

自适应光学波前实时处理机结构设计*

蒋咏梅 陈 严 孔铁生

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘 要 本文介绍的波前处理机是1.2m望远镜自适应光学系统的关键部件之一,吞吐率高,延时小,是具有高速数据处理能力的实时处理系统。为满足系统的高速度性能,系统设计在实时性、并发性的基础上,将图象数据采集加入流水线,并对波前处理中自然存在的子任务作“去相关”处理,建立了图象采集、斜率计算、波前复原间流水线操作。图象读出时间的利用及流水线的建立,大大减少了时延,降低了系统实时性要求。流水线处理与高度并行处理相结合,也是本处理机设计的一大特色。

关键词 波前处理机, 实时系统, 并行处理, 流水线处理

分类号 TP368

Architecture Design of the Adaptive Optics Wavefront Real-time Processor System

Jiang Yongmei Chen Yan Kong Tiesheng

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract The optics wavefront processor system(OWPS) described in this paper is one of the key processors in 1.2m telescope adaptive optics system (AOS). It is a high-performace system with high throughput rate and short delay. In order to meet the high speed requirement, the demanded real-time and concurrency in the main computation is first analyzed, then a decorrelation procedure for wavefront processing is proposed. Based on the several subtasks in wavefront computation, data acquisition, slope computation and wavefront reconstruction are conducted in pipeline. The delay is reduced greatly by the utilization of image aquisition time and the foundation of pepeline.

Key words OWPS, real-time system, parrallel processing, pipeline processing

本文研究设计1.2m望远镜自适应光学系统中的波前实时处理机,是系统的关键部件之一。它用于实时采集波前探测器输出的图像信号,完成自适应光学系统中所有实时

* 1996年3月7日收稿

信号处理,具有吞吐率高、延时小的特点,是一个具有高速数据处理能力的实时系统。

系统工作时,波前传感器实时测出波前误差,送给波前处理机进行实时信号处理,输出校正电压,控制波前校正器,将波前误差予以抵消,消除大气扰动对成像的影响,改善了成像质量。高速实时性能是该系统的最大特色。依据这一性能要求,波前处理机结构设计重点进行以下三方面工作。

1 技术指标

1.1 波前处理机的框图

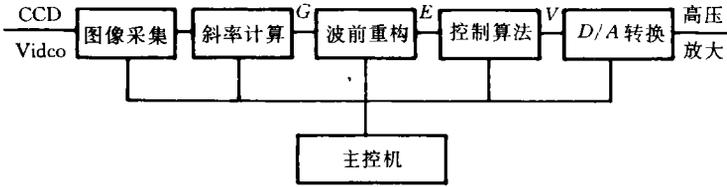


图1 波前处理机框图

1.2 波前处理流程

(1) 实时采集 CCD 相机输出的图像信号。图像读出时间为 $1T$, 约为 $1ms$

CCD 像面的子孔径排列方式如图 2。

52 个子孔径,子孔径排列为 8×8 ,其子孔径的大小可调,最大 16×16 像素, 15×15 , 14×14 , ... 或 16×15 , 15×16 , ...。

(2) 斜率计算

波前斜率计算得到一帧图像的斜率:

$$G[S_{X_1}, S_{Y_1}, \dots, S_{X_n}, S_{Y_n}]^T$$

主要运算是重心求解

$$S_X = \frac{\sum_{j=0}^{15} \sum_{k=0}^{15} W_{jk} T_{X_{jk}}}{f \cdot \sum_{j=0}^{15} \sum_{k=0}^{15} W_{jk}} \quad S_Y = \frac{\sum_{j=0}^{15} \sum_{k=0}^{15} W_{jk} T_{Y_{jk}}}{f \cdot \sum_{j=0}^{15} \sum_{k=0}^{15} W_{jk}}$$

式中 W_{jk} 为在子孔径坐标 (j, k) 处的光强值, $T_{X_{jk}}, T_{Y_{jk}}$ 为坐标 (j, k) 处光强在 x, y 方向的加权值, f 为中继透镜的焦距(常数),子孔径大小为 $j \times k$ 个像素。

重心求解是一种矢量内积运算,计算量大,为 $64 \times 16 \times 16 \times 3 \approx 50000$ 次/帧。

(3) 波前重构,得到待校正的波面误差矢量 $E = [E_1, E_2, \dots, E_n]$

a) 倾斜镜单独控制时,波前重构运算包括下面部分:

$$E_D = M \cdot G_D$$

此处 M 为系统提供的波前重构矩阵,维数为 61×104 。

b) 倾斜镜与变形镜一起控制,重构运算为: $E = M \cdot G$ 。

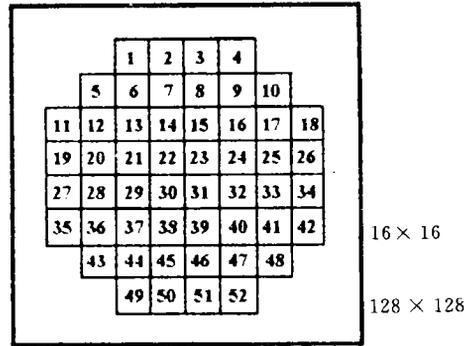


图2 52子孔径排列方式

此处 M 为 63×104 矩阵, E 包括变形镜与倾斜镜所要校正的波面误差。这是一种矩阵、矢量运算, 计算量为 $64 \times 104 \approx 7000$ 次/帧。

(4) 控制算法, 经过迭代运算得到控制 V 矢量。

控制算法以 E 矢量为输入, 需待一帧图像全部读入后计算得到, 因而无法加入流水线处理, 计算量为 $64 \times 7 \approx 500$ 次/帧。

1.3 波前处理机计算延时

波前处理机完成从本帧图像开始读出到斜率计算、波前复原、控制算法、电压输出的全部工作, 必须在下帧图像读出时间的 0.25 个周期内完成。

2 系统的实时性与并发性分析

并行处理技术和流水线处理技术是利用算法、结构的并发特性, 提高系统的处理速度的两种基本方法。流水线操作和高度并行处理技术相结合是波前处理机设计的一大特色。它保证了系统具有较高的数据处理速率。

2.1 图像读出、处理

将图像读出即加入流水线, 此即斜率计算在一行子孔径数据读入后立即开始进行, 使处理延时仅有一行子孔径的扫描时间。图像采集时间的利用, 大大减少了时延, 降低了处理机实时性要求。具体比较如下:

(1) 图像读出、处理顺序进行

此时数据处理时间限制在 $0.25T$ 以内, 约 $250\mu s$ 处理一帧图像, 处理一帧图像运算约为 60000 次, 由此要求波前处理机运算速度达到 240MOPS, 硬件成本高, 可选择性小。

(2) 图像读出、处理在时间上重迭, 即采用帧内流水处理。

此时数据处理时间加长到 $1T$, 波前处理机运算速度降为 60MOPS, 大大降低实现难度。

2.2 算法并发性的提取

波前处理机结构的并发性表现在子任务模块间流水线操作和子任务模块内 (处理机模块内) 的并行处理两个方面。

(1) 流水线的建立

流水线处理的基本原理就是把待处理的任務分解为一组相互有关的但又有相对独立性, 可顺序执行的子任务; 同时处理系统也被划分为一组串行连接的功能单元, 每个功能单元完成相互的一个上述的子任务。

由波前处理机的工作流程, 四个子任务分别是图像采集、斜率计算、波前重构、控制算法。其中控制迭代算法的输入为 E 矢量, 而 E 矢量的取得与一帧图象的所有数据有关, 是在一帧图象全部读入后计算得到。因此, 控制算法部分无法加入流水线处理。

进一步分析发现, 波前重构计算中, 对于倾斜镜单独控制这种情形, 有

$$E_D = M \cdot G_D = M \cdot [S_{x1} - S_{xT}, S_{y1} - S_{yT}, \dots, S_{y_n} - S_{yT}]^T$$

其中 S_{xT}, S_{yT} 是 x, y 方向的平均斜率, 也是在一帧图像全部读入后获得的。这样出现了“相关”情况, 使得流水线不能连续工作而产生阻塞。下面通过公式变形, 进行“去相关”处理, 使各子任务具有相对独立性, 让流水线畅通起来。

重排 M, G_D, G , 定义:

$$G = [S_{X_1} \cdots S_{X_n} S_{Y_1} \cdots S_{Y_n}]^T = [S_X S_Y]^T$$

$$G_D = [S_{DX_1} \cdots S_{DX_n} S_{DY_1} \cdots S_{DY_n}]^T = [S_{DX} S_{DY}]^T$$

$$J_X = J_Y = [1 \cdots 1]^T$$

$$E_D = M \cdot G_D = [M_X \quad M_Y] [S_{DX} \quad S_{DY}]^T = [M_X \quad M_Y] \begin{bmatrix} S_X - S_{XT} \cdot J_X \\ S_Y - S_{YT} \cdot J_Y \end{bmatrix}$$

$$= MG - (M_X \cdot J_X) S_{XT} - (M_Y \cdot J_Y) S_{YT}$$

可以导出迭代公式为:

$$E_D^{(k)} = E_D^{(k-1)} + M_{XK} \cdot S_{XK} + M_{YK} \cdot S_{YK} - (M_X \cdot J_X) S_{XT}^{(k)} - (M_Y \cdot J_Y) S_{YT}^{(k)}$$

上式可进一步近似为

$$E_D^{(k)} = E_D^{(k-1)} + (M_{XK} - M_X \cdot J_X/n) S_{XK} + (M_{YK} - M_Y \cdot J_Y/n) \cdot S_{YK}$$

这样, 通过迭代运算将 S_{XT} 与 S_{YT} 化解, 除去“相关”性, 使流水线处理得以实现。可以看出, 这属于一种单功能处理单元级流水线。下面列出各流水段完成的主要运算:

- a) 图像第 k 行子孔径 A/D 数据的读入;
- b) 求重心 (S_{Xk}, S_{Yk}) , 每次流水求一行子孔径的重心;
- c) 波前重构:

倾斜镜单独控制公式见以上分析。

倾斜镜与变形镜一起控制

$$E_D^{(k)} = E_D^{(k-1)} + M_{XK} \cdot S_{XK} + M_{YK} \cdot S_{YK} \quad k=1, \cdots, n$$

这样整个流水线分作了三个流水段, 流水线的最大速率取决于所需时间最长的流水段。

(2) 并行处理的实现

把一个任务划分成几个子任务来获得并行性显然是有限的, 流水线技术紧密依赖于应用, 因此一般流水线只能提供一种有限的并发性, 需使用空间资源重复技术, 即开发并行处理。并行处理表现在:

i) 算法本身的并行性。重心求解, 波前重构可看作矢量内积、矩阵矢量相乘运算。算法本身有着很好的并行性, 相应地采用高度并行的 SIMD 阵列结构。

ii) 图象中一行子孔径数据处理计算之间的独立性、并行性, 相应地采用给一行中每一个子孔径配置一个 DSP 处理芯片的方法, 使得同一行各子孔径波前计算可以并行执行。

3 波前实时处理机结构设计分析、比较

3.1 整体结构

自适应光学系统中, 波前处理机与主控机之间构成主从式结构。本系统要求主控机对波前处理机实现管理, 并监控整个自适应光学系统。主从机之间通过存储器交换数据, 通过一个外部通信链——总线连接构成一个微机系统。作为从系统, 波前处理机采用高速 DSP 芯片组成三个硬件模块, 配置软件资源完成各子任务, 子任务间形成流水处理, 提高处理机的运算速度。

3.2 处理机各硬件模块结构

(1) 斜率计算部分, 主要完成矢量内积运算

结构 1: 选用 3 片高速乘法累加器 (16 位, 50ns) 和 2 片 C50 组成一种异构型 MIMD 结构。采用这种结构, 形式简单、紧凑, 计算效率高, 具有很高的处理速度和性能价格比。所有的子孔径用同一套 DSP 器件处理, 能适应以后可能的子孔径排布方式、大小的变动, 有很高的灵活性和可用性。缺点是乘法器的逻辑设计复杂, 调试较困难。

结构 2: 选取 8 片 TMS320C50 芯片组成线性阵列, 对应于 52 子孔径排布方式中的一行。即每片 C50 处理一行中一个子孔径的 A/D 采样数据。设计中采用了资源重复技术来提高系统的处理速度, 性能指标要求一行子孔径的斜率计算在 $110\mu\text{s}$ 以内完成。采用 8 片 C50 后, 对每片 C50 完成一个子孔径斜率计算的速度要求放宽到原来的 10 倍。这属于一种 SIMD 结构, 精度高、规整、固定、带有专用性、易于设计, 但器件量大, 芯片较多。针对系统目前状况, 考虑采用这种方式。

结构 3: 采用 7 片或稍多的 C50 组成同构型 MIMD 结构, 确切地说是主从分布式结构。用一片 C50 作主控机, 其余的组成线性从机阵列。主从机之间通过双端口 DPR 通讯。

(2) 波前重构部分

流水线处理技术的采用, 使波前重构计算时间延长到 1ms 左右, 大大减轻了对器件性能的要求。这里选用 3 片 C50 组成线阵, 属 SIMD 结构, 即采用了资源重复技术, 在操作级实现并行处理, 从而达到技术指标要求。

这种结构与 (1) 中结构 2 类似, 但这里完成的是一种矩阵矢量的运算, 是利用算法本身内在的并行性, 而 (1) 中结构 2 是利用一行子孔径中各个不同的子孔径斜率计算之间的并行性。这里 C50 器件少, 结构规则、统一, 易于调试实现。

(3) 控制算法和 D/A 部分, 用单片 C30 实现。

4 结 论

本系统具有以下特点:

1. 处理机级流水线与处理机模块内高度并行满足了实时性要求。

2. 就总体而言, 主控机与波前处理机构成一种 PC 环境下的主从式结构。波前处理机本身由三个子任务模块组成, 分别完成波前斜率计算, 波前重构及控制算法、D/A 转换等。其中前两个子任务模块采用一种 SIMD 分布式结构, 分别利用了一行子孔径数据间处理的并行性和矩阵运算固有的并行性。高度并行处理提高了处理机的性能, 采用 SIMD 结构易于设计、调试实现。

3. 在读入一行子孔径数据后立即开始图象数据的处理, 从而图象采集时间的利用减少了处理带来的延时, 系统易于设计实现。

参 考 文 献

- 1 Madec PY, *et. al.* Optical adaptive optics techniques, *Photonics Spectra*, 1988, (8): 97~104
- 2 Arambepoal B. VLSI architectures for high speed signal processing. *Proc IEEE Colloquim on VLSI Architectures*, March 1987
- 3 沈兰荪. 实时系统构成. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993 (责任编辑 潘 生)