

基于 Lab 特征模型的乒乓球追踪机器人的设计与实现

熊 杰, 兰智高, 谢 伟

(黄冈师范学院 物理与电信学院, 湖北 黄冈 438000)

摘要: 随着科技的进步, 机器人是未来发展的趋势; 乒乓球追踪机器人是一种典型的实时机器人, 追踪是捡球机器人前期的必要基础; 针对单目摄像头的运用, 提出了一种基于 Lab 特征模型的乒乓球追踪机器人的设计方法; 乒乓球追踪机器人采用图像处理技术和光学理论对乒乓球进行识别、定位、测距, 并能通过单片机控制电机实现实时追踪; 对乒乓球颜色特征提取和乒乓球中心定位算法进行了研究, 采用 Lab 特征模型对乒乓球颜色进行识别, 引入质心法对乒乓球中心实现定位, 推理出单摄像头对乒乓球进行距离测量的示意图和理论公式; 依据定位中心和距离值, 通过单片机控制电机运动, 实现对乒乓球追踪功能; 经实验测试, 该机器人能够对乒乓球进行快速精准定位, 算法处理时间小于 100 ms, 定位误差小于 30 mm。

关键词: 乒乓球检测; 追踪机器人; Lab 特征; 质心法; 单目测距

Design and Implementation of Table Tennis Ball Tracking Robot Base on Lab Feature Models

Xiong Jie, Lan Zhigao, Xie Wei

(School of physics and Telecommunications, Huanggang Normal College, Huanggang 438000, China)

Abstract: With the development of science and technology, robot is the trend of future development. The table tennis tracking robot is a typical real-time robot. Tracking is the necessary foundation of the early stage of the ball picking robot. Aiming at the application of monocular camera, a design method of the table tennis tracking robot based on Lab feature model is proposed, which is a table tennis tracker. The robot uses image processing technology and optical theory to identify, locate and measure the distance of the table tennis ball, and can realize real-time tracking by controlling the motor with a single-chip microcomputer. The color feature extraction and location algorithm of table tennis center are studied. The Lab feature model is used to identify the color of table tennis. The center of gravity method is introduced to locate the center of table tennis. The schematic diagram and theoretical formula of distance measurement of table tennis with a single camera are deduced. According to the location center and distance value, the single-chip microcomputer controls the motor movement, realizes the table tennis tracking function. The experimental results show that the robot can locate the table tennis ball quickly and accurately. The processing time of the algorithm is less than 100ms and the positioning error is less than 30mm.

Keywords: table tennis detection; tracking robot; Lab feature; center of gravity method; Monocular Range measurement

0 引言

乒乓球追踪机器人是一种典型的实时机器人, 需要通过图像处理的方法对乒乓球识别和中心定位, 主控制器识别乒乓球的位置来控制机器人进行追踪^[1]。

文献 [2] 研究了多颜色模型下的乒乓球快速检测方法, 提出了 HSV 颜色模型中对颜色的筛选, 得到了一定的精度, 但需要用两台摄像机才能实现。文献 [3] 设计了乒

乓球机器人, 实现了精确控制, 速度也较快, 但使用的是计算机资源, 软件需要在 LabVIEW 上进行操作, 不能集成的小车上。文献 [4] 提出单目摄像头视觉定位, 但需要外界码盘陀螺仪传感器信息才能进行准确定位。

本文提出了一种基于 Lab 颜色特征模型的乒乓球追踪机器人的设计方案。系统主要采用 Lab 颜色特征对乒乓球颜色进行识别, 运用质心法对乒乓球中心进行定位, 采用单目摄像头进行距离测量, 控制云台模块保持乒乓球处在图像中心位置。系统主要包含摄像头视频获取, 图像处理, 乒乓球中心检测与定位, 云台与电机联动模块等, 是乒乓球捡球机器人前期所必须的工作。

1 系统结构及原理

乒乓球追踪机器人框架如图 1 所示。系统主要由摄像头模块、STM32 主控制器、STC89C52 单片机模块、云台模块、电机控制模块等部分组成。

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-15。

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目(Q20172903); 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2017196); 黄冈师范学院 2018 年重点扶持学科(2018-3)。

作者简介: 熊 杰(1982-), 男, 湖北天门人, 硕士, 讲师, 主要从事模式识别, 嵌入式系统, 智能仪器仪表方向的研究。

通讯作者: 兰智高(1968-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 硕士生导师, 主要从事科学教育和 STS 方向的研究。

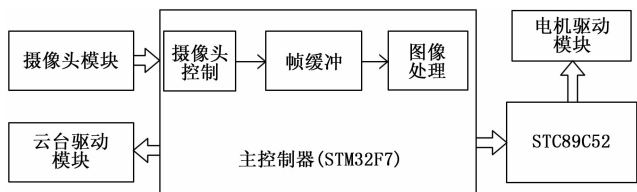


图 1 乒乓球追踪机器人框架图

摄像头模块将采集到的图片信息送入主控芯片, 通过图像处理算法对乒乓球进行识别与定位, 控制云台模块保持乒乓球处在图像中心位置, 并把乒乓球位置信息和云台数据通过串口传送至 STC89C52 单片机对电机驱动模块进行控制, 单片机控制小车对乒乓球进行追踪。

2 硬件设计

乒乓球追踪机器人硬件电路主要包括主控制器、摄像头模块、云台舵机模块、电机控制模块。主控制器是性能强大的 32 单片机 STM32F765, 主频达 216 MHz, 2M flash。可用于视频处理, 在色块追踪上, 帧率可以达到 85~90 帧, 速度满足需要。

STM32F765 作为主控制器, 控制 OV7725 摄像头模块进行图像采集, 采集到的图像, 运用图像处理算法及中心定位算法, 控制云台进行转动, 采用光学原理对乒乓球进行单目测距, 主控制器通过串口向 STC89C52 单片机传输云台角度与测量距离, 通过单片机对小车进行控制, 达到实时追踪目的。

硬件电路中电源模块需要提供 12 V, 5 V, 3 V 电压, 摄像头电路需要通过主控制器硬件 IIC 总线对 OV7725 进行控制, 电机驱动电路由 STC89C52 单片机进行控制运动, 云台模块由主控制器控制, 通过定时器控制占空比来控制两个舵机进行旋转。

2.1 电源模块

主电源采用 4 节 18650 电池供电, 主要为电机驱动电路和云台模块提供大电流, 通过 ASM-1117-5V 电压芯片将 12V 转为 5V 供 STC89C52 单片机供电, 通过 BD331A 稳压芯片将 5V 转为 3.3V 为主控芯片和摄像头模块供电。

2.2 摄像头电路

摄像头选用 Omni Vision 公司生产的 OV7725 图像感光元件^[5]。摄像头 OV7725 由 8 根数据线、1 根帧同步信号引脚、1 根行同步信号引、1 根像素同步信号引脚、2 根总线寄存器配置信号引脚 SCL 和 SDA、1 根工作时钟信号引脚组成。OV7725 是一款低功耗、高性能的 VGA (Vide Graphics Array, 视频图形陈列) COMS 图像传感器, 其在 80 FPS 下可以处理 640×480 8-bit 灰度图或者 320×240 16-bit RGB565 彩色图像。通过 IIC 总线可以与主控芯片进行通信。

2.3 电机驱动电路

电机驱动芯片采用 L293D 芯片进行驱动, L293D 是一款单片集成的高电压、高电流、4 通道电机驱动, 设计用于连接标准 DTL 或 TTL 逻辑电平, 驱动电机工作。

为了简化为双桥应用, L293D 每个通道对都配备了一个使能输入端。L293D 逻辑电路具有独立的供电输入, 可在更低的电压下工作。此外, L293D 还内置了箝位二极管。其驱动电路如图 2 所示。

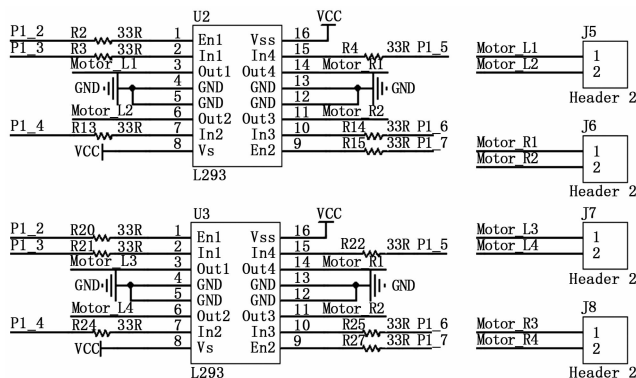


图 2 电机驱动电路

2.4 云台模块

云台模块由 2 个微型 SG90 舵机组成, 机械结构采用 3D 打印件, 如图 3 所示, 实现云台 180 度对乒乓球识别。

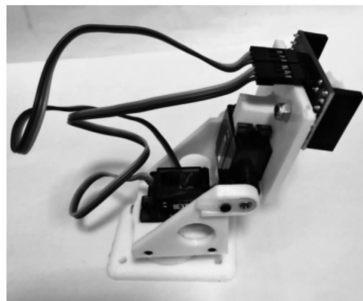


图 3 云台模块

舵机由自由指定旋转角度的电机组成, 引出线由两根电源线, 1 根控制线组成。电机内部有一个周期为 20 ms, 脉冲宽度为 1.5 ms 的基准脉冲 V_0 。为了控制舵机, 给信号线输入一个周期也为 20 ms, 由不同的占空比控制舵机正反转。该占空比经过舵机内部调制芯片的处理成为一个偏置电压 V , 舵机内部首先通过比较 $\Delta V = V - V_0$, $\Delta V = V - V_0$ 的正负来进行正相或反相转动, 同时舵机内部带有平衡电位器, 内部齿轮转动的同时会带动电位器变化, 电位器会逐渐减小电压差 ΔV , 当电机转到指定角度时 ΔV 刚好为 0, 舵机停止转动。因此, 若想控制舵机转到指定角度, 只需要主控制器输出指定占空比的脉冲信号即可。

SG90 舵机的位置等级有 1024 个, 有效角度范围 180°, 控制的角度精度是可以达到 $180/1024 \approx 0.18^\circ$ 。

主控制器通过 PID 算法对两个微型舵机进行控制, 实现抖动小, 精准角度控制。

通过该云台, 控制乒乓球始终处于图像正中心位置, 为后续定位和测距做准备。

3 软件设计

乒乓球追踪机器人软件部分主要包含摄像头采集、乒

乓球识别、中心定位、云台调整、小车电机控制等几个部分。其软件流程如图 4 所示。

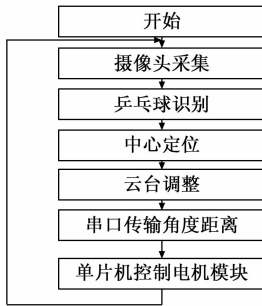


图 4 软件总流程图

该系统采用单摄像进行图像采集，STM32 主控制器对采集的图片进行分析，设定颜色阈值对乒乓球进行识别，通过中心定位算法实现乒乓球中心定位，并调整云台模块控制乒乓球处在图像中央位置，通过光学原理对乒乓球距离测量，主控制器通过串口传输云台角度和距离信息，STC 单片机通过云台角度和测量距离控制小车对乒乓球进行实时追踪。

3.1 色彩空间

RGB 颜色模型最为常见，主要用于显示器等发光体的颜色显示，是一种加色法混色模型。通过将红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三种基本色按其亮度的不同分别划分为 256 个等级，进行不同程度的叠加，能够表示 1600 多万种不同的颜色^[2]。该模型的颜色表达能力强，但对光照变化较为敏感。表 1 为强光与弱光条件黄色乒乓球 RGB 颜色分布范围。

表 1 强光与弱光条件乒乓球 RGB 颜色分布范围

	R(1)	G(1)	B(1)	R(2)	G(2)	B(2)
Min	172	162	85	156	113	52
Max	255	183	130	255	146	90

Notes: (1) condition of strong light, (2) condition of weak light

Lab 颜色模型是一种与设备无关的颜色空间，它由三个分量组成，分别是亮度分量 L ，色调分量 a ， b 。其中这是 L 分量取值范围为 $[0-100]$ ， a 分量范围为 -120 (绿色) ~ 120 (红色)， b 分量取值范围为 -120 (蓝色) ~ 120 (黄色)^[6]。

在复杂环境下，需要对乒乓球进行有效检测与跟踪，本文提出了一种基于 Lab 颜色模型下的乒乓球检测与跟踪方法。结合乒乓球在 LAB 颜色空间中的颜色分布特性，可以有效去除光线及其他颜色的干扰，提取出乒乓球区域。并以图像中乒乓球区域的质心位置作为乒乓球的定位坐标，从而实现对乒乓球的实时识别与跟踪的目的。通过测试分析，证实了该方法的可行性。

RGB 颜色空间与 Lab 颜色的转换^[7]，可用如下公式进行：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L = 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b = 200[f(Y) - f(Z/Z_n)] \end{cases} \quad (2)$$

$$f(x) = \begin{cases} 7.787 + \frac{16}{116} \\ x^{1/3} \end{cases} \quad (3)$$

其中： $(x \ y \ z)^T$ 为过渡空间， X_n, Y_n, Z_n 为白光条件下的刺激值，一般取值分别为：95.047, 100.0, 108.883。

表 2 强光与弱光条件乒乓球 Lab 颜色分布范围

	L(1)	a(1)	b(1)	L(2)	a(2)	b(2)
Min	66	-5	41	51	12	40
Max	89	48	89	72	38	82

Notes: (1) condition of strong light, (2) condition of weak light

利用 Lab 颜色模型对乒乓球进行检测并进行分割，设计乒乓球的 RGB 变化范围，将 RGB 图像转换到 Lab 颜色模型中，统计出乒乓球在 Lab 颜色空间中的各分量范围，记作 ThresholdLab。

通过摄像头采集的 RGB 图像，转化成 Lab 颜色模型，并得到其各像素点 (x, y) 对应的 Lab 各分量值^[2]，分别对该像素的 L, a, b 值进行阈值判断：

$$binary(i, j) = \begin{cases} 255, & (L, a, b) \in \text{ThresholdLab} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

通过阈值判断，实现对感兴趣区域 (Region Of Interests, ROI) 进行分割。本文中取值格式为：

$Lab = (L-, L+, a-, a+, b-, b+)$ ，实验中取 Lab 阈值为： $Lab = (55, 70, 18, 58, 45, 64)$ 。

3.2 小球中心定位

分割后的图像包含的是乒乓球区域图像，要对球心进行定位，则需要获得乒乓球的中心位置，本文以二值图像 binary 中乒乓球区域的质心位置作为乒乓球中心坐标。假设二值图像的大小为 $M * N$ ，则质心坐标 $center = (x, y)$ 的计算方式如下所示^[2]：

$$x = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} j \cdot binary(i, j) \right) / A \quad (4)$$

$$y = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} i \cdot binary(i, j) \right) / A \quad (5)$$

其中， A 表示二值图中，乒乓球面积的大小：

$$A = \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} binary(i, j) \right) \quad (6)$$

乒乓球识别及中心定位软件流程如图 5 如示。

3.3 单目距离测量

单摄像头测距是一种采用图像处理和光学原理的视觉检测技术，单摄像头测距方法通过单个摄像头获取目标图像并结合摄像头模型及摄像头参数进行视觉测距^[9]。与双目视觉测距相比较，单目视觉测距方法具有硬件要求低，构造简单，成本低等特点。除此之外，单摄像头测距不需要进行图像匹配，因此，单摄像头测距具有更快的测量速度，同时避免了双摄像头测距的图像匹配误差。目前单摄

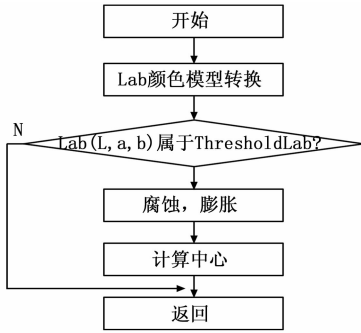


图 5 乒乓球中心识别及中心定位软件流程图

像头测距方法主要包括 AprilTag 法、几何光学法、几何相似法。

3.3.1 AprilTag 法

AprilTag 是一种视觉基准库, 可用于各种视觉定位操作, 包括增强现实技术, 机器人和相机校准等。通过事先设定的与二维码相似的标签, 通过摄像头可以快速准备的检测出标志, 而 AprilTag 检测程序可以计算相对于相机的精确 3D 位置, 方向和 id。但需要对目标先进行打标处理。

3.3.2 几何光学法

几何光学法使用的是光学折射原理。该方法需要已知摄像头固有的焦距以及像距。该方法可能因为摄像机镜头畸变, 而影响测距效果, 因此不能达到实时测距的目的。

3.3.3 几何相似法

根据几何相似原理以及透视投影原理, 几何相似法将实际空间中的目标物体映射到摄像机的成像平面, 构建成一个几何模型, 结合摄像机的实际物理焦距计算摄像机到目标物体之间的距离^[8]。

本系统采用的是单摄像头的几何相似法, 该方法需要选参照物, 利用参照物的大小比例来计算距离。本文通过摄像头里乒乓球的大小, 计算摄像头与乒乓球之间的距离。

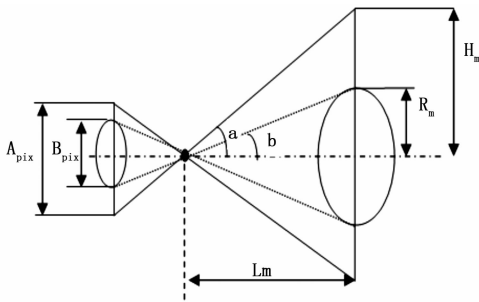


图 6 单摄像头测距原理

由图 6 中左边的摄像头里的几何关系可得知:

$$\tan(a) = \frac{A_{pix}}{2L} \quad (7)$$

$$\tan(b) = \frac{B_{pix}}{2L} \quad (8)$$

所以:

$$\frac{\tan(a)}{\tan(b)} = \frac{A_{pix}}{B_{pix}} \quad (9)$$

由图 6 中右边的真实环境里的几何关系得知:

$$\tan(b) = \frac{R_m}{L_m} \quad (10)$$

带入 (9 式), 可得 (结论公式 11):

$$L_m * B_{pix} = \frac{R_m * A_{pix}}{\tan(a)} \quad (11)$$

$$Distance = K/L_m \quad (12)$$

其中: L_m 是长度, B_{pix} 是摄像头中乒乓球所占的像素 (直径的像素), R_m 是球真实的半径, A_{pix} 是固定的像素。公式 (12) 中 K 值计算方法, 测试时先让球距离摄像头 10 cm, 打印出摄像头里直径的像素值, 然后相乘, 就得到了 k 的值。

4 实验结果与分析

4.1 Lab 特征阈值实验

实验首先通过软件对乒乓球在强光和弱光下进行 Lab 值测定, 其中强光下 $Lab = (66, 89, -5, 48, 41, 89)$, 弱光下 $Lab = (51, 72, 12, 38, 40, 82)$, 其中取值格式为:

$Lab = (L-, L+, a-, a+, b-, b+)$ 。通过实验选择 Lab 阈值, 即 $Lab = (55, 70, 18, 58, 45, 64)$, 实现在背景和不同色块干扰下对乒乓球 ROI 区域进行识别, 如图 7 所示。

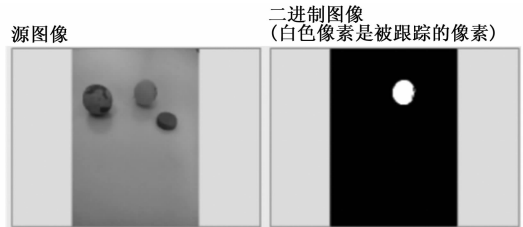


图 7 Lab 阈值测试

4.2 乒乓球中心定位实验

识别乒乓球区域后, 通过质心算法对乒乓球中心进行中心定位, 对乒乓球进行准确定位。如图 8 所示, 通过白色框对黄色乒乓球进行识别, 用 + 标签对中心进行定位。

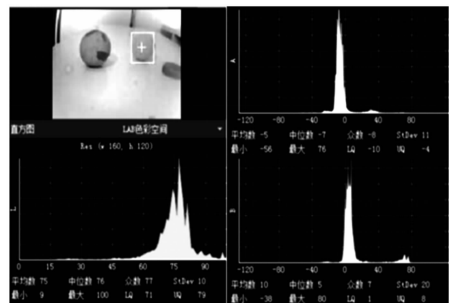


图 8 中心定位实验

4.3 单摄像头测距实验

测试时先让球距离摄像头 10 cm, 运用公式 (7) ~ (12), 确定公式 (12) 的 K 值, 最后用公式 (12) 测试出如表 3 所示的数据。

(下转第 282 页)