第 11 卷 第 4 期		集	成	技	术	Vol. 11	No. 4
2022 年 7 月	JOURNAL C)F INT	'EGRA'	TION	TECHNOLOGY	Jul	. 2022

引文格式:

郑泽凡,谷飞飞,王思成,等.基于三维视觉的机器人安全预警系统 [J].集成技术, 2022, 11(4): 80-91.

Zheng ZF, Gu FF, Wang SC, et al. A robot safety warning system based on 3D vision [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(4): 80-91.

基于三维视觉的机器人安全预警系统

郑泽凡^{1,2} 谷飞飞^{1,3} 王思成^{1,3} 宋 展^{1,4*}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055) ²(中国科学院大学 北京 100049) ³(人工智能与数字经济广东省实验室 深圳 518052) ⁴(粤港澳人机智能协同系统联合实验室 深圳 518055)

摘 要 在许多自动化应用场景中,如装配和分拣过程中,工业机器人的应用是提高生产质量和生 产效率的一个重要环节。在机器人工作过程中,保证机器人和工人工作的安全,是推动机器人应用 和发展的首要前提。该文提出一种基于三维视觉的机器人安全预警系统。首先,该系统利用三维相 机对监控场景进行高精度三维重建,并将多个点云进行融合;然后,提取人体关键点,并根据三维 人体关键点判断人与机械臂的安全距离;最后,计算判断人体与机器人是否处于设定的安全距离范 围,并据此控制机械臂的工作状态。实验结果表明,该文所开发的安全预警系统能保障大视野范围 内的人员安全。

关键词 安全系统;机器人;三维视觉;点云融合 中图分类号 TP 391 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20211228002

A Robot Safety Warning System Based on 3D Vision

ZHENG Zefan^{1,2} GU Feifei^{1,3} WANG Sicheng^{1,3} SONG Zhan^{1,4*}

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China) ²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy, Shenzhen 518052, China)

⁴(Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Shenzhen Institute of

Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: zhan.song@siat.ac.cn

Abstract In many automation application scenarios, such as assembly and sorting processes, the use of

收稿日期: 2021-12-28 修回日期: 2022-01-29

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B090925001);人工智能与数字经济广东省实验室(深圳)开放课题资助项目(GML-KF-22-25); 深圳市科技计划资助项目(RCBS20200714114921207)

作者简介:郑泽凡,硕士研究生,研究方向为计算机 3D 视觉;谷飞飞,博士,助理研究员,研究方向为图像处理与机器视觉;王思成,硕士研究 生,研究方向为计算机 3D 视觉;宋展(通讯作者),博士研究生导师,研究方向为计算机 3D 视觉, E-mail: zhan.song@siat.ac.cn。

industrial robots is an important part of improving production quality and productivity. During the working processes, safety is one of the primary prerequisites to be considered. In this paper, a safety warning system based on 3D vision for robots is proposed. First, the system uses 3D cameras to perform high-precision 3D reconstruction of the monitoring scene and fuse multiple point clouds; secondly, the human key points are extracted and the safety distance between the human and the robot arm is judged according to the key points; finally, the calculation determines whether the human and the robot are at the set safety distance and controls the working state of the robot arm. Experimental results show that the proposed safety warning system is able to work within a large field of view.

Keywords security system; robot; 3D vision; point cloud fusion

Funding This work is supported in part by Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2020B090925001), Open Research Fund from Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (SZ)(GML-KF-22-25), Shenzhen Science and Technology Program (RCBS20200714114921207)

1 引 言

随着自动化制造技术的不断发展,越来越 多的工业机器人被应用在分拣、装配、上料、焊 接、涂装等领域,工业机器人的广泛应用对提高 劳动产品的质量、产量有着十分重要的意义^[1-2]。 在机器人运行过程中,保证操作人员和周围设 备的绝对安全,是扩大机器人应用领域、保障 人机协作安全进行的首要前提。因此,研究机 器人安全技术将成为推动未来机器人发展的必 然需求^[3]。

随着人们对机器人安全技术的研究,工业机器人安全防护技术逐渐形成了3个主要方向—— 机器人本体控制、机器人操作、人机干涉碰撞。 着重在工业机器人控制器的完善、工业机器人对 危险指令的识别和工业机器人隔离设备的搭建^[46] 3个领域提高工业机器人的安全性。其中,隔离设 备的发展最为快速多样,目前最常见的安全防护 手段是在机器人工作区域外部安装金属防护栏^[7]。 安装护栏不仅可以有效隔绝人体,而且具有成本 低、制作简单等优势。但护栏的安装需要预留足

够的位置,在配置机器人设备时,护栏的设计和 安装还需要耗费一定的时间,在实际应用过程 中,很难快速地改变护栏的位置。针对安装护栏 的弊端,相关领域人员对基于传统传感器和机器 视觉的安全防护系统进行了更加深入的研究。 例如,利用"光幕技术"模拟物理护栏^[8]、利用 红外距离传感器标记人与机器人之间的距离^[9] 和利用力传感器来判断机器人是否与周边的人 或物体发生碰撞^[10]。基于传统传感器的安全防 护系统,一定程度上减少了传统护栏的弊端, 但其仍需要一定的安装空间,需要针对特定的 工作环境进行部署方案的设计。且为了实现全 方位的防护,需要大量传感器,若使用高精度 的传感器,还会增加成本。基于机器视觉的安全 防护系统,凭借机器视觉技术在运动目标检测、 人体识别、实时定位等方面的技术积累[11-12],通 过识别对象与机器人的位置[13],结合机器人控 制器的防控策略,来防止安全问题的发生^[14]。 然而,目前的视觉防护系统大多依靠二维(Two-Dimensional, 2D)图像进行禁区划分和人员检 测,无法实时反映人员与禁区的真实距离,容易

误判。

本 文 提 出 一 种 基 于 三 维 (Three-Dimensional, 3D)视觉的机器人安全预警系统, 在机器视觉安全防护系统中引入场景的 3D 点云 信息来协助判断安全状态。系统分为双 Kinect 采 集模块、点云处理模块、控制模块和显示模块。 在双 Kinect 采集模块中,采用 Azure Kinect 的飞 行时间(Time of Flight, ToF)模块实时对监控场 景进行 3D 重建^[15]。点云处理模块首先对所获取 点云中的 3D 人体关键点进行识别, 然后在刚性 配准后拼接得到更完整的场景点云,最后逐一比 较人体与所设置的禁区中心之间的最小距离,并 将最小距离与预设的安全距离进行比较,判断人 体与禁区之间的关系,及时与机器人控制器进行 通信,控制机器人的工作状态,以确保机器人安 全工作。此外,显示模块将监控画面和状态通过 软件进行展示,方便操作员实时监管。

2 系统方案设计

2.1 系统硬件设计

基于 3D 视觉的机器人安全预警系统由 Azure Kinect 设备、上位机、机器人控制器等部 分组成。

本文的系统设计图如图 1 所示。首先,由 Azure Kinect 设备采集各自视角下的点云、彩色 (Red-Green-Blue, RGB)图像和人体关节点信 息,并传到上位机;然后,上位机利用双目标定 得到的刚性配准参数,将点云进行拼接,在一个 统一坐标系下得到更加完整的场景点云和 3D 人 体关键点的坐标信息;最后,根据预设好的禁区 中心和安全距离判断人体是否处于危险状态, 并且通过传输控制协议/网际协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP)将状态 传送给机器人控制器,确保机器人的安全运行。



Fig. 1 The diagram of system design

2.2 系统软件设计

在 Windows 系统环境下,将 Visual Studio 20017 作为软件开发平台,C++语言作为程序 开发环境。系统软件结构运用类设计思想,对应 的软件结构如图 2 所示,其分为双 Kinect 采集模 块、点云处理模块、控制模块和显示模块。

(1)双 Kinect 采集模块。该模块首先对两台 Azure Kinect 设备中深度相机之间的旋转平移矩阵 参数进行标定;然后通过设备的软件开发工具箱 (Software Development Kit, SDK)获取每台设备捕 获的 RGB 图像、深度图和点云;最后将 RGB 图 像和深度图发送到显示模块进行显示,将点云和 RGB 图像发送给点云处理模块进行后续处理。

(2)点云处理模块。该模块首先利用 Azure Kinect 的 SDK 对场景中 3D 人体关键点进行提 取; 然后,通过双目标定得到深度相机之间的外 参矩阵,再利用该外参矩阵对两个点云进行刚性 配准后拼接,将 3D 人体关键点转换到统一坐标 系下;最后,将 3D 人体关键点映射到 RGB 图像 上,将 RGB 图像中的 2D 人体关键点检测结果发 送到显示模块,将统一坐标系下的点云发送到控 制模块。

(3)控制模块。该模块在收到的点云上设置 禁区,并结合 3D 人体关键点进行距离计算,从 而得到人体到禁区的最短距离,并根据此距离决 定机器人的运行状态。最后通过 TCP/IP 通信将 控制命令发送给机器人控制器。

(4)显示模块。该模块负责将接收到的 RGB 图像、深度图结果进行显示;当人体处于危险状 态时,予以警示。方便操作员进行人工监控。

3 系统实现的关键技术

深度图 双 Kinect 采集模块 系统标定 RGB 图 (双目标定) 点云 显 三示模块 点云处理模块 提取人体关 拼接场景点云 显 键点 示图 控制模块 计算人与禁区 上报状态 的位置关系

本文提出的基于 3D 视觉的机器人安全预

图 2 系统软件结构

Fig. 2 Structure of system software

4期

警系统的关键技术大致分为 3 步: (1)标定两台 Azure Kinect 设备中深度相机的外参矩阵,并通 过标定得到的外参矩阵实现点云的配准、拼接; (2)利用拼接好的点云进行禁区中心点和禁区半 径的设定,得到禁区范围后,结合 Azure Kinect 设备获取的 3D 人体关键点信息,进行状态判 断; (3)根据(2)中得到的状态判断结果与机械臂 控制器进行通信,保证人员安全。

3.1 点云获取与系统标定

根据透视投影原理^[16]得到空间点坐标的计算 公式,如公式(1)所示:

$$\begin{cases} x_{c} = z \times (u - u_{0}) \times d_{x} / f \\ y_{c} = z \times (v - v_{0}) \times d_{y} / f \\ z_{c} = z \end{cases}$$
(1)

其中, z 为深度图中对应像素点所表示的深度 值; (u,v)为深度图坐标系下的任意坐标点; (u_0,v_0) 为图像的中心坐标; f 为相机焦距; d_x,d_y 分别为每个像元的长和宽; (x_c,y_c,z_c) 为像素点 (u,v)所指向的现实点在相机坐标系下的坐标。

将 Azure Kinect 设备中 ToF 模块直接获取的 深度图,与该设备出厂自带的标定好的内参相结 合,再代入公式(1),可计算得到深度相机坐标 系下的空间点坐标。同时,利用 Azure Kinect 设 备的 SDK 可以获取设备视野中的有关人体信息 的数据帧,进而提取人体的关节位置信息。

本系统的标定指两台 Azure Kinect 设备中深度 相机之间的外参矩阵标定。其目的是获取两个深 度相机坐标系之间的旋转平移矩阵,并根据该旋 转平移矩阵将其中一台相机获得的点云结果转移 到另一台相机的坐标系下。图 3 为两个深度相机之 间的坐标关系图。根据图 3 所示的几何关系可以 得到两台相机之间的变换关系,如公式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} x_{m} \\ y_{m} \\ z_{m} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}, \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s} \\ y_{s} \\ z_{s} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{1} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{2} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s} \\ y_{s} \\ z_{s} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2)



Fig. 3 Coordinate diagram

通常,双目标定算法^[17-18]要求空间中的一块标定板能够同时被两台相机观测到。通过给定空间中任意点 *P* 在两台相机的相机坐标系下的坐标*P*,和 *P*,如公式(3)所示:

$$P_{1} = R_{1}P + T_{1}$$

$$P_{r} = R_{r}P + T_{r}$$
(3)

根据公式(3)可以推得两台相机外参之间的关系 如公式(4)所示:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{r} \boldsymbol{R}_{l}^{-1} \\ \boldsymbol{T} = \boldsymbol{T}_{r} - \boldsymbol{R} \boldsymbol{T}_{l} \end{cases}$$
(4)

再通过多次轻微移动标定板,获取同一时刻下两 台相机所拍摄的多组标定板图片,提取图片中角 点在两台相机坐标系下的坐标值,来单独求解多 组[**R**₁,**T**₁]和[**R**₁,**T**₁],用以计算[**R**,**T**]。

在本文提出的系统中,由于两台 Azure Kinect 设备几乎对视,无法观察到同一标定板 的同一面,因此,本文采用了一种新的标定方 案,其原理如图 4 所示。设主深度相机坐标系为 $O_m - x_m y_m z_m$,副深度相机坐标系为 $O_s - x_s y_s z_s$, 则副深度相机坐标系和主深度相机坐标系之间的 旋转平移矩阵为 [**R**,**T**]。给定一张较大的正反两 面印有相同棋盘格的标定纸,由于标定纸非常 薄,其正反两面的对应点可认为是空间中的同一 点。此时,通过 Azure Kinect 设备分别获得两个 深度相机坐标系下的对应角点坐标 $P_{s_i}(x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ 和 $P_{m_i}(x_{m_i}, y_{m_i}, z_{m_i})$ 。再使用最小二乘法^[19]计算 [*R*,*T*],其数学模型总结如公式(5)所示。其中, γ 是通过 Zhang^[20]的方法得到的函数。

 $\min_{R,T} error =$

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \left\| \gamma\left(x_{\mathbf{s}_{i}}, y_{\mathbf{s}_{i}}, z_{\mathbf{s}_{i}}\right) - \boldsymbol{R} \times \gamma\left(x_{\mathbf{m}_{i}}, y_{\mathbf{m}_{i}}, z_{\mathbf{m}_{i}}\right) + \boldsymbol{T} \right\|_{2}^{2}$$
(5)

经上述方案获得点云和矩阵 [*R*,*T*] 后,对点 云做拼接处理,得到场景的更加完整点云和 3D 人体关键点的完整坐标信息。



Fig. 4 System calibration schematic diagram

3.2 安全区域设定与侵入体识别

在获得场景的更加完整点云和 3D 人体关键 点的完整坐标信息后,再设定一个安全区域, 便于系统判断人体的安全状态。一般而言,机 械臂工作范围是一个近似球体的区域, 其最大 工作半径会在机械臂用户手册中给出,但传统方 法难以测量禁区中心点在深度相机坐标系下的 坐标值。由此,本文通过在点云中确定禁区中心 点坐标和自定义球体半径的方法设置禁区,禁区 效果示意图如图 5 所示。该方法分为 3 个步骤: (1)在 RGB 图像或深度图像中标记一个像素点 作为禁区的中心,记该像素点在图像上的坐标为 $P_{c}(u_{c},v_{c})$,并将该像素点代入公式(1),可计算得 到该像素点在深度相机坐标系下的空间点坐标; 然后结合双目标定获得的两台 Azure Kinect 设备 中深度相机的外参 [R,T],代入公式(2)即可将 该禁区中心点转换到一个统一坐标系中。(2)对

3D 人体关键点进行类似的操作。(3)利用球面方程,计算 3D 人体关键点与禁区所形成球面的位置关系。



图 5 禁区示意图

Fig. 5 The range of restricted area

记统一坐标系下的禁区中心点为 $C(x_c, y_c, z_c)$, 3D 人体关键点中的点为 $b_j(x_{b_j}, y_{b_j}, z_{b_j})$, 预设安 全距离分别为 d_1 和 d_2 , 且 $d_1 > d_2$, $dist(C, b_j)$ 为 C 和 b_j 两空间点之间的距离, *State* 为机器人应处 于的状态。公式(6)为机器人的状态判断公式。

	safe	$\min dist(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{b}_j) > d_1$
State={	slowdown	$d_2 \leq \min dist(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{b}_j) \leq d_1(6)$
	dangerous	$\min dist(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{b}_{j}) \leq d_{2}$

3.3 机器人运动状态控制

基于上位机通过 TCP/IP 发送状态控制指令和 机器人控制器上部署对应的指令响应脚本,可实 现对机器人运动状态的控制。上位机为网络通信 的客户端,机器人控制器为服务端。

为避免上位机频繁发送控制指令,上位机会 维持两个机器人运动状态变量。一个负责记录当 前计算得到的机器人状态 *State*_{now},另一个负责 记录上一个时刻的机器人状态 *State*_{previous}。当且 仅当当前状态与上一个时刻的状态不一致时,才 将当前状态通过字符串发送给机器人控制器。

机器人控制器与上位机建立链接后,可监听

端口发送的指令,根据指令调用机器人的调速模块,从而设置机器人的全局运动速度。其中, safe 表示正常运行,slowdown表示调速至运行速度的 50%,dangerous 表示暂停运行。

4 实验结果与分析

4.1 实验设备

本实验平台由两台 Azure Kinect 设备、优 傲 UR5 机械臂、越疆 CR5 机械臂和上位机电 脑组成。其中,Azure Kinect 设备的 RGB 相 机的分辨率设置为 1 920×1 080,帧率设置为 30 fps,视野范围为 90°×59°;ToF 相机工作 模式设置为窄视野范围 2×2 像素融合模式,分 辨率为 320×288,帧率为 30 fps,视野范围为 75°×65°,工作范围为 0.50~5.46 m,曝光时间 为 12.8 ms;由于两台 Azure Kinect 对重叠的视 场成像,为避免 ToF 模块投射的激光互相干扰, 两台 Azure Kinect 设备用 AUX 线连接,主 Azure Kinect 的 ToF 模块激光投射完毕后,将通过 AUX 线发出一个信号触发副 Azure Kinect 工作; 机器人选用丹麦优傲机械臂(UR5),其有效负载 为5 kg,有效工作半径为 850 mm,自由度为6个 旋转关节; 上位机处理器为 Intel i7 9700, 显卡为 Nvidia RTX 2080 Super, 内存大小为 32 GB。实 验平台搭建如图 6 所示。

4.2 实验结果分析

在基于 3D 视觉的机器人安全预警系统实验 中,首先计算两台 Azure Kinect 设备中深度相机 的外参矩阵,然后根据第 3.1 节表述的步骤对深 度相机进行双目标定,标定结果如图 7 所示。双 Azure Kinect 不仅解决了单 Azure Kinect 存在的视 野盲区问题,如图 7(b)~(e)所示,还具有较高 的标定精度,拼接后的点云也显示该系统的监控 区域覆盖面积大,可满足机器人工作场景下的人 员安全监控要求。本文选取场景中的某一薄木板 进行重建,拼接后的木板点云如图 7(f)所示,由 图 7(f)可知,主、副深度相机中木板的点云基 本重合。本文还对场景中的某一方形柜子进行重 建,拼接后的柜子点云如图 7(g)所示,由图 7(g) 可知,柜子的几何特征基本上得到了复原。

为进一步量化深度相机标定的精度,本文 利用第3节双目标定使用的标定纸,根据第3节 描述的过程,在统一坐标系下,分别记录两个 Azure Kinect 视角下标定纸上9个角点的坐标值并 进行比较,比较结果如表1所示。由表1可知,



图 6 实验平台搭建 Fig. 6 The experimental setup



(a)副相机 RGB

(b)副相机点云



(c) 主相机 RGB

(d)主相机点云

(g)拼接柜子点云



(e)拼接后的点云







Fig. 7 The result of calibration

表1 9点坐标值比较

I able 1 Comparison of 9 points' position

序号	主深度相机 (mm)	副深度相机 (mm)	位置误差 (mm)
1	(-216, -722, 2 206)	(-217, -721, 2 204)	(1, 1, 2)
2	(99, -780, 2 329)	$(101, -778, 2\ 330)$	(2, 2, 1)
3	(445, -845, 2 462)	(445, -846, 2 467)	(0, 1, 5)
4	(-178, -525, 2 350)	(-176, -528, 2 354)	(2, 3, 4)
5	(124, -564, 2 477)	(124, -564, 2 476)	(0, 0, 1)
6	(431, -569, 2 623)	(431, -569, 2 624)	(0, 0, 1)
7	(-200, -195, 2 544)	(-203, -196, 2 545)	(3, 1, 1)
8	(99, -246, 2 660)	(99, -246, 2 663)	(0, 0, 3)
9	(435, -263, 2 822)	(437, -261, 2 825)	(2, 2, 3)

两个深度相机外参标定精度均在 5 mm 以内。

为验证系统的可靠性,针对不同体型、服 装、性别的行人,本文从各个角度对禁区进行侵 入测试,记录预警的准确率。此外,为更直观地 观察系统状态,本文还设计了一套基于微软基础 类库的控制软件,如图 8 所示。该软件可以自定 义禁区中心点、禁区半径等参数,且可以实时显 示监控画面和标记人体所处状态。

本文在优傲 UR5 机械臂和越疆 CR5 上进行 行人闯入实验,当机械臂处于运动状态时,使行 人闯入,机械臂需要根据人和机械臂的距离做出 相应的减速或停止动作。累计重复 100 次随机穿 着的随机人员进行随机方向的闯入实验。系统 按照第3节中的程序进行计算,部分实验过程如 图9所示,部分实验记录如表2所示。

由表 2 可知,在实时监控下,系统对各种穿



图 8 软件界面

Fig. 8 Software interface



(a) 触发减速



(d)触发减速

(b)触发停止





(f)正常运行

图 9 实验过程

Fig. 9 Experiment procedure

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
序号	穿着	身高 / 体重	警示状况	遮挡下是否正常工作
1	白色短袖、黑色长裤	171 cm/67 kg	正确	是
2	黑色长衣、蓝色长裤	165 cm/60 kg	正确	是
3	黑鸭舌帽、黑色上衣、黑色长裤	179 cm/63 kg	正确	是
4	棕色上衣、蓝色长裤	168 cm/52 kg	正确	是
5	灰色上衣、灰色长裤	165 cm/44 kg	正确	是
6	蓝色上衣、绿色长裤	163 cm/75 kg	正确	是
7	红色上衣、蓝色长裤	167 cm/60 kg	正确	是
8	紫色上衣、黑色长裤	164 cm/62 kg	正确	是
9	兜帽、黑色上衣、黑色长裤	172 cm/65 kg	正确	是

表 2 实验结果 Table 2 Result of experiment

着的人员侵入禁区行为的检测率为 100%, 且系统 在两种机械臂上均可以正常运行。如图 9(a)~(c) 所示,在优傲 UR5 机械臂场景中,当行人进入 预设的减速距离和停止距离时,可触发相应的警 告,并对机器人控制器发出相应的控制指令。如 图 9(d)~(f)所示,在越疆 CR5 机械臂场景中, 当其中一台 Azure Kinect 丢失对白布后面行人的 监控后,另一台 Azure Kinect 依旧可以从它的视 角继续监控场景,保证人员安全。综上所述,本 文所搭建系统具有稳定性和可靠性。

与现有的安全防护系统相比,常州节卡智能 装备有限公司发布了一种基于 2D 视觉的机械臂 安全防护系统^[21],其通过获取机械臂正上方的 俯视图结合人体识别,实现类似虚拟栏杆的功 能。该系统实现了对固定禁区的人体侵入监控, 但无法根据机械臂的运动状态实时改变禁区。

ABB (Asea Brown Boveri)公司推出"Safe Move 2(机器人安全区域控制技术)",该系统使用大 量传感器对禁区进行覆盖监控^[22],结合软件对禁 区进行高度定制化的监控,但高精度的传感器会 导致系统成本增加,此外,"Safe Move 2"系统 只适用于 ABB 公司的产品,难以泛化到其他机 器人上。目前,虽然有基于视觉检测的机器人安 全防护系统,也有许多基于传感器的解决方案, 但是基于人体检测的方案缺少 3D 位置信息,导 致精度不够,且对监控相机的架设有一定要求。 基于传感器的解决方案,其监控效果与传感器 精度和布置方案有很大关系,通用性较差^[23]。 与现有方法相比,本文的机器人安全防护系统 可作为保障机器人安全作业的一种全新的可行 解决方案。

5 结 论

在机器人作业过程中,针对人员安全保障 问题,本文搭建了基于 3D 视觉的机器人安全预 警系统。首先,本文利用 Azure Kinect 可以高速 重建大场景点云和检测人体的优势,实时获取 场景中的点云信息。为了实现安全防护功能, 先对两台 Azure Kinect 中的深度相机进行双目标 定,获取其外参矩阵,再根据外参矩阵将点云 都统一到一个公共坐标系下; 然后, 根据设定 好的禁区范围和获取的 3D 人体关键点信息计算 判断人员的安全状态;最后,通过 TCP/IP 协议 与机器人控制器通信,确保机器人安全工作。 该系统能够利用多 Azure Kinect 进行多角度监 控,利用更完整的 3D 位置信息,正确控制机器 人的工作状态,保障人员安全,同时具有架设 简单、部署方便的优势,是保障人机交互安全 作业的一个新思路。

- 张红霞. 国内外工业机器人发展现状与趋势研究
 [J]. 电子世界, 2013, (12): 5.
 Zhang HX. Research on the development status and trend of industrial robots at home and abroad [J].
 Electronics World, 2013, (12): 5.
- [2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业 化发展战略 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
 Wang TM, Tao Y. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [3] 陈骞. 欧盟机器人 2016 年发展策略 [J]. 上海信息 化, 2016, (7): 79-81.
 Chen Q. EU robot development strategy in 2016 [J].
 Shanghai Informatization, 2016, (7): 79-81.
- [4] Bogue R. Sensing skins for robots: product developments and recent research [J]. Industrial Robot, 2020, 47(3): 313-318.
- [5] 万燕英, 伍祁林. 工业机器人安全防护技术综述
 [J]. 机电工程技术, 2021, 50(9): 121-123.
 Wan YY, Wu QL. Overview on safety protection technology of industrial robots [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(9): 121-123
- [6] Bouraine S, Azouaoui O. Safe motion planning based on a new encoding technique for tree expansion using particle swarm optimization [J]. Robotica, 2021, 39(5): 885-927.
- [7] Kartashevand VA, Kartashev VV. Intellectual collaborative robot safety control system: separating the working areas of the robot and operator [C] // Proceedings of the 2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2017: 237-240.
- [8] Tan JTC, Duan F, Zhang Y, et al. Safety design and development of human-robot collaboration in cellular manufacturing [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Automation

Science and Engineering, 2009: 537-542.

- [9] Gajbhiye CS, Krishnan MG, Kumaravel S, et al. Fuzzy—Arduino based control strategy for human safety in industrial robots [C] // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems, 2017: 1-6.
- [10] Cirillo A, Ficuciello F, Natale C, et al. A conformable force/tactile skin for physical human-robot interaction [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2015, 1(1): 41-48.
- [11] 黄绿娥. 基于机器视觉的人体运动目标智能监控 系统设计与研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
 Huang LE. Design and research on the intelligent detection and tracking system for motion people based on machine vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [12] 蔺广逢,范引娣. 智能视频监控中的人体检测与 识别 [J]. 计算机应用, 2007, 27(B12): 91-92.
 Lin GF, Fan ZD. Human detection and recognition in intelligent video surveillance [J]. Computer Application, 2007, 27(B12): 91-92.
- [13] Robla S, Llata JR, Torre-Ferrero C, et al. Visual sensor fusion for active security in robotic industrial environments [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014, 2014(1): 1-20.
- [14] Bdiwi M. Integrated sensors system for human safety during cooperating with industrial robots for handing-over and assembling tasks [J]. Procedia CIRP, 2014, 23: 65-70.
- [15] Tölgyessy M, Dekan M, Chovanec Ľ, et al. Evaluation of the Azure Kinect and its comparison to Kinect V1 and Kinect V2 [J]. Sensors, 2021, 21(2): 413.
- [16] 何援军. 透视和透视投影变换——论图形变换和 投影的若干问题之三 [J]. 计算机辅助设计与图形 学学报, 2005, 17(4): 734-739.
 He YJ. Perspective and its projection transformation [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(4): 734-739.

- [17] 于勇,张晖,林茂松. 基于双目立体视觉三维重建 系统的研究与设计 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 127-130.
 Yu Y, Zhang H, Lin MS. Research and design of the 3D reconstruction system based on binocular stereo vision [J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(6): 127-130.
- [18] 庄光明, 崔建伟, 彭作祥. 基于双目定位原理的系统标定算法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(8): 45-47.

Zhuang GM, Cui JW, Peng ZX. Calculation of system demarcation based on binocular location [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(8): 45-47.

- [19] Axelsson O. A generalized conjugate gradient, least square method [J]. Numerische Mathematik, 1987, 51(2): 209-227.
- [20] Zhang ZY. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 666-673.

[21] 常州节卡智能装备有限公司. 一种安全防护方法、装置和计算机设备: 中国, CN201811578371.2
[P]. 2019-01-29[2021-12-25]. https://www.qixin.com/patents/434e3230313831313537383337312e32/54.

Changzhou Jaka Intelligent Equipment Co. A security protection method, device and computer equitment: China, CN201811578371.2 [P]. 2019-01-29[2021-12-25]. https://www.qixin.com/patents/434e3230313831313537383337312e32/54.

- [22] Maurtua I, Ibarguren A, Kildal J, et al. Humanrobot collaboration in industrial applications: safety, interaction and trust [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(4): 1-10.
- [23] 黄海丰,刘培森,李擎,等.协作机器人智能控制
 与人机交互研究综述 [J].工程科学学报,2022,
 44(4):780-791.

Huang HF, Liu PS, Li Q, et al. Review: intelligent control and human-robot interaction for collaborative robots [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 780-791.