算的准确性，还需要建立各像素坐标与空间坐标之间的匹配关系。由于本文研究属于多级测量中的末端定位，被测物不会发生较大程度的倾斜，在通过连通域分析找到面积较低的 4 个非共面特征点后，利用特征点与像面角点之间的相对位置关系就可以对非共面特征点进行标记排序。识别效果如图 6 所示，进一步与被测物坐标系下的特征点序列相对应就可以实现特征点匹配。

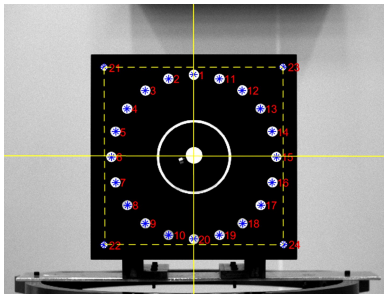


图 6　特征点识别效果图

利用标定得到的畸变系数对特征点像素坐标进行去畸变处理，结合特征点在靶标坐标系上的空间坐标及相机内参数利用 EPNP[16] 算法得到并记录转台零位状态下靶标的六自由度测量结果，如表 2 所示。

表 2　靶标六自由度测量结果

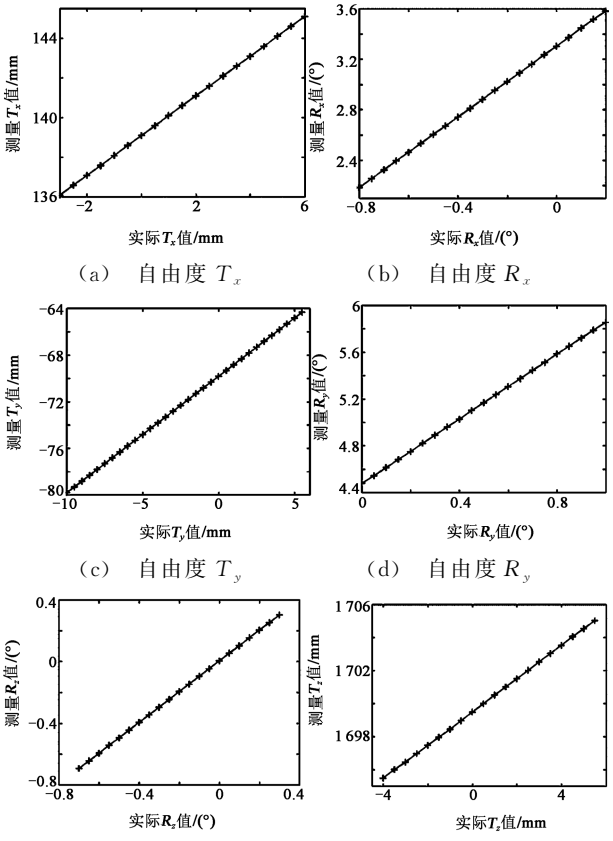
6-DoF 参数	T_x/mm	T_y/mm	T_z/mm	R_x/(°)	R_y/(°)	R_z/(°)
控制	0	0	0	0	0	0
测量	139.07	69.83	1 699.48	3.30	4.47	0.004

下面研究在初步配准的基础上，通过构建校正方程的方式来进行测量数据坐标系转换的数据处理方法。

3 测量数据处理

3.1 数据分析

首先分析测量系统对被测物六自由度变化量的测量结果，在转台行程内以固定步长改变转台在各自由度下的参数，同时保持其余自由度信息不变，记录对应自由度的视觉测量结果如图 7 所示。



(a) 自由度 T_x (b) 自由度 R_x

(c) 自由度 T_y (d) 自由度 R_y

(e) 自由度 R_z (f) 自由度 T_z

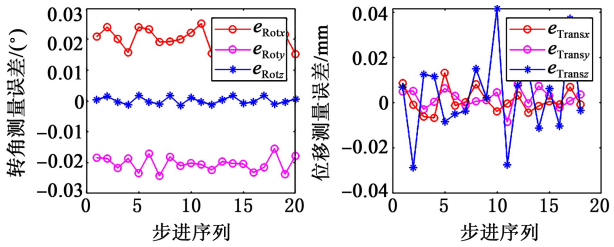
图 7 六自由度变化测量结果

转台在各自由度上的变化情况能够在对应自由度上的视觉测量结果中得到线性反演。但由于初始位姿关系的存在，测量结果与转台的真值之间会存在一定偏移。

首先利用精密转台的真实改变量对视觉测量结果进行精度验证，将测量误差定义为

$$\begin{cases} e_{\text{Rot}} = |R_{\text{estimate}} - R_{\text{real}}| \\ e_{\text{trans}} = |T_{\text{estimate}} - T_{\text{real}}| \end{cases} \tag{5}$$

在真实步进角度 $R_{\text{real}}=0.05°$，真实步进位移 $T_{\text{real}}=0.5$ mm 时，六自由度方向上的步进量测量误差如图 8 所示。可以看到，x，y 方向存在较大程度的转角测量误差，误差大小相对稳定，符合线性系统误差的特征，所以首先考虑采用线性校正模型对原始测量数据进行补偿。

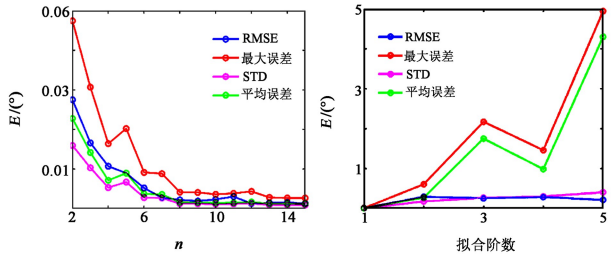


(a) 转角测量误差 (b) 位移测量误差

图 8 六自由度步进值测量误差

3.2 数据处理方法

在相机与转台坐标系之间的相对位姿关系固定后，以取样空间内的数据通过最小二乘法拟合得到校正模型的相关参数，进而构建出各自由度上的校正方程。以前 n 组测量数据作为取样空间构建线性校正模型，利用样本空间以外的数据对校正结果进行检验，将六自由度转台实际的状态值作为真实值，以 y 方向转角 R_y 的测量误差为例，分析样本空间大小 n 对最终测量精度的影响，如图 9(a)所示。



(a) 取样空间大小的影响 (b) 拟合多项式阶数的影响

图 9 校正模型相关参数对测量误差的影响

图 9(b)表示拟合模型的阶数对测量精度的影响情况，从而对比验证了线性校正模型的有效性。表 3 给出了线性校正模型补偿后在 1.7 m 测量距离下的六自由度测量精度。

表 3 补偿后的测量误差

自由度	最大误差	平均误差	STD	RMSE
T_x/mm	0.013 4	0.005 4	0.004 2	0.007 7
T_y/mm	0.010 2	0.004 2	0.003 1	0.004 2
T_z/mm	0.087 2	0.035 5	0.035 5	0.017 9
R_x/(°)	0.005 4	0.001 7	0.001 6	0.002 8
R_y/(°)	0.003 6	0.001 4	0.001 1	0.002 3
R_z/(°)	0.001 4	0.000 7	0.000 3	0.000 9

由测量结果可以看到，该数据处理方法可以将视觉测量结果准确转换到转台坐标系上，以 RMSE 作为评价指标，在 10 mm 和 1°转台行程内的位置姿态测量精度分别优于 0.02 mm 和 0.003°，在大行程中对所提出方法进行验证将是未来工作的重点。

4　结论

搭建了一套基于特征点识别的单目视觉位姿测量系统，建立了测量模型并对系统中存在的误差进行了分析，根据测量数据中存在的非正交误差构建了线性补偿模型，提出一种利用运动样本空间构建补偿方程的数据处理方法，可以在实现视觉测量数据坐标系转换的同时对系统误差进行校正。实验结果表明，在转台行程范围内的转角测量精度优于 0.003°，位置测量精度优于 0.02 mm。该方法不需要借助复杂设备进行相机外参数标定，满足在轨实验的要求，进一步可以实现利用视觉位姿测量数据指导空间精密定位，具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Opromolla R, Fasano G, Rufino G, et al. A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2017, 93: 53-72.

[2] Yan Kun, Zhao Rujin, Tian Hong, et al. A high accuracy method for pose estimation based on rotation parameters[J]. Measurement, 2018, 122: 392-401.

[3] 余海涛，施光林. 基于椭圆检测算法的位姿快速测量技术[J]. 传感器与微系统，2020，39(5)：122-124，128.
Yu Haitao, Shi Guanglin. Pose fast measurement technology based on ellipse detection algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 122-124, 128.

[4] 赵连军. 基于目标特征的单目视觉位置姿态测量技术研究[D]. 中国科学院研究生院(光电技术研究所)，2014.
Zhao Lianjun. Research on monocular vision position and attitude measurement based on target feature[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics), 2014.

[5] 张慧娟，熊　芝，劳达宝，等. 基于 EPNP 算法的单目视觉测量系统研究[J]. 红外与激光工程，2019，48(5)：190-195.
Zhang Huijuan, Xiong Zhi, Lao Dabao, et al. Monocular vision measurement system based on EPNP algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 190-195.

[6] 陈启军，周自强，刘成菊，等. 基于视觉的六自由度机械臂运动学参数辨识[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2020，48(7)：1023-1029.
Chen Qijun, Zhou Ziqiang, Liu Chengju, et al. Design of a vision calibration method of kinematic parameters for 6-DoF manipulator[J]. J. of Tongji University (Natural Science Edi.), 2020, 48(7): 1023-1029.

[7] 屈也频，侯　旺. 基于误差传播理论的 PnP 问题姿态精度分析[J]. 光学精密工程，2019，27(2)：479-487.
Qu Yepin, Hou Wang. Attitude accuracy analysis of PnP based on error propagation theory[J]. Opt. Precision Eng., 2019, 27(2): 479-487.

[8] 沈姗姗，叶荣诚，陈　艳. 光子计数深度获取系统误差机理研究和矫正[J]. 光子学报，2017，46(12)：216-224.
Shen Shanshan, Ye Rongcheng, Chen Yan. Error theory research and correction on depth acquisition photon counting system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 216-224.

[9] 王　腾，杨树明，李述胜，等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报，2020，40(23)：162-174.
Wang Teng, Yang Shuming, Li Shusheng, et al. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 162-174.

[10] 乔中坤，马国庆，周文纳，等. 多旋翼无人机航磁系统误差综合补偿研究[J]. 地球物理学报，2020，63(12)：4604-4612.
Qiao Zhongkun, Ma Guoqing, Zhou Wenna, et al. Research on the comprehensive compensation of aeromagnetic system error of multi-rotor UAV[J]. Chinese J. of Geophysics, 2020, 63(12): 4604-4612.

[11] Wu P C, Tseng H Y, Yang M H, et al. Direct pose estimation for planar objects[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2018, 172: 50-66.

[12] Hesch J A, Roumeliotis S I. A direct least-squares (DLS) method for PnP[C]// IEEE 2011 Inter. Conf. on Computer Vision, 2011: 383-390.

[13] Eric Marchand, Hideaki Uchiyama, Fabien Spindler. Pose estimation for augmented reality: A hands-on survey[J]. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(12): 2633-2651.

[14] Pan Hui, Huang Jianyu, Qin Shiyin. High accurate estimation of relative pose of cooperative space targets based on measurement of monocular vision imaging[J]. Optik-Inter. J. for Light and Electron Optics, 2014, 125(13): 3127-3133.

[15] 闵永智，陶　佳，任维卓. 基于特征点位置校正的靶标位姿测量方法[J]. 自动化学报，2020，46(3)：509-517.
Min Yongzhi, Tao Jia, Ren Weizhuo. The measurement method of target pose based on feature points position calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 509-517.

[16] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: An accurate $o(n)$ solution to the PnP problem[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.

作者简介：

刘　岩(1995—)，男，硕士研究生，主要研究方向为空间精密测量及数字图像处理；

雷柏平(1976—)，男，博士，高级工程师，硕士生导师，主要从事空间光机系统设计及测试技术方面的研究。