

基于多目视觉的高集成特种车辆 通用自动标定方法研究

蒋圣鹏, 刘禹华, 曾远帆, 王上飞, 王艺伟, 周迪

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 高集成特种车辆的标定工作直接影响车辆使用性能, 是车辆研制过程的重要环节; 传统标定方法使用经纬仪、水平仪等仪器对车辆进行测量, 操作复杂、自动化水平和工作效率低; 针对这一问题, 提出了一种基于多目视觉测量技术的高集成特种车辆通用自动标定方法, 利用多相机拍摄地面控制场和固定于被测产品表面测量工装, 获取编码点信息, 利用基于最小二乘法的空间坐标转换原理和公共点转换技术计算各待测对象之间的空间位姿关系, 从而得出车辆各项精度指标; 验证试验结果表明, 相对于传统标定方法, 视觉通用自动标定方法可在精度相当的前提下将标定时间减少为原来的 25%, 大大提高标定效率。

关键词: 特种车辆; 双目视觉; 自动标定; 标定系统

Research on General Automatic Calibration Method for Highly Integrated Special Vehicles Based on Multi-View Vision

JIANG Shengpeng, LIU Yuhua, ZENG Yuanfan, WANG Shangfei, WANG Yiwei, ZHOU Di
(Shanghai Mechanical and Electrical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The calibration of highly integrated special vehicles directly affects their performance and is a crucial step in the development of vehicles. Traditional calibration methods use instruments such as theodolites and spirit levels to measure the vehicle, which has the characteristics of complex operations and low automation and efficiency. To address this issue, this paper proposes a general automatic calibration method for highly integrated special vehicles based on multi-view vision measurement technology. Using multiple cameras to photograph the ground control field and measurement fixtures fixed on the surface of the tested product to obtain the encoded point information. By applying the spatial coordinate transformation principle based on the least squares method and common point transformation techniques, the spatial pose relationships between the tested objects are calculated, thereby achieving various accuracy indicators of the vehicle. Validation tests show that, compared to traditional calibration methods, the proposed vision-based automatic calibration method can reduce the calibration time to 25% of the original duration while maintaining comparable accuracy, significantly improving calibration efficiency.

Keywords: special vehicles; binocular vision; automatic calibration; calibration system

0 引言

在特种车辆研制和生产过程中, 标定工作是确保其性能稳定和可靠的重要环节之一。标定精度直接影响车辆不同作业环境下的执行特种任务的成功率, 而标定工作的效率则对研制进度和交付周期起着重要作用。因此

如何进行精确、高效地标定成为了研究重点^[1]。传统标定方法主要通过测量仪器对车辆各定位面和基准面之间的夹角进行测量。目前常用的标定方法包括激光跟踪仪测量法^[2-3]、全站仪测量法^[4-5]、经纬仪测量法^[6-8]等。其中, 经纬仪测量法使用最为广泛, 操作人员使用经纬仪、水平仪等仪器对车辆进行测量, 通过人工记录与计

收稿日期:2024-08-19; 修回日期:2024-12-29。

作者简介:蒋圣鹏(1995-),男,硕士,工程师。

通讯作者:曾远帆(1988-),男,博士,高级工程师。

引用格式:蒋圣鹏,刘禹华,曾远帆,等. 基于多目视觉的高集成特种车辆通用自动标定方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12):174-181, 205.

算得出车辆各项精度指标。

尽管经纬仪测量法得到了广泛应用, 但是其局限性逐渐显现^[9]。首先, 每次测量都需要操作人员进行手动瞄准和调节, 操作难度高, 导致标定过程耗时长, 效率低。其次, 人工操作不可避免地带来人为误差, 导致重复性偏差增大, 测量精度降低。此外, 操作人员的技术水平对测量结果有较大影响, 这进一步增加了标定过程中的不确定性。因此, 如何开发简化操作、提升效率且降低人为误差的标定方法, 已成为亟待解决的问题。

近年来, 随着图像处理技术和计算机计算能力的快速发展, 基于视觉的图像检测技术逐渐成为标定领域的研究热点之一^[10-12]。相比传统标定方法, 视觉检测技术具有非接触、实时性强、测量精度高、信息量丰富等诸多优势^[13]。该技术已经在复杂结构的位姿测量中展现出巨大潜力。

国际上, 日本 Nomura 等人^[14]提出了一种基于密集立体视觉的船舶三维位置测量方法, 通过立体相机拍摄的图像, 采用半全局匹配 (SGM) 算法, 测量船体多个部位的位置, 实验表明, 即使在特征较少的船体图像中, 深度信息也能有效提取, 且测量误差控制在 1 米以内, 具备良好的精度和实用性。美国 Perry 等人^[15]提出了一种基于无人机和计算机视觉的便携式三分量位移测量技术, 使用光学和红外摄像头集成的无人机平台对三维结构进行动态位移测量, 相较于现有的技术, 提供了更高的测量灵活性和精度, 实验验证了该方法的有效性, 显示出其在桥梁检验和结构健康监测中的潜力。荷兰 Kromanis 等人^[16]提出了一种多摄像头位置测量方法, 用于桥梁的位移监测。该方法不依赖摄像头位置, 通过坐标变换技术计算结构位移, 能有效应对不同视角和位置的图像。

在国内, 天津大学研究人员^[12]针对定向天线位姿精密测量需求, 研究了一种多目视觉定向天线位姿测量方法, 解决了遮挡条件下无法精确解算位姿的问题。南京大学研究团队^[17]提出了一种基于组合视觉系统的机器人插销对接预对准测量方法, 采用动态坐标系校准和孔边缘匹配算法, 提升了孔位和机器人姿态测量精度, 实验结果验证了该系统在局部精度、测量范围和机器人自动化方面的优势。大连理工大学 Li 等人^[18]提出了一种基于双目视觉的三维方法, 用于检测数控机床的动态和大范围轮廓误差, 该方法结合闪光照明和编码解码技术, 提高了测量精度。Lü 等人^[19]提出了一种基于双目视觉的三维坐标检测方法, 用于解决环锭纺纱自动接头机在纱线断裂后的定位精度问题, 通过增强纺锭底部的对比度并使用单对特征点匹配算法, 实验结果显示该方法与传统方法相比, 定位误差小于 2 mm, 节省了 80% 的程序时间。天津科技大学研究团队^[20]提出了一

种基于双目视觉的战斗机武器系统校靶方法, 有效简化了校靶流程, 提高了战斗机制造、装备过程中的工作效率和可靠性。

基于上述背景, 本文提出了一种基于多目视觉测量技术的高集成特种车辆通用标定方法。该方法通过多相机系统测量车辆的三维位姿信息, 实现标定过程的高效化和自动化。本文首先推导了多相机系统下被测物三维坐标方程和坐标转换方程, 并在此基础上构建高集成特种车辆视觉通用标定系统。通过标定验证试验, 将本文所述方法与传统的经纬仪测量法进行对比, 验证视觉标定方法在精度和效率上的优势。

1 视觉标定原理

高集成特种车辆视觉通用自动标定系统如图 1 所示, 原理如图 2 所示, 自动标定系统主要由地面控制场、测量工装、实时测量相机、相机安装桁架、联机控制器、控制显示设备等组成。

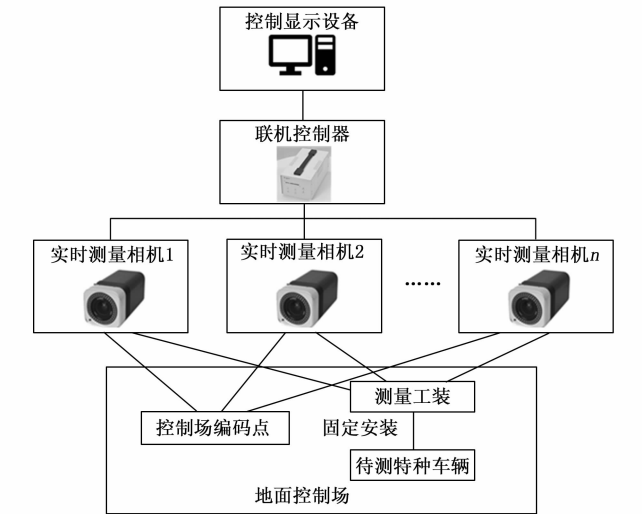


图 1 高集成特种车辆通用自动标定系统框图

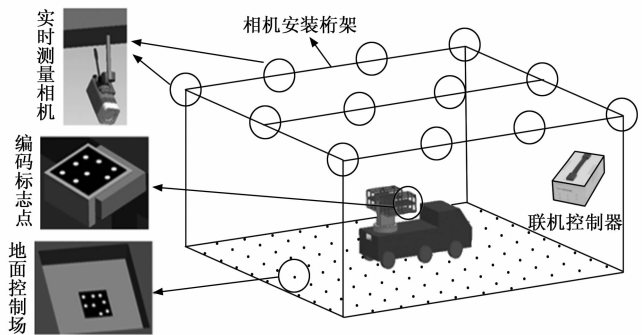


图 2 高集成特种车辆通用自动标定示意图

地面控制场由若干均布于地面的编码点组成, 用于表征大地水平面和绝对北向; 测量工装表面粘贴编码点, 安装于特种车辆上, 用于获取特定基准面或被测面

的法向信息；实时测量相机固定于相机安装桁架上，用于获取测试系统中被测对象各个方向的图像信息；联机控制器主要作用为连接相机与电脑，为相机与电脑提供数据传输、供电并控制指令传递；控制显示设备主要根据标定项目和指令控制标定系统进行标定工作，包括图像处理、坐标转换、计算测试结果并通过可视化设备显示标定过程状态和结果。

在固定站位地面布置控制场，控制场与真北方向以及大地水平面之间的关系通过前期标定获得，特种车辆通用标定系统通过测量地面控制场来获取真北方向和大地水平面。同时，在车上相应基准面上安装测量工装，多相机通过测量工装来获取基准面的法向信息。特种车辆通用标定系统在测量过程中能够同时测量控制场以及车上各个基准面上的测量工装。通过控制场统一坐标系，获得真北方向和大地水平面，然后通过测量工装获取各个基准面的法向信息，之后根据不同的分析需求进行数据自动处理，获得车体不同状态下姿态角测量结果。

在数字近景工业摄影测量中，不同的位置的摄影相机拍摄同一被测目标物，获得的多张不同角度的被测目标物的像片称为立体像对。若采用 n 台相机在不同的位置拍摄被测目标物，被测目标物包含 m 个关键物方点，可形成多位置交会的多目立体模型。如图 3 所示，使用第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 个相机在摄站点 S_j 拍摄同一被测目标物方点 P_i ($i=1, 2, \dots, m$)，在摄站点 S_j 获得物方点 P_i 对应的像点 p_{ij} 。建立摄影测量坐标系 A -XYZ、第 j 个摄站点 S_j 的像空间坐标系 S_j - $x_j y_j z_j$ 和像空间辅助坐标系 S_j - $X_j Y_j Z_j$ 。

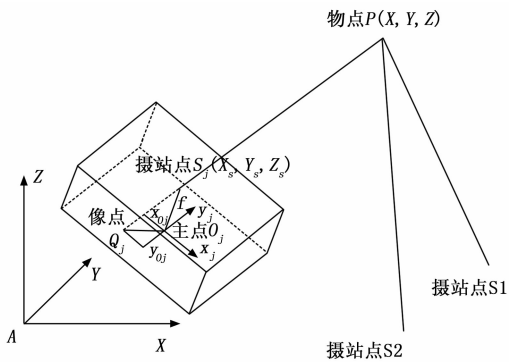


图 3 摄影测量原理图

1.1 坐标系转换

根据三维参数转换模型，两个右手空间直角坐标系进行转换时，一般存在 3 个平移量、3 个旋转量和一个尺度因子。仪器所构成的测量坐标系 A -XYZ 先缩放 k 倍，再旋转 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ ，最后平移 (X_0, Y_0, Z_0) 后，可转换到像空间坐标系 S_j - $x_j y_j z_j$ 中。若物方点 P_i 在 A -XYZ 中的坐标表示为 (X_i, Y_i, Z_i) ，在 S_j - $x_j y_j z_j$ 中的坐标表示

为 $(x_{Pij}, y_{Pij}, z_{Pij})$ ，则有：

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \frac{1}{k} \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_{Pij} \\ y_{Pij} \\ z_{Pij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， \mathbf{R} 为旋转矩阵，其构造按 Kardan 旋转进行，首先绕 X 轴旋转 ϵ_x ，此时 Z 轴到达 OYZ 与 OYX 两面的交线位置，其次绕旋转后的 Y 轴旋转 ϵ_y ，使 Z 轴最终到达 z 轴，最后绕 z 轴旋转 ϵ_z ，最终使 X 、 Y 轴分别与 x 、 y 轴重合。坐标系分别绕以上坐标轴单独旋转的转换矩阵为：

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(\epsilon_x) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon_x & -\sin \epsilon_x \\ 0 & \sin \epsilon_x & \cos \epsilon_x \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\epsilon_y) &= \begin{bmatrix} \cos \epsilon_y & 0 & \sin \epsilon_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \epsilon_y & 0 & \cos \epsilon_y \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\epsilon_z) &= \begin{bmatrix} \cos \epsilon_z & -\sin \epsilon_z & 0 \\ \sin \epsilon_z & \cos \epsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

最终旋转矩阵 \mathbf{R} 为：

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\epsilon_x) \mathbf{R}_y(\epsilon_y) \mathbf{R}_z(\epsilon_z) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

转换矩阵 \mathbf{R} 中的各参数为：

$$\begin{cases} a_1 = \cos \epsilon_y \cos \epsilon_z \\ a_2 = -\cos \epsilon_y \sin \epsilon_z \\ a_3 = \sin \epsilon_y \\ b_1 = \cos \epsilon_x \sin \epsilon_z + \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z \\ b_2 = \cos \epsilon_x \cos \epsilon_z - \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z \\ b_3 = -\sin \epsilon_x \cos \epsilon_y \\ c_1 = \sin \epsilon_x \sin \epsilon_z - \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z \\ c_2 = \sin \epsilon_x \cos \epsilon_z + \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z \\ c_3 = \cos \epsilon_x \cos \epsilon_y \end{cases} \quad (4)$$

1.2 公共点转换

通过不同坐标系下的同一点集的三维坐标值，能够确定两个坐标系之间坐标系转换参数。对一组公共点，存在两个不同坐标系，两坐标系之间有 3 个平移参数、3 个旋转参数和一个尺度因子，记为 $t = (X_0, Y_0, Z_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, k)$ 。设公共点在坐标系 1 下的坐标为 (X, Y, Z) ，在坐标系 2 下的坐标为 (x, y, z) ，根据式 (1) 坐标系 1 与坐标系 2 之间的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此，对第 i 个公共点，可列出拟合方程：

$$v_i = a^T dt + F_i \quad (6)$$

式中:

$$a_i = \frac{\partial F}{\partial t} \Big|_{x=x_i, y=y_i, z=z_i} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由此可知, 每个公共点可构建 3 个方程, 而坐标系转换参数含有 7 个未知量, 因此理论上如果有 3 个以上的已知公共点, 即可求出坐标系转换参数。

1.3 建立共线方程

若像点 p_{ij} 在像空间坐标系下的坐标为 $(x_{pij}, y_{pij}, -f_j)$ (f_j 为主距, 定义为摄站点到影像面的垂距), 则经过空间直角坐标系旋转变换, 像点在空间辅助坐标系下坐标 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) 可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ Z_{ij} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_{pij} \\ y_{pij} \\ -f_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1j} & a_{2j} & a_{3j} \\ b_{1j} & b_{2j} & b_{3j} \\ c_{1j} & c_{2j} & c_{3j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pij} \\ y_{pij} \\ -f_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, \mathbf{R} 为转换矩阵, 与影像面在摄影瞬间相对于摄影测量坐标系的姿态角 φ 、 ω 、 κ 相关:

$$\begin{cases} a_1 = \cos\varphi\cos\kappa - \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ a_2 = -\cos\varphi\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ a_3 = -\sin\varphi\cos\omega \\ b_1 = \cos\omega\sin\kappa \\ b_2 = \cos\omega\cos\kappa \\ b_3 = -\sin\omega \\ c_1 = \sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \\ c_2 = -\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \\ c_3 = \cos\varphi\cos\omega \end{cases} \quad (10)$$

进行摄影测量时, 被摄物体、摄影中心和影像点在同一直线上, 即图 2 中的 P_i 、 S_j 、 p_{ij} 三点共线, 在摄影测量坐标系下 P_i 、 S_j 、 p_{ij} 的坐标分别为 (X_i, Y_i, Z_i) 、 (X_{sj}, Y_{sj}, Z_{sj}) 、 $(X_{pij}, Y_{pij}, Z_{pij})$, 根据共线条件可列方程:

$$\frac{X_{pij} - X_{sj}}{X_i - X_{sj}} = \frac{Y_{pij} - Y_{sj}}{Y_i - Y_{sj}} = \frac{Z_{pij} - Z_{sj}}{Z_i - Z_{sj}} \quad (11)$$

联合式 (1) 和式 (3), 考虑相机的内方位元素 (x_{0j}, y_{0j}, f_j) 和像点坐标相对其理论位置坐标 (x_{pij}, y_{pij}) 存在的小偏差 (畸变) Δx_{ij} 和 Δy_{ij} , 可得到共线方程:

$$\begin{cases} x_{pij} - x_{0j} + \Delta x_{ij} = \\ -f_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{sj}) + b_{1j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{1j}(Z_i - Z_{sj})}{a_{3j}(X_i - X_{sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{sj})} \\ y_{pij} - y_{0j} + \Delta y_{ij} = \\ -f_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{sj}) + b_{2j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{2j}(Z_i - Z_{sj})}{a_{3j}(X_i - X_{sj}) + b_{3j}(Y_i - Y_{sj}) + c_{3j}(Z_i - Z_{sj})} \end{cases} \quad (12)$$

由最小二乘平差原理, 在已知条件的基础上, 根据式 (4) 列出误差方程式, 采用光束平差算法进行综合求解, 即可以获得被测物方点的三维空间坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 。若被测平面上设置 3 个物方点, 即可通过计算的三维空间坐标系下物方点坐标确定被侧面位置信息和法向信息。

将上述基础理论应用于本文的复杂车体标定。如图 4 所示, 首先通过预先设计和标定的控制场靶点, 根据公共点转换技术计算固定相机对应的像空间坐标系与摄影测量坐标系之间的转换参数, 建立待测对象的基准面 (如大地水平面、真北方向、车体基准等) 与测量工装上的摄影测量标志之间的空间位姿关系。同时在图像上获取被侧面上的标志点在像平面坐标系下的坐标, 通过坐标转换技术计算标志点在摄影测量坐标系下的坐标, 实现不同相机中的像点坐标的统一。最后, 通过共线方程中建立像点和物方点的参数方程, 求解得到被测物方点在摄影测量坐标系下的三维空间坐标, 从而得到统一坐标系下各待测对象的基准面及其法线, 最终得到各待测对象之间的空间位姿关系。

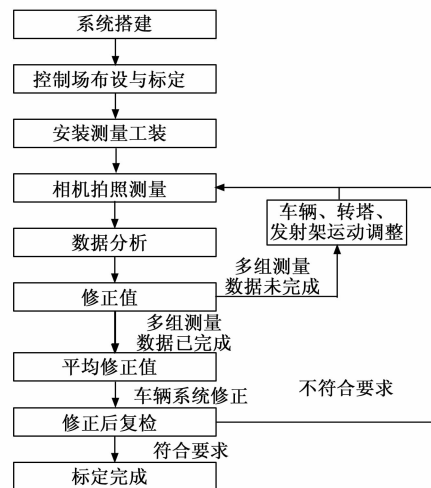


图 4 方案实施流程图

2 视觉通用自动标定流程

2.1 系统搭建

系统搭建主要指的是固定站的建设, 固定站主要包括相机安装桁架、运动测量相机等。首先在固定站四周搭建桁架, 通过相机云台和专用固定工装将测量相机固定在桁架上, 通过相机云台可以调节每台相机的镜头指向, 通过电缆线将各台相机与控制器连接, 控制器之间通过网线进行串联并与电脑连接。

通过云台调整各台相机的镜头指向, 使得所有相机视场可覆盖整个固定站位, 同时保证任意位置都可以同时被两台或者两台以上的相机测量到, 相机位置及相机角度模拟如图 5 所示。

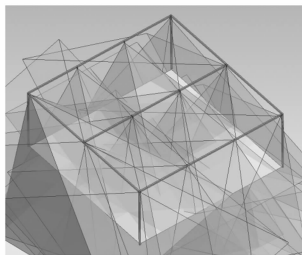


图 5 多相机视场范围示意图

系统搭建工作只需要进行一次即可，后续可以一直使用。当测量相机被从安装位置上取下后，再次安装到原先位置，需要对各台相机的镜头指向进行检查和调整。相机拆下再次安装状况包括相机取下重新标定参数文件、相机每年按时送第三方检定、相机故障取下维修、相机故障需要更换等。

2.2 控制场布设与标定

控制场采用摄影测量编码点进行布置，在固定站位地面上设计有预埋坑，预埋坑内安装摄影测量编码点工装，编码点按网格状进行分布，编码点间距初步设定为 1 m 左右。

标定系统投入使用前对地面控制场进行标定，建立控制场与真北方向和大地水平面之间的关系。首先在控制场内布置 n ($n \geq 3$) 个靶标或者工装，靶标或工装上设有编码点，在地面控制场边缘架设一台陀螺经纬仪和两台电子经纬仪，如图 6 所示。使用陀螺经纬仪寻北找到真北方向，在控制场内部或者附近再次粘贴两个靶标或者工装，使用陀螺经纬仪瞄准两个靶标，获得两靶标连线与真北夹角。使用两台电子经纬仪建立经纬仪测量系统，经纬仪测量系统坐标系的 XOY 面为大地水平面，使用经纬仪测量前面粘贴的两个靶标，通过计算得到经纬仪坐标系与真北方向之间关系。再使用经纬仪测量控制场内布置的 n 个靶标点或者工装，通过计算可得到经纬仪坐标系与 n 个靶标编码点之间关系。最后使用单相机系统对地面编码点和 n 个靶标编码点进行测量，

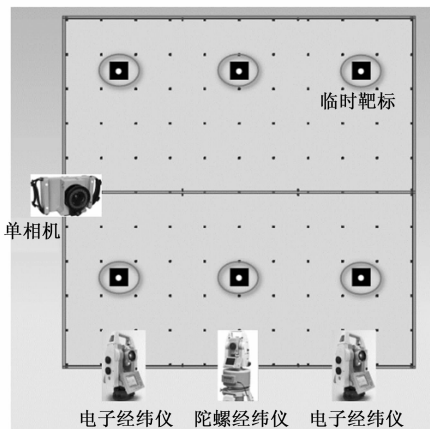


图 6 控制场标定

通过计算得到地面编码点与大地水平面和真北方向之间关系。

控制场标定工作只需进行一次即可，地面控制场标定完成后会生成标定文件，在粘贴编码点的地面没有发生变形沉降、地面编码点没有大面积污染损坏前提下，后续可一直使用该标定文件。但是为保证系统测量精度，可定期对控制场进行重新标定。

2.3 测量工装安装

测量工装用于辅助获取基准面法向信息。每个测量工装上都粘贴有摄影编码点，且各个测量工装上粘贴的编码点编号都不相同，以保证每个测量工装都是唯一的，因此测量软件需要根据编码点编号自动判断测到的工装是哪个基准上的工装。此外，测量工装上与基准面接触的安裝平面和测量工装上粘贴的摄影编码点之间关系已提前标定，可通过测量工装上的摄影编码点坐标来计算对应的基准面的姿态。

待测车辆进入测量区域并停稳后，在车辆各个基准被测量面上安装对应测量工装，需要保证测量工装与被侧面光滑平整且连接可靠，特种车辆典型测量工装安装方式如图 7 所示。

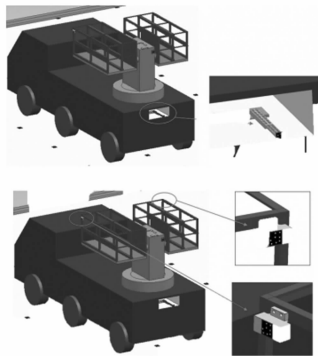


图 7 测量工装

2.4 相机拍摄

将待测车辆姿态调节到位后，测量人员通过测量软件控制多相机系统对工装和地面控制场进行拍照，获取各相机视场下待测车辆的多视角图像。

2.5 基准数据自动获取

软件中基准数据为大地水平面和真北方向，基准数据的获取过程采用自动化处理分析，软件内部分析流程如下：

1) 测量软件通过相机拍摄的照片以及前期标定的控制场文件进行控制场定向，建立多相机测量系统（多相机测量坐标系），以及多相机测量坐标系与控制场坐标系关系。

2) 测量软件自动获取前期标定的控制场文件内含有的标定信息，包括控制场坐标系与大地水平面关系、

控制场坐标系与真北方向关系。

3) 测量软件通过公共点转换、坐标系传递技术, 获得多相机测量坐标系与大地水平面、真北方向关系。

2.6 测量数据自动分析

数据分析即为计算车体上各个基准面间以及与真北方向间的角度关系, 数据分析的过程也采用自动化处理分析, 软件内部分析流程如下:

1) 测量软件使用相机拍摄的照片通过前方交会计算出各个基准工装上编码点在多相机测量坐标系下的三维坐标。

2) 测量软件自动获取前期标定的各个工装文件内含有的标定信息, 包括基准工装上编码点坐标与基准工装安装平面法向关系。

3) 通过公共点转换、坐标系传递功能, 获得各个基准工装上安装平面法向与大地水平面、真北方向关系。

4) 测量软件根据各个关系计算各个基准面的姿态, 得到各个基准面间以及与真北方向间的角度关系, 包括车体姿态角(北向角、侧倾角、俯仰角)和其他上装结构的姿态角, 软件根据测量出的角度值计算角度修正值。

当前状态车体角度测量完成后, 操作人员控制车辆将车体姿态调整到下一个测量状态, 然后再次重复相机拍摄、基准数据获取、数据分析过程, 当所有姿态测量完成后, 软件计算出修正值均值, 并将均值发送给车体控制系统。在车体控制系统角度修正完成后, 再次通过测量验证修正后车体各角度是否符合指标, 满足指标则标定完成, 不满足指标则重新进行车体标定。

3 试验验证

3.1 系统精度测试

现场布设 6 个测量靶标, 然后分别使用跟踪仪测量系统和复杂车体智能标定原理样机对靶标进行测量, 然后计算各靶标之间距离, 以跟踪仪测量结果为参考值计算各系统测量偏差, 根据偏差结果验证系统各项精度指标是否满足要求。

因车体标定系统的测量范围为 20 m, 结合精度指标要求, 系统精度指标验证时, 分别进行 4、5、10、15、20 m 的精度测试。下面以 4 m 的精度指标测试为例介绍测量方法, 其他距离的精度指标测试方法与 4 m 的类似。

在现场布设 6 个靶球底座, 6 个靶球底座分为两组, 一组 3 个, 两组靶球底座之间相距约 4 m, 布设示意图见图 8, ①~③、④~⑥分别为两组靶球底座, ①与④、②与⑤、③与⑥之间距离约 4 m。在 6 个靶球底座区域内布设若干编码点, 用于制作控制场为多相机进

行控制场定向。在 6 个靶球底座附近位置架设跟踪仪测量系统, 使用跟踪仪靶球分别测量 6 个靶球底座的三维坐标, 然后计算①与④、②与⑤、③与⑥之间距离, 以及①⑤直线与②④直线夹角、②⑥直线与③⑤直线夹角、①⑥直线与③④直线夹角, 跟踪仪测量结果作为参考值。然后使用自动标定系统测量 6 个靶球底座的三维坐标, 同样根据测量点坐标分析计算 3 个距离值和 3 个角度值, 并将测量结果与参考值进行比对分析, 计算测量偏差, 根据偏差结果验证系统各项精度指标。试验现场进行精度指标验证测试时一般都采用与跟踪仪系统与待测试设备进行比对分析, 通过将两种测量方法得到结果的偏差值与限差进行对比, 若在限差值范围内, 即认为自动标定系统满足精度要求。限差计算方法为跟踪仪系统精度与待测试设备精度的平方平均数。

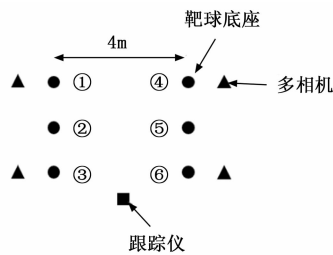


图 8 各设备布设位置示意图

测量前跟踪仪系统送至第三方通过干涉仪完成校准, 精度指标为: 测距精度 0.015 mm + 0.006 mm/m, 角度精度 45"。车体标定系统需求的精度一般为: 测距精度 0.012 mm + 0.012 mm/m, 角度精度 45"。因此 4、5、10、15、20 m 距离的精度测试的限差分别为 0.072、0.085、0.152、0.219、0.286 mm, 角度限差为 45"。

测试结果如表 1 和表 2 所示, 距离测试和角度测试偏差均在限差内, 说明本研究的自动标定系统测距精度可达到 0.012 mm + 0.012 mm/m, 角度精度可达到 45"。

3.2 样车车体标定测试

使用高集成特种车辆视觉标定系统原理样机对样车进行车体标定验证试验, 并与传统方法进行比对验证, 验证通用自动标定系统功能性能指标和通用自动标定方法的工作效率。

试验验证的车体标定项目包括:

- 1) 驻车状态下, 测量车体姿态角, 包括北向角、侧倾角、俯仰角;
- 2) 分别在俯仰架相对车体高低 0、20、40 和 60° 时, 测量俯仰架高低角;
- 3) 分别在俯仰架相对车体方位 0、90、180 和 270° 时, 测量俯仰架方位角。

测量设备布置如图 9 所示。首先通过传统标定方法

表 1 不同距离测试结果

mm

序号	测试距离	跟踪仪	车体自动标定系统			偏差			限差
			第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	
1	4 m	4 007.242	4 007.216	4 007.210	4 007.200	−0.026	−0.032	−0.042	0.072
		3 983.743	3 983.696	3 983.701	3 983.707	−0.047	−0.042	−0.036	
		3 949.476	3 949.527	3 949.531	3 949.505	0.051	0.055	0.029	
2	5 m	4 982.918	4 982.929	4 982.945	4 982.946	0.011	0.027	0.028	0.085
		5 002.055	5 002.100	5 002.110	5 002.103	0.045	0.055	0.048	
		4 995.775	4 995.717	4 995.716	4 995.726	−0.058	−0.059	−0.049	
3	10 m	10 063.552	10 063.561	10 063.571	10 063.612	0.009	0.019	0.060	0.152
		10 055.676	10 055.652	10 055.672	10 055.669	−0.024	−0.004	−0.007	
		10 093.855	10 093.796	10 093.803	10 093.808	−0.059	−0.052	−0.047	
4	15 m	15 046.630	15 046.661	15 046.624	15 046.650	0.031	−0.006	0.020	0.219
		15 065.680	15 065.775	15 065.790	15 065.790	0.095	0.110	0.110	
		15 003.921	15 003.838	15 003.840	15 003.821	−0.083	−0.081	−0.100	
5	20 m	19 866.889	19 866.707	19 866.730	19 866.701	−0.182	−0.159	−0.188	0.286
		19 895.675	19 895.724	19 895.717	19 895.711	0.049	0.042	0.036	
		19 841.345	19 841.278	19 841.301	19 841.271	−0.067	−0.044	−0.074	

表 2 不同距离角度测试结果

(°)

序号	测试距离	跟踪仪	车体自动标定系统			偏差			限差
			第一组	第二组	第三组	第一组	第二组	第三组	
1	4 m	27.735	27.736	27.736	27.736	0.001	0.001	0.001	0.012 5
		53.425	53.426	53.425	53.426	0.001	0.000	0.001	
		28.721	28.722	28.722	28.722	0.001	0.001	0.001	
2	5 m	21.859	21.858	21.858	21.858	−0.001	−0.001	−0.001	0.012 5
		43.709	43.709	43.710	43.710	0.000	0.001	0.001	
		21.436	21.436	21.436	21.437	0.000	0.000	0.001	
3	10 m	11.801	11.801	11.802	11.801	0.000	0.001	0.000	0.012 5
		22.868	22.869	22.869	22.869	0.001	0.001	0.001	
		11.325	11.325	11.326	11.325	0.000	0.001	0.000	
4	15 m	7.693	7.694	7.694	7.694	0.001	0.001	0.001	0.012 5
		15.311	15.312	15.312	15.312	0.001	0.001	0.001	
		7.665	7.664	7.664	7.664	−0.001	−0.001	−0.001	
5	20 m	11.801	11.802	11.802	11.801	0.001	0.001	0.000	0.012 5
		22.868	22.869	22.869	22.869	0.001	0.001	0.001	
		11.325	11.325	11.326	11.326	0.000	0.001	0.001	

测量获取车体标定结果，使用陀螺经纬仪和电子经纬仪测量方位方向相关角度，使用象限仪测量横滚俯仰相关角度，测量结果作为参考值；然后使用多相机系统测量获取车体标定结果，与参考值比对分析，计算多相机测量系统的测量偏差。此外，使用两种方法进行标定时，

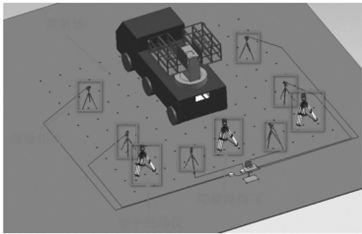


图 9 车体标定系统布置示意图

分别记录不同标定项目的消耗时间。

根据各设备精度指标，通过传统方法测量车体各个角度时测量精度分别为：车体北向角测量精度为 17″，车体侧倾角测量精度 108″，车体俯仰角测量精度 12″，俯仰架高低角测量精度 109″，俯仰架方位角测量精度 19″。标定系统角度精度指标为 45″，通过各指标精度叠加计算可以得到各角度通过多相机系统测量并与传统方法比对计算时各个角度限差值如下：车体北向角角度比对限差为 49″ (0.014°)，车体侧倾角角度比对限差 117″ (0.033°)，车体俯仰角角度比对限差 48″ (0.014°)，俯仰架高低角角度比对限差 118″ (0.033°)，俯仰架方位角角度比对限差 49″ (0.014°)。若偏差值在限差范围内，则表明系统精度指标在 45″以内。

验证试验的标定角度数据见表 3, 消耗时间数据见表 4。传统标定方法与视觉标定方法角度数据偏差远小于限差值, 说明视觉自动标定系统标定角度精度可达到 45"。通过比较各项的标定时间, 表明车辆标定全流程耗时从 12 h 减小到 3 h。综上, 本文所提出的视觉通用标定方法可在角度精度 45" 的情况下, 将标定时间减少为传统标定方法的 25%。

表 3 高集成特种车辆标定角度数据 (°)

标定项目			传统标定方法	视觉标定方法	偏差	限差
车体姿态	车体北向角		16.814	16.821	0.007	0.014
	车体侧倾角		-0.012	-0.009	0.003	0.033
	车体俯仰角		-0.023	-0.029	-0.006	0.014
俯仰架高低角	左俯仰架	0	-0.773	-0.780	-0.007	0.033
		20	19.279	19.283	0.004	0.033
		40	39.375	39.387	0.012	0.033
		55	53.313	53.296	-0.017	0.033
	右俯仰架	0	2.580	2.609	0.029	0.033
		20	21.645	21.637	-0.008	0.033
		40	41.744	41.727	-0.017	0.033
		55	56.513	56.502	-0.011	0.033
俯仰架方位角	左俯仰架	0	-0.271	-0.279	-0.008	0.014
		90	86.281	86.286	0.005	0.014
		180	179.590	179.596	0.006	0.014
	右俯仰架	0	-0.365	-0.374	-0.009	0.014
		180	179.886	179.895	0.009	0.014
		270	269.625	269.633	0.008	0.014

表 4 高集成特种车辆标定时间数据 h

标定项目		传统标定方法	视觉标定方法	时间差
车体姿态角	车体北向角	1	0.5	1.5
	车体侧倾角	0.5		
	车体俯仰角	0.5		
俯仰架高低角		4	1	3
俯仰架方位角		6	1.5	4.5
合计		12	3	9

4 结束语

本文针对高集成特种车辆标定过程操作繁琐、自动化水平和工作效率低的问题, 提出了一种基于多目视觉测量技术的新型高集成特种车辆通用标定方法。根据特种车辆实际测试工况, 研究了基于最小二乘法的空间坐标转换原理和公共点转换技术, 搭建了高集成特种车辆标定系统。为验证标定方法的先进性, 分别使用传统方法和视觉通用标定方法进行特种车辆标定, 试验结果表明, 相对于传统标定方法, 视觉通用自动标定方法可在角度精度 45" 的情况下, 将标定时间减少为传统标定方法的 25%, 大大地提高了标定效率, 消除了人为误差, 提高了测试的可靠性。

参考文献:

[1] 罗 捷, 李远智, 黄宇飞, 等. 基于机器视觉的车身二次定位技术在整车 DTS 在线测量系统中的应用 [J]. 轻工科技, 2024 (4): 84-86.

[2] 孟繁胜, 张玉福, 李 彬, 等. 一种基于激光跟踪仪的火箭炮精度检测方法 [J]. 新技术新工艺, 2020 (11): 76-79.

[3] 赵云涛, 方 成, 李维刚. 基于改进指数优化与迭代加权 LM 法的机器人标定方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024 (11): 18-23.

[4] 刘志鹏, 李 锴, 徐 强. 基于蒙特卡洛法的单全站仪调炮精度测量系统不确定度研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38 (2): 63-66.

[5] 张 光, 任国全, 张英堂, 等. 基于全站仪的身管火炮零线检校方法研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 117 (1): 76-79.

[6] WU D, DU F. A new method of precise orientation adjustment based on matrix similarity for large-scale component [J]. Assembly Automation, 2018, 38 (2): 207-215.

[7] 孟 波, 王圣旭, 游 蕃, 等. 火箭炮调炮精度智能检测系统设计与实现 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (1): 78-82.

[8] FU Q, ZHAO F, ZHU R, et al. Research on the intersection angle measurement and positioning accuracy of a photoelectric theodolite [J]. Frontiers in Physics, 2023, 10: 1121050.

[9] 张 豪, 杨 鑫, 陈龙森, 等. 基于双目视觉的火炮身管指向全自动测量方法 [J]. 光学学报, 2023, 43 (2): 106-114.

[10] 孙棧伊, 范文晶, 曾远帆, 等. 基于 Harris 角点检测的装填靶识别方法 [J]. 空天防御, 2022, 5 (4): 87-91.

[11] 邱忠宇, 赵文龙, 高 文, 等. 动态视觉传感器的目标检测算法对比分析 [J]. 空天防御, 2021 (1): 8-13.

[12] 蒋兴好, 赵泽宇, 许 可. 基于视觉的飞行器智能目标检测对抗技术 [J]. 空天防御, 2021 (4): 101-106.

[13] DAI Z X, YANG G H, GAO Y H, et al. Large displacement measurement method based on panning 3D vision [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44 (19): 1912002.

[14] NOMURA Y, YAMAMOTO S, HASHIMOTO T. Study of 3D measurement of ships using dense stereo vision: towards application in automatic berthing systems [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26: 573-581.

[15] PERRY B J, GUO Y. A portable three-component displacement measurement technique using an unmanned aerial vehicle (UAV) and computer vision: a proof of concept [J]. Measurement, 2021, 176: 109222.

(下转第 205 页)