

스테레오 카메라를 이용한 지능형 보행보조로봇의 개발

박민종* · 김정엽*†

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Development of Intelligent Walking Assistive Robot Using Stereo Cameras

Min-Jong Park* and Jung-Yup Kim*†

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received February 6, 2014 ; Revised May 28, 2014 ; Accepted June 9, 2014)

Key Words: Walking Assistive Robot(보행보조로봇), Stereo Camera(스테레오 카메라)

초록: 본 논문에서는 보행이 불편한 노인들의 효과적인 자가 재활을 위한 보행 보조 로봇의 개발에 대해 연구하였다. 개발된 로봇의 주요 특징은 크게 유아보행기 및 전동휠체어 메커니즘을 융합한 안전성 및 운동성향상과 가변저항 및 스테레오 카메라를 이용한 정확한 보행 추종 제어 알고리즘으로 나눌 수 있다. 구체적으로, 유아보행기의 메커니즘을 적용하여 사용자가 보행 중 넘어지는 사고로부터 안전을 확보하는 동시에 다리근육의 부담을 줄여줄 수 있는 골반지지대를 설계하였으며, 전동휠체어와 같이 구동모터를 이용하여 사용자가 적은 힘으로도 로봇을 이동시킬 수 있도록 하였다. 다음으로, 골반지지대에 부착된 가변저항을 이용하여 사용자의 보행 의도 및 방향을 로봇이 자동적으로 판단하고 사용자를 추종할 수 있도록 하였으며, 스테레오 카메라를 이용한 사용자 하체모션분석 알고리즘으로부터 추종 반응속도와 정확성을 한층 높였다. 최종적으로, 단계적인 보행 보조 실험을 통해 개발된 로봇의 사용자 보행 추종 성능을 실험적으로 검증하였다.

Abstract: This paper describes the development of a walking assistive robot for effective self-rehabilitation for elderly people facing an inconvenience in walking. The main features of the developed robot are enhanced safety and mobility using the baby walker and electric wheelchair mechanisms and an accurate walking tracking control algorithm using potentiometers and stereo cameras. Specifically, a pelvis supporter is designed to prevent the user from falling down and reduce the burden on their legs, and electric motors are used for easy locomotion with low effort. Next, the walking intention and direction of the user are automatically recognized by using potentiometers attached at the pelvis supporter so that the robot can track the user, and the rapidity and accuracy of the tracking were increased by applying a lower-body motion analysis algorithm with stereo cameras. Finally, the user-tracking performance of the developed robot was experimentally verified through stepwise walking assistance experiments.

1. 서론

최근 빠르게 증가하는 인간 수명에 따라 노인 인구가 급속히 늘어나고 있다. 그에 비해 출산율은 현저히 떨어지면서 전체인구에서 노인인구의 비중이 높아지고 있는 추세이다. UN 분류기준을

따르면 전체인구에서 65세 이상의 인구가 7% 이상이면 고령화 사회, 14%이상이면 고령사회, 20% 이상이면 초 고령 사회로 분류되는데 현재 우리나라는 2010년을 기점으로 65세 이상의 인구가 11%를 넘어가면서 고령화 사회로 분류가 되고 있다. 또한 오는 2050년까지 전 세계 60세 이상의 노인 인구가 3배 이상 증가한다는 전망과 함께 우리나라도 2026년에는 초 고령 사회로의 진입을 예측하고 있다(Table 1 참조).

† Corresponding Author, jyk76@seoultech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Predicted increase in the elder population⁽¹⁾

	2010	2016	2018	2026
Total Population	48,875	49,312	49,340	49,039
Population aged 65 and over	5,357	6,585	7,075	10,218
Ratio	11	13.4	14.3	20.8

units : 1000 persons, %

**Fig. 1** (a) Folding walker (b) Wheeled walker

인구의 고령화를 통해 생기는 사회적인 문제는 늘어난 인간 수명에 비해 사회생활이 가능한 나이는 크게 증가하지 않았다는 점이다. 노인성 질환이나 사고로 생긴 장애로 인해 사회 참여가 힘들어짐에 따라 사회적, 경제적인 어려움되면서 노인 인구의 삶의 질은 매우 낮아질 수밖에 없다. 노인의 경우 뇌 관련 질환의 치료 및 사고 이후 거동능력이 현저히 떨어지는 경우가 많은데 사회생활의 기본적인 부분인 보행은 노인 인구의 사회 참여를 방해하는 요인 중 가장 큰 부분을 차지한다. 따라서, 노인층의 사고 후 재활 치료는 사회 복귀를 위한 아주 중요한 부분으로 자리 잡고 있다.

이러한 노인들의 보행 재활을 위해서는 보행보조기가 필요한데 일반적으로 사용되는 단순 보행보조기로는 족형 보행기와 바퀴형 보행기가 있다 (Fig. 1 참조). 족형 보행기(Fig. 1(a))는 지면과의 높은 마찰에 의해 비교적 안정성이 높지만 이동성이 떨어지는 단점이 있으며, 바퀴형 보행기(Fig. 1(b))는 족형 보행기에 비해 이동성을 높였지만 보행 중 자칫 바퀴의 구름에 의해서 넘어질 수 있는 위험성이 있다. 또한, 이러한 단순 보행보조기들은 손이나 팔을 이용해서 보행보조기에 의지하기 때문에 양팔이 자유롭지 못하며, 보행보조

기를 잡고 있는 손이 미끄러지게 되면 넘어질 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

최근, 단순 바퀴형 보행보조기에 로봇 기술을 응용한 바퀴형 보행 보조 로봇의 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 보행 보조 로봇은 사용자의 보행을 보조하는 기능과 함께 레이저센서와 초음파센서 등을 이용하여 주변장애물을 감지해서 충돌 회피 기능을 통해 안전한 경로로 운동할 수 있다. Trinity College에서 개발한 PAM-AID(Personal Adaptive Mobility AID for the frail visually impaired)는 자전거 핸들과 같은 모양의 손잡이를 통해 로봇을 제어하는 전략을 선택하였다.⁽²⁾ Haptica 사에서 개발한 Guido는 지도 작성을 통해 안전한 경로로의 보행기능을 가지고 있으며 사용자의 보행의지는 손잡이에 장착되어 있는 힘 센서를 이용하여 파악하는 전략을 사용하고 있다.⁽³⁾ PAMM(Personal Aid for Mobility and Monitoring)은 보행보조와 함께 건강 모니터링을 목적으로 MIT에서 개발하였다.⁽⁴⁾ 천장에 부착한 마커를 카메라를 통해 인식해서 시설내의 로봇의 절대적인 위치를 알아내고, 사용자가 지정한 목적지로의 경로를 계산해서 안내한다. 또한, 사용자의 보행 운동 정보와 함께 심박과 같은 심전도정보를 측정하여 기록한다. Hitachi 사에서 개발한 동력 보조식 보행 보조 시스템은 전방 2개의 캐스터와 후방 2개의 구동모터가 장착되어있다.⁽⁵⁾ 손잡이의 힘 센서를 이용해서 사용자의 보행의지를 판단하고 힘의 크기에 비례해서 계산된 속도로 모터를 구동한다. 그 외에도 기울기 센서를 이용해서 경사면에서도 원활한 주행기능을 가지고 있다. Care-O-bot은 독일의 IPA연구소에서 개발한 보행 보조 로봇으로 정해진 목적지로 이동할 때 자동으로 경로상의 장애물을 회피하면서 주행한다.⁽⁶⁾ 핸들에 가해지는 힘을 통해 보행 속도와 방향을 결정하며, 로봇의 전방에 설치된 터치스크린을 이용하여 주 사용 대상인 노인이 쉽게 제어할 수 있다. 또한, 사용자가 위급할 때는 응급버튼을 눌러서 도움을 요청한다. IAI-CSIC 에서 개발한 APAS(Andador Pseudorobotico de Alta Seguridad) Smart walker는 로봇의 무게중심을 아래에 배치하여 안정적인 구조로 설계하였고, 뒷바퀴에 장착되어있는 DC모터를 이용하여 사용자를 끌어준다.⁽⁷⁾ 모터는 손잡이 양쪽에 있는 스위치를 이용하여 제어한다. 국내에서도 바퀴형 보행 보조 로

봇의 개발이 진행되고 있는데, 한국산업기술대학교의 IHLAB에서 개발한 보행 보조 로봇은 손잡이를 통해 사용자의 보행의지를 파악하는 전략을 사용하고 있으며 사용자의 건강을 모니터링 하기 위한 시스템이 구성되어 있다. 2008년 공정식의 4인은 보행 보조기에 퍼지 알고리즘을 적용한 동력식 보행보조기를 개발하였다.⁽⁸⁾ 로봇의 전방에 FSR센서를 이용한 손잡이를 장착하여 사용자의 보행의지를 판단하고 퍼지 알고리즘을 이용하여 보행의지 판단능력을 향상시켰다.

이러한 바퀴형 보행 보조 로봇들은 대부분 손잡이에 힘 센서를 장착하여 이를 통해 보행의지를 판단하는 전략을 선택하고 있다. 하지만 이러한 방식은 사용자로 하여금 팔이나 손이 필요한 작업을 불허하며, 사용자의 보행상태와는 다소 거리가 있는 양팔의 힘을 통해 보행속도를 결정하는 방법은 주요 사용 대상이 노인이라는 점에서 로봇의 이동속도를 제어하기 어려울 수 있다. 또한, 사용자가 자칫 넘어지는 것을 방지할 수 있는 메커니즘이 준비되어 있지 않아 돌발적인 사고에 대한 대처를 위해 보조 인력이 항상 준비되어 있어야 한다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 보완할 수 있도록 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 모터 구동식 휠체어에 유아 보행기를 결합하여 사용자가 넘어지는 사고를 원천적으로 방지하고, 사용자의 두 팔을 자유롭게 하면서도 정확한 보행 보조가 가능한 새로운 개념의 보행 보조 로봇을 2013년도부터 개발해왔다.⁽⁹⁾ 기존에 개발된 로봇의 특징으로는 가변저항을 이용한 인체공학적인 운동감지부를 통해 착용자의 보행의도를 판단하고 이동방향과 보행 속도 정보를 얻어내 구동모터를 알맞게 제어하였다. 이를 통해 사용자는 손과 팔의 움직임에 제약을 받지 않으면서도 특별한 연습이나 보호없이 로봇을 이용할 수 있었다. 본 논문은 기존 연구에서 사용자 보행에 따른 로봇의 운동 반응 속

도와 추종 정확성을 극대화하고자 스테레오 카메라를 이용해서 얻어낸 하체모션정보를 이용하여 피드백과 피드포워드 추종 제어 알고리즘을 추가 개발하였다. 이로부터, 보조 인력의 도움 없이 보행 재할이 필요한 노인들의 안전이 확보되고 양팔 사용이 자유로우며 보행의도를 효과적으로 인지하여 적절한 속도로 사용자를 추종할 수 있는 보행 보조 로봇을 개발하였다.

2. 로봇 기구부 및 전장부 설계

2.1 로봇 하드웨어 설계

제작된 로봇의 사진과 기본 사양은 Fig. 3과 Table 2와 같다. 기본적으로 보행 보조 로봇을 구성하는 프레임은 무게대비 높은 강성을 위해 단면 30×30 mm 크기의 알루미늄 프로파일을 사용하여 제작하였다. 평균 신장의 노인이 착용하였을 때의 골반높이와 보폭을 고려하여 착용한 후에 움직임이 불편하지 않도록 로봇의 내부 크기는 너비 830 mm, 깊이 800 mm, 높이 1200 mm 로 결정하였다. 보행시 골반에서 착지 발까지의 평균적인 거리가 380 mm 인 점을 고려했을 때 골반 지지대에서 전방 프레임까지의 거리를 440 mm 로 설정하여 일반보행

Table 2 Specifications of walking assistive robot

Dimensions	1260mm × 800mm × 1200mm
Weight	48 kg _r
Battery	STX14-BS 24V 12Ah
Actuators	2 x 24V DC motor 150W , 1 x 24V DC motor 12.7W
Controllers	Main Controller : TMS320F2812 Motor Controller : CUBE2408-DID Vision Processor : FitPC-2i
Sensors	2 x Potentiometer 2 x infrared camera



Fig. 2 Development concept

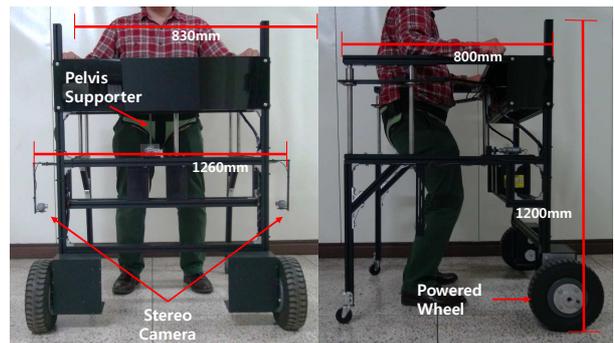


Fig. 3 Photograph of walking assistive robot

시에 발이 로봇의 프레임에 닿지 않도록 하였으며, 스테레오 카메라의 화각을 고려하여 카메라를 215 mm 외부로 설치하였다.

로봇의 총 무게는 약 48 kg_f 이며 착용자의 체중을 80 kg_f 으로 가정하고 이 중 50 %인 40 kg_f 를 보조한다고 하면, 반지름이 13.5 cm의 바퀴로 10도 경사지를 주행할 때 바퀴 한 개에 필요한 토크는 Fig. 4를 참조하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_{motor} = \frac{1}{2} F_t r = 10.1 Nm \quad (1)$$

로봇의 구동부인 모터는 무게 및 크기 대비 파워가 높은 맥슨 모터사의 RE40 모델을 사용하였으며 모터와 연결되는 감속기는 백래쉬가 10 arcmin 이하의 성능을 가진 Apex 사의 PE050으로 선정하였다. 감속비가 50:1인 감속기를 선정함과 동시에 모터에서 감속기로 힘을 전달하는 타이밍 풀리의 감속비 또한 2:1로 설정함으로써 모터의 토크 증폭 효과와 함께 Fig. 5 와 같이 컴팩트한 구동부를 구현하였다. RE40은 150 Watt 급의 DC 모터로 타이밍 풀리와 감속기를 거친 최종 출력 정격 토크는 17.0 Nm 로 식 (1)에서 제시한 10.1 Nm의 주행조건을 만족한다. 또한, 감속비 100:1의 조건에서 75세 이상의 평균 보행 속도인 0.8 m/s 로 주행하기 위해서는 모터의 rpm은 식 (2)를 통해 구할 수 있다. RE40의 정격 속도는 6930 rpm 으로 5658.8 rpm의 요구속도를 역시 만족한다.

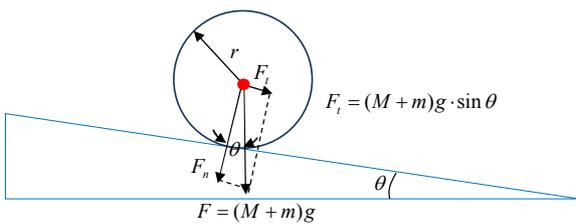


Fig. 4 Calculation of maximum wheel torque



Fig. 5 Powered wheel part

$$2\pi r \cdot \frac{rpm_{motor}}{60 \cdot 100} = 0.8m/s \quad (2)$$

$$rpm_{motor} = 5658.8rpm$$

Fig. 3에서 로봇의 골반지지대(pelvis supporter)는 사용자가 넘어져 일어날 수 있는 사고로부터 보호하는 목적과 다리에 작용하는 하중을 경감시키는 목적 및 사용자의 보행 의지를 판단하기 위한 목적으로 설계되었다. 골반지지대는 유아용 보행기와 같이 사용자의 둔부를 감싸 들어 올려주며 이를 통해 넘어지는 사고로부터 안전을 확보해준다. 동시에 보행 시 다리에 실리는 체중을 줄여주어 재활을 위한 보행 보조 기능을 얻을 수 있다. 사용자에게 신장에 따라 골반지지대의 높이를 조절하기 위해 Fig. 6과 같이 볼 스크류와 샤프트 가이드 및 DC모터를 이용하여 설계하였다. 또한 Fig. 7과 같이 골반지지대의 좌우에 부착되어 있는 운동감지부는 회전부의 회전 각도를 가변저항을 이용하여 측정함으로써 사용자의 보행 의도와 방향을 판단할 수 있도록 설계하였다. 운동감지부의 회전부는 골반지지대와 연결되어 사용자의 움직임에 따라 회전하여 가변저항에 변화

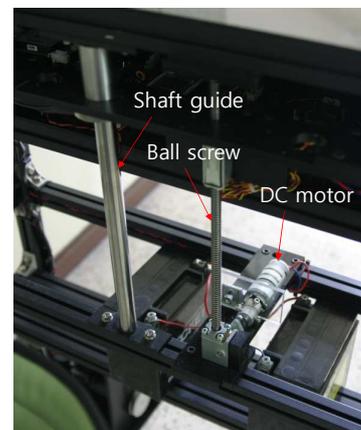


Fig. 6 Height adjust mechanism of pelvis supporter

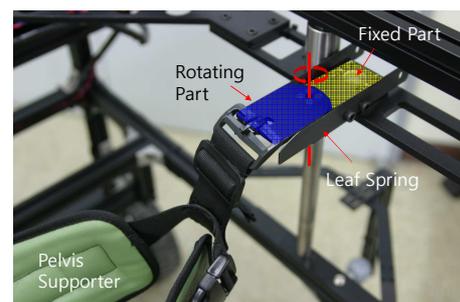


Fig. 7 Pelvis motion sensor mechanism

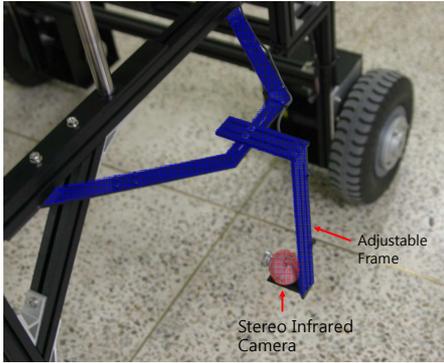


Fig. 8 Stereo infrared cameras system

를 주며, 힘을 받지 않을 때는 중심위치로 돌아올 수 있도록 회전부 좌우에는 리턴용 판스프링이 부착되어 있다.

다음으로, 착용자의 보행 의도를 좀더 능동적으로 판단하기 위해 스테레오 카메라를 이용하였다. 사용자의 하체 움직임이 가장 정확히 관찰할 수 있는 시점은 보행을 측면에서 바라볼 경우이다. 이와 같은 이유로 Fig. 8과 같이 스테레오 카메라는 로봇의 양쪽 측면에 위치하고, 상하좌우 위치 조절 가능한 지지대를 통해 사용자의 신체 조건에 따라 조절이 가능하며, 광각렌즈를 추가 장착하여 근거리에서 하체모션을 촬영할 수 있도록 하였다.

2.2 로봇 제어 시스템 설계

제어시스템은 크게 보행 보조 로봇의 주제어기인 TMS320F2812를 중심으로 모터제어기와 소형 PC로 구성되어있다(Fig. 9 참조). 주제어기는 골반지지대에 장착되어 있는 두 개의 운동감지부의 회전 각도를 측정하여 착용자의 보행정보를 획득하고, PC의 스테레오 카메라를 이용해 얻어진 하체정보를 직렬통신을 통해 전달받아 보행 보조 피드백 제어 및 피드포워드 제어를 수행하며 CAN통신을 통해 모터제어기에 모터의 속도 명령을 보낸다. 모터 구동을 위해 200 Watt급 모터 2개를 동시에 제어 할 수 있는 로보큐브테크사의 CUBE2408-DID 모터제어기를 사용하였으며, 주제어기로부터 10 ms 제어 주기의 속도명령을 받아 모터를 구동한다. PC 는 스테레오 카메라로부터 영상정보를 받아오고 처리하기 위해 Atom Core 프로세서가 장착된 Compulab사의 Fit-PC2를 사용하였다. 스테레오 카메라를 통해 얻은 영상정보는 공개 라이브러리인 OpenCV를 이용하여 처리

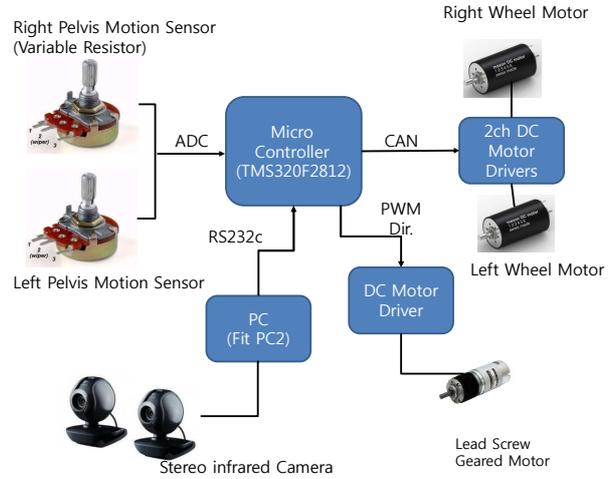


Fig. 9 Control system diagram of the robot

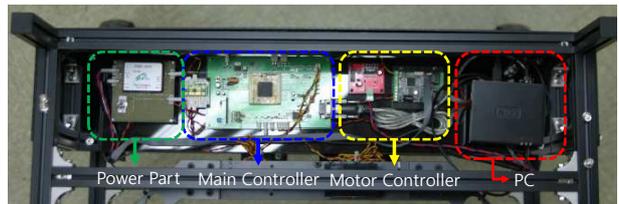


Fig. 10 Photograph of the developed control system

되며, 약 15 fps로 영상정보를 주제어기에 전송한다. 영상처리를 위한 스테레오 카메라는 Logitech사의 비교적 저렴한 웹캠인 C120에 적외선필터를 장착하여 고가의 적외선 카메라를 대체하였다. 또한 카메라에 광각렌즈를 추가 장착함으로써 거리대비 넓은 시야각을 확보하였다. Fig. 10은 제작된 제어시스템 구성사진을 보여준다.

3. 로봇 제어 알고리즘

3.1 운동감지부를 이용한 피드백 제어

착용자의 보행을 추종 제어하는 방법은 세 가지로 구성된다. 그중 첫 번째는 골반지지대 양단에 장착되어있는 운동감지부를 이용한 제어 알고리즘이다. 운동감지부는 가변저항으로부터 사용자의 골반의 위치와 회전을 측정하며 이로부터 이동 방향과 속도를 판단한다. Fig. 11과 같이 골반지지대를 위에서 내려다 봤을 때, 보행 시 지지대의 형상에 따라 적절한 제어입력을 아래 식과 같이 생성시킨다.

$$\begin{aligned} w_{rm1} &= k_1 \cdot \theta_{rp} \\ w_{lm1} &= k_1 \cdot \theta_{lp} \end{aligned} \quad (3)$$

위 식 (3)에서, w_{rm1} 과 w_{lm1} 은 오른쪽 모터와 왼쪽 모터의 회전속도(rpm)이고, θ_{rp} 와 θ_{lp} 는 오른쪽과 왼쪽 운동감지부의 회전각도이며 k_1 는 비례상수로서 80 rpm/deg의 값으로 설정되었다. 오른쪽의 운동감지부는 오른쪽 모터를 구동하는데 사용되고, 왼쪽의 운동감지부는 왼쪽 모터를 구동하는 데에 사용되어 각각 독립적인 제어를 수행한다. 만약, 운동감지부의 회전각이 방향이 양수방향이라면 모터를 전진방향으로 구동하고, 각도가 음수방향이라면 모터를 후진방향으로 구동함으로써 오른쪽, 왼쪽 운동감지부의 회전각을 영으로 적분 제어하는 동시에 사용자의 보행을 추종하게 된다. 참고로, Fig. 12는 운동감지부 회전각도에 따른 모터 속도 관계식을 보여준다. 모터의 최대 회전 속도는 노인의 평균

보행 속도인 0.8 m/s를 최대속도로 맞추기 위해 5600 rpm으로 제한하며, 회전각이 일정 범위 안의 값이라면 모터가 동작하지 않는 데드존(Dead Zone)을 설정하여 사용자의 작은 움직임에 민감하게 반응하여 로봇이 진동하는 현상을 제거하였다.

3.2 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어

두 번째 알고리즘은 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어 알고리즘이다. 본 알고리즘은 로봇의 좌우에 설치한 적외선 카메라를 이용하여 사용자의 무릎과 발목들의 위치 정보를 피드백하여 사용자를 추종 제어한다. 스테레오 카메라를 이용한 추종제어를 추가하는 이유는 서론에서 언급한 것과 같이 골반의 움직임만을 이용한 추종 제어는 다리 스윙 모션이 고려되지 않아 다소 반응이 느리기 때문이다. 하체 모션 정보를 측정하기 위하여 우선, 적외선이 방출되는 마커(Fig. 13 참조)를 밴드를 이용하여 무릎과 발목에 각각 부착하였으며, 총 4개의 마커 위치를 PC와 연결된 카메라를 통하여 측정한다. 그리고, 측정된 4개의 마커들의 평균위치값을 이용하여 로봇에서 바라본 하체의 위치를 계산한다. Fig. 14와 같이 전진

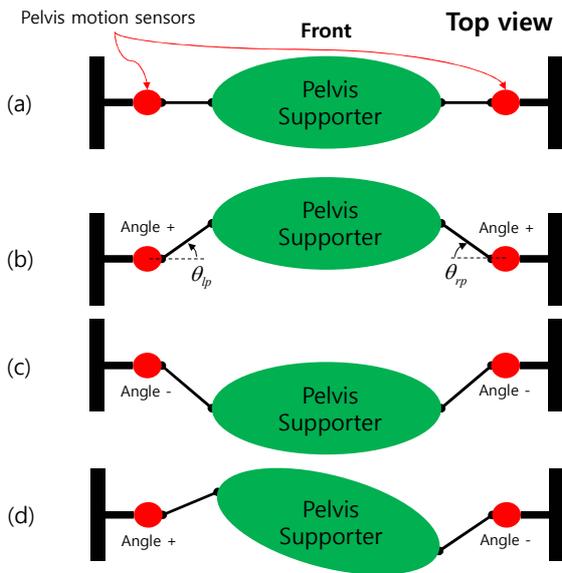


Fig. 11 Angles of pelvis motion sensors according to walking types: (a) standstill (b) forward walking (c) backward walking (d) CW rotating

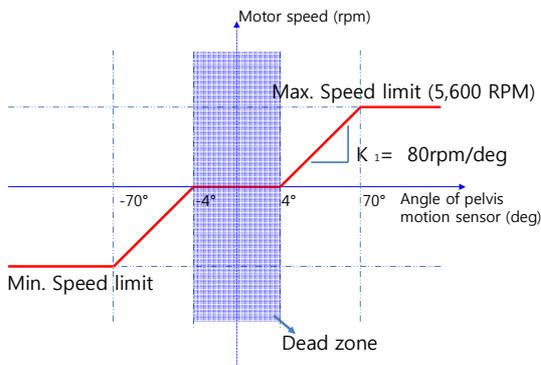


Fig. 12 Motor speed according to angle of pelvis motion sensor



Fig. 13 Infrared marker locations

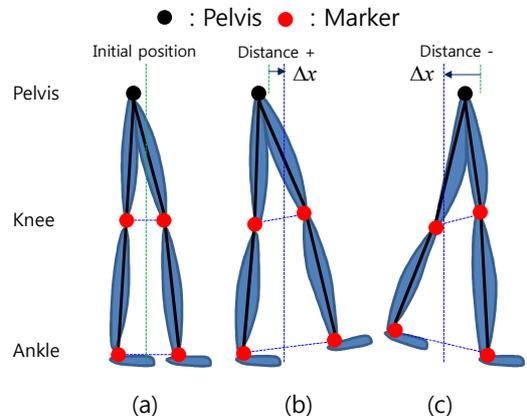


Fig. 14 Schematics of feedback control using stereo cameras : (a) standstill (b) forward walking (c) backward walking

보행일 경우 초기 위치로부터 현재 평균위치값이 양수가 되며, 후진 보행일 경우 평균위치값이 음수가 되어 아래와 같은 제어 법칙을 이용하여 모터를 구동시킨다.

$$\begin{aligned} w_{rm2} &= k_2 \cdot \Delta x \\ w_{lm2} &= w_{rm2} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 w_{rm2} 과 w_{lm2} 은 오른쪽 모터와 왼쪽 모터의 회전속도이고 Δx 는 카메라에서 바라본 하체의 전진방향 위치평균이다. 하체의 전진방향 위치평균에 비례해서 양쪽 모터의 속도를 결정하며, 이러한 알고리즘으로부터 Δx 를 영으로 적분 제어하게 된다. 이때 k_2 의 값은 카메라로부터 얻어진 영상의 pixel 대비 rpm값으로 10 rpm/pixel로 설정하였다.

3.3 스테레오 카메라를 이용한 피드포워드 제어

세 번째 알고리즘은 스테레오 카메라를 이용한 피드포워드 제어 알고리즘이다. 기존의 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어에서는 보행을 시작하는 시점과 정지하는 시점의 반응성이 높아졌으나, 피드백 제어 방식의 한계점으로 인해 연속적인 보행 중에서 소량의 추종 오차가 존재한다. 따라서, 본 알고리즘의 목적은 인간의 걸음새 메커니즘을 이용하여 피드포워드 제어입력을 생성 시킴으로써 로봇의 보행 추종 성능을 극대화시키는 것이다.

본 알고리즘을 구현하기 위해서는 우선, 스테레오 카메라를 통해 얻어진 사용자의 무릎과 발목의 위치를 통해 현재 보행 운동을 판단하는 것을 수행하였다. 매순간 각 다리의 스윙(swing) 상태 및 지지(stance) 상태를 확인하여 전진 보행, 후진 보행, 정지를 판단하며, 각 다리의 스윙 및 지지 상태는 발목에 부착된 마커의 높이 변화량을 통하여 확인하였다. Fig. 15와 같이 스테레오 카메라를 통해 측정된 발목의 높이의 변화량이 실험치인 200 pixel 이상일 경우 해당 다리는 스윙 상태라고 판단한다. 이때 픽셀의 수는 보행상황이 아닌데도 불구하고 자칫 스윙으로 판단할 수 없도록 여러 번의 보행 실험을 통하여 최소한의 픽셀수로 결정되었으며 약 120 mm에 해당한다.

각 다리의 스윙/지지 상태를 알아낸 뒤에는 보행 방향을 판단하는데, 정지 상태를 제외한 보행 방향은 각 다리에서 스윙 상태의 시작지점과 종

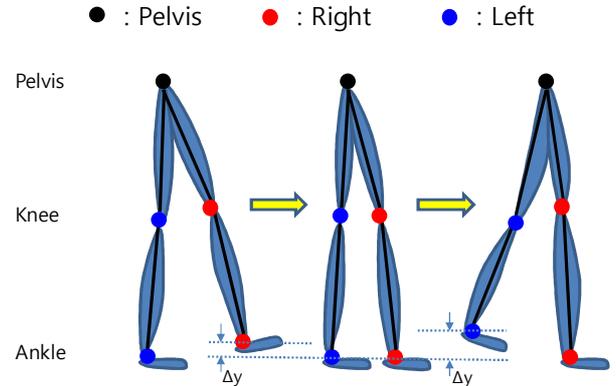


Fig. 15 Determination of swing/stance phase using ankle height

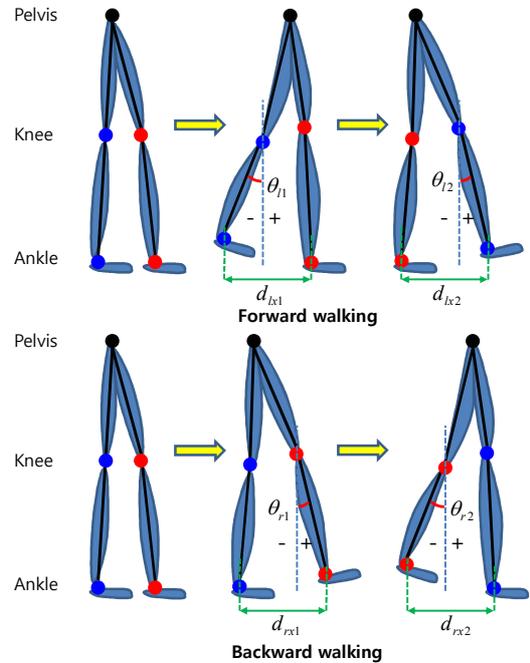


Fig. 16 Schematics of feedforward control using stereo cameras

료지점에서 정강이 링크의 기울기 각도의 차이로 판단한다(Fig. 16 참조). 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \text{if } (\theta_{l1} - \theta_{l2}) < 0 & \text{then } dir = 1 \\ \text{if } (\theta_{l1} - \theta_{l2}) > 0 & \text{then } dir = -1 \\ \text{if } (\theta_{r1} - \theta_{r2}) < 0 & \text{then } dir = 1 \\ \text{if } (\theta_{r1} - \theta_{r2}) > 0 & \text{then } dir = -1 \end{cases} \quad (6)$$

즉, 한쪽의 다리가 스윙 상태가 되는 순간 정강이 기울기 각도 값(θ_{r1} 또는 θ_{l1})을 측정하고, 스윙 상태에서 지지상태로 변하는 순간 정강이 기

올기 각도 값(θ_{r2} 또는 θ_{l2})을 구하여 그 차이가 음수라면 전진보행으로 판단하고, 각도 차이가 양수라면 후진보행으로 판단한다. 식 (6)에서 *dir*은 운동 진행 방향으로 구동모터의 회전 방향을 결정한다.

다음으로, 보행 속도를 보폭으로부터 추정하여 아래의 식을 통하여 양쪽 모터들의 피드포워드 구동 속도를 결정한다.

$$\begin{aligned} d_{width} &= (d_{lx1} + d_{lx2}) \text{ or } (d_{rx1} + d_{rx2}) & (7) \\ w_{rm3} &= dir \cdot k_3 \cdot d_{width} \\ w_{lm3} &= w_{rm3} \end{aligned}$$

위 식 (7)에서, 왼 다리가 스윙상태가 되는 순간과 착지상태가 되는 순간 측정된 두 다리 사이의 거리의 합($d_{lx1} + d_{lx2}$)과 오른 다리가 스윙상태가 되는 순간과 착지 상태가 되는 순간에 측정된 두 다리 사이의 거리의 합($d_{rx1} + d_{rx2}$)을 번갈아 계산하여 보행 시 착용자의 보폭을 얻어내며, 이렇게 계산된 보폭을 보행 방향에 따른 부호와 함께 계산하여 모터 구동에 적용한다. 이때 k_3 의 값은 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어와 같은 10 rpm/pixel 로 설정하였다.

$$\begin{aligned} w_{rm} &= w_{rm1} + w_{rm2} + w_{rm3} & (8) \\ w_{lm} &= w_{lm1} + w_{lm2} + w_{lm3} \end{aligned}$$

최종적으로, 위 식 (8)에서 볼 수 있듯이 운동감지부를 이용한 피드백 제어입력과 스테레오 카메라를 이용한 피드백 및 피드포워드 제어입력들이 중첩되어 로봇의 구동 모터에 적용되며 Fig. 17에 사용자 추종 제어 알고리즘의 블록선도를 나타내었다. 보행보조로봇은 최종적으로 오른 모터와 왼 모터의 속도입력인 w_{rm} 과 w_{lm} 으로부터 구동되며, 이는 각각 w_{rm1} 과 w_{lm1} , 그리고 w_{m2} 와 w_{m3} 로부터 계산된다. w_{rm1} 과 w_{lm1} 은 로봇의 운동감지부로부터 얻은 θ_{rp} 과 θ_{lp} 의 값을 0으로 제어하기 위한 제어입력이며, w_{m2} ($=w_{lm2} = w_{rm2}$)는 카메라를 통해 얻어낸 사용자와 로봇의 하체위치차이를 보상하기 위한 제어입력이다. 여기서, x_R 은 로봇의 변위이며 x_H 는 사용자의 변위를 의미한다. 이러한 w_{m2} 는 로봇의 좌우 모터에 똑같이 적용된다. 마지막으로 w_{m3} ($=w_{rm3} = w_{lm3}$)는 사용자의 카메라와 보행 패턴 분석을 통해 결정되는 피드포워드 제어입력으로 w_{m2} 와 같이 로봇의 좌우 모터에 같은 값이 적용된다.

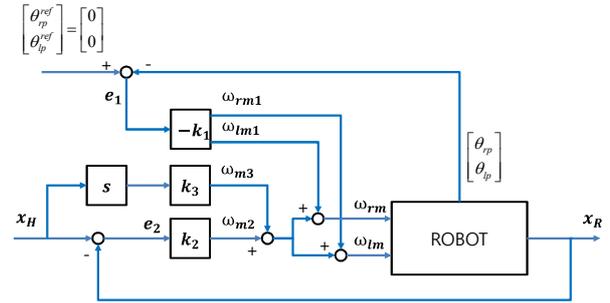


Fig. 17 Block diagram of control system

4. 로봇 보행 추종 실험

본 절에서는 개발된 보행 보조 로봇의 추종 성능을 검증하기 위한 세 가지 실험을 수행하였다. 세 가지 실험 모두 동일한 피실험자가 전진과 후진보행 보조 실험을 10초간의 거의 같은 속도의 보행(전진 : 약 0.38 m/sec, 후진 : 약 0.28 m/sec)으로 수행하였으며, 각 경우에서 여러 번의 실험 결과 중의 하나를 표본으로 제시하였다.

4.1 운동 감지부만을 이용한 보행 추종 실험

첫 번째로, 골반지지대의 운동감지부를 이용한 피드백 제어를 통해 사용자의 보행을 로봇이 잘 추종하는지를 실험하였다. 실험 결과로써 Fig. 18은 전진 및 후진 보행 시 운동감지부의 좌우 및 평균 회전각 궤적을 보여준다. 전진 보행 시 운동감지부의 평균 회전각은 대체적으로 10° 와 20° 사이의 비교적 큰 양수값을 가지며 RMS 수치는 15.01° 로 계산되었다. 본 RMS 수치를 운동감지부와 사용자의 골반 사이의 거리로 환산하였을 때, 평균적으로 보행자와 약 70 mm의 차이를 유지하며 추종하였다는 결과를 보여준다. 후진 보행 역시 운동감지부의 평균 회전각은 -10° 와 -20° 사이의 값을 가지며, RMS 수치는 15.25° 로 평균적으로 로봇이 약 78 mm의 골반 거리 차를 유지하며 사용자를 추종했다는 것을 보여준다. 또한, Fig. 19는 스테레오 카메라로부터 얻은 양 무릎의 전진방향 위치평균과 양 발목의 전진방향 위치평균 및 양 무릎과 발목의 최종 위치평균 궤적들을 보여준다. 사용자가 보행운동을 할 때 각각의 평균값은 다리 스윙 운동으로부터 일정 범위 안에서 진동하게 되는데 보행 보조로봇이 사용자를 신속하게 추종할 경우 진동하는 궤적의 RMS 수치가 작아지게 된다. 운동감지부를 이용한 제어 알고리즘으로 전진 보행 시에 측정된 양 무릎 위치평균과 양 발목 위치평균의 RMS 수치들은 각각 46.87, 74.86 pixel이며, 후진 보행 시에는 78.61, 78.47 pixel로 다소 큰 수치를 보였다.

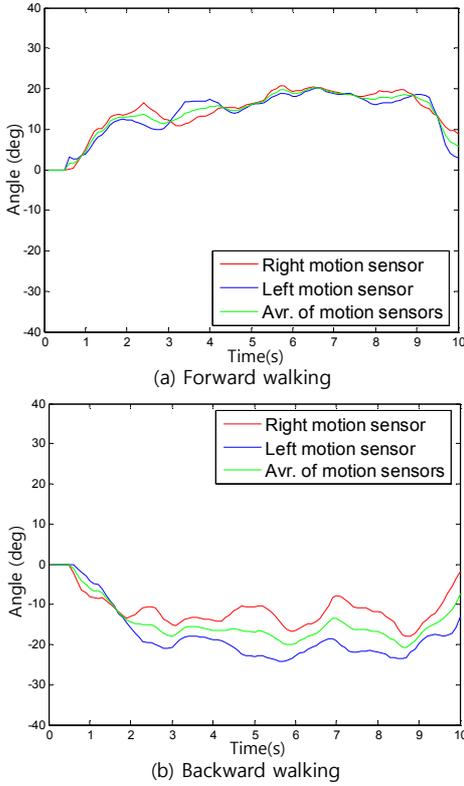


Fig. 18 Angle trajectories of motion sensors during the first walking experiment

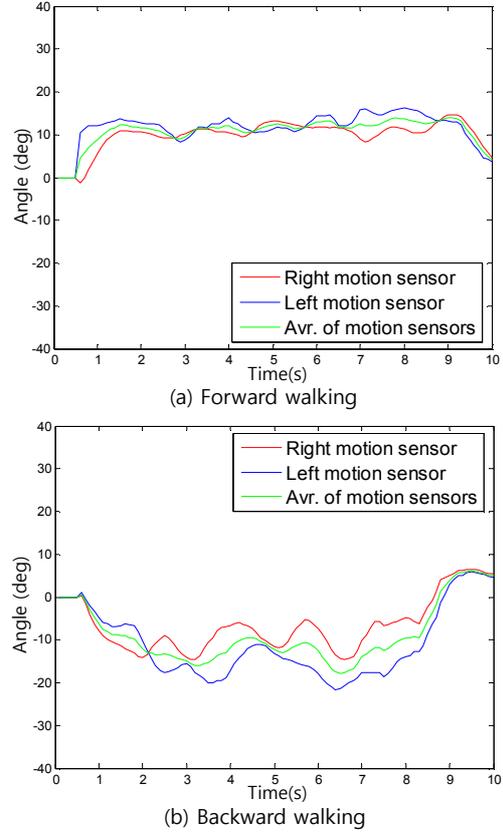


Fig. 20 Angle trajectories of motion sensors during the second walking experiment

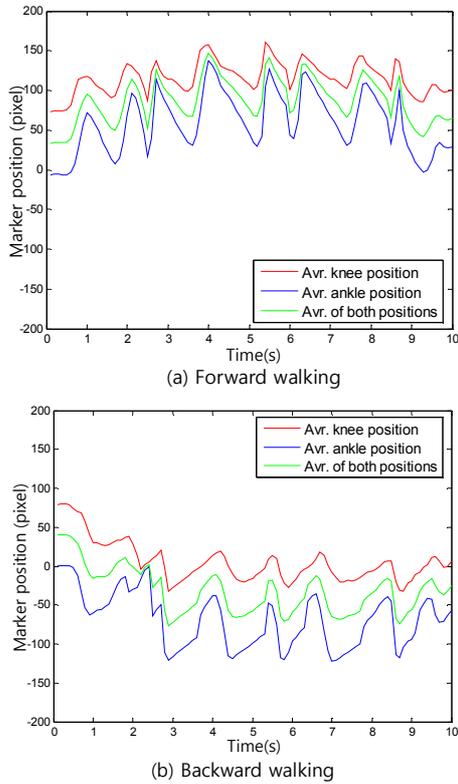


Fig. 19 Knee and ankle marker position trajectories during the first walking experiment

4.2 스테레오 카메라의 피드백 제어가 추가된 보행 추종 실험

두 번째로, 첫 번째 실험조건에서 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어를 추가하여 실험을 수행하였다. 마찬가지로, 전/후진 보행 실험 중에 운동감지부의 회전각과 무릎 및 발목의 마커 위치 궤적들을 측정하였다. 실험 결과로써, Fig. 20은 운동감지부의 회전각 그래프를 보여준다. 전진 운동 시 대체적으로 평균 회전각이 10° 근처에서 변화했음을 알 수 있다(Fig. 20(a) 참조). 이때, 평균 회전각의 RMS 수치는 11.25° 로써 보행 보조 로봇이 사용자와 약 58 mm의 골반 거리 차이를 유지하면서 추종했다는 것을 보여준다. 이는 운동감지부만을 이용하였을 때의 결과보다 골반 추종 거리 오차가 줄어들었음을 나타내며, 추종 성능이 18.8 % 향상되었음을 나타낸다. 후진 보행 시(Fig. 20(b) 참조) 운동감지부의 평균 회전각 RMS 수치는 11.03°로 보행 보조 로봇이 약 57 mm의 골반 거리를 유지하면서 추종하였으며, 이는 운동감지부만을 이용하였을 때보다 사

용자를 추종하는 성능이 26.9 % 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 21은 스테레오 카메라를 측정한 무릎의 발목의 마커 위치평균 궤적들을 보여준다. 전진 보행 중의 양 무릎의 위치평균 및 양 발목의 위치평균 RMS 수치들은 각각 38.83, 69.14 pixel로 운동감지부만을 이용한 피드백 제어 알고리즘과 비교하였을 때 각각 17.1 %, 7.63 % 가 줄어들었음을 확인하였다. 후진 보행 시의 결과 역시 RMS 수치들이 57.53, 62.32 pixel로 각각 26.82 %, 20.57 % 가 줄어들었으며, 이러한 결과로부터 골반지대의 운동감지부만을 이용할 때보다 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어를 함께 적용했을 때 보행 보조 로봇이 더 효과적으로 사용자를 추종하였음을 알 수 있다.

4.3 스테레오 카메라의 피드포워드 제어가 최종 추가된 보행 추종 실험

마지막으로, 보행 보조 로봇에 운동감지부를 통한 피드백 제어와 스테레오 카메라를 이용한 피드백 및 피드포워드 제어를 모두 적용하였을

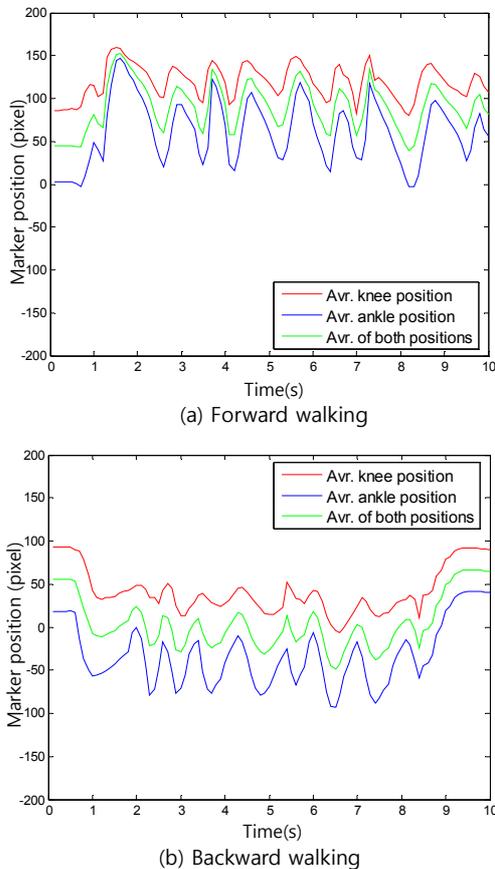


Fig. 21 Knee and ankle marker position trajectories during the second walking experiment

때의 전/후진 보행 실험을 수행하였고 그 결과를 Fig. 22와 23에 도시하였다. 전진 보행 시 운동감지부의 평균 회전각 RMS 수치는 9.52° 이며 후진 보행 시에는 7.59° 이다. 이는 보행 보조 로봇이 전진 보행 시에는 약 49 mm, 후진 보행 시에는 약 39 mm의 골반 거리 차이를 유지하며 사용자를 추종한다는 결과를 나타낸다. 이렇게 측정된 결과는 운동감지부만을 이용했을 때보다 40.6 %, 스테레오 카메라를 이용한 피드백 제어를 적용했을 때 보다 23.5 %의 사용자 추종 능력의 향상을 보여준다. Fig. 23은 스테레오 카메라로 측정한 양 무릎의 위치평균과 양 발목 위치평균 그래프이며, 무릎과 발목의 평균 위치 RMS 수치들은 전진 보행 시에 각각 25.17, 50.48 pixel이며, 후진 보행 시에는 28.23, 49.91 pixel로 측정되었다. 이는 운동감지부만을 이용했을 때보다 약 41.64 %, 스테레오 카메라를 이용한 피드백제어를 했을 때보다 28.89 % 줄어든 값으로 기존의 제어와 비교해보았을 때 더 빠르고 정확하게 사용자를 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 세 가지 보행 실험에 대한 RMS 수치들을 Table 3에

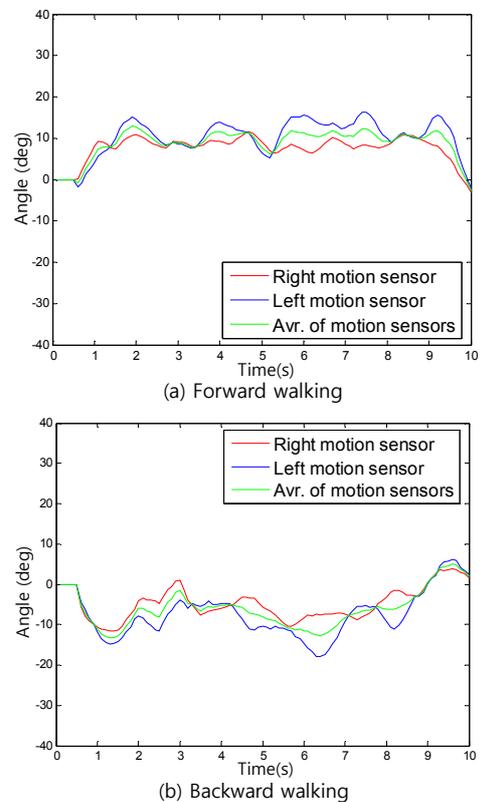
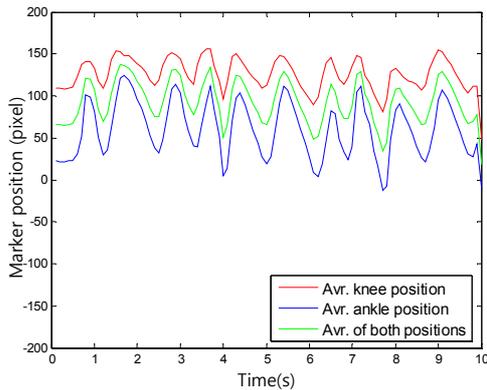


Fig. 22 Angle trajectories of motion sensors during the final walking experiment

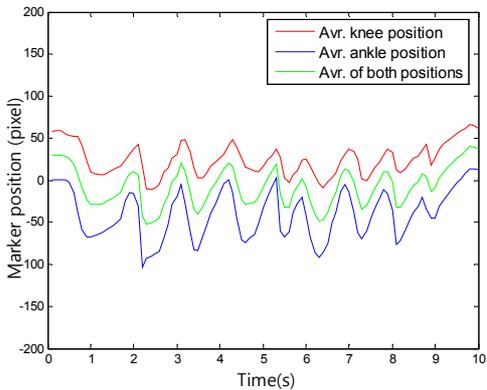
Table 3 Summary of RMS values for three walking experiments

Waking Direction	Motion sensor value RMS (deg)	
	forward walking	backward walking
Feedback control using motion sensors	15.01 °	15.25 °
Feedback control using stereo cameras	11.25 °	11.03 °
Feedback control using motion sensors	9.52 °	7.59 °

Waking Direction	Infrared marker knee RMS (pixel)		Infrared marker ankle RMS (pixel)	
	forward walking	backward walking	forward walking	backward walking
Feedback control using motion sensors	46.87	78.61	74.86	78.47
Feedback control using stereo cameras	38.83	57.53	69.14	62.32
Feedback control using motion sensors	25.17	28.23	50.48	49.91



(a) Forward walking



(b) Backward walking

Fig. 23 Knee and ankle marker position trajectories during the final walking experiment

요약하였다. 위의 표와 같이 운동감지부의 회전 각과 마커위치들의 RMS 값들이 단계적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 참고로, 전/후진 보행 실험



(a) Forward walking



(b) Backward walking

Fig. 24 Snapshots of the final walking experiments

실험 스냅 사진을 Fig. 24에 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 노인들의 자율적인 보행 재활을 위해 손쉽고 안전한 지능형 보행 보조 로봇을 개발하였다. 기본적으로 이전 연구⁽⁹⁾에서 제안되었던 핵심 아이디어를 이용하여 골반의 운동감지부로부터 사용자의 보행 의지를 로봇이 자동적으로 인지하고 사용자를 효과적으로 추종하는 알고리즘을 구현하였고, 더 나아가 스테레오 카메라를 이용한 피드백 및 피드포워드 제어 알고리즘을 개발함으로써 사용자의 보행속도와 방향을 보다 빠르고 정확하게 인지하여 추종할 수 있도록 하였다. 최종적으로, 제안된 제어 알고리즘들의 사용자 추종 성능은 실제 단계적인 보행 실험으로부터 그 성능을 검증하였다.

현재 본 논문에서 개발된 보행 보조 로봇은 측면에 설치되어있는 스테레오 카메라의 시야각을 확보하기 위해 로봇의 너비가 다소 크다는 단점이 있다. 이러한 단점으로 인해 좁은 방문을 통과하기에는 다소 무리가 있어 보행 재활을 위한 넓은 공간에서의 사용으로 제한된다. 향후, 스테레오 카메라가 아닌, 모노 카메라를 사용자 전방에 장착하여 양 발의 위치를 검출함으로써 보행

속도, 방향 및 회전각을 도출할 계획이며 로봇의 너비도 좁게 설계하여 좁은 방문을 쉽게 통과할 수 있도록 개선할 예정이다.

참고문헌 (References)

- (1) <http://kostat.go.kr>
- (2) Lacey, G., Namara, S. M. and Dawson-Howe, K. M., 1998, "Personal Adaptive Mobility Aid for the Infirm and Elderly Blind," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1458, pp. 211~220.
- (3) Rodriguez-Losada, D., Matia, F., Jimenez, A., Galan, R. and Lacey, G., 2005, "Implementing Map Based Navigation in Guido, the Robotic SmartWalker," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 3401~3406.
- (4) Spenko, M., Yu, H. and Dubowsky, S., 2006, "Robotic Personal Aids for Mobility and Monitoring for the Elderly", *IEEE Transactions on Neural systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp.344~351.
- (5) Egawa, S., Nemoto, Y., Fujie, M. G., Koseki, A., Hattori, S. and Ishii, T., 1999, "Power-Assisted Walking Support System With Imbalance Compensation Control For Hemiplegics," *the First Joint EMBS/BMES Conference*. pp. 635.
- (6) Graf, B., Hans, M., Kubacki, J. and Schraft, R. D., 2002, "Robotic Home Assistant Care-O-Bot II," *the Second Joint EMBS/BMES Conference*, pp. 2343~2344.
- (7) Ceres, R., Pons, J. L., Calderon, L., Mesonero-Romanos, D., Jimenez, A. R., Sanchez, F., Abizanda, P., Saro, B. and Bonivardo, G., 2005, "Andador Activo Para la Rehabilitacion y el Mantenimiento de la Movilidad Natural," *IMSERSO, Estudios I+D+I*, No. 25, pp. 1~8.
- (8) Kong, J. S., Lee, D. K., Nam, Y. S., Lee, B. H. and Lee, E. H., 2008, "Optimized Walking Will Recognizing System of the Walking Aid with the Fuzzy Algorithm," *Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 692~699.
- (9) Kim, J. Y., 2013, "Development of Ergonomic Walking Assistance Robot for the Elderly and the Infirm," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 600~606.