

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.016

收获机虚拟环境模型与仿真平台构建

陈燕^{1,2} 曾泽钦^{1,2} 王杰^{1,2} 邹湘军^{1,2} 贾春洋^{1,2} 张坡^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为实现收获机械的设计创新以及整机作业行为和性能的仿真试验,以玉米收获机为例,采用 Unity3D 虚拟平台构建了收获机械三维仿真模型。根据物料流变特性,以虚拟弹簧和虚拟墙构建了植株模型,通过建立行为控制模型实现了收获机械与植株的交互,最终开发了收获仿真平台,应用该平台进行了验证试验和不同条件下的收获仿真试验。试验结果表明,构建的植株模型和虚拟收获环境符合收获机械仿真需求,仿真平台可进行收获机械作业性能的评估。

关键词: 联合收获机; 虚拟环境; 仿真平台; 仿真试验

中图分类号: S225; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0159-08

Virtual Environment Construction and Simulation Platform of Harvesting Machinery

CHEN Yan^{1,2} ZENG Zeqin^{1,2} WANG Jie^{1,2} ZOU Xiangjun^{1,2} JIA Chunyang^{1,2} ZHANG Po^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agriculture Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to realize the design innovation of harvesting equipment and the simulation test of the machine operation behavior and performance, the corn harvesting equipment was taken as an example, the 3D simulation model of harvesting equipment was built by Unity3D virtual platform. In order to simulate the deformation of the plant, according to the rheological properties, the plant model was constructed by connecting multiple cylinders with virtual springs and virtual walls. Then, establishment of behavioral models achieved interaction between harvesting equipment and plants. Finally, the harvesting simulation platform was used to verify the harvesting simulation test under different conditions, including the state change test of the plant under wind and rain, the harvesting behavior observation test of the harvesting process and the harvesting performance test of harvesting equipment with the traveling speed and planting density as factors. The result was that the fruit loss rate was decreased rapidly with the increase of speed, but the rate was decreased slowly when the speed exceeded 0.385 m/s. At the same time, the higher the planting density was, the slower the fruit loss rate was decreased. Further analysis of variance showed that both the traveling speed and the planting density had significant effects on the harvesting performance of the harvesting equipment ($P < 0.01$), which showed that the simulation platform can effectively simulate the harvesting situation and evaluate the performance of the harvesting equipment.

Key words: combine harvester; virtual environment; simulation platform; simulation test

0 引言

农业机械设计研究需要大量的野外试验^[1],对

粮食作物及农产品收获机的研究,需等待收获季节,严重影响设备的研发周期^[2]。虚拟现实的虚拟设计与三维仿真及其人机交互技术具有安全可靠的特

收稿日期: 2019-01-11 修回日期: 2019-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)和广东省自然科学基金项目(2018A030307067)

作者简介: 陈燕(1964—),女,副教授,主要从事农业机器人、农业智能装备和智能设计与制造研究,E-mail: cy123@scau.edu.cn

通信作者: 邹湘军(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机器人和机器视觉研究,E-mail: xjzou1@163.com

点,可缩短设计周期,提高设计品质^[1,3]。虚拟现实技术在工业、农业、军事、医学和教育等各个应用领域已取得很多研究成果^[3-10]。

随着三维建模技术的发展,仿真技术趋向成熟,许多研究者采用仿真技术构建作业环境,用于农业机械设计。文献[11-12]开发了水果采摘机器人虚拟设计与仿真系统;文献[13]开发了交互式联合收获机仿真系统,用于评估新型收获技术;还有许多研究者通过 Unity3D 虚拟平台开发虚拟作业环境,用于各类农业装备试验^[14-18]。在开发虚拟环境仿真平台时,采用有限元分析、面片操作等技术可模拟出植株变形细节^[19-23],但其处理的数据量大,不适用于场景展示;采用静态模型、图形处理器等技术可减少模型数据量^[11-18],有利于环境展示,但缺少动态变化。

本文采用 Unity3D 虚拟平台,以玉米收获机为例,构建虚拟收获环境及其仿真平台,试验分析植株收获期间及其在风雨影响下的受力状态变化,仿真评估收获机械的作业性能,为开发交互式收获机械仿真平台、实现收获机械的设计创新以及整机作业行为和性能的仿真试验提供技术支持。

1 仿真平台架构与原理

以玉米收获机为例,采用 Unity3D 虚拟平台,以 C#编程语言构建收获机械虚拟收获环境及其仿真平台。

1.1 系统结构

收获机械仿真平台系统结构如图 1 所示,分为 6 个模块:①视角控制器:作为控制界面,可以控制视角与其他模块参数的输入输出。②收获机械控制器:具有收获机械的各类特性,如割台系统、移动系统与转向系统等。③植株控制器:具有植株模型各类特性,如植株数据系统、植株生成系统等。④环境展示控制器:具有风、雨效果,可控制风雨大小与方向。⑤模型库:存储收获机械、植株与地形等模型。⑥数据库:存储收获机械的运动参数、收获结果与植株模型的结构参数等。

通过添加 Unity3D 物理碰撞组件,结合虚拟物理引擎,可模拟收获机械割台与植株模型互动状况,以及实现风雨对植株的影响作用。

1.2 视角漫游模式的选择

视角变化是影响虚拟沉浸度与评价虚拟环境效果的重要部分^[15]。一般分两类视角漫游模式:自动漫游与人工漫游。

自动漫游即视角沿着设定好的路径与角度进行平移与旋转,适用于非交互性的展示。本文在展示

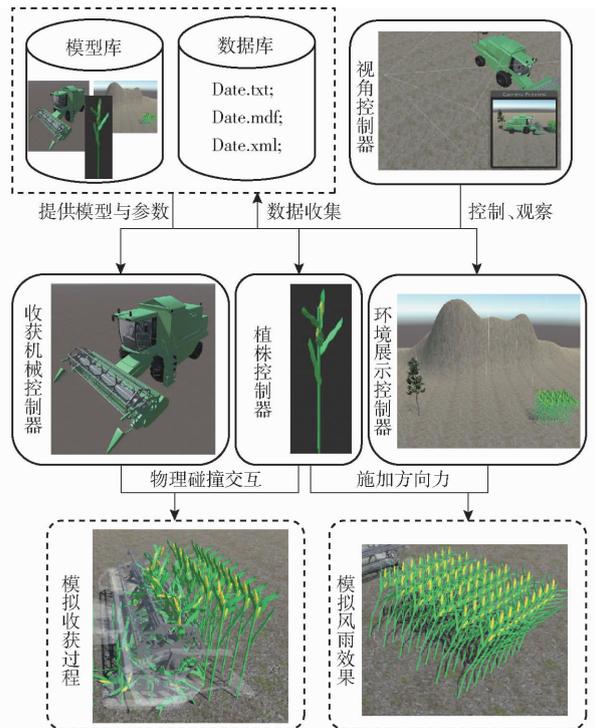
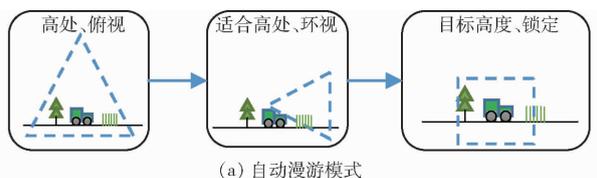


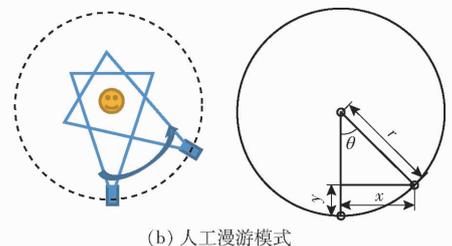
图1 收获机械仿真平台系统结构图

Fig.1 System structure of harvest equipment simulation platform

全景时使用自动漫游模式,其步骤如图 2a 所示。先在高处进行俯视,展示环境分布概况;然后,视角高度下降至适合高度“抬头”——从俯视渐变为平视,环视一周展示全景近况;最终视角移动至正对收获机械,并将视角中心锁定为收获机械,进入人工漫游模式。



(a) 自动漫游模式



(b) 人工漫游示意图

图2 自动漫游流程与人工漫游示意图

Fig.2 Process diagrams of automatic and manual roamings

人工漫游是人机交互的重要组成部分,主要观察对象是收获机械与植株,重点是收获机械与植株的交互状况。以收获机械为视角中心,利用鼠标控制视角旋转与远近,键盘辅助控制视角平移,如图 2b 所示。设鼠标水平方向的移动量为 D ,通过转换系数 S 将鼠标的水平移动量转换为视角相对于中心的旋转量 θ 和视角自身水平旋转角 φ , φ 与

θ 定义为

$$\varphi = -\theta = -DS \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin \theta \\ r(1 - \cos \theta) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{\text{keyboard}} \\ y_{\text{keyboard}} \\ z_{\text{keyboard}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[x \ y \ z]^T$ ——视角在空间的平移矩阵, m
 r ——相机与中心点间在水平面的投影距离, m
 $[x_{\text{keyboard}} \ y_{\text{keyboard}} \ z_{\text{keyboard}}]^T$ ——键盘控制视角平移的平移矩阵, m

2 虚拟收获环境构建

对于虚拟环境构建, 三维模型是其重要基础^[9]。研究重点为收获仿真, 需构建收获机械与植株的仿真模型, 同时还需构建行为控制模型实现两者的交互。

2.1 收获机械模型

以某收获机械传动系统及其变速箱为设计原型, 如图3所示。该联合收获机可用于多种谷物收获, 且带有拨禾轮的割台结构有利于观察收获状况; 变速箱分慢8挡、快8挡与倒8挡共有24挡变速, 可提供多种行进速度的选择。



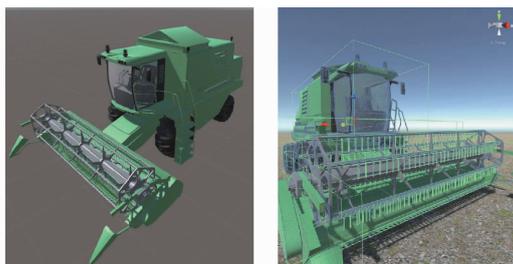
图3 仿真原型

Fig. 3 Model prototype

收获机械由大量的部件与零件组成, 且每个部件含大量零件, 而在虚拟环境中, 每个可视对象均需要网格信息与纹理信息, 包括顶点信息、面片索引信息等数据。在虚拟环境中按照收获机械实际的复杂程度显示占用的数据量太大。因此, 去除非观测的部件与零件, 收获机械模型主要分成车体模块、割台模块与功能模块。车体模块包括车体外壳、车轮等外观部分。割台模块包括拨禾轮、切割刀具等收获部分。功能模块包括收获机械的物理组件与脚本组件, 如刚体组件、碰撞体组件、车体移动脚本与割台控制脚本等, 如图4所示。

2.2 虚拟植株模型

植株由茎秆、叶子和果实构成, 为了模拟植株的收获状态, 根据植株的流变特性, 利用虚拟弹簧与虚拟墙构建植株模型, 使其能够根据风雨作用力或碰撞发生相应的变化。



(a) 模型导入Unity3D

(b) 碰撞体设置

图4 收获机械模型

Fig. 4 Harvest equipment model

2.2.1 植株茎秆模型

农业物料可通过弹性体、黏性体与塑性体的组合模拟其实际流变特性^[23]。本文采用麦克斯韦模型(Maxwell model)模拟植株流变特性, 模型由一个弹簧和一个粘壶串联组成, 可表示物料应力松弛过程, 如图5a所示。Unity3D中的弹簧关节组件可以设置弹力组件与阻尼组件, 可用弹簧关节组件构成麦克斯韦模型模拟植株的变形状况, 其定义为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t \quad (3)$$

式中 ε ——应变

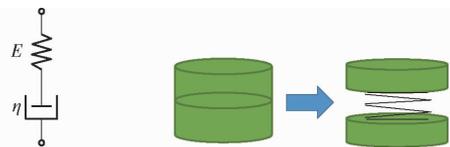
σ ——应力, Pa

E ——物料的弹性模量, Pa

η ——物料阻尼系数, Pa·s

t ——时间, s

有限元分析是物料仿真研究惯用方法^[19,21], 细化模型网格, 可将弹性元件散布到微小单元模拟实际物料变化状况。因此, 效仿有限元仿真方法——离散梁法^[19], 采用圆柱体刚性杆与虚拟弹簧连接构成植株茎秆模型, 如图5b所示, 可通过圆柱体数量调整植株占用数据量。



(a) 麦克斯韦模型

(b) 在圆柱体间添加带有阻尼的弹簧

图5 植株茎秆模型

Fig. 5 Plant stem model

2.2.2 虚拟墙

茎秆模型受力会出现大间隙, 设置虚拟墙限制茎秆每节圆柱体的分离。在茎秆每节圆柱体连接处设置虚拟墙面, 将圆柱体限制在墙面中间。

2.2.3 植株模型

将建好的叶子与果实模型添加在茎秆模型上构建出植株模型, 利用阵列操作可构建成组的植株模型, 如图6所示。

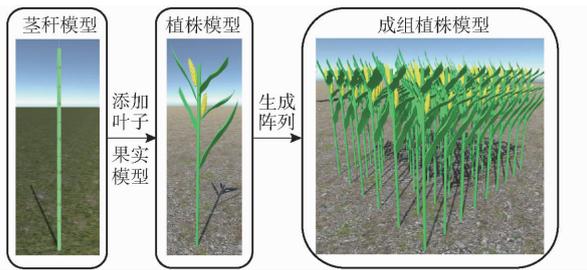


图6 植株模型构建

Fig. 6 Plant model construction

2.3 收获机械、风雨与植株的交互

2.3.1 收获机械与植株作业行为建模与交互规则

虚拟对象的行为表达可由行为模型与认知模型构成。行为模型是虚拟对象对外部变化的直接反应,所模拟的行为应符合现实世界中的基本运动和行为规律;认知模型是虚拟角色对获取的信息进行分析、决策执行过程的一种描述。

根据收获作业状况,将行为控制模型分为不具备认知的应激行为与基于认知的反馈行为。应激行为是对象本身特性的体现,如刚体、碰撞体等特性,可视化结果为植株与收获机械根据重力系统在环境平台上停留、植株受力后产生偏移等现象;反馈行为是认知系统对外部变化的判断与推理,根据推理结果指导对象行为表现,可视化结果为植株被割刀割断、进入收获口的植株会消失等现象。一个外部变化可引起模型多部分的行为表现,多个行为融合形成作业现象,如图7所示。

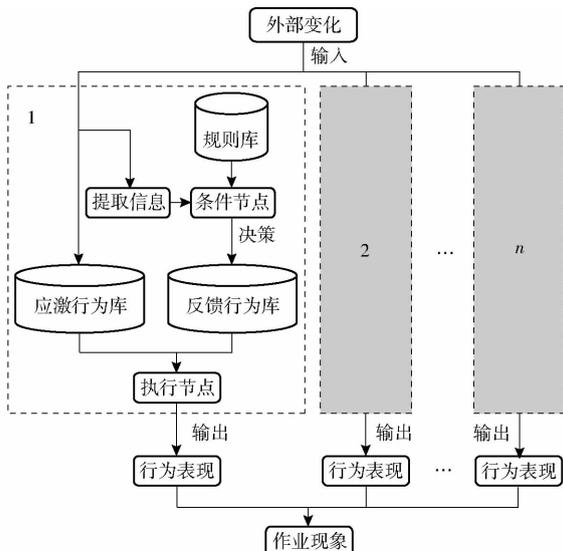


图7 行为控制模型

Fig. 7 Model of behavioral controls

反馈行为可形成行为推理规则,设行为推理规则是规则 R 的集合^[26],定义为

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad (4)$$

对任意行为有如下规则描述:根据第 i 个规则,

对条件 F_i 推理并决策,决策结果传输到执行节点输出行为 A_i ,与其他行为产生的可视化现象为 P_i ,定义为

$$R_i: \text{IF } F_i \text{ THEN } A_i \text{ SHOW AS } P_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

根据收获状况,收获机械与植株的交互行为推理规则描述如下:

R_1 : IF 启动割台 THEN 拨禾轮按照设定好的扭矩转动 AND 割刀触发器开启 SHOW AS 拨禾轮转动可拖拽植株,割刀可切割植株,不会被植株阻碍前进。

R_2 : IF 植株与割刀接触 THEN 计算植株切割处位置 AND 植株切割处圆柱体的连接解除 SHOW AS 植株可被割刀割断。

R_3 : IF 植株进入收获口 THEN 计算进入植株中果实数量,消灭植株,释放数据 SHOW AS 植株消失,收获量增加。

根据行为推理规则,建立收获机械与植株的交互规则,如图8所示。根据收获作业流程,收获机械先利用拨禾轮滚动限制植株位移;然后,割刀与植株接触,解除植株切割处的连接,使植株根部留在地面上,上部被拨禾轮拖拽入割台;割台螺旋推运器带动植株送往收获口;最后,当植株被送入收获口,计算其中果实模型数量即收获量数据,并将进入收获口的植株消灭以释放数据。

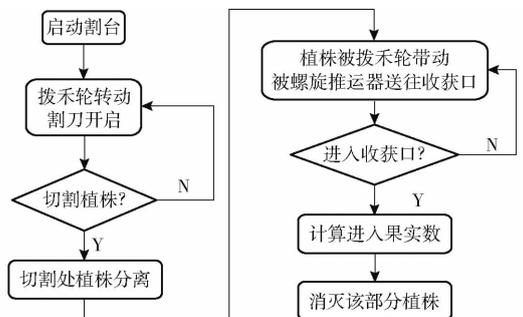


图8 收获机械与植株的交互规则

Fig. 8 Interaction rules between harvesting equipment and plants

2.3.2 风雨与植株的交互行为

为模拟出真实环境的复杂条件,设计了风雨效果。环境对植株主要的影响是风雨作用力,风作用力是无形的方向力,雨作用力是液滴碰撞植株产生的力。风雨对植株的影响是植株模型受风雨的力产生的应激性反应,可视化结果为顺着风、雨的方向变形。

将风、雨两者均转换为无形的方向力,且雨的展示效果通过 Unity3D 的粒子动画系统实现。设定风的初始方向为水平向前,雨的方向为垂直向下,风雨对植株的作用力定义为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} qL_{\text{section}} \cos\phi \cos\psi \\ qL_{\text{section}} \cos\phi \sin\psi \\ qL_{\text{section}} \sin\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} NC \sin\phi \sin\psi \\ NC \sin\phi \cos\psi \\ NC \cos\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $[F_x \ F_y \ F_z]^T$ ——植株茎秆每节圆柱体的各向受力, N

q ——风对植株的均布载荷, N/m

L_{section} ——植株茎秆每节圆柱体的均布载荷长度, m

ψ ——风力在水平面上与向前矢量的夹角, rad

ϕ ——风力在垂直面上与垂直向下矢量的夹角, rad

N ——雨的数量等级对应的载荷, N

C ——植株叶面接触面积系数

3 仿真试验与结果分析

3.1 试验设计与方法

为验证构建的植株模型和虚拟收获环境符合收获仿真需求,并可用于收获机械作业行为及性能的仿真试验,首先应用所构建的收获机械仿真平台进行验证试验。验证试验后,进行不同条件下的收获仿真试验,评估收获机械的作业性能。仿真试验设计如下:

(1) 风雨作用下植株的状态变化试验

为验证所构建的植株模型可模拟植株受力弹性变化,将风、雨作用力均转换为无形的方向力,选取方向力为 1 N,进行风雨对植株作用的模拟试验。试验后,统计植株不同位置(将植株由下往上分成 4 段)的变形数据,分析植株在风雨作用下的状态变化和变形特点。每组试验重复 20 次。

(2) 收获过程收获行为观察试验

为模拟玉米的收获行为过程,选取收获机高低 2 挡行进速度(0.124 m/s 和 0.939 m/s)进行收获仿真试验,试验过程观察收获行为、收获过程的漏果、漏节和植株被甩飞的情况。每组试验重复 5 次。

(3) 收获机械对植株的收获性能试验

选取收获机械行进速度和植株密度为试验因子分别进行单因素收获试验,考虑试验因子对收获机械的收获性能影响,行进速度按照 1204 型变速箱设置 5 个挡位,分别为 0.124、0.156、0.231、0.358、0.939 m/s;植株密度设置 3 个水平,分别为 4.6、9.2、18.4 株/m²。每组试验重复 20 次,试验后统计收获个数,计算漏果率。漏果率计算式为

$$\omega_f = \frac{q_T - q_S}{q_T} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ω_f ——漏果率

q_T ——果实总数量

q_S ——收获果实数量

3.2 结果分析

3.2.1 风雨作用下植株的变化

风雨作用下同一排植株的位移和速度随时间变化的曲线具有相似性,图 9 是中间位置植株的位移和速度曲线。

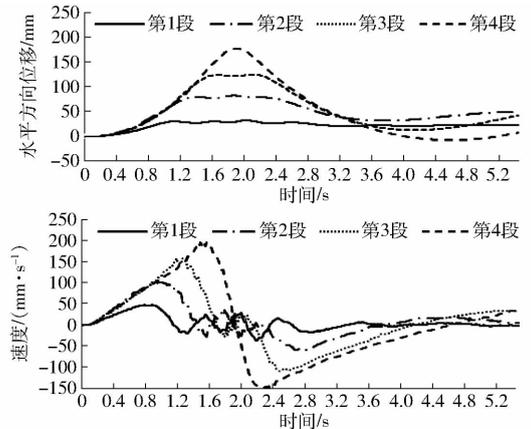


图 9 风雨作用下植株变化曲线

Fig.9 Variation curves of plants under influence of wind and rain

由图 9 可见,在风雨作用下,植株各段向力方向偏移,节点越高偏移幅度越大,而且偏移速度越大;偏移值达到最大后(此时速度为 0)发生弹复现象,植株逐渐恢复原态;整个偏移过程,植株的速度变化趋势类似于正弦曲线。因此,本文所构建的植株模型可模拟植株受力弹性变化。

3.2.2 收获过程中的植株状态

植株收获行为观察试验结果如图 10 所示,其仿

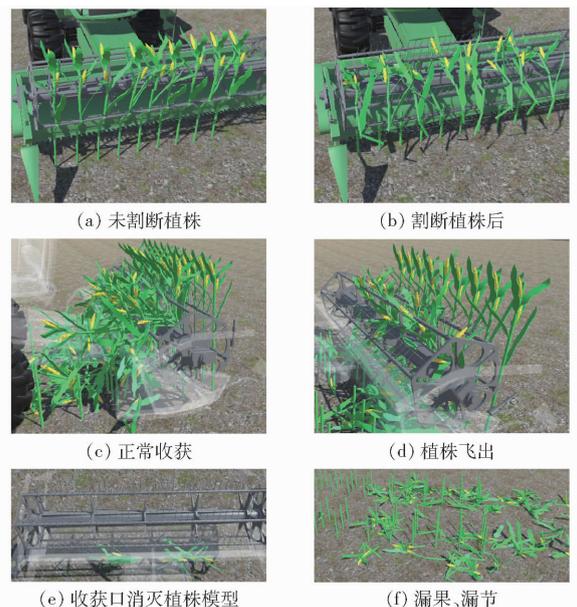


图 10 虚拟收获仿真

Fig.10 Simulation of virtual harvest situation

真收获过程符合收获作业流程:首先拨禾轮先限制植株,然后割刀割断植株,接着植株被拨禾轮拽入割台由螺旋推运器送往收获口。正常收获状态如图10c所示,期间会出现漏果、漏节的情况(图10f)。收获机行进速度过高时,会出现植株被甩飞的情况(图10d)。试验表明,植株模型符合收获仿真需求,可用于收获机械作业行为及性能的仿真试验。

3.2.3 收获机行进速度和植株密度对漏果率的影响

图11为不同植株密度下收获机行进速度对漏果率的影响曲线。由图可见,漏果率随着行进速度的提高而快速下降,但速度超过0.385 m/s时下降缓慢,而且植株密度越高,漏果率下降越缓慢。仿真结果与文献[28-30]的结论一致。进一步方差分析表明,行进速度和植株密度均对收获机械的收获性能影响显著($P < 0.01$)。

4 结论

(1)借鉴有限元仿真分析方法,将植株茎秆分

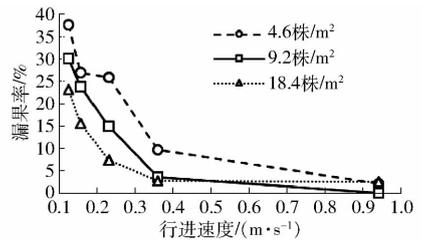


图11 不同行进速度下收获漏果率

Fig.11 Harvesting fruit loss rate at different travel speeds

成多个圆柱体,利用虚拟弹簧和虚拟墙构建植株模型,模拟其受力状态;同时,根据作业状况建立行为控制模型,分为不具备认知的应激行为与基于认知的反馈行为,根据行为推理规则形成交互规则,实现收获机械与植株之间的交互。

(2)多组收获仿真试验表明,虚拟环境建模可靠,农业装备模型运行正常,与植株交互效果真实;所构建仿真平台有效,漏果率随着收获机行进速度的提高而快速减小,植株密度越高,漏果率下降越缓慢,符合实际收获规律。

(3)构建的收获仿真平台可进行收获机械作业性能评估。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文,廖娟,邹湘军,等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20):1-14.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZOU Xiangjun, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):1-14. (in Chinese)
- [2] 臧宇,朱忠祥,宋正河,等. 农业装备虚拟试验系统平台的建立[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):70-74,127.
ZANG Yu, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Virtual experiment system platform for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):70-74, 127. (in Chinese)
- [3] 邹湘军,孙健,何汉武,等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9):1905-1909.
ZOU Xiangjun, SUN Jian, HE Hanwu, et al. The development and prospects of virtual reality[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9):1905-1909. (in Chinese)
- [4] ANNA P G S, FERNANDES P T, MONA L M D O, et al. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 124:474-492.
- [5] XIONG Juntao, LIN Rui, LIU Zhen, et al. The recognition of litchi clusters and calculation of picking point in nocturnal natural environment[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166:44-57.
- [6] ZHENG Y, CHENG B, HUANG Q, et al. Research on virtual driving system of a forestry logging harvester[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(2):667-682.
- [7] LIU F, LU Y, ZHANG S. A pragmatic system to support virtual assembly for military armored vehicle integrated transmission system in the virtual environment[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(2):1337-1354.
- [8] HSU C L, CHOU Y C, LI Y T, et al. Pre-operative virtual simulation and three-dimensional printing techniques for the surgical management of acetabular fractures[J/OL]. International Orthopaedics (SICOT), 2018:1-8. DOI: 10.1007/s00264-018-4111-8.
- [9] LOWELL V L, ALSHAMMARI A. Experiential learning experiences in an online 3D virtual environment for mental health interviewing and diagnosis role-playing: a comparison of perceived learning across learning activities[J]. Educational Technology Research and Development, 2019, 67(4):825-854.
- [10] JENSEN L, KONRADSEN F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training[J]. Education and Information Technologies, 2018, 23(4):1515-1529.
- [11] 邹湘军,李静,孙权,等. 采摘机械手虚拟设计与仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11):2748-2752.
ZOU Xiangjun, LI Jing, SUN Quan, et al. Research on picking manipulator virtual design and simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11):2748-2752. (in Chinese)

- [12] 罗陆锋, 邹湘军, 程堂灿, 等. 采摘机器人视觉定位及行为控制的硬件在环虚拟试验系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):39-46.
LUO Lufeng, ZOU Xiangjun, CHENG Tangcan, et al. Design of virtual test system based on hardware-in-loop for picking robot vision localization and behavior control[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):39-46. (in Chinese)
- [13] MEUSEL C, KIEU D, GILBERT S, et al. Evaluating operator harvest technology within a high-fidelity combine simulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148:309-321.
- [14] 董莹莹, 赵星, 王纪华. 基于 GPU 的虚拟植物生长的双尺度自动机模型实现方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):207-212.
DONG Yingying, ZHAO Xing, WANG Jihua. Rendering plants with dual-scale automaton model based on GPU [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):207-212. (in Chinese)
- [15] 李春晓, 孙瑞志, 戴佚舟, 等. 基于 Unity3D 的中国古代农耕虚拟场景智能展示平台[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1):308-314.
LI Chunxiao, SUN Ruizhi, DAI Yizhou, et al. Intelligent exhibition platform of Chinese ancient farming virtual scene based on Unity3D[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1):308-314. (in Chinese)
- [16] 吕萌萌, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于 Unity 3D 果树交互虚拟修剪技术及其实现[J]. 农机化研究, 2015, 37(4):7-11,35.
LÜ Mengmeng, GUO Xinyu, LU Shenglian, et al. Virtual interactive pruning operation on fruit tree based on Unity3D[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4):7-11, 35. (in Chinese)
- [17] 程博文, 郑一力, 黄青青, 等. 基于 Unity3D 的林木联合采育机虚拟训练系统研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4):1310-1318.
CHENG Bowen, ZHENG Yili, HUANG Qingqing, et al. Forestry felling & cultivation machine virtual training system based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4):1310-1318. (in Chinese)
- [18] CHENG Chunming, KANG Li, CAI Saihua, et al. Virtual display and interactive experience platform of farming culture based on Unity3D [J]. IFAC Papers On Line, 2018, 51(17):637-642.
- [19] 蒲明辉, 吴江. 基于 ADAMS 的甘蔗柔性体建模研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7):1930-1932.
PU Minghui, WU Jiang. Study on flexible sugarcane modeling based on ADAMS software[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(7):1930-1932. (in Chinese)
- [20] XIAO B X, GUO X Y, DD X H, et al. An interactive digital design system for corn modeling[J]. Mathematical Computer Modelling, 2010, 51(11-12):1383-1389.
- [21] 杜岳峰, 毛恩荣, 宋正河, 等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊):106-111.
DU Yuefeng, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):106-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s021&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.021. (in Chinese)
- [22] GALDOS M V, CERRI C C, CERRI C E P, et al. Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth [J]. Plant and Soil, 2010, 326(1-2):243-259.
- [23] 马彦华, 宣传忠, 武佩, 等. 玉米秸秆振动压缩过程的应力松弛试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19):88-94.
MA Yanhua, XUAN Chuanzhong, WU Pei, et al. Experiment on stress relaxation of corn stover during compression with assisted vibration[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19):88-94. (in Chinese)
- [24] 马云海, 张金波, 吴亚丽. 农业物料学[M]. 北京:化学工业出版社, 2015:26-28.
- [25] TANG Liang, SONG Weiguo, HOU Tiancheng, et al. Collision detection of virtual plant based on bounding volume hierarchy: a case study on virtual wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2):306-314.
- [26] 邹湘军, 罗锡文, 卢俊, 等. 虚拟环境下农业移动机器人行为及其仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(增刊2):551-553,562.
ZOU Xiangjun, LUO Xiwen, LU Jun, et al. Modeling for behavior and simulation of agriculture mobile robot in virtual environment[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(Supp.2):551-553, 562. (in Chinese)
- [27] 罗陆锋, 邹湘军, 卢清华, 等. 采摘机器人作业行为虚拟仿真与样机试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):34-42.
LUO Lufeng, ZOU Xiangjun, LU Qinghua, et al. Virtual simulation and prototype test for behavior of robot in picking process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):34-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180504&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.004. (in Chinese)
- [28] 贺俊林, 佟金, 胡伟, 等. 辊型和作业速度对玉米收获机摘穗性能的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3):46-49.
HE Junlin, TONG Jin, HU Wei, et al. Influence of snapping roll type and harvesting speed on 4YW-Q corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3):46-49. (in Chinese)
- [29] 陈进, 宁小波, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):87-91,86.

- CHEN Jin, NING Xiaobo, LI Yaoming, et al. Fuzzy adaptive control system of forward speed for combine harvester based on model reference[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):87-91, 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141014&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.014. (in Chinese)
- [30] 袁建宁, 李显旺, 张晓文, 等. 梳脱式收获机设计理论的研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2):38-44.
YUAN Jianning, LI Xianwang, ZHANG Xiaowen, et al. Research on design theory of comb-type harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(2):38-44. (in Chinese)
- [31] 杜岳峰, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 1-5.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):1-5. (in Chinese)
- [32] 丛宏斌, 李明利, 李汝莘, 等. 4YQK-2 型茎秆青贮打捆玉米收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10):96-100.
CONG Hongbin, LI Mingli, LI Ruxin, et al. Design of 4YQK-2 combine harvester for corn and straw ensilage [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10):96-100. (in Chinese)
- [33] 齐自成, 张进凯, 邵长敏, 等. 中小型穗茎兼收玉米联合收获机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 25-29.
QI Zicheng, ZHANG Jinkai, SHAO Zhangmin, et al. Design and test of small and medium spike stalk corn combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5):25-29. (in Chinese)
- [34] 杜岳峰, 毛恩荣, 朱忠祥, 等. 两行玉米收获机割台设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2):22-26.
DU Yuefeng, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of two row corn harvester header [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):22-26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s205&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.005. (in Chinese)
- [35] 明博, 谢瑞芝, 侯鹏, 等. 2005—2016 年中国玉米种植密度变化分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11):1960-1972.
MING Bo, XIE Ruizhi, HOU Peng, et al. Changes of maize planting density in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):1960-1972. (in Chinese)

(上接第 354 页)

- [20] 史智佳, 吕玉, 臧明伍, 等. 质地多面剖析法测定模式下取样规格对质构参数的影响[J]. 肉类研究, 2012, 26(10): 26-29.
SHI Zhijia, LÜ Yu, ZANG Mingwu, et al. Effects of sample specifications on results of determination of texture profile analysis parameters of sausages[J]. Meat Research, 2012, 26(10):26-29. (in Chinese)
- [21] 夏秀芳, 孔保华, 郭园园, 等. 反复冷冻-解冻对猪肉品质特性和微观结构的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 982-988.
XIA Xiufang, KONG Baohua, GUO Yuanyuan, et al. Effect of freeze-thawing cycles on the quality properties and microstructure of pork muscle[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3):982-988. (in Chinese)
- [22] 李龙, 彭彦昆, 李永玉, 等. 基于纹理和梯度特征的苹果伤痕与果梗/花萼在线识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11):328-335.
LI Long, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Online identification of apple scarring and stems/calyxes based on texture and edge gradient features[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):328-335. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181139&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.039. (in Chinese)
- [23] 李大华, 赵相飞, 许亮, 等. 基于纹理特征与 HSI 空间的苹果识别与标定[J]. 图学学报, 2016, 37(5):688-693.
LI Dahua, ZHAO Xiangfei, XU Liang, et al. Apple identification and calibration based on the texture characteristics and HSI space[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5):688-693. (in Chinese)
- [24] 付小环, 胡军华, 李家春, 等. 应用近红外光谱技术对茯苓药材进行定性定量检测研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(2):280-286.
FU Xiaohuan, HU Junhua, LI Jiachun, et al. Qualitative and quantitative detection of *Poria cocos* by near infrared reflectance spectroscopy[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(2):280-286. (in Chinese)
- [25] 宋雅迪, 袁亚宏, 岳田利, 等. 基于红外光谱技术的高渗酵母快速鉴别方法[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11):212-220.
SONG Yadi, YUAN Yahong, YUE Tianli, et al. Rapid discrimination of osmophilic yeasts based on infrared spectroscopic techniques[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(11):212-220. (in Chinese)
- [26] BURGESS C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2):121-167.
- [27] SÁNCHEZ V D A. Advanced support vector machines and kernel methods[J]. Neurocomputing, 2003, 55(1-2):5-20.