

# VR 방향전환보행 기술 동향

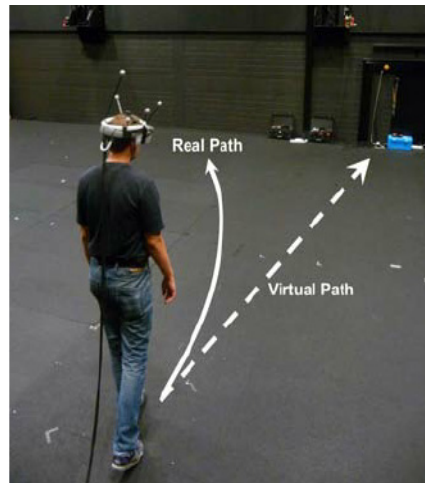
이인권

연세대학교 교수

HMD(Head Mounted Display)를 통해 경험하는 가상세계는 무한히 넓을 수 있지만 사용자가 존재하고 있는 실제 세계는 흔히 매우 좁기 때문에 가상 세계에서 걸어서 이동할 때 사용자는 실제 세계에서 트레드밀과 같은 특수 장비 없이는 걷는 경험을 함께 느낄 수 없다. VR 연구자들은 이러한 제약을 넘어 가상세계를 걸어 다니는 경우 실제로 사용자를 걷게 할 수 있는 다양한 기법들을 연구해 왔다. 시각 및 다양한 감각의 왜곡을 통해 이를 가능하게 하려는 방향전환 보행(Redirected Walking) 기술의 과거와 현재를 조명해 본다.

## I. 서론

2015년 개봉한 디즈니의 SF 실사 영화 ‘투모로우랜드’는 가상현실 세계와 현실 세계의 연결을 잘 표현하고 있다. 우연히 가상세계로 진입하는 장치를 얻게 된 주인공은 버튼을 누르는 순간 눈앞에 펼쳐진 끝도 없는 가상의 들판을 마주하게 된다. 그러나 멀리 보이는 도시로 몇 발자국 걸음을 옮기던 주인공은 곧바로 현실 공간의 기둥에 부딪혀 넘어져 버린다. 이 장면은 본 고의 주제인 “방향전환보행(Redirected Walking: RDW)”[1]의 필요성을 매우 잘 보여주고 있다. 가상 세계에 진입한 사용자는 실제 공간을 볼 수 없기 때문에 가상공간에서의 이동을 그대로 실제 공간에서의 동작으로 함께 행한



〈자료〉 C. T. Neth et al., “Velocity-dependent dynamic curvature gain for redirected walking,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, V18, No.7, 2012, pp.1041-1052.

[그림 1] RDW의 개념

\* 본 내용은 이인권 교수(☎ 02-2123-5713, iklee@yonsei.ac.kr)에게 문의하시기 바랍니다.

\*\* 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

다는 것은 매우 위험한 일이다. RDW 기술은 이런 제약을 최소화 하고자 하는 각종 관련 기술을 말한다. 예를 들어, 가장 많이 쓰이는 기법은 HMD를 통해 보이는 가상세계에서의 뷰를 사용자가 알아채지 못하게 약간씩 왜곡시킴으로서 사용자가 실제 공간에서 이동하는 방향을 바꾸도록 하는 것이다. 즉, [그림 1]과 같이 가상공간에서는 직선으로 걷고 있지만 실제 공간에서는 곡선을 그리며 회전하게 만들어서, 좁은 실제공간을 넓은 가상공간에 매핑하게 된다. 본 고에서는 이러한 RDW 기술의 개발에 대한 그 동안의 역사를 돌아보고, 아울러 RDW 기술의 현황과 미래에 관해 조명해 본다.

## II. 방향전환 개념

방향전환(Redirection)이란 가상환경 내에서 사용자의 움직임의 변형이나 가상환경 구조의 조작을 통해 실제환경과 가상환경의 동작들이 더 이상 1:1로 매핑되지 않도록 하는 기법을 말한다. 이러한 조작을 통해 걷는 사용자에게 경로를 안내하여 사용 가능한 실제 공간보다 훨씬 큰 가상환경 안을 돌아다닐 수 있게 한다. 가상환경 내의 자유로운 보행의 경험을 강화하기 위해 무지향성 트레드밀(omnidirectional treadmill)과 같은 고가의 대형 인터랙션 장치들을 이용하여 제자리걸음을 돕는 방법도 있으나, 이것은 일반적인 사용자를 대상으로 한다고 보기 어렵다. 이러한 면에서 RDW는 사용자를 실제로 걷게 함으로서 보다 정확한 자기 수용 감각(proprioceptive), 운동감각(kinesthetic), 전정자극(vestibular)의 시뮬레이션을 구현하는 효율적인 기술이라 할 수 있다.

RDW와 비교하여 가상환경 내의 특정 지점으로 사용자가 건너 뛰어 움직이는 재배치(relocation) 기법을 고려할 수 있다. 예를 들면, 입력 장치의 버튼을 눌러 가상공간의 지점들을 건너뛰는 것이다. 재배치 기술로도 움직이는 것을 시뮬레이션 할 수 있기 때문에 이를 방향전환 기술의 일종으로 볼 수도 있으나, 이 경우 주가 되는 이동 방법이 걷기가 아니기 때문에 RDW에 비해서 현실감은 많이 떨어진다. 반면에 RDW는 사용자가 가상환경 안을 걸어 다니는 것에만 초점을 둔다.

이상적인 RDW 기술은 최소한 다음의 네 가지 조건을 만족해야 한다[1].

- 사용자는 방향전환이 발생하고 있는지 인식하지 못해야 한다.
- 안전해야 한다. 즉, 다른 사용자나 장애물과의 충돌을 방지해야 한다.
- 일반화가 가능하다. 즉, 어떤 가상환경이나 사용자에게도 적용 가능하다.
- 사이버 멀미 등 원치 않는 부작용을 최소화하고, 다른 작업을 방해하지 않아야 한다.

이러한 조건들을 만족하는 RDW 기술을 제약하는 정적요인들로는 실제공간과 가상공간의 크기

와 모양, 사용자가 조작을 감지하는 능력(정도), 사용자 수, 사용자의 예상 경로정보에 대한 액세스 유무 등이 있으며, 동적 요인들로는 실제 및 가상환경 내의 사용자의 현재 및 과거 위치 등이 있다. 물론 위에서 나열한 네 가지 조건을 모두 만족하는 이상적인 단일 RDW 알고리즘은 아직 존재하지 않지만, 지난 10여 년간 많은 관련기술이 개발, 소개되었다[1].

### III. RDW 기술의 분류

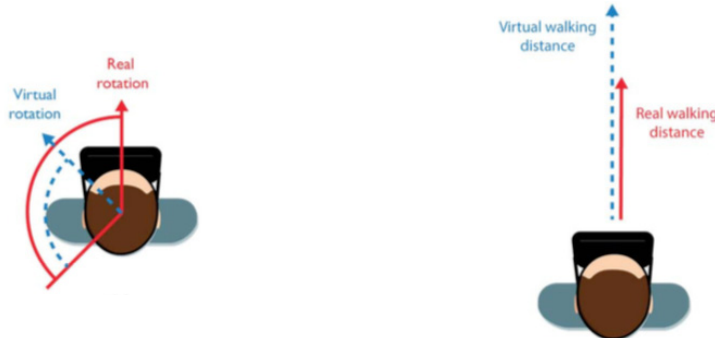
다양한 형태의 RDW가 제안되었는데, 크게 두 가지 조작 방식 중 하나를 기반으로 한다. ① 사용자의 실제와 가상의 이동과 회전 간의 매핑을 조작하여 실제 공간의 한계선이나 장애물로부터 사용자를 되도록 멀어지게 하는 기술과 ② 가상공간의 건축 구조를 조작하는 기술(예; 방, 복도, 문 등의 위치를 조작), 즉 상대적으로 큰 가상공간을 작은 실제 공간 크기로 압축하는 “자체 오버랩핑 가능한 가상공간”을 생성할 수 있는 기술이다. 이러한 기술들은 사용자가 감지하지 못하게 적용되는 방향전환 기술, 즉 미세 기술(subtle technique)과 사용자가 감지할 수 있는 기술, 즉 명시적 기술(overt technique)로 구별하는 것이 가능하다[2]. 미세 기술은 지각할 수 없는 기준을 충족하므로 대부분의 응용 프로그램에 적합하다. 그러나 때로는 실용적인 제한이나 안전 기준을 준수할 필요가 있기 때문에 명시적 기술을 사용해야 한다.

#### 1. 전환이득(Redirection Gain) 미세 조정

RDW의 초기 구현은 사용자의 실제 회전과 가상 회전 간의 매핑 조작에 의존했다[3]. 특히, 사용자가 감지할 수 없는 회전 이득(rotational gains) ([그림 2(a)])을 사용자의 자연스러운 머리 회전에 적용하였다. 예를 들면, 실제로 사용자가 30도 머리를 돌리면 가상공간의 뷰는 90도 회전하는 식이다. 이러한 일종의 눈속임을 통해 미리 정의된 경로를 따라 가상 복도로 사용자를 이동시켰는데, 실제 공간에서 사용자는 앞뒤로 직선운동만을 하도록 만들 수 있었다. 원칙적으로 회전 이득은 회전의 각 구성 요소들(pitch, yaw, roll)에 적용할 수 있지만 일반적으로는 yaw, 즉 좌우 방향으로의 회전에만 적용한다. 최근에는 걷는 사용자의 물리적 경로를 제어하기 위해 다른 유형의 이득들도 제안되었다.

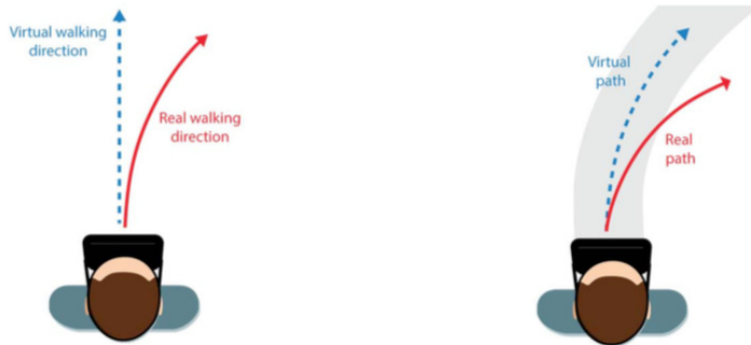
#### 가. 전환이득의 종류

직선이동이득(translation gains, [그림 2(b)])은 사용자의 전진 스텝의 크기를 가상공간에서 의



(a) 회전이득(rotation gains, 사용자 정지)

(b) 직선이동이득(translation gains, 사용자 전진 이동)



(c) 곡률이득(curvature gains, 사용자 전진 이동)

(d) 굽힘이득(bending gains, 사용자 곡선 이동)

〈자료〉 N. Christian, et al., "15 Years of Research on Redirected Walking in Immersive Virtual Environments," IEEE computer graphics and applications, 2018, 38.2: 44-56.

[그림 2] 사용자의 실제 공간과 가상공간에서의 이동 간의 매핑을 다루기 위한 4가지 유형의 이득(Gain)도적으로 늘이거나 줄이는 것으로, 일반적으로 작은 실제 공간을 훨씬 큰 가상공간에 매핑할 수 있도록 한다. 즉, 사용자가 실제 공간에서 1m 전진할 경우, 렌더링되는 가상 뷰는 2m를 전진하는 식이다. 곡률이득(curvature gains, [그림 2(c)])은 사용자가 전진하는 동안 연속적으로 적용되는 회전인데, 이를 통해 무한대로 긴 가상의 직선 경로를 실제공간의 원 경로(circle path)에 매핑할 수 있다. 곡률이득을 이끌기 위해 흔히 사용자가 직선으로 바라보는 가상의 뷰를 의도적으로 약간씩 회전시켜 사용자의 실제 움직임이 곡선이 되도록 한다.

굽힘이득(bending gains, [그림 2(d)])은 걷는 사용자의 경로를 실제보다 더 굽힌다는 측면에서는 곡률이득과 같으나, 가상 경로가 직선이 아닌 곡선이라는 점이 다르다. 곡률이득과 굽힘이득이 효율적으로 적용되기 위해서는 굽는 방향을 정확하게 예측할 수 있도록 사용자의 미래의 경로를 예측하는 정보를 알아내는 방법이 중요하다.

#### 나. 전환이득의 인지한계

이러한 이득을 사용자가 감지하지 못하게 하려면 사용자의 인지한계(perceptual threshold) 보다 작게 이득을 잡아 주는 것이 또한 중요하다. 다양한 이득에 대한 인지한계를 측정하는 것은 아직도 활발하게 연구되고 있는 주제이다. 직선이동[4], 회전[5], 곡률[6], 굽힘[7]이득들에 대한 인지한계를 요약해 보면, 직선이동이득의 인지한계는 14% 축소부터 26% 확장까지 가능하다[6], 즉, 현재 사용되는 상용 HMD일 경우 약  $4.6\text{m} \times 4.6\text{m}$ 의 실제 공간을  $5.8\text{m} \times 5.8\text{m}$ 의 가상공간으로 매핑하는 것이 가능하지만 그 효과는 미미하다. 또한, 사용자가 걷는 속도를 조절하여 적용된 직선이동이득을 무의식적으로 보완한다는 사실도 알려져 있다[8]. 회전 이득의 인지한계에 대해서도 많은 연구가 되어 왔지만, 가장 최근의 결과로는 가상 회전보다 실제 회전이 49% 초과 또는 20% 부족이 인지한계인 것으로 알려져 있다[6]. 곡률이득의 경우 환경에 따라 극명한 차이가 나타나서 반경 22m[6], 11.6m[9], 또는 6.4m[10]까지의 원호 패스를 직선으로 인식하는 것까지 가능하다는 보고들이 있으며, 천천히 걸을 때 곡률이득을 잘 인지하지 못한다는 점[11]과 곡률과 직선이득이 함께 적용될 수 있다는 점[10]이 관찰되었다. 굽힘이득의 경우 가상세계의 반지름보다 실제세계에서는 4.4배의 반지름까지 구부러질 수 있다는 것이 발견되었으며[7], 심하게는  $4\text{m} \times 4\text{m}$ 의 실제공간이  $25\text{m} \times 25\text{m}$ 의 가상공간을 커버할 수 있다고 보고되었으나[10], 이 경우는 사용자의 움직임이 미리 정의된 경로로 제한되는 경우이다.

#### 다. 기타 감각의 사용

몇 가지 연구는 시각적으로 일치하는 햅틱 또는 청각 자극을 함께 이용하는 것이 높은 이득을 얻는데 도움이 된다는 점을 밝히고 있다. 예를 들면, 실제공간의 원형 벽을 만지며 가상 직선 경로를 걷는 경우 곡률이득이 증가될 수 있다[12]. 이 밖에 사운드의 추가가 전환이득에 미치는 영향을 조사한 시도도 있으나, 뚜렷한 영향은 밝혀지지 않았다[13].

## 2. 명시적 전환(Overt Redirection) 및 중재(Interventions)

전환 이득을 사용한 미세 조정이 가장 바람직한 경우이겠으나, 때로는 이러한 조정이 불가능한 상황에 맞닥트릴 수 있으며, 이런 경우에는 사용자가 알아채는 명시적 전환 기법을 이용해야 한다. 가장 극명한 예로는 “seven league boots”[14]와 같은 경우로, 사용자가 컨트롤러의 버튼을 눌러 직선이동이득을 적용할 것인지를 결정하게 하는 것이다. 그러나 이보다 더 명시적 전환이 필요한 경우는 바로 사용자가 실제 공간의 끝자락에 다다라서 더 이상 어떠한 미세조정 기법이 소용이

없는 경우이다. 이럴 때에는 경고 사인을 보내 사용자에게 상황을 알리고 다른 행동을 취할 수 있게 해야 한다.

Williams 등[15]은 이런 경우를 처리하는 세 가지 방법을 제안하였는데, ① 첫 번째는 freeze-backup 방법으로, 가상공간을 정지시킨 후 사용자를 뒤로 물려서게 하여 공간을 확보한 후 다시 가상 체험을 재개하는 것이며, ② 두 번째는 freeze-turn 방법으로, 가상공간 정지 후 사용자를 실제 공간 중심부를 향해 돌게 한 후 가상 체험을 재개하는 것이며, ③ 세 번째는 2:1 turn 방법으로, 사용자에게 제자리에서 180도를 돌게 하는 동안 가상공간을 360도 회전시켜서 가상공간에서의 진행방향은 바뀌지 않고 다만 실제 공간에서만 반대방향으로 진행하게 하는 방식이다.

또 다른 방식으로는 ‘distractors’[16]라는 방식이 있는데, 사용자에게 특정 가상 물체(예를 들면, 가상의 종달새)를 쳐다보게 하고 사용자가 고개를 돌려 가상 물체를 바라보는 순간 가상공간을 임의로 회전하여 위험에서 벗어나게 하는 방식이다. 이 방식은 다른 방식에 비해 사용자들의 현실감을 유지하고 만족감을 높여주었으며, 특히 종달새의 경우 종달새 소리를 더 크게 할수록 효과가 좋았다. 또 다른 시도로는 가상공간에 가상 에이전트를 등장시켜 사용자의 시야를 분산시키고 이 에이전트가 사용자와 교차하는 순간 가상공간을 회전시키는 방식도 시도되었다[17],[18].

### 3. 가상공간 구조(Virtual Architecture)의 미세 조정

방향전환보행을 해결하는 완전히 다른 방향의 접근은 바로 가상공간의 구조를 사용자가 알아채지 못하게 조금씩 바꾸는 방법이다. 이렇게 하면 사용자는 좁은 실제 공간 안을 끊임없이 확보하면서 무한한 가상공간을 탐험할 수 있게 된다. Suma 등[19]은 사용자가 방의 문을 열고 들어가 책상으로 다가가는 순간 가상공간을 회전시키고 문의 위치를 벽의 다른 위치로 변경하여, 사용자가 다시 문을 나오는 순간 좁은 실제 공간을 계속 활용할 수 있게 하였는데, 놀랍게도 77명의 실험대상자 중 단 한명만이 이러한 변화를 알아챘으며, 이러한 방법으로 4.3m×4.3m의 실제공간으로 219 제곱미터의 넓은 가상공간을 탐험할 수 있게 되었다. 이러한 가상공간 구조의 미세조정 기법을 변형한 기법들[20]~[22]이 계속 제안되고 있다.

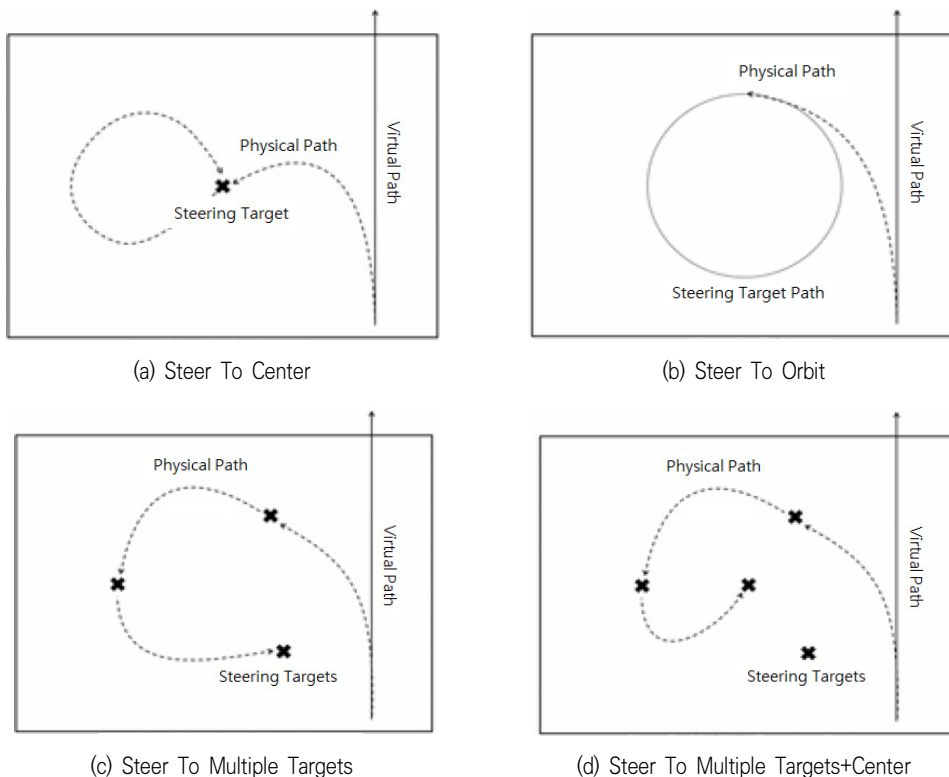
## IV. 방향전환 컨트롤러

위에서 설명한 기법 중 하나만을 사용하여 가상공간을 자유롭게 탐색하는 것은 거의 불가능하다. 개발자는 흔히 방향전환 컨트롤러(Redirection Controller)를 사용하여 실제 및 가상공간의 사용자

위치를 기반으로 방향전환 기술을 관리한다. Redirected Walking Toolkit[23]과 같은 소프트웨어 라이브러리는 기본 방향전환 기술 구현을 제공하고 있으며, 방향전환 컨트롤러는 이런 기본 라이브러리 위의 더 높은 레벨에서 방향전환과 재배치를 관리할 수 있다.

스크립트 컨트롤러(Scripted Controller)는 주로 개발자가 미리 결정한 물리적 경로와 가상 경로를 따라 사용자를 조종한다[3]. 스크립트를 사용하는 컨트롤러의 장점은 개발자가 사용자의 경로와 방향전환 기술을 사용하도록 미리 정의하는 것이다. 이렇게 하면 가상의 경험이 원하는 물리적 공간에 맞춰질 수 있다. 이러한 컨트롤러는 여러 가상공간에서 쉽게 재사용할 수 없으며 각 시뮬레이션에 대해 광범위한 사용자 정의가 필요할 수 있고, 사용자가 미리 정의된 경로를 벗어나면 오류가 발생할 수 있다. 예를 들어, 가상공간 구조 변경에 사용된 기법들[19],[20]은 스크립트를 사용하는 컨트롤러로 간주될 수 있다.

일반화된 컨트롤러(Generalized Controller, [그림 3])는 본질적으로 반응적이며 사용자가 의도



〈자료〉 E. Hodgson, et al., "Comparing Four Approaches to Generalized Redirected Walking: Simulation and Live User Data," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19.4:634-643.

[그림 3] 일반화된 컨트롤러의 네 가지 알고리즘

한 가상 탐험에 관계없이 사용자가 특정 물리적 장소 또는 패턴을 향하도록 안내하는 미묘한 연속 기술을 사용한다. 이 경우 가상공간 또는 사용자의 이동에 대한 사전 스크립팅 지식이 필요하지 않으므로 스크립트 컨트롤러보다 유연하지만 상대적으로 덜 최적화되어 있다고 볼 수 있다. 다음과 같은 네 가지 일반화 알고리즘을 고려할 수 있다[25]. ① steer-to-center: 사용자를 항상 실제 공간의 중심으로 안내, ② steer-to-multiple-targets: 사용자를 일련의 정해진 포인트로 유도, ③ steer-to-orbit: 센터를 중심으로 원형 경로를 따라 사용자를 안내하는 방법, ④ steer-to-multiple-targets+center: 정해진 포인트들이나 중심으로 유도하는 방법들이다. 중첩 궤도나 8자 패턴을 포함하는 변형 방식도 제안되었으며[24], 다양한 일반화 알고리즘의 검토와 비교 연구도 수행되었다[25].

예측 컨트롤러(Predictive Controller)는 실제 및 가상 환경을 분석하여 사용자가 갈 수 있는지 없는지 또는 갈 가능성이 높은지를 결정한 다음, 해당 정보를 사용하여 방향전환을 안내한다. 예를 들어, 교차로가 없는 가상 복도를 따라 걷는 사용자는 직진할 가능성이 높다. 예측 제어기는 정보에 입각하여 사용자의 진행 방향을 선택하기 위해 전형적인 인간의 걷기의 특성을 고려할 수도 있다 [26]. Zmuda 등[27]의 FORCE 알고리즘은 주요 결정 지점에서 방향전환 전략의 변경과 결합된 미세한 연속 기술을 사용한다. 가상공간은 일련의 탐색 가능한 경로와 결정 포인트로 사전 처리되며, 컨트롤러는 사용자를 조종하기 위해 최적의 물리적 위치를 계산한다. 스크립트 컨트롤러와 마찬가지로, 예측 컨트롤러는 각 가상공간에 대해 사용 가능한 경로를 사전 처리하여 데이터로 만들거나, 예상 경로를 실시간으로 평가해야 한다. Zank와 Kunz[28]가 제안한 것과 같은 최근의 접근법은 개발자가 수동으로 지정하지 않아도 되도록 주어진 가상공간에 대한 탐색 가능한 경로와 결정 포인트를 자동으로 계산하여 이 프로세스를 단순화하고 있다.

리셋 컨트롤러(Reset Controller)는 사용자를 실제 공간의 경계에서 되도록 멀어지도록 재지정하는 데 가장 자주 사용되는 방향전환 기술이다. 예를 들면, 명백한 2:1 회전 및 동결 회전, 또는 ‘distractor’ 방식이 있다. 컨트롤러 재설정에는 모든 크기의 실제공간에서 효과적이지만 실제공간의 크기가 감소함에 따라 중단 빈도가 증가하게 된다.

이러한 컨트롤러들의 구분이 상호 배타적이지는 않다. 예를 들어, 일반화된 컨트롤러는 실제공간의 한계에 다다른 순간 distractor와 같은 명시적 기법을 사용할 수 있다. 예측 컨트롤러는 일반화된 알고리즘을 기본으로 사용하고, 필요에 따라 알고리즘을 변경할 수도 있다. 서로 다른 응용 프로그램이 서로 다른 조합의 컨트롤러와 기술을 제공할 수 있다. Nescher 등[29]은 공간을 최적화하고 비용을 최소화하기 위해 다양한 방향전환 컨트롤러를 동적으로 선택하고 가중치를 부여하는 알고리즘을 제시했다.



한편, 컨트롤러 유형에 관계없이 이제까지의 RDW 연구는 거의 단일 사용자를 유도하는 데만 초점을 맞추었지만 최근의 작업에서는 둘 이상의 사용자를 동시에 방향전환하는 문제를 해결하기 위해 노력하고 있다. 다중 사용자 방향전환 컨트롤러(Multi-user redirection controller)는 두 명 이상의 사용자가 장애물들이 존재할 수 있는 동일한 실제 공간에 존재하는 경우 가상공간 탐험을 안내하기 위한 기법이다. 몇 가지 연구들[30],[31]이 문제를 탐구하기 위해 시뮬레이션을 사용했지만, 아직 사용자 연구가 수행되지 않았다. 가장 간단한 형태는 다중 사용자들을 서로 다른 자신의 중심을 가지도록 steer-to-center로 안내하는 방법이다. 그러나 각 사용자들의 실제 공간을 최대화하려면 좀 더 정교한 컨트롤러가 요구된다. 그밖에 충돌처리 등 다양한 해결방법들이 연구될 수 있다. 좀 더 일반적인 형태로는 각 사용자가 서로 분리된 원격의 실제 공간에 존재하는 경우로, 이를 위해서는 좀 더 다른 측면들이 고려될 수 있을 것이다[32].

## V. RDW 기술의 현재와 미래

이상적인 RDW 기술은 사용자가 지각할 수 없고, 안전하고, 일반화할 수 있어야 하며 원치 않는 부작용이 없어야 한다. 이제 마지막으로 RDW의 현재의 과제 및 앞으로의 방향에 대해 간략히 알아보기로 한다[1].

- 이득(gain)의 인지 한계: 사용자의 인지 한계에 대한 우리의 이해는 아직 불완전하여 향후 추가 연구의 필요성을 시사하고 있다. 이전에 식별된 임계값이 현재의 최신 HMD에 적용되는지 여부, 사용자마다 다른 민감도 때문에 생기는 인지 한계의 차이, 특정 작업에 참여했을 때 생기는 인지 한계의 차이 등에 대해 더 연구할 수 있으며, 이 관계를 이해하면 현재 작업이나 사용자의 주의 상태 측정에 따라 동적으로 이득을 조정할 수 있다. distractor와 비슷한 기법을 발전시켜 사용자의 눈 깜박임, 특정 행동 시의(내러티브 등) 주의력 감소 등을 이용한 방향전환 기법들도 고려해 볼 수 있다. 가상의 눈, 비나 기상 상태 등을 조작하여 사용자의 시야를 고의로 방해하면서 이득을 더 취하는 방식도 고려될 수 있다.
- 가상환경의 조작: 가상환경의 조작을 통한 방향 전환은 RDW에 대한 새로운 접근 방법으로, 지금까지는 실내 환경의 조작에만 집중하여 왔으나 실외 가상환경, 시야 밖의 구조물 재배치 등과 같은 효과를 사용할 수 있을 것으로 보이며, 이를 위해 아티스트가 만들어 둔 환경 모델의 레이아웃을 자동 조작할 수 있는 모델링적 관점에서의 접근이 필요할 것이다.
- 안전성: 안전성을 담보하기 위해 사용되는 재설정 및 명시적 방향전환 기법에 대한 연구도

더 수행되어야 하는데, 최근에는 가상환경 자체의 묘사(narrative)에 visual distractor를 통합하는 기법도 제안되었다[17]. 하지만 아직 잘 분석되어 있지 않으며, 명시적 묘사와 미세 묘사에 대한 절충점을 제대로 이해하고 있지 못하다. 또한, 모션이 트래킹되는 실험실 안에서의 실제 공간을 벗어나 넓은 실제 환경으로 나아갈 때 생기는 문제들도 고려되고 있다.

- 일반화 가능성: 지금까지 제안된 RDW 컨트롤러는 한 가지 만으로는 불안정하다. ① 스크립트 컨트롤러는 가장 효과적이지만 사용자가 설계된 경로를 따르는 경우에 한정되고, ② 일반화된 컨트롤러는 사용자에게 큰 자유도를 제공하지만 종종 재설정이 필요하며, ③ 예측 컨트롤러를 위해서는 경로를 예측하고 일반적인 인간 행동에 대한 데이터를 생성하기 위해 오프라인 사전 처리가 필요하다. 따라서 주어진 가상환경에서 탐색 가능한 경로와 결정 포인트를 자동으로 계산하고 사용자의 미래 경로를 예측하는 것은 여전히 중요한 과제이다. 최근 몇 가지 예외를 제외한 대부분의 예측 컨트롤러는 사용자의 현재 보행 동작에 대한 정보에 의존해 왔다. 그러나 미래의 연구는 경로 및 표적 예측을 위한 시각 추적(eye-tracking) 및 두뇌 컴퓨터 인터페이스(brain-computer interface)와 같은 생체 인식 기법도 활용 할 수 있을 것이다. RDW 컨트롤러가 사용자의 자발적 동작을 처리하고, 여러 사용자의 경로를 조작해야 하거나, 사용자의 공간이 아주 작고, 장비도 충분하지 않은 경우, 이 문제들은 더욱 심각해진다. 극단적인 경우에는 RDW, 재배치 기술 및 다른 장비(예; Walk-in-place - 제자리 걷기 장비) 기술의 새로운 조합이 필요할 수 있다.
- 원하지 않는 부작용의 최소화: 거의 모든 VR 애플리케이션에서 문제가 되고 있는 부작용에 대해 RDW 기술도 자유롭지 못하다. 크게 보아서 RDW 시뮬레이터를 이용한 사용자가 느끼게 되는 시뮬레이터 sickness[3],[33], 공간지각 능력[15],[16],[19],[22],[34], 그리고 인지능력의 부하[35],[36]와 같은 부작용들이 관련 연구에서 언급되고 있으나 아직 체계적이라 볼 수 없다. RDW의 인지적 하중과 공간적 추론에 대한 인지적 효과가 추가로 평가되어야 한다. 미묘한 방향 전환이 시뮬레이터 sickness를 크게 강화하지 않는다는 것이 일반적인 가정인데, 연구를 통해 이 가정을 강화해야 한다. 아직 사용자를 불편하게 하는 요소에 대한 완전한 이해가 부족하며, 앞으로의 연구는 실제 사용 사례에 적용된 RDW의 중요한 영향 중 일부라도 계속 탐구해 나가야 한다.

RDW를 경험해 본 사용자들은 대부분 이 기술이 가져다주는 현실감에 놀라움을 표현한다. 그러나 지금까지 RDW 분야의 대부분의 지식은 매우 적은 소수의 연구자들에 의해 유지되고 있다. 무엇보다 연구 개발 프로토타입과 실제 VR 개발자 프로젝트 사이의 격차를 해소하는 것이 중요할 것이다. RDW 사용에 있어 안전성 확보의 어려움은 이 기법이 실용적인 콘텐츠에 사용되는 것을

가로막고 있는 가장 큰 요소이다. 그럼에도 불구하고, RDW가 가져오는 현실감의 증대는 다른 어떤 이동 방식보다 뛰어나기 때문에 언젠가는 반드시 실용화될 수 있을 것으로 보인다. 결국 완전한 가상 세계의 구축이야말로 모든 컴퓨팅의 궁극적 목표 중의 하나이며, 이 과정에서 RDW와 같은 기술은 중요한 역할을 하게 될 것이다. 따라서 RDW의 실용화를 위해 더 많은 아이디어와 노력들이 필요할 것으로 생각된다. RDW에 대한 지난 연구들을 바탕으로 혁신, 탐구 및 견고한 기초 연구의 전통을 유지하면서 VR 커뮤니티가 더 많은 연구에 집중하는 것이 요구되는 중요한 시점이다.

#### [ 참고문헌 ]

- [1] N. Christian, et al., "15 Years of Research on Redirected Walking in Immersive Virtual Environments," IEEE computer graphics and applications, 2018, 38.2: 44-56.
- [2] E. A. Suma et al., "A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments," Proceedings of IEEE Virtual Reality, Short Papers and Posters(VRW 12), 2012, pp.43-46.
- [3] S. Razzaque, Z. Kohn, and M.C. Whitton, "Redirected walking," Proceedings of Eurographics, 2001, pp.105-106.
- [4] B. Williams et al., "Updating orientation in large virtual environments using scaled translational gain," Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV 06), 2006, pp.21-28.
- [5] S. Razzaque, "Redirected Walking," thesis PhD Thesis AAI3190299, The University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [6] F. Steinicke et al., "Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.16, No.1, 2010, pp.17-27.
- [7] E. Langbehn et al., "Bending the curve: Sensitivity to bending of curved paths and application in room-scale VR," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.23, No.4, 2017, pp.1389-1398.
- [8] R. Zhang, B. Li, and S.A. Kuhl, "Human sensitivity to dynamic translational gains in head-mounted displays," Proceedings of the ACM Symposium on Spatial User Interaction(SUI 14), 2014, pp.62-65.
- [9] T. Grechkin et al., "Revisiting detection thresholds for redirected walking: combining translation and curvature gains," Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception(SAP 16), 2016, pp.113-120.
- [10] E. Langbehn et al., "Application of redirected walking in room-scale VR," Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 17), 2017, pp.449- 450.
- [11] C. T. Neth et al., "Velocity-dependent dynamic curvature gain for redirected walking," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.18, No.7, 2012, pp.1041-1052.
- [12] K. Matsumoto et al., "Curvature manipulation techniques in redirection using haptic cues," Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces(3DUI 16), 2016, pp.105-108.
- [13] N. C. Nilsson et al., "Estimation of detection thresholds for audiovisual rotation gains," Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 16), 2016, pp. 241- 242.

- [14] V. Interrante, B. Ries, and L. Anderson, "Seven league boots: A new metaphor for augmented locomotion through moderately large scale immersive virtual environments," Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces(3DUI 07), 2007, pp.167-170.
- [15] B. Williams et al., "Exploring large virtual environments with an HMD when physical space is limited," Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV 07), 2007, pp.41-48.
- [16] T. C. Peck, H. Fuchs, and M.C. Whitton, "An evaluation of navigational ability comparing redirected free exploration with distractors to walking-in-place and joystick locomotion interfaces," Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 11), 2011, pp.55-62.
- [17] T. Grechkin et al., "Towards context-sensitive reorientation for real walking in virtual reality," Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 15), 2015, pp.185-186.
- [18] C. T. Neth et al., "Velocity-dependent dynamic curvature gain for redirected walking," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.18, No.7, 2012, pp.1041-1052.
- [19] E. A. Suma et al., "Leveraging change blindness for redirection in virtual environments," Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 11), 2011, pp.159-166.
- [20] E. A. Suma et al., "Impossible spaces: Maximizing natural walking in virtual environments with self-overlapping architecture," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.18, No.4, 2012, pp.555-564.
- [21] K. Vasylevska et al., "Flexible spaces: Dynamic layout generation for infinite walking in virtual environments," Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces(3DUI 13), 2013, pp.39-42.
- [22] K. Vasylevska and H. Kaufmann, "Compressing VR: Fitting large virtual environments within limited physical space," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.37, No.5, 2017, pp.85-91.
- [23] M. Azmandian et al., "The redirected walking toolkit: A unified development and deployment platform for exploring large virtual environments," 2016 IEEE 2nd Workshop on Everyday VR (WEVR 16), 2016, pp.1-6.
- [24] T. Field and P. Vamplew, "Generalised algorithms for redirected walking in virtual environments," Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Science and Technology (AISAT 04), 2004, pp.58-63.
- [25] E. Hodgson, E. Bachmann, and T. Thrash, "Performance of redirected walking algorithms in a constrained virtual world," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.20, No.4, 2014, pp.579-587.
- [26] M. Zank and A. Kunz, "Where are you going? Using human locomotion models for target estimation," The Visual Computer, Vol.32, No.10, 2016, pp.1323-1335.
- [27] M. A. Zmuda et al., "Optimizing constrained-environment redirected walking instructions using search techniques," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.19, No.11, 2013, pp.1872-1884.
- [28] M. Zank and A. Kunz, "Optimized graph extraction and locomotion prediction for redirected walking," Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces(3DUI 17), 2017, pp.120-129.
- [29] T. Nescher, Y.-Y. Huang, and A. Kunz, "Planning redirection techniques for optimal free walking experience using model predictive control," Proceedings of the IEEE Symposium on 3D User Interfaces(3DUI 14), 2014, pp.111-118.

- [30] M. Azmandian, T. Grechkin, and E.S. Rosenberg, "An evaluation of strategies for two-user redirected walking in shared physical spaces," Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Virtual Reality(VR 17), 2017, pp.91-98.
- [31] E. R. Bachmann et al., "Collision prediction and prevention in a simultaneous two-user immersive virtual environment," Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Virtual Reality (VR 13), 2013, pp.89-90.
- [32] M. Zank, T. Nescher, and A. Kunz, "Robust prediction of auditory step feedback for forward walking," Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 13), 2013, pp.119-122.
- [33] G. Bruder et al., "Tuning self-motion perception in virtual reality with visual illusions," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.18, No.7, 2012, pp.1068-1078.
- [34] E. Hodgson, E. Bachmann, and D. Waller, "Redirected walking to explore virtual environments: Assessing the potential for spatial interference," ACM Transactions on Applied Perception, Vol.8, No.4, 2011, pp.1-22.
- [35] W. E. Marsh et al., "Cognitive demands of semi-natural virtual locomotion," Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.22, No.3, 2013, pp.216-234.
- [36] G. Bruder, P. Lubos, and F. Steinicke, "Cognitive resource demands of redirected walking," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.21, No.4, 2015, pp.539-544.