

# 面向空间液桥实验的视触融合 体感控制研究

宋梦<sup>1</sup>, 王党校<sup>1</sup>, 于歌<sup>2</sup>, 郭丽丽<sup>2</sup>, 张玉茹<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191;

2. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘要:** 空间遥科学可以实现人与远程空间实验设备间的同步交互操作的需求, 大大延伸了地面操作者的感知能力与行为能力。与一般的人机交互任务相比, 遥科学对时间同步性、实时交互性的要求较高, 对鲁棒性及容错性也有一定程度的要求。本文针对空间液桥实验中拉桥、清桥等过程随动控制的任务需求, 为达到自然沉浸的交互式效果, 基于 Oculus Rift DK2 头戴式设备进行三维场景开发, 区别于前人基于 unity 的研究, 将 Oculus 与 Leap Motion 用 C++ 集成在同一程序中, 具有一定的探索性; 开发了一种基于液桥实验的手势识别算法与模糊控制算法, 该算法记忆负荷小, 识别准确率高, 鲁棒性好; 并将振动反馈与手势识别相融合, 提出了一种基于 Leap Motion 控制和 Oculus 三维显示的视触融合反馈策略, 即利用界面具体数值提醒与振动电机震感提示相结合的方式将视觉与触觉相结合, 并进行了基于液桥实验的单一视觉反馈与视触融合反馈的对比实验, 验证了视触融合的交互性效果优于单一视觉反馈效果。本文首次将穿戴式振动触觉设备、Leap Motion 的多手指识别与 Oculus 三维显示相结合, 并将上述组合用于空间遥科学实验, 为遥科学实验提供了一种新的控制方式。

**关键词:** 空间遥科学; 液桥实验; Oculus Rift DK2; Leap Motion; 手势识别; 视触融合

## Somatosensory control experiments based on space liquid bridge using the method of the visual and tactile integration

Meng Song<sup>[1]</sup>, DangXiao Wang<sup>[1]</sup>, Mu Xu<sup>[1]</sup>, Ge Yu<sup>[2]</sup>, LiLiGuo<sup>[2]</sup>, YuRu Zhang<sup>[1]</sup>

(1. State Key Lab of Virtual Reality Technology and Systems, Beijing 100191;

2. Technology and Engineering Center for Space Utilization Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

**Abstract:** Space telescience has the ability to synchronize the interaction between the human beings and remote space laboratory equipment, helping to realize the extension of perception and the ability of behavior. Compared with the general task of human-computer interaction, telescience has higher requirements in time synchronization and real-time interactivity, and the space experiment also has a certain degree of requirement on robustness and fault tolerance. In this thesis, aiming at space liquid bridge experiment, the task needs to use servo method to control bridge pulling and clearance process. Using Oculus Rift DK2 headsets to develop three-dimensional scene in order to achieve the interactive effect of natural and immersion. Different from previous studies based on unity, the Oculus and LMC using C++ integrated in the same program, which has some exploratory. This thesis develops gesture recognition algorithm and fuzzy control algorithm based on the experiment of liquid bridge, and the algorithm has small memory load, high recognition accuracy and robustness. A new method is proposed which combines gesture recognition and the vibration feedback based on Leap Motion somatosensory and Oculus three-dimensional display, namely combining the specific values on the interface with the vibration which causes by vibration motor. In this thesis we perform comparative experiments on single visual feedback and visual-tactile feedback, which verifies the interactive effect of the visual-tactile feedback is superior to the single visual feedback. This thesis proposes a new system that combines wearable vibration tactile devices with Leap Motion multi-finger recognition and Oculus three-dimensional display which is utilized in space telescience will provide a new way of controlling.

**Key words:** space telepresence, liquid bridge experiment, Oculus Rift DK2, Leap Motion, gesture recognition, visual and tactile integration

## 1. 引言

空间科学实验涉及领域广，复杂度高，探索性强，并且航天员可接受的实验技能训练数量以及时间跨度是有限的，因此若没有地面科学家和研究人员对实验进程进行实时地控制和调整，大量空间操作任务是无法完成的。遥科学将空间实验舱内的实验装置、地面控制与操作人员连接在一个回路中<sup>[1]</sup>，对实验进程进行交互式控制，尤其适用于大量需要频繁操作，精确控制的空间科学实验，极大地提高了空间应用效率并降低系统成本，目前已经成为国际空间站上大规模开展空间科学实验的重要手段。

与此同时，基于 Leap Motion Controller (LMC) 的手势交互也在不断的发展，不同的手势识别算法陆续被开发出来。其中，朱鸿展等人利用 LMC 采集手指在空间中的位置信息，通过采用方向链码描述手指的移动轨迹的方法建立书空手势模型，利用模板匹配将检测到的手势的移动方向与标准手势的移动方向进行比较，通过测量两者之间的相似度来完成对书空手势的识别。这种手势识别算法的匹配率达到90%~95%，但是对弧线较长的手势的匹配率为 87%，鲁棒性有待提高，且只能识别较为简单的二维空间手势，对于复杂手势或者三维空间手势的应用性不强<sup>[2]</sup>。M. Mohandes 等人利用 LMC 进行阿拉伯手语识别，该系统包含了数据获取阶段、预处理阶段、特征提取阶段和特征识别阶段，使用 Nave Bayes 分类器达到 98% 的准确率，使用 MLP 达到超过 99% 的准确率<sup>[3]</sup>。王倩倩等人进行基于半马尔可夫模型的早期动态手势识别的相关研究，利用 LMC 采集的三维坐标数据，可以在手势完成之前识别出相应手势，平均准确率达到 94.875%，高于应用马尔可夫模型的准确率<sup>[4]</sup>。Khademi M 等人利用 MLP 对中风患者进行手部康复性训练，有效的改善了患者的手部运动<sup>[5]</sup>。

随着时代的发展，虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 由于可以提供沉浸式的交互环境，增强用户的真实感而逐渐扩展其应用。国内外针对 VR 技术进行了一系列研究。如美国宇航局的 Ames 实验室建立了航空、卫星维护及空间站 VR 训练系统，北京航空航天大学计算机系实现了分布式虚拟环境网络设计，可以提供实时三维动态数据库、虚拟现实演示环境、虚拟现实应用系统的开发平台等。Oculus Rift 是目前性能较好、性价比较高的一款 VR 显示头戴式设备，大多虚拟现实平台是基于其进行开发的。

触觉是感觉之母，是人与生俱来的一种能力。其优点在于它能够和视觉、听觉信号同时被感知，具有全方位的感知能力。振动反馈是触觉反馈的一种，依靠振动反馈可以提示下一步的操作规程，如：盲人向何种方向行进<sup>[6]</sup>、作用力反馈<sup>[7]</sup>等。单一的振动反馈存在反应时间长、交互效果弱等缺点，故而提出对视觉、振动、听觉反馈等进行融合，为用户提供多通道感知矢量场的环境。目前尚无针对将振动感知与 LMC、Oculus 相结合的研究或文献，是多通道融合领域的一项空白。

基于手势识别技术的遥操作支持系统，能够让操作者以像真实世界一样的方式来完成遥操作。为了保证操作人员对液桥实验操作的准确性与鲁棒性，依赖单一的视觉反馈可能无法达到预期目的，随着多通道冗余的发展，本文创造性地将穿戴式振动触觉、Leap Motion 多手指手势识别与 Oculus 三维沉浸式显示相结合即利用 LMC 进行手势算法的开发，通过视觉文字、图像提示以及靠近预期目标的手的不同振动感知进行对下一步运动方向、速度及步长的选择，从而提高操作准确率。此外，本文解决了 LMC 对液桥实验过程中的随动控制，方便操作人员变换不同的运动步长及速率，防止因步长移动过大而超过目标值，导致操作准确率的降低；通过利用多播网发送指令编码消息和设置刷新频率消除人眼视觉暂留现象的方式解决了遥科学对时间同步性和实时交互性的较高要求。

本文的其余安排如下：第二部分对遥科学液桥虚拟交互系统进行介绍，第三部分详述 Oculus 沉浸式环境的搭建和手势识别算法，第四部分详述视觉与振动融合的具体措施，第五部分进行了单一视觉反馈与视触融合反馈的对比实验，第六部分对全文进行了总结与展望。

## 2. 遥科学液桥虚拟交互系统

遥科学虚拟交互系统是针对空间实验室遥科学实验操作的人机交互系统，有别于传统软件中的视觉反馈和键盘鼠标操作，遥科学虚拟交互系统能够以更贴近于自然交互方式，通过人手的手势和动作完成操控指令的输入，提供沉浸感极强的立体虚拟实验场景的显示和观察。这种自然手势输入和立体显示效果能够为遥科学实验人员构建逼真、自然、沉浸的交互效果，从而保证遥科学实验更加直观可视、易操作。

### 2.1 空间液桥实验介绍

空间液桥实验是一项在空间环境中开展的流体物体实验，其目的是研究液桥热毛细对流的流动规律和振荡机制，这对于人们认识和开发空间资源具有重要的意义。在实验过程中，需要有计划分步骤地实施注液、液桥拉伸或降低、上下液桥的升温 and 降温等操作，并随时依据实验状态对参数进行调整。

基于基本交互手势库，将液桥遥科学实验中的每一个操作动作转化为一系列基本手势来实现，通过与已有的液桥交互软件接口完成拉桥、注液、加热、制冷和清桥五个基本操作的体感（自然手势）交互，使实验人员的操作更加自然容易。

### 2.2 遥科学液桥虚拟交互系统的功能及性能要求

由液桥实验介绍，概括出遥科学液桥虚拟交互系统的功能如下：（1）分解出基本自然手势，通过 Leap Motion 实现不同的手势识别；（2）实现拉桥、注液、加热、清桥操作的交互手势和动作的定制。

系统的性能要求如下：（1）精确度：指准确完成液桥实验的各项操作，其中，拉桥电机分辨率为 1mm，注液电机分辨率为 0.005mm，温控分辨率为 1℃；（2）自然性：指手势识别稳定可靠、无歧义；交互手势易学习，记忆负荷小。

## 3. Oculus 沉浸式环境的搭建与手势识别算法开发

### 3.1 Oculus 沉浸式环境的搭建

由于要求模拟空间液桥实验，故场景中需要放置实验装置。利用 unity 进行开发可以大大减轻编程难度，但是为了提高程序的稳定性与灵活性，本文采用 C++进行程序的开发。将 Oculus 与 LMC 用 C++集成在同一程序中，在该研究领域中较少，具有较强的探索性。

整体场景基于 openscenegraph (osg) 进行开发，所以模型导入需要通过读取\*.osg 文件实现，但是模型导入后的位姿与理想位姿有一定的差异，故需要通过位姿变换矩阵实现，如图 1。

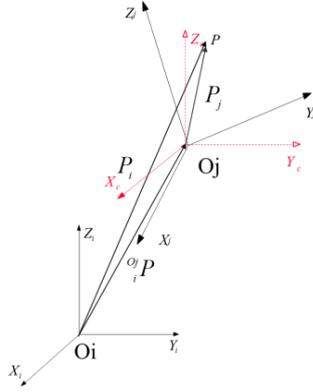


图 1 位姿变换

如图，模型导入后的位姿为坐标系j，期望坐标系为i，故需要将j转化为i。

$$\begin{aligned}
 {}^jR &= R(Z_A, \alpha)R(Y_A, \beta)R(X_A, \gamma) \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \tag{1}
 \end{aligned}$$

$${}^i T = Trans({}^o_i P)R(K, \theta) = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & {}^o_i P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^j R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^j R & {}^o_i P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$${}^j T = {}^i T^{-1} \tag{3}$$

公式[1]、[2]中的参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 及矩阵 ${}^o_i P$ 均与具体模型相关。

模型导入及位姿变换后的整体效果如图 2。（由于 Oculus 显示是基于双目原理，电脑屏幕中显示的是左右眼中的场景，映射到 Oculus 中，最后用户观察到的是合成的 3D 图像）。为了增强沉浸感，运用模拟太空的天空盒子贴图。

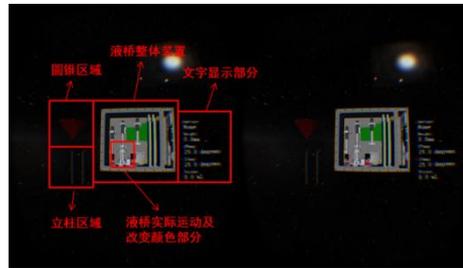


图 2 三维场景图

如图，场景分为如下四大区域，分别为液桥整体装置、圆锥区域、立柱区域及文字显示部分。其中液桥整体部分包含液桥实际运动及改变颜色部分，放大图如图 3 所示。

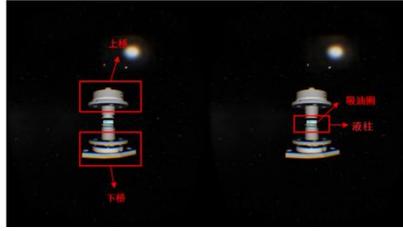
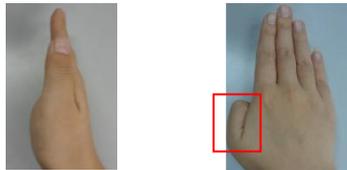


图 3 液桥实际运动及颜色改变部分放大图

### 3.2 手势识别算法开发

手势识别算法的设计难点：(1) 交互任务种类多，即对手势识别的可靠性要求高；(2) 位置控制精度高，即对手势识别的准确性要求高；(3) 容易学习和记忆，即对手势识别的自然性要求高。

由于 LMC 设备自身的限制，使其无法在手指之间发生遮挡时进行识别<sup>[8-9]</sup>，如图 4 (a)。大拇指放置的位置不对也可能发生识别错误，如将 4 指识别为 5 指，如图 4 (b)。

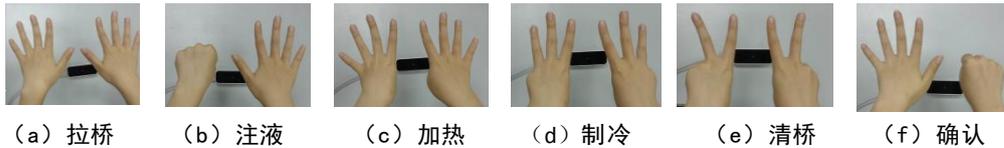


(a) 手指遮挡 (b) 大拇指的误判

图 4

针对项目需求及 LMC 可能存在的问题，设计如下的算法：

(1) 采用设定 5 种不同的手势分别对应液桥的 5 种操作，其算法主要针对左右手及手指个数进行开发，具体对应方式如图 5 (a~e)。



(a) 拉桥 (b) 注液 (c) 加热 (d) 制冷 (e) 清桥 (f) 确认

图 5 操作手势分类

整体佩戴效果图如图 6 (a)。以拉桥操作为例，双手保持在 Leap Motion 追踪范围（上方 8 立方英尺的倒锥形的可交互式 3D 空间）内，每只手伸出 5 根手指，屏幕右方的第一行文字显示为 Height，代表进入拉桥状态。在拉桥过程中，使左右手掌有一定的高度差，如图 6 (b)。



(a) 整体佩戴效果图



(b) 手势呈现高度差的状态图

图 6

(a) 屏幕上上桥位置的移动

左手掌心坐标为  $p_0$ ，右手掌心坐标为  $p_1$ ，液桥高度为  $height$ ，左右手掌心高度差为  $delta$ ，阈值为

threshold, 比例为scaling, 指数为exponential, 屏幕上上桥移动速率为rate, 上桥移动距离系数为coefficient, 则:

$$\Delta = p_1 \cdot y - p_0 \cdot y \quad [4]$$

$$\text{height} = \text{coefficient} \times \Delta \quad [5]$$

$$\text{rate} = [(|\Delta| - \text{threshold}) \times \text{scaling}]^{\text{exponential}} \quad [6]$$

经过反复试验, 最终确定参数值: threshold = 40.0, scaling = 0.04, exponential = 1.0, coefficient = 0.1. 通过公式[6]实现上桥移动速率与手掌高度差随动。在这种参数状态下, rate值处于操作者反应时间0.15~0.4s内。阈值定为40, 即左右手高度差的绝对值低于40mm时上桥不发生移动, 防止双手抖动产生误操作。

屏幕上上桥的位置与手随动, 并且屏幕文字中Height的数值实时变化, 数值达到操作者设定值时进行确认手势的操作(图5(6))。

(b) 液柱形态的变化

在拉桥过程中, 除了上桥位置会向上移动, 液柱的形态也会发生一定程度的改变。利用Nurbs曲面计算及显示算法模拟液柱形态的变化。

$$a = \frac{3 \times \text{Vol}}{2 \times \pi \times h} - \text{Radius} \times \text{Radius} \times 0.5 \quad [7]$$

$$b = \frac{h \times h}{4 \times (a - \text{Radius} \times \text{Radius})} \times a \quad [8]$$

其中Radius = 5为液柱初始半径, HiGH = 5为液柱初始高度, Vol =  $\pi \times \text{Radius} \times \text{Radius} \times \text{HiGH}$ , 参数a、b为计算出的双曲线参数, 利用a、b计算出控制节点, 最后利用opengl中的gluNurbsSurface函数进行Nurbs曲面的绘制。

拉伸后的液桥状态如图7(b)所示。



(a) 液桥原态



(b) 拉伸后的液桥状态



(c) 注液后的液桥状态

图7 液桥状态

(2) 模糊控制算法的研究

由于前述LMC的局限性, 需要设计一个模糊控制算法, 提高手势识别的准确率, 流程图如图8。

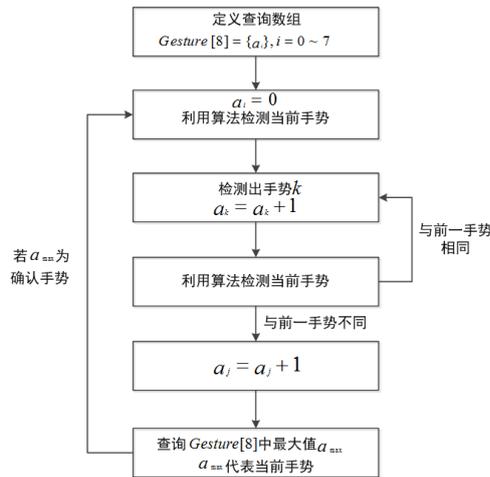


图8 模糊控制算法流程图

这种算法较为简单，执行效率高。并且每 33ms 进行一次手势检测，可以方便快速的识别出正确手势，避免误操作。

同理，加热、制冷、注液、清桥均采用相同的手势控制以及随动控制，注液后的液柱状态如图 7 (c) 所示，液桥各种形态如图 9。该算法逻辑结构简单，执行时间短，效率高，并且加入了模糊控制的思想，防止因为手势识别错误造成的误操作，鲁棒性及准确性均有所提高。

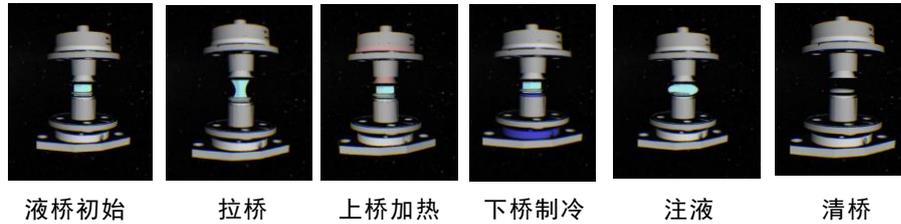


图 9 液桥各种形态

在五种既定手势的基础上增加确认手势，当操作者执行确认手势后，则代表当前指令执行完毕，将指令数据存储备用，并且提供接口，可以与已开发完成的上位机软件进行通信，从而向空间实验室发送指令，如图 10。



图 10 上位机界面

(3) 由于场景中的模型较多，为全面细致的观察操作效果，需要增加对场景进行旋转缩放等操作。由于操作者佩戴 Oculus 后无法自主利用键盘进行对场景的控制，故增加单手势控制，如图 11 (a)，实现效果如图 (b) (c)。

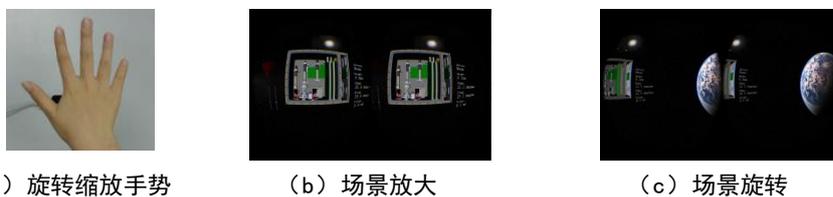


图 11

右手平行于 LMC，向屏幕方向运动则为场景放大，向远离屏幕方向运动即为场景缩小，向左移动则为场景向左旋转，向右移动则为场景向右旋转。

场景缩放的控制算法：

$$z = \text{curhands.z} - \text{prehands.z} \quad [9]$$

其中  $\text{curhands}$  为当前手掌位置， $\text{prehands}$  为前一手掌位置。为了避免手的轻微抖动对场景的缩放造成误操作，需要设定一个阈值为 30mm，若  $|z| > 30 \ \&\& \ \text{norm} == 1$ ，场景放大，反之缩小。场景旋转算法与之类似。缩放与旋转手势是利用掌心位置差与法线信息触发的算法。若右手倾斜运动，程序会判断  $x$  方向和  $z$  方向的差值大小，若  $|x| \geq |z|$ ，则为场景旋转，否则为场景缩放。

由于操作者头戴 Oculus 时，无法知道自身双手是否处于要求范围内，并且对左右手掌垂直高度差没有一个直观的认识，故需要通过场景中的圆锥区域及圆柱区域进行观察，如图 12 所示。

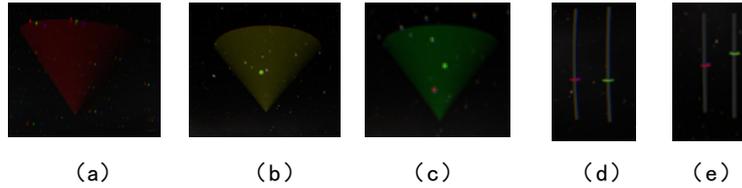


图 12 圆锥区域与圆柱区域

当操作者的手位于 Leap Motion 可操作范围内时，小球在圆锥内随手运动，当手超出区域时，小球停止运动。当两只手均在圆锥区域内时，圆锥呈现绿色 (c)；当一只手在圆锥区域内时，圆锥呈现黄色 (b)；当没有检测到手位于圆锥区域内时，圆锥呈现红色 (a)。

操作者观察屏幕中的小球，看到的是小球所处位置的三维空间，由于深度感会对用户造成两者竖直高度差判断不准确，所以在圆锥的下方有两个圆柱，圆柱套有两个圆环，左右圆环分别代表左右手，通过观察圆环所处的高度差即可判断实际中左右手所处的高度差。从而在观察数值变化速率的同时观察圆环的位置，对高度差进行一个简单的判断，进而控制运动速率。所以在进行操作时，一方面观察小球是否超出圆锥范围，另一方面通过圆环的高度差确定当前手掌的高度差，不断调整，从而获取用户需求的变化速率。

#### 4. 视触融合实验平台的搭建

随着多通道技术的迅速发展，为视觉、触觉、听觉等多种信道融合提供可能。上述均是基于 Oculus 三维沉浸式显示与 Leap Motion 多手指识别相结合的纯视觉状态下的操作。由于凭借单一视觉反馈达到精确控制的难度较大，且反馈途径略单一，没有发挥操作者多种感官的优势，故在此基础上开发视触融合平台，以此来研究视触融合反馈与单一视觉反馈对操作偏差率造成的影响。其中，振动反馈是触觉反馈的一种，通过振动刺激给操作者带来的体验更为直观，故选用通过振动反馈带给操作者的震感提示当前所处状态。

具体实施过程如下：操作者左右手均带手套，左右手套的上方和下方各安装一个振动电机。当感知双手手套上方电机振动越强烈时，代表向上移动的过程中距离设定的目标值越接近；感知双手手套下方电机振动越强烈时，代表在向下移动的过程中距离设定的目标值越接近，达到设定的目标值后，电机停止振动。振感越强烈代表离目标值越近，通过振感强弱提示操作者合理改变双手掌心位置的高度差，降低液桥装置的变化速率，从而精确稳定的完成操作任务。

这种方法的优点是符合操作者的主观认知，上电机振动提示操作者减缓向上移动的步长，下电机振动代表减缓向下移动的步长。缺点是手套在一定程度上会降低运动测量的精度，经过反复测试，选用与人手贴合度较好的工具手套，在本实验中，降低的精度在预期范围内，对实验结果产生的影响较小。故而本文选择上下电机振动的方法进行振动反馈的引入。

具体实现过程如下：

利用 stm32 核心板控制 4 个振动电机的振动，在已编写完成的液桥程序中向串口发送指令，如 09090000ab，其中前 9 位分别对应 1~9 号电机，ab 为停止位。本实验中采用 1~4 号电机，其中 1、3 号电机装在手套的上方，2、4 号电机装在手套的下方。至此视触融合实验平台搭建完成，如图 13 所示。



图 13 视触实验平台（手套及相应电路控制）

以拉桥为例，当上桥当前高度（如 12.5mm）接近预期值（如 15mm）时，左右手套的上方振动电机振动幅度越大即振感越强，通过不断增强的振动告知操作者需要降低上桥的移动速率，即将双手的竖直高度差降低（但高于设定阈值，见 3.2 (1)）以此降低上桥变化速率（随动系统，见 3.2 (1)），直至达到或者超过目标值 15mm，振动电机才停止振动。由此可以实现视触融合，即既可以通过屏幕中的具体数值显示，

又可以通过振动感知下一步需要采取的措施。同理，当液桥向下移动时，左右手套的下方振动电机振动，告知操作者需要减小向下移动的步长。

## 5. 单一视觉反馈与视触融合反馈的对比实验

空间液桥实验包括五种操作，此处只对拉桥和注液操作进行实验数据的分析与处理。

### 5.1 基于拉桥操作的两种反馈实验

#### (1) 单一视觉反馈状态下的测试

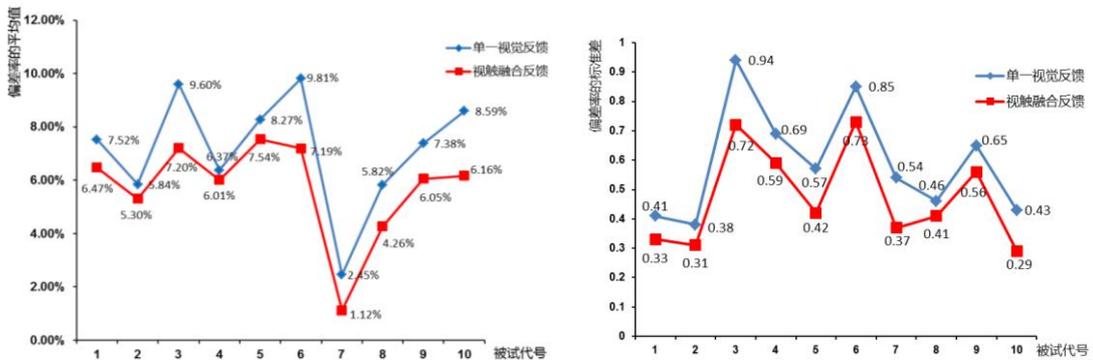
招录 10 名被试（其中男性 5 位，女性 5 位），测试在只有视觉图像提示当前液桥高度的情况下，达到预期设定值（ $h_0 = 15\text{mm}$ ）的偏差率的平均值及标准差。

a. 每位被试进行 10 次实验，并记录每次实验结果，及液桥高度的具体值  $h_1 \sim h_{10}$ ；

b.  $\mu_1 = \frac{\sum_{i=1}^{10} |h_i - h_0|}{10}$ ， $\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (h_i - \mu_1)^2}$ ，其中  $\mu_1$  为被试操作偏差率的平均值， $\sigma_1$  为相应标准差。

#### (2) 视触融合反馈状态下的测试

被试相同，测试在视觉图像反馈与电机振动反馈相结合的情况下，达到预期设定值的偏差率的平均值及标准差，数据处理如 5.1 (1)。



(a) 偏差率的平均值比较

(b) 偏差率的标准差比较

图 14 基于拉桥操作的两种反馈实验数据比较

由图 14，10 名被试在单一视觉反馈状态下和视触融合反馈状态下的偏差率平均值的范围分别为 2.45%~9.81% 和 1.12%~7.54%，标准差的范围分别为 0.41~0.94 和 0.29~0.73，说明不同个体之间确实存在差异，表现为对实验的适应程度及反应的快速性；10 名被试在视触融合状态下偏差率的平均值和标准差均低于单一视觉反馈状态，说明被试在视触融合反馈情况下操作稳定性提高，失误率降低，增加振动前后的作用效果明显，即视触融合的交互性效果优于单一视觉反馈效果。

### 5.2 基于注液操作的两种反馈实验

#### (1) 单一视觉反馈状态下的测试

被试相同，测试在只有视觉图像提示当前液桥液体量的情况下，达到预期设定值（ $V_0 = 10\text{mL}$ ）的偏差率的平均值及标准差。

每位被试进行 10 次实验，并记录每次实验结果，及液桥高度的具体值  $V_1 \sim V_{10}$ ；

c.  $\mu_2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} |V_i - V_0|}{10}$ ,  $\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (V_i - \mu_2)^2}$ , 其中 $\mu_2$ 为被试i操作偏差率的平均值,  $\sigma_2$ 为相应标准差。

(2) 视触融合反馈状态下的测试

被试相同, 测试在视觉图像反馈与电机振动反馈相结合的情况下, 达到预期设定值的偏差率的平均值及标准差, 数据处理如 5.2 (1)。

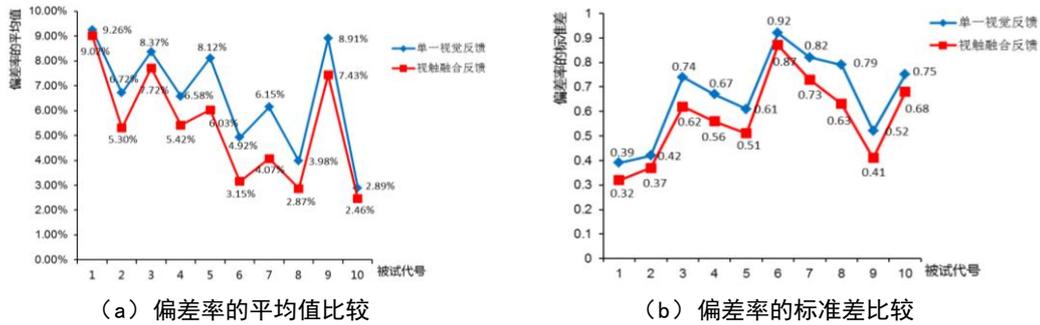


图 15 基于注液操作的两种反馈实验数据比较

由图 15, 10 名被试在单一视觉反馈状态下和视触融合反馈状态下的偏差率平均值的范围分别为 2.89%~9.26%和 2.46%~9.02%, 标准差的范围分别为 0.41~0.94和 0.32~0.87, 10 名被试在视触融合状态下偏差率的平均值和标准差均低于单一视觉反馈状态, 说明视触融合反馈平台具有一定的效果。

这种现象的产生可能是由于被试对数字信号的处理要经过大脑的反馈, 且部分操作者对数字的敏感程度不够, 无法第一时间判断数字的变化趋势, 导致对设定值的误判, 从而降低操作准确率。而加入振动刺激后, 在操作者对视觉信号进行处理的同时, 对振动信号也需要进行处理, 而且震感与靠近目标值的距离成正比, 距离目标值远, 振动较弱; 距离目标值越近, 振动越强, 振动的整体趋势是从 1 级到 9 级, 到达或者超过目标值后振动停止。与单一视觉感知相比, 操作人员对振动的感知更加明显, 而且振动涉及到生物刺激等方面, 可能与反射弧等生物量相关, 这也是本文将要进一步研究的问题。后续, 将对单一级别震感、与目标值距离成正比的震感相比较, 判断震感的改变是否影响操作人员的操作准确率, 并与生物学相结合进行研究, 探求触觉与视觉的不同生理机制对本实验的影响。

综上, 该视触融合算法识别准确率高, 经过多次试验, 程序容错性较好, 在程序运行过程中没有发生崩溃等现象, 拉桥、制冷等操作过程稳定, 鲁棒性好。

## 6. 总结与展望

本文基于 Oculus Rift DK2 头戴式设备进行三维场景开发, 实现沉浸式显示, 使操作者身临其境; 将 Oculus 与 LMC 用 C++集成在同一程序中, 提高了程序的稳定性与灵活性, 实现了三维环境中的手势控制, 由于前人的大多数研究均基于 Unity 进行开发, 故基于 C++的开发模式具有较强的探索性; 开发了一种基于液桥实验的手势识别算法与模糊控制算法, 该算法记忆负荷小, 识别准确率高, 鲁棒性好, 但是现阶段的手势识别算法没有针对动态手势进行研究, 未来将在手势库中增加对动态手势的跟踪和识别; 提出了一种基于 LMC 控制和 Oculus Rift DK2 三维显示的视触融合反馈策略, 即利用界面具体数值提醒与振动电机震感提示相结合的方式实现了振动反馈与手势识别的结合, 首次尝试了将体感交互技术与虚拟现实技术应用于空间遥科学实验操作中; 通过单一视觉感知与视触融合进行实验对比发现后者能够有效提高操作者的准确率, 为未来空间站实现大规模、高水平使用遥科学系统以及开展空间科学实验起到技术积累的作用。

### 参考文献

[1] 张珩, 李庚田. 遥科学的概念, 应用与发展[J]. 中国航天, 1997, (11):16-20.  
 [2] 朱鸿展, 宋辰辰, 吴玲达. 基于方向链码的书空手势识别[J]. 中国科技论文, 2014, (10):1155-1159.  
 [3] Mohandes M, Aliyu S, Deriche M. Arabic sign language recognition using the leap motion controller[C]. Industrial Electronics (ISIE),

2014 IEEE 23rd International Symposium on. IEEE, 2014:960 - 965.

[4] Qianqian Wang, Yuanrong Xu, Yong Wang and Xinyu Wu. Dynamic Hand Gesture Early Recognition based on Hidden Semi-Markov Models[C]. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2014.

[5] Khademi M, Mousavi Hondori H, McKenzie A, et al. Free-hand interaction with leap motion controller for stroke rehabilitation[J]. Chi 14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2014.

[6] 徐晨曦. 基于振动触觉反馈的便携式环境信息感知器[D]. 南京航空航天大学, 2013.

[7] VG P, GC B, M B, et al. A virtual-reality-based telerehabilitation system with force feedback[J]. IEEE Trans Inf Technol Biomed, 2000, 4(1):45--51.

[8] Weichert F, Bachmann D, Rudak B, et al. Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller[J]. Sensors, 2013, 13(5):6380-6393.

[9] Potter L E, Araullo J, Carter L. The Leap Motion controller: a view on sign language[C]// Australian Computer-Human Interaction Conference: Augmentation, Application, Innovation, Collaboration. 2013:175-178.

#### 作者信息:

[1] 宋梦, 硕士, 北京航空航天大学, 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学 (100191), 13811107570, 1943361655@qq.com;

[2] 王党校, 教授, 北京航空航天大学, 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学 (100191), 13693150726, hapticwang@163.com..