3 Conceptual Design 5

3.1. Research Direction

正和前文所介绍的一样，本次论文所讨论的对于设计的范围确定也是由大范围逐步向小范围所缩减，但是对于研究的方向和主要的关键想法其实没有太大的变化，即如何使用户感受到自身或者自身所操纵角色的运动轨迹和运动状态。如何让用户意识到他们在虚拟空间中做某一个动作的时候，的确是自己在主动的自发的做某一个动作，而非只是遵循系统的指引将手部或者控制器移动到指定位置，较为抽象的解释就是，如何让用户感受到动作的质量，和真实性。我们是否可以通过某些力学装置来向用户传递他们所操纵的物体在虚拟空间下的动作质量，或者说是足够具体的动作信息，来辅助用户在主观或者客观的调整自身的动作姿势的幅度和力度变化。

本次研究和之前以外的不同点，在于本次用户所操纵的物体对象是具有一定自主行动能力的目标对象TBD

3.2. Prototype Version 1 -Katana . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

3.2.1 Concept Design

在最初的设计尝试中，首先是从用户在虚拟环境下最常见的手持武器做为参考和作用对象进行考虑的，本次的设计目标是希望能开发一套可以在虚拟环境中模拟用户手持物体的运动状态，例如武器。最开始的实现场景也是从较为基础的击剑中的格挡动作做为输出目标，这个格挡机制被广泛的应用在动作游戏设计中，所以在早期的理想化应用场景中也是希望能通过力触觉技术可以有效展现出剑客高质量格挡动作，能在用户挥出被当作武器的控制器并成功进行格挡之后，产生由格挡所引起的反震力的力觉反馈从而使得用户可以像真正的剑客对决中展现的那样的互相格挡的动作交互。

在原型设计上也是选用了螺线管做为主要的力学输出来源，因为本次设计目标是模拟类似冲击力的反震力，而在力的输出表现上，常见的驱动型物理力量表现装置，大致可以被分为三类，螺线管、震动子、伺服电机。各类型在力学上的表现特征总结如下：

螺线管（Soleno id）：螺线管是一种电磁装置，通过在线圈中通电产生磁场来产生力触觉。当电流通过线圈时，磁场会产生一个作用在可移动芯片上的力。螺线管通常具有较大的力输出能力和较高的刚度。它们常用于需要较高力度和较大位移范围的应用，例如力反馈手柄和机器人操作中。

震动子（Vibrator）：震动子是一种能产生振动的力触觉装置。它通常由一个小型电机和偏心质量（如偏心旋转质量或偏心线性质量）组成。当电机启动时，偏心质量会引起装置的振动，从而产生触觉反馈。震动子通常具有较小的力输出和较低的刚度，适用于需要快速触觉刺激的应用，例如游戏控制器和触觉通知设备。

伺服电机（Servo Motor）：伺服电机是一种能够提供精确力控制和位置控制的力触觉装置。它由电机、传感器和反馈控制系统组成。伺服电机根据传感器反馈的位置信息来调整输出力，以实现精确的力控制。伺服电机通常具有较高的力输出和较高的控制精度，适用于需要精确力控制和位置反馈的应用，例如外科手术模拟器和工业机器人。

原型设计为在刀体的刀刃一侧设置多个螺线管，利用螺线管对刀体的撞击，模拟虚拟环境中格挡所产生的冲击力，并且使得用户强行产生力学反应。

3.2.2 Implement

3.2.2.1 多点输出控制实验电路 -1

考虑到电压分流原理，首次的尝试是检测常规开发板自带的6v电路上是否可以保证多个小型螺线管的输出，实现多点输出的目的。

3.2.2.2实现逻辑电路

与实验电路相同，最初的原型设计同样使用arduino开发板做为主要的控制电路，同时由于希望螺线管装置可以产生足够力学效果，所以在尝试了三种大型较高输出的螺线管之后，选择使用24v的大型螺线管做为输出驱动，并且使用了继电器在物理上实现了小电路控制大电路，保证了高压环境下的安全。

3.2.2.3 3d设计

除了在核心的构造上，在整体的设计上使用了激光打印和3d打印，为保证螺线管和刀刃部位的接触点的一致性，使用了激光切割制作刀刃用的夹具。

而在夹具的下方使用3d打印的盒子对螺线管的承载，在链接的部位，由于在当时没有找到合适的材料，仅仅使用了木棍做为两个部位之间的链接件。

在制作完成后，该装置可以实现最基础的对刀刃的撞击功能，简单来说通过开发板控制继电器的开合，可以控制螺线管所在电路，当电路被连通时，螺线管的轴心部分在电磁力的作用下向后推动，电路断开时，电磁恢复成默认状态，轴心部分向前推动产生冲击力。在开发板内部的控制逻辑为匀速控制数字信号的有无，使得用户可以感受到类似于在虚拟空间中刀剑碰撞的反冲力。

3.2.3 Pilot Test 1

经过初步的测试后（n=5），用户对于整体的反馈，低于预期状态

总结下来有以下几点问题

整体重量较大，且重量分布不合理，首先螺线管具有较大的自重，再加上悬挂区域离用户手握部位较远，力臂过长，导致整体的设计重量较高，再加上重量的无法支持用户在自如地使用设备。除了在机械的力觉效果上没有达到预期的效果之外，用户强烈建议需要利用视觉信息来补充不足的部分，换句话说，如果是仅在使用该力学设备的情况下，用户仍然对该设备的应用场景以及所传达的信息具体内容表示疑惑，需要视觉进行引导。

3.3. Prototype Version 2 -zShape . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

3.3.1 Concept Design

在第一次的制作和测试之后，根据获得的反馈进行改造出第二版本的原型机，首先在装置的作用目标上仍然和前一次的目标一致，目标是开发一套可以在虚拟环境中模拟用户手持物体的运动状态，例如武器。主要的修改点有以下几点：

1. 设备本身长度不需要和现实中的一致，例如在模拟武士刀的情况下，力学设备自身不需要与武士刀保持相同长度，所以设备将不使用模型刀具做为主要载体，而仅仅使用3d打印，打印出设备主体，在设计的时候需要考虑到用户的握持方式，注意倾斜的角度。
2. 考虑重量平衡，不仅仅是设计中的刀刃的前端需要力学发生装置，同样在反震的实现过程中，设备的后端也需要力学发生装置来保证一定程度上的平衡，不至于由于设备前端过重使得用户在使用的过程中无法控制自己的行为。在重物的选用中，选择了和前端相同的螺线管进行调配，
3. 既然在设计中取消了刀刃的存在，在设计的过程中需要考虑仅仅依靠螺线管自身对空气的撞击产生的惯性是否能对用户产生足够的力学效果，或者使用其他物体来替代刀刃做为螺线管的撞击点。

3.3.2 Implement

3.2.2.1 力触觉设备

在重物的配置上，选择了和上一次原型设计中相同的力触觉发生装置，螺线管，并且选用了相同输出的型号，来确保用户在使用的时候有着相同的前后重量感知。并且根据功能设计为螺线管向两个相反的方向产生输出，来分别模拟受到的冲击力和受到冲击力之后的反震力。

3.2.2.2 3d设计

在主体的部分，选用了z字型的设计，中间的倾斜部分，方便用户握持，并带有一定的角度来辅助力学设备可以更好的进行输出调整。上下两端的横线结构用于提供螺线管底座的支撑。

在对螺线管撞击部位的设计中，设计了一块挡板用于接受螺线管所产生的冲击力，关于挡板和主体的链接方式，尝试过两种方案，直接固定在底部以及利用导轨和弹簧使得挡板具备伸缩性，具体来说则是在底座的内部挖出导轨确保挡板的运动路线，并在导轨的内部添加了弹簧用于对挡板受撞击后复原至原本的位置。但是在实际测试效果后导轨加挡板的力学效果不如直接用挡板的效果好，故还是选择将挡板固定在底座上。

3.3.3 Pilot Test 2

在制作完成之后，也是经过了一次简单的测试（n=5），与前一次相比在整体表现上和前一次原型相比有明显的提升，具体表现在有更小的体积，有更轻的重量，有更好的平衡性，由于形状不再是长条的类型，所以在实际的应用过程中，使用方法和模拟对象也不再局限于长剑类的武器。

在前后的两个方向进行力学输出之后，设备整体的动作表现有着明显的增强，可以使人感受到前进和退后的力学效果。同时在两个方向上的输出比前一次的单一输出相比有着更大的调节空间，也就是说螺线管在自身的输出模式上可以进行微调，例如后端的螺线管在击发时间上略微比前端的击发时间稍后，会不会使得用户先感受到撞击，在感受到反震力，这样一个受力格挡完整的力学过程。

但是该原型在测试的过程中，用户仍然对于设备的目的，在不借助视觉信息的情况下无法明确设备的作用意图，在测试中提到“动作的发生力学效果很明显，我知道在使用设备的时候发生了某种动作，但是具体是什么样的动作仍然很疑惑。”

3.3.4 Conclusion

除了设备以及系统自身的问题以外，在整个设计过程中仍然有三个较为核心的问题没有得到明确的答案，第一，这套力学设备注重再现的是具体的哪种物理力。虽然在设计时的目标是希望用户在使用该设备的时候能够明确感受到自身的动作轨迹和方向，但是在武器挥舞的应用场景下，具体是反馈哪一种力，没有被明确。第二有限的应用场景，能应用到该系统的使用场景除了可以用于用户的武器格斗场景之外，是否还有其他潜在的应用场景，第三，在设计的过程中仍然是对现实中所存在的力学现象进行再现，而非对具体用户如何与未来的科技内容进行创新型的交互方式，需要考虑到一些目前现实中没有或者未来可能会出现新型的交互方式

3.4. Drone Research Project . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

除了在自身对于运动类的力触觉方面的探索之外，还有过其他的研究项目，虽然在方法和内容上与本次的研究主题不相同之外，但是同样做为对力触觉技术的研究，对之后的研究发展有着重要的参考作用。

本次的额外研究内容是有关利用无人机做为力触觉的输出来源，设计之初是考虑利用无人机的3dof自由度上的力学输出来对用户的人体在力学上产生效果，但是在多次的尝试之后，由于无人机与用户之间的距离需要保持固定距离，在实际的算法实现上较为困难，最终采用了将无人机固定在用户的头部，并且通过前庭作用，利用无人机对用户的头部产生在多个方向上的力学效果，从而引导用户到达在导航方向上的效果。

在设计上，我们通过将将开源无人机的底部和头盔相连接，用户通过佩戴头盔来感受整个无人机提供的物理线索来辨别指引方向。并且在无人机的下方也是使用了额外的木质结构与交叉结构来与用户的胸腔部位的固定来分散无人机整体的质量。来减轻无人机较高重量从而对用户的影响。

在实际的实验（n=5）过后，通过无人机对用户的方向指引方法确实可以引导用户在方向上的辨别程度，随之在第二个实验中，也是利用该系统在用户没有视觉，仅依靠触觉的条件下可以依靠该系统到达预期的指定地点。

3.5. Prototype Version 3 -1dof . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

3.5.1 Concept Design

在经历过之前两次的尝试之后，选择从核心的问题着手解决，先明确自己的研究方向，首先在明确自身的运动轨迹上，可能先从小的，具有固定的运动路径的物体上着手可能会更加容易明确自身的研究特点，例如只会前进和后退的列车或者汽车，和之前预期的用户自由动作相比，用户所具有的人体关节拥有太高的自由度，很难找到最基本的实现目标和测量方法，所以本次的原型设计从最基础的移动动作上开始重新思考和设计原型的设计。

由于需要考虑到多个维度方向上的运动变化，在之前的其他研究中使用了导轨和倾斜式的设计之后，倾斜式的设计无法在长时间的运动中有效表现移动的准确距离和感受，所以本次的早期设计中，有尝试过两个版本的设计方案，

1. 在类似与手柄的部件上安装三个转轮，每一个转轮分别代表在xyz上一个维度的移动，希望能通过这样的设置，能向用户传递在xyz各个维度上的运动信息。
2. 在装置的各个方向上通过放置震动子，利用震动子的震动信息来代表物体的不同运动状态，（图中黄色的圆柱形代表一个震动子，蓝色代表支撑用的结构）

在后续的商量中，最终选择了以第一种方案为核心的构造方案，即通过转轮的正方向和反方向转动来代表虚拟空间中目标物体的向前或向后运动。

3.5.2 Implement

3.5.2.1 haptic design

在实现的方式上，使用了arduino的360伺服器做为最终的力学表现装置，通过3d打印的外壳安装在伺服器的顶部，希望用户通过感受外部的触觉盖子的转动来感受到虚拟空间内物体相同的运动情况。

此外还尝试过通过曲柄的推拉结构，在用户的手部放置外壳，利用内部的扁平状的结构组合，利用推力和拉力来表现物体的前进与后退，但是在力学表现上明显弱于转轮结构。

在系统的控制上，利用了unity和arduino通过，利用了串口通讯，通过unity来传递参数调节arduino的数字输出信号来控制伺服器。使得用户可以通过控制方向键来控制伺服器的运转情况。

3.5.2.2 3d print

利用3d打印的结构，将用户接触的部分和伺服器旋转的部分进行间隔，

并且根据接触的部位不同，所产生的力学效果也会有所不同，例如在内部的测试中，负责向前和向后移动方向的移动伺服器部件由于接触的部分较为手掌的内侧（包括手指的内部以及手掌内部），和与用户的指尖相互接触的情况相比，产生的力触觉在相同面积的情况下较为微弱，在敏感程度上有所不同，还有接触物体表面的纹理在力学表达的效果上也有所不同，例如与光滑的平面相比有凹凸图形的纹理可以产生更强的力触觉，但是在凹凸面较为多的情况下，又会容易使得在使用设备的过程中产生疼痛感，所以在经过四次的测试之后，选用了适中的凹凸面，在保证可以产生有效的力触觉的同时，又可以使得用户在使用的过程中不会产生疼痛感。

此外经过测试旋转运动根据旋转接触面积和手掌的位置关系不同，所提供的力学效果也有所不同，当旋转轴心与手掌面平行时的力学表现要明显弱于交叉垂直关系的情况。根据以上的测试和调整之后，最终选择了增强接触面积来提高用户的使用感受。

3.5.2.3 system design

在系统的搭建中，不仅仅使用了unity做为主要的控制交互界面，还利用unity搭建了用于对用户视觉提示的应用场景搭建，在unity的系统中搭建一个模拟的驾驶系统，在这样的应用场景中用户可以做到通过控制场景中小车的移动来同步转动手持设备中的伺服器。

3.5.3 Preliminary User Test 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

在经过制作之后，通过简单的使用户感受到小车在前后方向的移动操作和设备所产生的力触觉之后，得到了非常多的反馈，通过简要的概括和整理之后，如下所示。

·001

1. No improvement of the immersion of the game.

2. There's a strong sensation regarding the direction of distance.

3. The way of gripping needs to be improved, a more natural grip is required. For instance, when holding it horizontally, it should feel more like bicycle riding.

4. Desires feedback in the left and right directions.

5. Wants to increase the awareness of the tires and the feeling of contact with the ground.

6. The delay is quite significant, more immediate feedback is desired.

·002

1. There's a distinct feeling of moving forward.

2. The tactile feeling of moving forward and backward is inconsistent.

3. The contact area with the palm needs to be well planned.

4. Desires a diagonal forward direction.

5. There might be a greater enhancement for visually impaired individuals.

6. When used in a video or racing environment, providing a corresponding sense of speed would be more immersive and increase the distance between the user and the racer.

·003

1. Desires force feedback in the left and right directions.

2. Bugs and delay greatly affect the overall immersive physical experience.

3. The choice of Vection in the forward and backward direction has an impact on the user.

4. The method of grip requires moderate pressure, to avoid being too hard to turn, or too light to feel.

5. Continue fixing bugs.

·004

1. Desires the inertial feeling of stopping when finally parking.

2. Wants the feeling of acceleration pushback.

3. Considering how to integrate with the controller.

·005

1. There's no sense of unity between the controller and the system.

2. Visual impact?

3. The feeling in the two directions is inconsistent.

4. The rotation towards one's own body direction is more intense.

·006

1. The sensation of moving direction is very strong.

2. Holding with one hand and operating with the other creates a serious feeling of disconnection.

3. Wants feedback of the dull feeling when stopping and the vibration of movement.

4. Integration with the joystick? Embedding?

3.6. Prototype Version 4 -2dof . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 5

3.5.1 Concept Design

经过前一次的测试之后，整个系统首先在力学上的效果非常明显，其次用户获得的使用体感上成功接近于本次的研究目的，既感受到运动物体的运动状态包括移动方向和旋转角度，但是在更多的细节信息上仍然还是缺少部分信息，例如速度向量的关系，并且由于应用场景，大多数的用户还是希望不仅仅是在单一的前后1dof的力学反馈上，强烈要求至少在左右发方向上也需要有相应的力学反馈。更多的还有此外还有一些系统上需要优化的部分，例如降低通讯延迟，降低单次的运转持续时间，提高更新检测频率，此外在除了设备自身的力学作用以外，其他的应用场景下是否还有其他可能的应用场景，例如是否可以增强用户和虚拟载具之间的联系感觉。

3.5.2 Implement

根据以上的前一次的用户要求下，本次的系统更新主要为提供左右方向上的旋转，在用户的手掌下方的中心处，平行于用户手掌的地方，设置了在左右方向上的360度伺服器，并且由于人体的手掌在使用中容易呈现弧形形状，所以在盖子的边角处进行了倒角的处理，同样避免了用户在使用时容易产生疼痛的感觉。

此外在系统的设置中，将第三人称视角转化为第一人称视角，更好的模拟用户在驾驶环境中的真实体验。并且该系统不仅仅在方向和角度上呈现正相关，在设备的旋转速度上也会根据虚拟物体的速度进行实时的改变。在系统上的调整还有，提高了串口通讯的刷新频率，由原来的刷新率提升为现在的刷新率，并且也降低了单次的旋转持续时间，有效避免了在串口中通讯堆积，先输入的信号处理时间过长导致后进入的信号无法及时处理。