

5G 电源模组高精度 3D 结构光测量技术



High-Precision 3D Structure Optical Measurement Technology for 5G Power Modules

邓芳伟/DENG Fangwei, 黄石军/HUANG Shijun

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20241031.1811.002.html>

网络出版日期: 2024-11-01

收稿日期: 2024-08-06

摘要: 提出了多视角大景深高精度 3D 视觉传感技术。运用高清数字光处理 (DLP) 结构光投影技术和高速高分辨工业相机, 从板级集成电路设计、控制驱动软件研发、3D 点云重建与处理算法等方面深入研究, 自主研发亚微米级/低成本多视角大景深高精度 3D 视觉测量技术。主要包括: 采用高分辨率、高帧率的工业摄像机, 实现高精度的三维重建; 采用多波长相位扩展法, 实现高精度的相位计算; 利用多工业摄像机解决视场隐藏, 扩大了三维重构视场, 最终实现了 0.48 μm Z 轴的重复精度。

关键词: 多视角; 三维重建; 多波长相位扩展法

Abstract: The multi-angle large-field-depth high-precision 3D visual sensing technology is proposed, which uses the high-definition digital light processing (DLP) structure light projection technology and high-speed high-resolution industrial camera to conduct in-depth research on board-level integrated circuit design, control drive software R&D, and 3D point cloud reconstruction and processing algorithms, and independently develops sub-micron-level/low-cost high-precision 3D visual measurement technology. High-resolution and high-frame-rate industrial cameras are used to achieve high-precision 3D reconstruction. The multi-wavelength phase spread method is used to implement high-precision phase calculation. Multi-industrial cameras are used to hide the field of view, expanding the three-dimensional reconstruction of the field of view, and finally achieving the repetition accuracy of the 0.48 μm Z axis.

Keywords: multi-perspective; three-dimensional reconstruction; multi-wavelength phase spread method

引用格式: 邓芳伟, 黄石军. 5G 电源模组高精度 3D 结构光测量技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 75-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405011

Citation: DENG F W, HUANG S J. High-precision 3D structure optical measurement technology for 5G power modules [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 75-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405011

1 背景概述

随着以手机、智能穿戴设备为代表的 3C 电子高端制造业的迅猛发展, 传统“光源+镜头+2D 工业相机”的机器视觉检测方式对精密零件的空间尺寸、平面度、段差、表面质量关键指标参数的获取难以实现。3D 视觉检测技术成为高端制造行业产品品质提升的关键之一。然而, 目前市场上已有的 3D 视觉检测设备仍不能很好地满足 3C 电子高端制

造行业的检测需求。

在现有 5G 电源模组测量工艺中, 大多使用 2D 相机进行平面测量, 其中测量的尺度主要为芯片尺寸、位置以及整体的缺漏, 但是对于电源模组中的一些插针并没有很好的测量方案, 往往依靠人工借助仪器观看和经验判断来评判插针高度是否一致, 以及是否需要修正和调整。为此, 在主要的 5G 电源模组生产线中, 插针的高度往往不能被很好地测量出来。通常情况下, 装配的误差和运输中的磕碰经常会导致插针产生高低不平整, 没有被检出的模组会进一步导致后面的工序受到影响。因此, 电源模组的生产良品率将会受到较大影响。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB328200、2010CB328201); 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA01Z257); 国家自然科学基金项目 (60602058、60572120); 国家科技重大专项 (2009ZX03003-002-02)

2 解决方案

业界针对3D机器视觉测量技术进行了探索研究。文献[1]使用了时间编码的结构光系统来获得精确的3D测量数据。这项工作考虑了构成结构光系统的相机和投影仪中的镜头畸变。所提出的方法可以实现大约1 mm的平均误差。此外，多视角结构光系统也很受欢迎。文献[2]提出了一种基于立体视觉的3D测量方法，以实现自动测量系统，将测量精度提高到大约0.1 mm。文献[3]提出了一种将两个任意相机组合成一个系统的方法，每个组合都可以将数据生成到通用坐标系中。这项工作进一步提高了测量精度，使测量精度达到了约0.02 mm，在3D结构光测量中使用了二进制散焦技术来加快测量速度。文献[4]结合了1D条纹调制和2D条纹调制，有助于提高效率和准确性。这种方法可以减少16.9%的测量误差^[4]。

从上述研究结果中，我们可以发现，在微米级别的3D机器视觉形状测量解决方案中，尚未有被证实的技术^[5]。高精度3D机器视觉技术的最佳结果仍然大约是1 μm，且没有进一步的突破^[6-7]。当前机器视觉领域的主流解决方案是使用单目或立体相机来重建表面。在结构光中使用多目相机来解决更大的测量视野问题仍然是一个空白领域。

为了解决5G电源模组生产线中插针的歪斜三维测量问题，我们提出了多视角大景深高精度3D视觉传感技术，运用高清数字光处理(DLP)结构光投影技术和高速高分辨工业相机，从板级集成电路设计、控制驱动软件研发、3D点云重建与处理算法等方面深入研究，自主研发亚微米级/低成本的高精度3D视觉测量技术。核心技术点如下：1) 利用多路高分辨率摄像机生成多视点图像，以保证数据处理速度，并在一定程度上解决了点云数据单侧阴影和缺失问题。同时，利用算法优化数据冗余度和信息重叠度。2) 采用459 nm频带的高分辨率蓝光投影模块屏蔽大部分环境光，为结构化光测量系统提供亮度高、稳定可靠的测量光源。3) 采用多频四步移相法的正弦波光栅编码方案，可解开正弦波相位，避免二值化引起的相位计算误差，提高系统对表面纹理干扰的鲁棒性。

3 系统设计

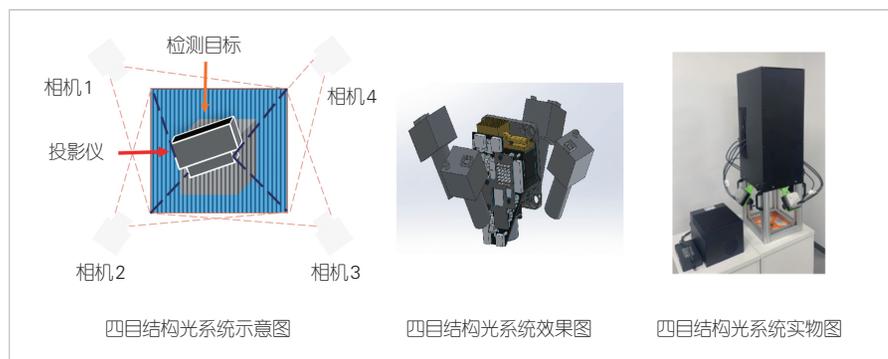
本系统采用4个16MP Basler CoaX -

Press 2.0 boA5320-150 cm 高分辨率的工业相机、1个DLP 4710模块1 080 P分辨率的投影仪。其中，DLP模块可以达到120 Hz的投影频率。在实测情况下，为了使摄像机的视场覆盖物体，重叠视场要大于物体，4个摄像机都能生成物体的图像，我们设计了一个多视角系统，并使用SolidWorks模拟重叠视场，找到最佳测量点。3D测量系统和仿真结果如图1所示。

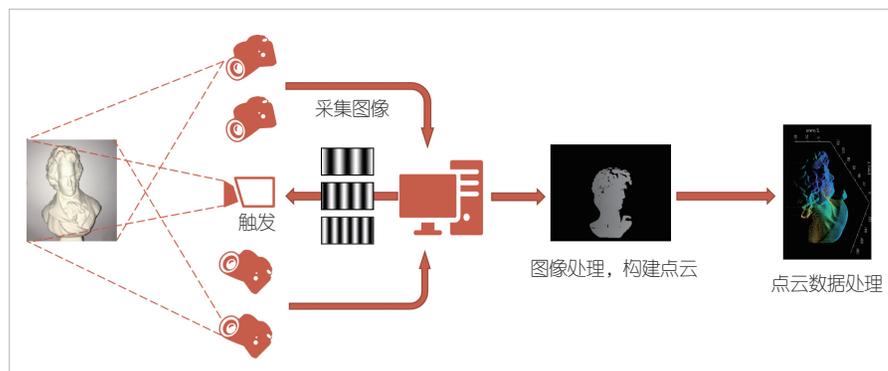
- 1) 4个相机部署在同一水平高度，光心都聚焦在检测物体的中心，达到相机重叠区域最大化；
- 2) DLP投影仪垂直向下部署，向检测物体表面投出不同纹路图案；
- 3) 工控机提供信号控制和数据接口，一方面触发投影仪和相机拍摄，另一方面获取相机采集的图像数据；
- 4) 在采集区域提供水平面板，用于放置检测物体，确保位姿水平，符合拍摄要求。

4 工作流程

图2显示了这一系统的主要工作流程。一旦将测试对象置于系统的测量视野范围内，就会触发工控机执行测量程序。投影仪拍摄一组连续正弦曲线，并同时触发摄像机。触发的摄像机捕捉图像，并将其发送到工控机以进行进一步处



▲图1 系统设计图



▲图2 工作流程示意图

理。系统利用校准参数和处理后的图像，以点云的形式重建测试对象。

1) 系统准备：根据实际需要利用多相机系统，从不同视角准确捕获条纹图像，利用投影仪生成清晰、对比度适中的正弦条纹图。

2) 摄像机标定：通过摄像机标定来建立有效的成像模型，求解出摄像机的内外参数。这些参数包括焦距、光心（内参数），以及相机的位置、姿态（外参数）。

3) 生成正弦条纹图：使用计算机编程生成一系列具有特定相位差（如 $\pi/2$ ）的正弦条纹图。这些条纹图将用于后续的投影。

4) 投影正弦条纹：将生成的正弦条纹图依次投影到被测物体上。投影仪需要按照预定的顺序和相位差投影条纹，以确保后续能够准确提取相位信息。

5) 拍摄条纹图像：使用4个相机从不同的视角拍摄目标场景或物体，获取二维图像序列。这些图像需要覆盖目标物体的各个侧面，以便后续能够从中提取足够的三维信息。

6) 相位提取：从每个视角的条纹图像中提取相位信息，对相位进行解包裹处理以获得连续的相位分布图。

7) 相位匹配：将不同视角的相位分布图进行匹配，建立相位点之间的对应关系。

8) 三维重建：利用相位差与物体高度之间的数学关系（如三角测量原理）计算出被测物体上各点的高度信息，将计算出的高度信息与二维图像坐标相结合生成被测物体的三维点云数据。

5 技术思路

如图3所示，系统主要由硬件搭建、参数标定、点云构建、点云处理、点云配准5个模块组成，各模块功能如下：

1) 硬件搭建主要负责相机、结构光投影仪、工控机、数据线、采集卡、标定板等设备的选型和组装，以及标定和调试等工作。它是实现3D视觉测量的基础，其意义在于提供高质量的图像数据，从而实现精准的三维测量。正确选择和优化可以提高测量的精度和效率，同时也可以为不同应用场景提供定制化的解决方案。

2) 参数标定用于确定相机和激光扫描仪等设备的内部和外部参数，以便进行准确的三维测量。这通常包括两个方面：相机内部参数标定和外部参数标定。其中，相机内部参数标定主要是指确定

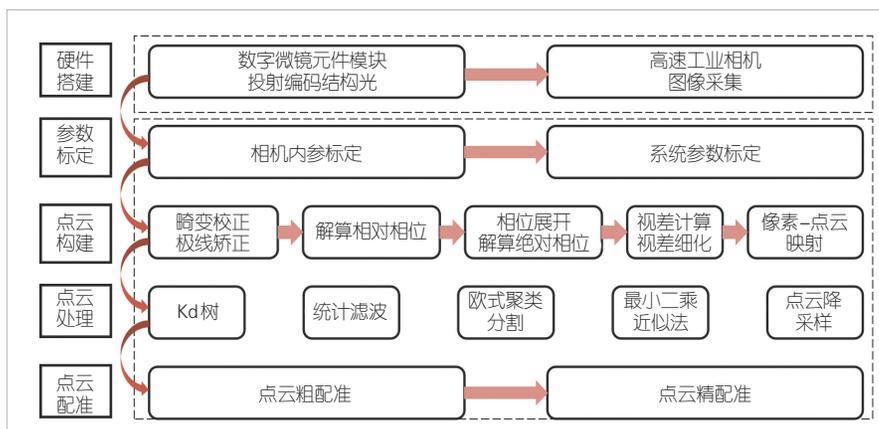
相机的焦距、畸变等参数，这些参数会影响到相机成像的精度和质量；外部参数标定则是指确定相机的位置和姿态等参数。正确的参数标定可以消除设备本身的误差，从而实现更加准确的三维测量。

3) 点云构建是指将三维场景或物体表面的离散点数据转换成点云模型的方法。使用工业相机和结构光进行扫描和捕获物体表面图像信息，采用相移法生成点云数据。点云构建包括：

- 畸变矫正主要针对由于设备运动或采集过程中产生的点云数据变形问题；
- 极线矫正主要用于解决由于相机内外参数不一致导致的左右视图对应点不在同一水平线上的问题；
- 解算相对相位的目的在于提取和分析信号或波之间的相位差异，这种差异通常包含了关于被测对象的重要信息；
- 相位展开恢复被折叠或包裹的相位信息到其真实、连续的数值范围；
- 视差计算通过测量和计算不同观测点对于同一目标的观测差异，来推断或确定目标物体与观测者之间的距离；
- 像素点云映射将三维空间中的点云数据映射到二维图像平面上，以便进行进一步的图像处理和分析。

4) 点云处理是对采集到的点云数据进行处理和分析的过程，目的是提取有用的信息并将其转换为可视化或数字模型。点云处理包括数据表示、统计滤波、欧式聚类分割、MLS、点云降采样等功能。

- 数据表示是指利用存储 k 维空间向量点集并进行快速检索的树形数据结构；
- 统计滤波通过测量数据的局部统计特征来消除噪声或提取特定的特征；
- 欧式聚类分割将无序的点云数据根据空间中的几何特



▲图3 系统架构

征和密度分布分割成多个有意义的簇或群组；

- MLS通过局部加权最小二乘方法，对离散数据点进行曲面拟合；

- 点云降采样减少点云中的点数，从而显著降低数据量。

5) 点云配准是将多个点云数据对齐到同一个坐标系中的过程，以便进行后续处理和分析。粗配准是在两个点云之间的变换完全未知的情况下进行的较为粗糙的配准，目的是为精配准提供一个较好的变换初值。利用随机参数估计算法通过随机采样和一致性检验来估计数学模型的参数，处理包含大量噪声和离群点的数据。

精配准是在粗配准的基础上，进一步计算两个点云之间的精确旋转和平移矩阵。利用迭代最近点 (ICP) 算法，通过迭代优化的方式，逐步最小化对应点对之间的误差，从而实现对齐。

6 关键技术

1) 四步相移法

投影模组生成具有一定相移的正弦光栅条纹图，相机将同步拍摄这一组光栅图像^[8]。由于物体表面的高度变化，投射的光栅图案会发生扭曲，这种扭曲实质上反映了物体表面的相位信息。四步相移法通过精确控制投影图案的相位变化，并记录相应的干涉图像，从而实现物体表面相位信息的精确测量。通过分析具有一定相位差的多幅光栅图像，解算出被测物表面形貌数据的相位初值。通过正确的相位初值和更多的编码图案进行相位展开，得到在图像画面范围内的无歧义绝对相位值^[9]。通常带有相移的光强可以表示为：

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \delta]。 \quad (1)$$

其中， I_n 为光强函数， A 为背景光强， B 为条纹的调制幅值， $\Phi(x, y)$ 点对应的相位， δ 为移动相位值，采用四步相移法，其相移步距为： 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ ，则光强表达式依次是：

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y)], \quad (2)$$

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \pi/2], \quad (3)$$

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \pi], \quad (4)$$

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + 3\pi/2]。 \quad (5)$$

通过对四幅不同相移的光栅图像进行相位提取，可以使用公式 (6) 完成对相位主值的计算^[10]：

$$\Phi(x, y) = \arctan((I_2 - I_4)/(I_1 - I_3))。 \quad (6)$$

由此可以得到在图像中呈周期变化的相位主值。但由于单一频率所得到的相位主值并不能完全覆盖整幅图像的像素分布，这会导致不同位置的像素可能具有相同的相位主值，因此还需要对相位主值进行展开，通过展开周期变化的相位主值得到能包裹整幅图像的绝对相位。具体步骤如下：

- 投影相位图案：投影仪首先投射一个初始相位为0的正弦光栅图案到物体上。随后，依次改变投影图案的相位，每次增加 $\pi/2$ ，直到完成4个相位状态 ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) 的投影。

- 图像捕获：相机在每个相位状态下捕获一幅图像，共得到4幅干涉图像。这些图像包含了由于物体表面高度变化而引起的光栅图案扭曲信息。

- 相位计算：通过算法处理这4幅干涉图像，计算出它们之间的相位差。常用的算法包括傅里叶变换法、相移算法等。这些算法能够利用图像中的光强信息反推出相位信息，从而得到物体表面的相位分布图。

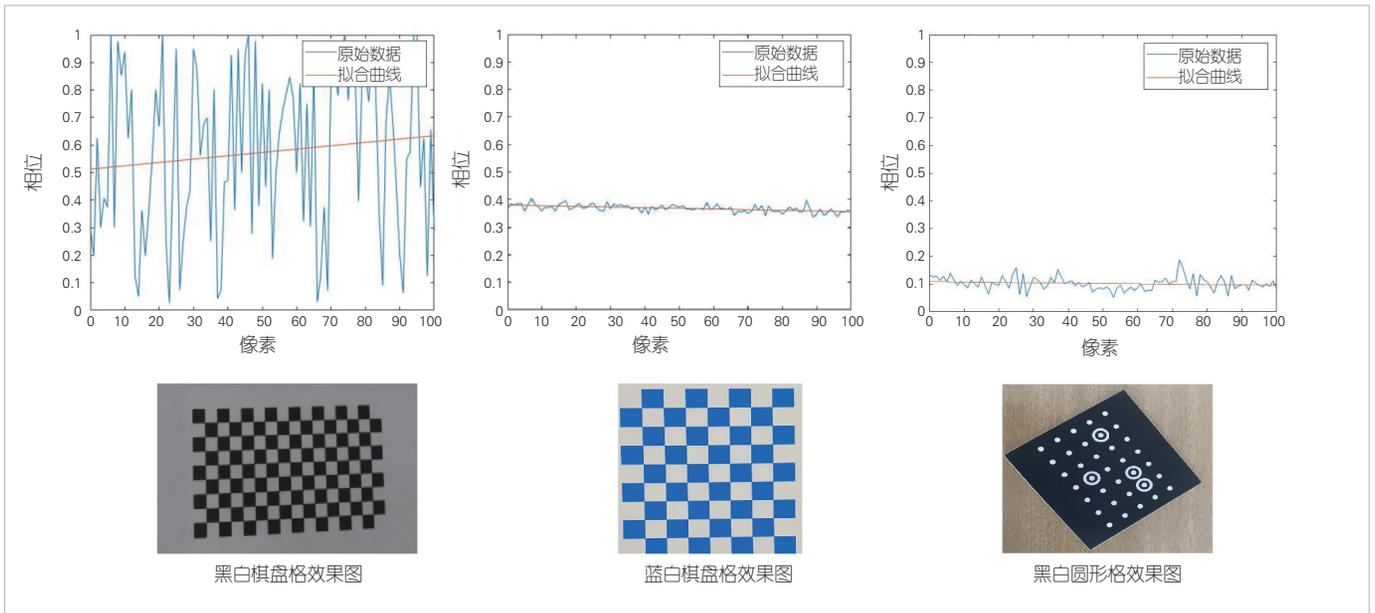
- 三维重建：根据得到的相位分布图以及投影仪、相机和物体的几何关系，利用数学方法计算出物体表面的三维坐标。这一步骤通常需要结合标定好的系统参数和相机成像模型进行。

2) 结构光系统标定模型

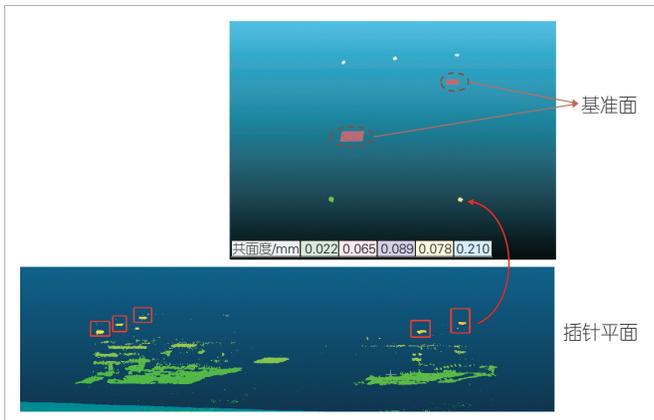
在校准方法中，目前主流使用的是张式校准方法^[11]，具备稳定性和鲁棒性。但这种方法也有缺点，因为结构光系统在校准过程中，采用投影方式来进行校准，棋盘校准板一般需要放置在4个角落，如果棋盘校准板被正弦曲线覆盖，那么当放置在角落时，特征很难被准确地从曲线中提取出来。改进的校准方法是用圆校准板代替棋盘，因为圆点与背景是分开的。这样，无论投影的模式是否存在，圆点都很容易提取。黑白棋盘格相位误差为：0.302 弧度，蓝白棋盘格相位误差 0.13 弧度，黑白圆形格相位误差 0.024 弧度。图4显示，在提取角点的重投误差中，圆形校准板的性能比棋盘校准板好得多，并且黑白棋盘校准板的相位变化最大，圆形校准板的相位变化最小（理想的相位是单行恒定的）。

3) 点云处理算法

在印制电路板 (PCB) 生产过程中，有时PCB上的针脚可能因人为干扰或装配误差而偏斜，因此必须找出针脚是否垂直。为了找到PCB上的针脚的共面度，必须准确找到针脚的顶面。如图5所示，利用生成的点云数据，通过采用RANSAC算法或最小均方法拟合，从而准确得到针脚的顶面，计算所有针脚的顶面彼此之间的距离。设置最大距离和



▲图4 不同校准板的相位分布



▲图5 点云处理效果图

最小距离之间的差值可以决定针脚的共面度，其中RANSAC算法是通过随机采样数据集中的一部分点（假设为内点）来

拟合模型，然后用这个模型去测试数据集中的所有点，找出符合模型的数据点（内点），并排除不符合的数据点（外点）。通过多次迭代，算法不断寻找包含更多内点的模型，直到满足一定的条件（如迭代次数达到预设值或内点数量超过一定比例）为止。RANSAC算法的核心在于其随机性和迭代性，这使得它能够存在大量外点的情况下依然能够估计出合理的模型参数。

7 实验结果

表1显示了实际5G电源模块PCB测量结果。我们将试验结果与坐标测量机（CMM）和Mega相3D结构光照相机M051090进行比较，并进一步与实际值进行比较。实验表明，在实际测量中，采用均方根计算得出的重复性误差为0.001 mm，绝对误差为0.01 mm。测试结果如表1所示。

▼表1 测试结果

测试工件	本系统测量值/mm	本系统测量误差/mm	CMM测量值/mm	CMM 测量误差/mm	M051090 测量值/mm	M051090 测量误差/mm
PCB 1	7.226 2	0.015 15	7.258 8	0.007 81	7.296 6	0.017 21
	7.259 2		7.263 0		7.272 4	
	7.238 2		7.257 2		7.282 8	
	7.228 0		7.274 5		7.299 8	
PCB 2	7.304 9	0.040 76	7.302 8	0.030 59	7.328 9	0.044 17
	7.259 2		7.326 0		7.381 2	
	7.311 9		7.372 9		7.398 9	
	7.358 8		7.352 4		7.415 9	

CMM: 坐标测量机 PCB: 印制电路板

8 结论

本文所提系统采用高速摄像机和高速投影机实现了5G电源模组的三维重建和高精度的针脚测量应用。实验结果表明，与CMM和M051090相比，该系统的重复性和准确度都能满足实际生产要求。

该系统可以应用于3C电子制造行业的立体尺寸测量、空间精确定位引导、器件表面形状分析等高精度测量领域，具体应用包括手机中框尺寸检测、手机镜头模组胶路检测、金属配件高度测量、电池表面质量检查等。此外，该系统的相关技术成果还可以用于高端制造，例如汽车零部件的铸造件表面质量缺陷检查等。

高精度3D结构光测量技术能够实现亚微米级别的精确测量，对于需要严格控制的工业生产和科学研究至关重要。在生产过程中，企业可以利用该技术对产品进行实时、在线的测量和检测。这种实时的质量控制能够及时发现并解决潜在的质量问题，提高产品的质量和稳定性，还能够为产品设计和生产提供精确的尺寸、形状和表面粗糙度等参数，有助于企业优化产品设计、改进生产工艺，进而提升产品的市场竞争力。

在智能制造、数字化工厂等新型生产模式下，高精度3D测量技术更是发挥着关键作用。通过对工厂设备进行全生命周期测量、虚拟装配、动态模拟等操作，企业可以更好地实现生产过程的数字化和智能化。

参考文献

- [1] KUNZMANN H, TRAPET E, WÄLDELE F. A uniform concept for calibration, acceptance test, and periodic inspection of coordinate measuring machines using reference objects [J]. *CIRP annals*, 1990, 39(1): 561-564. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)61119-6
- [2] EI-HAKIM S F, BERARDIN J A, BLAIS F. Comparative evaluation of the performance of passive and active 3d vision systems [EB/OL]. [2024-08-06]. <https://core.ac.uk/outputs/24323593/>
- [3] VILAÇA J L, FONSECA J C, PINHO A M. Calibration procedure for 3D measurement systems using two cameras and a laser line [J]. *Optics & laser technology*, 2009, 41(2): 112-119. DOI: 10.1016/j.optlastec.2008.05.012
- [4] GENG J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial [J]. *Advances in optics and photonics*, 2011, 3(2): 128. DOI: 10.1364/aop.3.000128

- [5] MOTTA J M S T, DE CARVALHO G C, MCMMASTER R S. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera [J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2001, 17(6): 487-497. DOI: 10.1016/s0736-5845(01)00024-2
- [6] GALLUCCI A, ZNAMENSKIY D, et al. Prediction of 3D body parts from face shape and anthropometric measurements [J]. *Journal of image and graphics*, 2020, 8(3): 67-77. DOI: 10.18178/joig.8.3.67-74
- [7] FURUNO T, FUJITA S, WANG D H, et al. 3D bow and posture measurements for virtual reality customer service training system [J]. *Journal of image and graphics*, 2021, 9(4): 152-156. DOI: 10.18178/joig.9.4.152-156
- [8] AILANI V, PRAKASH D, VENKATESH K S. Self localization with edge detection in 3D space [J]. *Journal of image and graphics*, 2013, 1(2): 99-103. DOI: 10.12720/joig.1.2.99-103
- [9] LEE H M, CHOI W C. Algorithm of 3D spatial coordinates measurement using a camera image [J]. *Journal of image and graphics*, 2015, 3(1): 30-33. DOI: 10.18178/joig.3.1.30-33
- [10] HU H H, GAO J, ZHOU H Y, et al. A combined binary defocusing technique with multi-frequency phase error compensation in 3D shape measurement [J]. *Optics and lasers in engineering*, 2020, 124: 105806. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105806
- [11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334. DOI: 10.1109/34.888718

作者简介



邓芳伟，中兴通讯产业数字方案部产品总监；研究方向为产业数字化转型，具体包括提供行业数字底座和移动机器人以及相关配套产品。



黄石军，中兴通讯高级战略规划师；研究方向包括机器视觉、人工智能、计算机视觉。