

## 가상현실 대화용 가상걸음 장치의 설계

### Design of a Virtual Walking Machine for Virtual Reality Interface

윤 정 원, 류 제 하\*  
(Jungwon Yoon and Jeha Ryu)

**Abstract :** This paper describes a novel locomotion interface that can generate infinite floor for various surfaces, named as virtual walking machine. This interface allows users to participate in a life-like walking experience in virtual environments, which include various terrains such as plains, slopes and stair ground surfaces. The interface is composed of two three-DOF (X, Y, Yaw) planar devices and two four-DOF (Pitch, Roll, Z, and relative rotation) footpads. The planar devices are driven by AC servomotors for generating fast motions, while the footpad devices are driven by pneumatic actuators for continuous support of human weight. To simulate natural human walking, the locomotion interface design specifications are acquired based on gait analysis and each mechanism is optimally designed and manufactured to satisfy the given requirements. The designed locomotion interface allows natural walking (step: 0.8m, height: 20cm, load capability: 100kg, slope: 30 deg) for various terrains.

**Keywords :** locomotion interface, walking machine, parallel robot, virtual environment, and haptics

#### I. 서론

보행은 사람이 이동하기 위한 가장 기본적인 방법으로 일상 생활의 많은 부분이 보행을 통해 이뤄지고, 보행을 통해 공간 감각의 대부분을 인지 한다. 따라서, 가상환경에 능동적으로 참여하면서 실제의 공간 감각을 제공해주기 위한 인터페이스가 필요하다. 이동(Locomotion) 인터페이스는 제한된 공간의 가상환경아래서 걸음과 달리기와 같은 사람의 움직임(mobility)을 유도해 사람의 에너지를 발산케 하는 디바이스이다. 이동 인터페이스는 조이스틱을 이용한 가상환경의 조작이나 모션 플랫폼에 사용자가 앉아서 가상환경에 몰입하던 시스템들에 비해 사람의 전신 움직임을 유도해 몰입감을 증대화 시킨다는 장점이 있다. 또한 이동 인터페이스의 사용으로 실제 걸음을 통한 가상환경과의 직접적인 참여로 다양한 훈련에 효과적으로 사용할 수 있다. 이동 인터페이스의 종류로는 자전거 형태의 페달 디바이스, 벨트 타입의 트레드밀(treadmill), 로봇을 양 발에 위치시키는 발 플랫폼(foot platform), 슬라이딩 머신(sliding machine) 등으로 구분 할 수 있다[1]. 페달 디바이스의 일종으로 Brogan 외는 Tectrix Bicycle[2] 이라 불리는 자전거 시뮬레이터를 개발 하였다. 트레드밀 타입으로는 Utah 대학에서 Sarcos TreadPort[3] 라고 불리는 경사(tilt)지면이 가능한 트레드밀을 만들었고 그 외 굴곡지면[4]을 표현할 수 있는 트레드밀도 제시되었다. 발 플랫폼 형태로 Iwata는 턴 테이블 위에 놓여진 2개의 병진 3자유도 플랫폼에 사용자 발이 위치하게 하고 발에 장착된 센서를 이용해 사용자의 걸음을 인식하여 플랫폼이 계단 같은 굴곡지면을 재현하도록 한 GaitMaster[5]를 제시하였다. 발 플랫폼의 다른 형태로, Sarcos 사는 계단 디바이스(steping device)를 만들어 가상 전쟁 상황에서 군인들을 훈련시킬 목적으로

"Sarcos Biport[6]"를 제시하였다. 슬라이딩 머신타입으로 Iwata는 일련의 롤러 스케이트 타입[7]을 제시하였다.

이상과 같이 다양한 이동디바이스가 제시 되었지만 대부분 제한된 지면만을 재현할 수 있어 평지, 계단, 경사, 회전 등을 하나의 디바이스로 구현할 수 있는 이동 인터페이스는 제시되지 않았다. 대표적인 이동 디바이스인 트레드밀은 전체 부피가 너무 커서 평지에서 달리기와 같은 빠른 모션은 가능하지만, 큰 관성으로 인해 빠른 경사지면 등을 구현하기에는 한계를 가진다. 또한 페달 타입의 디바이스는 1자유도의 간단한 모션만이 재현 가능하여 자연스런 사람의 보행을 재현하기에는 역부족이다. Iwata가 제안한 슬라이딩 머신은 지면의 경사나 계단 등을 구현할 수 없고, 발 플랫폼 구조인 GaitMaster의 경우 실제 만족할 만한 보폭 작업공간을 재현하지 못해 계단지면 이외에는 적용하기 힘들다. 또한, 정상적인 사람의 보행형태는 발이 지면에 닿을 때 발 바닥에서의 앞/뒤꿈치의 상대운동이 있지만 발에서의 상대운동을 고려한 디바이스는 개발되지 않고 있는 상태이다.

본 논문에서는 평지, 계단, 경사, 회전 등 다양한 지면에서 앞/뒤꿈치의 상대운동 재현 및 자연스런 보행이 가능한 새로운 이동디바이스인 가상걸음장치(Virtual Walking Machine)를 제시하고자 한다. 제안된 가상걸음장치는 직-병렬타입의 병렬구조로 구성되어 사람의 무게를 지탱할 수 있는 강성 및 자연스런 걸음을 위한 작업공간을 제공할 수 있어 사람의 걸음을 재현해 주는데 적합한 구조이다. 따라서, 제시된 구조가 자연스런 걸음 조건을 만족하도록 사람의 정상 보행(normal gait)데이터를 이용하여 디바이스를 최적으로 설계하고자 한다.

#### II. 가상걸음장치의 설계 요구사항

가상걸음장치를 설계하기 전에 우선 일반적인 사람의 보행 운동 및 발목 운동을 분석하는 것이 필요하다. 정상보행(Normal gait)은 팔다리와 몸통의 주기적인 상호작용 운동으로 몸의 중심을 완만하게 전환시키며 이동하는 일련의 과정이다. 보행을 결정 짓는 것으로는 슬부와 족부의 상호관계

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 25., 채택확정 : 2004. 10. 13.

윤정원, 류제하 : 광주과학기술원 기전공학과

(garden@gist.ac.kr/ryu@gist.ac.kr)

※ 본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(No. R01-2002-000-00254-0) 지원으로 수행되었습니다.

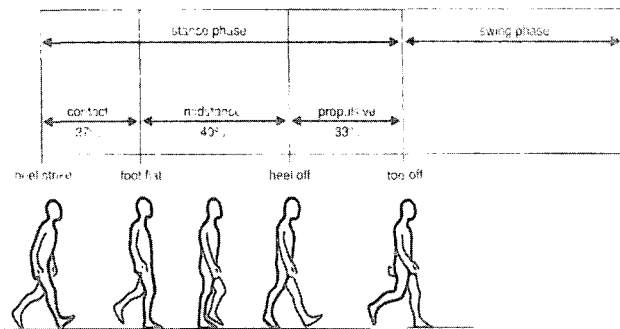
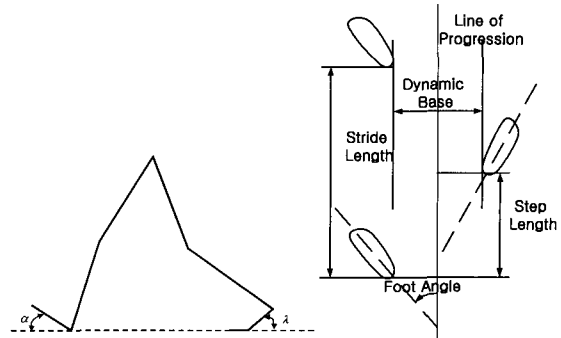


그림 1. 보행주기[8].  
Fig. 1. Gait cycle.

(Knee-ankle interaction), 무릎의 굴곡, 고관절 굴곡, 골반의 회전(Pelvic rotation), 골반의 측면검사(lateral tilting), 골반의 측면 점미(lateral displacement)등으로 이루어져 있다. 보행주기(gait cycle)는 발이 땅에 접지하고 있는 구간인 착지단계(stance phase)와 한쪽 발이 땅에서 들어올려져 발등이 다시 땅에 내려앉을 때까지의 구간인 걸음단계(swing phase)로 나뉘고 이 두 보행주기가 서로 율동적으로 교대하여 보행의 형태를 이룬다. 대략 전체 보행주기의 60% 기간 동안 착지단계가 차지하고 나머지 40%정도의 기간을 걸음단계가 차지한다 (그림 1). 착지단계 기간동안 사람의 발은 일정한 착지 각으로 땅에 착지하여 점차적으로 발등을 축으로 전진 방향으로 회전한 다음, 발이 지면과 평평해진 이후 발등과 발가락 사이의 상대회전각(MTP joint)에서 다시 회전이 일어나 발가락을 밀고 앞으로 전진한다. 따라서 발바닥의 상대 회전각이 자연스런 걸음을 위해서는 꼭 필요하다. 무릎과 족부는 뒤꿈치닫기(heel strike)의 쇼크를 부드럽게 흡수하며 몸 전체의 중심점을 완만하게 유지하는 기능을 한다. 착지단계동안 발과 지면과의 사이 각을 살펴보면 뒤꿈치 닫기 기간 동안 발등 중심부에서 30도의 회전각이 필요하고 발끝 밀기(Toe off) 동안 최대 발등과 발가락의 상대 회전각을 중심으로 최대 -60도 이상을 재현 할 수 있어야 한다. 그림 2(a)는 뒤꿈치 닫기 각( $\alpha$ ) 및 발끝 밀기 각( $\lambda$ )을 설명하고 있다. 그림 2(b)는 걸음 걸이를 표현하기 위한 속도, 걸음거리(step length), 걸음동안에 두 발사이의 간격(dynamic base) 등의 변수들이 있고, 위 변수들을 통해 걸음 조건들을 나타낼 수 있다. 평지의 일반 보행에서의 성능을 정리하면 다음과 같다.

걸음 속도 : 1.2m/s, 한걸음 거리 : 0.7m, 걸음동안의 상하운동 범위 : 5cm, 두발사이 간격: 10cm 이내, 진행 방향에 대한 발목 각도 (Foot angle)는 7도 이내 이고 걸음수(cadence)는 1분에 70-130보이며 평균 90보이다. 또한, 사람의 걸음동안 지면에 닿을 때 사람의 무게에 의한 중력 반작용 힘(Gravity Reaction Force)이 작용한다. 실제 지면에 발생하는 지면 반력값을 알면, 가상걸음장치의 힘 반영 특성을 정의 할 수 있다. 보행의 착지(stance)동안 힘 측정 판에 기록된 수직 중력 반력의 최고 값은 대략 사람 무게의 120%이고 전 후진 최대 힘은 대략 사람 무게의 20%이다. 중력 반력의 작용점을 압력의 중심(Center Of Pressure) 이라고 정의하고 압력중심은 발목중심에서 발가락으로 착지 기간동안 발등에서 발가락 방



(a) 발바닥의 상대 각 (b) 걸음 변수

그림 2. 보행 변수.

Fig. 2. Gait parameters.

표 1. 자연스런 걸음을 위한 설계요구사항.

Table 1. Design requirements for natural walking.

	걸음속도	작업공간	회전각	반력
평면 운동	전진 1.2m/s	전진 0.7m	발목각도 7도	전진 사람 무게의 20%
공간 운동	상하 0.1m/s	상하 0.05m	피치30도, 최대 앞/뒤꿈치 상대각 60도	사람 무게의 120%

향으로 전진한다. 이상의 내용들을 정리하여 표 1과 같이 실제 보행 시 필요한 성능을 요약하였다.

### III. 가상걸음장치의 개요

제안된 가상걸음장치는 평면운동을 하는 3자유도(X,Y, Yaw) 병렬기구 (3개의 모터와 각 모터에 두 개의 링크로 연결된 플랫폼으로 구성)형태의 평판과 이 플랫폼 위에 설치된 4개의 병진구동기로 발의 앞/뒤꿈치에 상대운동을 허락하는 4자유도 발판(상하,피치,롤, 앞/뒤꿈치의 상대운동)이 각 발에 위치하는 전체 14자유도의 구조로 되어있다 (그림 3). 즉, 각 발에 위치한 로봇은 전진 및 회전의 6자유도의 운동 및 발의 상대 각 운동을 재현할 수 있다. 제안된 구조는 전진 운동을 하는 걸음단계와 사람 무게를 지탱해 주는 착지단계의 실제 보행 특성을 고려하였다. 따라서, 전진 단계에서의 평면 병렬 로봇 구조의 평판 및 착지 단계에서의 스튜어트 플랫폼 형태의 발판구조로 분리하여, 각 걸음 단계에서 필요한 성능을 만족하도록 하였다. 특히 지면과 접촉하는 3자유도 평판 플랫폼에 볼캐스터(ball caster)를 장착하여, 평판에 작용하는 사람무게에 의한 힘 특성을 최소화 하여 적은 평판 구동기로 빠르고 강성이 큰 운동이 가능하게 하였다. 다음과 같이 새로운 가상걸음장치의 기구적 특징을 요약하면: a) 걸음의 평면 운동과 상하운동을 분리 한 기구, b) 전방향(omni directional), 평평하지 않은 지면의 구현이 가능하면서 자연스런 걸음을 위한 큰 작업공간 및 사람의 무게를 지탱할 수 있는 큰 힘 반영 특성, c)실제 걸음 시 발바닥의 상대 운동이 가능하도록 해서 보다 사람의 걸음에 가까운 모션이 발생 가능하다. 그림 3에서는 제안된 이동 디바이스를 이용한 가상

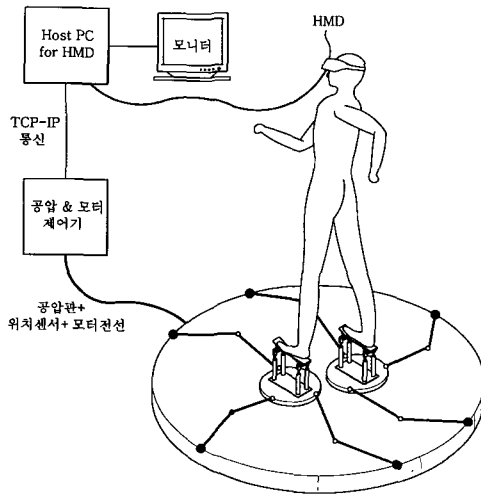


그림 3. 새로운 가상 걸음장치.  
Fig. 3. Novel virtual walking machine.

환경 시스템 구성도를 보여주고 있다. 사람은 HMD(Head Mount Display)를 착용하거나, 혹은 CAVE 디스플레이를 보는 상태에서 가상걸음장치 위에 서고 발은 발판과 연결된 상태에서 앞으로 나아가는 혹은 회전하는 걸기를 한다.

IV. 가상걸음장치의 설계

1. 평면기구 설계

1.1 기구부 설계

평면이동장치(평판)는 진진단계동안 걸음동작이 일어나도록 발을 따라가고 발이 지면에 착지 할 때 실제 지면과 같이 발이 미끄러지지 않도록 발을 지지해주는 역할을 한다. 또한 발이 장치의 플랫폼에 착지해 있을 동안 걸음을 뒤로 미끄러지게 해서 지속적인 걸음을 유지하도록 한다. 따라서 평면이동장치는 실제 사람의 보행을 위한 자연스런 보폭이 가능하도록 큰 전진 작업공간을 발생시키고, 발이 땅에 접지할 때 발생하는 만큼의 반력을 재생할 수 있어야 한다. 제한된 평면 이동장치의 기구는 RRR 형태의 평면 병렬기구가 각 발에 위치한 상태로 첫번째 조인트가 능동 조인트로 되는 구조이다. 평면 이동장치는 일반적인 보행 궤적을 재현하기 위해 상호 링크들의 충돌이 없어야 하고 특이점(singularities)이 작업공간 내에 존재하지 않아야 한다. 그리고 두개의 평면이동장치가 양 발에 각각 위치하면서 보행에 필요한 작업공간을 만들어야 하고, 이때 각 링크들의 충돌을 피하기 위해서 각 장치의 구동기는 비대칭적으로 위치해야 하며 이로 인해 장치의 등방성(isotropy)이 낮아 질 수 있다. 따라서 장치의 지정된 작업공간 내에서 등방성(isotropy)을 최대로 하도록 설계되어야 한다. 등방성을 목적함수(objective function)로 잡았을 때, 특이점 회피 및 플랫폼의 주어진 힘에 대한 구동기 힘의 균등성을 동시에 구현 할 수는 장점이 있다. 등방성은 주어진 디바이스의 자코비안 행렬의 CN(Condition number)를 사용하여 정의 될 수 있으며 CN은 다음과 같이 정의된다.

$$CN = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \quad (1)$$

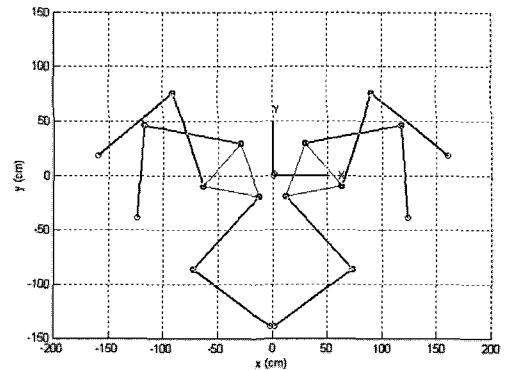


그림 4. 평면기구의 최적형상.  
Fig. 4. The optimum architecture for planar device.

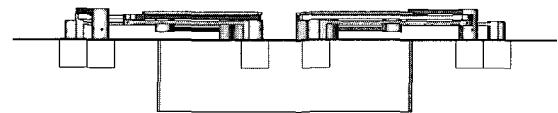


그림 5. 평면 기구의 3차원 모델.  
Fig. 5. Planar mechanism with 3D modeling.

여기서,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  는 자코비안 행렬의 특이값(singular values)의 최대, 최소값을 나타낸다. 그리고, 전체 작업공간에 대한 등방성 지수(Global Conditioning Index)는 다음과 같이 정의된다.

$$GCI = \frac{\int \frac{1}{CN} dw}{\int dw}, \quad 0 \leq GCI \leq 1 \quad (2)$$

여기서,  $w$ 는 로봇의 이동 가능한 작업공간을 나타낸다. 이 지표는 작업공간내의 전 범위에서의 기구학적 등방성을 나타낸다. 따라서, 최적 설계함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

- Maximize Isotropy (GCI)
- Subjects to Design variables limits
- Interference
- Workspace

여기서, 목적함수는 정해진 작업공간 내에서 링크 및 다른 플랫폼과의 충돌을 피하면서 GCI를 최대로 하는 것이다. MATLAB 5.3의 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하는 비선형 최적설계 함수  $fmincon()$  을 사용하여 최적화 문제를 풀었다. 이때 주의할 점으로 초기 값을 비선형 조건식을 만족하도록 선택되어야 하며, 다양한 초기값에 따른 결과 값을 반복적으로 실행한 결과 최종 선택된 평면이동장치의 형상이 그림 4에 나타나 있다.

최적 설계로 구해진 각 링크의 형상에서 서로 겹쳐 지는 부분이 있을지라도 그림 5에 보여진 것 같이 실제 3D 모델링에서 링크 간에 상하 방향 읍셋을 주어서 충돌을 피하도록 설계하였다.

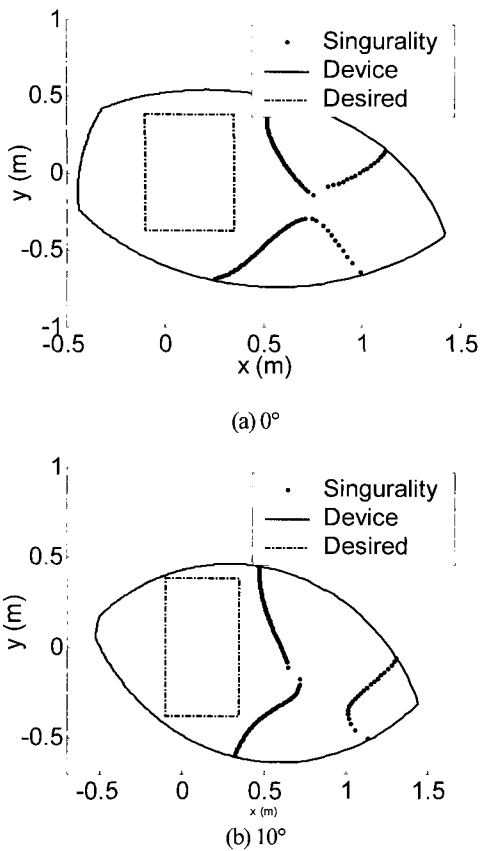


그림 6. 평면이동 장치의 특이점 및 작업공간.  
Fig. 6. Singularity and workspace of the planar device.

그림 6은 설계된 형상이 원하는 작업공간 ( $x=25\text{cm}$  이상,  $y=100\text{cm}$  이상)을 만족하면서 특이점(singularity)이 없다는 것을 보여주고 있다. 이때, yaw각이  $0^\circ, 30^\circ$  일 때 모두 지정된 작업공간(Prescribed Workspace)을 만족하는 것을 볼 수 있지만  $0^\circ$ 도 비해  $30^\circ$ 일 때 지정된 작업공간이 기구의 작업공간 경계에 가까이 가는 것을 알 수 있다. 또한 각 경우에 대해서 기구의 자코비안을 이용해서 수치적으로 구해진 특이점 궤적이 지정 작업공간 밖에 있는 것을 확인할 수 있다.

1.2 구동부 설계

구동부의 적용 가능한 최대 힘이 정해졌을 때, 디바이스 플랫폼에서의 최대 힘/토크는 플랫폼과 구동기 사이의 아래 힘/토크 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\tau = J^T F \tag{1}$$

여기서  $\tau^T$  는 구동부의 힘 벡터이고,  $F$  는 플랫폼의 힘 벡터이다. 제한된 구동부의 힘으로부터, 플랫폼에 적용 가능한 최대 힘/토크는 이산 수치 방법으로 계산될 수 있다[9]. 플랫폼의 각축에서의 최대 힘/토크는 각 구동부의 최대 힘이 정해진 범위를 넘기는 지의 유무를 이용하여서 이산적으로 계산될 수 있다.

그림 7은 주어진 병진 작업공간에서 모터의 최대 토크

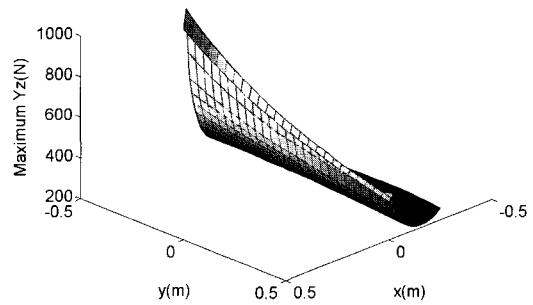


그림 7. 85Nm 구동기 범위에서 y축 최대 발생 힘.  
Fig. 7. The maximum y-axis forces at single actuator 85Nm.

표 2. 평면 디바이스의 성능.

Table 2. The performance of the planar device.

	Step length	Dynamic base	Foot angle	Braking Force
Spec	0.7 m	5-10 cm	7 deg	160N
Designed	0.8 m	0 cm	30 deg	200N

85Nm가 주어졌을 때 플랫폼이 낼 수 있는 y 축 방향 최대 힘을 보여준다. 여기서 작업공간의 x, y 좌표 변화에 따라 최대 937N에서 최저 211까지 발생할 수 있는 힘이 틀리며 지정 작업공간 내에서는 적어도 211N의 힘을 발생시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 최적 설계 및 적절한 모터의 선정으로, 평판 디바이스는 0.8미터의 step length, 10cm 이내의 dynamics base, 30도의 yaw 각, 200N 이상의 브레이크 힘을 발생시킬 수 있어, 자연스런 평면 운동에 필요한 걸음 조건들을 만족시킬 수 있었다.

평판의 모든 링크들은 디바이스의 이동 관성을 줄이기 위해서 가벼운 알루미늄 프레임으로 제작되었다. 또한 실제 장치와 지면 사이에는 볼 캐스터를 장착하여 사람의 무거운 무게로 인해 발생하는 마찰력을 제거해 모터에 작용하는 토크를 대폭 감소 시켰다. 그리고 전기 모터는 미쯔비시사의 3KW 출력의 저 회전 (1000rpm) 고 토크(86Nm) 모델을 선택하였다. 선택된 모터의 고 토크 특성으로 감속기의 사용 없이 플랫폼의 구동 링크에 직접구동방식(direct drive)으로 모터를 연결하였다. 직접구동방식은 저 마찰 특성 및 백러쉬(backlash)를 없애 빠른 동작을 구현할 수 가 있다. 게다가 링크들간의 조인트 마찰을 최소화 하기 위해서, 볼 베어링을 모든 회전관절 사이에 삽입하였다.

2. 공간기구 설계

2.1 기부부 설명

공간 기구는 실제 걸음 동작이 일어 날 때 발의 상하 모션을 제어하고 중력방향의 사람무게를 지탱하도록 설계되어야 한다. 또한 실제 걸음동작 동안 발바닥이 고정되어 있는 것이 아니라 앞발과 뒷발의 상대회전 운동이 일어나므로 상대 회전각을 생성시킬 수 있어야 한다. 또한 공간기구는 다양한 지면을 재현하기 위하여 상하운동 및 피치(pitch), 롤(roll)

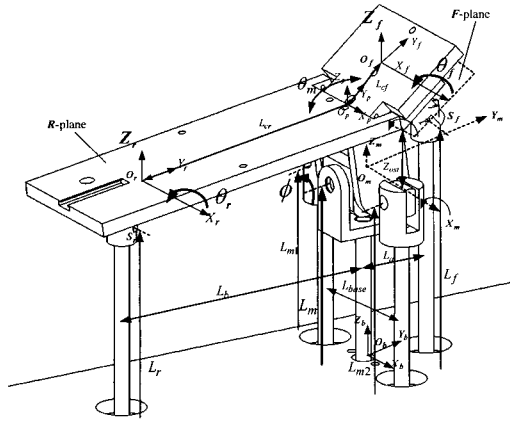


그림 8. 2개의 플랫폼으로의 4자유도 공간기구.  
Fig. 8. 4-dof mechanism with two platforms.

운동을 만들어 낼 수 있어야 한다.

스튜어트 플랫폼 형태의 일반적인 병렬로봇은 직렬로봇에 비해 적은 관성, 높은 강성, 좋은 정밀도, 편리한 이동성 등의 장점을 가져 재활치료등에 적합하다. 하지만 대부분의 병렬로봇은 단일 플랫폼으로 구성되어 있어, 사람과 같이 다분절로 이뤄진 신체를 지지하기 위해서는 두개 이상의 플랫폼이 필요하다. 따라서, 병렬기구이면서 두개의 플랫폼으로 구성되어 앞/뒤 발의 상대 각을 가능하게 하는 4자유도 병렬 구조 로봇을 제시하였다[10]. 그림 8에 보여진 것 같이 2개의 플랫폼으로 구성된 기구는 각 플랫폼에서 피치( $\theta_f$  and  $\theta_r$ ) 및 롤( $\phi$ ) 회전이 가능하고, 두 플랫폼의 상하 운동( $Z_f$  and  $Z_r$ )을 재현할 수 있다.

이 새로운 병렬기구 구조는 그림 8에 보여진 것 같이 전, 후 플랫폼 및 3개의 체인으로 구성되어 있다. 여기에서 P는 선형 관절, R은 회전관절, S는 구형관절을 의미한다. 이상의 구조로 발이 장치에 단단히 연결되어 있을지라도, 제안된 로봇 구조는 앞/뒤 발의 상대 각을 허락한다. 더구나, 제안된 기구부는 순 기구학이 간단한 단힌 해로 구해져서 일반 병렬로봇에 비해 계산로드가 적다. 게다가, 각 플랫폼은 단지 2개의 조인트 체인을 가지고 있어 사람의 무게를 지지하기 충분한 강성 및 큰 작업공간을 재생시킬 수가 있다. 따라서, 직병렬 로봇의 중간적인 특징을 가지는 제안된 공간 기구부 구조는 사람의 무게를 지탱하는 발에 적합한 기구적인 특징을 가진다.

2.2 기구부 설계

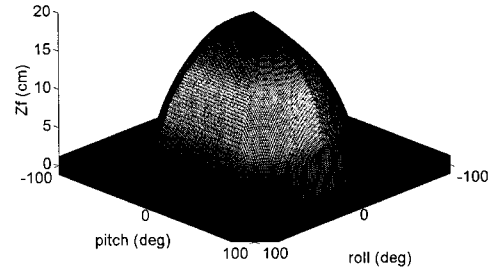
2장에서 설계 요구사항을 만족하도록, 컴퓨터 시뮬레이션으로 다음과 같이 설계 변수 값들이 결정되었다.

$$L_a = 5 \text{ cm}, L_b = 15 \text{ cm}, L_{base} = 10 \text{ cm},$$

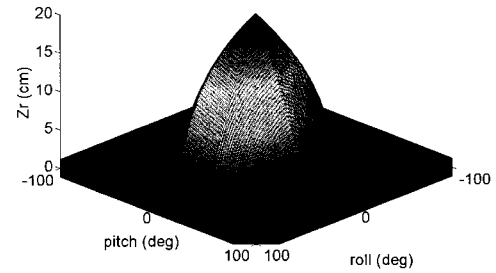
실린더 스트로크 = 20 cm

여기서  $L_a, L_b$  는 중간 체인에서 앞/뒤 플랫폼까지의 거리이고,  $L_{base}$  는 2자유도 기구부의 선형 관절사이의 거리이다(그림 8참조).

이상의 설계된 변수에 기반해서, 회전 작업공간은 그림 9



(a) 앞 판



(b) 뒤 판

그림 9. 공간기구의 작업공간.  
Fig. 9. Workspaces of the spatial device.

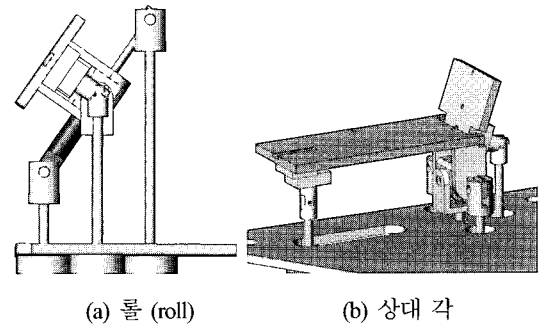


그림 10. 최대 허용가능 회전의 기하학적 재현.  
Fig. 10. Geometric representation of maximum allowable rotations.

와 같이 역기구학 및 구동부의 구동 가능한 길이의 제한 값을 이용하여 수치 해석적으로 구하였다. 그림 9(a)는 앞 플랫폼의 피치 각( $\theta_f$ ) 및 롤 각( $\phi$ )에 대한 상하 운동( $Z_f$ )의 이동 범위를 나타내고 있다. 반면, 그림 9(b)는 뒤 플랫폼의 피치 각( $\theta_r$ ) 및 롤 각( $\phi$ )에 대한 상하 운동( $Z_r$ )의 이동 범위를 나타낸다. 상하운동의 최대 작업 범위는 20cm 이고, 최대 앞/뒤 플랫폼의 피치 각은 각각  $\pm 50^\circ, \pm 70^\circ$ 를 초과하였다. 또한, 두 플랫폼의 최대 롤 각은  $\pm 55^\circ$ 를 넘어 섰다. 상대 각  $\theta_m$  ( $\theta_m = \theta_f - \theta_r$ )은 앞/뒤 발판의 상대 각에 의해서 구현되고, 최대 허용가능 각은  $\theta_f=0$  이고  $\theta_r=$  최대 혹은 최소 일 때  $\pm 70^\circ$ 까지 된다. 그림 10은 롤 각  $55^\circ$ 도 및 상대 각  $70^\circ$ 에서의 설계된 공간기구부의 기하학적 형상을 나타내고 있다.

2.3 재구성(Reconfigurability)

발판의 경우 그림 11(a)에 보이는 것같이 발판의 상대 각이

가능하기 때문에 사용자의 발이 발판에 부착되더라도 자연스런 이동 운동을 재생시킬 수 있다. 따라서 다양한 햅틱 효과들을 가상환경과 더불어 현실감 있게 재현시킬 수 있다. 하지만, 대형 로봇이 발에 부착 되기 때문에 걸음 재활동의 전형적인 걸음레직에 따른 훈련 등을 할 때는 효과적이나 사용자의 의도에 맞는 자연스런 걸음을 구현하기에는 어려움이 있다. 따라서, 4자유도 발판에 그림 11(b)와 같이 큰 판을 연결하고 앞 플랫폼에 위치한 선형 구동기를 분리 하다면 롤, 피치, 상하운동의 3자유도 운동 기구부로 변환하게 되고, 평판의 3자유도와 합쳐 한쪽 발판의 플랫폼은 총 6자유도의 운동을 발생시킬 수 있다. 즉, 사용자 발의 상대 각이 없어져 사용자의 발이 직접 발판에 고정되지 않는다. 따라서, 사용자의 의도에 맞게 센서 시스템으로 사람의 걸음 정보를 획득하여 발판이 발을 추적하도록 한다. 따라서, 사용자에게 로봇이 부착되지 않아 자연스런 걸음을 재현할 수 있다. 이때 추적 오차를 보상하기 위해서 발판을 상대적으로 크게 하였다. 그림 12는 큰 판의 부착 여부에 따라 발이 발판에 부착되어 다양한 햅틱효과를 발에 재현 할 수 있는 햅틱모드의 14자유도의 인터페이스 장치(그림 12(a))에서 사용자 발이 로봇에 부착되지 않아 큰 발판 위에서 자연스런 걸음이 가능한 이동(mobility) 모드로의 12 자유도의 인터페이스 장치로의 변환이 가능함을 보여주고 있다.

2.4 구동부 설계

공간 디바이스는 다양한 지표면을 재현하기 위해 충분한 작업공간 및 사람의 무게를 지탱할 수 있는 힘 반영 능력이

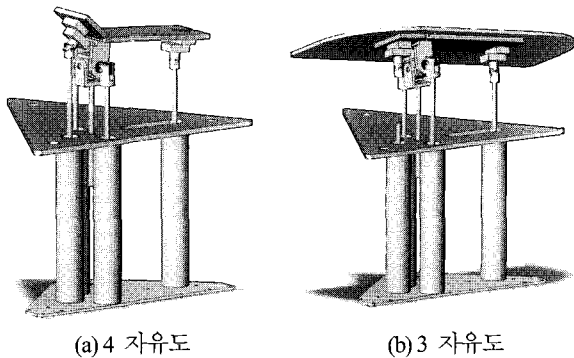


그림 11. 공간기구의 재구성. Fig. 11. Reconfigurability of the spatial device.

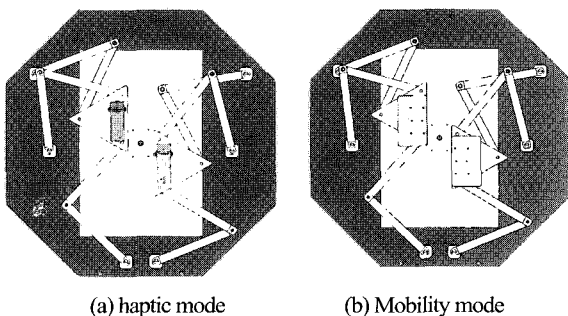


그림 12. 가상걸음장치의 재구성. Fig. 12. Reconfigurability of the virtual walking machine.

가지고 있어야 한다. 또한 자연스런 걸음에서 상하운동 범위가 5cm 이내이지만 계단 및 경사 등의 고려 및 실제 구현시의 힘 효율을 생각해서 20cm의 운동 범위를 가지면서 100psi에서 최대 1000N 이상의 힘을 발생시킬 수 있는 지름 50φ의 공압 실린더를 선택하였다.

지름 50φ의 공압 실린더(최대 힘: 100psi에서 1000N)가 최대 힘 1000N으로 제한될 때, 플랫폼의 최대 힘 반영 능력이 3.2 장의 평판에서와 같은 방법으로 자코비안 관계식 및 이산 수치 해석 법으로 구해질 수 있다. 그림 13(a)에 회전 작업공간 내의 피치 및 롤 각의 변화에 대해 롤 축에 대한 최대 토크  $T_{\phi}$ 는 104Nm를 초과하고, 반면에 피치 축에 대한 최대 토크  $T_{\theta}$ 는 248Nm를 초과한다(그림 13(b)). 최대 토크  $T_{\phi}$ 는 2자유도 기구부에서 생성되는 롤 각과 피치 각이 서로 독립적이므로, 피치 각의 변화에 영향을 받지 않는 것을 그림 13(a)에서 볼 수 있다. 그림 13(c)는 피치 및 롤 각의 변화에 대해서 z축에 대한 최대 힘  $F_z$ 이 플랫폼의 센터에서 적어도 1100N 이상 발생 가능한 것을 보여준다. 두 회전각이 0일 때는 최대 발생 힘이 3000N이 된다. 이 값은 3개

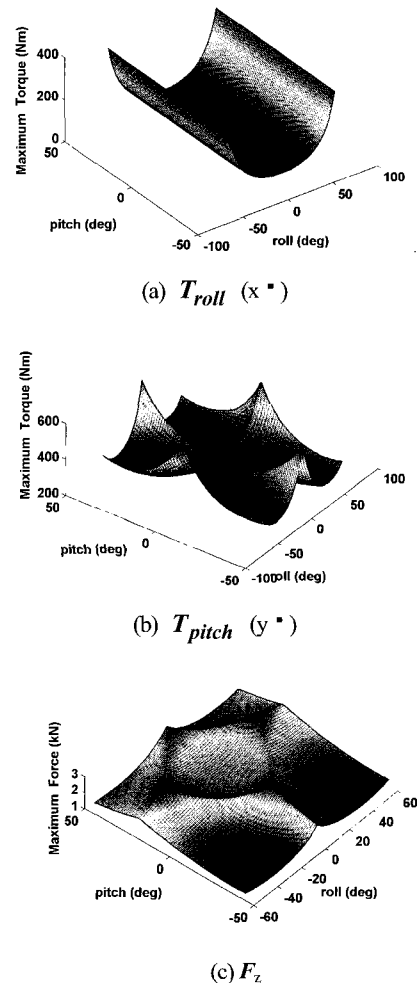


그림 13. 1000N 구동기 범위에서 최대 발생 힘. Fig. 13. The maximum forces at single actuator 1000N.

표 3. 공간 디바이스의 성능.

Table 3. Specifications of the spatial device.

	Vertical motion	Pitch angle	Roll angle	Supporting force
Spec	5cm	30deg	-	1000N
Designed	10cm	20deg	25 deg	1000N

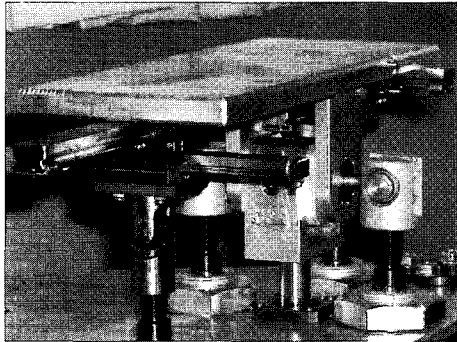


그림 14. 공간기구(발판)의 제작.

Fig. 14. The fabrication of the spatial device (footpad).



그림 15. 안정장치 및 가상걸음장치의 제작.

Fig. 15. The fabrication of the virtual walking machine and safety devices.

의 구동부 각각의 최대 제한 값의 합과 같다. 마지막으로 두 플랫폼의 상대운동에 의해서 발생될 수 있는 최대 토크는 두 플랫폼의 상대 토크 값에 의해서 최대 300Nm까지 구현할 수 있다.

표 3은 최종 설계된 발판의 성능 및 2장에서 제시한 공간 기구부의 필요한 성능 및 설계 결과값을 요약 비교하였다. 표 3에 근거하여, 정상걸음을 위한 성능 요구사항을 발판이 만족하는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 이상의 설계로 제작된 발판을 보여주고 있다. P-P 조인트는 2개의 리니어 가이드를

xy 스테이지와 같이 수직으로 직렬 연결하였고, 구형 관절은 유니버설 조인트와 회전관절의 합으로 구현하여 회전 각을 크게 하였다.

따라서, 가상 걸음장치의 각 기구부 및 구동부의 설계로 전체 디바이스는 사람의 무게를 지지 할 수 있는 힘 성능 및 자연스런 걸음이 가능한 작업공간을 제공한다(전진 작업공간: 최대 0.8m, 회전 작업공간: 피치 최대 30도 이상, 앞/뒤꿈치 상대 각 60도 이상, 힘 반영능력: 100kg).

3. 안전 장치 및 가상걸음장치 제작

기구부 및 구동부 설계 외에, 가상걸음장치 위에서 실제 보행할 때 안정성을 보장하기 위해서 사용자가 하니스(harness)를 착용하게 하여 사용자 실수 혹은 가상걸음장치의 오 작동등에 의해서 사용자가 플랫폼 위에서 떨어지는 경우를 대비하였다. 또한, 평행봉을 설치하여 보행 시 몸의 평행이 어려운 경우 평행 유지를 위해 설치 되었다. 이상의 보조 장치들은 가상걸음 장치 위에서의 보행 익숙도, 제어기의 안정성, 실제 사용자의 보행 수준에 따라서 착용 유무를 결정할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 가상 환경에 존재하는 평지, 계단, 경사와 같은 다양한 지면에서 사용자가 자연스런 걸음으로 인터페이스할 수 있는 새로운 가상걸음장치를 제시하였다. 제안된 장치는 3자유도의 평판 및 발바닥의 상대 각을 포함한 4자유도의 발판이 직-병렬로 연결된 7자유도 로봇이 각 발에 위치하는 총14자유도의 새로운 로봇 구조로 구성되어 있다. 각 발에 평판 및 발판이 직-병렬형태로 구성되어 있어, 사람의 무게를 지탱할 수 있는 강성 및 보행 시 필요한 충분한 작업공간을 제공할 수 있다. 또한, 제안된 구조가 자연스런 걸음을 만족하도록 정상 보행 분석데이터를 기초로 기구부, 구동부를 설계하여 전진 작업공간 : 최대 0.8m, 회전 작업공간 : 피치 최대 30도 이상, 앞/뒤꿈치 상대 각 60도 이상, 힘 반영능력 : 100kg 의 성능을 만족하였다. 향후 과제로 센스, 제어시스템의 구현 및 구현된 가상걸음 장치의 평가를 수행할 예정이다.

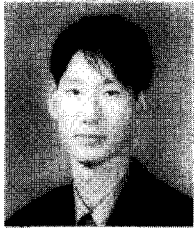
참고문헌

- [1] J. M. Hollerbach, "Locomotion interfaces," in: *Handbook of Virtual Environments Technology*, K.M. Stanney, ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2002, pp. 239-254.
- [2] D. C. Brogan, R. A. Metoyer, and J. K. Hodgins, "Dynamically simulated characters in virtual environments," *SIGGRAPH Visual Proc.*, pp.216, 1997.
- [3] R. R. Christensen, J. M. Hollerbach, Y. Xu, & S. G. Meek, "Inertial-force feedback for the treadport locomotion interface," *Presence*, vol. 9, no. 1, pp. 1-14, 2000.
- [4] H. Noma, T. sugihra, and T. Miyasato, "Development of ground surface simulator for tele-e-merge system", *Proc. of IEEE 2000 Virtual Reality*, p. 217, 2000.
- [5] H. Iwata, "The gaitMaster: locomotion interface for uneven virtual Surface," *Proc. of 4th VRSJ Annual Conf.*, 1999, 345-348.
- [6] [http://www.sarcos.com/interpic\\_virtualinter.html](http://www.sarcos.com/interpic_virtualinter.html)
- [7] H. Iwata and T. Fujii, "Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environments," *Proc. of IEEE*

1996 *Virtual Reality Annual Int'l Symp.*, pp. 60-65, 1996.

- [8] J. Perry, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function* (Thorofare, N. J. :Slack Inc., 1992).
- [9] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2000, pp. 254-255.

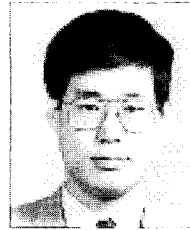
- [10] J. Yoon and J. Ryu, "A new family of 4- dof Parallel mechanisms (1T- 3R and 2T-2R) with two platforms and its application to a footpad device", *ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference*, DETC 57100, 2004.



**윤 정 원**

1973년 5월 1일생. 1998년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 2000년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2000~현재 동 대학원 기전공학과 박사과정. 관심분야는 병렬로봇을 이용한 인간-로봇 상호작용분야의 설계/제어 및 재활

훈련에의 적용.



**류 제 하**

1959년 7월 19일생. 1982년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1984년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1991년 The Univeristy of Iowa, 기계공학과(공학박사). 1992년 ~1994년 United Defence LP 선임 연구원. 1995년~현재 광주과학기술원 기전공학

과 교수. 관심 분야는 역/촉감제시장치 설계 및 제어, 컴퓨터 햅틱스, 교육 및 재활 훈련에 적용.