

单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统

何斐彦 林嘉睿* 高 扬 任永杰 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 为了提高单目视觉实时测量双护盾隧道掘进机前后盾相对位姿的精度,引入高精度倾角传感器与单目视觉构成一种组合测量系统。该系统将两个倾角传感器分别与视觉传感器和特征点系统固定连接,通过倾角传感器提供的多个角度约束,结合单目视觉实现掘进机前盾体相对于后盾体位姿的更高精度测量。仿真实验表明该系统是可行的,并且具有理想的精度。搭建了模拟双护盾隧道掘进机位姿变化的实验平台,利用全站仪进行精度验证。结果表明系统的测量精度优于3 mm,相对于单目视觉测量方法来说,测量精度有了显著提升,可以满足隧道施工中双护盾隧道掘进机位姿的精密测量需求。

关键词 机器视觉; 位姿测量; 单目视觉; 倾角传感器; 双护盾隧道掘进机

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1215002

Optimized Pose Measurement System Combining Monocular Vision with Inclinometer Sensors

He Feiyan Lin Jiarui Gao Yang Ren Yongjie Zhu Jigui

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

Abstract In order to improve the precision of pure monocular vision for the relative pose between two shields of double shield tunnel boring machine (TBM) during excavating process, this paper presents a new measurement system combining monocular vision and high-precision inclinometer sensors. Two inclinometer sensors are fixed with the camera and feature points separately. By multiple constraints of angles provided by inclinometer sensors and the monocular vision, the pose between front shield and back shield is measured with higher precision. In this paper, simulation shows that the feasibility of the system is validated and it has ideal precision. Afterwards, the experimental platform to simulate the pose of double shield TBM is established, and the accuracy verification experiment is conducted by a total station. The result indicates that the measurement precision is less than 3 mm and much better than that of the pure monocular vision measurement method, which means that this model can satisfy precise measurement requirements of double shield TBM poses during excavating process.

Key words machine vision; pose measurement; monocular vision; inclinometer sensor; double shield tunnel boring machine

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 150.1488; 150.6044

1 引 言

隧道掘进机是一种集机、电、液、光、计算机技术为一体的高智能化、新型、先进的隧道施工重大技术装备。随着国民经济的快速发展,我国城市化进程不断加快,今后相当长的时期内,国内城市地铁隧道等隧道工程都将需要大量的隧道掘进机。双护盾硬岩隧道掘进机因其工作效率高、施工安全可靠、对周边地面建筑物干扰小等优点而成为隧道施工的首选^[1-2]。双护盾隧道掘进机由刀盘、前盾、后盾和拼装系统等部分组成,

收稿日期: 2016-05-19; 收到修改稿日期: 2016-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(51305297)、国家重大科学仪器设备开发专项子任务(2013YQ35074702)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCQNJC04600)

作者简介: 何斐彦(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: hfy_921215@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: jiguizhu@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: linjr@tju.edu.cn

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 6 个自由度的变动。在施工过程中,双护盾隧道掘进机需要按照设计轴线进行掘进,并且只能前进,不能后退。因此在掘进过程中,必须实时测量掘进机两个盾体的位姿信息,以便控制掘进误差并进行有效的调整。

为了能够实时、高精度、自动获取隧道掘进机的位姿,施工过程中一般采用自动导向系统,目前常用的方法主要有棱镜法、惯性测量法、激光标靶法等。棱镜法对通视条件要求很高,测量现场很难保证,再加之其测量效率低,实时性差,因此目前已经较少使用。惯性测量法主要通过陀螺仪和加速度计等惯性元件的组合使用,通过积分计算获取目标的位姿,其最大的缺点在于误差会随着时间的推移而发散,所以该方法会有累积误差,需要定期校正,测量精度低。激光标靶法使用全站仪配合单个激光标靶即可实现目标物体位姿测量,该方法具有便捷性好、量程大、测量精度高等优点^[3-4]。但是,利用激光标靶法测量双护盾硬岩隧道掘进机的前盾位姿时,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。

在位姿测量领域单目视觉系统通过解算 PnP 问题获取被测目标位姿信息,该系统具有结构简单、视场大、实时性强等优点。杨文辉等^[4]设计了一个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,该系统整体测量精度优于 10 mm,基本达到了导向系统测量的需求,但是系统的稳定性不高,测量精度还有很大的提升空间。为了提高大视场下的系统精度及系统的稳定性,本文采用倾角传感器提供多个角度约束,设计了一种单目视觉与倾角传感器组合的测量系统。搭建了模拟双护盾隧道掘进机位姿变化的实验平台,验证了该系统的可行性与精度。

2 整体模型设计

双护盾隧道掘进机组合测量系统主要由特征点系统、相机系统、倾角传感器、全站仪等构成,系统示意图如图 1 所示。从图 1 可以看到,特征点系统安装在隧道掘进机前盾的尾部,5 个特征点非共面分布;相机安装于后盾的前端,并且需要保证特征点系统的光学特征点位于相机的视场内;两个倾角传感器分别与特征点系统和相机固定连接;全站仪放置在掘进机的后面。基于 ARM-Linux 嵌入式平台的相机系统由 ARM Cortex-A8 处理器、Basler 数字相机以及相关辅助电路等构成。两个倾角传感器与特征点系统及相机系统之间的相对位置关系需要提前标定好。光学特征点之间的相对位置关系由设计参数决定,精度由工装保证。相机实时采集特征点图像,下位机完成特征点的识别和中心提取,并通过两个倾角传感器提供的角度约束,完成前后盾相对位姿的解算。

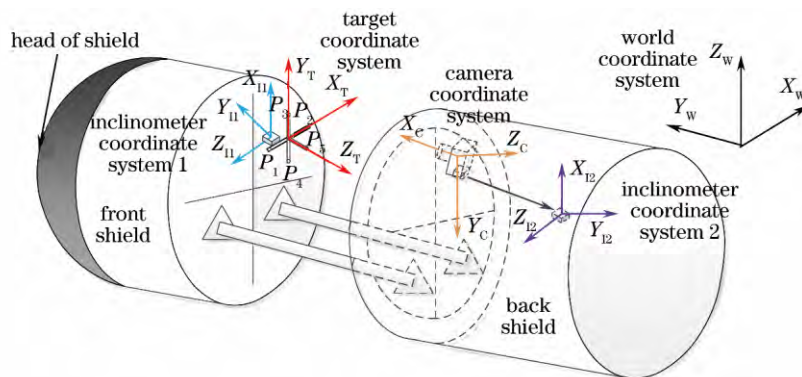


图 1 双护盾隧道掘进机组合测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double shield tunnel boring machine combined measurement system

双护盾隧道掘进机组合测量系统共有 5 个坐标系:倾角仪 1 坐标系 $O_{I1} X_{I1} Y_{I1} Z_{I1}$ 、特征点坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 、相机坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ 、倾角仪 2 坐标系 $O_{I2} X_{I2} Y_{I2} Z_{I2}$ 以及世界坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 。由于倾角仪只输出两个角度值,因此只利用倾角仪坐标系的旋转角度信息,故可设特征点坐标系到倾角仪 1 坐标系的旋转矩阵为 R_1 ,相机坐标系到倾角仪 2 坐标系的旋转矩阵为 R_2 ,相应的平移矩阵不考虑,它们的关系均由标定得到。倾角仪 1 坐标系到世界坐标系的旋转、平移矩阵分别为 R_{I1W} 、 T_{I1W} ,倾角仪 2 坐标系到世界坐标系的旋转、平移矩阵分别为 R_{I2W} 、 T_{I2W} ,相机坐标系到世界坐标系的旋转、平移矩阵分别为 R_{CW} 、 T_{CW} ,特征点坐标

系到世界坐标系的旋转、平移矩阵分别为 \mathbf{R}_{TW} 、 \mathbf{T}_{TW} ，特征点坐标系到相机坐标系的旋转、平移矩阵分别为 \mathbf{R}_{TC} 、 \mathbf{T}_{TC} 。旋转矩阵 \mathbf{R} 绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角分别为 ω 、 φ 、 κ 。倾角仪 X 、 Y 轴的输出分别为 β 、 γ 。

3 测量原理

3.1 线性求初解

3.1.1 坐标系转换及相机模型

由特征点坐标系和相机坐标系的关系可知：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{TC} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{TC}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{R}_{TC} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{TC} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}。$$

由相机坐标系、特征点坐标系和世界坐标系之间的关系可知：

$$\mathbf{R}_{TC} = (\mathbf{R}_{CW})^{-1} \mathbf{R}_{TW}, \quad (2)$$

因为旋转矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega$ ，令 $\mathbf{R}^a = \mathbf{R}_\kappa$ ， $\mathbf{R}^b = \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega$ ，则(2)式可以转化为

$$\mathbf{R}_{TC} = (\mathbf{R}_{CW}^b)^{-1} (\mathbf{R}_{CW}^a)^{-1} \mathbf{R}_{TW}^a \mathbf{R}_{TW}^b, \quad (3)$$

令 $\mathbf{R}^c = (\mathbf{R}_{CW}^a)^{-1} \mathbf{R}_{TW}^a$ ，则(1)式可变为

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{CW}^b)^{-1} \mathbf{R}^c \mathbf{R}_{TW}^b \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{TC}, \quad (4)$$

$$\text{式中 } (\mathbf{R}_{CW}^b)^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{TW}^b = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_4 & b_5 & b_6 \\ b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix}。$$

由刚体变换原理可知：

$$\mathbf{R}^c = \begin{bmatrix} \cos \kappa_{CW} & -\sin \kappa_{CW} & 0 \\ \sin \kappa_{CW} & \cos \kappa_{CW} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \cos \kappa_{TW} & -\sin \kappa_{TW} & 0 \\ \sin \kappa_{TW} & \cos \kappa_{TW} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & 0 \\ -\beta & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 。

设相机的焦距为 f ，径向畸变为 (k_1, k_2, k_3) ，切向畸变为 (p_1, p_2) ，畸变矫正后的特征点在相面上的坐标为 (x_c, y_c) ，由相机成像模型可得：

$$\begin{cases} x_c = f \frac{X_C}{Z_C} \\ y_c = f \frac{Y_C}{Z_C} \end{cases}, \quad (6)$$

把(4)式、(5)式代入(6)式可得：

$$\begin{cases} x_c = f \frac{c_1 \alpha + c_2 \beta + t_1 + c_3}{c_7 \alpha + c_8 \beta + t_3 + c_9} \\ y_c = f \frac{c_4 \alpha + c_5 \beta + t_2 + c_6}{c_7 \alpha + c_8 \beta + t_3 + c_9} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\text{式中 } \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 a_1 + d_2 a_2 & d_2 a_1 - d_1 a_2 & d_3 a_3 \\ d_1 a_4 + d_2 a_5 & d_2 a_4 - d_1 a_5 & d_3 a_6 \\ d_1 a_7 + d_2 a_8 & d_2 a_7 - d_1 a_8 & d_3 a_9 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 X_T + b_2 Y_T + b_3 Z_T \\ b_4 X_T + b_5 Y_T + b_6 Z_T \\ b_7 X_T + b_8 Y_T + b_9 Z_T \end{bmatrix}。$$

3.1.2 倾角仪模型

倾角仪输出的两个值 β 和 γ 分别为其 X 轴和 Y 轴与水平面的夹角(图 2)。参考坐标系的 XOY 平面与水平面平行,因此倾角仪 X 轴方向输出的角度即为绕 Y 轴的旋转角(俯仰角),但是 Y 轴方向输出的角度并不等于绕 X 轴的旋转角(滚转角),下面通过简单的推导得出其值。

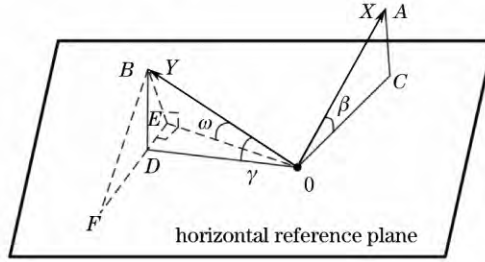


图 2 倾角仪输出角与旋转角之间的关系

Fig. 2 Relationship between output angle and rotation angle of the inclinometer

从图 2 可知,直线 OE 垂直于平面 OAC 和平面 BDE ,因此有 $OE \perp BE$, $OE \perp BF$ 。延长 ED 至 F ,使得直线 BF 平行于直线 AO ,则有 $\angle BFD = \beta$,并且 $BF \perp OB$ 。因此, $BF \perp$ 平面 OBE ,则有 $BF \perp BE$ 。所以 $\angle DBE = \angle BFD = \beta$ 。

由三角函数关系可知:

$$\sin \omega = \frac{BE}{OB} = \frac{BD}{OB} \cdot \frac{BE}{BD} = \frac{\sin \gamma}{\cos \beta} \quad (8)$$

这样可以得到倾角仪输出角与相应旋转角之间的关系:

$$\begin{cases} \omega = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma}{\cos \beta}\right) \\ \varphi = \beta \end{cases} \quad (9)$$

因此,由倾角仪 1 的输出可知:

$$\omega_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma_1}{\cos \beta_1}\right), \varphi_1 = \beta_1 \quad (10)$$

由特征点坐标系、倾角仪 1 坐标系和世界坐标系之间的关系可知:

$$\mathbf{R}_{TW} = \mathbf{R}_{IW} \mathbf{R}_1 \quad (11)$$

由此可得:

$$\begin{cases} \omega_{TW} = \arctan \left[\frac{\mathbf{R}_{IW}(3,1)\mathbf{R}_1(1,2) + \mathbf{R}_{IW}(3,2)\mathbf{R}_1(2,2) + \mathbf{R}_{IW}(3,3)\mathbf{R}_1(3,2)}{\mathbf{R}_{IW}(3,1)\mathbf{R}_1(1,3) + \mathbf{R}_{IW}(3,2)\mathbf{R}_1(2,3) + \mathbf{R}_{IW}(3,3)\mathbf{R}_1(3,3)} \right] \\ \varphi_{TW} = -\arcsin [\mathbf{R}_{IW}(3,1)\mathbf{R}_1(1,1) + \mathbf{R}_{IW}(3,2)\mathbf{R}_1(2,1) + \mathbf{R}_{IW}(3,3)\mathbf{R}_1(3,1)] \end{cases} \quad (12)$$

\mathbf{R}_1 是提前标定好的,而由刚体变换原理可知:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{IW}(3,1) = -\sin \varphi_1 \\ \mathbf{R}_{IW}(3,2) = \sin \omega_1 \cos \varphi_1 \\ \mathbf{R}_{IW}(3,3) = \cos \omega_1 \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (13)$$

这样,联立(10)、(12)和(13)式可以求出 \mathbf{R}_{TW}^b 。同理,可以求解出 \mathbf{R}_{CW}^b 。

3.1.3 组合测量原理

由于在上节中, \mathbf{R}_{TW}^b 和 \mathbf{R}_{CW}^b 都可以由倾角仪模型求解出来,而 $[X_T, Y_T, Z_T]$ 是已知的,则相机模型的最终求解(7)式中的待求未知参数就变为 $\alpha, \beta, t_1, t_2, t_3$ 。

这里可以将(7)式进一步写成关于 $\mathbf{x} = [\alpha \ \beta \ t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ 的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} x_c c_7 - f c_1 & x_c c_8 - f c_2 & -f & 0 & x_c \\ y_c c_7 - f c_4 & y_c c_8 - f c_5 & 0 & -f & y_c \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} f c_3 - x_c e_9 \\ f c_6 - y_c e_9 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

通过求解(14)式即可解出 \mathbf{x} ,进一步便可求得 \mathbf{R}_{TC} 、 \mathbf{T}_{TC} ,并将其作为进一步优化求解的初值。

3.2 非线性优化

在求得初值后,继续利用 Levenberg-Marquardt 最优化方法求得 R_{TC} 、 T_{TC} 的精确值。由特征点坐标系和相机坐标系之间的关系[(1)式]及相机的成像模型[(6)式]可设:

$$\begin{cases} f_{i1}(x) = x_c - f \frac{r_1 X_T + r_2 Y_T + r_3 Z_T + t_1}{r_7 X_T + r_8 Y_T + r_9 Z_T + t_3} \\ f_{i2}(x) = y_c - f \frac{r_4 X_T + r_5 Y_T + r_6 Z_T + t_2}{r_7 X_T + r_8 Y_T + r_9 Z_T + t_3} \end{cases} \quad (15)$$

由旋转矩阵 R_{TC} 是单位正交矩阵可设:

$$\begin{cases} j_1 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - 1 \\ j_2 = r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 - 1 \\ j_3 = r_7^2 + r_8^2 + r_9^2 - 1 \\ j_4 = r_1 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_6 \\ j_5 = r_1 r_7 + r_2 r_8 + r_3 r_9 \\ j_6 = r_4 r_7 + r_5 r_8 + r_6 r_9 \end{cases} \quad (16)$$

由 R^c 可设:

$$\begin{cases} k_1 = R^c(1,3), k_2 = R^c(2,3) \\ k_3 = R^c(3,1), k_4 = R^c(3,2) \\ k_5 = R^c(3,3) - 1 \\ k_6 = R^c(1,2) + R^c(2,1) \\ k_7 = R^c(1,1) - R^c(2,2) \\ k_8 = R^c(1,1)^2 + R^c(2,2)^2 - 1 \end{cases} \quad (17)$$

因此可构造目标函数:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n f_{i1}^2(x) + \sum_{i=1}^n f_{i2}^2(x) + M \sum_{i=1}^6 j_i^2(x) + M \sum_{i=1}^8 k_i^2(x), \quad (18)$$

式中 M 为惩罚因子,通常取 1000000。对于(18)式的求解,在常用解法中,Levenberg-Marquardt 算法是使用最为广泛的非线性最小二乘法,该法具有下降速度快、算法稳定性好等优点。因此,利用(14)式求解出的 R_{TC} 和 T_{TC} 作为初值,然后采用 Levenberg-Marquardt 算法求解(18)式即可得到 R_{TC} 和 T_{TC} 的精确解。

4 实验验证

4.1 仿真实验

为了验证提出的单目视觉与倾角传感器组合测量前后盾相对位姿方法的精度,建立了仿真实验系统,并与单目视觉前后盾相对位姿测量方法的精度进行比较。

实验中,设置相机的内部参数为: $d_x = d_y = 0.0053$ mm, 焦距 $f = 16$ mm, 图像大小为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。相机和特征点系统之间的距离设置为 4 m, 模型中的未知参数全部设置为理想的, 倾角传感器的测量不确定度设置为 0.005° 。实验中模拟特征点坐标系和相机坐标系的多种相对位姿情况, 每种情况下都给光学中心添加零均值的高斯噪声, 不确定度为 $0.1 \sim 1 \text{ pixel}$, 并且每种情况模拟 1000 次。同时, 为了方便, 采用三个欧拉角(俯仰角、方位角和滚转角)来描述特征点坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 R_{TC} 。

仿真结果如图 3 所示, 6 幅图分别表示两种方法所求得 R_{TC} 、 T_{TC} 的误差。实验结果表明, 单目视觉与倾角传感器组合测量方法能显著提升俯仰角和滚转角的精度, 并且随着高斯噪声的增加, 精度的提升越发明显。但是, 利用单目视觉与倾角传感器组合测量方法获得的方位角和平移矩阵的精度几乎没有改变, 这是因为倾角传感器仅增加了俯仰和滚转方向的约束, 所以仅提升了这两个方向的精度。

4.2 系统搭建与实验验证

为了验证该系统的测量精度, 搭建了如图 4 所示的实验平台。以 1.6 m 长的长方体刚体模拟双护盾隧道掘进机的前盾, 并将全站仪测量钢球(SMR)和特征点系统分别固定于刚体的两端, 钢球位置相当于盾首

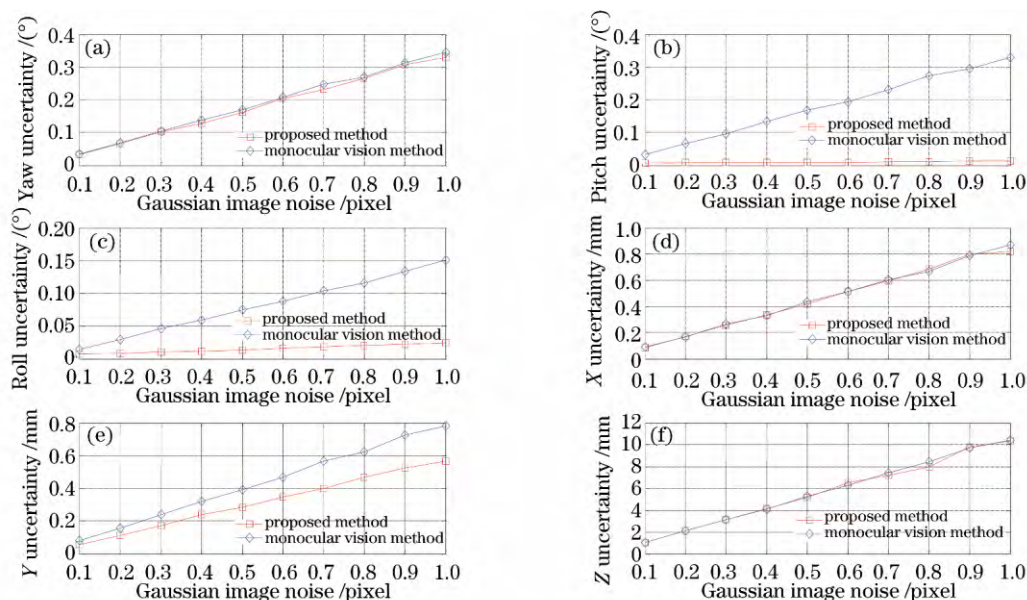


图 3 仿真实验结果

Fig. 3 Results of the simulation experiment

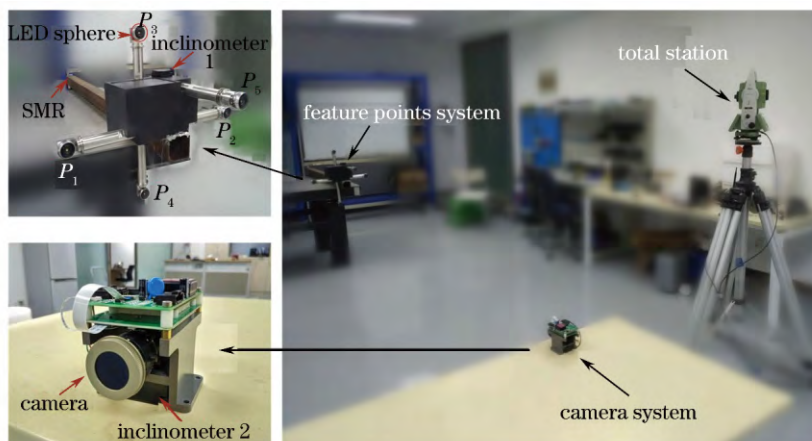


图 4 测量系统实验图

Fig. 4 Experimental map of the measurement system

中心,并由全站仪测量出其坐标值当做真值。

搭建的特征点系统由 5 个不共面的特征点组成,其具体标号如图 4 所示。使用 1.5 in(3.81 cm)钢球的中心 LED 点当做特征点,该特征点在标定及测量时可以被标准测量钢球的中心点完全替代。使用高精度的影像仪进行工装调整,可以使实验用钢球的 LED 中心与标准钢球球心在同一位置。这样,在特征点系统标定完成之后,5 个特征点的坐标值可以由全站仪精密测量得到,其值如表 1 所示。

表 1 特征点坐标值

Table 1 Coordinates of the feature points

Point	x /mm	y /mm	z /mm
P_1	-250	0	100
P_2	250	0	100
P_3	0	250	0
P_4	0	-250	0
P_5	80	80	250

相机放置于距离特征点系统 2.5~4 m 的位置。一旦系统搭建完成,特征点系统与盾首中心的相对位置便不会改变,盾首中心在特征点坐标系下的坐标也会提前由全站仪标定。通过测量系统实时获取特征点系

统与相机系统之间的旋转平移矩阵,即可获得盾首中心的坐标值,并与真值进行比较,验证系统精度。

然后,模拟双护盾隧道掘进机的运动,改变刚体的位置和姿态,分别用单目视觉与倾角传感器组合测量系统与单目视觉测量系统进行测量,并将结果与全站仪测得的真值进行比较,获得误差值。实验数据如表 2 所示,表中 TS 表示全站仪测量的盾首中心坐标,PM 表示单目视觉系统测量的盾首中心坐标,MI 表示单目视觉与倾角传感器组合测量系统测量得到的盾首中心坐标, d_x 、 d_y 、 d_z 分别表示 X 、 Y 、 Z 轴的偏差, Δd 表示系统的测量坐标与全站仪测量得到的真值之间的距离差。通过计算可知,单目视觉与倾角传感器组合测量方法的平均偏差值为 2.58 mm,而单目视觉测量方法的平均偏差值为 4.02 mm。因此,单目视觉与倾角传感器组合测量方法不仅可以很好地满足双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量的需求,而且相对于单目视觉测量方法来说,精度有了显著提升。

表 2 两个测量系统的精度对比

Table 2 Accuracy comparison of two measurement systems

No		X /mm	Y /mm	Z /mm	d_x /mm	d_y /mm	d_z /mm	Δd /mm
1	MI	39.2788	1363.14	4517.95	3.21	-0.17	2.07	3.82
	PM	39.0729	1366.27	4515.15	3.00	2.96	-0.73	4.28
	TS	36.0705	1363.31	4515.88				
2	MI	61.3261	1569.92	4658.94	1.27	-0.35	-0.62	1.46
	PM	64.6658	1570.06	4658.67	4.61	-0.21	-0.89	4.70
	TS	60.0575	1570.27	4659.56				
3	MI	312.176	1355.03	5010.02	2.21	-0.11	-0.83	2.63
	PM	311.512	1352.23	5012.66	1.55	-2.91	1.81	3.76
	TS	309.965	1355.14	5010.85				
4	MI	-52.0804	1444.85	5073.27	2.02	0.16	-1.07	2.29
	PM	-50.7107	1444.94	5073.15	3.39	0.25	-1.19	3.60
	TS	-54.1009	1444.69	5074.34				
5	MI	136.545	1570.39	5812.43	-0.61	0.13	1.57	1.69
	PM	137.137	1572.69	5810.33	-0.02	2.43	-0.53	2.49
	TS	137.156	1570.26	5810.86				
6	MI	-70.9675	1551.92	5767.15	2.78	0.06	2.23	3.56
	PM	-69.551	1554.79	5763.7	4.20	2.93	-1.22	5.26
	TS	-73.7498	1551.86	5764.92				

5 结 论

针对双护盾隧道掘进机的精密测量需求,通过将单目视觉与倾角传感器的组合,设计了一种测量双护盾隧道掘进机前后盾相对位姿的系统,并详细阐述了测量原理。为了验证系统的精度以及可行性,使用 Matlab 软件进行了仿真实验,并搭建了模拟实验平台,利用全站仪进行精度验证,将测量结果与单目视觉系统的测量结果进行比较。仿真实验结果表明,单目视觉与倾角传感器组合测量方法使得旋转矩阵中的俯仰角和滚转角的测量精度得到了提升,并且随着高斯噪声的增加,精度提升愈发显著。而在对比实验中,单目视觉与倾角传感器组合测量系统的测量精度优于 3 mm,能够很好地满足测量需求。同时,相对于单目视觉测量方法,测量精度也得到了显著的提升。

参 考 文 献

- Hong Kairong. State-of-art and prospect of tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 95-107.
洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 95-107.
- 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.

- 3 Meng Xiangrui. Key techniques on new type laser target pose measurement system[D]. Tianjin; Tianjin University, 2014.
孟祥瑞. 新型激光靶位姿测量系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- 4 Yang Wenhui, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* Pose measurement system of double shield universal compact TBM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112005.
杨文辉, 林嘉睿, 高 扬, 等. 双护盾硬岩隧道掘进机位姿测量系统[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112005.
- 5 Yang Wenhui, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* Modeling and error analysis of laser target pose measurement system[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(4): 293-298.
杨文辉, 林嘉睿, 高 扬, 等. 激光靶位姿测量系统的建模与误差分析[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(4): 293-298.
- 6 Zhao Lianjun. Research on mono-vision pose measurement based on features of target[D]. Beijing; University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
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]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- 7 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.
- 8 Zhu Shiping, Qiang Xifu. Study on monocular vision method used for camera positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 339-343.
祝世平, 强锡富. 用于摄像机定位的单目视觉方法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 339-343.
- 9 Zhang Jianzhong. Kinematics calibration of stewart platforms based on configurations measured with two inclinometers [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2007.
张建中. 基于倾角仪测量位姿的六自由度平台运动学标定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- 10 Wu Fuchao, Hu Zhanyi. A linear method for the PnP problem[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 682-688.
吴福朝, 胡占义. PnP 问题的线性求解算法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 682-688.
- 11 Wu Fuchao. Mathematical methods in computer vision[M]. Beijing: Science Press, 2008.
吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 12 Zhang Zimiao, Wang Peng, Sun Changku. Position and orientation measurement method with monocular vision and digital simulation[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2011, 44(5): 440-444.
张子森, 王 鹏, 孙长库. 单目视觉位姿测量方法及数字仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2011, 44(5): 440-444.
- 13 Lobo J, Dias J. Relative pose calibration between visual and inertial sensors[J]. The International Journal of Robotics Research, 2007, 26(6): 561-575.
- 14 Zheng Y, Kuang Y, Sugimoto S, *et al.* Revisiting the PnP problem: a fast, general and optimal solution[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2013: 2344-2351.
- 15 Liu Z, Li F, Li X, *et al.* A novel and accurate calibration method for cameras with large field of view using combined small targets[J]. Measurement, 2015, 64: 1-16.