

文章编号: 1672-2892(2012)01-0124-05

基于 CMOS 的机器人视觉系统设计

马 宁

(东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对机器人系统任务的特点, 设计了一种单目视觉系统。采用 CMOS 图像传感器, 通过 CPLD 形成控制时序, 搭建了 30 万像素分辨力的硬件系统。基于简化的 HSI 颜色模型, 并采用抽样方法, 实现了对对象状态的判断; 系统采用高性能 DSP 器件, 在进行图像处理的同时实施机器人的运动控制。系统软件算法在 Matlab 下进行了仿真并移植于 DSP。实验结果表明, 该系统实现了特定对象的状态判别功能, 并具有良好的实时性。

关键词: 机器人; DSP2812 技术; 视觉系统; 互补性氧化金属半导体图像传感器

中图分类号: TN433; TP242.6

文献标识码: A

Design and implementation of robot vision based on CMOS

MA Ning

(Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: According to the characteristics of robot duty, this study designed a monocular vision system. With Complex Programmable Logic Device(CPLD) to form the control timing sequence, a Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) image sensor was adopted to build up a hardware platform with a resolution of 0.3 M pixel. Based on the simplified Hue Saturation Intensity(HSI) color model, the object status could be judged with a sampling method. The high-performance Digital Signal Processing(DSP) processor used could provide image processing and motion control functions simultaneously. The algorithm was verified with Matlab and then ported to DSP. Experimental result has shown that the system can implement the status judgment successfully.

Key words: robot; DSP2812; monocular vision system; Complementary Metal Oxide Semiconductor image sensor

视觉系统作为智能机器人的重要组成部分, 正日益受到重视。非视觉导航机器人的传感器系统通常仅能得到环境的局部信息。引进视觉系统可以提高自主机器人的智能化程度, 增强机器人运动的灵活性^[1]。视觉系统的图像传感器有电荷耦合(Charge Coupled Device, CCD)和互补金属氧化物导体(CMOS)2种, CCD 视觉系统价格高, 系统复杂, 集成度低^[2-4], CMOS 摄像头更适合小型机器人应用^[5]。同时, 现有的视觉导航大多存在某些缺陷, 如采集过程复杂, 图像处理速度较慢等^[6-7]。本文针对移动机器人的应用特点, 依托 DSP 处理器, 设计了一套基于 CMOS 图像传感器的机器人视觉系统, 具有体积小, 集成度高, 功耗低等特点, 现场应用效果良好。

本文所研究的移动机器人, 其形式为 4 轮小车, 具备完整的控制系统, 能自主收集和處理环境信息并做出行为决策。机器人的任务可描述为: 循线行进至目标位置附近; 判断任务物块的放置情况; 根据现场实时情况, 进行位置移动或放置物块。其中, 路线行走的准确性在很大程度上决定机器人整套动作的成败。常用的红外、激光等方式无法准确判别目标位置的状况, 相对地, 视觉方式更适合机器人的任务应用。

1 视觉系统设计

1.1 视觉系统结构

图 1 给出了工作现场的机器人和物块放置的情形, 此时机器人已成功放置 U 型物块, 并前往下一位置。可以

看出, 场地上的目标颜色容易与背景区分开来。由于机器人能通过导航线准确行走至目标位置, 可以认为视觉系统的成像距离和物块在摄像头视窗内的成像位置基本保持不变。该特性在一定程度上降低了视觉系统的精确性要求。

视觉系统由图像传感器、时序控制器、处理器以及外部接口电路组成, 系统结构如图 2 所示。其中, CMOS 摄像头可以根据使用环境和具体需求调整分辨率和数据格式。控制器完成对 CMOS 摄像头的初始化, 对 CMOS 摄像头与存储器之间、DSP 与存储器之间的数据传输进行协调控制。DSP 为整个控制系统和图像信息处理的核心部件, 从存储器中读取数据, 完成图像处理和信息提取等工作, 并向 CPLD 发出指令, 使图像采集与处理协调进行。CPLD 根据 DSP 的指令, 执行事先设计好的控制命令, 对视觉芯片进行控制。存储器用于对所拍摄图像的存储, 以及为图像处理过程中的数据交换提供存储空间。DSP、存储器和 CPLD 的选择, 需要考虑图像传感器分辨率、图像输出格式、定位算法以及信号输出方式等多种因素的影响。主控芯片的性能同时也影响到数据存储、传输及处理过程。

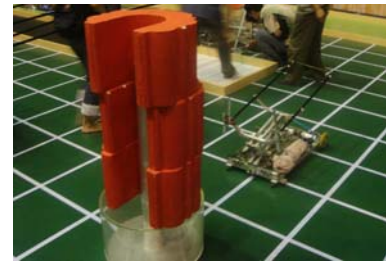


Fig.1 Robot and blocks arrangement
图 1 轮式机器人与物块放置情形

1.2 处理器选择

基于运动控制和图像处理两方面的因素考虑, 选择 TI 公司的 TMS320F2812 型 DSP 为系统主处理器。它是目前用于工业和机器人控制等领域的最高档 DSP 之一, 集成了多种先进的外设, 适用于电机运动控制, 同时具有快速图像处理的能力。

DSP2812 内部资源十分丰富, 能够很好地简化外围电路设计, 主要性能指标如下: 1) 高主频, 达 150 MHz; 2) 低功耗, 1.8 V 和 3.3 V 供电; 3) 128 KB 内部 Flash, 18 KB 内部 Single Access RAM(SARAM), 可外扩 1 MB 存储器; 4) 可支持 45 个外设级中断和 3 个外部中断; 5) 提取中断向量和保存现场只需 9 个时钟周期; 6) 拥有双事件管理器 EVA 和 EVB, 控制更加灵活; 7) 具备 56 个可编程且可复用的 I/O 口; 8) 拥有 3 个系统级定时器和 2 个属于事件管理器的定时器。这些特点在应用上具有极大的灵活性。

DSP2812 的软件编程支持 C/C++, 具有很高的效率, 在完成数学算法和系统控制等任务时都具有相当高的性能, 从而避免了在系统中使用多个处理器的麻烦。考虑轮式机器人的特点, 运动控制与视觉判断的处理是分时进行的, 因此 DSP2812 能够在不同时段分别满足机器人控制与图像数据处理的要求。

1.3 图像传感器

图像成像部件主要有 CCD 元件和 CMOS 器件。CCD 输出模拟制式的视频, 需要配备 A/D 转换才能输出数字图像, 且需要 3~4 组电源, 使用过程十分复杂; 而 CMOS 图像传感器整合了 ADC(Analog to Digital Converter) 与信号处理器, 电路集成度高, 体积大幅缩小, 而且电源消耗低, 利用 3.3 V 的电源即可驱动, 尤其适合于模块化开发。目前 CMOS 图像传感器在分辨率上最高达 1 680 万像素, 帧速率最高可达 2 万帧/s, 提供了宽泛的选用范围。由于本系统的感知目标为大面积、同色调的实体, 对分辨率要求不高, 因此从硬件接口和易用性角度考虑, 采用 OmniVision 公司的 OV7660 传感器。

OV7660 分辨率为 640×480 像素, 最大图像帧频率为 30 帧/s, 可以输出 R,G,B 的原始数据格式, 支持符合 CCIR656 标准的 YUV 和 YCbCr 的视频输出格式, 在芯片内集成了颜色补偿算法。控制接口支持 SCCB(Serial Camera Control Bus)协议, 可以通过软件编程实现白平衡、曝光控制、饱和度和色调的控制等。在本系统中, 采用 YCbCr(4:2:2)数据格式, 伴随 PCLK(Pixel Clock)脉冲, 由 D0-D7 数据线输出图像信息序列 YCbYCr YCbYCr。

1.4 时序控制器

控制器与 CMOS 摄像头、存储器及 DSP 通信时, 存在较复杂的时序控制逻辑。为减轻 DSP 的负担, 提高实时性, 同时简化外围接口, 引入了 CPLD 实现部分逻辑控制功能。

系统所采用的 CPLD 为 XC9572XL, 系统时钟速度可达 178 MHz, 具有 72 个宏单元和 1 600 个系统门, 拥

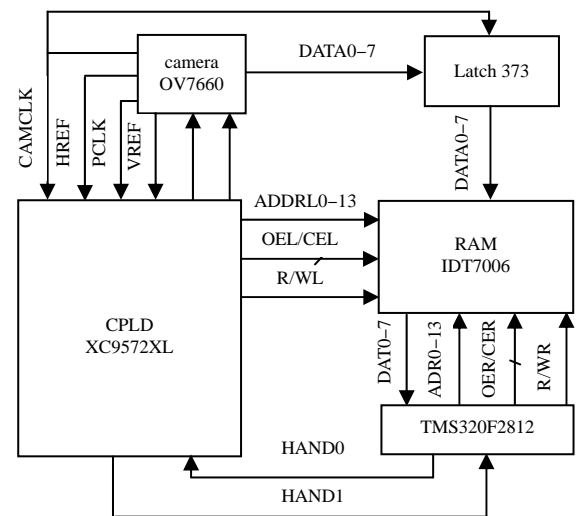


Fig.2 Architecture of the visual system
图 2 单目视觉系统结构

有 44 个可供用户使用的 I/O 引脚, 通过 JTAG(Joint Test Action Group)接口实现在线编程。通过 VHDL 语言在集成开发环境 ISE 下完成逻辑设计, 编译后通过 JTAG 接口下载。其核心任务是: 1) 产生 CMOS 摄像头的初始化时序; 2) 实现双口 RAM(Random Access Memory)芯片的写时序; 3) 依据 CMOS 摄像头的输出时序信号, 产生数据至双口 RAM 的地址。

1.5 帧存储器

存储器主要是存储 CMOS 所采集的图像数据, 既要与 CMOS 图像传感器进行通信, 又要与 DSP 交换数据, 其中的地址译码及同步握手逻辑较为复杂, 容易引起访问冲突, 采用高速缓存能够较好地解决此问题。

适用的高速缓存方案通常有 3 种: 双口 RAM 方式、FIFO(First In First Out)方式和高速 SRAM(Static RAM)切换方式。其中, 双口 RAM 能达到很高的传输速度, 并且具有随机存取的优点; 具有 2 套独立的数据、地址和控制总线, 可从 2 个端口同时读写而互不干扰, 并可将图像数据从一个端口写入, 而由处理器从另一端口读出。对于本系统, 双口 RAM 具有突出的优点。

考虑数据存储量与存取速度的要求, 选用了 IDT70V06 型高速 16 K×8 双口静态 RAM。该芯片提供 2 个分别控制的独立端口, 地址线、I/O 口以及异步读写信号, 在容量上足以满足 640×480 像素分辨率下的 1/40 抽样数据, 即 7.5 kByte。

2 视觉时序与接口

2.1 CMOS 摄像头时序

OV7660 的时序信号如图 2 所示。帧同步信号 VSYNC 的上升沿表示 1 帧新图像的到来, 下降沿表示 1 帧图像数据采集的开始。HREF 为水平同步信号, 其上升沿表示 1 列图像数据的开始。PCLK 为输出数据同步信号。

当 HREF 为高电平期间, OV7660 才开始有效的数据采集, PCLK 下降沿的到来表明数据的产生, PCLK 每产生 1 个上升沿出现 1 个下降沿, 则传输 1 位数据。对于为 640×480 像素的分辨力, HREF 为高电平期间共传输 640 bit 数据。在 1 帧图像中, 即 VSYNC 为低电平期间, HREF 出现 480 次高电平。当下一个 VSYNC 信号的上升沿到来时, 就表明 1 帧图像采集过程的结束。

2.2 接口设计

OV7660 的场同步信号 VSYNC, 行同步信号 HREF 以及像素时钟信号 PCLK 接至 CPLD 芯片, 产生控制信号把 OV7660 输出的数据信号存入帧存储器 IDT70V06 中。

在 CPLD 中完成了对双口 RAM 的写控制、通知 DSP 读信号等功能。CPLD 接收场同步信号 VSYNC, 此信号的下降沿表示图像传感器输出 1 帧的开始, 此时 CPLD 产生写复位信号(WRST)负脉冲, 复位 FIFO 的写指针。场同步信号 VSYNC 下降沿后, 判断行同步信号 HREF 的上升沿到来, 接着利用像素时钟信号 PCLK 作为写时钟 WCK 将图像数据直接存储到 FIFO 中, 当存到一定的数后, 就及时发信号给 DSP, 以便 DSP 读取数据, 本系统采用中断 INT0 向 DSP 发出通知, DSP 可以根据具体情况决定是否读取数据。

读数据时, 可利用 RD 和片选, 产生 RCK 信号。DSP 自动调用执行视觉决策子程序, 程序执行时首先由 DSP 芯片通过 I2C 总线配置 OV7660 的工作参数。当需要采集图像时, 由 TMS320F2812 发出 1 个启动脉冲给 CPLD。

CPLD 的输入信号 PCLK 是 1 帧图像的像素同步信号, 同时给双口 RAM 使能信号、片选信号和写信号, 在此信号的作用下采集图像, 将标准的数字图像数据存入双口 RAM。在图像采集结束后, 场同步信号有 1 个结束脉冲, 信号经 CPLD 控制后输出信号给 TMS320F2812。这时 DSP 就可以对双口 RAM 进行读操作, 将数字图像的数据读入作处理。

3 图像算法与软件设计

3.1 颜色模型转换

CMOS 图像传感器依据 RGB 模型提供数据, 可直接用来进行图像分割^[8]。但由于 RGB 模型为加色模型, 空间各分量具有很高的相关性, 处理较为繁杂。而 HSI 模型将强度从颜色信息中分离出来, 其色调、饱和度要素与人类感知相对应, 更贴近本系统的应用背景。

HSI 空间模型中的 H 分量为色调, 对应于光的主波长; S 分量为饱和度, 对应于颜色中掺和白山的程度; I 分量为光强度, 对应于光的明亮程度。HSI 空间模型以 H 分量为主要分割参数, 但当 I 分量较小时, H 值趋向于不确定, 因此把 I 分量也作为识别依据。在具体应用时按式(1)将 RGB 空间变换到 HSI 空间^[9]:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{3}(R+B+G) \\ S = 1 - \frac{3}{(R+B+G)}[\min(R,G,B)] \\ H = \arccos \left\{ \frac{[(R-G)+(R-B)]/2}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{cases} \quad (1)$$

当 $G < B$ 时, $H = 360 - H$ 。在不影响识别结论的前提下, 为简化运算, 式(1)可以转化为式(2), 适合于微处理器应用的计算步骤。

$$\begin{cases} \text{When } G < B, & H = 360 - H \\ I = \max(R,G,B), & I_{\min} = \min(R,G,B) \\ \text{When } R = I, & H = (G-B)/(I-I_{\min}) \\ \text{When } G = I, & H = 2+(B-R)/(I-I_{\min}) \\ \text{When } B = I, & H = 4+(R-G)/(I-I_{\min}) \\ H = H \times 60 \\ \text{If } H < 0, & H = H + 360 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 算法设计

由于重量和体积限制, 轮式机器人的控制系统难以采用 PC 机来实现, 从而排除了复杂算法的应用可能。通过 Sobel 算子可以提取物块图像的边界, 但需要对整幅图像进行矩阵运算, 运算量较大。分析得知, 穿越物块图像的任一条横线 H 分量都在边界处发生明显的梯度变化, 因此可通过检测 U 形物块上任一行图像的 4 个边界来判断物块的开口方向: 当从左往右扫描到某点达到红色或者蓝色的 H 分量时, 认为其可能是物块的 1 个边界。同理可以判断出其他 3 个边界。通过增加扫描横线的数量并取平均值, 可以有效地除去由于图像的背景复杂所引起的噪声和误差。但处理的行数过多将增加计算量, 从而影响系统的实时性。根据设备本身的存储容量和物块的特点, 按照平均间距选择 12 条横线(即: 40 抽 1), 此时效果足以满足需要。当所选取的直线存在多个噪声点时, 对算法有较大影响。当噪声点是孤立(不构成连续分布)时, 则能够通过考察相邻点加以判断。经过上述改进, 视觉系统的性能明显提高。

3.3 系统软件设计

系统的软件设计包括: 图像的预处理、定位算法以及 CPLD 的程序设计。图像的预处理提取感兴趣的图像信息, 为定位算法提供数据, 它依赖于具体的视觉芯片的类型以及定位算法, 但是算法都很成熟, 只是要根据需要具体选择。CPLD 程序采用硬件描述语言 VHDL, 在 WebPack 软件平台上编写。

Matlab 提供了数字图像处理工具包, 数字图像处理更加容易, 更加方便, 确定的图像处理算法更加有效。本文首先通过 Matlab 仿真, 根据效果确定基于边缘检测思想的图像识别算法, 再将其移植到 DSP2812 上。

图 3 给出了其中 1 幅图片及其检测结果。实验中用到了 CCS2 软件的图表(graph)功能。如图 3 所示, 所采用的算法很好地判别了 U 型物块的开口方向。

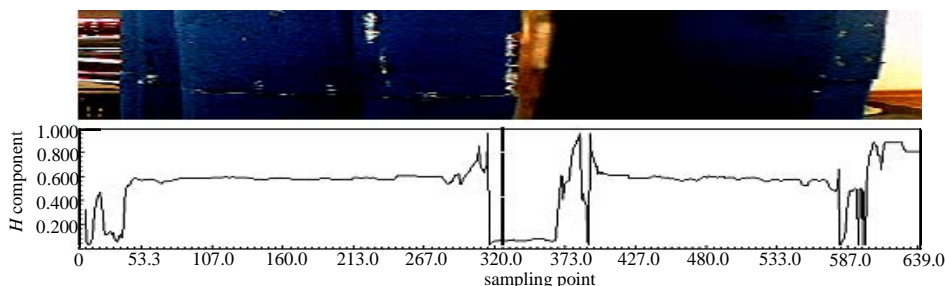


Fig.3 Visual detection result
图 3 一幅视觉检测结果

4 结论

针对机器人视觉系统功能要求,本文选择合适的器件构建了机器人视觉硬件和软件系统。重点阐述了硬件系统的原理、各功能模块的芯片选择及相应的接口设计和软件设计。相对于计算机视觉和 CCD 系统,所设计的系统具有体积小、功耗低、集成度高、算法可固化等优点,而且充分利用了 DSP 的处理能力,具有良好的实时性。

CMOS 图像传感器可以广泛地应用到工业检测、物体识别、工件定位、机器人自导引等很多领域。本系统实现了软硬件的研制与开发,下一步的研究重点是全窗口、全分辨率图像处理算法及视觉系统的变焦距问题。

参考文献:

- [1] 杨少平,孔庆生,陈雄. 基于图像的移动机器人视觉伺服[J]. 信息与电子工程, 2010,8(5):598-602. (YANG Shaoping, KONG Qingsheng, CHEN Xiong. Image-based Visual Serving For Mobile Robots[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(5):598-602.)
- [2] Haverinen J, Parpala M, Roning J. A Miniature Mobile Robot with a Color Stereo Camera System for Swarm Robotics Research[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway:[s.n.], 2005:2483-2486.
- [3] 段勇. 自主足球机器人视觉系统结构及关键技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006,27(1):9-12. (DUAN Yong. Framework and Key Technologies of Autonomous Soccer-Robot Vision System[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2006,27(1):9-12.)
- [4] Andrian H, Song Kai-Tai. Embedded CMOS Imaging System for Real-time Robotic Vision[C]// 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway:[s.n.], 2005:1096-1101.
- [5] Mahlkecht S, Oberhammer R, Novak G. A Real-time Image Recognition System for Tiny Autonomous Mobile Robots[C]// Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Toronto:[s.n.], 2004:324-330.
- [6] 董吉文,杨森,鲁守银. 基于单目视觉的移动机器人导航方法[J]. 山东大学学报:理学版, 2008,43(11):1-4. (DONG Jiwen, YANG Sen, LU Shouyin. Navigation Method of the Monocular Vision Based Mobile Robot[J]. Journal of Shandong University(Natural Science), 2008,43(11):1-4.)
- [7] Shimizu K, Hirai S. Implementing Planar Motion Tracking Algorithms on CMOS+FPGA Vision System[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway:[s.n.], 2006:1366-1371.
- [8] 郑志强,季秀才,刘斐. 基于 CMOS 的双目视觉定位系统的设计[J]. 国防科技大学学报, 2003,25(6):1-5. (ZHENG Zhiqiang, JI Xiucui, LIU Fei. Design of a Binocular Visual Positioning System Based on CMOS Chips[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003,25(6):1-5.)
- [9] 章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. (ZHANG Yujin. Image Process and Analysis[M]. Beijing:High Education Press, 2000.)

作者简介:



马宁(1974-),女,辽宁凤城人,电气工程师,硕士研究生,研究方向为工业电气自动化与模式识别.email:neu_manning@126.com.