

导弹虚拟装填训练中弹箱位姿交互控制技术

刘海平, 王 巍, 陆万田, 李培林

(空军工程大学防空反导学院,西安,710051)

摘要 在对导弹装填训练中弹箱受力分析的基础上,建立了弹箱的力学模型以及弹箱位姿变换的数学模型。基于 Visual C++ 编程语言,结合 OpenSceneGraph(OSG)图形渲染引擎,设计了一种简单高效的虚拟弹箱位姿实时控制方法,实现了弹箱在虚拟场景中运动位姿的交互控制,仿真结果表明,该方法能够真实模拟装填训练中操作人员协同控制弹箱位姿的训练过程,为研究分布式导弹虚拟装填协同训练系统打下基础。

关键词 导弹装填;虚拟弹箱;位姿;交互控制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.007

中图分类号 TJ761.1⁺3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0029-04

Research on Position and Pose Control for Virtual Missile Loading Training

LIU Hai-ping, WANG Wei, LU Wan-tian, LI Pei-lin,

(Air force Engineering University, College of Air and Missile Defense, Shanxi, Xi'an, 710051)

Abstract: Based on the force analysis of missile in missile lording training, the missile force model and position and pose transformation math model are both built. Using Visual C++ as the programming language and OSG as the graphics engine, the position and pose real-time control method for missile is designed, which can interactively control the missile's position and pose in virtual scene efficiently and briefly. Results indicated that this method can made visual simulation of missile lording training more realistic. This study laid the foundation of building the virtual loading distributed co-training system.

Key words: Missile Loading; Virtual training; Position and pose; interactively control

在导弹装填训练中,虚拟物体位姿交互控制是分布式导弹虚拟装填协同训练系统的关键技术之一。目前虚拟实体位姿控制一直是虚拟现实系统中的热门研究课题^[1],北京大学的苑严伟等^[2]设计的农业机械虚拟实验系统,能够实时根据农作物的位置信息发出控制信号,控制拖拉机行驶速度、方向和平衡控制。青岛科技大学的叶琳等^[3]研究了一种基于嵌入式系统的手部跟踪控制系统,该系统通过运

动手势识别算法,能够较好地实现手部的姿态跟踪。武汉理工大学的任静丽等^[4]在虚拟场景中控制虚拟人的跑步姿态,完成虚拟人跑步姿态多样变化。中国农业机械化科学研究院的杨方飞等^[5-6]建立联合收割机的运动姿态曲线,实现整机在虚拟场景中的运动姿态交互控制。

Open Scene Graph(OSG)图形渲染引擎是一款高性能、跨平台的开源 3D 场景图形程序开发接口

收稿日期:2013-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075395)

作者简介:刘海平(1977—),男,四川资中人,讲师,主要从事虚拟现实技术研究.E-mail:780264077@qq.com

引用格式:刘海平,王巍,陆万田,等. 导弹虚拟装填训练中弹箱位姿交互控制技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):29-32. LIU Haiping, WANG Wei, QU Yang, et al. Research on Position and Pose Control for Virtual Missile Loading Training[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2015, 16(2): 29-32.

(API)^[7]。本文结合 OSG 图形渲染引擎和 Visual C++2008 编程环境,设计了一种方便快捷的虚拟弹箱位姿控制方法,通过进行弹箱的力学分析,建立弹箱位姿变化的数学模型,实现了弹箱在虚拟场景中的实时位姿计算,真实模拟了多名人员协同控制单向位姿的训练过程,为开发分布式导弹虚拟装填协同训练系统打下基础。

1 虚拟物体位姿交互控制方法设计

导弹虚拟装填训练系统采用 C/S 模式软件体系结构,该结构的安全性和可靠性很高,系统设计了多个客户端协同吊机操作人员(服务器)进行装填训练,其中客户端的主要工作是协同控制物体(弹箱)位姿。实际装填训练中,训练人员用手的推力来控制物体的位姿,物体的位姿变换主要由手的施力点和推力大小共同决定的;虚拟装填训练中,用户通过客户端登陆系统,并利用普通鼠标实时交互控制虚拟场景中物体的位姿,控制过程为:

步骤 1 初始化虚拟训练场景,客户端用户滚动鼠标滚轮,用左键点击屏幕上物体;

步骤 2 通过鼠标滚轮的滚动值确定推力的大小,利用屏幕坐标系坐标位置和深度测试确定推力作用点的窗口坐标系坐标;

步骤 3 通过坐标转换确定推力在物体局部坐标系上的作用点,并将推力的大小和作用点的位置坐标发送到服务器端;

步骤 4 服务器端消息接受器实时接收客户端的消息,并进行物体模型的位姿计算,服务器端完成虚拟场景的渲染;

步骤 5 服务器将位姿信息实时发送到客户端,客户端完成虚拟场景渲染更新。

窗口坐标系以屏幕左下角为坐标原点, X/Y 方向取值在 (0,0) ~ (width,height) 的范围内; Z 方向的取值范围 [0,1],也就是 OpenGL 中深度缓存

$$\mathbf{R}(Y_\gamma, X_\beta, Z_\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\alpha - \sin\alpha \sin\gamma \sin\beta & -\cos\beta \sin\alpha & \sin\gamma \cos\alpha + \sin\alpha \cos\gamma \sin\beta & 0 \\ \sin\gamma \cos\alpha + \sin\alpha \cos\gamma \sin\beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

所以物体的姿态可以用欧拉角的 3 个角度 (α, β, γ) 来表示。可以认为 $\mathbf{R}(Y_\gamma, X_\beta, Z_\alpha)$ 是虚拟实体由姿态 (0,0,0) 变化到 (α, β, γ) 的变换矩阵。

3) 复合变换。复合变换是附体坐标系相对于固定参考坐标系的一系列沿轴平移和绕轴旋转变换所

值的含义。推力大小由鼠标滚轮转动来确定的,推力作用点的窗口坐标由鼠标左键点击的屏幕坐标和虚拟场景的深度测试共同确定的,将推力作用点的窗口坐标系坐标转化到虚拟场景中弹箱模型的附体坐标系坐标的求解过程为:

$$\begin{aligned} V_{wcs} &= V_{dcs} (\mathbf{M}_M \cdot \mathbf{M}_P \cdot \mathbf{M}_W) - 1 \\ V &= V_{wcs} (\mathbf{M}_{PB} \cdot \mathbf{M}_{PF}) - 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: V 为弹箱附体坐标系坐标; V_{wcs} 为世界坐标系坐标; V_{dcs} 为窗口坐标系坐标; \mathbf{M}_{PB} 为箱体附体坐标系到箱体局部坐标系的转换矩阵; \mathbf{M}_{PF} 为箱体局部坐标系到世界坐标系的转换矩阵; \mathbf{M}_M 为模型视点矩阵; \mathbf{M}_P 为投影变换矩阵; \mathbf{M}_W 为窗口变换。

2 弹箱位姿矩阵

虚拟实体位姿变换的实质是虚拟实体的附体坐标系相对于固定的参考坐标系的变换,虚拟实体位姿的变换可以用坐标系来表示。虚拟实体位姿变换可分为 3 种情况:

1) 纯平移变换。如果虚拟实体在虚拟场景中以不变的姿态运动,那么该变换就是纯平移。在这种情况下,新坐标系的表示可以通过坐标系左乘变换矩阵得到。

2) 绕坐标轴纯旋转变换。如果虚拟实体在虚拟场景中仅绕着局部坐标系旋转,那么该变换就是纯旋转。虚拟实体的姿态可以采用 Y-X-Z 欧拉角描述:首先绕局部坐标系 Y 轴转 γ 角,之后绕局部坐标系 X 轴转 β 角,然后绕局部坐标系 Z 轴转 α 角。根据绕坐标轴旋转的旋转矩阵,我们可以计算出整个过程的旋转矩阵,由 Y-X-Z 欧拉角得旋转矩阵:

$$\mathbf{R}(Y_\gamma, X_\beta, Z_\alpha) = \text{Rot}(Y, \gamma) \cdot \text{Rot}(X, \beta) \cdot \text{Rot}(Z, \alpha) \quad (2)$$

根据三维齐次坐标绕 X、Y、Z 3 个轴旋转变化的矩阵:可以计算弹箱绕坐标轴的旋转矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma \sin\alpha + \cos\alpha \sin\gamma \sin\beta & -\sin\gamma \cos\beta & 0 \\ \cos\beta \cos\alpha & \sin\beta & 0 \\ \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \cos\gamma \sin\beta & \cos\gamma \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

组成的。任何变换都可以分解为按一定顺序的一组平移和旋转变换。为了完全描述物体的位姿变换,物体附体坐标系的原点和坐标轴的方位分别有平移矩阵 \mathbf{T}_1 和旋转矩阵 \mathbf{R} 描述。这样,弹箱的位姿可由附体坐标系的变换矩阵 \mathbf{T} 表示为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\alpha - \sin\alpha \sin\gamma \sin\beta & \cos\gamma \sin\alpha + \cos\alpha \sin\gamma \sin\beta & -\sin\gamma \cos\beta & d_x \\ -\cos\beta \sin\alpha & \cos\beta \cos\alpha & \sin\beta & d_y \\ \sin\gamma \cos\alpha + \sin\alpha \cos\gamma \sin\beta & \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \cos\gamma \sin\beta & \cos\gamma \cos\beta & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 弹箱力学模型构建

3.1 模型简化

装填训练中,弹箱是利用 4 根钢丝吊索与吊钩连接的,由于 2 枚弹箱的总质量较大,弹箱在起吊状态下,钢丝吊索的物理学模型类似于轻质杆。

为了客观真实的建立弹箱起吊状态的数学模型,在建立弹箱的力学模型前作以下假设:①弹箱部件为刚体,且密度均匀的长方体;②号手用手推动弹箱时,推力的方向垂直于手接触的弹箱表面向里;③号手协同推动弹箱时,吊机操作人员暂停操作;④吊钩部件的约束方式简化为通过圆球和球壳连接在一起的球铰链。

3.2 模型力学分析

弹箱在起吊过程中受到 2 名号手的推力 F_1, F_2 , 弹箱的重力 G , 以及 4 根吊索的拉力 T_1, T_2, T_3, T_4 。因为 $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$, 则 T_1, T_2, T_3, T_4 可以合成为方向沿着附体坐标系 w 轴的力, 同时将重力 G 投影到附体坐标系的轴线方向上, 弹箱部件和吊钩部件的受力分析见图 1。

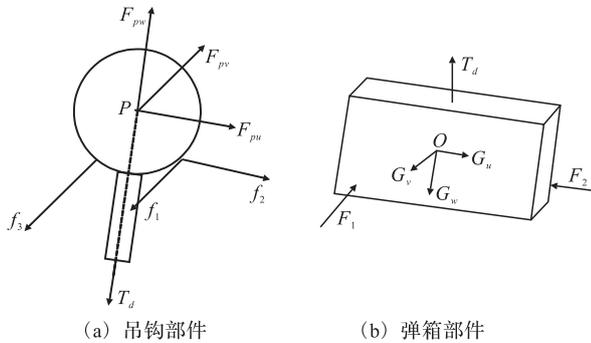


图 1 弹箱力学分析

Fig.1 The force analysis of missile

图 1 中, T_d 是 T_1, T_2, T_3, T_4 的合力, G_u, G_w , G_v 是重力 G 的分量。

4 弹箱位姿变换数学模型构建

对弹箱模型进行受力分析之后,要对弹箱模型进行运动求解得到弹箱模型在各个时间步长内的位置信息和姿态信息,从而对弹箱模型的位姿进行实时仿真。

4.1 弹箱姿态计算

通常弹箱绕着某个轴转动时,该转动方向有 2

个参数:转动角度 θ 和转动角速度 ω 。在基于时间步长的循环中,新的角度 θ' 和新的转动角速度 ω' 可以利用数值方法进行实时计算。

Velert 积分法^[8]是一种更加简单,快速,稳定的积分方法。设沿着某个轴的力矩合为 M ,转动惯量为 J ,选好时间步长后,对弹箱绕着某个轴转动角度的更新规则如下:

$$\begin{aligned} \theta' &= 2\theta - \theta^* + M/J \cdot \Delta t^2 \\ \theta^* &= \theta \end{aligned} \quad (5)$$

根据 Veret 积分法得到附体坐标系的 Y-X-Z 欧拉角 (γ, β, α) 的更新规则如下:

$$\begin{cases} \alpha' = 2\alpha - \alpha^* + M_u/J_u \cdot \Delta t^2 \\ \beta' = 2\beta - \beta^* + M_v/J_v \cdot \Delta t^2 \\ \gamma' = 2\gamma - \gamma^* + M_\gamma/J_\gamma \cdot \Delta t^2 \\ \alpha^* = \alpha, \beta^* = \beta, \gamma^* = \gamma \end{cases} \quad (6)$$

式中: (γ, β, α) 为当前时刻欧拉角; $(\gamma^*, \beta^*, \alpha^*)$ 为上一时刻欧拉角; $(\gamma', \beta', \alpha')$ 为下一时刻欧拉角; J_u, J_v, J_w 分别为弹箱绕着 A 轴、B 轴和 C 轴转动时的转动惯量; M_u, M_v, M_w 分别为弹箱沿着 A 轴、B 轴和 C 轴方向的力矩

4.2 弹箱位置计算

设当前时刻附体坐标系的位置信息为附体坐标系原点在世界坐标系的坐标 (d_x, d_y, d_z) ; 吊钩部件的旋转中心 P 到弹箱重心的距离为 l , 图 2 为附体坐标系绕着吊钩 P 转动时,附体坐标系原点的矢量变换。

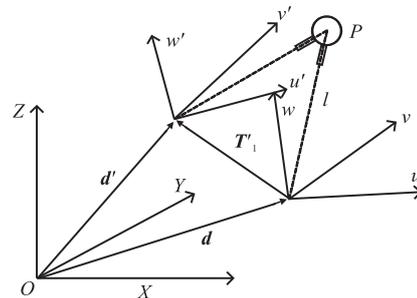


图 2 弹箱附体坐标系变换

Fig.2 The coordinate system change of missile

由图 2 知 $d' = (d + T_1)$, 其中 d 是当前时刻附体坐标系原点的向量, T' 是附体坐标系的变化向量, d' 是下一时刻附体坐标系原点的向量。即:

$$\begin{aligned} d &= (d_x, d_y, d_z) \\ T_1 &= (l(\sin\gamma' - \sin\gamma), l(\sin\beta' - \sin\beta), \\ & l[(\cos\beta + \cos\gamma) - (\cos\beta' + \cos\gamma')]) \end{aligned} \quad (7)$$

则当前时刻的位置信息为 T' 。

$$T'_1 = (l(\sin\gamma' - \sin\gamma) + d_x, l(\sin\beta' - \sin\beta) + d_y, l[(\cos\beta + \cos\gamma) - (\cos\beta' + \cos\gamma') + d_z]) \quad (8)$$

利用当前时刻附体坐标系的位姿矩阵 T , 以及上一时刻的 $Y-X-Z$ 欧拉角 $(\gamma^*, \beta^*, \alpha^*)$, 根据式(7)和式(9), 可以实时计算下一时刻附体坐标系位姿矩阵 T' :

$$T' = \begin{bmatrix} R(\gamma', \beta', \alpha') & T'_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可知, 利用该数学模型能够实时计算虚拟弹箱的空间位姿信息。

5 仿真分析

本文在 Microsoft Visual Studio 2008 环境下进行位姿控制程序开发。系统采用 C/S(服务器/客户端)模式的分布式网络体系结构。客户端协同推动弹箱的训练实例见图 3(箭头表示用户左键单击的位置)。

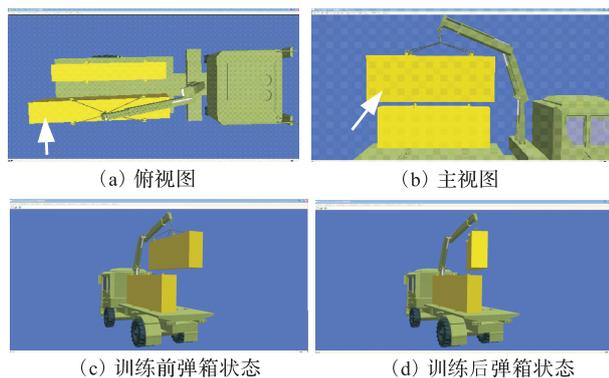


图 3 训练实例

Fig.3 Training example

由图 3 结果可以得出用户利用鼠标点动虚拟弹箱右侧时, 弹箱的位姿发生相应的变化, 与真实训练情况基本一致, 进一步证明了虚拟装填训练中弹箱位姿控制方式的合理性和正确性。

6 结语

本文提出一种虚拟弹箱位姿交互控制方法, 该方法简单高效, 能够满足用户实时控制虚拟弹箱位姿变换的要求。同时, 将该交互控制方式应用于某型导弹虚拟装填协同训练系统中, 达到了真实模拟号手协同推动弹箱的训练过程, 能够满足导弹虚拟装填训练的真实性和实时性要求。但是, 由于普通鼠标不具有力学反馈的功能, 因此该交互方式还存在一些不合理性, 今后还需要进一步研究改进。

参考文献(References):

- [1] 杨友红. 虚拟训练仿真中人的运动控制研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
YANG Youhong. A Study on Motion Control of Virtual Human in Virtual Training Simulation System[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007. (in Chinese)
- [2] 苑严伟, 张小超. 农业机械虚拟实验交互控制系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 149-153.
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao. Interaction Control System of Agricultural Machinery Virtual Test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 149-153. (in Chinese)
- [3] 叶琳, 邱龙辉. 基于 ARM 的嵌入式手姿跟踪识别控制系统研究[J]. 新技术新工艺, 2009, 9(8): 21-25.
YE Lin, QIU Longhui. Research on the Embedded Control System based on ARM of Virtual Interactive Hand Gesture Tracking Equipmen[J]. New Technology and New Process, 2009, 9(8): 21-25. (in Chinese)
- [4] 任静丽, 杨克俭. 虚拟人跑步运动控制技术[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 32(5): 967-971.
REN Jingli, YANG Kejian. The Research of Running Motion Control Methods for Virtual Human[J]. Journal of Wuhan University of Technolog, 2008, 32(5): 967-971. (in Chinese)
- [5] 杨方飞, 阎楚良. 基于视景仿真的联合收获机虚拟实验技术[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 79-83.
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Virtual Test of Combine Harvester Based on Visual Simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 79-83. (in Chinese)
- [6] Yan Chuliang, Li Jie. Digital Design of A Combine Harvester Using Virtual Prototype[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2007, 2(2): 159-163.
- [7] Martz P. Open Scene Graph Quick Start Guide[M]. New York: Skew Matrix Software LLC, 2007.
- [8] Devil L J. The Blue Faceted Dress: Real-Time Cloth Animation[EB/OL]. [2006-06-01] (2006-09). <http://www.gdmag.com>.

(编辑: 田新华)