

加权负载求导预测的流媒体接纳控制研究

卢 为,金士尧,毛羽刚,张冬松

(国防科学技术大学 计算机学院 并行与分布处理国家重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘 要:随着流媒体服务要求的不断提高,网络应用对计算、存储资源的需求不断增长。未来一段时间服务器负载的变化情况,是保证 QoS 要考虑的一个重要问题。因此,对当前网络应用的系统负载分析预测十分有必要。文中以有典型软实时特点的流媒体应用为研究对象,在原有三种资源的基础上,加入了硬盘资源作为第四种考虑对象,提出了加权的负载求导预测法,并以此为基础实现了流媒体的实时接纳控制方法。实验结果表明,该方法预测误差较小,能在高负载的情况下确保较高的服务接纳率和较低的丢包率。

关键词:多种资源;加权负载求导法;流媒体服务;接纳控制

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)11-0030-06

Research on Admission Control for Streaming Media Services of Weight Load Derivation Forecasting

LU Wei, JIN Shi-yao, MAO Yu-gang, ZHANG Dong-song

(National Laboratory of Parallel and Distributed Processing, School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As the increasing requirements of streaming media service, network applications need more and more computing and storage resources. It is an important issue for ensuring the QoS for the next period of time server load variation. So, it is necessary to analyze the system load of the dedicated network applications. Focus on the typical streaming media applications with soft real-time. In the original three kinds of resources, and on the basis of the hard disk resource as a fourth to consider object, designed a load-measurement method to gather the system load. The experimental results show that this method has smaller error, and ensures the higher acceptance rate of the service and the lower packet loss rate in the high-load conditions.

Key words: multiple resource; weight load derivation; streaming media service; admission control

0 引 言

流媒体应用是十分典型的软实时任务,近年来随着各种网络电影、电视剧发展,用户对 QoS 的要求也不断提高,流媒体应用对资源的需求也越来越大。通过测量获取计算、存储资源(分为硬盘和内存)和网络带宽的变化情况,预测未来网络资源需求,从而解决有限资源与实时任务时限要求之间的矛盾,是具有现实意义的^[1]。

网络资源预测^[2]分为长期预测、短期预测两种。长期预测,一般是采用统计学的方法予以解决,比如时间序列分析法。它是依据系统测量得到的根据时间序

列产生的数据,以曲线拟合和参数估计来建立数学模型的预测法^[3]。但其有一个缺点是预测要建立在大量的历史数据之上,并且对于网络突发情况不能比较准确的把握,同时实时性也较差。短期预测,较常用的有线性外推法。线性外推法首先是收集对象的动态数列,然后画数据点分布图,如果散点构成的曲线非常近似于直线,则按直线的规律进行外推。短期预测方法具有较强的实时性,能够真实反映网络突发事件带来的资源变化,但是预测开销较大,且数据较多,不易保存^[4]。

现有研究有如下三点不足:缺少了对于硬盘资源的考虑;对于网络任务环境下随机任务对于预测干扰考虑过少,特别是在服务器总体资源不高的情况下,随机任务造成的毛刺对预测影响较大^[5];预测的可靠性不高和对预测数据要求样本过多。基于此,文中设计了基于系统负载高低的可变时间测量法,实现了对计算、存储资源(分为硬盘和内存)和带宽的测量,为网

收稿日期:2012-03-27;修回日期:2012-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61103084, 61170284);国家教育部博士点基金(20104307110005)

作者简介:卢 为(1984-),男,湖南长沙人,硕士生,研究方向为实时系统;金士尧,教授,博导,研究方向为实时系统、分布式交互仿真、虚拟现实等。

络实时可执行概率的计算提供数据;进而提出了一种克服预测对数据要求高的预测方法:加权负载求导预测法,实现了对流媒体资源负载情况的预测,得到了较好的预测结果(预测平均相对误差在 6% 以内);最后设计了基于可执行概率预测的接纳控制方法,实现了有效的接纳控制,在高负载的情况下保证了较高的服务接纳率。

1 基于负载的可变窗口测量法

流媒体实际上指的是一种新的媒体传送方式—流式传输。流式传输方式是将视频和音频等多媒体文件经过压缩分成一个个压缩包,由服务器向用户计算机连续的、实时的传送。流媒体应用是指音视频在网络上以实时的、无需下载等待的方式进行播放^[6]。比如:在线新闻直播、远程医疗、视频点播等。流媒体应用具有软实时性,基本特征是:用户提出请求之后,系统应当尽快响应,确保以既定的服务质量在指定时限内完成^[6]。

1.1 测量的对象

许多网络测量研究对网络带宽较为关注,而对其它资源的影响研究较少。现有的视频文件采用多种编码格式和封装方式,处理过程中消耗的计算资源越来越多;视频长度也越来越长,服务器需要高速的磁盘 I/O;高清视频的出现,直接导致了网络带宽的占用率越来越高。流媒体技术的不断成熟和发展,用户对服务质量提出了更高要求,所以应该综合考虑计算、存储资源以及网络带宽的占用情况,以便做出更好地判断^[7]。

1.2 测量规则

文中将四种资源考虑在内,设计了一种基于负载的可变时间测量方法,其测量间隔 T 由上一次测量得到的四种资源中负载数值最大的 F_s ($0\% \leq F_s \leq 100\%$) 所决定,与初始测量间隔相乘,取其整数,减去初始测量间隔 T_0 ,得到下一次的测量间隔。这样既能保证在高负载的情况下较准确地得到系统实时数据,同时在低负载的情况下减少测量次数。

1.3 测量方法

文中在 Linux 系统下通过结合 Proc 文件系统和加载内核模块 LKM 实现了对计算资源、存储资源、网络带宽等资源的测量。同时,文中将硬盘资源考虑在内,更能全面地测量出系统负载情况。

随着各类硬件速度的突飞猛进,但是硬盘由于其物理特性是机械的,其转速很难再提升,其响应速度最终就落在 ms(毫秒)的级别,不能向其他硬件设备那样提高,所以现在越来越多人感觉到最终的性能瓶颈开始向硬盘集中了,因此加入硬盘作为测量项目是十分

有必要的。

Proc 文件系统是 Linux 中一个特殊的伪文件系统,它向用户和应用程序提供系统进程运行的各种信息。Proc 文件只存在于内存当中,不占用外存空间,因此在测量时,它的优点是具有很强的实时性。

网络资源负载的测量过程如图 1 所示。文中将测量间隔初值设为 10 秒。测量过程分为数据获取和时隙控制模块两个部分^[8]。

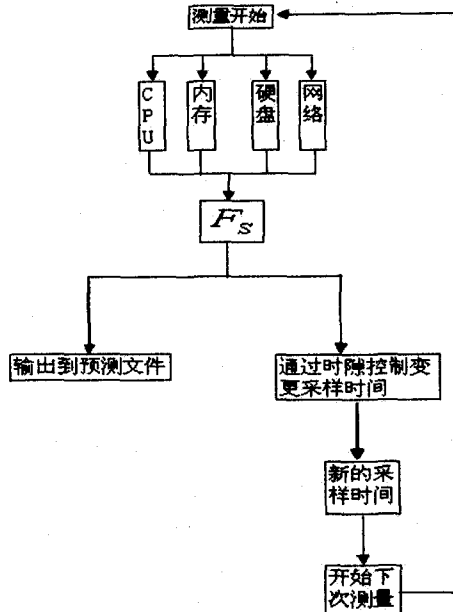


图 1 网络资源负载的测量过程

时隙控制模块控制每次测量的间隔,由上一次的测量结果决定。初始测量间隔设置为 T_0 ,设某次测量得到的某一项 F_s 数值为测量结果中四种资源负载的最大值,则下次的测量间隔为:

$$T = (1 - F_s) T_0$$

因此,当负载情况较高时,可以更为准确地得到系统的负载情况,使接纳控制更为可靠;同时在负载较低的情况下,减少不必要的测量次数,节约测量开销。

数据获取的过程具体描述如下:

首先利用加载内核模块读取 Proc 系统内的相关文件,计算测量时间内的计算、存储资源(包括硬盘和内存)和网络带宽的占用情况:

硬盘资源占用率 h 。Iostat 命令提供了丰富的磁盘 I/O 状态数据,从中可以得到重要参数 %util^[9]。它的含义是在统计时间内所有处理 I/O 时间,除以总统计时间。这样可以换算出一秒中有百分之多少的时间用于 I/O 操作。即硬盘的负载情况,如果 %util 接近 100%,说明产生的 I/O 请求太多,I/O 系统已经满负荷,该磁盘可能存在瓶颈。对于 Linux 2.6 版本,Iostat 的数据来源于 /proc/diskstats 或者 /sys/block/stat 中。公式如下:

$$h = \% \text{util}/100\%$$

CPU 占用率 \hat{c} [8]。CPU 总时间从 stat 文件获取, 包含 7 个参数, 单位为 jiffies, 公式如下:

$$c_{\text{total}} = \text{user} + \text{system} + \text{nice} + \text{idle} + \text{iowait} + \text{irq} + \text{softirq}$$

其中: user 为用户态的 CPU 时间(不包含 nice 值为负的进程); system 为核心态时间; nice 为 nice 值为负的进程所占用的 CPU 时间; idle 为除硬盘 IO 等待时间以外其它等待时间; iowait 为硬盘 IO 等待时间; irq 为硬中断时间; softirq 为软中断时间。

$$\text{因此, } \hat{c} = (1 - \frac{\text{idle}}{c_{\text{total}}}) \times 100\%$$

内存占用率 \hat{m} [8]。meminfo 文件中包含内存总量 M_{total} 和内存空闲量 M_{free} 。因此, 将 M_{free} 值除以内存总量, 得到 \hat{m} , 将此值除以总内存容量再乘以 100%, 即可得内存占用率。

网络带宽占用率 \hat{v} [8]。net/dev 文件包含网卡数据接收量 N_{rece} 和发送量 N_{tran} (单位: byte)。目前网络设备接口大多支持全双工模式, 计算数据传输率时应当对上行(接收)和下行(发送)传输率进行区分。在流媒体应用中, 服务器端的下行数据高于上行数据两个以上数量级, 因此在决策过程中主要关注的是下行速率对服务质量的影响。按时间间隔 t 先后两次测量 N_{tran} 的值 N_{t1} 和 N_{t2} , 则占用的网络带宽为:

$$\hat{v} = \frac{8 \times (N_{t2} - N_{t1})}{t}$$

将此值除以总网络下行带宽再乘以 100%, 即可得网络带宽。

当获取计算、存储资源和网络带宽的占用率完成后, 将数据存入相对应文件中, 经过数据处理作为预测的历史数据。

2 基于加权负载求导法实时接纳控制机制

2.1 基于加权负载求导的预测方法

Maureen Chesire [10] 等人的研究表明: 流媒体用户的访问量是随时间变化的, 每天不同时段访问量有显著差别。金士尧等在文献 [1] 中也指出, 共享网络资源余量曲线的波动与上下班统一的作息安排有关。由此拓展开来, 流媒体服务器的访问量按照周、月、年都有周期性和季节性特征, 由此带来的网络资源余量波动也会呈现出类似的规律。同样, 每天的负载高低有差别, 但其负载的变化率是有一定规律的。

因此, 只要找出一个适当函数来拟合每天的负载曲线, 对这个函数进行一次求导, 可得出一天的负载变化率。虽然每天的负载大小变化是很难准确预测

的, 但对负载曲线求导后, 得出的负载变化率总是在一定范围内波动的, 有一定稳定性。其基本思想就是将服务器的任务负载看成对应于时间的函数 $P = f(t)$ 。因此, 利用负载的变化率来进行负载预测将会使精确度提高。这一观点将在误差分析中得以论证。

加权负载求导法预测的基本公式是:

$$P(i+1) = P(i) + \Delta P(i)$$

式中:

$P(i+1)$ 代表对第 $i+1$ 点(即预测的点)的负载预测值;

$P(i)$ 代表第 i 点的实际负载值;

$\Delta P(i)$ 代表第 i 点的预测的负载变化率。

其问题的关键是如何取得 $\Delta P(i)$ 。实际计算的流程为:

- (1) 取得数据。
- (2) 建立数学模型。
- (3) 计算负载变化率的特性函数。
- (4) 负载函数预测结果输出。
- (5) 误差计算和分析。

当完成一次测量后, 可以得到随时间变化的负载曲线 $P = F(t)$ 。在此基础上求 P 的导数, 即对负载曲线进行一次求导, 便可以得到每一点的负载变化率。当完成多次测量后, 可以得到多个同一时间点的负载变化率, 然后利用加权平均法对得出的同一时间点的多次负载变化率进行统计计算, 最后利用得到的负载变化率曲线进行负载预测, 从而得到负载的预测曲线。

这里还需要注意加权平均的分形相似性。在进行加权平均时, 一般是将各样本在待预测点的负载增量加权后得到 $\Delta P(i)$ 。理论中是没有问题的, 但是其分形相似只是体现在了图形的负载曲线中, 并不是想象的负载数值, 因此在求待预测点的负载变化率 $\Delta P(i)$ 时, 需要对历史数据中待预测点的负载变化率加权。文中在计算加权时, 将数据 $\Delta P(i)$ 调整为

$$P(i) \times \left[\sum_{k=1}^n C_k \times P'_k(i) \right]$$

上式中权值 $P'_k(i)$ 代表各测量数据中对应点的负载变化率, $P(i)$ 代表各测量数据对应点的实际测量值, C_k 为加权值。由于文中的测量方式在高负载情况下, 需要较准确地得到系统实时数据, 故采样的点较密集, 因此

$$P'_k(i) = \frac{(P_{i+1} - P_i)}{n}$$

其中: n 代表历史数据的天数。

2.2 基于指数平滑法的毛刺处理

在网络环境下, 随机情况、突发任务是十分多的,

因此在预测曲线上,网络随机任务引起的预测毛刺较多。基础负载有规律容易预测,但是对于随机部分,却是很难预测,将其作为基础负载是不精确的。因此文中采用了典型的指数平滑法,对负载曲线进行一下平滑处理,通过一定程度的平滑去除负载曲线的随机部分。

指数平滑法是美国学者是布朗(Robert G. Brown)所提出的。其主要原理是:时间序列的态势具有稳定性或规则性,所以时间序列可被合理地顺势推延;最近的过去态势,在某种程度上会持续到未来,所以将较大的权数放在最近的资料。指数平滑法适应性强、性能好、计算速度快,在各个领域都有着广泛的应用。文中主要使用指数平滑法修匀历史数据。在网络应用环境,单个随机任务都容易造成较大的毛刺,因此需要对原有的指数平滑公式进行修改,加强历史数据的权重,故平滑系数应比较小、同时应取 n 点前 1 位的数据作为历史数据。实际应用公式如下:

$$S(i, n) = (1 - b) \times S(i, n - 1) + b \times S(i, n)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$$

其中: $S(i, n)$ 为平滑后的负载曲线数据, $S(i, n)$ 为对应测量数据的第 i 天的第 n 个点的负载数值, $S(i, n - 1)$ 为测量数据的第 i 天的第 $n - 1$ 个点的负载数值, b 为平滑系数。

由于网络资源预测属于短期预测,应体现出一定的延续性,同样需要根据近大远小的原则进行调整,因此,平滑指数的选择决定了模型的预测精度。

根据网络任务特点以及多次预测验证,文中将 b 定为 0.6,这样符合轻老信息,重新信息的近大远小原则,保持了其延续性,效果较好。

2.3 数据检验和误差分析

计算负载变化率后,需要进行数据检验和误差分析。在实际预测中,通过调整历史数据的权重和天数的多少,提高了负载变化率曲线的精确性,具备了较高的适应性。图 2 表示的是利用加权负载求导法进行预测的曲线(以两小时内硬盘的负载为例),其预测值相比实际值误差较小,最大相对误差为 9.67%,平均相对误差为 5.76%。

同时,未经过指数平滑处理的预测误差为最大相对误差为 12.14%,平均相对误差为 7.51%,说明对历史数据进行平滑处理是有效的,能一定程度消除网络中随机任务对预测的干扰。

当然预测值和实际负载并非完全吻合,误差产生的原因,可能主要有以下几个方面:

(1) 由于负载、时间的对应关系有时会发生一定程度地偏移,引起误差。这往往是负载变化率大时容易引起较大的相对误差。

(2) 由于数据的不准确引起的系统性误差。

(3) 方法的本身忽略了某些因素,也可能导致一些误差。

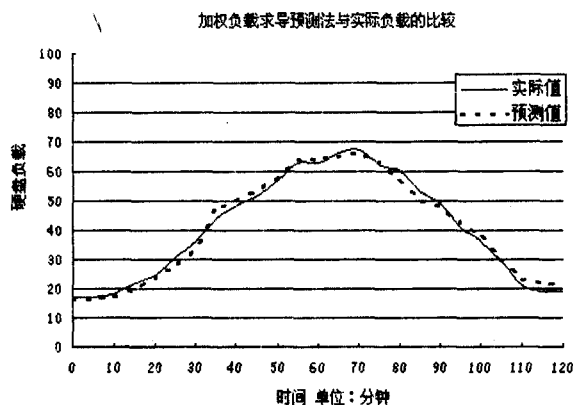


图 2 预测值与实际值误差比较

2.4 实时可执行概率的计算

网络实时可执行概率是指在用户的容忍范围内,网络中的软实时任务请求能够以多大的概率被执行。它的获取是网络实时任务接纳控制的关键。而对于概率的确定有两个定理:

定理 1^[1]:在整个实时任务(集)执行过程中,任何时刻共享网络所能提供的资源余量必须满足实时任务(集)对资源的需求,即实时任务(集)可执行的必要条件就是资源必须供大于等于需。

定理 2^[1]:实时任务可执行的充分条件就是任务的执行时间满足时限的要求。

根据以上定理,可以推出如下计算方法:

对于一个流媒体任务,有其需要的资源大小、需要执行时间的长度等等限定条件。所以可以通过测量来获取当前整体的资源情况,通过预测获取下一个时段资源可用余量情况,做出接纳判断。

在同时满足任务执行需求资源可用余量和资源可用余量持续时间足够的情况下,任务是可以接纳并执行的。可执行的时间之和与所占总时间的比例,即为可执行概率。

以图 2 得到的负载预测输出数据为例,设定对四种资源的负载上限为 90%,同时设定某个流媒体任务需求资源占总资源的 30%,持续时长为 5 分钟。重复图 2 的实验,将时长由 2 小时改为 24 小时,即可得到大于流媒体请求所需的 24 小时网络资源可用余量可执行概率曲线图(以硬盘为例,其他类同),如图 3 所示。

由此,根据预测得到的曲线图,可以计算出对于某个任务,其硬盘资源需求为 $X\%$,持续时间为 T ,在 24 小时内,每小时硬盘资源可用余量大于资源需求 $X\%$ 的概率。同理,对于 CPU、网络带宽、内存也可以进行

类似判断。

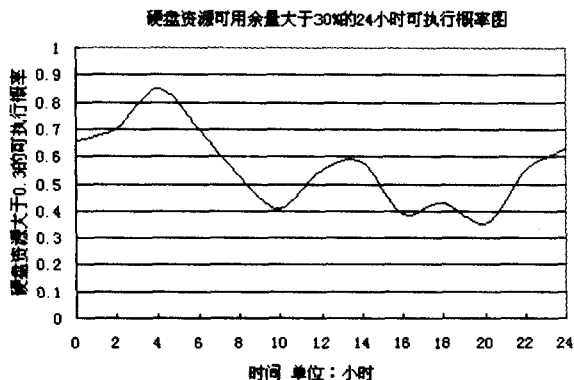


图3 硬盘资源可用余量大于30%的24小时概率曲线图

2.5 基于实时可执行概率的接纳控制方法

文中设计了基于可执行概率的接纳控制方法,通过测量四种资源进行预测并计算可执行概率,以此作为依据进行接纳控制。任务到达时,首先判定系统资源是否满足任务接纳需求;然后判定在任务持续时间内系统资源是否一直能满足任务需求。当以上两个条件满足,接纳任务。由于预测有天生的不精确性,所以设置一个预测误差记录模块加以记录,以便在下次预测加以校正。

在任务执行过程中,对于某时刻 T :

(1) 当预测值与实测值之间的偏差小于等于10% (经过数据检验和误差统计分析可知该预测方法的最大相对误差和平均相对误差均小于10%),可以认为预测结果是可靠的。

(2) 当预测结果与实际结果的偏差大于10%,可以认为预测结果有偏差,将此时误差值记录,以便为下次预测和接纳控制提供调整依据。

3 实验

为了验证预测方法和接纳控制机制的有效性和可行性,文中通过实验进行了验证。

3.1 实验环境

实验平台采用 C/S 结构,由 1 台服务器和 6 台客户机组成。服务器所用 AMD 四核羿龙 970 处理器,内存 2G,网卡工作模式为全双工,传输速率 100Mbps,操作系统为 Redhat Enterprise Linux 5,内核版本 2.6.18。安装苹果公司的 Darwin Streaming Server (DSS) 作为流媒体服务器软件,它具有开源的优势,为用户和开发人员预留了编程接口,使用的版本为 6.0.3。

测试环境:文中在 Linux 系统内实现了加权负载求导预测法的可执行概率计算程序、误差记录模块。为了获得系统实际负载,设计了测量模块,测量时间间

隔为 10 秒。预测所用的基本数据通过对测量数据采样获得。在 DSS 中增加了接纳判定模块,根据条件进行接纳控制判断。

3.2 结果分析

(1) 基于加权负载求导预测的接纳机制与基于测量的接纳控制机制的比较 (服务器负载上限设定为 90%)。

在负载相近的情况之下,分别用两种机制实现了流媒体服务器接纳控制。加权负载求导预测接纳机制原理已在前面介绍,传统方法为基于测量的接纳控制机制^[11],其原理为测量和算法^[12],针对的是网络带宽测量并进行接纳判断,从而进行接纳控制。

客户端利用 QuickTime 播放器进行随机访问,播放服务器上的流媒体文件。实验持续的时间为 40 小时,每种机制重复 5 次,每次时长为 4 小时。取其中 1 次的 4 小时数据绘制成图,如图 4 所示。

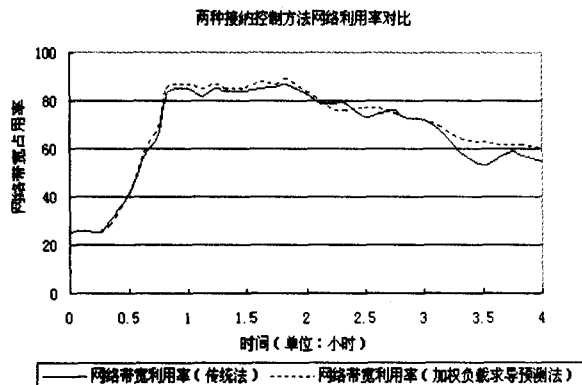


图4 两种方法的网络带宽占用率对比曲线图

从图中可以看出 (以网络带宽为例), 加权负载求导预测的接纳机制通过限制系统接入服务的数量, 在高负载的情况下, 对于网络带宽的利用率高于传统的接纳控制方法, 更加贴近上限 (90%)。此外, 加权负载求导预测的接纳机制保证了网络带宽占用率不超过实验设定的上限, 避免了因资源竞争引起的任务超时和中止。

表1 两种接纳机制的对比

	加权负载求导预测法接纳控制机制	传统接纳机制
平均丢包率	4.3%	6.8%
接纳率 (高负载下)	55.37%	50.22%

(2) 从实际执行任务的过程来看, 由于加权负载求导预测接纳机制和传统方法在低负载情况下的接纳率均接近 100%, 文中主要给出两种接纳机制在高负载情况下的比较结果, 如表 1 所示。加权负载求导预测接纳机制接纳率在高负载的情况下达到了 55.37%, 高于传统接纳机制的 50.22%, 同时丢包率相比

传统接纳机制有所降低。

4 结束语

文中提出了加权负载求导预测接纳机制,对流媒体应用中的实时接纳控制技术的研究作出了有益探索。该方法在获取 CPU、内存、网络带宽占用情况的基础上,加入了硬盘作为新的参考,考虑了网络随机任务对负载预测的影响,并以此为依据进行了有效地接纳控制决策,提高了服务质量。算法中参数的取值,可以依实际情况进行调整,能适用于不同需求,并可提高预测精度及接纳率。实验结果表明,加权负载求导预测的接纳机制能在低负载的情况实现接近 100% 的服务接纳率,同时在高负载下实现较高的服务接纳率,同时降低了丢包率。

参考文献:

- [1] 金士尧. 共享资源网络的实时任务接纳控制方法[P]. 中国:ZL200810144000.3,2010-12-01.
- [2] Berran J. Long range dependence[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews:Computational Statistics,2010,2(1):26-35.
- [3] 翁苏湘,金永生,王彦丽. 网络资源分配中的接纳控制技术[J]. 吉林大学学报,2008,26(6):609-614.
- [4] 彭 静. 基于策略的资源分配和接纳控制[J]. 重庆师范学

(上接第 29 页)

方面的优势,实现程序资源的共享。IDL 与 LabVIEW 相结合的单微粒跟踪软件开发实例也进一步证明了二者互补不但降低代码编写的难度、缩短开发周期,而且可有效提高数据处理效率。

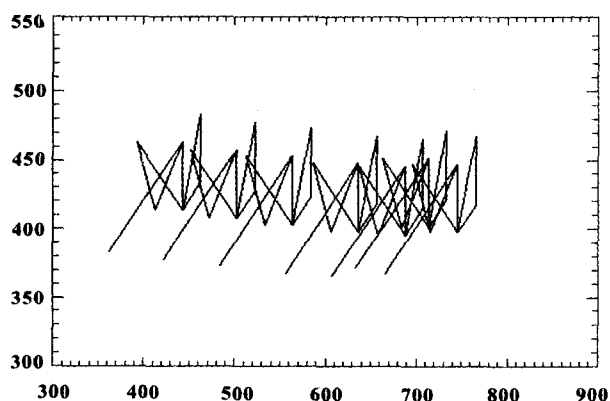


图 5 IDLDrawWidget 控件 OLE 容器里显示的单粒运行轨迹

参考文献:

- [1] 张会香,成谢锋. LabVIEW 平台上的心音分析虚拟仪器设计[J]. 计算机技术与发展,2010,20(11):217-220.
- [2] 鄢志丹,孙立东,李艳宁,等. 基于虚拟仪器的实时单微粒跟踪系统设计[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1352-1357.

院学报(自然科学版),2002,19(3):23-37.

- [5] Goncalves P,Azevedo R,Gomes D,et al. Evaluation of policy-based admission control mechanisms in NGN[C]//International Conference on Telecommunications. [s. l.]:[s. n.],2009.
- [6] 李 超,张冬松,金士尧. 面向流媒体应用的实时可执行概率获取方法研究[J]. 计算机应用研究,2010,27(9):3462-3465.
- [7] Nam S Y,Kim S,Sung D K. Measurement-based Admission Control at Edge Routers[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2008,16(2):410-423.
- [8] 杨 帆. 共享网络中的实时任务可执行概率研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [9] Negus C. Linux 命令详解手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [10] Chesire M,Wolman A,Voelker G M,et al. Measurement and Analysis of a Streaming-media Workload[C]//Proceedings of the Third USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. San Francisco,CA,USA:[s. n.],2001:1-12.
- [11] Breslau L,Jamin S,Shenker S. Comments on the Performance of Measurement-based Admission Control Algorithms[C]//IEEE Infocom. [s. l.]:[s. n.],2000:1233-1242.
- [12] 陈雪娟. P2P 网络实时流媒体分发技术的研究探讨[J]. 信息与电脑,2010(11):98-100.

- [3] 郭前岗,李海燕,周西峰. 基于 LabVIEW 的多电机分布式控制系统[J]. 计算机技术与发展,2011,21(3):217-220.
- [4] 朱玉伟,拾 兵,黄 勇,等. 基于 IDL 与 VB 的遥感数据提取[J]. 计算机应用研究,2006(3):181-182.
- [5] 黄修东,刘立民,曹君陟. VB 调用 IDL 接口混合编程技术[J]. 微型电脑应用,2006,22(2):34-36.
- [6] 王维喜,李 智. 基于生产者/消费者设计模式的连续音频信号采集系统[J]. 现代电子技术,2009(7):129-132.
- [7] 雷晏瑶,李 智. 基于生产者/消费者的数据采集系统设计[J]. 机械,2011,38(9):39-43.
- [8] Thompson R E,Larson D R,Webb W W. Precise Nanometer Localization Analysis for Individual Fluorescent Probes[J]. Biophys J.,2002,82(5):2775-2783.
- [9] Shalzarini I F,Koumoutsakos P. Feature Point Tracking and Trajectory Analysis for Video Imaging in Cell Biology[J]. J. Struct Biol,2005,151(2):182-195.
- [10] Rogers S S,Waigh T A,Zhao X B,et al. Precise Particle Tracking Against a Complicated Background:Polynomial Fitting with Gaussian Weight[J]. Physical Biology,2007,4(3):220-227.
- [11] Berglund A J,Mcmahon M D,Mcclelland J J,et al. Fast,Bias-free Algorithm for Tracking Single Particles with Variable Size and Shape[J]. Opt. Express,2008,16(18):14064-14075.
- [12] 鄢志丹,孙立东,李艳宁,等. 一种荧光单分子高精度快速跟踪方法的研究[J]. 光学学报,2010,30(7):1994-2000.