

文章编号: 1001-3806(2009)01-0053-04

基于 DSP 的温度场重建

刘仲寿, 万雄*, 王庆, 危荃
(南昌航空大学 自动化学院, 南昌 330063)

摘要: 为了实现温度场的实时重建, 采用高端数字信号处理器作为同时迭代重建算法的运算核心, 实现发射光谱层析技术温度场的实时重建。通过实验取得了重建算法在高端数字信号处理器系统和 PC 系统下, 所需要不同时间的数据。结果表明, 通用 PC 无法实现发射光谱层析技术温度场实时重建, 基于数字信号处理器的重建算法并结合通用 PC 机强大的控制和显示功能是温度场实时重建实现的较好方案。

关键词: 傅里叶光学与光信号处理; 发射光谱层析技术; 重建; 同时迭代重建算法; 温度场; 数字信号处理器

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

DSP-based reconstruction of temperature field

LIU Zhong-shou, WAN Xiong, WANG Qing, WEI Quan

(College of Automation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to achieve real-time temperature reconstruction, high-end digital signal processor (DSP) was used as the computing core of simultaneous iterative reconstruction technique reconstruction algorithm. Emission spectral tomography (EST) real-time reconstruction of the temperature field was achieved. Through the experiment, the data was obtained that reconstruction algorithm needs different time under DSP system and PC system. The results indicate that using DSP as computing core, real-time EST reconstruction of temperature field can be achieved. DSP-based temperature reconstruction algorithm combined with a generic PC's control and display function is a good method for EST temperature field reconstruction.

Key words: Fourier optics and optical signal processing; emission spectral tomography; reconstruction; simultaneous iterative reconstruction technique; temperature field; digital signal processor

引言

温度是确定物体状态的最重要参量之一, 在国防、军事、科学实验及工农业生产中具有十分重要的作用, 尤其是高温测量, 在航天、材料、能源、冶金、核工业等领域占具有极重要的地位。传统测温一般只是测量某点的温度, 近年来有些学者对温度场场测量进行研究, 但大多是获取数据后再在计算机上重建, 并没解决实时问题, 作者在高端数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 硬件的基础上结合发射光谱层析技术 (emission spectral tomography, EST) 实现了温度场的实时层析重建, 为温度场实时测量研究从纯数值仿真到

仪器化打下基础。

1 发射光谱层析原理及同时迭代重建算法

1.1 发射光谱层析原理

本文中主要研究透明火焰的温度场重建。透明火焰是一种弥散介质, 它在面阵 CCD 上所成的像可以看作火焰各 3 维微元的辐射强度通过一定厚度的弥散介质之后的累积值。火焰的微元通过光学镜头后在像面上产生的照度 E 可由下式近似计算^[1]:

$$E = \frac{\pi}{4} L \tau \left(\frac{D}{f}\right)^2 \frac{1}{(1-\beta)^2} \cos^4 \theta \quad (1)$$

式中, L 为火焰中某点的辐亮度, D 为出瞳直径, f 为焦距, β 为光学系统的纵向放大率, τ 为光学系统的透射比, θ 为视场角。对于一定的光学系统在视场角较小, 忽略景深影响的条件下火焰微元在 CCD 靶面上的照度与微元亮度成比例, CCD 靶面上的照度可以看作沿某条射线火焰辐亮度的积分, 如下式所示:

$$E(u, v) = \int k_i L(x, y, z) ds \quad (2)$$

式中, k_i 为由光学系统所决定的比例系数。成像模型

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577016); 航空科学基金资助项目 (2006ZD56004); “无损检测技术” 省部共建教育部重点实验室研究资助项目 (2005-314); 江西省自然科学基金资助项目 (0512034)

作者简介: 刘仲寿 (1970-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要研究领域为信号处理与信号分析, DSP。

* 通讯联系人。E-mail: wanxiangl@tom.com

收稿日期: 2007-11-11; 收到修改稿日期: 2008-03-24

如图1所示。

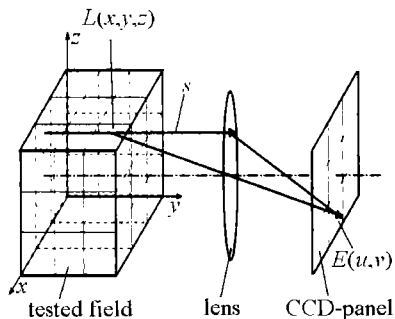


Fig. 1 The sketch of imaging system

照度经 CCD 光电转换和 DSP 板上的视频编码器量化之后得到灰度图像 $G(u, v)$ 。在 CCD 未饱和的条件下图像灰度与 CCD 靶面上的照度近似成比例。即：

$$G(u, v) = k_2 E(u, v) \quad (3)$$

式中, k_2 为由光电转换和量化系统所决定的比例系数。由(1)式、(2)式可得图像灰度和火焰辐亮度之间的关系：

$$G(u, v) = k_3 \int L(x, y, z) ds \quad (4)$$

式中, 系数 $k_3 = k_1 \times k_2$ 。系数 k_3 是由系统决定的。根据辐射测温原理有公式：

$$T = \frac{C_2}{\lambda [\ln L(\lambda, T) + 5 \ln \lambda - \ln \varepsilon(\lambda, T) - \ln C_1]} \quad (5)$$

式中, λ 为波长, T 为热力学温度; C_1 为第 1 辐射常数; C_2 为第 2 辐射常数; $\varepsilon(\lambda, T)$ 是物体的发射率; 由(4)式据布尔雷唐逆变换可知, 可以通过图像灰度反演得到火焰内部各点辐亮度。结合(5)式就可以计算火焰的实际温度。

1.2 同时迭代重建算法^[2]

在迭代算法过程中, 要减小误差, 办法之一是下式：

$$\Phi_1(\hat{F}) = (P - WF)^T (P - WF) \quad (6)$$

有最小值。其条件是: $W^T P = W^T WF$ (7)

解出方程中的 F , 即是所求满足最小二乘准则的解。式中, P 为测量向量, W 为投影矩阵, F 为图像向量, \hat{F} 为 F 的估计。在本文中, P 的物理意义是图像灰度所组成的向量; F 的物理意义是火焰辐亮度所组成的向量。

(7) 式一般采用迭代法来求解：

$$\begin{cases} F^{(0)} = W^T P \\ F^{(k+1)} = F^{(k)} + \xi (W^T P - W^T WF^{(k)}) \\ F^{(k+1)} = F^{(k)} + \xi W^T (P - WF^{(k)}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, ξ 是松弛因子。(8) 式的意义是: 取 DSP 得到的图像灰度所组成的向量反投影作为初始的火焰辐亮度所组成的向量, 在求 $(k+1)$ 次估计 $F^{(k+1)}$ 时, 利用 k 次估计 $F^{(k)}$ 加上校正量。校正量正比于第 k 次估计的误差矢量的反投影 $W^T (P - WF^{(k)})$ 。因而每个温度点的

辐亮度校正值实际是通过该温度点的所有射线和的误差值之累加, 而不是只与一条射线有关, 这也是同时迭代重建 (simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT) 算法能有效地抑制测量数据中噪声的根本原因。由于每一温度点的辐亮度校正值是所有过该温度点射线的共同贡献, 一些随机误差被平均掉了。因此, SIRT 的校正过程被称为逐点校正。最终 $F^{(k+1)}$ 就是要求的重建后的火焰辐亮度向量, 得到了火焰辐亮度, 则根据(5) 式就可以得到火焰的实际温度向量。

2 DSP-EST 温度重建系统

2.1 DSP 系统组成和特点

DSP 系统主要由 1 个 32 位定点 DSP TMSDM642、1 个 32M SDRAM、1 个 4M FLASH、1 个 10M/100M 以太网接口、4 个视频编码芯片 TVP5150 组成。硬件主要资源如图 2 所示, 高达 32M 的 SDRAM 可以方

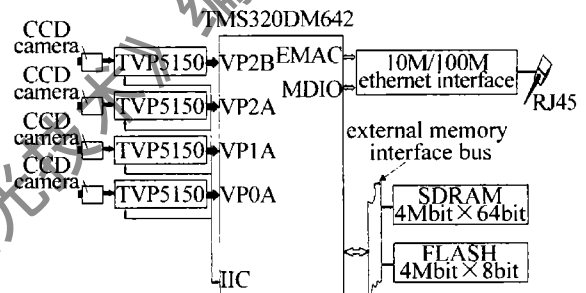


Fig. 2 DSP hardware system diagram

便地动态存放重建前的原始数据及重建后数据结果; 4M 的 FLASH 可以固化引导程序和主程序, 使 DSP 运行脱离 CCS 编译环境; 网络接口可以将 DSP 重建后的数据通过 TCP/IP 协议传送到 PC 机上显示和保存; 视频编码芯片将模拟的视频信号转化为数字视频, 提供同时迭代重建算法 SIRT 所需要的图像亮度向量。

DM642 是 TI 推出针对多媒体处理领域应用的 DSP, 给多媒体设备的实现带来了一种有效的实现手段。DM642 建立在 C64x DSP 核基础上, 采用德州仪器公司开发的第 2 代高性能的先进的超长指令字结构 VelociTI. 2™, 其每个乘法器在每个时钟周期内可执行 2 个 16 位 × 16 位的乘法或 4 个 8 位 × 8 位的乘法。另外 6 个算术逻辑单元, 在每个时钟周期内都可执行 2 个 16 位或 4 个 8 位的加减、比较、移位等运算。在 600MHz 的时钟频率下, DM642 每秒可以进行 24 亿次 16 位的乘累加或 48 亿次 8 位的乘累加。这样强大的运算能力, 使得 DM642 可以进行实时的温度场同时迭代重建算法 SIRT 重建。同时在 C64x 的基础上, 它增加了很多的外围设备和接口^[3]。

2.2 DSP-EST 重建系统

整个系统如图 3 所示, 主要由待测温度场、CCD

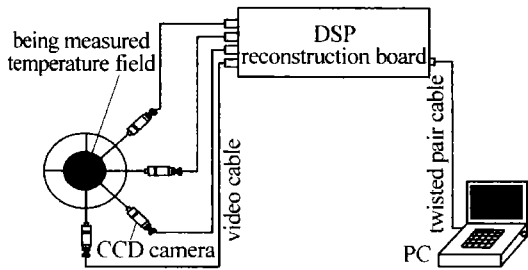


Fig. 3 the diagram of DSP-EST reconstruction system

摄像头及附属光路、DSP 系统、PC 机构成。PC 机显示和保存 DSP 重建后的数据；DSP 系统对 4 路模拟视频同步及离散化，并运行同时迭代重建算法 SIRT 任务重建，重建完成后，唤醒用户数据包协议 (user datagram protocol, UDP) 通讯任务，将重建后的结果传送到 PC 机。

3 系统简介

SIRT 算法的 DSP 开发重点和难点是同步和优化^[4,5]。同时迭代重建算法 SIRT 要求多路采集的数字视频信号必须是同一时间段采集到的信号，为了尽量减少每路之间的时差，系统采用 DSP/BIOS 实时内核及 RF5 框架的同步模块进行调度，解决同步问题。程序流程如图 4 所示。

优化的目标是更快的执行时间和更小的代码尺寸。为了兼顾代码的效率和开发速度，系统采用混合编程，大部分用 C 语言实现，对运算量最大的同时迭代重建算法 SIRT 模块，采用线性汇编并且主要以软件

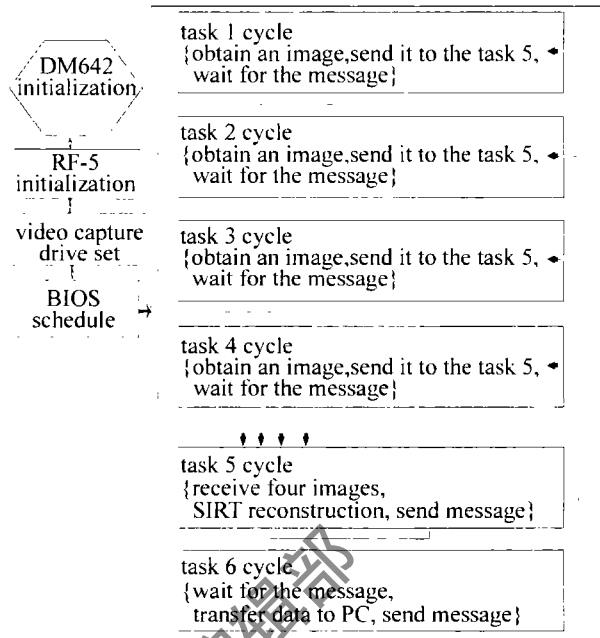


Fig. 4 DSP software program flowchart

流水的方式优化。由于同时迭代重建算法 SIRT 的运算量极大，因此，优化的首要目标是取得更快的执行时间。

4 重建结果分析及重建实例

为了比较 DSP 重建和 PC 重建所用时间关系，对不同大小的待测区域在不同的环境下所用时间进行测试，结果如表 1 所示。表 1 中，PC 系统配置为：Celeron2.80HG, 512M, WindowsXP；DSP 系统的配置为：TI

Table 1 Comparison table of reconstruction time

being measured region/pixels	time of reconstruction by PC/s	time of reconstruction by DSP/s
64 × 64 SIRT 4 directions 64 projections in each direction	6.33	0.91
128 × 128 SIRT 4 directions 128 projections in each direction	50.78	7.20
256 × 256 SIRT 4 directions 256 projections in each direction	406.21	58.29

DM642, SDRAM 32M, ccs 2.20.18。

从表中数据可以分析出：PC 重建和 DSP 重建所用时间都和所测区域面积的 $(m/2)$ 次幂成正比， m 一般取 3~5， m 的取值与所测区域面积的规则程度和每向射线数有关，在所测区域相同的条件下，DSP 重建时间和 PC 重建时间成线性倍数关系。

图 5 为第 50 层重建的 2 维温度的网格图。

本文中主要探讨温度场重建的实时性问题，限于篇幅，以下对重建误差问题，仅作简要说明。根据上百次的试验测量及经验数据分析，温度场重建值的相对误差界在 8%~13% 之间，误差仍属较大；但考虑到温

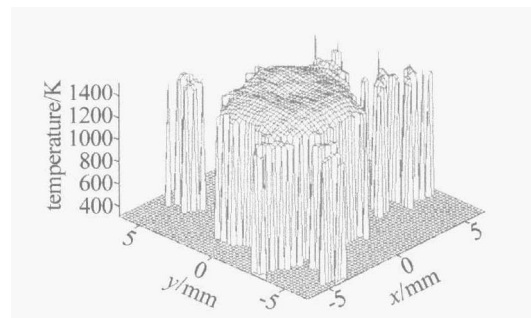


Fig. 5 Two-dimensional temperature field grid map of No. 50 level by reconstruction

度场是实时瞬变的流场，变化复杂，而重建算法的运算量又极大，如果在能确保实时性的前提下，这样的精度

尚可接受。该温度场重建系统的误差来源主要有以下几个方面^[6-10]:(1)重建模型假设所产生的误差。重建算法假设射束为平行束,由于光谱辐射特性和摄像机镜头景深等原因,使实际成像系统不能严格满足平行射束的条件。在试验中已经提出了采用空间滤波器和远心镜头以提高数据采集效果的方法,这些将作为本课题的后续研究。(2)多台 CCD 摄像头对准精度产生的误差。特别在投影方向数较多时由此产生的误差会较大。(3)由温度标定方法产生的误差。文中采用简单的单点标定法,只考虑了波长对发射率的影响而没有考虑温度对发射率的影响。研究更好的温度标定方法将会大大提高测温精度。(4)灰度量化产生的误差。DSP 图像采集处理系统的灰度等级只有 256 级,精度不够高,如采用 10 位(1024 级)或更高的视频编码器,则可提高精度。(5)由重建算法产生的误差。

5 结 论

通过 DSP 硬件资源的功能介绍和软件技术分析,及不同条件下同时迭代重建算法 SIRT 重建时间的比较,DSP 在同时迭代重建算法 SIRT 上有较优越的性能,试验实测也表明,DSP 完成重建比 PC 完成重建快 6 倍~11 倍,DSP 系统、PC 机及光路系统可以组成 1 套性能较高的 EST 重建系统。同时也看到 DSP 重建的一些不足之处,单片 DSP 重建,则采集的方向路数有限,并且如果所测的范围较大,DSP 所花的时间也较长;如果采用多 DSP 重建,可以解决上述问题,但系统的成本和复杂度都明显增大;并且 DSP 也不是同时迭代重建算法 SIRT 等 CT 算法的专用芯片,因此,

FPGA + ARM 的方案,其中 FPGA 硬件实现同时迭代重建算法 SIRT 等重建算法,ARM 协调和控制,也是下一步考虑的重点之一。

参 考 文 献

- [1] LI H. Study on flame temperature three-dimensional reconstructions based on emission spectral tomography [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2007; 59-88 (in Chinese).
 - [2] WANG X. Theoretical study on emission spectral tomography algorithms and its application to three-dimensional fluid field reconstructions [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004; 36-47 (in Chinese).
 - [3] LI F H. TMS320C600 series DSPs principles and applications [M]. 2nd ed. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 2003; 8-21 (in Chinese).
 - [4] CHENG F. Real-time multi-task embedded software development foundation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004; 115-152 (in Chinese).
 - [5] JI Y. DSP embedded application systems development typical example [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006; 11-15 (in Chinese).
 - [6] WANG X, GAO Y Q, HE X D. Three-dimensional flame temperature field reconstruction with multi-wavelength radiation computed tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (9): 1099-1104 (in Chinese).
 - [7] LONG R Sh, LIU W J, SHANG X F, *et al.* Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. Laser Technology, 2007, 31 (4): 394-396 (in Chinese).
 - [8] WANG X F, LU X D, CHEN G N, *et al.* Simulation and verification of the temperature field in laser hardening [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 162-165 (in Chinese).
 - [9] LI X Y, QI X J, ZENG X Y, *et al.* Establishment and application of temperature field model in laser micro-cladding [J]. Laser Technology, 2005, 29 (6): 561-563 (in Chinese).
 - [10] LI L, SHI P, LIU X F, *et al.* Temperature field of quadrate frequency crystal KTP in all-solid-state laser [J]. Laser Technology, 2005, 29 (4): 350-355 (in Chinese).
-
- (上接第 17 页)
- ## 参 考 文 献
- [1] NODA J, OKAMOTO K, SASAKI Y. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1986, 4 (8): 1071-1089.
 - [2] CHEN W, LI Sh Y, CHENG Y, *et al.* The technology progress and developing trends of polarization maintaining optical fiber [J]. Study of Optical Communications, 2003, 120 (6): 54-57 (in Chinese).
 - [3] TAN J R, LIU Y Zh, HUANG L. Development of fiber-optic gyroscope [J]. Laser Technology, 2006, 30 (5): 544-547 (in Chinese).
 - [4] ZHANG P G, IRVINE-HALLIDAY D. Measurement of the beat length in high-birefringent optical fiber by way of magneto-optic modulation [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12 (4): 597-602.
 - [5] XIA L, LI X H, YIN Y Zh, *et al.* Study of writing fiber Bragg grating into birefringent fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22 (8): 1004-1007 (in Chinese).
 - [6] MI J, ZHANG Ch X, LI Zh, *et al.* Measuring the beatlength of polarization maintaining fiber by broadband light source and conoscopic interference [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17 (9): 1074-1077 (in Chinese).
 - [7] YANG Y H, LI L, JIANG D G, *et al.* Precision measurement scheme for beat-length of polarization maintain optical fiber [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15 (6): 807-811 (in Chinese).
 - [8] WU J F, CHEN G X. Analysis on reflection characteristic of HiBi fiber sagnac rings by Jones matrix [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006 (9): 63-66 (in Chinese).
 - [9] KIM K, MANDEL L, WOLF E. Relationship between Jones and Mueller matrices for random media [J]. J O S A, 1987, A4 (3): 433.