

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0678

## 一种六足机器人模拟驾驶系统研究与实现

金 马<sup>1</sup>, 高海波<sup>1</sup>, 丁 亮<sup>1</sup>, 李佳钰<sup>2</sup>, 于海涛<sup>1</sup>, 刘 振<sup>1</sup>,  
李 楠<sup>1</sup>, 邓宗全<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学机电控制及自动化技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 为了实现六足机器人驾驶员的模拟训练, 对六足机器人模拟驾驶系统的关键技术进行了研究, 进而开发了一种实时的六足机器人模拟驾驶系统. 该系统在复杂系统实时仿真框架 Eurosim 下进行开发以保证各软、硬件模块之间的实时交互. 对系统的软、硬件进行了设计, 以一种有人驾驶六足机器人为原型建立了仿真模型, 实现了六足机器人模拟驾驶. 实验结果表明该系统能够实时地、正确地对驾驶员的操作做出反应, 真实地模拟了机器人的运动.

**关键词:** 六足机器人; 模拟驾驶系统; 实时仿真

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0446(2016)-06-0678-09

### Research and Implementation of a Driving Simulator for Hexapod Robots

JIN Ma<sup>1</sup>, GAO Haibo<sup>1</sup>, DING Liang<sup>1</sup>, LI Jiayu<sup>2</sup>, YU Haitao<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, LI Nan<sup>1</sup>, DENG Zongquan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Research Institute of Mechatronic Control and Automation Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to achieve the training of drivers of hexapod robots, key techniques of driving simulator for hexapod robots are studied, and then a real-time driving simulator for hexapod robots is developed. The system is established under Eurosim, a real-time simulation frame for complex systems, to guarantee the real-time interaction between the hardware and software modules. The hardware and software of the system are designed, a simulation model is developed based on a manned hexapod robot, and thus the driving simulation of hexapod robot is implemented. The experimental results indicate that the system can respond to the driver's command rightly and in real-time, and the motion of the robot is simulated veritably.

**Keywords:** hexapod robot; driving simulator; real-time simulation

## 1 引言 (Introduction)

足式机器人在面对崎岖地形时具有比轮式移动机械更强的通过性能和地形适应性<sup>[1]</sup>, 在抢险救灾等特殊环境下具有广阔的应用前景. 随着机器人步行技术的日趋成熟, 大型化、有人化、实用化的足式机器人也逐渐成为了机器人研究的发展方向之一. 六足机器人是有人驾驶足式机器人的最主要形式, 如美国的 ASV<sup>[2]</sup>、挪威 Plustech 公司的伐木机器人<sup>[3]</sup>、英国的 Mantis 等.

借助仿真技术实现的模拟驾驶系统是对驾驶员进行培养训练的一种有效手段, 也是驾驶安全领域研究的热点之一<sup>[4]</sup>, 其在普通地面车辆等领域已经

得到了广泛的应用<sup>[5-7]</sup>. 轮式车辆的模拟驾驶系统主要用于对公路上复杂的交通状况进行模拟从而训练驾驶员在城市交通流等环境下的驾驶技巧, 或是模拟在野外道路上驾驶员的操作反应, 其车轮与地面之间仍属于连续稳定接触, 故而对碰撞、接触力学和动力学等的解算精度要求不高. 与轮式移动相比, 足式机器人具有运动不连续、落足冲击大、操纵自由度多等特点, 其每一步行走都相当于足与地面之间的一次碰撞, 且主要应用于复杂地面环境下的作业. 足式机器人的运动特点和应用环境导致了其驾驶具有很高的危险性, 操作不当很容易造成其机械结构的损坏甚至驾驶人员的伤亡, 因此必须对驾驶员进行专门的训练. 由于普通车辆模拟驾驶系

基金项目: 国家自然科学基金 (51275106, 51575120); “111” 创新引智计划 (B07018); 自然科学基金委创新研究群体项目 (51521003); 哈尔滨工业大学重大重点科技创新培育支持计划 (HIT.MKSTISP.2016.05); 国家 973 计划 (2013CB035502); 哈尔滨市杰出青年人才项目 (2014RFYXJ001).

通信作者: 丁亮, liangding@hit.edu.cn 收稿/录用/修回: 2016-09-29/2016-11-18/2016-11-20

统所重点研究的复杂交通流和行人、牲畜等突发事件等情况并不会出现于六足机器人的工作场合之中, 且足式机械反复碰撞的行走方式为动力学的准确模拟带来了困难, 因此很难利用传统车辆的模拟驾驶系统对六足机器人的驾驶进行模拟. 然而在国内外的文献中尚未有专门针对六足机器人的模拟驾驶系统的相关研究.

为给驾驶员提供真实的驾驶体验, 模拟驾驶仿真的实时性也是重要的保证条件. 由欧空局开发的复杂系统实时仿真框架 Eurosim 和加拿大 CMLabs 公司的多体动力学仿真软件 Vortex 为机器人的高保真度实时动力学仿真提供了良好的平台. 本文以 Eurosim 和 Vortex 为软件基础, 结合对六足机器人模拟驾驶系统关键技术的研究, 开发了一种针对六足机器人的实时模拟驾驶仿真系统, 实现了六足机器人的模拟驾驶

## 2 关键技术研究 (Study of the key techniques)

普通车辆的模拟驾驶系统的关键技术主要有机构运动学、车辆动力学的模拟、碰撞检测、操作反馈的模拟、交通流模拟、视景仿真和多自由度平台等<sup>[8-9]</sup>. 与轮式车辆不同, 六足机器人的操纵系统不通过机构与运动执行机构相连, 其操纵与运动的映射主要通过运动规划程序完成, 且应用环境决定了其周围不可能存在复杂的交通流. 因此六足机器人模拟驾驶系统的主要关键技术可归纳为动力学的模拟、视景仿真、碰撞检测与接触力学的求解和多自由度运动台等.

### 2.1 机器人动力学的模拟

由于多刚体系统的动力学解算技术已经较为成熟, 多种多体动力学仿真软件如 Adams、Vortex 等均能完成此功能并达到相当高的准确度, 因此接触模拟的保真度成为了当前限制动力学仿真保真度的最主要因素. 本文中的多体动力学解算由加拿大 CMLabs 公司开发的 Vortex 动力学引擎<sup>[10]</sup>完成. 而动力学模拟的保真度主要利用高保真度足一地接触作用模型对 Vortex 软件进行二次开发保证.

作为足式机器人与环境相互作用的最重要媒介, 机器人足与地面的接触情况直接影响机器人的运动状态和驾驶者的感受, 并决定着驾驶者的后续操作. 对机器人足与地面间接触作用的力学模型的研究一般分为法向力学模型和切向力学模型两个方面. 在法向上, 足与地面间的作用力主要与足在地面中的沉陷量和沉陷速度有关. 采用一种改进的 Hunt-Crossley 模型来模拟机器人足与地面的接触,

该模型的形式为

$$\begin{cases} F_N = k_N \delta^{n_1} + c_N \dot{\delta}^m \delta^{n_2}, & \delta > 0, \dot{\delta} > 0 \\ 0, & \delta < 0 \text{ 或 } \dot{\delta} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F_N$  为法向接触力;  $\delta$  代表足端在地面中的法向沉陷量, 其中  $\delta > 0$  时代代表足端参考点浸入地面的深度,  $\delta < 0$  时代代表足端参考点离开地面的距离;  $k_N$  和  $c_N$  分别为接触的刚度和阻尼系数;  $m$ 、 $n_1$  和  $n_2$  分别为沉陷速度和沉陷量的指数, 其中  $n_1$  可根据地面软硬程度不同取 0.1 (最软) 至 2 (最硬) 之间的值,  $m$  通常可取为 0、1 或与  $n_1$  相同,  $n_2$  可根据地面的软硬程度取 0.5 (最软) 至 1 (最硬) 之间的值. 表 1<sup>[11-12]</sup> 中给出了几种典型地面的刚度 ( $k_{TN}$ ) 和阻尼 ( $c_{TN}$ ) 系数值,  $m$ 、 $n_1$  和  $n_2$  的精确数值需通过实验测得. 对于有明显分层的地面 (如岩石地面上覆盖一层泥土、沙子等情况), 地面的等效刚度系数为

$$k_{TN} = 1 / \sum_{i=1}^{n_F} \frac{1}{k_{TNi}} \quad (2)$$

式中  $n_F$  为土壤层数,  $k_{TNi}$  为第  $i$  层土壤的刚度系数值. 阻尼系数可选用与足直接发生接触的地面材质的阻尼系数值.

表 1 典型地面参数  
Tab.1 Parameters of typical terrains

地面	$k_{TN} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_{TN} / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_T / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
混凝土	$3.4 \times 10^9$	$1.8 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5$
木	$1.5 \times 10^9$	$1.2 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$
砂砾	$2.3 \times 10^7$	$1.4 \times 10^4$	$1.2 \times 10^4$
沙子	$9.1 \times 10^6$	$9.0 \times 10^3$	$7.9 \times 10^3$
硬土	$1.7 \times 10^6$	$3.9 \times 10^3$	$3.4 \times 10^3$
松土	$3.4 \times 10^5$	$1.8 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$
泥炭	$5.7 \times 10^4$	$7.2 \times 10^2$	$6.3 \times 10^2$

在切向上, 足一地间的作用力主要与机器人足在地面上的切向剪切位移和剪切速度有关. 利用如下模型来模拟切向接触<sup>[13]</sup>:

$$F_T = -\frac{e^{s/K} - e^{-s/K}}{e^{s/K} + e^{-s/K}} \mu_f F_N - c_T \dot{s} \sqrt{|s|}, \quad s > 0 \quad (3)$$

式中  $F_T$  为切向接触力;  $s$  为足在地面上的切向剪切位移;  $K$  为地面的剪切位移模量, 该常数与地面材质有关, 表 2<sup>[12]</sup> 给出了几种典型材料间的剪切位移模量;  $\mu_f$  为足与地面的摩擦系数,  $c_T$  为该接触的阻尼系数, 表 1<sup>[11-12]</sup> 中给出了几种典型地面的切向阻尼系数.

对于分层的地面, 各参数可选择与机器人足直接发生接触的地面层材质的参数值.

表2 几种材料间的剪切位移模量

Tab.2 Shearing displacement modulus between some materials

材料	$K / \text{mm}$
橡胶—砖	23.3
橡胶—大理石	11.4
橡胶—铁	16.1
橡胶—沙子	155.1

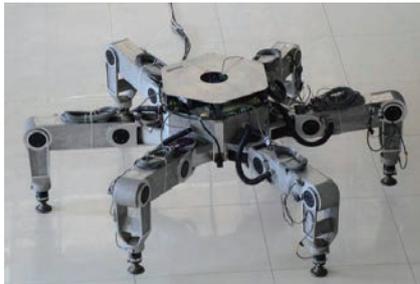


图1 足—地作用力学模型验证

Fig.1 Validation of the foot-terrain interaction model

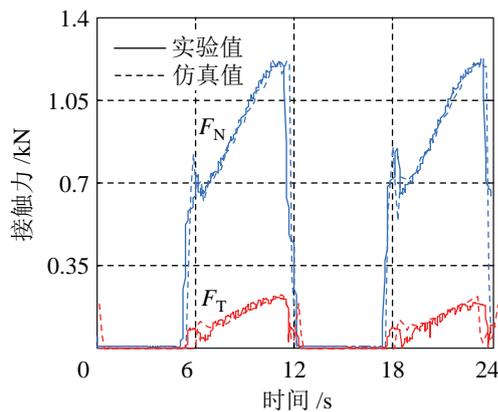


图2 足—地作用力学模型保真度验证

Fig.2 Validation of the fidelity of the foot-terrain interaction mechanics model

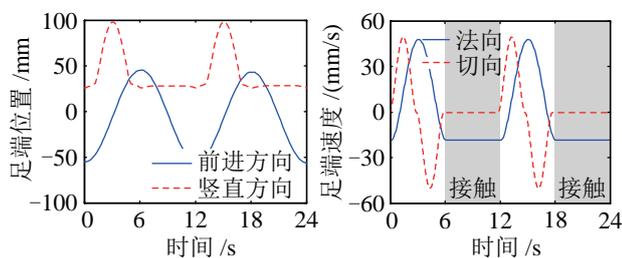


图3 足端运动规划

Fig.3 Motion planning of the foot

图2为利用图1中所示机器人进行实验和以该机器人为原型建立模型,利用基于Vortex动力学引擎开发的、集成了上述足—地作用力学模型及其解算功能模块的六足机器人仿真平台<sup>[13]</sup>进行仿真时的足与地面间接触力对比。其中实验数据通过机器人足端安装的6维力/力矩传感器(ATI FT11293)

测得,实验和仿真中机器人采用三角步态的形式行走,足端的运动规划如图3所示,仿真中所采用的地面参数如表3所示。通过图2可以看出,在法向和切向上该模型均能以较高的保真度预测足和地面间的接触力。一系列实验证明,利用本文的接触模型可取得较好的仿真效果,达到较高的保真度。

表3 仿真中所采用的地面参数

Tab.3 Terrain parameters in the simulation

参数	取值
$k_{TN}$	$1.0 \times 10^9 \text{ N/m}$
$c_{TN}$	$1.0 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{s/m}$
$n_1$	2.0
$n_2$	1.0
$m$	1.0
$K$	0.1 mm
$\mu$	0.175
$c_T$	$1.0 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{s/m}$

## 2.2 视景仿真

视景仿真是模拟驾驶系统中的重要成分,通过视景仿真产生的虚拟视景可以使驾驶员产生沉浸感,增强驾驶感受。六足机器人模拟驾驶系统中的虚拟视景应包括机器人、地形和地面景观等内容。视景仿真一般可分为场景建模和视景驱动两步。

本文中的视景仿真模型由物理模型和场景模型两部分构成。其中物理模型主要用于碰撞检测和动力学解算,由于机器人系统是非常复杂的多体动力学系统,且在设计的过程中具有很强的不确定性,因此很难且没有必要对六足机器人的物理模型进行完整和准确的构建。在能够表达机器人、地形和岩石、树木等地面实体的几何属性和质量、质心、惯性张量、材料等物理属性的基础上应尽量简化以提高运算速度。

具体简化方法为:根据机器人在运动时的实际情况分析出关键的受力部件,分析各参数对运动过程的影响,进而对机器人的物理模型进行相应的简化。

简化原则是:

- (1) 保留与机器人移动性能相关的关节,不相关的连接则将相连的部件整合为一个部件;
- (2) 将机体简化成一个实体,将各腿及液压缸等结构简化为杆件;
- (3) 直接与地面接触的足则保留其实际的形状,这样既能得到较快的运算速度,又能保证计算精度。

机器人和地面景观实体的物理模型利用 Vortex 提供的建模功能所创建。

地形的物理模型主要用以表征地面高度、法矢等地貌信息。地形的物理模型利用数字高程模型 (DEM) 创建, 其主要由一系列节点位置信息构成。对于结构化的地形, 可直接通过地面高度函数  $z(x,y)$  来生成, 对于不能用数学函数表示的复杂非结构化地形或随机地形, 则通过实测采样信息或随机算法制作地形节点阵列文件。仿真程序通过读取外部 DEM 文件的形式生成地形。图 4 为一种机器人和地形的物理模型。



图 4 一种机器人和地形的物理模型

Fig.4 Physical models of a robot and a terrain

场景模型主要用于视景显示, 从而为驾驶者带来沉浸感。场景模型利用 3DsMax 创建, 而后以 IVE 格式导出为场景文件并利用 Vortex 与相应的物理模型进行绑定, 最后通过 OSG (open scene graph) 引擎驱动显示, 如图 5 所示。

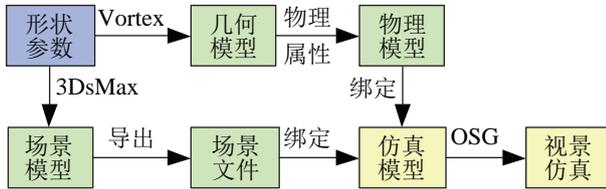


图 5 视景仿真流程

Fig.5 Process of scene simulation

### 2.3 碰撞检测与接触力学求解

机器人机身和足与环境之间的碰撞检测与接触力学求解以不同的方式实现: 对于较少发生的机器人机身与周围环境之间的碰撞, 利用 Vortex 集成的碰撞检测和接触力学求解功能实现; 而对于机器人足与地面间的接触, 其碰撞检测和足一地作用力学解算程序通过 C++ 语言对 Vortex 进行二次开发实现。首先获取地面的法向量, 根据从 Vortex 软件中读取出的足端位置, 地面的法向量可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} n_{tx} = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\ n_{ty} = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (y_3 - y_1)(z_3 - z_1) \\ n_{tz} = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $[n_{tx}, n_{ty}, n_{tz}]^T$  为地面的法向量;  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  和  $(x_3, y_3, z_3)$  分别为地面高程模型中包围足端投影点的 3 个点  $p_1$ 、 $p_2$  和  $p_3$  在世界坐标系  $\Sigma_0$  下的坐标值, 如图 6 所示。

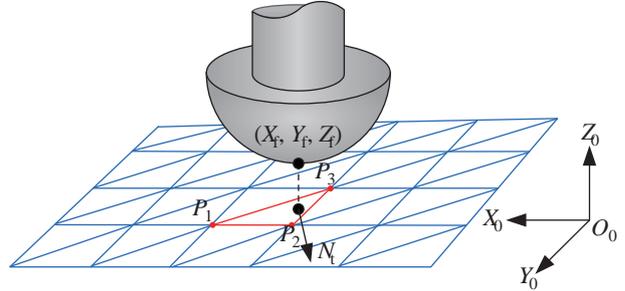


图 6 足一地接触区域求解

Fig.6 Solving of the foot-terrain interaction area

于是足端的沉陷量为

$$\delta = z_1 - \frac{n_{tx}(x_f - x_1) + n_{ty}(y_f - y_1)}{n_{tz}} - z_f \quad (5)$$

式中  $(x_f, y_f, z_f)$  为足端坐标。

足端沉陷速度为

$$\dot{\delta} = -\frac{n_{tx}\dot{x}_f + n_{ty}\dot{y}_f}{n_{tz}} - \dot{z}_f \quad (6)$$

切向滑移量为

$$\begin{cases} s_x = (x_f - x_{in}) \cos \beta + (y_f - y_{in}) \sin \alpha \sin \beta - \\ \quad (z_f - z_{in}) \cos \alpha \sin \beta \\ s_y = (y_f - y_{in}) \cos \alpha - (z_f - z_{in}) \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中  $s_x$  和  $s_y$  分别为足在  $x$  和  $y$  方向的滑移量,  $(x_{in}, y_{in}, z_{in})$  为足刚刚与地面进入接触时刻的坐标值,  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  由下式给出:

$$\begin{cases} \varphi_2 = \arcsin \frac{n_{tx}}{|n_t|} \\ \varphi_1 = -\arcsin \frac{n_{tz}}{|n_t| \cos \varphi_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $n_t$  为足端法向量, 足的滑移速度为

$$\begin{cases} \dot{s}_x = x_f \cos \varphi_2 + y_f \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 - (z_f - z_{in}) \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ \dot{s}_y = y_f \cos \varphi_1 - z_f \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (9)$$

得知沉陷和滑移的大小和速度后, 便可利用式 (1) 和式 (3) 来计算接触力的大小并施加到各足足端。

### 2.4 多自由度运动台

多自由度运动台用于搭载驾驶员与操纵系统硬件并模拟车身的俯仰、滚转、颠簸、碰撞和震动等运动情况以增强驾驶员的实际驾驶感受, 根据需要一般具有 3 ~ 6 个自由度。其自由度越多, 驾驶员所体验的驾驶感受越真实, 但其成本和控制难度也

相应增大。考虑到六足机器人一般运动速度较慢，相应地在前进和转向方向上的加速度也较小，因此驾驶员在前进方向和转向方向上所体验到的加速和运动感受不强。驾驶员能感受到的机器人运动主要有：(1) 由于机器人在崎岖地面上行走而引起的车身整体俯仰和侧倾；(2) 由足和地面接触冲击引起的机身法向震颤。

综合考虑驾驶员的主要感受和成本因素，采用3自由度运动台对机器人的运动进行模拟，其机构示意图如图7所示。3个电动缸控制1个竖直方向的移动自由度和2个转动自由度运动。其中移动自由度用于模拟机器人本体的垂直震动，2个转动自由度分别用于模拟机器人的俯仰及滚转。运动平台的逆运动学方程为

$$\begin{cases} d_1 = z_h - \frac{L}{2}c\alpha s\beta - \sqrt{l^2 - \frac{L^2}{4}[(1-c\beta)^2 + (1-s\alpha s\beta)^2]} \\ d_2 = z_h + \frac{L}{2}c\alpha s\beta + \frac{W}{2}s\alpha - \sqrt{l^2 - \frac{L^2}{4}(1-c\beta)^2 - \left[\frac{L}{2}s\alpha s\beta + \frac{W}{2}(1-c\alpha)\right]^2} \\ d_3 = z_h + \frac{L}{2}c\alpha s\beta - \frac{W}{2}s\alpha - \sqrt{l^2 - \frac{L^2}{4}(1-c\beta)^2 - \left[\frac{L}{2}s\alpha s\beta - \frac{W}{2}(1-c\alpha)\right]^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  分别为3个电动缸的长度， $z_h$  为平台中心高度， $\alpha$  为平台滚转角度， $\beta$  为俯仰角，如图7中所示， $s$  和  $c$  分别代表正弦 (sin) 和余弦 (cos) 函数。根据该逆运动学方程驱动3个电动缸运动即可实现运动平台在竖直方向的震动和俯仰、

滚转运动。

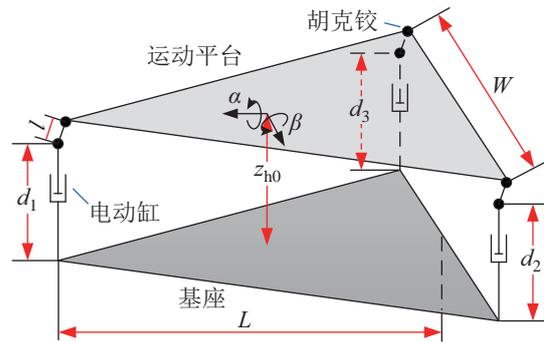


图7 3自由度运动平台机构示意图

Fig.7 Mechanism scheme of the 3-DOF motion platform

### 3 系统硬件架构 (Hardware structure of the system)

该系统的硬件系统主要由3台计算机、1个3自由度运动台、1套多媒体投影系统、1个方向盘、1个油门踏板、1个刹车踏板，以及一系列按钮、旋钮、手柄等操纵设备组成，其总体架构如图8所示。其中操纵计算机选用贝加莱 Panel PC 900 触屏工控机，主要用于处理驾驶者的操纵信号。按钮、旋钮手柄等器件通过贝加莱的 X20 端子与操纵计算机连接；方向盘、油门踏板和刹车踏板安装于运动台上并通过 USB 与操纵计算机连接，最后组成的安装于3维运动平台上的驾驶舱内操纵系统如图9所示。仿真计算机选用 SGI Octane IV 图形工作站，主要用于进行机器人的动力学仿真、运动控制，并驱动多媒体投影系统进行场景显示。仿真管理机为惠普 z228 工作站，主要用于采集其他2台计算机的信息并对仿真进行统一管理，以保证各部分程序运行的同步性及仿真的实时性，并进行机器人的运动规划与运动平台的运动控制等工作。

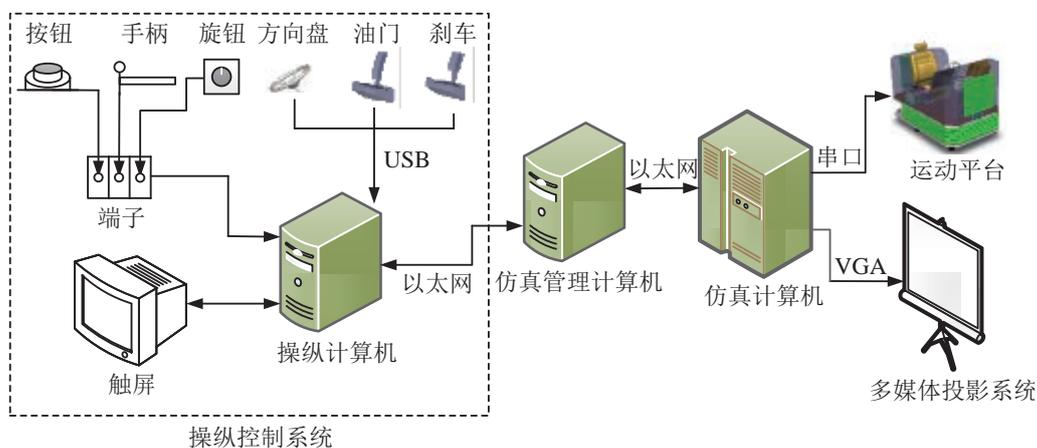


图8 系统硬件结构

Fig.8 Hardware structure of the system



图 9 模拟驾驶舱及操纵控制系统硬件

Fig.9 The cockpit and hardware of the manipulation system

### 4 系统软件结构 (Software structure of the system)

整个仿真系统由欧洲航天局开发的复杂系统实时仿真框架 EUropean Real-time Operations SIMulator (Eurosим) 统一进行管理, 以保证系统的实时性. 该框架能够对多程序、多软件的仿真模型进行配置与管理, 还能够根据需要对不同的仿真程序分配不同的仿真频率以实现资源的合理利用. 该框架能够支持利用 C、C++、Fortran 等语言的编程并提供了丰富的软、硬件接口, 为硬件在环及人在环仿真提供了便利的条件, 其系统架构如图 10 所示.

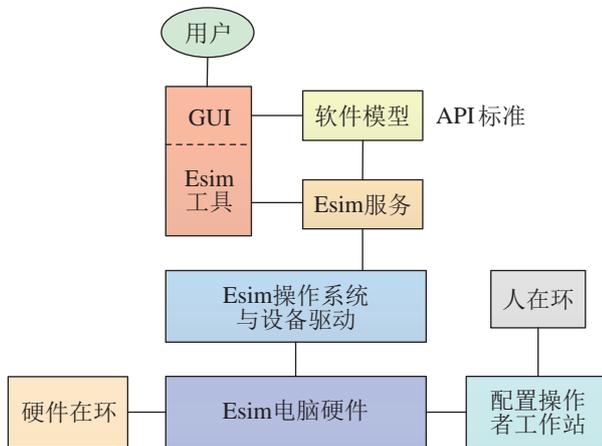


图 10 Eurosим 系统架构

Fig.10 The system structure of Eurosим

仿真管理机与其他两台计算机之间采用以太网通信, 其中操纵计算机与仿真计算机分别作为服务器, 仿真管理机作为客户端以固定的频率主动获取或发送数据, 以控制仿真频率. 仿真系统的软件结构如图 11 所示.

仿真程序运行的流程如图 12 所示. 运行于管理计算机上的仿真主程序首先以 25 Hz 的频率向操纵电脑请求操纵指令信息; 根据操纵者的指令规划

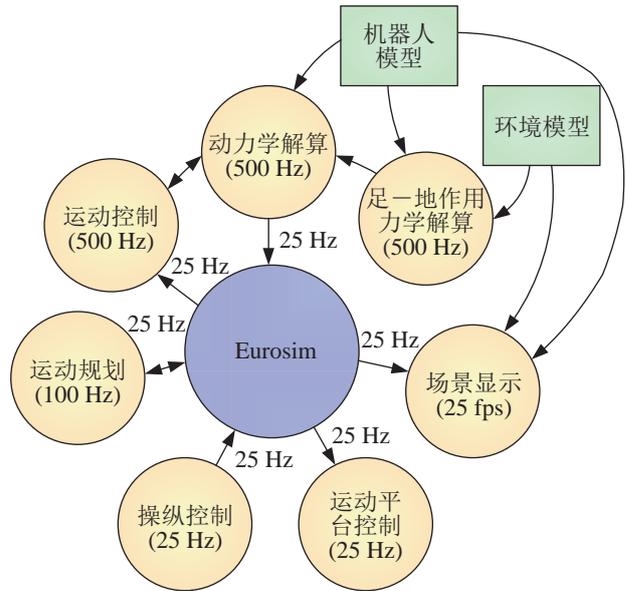


图 11 系统软件结构

Fig.11 Software structure of the system

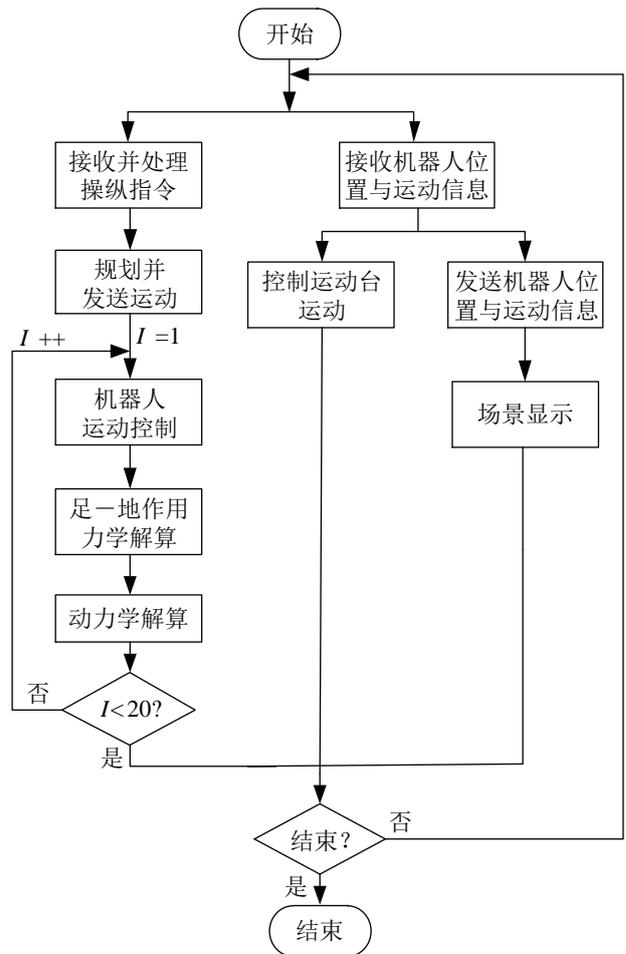


图 12 系统运行流程图

Fig.12 Flowchart of the system

机器人的运动, 并发送至机器人的运动控制程序; 运动控制根据规划和动力学仿真程序的反馈控制机器人的运动, 并将运动发送至动力学仿真程序; 运

行于仿真计算机上的动力学仿真程序根据控制信息和足—地作用力学解算程序计算的足端力学数据进行多体动力学的计算；足—地作用力学程序根据动力学解算程序计算出的各足的位置和速度信息计算各足与地面之间的接触力，并反馈给动力学仿真程序；由机器人控制程序至足—地力学解算程序循环20次以达到较高的动力学仿真频率，提高仿真精度，循环完成后等待下一个规划指令。

另一方面，在向运动控制程序发送指令的同时，主程序向动力学仿真程序请求机器人位置、速度及各关节的位置信息。根据该信息控制运动平台运动并将其发送至基于 OSG 的场景显示程序以进行场景显示。

## 5 系统的实现与验证 (Implementation and validation of the system)

以一种有人驾驶六足机器人设计方案为原型建立机器人模型。其机体长约 3 m，宽约 1.5 m，高约 1.8 m，总质量约 3 t，可搭载 1 到 2 名乘员。利用 C++ 语言建立各部分模型从而进行模拟驾驶仿真，效果如图 13 所示。从图 13 可以看出，场景显示界面由 2 个窗口组成，其中右侧窗口显示六足机器人驾驶室内视角；而左侧小窗口以观察者视角显示机器人的实时运动状态，以帮助驾驶员对机器人的运行原理、运动姿态及驾驶感受和相应操作等产生更加深刻的理解，有助于六足机器人驾驶员驾驶技术的快速提高。



图 13 系统的实现

Fig.13 Implementation of the system

仿真中机器人采用三角步态进行行走，6 条腿分为 2 组交替进行摆动与支撑以实现机器人的运动，如图 14 所示。图 15 所示为在模拟驾驶仿真中测得的机体转向角速度与驾驶员操纵的方向盘转角。从图中可以看出，在驾驶员不进行转向操作时机器人仍有一定的转向速度，并呈周期性变化。这种现象是由六足机器人周期性的行走方式决定的：首先，机器人足与地面产生接触时的冲击使机器

人产生了一定的角速度；其次，由于机器人足与地面的切向接触力与其在地面上的剪切位移有关，而在以三角步态行走时机器人两侧支撑足的数目不一致，根据受力平衡原理其各足的滑动距离也必然不一致，这种两侧足与地面不等速的相对滑动也是引起机器人机体角速度的原因之一。图 15 还表明，机器人转向角速度与方向盘转角成正比关系，模拟驾驶仿真中的机器人能够正确、及时地响应驾驶员的操作指令。

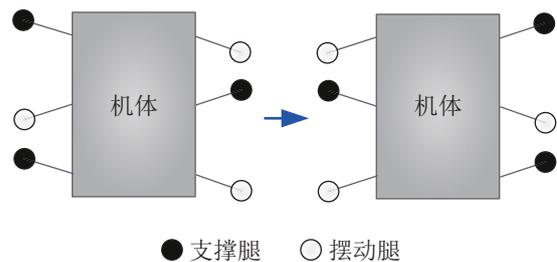


图 14 三角步态示意图

Fig.14 Scheme of the triangle gait

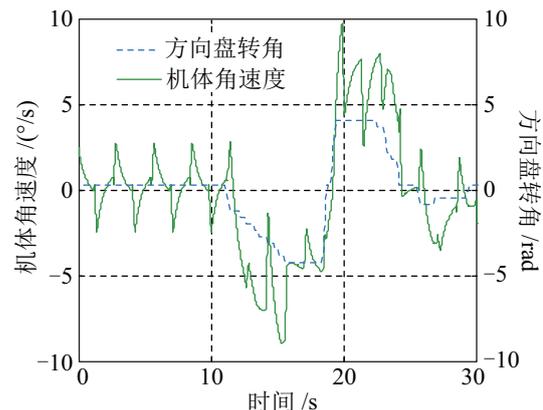


图 15 机器人转向角速度与方向盘输入

Fig.15 Turning angular velocity of the robot and the steering wheel's input

图 16 为仿真中所测得的机器人的俯仰角和滚转角，可以看出在行走过程中机器人的姿态也呈周期性变化。这是由于地面对机器人足所提供的支持力与足在地面上的法向沉陷量有关。在行走时，单足支撑侧的足所承受的支撑力远大于双足支撑侧单个足所承受的支撑力，因此其在地面上的沉陷也较大，这是引起机体滚转角周期性阶跃变化的原因。而机体的俯仰角变化是由于随着机器人向前行走，机器人质心也随之向前移动，从而主要支撑力由后足转移至前足而引起的。这种足式机器人所特有的行走过程中机身周期性姿态变化在模拟驾驶系统中得到了正确的模拟。

机器人在垂直方向上的加速度是驾驶员产生颠簸感的最主要成因。图 17 为仿真中的机器人法向

加速度, 该加速度主要是由机器人落足冲击引起的, 该数据能够为机器人规划和控制算法的设计提供重要参考.

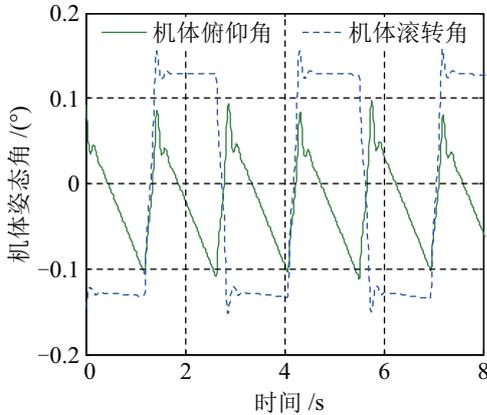


图 16 机器人姿态角

Fig.16 Attitude angle of the robot

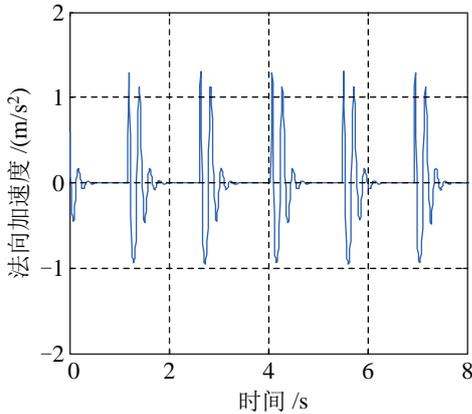


图 17 机器人法向加速度

Fig.17 Normal acceleration of the robot

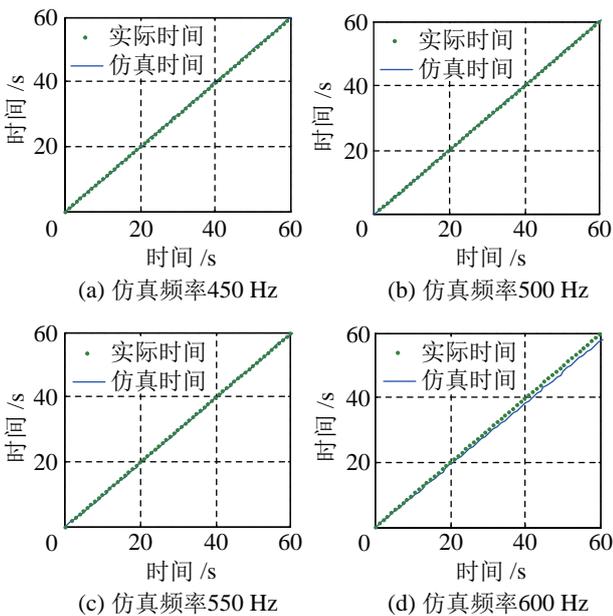


图 18 系统实时性校验

Fig.18 Verification of real-time performance of the system

由于动力学仿真程序计算量较大且所需计算频率较高, 因此其成为影响系统实时性的最大因素. 为验证模拟驾驶仿真的实时性, 在动力学仿真程序中通过系统函数 `GetTickCount()` 读取系统时间作为实际时间, 通过仿真步长和当前仿真步数计算仿真时间. 图 18 所示为在不同仿真频率下仿真时间与实际时间的对比情况. 从图中可以看出, 当仿真频率低于 550 Hz 时, 仿真时间与实际时间一致; 当仿真频率达到 600 Hz 时, 仿真时间逐渐滞后于实际时间, 即系统计算能力不足以支持实时仿真. 在实验中和实际应用中所设置的 500 Hz 仿真频率下, 该系统能完成六足机器人的实时驾驶模拟.

### 6 结论 (Conclusion)

模拟驾驶系统是对驾驶员进行培养和训练的重要手段之一, 为解决有人驾驶六足机器人模拟驾驶的问题, 本文对其关键技术进行了研究, 进而开发了一种六足机器人模拟驾驶系统. 有以下结论:

(1) 建立了机器人足与地面之间的接触力学模型, 解决了视景仿真技术, 提出了碰撞检测与接触力学的求解方法, 设计了一种 3 自由度运动台并对其逆运动学进行了分析.

(2) 对机器人模拟驾驶系统软硬件结构进行了设计. 开发了六足机器人模拟驾驶系统, 该系统由 3 维运动台、一系列操纵设备及计算机和投影系统构成. 以 `Vortex` 为动力学引擎, 在实时仿真框架 `Eurosim` 下对系统软件进行了设计, 保证了系统的高效运行.

(3) 进行了模拟驾驶系统的实验研究. 以一种载人六足机器人的设计方案为原型建立了仿真模型, 实现了六足机器人的模拟驾驶. 实验结果表明, 该系统实现了实时模拟驾驶仿真, 并能够对驾驶员的操作做出正确的反应, 真实地模拟了机器人的运动.

此外, 由于该系统基于 C++ 语言开发, 因此具有较高的灵活性, 方便实现对不同结构、算法的机器人进行模拟驾驶. 利用该系统还能够实现对有人驾驶机器人的操纵控制算法设计、验证及优化等工作.

### 参考文献 (References)

[1] 邓宗全, 刘逸群, 高海波, 等. 液压驱动六足机器人步行腿节段长度比例研究 [J]. 机器人, 2014, 36(5): 544-551.  
 Deng Z Q, Liu Y Q, Gao H B, et al. On the segment length ratio of the walking leg of a hydraulically actuated hexapod robot[J]. Robot, 2014, 36(5): 544-551.

- [2] Waldron K J, McGhee R B. The adaptive suspension vehicle[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1986, 6(6): 7-12.
- [3] Halme A, Vainio M. Forestry robotics – Why, what and when [M]//Autonomous robotic systems. Berlin, Germany: Springer, 1998: 151-162.
- [4] 吴初娜, 于鹏程, 孙纯, 等. 三维模拟驾驶仿真系统的研究与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(7): 2771-2775.  
Wu C N, Yu P C, Sun C, et al. Research and development of 3D driving simulation system[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(7): 2771-2775.
- [5] Weinberg G, Harsham B. Developing a low-cost driving simulator for the evaluation of in-vehicle technologies[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. New York, USA: ACM, 2009: 51-54.
- [6] Yanai S, Itoh Y, Nemoto T, et al. Development of portable driving simulator system[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 29(2): 207-210.
- [7] Ihemedu-Steinke Q C, Sirim D, Erbach R, et al. Development and evaluation of a virtual reality driving simulator[C]//Mensch und Computer 2015 Workshopband. 2015: 491-500.
- [8] 贾连兴, 韩世刚, 汪霖. 城市模拟驾驶系统的实现及其关键技术 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 4907-4909.  
Jia L X, Han S G, Wang L. Realization and key technology of city driving simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(18): 4907-4909.
- [9] 王力军, 荆旭, 滕贻健, 等. 汽车驾驶模拟系统的研究与进展 [J]. 农业装备与车辆工程, 2009(5): 34-37.  
Wang L J, Jing X, Teng Y J, et al. The discussion and development of vehicle driving simulation system[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009(5): 34-37.
- [10] 贾彦辉. 基于 Vortex 的月球车移动性能仿真与评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
Jia Y H. Vortex-based simulation and evaluation for mobility performance of lunar rovers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [11] Silva M F, Machado J A T, Lopes A M. Modelling and simulation of artificial locomotion systems[J]. Robotica, 2005, 23(5): 595-606.
- [12] Ding L, Gao H B, Deng Z Q, et al. Foot-terrain interaction mechanics for legged robots: Modeling and experimental validation[J]. International Journal of Robotics Research, 2013, 32(13): 1585-1606.
- [13] Gao H B, Jin M, Ding L, et al. A real-time, high fidelity dynamic simulation platform for hexapod robots on soft terrain[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 68(8): 125-145.

#### 作者简介:

金马 (1990-), 男, 博士生. 研究领域: 六足机器人.

高海波 (1970-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 特种机器人, 星球探测车.

丁亮 (1980-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 特种机器人, 星球探测车.