

## 基于 AR 虚实图像注意力机制的电缆装配质量检测方法

赵甘霖<sup>1</sup>, 余畅<sup>1</sup>, 张建富<sup>1</sup>, 杨建新<sup>2</sup>, 冯平法<sup>1,3</sup>, 沈群<sup>4</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学基础工业训练中心, 北京 100084;  
3. 清华大学深圳国际研究生院先进制造学部, 广东 深圳 518055; 4. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 航天器中电缆装配在总装环节占据大量比重, 电缆装配质量直接影响着产品整机的工作性能。现有的增强现实辅助电缆装配系统缺乏对装配结果实时判断和反馈的能力, 无法识别当前装配的电缆是否符合装配质量要求。为了解决上述问题, 提出了一种基于 AR 虚实图像注意力机制的电缆装配质量检测方法, 通过构建虚拟辅助模型, 在拍摄的装配结果图像中定位检测关键区域, 过滤冗余图像信息; 进而基于 YOLOv4-Tiny 图像检测模型对电缆装配关键节点位置进行了判断, 基于计算电缆邻域平均重合度的方法求得了敷设路径的重合度, 基于相机逆投影的方法得到了电缆的弯曲半径。最后, 利用 HoloLens2 开发了基于增强现实技术的电缆装配质量检测系统, 并对设计的 4 个电缆装配案例进行了质量检测, 实验验证了本文方法及系统的可行性和有效性。

**关键词:** 电缆装配; 质量检测; 增强现实辅助装配; AR 虚实图像; 注意力机制

**中图分类号:** TP391.9; V465

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00236

## Inspection method for cable assembly quality based on AR virtual-real image attention mechanism

ZHAO Ganlin<sup>1</sup>, YU Chang<sup>1</sup>, ZHANG Jianfu<sup>1</sup>, YANG Jianxin<sup>2</sup>, FENG Pingfa<sup>1,3</sup>, SHEN Qun<sup>4</sup>

1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Fundamental Industry Training Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Division of Advanced Manufacturing, Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

4. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China

**Abstract:** Cable assembly in spacecraft occupies a large proportion in the final assembly process, and the quality of cable assembly directly affects the working performance of the whole product. The existing augmented reality-assisted cable assembly system lacks the ability to make real-time judgment and feedback on the assembly results, and cannot identify whether the currently assembled cable meets the quality requirements. In order to solve the above problems, a cable assembly quality inspection method based on AR virtual-real image attention mechanism was proposed. Critical areas in the captured images were located and detected by constructing virtual assist models to filter redundant image information. Based on YOLOv4-Tiny image detection model, the key node location of assembled cable was judged. The overlap of the laying path was obtained based on the method of calculating the average overlap of the neighborhood, and the bending radius of the cable was derived based on the method of camera inverse projection. Finally, an augmented reality-based cable assembly quality inspection system was developed using HoloLens2. The quality inspection was performed on the four designed cable assembly cases, and the feasibility and effectiveness of the method and system were experimentally verified.

**Key words:** cable assembly, quality inspection, augmented reality assisted assembly, AR virtual-real image, attention mechanism

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-20

通信作者: 张建富, zhjf@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目: 清华-东方红合作项目: 基于 AR 的电缆网总装铺设引导系统软件开发

**Foundation Item:** Tsinghua-DFH Cooperation Project: AR-based software development for cable assembly guidance system

## 1 引言

电缆是传输电流和信号、保证设备连接和运行的重要部件。在航天器产品中,各种电缆及其附件的质量占产品总质量的比例可达 20%<sup>[1]</sup>,同时电缆装配质量在很大程度上影响了产品的整体性能<sup>[2]</sup>。目前,航天器电缆装配大多采用依托二维或三维图纸的手工作业。由于操作步骤复杂,工作空间狭窄,引导方式落后,装配任务的效率和质量高度依赖于操作人员的技术水平。这种情况导致了电缆敷设的节点位置、弯曲程度、敷设走向等质量参数因人而异,给装配质量一致性保障带来了很大挑战。

随着增强现实(AR, augmented reality)技术的不断发展,增强现实辅助装配技术逐步替代传统的图纸。增强现实辅助装配是一种在装配过程中,将虚拟的特殊效果与现实世界以特定的空间关系结合起来的技术<sup>[3]</sup>。计算机模拟将物理信息(三维模型、动画、图像、视频、符号、文字等)叠加在屏幕上,使用户获得超越现实的感官体验,提高装配任务的效率和质量。20世纪90年代,波音公司<sup>[4-5]</sup>率先将AR技术用于飞机制造中的电缆安装。结合谷歌AR眼镜,波音公司开发的系统可以在操作人员的视野中显示电缆路径、文字标注信息。这种AR装配系统使装配效率提高约20%、装配精度提高约24%。空客公司<sup>[6]</sup>将AR技术应用于军用运输机的装配过程,开发了一套名为“MOON”的AR智能电缆装配引导系统,使电缆装配制造周期缩短50%。Zheng等<sup>[7]</sup>开发了一种电缆装配智能辅助系统,该系统能够识别支架的数量、类型和位置,正确读取飞机电缆的文字,从而辅助操作者高效地完成装配任务。Zhang等<sup>[8]</sup>设计了基于AR技术的电缆装配系统,该系统可以通过HoloLens将轻量化的三维电缆模型和信息按照真实的遮挡关系显示在物理环境中,引导工人完成电缆装配。陈华俊等<sup>[9]</sup>采用Vuforia平面标志以及即时定位与地图构建(SLAM, simultaneous localization and mapping)技术定位虚拟模型,并在航天器电缆装配过程中进行了应用验证,证明了增强现实装配电缆在时间上具备优势。

增强现实辅助装配技术因指令清晰、直观、易懂,在一定程度上降低了操作人员出现装配错误的概率。然而,目前大多数研究采取的装配引导方式无法给予操作者装配结果反馈信息,只能被动地显示固定的装配引导信息。这种情况导致了系统无

法判断操作者是否按照引导信息正确地完成了装配,也就无法确认装配质量是否满足检测要求。为了使系统能够在装配过程中实时判断电缆装配的结果是否正确,进一步地提升装配质量,并提供实时的纠错引导功能,利用机器视觉进行电缆装配质量检测的研究得到广泛关注。Parmar等<sup>[10]</sup>采用基于滑动窗口和轮廓检测算法检测交叉电缆走向,可以对交叉的多条电缆进行提取区分。Sun等<sup>[11]</sup>提出一种基于模拟退火算法的二维算法,能够从低对比度图像中提取电缆前景。温沛涵等<sup>[12]</sup>针对发动机软管装配问题,利用颜色分割与形状约束从复杂背景中提取软管与接头的图像。焦晨航<sup>[13]</sup>针对电缆变形检测问题,提出了有标记和无标记两种变形检测方法,实现了简单背景下较高精度的定位。为了解决平面检测不能完全反映出电缆在空间中的走向问题,有研究者尝试在平面图像的基础上结合深度信息,对电缆的空间走向进行分析。刘睿等<sup>[14]</sup>利用手指特征分割电缆图像,并结合深度数据对两指之间的电缆弯曲半径进行检测。魏焯涛<sup>[15]</sup>采用Kinectv2相机采集电缆点云,并利用贝塞尔曲线拟合电缆形状,得出电缆的空间走向信息。除电缆本身的检测外,也有不少针对电缆装配中的组件检测的研究。冒文彦<sup>[16]</sup>将基于区域的卷积神经网络(Mask RCNN, Mask region-based convolutional neural networks)应用在电缆的线夹检测上,能够准确检测出线夹是否存在装配错误。Li等<sup>[17]</sup>研究大场景下的电缆检测,基于远距离输电电缆与输电塔的关联关系,选择不同分层模型进行电缆检测,对小场景下的电缆检测也具有启发意义。Li等<sup>[18]</sup>开发了一套基于AR眼镜与深度学习方法的航空连接器引脚检测系统,能够自动检测线束的不匹配引脚。

虽然现有的基于像素运算和特征提取的电缆检测方法可以在一些情况下较好地完成检测任务,但是这类方法也存在着计算开销大,对拍摄位姿、光照和遮挡等客观环境因素较为敏感、复杂环境精度较差等问题,并不适用于计算能力有限且拍摄位姿、光照和遮挡情况多变的基于移动AR设备的增强现实辅助装配场景。为此,本文旨在以移动AR设备为主体,提出一种在增强现实辅助装配环境下基于AR虚实图像注意力机制的电缆装配质量一致性检测的方法,并完成系统搭建和验证,使设计的系统可以在用户按照AR引导信息完成装配后对电缆关键节点位置、敷设路径和弯曲程度进行检测,

并将检测信息实时反馈给操作者并进行记录。

## 2 电缆装配信息建模及质量评价

### 2.1 装配质量评价标准

为了能够定量地评价电缆装配质量，本文基于航天器中的电缆装配提出两类共 3 种评价标准。电缆装配质量评价标准如表 1 所示，评价标准分为装配位置标准和装配几何标准。在装配位置标准中，需要确定电缆关键节点的固定位置是否在容差范围内，其中关键节点包括电缆的机械类固定点（卡扣、支架等处）和电气类连接点（电连接器连接处）两类。关键节点的容差距离根据实际的装配对象和场景确定。在本文搭建的实验台上，关键节点都固定在实验台的安装孔上，实验台的安装孔间距为 25 mm，因此将电缆关键节点装配位置与设计的误差限制在 25 mm 以内，若超出该阈值，则说明关键节点的安装孔一定出现了错误。在装配几何标准中，电缆的最小弯曲半径不能小于一定倍数的电缆外径，同时敷设路径与设计路径需要有较好的重合度。本文实验采用的电缆是低电压差分信号电缆，按实际卫星装配要求，此类电缆最小弯曲半径需大于或等于 10 倍电缆外径。在关键节点位置固定的情况下，电缆的敷设路径与设计路径重合度较高，但在实际安装过程中，电缆安装长度会大于设计长度，在起止段、弯折段、悬空段会出现一定偏差，最终根据实验经验设定路

径重合度阈值为 85%。

表 1 电缆装配质量评价标准

标准类型	评价内容	量化指标
装配位置标准	电缆关键节点装配位置与设计的误差	≤25 mm
装配几何标准	电缆敷设路径与设计路径重合度	≥85%
	电缆最小弯曲半径（电缆外径为 $d$ ）	≥10 $d$

### 2.2 装配信息建模

为了在增强现实辅助装配的环境下实时获取电缆的各类信息、辅助进行质量检测，本文基于统一建模语言（UML, unified modeling language）对电缆的各类关键信息进行了建模，从而方便在检测过程中快速调用，电缆装配信息模型 UML 类图如图 1 所示。本模型包含了增强现实辅助装配环境下完成一次电缆装配引导和检测的全部信息。其中，电缆装配信息、装配引导信息、工序及工步信息从工艺文档中提取；装配模型信息和关键节点信息根据电缆设计模型得到；辅助检测模型信息根据电缆模型生成而获得；装配检测信息是依据本文提出的检测方法完成检测后的输出结果。通过比较装配检测信息内的数据和电缆装配质量评价标准的量化指标，即可得到当前装配的电缆是否符合质量检测要求。

### 2.3 装配质量检测方法

注意力机制源于对人类视觉的研究。对于计算

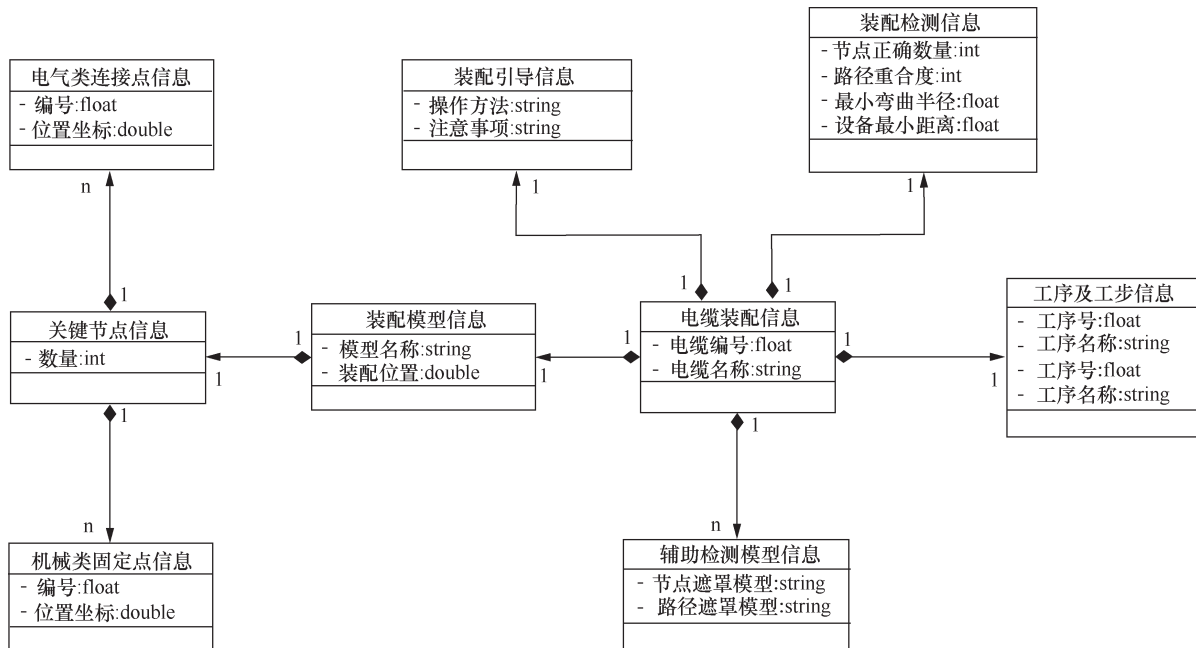


图 1 电缆装配信息模型 UML 类图

机视觉检测来说,为了合理利用有限的视觉信息处理资源,需要选择图像区域中的特定区域或像素,然后集中关注进行识别和处理。针对传统机器视觉二维图像检测中存在的深度信息缺失、冗余信息较多和特征分析区域定位困难的问题,本文提出了AR虚实图像注意力机制,其核心流程如图2所示。本文方法利用增强现实中虚实空间匹配对准的机制,通过对设计模型特定关注区域的重构和添加形成新的辅助检测的虚拟模型,使其在拍摄出的真实装配物体检测图像中形成遮罩,最终形成图像检测注意力聚焦的区域,把二维平面的像素处理问题转化为虚拟空间内三维信息的匹配问题。通过设计的各类虚拟模型遮罩,可以在三维虚拟空间内快速定位目标区域并显示在二维AR虚实叠加图中,从而缩短图像关键信息的检索和定位过程,并可以大幅度降低参与运算分析的像素数量。

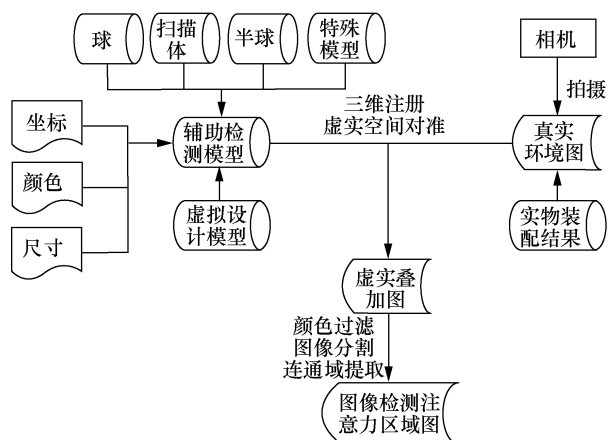


图2 AR虚实图像注意力机制的核心流程

### 3 基于AR虚实图像注意力机制的电缆装配质量检测

#### 3.1 电缆装配关键节点位置检测

电缆装配中的关键节点是指电缆固定在设备上的节点,主要分为两类:机械类节点和电气类节点。机械类节点主要是电缆和舱体或支架通过卡扣连接的位置,一般会按照一定的间距沿电缆敷设方向排布。电气类节点是电缆的一端和设备的连接处,主要通过电连接器进行连接,一般为电缆敷设的起点或终点。电缆上关键节点决定了电缆的整体走向和连接位置,是电缆装配质量一致性的重要参考要素,在装配检测中应该首先确定关键节点的安装位置是否正确。本文基于AR虚实图像注意力机制在电缆关键节点处创建半球体虚拟遮罩形成节

点检测注意力区域图,最后通过深度学习图像检测模型YOLOv4-Tiny(You Only Look Once v4-Tiny)识别输出图像,判断关键节点的位置是否存在对应的典型零部件。

本文根据AR装配引导三维模型上的关键节点位置生成以其为中心点、半径为 $R$ 的红色半球体,球体的半径 $R$ 取检测标准中设定的容差距离25 mm,在虚拟空间中电缆装配及关键节点球体模型如图3(a)所示。在检测记录环节,完成虚实空间三维注册对准后,系统将在同一位置同时拍摄两张图像,其中一张为带有生成的虚拟半球体的电缆关键节点虚实叠加图(如图3(b)所示),另外一张为不带虚拟物体的电缆装配结果实物图像(如图3(c)所示)。进一步地,系统将虚实叠加图转化到色调、饱和度、明度(HSV, hue, saturation, value)颜色空间,通过提取红色的区域(H: 0~10,156~180; S: 43~255; V: 46~255),并对面积较小连通域面积的噪声点进行抑制,从而获得关键节点感兴趣区域(ROI, region of interest)二值图(如图3(d)所示)。将ROI二值图和装配结果实物图像进行位与运算,删除非注意力区域的像素信息,得到最终需要的节点检测注意力区域图(如图3(e)所示)。

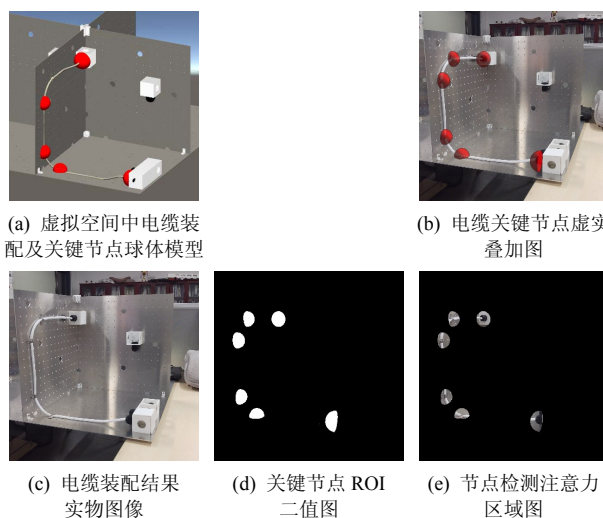


图3 电缆装配关键节点检测

获得电缆装配关键节点检测注意力区域图后,本文利用基于深度神经网络的对象识别和定位算法YOLOv4-Tiny图像检测模型<sup>[19]</sup>对其进行检测,确认图中是否有与检测要求相符合数量的机械类节点和电气类节点。

本文使用的训练集涵盖了选取的两类电缆装

配关键节点的典型零部件：电连接器和固定卡扣，每类选取了50张图片作为训练集、15张图片作为测试集。为了弥补训练集的不足，本文利用在PASCAL VOC 2007数据集<sup>[20]</sup>中训练完成得到的权重在本数据集上进行迁移学习，从而达到使用小样本就可获得较好训练效果的目的。训练模型的损失曲线如图4所示，经过8000次迭代，平均损失值为0.024，模型收敛情况较好。电连接器和固定卡扣在测试集上的平均精度均值（MAP, mean average precision）分别为100%和93.63%，识别精度较好，满足电缆装配检测环境下的精度需求。

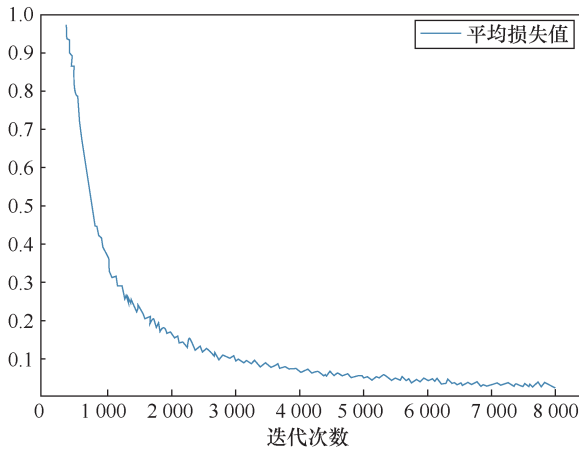


图4 训练模型的损失曲线

完成模型训练后，将节点检测注意力区域图按照连通域切分为多个单独的图像，并输入YOLOv4-Tiny模型进行检测，保留置信度大于0.6的检测结果。根据检测结果识别物体类型，若其与对应的关键节点类型一致则说明节点质量检测合格，否则不满足质量标准要求。

### 3.2 电缆敷设路径重合度检测

确定电缆装配关键节点符合质量要求后，需要确定电缆敷设走向与设计路径的误差是否在容许范围内，也就是电缆装配的重合度是否达到阈值。由于电缆不同于刚性设备，装配过程中敷设路径无法与设计路径完全统一，会存在小的偏移和弯曲，但这样的局部错位并不会影响整体的质量一致性评价。所以在计算重合度时，本文引入了邻域平均重合度的计算方式。基于AR虚实图像注意力机制，构建扩倍电缆模型作为敷设路径的ROI进行分析。

记实物电缆为 $X_R$ ，原设计电缆模型为 $X_V$ ，构建的与原设计电缆中心线路径相同且电缆直径为

原设计电缆直径 $n$ 倍的扩倍虚拟电缆模型为 $X_{Vn}$ ，则在三维AR空间中， $X_R$ 与 $X_V$ 的邻域平均重合度可记为CR（contact ratio），根据电缆装配质量评价标准有

$$CR = \frac{V_{X_R} \cap V_{X_{Vn}}}{V_{X_V}} \quad (1)$$

其中， $V_{X_R}$ 、 $V_{X_V}$ 、 $V_{X_{Vn}}$ 分别表示3种电缆在AR空间中的体积区域。由于3种电缆均可以视为圆在近似相同路径上形成的扫描体，拍摄获取虚实叠加图像后，在相机成像平面上形成的虚实叠加图中，根据成像模型，3种电缆在路径邻域范围内截面处的圆投影成椭圆，且长轴不变，短轴和路径的缩短比例一致。所以，可以将式(1)中的体积比近似转化为虚实叠加图像中的面积比为

$$CR = \frac{S_{X_R} \cap S_{X_{Vn}}}{S_{X_V}} = n \frac{S_{X_R} \cap S_{X_{Vn}}}{S_{X_{Vn}}} = n \frac{\sum_{(i,j) \in S_{X_R} \cap S_{X_{Vn}}} P(i,j)}{\sum_{(m,n) \in S_{X_{Vn}}} P(m,n)} \quad (2)$$

其中， $S_{X_R}$ 、 $S_{X_V}$ 、 $S_{X_{Vn}}$ 分别表示3种电缆在AR虚实叠加图中的面积区域， $P(i,j)$ 和 $P(m,n)$ 分别表示扩倍虚拟电缆模型区域的像素点和实物电缆与扩倍虚拟电缆模型重叠区域的像素点。根据电缆实际敷设的随机偏移程度，并结合实际要求，可选取合适的扩倍电缆模型的放大倍数 $n$ ，以获得最佳的检测精度。

本文基于AR虚实图像注意力机制及检测要求，在虚拟空间生成 $n=3$ 的与设计电缆模型同轴的扩倍电缆模型，虚拟空间中扩倍电缆模型如图5(a)所示。检测记录环节，在完成虚实空间三维注册对准后，系统将在同一位置同时拍摄两张图像，其中一张为不带虚拟物体的电缆装配结果实物图像（如图5(b)所示），另外一张为带有生成的虚拟电缆的电缆敷设路径虚实叠加图（如图5(c)所示）。进一步地，系统将虚实叠加图转化到HSV颜色空间，通过提取蓝色的区域（H: 100~124; S: 43~255; V: 46~255），并对较小面积连通域的噪声点进行抑制，从而获得敷设路径ROI二值图（如图5(d)所示）。将ROI二值图和装配结果实物图像进行位与运算，删除非注意力区域的像素信息，得到最终需要的路径检测注意力区域图（如图5(e)所示）。

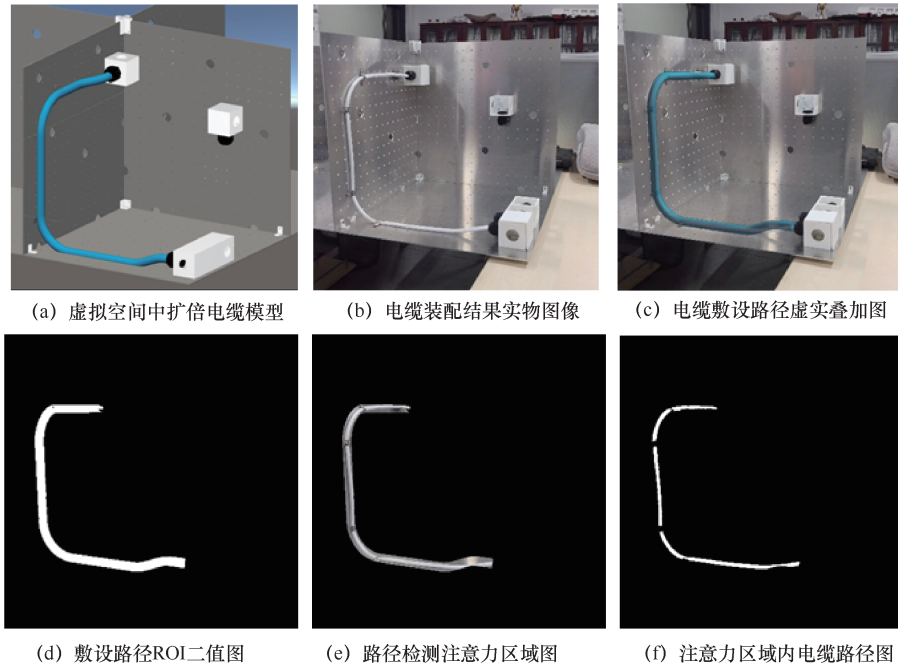


图 5 电缆装配敷设路径检测

获得了电缆敷设路径区域的 ROI 后，本文首先通过提取灰度值为 255 的像素点得到敷设路径 ROI 二值图中扩倍电缆模型在图像中的像素点数量。然后在路径检测注意力区域图中提取 HSV 空间中与电缆颜色相同的区域，本例中电缆为白色 (H: 0~180; S: 0~30; V: 221~255)。通过删除较小连通域的噪声点，可以得到真实电缆在注意力区域内电线路径图 (如图 5(f)所示)，进而经过计算得到实物电缆在路径检测注意力区域图中占有的像素数量。最后代入邻域平均重合度的计算公式，根据表 1 给定的电缆装配质量评价标准，若结果大于 85%则证明电缆敷设路径符合质量一致性要求，否则不满足检测标准。

### 3.3 电缆装配弯曲半径检测

本节基于 AR 虚实模型注意力机制，提取仅包

含电缆大幅度弯曲位置的图像，并对该区域内的电缆弯曲半径进行计算，检测其是否满足质量要求。由于电缆弯曲方向是任意空间方向的，仅靠平面图像不能反映电缆在空间中的弯曲情况。但是，结合 AR 头显与三维开发引擎 Unity 的空间定位功能，能够在拍摄二维图像的同时，获取相机的外参矩阵  $[R|t]$ ；再结合内参矩阵  $K$ ，可以计算出相机的实时投影矩阵  $P = K[R|t]$ ，从而将二维图像中的电缆三维复原。

电缆装配弯曲半径检测如图 6 所示，利用虚拟球形遮罩定位提取电缆模型中弯曲半径较大的区域，再通过颜色空间转换和连通域筛选可以得到弯曲半径检测注意力区域图 (如图 6(b)和图 6(c)所示)。

由于卫星电缆要求尽量沿结构表面敷设，而且

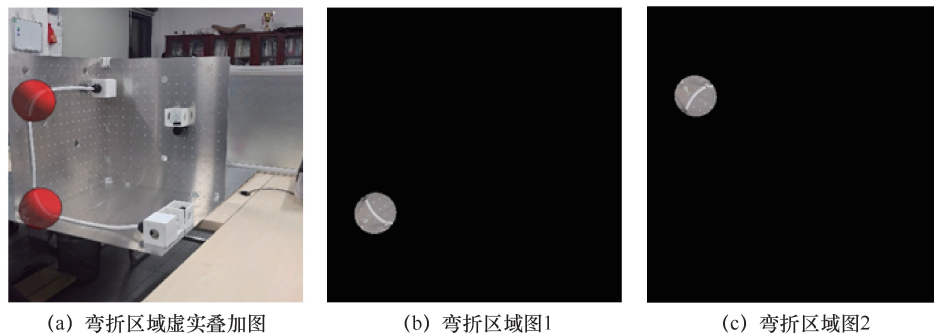


图 6 电缆装配弯曲半径检测

电缆弯折段两端一般会通过卡扣固定, 所以可以近似认为单块 ROI 内的电缆弯曲发生在同一平面内, 该平面与虚拟电缆所处平面一致, 在世界坐标系中的参数表达式为  $S: Ax + By + Cz = 1$ 。

在获取相机实时投影矩阵与电缆所处平面表达式的基础上, 本文提出了一种基于相机逆投影的电缆空间弯曲半径计算方法, 主要思路如下:

(1) 利用平面图像处理方法提取电缆信息, 获取电缆骨干的像素点集  $U^{\text{Camera}}$ ;

(2) 将点集  $U^{\text{Camera}}$  逆投影至平面  $S$  上, 获得电缆骨干的空间坐标点集  $U^{\text{World}}$ ;

(3) 将点集  $U^{\text{World}}$  的三维坐标转换为平面  $S$  上的二维坐标, 获取新点集  $U^S$ ;

(4) 对点集  $U^S$  进行曲线平滑, 基于最小二乘法计算该段电缆的弯曲半径。

以图 6(b) 中的弯折电缆为例, 首先通过阈值分割将电缆与背景区分开, 再进行降噪、开闭运算等处理。然后采用最大连通区域检测的方法, 只保留该区域内的最大连通区域, 也就是电缆主干的部分, 对其他连通区域进行填充。最后再对电缆图像进行细化处理, 只保留电缆的骨干点集。平面图像处理流程如图 7 所示。

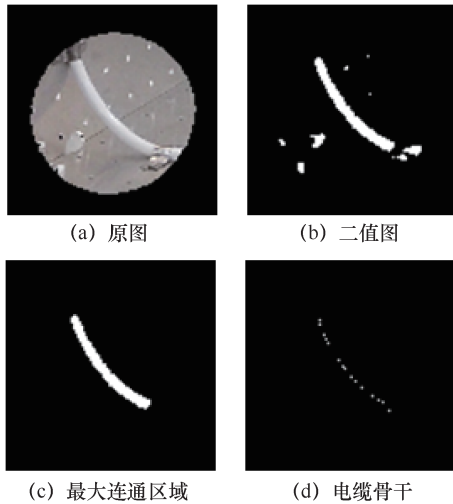


图7 平面图像处理流程

平面图像中的电缆弯曲不能完全反映电缆在空间上的走向变化, 利用逆投影方法, 将电缆骨干的像素点集  $U^{\text{Camera}}$  逆投影到电缆骨干理论所处的空间平面  $S$  上, 获取电缆骨干的空间点集  $U^{\text{World}}$ 。推导过程如下。

假设世界坐标系中有一点  $M = (X, Y, Z)^T$ , 其像

素坐标为  $m = (u, v)^T$ , 根据相机成像原理, 坐标之间满足投影关系  $\hat{m} \sim \mathbf{P}\hat{M}$ ,  $\mathbf{P}$  是相机投影矩阵, 展开投影方程可得到

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_{11}X + P_{12}Y + P_{13}Z + P_{14} \\ P_{21}X + P_{22}Y + P_{23}Z + P_{24} \\ P_{31}X + P_{32}Y + P_{33}Z + P_{34} \end{bmatrix}$$

根据齐次坐标的意义, 有

$$\begin{aligned} u &= \frac{P_{11}X + P_{12}Y + P_{13}Z + P_{14}}{P_{31}X + P_{32}Y + P_{33}Z + P_{34}} \\ v &= \frac{P_{21}X + P_{22}Y + P_{23}Z + P_{24}}{P_{31}X + P_{32}Y + P_{33}Z + P_{34}} \end{aligned} \quad (4)$$

又由于点  $M$  落在平面  $S$  上, 可以将三式联立, 整理成关于  $X, Y, Z$  的方程组形式为

$$\begin{cases} (P_{11} - uP_{31})X + (P_{12} - uP_{32})Y + (P_{13} - uP_{33})Z = -(P_{14} - uP_{34}) \\ (P_{21} - vP_{31})X + (P_{22} - vP_{32})Y + (P_{23} - vP_{33})Z = -(P_{24} - vP_{34}) \\ AX + BY + CZ = 1 \end{cases} \quad (5)$$

解该方程组, 便可以获得点  $M$  的空间坐标, 如图 8 所示, 图 8(a) 是图 7(d) 的逆投影结果。因为假设弯曲发生在平面  $S$  内, 所以将参考点的三维坐标转化为平面  $S$  上一个新坐标系下的二维坐标, 简化弯曲半径的计算过程。

取点集  $U^{\text{World}}$  中的第一个点  $O$  和最后一个点  $Q$ , 以  $O$  为原点,  $\vec{OQ}$  为  $x$  轴正向, 平面  $S$  的法向量  $\vec{n} = (A, B, C)^T$  为  $z$  轴正向, 则对于点集中除点  $O$  外的任意点  $N$ , 其在新平面坐标系的坐标为  $(x_N, y_N)$ , 新点集  $U^S$  如图 8(b) 所示。

$$x_N = \frac{\vec{OQ} \cdot \vec{ON}}{|\vec{OQ}|}$$

$$y_N = \text{spt} \cdot \sqrt{|\vec{ON}|^2 - x_N^2}$$

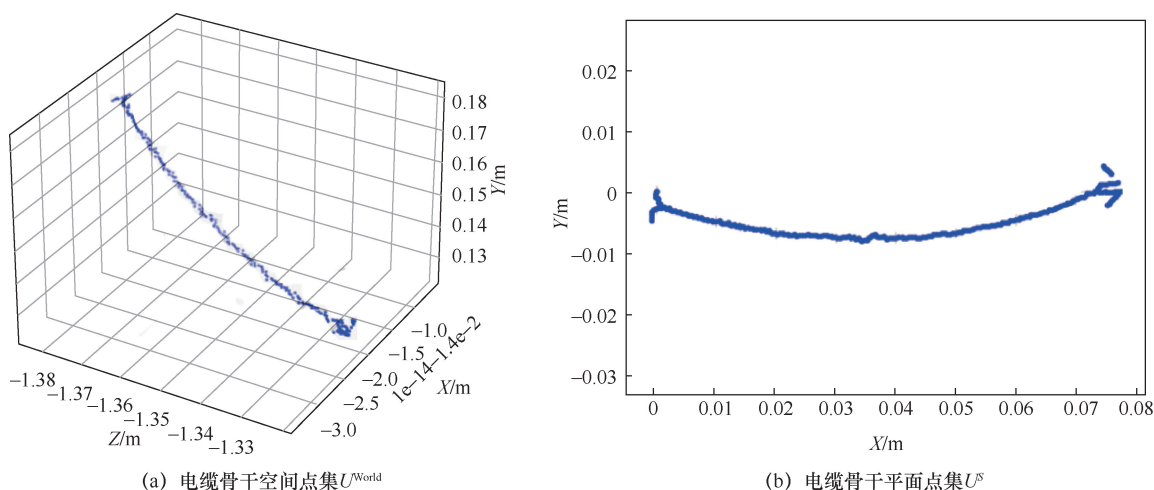


图8 电缆骨干点集

$$spt = \begin{cases} 1, & (\vec{OQ} \cdot \vec{ON}) \cdot \vec{n} > 0 \\ -1, & (\vec{OQ} \cdot \vec{ON}) \cdot \vec{n} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

获取点集  $U^S$  后，还需要对该段电缆的弯曲半径进行计算。实际上，点集  $U^S$  上仍存在较多波折、分叉、毛刺等，不利于计算弯曲半径，所以对  $U^S$  进行局部加权回归，得到一条平滑曲线；再使用最小二乘法圆拟合来拟合这条曲线，可以获得该段区域电缆的总弯曲半径。

## 4 系统开发及验证

### 4.1 原型系统开发

根据上述的电缆装配信息和质量检测方法，搭建的实验平台如图9所示。增强现实装配环境下的电缆装配质量检测移动端系统以 Unity3D 2017.3.17f 作为开发引擎，基于 C# 语言完成 AR 端系统开发，最终将程序部署到 HoloLens2 增强现实头显设备中。PC 端的图像处理模块在 Windows10 操作系统下，以 Visual Studio2019 作为开发平台、C++ 作为开发语言，结合 Opencv4.0 完成。用户通过 HoloLens2 显示的可视化装配指令的引导下完成一条电缆的装配后，根据用户的手势系统开启电缆装配检测模块。经过 HoloLens2 拍摄和生成的多张 AR 虚实叠加图像通过 TCP/IP 协议传输到 PC 端，通过图像处理模块进行电缆装配关键节点、敷设路径和弯曲半径的 3 项检测。最终，PC 端记录检测结果并传输到 HoloLens2 端提示用户装配结果。

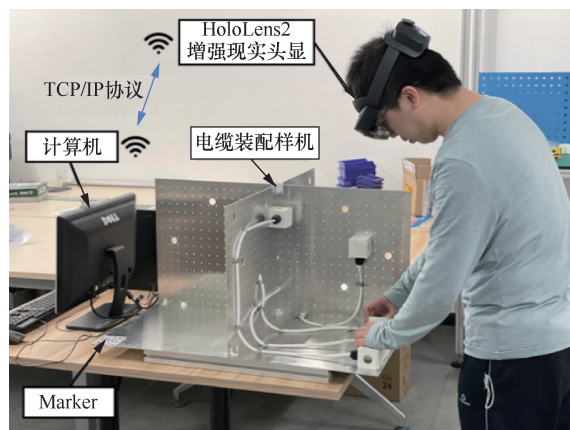


图9 实验平台

### 4.2 电缆装配案例验证

为了验证原型系统的可行性，本文在搭建的实验台上布设了 4 条电缆，电缆设计模型和装配结果实物如图 10 所示，对 4 条电缆分别标注为电缆 1、电缆 2、电缆 3、电缆 4，并按照从上到下的顺序对所有关键节点进行编号，其中 M 代表机械类节点，E 代表电器类节点。

按照第 3 节的流程分别对 4 条电缆进行虚实叠加图的拍摄和图像处理，可以得到每条电缆的节点检测注意力区域图、路径检测注意力区域图和弯折区域图。

首先，对 4 条电缆的关键节点进行检测，根据设计模型可知 4 条电缆共有 20 个关键节点，其中 5 个为电器类节点，15 个为机械类节点。将所有节点区域图输入训练好的 YOLOv4-Tiny 模型，得到电缆 1~4 关键节点区域检测结果如表 2 所示，电缆 1~4 装配关键节点处典型零部件图像检测结果如图 11 所示。图中 connector 代表电连接器，clip 代

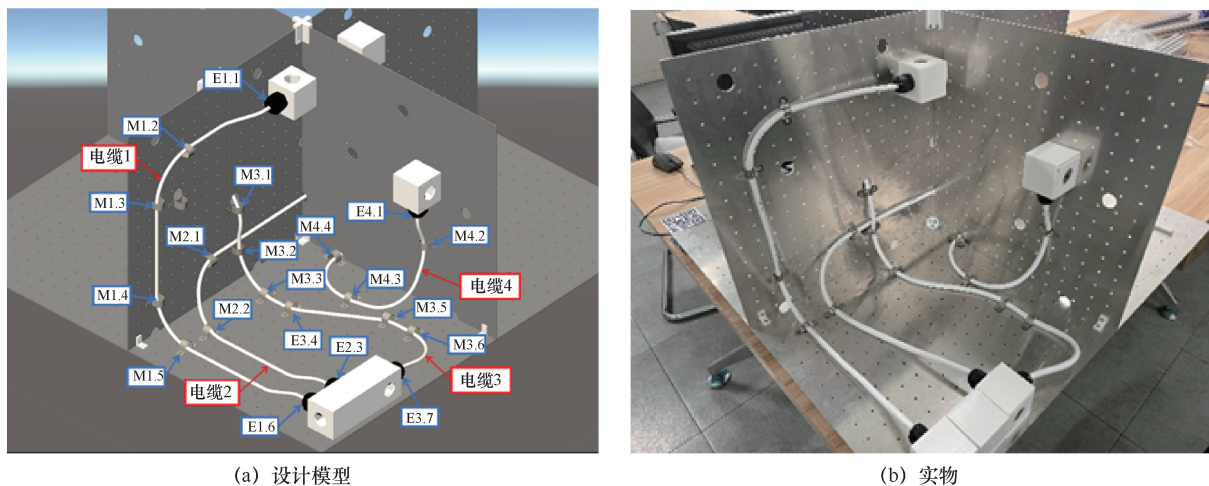


图 10 电缆设计模型及装配结果实物

表 2 电缆 1~电缆 4 关键节点区域检测结果

编号	检测结果
电缆 1	节点 E1.1 M1.2 M1.3 M1.4 M1.5 E1.6
	检测物体 connector clip clip clip clip connector 置信度 1.00 0.68 1.00 0.81 0.98 1.00
电缆 2	节点 M2.1 M2.2 E2.3
	检测物体 未检出 clip 未检出 置信度 无 1.00 无
电缆 3	节点 M3.1 M3.2 M3.3 M3.4 M3.5 M3.6 E3.7
	检测物体 clip clip clip 未检出 clip clip connector 置信度 0.99 1.00 0.98 无 0.94 1.00 1.00
电缆 4	节点 E4.1 M4.2 M4.3 M4.4
	检测物体 connector clip clip clip 置信度 1.00 0.96 1.00 0.91

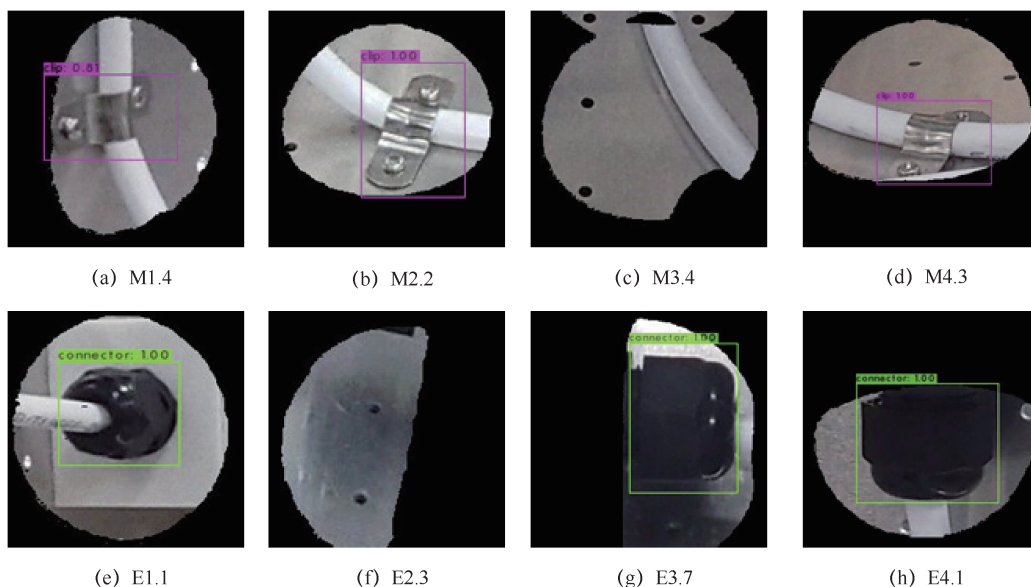


图 11 电缆 1~电缆 4 装配关键节点处典型零部件图像检测结果

表固定卡扣，数字表示物体检测的置信度。从结果可以看出，模型识别出的物体和所在节点类型均匹配，且置信度均大于 0.6，其中共有 3 张图像没有检测出电连接器或者卡扣，即视为节点装配位置错误的情况。

然后，对 4 条电缆的敷设路径重合度进行计算，电缆 1~电缆 4 路径检测注意力区域如图 12 所示。按照第 3 节的算法，通过转换颜色空间并进行连通域筛选获得注意力区域内电缆路径图，并计算虚拟电缆和真实电缆在图上的像素点数量，最后代入邻域平均重合度计算式，电缆 1~电缆 4 敷设路径重合度计算结果如表 3 所示。为了验证算法计算的重合度和实际重合度的误差，本文利用激光探测及测距 (LiDAR, light detection and ranging) 技术对实际装配场景进行扫描，完成其虚拟点云模型的建立。然后将该点云模型导入 Unity3D 进行部分修复，进而计算其与设计模型的实际重合度。从结果可以看出，本文提出的计算方法得到的邻域平均重合度和实际值较为符合，整体误差率平均为 7.62%，符合实际检测要求。

最后，对 4 条电缆中的 6 个弯折区域进行了检测，电缆 1~电缆 4 弯曲半径检测结果如表 4 所示。作为对比，采用刚性平板贴合电缆弯折平面后，基于描点法获取电缆的弯折走向，然后使用最小二乘法计算电缆的实际弯曲半径。本文算法在 6 例目标电缆图像上都达到了 5%以内的误差，相较于利用深度图像与彩色图像配准方法<sup>[14]</sup>10%左右的误差，本文算法在精度上有显著提升。本文算法是在 HoloLens2 设备的功能基础上实现的，利用了 HoloLens2 的自定位功能与虚拟模型的信息，与 RGB-D 方法相比，避免了深度图像配准困难、数据点稀疏等问题，使得运算更为简洁，高分辨率的彩色图像也进一步保证了检测精度。

实验中用的是外径 8.5 mm 的低电压差分信号电缆，其 10 倍直径为 85 mm，电缆弯曲半径需大于 10 倍电缆直径。综合上述 3 项检测，电缆 1~电缆 4 装配质量检测结果如表 5 所示，电缆 1 和电缆 4 满足装配质量一致性检测要求，电缆 2 和电缆 3 则不满足设定的要求。通过和装配结果实物进行检

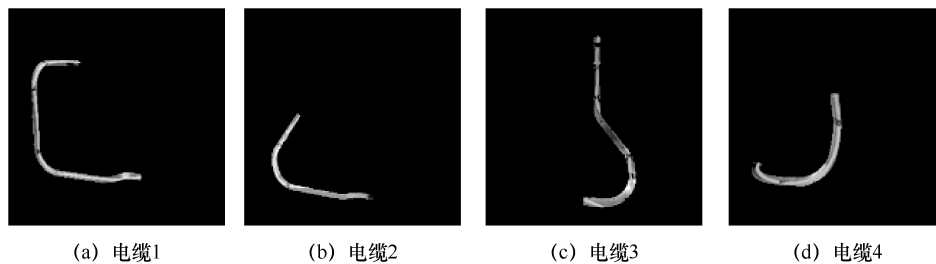


图 12 电缆 1~电缆 4 路径检测注意力区域

表 3 电缆 1~电缆 4 敷设路径重合度计算结果

电缆编号	扩倍模型像素/个	重叠区域像素/个	邻域平均重合度	实际重合度
电缆 1	162 259	47 111	87.10%	91.14%
电缆 2	100 861	20 045	59.62%	54.43%
电缆 3	168 389	27 395	48.81%	44.76%
电缆 4	147 183	45 735	93.22%	86.74%

表 4 电缆 1~电缆 4 弯曲半径检测结果

区域编号	电缆 1-1	电缆 1-2	电缆 2-1	电缆 3-1	电缆 4-1	电缆 4-2
区域图像						
检测半径/mm	104.79	88.32	124.30	40.65	139.11	94.55
实际半径/mm	106.65	90.53	122.17	42.64	133.99	93.06
检测误差率	1.74%	2.44%	1.74%	4.66%	3.82%	1.60%

表5 电缆1~电缆4装配质量检测结果

电缆编号	关键节点检测	敷设路径检测	弯曲半径检测	质量检测结果
电缆1	合格	合格	合格	合格
电缆2	不合格	不合格	合格	不合格
电缆3	不合格	不合格	不合格	不合格
电缆4	合格	合格	合格	合格

查和对比,证明本文的方法计算出的装配质量检测结果正确无误。

## 5 结束语

为了在增强现实辅助装配环境下对装配结果进行实时质量检测,本文提出了一种基于AR虚拟图像注意力机制的视觉检测方法。本文方法利用增强现实中虚实空间匹配对准的机制,通过对设计模型特定关注区域的重构和添加形成新的辅助检测的虚拟模型,使其在拍摄出的真实装配物体检测图像中形成遮罩,过滤冗余图像信息,形成图像检测注意力聚焦的区域。进而,基于提取出的图像注意力区域,根据提出的电缆装配质量评价标准,提出了关键节点位置、敷设路径重合度、电缆装配弯曲半径的检测和计算方法。

(1) 关键节点位置检测:通过提取节点处的半球形注意力区域图,并利用YOLOv4-Tiny模型对节点区域内的电连接器和固定卡扣进行了检测,从而判断关键节点的装配位置是否正确。

(2) 敷设路径重合度检测:提出了一种通过像素点数量计算的电缆敷设领域平均重合度的计算方法,并利用通过扩倍电缆模型获得的电缆路径注意力区域图完成了重合度的计算。

(3) 电缆装配弯曲半径检测:提出了一种基于相机逆投影的电缆空间弯曲半径计算方法,并通过弯折区域图计算得到了电缆实际空间弯曲半径。

最后,基于HoloLens2增强现实头显开发了基于增强现实技术的电缆装配质量检测系统,并在搭建的实验平台上对4条装配的电缆进行了测试。实验证明,开发的系统可以正确地对电缆装配关键节点位置、敷设路径重合度和弯曲半径进行检测,并有效判断电缆的装配质量是否满足设计要求。

在未来工作中,本系统还需要解决如下两个问题:(1)如何通过增加额外的拍摄检测机位克服在空间狭小、视野受限的装配场景中电缆检测的问题;(2)如何自动生成准确且交互便捷的装配错

误反馈信息。本文研究的最终目标是形成一套在人工电缆装配场景下辅助进行智能化指导、检测和反馈的增强现实辅助装配及检测系统。

## 参考文献:

- [1] GOODDING J C, ARDELEAN E V, BABUSKA V, et al. Experimental techniques and structural parameter estimation studies of spacecraft cables[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, 48(6): 942-957.
- [2] ARDELEAN E V, BABUŠKA V, GOODDING J C, et al. Cable effects study: tangents, rabbit holes, dead ends, and valuable results[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 52(2): 569-583.
- [3] WANG X, ONG S K, NEE A Y C. A comprehensive survey of augmented reality assembly research[J]. *Advances in Manufacturing*, 2016, 4(1): 1-22.
- [4] CAUDELL T P, MIZELL D W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes[C]//*Proceedings of the 25th Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l. :s.n.], 1992, 2: 659-669.
- [5] MIZELL D. Boeing's wire bundle assembly project[M]. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Boca Raton: CRC Press, 2001: 462-482.
- [6] SERVÁN J, MAS F, MENÉNDEZ J L, et al. Using augmented reality in AIRBUS A400M shop floor assembly work instructions[C]//*AIP Conference Proceedings*. Melville: American Institute of Physics, 2012, 1431(1): 633-640.
- [7] ZHENG L Y, LIU X, AN Z W, et al. A smart assistance system for cable assembly by combining wearable augmented reality with portable visual inspection[J]. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2020, 2(1): 12-27.
- [8] ZHANG W, CHEN C Y, CHEN H J, et al. Application of augmented reality in satellite cable network assembly[C]//*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 2019, 542(1): 012034.
- [9] 陈华俊, 陈畅宇, 孙刚, 等. 增强现实在航天器电缆装配中的应用技术研究[J]. *科技与创新*, 2019(8): 40-44.  
CHEN H J, CHEN C Y, SUN G, et al. Research on the application technology of augmented reality in spacecraft cable assembly[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2019(8): 40-44.
- [10] PARMAR P. Use of computer vision to detect tangles in tangled objects[C]//*Proceedings of 2013 IEEE Second International Conference on Image Information Processing (ICIIP-2013)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 39-44.
- [11] SUN F J, WANG H, FAN J Q. 2D otsu segmentation algorithm based on simulated annealing genetic algorithm for iced-cable images[C]//*Proceedings of 2009 International Forum on Information Technology and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 600-602.

- [12] 温沛涵, 吴梦杰, 易树平, 等. 基于目标识别的软管装配视觉检测系统[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1486-1496.  
WEN P H, WU M J, YI S P, et al. Visual inspection system for hose assembly based on object recognition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(6): 1486-1496.
- [13] 焦晨航. 约束空间中电缆线安装方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
JIAO C H. Research on cable installation method in constrained space[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [14] 刘睿, 尹旭悦, 范秀敏, 等. 面向 AR 辅助引导的电缆敷设质量一致性视觉检测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 53-62.  
LIU R, YIN X Y, FAN X M, et al. AR guidance-based visual inspection method for cable laying quality consistency check[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 53-62.
- [15] 魏煌涛. 基于视觉的电缆安装方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
WEI H T. Research on installation method of cable based on vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [16] 冒文彦. 基于卷积神经网络的高铁电缆线夹装配质量检测技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
MAO W Y. Research on assembly quality inspection technology of high-speed rail cable clamps based on convolutional neural network[D]. Zhenjiang, China: Jiangsu University, 2020.
- [17] LI B, CHEN C. Transmission line detection based on a hierarchical and contextual model for aerial images[J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(4):1: 043054.
- [18] LI S F, ZHENG P, ZHENG L Y. An AR-assisted deep learning-based approach for automatic inspection of aviation connectors[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 1721-1731.
- [19] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y MARK. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv: 2004.10934, 2020.
- [20] EVERINGHAM M, WINN J. The PASCAL visual object classes challenge 2007 (voc2007) development kit[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 111(1):98-136.

[作者简介]



赵甘霖 (1995- ), 男, 清华大学机械工程系博士生, 主要研究方向为机器视觉、增强现实辅助装配技术等。



余畅 (1998- ), 男, 清华大学机械工程系博士生, 主要研究方向为机器视觉、增强现实、智能制造等。



张建富 (1975- ), 男, 博士, 清华大学机械工程系副教授、特别研究员, 主要研究方向为精密加工技术、超声加工技术及系统、先进制造装备、智能制造系统等。



杨建新 (1977- ), 男, 博士, 清华大学基础工业训练中心副教授, 主要研究方向为增强现实、智能制造、精密测量等。



冯平法 (1966- ), 男, 博士, 清华大学机械工程系教授, 主要研究方向为智能制造与精密加工等。



沈群 (1989- ), 男, 航天东方红卫星有限公司工程师, 主要研究方向为卫星制造智能装备等。