
3차원 진동 그리드 디스플레이를 통한 3차원 좌표 정보 표현

Providing 3D Positional Information with 3D Vibrotactile Grid Display

이준수, Junsu Lee*, 이재연, Jaeyeon Lee**

요약 3차원 진동 그리드 디스플레이를 컨트롤러의 후면과 측면에 부착, 조종 중인 물체 주변의 3차원 좌표 정보를 표현하는 방법을 조사하였다. 각도와 고도 정보 표현에 적합한 진동 패턴 디자인을 채택하기 위한 두 개의 사용자 실험을 12명의 피험자 대상으로 진행하였다. 피험자의 정확도와 응답 속도를 비교하였을 때, 후면 그리드의 각도 표현을 위하여 타원 또는 직사각형 형태의 진동 지점 렌더링 방식을 사용하는 것이 적합하며, 측면 그리드의 고도 표현을 위하여 진동의 시작점과 종료점을 검지의 끝부분으로 고정하는 것이 더 정확하고 빠른 인지를 제공함을 알 수 있다. 이후 실험을 통하여 각도와 고도를 동시에 표현할 수 있는 진동 패턴 디자인을 모색하고자 한다.

Abstract We investigated the feasibility of attaching a 3D vibrotactile grid display to the back and sides of the controller to represent 3D positional information around the object on control. Two user studies were conducted with 12 participants, to select a suitable vibration pattern design for direction and altitude representation. Comparing the accuracy and response speed of participants, it was found that it is suitable to use an elliptical or rectangular actuation point rendering method for the direction representation of the back grid, and fixing the start and end points of the vibration with the tip of the index finger for the altitude representation of the side grid provides more accurate and faster perception. In future experiments, we will explore the design of vibration patterns that can simultaneously represent direction and altitude.

핵심어: 3차원 진동 그리드 디스플레이(3D Vibrotactile Grid Display), 진동 피드백(Vibrotactile Feedback), 진동 착시(Vibrotactile Illusion), 좌표계(Coordinate System)

1. 서론

진동 디스플레이는 사용자의 신체 부위에 직접 접촉하여 진동 패턴을 재생, 진동 촉각을 통해 정보를 사용자에게 전달하여 빠르게 반응할 수 있도록 보조하는 역할을 한다. 이때 진동 패턴 생성의 편리함과 이후 연구의 설계 일관성을 위하여 진동 모터를 일정한 간격으로 진동 모터를 배치하는 경우가 많으며, 이런 설계를 진동 그리드 디스플레이(vibrotactile grid display)라 일컫는다.

진동 그리드 디스플레이의 다방면 적용 가능성은 꾸준히 연구되었다. 예를 들어, 사용자의 등과 접촉하여 진동 패턴을 재생하거나[1] 팔토시를 제작하여 팔뚝 전체를 감싸는 디스플레이를 제작하는[3] 등 햅틱에서 흔히 활용되지 않는 신체 부위에서의 피드백 제공을 시도하였다. 면적이 좁고 형상이 복잡한 손바닥의 경우, 손가락만을 이용하는 그리드 디스플레이를 사용하거나[2], 진동 그리드가 부착된 휴대 디바이스를 쥐는[5] 방법이 알려져 있다. 최근 연구에서는 VR 환경에서의 다양한 손 활용 시나리오를 고려, 손의 모양에 맞춰 진동 그리드 디스플레이가 실시간으로 변하는 방식 또한 제안되었다[4].

현재 진동 그리드 디스플레이 관련 연구들은 1-2차원 형태의 그리드를 활용하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 이런 디자인은 평면적인 진동 패턴 재생만 가능하다는 한계점을 가지며, 특히 3차원상의 정보를 제공하기 위해 추가적인 정보 가공 과정이 필요하게 된다. 사용자가 가공된 정보를 전달받았을 때, 해당 정보를 원래 의미로 해석해 내기 위하여 추가적인 시간이 소요되며, 이는 빠른 정보 전달이라는 진동 디스플레이 사용 목적과 반대되는 취약점이다. 해당 취약점이 드러나는 일례로 드론 조종을 볼 수 있다. 드론을 조종하는 상황에서 드론 비행에 위협되는 요소를 빠르게 인지하는 것이 중요하다. 드론 조종에 2차원 진동 그리드 디스플레이를 적용한다면, 위협 이벤트에 대한 정보의 가공이 필수적이다(디바이스 바깥 방향의 진동이 드론 뒤편에서의 위협을 의미하는 등). 이 경우 사용자가 해당 진동 패턴의 의미를 충분히 숙지하여야 하며, 패턴을 해석하는 데 소요된 시간은 위협 요소 대응 속도를 늦춘다.

1-2차원 진동 그리드 디스플레이의 평면적 한계를 극복하여, 3차원 정보를 가공 없이 전달하는 방법을 모색하고자, 본 연구에서는 3차원 진동 그리드 디스플레이를 컨트롤러 디바이스에 적용, 3차원 위치 정보를 가공 없이 전달하는 디자인을 제안한다. 3차원 좌표를 표현하는 방법인 원통좌표계를 활용, 이벤트 발생 지점의 각도와 고도 정보를 직접 전달하여, 정보를 가공 없이 빠르고 정확하게 파악할 수 있는 3차원 진동 그리드 디스플레이를 설계하고자 한다.

2. 컨트롤러 디바이스

본 연구에서 활용하기 위하여 컨트롤러를 모방한 디바이스를 그림 1과 같이 제작하였다. RadioMaster사의 TX16S

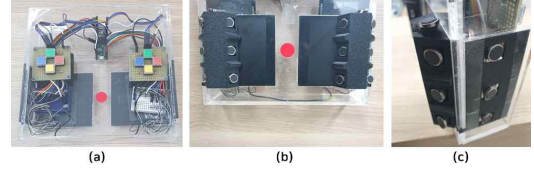


그림 1. 디바이스의 정면 모습과(a) 후면(b), 측면(c) 그리드

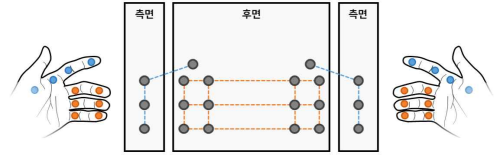


그림 2. 디바이스의 진동 모터 배치 및 손과의 접촉 부위

드론 컨트롤러의 규격을 참고하여 191mm × 185mm × 48mm의 크기로 아크릴 본체를 제작하였다. 여기에 3D 프린트한 tactile marker를 부착하여, 디바이스를 양손으로 잡았을 때 진동 그리드 디스플레이가 손과 확실히 밀착할 수 있도록 하였다. 엄지가 닿는 영역에 8개의 버튼을 부착하여, 디바이스를 든 상태로 실험 중 조작이 가능하도록 하였다.

Tactile marker를 따라 총 20개의 ERM(Eccentric Rotating Mass) 진동 모터를 부착, 디바이스를 둘러싸는 3차원 진동 그리드 디스플레이를 형성하였다. 후면에 14개, 양 측면에 각 3개를 부착하였으며, 인접한 진동 모터끼리는 3cm의 간격을 두었다. 디바이스를 양손으로 잡았을 때 각 진동 모터와 손의 접촉 지점은 그림 2와 같다. 측면 모터는 손바닥과, 후면 모터는 중지, 약지, 소지와 맞닿으며, 검지의 경우 손가락의 끝이 후면의 진동 모터와 닿는다.

사·공간적으로 풍부한 진동 패턴을 생성하기 위하여, 촉각 착시 기법의 하나인 팬텀 자극(Phantom Sensation)을 사용하였다. 본 기법은 진동 세기를 달리하여 동시에 모터를 재생, 2개 이상의 진동 모터 사이의 한 지점에서 진동이 일어났다는 착각을 끌어낸다. 본 연구에서는 진동 모터의 진동 세기(A_p) 계산을 위하여 다음과 같은 수식을 사용하였다:

$$A_p = A \times \frac{\max(D_{\max} - \max(d, D_{\min}), 0)}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (1)$$

이때 A 는 팬텀 자극으로 생성할 진동 세기, D_{\min} 과 D_{\max} 는 팬텀 자극이 일어나는 거리의 범위, 그리고 d 는 진동 모터와 진동 지점의 실제 거리이다($D_{\min} \leq d \leq D_{\max}$).

후면 그리드의 경우 양손 사이에 12cm의 간격이 존재하는데(그림 2 참고), 진동 패턴을 생성하는 알고리즘에서는 이를 3cm의 간격으로 간주하였다. 이는 컨트롤러를 보지 않는 상태에서 진동을 느낄 때, 사용자가 두 손 사이의 간격을 정확히 인지하지 못할 것이라는 가정으로부터 나온 디자인으로, 이는 디바이스의 정중앙에서 팬텀 자극을 활용할 때 진동 세기가 과하게 줄어드는 것을 방지하여 준다.

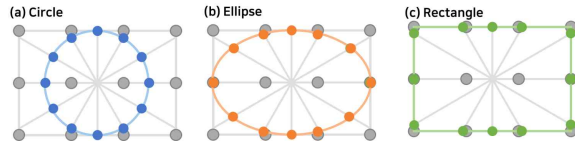


그림 3. 사용자 실험 1에 사용된 후면 그리드 진동 지점 렌더링 방식. 좌측부터 원(a), 타원(b), 직사각형(c)

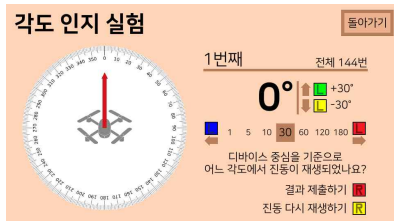


그림 4. 사용자 실험 1 인터페이스

3. 사용자 실험 1 - 후면 그리드를 통한 각도 인지

후면에 있는 진동 그리드 디스플레이를 물체의 각도 표현을 위하여 사용하였다. 컨트롤러 디바이스의 중심점을 그림 1의 빨간색 점으로 설정, 중심점과 진동 발생 지점을 연결한 벡터의 각도를 통하여 3차원 위치의 각도를 표현하고자 하였다. 3×4의 후면 그리드에서 진동 위치를 지정하기 위한 렌더링 방식을 그림 3과 같이 사용하였다. 각 방식의 진동 지점 렌더링 방법은, 그리드 내에서 그릴 수 있는 최대 크기의 도형(원, 타원, 직사각형)을 그린 후, 중심점에서 12방향(0°부터 시작하여 30°씩 각도를 변경)으로 뻗어 나오는 벡터들과의 교점을 진동 지점으로 설정하는 것으로 설계하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 원형 방식의 경우 인접한 진동 지점과의 거리가 균일하고, 직사각형은 그리드 전체를 활용하도록 위치하였으며, 타원형은 두 방식이 적절히 융합된 모습을 보인다. 세 가지 렌더링 방법 중 가장 우수한 각도 인지 및 응답 속도 성능을 갖는 렌더링 방법을 다음 단계에서의 각도 표현 방식으로 사용하기 위하여 본 사용자 실험을 진행하였다. 본 사용자 실험을 위하여 온라인 게시판을 통해 총 12명의 피실험자(남자 7명, 여자 5명, 19-26세)를 모집하였다.

3.1 실험 절차

실험은 섹션 3에서 언급된 3가지의 렌더링 방식과 12방향의 진동에 대하여 각도를 얼마나 정확하게 인지 가능한가 파악할 수 있도록 설계하였다. 먼저, 피험자는 1.5초 동안 특정 위치에서 지속 재생되는 진동을 느낀다. 재생된 진동의 발생 지점을 파악, 컨트롤러의 중심점과 해당 지점을 연결하여 만들어지는 벡터의 각도를 그림 4와 같은 인터페이스에 입력한다. 응답은 0~359° 사이의 정수이며, 디바이스에 부착된 버튼(그림 1 참고)을 사용해 응답을 조정한다.

3개의 렌더링 방식과 12개의 진동 방향으로 인하여 총 36개의 서로 다른 진동 위치가 존재하며, 진동마다 피험자당 4번의 응답을 제출받았다. 따라서, 피험자 1명당 총 144개의

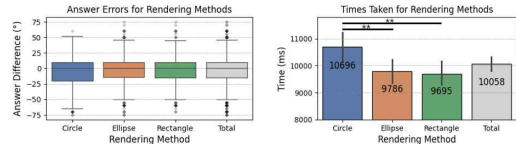


그림 5. 3가지 렌더링 방식에서의 인지한 각도 오차(좌)와 응답 1회에 소요된 시간(우)

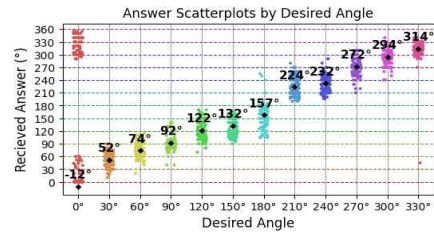


그림 6. 의도한 12개의 각도에 대한 실제 응답의 분포와 응답의 평균 (검정색 점과 텍스트)

응답이 생성되었으며, 모든 피험자로부터 전달받은 응답은 렌더링 방식별로 576개, 진동 방향별로 144개이다.

피험자는 튜토리얼 세션을 통하여 진동 재생, 인터페이스 및 응답 제출에 대하여 숙지한 채로 실험을 진행하였다. 다른 신체 부위 또는 바닥으로의 진동 분산을 방지하기 위하여, 피험자는 실험을 진행하는 동안 일어선 상태로 디바이스를 양손으로 들고 있는 자세를 유지하였다. 메인 세션 중에는 핑크 노이즈를 지속해서 재생하여, 진동에 의한 소음에 영향을 받지 못하도록 하였다. 정확한 응답 제출을 위하여 진동은 몇 번이든 재생할 수 있도록 하였다. 실험 중 피로를 고려, 피험자가 자세 유지에 불편함을 느끼는 경우, 컨트롤러를 내려놓고 앉아 3분 이내의 쉬는 시간을 제공하였다. 사용자 실험 이후 피험자는 진동 재생에 대한 간단한 질문에 답하였다.

3.2 실험 결과

결과 분석을 진행하기 전에 각 응답에 대하여 각도의 오차(의도한 각도 - 응답 각도)를 계산하였다. 계산된 1728개의 데이터 중 3 시그마를 벗어나는 데이터는 분석에서 제외하였으며, 총 14개 (0.81%)가 제외되었다.

렌더링 방식에 따른 인지된 각도 오차와 응답 소요 시간은 그림 5와 같다. 인지된 각도 오차는 중간값이 0°로 전체적으로 벗어난 모습을 보이지는 않았으나, 극단값을 뺀 오차의 범위는 -50°~+46°로 확인되었다. 원형 렌더링 방식의 경우 각도 오차가 평균보다 클 뿐만 아니라(-65°~+52°) 응답 소요 시간도 다른 방식보다 유의미하게 오래 걸림을 확인하였다. 타원형과 직사각형 렌더링 방식의 경우, 직사각형 방식이 오차나 소요 시간 면에서 약간의 우세함을 보였으나 타원형과의 통계적 유의미함은 확인되지 않았다.

의도한 각도에 따른 인지된 각도의 분산은 그림 6과 같다. 실제 진동 모터 1개만 사용하는 90°와 270° 진동 패턴의 경우, 실제 의도한 각도와 인지된 각도가 잘 부합하여 최소의

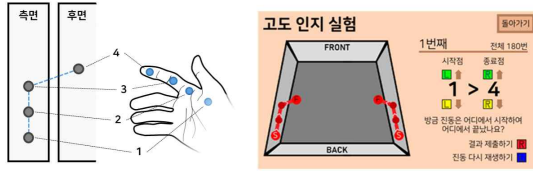


그림 7. 측면과 엄지 그리드의 번호 매핑(좌), 사용자 실험 2의 실험 인터페이스(우)

오차가 발생함을 확인하였다(+2°). 반면, 팬텀 자극을 이용해서만 생성할 수 있는, 컨트롤러의 중앙 부근에서 일어나는 0°와 180°의 진동의 경우 의도한 각도와 인지한 각도가 상당히 큰 차이가 나는 것을 확인하였다(-12°, -23°). 해당 결과를 피험자 설문과 비교하였을 때, 편향이 일어난 이유는 피험자 대부분이 양손에서 진동이 느껴지는 경우 더 진동이 세게 일어났다고 생각한 방향으로 응답을 제출하였기 때문으로 보인다.

4. 사용자 실험 2 - 측면 그리드를 통한 고도 인지

섹션 2에서 언급한 대로, 측면 그리드와 엄지 그리드는 함께 이용하였으며, 원통좌표계 중 고도 표현을 담당하였다. 사용자 실험 1에서의 각도 표현과 달리, 본 실험에서는 시간에 따라 진동 지점이 바뀌는 진동을 이용하였다. 이는 이후 연구에서 각도 표현과 고도 표현을 동시에 진행할 때, 서로 다른 양상의 두 진동 패턴을 재생하여 각도와 고도 정보를 혼동하지 않도록 하기 위함이다.

디바이스를 들었을 때 아래에 있는 진동 모터부터 1-4의 번호를 매겼다 (그림 7 참고). 이 4개의 번호 중 서로 다른 두 번호가 진동의 시작점 및 종료점으로 선택되어, 1.2초 동안 진동 지점이 움직이는 패턴이 생성된다. 이때 생성할 수 있는 진동 패턴의 종류는 12 가지이다 (상향, 하향 패턴 각 6가지). 본 사용자 실험을 통하여 같은 방향과 길이의 진동 패턴을 재생할 때 가장 정확도가 높은 시작점과 종료점 설정 방식을 확인하고, 이후 실험에서 움직이는 진동 패턴을 활용할 때 고려할 요소들을 파악하고자 한다.

4.1 실험 절차

실험은 섹션 4에서 언급된 12개의 진동 패턴을 다른 패턴과 혼동하지 않고 구분해 내는가 평가하도록 설계하였다. 먼저, 피험자는 1.2초 동안 진동 패턴을 느낀다. 전달받은 진동 패턴의 시작점과 종료점을 파악하여, 그림 7의 실험 인터페이스가 지시하는 대로 12개의 진동 패턴에 대하여 피험자 당 15번의 응답을 버튼 조작을 통하여 제출받았다. 따라서, 피험자 1명당 총 180개의 응답이 생성되었으며, 모든 피험자로부터 전달받은 응답은 진동 패턴별로 180개가 생성되었다.

피험자 모집 관련 환경은 사용자 실험 1과 일치한다. 동일한 피험자 12명이 참여하였으며, 사용자 실험 1을 진행한 다음 날에 본 실험이 진행되었다. 튜토리얼 세션에서 피험자는

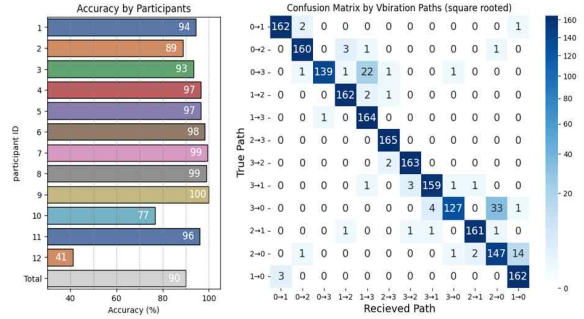


그림 8. 피험자별 응답 정확도(좌), 정답과 응답 진동 패턴에 대한 confusion matrix(우)

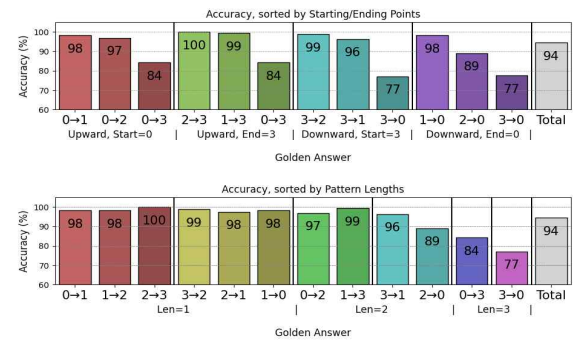


그림 9. 진동 패턴별 응답 정확도, 패턴의 방향과 시작/종료점에 따라 구분한 결과(상), 패턴의 길이에 따라 구분한 결과(하)

진동 모터의 지점 1-4번의 개념에 대하여 전달받았으며, 재생 지점에 대한 이해를 위하여 각 지점에 대하여 1.5초의 고정된 위치의 진동을 확인하였다. 메인 세션에서는 정확한 응답 제출을 위하여 진동을 몇 번이든 재생할 수 있도록 하였다.

4.2 실험 결과

결과 분석을 진행하기 전 피험자별 응답 정확도를 확인하였다 (그림 8). 대부분 피험자의 정확도가 90%를 넘었으나, 피험자 12의 경우 41%라는 매우 낮은 정확도를 보였다. 해당 피험자의 결과를 적용하면 다른 피험자에 의하여 생성된 경향성을 없앨뿐더러, 피험자 12의 결과만 확인하였을 때도 유의미한 경향성을 확인할 수 없었기에 최종적으로 분석에서 제외하였다. 제외 결과, 진동 패턴마다 총 165개의 응답으로 결과 분석을 진행하였다.

그림 8의 우측 그림은 11명의 피험자에 대하여 정답과 응답 진동 패턴에 대한 confusion matrix를 보여준다. 12개의 진동 패턴 중 10개의 진동 패턴이 전체 165개 중 160개의 정답을 보였다(97.0%). 지점 3과 0을 사용하는 두 개의 패턴에서 가장 낮은 정답률을 보였는데 (77.0%와 84.2%), 오답 양상을 확인하였을 때 지점 3 대신 지점 2로 오인하는 경우를 가장 많이 확인하였다. 기타 오답의 경우 인접한 지점과 1칸씩 어긋나거나, 시작점과 종료점을 반대로 인지한 경우가 많았으며, 특히 지점 간의 거리가 1칸밖에 나지 않는 경우에 반대로 응답한 경우가 두드러졌다.

측면 그리드의 고도 표현 디자인 선택을 위하여, 각 패턴에 대한 응답 정확도를 방향과 시작/종료점에 따라, 그리고 진동 패턴의 길이에 따라 구분하여 그림 9와 같이 제시하였다. 모든 패턴의 정확도를 종합하였을 때, 94%라는 상당히 높은 응답 정확도를 보였다. 상향 진동 패턴 중 종료점을 지점 3으로 고정하였을 때, 그리고 하향 진동 패턴 중 시작점을 지점 3으로 고정하였을 때 더욱 높은 정확도를 확인할 수 있었다. 패턴의 길이로 구분 지어 확인했을 때, 패턴의 길이가 1일 경우(시작/종료점의 번호 차이가 1) 98~100%라는 매우 높은 정확도를 보인 반면, 길이가 증가할수록 정확도가 내려가 길이가 3인 경우에 77~84%의 저조한 정확도를 보였다. 더불어, 상향 진동보다 하향 진동에서의 정확도가 전반적으로 낮게 나왔음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 진동 그리드 디스플레이를 컨트롤러에 적용하여 3차원 공간에서의 각도와 고도 표현에 사용하는 방법을 조사하였다. 두 번의 사용자 실험으로 각 정보 표현에 적합한 진동 패턴 디자인을 확인하였으며, 인지 능력과 응답 속도 등을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

5.1 각도 표현을 위한 디자인 선정

사용자 실험 1을 통하여 원형, 타원형, 직사각형 진동 렌더링 방식 중 하나를 선택하고자 하였고, 그 결과 타원형과 직사각형이 비슷한 수준의 각도 인지 및 응답 속도 성능이 보임을 확인하였다. 원형의 경우 전체적으로 미흡한 성능을 보여 이후 연구에서는 채택하지 않고, 남은 두 렌더링 방식 중에서 선택하는 것으로 결론지었다.

한편, 양손 사이에서 재생되는 진동(0°와 180°)이 각도 오차가 상대적으로 컸던 점을 고려하면, 진동 그리드 간격을 12cm 대신 3cm로 간주하고 진동 세기를 계산하는 시도는 개선이 필요한 것으로 보인다. 이후 컨트롤러 디바이스를 개선할 때, 전체 폭을 축소하여 양손 사이의 간격을 줄이거나, 손이 닿지 않는 컨트롤러 정중앙에도 진동 모터를 추가로 부착하는 방식으로 보완할 예정이다.

5.2 고도 표현을 위한 디자인 선정

사용자 실험 2를 통하여 고도 표현을 위하여 움직이는 진동 패턴을 사용할 때의 고려 사항을 확인하였다. 지점 3(검지와 닿는 진동 모터)이 시작점 또는 종료점으로 고정되어 사용되는 진동 패턴이 응답 정확도가 전반적으로 높음을 확인하였다. 이는 3차원 진동 그리드 디스플레이의 특성을 살려, 한 평면 위에 있지 않은 진동 모터 배치가 움직이는 진동 패턴의

경로를 구분하는 데에 도움을 준 것으로 해석할 수 있으며, 이후 연구에서도 위치가 특수한 진동 모터를 anchor로 삼아 패턴을 생성하는 디자인을 활용할 것이다.

진동 패턴의 이동 거리가 길어질수록 응답 정확도가 낮아지는 경향을 확인하였는데, 이는 1.2초라는 진동 재생 시간이 시작점과 종료점을 파악하는 데에 너무 짧았던 것으로 추측된다. 즉, 시작/종료점에 진동이 머무는 시간이 매우 짧아 인접한 다른 진동 지점으로 착각하게 되는 것으로 판단하며, 이를 보완하고자 진동 패턴이 길이에 비례하여 진동 재생 시간을 늘리는 디자인을 선택하고자 한다.

5.3 향후 계획

이후 연구에서는 섹션 5에서 언급한 디바이스 개선을 진행한 후, 각도와 고도 정보를 동시에 제공할 수 있는 진동 패턴을 디자인하는 것에 중점을 둘 것이다. 이때, 진동 패턴은 사용자 실험 1, 2로 구체화한 디자인을 그대로 합하는 방식과(후면의 고정 진동과 측면의 움직이는 진동을 동시 재생), 선정된 디자인을 참고하여 새로운 진동 생성 알고리즘을 제작하는 방식으로 나뉜다. 각 방식에 대한 개발이 완료되면, 드론 또는 VR 게임 조종 등의 사용 시나리오와 함께 실제 사용 경험을 묻는 사용자 실험을 진행하여 더 적합한 방식을 선정할 것이다.

참고문헌

- [1] Israr, A., & Poupyrev, I. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 2019-2028. 2011.
- [2] Lee, J., Kim, Y., & Kim, G. J. Rich pinch: Perception of object movement with tactile illusion. IEEE transactions on haptics. 9(1). pp. 80-89. 2015.
- [3] Salazar, J., Hirata, Y., & Kosuge, K. Motion guidance using haptic feedback based on vibrotactile illusions. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 4685-4691. 2016.
- [4] Sung, Y., Kim, R., Song, K. W., Shao, Y., & Yoon, S. H. HapticPilot: Authoring In-Situ Hand Posture-Adaptive Vibrotactile Feedback for Virtual Reality. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. 7(4). pp. 1-28. 1991.
- [5] Yang, G. H., Jin, M. S., Jin, Y., & Kang, S. T-mobile: Vibrotactile display pad with spatial and directional information for hand-held device. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 5245-5250. 2010.