



嵌入式硬实时操作系统的趋势与TOPPERS技术

高田广章¹ 曾 刚²

1: NPO TOPPERS协会 会长
名古屋大学 信息科学研究科 教授
附属嵌入式系统研究中心 主任

Email: hiro@ertl.jp

2: 工学院研究科 讲师

Email: sogo@ertl.jp

❖ 嵌入式硬实时操作系统的趋势

- 当前的热点和今后的趋势
- RTOS的保护功能
- 多核处理器RTOS

❖ TOPPERS技术介绍

- TOPPERS概要
- 主要开发成果及应用实例
- TOPPERS专用许可证
- TOPPERS发展路线图

嵌入式硬实时操作系统的趋势

❖ 当前嵌入式系统所面临的挑战

- ❖ 汽车嵌入式系统设计的例子
- ❖ 复杂的汽车电子系统设计
 - 增加的开发成本和开发周期
 - 高可靠性，安全性，实时性的要求
 - ISO26262功能安全国际标准（2011/11/15）

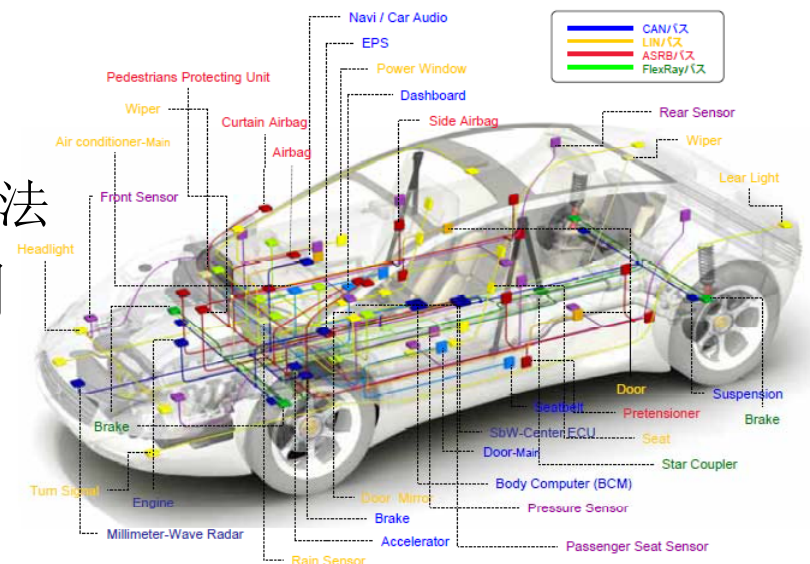


LEXUS LS-460

- 超过100个ECUs
- 7百万行软件代码

- ❖ 大规模复杂化的软件
 - 怎样取得高可靠性，安全性
 - 怎样有效利用以前的软件资产
 - 对策： RTOS的保护功能
- 以及基于AUTOSAR软件平台的设计方法

- ❖ 电子控制单元 (ECU) 的大量使用
 - 成本增加
 - 设置空间不足
 - 对策： 采用多核处理器统合ECU



<http://www.renesas.com>

❖ RTOS的当前热点

- 保护功能（内存保护，时间保护等）的实现
 - uITRON4.0/PX标准，TOPPERS新一代内核标准
 - AUTOSAR OS标准（车载软件平台）
- 多核处理器RTOS的开发
 - TOPPERS新一代内核标准
 - AUTOSAR Multi-Core OS标准（4.0版）

❖ RTOS今后的挑战

- 低功耗，省能量控制
 - 通用OS均已具备了低功耗，省能量控制功能，但是在RTOS中还没有普遍导入
- 支持Many-core processor的RTOS
- 支持动态可重构芯片的RTOS

❖ 什么是OS的保护功能

- 防止在OS之上运行的应用程序在出现异常时，对OS以及其他应用程序带来危害

❖ 保护功能的作用

- 软件缺陷（bug）的早期发现
- 当某一应用程序被修改后，不需要对其他应用程序进行再验证
- 可以针对应用程序的不同要求，采用不同的信赖性水平（例：功能安全规格IEC61508中的安全度水准SIL（Safety Integrity Level））设计
- 保护系统中的重要功能和数据
- 确保安全性（security）

❖ 空间分割资源访问保护功能

- 内存保护：防止对禁止访问区域内存的访问
- 对象保护（或者服务保护）：防止对禁止访问的内核对象的访问

❖ 时间保护功能

- 防止占用过多的处理器使用时间

❖ 资源动态分配保护

- 内存分配保护：防止分配过多内存

❖ 其他资源的保护功能（比如，网络通信时间）

❖ 保护单位

- 任务，中断调用...，作为保护的對象粒度太小
- 保护域 (domain) (或者，以过程，应用为保护单位)
 - 内核对象的集合
(如，任务，中断调用，信号量，内存区域等)
 - 一般只能访问同一保护域内的内核对象

❖ 实现保护功能所必要的硬件支持

- 处理器具有特权模式和用户模式，(实现 security 保护功能时必须的硬件功能)
- 实现内存保护功能，要求使用内存管理单元 (MMU) 或者内存保护单元 (MPU)

- ❖ 限定保护域能够访问的内存区域
 - 比如，限定任务只能访问如下的内存区域
 - 任务自己的栈区域
 - 同一保护域内的程序段和数据段
 - 共享的程序段
 - 共享的数据段（读操作，如果需要可以对写操作进行限定）
- ❖ 服务调用使用数据指针访问内存时，也能进行保护
- ❖ 并不需要像通用OS的进程一样，对每个保护域设置独立的内存空间

对象保护功能（服务保护功能）

- 限定保护域通过服务调用所能访问的内核对象
- 比如，限定能对某一信号量进行访问的保护域
- 限定能调用与内核对象无关的服务的保护域
- 比如，限定能禁止中断的保护域

特权服务的调用功能

- 登录在特权模式下能调用的服务
- 由中间件或者设备驱动在特权模式下调用该服务

❖ 目的

- 防止被保护的访问主体使用超过允许的处理器时间
- 最近被导入到RTOS中，但是具体的功能随OS而不同

❖ 例1：ITRON内核标准中的过运行（overrun）调用

- 当任务使用完了设定的处理器时间后，将自动启动该调用

❖ 例2：AUTOSAR OS标准中的时间保护

- 可设定任务，中断调用执行时间的上限
- 可设定任务，中断调用所允许的中断禁止时间以及资源占用时间的上限
- 可设定任务，中断调用到达时间间隔的下限

❖ TOPPERS/HRP2内核

- 与日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）共同开发
- 面向高信赖系统应用，实现了各种保护功能
 - 内存保护，对象访问保护，时间保护
 - 被选择作为SpaceWire（下一代宇宙飞行器用通信网络规格）用RTOS内核
 - 已接近完成，将于最近公开

❖ TOPPERS新一代车载系统RTOS

- 早期通过与丰田汽车公司的合作，进行了设计研究，编码，测试以及性能评价（2008年-2010年）
- 当前通过联合体（consortium）共同研究的形式继续开发（参加企业11家）（2011年-）
 - 实现了AUTOSAR OS 规格要求的多种保护功能
 - 并且对AUTOSAR OS 规格进行了针对多核的独立的扩展
 - TOPPERS在AUTOSAR OS多核实现技术上处于世界领先水平

❖ 为什么要使用多核处理器

- 因为高时钟频率所带来的发热问题，限制了单处理器性能的进一步提升
- 和一个2GHz的高性能单处理器比较，使用5个400MHz的低性能处理器要消费更低的功耗

❖ 多核处理器所面临的课题

- 对于很多的嵌入式系统来说，一定程度的并发性存在
- 并发执行可以是，进程/任务/线程的形式实现，如果能较好地实现相互同步·通信功能，就能比较容易对应
- 但是，由于很多情况下，软件都没有很好地实现这些功能，因此为了实现并发执行往往都需要进行相应修改

根据RTOS功能的多核处理器的分类

共享内存（密结合）型

- 对称型多核处理器（SMP）

- 各处理器具有同等的地位
- 基本上所有任务可在任何处理器上执行

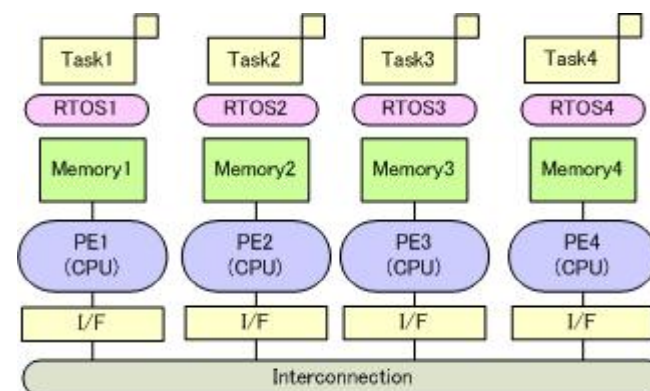
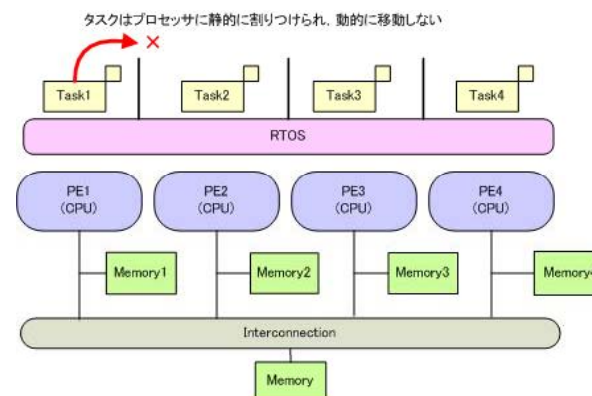
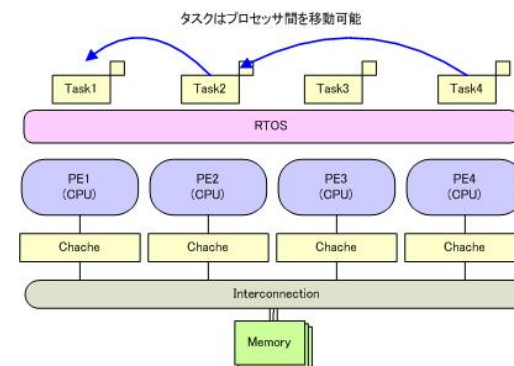
- 功能分散型多核处理器（FDMP）

- 各处理器的地位不同
- 事先决定各处理器所能完成的任务

消息交换（疏结合）型

- 对称型（负荷分散型）

- 功能分散型



图参照名古屋大学NCES博客:

<http://www.nces.is.nagoya-u.ac.jp/NEXCESS/blog/index.php?catid=40&blogid=5>

❖ 目标

- 除了并发处理以外，象单处理器OS一样使用
(但是因为并发处理，而带来了很大的不同！)

❖ SMP多核处理器OS功能

- 因为任务可以在任何处理器上执行，可以通过负载平衡来提高系统吞吐量

❖ FDMP多核处理器OS功能

- 由设计者负责分配任务到处理器，任务调度和中断处理以处理器为单位进行
- 除此之外，应用程序不需要考虑处理器的不同

❖ SMP多核处理器RTOS的课题

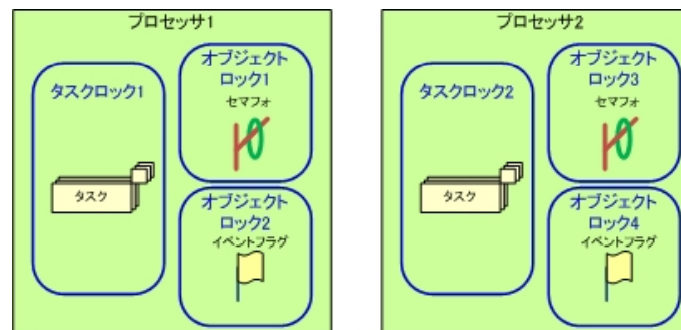
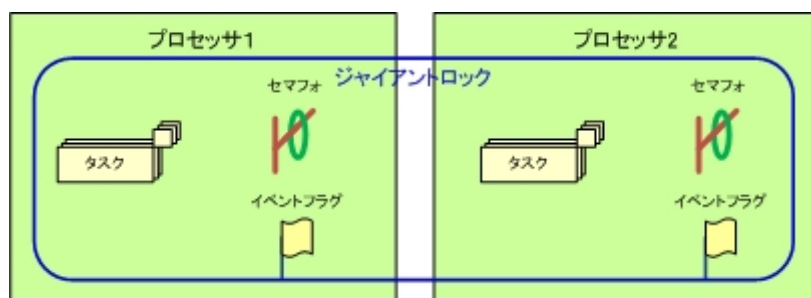
- 最差执行时间 (WCET) 难以预测, 不适合硬实时系统
- 调度扩展性 (schedulability) 低

❖ 互斥锁粒度和死锁回避

- 如果采用过小的互斥锁, 为了避免死锁付出的开销将会很大 (特别是最差情况时的开销)

❖ 处理器内同步互斥, 和处理器间同步互斥的问题

- 通过禁止中断来实现处理器内同步, 与通过自旋锁 (spinlock) 实现处理器间同步的实时性难以同时实现



图参照名古屋大学NCES博客:

<http://www.nces.is.nagoya-u.ac.jp/NEXCESS/blog/index.php?catid=53&blogid=5>

- ❖ FMP: Flexible Multiprocessor Profile RTOS
 - 针对硬实时应用，基于FDMP的原则，吸收了SMP的优点
 - 针对目标硬件情况，可配置互斥锁的粒度，并解决了死锁问题
 - 平衡互斥锁获取效率，和快速的中断响应时间
- ❖ 遵循功能分散原则（FDMP）
 - 任务，中断处理基本上在指定的处理器上执行
 - 任务调度，中断管理以处理器为单位进行（如同单处理器RTOS一样）
- ❖ 提供灵活的任务动态迁移(task migration) API
 - 可迁移任务和不可迁移任务静态指定
 - 可以通过API指定当前处理器上的任务迁移到任何其他处理器
 - 可以通过API指定任意任务在任意的处理器上启动
- ❖ 任务动态迁移的使用场景
 - 由应用程序按计划实现任务迁移
 - 由中间件实现动态负载平衡

❖ 互斥功能实现方法的不同

- 多处理器间的互斥不能通过禁止中断来实现
- 任务间的互斥可以通过信号量，互斥量来实现
- 任务和中断调用间的互斥，必须使用自旋锁等功能来实现

❖ 实现并发执行的难题

- 当自然存在的并发实行度小于可供执行的处理器时，要求将单个的处理分解为可以并发执行的多个任务来实现

TOPPERS技术介绍



以基于ITRON的研究开发成果为基础，开发各种高质量的开放源代码的嵌入式系统基础软件。同时，提供相关的应用技术。

目标成为在嵌入式领域中 类似Linux地位的OS

❖ 协会的推进主体

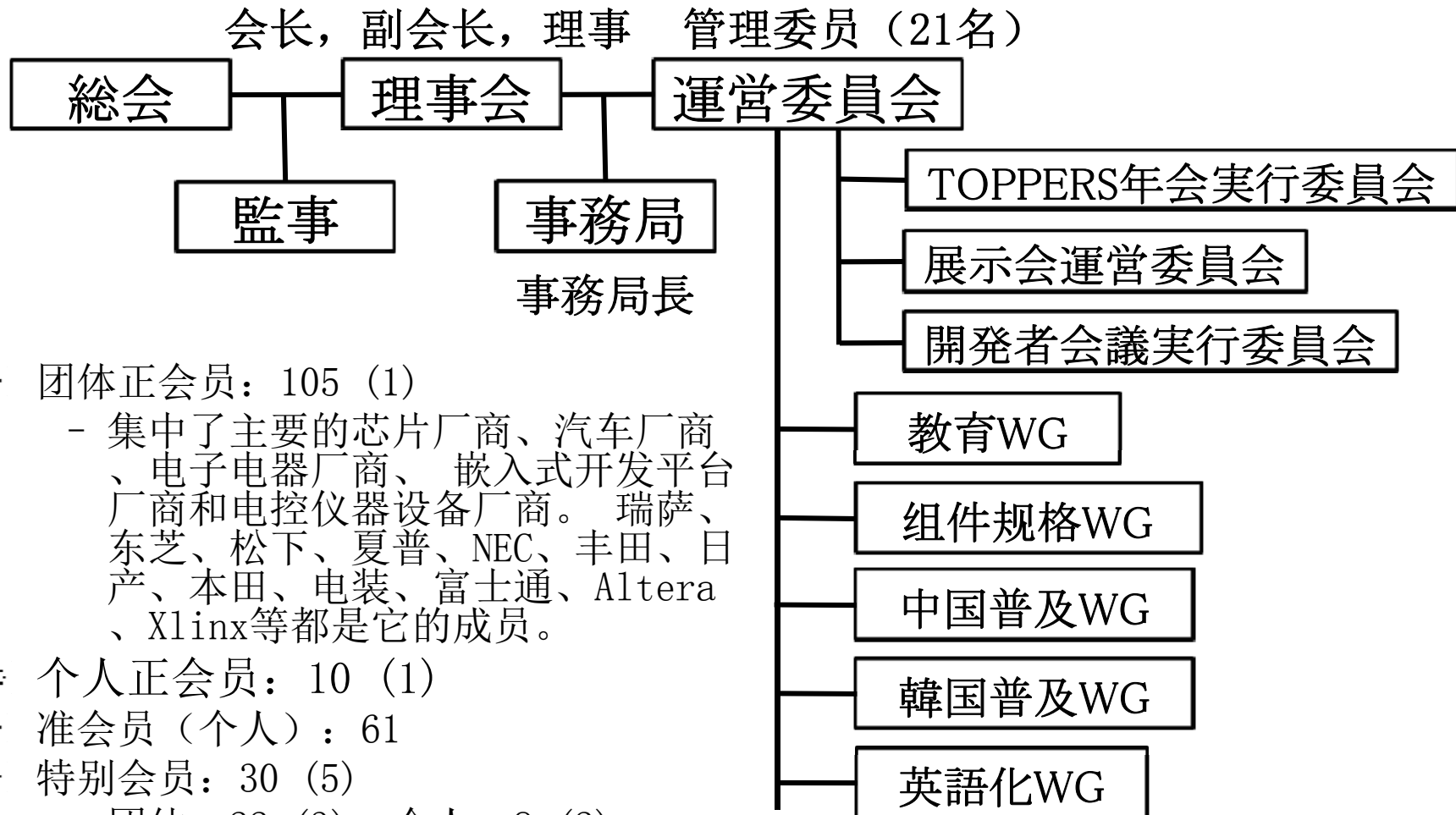
- 由产业界/学术界/政府的团体和个人组成的项目型团体
- 2003年9月注册为非营利组织（NPO）

❖ 协会创始人

- TOPPERS协会会长：名古屋大学 高田广章教授
- 名古屋大学嵌入式系统研究中心（NCES）创始人，主任

- ❖ TRON (The Real-time Operating system Nucleus)
 - TRON项目（坂村健，东京大学教授）制定的嵌入式系统的实时操作系统的标准规格
 - 1984年开始
 - 1999年发表 μ ITRON4.0规格书
 - 2010年作为ITRON规格的标准化团体的TRON协会解散
- ❖ 任何人都可以按照此公开规格开发自己的内核
 - 按照ITRON规格开发的内核不一定是开源的
- ❖ 从1990年代后半起，日本开发的嵌入式系统的30%采用了符合ITRON标准的内核（日本经济产业部和TRON协会的调查结果）
- ❖ **ITRON系统是世界上应用最多的操作系统之一**

[source: Linux News, Applications: The Most Popular Operating System in the World - By Jan Krikke]



- ❖ 团体正会员: 105 (1)
 - 集中了主要的芯片厂商、汽车厂商、电子电器厂商、嵌入式开发平台厂商和电控仪器设备厂商。瑞萨、东芝、松下、夏普、NEC、丰田、日产、本田、电装、富士通、Altera、Xilinx等都是它的成员。
- ❖ 个人正会员: 10 (1)
- ❖ 准会员 (个人): 61
- ❖ 特别会员: 30 (5)
 - 团体: 22 (3); 个人: 8 (2)

根据需要灵活地设置WG

合计: 206 (2011/11/7)

*() 中为TOPPERS在中国的会员数

嵌入式系统联谊会
华中科技大学
湖南大学

- ❖ 开发终极版的ITRON规格实时操作系统 **现已基本完成**
 - 减少基于ITRON开发的“过剩投资”和“过多的多样性”
- ❖ 研究新一代的实时操作系统技术
 - 充分满足嵌入式系统的需求，继承 ITRON 技术的优秀特征，进行新一代嵌入式操作系统技术的研究开发
 - 绝不等同于重复开发第二个 Linux!**
 - 通过开放源代码的理念，有效地集合产业界、学术界、政府等各类团体以及个人的智慧和力量
- ❖ 研究嵌入式系统的开发技术及开发工具
 - 提升嵌入式系统开发的质量和效率
- ❖ 推动嵌入式系统开发人才的培养
 - 利用开放式源代码软件的优势，通过提供教材，进行各种形式的普及教育，为嵌入式系统开发人才的培养做出贡献

- ❖ TOPPERS的任务之一就是开发嵌入式系统平台
 - ! TOPPERS的第二个“P”就是Platform（平台）
- ❖ 但是TOPPERS并不开发面向各个领域的系统平台，而是提供构建各应用系统平台所需的组件
 - 作为特例，TOPPERS直接参与开发汽车控制系统基础软件平台
- ❖ TOPPERS也开发将各种部件组合在一起构建系统平台的技术
 - TECS：面向嵌入式系统的组件系统
- ❖ 积累了众多可以直接应用于产业界的高质量的设计资产

- ❖ TOPPERS/JSP内核 **最早的开发成果**
 - 符合 μ ITRON4.0规格的标准功能要求的实时内核
- ❖ TOPPERS/FI4内核 **信息处理推进机构**
 - 实现了 μ ITRON4.0规格规定的所有功能的实时内核
- ❖ TOPPERS/FDMP内核 **信息处理推进机构**
 - 面向功能分散型多核系统的实时内核
- ❖ TOPPERS/HRP内核 **与JAXA共同开发**
 - 面向高可靠性系统，具有内存保护等功能的实时内核
 - 由日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）进行了验证

TOPPERS/ASP内核

新一代内核的起点

- 相对于JSP内核，从可靠性/安全性/软件可移植性等方面进行了多种扩张和改良
- 其扩张软件包可支持对象的动态生成

TOPPERS/FMP

- 以ASP内核为基础针对多核系统进行了扩张

TOPPERS新一代内核的综合规格

- 基于 μ ITRON4.0，为满足近10年来的新的需求而改良/扩张的内核规格
- 正在制定过程中，已经完成了ASP，FMP和HRP2内核的规格定义

- ⇨ TINET **经济产业部 地方联合体**
 - 符合ITRON TCP/IP API规格的紧凑型IP协议栈。支持IPv4 和IPv6
- ⇨ FatFs for TOPPERS
 - 支持FAT12/16/32的文件系统
- ⇨ CAN/LIN中间件包 **经济产业部 地方联合体**
 - 支持CAN和LIN的通信中间件
- ⇨ RLL (Remote Link Loader) **信息处理推进机构**
- ⇨ DLM (Dynamic Loading Manager)
 - 上述两个都是实现动态调用的中间件，但所使用的实现方式不同

- ❖ TECS (TOPPERS嵌入式组件系统: TOPPERS Embedded Component System)
 - 将各软件模块封装为组件, 通过将必要的组件结合在一起, 快速构建大规模嵌入式软件的技术 (规格和工具)
- ❖ SafeG
 - 在单一处理器上, 使通用OS和实时OS同时安全运行的双OS虚拟化技术
- ❖ TLV (TraceLogVisualizer)
 - 实时OS的执行履历的可视化工具
- ❖ TOPPERS Builder
 - 采用Eclipse/CDT的基于TOPPERS内核的应用综合开发环境
 - 提供能在Bootable Linux上运行的Bootable CD-ROM
- ❖ TTSP (TOPPERS软件测试套件包: TOPPERS Test Suite Package)
 - TOPPERS 新一代内核的测试套件
 - 包括独自の测试脚本语言, 以及由脚本自动生成测试程序的软件工具

- ❖ TOPPERS/SSP（最小功能内核）
 - TOPPERS 2010年度公开征集采纳项目
 - 由名古屋工业研究所和杉本明加（个人会员）开发
- ❖ 功能最小化的实时内核
 - 任务只具有三个状态，即运行状态，运行可能状态，和休止状态（没有等待状态）
 - 每个优先度水平只对应一个任务
- ❖ 标准内核大小（Cortex-M3, gcc）
 - ROM: 约 3 KB
 - RAM: 24 bytes
- ❖ 支持处理器：Cortex-M3, M32C, M16C

- ❖ 初级开发讲座教材 **提供中英文版本**
 - 通过动手实践，学习在RTOS上进行嵌入式软件开发的基础

- ❖ 中级开发讲座教材 **提供中文版本**
 - 学习网络编程及系统设计手法
- ❖ 基础1开发讲座教材
 - 学习小规模嵌入式系统的开发和RTOS的基础
- ❖ 基础2开发讲座教材
 - RTOS的讲解和内核调用的开发体验
- ❖ 其他的教育材料
 - TOPPERS版压水车，TOPPERS两足行走机器人教材
 - 面向嵌入式工程人员的TECS教育教材
 - 面向ET机器人大赛的TOPPERS培训教材

消费电子产品



PM-A970 (EPSON)



DO!KARAOKE (PANASONIC)

最初采用FMP
内核的产品

945SH (SHARP)



IPSiO GX e3300 (Ricoh)



GT-541 (Brother)



UA-101 (Roland)

TOPPERS OS 开发成果应用事例

工业产品及其它应用

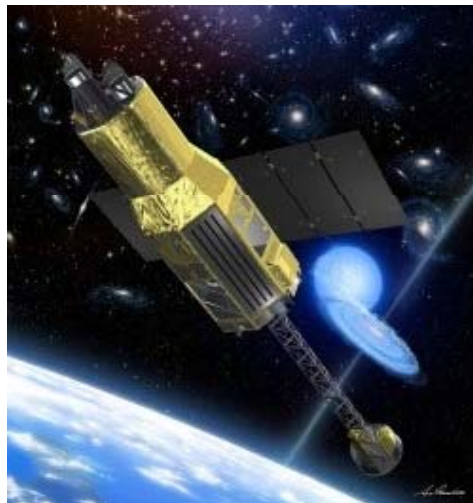
在车身控制中采用了TOPPERS/ATK1和CAN/LIN 中间件



Kizashi (SUZUKI)



H-IIIB (JAXA)
(开发中)



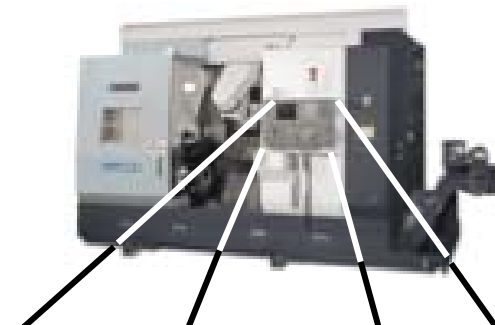
ASTRO-H (JAXA)
(开发中)



AP-X (Kyowa MEDIX)



DP-350 (Daihen)



OSP-P200 (Okuma)

TOPPERS开发的软件使用独自的软件许可证

❖ 基本出发点

- 考虑到嵌入式系统的具体情况，提供相对于GNU GPL、BSD等更为开放的许可证条件
- 通过宣传TOPPERS开发成果的实际使用事例，以获得进一步开发所需要的资金。为此，希望得到TOPPERS成果在什么领域被如何使用的信息

❖ 许可证的内容

- TOPPERS软件的派生物没有必要作为开放源代码公开，也可以进行销售以获取商业利益
- 在嵌入式设备中使用本软件时，仅需要向TOPPERS协会报告即可（报告义务）

— — Reportware — —

❖ TOPPERS/ATK1内核（第一代车载软件内核）

- 最早版本2004年11月开始公开
- 符合汽车控制系统领域的国际标准OSEK/VDX规格的实时内核
- 通过MODISTARC验证（下载后可直接用于制品）
- 符合MISRA-C语言设计规约
- 已在铃木多款汽车上应用

❖ CAN/LIN中间件包

- 支持CAN和LIN的通信中间件

❖ TOPPERS FlexRay中间件包

- 2006年面向会员公开
- 由时间触发模块，通信功能，网络管理功能构成

❖ 开发目标

- 制定基于AUTOSAR OS 规格的新一代车载嵌入式系统RTOS规格，并在此基础上开发RTOS
- 预定以TOPPERS/ATK2的名称，作为TOPPERS成果公开源码

❖ 基础研究阶段（2008年~2010年）

- 以名古屋大学嵌入式系统研究中心（NCES）为基地，通过与丰田汽车公司的合作，进行了设计研究，编码，测试以及性能评价。
 - 实现了AUTOSAR OS 规格的 SC1, SC2, SC3
 - 对AUTOSAR OS 规格进行了针对多核的独自の扩展

❖ 设计实现阶段（2011年~）

- 以NCES为中心，通过联合体（consortium）共同研究的形式继续开发
- **TOPPERS在AUTOSAR OS多核实现技术上处于世界领先水平**

项目的定位

- 通过吸引众多企业参加名古屋大学嵌入式系统研究中心(NCES)设定的研究开发课题，以联合体共同研究形式来推进研究和开发
- 培养高级研究开发人才的重要环节之一

参加企业（2011年5月为止，按50音顺）

- WITZ
- OTSL
- Sunny Giken Inc.
- 电装
- 东芝
- 丰田汽车
- 日本电器通信系统
- Panasonic 先进技术
- 富士软件
- 富士通VLSI
- 瑞萨电子

❖ 研究开发内容

- 制定基于AUTOSAR OS 规格的新一代车载嵌入式系统RTOS规格
- 根据制定的规格设计实现RTOS并进行评价
- 开发验证套件

❖ 研究开发体制

- 相关企业有12名技术人员常驻NCES参与开发
- 名古屋大学有8名老师和研究员参加

❖ 研究开发期间

- 第一阶段从2011年4月到2012年3月
- 根据进展和成果以决定是否继续

❖ 研究开发成果

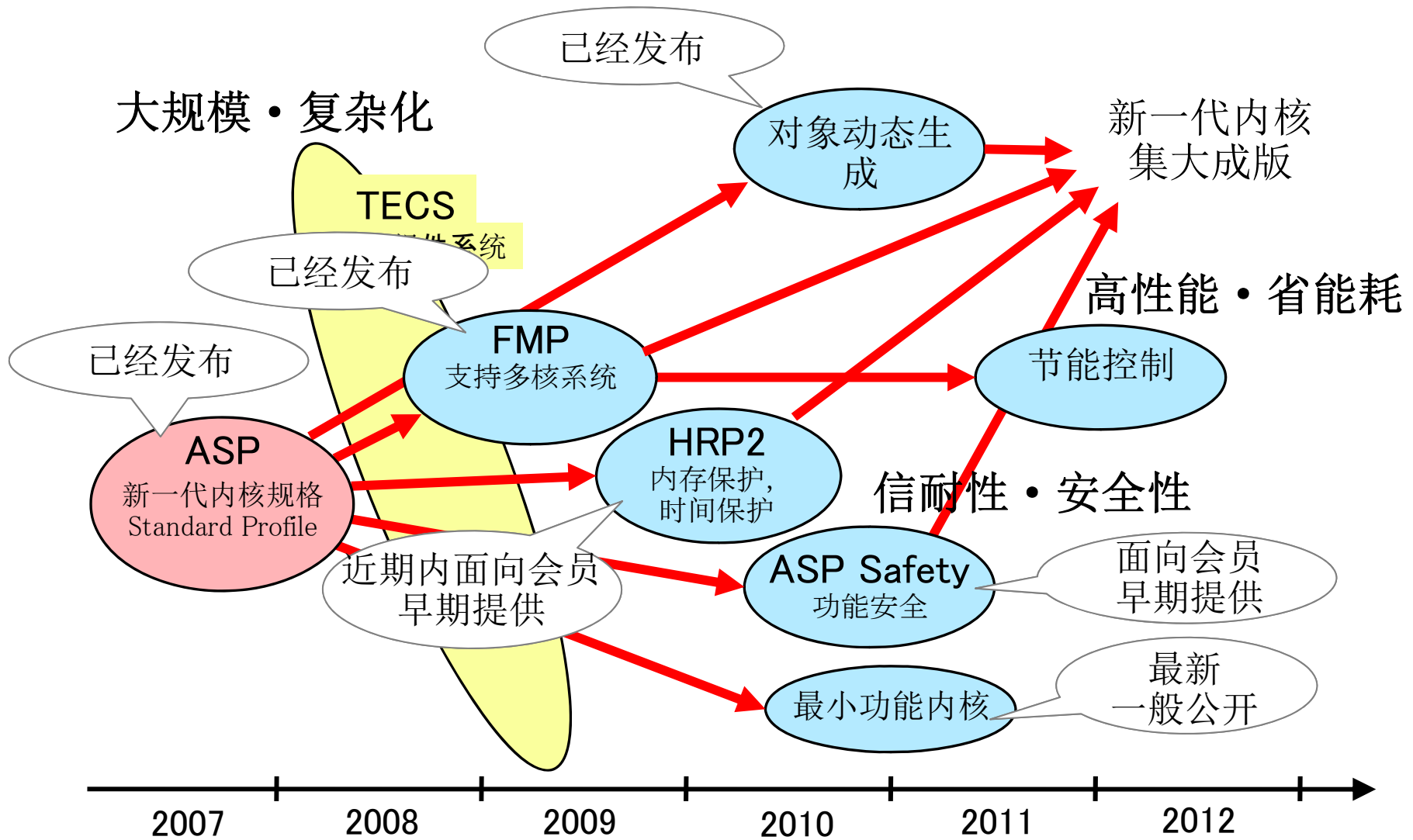
- 除了验证套件之外，其它研究开发成果将开放源代码

TOPPERS的发展方向

- 重视与TOPPERS关联的各种商业发展机会
 - 为了使基于开源软件的商业模式更容易成功，并不追求一切都要开源
- 国际推广和普及
 - 重视亚洲地区的推广和普及，设立中国普及WG和韩国普及WG

今后的工作重心

- 新一代实时内核技术：**追求高可靠性·安全性·实时性·省能耗！**
 - TOPPERS新一代内核（ITRON规范的发展）
 - 新一代车载系统RTOS(以OSEK/VDX, AUTOSAR规格为基础)
- 嵌入式软件组件化技术
 - TECS（TOPPERS Embedded Component System）
- 嵌入式系统平台及开发工具
 - 各种中间件和虚拟化技术
 - 开发工具(仿真器，视觉化工具)
- 嵌入式技术人员培训教材的开发
 - 培养嵌入式平台技术人员
 - 向ET机器人大赛提供RTOS，中间件和教材



欢迎使用TOPPERS成果并参与TOPPERS工程



- TOPPERS重视在亚洲地区的推广和普及
- TOPPERS重视使用TOPPERS成果所开展的商业活动
- 欢迎下载和使用TOPPERS的各种开发成果
- 欢迎加入TOPPERS协会，以推动TOPPERS工程的进一步发展
- TOPPERS在中国开展的有关活动敬请访问TOPPERS中文网站



… High Quality Open Source

面向工业控制的新标准

TOPPERS协会致力于为嵌入式系统领域提供高质量的开源软件以及教育资源，为嵌入式系统开发提出新的标准

<http://www.toppers.jp/>

中文 <http://www.toppers.jp/cn/>