

An Embedded System Design and Implementation for Golf Ball Pattern Recognition Based on ZYNQ^{*}

XIONG Guoqiang¹, Xu Yuan^{2*}, ZHU Mingcheng¹, WANG Shaobo³, LIU Hongwei²

(1. Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China; 2. Shenzhen Technology University, Shenzhen Guangdong 518118, China;
3. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, China)

Abstract: The screen golf system needs high-speed camera to get the rotation speed and angle of the golf ball, a simple way is to draw the patterns on the golf balls to measure the flying parameters of the spheres. Because the exposure time of the high-speed imaging system is short, the captured sphere has low contrast and blurred edge. In order to identify the pattern of the surface of a golf ball, we have designed a set of embedded system of golf ball pattern recognition based on ZYNQ, fitted by the least squares method for the image to determine the threshold surface, and shift threshold surface using adaptive algorithm, which algorithm is robust to different image. The results show that the algorithm can accurately separate the pattern on the sphere from the sphere.

Key words: ZYNQ; threshold surface; adaptive; embedded; low contrast

EEACC: 6140C

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.042

一种基于 ZYNQ 的嵌入式高尔夫球体 花纹识别系统设计与实现^{*}

熊国强¹, 徐 渊^{2*}, 朱明程¹, 王少博³, 刘宏伟²

(1. 深圳大学, 广东 深圳 518060; 2. 深圳技术大学(筹), 广东 深圳 518118; 3. 中科院合肥物质科学研究院, 合肥 230000)

摘 要: 屏幕高尔夫系统需要通过高速摄像机获取高尔夫球体的旋转速度和飞行角度, 一种简便的做法是在普通的球体上绘制花纹来测量球体的飞行参数。由于高速成像系统曝光时间短, 因此采集到的球体图片对比度低且边缘模糊。为了识别高尔夫球体表面的花纹, 设计出了一套以 ZYNQ 为核心的嵌入式高尔夫球体花纹识别系统, 通过最小二乘法对图像拟合出阈值曲面, 同时利用自适应算法来确定阈值曲面的平移量, 保证算法对不同的图片具有较好的鲁棒性。实验结果表明, 算法可以准确的将球体上的花纹同球体分离开。

关键词: ZYNQ; 阈值曲面; 自适应; 嵌入式; 低对比度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)02-0484-07

屏幕高尔夫是一种室内电子运动系统, 能够提供高尔夫球的击打数据, 用于高尔夫训练和比赛。它通过传感器测量高尔夫球的初始运动参数, 主要包括高尔夫球的速度、水平发射角、垂直发射角、后旋和侧旋等, 根据初始运动参数对球体飞行轨迹进行建模从而预测高尔夫球的轨迹, 并在屏幕上显示。因此这些参数测量的准确性对于建模精度起着决定性的作用。

大部分高尔夫设备采用了成本低廉的红外感应器, 但是红外感应器的测量精度低, 检测范围窄, 且不

能提供旋转参数, 此外红外感应器型高尔夫球设备的检出率受光照条件的影响较大, 容易出现错误^[1-2]。视觉测量型高尔夫球设备由于其非接触性、检测范围宽、精度高等优点逐渐成为室内高尔夫传感器的主流, 主要包括立体高速摄像机和多曝光相机。立体高速摄像机利用两个高速摄像机在三维空间跟踪高尔夫球, 并通过识别高尔夫球上的特殊标记^[3]来测量旋转参数。高速摄像机一般为 800 帧/s 以上, 曝光时间短, 在没有闪光灯的情况下每帧图像亮度很低, 对球体上花纹的识别造成了很大的困难, 如图 1 所示。因

项目来源: 深圳市基础研究项目(JCYJ20150324141711595)

收稿日期: 2018-04-04

修改日期: 2018-07-05

此需要增加额外的闪光灯^[4]来提高图像亮度,但是闪光灯会干扰玩家的注意力,损害用户体验,同时集成额外的闪光单元存在更换的需要,由于其寿命有限会导致更高的成本。为了解决上述问题,本文设计出了一套针对低对比度的高尔夫球体花纹识别系统,使得系统在不需要闪光灯的情况下能够识别球体上的花纹从而测量球体的旋转参数。

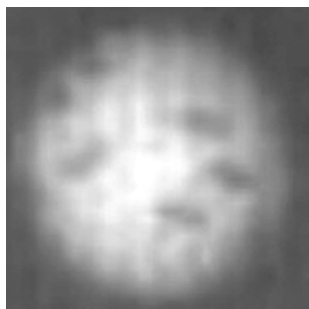


图1 高速摄像机下的球体图像

1 系统总体介绍

在屏幕高尔夫系统中,球体的初始旋转速度和旋转角度对于飞行轨迹有着很大的影响,为了对球体轨迹进行精确建模,通过测量两帧图像中球体花纹的相对位置来计算球体的旋转速度和角度,因此球体花纹的识别分割在系统中具有非常重要的作用。同时为了有出色的用户体验,对于时间具有较高的要求,即要求系统能在很短的时间内完成高尔夫球从击打到在屏幕上显示出运动轨迹。

系统示意图如图2所示,系统所有功能均在 ZYNQ 上实现, FPGA 通过 LVDS 接口采集两个高速摄像机的图像并存储到 DDR 中,在运行 Linux 操作系统的 ARM 内核上实现运动参数计算和花纹识别。

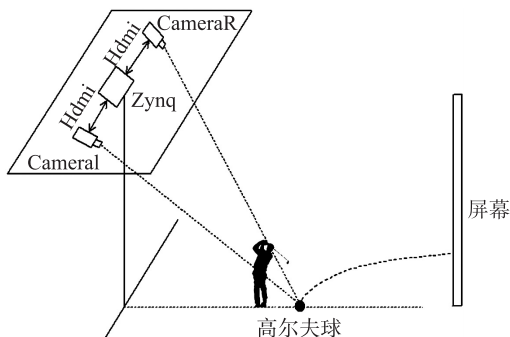


图2 系统示意图

2 软件算法设计

2.1 原理

本文提出的球体花纹识别算法是根据图像每一行像素分布通过最小二乘法来拟合出最接近其变化

趋势的曲线,由于拟合出的曲线对于突变边缘不敏感,因而恰好可以将分布不均的目标同背景分离开,如图3所示。

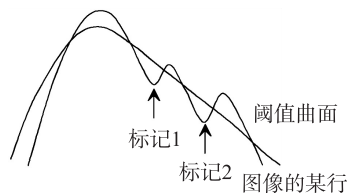


图3 阈值曲面分割原理

自适应阈值曲面算法的执行步骤为:

- (1) 对图像进行灰度拉伸,提高图像的对比度。
- (2) 通过最小二乘法对图像的每一行拟合出阈值曲线进而得到阈值曲面。
- (3) 通过 OTSU^[5] 自适应算法确定阈值曲面的偏移量。
- (4) 根据得到的阈值曲面对图像进行分割。

2.2 灰度拉伸

灰度拉伸的目的是为了将图像中每个像素之间的灰度值拉伸开从而提高图像的对比度,使得目标和背景之间的差异变大。

设 $I(i, j)$ 是图像 i 行 j 列的像素灰度值,首先搜寻图像中最大的灰度值 $G_{\max}$ 和最小灰度值 $G_{\min}$,对图像的每一个像素执行下面的变换式:

$$I(i, j) = [I(i, j) - G_{\min}] \frac{255}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (1)$$

通过式(1)可以将原图像的灰度范围拉伸到 0~255,处理效果如图4所示。

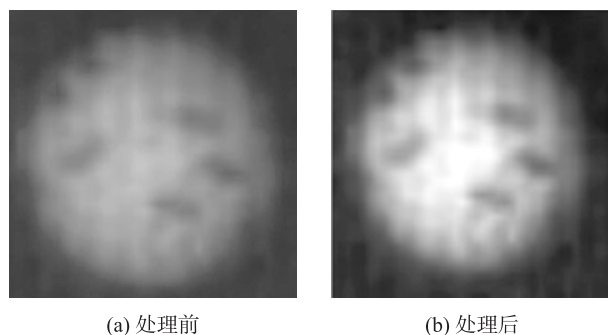


图4 灰度拉伸效果

2.3 基于最小二乘法的阈值曲面拟合

最小二乘法的本质是寻找一条曲线来使得所有样本点与这条曲线偏差的平方和最小,因此求解最小二乘法可以归结为求极值问题。

本文根据最小二乘法对图像的每一行像素灰度拟合出阈值曲线,通过每一行的阈值曲线得到整幅图像的阈值曲面。设图像的某一行有 n 个点,坐标为 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 每个坐标对应的灰度值为 y_i

($i=1,2,3,\dots,n$), 设拟合多项式为:

$$f(x) = \sum_{j=0}^k a_j x^j \quad (2)$$

式中: a_j 为待求系数, k 为最小二乘法的阶数, 阶数越高拟合出来的曲线也就越复杂。设各点到这条曲线的偏差和平方为 Q , 即:

$$Q = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=0}^k a_j x_i^j \right]^2 \quad (3)$$

求解各个系数 a_j 使得偏差和平方 Q 达到最小, 即得到该行的阈值曲线, 对图像的每一行执行上述过程就可以得到整幅图像的阈值曲面, 在本文中最小二乘法阶数 k 取 3。

2.4 确定阈值曲面偏移量

通过最小二乘法拟合出阈值曲面后, 并不能直接对图像进行分割, 因为拟合出来的阈值曲面与背景相离过近, 在分割的时候容易将小部分背景归为目标。因此需要将阈值曲面往下做一个平移, 保证背景和阈值曲面有足够的安全距离, 偏移量通过自适应算法计算得到。

自适应算法采用 OTSU 法, 又称最大类间方差法。OTSU 的基本思想是初始化一个偏移量将图像分为两类, 然后计算这两类之间的方差, 更新偏移量直至使得两类之间的方差达到最大, 则该偏移量为最佳值。

首先确定偏移量的取值范围, 设 $I(i,j)$ 是图像 i 行 j 列的像素灰度值, $T(i,j)$ 为阈值曲面中对应的阈值点, 则计算:

$$D(i,j) = I(i,j) - T(i,j) \quad (4)$$

然后找到 $D(i,j)$ 中的最大值:

$$D_{\max} = \max(D) \quad (5)$$

当偏移量为 $D_{\max}$ 时, 阈值曲面和图像不相交, 因此偏移量的取值范围为 $0 \sim D_{\max}$ 。

为了找到一个最佳的偏移量, 需要在 $0 \sim D_{\max}$ 中找到一个值, 使得图像被分为两部分后类间方差最大, 具体过程如下:

首先初始化一个偏移量 offset, 对阈值曲面进行平移得到新的阈值曲面 $T_n(i,j)$:

$$T_n(i,j) = T(i,j) - \text{offset} \quad (6)$$

通过 $T_n(i,j)$ 将图像 I 分为 I_A 和 I_B 两部分, 然后分别计算 I_A 和 I_B 两部分像素的均值 μ_A 和 μ_B :

$$\mu_A = \frac{1}{N_A} \sum_{(i,j) \in A} I_A(i,j) \quad (7)$$

$$\mu_B = \frac{1}{N_B} \sum_{(i,j) \in B} I_B(i,j) \quad (8)$$

式中: N_A 、 N_B 为 I_A 和 I_B 两部分的像素个数。

然后计算 I_A 和 I_B 两部分之间的方差, 如式(9)

所示:

$$\sigma = N_A N_B (\mu_A - \mu_B)^2 \quad (9)$$

最后将 offset 从 0 到 $D_{\max}$ 之间循环, 分别计算 I_A 和 I_B 两部分之间的方差, 然后找到最大方差, 则对应的 offset 即为最佳的偏移量, 偏移量和类间方差之间的关系如图 5 所示。找到最佳的偏移量之后就可以对阈值曲面进行平移, 得到新的阈值曲面:

$$T(i,j) = T(i,j) - \text{offset} \quad (10)$$

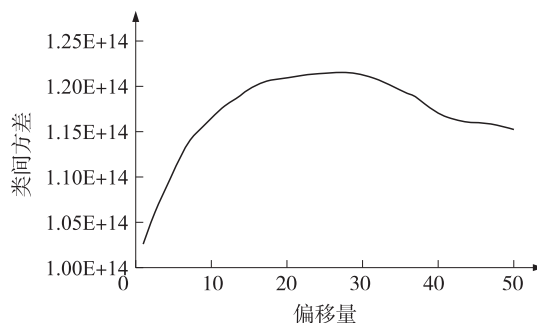


图 5 偏移量与类间方差之间的关系

2.5 通过阈值曲面分割图像

求出阈值曲面之后, 就可以用来对图像进行二值化分割。图像的二值化分割实质是一个比较过程, 通过对比同一坐标处图像灰度值和阈值的大小来决定该点分割之后的灰度值。

设 $I(i,j)$ 是图像 i 行 j 列像素点的灰度值, $T(i,j)$ 为阈值曲面中该点对应的阈值, $N(i,j)$ 为分割后生成的图像对应的像素点灰度值, 则当:

$$I(i,j) > T(i,j) \quad (11)$$

令:

$$N(i,j) = 0 \quad (12)$$

否则:

$$N(i,j) = 255 \quad (13)$$

对图像所有像素点执行上述操作, 然后对分割后图像进行中值滤波, 最终完成图像的二值化分割。

3 实现

3.1 硬件平台设计

本系统的硬件结构框图如图 6 所示, 主要由两个高速摄像机 HDMI、ZYNQ 7Z020、DDR 存储模块、SD 卡模块和通讯接口组成。

ZYNQ 上集成了 ARM Cortex-A9 处理器和海量的可编程逻辑资源, 对于图像采集和处理具有很强的优势。由于系统对于实时性要求较高, 因此在本系统中, 将对速度要求较高的图像采集部分通过 ZYNQ 的逻辑部分实现。图像处理部分由于计算复杂度高, 运算量大, 因此这部分在 ZYNQ 的 ARM 内

核上运行了 Linux 系统并调用 opencv 库来实现。

系统的工作过程为:系统上电后,ZYNQ 的逻辑部分产生控制信号读取摄像机传出来的数据,经过简单处理后缓存到 DDR 中。算法部分,ARM 内核读取一帧图像数据然后通过调用 opencv 库进行处理,处理完毕后将图像数据通过网口输出。通讯接口主要用来调整系统工作参数,如设置摄像机的曝光值等。

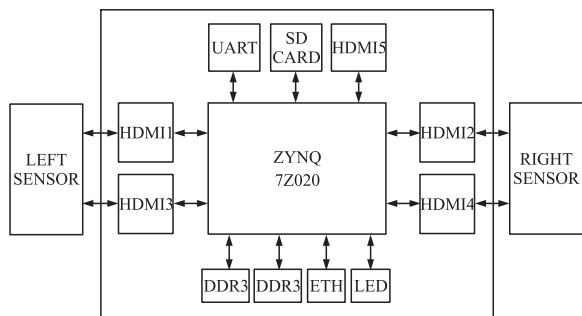


图6 花纹识别系统硬件框图

3.2 FPGA 设计

FPGA 实现的整体框架如图 7 所示。

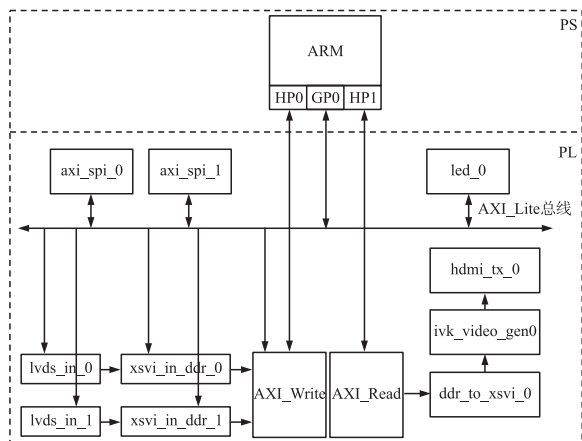


图7 FPGA 内部系统功能模块

各部分的工作分别如下:

(1) axi_spi 模块:用来配置 sensor 的寄存器,数据的传输协议为 SPI 串行传输。

(2) lvds_in 模块:用来采集 sensor 的图像数据,接收 sensor 的 lvds 通道的图像数据及相应的同步码,生成 sensor 的行、场同步信号及串转并生成相应的有效图像数据,Lvds 传输的电平为 2.5V。

(3) xsvi_in_ddr 模块:接收 sensor 的行同步信号及图像的数据,存储到 fifo 中,将图像数据送到内存控制器中,主要由异步 fifo 和 axi 写时序生成状态机。

(4) AXI_Write 总线模块:axi_write 总线模块连接着 PS 中 HP0 的高速总线接口,实现数据的高速传输,将 PL 的数据图像送到 PS 中的内存控制器的

fifo 中,进而将图像数据写入到 DDR 中。

(5) AXI_Lite 总线模块:axi_lite 总线用来配置 PL 中各个 IP 的寄存器,连接着 PS 中 GP0 的普通总线接口,一般用于数据的低速传输。

(6) AXI_Read 总线模块:axi_read 模块连接着 PS 中 HP1 的高速总线接口,与内存控制器进行高速通信,用来读取 DDR 中的图像数据。

(7) ddr_to_xsvi 模块:预先通过 axi 读时序生成状态机模块将内存控制器里的数据缓存在异步 fifo 里,然后根据外部来的数据请求信号将数据从 fifo 里读出来,以 xsvi 接口传给下一个模块。

(8) ivk_video_gen 模块:用来生成不同分辨率的视频所需要的标准时序,由两个计数器和两个状态机组成,行计数器和行状态机用来生成行同步时序,而场计数器和场状态机用来生成场同步时序。

(9) hdmix_tx 模块:用来将并行的图像数据转换成 TMDS 标准信号,通过 hdmi 接口将数据输出,进行图像显示,方便图像的调试。

(10) led 模块:用来显示系统状态,方便调试。

在本系统中,由于对于时间要求较高,而 FPGA 逻辑部分的执行时间很短,因此软件算法部分的运行时间决定了整个系统的时间。为了减少软件算法部分的运算量,将图像分割部分通过 FPGA 硬件逻辑来实现。这是由于图像分割本质是数据比较,因此可以在将图像数据写入到 DDR 的过程中完成,在传输图像数据的同时将对应像素的阈值一起发送,然后经过比较模块得到结果写入到 DDR 中。这样省去了软件中对每一个像素进行比较从而大大节省了算法的执行时间。该部分在 AXI_Write 模块中完成,内部结构如图 8 所示。

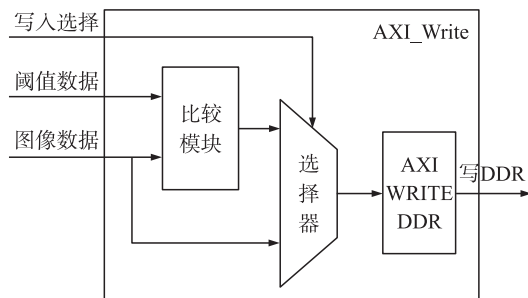


图8 AXI_WRITE 模块内部结构

4 实验结果与分析

在本系统中,ZYNQ 的逻辑部分采用的时钟频率为 100 MHz,ARM Cortex-A9 处理器的主频为 600 MHz,综合布线后 ZYNQ 的逻辑资源占用情况如表 1 所示。

表 1 ZYNQ 逻辑资源占用表

Resource	Utilization	Available	Utilization%
LUT	5 907	53 200	11.10
LUTRAM	113	17 400	0.65
FF	6 536	106 400	6.14
BRAM	5	140	3.57
IO	63	200	31.50
BUFG	15	32	46.88
MMCM	2	4	50.00

采集高速摄像机下球体图像对算法进行测试,分割结果如图 9 所示。图 9(b)是将原图像转换成高度图显示出来,在高度图中可以明显看出标记以不同的高度分布在球体上,在这种情况下采用单阈

值无法将所有标记同球体分离开。从图 9(d) 可以看到采用本文提出的自适应阈值曲面分割算法能够有效的在光照不均和边缘模糊的球体上将标记提取出来。将本文算法同其他分割算法进行比较,各算法的分割结果如图 10 所示。图 10(b)采用的是基于最大熵的单阈值分割法^[6],通过最大熵来确定最优阈值,从图中可以看出该类算法无法将所有标记提取出来。图 10(c)采用多阈值^[7]对图像进行分割,最终分割结果具有较大误差。图 10(d)采用 Chanvese 模型分割算法^[8],分割结果同样具有很大误差。本文算法对原图像取到了很好的分割效果,如图 10(e)所示。

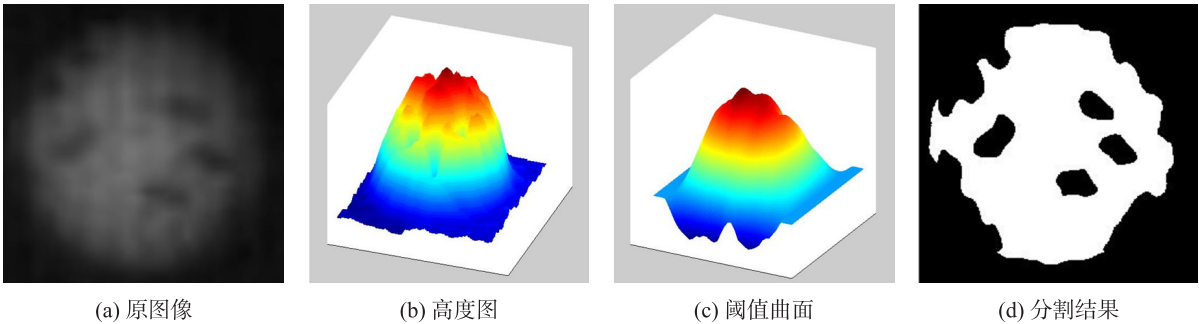


图 9 分割示例

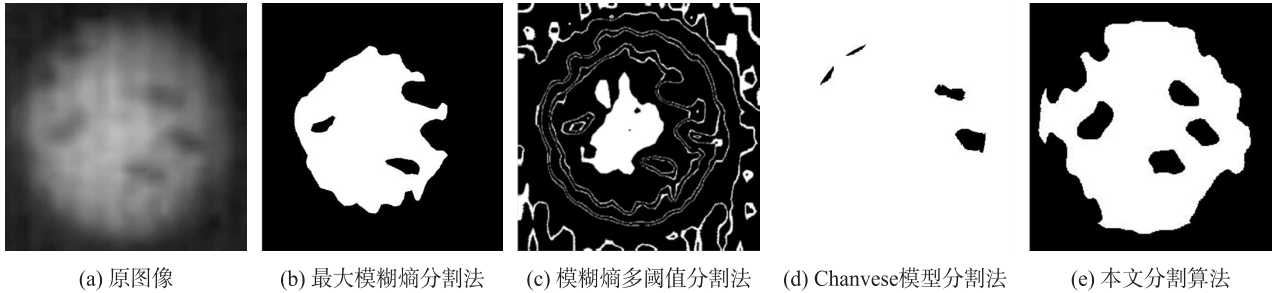


图 10 各类算法分割结果对比

为了进一步验证本文算法的有效性,利用高速摄像机采集 144 张不同光照条件下带有标记的球体图片,由于曝光时间短,这些图片对比度低并且边缘模糊,以此来测试各个算法的分割效果。通过统计所有标记被分割出来的图片数量来计算每种算法分割的成功率,进而验证每种算法对于低对比度图片分割的效果。表 2 列出了各个算法对低对比度图片分割成功的图片数量和成功率。

表 2 各算法分割成功率

算法	分割成功图片数量/张	成功率/%
最大模糊熵分割法	0	0%
模糊熵多阈值分割法	0	0%
Chanvese 模型分割法	29	20%
本文分割算法	131	91%

从表 2 各个算法分割的成功率可以看出,对于光照不均和低对比度的图片来说,采用传统的单阈值或多阈值分割算法无法起到良好的分割结果,这是由于采用单阈值分割算法时,光照不均的图片中目标的灰度值会随着在图片中的位置不同而发生很大变化,从而导致单个阈值无法将所有目标从图片中分割出来。为了解决这个问题引入了多阈值分割算法,多阈值分割法根据直方图的极大值来划分灰度区间。然而低对比图像的直方图呈多峰分布,导致划分的灰度区间过多,造成了每个灰度区间的像素过少,失去了统计意义,使得在确定每个灰度区间的阈值时发生很大误差,如表 3 所示,每个灰度区间计算得到的阈值都位于区间的边界处,从而造成分割结果无法达到预期效果。

表3 模糊熵多阈值分割法灰度区间及阈值

灰度区间	最优阈值
7~11	7
12~17	17
18~40	18
41~46	41
47~65	47
66~71	66
72~96	72
97~105	105
106~115	115
116~117	117

Chanvese 分割算法的复杂度高,而且很多关键的参数需要根据经验调试得到,因此对于不同光照和不同角度的球体图片无法做到很好的鲁棒性。本文提出的自适应阈值曲面分割算法,通过最小二乘法拟合出整幅图像的阈值曲面,然后通过自适应算法使得对于不同光照和不同角度的球体图片都起到了很好的分割效果。

为了评估系统的执行效率,分别进行 100 次击打实验,记录每次每个算法的处理时间,如表 4 所示。最终统计出总的平均时间为 272.07 ms,其中花纹识别约为 50.17 ms,占系统总处理时间的 18.4%,可以看出系统满足实时性要求,为屏幕高尔夫提供了出色的用户体验。

表4 系统算法执行时间

算法	平均时间	所占比例
击打检测	5.19 ms	1.91%
球体捕获	20.26 ms	7.45%
球体跟踪	193.28 ms	71.00%
花纹识别	50.17 ms	18.40%
参数计算	3.17 ms	1.17%
总计时间	272.07 ms	

在文献 4 中,为了尽可能增加高速摄像机的采集帧率并且减少曝光时间,需要加入闪光灯,以此获取更加清晰的高尔夫球图片,保证后续花纹提取的成功率。但是闪光灯会损害用户的体验,分散注意力,同时会增加后续的维护成本。为此,本文针对低对比度下高尔夫球体花纹分割提出了一套嵌入式花纹识别系统,实现了无需外接闪光灯的情况下精确的分割出高尔夫球上的花纹。同时为了保证系统的实时性,在图像处理的过程中加入了硬件处理模块,大大的提高了每帧图像的处理速度。文献 4 中摄像机的采集帧率为 416 frame/s,而在本文中摄像机的采集帧率可达到 715 frame/s,因此可以看出本文设计的嵌入式系统具有更好的效果和实时性。

5 结束语

针对屏幕高尔夫系统中低对比度球体分割问题,本文提出并设计了一套以 ZYNQ 为核心的嵌入式花纹识别系统,对于光照不均和边缘模糊的球体图像,通过最小二乘法对图像拟合出阈值曲面,同时利用自适应算法来确定阈值曲面的平移量,保证算法对不同的图片具有良好的鲁棒性。同时为了缩短系统的执行时间,将部分处理流程交由硬件模块执行,提高了系统的实时性。实验结果表明,本系统可以快速有效的将花纹从球体中分离出来。

参考文献:

- [1] Bae J E, Park G T, Kim J W, et al. Extraction of Golf Ball Features Based on Perpendicular Planar Sensor [C]//International Conference Consumer Electronics, 2010: 515-516.
- [2] Ji E B, Jin W K, Hang J K, et al. Estimation of 3-D Trajectory of the Golf Ball Using Dual Linear Sensor [C]//International Joint Conference on Inc, 2009: 2024-2030.
- [3] 张红彬. 高尔夫球运动参数测量系统的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2014: 1-56.
- [4] 李旭龙. 虚拟高尔夫系统研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2012: 1-68.
- [5] 李学俊, 刘祥俊, 赵礼良. 基于梯度熵的 Otsu 图像分割算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(3): 705-709.
- [6] 吴成茂, 张干. 灰度级加权的直方图模糊熵阈值分割法[J]. 西安邮电大学学报, 2013, 18(5): 8-13.
- [7] 宋欢欢, 李雷. 基于模糊熵的自适应多阈值图像分割方法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(12): 32-36.
- [8] 顾鹏程, 黄福珍. 基于改进 Chan-Vese 模型的电力设备红外图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(10): 193-196.
- [9] 王仲, 郑裕浩, 付鲁华, 等. 光照不均图像的阈值分割[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(11): 3467-3470.
- [10] 霍凤财, 孙宝翔, 任伟建. 基于图像阈值分割的改进蜂群算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2015, 33(1): 84-93.
- [11] 李森, 杨恢先, 张建波, 等. 改进二维直方图区域划分的阈值分割方法研究[J]. 光电子激光, 2013, 24(7): 1426-1433.
- [12] 朱磊, 白瑞林, 吉峰. 光照不均匀图像的灰度波动局部阈值分割[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(12): 144-149.
- [13] 张新明, 孙印杰, 郑延斌. 二维直方图准分的 Otsu 图像分割及其快速实现[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1778-1784.
- [14] Sauvola J, Pietikainen M. A Daptive Document Image Binarization [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(2): 225-236.
- [15] Valizadeh M, Kabir E. An Adaptive Water Flow Model for Binarization of Degraded Document Images [J]. International Journal on Document Analysis and Recognition, 2013, 16(2): 165-176.
- [16] Kittler J, Illingworth J. Minimum Error Thresholding [J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 41-47.
- [17] Nakagawa Y, Rosenfeld A. Some Experiments on Variable Thresholding [J]. Pattern Recognition, 1979, 11(3): 191-204.
- [18] Bobin J, Starck J L, Fadili J M, et al. Morphological Component Analysis: An Adaptive Thresholding Strategy [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2007, 16(11): 2675-2681.

- [19] Rajapakse J C, Giedd J N, Rapoport J L. Statistical Approach to Segmentation of Single-Channel Cerebral MR Images [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 176-186.

- [20] Chan F H Y, Lam F K, Zhu H. Adaptive Thresholding by Variational Method[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1998, 7(3): 468-473.



熊国强(1994-),男,汉族,安徽芜湖人,深圳大学,硕士,研究方向为SOC及嵌入式系统设计,874176979@qq.com;



徐 渊(1978-),男,汉族,陕西西安人,深圳技术大学(筹),副教授,研究方向为面向视频处理的SOC芯片设计,xuyuann@sztu.edu.cn;



刘宏伟(1975-),男,汉族,河南卫辉人,深圳技术大学(筹),教授,研究方向为密码学与信息安全,liuhongwei@sztu.edu.cn。