

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.019

基于增强现实的飞机线缆识别与可视化方法

吴悦雅¹, 胡俊山¹, 苏兴涛¹, 钱圣²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京晨光集团有限责任公司, 江苏 南京 210016)

摘 要: 针对传统飞机线缆人工装配时具有的周期长、工艺文件阅读困难、出错率高、返工率高等问题, 提出一种针对待装配线缆的编码识别和增强现实可视化引导方法。利用深度学习方法分别进行线缆编码区域的提取和编码内容的识别, 并通过倾斜校正方法提高提取的准确度。搭建增强现实识别与引导系统, 利用增强现实技术虚实结合、即时交互的特点, 直观将识别完成的飞机线缆进行可视化显示。

关键词: 飞机线缆; 增强现实; 深度学习; 文字识别

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0096-05

Coding Recognition and Visualization Method of Aircraft Cable Based on Augmented Reality

WU Yueya¹, HU Junshan¹, SU Xingtao¹, QIAN Sheng²(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Nanjing Chenguang Group Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: To overcome the defects of traditional aircraft cable assembly method such as long cycle, difficulty in reading process documents, high error rate and high rework rate, a method of coding recognition and augmented-reality visualization guidance for cables to be assembled is proposed. The deep learning method is used to extract the coding region of the cable and identify the coding content, and the accuracy of the extraction is improved by the tilt correction method. The augmented reality recognition and guidance system is built, and the aircraft cables identified are visually displayed using the features of virtual and real combination and instant interaction of augmented reality technology.

Keywords: aircraft cable; augmented reality; deep learning; character recognition

0 引言

飞机线缆是飞机控制系统的重要组成部分, 其具有分支多、结构复杂的特点。固定线缆的支架、连接器和卡箍种类多、数量大, 且仍以人工装配为主。传统工艺文件只能通过文字和图片描述安装位置, 无法清晰地表现出布线路径、安装关系与装配空间位置^[1], 对人工装配来说十分抽象不直观, 并且依靠人工难以快速准确地找出待安装线缆。利用增强现实技术, 通过其虚实融合、实时交互的特性将虚拟信息叠加在真实环境中, 以直观可视化的方式代替传统纸质工艺手册, 来指导线缆铺设工作, 并通过文字识别方法进行线缆编码的识别, 以自动识别相应的待安装线缆。这有利于解决上述传统工艺文件的局限性, 并能够有

效提高当前飞机线缆装配的自动化、智能化^[2-3]。

增强现实技术在工程行业的应用起源于飞机装配。早在 19 世纪, CAUDELL 等^[4]开发了一个 AR 辅助系统, 使用头部传感器获取工人的位置, 并将线缆连接所需信息显示在透视式头盔上, 以指导工人完成作业。国内也逐渐开始将 AR 技术用于飞机装配领域, 王月^[5]对虚实注册和虚实遮挡等技术进行了深入研究, 研制了一个具有虚实融合处理能力的面向机械产品的 AR 引导原型系统。唐健钧等^[6]开展了基于动态操作描述的通用化 AR 指令和基于连续作业状态的一体化操作引导关键技术研究。在编码识别方面, 张杰等^[7]对航空发动机风扇转子叶片雕刻字符编码进行了 OCR 识别, 将叶片编码的识别准确率从 21% 提高到了 89%; 刘欣等^[8]提出了深度卷积神经网络零

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1707403)

第一作者简介: 吴悦雅(1999—), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为 AR 辅助装配, wuyueya@nuaa.edu.cn。

通信作者简介: 胡俊山(1988—), 男, 江苏南京人, 副教授, 校聘长空学者, 博士, 研究方向为飞行器智能装配/修复技术与装备、智能制造工艺与装备数字孪生技术, hujunshan@nuaa.edu.cn。

件编号分类算法,并达到了 94.1% 的准确度。

针对飞机线缆铺设作业指导抽象、编码辨认困难的问题,为提高增强现实技术在飞机线缆铺设辅助引导过程中的自动化、智能化水平,本文在现有研究基础上,提出了一种针对待装配线缆的编码识别和增强现实可视化引导方法。通过增强现实设备采集线缆编号的图片,实现编号的自动提取与识别,完成线缆识别自动化流程,并搭建增强现实识别与可视化系统,辅助人工作业。

1 增强现实系统架构

增强现实线缆识别与可视化系统主要包括线缆编码识别和线缆可视化引导,其工作流程如图 1 所示。首先在现场拍摄待安装线缆编码图像进行编码智能识别,改进 CTPN+CRNN 算法定位编码区域并识别,将识别结果与数据库中的线缆任务进行匹配以直接获取该线缆的信息。通过基于标识物的跟踪注册方法实现虚拟信息在现场中的注册,将相应线缆的引导信息加载在相应位置对操作人员进行可视化安装指导。

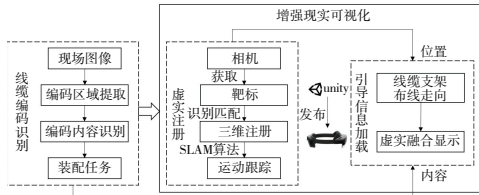


图 1 增强现实线缆识别与可视化系统架构

2 线缆编码识别方法

线缆编码由英文字母、阿拉伯数字组成,有时包含“-”短横线符号,本文线缆编码识别模块中使用 CTPN 算法^[9]在杂乱的现场环境中将线缆编码区域提取出来,使用 CRNN 算法^[10]识别编码文本,实现端到端的线缆编号识别。

2.1 线缆编码提取

CTPN 模型结合 CNN 卷积神经网络和 BiLSTM 双向长短期记忆网络进行文字区域提取,将整个编码区域分为小的候选框进行检测,将检测到的小框拼接在一起得到完整的编码框,其网络结构如图 2 所示。

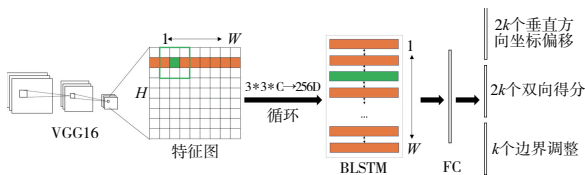


图 2 CTPN 网络结构

将在现场拍摄的编码图像作为输入图像,利用 CTPN 算法进行编码区域检测的方法流程如下。

1) 通过 VGG16 网络对输入图像进行特征提取,利用 5 个卷积层得到 $W \times H \times C$ 的特征图。在经过卷积层的同时,特征图也经过了 4 层池化,此时特征图与原图的大小比例为 1:16,特征图中 1 个像素相当于原始输入的 16 个像素。然后使用 3×3 的卷积核在特征图上进行滑窗操作,每一行特征都能够得到 $W \times 3 \times 3 \times C$ 的特征矩阵。

2) 将得到的每一行特征矩阵输入到 BiLSTM 网络中,参考上下文信息学习每一行的序列特征,输出 $W \times 256$ 的序列矩阵。

3) 将输出的 $W \times 256$ 的序列矩阵输入全连接层 FC 进行分类,获取 $2k$ 个 vertical coordinates、 $2k$ 个 scores 及 k 个 side-refinement。其中, $2k$ 个 vertical coordinates 指的是文本提取框的高度和中心 y 轴坐标, $2k$ 个 scores 表示该区域是否为文本区域的双向得分, k 个 side-refinement 表示文本提取框的边界位置水平调整量。

在特征图上进行特征提取时,将每一个特征点都作为一个锚点(anchor),每一个锚点都可以选取产生 10 个宽度一致、高度不同的文本提取框,其宽度为 16,高度变化范围是 11~283。

预测的 $2k$ 个 vertical coordinates 指的是文本提取框的高度和中心 y 轴坐标,* 表示 ground truth, a 表示锚点 anchor,则文本区域的高度 v_h 和中心 y 轴坐标 v_c 的表示方法如下

$$\begin{cases} v_c = \frac{c_y - c_y^a}{h^a} \\ v_h = \ln\left(\frac{h}{h^a}\right) \\ v_c^* = \frac{c_y^* - c_y^a}{h^a} \\ v_h^* = \ln\left(\frac{h}{h^a}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v = \{v_c, v_h\}$ 、 $v^* = \{v_c^*, v_h^*\}$ 分别为中心坐标和高度的预测值和实际值; c_y^a 、 h^a 分别为 anchor 的中心 y 轴坐标和高度; c_y 、 h 分别为中心 y 轴坐标和高度的预测值; c_y^* 、 h^* 分别为中心 y 轴坐标和高度的实际值。anchor 经过上述回归层处理后,会获得如图 3 所示的 1 组竖直条状的细密文本候选框。



图 3 线缆编码文本候选框检测

采用标准的非极大值抑制算法去除多余的文本候选框,最后使用文本线构造算法将多个文本候选框连接成一个文本预测框如图4所示。

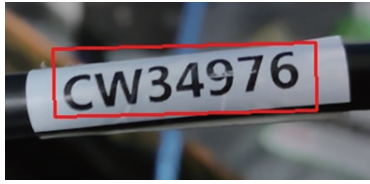


图4 线缆编码文本候选框检测

由于CTPN网络对水平文本有很好的检测效果,对带有倾斜角度的文本检测效果不佳,而实际拍摄的图像大多带有一定的旋转角度,因此在检测之前对图像进行倾斜校正预处理,使用霍夫变换计算图像文本倾斜角度 α ,根据下式获得旋转矩阵,进而进行放射变换,完成旋转校正。

$$M = \begin{bmatrix} \alpha\beta(1-\alpha) \cdot x_{\text{center}} - \beta \cdot y_{\text{center}} \\ -\beta\alpha\beta \cdot x_{\text{center}} + (1-\alpha) \cdot y_{\text{center}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\alpha = \cos(a_{\text{angle}})$; $\beta = \sin(a_{\text{angle}})$; $x_{\text{center}}, y_{\text{center}}$ 为图像的中心坐标。

编码区域检测前加入倾斜校正,能够使检测结果与编码区域更加贴合,从而使得最终识别结果更加准确,检测结果如图5所示。

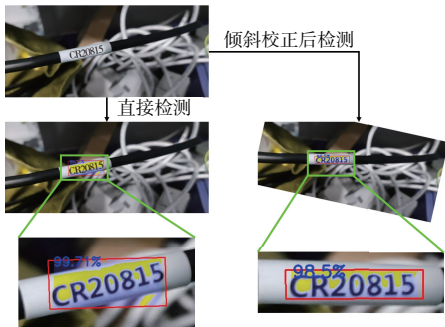


图5 线缆编码检测结果

2.2 编码字符识别

将检测出的编码区域进行剪裁后输入CRNN网络,由于线缆的编码排布规则,使用CRNN网络基于图像的序列进行识别,能够实现不定长编码区域中的内容识别,其网络架构如图6所示。

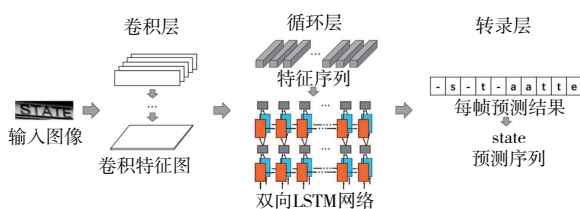


图6 CRNN网络结构

CRNN网络分为卷积层、循环层、转录层3部分:

1)卷积层。CRNN算法的网络配置如表1所示,其中卷积层通过CNN网络中的卷积层和最大池化层组成,进行输入图像的特征提取。由于文本图像多为高较小宽较长,两个池化层的窗口尺寸由 2×2 改为 1×2 ,即高度减半4次,宽度只减半两次,尽量保留宽度方向的信息。输入图像在输入网络前统一归一化 $W \times 32$ 的单通道灰度图像,通过CNN网络后得到512个高度为1的特征图,然后将特征图从左向右生成每列包含512维特征的特征向量,以特征向量序列形式输送到下一网络模块进行训练。

表1 CRNN网络配置

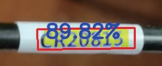
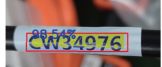
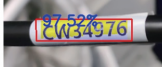
Type	Configurations
Transcription	-
Bidirectional-LSTM	#hidden units:256
Bidirectional-LSTM	#hidden units:256
Map-to-Sequence	-
Convolution	#maps:512, k:2 × 2, s:1, p:0
MaxPooling	Window:1 × 2, s:2
BatchNormalization	-
Convolution	#maps:512, k:3 × 3, s:1, p:1
BatchNormalization	-
Convolution	#maps:512, k:3 × 3, s:1, p:1
MaxPooling	Window:1 × 2, s:2
Convolution	#maps:256, k:3 × 3, s:1, p:1
Convolution	#maps:256, k:3 × 3, s:1, p:1
MaxPooling	Window:2 × 2, s:2
Convolution	#maps:128, k:3 × 3, s:1, p:1
MaxPooling	Window:2 × 2, s:2
Convolution	#maps:64, k:3 × 3, s:1, p:1
Input	$W \times 32$ gray-scale image

2)循环层。为充分利用上下文信息,通过两层各256单元的BiLSTM网络对预测特征序列的标签特征,输出40个长度为字符类别数的概率分布向量构成的后验概率矩阵。

3)转录层。利用循环层得到的后概率矩阵得到可能性最大的文本标签,再对文本标签中的内容进行合并去冗。通过CTC网络训练对字符进行编码,在重复字符中间插入“-”字符,再将没有“-”字符相连的相同字符进行合并,最后去掉“-”字符组成字符序列,对齐输入输出结果获得最终文本串。

将编码检测和识别结合起来,使用100张现场拍摄线缆图像进行测试,最终识别的准确率为94.3%,部分识别结果如表2所示。

表 2 线缆编码识别结果

原图	编码检测结果	编码识别结果
		CR20815
		CR20815
		CW34976
		WT36-
		CW34976

3 增强现实线缆识别与可视化系统

为了测试基于编码识别的增强现实线缆识别与可视化系统的可行性,参照飞机壁板结构,设计工装平台和支架,搭建实验平台。增强现实线缆铺设可视化系统在 Windows10 操作系统下完成,采用 Unity3D 2019.4.12f1 作为开发引擎,使用 Vuforia SDK 实现跟踪注册,基于 C#语言编写,搭载在 Hololens2 头显上。

3.1 线缆编码现场识别

线缆编码提取与识别部分使用 Python 语言和 Opencv 开发,系统采用 C/S 架构,基于局域网和 Socket 实现 Hololens2 头显端和 PC 端编码识别模块的通信。通过 IP 地址和端口号进行连接,利用 Hololens2 拍摄现场线缆编码图像传递到 PC 端,PC 端向 Hololens2 返回识别结果,根据编码识别内容在数据库中匹配唯一的线缆信息。图 7 为头显端线缆编码识别的用户界面,操作人员通过手势和语音与其进行交互。



图 7 线缆编码识别用户界面

3.2 虚拟信息注册

增强现实线缆识别与可视化系统需要实现两方面的功能,一是虚拟引导信息在正确的位置进行注册,二是根据不同的线缆识别结果加载相应的虚拟引导信息,其中虚拟信息的注册利用基于标识物的跟踪注册技术实现。首先在虚拟场景中按位姿关系设置好标识物和需要叠加的虚拟信息,然后计算机调用摄像头获取真实场景图像帧,捕捉到特定标识物后,对其进行处理解码,获取标识物的位置信息。最后进行坐标系转换完成虚拟信息在真实场景中的叠加。系统采用 Vuforia 结合 SLAM 技术进行虚拟模型跟踪注册,在 Vuforia 中定义标识物图像,通过识别图像特征与相机拍摄的现场图像进行匹配,并利用 HoloLens 扫描作业现场生成特征点云重建三维场景,对识别后的标识物进行定位与坐标转换,进而基于 SLAM 算法将标识物携带的虚拟模型定位在三维世界空间中,图 8 为利用标识物进行虚拟信息注册的示意图。操作人员在运动过程中利用 Hololens2 自带 SLAM 算法进行运动估计,保证对虚拟信息的跟踪,在任何位置都能以正确的视角实现对三维模型等虚拟信息的渲染。



图 8 基于标识物的虚拟信息注册

3.3 线缆可视化效果

本系统利用线缆支架与线缆模型进行线缆的可视化描述,线缆识别与可视化引导方法如下:首先扫描标识物进行虚拟信息的注册定位;然后拍摄要安装线缆的编码图像通过识别界面完成编码内容的识别,如图 9(a)所示;根据识别结果在现场的真实壁板上的相应位置叠加相应线缆的虚拟引导信息,其可视化效果如图 9(b)所示,使用蓝色支架虚拟模型代表线缆铺设经过的支架,使用黄色线缆虚拟模型指示线缆的布线走向,直观引导其布线路径;操作人员佩戴 Hololens2 眼镜根据指示的铺设位置和布线走向完成安装操作,如图 9(c)所示。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

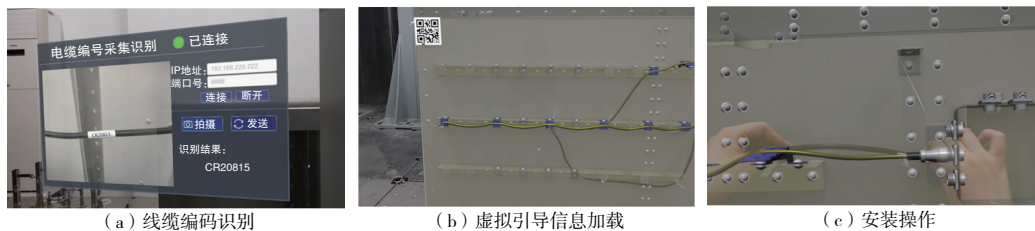


图9 线缆可视化效果图

4 结语

本文提出了一种针对待装配线缆的编码识别和增强现实可视化引导方法。通过倾斜校正和CTPN+CRNN网络对线缆编码进行提取与识别,利用增强现实技术将可视化虚拟信息叠加到线缆现场中进行直观引导,实现了线缆识别自动化和沉浸式铺设引导一体化。经过系统搭建验证,本系统能够有效实现飞机线缆的自动化识别与可视化显示。

参考文献:

- [1] 刘检华. 军工数字化装配技术[J]. 国防制造技术, 2011(4):5-7,11.
- [2] ZHOU F, DUHHB, BILLINGHURST M. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: a review of ten years of ISMAR[C]//2008thIEEE/ACM International Symposium on Mixed andAugmented Reality. Cambridge: IEEE,2008:193-202.
- [3] REINHART G, PATRON C. Integrating augmented reality in the assembly domain - fundamentals, benefits and applications[J]. CIRP Annals,2003,52(1):5-8.
- [4] CAUDELL T P, MIZELL D W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes[C]//Proceedings of the Twenty-

Fifth Hawaii International Conference on SystemSciences. Kauai, HI, USA: IEEE,1992:659-669.

- [5] 王月. 面向产品装配引导的增强现实虚实融合技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2018.
- [6] 唐健钧,叶波,耿俊浩. 飞机装配作业 AR 智能引导技术探索与实践[J]. 航空制造技术,2019,62(8):22-27.
- [7] 张杰,王淑侠,何卫平等. 航空发动机叶片装配执行过程智能检测及 AR 引导[J]. 计算机集成制造系统,2023:1-18. (EI)
- [8] 刘欣,李佩娟,盛云龙. 基于 Tensorflow 框架的生产线零件编号分类算法研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2019,17(4):31-37.
- [9] TIAN Z, HUANG W L, HE T, et al. Detecting text in natural image with connectionist text proposal network[M]// ComputerVision - ECCV2016. Cham: Springer InternationalPublishing,2016:56-72.
- [10] SHI B G, BAI X, YAO C. An end-to-end trainable neural network for image-based sequence recognition and its application to scene text recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2017,39(11):2298-2304.

收稿日期:2023-11-20

(上接第85页)

- [15] 林星铭,孟羽,林浩,等. 自动化散货码头装卸作业存在的问题与对策[J]. 水运工程,2018(6):204-207.
- [16] 许月琳,刘荣林. 煤矿铁路装车牵引系统的设计与实现[J]. 煤矿机械,2014,35(8):19-21.
- [17] 殷庆华,杨雪峰. 无极绳连续牵引车系统的稳定分析[J]. 煤矿机械,2011,32(6):98-100.
- [18] 刘迎春,白茜,詹海峰,等. 粗碎下长给矿皮带运输机传动机构研究及应用[J]. 中国钨业,2019,43(6):30-32.
- [19] 屈小兵. 煤矿铁路快速装车系统新式变轨铁牛的研究与应用[J]. 煤矿机械,2012,33(6):181-182.

- [20] 牛春红,张军民. 四轮驱动公路铁路两用牵引车研制[J]. 机械工程与自动化,2020(2):113-115.
- [21] 刘晓,马春晓. 铁牛调车系统在铁运货物卸车中的应用[J]. 纯碱工业,2016(3):21-22.
- [22] 朱晓冬. 一种集成式多功能自动装车系统成套技术及其应用[J]. 港口科技,2014(8):3-6.
- [23] 李菁川,周亚运,任烜,等. 全自动移动式平料装车机控制系统设计[J]. 港口装卸,2018(6):19-23.
- [24] 张华. 连续式装车机全自动电气控制系统设计[J]. 起重运输机械,2014(5):13-16.

收稿日期:2024-03-07