

基于模糊理论的自适应阈值实时 DSP 系统

鲁剑锋^{1,2}, 吴 川²

(1.中国科学院研究生院, 北京 100049;

2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130032)

摘要: 模糊集理论是一门新出现的理论, 在图像处理、自动控制等方面已经得到了很大的应用, 针对低对比度场景下, 利用模糊理论及最大模糊熵值的原则找到最佳阈值, 把目标从背景中分割出来, 改进了已有的隶属函数, 使自动阈值的选取过程大大缩短。系统应用 TI 公司的数字信号处理器 TMS320C6416 为核心, 采用现场可编程门阵列 FPGA 分别作为图像预处理, 经过对低对比度图像视频采用多种分割方法处理表明文中的 DSP 系统与算法切实可行。

关键词: 数字信号处理器; 模糊理论; 自适应阈值; 隶属函数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)增(探测与制导)-0294-05

Design of real-time adaptive thresholding of fuzzy theory processing system based on digital signal processor

LU Jian-feng^{1,2}, WU Chuan²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130032, China)

Abstract: Fuzzy theory is a new theory that is found on recently. And it has been used on many fields such as image processing, automation. In this paper fuzzy theory and maximum entropy principle are applied to select the threshold value for gray-level image. It uses TI's TMS320C6416 as the core processor, achieves the image preprocessing by field programmable gate array (FPGA). The experiment results show that it is useful, and the proposed approach can select the threshold automatically and effectively.

Key words: Digital signal processor; Fuzzy theory; Maximum fuzzy entropy; Adaptive threshold membership function

0 引言

数字图像处理技术是在 20 世纪 60 年代以来出现的一门新兴学科, 随着其发展相应的处理器也不断产生、进步, 基于数字信号处理器 (DSP) 和可编程器件 (FPGA、CPLD) 的处理平台为更新、更快的算法的实现提供了可能, 从而使数字图像处理技术在军

事、工业、医学等方面得到了极大的应用^[1]。Zadeh 于 1965 年提出了模糊集合论。通常认为图像的模糊性是由多种原因引起: (1) 三维目标投影为二维图像时有信息损失; (2) 边缘、边界、区域、纹理等的定义存在模糊性; (3) 对图像低层处理结果的解释带有模糊性, 所以在图像处理中常采用模糊数学方法。

收稿日期: 2007-08-14

作者简介: 鲁剑锋(1978-), 男, 吉林长春人, 硕士生, 主要从事数字图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。Email: pc80586@sina.com

导师简介: 朱明(1964-), 男, 江西南昌人, 研究员, 主要从事数字图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。Email: zhuming_ac@163.com

1 DSP 实时数字图像处理系统硬件的构成

采用了美国 TI 公司的高速数字信号处理器, 以 TMS320C416 为核心, 辅助现场可编程门阵列 FPGA^[2] 以及高速的视频 A/D, D/A 等器件构成了实时的高速数字图像处理系统。系统的具体原理框图见图 1。

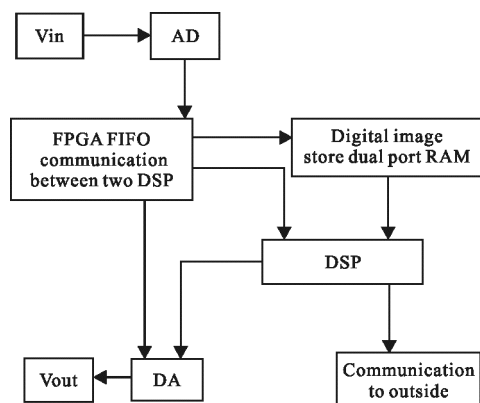


图 1 DSP 图像处理系统硬件原理框图

Fig.1 Hardware block diagram of DSP signal image processing system

这个数字图像处理系统的工作原理是, 由 CCD 给出的模拟视频信号, 经过时序产生及图像预处理部分, 通过高速视频 A/D 将模拟信号转换为数字信号。同时分离出来的同步信号, 由 CPLD 地址发生器产生数字图像的存储地址, 这样, 在可选择的任意大小的范围内的图像数据依照地址发生器产生的地址依次存入图像存储器(双口 RAM)中。数字信号处理器 DSP1 将图像存储器(双口 RAM)中的图像以 DMA 方式存在同步动态存储器 SDRAM 中。由 DSP1 和 SDRAM 组成的数字处理单元 1 在对图像数据进行处理后, 再将数据通过多通道缓冲串口 McBSP 或由 FPGA 组成 FIFO 传递给数字信号处理器 DSP2 及其所带的 SDRAM^[2-3], 处理单元 2 在对传来的目标图像数据作进一步的处理之后, 通过高速的 D/A, 转化成为模拟的视频信号, 用于输出。DSP1 接有通讯单元, 通过 RS422 和 RS232 实现与上位机的数据交换过程。

该系统的主要特点是: TMS320C6416 DSP 处理器, 处理能力可达 4800MIPS; 每片 TMS320C6416 DSP 带 4 Banks \times 512 K \times 32 Bit 的 SDRAM, 时钟主频 166 MHz; 每片 TMS320C6416 DSP 带 8MBIT FLASH

ROM; FPGA 组成的 FIFO, 用于图像的滤波, 边缘等预处理工作; 外部与同步串行设备接口; 具有 JTAG 端口, 支持多处理器仿真器调试; 低电平逻辑数字电路设计, 降低功耗; 全面采用小型表贴封装器件, 减小 PCB 尺寸, 增强系统可靠性。

1.1 TMS320C6416 数字信号处理器

TMS320C6416 是美国德州仪器(TI)公司出品的 TMS320C6000 系列处理器的一种, 片内设计为修正的哈佛总线结构^[4-5]。这里所选用的 TMS320C6416GLZ, DSP 的时钟主频为 600 MHz, 即指令周期速度达到了 4 800 MIPS (兆条指令/S), 采用了 6 000 系列的超长指令字(VILW)结构, 每个时钟周期读取指令总字长为 256 位。TMS320C6416 采用片内的 PLL 电路对外部时钟进行倍频^[6], 在系统设计时采用 50 MHz 的晶振, 用片内的 PLL 电路 12 倍频。TMS320C6416 片内集成了 1M-BYTE 的 DATA RAM 和 PROGRAM RAM。

1.2 DSP 外扩设备

TMS320C6416 设有主机口(HPI), 访问片外存储器时必须通过外部存储器接口(EMIFA&EMIFB)^[5]。

EMIF 可以扩展的存储器包括^[7]:

Pipeline 结构的同步突发静态 RAM(SBRAM); 同步动态 RAM(SDRAM); 异步器件, 包括 SRRAM, FLASH, FIFO 等^[8]。

TMS320C6416 芯片的 EMIF 接口, 将 SBRAM 和 SDRAM 接口复用^[9], 因此, 只能外扩其一。在本系统中, 选用 SDRAM (HY57V653220B), 用作 DSP 的缓存, 采用 DSP 的无缝接口, 接口速度为 1/2CPU CLOCK^[9]。本系统采用的图像为 256 级灰度信号, 按照每场图像 512 \times 256 像素计算, 需要 256 K \times 8 bit, 因此, 本系统 DSP 扩一片 SDRAM, 为 4 Banks \times 512 \times 32 bit, 占用 CE2 空间。

异步存储器接口选择用一片双口 RAM (IDT7132) 作为图像数据从 FPGA 到 DSP 的传输, IDT7132 为 2 K \times 8 bit, 由 DMA 控制寄存器把图像数据以 DMA 方式导入 DSP 中^[7]。

系统采用 1 片 FLASH (AM29LV800) 作为程序存储器, 存储 DSP 和 FPGA 的程序, 上电复位时将程序自举, 导入 DSP 和 FPGA 内。本系统采用 MAP1 存储器映射方式, FLASH 闪存占用 DSP 的 EMIFB16 位接口空间, SDRAM 与双口 RAM 占用 DSP 的 EMIFA32 位接口空间。

2 模糊阈值算法的应用

一个论域 X 上的模糊子集, 对于任意一个 $x \in X$ 都有一个数 $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 与之对应, 这就是 x 属于模糊子集 A 的隶属程度, 映射 μ_A 又称为 A 的隶属函数^[1]。

分割是将图像细分为构成它的子区域或者对象。分割的程度取决于要解决的问题, 即, 将感兴趣的东西从图像中分离出来。分离出来得目标到什么程度是要取决于用于判断什么是目标的尺度, 这个尺度就是常说的图像的阈值。合理的阈值, 可以清晰地提出目标物体, 而将背景分离出来, 如果阈值选取不合理, 就会造成目标与背景混合, 得不到所需物体的轮廓。

设一幅图像有 L 灰度级, 用 $\Omega = \{r_0, r_1, \dots, r_{L-1}\}$ 表示, 就不同的阈值而言, 某一灰度级属于亮的集合还是暗的集合是一个模糊概念, 根据模糊理论通过构造隶属函数 $\mu(r_i)$ ($i = 0, 1, \dots, L-1$) 把 Ω 映射到 $[0, 1]$ 之间来确定一个模糊子集 A , 它描述了原灰度集集合中各灰级从属于该模糊子集的程度。

如果用矩阵描述这个灰度级 L , 图像大小为 $M \times N$ 的图像, 为:

$$I = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

选用:

$$\mu_A(x, y) = \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{L-1-H(x, y)}{D} \right) \right]$$

为隶属函数, D 为模糊因子, $D = L - 1$; 则映射到 $[0, 1]$ 之间的模糊子集为:

$$I_1 = \begin{bmatrix} \mu_A(0,0) & \mu_A(0,1) & \dots & \mu_A(0,N-1) \\ \mu_A(1,0) & \mu_A(1,1) & \dots & \mu_A(1,N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_A(M-1,0) & \mu_A(M-1,1) & \dots & \mu_A(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

当设定某一阈值以后, 可以得到每个灰度级属于亮或暗的程度 (也称为隶属度)。设隶属函数为 $\mu(r_i)$ ($i = 0, 1, \dots, L-1$), 模糊子集 A 可表示为:

$$A = \frac{\mu(0)}{r_0} + \frac{\mu(1)}{r_1} + \dots + \frac{\mu(r_{L-1})}{r_{L-1}} \quad (1)$$

这里连加并不是单纯意义上的求和, 而是集合的意思。由公式 (1) 可求出 A 的概率如下:

$$P(A) = \sum_{i=0}^{L-1} \mu(r_i) P_r(r_i) \quad (2)$$

因为随着选取阈值的不同, 可以得到不同模糊子集。设 $U = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 表示模糊子集的一个有限分割。依据信息论的知识, 熵可以写成如下形式:

$$H(U) = - \sum_{k=1}^c P(A_k) \ln P(A_k) \quad (3)$$

在得出不同分割的模糊子集合以后, 就要评价以这个阈值为标准进行分割是否合理, 即分割后得到的图像与原始图像的相似程度。在信息论中, 可用熵作为模糊集合的量度^[9]。每一种分割的熵是 $H = -P(A) \log P(A)$, 根据最大熵原则, 当熵值最大时对应分割点为理想分割点。

这也就是模糊阈值法的基本原理。对于一幅图像, 选取模糊阈值有以下几个步骤:

- (1) 输入图像;
- (2) 求图像的直方图 $h_i, i = 0, \dots, 255$;
- (3) 计算当前灰度级的概率, $P_r(i) = h_i, i = 0, \dots, 255$;
- (4) 构造隶属函数, 求出模糊集合;
- (5) 求出各模糊集合所对应的熵;
- (6) 求出当熵取极值时对应的阈值, 即找到最佳阈值。

构造一个合理的隶属函数, 恰当地反映出元素与模糊集的关系, 对于通过模糊集理论和最大熵原则找到最佳阈值, 把图像分成亮暗两个部分, 从而把目标和背景分开, 是至关重要。

针对空间低对比度、弱目标的情况, 系统选择了半梯形分布的隶属函数, 见图 2。

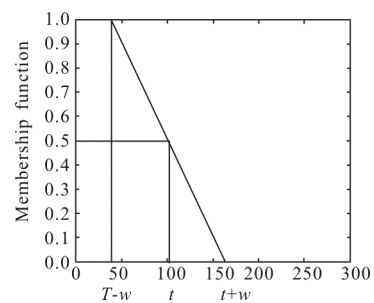


图 2 半梯形分布隶属函数

Fig.2 Membership function of half echelon

斜线部分函数为： $\mu(i)=-\frac{1}{2w}i+\frac{1}{2w}t+0.5$

式中： $2w$ 是图像的最大灰度与最小灰度的 Membership Function 差。

所以隶属函数可以表示为：

$$\mu(i)=\begin{cases}1 & i\leq t \\ -\frac{1}{2w}i+\frac{1}{2w}t+\frac{1}{2} & t-w< i\leq t+w \\ 0 & i>t+w\end{cases}$$

它表达的含义是：把一幅图像的各个灰度级属于暗区域的程度看作一个模糊子集合，随着灰度级的增高，属于暗区域的程度降低，其中 W 的值决定该隶属函数的形状，即决定各灰度级从属于暗区域的程度。当以该模糊集合为参数通过最大熵原则就可找到一个理想阈值^[1]。比较 H.D.CHENG 等人使用的隶属函数与文中系统采用的隶属函数，文中的算法结构简单，搜索次数少，对于低对比度、弱目标分割效果明显，更加适用于基于 DSP 的硬件平台中，应用于实际的工程。结果如图 3~图 7 所示。

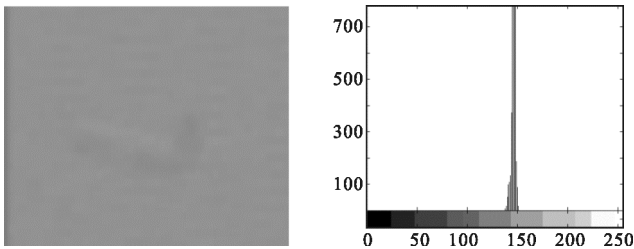


图 3 原图像

图 4 灰度直方图

Fig.3 Original image

Fig.4 Grey histogram



图 5 求最小模糊度方法图

图 6 H.D. CHENG 方法

图 7 文中方法

Fig.5 Minimum fuzzy pitch

Fig.6 Method of CHENG

Fig.7 Method of this article

利用单片的 C6416 处理系统，处理上面图像，使用最小模糊度方法，H.D CHENG 的方法与本文的最大模糊熵的方法在搜索次数与最优阈值的比较见表 1。

表1 最优阈值及搜索次数的比较

Tab.1 Comparison of threshold and search degree

Method	Minimum fuzzy pitch	Method of CHENG	Method of maximum fuzzy entropy
Degree	255	32 640	246
Threshold	122	123	100

利用单片的 C6416 处理系统，DSP 时钟主频为 600 MHz，程序为 C 语言，采用 CCS 3.1 版本的-O3 级优化^[10]，处理上面图像，使用最小模糊度方法，H.D. CHENG 的方法与文中的最大模糊熵的方法在时间上的比较见表 2。

表2 处理一幅图像不同算法的时间比较

Tab.2 Comparison of calculation time of three kinds of method

Method	Minimum fuzzy pitch	Method of CHENG	Method of maximum fuzzy entropy
Time	21.9 ms	486.3 ms	16.7 ms

完成算法所用的时间测量方法：在算法函数调用之前后，利用 DSP 来控制发光二极管的亮、暗，使用示波器测量发光二极管的电平宽度，即为 DSP 完成算法所需要的时间。

从时间上看，使用文中的方法，在 C6416 的处理系统中，针对标准的 PAL 制式的视频信号，可以达到 20 ms 的场频实时性，并且，如果采用汇编语言，调用 C6416 的特有函数，在处理的时间上还可以有很大的提高^[6]。通过实验可以看出，文中的方法对于低对比度、弱目标的图像的分割及目标提取，具有一定的优势。

3 结 论

由高性能数字信号处理器 TMS320C6416 和可编程逻辑器件 FPGA 组成的实时图像处理系统，实现了图像的采集，实时的数据处理以及输出，采用了在线编程技术，利用 JTAG 对系统进行在线调试，使系统具有很好的升级性能和扩展性能。采用贴片器件，既减小了 PCB 板的尺寸，又增强了系统的可靠性。经

实验证明，系统运算基于最大模糊熵的自适应阈值图像分割算法速度快、可靠性高、实时性好，在图像低对比度、弱目标提取等方面有着很好的应用前景。

参考文献：

[1] 胡广书.数字信号处理——理论、算法与实现.[M] 北京:清华大学出版社,1997.

[2] 周建民.可编程阵列逻辑PAL应用技术[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1990.

[3] MAXIM Data Book,MAXIM[Z].1999.

[4] 李方慧,王飞,何佩琨. TMS320C6000系列DSPs原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2003.

[5] 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.

[6] TMS320C6000 Cpu and Instruction Set Reference Guide[Z].1999.

[7] TMS320C6000 EMIF to External FIFO Interface[Z].Texas Instruments Incorporated,1999.

[8] 戴逸民,梁晓雯,裴小平.等.基于DSP的现代电子系统设计[M].北京:电子工业出版社,2002.

[9] TMS320C6000 EMIF to External SDRAM/SGRAM Interface[Z].Texas Instruments Incorporated,1999.

[10] TMS320C6000 Code Composer Studio User's Guide[Z].Texes Instruments Incorporated,1999.