

文章编号: 1002-1582(2026)02-0230-06

基于动态视觉标定的大尺寸钢板平面度在线检测方法

程颖*, 秦浩森, 毕德学, 商腾达

(天津科技大学 机械工程学院 天津市轻工与食品机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300457)

摘 要: 为了消除大尺寸钢板平面度动态高精度测量中, 滚筒传输速度非均匀波动引发的扫描畸变及长期负载下滚筒引入的系统误差, 构建了基于双目线激光与非编码视觉标记的运动补偿检测系统。核心创新是在钢板表面布设非编码视觉标记点, 集成亚像素级角点追踪与速度矢量实时解算算法, 实现钢板运动速度高精度动态标定, 消除线扫描对机械传输速度稳定性的依赖。实验表明, 系统在5Hz的采样频率下, 平面度检测误差稳定在0.2mm以内; 通过滚筒磨损仿真模型与实验验证, 滚筒形变达6mm的极端工况, 测量误差仍 $\leq 0.2\text{mm}$, 鲁棒性良好。三维点云处理中, 最小二乘法拟合基准平面较主成分分析法, 可将最终测量误差减低20%。方法为工业现场大尺寸板材动态、高精度、高鲁棒性在线检测提供了可靠的解决方案。

关 键 词: 机器视觉; 双目线激光; 移动标定; 平面度检测

中图分类号: TP751.1; TG83

文献标识码: A

An online detection method for the flatness of large-sized steel plates based on dynamic visual calibration

CHENG Ying*, QIN Haosen, BI Dexue, SHANG Tengda

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To eliminate the scanning distortion caused by the non-uniform fluctuation of the roller transmission speed and the system error introduced by the rollers under long-term load in the dynamic high-precision measurement of the flatness of large-sized steel plates, a motion compensation detection system based on binocular line laser and non-coded visual markers was constructed. The core innovation lies in the deployment of non-coded visual marker points on the surface of the steel plate, integrating sub-pixel corner tracking and real-time speed vector calculation algorithms to achieve high-precision dynamic calibration of the steel plate's movement speed, thereby eliminating the dependence of line scanning on the stability of mechanical transmission speed. Experiments show that the system's flatness detection error is stable within 0.2mm at a sampling frequency of 5Hz. Through the simulation model of roller wear and experimental verification, even in the extreme condition where the roller deformation reaches 6mm, the measurement error is still $\leq 0.2\text{mm}$, demonstrating good robustness. In the processing of three-dimensional point clouds, the least squares method for fitting the reference plane can reduce the final measurement error by 20% compared to the principal component analysis method. This method provides a reliable solution for the dynamic, high-precision, and highly robust online detection of large-sized plates in industrial fields.

Keywords: machine vision; dual-line laser; mobile calibration; flatness detection

收稿日期: 2025-10-22; 收到修改稿日期: 2025-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (61705166); 天津市教委科研计划项目 (2017KJ019); 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室 (天津科技大学) 开放基金资助项目 (2024LIMFE04); 天津市计量科技项目 (2024TJMT031)

作者简介: 程颖 (1982—), 女, 副教授, 博士, 从事光学自由曲面设计、机器视觉检测方面的研究。chengyingcd@163.com
秦浩森 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事机器视觉检测方面的研究。15598750997@163.com

* 通讯作者: chengyingcd@163.com

0 引言

在船舶、汽车、桥梁及重型机械制造邻域,大尺寸钢板的平面度误差直接影响结构件装配精度和安全性^[1]。传统人工检测采用直角尺等进行抽样检测,存在效率低、覆盖率不足等缺陷已无法满足高精度自动化生产需求^[2]。而基于机器视觉^[3]的非接触式测量技术^[4],凭借高效、全场分析优势,逐渐成为工业检测主流方案。

然而,工业现场动态测量仍面临显著干扰,由于机械振动和钢板的弯曲程度不同,利用滚筒传输钢板会导致钢板的运动速度呈现非均匀性,导致线激光扫描数据出现运动方向畸变。其二,长期负载下滚筒发生径向磨损形变,引入系统性测量基准偏移。现有方法中,Yang等^[5]利用激光三角法^[6]在滚筒传输钢板的场景下对钢板的轮廓进行检测,利用滚筒的速度及相机采集频率简单计算了每一帧的实时速度,并未考虑到振动等一些因素带来速度变化的影响,导致钢板运动方向上的精度仅有0.28mm。Li等^[7]利用双目立体视觉和编码结构光相结合的三维重建方法^[8]完成对物体表面的重建,但是其本质上是一种静态测量方法,其测量过程需要物体保持静止,无法适应钢板在滚筒输送过程中的连续运动。并且在大场景下双目相机并不能完全覆盖整个钢板,因此需要多组双目相机,不仅大大增加了检测成本,而且大场景下的点云拼接过程复杂,标定过程繁琐。针对上述速度波动与形变误差的耦合干扰,本文提出基于非编码点动态标定的双目线激光检测方法。该方法创新性地融合线激光扫描的高效性与非编码点运动追踪的鲁棒性,构建适用于滚筒传输场景,大尺寸钢板表面三维重建框架。

本文首先系统的介绍了动态测量系统架构,包括硬件系统,双目视觉^[9],运动传输及激光投射^[10]四个部分,然后构建了完整的大场景下钢板平面度检测的数学模型;其次对实时重建算法的整体流程进行理论推算,并且对平面度的评定数学模型进行分析;最后就是对动态标定精度及三维重建精度进行实验验证与分析。

1 动态三维重建理论和方法

1.1 动态测量系统架构

针对大场景下钢板平面度的动态测量需求,本文设计了一套包含激光投射、双目视觉和滚筒运动传输三个模块的硬件系统,系统架构如图1所示,通过多线激光器投射激光条纹增强钢板表面

特征信息,同步采集带激光条纹的钢板表面图像与非编码视觉标记点,解决表面特征点稀疏致立体匹配^[11]难题及速度波动问题,实现运动中钢板完整三维重建^[12]。具体测量流程如图2所示,首先标定两台相机,确定其内外参及畸变系数;在扫描钢板时,依据标定结果对左右图像做极线校正^[13];随后提取图像中激光线的中心点及非编码视觉标记点;再基于双目重建原理,重建激光中心线及非编码视觉标记点;同时根据每帧图像中重建的角点坐标计算实时速度,拼接完整钢板表面,最后对钢板表面进行平面度测量。

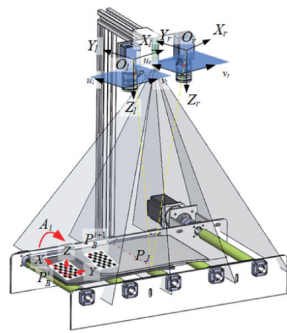


图1 平面度在线检测系统原理图

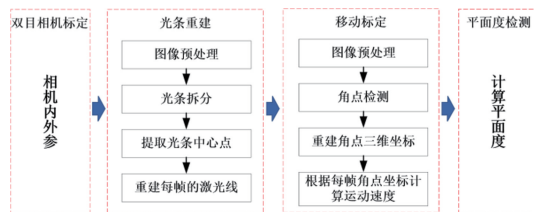


图2 平面度在线检测流程

1.2 数学模型

双目成像模型基于三角测量原理,通过两个空间位置固定的相机从不同视角同步采集目标场景图像。如图1所示,图中 O_l, O_r 表示左右相机光心, $(X_l, Y_l, Z_l), (X_r, Y_r, Z_r)$ 为左右相机的相机坐标系, P_l, P_r 为激光线上的某点 P_j 在左右相机像平面的点, P_B^i 为第 i 帧的非编码视觉标记点的三维点集, P_B^{i+1} 为第 $i+1$ 帧的非编码视觉标记点的三维点集, A_i 为第 i 帧的非编码视觉标记点变换为第 $i+1$ 帧的非编码视觉标记点的位姿变换矩阵。通过特征匹配建立两幅图像中对应点的视差 d ,可得 Z

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (1)$$

式中, f 为焦距, B 为基线。滚筒在传输钢板时产生的振动,其振幅 $\Delta Z(v)$ 的大小会影响深度值的计算结果;此外,滚筒长期使用后产生的形变 $\Delta Z(\lambda)$ 也会对深度值计算造成影响。因此,在计算深度值时需要将这两个因素纳入考虑,则深度值 Z 为

$$Z = \frac{Bf}{d} + \Delta Z(v) + \Delta Z(\lambda) \quad (2)$$

式中, $\Delta Z(v)$ 为速度相关的误差项, 与钢板的瞬时速度 v 正相关, v 的变化越大, $\Delta Z(v)$ 的值越大。同时, $\Delta Z(\lambda)$ 为滚筒形变相关的误差项, 与滚筒形变量 λ 正相关, λ 越大, $\Delta Z(\lambda)$ 的值越大。

1.3 实时重建算法

1.3.1 非编码视觉标记点动态标定

在钢板的表面粘贴一个 7×8 的大小为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的非编码视觉标记点, 如图 3 所示, 其角点作为速度标定的非编码视觉标记点。该方法通过解算钢板表面非编码视觉标记点的位姿变换矩阵, 实时获取钢板六自由度运动参数, 解决了传统标定板方法因未考虑钢板起伏而产生的运动畸变问题, 实现了传输过程中速度矢量的动态标定。

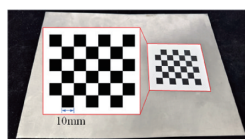


图 3 棋盘格非编码视觉标记点

具体角点检测流程如图 4 所示, 本文采用基于梯度和角点响应函数的方法进行棋盘格角点的检测, 检测结果如图 5 所示。首先利用 Sobel 算子计算图像在 x 和 y 方向上的梯度, 然后根据 Harris 角点检测中的响应函数, 通过设定阈值, 筛选出响应值大于阈值的像素点作为候选角点。为提高角点检测的精度, 采用基于最小二乘法的抛物线拟合的亚像素级角点检测方法, 对于每个候选角点, 在其邻域内构建一个局部坐标系, 将邻域内像素点的灰度值看作是坐标的函数。通过求解最小二乘问题, 得到抛物线的参数, 进而计算出抛物线的极值点, 该极值点即为亚像素级精度的角点位置。

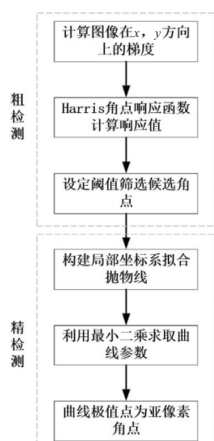


图 4 非编码视觉标记点检测流程图

为实现钢板移动过程中速度的实时标定, 需基于相邻帧非编码视觉标记点三维坐标解算瞬时的位移矢量, 如图 6 所示, 设相邻帧非编码视觉标记点的位姿变换矩阵为 A_n , 表示为

$$A_n = \begin{bmatrix} R_n & T_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R_n , T_n 为旋转和平移矩阵, 设第 n 帧非编码视觉标记点的齐次坐标点的点集为 $P_n = \{P_n^i\}$ ($0 \leq i \leq 29$), 第 $n+1$ 帧非编码视觉标记点的次坐标点的点集为 $P_{n+1} = \{P_{n+1}^i\}$ ($0 \leq i \leq 29$), 由 P_n 及 P_{n+1} 可以求得 A_n , 位姿变换关系可表示为

$$p_n^T = A_n p_{n+1}^T \quad (4)$$

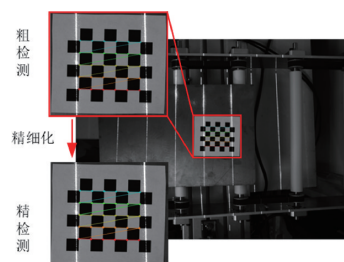


图 5 非编码视觉标记点检测结果

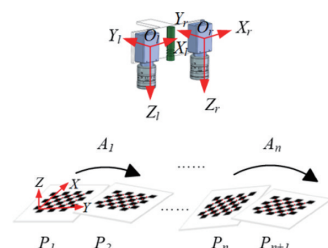


图 6 非编码视觉标记点动态标定原理图

1.3.2 激光条纹匹配

经极线校正后, 双目相机成像平面共面且对应匹配点纵坐标一致。基于该约束条件, 提取到激光光条的中心点即可实现快速匹配。设匹配点在左相机图像坐标为 (u_l, v_l) , 在图像坐标系下的光心位置 (u_0, v_0) , 焦距为 f , 视差为 d 及基线距为 B , 则可求得在左相机坐标系下的三维坐标点 $P = (X, Y, Z)$ 为

$$P^T = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(u_l - u_0)B}{d} \\ \frac{(v_l - v_0)B}{d} \\ \frac{Bf}{d} + \Delta Z(v) + \Delta Z(\lambda) \end{pmatrix} \quad (5)$$

以初始时刻坐标系为基准, 结合实时的速度矢量, 即可求得某一时刻经过移动后在基坐标系中的三维点坐标点 $Q = (X_n^i, Y_n^i, Z_n^i)$

$$Q^T = A_n \cdots A_1 P^T \quad (6)$$

式中 P^T , Q^T 为 P , Q 的齐次坐标的转置。

2 实验结果与分析

2.1 实验系统搭建

实验系统搭建如图 7 所示, 双目视觉模块采用两台分辨率为 $3000\text{px} \times 4096\text{px}$ 的黑白相机, 像元尺

寸为 $3.45\mu\text{m}$, 搭配 16mm 的定焦镜头及一个 650nm 的七线激光器; 运动传输模块包含5组 $R10\times 200\text{mm}$ 的钢制滚筒, 最大中心距为 170mm , 由57HB56L 4-30DB步进电机通过减速器及联轴器驱动, 步距角为 1.8° , 电机的转速为 15mm/s , 减速器的转速比为 $10:1$, 则滚筒的理想转速为 1.5mm/s ; 通过Arduino触发双目相机以 5Hz 帧率同步曝光。该系统可模拟工业场景中钢板的连续传输场景。

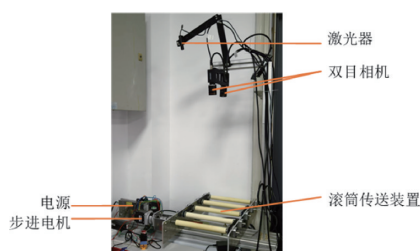


图7 动态视觉标定的平面度在线检测实验设备

钢板通过滚筒传送装置进行传输, 通过多线激光器投射的结构光条纹增加表面特征, 双目相机同步采集图像并重建三维点云, 最终基于最小二乘法平面拟合算法输出平面度检测结果。

2.2 动态标定精度验证

为验证非编码点动态标定算法精度, 选取 5mm 的A量块, 10mm 的B量块及平面度为 0.041mm 的C平板进行测试, 如图8所示。经过动态标定与三维重建后, 三个测试件重建结果如图9所示。

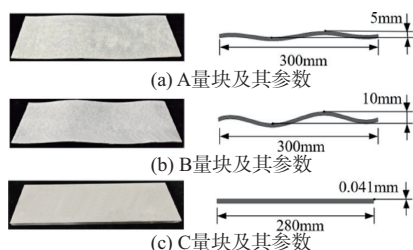


图8 量块及其参数

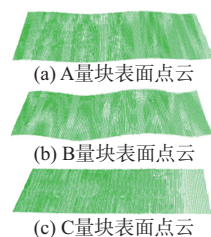


图9 量块表面点云

三个量块的速度矢量分解图如图10、11和图12所示, 以第一帧的非编码点的坐标系为基坐标系, 起始点为右端第一个红色矢量, 蓝色矢量为A量块、B量块及C量块移动后每一帧的速度矢量变换。由于滚筒在输送量块时, 会沿着量块表面的面型传送, 因此从结果上看, 物体在竖直方向上的速度变化的波动幅度与其面型有关, 同样由图12可

知, 平面度较为平整的量块在传输的过程中也会在竖直方向上有一定的变化, 带来这一变化的原因在于滚筒的震动及滚筒的变形。以滚筒理想转速为基准, 物体整体的速度波动幅度 $\leq 34\%$ 。

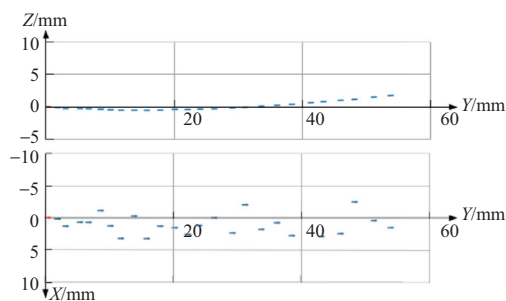


图10 A量块速度矢量分解图

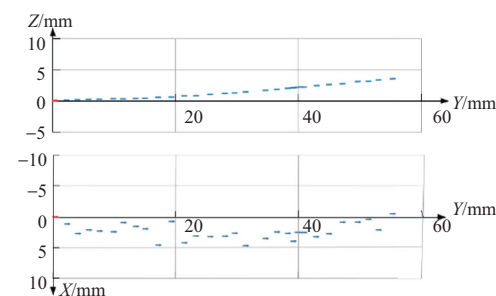


图11 B量块速度矢量分解图

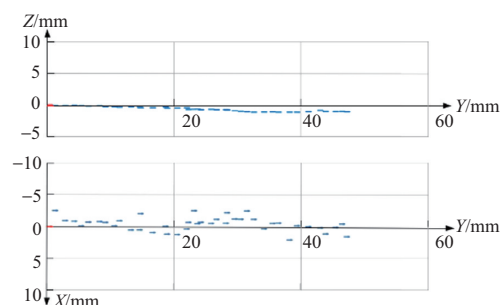


图12 C量块速度矢量分解图

分别进行十次重复性实验后, 平面度误差如图13所示, 保持在 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 之间, 符合检测精度小于 0.3mm 的要求。

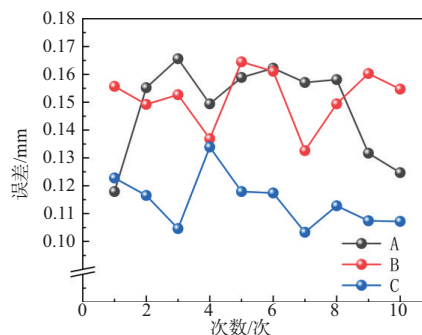


图13 动态标定精度的平面度误差数据

2.3 三维重建精度验证

2.3.1 机械形变影响实验

为了模拟工厂中钢板运输对滚筒的磨损, 将

滚筒依次固定 2mm, 4mm, 6mm 的垫块, 如图 14 及图 15 所示, 利用平面度为 5mm 的 A 量块及 0.041mm 的 C 平板验证滚筒磨损对重建精度的影响。实验结果如表 1, 均值误差如图 16 所示。实验结果表明在本文所模拟的形变范围在 2~6mm 之内, 滚筒形变对测量精度的影响不显著。

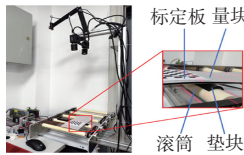


图 14 机械形变影响实验装置

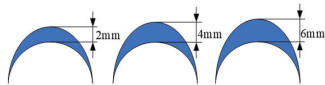


图 15 模拟滚筒形变垫块模型

表 1 机械形变影响实验结果 (单位: mm)

量块	垫块	1	2	3	4	5
A	原滚筒	0.1276	0.1478	0.1463	0.1325	0.1751
	2mm	0.1562	0.1741	0.1245	0.1635	0.1642
	4mm	0.1837	0.1245	0.1543	0.1765	0.1321
	6mm	0.1543	0.1876	0.1891	0.1678	0.1432
C	原滚筒	0.1491	0.1054	0.1126	0.1157	0.1125
	2mm	0.1229	0.1067	0.1375	0.1273	0.1496
	4mm	0.1194	0.1038	0.1303	0.1126	0.1212
	6mm	0.1536	0.1456	0.1433	0.1393	0.1458
量块	垫块	6	7	8	9	10
A	原滚筒	0.1245	0.1367	0.1364	0.1673	0.1571
	2mm	0.1237	0.1127	0.1245	0.1172	0.1195
	4mm	0.1534	0.1367	0.1731	0.1345	0.1643
	6mm	0.1234	0.1345	0.1458	0.1541	0.1274
C	原滚筒	0.1367	0.1354	0.1643	0.1534	0.1641
	2mm	0.1233	0.1134	0.1167	0.1236	0.1257
	4mm	0.1354	0.1567	0.1674	0.1524	0.1467
	6mm	0.1267	0.1352	0.1254	0.1354	0.1271

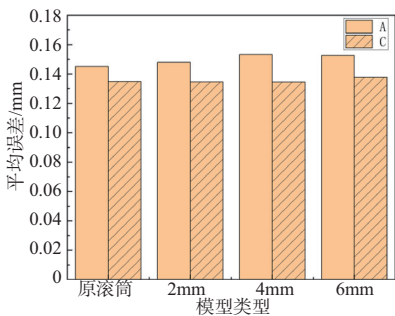


图 16 A,C 量块平面度均值误差图

2.3.2 基准平面拟合

平面度的两类评定方法为主成分分析法^[14] (Principal Component Analysis, PCA) 及最小二乘法^[15] (Least Square Method, LSM), 其中最小二乘法拟合基准面的公式为

$$\min \sum_{i=1}^n (z_i - (ax_i + by_i + c))^2 \quad (7)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为钢板表面重建点的三维坐标, $ax+by-z=0$ 为拟合的理想平面方程。

实验中对平面度为 5mm 的 A 量块、平面度为 10mm 的 B 量块及平面度为 0.041mm 的 C 平板分别进行 5 次扫描, 分别采用两类方法评定平面度, 得到的平面度误差如表 2 所示。由结果可知, 利用最小二乘法计算出的平面度误差比最小区域包容法的计算结果更接近真实值, 误差较 PCA 降低约 20%, 因此本文选定最小二乘法作为平面度评定算法。

表 2 基准平面拟合对比实验结果 (单位: mm)

量块	算法	1	2	3	4	5
A	PCA	0.1734	0.1935	0.1856	0.1478	0.1654
	LSM	0.1395	0.1856	0.1481	0.1194	0.1458
B	PCA	0.1968	0.1917	0.1698	0.1854	0.1734
	LSM	0.1526	0.1824	0.1365	0.1539	0.1398
C	PCA	0.1451	0.1616	0.1583	0.1597	0.1254
	LSM	0.1051	0.1011	0.1072	0.1054	0.1074

2.3.3 运动补偿效果

传统激光扫描通常将输送平台运动近似为匀速直线运动, 通过获取位移平台按指定帧率移动后两个不同位置的标定板图像计算平移速度矢量, 重建的量块点云如图 17 所示。可以看出, 传统方式扫描的平整表面与实际相差并不大, 但在重建有曲面的量块, 如图中标红的位置, 会出现表面错位的现象及曲面扫描失真的情况。

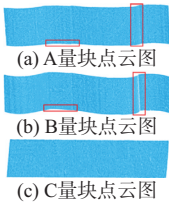


图 17 传统移动标定重建量块表面的点云效果图

2.3.4 实际样件检测

根据上文内容, 完成了对钢板平面度检测精度要求的理论验证, 接下来对两个弯曲的钢板进行检测, 图 18 (a) 和 (c) 为 200mm×300mm 两个不同弯曲程度的钢板 D 和 F, 图 18 (b) 和 (d) 为两个钢板重建后的点云, 蓝色区域为钢板波谷的位置, 红色区域为钢板波峰的位置。可以看出重建点云清晰呈现波峰与波谷分布。

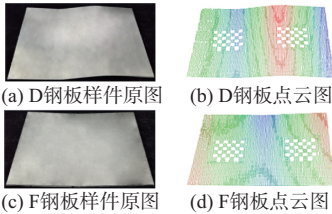


图 18 样件原图及点云图

速度矢量波动如图 19 和图 20 所示，反映了钢板的变速运动，如图可知 D、F 两个钢板在竖直方向上的速度变化幅度分别为 4.8mm，5.1mm，在水平方向上速度变化的幅度分别为 5.2mm，7.3mm。

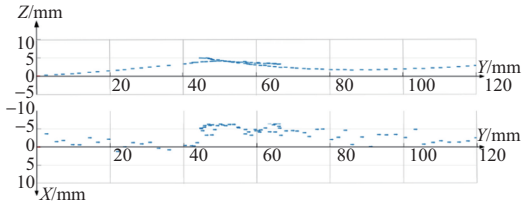


图 19 D 钢板速度矢量分解图

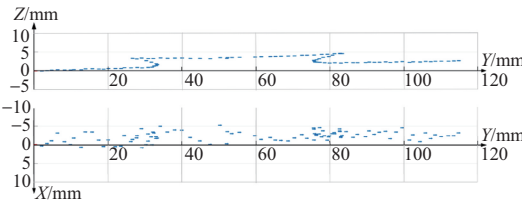


图 20 F 钢板速度矢量分解图

最后是精度验证，与钢板三坐标测量结果对比结果如表 3 所示，可以看出误差 $\leq 0.15\text{mm}$ ，符合实际检测中低于 0.3mm 的平面度检测精度要求。

表 3 精度验证（单位：mm）

	三坐标测量仪(精度为 0.01mm)	本文	差值
钢板 D	6.06772	6.17221	0.10449
钢板 F	11.69289	11.84546	0.15257

3 结 论

本文针对大尺寸钢板滚筒的传输中速度矢量动态标定的难题下，本文提出基于非编码视觉标记点的在线标定算法，通过亚像素级的位姿解算，实现变速状态下的高精度平面度检测。实验证实，滚筒在传输钢板时在竖直方向上的速度矢量变换与其面型有关，同时滚筒的形变及振动确实会存在，但该方法在这种情况下系统误差稳定在 0.2mm 以内；最小二乘拟合较主成分分析法误差降低 20%；工业样件检测中本文的方法与三坐标测量对比误差 $\leq 0.15\text{mm}$ 。该方法为连续生产线的大尺寸钢板动态检测提供了高鲁棒性解决方案。但在实际检测过程中，检测速度较慢，有一定的局限性，后期可通过优化算法等方式实现在线快速检测，同时完善整个检测流程，进一步提高检测效率。

参考文献：

[1] 杨璐雅. 钢板表面缺陷图像检测与分类识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Yang Luyi. Research on image detection and classification recognition technology for surface defects of steel plates[D]. Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2023

[2] 王韬. 基于线结构光的钢板轮廓检测系统研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2024

Wang Tao. Research on steel plate profile detection system based on linear structured light[D]. Taiyuan University of Science and Technology, 2024

[3] Liu Y, Ou P, Xu X, et al. Multi-line structured light binocular vision stereo matching method via coarse-to-fine spatial geometric constraints[J]. Optics and Laser Technology, 2024, 176: 110950.

[4] 时浩, 邓高旭, 李正楠, 等. 基于激光点云的中厚板表面平整度测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(16): 2464—2473.
Shi Hao, Deng Gaoxu, Li Zhengnan, et al. Measurement of surface flatness of medium and thick plates based on laser point cloud [J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(16): 2464—2473.

[5] 杨璐雅. 钢板表面缺陷图像检测与分类识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Yang Luya. Research on image detection and classification recognition technology of surface defects on steel plates[D]. Xidian University, 2023.

[6] Wang L, Yang H, Jiang J, et al. A cone array calibration-based line laser triangulation method for freeform surface measurement independent of motion device precision[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 195109272—109272.

[7] 李政锋. 基于双目视觉和线结构光的工件三维重建与测量[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
Li Zhengfeng. Three-dimensional reconstruction and measurement of workpieces based on binocular vision and linear structured light[D]. Xiamen University, 2021.

[8] Chen Y, Jiang W, Luo Z, et al. A novel 3D reconstruction method with a binocular-line laser system[J]. Measurement, 2024, 227: 114238.

[9] Fu Y, Liu B, Zhong K, et al. Virtual binocular stereo vision measurement method without phase unwrapping[J]. Optics Communications, 2025, 585: 131869—131869.

[10] Cao M, Zhang G, Chen Y. Stereo matching of light-spot image points in light pen in binocular stereo visual[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(3): 1366—1370.

[11] 刘盼, 王金海. 基于平行双目立体视觉的测距系统[J]. 计算机应用, 2012, 32(S2): 162—164.
Liu Pan, Wang Jinhai. Distance measurement system based on parallel binocular stereo vision[J]. Computer Applications, 2012, 32(S2): 162—164.

[12] 万聪灵, 余学才, 蒋波, 等. 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法[J]. 计量学报, 2014, 35(01): 34—38.
Wan Congling, Yu Xuecai, Jiang Bo, et al. Calibration method for billet profile measurement with line-structured light binocular sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(01): 34—38.

[13] 曹淞翔. 基于双目视觉的三维重建[J]. 通讯世界, 2018, 25(12): 236—238.
Cao Songxiang. 3D reconstruction based on binocular vision [J]. Communications World, 2018, 25(12): 236—238.

[14] 张宇, 李毅红, 陈平, 等. 基于机器视觉的带钢板边浪平直度测量方法[J]. 中国测试, 2024, 50(09): 91—97.
Zhang Yu, Li Yihong, Chen Ping, et al. Measurement method of edge wave straightness of steel plate based on machine vision [J]. Chinese Journal of Testing, 2024, 50(09): 91—97.

[15] 郑游. 基于手持式的双目扫描三维重建方法研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
Zheng You. Research on 3D reconstruction method based on hand-held binocular scanning[D]. Wuhan Institute of Technology, 2023.