

5-15-2020

A New Interactive Simulation Method for Virtual Tape Measurement

Dongjin Huang

1. Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China; ;2. Shanghai Engineering Research Center of Motion Picture Special Effects, Shanghai 200072, China;

Chenfeng Jiang

1. Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China; ;2. Shanghai Engineering Research Center of Motion Picture Special Effects, Shanghai 200072, China;

Xianglong Wang

1. Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China; ;2. Shanghai Engineering Research Center of Motion Picture Special Effects, Shanghai 200072, China;

Linhui Gu

1. Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China; ;2. Shanghai Engineering Research Center of Motion Picture Special Effects, Shanghai 200072, 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.

A New Interactive Simulation Method for Virtual Tape Measurement

Abstract

Abstract: The virtual tape measurement is an extremely important process in the industrial training systems, and the fidelity of the measurement depends on the stability of the grasp and the accuracy of the tape measure. *Combined with the virtual hand, a new interactive simulation method for the virtual tape measurement is proposed and applied to the wind-driven generator alignment training simulation system. The fusion of the geometric rules and physical rules improves the grasping judgment method, and the quaternion adjusts the grasp gesture. Based on the 3D algorithm, the tape width uneven is solved by optimizing the vertex setting to generate a smooth ruler.* The experimental results show that our method is effective, and could greatly improve the virtual training effect with the accurate and natural grasping and the realistic tape simulation result.

Keywords

Virtual training, Virtual measurement, Grasp judgment, Tape simulation

Recommended Citation

Huang Dongjin, Jiang Chenfeng, Wang Xianglong, Gu Linhui. A New Interactive Simulation Method for Virtual Tape Measurement[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 856-865.

一种新的虚拟卷尺测量交互仿真方法

黄东晋^{1,2}, 蒋晨凤^{1,2}, 王祥龙^{1,2}, 顾琳慧^{1,2}

(1. 上海大学上海电影学院, 上海 200072; 2. 上海电影特效工程技术研究中心, 上海 200072)

摘要: 虚拟卷尺测量是工业培训系统中重要的工序, 其交互仿真的逼真度主要取决于抓取的稳定性和卷尺建模的精确性。结合虚拟手, 提出一种新的虚拟卷尺测量交互仿真方法, 并应用到风力发电机对中培训仿真系统中。通过融合几何规则和物理规则改进抓取判断方法, 并利用四元数调整抓取姿态。在三维 Bresenham 算法的基础上, 通过优化顶点设置解决宽度不均等问题, 实现虚拟尺条的平滑伸缩。实验结果表明, 该方法是有用的, 抓取准确自然, 卷尺仿真逼真, 能够大大提高虚拟培训效果。

关键词: 虚拟培训; 虚拟测量; 抓取判断; 卷尺仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 05-0856-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0597

A New Interactive Simulation Method for Virtual Tape Measurement

Huang Dongjin^{1,2}, Jiang Chenfeng^{1,2}, Wang Xianglong^{1,2}, Gu Linhui^{1,2}

(1. Shanghai Film Academy, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motion Picture Special Effects, Shanghai 200072, China)

Abstract: The virtual tape measurement is an extremely important process in the industrial training systems, and the fidelity of the measurement depends on the stability of the grasp and the accuracy of the tape measure. Combined with the virtual hand, a new interactive simulation method for the virtual tape measurement is proposed and applied to the wind-driven generator alignment training simulation system. The fusion of the geometric rules and physical rules improves the grasping judgment method, and the quaternion adjusts the grasp gesture. Based on the 3D algorithm, the tape width uneven is solved by optimizing the vertex setting to generate a smooth ruler. The experimental results show that our method is effective, and could greatly improve the virtual training effect with the accurate and natural grasping and the realistic tape simulation result.

Keywords: Virtual training; Virtual measurement; Grasp judgment; Tape simulation

引言

目前, 虚拟现实已经被国家列为智能制造核心信息设备领域的关键技术之一, 越来越多的工业企

业将虚拟现实作为发展重点, 用以改造提升传统的生产方式。按照应用场景分, “虚拟现实+工业生产”主要包括产品设计、运维巡检、远程协作、操作培训和数字孪生 5 个方面, 其中操作培训又是这 5 类中应用最多的一种方式。例如, Carlson 等^[1]设计了虚拟装配训练系统, 并验证了系统的有效性及虚拟部件色彩对培训效率的影响; Wu 等^[2]设计了变电站二次回路虚拟测量仿真系统, 减少仪器损害



收稿日期: 2018-09-06 修回日期: 2019-02-15;
基金项目: 国家自然科学基金(61402278), 上海市自然科学基金(14ZR1415800);
作者简介: 黄东晋(1982-), 男, 浙江温州, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟现实、计算机图形学、物理仿真等。

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

的成本提高培训效率; 张力匀等^[3]提出一种基于虚拟现实的维修时间预计方法, 并应用于民用飞机维修拆卸任务的时间估计; 张波等^[4]设计了船舶消防训练仿真系统, 改进实际训练的不足; Barata 等^[5]将虚拟现实技术应用到电力电气方面, 帮助他人创建虚拟维护培训。近些年, 有部分研究员通过引入虚拟手改进虚拟行为特点, 使操作更符合人们的认知习惯。例如: 蔡娟娟等^[6]提出一种适用于虚拟制造环境的虚拟手自主行为构造方法, 实现虚拟手在复杂零件表面较自然的抓握; Chen 等^[7]结合触觉提出了一种虚拟装配技术, 并根据零件类别设计了手势和手形; 熊巍等^[8]提出一种识别层次化交互手势与建模方法, 有效增加虚拟装配环境中的用户体验。潘康俊^[9]针对不可预测性的工作环境, 提出一种数据手套和步进电机组合方式的灵巧手主从控制方法。虚拟现实技术为工业培训系统提供更加安全的学习环境, 避免了实际培训的高危险性, 且提高了培训的质量。

在实际的工业培训期间, 卷尺测量是不可或缺的工序, 除了上文提到的变电站相关培训、设备运维巡检等, 在隧道监控量测、建筑装修等培训中都需要用到卷尺。但是, 在当前的虚拟培训系统中, 对于虚拟测量的仿真方法研究较少。本文结合虚拟手提出一种新的虚拟卷尺测量仿真方法。要满足虚拟测量的培训效果, 则面临 2 个关键性问题: 如何精确地抓取和使用卷尺等工具、如何逼真地模拟卷尺尺条的自由伸缩。

针对上述 2 个问题, 本文在利用基本几何体分解复杂物体的基础上添加物理因素改进已有的抓取判定规则, 提高抓取的精确性, 并结合四元数调整抓取姿态, 使其更符合实际的操作方式。同时, 基于三维 Bresenham 算法, 提出一种适用于三维空间的任意宽度直线生成算法, 模拟了卷尺尺条的伸缩, 条带平滑且宽度均匀。本文通过对比实验验证了该方法的有效性, 并成功地应用到风力发电机对中虚拟培训系统中。

1 相关研究工作

虚拟测量交互仿真主要包含 2 个关键的技术点: 如何以自然姿态抓取和操作卷尺、如何实时伸缩卷尺的尺条。本文主要从这两方面对国内、外研究进行总结。

虚拟抓取技术: 对于虚拟手抓取的研究, 国外从 20 世纪 90 年代开始, 国内起步晚, 但近几年发展较迅速。人手与虚拟环境的交互大致分为两类: 手势控制^[7]和触碰抓取^[9-15], 其中触碰抓取更真实。针对触碰抓取判定规则, 研究人员从物理规则和几何规则两方面进行研究。基于物理规则的判定需要在虚拟环境中精确获得各手指施力的大小, 计算复杂度高, 运算效率低且容易造成反应延迟; 基于几何规则的判定简单直观, 有助于碰撞检测但易误抓。

基于几何的判定方法是由 Boulic 等^[10]利用多球体传感器的虚拟手研究抓取简单的几何模型; 之后, Ullmann 等^[11]通过识别手的不同状态, 结合各触点的位置制定抓取规则。研究人员不断改进基于几何的抓取判定方法, 李澍等^[12]实现未被抓取和被抓取时候的模型运动控制, 实现精确抓取简单凸几何模型, 不适宜抓取形状较复杂的对象; Suzuki 等^[13]通过精确检测用户指尖的位置再计算虚拟对象和指尖的位置关系, 开发一种裸手与虚拟对象交互的系统, 也不适合复杂形状; 杨晓文等^[14]提出一种基于有效阈值的抓取判定, 该方法对曲面物体抓取效果较差; 胡晨等^[15]利用简单形状分解复杂对象的方法, 较精确地实现稳定抓取复杂物体。

卷尺仿真技术: 对于虚拟卷尺的仿真, 国内外鲜有研究。虚拟卷尺仿真的关键在于模拟尺条自由伸缩。尺条仿真又可看作在三维空间实时生成一条有特定宽度的平滑线段。直线的生成算法主要有: DDA 算法、中点画线算法以及 Bresenham 算法, 3 种方法中 Bresenham 算法被认为是最有效的。Bresenham 算法最早是从二维笛卡尔坐标系上绘

制直线时提出的，屠晓明等^[16]在此基础上将该算法进行了三维推广。在实际应用中，所用线段通常有线宽和线型，现有方案主要有正方形刷子算法、线刷子算法和区域填充算法^[17]。正方形刷子算法会因重复地写像素造成效率低，而且线的终端易出现垂直或水平的现象。线刷子算法有效简单，但也容易出现粗细不均的现象。这 2 种方法在两线段拼接处都会出现间隙。区域填充算法则是用 Bresenham 算法计算出线段并画出闭合区域的边界，再进行填充，这种方法可以生成线宽均匀且可控的线段，但是相对复杂。现有对任意宽度直线生成算法的研究主要在二维层面，不完全适用于三维虚拟空间的卷尺仿真。因此，如何在三维空间实时生成宽度均匀的线段是本文需要解决的重要问题。

2 虚拟抓取

虚拟抓取是虚拟手交互的重点研究问题，极大影响交互的真实感。抓取过程需要解决虚拟手建模、运动映射、抓取判定、碰撞检测等问题。本节重点阐述抓取判定。

2.1 抓取规则

基于几何的判定方法包含 2 个关键元素：手指接触物体的数量、位置，以及被抓对象的形状。本文在该判定方法^[15]的基础上添加物理因素进行判定，按照实际作业中工具的质量和材质设置物理属性。譬如，对于风力发电机对中培训仿真系统中，工具对应的物理属性设置如表 1 所示。

表 1 工具的物理属性设置
Tab. 1 Physial properties of tools

工具名称	重力/kg	阻力/ μ
卷尺 (10m)	0.496	0.1
13#棘轮扳手	0.45	0.1
30#开口扳手	0.62	0.1
液压扳手	23	0.25
千斤顶	3.3	0.15
激光对中仪	1.0	0.15
测量单元 S.M	0.455	0.15
地脚调整垫片	0.2	0.1

虚拟手的抓取过程如图 1 所示，当触碰到虚拟工具时，先判断被触碰对象的重力是否在人单手承重范围内，再根据本文制定的抓取规则进行判断，从而实现较符合实际的稳定抓取。

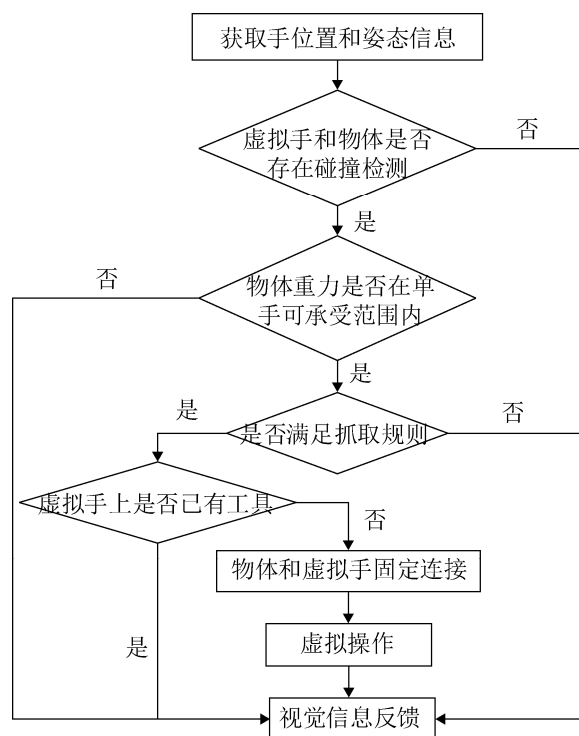


图 1 虚拟手抓取流程
Fig. 1 Virtual hand grasping process

具体的抓取判定规则如下：

规则 1：处理基本几何体，规定绝大多数长方体至少有 3 个触点且至少有一对触点的法矢夹角要超过 90°，对厚度不足 5 mm 的扁状长方体要求至少有 2 个触点并且分别位于对立面；对于球体，规定球面上的所有触点不在同一个半球上；对于圆柱体，规定圆柱面的触点投影到底面后，形成的凸多边形能够包含底面的圆心或在棱边、顶面和底面的触点满足上述长方体的规则。

规则 2：处理复杂物体，分为 2 种情况：(1) 若所有或部分触点在同一基本几何体上，并满足规则 1 则判定为成功抓取，否则抓取失败。理念是：刚体连接，部分带动整体。(2) 若触点所在基本几何体数量多而分散，则利用力的传递性将受力集中于同一基本几何体，再利用情况 1 判定，满足则抓

取, 不满足则利用规则 3 融合物理规则进行判定。

规则 3: 由于物理变形计算量非常大, 本文抓取物体设为刚性物体, 通过手指正压力与摩擦力的相互约束关系判别虚拟手与物体的关系, 在广义六维力空间中, 对物体受力分析, 判断力和力矩是否平衡。各触点正压力近似相等, 正压力 $F_N = k\Delta x$, 其中 k 为近似肌肉弹性形变系数, Δx 为碰撞检测所得的穿透量; 摩擦力 $f = \mu F_N$, μ 为初始设定的最大静摩擦系数, 从而判断各触点的作用力是否可以克服重力, 可以克服则结合力矩进行确认, 否则直接判定为不可抓取。力矩的判定是以任意一个触点为基点, 根据力矩公式 $M = F \times L$ 计算其余触点到该基础点的力矩情况, F 为矢量力, L 是从手指触点到基点的距离矢量, 满足合力矩为零则判定为可抓取, 否则抓取失败。

2.2 姿态调整

本文采用四元数旋转的方法对符合抓取规则的工具进行姿态调整, 使其更贴近实际操作。四元数旋转相比矩阵旋转和欧拉旋转, 优势在于防止万向节锁现象。但四元数旋转不直观, x , y , z 轴的变化并不表示相应角度的转动。为了解决该问题, 使用一个表达式和欧拉旋转进行转换。假设:

$$q = ((x, y, z), w) = (v, w) \quad (1)$$

式中: v 为向量; w 为实数。给定一个欧拉旋转 (X, Y, Z) , 其对应的四元数为:

$$\begin{cases} x = \sin\left(\frac{Y}{2}\right)\sin\left(\frac{Z}{2}\right)\cos\left(\frac{X}{2}\right) + \cos\left(\frac{Y}{2}\right)\cos\left(\frac{Z}{2}\right)\sin\left(\frac{X}{2}\right) \\ y = \sin\left(\frac{Y}{2}\right)\cos\left(\frac{Z}{2}\right)\cos\left(\frac{X}{2}\right) + \cos\left(\frac{Y}{2}\right)\sin\left(\frac{Z}{2}\right)\sin\left(\frac{X}{2}\right) \\ z = \cos\left(\frac{Y}{2}\right)\sin\left(\frac{Z}{2}\right)\cos\left(\frac{X}{2}\right) - \sin\left(\frac{Y}{2}\right)\cos\left(\frac{Z}{2}\right)\sin\left(\frac{X}{2}\right) \\ w = \cos\left(\frac{Y}{2}\right)\cos\left(\frac{Z}{2}\right)\cos\left(\frac{X}{2}\right) - \sin\left(\frac{Y}{2}\right)\sin\left(\frac{Z}{2}\right)\sin\left(\frac{X}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

本文将公式(1)~(2)作为工具的姿态调整方程, 对手中的物体状态叠加角度差值。首先, 设置物体的旋转中心, 再用欧拉角的形式设定物体在手中的期望姿态角, 并将该姿态角转化成四元数输出, 该方法修正了传统转换方法的角度局限问题。

3 虚拟卷尺模拟

虚拟卷尺仿真的逼真程度与尺条的实时平滑生成有很大关系。我们提出一种新的算法模拟卷尺测量, 交互方式贴近实际操作。

3.1 三维 Bresenham 直线算法

以二维 Bresenham 算法为基础, 将三维直线投影到两个坐标平面上, 从而把二维 Bresenham 算法推广至三维^[18-19]。具体算法如下:

假设三维直线的像素坐标为 (x, y, z) , 其中 x 是已知的, 为了获得 y 坐标和 z 坐标, 分别把直线投影到 xoy 平面和 xoz 平面并计算。例如, 一条三维空间上的直线朝 z 方向进行投影, 可得位于 xoy 平面上的一条二维直线。设直线方程为: $y = kx + b$ 。其中, k 为直线的斜率, b 为 y 轴的截距。根据直线的两端点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 可得:

$$\begin{cases} k = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1) \\ b = y_1 - kx_1 \end{cases} \quad (3)$$

由公式(3)可计算出 Δx 对应的增量 $\Delta y = k\Delta x$ 或得到指定 Δy 对应的 $\Delta x = k\Delta y$ 。

设直线上任意一点坐标为 (x_i, y_i) , 则该直线上的下一点坐标为 (x_{i+1}, y_{i+1}) , 其中 $x_{i+1} = x_i + 1$, $y_{i+1} = y_i + k$ 。在绘制直线时, $(x_i, y_{i,n})$ 表示最接近 (x_i, y_i) 的像素, $(x_{i+1}, y_{i+1,n})$ 表示最接近 (x_{i+1}, y_{i+1}) 的像素, 从而可以用它们表示直线上的点。

由二维 Bresenham 生成算法, 误差项 d 以及决策参数 e 可以表示成:

$$\begin{cases} d(y_{i+1}) = y_{i+1} - y_{i,n} \\ e(y_{i+1}) = y_{i+1} - y_{i,n} - 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

则

$$\begin{cases} y_{i+1}, n = y_{i,n} + 1, & e(y_{i+1}) \geq 0 \\ y_{i+1}, n = y_{i,n}, & e(y_{i+1}) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

同理, 三维直线投影在 xoz 平面上, e 为:

$$e(z_{i+1}) = z_{i+1} - z_{i,n} - 0.5 \quad (6)$$

则

$$\begin{cases} z_{i+1}, n = z_{i,n} + 1, & e(z_{i+1}) \geq 0 \\ z_{i+1}, n = z_{i,n}, & e(z_{i+1}) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

基于上述投影原理, 根据公式(4)~(7)可得到三维直线的决策参数, 算得空间直线上各点的坐标, 从而生成相应的三维直线。

3.2 基于三维 Bresenham 的卷尺生成算法

现有的任意宽度直线生成算法可以绘制较平滑的直线, 但是在三维空间连续绘制折线, 尤其是直角折线, 容易产生宽度不均的问题。为了改善这个问题, 本文卷尺仿真引入“交点”并在三维空间中优化顶点的设置, 根据指定宽度设定一个包含 2 个或多个点的数组, 并在每 2 个点之间绘制平直连续的线, 通过改变宽度和填充图案来调整尺条样式, 主要包含 3 个关键步骤: 定义路径点、生成尺条、计算距离, 具体算法如下:

step 1: 按需定义路径点, 如图 2(a)所示。本文将被测物体的起始端及卷尺尺条末端作为顶点。

step 2: 把当前路径点作为起点, 得到朝下一路径点的方向, 再根据方向和宽度得到两侧的边缘点, 如图 2(b)所示。

step 3: 由 2 个边缘点和方向, 依照 Bresenham 算法在三维空间得到一组直线, 如图 2(c)所示。

step 4: 取前一路径点和新路径点同侧边缘的直线交点, 共 2 个, 如图 2(d)所示。在三维空间, 两条直线不一定相交, 但两条不平行的直线会得到唯一垂直于该直线的法线, “三维交点”的获取是以该法线为 Y 轴建立一个坐标系, 在 xoz 平面可得直线交点, 再得到两条直线上的“三维交点”。

step 5: 将 2 个边缘点和下一路径点的 2 个交点作为顶点, 连接顶点形成封闭区域, 再用区域填充算法对生成的区域进行填充, 如图 2(e)所示。

step 6: 计算卷尺的测量距离。本文按实际比例进行距离调整并实时显示两点间距, 假设两点坐标分别为 (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 公式如下:

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (8)$$

上述方法是以顶点去控制渲染尺寸和位置的条带, 得到宽度始终一致的平滑线段, 主要针对卷尺进行直线和折线的测量仿真。但是, 对于任意宽

度的曲线测量则需要结合 Bézier 曲线。目前已经把二阶几何连续闭合全凸曲线的插值方法用于模拟卷尺测量精确轨迹^[20]。给定点 P_0, P_1, \dots, P_n , Bézier 曲线的一般参数方程为:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} P_i (1-t)^{n-i} t^i = \binom{n}{0} P_0 (1-t)^n t^0 + \binom{n}{1} P_1 (1-t)^{n-1} t^1 + \dots + \binom{n}{n-1} P_{n-1} (1-t)^1 t^{n-1} + \binom{n}{n} P_n (1-t)^0 t^n, t \in [0, 1] \quad (9)$$

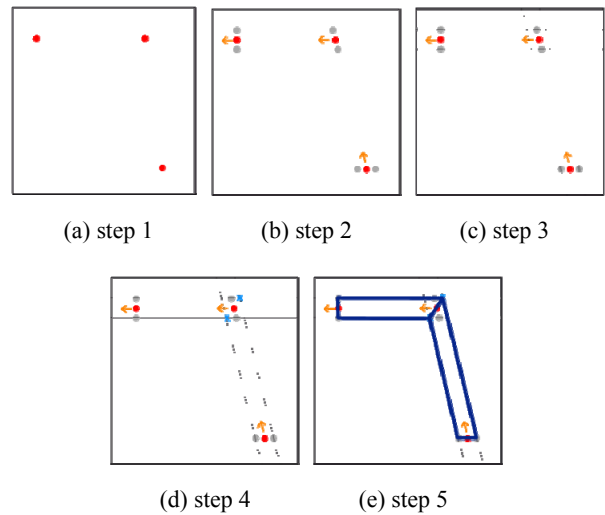


图 2 虚拟卷尺仿真算法
Fig. 2 Virtual tape simulation algorithm

三维空间中, 显示有线宽的曲线, 可以通过连续多段直线来模拟, 但是路径点设置和距离计算有所不同, 路径点除了被测物体的始末点外还需要增加控制点。例如: 圆周测量, 需要结合 3 阶 Bézier 曲线, 至少在待测物体表面顺时针设定 4 个路径点并设置圆半径, 从而计算出 8 个控制点。

计算任意阶数的曲线长度, 可以按照微积分思想, 把 Bézier 曲线的一般参数公式(9)中的参数 t 设为无限小, 从而求得曲线长度(公式(10)):

$$S = \sum (P_d(t)) * \Delta t \quad (10)$$

式中: $P_d(t)$ 表示 t 时刻的速度; Δt 为时间差。

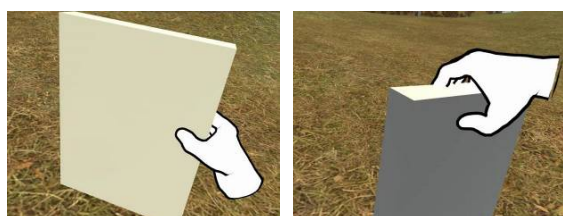
4 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性和实用性,先对两个主要技术:虚拟抓取和虚拟卷尺模拟分别进行实验;再将方法移植到风力发电机对中培训仿真系统进行验证。实验使用 Unity3D 引擎构建虚拟场景,并使用 Miiglove 多交互智能手套及 VIVE 跟踪器获取手指运动数据。

4.1 虚拟抓取仿真实验

4.1.1 算法对比

将本文判定方法与几何抓取判定、阈值抓取判定方法分别进行比较。图 3(a)和图 3(b)是与几何规则进行对比。针对 $0.1\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 0.3\text{ m}$, 50 kg , $\mu=0.15$ 的物体进行抓取测试。虽然满足长方体抓取规则,但它的重力远大于各接触点的作用力,不满足抓取规则 3,所以不被抓取。图 3(c)和图 3(d)是与有效阈值角度规则进行对比,当抓取含有曲面的物体时,本文方法判定更准确,因不满足规则 1 中球体规则,所以不被抓取。



(a) 几何规则^[15]抓取起来 (b) 本文规则不抓取



(c) 阈值规则^[14]抓取起来 (d) 本文规则不抓取

图 3 虚拟抓取结果对比

Fig. 3 Virtual grasp results comparison

4.1.2 实例验证

以风力发电机对中作业中的各类工具为例,进行抓取实验,按照表 1 设定的属性反复进行 50 次

抓取动作,抓取成功率如表 2 所示,抓取效果如图 4 和图 5 所示。图 4(a)不满足抓取规则 1 中对长方体的判定,抓取失败。图 4(b)满足规则 2,抓取成功。图 4(c)尺钩属于扁状长方体,满足规则 1,抓取成功。图 5 是姿态调整前后的对比图,合理的测量姿势为尺身垂直于手掌向下,尺钩朝向虎口处。

结果表明,虚拟手运用本文算法抓取效果良好,准确率较高,交互操作及姿势贴近实际。

表 2 虚拟手抓取测试

Tab. 2 Grasping tests

工具	接触点含几何体个数	直接抓取	判断正确	判断错误	成功率/%
卷尺	1~2	42	47	3	94
棘轮扳手	1	39	46	5	92
开口扳手	1~2	42	48	3	96
千斤顶	1~2	41	46	4	92
激光对中仪	2~3	38	43	6	86
测量单元	2~4	44	44	6	88
调整垫片	1	33	49	1	98



(a) 不能抓取 (b) 可以抓取 (c) 尺条被拉动

图 4 卷尺抓取判定情况

Fig. 4 Judgment of tape grasping



(a) 调整前 (b) 调整后

图 5 抓取姿态调整

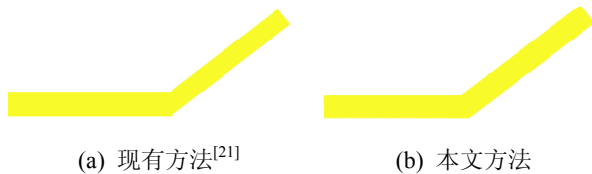
Fig. 5 Adjustment of grasping gesture

4.2 虚拟测量仿真实验

4.2.1 算法对比

本文算法与其他线宽直线生成算法进行比较,

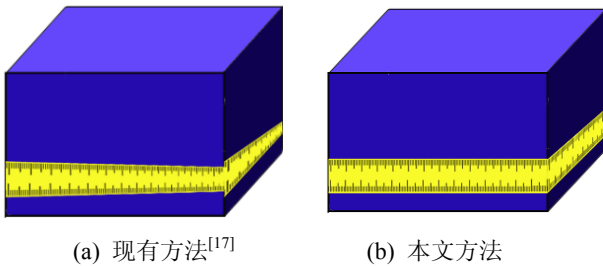
结果如图 6 和图 7 所示。图 6(a)是结合 DDA 直线算法和 Wu 直线反走样算法,虽然改进了边缘反走样效果,但是折角处会改变线宽。图 7(a)算法折角处会形成头粗尾细的现象。图 6(b)和图 7(b)为本文算法,优化顶点设置,很好地解决了已有方法生成折线时粗细不均和折角处有缺口的现象。



(a) 现有方法^[21] (b) 本文方法

图 6 折线生成结果对比

Fig. 6 Polyline generation results comparison



(a) 现有方法^[17] (b) 本文方法

图 7 虚拟卷尺仿真结果对比

Fig. 7 Virtual tape simulation results comparison

4.2.2 测量交互方式

按照操作习惯设置了 2 种操作方式,数据均在尺身上实时显示。

图 8 是利用方式一,即通过左手食指和拇指同时按动指控模块来模拟拉尺钩,再用右手拉动尺身进行测量;图 9 是利用方式二,即通过碰撞检测将尺钩固定于被测物体的起点处,拉动尺身进行测量。

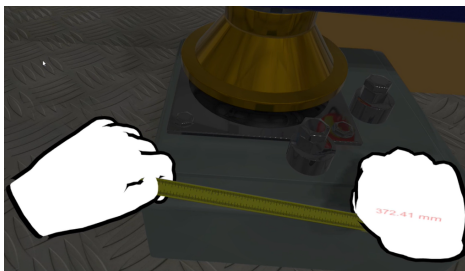


图 8 利用方式一进行虚拟测量的结果

Fig. 8 Result of virtual measurement using mode 1



图 9 利用方式二进行虚拟测量的结果

Fig. 9 Result of virtual measurement using mode 2

4.3 系统验证

卷尺测量应用在各个领域,以某型风力发电机为对象,研发了一套风力发电机对中培训仿真系统,进一步验证本文方法的有效性和实用性。

4.3.1 培训系统架构

该系统由硬件和软件两部分组成,系统架构如图 10 所示,将虚拟手的状态信息输入到 Unity3D 引擎,实现与虚拟环境的交互。图 11 是风力发电机对中作业的整体操作流程,其中多个环节需要进行虚拟测量。

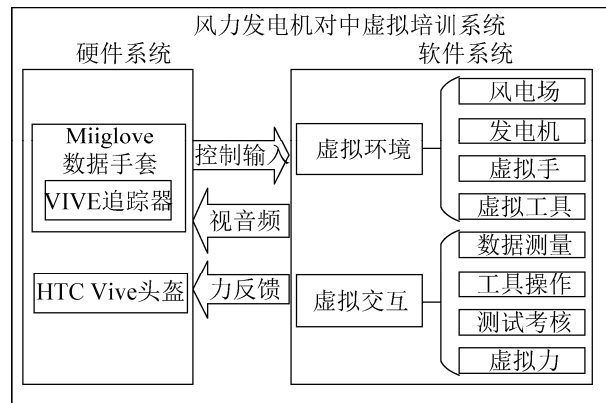


图 10 系统架构

Fig. 10 System framework

4.3.2 系统评估

为验证该方法在实际应用中的有效性,我们对某电气集团的 18 名新手操作人员(实地培训过 0 次或 1 次)和 2 名专业操作人员进行测试和观察。图 12 是用户使用虚拟培训系统的现场情形。

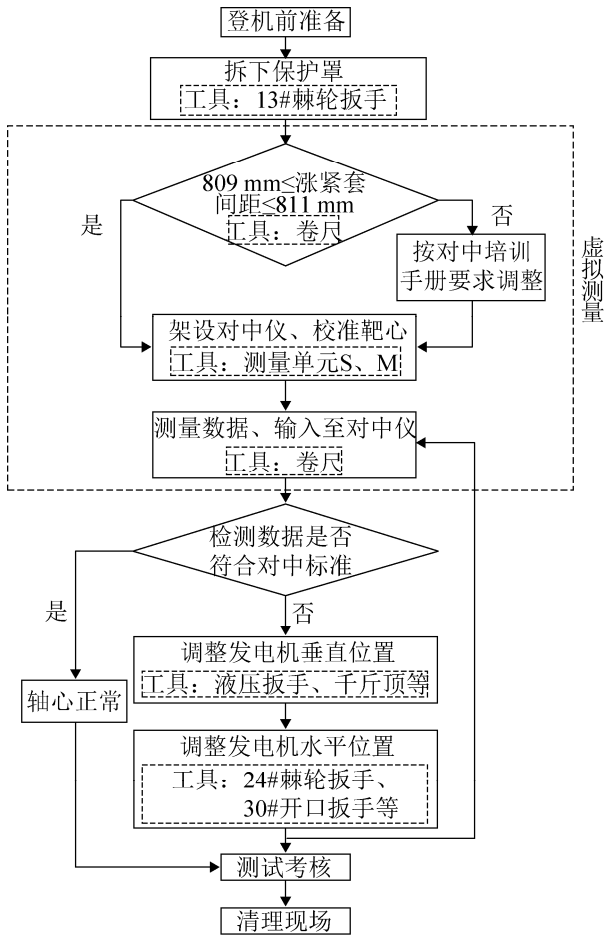
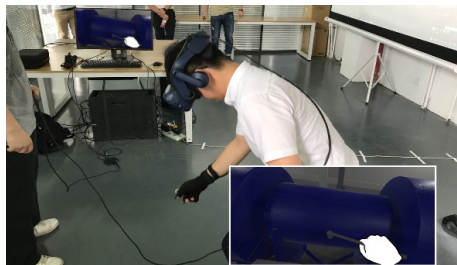


图 11 系统操作流程

Fig. 11 System operation flow



(a) 实验室测试



(b) 企业培训中心

图 12 虚拟对中培训的现场情形

Fig. 12 Environment of virtual alignment training

操作人员在培训完成后填写主观评价调查问卷, 主要针对抓取是否准确、卷尺仿真是否逼真、培训系统是否实用等方面, 问卷结果如表 3 所示。

表 3 实验者主观评价问卷调查结果

Tab. 3 Subjective evaluation questionnaire results

测试项目	很好	好	一般	差	很差
场景逼真度	20	0	0	0	0
画面流畅度	18	2	0	0	0
虚拟抓取真实感	17	2	1	0	0
抓取姿态吻合度	18	2	0	0	0
卷尺尺条逼真度	20	0	0	0	0
卷尺操作真实感	16	3	1	0	0
力触觉平稳度	17	2	1	0	0
总体交互性	19	1	0	0	0
培训系统实用性	19	1	0	0	0

结果表明, 虚拟手在对中作业中抓取效果良好, 卷尺测量逼真, 交互贴近实际。操作人员表示该系统比传统培训有更深切的体验, 有助于培训教学。

5 结论

本文提出了一种新的虚拟测量交互仿真方法, 并应用于风力发电机对中培训仿真系统。本文方法主要包含:

(1) 融合几何规则和物理规则改进已有的抓取判定方法, 并结合四元数调整虚拟手的抓取姿态, 使其更符合实际操作中的抓取方式。

(2) 以三维 Bresenham 算法为基础, 提出一种适用于三维空间的任意宽度直线的生成算法, 用来模拟卷尺尺条的自由伸缩, 通过优化顶点设置解决了宽度不均的问题, 大大提高对中培训虚拟交互的自然性。

下一步, 我们将进一步完善本文算法, 研究力反馈机制, 在卷尺拉动过程中生成逼真的虚拟力, 继续提高培训系统中虚拟测量的真实感。

参考文献:

- [1] Carlson P, Peters A, Gilbert S B, et al. Virtual Training: Learning Transfer of Assembly Tasks[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (S1077-2626), 2015, 21(6): 770-782.

- [2] Wu Y, Huang J, Xu Z, et al. Research and development of virtual measurement system of substation secondary simulation circuit[C]// 2016 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). Shanghai, China: IEEE, 2016: 444-448.
- [3] 张力匀, 刘毅, 刘佳. 基于虚拟现实的维修时间预计方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(8): 1383-1392.
Zhang Liyun, Liu Yi, Liu Jia. Maintenance Time Prediction Using Virtual Reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(8): 1383-1392.
- [4] 张波, 孙俊, 商蕾, 等. 基于 HMD 的船舶虚拟消防训练系统设计及实现[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(1): 43-52.
Zhang Bo, Sun Jun, Shang Lei, et al. Design and Realization of Ship Virtual Fire Training System Based on HMD[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 43-52.
- [5] Barata P N A, Filho M R, Nunes M V A. Consolidating Learning in Power Systems: Virtual Reality Applied to the Study of the Operation of Electric Power Transformers[J]. IEEE Transactions on Education (S0018-9359), 2015, 58(4): 255-261.
- [6] 蔡娟娟, 程成, Alhazmi Marwah, 等. 虚拟制造环境中虚拟手的行为构造[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(3): 499-507.
Cai Xianjuan, Cheng Cheng, Alhazmi Marwah, et al. Research on Behavior Simulation of Virtual Hand in Virtual Manufacturing Environment[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(3): 499-507.
- [7] Chen J, Yuan Y, Yang J. Research on virtual assembly technology based on haptic senses[C]// 2015 10th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). Cambridge, United Kingdom: IEEE, 2015: 725-728.
- [8] 熊巍, 王清辉, 李静蓉. 面向虚拟装配的层次化交互手势技术[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 78-84.
Xiong Wei, Wang Qinghui, Li Jingrong. A Hierarchical Method of Interaction Hand Gesture for Virtual Assembly[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2016, 44(1): 78-84.
- [9] 潘康俊. 基于数据手套的灵巧手主从控制[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(7): 2600-2607.
Pan Kangjun. Master-slave Control Method of Dexterous Hands Based on Data Glove[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2600-2607.
- [10] Boulic R, Rezzonico S, Thalmann D. Multi-finger manipulation of virtual objects[C]//Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. London, United Kingdom: ACM, 1996: 67-74.
- [11] Ullmann T, Sauer J. Intuitive virtual grasping for non haptic environments[C]//Proceedings the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Hong Kong, China: IEEE, 2000: 373-457.
- [12] 李澍, 刘毅, 王念东. 虚拟环境中的多手指抓取操作技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(10): 1728-1733.
Li Shu, Liu Yi, Wang Niandong. Research on Multi-finger Grasping in Virtual Environment[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(10): 1728-1733.
- [13] Suzuki S, Suzuki H, Sato M. Grasping a virtual object with a bare hand[M]// ACM SIGGRAPH 2014 Posters. Vancouver, Canada: ACM, 2014: 1.
- [14] 杨晓文, 张志纯, 况立群, 等. 基于虚拟手的人机交互关键技术[J]. 计算机应用, 2015, 35(10): 2945-2949.
Yang Xiaowen, Zhang Zhichun, Kuang Liqun, et al. Key Technologies of Human Computer Interaction Based on Virtual Hand[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(10): 2945-2949.
- [15] 胡晨, 张学聃, 马惠敏. 适应物体形状的虚拟手抓取[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(5): 663-670.
Hu Chen, Zhang Xuedan, Ma Huimin. Shape-adaptive Virtual Hand-grasping Method[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(5): 663-670.
- [16] 屠晓明, 刘雄伟. 直线 Bresenham 生成算法的三维推广[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(9): 779-782.
Tu Xiaoming, Liu Xiongwei. Generalizing Bresenham's Algorithm to 3D Straight-Line[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(9): 779-782.
- [17] 尹洪松, 唐莉萍, 曾培峰. 基于 Bresenham 的任意宽度直线生成算法[J]. 微型机与应用, 2015, 34(16): 24-26.
Yin Hongsong, Tang Liping, Zeng Peifeng. Arbitrary Width Line Generation Based on Bresenham Algorithm[J]. Information Technology and Network Security, 2015, 34(16): 24-26.
- [18] 邓卫燕, 陆国栋, 陈龙. 基于直线特性和投影原理的三维直线生成算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007,

- 41(4): 626-629.
- Deng Weiyang, Lu Guodong, Chen Long. New 3D linegenerating algorithm based on line property and projecting[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(4): 626-629.
- [19] Au C, Woo T. Three dimensional extension of Bresenham's Algorithm with Voronoi diagram[J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2011, 43(4): 417-426.
- [20] 尤磊, 冯岩, 郭建伟, 等. 二阶几何连续的闭合全凸曲线的构建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(12): 2216-2224.
- You Lei, Feng Yan, Guo Jianwei, et al. Construction of Closed, Global Convexity and G2 Continuity Curve[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(12): 2216-2224.
- [21] 骆朝亮, 谢忠. 一种快速的多线宽直线反走样算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 188-190.
- Luo Chaoliang, Xie Zhong. Rapid algorithm for anti-aliasing of arbitrary width line drawing[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(21): 188-190.