

文章编号 1004-924X(2013)10-2617-10

基于并联理论的单目视觉位姿估计

耿明超^{1,2}, 赵铁石^{1,2*}, 边 辉^{1,2}, 唐启敬³

- (1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要:搭建了一种主动式测量系统用于测试伺服稳定平台的伺服精度。以此系统为基础,提出了基于并联理论的单目视觉位姿测量方法。介绍了系统的硬件组成和系统测量原理,分析了系统的分辨率。给出了激光点在投影靶坐标系下的计算原理及过程。然后,从并联机构的自由度出发,将视觉测量系统等效地转化为一个并联机构,将视觉测量系统的位姿估计问题转换为并联机构的正解问题。利用并联机构的运动影响系数迭代求解系统的位姿,由并联机构关节螺旋直接得到影响系数,由此简化了推导过程。仿真和实验结果表明:系统的姿态测量精度为 $\pm 0.05^\circ$ 。该方法能够快速稳定的收敛,基本达到了系统的设计要求。

关键词:单目视觉;位姿测量;并联机构;运动影响系数;激光点

中图分类号:TP242.62;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2617

Pose estimation of monocular vision based on parallel theory

GENG Ming-chao^{1,2}, ZHAO Tie-shi^{1,2*}, BIAN Hui^{1,2}, TANG Qi-jing³

- (1. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yansan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of the Ministry of Education, Qinhuangdao 066004, China;
 3. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)
- * Corresponding author, E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

Abstract: An active measurement system was put up to measure the servo accuracy of a servo stable platform. On the basis of the system, a new pose estimation method of monocular vision was proposed according to the parallel theory. First, the hardware composition and measuring principle of the system were introduced and its resolution was analyzed. The calculation principle and calculation process of the world coordinates of laser points were given. Then, from the freedom of a parallel mechanism, the visual measurement system was transformed into a parallel mechanism equivalently, and the pose estimation problem was transformed into a forward solution problem of parallel mechanism. Furthermore, the kinematics influence coefficient of the parallel mechanism was used to estimate the pose of the system. Instead of complex derivations, the kinematics influence coefficient could be obtained directly. The simulation and experimental results show that the orientation measurement accuracy of the system is $\pm 0.05^\circ$, which concludes that the method has a rapid and stable

收稿日期:2013-05-13;修订日期:2013-05-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975244)

convergence for the design requirements of the system.

Key words: monocular vision; pose estimation; parallel mechanism; kinematics influence coefficient; laser point

1 引言

位姿信息是反映空间目标的重要参数,是指一个坐标系相对于空间中另一个坐标系的位置和姿态。因具有结构简单、便于移动、数据采集快、不接触被测物体和成本低等特点,视觉测量被广泛应用于位姿测量领域,而单目视觉以其标定步骤少、视场大和没有立体匹配问题等倍受学者的关注^[1]。

传统的位姿测量方法都是通过相机的物像投影关系来进行计算,通常是在目标物体上设置 N 个在物体坐标系下坐标已知的特征点,然后用相机拍摄物体,得到点的像面坐标,通过 N 个点之间的约束关系来得到目标物体在相机坐标系下的坐标,即所谓的 PNP 问题^[2-3]。这种方法的问题是必须知道空间点在物体坐标系下的位姿。Haralick 提出了一种空间尺寸未知矩形的姿态测量算法,该方法在运用坐标系旋转时,其中一个轴的旋转方向与另外 2 个轴的旋转方向不统一^[4]。徐科军等基于单目手眼相机和激光测距仪,对 Haralick 的姿态测量算法进行了改进,使坐标轴的旋转得到了统一,并得到了位置信息^[5]。以上算法都是基于点约束的,而基于椭圆度的算法不存在点约束问题,通过求解椭圆形靶标所在平面的法线方向和方位,利用法线的位姿来表示相机的像平面和目标平面的位姿关系^[6-7]。许薇等利用激光发射器的光束照射在参考平面上形成激光点,物体运动时激光束经过参考平面的调制,使投射在参考平面上的激光点成为系统的特征量,再通过一系列的投影和几何关系获得像平面相对于参考平面的位姿关系^[8]。在一些测量系统中,将红色 LED 安装在靶上视为特征点,相比平面光刻靶标提高了系统的测量精度^[9-10]。另外还有很多学者开展了单目视觉的位姿测量方法研究^[11-13],但是提出的方法多数不适合本文的应用背景,或者推导计算的过程比较复杂。

本文以伺服稳定平台的伺服精度测试为背

景,搭建了一种主动式测量系统用于测量平台的位姿,有效地提高了系统的姿态测量精度。首先对系统的分辨率进行了分析,然后提出了视觉测量系统到并联机构的等效理论,将并联理论的影响系数等理论应用于视觉测量系统位姿求解,影响系数矩阵能够直接得出,没有复杂的推导,简化了计算的过程。最后给出位姿求解的仿真和实验,验证了分析理论的可行性和正确性。

2 测量系统的构成

2.1 测量系统的构成

主动式测量系统如图 1 所示,由被测物体(伺服稳定平台)、运动模拟台、激光发射器、光电投影靶、相机、采集卡和工控机组成。伺服稳定平台能够实现 3 个方向的转动,且转动轴线交汇于一点。运动模拟平台为高精度 Stewart 并联平台,能够实现高精度的定位、连续运动。测量过程中,运动模拟台的转动中心和伺服稳定平台的转动中心基本重合,以保证伺服稳定平台转动中心的位置不会发生变化。激光发射器安装在伺服稳定平台上,相机采集投射到光电投影靶上的光点信息,由工控机上的数据处理系统根据采集到的光点信息,实时计算出伺服稳定平台位姿。

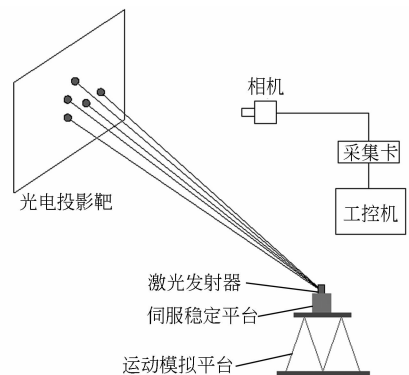


图 1 主动式测量系统原理图

Fig. 1 Principle of active measuring system

被测物体相对于投影靶的转角范围小于 5° ,系统选用的 $1\ 600\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$ 的光电投影靶

以保证激光束始终在靶的范围内。光电投影靶是在硬幕上安装 35 个 LED,由开关控制 LED 的亮灭。系统在标定过程中,打开 LED,相机采集图像进行外参数的标定。LED 在投影靶坐标系中的坐标可以通过单相机在 2 个位置的立体匹配得到。在实时测量过程中,关闭 LED,投影靶接收来自激光发射器发出的激光束在投影靶上形成激光点。

2.2 测量系统的分辨率

测量系统使用的激光发射器波长 650 nm,出瞳功率 5 mW,发散度 0.4 mrad。被测物体到投影靶的距离为 5 000 mm 时,投射到投影靶上的激光点的直径为 2 mm 左右,在相机图像中占 12 个像素左右,符合圆点检测的要求。投影靶上激光点的移动量

$$d = D \arctan \theta, \tag{1}$$

其中: D 为被测物体到投影靶的距离, θ 为偏转角,当 $D = 5\ 000\ \text{mm}$, $\theta = 0.02^\circ$ 时, $d = 1.744\ 4\ \text{mm}$ 。系统选用的相机分辨率为 $1\ 600 \times 1\ 200$,则单位像素反映到投影靶上的移动量为 1.0 mm,小于偏转角为 0.02° 时的移动量为 1.744 4 mm,即测量系统的姿态分辨率为 0.02° 。测量系统对被测物体的移动没有放大作用,所以系统的移动分辨率为单位像素反映到投影靶上的移动量 1 mm。

3 激光点世界坐标的获取

3.1 测量系统坐标系描述

如图 2 所示,世界坐标系 $O\text{-}XYZ$ 的原点在投影靶的中心,其 X 轴和 Y 轴分别平行于靶的长

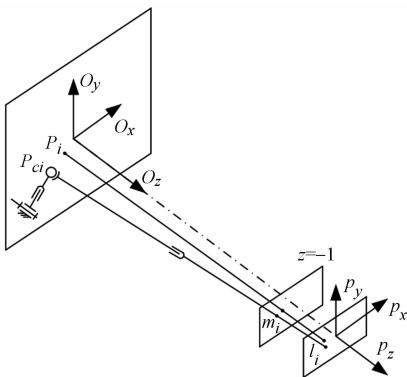


图 2 激光束的数学描述

Fig. 2 Mathematical description of the laser beam

边和短边, Z 轴垂直于靶面。坐标系 $p\text{-}xyz$ 固定在伺服稳定平台上,在初始位置时,其方位同坐标系 $O\text{-}XYZ$ 方位重合。

$\{P_i:(X_{pi},Y_{pi},0),i=1,2,3\}$ 为激光点在世界坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标, $\{p_i:(x_{pi},y_{pi},z_{pi}),i=1,2,3\}$ 为激光点在 $p\text{-}xyz$ 中的坐标。取 $p\text{-}xyz$ 坐标系中 $z=0$ 平面与第 i 条激光束的交点坐标为 $l_i=(x_{li},y_{li},0)$,为了确定激光束的方向向量,取 $p\text{-}xyz$ 坐标系中 $z=-1$ 平面与第 i 条激光束的交点坐标 $m_i=(x_{mi},y_{mi},-1)$ 。

3.2 激光点世界坐标的获取

为了提高系统的测量精度,首先对相机的内部参数进行标定,标定采用针孔模型,标定的内部参数主要有有效焦距、相面中心、一阶二阶透镜径向畸变参数、一阶二阶透镜切向畸变参数。测量系统利用平面的棋盘靶对相机的内参数进行标定。

要计算光点在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标,必须已知相机的外参数。在本测量系统中,光电投影靶上的 35 个 LED 在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标已知,像平面坐标可由采集系统通过 MIL(Matrox Imaging Library)得到,因此相机的外参数标定问题可以归结为 PNP 问题,很容易求解出相机坐标系和光电靶坐标系之间的位姿关系 $[R_c\ t_c]$ 。

由文献[2]可知:

$$Z_{ci} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_c & t_c \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{pi} \\ Y_{pi} \\ Z_{pi} \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 P_w = M P_i, \tag{2}$$

其中: (u_i, v_i) 为光点的像素坐标。 M_1 完全由 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 决定,而 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 只与相机的内部结构有关,可由相机内参数标定过程得到。 M_2 完全由相机相对与世界坐标系的位姿决定,可由相机的外参数标定过程得到。

M 是 3×4 的不可逆矩阵,当 M 与 (u_i, v_i) 已知时,由式(2)给出的 3 个方程中消去 Z_{ci} ,可以得到关于 X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi} 的 2 个线性方程,而在此测量系统中,激光点在投影靶面内, $Z_{pi}=0$ 。所以当 M 与 (u_i, v_i) 为已知,由式(2)及 $Z_{pi}=0$ 可以唯一的求得 X_{pi} 和 Y_{pi} ,即激光点在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标为 $(X_{pi}, Y_{pi}, 0)$ 。

4 测量系统的等效模型

4.1 激光束的等效模型

本文以并联理论为基础,将测量系统等效为并联机构,应用成熟的并联理论来求解视觉测量系统的位姿估计问题。如图 2 所示,将 $p\text{-}xyz$ 坐标系所在的被测物体等效为并联机构的动平台,坐标系 $O\text{-}XYZ$ 所在的投影靶等效为定平台,每条激光束等效为并联机构的一个 RPSP 分支。为了防止等效分支对动平台产生约束,减少动平台的自由度,防止产生错误的等效模型,首先计算等效分支的自由度。

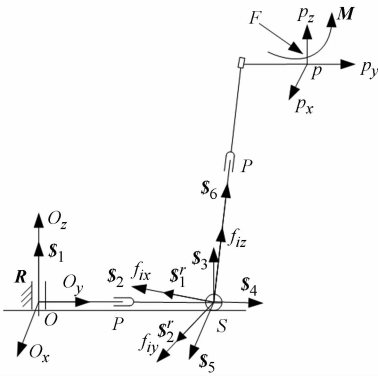


图 3 激光束的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the laser beam

如图 3 所示,等效分支在坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中的运动旋量为

$$\mathcal{S}_1 = (0 \quad 0 \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$\mathcal{S}_2 = (0 \quad 0 \quad 0; 0 \quad 1 \quad 0)$$

$$\mathcal{S}_3 = (0 \quad 0 \quad 1; a \quad 0 \quad 0)$$

$$\mathcal{S}_4 = (0 \quad 1 \quad 0; 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$\mathcal{S}_5 = (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad 0 \quad -a)$$

$$\mathcal{S}_6 = (0 \quad 0 \quad 0; 0 \quad q \quad r)$$

其中: a, q, r 为实数。在坐标系 O 中,球副 S 中心到原点的矢径为 $\mathbf{r}_{os} = (0, a, 0)$,移动副方向向量 $\mathbf{h}_{os} = (0, q, r)$ 。很明显,等效分支是 6 自由度的串联分支,对动平台没有任何约束作用。

4.2 测量系统的等效模型

机构要能够实现确定的运动,驱动数目应与机构的自由度数相同。在图 1 所示的测量系统中,光点在投影靶平面上运动,为了使等效分支实现这样的运动,本文选定等效分支的前两个运动副即 R 副和 P 副为分支的驱动输入。由于动平

台有 6 个自由度,而每个等效分支有 2 个驱动输入,测量系统等效的并联机构就由 3 个 RPSP 分支组成,如图 4 所示。

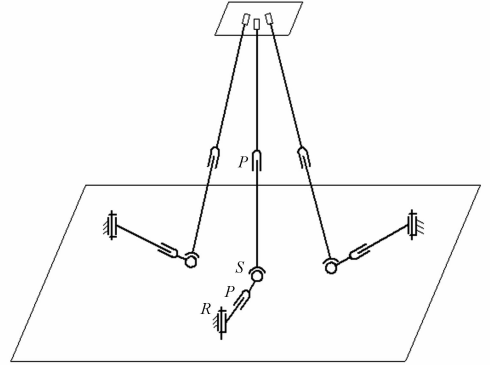


图 4 测量系统的等效模型

Fig. 4 Equivalent model of the measurement system

在图 1 中,测量系统存在着 5 条激光束,任选 3 条不平行的激光束作为并联机构的等效分支,其余 2 条作为确定激光点拓扑关系的标志。实际测量过程中,光点在坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标为已知,即并联机构的驱动输入为已知。求解被测物体相对于投影靶的位姿,相当于并联机构的动平台相对于定平台的位姿求解问题,即并联机构的正解。

5 影响系数法求解位姿的过程

由于并联机构的复杂性,位置正解的难度比较大,封闭解的推导过程繁琐,且很难满足实时性的要求,本文采用影响系数迭代搜索来求解并联机构的正解,基本能够满足系统实时性要求。

5.1 等效并联机构影响系数

机构运动影响系数反映了机构的运动学和动力学本质,影响系数本身与机构的运动学尺寸及所选原动件位置有关。运动影响系数定义为操作速度与关节速度的线性变换^[14]。本节从并联机构的静力学入手,首先建立了静力影响系数,然后求出速度影响系数。

如图 3 所示,假设动平台受到的力旋量为 $\mathbf{W}_p = (\mathbf{M}_p, \mathbf{F}_p)$,其中 \mathbf{F}_p 和 \mathbf{M}_p 分别为动平台上作用力的主矢和对坐标系 $p\text{-}xyz$ 原点的主矩。在某一瞬时,将分支的前 2 个运动副(R 副和 P 副)锁住,此时,分支能够实现的运动为绕球副 S 中心的转动和沿第二个移动副 P 的移动。由此可知

分支的 2 个约束力应分布在垂直于第二个移动副的平面内,且这 2 个约束力相互垂直,设为 $\$ _1^r$, $\$ _2^r$ 。由于等效并联机构的分支结构相同,其余 2 个分支的约束力分别设为 $\$ _3^r$, $\$ _4^r$, $\$ _5^r$, $\$ _6^r$ 。

考虑动平台的平衡,6 个力旋量之和应与作用于动平台上的力旋量平衡,因此可以列出平衡方程:

$$f_1 \$ _1^r + f_2 \$ _2^r + f_3 \$ _3^r + f_4 \$ _4^r + f_5 \$ _5^r + f_6 \$ _6^r = \mathbf{W}_p, \quad (3)$$

式中: f_i 为 i 个杆受到的轴力, $\$ _i^r$ 为第 i 个杆的单位轴线螺旋在坐标系 $p\text{-}xyz$ 中的表示。由文献[14]可知,机构的一阶静力影响系数矩阵为

$$[\mathbf{G}_f^r] = [\$ _1^r \quad \$ _2^r \quad \$ _3^r \quad \$ _4^r \quad \$ _5^r \quad \$ _6^r] = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \mathbf{S}_3 & \mathbf{S}_4 & \mathbf{S}_5 & \mathbf{S}_6 \\ \mathbf{S}_{01} & \mathbf{S}_{02} & \mathbf{S}_{03} & \mathbf{S}_{04} & \mathbf{S}_{05} & \mathbf{S}_{06} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

如图 2 所示,设球副中心 S 在 $O\text{-}XYZ$ 坐标系中的坐标为 $P_{ci} = (X_{cpi}, Y_{cpi}, 0)$,即假想的光点在 $O\text{-}XYZ$ 中的坐标,在 $p\text{-}xyz$ 坐标系中的坐标为 $p_{ci} = (x_{cpi}, y_{cpi}, z_{cpi})$ 。第二个移动副的单位方向向量在坐标系 $p\text{-}xyz$ 中的表示为:

$$\mathbf{h}_{ci} = (\mathbf{l}_i - \mathbf{m}_i) / |\mathbf{l}_i - \mathbf{m}_i|. \quad (5)$$

规定 $\$ _1^r$ 在投影靶平面内,动平台相对于定平台的位姿变换矩阵为 $[\mathbf{R}_{p0}, \mathbf{t}_{p0}]$,则 $\$ _1^r$, $\$ _2^r$ 在坐标系 $p\text{-}xyz$ 中表示为:

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{R}_{p0} (0, 0, 1)^T \times \mathbf{h}_{c1}, \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{h}_{c1} \times \mathbf{S}_1. \quad (7)$$

由于 $p_{ci} = \mathbf{R}_{p0} \mathbf{P}_{ci} + \mathbf{t}_{p0}$,则有

$$\mathbf{S}_{01} = \mathbf{r}_{ps1} \times \mathbf{S}_1 = \mathbf{p}_{c1} \times \mathbf{S}_1, \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_{02} = \mathbf{r}_{ps1} \times \mathbf{S}_2 = \mathbf{p}_{c1} \times \mathbf{S}_2, \quad (9)$$

其中: \mathbf{r}_{ps1} 为球副中心到坐标系 $p\text{-}xyz$ 原点的矢径在 $p\text{-}xyz$ 中的表示。由于并联机构的对称性,同理可以很方便的得出其他 2 个分支的力螺旋。

由机构学中运动传递与力传递之间的对偶关系可知,机构的运动影响系数为:

$$[\mathbf{G}_q^H] = ([\mathbf{G}_f^r]^{-1})^T. \quad (10)$$

5.2 等效并联机构的广义速度重建

在机构等效时,选定等效分支的前 2 个运动副(R 副和 P 副)为驱动输入,由于在求解运动影响系数时,机构分支的驱动副为 2 个虚设的驱动副,所以并联机构的广义的输入速度已经不是实际光点和假想光点在投影靶的坐标差,而需要重新构造。

设 dq_i 为分支沿 $\$ _i^r$ 方向的关节速度,瞬时实

际激光点的坐标为 p_i 。如图 3 所示,以假想光点(球副中心) p_{c1} 为原点, \mathbf{S}_1 为 x 轴, \mathbf{S}_2 为 y 轴,移动副 P 的单位方向向量 \mathbf{h}_{c1} 为 z 轴建立 $f_1\text{-}xyz$ 坐标系,则 $f_1\text{-}xyz$ 到 $p\text{-}xyz$ 的位姿变换矩阵 \mathbf{T}_{pf1} 可以得出:

$$\mathbf{T}_{pf1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \mathbf{h}_{c1} & \mathbf{p}_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

则 $p\text{-}xyz$ 到 $f_1\text{-}xyz$ 的位姿变换矩阵 \mathbf{T}_{pf1} 为:

$$\mathbf{T}_{fp1} = [\mathbf{T}_{pf1}]^{-1}. \quad (11)$$

同理可以得到其它 2 个分支的位姿变换矩阵(分别设为 \mathbf{T}_{pf2} 和 \mathbf{T}_{pf3})。

则每个分支的等效关节速度为

$$(dq_1 \quad dq_2 \quad 0)^T = \mathbf{T}_{fq1} \mathbf{p}_1, \quad (12)$$

$$(dq_3 \quad dq_4 \quad 0)^T = \mathbf{T}_{fq2} \mathbf{p}_2, \quad (13)$$

$$(dq_5 \quad dq_6 \quad 0)^T = \mathbf{T}_{fq3} \mathbf{p}_3. \quad (14)$$

合并式(12)~(14),测量系统等效并联机构的重构的广义速度为:

$$d\mathbf{q} = [dq_1 \quad dq_2 \quad dq_3 \quad dq_4 \quad dq_5 \quad dq_6]^T. \quad (15)$$

5.3 影响系数迭代求解系统位姿过程

给定动平台相对于定平台的初始位姿为 $[\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0]$,理论位姿为 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。

影响系数迭代求解系统位姿的过程如下所示:

1) 通过 MIL 得到光点的实际像素坐标 (u_i, v_i) 。

2) 通过式(2)计算光点的实际世界坐标 $\mathbf{P}_i = (X_{pi}, Y_{pi}, 0)$ 。

3) 设置 $k=0$,初始化动平台的位姿,即 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]_k = [\mathbf{R}_0 \quad \mathbf{t}_0]$ 。

4) 通过式(15)得到对应于 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]_k$ 的广义速度 $d\mathbf{q}$ 。

5) 计算偏差 ϵ

$$\epsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (q_i^2)},$$

其中: ϵ 表示假想的光点坐标与实际的光点坐标的偏差在坐标系 $f_i\text{-}xyz$ 中的表示。

6) 如果偏差 ϵ 小于测量系统预先设定的偏差 ξ ,则执行步骤 10),否则执行步骤 7)。

7) 如果迭代的次数超过系统设定的最大迭代次数,执行步骤 10),否则执行步骤 8)。

8) 由文献[14]可知:

$$d\mathbf{v}_H = [\mathbf{G}_q^H] d\mathbf{q},$$

其中： dv_H 为动平台微速度在坐标系 $p\text{-}xyz$ 中的表示。

9) 设置 $k=k+1$, 将 dv_H 叠加到第 k 次的 $[R \ t]$, 即: $[R \ t]_{k+1} = [R \ t]_k + dv_H$ 。

10) 迭代结束, 输出结果。迭代搜索过程如图 5 所示。

6 数值算例和实验

6.1 数值算例

激光束的结构参数在坐标系 $p\text{-}xyz$ 中的表示为:

$$\begin{aligned} m_1 &= (-0.05, 0.01, -1)\text{m} & l_1 &= (0.052, -0.004, 0)\text{m} \\ m_2 &= (0.041, 0.003, -1)\text{m} & l_2 &= (-0.045, 0.005, 0)\text{m} \\ m_3 &= (0.007, 0.083, -1)\text{m} & l_3 &= (-0.005, -0.066, 0)\text{m} \end{aligned}$$

给定伺服稳定平台相对于投影靶的位姿为 $R = (R_x, R_y, R_z)$ 、 $t = (t_x, t_y, t_z)$, 其运动规律为 $Z\text{-}X\text{-}Y$ 欧拉角。

通过图 1 所示模型, 由 Matlab 计算出对应于 $[R \ t]$ 理论光点的坐标, 然后给定初始位姿 $[R_0 \ t_0]$ 。将计算得到的理论光点坐标和给定的初始位姿代入到上述模型中计算实际位姿。表 1 给出了两组运动及理论的光点坐标。

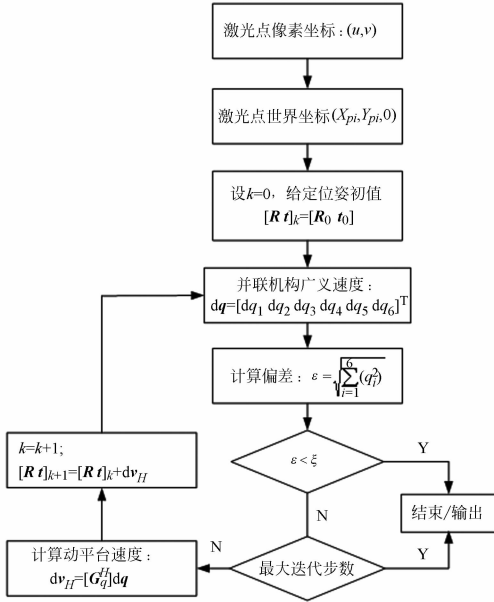


图 5 位姿求解流程图

Fig. 5 Flow chart of the pose estimation

表 1 给定的运动及光点理论坐标

Tab. 1 Given motion coordinates and the ideal coordinates of laser points

| 序号 | 给定运动 $[R \ t]/(^{\circ})$ | P_1/m | P_2/m | P_3/m | 给定初值 $[R_0 \ t_0]/(^{\circ})$ |
|----|--|---------------------|----------------------|-----------------------|---|
| 1 | $[1.00, 2.00, 3.00, -0.050, 0.100, 4.500]$ | $(0.302, 0.130, 0)$ | $(-0.645, 0.162, 0)$ | $(-0.231, -0.567, 0)$ | $[0.00, 0.00, 0.00, 0.000, 0.000, 4.000]$ |
| 2 | $[2.00, 3.00, 5.00, 0.100, 0.200, 5.000]$ | $(0.386, 0.327, 0)$ | $(-0.655, 0.324, 0)$ | $(-0.169, -0.461, 0)$ | $[0.00, 0.00, 0.00, 0.000, 0.000, 4.000]$ |

表 2 表 1 中第一组运动的迭代过程数据

Tab. 2 Data in the iterative process of the frist group motion of Tab. 1

| 迭代步数 | P_{e1}/m | P_{e2}/m | P_{e3}/m | dq/m | $[G_q^H]$ | $[R \ t]/(^{\circ})$ |
|------|----------------------|----------------------|-----------------------|--|----------------|--|
| 1 | $(0.460, -0.060, 0)$ | $(-0.389, 0.013, 0)$ | $(-0.053, -0.662, 0)$ | $[0.3732, 0.1227, -0.3051, -0.2718, -0.1319, 0.1893]$ | $[G_q^H]_{11}$ | $[0.00, 0.00, 0.00, 0.000, 0.000, 4.000]$ |
| 2 | $(0.272, 0.134, 0)$ | $(-0.676, 0.159, 0)$ | $(-0.256, -0.567, 0)$ | $[-0.0115, -0.0277, -0.0067, 0.0301, 0.0236, 0.0092]$ | $[G_q^H]_{12}$ | $[1.50, 2.72, 3.33, -0.021, 0.065, 4.498]$ |
| 3 | $(0.304, 0.132, 0)$ | $(-0.643, 0.164, 0)$ | $(-0.229, -0.565, 0)$ | $[-0.0019, 0.0026, 0.0028, -0.0023, -0.0014, -0.0032]$ | $[G_q^H]_{13}$ | $[1.04, 2.05, 2.98, -0.044, 0.099, 4.501]$ |
| 4 | $(0.302, 0.131, 0)$ | $(-0.645, 0.162, 0)$ | $(-0.231, -0.567, 0)$ | $[-0.2948, -0.0359, 0.3056, 0.0537, 0.1502, -0.3005] \times 10^{-3}$ | $[G_q^H]_{14}$ | $[0.99, 2.00, 3.00, -0.05, 0.100, 4.499]$ |
| 5 | $(0.302, 0.130, 0)$ | $(-0.645, 0.162, 0)$ | $(-0.231, -0.567, 0)$ | $[-0.0463, -0.2820, -0.0187, 0.2932, 0.2783, 0.0757] \times 10^{-4}$ | $[G_q^H]_{15}$ | $[1.00, 2.00, 3.00, -0.05, 0.100, 4.500]$ |

表 3 表 1 中第二组运动的迭代过程数据

Tab. 3 Data in the iterative process of the second group motion of Tab. 1

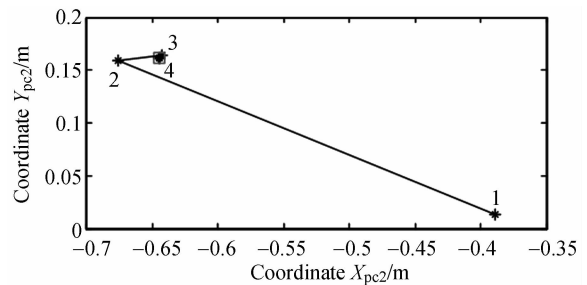
| 迭代 步数 | P_{c1}/m | P_{c2}/m | P_{c3}/m | dq/m | $[G_q^H]$ | $[R \ t]/(^{\circ})$ |
|----------|--------------------|--------------------|---------------------|---|----------------|--|
| 1 | (0.460, -0.060, 0) | (-0.389, 0.013, 0) | (-0.053, -0.662, 0) | [0.3732, 0.1227, -0.3051, -0.2718, -0.1319, 0.1893] | $[G_q^H]_{21}$ | [0.00, 0.00, 0.00, 0.000, 0.000, 4.000] |
| 2 | (0.267, 0.346, 0) | (-0.783, 0.323, 0) | (-0.274, -0.453, 0) | [-0.1229, 0.0114, -0.0296, 0.1226, 0.0813, 0.0664] | $[G_q^H]_{22}$ | [3.45, 5.36, 6.11, 0.199, 0.110, 4.999] |
| 3 | (0.397, 0.342, 0) | (-0.645, 0.341, 0) | (-0.161, -0.443, 0) | [-0.0069, 0.0162, 0.0184, -0.0051, -0.0000, -0.0192] | $[G_q^H]_{23}$ | [2.60, 2.91, 4.93, 0.106, 0.163, 4.996] |
| 4 | (0.392, 0.326, 0) | (-0.651, 0.325, 0) | (-0.166, -0.460, 0) | [0.0016, 0.0028, 0.0010, -0.0033, -0.0025, -0.0015] | $[G_q^H]_{24}$ | [1.96, 3.02, 4.97, 0.105, 0.204, 4.998] |
| 5 | (0.388, 0.3268, 0) | (-0.655, 0.325, 0) | (-0.169, -0.460, 0) | [-0.5249, -0.2604, 0.2242, 0.4858, 0.5360, -0.1321] $\times 10^{-3}$ | $[G_q^H]_{25}$ | [2.00, 3.00, 5.00, 0.100, 0.200, 5.000] |
| 6 | (0.386, 0.327, 0) | (-0.655, 0.324, 0) | (-0.169, -0.461, 0) | [-0.0923, -0.5031, -0.2663 0.5134, 0.3763, 0.4043] $\times 10^{-4}$ | $[G_q^H]_{26}$ | [2.00, 3.00, 5.00, 0.100, 0.200, 5.000] |

表 4 实验结果

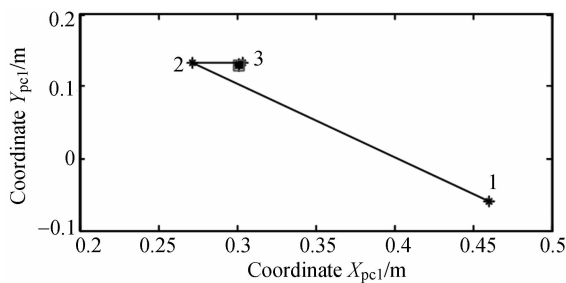
Tab. 4 Experiment results

| 序号 | 给定运动 $[R \ t]/(^{\circ})$ | P_1/m | P_2/m | P_3/m | 实验结果 $[R \ t]/(^{\circ})$ |
|----|--|-------------------|--------------------|---------------------|---|
| 1 | [2.00, 3.00, 0.00, 0.115, 0.203, 5.126] | (0.412, 0.309, 0) | (-0.645, 0.399, 0) | (-0.220, -0.443, 0) | [2.04, 3.02, 0.01, 0.115, 0.202, 5.123] |
| 2 | [0.00, 2.00, 0.00, 0.115, 0.203, 5.126] | (0.505, 0.146, 0) | (-0.560, 0.181, 0) | (-0.949, -0.642, 0) | [0.02, 2.04, 2.98, 0.111, 0.199, 5.130] |
| 3 | [2.00, 0.00, 3.00, 0.115, 0.203, 5.126] | (0.683, 0.342, 0) | (-0.382, 0.377, 0) | (0.082, -0.442, 0) | [2.03, -0.02, 3.03, 0.112, 0.206, 5.129] |

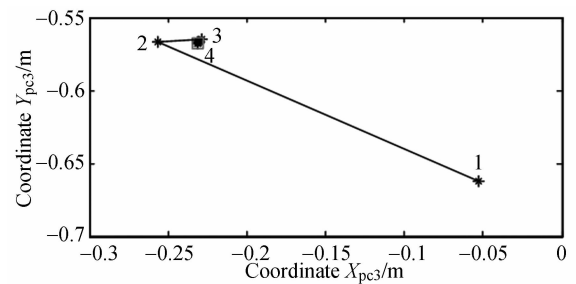
$[G_q^H]_{ij}$ 表示表 1 中的第 i 组运动,第 j 步迭代对应的 $[G_q^H]$ 。从表 2 和表 3 中可以看出,通过计算得到的假想光点坐标 P_{ci} 较快的逼近理论光点坐标,并且 $[R \ t]$ 也较快地达到其给定的理论值。图 6 为表 1 中第一组运动 3 个假想光点逼近理论点的路径图,图中方框代表了其理论值,从图中可以看出假想光点在第 4 步时就已经到达了理论值附近。图 7 则表示了表 1 中第一组运动被测物体



(b) 第二个假想光点的运动路径
(b) Path of the second imaginary point



(a) 第一个假想光点的运动路径
(a) Path of the first imaginary point



(c) 第三个假想光点的运动路径
(c) Path of the third imaginary point

图 6 假想光点的运动路径示意图

Fig. 6 Schematics of the imaginary points' paths

位姿的迭代收敛过程,从图中可以看出位姿解在 10 步内已经稳定收敛。

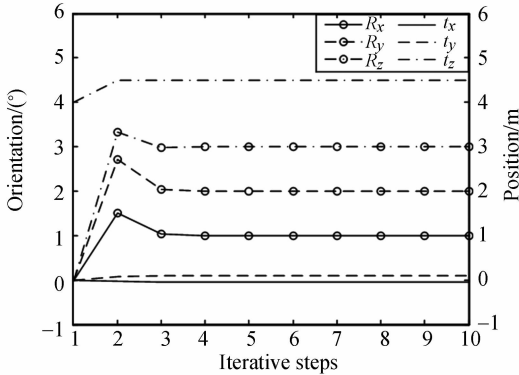


图 7 位姿迭代收敛过程

Fig. 7 Iterative process of the pose

6.2 实验

在实际的测量过程中,由于加工制造和装配等引起的误差使得运动模拟台的转动中心和伺服稳定平台的转动中心很难重合,直接影响了系统的测量精度。上述误差为系统误差,可以根据伺服稳定平台的转动中心相对于运动模拟台的耦合运动参数进行修正。测量系统的移动测量分辨率较低,同时受到其它因素影响,系统的移动测量精度为 5 mm。测量系统的优势在于姿态的测量,这也是符合伺服稳定平台的转动精度的测试需求。为了测试搭建测量系统的测量精度,如图 8 所示,将激光发射器安装在高精度运动模拟台上,运动模拟台的转角定位精度为 0.01° ,位置定位精度为 0.1 mm。通过标定可以得出激光束在 p - xy - z 坐标系中的结构参数。实验时,高精度运动模拟台绕同一个定点转动。实验中给定了三组运动,测量系统实验结果如表 4 所示。

参考文献:

- [1] 朱枫,何雷,郝颖明,等. 视觉位姿测量中单目视觉与双目立体视觉测量精度比较[J]. 仪器仪表学报, 2007,28(4):165-169.
ZHU F, HE L, HAO Y M, et al.. Contrast of calculated accuracy between monocular vision and binocular vision without modeling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 165-169. (in Chinese)



图 8 主动式测量系统实物图

Fig. 8 Physical map of active measuring system

从表 4 可以看出,姿态的最大偏差为 0.04° ,位置的最大偏差为 4 mm,基本满足了系统的精度设计要求。

7 结 论

本文以伺服稳定平台的姿态精度测试为背景,搭建了一种主动式测量系统,该系统对被测物体的姿态变化进行放大,能有效地提高系统的姿态测量精度。从并联机构的自由度出发,将视觉测量系统等效地转化为一个并联机构,将视觉测量系统的位姿估计问题转换为并联机构的正解问题。利用并联机构影响系数迭代求解系统的位姿,影响系数能够通过并联机构关节螺旋直接得到,没有复杂的推导过程。通过仿真验证,该方法能够以较快的速度收敛,且对给定的初值没有严格的要求。最后通过实验验证了方法的可行性,实验结果表明:主动式测量系统的姿态测量精度为 $\pm 0.05^\circ$,基本满足了伺服稳定平台的姿态精度测试要求。

- [2] 马颂德,张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1997.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision-The Theory of Computation and Basis of Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 刘峰,王向军,许薇,等. 并联跟踪台单目视觉自标定方法[J]. 红外与激光工程,2009,38(1): 175-179.
LIU F, WANG X J, XU W, et al.. Self-calibration method for the parallel tracking platform based on the monocular vision [J]. *Infrared and Laser En-*

- gineering, 2009, 38(1):175-179. (in Chinese)
- [4] ROBERT M H. Determining camera parameters from the perspective projection of a rectangle [J]. *Pattern Recognition*, 1989, 22(3):225-230.
- [5] 高学海,徐科军,张翰,等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(8): 1479-1485.
GAO X H, XU K J, ZHANG H, *et al.*. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder [J]. *Chinese journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(8):396-401. (in Chinese)
- [6] 魏振忠,赵征,张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 1669-1673.
WEI ZH ZH, ZHAO ZH, ZHANG G J. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 685-691. (in Chinese)
- [7] 张磊,徐科军,赵锐,等. 一种基于圆特征的单目视觉位姿测量算法的改进[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2009, 32(11): 685-691.
ZHANG L, XU K J, ZHAO R, *et al.*. Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circle features [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2009, 32(11):685-691. (in Chinese)
- [8] 许微. 基于几何特征量的自主位姿测量方法的研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
XU W. *Study on the self-measurement method of the attitude and position based on geometrical characteristic parameter* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [9] 肖旭. 单目视觉位姿测量方法的研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
XIAO X. *Study on Position-pose measurement method of monocular vision* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [10] ZHANG SH J, GAO X B, ZHANG F, *et al.*. Monocular vision based iterative pose estimation algorithm from corresponding feature points [J]. *Science China*, 2010, 53(8):1682-1696.
- [11] 孙泽林,王昭,李明. 火炮稳定精度图像测试系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1):157-164.
SUN Z L, WANG ZH, LI M. Image test system for gun stabilization accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 157-164. (in Chinese)
- [12] BATISTA J, ARAUJO H, ALMEIDA A T. Pose view stability analysis for camera look angles computation [C]. *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, ICPR*, 1996: 171-175.
- [13] 韩延祥,张志胜,戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1110-1116.
HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1110-1116. (in Chinese)
- [14] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced spatial mechanism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. (in Chinese)

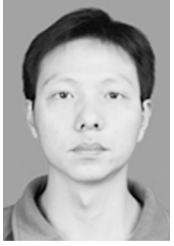
作者简介:



耿明超(1984—),男,河北保定人,博士研究生,2007年于河北建筑工程学院获得学士学位,主要从事机器人技术方面的研究。E-mail: mcgeng@ysu.edu.cn



边辉(1983—),男,河北张家口人,博士,讲师,2005年、2011年于燕山大学分别获得学士、博士学位,主要从事机器人技术等方面研究。E-mail: ysubh@ysu.edu.cn



唐启敬(1983—),男,广西桂林人,博士,工程师,2007年、2013年于燕山大学分别获得学士、博士学位,现为上海航天电子技术研究所工程师,主要从事机器人技术方面、导引头等方面研究。
E-mail: qjtang@ysu.edu.cn

导师简介:



赵铁石(1963—),男,河北秦皇岛人,博士,教授,博士生导师,1985年于合肥工业大学获得学士学位,1992年、2000年于燕山大学分别获得硕士、博士学位,主要从事并联机器人理论与应用、仿生与医疗康复机器人、微操作机器人与微机电系统、计算机图像处理与光机电集成系统、新型传感器研发等方面的研究。E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)