

Open-MP 与并行程序设计^{*})

陈 峻 陈宏建 秦 玲

(扬州大学信息工程学院计算机系 扬州225009)

Open-MP and Parallel Programming

CHEN Ling CHEN Hong-Jian QIN Ling

(Department of Computer Science, Yangzhou University, Yangzhou 225009)

Abstract The application programming interface Open-MP for the shared memory parallel computer system and its characteristics are illustrated. We also compare Open-MP with parallel programming tool MPI. To overcome the disadvantage of large overhead in Open-MP program, several optimization methods in Open-MP programming are presented to increase the efficiency of its execution.

Keywords Parallel processing, Shared memory system, Open-MP

1 引言

随着并行处理技术的发展,并行计算已日益成为现代科学与工程计算必不可少的工具。工作站机群(COW)以及大规模并行处理机(MPP)的发展与应用使得并行计算向高性能、可扩充、通用性发展。又因为并行程序设计是影响并行计算性能的重要因素,所以对并行程序设计的环境和工具的研究就显得越来越重要。在过去十年中,许多高校开设了有关并行处理的课程,而且其中重要的一部分是有关并行程序设计的内容。

当前在实际并行程序设计中所使用的并行程序设计语言,大都是对 FORTRAN 和 C 等传统的串行语言进行扩展而得到的。其中的一种扩展方法,是在程序设计语言中加入编译制导以指示程序并行执行,如共享存储的多处理机系统的应用程序接口 Open-MP,正是使用了这种方式。在90年代末出台的支持多平台的共享存储的应用程序接口(API)Open-MP 是一个可移植的、可扩充的并行编程工具,它可以给在共享存储结构上进行并行程序设计的人们一个简单、灵活的接口,以开发各种平台上的并行程序。共享存储的多处理机系统是一种重要的并行计算结构,已被普遍接受,在此上的有效的并行程序设计方式就显得十分重要。本文介绍 Open-MP 及其特点,并将它与 MPI 等并行编程工具进行了比较,提出了用 Open-MP 与 MPI 相结合进行程序设计教学的方法。

2 关于 Open-Mp

Open-MP 是由 DEC、Intel、IBM、SGI 等计算机软硬件联合支持的多平台共享存储应用程序接口(API)。Open-MP 是编译制导、库例程和为 Unix 与 Windows NT 平台提供环境变量等的集合。它已经在 Windows NT 环境以及所有主要的 Unix 环境下实现,可以在工作站、工作站网络和 SMP 系统上运行。Open-MP 提供 C 语言或 FORTRAN 的绑定,使得一个用标准的 Open-MP 编写的消息传递并行程序具有很

强的通用性。

Open-MP 支持 FORTRAN 以及 C、C++ 程序的绑定,为了使一般的 Fortran 以及 C、C++ 程序段并行以得到 Open-MP 程序,用户只需插入一些 Open-MP 的制导命令来告诉编译程序如何将串行程序并行化。以 FORTRAN 绑定为例,制导命令由! \$OMP 开头,从第一列开始,独立占有一行。

我们不妨通过一些简单的例子来说明 Open-MP 主要制导命令和 Open-MP 的主要特性。通常在一个程序中,最占时间的往往是循环结构,因此,Open-MP 通常对循环结构并行化,将其分成若干个线程来并行执行,这样会大大提高计算性能。下面是一个带有大量循环计算的 Open-MP 程序段。

```
! $OMP PARALLEL DO
do i=1,128
  b(i)=a(i)+c(i)
enddo
! $OMP END PARALLEL DO
```

第一个制导命令! \$OMP PARALLEL DO 指出下面的循环将被并行执行。第二个制导命令! \$OMP END PARALLEL DO 指出被并行执行部分的结束。这样将循环结构分解成若干个并行线程。隐含地,在每一个“! \$OMP END PARALLEL DO”的结尾有一个路障,以使所有线程在此等待其他的线程,然后同步地继续执行。也可以用制导命令! \$OMP END DO NOWAIT 来取消此路障。

在 Open-MP 中将一段程序并行化时,要将各次循环或不同程序段映射到线程中,从而决定处理机之间的工作划分,这就是所谓调度策略。编程中可以使用调度制导命令来实现不同的调度策略。在 Open-MP 中,有四种调度策略:静态调度策略、动态调度策略、引导调度策略和运行时调度策略。例如:

```
! $OMP PARALLEL DO SCHEDULE(STATIC,N)
是一个静态调度策略的制导命令,将固定大小 N 的循环块放入一个线程之中。又如:
```

```
! $OMP PARALLEL DO SCHEDULE(DYNAMIC,N)
也是一个静态调度策略的制导命令,在有足够的 CPU 时,将
```

^{*}) 本课题得到国家自然科学基金(批准号60074013)、国家高性能计算基金(批准号00219)、江苏省教育厅自然科学基金和南京大学软件新技术国家重点实验室开放基金的资助。陈 峻 教授,主要研究方向为算法设计和并行计算。陈宏建 讲师,硕士研究生,主要研究方向为系统优化,软件工程。秦 玲 硕士研究生,主要研究方向为算法设计和并行计算。

固定大小 N 的循环块放入一个线程之中。

Open-MP 的另一种重要的制导命令是共享变量制导命令,此制导命令决定变量是否被共享。变量可以定义为共享和非共享两种。共享变量可以被所有的处理机所访问,而非共享变量只能被它所在的处理机所访问。例如在下段程序中,

```
! $OMP PARALLEL DO SHARED (A,B,C,N) PRIVATE (I,
TEMP)
do I=1,N
TEMP=A(I)/B(I)
C(I)=TEMP+1.0/TEMP
enddo
! $OMP END PARALLEL DO
```

程序段中第一个制导命令指出 A、B、C 和 N 都是共享变量,可以被所有处理机所访问,而循环变量 I 是非共享变量,只能被它所在处理机所访问。变量 TEMP 也定义为非共享变量,这是因为,如果 TEMP 为共享变量的话,由于多个处理机要向同一个存储地址写入,TEMP 的结果值将是不定的。

还有一种重要的制导命令是归约制导命令,此命令的一般形式为:REDUCTION(op:variable),它定义一个可用作归约操作结果的变量 variable,这里 op 为一个操作或运算,如 +、×、max 等。变量 variable 在每个处理机中有局部的值,在并行计算结束后,该变量所有的局部的值由操作 op 归约为它的结果值存于主处理机中。例如:下面是一个求全局和 ASUM 与求全局积 APROD 的例子。

```
ASUM=0.0
APROD=1.0
! $OMP PARALLEL DO REDUCTION(+:ASUM)
REDUCTION(*:APROD)
do j=1,n
ASUM=ASUM+A(I)
APROD=APROD*A(I)
enddo
! $OMP END PARALLEL DO
```

每个处理机都有变量 ASUM 和 APROD 的局部值,在并行计算结束后,它们的局部值分别由 +、× 操作归约为它们的结果值存于主处理机的 ASUM 和 APROD 中。

相对于其他并行编程工具,Open-MP 有如下一些优点:

(1)它具有编程的简易性。用户仅需在串行程序中加入一些制导即可,这些制导可以告诉编译系统如何将代码并行化,而用户无需了解其并行执行构成的细节。(2)当在单机上运行时,所插入的制导可以看成是注释语句,因此单机上的运行结果可以看成是串行或并行的运行结果。这样,运行结果的正确性容易被验证,降低了代码的调试、维护成本。(3)可以在各种平台之间移植,如 Windows NT、Unix 等等。(4)能灵活地支持粗粒度并行性。由于 Open-MP 的这些优点,使得它越来越被重视,是一种很有前途的并行编程工具。

3 Open-MP 和其他并行编程工具

目前有四种主要的并行编程工具:HPF、Open-MP、PVM 和 MPI。

HPF 依赖先进的编译手段来预测和发掘数据并行程序,虽然它以 Fortran 为基础,但它是一种全新的语言,需要开发专门的编译程序。这就使得它在很大程度上依赖于硬件结构,因而 HPF 在通用性和效率方面尚有严格的限制。HPF 不支持开拓控制并行,不适合于支持异步迭代、流水线式的计算,基于数据库的应用也比较困难。此外,HPF 是设计来用于表达数据并行程序的,因而,它不适宜处理不规则数据结构。

PVM 系统使用消息传递模式,它的一个关键性概念就是将许多计算机群集起来并看成是一个完整的大型虚拟计算机系统,这也是它称为并行虚拟机(PVM)的原因。PVM 计算模

型具有简单、通用的性质,适用于许多类型的程序结构。PVM 包括监控进程和例程库,监控进程提供系统调用的接口,实现进程的控制、通讯和错误检测;例程库提供并行所需的例程,包括创建、结束任务、任务间的通讯与同步、数据的缓冲及传输等。

MPI 也是一个用于开发基于消息传递的并行程序的消息传递接口,具有可移植性和易用性,有完备的异步通信功能。MPI 提供了与 C 和 FORTRAN 语言的绑定,可以做到与操作系统或硬件的特性无关,它在消息数据类型、通信体、通信操作、虚拟拓扑等概念的基础上提供了强大的功能,已经在 Windows 环境以及所有主要的 Unix 工作站以及所有主要的并行机上实现,具有很强的通用性。

在共享存储的环境下的并行程序设计一般比分布式存储环境下容易一些,然而,在分布式存储的环境下的并行程序设计往往具有更高的效率。这有点象汇编语言与高级程序设计语言之间的关系。汇编语言程序往往更精炼且具有较高的运行速度,常应用于实时系统中,这些系统存储空间较小,要求的反应速度快,但编程的人力消耗不是主要考虑的因素。此外,汇编语言对学生理解计算机组成、计算机算术运算、机器代码、编址、指令周期中的一些基本概念十分有益。而当我们编程解决一个较大的复杂问题时,就需要象 C、C++ 或 Java 等高级语言。类似地,在并行编程领域,MPI、PVM 等需要编程者安排通讯、同步、存贮分配等细节,类似于低级语言;而 Open-MP 掩盖了这些细节,给编程者以极大的方便,类似于高级语言。学生们可以通过学习 MPI、PVM 等低级语言来理解如可扩充性、广播、一对一通信、性能分析、通信的额外开销、加速比等有关并行处理的概念及其实际应用。而在类似于 Open-MP 和 HPF 等高级语言中,由于这些概念以及实现细节被语言所掩盖,学生很难从中理解它们,可以在较短的时里掌握用高级语言的编程技巧,编程解决较大的实际并行计算问题。

由于并行程序设计人员的缺乏以及并行程序设计工作量的增加,未来并行程序设计在很大程度上要依靠如 Open-MP 等高级并行程序设计语言。推广高级并行程序设计语言是普及并行计算机应用、使非计算机专业工作者也能应用并行计算机的一个重要途径。因此,在并行处理的有关课程中讲授高级程度设计语言与使用消息传递机制的低级语言都是十分必要的。

4 并行程序设计语言的教学

在并行程序设计语言的教学,可以采取高、低级语言相结合的策略:使用低级语言教会学生并行计算的基本知识,诸如可扩充性、广播、一对一通信、性能、通讯的额外开销、加速比等等;另一方面,使用高级语言教会学生另一些概念,如各种调度策略,任务并行等等。由于 MPI 以及 Open-MP 是最广泛使用的低级和高级语言,选择它们作为并行程序设计语言来教学是比较适合的。

Open-MP 简单易学,可以使学生在较短时间里对许多实际应用问题进行并行编程。学生还可以在短期内对不同的调度方式进行实验,诸如静态、动态循环调度方式等,这在 MPI 中是无法实现的。使用 Open-MP 还有一个好处,就是它可以通过插入几个制导语句来容易地实现任务级并行。通过循环并行与任务并行相结合,可以获得较高的性能和较好的可扩性,而这在 MPI、HPF 中是难以实现的。

然而,Open-MP 也有一些缺陷。由于 Open-MP 是一个高级并行程序设计语言,许多细节上的东西对用户来讲是不知道的。尽管学生可以很快地学习此语言,在学习一些基本技术后就可以进行编程,但另一方面,学生看不到并行程序中的通讯等底层操作细节。因为 Open-MP 是在共享存储处理机上的,它不提供有关对数组以及其它数据结构的存储分配的方案。这样,虽然使学生摆脱复杂的存储分配工作,集中精力考虑循环以及任务的并行,编程较容易,却在另一方面给学生带来了不了解在分布式存储环境中常用的一些存储分配方案细节的烦恼。

因 Open-MP 的上述缺陷,学生们不能通过学习 Open-MP 掌握并行程序设计的全貌。一个有效的解决此矛盾的方法是:使用典型的 MPI 程序作为对 Open-MP 的一种详细注解,使用一些简单的 MPI 编程作为对学习 Open-MP 的补充,然后学生使用 Open-MP 中的各种高度策略以及复杂的并行模式进行编程实践。用这样的方法,学生可以在较短时间里实践各种编程模式及技巧,这对于仅使用 MPI 或 PVM 的教学方法而言,是很难达到的,这是因为用 MPI 或 PVM 编写大型并行程序工作量十分大。

可以让学生首先在分布式存储环境下通过学习 MPI 来学习一些基本的编程知识,然后开始用简单的 MPI 结构,如

MPI-Bcast、MPI-Reduce、MPI-Send 以及 MPI-Recv 来将串行程序并行化,经过几个小的编程实践,他们可以学习一对一通信、多重广泛、广泛、归纳、同步以及并发等概念,且熟练地应用相关操作。此后,让学生开始使用 Open-MP 并行编程,让他们学会使用 Open-MP 中的四种调度方案,学会各种制导命令的使用,并会分析程序执行的性能要求,学会选择较优的调度策略。最后可要求学生将一个实用的、较大的串行程序用 Open-MP 并行化,使学生掌握如何将一个串行程序并行化,并能将学到的并行处理知识应用到实际问题之中,真正解决实际问题。

参考文献

(上接第90页)

化为只考虑弧的容量有限的传统的多信息流情形^[11]了,而且本文中重新定义的最小路径与最小路径的传统定义就一致了。

4. 在单信息流情况下显然有

$$\Pr\{W(X) \geq d\} = 1 - \Pr\{X | W(X) \leq d-1\}$$

但是这个结果不能扩展到多信息流(即只考虑弧的容量有限)的情况。

参考文献

- 1 Lee S H. Performance Indexes of a Telecommunication network. IEEE Trans. Reliability, 1980, R-29: 24~26
- 2 Abraham J A. An Improved Algorithm for Network Reliability. IEEE Trans. Reliability, 1979, 28: 58~61
- 3 Aggarwal K K, Chopra Y C, Bajwa J S. Capacity Consideration in Reliability Analysis of Communication System. IEEE Trans. Reliability, 1982, 31: 177~180
- 4 Trstensky D, Bowron P. An Alternative Index for the Reliability of Telecommunication Networks. IEEE Trans. Reliability, 1985, R-34: 329~337
- 5 Aggarwal K K, Gupta J S, Misbra K B. A simple Method for Reliability Evaluation of a Communication System. IEEE Trans. Communications, 1975, COM-23: 563~566
- 6 Xue J. On Multistate System Analysis. IEE Trans. Reliability, 1985, R-34: 329~337

- 1 Chandra R, Menon R, Dagum L, et al. Parallel Programming in Open-MP, Morgan Kaufman Publishers, Oct. 2000
- 2 Hwang K, Xu Ziwei. Scalable parallel computing: Technology, Architecture, Programming, WCB/McGraw-Hill Co. 1998
- 3 MPI Forum, MPI: A message passing interface. In: Proc. of Supercomputing' 93. IEEE Computer Society, 1993. 878~883
- 4 Wilkinson B, Allen M. Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers, Prentice Hall Inc. 1999
- 5 陈国良. 并行计算: 结构、算法、编程. 北京: 高等教育出版社, 1999
- 7 Lin J S, Jane C C, Yuan J. On Reliability Evaluation of a Capacitated-Flow Network in Terms of Minimal Pathsets. Network, 1995, 25: 131~138
- 8 Lin Y K. A Simple Algorithm for Reliability Evaluation of a Stochastic-Flow Network with Node Failure. Computers & Operations Research, 2001, 28: 1277~1285
- 9 Jane C C, Lin J S, Yuan J. Reliability Evaluation of a Limited-Flow Network in Terms of Minimal Cutsets. IEEE Trans. Reliability, 1993, 42(3): 354~361
- 10 Lin Y K. On Reliability Evaluation of a Stochastic-Flow Network in Terms of minimal Cuts. J. Chinese Institute of Industrial Engineers, 2001, 18(3): 49~54
- 11 Lin Y K. Study on the Multicommodity Reliability of a Capacitated-Flow Network. Computer and Maths. Appl., 2001, 42: 255~264
- 12 Lin Y K. Study on the Performance Index for a Multicommodity Stochastic-Flow Network. J Chinese Ins. Industrial Engineers, 2002, 19(3): 42~48
- 13 Lin Y K. Study on the Multicommodity Reliability of a Capacitated-Flow Network. Computer and Maths. Appl., 2001, 42: 255~264
- 14 Lin Y K. Study on the Performance Index for a Multicommodity Stochastic-Flow Network. J Chinese Ins. Industrial Engineers, 2002, 19(3): 42~48
- 15 孙伟平, 周敬利, 余胜生. 流网络可靠度的计算算法综述. 计算机科学, 已录用