

基于视觉的触觉传感器信号处理电路设计

张贵相, 钟 艺, 张 春
(清华大学 微电子研究所, 北京 100084)

摘 要: 基于视觉的传感器由图像传感器和内部有标记点的透明弹性胶体构成, 当传感器受力时弹性体发生形变, 标记点发生位移, 图像传感器获取标记点位移信息, 再利用弹性原理由标记点位移计算出传感器的受力情况. 信号处理电路以小型 FPGA 芯片 EP4CGX30 为数据处理器, 实现高速图像采集、标记点位置识别、标记点位移计算及传感器受力直接输出, 其尺寸满足放置在机械手的第二指节中的要求.

关键词: 触觉传感器; 基于视觉; 信号处理电路; 小型化

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)02-0018-04

Signal Processing Circuit for Vision-Based Tactile Sensor

ZHANG Gui-xiang, ZHONG Yi, ZHANG Chun

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

Abstract: A vision-based tactile sensor is made of a camera and a transparent elastic body with markers inside. When a force is applied to the sensor, the elastic body deforms and the markers move. The camera captures the movements of the markers. Then the force applied on the sensor is calculated by elastic theory and the movements of the markers. The signal processing circuit is a circuit with a small size FPGA EP4CGX30 served as data process unit and can catch pictures with a high speed, identify the location of markers and calculate the movements of markers and the force applied on the sensor. The size of the circuit is small enough to be put into the second part of the mechanical finger.

Key words: tactile sensor, vision-based, signal processing circuit, small-sized

1 引言

在基于视觉的触觉传感器中, 它的传感器单元不需要诸如电容、电阻之类的电子元器件, 因此可以有效减少测量单元的体积及传感器连线数量, 能较好地实现传感器的小型化和高度集成化. 同时, 由于其采集的为图像信息而非电信号, 也不容易受到温度或电磁干扰等外界环境的影响^[1].

基于视觉的触觉传感器主要由弹性体和图像传感器两部分组成. 传感器受力时, 其弹性体发生的形变与其所受力的大小有关, 通过图像传感器获取弹性体形变, 进而获得传感器受力信息, 即触觉信息. 目前做得比较好的基于视觉的触觉传感器有 Gelforce 传感器、Gelsight 传感器. Gelforce 传感器通过

在弹性体内部放置标记点, 测量传感器受力时标记点位移计算出传感器受力^[2]. Gelsight 传感器在弹性体表面涂有一层全反射涂料, 通过测量传感器受力时反射光强的变化获取弹性体形变^[3-4].

Gelforce 和 Gelsight 传感器都需要将图像传感器采集的图像传输至 PC 端处理, 这影响了传感器的使用范围. 因此, 设计一个信号处理电路, 使参考 Gelforce 设计的传感器可以直接输出受力信息增加传感器的使用范围.

2 基于视觉的触觉传感器的基本原理

基于视觉的触觉传感器由透明弹性体制成, 弹性体内部有两层不同颜色的标记点. 如图 1 所示, 当传感器受力时, 标记点的位置会发生变化, 若以传感

收稿日期: 2015-04-11; 修回日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61327809)

器表面的某一点为原点,平行于传感器表面的平面为 XY 平面,设某一个标记点的坐标为 (x, y, z) ,并设原点处受到的力的三个方向的分量分别为 f_x, f_y, f_z ,根据弹性原理,标记点在 XY 平面内的位移 (u_x, u_y) 可由式(1)、(2) 计算求出^[5]. 在公式中, σ 为材料的泊松系数, E 为材料的杨氏模量,它们仅与材料自身的力学特性有关,所以当材料选定时, σ 与 E 均为定值.

$$u_x = \frac{1+\sigma}{2\pi E} \left\{ \left[\frac{xz}{r^3} - \frac{(1-2\sigma)x}{r(r+z)} \right] f_z + \frac{2(1-\sigma)r+z}{r(r+z)} f_x + \left[\frac{2r(\sigma r+z)+z^2}{r^3(r+z)^2} \right] (xf_x + yf_y) \right\} \quad (1)$$

$$u_y = \frac{1+\sigma}{2\pi E} \left\{ \left[\frac{yz}{r^3} - \frac{(1-2\sigma)y}{r(r+z)} \right] f_z + \frac{2(1-\sigma)r+z}{r(r+z)} f_y + \left[\frac{2r(\sigma r+z)+z^2}{r^3(r+z)^2} \right] (xf_x + yf_y) \right\} \quad (2)$$

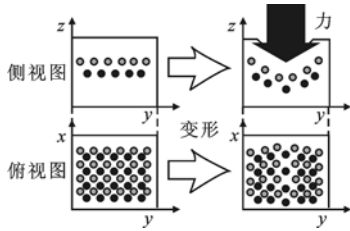


图1 传感器表面受力时内部标记点位移情况

传感器表面的原点位置选定后,任意一个标记点的坐标 (x, y, z) 也随之确定,即式(1)、(2) 中 x, y, z 与 r 也均为定值. 即当传感器制作完成坐标系确定后,式(1)、(2) 右端除了 f_x, f_y, f_z 外其余值均为定值,可以简写成式(3)、(4),即已知传感器在原点的受力信息 (f_x, f_y, f_z) ,可求出传感器内坐标为 (x, y, z) 的标记点在水平方向的位移 u_x, u_y .

$$u_x(x, y) = h_{xx} * f_x + h_{xy} * f_y + h_{xz} * f_z \quad (3)$$

$$u_y(x, y) = h_{yx} * f_x + h_{yy} * f_y + h_{yz} * f_z \quad (4)$$

反之,若已知式(3)、(4) 中传感器内坐标为 (x, y, z) 的标记点在水平方向的位移 u_x, u_y ,求传感器在原点的受力信息 (f_x, f_y, f_z) ,会因已知等式数量小于待求未知量数量而无法求出,因而求坐标原点的受力信息至少需要知道传感器内两个标记点的位移. 将传感器划分为若干个测量单元,每个测量单元包含相邻的两个不同颜色的标记点. 每个测量单元内标记点位移与原点受力的关系如式(5) 所示,其中 $\mathbf{u}$ 为两个标记点水平位移向量, $\mathbf{f}$ 为测量单元原点受力向量, $\mathbf{H}$ 为受力信息到标记点位移的转移矩阵.

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}\mathbf{f} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{Rx} \\ u_{Ry} \\ u_{Bx} \\ u_{By} \end{bmatrix} \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{Rxx}, h_{Ryx}, h_{Rzx} \\ h_{Rxy}, h_{Ryy}, h_{Rzy} \\ h_{Bxx}, h_{Byx}, h_{Bzx} \\ h_{Bxy}, h_{Byy}, h_{Bzy} \end{bmatrix} \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}$$

式中, $\mathbf{u}$ 与 $\mathbf{H}$ 已知, $\mathbf{f}$ 为待求量,将矩阵 $\mathbf{H}$ 求逆再与向量 $\mathbf{u}$ 相乘即可求得受力向量 $\mathbf{f}$. 然而,矩阵 $\mathbf{H}$ 不是方阵,因此用式(6) 求出其广义逆矩阵 $\mathbf{G}$,再与向量 $\mathbf{u}$ 相乘,如式(7) 所示.

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{G}\mathbf{u} \quad (7)$$

3 传感器的信号处理电路设计

基于视觉的触觉传感器系统整体结构如图2 所示. 图像传感器采集图像,通过 DVP 接口传递给信号处理电路,信号处理电路计算图像中标记点位移并由标记点位移求出传感器受力信息,再过 SPI 接口传递给上位机.



图2 基于视觉的触觉传感器系统结构图

因此,基于视觉的触觉传感器的信号处理电路主要需要实现两个功能:(1)通过图像传感器采集的图像计算出标记点的位移;(2)通过标记点的位移计算出传感器的受力信息. 其中第一个功能需要对采集的图像进行逐像素点扫描、识别,运算量大,是信号处理电路的速度瓶颈. 因此,采用硬件实现. 第二个功能计算公式相对复杂,但运算量很小,适宜在 CPU 上用软件实现,所以采用 Nios II 实现. Nios II 是 Altera 第二代 32 位 RISC 微处理器软核,可用于各种 Altera 的 FPGA,其核心及外围设备都使用 HDL 代码编写.

功能2 的电路结构图如图3 所示,其中 VSPU 模块为实现功能1 即计算标记点位移的电路模块,它与 Nios II 通过 Avalon 总线连接. SRAM 为存储器模块,它作为 Nios 处理器的缓存、数据存储与指令存储,最少需要 20 kB 的存储空间. SPI 模块为实现信号处理电路与上位机相连的 SPI 接口模块.

实现功能1 的电路主要结构如图4 和图5 所示,各模块具体内容如下所示.

(1) Image Sensor Control: 控制图像传感器采集图像,并将图像以 RAW 格式存储在 RAM 芯片中;

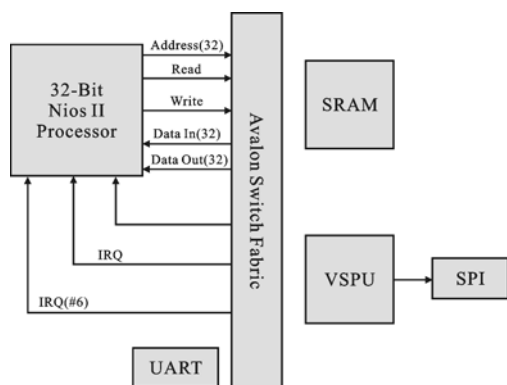


图3 计算传感器受力电路结构图

(2) Image Scan: 依次扫描图像中的各个像素点,并对应的像素点坐标,扫描顺序为从左至右,从上到下;

(3) RAM Address: 由像素点坐标计算出该像素点 RAW 值在 RAM 芯片中对应的存储地址,读出像素点的 RAW 值,具体方法为将像素点纵坐标对应为在 RAM 芯片中的高位存储地址,将像素点横坐标对应为在 RAM 芯片中的低位存储地址;

(4) Marker Judge: 由像素点的 RAW 值判断该像素点是属于标记点还是属于背景点;

(5) Mass Measurement of Marke: 利用质心法求出图像传感器采集图像中标记点的像素坐标,即找出属于一个标记点的所有像素点,将它们的像素坐标累加并求平均,在文献[6]中,标记的位移测量的精度为0.1个像素点,为了达到相同数量级的精度,在计算平均值前将标记点像素坐标累加值左移3位,使结果可以精确到1/8个像素点;

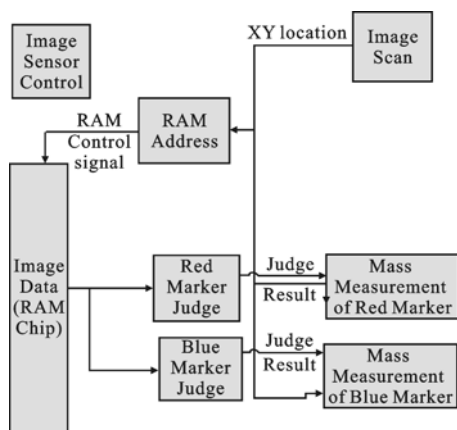


图4 标记点位移计算电路结构图(1)

(6) Marker Initial Location: 利用 RAM IP 存储标记点的初始坐标;

(7) Applied Force: 利用双端口 RAM IP 存储传

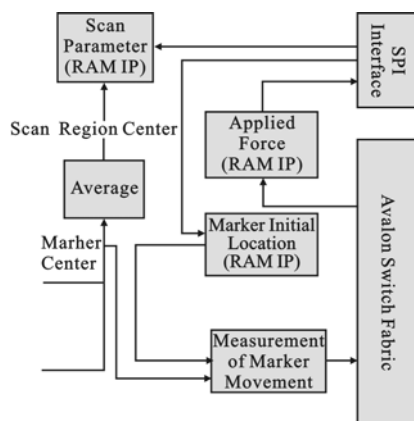


图5 标记点位移计算电路结构图(2)

感器单元的受力信息,其中与 Avalon 总线接口相连的为只写端口,与 SPI 总线接口相连的为只读端口;

(8) Measurement Of Movement: 将图像传感器采集图像的像素点坐标与标记点的坐标求差,计算出标记点的位移;

(9) SPI Interface: 通过 SPI 接口将 RAM IP 中的标记点受力信息传递给上位机。

4 测试结果

参考文献[6]中的方法检验信号处理电路的测量标记点位移的功能。在弹性体表面不受力的情况下,对其连续拍摄。将标记点在一定范围内移动,再由信号处理电路计算每次移动后标记点到位移量。

在 Modelsim 下信号处理的运算结果如图6所示,其中 Sumx 和 Sumy 为属于一个标记点的所有像素点的横纵坐标累加值, N 属于一个像素点的像素点个数, X_c 和 Y_c 为标记点坐标计算结果(由于计算标记点坐标前将坐标累加值左移了3位,所以标记点实际坐标为计算结果除以8), seq 为测量区域的序列(从0开始计), finish 为一个测量区域扫描完成信号。

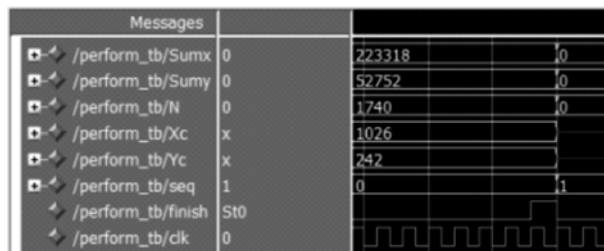


图6 信号处理电路 Modelsim 下运算结果

全部测试结果如表1所示,由于标记点坐标精确到1/8像素点坐标,所以标记点位移的也精确到

1/8 像素.从表中可以看出,信号处理电路实现测量标记点位移的功能,误差小于 1/8 像素.

表 1 信号处理电路功能检验结果

标记点位移	信号处理电路计算结果
1	1.125
2	2.125
3	3.000
4	3.875
5	4.875

5 结束语

基于视觉的触觉传感器是一种新型的触觉传感器,相对于传统基于电信号的触觉传感器更不容易受到外界化境的影响.本文设计了基于视觉的触觉传感器的信号处理电路,实现通过图像传感器采集的图像计算出标记点的位移,并通过标记点的位移计算出传感器的受力信息,分别采用了硬件和 Nios II 微处理器软核实现.整体设计测试的精度误差小于 1/8 像素,并采用 FBGA 封装形式的 EP4C30 芯片,最终电路板实物尺寸为 20 mm×40 mm,可以放置在设计尺寸为 50 mm×25 mm×25 mm 的机械手第二指节中,有利于机械手的小型化.

参考文献:

[1] Yousef H, Boukallel M, Althoefer K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics—A review [J]. Sensors and Actuators A: physical, 2011, 167 (2): 171-187.

[2] Kamiyama K, Vlack K, Mizota T, et al. Vision-based sensor for real-time measuring of surface traction fields [J]. Computer Graphics and Applications, IEEE, 2005, 25(1): 68-75.

[3] Johnson M K, Adelson E H. Retrographic sensing for the measurement of surface texture and shape[C] //Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on. USA, Miami, IEEE, 2009: 1070-1077.

[4] Johnson M K, Cole F, Raj A, et al. Microgeometry capture using an elastomeric sensor[C] //ACM Transactions on Graphics (TOG). USA, Los Angelous, ACM, 2011, 30(4): 46.

[5] Sato K, Kamiyama K, Nii H, et al. Measurement of force vector field of robotic finger using vision-based haptic sensor[C] //Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. French, Nice, IEEE, 2008: 488-493.

[6] Sato K, Kamiyama K, Kawakami N, et al. Finger-shaped gelforce: sensor for measuring surface traction fields for robotic hand[J]. Haptics, IEEE Transactions on, 2010, 3(1): 37-47.

作者简介:

张贵相 男,(1989-),硕士.研究方向为新型触觉传感器.
E-mail:zgxl2@mails.tsinghua.edu.cn.

钟 艺 男,(1992-),硕士.研究方向为新型触觉传感器.

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.