

基于PC104和FPGA的嵌入式图像采集处理系统设计与实现

王宇, 王硕, 周超

中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190

E-mail: yu.wang@ia.ac.cn, shuo.wang@ia.ac.cn, chao.zhou@ia.ac.cn

摘要: 本文设计出一种基于PC104和FPGA的图像采集处理系统, PC104与FPGA利用PC104-PLUS总线进行通讯, FPGA协处理器实现CMOS摄像头的图像采集和预处理, PC104作为上位机, 实现基于LSD局部直线检测器的特征点检测算法和基于颜色的Camshift目标跟踪算法。基于图像采集处理系统的设计方案, 给出了图像采集处理系统的具体实现, 并通过色标的特征点检测和目标跟踪实验验证了图像采集处理系统的可行性。

关键词: 图像采集处理系统, 特征点检测, 目标跟踪

The Embedded Image Capture and Processing System Based on PC104 and FPGA

WANG Yu, WANG Shuo, ZHOU Chao

State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, P. R. China

E-mail: yu.wang@ia.ac.cn, shuo.wang@ia.ac.cn, chao.zhou@ia.ac.cn

Abstract: In this paper, an image capture and processing system based on PC104 and FPGA is designed. The communication between PC104 and FPGA is achieved by PC104-PLUS bus. The FPGA co-processor accomplishes the image capture of CMOS camera and image pretreatment. The PC104 controller, as an upper computer monitor, realizes feature point detection based on LSD line detector and Camshift target tracking algorithm based on the color. Based on the design of the image capture and processing system, the concrete implementation scheme of the image capture and processing system is proposed. And the practicability of our image capture and processing system is demonstrated by feature point detection of a color mark and target tracking algorithm.

Key Words: Image capture and processing system, Feature point detection, Target tracking

1 引言

随着视觉测量与视觉伺服控制技术的不断发展, 视觉系统在工业等领域的应用越来越广泛, 如它可以取代生产线上的人工检测, 提高生产效率, 具有较高的可靠性和精确度。视觉系统按其组成可划分为基于PC机的视觉系统和智能相机。由于传统的基于PC机的视觉系统存在体积大、不易安装、维护等弱点, 智能相机近年来备受关注。智能相机是一种高度集成化的视觉系统, 它将图像采集、信息通讯、图像处理等功能集成一体, 易于实现和模块化, 具有广阔的应用价值和开发前景。很多学者对智能相机做了深入地研究, Bonato等人设计了一种能够用于手势识别的智能相机, 并成功应用于移动机器人中[1]。Zivkovic利用无线智能相机网络实现了实时的三维重建[2]。Alessandrelli等人将基于FPGA的智能相机应用到智能交通系统中, 实现对交通系统的信息收集[3]。

基于嵌入式系统结构的智能相机一般采用DSP和FPGA相结合的硬件框架[4], DSP处理器作为图像处理单元, 实现图像滤波、特征提取、物体识别等功能; FPGA作为图像采集单元, 实现图像采

集、图像显示等功能。由于FPGA具有并行处理、图像处理速度快等特点, 近几年许多学者利用FPGA直接实现一些图像处理算法, 如利用和设计流水线结构, 实现图像的滤波算法[5], 通过FPGA实现图像的边缘提取算子[6]-[7], Tippett等人实现了并行的Harris角点提取, 并利用Harris角点的平移和旋转不变性设计了基于FPGA的物体跟踪算法[8], 对于跟踪问题也有利用FPGA实现基于颜色的粒子滤波算法[9]。但是不管是利用DSP作为图像处理单元还是直接利用FPGA进行并行结构的算法设计, 整体的设计与结构较复杂, 实现图像处理算法时开发周期长。

因此, 我们设计了基于PC104和FPGA相结合的图像采集处理系统, PC104处理器具有体积小、可靠性高、功耗低等特点, 易于维护、扩展、模块化, 广泛应用于嵌入式控制系统的开发中, 而且可以采用多种操作系统平台实现图像处理算法, 由于PC104工控机与主流的台式PC机结构体系基本相同, 软件上可以利用视觉处理开发工具opencv等, 可以方便的实现图像显示和图像处理算法, 大大缩短了开发周期。

2 图像采集系统的框架结构

图像采集系统硬件框架如图1所示, 采用了以PC104为主控制器、FPGA为协处理器的硬件结构框架。FPGA协处理器主要实现对CMOS摄像头的图像采集; PC104工控机作为图像处理核心单元, 实现图像

此项工作得到国家自然科学基金(No. 51175496), 国家自然科学基金(No. 61105105), 基金重点项目(No. 61233014)和863计划(No. 2012AA041402)资助。

滤波、边缘提取、目标跟踪等图像处理算法；上位机与下位机的通讯采用PC104-PLUS总线进行通讯，实现图像信息的传输。其具体工作过程：FPGA协处理器通过SCCB接口向CMOS摄像头发送控制信号，并实时得到图像，FPGA将得到的图像缓存到SDRAM存储乒乓模块，当SDRAM满一帧图像时，将图像通过PC104-PLUS总线传送到PC104主控制器，PC104主控制器对采集到的一帧图像进行处理，如特征提取、目标跟踪等，并实时显示，同时FPGA控制另一片SDRAM对下一帧从图像传感器采集出来的图像进行存储。

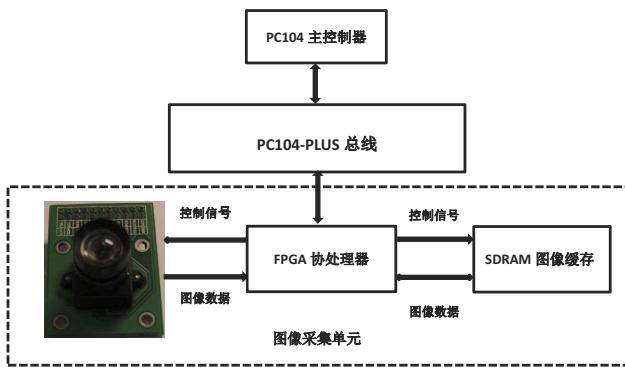


图1: 硬件总体框架

3 图像处理算法设计

图像处理是图像采集处理系统不可缺少的重要内容，本系统的图像处理软件设计主要包括图像的预处理、特征点检测和目标跟踪等。因为感光芯片采集出来的图像数据格式为RAW-RGB格式，需要通过FPGA对图像数据进行预处理，实现格式转换，得到RGB数据格式。特征点检测和目标跟踪主要由PC104工控机完成，图像采集通过PC104-PLUS总线通讯模块单元得到图像数据，利用数据整合成一幅图像，对图像进行处理。本文设计的图像处理算法主要有特征点提取和目标跟踪算法，流程图如图2所示。

3.1 图像数据的预处理

感光芯片采集出来的图像数据格式为RAW-RGB格式，如图3所示。需要对图像进行预处理，将RAW-RGB格式转换成RGB数据格式。常有方法有最邻近插值法和双线性插值算法，采用最邻近插值算法会丢失图像的一些边缘信息，采用双线性插值算法得到的图像比较平滑。本文采用双线性插值滤波方法，将RAW-RGB数据格式转换为RGB数据格式。

从图4中，我们可以得到四种情况的3*3矩阵，分别为：

情况1：

$$\begin{pmatrix} Gr & R & Gr \\ B & Gb & B \\ Gr & R & Gr \end{pmatrix}$$

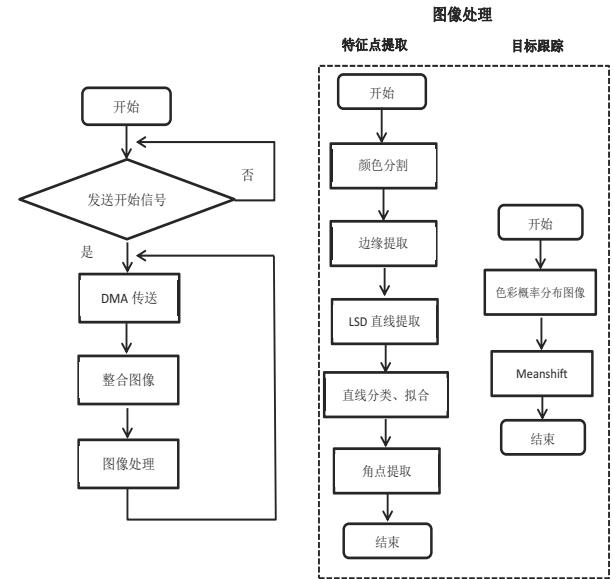


图2: 上位机算法流程图

Gr	R	Gr	R	Gr	R
B	Gb	B	Gb	B	Gb
Gr	R	Gr	R	Gr	R
B	Gb	B	Gb	B	Gb
Gr	R	Gr	R	Gr	R
B	Gb	B	Gb	B	Gb

图3: RAW-RGB格式

情况2：

$$\begin{pmatrix} R & Gr & R \\ Gb & B & Gb \\ R & Gr & R \end{pmatrix}$$

情况3：

$$\begin{pmatrix} B & Gb & B \\ Gr & R & Gr \\ B & Gb & B \end{pmatrix}$$

情况4：

$$\begin{pmatrix} Gb & B & Gb \\ R & Gr & R \\ Gb & B & Gb \end{pmatrix}$$

对于(1)、(2)、(3)、(4)四种情况分别设计模板进行计算每个中心点的RGB值，实现双线性插值算法，得到RGB数据格式，具体的模板为式(1)、(2)、(3)、(4)所

示。

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\ G = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ B = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ G = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\ B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ G = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ B = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ G = \frac{1}{5} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ B = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (4)$$

3.2 特征点检测

特征点检测一般可以采用Harris、CSS等角点检测方法，但是由于阈值的影响，在实时检测时测量不精确，为了精确的找到四个角点，我们采用提取直线的方法，利用两两直线相交来求取特征点，测量精度高。目前直线检测有Hough变换等方法，而本文利用LSD局部直线检测器[10]，对长方形的四条直线进行检测。

特征提取算法处理过程如图4所示，将采集的图像利用式(5)从RGB空间转换到HSI空间，

$$\left\{ \begin{array}{l} H = \begin{cases} \theta, B \leq G \\ 360 - \theta, B > G \end{cases} \\ S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \\ I = \frac{R+G+B}{3} \end{array} \right. \quad (5)$$

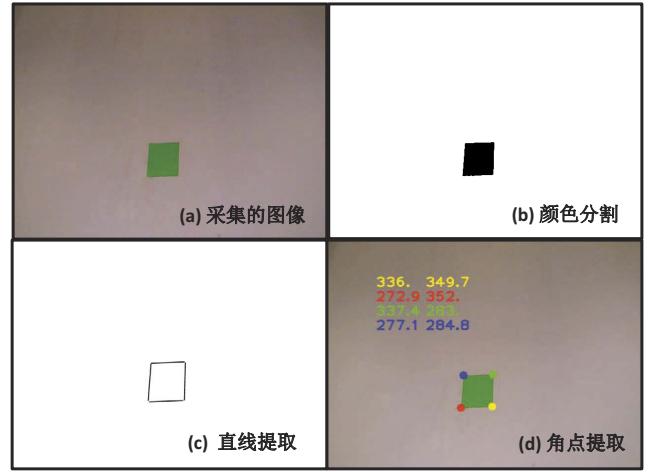


图4: 矩形特征提取

式中，

$$\theta = \arccos \left(\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{(\frac{1}{2})}} \right).$$

通过阈值提取矩形的颜色信息，进行矩形的颜色分割，经过二值化，得到二值化图像，如图4 (b) 所示。对二值化图像进行边缘提取，利用式 (6) 求取每个像素点(x,y)的梯度方向。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_x(x, y) = \left(\frac{I(x, y+1) + I(x+1, y+1) - I(x, y) - I(x+1, y)}{2} \right) \\ G_y(x, y) = \left(\frac{I(x, y) + I(x, y+1) - I(x+1, y) - I(x+1, y+1)}{2} \right) \\ \theta(x, y) = \arctan \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \end{array} \right. \quad (6)$$

对二值化图像进行LSD直线检测，LSD直线检测主要思想是判断图像中梯度方向大致相同的像素点进行连接，再通过寻找最近线段中斜率相同的进行拟合。主要包括区域增长、区域的矩形近似和线段的验证三部分。区域增长是对梯度方向大致相同的像素点进行连接，每增加一个像素点就要把该区域的梯度方位角进行更改，区域梯度方位角利用式(7)进行更改。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_x = S_x + \cos(\theta_P), \\ S_y = S_y + \sin(\theta_P), \\ \theta_{region} = \arctan(\frac{S_y}{S_x}), \end{array} \right. \quad (7)$$

其中 θ_P 为P点梯度方位角， θ_{region} 为region区域的梯度方位角， S_y, S_x 分别为属于该区域的所有点方位角正、余弦累加值。矩形近似就是将区域进行大致关联得到矩形，矩形的中心位置利用梯度幅值来确定。验证线段的正确性是通过矩形内梯度方位角与矩形的方向大小满足一定阈值范围的区域个数多少来判断。因此进行直线检测后需对LSD检测出的线段进行分类、最小二乘直线拟合，最后得到长方形标记块的四条边，如图4 (c) 所示。利用两两直线相交得到矩形的四个顶点，如图4 (d) 所示，每个顶点用四个不同颜色点代表，在图中显示了每个点在图像平面坐标下的坐标。

3.3 目标跟踪

目标的运动跟踪主要利用Camshift跟踪算

法[11]，Camshift算法主要是利用颜色直方图特征进行目标跟踪的一种算法。先将图像RGB空间转换成HSI空间，利用H分量得到颜色直方图，最后得到每帧的色彩概率分布图像，图像采集处理系统进行目标跟踪时，算法利用上一帧的目标跟踪结果作为初始值，自适应调整窗口位置，实现目标跟踪，具体算法的流程图如图5所示，其中利用式(8)计算质心 (x_c, y_c) ，

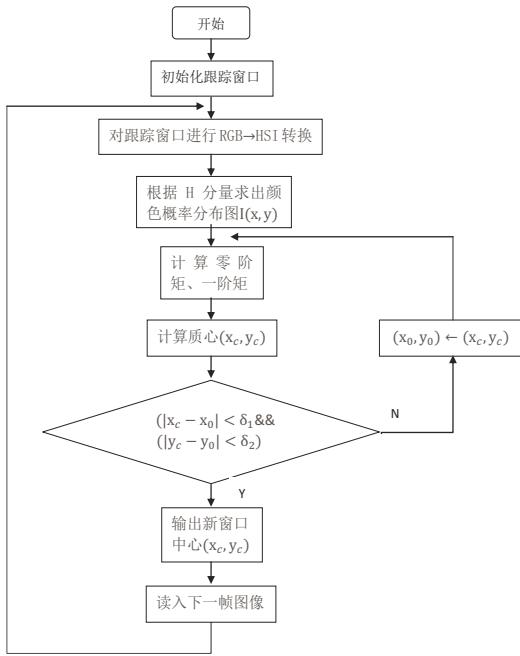


图 5: 目标跟踪算法流程图

$$\begin{cases} x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \\ y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}}, \end{cases} \quad (8)$$

其中， M_{00} ， M_{01} ， M_{10} 分别为 $I(x,y)$ 的零阶矩和一阶矩，利用式(9)进行计算。

$$\begin{cases} M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y), \\ M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x, y), \\ M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x, y), \end{cases} \quad (9)$$

4 图像采集系统的实现

为了验证方案的可行性，我们研制了一种图像采集系统，如图6所示，PC104工控机作为主控制器，采用Windows操作系统，利用视觉处理工具opencv实现图像滤波、边缘提取、目标跟踪等图像处理算法。FPGA协处理器作为下位机，上位机与下位机通讯利用PC104-PLUS总线通讯单元实现。

4.1 FPGA协处理器

以FPGA为协处理器的下位机电路板采用八层板电路设计，包括FPGA复位电路、SDRAM存储单元、摄像头接口以及以PCI9054芯片为基础的PCI总线接口电路等，复位电路采用DS1232复位芯片，搭建复位电路，能对FPGA进行复位；电路板具有三片SDRAM存储空

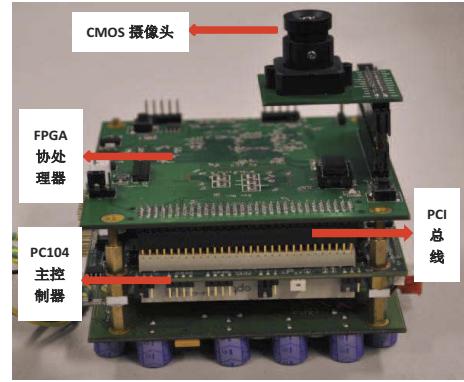


图 6: 图像采集系统

间，两片SDRAM作为图像的存储空间，实现图像采集的乒乓操作，另一片作为FPGA的NIOS核存储空间；摄像头接口用于连接图像摄取装置的数据线和控制线；

图像摄取装置分为CCD和CMOS两种图像传感器，CMOS图像传感器具有功耗低、尺寸小、价格低等优点，CCD相比CMOS图像传感器则成像质量好，灵敏度高，但是价格相对较贵，本文的嵌入式图像采集处理系统采用CMOS图像传感器MT9P031感光芯片。此芯片最大分辨率为500万像素，帧率可达到14FPS/s，在640*480分辨率下最大帧率为53FPS/s。MT9P031感光芯片无需驱动，只需FPGA利用感光芯片内部提供的SCCB通讯接口为其提供控制信号就可以采集到RAW-RGB格式的图像数据，大大的简化了系统设计。

CMOS摄像头是通过SCCB接口发送控制信号。SCCB接口如图7所示，由一条传输时钟信号的SIO_C和一条用于传输数据信号的SIO_D组成。SCCB的通讯协议和IIC通讯协议基本相同，SIO_C时钟线保持为高，SIO_D信号线由高变低时，开始数据传输；SIO_C时钟线保持为高，SIO_D信号线由低变高时，结束数据传输。

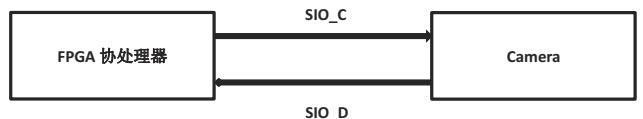


图 7: SCCB工作原理图

4.2 PC104-PLUS总线通讯单元

PC104-PLUS总线基于PCI总线协议标准，目前实现PCI协议标准的设计方法一般有两种：一是通过FPGA对整个PCI协议进行编写，二是通过PLX公司提供的专用芯片实现PCI总线通讯。前一种编程和调试工作量大，后一种编程简单，实现容易。本文采用PCI9054桥接专用芯片实现PC104工控机与FPGA协处理器的PCI总线协议标准，如图8所示，PCI9054是专门提供PCI总线协议标准的芯片，传输速率可达132MB/s，具有两个独立的DMA通道，主要由M、C、J三种模式，我们选用地址总线和数据总

线非复用的C模式，利用EEROM对PCI9054芯片进行外部配置，实现PC104-PLUS总线的通讯。

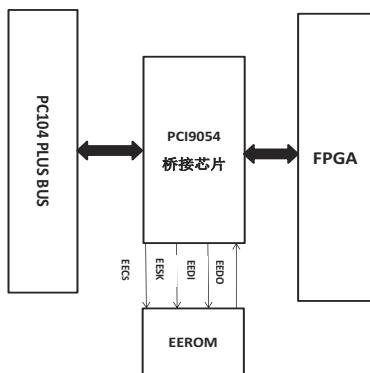


图 8: PC104-PLUS 通讯接口框图

5 实验结果

为了验证嵌入式图像采集处理系统的功能，对长方形色标分别进行了特征点检测和目标跟踪实验。

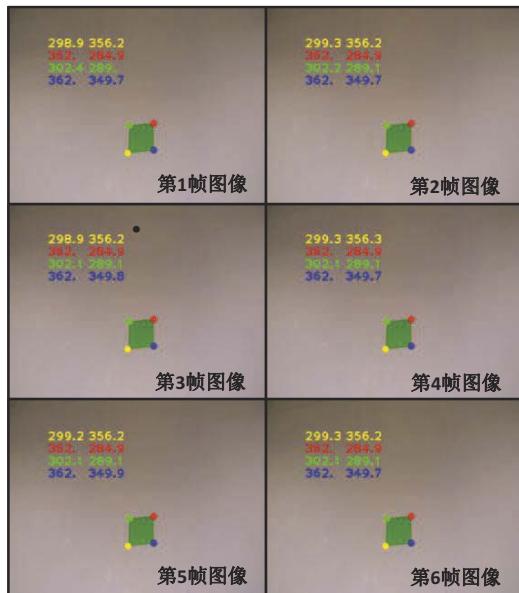


图 9: 特征点检测

5.1 特征点检测实验结果

为了验证系统特征点检测的可行性，我们对矩形色标进行特征点检测实验，如图9所示。矩形的四点在图像平面坐标系下的实际位置信息分别为(299,356), (362,285), (302, 289), (362, 350)，通过特征点提取，四个点分别由黄、红、绿、蓝来标记出来，图像左上方分别是矩形色标四点的图像平面坐标系下的X,Y坐标。

为了验证特征点检测的精度，实验提取四个顶点的位置信息，并做了如下实验，固定矩形色标和摄像头不动，四个顶点随着时间的变化而得到的特征点变化值，并对其进行了观测。我们对120组测量数据计算其均值，得到四个顶点的平均值，分别为

(299.2, 355.9), (362, 284.3), (302.1, 289.1), (362, 349.8)。为了验证特征点检测算法精度，我们对120组像素点的坐标(x,y)利用式(10)计算，分别得到四个顶点的欧氏距离变化图如图10所示，其中黑色线是每个顶点的平均值利用式(10)计算得到的距离量度，矩形四个点(x, y)坐标欧氏距离的最大偏差和最大方差如表1所示。

$$dis = [x^2 + y^2]^{(\frac{1}{2})} \quad (10)$$

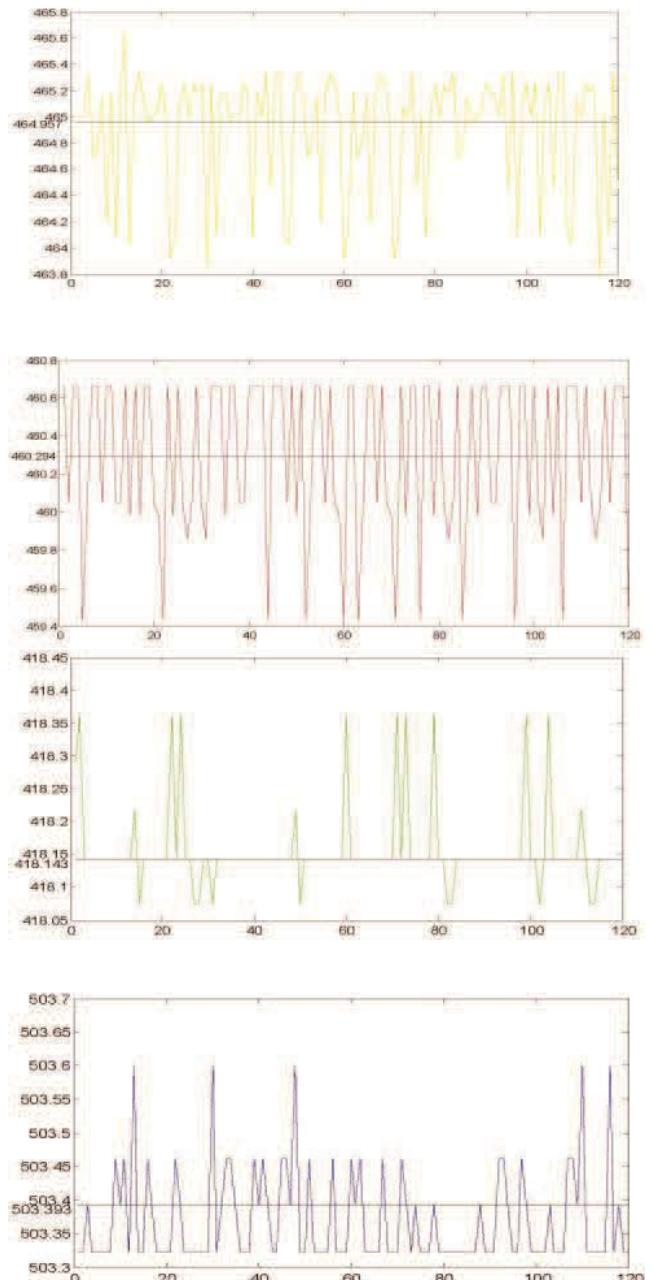


图 10: 欧氏距离变化图

5.2 目标跟踪实验结果

为了验证图像采集处理系统目标跟踪的可行性，我们对矩形色标进行了Camshift跟踪算法实验，对实时采集的每帧图像进行跟踪。实验中设定矩形色标不动，摄像头沿一个方向移动，用红色椭圆圈出长方形

表 1: 欧氏距离最大偏差和最大方差

矩形色标四点	最大偏差	最大方差
黄点	1.12	0.212
红点	0.86	0.179
绿点	0.22	0.004
蓝点	0.21	0.005

色标在图像中的位置，如图11所示。通过实验可以看出图像采集系统对目标跟踪的可行性和稳定性。

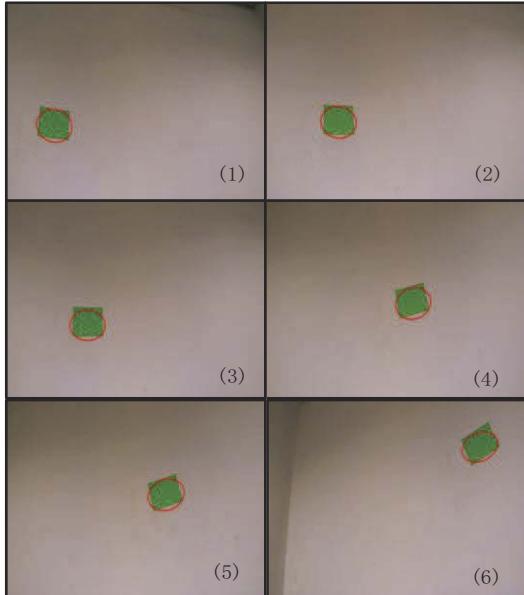


图 11: 矩形色标跟踪

6 结论

本文介绍了基于PC104和FPGA的嵌入式图像采集处理系统的设计方案及其具体实现，并利用该系统实现了图像的预处理、特征点检测和目标跟踪算法，通过实验验证了所提方案的可行性和研制系统的实用性。设计的系统可利用的开源软件资源丰富，图像处理算法便于开发，具有开发周期短、结构简单、使用方便等特点。

参考文献

- [1] V. Bonato, A. Sanches, M. Fernandes, J. Cardoso, E. Simoes, and E. Marques, A Real Time Gesture Recognition System for Mobile Robots, in *Proceedings of 5th International Conference on Informatics in Control, Automation, and Robotics*, 2004: 207–214

- [2] Zoran Zivkovic, Wireless smart camera network for real-time human 3D pose reconstruction, *Computer Vision and Image Understanding*, 114(11): 1215–1222, 2010.
- [3] Daniele Alessandrelli, Andrea Azzarà, Matteo Petracca, Christian Nastasi and Paolo Pagano, ScanTraffic: Smart Camera Network for Traffic Information Collection, *Wireless Sensor Networks Lecture Notes in Computer Science*, 7158: 196–211, 2012.
- [4] Duan Jinghong, Deng Yaling, and Liang Ku, Development of Image Processing System Based on DSP and F-PGA, in *Proceedings of 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2007: 791–794.
- [5] Juan Manuel Ramírez, Emmanuel Morales Flores, Jorge Martínez-Carballedo, Rogerio Enriquez, Vicente Alarcón-Aquino, and David Báez-López, An FPGA-based Architecture for Linear and Morphological Image Filtering, in *Proceedings of 20th International Conference on Electronics, Communications and Computer*, 2010: 90–95.
- [6] 韦海萍, 赵保军, 唐林波, Canny算法的改进及其硬件的实现, 光学技术, 12(12): 263–266, 2006.
- [7] Zhengyang Guo, Wenbo Xu, and Zhilei Chai, Image Edge Detection Based on FPGA, in *Proceedings of 9th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*, 2010: 169–171.
- [8] Beau Tippetts, Spencer Fowers, Kirt Lillywhite, Dah-Jye Lee, and James Archibald, FPGA Implementation of a Feature Detection and Tracking Algorithm for Real-time Applications, *Advances in Visual Computing Lecture Notes in Computer Science*, 4841, 682–691, 2007.
- [9] Jung Uk Cho, Seung Hun Jin, Xuan Dai Pham, and Jae Wook Jeo, A real-time object tracking system using a particle filter, in *Proceedings of 2006 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006: 2822–2827.
- [10] R.G. von Gioi, J. Jakubowicz, J.M. Morel, and G. Randall, LSD: A Fast Line Segment Detector with a False Detection Control, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(4): 722–732, 2010.
- [11] Gary R. Bradsk, Real time face and object tracking as a component of a perceptual user interface, in *Proceedings of 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 1998: 214–219.