

基于光线跟踪方法的全局光照研究

张全贵^{1,2} 王 普¹ 闫健卓¹ 方丽英¹

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)¹

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105)²

摘 要 光线跟踪方法是解决全局光照问题的一种重要方法。概括性地提出光线跟踪方法研究的基本任务是研究关于采样、加速求交的问题,并综述性地分析了光线跟踪相关算法。介绍了该领域近期研究热点即实时光线跟踪以及基于图形硬件的光线跟踪的相关研究工作,指出了光线跟踪方法在解决全局光照问题时的优缺点以及未来的研究重点。展望了基于光线跟踪方法的全局光照应用前景。

关键词 光线跟踪,全局光照,加速求交,采样,动态场景

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Study on Global Illumination Using Ray Tracing

ZHANG Quan-gui^{1,2} WANG Pu¹ YAN Jian-zhuo¹ FANG Li-ying¹

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)¹

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)²

Abstract Ray tracing is an important method to resolve global illumination. We think that the essential problem of ray tracing is the study on the light crossing and efficient sampling. This paper provided a survey on ray tracing algorithms. We introduced the research on real-time ray tracing and GPU based ray tracing, which is the hotspot at present. We pointed out the advantage and disadvantage of ray tracing based global illumination, and the research pivot in the near future. In the end, we prospected the application foreground of ray tracing based global illumination.

Keywords Ray tracing, Global illumination, Light crossing, Sampling, Dynamic scenes

全局光照是指除了考虑光源对物体的直接作用外还需要考虑场景中由于物体之间的相互作用而产生的间接光照情况。引入全局光照能够有效地增强虚拟场景的真实性。解决全局光照问题的基本方法有两种,即光能辐射度方法和光线跟踪方法。对于辐射度方法,国内外研究人员进行了相关综述性分析;对于光线跟踪方法解决全局光照问题,国内外学者对其最新研究成果进行的综述性分析较少而且不全面,因此本文针对此问题进行了相关研究。

辐射度方法采用热力学中辐射度概念,模拟封闭环境中物体表面之间的理想漫反射,以及由漫反射所产生的颜色渗透现象。由于辐射度方法仅适用于理想漫反射面所组成的场景,没有考虑镜面反射和透射,因此其应用受到了很大的限制。光线跟踪方法能够很好地模拟物体间的理想镜面反射和规则透射及阴影效果,但由于是处理逐个像素,不是处理逐个图元,需跟踪每一条从视点发出的光线,因而涉及到大量的光线与景物的求交运算,计算量十分庞大。另外,光线跟踪方法本质上是一个离散采样算法,各个屏幕像素的亮度是分别计算的,绘制的画面有时会出现严重的走样现象。因此,关于光线跟踪方法的研究一般从两个方面入手:一是加速光线与场

景中物体求交算法的研究;二是寻求好的采样算法,解决由于点采样引起的画面走样问题。

1 光线跟踪算法综述

1.1 经典光线跟踪算法

Whitted 提出了光线跟踪算法^[2],基于此算法研究者提出了多种光线跟踪算法。经典光线跟踪算法的思想如图 1 所示。由视点向屏幕上的所有像素中心发射光线,对于每一条光线,找出与之最近的相交物体的交点。若该点处表面为镜面或透射面,则做递归光线跟踪。交点处光亮度由 3 部分组成:

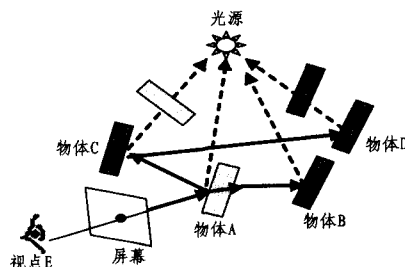


图 1 光线跟踪

到稿日期:2009-05-27 返修日期:2009-08-05 本文受国家自然科学基金项目(60704036),北京工业大学青年基金项目(97002011200701)资助。

张全贵(1978—),男,博士生,讲师,主要研究方向为虚拟现实、智能计算, E-mail: zhqg@126.com; 王 普(1962—),教授,博士生导师,主要研究方向为计算机控制系统、智能信息处理、虚拟现实; 闫健卓(1973—),女,博士,副教授,主要研究方向为信息集成及智能信息处理; 方丽英(1977—),女,博士,讲师,主要研究方向为信息集成及智能信息处理。

(1)由光源直接照射而产生的光亮度;

(2)来自场景中其它物体通过该点向视点方向投射的镜面反射光亮度;

(3)来自场景中其它物体通过该点向视点方向投射的透射光亮度。

算法首先进行阴影计算,确定当前交点是否位于该光源的阴影区域内,即从当前交点向该光源投射一条阴影测试光线(图1虚线)。若测试光线在到达光源之前与场景中的不透明物体相交,则说明当前交点位于该光源的阴影内。此时当前交点由于没受到该光源的直接照射,其产生的局部光亮度可取零。若与测试光线相交的物体均为透明体,则从光源发射的光能在穿过这些物体时受到一定程度的衰减,从而使该光源在当前交点处产生的局部光亮度减弱。计算上述3部分得到每一像素处的光亮度。

光线跟踪终止条件:一是光线射出画面,不再与场景中的景物相交;二是被跟踪的结点对屏幕像素显示光亮度的贡献小于一定阈值;三是达到光线跟踪的最大深度。

经典光线跟踪算法存在的问题是求交计算量占整个光线跟踪计算量的90%以上,点采样容易导致画面走样,因此基于此算法提出了很多改进算法。

1.2 分布式光线跟踪和蒙特卡罗光线跟踪

基于经典光线跟踪算法,Cook等人引入了分布式光线跟踪算法^[3],并由Kajiya扩展为Monte Carlo光线跟踪算法^[1]。

分布式光线跟踪不是采用几何形状来表达一束光线,而是在一立体角内分布式地随机跟踪一定数量的光线。因而,该算法有效地克服了圆锥跟踪算法中圆锥与景物之间求交困难的问题,而且能生成诸如模糊镜面反射、模糊折射、半影、景深及运动模拟等光照效果。

分布式光线跟踪算法在处理每一被跟踪光线时,在光线与景物表面的交点处不仅朝其镜面反射方向和规则透射方向发射光线,而且依据景物表面的光照性质朝其镜面反射方向和规则透射方向附近的立体角内亦发射采样光线,即“分布式”地进行光线跟踪。该算法的计算效率依赖于每一表面镜面反射分布函数和规则透射分布函数以及采样光线的数目。若取Phong镜面反射分布函数和规则透射分布函数,则分布式光线跟踪所对应的光照明模型可表达为:

$$I = I_{local} + k_r \left[\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^M (N \cdot H_j)^n I_{s_j} \right] + k_t \left[\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^M (N \cdot H_j')^n I_{t_j} \right]$$

其中, M 为每一交点处朝镜面反射方向和规则透射方向立体角内发射的采样光线数目, I_{s_j} 是沿第 j 个镜面反射方向立体角内的环境入射光亮度, I_{t_j} 是沿第 j 个规则透射方向立体角内的环境入射光亮度。

与经典光线跟踪算法一样,上式是一个递归定义式,各采样光线的光亮度 I_{s_j} 和 I_{t_j} 的计算可通过递归地调用上式而得到。最后加权平均这些光亮度,就可计算出来自环境的总的镜面反射和规则透射入射光亮度。

分布式光线跟踪算法实际上是一个蒙特卡罗积分采样的过程。因而,该算法不仅有效地避免了传统光线跟踪算法由于点采样引起的图形走样现象,克服了圆锥光线跟踪求交困难的问题,而且真实地模拟了景深、运动模糊和半影等效果,大大提高了光线跟踪算法所生成图形的真实性。目前该算法已广泛应用于各真实感图形绘制系统中。

1.3 双向光线跟踪

分布式光线跟踪算法只逆向跟踪从视点出发经由镜面和透射面的反射和透射光线,只能模拟周围场景在镜面和透射面上产生的整体光照效果,无法模拟漫射表面上的整体光照效果。因此,它对场景光照的表达是不完全的。然而环境对漫射表面的光亮度影响有时会很大。在双向光线跟踪基础上Chen等提出了双向光线跟踪算法^[4]。

双向光线跟踪技术,即同时从光源和观察者出发,对光线进行正向和逆向跟踪。这里的逆向跟踪实际上就是传统的光线跟踪,而从光源出发的正向光线跟踪则用来计算来自环境的镜面反射光和规则透射光对漫射表面光亮度的贡献。正向光线跟踪是一个与视点和视线方向无关的过程。

1.4 光子映射

光子映射(Photon Mapping)是光线跟踪算法的延伸,它结合了双向光线跟踪和蒙特卡罗方法的优势。光子映射是当前模拟全局照明最快的算法之一,是由Jensen提出并发展起来的^[5]。光子映射技术与以往的光照绘制方法不同,它是从光的物理属性出发,研究光子在场景中的传输,使得对于光照的模拟真正达到了从自然属性的角度来考虑。这种方法能够更有效地模拟一些特殊的光学现象和效果,例如焦散、颜色渗透、半影、烟雾、次表面光线散射、夜空、运动模糊等。光子映射主要通过两个步骤实现:

(1)构建光子图

通过从光源向场景发射大量光子来构建光子图。算法跟踪穿过场景的每个光子,光子与物体表面碰撞后会产生3种情况:被反射、透射或吸收。一般采用俄罗斯轮盘赌的方法来决定发生哪种情况。被反射光子运动的新方向由物体表面的双向反射分布函数(BRDF)来计算。当光子与漫反射表面碰撞时被记录下来,碰撞点的位置、光子的能量、入射的方向等都被存储在光子图中(一种被称为平衡KD树的数据结构),这种存储结构与物体的几何属性无关,使用它可以提高绘制效率并减少内存的占用。

建立的光子图分为两种:焦散光子图(caustics photon map)和全局光子图(global photon map)。焦散光子图只存储与产生焦散效果有关的光子,当射向镜面物体的光子经镜面反射后与漫射表面碰撞时被记录下来,这时得到的就是焦散光子图。焦散的渲染是通过基于焦散光子图的辐射度估算来实现的,这个过程可以直接看到,因此需要高密度的光子。

全局光子图通过向所有物体发射光子来建立,用于粗略估计场景中的光通量。它不能被直接看到,因此不需要像焦散光子图那样精确。全局光子图中的光子可分为直接照明光子、间接照明光子和阴影光子。如图2所示,通过追踪从光源开始穿越整个场景的光线来产生阴影光子。在第一个交点处存储一个普通的光子,在下一个交点处存储阴影光子。这些阴影光子用于渲染时减少阴影光线的数目,优化阴影的渲染。

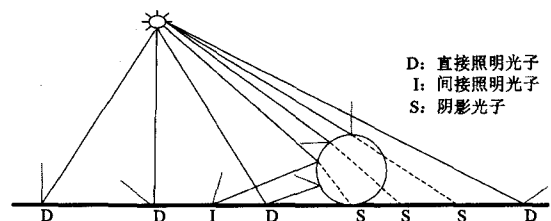


图2 光子映射

(2) 绘制

光子图建立以后,直接光照部分按照经典的光线跟踪方法计算。对于间接光照部分,查询步骤 1 中所建立的光子图,对于每个像素,在跟踪的视线与场景的第一个交点处将发出数条光线,在这些光线与场景的交点处,使用 MonteCarlo 方法来估计光子的密度。对于焦散现象,需要进行特殊的处理,这时光子纹理被直接绘制出来,而不是通过 MonteCarlo 密度估计。

与其他全局光照方法相比,光子映射的最大优点就是高效。一是光子传输的过程将能够通过光子图而得到重用,不需要像光线跟踪那样对屏幕上的每个像素重复进行几千次传输模拟。二是考虑到间接光照的变化往往比直接光照平缓,因此在计算时并不需要从光源发出太多的光子,可通过 Monte Carlo 的密度估计来收集存储光子图中的较少量的光子。但是这种优势是以存储作为代价的,因为需要为光子图的存储消耗额外的空间。因此有一些研究人员在专门研究数据压缩算法。

1.5 反走样算法研究及加速求交算法研究

1.5.1 反走样算法研究

在真实感图像绘制中,极少数图像的频谱是带限的(Band-Limited),绝大多数图像的明暗变化率非常大,因此不管采用多高的采样率都不可避免出现走样和失真。如在图像的突变边缘上,会看到阶梯状伪影。因此,如何采用尽可能少的采样点数而尽量减少走样,是光线跟踪需要解决的一个重要问题。关于采样的研究一般有两个方向,一是从采样点分布的角度进行研究,二是从采样量的角度进行研究。从采样点分布的角度出现了很多算法,如规则采样、随机采样(亦称波松采样)、抖动采样(亦称蒙特卡罗分层采样)、半抖动采样和波松圆盘采样等。从采样量的角度有两类算法:一是超级采样,二是自适应采样。超级采样是指在每个像素点处均匀分布超过一个的采样点,自适应采样是根据像素计算光照难度来决定像素的采样量,如可以根据蒙特卡罗算法收敛的速度来选择采样量。自适应采样研究中包括以下算法:基于方差的自适应采样^[6]、基于置信区间的自适应采样^[7]、基于对比度(Contrast)的自适应采样^[8-10]、基于香农熵(Shannon)的自适应采样^[11-13]和基于 f-散度(f-Divergence)的自适应采样^[14]等。

1.5.2 加速求交算法研究

在光线跟踪方法中,最为耗时的部分是光线与场景的求交计算。如何引入合适的加速数据结构来加快求交运算,是提高光线跟踪效率的重要研究领域。出现的典型算法有均匀网格^[15]、层次包围体^[16]、八叉树^[17]和 KD 树^[18]等。

2 光线跟踪近期研究进展

2.1 采样及加速求交新算法研究

近几年来,光线跟踪的研究仍然围绕加速求交算法和采样算法这条主线来进行,出现了一些新的算法,如 Metropolis 算法^[21],即利用路径空间的连续性设计随机采样来加快收敛,其基本思想是产生一系列的传输路径,其中的每一条路径都是通过上一条路径的某种变换得到的。这种变换的设计使得这些路径的概率分布正比于其对于最终绘制图像的贡献,从而保证了在路径空间中的“重要区域”进行更多的采样,以

有效加快 Monte Carlo 方法收敛的速度。基于 Metropolis 算法,Cline 等人 2005 年提出了基于能量重分布的光线跟踪算法(ERPT)^[22],此算法是一个混合算法,它将 Metropolis 路径变换的采样思想应用于标准 Monte Carlo 算法中。它的思想是通过在图像空间利用路径变换对样本能量进行重新分布来减小方差。它从概念上要比 Metropolis 算法简单,但却继承了 Metropolis 算法路径变换的思想。2005 年 Talbot 等人将重要性重采样方法用于 Monte Carlo 全局照明中,以有效减小方差^[23]。

2.2 动态光线跟踪算法研究

实现全局光照条件下的动态场景的交互性具有重要的意义,它可以有效地提高电影工业、游戏、汽车和飞机设计以及建筑等行业设计过程的高效性,并能有效地降低成本。目前出现了一些全局光照条件下实现动态场景交互性的算法,如基于预计算的方法。但是由于缺少光线跟踪特性,还不能实现真正意义上的全局光照,因此动态光线跟踪算法的研究具有重要的意义。

近年来一些研究人员开始进行动态光线跟踪的研究,基于高速缓存和 SIMD 指令集实现了一些动态场景中交互式光线跟踪系统^[24-26],这些系统一般运行于共享内存的高速并行计算机环境下或基于普通 PC 机组成的分布式系统中。然而,这些系统的局限性导致其与现有的全局光照算法不兼容,主要表现在计算机性能的限制、并行及分布式网络带宽的限制以及交互操作本身的限制。如现存的大部分算法都是采样预计算的方法,这本身就限制了交互性。基于先前的工作,Wald 等人提出了一种并行的全局光照算法,该算法具有很小的预计算量和通信量,采用基于准 Monte Carlo 积分的高效采样算法。

2.3 基于图形硬件的光线跟踪算法研究

近年来另一个研究热点是基于 GPU 的光线跟踪研究,即充分利用 GPU 并行处理体系结构的优势来实现光线跟踪。

随着图形处理器(GPU)性能的大幅度提高以及可编程特性的发展,图形绘制管线的某些阶段和图形算法逐渐从 CPU 向 GPU 转移。基于光能辐射度方法的全局光照算法在 GPU 上的实现研究较早,因为其于光线跟踪方法相比在 GPU 上较容易实现。基于光线跟踪方法的全局光照算法在 GPU 上的实现近几年才刚刚出现^[27-30]。文献[27]提出的光线跟踪算法将所有的光线跟踪内核都建立在 GPU 之上,包括视线产生器、遍历器、求交器和着色器。文献[28]仅仅把 GPU 作为一个光线-三角形求交器,将其他的光线跟踪工作留给 CPU。

最近几年,一些光线与场景求交运算的加速算法被引入到 GPU 上。最先被引入到 GPU 中的是均匀栅格算法,因为这种算法无论是在构造还是在遍历上都非常简单。文献[29]提出了一个能够在 GPU 上实现的 KD-tree 算法,并指出 KD-tree 的性能超过均匀栅格。文献[30]提出了一个 BVH 实现,并指出其与均匀栅格和 KD-tree 相比具有更好的性能。

结束语 本文对基于光线跟踪方法的全局光照问题进行了初步研究。基于光线跟踪方法的全局光照条件下的绘制更接近于物理光照模型,更加精确,因而可以绘制出更加细致的图像帧。但其由于计算复杂度太高,不易于硬件化,而且需要

对场景中的光源、几何表面、材质、光线积分路径等高维数据进行大量的采样,因此到目前为止还很难用于交互式实时应用。虽然出现了一些交互式光线跟踪算法,但这些算法均是运行于超高性能计算机或 PC 机集群环境下的。

对于基于光线跟踪方法的全局光照问题,我们认为未来的研究将沿着以下方向进行:一是继续研究更高效的加速求交算法和采样算法,这是该研究领域需要解决的瓶颈问题;二是针对实时交互式应用,改进现有算法或研究新的算法,使其能够真正应用于游戏、虚拟现实等交互式应用中;三是充分发挥 GPU 的并行处理能力和可编程功能,研究更适合于现有图形硬件设备的光线跟踪算法,使其易于硬件化。

基于光线跟踪方法的全局光照虽然目前的实际应用还不是很多,但随着通用处理器以及图形硬件设备的飞速发展,必将能够应用于游戏、虚拟现实等实时交互式应用中,具有很大的研究价值及应用前景。

参考文献

- [1] Kajiya J T. The Rendering Equation [C] // SIGGRAPH '86: Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1986: 143-150
- [2] Whitted T. An improved illumination model for shaded display [J]. Commun. ACM, 1980, 23(6): 343-349
- [3] Cook R L, Porter T, Carpenter L. Distributed Ray Tracing [C] // SIGGRAPH '84: Proceedings of the 11th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1984: 137-145
- [4] Chen S, Rushmeier H E, Miller G, et al. A progressive multi-pass method for global illumination [C] // SIGGRAPH '91: Proceedings of the 18th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1991: 165-174
- [5] Jensen H W. Global illumination using photon maps [C] // Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96. London, UK: Springer-Verlag, 1996: 21-30
- [6] Lee M E, Redner R A, Useton S P. Statistically optimized sampling for distributed ray tracing [J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 61-65
- [7] Purgthofe W. A statistical method for adaptive stochastic sampling [J]. Computers & Graphics, 1987, 11(2): 157-162
- [8] Mitchell D P. Generating antialiased images at low sampling densities [J]. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '87), 1987, 21(4): 65-72
- [9] Plataniotis K N, Androustos D, Venetsanopoulos A N. Multi-channel Filters for Image Processing [J]. Signal Processing: Image Communications, 1997, 9(2): 143-158
- [10] Slusallek P, Seidel H P. Vision-An Architecture for Global Illumination Calculations [J]. IEEE Trans. Visualization & Computer Graphics, 1995, 1(1): 77-96
- [11] Rigau J, Feixas M, Sbert M. New Contrast Measures for Pixel-Supersampling [C] // Proceedings of CGI'02. July 2002: 439-451
- [12] Rigau J, Feixas M, Sbert M. Refinement Criteria Based on f-Divergences [C] // Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2003
- [13] Rigau J, Feixas M, Sbert M. Entropy-based Adaptive Super sampling [C] // Proceedings of GI'03. 2003
- [14] Rigau J, Feixas M, Sbert M. Refinement Criteria Based on f-Divergences [C] // Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering 2003. June 2003
- [15] Fujimoto A, Tanaka T, Iwata K. Arts: accelerated ray-tracing system [M]. Tutorial: Computer Graphics; image synthesis. New York, NY, USA: Computer Science Press, Inc. 1988: 148-159
- [16] Rubin S M, Whitted T. A 3-dimensional representation for fast rendering of complex scenes [C] // SIGGRAPH '80: Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1980: 110-116
- [17] Glassner A S. Space subdivision for fast ray tracing [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1984, 4(10): 15-22
- [18] Sugerma F T J. KD-tree acceleration structures for a GPU ray tracer [C] // Proceedings of the Graphics Hardware 2005. Los Angeles, California, 2005: 15-22
- [19] Reshetov A, Soupikov A, Hurley J. Multi-level ray tracing algorithm [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 1176-1185
- [20] Wald I, Slusallek P, Benthin C, et al. Interactive rendering with coherent ray tracing [J]. Proceedings of the EUROGRAPHICS'2001. Los Angeles, California, 2001, 20(3): 153-164
- [21] Veach E, Guibas L J. Metropolis light transport [C] // SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 65-76
- [22] Cline D, Talbot J, Egbert P. Energy redistribution path tracing [J]. ACM Trans. Graph, 2005, 24(3): 1186-1195
- [23] Talbot J F, Cline D, Egbert P. Importance Resampling for Global Illumination [C] // Eurographics Symposium on Rendering (2005). 2005
- [24] Wald I, Slusallek P, Benthin C. Interactive Distributed Ray Tracing of Highly Complex Models [C] // Myszkowski K, Gortler S, eds. Rendering Techniques 2001 (Proc. 12th Eurographics Workshop on Rendering). 2001
- [25] Wald I, Benthin C, Wagner M, et al. Interactive Rendering with Coherent Ray Tracing [J]. Computer Graphics Forum, 2001, 20(3)
- [26] Wald I, Benthin C, Slusallek P. A simple and practical Method for Interactive Ray Tracing of Dynamic Scenes [R]. Saarland University, 2002
- [27] Purcell T J, Buck I, Mark W R, et al. Ray tracing on programmable graphics hardware [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 703-712
- [28] Carr N A, Hall J D, Hart J C. The ray engine [C] // Proceedings of SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Graphics. Hardware, 2002
- [29] Foley T, Sugerma J. KD-tree acceleration structures for a GPU raytracer [C] // Proceedings of SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Graphics Hardware. 2005
- [30] Thrane Na, Simonsen L O. A comparison of acceleration structures for GPU assisted ray tracing [D]. University of Aarhus, 2005

可维护性:为求得系统的可维护性 $M(t)$,先定义系统的修复率 $\mu(t)$,它表示修理时间已达到某个时刻但尚未修复的资源,在该时刻后的单位时间内完成修复的概率可表示为:

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \frac{dM(t)}{dt} \quad (5)$$

则由式(5)可得

$$M(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right) \quad (6)$$

当 $\mu(t)$ 为常数时,式(6)可写为

$$M(t) = 1 - \exp(-\mu t) \quad (7)$$

MTTR:系统的平均修复时间可表示为

$$MTTR = \lambda / \rho = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i)} \quad (8)$$

其中, $\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$ 为系统维修系数, $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ 为第 i 个部件的维修系数。

MTBF:系统的平均故障间隔时间可近似等于正常工作时间与在此段时间内故障次数之比

$$MTBF = t / N_f(t) \quad (9)$$

可用性:系统的稳态可用性为状态 M_0 的稳定概率

$$A_s = \pi_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^{-1} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \rho_i\right)^{-1} = (1 + \rho)^{-1} \quad (10)$$

下面以可靠性和平均修复时间为例,对比简单及异常处理模型在订单流入速率逐渐增加情况下的可靠性和平均修复时间,图9和图10中 Simple 表示简单模型,Exception 表示异常处理模型。

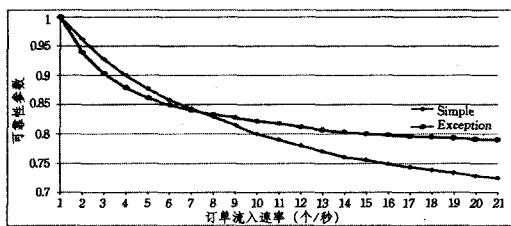


图9 可靠性对比图

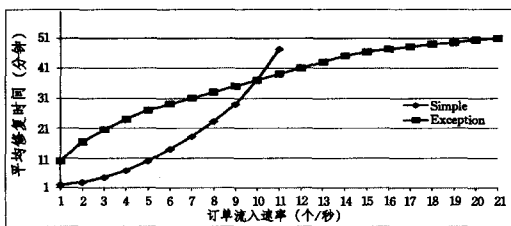


图10 平均修复时间对比图

从图9和图10中可以看出订单流入速率相同的情况下,异常处理模型在可靠性和平均修复时间方面均优于简单模型。

结束语 本文简要介绍了支持异常处理操作的柔性 workflow 及其特点,随后以 ELMS 的补货流程为例,给出了该流程基于 SPN 的简单流程模型和引入异常处理操作的柔性流程模型,在异常产生速度逐渐增加的情况下,通过对比二者的可信性参数,发现随着异常产生的增加,支持异常处理操作的柔性 workflow 的性能要优于普通的工作流系统。作者将进一步研究支持异常处理的柔性 workflow。

参考文献

- [1] 林闯,王元卓,杨扬,等.基于随机 Petri 网的网络可信性分析方法研究[J].电子学报,2006,34(2):322-332
- [2] Barlow R E. Mathematical theory of reliability: A historical perspective [J]. IEEE Trans on Reliability, 1984, 33(1): 16-20
- [3] Algirdas A, Laprie J-C, Randell B, et al. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2004, 1(1): 11-33
- [4] Avizienis A, Laprie J, Randell B. Fundamental Concepts of Dependability [R]. LAAS2CNRS, N01145. Apr. 2001
- [5] NUTTGJ. The evolution towards flexible workflow systems [J]. Distributed System Engineering, 1996, 3(4): 276-294
- [6] Han Y, Sheth A, Bussler R C. A taxonomy of adaptive workflow management [A]//Workshop in Conference on Computer Supported Cooperative Work: Towards Adaptive Workflow Systems [C]. Seattle, USA: ACM Press, 1998
- [7] Kammer P J, Bolcer G A, Taylor M, et al. Techniques for supporting dynamic and adaptive workflow [J]. Computer Supported Cooperative Work, 2000, 9(3/4): 269-292
- [8] Sadiq S. On capturing exceptions in workflow process models [A]//Proceedings of the 4th International Conference on Business Information Systems [C]. Poznan, Poland: Springer-Verlag, 2000
- [9] Casati F. A discussion on approaches to handling exceptions in workflows [A]//Proceedings of the International Conference on Computer - Supported Cooperative Work, workshop on Adaptive Workflow Systems [C]. Seattle, USA: ACM Press, 1998
- [10] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 清华大学出版社, 2000: 93-125
- [11] Lin C, Sheng L J, Wu J P, et al. An integrative scheme of differentiated service: modeling and performance analysis [A]//Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2000. Proceedings, 8th International Symposium on [C]. Book, News, Inc, Portland, OR: IEEE, 2000: 441-448
- [12] 林闯. 一种资源共享系统的模型和近似性能分析 [J]. 计算机学报, 1997, 20(10): 865-871
- [13] Workflow Management Coalition. The workflow reference model [Z]. WFMC - TC00 - 1003. 1995
- [14] 田立勤, 林闯, 周文江. 随机 Petri 网模型中变迁的串并联性能等价化简技术 [J]. 电子学报, 2002, 30(8): 1134-1137
- [15] Ciaodo G, Muppala J, Trivedi K S. SPNP: Stochastic Petri Net Package [A]//Proc. Petri Nets and Performance Models [C]. 1989: 142-151

(上接第 30 页)

- [31] Romeiro F, Velho L. Computer Graphics Brazil: Scalable GPU rendering of CSG models [J]. Computers and Graphics, 2008, 32(5)
- [32] Ritschel T. Imperfect shadow maps for efficient computation of indirect illumination [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-8
- [33] Cheslack-Postava E, Wang Rui. Fast, realistic lighting and material design using nonlinear cut approximation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-10
- [34] Lehtinen J, Zwicker M. A meshless hierarchical representation

for light transport [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9

- [35] Pacanowski R, Raynaud M. Efficient streaming of 3 D scenes with complex geometry and complex lighting [C]//Proceedings of the 13th International Symposium, 2008: 11-17
- [36] Ritschel T, Grosch T. Interactive global illumination based on coherent surface shadow maps [C]//Proceedings of graphics interface 2008. 2008: 185-192
- [37] 任重, 周昆. 复杂环境光源下的动态场景实时绘制算法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 8(8)
- [38] 孙鑫, 周昆, 石教英. 可变材质的实时全局光照照明绘制 [J]. 软件学报, 2008, 19(4)