

가상현실 대화용 가상걸음 장치의 지능제어

Intelligent Control of a Virtual Walking Machine for Virtual Reality Interface

윤 정 원, 박 장 우, 류 제 하*
(Jungwon Yoon, Jangwoo Park, and Jeha Ryu)

Abstract : This paper proposes intelligent control of a virtual walking machine that can generate infinite floor for various surfaces and can provide proprioceptive feedback of walking to a user. This machine allows users to participate in a life-like walking experience in virtual environments with various terrains. The controller of the machine is implemented hierarchically, at low-level for robust actuator control, at mid-level for platform control to compensate the external forces by foot contact, and at high-level control for generating walking trajectory. The high level controller is suggested to generate continuous walking on an infinite floor for various terrains. For the high level control, each independent platform follows a man foot during the swing phase, while the other platform moves back during single stance phase. During double limb support, two platforms manipulate neutral positions to compensate the offset errors generated by velocity changes. This control can, therefore, satisfy natural walking conditions in any direction. Transition phase between the swing and the stance phases is detected by using simple switch sensor system, while human foot motions are sensed by careful calibration with a magnetic motion tracker attached to the shoe. Experimental results of walking simulations at level ground, slope, and stairs, show that with the proposed machine, a general person can walk naturally on various terrains with safety and without any considerable disturbances. This interface can be applied to various areas such as VR navigations, rehabilitation, and gait analysis.

Keywords : virtual walking, locomotion interface, virtual reality, intelligent control, haptics

1. 서론

가상현실기술은 실재하지 않거나 먼 거리에 있는 환경을 컴퓨터 그래픽등으로 가상 세계를 생성해주고 여러 인터페이스 장치를 사용하여 인간의 오감 (시각, 청각, 촉각, 후각, 미각 등)에 적절한 신호를 전달하여 줌으로써 현재 그 환경에 실재하고 있다고 느끼도록 만들어 주고 가상세계와의 상호작용을 통하여 의료 진단, 치료, 재활, 수술, 게임, 훈련, 교육, 설계 등에 유용한 도구 및 환경을 제공하는 기술이다. 그런데 질 좋은 가상현실 도구 및 환경은 실제의 현실을 상당히 정확하고 실감있게 묘사할 수 있어야 하며 따라서 사용자에게 자연스럽게 편리한 상호작용을 허락하는 인터페이스 기술을 개발하여 현실감(몰입감)을 극대화하는 것이 매우 중요하다[1,2]. 가상현실 시스템에서 인간의 오감 체험을 위한 감각 생성을 위해 고안된 인터페이스 장치들로 시각 표시 장치, 위치 추적용 장치, 음향 인터페이스 장치, 장갑용 입력 장치, 촉각이나 힘 되먹임이 가능한 햅틱(haptic) 인터페이스 장치, 후각용 인터페이스 장치 등이 현재 까지 나와 있으나 역/촉감의 제시장치를 제외하고 조작성이 능동적으로 가상현실에 참여하여 상호작용을 경험할 수 있는 방법이 현재까지는 제한적이다.

따라서 가상환경에 능동적으로 참여하면서 실제의 공간

감각을 제공해주기 위한 이동(locomotion) 인터페이스는 제한된 공간의 가상환경 안에서 걸음과 달리기와 같은 사람의 움직임(mobility)을 시뮬레이션 해서 사람의 에너지를 발산케 하는 디바이스이다[3]. 따라서, 이동인터페이스를 이용하여 하지 및 보행에 문제를 가진 환자를 일상생활에서 걷기에 익숙하게 할 수 있는 재활운동장치, 방안에서 운동을 가능케 하는 운동기구, 지각운동(sensorimotor Integration)과 항해에 관련된 여러 연구를 수행 할 수 있는 심리연구용 시스템, 자동차의 조립라인설계, 배의 내부 설계 등에 이용되는 가상설계(virtual design)분야, 군사작전중의 군인, 경찰의 순찰, 소방수의 화재 진압 등의 가상환경을 이용한 가상환경 훈련, 걸음새등을 분석할 수 있는 측정 도구로 사용되는 보행분석, 박물관, 역사적 유물, 달표면 걷기 등을 체험케 할 수 있는 교육용 도구등에 적용 가능하다.

이상의 다양한 적용분야에 이동인터페이스를 사용하기 위해서는 평지뿐만 아니라 계단, 경사 등의 다양한 지면을 생성시킬 수 있어야 한다. 하지만 기존에 제시된 이동 인터페이스는 평지 및 경사지면을 위한 1축 Treadmills[4], 걸음 방향의 전환을 위해 회전을 허락하는 2축 Treadmills[5-7], 3자유도 병진운동재현으로 계단지면 시뮬레이션을 허락하는 불규칙 지면 형성용 제어-플랫폼 타입[8-10] 등으로 제한된 지면 형성능력을 가지고 있었다. 따라서, 다양한 지면생성을 위해 사용자의 양 발에 6자유도의 로봇 플랫폼이 위치한 가상걸음장치(virtual walking machine)[11]를 제시하였다. 제안된 이동인터페이스는 총 12자유도의 병렬로봇 구조의 하이브리드 타입 플랫폼으로 구성되어 평지, 계단, 경사등의 다양한 지면을 생성시킬 수 있고 정상보행분석 데이터에 기반해 자연스런 걸음을 만족하도록 최적 설계되었다. 하지만, 제안된 로봇 플랫폼타입의 인터페이스를 이용하여 사용자가 자연스런 걸

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 1. 5., 채택확정 : 2006. 6. 6.

윤정원 : 경상대학교기계항공공학부 항공기부품기술연구센터

(jwoon@gnu.ac.kr)

박장우, 류제하 : 광주과학기술연구원 기전공학과

(jw7912@gist.ac.kr/ryu@gist.ac.kr)

※ 본 논문은 한국 과학재단 목적기초연구(No. R01-2002-000-00254-0) 및 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-005-J09902).

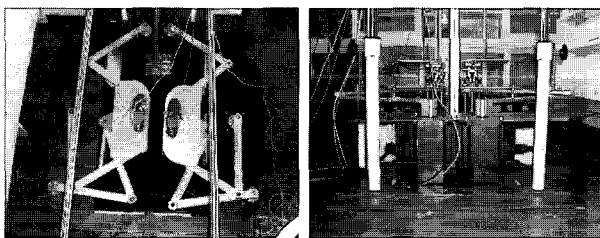
음을 실제로 걷기 위해서는 사용자의 걸음운동정보의 실시간으로 획득을 위한 센서시스템의 설계, 정확한 로봇 플랫폼의 위치 및 속도제어, 제한된 작업공간에서 사용자의 지속적인 걸음을 허락하기 위한 걸음제어 알고리즘등이 적절하게 설계되어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 사용자가 로봇플랫폼 위에서 안정성을 보장하면서 자연스런 걸음을 허락하는 가상걸음장치의 제어방법론을 제시하고자 한다. 제 II장에서는 가상걸음장치의 개요를 설명하고 제 III장에서는 사람의 걸음정보를 획득하기 위한 센서시스템, IV 및 V장에서는 가상걸음장치의 제어 및 실험결과를, 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론 및 추후과제로 마무리하고자 한다.

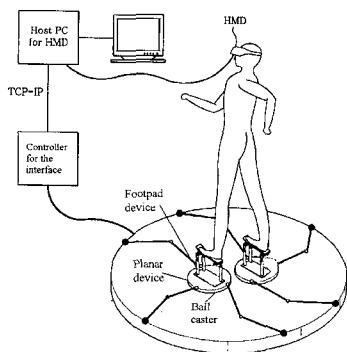
II. 가상걸음장치 개요

1. 가상걸음장치

그림 1은 본 연구에서 제시한 가상걸음장치(VWM)의 제작된 장치 및 전체 시스템 구성도를 보여준다. 제안된 VWM은 평면운동을 하는 3자유도(x, y, yaw) RRR타입 병렬기구(3개의 모터와 각 모터에 두 개의 링크로 연결된 운동대로 구성)와 이 운동대위에 설치된 3개의 병진구동기로 발의 공간운동(z, pitch, roll)을 허락하는 발판으로 구성되어 있다[11]. 따라서, 본 장치는 전방위 (omni-directional) 불규칙 지표면 (uneven terrain)을 시뮬레이션 할 수 있는 새로운 걸음 인터페이스장치로 주요 보폭이 충분히 나오도록 정상보행분석에 기반한 성능조건(전진 작업공간: 최대 0.8m, 회전 작업공간: 피치 최대 30도 이상, 힘 반영능력: 100kg)을 만족하도록 최적설계가 수행되었고, 위 설계로써 평면운동과 상하운동이 독립적으로 되어 기존의 stewart타입 플랫폼 [12]을 이용하는 기구부의 단점들을 극복할 수 있었다.



(a) 평면도 (b) 정면도



(c) 가상환경과의 상호작용

그림 1. 로봇 플랫폼구조의 가상 걸음장치.
Fig. 1. A virtual walking machine with robotic platforms.

여기서 3자유도 병렬구조의 평판운동대는 볼베어링으로 지면과 접촉하여 평면운동 시 작은 크기의 모터로도 빠르고 강성이 큰 운동을 만들어내는 장점이 있다. 발판은 공간3자유도에서 앞/뒤발의 상대운동을 허락하는 4자유도 구조로 재변형(reconfigurable)가능하고, 4자유도 발판에서는 발이 로봇플랫폼에 부착되어 로봇이 생성하는 걸음 궤적을 발이 따라가도록 하는 수동모드(passive mode)의 인터페이스로 사용 가능하다. 반면, 본 논문에서 사용하고 있는 3자유도 발판은 발과 발판이 서로 물리적으로 연결되어 있지 않아 사용자의 자연스런 걸음을 허락한다. 즉, 사용자의 발이 직접 발판에 고정되지 않고 사용자의 의도에 맞게 센서 시스템으로 사람의 걸음 정보를 획득하여 발판이 발을 추적하도록 한다. 사람은 HMD(Head Mount Display)를 착용하거나 혹은 CAVE와 같은 대형 디스플레이 평면을 보는 상태에서 VWM위에 서서 걷기를 수행한다. 그러므로 제자리 걷기가 아니라 treadmill에서 걷거나 escalator에서 반대방향으로 걷는 것과 같이 실제로는 사람이 나아간 만큼 플랫폼이 원래 위치(중립위치)로 되돌려주므로 사람은 바깥에서 보면 그 자리에 있으나 가상환경하고 연동되면 가상환경을 실제 걷는 것처럼 느끼게 된다.

III. 센서 시스템 구성

사용자 발이 로봇 플랫폼에 고정되지 않는 경우 로봇플랫폼 제어를 위해 사용자 발을 정확히 추종하고 발이 땅과 접촉하는 것을 감지하는 센서시스템의 설계가 매우 중요해진다. 따라서, 본 장에서는 가상걸음장치 위에서 자연스런 걸음을 위한 사용자 발 위치 및 걸음 상태를 파악하는 센서시스템에 대해 설명 할 것이다.

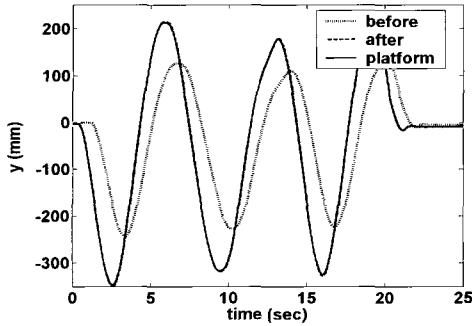
1. 걸음 위치 센서

사람의 걸음은 발이 땅에 접지하고 있는 착지단계(stance phase)와 발이 땅에 닿지 않고 앞으로 전진하는 회전단계(swing phase)로 나뉜다. 회전단계에는 상대적으로 저렴한 가격과 사용하기 편리한 Polhemus 3D 자기타입 모션트래커(magnetic motion trackers, FASTRACK)를 사용하여 발의 위치와 방향을 측정하였고 동작 중에 신발과 분리되지 않도록 그림 2와 같이 단단히 고정하였다.

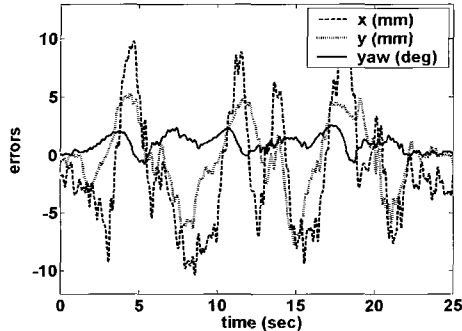
그러나 자기타입 모션트래커는 일반적으로 주위의 금속재료에 의한 자성노이즈에 매우 약하고, 리시버(receiver)와 트랜스미터(transmitter)사이의 거리가 증가하면 오차가 매우 심각해지는데 실제 가상걸음장치에서의 걸음은 FASTRACK이



그림 2. 신발에 부착된 자기타입 모션트래커.
Fig. 2. Magnetic motion tracker attached to the shoe.



(a) 전후방향 (back-and-forth direction)



(b) 보정 오차

그림 3. 자기타입 모션트랙커의 보정 결과.

Fig. 3. Calibration results of a magnetic motion tracker.

정확도를 보장하는 30cm보다 넓은 작업공간을 필요로 한다. 따라서, 모션트랙커의 정확도 및 안정성을 증가시키기 위해서 보정(calibration)을 실시하였다. 우선, 측정오차를 보상하기 위해서 작업공간 안에서 트랙커 센서의 실제 위치와 그에 대응하는 센서 측정위치 값을 포함하는 보상테이블을 실험적으로 획득할 필요가 있다. 보상테이블 작성방법으로, 실제 위치 값 및 센서에서 얻어진 위치 값을 저장하기 위해 리시버를 신발에 부착시킨 상태에서 신발을 플랫폼 위에 올려놓고 플랫폼을 사람이 임의적으로 움직여 실제 플랫폼 위치 값 및 트랙커 센서 값을 측정 하였다. 이때 플랫폼의 실제 위치는 모터 회전각의 측정 및 순기구학을 계산하여 수치적으로 획득 할 수 있었다. 위 과정으로 구한 센서의 실제 값과 측정 값을 이용하여 보상테이블을 작성하여 공간왜곡함수(field distortion function) [13]를 오프라인(off-line)상으로 계산 하였다. 마지막으로, 구해진 공간왜곡함수 및 실시간으로 획득된 센서 값을 이용해 측정된 센서위치에 따른 위치오차 값을 계산하고 측정된 센서 값에서 오차 값을 빼는 과정을 통해 센서 값을 실시간으로 보정하였다.

그림 3(a)에서는 걸음 전후방향 (back-and-forth direction)에서의 플랫폼의 위치 및 플랫폼에 부착된 모션트랙커 센서의 보정 전 및 보정 후의 값을 보여주고 있다. 이 때 보정은 600 개의 측정 데이터를 사용하였고, 그림 3(b)는 x, y, yaw의 평면 축에 대한 오차를 보여주고 있다. 보정을 통해 오차 감소율을 통한 정밀도는 3-4배 이상 증가하였고, 보정 후에 x, y, yaw축의 최대 오차 값은 각각 10mm, 6mm, 3mm였다. 실험 값에서 최대 10mm까지의 센서 오차가 발생하였지만 이 오

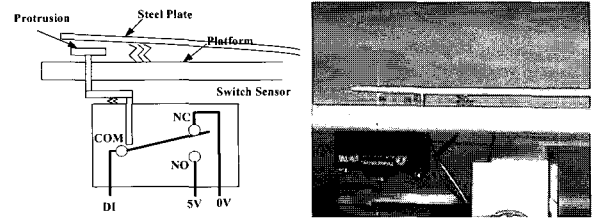


그림 4. 마이크로 스위치센서를 이용한 걸음단계감지.

Fig. 4. The walking phase detection using micro switch sensor.

차는 발에 비해 비교적 큰 이동플랫폼 (250mm×500mm)의 사용으로 사람 발의 추적에 큰 문제가 되지 않았다.

2. 스위치 센서를 통한 걸음상태 전환 감지

압력센서를 통한 걸음의 상태(phase) 감지는 마이크로 타입의 스위치 센서(Honeywell Corp., SZM-Z15-G16)를 사용하였다. 분당 최대 240회의 on/off가 가능하며, 매우 작은 힘(대략 100gf)에도 스위칭이 가능한 특징을 가지고 있다. 또한, 미세한 힘의 작용에 의해 on/off의 두 신호만을 출력하기 때문에 사용자의 무게에 상관없이 정확하고 강건한 걸음 상태의 감지를 보장할 수 있다.

스위치 센서는 그림 4에 보여진 것 같이 플랫폼에 설치되었다. 센서의 몸체는 플랫폼 아래에 부착되었고 스위치 돌출부와 얇은 철판은 플랫폼 위쪽에 놓여졌고, 철판은 사용자의 발이 철판 위에 착지할 때 스위치 센서의 돌출부를 누르도록 배치되었다. 350mm* 250mm*2mm 크기의 철판은 발이 철판의 어떤 위치에 착지하더라도 스위치 센서를 구동하도록 곡면 형태로 제작되었다. 철판과 센서 돌출부사이에는 스프링이 발의 착지이후에 철판과 스위치의 일정한 간격을 유지하도록 설치되었고, 스프링 상수는 철판을 지지하기에는 충분하지만 사람이 최소한도로 적게 스프링력을 감지하도록 선택되었다. 스위치 센서를 측정하기 위해 5V와 0V가 스위치 센서의 NO, NC 터미널에 각각 공급되었고, Com 터미널이 DI (Digital Input) 모듈에 연결되었다. 발이 철판과 접촉하면, 센서의 돌출부는 NCTerminal에서 NO터미널로 연결하고 COM터미널이 0V에서 5V로 변환된다. 따라서, 제안된 스위치 센서로 간단하면서 강건하게 걸음상태를 측정할 수 있었다.

IV. 가상걸음장치 제어

제안된 가상걸음장치 제어의 목적은 회전단계 동안에 빠르고 정확하게 사용자의 발을 추종하고, 착지단계 동안에 사용자 걸음에 의한 외란에 강건성을 유지하면서 가능한 부드럽게 원래 위치로 돌아오게 하는 것이다. 이상의 목적을 위해서, 제어기는 계층적으로 강건 구동기제어를 위한 하위레벨 제어, 발의 충격에 의한 외부력을 보상하기위한 중간레벨 제어, 지속적인 걸음을 위한 걸음레절생성 및 다양한 지면효과 재생을 위한 상위레벨제어기로 나뉜다.

1. 하위레벨 제어

하위 수준의 제어는 각 구동기의 명령계적을 만들어 내는 제어로 양 발에 위치하는 2개의 평판 3자유도 디바이스는 AC 전기모터로 제어하고 공간운동을 하는 2개의 3자유도 발판디바이스는 공압실린더로 제어한다. 평면 3자유도 제어에 사용되는 AC 전기모터의 경우 모터 출력 단에 장착되어 있

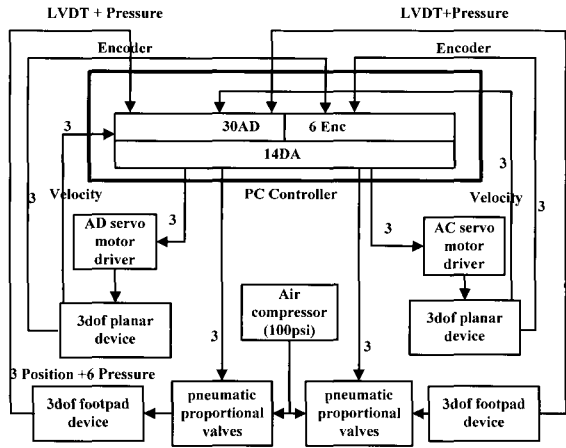


그림 5. VWM 제어용 하드웨어.
Fig. 5. The controller hardware for the VWM.

는 엔코더 신호를 이용해 회전각을 측정하고 모터 출력 단에서 나오는 전류 값을 이용하여 모터 출력 단의 토크를 제어한다. 상하, 피치, 롤 운동을 만들어 내는 발판의 경우 고속 Servo 밸브를 사용하여 서보비례제어를 한다. 한 발에 3개의 공압실린더가 설치되고 위/아래 실린더 압력을 제어해주기 위하여 각 발마다 6개의 압력센서가 필요하며 3개 채널을 갖는 공압 밸브가 각 발 당 필요하다. 따라서, 그림 5에 나타난 것 같이 VWM의 12자유도 제어하드웨어 시스템을 구성하였다. 전체 제어는 통신 및 데이터 측정등에 유리하도록 윈도우 기반의 실시간 시스템으로 구현되었다.

1.1 평판 디바이스(Planar device) 제어

병렬기구타입 평판 디바이스의 경우 순 기구학 해가 해석적으로 존재하지 않기 때문에 연성된 운동방정식을 조인트 변수 공간의 닫힌 형태(closed form)로 나타낼 수 없다. 따라서 구동부인 모터와 모터에 연결된 링크를 이차시스템으로 모델링하고 플랫폼과 링크의 관성력에 의한 연성 효과들은 구동부에 대한 외란으로 간주한 적분 슬라이딩 모드 제어를 구현하였다[14].

1.2 발판 디바이스(Footpad device) 제어

발판 제어를 위해 고속의 비례제어 밸브(PositionX Corp.)를 사용하였고 저 마찰에 변위센서를 포함한 양 방향 제어 실린더(Bimba Corp.)를 사용하였다. 제어 입력은 양 단의 압력차에 비례하게 정해지고 다음과 같이 나타내어진다.

$$\Delta P = (K_p + K_d s)(L_c - L_m) + K_m(P_l - P_u) \quad (1)$$

여기서 L_c, L_m 은 각각 실린더 변위의 입력과 출력값을 나타내고, K_p, K_d 은 변위의 에러값에 대한 비례, 미분 계인이며, P_b, P_u 은 실린더 양단의 압력을 나타내며, K_m 은 압력 피드백 계인이다. 여기서, 위치제어에 추가된 압력 피드백은 실린더에 작용하는 외부힘에 비례하며 시스템의 안정성을 증가 시켜 사용자 발에 의해서 발생하는 외란을 효과적으로 상쇄시키는 역할을 한다.

2. 중간단위 제어

중간레벨 제어에서는 평판 및 발판의 플랫폼 제어로서 각 장치는 사람의 발을 빠른 속도로 추적해야 하며, 발이 지면

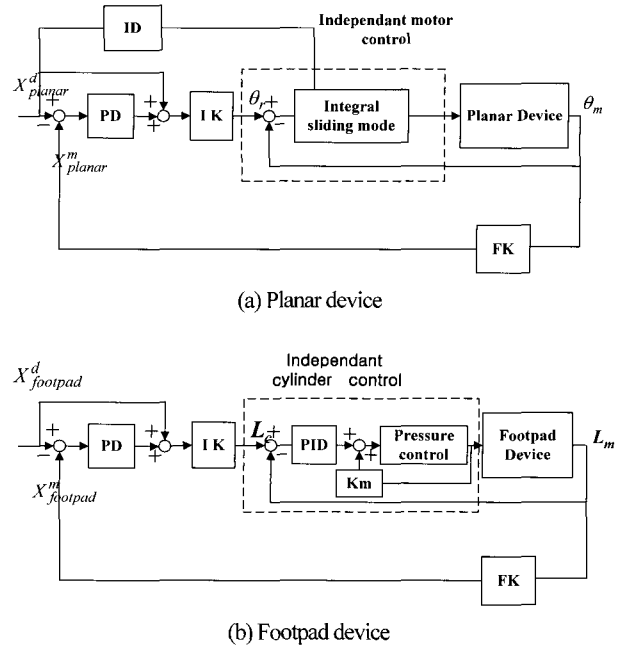


그림 6. 중간레벨 제어기 구성도.
Fig. 6. Mid-level controller block diagram.

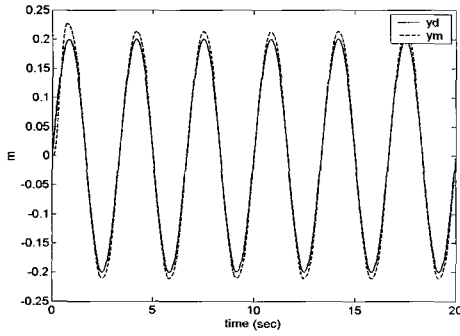
에 닿을 때 발생하는 힘에 대해서도 강건하여야 한다. 따라서 각 장치의 강성을 증가시키기 위해서 플랫폼 좌표계에서의 PD 타입 피드백 제어를 수행하였다. 제안된 이동장치는 2개의 3자유도 병렬로봇 시스템의 조합이라 적은 계산량으로 실시간으로 순 기구학을 얻을 수 있었고, 플랫폼 좌표계에서의 피드백이 가능하였다. 플랫폼의 PD제어기는 원하는 궤적 X_d 가 주어졌을 때 모터 엔코더에서 측정된 모터 회전각을 이용해 순 기구학을 통한 플랫폼의 좌표 X_m 이 측정되고 (2)와 같이 최종 입력이 결정된다.

$$X_{planar}^C = X_{planar}^d + K_p(X_{planar}^d - X_{planar}^m) + K_d(\dot{X}_{planar}^d - \dot{X}_{planar}^m) \quad (2)$$

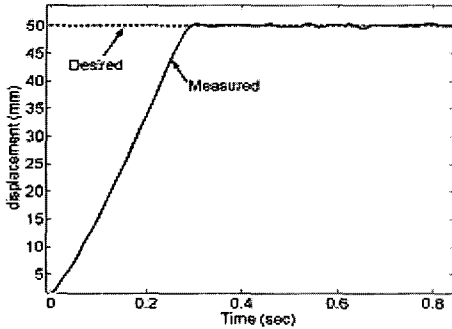
따라서, 전체 제어 시스템 블록도는 그림 6에 나타나 있다. 여기서 IK는 역기구학 (Inverse Kinematics), FK는 순기구학 (Forward Kinematics), ID(Inverse Dynamics)는 역동역학을 나타낸다. 비슷한 방법으로 발판장치의 제어시스템도 아래식과 같이 구현되었다.

$$X_{footpad}^C = X_{footpad}^d + K_p(X_{footpad}^d - X_{footpad}^m) + K_d(\dot{X}_{footpad}^d - \dot{X}_{footpad}^m) \quad (3)$$

그림 7(a)은 하중 30kg을 이동장치 위에 올려 놓고 원하는 궤적 $y_d = 0.2\sin(0.6\pi)$ 을 주었을 경우에 y축에 대한 이동장치의 좌표값을 나타내고 있다. 무게에 비례해서 에러값이 증가하는 경향을 보였고 30kg에서 에러 값이 0.02m이내로 나왔다. 그림 7(b)는 발판의 z축 단위입력(step input) 변위 값을 보여주고 있고 0.3초 이내의 정착시간(setting time) 및 0.5mm 이내의 오차 값을 가진다. 중간레벨 실험결과로부터 평판디바이스의 최대 속도 및 구현가능 주파수는 1.2m/s, 1.5Hz였고 발판디바이스의 상하방향 최대 속도 및 주파수는 0.2m/s, 3Hz였다. 위 결과들은 정상보행에 관련된 속도성능 [15]을 시켰다.



(a) 평면이동장치



(b) 발판장치

그림 7. 평면이동장치 및 발판의 실험결과.
Fig. 7. Experimental results for the planar and footpad device.

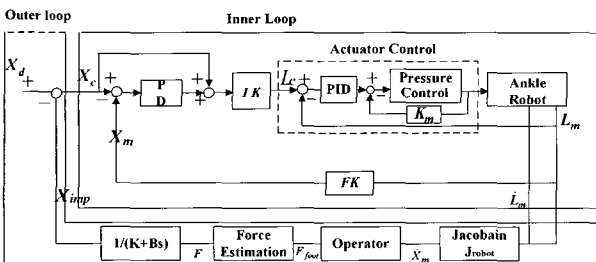


그림 8. 햅틱효과 구현을 위한 임피던스제어기.
Fig. 8. The impedance controller for haptic effect.

3. 상위레벨 제어

상위레벨 제어에서는 가상걸음장치를 이용하여 다양한 가상지면 환경에서 사용자로 하여금 부드럽고 지속적으로 제한된 공간에서 걸을 수 있도록 하고, 지면의 딱딱함을 조절하여 물리적인 측면에서 보다 폭넓은 지면생성이 가능한 제어를 제시한다.

3.1 햅틱 효과구현

다양한 지면의 햅틱 효과를 재생하기 위해서 VWM플랫폼의 임피던스를 조절하여 잔디, 진흙등의 느낌을 가질 수 있도록 위치기반 임피던스 제어기[16]를 그림 8과 같이 구현하였다.

위치기반 임피던스제어기는 위치제어기(inner loop)와 위치제어 입력 값을 수정하는 힘제어 루프(outer loop)로 구성되어 목표 임피던스를 만족시킨다. 여기서 VWM 플랫폼의 힘 입력 값 F_d 와 위치 입력 값 X_d 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$F_d = K(X_d - X_m) + B(\dot{X}_d - \dot{X}_m) \tag{4}$$

여기서, $K = \text{diag} \{K_z, K_\theta, K_\phi\}$ 는 강성 행렬이고, $B = \text{diag} \{B_z, B_\theta, B_\phi\}$ 는 댐핑 행렬이다. 또한 위치 조절 벡터 X_{imp} 는 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$F_m = KX_{imp} + B\dot{X}_{imp} \tag{5}$$

여기서 F_m 은 압력센서에 의해서 측정되는 상호작용힘이고, 위치결정 벡터 X_c 와 위치 조절 벡터 X_{imp} 는 다음 관계식을 가진다.

$$X_c = X_d - X_{imp} \tag{6}$$

따라서, 위치결정벡터 X_c 는 측정된 힘 F_m 를 포함한 (5)에서 계산된 위치조절벡터 X_{imp} 에 의해서 결정된다. 만약 위치제어가 완벽하게 작동한다면($X_c = X_m$), (4)의 힘 F_d 는 (5)에서의 측정힘과 같게 되고 원하는 임피던스가 획득 될 수 있다. 또한, 상호작용 힘이 없으면 위치 입력 값 X_d 는 위치결정 벡터 X_c 로 되고 임피던스제어기는 단순히 위치제어기로 바뀐다. 이 때, 큰 임피던스는 딱딱한 지면을 의미하고 적은 임피던스는 보다 물렁물렁한 지면을 의미하게 된다.

안정성이 유지된 상태에서 임피던스제어를 구동하기 위해서 구동 가능한 임피던스를 실험적으로 구하였다. 불안정성은, 외란(사람발의 힘)이 작용할 때 시스템이 불안정해지는 것으로 정의하였고, 위치제어기에 압력제어의 피드백으로 외란을 보상하여 위치제어의 안정성을 신장시켰기 때문에 비교적 넓은 범위의 임피던스범위를 구현할 수 있었다. 최대적용 가능 강성은 구현 가능한 최대 계인의 위치제어에서 외부 힘에 의한 변형 및 가해진 힘을 측정하여 구하였다[17]. 비슷하게 최소적용가능 강성도 구하였다. 구해진 최대적용가능 임피던스 200kN/m는 아주 딱딱한 지면의 느낌을 만들어 내었고, 최소적용가능 임피던스 5000N/m의 지면은 비교적 딱딱한 숨정도의 강성으로 느껴졌다. 따라서 실험으로 안정성을 유지하면서 제안된 범위의 임피던스로 지면의 무르기를 조절 가능하게 하였다.

3.2 걸음궤적 생성

3.2.1 평지걸음궤적 생성

이동인터페이스에서 지속적인 걸음을 위해서 사용자는 항상 인터페이스 디바이스의 중심에 위치할 필요가 있다. 이에, 보행분석에서 사용되는 조건들을 이용하여 자연스런 걸음 상쇄법의 제시가 필요하다. 정상보행사이클에서 착지단계는 대략 60%, 회전단계는 대략 40%의 비율로 이뤄져 있다. 이 때, 두 발이 땅에 접촉하고 있는 시간인 두발 착지단계(double support phase)가 존재한다는 것을 유념해야 한다[15]. 이 기간 동안에 몸의 무게 중심은 가장 낮은 위치에 있게 되고, 착지단계의 시작 10%와 마지막 10%에서 발생한다. 하지만 발판타입 이동인터페이스인 ‘Gait Mater’[8]의 경우 위 두 발 착지단계를 고려하지 않았다. 따라서, 보행 동안에 존재하는 두발 착지단계를 고려한 걸음 상쇄법을 제시하고자 한다.

제안된 걸음 상쇄법은 발이 자연스럽게 앞으로 전진할 때 각 평판 플랫폼이 신발에 부착된 자기 트래커를 추종하고,

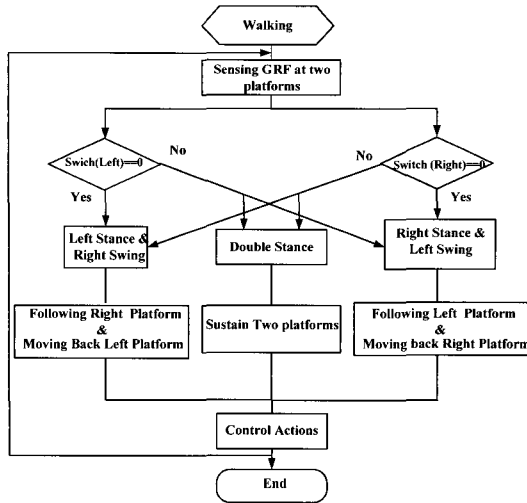


그림 9. 정상 보행 분석을 이용한 걸음 상쇄법.
Fig. 9. The cancellation method for normal gait analysis.

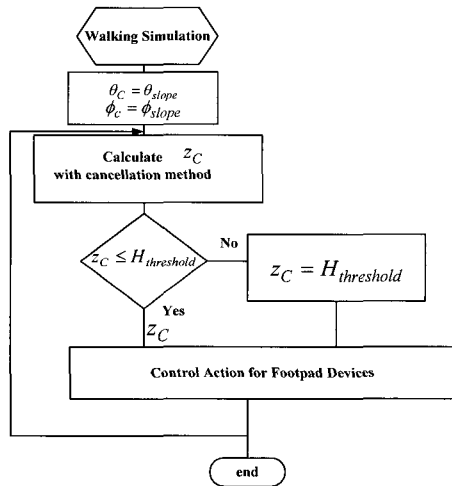


그림 10. 공간 운동을 위한 걸음 제어로직.
Fig. 10. The walking control algorithm for spatial motions.

반면에 한 발이 플랫폼과 접촉할 때인 한발 착지단계(single stance phase) 동안에는 뒤로 물러난다. 만일 두발이 동시에 플랫폼과 접촉해 있다면, 두 플랫폼은 각각 현재의 플랫폼 위치를 유지하게 한다. 회전단계와 착지단계 사이의 전이(transition)는 사람 발에 의해서 구동되는 스위치센서를 통해 감지된다.

그림 9는 제안된 걸음 감쇄법의 블럭다이어그램을 보여주고 있다. 위 알고리즘은 기존의 방법에서 두발 착지단계의 삽입으로 사용자의 의도에 따라 자연스럽게 걸음을 멈추고 시작하는 것을 허락한다. 왜냐하면, 두발 착지단계의 고려로 새로운 걸음 사이클에 대한 초기화 작업이 가능해 사용자 의도에 맞추어 걸음의 사이클 시작을 가능하게 하기 때문이다. 따라서, 제안된 알고리즘은 정상 보행분석을 만족하면서 이 동인터페이스의 평면지면에서 자연스런 걸음을 허락한다.

3.2.2 공간걸음계적 생성

계단, 경사등의 공간지면에서의 가상걸음을 위해 3자유도의 발판이 사용되었다. 계단지면을 시뮬레이션하기 위해 발

판 플랫폼은 0° 경사각을 가져야 하고 평지에서의 걸음상쇄법이 상하방향에 대해서도 동일하게 적용 가능하다. 하지만, 평면운동과 틀리게 상하운동에 있어서는 제한조건(constraint)이 존재한다. 즉, 발판의 상하운동 입력명령인 z_c 가 높이 문턱치(threshold)인 $H_{threshold}$ 보다 높으면, 발판의 입력명령값 z_c 는 계단의 높이를 유지하기 위해서 $H_{threshold}$ 가 되어야 한다. 공간 운동에 대한 제안된 알고리즘은 그림 9에 나타나 있다. 그림 10에서 θ_{slope} , ϕ_{slope} 은 지면경사의 피치 및 롤각이고, H_{ground} , H_{stair} 은 각각 지면 및 계단 높이이다.

계단 지면은 그림 11(a)에 보여진 것 같이 아래와 같은 변수값들을 가져야 한다.

$$\begin{aligned} \phi_{slope} &= 0, & \theta_{slope} &= 0, \\ H_{threshold} &= H_{ground} + H_{stair} \end{aligned} \tag{7}$$

경사지면 생성에 관해서는, 발판의 피치각이 상수 값을 가지고 롤 각이 0° 이라면, 지면은 오르막길 혹은 내리막길이 될것이다. 반대로, 발판의 피치각이 0° 이고 롤 각이 상수 값을 가진다면, 지면은 사면경사(side slope)를 가지게 된다. 따라서, 지면이 오르막이라면 피치각은 양수이고 지면높이는 그림 11(b)와 같이 전진 방향으로 발이 진행함에 따라 증가하여야 한다. 평지운동과 상하 운동에 관한 걸음계적 생성제어와 지속적인 걸음을 허락하기 위해서 플랫폼이 홈 위치로 돌아가도록 다음과 같은 조건으로 지면 높이 문턱치 $H_{threshold}$ 가 정해진다.

$$\begin{aligned} \theta_C &= \theta_{slope}, & \phi_C &= \phi_{slope}, \\ H_{threshold} &= H_{ground} + y_c \tan(\theta) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, θ_c , ϕ_c 는 각각 발판의 제어입력 피치 및 롤각이고, y_c 는 전진 및 후진방향의 발의 제어 명령값이다.

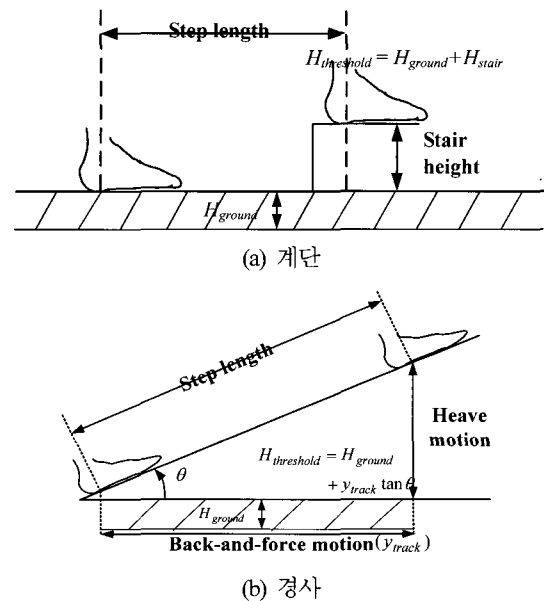
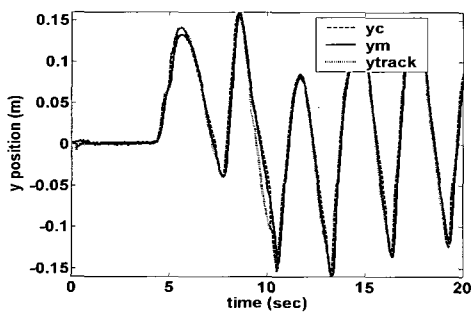


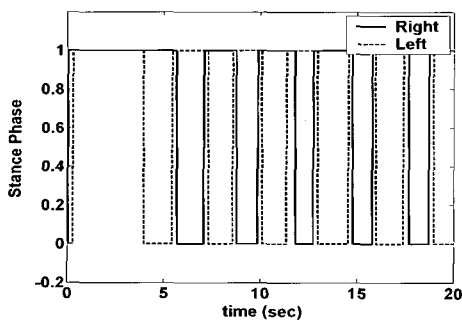
그림 11. 공간걸음지면 생성.
Fig. 11. The spatial ground surface generation.

V. 가상걸음장치를 이용한 걸음 실험

본 장에서는 제작된 가상걸음장치 및 제안된 걸음 알고리즘을 적용할 수 있도록 다양한 지면에서의 걸음을 수행하였다. 우선, 제안된 장치로 실제의 걸음을 통한 기계와의 상호작용을 위해서 사용자의 안정성이 항상 보장되어야 한다. 따라서, 사용자의 안정성을 보장하기 위해서 다음과 같은 가상 걸음장치에 대한 안전조치들을 수행하였다. (i) 우선, 사용자 발의 안전한 착지를 위해서 최고 1cm의 추적오차를 가지는 모션트랙커를 보상하기 위해서 사람 발 면적보다 4배 정도의 넓이를 가지는 플랫폼을 발판 위에 부착하였다. (ii) 초기에 사용자가 VWM위에서 추락했을 때 평판의 링크들에 의해 부상당하는 것을 방지하기 위해 천장에 매달린 하니스(harness)를 착용하고 사용자가 실험을 수행하였다. 또한, 걸음 동안에 균형을 유지할 수 있도록 두 손을 잡을 수 있는 평형대를 설치 하였다. 하지만 VWM위에서의 실제 걸음 동안 위험한 상황이 발생하지 않았으므로, 최종적으로는 보다 자연스런 사용자 걸음을 위해 하니스를 제거하였다. (iii) 평판의 제어 신호가 모터의 최고 토크보다 클 경우 모터의 서보 신호를 off로 전환하여 사람 발을 쫓아가지 못할 때 VWM이 불안정해지는 것을 방지하였다. (iv) 또한, 평판 플랫폼의 끝단에 평판과 베이스와의 충돌 시 발생하는 충격을 흡수하기 위해 플라스틱재질의 댐퍼를 부착하였다. (v) 마지막으로, 사용자는 VWM의 최고속도보다 느리게 걷도록 초기에 지시를 받아서 과도하게 빠른 속도로 걷지 않도록 하였다. 이상의 안정성을 강화하기 위한 조치의 결과로서, VWM 위에서의 사용자 걸음 실험 동안 위험스런 상황이 한번도 발생하지 않았다.

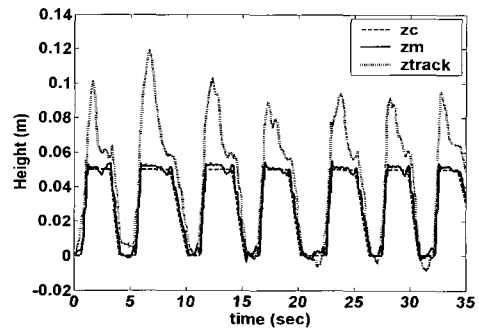


(a) y_c , y_m , and y_{track}

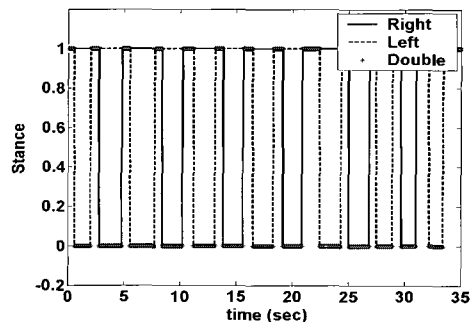


(b) 착지단계

그림 12는 평지에서의 제안된 지능제어기를 사용한 보행의 실험 결과를 보여준다. 사용자가 VWM장치 위에서 초기에는 대략 3초 동안 서 있었고 그 기간동안은 두발이 지면에 접지해 있다. 다음 왼발이 회전단계 동안에 앞으로 이동하게 되고 오른발이 단일착지단계 동안 홈 위치로 이동하게 된다. 그림 12(a)는 이때 전후진 방향의 트랙커 입력 y_{track} 명령 입력 y_c 값을 보여주고, 또한 플랫폼 측정 값 y_m 이 명령입력 값을 잘 추종하고 있음을 보여준다. 회전단계 동안 플랫폼은 수용할 수 있는 오차범위내에서 트랙커를 추종하고 있고, 착지단계동안 이전 회전단계의 평균 속도로 큰 jerk운동없이 부드러운 궤적생성으로 뒤로 물러나는 것을 볼 수 있다. 또한, 두발 착지기가 보행주기 전반에 존재하는 것을 그림 12(b)에서 볼 수 있다. 그림 13은 5cm의 계단높이에서의 걸음 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림 13(a)는 상하운동 방향의 제어 명령입력 값 z_c 는 발에 부착된 트랙커 z_{track} 가 $H_{threshold}$ (5cm) 보다 적을 때는 트랙커 z_{track} 를 추종하고 트랙커 z_{track} 가 $H_{threshold}$ (5cm) 보다 높을때는 높이 문턱치 $H_{threshold}$ 를 유지하는 것을 볼 수 있다. 그림 13(b)는 상대적으로 평지 전진 걸음에 비해 두발 착지기 시간이 증가한 것을 볼 수 있다. 경사 지면 시뮬레이션에서는 평지걸음 제어 알고리즘에서 약간의 변경만을 요한다. 전진 방향은 같고, 단지 높이가 사용자가 회전단계동안 앞으로 나아갈 때 주어진 걸음값에 대해서 증가하든지 감소한다. 그림 14(a)는 지면 높이 문턱치 $H_{threshold}$ 가 발의 전 후진 움직임에 따라서 변화하는 것을 보여주고 (여기서, H_{ground} 는 5cm로 세팅), 그림 14(b)는 발판이 회전단계동안 사용자 발을 추종하고 착지기 동안 $H_{threshold}$ 에



(a) z_c , z_m , and z_{track}



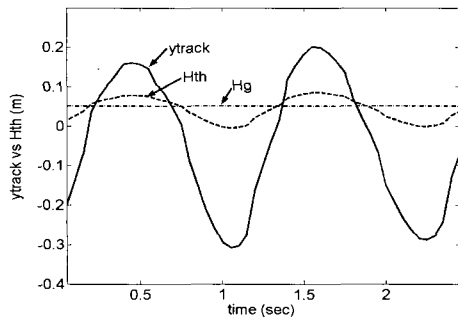
(b) 착지단계

그림 12. 평지에서의 걸음.

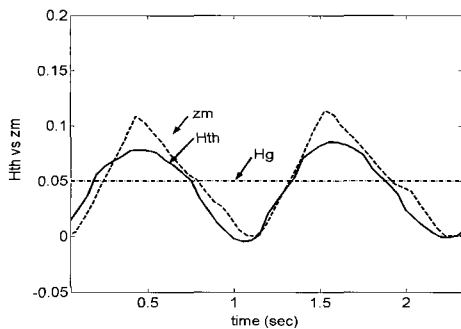
Fig. 12. Level ground walking test for plane level.

그림 13. 계단에서의 걸음.

Fig. 13. Walking test for stair level.



(a) y_{track} vs $H_{threshold}$



(b) z_m vs $H_{threshold}$

그림 14. 경사지면에서의 걸음.

Fig. 14. Walking test for slope.

따라서 내려가는 것을 보여준다. 제어입력 값 $H_{threshold}$ 에 대한 발판의 시간지연은 대략 0.2초였다. 경사지면 실험 동안에 사용자는 안정성을 유지하기 위해서 몸을 앞으로 숙이는 것을 확인 할 수 있었다.

VI. 결론 및 향후 연구

본 논문은 가상환경에 걸음인터페이스로 사용되는 가상걸음장치(VWM)의 지능제어에 관한 연구로 본 장치는 독립된 평면운동을 하는 3자유도 평판 (x, y, yaw)과 공간운동의 발판 (z, pitch, roll)으로 구성된 6자유도 플랫폼이 양 발에 위치한 장치로 다양한 지면환경을 구현할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 VWM을 사용하여 사용자가 자연스런 걸음이 가능하도록 지능제어기를 구현하였다. 우선, 사용자의 보행 정보를 인식하기 위한 센서시스템으로 보행자의 발 위치를 자기모션트랙커를 사용하여 측정하였고 보정 알고리즘을 통해 정밀도 및 안정성을 증가시켰다. 다음으로, 스위치를 이용한 보행의 상태를 사용자의 무게와 상관없이 정확하게 측정할 수 있도록 마이크로 센서 시스템을 구현하였다. 따라서, 위 두 센서의 조합으로 제어에 필요한 사용자 걸음의 정보를 효율적으로 획득 할 수 있었다. 또한, 구동기의 강인제어를 위한 하위레벨제어, 발의 접촉이나 마찰력에 따른 외력을 보상하기 위한 중간레벨제어, 그리고 보행경로를 설계하기 위한 상위레벨제어로 구성하여 로봇과 인간의 걸음을 통한 상호작용 지능제어기를 구축하였다. 특히, 상위레벨 제어에서는 지속적인 걸음을 위해 보행의 회전단계동안 빠르고 정확하게 보행자의 발을 따라가고 착지단계동안 원래위치(home

position)로 발을 돌려 놓게 하고 두발이 모두 지면에 접촉해 있는 경우에는 두 개의 플랫폼이 중립위치를 유지 하도록 하여 자연스런 걸음이 가능토록 하였다. 제작된 장치의 최대 허용 가능한 전진방향 및 상하방향 속도는 최대1.2m/s, 0.2m/s 였다. 위 속도들은 환자의 걸음 재활용으로는 충분할 것으로 생각된다. 마지막으로, 제안된 지능제어기 및 구현된 가상걸음장치를 사용하여 평지, 계단, 경사등의 실험결과로부터 정상상태의 피험자는 자연스럽게 걸을 수 있었고 걸음의 정지와 시작을 안정하게 수행할 수 있었다. 추후과제로는 제안된 가상걸음장치에서의 걸음 및 실제 걸음에서의 보행분석비교 후에 하지재활 쪽 적용을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] R. Kalawsky, *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison Wesley, 1993.
- [2] G Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [3] J. M. Hollerbach, "Locomotion interfaces," in: *book of Virtual Environments Technology*, K.M. Stanney, ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2002, pp. 239-254.
- [4] 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.
- [5] R. Darken, W. Cockayne, D. Carnein, "The omni-directional treadmill: a locomotion device for virtual worlds," *Proc. of User Interface Software Technology (UIST 97)*, 1997, pp. 213-222.
- [6] H. Iwata, "Walking about virtual environment on an infinite floor," *Proc. of IEEE Virtual Reality*, 1999, pp. 286-293.
- [7] Z. Wang, K. Bauemfeind, and T. Sugar, "Omni-directional treadmill system," *Proc. of 11th Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, 2003, pp. 367-373.
- [8] G P. Roston and T. Peurach, "A whole body kinesthetic display device for virtual reality applications," *Proc. IEEE Intl. Conf. on Rob. and Auto.*, 1997, pp. 3006-3011.
- [9] H.Schmidt, S. Hesse, R. Bernhardt, and J. Krüger, "Haptic Walker-a novel haptic foot device," *ACM Transaction on Applied Perception*, vol. 2, no. 2, pp. 166-180, 2005.
- [10] H. Iwata, H. Yano, and F. Nakaizumi, "Gait master: a versatile locomotion interface for uneven virtual terrain," *Prof. of IEEE Virtual Reality*, 2001, pp. 131-137.
- [11] 윤정원, 류제하, "가상현실대화용 가상걸음장치의 설계," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권, 제11호, pp. 1044-1051, 2004.
- [12] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 2000, pp. 254-255.
- [13] V. Kindratenko, "Calibration of electromagnetic tracking devices," *Virtual Reality: Research, Development, and Applications*, vol. 4, pp.139-150, 1999.
- [14] J. Yoon and J. Ryu, "The development of the 3-DOF planar parallel robot (RRR Type) for omni-directional locomotion interface," *3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Sept.6-8, Sydney, Australia, 2004.
- [15] J. Perry, *Gait Analysis: Normal and Pathological Function* (Thorofare, N. J. :Slack Inc., 1992).
- [16] B. Heinrichs, N. Sepelri and A. B. Thorton-Trump, "Position based impedance control of an industrial hydraulic manipulator,"

IEEE Control Systems Magazine, vol. 17, no. 1, pp. 46-52, 1997.
 [17] R. E. Ellis, O. M. Ismaeil, and M. G. Lipsett, "Design and

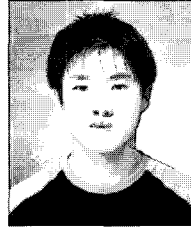
evaluation of a high-performance haptic interface," *Robotica*, vol. 14, no. 3, pp. 321-327, 1996.



윤정원

1973년 5월 1일생. 1998년 전북대학교 정밀기계공학과(공학사). 2000년 광주과학기술원 기전공학과(공학석사). 2005년 동 대학원 기전공학과 박사. 2005년 한국전자통신연구원 선임연구원. 2005년~현재 경상대학교 기계항공공학부 전임

강사. 관심분야는 햅틱스 및 이동인터페이스, 병렬로봇 설계/제어, 역감제시장치의 재활 훈련적용, VR기반 부품설계.



박장우

1979년 12월 7일생. 2002년 부산대학교 기계공학부(공학사). 2005년 3월~현재 광주과학기술원 기전공학과 석사과정. 관심 분야는 병렬로봇설계 및 제어, 힘반영 장치설계/제어 및 재활훈련적용.



류제하

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

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