

无线传感器网络中的可靠传输研究^{*})

何庆伟 孙利民 刘俊涛

(中国科学院软件研究所 北京 100080)

摘要 无线传感器网络是由大量微型传感器节点以自组织和多跳的方式构成的网络。它具有资源非常受限、无线通信链路质量不稳定和网络拓扑动态变化等诸多显著特点,与现有的互联网和其它无线网络存在较大差别,向可靠数据传输提出新的挑战和要求。针对无线传感器网络,本文探讨了设计可靠传输协议应考虑的因素,分析了两种可靠传输的实现机制,提出可靠传输协议的分类方法,并重点介绍近年来提出的典型可靠传输协议,最后指出将来的研究方向。

关键词 无线传感器网络,可靠传输,可靠性,丢失恢复

Research on Reliable Transport in Wireless Sensor Network

HE Qing-Wei SUN Li-Min LIU Jun-Tao

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Wireless sensor network consists of a large number of sensor nodes in Ad hoc and multi-hop manner. Due to its characteristics of constrained resources, poor link quality and dynamic topology, it is largely different from Internet and other wireless networks and poses new challenge for reliable data transport. Aiming at wireless sensor network, this paper presents some essential considerations for reliable transport protocols, analyzes two mechanisms for reliable transport, categorizes these protocols, mainly introduces several recent typical protocols, and finally proposes research directions for future work.

Keywords Wireless sensor network, Reliable transport, Reliability, Loss recovery

1 引言

无线传感器网络是由大量传感器节点以自组织和多跳的方式构成的无线网络。它具有资源非常受限、无线通信链路质量不稳定和网络拓扑动态性等诸多显著特点,与现有的互联网和其它无线网络具有很大差别。

可靠传输是传输层协议的主要功能之一,本文研究无线传感器网络中的可靠传输。TCP 和 UDP 协议虽然在互联网中得到很好的应用,但并不适用于无线传感器网络。首先, TCP 协议是面向连接的协议,在发送数据之前,必须先建立连接。在无线传感器网络中,由于数据分组的长度通常很短,相比之下,建立连接的过程反而会带来较大开销。而 UDP 协议则是无连接的协议,不提供任何可靠性保证。其次, TCP 使用端到端的 ACK 和丢失恢复以保证可靠性。由于发送方在每次数据传输后都需要等待来自接收方的 ACK,所以将导致更低的吞吐量和更大的传输延迟。此外, TCP 和 UDP 都是基于一对一的通信模式,而无线传感器网络的应用通常是多对一的通信模式。因此,需要提出新的可靠传输协议以适用于无线传感器网络。

由于无线传感器网络的自身特点,设计可靠传输协议应考虑如下几个方面:(1)能量开销。传感器节点的能量是有限的,可靠传输协议必须考虑能量问题,通过高效使用能量来延长网络生存周期。(2)缓存大小。可靠传输往往需要缓存数据,而节点的缓存空间是有限的,过多的缓存数据会导致缓冲

区溢出。(3)复杂性。复杂的可靠传输会增加传感器节点的处理开销,从而可能降低吞吐量。(4)鲁棒性。可靠传输协议应能动态适应网络中有新节点加入或节点出现失效的情况。

下面首先阐述实现可靠传输的基本机制,然后给出可靠传输协议的分类方法,并重点介绍一些典型的可靠传输协议,最后进行总结。

2 可靠传输协议的实现机制及分类

2.1 可靠传输协议的实现机制

在无线传感器网络中,节点间的无线通信质量往往不稳定,从而导致较高的分组丢失率,影响数据的可靠传输。丢失恢复和调整节点发送速率是无线传感器网络中两种基本的可靠传输实现机制。

丢失恢复有逐跳和端到端两种方式:逐跳的方式是指在一跳范围内进行丢失恢复,而端到端的方式是指在源节点和目的节点之间进行丢失恢复。丢失恢复的过程包含丢失检测和丢失重传两个阶段。分组的丢失检测通常采用基于序列号的方法,当发现序列号失序时,就表明出现分组丢失。丢失重传主要采用基于 ACK 和基于 NACK 两种策略。基于 ACK 的策略,是接收节点对收到的分组向发送节点反馈 ACK。发送节点在定时器超时前未收到接收节点的 ACK,就认为分组出现丢失,从而重传分组。基于 NACK 的策略,是接收节点发现分组丢失时,向发送节点反馈 NACK 以请求重传。

调整节点发送速率是基于事件的无线传感器网络应用中

^{*} 本文研究得到国家自然科学基金项目(No. 60373049)和国家 973 计划项目(No. 2006CB303000)资助。何庆伟 硕士生,研究方向为无线传感器网络。孙利民 博士,研究员,主要研究方向为无线传感器网络和宽带综合接入网络。刘俊涛 硕士生,研究方向为无线传感器网络。

的可靠传输实现机制。为了达到应用要求的保真度, sink 节点需要收到一定数目的分组。在满足应用保真度的情况下, 可以容忍少量分组的丢失, 而不需要每个分组都无丢失地传输。如果当前保真度低于期望保真度时, 通过提高节点发送速率可以弥补少量数据的丢失, 达到期望保真度, 从而实现数据的可靠传输。

2.2 协议分类

目前, 在无线传感器网络中已提出了一些可靠传输协议。通过对这些协议的分析, 根据数据流传输的方向、不同的可靠性要求以及对传感器节点移动性的支持进行分类。

2.2.1 Mote-to-Sink 可靠传输与 Sink-to-Mote 可靠传输

根据数据流的方向, 可把可靠传输协议分为 Mote-to-Sink 的可靠传输与 Sink-to-Mote 的可靠传输。这里, Mote 表示传感器节点, sink 表示汇聚节点。Mote-to-Sink 可靠传输是把来自传感器节点的数据可靠传输到 sink 节点, 而 Sink-to-Mote 可靠传输则是 sink 节点的数据可靠传输到传感器节点。PSFQ^[1] 协议和 GARUDA^[2] 协议属于 Sink-to-Mote 可靠传输, 而 RMST^[3]、ESRT^[4]、PORT^[5]、STCP^[6]、RBC^[7] 协议以及文[8]和文[9]中都是探讨 Mote-to-Sink 的可靠传输。

2.2.2 绝对可靠性与相对可靠性

绝对可靠性要求数据在传输过程中不能丢失, 而相对可靠性则可以容忍一定程度上数据的丢失。在 Mote-to-Sink 数据流方向上, sink 节点可能需要收到传感器节点报告的所有数据, 即支持绝对可靠性。但 sink 节点也可能只对网络中的公共信息感兴趣, 则需要支持相对可靠性。对于 Sink-to-Mote 数据流方向上, sink 节点通常希望传感器节点收到它发送的所有数据, 如节点程序更新应用和查询网络信息应用等, 所以应支持绝对可靠性。ESRT、PORT 和 STCP 协议保证绝对可靠性, 而其它可靠传输协议则保证相对可靠性。

2.2.3 无移动性与支持移动性

现有的可靠传输协议主要研究全部节点都静止的情况, 而文[9]和文[10]中则考虑 sink 节点移动情况下的可靠传输。节点的移动性给网络的拓扑结构带来更高的动态性, 也增加了可靠传输协议的复杂性, 但可以均衡整个网络的能量消耗, 从而延长网络生存周期。

3 典型的可靠传输协议

依据前面所述的第一种分类方法, 把现有的可靠传输协议分为 Sink-to-Mote 可靠传输和 Mote-to-Sink 可靠传输, 分别进行介绍。

3.1 Sink-to-Mote 可靠传输

3.1.1 PSFQ^[1] 协议

PSFQ(Pump Slowly Fetch Quickly)协议是基于 WSN 传感器节点重编程应用而提出的协议, 保证每个节点都能够收到来自 sink 节点的全部分组。它的基本思想是在逐跳传输分组时, 上一跳节点以较慢的速率发送分组, 下一跳节点发现分组丢失后, 立即向上一跳节点请求重传。PSFQ 协议主要包括三种基本操作: “放”(Pump)操作, “取”(Fetch)操作和“报告”(Report)操作。“放”操作是指上一跳节点向下一跳节点按序转发分组; “取”操作是指下一跳节点在检测到分组丢失时, 向上一跳节点请求重传; “报告”操作是传感器节点在收到 sink 节点的报告请求时, 向 sink 节点报告分组的接收情况。“放”操作和“取”操作的过程如图 1 所示。通过“报告”操

作, sink 节点可以知道整个传输过程是否已经完成, 从而决定是否释放缓存分组的空间。

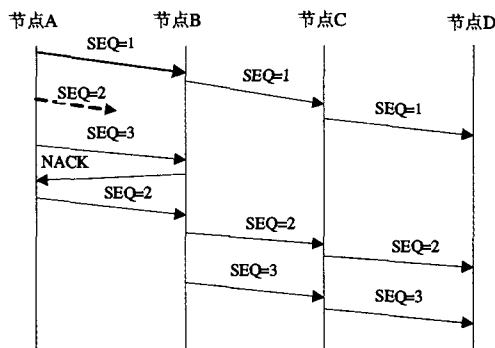


图 1 PSFQ 中“放”操作和“取”操作

由于采用基于单纯的 NACK 的确认机制, PSFQ 协议不能发现所有分组都丢失的情况; “放”操作速度较慢, 增加分组的传输延时, 也浪费了带宽; 为了重传分组, 逐跳的丢失恢复机制需要较大的缓存空间。

3.1.2 GARUDA^[2] 协议

针对 NACK 机制的缺点, GARUDA 采用 WFP(Wait-for-First-Packet)脉冲确保第一个分组能被所有传感器节点都正确接收。通过第一个分组在网络中的传输, 每个节点可以确定距离 sink 节点的跳数。只有距离 sink 节点跳数为 3 的倍数的节点才可能成为 core 节点。处于这些跳数的节点当侦听到相同跳数的其它 core 节点, 则选择第一个侦听到的 core 节点作为自己的 core 节点, 否则选择自己作为 core 节点。

在网络中传输第一个分组之后, 每个节点都能确定自己是 core 节点或非 core 节点, 且每个 core 节点也知道它的上游 core 节点。后续的分组首先在 core 节点之间进行传输, 然后在 core 节点与非 core 节点之间传输。core 节点发现分组丢失时, 将向上游 core 节点发送 NACK 以请求重传。当非 core 节点发现分组丢失时, 也将向它知道的 core 节点发送 NACK 以请求重传。

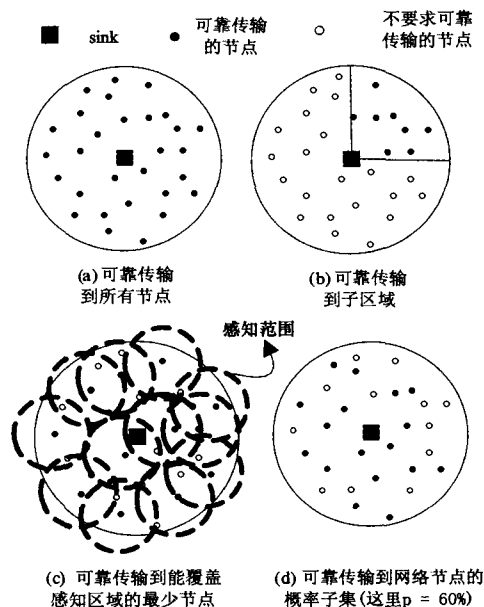


图 2 GARUDA 中定义的四种可靠性

另外, GARUDA 可以支持四种不同的可靠性: (a) 可靠传输到所有节点, 这也是 GARUDA 默认的语义; (b) 可靠传输到子区域, 这是基于地理位置的可靠传输; (c) 可靠传输到能覆盖整个区域的最少节点, 表示冗余感知的传输; (d) 可靠传输到网络节点的概率子集, 适用于进行不同分辨率查看的应用。四种不同的可靠性具体如图 2 所示。

从本质上看, GARUDA 定义的可靠性是选择出期望接收 sink 节点数据分组的节点集合, 但在这个集合中的节点都需要收到 sink 节点发送的所有分组。因此, GARUDA 保证的可靠性仍然是绝对可靠性。此外, GARUDA 采用高能量的 WFP 脉冲, 对传感器节点提出了较高的要求。

3.2 Mote-to-Sink 可靠传输

3.2.1 RMST^[3] 协议

RMST(Reliable Multi-Segment Transport) 是以定向扩散路由协议为基础的可靠传输协议。传感器节点可以配置成缓存模式和非缓存模式。缓存模式对应于逐跳的可靠传输, 而非缓存模式对应于端到端的可靠传输。在非缓存模式下, 只有源节点和 sink 节点需要维护缓存, 而中间节点不需要维护缓存, 分组的丢失检测由 sink 节点负责。但在缓存模式下, 源节点到 sink 节点的传输路径上的每一个节点都需要维护缓存, 并且都参与分组丢失检测。

此外, RMST 基于跨层优化的思想, 综合考虑 MAC 层和传输层, 以在丢失率较高的传感器网络中提供可靠性保证。RMST 认为在 MAC 层应有选择地使用 ARQ, 即对于单播传输的数据和控制分组采用 ARQ 机制, 而对于广播传输的路径发现分组就无需 ARQ 机制。对于传输层, 应采用 NACK 的确认机制。

虽然, RMST 可以提供 Mote-to-Sink 的逐跳和端到端的可靠传输, 但它不能保证分组的顺序到达, 也不能提供任何实时性保证。其次, RMST 依赖于定向扩散路由协议。同时, RMST 采用 NACK 确认机制, 在缓存模式下中间节点由于存储容量的限制可能出现缓冲区溢出。

3.2.2 RBC^[7] 协议

在传统的基于滑动窗口的确认模式中, 当已发送的分组未得到确认时, 发送节点发送的分组数不能超过窗口大小, 从而降低了网络的吞吐量。为此, RBC(Reliable Bursty Convergecast) 通过多个不同优先级的队列来管理新的分组和未得到确认的分组, 使用无窗口的块确认模式以提高信道的利用率, 并采用无序分组转发。其次, RBC 通过有区分的信道争用来控制和调度分组的重传, 以减少新产生的分组与需要重传的分组之间的信道争用冲突。此外, RBC 可以动态调整重传定时器的超时值以减少重传次数, 同时缩短重传前等待的时间。

3.2.3 ESRT^[4] 协议与 PORT^[5] 协议

ESRT(Event-to-Sink Reliable Transport) 协议把可靠性定义为在当前周期内 sink 节点收到来自所有节点的分组数。sink 节点基于当前周期的可靠性和拥塞情况, 把整个网络的状态分为五种: (低可靠性、无拥塞), (高可靠性、无拥塞), (低可靠性、拥塞), (高可靠性、拥塞) 和最佳状态, 如图 3 所示。最佳状态是指当前可靠性恰好达到 sink 节点期望的可靠性且没有发生拥塞时的状态。虽然高可靠性可以使 sink 节点获得对网络事件的充足信息, 但是消耗了不必要的能量。因此为了达到能量高效, ESRT 应使网络尽量维持在最佳状态。

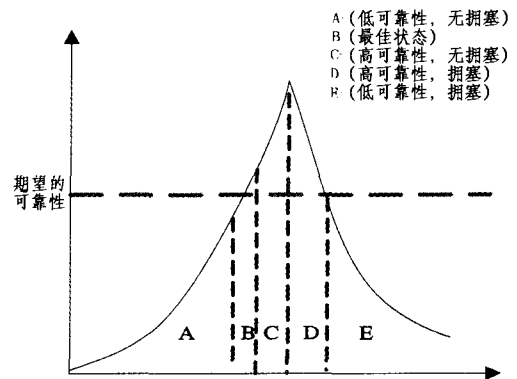


图 3 ESRT 协议定义的五种网络状态

在 ESRT 协议中, sink 节点根据当前网络的状态, 计算在下一个周期内的期望的节点报告速率, 然后广播给所有的传感器节点。传感器节点在下一个周期将按照新的期望报告速率向 sink 节点发送分组。

由于 ESRT 在通知节点新的期望报告速率时, 采用高能量的信号以一跳方式到达全网节点。这不仅对 sink 节点有特殊要求, 而且这个高能量的信号也会严重干扰网络中其它分组的传输。此外, ESRT 没有区分对待不同节点报告的分组的重要性, 也不能分别调整各个节点的报告速率。

与 ESRT 比较而言, 文[5]中提出的 PORT(Price-Oriented Reliable Transport) 协议着重考虑不同源节点发送的分组对整个网络信息的重要性。为使 sink 节点获得对于网络事件的足够信息且达到能量高效, PORT 协议采用两种方法: (1) 分别计算不同源节点的报告速率。sink 节点根据各源节点的汇报分组的重要性和端到端的通信能量消耗, 采用最优化方法计算各源节点的最优报告速率, 并反馈给各源节点。(2) 采用多路径路由机制。传感器节点根据邻居节点反馈的链路状况及时选择路由, 避免使用链路质量较差的路径。

3.2.4 STCP^[6] 协议

STCP(Sensor Transmission Control Protocol) 协议通过在会话初始化分组中指定期望的可靠性和数据流的类型, 可以支持不同数据流要求的可靠性。源节点在向 sink 节点发送数据分组之前, 需要首先向 sink 节点发送会话初始化分组。

STCP 协议把传感器节点产生的数据流分为连续流和事件流。对于连续流, 可靠性定义为在一定间隔内, sink 节点成功收到的分组数与应收分组数的比值。根据连续流的发送速率, sink 节点能够估计每个分组到达的时间。如果在期望的时间间隔内未收到源节点的分组, 且当前可靠性低于期望的可靠性, 则 sink 节点需要向源节点发送 NACK 以请求重传。对于事件流, 可靠性定义为 sink 节点当前收到的分组数与当前收到分组的最大序列号的比值。在此类型的数据流中, sink 节点无法估计分组到达的时间, 对于接收到的分组需要发送 ACK 确认。

虽然 STCP 与 ESRT 和 PORT 保证的可靠性都属于相对可靠性, 但是 ESRT 和 PORT 中期望的可靠性都是由 sink 节点根据具体的应用定义的。而 STCP 中期望的可靠性则是由传感器节点定义的, 并通知 sink 节点。

3.2.5 冗余编码策略和移动性支持

(1) 冗余编码策略。为了提高传输可靠性, 文[8]中提出冗余编码的方法, 即发送节点在发送分组之前对分组进行编

码,接收节点对接收到的分组进行解码。比如,要发送 M 个分组,发送节点在发送前把这 M 个分组转换成 $M+R$ 个分组。接收节点只要收到这 $M+R$ 个分组中的任意 M 个分组,就可以重构出原始的 M 个分组。但如果丢失的分组数目超过 R ,则接收节点就无法恢复出原始的 M 个分组。因此这种方法只能容忍一定程度分组的丢失,但为研究无线传感器网络中的可靠传输提供了新的思路。

(2)移动性支持。文[9]中着重解决批量数据的可靠传输问题,并支持 sink 节点在一定程度上的移动性。这种方法主要应用于传输批量数据的无线传感器网络中,如视频传感器网络。对于批量数据,只有当 sink 节点发送传输请求时,传感器节点才进行传输。通过传输请求在网络中以洪泛方式传播,可以建立一棵路由树。批量数据将按照这棵路由树从传感器节点传输到 sink 节点。

批量数据的可靠传输综合使用逐跳的 RTS/CTS 突发传输以及基于 NACK 的端到端请求重传机制,如图 4 所示。在数据逐跳传输之前,传感器节点首先需要进行 RTS/CTS 的握手过程。sink 节点负责分组的丢失检测,传输路径上的节点只负责转发。当发现分组丢失时,sink 节点发送 NACK 以请求源节点重传丢失的分组。当 sink 节点不需要收集数据时,可以在网络中任意移动。当 sink 节点希望再次收集数据

时,需要重新发送传输请求,以建立新的路由树。但是在路由树建立之后,sink 节点的移动性应受到限制。

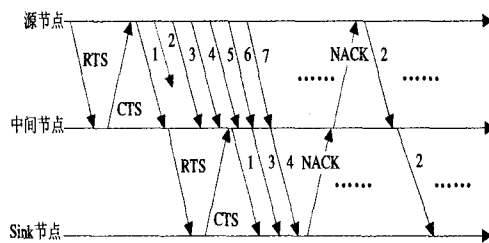


图 4 批量数据的传输过程

文[10]探讨在丢失容忍的移动网络中可靠传输的相关问题。在这种网络中,所有节点都是可移动的,网络的连通性是间断的,数据传输也具有较大的延迟。作者分别讨论逐跳的数据传输和两种端到端的数据传输——被动确认与主动确认。逐跳的数据传输能够减小数据在源节点缓冲内的停留时间,但无法提供端到端的可靠性;主动确认方法能够使确认分组在网络中很快的扩散,缺点是开销大;与主动确认方法相比,被动确认方法有较小的开销,但要花较长的时间使网络中的节点释放缓存数据占用的空间。

表 1 可靠传输协议参照表

分类	方向	可靠性	确认	丢失恢复	移动性
PSFQ	Sink-to-Mote	绝对	NACK	逐跳	无
GARUDA	Sink-to-Mote	绝对	NACK	逐跳	无
RMST	Mote-to-Sink	绝对	NACK	逐跳/端到端	无
ESRT	Mote-to-Sink	相对	无	无	无
STCP	Mote-to-Sink	相对	NACK/ACK	端到端	无
PORT	Mote-to-Sink	相对	无	无	无
RBC	Mote-to-Sink	绝对	ACK	逐跳	无
文[8]	Mote-to-Sink	绝对	ACK	逐跳	无
文[9]	Mote-to-Sink	绝对	NACK	逐跳/端到端	有
文[10]	Mote-to-Sink	绝对	ACK	逐跳/端到端	有

结论 可靠传输协议是无线传感器网络目前研究的热点问题之一,在分组丢失率较高的无线传感器网络中起着重要作用。本文对现有的可靠传输协议进行归纳,如表 1 所示。

现有的可靠传输协议在一定程度上解决了可靠传输的问题,但仍然有很大改进的空间。首先,可以考虑跨层优化。在无线传感器网络中,能量是非常宝贵的资源。为了达到能量高效,可靠传输协议可以充分利用 MAC 层、路由层和应用层提供的信息。其次,提供更灵活的移动性支持。具有移动性的 sink 节点可以均衡网络中节点的能量消耗。文[9]中对 sink 节点的移动性支持相当有限,文[10]中支持的移动性只适用于丢失容忍的网络中。最后,支持多个 sink 节点的情况。在大规模的无线传感器网络中,可能需要多个 sink 节点收集数据。如何把数据以能量高效的方式传输到多个 sink 节点对可靠传输协议提出了新的要求。

参考文献

1 Wan C Y, Campbell A T. PSFQ: A reliable transport protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of ACM WSNA'02, Atlanta, USA, 2002
 2 Park S J, Vedantham R, Sivakumar R, et al. A scalable approach for reliable downstream data delivery in wireless sensor networks. In: Proceedings of ACM MobiHoc'04, Roppongi, Ja-

pan, 2004
 3 Stann F, Heidemann J. RMST: Reliable data transport in sensor networks. In: Proceedings of IEEE SNPA'03, Anchorage, USA, 2003
 4 Sankarasubramaniam Y, Akan O B, Akyildiz I F. ESRT: Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. In: Proceedings of ACM Mobihoc'03, Annapolis, USA, 2003
 5 Zhou Yangfan, Lyu M R. PORT: A Price-Oriented Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks. In: 16th IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering (IS-SRE'05), 2005, 117~126
 6 Iyer Y G, Gandham S, Venkatesan S. STCP: A generic transport layer protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE ICCCN 2005, San Diego, California, USA, 2005
 7 Zhang H, Arora A, Choi Y, et al. Reliable bursty convergecast in wireless sensor networks. In: Proceedings of ACM Mobihoc'05, Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2005
 8 Kim S, Fonseca R, Culler D. Reliable Transfer on Wireless Sensor Networks. In: First IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communication and Networks (SECON'04), Santa Clara, CA, 2004
 9 Volgyesi P, Nadas A, Ledeczi A, et al. Reliable Multihop Bulk Transfer Service for Wireless Sensor Networks. In: 13th Annual IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS 2006), CD-ROM, Potsdam, Germany, March 2006
 10 Harras K A, Almeroth K C. Transport layer issues in delay tolerant mobile networks. In: Proceedings of IFIP-TC6 Networking, May 2006
 11 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102~114