

DOI: 10.3901/JME.2022.20.294

宽厚板板形测量系统与标定方法研究^{*}

李子良^{1,2} 王涛¹ 张金柱¹ 师玮¹ 白建鑫¹ 黄庆学¹

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原 030024;
2. 太原科技大学电子信息工程学院 太原 030024)

摘要: 针对当前宽厚板板形在线智能化检测的需求,设计一种单激光器多相机的宽厚板板形测量系统,提出一种基于唯一激光平面的多相机坐标系姿态校准标定方法。板形测量系统由分别位于宽厚板矫正机前后的两个相同的子系统组成,子系统采用多相机测量视野拼接的方式,实现宽厚板板形的检测;利用相邻相机公共视野中同一姿态标定板世界坐标系的唯一性,将多个相机的坐标系映射在基准坐标系下,根据实际激光平面的唯一性将多个相机坐标系统一为同一姿态,并通过统一坐标后相邻相机点云数据的位置关系,实现多相机测量数据的快速拼接,完成多相机结构光测量系统坐标系的标定。试验结果表明,该方法准确有效,为大视场结构光三维测量提供了一种有效的测量标定方法。

关键词: 板形测量; 结构光测量; 相机标定; 姿态校准; 点云数据

中图分类号: TP23

Research on Plate Shape Measurement System and Calibration Method of Wide and Thick Plate

LI Ziliang^{1,2} WANG Tao¹ ZHANG Jinzhu¹ SHI Wei¹
BAI Jianxin¹ HUANG Qingxue¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Aiming at the current demand for online intelligent detection of wide and thick plate shape, a wide and thick plate shape measurement system with single laser and multi-camera is designed, and a attitude calibration method of multi-camera coordinate system is proposed based on the unique laser plane. The plate shape measurement system is composed of two identical subsystems located before and after the wide and thick plate levelling machine. The subsystem adopts the method of multi-camera measurement vision splicing to realize the detection of wide and thick plate shape. First, using the uniqueness of the world coordinate system of the same attitude calibration plate in the common view of adjacent cameras, the coordinate systems of multiple cameras are mapped to the reference coordinate system. Then the multi-camera coordinate systems are set to the same posture according to the uniqueness of the laser plane. At last, fast stitching of point cloud data with multi-camera system is implemented according to position relation of adjacent cameras point cloud data which unified coordinate. The multi-camera structured light measurement system calibration has been finished. The experimental results show that the method is accurate and effective, which provides an effective calibration method for 3D measurement of large field of view structured light.

Key words: plate shape measurement; structural light measurement; camera calibration; attitude calibration; point cloud data

^{*} 国家重点研发计划课题(2018YFB1308702)、山西省科技重大专项(20181102016, 20181102015)、机器人技术与系统国家重点实验室开放基金课题(SKLR-S-2020-KF-17)和山西省应用基础面上青年基金(201901D211011)资助项目。20211108收到初稿, 20220315收到修改稿

0 前言

随着现代科技的发展, 现有的金属轧制精整装备设计理论和控制技术, 难以满足市场多样化的需求。在轨道交通、重型装备、军事工业、航空航天等领域都对金属制品的强度、韧性、外形精度等指标, 提出了更高的要求。面对激烈的市场竞争和钢铁行业粗钢产能过剩^[1-2]的困局, 开发先进的高精度、高效率和高品质的精整装备变得越来越重要。大型矫直机、压平机是宽厚板精整生产线上的主体设备, 而板材矫正过程中智能化的实现, 首先要求整个矫正过程必须有相关的宽厚板板形数据。近年来, 机器视觉检测^[3-4]逐步发展为智能装备中不可或缺的检测手段, 其中工业相机和激光器组成的线结构光测量系统^[5-6], 以结构简单、效率高、非接触式测量等为主要特点, 在三维重建^[7-9]、三维表面形状测量^[10-12]等领域具有广泛的应用前景, 这为宽厚板板形测量提供了方向。当前现有的结构光测量系统测量宽度范围有限^[24, 28, 31], 而宽厚板的实际板宽可达 5 m 及以上^[13-15], 这给结构光测量系统提出了新的挑战, 搭建这种超大范围的结构光测量系统也是金属轧制精整装备智能化的关键技术之一, 要精准测量宽厚板的板形, 首要解决的就是超大范围测量系统的标定问题。

在线结构光宽厚板测量系统中, 测量精度很大程度上取决于系统的标定精度, 线结构光的标定也是结构光测量系统中的关键部分, 对于单相机线结构光标定技术很早就得到了广泛的研究^[16-19]。常用的技术主要有矢量叉乘法^[20-21](通过两个不平行的激光条纹矢量的叉乘来计算激光平面的法向量)、线性方程组的求解法^[22-23](通过变换矩阵将图像的二维像素点对应到激光平面上的三维点)、交比不变性法^[24-27](利用交比不变性原理求解盘靶标上的 3 个共线点所在直线的交点坐标, 继而获得光平面上较高精度的标定点)、消失点和消失线的方法^[28-29](利用计算机视觉中消失点和消失线的知识可以获得激光平面的法向量)、Plücker 矩阵求解法^[30-32](直接用 Plücker 矩阵求解了激光平面方程, 但其推导计算过程较为复杂, 不易理解)、立体标定靶透视投影法^[33](利用透视变换计算立体标定靶上的矩形框在成像面的投影, 得到单应性矩阵, 但标定精度受立体标定靶的精度制约)。还有学者提出了基于三标志点的多视数据对齐、传感器性能提升及标定算法优化的方法^[34-35], 用于实现单传感器的三维测量, 但测量

过程复杂, 范围有限, 且精度不高。近年来多相机的联合测量方法^[36]也得到了较大发展, 多相机测量的常用标定技术主要有利用大型一维靶标^[37]完成多个相机内、外部参数和光平面位置参数的快速标定和坐标系统一, 然而大型标定靶制作技术难度大、成本高。黄邦奎等^[38]利用空间距离为约束条件, 建立目标函数, 借助非线性优化方法完成全局校准, 精度依赖于空间距离精度, 标定方法相对复杂; 张启灿等^[39]利用特制标定模块得到多相机之间的坐标转换模型, 实现了局部三维测量数据到全局坐标系的标定; HUANG 等^[40]利用组合靶标的固有特性统一了局部标定和全局标定; 李涛涛等^[41]利用公共视野的特征点匹配及透视变换完成多相机坐标标定统一, 在扩展视野多相机系统中, 相邻相机的公共视野有限, 对标定精度影响较大。

当前多相机联合测量标定方法, 多依赖于立体标定靶或者立体空间位置进行多相机之间的坐标标定, 大型立体标定靶的加工技术难度大, 且成本高, 实现难度大。因此, 本文提出了一种基于唯一激光平面的多相机坐标系姿态校准标定方法, 该方法主要基于唯一激光平面的不变性, 利用公共视野的标定图像的外参数, 将多相机坐标系映射到了基准坐标系, 根据实际激光平面的唯一性对各相机坐标系进行姿态校准, 使得多个相机的坐标系统一到基准坐标系下, 完成多相机测量系统的标定。该姿态校准标定方法相对传统标定方法, 不需要加工高精度立体标定工具, 借助单个平面标定板即可完成多相机测量系统的标定, 标定工具及标定过程简单实用; 同时, 根据坐标映射结果直接拼接点云数据, 有效的避免了使用点云数据做特征匹配带来的大量计算, 实现了多相机协同测量数据的实时获取。

本文的多相机协同测量系统主要由多个工业相机、一个单线线激光器和工控机及相关软件组成, 多个相机的组合可以扩大整个视野范围, 满足既扩大了测量范围又不损失精度的要求, 从而实现了宽范围、大视野的三维形貌测量。

1 宽厚板板形测量系统

本文提出的宽厚板板形测量系统是由相同的两个子系统组成(图 1), 子系统主要包括工业相机组、线激光器、宽厚板及辊道运动装置、工控机等组成。每个子系统的工业相机均垂直向下等距离安装在同一水平直线上, 线激光器与相机间隔一定距离, 并倾斜一定角度安装于龙门架上。该板形测量系统的

两个子系统分别布置于板材矫正设备的出入料口侧, 子系统 1 用于测量矫正前的板形, 并为矫正机的板形控制^[42]提供实时板形信息, 可实现矫正机的闭环控制; 子系统 2 用于测量矫正后的板形, 构建板形数据库, 实现宽厚板板形质量智能分级。两个子系统的测量原理相同, 具体体现为: ① 单线激光线投射到宽厚板表面, 形成与板材表面相符的激光线条; ② 根据宽厚板在其辊道上的运动位移, 控制多相机组等间距同时拍照, 完成图像数据的采集; ③ 依据标定结果, 计算激光线条每点的三维坐标值, 完成多相机协同测量。

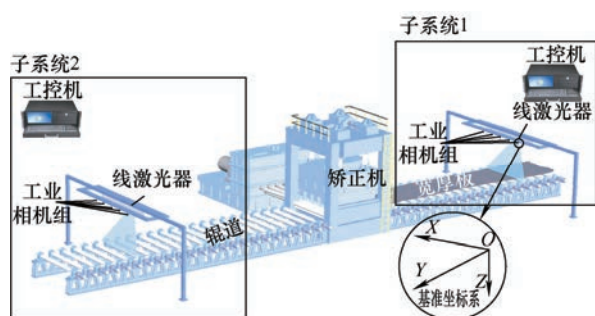


图 1 宽厚板板形测量系统

为了更加方便有效地标定子系统, 本文提出了一种基于唯一激光平面的多相机坐标系姿态校准方法, 该方法是通过将多相机测量结果映射在基准坐标系下, 并进一步进行姿态对准, 快速完成了多相机测量点云数据大视场的拼接, 实现大视场下的三维点云数据的快速获取。

2 多相机协同测量系统的标定

在进行多相机协同测量系统标定前, 首先对单相机线结构光测量系统标定, 单相机结构光系统标定是在文献[43]的基础上, 采用能去除误差较大数据的 RANSAC^[44-45]拟合方法, 得到单相机坐标系下的激光平面方程; 其次建立基准坐标系, 将每个相机的相机坐标系映射在基准坐标系下; 最后校准每个相机坐标系的姿态, 完成多相机协同测量系统的标定。

2.1 建立基准坐标系

为了将多相机独立测量的结果映射到同一坐标系下, 文中选取多相机线结构光测量系统中侧面第一个相机为基准相机, 以该相机坐标系作为建立的基准坐标系, 如图 1 中所示, 基准坐标系的 Z 坐标垂直向下, X 坐标是板宽方向, Y 坐标是钢板运动方向。

2.2 相机 i 坐标系在基准坐标系下的映射

由张正友^[46]标定方法可知, 相机标定时的世界坐标系与相机坐标系之间的关系为

$$\tilde{M} = B^{-1}\tilde{N} \quad (1)$$

式中, B^{-1} 为相机外参数矩阵 B 的逆矩阵, \tilde{M} 为世界坐标的齐次坐标, \tilde{N} 为相机坐标系的齐次坐标。

在拍摄标定图像过程中, 相邻相机拍摄了一张公共视野的标定图像, 根据该公共标定图像上世界坐标系的唯一性, 可得相机 i 坐标系在相机 $i-1$ 坐标系的映射关系为

$$\tilde{N}_{i-1} = H_{i-1,i}\tilde{N}_i \quad i \geq 2 \quad (2)$$

式中, $H_{i-1,i} = B_{i-1,i}^{-1}B_i$, $B_{i-1,i}$ 是相机 i 与相机 $i-1$ 公共标定图像在相机 i 的外参数矩阵、 $B_{i-1,i}$ 是相机 i 与相机 $i-1$ 公共标定图像在相机 $i-1$ 的外参数矩阵、 \tilde{N}_i 是相机 i 坐标系的齐次坐标、 \tilde{N}_{i-1} 是 \tilde{N}_i 在相机 $i-1$ 坐标系的映射。

进一步可得相机 i 在基准坐标系的映射关系为

$$\tilde{N}_1 = H_{1,2} \cdots H_{i-2,i-1} H_{i-1,i} \tilde{N}_i \quad i \geq 3 \quad (3)$$

式(3)可把所有相机坐标系映射在基准坐标系下, 但由于各相机之间的安装误差等, 基准坐标系下的各激光平面并未在同一平面上, 而实际的激光平面只有一个, 为了进一步减小误差, 本文对基准坐标系下各个激光平面及其相应坐标系进行了姿态校准。

2.3 基准坐标系下各相机的姿态校准

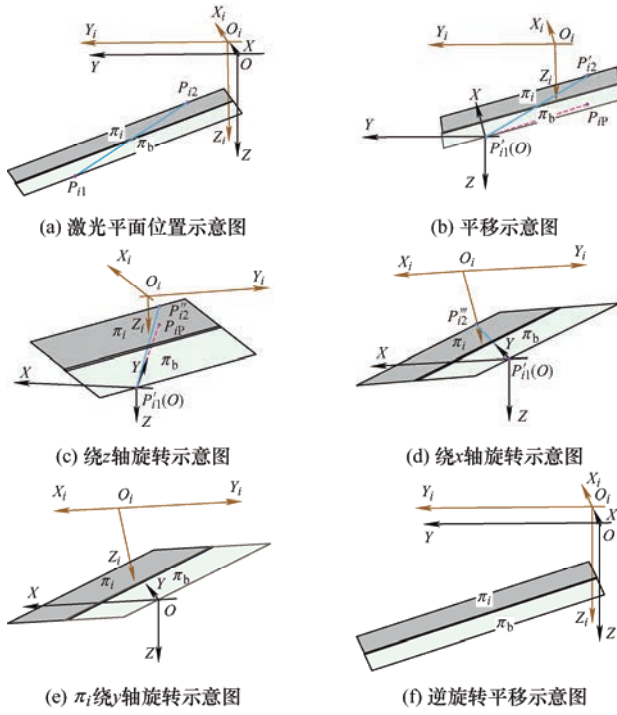
设基准坐标系为 $OXYZ$, 平面 π_b 为基准相机的激光平面; 设相机 i 坐标系在基准坐标系下表示为 $O_iX_iY_iZ_i$, 其相应的激光平面表示为 π_i , 平面 π_b 、 π_i 在基准坐标系下的显示结果如图 2a 所示, 两个激光平面由于相机安装或计算误差并未在同一平面上, 将平面 π_i 通过平移旋转与平面 π_b 进行姿态对准, 并用同样方法操作相机 i 的坐标系与基准坐标系进行姿态对准。

相机 i 坐标系映射在基准坐标系下的姿态对准步骤如下。

(1) 获取交线方程。如图 2a 所示直线 $P_{i1}P_{i2}$ 是平面 π_b 和平面 π_i 的交线, 交线方程为

$$\begin{cases} a_1x_c + b_1y_c + c_1z_c + d_1 = 0 \\ a_i x_c + b_i y_c + c_i z_c + d_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, (a_1, b_1, c_1, d_1) 为 π_b 的平面方程系数、 (a_i, b_i, c_i, d_i) 为 π_i 的平面方程系数、点 P_{i1} 的坐标设为 $(P_{i1x}, P_{i1y}, P_{i1z})$ 、点 P_{i2} 的坐标设为 $(P_{i2x}, P_{i2y}, P_{i2z})$ 。

图 2 相机 i 坐标系与基准坐标系的姿态对准过程

(2) 平移激光平面。保持基准坐标系 $OXYZ$ 不变, 平移激光平面 π_b 、 π_i 和 $O_iX_iY_iZ_i$ 的方法可表示为

$$T_i = T(x, -P_{i1x}) \cdot T(y, -P_{i1y}) \cdot T(z, -P_{i1z}) \quad (5)$$

平移结果如图 2b 所示, 即将 P_{i1} 点移至基准坐标系原点 O 得到 P'_{i1} 点, P_{i2} 移至 P'_{i2} 点, 此时平面 π_b 、 π_i 的交线 $P'_{i1}P'_{i2}$ 在 XOY 平面的投影线为 $P'_{i1}P'_{ip}$ 。

(3) 激光平面绕 Z 轴旋转。平移后的激光平面绕 Z 轴旋转 θ_{iz} 的方法可表示为

$$R_{z_i} = Rot(z, \theta_{iz}) \quad (6)$$

$$\theta_{iz} = \begin{cases} 90^\circ - \theta_{izx} & \theta_{izy} \leq 90^\circ \\ 90^\circ + \theta_{izx} & \text{其他} \end{cases}$$

式中, θ_{izx} 是向量 $P'_{i1}P'_{ip}$ 与 X 轴的夹角、 θ_{izy} 是向量 $P'_{i1}P'_{ip}$ 与 Y 轴的夹角, 旋转结果如图 2c 所示, 两平面交线 $P'_{i1}P'_{i2}$ 旋转至 $P'_{i1}P'_{i2}''$, $P'_{i1}P'_{ip}$ 旋转至 $P'_{i1}P'_{ip}''$, 此时直线 $P'_{i1}P'_{i2}''$ 位于平面 YOZ 上, 直线 $P'_{i1}P'_{ip}''$ 位于 Y 轴上。

(4) 激光平面绕 X 轴旋转。绕 Z 轴旋转后激光平面再绕 X 轴旋转 θ_{ix} 的方法可表示为

$$R_{x_i} = Rot(x, \theta_{ix}) \quad (7)$$

$$\theta_{ix} = \begin{cases} -90^\circ - \theta_{ixz} & \theta_{ixz} < 90^\circ, \theta_{ixy} > 90^\circ \\ 270^\circ + \theta_{ixz} & \theta_{ixz} > 90^\circ, \theta_{ixy} > 90^\circ \\ \theta_{ixz} - 90^\circ & \text{其他} \end{cases}$$

式中, θ_{ixz} 是向量 $P'_{i1}P'_{i2}''$ 与 Z 轴的夹角、 θ_{ixy} 是向量 $P'_{i1}P'_{i2}''$ 与 Y 轴的夹角, 旋转结果如图 2d 所示, 此时

得到两个平面的交线 $P'_{i1}P'_{i2}'''$, 该交线完全位于基准坐标系的 Y 轴上。

(5) 激光平面绕 Y 轴旋转。保持平面 π_b 不动, 将平面 π_i 绕 Y 轴旋转 θ_{iy} 的方法可表示为

$$R_{y_i} = Rot(y, \theta_{iy}) \quad (8)$$

$$\theta_{iy} = \begin{cases} \theta_{bi} & \theta_{iyb} < \theta_{iyi} \\ -\theta_{bi} & \text{其他} \end{cases}$$

式中, θ_{bi} 是平面 π_b 与平面 π_i 的夹角、 θ_{iyb} 是 π_b 的法向量与 Z 轴的夹角、 θ_{iyi} 是 π_i 的法向量与 Z 轴的夹角, 旋转结果如图 2e 所示, 此时 π_b 、 π_i 已完全重合。

(6) 激光平面的逆旋转。至此, 平面 π_i 已经与基准激光平面 π_b 位于同一平面上了, 之后需将此时的 π_b 、 π_i 及 $O_iX_iY_iZ_i$ 还原至基准坐标系下, 这个还原过程是上述平移旋转的逆过程, 逆旋转平移矩阵为

$$R_{in} = T_{in} \cdot R_{z_{in}} \cdot R_{x_{in}} \quad (9)$$

式中, $R_{x_{in}} = Rot(x, -\theta_{ix})$ 、 $R_{z_{in}} = Rot(z, -\theta_{iz})$ 、 $T_{in} = T(x, P_{i1x}) \cdot T(y, P_{i1y}) \cdot T(z, P_{i1z})$, 逆旋转结果如图 2f 所示。

由姿态对准过程可知, 相机 i 相对基准坐标系的姿态对准矩阵 $R_{1,i}$ 为

$$R_{1,i} = R_{in} \cdot R_{y_i} \cdot R_{x_i} \cdot R_{z_i} \cdot T_i \quad (10)$$

而相机 $i+1$ 坐标系到基准坐标系的姿态对准矩阵可按本节方法计算得到, 相机 i 、 $i+1$ 坐标系与基准坐标系最终的姿态对准结果如图 3 所示, 图中 π_b 是基准相机的激光平面, π_i 是相机 i 的激光平面, π_{i+1} 是相机 $i+1$ 的激光平面, 通过式(10)进行相机坐标系姿态对准后, 三个不同相机坐标系下得到的激光平面的姿态已经完全一致, 即相机 i 、 $i+1$ 坐标系在基准坐标系下完成了姿态对准, 其他相机可用类似方法完成姿态对准。

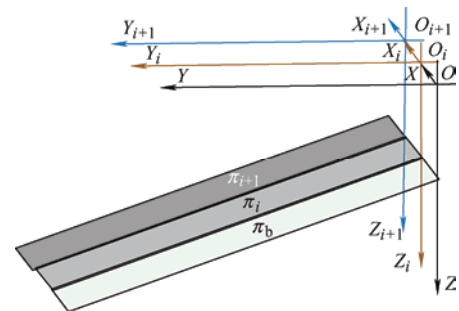


图 3 多相机姿态对准结果

2.4 多相机测量数据拼接

得到了其他相机坐标系与基准坐标系的姿态映射对准关系后, 相机 i 计算的点云数据映射对准到基准坐标系的计算方法为

$$\begin{pmatrix} CX_i, CY_i, CZ_i, 1 \end{pmatrix}^T = R_{1,i} H_{1,2} \cdots H_{i-2,i-1} H_{i-1,i} (X_i, Y_i, Z_i, 1)^T \quad (11)$$

式中, $(X_i, Y_i, Z_i, 1)$ 是相机 i 计算得到的点云数据的齐次坐标值、 $(CX_i, CY_i, CZ_i, 1)$ 是 $(X_i, Y_i, Z_i, 1)$ 映射对准到基准坐标系的齐次坐标值。

CX_i 是相机 i 在基准坐标系的被测工件宽度方向上的坐标值, 因此, 多相机测量的点云数据的拼接关系为

$$Z = CZ_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} CX_{i,f} < X < \frac{CX_{i,l} + CX_{i+1,f}}{2} & i=1 \\ \frac{CX_{i-1,l} + CX_{i,f}}{2} < X < \frac{CX_{i-1,l} + CX_{i,f}}{2} & 1 < i < n, n \geq 3 \\ \frac{CX_{i-1,l} + CX_{i,f}}{2} < X < CX_{i,l} & i=n, n \geq 2 \end{cases}$$

式中, $CX_{i,f}$ 为相机 i 点云数据每一行的第一个 X 值、 $CX_{i,l}$ 为相机 i 点云数据每一行的最后一个 X 值, 其他以此类推, 从而完成多相机协同测量中点云数据的快速拼接。

3 多相机协同测量系统的试验及结果

3.1 试验平台搭建

为了验证宽厚板板形测量系统的有效性, 基于实验室条件, 本文搭建了具有三个相机的板形测量试验平台, 如图 4 所示。试验平台主要由三个工业相机、三个蓝光滤光片、一个蓝光激光器、传送辊道、钢板及工控机等组成。其中工业相机采用 MER2-502-79U3C; 相机配有镜头 LM16JC5M2; 滤

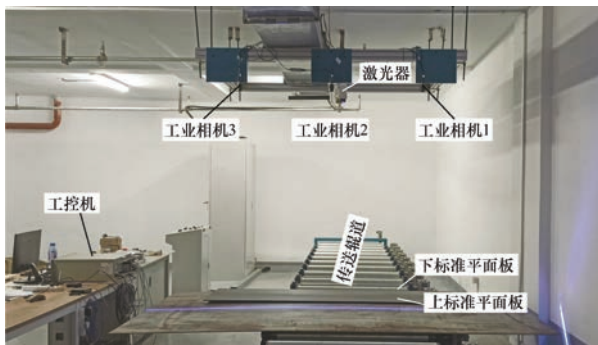


图 4 板形测量试验平台

光片采用 MV450/20; 激光器采用 ILS-450-1000-S-A-75; 标定板采用 13×23 棋盘格平面板。相机与钢板距离约 1 600 mm, 相机与激光器距离约 1 000 mm。

3.2 结构光系统标定结果

3.2.1 各相机激光平面标定结果

系统搭建完成后, 取工业相机 1 坐标系为基准坐标系。每个相机分别拍摄不少于 50 张带有激光线条的标定图像, 同时每相邻两个相机拍摄一张公共视野的标定图像。根据文中前述方法, 首先分别对三个相机用张正友标定方法进行了内外参数标定及畸变参数计算, 其次根据相机参数及提取的激光线条拟合出来三个相机在各自坐标系下的激光平面方程, 计算结果见表 1。

表 1 各相机坐标系下的激光平面方程系数表

相机	a	b	c	d
相机 1	0.015 675	-1.578 470	-1	1 582.933 549
相机 2	0.020 076	-1.576 357	-1	1 592.728 594
相机 3	0.015 746	-1.595 118	-1	1 613.279 330

3.2.2 计算基准坐标系的映射矩阵及姿态对准矩阵

根据相邻相机相同视野采集到的标定图像的外参数矩阵, 计算相机 2 和相机 3 坐标系到基准坐标系的映射矩阵 $H_{1,2}$ 与 $H_{1,3}$, 然后再计算相机 2 和相机 3 坐标系与基准坐标系的姿态对准矩阵 $R_{1,2}$ 与 $R_{1,3}$, 各相机的映射矩阵及姿态对准矩阵计算结果见表 2。

表 2 各相机的映射矩阵及姿态对准矩阵表

映射矩阵	参数值			
$H_{1,2}$	0.999 999	-0.000 111	-0.0015 389	664.073 373
	0.000 118	0.999 989	0.004 670	-6.729 704
	0.001 538	-0.004 670	0.999 988	-0.130 379
	0	0	0	1
$H_{1,3}$	0.999 997	0.002 443	0.000 566	1 324.828 391
	-0.002 446	0.999 984	0.005 024	-10.467 933
	-0.000 554	-0.005 025	0.999 987	-1.685 407
	0	0	0	1
$R_{1,2}$	0.999 994	0.002 759	0.001 780	-2.831 416
	-0.002 751	0.999 987	-0.004 080	8.140 782
	-0.001 791	0.004 075	0.999 990	1.086 179
	0	0	0	1
$R_{1,3}$	0.999 997	-0.002 073	-0.001 203	1.952 984
	0.002 061	0.999 950	-0.009 763	11.129 129
	0.001 223	0.009 761	0.999 952	-2.693 138
	0	0	0	1

3.3 原始点云数据分析

本文以钢板及钢化玻璃板为测量对象对宽厚板板形测量系统进行了测试, 钢板规格为 2 800 mm×1 500 mm×6 mm(宽、长、厚), 如图 4 中所示, 由于辊道有效宽度只有 1 000 mm, 所以板材只有中间的 1 000 mm 宽紧贴辊道, 而两侧是悬空的; 为了获取板形测量系统的重复精度和测量精度, 采用了两块

规格为 2 000 mm×400 mm×7.5 mm(宽、长、厚)黑色不透明钢化玻璃作为标准平面板。为了避免增加重量造成变形而增大测量数据误差的问题, 直接将两块标准平面板在宽度方向上错开 170 mm 同时叠放至钢板上。三个相机各自测量含有标准平面板的点云数据的三维视图如图 5a、5b、5c 所示, 图中明显可以看出两端悬空的钢板均有下垂。

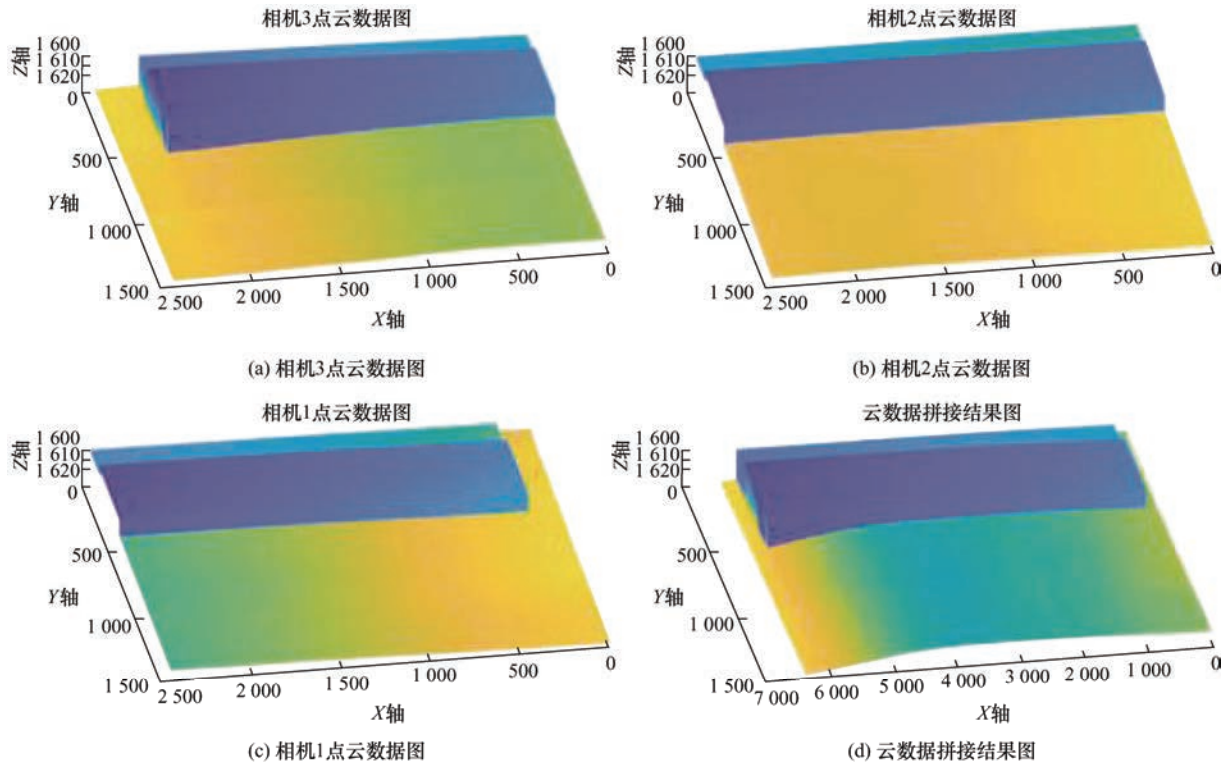


图 5 三相机测量点云数据图

用式(11)、(12)提取的每个相机的不重合的点云数据进行拼接, 拼接结果如图 5d 所示。由图 5d 可知, 钢板左侧悬空部分变形量大, 下垂严重, 右侧受电机罩支撑作用形变较小; 标准平面板整体有倾斜, 拼接后的结果在同一平面; 测量结果与被测对象的真实形变特征相符。

为了获取本文板形测量系统的精度, 基于上述测量过程, 进行 14 次重复试验, 提取两块叠放的标准平面板的三维点云数据, 并将二者的点云数据分割, 获得上、下两块标准板的点云数据为 $R_{i\xi}$ ($i=1, 2, \dots, 14; \xi=\text{上, 下}$), $R_{i\xi}$ 表示第 i 次试验所得 ξ 标准平面板的点云数据。第 k 组类内点云数据差值定义为

$$Q_{kmn} = R_{im} - R_{jn} \quad (13)$$

($i, j \in [1, 14], k \in [1, 91]; \text{且 } i \neq j, m = n = \text{上或下}$)

第 k 组类间点云数据差值定义为

$$D_{kmn} = R_{im} - R_{jn} - R \quad (14)$$

($i, j \in [1, 14], k \in [1, 196]; \text{且 } m = \text{下}, n = \text{上}$)

式中, R 矩阵的所有元素为标准平面板厚度 7.5 mm。

Q_{kmn} 或 D_{kmn} 的数据分布在区间 $[a, b]$ 内的百分比定义为

$$S_{k[a,b]} = \frac{N_{k[a,b]}}{N_k} \times 100\% \quad (15)$$

式中, $N_{k[a,b]}$ 是第 k 组差值数据 Q_{kmn} 或 D_{kmn} 分布在区间 $[a, b]$ 的个数, N_k 第 k 组差值数据 Q_{kmn} 或 D_{kmn} 的总个数。

计算 Q_{kmn} 是为了评价测量系统的重复精度, 计算 D_{kmn} 是为了评价测量系统的测量精度。上、下标准平面板的 Q_{kmn} 均为 91 组, D_{kmn} 为 196 组, 文中计算了 Q_{kmn} 和 D_{kmn} 的数值区间统计分布, 计算结果见表 3, 明显可以看出, 对于 Q_{kmn} , 分布 ± 0.6 mm

范围的点云数据量已经超过了 95%，则取该范围作为整个测量系统的重复测量精度，但在该范围内， D_{kmn} 的分布在该区间的数据量只占了 81.661%，而 D_{kmn} 在 ± 1.0 mm 范围内的数据分布超过了 95%，因此取系统的测量精度 ± 1.0 mm，这说明系统重复测量精度大于系统测量精度。

为了进一步说明数据的分布情况，文中还计算了 Q_{kmn} 和 D_{kmn} 的均值、标准和差及与粗糙度相关的参数，计算结果见表 4。理论上 Q_{kmn} 和 D_{kmn} 应该为零矩阵，明显由表 3、4 数据可知，二者并不为零，而是在一定范围内上下波动。表 4 中 Q_{kmn} 和 D_{kmn} 均值的算术平均值在 0.034 mm 左右，这说明 Q_{kmn} 和 D_{kmn} 的真实数据均在 $Z = 0$ 平面附近上下波动，而 Q_{kmn} 标准差的算术平均值在 0.33 mm 左右， D_{kmn} 标

准差的算术平均值则在 0.46 mm 左右，这说明 D_{kmn} 的波动比 Q_{kmn} 波动大。由粗糙度中的算术平均高度 S_{ak} 数值可以看出，类内数据差值基本类似，约在 0.21 mm 左右，而相应的 D_{kmn} 的 S_{ak} 大于 0.33 mm，该参数是所有测量值相对实际理论平面 $Z = 0$ 高度差绝对值的平均值，表示真实数据与理论值的平均高度差，该参数也明显小于前述精度值；粗糙度中的最大高度 S_{zk} 、最大峰高 S_{pk} 及最大谷深 S_{vk} 都是表征测量数据对于理论值的最大跳动，不难发现，测量数据中还存在少量波动较大的数据，但由于这些数据在总数据量中占比很小，对真实测量值的影响较小，可以通过滤波的方法去除。总体来看，测量数据的分布波动平稳，从而进一步说明了本文算法的有效性。

表 3 标准平面板类内、类间差值数值统计表

%

取值区间[a, b]	[-0.2,0.2]	[-0.4,0.4]	[-0.6,0.6]	[-0.8,0.8]	[-1.0,1.0]
下标准平面板的 $\frac{1}{91} \sum_{k=1}^{91} S_{k[a,b]}$	0.540 581	0.691 889	0.959 558	0.977 157	0.997 184
上标准平面板的 $\frac{1}{91} \sum_{k=1}^{91} S_{k[a,b]}$	0.540 392	0.722 238	0.963 913	0.980 526	0.998 974
下、上标准平面板的 $\frac{1}{196} \sum_{k=1}^{196} S_{k[a,b]}$	0.360 474	0.610 236	0.812 690	0.916 574	0.960 164

表 4 标准平面板类内、类间差值统计分布参数及粗糙度参数表

mm

		统计分布参数		粗糙度参数			
		E_k	S_k	S_{ak}	S_{zk}	S_{pk}	S_{vk}
Q_{kmn} $m = n = \text{下}$	最大值	0.123 919	0.351 628	0.229 195	2.712 925	0.579 715	-1.036 087
	最小值	-0.122 944	0.293 307	0.174 849	1.562 475	0.441 064	-2.200 572
	算术平均值	0.034 719	0.325 727	0.205 469	1.858 592	0.513 174	-1.345 418
Q_{kmn} $m = n = \text{上}$	最大值	0.105 689	0.322 428	0.216 514	1.912 805	0.568 977	-0.964 833
	最小值	-0.081 952	0.294 744	0.182 828	1.519 271	0.450 161	-1.431 372
	算术平均值	0.034 823	0.315 234	0.202 561	1.622 076	0.507 787	-1.114 289
D_{kmn} $m = \text{下}, n = \text{上}$	最大值	0.133 264	0.502 271	0.369 937	3.455 407	1.109 006	-1.360 095
	最小值	-0.096 345	0.430 962	0.312 593	2.191 263	0.719 913	-2.436 367
	算术平均值	0.033 652	0.460 294	0.339 490	2.669 271	0.990 815	-1.678 456

注： E_k 为第 k 组差值数据的均值， S_k 为第 k 组差值数据的标准差， S_{ak} 为第 k 组差值数据的算术平均高度， S_{zk} 为第 k 组差值数据的最大高度， S_{pk} 为第 k 组差值数据的最大峰高， S_{vk} 为第 k 组差值数据的最大谷深。

文中通过坐标映射及姿态对准方法统一了宽厚板板形多相机测量系统的坐标系，建立了具有基准坐标系的多相机板形测量系统，解决了单相机视野宽度不够的问题，实现了超宽板材的板形测量。这种大视野远距离测量方案的测量精度为 ± 1.0 mm，总体来说，满足国标 GB/T 708—2019、GB/T 709—2019 对不平度的要求，但系统测量精度还可通过使用优化图像处理算法、滤波算法进一步提高，以获

取更高精度的板形原始数据，后续工作将着重放在提高测量精度方面。总之，文中测量系统的方法及结果为实现宽厚板等大尺寸工件测量提供了有效的标定测量方法。

4 结论

(1) 针对传统的冶金精整行业，本文设计了一

种宽厚板板形多相机协同测量系统, 为实现板材矫正闭环控制提供了板形数据支撑。

(2) 提出了一种基于唯一激光平面的多相机坐标系姿态校准标定方法。该方法不需要加工高精度立体标定工具, 只借助单个平面标定板完成了整个大视场测量系统的标定, 标定工具及标定过程简单; 在多相机点云数据拼接中, 根据坐标映射结果直接拼接点云数据, 有效地避免了使用点云数据做特征匹配带来的大量计算, 实现了多相机点云数据的快速拼接。

(3) 搭建了试验验证平台, 给出了关键步骤的试验数据及点云数据图, 由试验结果可知, 本文提出的多相机大视场测量标定方法实现了相机姿态的对准, 方便的将多相机测量系统标定到了基准坐标系, 为冶金精整装备行业大工件、大视场、宽范围测量提供了理论测量依据。

参 考 文 献

- [1] 马开. 煤钢去产能进入新阶段经济注入新动能[J]. 纳中国科技投资, 2018(31): 5-6.
MA Kai. Decapacity of coal and steel enters a new stage of economic injection[J]. China Venture Capital, 2018(31): 5-6.
- [2] 陆之瑶, 吴思. 重估钢铁行业过剩产能[J]. 中国经济报告, 2017(12): 70-71.
LU Zhiyao, WU Si. Reassessing overcapacity of steel industry[J]. China Policy Review, 2017(12): 70-71.
- [3] 易怀安, 刘坚, 路恩会. 基于图像清晰度评价的磨削表面粗糙度检测方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 15-21.
YI Huaian, LIU Jian, LU Enhui. Detection method of grinding surface roughness based on image definition evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 15-21.
- [4] LIU Shaoli, JIN Peng, LIU Jianhua, et al. Accurate measurement method for Tube's endpoints based on machine vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 152-163.
- [5] ALAM A, O'NILS M, MANUILSKI A, et al. Limitation of a line-of-light online paper surface measurement system[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2715-2724.
- [6] QI Ouyang, CONG Wen, SONG Yongduan, et al. Approach for designing and developing high-precision integrative systems for strip flatness detection[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8429-8438.
- [7] WANG Zhenzhou, ZHOU Qi, SHUANG Yongcan. Three-dimensional reconstruction with single-shot structured light dot pattern and analytic solutions[J]. Measurement, 2020, 151(2020): 107114.1-107114.10.
- [8] HUI Chen, WEN Cui. A comparative analysis between active structured light and multi-view stereo vision technique for 3D reconstruction of face model surface[J]. Optik, 2020, 206(2020): 164190.1-164190.9.
- [9] ZHANG Jing, LUO Bin, SU Xin, et al. A convenient 3D reconstruction model based on parallel-axis structured light system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 138(2021): 106366.1-106366.5.
- [10] YU Haotian, HUANG Yu, ZHENG Dongliang, et al. Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot[J]. Optik, 2020, 202(2020): 163656.1-163656.11.
- [11] LIU Yanzhao, FU Yanjun, ZHUAN Yuhao, et al. Large depth-of-field 3D measurement with a microscopic structured-light system[J]. Optics Communications, 2021, 481(2021): 126540.1-126540.10.
- [12] PAN Xinjian, WU Jieying, LI Zhili, et al. Self-calibration for linear structured light 3D measurement system based on quantum genetic algorithm and feature matching[J]. Optik, 2021, 225(2021): 165749.1-165749.10.
- [13] 韩志彬. 5000 mm 宽厚板轧机传动轴断轴分析及对策[J]. 金属材料与冶金工程, 2013, 41(4): 41-43.
HAN Zhibin. The analysis and countermeasures on the main driving shaft broken of 5 000 mm heavy plate mill[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2013, 41(4): 41-43.
- [14] 周军. 5m 以上宽厚板工作辊组织优化研究[J]. 现代冶金, 2017, 45(2): 38-40.
ZHOU Jun. Study on the structure optimization of working roller of 5m heavy plate[J]. Modern Metallurgy, 2017, 45(2): 38-40.
- [15] 王广科, 苗雨川. 5m 宽厚板轧机平面形状控制技术及优化[J]. 宝钢技术, 2018(6): 68-74.
WANG Guangke, MIAO Yuchuan. Plane view shape control technology and optimization of 5 m heavy plate mill at Baosteel[J]. Bao-Steel Technology, 2018(6): 68-74.
- [16] 周富强, 张广军, 江洁. 线结构光视觉传感器的现场标定方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(6): 169-173.
ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun, JIANG jie. Field calibration method for line structured light vision sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004,

- 40(6): 169-173.
- [17] 张曦, 张健. 线结构光标定方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020001.1-020001.11.
ZHANG Xi, ZHANG Jian. Summary on calibration method of line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020001.1-020001.11.
- [18] 周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412005.1-0412005.8.
ZHOU Jingbo, LI Yuehua, QIN Zhiying, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412005.1-0412005.8.
- [19] XU Xiaobin, FEI Zhongwen, YANG Jian, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review[J]. Results in Physics, 2020, 19(2020): 103637.1-103637.17.
- [20] ZHENG Fei, KONG Bin. Calibration of linear structured light system by planar checkerboard[C]// IEEE International Conference on Information Acquisition. Hefei: IEEE, 2004: 344-346.
- [21] FAN Junfeng, JING Fengshui, FANG Zaojun, et al. A simple calibration method of structured light plane parameters for welding robots[C]// 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu: IEEE, 2016: 6127-6132.
- [22] MCIVOR A M. Calibration of a laser stripe profiler[C]// IEEE Comput. Soc Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Ont: IEEE, 1999: 92-98.
- [23] CHE Chenggang, NU Jun. A ball-target-based extrinsic calibration technique for high-accuracy 3D metrology using off-the-shelf laser-stripe sensors[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 210-219.
- [24] XIE Zexiao, WANG Xiaomin, CHI Shukai. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of structured-light sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 9-18.
- [25] CHU C W, HWANG S, JUNG S K. Calibration-free approach to 3D reconstruction using light stripe projections on a cube frame[C]// IEEE Comput. Soc Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Quebec: IEEE, 2001: 13-19.
- [26] HUYNH D Q, OWENS R A, HARTMANN P E. Calibrating a structured light stripe system: a novel approach[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 33(1): 73-86.
- [27] 徐光祐, 刘立峰, 曾建超, 等. 一种新的基于结构光的三维视觉系统标定方法[J]. 计算机学报, 1995, 18(6): 450-456.
XU Guangyou, LIU Lifeng, ZENG Jianchao, et al. A new method of calibration in 3D vision system based structure-light[J]. Chinese Journal of Computers, 1995, 18(6): 450-456.
- [28] WEI Zhenzhong, XIE Meng, ZHANG Guangjun. Calibration method for line structured light vision sensor based on vanish points and lines[C]// IEEE 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 794-797.
- [29] WEI Zhenzhong, SHAO Mingwei, ZHANG Guangjun, et al. Parallel-based calibration method for line-structured light vision sensor[J]. Optical Engineering, 2014, 53(3): 033101.1-033101.12.
- [30] XU Guan, ZHANG Xinyuan, SU Jian, et al. Solution approach of a laser plane based on Plücker matrices of the projective lines on a flexible 2D target[J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2653-2656.
- [31] XU Guan, ZHENG Anqi, LI Xiaotao, et al. Optimization solution of laser plane generated from maximum likelihood estimation of projection plane[J]. Sensors and Materials, 2018, 30(5): 1155-1164.
- [32] 刘震, 张广军, 魏振忠, 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3124-3128.
LIU Zhen, ZHANG Guangjun, WEI Zhenzhong, et al. Primary resonance analysis of solid and liquid mixture vibration isolation system[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3124-3128.
- [33] 张翰, 包国琦, 刘凯. 一种结构光三维成像系统的简易标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 148-156.
ZHANG Han, BAO Guoqi, LIU Kai. Simple calibration method for three-dimensional imaging system with structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 148-156.
- [34] 曲学军, 王勇, 樊龙欣, 等. 线结构光三维扫描测量中的多视数据对齐[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 124-129.
QU Xuejun, WANG Yong, FAN Longxin, et al. Alignment of multi-view data of linear structure light scanning measurement[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(5): 124-129.
- [35] 解则晓, 刘静晓. 超大尺度线结构光传感器现场标定技

- 术[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 290-296.
- XIE Zexiao, LIU Jingxiao. Calibration technology for line structured light sensor with large scale[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 290-296.
- [36] ZHAN Dong, YU Long, XIAO Jian, et al. Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8664-8684.
- [37] 马玉坤, 王中亚, 杨国威, 等. 基于线结构光传感器的公路平整度测量系统[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1597-1603.
- MA Yukun, WANG Zhongya, YANG Guowei, et al. A system based on structured-light sensors for measurement of pavement evenness[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11): 1597-1603.
- [38] 黄邦奎, 刘震, 张广军. 多传感器线结构光视觉测量系统全局校准[J]. 光电子·激光, 2011, 22(12): 1816-1820.
- HUANG Bangkui, LIU Zhen, ZHANG Guangjun. Global calibration of multi-sensor vision measurement system based on line structured light[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(12): 1816-1820.
- [39] 张启灿, 苏显渝, 邹小平. 多个线结构光传感器三维测量系统的校准[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 225-227.
- ZHANG Qican, SU Xianyu, ZOU Xiaoping. Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illum inated laser[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 225-227.
- [40] HUANG Yinguo, LI Xinghua, CHEN Peifen. Calibration method for line-structured light multi-vision sensor based on combined target[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, (1): 92-98.
- [41] 李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 136-146.
- LI Taotao, YANG Feng, XU Xianlei. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 136-146.
- [42] 彭艳, 牛山. 板带轧机板形控制性能评价方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 26-44.
- PENG Yan, NIU Shan. Review on assessment methods for shape control performance of strip rolling mills[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 26-44.
- [43] 张瑞峰, 舒子芸, 南刚雷. 一种新的线结构光标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 82-89.
- ZHANG Ruifeng, SHU Ziyun, NAN Ganglei. Calibration method for line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 82-89.
- [44] CHUM O, MATAS J. Optimal randomized RANSAC[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(8): 1472-1482.
- [45] NURUNNABI A, WEST G, BELTON D. Outlier detection and robust normal-curvature estimation in mobile laser scanning 3D point cloud data[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(4): 1404-1419.
- [46] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
-
- 作者简介: 李子良, 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器视觉检测与装备智能化。
E-mail: lzlzyc8182@163.com
- 王涛(通信作者), 男, 1985 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轧制设备设计理论、金属复合材料轧制成形、装备智能化设计等。
E-mail: twang@tyut.edu.cn