

文章编号: 1003-501X(2015)04-0049-07

空间方位向量与包围体策略结合的 3D 模型拾取

邹英强, 姚剑敏, 林志贤, 郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350116)

摘要: 3D 模型的拾取在三维人机交互、交互式图像系统图形拾取方面均有重要应用, 目前普遍的拾取算法均需利用鼠标操作才能实现, 在拾取计算过程中常存在一系列矩阵求逆的问题, 且对 3D 模型构造的拾取包围体过于单一, 影响拾取的有效性、便捷性和精确性。本文提出了一种基于空间方位向量与包围体策略结合的 3D 模型拾取算法。首先, 用实体交互笔代替鼠标, 在下位机解算交互笔空间姿态信息, 将交互笔空间方位向量实时映射到虚拟场景世界坐标空间并生成一条拾取射线; 其次, 采用形状判定阈值策略, 对 3D 模型不同模块的外形特征实时建立针对具体模块的盒状包围体和球状包围体; 最后, 通过拾取射线与具体包围体的相交检测, 判定是否拾取了具体模块。实验中以拾取具体 3D 模型为例, 相比于经典射线与单一包围体的拾取方法, 本文所提出的算法对模块的拾取速度提高了 16.98%, 对 3D 模型相邻模块边缘的拾取误判率从单一包围体的 71.26% 降低到 12.80%, 操作便捷有效。

关键词: 3D 模型拾取; 实体交互笔; 方位向量; 包围体

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2015.04.009

3D Model Picking Based on Spatial Orientation Vector and Bounding Volume Strategy

ZOU Yingqiang, YAO Jianmin, LIN Zhixian, GUO Tailiang

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The pickup of 3D model is importantly applied in terms of 3D human-computer interaction, and the graphics pickup of interactive graphics system. Currently, the picking algorithm must count on mouse. There are a series of inverse matrix problems in the process of picking algorithm, such as too much simple pickup-surrounded of the structure of 3D model, which influence the effectiveness, convenience and veracity of pickup. A 3D model packing algorithm is presented based on spatial orientation vector and bounding volume strategy. Firstly, spatial attitude information of interactive pen is solved in the slave computer space using entity interactive pen instead of a mouse, then map it into the virtual scene space to make a pick-ray. Secondly, adopt the strategy of shape determination threshold, for 3D model, according to the shape characteristics of different modules, which establish box-shaped bounding and spherical bounding real-time. At last, we judge if it pickup the specific modules or not through the intersection detection between pick-ray and specific bounding. We make specific 3D Model as an example in our experiment, with the using of this algorithm which is pointed out in this paper, the rate of pickup rises 16.98%. What's more, the pickup misdiagnosis rate of module edges of 3D model is lowed down to 12.80% from 71.26% when it uses the single bounding. The operation is effective and convenience.

Key words: 3D model picking; entity interactive pen; orientation vector; bounding volume

收稿日期: 2014-07-28; 收到修改稿日期: 2014-10-19

基金项目: 国家 863 重大专项(2012AA03A301, 2013AA030601); 国家自然科学基金(61101169, 61106053); 福建省自然科学基金(2011J01347)资助项目

作者简介: 邹英强(1989-), 男(汉族), 福建南平人。硕士研究生, 主要研究工作是虚拟现实技术、图像处理。E-mail: lzx2005000@163.com。

<http://www.gdgc.ac.cn>

0 引言

随着虚拟现实技术的深入研究与应用, 真实世界中的物体可以形象逼真的通过屏幕显示出来。为了更好的对虚拟场景的物体进行操作, 虚拟现实系统需要用户通过输入设备与系统进行交互, 如对物体进行移动、旋转, 其前提是通过拾取方法来定位场景中的操作对象。随着对人机交互系统实时性要求的提高, 虚拟场景中模型也日益复杂, 需要系统提供更加快速的拾取操作以及更高的拾取精度, 以满足系统交互的实时性需求^[1]。

目前拾取算法主要有传统的基于三维空间的射线拾取算法、OpenGL 选择机制拾取法、基于图像空间的拾取算法、以及基于视口空间的拾取算法等^[2-4]。以上拾取方法在拾取速度、精度、人机交互便捷性等方面都存在一定程度的局限性^[5], 屏幕拾取点的获取需要通过鼠标点击操作完成, 并且在拾取计算过程中常存在一系列矩阵求逆的问题。另外, 为了加快拾取速度和提高拾取精度, 很多算法都结合了包围体拾取方法。虚拟场景的 3D 模型一般是由很多特征小模块按照具体分布组合而成的, 在拾取具体模块部位时, 为提高拾取精度, 应尽量减小相邻模块部位对本次拾取的干扰。目前常见方法中对于同一个 3D 模型的不同模块部位构造的拾取包围体过于单一, 拾取精度不高^[6-7]。

在人机交互系统中, 交互工具有鼠标、键盘、交互笔等, 而笔式交互技术作为一种重要的人机交互技术, 近年来受到人们广泛的重视。目前已有体积小、精度好的 MEMS 惯性传感器被安装在交互笔上, 为交互笔的运动跟踪和空间姿态解算提供了新的方法和思路^[8]。在解算空间方位姿态的基础上, 实体交互笔可以通过姿态传感器定位自身空间方位^[9-11], 可用于虚拟现实场景中实现物体拾取操作。作为新一代优秀的自然人机交互设备, 人机交互笔在笔式交互软件开发平台、面向教学的笔式办公套件、面向文字输入的神笔马良系统的开发、医疗虚拟手术操作等领域都将得到更广泛的应用。

针对经典射线拾取方法的拾取速度不高及固有的局限性, 同时为提高对虚拟场景中 3D 模型相邻模块的拾取精度, 摒弃经典鼠标拾取算法, 本文提出了一种基于空间方位向量与包围体策略结合的 3D 模型拾取算法, 对 3D 模型的拾取速度和拾取精度都得到一定程度的提高。

1 三维拾取算法及其问题分析

1.1 三维拾取算法原理

虚拟场景中的三维模型需要经过一系列的变换才能从计算机屏幕中显示出来, 如图 1 所示, 物体通过模型矩阵、视图矩阵、透视投影矩阵、视口矩阵最终投影到屏幕中进行显示。

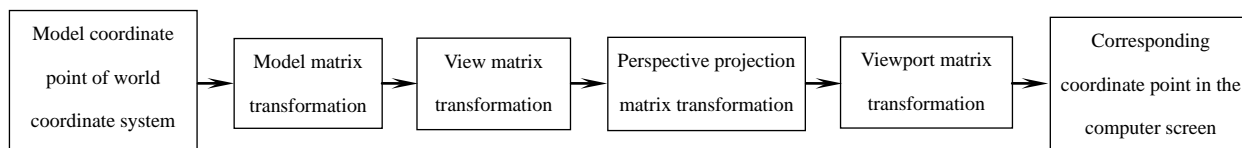


图 1 三维模型投影到计算机屏幕流程图

Fig.1 Flow chart of 3D model projected onto a computer screen

三维拾取是图 1 的逆过程, 通过鼠标获取到的屏幕坐标点, 通过一系列的透视投影逆变换, 最终转化为虚拟场景世界坐标系中的点, 进而控制三维物体^[12]。

1.2 经典射线拾取法

射线拾取算法是一类 3D 拾取经典算法^[13], 其基本原理是获取屏幕坐标点 A , 通过视口矩阵逆变换转化为图形系统的视口坐标点 A' 。假设视图空间原点 O 与世界空间原点 O 重合, 最终世界空间中的点 P 与鼠标在屏幕上的拾取点 A 之间的关系可以表示为 $P = M^{-1} \cdot E^{-1} \cdot P^{-1} \cdot V^{-1} \cdot A$, 其中 M^{-1} 为模型变换逆矩阵, E^{-1} 为视图变换逆矩阵, P^{-1} 为透视投影变换逆矩阵, V^{-1} 为视口变换逆矩阵。从该表达式可知, 世界空间射线 OP 的获取需要经过一系列的矩阵求逆运算, 鼠标每次点击不同的点时, 都要重新计算这些逆矩阵, 实际上这些矩阵并非总是可以逆的, 并且求解逆矩阵计算量较大。另外经典射线法与其他拾取算法的屏幕

拾取点均通过点击鼠标获得, 在对不同外形特征模块构造单一包围体时易导致误判。

2 基于空间方位向量射线法的 3D 模型拾取

2.1 空间方位向量射线法

对于经典射线拾取法, 最终目的是要在与 3D 模型同一坐标空间中(世界坐标空间)生成一条有方向的射线 OP , 射线方位向量通过鼠标拾取屏幕上的点, 在不同空间变换后并通过一系列矩阵求逆运算得到。为了避免通过鼠标拾取时需要处理一系列的矩阵求逆运算, 在实体交互笔的基础上, 本方法提出一种基于空间方位向量射线法的 3D 模型拾取算法, 算法流程图如图 2 所示。具体过程是在下位机中实时计算实体交互笔的空间方位向量, 将空间方位向量实时映射到虚拟场景世界坐标空间中, 由于传入的空间方位向量在世界坐标空间中, 所以无需像鼠标拾取一样要把方位向量变换到世界坐标空间中。射线长度参数可以根据虚拟场景预设固定值和可变值^[14], 利用长度参数和传入的方位向量构造拾取射线。

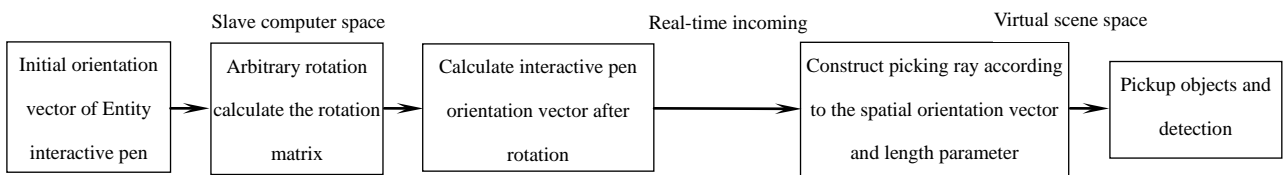


图 2 算法流程示意图

Fig.2 Algorithm flow diagram

实体交互笔由 MEMS 空间姿态传感器、解算空间姿态信息的下位机处理器组成。下位机计算交互笔方位向量与虚拟场景中拾取物体计算是并行的, 因此下位机独立计算空间方位向量的时间对整体拾取时间并不影响。由于采用了实体交互笔的人机交互方式, 整个拾取过程不涉及矩阵求逆运算, 使得整个拾取过程快速、便捷、自如。

2.2 算法实现步骤

1) 下位机解算实体交互笔空间方位向量

本方法采用实体交互笔确定拾取射线的方向。在现实空间坐标与虚拟空间坐标一一映射下, 假设交互笔绕 z 轴旋转的角度为 α , 绕 y 轴旋转的角度为 θ , 绕 x 轴旋转的角度为 γ , $R_z(\alpha)$ 为绕 z 轴旋转 α 的旋转矩阵, $R_y(\theta)$ 为绕 y 轴旋转 θ 的旋转矩阵, $R_x(\gamma)$ 为绕 x 轴旋转 γ 的旋转矩阵, 则交互笔综合旋转矩阵 $R = R_x(\gamma) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\alpha)$ 。假设实体交互笔初始方位向量为 $Q(x, y, z)$, 实体交互笔旋转后方位向量为 $H(x, y, z)$, 则 $H(x, y, z) = R \cdot Q(x, y, z)$ 。更新后的方位向量 $H(x, y, z)$ 可直接用于构建拾取射线, 从而避免了拾取点在不同空间的一系列变换。

2) 构建虚拟场景拾取射线

在虚拟场景世界坐标系中定义一条射线 OP , 以原点 $O(0,0,0)$ 为射线的起点, 该射线可表示为

$$P(x, y, z, t) = O(0,0,0) + D(x, y, z) \cdot t \quad (1)$$

其中: $D(x, y, z)$ 为射线的三维方位向量, 由下位机实时解算确定, t 为射线长度参数。实体交互笔开始工作时, 以 $Q(x, y, z)$ 初始方位向量为参考值, 转过一定角度, 此时虚拟场景世界空间中的点 P 可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_x(\gamma) R_y(\theta) R_z(\alpha) \begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{bmatrix} \cdot t \quad (2)$$

式(2)表明, 该算法只需要确定实体交互笔旋转的空间方位向量和一个预设的长度参数, 就可以在虚拟场景世界空间构建拾取射线, 与经典射线法对比, 无需鼠标获取屏幕拾取点 A , 也完全避免了拾取过程中一系列的矩阵求逆运算。拾取过程中, 用实体交互笔代替了鼠标, 拾取射线的生成比经典射线法简单快速, 并且下位机计算射线方位向量的时间并不包含在整个拾取时间之内, 有效提高了拾取速度。

2.3 拾取速度和精度缺陷

3D 模型由大量的三角形网格组成,虽然空间方位向量法与经典射线法相比,节省了计算矩阵求逆的时间,但是在射线与具体 3D 模块的拾取过程中,射线需要遍历虚拟场景中的每个模块,即遍历每个模块的每个三角形。为了避免射线在拾取具体模块时还需要依次对前面序列的模块一一遍历检测的缺陷,可以对具体的模块构造包围体,转化为射线与包围体的相交检测^[15]。在 3D 模型中,对不同模块构造包围体会对射线的拾取精度造成不同程度的影响。本方法将对已有包围体策略进行改进,以提高拾取精度。

3 空间方位向量射线法与包围体策略的结合

3.1 拾取包围体策略

复杂 3D 模型中三角形数量庞大,遍历过程耗时长,严重影响射线拾取速度。包围体策略是一种基于射线拾取策略的、更加快速简便的拾取策略。常见包围体类型有 spheres、DOPs、AABB, OBB 等^[16]。可以通过不同的方法构造包围体^[17]。如图 3 为几种包围体示意图,其中图 3(a)表示对 3D 模型构建 AABB 包围体,图 3(b)表示对 3D 模型构建球状包围体,图 3(c)表示对 3D 模型构建 DOPs 包围体。将空间方位射线拾取法与包围体策略相结合,只需判断射线的拾取点是否在包围体内部,即可判断是否拾取到具体物体。采用这种策略虽然会牺牲拾取的精度,但是在很大程度上提高了拾取速度。

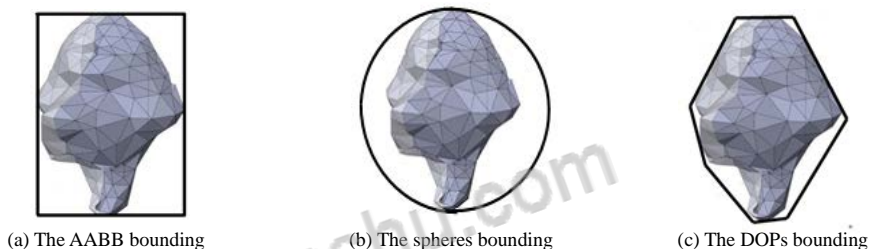


图 3 几种包围体示意图

Fig.3 Schematic diagram of several bindings

三维虚拟场景中 3D 模块形状各异,部分外形近似箱体,部分外形近似球体。目前很多方法在构造包围体时没有根据 3D 模块的具体外形特征,构造符合外形特征的包围体,只是对场景中所有的 3D 模块构造单一的盒状包围体或者球状包围体。过于单一化的构造方案导致相邻包围体之间存在重叠区域,最终导致射线拾取过程中存在误判干扰现象。如图 4(a)3D 人体模型、图 4(b)拖车模型所示,利用传统方法对 3D 模型不同模块构造单一的包围体,相邻模块之间存在很大的重叠区域,当射线拾取模块边缘时,这些重叠区域对拾取精度会造成很大影响。

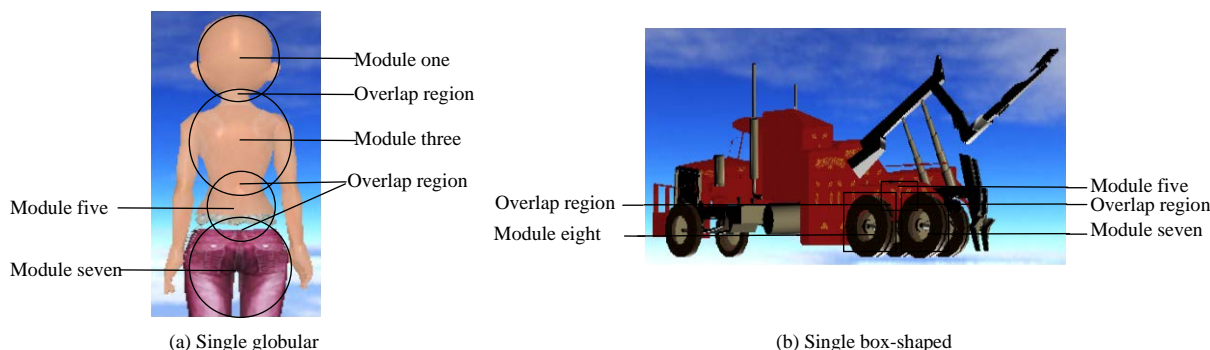


图 4 单一包围体

Fig.4 Boundings of single

以下根据 3D 模型中不同模块形状判定阈值实时构建盒状包围体和球状包围体,以提高射线拾取精度。

3.2 形状判定阈值策略

假设 3D 模块在 x 轴方向上的半径为 X , 在 y 轴方向上的半径为 Y , 在 z 轴方向上的半径为 Z 。本方法

通过设定一个合理的形状判定阈值 T ,对三个方向上的半径两两判断,如果同时满足 $|X - Y| \leq T$, $|Y - Z| \leq T$, $|Z - X| \leq T$, 则表明三个方向上的半径长度相差较小, 以此判定模块近似球体, 为模块构建球状包围体, 包围球的半径定义为三个方向上半径长度最长的半径, 保证模块上所有点都在包围球内部。若上述式子中至少有一个条件不满足, 则表明模块近似盒状, 为模块构造盒状包围体。

如图 5(a)、(b)所示, 采用形状判定阈值法, 根据模块外形特征构建符合其形状的包围体, 相邻模块之间的重叠区域大大减少, 有效降低了射线拾取过程中受相邻模块的干扰。

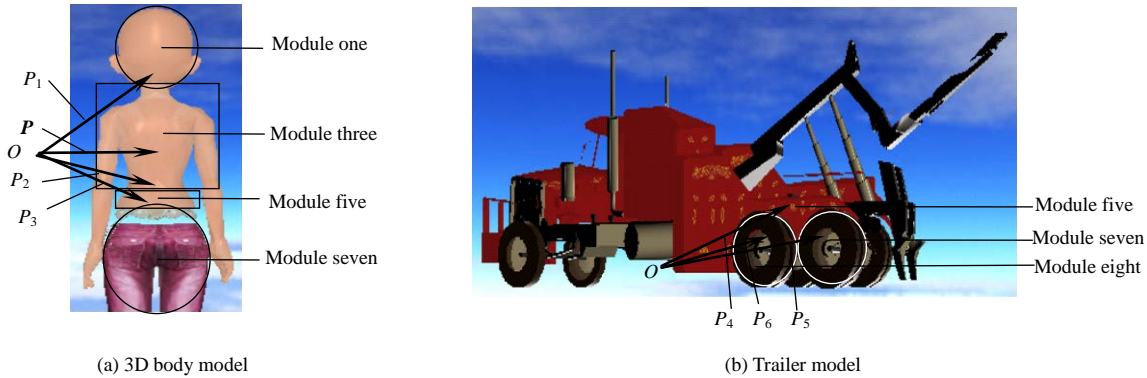


图 5 形状判定阈值法

Fig.5 Shape determination threshold method

3.3 射线与包围体结合判断

本方法利用实体交互笔空间方位向量生成拾取射线, 拾取射线可以绕 O 点自由转动。射线上的点 P 可以随着交互笔的空间方位变化实时生成射线 OP 。拾取射线与具体模块包围体相交检测时, 如果射线上的点 P 落在包围体内部, 则表明射线与包围体相交, 也即表示拾取到该模块。在图 5(a)的 3D 人体模型中, 表明射线 OP_1 拾取到模块 1, 射线 OP_2 拾取到模块 3, 射线 OP_3 拾取到模块 5。在图 5(b)的拖车模型中, 表明射线 OP_4 拾取到模块 5, 射线 OP_5 拾取到模块 7, 射线 OP_6 拾取到模块 8。

4 实验结果

4.1 拾取速度对比

对 3D 模型随机抽取几个模块进行实验, 采用鼠标经典射线拾取法和空间方位向量射线法拾取模块, 分别对 3D 人体模型和拖车模型的部分模块拾取十次, 求出在两种方法下的平均拾取时间及拾取速度提高率, 如表 1 所示。

表 1 3D 模型拾取时间和提高率

Table 1 3D model picking time and raise rates

Method	Model	Module 0	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4
Classic ray method t/ms	3D body	0.061 451 41		0.068 053	0.096 452	0.047 314 297
	Trailer	0.515 413 536	0.220 0102 87		0.157 923 761	
Orientation vector ray method t/ms	3D body	0.053 945 4		0.056 040 63	0.081 518 72	0.039 083 18
	Trailer	0.432 220 79	0.184 137 045		0.137 327 94	
Raise rates/%	3D body	14.71		17.65	15.48	17.39
	Trailer	16.14	16.31		13.04	
Method	model	Module 5	Module 6	Module 7	Module 8	
Classic ray method t/ms	3D body		0.062 894	0.068 259		
	Trailer	0.073 097 547		0.798 320 825	0.204 559 173	
Orientation vector ray method t/ms	3D body		0.049 754 94	0.056 375 89		
	Trailer	0.063 691 609		0.651 876 2	0.156 560 728	
Raise rates/%	3D body		20.89	17.41		
	Trailer	12.87		18.34	23.46	

拾取时间以毫秒为单位,从表 1 可以得出采用本方法的拾取时间明显减少,对各模块拾取速度提高率求平均值,得出采用本方法拾取物体的速度提高了 16.98%。

4.2 拾取精度效果

随机拾取 3D 模型的某个具体模块进行实验,拾取精度如表 2 和表 3 所示。

图 5(a)、(b)与图 4(a)、(b)相比,采用射线与形状判定阈值策略相结合的方法,相邻模块之间的重叠区域大大减少,拾取具体模块的误判干扰率大大降低。从表 2 可知,拾取 3D 人体模型模块 7 时,受相邻模块 5 的干扰大大降低。从表 3 可知,拾取拖车模型模块 5 时,受相邻模块 8 的干扰大大降低。采用本方法对 3D 模型相邻模块边缘的拾取误判率从单一包围体的 71.26%降低到 12.80%。

表 2 3D 人体模型拾取精度对比

Table 2 3D body model picking accuracy comparison		
Pickup module seven	Pickup times	Misjudgement interference
Single bounding volume method/(times)	207	153
Threshold determination method/(times)	207	23

表 3 拖车模型拾取精度对比

Table 3 Trailer model picking accuracy comparison		
Pickup module five	Pickup times	Misjudgement interference
Single bounding volume method/(times)	207	142
Threshold determination method/(times)	207	30

5 结 论

本文提出并实现了一种基于空间方位向量射线法和改进包围体策略对 3D 模型各个模块进行拾取的方法,该方法用实体交互笔代替鼠标拾取操作,比经典射线法及传统包围体方法对 3D 模型的拾取速度更快,对相邻模型的拾取精度更高。在不需要鼠标拾取及对一系列矩阵求逆运算的情况下,本方法的拾取速度提高了 16.98%,并且对相邻模型边缘的误判操作明显减少,提高了拾取物体的精度,对相邻模块边缘的拾取误判率从单一包围体的 71.26%降低到 12.80%。该方法适合于虚拟场景中对 3D 物体的有效拾取,并取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 岳文理,王坚,戴毅茹.交互式图形系统中图形拾取算法的研究与应用[J].机电产品开发与创新,2006,40(6):3-4.
YUE Wenli, WANG Jian, DAI Yiru. Research on Algorithm for Picking up Graph in Interactive Graphics Systems [J]. **Development & Innovation of Machinery & Electrical Products**, 2006, 40(6): 3-4.
- [2] 常君明,冯頔,陈庆,等.快速交互图像拾取系统的设计与开发[J].舰船电子工程,2011,31(11):120-121.
CHANG Junming, FENG Di, CHEN Qing, et al. Design and Development of Fast Interactive Pick-up Image System [J]. **Ship Electronic Engineering**, 2011, 31(11): 120-121.
- [3] 李奇峰,郭同德.三维场景地面坐标拾取的射线投影算法[J].测绘科学技术学报,2014,31(1):93-96.
LI Qifeng, GUO Tongde. The Algorithm of Ground Coordinates Picking in 3D Scene Based on Projection of Ray[J]. **Journal of Geomatics and Technology**, 2014, 31(1): 93-96.
- [4] WU Junsheng, JIANG Wenhe. Research on smart pick of three-dimension grid data [C]// **Computer Application and System Modeling (ICCASM)**, Xi'an, China, 2010: (V5-537)-(V5-540).
- [5] 王剑,陆国栋,谭建荣.三维场中图形对象的拾取方法[J].机械,2004,31(7):29-31.
WAGN Jian, LU Guodong, TAN Jianrong. The selection method of the graphics at 3D graphic browser [J]. **Machinery**, 2004, 31(7): 29-31.
- [6] XIONG Yumei, CHEN Yimin. An improved bounding box algorithm to collision detection for virtual environment [J]. **International Journal of Digital Content Technology and its Applications**(S1975-9339), 2011, 5(2): 231-236.
- [7] 尚雷明,李廷,何桃,等.基于最小包围盒策略的人体辐射剂量评估方法研究[J].核科学与工程,2014,34(1):82-84.
SHANG Leiming, LI Ting, HE Tao, et al. A Method for Radiation Does Assessment of Human Body Based on Minimum Bounding Box [J]. **Nuclear Science and Engineering**, 2014, 34(1): 82-84.

- [8] RYANA, JOSEPHAP. A wireless, compact, multi-user sensor system for interactive dance [C]// **Proceedings of the 2006 international conference on new interfaces for musical expression**. Paris, France, 2006: 134-139.
- [9] 宋静. 基于磁强计、加速度计和陀螺原理的姿态测试算法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011: 40-47.
SONG Jing. The attitude test algorithm based magnetometers, accelerometers and gyros [D]. Taiyuan: North University of China, 2011: 40-47.
- [10] Zimmerman Aaron. State Estimation Filtering Algorithms for Vehicle Attitude Determination using a Dual-Arc Accelerometer Array and 3-Axis Rate Gyroscopes [D]. Rochester Institute of Technology, 2011: 3-11.
- [11] 丁策, 戴明, 李嘉全, 等. 机载光电陀螺稳定平台的伪微分反馈控制 [J]. 光电工程, 2012, **39**(10): 128-134.
DING Ce, DAI Ming, LI Jiaquan, *et al.* The PDF Control of Airborne Photoelectric Gyro Stabilized Platform [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2012, **39**(10): 128-134.
- [12] 贺涛. 计算机图形学人机交互中三维拾取方法的研究 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2013(16): 79-80.
HE Tao. In Computer Graphics Human-computer Interaction Research of 3D Pick up Method [J]. **Computer Programming Skills & Maintenance**, 2013(16): 79-80.
- [13] 姚继权, 李晓豁. 计算机图形学人机交互中三维拾取方法的研究 [J]. 工程设计学报, 2006, **13**(2): 117-119.
YAO Jiquan, LI Xiaohuo. Research on 3-dimension pick-up of human-computer interaction on computer graphics [J]. **Journal of Engineering Design**, 2006, **13**(2): 117-119.
- [14] VANACKEN L, GROSSMAN T, CONINX K. Multimodal selection techniques for dense and occluded 3D virtual environments [J]. **International Journal of Human-Computer Studies**(S1071-5819), 2009, **67**(3): 237-255.
- [15] WANG Yao, HU Yanjuan, FAN Jiuchen. Collision Detection Based on Bounding Box for NC Machining Simulation [J]. **Physics Procedia**(S1875-3892), 2012, **Part A**(24): 247-252.
- [16] 伍航. 基于虚拟现实的髋关节模拟置换手术关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 33-36.
WU Hang. Key Technologies Of Simulation System for Hip Arthroplasty Based on Virtual Reality [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013: 33-36.
- [17] 许熠. 基于混合包围盒的碰撞检测算法的优化研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 11-17.
XU Yi. Optimization based on hybrid bounding box for collision detection algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013: 11-17.

~~~~~  
( 上接第 48 页 )

- [9] 钟权, 周进, 吴钦章, 等. 基于 Hough 变换和边缘灰度直方图的直线跟踪算法 [J]. 光电工程, 2014, **41**(3): 89-94.  
ZHONG Quan, ZHOU Jin, WU Qinzhang, *et al.* A Method of Line Tracking Based on Hough Transforms and Edge Histogram [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2014, **41**(3): 89-94.
- [10] 刘晓俊. 一种基于图像的近距离大偏角圆形目标的高效检测方法: 中国, 201310075019.8 [P]. 2013-06-19.
- [11] 吕洪赫, 姚振杰, 易卫东. 基于对称性的最小二乘拟合随机椭圆检测算法 [J]. 电子测量技术, 2011, **34**(5): 37-41.  
LÜ Honghe, YAO Zhenjie, YI Weidong. Randomly least square fitting elliptic detection algorithm based on symmetry [J]. **Electronic Measurement Technology**, 2011, **34**(5): 37-41.
- [12] DING Meng, WEI Li, WANG Bangfeng. Vision-based estimation of relative pose in autonomous aerial refueling [J]. **Chinese Journal of Aeronautics**(S1000-9361), 2011, **24**(6): 807-815.





论文写作，论文降重，  
论文格式排版，论文发表，  
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，  
英文翻译，提供全流程发表支持  
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：[http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

---