

# 纹理识别触觉传感器的设计与实现

闫 岩, 谢文遨, 张远航, 张 春

(清华大学 微电子学研究所, 北京 100084)

**摘 要:** 为了解决机器人手指在抓取物体时无法识别其表面纹理信息的问题, 设计了一种基于视觉的纹理识别触觉传感器. 该传感器的硬件部分包括弹性体、照明装置和摄像头, 而算法部分则是直接运用旋转不变 LBP 算法将拍摄到的纹理图像进行计算识别. 为了加快传感器的速度并拓宽其适用范围, 将算法移植到硬件电路并在 FPGA 上进行了验证. 实验结果证明该传感器不仅可以识别包括指纹、皮革、织物、纸张等在内的 12 种纹理, 而且可以达到 24 f/s 帧率的实时性处理.

**关键词:** 纹理识别; 触觉传感器; 硬件电路; 机械手

**中图分类号:** TN4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—7180(2017)12—0059—04

## Design and Verification of Tactile Sensor for Texture Recognition

YAN Yan, XIE Wen-ao, ZAHNG Yuan-hang, ZHANG Chun

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A vision-based tactile sensor is designed to satisfy the need of texture classification when the robotic hand grasping an object. The sensor includes three parts, which are a slab of elastomer, lighting devices and a camera. After obtaining clear images from this sensor, invariant LBP algorithm is used to determine which type the texture belongs to. In order to accelerate the computation speed and widen the use range, the algorithm is transplanted to circuits and verified in FPGA. Tests showed that the sensor can recognize 12 types of texture, including fingerprints, leather, fabric and so on. It can also get a real time result with the speed of 24fps.

**Key words:** texture recognition; tactile sensor; FPGA; robotic hand

## 1 引言

现在, 世界上大部分触觉传感器只能测量力度和抓取时的位移, 而部分能测量纹理的传感器不是构造复杂就是没有基于视觉. 例如文献[1]通过在传感器内部放置标记点, 利用测量标记点的位移来计算力, 但它并不能得到纹理信息; BioTack<sup>[2]</sup>使用不可压缩的液体来传导表面形变, 进而判断物体表面信息; Gelsight<sup>[3]</sup>通过三维重建的方法提取纹理, 然后从三维转变为二维再进行纹理识别. 我们的传感器则是基于视觉, 直接处理拍摄到的纹理图像, 并对它们进行分类, 比其他方法更方便快捷. 本文提出的传感器结构主要由弹性体、照明电路和图像传感器

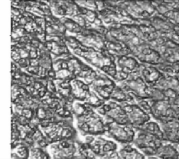
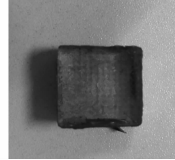
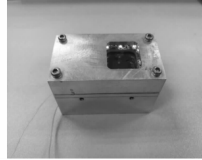
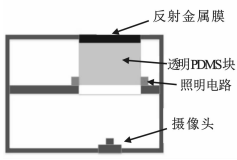
组成, 在此基础上我们基于 LBP<sup>[4]</sup> (Local Binary Pattern) 算法设计了一个纹理识别系统, 并将其转化为电路, 提高了传感器处理的速度.

## 2 传感器模型

传感器的原理图如图 1(a) 所示: 最上部是一块一边溅射金属另外一边透明的弹性体块, LED 照明板放置在弹性体下方并将其环绕, 摄像头采用型号为 MT9F002 的微距摄像头, 并与弹性体的中心处于一条直线. 弹性体尺寸是 13 mm × 13 mm × 5 mm, 由透明的 PDMS (Polydimethylsiloxane) 制成. 这种材料具有很强的弹性, 因此可以将物体的纹理清晰地呈现出来, 同时其透明性确保摄像头可以拍

摄到纹理图像。通过改变硅胶与固化剂的比例以及加热固化时的温度,可以得到不同弹性的 PDMS,这里采用的比例为 30 : 1,加热温度为 85 摄氏度。同时,在 PDMS 块一侧的表面溅射 2000 Å 金属铜,当

物体按压在上面时可以从另外一侧得到纹理图像。这种溅射膜方法的创新性在于使得所有纹理的获取都在统一环境下进行,尤其对透明或者反光的物体也可以直接拍摄。



(a)传感器原理示意图 (b)传感器实物(不带弹性体) (c)弹性体 (d)拍摄到的皮革纹理

图 1 传感器原理示意、实物、弹性体及拍摄到的皮革纹理

### 3 纹理识别算法

纹理图像普遍包含重复的结构,但是也会有一些变化,例如随机的位置、朝向或者亮度等。纹理识别的最大问题是从实际环境中得到的图像易于受到纹理位置的影响,因此算法必须具有旋转不变性。主要有以下三种具有旋转不变性的纹理识别方法:统计学、基于模型和基于结构<sup>[5]</sup>。本文采用改进的统计学 LBP 方法计算特征分布直方图,进而与纹理库中的数据做对比,得到纹理的种类。

#### 3.1 LBP 基本方法

LBP 方法概括来说是用一个对称圆形模板遍历整幅灰度图像,如图 2 所示。我们选择半径为  $R = 1$ ,取样点数  $P = 8$  的模板: $g_c$  是模板的中心像素且其坐标为  $(0,0)$ ,圆上点的坐标可以使用式(1)计算,各点的像素值可以根据坐标值采用双线性插值的方法得到。

$$(x, y) = (R \cos(2\pi p/P), R \sin(2\pi p/P)) \quad (1)$$

根据式(2),将各点的亮度与中心点进行比较,大于中心点则将对应该位置为 1,否则置为 0,这样每次模板操作都会得到一个 8-bit 的值  $T$ ,因此遍历图像后对 256 个值进行计数即可得到数量直方图。

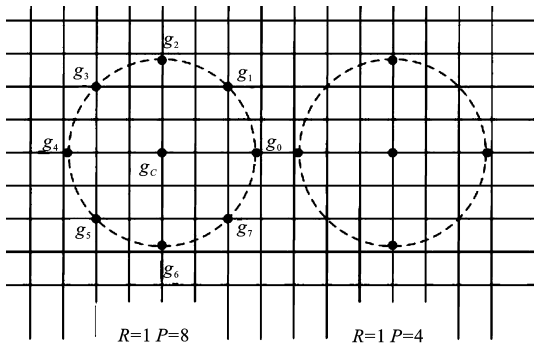


图 2 LBP 原理示意图

$$T \approx t(s(g_0 - g_c), \dots, s(g_{P-1} - g_c))$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

#### 3.2 旋转不变 LBP 算法

3.1 节中的算法通过与模板中心像素比较解决了亮度变化对纹理识别的影响,为了解决位置对结果的影响,我们采用旋转不变 LBP 算法<sup>[4]</sup>。

$$LBP_{P,R}^r = \min\{ROR(T, i)\} \quad (3)$$

式中,  $ROR(x, i)$  表示将  $x$  向右循环移位  $i$  次。根据 Ojala 的研究结果,有些模式出现的频率要远远大于其他,大概占总模式的 99% 以上,因此可以只统计高频模式的直方图以简化计算。高频模式有一个共同特点,如式(4)所示,在 8-bit 数中由 0 变为 1 和由 1 变为 0 的总次数要小于等于 2。根据简化,将需要计数的值由 256 个降低为 10 个,在不牺牲效果的情况下不但极大提高了计算速度,而且降低了资源使用量。

$$LBP_{idx} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c), & \text{if } U(LBP) \leq 2 \\ P + 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U(LBP) = |s(g_{p-1} - g_c) - s(g_0 - g_c)| + \sum_{p=1}^{P-1} |s(g_p - g_c) - s(g_{p-1} - g_c)| \quad (4)$$

### 4 传感器电路设计

传感器的电路主要有两个组成部分:由 CMOS 摄像头得到的图像计算 10 个模式的数量统计数据;在纹理库中搜索,得到新纹理所属的类别。因为第一部分需要重复对图像进行模板操作,遍历图像虽然计算量很大但是操作简单,是提高该电路速度的关键,因此采用硬件电路实现。而搜索算法复杂,并不适合做到电路级别,因此使用 FPGA 中的软核实现。传感器电路的整体结构如图 3 所示。

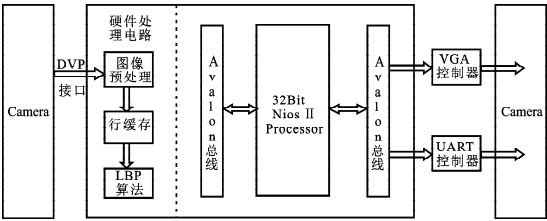


图 3 传感器电路的整体结构示意图

4.1 硬件电路结构

硬件电路部分的组成结构如图 4 所示,主要分为图像预处理模块: Image\_Capture, Raw2RGB, Curve\_Average 和 LBP 算法实现电路: LBP、LBP\_Count.

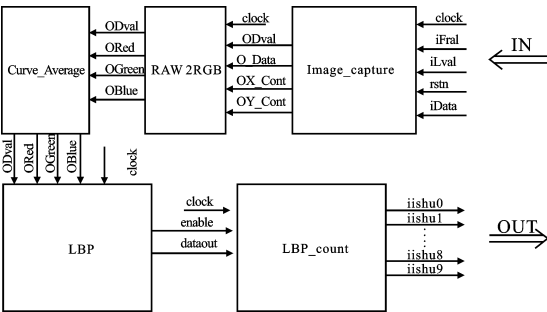


图 4 硬件电路部分结构示意图

(1)图像数据预处理电路

Image\_Capture:控制摄像头采集图像,并把数据以 RAW 格式递给下面的模块。  
Raw2RGB:图像由 RAW 格式转化为 RGB 格式. 图像传感器的分辨率是 1 920×1 080,经过插值算法每四个像素合并为一个像素,因此经过该模块后分辨率变为原来的一半,即 960×540。  
Curve\_Average:对图像数据进行平滑操作。

(2)LBP 算法实现电路

LBP:对于图像的遍历操作常规做法是先将一帧图像存储到 RAM 中,然后根据地址将数据读出进行模板计算. 这样做需要很大的内存去存储图像数据并且速度很慢. 根据所选择的半径  $R$  和采样点  $P$  的值可知 LBP 算法的主要操作是  $3\times3$  模板运算,因此本文采用流水线的方法优化电路. 由于模板在遍历图像时每个像素都会被用到多次,因此要 RAM 缓存三行图像。

如图 5 所示,模板行 0 使用三个移位寄存器直接输入数据,行 1 与行 2 的数据是通过状态机控制行缓存中的数据输入. 状态机控制逻辑如表 1 所示.

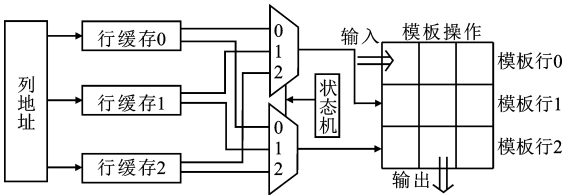


图 5 流水线实现 LBP 算法示意图

表 1 模板数据输入的状态机控制逻辑

| 状态    | 行缓存 0 | 行缓存 1  | 行缓存 2  |
|-------|-------|--------|--------|
| 0     | 写入数据  | 空(行 2) | 空(行 1) |
| 1     | 模板行 1 | 写入数据   | 空(行 2) |
| 2     | 模板行 2 | 模板行 1  | 写入数据   |
| 0     | 写入数据  | 模板行 2  | 模板行 1  |
| 1     | 模板行 1 | 写入数据   | 模板行 2  |
| 2     | 模板行 2 | 模板行 1  | 写入数据   |
| ..... | ..... | .....  | .....  |

对于这种模板操作,边缘的行与列无法处理,但是这并不影响整体的结果,可以忽略.

LBP\_Count:LBP 输出的值为模板操作后的 8 bit 数据,LBP\_Count 的作用是得到高频模式的数量统计. 其中通过左移一位并且异或的方法计算 8 bit 数中由 0 变为 1 和由 1 变为 0 的总次数,对于总次数小于等于 2 的数据相加所有位并计数. 最终得到模式数量统计数据.

4.2 软核操作

NIOSII 是 Altera 集成的处理器软核,适合处理复杂且不具有重复性的计算. 根据硬件电路部分计算得到的统计数据,在 NiOSII 中使用 KNN(K Nearest Neighbour)算法在纹理库中搜索该纹理的匹配种类,并将其通过 UART 传到上位机中.

5 传感器电路验证

5.1 仿真与分析

基于 Altera 公司的芯片 EP4CE55F23C6N 进行综合与仿真. 首先验证电路的功能,图 6 给出了用 Signal-tap 抓取到某一帧图像的硬件电路处理信号图,由此得到的纹理种类正确,可以验证电路功能正确.

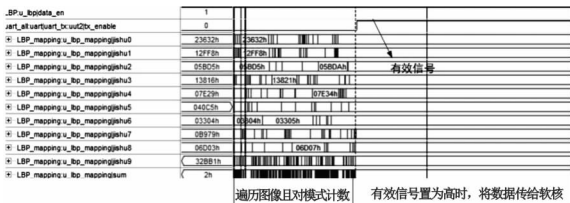


图 6 硬件电路处理信号图

使用 Quartus 综合工具评估电路的性能与资源

使用量. 由综合报告得知电路的最大逻辑延时为 16.2 ns, 将系统时钟设置为 50 MHz, 因此图像处理的速度可达到 24 f/s. 逻辑资源的使用量如表 2 所示. 可见, 采用流水线行缓存的方法可以极大的减少逻辑资源的使用数量.

表 2 电路逻辑资源使用量

| Slice 资源                 | 可用数量      | 使用数量    | 使用率/% |
|--------------------------|-----------|---------|-------|
| Logic elements           | 55 856    | 3 746   | 7     |
| Dedicated logic elements | 55 856    | 3 350   | 6     |
| Memory bits              | 2 396 160 | 172 356 | 7     |

5.2 测试与实验

为了验证该传感器以及相应电路的功能, 本文构建了纹理库, 并在此基础上进行了实验. 实验对象包括指纹、皮革、皮肤、五种纺织品、泡沫和三种不通颗粒度的砂纸, 部分如图 7 所示. 实验变量分为纹理的放置方向与图像的拍摄亮度. 通过随意摆放纹理的朝向并调节照明装置的亮度进行多次试验, 识别的成功率达到 95%. 由图片可知, 某些软的材料按压在同样软的硅胶上, 纹理不够明显, 因此会影响分类的准确性, 这也是我们后续工作需要改进的地方, 但是对于纹理信息差异较大的材料, 该传感器可以准确地分辨出来.

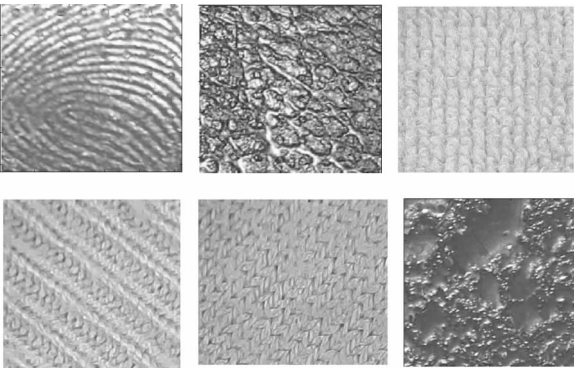


图 7 实验对象

(从上到下, 从左到右依次为指纹、皮革、三种针织物、泡沫)

6 结束语

本文介绍了一种基于视觉的能够进行纹理识别

的触觉传感器, 该传感器由弹性体、照明电路以及摄像头三部分组成. 同时设计了基于 LBP 的纹理识别算法, 该算法具有旋转不变性, 并且能有效规避亮度变化带来的影响. 在此基础上又设计了一套能够进行纹理识别的电路, 极大地提高了运算速度, 并且在 FPGA 上进行验证. 最后建立了包含指纹、皮革、针织品、纸张和木材的纹理库, 验证了传感器工作的正确性.

参考文献:

[1] Jiang Hanjun, Zhu Xiyang. Vision-based tactile sensor using depth from defocus for artificial finger in hand prosthesis[J]. Electronics Letters , 2016 , 52 (20) : 1665-1667.

[2] Fishel J A, Loeb G E. Sensing tactile microvibrations with the Biotac[C]// The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Bio mechatronics. IEEE, 2012.

[3] Johnson M K , Cole F. Microgeometry capture using elastometric sensor, graphics [J]. ACM transactions on, 2011,30(4) :46.

[4] Timo Ojala, Matti Pietikainen. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary pattern[J]. Pattern Analusis and Machine Intelligence, ACM transactions on , 2000 , 24 (7) : 404-420.

[5] Rui Li, Edward H Adelson. Sensng and recognizing surface textures using a gelsight sensor[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Conference . IEEE,2013: 1241-1247.

作者简介:

闫 岩 女, (1992-), 硕士. 研究方向为机械手触觉传感器设计. E-mail: yany14@mails. tsinghua. edu. cn.

谢文邀 男, (1994-), 硕士. 研究方向为数字电路设计.

张远航 女, (1994-), 硕士. 研究方向为数字电路设计.

张 春 男, (1972-), 博士, 副研究员. 研究方向为 RFID 技术与新型触觉传感器.

作者简介:

杨 璐 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为射频集成电路设计. E-mail: yll0127@mail. ustc. edu. cn.

王云阵 男, (1989-), 博士. 研究方向为模拟集成电路设计.

林福江 男, (1958-), 博士, 教授. 研究方向为射频器件建模及射频集成电路设计.

(上接第 58 页)

[9] Abdelghany M A, Pokharel R K, Kanaya H, et al. Low-voltage low-power combined LNA-single gate mixer for 5GHz wireless systems[C]//Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). IEEE, 2011: 1-4.