

基于多线程技术的嵌入式三维数字成像系统

王晓东^{1,2}, 彭翔^{1,2}, 田劲东², 关颖健²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 深圳大学光电子学研究所, 教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 提出一种基于多线程技术的嵌入式三维数字成像 DSP 系统设计。该系统应用时间序列变频条纹数字投影原理, 使用 DSP/BIOS 实时操作系统的配置工具实现多线程 DSP 应用软件, 从而实现编码条纹投影、调制图像采集和相位解调的流水线处理过程, 并且使用软件流水方法对相位重建计算进行优化。实验表明, 该 DSP 系统能实现快速的三维表面测量任务。

关键词: 嵌入式系统; 多线程; 三维数字成像; 数字信号处理器; 流水线

Embedded 3-D Digital Imaging System Based on Multi-thread Technique

WANG Xiao-dong^{1,2}, PENG Xiang^{1,2}, TIAN Jin-dong², GUANG Ying-jian²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072; 2. Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Ministry of Education, Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract An embedded 3-D digital imaging scheme with Digital Signal Processor(DSP) based on multi-thread technique is presented, which utilizes the principle of temporal sequential frequency-varying fringe digital projection. This approach uses the configuration tool of DSP/BIOS real-time operating system to implement a multi-thread DSP application software, so as to realize the pipeline processes of the fringe projection, data acquisition, and automatic fringe analysis. The software pipeline is also adopted for the calculation of phase-map rebuilding. Experimental results show that this scheme can implement fast 3-D surface measurement.

Key words embedded system; multi-thread; 3-D digital imaging; Digital Signal Processor(DSP); pipeline

1 概述

数字投影法三维数字成像具有非接触和面扫描的优点, 是物体三维数字成像^[1]领域一个重要发展方向。它的基本原理是将编码结构光投影到物体表面, 随后从 CCD 或 CMOS 相机采集的变形结构光图像中解调出物体的相位分布图, 最终根据相位分布图和测量系统的结构参数解出物体的 3-D 坐标。

数字信号处理器(DSP)作为一种嵌入式处理器, 具有数据处理速度快和功耗低的优点, 被广泛应用于嵌入式图像和多媒体处理领域。本文提出了使用以 TMS320DM642 DSP^[2-3]为核心的 DSP 系统实现三维数字成像, 在 DSP/BIOS^[4]实时操作系统的基础上, 应用多线程编程方法实现了图像采集、编码结构光投影和条纹图分析的流水线处理过程。

2 光栅投影法三维成像原理

图 1 是用于物体表面三维传感的光路原理图, 1 块 DM642 DSP 处理器板控制数字投影装置, 将不同模式的正弦编码条纹图投射到待测物体表面, 并通过 DSP 的视频端口采集 CCD 图像。数字投影装置使用基于 DMD 的 DLP 投影仪, 以便实现快速和高对比度的编码条纹投影。当 CCD 光轴与投影仪光轴之间夹角 $\theta \neq 0$ 时, 物体表面的高度信息使得条纹空间相位被调制^[5]。

图 1 中的 DSP 板采集 CCD 相机拍摄的变形条纹图像, 然后进行条纹分析解出相位分布图, 最后根据相位图可以反推出物体深度。

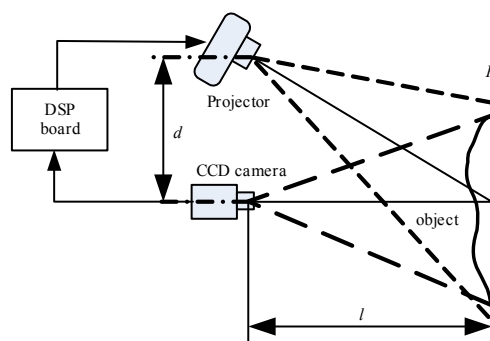


图 1 系统结构原理

当编码条纹照射到物体表面时, 物体表面的光强分布函数为^[5]

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (1)$$

其中, $a(x, y)$ 是背景光强; $b(x, y)$ 是结构光调制强度; f_0 为结构光空间频率; $\phi(x, y)$ 为经过物体高度调制的相位; $I(x, y)$ 是 CCD 采集到的光强图像。 $\phi(x, y)$ 的求解使用了相移法^[5]和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60275012); 广东省自然科学基金资助项目(60275012); 深圳科技局基金资助项目(200619)

作者简介: 王晓东(1976-), 男, 博士, 主研方向: 三维数字成像; 彭翔, 教授、博士生导师; 田劲东, 副研究员、博士生导师; 关颖健, 硕士研究生

收稿日期: 2007-10-20 **E-mail:** wxdsu@eyou.com

时间相位展开方法^[6], ϕ 相位和物体高度映射关系下式所示^[5]:

$$\phi = \frac{2\pi f_0 dh}{l-h} \quad (2)$$

3 硬件结构

三维成像系统的硬件结构如图 2 所示,采用 DSP 作为主控制器进行条纹分析处理, FPGA 控制条纹投影的显示输出。DSP 芯片采用了 C64 内核的 TMS320DM642 DSP, 64 bit 的外部 EMIF 数据总线, 峰值运算能力为 4 800 MIPS, 有 3 个视频端口 VP0, VP1, VP2, 其中 VP0 和 VP1 设为图像采集工作模式, 可以同时采集 2 路视频, VP2 工作模式设为显示。FPGA 主要功能是作为 VP2 端口和视频编码器 SAA7105 之间的转接控制器, 负责数据打包和解包操作, 并且内部集成了 128 个单元的颜色查找表。

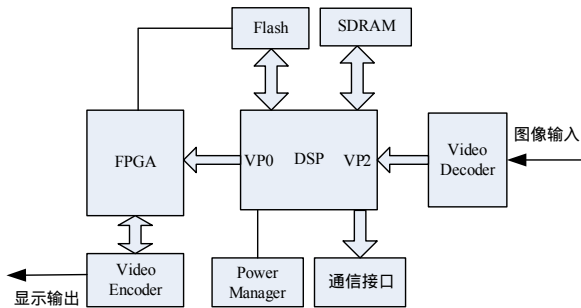


图 2 DSP 硬件系统结构

4 三维成像的 DSP 软件设计

4.1 系统线程划分

实时 DSP 应用需要同时执行不相关的功能, 这些功能可以在不同的线程内执行。DSP 应用软件使用 DSP/BIOS^[3] 系统静态创建和配置软件的各个线程模块。DSP/BIOS 是 TI 公司开发的多任务实时系统, 功能强大, 具有配置灵活(可以静态或动态配置)、响应迅速、占用存储空间少、API 函数模块化(可以裁剪)等优点。DSP/BIOS 提供了实时分析工具, 可以获得系统实时运行过程中的数据, 便于对系统性能指标进行分析。DSP/BIOS 的实时数据交换(RTDX)技术可在程序连续运行的情况下与主机交换数据, RTDX 提供了 OLE API, 能方便地与符合 OLE API 标准的软件(如 Labview, Matlab 等)或用户开发的客户端软件交互。

DSP/BIOS 支持 4 种线程类型, 分别为硬中断(HWI)、软中断(SWI)、任务(TSK)、后台 idle 线程(IDL)。以上 4 种线程中硬中断的优先级最高, 能实现关键的处理, 通过外部的异步事件触发, 但运行时间不宜过长; 软中断是通过软件触发的中断, 任务的优先级低于硬中断线程, 可被用于后台数据处理。DSP/BIOS 的线程同步通信工具包括队列 Que、邮箱 Mailbox 和信号量 Semaphore 等。

使用 DSP/BIOS 的配置工具, 本系统的 DSP 软件划分为条纹投影中断(project_swi)、采集中断(imageAcq_swi)、条纹处理任务(TSK_FringeP)、系统控制任务和主机通信任务线程模块。其中, 投影和采集中断使用了软中断; 条纹处理任务的优先级最低。系统还使用 2 个周期函数对象 PRD0, PRD1, 用于采集和显示延时。

4.2 软件流程

三维成像 DSP 软件系统的核心功能通过条纹投影、条纹采集和条纹处理 3 个线程完成, 它们采用如图 3 所示的流水线方式运行。

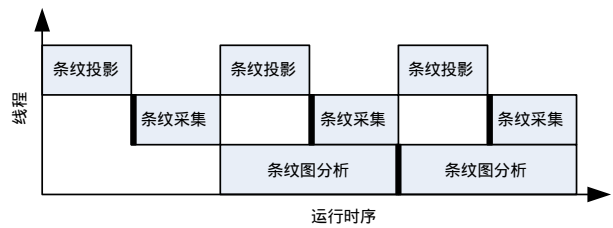


图 3 条纹投影、采集和条纹分析流水线时序图

在各个线程中, 条纹处理任务是系统的核心控制线程, 它采用 Task 类型线程实现, 流程如图 4 所示。任务初始化后, 条纹频率 f_1 初始值为 $f_0=1$, 启动投影和采集软中断, 投影采集初始频率 f_0 的 5 次相移条纹图; 然后条纹处理任务进入条纹投影、采集和分析工作循环。条纹图采集线程和条纹处理任务之间通过信号 SEM0 实现同步; 在每次条纹投影(project_swi)结束时触发条纹采集(imageAcq_swi)线程, 在频率 f_1 的 5 次相移的条纹图全部采集完后, 采集线程发送 SEM0 信号, 以便激活条纹处理任务(TSK_FringeP)。条纹处理任务接收到 SEM0 后, 更新待投影条纹频率参数, 即“ $f_2=2f_1$ ”, 判断 f_2 是否小于等于投影截止频率 f_s , 若 f_2 小于等于 f_s , 则触发频率 f_2 的条纹投影, 否则直接进入条纹分析程序模块计算频率 f_1 条纹的折叠相位和展开相位。条纹分析之后重新判断 f_2 是否小于等于 f_s , 若 f_2 小于等于 f_s , 则等待条纹投影和采集结束(等待 SEM0 信号到来), 反之, 条纹处理任务进入三维点云计算阶段, 随后结束条纹分析任务。

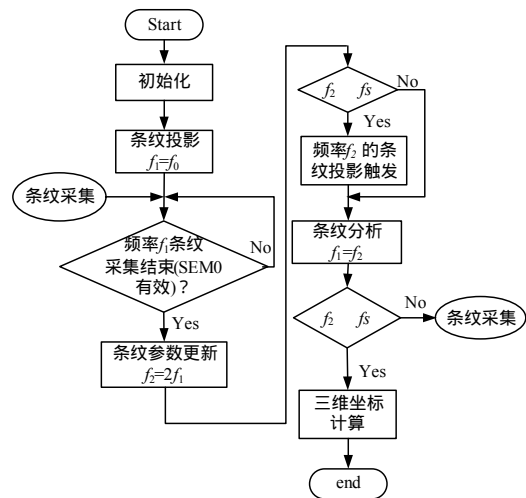


图 4 条纹处理任务流程

4.3 DSP 软件优化

系统的 DSP 程序用 C 代码开发, 与汇编语言相比, 运行速度存在较大差距。为此, 采用软件流水、循环展开、使用寄存器变量、内联(intrinsics)函数^[7]和有效地利用 DSP 片内存储器等措施对条纹分析过程进行了性能优化。折叠相位与展开相位计算的叠代过程是最耗时的核心循环, 将数据分批通过 EDMA 读入片内存储器, 通过循环展开和软件流水, 并利用 intrinsics 函数一次读入 4 个像素(每个像素灰度 8), 调用多字节乘加 intrinsics 函数同时对多个像素进行操作, 并通过编译器设置实现软件流水, 使得 DSP 芯片 8 个并行处理单元尽可能保持充满。条纹自动分析 DSP 算法经过优化后, 速度显著提高, 对于 512×512 条纹图, 优化前和优化后相位展开一次平均时钟数分别约为 4.63×10^8 、 6.44×10^7 , 速度提高了 7 倍。表 1 是 DSP 在 500 MHz 时, 自动条纹分析过程中相位计

算优化前和优化后运行时间的对比。

表 1 自动条纹分析运行时间 ms

折叠的相位计算平均时间		时间相位展开迭代平均时间	
优化前	优化后	优化前	优化后
544	109	359	20

5 系统实验结果

系统实验采用 5 步相移, 投影初始频率设为 1, 截止频率 64, 按照以 2 为底的指数增加频率, 共需 7 次变频。条纹投影和图像采集部分均采用 720×576 的 Pal 制式, 相位图是 512×512 个像素。图 5 是利用本文提出的嵌入式三维成像系统的实际测量结果。

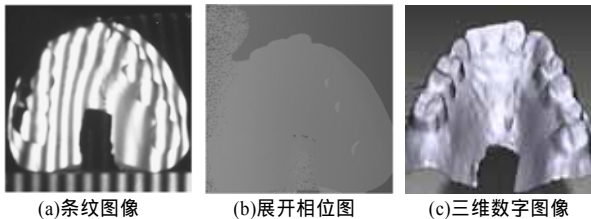


图 5 牙齿模型实际测量结果

嵌入式系统平台所采用的 DM642 DSP 处理器的系统时钟为 500 MHz, 系统与 PC 条纹自动分析运行时间对比实验如表 1 所示, 相位重建使用了 7 次变频条纹投影。PC 配置的是 P4 2.8 GHz 处理器, 实验室已经开发了基于 VC 的 PC 环境下条纹自动分析软件, 其运行于 Windows 平台上, 条纹投影、采集和处理运行于串行模式, 即所有频率和相位条纹投影采集结束后, 进行条纹自动分析。实验证明, 5 步相移的图像处理速度可达到 39.5 帧/s, 可满足实时条纹自动分析的

要求。

6 结束语

本文提出一种基于 DSP 的嵌入式三维数字成像系统及其软件实现方法。在 TMS320DM642 定点 DSP 和 DSP/BIOS 实时操作系统基础上, 使用多线程技术实现编码条纹投影、调制图像采集以及条纹自动分析的并行流水线处理, 通过软件流水进行展开相位图计算。实验证明, 该系统运行速度快、运行稳定、重复性好、测量精度较高, 可实现视频速度条纹分析。

参考文献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of Three-dimensional Shape Measurement Using Optical Methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-point Digital Signal Processor Data Manual(SPRS200B)[Z]. (2003-05-03). http://www.ti.com/sc/docs/psheets/man_dsp.htm.
- [3] 梁 迅, 熊水东. DM642 嵌入式网络接口开发设计[J]. 计算机工程, 2007, 33(16): 277-279.
- [4] TMS320 DSP/BIOS User's Guide (SPRU423)[Z]. (2002-08-30). <http://focus.ti.com/lit/ug/spru423f/spru423f.pdf>.
- [5] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated Phase-measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects[J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] 彭 翔, 韦林彬, 邱文杰. 广义条纹图序列编码的相位重建[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1156-1161.
- [7] TMS320C6000 Optimizing Compiler User's Guide (SPRU187k)[Z]. (2002-03-07). http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15745-s07/www/c6xref/compiler_guide.pdf.

(上接第 20 页)

$P_A = [2, 2, 1]^T$, 经过配置运算产生如图 3 所示的实例产品。

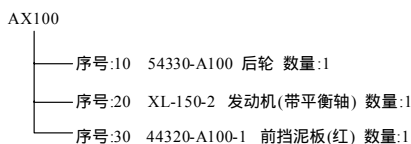


图 3 实例产品

4 应用实例

该知识表达方法在金城集团摩托车制造中得到成功的应用。该企业年产摩托车 60 多万辆, 产品型号众多, 客户需求复杂, 如 AX100 型号摩托车, 变形产品超过了千种。使用该产品配置后, 有效地解决了产品零件多、客户需求复杂的配置问题, 收到了良好的社会效益和经济效益。产品知识表达及配置求解过程见图 1, 图中“确定产品特征向量”是将用户对产品的特征描述用产品特征向量表示, 在上面的例子中, 将普通路况、高档、红色的产品特征转化为 $P_A = [2, 2, 1]^T$ 。根据 P_A , STRU, CONSTRAINTS 进行配置求解。从表 1 可以看出约束表达通俗易懂, 并且约束之间没有关联, 这种约束表达方法降低了知识表达的难度, 并且使得配置求解实现较为容易。在通过冲突检查后, 可生产满足用户产品特征要求的实

例产品。

5 结束语

本文提出了基于产品特征向量的产品配置模型, 给出了知识表达的理论基础及其实现步骤。这种产品配置知识表达的方法在金城集团已成功应用, 在其他企业也得到了很好的应用, 较低的使用门槛和对不同行业较强的适应性使得这种产品配置方法具有较强的活力。

参考文献

- [1] McGuinness D L, Wright R. An Industrial-strength Description Logic-based Configuration Platform[J]. Intelligent Systems & Their Applications, 1998, 13(4): 69-77.
- [2] Stumptner M. An Overview of Knowledge-based Configuration[J]. AI Communications, 1997, 10(2): 111-126
- [3] Olsen K A, Saetre P, Thorstenson A. A Procedure-oriented Generic Bill of Materials[J]. Computer Industry Engineering, 1997, 32(1): 29-45.
- [4] 刘 裕, 麦家健, 李 磊. 基于与或树的柔性 BOM 结构及其产品配置算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(21): 189-191.
- [5] 杨煜俊, 刘清华, 万 立, 等. 基于条件约束满足问题的产品配置研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(11): 1332-1337.