

分时分区操作系统互斥信号量的设计与分析

冉 鹏, 颜纪迅

(飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:随着航空电子系统日趋复杂化以及对安全性的不断提高,采用空间隔离、时间预先分配的分时分区操作系统已成为未来的发展方向。分时分区操作系统 FCOS 中为了使分区内部并发执行的多个任务之间合理有效的共享资源和相互合作,需要一种可靠的互斥信号量机制进行保障。文中设计了一种同时采用优先级继承和优先级天花板的混合型互斥信号量机制,并在 PowerPC755 平台与其他操作系统的互斥信号量进行了试验对比分析,证明其可以高效地防止任务间发生优先级反转。

关键词:分时分区操作系统;互斥信号量;优先级反转

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)01-0043-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.011

Design and Analysis of Mutex in Temporal and Spatial Partitioning Operating System

RAN Peng, YAN Ji-xun

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the increasing complexity of avionics system and the continuous improvement of security, adopting the temporal and spatial partitioning operating system of spatial separation and time preassignment has become the developing direction in the future. Within the temporal and spatial partitioning operating system FCOS in order to enable the concurrent execution of multiple tasks in the internal of partition to share resource and mutually cooperate reasonably and effectively, a kind of reliable mutex mechanism is needed for security. In this paper a kind of hybrid mutex semaphore mechanism adopting both priority inheritance and priority ceiling is designed, and make an experiment to comparative analysis with the mutex of other operating system on the platform of PowerPC755 to prove that can high effectively prevent the occurrence of priority inversion among tasks.

Key words: temporal and spatial partitioning operating system; mutex semaphore; priority inversion

0 引言

分时分区操作系统是一种具有高安全性、高可靠性的嵌入式实时操作系统。它在空间上以分区作为资源分配单位,任务具有独立的存储器资源,从而实现用户与操作系统,用户与用户之间在存储空间上进行隔离,达到互不影响的目的。时间上采用预先分配好的时间调度框架对分区进行调度,分区的调度在时间上具有严格的确定性^[1]。

分时分区操作系统 FCOS 符合 ARINC653 标准,采用了 APEX 接口,从而使应用程序在可移植性、可重用性、模块化、集成化方面更加方便,已成为未来航空电子系统所采用嵌入式实时操作系统的发展趋势。

1 分时分区操作系统对互斥信号量的要求

FCOS 在互斥信号量的设计上需要解决任务与共享资源之间的关系问题,能够有效地避免任务在占用资源时出现优先级反转问题,并且在运行效率和灵活性上比其他类型的操作系统有更严格的要求。

1.1 优先级反转问题

图 1 描述了优先级反转是如何出现的。图中任务 1 优先级高于任务 2,任务 2 优先级高于任务 3。

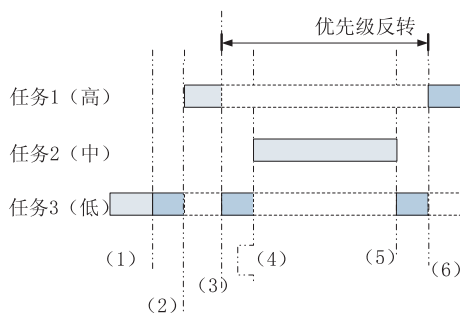


图 1 优先级反转图示

收稿日期:2012-05-21;修回日期:2012-08-25

基金项目:中航科学基金(20100718004)

作者简介:冉 鹏(1981-),男,硕士,工程师,CCF 会员,研究领域为嵌入式实时操作系统、嵌入式飞行控制软件。

(1) 任务 3 得到信号量。

(2) 任务 1 剥夺任务 3 的 CPU 使用权。

(3) 任务 1 试图得到信号量, 由于信号量被任务 3 占用, 任务 1 只能挂起, 等待任务 3 释放信号量; 任务 3 继续运行。

(4) 任务 2 剥夺任务 3 的 CPU 使用权。

(5) 任务 3 继续运行。

(6) 任务 3 释放信号量, 任务 1 得以运行。

在这种情况下, 任务 1 优先级实际上降到了任务 3 优先级的水平。因为任务 1 要等待, 直等到任务 3 释放占用的共享资源。由于任务 2 剥夺了任务 3 的 CPU 使用权, 使任务 1 的状况更加恶化, 并使任务 1 增加了额外的延迟时间。任务 1 和任务 2 的优先级发生了反转^[2-5]。

1.2 传统优先级反转解决方案

a) 优先级继承技术。

当一个任务阻塞了一个或多个高优先级的任务时, 它便忽略自己的原始优先级而以它阻塞的所有任务的最高优先级执行临界区, 使得该任务能尽快释放出优先级较高的任务所需要的资源。在退出临界区后, 该任务再返回到它最初的优先级。

优先级继承技术的缺点是在每次资源申请时都需要比较当前占有资源任务的优先级与申请资源任务的优先级大小, 并可能修改占有资源任务的优先级。这就导致一个任务在临界区内运行时多次优先级的改变。而优先级的改变是有一定时间代价的, 因此效率不高^[6-8]。

b) 优先级天花板技术。

为每一个临界资源设置一个天花板优先级, 即所有可能使用到它的任务中优先级最高的那个任务的优先级。当一个任务进入临界区时, 系统便把这个天花板优先级传递给这个任务, 使得这个任务的优先级最高。当这个任务退出临界区后系统立即把他的优先级恢复正常, 从而保证系统不会出现优先级反转的现象。

优先级天花板技术的缺点是需要预先知道可能是用到资源的所有任务的优先级, 并据此设定该资源的天花板优先级, 但这个要求在实际应用中往往是难以实现的^[9,10]。

2 复合型互斥信号量设计方案

通过 1.2 节对优先级继承和优先级天花板的分析与比较, 可以看到两种常规的优先级反转解决方案都由其各自的缺点, 同时考虑分时分区操作系统对任务实时性及高可靠性的要求, 文中将设计一种同时实现优先级继承和优先级天花板技术的混合型互斥信号量机制。

2.1 合型互斥信号量设计原理

设计原理:

a) 互斥信号量创建时由用户指定信号量的分派策略, 分为以下 4 种:

(1) FIFO 策略;

(2) 简单优先级策略;

(3) 优先级继承策略;

(4) 优先级天花板策略。

当选择优先级天花板策略时, 需要设置天花板优先级 PCP;

b) 如果使用了优先级天花板策略, 当任务成功获得互斥信号量时, 任务的优先级将被提升为 PCP。当任务释放信号量后, 其优先级恢复到原先的优先级;

c) 如果使用了优先级继承策略, 且任务不能获得所申请的互斥信号量时, 任务被阻塞, 同时将互斥信号量 owner 任务的优先级更改为这两个任务优先级较高者, 当 owner 任务释放互斥信号量后, 优先级恢复到原先的优先级;

d) 使用 FIFO 策略或简单优先级策略时, 不需要对任务的优先级进行更改, 仅区分当任务释放互斥信号量后, 从信号量的阻塞队列中取出一个被阻塞的任务时采用 FIFO 方法或采用按优先级高低选取方法。

2.2 数据结构及属性定义

互斥信号量控制结构设计如下:

```
typedef struct {
    Thread_queue_Control Wait_queue; /* 等待队列 */
    FCORE_mutex_Attr Attributes; /* 属性定义 */
    UINT32 lock; /* 锁定状态 */
    UINT32 nest_count; /* 嵌套次数 */
    Thread_Control *holder; /* 持有者指针 */
    Objects_Id holder_id; /* 持有者 ID */
} FCORE_mutex_Control;
```

为了同时使用优先级继承和优先级天花板技术, 需要在信号量的属性中能够体现这两个属性, 定义如下:

```
typedef enum {
    ...
    FCORE_MUTEX_PRIORITY_INHERIT, /* 优先级继承 */
    /*
    FCORE_MUTEX_PRIORITY_CEILING /* 优先级天花板 */
} FCORE_mutex_Disciplines;
```

2.3 主要算法实现

2.3.1 获取互斥信号量(P 操作) 算法

获取互斥信号量模块定义如下:

```
void _FCORE_mutex_Seize(
    FCORE_mutex_Control *the_mutex,
    Objects_Id id,
    BOOL wait,
```

Watchdog_Interval timeout
)
其中 the_mutex 为任务分配到的信号量句柄,id 为申请的 mutex 标识值,wait 为信号量被锁定时是否进行阻塞等待的标志,timeout 表明需要等待时,等待的最大时间。

算法主要设计思想:
a) 如果信号量未被锁定,则申请成功,进行优先级天花板处理;否则,若信号量被本任务自己锁定,则进行嵌套处理;否则判断是否需要等待,不需要则直接返回,需要则阻塞,并进行优先级继承处理;
b) 如果使用优先级天花板技术,需要在调用函数时传入天花板优先级 PCP,在任务成功申请到信号量后将任务优先级更新为 PCP,主要流程如图 2 所示:

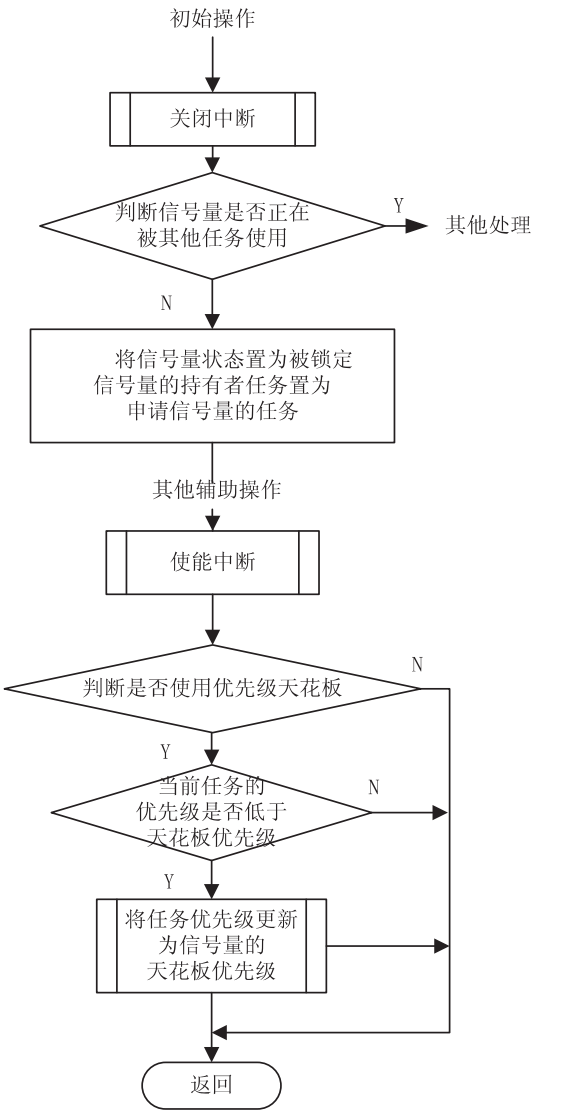


图 2 P 操作对优先级天花板技术处理流程
c) 如果使用优先级继承技术,则当任务申请的信号量已经被其他任务持有时,将持有者任务优先级更新为其优先级与当前任务优先级的较高者,主要流程如图 3 所示:

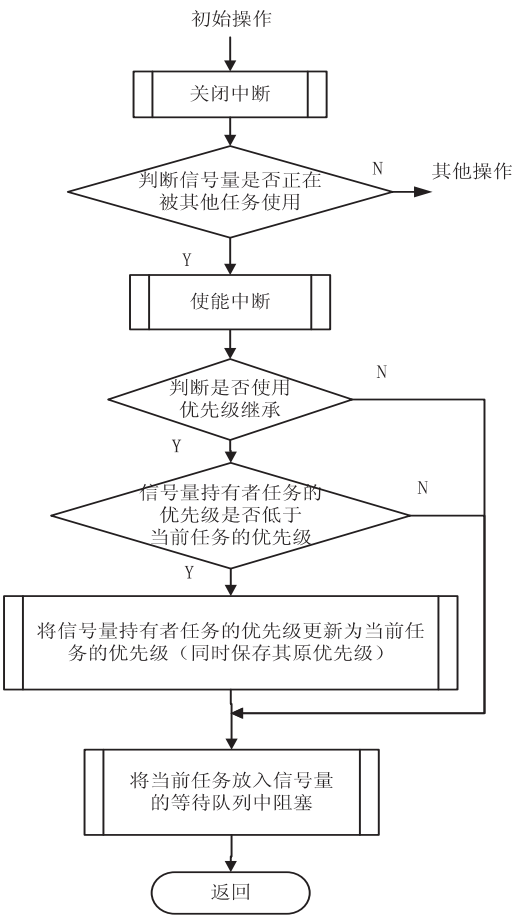


图 3 P 操作优先级继承技术处理流程
2.3.2 释放互斥信号量(V 操作)算法

释放互斥信号量模块定义如下:
FCORE_mutex_Status _CORE_mutex_Surrender(
FCORE_mutex_Control * the_mutex,
Objects_Id id
)

其中 the_mutex 为需释放的信号量句柄,id 为释放的 mutex 标识值。
算法流程如下:
a) 如果信号量嵌套计数为 0,则直接从等待队列中唤醒等待的任务;否则执行 b);
b) 嵌套计数-1(解锁),如果解锁后仍被锁定,则依据嵌套类型分别进行处理,否则执行 c);
c) 如果采用了优先级继承/优先级天花板技术,则需要恢复任务的原优先级;
d) 从等待队列中唤醒等待的任务,如果没有等待任务则置信号量未锁定;否则取出等待任务,如果使用优先级天花板技术,则将取出的任务优先级更新为信号量天花板优先级。

3 与其他操作系统互斥信号量比较分析

3.1 uC/OS-II 互斥信号量

uC/OS-II 中的互斥信号量针对优先级反转问题

采用了优先级继承技术,但是由于 uC/OS-II 不允许许多任务处于同一优先级,导致使用 mutex 的任务不能够将自己的优先级提升为它阻塞的所有任务的最高优先级执行。为此 uC/OS-II 采取的方法是将占有 mutex 的低优先级任务的优先级提高到略高于等待 mutex 的高优先级任务的优先级,即优先级继承优先级 (PIP)^[11]。

然而 PIP 需要在创建 mutex 时进行指定,指定为何值需要用户自己进行判断。而这又恰恰是优先级天花板技术的缺点(需要预先指定天花板优先级),可见,该方法不仅没有避免传统优先级继承的缺点,还带入了新的问题。

3.2 VxWorks 互斥信号量

VxWorks 中的互斥信号量采用的是传统的优先级继承技术^[12]。其算法与文中 1.2 节中描述的类似。当用户能够确定使用该信号量的全部任务的优先级时,此方法的效率将远远低于优先级天花板技术。

3.3 混合型互斥信号量

文中设计的混合型信号量兼顾了优先级继承和优先级天花板两种方法。

当用户能够确定天花板优先级时可以依据优先级天花板策略将占有 mutex 的任务一次性提升到天花板优先级 PCP,避免了优先级继承技术中比较当前占有 mutex 任务的优先级与申请 mutex 任务的优先级大小,以及修改占有 mutex 任务的优先级时所需要的时间开销。此时,运行效率明显优于 uC/OS-II 和 VxWorks 的互斥信号量机制。

当用户无法确定天花板优先级时也可以退而使用优先级继承技术,依然可以有效地避免优先级反转。

3.4 试验分析

在 PowerPC755 处理器板上分别使用分时分区操作系统 FCOS 及 VxWorks5.5 针对互斥信号量进行仿真测试,测试方法如下:

1) 如图 1 所示分别创建三个任务 T1、T2、T3,优先级 $T1 > T2 > T3$,按 T3、T1、T2 的顺序依次运行三个任务(不使用防优先级反转策略);

2) 使用辅助时钟计算三个任务运行完成所使用的时间 time1;

3) 使用防优先级反转策略重新运行三个任务,并使用辅助时钟计算三个任务运行完成所使用的时间 time2;

4) 计算 $\Delta T = \text{time2} - \text{time1}$,即为解决优先级反转所消耗的时间。

按以上方法,任务数不断增加,可获得在不同任务数时,信号量防止优先级反转所付出的时间代价。

在使用 FCOS 进行仿真的过程中,由于任务数及

优先级已知,可直接采用优先级天花板策略;VxWorks 采用的是其唯一的优先级继承策略。仿真结果如图 4 所示。

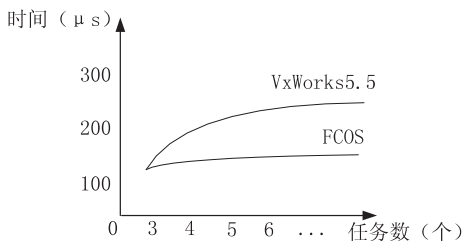


图 4 仿真结果

从仿真结果中可以看到,只有三个任务参与信号量争夺时,两种方法的时间消耗基本是一样的。随着参与争夺信号量任务数的增加,采用优先级继承的 VxWorks 操作系统时间消耗有比较明显的增加,而在预知任务优先级而采用优先级天花板策略的 FCOS 操作系统的时间消耗增加的很少。

可见,采用混合型互斥信号量的分时分区操作系统 FCOS 在优先级可预知时,工作效率大大高于其他操作系统;即使用户无法确定天花板优先级,也可以退而使用优先级继承技术,依然可以达到其他操作系统的效果。

4 结束语

复合型互斥信号量通过结合优先级继承与优先级天花板两种技术的结合有效地解决优先级反转问题。在使用时可由用户进行配置选择,大大提高了实时系统的灵活性,符合分时分区操作系统 FCOS 对可靠性和灵活性的要求。

分时分区操作系统 FCOS 已在国内某小型无人直升机上进行试飞验证。在多任务调度的过程中,复合型互斥信号量能够有效地防止任务间发生优先级反转,满足系统的应用需求。

参考文献:

- [1] Tang Xiaoming, Zhu Zhiqiang. A Safety Critical Operating System towards Partitioning Architecture[C]//Proceedings of International Conference on Pacific Asian Aviation and Aerospace. [s. l.]:[s. n.], 2010.
- [2] Babaoglu O, Schneider F B. Priority Inversion and Its Prevention[J]. Journal of Real-time Systems, 1993, 16(5): 285-303.
- [3] 郑尚志,陈祖爵,韩云,等. Linux 中信号量机制研究[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(12): 92-95.
- [4] 丛伟,王勇,于宏坤. 用 VxWorks 的信号量机制实现任务同步[J]. 微机发展(现更名: 计算机技术与发展), 2004, 14(7): 43-44.

图 3 给出了采样率为 0.4 时的 lenna 重建图像的主观视觉效果比较。可以看出,在相同的采样比率下,文中给出的方法可以更好地保留图像的重要细节信息,更好地重建图像质量,并且具有较少的重建噪声。



图 3 重建图像质量比较 (SR=0.4)

4 结束语

在分析图像 DCT 系数分布特性的基础上,提出了一种基于灰度纹理信息的压缩采样方法。该方法通过提取图像分块离散余弦变换交流系数的能量,充分利用代表图像细节纹理信息的交流分量系数。细节纹理信息比较丰富的图像块分配相对较多的测量维数,纹理细节不太丰富的图像块分配相对较少的测量维数对图像压缩采样。

大量实验结果表明:相对于同类方法,该方法在保留图像纹理细节的同时,不仅能够有效提高图像的重建质量,而且能够更好地降低采样比率和有效降低系统的计算复杂度。

参考文献:

- [1] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Yu Ying, Wang Bin, Zhang Liming. Saliency-based Compressive Sampling for Image Signals[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(11): 973-976.
- [3] Ji Shihao, Xue Ya, Carin L. Bayesian compressive sensing[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008, 56(6): 2346-2356.
- [4] 李树涛, 魏 丹. 压缩传感综述[J]. 自动化学报, 2009, 35(11): 1369-1377.
- [5] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [6] Li Lin, Kong Lingfu, Lian Qiusheng. Image compressed sensing reconstruction based on contourlet Wiener filtering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2051-2056.
- [7] Lian Qiusheng, Gao Yanyan, Chen Shuzhen. Compressed sensing image reconstruction based on two-step iterative shrinkage and complex wavelet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1426-1431.
- [8] Stnkovic V, Stnkovic L, Cheng S. Compressive video sampling[C]//16th Eur. Signal Processing Conf. [s. l.]: [s. n.], 2008.
- [9] Stnkovic V, Stnkovic L, Cheng S. Compressive video sampling with side information[C]//IEEE Int. Image Processing. [s. l.]: [s. n.], 2009: 3037-3040.
- [10] Candes E J, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections; universal encoding strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [11] Jing Zou, Gilbert A C, Strauss J, et al. Theoretical and experimental analysis of a randomized algorithm for sparse Fourier transform analysis[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 211(2): 572-595.
- [12] Gan L. Block compressed sensing of natural images[C]//International Conference on Digital Signal Processing. [s. l.]: [s. n.], 2007: 403-406.

(上接第 46 页)

- [5] 毛德操, 胡希明. Linux 内核源代码情景分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [6] Stallings W. 操作系统-精髓与设计原理[M]. 第 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [7] 王继刚, 顾国昌, 谢世波, 等. 一种改进的优先级继承协议及其算法研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(8): 41-44.
- [8] 王亚军. 优先级继承运用于 Linux 内核信号量的研究与实现[J]. 计算机系统应用, 2010(11): 203-207.
- [9] Goodenough J B, Sha L. The Priority Ceiling Protocol: A Method for Minimizing the Blocking of High Priority Ada Tasks

[C]//Proc. of the 2nd International Workshop on Realtime. [s. l.]: [s. n.], 1987.

- [10] 胡国珍, 范生凯. 嵌入式 RTOS 优先级天花板研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8): 1893-1895.
- [11] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 UCOS-II[M]. 邵贝贝译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [12] River W. VxWorks Kernel Programmer's Guide[M]. Alameda, USA: Wind River Systems, Inc., 2003.

分时分区操作系统互斥信号量的设计与分析

作者: [冉鹏, 颜纪迅](#)
作者单位: [飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013(1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201301013.aspx