

8-14-2020

Research on Simulation of Flexible Rope for Ship

Mincang Liang

Key Lab. of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Yin Yong

Key Lab. of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research on Simulation of Flexible Rope for Ship

Abstract

Abstract: In view of the problems on unreal-time, less realistic and the instability of the marine flexible rope simulation system, *one kind of structure-bending spring model was proposed based on the traditional mass-spring model*. Bending springs were added in the model to limit the abnormal bending phenomenon in the particle of model by setting different elasticity and damping coefficient for two kinds of spring to simulate the ropes with different rigidity. In order to guarantee the stability and accuracy of the model, *improved Euler method was adopted for numerical solution*. At the same time, *position adjustment method and speed adjustment method were used to solve the problem of super elasticity in the simulation of flexible rope*, and verify the feasibility of the model by simulation experiments.

Keywords

flexible rope, mass-spring model, structure-bending spring mode, problem of super elasticity

Recommended Citation

Liang Mincang, Yin Yong. Research on Simulation of Flexible Rope for Ship[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 1945-1950.

船用柔性绳索的仿真研究

梁民仓, 尹勇

(大连海事大学航海动态仿真和控制交通部重点实验室, 大连 116026)

摘要: 针对仿真系统中船用柔性绳索模拟存在实时性差、逼真度不够及易发散等问题, 提出了一种基于质点-弹簧模型的结构-弯曲弹簧模型, 该模型通过添加弯曲弹簧以限制绳子质点处的不正常弯曲现象, 并可通过设置两种弹簧不同的弹性、阻尼系数以模拟不同硬度的绳索。为了保证模型运行稳定性及精度, 采用改进的 Euler 法进行数值解算, 同时运用位置调整法、速度调整法解决柔性绳索仿真时的超弹性问题, 并通过仿真实验对该模型进行了验证。

关键词: 柔性绳索; 质点-弹簧模型; 结构-弯曲弹簧模型; 超弹性问题

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-1945-06

Research on Simulation of Flexible Rope for Ship

Liang Mincang, Yin Yong

(Key Lab. of Marine Simulation & Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In view of the problems on unreal-time, less realistic and the instability of the marine flexible rope simulation system, one kind of structure-bending spring model was proposed based on the traditional mass-spring model. Bending springs were added in the model to limit the abnormal bending phenomenon in the particle of model by setting different elasticity and damping coefficient for two kinds of spring to simulate the ropes with different rigidity. In order to guarantee the stability and accuracy of the model, improved Euler method was adopted for numerical solution. At the same time, position adjustment method and speed adjustment method were used to solve the problem of super elasticity in the simulation of flexible rope, and verify the feasibility of the model by simulation experiments.

Keywords: flexible rope; mass-spring model; structure-bending spring mode; problem of super elasticity

引言

柔性物体的模拟是真实感图形学研究领域的重点内容之一, 其在虚拟手术、织物仿真、虚拟吊装系统仿真、拖轮拖带作业、船舶靠离泊等工程领域应用十分广泛。船用缆绳或者吊索的模拟本质上属于柔性物体仿真^[1]。随着计算机硬件设备性能的

不断提升, 虚拟现实场景的真实感、实时性等众多需求的不断提升, 柔性物体仿真要求也越来越高。

柔性物体建模主要采用质点—弹簧模型、有限元分析法两种, 其中质点-弹簧模型易于理解、算法复杂度低并且易于实现, 因此众多国内外学者对其进行了深入研究^[2-3]。上海交通大学刘浩基于质点-弹簧模型, 运用结构、弯曲和剪切三种类型的弹簧搭建布料的平面质点网格, 开发了三维布料仿真系统^[4], 谢海波等人基于质点弹簧模型, 介绍了 3D 软体的建模方法, 实际仿真时将绳索简化为 1D 的弹簧系统, 并且未对绳索的弯曲度进行限制, 最终的研究成果应用于虚拟战场运输机空降绳索的



收稿日期: 2016-03-31 修回日期: 2016-07-11;
基金项目: 863 课题(2015AA016404), 海洋公益性行业科研专项(201505017-4), 中央高校基本科研业务费专项资金(3132016310);
作者简介: 梁民仓(1991-), 男, 河南濮阳, 硕士生, 研究方向为航海动态仿真、交通系统虚拟现实技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1945 •

模拟^[1]；王崴等人改进了质点-弹簧模型，提出了蜂窝状弹簧-质点模型并使用改进的 Verlet-梯形预测-校正法进行数值求解，并将仿真模型应用于虚拟吊装训练系统^[5]，该模型具有很好的仿真效果，但模型结构比较复杂，计算量较大；大连海事大学孙雪峰将质点弹簧模型应用于渔网的模拟，建立了单船中层拖网系统的数学模型^[6]；大连海事大学刘鑫等人基于质点弹簧模型，建立了柔性缆绳模型并应用于船舶操纵模拟器系统^[7-8]，其模型就是简单的 1D 弹簧系统，不能较好的模拟绳索的几何效果。柔性绳索的仿真最主要的问题就是容易发散，出现不规则运动。本文基于质点-弹簧模型方法，运用位置调整法、速度调整法解决柔性绳索仿真时的超弹性问题，建立了更稳定的绳索模型，通过更改不同参数模拟不同类型的缆绳效果。论文的最终成果已应用于蛟龙号潜器的收放操作仿真系统，验证了论文算法的可靠性。

1 模型的建立

质点-弹簧模型是将柔性绳索离散成一系列有质量的质点，质点之间通过无质量的弹簧进行连接的 1D 弹簧系统，如图 1(a)所示，此方法简单直观、容易理解。传统上，利用质点-弹簧模型模拟布料等柔性物体时，采用结构弹簧、弯曲弹簧以及剪切弹簧三种弹簧连接构成网格状的质点平面^[9]，根据经典力学理论并选取合适的数值解算方法，可以较好的对柔性物体进行仿真。但柔性绳索模拟是将绳子质点和弹簧进行线性连接，中间连接的弹簧为结构弹簧，由于未能限制质点之间的弯曲度，因此造成模型不能很好的模拟绳索的几何效果，并且容易发散，效果失真。

本文基于前人的研究成果，提出了结构-弯曲弹簧模型。该模型中绳索的质量均匀分布在质点上，质点之间由两种无质量弹簧进行连接：结构和弯曲弹簧，相邻质点之间由结构弹簧进行连接，以限制绳索在相邻质点方向上的过度拉伸和挤压；间隔一个质点的两质点之间添加弯曲弹簧，以防止绳

索因缠绕、扭结受力时发生弯曲或折叠的过度变形。通过外加弯曲弹簧对质点之间的弯曲度进行限制，如图 1(b)所示，并且可通过调整弯曲弹簧的弹性系数和阻尼系数模拟不同硬度的绳索，并结合经典力学和胡克定律可以很好地模拟柔性绳索的物理特性。

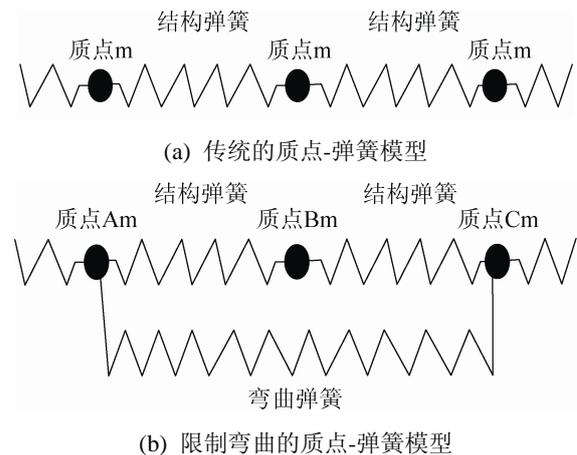


图 1 质点弹簧模型的结构图

1.1 受力分析

对物体进行合理的受力分析是给出精确模型的前提。此处质点受力分为内力和外力，内力是质点之间的相互作用力，主要包括弹簧的弹性形变力和阻尼力^[10]；外力是外界对质点施加的扰动力，主要包括重力、摩擦阻力以及外界施加的力等。质点的受力满足牛顿第二定律，即：

$$F = ma = m * (\partial^2 X) / (\partial t^2) =$$

$$F_{out}(X, t) + F_{in}(X, t) \quad (1)$$

式中： m 为质点质量； X 为所需要求解的质点位置； $F_{out}(X, t)$ 为质点所受外力； $F_{in}(X, t)$ 为质点所受内力。

质点所受内力主要包括弹簧的弹性形变力和阻尼力，本模型的质点受力计算需要分别计算结构弹簧和弯曲弹簧所产生的内力。理想的质点-弹簧模型，弹簧的形变是线性变化，与弹簧的弹性系数和形变量有关，满足胡克定律，即：

$$F_{spring} = -K_S * (|X_{AB}| - L) * (X_{AB} / |X_{AB}|) \quad (2)$$

式中： F_{spring} 为弹簧拉(压)力； K_S 为弹性系数； X_{AB} 为质点 A 、 B 的位置向量； L 为弹簧的初始长度。

弹簧的阻尼力与相连质点的速度有关, 是阻止弹簧发生过度变形、维护系统稳定的力, 作用于质点 A 的阻尼力表示为:

$$F_{SD} = K_{SD}(V_A - V_B) \quad (3)$$

式中: F_{SD} 为弹簧的阻尼力; K_{SD} 为弹簧的阻尼系数; V_A , V_B 分别为质点 A 、 B 的速度矢量。

$$\text{质点的重力计算公式: } G=mg \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度矢量, 取值为(0.0, -9.81, 0.0)。

质点所受外界摩擦阻力主要包括空气摩擦阻力以及与其他物体表面接触产生的摩擦阻力, 其中后者不是一直存在的, 可视模拟的环境进行添加。质点所受空气阻力:

$$F_A = 0.5C\rho_A S V^2 = K_A V^2 \quad (5)$$

式中: C 为空气流系数; ρ_A 为空气密度; S 为绳索在运动方向上的投影面积; V 为质点瞬间速度; K_A 为空气阻力系数。由于绳索的投影面积变化不大, 此处可简化为后者, K_A 可在模拟环境中自行设定。

1.2 限制模型

柔性物体模拟最大的问题就是容易发散(质点剧烈抖动的不规则运动现象), 需要健壮的积分算法保证系统运行的稳定性。弹簧的增长量与受力的关系是在一定范围内为线性变化(如图 2), 受力过大会出现超弹性现象^[11-12]。实际仿真过程中, 出于计算效率、精度以及弹簧的胡克定律适用限制等因素考虑, 会采用折中的解算方法, 发散问题以及超弹性问题需要在算法上添加约束条件予以解决。

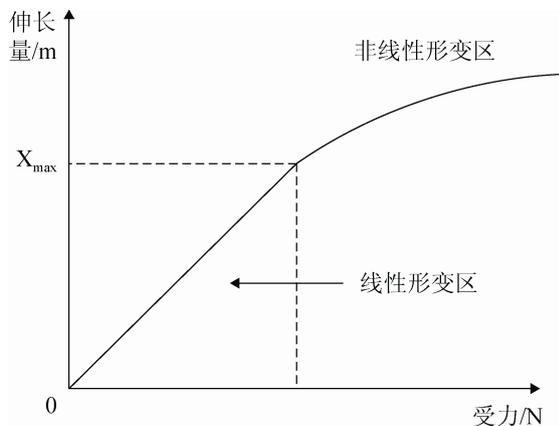


图 2 质点-弹簧模型中弹簧受力/形变图

为了使本文中的模型能更真实、稳定的模拟柔性绳索的运动, 本文同时采用位置调整法^[11]和速度调整法^[13]解决超弹性问题。算法步骤如下:

- 1) 结构弹簧及弯曲弹簧设置伸长量阈值 δ_{\max} ;
- 2) 每次迭代都按照上述模型解算质点的位置, 计算出质点间弹簧的伸长量 $\delta = \|X_{AB}\| - L$;
- 3) 位置调整法: 当弹簧伸长量超过限定阈值, 即 $\delta \geq \delta_{\max}$ 时, 在两质点连线方向上, 朝向对方质点等幅度的调整质点位置, 如图 3 所示, 使得两质点之间的距离恢复成预设长度, 此操作既保证弹簧长度在限定范围内, 同时保证调整下一个质点位置时弹簧伸长量具有一定富余量。

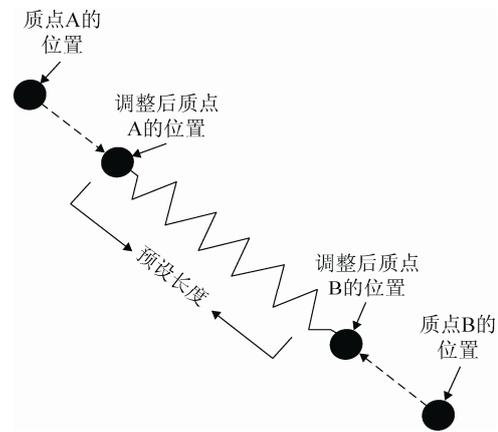


图 3 超弹性弹簧质点的位置调整图

- 4) 速度调整法: 当弹簧伸长量超过限定阈值并进行位置调整之后, 同时将质点沿弹簧方向的速度分量设置为 0, 如图 4 所示, 将质点 A、B 的速度分别分解为解为质点连线方向 V_{A0} 、 V_{B0} 和垂直于弹簧方向 V_{A1} 、 V_{B1} 的两个分量, 调整时既是同时将 V_{A0} 和 V_{B0} 设置为 0, 防止了弹簧进一步被拉伸, 可减少多次进行位置调整的计算量。

2 数值解算

质点-弹簧模型中质点的运动状态方程在时间域上可表示为:

$$\begin{cases} X(t_0) = X_0 \\ \dot{X}(t_0) = V_0 \\ \ddot{X}(t_0) = F(V, X, t)/m \end{cases} \quad (6)$$

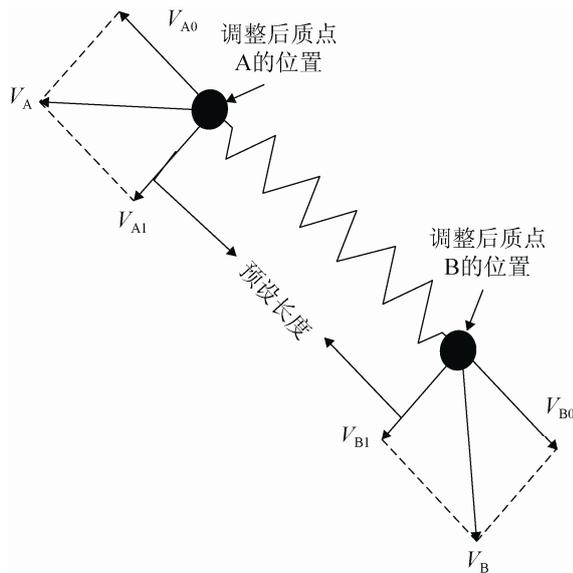


图 4 超弹性弹簧质点的速度调整图

对于微分方程的求解通常利用差分代替微分, 将非线性连续变化的曲线离散化为线型问题进行近似求解。通常就是运用数值积分求解二阶微分方程, 常用的方法有: 显式 Euler 法、隐式 Euler 法、梯形法、四阶 Runge-Kutta 法以及 Verlet 法, 无论何种方法都会涉及到计算效率、精度以及稳定性问题^[14]。显式欧拉法计算效率高, 但是精度较低, 系统运行不稳定; 隐式 Euler 法以及四阶 Runge-Kutta 法计算精度高, 但是计算量大, 效率会受到影响, 可能达不到实时性要求。综合计算精度和计算效率, 本文采用改进的 Euler 法进行求解。

针对质点速度使用改进的 Euler 法求解方程为:

$$\begin{cases} K_1 = f(t_n, V_n) \\ K_2 = f(t_n + h, V_n + h * K_1) \\ V_{n+1} = V_n + h/2 * (K_1 + K_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f(t_n, V_n)$ 是关于速度和时间的导数, 此处相当于质点的加速度; h 为时间步长; t_n 、 V_n 表示当前时刻状态变量。 t_{n+1} 、 V_{n+1} 是要求取的下一时刻的状态值, K_1 表示当前 t_n 时刻的质点加速度, K_2 表示根据加速度 K_1 改变质点位置和速度之后的加速度大小。

改进的欧拉算法是将当前时刻的加速度 K_1 和

下一时刻的加速度 K_2 取平均值, 进而根据平均加速度求取下一时刻的速度 V_{n+1} 。此方法对积分进行两次计算, 计算量不大, 但精度有了很大提高, 满足仿真系统的需要。

3 仿真实现及在船用绳索仿真中的应用

基于质点-弹簧模型建立的柔性绳索模型, 模拟的精度与设定的质点数量、弹簧初始长度以及模拟的时间步长有关, 实际应用中也与场景的渲染复杂度有关。本文提出有限制的结构-弯曲弹簧模型, 利用 C++ 编程并使用 OpenGL 进行简单渲染, 通过仿真实验对本文模型在柔性绳索物理行为方面的改进进行了验证。仿真实现的流程如图 5 所示。

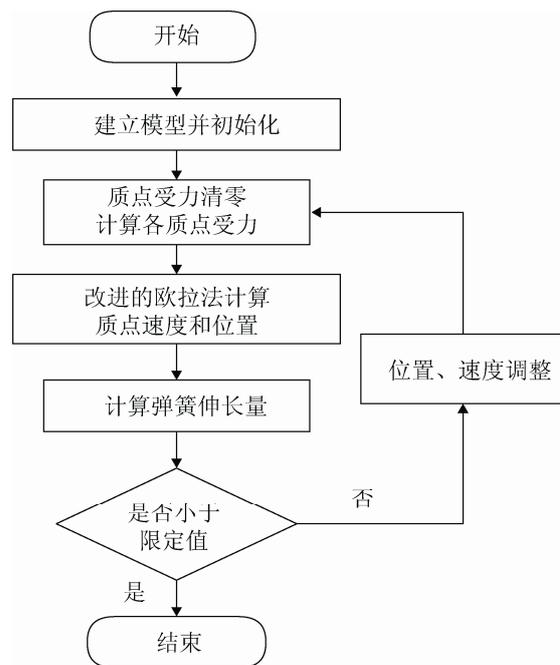


图 5 模拟实现流程图

分别用不加弯曲弹簧的质点-弹簧模型和本文提出的有限制的结构-弯曲弹簧模型仿真柔性物体, 图 6 为不加弯曲弹簧的仿真效果, 明显可以看出多个质点处弯曲超过 180° , 弯曲效果过于僵硬, 很不真实。采用本文模型的模拟效果如图 7, 绳子弯曲更加真实, 并且可通过调整两种弹簧的弹性系数和阻尼系数, 模拟不同硬度的绳索。

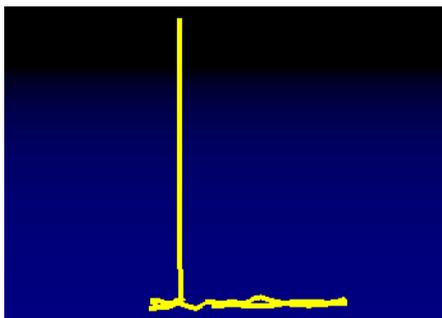


图 6 未添加弯曲弹簧的模拟效果

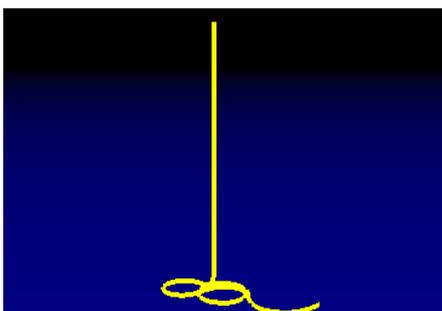


图 7 限制弯曲模型的模拟效果

船舶系泊以及货物吊装设备中, 绳索的种类和规格非常多, 而在船舶操纵模拟器、拖轮模拟器等仿真系统中, 对柔性绳索的模拟直接影响到仿真的环境真实感。本文提出的结构-弯曲弹簧模型, 通过修改相关限定参数, 即两种连接弹簧的弹性系数和阻尼系数, 可以较好的模拟不同材质、硬度的船用绳索。

船用绳索按照材质的不同, 可分为: 植物纤维绳、化学纤维绳和钢丝绳三大类^[15]。不同类型的绳索由不同的材质和不同的制作工艺加工而成, 具有自身独特的优缺点, 在船上的用途也不尽相同。

船用绳索具有软、硬之分, 硬度与材质、绳索半径有关。如图 8~9 是应用本文的模型建模并绘制的不同种类船用绳索, 通过调整结构弹簧和弯曲弹簧的弹性、阻尼系数的大小, 可模拟不同硬度的绳索效果。具体应用时, 可根据需要改变渲染材质、绳索半径以及硬度大小。模拟时由于需要进行绳索质点之间的内部碰撞检测, 所以质点的碰撞体包围盒设置较小, 质点碰撞体之间有一定空隙, 所以会出现穿透现象。图 8 模拟柔软、质轻的植物纤维绳如撇缆绳、测深绳等。图 9 模拟弹性、强度较大的

钢丝绳。实验表明, 本文提出的模型较好解决了原模型的超弹性问题, 保证了系统运行的稳定性。

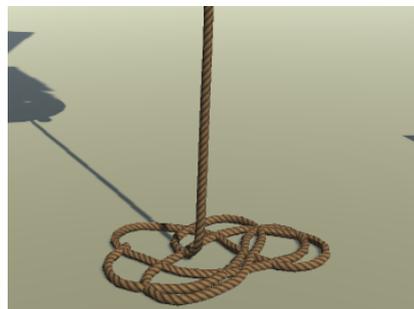


图 8 弹簧弹性、阻尼系数较小时效果图

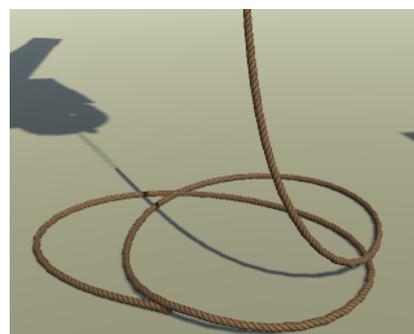


图 9 弹簧弹性、阻尼系数较大时效果图

4 结论

本文针对柔性绳索进行模拟仿真, 提出了基于结构-弯曲弹簧模型的绳索建模方法, 为保证计算精度和效率要求, 采用改进的 Euler 法求解质点运动微分方程, 同时利用位置、速度调整法较好地解决了质点弹簧模型的超弹性问题, 保证了系统运行的稳定性。

参考文献:

- [1] 谢海波, 谭晓兰, 甘亮. 基于质量弹簧系统的实时绳索仿真方法 [J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 479-482.
- [2] Wang L Q, Xu Y G, He N, et al. Modeling and simulation of flexible cable Pendulum system excited by lifted object motion [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (S1007-1172), 2012, 46(9): 1416-1420.
- [3] Sreenivasan S, Goel P, Ghosal A. A real-time algorithm for simulation of flexible objects and hyper-redundant manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory (S0094-114X), 2009, 45(3): 454-466.

(下转第 1956 页)