

四 DSP 实现运动模糊图像的实时恢复

刘 微^{①②} 朱 明^① 李向荣^③

^①(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130031)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

^③(青岛科技大学机电学院 青岛 266061)

摘 要 为解决相机与被拍摄物体之间存在较大相对运动而产生的图像模糊, 提出使用 3 个定点 DSP 和 1 个浮点 DSP 共同完成运动模糊图像实时恢复的方法。研究运动模糊图像的退化模型, 采用维纳滤波方法进行运动模糊图像恢复。阐述了定点 DSP 完成二维 FFT 的原理和注意事项, 说明了 4 个 DSP 在图像恢复过程中各自的功能。对于 512×512 大小的图像, 定点 DSP 完成二维 FFT 的时间为 17.7ms, 浮点 DSP 完成浮点数据乘法和除法的时间总共为 32.5ms, 据此计算了各个 DSP 的工作负荷。通过这些指标说明, 此硬件结构可以完成 512×512 大小运动模糊图像的实时恢复。

关键词 运动模糊, 模糊图像恢复, DSP, FFT, 维纳滤波

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2022-04

Real-time Restoration of Motion Blurred Image Based on Four DSPs

Liu Wei^{①②} Zhu Ming^① Li Xiang-rong^③

^①(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

^②(Graduate school of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

^③(Dept. of Mech. and Elec. Eng., Qingdao University of Science & Technology Qingdao 266061, China)

Abstract To absolve image blur phenomena caused by relative motion between camera and objects, a real-time blur image restoration method is put forward, which is composed of three fixed point DSP and one float point DSP. Degeneration model is researched, from the point of view of software, wiener filtering is adopted to restore image. Two-dimensional FFT principle and important questions are presented executed by fixed DSP, the respective functions of four DSP is explained during the course of image restoration. For the image of 512×512, the time of two-dimensional FFT by fixed DSP is 17.7ms, the gross time of float point multiplication and division by float point DSP is 32.51ms, according to above time, the load of every DSP is calculated. From these datum, the hardware can complete real-time restoration of 512×512 image.

Key words Motion blur, Blurred image restoration, DSP, FFT, Wiener filtering

1 引言

当相机位于高速运动载体上时, 拍摄的图像都有不同程度的模糊。这种模糊大多是由于相机与景物的相对移动而导致曝光时间段内不同景物点在 CCD 的同一点同时曝光而造成的。运动模糊现象在数字图像处理实践中经常会遇到, 本文将要研究的运动模糊图像恢复, 是针对匀速直线运动引起的图像模糊进行复原。图像恢复操作的数据量大, 算法复杂, 这直接影响了处理速度。为了实现实时处理, 本文使用 3 个定点 DSP TMS320C6416 和 1 个浮点 DSP TMS320C6711 完成运动模糊图像的实时恢复。

本文的重点是从硬件角度讲述这 4 个 DSP 如何实现运动模糊图像恢复以及各个 DSP 的工作负荷。

2 运动模糊图像退化/恢复模型

设 $f(x, y)$ 为原图像, 相机以速度 v 沿与水平成 θ 角的方向移动, $g(x, y)$ 为摄取的模糊图像, 因此有如下的关系:

$$g(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T f(x - vt \cos \theta, y - vt \sin \theta) dt \quad (1)$$

式(1)中 T 为曝光时间。假设相机的运动参数 (v, θ, t) 已知, 如果未知可通过其频谱中的零点位置求出, 这不是本文重点, 详见文献[1,2]。

由式(1)可以看出, 运动模糊就是相机和拍摄物体在快门打开期间 T 的相对运动引起物体在图像中的平滑。考虑到噪声的影响, 运动模糊图像的退化模型可以描述为一个退化函数和一个加性噪声项, 处理一幅输入图像 $f(x, y)$ 产生一幅退化图像 $g(x, y)$ 。退化公式用卷积形式表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

式(2)中 $h(x, y)$ 是点扩散函数(PSF)的空间描述, $f(x, y)$ 为原始图像, $g(x, y)$ 是模糊图像, $n(x, y)$ 是混叠在信号中的加性噪声。其中“*”表示空间卷积^[3]。 $h(x, y)$ 是与相机运动参数有关的一个常量, 具体求解方法见参考文献[4]。

由于空间域的卷积等同于频率域的乘积, 所以式(2)的频率域描述为

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

式(3)的大写字母项是式(2)中相应项的傅里叶变换^[5]。

运动模糊图像频率域恢复最常用的方法是维纳滤波(最小均方差滤波)方法, 它是建立在图像和噪声是随机过程的基础上, 而目标是找一个未污染图像 $f(x, y)$ 的估计值 $\hat{f}(x, y)$, 使它们的均方误差最小。误差度量由下式给出:

$$e(x, y)^2 = E\left\{\left(f(x, y) - \hat{f}(x, y)\right)^2\right\} \quad (4)$$

$E\{\}$ 是期望值运算。这里假定: 噪声和图像不相关; 其中一个有零均值; 估计的灰度级是退化图像灰度级的线性函数。在这些条件下, 误差函数的最小值在频域用下列表达式计算:

$$\begin{aligned} \hat{F}(u, v) &= \left[\frac{H^*(u, v)S_f(u, v)}{S_f(u, v)|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)} \right] G(u, v) \\ &= \left[\frac{1}{H(u, v)|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $G(u, v)$ 是退化图像, $H(u, v)$ 是点扩散函数, $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭, $\hat{F}(u, v)$ 是恢复图像。 $S_n(u, v)$ 是噪声的功率谱, $S_f(u, v)$ 是未退化图像的功率谱。方括号里边的项组成的滤波器就是最小均方差滤波器, 也叫维纳滤波器。

当处理白噪声时 $S_n(u, v)$ 是一个常数, 大大简化了处理过程。然而未退化图像的功率谱很少是已知的。当这些值未知或不能估计时, 经常使用的方法是用下面的表达式近似^[3]。

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)|H(u, v)|^2 + \lambda} \right] G(u, v) \quad (6)$$

在这里, λ 为常数。 λ 的取值范围会对恢复结果产生一定影响, 具体参见参考文献[4]。本文决定使用式(6)进行运动模糊图像的恢复。

3 DSP 中二维快速傅里叶变换(FFT)的实现

通过式(6)可以看出, 运动模糊图像恢复的关键是FFT运算, FFT运算速度直接影响着能否实时恢复。FFT的计算见式(7), 其中 W 因子的取值范围是在 ± 1 之间的小数。在本系统中FFT运算是由定点DSP TMS320C6416 来完成。定点DSP 芯片的操作数采用整数来表示, 所以完成FFT计算必须对 W 因子进行必要的扩大。这里, 我们选择扩大 $32768(2^{15})$ 倍, 取其整数部分, 即采用Q15 表示法^[6]。在DSP6416 的汇编语言中有MPYHIR, MPYIHR, MPYILR, MPYLIR这4个指令是针对Q15 数据进行相乘, 在进行乘法的时候对运算结果自动缩小 32768 倍^[7]。利用这些特殊指令编写FFT程序, 极大

地提高了处理速度。

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (7a)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-nk} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)W_M^{mu}W_N^{nv}, \\ u &= 0, 1, \dots, M-1; \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} f(m, n) &= \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v)W_M^{-mu}W_N^{-nv}, \\ m &= 0, 1, \dots, M-1; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (8b)$$

二维 FFT 是在一维 FFT 的基础上推导出来的。如式(8)。考虑离散傅里叶变换的实现, 式(8a)中可以改写为

$$F(u, v) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)W_N^{nv} \right] W_M^{mu} \quad (9)$$

在方括号中的式子对应了第 m 行的一维傅里叶变换, 并且可以用标准快速傅里叶变换来计算(通常假设 N 和 M 为 2 的整数倍)。每一行都用相应的傅里叶变换结果代替, 然后再计算每一列的离散傅里叶变换。

图像数据在内存中通常是依次存储, 即第 1 行之后存储第 2 行, 第 2 行之后存储第 3 行。在编写行 FFT 程序的时候, 由于数据是连续存储的, 这样有利于发挥 DSP 的多个并行单元的优势, 所以数据存取和计算的速度比较快。在编写列 FFT 程序的时候, 由于每列之间的数据并非是连续存储, 导致 DSP 计算 FFT 的速度下降很多, 同时也增加了程序的复杂性。

我们可以在每 1 行都进行 FFT 以后, 将其计算结果进行转置, 即第 1 列与第 1 行交换, 第 2 列与第 2 行交换, 然后再应用行 FFT 程序对其进行变换, 这样就得到了转置的二维 FFT 结果。对这个结果再进行转置就得到了我们想要的二维 FFT 结果。

可以简要概括为, 先将 W 因子用 Q15 表示法进行放大, 然后利用一维 FFT 程序对每行数据进行傅里叶变换, 对这个结果进行转置后再次应用一维 FFT 程序进行计算, 这样就得到了转置后的二维 FFT 变换结果。

4 硬件实现原理

在运动模糊图像恢复过程中, 由于图像数据量比较大并且计算中涉及时频转换, 用普通的 PC 机和单个 DSP 已经无法实时完成。本文提出了用 4 个 DSP 搭建的硬件平台来完成此任务。

如图 1 所示, 硬件主体由 4 个 DSP 组成, 其中有 3 个定点 DSP TMS320C6416(以下简称 DSP6416)和 1 个浮点 DSP TMS320C6711(以下简称 DSP6711)。DSP6416 支持 8/16/32/64 bit 数据传输, DSP6711 支持 8/16/32 bit 数据传输^[8, 9]。由于 DSP6711 的数据线宽度最大只有 32bit, 所以系统中的各个

DSP之间数据线连接均采用 32bit, 并且每个DSP外围扩有 8M×32bit的SDRAM。

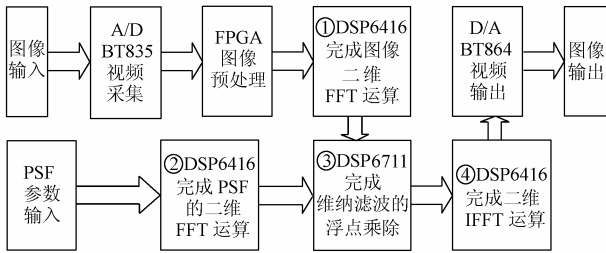


图 1 运动模糊图像恢复原理框图

Fig.1 Principle skeleton of motion blurred image restoration

原始模糊图像输入,经过 A/D 采样变成 8bit 的数字信号,经过 FPGA 的预处理,将其送到第 1 片 DSP6416,完成原始图像的二维 FFT 变换。

通过焦距值、物体离相机的距离以及相机相对物体的运动速度,可以求出点扩散函数 PSF,即 $h(x,y)$ 。第 2 片 DSP6416 完成 PSF 的二维 FFT 运算。

将原始模糊图像的 FFT 结果和 PSF 的 FFT 送给第 3 片 DSP6711,这是一片浮点 DSP,用它来完成浮点乘法和除法运算。根据式(6)完成运动模糊图像的恢复,恢复后的结果转换为定点格式后送给第 4 片 DSP6416,由它完成图像的 IFFT 变换。变换结果带有虚部的复数,对此复数取模后,将其送给 D/A 进行输出,得到恢复后的清晰图像。

5 所能达到的指标

DSP 函数的执行时间,包括每条代码的执行时间、中断开销以及函数之间相互调用的时间。由于后两项只占很小的比例,所以我们用每条代码的执行时间总和来近似 DSP 函数的执行时间。以下的计算都是根据程序的每条指令来计算函数的执行周期,从而得到函数的执行时间。

在本设计中,DSP6416 工作时钟频率为 600MHz,每条指令的执行时间为 1.667ns,这样 FFT 及其倒位序时间如表 1。

表 1 一维 FFT 在 DSP6416 中的执行周期和执行时间

Tab.1 Executing period and time of one-dimensional FFT in DSP6416

点数	256	512	1024
倒位序执行周期	480	928	1824
FFT 周期	4250	9441	20840
倒位序时间(μs)	0.8	1.55	3.04
FFT 时间(μs)	7.08	15.74	34.74

对于标准基 2-FFT 算法,在进行 FFT 计算之前必须进行倒位序。倒位序的时间加上 FFT 的时间就是计算一维 FFT 所需要的总时间。二维 FFT 的时间是在每行都进行一维 FFT 的基础上再进行数据转置,然后再进行一次一维 FFT。计算 $M \times N$ 二维数据 FFT 的时间,可以用公式表示为:二维 FFT 时间=(倒位序时间+FFT 时间)×(M+N)。由于数据转置需要的时间很少,在计算中可以忽略。由表 2 可知,对于每帧 40ms 的标准视频信号,要实时计算二维 FFT,则数据大小必须小于 1024×512。

表 2 二维 FFT 的计算时间

Tab.2 Executing time of two-dimensional FFT

二维数据点数	256×256	512×512	1024×512	1024×1024
二维 FFT 时间(ms)	4.04	17.70	38.68	77.38

DSP6711 最高工作时钟频率为 250MHz,每条指令的执行时间为 4ns。作为浮点 DSP,可以在一个时钟周期内完成浮点乘法,在 30 个周期内完成一次浮点除法,这样 DSP6711 完成浮点乘法的时间如表 3。

表 3 DSP6711 完成浮点乘法除法时间

Tab.3 Float point multiplication and division time in DSP6711

二维数据点数	256×256	512×512	1024×512	1024×1024
浮点乘法(ms)	0.26	1.05	2.10	4.19
浮点除法(ms)	7.86	31.46	62.91	125.83

为了能够实现实时处理,由表 3 可以看出,当图像大小为 512×512 时,DSP6711 完成浮点乘除的时间总共为 32.51ms,满足实时性要求。综合考虑二维 FFT 时间和浮点乘除的时间,为实现实时处理,本系统处理图像最大为 512×512。

表 4 各个 DSP 的工作负荷

Tab.4 Work load of every DSP

DSP	1	2	3	4
工作负荷	0.44	0.44	0.81	0.44

由图 1 可知,DSP①完成图像的 FFT 运算,DSP②完成 PSF 的 FFT 运算。DSP④完成 IFFT 运算。由式(7)可知,IFFT 的运算和 FFT 的运算只是相差蝶形因子和一个常数项。蝶形因子可以做成表格,由 DSP 查表来完成计算,而常数项都是 2 的整数倍,这样就可以通过对数据的移位来完成对常数项的除法,这样完成除法的时间就很少。所以可以将 IFFT 的运算量等同于 FFT。所以 DSP①,②,④的工作负荷为 512×512 点二维 FFT 的时间除以每帧图像的时间,即 17.70/40=0.44。DSP③主要完成浮点乘除,它的工作负荷为浮点乘除的时间除以每帧图像的时间,即 (31.46+1.05)/40=0.81。

以上分析表明,此硬件平台可以完成 512×512 大小运动模糊图像的实时恢复。在这四个 DSP 中,DSP①,②,④的工作负荷比较轻,可以将前期数据处理以及数据格式转换工作在这 3 个 DSP 中完成。对于工作负荷最重的 DSP③,应该在编程过程中尽量减少它的工作,将一些工作转移到其它 DSP 中完成。

6 试验结果

运动模糊试验装置包括可以控制转速的摇摆台、相机、DSP 处理器和监视器等。图 2 是利用摇摆台在外场采集的某电视塔的模糊图片,根据摇摆台的转动速度、相机的焦距以

及景物与相机的距离可以得到PSF^[10], 令 λ 等于 0.05, 根据式(6)得到的恢复结果如图 3 所示。可以看到虽然恢复图像的边沿存在振铃效应, 但图像中心的恢复效果比较好, 可以清晰的分辨出电视塔的钢架结构。



图 2 模糊图像
Fig.2 Blurred image



图 3 恢复图像
Fig.3 Restored image

7 结束语

本文提出了用 3 个定点 DSP 和 1 个浮点 DSP 来完成运动模糊图像恢复的方案。分析了各个 DSP 工作原理并且计算了它们的工作负荷。试验证明, 此方案可以实现图像大小为 512×512 的运动模糊实时恢复。由图 3 可以看出, 恢复图像的中心区域效果很好, 但边沿存在着振铃效应, 对算法进一步改进是今后努力的方向。

参 考 文 献

- [1] Chang M M, Tekalp A M, Erdem A T. Blur identification using the bispectrum [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39(10): 2323–2325.
 - [2] Saw chuk A A. Space-Variant system analysis of image motion [J]. *JOSA*, 1973, 63(9): 1052–1063.
 - [3] Gonzalez R C, Woods R E 著. 阮秋琦, 阮宇智等译. 数字图像处理(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2003: 207–210.
 - [4] 王晓红, 赵荣椿. 任意方向运动模糊的消除. 中国图像图形学报[J], 2000, 5(6): 525–529.
 - [5] 王旭辉, 郭光亚. 二维匀速运动模糊图像恢复问题的研究. 计算机应用[J], 2002, 20(10), 25–28.
 - [6] 张雄伟, 陈亮等. DSP集成开发与应用实例. 电子工业出版社[M], 2002: 17–18.
 - [7] TMS320C6000 Assembly Language Tools User's Guide. Texas Instruments Incorporated, October 2002.
 - [8] TMS320C64x Technical Overview. Texas Instruments Incorporated, January 2001.
 - [9] 李方惠, 王飞等. TMS320C6000 系列 DSPs 原理与应用(第 2 版). 电子工业出版社[M], 2003: 8–11.
 - [10] 金龙旭, 吕增明, 熊经武. CCD 相机全自动曝光系统. 光学精密工程, 2002, 10(6): 587–591.
- 刘 微: 男, 1979 年生, 博士生, 从事信号处理、图像处理及目标跟踪与识别方面的研究。
- 朱 明: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 从事数字图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。
- 李向荣: 女, 1979 年生, 博士生, 从事光学检测、机械设计以及图像处理等方面的研究。