

基于可重构体系的多机器人共享模块剩余能力估计

钱 徽, 吴春明, 朱淼良
(浙江大学计算机学院, 浙江杭州 310027)

摘 要: 本文首先介绍了支持可重构体系的扩展 Robix 通信环境. 在这个通信环境的基础上, 提出了一种类 pathChirp 的多机器人共享模块剩余能力估计方法. 该方法根据一组诊断数据流的排队延迟情况, 分析由共享模块构成的整个路径的剩余能力. 实验结果表明, 该方法稳定可靠, 适合多机器人体系结构验证和多机器人任务调度等应用.

关键词: 多机器人系统; 可重构体系; 剩余能力估计

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 11-1969-04

Available Capacity Estimation for Shared Computing Resource in Multi-Robot System

QIAN Hui, WU Chunming, ZHU Miaoliang
(College of CS, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A communication environment for multi-robot system, ERobix, is introduced to support the redeployable architecture. Based on this communication environment, a method of available capacity estimation for shared computing resource in multi-robot system is proposed. This method exploits the queuing delay information of a set of data units dispatched with the increasing time spacing to estimate the available computing capacity. The result of experiment shows that this method is stable and reliable for architecture validation or task scheduling of multi-robot system.

Key words: multi-robot system; redeployable architecture; available capacity estimation

1 引言

多机器人系统(Multi-Robot System, MRS)是当前机器人研究领域的热点, 包括基于仿生学的机器人群研究、多机器人通信、多机器人体系结构和任务分配、多机器人定位和映射、对象传输和操纵、多机器人运动协调、结构变形机器人等多个方向^[1]. 多机器人通信作为其中的一个重要问题得到了广泛的关注^[2~4].

多机器人通信一般被认为有两种形式: 隐含的通信^[2]和显式的通信^[3]. 研究表明, 在一般的情况下, 即使只有少量的显式通信也能极大提高机器人群任务完成的能力^[4]. 多机器人显式通信的本质是在多机器人之间有意识地共享对外部环境的认知和认知能力, 一般分为两个层次:

(1) 信息共享, 主要指多机器人间互相传递对外部环境的感知结果;

(2) 能力共享, 主要指多机器人间互相提供计算资源进行联合计算.

兼具上述两个层次通信功能的多机器人系统首先要求通信基础结构鲁棒、高效, 以满足信息共享和能力共享的基本要

求; 其次, 该系统须要单机器人在体系结构上提供共享模块, 遵守能力共享的连接协议, 提供系统的可重构能力; 最后, 在更高的层面上, 该系统须要维护多机器人之间信息共享的因果关系(Causal Order). 因此, 对此类系统的体系结构的仿真测试和故障诊断也集中: (1) 对底层通信结构的测试; (2) 对共享模块的剩余能力测试和单机器人时序测试; (3) 对多机器人的因果序测试三个层面上. 其中, 针对共享模块的剩余能力测试还给上述多机器人系统的任务调度提供了直接的量化依据, 具有重要意义.

本文将在第 2 节介绍支持可重构体系的扩展 Robix 通信环境^[5,6]. 针对扩展 Robix 通信环境, 本文在第 3 节提出一种共享模块的剩余能力估计方法. 该方法通过对多个序列的诊断数据流的分析, 得到重构的体系结构中的共享模块的剩余能力. 该方法对多机器人仿真测试和多机器人的任务调度都具有重要意义.

2 支持可重构体系的扩展 ROBIX 通信环境

可重构机器人本质上提出了一种分布式资源的概念^[7]. 这些资源包括: (1) 传感器, 包括视觉传感器, 深度传感器, 位

置传感器等;(2)处理器,包括融合模块,状态估计模块(推理模块),映射模块,规划和导航控制模块等,属于计算资源;(3)效应器,又称为受动器,包括机电模块,夹具控制模块,移动平台控制模块等。

一般的单体机器人系统并不对这三种资源进行划分,所有传感器,处理器和效应器集成在一起,物理上始终属于这个单体机器人系统。而可重构体系结构区分这些资源,定义了资源调用的接口,提供显式的服务,并包含了一系列局部和远程的连接选择。在可重构体系结构中,传感器和效应器可以始终属于一个单体机器人系统,而作为计算资源的处理器,虽然物理载体可能属于某一个单体的机器人系统,但是仍然可以接受再分配。这些计算资源被包装为独立的模块,和其他物理实体上的传感器和效应器材重新配置成一个虚拟的机器人,或者被多个机器人共用。图1是一个典型的划分了资源类型的机器人体系结构。

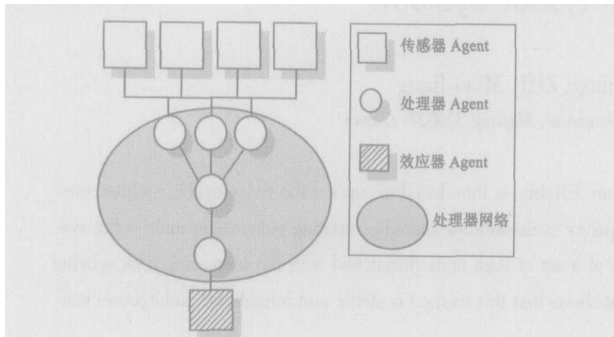


图1 可重构机器人的单体结构

可重构体系结构包含三个基本元素是:(1)一组资源,包括传感器,处理器和效应器;(2)一个名字和目录服务器,用来快速查找资源的地址信息;(3)一个构造定义,规定拓扑和模块的连接准则。一个典型的可重构造体系的多机器人模型要求每个资源向名字和目录服务器登记。当一个配置开始初始化,这个配置使用名字和目录服务来定位模块,从而完成连接准备。在一个复杂系统中,名字服务器还可以提供访问控制和

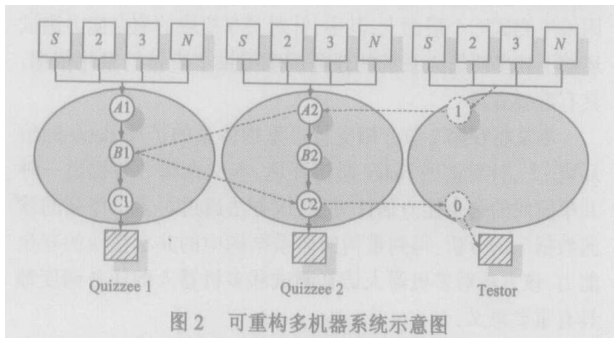


图2 可重构多机器人系统示意图

资源监视。图2是一个进行完配置初始化后的多机器人系统。其中,箭头表示数据流;实线表明数据在本地机器人系统中流动,虚线表明数据连接到远程机器人上。其中,第三个机器人系统和第一个机器人系统共用了模块 B_1 , 和第二个机器人系统共用了模块 A_2 和 C_2 。第一个机器人系统的处理器序列为 $[A_1, B_1, C_1]$; 第二个机器人系统的处理序列为 $[A_2, B_2, C_2]$; 第二个机器人系统的处理序列为 $[A_2, B_1, C_2]$ 。第三个机器人

系统中的 I 和 O 模块负责送出数据和接收数据。图2中的 S , 2, 3 和 N 模块分别为立体视觉模块 ST , 二维模块 $2D$, 三维模块 $3D$ 和夜视模块 NV 。

本文中,我们采用扩展的 Robix 通信环境(ERobix)来支持可重构体系结构要求。Robix 通信环境是一个消息传递的支持平台^[5,6]。在 Robix 通信环境中,上述资源被认为是智能体。Robix 通信环境完成智能体之间透明的消息交换。Robix 通信环境的本质上是基于 TCP/IP 协议连接所有智能体。在每一台计算机上,Robix 通过一对接收智能体和发送智能体完成数据传输,同时提供应用层接口实现其他智能体的消息传递请求。Robix 把机器人系统中的所有计算机集成为一个多计算机平行处理连通域。智能体不必关心其在连通域中的物理位置,只要知道智能体的名字就能自由通信、共享资源和接受统一调度。Robix 通信环境的体系结构如图3所示。

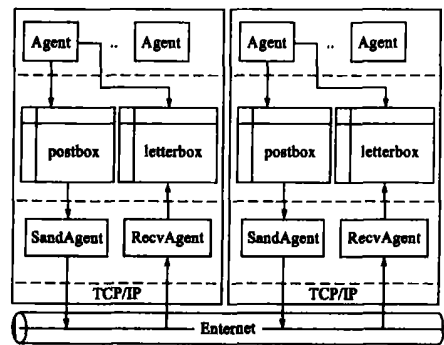


图3 Robix通信环境体系结构示意图

因此,原理上 Robix 通信环境提供了对资源(智能体)的管理,提供了单体机器人系统的名字服务。ERobix 对 Robix 的扩展主要体现在两个方面。首先,ERobix 扩展应用层协议,对每一个单元的处理提供处理器路径表。原有的 Robix 通信环境中,目的地址的选择由每个处理器 Agent 决定,在扩展的 Robix 通信环境中,处理器 Agent 检查应用层协议头中的处理器路径表,查表决定下一个处理器的名字。这样在如图2中的第三个机器人的 I 模块就可以在远程连接中决定整个处理的路径。其次,ERobix 把名字服务扩展到多机器人体系结构,支持多个单体机器人系统的连通域。采用层次化的名字和目录服务。每个单体机器人分别在不同的目录项中;同时,执行不同任务的机器人可以分组编在不同子目录中。图4(a)是一个自主式移动多机器人系统(Autonomous Mobile Multi Robot System, AMMRS)。该系统的每一个单体机器人都是一个集环境感知、规划决策、自动行驶等多种功能于一体的复杂平台,需要在各种复杂的道路状况下做出正确决策,实现道路跟踪、避障、越野等功能。图4(b)是机器人 D 的处理器路径表;图4(c)是机器人 B 的名字和目录树。

3 共享模块的剩余能力检测方法

ERobix 通信环境支持的处理器网络实质上是一种存储转发网络。每个智能体收到来自其他智能体的数据,处理这个数据,将输出发给下一个智能体。数据从传感器智能体产生,历经多级融合、规划和导航控制智能体,最后形成驾驶指令,形

成一个处理路径. 对于可重构体系来说, 每一个不同的配置可能导致一条新的具有不同能力的处理路径. 因此, 整个处理器网络可以类比为存储转发的路由网络.

受到网络通信领域对可用带宽的估计算法的启发^[8~10], 本文试图构造一种主动的共享模块的剩余能力检测方法. 首先, 剩余能力可以定义为:

$$C_R[t - \tau, t] = \min_i \left[C_i - \frac{A_i[t - \tau, t] p_i}{\tau} \right]$$

这个定义和 Ribeiro 等提出的 pathChirp 方法的定义基本一致^[8], 唯一的差别在于剩余能力的定义在 pathChirp 中是每个单位时间中通过的字节数量, 而在本文中的定义是每单位时间的消息处理数量. 其中 $C_R[a, b]$ 表示在时段 $[a, b]$ 的剩余能力; C_i 表示智能体 i 的消息处理能力; $A_i[a, b]$ 表示智能体 i 在时段 $[a, b]$ 中处理的消息数量; p_i 表示消息到达智能体 i 的最小时间. 例如对于如图 4 所示的智能体 Combatant. C. A2 每秒钟可以处理 20 个消息, 但是当前本地的传感器每秒钟发送给该智能体 2 个消息, 则此时可以提供给 Combatant. D. I 剩余的处理能力.

直觉上看, 如果我们选定一条测试路径, 以一定的速率 R 发送数据消息, 则假定 $R > C_R[t - \tau, t]$ 将使整个路径的消息处理发生延迟, 反之则不会发生消息处理延迟. 因此, 如果, 我们构造一个消息发送队列, 精心设定发送速率, 就可以从输出结果中观察到实际的剩余能力.

定义消息队列为的 M_1, M_2, \dots, M_{2N} , 消息 M_k 和消息 M_{k+1} 之间的间隔为 Δ_k , 定义如式(1)所示. 这样定义的好处是把相等的间隔维持两次.

$$\Delta_k = T \gamma^{N-1-k/2}$$

测试的基本步骤是首先由测试机器人系统的智能体 Combatant. Test. I 发送消息队列, 测试消息到达接受智能体 Combatant. Test. O, 记录到达的时间 $t_{k,e}^{(m)}$. 其中, 上标表示试验的序号. 设定排队延迟为 $q_k^{(m)}$, 则容易得到:

$$q_L^{(m)} - q_U^{(m)} = (t_{L,e}^{(m)} - t_{U,e}^{(m)}) - (t_{L,s}^{(m)} - t_{U,s}^{(m)}) \quad (1)$$

其中, $t_{k,s}^{(m)}$ 为第 k 个消息发送的时间. 式(1)的价值在于: 由于无法同步发送智能体和接收智能体所在的计算机的时钟, 我们无法得到准确的延迟时间, 但是可以得到准确的延迟时间差. 后续的处理都可以转化为使用延迟时间差来代替使用准确的延迟时间.

一般来说, 记录得到的延迟应该为如图 5 所表示的模式. 延迟为零说明路径可以顺利地处理, 对估计路径的剩余能力来说, 不能起到作用. 延迟变大一般有两种情况, 一种情况是先变大, 然后又回归为零, 形成有界的延迟漂移段; 另外一种情况是一直保持变大, 直到所有测试消息全部被处理, 形成无界的延迟漂移段(显然, 无界延迟漂移段最多只有一个). 前一种情况一般是由于突发数据流造成的暂时阻塞, 实际上发送速度并没有超过处理路径上的瓶颈处理能力.

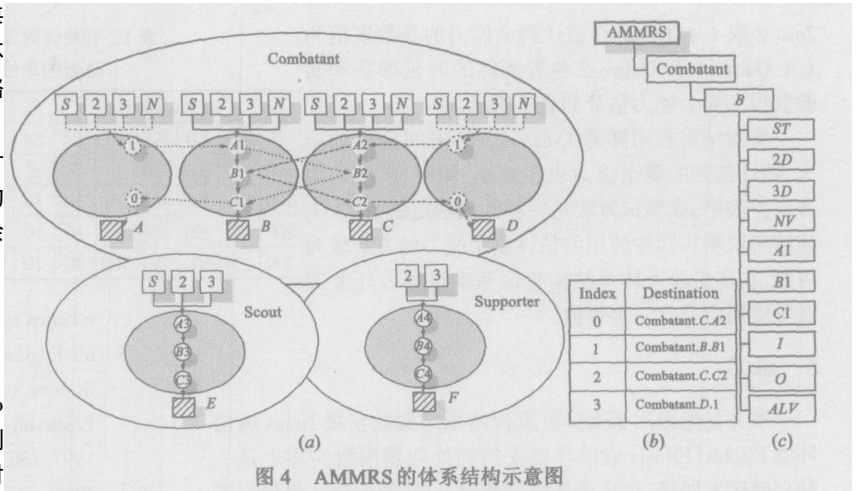


图 4 AMMRS 的体系结构示意图

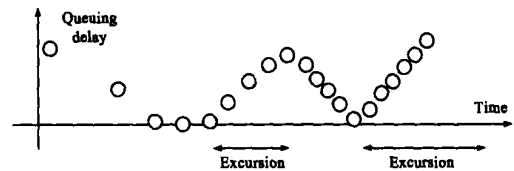


图 5 延迟模式示意图

由于, 对路径剩余能力的估计建立在对延迟变大情况的分析之上, 因此首先必须把延迟漂移段从得到的延迟序列中分割出来. 分割方法沿用 pathChirp 的方法: 在延迟序列中找到延迟开始变大的位置 i 作为延迟漂移段的开始位置. 满足式(2)的第一个位置 j 为延迟漂移段的结束位置. 式(2)使用了式(1)定义的延迟时间差.

$$q_j^{(m)} - q_i^{(m)} < \frac{\max_{i \leq k \leq j} [q_k^{(m)} - q_i^{(m)}]}{F} \quad (2)$$

在获得延迟漂移段的基础上, 我们来估计从每个消息时延迟中获得的剩余能力 $E_k^{(m)}$. 首先, 如果第 k 个延迟属于有界的延迟漂移段, 并且 $q_k^{(m)} \leq q_{k+1}^{(m)}$, 则 $E_k^{(m)} = 1/\Delta_k$; 如果第 k 个延迟属于无界的延迟漂移段, 则 $E_k^{(m)} = 1/\Delta_l, \forall k > 1$; 其他的情况都保持为 $E_k^{(m)} = 1/\Delta_l, \forall k > l$, l 是无界的延迟漂移段的第一个消息的序号. 上述对 $E_k^{(m)}$ 的估计方法基本等同于 Ribeiro 等提出的用于互网络可用带宽检测的 pathChirp 方法^[8].

得到 $E_k^{(m)}$ 可以计算第 m 次实验的路径剩余能力, 如式(3)所示. 多次实验统计 $D^{(m)}$ 得到最终的 $C_R(t - \tau, t)$.

$$D^{(m)} = \sum_{k=1}^{2N-1} E_k^{(m)} \Delta_k \setminus \sum_{k=1}^{2N-1} \Delta_k \quad (3)$$

4 实验结果

用作实验的多机器人系统如图 2 所表示. 其中机器人 Testor 的智能体 Testor. I 发送测试消息给路径/ Quizee2. A2, Quizee1. B1, Quizee2. C2, Testor. O]. 机器人 Quizee1 和 Quizee2 自身要完成消息的处理, 处理路径分别为 [Quizee1. A1, Quizee1. B1, Quizee1. C1] 和 [Quizee2. A2, Quizee2. B2, Quizee2. C2]. 其中 Testor. I 发送测试消息的 N 取 25, T 取

2ms, γ 取 1.4. Testor. O 估计剩余能力的参数取值为 1.5. Quizzeel 和 Quizzee2 各智能体的时延参数和实验获得的剩余能力估计如表 1 所示.

实验结果表明随着 Quizzee2. A2 时间延迟的增大, 估计得到的剩余能力也在变小. 同时, 实验的均方误差表明, 该测试方法是一种性能稳定的方法. 上述结果说明实验中使用的估计剩余能力的方法较为可靠, 在多机器人体系结构验证和多机器人任务调度等应用中具有一定价值.

5 总结

本文首先提出了支持可重构体系结构的扩展 Robix 通信环境 ERobix. ERobix 通信环境支持的处理器网络实质上是一种存储转发网络. 在这个环境的基础上, 我们根据一组规定发送速率的消息的排队延迟情况, 可以分析得到由共享模块构成的整个路径的剩余能力. 这个方法源自互联网可用带宽检测算法 pathChirp. 实验结果表明, 这个方法稳定可靠, 适合给多机器人体系结构验证和多机器人任务调度等应用提供量化根据.

参考文献:

[1] Tamio A, et al. Editorial: Advances in multi robot systems [J]. IEEE Trans, 2002, RA- 18(5) : 655- 611.

[2] Pagello E, et al. Cooperative behaviors in multi robot systems through implicit communication[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29(1) : 65- 77.

[3] MacLennan B. Synthetic ethology: An approach to the study of communication[A]. Christopher G Langton, Charles Taylor, J Doyne Farmer, Steen Rasmussen. 1991 2nd interdisciplinary workshop on synthesis and simulation of living systems proceedings[C]. Redwood City, CA: Addison Wesley, 1991. 631 - 658.

[4] Balch T R, Arkin R C. Communication in reactive multiagent robotic systems[J]. Autonomous Robots, 1994, 1(1) : 1- 25.

[5] 吴春明, 张友军, 朱森良. 分布式自主移动机器人集成环境[J]. 软件学报, 1997, 8(10) : 793- 797.

[6] 朱森良, 张新晖, 吴春明, 钱徽. 自主机器人自组织结构 IRASO 的仿真研究[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(17) : 776- 782.

[7] G T McKee G T, Brookds B. Resource management for networked

表 1 智能体时延参数选择和剩余能力估计表(时间延迟的单位为毫秒, 剩余能力的单位为次/秒)

Quizzeel							Quizzee2							实验 次数	C_R	MSE
ST	$2D$	$3D$	NV	$A1$	$B1$	$C1$	ST	$2D$	$3D$	NV	$A2$	$B2$	$C2$			
200	120	200	250	8	5	5	200	120	200	250	8	5	5	50	95	0.04
200	120	200	250	20	10	10	200	120	200	250	20	10	10	50	39	0.02
200	120	200	250	50	10	10	200	120	200	250	50	10	10	50	9	0.01
200	120	200	250	100	10	10	200	120	200	250	100	10	10	50	3	0.01

robotics systems[A]. 1997 Institute of Electrical & Electronics Enginee 7th IEEE/RSJ Intl Conf on Intelligent Robots and Systems proceedings[C]. Grenoble, France: IEEE Industrial Electronics & IEEE Robotics and Automation Societies, 1997. 1363- 1368.

[8] Ribeiro V, et al. PathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths[DB/ OL]. <http://cmc.rice.edu/docs/docs/Rib2003Apr5pathChirp.pdf>, 2003- 04- 01.

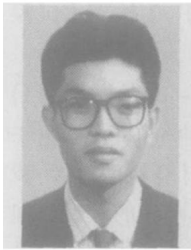
[9] Jain M, et al. End to end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput[J]. IEEE Trans, 2003, Netw- 11(4) : 537- 549.

[10] Melander B, et al. A new end to end probing and analysis method for estimating bandwidth bottlenecks[DB/ OL]. www.sics.se/cna/connected/conr_globecom.ps. 2000- 11- 01.

作者简介:



钱 徽 男, 1974 年生于浙江金华, 2002 年获浙江大学计算机学院博士学位, 现为浙江大学计算机学院讲师, 主要研究方向为智能机器人、图像处理.



吴春明 男, 1967 年生于浙江萧山, 博士, 浙江大学计算机学院副教授, 主要从事人工智能、智能机器人技术及计算机网络等领域方向的科学研究工作. E-mail: wuchunming@cs.zju.edu.cn.