

基于双目视觉的火炮身管指向全自动测量方法

张豪^{1,2}, 杨鑫^{1,2}, 陈龙森³, 朱宪伟^{1,2*}¹深圳大学智能光测图像研究院, 广东 深圳 518000;²深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518000;³南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210000

摘要 火炮装备前或服役过程中需要进行身管指向测量以校正火控系统偏差。目前普遍使用双经纬仪进行身管指向测量, 该方法的测量效率低, 难以满足未来战场环境下火控系统的快速标校。提出了基于双目视觉的身管指向高精度、自动化测量方法, 利用合作标志点分析身管转动, 将身管转动分解为先后两次绕轴运动, 结合铅垂线测量实现身管指向解算, 利用 LM (Levenberg-Marquardt) 算法进行指向优化, 得到身管指向最终结果。于实验室开展了半实物仿真, 并在某火炮厂进行了实验验证。结果表明, 火炮身管的高低角测量精度优于 0.15° , 其方向角测量精度优于 0.12° , 两姿态角的重复性偏差均优于 0.0035° 。所提方法具备高精度、高鲁棒性、全自动的优势, 可实现未来战场环境下火炮身管指向的全自动测量。

关键词 测量; 相机标定; 双目视觉; 身管指向; 火控系统; 位姿估计

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221397

1 引言

调炮精度决定火炮身管指向准确度, 是火炮能否实现目标精确打击的关键, 是火炮的一项关键的技术指标^[1]。随着电子技术、计算机技术和定位定向技术的发展, 传统火炮的间接瞄准已被自动操瞄所替代^[2]。使用未校正过的火控系统进行调炮时, 身管指向可能存在较大偏差, 因此需进行火炮身管指向测量, 以实现火控系统的系统偏差校正, 提升火炮打击精度。

目前, 多种基于高精度测量仪器的空间角测量方法可应用在身管指向测量上, 如激光跟踪仪法^[3]、单全站仪测量法^[4]、双经纬仪法^[5]等。其中, 双经纬仪法是目前身管指向测量中应用最广也最为成熟的方法。双经纬仪法通过获取零位置和测量位置身管上指定点或标志点的水平角和天顶角来解算调炮高低角和调炮方向角^[1]。使用经纬仪进行测量时, 每个测量位置都需要操作员目视介入并进行手动调节瞄准, 该方法易引入主观偏差, 导致重复性偏差大、测量效率较低, 不适合进行身管指向动态测量, 更加不适合战场环境中的快速标校。

近年来, 随着图像处理技术和计算机性能的提升, 基于视觉的测量方法得到了充足的发展和广泛的应用。利用双相机测量身管指向属于位姿估计问题, 目

前的位姿估计经典算法包括基于 3D/2D 点对关系解算位姿的 PnP 方法^[6]、基于 3D/3D 点对关系解算位姿的 SVD (singular value decomposition) 方法^[7]、ICP (iterative closest point) 方法^[8]和基于目标物 CAD 模型与 2D 图像匹配的方法^[9-10]。在直接利用相机测量身管指向的研究中, 宋庆华等^[11]在身管安装圆形标牌, 根据标牌相对于测量车辆上摄像头的不同位置变化所产生的不同形变来间接计算出火炮身管的射向角度。全厚德等^[12]基于双目交会原理, 进行了固定身管高低角或方位角情况下另一角度的测量。齐寰宇等^[13]通过在与身管关系已知的位置上粘贴条状标志点的方式进行身管指向测量。苏建东等^[14]利用转动平台的高精度输出值进行了安装误差标定, 实现了棋盘靶标任意安装下的转动平台姿态测量。这些方法存在操作困难或系统复杂等问题, 安装圆形标牌方式复杂, 粘贴条状标志点方式需要标定标志点与身管的关系, 操作复杂, 利用转动平台进行安装误差标定要求转动平台精度高, 现场实测难以满足。

本文提出一种具有高精度、高鲁棒性的身管指向测量方法, 以固连在身管上的棋盘靶标角点为合作标志点, 其中棋盘靶标可任意布置且无需进行安装误差标定。系统利用合作标志点求解身管由零位置转动到测量位置对应的旋转矩阵, 结合铅垂线测量分解旋转

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-07-21; 网络首发日期: 2022-07-31

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1306800)

通信作者: *zxw2899@szu.edu.cn

矩阵,解算身管指向。

2 火炮身管指向测量原理

身管指向测量示意图见图 1,双相机放置在身管前方,铅垂线悬挂在身管上,合作标志点与身管固连。 $\overrightarrow{MP_0}$ 为零位置身管指向, $\overrightarrow{MP_2}$ 为测量位置身管指向,记 P_0 至 P_2 的转角为 θ 。身管由 P_0 至 P_2 的转动可以分解为先后两次仅有方向角、高低角变化的绕轴转动:1)方向角转动, P_0 绕方向角转动轴 MS_d 逆时针转动 γ 至 P_1 ;2)高低角转动, P_1 绕高低角转动轴 MS_a 逆时针转动 α 至 P_2 。其中, MS_d 垂直于当地水平面, MS_a 垂直于 P_1 和 S_d 所组成的平面,则 α 、 γ 分别对应测量位置身管的高低角、方向角。 $M-X_M Y_M Z_M$ 为以转动平台中心为原点的测量坐标系, Z_M 轴平行于 MS_d 。

身管指向测量算法流程见图 2,提前用张正友标定法进行双目立体标定。相机系统标定完成后,标定铅垂线方向,后将身管调至零位置及测量位置,重建两个位置的合作标志点三维坐标,计算零位置至测量位置的转动在相机坐标系下的旋转矩阵描述,铅垂线平行于火炮方向角转动轴,铅垂线方向标定完成后,将旋转矩阵转换至以火炮方向角转动轴为 Z 轴的测量坐标系下进行分解,实现身管指向测量。

在双目立体标定完成后,通过双目三角测量方法计算零位置及测量位置的合作标志点在 1 号相机坐标系 (C_1 系) 下的三维坐标 $q_i, m_i, i=1, 2, \dots, n$ 。 q_i, m_i 满足:

$$m_i = R^{(C_1)} q_i + t, \quad (1)$$

式中: $R^{(C_1)}$ 和 t 分别对应身管由零位置到测量位置的转动在 C_1 系下的旋转矩阵和平移向量, $R^{(C_1)} \in SO(3)$ (SO 表示特殊正交群), $t \in R^{3 \times 1}$ 。已知对应的三维点

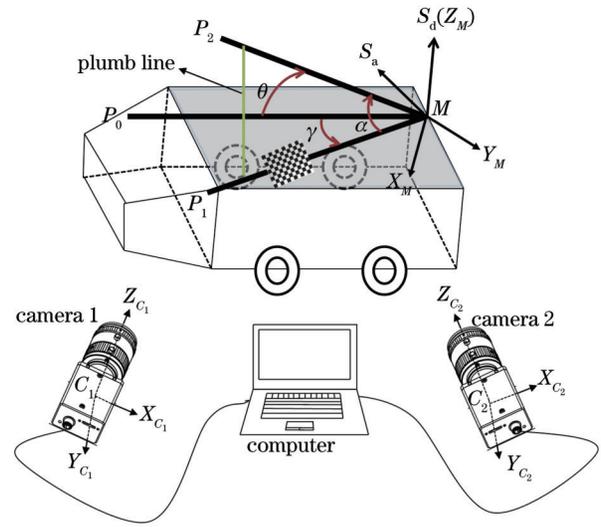


图 1 身管指向测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cannon barrel pointing measurement

q_i, m_i , 即可通过 SVD 分解得到 $R^{(C_1)}, t$ 。

火炮可视二维转动平台,本文在算法设计中将身管的高低角、方向角视为绕高低角转动轴及方向角转动轴的转动角。得到 $R^{(C_1)}$ 后,至少还需标定火炮的其中一个转轴方向才能进行角度分解。由于身管的高低角、方向角定义在大地坐标系,其方向角转动轴平行于铅垂线,铅垂线便于测量,因此引入铅垂线标定火炮方向角转动轴方向。

基于双目的铅垂线测量采用面面交汇的方式^[15],如图 3 所示,铅垂线 L 在 1 号相机像面上的投影记为 l_1 ,光心 C_1 与 l_1 所形成的平面在 C_1 系下的单位法向量记为 $n_1^{(C_1)}$, L 在 2 号相机像面上的投影记为 l_2 ,光心 C_2 与 l_2 所形成的平面在 C_1 系下的单位法向量记为 $n_2^{(C_1)}$,

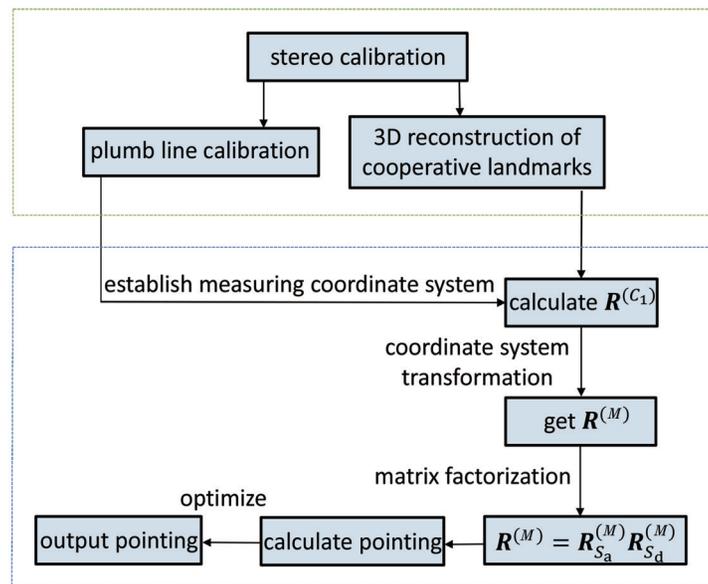


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

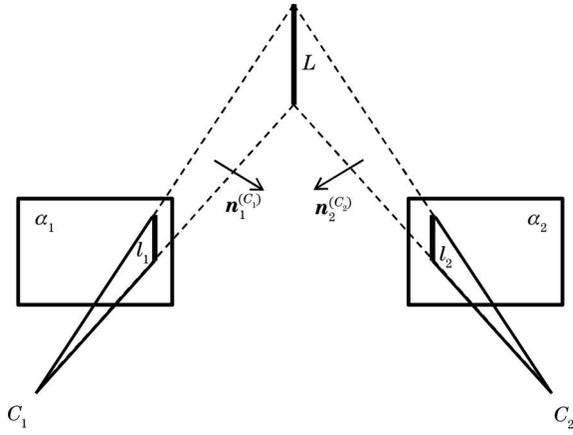


图 3 铅垂线方向测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical line direction measurement

则提取双相机图像中的铅垂线投影 l_1 及 l_2 后,可得到 $n_1^{(C_1)}$ 、 $n_2^{(C_1)}$,进而推出铅垂线在 C_1 系下的方向 $n_{S_d}^{(C_1)}$:

$$n_{S_d}^{(C_1)} = n_1^{(C_1)} \times n_2^{(C_1)}. \quad (2)$$

铅垂线标定完成后,建立以方向角转动轴为 Z 轴的测量坐标系 M 系 ($M-X_M Y_M Z_M$)。记 $n_{X_M}^{(C_1)}$ 、 $n_{Y_M}^{(C_1)}$ 、 $n_{Z_M}^{(C_1)}$ 为轴 X_M 、 Y_M 、 Z_M 在 C_1 系下的单位向量,则 $n_{S_d}^{(C_1)}$ 等于 $n_{S_d}^{(C_1)}$, X_M 、 Y_M 轴方向可在满足直角坐标系准则前提下任意选取,两个轴的方向在解算过程中是中间变量,其方向的选取不影响身管指向解算结果。选定轴 X_M 、 Y_M 的方向后, $n_{X_M}^{(C_1)}$ 、 $n_{Y_M}^{(C_1)}$ 变为已知量,此时 M 系三个坐标轴在 C_1 系下的方向已知,可以得到 C_1 系到 M 系的

旋转矩阵 $R_{C_1}^{(M)}$:

$$R_{C_1}^{(M)} = \left[\begin{matrix} [n_{X_M}^{(C_1)}]^T \\ [n_{Y_M}^{(C_1)}]^T \\ [n_{Z_M}^{(C_1)}]^T \end{matrix} \right]^T. \quad (3)$$

已知 C_1 系到 M 系的旋转关系,将身管由零位置到测量位置的旋转描述由 C_1 系转换至 M 系,得到其在 M 系下的旋转向量描述 $r^{(M)}$:

$$r^{(M)} = R_{C_1}^{(M)} r^{(C_1)}, \quad (4)$$

式中: $r^{(C_1)}$ 为 $R^{(C_1)}$ 对应的旋转向量。则零位置到测量位置的旋转角 θ 为向量 $r^{(M)}$ 的模,即

$$\theta = |r^{(M)}|. \quad (5)$$

记身管方向角转动、高低角转动对应的 M 系下的旋转向量为 $r_{S_a}^{(M)}$ 、 $r_{S_b}^{(M)}$,火炮方向角转动轴 MS_d 平行于 Z_M 轴,其在 M 系的单位方向为 $[0, 0, 1]$,转轴 MS_a 在轴 X_M 、 Y_M 所形成的平面上,其在 M 系下的单位向量可设为 $[\cos \beta, \sin \beta, 0]$,则 $r_{S_a}^{(M)}$ 、 $r_{S_b}^{(M)}$ 可分别表示为

$$r_{S_a}^{(M)} = \gamma [0, 0, 1], \quad (6)$$

$$r_{S_b}^{(M)} = \alpha [\cos \beta, \sin \beta, 0]. \quad (7)$$

为解算身管在大地坐标下的高低角、方向角,在测量坐标系将身管由零位置至测量位置的转动分解为方向角转动和高低角转动:

$$R^{(M)} = R_{S_b}^{(M)} R_{S_a}^{(M)}, \quad (8)$$

式中: $R_{S_b}^{(M)}$ 、 $R_{S_a}^{(M)}$ 为 $r_{S_b}^{(M)}$ 、 $r_{S_a}^{(M)}$ 对应的 $SO(3)$ 上的旋转矩阵; $R^{(M)}$ 为 $r^{(M)}$ 对应的 $SO(3)$ 上的旋转矩阵。式(8)展开如下:

$$R^{(M)} = \begin{bmatrix} \cos \alpha + (1 - \cos \alpha) \cos^2 \beta & (1 - \cos \alpha) \cos \beta \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ (1 - \cos \alpha) \cos \beta \sin \beta & \cos \alpha + (1 - \cos \alpha) \sin^2 \beta & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(9)计算测量位置身管高低角 α 、方向角 γ 及高低角转动轴方向初值:

$$\alpha = \arccos [R_{3,3}^{(M)}], \quad (10)$$

$$\sin \beta = \frac{R_{1,3}^{(M)}}{\sin \alpha}, \cos \beta = -\frac{R_{2,3}^{(M)}}{\sin \alpha}, \quad (11)$$

$$\gamma = \arcsin \left\{ \left[\left[R_{S_b}^{(M)} \right]^{-1} R^{(M)} \right]_{2,1} \right\}, \quad (12)$$

式中:矩阵右下角数字 i, j 代表此矩阵 i 行 j 列对应的元素,如 $R_{1,3}^{(M)}$ 表示矩阵 $R^{(M)}$ 中 1 行 3 列对应的元素。以式(10)~(12)解算出的高低角 α 、方向角 γ 以及 β 为初值,采用 LM 算法进行优化,得到最终的身管指向,其中目标函数为

$$\min_{\alpha, \beta, \gamma} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} \left\{ R_{i,j}^{(M)} - [R_{S_b}^{(M)} R_{S_a}^{(M)}]_{i,j} \right\}^2. \quad (13)$$

3 仿真和实验验证

为评估系统的测量精度,本文以高精度云台模拟

火炮的转动装置进行了半实物仿真,并在某火炮厂进行了现场实验。半实物仿真和现场实验分别以云台的角度输出值(精度 0.0078°)和使用双经纬仪标校后的火控系统的角度输出值(精度 0.0600°)作为真值,进行身管高低角 α 、方向角 γ 、旋转角 θ 的对比测量。在火炮领域,一般以 mil 为单位描述角度,1 mil 对应 0.06° ,后续实验结果附带 mil 描述。

3.1 实验步骤

现场实验步骤可分为如下 4 步:

1) 双相机标定:使用棋盘格标定板,将其与转动平台固连,调节转动平台至数个不同角度,待转动平台稳定后,控制双相机同步采图,完成双目立体标定。

2) 铅垂线方向标定:在身管上悬挂铅垂线,待铅垂线稳定后,双相机同步采图,在图像中提取铅垂线,完成铅垂线方向标定。

3) 合作标志点三维重建:控制转动平台先后运动至零位置和测量位置,双相机同步采集两个位置图像,

计算两个位置处合作标志点的三维坐标。

4) 指向解算: 利用以上 3 个步骤获取的信息进行身管指向解算。

半实物仿真与现场实验在步骤 2) 上略有不同, 现场实验中铅垂线方向标定实质是标定出火炮转动装置方向角转动轴方向。半实物仿真使用云台模拟火炮转动装置, 云台的方向角转动轴方向与其摆放平面相关, 不能通过铅垂线测量进行标定。但云台精度高, 可控制云台转动至数个不同的位置并采集图像, 以云台角度输出值为真值进行高精度的云台方向角转动轴标定^[14], 因此, 半实物仿真不记录铅垂线。

3.2 半实物仿真

半实物仿真布置图见图 4, 使用云台模拟火炮转

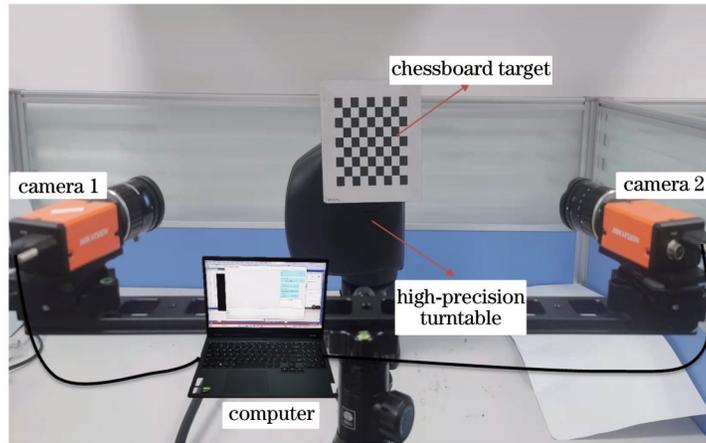


图 4 半实物仿真布置图

Fig. 4 Semi-physical simulation layout

由测量结果可知, 测量范围内: 高低角 α 的测量精度优于 0.09000° (1.500 mil), 重复性偏差优于 0.00090° (0.015 mil); 方向角 γ 的测量精度优于 0.15000° (2.500 mil), 重复性偏差优于 0.00400° (0.067 mil); 旋转角 θ 的测量精度优于 0.08000° (1.330 mil)。方向角和高低角的重复性偏差远低于其测量绝对误差, 说明由角点提取不稳定引入的随机误差极小, 测量系统的误差主要是系统误差。

θ 的解算不含旋转矩阵分解, 主要受相机标定误差的影响, 仿真在零位置附近进行双目标定, 以固定的相机内参进行测量。由图 5(c)、(f) 可见, 相机对标定板所在位置附近的测量较为准确, 对与标定板距离较大位置处的测量会存在较大误差, 因此大角度转动场景下的 θ 测量误差一般较大。

由图 5(b)、(e) 可见, 方向角误差与测量位置高低角 α 、方向角 γ 近似呈线性关系, 方向角误差为 $-0.12^\circ \sim 0.15^\circ$ 。由图 5(a)、(d) 可见, 高低角测量误差随测量位置高低角 α 呈波动变化、与测量位置方向角 γ 近似呈线性关系, 高低角误差为 $-0.09^\circ \sim 0.05^\circ$ 。高低角和方向角的测量精度除受相机标定的影响外, 还受转动平台方向角转动轴标定的影响。旋转角测量与方

向装置, 双相机摆放在云台前方, 棋盘格固定在云台上, 其中双相机均为海康 MV-CH089-10UM 型号相机 (4096 pixel \times 2160 pixel), 棋盘格为 8×8 规格, 相邻角点间距为 12 mm。仿真验证分为精度验证及重复性验证。精度验证以测量位置方向角 γ 为变量分为 5 组, γ 分别为 -30° 、 -20° 、 -10° 、 10° 、 20° 。每组仿真除 0° 外, 在 $-30^\circ \sim 24^\circ$ 间以 6° 为步长设置测量位置高低角 α , 进行测量位置对应的高低角 α 、方向角 γ 、旋转角 θ 测量, 得到的统计结果如图 5 所示。重复性验证对一个固定测量位置重复测量 10 次, 统计结果如图 6 所示, 其中某一次的重复性偏差为该次指向测量结果与 10 次指向测量结果均值之差。

向角转动轴标定无关, 其误差为 $-0.04^\circ \sim 0.08^\circ$, 测量位置方向角和高低角绝对值小于旋转角, 而其误差却近似为旋转角误差的 2 倍。因此方向角转动轴标定是影响方向角、高低角测量精度的主要因素。

图 7 中 \overrightarrow{MS}_d 为方向角转动轴实际方向, 其测量方向为 \overrightarrow{MS}'_d , 二者夹角为 δ , 平面 a 、 a' 的法向分别为 \overrightarrow{MS}_a 、 \overrightarrow{MS}'_a 。 \overrightarrow{MS}_a 为高低角转动轴实际方向, 其求解方向为 \overrightarrow{MS}'_a , MS'_a 为 S_a 与 S_d 所形成的平面与平面 a' 的交线, MS'_a 与 MS_d 的夹角记为 ϵ 。完成方向角转动轴标定后, MS_d 、 MS'_d 、 MS_a 的指向固定, 但不同测量位置解算出的高低角转动轴 MS'_a 与前面三者的相对关系是不一致的, 其在平面 a' 上 S'_a 附近的某一位置。因此, 不同测量位置解算出的 MS_d 与 MS'_a 、 MS_a 与 MS'_a 夹角可能不同, 分别记为 $\epsilon + \Delta\epsilon$ 、 $\delta + \Delta\delta$, 其中, $\Delta\epsilon$ 和 $\Delta\delta$ 为 MS'_a 方向不确定造成的波动。

固定测量位置高低角, 使不同的测量位置仅有方向角不同时, 方向角测量误差为 $\gamma_{error}^{(\gamma)}$ 、高低角测量误差为 $\alpha_{error}^{(\gamma)}$; 固定测量位置方向角, 使不同的测量位置仅有高低角不同时, 方向角测量误差为 $\gamma_{error}^{(\alpha)}$ 、高低角测量误差为 $\alpha_{error}^{(\alpha)}$ 。上述 4 种误差可表示为

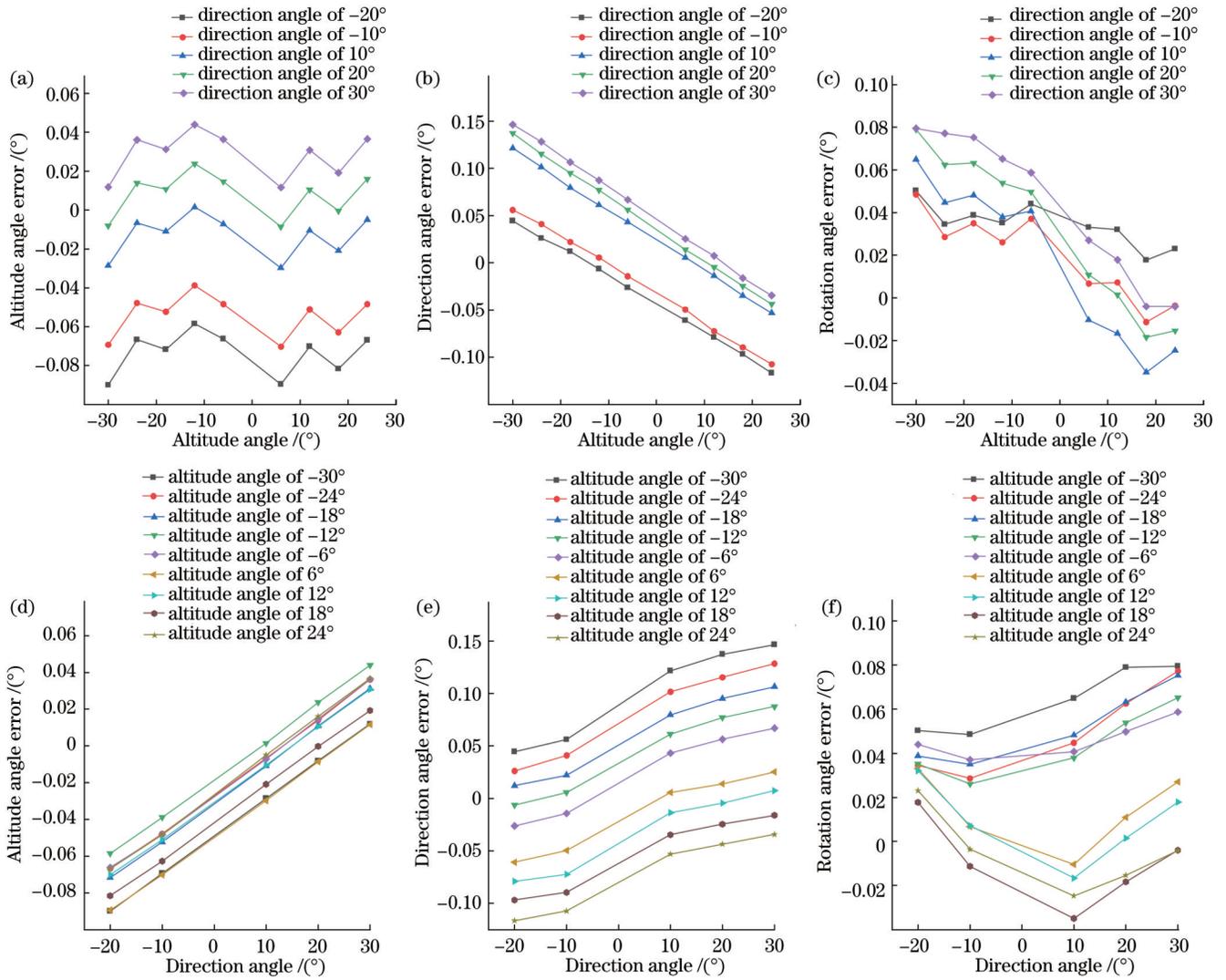


图 5 精度验证结果。(a)高低角误差随高低角的变化;(b)方向角误差随高低角的变化;(c)旋转角误差随高低角的变化;(d)高低角误差随方向角的变化;(e)方向角误差随方向角的变化;(f)旋转角误差随方向角的变化

Fig. 5 Accuracy verification results. (a) Altitude angle error varying with altitude angle; (b) direction angle error varying with altitude angle; (c) rotation angle error varying with altitude angle; (d) altitude angle error varying with direction angle; (e) direction angle error varying with direction angle; (f) rotation angle error varying with direction angle

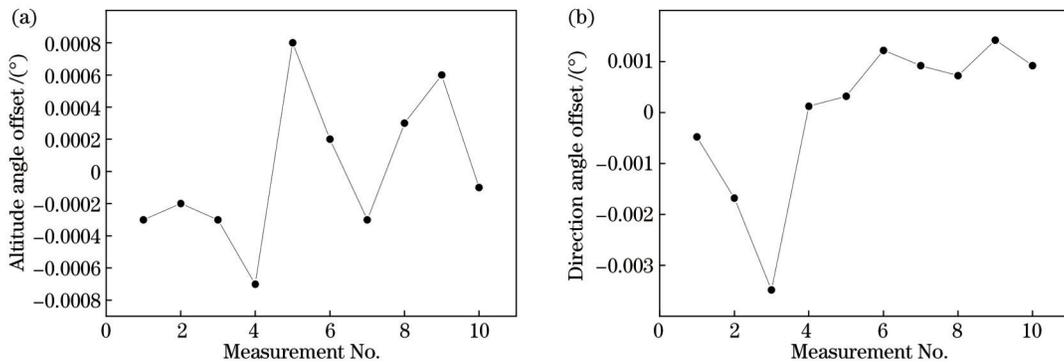


图 6 重复性验证结果。(a)高低角重复性;(b)方向角重复性

Fig. 6 Repeated verification results. (a) Altitude angle repeatability; (b) direction angle repeatability

$$\gamma_{\text{error}}^{(\gamma)} \approx (1 - \cos \delta) \gamma, \quad (14)$$

$$\gamma_{\text{error}}^{(\alpha)} \approx \alpha \sin \delta, \quad (15)$$

$$\alpha_{\text{error}}^{(\gamma)} \approx \gamma \cos(\varepsilon + \Delta\varepsilon), \quad (16)$$

$$\alpha_{\text{error}}^{(\alpha)} \approx [1 - \cos(\delta + \Delta\delta)] \alpha_0. \quad (17)$$

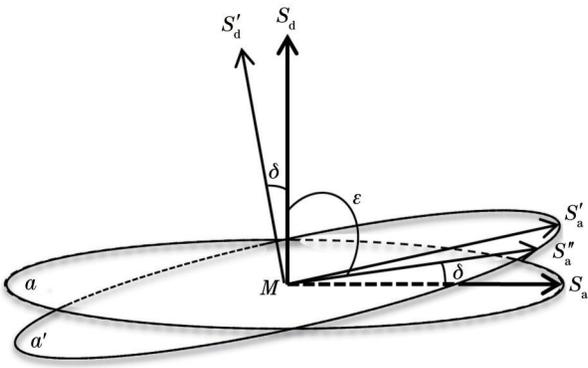


图 7 测量误差分析示意图

Fig. 7 Schematic diagram of measurement error analysis

由式(14)、(15)可知, $\gamma_{error}^{(\gamma)}$ 与 γ 、 $\gamma_{error}^{(\alpha)}$ 与 α 均近似呈线性关系。由式(16)可知, $\alpha_{error}^{(\gamma)}$ 受 γ 和 $\Delta\epsilon$ 的影响, 但 MS_d 与 MS'_a 的夹角对 $\overrightarrow{MS'_a}$ 方向波动不敏感, 即 $\Delta\epsilon$ 较

小, $\cos(\epsilon + \Delta\epsilon)$ 可近似为常数, $\alpha_{error}^{(\gamma)}$ 与 γ 仍近似呈线性关系。由式(17)可知: $\alpha_{error}^{(\alpha)}$ 受 α 和 $\Delta\delta$ 影响, MS_a 与 MS'_a 的夹角对 $\overrightarrow{MS'_a}$ 方向波动较敏感, 即 $\Delta\delta$ 较大, 导致 $\cos(\delta + \Delta\delta)$ 值存在较大的随机波动, $\alpha_{error}^{(\alpha)}$ 与 α 呈波动关系。

3.3 现场实验

图 8 为在某火炮厂进行现场实验的布置图, 实验中双相机布置在身管前方, 铅垂线悬挂在身管上, 棋盘格与身管固定, 其中双相机均为海康 MV-CH089-10UM 型号相机 (4096 pixel × 2160 pixel), 棋盘格为 12 × 8 规格, 相邻角点间距为 50 mm。实验分为精度验证实验和重复性验证实验。精度验证实验对火炮厂调炮精度测量流程中 7 个指定的身管位置进行测量, 结果见表 1。为探究测量系统对身管小角度转动场景下的指向测量精度, 进一步进行身管小角度转动指向测量实验, 结果见表 2。图 9 为重复性验证结果。

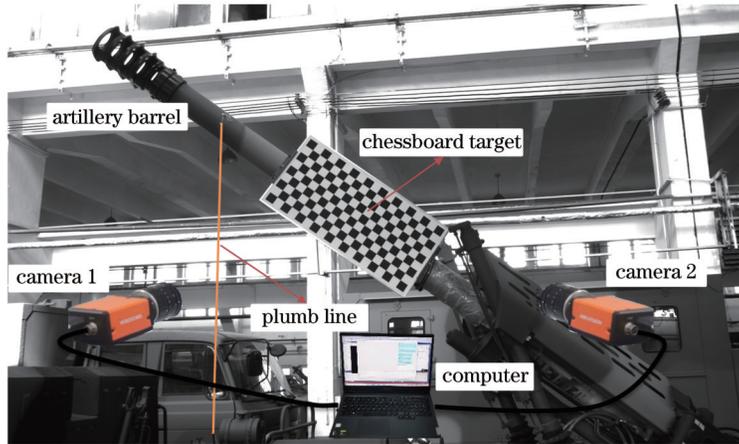


图 8 现场实验布置图

Fig. 8 Field experiment layout

表 1 身管指向测量结果

Table 1 Barrel pointing measurement results

unit: (°)

Number	Standard value		Measurement value		Error	
	α	γ	α	γ	α	γ
1	24.000	-12.000	23.868	-11.883	-0.132	0.117
2	36.000	6.000	35.960	6.023	-0.040	0.023
3	48.000	18.000	48.050	18.007	0.050	0.007
4	30.000	-6.000	29.890	-5.958	-0.110	0.042
5	54.000	30.000	54.149	30.061	0.149	0.061
6	66.000	24.000	66.108	23.911	0.108	-0.089
7	36.000	-6.000	35.872	-6.010	-0.128	-0.010

表 1 表明, 在要求的测量范围内, 系统对身管高低角 α 的测量精度优于 0.15000° (2.500 mil), 方向角 γ 的测量精度优于 0.12000° (2.000 mil)。表 2 表明, 在身管小角度转动场景下的两姿态角测量精度优于 0.06000° (1.000 mil)。图 9 表明, 高低角重复性偏差优于 0.00080° (0.013 mil), 方向角重复性偏差优于

0.00350° (0.058 mil)。现场实验与半实物仿真中高低角、方向角的重复性偏差均远小于其测量误差, 现场实验指向测量精度与半实物仿真相当。

4 结 论

依据身管指向测量需求, 提出一种高精度、高鲁棒

表 2 身管小角度转动指向测量结果

Table 2 Measurement results of small-angle rotation pointing of barrel

unit: ($^{\circ}$)

Number	Standard value		Measurement value		Error	
	α	γ	α	γ	α	γ
1	0	3.000	-0.048	2.996	-0.048	-0.004
2	0	-3.000	-0.056	-2.990	-0.056	0.010
3	3.000	0	2.973	0.016	-0.027	0.016
4	-3.000	0	-2.968	-0.007	0.032	-0.007
5	3.000	3.000	2.952	3.021	-0.048	0.021
6	-3.000	3.000	-3.003	2.965	-0.003	-0.035
7	-3.000	-3.000	-2.960	-3.006	0.040	-0.006
8	3.000	-3.000	2.998	-3.003	-0.002	-0.003

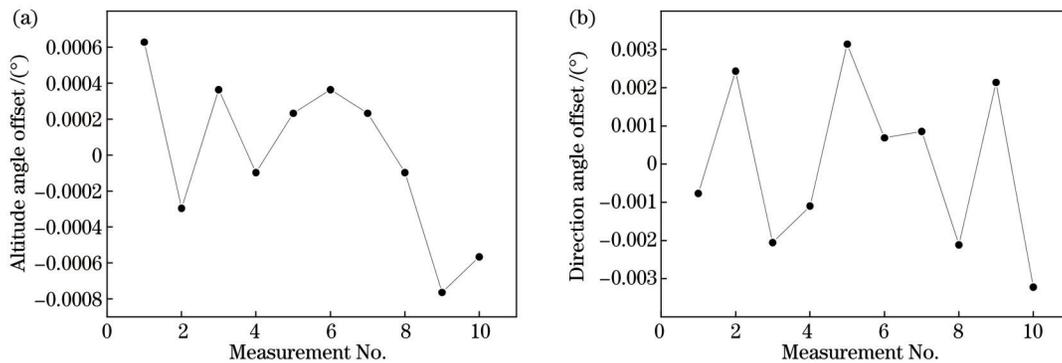


图 9 重复性验证实验结果。(a)高低角重复性;(b)方向角重复性

Fig. 9 Repeated verification experimental results. (a) Altitude angle repeatability; (b) direction angle repeatability

性的测量方法,以棋盘格角点为合作标志点,搭建双目视觉测量系统,通过合作标志点三维重建分析身管转动,引入铅垂线方向测量进行身管转动分解,解算大地坐标系下的身管指向。铅垂线的引入解决了合作标志点安装标定的难题,实现合作标志点任意布置下的指向测量任务,简化了现有视觉测量方法的流程。使用 VS2019+QT5.12 开发测量系统软件,该软件集成图像显示、相机标定、同步采图、铅垂线测量等功能,可实现自动化测量。现场实验表明:在火炮厂指定的测量范围,本测量系统对身管高低角的测量精度优于 0.1500° (2.500 mil),方向角的测量精度优于 0.1200° (2.000 mil),两姿态角的重复性偏差优于 0.0035° (0.058 mil),在身管小角度转动场景下的两姿态角测量精度优于 0.0600° (1.000 mil)。本测量系统在身管小角度转动场景下的指向测量精度与双经纬仪相当,但受限于相机畸变等,本测量系统对于大角度转动场景下的测量精度不及双经纬仪。总体而言,本测量系统的测量精度较高,具有操作简便、成本低、测量效率高、自动化程度高的优势,为火炮身管指向测量提供了一种新方案,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 张光,任国全,张英堂,等. 调炮精度检测中双经纬仪优化布站方法[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(9): 176-179.
- [2] 方安国,徐锐,张金萍. 火箭炮调炮精度的几种测量方法比较研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(3): 76-79.
- [3] 林嘉睿,郝继贵,张皓琳,等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 463-468.
- [4] 曾刊,赖文娟,雷雨能. 单全站仪调炮精度检测系统[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 18-19, 28.
- [5] 郭虎生,尹智,王圣旭. 双经纬仪调炮精度测量数据的误差分析及补偿[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(5): 79-81.
- [6] 陈文均,尹义贺,张跃强,等. 基于垂直双相机的微动平台位姿修正方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2315001.
- [7] 赵明富,曹利波,宋涛,等. 三维点云配准中 FPFH 邻域半径自主选取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0610002.

Zhang G, Ren G Q, Zhang Y T, et al. Research on optimizing disposition method of double theodolites in Gun rotated precision detection[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(9): 176-179.

- [2] 方安国,徐锐,张金萍. 火箭炮调炮精度的几种测量方法比较研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(3): 76-79.
- [3] 林嘉睿,郝继贵,张皓琳,等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 463-468.
- [4] 曾刊,赖文娟,雷雨能. 单全站仪调炮精度检测系统[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 18-19, 28.
- [5] 郭虎生,尹智,王圣旭. 双经纬仪调炮精度测量数据的误差分析及补偿[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(5): 79-81.
- [6] 陈文均,尹义贺,张跃强,等. 基于垂直双相机的微动平台位姿修正方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2315001.
- [7] 赵明富,曹利波,宋涛,等. 三维点云配准中 FPFH 邻域半径自主选取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0610002.

- Zhao M F, Cao L B, Song T, et al. Independent method for selecting radius of FPFH neighborhood in 3D point cloud registration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0610002.
- [8] 石峰源, 张春明, 姜丽辉, 等. 采用主成分分析的 ICP 算法优化与验证[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 1611002.
- Shi F Y, Zhang C M, Jiang L H, et al. Optimization and verification of ICP algorithm using principal component analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 1611002.
- [9] Sun X L, Zhou J X, Zhang W L, et al. Robust monocular pose tracking of less-distinct objects based on contour-part model[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2021, 31(11): 4409-4421.
- [10] Song L, Chen D, Hou T, et al. Automatic docking system of fuel filler with CAD model-based tracking and visual servoing control[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC), July 27-29, 2020, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2020: 6013-6017.
- [11] 宋庆华, 江春华. 基于图像处理的火炮身管定位定向方法[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(1): 109-110, 178.
- Song Q H, Jiang C H. A method of mensuration of the bodyworks' directions and position based on image processing for artillery[J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(1): 109-110, 178.
- [12] 全厚德, 赵波, 王建华, 等. 高炮随动系统性能测量算法[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(11): 161-163, 167.
- Quan H D, Zhao B, Wang J H, et al. Study on measurement algorithm of gun servo systems performance[J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(11): 161-163, 167.
- [13] 齐寰宇, 段修生, 马月辉, 等. 火炮身管指向测量中图像的特征提取与校正[J]. *火炮发射与控制学报*, 2021, 42(2): 34-39.
- Qi H Y, Duan X S, Ma Y H, et al. Feature extraction and correction of image corner points in gun barrel direction measurement[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2021, 42(2): 34-39.
- [14] 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0815002.
- Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0815002.
- [15] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. *国防科技大学学报*, 2000, 22(2): 15-19.
- Yu Q F, Sun X Y, Chen G J. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(2): 15-19.

Automatic Measurement Method of Cannon Barrel Pointing Based on Binocular Vision

Zhang Hao^{1,2}, Yang Xin^{1,2}, Chen Longmiao³, Zhu Xianwei^{1,2*}

¹*Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

²*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

³*School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, Jiangsu, China*

Abstract

Objective The artillery adjustment accuracy directly affects the hitting accuracy of the artillery, and it is a key performance parameter of the artillery. The system deviation of a fire control system before artillery equipment or after serving for a period of time is generally large, which results in a large deviation between the actual direction of the barrel and the setting direction of the system. The accuracy of artillery adjustment can be evaluated by using high-precision barrel pointing measurement, and the system deviation of the fire control system can be corrected by using pointing measurement data to improve the hitting accuracy. At present, the double theodolite method is widely used for barrel pointing measurement. The theodolite needs to acquire the horizontal angle and zenith angle data of observation points in the form of artificial sighting, and the measured data need to be manually input into the computer to calculate the barrel pointing. The low measurement efficiency and low degree of automation restrict the production efficiency of the artillery, and it is difficult to meet the rapid calibration requirement of the fire control system in future battlefield environments.

Methods The visual measurement method features non-contact, speediness, high accuracy, and easy integration. In this paper, a new method of barrel pointing measurement based on binocular vision is proposed. With corner points of a chess board fixed on the barrel as cooperative marking points, images taken by two cameras when the barrel is at zero position and measuring position are automatically analyzed by image processing, and the pixel coordinates of cooperative marking points in the images taken by two cameras are calculated and used to analyze barrel rotation. It is proposed to decompose the rotation of the barrel into two revolving movements, with only the direction angle and altitude angle changing, respectively. On this basis, measurement equations are established, and the direction angle and altitude angle are decoupled. The direction quantity of the plumb line in the camera coordinate system is obtained by plumb line

measurement, and the relationship between the camera coordinate system and the geodetic coordinate system is established, with the initial value of the barrel in the geodetic coordinate system obtained. Then, LM (Levenberg-Marquardt) algorithm is used to optimize the barrel pointing, and the final result of barrel pointing is obtained.

Results and Discussions In order to verify the accuracy of the proposed measurement method, a semi-physical simulation test is carried out in the laboratory by using a high-precision two-dimensional rotating platform to simulate the rotating device of the artillery, and a field test is carried out in an artillery factory. Both semi-physical simulation test and field test have verified the measurement accuracy and repeatability deviation of the measurement system. The semi-physical test results show that the measurement accuracy of barrel altitude angle is better than 0.09° [Fig. 5(a)], and that of direction angle is better than 0.15° [Fig. 5(b)]. The repeatability deviation of both angles is better than 0.0035° (Fig. 6). The field test results show that the measurement accuracy of the measurement system for altitude angle is better than 0.15° (Table 1), while that for direction angle is better than 0.12° (Table 1), and the repeatability deviation of both angles is better than 0.0035° (Fig. 9). The field test results are basically consistent to those of semi-physical simulation test, and the repeatability deviation is very low, which shows that the measurement method is highly robust to external disturbances such as light instability.

Conclusions In this paper, an artillery barrel pointing measurement system based on binocular vision is built, and measurement equations are derived. The measurement system software is developed, and the functions of system calibration and measurement are integrated to realize automatic measurement. The introduction of plumb line in the measurement method brings the advantage of low operation difficulty compared with the existing visual measurement methods and improves the convenience of visual measurement methods in the application of barrel pointing measurement. Barrel pointing measurement can be accomplished when the cooperative marking points are arranged arbitrarily without installation error calibration. The semi-physical test and field test results prove that the method presented in this paper has the advantages of high measurement accuracy, high robustness, and full-automation. It provides a new scheme for the pointing measurement of artillery barrel, which can realize the automatic measurement of artillery barrel pointing in future battlefield environments and has broad application prospects.

Key words measurement; camera calibration; binocular vision; barrel pointing; fire control system; pose estimation