

嵌入分布式系统中的多节点自适应重构

张凯龙^{1,2}, 梁克^{1,2}, 周兴社^{1,2}, 杨志义^{1,2}

(1. 西北工业大学计算机学院, 西安 710072; 2. 陕西省嵌入式系统技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: 结合多 UAV、传感器网络等嵌入分布式系统的自适应计算需求, 分析嵌入分布式系统中节点间相似度的表示机制与相似度的计算方法。提出嵌入分布式系统中相似节点的自动发现机制以及相似节点上的任务自动部署方法。结合“感知→评估→调整→感知”的自适应计算思想, 研究任务/节点失效时的可适度降级分布重构技术。该方法对于提高嵌入分布式系统的自适应计算与容错能力有一定的应用价值。
关键词: 嵌入分布式系统; 相似节点; 自适应; 部署; 重构

Adaptive Reconfiguration Among Multi-nodes in Distributed Embedded System

ZHANG Kai-long^{1,2}, LIANG Ke^{1,2}, ZHOU Xing-she^{1,2}, YANG Zhi-yi^{1,2}

(1. School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Embedded System Technology, Xi'an 710072)

【Abstract】 According to the requirement for adaptability in distributed embedded system such as UAVs, wireless sensor network and so on, some common methods are proposed to define similar nodes, compute their similarity degree, discover similar nodes and deploy the other's tasks on them automatically. Based on the adaptive computing thoughts of "sensing → evaluating → adjusting → sensing", some reconfiguration ways for fault nodes and tasks are studied. The methods are more efficient to improve the adaptability of distributed embedded systems, in which some nodes are similar.

【Key words】 embedded distributed system; similar node; adaptive; deployment; reconfiguration

1 概述

对于环境状态不可预知的嵌入分布式应用, 如无线传感器网络、多 UAV 等, 其面临的一个挑战就是如何有效处理外界环境中各种不可预知的事件, 以提高该类系统对动态环境的自适应能力。可动态重构系统(或自适应系统^[1])技术可以在一定程度上保证应用系统的容错、自治以及对环境变化的适应性。该类系统可以通过“感知→评估→调整(结构或功能)→感知”的方法实现对环境的感知和对自身行为的动态调整^[1]。相关的研究工作主要包括自适应理论模型研究^[1-2]、自适应系统体系结构研究^[2-5]、自适应任务管理、应用设计方法研究^[5-6]等。文献[2]按目标将自适应系统分为功能型自适应系统^[7]和故障型自适应系统^[5]。文献[2]还按运行时的适应能力将技术分为自适应节点映射技术(功能迁移)、自适应协作技术(功能替代)和自适应功能技术(功能改变)等。

自适应节点映射是嵌入分布式自适应系统中研究的一个重要问题, 其实现需要特殊的软件框架和硬件方案来解决^[2]。在实际设计中, 自适应系统可采用非自适应方法实现, 非自适应系统也可采用自适应方法实现^[1]。本文基于现有技术, 结合嵌入分布式系统整体运行目标及性能可适度降级原则, 研究了一种基于相似节点自发现的自适应重构技术。

2 相似节点及其相似度的定义

节点或模块间实现功能映射的关键在于两者间相似的程度, 当且仅当 2 个节点相似时才能实现任务的迁移。

定义 1 节点 $n = \langle nid, nhs, nts, np, nps, nmaxps, nrs \rangle$ 。其中, nid 是计算节点的唯一性标识; nhs 是节点自身所拥有资

源及可使用外部资源的集合; nts 为节点中所部署任务的集合; np 表示该节点在分布系统中的权重; nps 是节点当前的负载状态, 由节点上特定的任务收集; $nmaxps$ 是节点的最大负载门限; nrs 是与本节点相似的节点的集合, 初值为 null。

定义 2 节点中的计算任务 $t = \langle tid, nid, ths, tp, trs, ts \rangle$ 。其中, tid 是该任务的标识; nid 是任务所在节点标识; ths 为任务运行所需资源, 包括节点运行资源、通信资源及操作的外设等; tp 是任务权重; trs 是本任务冗余任务集合, 每个元素由二元组 $\langle tid, nid \rangle$ 表示以说明该备份任务被部署在哪个节点; ts 是该任务当前的运行状态。

基于上述定义, 嵌入分布式系统可由节点以及节点间的关系来描述。这种描述有助于提高节点对自身任务的管理能力、运行状态的感知能力以及故障的定位与恢复能力等。为实现节点映射, 进一步给出相似节点定义及节点间相似度的计算方法。

定义 3 若 n_m 具有 n_k 上任务 t 运行所需的资源, 即 $t(ths) \subseteq n_k(nhs)$ 且 $t(ths) \subseteq n_m(nhs)$ 时, 则称 n_m 为 n_k 的相似节点。 n_k 和 n_m 的相似度 $s(n_k, n_m)$ 可由式(1)计算。

$$s(n_k, n_m) = \sum_{t=1}^r \left[\frac{|t_i(ths) \cap n_m(nhs)|}{|t_i(ths)|} \right] \quad (1)$$

基金项目: 国家“十一五”预研基金资助项目(51316020105)

作者简介: 张凯龙(1977 -), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 网络化嵌入式计算技术, 嵌入式软件测试技术; 梁克, 博士研究生; 周兴社, 教授、博士生导师; 杨志义, 教授

收稿日期: 2007-07-22 **E-mail:** kl.zhang@nwpu.edu.cn

设 n_k 中有 r 个任务,当 $s(n_k, n_m)=0$ 时, n_k 和 n_m 为异构节点;当 $s(n_k, n_m) \neq 0$ 时, n_k 和 n_m 为相似节点,其中,若 $s(n_k, n_m)=r$,则 n_m 为 n_k 的完全可映射节点(或冗余节点)。但是, n_m 中至少存一个任务可在 n_k 上有效运行时, n_k 才是 n_m 的相似节点。 $s(n_k, n_m)=r$ 且 $s(n_m, n_k)=r$ 时, n_k 和 n_m 为同类节点。节点相似度的建立将为自适应节点间的映射乃至重构提供依据。

3 相似节点的自动发现方法

研究嵌入分布式系统中相似节点的自动发现机制是实现动态节点映射的关键。相似节点动态发现的基本思想是:各节点初始化过程中通过广播机制相互交换自身的资源等信息,并在本地接收、计算与其相似的节点集合。这种动态节点发现方法可以保证整个系统的开放性和自适应管理能力。但是,这一过程常常需要多次握手通信,而且单次交换的信息量大,会导致收敛速度慢、通信带宽及能量消耗过大等问题,不适合嵌入分布应用。

考虑嵌入分布式系统中的节点成员具有一定的稳定性和不变性,本文结合静态机制提出一种优化的相似节点自动发现方法。(1)节点第1次进入系统:1)节点 n_k 向整个系统广播信息,信息帧 $frame(n_k)=\{n_k(nid), n_k(nhs), n_k(np), (n_k(nps) - n_k(nmaxps))\}$;2) n_m 收到 $frame(n_k)$ 并用式(1)计算相似度,当 $s(n_m, n_k) \neq 0$ 且 $(n_k(nps) - n_k(nmaxps)) < 0$ 时, n_k 是 n_m 的相似节点,此时可将 n_k 相关信息添加到 $n_m(nrs)$ 集合及 n_m 上各任务的备份节点集合 $t(trs)$ 中;3)收敛后, n_m 在本地静态存储相似节点及元素形式为 $\langle null, n_k(nid) \rangle$ 的任务备份节点列表。(2)系统重新运行过程:1)系统重新运行时, n_m 从本地读取本节点配置文件中的相似节点列表 $n_m(nrs)$ 和各任务的备份节点集合 $t(trs)$;2) n_m 向任务 t 的备份节点 n_k 发送任务资源 $t(ths)$ 的验证请求;3)若 n_k 当前可支持 $t(ths)$ 的有效运行,则在本节点登记服务请求,发送许可应答;否则,拒绝服务;4) n_k 收到应答后获知对端节点是否允许在运行过程中接收其任务 t ,被拒绝时,删除本地内存中的 $\langle null, n_k(nid) \rangle$ 项。

该方法采用动态生成、静态存储及多次动态验证的思想。系统第1次运行时的时间、通信复杂度与单一动态发现方法相同。以拥有 h 个节点的系统为例:系统重新运行时,各节点只对部分节点发送验证请求,因此,通信成本为 $\sum C_l$,其中, l 的范围为 $1 \sim h$ 且 $C_l \leq 3(h-1)$,可知 $0 \leq \sum C_l \leq 3h(h-1)$ 。相似节点自动发现的成本比较如图1所示。

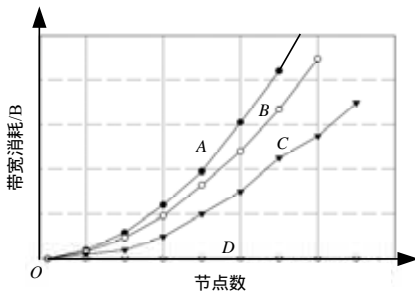


图1 相似节点自动发现的成本比较

在图1中,A曲线、B曲线表示原有方法在不同平均帧长时的节点发现成本,而C曲线表示优化后系统重新运行时一种可能的开销,D曲线表示系统中节点完全异构。由图1可知,在节点数量及平均帧长不变的情况下,优化的自动发现方法更好地降低了通信时间与通信带宽的消耗。

4 节点的自适应动态重构

在部分功能单元失效的情况下,嵌入分布式系统实行自

适应的任务迁移与重构非常重要。在执行自动发现操作之后,系统中的每个节点都将建立其相似节点集合以及可能的任务备份节点集合。

4.1 备份任务的自动部署

权重越大的任务越关键,应该优先部署在高性能相似节点上,根据该思路,本文研究了基于请求-响应-注册过程的备份任务部署方法。该过程中的主要步骤如下:(1)从 n_k 的任务集合 $n_k(nts)$ 中选取 $t(tp)$ 值最大的任务 t_i ,获取其资源集合 $t_i(ths)$ 及 $t_i(trs)$; (2)从 $t_i(trs)$ 中依次选择 $(n(nmaxps) - n(nps))$ 非负且最大的节点(设为 n_m);若 $t_i(ths) \subseteq n_m(nhs)$,则 n_m 可作为 t_i 的备份节点,否则取其次; (3) n_k 向 n_m 发送 t_i 的服务请求, n_m 判断是否能够接收该任务,并决定许可还是拒绝; (4)备份服务被许可时, n_k 将 t_i 的冗余实体传递到 n_m ;否则,返回(2); (5) n_m 创建 t_i 的备份任务 t_i 并在本地进行注册, n_m 将 $t_i(tid)$ 发送到 n_k ; (6) n_k 将 $t_i(trs)$ 中元素 $\langle null, n_m(nid) \rangle$ 更新为 $\langle t_i(tid), n_m(nid) \rangle$; (7) $t_i(trs)$ 非空时,返回步骤(2)继续执行;否则, n_k 发送 $t_i(trs)$ 到备份 t_i 的各个节点,各备份节点维护统一的 $t_i(trs)$,返回步骤(1)继续执行。

在系统初始状态中,所有节点都通过这种方式来完成备份任务的部署。所有提供了任务 t_i 备份服务的节点都将具有相同的集合 $t_i(trs)$,这可为实现故障任务的协商迁移提供支持。但是,所有相似节点对同一个任务进行多冗余处理将会消耗大量资源。在实际中,越重要的任务或越容易出故障的任务应该得到更多的备份,可据此对步骤(7)进行优化以实现备份任务数量的限制。

4.2 节点状态的感知与重构

节点状态包括了节点中各任务及节点的整体运行状态。为有效实现各种运行状态的感知与协调,本文为各个节点引入了状态监测实体,周期地探测各任务的状态。当其探测到故障或探测超时时,即可确定任务的故障。另外,相似节点上的监测实体也将利用空闲时间片进行状态协调与感知,以监测是否有相似节点失效。

对于失效任务的恢复可采用2种不同方法:(1)本地恢复,即监测任务感知到故障任务后,首先按照节点的任务列表获取任务信息,进而清除失效任务,并在本地重新创建任务、恢复与其他任务的通信;(2)任务迁移,即本地节点无法恢复失效任务时,监测任务将依据失效任务的 $t(trs)$ 集合在分布系统中查找有效的备份节点,并激活相应节点上的备份任务。

对于系统运行中可能出现的节点失效情况,可在节点间引入特定机制,如在监测任务中增加相似节点间运行状态的周期性通告功能。节点 n_k 失效时,其所有相似节点都将不在能感知到该节点的状态,各相似节点在对 n_k 的状态感知超时后将按照条件“ $n(nid)=n_k(nid)$ ”从相似节点列表与备份任务列表中查找 n_k 上的任务,并依据 $t(trs)$ 判断自己是否为 n_k 上任务 t 的第1个备份节点,若是,节点激活该任务,更改自己为该任务的主节点并向其他冗余节点进行通告。重构后节点 n_k 的任务将存在于整个分布式系统中。但由于不能保证节点上所有任务都可被有效迁移,因此重构后系统的功能与性能可能会被过度降级。

在系统运行过程中,各节点的负载状态将发生动态变化,仅仅以系统初始状态的配置信息作为选择迁移对象的依据不符合实际情况,也不能保证重构后系统的全局最优。因此,与任务的迁移类似,可在多个备份节点间引入自协商机制。各相似节点依权重、当前负载、激活冗余任务后的负载等计

算承担该任务的概率，并向其他相似节点发送。各节点选举最大概率的节点作为迁移对象，在同等能力下选择 $n(nid)$ 最小的节点作为迁移对象。图 2 给出了 3 个相似节点间初始化、自动发现与任务部署、任务迁移与节点重构的过程。

图 2(a)是各节点初始化之后的任务列表；在发现相似节点后主动进行任务部署，如图 2(b)所示；在 n_1 失效后其任务将被迁移到 n_2 和 n_3 执行，重构后的 n_1 被适度降级，如图 2(c)所示。

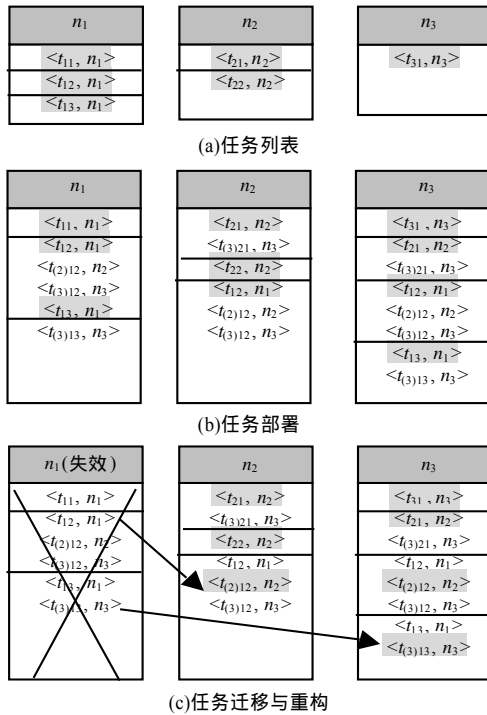


图 2 节点失效时相似节点间的任务迁移与重构

(上接第 25 页)

将本文方法得到的识别率与几种典型的识别方法得到的识别率相比较，结果如表 2 所示。文献[5]给出一种模板匹配法，该方法以 10° 为方位单元，对每个方位单元内的训练图像样本取平均作为模板，用最小距离准则作匹配完成分类。文献[6]给出了一种支持向量机分类方法，该方法没有进行任何特征提取，以 30° 为方位单元，在每个方位单元内对图像样本用支持向量机完成分类。文献[7]是对目标图像求多个离散角度上的 Radon 变换，用变换后生成的一系列统计量组成特征向量，用隐马尔可夫模型完成识别。本文方法得到的最高平均识别率明显高于其他几种识别方法得到的识别率。

表 2 几种识别方法的识别率比较

识别方法	BMP2 识别率/(%)	BTR70 识别率/(%)	T72 识别率/(%)	平均 识别率/(%)
模板匹配法 ^[5]	82.79	93.37	94.50	89.30
SVM ^[6]	90.97	99.49	88.14	90.99
HMM ^[7]	90.80	92.30	100.00	94.90
本文的方法	96.25	99.49	96.74	96.92

6 结束语

本文提出一种基于 ICA 和 SVM 的 SAR 图像特征提取与目标识别方法。实验结果证明，ICA 可去除特征分量间的高阶冗余度，得到的特征具有较好的鲁棒性。SVM 对提取出的特征向量具有较优的分类能力，能较准确地判断出目标所属的类别。目前，基于核的 ICA(Kernel-ICA)以及非负矩阵分解

5 结束语

本文根据嵌入分布式系统的特征，基于相似资源间实现任务冗余的思想，研究了嵌入分布式系统中关键元素的描述模型，提出相似资源自动发现、冗余任务自主部署及故障任务监测与迁移等方法。研究得出如下结论：利用相似资源进行任务冗余可在不增加冗余硬件的情况下提高系统的自容错能力，符合嵌入式计算系统的特征；自主冗余任务部署、任务/节点的故障自监测及自我重构可有效提高系统的自适应容错能力。

参考文献

- [1] Karsai G, Sztipanovits J. A Model Based Approach to Self-adaptive Software[J]. IEEE Intelligent System, 1999, 14(3): 46-53.
- [2] Trapp M, Schürmann B. On the Modeling of Adaptive Systems[C]// Proc. of International Workshop on Dependable Embedded Systems. Florence, Italy: [s. n.], 2003.
- [3] Schwan K, Poellabauer C, Eisenhauer G, et al. InfoFabric: Adaptive Services in Distributed Embedded Systems[C]//Proceedings of the IEEE Workshop on Large Scale Real-time and Embedded Systems. Austin, TX, USA: [s. n.], 2002.
- [4] Sztipanovits J. The Multigraph and Structural Adaptivity[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(8): 2695-2716.
- [5] Nace W, Koopman P. A Product Family Approach to Graceful Degradation[C]//Proc. of Distributed and Parallel Embedded Systems. Paderborn, Germany: [s. n.], 2000.
- [6] 刘东, 张春元, 李瑞, 等. 基于任务同步的双机容错系统[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 224-226.
- [7] Cobleigh J M, Osterweil L J, Wise A, et al. Containment Units: A Hierarchically Composable Architecture for Adaptive Systems[C]// Proceedings of ACM SIGSOFT'02. Charleston, SC, USA: ACM Press, 2002.

等数据分析方法被应用于特征提取领域，其对 SAR 图像特征提取的研究正在进行中。

参考文献

- [1] Comon P. Independent Component Analysis: A New Concept[J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.
- [2] Bell A, Sejnowski T J. Information-maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution[J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1129-1159.
- [3] 徐正光, 武楠, 穆志纯. 基于独立分量分析的人耳识别方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 178-180.
- [4] Vapnik V N. An Overview of Statistical Learning Theory[J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1999, 10(5): 988-999.
- [5] Ross T D, Worrell S W, Velten V J, et al. Standard SAR ATR Evaluation Experiments Using the MSTAR Public Release Data Set[C]//Proc. of SPIE Conference on Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery. Orlando, Florida, USA: [s. n.], 1998.
- [6] Zhao Qun, Principe J C. Support Vector Machines for SAR Automatic Target Recognition[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 643-654.
- [7] Nilubol C, Pham Q H. Translational and Rotational Invariant Hidden Markov Model for Automatic Target Recognition[C]//Proc. of SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition. Orlando, Florida, USA: [s. n.], 1998.

