

# 组培苗识别算法在基于 TMS320C6711 图像处理平台上的实现

杨丽 张铁中

(中国农业大学 工学院,北京 100083)

**摘要** 为达到组培苗分割移植机器人的嵌入式控制系统对图像处理器小型化和快速化的要求,采用基于 TMS320C6711 的嵌入式图像处理平台,开发了运行于该平台的软件系统,实现了组培苗识别算法在该平台上的移植。针对 DSP 软件开发难度大、涉及因素多,以及在本研究中需要大量数据存取的情况,在保证功能的前提下尽量精简软件结构,编写了轻量简洁的 Bootloader 和适应大量数据存取的连接命令文件。对软件进行了优化,将算法中占用时间较长的环节用线性汇编语言编写,使总处理时间降低了近 80 ms。该图像处理器实验室测试结果为,苗节点识别准确率 96%,每棵苗的处理时间为 0.7~0.8 s,10 ×24 h 连续运转稳定,性能达到设计要求。该图像处理器的体积只有 PC 机的 1/20,达到了小型化的要求。

**关键词** 识别算法; DSP; TMS320C6711; 软件开发; 移植

**中图分类号** TP 391; TN 911.73

**文章编号** 1007-4333(2004)06-0060-05

**文献标识码** A

## Realization of plantlet recognition algorithm on a TMS320C6711 based embedded image processing system

Yang Li, Zhang Tiezhong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** An embedded image processing system based on TMS320C6711, as well as its software system, was adopted to realize the transplantation of the tissue culture plantlet recognition algorithm on the system, which satisfied the needs of an image processor with high speed and small size used for a tissue culture plantlet robot. The crucial problems, such as programming bootloader, interrupt vector, command file, and assigning memory space, optimizing code and achieving mix-language programming, were discussed aiming at the characteristics of the embedded system during the software development. The system has a good stability, strong real-time capability, and high accuracy.

**Key words** recognition algorithm; DSP; TMS320C6711; software exploitation; transplantation

目前通用的图像识别系统主要通过图像采集卡将图像传送到 PC 机上,在 PC 上运行图像识别程序完成图像的识别过程<sup>[1]</sup>。对于嵌入式系统来说,要求整个控制系统的体积尽可能小,如果采用 PC 来完成图像信号的识别,无疑增大了控制系统的体积,不利于实现控制器真正“嵌入”到设备中的要求;而且 PC 机也无法实现嵌入式系统实时性的要求。近年来,高速数字信号处理器(DSP)由于其强大的功能、不断上升的性价比而得到迅速发展。在国外,DSP 芯片已经被广泛应用于通信、数字信号处理、

自动控制等许多领域<sup>[2]</sup>。

组培苗识别算法是组培苗分割移植机器人研究课题中的重要组成部分,算法包括彩色图像灰度化、灰度图像增强、二值化、闭运算、细线化和苗节点搜索等环节(图 1)。其目的是为机器人提供准确的抓取位置,即向主控制器发送各剪切点的三维坐标。该算法已在 PC 机上 Visual C++ 6.0 环境下由笔者开发成功。本研究将其移植到基于 TMS320C6711 的嵌入式图像处理平台上,实现机器人嵌入式控制系统的图像处理,从而使组培苗分割

收稿日期:2004-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60375036)

作者简介:杨丽,博士研究生;张铁中,博士生导师,教授,主要从事生物生产自动化和农业机器人的研究,E-mail:zhangtz@cau.edu.cn

移植机器人具有真正的嵌入式控制器,达到缩小体积,提高速度的目的。

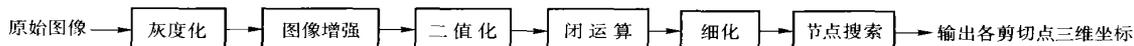


图 1 组培苗识别算法流程图

Fig. 1 Recognition algorithm on plantlet

## 1 基于 TMS320C6711 的图像处理平台

### 1.1 TMS320C6711 DSP 的性能特点

TMS320C6711 是 TMS320C6000 系列中一款高性能浮点型产品,工作频率 150 MHz,性能可达 1 200 MI/s 和 900 MFLO/s。TMS320C6711 具有典型的超长指令字 (very long instruction word, VLIW) 结构,该结构由多个并行运行的执行单元组成,这些单元在单个周期内可以同时执行 8 条指令<sup>[3]</sup>。TMS320C6711 的高速运算能力为本研究中算法的实时性要求提供了保证。

### 1.2 基于 TMS320C6711 的图像处理平台硬件组成

基于 TMS320C6711 的图像处理平台<sup>[4]</sup>的硬件组成见图 2。整个系统的工作流程为:模拟视频信号输入以后,经放大电路放大到 A/D 转换器的动态范围之内,送 A/D 转换器进行 A/D 转换,转换后的数字图像数据经 FPGA 送视频存储器进行临时保

存,此时如果不想对图像进行处理,可以将图像数据直接送往 D/A 转换器进行 D/A 变换,然后送显示屏显示;若需要对图像进行处理,则要把图像数据传输给 DSP。FPGA 的图像缓存区映射在 DSP 的 CE2 空间,DSP 可以对其内的图像数据直接进行访问,并完成处理算法,处理后的结果再送回缓存区,然后对处理结果进行显示。由于 TMS320C6711 的片内空间较小,板上扩展了 8 MB × 32 bit 的 SDRAM,作为图像处理过程中的临时存储区,它映射在 DSP 的 CE0 空间。1 MB × 8 bit 大小的 Flash 用于存放 DSP 引导程序和应用程序,映射在 DSP 的 CE1 空间。此平台采用并口进行仿真。CPLD 接口管理器的主要作用是完成 DSP 与 FPGA、DSP 与存储器之间的接口电平转换。FPGA 程序存储器的功能是在系统上电过程中,在 FPGA 内部加载时序的控制下将其内部存储的程序传送到 FPGA 的配置 RAM 中,使 FPGA 的内部逻辑正常工作。

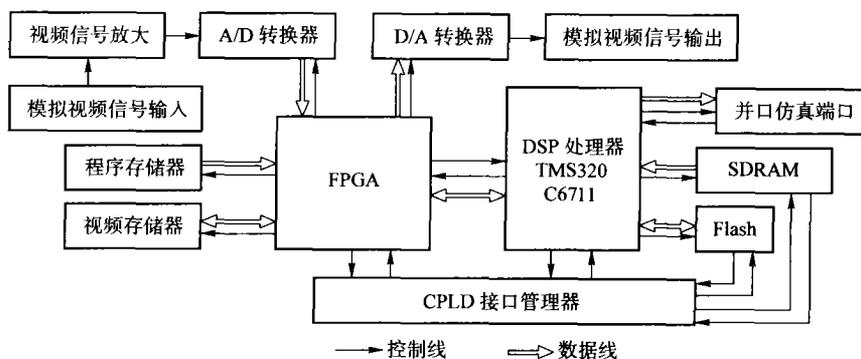


图 2 图像处理平台硬件组成框图

Fig. 2 Structure of hardware

## 2 基于 TMS320C6711 DSP 的软件设计

TMS320C6000 的编译器接受 3 种形式的代码:标准 C 语言代码、汇编代码和线性汇编代码。C 语言代码具有清晰易懂、可维护性和可移植性好等优点,而且编译器能对 C 代码进行优化。对于 C6711,优化后 C 代码的运行效率可达手工编写汇编代码的 70% ~ 80%,一般对实时性要求不是很强的应

用,采用 C 编程就可满足要求<sup>[5]</sup>。汇编代码可以达到最快的执行速度,但编程工作量大,开发周期长,代码的可读性和可维护性差。线性汇编代码是简化了的汇编代码,无需给出汇编代码必须指出的所有信息,但具有与汇编代码相近的执行速度。由于本研究中对图像识别有一定的实时性要求,因此在进行软件编程时采用 C 语言和线性汇编语言混合编程的方法。

基于 DSP 的应用程序必须包括的文件有:自启动程序、中断向量表、主程序、连接命令文件和 C 语言运行库文件<sup>[6]</sup>。

### 2.1 自启动程序 Bootloader

Bootloader 程序的主要任务是完成系统寄存器的初始化,将应用程序从外部非易失性存储器 Flash 中搬到片内高速存储器 L2 中,之后跳转到 C 入口点 `c.int00()` 函数处。本研究中 Bootloader 程序用汇编语言编写,尺寸不到 1 kB,放在 Flash 区的最前面。芯片的自加载方式设置为 8 bit ROM 方式,芯片在上电复位时,自动将位于外部 CE1 空间 Flash ROM 区前 1 kB 的内容搬入片内 L2 中的 0~1 kB 的位置,传输完成后,CPU 退出复位状态,将程序指针 PC 指向 0 地址,从 0 地址开始运行程序。整个自启动的过程见图 3。其中 `c.int00()` 函数由 C 运行库 `rts6700.lib` 提供,其任务是建立堆栈,初始化变量,然后调用 `Main()` 函数。

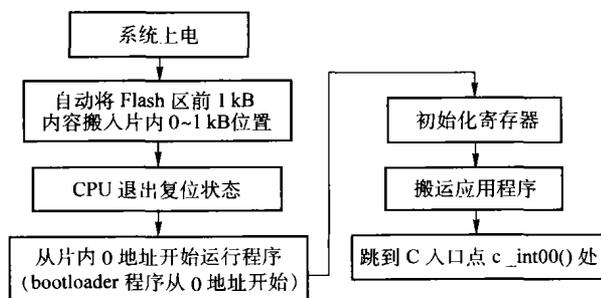


图 3 图像处理系统自启动过程流程图

Fig. 3 Auto-startup course of image process system

### 2.2 中断向量表 IST 的编写

中断向量表 IST 是一个包含 16 个连续中断服务代码取指包的地址表,每个中断服务代码取指包都含有 8 条指令。当 CPU 开始处理一个中断时,要参照 IST 进行<sup>[7]</sup>。本研究中图像识别算法放在中断中进行,因此这里除了用到复位中断以外,还用到可屏蔽中断 INT4。IST 用汇编语言编写,部分代码如下。

```

RESET:      ;复位中断取指包
    mvgl .c.int00, b0      ;取 C 入口点地址
    mvkh .c.int00, b0
    b b0      ;跳转到 C 入口点
    ...
INT4:      ;INT4 中断取指包
    stw b0, *--b15      ;在堆栈中保存 b0 寄存器
  
```

```

    mvgl .function.int4, b0      ;取中断服务
    函数 function.int4() 地址
    mvkh.function.int4, b0
    ldw *b0, b0
    nop 4
    b b0      ;跳转到 function.int4() 函数处执行
    ldw *b15, b0      ;恢复 b0 寄存器
    nop 5
  
```

在编写中断向量表时,需要注意的是程序中每个中断取指包都必须写够 8 条指令,即使是没有用到的中断,否则,中断发生时 DSP 就会跑飞。

### 2.3 连接器命令文件的编写

TI 连接器的主要功能是根据用户说明的程序和数据存放地址,把汇编器产生的浮动地址代码和数据映射到用户系统的实际地址空间,而这是通过连接命令文件 (.cmd) 控制的。在命令文件内需要说明系统的存储器配置以及程序和数据的具体存放地址。然后命令文件作为连接器的一个命令参数输入连接器。具体连接过程由连接器完成。下面是程序中编写的命令文件 (.cmd) :

```

MEMORY      ;定义用户系统的存储区域
{
    BOOT.RAM:  o = 00000000h    l =
    00000800h
    VECS:     o = 00000800h    l = 00000400h
    IRAM:     o = 00000c00h    l = 0000f400h
    CE0:      o = 80000000h    l = 02000000h
}
SECTIONS      ;将各代码段和数据段分配到
MEMORY 定义的存储区域
{
    .boot.load > BOOT.RAM
    .vectors > VECS
    .text > IRAM
    .cinit > IRAM
    .heap > IRAM
    .stack > IRAM
    .bss > IRAM
    .const > IRAM
    .data > IRAM
    .far > CE0
}
  
```

在 MEMORY 中定义的 BOOT.RAM, VECS, IRAM 共同占据片内存储器 L2 空间 64 kB。BOOT.RAM 段从 0x0 开始, 长度为 0x800 (即 2 kB), 这个空间用于存放自启动程序 Bootloader。从 0x800 开始的是 VECS 段, 用于存放中断向量表。IRAM 段内存放 .text, .cinit, .heap, .stack, .bss, .const, .data 段, 共用 61 kB 空间。在图像处理算法中有时要将图像数据暂存, 由于一幅图像为 567 × 720 × 8 bit, 大约需要 405 kB 空间, 无法存在片内, 在编程中用关键字 .far 自定义的缓存区放在 SDRAM 内 (映射在 DSP 的 CE0 空间, 地址从 0x80000000 开始, 长度为 32 MB)。

#### 2.4 主控程序

图像缓存区在 DSP 的控制下可以工作在输入图像、处理图像和显示 (输出处理结果) 3 种模式下。由 CE2 空间 0xA020000C 地址位决定这 3 种工作模式: 向 0xA020000C 地址写入控制字 0x09 就采集一幅图像进入缓存区; 写入 0x0a 可进入处理模式 (此模式下可对缓存区内的图像数据进行处理, 同时 CCD 拍摄的图像在显示屏上实时显示); 写入 0x0c 即把处理后的结果显示出来。

主控程序运行流程为: 初始化各中断寄存器, 在控制状态寄存器 CSR 内将端结方式设置为小端终结模式, 屏蔽除 NMI 中断以外的所有中断; 进行外部存储器接口 EMIF 各寄存器的初始化, 将 DSP 的 CE0 空间设置为 32 bit 的 SDRAM, CE1 空间设置为 8 bit 的 flash ROM, CE2 和 CE3 空间都设置成 32 bit 的异步接口方式; 设置定时器; 设置串口; 设置 I2C 总线接口, 完成对视频信号输入制式、视频信号通道选择、视频数据输出格式、亮度色度及对比度设定、视频采集量化启动和关闭等功能; 再重新设置中断, 重置中断服务表指针寄存器 ISTP 将中断服务表重定位到 800 h, 选 INT4 为中断源, 打开 INT4 和全局中断; 向 0xA020000C 地址位写入 0x0a, 进入一个无限循环里, 这样显示屏上实时显示拍摄的图像, 如果有中断到来则进入中断处理程序。

#### 2.5 中断服务程序

图像处理算法是由中断服务函数 function.int4 () 完成的, 该函数采用 C 语言编写。进入中断处理程序以后, 首先向 0xA020000C 地址写入 0x09, 采集一幅图像; 然后写入 0x0a, 进行算法处理, 图像处理完成后通过串口将各节点的三维坐标发送到主控制器; 最后写入 0x0c, 退出中断, 返回主程序。这样显

示器会一直显示刚处理的图像, 直到下一个中断到来。

缓存区的图像格式为 YUV 4 2 2 彩色空间, Y, U, V 各占 8 位, 2 个 Y 值共用 1 个 U, V 值。由于在识别算法中只涉及到灰度图像, 所以编程时将 U 和 V 值都设置为 0x80, 图像就转换成灰度图像, 再将 Y 值取出放在一个 576 × 720 的数组里 (用 .far 关键字自定义的缓存区)。中值滤波、闭运算、腐蚀、细化和节点搜索等处理算法只需对数组里的数据进行。这样处理的好处是便于寻址, 同时可以 1 次存取 4 个图像像素, 便于 DSP 的并行处理。

#### 2.6 软件优化

用编译器对 C 代码程序进行优化, 本研究中主要优化中断服务函数 function.int4 ()。采用的优化方法<sup>[8]</sup>为: 1) 对短字长的数据使用宽长度的存储器访问, 用 (unsigned int \*) 1 次存取 4 个点的图像数据 (unsigned char 型, 0 ~ 255), 实现数据打包处理。2) 改进循环程序, 使之有利于用软件流水技术优化。C 代码优化后组培苗识别算法各步骤处理时间占总耗时间的比例见表 1。可见, 组培苗识别的计算时间主要耗费在灰度滤波增强、二值图像的膨胀、腐蚀和细化环节, 因此把这几个环节拿出来采用线性汇编语言编写算法<sup>[9]</sup>。采用线性汇编重新编写滤波增强、膨胀、腐蚀和细化这几个函数后, 滤波增强时间减少了 22.6 ms, 膨胀时间减少了 20.7 ms, 腐蚀时间减少了 17.4 ms, 细化时间减少了 19.2 ms。整个图像处理时间不到 1 s, 在笔者预定时间之内, 因此其他环节的算法仍用 C 语言编写。采用这种混合编程的方法既保证了算法的执行效率, 又降低了编程难度, 试验证明是一个比较好的适合嵌入式系统的编程方法。

表 1 识别算法各步骤处理时间

Table 1 Processing time of algorithm %

算 法	时间比例	算 法	时间比例
灰度化	2.8	腐蚀	10.5
灰度拉伸	5.3	细化	28.1
滤波增强	34.3	节点搜索	2.6
二值化	1.6	总计	100
膨胀	14.8		

### 3 试验及结果分析

将编制的软件烧写到 TMS320C6711 嵌入式图

像处理平台的 Flash 中,在实验室内对此图像平台进行了 4 组实验。

1) 测试嵌入式图像处理平台对图像识别的准确性。对 100 棵不同大小、不同摆放方位的苗分别进行了节点识别处理。结果表明节点识别的成功率为 96%,这与在 VC++6.0 下识别的结果大致相同,说明此图像处理平台对算法的执行精度没有影响。

2) 测试程序在 TMS320C6711 嵌入式图像处理平台上长时间运行的稳定性。进行了 10 次、每次 24 h 的连续运转实验。运行期间,系统没有出现死机、程序跑飞等任何问题,说明在保证硬件可靠性的前提下,所编写的程序具有很好的稳定性。

3) 测试嵌入式图像处理平台处理图像的实时性。对 50 幅苗图像的处理时间进行了统计。统计结果表明每棵苗的处理时间都在 0.7~0.8 s 之间,满足预定的图像处理时间 1 s 的要求。

4) 该图像处理器的体积为 220 mm × 160 mm × 50 mm,约为传统图像处理器 PC 机的 1/20,可方便地嵌入控制箱内,达到小型化的要求。

## 4 结 论

本研究成功地实现了组培苗识别算法在基于 TMS320C6711 DSP 的嵌入式图像处理平台上的移植。试验结果表明移植后的图像处理系统对苗节点识别成功率为 96%,对每棵苗的处理时间在 0.7~0.8 s 之间,10 × 24 h 连续运行稳定,体积只有传统的图像处理器 PC 机的 1/20,达到了小型化、快速化

和高稳定性的设计目的。对于基于 DSP 的嵌入式应用,尤其是对于有一定实时性要求的需要大量数据计算的场合,该研究可供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 任俊,涂晓昱,傅一平,等. 利用 DSP 的实时图像识别系统的设计与应用[J]. 光电工程,2004,31(2):66~69
- [2] 张雄伟. DSP 芯片原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社,2001.1~9
- [3] Texas Instruments. TMS320C6711 floating-point digital signal processor. <http://focus.ti.com/lit/ds/sprs0881/sprs0881.pdf>
- [4] Texas Instruments. C6711 dsk schematics. <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/tmds320006711.html>
- [5] 李方慧,王飞,何佩琨. TMS320C6000 系列 DSPs 原理和应用[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社,2003.91~92
- [6] Texas Instruments. TMS320C6000 programmer's guide (literature number SPRU198g). <http://focus.ti.com/lit/ug/spru198g/spru198g.pdf>
- [7] 王念旭. DSP 基础与应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.348~360
- [8] Texas Instruments. TMS320C6000 optimizing C compiler user's guide (literature number SPRU187k). <http://focus.ti.com/lit/ug/spru187k/spru187k.pdf>
- [9] Texas Instruments. TMS320C6000 assembly language tools user's guide (literature number SPRU186m). <http://focus.ti.com/lit/ug/spru186m/spru186m.pdf>