

## 基于 EPNP 算法的单目视觉测量系统研究

张慧娟<sup>1,2</sup>, 熊 芝<sup>1</sup>, 劳达宝<sup>2</sup>, 周维虎<sup>2</sup>

- (1. 湖北工业大学 机械学院, 湖北 武汉 430068;
2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

**摘要:** 利用计算机视觉进行姿态测量的方法已广泛应用于现代控制、导航、跟踪等多个领域中。研究并设计了一种基于 P4P 矩形分布的平面靶标和 EPNP 算法结合的单目视觉姿态测量方法。首先, 利用单相机获取平面靶标图像, 经图像处理得到四个特征点的像素坐标, 并使用 EPNP 算法进行姿态解算; 其次, 对姿态角测量误差进行了仿真分析, 为提高姿态测量精度提供了理论指导和依据; 最后, 提出一种与高精度二维转台结合的坐标系配准方法, 利用该方法对三个方向姿态角精度进行验证。实验结果表明: 当绕  $x$  和  $y$  轴的转动角度在  $[-6^\circ, 6^\circ]$  时, 姿态测量误差小于  $0.1^\circ$ , 可以满足测量应用需求。

**关键词:** 计算机视觉; 姿态; EPNP; 平面靶标

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0517005

## Monocular vision measurement system based on EPNP algorithm

Zhang Huijuan<sup>1,2</sup>, Xiong Zhi<sup>1</sup>, Lao Dabao<sup>2</sup>, Zhou Weihui<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Institute of Optics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The method of pose measurement using computer vision is widely used in modern control, navigation, tracking and other fields. A monocular visual pose measurement method was studied and designed based on P4P rectangular distribution of planar target and EPNP algorithm in this paper. Firstly, a single camera was used to obtain the plane target image. After the image processing, the pixel coordinates of the four feature points were obtained, and the EPNP algorithm was used to perform the attitude calculation. Secondly, the simulation analysis of pose error measurement provides theoretical guidance and basis for improving attitude measurement accuracy. Finally, a coordinate system registration method combined with a high-precision two-dimensional turntable was proposed. The method was used to verify the accuracy of the three-direction attitude angles. The experimental results show that the rotation angle around the  $x$  and  $y$  axes is  $[-6^\circ, 6^\circ]$ , the pose measurement error is less than  $0.1^\circ$  to meet the measurement application requirements.

**Key words:** computer vision; pose; EPNP; plane target

收稿日期: 2018-12-09; 修订日期: 2019-01-01

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-415-1); 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发(2017YFF0107300); 中国科学院装备研制项目(YZ201618); 大尺寸多站异构网络动态测量与空间位姿溯源方法与技术(2017YFF0204802)

作者简介: 张慧娟(1993-), 女, 硕士生, 主要从事计算机视觉方面的研究。Email: azhj147258@163.com

通信作者: 熊芝(1985-), 女, 副教授, 博士, 主要从事大尺寸测量、激光及光电检测技术方面的研究。Email: xiongzi0611@163.com  
劳达宝(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光电大尺寸测量技术方面的研究。Email: laodabao@aoe.ac.cn

## 0 引言

随着科技的不断发展,现代控制、导航、跟踪等多个领域都对视觉测量提出了更高的要求,其中姿态测量技术已成为各领域的重要研究方向之一<sup>[1]</sup>。单目姿态测量只使用一个摄像机,相较于多目视觉测量方法,测量范围大、结构简单,且避免了立体匹配的困难,具有广泛适用性,因此广泛应用于机器人跟踪导航、飞行器对接、视觉导航等多个领域<sup>[2]</sup>。但是受限于每个空间点有且仅有一条透视投影直线与之对应,缺乏空间点深度信息,因此需要额外的约束条件实现从二维图像坐标到三维空间坐标的转换,最常用的方法是利用特征点空间位置约束,即 PNP 问题。其中基于三个特征点的位姿测量方法是位姿测量算法中的经典方法,对于特征点个数  $3 \leq n \leq 5$  的情况受到了国内外学者的广泛关注和研究<sup>[3-5]</sup>,但是使用  $3 \leq n \leq 5$  个特征点估计位姿时,通常存在多解问题,且对图像噪声较为敏感,抗干扰能力较差<sup>[6]</sup>,因此,如何解决上述问题并满足高精度测量要求仍是一个亟待解决的问题。

此外,利用单个相机和其他测量方案结合进行姿态测量的方法也成为了研究的热点,例如华中科技大学<sup>[7]</sup>、上海交通大学、天津大学<sup>[8-9]</sup>等基于盾构机施工中的导向系统对姿态测量的研究,利用切口的角锥棱镜将全站仪透过的光成像在 CCD 上,以测量部分姿态角,其他姿态角则通过倾角仪测量得到。该方法操作简单,能实现姿态的实时高精度自动化测量,并能将测量数据实时反馈。但是由于倾角仪以重力加速度方向作为测角基准,在动态环境下,当存在额外干扰加速度时,测量基准易受干扰,导致出现测量偏差。相较于用特征点约束方法求解姿态,累加式组合方案缺乏深度集成,并未构成一个有机的整体且标定困难。

EPnP 算法是由 Lepetie 和 Moreno<sup>[10]</sup>在 2009 年提出的高精度快速位姿估计算法,该算法无须迭代求解,时间复杂度为  $O(n)$ ,抗干扰能力强,只需三对共面(非共面需要四对)3D-2D 匹配点,即可得到精确位姿,被认为是目前最高效的摄像机位姿估计算法之一<sup>[11]</sup>。参考文献[12-14]从噪声、特征点个数、实时性等角度对比了 EPNP 与 POSIT、DLT、后方交会

等方法,结果表明 EPNP 更精确、计算效率相对更高、抗干扰能力更强。由于共面的 P4P 问题存在唯一解,且 EPNP 算法精度高、能很好地解决图像噪声和抗干扰能力差的问题,因此,将两者结合提出一种基于 P4P 矩形分布的平面靶标和 ENP 算法结合的单目视觉测量方法。首先对 EPNP 算法的原理进行了概述,并提出了一种坐标系配准方法用来验证姿态测量精度;然后,对姿态角测量误差进行了仿真分析,最后,通过实验验证了文中提出方法的有效性和精度。

## 1 基于 EPNP 的姿态角测量

### 1.1 EPNP 测量原理

图 1 所示为系统的姿态测量原理图,设靶标中特征点的世界坐标为  $\{K_i^B, i=1,2,3,4\}$ ,右上标  $B$  用来标注在靶标坐标系下的坐标,四个虚拟控制点在靶标坐标系下的非齐次坐标为  $V_j^B = (x_j^B, y_j^B, z_j^B)^T$ ,靶标特征点的坐标与虚拟控制点的坐标关系为:

$$K_i^B = \sum_{j=1}^4 a_{ij} V_j^B, i=1,2,3,4 \quad (1)$$

由线性关系在欧式变换下的不变性可知,有:

$$K_i^c = \sum_{j=1}^4 a_{ij} V_j^c, i=1,2,3,4 \quad (2)$$

式中: $c$  用来标注在相机坐标系下的坐标; $K_i^B$  齐次坐标最后一位为 1,转换系数满足  $\sum_{j=1}^4 a_{ij} = 1$ ,  $[a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}]^T$  为权重,即靶标特征点在以虚拟控制点为基的欧式空间中的坐标,且每个靶标特征点可表示为四个虚拟控制点的加权和,如公式(3)所示:

$$[a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}]^T = [V_1^B, V_2^B, V_3^B, V_4^B]^{-1} K_i^B \quad (3)$$

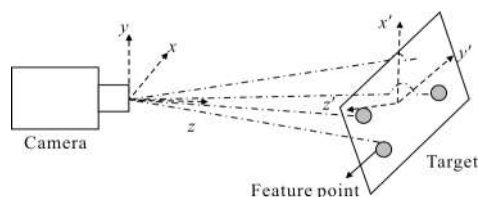


图 1 单相机姿态测量原理

Fig.1 Single camera pose measurement principle

设靶标特征点对应的图像坐标为 $(u_i, v_i)$ ,采用张正友平面标定方法对相机进行标定,得到内参矩阵为 $A$ ,则有:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = AK_i^B = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & v_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 a_{ij} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \end{bmatrix}, i=1,2,3,4 \quad (4)$$

式中: $s_i$ 为特征点的投影深度; $A$ 为摄像机的内参矩阵, $f_x, f_y, u_x, v_y$ 为相机的内部参数。由公式(4)可知, $s_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} z_j^c$ ,每个靶标特征点和像点之间的对应关系可得:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 a_{ij} f_x x_j^c + a_{ij} (u_x - u_i) z_j^c = 0 \\ \sum_{j=1}^4 a_{ij} f_y y_j^c + a_{ij} (v_y - u_i) z_j^c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

当有四个空间点和图像点对应时,可得到含八个方程的线性方程组,记为矩阵形式 $Mx=0$ ,其中是 $8 \times 12$ 的矩阵,其中向量 $x = [V_1^T \ V_1^T \ V_1^T \ V_1^T]^T$ 为 $12 \times 1$ 的向量,包含了四个虚拟控制点在相机坐标系下的非齐次坐标。根据欧式变换的保距性,由四个靶标特征点之间的距离已知,即可求出四个靶标特征点在相机坐标系下的坐标,从而将求解三维到二维的 PNP 问题就转化为求解经典的三维到三维的刚体运动问题,进而求得靶标姿态 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 信息,其中 $\alpha, \beta, \gamma$ 为分别绕相机坐标系 $x, y, z$ 轴的角度(见图 1)。

### 1.2 姿态角测量误差分析

影响姿态角测量精度的误差因素主要有图像处理、相机标定、靶标制造精度以及解算算法误差等。图像处理是获取特征点像素坐标的过程,利用相机采集平面靶标图像,对图像进行滤波、轮廓检测等处理后得到像素中心坐标 $(u_i, v_i), i=1,2,\dots,n$ ;相机标定采用张正友标定法,影响标定精度的因素主要有标定图片数量、特征点数量、标定板测量误差等;靶标的制作误差是产生特征点世界坐标的误差。由于 EPNP 算法考虑了镜头的畸变参数,因此文中主要分析图像处理误差和靶标制造精度对姿态测量精度的影响。

(1) 图像处理误差。假设图像处理得到的特征点像素坐标 $(u_i, v_i)$ 的误差区间分别为 $[-0.5 \text{ pixel}, 0.5 \text{ pixel}]$ 、

$[-1 \text{ pixel}, 1 \text{ pixel}]$ 、 $[-1.5 \text{ pixel}, 1.5 \text{ pixel}]$ 和 $[-2 \text{ pixel}, 2 \text{ pixel}]$ ,分别仿真分析得到像素坐标误差对姿态测量精度的影响,如图 2 所示,由仿真结果可得 $[-1 \text{ pixel}, 1 \text{ pixel}]$ 时, $\alpha$ 的标准差为 $0.438^\circ$ , $\beta$ 的标准差为 $0.473^\circ$ , $\gamma$ 的标准差为 $0.040^\circ$ ;像素坐标误差为 $[-2 \text{ pixel}, 2 \text{ pixel}]$ 时, $\alpha$ 的标准差为 $0.829^\circ$ , $\beta$ 的标准差为 $0.965^\circ$ , $\gamma$ 的标准差为 $0.086^\circ$ 。

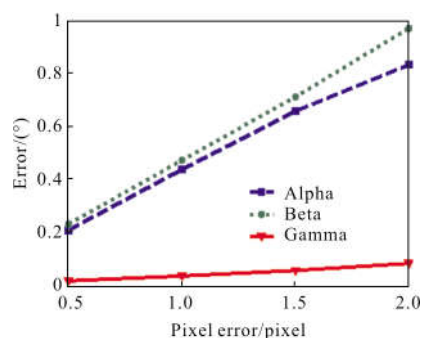


图 2 像素坐标误差对姿态误差的影响

Fig.2 Effect of pixel coordinate error on pose error

(2) 靶标制造精度误差。假设靶标制造得到的特征点的世界坐标 $(x, y, z)$ 的误差区间为 $[-0.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}]$ ,通过仿真分析得到 $\alpha$ 的标准差为 $0.299^\circ$ , $\beta$ 的标准差为 $0.385^\circ$ , $\gamma$ 的标准差为 $0.032^\circ$ 。

通过对以上误差分析可知,像素坐标误差与姿态测量误差呈正相关,像素坐标误差越大,对姿态测量误差的影响也越大。此外,像素坐标误差和世界坐标误差对 $\gamma$ 角度的影响最小,对 $\beta$ 角度的影响都要大于对 $\alpha$ 角度的影响。因此,进一步提高靶标制造精度和图像处理精度是保证姿态测量精度的前提。

## 2 坐标系配准方法

为了验证三个方向姿态角的测量精度,使用高精度二维转台对姿态解算的结果进行验证,将相机坐标系与转台坐标系配准,即将相机坐标系各坐标轴方向调节至与转台各坐标轴方向平行,如图 3 所示,将平面靶标固定在转台中,此时靶标在相机坐标系下的姿态等效为靶标与转台坐标系三个方向轴的夹角。坐标系配准分为两个步骤,首先配准相机坐标系 $z$ 轴(相机视轴),当相机视轴 $z$ 轴与转台竖轴 $z'$ 平行时,转台绕竖轴旋转一周,转台上任意一点在相机中成像轨迹为圆,不平行时,则为椭圆,利用这一现象,调节两个坐标系 $z$ 轴平行度;当两坐标系 $z$ 轴平

行后,此时相机坐标系  $xoy$  平面与转台坐标系  $x'o'y'$  平面平行,水平调节转台至靶标姿态  $(\alpha, \beta, \gamma)$  为零的位置即为两坐标系配准位置,即满足:

$$f(\alpha, \beta, \gamma) = (0, 0, 0) \quad (6)$$

相机坐标系与转台坐标系配准后,调节转台俯仰转动等效为绕相机  $x$  轴转动,得到  $\alpha$ ; 水平转动即可等效为绕相机  $z$  轴转动,得到  $\beta$ ; 将转台从零位位置水平转动  $90^\circ$  后再俯仰转动即可等效为绕相机  $y$  轴转动,得到  $\beta$ 。转动过程中以二维精密转台转动量为基准,将获取的靶标姿态与转台转动的固定角度值进行对比,即可验证三个方向姿态角的测量精度。

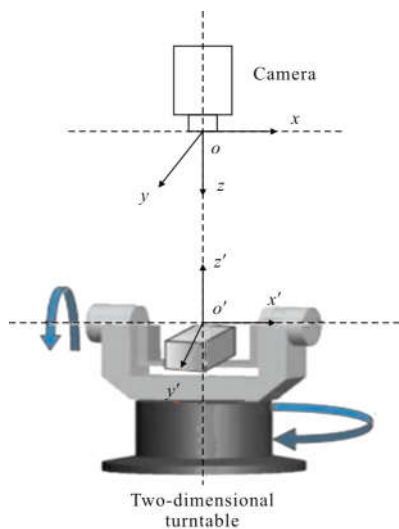


图 3 相机坐标系与转台坐标系配准

Fig.3 Registration of camera coordinate system and turntable coordinate system

当相机坐标系和转台坐标系  $z$  轴不平行时,出现的零位误差  $f(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$  即为配准误差,该误差影响姿态角精度的检定结果,因此,为了避免该误差,在对姿态测量精度验证时,以二维精密转台转动量为基准,通过分析转台转动前后靶标姿态的相对改变量来评定算法的测量精度,此时,配准误差将不影响测量精度的检定结果。

### 3 姿态角测量精度验证实验

#### 3.1 实验装置

为了验证姿态测量方法的可行性和精度,搭建了相应的实验系统平台,如图 4 所示,系统包括 CCD 相机、二维精密转台、精密调节台、计算机和平

面靶标。其中,CCD 相机选用 balser acA2500-20 gm,分辨率为  $2\ 592 \times 2\ 048$ ,镜头焦距 12.5 mm。二维精密转台角位置测量精度为  $\pm 2''$ ,水平角转动范围为  $[30^\circ, 330^\circ]$ ,俯仰角转动范围为  $[40^\circ, 150^\circ]$ ;利用两台精密调节台调节相机坐标系与转台坐标系  $z$  轴平行度,并利用计算机控制转台精密转动以及进行姿态求解。

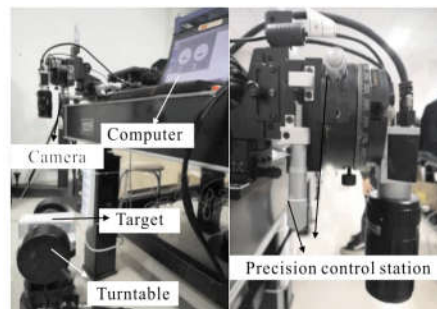
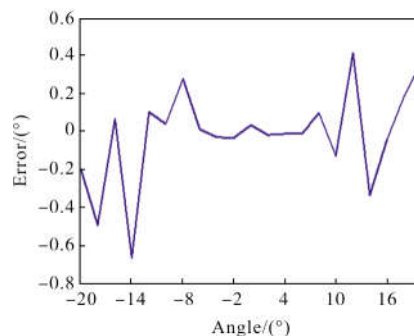


图 4 系统实验图

Fig.4 System experiment diagram

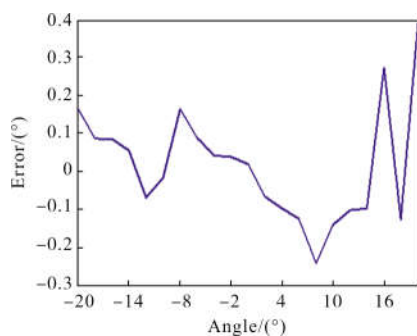
#### 3.2 结果及分析

由于二维转台角度限位,因此实验过程中控制转台分别绕转台坐标系(图 3 所示) $x'$ 轴和  $y'$ 轴依次转动  $2^\circ$ ,转动范围为  $[-20^\circ, 20^\circ]$ ;绕  $z'$ 轴依次转动  $10^\circ$ ,转动范围为  $[-45^\circ, 35^\circ]$ 。以转台转动角度为真值,获取每次转动后的靶标图像,将姿态测量结果分别与转台转动角度值进行比较,得到三个方向姿态角的测量误差曲线,如图 5 所示。对图 5 数据进行分析,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出三个方向姿态角的标准差分别为  $0.248\ 0^\circ$ 、 $0.277\ 2^\circ$ 和  $0.044\ 5^\circ$ 。 $\gamma$  的测量误差最小, $\beta$  的平均值和标准差都比  $\alpha$  的平均值和标准差大,该结果也验证了仿真的结论,图像处理误差和靶标制作精度误差对  $\beta$  角度的影响要大于对  $\alpha$  角度的影响。



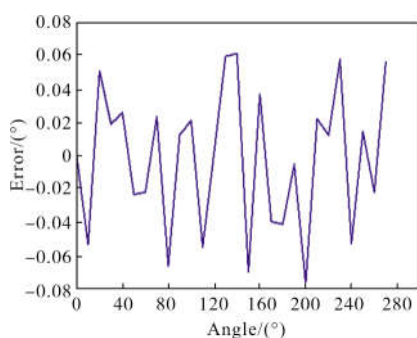
(a)  $\alpha$  测量误差与转动角度的关系

(a) Relationship between  $\alpha$  measurement error and rotation angle



(b)  $\beta$  测量误差与转动角度的关系

(b) Relationship between  $\beta$  measurement error and rotation angle



(c)  $\gamma$  测量误差与转动角度的关系

(c) Relationship between  $\gamma$  measurement error and rotation angle

图 5 姿态角的测量误差与转动角度的关系

Fig.5 Relationship between measurement error and rotation angle of pose angle

表1 姿态角测量误差

Tab.1 Pose angle measurement error

Angle/(°)	Max/(°)	Min/(°)	Average/(°)	Standard deviation/(°)
$\alpha$	0.665 3	0.011 7	0.174 9	0.248 0
$\beta$	0.374 6	0.019 8	0.183 6	0.277 2
$\gamma$	0.077 4	0.001 3	0.037 9	0.044 5

由图 5 可知,当转台绕  $x$  和  $y$  轴转动时,随着转动角度值增大, $\alpha$  和  $\beta$  的测量误差也在增大。这是因为随着转动角度增大,靶标一端超出相机景深范围之外,像素点的检测精度下降,导致图像处理误差增大。当转台绕  $z$  轴转动时,由于是水平转动,不影响图像处理精度,因此测量误差相比于  $x$  和  $y$  轴的测量误差要小。此外,当转动角度范围在  $[-6^\circ, 6^\circ]$  时, $\alpha$  和  $\beta$  测量误差曲线较稳定,测量误差保持在  $0.1^\circ$  以内。

## 4 结 论

文中研究并设计了一种基于 P4P 矩形分布的平面靶标和 EPNP 算法结合的单目视觉姿态测量方法;分析了图像处理以及靶标制造精度误差对姿态测量精度的影响;提出了一种与高精度二维转台结合的坐标系配准方法,对姿态测量精度进行了验证。实验结果表明三个方向姿态角的标准差分别为  $0.248 0^\circ$ 、 $0.277 2^\circ$  和  $0.044 5^\circ$ ;当转动角度在  $[-6^\circ, 6^\circ]$  时, $x$  和  $y$  轴的标准差可达到  $0.021 6^\circ$  和  $0.075 2^\circ$ ,姿态测量误差小于  $0.1^\circ$ ,该精度能够满足大多数实际工程精度需求。实验结果验证了该姿态测量方法的有效性和可行性。

## 参考文献:

- [1] Yu Chang'an. Study on position and attitude tracking technology of single camera vision based on cooperate aim [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese) 于长安. 基于合作目标的单目视觉位姿跟踪技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] Wang Peng, Sun Changku, Zhang Zimiao. Linear pose estimation with a monocular vision system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32 (5): 1126-1131. (in Chinese) 王鹏, 孙长库, 张子森. 单目视觉位姿测量的线性求解[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1126-1131.
- [3] Stephen A Kyle. Roll angle in 6DOF tracking [J]. *Journal of the CMSC*, 2008, 6(5): 1-10.
- [4] Wang Tianyu, Dong Wenbo, Wang Zhenyu. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427003. (in Chinese) 王天宇, 董文博, 王震宇. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0427003.
- [5] Rawia Frikha. Camera pose estimation for augmented reality in a small indoor dynamicscene [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(5): 24-30.
- [6] Xi Zhihong, Li Shuang, Zeng Jiqin, et al. Research on an improved algorithm for solving PnP problem [J]. *Applied Science and Technology*, 2018, 45(4): 56-60. (in Chinese) 席志红, 李爽, 曾继琴, 等. 一种改进的 PnP 问题求解算

- 法研究[J]. 应用科技, 2018, 45(4): 56–60.
- [7] Chen Peidong. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering [D]. Wuhan : Huazhong University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)  
陈沛东. 盾构姿态测量系统的关键技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [8] Gao Yang. Research on 6-DOF measurement in large-scale precision engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)  
高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津: 天津大学. 2016.
- [9] He Feiyan, Lin Jiarui, Gao Yang, et al. Optimized pose measurement system combining monocular vision with inclinometer sensor [J]. *Acta Optica Sinica Journal of Optics*, 2016, 36(12): 1–8. (in Chinese)  
何斐彦, 林嘉睿, 高扬, 等. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1–8.
- [10] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. Epanp: an accurate  $O(n)$  solution to the pnp problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155–166.
- [11] Li Shujie, Liu Xiaoping. An accurate and fast algorithm for camera pose estimate on [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(1): 20–27. (in Chinese)  
李书杰, 刘小平. 摄像机位姿的高精度快速求解 [J]. 中国图像图形学报, 2014, 19(1): 20–27.
- [12] Wu Jun, Bai Gang, Zhang Caixia. Experimental comparison and analysis of EPNP and POSIT algorithm in head pose estimation [J]. *Journal of North China University of Technology*, 2017, 29(2): 19–27. (in Chinese)  
武君, 白刚, 张彩霞. EPNP 和 POSIT 算法在头部姿态估计上的实验比较与分析[J]. 北方工业大学学报, 2017, 29(2): 19–27.
- [13] Deng Fei, Wu Yousi. Position and pose estimation of spherical panoramic image with improved EPnP algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(6): 677–684. (in Chinese)  
邓非, 吴幼丝. 球形全景影像位姿估计的改进 EPnP 算法 [J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 677–684.
- [14] Yang Sen. Weighted linear methods for the camera pose estimation[J]. *Journal of Software*, 2011, 22(10): 2476–2487. (in Chinese)  
杨森. 摄像机位姿的加权线性算法[J]. 软件学报, 2011, 22(10): 2476–2487.