

doi: 10.7690/bgzdh.2018.03.013

基于高速视觉的乒乓球机器人

王滨生, 刘佳男, 刘吉, 吴伟, 赵晨阳

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对现有乒乓球机器人各自由度对应的执行机构累积误差较大的问题, 开发一种能与人对打乒乓球的机器人。该机器人主要包括移动机构和击球机构, 采用 G 型夹封闭夹持、垂直球网方向同步双导轨、平行球网方向单导轨、舵机控制平台和球拍角度、气缸推球拍的方案, 视觉系统采用基于 Kinect 的乒乓球识别算法, 通过阈值分割算法和轮廓提取算法等图像处理方法提取图像中的信息。实现了机器人与人对打乒乓球的功能。结果表明: 该方案是可行、成功的, 对同行有一定的参考价值。

关键词: 视觉; 高速; 机器人

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Table Tennis Robot Based on High Speed Vision

Wang Binsheng, Liu Jianan, Liu Ji, Wu Wei, Zhao Chenyang

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper develops a kind of robot which can play table tennis with people in order to solve the problem of accumulating errors of the implementing agencies corresponding to the degree of freedom of existing table tennis robots. The robot mainly comprises a moving mechanism and a hitting mechanism. Use the design of clamp clamped with G clamp, synchronous dual guide vertical to ball net, single guide parallel to ball net, steering gear control platform and angle of the racket, cylinder push shot. The visual system adopts Kinect-based table tennis recognition algorithm, the information in the image is extracted by image processing methods such as threshold segmentation algorithm and contour extraction algorithm. Realize the robot playing table tennis with people. The results show that the design is feasible and successful, and it has some reference value for peers.

Keywords: vision; high speed; robot;

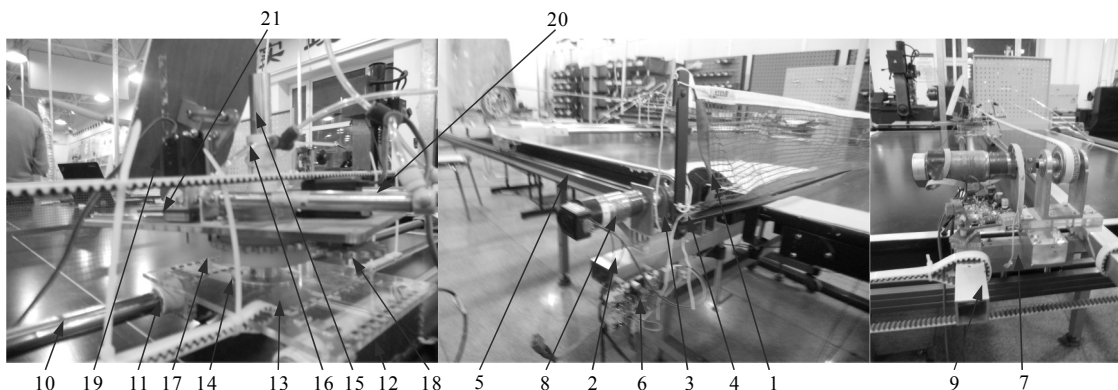
0 引言

乒乓球机器人有 2 种应用场合: 一是为职业乒乓球运动员提供模仿竞争对手的打法训练; 二是给业余乒乓球爱好者做陪练。在控制系统和机械结构速度能满足要求的情况下, 需要能精确地将球击回运动员所在球台上的特定位置。为解决现有乒乓球机器人各自由度对应的执行机构累积

误差大的问题, 笔者提出一种能与人打乒乓球的机器人设计方案。

1 机械结构

机械结构整体方案如图 1 所示。G 型夹封闭夹持、垂直球网方向同步双导轨、平行球网方向单导轨、舵机控制平台和球拍角度、气缸推球拍的方案。机构后方配备一个气泵用作气缸的动力源。



1. G 型夹; 2. 铝方管; 3. 电机座; 4. 带轮座; 5. 导轨; 6. 电机驱动板; 7. 小车; 8. 电机; 9. 铝方管; 10. 导轨; 11. 水管; 12. 有机玻璃; 13. 小车平台; 14. 法兰盘; 15. 击球机构; 16. 水管 2; 17. 尼龙圆盘; 18. 齿轮; 19. 舵机; 20. 气缸; 21. 球拍小平台。

图 1 各机构局部图

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2017-12-02

作者简介: 王滨生(1960—), 男, 黑龙江人, 教授级高工, 从事超硬材料加工、大学生创新创业研究。

机械结构有5个自由度，虽在垂直球台方向保留有自由度，但考虑到设置此自由度后球拍能在球运动轨迹任意位置击球，选取最佳击球点会增加判断击球点的难度，所以笔者没有设置该自由度，击球点统一到高于球台18 cm的平面。

G型夹将2根38 mm×25 mm铝方管夹持在球桌上，电机座(附带垫高块)、带轮座、导轨和电机驱动板都固定在这2根方管上。导轨上有辆小车，小车上的螺栓夹持20×20铝方管。2个FAULHABER 3557电机通过位置闭环和速度闭环控制实现同步驱动。电机带动带轮旋转，带轮上的同步带绑在平行球网方向导轨延伸出的方铝管上。方铝管通过螺栓固定在小车上，这样实现小车在垂直球网方向的导轨中滑动。

1.1 平行球网方向

导轨为不锈钢管，两侧用螺栓连接了25 mm×25 mm，厚度2 mm铝方管，铝方管与垂直球网方向导轨上的小车通过螺栓连接。不锈钢管与击球机构小车是通过内径19 mm的pvc水管连接，属于间隙配合，从而形成滑动摩擦。笔者在不锈钢管上涂有机油以减小摩擦。pvc水管与切好形状的有机玻璃过盈配合，再经插口形状的有机玻璃交接，与小车平台相连。为防止不锈钢管弯曲变形，在有机玻璃下方增设了牛眼轮作支撑。带轮座和电机座与有机玻璃一起固定在铝方管上。同步带绑在小车的平台上，由主动小轮拉动。

1.2 击球机构

平行球网方向的小车平台与击球机构通过法兰盘螺栓连接。法兰盘与钢管通过尼龙过盈配合连接，外加一根贯穿3个型材的螺栓防止相对旋转和轴向位移。击球机构的不锈钢管主轴与pvc水管可以相对滑移，用一根螺栓限制pvc水管的旋转，pvc水管上铣了一道槽为螺栓留出滑移位置。由于取消了该自由度，就把他们的相对位置固定。pvc管上固定有一个尼龙圆盘，通过紧定螺栓配合。圆盘中夹有一片有机玻璃齿轮，其相对位置由螺栓固定。圆盘上方有一个推力滚子轴承，轴承上方是击球机构的旋转平台。为防止旋转平台倾覆，特意将旋转平台与主轴间隙配合处加厚，毕竟有机玻璃只有5 mm厚。通过旋转平台上舵机的旋转能实现旋转平台左右角度的控制。气缸、直线导轨都固定在旋转

平台上。球拍小平台在直线导轨的滑块上，气缸能高速推动球拍小平台，实现主动击打的动作，气压控制在0.5 MPa即可。球拍在小平台的俯仰角度由舵机和四连杆控制，作为摇杆，球拍上有2个角铝构成的铰链。

2 视觉系统

2.1 概述

乒乓球机器人关键技术是基于Kinect的乒乓球识别算法^[1]。乒乓球运动的速度一般可达到7 m/s，而与人对打时速度最高可达20 m/s。

本系统采用Visual studio 2010作为软件开发工具，利用OpenCV开源库实现图像处理算法。在计算机上处理kinect采集的彩色图像和深度图像，根据阈值算法和轮廓提取算法提取乒乓球的平面位置，再对彩色图像和深度图像中的信息进行坐标变化，计算出乒乓球的实时空间坐标。

使用的摄像头为基于Kinect的图像采集摄像头。Kinect有3个镜头，中间的镜头是RGB彩色摄影机，用来采集彩色图像。左右两边镜头则分别为红外线发射器和红外线CMOS摄影机所构成的3D结构光深度感应器，用来采集深度数据(场景中物体到摄像头的距离)。彩色摄像头最大支持1 280×960分辨率成像，红外摄像头最大支持640×480成像。Kinect还搭配了追焦技术，底座马达会随着对焦物体移动跟着转动。先对RGB彩色图像进行图像处理，提取乒乓球的平面位置，然后再与深度图像匹配，从而计算出空间坐标。

2.2 阈值分割算法

图像分割是图像处理中的基础难题，基于阈值的分割则又是图像分割最基本的难题之一，其难点在于阈值的选取。事实证明，阈值选择恰当与否对分割的效果起着决定性作用。笔者参考文献[2]，用本算法对彩色图像进行阈值设定，对局部图像进行阈值设定，其他部分的RGB值设置为零，得到二值图像。

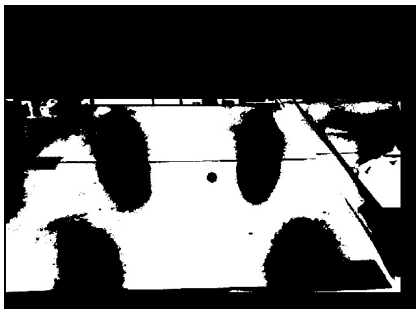
由于采用黄色的乒乓球，根据颜色调和原理，对8位RGB彩色图像中的绿色分量和红色分量阈值都设定为(150, 255)，蓝色分量阈值设定(0, 50)，这样很好地提取了黄色分量。对桌面上的5个标志，设定绿色分量范围为(150, 255)，而蓝色分量和黄色分量都设定为(0, 50)，提取了绿色分量。

2.3 轮廓提取算法

通过阈值分割算法对彩色图像进行分割，得到分别表示黄色乒乓球和绿色桌面标记物的所在区域的 2 幅二值图像^[3]。在 2 次膨胀操作后，消除外界不必要的干扰点。在用轮廓提取算法得到相应图像的外界轮廓，将其处在动态内存中的一个序列中。至此可以利用 OpenCV 中的提取轮廓中心函数得到相应物体的中心坐标。图像提取效果对比如图 2 所示。



(a) 拍摄的原始图片



(b) 阈值分割算法得到二值图像



(c) 轮廓提取法得到物体中心坐标

图 2 图像提取效果对比

2.4 空间坐标点确定

由文献[1, 4]查得，当得到乒乓球和桌面标注物在彩色图像中的坐标之后，得到坐标 (x,y,z) 。通过转换矩阵转换为坐标系下的坐标。

2.5 乒乓球运动轨迹预测和击球点预测

轨迹预测算法主要分为基于参数模型的方法和基于经验学习的方法 2 类。经验学习方法通过大

量实验让机器自动学习，将结果汇总到一个数据库中，一旦遇到相似轨迹就直接读出数据，并传递信息给执行机构。由于经验学习法成本非常高，所以本项目采用基于参数模型的方法。

在基于参数模型的方法中，首先要对乒乓球在各个轴向上受力进行分析。例如，水平方向上主要受到空气的阻力，而阻力大小与乒乓球的飞行速度、横截面积以及自旋等因素有关，这些因素可以用相应的阻力系数来表示，并在实验中确定。在竖直方向上除了受空气阻力外还有重力的作用。在受力分析的基础上，就可以列出乒乓球在空中飞行的轨迹方程。

具体应用中，首先要采集 5~10 个乒乓球的坐标点作为初始点，然后进行迭代来求取以后的飞行轨迹。当球与球台发生碰撞后，因乒乓球在水平和竖直方向的能量损失不同，利用 2 个方向上的能量损失系数，代表 2 个方向上碰撞后速度损失量。

2.6 乒乓球飞行运动建模^[1-6]

乒乓球在飞行过程中主要受到 4 个力，分别为重力 F_G 、浮力 F_g 、空气阻力 F_D 及旋转时的马格努斯力 F_m 。查文献得到速度和位置公式：

$$v_x = \frac{v_{x0}m}{k_f v_{x0}t + m}, \quad v_y = \frac{v_{y0}m}{k_f v_{y0}t + m},$$

$$v_z = \sqrt{\frac{mg}{k_f}} \frac{1 - e^{-2t\sqrt{\frac{k_f}{mg}}}}{1 + e^{-2t\sqrt{\frac{k_f}{mg}}}} + v_{z0};$$

$$x = \frac{m}{k_f} \ln\left(1 + \frac{k_f v_{x0}t}{m}\right) + x_0, \quad y = \frac{m}{k_f} \ln\left(1 + \frac{k_f v_{y0}t}{m}\right) + y_0,$$

$$z = -\frac{m}{2k_f} \ln \frac{(1 + e^{-2t\sqrt{\frac{k_f}{mg}}})^2}{4e^{-2t\sqrt{\frac{k_f}{mg}}}} + z_0 + v_{z0}t.$$

式中 k_f 为空气阻力系数。通过乒乓球飞行机理的分析，得到预测点模型如图 3。

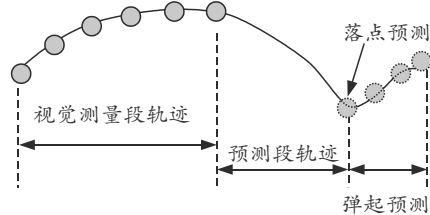


图 3 预测点模型

3 结束语

笔者主要研究了乒乓球机器人的机械结构和

视觉系统。在机械方面通过分析球拍击打乒乓球的角度和轨迹，将球拍运动分解，再通过不同的动力源分别实现，达到合成的击球动作^[7]。视觉系统是通过图像颜色及形状的提取和筛选来捕捉乒乓球位置坐标，再通过摄像得到多帧照片计算速度，预判击球点。最后通过电路的多级控制和反馈调节的控制系统，把视觉采集到的数据传达给各动力源，最终让机械结构把球打回另一半场的指定位置，实现机器人与人对打乒乓球的功能。

参考文献：

- [1] 张正涛. 乒乓球机器人视觉测量与控制[Z]. 中国科学院研究生院(研动化研究所), 2010.
- [2] 张远辉. 基于实时视觉的乒乓球机器人标定和轨迹跟踪技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [3] 李雪茹, 王禹林, 欧屹, 等. 三轮全向移动机器人的航迹推算定位方法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 62-65.
- [4] 陈国栋, 徐德, 任艳青, 等. 基于亚像素的乒乓球机器人本体位姿视觉测量[J]. 控制与决策, 2012, 27(10): 1572-1574.
- [5] 孙在, 余广鑫, 郭美, 等. 乒乓球弧圈球的空气动力学原理及其飞行轨迹的仿真分析[J]. 体育科学, 2008, 28(4): 69-71.
- [6] 周加永, 莫新民, 张昂, 等. 外骨骼助力机器人研究现状与关键技术分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016(10): 99-104.
- [7] 王浩, 赫雷, 曹维清, 等. 六足机器人轮腿结构设计与仿真分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 81-84.