

基于 OSG 和 Bullet 的船舶碰撞响应三维仿真

关克平, 江靖楠, 吴天裕, 陈锦标

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘 要:针对目前在航海模拟器中缺少对船舶碰撞响应的三维仿真,提出在航海模拟器中基于开源场景图形(OpenSceneGraph, OSG)渲染引擎开发的三维视景中加入 Bullet 物理引擎的技术方案.根据刚体动力学、接触与碰撞动力学和能量守恒定律,基于 Bullet 刚体碰撞响应模型,建立船舶三维碰撞动力学模型;运用 Projected Gauss-Seidel 迭代算法,得到碰撞后船舶实时的六自由度位置姿态参数;根据碰撞检测阶段获取的碰撞点位置参数,实时绘制划痕并添加爆炸特效.该方案已成功应用于航海模拟器视景系统中,渲染效果良好.

关键词:航海模拟器;三维视景系统;碰撞响应;开源场景图形(OSG);Bullet 物理引擎

中图分类号: U666.158

文献标志码: A

Three-dimensional simulation on collision response of ships based on OSG and Bullet

GUAN Keping, JIANG Jingnan, WU Tianyu, CHEN Jinbiao

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime Univ., Shanghai 201306, China)

Abstract: Considering no three-dimensional (3D) simulation on collision response of ships in navigational simulator nowadays, a proposal of adding the technology of Bullet (a physical engine) to the 3D scene which is developed based on an OpenSceneGraph (OSG) rendering engine in navigational simulator is put forward. According to the rigid body dynamics, contact and collision dynamics and law of conservation of energy, the 3D collision dynamics model of ships is built based on the rigid body collision response model in Bullet. Then the Projected Gauss-Seidel iterative algorithm is used to calculate the 6-DOF location and posture parameters of ships after collision. According to the location parameters of collision points obtained in the period of collision detection, the scratch is drawn in real time, and the explosion effect is added. This proposal is applied to the vision system of navigational simulator successfully, and is of good rendering effect.

Key words: navigational simulator; three-dimensional (3D) vision system; collision response; OpenSceneGraph (OSG); Bullet physical engine

0 引言

随着国际航运业和现代造船技术的不断发展,船舶大型化、高速化趋势明显,通航密度也越来越大,通航安全问题备受瞩目。^[1]为提高海上航行安全,降低海事事故发生率,通常运用航海模拟器对船员进行培训和评估。国际海事组织发布的《STCW 公约》马尼拉修正案对航海模拟器提出更高的设备要求,完善航海模拟器的功能迫在眉睫。碰撞检测和碰撞响应是航海模拟器的关键技术之一,目前的模拟系统对碰撞后的船舶往往只做简单的停船处理,碰撞响应视景真实感欠缺。^[2]若能有效解决船舶碰撞响应的真实感问题,则可进一步完善航海模拟器的性能,提高船员应急情况下的模拟操纵能力。针对该问题,笔者提出将开源场景图形(OpenSceneGraph, OSG)三维渲染引擎与 Bullet 物理引擎结合的技术方案,研究三维碰撞响应算法,最终将该方案成功应用于航海模拟器的视景系统中。

1 技术支持

1.1 OSG

OSG 扩展功能突出,跨平台性和可移植性好,且具备良好的场景管理和图形渲染优化功能,能实时高效绘制并控制三维模型,支持多类型外接设备。^[3]目前,国内多数航海模拟器的三维视景系统是基于 OSG 开发的。

1.2 Bullet

物理引擎通过为刚性或柔性物体赋予真实物理属性的方式,计算物体的运动、旋转和碰撞反应。^[4]世界三大物理引擎分别为 Havok, PhysX 和 Bullet,其中 Bullet 是一个开源的、易扩展的动力学类库,可有效解决虚拟环境中可移动物体的碰撞问题,且运算快速稳定。Bullet 可作为一个碰撞检测库单独使用,开发者可根据需求自行设计仿真过程。^[5-6]

1.3 OSG 与 Bullet 的结合

1.3.1 OSG 与 Bullet 结合的可能性

OSG 和 Bullet 均使用四元数和三维向量表示物体的方位,用三角网格表示不规则几何体,并根据时间帧循环运行,这为 Bullet 与 OSG 的结合提供可能。OSG 主要用于管理场景结构并渲染三维视景,其碰撞检测功能具有一定的局限性,无法满足用户的精确碰撞检测要求;Bullet 赋予模型物理属性,提供多种碰撞检测方法,并根据动力学原理作出碰撞响应。将 OSG 与 Bullet 结合,可弥补二者自身存在

的不足,提高三维虚拟场景的真实感,符合物理世界的规律^[7]。

1.3.2 OSG 与 Bullet 结合的过程

OSG 与 Bullet 结合的过程^[8]:①初始化物理世界,即对碰撞配置对象(btDefaultCollisionConfiguration)、碰撞调度器对象(btCollisionDispatcher)、解算器(btConstraintSolver)、碰撞粗测阶段(BroadPhase)、动态世界(btDynamicsWorld)进行初始化;②定义碰撞检测,为进行碰撞检测的物体构建合适的碰撞几何体(btCollisionShape);③创建虚拟场景,设置物理世界中各物体的初始速度、位置、质量、摩擦力等物理参数;④设置回调,包括设置作用力和空间位置的回调,获取物理计算结果;⑤物理更新,根据回调获取的物体的位置姿态等参数,实时更新物体的空间位置。

2 碰撞响应力学基础

2.1 刚体动力学模型

2.1.1 刚体的平动

刚体的平动可简化为质点的移动。设刚体受力为 \mathbf{F} ,速度为 \mathbf{v} ,加速度为 \mathbf{a} ,位移为 \mathbf{x} ,根据牛顿第二定律,其运动方程和运动微分方程^[9]分别为

$$\mathbf{y}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{v}(t) \end{pmatrix}, \quad \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \\ \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{a}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.1.2 刚体的转动

设 t 时刻刚体所在的世界坐标系与局部坐标系间的旋转矩阵为 $\mathbf{R}(t)$,平移 $\mathbf{x}(t)$,刚体上某点 P 的线动量为 $\mathbf{P}(t) = m\mathbf{v}(t)$,角动量为 $\mathbf{L}(t) = \mathbf{I}(t)\boldsymbol{\omega}(t)$ 。当 $\mathbf{I}(t)$ 为主惯性张量时,根据相关动力学定理,其对应的运动方程和运动微分方程分别为

$$\mathbf{y}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{R}(t) \\ \mathbf{P}(t) \\ \mathbf{L}(t) \end{pmatrix}, \quad \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \boldsymbol{\omega}^*(t)\mathbf{R}(t) \\ \mathbf{F}(t) \\ \mathbf{T}(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为作用在刚体上某点 P 的力; $\mathbf{T}(t)$ 为刚体所受力矩; $\boldsymbol{\omega}^*(t)$ 为角速度矩阵。

刚体碰撞响应算法的核心为求解刚体的动力学微分方程。通过对实时获取的刚体质心的加速度和角加速度进行积分,可求得线速度和角速度,从而可最终求取平移向量和旋转矩阵。

2.2 船舶碰撞动力学三维模型

对船舶碰撞动力学三维模型作以下假设^[10]:在

船舶相撞时考虑船舶横荡、纵荡、艏摇和横摇运动;船舶碰撞和损伤变形区域极小,且为塑性碰撞;碰撞瞬间的冲击力在相撞船舶上同步传递;船舶为刚体,且忽略未发生碰撞部分的结构性能。

2.2.1 坐标系构建

为分析船舶碰撞动力学三维模型,构建图 1 所示的坐标系,其中 Ship A 为撞击船,Ship B 为被撞船。 $O-xyz$ 为全局坐标系,不随船舶位置的改变而改变。初始时刻, x 轴在撞击船的纵断面上, yOz 平面在撞击船的横断面上。 $O'-uvw$ 坐标系与 $O-xyz$ 坐标系类似。 z' 轴和 w' 轴分别经过撞击船和被撞船的重心且与 z 轴和 w 轴平行。点 P 为碰撞接触点,取点 P 的法向为 ξ 轴,切向为 η 轴,点 P 为坐标系原点。记 α 为 x 轴与 η 轴的夹角, β 为 x 轴与 u 轴的夹角。撞击船前进速度和横移速度分别为 V_{Ax} 和 V_{Ay} ,被撞船的前进速度和横移速度分别为 V_{Bu} 和 V_{Bv} 。

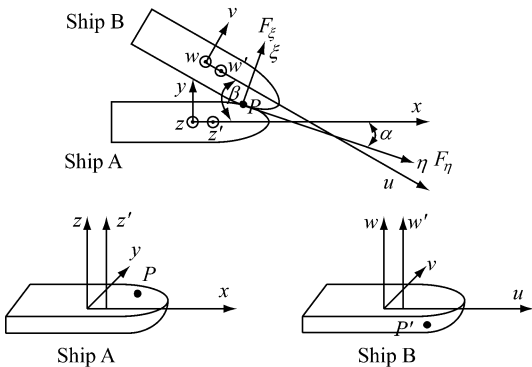


图 1 船舶碰撞分析坐标系

2.2.2 碰撞结束时的船体运动速度

设撞击船质心横坐标为 x_A ,碰撞点坐标 (x_C, y_C, h_A) ,撞击船及其纵荡、横荡运动附加质量系数分别为 M_A, m_{Ax} 和 m_{Ay} ,绕 x 轴和 z' 轴旋转的附加惯性矩系数分别为 j_{Ax} 和 $j_{Az'}$,绕 x 轴和 z' 轴旋转的惯性半径分别为 R_{Ax} 和 $R_{Az'}$,在 x 轴和 y 轴方向的线加速度分别为 V_{Ax} 和 V_{Ay} ,接触点法向和切向的碰撞冲量分别为 I_ξ 和 I_η 。对被撞船进行类似的参数假设。根据文献[10],基于刚体动力学、接触和碰撞动力学理论以及动量守恒定理,可得碰撞结束时撞击船

和被撞船的船体运动速度。

对于撞击船,有

$$v_{Ax} = V_{Ax} - \frac{I_\xi \sin \alpha + I_\eta \cos \alpha}{M_A (1 + m_{Ax})}$$
$$v_{Ay} = V_{Ay} - \frac{I_\xi \cos \alpha - I_\eta \sin \alpha}{M_A (1 + m_{Ay})}$$
$$\omega_{Az'} = - (I_\xi (y_C \sin \alpha - (x_C - x_A) \cos \alpha) + I_\eta (y_C \cos \alpha + (x_C - x_A) \sin \alpha)) / (M_A R_{Az'}^2 (1 + j_{Az'}))$$
$$\omega_{Ax} = \frac{I_\xi h_A \cos \alpha - I_\eta h_A \sin \alpha}{M_A R_{Ax}^2 (1 + j_{Ax})}$$

(3)

对于被撞船,有

$$v_{Bu} = V_{Bu} - \frac{I_\xi \sin(\beta - \alpha) - I_\eta \cos(\beta - \alpha)}{M_B (1 + m_{Bu})}$$
$$v_{Bv} = V_{Bv} + \frac{I_\xi \cos(\beta - \alpha) + I_\eta \sin(\beta - \alpha)}{M_B (1 + m_{Bv})}$$
$$\omega_{Bw'} = (I_\xi ((y_C - y_B) \sin \alpha - (x_C - x_A) \cos \alpha) + I_\eta ((y_C - y_B) \cos \alpha + (x_C - x_A) \sin \alpha)) / (M_B R_{Bw'}^2 (1 + j_{Bw'}))$$
$$\omega_{Bu} = \frac{I_\xi h_B \cos(\beta - \alpha) + I_\eta h_B \sin(\beta - \alpha)}{M_B R_{Bu}^2 (1 + j_{Bu})}$$

(4)

3 船舶碰撞响应算法

Bullet 的物理模拟分为粗测阶段 (BroadPhase) 和细测阶段 (NarrowPhase),根据 NarrowPhase 获得的重叠对 (Overlapping Pairs) 的分布情况计算碰撞对象岛 (Collision Island),然后对各岛进行约束分析,即碰撞响应。

3.1 构建动力学世界

动力学世界的构建流程见图 2。图 2 中:前缀 osg 表示 OSG 的结构类;前缀 bt 表示 Bullet 的结构类;ShipMT 是以船舶模型为子节点的矩阵。流程①至⑦分别说明如下:①根据船舶模型,建立动力学世界运动状态矩阵;②根据位置矩阵,设置运动状态矩阵的世界矩阵;③根据船舶模型,建立相应的动力学世界几何碰撞形状;④根据船舶质量,计算其惯性;⑤根据船舶的质量、惯性、几何碰撞体和运动状态矩阵,设置船舶(刚体)的物理属性;⑥根据船舶的物

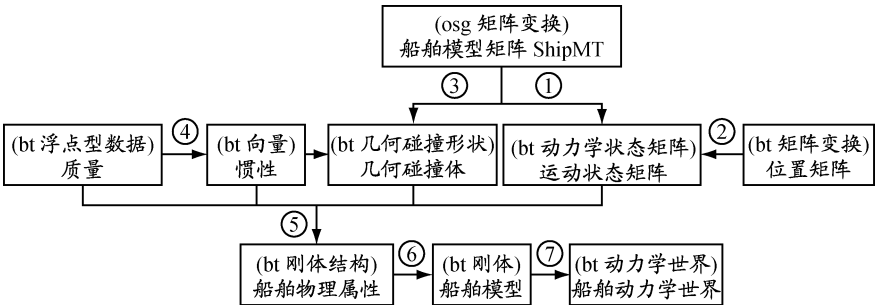


图 2 动力学世界的构建流程

理属性,建立船舶(刚体)的动力学模型;⑦设置船舶动力学模型的线速度、角速度后,添加至船舶动力学世界。

3.2 刚体动力学约束

3.2.1 刚体运动方程

所有物体的运动状态均可用经典力学中的牛顿-欧拉方程^[11]描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{v}_i \\ \dot{\mathbf{q}}_i = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i \mathbf{q}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{m}_i^{-1} \sum_{j_k=i} \mathbf{f}_{jk} - \mathbf{m}_i^{-1} \sum_{i_k=i} \mathbf{f}_{ik} + \mathbf{m}_i^{-1} \mathbf{f}'_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{I}_i^{-1} \sum_{j_k=i} \mathbf{r}_{kj} \times \mathbf{f}_{jk} - \mathbf{I}_i^{-1} \sum_{i_k=i} \mathbf{r}_{ki} \times \mathbf{f}_{ik} - \mathbf{I}_i^{-1} \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{I}_i^{-1} \boldsymbol{\tau}'_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:变量上面的点表示对时间求导; m_i 为物体*i*的质量; \mathbf{I}_i 为物体*i*的惯性张量; \mathbf{r}_i 为物体*i*的质心的位置; \mathbf{v}_i 为物体*i*的质心的速度; $\boldsymbol{\omega}_i$ 为物体*i*的质心的角速度; \mathbf{q}_i 为物体*i*方向的四元数;假设物体*i*和*j*在点*k*碰撞,则重新标记两物体为*i_k*和*j_k*,且*i_k*<*j_k*, \mathbf{f}_{i_k} 和 \mathbf{f}_{j_k} 分别为两物体在碰撞点*k*所受的力; \mathbf{f}'_i 为物体*i*所受到的所有外力; $\boldsymbol{\tau}'_i$ 为物体*i*受到的所有外力矩。

物体间各接触点法线符号见图3。令物体*i*的质心向量为 \mathbf{r}_i ,接触点*k*向量为 \mathbf{p}_k ,则物体*i*的接触点

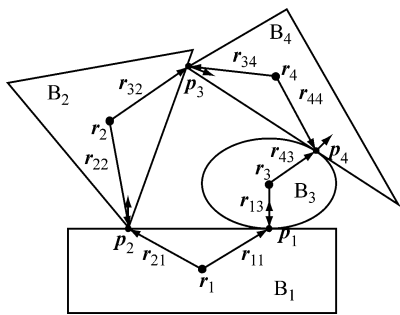


图3 接触点法线符号说明

*k*的向量可表示为

$$\mathbf{r}_{ki} = \mathbf{p}_k - \mathbf{r}_i \quad (6)$$

令 \mathbf{s} 和 \mathbf{u} 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{s} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{q}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{r}_n, \mathbf{q}_n)^T \\ \mathbf{u} = (\mathbf{v}_1, \boldsymbol{\omega}_1, \mathbf{v}_2, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \mathbf{v}_n, \boldsymbol{\omega}_n)^T \end{cases} \quad (7)$$

所有旋转的变化用矩阵 \mathbf{S} 表示,物体的质量用矩阵 \mathbf{M} 表示,接触点的法向量用矩阵 \mathbf{N} 表示,接触条件用矩阵 \mathbf{C} 表示。令 \mathbf{f} 为所有法向力摩擦因数的集合, \mathbf{f}' 为所有外力、外力矩、角速度的集合,则牛顿-欧拉方程可改写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{S} \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{C} \mathbf{N} \mathbf{f} + \mathbf{f}') \end{cases} \quad (8)$$

3.2.2 接触条件

可借助投影矩阵 $\mathbf{P}_k \in \mathbb{R}^{3k \times 3}$ 分析第*k*个接触点,其定义为

$$\mathbf{P}_k^T = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \cdots & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \cdots & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

其中第*k*个3×3子矩阵为单位矩阵。对应第*k*个接触点速度的法向分量为

$$\mathbf{n}_k^T \mathbf{P}_k^T \mathbf{C}^T \mathbf{u} = \mathbf{n}_k^T (\mathbf{v}_{j_k} + \boldsymbol{\omega}_{j_k} \times \mathbf{r}_{k,j_k}) - \mathbf{n}_k^T (\mathbf{v}_{i_k} + \boldsymbol{\omega}_{i_k} \times \mathbf{r}_{k,i_k}) \quad (10)$$

若物体*B_{i_k}*与*B_{j_k}*在*t*时刻的接触点向量为 \mathbf{p}_k ,当二者的接触条件中一个非零且另一个为零或负值时,或向量为 \mathbf{p}_k 的潜在碰撞点在*t*时刻未发生碰撞时,需要对速度给予补偿,使 $\mathbf{f}_k \geq 0$ 。

3.2.3 接触点约束

接触点约束可运用雅可比矩阵描述,记为 \mathbf{J}_c 。接触点有1+ η 个约束,故 \mathbf{J}_c 为一个(1+ η)×12的矩阵^[12]:

$$\mathbf{J}_c = (\mathbf{J}_1^i \quad \mathbf{J}_a^i \quad \mathbf{J}_1^j \quad \mathbf{J}_a^j) \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_1^i = \begin{pmatrix} -\mathbf{n}^T \\ -\mathbf{D}_k^T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_1^j = \begin{pmatrix} \mathbf{n}^T \\ \mathbf{D}_k^T \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{J}_a^i = \begin{pmatrix} -(\tilde{\mathbf{r}}_i^{\times} \mathbf{n})^T \\ -(\tilde{\mathbf{r}}_i^{\times} \mathbf{D}_k^T)^T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_a^j = \begin{pmatrix} (\tilde{\mathbf{r}}_j^{\times} \mathbf{n})^T \\ (\tilde{\mathbf{r}}_j^{\times} \mathbf{D}_k^T)^T \end{pmatrix}$$

式中: \mathbf{D}_k 为摩擦力矩阵, $\mathbf{D}_k = (d_{1k}, \dots, d_{\eta k})$; $\tilde{\mathbf{r}}_i^{\times}$ 和 $\tilde{\mathbf{r}}_j^{\times}$ 分别为 \mathbf{r}_i^{\times} 和 \mathbf{r}_j^{\times} 的增广矩阵, \mathbf{r}^{\times} 为刚体质心位置矩阵。

3.3 碰撞响应迭代算法

模拟运算中会产生许多*n*维稀疏矩阵方程组 $\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$,其中 \mathbf{A} 的阶数*n*较大,但又有较多零元素,一般用迭代法进行求解。

3.3.1 Gauss-Seidel 迭代法

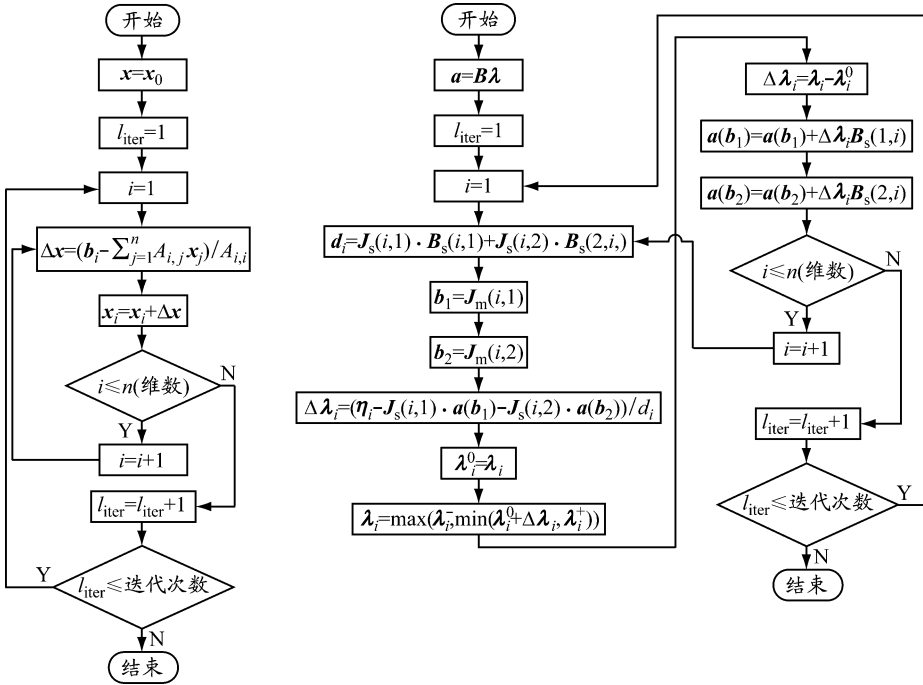
用 Gauss-Seidel 迭代法进行求解时,给定初始值 \mathbf{x}_0 ,假设经过*k*+1次迭代时,已求得 $\mathbf{x}_1^{k+1}, \mathbf{x}_2^{k+1}, \dots, \mathbf{x}_{i-1}^{k+1}$,则 \mathbf{x}_i^{k+1} 的值可以由这些值代入得到。用该方法求解线性方程收敛效果较好。一般情况下,给定迭代次数,相应算法流程见图4(a)。

3.3.2 Projected Gauss-Seidel 迭代法

Projected Gauss-Seidel 迭代法在 Gauss-Seidel 迭代法的基础上通过控制边界的方法求解未知数。调整上述算法的线性代数,构建约束的雅可比矩阵 \mathbf{J} 和 \mathbf{B} 的稀疏矩阵(其中, $\mathbf{B} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T$),可有效提高计算效果并减少内存占用量。

下面给出用 Projected Gauss-Seidel 迭代法近似求解 $\mathbf{J} \mathbf{B} \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\eta}$ (已知 $\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}^0$)的计算过程,其中 \mathbf{J}, \mathbf{B} ,

η 和 λ 均为 $6n \times 1$ 矩阵. 每一帧需根据边界条件确定实际增量 $\Delta\lambda_i$, 从而更新向量 a 的值, 使其始终满足 $a = B\lambda$. 令 $\lambda = \lambda^0$, 则其相应算法流程见图 4(b).



(a) Gauss-Seidel 迭代法 (b) Projected Gauss-Seidel 迭代法

图 4 Gauss-Seidel 迭代法和 Projected Gauss-Seidel 迭代法算法流程

Projected Gauss-Seidel 迭代法运行时间为 $O(s)$, 存储需求为 $O(s+n)$. 若 JB 正定, 则可判定收敛.

3.3.3 条件补偿

动力学约束问题可视为混合线性互补问题 (Mixed Linear Complementarity Problem, MLCP), 可表示为

$$\begin{cases} w = JB\lambda - \eta \\ \lambda^- \leq \lambda \leq \lambda^+ \\ w_i = 0 \leftrightarrow \lambda_i^- \leq \lambda_i \leq \lambda_i^+, \forall i \\ \lambda_i = \lambda^- \leftrightarrow w_i > 0, \forall i \\ \lambda_i = \lambda^+ \leftrightarrow w_i < 0, \forall i \end{cases} \quad (13)$$

其中: w 为约束速度; 后 3 行是补偿条件. 第 1 个补偿条件表示只要 λ 满足条件, 即可满足约束; 后 2 个补偿条件表示若不满足约束条件, 即若约束速度非零, 则 λ 只能取下界或上界.

4 船舶碰撞响应三维仿真实现

4.1 船舶六自由度姿态变化仿真

基于 Bullet 的刚体碰撞模型, 结合船舶碰撞的三维动力学原理, 进行碰撞响应三维仿真. 在仿真试验中, 本船和目标船的基本参数见表 1. 三维视景系统中本船与目标船碰撞前后的速度及六自由度参数见表 2, 其中: 船舶三维坐标位置为 (x, y, z) , 航向为

h , 横摇为 r , 纵摇为 p , 线速度为 (v_x, v_y, v_z) , 角速度为 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$. 航海模拟器中船舶碰撞响应的三维仿真效果见图 5.

表 1 本船和目标船基本参数

类型	名称	长/m	宽/m	吃水/m	载质量/t
本船	17 万 t 散货船	288.1	44.0	10.5	170 162
目标船	3 000 TEU 新重庆轮	263.2	32.2	8.5	22 000

表 2 本船与目标船碰撞前后的速度及六自由度参数

参数	碰撞前		碰撞后	
	本船	目标船	本船	目标船
x	-343.212 0	-438.674 0	-356.043 0	-448.025 0
y	86.661 4	227.086 0	102.445 0	244.702 0
z	0	0	0.157 3	-1.211 0
h	0.290 8	-0.087 2	0.282 7	-0.113 8
p	-0.007 3	0.003 4	-0.011 2	-0.008 1
r	-0.141 7	0.001 4	0.004 8	0.009 3
v	v_x	-2.828 2	0.446 7	-2.499 7
	v_y	4.221 5	2.533 1	4.086 5
	v_z	0	0	0.039 2
w	w_x	-0.000 9	0.000 0	-0.002 3
	w_y	-0.001 3	0.000 0	0.002 7
	w_z	0	0	-0.003 7



(a) 碰撞前

(b) 碰撞后

图5 本船与目标船碰撞前后的三维视景

4.2 碰撞划痕特效模拟

根据碰撞检测阶段获取的碰撞接触点的位置参数,将碰撞接触点依次连接,可实时绘制船舶碰撞的划痕,即:从连续碰撞的第2个碰撞接触点 p_2 开始绘制划痕;将当前获取的碰撞接触点 p_i 与前一个碰撞接触点 p_{i-1} 相连,形成线段 $p_{i-1}p_i$;每产生一个新的碰撞接触点,便绘制一条线段,直到下一次碰撞检测无碰撞接触点时停止本条划痕的绘制.若某时刻又产生新的碰撞接触点,则开始一条新划痕的绘制.碰撞划痕特效见图6(a).

每条划痕实际上是连接一次连续碰撞过程中的所有碰撞接触点 $\{p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, \dots, p_n\}$ 的折线段.为使折线段更加光滑,可适当提高碰撞检测的频率.

4.3 碰撞爆炸特效模拟

碰撞爆炸特效的产生主要借助 OSg 的粒子系统 osgParticle 实现,在每次连续碰撞的第1个碰撞接触点位置模拟爆炸的效果.^[13]碰撞特效主要运用 OSg 粒子系统中 ParticleEffect 中的 ExplosionEffect

模拟爆炸效果,FireEffect 模拟火的燃烧效果,ExplosionDebrisEffect 模拟爆炸后的四散颗粒效果,以及 SmokeEffect 模拟爆炸后的烟雾效果.碰撞爆炸特效见图6(b).



(a) 划痕特效

(b) 爆炸特效

图6 船舶碰撞的划痕和爆炸特效

5 结束语

将 OSg 三维渲染引擎与 Bullet 物理引擎结合以解决航海模拟器中船舶碰撞响应问题.根据刚体动力学相关理论和能量守恒定律,以 Bullet 的刚体碰撞响应原理为基础,引入船舶碰撞动力学模型,运用 Projected Gauss-Seidel 迭代法,根据船舶碰撞前的速度、角速度等物理参数,算出碰撞后的相应参数,进一步推算碰撞后船舶的位置姿态,并进行实时更新.此外,还根据碰撞检测阶段求得的碰撞点的位置,实时绘制划痕并加入爆炸特效,并实时更新这些特效的位置和姿态,使其随船舶的运动位置和姿态的改变而改变.

该方案创造性地在航海模拟器的视景系统中加入物理引擎 Bullet,不仅可完善碰撞响应的仿真效果,而且符合物理规律,能提高视景的真实感和逼真度.

参考文献:

- [1] 关克平,江靖楠,王静波.基于 OSg 的船撞桥碰撞检测的研究[J].中国航海,2014,37(2):49-53.
- [2] 施朝健,陈锦标,胡勤友.船舶操纵模拟器开发和应用的全球协作[J].上海海事大学学报,2007,28(1):1-6.
- [3] 於文.基于 OSg 的航海模拟器视景系统关键技术研究[D].厦门:集美大学,2012.
- [4] HAGLUND J, STROMDAHL H. Perspective on models in theoretical and practical traditions of knowledge: the example of Otto engine animations [J]. Int J Technol & Design Education, 2012, 22(3): 311-327.
- [5] 张靖.虚拟现实技术在吊装仿真与方案制定中的应用[D].大连:大连理工大学,2009.
- [6] MA Liang, MA Ruina, CHABLAT Damien, et al. Human arm simulation for interactive constrained environment design [J]. Int J Interactive Design & Manufacturing, 2013, 7(1): 27-36.
- [7] 有人,陈定方.虚拟现实环境中的物理模拟及物理引擎应用的研究[J].湖北工业大学学报,2008,23(2):7-9,22.
- [8] 李少华,马金博,张立栋.碰撞检测技术在颗粒混合中的应用[J].软件导刊,2013,12(3):77-79.
- [9] 胡伟超.基于物理引擎建模方法的沥青混凝土等效导热系数研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [10] 陈练,王自力,李良碧.基于三维解析法的船舶碰撞外部动力学研究[J].中国造船,2007,48(2):80-88.
- [11] 侯筱婷,李昌华.虚拟吊装施工场景碰撞检测研究[J].系统仿真学报,2014,26(1):76-84.
- [12] 张云波.多体动力学接触与碰撞建模研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [13] 李露,陈定方.基于 OSg 的粒子系统特效控制的研究[J].湖北工业大学学报,2009,24(4):51-53.

(编辑 贾裙平)