

文章编号:1001-9081(2009)12-3445-04

基于 PhysX 物理引擎的布料仿真技术的研究与实现

苏新新, 李学庆, 邱斌

(山东大学 计算机科学与技术学院, 济南 250001)

(hotsxx23@hotmail.com)

摘要:运用布料仿真技术中的物理方法来实现对布料印制效果的三维展示。首先对布料建立弹簧-质点模型,分析弹簧-质点模型的受力状况,以牛顿第二定律作为理论基础,用 PhysX 物理引擎中的模拟函数模拟布料的运动,并解决了仿真中与刚体的碰撞问题与布料自身的碰撞问题。最后通过生成多个仿真效果和加入多种交互功能,构建了适用于印花图案设计产品的虚拟展厅。

关键词:布料仿真; 弹簧-质点模型; PhysX 物理引擎; 碰撞检测

中图分类号: TP391 文献标志码:A

Research and implementation of cloth simulation algorithm based on PhysX physics engine

SU Xin-xin, LI Xue-qing, QI Bin

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan Shandong 250001, China)

Abstract: This article described a physically-based cloth simulation algorithm to show the cloth pattern's 3D effect. First the mass-spring model was created and the force on the model was analyzed. Then based on the Newton's Second Law, the cloth's movement was simulated by PhysX SDK. Furthermore, when the cloth collided with the rigid bodies in the environment and the cloth collided with itself, the collision technology in PhysX was used. Finally, several simulations were implemented and some interactive functions were added to set up the virtual hall applicable to pattern design.

Key words: cloth simulation; mass-spring model; PhysX physics engine; collision detection

0 引言

近年来,布料仿真技术已经越来越成为计算机图形学领域研究的热点。布料仿真技术从布料建模的角度可以分为三类:基于几何的方法、基于物理的方法、混合方法。基于几何的方法不考虑布料的物理特性,而是从布料的外观上进行模拟,如布料的扭曲、褶皱等表面特征。几何方法也是最早提出的布料仿真方法,对于用户的参与性和交互性要求较高^[1]。基于物理的方法提供了较高的实时性和简易的建模方法,该方法主要考虑布料的质量、拉伸、摩擦系数和弹性系数等物理特性,把整块布料看作是厚度为 0 的空间曲面,将布料按照经向和纬向划分为若干单元,假定每个单元质量相同,并认为布料的所有质量都浓缩到这些单元上,称为质点,质点之间有一根模拟的弹簧相连,这样便对布料建立了弹簧-质点模型。通过根据弹簧-质点模型的受力情况解其相应的运动学方程,就得到每个时刻质点的速度和位移变化,从而实现对布料的实时性模拟^[2-4]。混合方法是对几何方法和物理方法的综合应用^[5]。

本文从项目需求出发,将布料仿真技术应用于印染行业,实现了产品展示。该系统力求对印花图案进行三维仿真模拟,对布料建模后,运用 OpenGL 中的纹理映射函数,将图案库中的印花图案映射上去,模拟布料的动态和静态效果;同时提供给用户交互手段,使用户能够多视角进行观察;还提供给用户拖拽布料的功能,使对仿真产品有身临其境体验设计完成之后的产品的感觉。

本文使用物理方法对布料进行建模,从而实现布料的三维仿真展示。

1 解决思路

本文首先对布料建立弹簧-质点模型,然后设置时间步长,并分析在每个步长内所有质点的受力情况,根据牛顿第二定律运用 PhysX 中的相关模拟函数,在每个步长内更新质点的位置和速度,模拟布料在受力情况下的运动状态。当布料与场景中的刚体发生碰撞时,进行碰撞检测并做出响应。同时使用 OpenGL 中的纹理映射函数,把已有的图案映射到弹簧-质点模型上,从而实现仿真。图 1 为系统的流程图。

2 PhysX 物理引擎简介

所谓物理引擎,简单地说就是计算三维场景中,物体与场景之间,物体与角色之间、物体与物体之间的运动交互和力学特性。它将物理运动定律引入到虚拟场景中,使得交互性和互动性大大增强。

本文所研究的布料仿真,是基于物理方法的布料仿真,从建模到模拟动态过程,从本质讲,都是一种物理现象。尤其在布料的运动模拟中,设计思想是假设布料是有质量的物体,受环境中的作用力而呈现出运动的姿态,遵循了物理学中的牛顿第二定律。因此,在布料仿真中引入物理引擎,是符合算法的设计思想的。文本选用了 NVIDIA 公司的 PhysX 物理引擎作为模拟算法的开发包^[6]。

PhysX 开发中,首先定义各种不同的角色 (actor),然后指

收稿日期:2009-07-23。 基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAF01A44)。

作者简介:苏新新(1982-),女,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向:人机交互与虚拟现实; 李学庆(1964-),男,山东德州人,教授,博士,主要研究方向:人机交互与虚拟现实; 邱斌(1984-),男,河北阜城人,硕士研究生,主要研究方向:人机交互与虚拟现实。

定每个角色的形状(shape)属性和刚体(body)属性,最后是把这些角色都加入到场景(scene)空间中去,这样就构造出一个完整的物理世界。

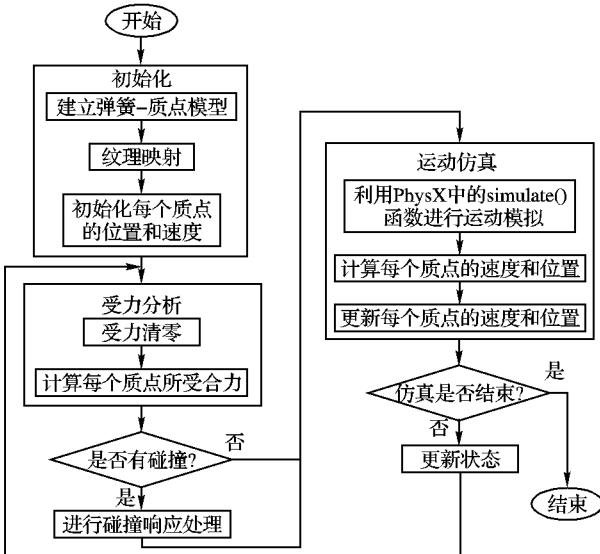


图 1 流程图

3 布料仿真效果的生成

3.1 建立布料的弹簧-质点模型

在基于物理方法的布料建模中,布料被假象成厚度为 0 的空间曲面,布料被离散化为规则的四边形网格,整个布料的质量被浓缩到这些质量相同的网格上,称之为质点。质点和质点之间一般有三类弹簧相连,即结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧,对应于不同的弹性系数和阻尼系数,用以模拟布料内部的纤维之间的作用力^[3]。图 2 为弹簧-质点模型的示意图以及三种弹簧:结构弹簧、剪切弹簧、弯曲弹簧。

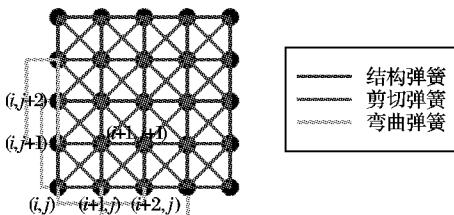


图 2 弹簧-质点模型

使用 PhysX 物理引擎,对布料建模的过程如下:

1) 创建场景(Scene):首先创建一个场景的描述器(NxSceneDesc)对象,PhysX SDK 利用这个场景描述器来创建一个场景实例,在描述器中可以调整各种参数来表达不同效果。

2) 给场景添加物理材质(Materials):物理材质指某一具体物体的表面属性和碰撞属性,这些属性可以确定一个物体和另一个物体发生碰撞时,是如何在该物体上反弹、滑动或者滚动的。

3) 向场景中添加角色(描述布料的 Actor)并创建出布料:布料的属性通过布料描述器 NxClothDesc 指定。描述布料属性的参数主要有厚度、密度、弯曲柔软度、拉伸柔软度、震荡衰减因子、摩擦系数等。

4) 建立应用类 MyCloth,对上述步骤中建立的布料模型进行渲染:由于弹簧-质点模型在运动中可能会出现网格上的四个点不共面的情况,从而使计算变复杂,因此本文将正方形网格采用“左上-右下”与“右上-左下”交替的剖分形式剖

分成三角形网格,这样可以保证每个面上的点总是共面并且布料的形态比较自然。按照上述步骤,建立弹簧-质点模型如图 3 所示。

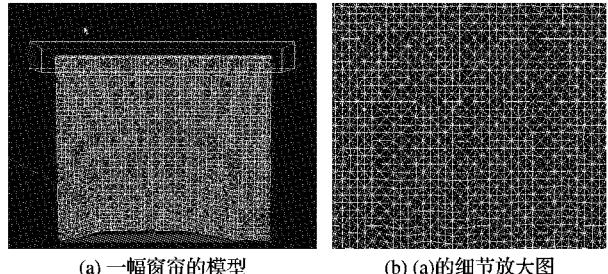


图 3 (a) 的细节放大图

图 3(a) 为一幅窗帘的弹簧-质点模型,此处我们定义了 $55 \times 48 = 2640$ 个质点, $54 \times 47 = 2538$ 个网格,并将这些网格剖分成 $54 \times 47 \times 2 = 5076$ 个三角形。图 3(b) 为弹簧-质点模型的细节放大图,可以看到对四边形网格的剖分方式。

3.2 布料的运动模拟

布料在我们模拟的物理环境中会受到各种作用力。对布料上的质点进行受力分析,大致可分为内力和外力。内力是指质点之间的三种相互作用力,包括结构力、剪切力、弯曲力;外力主要是布料在虚拟环境下受到的作用力的合力。

布料上质点的运动规律由牛顿第二定律来决定,确定了物体的质量、加速度以及作用于物体上的合力之间的关系。当在某时刻有多个作用力作用于物体上时,物体所受的合力等于所有力的向量和。对于布料上的每个质点而言,在时刻 t 它所受到的力为内力与外力之和。因此,得到:

$$m \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = F_{in}(X, t) + F_{en}(X, t) \quad (1)$$

其中: X 表示质点的位移矢量,是求解目标; m 表示质点的质量, F_{en} 表示质点所受外力, F_{in} 表示质点所受内力, F_{en} 和 F_{in} 都是关于时间和位置的函数,随 X 和 t 的变化而变化。

布料所受弹力、阻尼力、重力以及空气阻力的具体公式此处不再赘述。本文通过调用 PhysX 中模拟的相关函数来实现(代码 1)。StartPhysics() 方法是实现运动模拟的函数,该函数在 OpenGL 的回调函数中实现。在 StartPhysics() 方法中,首先获得从上一帧模拟到目前的时间步长,然后开启场中的模拟接口(gScene -> simulate(deltaTime)) 进行运动的模拟。运动模拟的效果将在下面章节中的实例中体现。

代码 1 PhysX 中的运动模拟

```

void StartPhysics(){
    NxReal deltaTime = UpdateTime();
    gScene -> simulate(deltaTime);
    gScene -> flushStream();
}
  
```

3.3 窗帘效果的生成

在建立窗帘的场景中,我们按第 3.1 节中的方法建立弹簧-质点模型。此外,创建了一个悬挂布料的横条角色(box),通过 attachToShape() 方法,将布料附着在横条上。除设置场景中的重力外,还添加了风力,将其大小和方向都设置成随机数:

```

cloths[0] -> setExternalAcceleration( NxVec3(
    -12 + NxMath::rand(-range, range),
    NxMath::rand(-range, range),
    NxMath::rand(-range, range)));
  
```

我们从图案库中选取一幅大小为 700×700 像素,BMP 格式的图片,使用 OpenGL 中的纹理映射函数将其映射到布料的弹簧-质点模型上,图 4 为窗帘效果。

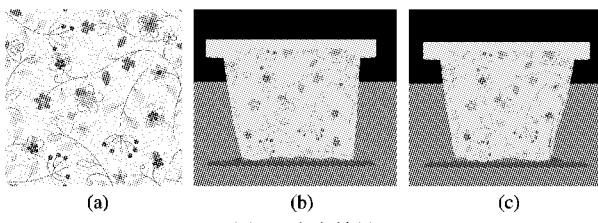


图 4 窗帘效果

图 4(a)为 BMP 格式图片,(b)~(c)是截取的布料在两个运动时刻的形态。可以看出,随着布料网格模型上质点的变化,布料相应地呈现出运动的形态。

3.4 桌布效果与球体效果的生成

当模拟桌布效果或将布料搭放在球体上的效果时,会涉及到布料与场景中的刚体(桌子和圆球)的碰撞问题,因此,碰撞检测技术也是布料仿真中的一个重要组成部分^[7-8]。判断布料与场景中刚体是否发生碰撞,通过以下两个条件:1) 质点到碰撞面的距离;2) 质点的运动方向。 X 表示质点的位移, V 表示质点的速度, P 表示平面上一点, N 表示平面的法向量, d 表示布料的厚度。当满足下列条件时,认为质点与平面发生了碰撞:

$$\begin{cases} (X - P) \cdot N < d \\ N \cdot V < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:第一个条件 $(X - P) \cdot N < d$ 表示质点与平面发生了接触,第二个条件 $N \cdot V < 0$ 表示质点的运动速度是朝向平面方向的。

在布料仿真的实际应用中,由于碰撞检测本身的复杂性以及对效率的高要求,应尽量使用目前比较成熟的碰撞检测引擎,而 PhysX 物理引擎内置的碰撞检测算法可以很好地解决上述问题^[6]。在 PhysX 中,碰撞检测的第一步是找出场景中可能发生碰撞的碰撞对。因为存在 $n \times n/2$ 对可能的碰撞对,如果场景很大,或者对象很多的话,全部检测将花费相当多的时间。物理引擎将自动地为各种几何体划分空间,通过这种方式,一个形状将只检测在它空间附近的几何体。此外,PhysX 中的碰撞检测技术还以采用了连续碰撞检测(Continuous Collision Detection, CCD)策略。连续碰撞检测可以将物体每两帧之间的碰撞检测连续化,保证在运动路线中出现的物体都能参与到碰撞检测。

我们在场景中使用多个角色的组合构建出方桌,同时开启场景中的碰撞检测标志,图 5~6 分别为布料的桌布效果和布料搭放在球体上的效果。

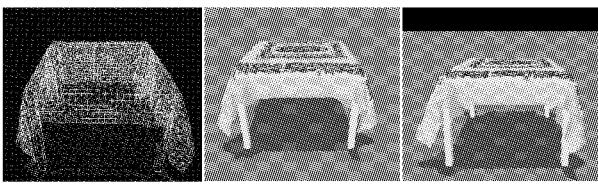


图 5 桌布效果

图 5(a)是桌布效果中布料的网格模型;图 5(b)、图 5(c)是将网格模型进行纹理映射之后,以不同角度进行观察的效果。图 6(a)是将布料搭放在球体上时布料的网格模型;图 6(b)、图 6(c)是将该网格模型进行纹理映射之后,以不同角度进行观察的效果。可以看出,由于开启了场景的碰撞检测标

志,使得布料并没有穿透桌布和刚性球体。

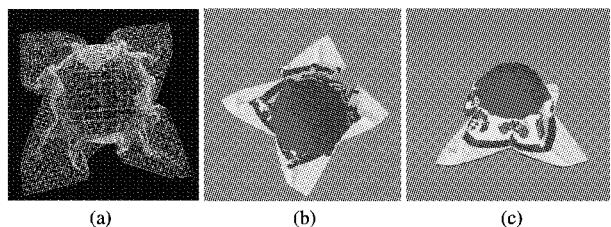


图 6 布料搭放在球体上的效果

3.5 拖拽效果的生成

在交互方式中,加入了鼠标拖拽布料的效果。在 PhysX 中,可以通过下面的函数来实现鼠标拖拽的效果^[6]:

```
void addForceAtVertex( const NxVec3& force,
    NxU32 vertexId, NxForceMode mode = NX_FORCE);
```

函数的参数分别表示作用力(此处为拖拽力)的大小、作用力施加的顶点 ID(鼠标右键选择的质点)以及作用力模式。vertexId 的获取,是通过射线拣选(raycast)的方法来获得。实现用射线拣选物体的算法分为两步。

1) 实现屏幕坐标到三维世界空间坐标的转换。

通过 OpenGL^[9] 中的函数:

```
gluUnProject( (GLdouble)xpos, (GLdouble)ypos, 1.0,
    mvmatrix, projmatrix, viewport, &wx, &wy, &wz);
```

对应于 zbuffer=0 和 zbuffer=1 的情况,分别能得到两个世界坐标,将这两个坐标相减,就确定了屏幕上某条从视点出发的射线。

2) 用射线与要进行拣选的三角形(布料网格)求交点。

射线与三角形求交的原理用到了图形学中的数学知识,在这里不再赘述。在用 PhysX SDK 对布料节点进行拣选时,使用步骤 1 中的算法得到了拣选射线之后,使用函数方法可得到选中的布料质点。

```
bool raycast( const NxRay& worldRay,
    NxVec3 &hit, NxU32 &vertexId);
```

用上述算法获得选中布料质点之后,就能向该质点施加作用力。此外,在鼠标移动事件中添加方法还可以实现用鼠标将布料固定于空间某一点的效果。

```
attachVertexToGlobalPosition
    (const NxU32 vertexId, const NxVec3 &pos);
```

图 7 是将覆盖于球体上的布料拽起并固定于空间两点的效果。

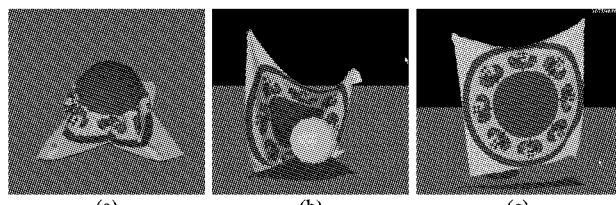


图 7 拖起布料固定于空间两点

图 7(a)为覆盖于球体上的布料;图 7(b)为通过射线拣选算法选定将布料的两角后,再施加作用力将布料拽起来;图 7(c)为通过上面叙述的函数将拽起的布料两角固定于空间中两点。

3.6 布料仿真系统的实现

在第 3.1~3.5 节,我们分别叙述了布料建模的方法、布料运动的模拟以及各种模拟各种布料效果的实现过程,在上述效果的基础上,我们开发了布料仿真的原型系统。开发该系统的目的,主要用于构建一个展示图案库中各种图案的虚拟展厅,并提供一些交互功能,丰富用户对展厅的操作手段。

(图 8)。

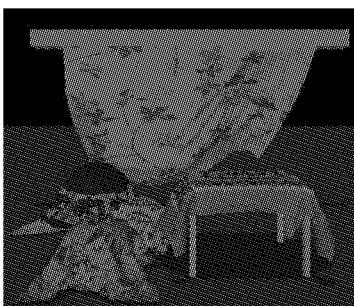


图 8 虚拟展厅效果

在对虚拟展厅的使用中,当印染图案设计完成并存入图案库中之后,用户可以从图案库中选中想要模拟的图案对象作为输入,然后选择布料的仿真效果,输出效果就是上面实现的效果;也可以选取我们构建的场景,将各种效果进行组合,在展厅中浏览各种布料图案;同时,用户可以通过交互手段去调节虚拟展厅中的光照、风向、风速等,并可用鼠标拖拽布料,



图 9 布料仿真系统的流程

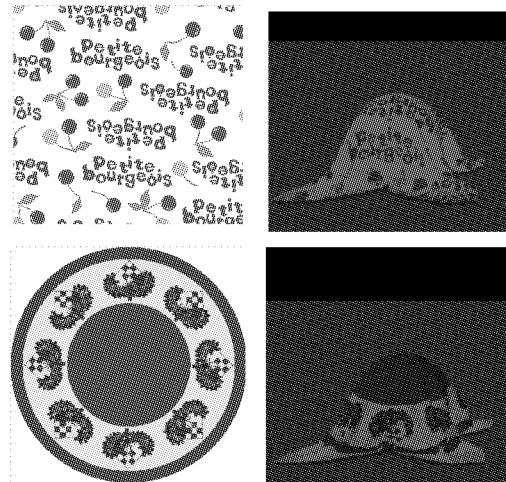


图 10 不同图案对应的仿真效果

(上接第 3415 页)

HFSJ 规定的时间内答复,否则下达时机过晚或遗漏;HFSJ 规定的时间下达的指令代号等于 ZLID 的值,则指令正确,否则错误。后者指挥员下达指令,飞机应答。如果下达的指令代号等于 ZLID 的值,则飞机在 HFSJ 秒后立即报告 FJDF 中的内容,完成对话。

4 结语

该系统大大提高了语音识别率,实现了全天候、全科目自主飞行。完全满足飞行院校、部队的指挥学员及指挥员进行训练、教学、考核的需要,使训练人员能够熟练掌握指挥技能,提高训练水平,降低训练费用。能够与其他仿真交互,组成更大规模系统仿真,提高训练人员的协同作战能力。

参考文献:

- [1] 王炳锡. 实用语音识别基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 刘金明. 飞行仿真中大规模场景渲染技术的研究与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [3] 邹庆元, 宋晗, 陈宗基. 多机多编队飞行仿真系统研究和设计系

以获得身临其境的感觉(图 9)。图 10 是使用图案库中不同图案进行仿真的效果。

4 结语

本文采用基于物理方法的布料仿真算法对布料进行仿真,首先对布料建立弹簧-质点模型并在每个时间步长内分析每个质点的受力情况,以牛顿第二定律作为理论基础,使用 PhysX 物理引擎来模拟布料的运动,解决了布料的碰撞与自碰撞问题。同时运用纹理映射技术,将原始的印花图案按照质点在网格上的索引值映射到网格模型上。通过生成布料的多种仿真效果,如桌布、窗帘等,建立了布料的虚拟展厅。

参考文献:

- [1] WEIL J. The synthesis of cloth objects [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH '86. New York: ACM, 1986: 49 - 54.
- [2] VOLINO P, COURCHESNE M, THALMANN N M. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH '94. New York: ACM, 1994: 137 - 144.
- [3] PROVOT X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [C]// Proceedings of Graphics Interface. Quebec: Canadian Information Processing Society, 1995: 147 - 154.
- [4] BREEN D, HOUSE D, GETTO P. A physically - based particle model of woven cloth[J]. The Visual Computer, 1992, 8(5/6): 264 - 277.
- [5] KUNII T, GOTODA H. Singularity theoretical modeling and animation of garment wrinkle formation process[J]. The Visual Computer, 1990, 6(6): 326 - 336.
- [6] Ageia. AGEIA PhysX SDK 2.7 [EB/OL]. [2009 - 05 - 01]. <http://files.aoaforums.com/D304-Ageia%20PhysX.html>.
- [7] MOORE M, WIHELM S. Collision detection and response for computer animation[J]. ACM Computer Graphics, 1998, 22(4): 289 - 298.
- [8] KAMAT V V. A survey of techniques for simulation of dynamic collision detection and response[J]. Computer Graphics, 1993, 17(4): 379 - 385.
- [9] MASON W, NEIDER J, DAVIS T, et al. OpenGL 编程权威指南 [M]. 3 版. 吴斌, 段海波, 薛凤武, 译. 北京: 中国电力出版社, 2001.

统[J]. 工程与电子技术, 2008, 30(4): 677 - 681.

- [4] 王嘉, 高正红. 飞机航路飞行的自动飞行仿真[J]. 飞行力学, 2008, 26(1): 75 - 78.
- [5] 牛夏牧, 商延顺. 飞行指挥模拟器训练方程的设计[J]. 计算机仿真, 2000, 17(3): 27 - 30.
- [6] 郝建平. 虚拟维修仿真理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] 李全安, 郭壁砖, 周亚军. 模拟器训练消除飞行员处置特情时紧张情绪的效果[J]. 航空军医, 2005(2): 47 - 48.
- [8] ZHANG LEI, JIANG HONG - ZHOU, LI HONG - REN . PC based high quality and low cost flight simulator [C]// 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Washington, DC: IEEE, 2007: 1017 - 1022.
- [9] 崔双喜, 朴春俊. 噪声环境下的语音识别性能研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(11): 1276 - 1291.
- [10] 丁沛. 语音识别中的抗噪声技术[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [11] 王嘉. 几种典型机动动作的自动飞行仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.