

# 基于 Intel SoC 的羽毛球捡拾机器人设计与实现 \*

刘永兵, 何伟, 张玲

(重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400000)

**摘要:** 针对羽毛球难以实现自动化捡拾问题, 研究了多传感器数据融合技术和路径规划, 设计了一款对羽毛球损伤率低的羽毛球捡拾机器人。该捡球机器人以激光雷达和摄像头为感知单元, 提高了定位与识别羽毛球的准确率; 以直流电机、机械部件等为机器人的动作执行单元, 实现了机器人的位移动作与捡球动作。测试结果表明, 该羽毛球捡拾机器人对球损伤率小于 5%、平均捡球速度为 20~30 个/min、拾球时间小于 0.4 s, 整个机器人系统具有一定实用性。

**关键词:** 羽毛球; 捡球机器人; FPGA; HPS; 路径规划

中图分类号: TN409

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200032

中文引用格式: 刘永兵, 何伟, 张玲. 基于 Intel SoC 的羽毛球捡拾机器人设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 118~122.

英文引用格式: Liu Yongbing, He Wei, Zhang Ling. Design and implementation of badminton picking robot based on Intel SoC[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 118~122.

## Design and implementation of badminton picking robot based on Intel SoC

Liu Yongbing, He Wei, Zhang Ling

(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** In the view of difficulty of automatic pick-up of badminton, this paper studied the multi-sensor data fusion technology and path planning, and designed a badminton pick-up robot which doesn't hurt the badmints. The ball picking robot uses a lidar and a camera as sensing units to improve the accuracy of positioning and identifying badminton; DC motors, mechanical parts, etc. are used as the robot's action execution units to realize the robot's displacement and ball picking actions. The test results show that the badminton ball picking robot has a ball injury rate of less than 5%, an average ball picking speed of 20 to 30 pieces/min, and a ball picking time of less than 0.4 seconds. The entire robot system has certain practicality.

**Key words:** badminton; ball-picking robot; FPGA; HPS; route planning

## 0 引言

羽毛球作为一项全民健身运动, 能够给人体带来很多好处。在羽毛球训练中, 频繁的人工捡球是一个低效的过程。若有一款能够自动无损伤拾取羽毛球的机器人代替人捡球, 羽毛球的捡球效率将会得到提升, 训练者也能从费时费力的捡球活动中脱离出来。

目前对羽毛球捡拾系统的研究主要有两类方案: 一类是需要人工配合操作的羽毛球捡球车<sup>[1]</sup>, 另一类是能够自动捡球的机器人方案<sup>[2]</sup>。对于羽毛球捡球车, 目前市场上已有产品售卖; 而对于羽毛球机器人的研究, 目前尚处于产品原型研究中。不管是捡球车方案还是机器人方案, 均在捡球过程中不可避免地损伤羽毛球。针对上述现状, 本研究设计了一种能够无损伤捡拾羽毛球的机器人。该捡球机器人以电机等传动机构为动作执行单

元, 以激光雷达和摄像头为机器人的感知单元<sup>[3]</sup>。

## 1 系统总体设计

设计的羽毛球捡拾机器人系统框图如图 1 所示。根据系统逻辑功能将机器人分为羽毛球信息采集部分、羽毛球信息处理部分及机器人动作控制部分。羽毛球信息采集部分组合了单线激光雷达和单目摄像头两种传感器, 用于实现羽毛球灰度信息和位置信息获取<sup>[4]</sup>; 羽毛

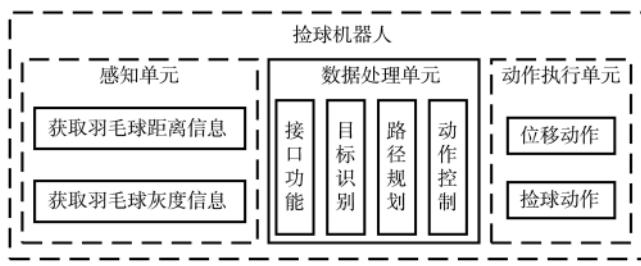


图 1 系统总体框图

\* 基金项目: 重庆市研究生科研创新项目 (CYS19059)

# 电路与系统 Circuits and Systems

球信息处理部分以 DE10-SoC 开发板为核心,用于完成羽毛球识别与捡球路径规划;机器人动作控制部分的硬件包括 SoC(System on Chip)、电机驱动板及若干个电机组,该部分按照规划好的捡球路径执行机器人位移动作和捡球动作。

机器人工作时,首先通过羽毛球距离信息采集部分获取羽毛球的距离和角度信息进行第一次目标识别,当 FPGA(Field Programmable Gate Array)端得到 HPS(Hard Processor System)端的指令后,摄像头采集图像送入 SoC 中 HPS 端,在嵌入式 Linux 系统中将羽毛球的距离信息和角度信息映射到图像中,并在图像中产生一个候选区域<sup>[5]</sup>,后续的羽毛球识别只在候选区域进行。当识别到羽毛球后,程序就会按照“最短路径优先”的方式规划一条捡球路径<sup>[6]</sup>。

## 2 系统硬件设计

为缩短开发周期,系统采用了 SoC 和外接电路结合的方式。在设计中,将 DE10-Nano 开发板的 SoC 作为核心器件,其中 FPGA 端负责连接外围器件和 HPS 端,外接驱动板的作用是驱动机器人执行元件。各硬件 IP 核(Intellectual Property core) 之间通过 Qsys 工具互联起来<sup>[7]</sup>。系统硬件框图如图 2 所示。

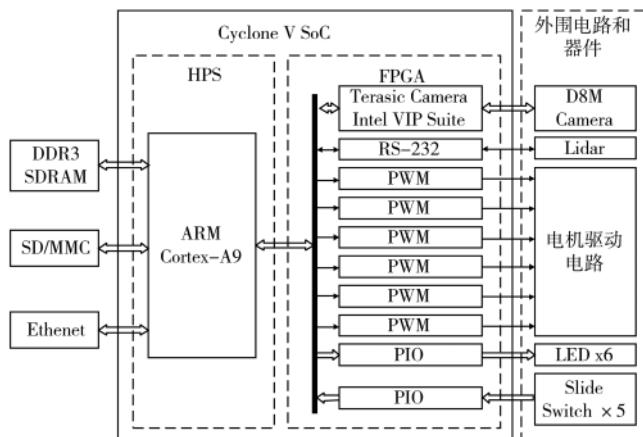


图 2 系统硬件框图

### 2.1 图像采集模块设计

图像采集模块中,主要考虑利用 FPGA 并行计算能力加快图像采集和格式转换过程。在本设计中,图像传感器采用 MIPI 接口的 D8M 摄像头。D8M 模块通过 GPIO(General Purpose Input Output) 接口连接至 FPGA 端。在 Qsys 中调用 TERASIC\_CAMERA 和 Intel VIP Suite 相关 IP 核构建图像采集模块<sup>[8]</sup>,图像采集模块各 IP 之间的连接情况如图 3 所示。

### 2.2 激光雷达连接配置

羽毛球二维平面坐标信息由单线激光雷达扫描得到,激光雷达与 SoC 采用串口通信。该串口是 Qsys 中调用 RS-232 IP 生成的,FPGA 和 HPS 之间通过 AXI(Advanced eXtensible Interface)总线通信。为实现激光雷达的

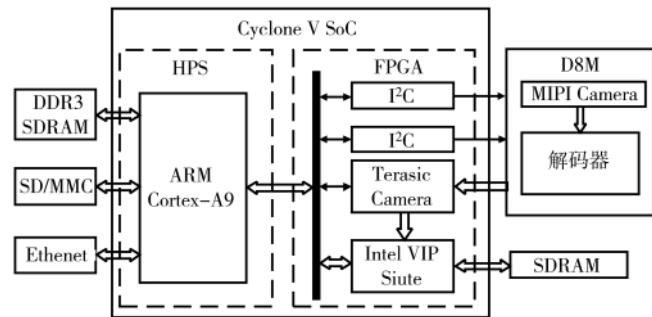


图 3 图像采集模块的配置

8K 高速采样速度,本文将串口波特率设置为 230 400 b/s。激光雷达、IP 核及 HPS 之间连接关系如图 4 所示。

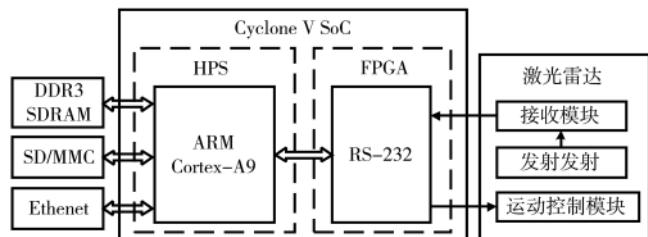


图 4 激光雷达连接配置

### 2.3 驱动模块设计

机器人的动作执行机构共由 7 个直流电机提供动力,这些电机由 6 路 PWM(Pulse Width Modulation)模块控制。考虑到芯片的功能和驱动能力,设计选用了 TB6612FNG,该芯片能够产生两路驱动信号并且具备开关功能。驱动电路使用了三个型号相同的驱动芯片,其中 1 号风扇和捡球轮驱动电路如图 5 所示。由于 Quartus 开发工具没有安装 PWM 模块的 IP 核,因此本研究中设计了一个 PWM IP 核。在 Qsys 中,调用了 6 路 PWM 模块控制 7 个电机,6 组电机能够独立工作、互不影响。在电机控制中,还加入了电机方向控制、驱动芯片使能控制,这些控制是在 Qsys 中调用 PIO IP 完成的。

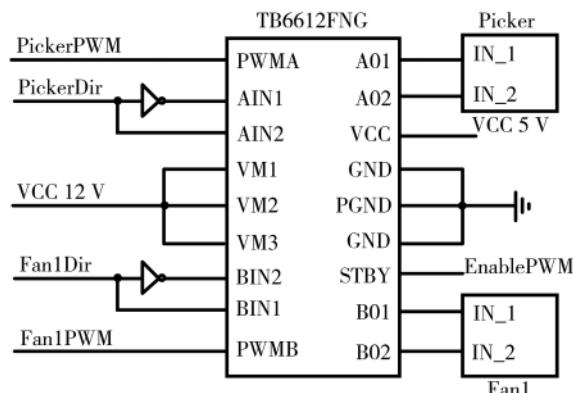


图 5 风扇和捡球轮驱动电路

## 3 HPS 端软件设计

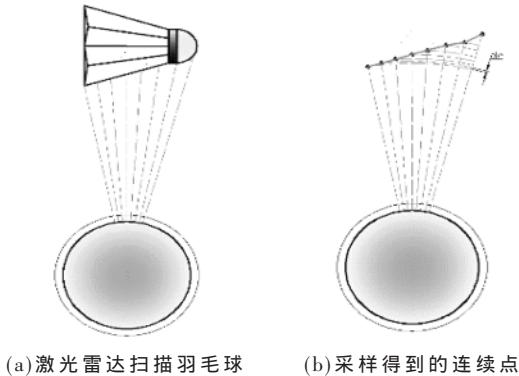
羽毛球目标识别和机器人动作控制都是在 HPS 端

# 电路与系统 Circuits and Systems

实现,因此需要设计嵌入式Linux应用程序,以实现羽毛球识别、定位及机器人捡球动作控制。

## 3.1 定位与初识别

识别与定位羽毛球是一个先假设后验证的过程。激光雷达在可视范围进行采样,如图6所示。若扫描到的物体大小符合羽毛球外形特征,则图像中该物体所在的区域将被送入目标识别程序进行识别。图7为羽毛球定



(a) 激光雷达扫描羽毛球 (b) 采样得到的连续点

图6 激光雷达对羽毛球进行横向扫描采样

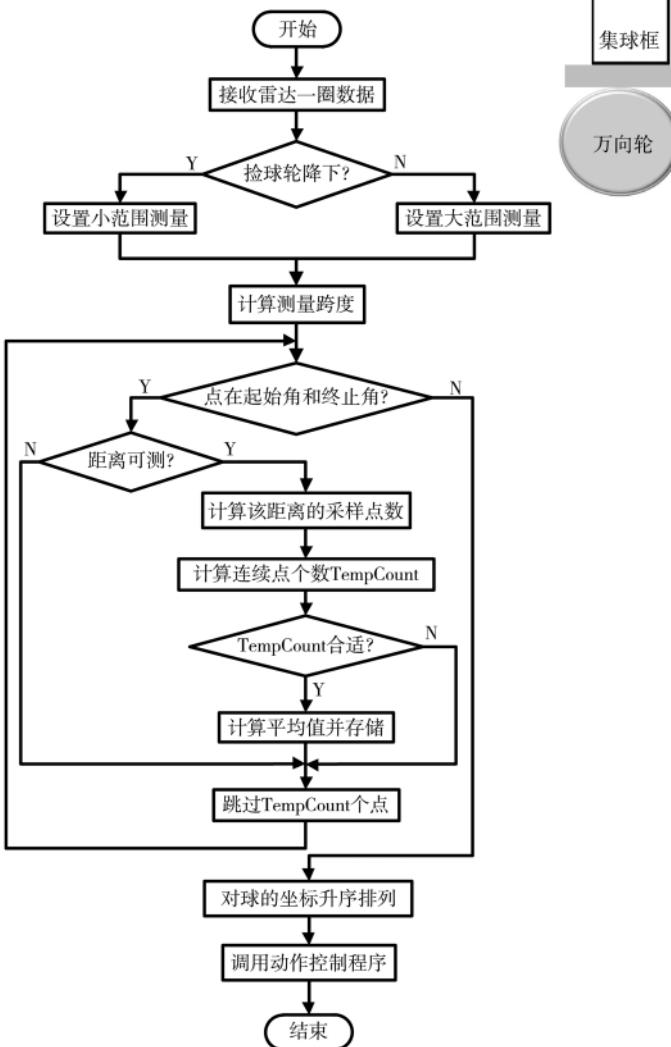


图7 羽毛球初识别流程

位与初识别程序流程。

初识别程序除了对激光雷达检测到的物体进行粗略判断外,其另一个作用是以粗实别后的羽毛球中心位置为基准点,进行候选区域计算。在后续的图像处理中,目标识别工作只在图像的候选区域进行,这样能够极大降低目标识别的计算量,进而提升识别速度。

## 3.2 羽毛球候选区域的计算

为了准确地计算选区域,需要先对激光雷达和摄像头进行联合标定<sup>[9]</sup>。在本研究中以激光雷达坐标系为世界坐标系,坐标原点为激光雷达接收器旋转中心,两个传感器的安装位置如图8所示。

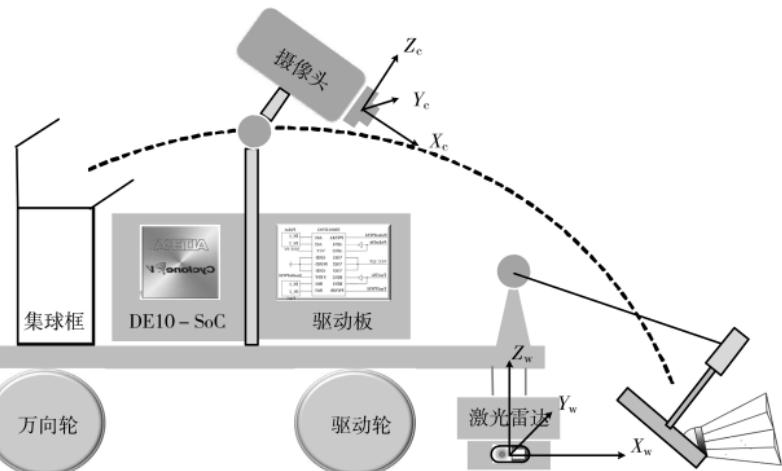


图8 激光雷达摄像头的安装位置

假设  $P_{Cam}$  为物体在摄像头坐标系中齐次坐标,则有:

$$P_{Cam} = [X_{Cam} \ Y_{Cam} \ Z_{Cam} \ 1]^T \quad (1)$$

设  $P_{Lidar}$  为该物体在激光雷达坐标系中的齐次坐标值,则:

$$P_{Lidar} = [X_{Lidar} \ Y_{Lidar} \ Z_{Lidar} \ 1]^T \quad (2)$$

$R(\theta_x), R(\theta_y), R(\theta_z)$  为激光雷达坐标系到摄像头坐标系绕三个坐标轴的旋转矩阵,  $T_{Lidar2Cam} = [X_{Lidar2Cam} \ Y_{Lidar2Cam} \ Z_{Lidar2Cam}]^T$  为激光雷达坐标系和摄像头坐标系之间的偏移矩阵。通过数学方法可将三个旋转矩阵合并成一个矩阵,合并后的矩阵总能写成四元数的形式<sup>[10]</sup>:

$$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则激光雷达坐标系到摄像头坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_{Cam} \\ Y_{Cam} \\ Z_{Cam} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) & T_{Lidar2Cam} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Lidar} \\ Y_{Lidar} \\ Z_{Lidar} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中偏移矩阵  $T_{Lidar2Cam}$  可通过直接测量得到,也可通过计算摄像头和激光雷达的安装参数得到;而四元数矩阵  $R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$  中三个角度因子的值需要根据候选框与图像

电路与系统 Circuits and Systems

中目标的匹配程度给出估计值，估计方法是在可视化界面中不断调整三个角度值，使候选框的大小与位置能够比较准确地反映图像中的感兴趣物体<sup>[11]</sup>。旋转矩阵求出后还需要求出摄像头的内参，摄像头内参标定采用张氏标定法得到。

### 3.3 羽毛球终识别程序设计

激光雷达扫描到的物体经初识别确定为类羽毛球物体后,FPGA 控制摄像头采集图像并送入 HPS 端进行最终判断。在本设计中,由于图像中羽毛球背景单一,且类羽毛球物体已经历了初识别,因此该物体的终识别使用传统图像处理中轮廓提取和颜色检测相结合的方法实现,其流程如图 9 所示。羽毛球识别结果如图 10 所示。

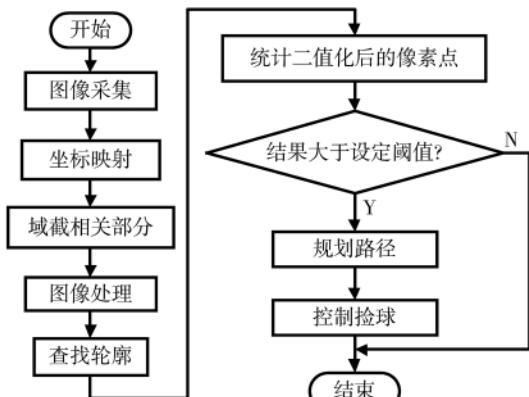


图 9 目标识别流程

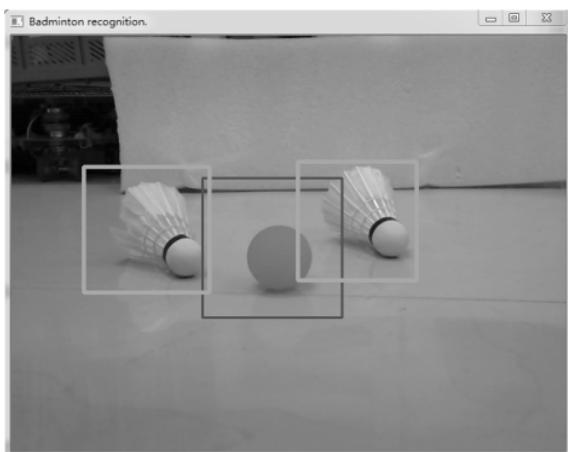


图 10 羽毛球识别结果

### 3.4 捡球路径规划

在本设计中，综合考虑了机器人功耗、捡球效率以及外形尺寸，采用了适合机器人的最短路径优先(Shortest Path First)的原则<sup>[12]</sup>。该原则是一种动态的路径规划，主要思想是让机器人时刻以最短的路径去捡球。捡球路径如图 11 所示。

### 3.5 捡球机器人动作控制程序设计

捡球机器人动作控制如图 12 所示。在动作流程中按照羽毛球与机器人之间的距离是否适合捡球<sup>[13]</sup>，将机

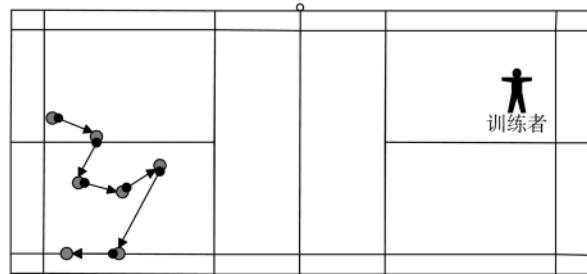


图 11 捡球最短路径示意图

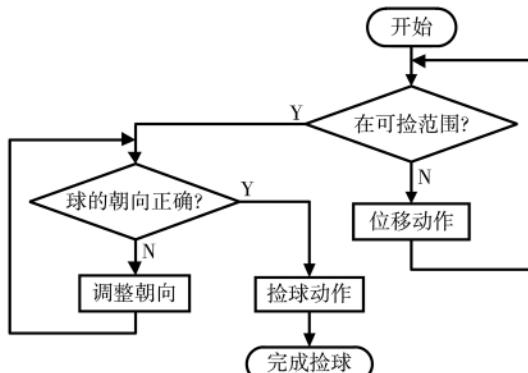


图 12 机器人动作的控制

机器人动作控制程序分成球控制和移动平台控制两个主要过程，以及一个辅助过程：羽毛球朝向调整过程。

### 3.5.1 移动平台控制程序设计

移动平台的控制主要是在机器人朝羽毛球移动过程中需要根据距离实现平滑的速度调整,为此设计利用激光雷达返回的实时距离信息设计了距离反馈调速机制。该调速方式中,激光雷达每隔一个采样周期便反馈一次距离信息,程序根据机器人与羽毛球之间的距离计算机器人直行速度和转向速度,机器人位移控制程序流程图如图 13 所示。

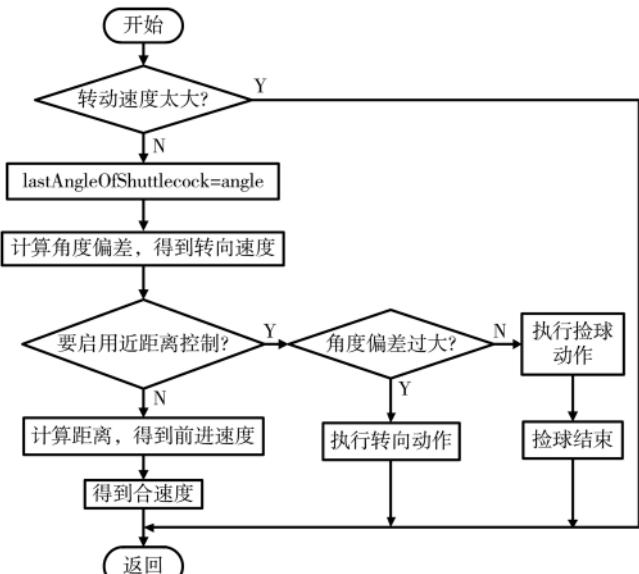


图 13 机器人位移控制流程

## 3.5.2 调整球头朝向程序设计

根据羽毛球距离、朝向的不同,两个涡轮风扇通过改变风量大小实现羽毛球方向调整,如图 14 所示。羽毛球的朝向由 3.3 节中羽毛球终识别中给出,当球的羽毛部分朝向捡球轮时,程序控制风扇利用风力将羽毛球朝向摆成球头朝向捡球轮。在实际工作中,机器人的近距离转向动作和羽毛球球头朝向的调整过程是同时进行的。

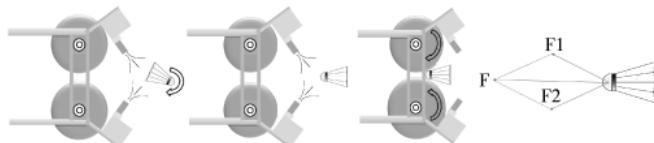


图 14 羽毛球方向调整示意图

## 3.5.3 捡球控制程序设计

当羽毛球与机器人距离合适、角度合适时,程序便会控制机器人进行捡球,捡球程序流程如图 15 所示。为实现羽毛球无损伤捡拾,本文设计了一种捡球方案。该捡球方案中采用一对旋转的软质捡球轮与羽毛球之间产生的合力将羽毛球抛起,达到捡球的效果。由于捡球轮仅接触到羽毛球头部,因此这种捡球方式对羽毛球没有损伤。程序通过调节两个捡球轮的转速实现调整羽毛球的抛起速度和高度,进而能够使羽毛球准确落入羽毛球回收框。在实际工作中,机器人的近距离位移动作和捡球过程也是一个相互影响、交替进行的过程。当捡球轮对准羽毛球球头并且捡球轮与羽毛球距离合适时,降下捡球装置将捡球轮调整至合适速度,控制机器人向前移动,捡球轮接触到羽毛球球头便可将羽毛球捡起。

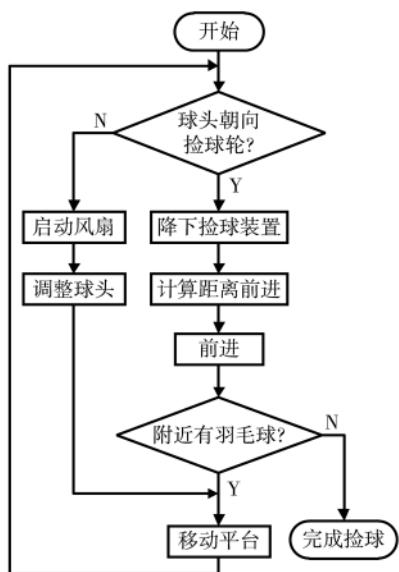


图 15 羽毛球捡拾控制流程

## 4 结论

本研究设计了一种能够无损伤捡拾羽毛球的机器人。机器人以 DE10-Nano 开发板为核心板,通过 FPGA

和 HPS 结合的方式在 SoC 中完成了软硬件设计,实现了羽毛球的定位、识别以及无损伤拾取。机器人采用 Intel SoC 作为硬件开发平台,后期可通过修改 FPGA 硬件逻辑实现硬件功能的扩充。例如,若机器人需要增加光电模块时只需要在 Qsys 中添加 PIO 模块,而不需要再去修改外接电路板。设计采用 FPGA 进行图像采集和格式转换,加快了图像处理过程,提高了机器人的实时性。实际测试结果表明,该羽毛球捡拾机器人对羽毛球损伤率小于 5%、平均捡球速度为 20~30(个/min)、单个羽毛球拾球时间小于 0.4 s,具有一定的实用价值。

## 参考文献

- [1] 华伟,陈黔宁,曹宁磊,等.羽毛球捡球车:CN20162064-2454.3[P].2016-06-24.
- [2] 徐再燃,司欢欢,田巨川,等.一种自动捡球机器人:CN201721377708.4[P].2017-10-24.
- [3] 李东,张贝贝,陈鑫,等.基于机器视觉的自主巡航智能捡球机器人:CN201811476052.0[P].2018-12-04.
- [4] 许峰,程子龙,陈华,等.激光雷达与摄像头交互式障碍物检测算法[J].数字通信世界,2017(9):262-263.
- [5] 陆怡悦,蔡云飞,石庭敏.基于多线激光雷达与视觉信息的实时行人检测[J].计算机与数字工程,2017,45(11):2256-2262.
- [6] 张婷宇,郑宝娟.基于滚动 Q 学习的机器人路径规划算法[J].科教导刊,2019(29):275-275.
- [7] 叶文杰.基于 SoC 的卡拉OK 音效处理器设计及实现[D].重庆:重庆大学,2016.
- [8] 龚雪菲.基于 SoC 的智能垃圾桶设计与实现[D].重庆:重庆大学,2018.
- [9] 黄遥.FSAC 赛车雷达障碍物检测与摄像头图像识别研究[D].沈阳:辽宁工业大学,2019.
- [10] 赫恩,巴克,卡里瑟斯.计算机图形学[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [11] 李玲玉.计算机化系统验证方法探讨[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [12] 郑文.机器人最短路径最短时间路径分析[J].制造业自动化,2013,35(4):142-146.
- [13] 周磊,梁佳楠,谭军民.机器人控制系统分析研究[J].科学与信息化,2019(27):184-188.

(收稿日期:2020-01-13)

## 作者简介:

刘永兵(1991-),男,硕士,主要研究方向:嵌入式系统。  
何伟(1964-),男,教授,主要研究方向:智能图像处理、电子系统设计、FPGA 应用研究、嵌入式系统。  
张玲(1964-),女,教授,主要研究方向:信号与信息处理、电路与系统。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所