

文章编号:1671-1637(2012)02-0062-08

## 增强半虚拟现实座舱技术

汤 勇, 顾宏斌, 李 鹏

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:**为提高半虚拟现实座舱中用户视觉真实感与人-座舱交互性能,提出了一种增强半虚拟现实座舱技术,将手图像实时融合到虚拟座舱环境中,使用户能实时看到自己的真实手。通过肤色检测算法实时分割摄像机采集图像,应用改进的自适应加权立体匹配算法与视图变形算法对图像进行视点校正,通过虚实匹配与虚实融合将手图像无缝融合到虚拟环境中,为用户提供增强虚拟环境中的可视化图像。测试结果表明:增强半虚拟现实座舱技术方案中触觉与视觉反馈真实,在头盔式虚拟环境中用户交互能点击到的最小方块边长为8 mm。采用增强半虚拟现实技术方案完成座舱内典型交互动作的时间比传统数据手套方案与半虚拟交互方案平均分别降低约50%与18%,极大提高了人-座舱交互性能,可有效增强虚拟现实座舱系统实用性,并降低开发成本。

**关键词:**半虚拟现实座舱;人机交互;增强虚拟;手图像分割;虚实匹配;虚实融合

**中图分类号:**V214.14

**文献标志码:**A

## Augmented semi-virtual reality cockpit technology

TANG Yong, GU Hong-bin, LI Peng

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to enhance the visual sense of users and the interaction performance of human-cockpit system in the semi-virtual reality cockpit system, an augmented semi-virtual reality cockpit technology was presented, which incorporated a realistic view of hand into the virtual environments and made user see his own real hand in real time. The captured images by using camera were real-time segmented by skin color detecting algorithm. The segmented foreground images were rectified by using adaptive weighted stereo matching algorithm and view morphing algorithm. Hand images were seamlessly integrated into virtual environment by using virtual-real matching and virtual-real fusion methods, which can provide user with the visual images in augmented virtual environment. Experimental result shows that augmented semi-virtual reality cockpit technology make users feel true for the feedback of touch and vision. The smallest side length of the square clicked by users is 8 mm in head-mounted virtual environment. In augmented semi-virtual reality cockpit system, the average interaction time decreases by about 50% and 18% compared with traditional data glove method and semi-virtual reality method. The technology effectively improves the human-cockpit interaction performance of the system, enhances its practicability, and its developed cost decreases. 1 tab, 11 figs, 22 refs.

**Key words:** semi-virtual reality cockpit; human-computer interaction; augmented virtuality; hand image segmentation; virtual-real matching; virtual-real fusion

收稿日期:2011-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61039002);国家863计划项目(2007AA01Z306)

作者简介:汤 勇(1983-),男,湖南益阳人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事航空器运行品质与仿真技术研究。

导师简介:顾宏斌(1957-),男,江苏常州人,南京航空航天大学教授,工学博士。

**Author resumes:** TANG Yong (1983-), male, doctoral student, +86-25-84890755, tangyong159@gmail.com; GU Hong-bin (1957-), male, professor, PhD, +86-25-84893501, ghb@nuaa.edu.cn.

## 0 引言

半虚拟现实座舱<sup>[1]</sup>是在虚拟座舱<sup>[2]</sup>基础上发展而来的一类飞行模拟设备,座舱内所有用户可触摸与操纵的设备均采用实物,保证操作良好的触觉与力觉。座舱内外所有视景均采用计算机图形技术(Computer Generation Image, CGI)生成。与传统飞行模拟设备相比,半虚拟现实座舱的优点是设备体积小,通用性强,成本低廉,只需改变视景与部分硬件,就能实现不同机型的可重配置。这类仿真设备缺陷也较为明显,用户由于头盔显示器(Head Mounted Display, HMD)的限制,无法直接看到自己的手,因此,难以实现自然和谐的人机交互。综合已有技术方案,现有人机交互方式主要分为以下2种。

(1)数据手套方案。数据手套是虚拟现实领域应用最早的交互设备,应用广泛。Hosseini等研究了工业设备仿真培训系统,利用数据手套与图像渲染相结合的方法进行手部跟踪与交互<sup>[3]</sup>;任程等开发了虚拟手交互系统,采用数据手套实时采集手的运动数据,通过顶点混合方式实现了逼真的虚拟手视觉效果<sup>[4]</sup>。数据手套交互的原理是实时采集手姿态数据,并驱动三维虚拟手运动,以实现与真实手一致的图像。由于数据手套靠传感器、电缆、激振器等硬件实现数据采集与基本触觉反馈,存在结构复杂、沉重、累赘以及价格昂贵等缺点,导致交互过程中用户运动不灵活,影响真实触觉。

(2)计算机视觉方案。为解决数据手套存在的问题,近年来基于计算机视觉的手部跟踪与交互得到了迅速发展。O'hagan等研究了针对平面显示器的裸手手势识别系统,可进行屏幕目标的选择、平移、旋转、缩放以及重置等操作<sup>[5]</sup>;Tosas等通过视觉指尖检测与定位,实现了HMD环境中手指与虚拟键盘的交互<sup>[6]</sup>;Fang等研制了能够识别5000多个手势词的连续手语识别交互系统<sup>[7-8]</sup>。利用计算机视觉进行手交互不需要数据手套或其他限制运动的额外设备,因此,交互过程更加自然,充分体现了虚拟现实中以人为中心的交互特征。目前,这种交互方式有了大量成果与应用,但也存在算法复杂,开发难度高,约束条件强等不足,应用范围与实用性受到一定限制。

上述2种交互方案均采用手势位置信息驱动几

何模型手,也就是通过三维几何模型建模与绘制(Graphics-based Modeling and Rendering, GBMR)方式,利用OpenGL或DirectX图形驱动进行虚拟手建模与控制,对硬件图形加速性能以及建模都有很高要求。由于人手外形的复杂性以及不同人手的特定视觉特性,三维模型手的视觉效果并不理想。为克服GBMR方式中存在的问题,基于图像建模与绘制(Image-based Modeling and Rendering, IBMR)的技术得到了广泛发展与应用。增强虚拟技术<sup>[9]</sup>就是基于GBMR框架,利用基于图像的建模与绘制方法描述复杂对象,通过虚实融合图像,解决虚拟现实系统中逼真绘制与实时渲染间的矛盾。

在早期虚拟座舱系统开发过程中大多采用数据手套与电磁跟踪器作为人机交互的基本设备,如戴树岭等研制的虚拟仿真飞机座舱系统,采用HMD作为显示设备,在不改变系统硬件条件下可实现多种机型仿真,成本低,柔性强<sup>[10]</sup>,但因为缺少力觉与触觉反馈,交互性能不高。为解决上述系统中真实触觉与力觉缺失的问题,Salzmann等研究了一类半虚拟交互仿真系统,座舱中主要操作设备采用实物代替,以采集操作数据与提供触觉反馈<sup>[11]</sup>,对比试验表明这种方法确实提高了交互性能,但仍存在数据手套带来的束缚感与成本高等问题。为实现虚拟座舱系统中无接触的自然人机交互,周来等研究了基于计算机视觉的人-座舱交互系统,综合采用复眼阵列算法与手势识别算法,初步解决了手指近距、中距、远距定位问题以及和基本座舱的交互功能<sup>[12]</sup>,但其算法在精度与效率方面还存在矛盾,系统鲁棒性有待提高。除上述几种交互方式外,罗斌等研制了基于混合现实技术的座舱交互方案,采用整体实物座舱作为人机交互设备,座舱外视景由三维图形技术生成,座舱内视景则由布置于座舱内的多个摄像机实时拍摄的图像替代<sup>[13]</sup>。测试表明这种方案中人机交互自然,交互性能高,但由于虚实图像边界明显,用户沉浸感受到一定破坏,而且需要构建实物座舱,开发成本相对较高。

增强半虚拟现实座舱技术是在增强虚拟技术基础上,对虚拟座舱中视景图像进行增强,将摄像机拍摄到的用户手图像作为人手代理融合到虚拟环境中,使用户的视觉感受从完全虚拟图像变为虚实融合图像,为用户提供完全真实的视觉反馈,避免了对

手进行复杂几何建模与手势驱动,并可脱离数据手套的束缚实现裸手交互。

## 1 技术方案

增强半虚拟现实座舱的硬件结构见图 1。在 HMD 眼点附近安装 2 个摄像机,实时采集用户进行交互动作时的视频图像。用户在头盔中看到的虚拟座舱采用 GBMR 技术生成。交互过程中用户可触摸操纵的座舱部件均采用实物构建,并加装数据采集模块。实现过程中首先对摄像机采集的视频图像预处理,进行立体标定、手势分割以及视点校正,然后将手图像实时无缝融合到虚拟环境中,为用户提供可视化图像,硬件采集的操作信息驱动虚拟座舱中的操作部件动作,系统原理见图 2。

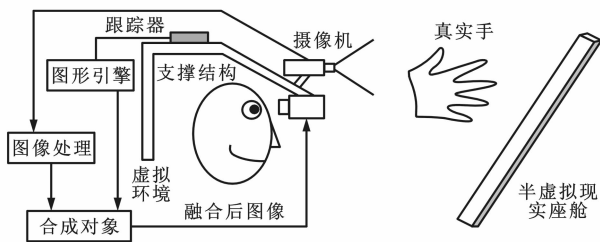


图 1 硬件结构

Fig. 1 Hardware structure

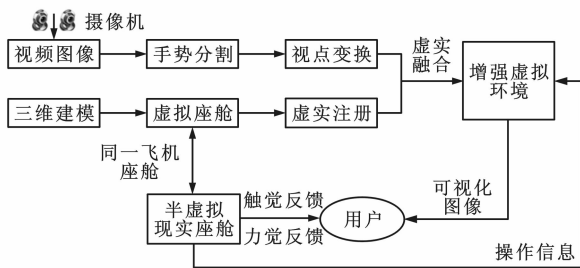


图 2 系统原理

Fig. 2 System principle

### 1.1 视频图像预处理

#### 1.1.1 摄像机立体标定与校正

摄像机安装在 HMD 两侧靠近眼点的位置,并尽量与眼点水平对齐,制作棋盘格标定模板,拍摄约 10 幅不同视点图像,采用 Zhang 的标定算法<sup>[14]</sup>对摄像机进行标定(MATLAB 标定工具箱提供算法与工具),消除安装误差及摄像机自身误差,保证图像平面极线平行,即 2 个摄像机水平对齐,为后续处理提供便利。

#### 1.1.2 手图像分割

采用徐战武等的肤色阈值分割方法<sup>[15]</sup>提取手图像,将摄像机采集的 RGB 色彩模型转换为 YCrCb 模型,再通过设定一定阈值遍历像素进行分

割。由于此算法只需对像素点进行一次遍历,因此,分割效率较高,但分割出的图像边缘易出现锯齿。为保证虚实融合效果,通过三次样条曲线拟合方法对分割出的手轮廓边缘进行拟合与平滑<sup>[16]</sup>,算法如下。

由三次样条函数拟合方法可知根据 4 个型值点  $u_1, u_2, u_3, u_4$  的值可以确定  $u_2, u_3$  之间的样条函数公式。根据这个公式与一定的步长,就可以插值出  $u_2, u_3$  之间的一系列点  $v_1, v_2, \dots, v_n$ 。依次用线段连接这些点,得到用折线段表示的拟合出来的样条曲线,见图 3。

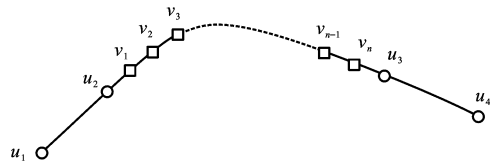


图 3 拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve

#### 1.1.3 视点校正

摄像机安装位置因 HMD 物理结构的限制无法与用户实际视点位置一致<sup>[17]</sup>,位置与视点间的偏差会对用户产生不良影响<sup>[18]</sup>,因此,有必要对摄像机进行视点校正,为用户提供更加合理的视图。摄像机经过标定处理,图像水平对齐后,可采用视图变形(View Morphing)算法<sup>[19]</sup>进行视图变形,得到新虚拟视点图像。View Morphing 算法是一种快速视图变形算法,可根据同一物体在不同视点的 2 幅图像,计算出两视点中间任意位置的虚拟视点图像,算法描述如下。

假定摄像机从世界坐标系位置  $C_1$  移动到位置  $C_2(C_x, C_y, 0)$ (括号内为其坐标,下同),焦距从  $f_1$  转换为  $f_2$ 。 $C_1, C_2$  处对应的投影矩阵  $\Pi_1, \Pi_2$  分别为

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Pi_2 = \begin{bmatrix} f_2 & 0 & 0 & -f_2 C_x \\ 0 & f_2 & 0 & -f_2 C_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设目标点  $Q(X, Y, Z)$  在  $C_1, C_2$  处摄像机上的投影像素点分别为  $p_1, p_2$ , 对其进行线性插值得

$$Sp_1 + (1-S)p_2 = S \frac{1}{Z} \Pi_1 Q + (1-S) \frac{1}{Z} \Pi_2 Q \quad (3)$$

$$\begin{cases} Sp_1 + (1-S)p_2 = \frac{1}{Z} \Pi_3 Q \\ \Pi_3 = S\Pi_1 + (1-S)\Pi_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S$  为插值因子。

由式(4)可以看出,图像像素点线性插值产生了新视图图像,投影矩阵为  $\Pi_1$  与  $\Pi_2$  的线性插值  $\Pi_3$ , 而对应的摄像机焦距  $f_3$  为

$$f_3 = S f_1 + (1 - S) f_2 \quad (5)$$

平行视图插值得到的中间视图可以看成摄像机沿着 2 个光学中心  $C_1$ 、 $C_2$  的连线进行平移,得到同一目标在新视点下的透视投影视图。此算法实现的前提是 2 幅图像间像素点的对应关系是已知的,或者可以通过手工标注控制点得到该对应关系。这显然无法满足交互过程中实时与自动化的要求,因此,本文首先通过立体匹配算法自动搜寻匹配点,得到左右图像间像素点的对应关系,再进行视图变形。

#### (1) 自适应权值立体匹配

图像立体匹配算法主要分为基于特征的匹配与基于区域的匹配。由于手图像内部肤色属于连续弱纹理区域,缺乏特征点,首先排除此匹配算法。Yoon 等提出的自适应权值立体匹配算法<sup>[20]</sup>,在参考图像与目标图像上计算权值,可有效抑制图像对应不确定性,与其他立体匹配算法相比,匹配效果与效率都显著提高,因此,本文采用此算法进行匹配,并根据手图像特点以及系统中实时性要求,加入约束改进算法,以提高匹配精度与速度。

Yoon 自适应权值立体匹配理论认为色度空间与距离空间的邻近性对权值的影响相互独立。设  $p$  为左参考图像上的 1 个像素点,  $q$  为  $p$  对应支持窗内的任意像素,则由  $p$ 、 $q$  色度差与距离差可计算出对应支持权值  $w$ 。同理可由右目标图像上与  $p$  点平行的 1 个像素点  $p'$  计算出对应支持权值  $w'$ 。对左右图像支撑窗口内的像素都进行对称加权处理,得到匹配点视差代价  $E_d(p, p')$  为

$$E_d(p, p') = \frac{w w' e(p, p')}{w w'} \quad (6)$$

式中:  $e(p, p')$  为像素相异性度量。

式(6)中引入  $e(p, p')$  的目的是为解决图像色度的不相似性在色度不连续处过大,像素间相异性不能简单用色度相异性度量的问题,因此,在像素相异性度量基础上引入截断阈值  $J$ , 即

$$e(p, p') = \min(\Delta\epsilon, J) \quad (7)$$

式中:  $\Delta\epsilon$  为像素  $p$  与像素  $p'$  的色度差(像素值差)。

在一定视差范围内按式(6)计算出所有视差代价  $E_d(p, p')$ , 待匹配点的实际视差就是当  $E_d(p, p')$  最小时所对应的视差值, 即

$$d' = \arg \min_{d \in L} [E_d(p, p')] \quad (8)$$

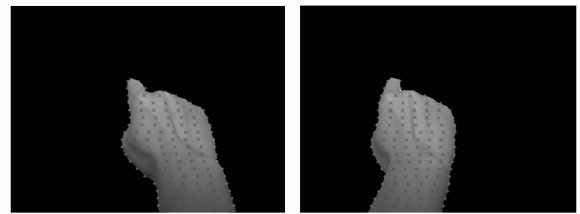
$$L = \{d_{\min}, \dots, d_{\max}\} \quad (9)$$

式中:  $d$  为  $p$  与  $p'$  之间的水平距离, 即两像素点视差;  $d'$  为待匹配点实际视差;  $L$  为视差范围。

在匹配过程中, 由于图像各点视差的不确定性,  $L$  取值范围大且为一固定值, 如果能针对特定匹配点选取特定  $L$ , 并将其限定某一可靠范围, 就能大幅减小计算量, 并提高匹配精度。在虚拟座舱系统中, 摄像机跟随头部运动, 用户视线与手具有基本一致的朝向, 保证了手图像水平方向视差限制在一定范围, 因此, 能作为预估视差范围  $L$  的条件。由于经过校正后的图像是水平对齐的, 因此, 可均匀选取一系列水平线与轮廓交点作为预估匹配点, 再在此交点之间均匀取  $N$  个点作为预估匹配点, 见图 4。对应 2 幅图的预估匹配点虽然不是真实匹配点, 但非常靠近真实匹配点, 假设 2 幅图中对应预估匹配点分别为  $p_3$ 、 $p_4$ , 则匹配点  $p_3$  的视差搜索范围  $L_1$  为

$$L_1 = \{|p_3 - p_4| - k, \dots, |p_3 - p_4| + k\} \quad (10)$$

式中:  $k$  为像素距离, 根据经验选取, 本文取 10。



(a) 左图像待匹配点

(b) 右图像预估匹配点

图 4 预估匹配点

Fig. 4 Estimated matching points

根据手图像连续、突变少的空间视觉特性, 引入视差梯度约束, 即视差几乎应该在所有地方都是平滑的, 视差梯度不应该超过一个恒定值<sup>[21]</sup>。假如在图像平面上有 2 个点  $p_5(a_1, b)$ 、 $p_6(a_2, b)$ , 视差分别为  $d_1$ 、 $d_2$ , 则视差梯度  $D$  为

$$D = \left| \frac{d_2 - d_1}{a_2 - a_1 + (d_2 - d_1)/2} \right| \quad (11)$$

利用式(7)~(9)搜寻匹配点时, 加入视差约束条件, 舍弃不满足式(11)的待匹配点, 得到真实匹配点见图 5。



(a) 左图像待匹配点

(b) 右图像真实匹配点

图 5 真实匹配点

Fig. 5 Real matching points

为保证实际匹配点视差不超过设定的范围,尽量减少误匹配情况的出现,Yoon 算法中视差范围一般选取较大值,从而使计算量大大增加,无法满足实时要求。本文对匹配点视差范围  $L$  进行了预估,并将其限定在可靠范围内,从而大幅减小计算量,并提高匹配精度。改进后的匹配算法中  $L$  取值远小于原始匹配算法,因此,计算量大幅减少,可满足系统精度与速度的要求。

## (2) 图像校正

左右 2 台摄像机的投影矩阵分别为  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ , 指定插值因子分别为  $S_3, S_4$ , 采用 View Morphing 变形算法, 按式(3)对左右图像像素点  $p_1, p_2$  进行插值, 得到中间像素  $p'_1, p'_2$  分别为

$$\begin{cases} p'_1 = (1 - S_3)p_1 + S_3p_2 \\ p'_2 = (1 - S_4)p_1 + S_4p_2 \end{cases} \quad (12)$$

新的投影矩阵  $\mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$  分别为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_3 = (1 - S_3)\mathbf{F}_1 + S_3\mathbf{F}_2 \\ \mathbf{F}_4 = (1 - S_4)\mathbf{F}_1 + S_4\mathbf{F}_2 \end{cases} \quad (13)$$

图 6 为插值出的新虚拟视点视图,  $I_1, I_2$  分别为原始位置处立体图像, 经过插值后可得到中间位置图像分别为  $I_3, I_4$ , 插值因子  $S_3$  取 0.2,  $S_4$  取 0.8。

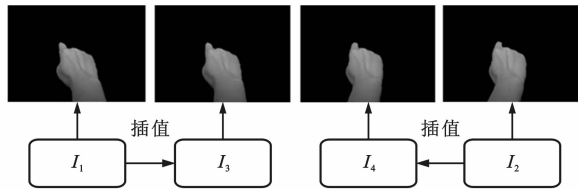


图 6 插值出的视图

Fig. 6 Interpolated images

## 1.2 虚实无缝融合

虚实无缝融合即一致性融合,是指将虚实物体融合到同一场景,为用户提供虚实一致的可视化环境,主要包括虚实匹配与虚实融合。

### 1.2.1 虚实匹配

虚实匹配是指保持虚拟环境与真实视频图像在三维空间中位置的一致性,即空间上的整合。由投影变换原理可知,保持虚拟摄像机与真实摄像机位置与参数的一致,就可实现真实图像与虚拟图像配准。

#### (1) 虚实摄像机外部参数一致

计算出真实摄像机精确位置并驱动虚拟摄像机就能实现虚实摄像机位置一致。本文采用电磁跟踪器实时跟踪头部空间位置与姿态,由于涉及到多个坐标系之间的相互转换,为简化计算,选取立体标定时模板上一固定点为世界坐标系原点,见图 7,通过以下 3 个步骤实现坐标转换,得到真实摄像机位置。

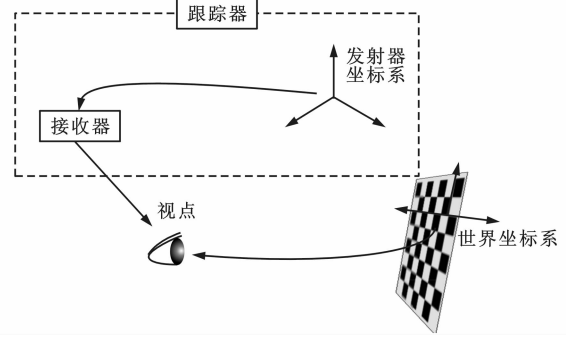


图 7 坐标系转换

Fig. 7 Coordinate system transformation

将接收器位置即发射器坐标系下的位置转换到世界坐标系下的位置。发射器坐标系  $\mathbf{X}$  与世界坐标系  $\mathbf{Y}$  之间为刚体变换关系,通过旋转矩阵  $\mathbf{M}'$ 、平移矩阵  $\mathbf{T}'$  以及缩放矩阵  $\mathbf{S}$  描述为

$$\mathbf{M}'\mathbf{S}\mathbf{X} + \mathbf{T}' = \mathbf{Y} \quad (14)$$

直接读取跟踪器读数,记录由 6 个空间点  $(x_t, y_t, z_t)$  坐标组成的 2 组输入数据矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_4 & x_5 & x_6 \\ y_4 & y_5 & y_6 \\ z_4 & z_5 & z_6 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

假设对应的输出点  $(\bar{x}_t, \bar{y}_t, \bar{z}_t)$  组成的数据矩阵为(对应世界坐标系下接收器位置)

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \bar{x}_3 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 & \bar{y}_3 \\ \bar{z}_1 & \bar{z}_2 & \bar{z}_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} \bar{x}_4 & \bar{x}_5 & \bar{x}_6 \\ \bar{y}_4 & \bar{y}_5 & \bar{y}_6 \\ \bar{z}_4 & \bar{z}_5 & \bar{z}_6 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

由式(14)可知

$$\begin{cases} \mathbf{M}'\mathbf{S}\mathbf{X}_1 + \mathbf{T}' = \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{M}'\mathbf{S}\mathbf{X}_2 + \mathbf{T}' = \mathbf{Y}_2 \end{cases} \quad (17)$$

假定

$$\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}$$

$$\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2 = \mathbf{Y}$$

可得

$$\mathbf{M}'\mathbf{S}\mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (18)$$

$$\mathbf{M}\mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (19)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为旋转矩阵。

通过标定摄像机外部参数可分别得到摄像机

(视点)位置  $Y_3, Y_4$ , 如果视点与接收器之间无相对旋转, 则  $Y_3, Y_4$  与  $Y_1, Y_2$  之间只有平移关系, 可通过 1 个平移矩阵进行转换, 即

$$\begin{cases} Y_1 = Y_3 + T \\ Y_2 = Y_4 + T \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $T$  为接收器与摄像机间的平移矩阵, 为已知量。

由矩阵变换关系可推导出式(19)有正交解的必要条件为

$$X^T Y = Y^T X \quad (21)$$

由于测量误差的存在, 式(21)没有精确正交解, 处理该问题的方法是求约束最小二乘解, 求解旋转矩阵  $M$ , 使得  $\|MX - Y\|$  最小。令

$$D = MX - Y$$

$\|D\|$  为矩阵 Frobenius 范数, 即

$$\|D\| = \sqrt{F(DD^T)} = \sqrt{\sum |d_{ij}|^2} \quad (22)$$

式中:  $d_{ij}$  为矩阵  $D$  中的元素;  $F(\cdot)$  为训练函数。

为计算出尽量接近真实矩阵的  $M$  值, 应尽可能多地记录空间点值, 选取一组点时应满足以下 2 个条件: 尽量保证  $\|X^T Y - Y^T X\|$  最小, 且取点时视点与接收器间无相对旋转。

记录初始接收器姿态角读数为  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ , 转换成旋转矩阵表示为  $M_1$ , 由式(18)、(19)可知, 世界坐标系与跟踪器坐标系间的角度偏差旋转矩阵  $M_2$  为

$$M_2 = M S^{-1}$$

在头部转动时, 记录由跟踪器姿态角计算出的旋转矩阵为  $M_3$ , 假设相对原点的旋转矩阵为  $M_0$ , 则

$$M_3 = M_0 M_1 M_2 \quad (23)$$

由式(23)计算出  $M_0$  后可分解出头部姿态角  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 。

接收器位置坐标转换到世界坐标系位置坐标。由姿态角转换得到旋转矩阵  $M_0$  校正视点与跟踪器之间偏差

$$Y_5 = MX + M_0 T \quad (24)$$

式中:  $Y_5$  为视点在世界坐标系中的位置。

(2) 虚实摄像机内部参数一致

在虚拟现实图形引擎中, 采用一个虚拟摄像机(虚拟视点)作为观察点, 使三维场景物体投影到其二维平面形成图像, 因此, 必须将标定得到的实际摄像机内参数转换为虚拟摄像机参数。虚拟摄像机参数见图 8, 图中  $r_1$  为水平视场角,  $r_2$  为垂直视场角,  $h_1$  为远裁剪面距离,  $h_2$  为近裁剪面距离,  $h_1$  与  $h_2$  值可以按照需要设定。

摄像机内参矩阵  $K$  为

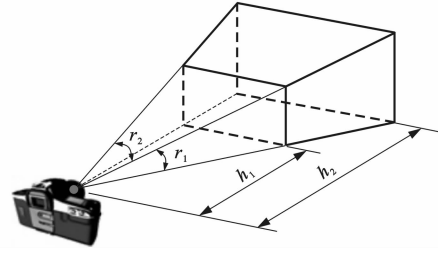


图 8 虚拟图形

Fig. 8 Virtual graphic

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & A_1 \\ 0 & f_y & A_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中:  $f_x, f_y$  分别为摄像机焦距;  $A_1, A_2$  分别为摄像机主点坐标。

假设图像的高度与宽度分别为  $h_3, h_4$ , 从几何关系可推导出视锥参数与摄像机内参转换公式为

$$\begin{cases} r_1 = \arctan(A_1/f_x) + \arctan[(h_4 - A_1)/f_x] \\ r_2 = \arctan(A_2/f_y) + \arctan[(A_2 - h_3)/f_y] \end{cases} \quad (26)$$

### 1.2.2 虚实融合

文中图像是经过处理的视频序列, 可采用混色原理融合到 GBMR 建模的虚拟场景中。混色是根据目前已经画好的颜色, 与正在计算的颜色的透明度(Alpha)混合, 作为新的颜色输出, 通常称之为 Alpha 混合技术, 表示为

$$c_3 = \eta c_1 + (1 - \eta) c_2 \quad (27)$$

式中:  $\eta$  为透明度值;  $c_1$  为透明物体颜色值;  $c_2, c_3$  分别为混合前、后物体的颜色值。

在混色过程中将手图像背景的 Alpha 值设置为 0, 轮廓内部 Alpha 值设置为 1, 实现融合。由于手的不规则外形, 融合后图像边缘容易出现走样现象, 因此, 可对分割出的手图像像素点按位置进行分类, 轮廓边缘与像素点从外至内, 从完全透明均匀过渡到半透明、不透明状态。这可以使边缘柔化, 达到自然衔接的效果, 实现融合过程中的反走样, 分类公式为

$$\eta = \begin{cases} 1.0 & \text{像素位于轮廓内部} \\ 0.5 & \text{像素在轮廓上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

## 2 试验结果分析

### 2.1 虚实无缝融合试验

仿照摄像机标定, 制作标定模板, 模板上黑色方块由大至小排列, 在虚拟环境中建立一个与现实标定模板位置、大小一致的虚拟标定模板, 见图 9。试验时用户点击虚拟模板方块, 考查用户能正确点击

到实际模板上的最小方块,指尖与方块有接触即为点击成功。试验表明,在头部随动情况下,用户能点击到的最小方块边长为 8 mm,飞行设备座舱中绝大部分操纵部件尺寸都大于此。试验证明了虚实无缝融合试验能保证用户顺利触摸到各种操纵部件,满足交互需求。

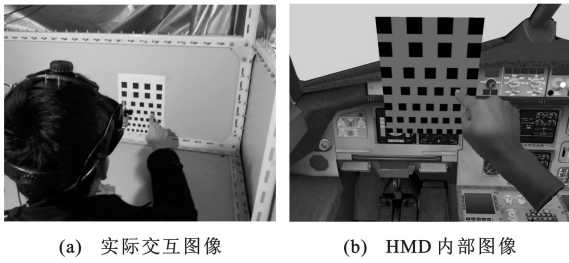


图 9 虚实融合图像  
Fig. 9 Virtual-real fusion images

2.2 交互性能试验

本文采用虚拟现实建模软件 Creator 建立一个完整的 A320 虚拟座舱,所有用户可触碰物体均为实物,并与虚拟座舱尺寸保持一致,见图 10。仿照 Schiefele 等的方法<sup>[22]</sup>,在虚拟座舱中选取 4 个典型交互任务:点击按钮,拨动拨钮(拨动到规定档位),旋转旋钮(旋转一周)与推动油门杆(推动一个行程),测试用户完成时间,分别在以下不同交互方案中完成任务。

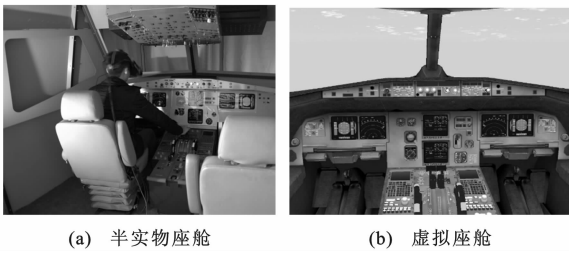


图 10 半虚拟座舱与虚拟座舱  
Fig. 10 Semi-virtual cockpit and virtual cockpit

- (1)在纯虚拟交互方案中,采用数据手套采集手部动作,利用碰撞检测完成交互,无触觉与力觉反馈。
  - (2)在半虚拟交互方案中,采用数据手套采集手部动作,利用实际面板采集手部操作信息,有触觉与力觉反馈。
  - (3)在增强半虚拟交互方案中,采用摄像机采集手部图像,融合显示给用户,利用实际面板采集手部操作信息,有触觉与力觉反馈。
  - (4)纯实物交互方案是完全自然的交互方式,用户可直接看到面板,有触觉与力觉反馈。
- 共有 5 人参与试验,每个交互动作重复 3 次,完成每个动作所需平均时间见表 1。

表 1 人机交互所需时间

Tab. 1 Human-computer interaction times <sup>s</sup>				
方案	点击按钮	拨动拨钮	旋转旋钮	推动油门杆
纯虚拟交互	7.5	7.9		6.4
半虚拟交互	3.7	3.5	3.7	4.2
增强半虚拟交互	3.0	3.3	2.9	3.8
纯实物交互	1.7	1.8	1.9	1.5

由表 1 可以看出:在无 HMD 与数据手套限制的纯实物交互方案中,用户完成规定交互动作所需时间最少,每个交互动作完成时间均在 1.5~2.0 s 内,真实环境保证了交互过程的自然与流畅;本文方案完成动作时间为 3 s 左右,与纯实物交互方案存在一定差距,但明显优于传统数据手套交互方案,每个交互动作消耗时间平均降低了 50% 左右;与半虚拟交互方案相比,本文方案消耗时间降低 18% 左右,虽然效率提升不明显,但由于没有数据手套束缚,明显提升了用户触觉真实感,交互过程更加自然;本文虚实无缝融合图像视觉效果也要明显优于前 2 种方案,交互过程中手图像视觉效果与用户真实手完全一致,见图 11。

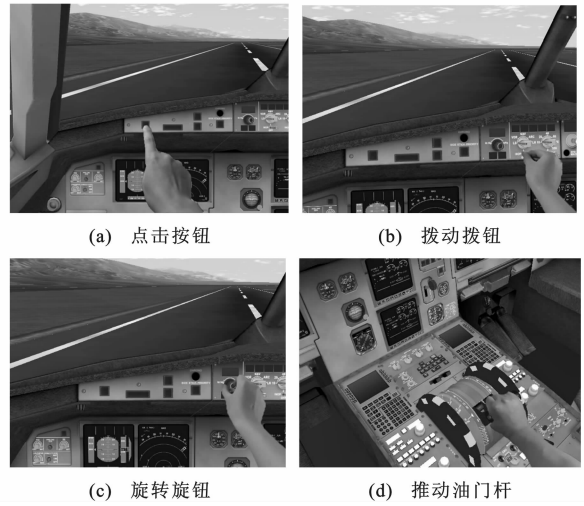


图 11 可视化图像  
Fig. 11 Visual images

3 结 语

本文采用增强虚拟技术创建了虚实融合的虚拟座舱视景,增强了半虚拟现实座舱中用户视觉真实感与沉浸感,实际上人机交互过程中已经不需要手势信息,也无需进行复杂几何建模,降低了系统复杂度,同时因脱离数据手套束缚,实现了裸手交互,增强了系统实用性。目前,这种交互方式仍存在一定缺陷,由于摄像机采集帧率限制与算法耗时,手动作

会存在一定延时,另外手图像分割易受光照影响,鲁棒性有待加强,这也是以后进一步研究和改进之处。

## 参考文献:

## References:

- [1] GU Hong-bin, WU Dong-su, LIU Hui. Development of a novel low-cost flight simulator for pilot training[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009(60): 685-689.
- [2] MCCARTY W D, SHEASBY S, AMBURN P, et al. A virtual cockpit for a distributed interactive simulation[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, 14(1): 49-54.
- [3] HOSSEINI M, MALRIC F, GEORGANAS N D. A haptic virtual environment for industrial training[C]//IEEE. IEEE International Workshop on Haptic Virtual Environments and their Applications, Ottawa: IEEE, 2002: 25-30.
- [4] 任 程,戴树岭.基于数据手套的逼真虚拟手的实现[J].系统仿真学报,2008,20(22):6214-6217.  
REN Cheng, DAI Shu-ling. Implementation of cyber-glove based realistic virtual hand[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(22): 6214-6217. (in Chinese)
- [5] O'HAGAN R G, ZELINSKY A, ROUGEAUX S. Visual gesture interfaces for virtual environments[J]. Interacting with Computers, 2002, 14(3): 231-250.
- [6] TOSAS M, LI B. Virtual touch screen for mixed reality[C]//HCI/ECCV. Computer Vision in Human-Computer Interaction of Lecture Notes in Computer Science. Prague: Springer-Verlag, 2004: 48-59.
- [7] FANG Gao-lin, GAO Wen, ZHAO De-bin. Large vocabulary sign language recognition based on fuzzy decision trees[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2004, 34(3): 305-314.
- [8] GAO Wen, MA Ji-yong, WU Jiang-qin, et al. Sign language recognition based on HMM/ANN/DP [J]. International Journal on Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 14(5): 587-602.
- [9] 郝爱民,何 兵,赵沁平.虚拟现实中的增强虚拟技术[J].北京航空航天大学学报,2003,29(10):909-913.  
HAO Ai-min, HE Bing, ZHAO Qin-ping. Review of augmented virtuality technology in virtual reality[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(10): 909-913. (in Chinese)
- [10] 戴树岭,雷小永,梅继红.虚拟仿真飞机座舱系统[J].系统仿真学报,2002,14(4):488-492.  
DAI Shu-lin, LEI Xiao-yong, MEI Ji-hong. Virtual cockpit system[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(4): 488-492. (in Chinese)
- [11] SALZMANN H, FROEHLICH B. The two-user seating buck, enabling face-to-face discussions of novel car interface concepts[C]//IEEE. IEEE Virtual Reality 2008. Keno: IEEE, 2008: 75-82.
- [12] 周 来,顾宏斌,孙 瑾,等.半虚拟现实座舱中基于最大后验概率框架的手姿态估计[J].航空学报,2011,32(7):1252-1259.  
ZHOU Lai, GU Hong-bin, SUN Jin, et al. Hand pose estimation based on maximum a posteriori framework in semi-virtual reality cockpit[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1252-1259. (in Chinese)
- [13] 罗 斌,姚 鹏,翁冬冬,等.基于混合现实的新型轻量级飞行模拟器系统[J].系统仿真学报,2009,21(17):5406-5410.  
LUO Bin, YAO Peng, WENG Dong-dong, et al. Novel, lightweight flight simulator system based on mixed reality[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5406-5410. (in Chinese)
- [14] ZHANG Zheng-you. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//IEEE. Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE, 1999: 666-673.
- [15] 徐达武,朱森良.肤色检测最优空间[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(9):1350-1356.  
XU Zhan-wu, ZHU Miao-liang. Optimum colorspace for skin-tone detection[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2006, 18(9): 1350-1356. (in Chinese)
- [16] 汤 勇,顾宏斌,周 来.交互系统中实时手势分割及指尖检测方法[J].光电工程,2010,37(7):145-150.  
TANG Yong, GU Hong-bin, ZHOU Lai. Real-time hand segmentation and fingertip detection for interaction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(7): 145-150. (in Chinese)
- [17] EDWARDS E K, ROLLAND J P, KELLER K P. Video see-through design for merging of real and virtual environments[C]//IEEE. Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium. New York: IEEE, 1993: 223-233.
- [18] ROLLAND J P, BIOCCA F A, BARLOW T, et al. Quantification of adaptation to virtual-eye location in see-thru head-mounted displays [C]//IEEE. Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium. Los Alamitos: IEEE, 1995: 56-66.
- [19] TANG Yong, GU Hong-bin. Automatic virtual view generation based on view morphing[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(6): 2051-2057.
- [20] YOON K J, KWEON I S. Locally adaptive support-weight approach for visual correspondence search[C]//IEEE. Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC: IEEE, 2005: 924-931.
- [21] ZITNICK C L, KANADE T. A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(7): 675-684.
- [22] SCHIEFELE J, ALBERT O, VAN LIER V, et al. Simple force feedback for small virtual environments[C]//SPIE. Conference of Modeling and Simulating Sensory Response for Real and Virtual Environments. Orlando: SPIE, 1998: 100-110.