

# 基于机器视觉的嵌入式工业在线检测系统

邓集杰<sup>1,2</sup>, 刘铁根<sup>1,2</sup>, 杨 永<sup>1,2</sup>, 朱均超<sup>1,2</sup>, 李晋申<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学精仪学院, 天津 300072; 2. 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:**介绍以高速线阵电荷耦合器件(CCD)和数字信号处理器(DSP)为核心的基于机器视觉的工业在线检测系统。该系统由硬件和软件两部分组成, 硬件部分包括光学成像模块、图像采集模块、数据处理模块及接口模块, 软件部分包括各部分的驱动、系统配置程序、图像预处理和数据处理程序。实验表明, 该系统是一套能够满足高速高精度工业在线视觉检测的嵌入式检测系统。

**关键词:** 机器视觉; 在线检测; 电荷耦合器件; 数字信号处理器; 图像采集; 图像处理

## Embedded Industry Production-line Image Examination System Based on Machine Visions

DENG Ji-jie<sup>1,2</sup>, LIU Tie-gen<sup>1,2</sup>, YANG Yong<sup>1,2</sup>, ZHU Jun-chao<sup>1,2</sup>, LI Jin-shen<sup>1,2</sup>

(1. College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072)

**【Abstract】** Industry production-line image examination system based on machine visions taking linear CCD and DSP as the core is introduced in this paper. The system is composed of hardware and software. The hardware of the system contains three parts: optical block, image capture block, data processing block and interface block. The software of the system consists of drivers, system configuration program, image pre-processing and processing program. The test results show that the system can satisfy the requirement of high speed and high precision in industry production-line vision examination.

**【Key words】** machine vision; online examination; CCD; DSP; image capture; image processing

### 1 概述

工业在线视觉检测系统, 是近年来新兴的一种在线检测手段, 它以机器视觉为基础, 利用智能化的图像采集处理系统, 对检测目标的表面图像信号进行采集和处理, 并输出处理结果。与其他机器视觉设备相比, 工业在线检测系统最显著的特点是具有较强的实时性, 以配合高速生产线。

目前, 机器视觉产品主要有两种形式<sup>[1]</sup>: (1) 基于PC机的板卡式, 它利用图像采集卡和图像传感器在PC机上实现。该方式借助了PC机的通用性, 开发难度低, 但操作难度高和稳定性较差, 而且现有操作系统均为非实时系统, 实时性难以保证, 另外此种系统成本高、体积大、便携性差。(2) 嵌入式, 它以嵌入式处理器为核心, 整体开发包括硬件电路、设备驱动和算法软件等整套系统, 因此软硬件可以灵活配置, 体积小, 利于实现高速数据采集与处理, 实时性好, 更适合进行在线检测。

目前国际主要机器视觉产品制造商都有各自的嵌入式视觉检测产品<sup>[2]</sup>。在国内, 机器视觉领域由于起步较晚, 自主开发的产品几乎全部为板卡式, 而嵌入式视觉检测系统目前还没有成熟的产品出现。为此, 笔者所在的实验室经过一年的攻关, 将嵌入式处理器与图像采集系统成功地结合, 研制出一套可以满足较高速生产线的基于机器视觉的嵌入式工业在线检测系统。

该系统以线阵 CCD 和 DSP 为核心, 实时采集检测对象图像信号, 经数字化后由处理器进行处理, 将处理后的结果以图片或信号方式输出。此外, 该系统还可通过外部接口实

现在线参数配置。

### 2 系统硬件设计

工业在线视觉检测智能相机系统包括以下 4 个部分, 如图 1 所示:

(1) 光学成像模块, 为 CCD 传感器提供有效的光照条件和光学图像, 由光源和光学透镜组成。根据检测对象不同, 光源可以采用直流、交流或脉冲等方式。若采用非直流方式, 则灯光闪烁频率需要与 CCD 曝光时间同步, 以避免频闪影响信号采集。

(2) 数据采集模块, 由线阵 CCD、CCD 驱动信号增强电路、CPLD 和 A/D 组成, 用于采集图像信号, 并将模拟信号数字化, 以便 DSP 处理。本系统采用黑白高速线阵 CCD——TH7814A, 该 CCD 为双路输出, 有效像素 2 048, 像敏单元尺寸 7 μm, 最高驱动频率 50 MHz; CCD 驱动信号增强电路是为满足该 CCD 所需的 9 V 高速驱动而设计的; A/D 芯片采用两片 XRD9856, 该芯片最大采样频率 27 MHz, 具有相关双采样功能(CDS), 精度为 10 位; 以上器件同步驱动脉冲均由 CPLD 产生。

(3) 数据处理模块, 由 DSP、随机存储器(RAM)、只读存

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(仪器专项: 60627002)

**作者简介:** 邓集杰(1979 - ), 男, 博士研究生, 主研方向: 机器视觉, 嵌入式光电检测系统; 刘铁根, 教授、博士生导师; 杨 永, 硕士研究生; 朱均超, 博士研究生; 李晋申, 在职硕士研究生

**收稿日期:** 2007-03-10 **E-mail:** djjie@yahoo.com.cn

存储器(ROM)组成,完成数据处理和存储、系统启动等功能。DSP 采用 TI 高速多媒体处理器 TMS320DM642,工作频率 600 MHz,最高指令处理速度 4 800 MI/s,数据总线宽度 64 位,该处理器最大特点在于具有三路视频接口,可以直接输入输出最高达 80 MHz 的 BT.656、Y/C 视频、原始视频等多种格式的视频信号,本系统采用原始视频模式。RAM 采用容量 32 MB,数据宽度 64 位的 SDRAM;ROM 由容量 16 MB 的 FLASH 和 256 B 的 EEPROM 构成。

(4)系统接口模块,系统所提供的接口有 100 Mb/s 网络接口(TCP/IP 协议)、串行外设接口(SPI)、RS232 串行接口,用于发送和接受各种数据及控制信号。

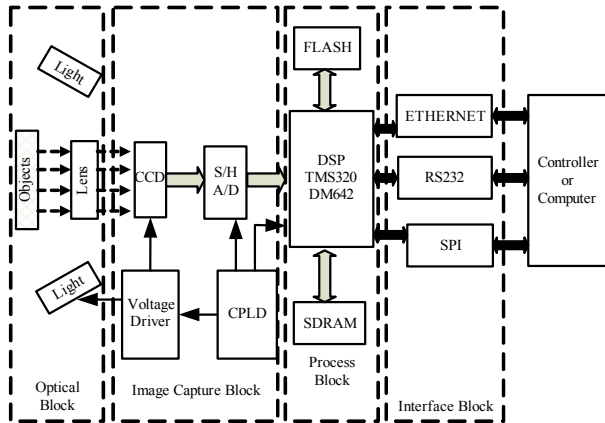


图 1 系统结构

该系统工作流程如下:光源照射到被检测物体,被检测物体经过光学透镜成像于 CCD 的像敏面上,通过 CCD 驱动电路产生的驱动信号导出 CCD 原始图像信号,该信号经后级的 A/D 转换为数字信号后输入 DSP。此时两种数据处理方式:(1)将数据直接进行运算处理,只将处理后所需要的结果从指定的接口输出,如给后级的分检机构;(2)将数据保持原始状态或处理后以图片格式输出。

### 3 系统程序设计

#### 3.1 系统驱动程序

##### 3.1.1 CPLD 硬件程序设计

CPLD 的作用是产生 CCD、A/D 及 DSP 视频端口的同步驱动脉冲。由该 CCD 及 A/D 的工作原理<sup>[3-4]</sup>可知 CCD 和 A/D 的驱动信号时序,并且只有使 A/D 的 SHP 和 SHD 分别采样于 CCD 输出信号的暗电平和有效电平位置,才能将 CCD 产生的原始模拟信号准确地采集和转化为数字信号,如图 2 所示。此外,DSP 视频接口也需要 CPLD 产生的同步脉冲及同步信号来接收数字图像信号,该驱动程序由 VHDL 编写。

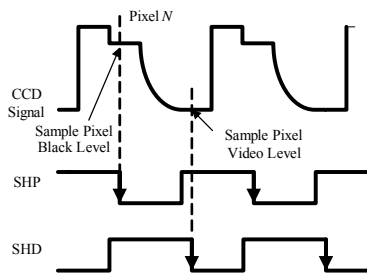


图 2 A/D 采样时序

##### 3.1.2 DSP 硬件驱动程序

DSP 硬件驱动程序用来管理硬件各部分工作方式及指定数据流向和组织方式,由以下 5 部分组成:

(1)视频口配置程序。由于 CCD 具有双路输出,采用两片 A/D,数据为两路 10 位原始视频数据,因此将视频口配置为双路 10 位原始视频数据捕获模式,并为每路视频接口设置 512 B 先入先出缓存(FIFO)。系统工作时将捕获的数字视频数据放入 FIFO 中,待 FIFO 填满后,将数据通过 EDMA 通道转移,数据清空后再重新填充。视频接口工作频率与前端 CCD 驱动频率相同。

(2)数据转移信道配置。图像数据通常都有很大的数据量,因此数据的转移、搬运及组织是重要的环节。本系统中数据转移采用增强型直接存储器访问模式(EDMA)。待 FIFO 存满后,触发 EDMA 启动,将数据一次性整体搬运至 RAM 中,并且保持数据组织形式不变。FIFO 清空后再重复进行填充。如此反复,直到接到停止信号为止。该系统中 EDMA 配置采用块同步的 2D 到 2D 模式(block synchronized 2D-to-2D transfers)。

(3)接口驱动。100 Mb/s 网络接口由于速度较快,可以用于传送图像数据,也可以接收控制信号。RS232 和 SPI 接口用于接收系统控制信号或送出处理结果信号。

(4)外部同步信号配置,用于与脉冲光源或后级执行机构同步。

(5)系统自引导程序,程序大小为 1 KB,存储于 FLASH 中从 0 KB ~ 1KB 的空间,用于脱机情况下引导系统启动,使之可独立工作。

### 3.2 系统软件设计

#### 3.2.1 系统控制软件

该检测系统为通用系统,所处环境和检测对象千差万别,因此需要根据具体的环境和检测内容进行相应的配置。通常嵌入式系统的程序调试需要使用仿真器,只能对程序代码进行修改,费时费力,使用不便,故本系统设计了一套可以通过网络接口进行在线配置的程序。这样只需一根普通网络直连线将检测系统与电脑相连,利用该程序就可以方便地配置系统参数及实时察看图像情况。配置内容包括相机 IP 地址及端口号、SPI 配置及输出、UART 配置、图像高宽及增益等属性、相机曝光时间等参数和相关图像存储等操作与显示该图像等。

#### 3.2.2 图像预处理

##### (1)畸变校正

畸变是像差的一种,由光学器件造成,是轴外点在像面上实际成像高度与理想像高之差<sup>[5]</sup>。对于线阵 CCD 系统来说,由光学镜头造成的畸变只存在于图像宽度方向。在对尺寸检测精度要求较为严格的应用场合,这种畸变是不允许存在的,必须进行校正。

目前常用的图像畸变校正方法主要有两种:拟合镜头畸变曲线<sup>[6]</sup>和利用标准样板<sup>[7]</sup>。前者需要知道光学系统的设计参数,后者只需根据系统畸变特征进行校正,方法简便,故本系统采用后者。

样板标定方法就是利用定制的标准样板,使其通过待校正光学系统成像,记录下其畸变图像,再根据样板理想设计参数和光学系统放大率,计算出样板理想的无失真像,比较它与实际像的差别,从而得出该系统畸变函数关系。由于该系统为线扫成像系统,因此采用文献[7]中的方法进行校正。

图 3 为实际测量的畸变量。实验使用凤凰 f24 mm/2.8 广角镜头,焦距 24 mm,视场角 28°,视场宽度 240 mm,分辨率 0.2 mm。图 4 为拟合后的曲线,式(1)为拟合方程。

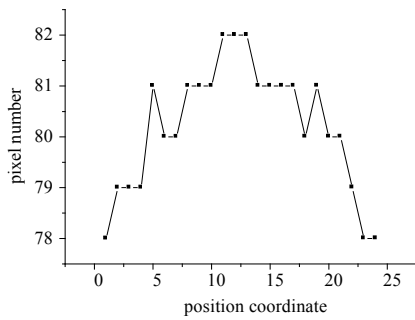


图3 10 mm 间距网格像素点数目曲线

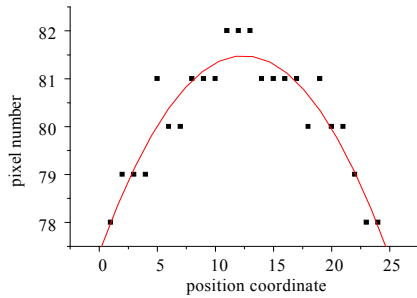


图4 10 mm 间距网格像素点数目拟合曲线

$$y = 77.37 + 0.66x - 0.0266x^2 \quad (1)$$

#### (2) 灰度校正

工业在线机器视觉检测系统通常都工作在较高的频率下，一般为 2 MHz ~ 20 MHz，使得线阵 CCD 的曝光时间仅为 0.1 ms ~ 1 ms，因此像面照度不一致而导致的成像灰度不均匀也是必须要解决的问题。针对线扫系统一帧图像只有一行的情况，参考文献[8]，并结合系统的实时性要求，采用相对灰度的计算方法，即先采集没有检测对象的背景图像信号，再采集含有目标对象的图像信号，将两幅图像相减即可以得到目标图像的真实灰度。

设  $I$  为背景图像， $P(x)$  为图像  $I$  在  $x$  像素点灰度值， $J$  为含有目标图像， $Q(x)$  为图像  $J$  在  $x$  像素点灰度值处。采集目标图像之前先将背景图像采集 1 000 行，并平均，求得按位置分布的背景象素强度  $\bar{P}(x)$ ，即

$$\bar{P}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{1000} p_i(x)}{1000} \quad (2)$$

之后将对应位置相减则可得出目标图像实际灰度  $F(x)$ ，即

$$F(x) = Q(x) - \bar{P}(x) \quad (3)$$

该算法原理简单、计算量小，非常适合实时性系统的要求。

#### 3.2.3 图像检测程序

对工业在线机器视觉检测系统来说，检测内容一般都是目标的二维特征<sup>[9]</sup>，如颜色、外轮廓形状、特定方向上的尺寸、表面光洁度、表面特征识别、特征点定位等，因此最常用的图像处理主要有图像增强，包括边缘锐化、轮廓提取、直方图处理、傅里叶变换等。

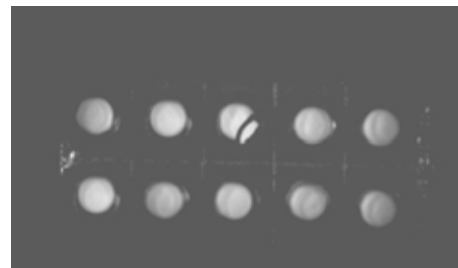
除了采用合适的算法对所采集到的图像进行有效处理外，工业在线检测系统还必须满足实时性的要求，因此需要对算法程序进行优化，以充分发挥 DSP 的运算能力。DSP 是一种具有并行指令执行功能的器件，本系统所采用的 DM642 可以在一个指令周期内并行执行 8 条指令。优化的目的就是使程序语句之间的相关性降低，更多地以并行方式被执行，充分发挥 DSP 的运算能力。除此以外，当系统采用 C 语言优

化设计仍不能满足要求时，需要将运算量大的以循环体为主的核心程序采用线性汇编编程。

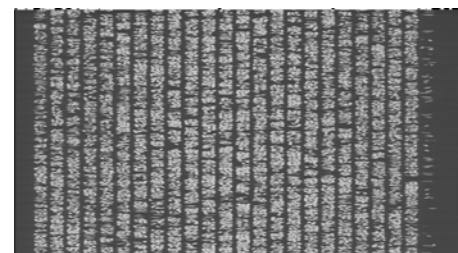
为此，本系统的算法采用高级语言与线性汇编语言混合编程，算法程序中主要的运算过程语句采用汇编语言以提高运算速度，而对于数据控制部分采用高级语言以简化程序，同时对高级语言程序也按照 DSP 运算流程进行 O<sub>3</sub> 级别的优化。

## 4 实验结果与分析

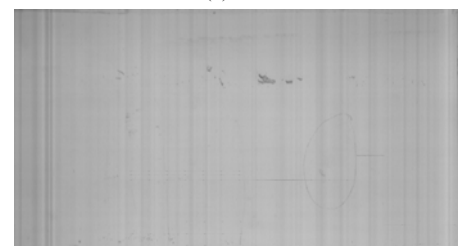
图 5 为该系统在实验中和实际工作生产线上所采集到的图片。图 5(a)为在药片包装生产线上进行的药片检测，检测内容为查看药片是否被装进包装中和药片是否有破损。该药片包装设备运行速度为 2 m/s。图 5(b)为米粒检测，在高速下落的米粒流中检测出颜色异常的米粒，并计算百分比。该系统检测速度为 3 m/s。图 5(c)为实验室内进行的相纸缺陷检测，目标移动速度为 1.5 m/s。由此 3 幅照片可以看出，该系统可以真实采集到高速生产线上有检测目标图像，而且图像灰度均匀、基本无畸变，细节清晰，完全能够满足图像处理的要求。



(a) Tablet



(b) Rice



(c) Printing paper

图5 系统采集的图像

在采用优化过 FFT 程序对系统运算速度进行的测试中，测试对象为 1 024×1 024 黑白图像，运行时间为 14 ms。但这个测试仅是理想情况，在实际的系统中，评估该系统是否能够满足检测的实时性要求除了要考虑程序本身的计算量外，还有一个必须要考虑的因素是每秒钟出现的中断次数。中断的出现会打断处理程序的运算，再加上执行一次中断需要进行一系列保护和恢复当前运算过程的程序，这些都会使得中断处理的效率与运算程序相比低得多。表 1 给出了每秒出现中断次数与运算效率之间的关系，可以看出，当中断大量增加时，运算效率会随之大幅降低。 (下转第 274 页)