

双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统

杨文辉 林嘉睿* 高 扬 郝继贵

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 针对隧道施工中双护盾硬岩隧道掘进机位姿的精密测量需求,设计了一种组合式位姿测量系统。系统把单目视觉和激光标靶相结合,在利用激光标靶和全站仪完成掘进机后盾体位姿测量基础上,通过所设计的光学特征点空间分布模型,实现特征点的准确识别,根据特征点之间已知的几何约束关系和摄像机的透视投影模型,进行实时的图像处理 and 位姿解算,实现掘进机前盾体相对后盾体位姿的非接触式测量。系统建立了光学特征点、智能视觉传感器、激光标靶和全站仪之间的坐标转换关系,搭建了模拟双护盾硬岩隧道掘进机位姿变化的实验平台,并利用全站仪进行精度验证,最终完成掘进机全方位的实时位姿测量。实验结果表明:在30 m×3 m测量范围内,系统测量精度优于5 mm。测量系统具有精度高、抗噪声能力强和实时性好等优点,可满足隧道施工中双护盾硬岩隧道掘进机位姿的精密自动测量要求。

关键词 机器视觉; 双护盾掘进机; 位姿测量; 单目视觉; 激光标靶; 全站仪

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1112005

Pose Measurement System of Double Shield Universal Compact TBM

Yang Wenhui Lin Jiarui Gao Yang Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The demand for precision pose measurement of double shield universal compact TBM, a new combinatorial pose measurement system is established. The system combined with monocular vision and laser target, by making use of laser target and total station, pose of back shield is measured real-time, on the basis of that, the spatial distribution mode of the optical characteristic points is proposed, by which the characteristic points is recognized, by using the feature points' known geometric constraints and the camera perspective projection model, the intelligent vision sensor can real-time process image, and calculate the position and orientation, the position and orientation between front shield and back shield is measured non-contact. The system builds coordinate transformation relationship between the optical characteristic points, intelligent vision sensor, laser target and total station. The experimental platform which can simulate the position and orientation change of double shield universal compact TBM is established, and the accuracy verification experiment is conducted by a total station, comprehensive pose of TBM is figured out. Experimental results indicate that the precision of the system is less than 5 mm in a field of 30 m×3 m. The measurement system has the advantages of higher precision, real time and rapid speed, as well as strong anti-jamming. It can satisfy precision automatic pose measurement requirements of double shield universal compact TBM in tunnel construction.

Key words machine vision; double shield TBM; pose measurement; monocular vision; laser target; total station

OCIS codes 150.0155; 150.4232; 150.6044; 150.1135; 280.4788

1 引 言

地铁隧道施工中,盾构法具有安全高效、自动化程度高和对周围环境影响小等优点,得到了广泛的应用。

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(51305297)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130032120067)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCQNJC04600)

作者简介: 杨文辉(1992—),男,硕士研究生,主要从事大尺寸精密测量方面的研究。E-mail: answer10@163.com

导师简介: 郝继贵(1970—),男,博士,教授,主要从事大尺寸精密测量方面的研究。E-mail: jiguzhu@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: linjr@tju.edu.cn

先进的隧道掘进机在地下工程中越来越显示其优越性,双护盾硬岩隧道掘进机(DSUC TBM)更因其施工速度快、适用岩层广、施工质量优、有效地利用隧道空间等特点成为隧道施工的首选对象,同时 DSUC TBM 可以解决隧道转弯半径小、岩性复杂、岩石强度高问题^[1]。DSUC TBM 由刀盘、前盾、后盾和拼装系统等部分组成,前盾和后盾之间通过伸缩油缸铰接,其铰接部分为铰球,以保证前盾和后盾之间可以有六个自由度的变动。在隧道施工过程中,掘进机必须沿着隧道设计路线掘进,才能保证隧道顺利地贯通,因此必须实时精确测量掘进机前盾和后盾的位姿,并结合隧道设计曲线及时调整掘进机位姿,从而保证掘进机按照预期的目标推进。

目前掘进机位姿自动测量方法主要是陀螺仪导向和激光标靶导向等。陀螺仪导向系统是通过陀螺仪和倾斜仪结合测量盾构机位姿^[2]。陀螺仪的测量精度受机械加工和装配,以及施工过程中产生的振动和温度变化等因素影响较大,其最大缺点是误差会随着时间的增加而发散,所以陀螺仪导向会有累计误差,需要定期校准,稳定性差,测量精度低,一般作为辅助参考测量^[3]。激光标靶导向法主要是使用激光标靶和全站仪联用完成盾构机位姿测量,具有测量效率高、范围广、精度高等优点^[3-6]。然而激光标靶应用于测量 DSUC TBM 前盾位姿时,全站仪测量激光在铰接伸缩区间很容易被遮挡,无法得到前盾位姿。目前,对于 DSUC TBM,前盾体位姿实时测量是掘进机自动导向急需解决的难点问题,特别是前盾盾首中心坐标的实时定位^[7]。

在位姿测量领域中,单目视觉系统利用提取被测目标的几何特征,通过解算得到相对位姿,具有视场大、没有立体匹配、实时性强等优点^[8]。因此,本文设计了单目视觉与激光标靶相结合的双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统。基于单目视觉测量原理,设计了光学特征点空间分布模型和智能视觉传感器,构建了基于光学特征点的相对位姿测量方法;运用全站仪精确标定智能视觉传感器和激光标靶相对位姿关系,进而得到系统的测量模型;搭建了模拟双护盾硬岩隧道掘进机位姿变化的实验平台,验证了测量系统的可行性和精度。

2 测量系统设计

双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统主要由光学特征点、智能视觉传感器、激光标靶、全站仪等构成,如图 1 所示,光学特征点安装在掘进机前盾尾端,智能视觉传感器和激光标靶分别安装于后盾首端和尾端,全站仪位于掘进机后方。光学特征点成像质量决定系统精度,系统选用激光二极管,具有亮度稳定、成像灰度线性好等特点^[9-10],前盾和后盾之间通过伸缩油缸铰接,立体空间相对狭小,将光学特征点设计成 6 个共面的特征点,光学特征点与前盾固连,特征点如图所示空间拓扑的结构设计使系统具备了良好的现场测量柔性,使特征点易于识别和匹配,并且便于现场安装,而且可以很大程度上避免测量遮挡问题的影响。智能视觉传感器基于 ARM-Linux 嵌入式平台,由 ARM11 处理器、CCD 模拟相机、网络通讯接口以及相关辅助电路等构成,能够实时采集特征点图像,完成图像特征光斑的提取和识别,以及相对位姿的解算。激光标靶和全站仪联用可以实时测量后盾体的位姿^[3-6];通过前盾、智能视觉传感器、激光标靶以及全站仪的坐标转换,可以实时得到掘进机前盾和后盾的位姿。

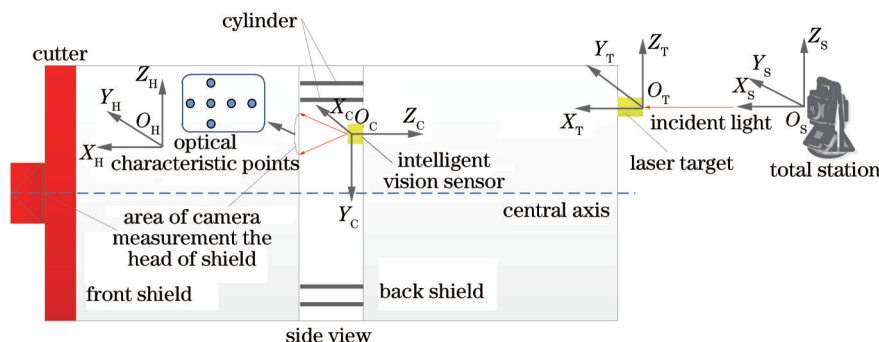


图 1 位姿测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of pose measurement system

双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统的坐标系包括:前盾坐标系 $O_H X_H Y_H Z_H$ 、相机坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ 、激光靶坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 和全站仪坐标系 $O_S X_S Y_S Z_S$ 。光学特征点和前盾盾首中心与前盾坐标系固连,前盾坐标系的原点和方向任意且不重要;相机坐标系的原点为镜头光心, X 轴和 Y 轴方向与 CCD 像素的 X 向和 Y 向相同;激光标靶坐标系的原点为反射棱镜测量中心点, Z 轴朝上, X 轴朝后;全站仪坐标系为全站仪自身定义。所有坐标系都无需映射到外部实体上,且均遵循左手法则。

3 基于单目视觉的前后盾相对位姿解算

3.1 特征光斑的提取与识别

在视觉精密测量中,光学特征点定位精度直接决定视觉测量系统的精度,系统中光学特征点通过结合滤光片等其他控制手段,能够得到高对比度的准理想图像,在许多特征点成像的亚像素定位方法中,灰度平方加权质心法加强了灰度值较大(距离中心较近)的像素点对质心位置的影响,抗干扰能力强,提高质心提取的精度。系统采用灰度平方加权质心法确定光斑中心位置^[11]。

特征点空间拓扑的结构设计充分考虑双护盾硬岩隧道掘进机前后盾的相对位姿变化特点以及现场实际工作条件,前后盾体结构较大,之间通过油缸铰接链接,尽可能让控制点充满整个相机的视场。结合以上特点,现场布置6个共面特征点,其结构设计成如图2中所示,便于后续特征点匹配。

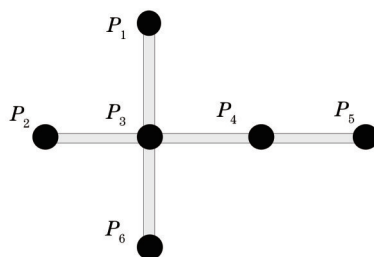


图2 光学特征点布局

Fig.2 Layout of the optical characteristic points

根据特征点空间拓扑约束在透视投影变换下的不变量进行特征点的匹配,即实现图像中光斑与光学特征点的准确对应。其匹配流程如下:

- 1) 对提取的特征光斑中心进行最小二乘法直线拟合,则拟合得到的直线 f 即为 $P_2\sim P_5$ 特征点所在的直线。
- 2) 分别计算点 $P_i(i=1,\dots,6)$ 到直线 f 的距离 $D_i(i=1,\dots,6)$,设定精度 ε ,如果 $D_i < \varepsilon$,则 P_i 为 $P_2\sim P_5$ 特征点之一,剩余两个点为 P_1 和 P_6 ,拟合得到直线 m ,可求得直线 f 和直线 m 的交点 G 。特征点 $P_2\sim P_5$ 中距离点 G 最近的是 P_3 点,最远的是 P_5 点; P_2 和 P_4 中,距离 P_5 最近的点是 P_4 点,距离远的是 P_2 点。
- 3) 通过判断剩余特征点位于直线 f 上方或是下方,确定 P_1 和 P_6 ,上方是 P_1 ,下方是 P_6 。

3.2 基于特征点的相对位姿解算

在视觉测量领域,利用光学特征点已知的位置约束关系及摄像机的透视投影模型,求解得到相对位姿的方法都可以归结到PNP问题^[12-13]。通过解决PNP问题,就可以求解特征点坐标系与摄像机坐标系的变换关系来完成对目标姿态的测量。目前针对PNP问题求解主要是有非迭代方法和迭代方法^[14]。非迭代方法通过相机模型构造方程,求解相对位姿。迭代方法是利用最优化技术,求解最佳位姿估计。非迭代方法实时性强、运算量小,实际应用中,由于相面点提取误差,控制点之间位置误差等,由线性方程求解得到的位姿精度不高^[15-17]。迭代方法能够较好克服噪声,但需要较好的初值否则无法稳定收敛。本文采用迭代和非迭代相结合的方法求解最佳相对位姿,线性解析求解初值,在此基础上通过非线性优化获得精确解。如图3所示,摄像机采用针孔模型^[18],摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$,像素坐标系为 O_{xy} ,前盾坐标系 $O_H X_H Y_H Z_H$ 。

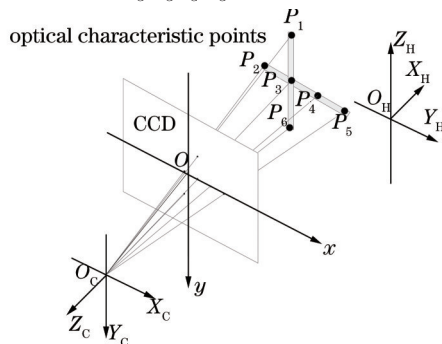


图3 单目视觉测量模型

Fig.3 Measurement model of the monocular vision

设光学特征点 P_i , 其在前盾坐标系下的坐标为 $(x'_i, y'_i, z'_i)^T$, 得到的对应成像点为 P'_i , 其在像平面坐标系下的坐标为 $(u_i, v_i)^T$ 。于是根据成像模型可得

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 ρ 为比例参数, A 为摄像机内部参数矩阵, R, T 分别为前盾坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量, 表示前盾坐标系与相机坐标系之间的变换关系。其表达式如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11}^T \\ r_{21}^T \\ r_{31}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

光学特征点 $P_i (i=1, \dots, 6)$, 对应成像点为 $P'_i (i=1, \dots, 6)$, 其在像平面坐标系下经过校正后的图像点归一化坐标为 $(x_{pi}, y_{pi})^T$ 。由于光学特征点共面, 光学特征点 $P_i (i=1, \dots, 6)$ 在前盾坐标系下坐标 $(x'_i, y'_i, z'_i)^T$ 经坐标转换到 $Z=0$ 平面以后的坐标为 $(x''_i, y''_i, 0)^T$, 于是由(1)式可得

$$\rho \begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, \dots, 6. \quad (3)$$

由此可得线性方程

$$\begin{cases} f_{ai} = (r_{11}x''_i + r_{12}y''_i + T_x) - x_{pi}(r_{31}x''_i + r_{32}y''_i + T_z) = 0 \\ f_{bi} = (r_{21}x''_i + r_{22}y''_i + T_y) - y_{pi}(r_{31}x''_i + r_{32}y''_i + T_z) = 0 \end{cases}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (4)$$

采用矩阵形式 $Ax=0$ 形式, 可以得到

$$Ax = \begin{bmatrix} x''_1 & y''_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_{p1}x''_1 & x_{p1}y''_1 & x_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & x''_1 & y''_1 & 1 & y_{p1}x''_1 & y_{p1}y''_1 & y_{p1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x''_n & y''_n & 1 & 0 & 0 & 0 & x_{pn}x''_n & x_{pn}y''_n & x_{pn} \\ 0 & 0 & 0 & x''_n & y''_n & 1 & y_{pn}x''_n & y_{pn}y''_n & y_{pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ T_x \\ r_{21} \\ r_{22} \\ T_y \\ r_{31} \\ r_{32} \\ T_z \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

每个特征点可以产生(4)式的2个线性方程, 通过系数矩阵 A 可知, 共面点非共线则矩阵满秩, 方程有唯一解。那么求解未知量至少需要4个非共线的特征点, 才能得到线性解, 并结合正交约束, 可解得 R, T 。在特征点布置过程中布置6个特征点, 充分考虑掘进机运动特征, 掘进机连接是油缸铰接, 只要能在相应的图像区域内部采集到4个或者以上特征点, 便可以进行姿态求解。通过线性方程可求得 R, T , 作为进一步优化求解的初值。

在求解初值的基础上, 利用优化技术最小目标函数来估计位姿, 目标函数由图像平面上特征点重投影误差构成, 所构造的目标函数为

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^6 \left[\left(x_{pi} - \frac{r_1^T P_i + T_x}{r_3^T P_i + T_z} \right)^2 + \left(y_{pi} - \frac{r_2^T P_i + T_y}{r_3^T P_i + T_z} \right)^2 \right], \quad (6)$$

(6)式的求解属于无约束非线性优化问题。在常用求解方法中, Levenberg-Marquardt^[19]法具有下降速度快及算法稳定性好等优点, 是最有效的非线性最小二乘算法之一。因此, 本文采用该算法对上述非线性目标函数进行求解。以(4)式求得的线性解 R 和 T 作为初值, 采用 Levenberg-Marquardt 优化算法求解(6)式可得到 R 和 T 的精确解。

在求得 R 和 T 精确解的基础上, 设前盾盾首中心在前盾坐标系下的坐标为 P_0 , 在相机坐标系下的坐标为 P_c , 则

$$P_c = R \cdot P_0 + T, \quad (7)$$

从而实现前盾盾首中心的位置测量。

4 单目视觉和激光标靶组合测量原理

全站仪可以自动锁定激光标靶,同时实时获取激光标靶的位置,激光标靶测得自身的空间姿态角,两者结合能够实现后盾体位姿测量^[3-6]。基于特征点的单目视觉位姿测量方法可以完成前后盾体相对位姿测量。通过相机坐标系和激光标靶坐标系的坐标转换,可以实时得到前盾位姿。

4.1 相机坐标系与激光标靶坐标系相对位姿的精确标定

双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统坐标转换示意图如图4所示,描述前盾坐标系与相机坐标系之间相对姿态是 R_{HC} 和 T_{HC} ,描述相机坐标系与激光标靶坐标系之间相对姿态是 R_{CT} 和 T_{CT} ,描述激光标靶坐标系与全站仪坐标系之间相对姿态是 R_{TS} 和 T_{TS} ,描述前盾坐标系与全站仪坐标系之间相对姿态是 R_{HS} 和 T_{HS} 。在实施测量前,需要精确标定相机坐标系与激光标靶坐标系之间相对姿态是 R_{CT} 和 T_{CT} 。

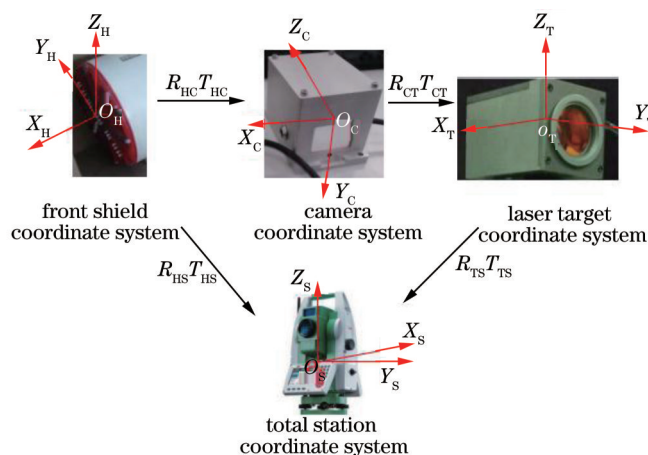


图4 系统坐标系转换示意图

Fig.4 Schematic diagram of system's coordinate transformation

根据光学控制点、智能视觉传感器、激光标靶和全站仪的空间坐标转换关系,设空间点 G ,则其在前盾坐标系下的坐标 G_H 与在全站仪坐标系下的坐标 G_S 满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} G_S \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{TS} & T_{TS} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CT} & T_{CT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{HC} & T_{HC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_H \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

首先,分别得到全站仪坐标系下的前盾盾首中心坐标 P_0 ,光学特征点坐标 $P_i(i=1, \dots, 6)$,构成前盾坐标系,则前盾盾首中心在前盾坐标系下的坐标也是 P_0 。然后,获取全站仪坐标系下激光标靶位置 T_{TS} 和姿态角,姿态角构成激光标靶坐标系在全站仪坐标系下的旋转矩阵 R_{TS} 。由于全站仪测量角度和空间的限制,单站位可能无法测得所有的要素,需要进行转站,通过多个站位完成测量。智能视觉传感器实时采集图像,解算可得盾首坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 R_{HC} 和平移向量 T_{HC} 。此时由(8)式可得

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{TS} & T_{TS} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{CT} & T_{CT} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{HC} & T_{HC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

化解可得

$$\begin{cases} R_{CT} = (R_{HC} \cdot R_{TS})^{-1} \\ T_{CT} = -R_{TS}^{-1} \cdot T_{TS} - (R_{HC} \cdot R_{TS})^{-1} \cdot T_{HC} \end{cases}. \quad (10)$$

4.2 组合测量原理

在测量过程中,智能视觉传感器实时采集光学特征点图像,获取前盾坐标系与相机坐标系相对位姿关系,全站仪位于掘进机后方,以自动跟踪模式锁定激光标靶,激光标靶实时测量自身坐标系与全站仪坐标系的相对姿态。系统通过前盾坐标系—相机坐标系—激光标靶坐标系—全站仪坐标系之间的坐标传递,根据(8)式可计算得到前盾盾首中心在全站仪坐标系下的坐标 P_S :

$$P_s = R_{TS} \cdot [R_{CT} \cdot (R_{HC} \cdot P_0 + T_{HC}) + T_{CT}] + T_{TS} \quad (11)$$

5 实验验证

5.1 仿真实验与结果

为了验证本文所构建的单目视觉前后盾相对位姿测量方法以及单目视觉和激光标靶组合测量系统的有效性,建立 Matlab 仿真实验系统,模拟位姿估计过程,这也是目前位姿估计算法最常用的研究手段^[20]。

5.1.1 单目视觉前后盾相对位姿测量方法仿真验证

实验中,给定相机内参如下: $d_x = d_y = 0.0086$ mm;焦距 $f = 12$ mm;主点坐标 $(u_c, v_c) = (384, 288)$,图像大小为 768×576 。根据光学特征点空间布局情况,光学特征点 $P_1 \sim P_6$ 共面,前盾盾首中心距离光学特征点平面 1.5 m,两者空间相对位置关系如图5(a)所示。为度量位姿测量误差,定义位姿测量误差 $E_{Head} = \|P_{Oure} - P_0\|$,其中 P_{Oure} 和 P_0 分别表示前盾盾首中心的真值和估计值。为了客观评价该方法的精度,实验中模拟前盾坐标系和相机坐标系多种情况的相对位姿关系,每一种情况下,取光学特征点高斯图像噪声方差为 0.1 pixel运行 1000 次,取平均值作为实验结果,得到的误差 E_{Head} 分布如图5(b)所示,结果表明,前盾盾首中心坐标测量误差最大不超过 2.5 mm。

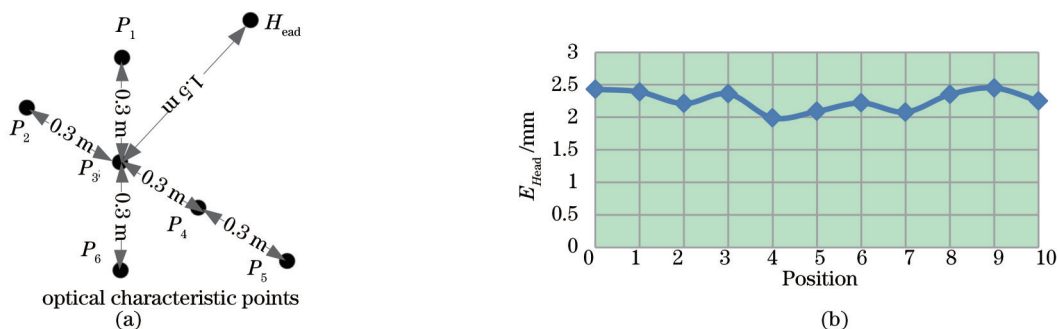


图5 (a) 光学特征点与盾首布局;(b) 盾首中心姿态误差

Fig.5 (a) Layout of optical characteristic points and head of shield; (b) error of head of shield pose

5.1.2 单目视觉和激光标靶组合测量系统仿真验证

实验中,光学特征点的空间布局和相机的相关参数与5.1.1节实验中的相同,激光标靶^[3]滚转角和俯仰角测量精度 0.005° ,水平角测量精度 0.006° ,取光学特征点高斯图像噪声方差为 0.1 pixel,模拟前盾坐标系和相机坐标系多种情况的相对位姿关系,每一种情况运行 1000 次,取平均值作为实验结果,得到单目视觉和激光标靶组合测量系统的误差 E_{Head} 分布如图6所示,结果表明,前盾盾首中心位姿测量误差小于 4 mm。

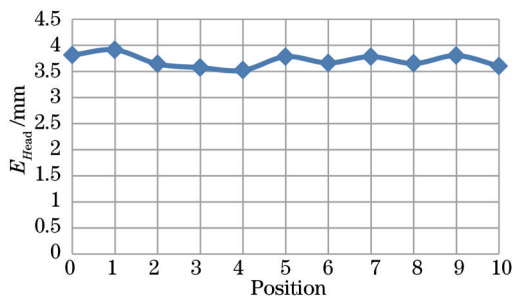


图6 盾首中心姿态误差

Fig.6 Error of head of shield pose

5.2 系统搭建

为了有效地验证位姿测量系统,搭建如图7所示的试验系统。整个试验系统包括光学特征点、智能视觉传感器、激光标靶、全站仪等。 0.9 m \times 0.6 m \times 1.5 m刚体架模拟前盾体,上边布置光学特征点和棱镜,两者相距 1.5 m,棱镜用于模拟前盾盾首中心。智能视觉传感器和激光标靶分别固定于刚体(长度 2 m)两端,模拟后盾体。光学特征点距离智能视觉传感器 3 m。全站仪距离激光标靶 30 m。全站仪型号为Leica TS15,有棱镜测距精度 $(1 + 1.5 \times 10^{-6})$ mm,测角精度 $1''$,无棱镜测距精度 $(2 + 2 \times 10^{-6})$ mm。具体实验流程如下:全站仪实时跟踪激光标靶,智

能视觉传感器和激光标靶实时解算测量结果,并通过网线接口传送结果,上位机进行综合解算。在实验过程中,首先标定智能视觉传感器和激光标靶相对位姿关系,然后调节刚体架来改变特征点和棱镜的位置和姿态,模拟前盾的运动,以及调节模拟后盾体的位置和姿态,通过位姿测量系统实时解算出棱镜在全站仪坐标系下坐标,并与全站仪实测值进行比较,求两坐标距离差作为评定位姿测量系统的测量精度。

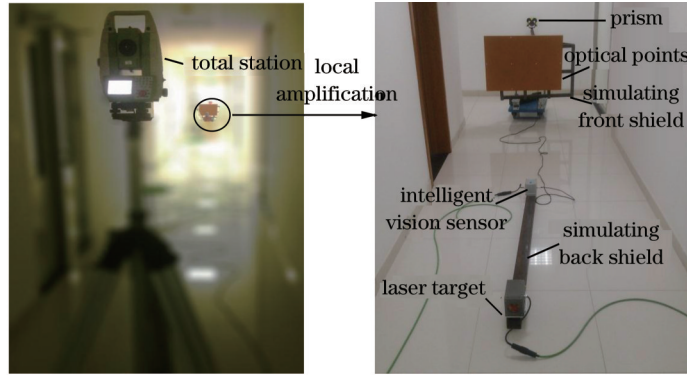


图7 双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统实验图

Fig.7 Experiment of the pose measurement system of double shield universal compact TBM

5.3 测量实验

基于图7所示的实验系统,首先运用本文标定方法标定智能视觉传感器和激光标靶相对位姿关系。在标定过程中,多次测量求解智能视觉传感器和激光标靶的相对位姿关系 R_{CT} 和 T_{CT} ,对测量得到的数据进行平均以提高精度,对图5所示的实验标定结果如下:

$$R_{CT} = \begin{bmatrix} 0.0127 & -0.1354 & -0.9907 \\ -0.9999 & 0.0034 & -0.0133 \\ 0.0052 & 0.9908 & -0.1353 \end{bmatrix}, T_{CT} = \begin{bmatrix} 1.9416 \\ -0.0156 \\ 0.1201 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

然后,模拟双护盾硬岩隧道掘进机的运动,改变前盾以及后盾的姿态,利用本文的组合测量方法进行位姿测量,实验数据如表1所示。其中MO表示双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统测量的盾首坐标,TS表示全站仪测量的盾首坐标,dX,dY和dZ表示X,Y和Z轴偏差,dΔ表示位姿测量系统测量坐标与全站仪测量坐标之间的距离差,此距离差用来衡量系统的测量精度。

表1 综合测量精度实验数据

Table 1 Experimental data of comprehensive measurement precision

No.		X /m	Y /m	Z /m	dX /mm	dY /mm	dZ /mm	dΔ /mm
1	MO	13.3687	6.8176	9.8278	1.6	2.4	2.9	4.09
	TS	13.3671	6.8152	9.8249				
2	MO	13.4499	6.8349	9.9597	1.8	-3.1	3.2	4.81
	TS	13.4481	6.838	9.9565				
3	MO	12.3777	5.8244	9.9192	-0.7	3.6	0.1	3.67
	TS	12.3784	5.8208	9.9191				
4	MO	8.5919	-0.0265	-1.3563	3.6	-0.8	1.8	4.1
	TS	8.5883	-0.0257	-1.3581				
5	MO	9.9332	-0.4031	-1.3315	0.3	0	1.5	1.53
	TS	9.9329	-0.4031	-1.333				
6	MO	9.6354	2.4709	-1.3362	-2.6	0.4	-2.6	3.7
	TS	9.638	2.4705	-1.3336				
7	MO	8.9219	-0.0361	5.3549	0.9	2.7	-3	4.14
	TS	8.921	-0.0388	5.3579				
8	MO	8.5939	3.0104	-1.2945	2.3	-2.8	1.3	3.85
	TS	8.5916	3.0132	-1.2958				

实验数据表明,实际实验精度略差于仿真实验精度,主要是由于光学特征点坐标测量误差,智能视觉传感器内参标定误差,相机坐标系和激光标靶坐标系相对位姿关系标定误差,激光标靶测量误差,全站仪测量误差等造成的,但是系统测量精度基本可控制在5 mm以内,该精度可以满足双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量的需求。

6 结 论

本文针对隧道施工中双护盾硬岩隧道掘进机位姿的精密测量需求,基于单目视觉测量原理,研究了光学特征点的空间分布,设计了基于光学特征点的相对位姿解算方法,分析了单目视觉与激光标靶结合的组合测量方法,构建了位姿测量系统。为了验证系统,搭建了模拟双护盾硬岩隧道掘进机位姿变化的实验平台,并利用全站仪进行精度验证。实验结果表明,系统实时性强,在30 m×3 m测量范围内,系统测量精度优于5 mm,能够很好地满足测量需求,实现双护盾硬岩隧道掘进机施工过程中位姿测量。

参 考 文 献

- 1 Wang Mengshu. Tunneling by TBM/shield in China: state-of-art, problems and proposals[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187.
王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- 2 Xu Ran. The Research of Auto Orientation System of the Shield in Subway Construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2008: 11-26.
徐 然. 地铁盾构智能导向系统研究[D]. 上海: 同济大学, 2008: 11-26.
- 3 Meng Xiangrui. Key Techniques on New Type Laser Target Pose Measurement System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 5-19.
孟祥瑞. 新型激光标靶位姿测量系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 5-19.
- 4 Chen Hui, Zhao Bin. Electric target based on non-diffracting beam and error analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(2): 34-40.
陈 慧, 赵 斌. 无衍射光电子标靶及误差分析[J]. 光电工程, 2011, 38(2): 34-40.
- 5 Neumayr R, Harker M, O'Leary P, *et al.*. New approaches to machine vision based displacement analysis[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2012 IEEE International, 2012: 979-984.
- 6 Ababsa F, Malle M. Robust camera pose estimation using 2d fiducials tracking for real-time augmented reality systems[C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI2004), 2004: 431-435.
- 7 Pan Guorong, Bai Yun, Li Huaifeng. Measuring method for link shield guiding system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(3): 55-58.
潘国荣, 白 昀, 李怀锋. 铰接盾构自动导向系统测量方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 55-58.
- 8 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position pose measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- 9 Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 10-25.
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 10-25.
- 10 Long Changyu, Zhu Jigui, Guo Yin, *et al.*. Study on close-range photogrammetry based on nonparameteric measurement model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215004.
隆昌宇, 郝继贵, 郭 寅, 等. 基于非参数测量模型的摄影测量方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215004.
- 11 Fan Qiaoyun, Zhang Guangjun. Spot centroiding algorithm for discrete noise image and its hardware implementation[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 19(12): 2992-2998.
樊巧云, 张广军. 离散噪声图像的光斑质心算法及其硬件实现[J]. 光学精密工程, 2012, 19(12): 2992-2998.
- 12 Zhai Guang, Zhang Jingrui, Zhang Yao. Linear-monocular vision based on coplanar feature points for space target relative determination [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(10): 1015-1020.
翟 光, 张景瑞, 张 尧. 基于共面光标提取的空间目标单目测量技术[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(10): 1015-1020.
- 13 Zhai Kun, Qu Xi, Li Zhi, *et al.*. Ground test and relative attitude determination algorithms of non-cooperative spacecraft[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(3): 61-65.
翟 坤, 曲 溪, 李 志, 等. 非合作航天器相对姿态确定算法及地面试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 61-65.

- 14 Zheng Y, Kuang Y, Sugimoto S, *et al.*. Revisiting the pnp problem: a fast, general and optimal solution[C]. Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on, 2013: 2344–2351.
- 15 Li Xin, Long Gucan, Liu Jinbo, *et al.*. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0115004.
李 鑫, 龙古灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115004.
- 16 Miao Xikui, Zhu Feng, Ding Qinghai, *et al.*. Monocular vision pose measurement based on docking ring component[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412006.
苗锡奎, 朱 枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412006.
- 17 Zhang Guangjun. Vision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2008: 17–19.
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 17–19.
- 18 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908007.
王子辰, 戴 明, 李 刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908007.
- 19 Behling R, Fischer A, Herrich M, *et al.*. A Levenberg–Marquardt method with approximate projections[J]. Computational Optimization & Applications, 2014, 59(1–2): 5–26.
- 20 Chen Peng, Hu Guangda, Yan Guirong. Camera pose estimation algorithm based on particle system kinematics[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0112002.
陈 鹏, 胡广大, 闫桂荣. 基于质点系运动原理的像机位姿估计算法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0112002.

栏目编辑: 何卓铭