

4-8

并行处理 计算机 单指令多数数据流

SIMD 计算机发展概述

景晓军 方滨兴

(哈尔滨工业大学计算机系 哈尔滨 150001)

TP338.6

摘要 This paper presents the main architecture of the SIMD computer in the development of parallel computers. Through analyzing and comparing the characteristics of SIMD computers and MIMD computers, the paper points out that some problems in nature are suitable for solving on SIMD computers, the research on SIMD computers needs to study deeply.

关键词 Parallel architecture, SIMD computer, MIMD computer, ASIMD, MSIMD

一、引言

并行处理是提高计算机性能的有效途径,已成为计算机系统结构研究的热点。SIMD(单指令多数数据流)计算机由 M. J. Flynn^[1]在 1966 年对计算机系统的分类中提出,发展到现在经历了近三十年的历史。在此期间对 SIMD 的研究由最初的并行处理研究热点到发现其僵化的控制结构所带来的问题求解局限而进入研究低谷,并开始转向 MIMD(多指令多数数据流)结构的研究。在对 MIMD 结构进行了充分的研究之后,也发现其求解问题时所存在的限制,从而又开始客观地评价两种结构的特点^[6,7],以期结合各自的优点,或者通过 SIMD 的研究指导和推进 MIMD 相关技术的发展^[11-21,26,29,30]。

SIMD 计算机的主体由同一控制器 CU 控制下通过互连网络相联结的多个处理单元 PE 组成,由 CU 完成取指、译码,然后指令或者在 CU 中执行,或者广播到各 PE 中,由 PE 对各自局部的数据同步地完成相同的运算操作。另外,一个完整的 SIMD 系统通常还必须要有高速 I/O 及大容量后援存储器来支持实际问题的求解。

按照 H. J. Siegel^[9]总结的 SIMD 结构模型,一台 SIMD 机器一般由四部分组成:处理单元、互连网络、机器指令和屏蔽方式。这种形式化描述模型提供了对不同 SIMD 机器进行评价和比较的公共形式基础。

由于 SIMD 的各 PE 不需要指令存储器及取指译码系统,其处理单元结构简单,有较好的性能价格比,并且处理器间的相互通讯在指令的控制下同步进行,避免了通讯同步开销。其算法设计也较直观、清晰,并且在实际应用中能有效地求解一些问题,这些问题主要包括:矩阵代数(乘法分解和求逆)、线性与整数规划、通用气候环流模型建立、射束产生与旋转、滤波与傅立叶分析、图象处理与模式识别、风洞实验、地图自动生成、景物实验分析^[3], SIMD 的这些特点使其在并行处理的一个研究时期倍受青睐^[4,5]。

下面就主要的 SIMD 结构计算机的结构、性能特点加以比较说明,主要包括 PEPE, STARAN, IL-LIac IV, BSP, MPP, DAP, GAPP, CLIP4, CM-2, CM-5, MP-1。

二、主要 SIMD 计算机简介

SIMD 从构形上来说有两种,一种是 PE-to-PE 形式,即 PE 由 ALU 和局部存储器组成,PE 间通过互连网络联结,完成 PE 之间的数据通讯。这种结构又被称作分布式局部存储结构 SIMD 计算机^[12],在已研究成的 SIMD 机器中占绝大多数。另一种构形是 PE-to-Memory 结构的 SIMD 计算机,PE 不含局部存储器,而有若干存储器模块通过对准网络与 PE 相连,各存储模块为各 PE 共享,所以这种结构又称作共享存储^[13]结构的 SIMD 计算机,这种结构较典型的代表是 BSP。下面就各种主要 SIMD 机器加以

景晓军 博士研究生,研究领域:数字系统模拟,并行计算机系统结构,并行计算机性能评价,并行程序性能评价等。

方滨兴 教授,研究领域:计算机安全,并行计算机系统结构等。

比较说明。

2.1 美联处理机 PEPE, STARAN

关联处理机是一种特殊的 SIMD 计算机,其所存储的数据项可按内容寻址,一条指令可对多组变量进行算术和逻辑操作^[3]。PEPE 和 STARAN 都是关联处理机。

PEPE(Parallel Element Processing Element)是七十年代初由 Burroughs 和 System Device 公司研制的,有 288 个 PE,前端机是 CDC7600。

PEPE 是全并行分布逻辑关联处理机^[4],与典型的 SIMD 结构不同之处在于其 PE 之间没有互连网直接相联系,PE 之间的通讯必须通过前端机来完成。它是一种典型的实验专用机,可以看作是 CDC7600 的附属处理机,主要应用于雷达信号处理,适合于各任务间通讯量小的应用。

STARAN 是 1975 年由 Goodyear Aerospace 公司推出的位串处理机,由 256 个 PE 通过 Flip (scramble/unscramble)互连网实现 PE 间及和存储

器之间的通讯,其存储器由 32 个关联阵列模块组成,而每个模块又由 256 字、256 位的多维访问(MDA)存储器组成,可利用交换网以位片、字片的形式访问存储器及对数据进行移位和其他变化。适于图象处理、信号处理、数据管理系统。

这两种机器都采用了关联存储器,造价比较昂贵,主要应用于军事领域。

在此值得一提的早期的 SIMD 机器还有 1962 年由 Westing House 公司的 Daniel Slotnick 领导的研究组研制的 Solomon,它被看作是 ILLIac IV 的前身。

2.2 SIMD 计算机的里程碑——ILLIac IV

表一列出了主要 SIMD 计算机的指标。ILLIac IV 是第一台真正的大规模阵列计算机,它是现今高性能计算机的先驱,使许多在此之前受处理器能力限制无法进行的科学计算成为现实,构造了使并行化和流水技术相结合的进化计算机体系结构^[2]。

表 1 主要 SIMD 机器性能比较

机器名	ILLIAC IV	MPP	DAP	GAPP	CM-2
年代 公司	1975 Burroughs	1983, Goodyear Aerospace	1980, ICL, AMT	1981 NCR 注册生产	1987, Thinking Machine
PE 个数	64	128 * 128	64 * 64	82944	64K
PE 局存	2K * 64(Bit)	1K(Bit)	1M(Bit)(最大)	128(Bit)	64K(Bit)
PE 能力	字操作	位操作	位操作	位操作	可变字长操作
PE 主频	13MHz	10MHz	10MHz	10MHz	
互连网	Mesh	Mesh	Mesh	Mesh	12 维 Cube
速度	300MIPS(32)	6553MOPS(8)	40,000MOPS(8)	33,177MOPS(8)	2500MIPS(32)
IO 速率	63Byte/s	80MByte/s	50MByte/s	30MByte/s	8 * 40MByte/s
HOST	CDC7600 IBM360, PDP10	VAX-11/780	SUN, VAX	VAX, SUN3 IBM PC/AT	VAX 8000, SUN 4 Symbolics 3600
语言	CFD, CLYPNIR, IVTRAN	Parallel Pascal	Fortran-Plus	特殊汇编	CM-Lisp, C*, *Lisp

* MOPS(Million Operation Per Second),空白处表示作者没有有关资料。

ILLIac IV 始于 Illinois 大学六十年代的研究,是该大学研制的第四代高级计算机,它的先驱包括 1952 年的电子管计算机(0.011MOPS),1963 年的半导体计算机(0.5MOPS),1966 年自动搜索图象数据的计算机。ILLIac IV 的总投资是 31M\$,最初的设计是 256 个处理器,后来由于经费问题而只有 64 个处理器。

ILLIac IV 的研究不仅推动了并行处理技术的

发展,而且在其研制过程中,对半导体工业及半导体设计方法都有巨大的推动作用,还在并行处理系统软件及程序设计研究方面造就了许多杰出的专家,如 David Kuck,他的工作对后来的研究有着深远的影响。

它所解决问题的类型也比较广泛,适合于地震预报、矩阵运算、随机过程模拟、信号处理等领域,ILLIac IV 在标量处理能力上是有限的,这一缺陷在后

继的 SIMD 机器中得到解决。

2.3 共享存储的 SIMD 计算机 BSP

在 ILLIac IV 研制成功后,为满足大型科学和工程计算日益增长的需要,Burroughs 公司在许多方面对 ILLIac IV 设计作了改进,增强其数组处理能力,于 1979 年推出了 BSP (Burroughs Science Processing),可以完成数值天气预报、核工程、地震信号处理、结构分析等大型科学计算问题。

BSP 一个显著特点是 PE 通过输入、输出对准网络来存取各存储体,BSP 的独特性能就是它的存储系统采用了质数存储技术来实现无冲突访问。尽管 BSP 已中止研制生产,但它仍不失为一台设计得很好的并行计算机。

2.4 SIMD 的发展 MPP, DAP

MPP^[2,3,11] (Massively Parallel Processing) 和 DAP^[2] (Distributed Array Processing) 与 ILLIac IV 相比无论是在半导体工业的技术支持上还是并行系统的软件开发上都有了很大的进步。

MPP 主要用于处理遥感卫星图片的大规模 SIMD 阵列机。该机器的程序设计语言是并行 Pascal,这种语言可独立于机器的结构,更能方便用户的使用。

DAP 的程序设计语言 Fortran-Plus 是对 Fortran 语言的扩展,支持数据并行结构和操作,这些扩展属于 Fortran 8X 标准的一部分。为了有效方便地解决实际问题,AMT DAP 还提供了 PDT^[12] (Parallel Data Transform) 机制支持复杂的问题数据空间向机器物理空间的映射,使用户能方便地在向量映射空间上解决各种问题,而不需在机器物理空间上进行操作。

MPP 和 DAP 较突出的一个特点就是采用了位串处理单元 (bit-serial processing),结构比较简单、造价低,能采用大规模单元阵列。位串处理可以灵活地处理各种长度的操作数,避免了固定长度处理器处理变字长数据所带来的资源浪费,但位串执行又使完成一个算术操作的步数增多,这一点可以通过大量的单元同时执行来获得整体速度的提高,这种位串处理方式也增加了系统软件的复杂程序,要获得高性能更加需要大量的向量化数据,故使适合求解的问题受到更多的限制,缩小了可应用的领域。随 VLSI 技术的发展,处理器芯片性能增强而造价降低,使用位串的处理单元构成大规模阵列亦成为可能。另外其它位串处理器的 SIMD 计算机还有 GAPP, CLIP。

GAPP (Geometric Algorithm Parallel Processor) 是为解决图象处理问题而设计的专用机。

GAPP 芯片是 1983 年由 NCR 公司注册生产的,早期一个 GAPP 芯片有 3×6 个处理单元,后来一个 GAPP 芯片中可有 6×12 个处理单元,GAPP 处理机根据需要由一定数量的 GAPP 芯片组成,单元之间的连结形式是 Mesh 网,目前 GAPP 最大的系统拥有 82944 个处理单元,其系统主要用作图象处理专用机以及作为高速图形外设的处理机。

CLIP (Cellular Logic Image Processor) 由伦敦数字大学学院从七十年代开始研究的用于模式识别的专用阵列机,它根据模式识别处理的特点建立处理器间的连结关系(在此不作详细说明)。

2.5 现代高性能的 SIMD 计算机 CM, MP

当代 SIMD 计算机的研究不仅有许多并行处理理论研究成果的支持,而且随着电子技术及 VLSI 的飞速发展,使用更强功能的处理器做为并行处理阵列已成为可能,因此现代 SIMD 一方面追求高的性能指标,另一方面试图解决过去 SIMD 所存在的一些问题,与 MIMD 结构一争高低。其中 CM 和 MP 系列 SIMD 计算机就是这一时期成就的集中体现。

CM (Connection Machine) 是在现代并行处理技术发展及 VLSI 技术发展的技术支持下由 1983 年成立的 Thinking Machine 公司生产的高性能并行处理机。它是被广泛接受的较成功的商品化 SIMD 计算机。

CM 的第一代产品是 CM-1,1986 年推出,拥有 64K 的位串处理单元,其峰值速度可达 1000MIPS,但 CM-1 为其后不久推出的 CM-2 所替代。

CM-2 与其他 SIMD 机器相比较具有许多显著的特点:

(1) CM-2 的标量指令在前端机中执行,即前端机代替了 CU 部件,CM-2 可同时有 4 个异种或同种前端机同时工作,其前端机可以是 SUN4, Symbolics 3600-Lisp Machine 和 DEC VAX8000 (带 BIBus)。

(2) CM-2 的程序控制部分在前端机上完成,并行处理部件可被看作是前端机的存储器的智能化扩展,可使程序设计者在其所熟悉的前端机上使用熟悉的环境,程序设计语言、调试环境都不需要做大的改变,使很大一部分应用代码适合于在程序、用户和操作系统之间接口,还可以充分利用前端机的处理能力来完成标量处理,使标量和向量部分都能高效地执行。

(3) CM-2 的各 PE 不仅可以访问自身的局存,而且还可自主访问其他 PE 内存存储器,即网络连结具有自主性^[12],提高了求解问题的灵活性,扩大了应用领域。

(4) 多前端机可同时工作,CM-2 可将其并行处

理阵列根据需要划分成独立工作部分,并且各部分无论是分解还是联系都比较方便。

(5)CM-2的高级程序设计语言也都是在原有语言语义的基础上作了很少的并行语义扩展而得到的,便于用户掌握,其上的高级语言有,CM-Lisp;增加了很少的语义而具有很强的数据并行程序设计语言。Lisp在保持原Lisp的灵活性的基础上,增强了对CM-2硬件的细粒度的控制。C*是标准(ANSI X3 J11)C的扩展。

正是这些特点使CM-2既具有很高的性能又便于用户有效地使用其解决实际问题,所以CM-2才能占有较大的SIMD应用市场。

MP^[3]是Maspar Computer公司研制的SIMD计算机。MP-1的PE阵列有三种配置,1K,4K和16K,最大配置下可达到26,000MIPS(32位RISC整数操作)。其CU部件也采用了RISC技术,具有14MIPS的处理能力。PE之间的互连网络比较复杂,每一个处理器板上有1024个PE,在一个处理器板上又以16个PE为一簇,被称作PEC(PE Cluster),共有64簇,每一个PEC通过X-Net Mesh网和多级交叉开关网相互连结起来。可以看出MP-1在CU和PE中都采用了RISC技术,从而大大提高了性能。

在MP-1中为改变过去SIMD僵硬的模式,使其能解决更多的问题,引入了ASIMD^[7](Autonomous SIMD)的概念,它除了象CM-2具有连结自主性外,还具有寻址自主性^[7],即各PE可通过间接寻址来达到隐含地对不同地址的数据访问。这与传统的SIMD结构中PE寻址地址由CU广播到各PE中各PE对相同地址处的数据进行操作不同,增强了求解问题的灵活性。

2.6 SIMD/MIMD的结合 MSIMD CM-5

在实际应用中,人们发现SIMD结构是完全同步执行的,能很高效地解决同步问题,而对于松散同步的问题,则不能非常高效求解。转而研究MIMD,希望能很好地解决SIMD不能很好解决的问题, MIMD可以高效地求解松散同步或异步求解的问题,但对于严格同步问题,其同步开销又较大,并且处理机越多这种开销就越大,这就需要把两者结合起来,发挥各自的优点,使求解问题的能力扩大,由此引出MSIMD(Multiple SIMD)的概念,MSIMD是并行处理系统可构成一个或多个独立的SIMD处理机。CM-5是这种机器的代表。

最早的MSIMD可追溯到七十年代末由Purdue大学设计的用于图象处理和模式识别的大规模并行处理系统PASM^[11],ILLIac IV最初的设计也是要设计成MSIMD的形式。

CM-5被认为是目前商品化并行处理系统中性

能最好的超级计算机。CM-5由32到16384个处理结点构成,每个PE具有32M字节的局存和128MFLOPS的向量处理速度,在最大配置下其峰值速度已超过1TFLOPS;它采用多个SUN工作站作为其多个CU。

CM-5由三个互连网络连结起来,它们是数据网络、控制网络和诊断网络。数据网主要完成PE点到点的信息交换。控制网提供操作协同,包括广播、同步、收集等,还起到系统管理功能。诊断网用于测试系统完整性检查和隔离错误。

CM-5的系统结构具有广泛意义,是对大规模问题的数据并行处理的优化,数据并行可在SIMD、MSIMD和MIMD模式下完成,故其求解问题能力很强。基于这些特点,所以CM-5被认为是当今性能最好的商品化并行机。

CM-5是适合于高效数据并行的通用结构,它的每一个结点都是一个完整的高效处理器,它在系统软件、程序设计语言及用户环境上都是很成功的系统,是当代并行处理技术发展的成功应用。

另外,在九十年代,为适应自然界中许多物理现象是三维空间模型的特点,如:医用图象生成,地震分析、分子模型等应用领域的问题,需要把三维模型归结成二维模型去解决问题。采用二维模拟使描述问题的抽象程度提高,但由于其只能代表三维有限的特性,所以并不能完全真实地反映客观现象。另一个问题是,对一个复杂的结构,模拟的结果数据不能及时地呈现给用户,需要用户对存储的结果数据进行再分析才能得到。针对这一问题,提出了一种三维网络互联的大规模并行SIMD结构的计算机——DTC(Data Transport Computer)。DTC中各阵列处理器以三维的网络互联。

在DTC中,每个处理器在控制器的控制下,生成虚拟处理器,从而使处理问题的结点要比实际具有的处理器个数多,之所以称之为DTC,一是因为其处理器之间的通讯结构能支持大量数据并行传送,二是与外设之间如显示器、传感器阵列等以可比的速率传送。

DTC与其他MPP系统相比较具有以下特点:

1. 生成方便,只需在基于UNIX系统的工作站的SCSI口上插一个DTC控制器,便可使现有的计算机环境变成DTC。

2. 应用开发环境方便;它使用的开发语言是ANSI C语言基础上扩展的Mutil C,并且使用通常的工作站环境,而不需用户再去熟悉。

总之,DTC和Mutil C语言已初步发展成可支持三维物理现象和一些其它需要三维求解问题的应用的模拟,以用户可理解的方式显示模拟结果,并且可高效地兼容处理2D和3D问题。

三、SIMD 计算机研究展望

同步问题适合于 SIMD 求解,松散同步问题适合于 MIMD 求解, SIMD 要高效地处理松散同步问题,需要更灵活的控制机制,而 MIMD 要高效地求解严格的同步问题,必须解决其同步开销过大的缺点^[7]。可见无论是 SIMD 还是 MIMD 都需要一定的改进才能处理对方适合求解的问题,市场上 SIMD 商用产品 DAP、CM-2^[8]的成功应用也有力地证明了这一观点。随着近几年 VLSI 技术的飞速发展,亚微米技术的应用,为 SIMD 的研究提供了工业基础的支持,推动了 SIMD 的研究,产生了 MIMD 与 SIMD 结构相结合的体系结构,被称为 MSIMD (Multiple SIMD),成功的产品就是目前公认的最快的商品化并行处理系统 CM-5。

SIMD 和 MIMD 是并行处理研究中两类有效的结构, SIMD 具有简单的优点, MIMD 具有灵活性高的优点。在 SIMD 经过一段较充分的研究及成功推出一系列 SIMD 计算机后,在求解实际问题时发现 SIMD 结构比较僵化(rigid),对一些非同步问题不能高效解决。于是注意力转移到 MIMD 结构,但在对 MIMD 的充分研究及求解实际问题后,又开始了重新评价两种结构的特点。

研究表明,在 MIMD 机上可以模拟 SIMD^[15],同样在 SIMD 上亦可模拟 MIMD 结构^[14],也就是说,两者可求解的问题范围是一致的,各自均可在对方结构上模拟实现,关键在于求解问题的效率。

要对两种结构进行客观的比较,就必须注意在应用问题、灵活性、同步、通讯、负载平衡和造价上进行全面的比较。MIMD 结构可以很好地实现控制并行,但也存在许多需要解决的问题,比如调试、负载平衡策略的研究等。真正控制并行的问题往往是异步求解问题,这类并行也不可能利用大量的处理器,因为随着处理器数增多,其调度的复杂性也就增大,变得难以驾驭,好在研究表明实际问题中可异步求解的只占 10%^[6]。

对于数据并行问题在实际中占大多数, Fox^[9]通过对目前 84 个较成功的并行应用程序的研究发现, 83% 使用的都是数据并行。SIMD 和 MIMD 都适合于求解数据并行问题,由于 SIMD 是一种严格同步执行机制,其能求解的问题有限,普遍将其做为专用计算机。这一观点在 SIMD 研究后期已被普遍接受。G.C. Fox^[9]近期的工作否定了这一普遍为研究者接受了的观点,通过对需要并行处理的实际问题的研究, Fox 指出其中 48% 是同步问题, 46% 是松散同步问题,剩下的是异步求解问题。对于同步数据并行,则适合于 SIMD,因为它没有同步开销并且可获得很高的加速比。对于松散同步的问题,则适合于 MIMD

求解, SIMD 要高效地解决松散同步必须扩展其控制灵活性,而 MIMD 要解决同步问题,同样需要加强其同步机制,并且在可利用的处理器数上也受到限制,因为处理器越多同步开销也就越大,在一定情况下有可能抵消增加处理器带来的效率。从程序设计及调试的角度来看 MIMD 程序设计比较复杂,设计者在程序设计中要考虑的因素较多,需要平衡各种因素的作用才可得到高效的程序^[17],已提出各种并行程序模型^[18],并且其调试环境也比较复杂。而 SIMD 的程序设计更符合现有的程序设计习惯,并且其调试环境可以借用现有的系统,这一点在 CM 机中可得到很好的证明。

由此可见 MIMD 与 SIMD 相比并不是具有以前想象的绝对优势,也存在着许多需要改进之处。

SIMD 要充分发挥其优势,也需要改变其操作比较僵化的特点,发展出 ASIMD^[17] (Autonomous SIMD) 结构,以便具有执行自主性,连结自主性,寻址自主性及 I/O 自主性^[17]。一些实际的系统如 CM-2, MP-1 等机器中逐渐具有上述的一个或几个功能。

目前对 SIMD 的研究还包括以下研究方向:

(1) 对 SIMD 模型的研究。在 Siegel^[19]提出的 (N, F, I, M) 四元组模型的基础上,又根据现代 SIMD 发展情况提出新的 SIMD 模型^[20],以此模型来把握众多的 SIMD 的结构特点,并且为结构上的扩展创新提供指导。

(2) SIMD 互连网络的研究^[9, 19, 21, 22, 23]。这种研究对 MIMD 的互连网络的研究也有指导意义,目的是为了提髙 SIMD 的 PE 间数据传输的灵活性和效率,以便使整机性能得到提高,在 ASIMD 中,连结自主性也属于这一研究方向。

(3) SIMD 程序设计的研宄,其中包括 SIMD 语言语义的研究^[24],以便设计出高效完整的 SIMD 语言。在现有高级语言上扩展语义后的语言预编译到串行机上模拟执行,为程序设计者提供程序的实践环境^[25]。再有是针对各种实际问题,设计高效的 SIMD 求解算法^[26, 27, 28],提高 SIMD 的应用水平,扩展其应用领域。还有是对 SIMD 语言中一些特殊关键的扩展语义的实现研究,比如程序中控制转移流的实现等^[29, 30],以便为 SIMD 的优化并行编译提供指导。

(4) SIMD 计算机性能评价的研究。作者的工作偏重于这方面,试图建立一个通用 SIMD 的性能评价平台,通过可用户自定义 SIMD 机器的一些结构特点,运行 SIMD 程序来得到对定义结构的有关性能参数进行分析。

综上所述,关于 SIMD 的研究正在由低谷开始回升,这一趋势从计算机并行处理方面较有权威的杂志和年会论文集上可见一斑。(参考文献共 30 篇略)