

基于 JPEG 压缩编码算法的数字图像处理系统^①

张敏海, 吴新开, 张婷婷

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湘潭 411201)

摘 要: 介绍了基于 TMS320VC6713 DSP&FPGA 的数字图像采集系统的硬件设计, 以及在 DSP 上实现图像 JPEG 压缩编码算法, 并通过 USB 总线将图像数据发送到 PC 机. 实验结果表明这种设计有效地减小了图片存储所需空间, 获得了较高的压缩比.

关键词: DSP; FPGA; JPEG

Digital Image Processing System Based on JPEG Compression Algorithm

ZHANG Min-Hai, WU Xin-Kai, ZHANG Ting-Ting

(School of Information and Electrical and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Design of image acquisition platform based on TMS320VC6713 DSP &FPGA is presented and the realization of JPEG compressing encoding based on DSP are expounded, and sends the processed image data to PC by USB bus. The experimental result indicates that this design reduces effectively the space of the picture. High compression ratio is obtained from experiments.

Key words: DSP; FPGA; JPEG

随着社会的发展, 基于图像处理的应用越来越广泛, 已经广泛渗透到视频监控、机器视觉、军事制导、电视电话等. 数字图像处理技术要求把模拟图像信号转换成可以被高速处理器进行处理的数字图像信号, 同时数字图像数据量特别大, 不利于传输与存储, 所以对高速高性能的图像处理平台以及图像数据压缩处理进行研究与设计具有较深的理论与现实意义.

1 系统硬件设计

目前, 以高速处理器 DSP 和 FPGA 组成数图像采集与处理平台为主流, 它对 CCD 摄像机的视频信号进行数字采集, 获得数字图像信号, 并利用 DSP 的 CCS 软件开发平台的汇编语言和 C/C++ 语言混合程序设计可以高效地实现各类数字图像处理算法, 系统能以 USB 方式将 DSP 处理的 JPEG 等图像文件数据上传给上位机(PC)进行监视与操控^[1], 如图 1 所示.

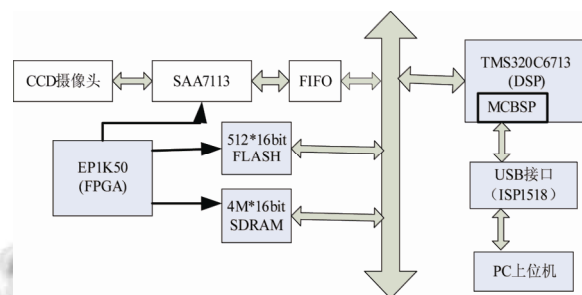


图 1 图像采集硬件系统图

TMS320VC6713 DSP 作为系统中进行图像信号处理的主处理器, 以它为中心扩展了 512K 的 FLASH 和 4M 的 SDRAM.

EP1K50 FPGA 为系统的协处理器, 作为系统整个的时序控制, 包括视频 A/D 的读和写控制、存储器的接口时序控制以及液晶接口的控制等^[2,3].

本系统采用专用的模拟视频解码器 SAA7113, SAA7113 接收 CVBS(复合视频)或 S-video 模拟视频输

^① 收稿时间:2012-02-17;收到修改稿时间:2012-04-04

入, 可以自动将 PAL、SECAM、NTSC 模式的彩色视频信号解码为 CCIR-601/656 兼容的彩色数字分量值, 器件功能通过 I2C 接口控制. CCD 摄像头拍摄的图片以模拟量的形式送到视频处理芯片 SAA7113 中进行处理. SAA7113 芯片会不间断的将模拟视频输入信号转换为经过处理的 8 位数字图像信号输出, 由于 DSP 进行数字信号处理是需要一定的时间. 如果将 SAA7113 的输出信号直接输入 DSP 进行处理势必造成数据的阻塞, 无法得到正确的结果. 所以, 需要在 SAA7113 和 DSP 之间加存储芯片作为数据缓冲. 所采用的缓冲芯片为 AL422B FIFO 芯片. 为处理得到的数据先暂时存放于缓存中, 当 DSP 准备好进行数据处理时将帧缓存中的数据调入 DSP 进行处理^[4].

本设计采取是采用 FIFO 来暂存 40 行图像数据, 视频解码器直接向 FIFO 中写入图像数据. 当 FIFO 中写入了 40 行图像数据后, 由 FPGA 向 DSP 发出中断请求; 同时, DSP 接到中断请求后, 启动 DMA 数据传输方式将 40 行图像数据从 FIFO 中读入到其外部 SDRAM 中存放. 这样在采集的同时, DSP 就可以先读取已采集的 40 行数据, 而不必等待一帧图像数据全部采集完成. 这样提高 DSP 的处理效率.

本系统是将 DSP 处理好的图像信息通过 USB 总线传送给 PC 进行处理和保存, 以实现通过 PC 电脑进行图像的监视与操控. USB 接口采用 Philips 公司的 ISP1581 USB 接口电路, 该器件符合 USB2.0 规范, 数据传输速率达到 480 Mb/s. 能够满足实时图像数据传输要求, 同时可通过主机向下发送指令和接收数据. ISP1581 芯片与 TMS320VC5416DSP 的数据通信是通过一个高速的通用并行接口来实现^[5].

2 JPEG压缩编码

JPEG 压缩编码是一种国际标准, 具有压缩比例高、失真小的特点, 在 PC、网络等众多领域应用广泛, 尤其在数码相机、手机、PDA 等嵌入式系统中的应用是其重要发展方向^[6]. 如图 2 所示为 JPEG 压缩与解压流程. JPEG 压缩编码主要由预处理、图像分块、DCT 变换、量化、Huffman 编码等流程构成. JPEG 压缩编码时, 需先将原始二维图像数据分成 8×8 的一个个数据块, 再将各数据块由原来的 RGB 颜色空间转换为 JPEG 需要的 YCbCr 颜色空间, 然后将各数据块按从左到右, 从上到下的顺序分别进行 DCT 编

码、量化和 Huffman 编码(量化和 Huffman 编码分别需要量化表和 Huffman 表的支持), 最后将编码得到的数据按照 JPEG 文件格式存储, 即完成了图像的 JPEG 压缩编码.

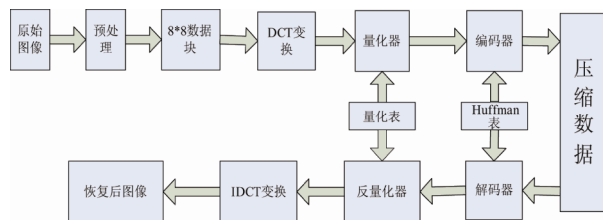


图 2 JPEG 编码解码流程图

2.1 图像预处理

计算机图像显示模型基本采用 RGB 颜色模型, 即一幅彩色图像信号由 R, G, B 三基色光的三幅图像信号相加而成. JPEG 分别压缩图像的每个彩色分量, 使用分色法将图像分成三个单独的图像, 再进行外理. 但一般 JPEG 的图片使用的是 YCrCb 颜色模型, YCrCb 模型更适合图形压缩^[4]. 因此, 编码前一般先将图像从 RGB 空间转换到 YCbCr 空间. 由 [RGB] 转换到 [YCbCr] 的关系式如下式: (R, G, B 都是 8bit unsigned)

$$Y = 0.2290R + 0.5870G + 0.1140B$$

$$C_b = -0.1687R - 0.33136G + 0.5000B + 128$$

$$C_r = 0.500R - 0.4187G - 0.0813B + 128$$

在 DSP 中实现时, 需先将系数矩阵作为常数表格存在程序空间.

2.2 离散余弦变换的实现

DCT 变换的快慢决定了整个 JPEG 算法的速度. 同一图像的原始输入数据均为无符号整数, 在对精度为 8 位的无符号数据编码时, 输入数据进行 FDCT 变换之前, 要先经过减 27 即减去 128. 范围为无符号图像数据平移成有符号数据, 才能作为 FDCT 的输入. 在解码端, 经过 IDCT 变换后, 输出值必须加上相同的位移值, 以恢复无符号代码. FDCT 变换的特征之一就是它能将 8×8 图像子块中的 64 个取样值中的能量集中到少数的几个变换系数中. JPEG 里, 要对数据压缩, 先要做一次前向 DCT 变换, 一次只对一个块(Block)进行变换. 将原始图像数据视为空间的函数 $f(x, y)$, x 为像素所处的行, Y 为像素所处的列, U 和 V 对应频域空间的行和列. 前向 FDCT 和反变换公式如下:

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \left[\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i, j) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2j+1)v\pi}{16} \right]$$

$$F(x, y) = \frac{1}{4} \left[\sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 F(u, v) \cos \frac{(2x+1)u}{16} \cos \frac{(2y+1)v}{16} \right]$$

上两式中:

$$C(u), C(v) = 1/\sqrt{2} \quad (u, v = 0)$$

$$C(u), C(v) = 1 \quad (\text{其他情况})$$

如果采用直接公式计算法, 则较复杂, 可以把二维 DCT 变换为一维 DCT. 将以上二维分解为一维变换(行、列) 进行计算. 即

$$F(u, v) = \frac{1}{2} C(u) \left[\sum_{i=0}^7 G(i, v) \cos \left(\frac{(2i+1)u\pi}{16} \right) \right]$$

$$F(i, v) = \frac{1}{2} C(v) \left[\sum_{j=0}^7 f(i, j) \cos \left(\frac{(2j+1)v\pi}{16} \right) \right]$$

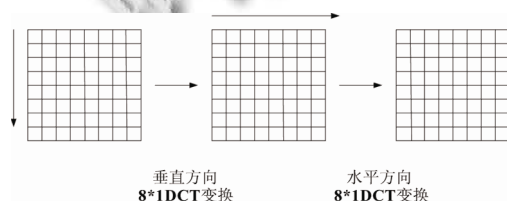


图 3 2 维 DCT 变 1 维 DCT

8 点一维序列 $x_i (0 \leq i \leq 7)$ 的 DCT 定义:

$$Y_0 = \sum_{i=0}^7 x_i \quad Y_m = \sqrt{2} \sum_{i=0}^7 x_i \cos [x_i \cos (2i+1) m / 16]$$

$(1 \leq m \leq 7)$

假设:

$$S_0 = x_0 + x_7 \quad S_1 = x_1 + x_6 \quad S_2 = x_2 + x_5 \quad S_3 = x_3 + x_4$$

$$S_4 = x_3 - x_4 \quad S_5 = x_2 - x_5 \quad S_6 = x_1 - x_6 \quad S_7 = x_0 - x_7$$

$$Y_0 = S_0 + S_1 + S_2 + S_3 \quad Y_4 = S_0 - S_1 - S_2 + S_3$$

$$Y_2 = S_0 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} - S_1 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} + S_2 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} - S_3 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16}$$

$$Y_6 = S_0 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} - S_1 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} + S_2 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16} - S_3 \sqrt{2} \cos \frac{6\pi}{16}$$

$$Y_7 = S_3 \left(\cos \frac{\pi}{16} + \sin \frac{\pi}{16} \right) + S_6 \left(\sin \frac{\pi}{16} - \cos \frac{\pi}{16} \right) + S_7 \left(\cos \frac{3\pi}{16} - \sin \frac{3\pi}{16} \right) - S_4 \left(\sin \frac{3\pi}{16} + \cos \frac{3\pi}{16} \right)$$

$$Y_3 = -S_4 \sqrt{2} \sin \frac{3\pi}{16} - S_5 \sqrt{2} \cos \frac{\pi}{16} - S_6 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{16} + S_7 \sqrt{2} \cos \frac{3\pi}{16}$$

$$Y_5 = S_4 \sqrt{2} \cos \frac{3\pi}{16} + S_5 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{16} - S_6 \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{16} + S_7 \sqrt{2} \cos \frac{3\pi}{16}$$

$$Y_1 = S_4 \left(\cos \frac{3\pi}{16} - \sin \frac{3\pi}{16} \right) + S_5 \left(\cos \frac{\pi}{16} - \sin \frac{\pi}{16} \right) +$$

从上述表达式可以看出, $Y_0 \sim Y_7$ 都是乘法累加运算, 而 $S_0 \sim S_7$ 可由 $x_0 \sim x_7$ 经过蝶形运算得到, 因此将 DCT 算法分成两级运算, 即第一级蝶形运算, 第二级乘法累加运算, 减少了运算级数, 也就减少了中间数据的存、取时间. 这样利用 DSP 的专用指令乘累加运算大大优化了 DCT 算法.

2.3 量化

量化的作用是在保证一定的图像质量前提下, 丢掉那些对视觉效果影响不大的信息, 以获得较高的压缩比. 是造成 DCT 编解码信息损失(或失真)的根源. 由于 DCT 系数包含了空间频率信息, 可充分利用人眼对不同频率敏感程度不同这一特性来选择量化表中的元素值的大小. 对视觉重要的系数采用细量化(量化步长较小), 如低频系数被细量化, 对高频系数采用粗量化(量化步长较大). JPEG 使用的颜色是 Y、U、V 格式. Y 分量代表了亮度信息, U、V 分量代表了色差信息. 相对而言, Y 分量是主要信息. 对 Y 采用细量化, 对 U、V 采用粗量化, 可以进一步提高压缩比. 所以量化表 JPEG 推荐有两张, 一张是针对 Y 的, 一张是针对 U、V 的.

在 JPEG 压缩算法中采用均匀量化器, 量化定义可以表述为: 对 64 个 DCT 系数除以其量化步长, 四舍五入取整, 描述为:

$$Q(u, v) = (\text{int}) (F(u, v) / \text{quantization_table}(u, v))$$

式中, $Q(u, v)$ 为量化后的系数幅度, $\text{quantization_table}(u, v)$ 为量化步长, 它是由 JPEG 标准提供的量化表(64 个不同量化步长)中的元素.

量化表可由用户根据图像的特性自己定义, 通过改变量化表中的量化因子 Q , 来改变对图像的压缩的程度.

2.4 Huffman 编码

经过 DCT 变换、量化, 8×8 的方块的绝大部分中高频系数变成了 0, 据编码经验知, 连续的 '0' 个数越多编码效率越高, 所以 JPEG 对 64 个系数采用了 Z 字形扫描的方式, 熵编码采纳了平均压缩比最高的编码 Huffman 编码.

3 系统软件设计

该系统软件主要完成对 CCD 视频信号进行数字

采集, 然后对图像数据进行 JPEG 压缩编码, 并通过 USB 总线将图像数据传送到上位机 PC 机. 所以系统软件包括系统初始化、图像采集、JPEG 压缩编码、数据上传等模块^[7,8]. 系统主程序流程如图 4.

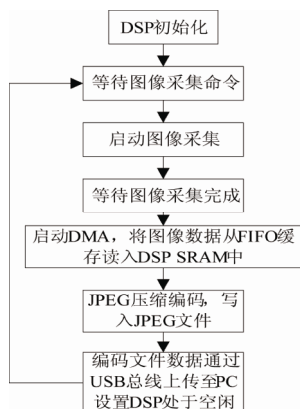


图4 系统主程序流程图

4 实验结果分析



(a) 采集的原始图像 320*240(75KB)



(b) 经过压缩的图像 16.6KB

图5 图像经压缩处理后的对比分析图

图5为在 DSP 的 CCS 调试环境下, 采用 C 和汇编混合编程, 对采集的 320*240*8 位的灰度视频图像进行 JPEG 标准压缩后复原的图像. 通过改变量化因子 Q , 可改变图像的压缩比, 压缩比越大, 压缩过程中的视觉损失越大, 压缩后的图片越不清晰. 对 75KB 的 320*240*8 的原始图像, 压缩后大约为 16.6KB, 压缩编码率为大概 4.5, 所花时间大约为 45ms, 在 1s 内向上位机发送 22 帧 320*240*8 的灰度图像, 基本满足系统实时要求.

5 结论

本文介绍了高速处理器 DSP 和 FPGA 组成数字图像采集与处理平台, 此平台可以做为一个通用的图像处理平台, 可以实现对图像 JPEG 压缩编码. 对本算法进行适当修改, 可以应用到数码相机, 手机等多种嵌入式系统中. 同时, 该压缩系统可以通过 USB 总线控制, 将压缩后的码流通过 JPEG 文件的形式传输给 PC 机. 另外, 在该平台上可以实现 JPEG2000, H.264, MPEG-4 等多媒体压缩编码标准.

参考文献

- 1 李世军. 基于 DSP 的数字图像采集、压缩系统的设计与实现. 电子技术应用, 2009, (7): 49-51.
- 2 侯法柱. 基于 FPGA 的图像采集与处理系统设计[硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- 3 张彦梅, 柴芳娇, 等. 基于 FPGA 的高速图像采集系统. 北京理工大学学报, 2010, 30(9): 1117-1120.
- 4 曾庆立. 基于 CPLD 的 SAA7113 的初始化及其控制设计. 吉首大学学报, 2009, 30(6): 66-69.
- 5 李小红, 等. 基于 TMS320C5416 图像处理系统的开发与实现. 仪器仪表学报, 2008, 19(4): 38-41.
- 6 云鹏. 基于 FPGA 的图像采集与 JPEG 压缩编码的研究[硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.
- 7 陈斯斯, 等. 基于 DSP 的 JPEG 图像压缩编码的实现. 计算机测量与控制, 2008, 16(10): 1481-1484.
- 8 许强, 赵仁德, 等. TMS320F28335 DSP 与 PC 机的串行通信设计. 微处理机, 2011, (4): 31-34.