

延展表面高分辨率形貌测量方法综述

马璐瑶, 郑继贵, 杨凌辉*, 廖瑞颖, 刘皓月, 樊一源, 杨朔

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 当前,以高密度点云为目标的三维形貌测量正在取代传统离散坐标测量成为几何量测量的新发展方向。除了狭义制造环境,高密度点云提供的多空间分辨率特性在以高铁、飞机、隧道为代表的机械装备、大型工程运行状态监控领域同样显现出广泛的应用前景。但与制造场景中静态条件下的点云形貌测量问题不同,对于处于服役状态的被测量对象,相关测量需求表现出点云需要伴随运动高速连续延展、高分辨率获取等新特点,所形成的延展表面测量新问题对传统测量方法提出了严重挑战。以线阵 CCD、CMOS 为代表的一维图像传感器可在运动状态下快速连续成像,为三维形貌测量系统提供满足高速、连续、高密度等测量要求的硬件潜力,近年来得到了持续发展和广泛关注。对基于一维图像的延展表面高分辨率形貌测量方法及涉及的参数标定、一维图像匹配、多传感器布局与同步、运动误差补偿等关键技术进行综述,并探讨它们未来可能的发展方向。

关键词 测量; 形貌测量; 延展表面; 高分辨率; 点云; 一维图像

中图分类号 TH701

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223445

Review of High-Resolution Shape Measurement Methods for Extendable Surfaces

Ma Luyao, Zhu Jigui, Yang Linghui*, Liao Ruiying, Liu Haoyue, Fan Yiyuan, Yang Shuo

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

Abstract Three-dimensional (3D) shape measurements based on high-density point clouds are currently replacing conventional discrete coordinate measurements and are thus a new development trend in the field of geometric measurement. In addition to their narrow-sense manufacturing applications, the multi-spatial-resolution characteristics of high-density point clouds provide a broad range of applications in the operational monitoring of mechanical equipments or large engineering projects such as high-speed trains, aircrafts, and tunnels. However, unlike with the 3D shape measurement problem that occurs under static conditions in the field of manufacturing, for the measured objects in service state, new characteristics are required, including in-motion high-speed continuous extension of point clouds and high-resolution acquisition. The new problem of extendable surface measurements poses a major challenge to conventional measurement methods. One-dimensional image sensors, represented by line-scan CCD and CMOS, can collect images rapidly and continuously in motion, providing excellent hardware potential for 3D shape measurements to meet the requirements of high-speed, continuous, and high-density measurements. One-dimensional image sensors have been in regular development and attracted considerable interest in recent years. In this paper, the key technologies including parameter calibration, one-dimensional image matching, multi-sensor layout and synchronization, and motion error compensation are reviewed for high-resolution shape measurements of extendable surfaces based on one-dimensional images, and their possible developmental directions are discussed.

Key words measurement; shape measurement; extendable surface; high resolution; point cloud; one-dimensional image

1 引言

近年来,对产品整体外形质量进行高效、精细化检

验成为航空航天^[1-3]、轨道交通^[4-5]、船舶建造^[6-7]等重要制造领域的迫切需求,以获取高密度点云为目标的三维形貌测量正在取代传统离散坐标测量成为几何量测

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(51975408, 52127810, 51721003)

通信作者: *icelinker@tju.edu.cn

量的新的发展方向,在产品组装^[8]、质量检测^[9]、逆向工程^[10]等多种制造场景中具有重要的支撑作用。由于具有非接触、精度高、适应性好等显著优势,基于光电传感和视觉成像的光学非接触式三维形貌测量技术是上述领域制造过程中高密度点云获取的主流技术手段^[11]。其中,较有代表性的技术包括基于光电传感的三维形貌测量方法和视觉三维形貌测量方法2类。前者采用激光测距与精密测角相结合的球坐标测量原理,利用扫描机构驱动激光光源按顺序扫过被测物表面,根据点的距离和扫描方位角度进行逐点坐标测量^[12-13];后者采用 CCD、CMOS 等传感器采集物体表面二维图像,可实现基于线结构光三角法的物体三维轮廓点云测量^[14-15],也可基于立体视觉成像原理及面结构光或物体表面纹理获得被测对象局部的高分辨率三维形貌^[16-18]。

值得注意的是,除了狭义制造环境,高密度点云提供的多空间分辨率特性在以高铁、飞机、隧道为代表的机械装备、大型工程运行状态监控领域^[19-21]同样显现出广泛的应用前景。特别是以裂纹、松动为代表的细小故障缺陷在飞机、高铁、隧道等重大装备设施运行过程中难以避免,一旦防控处置不当,极易快速恶化,造成严重生命财产损失,对运行安全保障造成巨大挑战。在机械系统中,复杂装备零部件数量多达上万,空间尺寸可达数百米,常见外观故障缺陷的特征尺寸在百微米至几十微米量级,发生位置分布随机,不易发现,目前主要依赖人工视检。现有基于图像的检测方法由于缺乏深度信息,检测完备性不足,易受光照、油污、沙尘等恶劣环境干扰,错检、漏检问题严重。近年来,引入三维点云信息依据结构特征进行检验的方法已被证明能够有效提升检测结果的可靠性和信息完整性,正成为相关领域研究的焦点和热点^[22-25]。

但是,与制造场景中静态条件下的点云形貌测量不同,高密度点云三维形貌测量中由于被测量对象处于服役状态,测量过程不能影响被测对象正常运行,甚至在某些检测等场景(如高铁检测)中三维形貌测量需要在传感器或被测物运动状态下连续完成,这就形成了一类延展表面高分辨率形貌测量新问题,并表现出与传统三维形貌测量问题完全不同的特点。首先,被测对象是在空间一个或多个维度上具有高延展性的三维表面,覆盖范围随运动连续变化延伸,宏观尺度可跨越几十米(机身)到上百米(路面、铁轨),不受传统测量“范围”概念的限制;其次,对于测量结果,需要保证高连续性和高分辨率,由于检测对象是在车身、机身范围内零散分布的亚毫米级或微米级细小缺陷,为达到精细预警要求,点云不仅需要在传感器视场内保证高密度分布,还需要在运动方向上保证高速连续延展,准确提供螺栓、裂缝等细节信息;最后,在点云生成同时需要对缺陷故障进行高效分析,保证检测结果时效,为预警处理提供充分时间。

上述测量问题中点云伴随运动高速自由延展,量程范围不受限制,对现有测量方法形成巨大挑战。现有光电扫描^[12-13]、视觉测量^[14-18]等大空间形貌测量方法的单次测量范围及分辨率均受到约束,无法满足要求,只能通过多次拼接或扫描测量实现延展。如,现有基于光电扫描传感的方法只能适用于低速运动状态下的高密度点云获取。高速运动状态下,激光扫描测距受测距动态性能或扫描机构转动速度的限制,实际获取的点云受到运动状态调制,空间线性无法保持,通常呈螺旋分布,测量结果在运动方向上存在较大误差。视觉测量方法虽然依靠高性能结构光传感能够部分解决测量速度问题,但是二维面阵器件“成像-缓存-处理”的串行步进式工作模式原理上不具备连续测量的基础,传输带宽和存储空间被大量非结构光区域的冗余数据占据,限制了分辨率与采集频率的提升,沿轨迹法向方向难以实现大视场高分辨率,沿轨迹切向方向难以实现快速扫描与高密度延展。即使目前使用效率最高的线结构光传感器,视觉测量方法也只能满足低速状态下的测量需求,局部点云密度/分辨率明显不足,高速状态下会造成细节遗失,导致检测结果欠缺可靠性和完整性。

与传统方法不同,以线阵 CCD、CMOS 为代表的一维图像传感器仅在线视场方向成像,利用被测物与传感器间的相对运动进行连续推扫,可生成不断延展的二维图像,同等工艺水平下单一方向分辨率更高,采集速度更快,在理论上可兼顾高点云密度在轨迹法向的高速延展和切向的大视场需求,对解决运动状态下高密度点云获取问题具有显著的原理优势,近年来得到了广泛关注^[26-31],相继发展了如图 1 所示的单线阵结构光或多视角测量、双线阵立体视觉、多线阵推扫交汇等三维形貌测量方法。单线阵测量方面,华中科技大学的 Hu 等^[32]和德国汉诺威大学的 Denkena 等^[33]均于 2009 年利用结构光实现相位-深度映射,原理如图 1(a)所示。2013 年,中国矿业大学 Hu 等^[34]进一步添加编码器减小运动状态变化的影响。日本京都大学的 Zhang 等^[35-36]分别于 2014 年和 2015 年采用单个一维图像传感器从大量不同视角全方位重建三维形貌,如图 1(b)所示。北京航空航天大学 Wu 等^[37]、Liu 等^[38]分别于 2018 年和 2019 年将其中一个一维图像传感器替换为二维图像传感器,实现了更鲁棒的匹配。对于双线阵立体视觉测量,德国马格德堡大学的 Ilchev 等^[39-42]于 2012 年提出了基于物体表面纹理的双一维图像传感器共面测量方法,于 2014 年和 2015 年进一步通过结构光设计实现了弱纹理表面测量,并于 2018 年优化了投影光源设计,系统结构均如图 1(c)所示。天津大学 Sun 等^[43-44]于 2016 年和 2018 年设计了基于伪随机条纹结构光的双目立体三维重建方法。天津大学 Liao 等^[45]于 2021 年提出了双一维图像传感器多帧测量方法,该方法实现了测量深度的增大和背景影响的

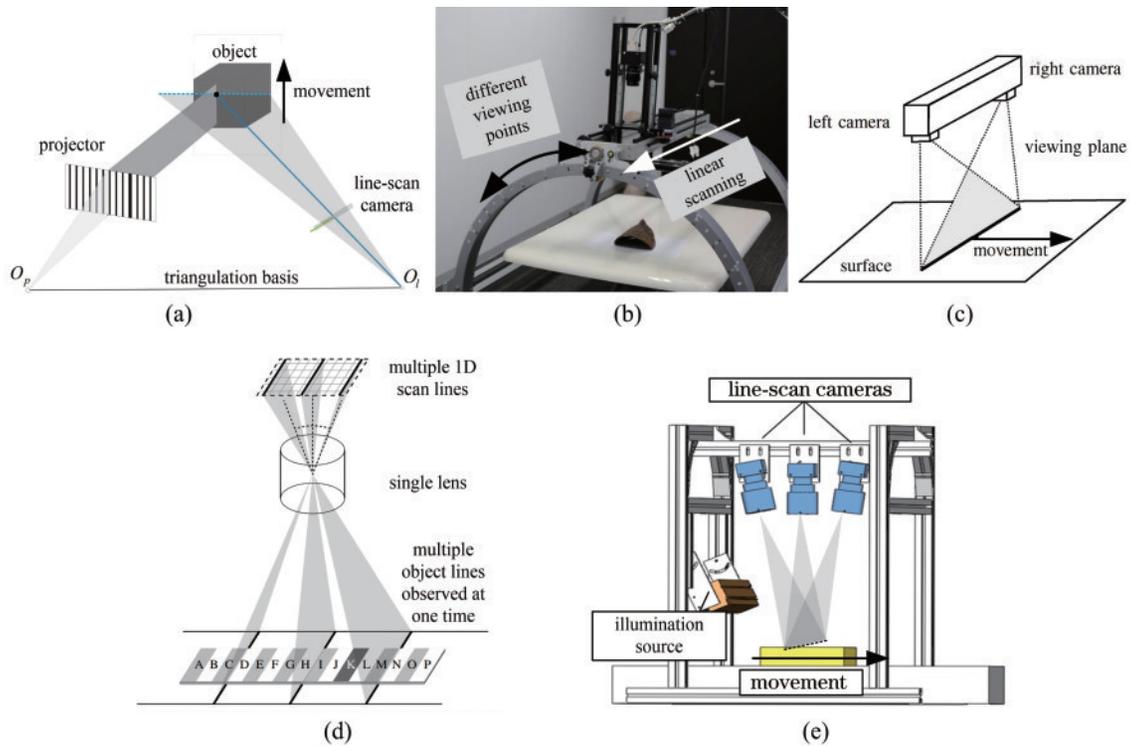


图 1 基于一维图像的三维形貌测量。(a)单线阵结构光^[33];(b)单线阵多视角^[35-36];(c)双线阵立体视觉^[39-42];(d)(e)多线阵推扫交汇^[47,49-50]

Fig. 1 3D shape measurement based on one-dimensional images. (a) Single line-scan sensor with structured light^[33]; (b) single line-scan sensor in multiple views^[35-36]; (c) dual line-scan stereo-vision sensor^[39-42]; (d)(e) multiple line-scan sensor with push-broom intersection^[47,49-50]

削弱。为了扩充测量理论,两个以上的多传感器测量逐渐得到研究,形成多线阵推扫交汇测量方法。奥地利科技学院 Holländer 等^[46-47]于 2013 年在反射镜的辅助下采用三行一维图像传感器实现形貌测量,于 2014 年实现了基于三维光场的多行一维图像传感器测量,如图 1(d)所示。Blaschitz 等^[48]于 2018 年通过图像校正进一步提高了测量精度。天津大学的 Liao 等^[49-50]于 2021 年和 2022 年研究了多个一维图像传感器在随机布局下进行测量的普适性理论,提出并完善了点云优化算法,如图 1(e)所示。德国 MV Tec 软件公司的 Steger 等^[51-52]于 2022 年采用远心镜头解决了多个一维图像传感器测量的极线校正问题。

虽然基于一维图像的形貌测量方法具备解决可扩展表面测量问题的硬件潜力,但由于传感器结构与采集模式的特殊性,测量在原理上仍面临一维图像信息不完备、多传感器动态同步、运动过程引入误差 3 大问题,按照目前研究进展,关键技术可总结为 4 方面。

1) 一维图像传感器参数标定。一维图像所含信息量少,无法像传统二维图像一样依靠圆心、角点等图像特征构造约束方程进行参数求解,使得相机参数标定成为测量需要解决的首要问题。

2) 一维图像匹配。相比于二维图像,一维图像匹配也更加困难,如何确定不同图像之间或图像与投影仪之间的匹配点、提高匹配鲁棒性是重要研究问题。

3) 多传感器布局与同步。由于传感器在运动状态下工作并仅在垂直于轨迹的一维方向成像,多传感器的布局对同一物点经过传感器视平面的时间先后造成影响,引入了物点采集的同步性问题。传感器的布局与不同传感器对同一物点的采集时间会改变匹配的极线、决定结构光的使用、影响 3D 坐标计算的方法。

4) 运动误差补偿。延展性三维形貌是在连续运动状态下测得的,重建精度容易受到运动误差影响。针对不可控的运动状态变化和微小振动,运动误差补偿是重要手段。

4 类关键技术的相互关系如图 2 所示。参数标定为 一维图像匹配提供精确的极线参数,为多传感器布局与同步提供更精确的外参信息,是实现测量的重要前提;传感器布局与同步问题决定了能否使用结构光,对一维图像匹配方法的多样化提出了要求,传感器布局与同步情况又影响着匹配的极线,因此合理控制多传感器布局与同步可以为更快捷的一维图像匹配提供帮助;系统与被测物的相对运动伴随着整个测量环节,因此运动误差补偿会深刻影响着一维图像的匹配和多传感器布局与同步。

本文将围绕延展表面高分辨率形貌测量问题,结合国内外已公开发表的相关文献,对 4 类关键技术进行综述介绍,分析并探讨延展表面高分辨率形貌测量方法的未来研究方向。

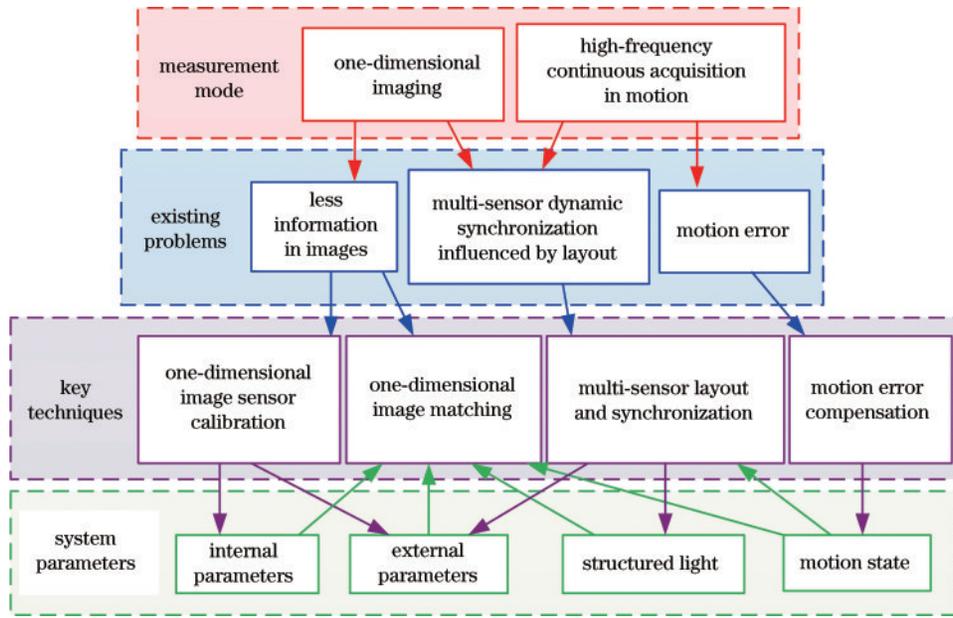


图 2 延展表面高分辨率形貌测量的关键技术

Fig. 2 Key techniques of high-resolution shape measurement for extendable surfaces

2 一维图像传感器参数标定

2.1 一维成像模型

一维图像可看作行数仅为 1 的特殊二维图像,成像模型与畸变模型可由二维图像传感器模型推导而来。已知的二维图像传感器模型为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & u_c & 0 \\ 0 & F_y & v_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $[X \ Y \ Z]^T$ 为物点坐标; $[u \ v]^T$ 为对应的图像像素坐标; (u_c, v_c) 为图像主点; F_x 和 F_y 为等效焦距; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 为描述世界坐标系相对传感器坐标系的旋转矩阵和平移向量; Z_c 为物点到光心的距离在光轴方向的投影。一维成像模型仅沿传感器的 u 方向进行成像,垂直于传感器的 v 方向为 0,如图 3 所示,其中 P 是物点, p' 是在反片上成像的像点, p 是对应在正片上的像点, f 为焦距, $O_s - X_s Y_s Z_s$ 为传感器坐标系, $O - XYZ$ 为世界坐标系。为了便于像点和物点在空间位置的换算,图像坐标系 $o - xy$ 建立在正片上。令式(1)的 v 方向为 0,得到一维图像传感器模型:

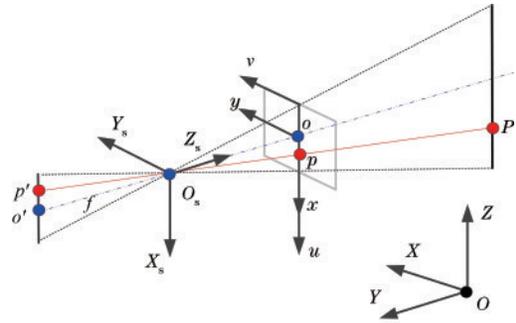


图 3 一维图像传感器模型

Fig. 3 One-dimensional image sensor model

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & u_c & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其展开形式为

$$\begin{cases} 0 = r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y \\ u = u_c + F_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \end{cases} \quad (3)$$

考虑到镜头存在畸变,理想的透视模型并不满足实际情况。合并二维图像传感器的径向畸变、离心畸变、薄棱镜畸变,省去一些高阶分量,得到

$$\begin{cases} \Delta x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 xy + p_2(3x^2 + y^2) + s_1(x^2 + y^2) \\ \Delta y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(x^2 + 3y^2) + 2p_2 xy + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_1, k_2, p_1, p_2, s_1 为畸变系数。一维图像传感器只考虑 x 轴方向的畸变,模型简化为

$$\Delta x = k_0 x^2 + k_1 x^3 + k_2 x^5, \quad (5)$$

式中: $k_0 = 3p_2 + s_1$ 。相应的一维成像模型为

$$\begin{cases} 0 = r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y \\ u = u_c + \Delta u + F_x \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta u = k_0(u - u_c)^2 + k_1(u - u_c)^3 + k_2(u - u_c)^5$ 。

传感器的每次一维成像仅对应一条点云轮廓线,需结合物体和传感器的相对运动信息将点云轮廓线拼接成完整点云。设物点相对于传感器的运动向量为 $\mathbf{m}(t)$, t 为成像时刻,点云测量的拓展方程为

$$\begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \mathbf{m}(t) = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $[X(t) \ Y(t) \ Z(t)]^T$ 表示零时刻被测物点的位置,该点经过时间 t 后位于 $[X \ Y \ Z]^T$ 并进入传感器视场。根据这种时间追溯方法,所有点可通过成像时刻与运动历史状态追溯至同一时刻(0时刻)的位置,构成被测表面的形貌。为实现形貌测量,一维图像传感器的内参(u_c, F_x, k_0, k_1, k_2)和外参(\mathbf{R}, \mathbf{T})需要事先标定。运动向量常通过外部测量设备获得,也可以在动态标定过程中确定。参数的标定依靠已知的、充足的特征点 3D 坐标和图像坐标。

2.2 一维图像传感器标定方法

一维图像信息量少,3D 标定物或 2D 平面靶标上所有的特征点无法同时进入传感器视场,传统标定方法难以适用^[53]。目前的解决方案可分为静态标定和动态标定两类^[54]。静态标定需要一维图像传感器在每一个拍摄视角与标定物保持相对静止,捕获标定物表面参数已知的条纹图案的某一截面并提取像点,利用交比不变性将其关联到参数已知的靶标条纹上。该方法简单便捷,但依赖高精度靶标,像素点坐标提取误差偏大。动态标定需要在每一个拍摄视角匀速、精确地移动一维图像传感器或标定物,通过拼接生成 2D 图像,提取二维特征。该方法更为复杂,标定环境受限,但有利于特征点的提取。

一维图像传感器静态标定方法起源于法国国家科学研究中心的 Horaud 等^[55]于 1993 年的研究,其设计了包含 3 条平行直线和 1 条斜线的 2D 平面靶标。该方法通过交比不变性确定像点对应的靶标图案位置,未考虑镜头畸变的影响,需要通过多次精确移动靶标增加特征点信息。美国佛罗里达大西洋大学 Zhuang 等^[56]在 Horaud 标定方法的基础上增加了畸变信息。西班牙阿尔卡拉大学 Luna 等^[57]对靶标进行改进,设计了由 2 个平行平面组成的立体靶标,每个靶标平面包含两组不同斜率的平行直线,避免了精密位移平台的使用,但标定精度受立体靶标制作精度影响,并要求传感器和图案之间具有准共面性。德国马格德堡大学 Lilienblum 等^[58]同样设计了两层编码直线图案进行标定。国防科技大学 Li 等^[59]设计了由 2 个相互垂直的 2D 平面靶标组成的立体靶标,靶标制作相对简单,标定时无需精密位移平台,并改进了 Luna 方法的像面平行条件,重投影误差(用均方根误差表示)为 0.547 个像素。Li 等^[60]在进一步的研究中将一维图像传感器和二维图像传感器固连,通过二维图像获得多次摆放

的 2D 靶标位姿,提升灵活性,重投影误差为 0.348 个像素。类似地,天津大学 Sun 等^[61-62]采用面阵相机或激光跟踪仪定位 2D 平面靶标,获取大范围分布的点,算法精度较 Li 的方法得到进一步提高,重投影误差为 0.1 个像素左右。东北大学 Niu 等^[63]采用同心圆环条纹三维直角立体靶标,通过粒子群优化算法求解内部参数,重投影误差为 0.16 个像素。天津大学的 Liao 等^[64]针对一维图像传感器观测目标时的偏心误差,设计了空心条纹 3D 靶标,当目标平面与像面夹角为 20° 时,虽然存在偏心状况,但标定的重投误差仅为 0.14 个像素,远远低于实心条纹对比组。奥维耶多大学 Usamentiaga 等^[65]针对标定的非线性优化过程中的线性初值问题,设计了鲁棒的线性初值获取方法,并通过大量仿真实验验证了方法的有效性。

动态标定方面,蒙特利尔大学的 Draréni 等^[66]提出了一种从不同方向扫描平面网格图像并进行标定的方法,该方法简单易行,但是一维图像传感器的运动方向须严格垂直于像元方向,未考虑镜头畸变。国防科技大学 Hui 等^[67]提出的方法考虑了畸变,利用直接线性变换获得解析参数并将其作为非线性优化的初值,重投影误差为 0.31 个像素,但需要保证传感器的匀速运动。之后,Hui 等^[68]设计了结合辅助二维图像传感器标定的方法,采用二维动态图像代替一维图像传感器的运动,像素点坐标提取较为便利,标定精度也有所提高,为 0.17 个像素。

3 一维图像匹配

实现一维图像匹配,确定同名像点,是根据传感器结构参数计算点云三维坐标的前提条件。相比二维图像,一维图像所含的信息更少,匹配难度更大。目前按照是否应用结构光,一维图像匹配可分为两类,即基于被动视觉的图像匹配和基于结构光的图像匹配。

3.1 基于被动视觉的图像匹配

当被测物表面具备丰富纹理或通过喷涂散斑等方式增加特征时^[69],可采用被动视觉方法^[70]实现匹配。对于一维图像传感器测量系统,直接方法就是匹配一维的图像特征。但是,一维图像所含信息量少,忽视了被测物纹理在另一个维度上的特征,容易出现匹配错误。由于一维图像是连续采集得到的,若合理控制传感器与被测物相对运动的轨迹与速度,按时间先后顺序拼接一维图像,即可获得理想的二维图像,利用二维图像更丰富的信息实现更准确的匹配。

日本京都大学 Zhang 等^[35-36]的研究属于这一类方法的代表。如图 4 所示,一维图像传感器从不同视角对被测物进行匀速直线扫描。沿直线扫描得到的一维图像被拼接为特征信息更加丰富的二维图像,对不同视角的二维图像提取二维 Affine-SIFT 特征,即可确定匹配点。Zhang 等在文献[36]中还采用二维特征匹配结果,提出的方法通过自标定估计相机不同视角的位

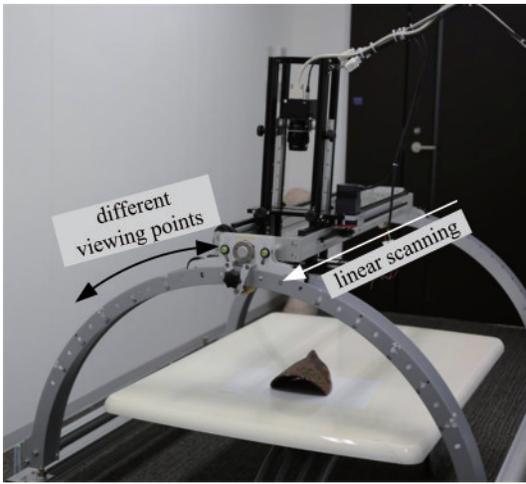


图 4 对被测物进行多视角推扫的过程^[35-36]

Fig. 4 Process of pushing and scanning the measured object from multiple perspectives^[35-36]

态,避免了对轨迹的重复标定,提高了测量效率,可实

现对木质面具、佛像等高纹理物体的高分辨率重建与彩色纹理映射,采用自标定后的测量均方根误差为 0.4 mm 左右。德国马格德堡大学的 Lilienblum 等^[40]于 2014 年的研究与之类似,但采用了互相关匹配法,该方法沿极线方向对多像素组成的图像块进行互相关系数计算,初步确定匹配点位置,再对互相关系数进行抛物线拟合并求解最大值坐标,实现亚像素匹配。天津大学 Liao 等^[50]于 2022 年的研究进一步改进了亚像素匹配算法,如图 5 所示,其中 (x, y) 是图像坐标系坐标。Lilienblum 等的亚像素匹配仍局限在一维图像方向,采用抛物线拟合,Liao 等的方法则考虑了二维图像方向,在匹配点附近对互相关系数进行二维二次多项式拟合,将相关值最大的点确定为亚像素匹配点,提升了亚像素匹配的精度。Liao 等的亚像素匹配方法需要保证传感器与被测物之间的匀速直线运动,采用普通位移平台时标准平面三维重建的均方根误差为 0.053 mm,采用高精度 PI 导轨时重建的均方根误差为 0.015 mm。

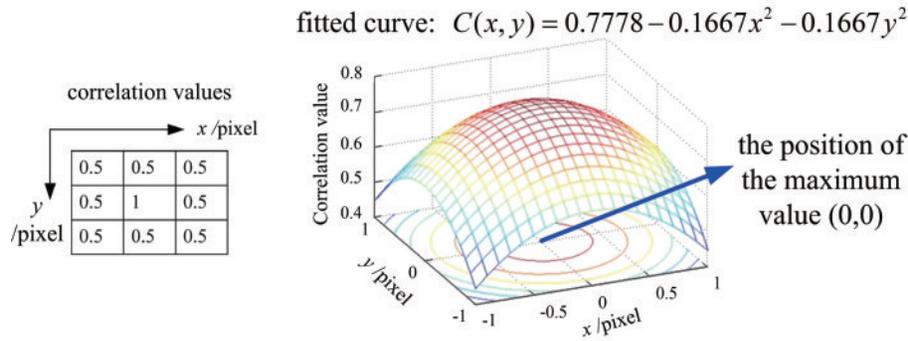


图 5 亚像素匹配^[50]

Fig. 5 Sub-pixel matching^[50]

基于被动视觉的匹配方法通过对一维图像的时序拼接,实现了对物体表面纹理的充分利用,增加了匹配特征,但是对运动状态要求严格。由于采用结构光测量大尺寸表面或运动表面时,一维图像传感器需要与投影仪固连,难以采集两个维度方向的结构光特征,因此一维图像时序拼接手段还未推广到结构光系统,仅面向被动视觉三维重建。

3.2 基于结构光的图像匹配

对于弱纹理、不易喷涂散斑的表面,通过结构光调制增加表面信息的主动视觉技术是有效匹配手段。针对基于结构光的一维图像匹配问题,当前研究常通过结构光构造一维特征信息或相位信息,或采用附加二维图像定位线结构光条纹。

3.2.1 一维特征匹配

对于动态扫描的一维图像传感器系统,结构光投影设备与一维图像传感器固连,呈相对静止状态,只有沿线视场方向的结构光调制特征被采集,因此常投影疏密变化的直线条纹。代表方法是天津大学 Sun 等^[43-44]提出的基于静态伪随机条纹的匹配方法,如图 6

所示,条纹沿一维传感器方向随机分布,条纹密度的不均匀性构成特征,共面的一维图像传感器对被测物表面条纹的同一行进行采集,采用一维归一化互相关进行匹配。假设一维图像传感器的像素排列方向为 u , 像素行数 v 与成像时刻相关,则同一物点在两个传感器像面的位置为 (u, v) 和 (u', v) , 相关函数为

$$K(u, v, u') = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{u+i,v} - \bar{G}_{u,v})(G'_{u'+i,v} - \bar{G}'_{u',v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{u+i,v} - \bar{G}_{u,v})^2 \times \sum_{i=1}^n (G'_{u'+i,v} - \bar{G}'_{u',v})^2}}, \quad (8)$$

式中: n 为序列长度; G 为像素灰度。相关函数最大点即为匹配点。Sun 等的匹配方法能够有效用于对标准平面、小弧度曲面的测量,最终三维重建的均方根误差在 0.05 mm 到 0.08 mm 之间,但是一维特征的匹配容易出错,需要结合视差有限性约束降低误匹配的概率,难以重建高度变化过大的表面。

基于结构光的一维特征匹配不仅可以依靠空间相关性,也可以依靠时间相关性,通过随时间不断切换的

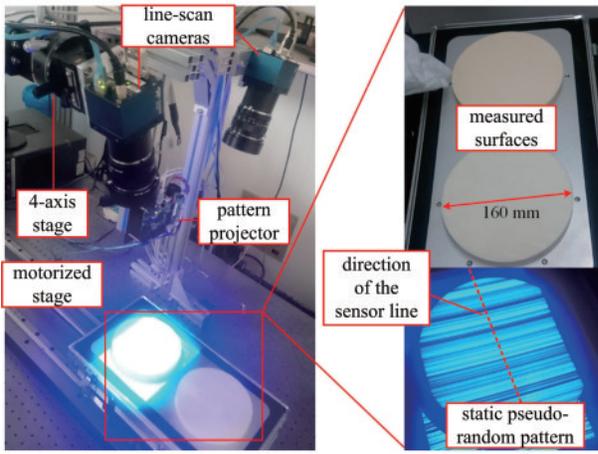


图 6 测量系统示意图^[43-44]

Fig. 6 Schematic of the measurement system^[43-44]

投影条纹沿传感器线视场法向方向构成特征。代表方法是 Lilienblum 等^[40-41]于 2014 年和 2015 年提出的时间相关法。系统结构与 Sun 等的一样,假设一维传感器的像素排列方向为 u , 像素行数 v 与成像时刻相关,则同一物点在两个传感器像面的位置为 (u, v) 和 (u', v) 。但不同于 Sun 等的方法,时间相关法沿着一维的 v 方向计算相关系数,

$$K(u, v, u') = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{u,v+i} - \bar{G}_{u,v})(G'_{u',v+i} - \bar{G}'_{u',v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{u,v+i} - \bar{G}_{u,v})^2 \times \sum_{i=1}^n (G'_{u',v+i} - \bar{G}'_{u',v})^2}} \quad (9)$$

采用 Lilienblum 等^[42]的时间相关匹配方法并选择合适的投影序列的长度,不仅能以 0.034 mm 的标准偏差重建纸平面,也能重建 50 mm 高的半球面,球体顶部的测量标准偏差为 0.051 mm。但该方法生成的匹配特征会出现图案质量分布不均匀或局部缺乏对比度的情况,产生垂直于传感器方向的条纹状系统误差。Lilienblum 等于 2018 年进一步设计了投影图案优化方法,实现了系统误差的减小,纸平面重建的精度提升了大约 0.018 mm。

基于结构光的一维特征匹配方法初见成效,但在特征匹配或特征构造上仍具挑战。Yang 等^[44]和 Lilienblum 等^[42]在研究中还发现,这一类匹配方法容易受到被测物表面光学性质的影响,如局部反光引发误匹配,这一现象对一维特征匹配方法提出了新的挑战。与此同时,基于相位的结构光匹配方法也得到研究,从另一个角度为解决一维图像匹配问题提供新思路。

3.2.2 一维相位匹配

基于相位的方法具有计算复杂度低、测量速度快、测量质量均匀的特点。一维图像的相位匹配方法重点在相位的计算,最简单的方法是直接投影一幅正弦条纹图像,条纹的分布沿一维传感器方向,采用一维傅里

叶变换和带滤波获得基频信息,再通过傅里叶逆变换获得折叠相位。在不存在孤立表面或非连续性表面的前提下,依据像素邻域内的折叠相位获得展开相位。德国汉诺威大学的 Denkena 等^[33]和中国矿业大学的 Hu 等^[34]的研究就采用了以上思路,实现了对小体积的凹痕、油滴的识别。

上述方法仅适用于连续表面或高度变化很小的表面,为了扩大测量高度范围,适应更复杂的表面形貌, Liao 等^[45]首次将时间相位展开法应用于一维扫描成像形貌测量系统,采用 DLP 投影仪高速循环投影三幅不同周期的正弦条纹并同步触发一维图像的采集。由于投影频率很高,采集三幅图像的传感器与物体的相对运动基本可以忽略。每轮投影的三幅正弦条纹图对被测物点提供了三个折叠相位,采用 protection distance minimization (PDM) 方法^[71]寻找三个折叠相位的整数条纹阶最优解,即可获得展开相位。Liao 等的方法不仅提升了一维相位匹配的性能,也解决了 Sun 等的一维特征匹配方法的测量深度受限问题,能够重建 Sun 等的方法难以测量的三角形工件和球面,对球体顶端测量的均方根误差为 0.126 mm。

对于结构光系统,背景的干扰、被测物表面局部反光也是影响匹配的重要问题。华中科技大学的 Hu 等^[32]提出了基于 π 相移的傅里叶轮廓术,额外添加一个一维图像传感器对具有 π 相移的正弦条纹进行采集,投影图案如图 7 所示。两个拍摄 π 相移正弦条纹的一维图像相减,去除零级分量,即可实现背景干扰的消除。实验证明,该方法相对传统的傅里叶轮廓术具有更高的可靠性,但未给出定量的精度评估。Liao 等^[45]在不增加传感器数量的基础上,通过多投影一张白色图片实现背景消除。Liao 等高速循环投影 3 张正弦条纹图和 1 张白图,默认 4 张图采集期间被测物与一维图像传感器的相对运动可以忽略。设采集的某一维正弦条纹图像为 $g_1(u)$, 一维白图为 $g_w(u)$, 则有

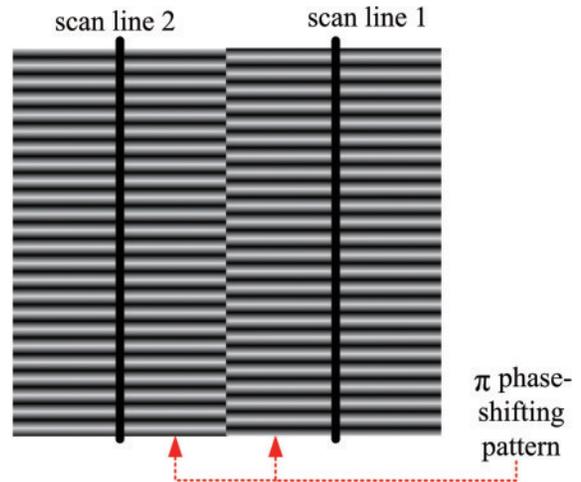


图 7 投影的 π 相移光栅图案^[32]

Fig. 7 Projected π phase-shifting grating pattern^[32]

$$\begin{cases} g_1(u) = \frac{1}{2}\gamma(u) + \frac{1}{2}\gamma(u)\cos[2\pi f_1 u + \varphi_1(u)], \\ g_w(u) = \gamma(u) \end{cases}, (10)$$

式中： γ 为被测物反射率； f_1 为正弦条纹的基频。令

$$g_d(u) = \frac{2g_1 - g_4}{g_4} = \cos[2\pi f_1 u + \varphi_1(u)], (11)$$

不仅消除了零频背景的影响，还消除了物体表面的反射率变化的影响。经过实验，Liao 等的方法能够完整地重建反光陶瓷平板，均方根误差为 0.020 mm，进一步完善了一维相位匹配方法，也解决了一维特征匹配方法对被测物光学性质敏感这项难题。

一维相位匹配方法也可以从时域上构造正弦条纹特征，提取相位信息。相移法是典型的方法^[40-41]，系统构型与时间相关法类似，但投影的是强度在时间上呈正弦变化的相移条纹。相移法在 v 方向上计算的相位信息为

$$\varphi(u, v) = \arctan_2\left(\sum_{i=1}^n G_{u,v+i} \cos \frac{2\pi i}{n}, \sum_{i=1}^n G_{u,v+i} \sin \frac{2\pi i}{n}\right). (12)$$

相比时间相关法，相移法计算复杂度低，测量质量更均匀，重建纸平面的标准偏差仅为 0.014 mm。但是，此方法也存在与时间相关法类似的条纹状的系统误差。相比其他一维相位匹配方法，相移法对测量深度有严格限制，只允许测量表面有略微弯曲。

3.2.3 一维和二维图像组合匹配

为进一步提高匹配的鲁棒性，北京航空航天大学的 Wu 等^[37-38]提出了二维图像辅助下的一维图像匹配，系统原理如图 8 所示。系统的一维图像传感器视平面与线结构光的光平面共面，能够清晰捕获纹理信息，二维传感器与一维传感器之间的相对位姿已经标定，利用双相机极线约束与提取的线结构光条中心确定匹配点。该匹配方法能够在复杂光照条件下稳定工作，对

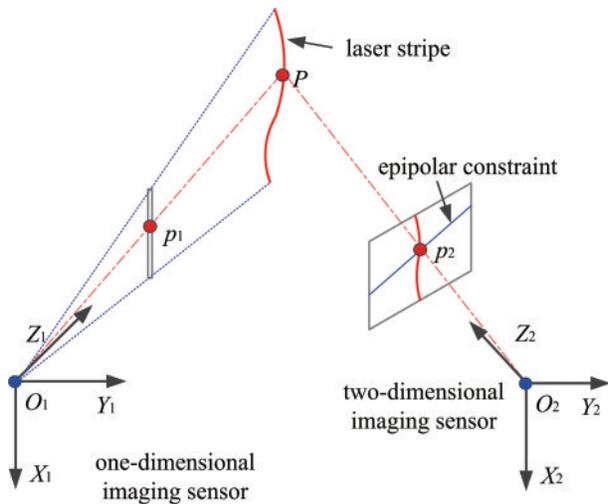


图 8 二维图像辅助下的一维图像匹配^[37-38]

Fig. 8 One-dimensional image matching assisted by two-dimensional image^[37-38]

复杂光学特性表面的适应能力强，甚至能够重建反光金属表面。系统能够实现 500 mm × 300 mm × 200 mm 测量范围内 0.13 mm 的测量精度。该方法在原理上与传统的基于线结构光的二维图像传感测量方法类似，通过利用一维图像纹理信息可实现三维形貌和表面纹理的同步配准，检测精度和鲁棒性更好，但是受限于二维图像采集速率，一维图像传感器速度的优势无法充分发挥。

4 多传感器布局与同步

图像采集在运动状态下连续进行，使传感器的布局结构对同一物点采集的同步性先后造成影响，不可避免地影响像点匹配极线和 3D 坐标计算过程。针对多传感器布局与同步问题，目前按照物点观测与采集的同步性可分为两类，即共面同步调节和异面异步信息融合。

4.1 共面同步调节

共面同步调节指一维图像传感器的视平面被调整为共面状态，在同步触发下进行采集的过程。这种状态下，尽管物体和传感器之间存在相对运动，传感器对同一物点的采集始终是同时的。虽然方法需要高精度的共面调节，但消除了采集时差，简化了测量环节。首先，共面的布局具备沿一维图像传感器方向的理想的极线，匹配点始终处于同时采集的一维图像之间；其次，3D 坐标的计算只需要考虑图像传感器的相对位姿，运动信息仅用于点云轮廓线的拼接；最后，由于传感器在同一时刻采集被测物表面的同一行，系统能够兼容结构光照明。

传感器的共面调节过程在很多文献中没有详细介绍，Liao 等^[49]的调节方法可作为代表。如图 9 所示，共

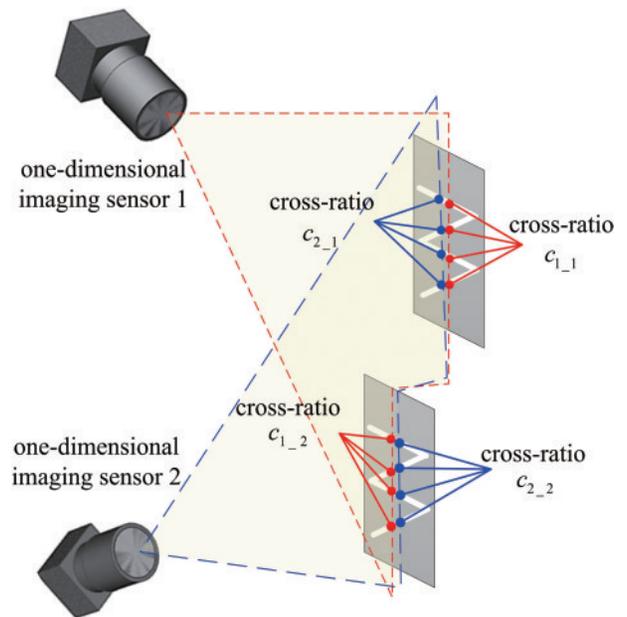


图 9 共面布局调节示意图^[49]

Fig. 9 Schematic of coplanar adjustment^[49]

面调节需要两个标定好的不同高度的平面,平面上有参数已知的条纹图案,不同传感器拍摄两个平面并分别计算交比。不断对两个传感器的姿态进行调节,直到交比 $c_{1,1}$ 等于交比 $c_{2,1}$ 且交比 $c_{1,2}$ 等于交比 $c_{2,2}$,此时传感器的视平面为共面状态。

4.2 异面异步信息融合

异面异步信息融合指一维图像传感器在视平面非共面的结构下对被测物进行动态扫描时,同一物点在不同传感器的捕获时间存在差异,或是进行补偿校正,或是利用差异信息推算物点高度的过程。虽然目前传感器共面结构和单传感器结构在研究中更为常见,不存在异面异步信息融合问题,但精准的共面调节难度较大,且随着研究的深入,更多数量传感器的引入和更复杂系统结构的出现势必绕不开异面异步信息融合这一重要研究问题。具备多传感器的异面异步采集系统除提高了测量可靠性之外,也由于复杂的系统架构具备很高的研究价值,适合作为验证性系统。

异面异步采集相对于共面同步采集也存在局限性。首先,极线的确定和 3D 坐标的计算都要考虑到相对运动信息,对运动稳定性的要求也更加严格;其次,为了保证一定的公共视场或其他成像需求,基线不可过大,限制了深度分辨率和测量精度;此外,由于采集时差的存在,难以兼容结构光照明,往往采用被动视觉方法。

针对一维图像异面异步信息融合问题,现有研究按照传感器的排列布局可以分为两类,即理想沿轨布局下的异面异步采集和随机布局下的异面异步采集。

4.2.1 理想沿轨布局下的异面异步采集

理想沿轨布局指一维图像传感器前后整齐排列且相互平行,被测物的相对运动方向垂直于传感器线视场方向。这种布局具有垂直于一维传感器方向的理想极线,便于匹配点的寻找。理想沿轨布局依赖于精准的人工调节,因此很多研究者会从二维图像传感器中筛选出其中的几行,构成等效的一维传感器沿轨布局。

奥地利科技学院 Holländer 等的研究^[46]属于典型,从一个特殊的二维图像传感器中筛选出几行进行快速连续性扫描,获得等效的一维图像传感器理想沿轨布局,这种布局易于搭建、刚性良好,但系统的基线小、深度分辨率低,运动方向需要精密调节。Blaschitz 等^[48]从图像校正的角度解决运动方向与传感器视场线不垂直的问题。他们重新定义一个 v 轴平行于传输方向的虚拟图像平面,设计一种逐像素扭曲算法,将原始图像投影到虚拟图像平面,图像经重采样后投影回原传感器平面,重构理想的校正图像。经过校正,高精度有效三维点数目明显增多(在两次实验中,有效三维点数目分别从 34971、222415 提升到 390138、775791)。Holländer 等^[46]针对测量基线小的问题,引入反射镜实现基线的扩大,如图 10 所示。中间的传感器线直接观测被测物,另外两条传感器线通过两个反射镜从其他

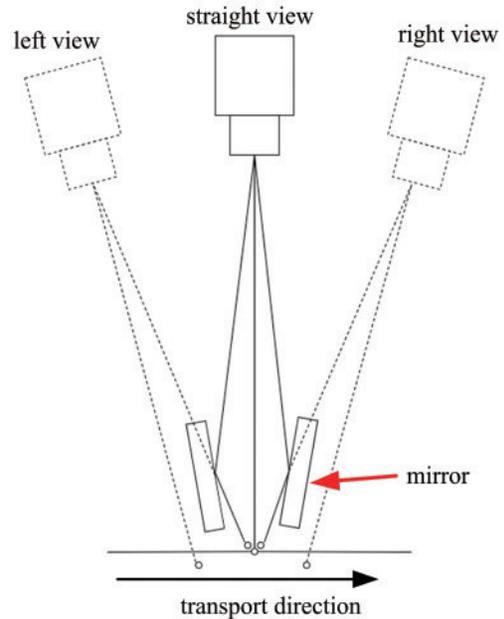


图 10 引入反射镜的系统示意图^[46]

Fig. 10 Schematic of the system with reflecting mirrors^[46]

视角观测,相当于扩大了基线,深度分辨率随之增加。经过实验,系统深度分辨率为单位视差 0.083 mm,对一个高度差为 1 mm 的阶梯模型进行重建,误差约为 0.5 个视差。但是,该系统不易搭建,散焦现象限制了基线的进一步扩大,多视图的照明问题限制了测量的高度范围。

在 3D 坐标计算方面,最直接的方法是沿垂直于传感器的极线方向根据纹理特征确定匹配点,计算双相机视差,由视差乘以一个固定常数,对应到实际物点高度,Holländer 等^[46]的研究就采用这种 3D 坐标计算方法。但是,视差和实际高度的对应关系与运动速度相关,易受运动状态干扰,需要物体与传感器的相对运动状态严格维持在理想的定值。理想沿轨布局下的异面异步采集系统还可以采用基于三维光场的测量方法^[47]。图 11 显示了三维光场的形成过程。视角 $i =$

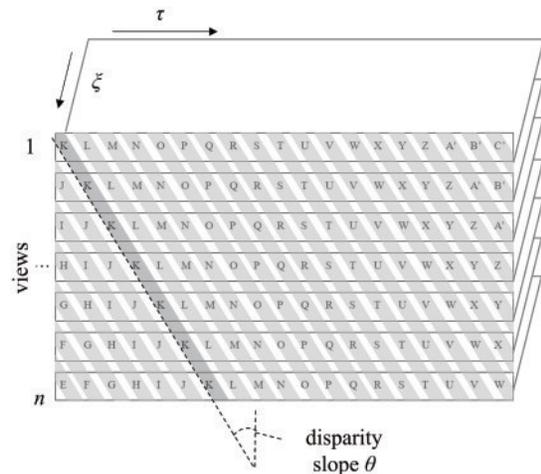


图 11 三维光场的形成过程^[47]

Fig. 11 Formation process of three-dimensional light field^[47]

1, 2, ..., n 与观察角度有关, 对应不同一维图像传感器。τ 与时间有关, ξ 与传感器观测到的纹理有关。每个纹理的斜率 θ 同传感器与对应物点间的距离相关, 计算的斜率可反映被测物表面不同点的高度。经过实验, 该方法能够重建 1 mm 高差的台阶、硬币、电路板等物体, 实验过程同样需要运动状态和传感器采集的严格控制。

4.2.2 随机布局下的异面异步采集

这一类布局下的一维传感器之间的位姿关系更为随机, 无需精细的结构调节, 被测物的运动方向也无需严格垂直于传感器方向。随机布局的研究结论具有良好的普适性。

随机布局下的异面异步采集令极线约束更为复杂。天津大学 Liao 等^[49-50]的研究中表示, 该布局下的极线不再是沿着或垂直于一维传感器方向的理想直线, 而是双曲线的一支。极线的形状不仅与传感器之间的位姿关系有关, 也与运动的方向、运动的速度、采集的频率有关, 具体计算过程较为复杂, 可参考文献^[50]。沿着计算的双曲极线即可实现匹配点查找。后续 3D 坐标计算原理如图 12 所示, 设 P_1, P_2, P_3 为匹配点, 在极短时间内, 设运动速度 v_{el} 和运动方向 d 是恒定的, 于是有

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + D_1 \\ D_1 = \Delta v_1 \times v_{el} \times d/f \\ P_3 = P_2 + D_3 \\ D_3 = \Delta v_3 \times v_{el} \times d/f \end{cases}, \quad (13)$$

式中: Δv_1 与 Δv_3 表示中间传感器 2 与两侧的传感器 1、3 的同一匹配点在图像行数的差值, 其与采集频率 f 的比值反映不同传感器采集到同一点之间的时间差。将式(13)代入标定好的多传感器成像方程, 物点坐标即可根据最小二乘法求解。运动条件理想的情况下,

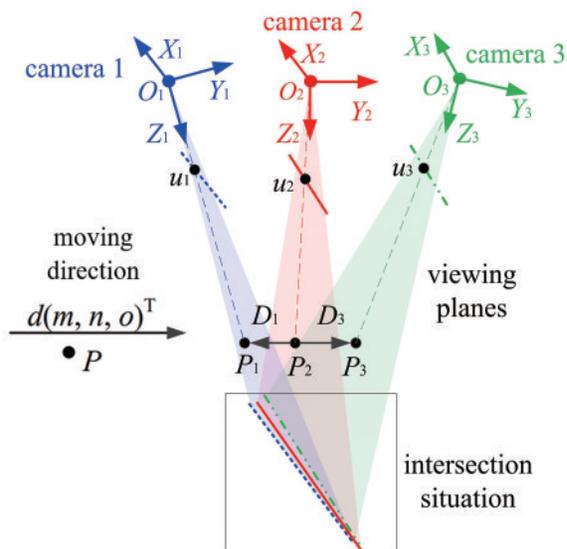


图 12 系统模型^[49-50]

Fig. 12 System model^[49-50]

Liao 等的方法三维重建标准平面的均方根误差可以达到 0.015 mm, 这与非共面传感器极线的精密计算和融合传感器异步采集信息的 3D 坐标求解密不可分。

德国 MVTec 软件公司的 Steger 等^[51-52]更换思路, 没有进行复杂的极线参数计算, 而是在远心镜头的辅助下实现极线校正, 即校正极线为一条理想的直线, 为后续的快速图像匹配提供支撑。他们指出, 普通镜头的一维图像传感器在随机布局下的极线难以严格校正, 而采用远心镜头可以将被测物体平行投影到图像中, 若能够确保传感器和物体以恒定速度进行线性相对运动, 则极线也是相互平行的, 只需旋转图像令极线水平、缩放图像使极线等距、平移图像令极线行数一致即可实现极线校正。可依靠立体视觉方法对经过校正的图像快速计算视差, 重建三维形貌。Steger 等的研究中未给出定量的精度评价, 但可观察到电路板的细节特征被高分辨率精密重建。

5 运动误差补偿

连续运动状态下的形貌测量容易因相对运动引入误差, 常依赖于高精度移动平台与理想的测量环境。为了进一步扩充应用场景, 提高系统的灵活性和实用性, 运动误差的补偿成为重要问题。

5.1 基于运动状态信息的误差补偿

减小运动误差最直接的方法是测量运动状态, 加以运动补偿。Hu 等^[34]的研究中给移动平台添加编码器, 这样能够反映运动速度变化, 调整采集频率, 减小一维图像传感器形貌测量的失真。孙博^[72]采用 T-mac 和 inertial measurement unit (IMU) 融合的方式为点云拼接提供高频率高精度定位信息, 该方法不仅能够用于运动误差的控制, 也为系统摆脱高精度移动平台、实现自由移动下的高精度测量打下基础, 扩充应用场景。在自由移动的小车上进行了标准平面的测量, 通过 T-mac 和 IMU 获取运动信息, 最终三维重建的均方根误差为 0.182 mm。

现阶段, 关于一维图像传感器的研究有待完善, 相应的运动误差补偿方法较为稀缺。然而, 一些类似的形貌测量系统, 例如线结构光二维图像传感器扫描系统、激光轮廓扫描系统, 在测量运动状态、补偿运动误差方面的应用更为广泛, 对一维图像传感器测量系统具有重要借鉴意义。占栋等^[73]对运动状态下线结构光轨道形貌测量的振动补偿问题进行了研究, 对获取的钢轨点云轮廓与标准钢轨轮廓进行对比和匹配, 利用轨腰曲线固有特征信息, 计算车辆的振动状态, 并进行振动补偿。马子骥等^[74]的研究同占栋的研究类似, 根据标准钢轨轮廓补偿多线结构光视觉扫描系统的振动误差, 并提出了基于分层逐步逼近的配准方法, 解决了轨腰圆弧难以精确定位的问题。同样面向轨道测量领域的还有薛鹏等^[75]的研究, 利用双目相机拍摄钢轨半断面轮廓线, 用于跟随轨道特征点, 根据轨道特征点变

化值计算出车体相对轨道的运动偏移,减少运动误差对钢轨检测数据的影响。Yin 等^[76]针对自由移动下的线结构光形貌测量系统,提出了一种基于双目视觉的扩展正交迭代定位算法,实现了对运动过程中系统位姿的精确解算,防止自由移动对测量精度的严重影响,最终获得的点云均方根误差小于 0.5 mm。类似地, Ayaz 等^[77]采用 IMU 视觉组合导航技术,该技术为结构光形貌测量系统提供运动状态信息。相关的市场化产品也可以提供有价值的思路,如 HandySCAN 3D 设备在获取结构光测量数据的同时,捕获全局控制点获取位姿状态; T-scan 设备在进行激光轮廓扫描的同时,通过 T-cam 设备得到运动信息。虽然以上方法具有重要的参考价值,但是推广到基于一维图像的延展表面高分辨率测量系统时,仍要面对测量频率提升、累积误差抑制、应用场景扩展等多方面的挑战,有待研究者进一步的探索。与此同时,激光测振仪、倾角仪、陀螺仪等仪器也在迅速发展,尤其是激光测振仪^[78],具有时间与空间分辨率高、非接触式测量等优点,为基于一维图像测量中的运动状态变化监测提供新的思路,为未来进一步实现运动误差的补偿提供有力的支撑。

5.2 面向点云的运动误差优化

运动状态测量难免具有误差和分辨力限制,微小振动的处理仍是挑战。Liao 等^[50]进一步提出了一种运动误差处理方法,该方法无需获取具体的运动状态信息,而是利用一维图像传感器多视角观测结果对点云进行进一步的优化。Liao 等的方法需要多个一维图像传感器前后排列,先根据多目视觉原理和大致运动信息计算点云坐标,再通过高斯牛顿优化方法对多视角结果进行单点逐一优化。Liao 等把单位时间内的每个点的运动向量作为待优化量,通过迭代的方式使测量点经过运动后尽可能投影到不同传感器的视平面上,即重投影误差的平方和最小,利用导轨的运动误差对校正方法的效果进行了评定。已知导轨的运动误差很小,难以进行精确的测量与补偿,采用 Liao 等的点云优化方法后,在使用普通导轨时,经过优化后的测量均方根误差从 0.063 mm 降至 0.053 mm,采用高精度的导轨时,测量均方根误差可从 0.017 mm 降到 0.015 mm。

6 研究展望

随着高铁、轨交、航空、航天等重要领域的装备性能不断提升,服役环境日益复杂/极端,装备服役状态下的常态化检测需求已进入高速增长阶段。相较于二维图像,三维点云数据深度信息丰富,测量对象与背景天然解耦,基于点云提供的更多维多分辨率特性,融合智能化技术进行深入挖掘分析,可进一步实现对复杂场景的准确理解感知,帮助工程运维人员更敏锐地捕捉装备运行状态的真实细微的变化,有效排除微裂纹、

损伤等潜在安全隐患。因此,未来可延展表面测量在不断提升性能的同时,将进一步面向装备服役等复杂场景,聚焦现场适应性、灵活性、多传感器融合及多维数据智能分析等方面,可能的发展方向如下。

1) 原理创新与测量性能提升。细节信息的高分辨率重建离不开高测量精度,设备动态运行的环境离不开高测量速度。未来提升精度的具体措施可能包括:完善一维图像匹配方法,减少误匹配;深入剖析不同系统布局下的测量理论,增加观测数量,改善系统结构;分析运动误差补偿方法,减小运动对精度的影响;采用外部基准特征提供精度参考,矫正点云。提升测量速度的举措可包括:完善高速投影技术,研制高亮度光源;研究并完善匹配方法和系统架构,提高 3D 点云计算速度。

2) 现场适应能力增强。大型列车、飞机等工业产品具备复杂曲率或复杂光学特性的表面^[79],连续性动态扫描的应用场景不允许曝光参数的多次改变与重复往返。未来提高现场适应能力的措施可包括:可靠的特征识别方法或相位展开算法;有效的被测物与背景分离方法;多光谱采集扩充图像信息或测量动态范围。

3) 延展自由度增加。目前相对运动的实现主要依靠高精度导轨,限制了测量方法应用场景的扩展。随着机器人、智能车、无人机等运动载体发展,提高延展自由度将成为重要需求,改进措施可包括:完善运动误差补偿方法;通过增加观测数据优化点云等。

4) 多维数据融合与智能分析。目前,机器学习主要集中在图像,目标的识别与检测缺乏鲁棒性,且难以进行定量评估,使得飞机、铁轨、隧道检测仍需要耗费大量人力。延展表面形貌测量所获取的高密度点云信息丰富,但分析处理过程缓慢、繁琐。未来研究可致力于三维点云与二维图像的同步获取、机器学习技术与点云和图像的高效结合,为可靠、精确、快速的自动化缺陷检测提供帮助。

7 结 论

延展表面高分辨率形貌测量在以高铁、飞机、隧道为代表的机械装备在役测量领域显现出重要应用价值,但高速、连续、高密度等测量需求对传统的基于光电传感和视觉成像的非接触式测量方法提出挑战。一维图像传感器能够在连续运动状态下高频快速扫描并兼顾轨迹法向和切向的高分辨率,以优秀的硬件潜力于近年来得到广泛关注。详细综述了基于一维图像的延展表面高分辨率形貌测量方法及所涉及的参数标定、一维图像匹配、多传感器布局与同步、运动误差补偿等关键技术,并指出未来的研究方向。目前成果与后续发展都将推动延展表面高分辨率测量在航空航天、轨道交通、船舶建造等国民经济重点领域发挥重要价值。

参 考 文 献

- [1] Saadat M, Cretin L. Measurement systems for large aerospace components[J]. *Sensor Review*, 2002, 22(3): 199-206.
- [2] Zhang B, Yao B G, Ke Y L. A novel posture alignment system for aircraft wing assembly[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2009, 10(11): 1624-1630.
- [3] Pugliese R, Konrad T, Abel D. LiDAR-aided relative and absolute localization for automated UAV-based inspection of aircraft fuselages[C]//2021 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), September 23-25, 2021, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2021.
- [4] 刘常杰, 杨学友, 郝继贵, 等. 基于工业机器人白车身柔性坐标测量系统研究[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(2): 207-210.
Liu C J, Yang X Y, Zhu J G, et al. Flexible coordinate measurement system based on industrial robot for car body-in-white[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(2): 207-210.
- [5] Zhang D H, Liang J, Guo C. Photogrammetric 3D measurement method applying to automobile panel[C]//2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), February 26-28, 2010, Singapore. New York: IEEE Press, 2010: 70-74.
- [6] 黄若波, 张杰. 基于全站仪和船舶 3D 设计系统的三维精度测量技术研究[J]. *造船技术*, 2011(4): 14-16.
Huang R B, Zhang J. Research on 3D precision measurement technology based on total station and ship 3D design system[J]. *Marine Technology*, 2011(4): 14-16.
- [7] 申玫, 管官. 一种船体分段测量点云自动匹配的算法[J]. *造船技术*, 2011(4): 17-18, 32.
Shen M, Guan G. An algorithm for automatic matching of point clouds in hull segmentation measurement[J]. *Marine Technology*, 2011(4): 17-18, 32.
- [8] Harding K. Engineering precision[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(11): 667-669.
- [9] Xiong Z M, Li Q Q, Mao Q Z, et al. A 3D laser profiling system for rail surface defect detection[J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1791.
- [10] Yang X L, Zhou T R, Wang L M. Reverse engineering application in automobile parts design[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 194/195/196: 2216-2219.
- [11] 阴雷, 王向军, 秦贯宇. 基于视觉结构光的大型曲面动态测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131202.
Yin L, Wang X J, Qin G Y. Dynamic measurement method of large-scale surface based on visual structured light technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131202.
- [12] Swinkels B L. High accuracy absolute distance metrology[J]. *Applied Sciences*, 2006, 621: 23.
- [13] Zhang H L, Ren Y J, Liu C J, et al. Flying spot laser triangulation scanner using lateral synchronization for surface profile precision measurement[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4405-4412.
- [14] Wei Z Z, Zhou F Q, Zhang G J. 3D coordinates measurement based on structured light sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 120(2): 527-535.
- [15] 占栋. 线结构光视觉测量关键技术及在轨道交通巡检中应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Zhan D. Research on key techniques of line-structured light vision measurement and its applications in railway dynamic inspection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [16] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 224-231.
- [17] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977.
- [18] 韩慧妍. 基于双目立体视觉的三维模型重建方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
Han H Y. Research on 3D model reconstruction method based on binocular stereo vision[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [19] 侯天龙. 基于结构光的高铁白车身装配质量检测 and 评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
Hou T L. Inspection and evaluation of assembly quality of high-speed train BIW based on structured light[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [20] 李清泉, 毛庆洲. 道路/轨道动态精密测量进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1734-1741.
Li Q Q, Mao Q Z. Progress on dynamic and precise engineering surveying for pavement and track[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1734-1741.
- [21] Buckhorst A F, Kluge-Wilkes A, Schmitt R H. Flying metrology and defect identification for aircraft surface inspection[J]. *Photonics Views*, 2019, 16(1): 68-71.
- [22] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 214-228.
Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 214-228.
- [23] 杨守瑞. 大型构件复杂曲面自动化测量方法与技术[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Yang S R. Method and technology for robotic measurement of complex surface on large-scale components[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [24] 刘涛. 面向汽车复杂零部件的自动化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Liu T. Research on key technologies for automated measurement of automotive complex parts[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [25] 张利斌, 王培俊, 张骁, 等. 高铁钢轨的三维结构光检测及视角优化研究[J]. *机械设计与制造*, 2016(4): 69-72.
Zhang L B, Wang P J, Zhang X, et al. Research on 3-D structured light rail detection of high speed railway and viewpoint optimization[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(4): 69-72.
- [26] 王克贤. 基于线阵相机的大尺寸砂轮表面形貌快速全场

- 测量方法[D]. 泉州: 华侨大学, 2018.
- Wang K X. Fast full field measurement method of large size grind wheel surface topography based on line array camera[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.
- [27] 赵运德. 基于线阵相机的车载式路面破损自动检测系统的研究与开发[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- Zhao Y D. Research and implement of vehicle-mounted automatic pavement distress detection system based on line-scan camera[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [28] 褚天舒, 郑树彬, 彭乐乐, 等. 轨道扣件的图像采集与振动补偿方法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(1): 223-227, 232.
- Chu T S, Zheng S B, Peng L L, et al. Image acquisition and vibration compensation method of track fasteners[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(1): 223-227, 232.
- [29] Zhao J, Zhou Y, Zhao J W, et al. Mover position detection for PMSLM based on line-scanning fence pattern and subpixel polynomial fitting algorithm[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(1): 44-54.
- [30] 王艳, 袁峰, 姜宏, 等. 基于三线阵 CCD 空间目标的高精度位姿解算[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515004.
- Wang Y, Yuan F, Jiang H, et al. High precision pose calculation of space target based on three linear array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515004.
- [31] 王雪平. 基于稀少控制点的资源三号影像几何纠正研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- Wang X P. Geometric rectification for ZY-3 image with sparse control points[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [32] Hu E Y, He Y M. Surface profile measurement of moving objects by using an improved π phase-shifting Fourier transform profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 57-61.
- [33] Denkena B, Huke P. Development of a high resolution pattern projection system using linescan cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7389: 73890F.
- [34] Hu E Y, Zhu Y H. 3D online measurement of spare parts with variable speed by using line-scan non-contact method[J]. Optik, 2013, 124(13): 1472-1476.
- [35] Zhang P C, Takeda T, Toque J A, et al. A line scan camera based stereo method for high resolution 3D image reconstruction[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9018: 901807.
- [36] Zhang P C, Jay Arre T, Ide-Ektessabi A. A line scan camera-based structure from motion for high-resolution 3D reconstruction[J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(5): 656-663.
- [37] Wu S, Liu Z, Ren Y, et al. A novel stereo vision sensor for fast moving objects[C]//Proceedings of the International Conference on Machine Vision and Applications, April 23-25, 2018, Singapore. New York: ACM Press, 2018: 41-45.
- [38] Liu Z, Wu S N, Wu Q, et al. A novel stereo vision measurement system using both line scan camera and frame camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3563-3575.
- [39] Ilchev T, Liliensblum E, Joedicke B, et al. A stereo line sensor system to high speed capturing of surfaces in color and 3D shape[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications and International Conference on Information Visualization Theory and Applications, February 24-26, 2012, Rome, Italy. Setúbal: SciTePress, 2012: 809-812.
- [40] Liliensblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3d surface reconstruction with a stereo line-scan system[C]//2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, May 12-15, 2014, Montevideo, Uruguay. New York: IEEE Press, 2014: 1171-1176.
- [41] Liliensblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3-D surface reconstruction with a stereo line-scan system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(5): 1258-1266.
- [42] Liliensblum E, Al-Hamadi A. Pattern optimization for 3D surface reconstruction with an active line scan camera system[C]//2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 7-10, 2018, Athens, Greece. New York: IEEE Press, 2018: 3159-3163.
- [43] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Sensor for in-motion continuous 3D shape measurement based on dual line-scan cameras[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1949.
- [44] Yang L H, Sun B, Liao R Y, et al. A stereo line-scan system for 3D shape measurement of fast-moving objects[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10621: 106210A.
- [45] Liao R Y, Yang L H, Ma L Y, et al. A dense 3-D point cloud measurement based on 1-D background-normalized Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5014412.
- [46] Holländer B, Štolc S, Huber-Mörk R. Multi-view line-scan inspection system using planar mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8791: 879118.
- [47] Štolc S, Soukup D, Holländer B, et al. Depth and all-in-focus imaging by a multi-line-scan light-field camera[J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(5): 053020.
- [48] Blaschitz B, Štolc S, Antensteiner D. Geometric calibration and image rectification of a multi-line scan camera for accurate 3D reconstruction[J]. Electronic Imaging, 2018, 30(9): 240.
- [49] Liao R Y, Ma L Y, Yang L H, et al. Dense three-dimensional point continuous measurement based on triple line-scan cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 12030: 12030.
- [50] Liao R Y, Yang L H, Ma L Y, et al. In-motion continuous point cloud measurement based on bundle adjustment fused with motion information of triple line-scan images[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21544-21567.
- [51] Steger C, Ulrich M. A multi-view camera model for line-scan cameras with telecentric lenses[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2022, 64(2): 105-130.
- [52] Steger C, Ulrich M. A camera model for line-scan cameras with telecentric lenses[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(1): 80-99.
- [53] 王澜, 孙博, 隆昌宇, 等. 一种基于共线特征点的线阵

- 相机内参标定方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1878-1883.
- Wang L, Sun B, Long C Y, et al. A novel method for calibrating intrinsic parameters of linear array cameras based on collinear feature points[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1878-1883.
- [54] 王国珩, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.
- Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
- [55] Horaud R, Mohr R, Lorecki B. On single-scanline camera calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 71-75.
- [56] Zhuang H, Horaud R. A note on "On single-scanline camera calibration" [and reply][J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 470-471.
- [57] Luna C A, Mazo M, Lazaro J L, et al. Calibration of line-scan cameras[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(8): 2185-2190.
- [58] Lilenblum E, Al-Hamadi A, Michaelis B. A coded 3D calibration method for line-scan cameras[M]//Weickert J, Hein M, Schiele B. Pattern recognition. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2013, 8142: 81-90.
- [59] Li D D, Wen G J, Bing W H, et al. Cross-ratio invariant based line scan camera geometric calibration with static linear data[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 62: 119-125.
- [60] Li D D, Wen G J, Qiu S H. Cross-ratio - based line scan camera calibration using a planar pattern[J]. Optical Engineering, 2016, 55(1): 014104.
- [61] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Calibration of line-scan cameras for precision measurement[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6836-6843.
- [62] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Stereo line-scan sensor calibration for 3D shape measurement[J]. Applied Optics, 2017, 56(28): 7905-7914.
- [63] Niu M H, Song K C, Wen X, et al. The line scan camera calibration based on space rings group[J]. IEEE Access, 2018, 6: 23711-23721.
- [64] Liao R Y, Zhu J G, Yang L H, et al. Flexible calibration method for line-scan cameras using a stereo target with hollow stripes[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 113: 6-13.
- [65] Usamentiaga R, Garcia D F, de la Calle F J. Line-scan camera calibration: a robust linear approach[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9443-9453.
- [66] Drarèni J, Roy S, Sturm P. Plane-based calibration for linear cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(2): 146-156.
- [67] Hui B W, Zhong J R, Wen G J, et al. Determination of line scan camera parameters via the direct linear transformation[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 113201.
- [68] Hui B W, Wen G J, Zhang P, et al. A novel line scan camera calibration technique with an auxiliary frame camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(9): 2567-2575.
- [69] 秦强, 张翔宇, 郭翔, 等. 基于数字图像的高温光学变形测量方法研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10): 1-11.
- Qin Q, Zhang X Y, Guo X, et al. Research on high temperature optical deformation measurement method based on digital image[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 1-11.
- [70] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631-652.
- Zheng T X, Huang S, Li Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652.
- [71] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 102: 70-91.
- [72] 孙博. 运动状态下高密度点云获取方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- Sun B. Research on In-motion high-density point cloud acquisition method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [73] 占栋, 于龙, 肖建, 等. 钢轨轮廓全断面高精度动态视觉测量方法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 96-106.
- Zhan D, Yu L, Xiao J, et al. Study on high-accuracy vision measurement approach for dynamic inspection of full cross-sectional rail profile[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 96-106.
- [74] 马子骥, 董艳茹, 刘宏立, 等. 基于多线结构光视觉的钢轨波磨动态测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 189-197.
- Ma Z J, Dong Y R, Liu H L, et al. Rail corrugation dynamic measurement method based on multi-line structured-light vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 189-197.
- [75] 薛鹏, 柴晓冬, 郑树彬. 基于视觉的车辆与轨道相对振动状态测量方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 39-41, 45.
- Xue P, Chai X D, Zheng S B. Research on relative vibration state measurement method of vehicle and rail based on vision[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(1): 39-41, 45.
- [76] Yin L, Wang X J, Ni Y B. Flexible three-dimensional reconstruction via structured-light-based visual positioning and global optimization[J]. Sensors, 2019, 19(7): 1583.
- [77] Ayaz S M, Kim M Y. Multiview registration-based handheld 3D profiling system using visual navigation and structured light[J]. International Journal of Optomechanics, 2017, 11(1): 1-14.
- [78] 朱磊磊, 马颢, 马修水, 等. 三维激光多普勒测振仪研究[J]. 电子世界, 2021(4): 52-53.
- Zhu L L, Ma X, Ma X S, et al. Research on three-dimensional laser Doppler vibrometer[J]. Electronics World, 2021(4): 52-53.
- [79] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
- Zhang Z H, Liu W, Liu G D, et al. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(6): 1483-1502.