

# 基于 `PTOLEMY II 11.0.1` 的实时系统实例设计 与仿真

## 1. 系统概述

本系统基于 Ptolemy 实现了对小球运动的仿真系统，通过对小球的上、下、左、右四种运动的仿真，使用先进先出（First In First Out, FIFO）、固定优先级（Fixed Priority, FP）、Round-Robin、最早截止时间优先（Earliest Deadline First, EDF）四种调度策略对小球的四种运动进行调度，从而探究这四种调度策略的特征。本系统主要包含三个模块：

1. 任务模块：对小球的四个方向的运动进行建模，抽象为实时系统中的任务（Task）；
2. 调度器模块：对小球的四个方向的运动所对应的Task进行调度，调度策略包括
  - 先进先出算法（First In First Out, FIFO）
  - 固定优先级算法（Fixed Priority, FP）
  - 循环调度算法（Round-Robin）
  - 最早截止时间优先算法（Earliest Deadline First, EDF）
3. 可视化模块：对小球的运动以及系统的调度决策进行可视化输出。

本文档将针对实时系统的建模方式、基于 `Ptolemy II 11.0.1`<sup>1</sup> 的建模实现、四种调度算法的特性分析、以及可视化结果进行叙述。最后一章中包括我们的源码结构以及系统的运行方法。

## 2. 整体设计

本节将针对系统概述中描述的顶层建模设计进行叙述，描述系统的基本运作原理。`Ptolemy II 11.0.1` 来自于 UC Berkeley 项目组成员所制作的信号仿真系统，经过多年的发展完善，它具有对实时系统进行仿真的功能。我们使用它对我们设计的小球运动系统进行建模，仿真其实时环境下的运作模式，探究实时系统调度算法的特征与优缺点。顶层视图如图1所示，其中参数TaskNum表示系统中的任

务数量，Frequency表示时钟周期：

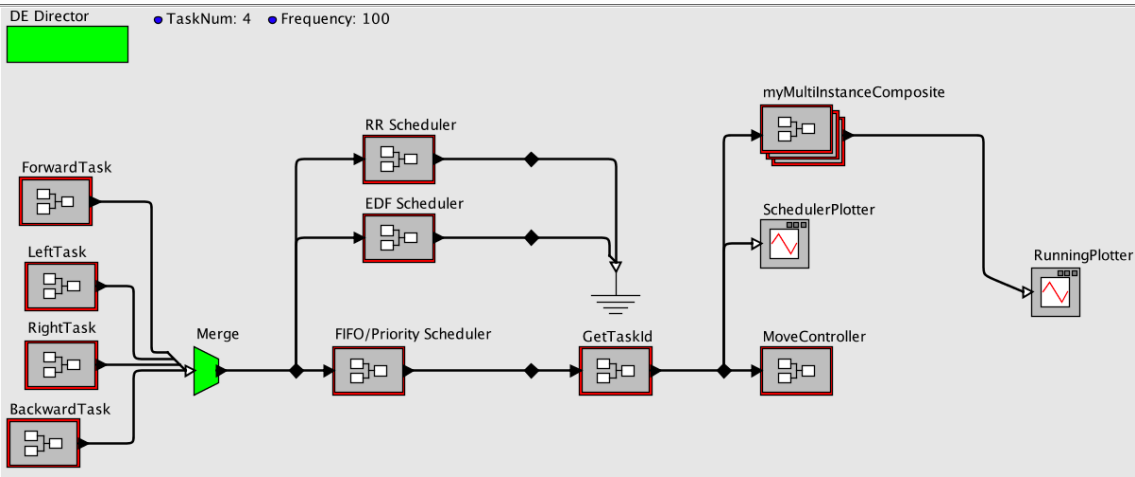


图 1 整体设计

## 2.1 任务模块

本模块负责对小球的四个方向的移动进行建模。在我们的模型中，需要进行的简化假设如下：

1. 小球只能在一个平面上运动，且只有四个移动方向，分别为：
  - 向前 (Forward)
  - 向后 (Backward)
  - 向左 (Left)
  - 向右 (Right)
2. 小球在每个给定的时刻只能向一个方向移动，如向左移动。不存在类似于向左上方移动的情况
3. 小球移动方向的切换不需要时间

根据以上三条假设，可以将小球的四个方向的移动分别抽象为实时系统中的四个任务：ForwardTask, BackwardTask, LeftTask, RightTask。这四个Task遵循实时系统建模的所有条件，即：只有一个处理任务的中央处理器CPU，每个给定时刻只有一个任务可以在运行；两个任务之间的上下文切换开销不计。这四个任务在 `Ptolemy II 11.0.1` 仿真软件中的建模结构图如图2所示：

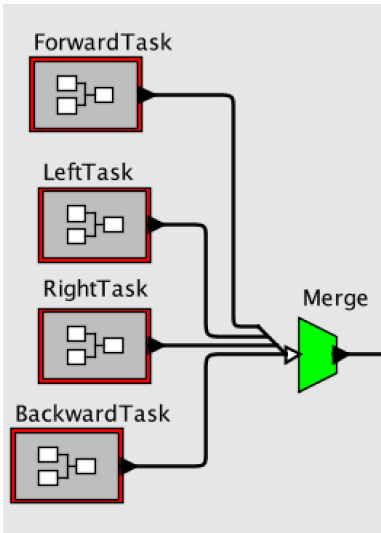


图 2 任务模块设计

同时，我们为每个任务添加了实时系统中任务调度的相关参数，包括

- computationTime, 计算时间。即需要向某一方向行进的时间长度。
- priority, 优先级。优先级高的任务可以抢占优先级低的任务。
- startTime, 即任务到达的时间。
- id, 任务的编号。每个任务都有唯一的编号。
- relativeDeadline, 相对deadline。

此模块输出的任务及其包含的调度相关信息 (computationTime, priority, id) 将被Merge模块所合并，统一输入到调度器模块。本模块设定了默认的startTime，即无需用户进行操作，即可触发任务。具体设计见第3章。

## 2.2 调度器模块

调度器模块接收来自于任务模块的任务信号，对来自于三个Task的Job按照三种调度策略进行调度。三种调度策略分别有：

- 先进先出算法 (First In First Out, FIFO) :

先来的任务先被调度运行，后来的任务需要等待先来的任务执行完毕才可以执行。这种调度算法有较为简洁的实现（在建模软件中实现也较为简洁），但没有考虑到任务的优先级；

- 固定优先级算法 (Fixed Priority, FP) :

优先级较高的任务先被执行。此算法虽然考虑到了任务的优先级，使得更为重要的任务优先执行，但存在饿死低优先级任务的风险；

- 循环调度算法 (Round-Robin) :

设置一个时间片，每个任务在每次循环中至多执行一个时间片的时间，超过该时间片后即刻放弃CPU，而在每个循环中所有任务按照FIFO算法进行调度。该算法的优点是达到了所有任务之间执行时间的公平，最小化了等待时间，但是由此带来了较为频繁的任务切换，即产生更多的上下文切换开销。本文没有对上下文切换的开销进行仿真，如2.1节中的简化假设所述。

- 最早截止时间优先算法 (Earliest Deadline First, EDF) :

截止时间最早的算法优先执行。本文中实现的EDF是抢占式的EDF算法，它最优化了deadline miss的发生，即发生的deadline miss最少。

在 `Ptolemy II 11.0.1` 中，我们使用了三个模块来对这四种调度算法进行建模，如图3所示，其中FIFO和FP算法被合并并在同一个模块实现，这是由于FIFO本质上是所有任务优先级相同的FP调度算法。调度模块接收来自于Merge的任务信号，向可视化模块输出Task Id。注意，可视化模块只接收来自于一个调度器的输出，其他调度器的输出将被抛弃。如图3，我们默认选择接收来自于FIFO/FP调度器的输出信号。

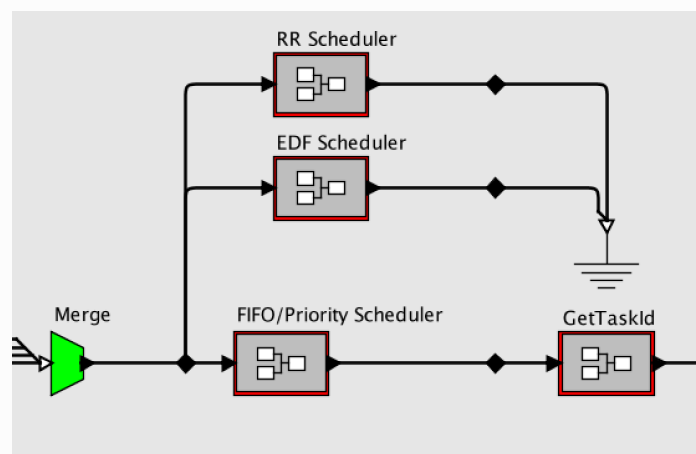


图 3 调度器模块设计

## 2.3 可视化模块

可视化模块接收来自于调度器模块的id，即当前运行的任务的id，来进行两部分可视化，分别是调度器调度决策可视化模块（折线图）以及小球运动的动画显示模块。如图4所示，MoveController实现了对小球运动的动画显示，使用了 `Ptolemy II 11.0.1` 软件中的Translate 3D组件以及ViewScreen组件。RunningPlotter对每个任务的调度情况绘制折线图，SchedulerPlotter对系统中正在运行的任务的ID绘制折线图。MyMultiInstance对ID信号进行多路复用，输入RunningPlotter产生4条折线图，对应每个任务的调度情况。

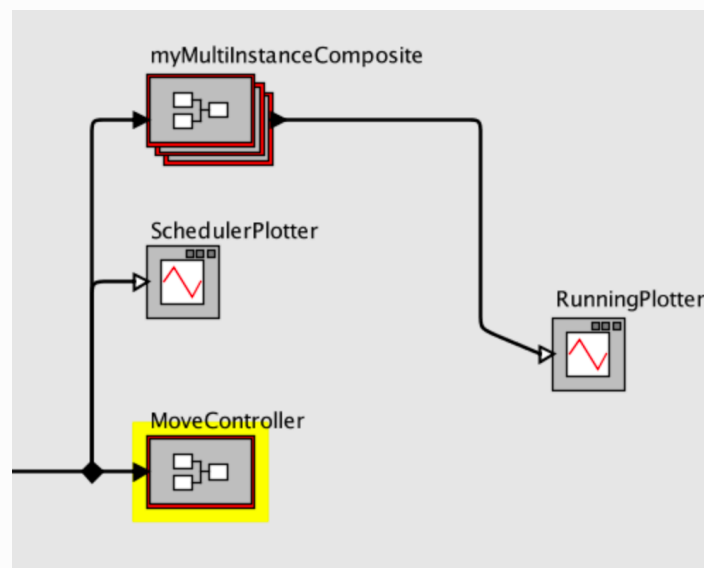


图 4 可视化模块设计

## 3. 详细设计

本章对系统的三个模块的设计进行叙述，描述其运行原理，以及如何对不同的调度算法进行仿真。我们的设计使用了 Ptolemy II 11.0.1 软件中的各类组件，每个组件发挥着不同的功能，详细参考文献 2。我们用 特殊字体 表示 Ptolemy II 11.0.1 软件中的组件，用普通字体表示其他参数。

### 3.1 任务模块

如图 5 所示为 ForwardTask 模块的内部结构，我们使用 Const 组件表示任务的参数，即 computationTime, priority, id, relativeDeadline。而 SingleEvent 组件用于在给定时刻 startTime（任务的到达时间）产生一个信号，输入到各个 Const 的 trigger 端口。这样，每个 Const 组件将会在 startTime 时刻向 RecordAssembler 发送其 value（即 computationTime, priority, id, relativeDeadline），而其他时刻 Const 组件没有输出（输出为空）。RecordAssembler 将这四个 value（可能为空）合并成一条信息，在 startTime 时刻输出到 out 端口。

我们基于此结构设计了四个任务，通过对每个任务的 startTime、relativeDeadline、computationTime 等参数进行手动设定，从而探究不同调度算法的特性。如 2.1 节所示。这四个模块产生的信号被 Merge 组件聚合后，发向调度器模块。

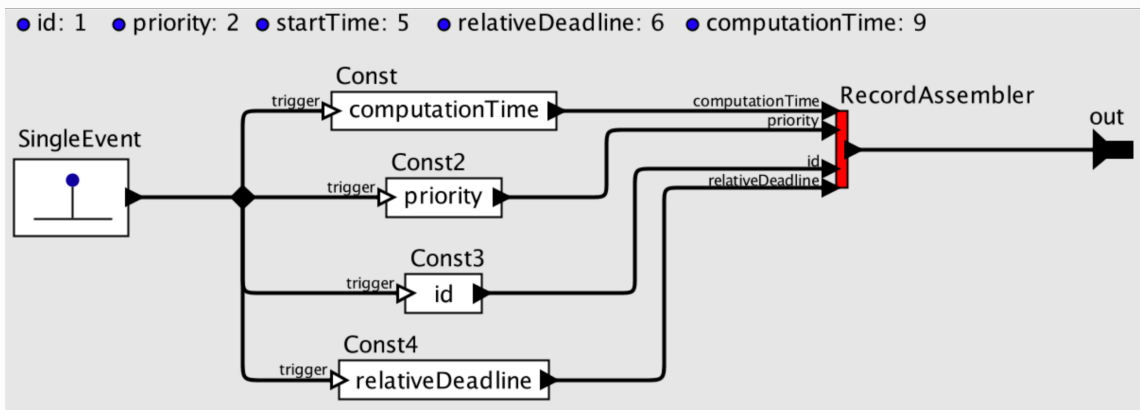


图 5 任务模块详细设计

### 3.2 调度器模块

调度器模块接收 Merge 组件发来的 Task 信号。我们实现了四种不同的调度算法，本节将一一讲解。

#### 3.2.1 先进先出、固定优先级算法（FIFO、FP）

由于 FIFO 算法是 FP 算法 priority = 1 的特殊情况，故我们用同一模块实现 FIFO 算法和 FP 算法。如图 6，in 端口输入的是来自四个 Task 的信号，in 信号发送到 RecordDisassembler 进行解码，得到两个信号，分别是 computationTime 和 priority，这两个信号是 Task 的执行参数。我们添加了一个参数 isFIFO，让我们不加修改即可实现两种调度算法：

- 当isFIFO设置为1时，该模块是一个FIFO调度器，所有Task的优先级相同，都为1；
- 当isFIFO设为0时，该模块是FP调度器，priority信号被 `expression` 组件保留。

我们将Task信号以及computationTime、priority信号作为 `AdvancedServer` 组件的输入，同时使用 `DiscreteClock` 组件作为 `AdvancedServer` 的trigger，使其在每个时钟周期都对到达的任务进行处理，并且输出正在执行的Task，即

`AdvancedServer` 组件改造自 `Server` 组件，其本质是一个固定优先级的服务器，接收任务信号以及任务对应的computationTime、priority，当任务执行完成后输出对应Task。这样，可视化模块不能在每个时钟周期获知正在执行的Task，也无法绘制相关图像。为此，我们定制了 `AdvancedServer`，添加trigger输入，使得 `AdvancedServer` 可以按照时钟周期输出正在执行的Task，我们称之为currentExec输出端口。为此，我们修改了 `Server.java` 的fire函数（见第5章），在每次接收到trigger信号之后，向currentExec端口输出当前执行的Task，如果当前Server中没有正在执行的Task，currentExec端口将输出null。

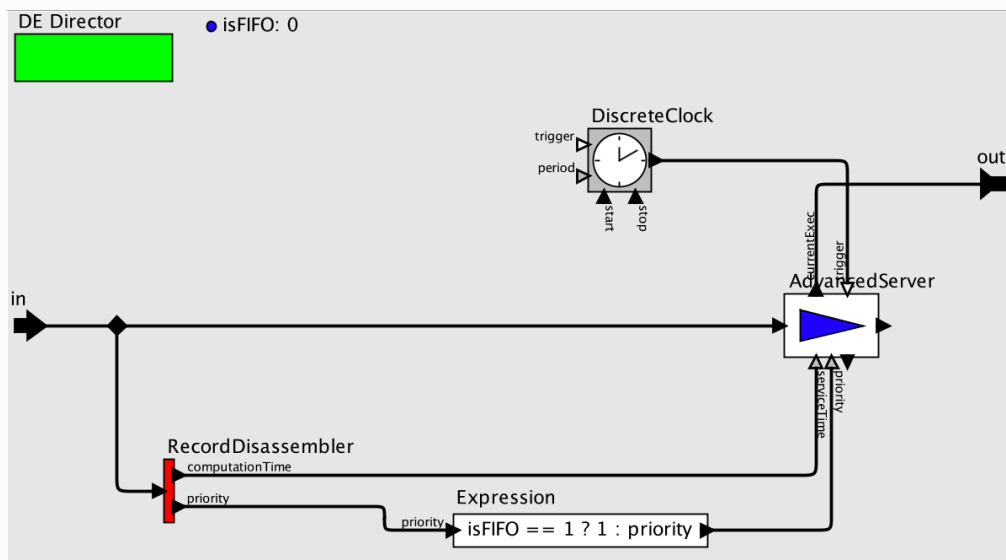


图 6 FIFO/FP调度器设计

### 3.2.2 最早截止时间优先算法（EDF）

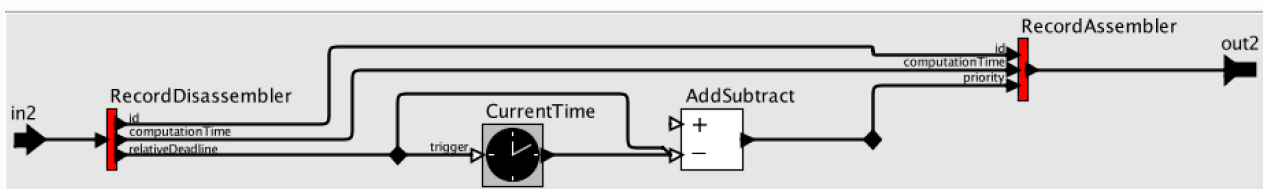


图 7 GetPriorityByDeadline模块设计

有了之前 `AdvancedServer` 的实现，我们可以不费力地将FIFO调度器转化为一个EDF调度器。如图8所示，我们增加了一个 `GetPriorityByDeadline` 模块，用来将距离截止时间近的任务设为高优先级任务，其实现如图7所示。`CurrentTime` 模块用来获取当前时间，将当前时间currentTime加上relativeDeadline，再取负值，作为任务的优先级priority。这样，绝对截止时间越早的进程将会有更高的优先级，即为抢占式的EDF调度算法。

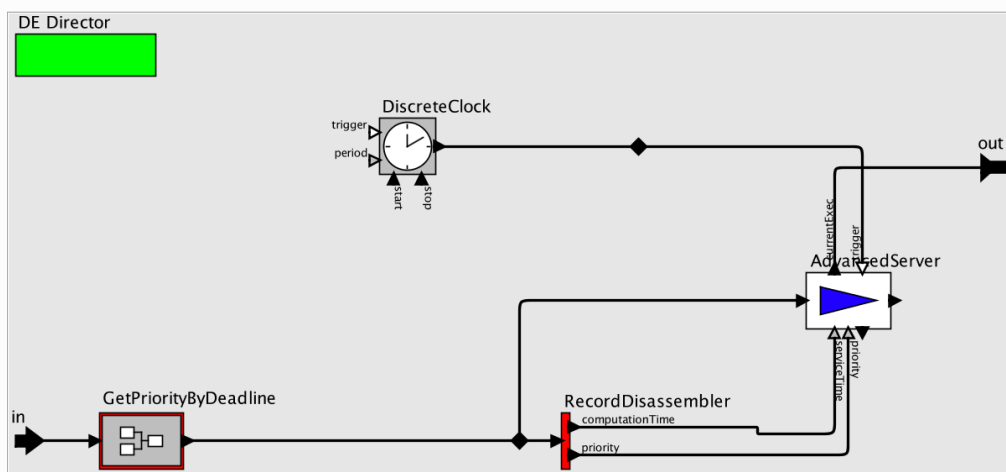


图 8 EDF调度器设计

### 3.2.3 循环调度算法（ROUND-ROBIN）

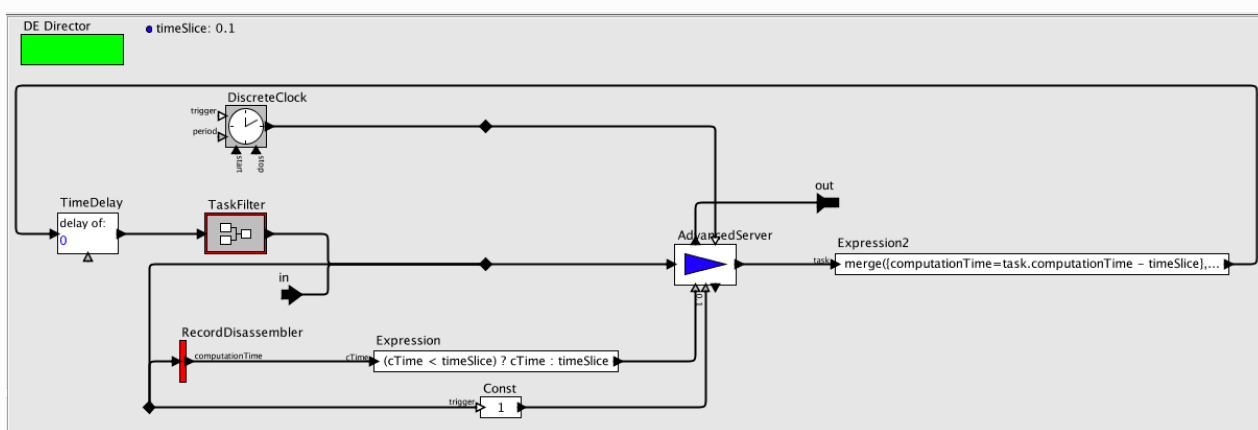


图 9 RR调度器设计

循环调度算法不能复用来自FIFO调度器的设计，需要重新进行设计。基于已有的 `AdvancedServer`，我们修改serviceTime（computationTime）输入来实现RR调度算法。如图9所示，我们将in端口的输入使用 `RecordDisassembler` 进行解码，获取当前到达任务的执行时间，作为 ctime 输入到 `Expression` 组件中。`Expression` 对 ctime 进行判断，如果 ctime 大于RR调度器的时间片参数 timeSlice，则将 timeSlice 作为 serviceTime 输入到 `AdvancedServer` 组件；否则将剩余的 ctime 输入到 `AdvancedServer` 组件。`Const` 组件将固定的 priority（1）输入到 `AdvancedServer` 组件。`AdvancedServer` 组件输出的 Task 再经过 `Expression2`，其 computationTime 被减去了 timeSlice，该 Task 经过 `TaskFilter` 组件的判断，如果 computationTime 为 0，即已经完成执行，那即可过滤掉此 Task。`TaskFilter` 的实现如图10所示。

经过如此的设计，每个任务不会占用 Server 超过 timeSlice 的时间就会将 Server 释放给下一个 Task，而 `AdvancedServer` 组件保证了在每个调度循环中，所有 Task 遵循 FIFO 调度算法。于是，我们即可实现 RR 调度器。

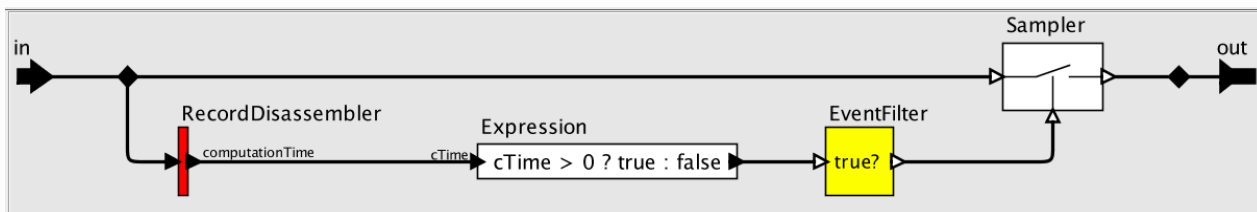


图 10 TaskFilter模块设计

### 3.3 可视化模块

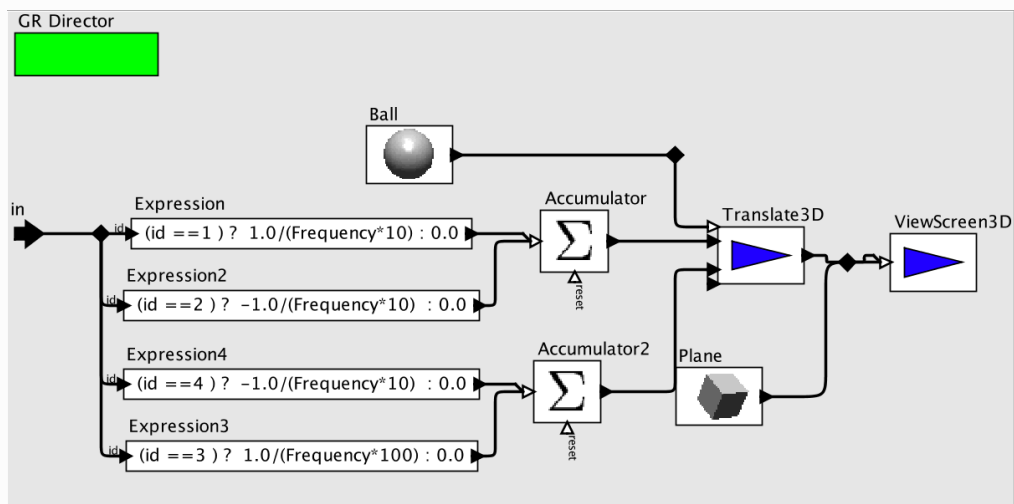


图 11 小球运动可视化模块设计

如图4，我们通过 `Plotter` 组件接收当前正在执行的Task对应的id，绘制两个调度折线图，其中 `myMultiInstanceComposite` 可以使得 `RunningPlotter` 组件绘制每个Task的运行情况。`MoveController` 负责小球运动进行动画显示，其实现如图11所示。当ForwardTask被调度运行时，小球的纵坐标加1；当BackwardTask被调度运行时，小球的纵坐标减1；当LeftTask被调度运行时，小球的横坐标加1；当RightTask被调度运行时，小球的横坐标减1；将平面、小球以及计算好的小球坐标输入 `Translate3D`、`ViewScreen3D` 组件进行显示即可完成动画显示，图12展示了小球运动的显示效果。

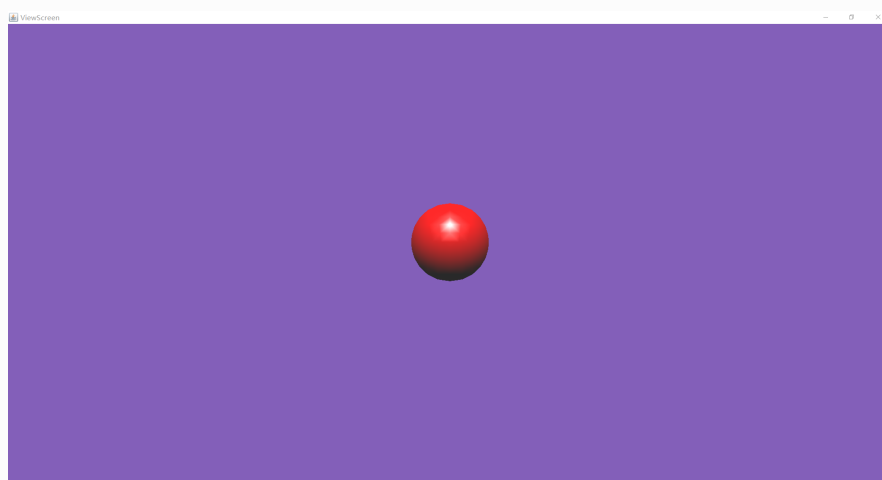


图 12 小球运动效果图



# 4 调度算法实验分析

本章通过设定每个任务的computationTime, priority, startTime, relativeDeadline, 运行上述章节所设计的仿真系统, 对四种调度算法进行仿真, 获取调度折线图, 从而观察其优缺点。

## 4.1 实验设定

如下表所示, 在四个调度器的实验中, 我们设定了相同的实验参数, 从而比较不同调度算法的特性与优缺点。我们对RunningPlotter所做的图像进行了采集, 而SchedulerPlotter包含了与RunningPlotter相同的调度信息, 本文限于篇幅, 没有对SchedulerPlotter做出的图像进行采集。对于Round-Robin算法, 我们取timeSlice = 0.1

| Task ID | computationTime | priority | startTime | relativeDeadline | absoluteDeadline |
|---------|-----------------|----------|-----------|------------------|------------------|
| 1       | 9               | 2        | 5         | 6                | 11               |
| 2       | 2               | 4        | 8         | 3                | 11               |
| 3       | 9               | 1        | 1         | 3                | 4                |
| 4       | 5               | 3        | 10        | 6                | 16               |

## 4.2 先进先出算法 (FIRST IN FIRST OUT, FIFO)

如图13所示, 红色折线代表Task 1, 蓝色折线代表Task 2, 绿色折线代表Task 3, 黑色折线代表Task 4。当任务被调度运行时, 折线处于高位。当任务在等待, 或任务已经完成执行时, 折线处于低位。图13展示了先进先出算法的调度结果。观察可知, task 1具有较长的computationTime, 但由于其到达时间最晚, 它被最后执行, 导致其完成时间 (finish time) 远远超过了截止时间 (deadline)。若小球要向前运动从而避免撞到障碍物, 那么小球将会大概率地撞到障碍物。

这是因为先进先出算法没有将任务的优先级、deadline考虑在调度算法中，仅仅根据任务到达时间的先后对任务进行调度。但是该调度算法有实现简单的优点，如3.2.1节所示，我们几乎无需修改原有的 `Server` 模块就实现了先进先出的调度算法。由于其实现简单，对实时系统中任务的性能影响十分小。

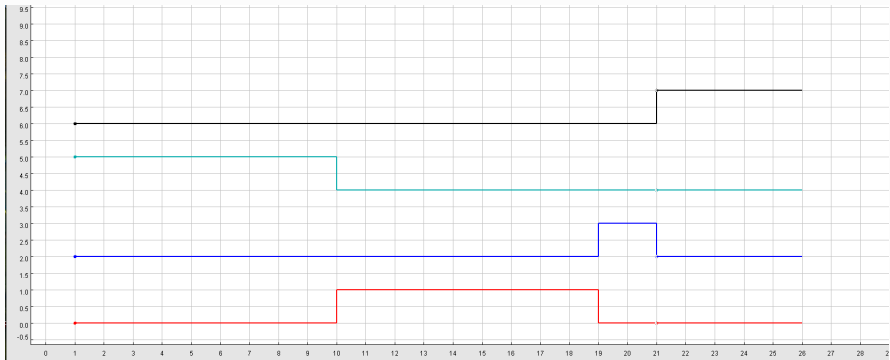


图 13 先进先出算法调度折线图

### 4.3 固定优先级算法（FIXED PRIORITY, FP）

折线颜色、高低含义同4.2节所述，图14展示了固定优先级算法的调度结果。在我们的系统中，Task 2具有最低的优先级，故会经常被其他任务所抢占，导致其完成时间远远超出了截止时间。然而优先级最高的Task 3在到来时就被立刻执行。假设Task 3对应的向左运用对于小球优先级最高，如在一个向左追赶小球的游戏场景，固定优先级算法能最大化的保证游戏的胜利。然而，向前的活动被经常抢占，出现了“饿死”（Starvation）现象。

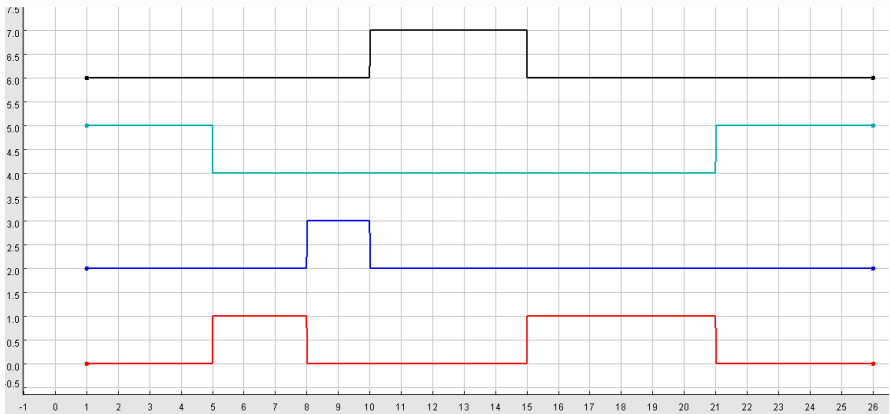


图 14 固定优先级算法调度折线图

### 4.4 循环调度算法（ROUND-ROBIN）

折线颜色、高低含义同4.2节所述，图15展示了循环调度算法的调度结果。在循环调度算法中，系统出现了频繁的上下文切换。虽然所有任务均得到了公平的执行时间，但是会给优先级很高的任务，如Task 3，造成巨大的影响。考虑4.3节提到的追赶游戏场景，小球将无法逃脱追赶；而且由于频繁的上下文切换，小球变换方向所需的能量很大，这对小球是一种负担。

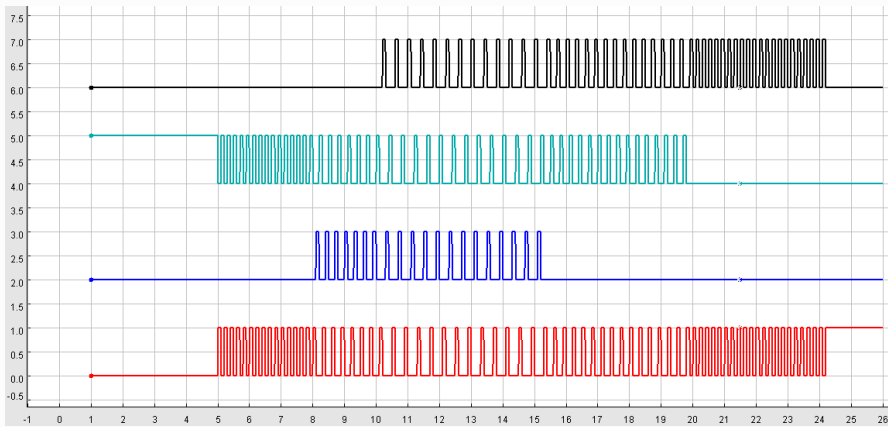


图 15 循环调度算法调度折线图

## 4.5 最早截止时间优先算法（EARLIEST DEADLINE FIRST, EDF)

折线颜色、高低含义同4.2节所述，图16展示了最早截止时间优先算法的调度结果。由于EDF对 deadline miss有最优性，该算法保证了数量最少的deadline miss（见实验配置表格所示）。假设有这样一个游戏场景，小球必须在指定时间到达某一平面区域，到达该平面区域所需的时间是 computationTime，那么到达时间的要求是absoluteDeadline。EDF调度算法保证了这类游戏的最大胜利。

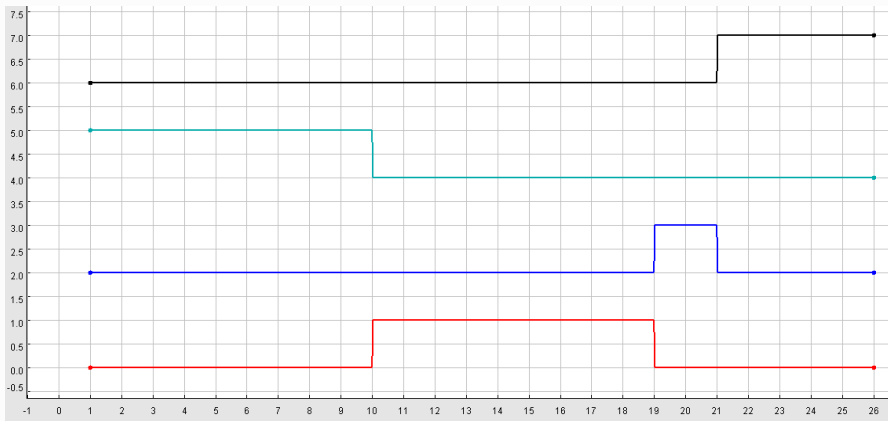


图 16 最早截止时间优先算法调度折线图

## 5 代码实现与运行步骤

本系统的实验代码以及实验环境已开源，Github地址为 <https://github.com/snake0/ptolemy-hw1>。本章对运行过程进行简要的叙述，并描述代码的实现。

### 5.1 运行步骤

如图 17 所示，只需点按绿色的运行按钮，系统就开始运行。可以看到 `RunningPlotter` 以及 `SchedulerPlotter` 中展示的折线随着时间慢慢被画出，也可观察到小球的运动。当所有任务执行完成后，点按红色的停止按钮，即可结束仿真。我们可以通过将 `GetTaskId` 的输入切换到不同的 Scheduler 模块，从而实现对不同调度策略的观察。

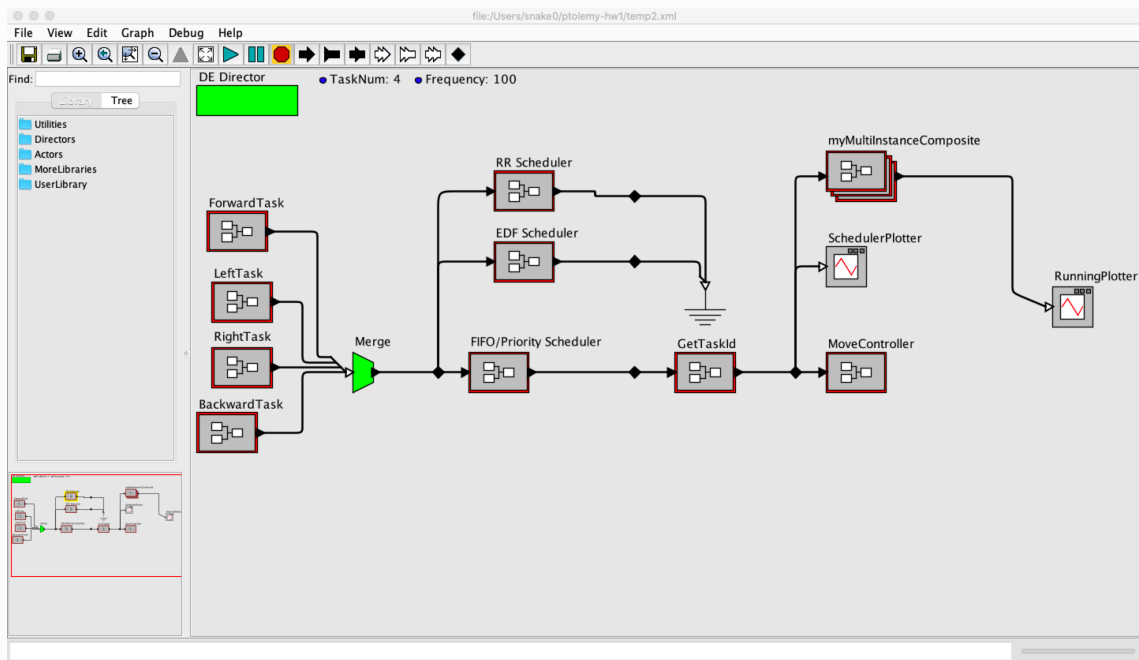


图 17 仿真系统的运行

### 5.2 代码结构

如下是我们在AdvancedServer.java中添加的代码。其含义是，在Server模块每次调用 `fire()` 函数时，我们检查currentJob。如果currentJob不为空，那么输出这个Job，否则输出null。这样我们设计的 `AdvancedServer` 模块即可在每个时钟周期输出其正在运行的Task。我们还给Server模块添加了trigger输入，从而接收时钟信号。

```
1  for (int i = 0; i < trigger.getWidth(); i++) {
2      if (trigger.hasToken(i)) {
3          trigger.get(i);
4          currentJob = this.peekQueue();
5          if (currentJob != null) {
6              Token outputToken = currentJob.payload;
7              currentExec.send(0, outputToken);
8          } else {
9              currentExec.send(0, null);
10         }
11     }
12 }
```

添加上述代码后，重新编译Ptolemy，用Ptolemy打开Github repo中的ball.xml文件，即可运行上述仿真系统。

## 参考文献

- 1 2019. The Ptolemy Project. <https://ptolemy.berkeley.edu/ptolemyII/index.htm>
- 2 信息物理融合系统（CPS）设计、建模与仿真 基于Ptolemy II平台 （美）爱德华·阿什福德·李 编著\_北京：机械工业出版社，2017.02\_P374