

# 移动实时嵌套事务的并发控制

廖国琼 刘云生 杨进才

(华中科技大学计算机学院 武汉 430074)

**摘 要** 在移动计算环境中,事务移动性和无线网络固有的缺陷使得传统分布式实时事务管理机制不足以支持移动实时事务的执行,故有必要为移动实时事务研究新的事务处理机制以提高其成功率.该文着重研究移动实时事务的并发控制机制.首先,该文给出了一个考虑事务定时限制以及移动性的嵌套事务模型.然后,为减少移动分布式环境中解决数据冲突的开销,该文研究了一种结合优先级夭折和优先级继承的基于封锁的并发控制协议 PAI-2PL.当高优先级事务被低优先级事务阻塞时,对于相同家族事务,采用优先级继承方法解决冲突;而对于不同家族事务,则夭折重启低优先级事务.另外,为减少由于断接所引起的无效阻塞,PAI-2PL 允许低优先级事务夭折处于断接状态的高优先级事务.通过性能测试,表明所提出的事务模型及并发控制机制能提高实时事务的成功率.

**关键词** 移动数据库;实时数据库;并发控制;嵌套事务

中图法分类号 TP311

## A Concurrency Control Mechanism for Mobile Real-Time Nested Transactions

LIAO Guo-Qiong LIU Yun-Sheng YANG Jin-Cai

(School of Computer, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** For the mobility of transactions and the inherence limitations of wireless network, the transaction management mechanisms for traditional distributed real-time transactions are incompetent to support the real-time transactions in mobile distributed environment to meet their deadlines. In the paper, a nested transaction model for mobile real-time transactions is presented, which takes the mobility and timing constraints into consideration. In order to reduce the overhead to resolve data conflicts in mobile computing environments, a concurrency control protocol PAI-2PL based on two-phase locking which integrates high priority abort (HPA) and priority inheritance (PI) schemes is proposed. As the high priority transactions are blocked by the low priority transactions, if the transactions belong to the same family, the PI scheme is used; otherwise the low priority transactions are selected to abort. In addition, in order to decrease futile blocking due to the disconnection of wireless network, it is permitted in PAI-2PL that the low priority transactions abort the disconnected high priority transactions. The performance of PAI-2PL is measured and analyzed in the end of the paper. It is shown that the suggested transaction model and concurrency control mechanism can increase the successful ratios of mobile real-time transactions.

**Keywords** mobile database; real-time database; concurrency control; nested transaction

收稿日期:2001-03-01;修改稿收到日期:2002-08-13. 本课题得到国家自然科学基金(60073045)、国家预研基金(00J15.3.3.JW0529)、国家教育部博士点基金资助.廖国琼,男,1969年生,博士,主要研究方向为现代(实时、主动、内存、移动、工程等非传统)数据库理论与技术及其集成实现、数据库与信息系统开发. E-mail:joanliao@263.net, joanliao6911@sina.com.刘云生,男,1940年生,教授,博士生导师,主要研究方向为现代(实时、主动、内存、移动等非传统)数据库理论与技术及其集成实现、数据库与信息系统开发、实时数据工程、软件方法学与工程技术.杨进才,男,1967年生,博士,副教授,主要研究领域为数据库技术、现代信息系统、电子商务、多媒体技术.

## 1 引言及相关工作

移动分布式计算环境是为了满足人们在任意地点、任意时刻访问任意数据的需求,实时(具有定时限制)应用是该环境中一类典型的应用,但事务的移动性以及无线网络的不可靠、不可预测和频繁断接等特性,使得传统分布式实时事务处理机制不适用于移动实时事务处理,如原子事务模型基本上不再适合于移动事务<sup>[1]</sup>;实时数据库基本的并发控制方法如 HPA(High Priority Abort)和 PI(Priority Inheritance)等也不利于移动实时事务处理<sup>[2]</sup>.因此,有必要为移动实时事务研究新的事务模型及处理机制.本文拟在文献[3]所给出的实时嵌套事务模型基础上,研究移动实时事务模型及其并发控制机制.

目前,有关移动实时事务的研究主要有:文献[2]提出了一种支持移动分布式实时事务的并发控制机制 DHP-2PL(Distributed High Priority Two-Phase Locking),但它是基于平坦事务模型;文献[4]给出了两种移动实时事务的执行模型 ESFH(事务在固定主机上执行)和 ESMH(事务在移动主机上执行);文献[5]则提出了一种支持无线网络频繁断接的软实时事务调度策略 DT-protocol.但是,针对移动实时事务的研究还是刚刚开始,还有待进一步深入,而研究的关键是在满足事务定时限制的基础上如何处理事务的移动特性.

## 2 移动实时嵌套事务

由移动主机 MH(Mobile Host)发出且具有定时限制的事务称为移动实时事务 MRTT(Mobile Real-Time Transaction).一个典型的移动实时事务如图 1 所示. MRTT 的执行可能随 MH 的移动而移动(如从无线单元  $cell_1$  迁移到无线单元  $cell_2$ ),在其执行过程中,一部分任务在移动主机上执行,而其它任务则交给它所在无线单元中的固定主机 FH(Fixed Host)来完成(如  $T_1$  和  $T_2$ ).当 FH 接收到来自 MH 的工作请求后,又将这些任务根据数据的分布分配到其它 FH 或 MH 上执行(如  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  和  $T_{13}$ ).这样,形成了复杂的嵌套结构事务.

语义上,一个移动实时嵌套事务可以定义如下.

**定义 1.** 移动实时事务 MRTT 为一个五元组:

$$MRTT ::= \langle S, R, <_t, C, L \rangle,$$

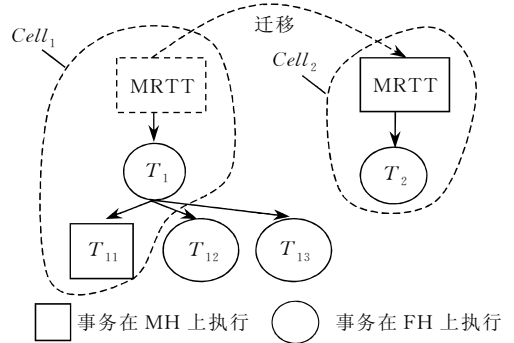
$$S ::= \{ \langle STEP \rangle, \},$$


图 1 移动实时嵌套事务

$$STEP ::= \langle SUBTRAN \rangle | \langle OP \rangle,$$

$$SUBTRAN ::= \langle MRTT \rangle,$$

$$OP ::= \langle OB-OP \rangle | \langle TM-OP \rangle,$$

$$OB-OP ::= INSETR | DELETE | UPDATE | QUERY,$$

$$TM-OP ::= BEGIN | COMMIT | ABORT | SPAWN,$$

$$R ::= \text{a set of resources required by MRTT,}$$

$$<_t ::= \text{a temporal order on } S,$$

$$C ::= \text{a set of constraints on } S \text{ and } R,$$

$$L ::= \text{the location of MRTT.}$$

## 3 移动实时嵌套事务的并发控制

在移动计算环境中,重启一个事务开销较大,而死锁的检测和解除会浪费移动主机上有限的资源,故高优先级夭折(引起事务重启)和优先级继承(导致死锁)两种并发控制机制都不利于移动实时事务处理.本文针对嵌套事务的特点,设计了一种结合上述两种机制的基于封锁的 PAI-2PL(Priority Abort and Inheritance Two-Phase Locking)并发控制协议.

### 3.1 PAI-2PL 并发控制协议

设事务集  $T, t, t' \in T; L(t, o)$  表示  $t$  获得数据对象  $o$  的锁;  $conflict(t, t', o)$  表示  $t$  与  $t'$  访问数据  $o$  时发生冲突;  $committing(t)$  表示事务  $t$  正在提交;  $R(t, t')$  表示  $t$  和  $t'$  为家族事务;  $A(t, t')$  表示  $t$  为  $t'$  的祖先事务;事务  $t$  的优先级记为  $pr(t)$ . PAI-2PL 可描述为下述规则:

规则 1. 相同家族事务冲突解决规则

$$\text{IF } \exists t' \in T (L(t', o) \wedge conflict(t, t', o) \wedge A(t', t))$$

$$\text{THEN } L(t, o) \wedge !L(t', o)$$

当子事务与其祖先事务发生存取冲突时,子事务无条件继承其祖先事务的锁,但祖先事务在该子事务释放锁前不能再对该对象进行冲突存取.该规

则保证了嵌套事务的内部一致性。

规则 2. 相同家族事务冲突解决规则

```
IF  $\exists t' \in T(L(t', o) \wedge \text{conflict}(t, t', o) \wedge R(t', t) \wedge (pr(t') < pr(t)))$ 
THEN  $pr(t') := pr(t)$ ;
 $\forall t'' (A(t', t') \wedge !A(t'', t)) (pr(t'') = pr(t))$ ;
 $t$  waits until  $!L(t', o)$ 
```

由于嵌套事务中的子事务实际上是代表根事务执行,故当同一家族事务发生冲突时,不相互夭折,而是让低优先级事务(包括它的祖先)继承高优先级事务的优先级。

规则 3. 不同家族事务冲突解决规则

```
IF  $\exists t' \in T(L(t', o) \wedge \text{conflict}(t, t', o) \wedge !R(t', t) \wedge (pr(t) > pr(t')) \wedge !\text{committing}(t'))$ 
THEN restart  $t'$ ;
 $L(t, o)$ ;
```

当分属两个不同家族的事务发生冲突时,夭折未开始提交的低优先级事务以防止不同家族事务的优先级倒置。

规则 4. 不同家族事务冲突解决规则

```
IF  $\exists t' \in T(L(t', o) \wedge \text{conflict}(t, t', o) \wedge !R(t', t) \wedge (pr(t) > pr(t')) \wedge \text{committing}(t'))$ 
THEN  $pr(t') := pr(t)$ ;
 $t$  waits until  $!L(t', o)$ 
```

当分属不同家族的事务冲突发生时,允许正在提交的低优先级事务继承高优先级事务的优先级完成提交,以避免系统资源浪费。

另外,无线网络的频繁断接不仅增加了处于断接状态的事务本身超截止期的概率,而且会引起无效阻塞<sup>[2]</sup>,即被阻塞事务由于阻塞时间过长,导致超截止期而夭折。因此,在频繁断接的移动计算环境中,当出现等待时,允许低优先级事务夭折处于断接状态的高优先级事务。于是有下面规则。

规则 5. 断接处理规则

```
IF  $t$  waits until  $!L(t', o) \wedge t'$  is executing at MH
THEN  $t$  connects with  $t'$  every  $\delta$ 
/*  $\delta$  is determined by wireless network
IF no any respond from  $t'$ 
THEN IF  $t'$  is disconnected actively
THEN IF  $t_c < t_p$ 
/*  $t_c$  is the disconnected time and  $t_p$  is the plan disconnected time of  $t'$ 
THEN  $t$  waits until  $!L(t', o)$ 
ELSE restart  $t'$ 
ELSE restart  $t'$ 
```

### 3.2 PAI-2PL 的正确性

衡量并发控制协议的正确性标准是该协议能否

保证事务执行的可串行化。文献[3]对嵌套事务执行的可串行化进行了讨论,在此不再赘述。

**定义 2.** 设事务集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,  $D_i$  为  $t$  的后代事务集,称  $T' = \{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\} (m \leq n)$  为  $T$  的一个可能执行集,记为  $T' = PES(T)$ ,当且仅当  $\forall t \in T (t \notin T' \Rightarrow (\forall t' \in D_i (t' \notin T')))$ ,即如果事务  $t$  不属于  $PES(T)$ ,则它的后代事务也不属于  $PES(T)$ 。

**定理 1.** 对于一个事务集  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,如果它执行并遵守嵌套事务的结构依赖关系<sup>[6]</sup>及 PAI-2PL 并发控制协议,则事务的执行是嵌套可串行化的。

**证明.** 嵌套事务中存在子事务对父事务的夭折依赖关系,即若父事务夭折,其子事务必须夭折。而且,子事务对数据库的更改只有等到包含该子事务的根事务提交时才能真正反映到物理数据库中去,这就保证了一个事务集  $T$  的执行效果等同于它的一个可能执行集  $PES(T)$  的执行效果。在 PAI-2PL 中:

- (1) 规则 1 保证了父子事务并发执行时数据库的一致性;
- (2) 规则 2 保证了同一家族事务并发执行时数据库的一致性;
- (3) 规则 3 和规则 4 保证了分属不同家族的事务并发执行时数据库的一致性。

因此,PAI-2PL 能保证事务集  $T$  的执行效果等同于它的一个可能执行集中  $PES(T)$  中事务的一个串行执行的效果,即事务集  $T$  的执行是嵌套可串行化的。

证毕。

### 3.3 死锁的检测和解除

PAI-2PL 协议是基于封锁的协议,当不同家族的事务发生数据存取冲突时,优先级夭折策略保证了高优先级事务不会被低优先级事务阻塞,故不同家族的事务不会发生死锁。但是,相同家族的事务是采用优先级继承解决冲突的,而优先级继承可能引起死锁,因此必须采取措施检测和解除死锁。PAI-2PL 的死锁检测与解除方法分别如下:

(1) 死锁检测处理步骤

1. 每个非叶子事务维持一个事务等待图(Transaction Wait-For Graph, TWFG);
2. 每当发生冲突时,发送冲突消息  $Message(t_r - id, t_h - id, ob - id)$  到两个冲突事务的最近共同祖先  $lca$  (Least Common Ancestor). 其中  $t_r - id$  为申请锁事务标识,  $t_h - id$  为持有锁事务标识,  $ob - id$  为冲突对象标识;
3. 在  $lca$  的 TWFG 中增加一条边,该边的两个顶点分别为冲突事务的祖先且为  $lca$  的儿子;
4. 检测 TWFG 中是否有回路,如有回路,则可能发生

死锁.

(2)死锁解除处理步骤

1. 当有回路出现时,选择回路中任意一条边;
2. 比较该边两顶点事务的优先级,选择较低优先级事务  $t$  准备夭折,并将产生该冲突的持有锁事务的标识  $t_h-id$  和冲突对象标识  $ob-id$  通知  $t$ ;
3. 从  $t$  到持有锁事务的路径依次检查是否有事务在此之前持有  $ob-id$  的锁,如有,则夭折该事务及其后代事务,否则,夭折持有锁事务,解除死锁.

图 2 是一个死锁检测和解除的例子. 首先,  $T_{111}$

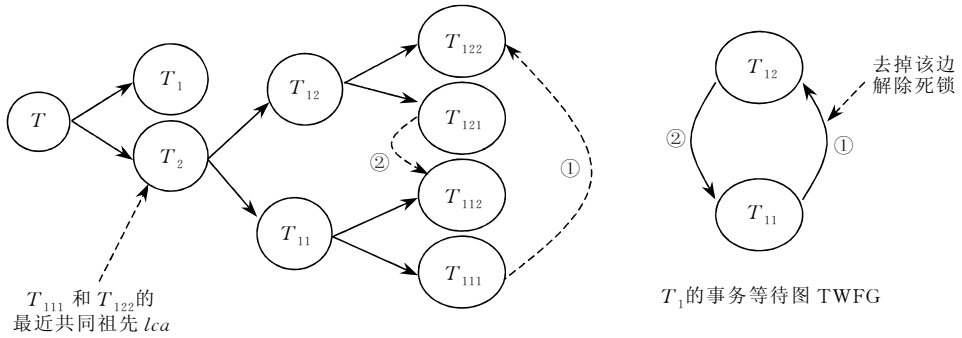


图 2 死锁的检测和解除

### 4 性能测试及分析

我们在国家自然科学基金资助、自行研制的分布式主动实时数据库原型系统 ARTs-II 上模拟移动计算环境完成了对 PAI-2PL 的性能测试. 由于文献[2]中的 DHP-2PL 协议只是在平坦事务模型中进行研究的,故我们选择文献[3]中的实时嵌套事务并发控制协议进行性能比较. 在文献[3]中,当事务发生存取冲突时,无论是兄弟事务和分属不同家族的事务,都是通过夭折重启低优先级事务的方法解决的,该协议记为 PA-2PL. 本实验采用的性能测度指标为:

(1)事务的超截止期比率(Missing Ratio, MR):  $MR = NumMiss / NumTotal \times 100\%$ . 其中  $NumMiss$  表示超截止期的事务数量,  $NumTotal$  表示事务总数.

(2)事务的重启概率(Restart Probability, RP):  $RP = NumRestart / NumTotal \times 100\%$ . 其中  $Num-$

等待  $T_{122}$  释放对象 A 的锁,在它们的共同祖先  $T_1$  的事务等待图 TWFG 中增加一条由  $T_{11}$  到  $T_{12}$  的边,检测到无回路,则  $T_{111}$  等待;然后,  $T_{121}$  等待  $T_{112}$  释放对象 B 的锁,同样在它们的共同祖先  $T_1$  的 TWFG 中增加一条由  $T_{12}$  到  $T_{11}$  的边. 此时,检测到  $T_1$  的 TWFG 中有回路出现,则可能发生死锁. 可以选择  $T_{11}$  到  $T_{12}$  的边解除死锁,假设  $T_{11}$  的优先级比  $T_{12}$  的低,则通知  $T_{11}$  事务  $T_{112}$  持有 B 的锁,由于  $T_{11}$  在此之前没有持有 B 的锁,因此  $T_{112}$  夭折,死锁解除.

$Restart$  表示重启事务数量,  $NumTotal$  表示事务总数.

#### 4.1 实验模型及参数

测试系统模型如图 3 所示. 其中, CC, Scheduler, RM, MDBMS 分别为 FH 和 MH 上的并发控制管理器、调度管理器、资源管理器以及内存数据库管理系统. MTM 和 FTM 分别为 MH 和 FH 上的事务管理器,负责各自的事务管理及相互之间的通信. 为支持实时事务,该系统采用内存数据库 MDB 体系结构,即数据库的“工作版本”常驻内存,而磁盘数据库 SDB 只作为数据库备份和 MDB 的后援支持. 为支持移动事务,在 MH 上增加过区切换控制器 HC 和断接处理器 DP 以负责处理移动主机的过区切换和频繁断接;且在 FH 上增加位置管理器 LM 以管理位于 FH 所在无线单元内主机位置的变化.

表 1 为实验模拟参数. 其中,事务发出间隔时间  $TT$  (Think Time) 表示移动主机完成一个事务后发出新事务的时间间隔. 随着  $TT$  的增加,系统中事务负荷不断减少.

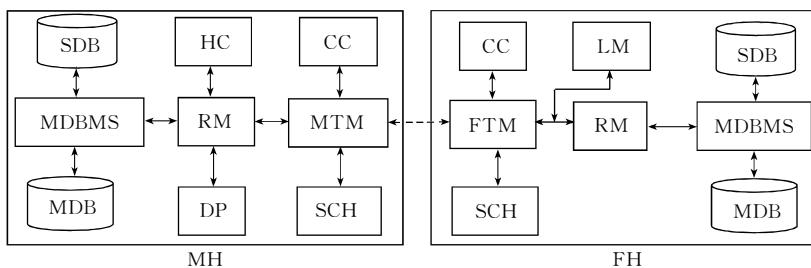


图 3 系统模型

表 1 模拟参数

参数	值	参数	值
发出事务的时间间隔(Think Time, $TT$ )	1~10s	数据库大小( $SizeDB$ )	500
移动主机数量( $NumMH$ )	30	操作数/子事务( $NumOP$ )	5~15
固定主机数量( $NumFH$ )	10	并发控制策略	PAI-2PL, PA-2PL
无线单元数量( $NumCell$ )	5	CPU 调度策略	最早截止期优先(EDF), 可抢占
断接概率( $DisconProb$ )	0.5%	内存置换策略	最长未使用淘汰(LRU)
过区切换概率( $HandoffProb$ )	0.2%	事务类型	软实时事务
数据库数量( $NumDB$ )	10	嵌套层次	2层

4.2 实验结果及分析

本实验的性能测试结果分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出,在不同的事务负荷下,采用 PAI-2PL 协议时,事务超截止期比率  $MR$  比采用 PA-2PL 协议时要低。其主要原因为:(1)PAI-2PL 通过优先级继承策略减少了家族事务和正在提交事务的夭折重启;(2)PAI-2PL 减少了由于移动主机断接所引起的无效阻塞。图 5 表示两种并发控制协议下事务重启概率  $RP$  的变化情况。明显可以看出,采用 PAI-2PL 协议时,事务的重启概率大大低于采用 PA-2PL 协议,这是因为 PAI-2PL 协议对于与相同家族事务以及与正在提交的事务之间的数据存取冲突都是通过优先级继承解决的,减少事务重启数量可以避免系统资源浪费,这特别有利于移动主机上执行的事务,因为移动主机上的资源通常是有限的。

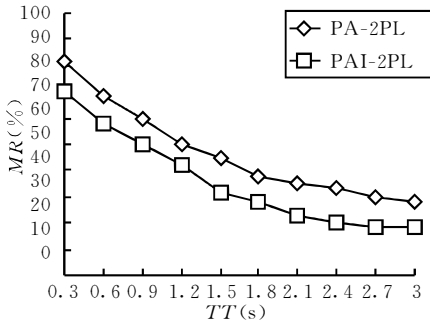


图 4 不同事务负荷下  $MR$  的变化

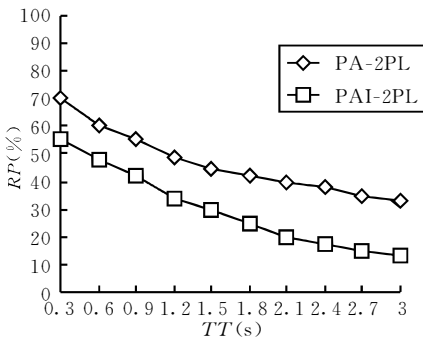


图 5 不同事务负荷下  $RP$  的变化

5 结束语

传统分布式实时事务管理机制不能较好地支持移动分布环境中实时事务的执行。因此,必须为移动分布式实时事务建立新的事务模型及其事务管理机制。本文分析了移动计算环境对实时事务的特殊要求,研究了一种结合优先级夭折与优先级继承的基于封锁的并发控制策略 PAI-2PL。我们在这方面做的工作概括如下:

- (1) 定义了一个移动实时嵌套事务模型;
- (2) 给出了支持上述事务模型的并发控制协议 PAI-2PL,并证明了它的正确性;
- (3) 对 PAI-2PL 协议进行了性能测试和分析,证明其具有较好的性能。

移动实时事务是一个新的研究领域,有许多方面需要研究,如移动实时事务的调度、提交与恢复机制等,我们将另文分别专门讨论。

参 考 文 献

- 1 Chrysanthos P K. Transaction processing in mobile computing environment. In: Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Advances in Parallel and Distributed Systems, New Jersey, 1993. 77~82
- 2 Lam K Y, Kuo T W, Tsang W H *et al.* Concurrency control in mobile distributed real-time database systems. Information Systems, 2000, 25(4): 261~286
- 3 LIU Yun-Sheng, LI Guo-Hui. Nested transaction in real-time database systems. Journal of Software, 1999, 10(5): 552~556 (in Chinese)  
(刘云生, 李国徽. 实时数据库系统中的嵌套事务. 软件学报, 1999,10(5): 552~556)
- 4 Kayan E, Ulusoy O. Real-time transaction management in mobile computing systems. In: Proceedings of the 6th International Conference on Database Systems for Advanced Applications, Hsinchu, Taiwan, 1999. 127~134

- 5 Saad-Bouzefrane S, Sadeg B, Amanton L. Soft real-time transaction scheduling in a wireless environment. In: Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, Magdeburg, Germany, 2001. 327

~334

- 6 LIU Yun-Sheng. Advanced Database Technology. Beijing: National Defence Industry Press, 2001 (in Chinese)  
(刘云生著. 现代数据库技术. 北京:国防工业出版社, 2001)



**LIAO Guo-Qiong**, born in 1969, Ph. D. . His main research interests include advanced databases technology, including real-time database, active database, main memory database, mobile database and engineering database, etc.

**LIU Yun-Sheng**, born in 1940, professor and Ph. D. supervisor. His main research interests include advanced da-

tases, including real-time database, active database, main memory database, and mobile database, etc, and their integration; database and information system development; real-time data engineering; and software methodology and engineering technology.

**YANG Jin-Cai**, born in 1967, associate professor, Ph. D. . His main research interests include database technology, advanced information system, electronic commerce and multimedia technology.

## 第八届控制、自动化、机器人和视觉国际会议征文

2004年12月6~9日 中国·昆明

The Eighth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2004, will be held in Kunming in December 2004. The conference will be co-organised by the School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University and Nanjing University of Science and Technology. The conference will provide a forum for Control and Automation professionals, manufacturing engineers and academic researchers to exchange up-to-date technical knowledge and experiences. ~ The conference will focus on both theory and applications. In addition to the technical sessions, there will be plenary, invited and tutorial sessions. The topics of interest are:

**Control:** Modeling and simulation of complex systems; Identification and estimation; Adaptive control; Robust control; Nonlinear control; Intelligent control; Hybrid systems; Computer networks control; Networked control systems; Control applications; Control engineering education

**Automation:** Instrumentation systems; Flexible manufacturing systems; Process Automation; Man-Machine Interactions; Computer Integrated Manufacturing; Factory modeling and simulation; Intelligent Automation

**Robotics:** Kinematics, dynamics and control; Mobile robot and navigation; Intelligent sensors and actuators; Dexterous manipulation and task planning; Medical robots; Humanoid robots; Underwater robots; Telerobotics and man-machine systems; Mechatronics; Mechanism design and applications

**Computer Vision:** Active and robot vision; Biomedical image analysis; Feature extraction, grouping and segmentation; Illumination and reflectance modeling; Image and video analysis/retrieval/indexing; Pattern recognition; Physics-based vision; Stereo/multiview geometry/SFM; Tracking and surveillance; Applications

**Emerging Technologies:** Machine learning; Soft computing; Modeling and simulations of biological systems; Biomedical instrumentation and applications; Micro-electromechanical systems

### Submission Procedure:

Papers must be written in English and should describe original work in detail. Please submit full papers to the website address <http://www.ntu.edu.sg/eee/icarcv> by 1 March, 2004. All submitted papers should be in the form of .pdf or .ps file and are to be limited to a maximum length of 6 pages (A4 size, single space, Times Roman of font size 10, two columns format), including figures, tables and references. Upon acceptance, authors will be required to register and present their papers. Papers will be published in the conference proceedings only if at least one of the authors is officially registered.

**Invited Sessions:** The Technical Programme Committee is soliciting proposals for invited sessions focusing on topics of ICARCV 2004. Prospective organisers should submit proposals to the Technical Programme Chairman by 1 March 2004.

**Best Paper Award:** Selection of the best paper will be made at the Conference based on both the technical content and presentation. The winner will be chosen by the Technical Program Committee in consultation with the International Advisory Committee.

### Important Dates:

Deadline for Full Paper Submissions: 1 March, 2004

Notification of Acceptance: 15 June, 2004

Submission of Camera Ready Manuscripts: 1 September, 2004