

인체 자중 보상 및 로봇 경로계획법을 이용한 이동형 보행 재활 시스템 개발

Development of Walking Assistive System using Body Weight Supporting and Path Planning Strategy

유 승 남, 손 응 희, 서 승 환, 이 상 호, 한 창 수*
(Seung-Nam Yu¹, Woong-Hee Shon¹, Seung-Whan Suh¹, Sang-Ho Lee¹, and Chang-Soo Han¹)
¹Hanyang University

Abstract: With the rising numbers of elderly and disabled people, the demand for welfare services using a robotic system and not involving human effort is likewise increasing. This study deals with a mobile-robot system combined with a BWS (Body Weight Support) system for gait rehabilitation. The BWS system is designed via the kinematic analysis of the robot's body-lifting characteristics and of the walking guide system that controls the total rehabilitation system integrated in the mobile robot. This mobile platform is operated by utilizing the AGV (Autonomous Guided Vehicle) driving algorithm. Especially, the method that integrates geometric path tracking and obstacle avoidance for a nonholonomic mobile robot is applied so that the system can be operated in an area where the elderly users are expected to be situated, such as in a public hospital or a rehabilitation center. The mobile robot follows the path by moving through the turning radius supplied by the pure-pursuit method which is one of the existing geometric path-tracking methods. The effectiveness of the proposed method is verified through the real experiments those are conducted for path tracking with static- and dynamic-obstacle avoidance. Finally, through the EMG (Electromyography) signal measurement of the subject, the performance of the proposed system in a real operation condition is evaluated.

Keywords: gait rehabilitation, service robot, BWS (Body Weight Support) system, pure-pursuit algorithm

I. 서론

직립상태에서의 보행은 일상에서 여러 활동을 안전하고 효율적으로 수행하는데 필수적인 활동이다. 동적 보행균형이 적절한 근육강도, 신경 조직 및 근육의 적절한 타이밍 조절과 더불어, 시각 등의 감각 입력을 통한 추가 정보 취득을 통해 보완된다는 점에 미루어 보았을 때, 보행은 인체의 종합적인 활동의 결과로 구현된다고 할 수 있다[1]. 노인의 경우 하나 이상의 감각 기관의 정상적인 노화 및 퇴화로 인해 보행이 원활하게 이루어지지 않을 수 있으며[2,4], 특히 근골격계의 취약성 때문에 낙상 등의 사고가 젊은이 및 일반인에 비해 빈번하게 발생이 되기도 한다[5-10]. 이러한 이유에서, 노인은 보행지원 장치 및 훈련장치를 통해 지속적으로 그들의 근력을 강화할 필요가 있다. Barbeau는 환자의 체중을 지원하는 상부 프레임을 포함하는 보행 재활장치의 설계 및 개발 기법을 제안하였으며, Saku Egawa는 타인의 도움을 필요로 하지 않는 전기식 보행보조 시스템을 개발하였다. 특히 위의 시스템은, 개별 환자의 보행 안정성을 고려한 댐핑 저항의 튜닝이 가능하도록 설계되었다[11,12]. Skye Mclachlan은 보행 보조식 모바일(mobile) 로봇시스템의 공유 및 다단 제어

전략을 제안하였다. 그들은 사용자의 의도와 장애물 회피 정보를 병합하는 퍼지알고리즘을 적용하였다[13]. Ying Jiang은 하지 재활을 위해 보행시의 인체 하중 중심을 중력의 변화에 초점을 둔, 전 방향 이동 로봇을 제안하는 한편, 로봇시스템 및 사용자를 통합적으로 고려한 제어 안전성을 확보하기 위한 제어시스템을 제안하였다[14].

본 연구는 모바일형 보행보조 시스템을 기반으로 하여 자동운전 및 수동운전모드 두 가지를 제안하고, 각각 운용방식을 사용자 및 로봇이 목표경로에 도달하기 위해 지향하는 벡터를 기준으로 움직임이 생성된다는 공통점에 착안하여, 인간의 방향 전환 보행 시에 발생하는 자연스러운 헤딩(transverse plan 상에서의 좌우 회전), 상체(frontal plan 상에서의 좌우 기울임), 하체(양 다리 폭의 차이에 의한 진행 방향 전환)의 변화를 사용자 명령 시스템(UCS: User Command System)에 적용하여 수동 운전모드를 구현하고, Pure Pursuit 기법을 적용한 기하학적 경로 추정법에 의해 자동운전 모드를 구현하여 보행 보조 및 시스템을 제안하였다. 이를 위해 AGV (Autonomous Guided Vehicle) 방식의 모바일 시스템 및 UCS 기반의 자중 보상 시스템을 통합한 로봇 재활 시스템을 제안하는 한편 능동적인 사용자의 자중 보상을 통한 하지 근력 부하의 경감 및 병원과 같은 실내 환경에 적합한 장애물 회피 및 경로계획기법을 바퀴형 이동로봇 플랫폼에 적용하여 운용 실험을 통해 성능을 최종적으로 검증하였다.

II. 기구 메커니즘 설계

1. 시스템 기본 요구사항

보행보조 시스템의 기구부는 인체 데이터, 임상 보행 분석

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 6. 10., 수정: 2010. 7. 12., 채택확정: 2010. 7. 20.

유승남, 서승환, 한창수: 한양대학교 기계공학과
(hymecer@gmail.com/solfa@daekhon.co.kr/cshan@hanyang.ac.kr)

손응희, 이상호: 한양대학교 메카트로닉스공학과

(shon@kitech.re.kr/softsky@ctp.or.kr)

※ 이 논문은 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 '고기능 로봇 메니플레이션 연구센터' 지원사업 (NIPA-2010-C7000-1001-0002) 및 2010년 HYU 연구특성화사업의 지원으로 수행되었음 (HYU-2010-T).

을 통해 취득된 기구학적 운동학적 데이터 및 노인의 걸음걸이 분석 등을 기반으로 설계되었다. 본 시스템의 최대허용하중은 80kg이며 이는 시스템에 거처되는 부분이 보행자 전체 하중의 일부분임을 감안할 때 타당한 설정이라고 할 수 있다. 첫 번째로 재활로봇 시스템 설계에서 고려되어야 할 측면은 안전성이다. 본 시스템을 이용하는 동안 실족 등 안전사고 상황도 고려되어야 한다. 두 번째로는 기능성이다. 보행재활 시스템의 경우, 사용자의 거동을 방해해서는 안되며, 특히 사용자의 보행 동안 상체의 자연스러운 동작은 진행방향을 기준으로 좌우방향, 연직방향에 대해서 규정지을 수 있는데, 좌우동작은 특히 보행의 안정성을 위해 중요한 요소이며, 연직방향은 자중보상과 관련이 있다. 본 연구에서 기준으로 설정한 노인 기준의 표준 보행 패턴은 114.8걸음/분, 보행속도는 0.5m/s, 단위 보행주기는 1.06초, 단위 보행 주기 당 이동거리는 0.49m, 보폭은 0.26m이다.

2. BWS 시스템의 설계

BWS는 환자의 보행 시에 하지 및 허리에 인가되는 인체 자중에 대한 부담을 단계적으로 경감시키기 위한 장치로서, 재활 훈련의 경과에 따라 상체의 무게를 최대한으로 보상하여 하지의 부담을 최소화 하거나, 반대로 정상적인 보행에 가까워 질수록 상체의 무게 부담을 하지 쪽으로 증가시킬 수 있도록 BWS의 지원효과를 약화시킬 수도 있다. 그림 1은 BWS의 기구학적인 구조를 도시하고 있다.

1) Position

$$Z_{O_2} + Z_2 - Z_{O_1} - Z_1 = 0$$

$$l_{O_2}j + l_{2A}e^{j\theta_2} - l_{O_1} - l_1e^{j\theta_1} = 0$$

$$\phi = \theta_1 - \theta_2$$

$$k_1 = l_{2A} - l_1 \cos \phi$$

$$k_2 = -l_1 \sin \phi$$

$$\therefore \theta_2 = 2 \tan^{-1} \frac{k_2 + \sqrt{k_2^2 - k_1^2 + l_{O_1}^2}}{k_1 + l_{O_1}}$$

2) Velocity

$$\omega_2 = \frac{l_1 \cos(\theta_2 + \phi) - l_1 \phi \sin(\theta_2 + \phi)}{l_1 \sin(\theta_2 + \phi) - l_{2A} \sin \theta_2}$$

$$\therefore v_y = (l_{2A} + l_{A2}) \cdot \omega_2 \cdot \cos \theta_2$$

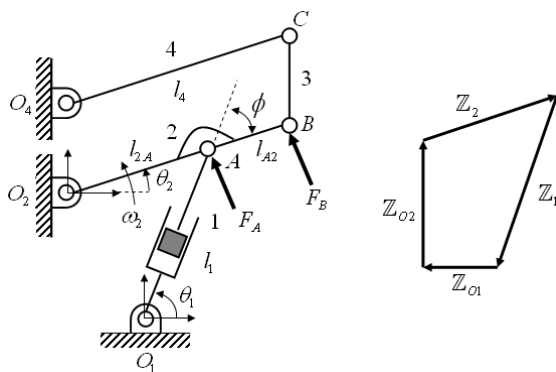


그림 1. BWS 시스템의 기구적 구조.
Fig. 1. Kinematics diagram of BWS.

3) Force

$$F_A = F \sin \phi$$

$$F_B = \frac{l_{2A}}{l_{2A} + l_{A2}} \cdot F$$

$$F_y = F_B \cos \theta_2$$

본 연구의 BWS 시스템은 사용자의 상체를 시스템에 지지함으로써 상체의 하중을 BWS로 이동시킴과 동시에, BWS와 모바일 시스템의 연결 부에 1자유도 직렬형 메커니즘을 도입하여, 사용자가 상체하중을 시스템에 인가함과 동시에, 로봇과 사용자간의 속도 차로 해 발생하는 사용자의 보행 의지가 그대로 로봇에 전달되도록 설계하였다. 또한 사용자의 보행속도 및 보폭을 고려하여 사용자와 로봇간의 안전거리를 유지하는데도 활용된다.

III. 모바일 플랫폼의 경로 계획 및 제어

1. 배경

그림 2는 제안된 2륜 구동형 모바일 로봇시스템의 기구학적 모델을 도시하고 있다.

회전반경은 R, 회전 각속도는 w, 선속도는 v, 절대좌표계에 속하는 임의의 고정 좌표계는 Gx, Gy, 이동로봇의 중심점에 속하는 좌표계는 Rx, Ry, 로 각각 정의하였다. 모바일 로봇의 위치 및 방향은 xR, yR, 및 θR 이라 할 때, 모바일 로봇의 기하학적 형상은 다음의 벡터 q로 정의할 수 있다.

$$q = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ \theta_R \end{bmatrix} \tag{1}$$

따라서 운동방정식은 다음과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u \tag{2}$$

여기서 u는 제어 입력 값이다. 일반적으로 이러한 종류의 nonholonomic 제한조건으로부터 모바일 로봇의 기구학적 모

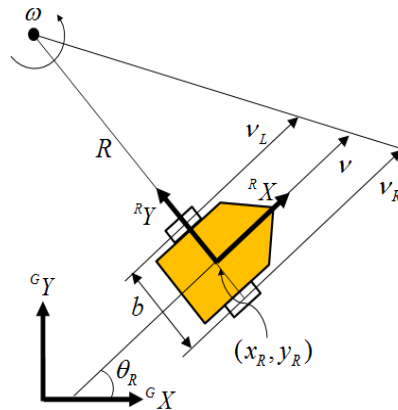


그림 2. 모바일 로봇의 기구학적 모델.
Fig. 2. Kinematic model of the mobile robot.

델을 도출할 수 있다. 이러한 nonholonomic 조건은 다음의 식으로 표현되는 속도 관련 제한 조건 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{x}_R \sin \theta_R - \dot{y}_R \cos \theta_R = 0 \quad (3)$$

이는, 모바일 로봇의 길이방향으로 충분히 저속으로 움직이고, 회전반경 방향의 견인력이 바뀌어 지면간의 최대 정지 마찰력을 넘지 않는 경우로 가정할 때, 모바일 로봇의 y축 방향의 속도성분이 0이기 때문에 모바일 로봇의 바뀌어 지면간에 미끄럼 움직임은 없는 것으로 간주할 수 있다(식 (3)). 식 (2)에서 모바일 로봇의 직선 및 회전 속도는 제어 입력으로 표현되었지만, 실제적인 최종 제어 입력은 바뀌어 양단의 선속도 값이어야 한다. 이는 각 바뀌어 모터로 구동되기 때문이다. 동시에 그림 2에 도시된 바와 선회반경 R로 회전하기 위한 양 바뀌어의 속도는 다음 식 (4)로 구해진다.

$$v_L = v \left(1 - \frac{b}{2R} \right), \quad v_R = v \left(1 + \frac{b}{2R} \right) \quad (4)$$

2. 수동 운전 제어

그림 3은 본 연구에서 제안된 보행보조로봇의 수동 운전시의 일반화된 운전모드를 도시하고 있다. 그림 3에 표현된 경로점은 사용자가 이동 및 도달하고자 하는 지점들을 나타낸다.

일반적으로 사용자의 의지대로 모바일 플랫폼을 조향 할 때는, 먼저 목표지점을 지향한 다음 상체를 이용하여 UCS를 통해 모바일 로봇을 조향 한다. 이때, 사용자 두부의 각도 변화가 발생하고(CIH: Change In Heading,) 이러한 차이를 보상하기 위해 사용자는 자신의 몸체를 움직임으로서 자연스럽게 USC에 조향 명령을 입력하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 모바일 로봇 시스템의 전후 움직임과 좌우 움직임에 대한 명령을 동시에 입력할 수 있다.

3. 자동 운전 제어

본 장에서는 보행보조 로봇의 자동 운전 기능을 위해 모바일 로봇의 기하학적 경로 추종 방법 중 하나인 pure pursuit를

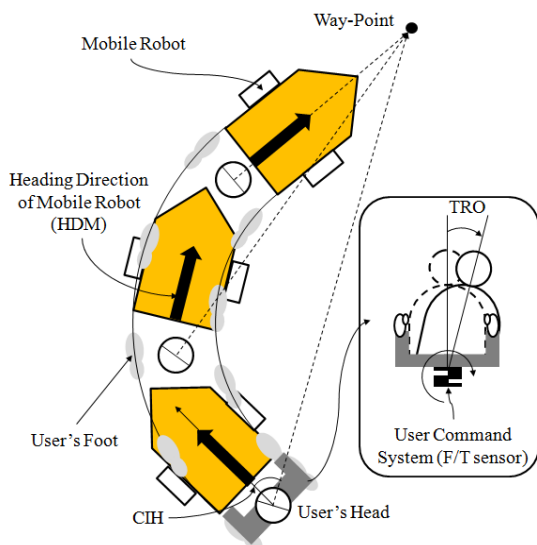


그림 3. 모바일 로봇 시스템의 수동 운전모드.
Fig. 3. Generalized walking using the proposed system.

제시하고, 이러한 경로 추종 제어기의 튜닝을 위한 예견 거리 계산 방법을 제안한다. 먼저, 이동 로봇의 경로를 정의하면 다음과 같다.

경로는 i) 연속적인 경로(continuous path), ii) 불연속적인 경유점들의 집합 (set of discrete waypoints) 등의 두 가지 종류로 구분한다. 하지만 i)의 경우, 2차원 평면 상에 함수로 경로를 정의해야 하므로 실제 하드웨어로의 적용 시 불필요한 계산량을 요구하기도 한다. 따라서 본 연구에서 제안한 모바일 로봇에는 ii)와 같이 경유점들의 집합으로서 이동로봇이 추종할 경로를 정의하였다.

3.1 Pure Pursuit 기법을 이용한 경로 추종

Pure pursuit은 이동 로봇이 기준 경로로 되돌아오기 위한 회전 반경을 생성하는 기하학적 경로 추종 방법이다. 그림 4는 pure pursuit 경로 추종 방법을 사용하여 회전 반경을 생성하는 것을 나타낸다. 회전반경은 이동 로봇의 중심점에서 예견거리 L 만큼 떨어진 경로상의 예견점(그림 4에서 'O'로 표시된 지점)과 이동 로봇의 중심점을 지나는 원을 생성함으로써 얻을 수 있다. 예견점의 위치가 로봇 좌표계 기준으로 y축으로 y_L , x축으로 x_L 만큼 떨어져 있을 때, 그림 4의 삼각형에서의 기하학적 관계로부터 아래 식을 얻을 수 있다.

$$x_L^2 + y_L^2 = L^2 \quad (5)$$

$$a^2 + x_L^2 = R_{track}^2 \quad (6)$$

$$a = R_{track} - y_L \quad (7)$$

식 (7)을 앞의 식 (6)에 대입하고 정리하면, 그림 4의 원의 반경, 즉 경로를 추종하기 위한 회전 반경 R_{track} 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$x_L^2 + y_L^2 = 2y_L R_{track} \quad (8)$$

$$R_{track} = \frac{L^2}{2y_L} \quad (9)$$

제어 시스템의 sample time을 Δt 라 할 때, 그림 5는 pure pursuit 경로 추종 방법을 사용함으로써 이동 로봇이 기준 경로로 돌아오는 과정을 보여주고 있다. 경로 위에 예견점을

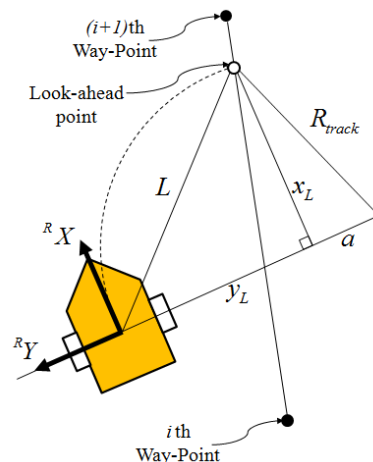


그림 4. Pure pursuit 기하.
Fig. 4. Geometry of pure pursuit.

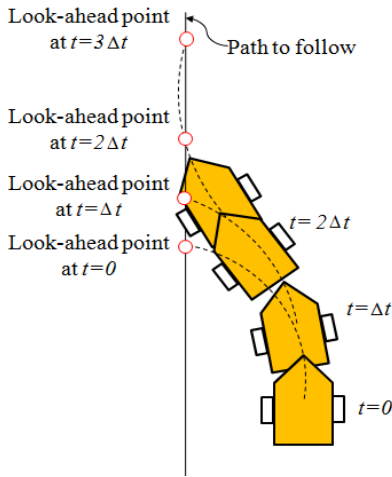


그림 5. 경로를 추종하는 로봇의 연속적인 위치.
Fig. 5. Sequential robot positions tracking a path.

찾아 식 (9)로부터 회전 반경을 계산하고, 계산된 회전 반경은 식 (4)로 적용되어 최종적으로 이동 로봇의 각 바퀴 속도 지령으로 사용된다. 이 과정을 매번 sample time 마다 수행하여 이동 로봇은 경로를 추종한다.

3.2 보행 예견 거리 선정

기하학적 경로 추종방법을 사용한 경로 추종 제어기의 성능은 예견거리에 의존한다. 이는, 수동운전 모드인 경우 사용자가 빠른 보행으로 전진할 때, 느린 보행 시에 비해 상대적으로 먼 지점을 바라보며 보행하는 것과 같이, 자동 운전모드의 경우에도 속도 변화에 따라 예견거리를 제어하여야 한다. 예견거리가 길 경우 모바일 로봇은 선회를 일찍 시작하므로, 경로를 정확하게 추종하게 만들기 위해서는 반대로 예견 거리는 짧아져야 한다. 하지만 예견거리를 짧게 선정할 경우 보행 로봇은 작은 회전 반경으로 선회 하므로 큰 각속도가 발생한다. 이는 보행 로봇의 바퀴와 지면간에 미끄러짐을 유발하며, 보행 로봇의 바퀴 제어 및 바퀴 회전을 통해 자신의 위치를 계산하는 오도메트리(odometry) 기법에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 이동 로봇의 각속도를 제한하기 위한 예견거리를 선정하는 방법을 제안한다.

이동 로봇이 기준 선속도를 유지하면서 경로를 추종할 때, 경유점과 경유점을 잇는 직선 경로들 사이의 각도가 180도인 경우 즉 보행자가 정반대 방향으로 180도 회전을 해야 되는 경우를 가장 가혹한 움직임으로 상정하였는데, 이때 모바일 로봇은 가장 작은 회전 반경을 따르게 된다. 따라서 이 경우가 경로 추종 중 발생할 수 있는 최대 각속도이며, 최대 각속도와 예견거리, 그리고 이동 로봇의 선속도의 관계를 정의하기 위해 180도 회전에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 선속도를 0.5m/s로 설정하고, 6m 전진 후 되돌아 오도록 하였으며, 초기 위치는 (0,0)이고 초기 방향은 0도이다. 최대 각속도 30degree/sec, 60degree/sec, 90degree/sec를 발생시키는 예견거리는 각각 1.9099m, 0.9550m, 0.6366m이며 그림 6은 이러한 세 가지 경우에 대한 이동 로봇의 궤적과 각속도를 나타낸다.

이와 같은 시뮬레이션 결과로부터 고정된 선속도에서 최대 각속도는 예견 거리에 반비례함을 확인하였고 pure pursuit

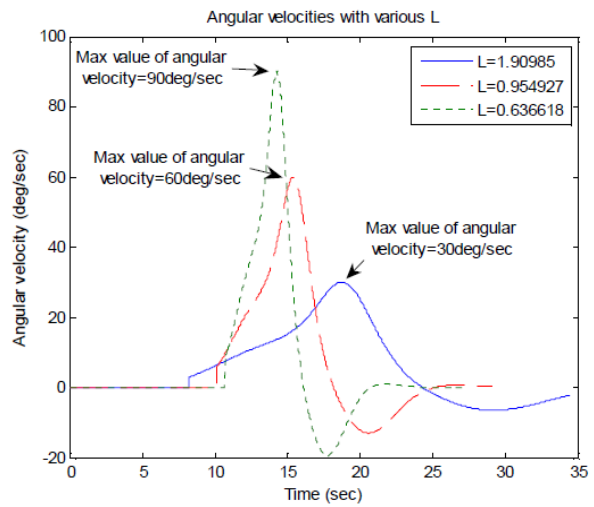
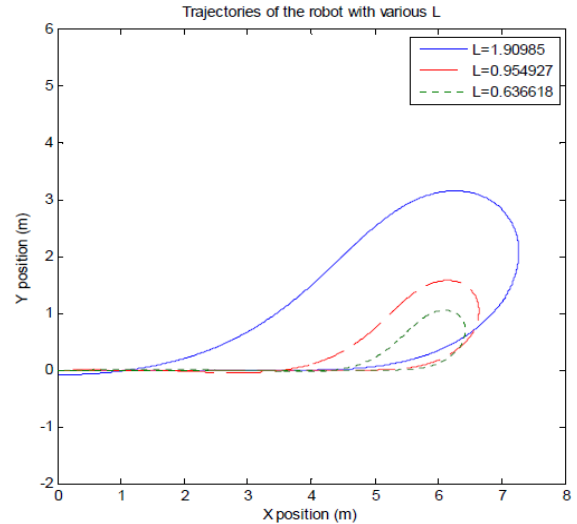


그림 6. 예견거리에 따른 이동 로봇의 궤적 및 각속도.
Fig. 6. Simulation Result of pure pursuit method.

경로 추종 방법에서 예견거리는 기준 선속도에 비례하도록 설정해야 하므로, 이동 로봇의 선속도가 v 일 때 최대 각속도 ω_{lim} 를 넘지 않기 위한 예견거리 L 은 아래와 같이 정의된다.

$$L = 2 \frac{v}{\omega_{lim}} \tag{10}$$

3.3 경로 추종 및 장애물 회피 통합

본 연구에서 제안한 모바일 로봇은 서두에서 언급하였듯이 가정, 병원, 노인복지시설 등 공공장소에서 사용할 수 있도록 설계되었다. 본 연구의 목표는, 미지의 환경에 대한 맵핑(mapping) 및 이를 통한 고지능형 자율주행 로봇이 아닌, 진행 경로 상의 장애물에 대한 로봇의 인지 및 사용자의 자연스러운 보행 훈련에 혼란을 주지 않는 자연스러운 회피를 구현하는 것이 목적이다. 이를 위해 안정적이고 자연스러운 장애물 회피에 주안점을 두었다. 본 연구에서 제안한 모바일 로봇 시스템에는 그림 6과 같이 2차원 평면을 180도 범위로 스캔 할 수 있는 레이저 스캐너가 탑재되어있으며, 이를 사용하여 장애물을 감지하였다. 그림 7에서 보이는 반지름 d_{max} 의 반원 영역이 실제 레이저 스캐너의 스캔 가능 영역

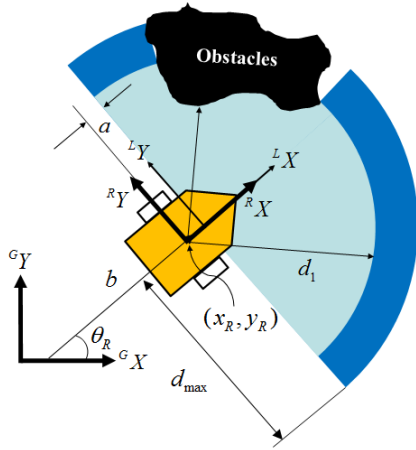


그림 7. 장애물 감지를 위한 좌표계.
Fig. 7. Coordinate systems for detecting the obstacle.

이라고 했을 경우, 그 중 반지름 d_i 의 반원 영역 내의 장애물만 고려한다. 따라서 이 영역을 장애물 유효 영역으로 정의한다. 레이저 스캐너의 중심에 레이저 스캐너 좌표계를 정의하였으며, L_x 와 L_y 는 레이저 스캐너 좌표계의 X축, Y축이다. 로봇 좌표계의 X축과 레이저 스캐너 좌표계의 X축은 동일 선상에 놓여있는 반면, 로봇 좌표계의 Y축과 레이저 스캐너 좌표계의 Y축은 α 만큼의 오프셋을 가지고 있다. 레이저 스캐너는 0.5도 단위로 거리 값을 얻으므로, $i = 0^\circ, 0.5^\circ, \dots, 180^\circ$ 에서 장애물까지의 위치벡터를 $p_{oi} = [x_{oi} \ y_{oi}]^T$ 라 정의한다. ${}^L p_{oi}$, ${}^R p_{oi}$ 그리고 ${}^G p_{oi}$ 는 벡터 p_{oi} 의 레이저 스캐너 좌표계, 로봇 좌표계, 지구 좌표계에 대한 좌표 값을 나타내며 이들 사이에 좌표 변환 관계는 변환행렬(transformation matrix)을 사용하여 표현할 수 있다. ${}^R p_{oi}$ 과 ${}^L p_{oi}$ 사이에는 식 (11), (12)의 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} {}^R p_{oi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^R_L T \begin{bmatrix} {}^L p_{oi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} {}^G p_{oi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^G_R T {}^R_L T \begin{bmatrix} {}^L p_{oi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 ${}^R_L T$ 와 ${}^G_R T$ 는 각각 레이저 스캐너 좌표계에서 로봇 좌표계로, 로봇 좌표계에서 지구 좌표계로의 변환 행렬이며 아래와 같이 구성된다.

$${}^R_L T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^G_R T = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & & \\ \sin \theta_R & & \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

앞에서 정의한 장애물까지의 위치벡터를 이용하여 가장 가까운 장애물까지의 리 d 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$d = \min_{i=0, 0.5, \dots, 180} |{}^R p_{oi}| \quad (14)$$

위의 식을 거리 d 로부터의 장애물 포텐셜(obstacle potential)로 정의하면, v_i 는 아래와 같이 설정할 수 있다.

$$v_i = \begin{cases} \frac{1}{d+d_0} + \frac{d}{(d+d_0)^2} & \text{if } 0 \leq d \leq d_1 \\ \frac{1}{d_1+d_0} + \frac{d_1}{(d_1+d_0)^2} & \text{if } d > d_1 \end{cases} \quad (15)$$

여기서 d_0 는 d 가 0인 경우 장애물 포텐셜이 무한대가 되는 것을 방지하기 위한 상수이다. 따라서 가상의 힘 f_i 는 장애물 포텐셜의 gradient를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$f_i = -\nabla v_i$$

$$f_i = \begin{cases} -\left(\frac{1}{(d_1+d_0)^2} - \frac{1}{(d+d_0)^2} \right) \frac{{}^R p_{oi}}{d} & \text{if } 0 \leq d \leq d_1 \\ 0 & \text{if } d > d_1 \end{cases} \quad (16)$$

본 논문에서는 식 (3)과 같은 nonholonomic 구속조건을 갖는 이동 로봇을 다루므로, 식 (16)으로 주어진 가상의 힘의 모든 방향으로 이동 로봇이 움직이는 것은 불가능하다. 이러한 구속조건을 고려하기 위해 본 논문은 장애물 포텐셜로부터 생성된 가상의 힘의 크기를 사용하여 장애물을 피하기 위한 회전반경을 생성하는 방법을 소개한다. 장애물 회피 회전 반경은 가상의 힘의 크기에 반비례 해야 하며, 이동 로봇의 운동 방향이 장애물을 향할 때 회전 반경은 더욱 작아야 한다. 따라서 장애물 회피 회전 반경은 다음과 같은 수식으로 정의한다.

$$R_{avoid} = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\alpha |f_i|} & \text{if } \theta_{oi} - \theta = 0 \\ \frac{\sin(\theta_{oi} - \theta)}{\alpha |f_i|} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

여기서 α 는 임의의 gain 값이고 θ_{oi} 는 장애물까지 위치 벡터 ${}^R p_{oi}$ 가 지구 좌표계의 x축과 이루는 각도이다. 그리고 ε 은 회전 반경이 0으로 되는 경우를 방지하기 위한 매우 작은 값이다.

3.4 장애물 감지에 따른 이동 로봇의 선 속도 감소

본 논문에서는 장애물로부터 가상의 힘이 발생할 경우, 이동 로봇의 선 속도 v 를 아래 식을 이용하여 감소시킨다.

$$v = v_{ref} - \beta |f_i|^2, \quad v > 0 \quad (18)$$

여기서 v_{ref} 는 기준 속도이며 β 는 임의의 gain 값이다. 따라서 식 (10)로 주어진 예견 거리 식에 위 식 (18)로 계산된 속도를 대입함으로써, 이동 로봇의 예견 거리 또한 속도에 비례하여 감소된다. 따라서 이동 로봇은 정적 장애물뿐만 아니라 동적 장애물에도 대응할 수 있다. 앞에서 pure pursuit 경로 추종 방법과 장애물 회피 방법은 각각 회전 반경을 식 (9)와 식 (17)로 계산하며, 다음과 같이 각속도로 표현 가능하다.

$$\omega_{track} = \frac{v}{R_{track}} \quad (19)$$

$$\omega_{avoid} = \frac{v}{R_{avoid}}$$

따라서 경로 추종과 장애물 회피를 동시에 하기 위한 각속

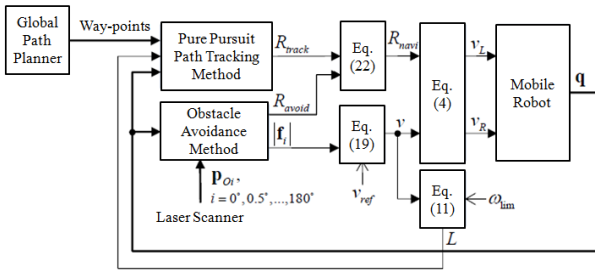


그림 8. 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 제어 시스템.
Fig. 8. The control system for path tracking and obstacle avoidance.

도 ω_{navi} 는 위의 경로 추종을 위한 각속도 ω_{track} 와 장애물 회피를 위한 각속도 ω_{avoid} 를 조합하여 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_{navi} = \omega_{track} + \omega_{avoid} = v \left(\frac{R_{track} + R_{avoid}}{R_{track} R_{avoid}} \right) \quad (20)$$

따라서 이동 로봇이 경로 추종과 장애물 회피를 동시에 하기 위한 회전 반경은 아래와 같다.

$$\omega_{navi} = \omega_{track} + \omega_{avoid} = v \left(\frac{R_{track} + R_{avoid}}{R_{track} R_{avoid}} \right) \quad (21)$$

위 식 (21)로 주어진 회전 반경과 식 (18)의 선 속도 계산 결과를 가지고 식 (4)로부터 이동 로봇의 양 쪽 바퀴의 선 속도를 얻을 수 있다.

$$R_{navi} = \frac{R_{track} R_{avoid}}{R_{track} + R_{avoid}} \quad (21)$$

4. 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 제어 시스템

이동 로봇이 추종할 경유점들을 시스템에 내장된 전역 경로 계획기(global path planner)로부터 제공받았을 때, 경로 추종 및 장애물 회피를 수행하기 위한 방법을 그림 8과 같이 제어 시스템으로 요약할 수 있다.

Pure pursuit 경로 추종 방법은 경유점, 예견 거리 및 이동 로봇의 위치와 방향을 피드백 받아 경로 추종을 위한 회전 반경 R_{track} 을 생성한다. 장애물 추종 방법은 이동 로봇의 위치와 방향, 그리고 레이저 스캐너로부터 얻어지는 장애물까지 위치 벡터들을 가지고 장애물 회피를 위한 회전 반경 R_{avoid} 를 생성한다. 최종적으로 이동 로봇 양 쪽 바퀴의 속도 지령이 앞에서의 두 회전 반경과 선 속도에 의해 결정되며, 장애물로 인한 가상의 힘 f_i 의 크기가 커질수록 선속도가 감소하며 이에 따라 감소되는 예견거리는 다시 pure pursuit 경로 추종 방법으로 피드백 된다.

IV. 실험 및 결과

1. 경로 추종 및 정적 장애물 회피 성능 검증

본 연구에서는 그림 9와 같은 최종 시스템을 제작하였으며, 실제 사용자를 통해 로봇의 경로 계획(정적, 동적 장애물 회피) 및 BWS 성능 실험을 수행하였다.

약 (5m, 0)과 (8m, 5m) 부근에 임의의 장애물을 설치한 후 경로 추종 및 정적 장애물 회피 실험을 수행하였다. 그림 10

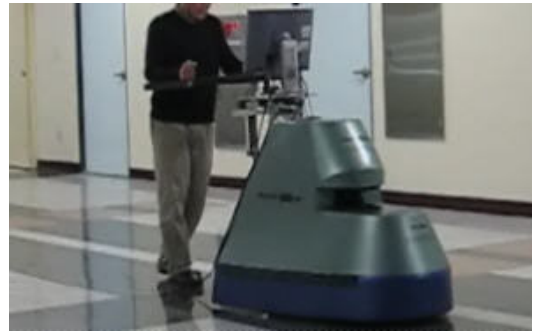


그림 9. 개발된 모바일형 보행 보조 로봇.
Fig. 9. The developed mobile-robot system.

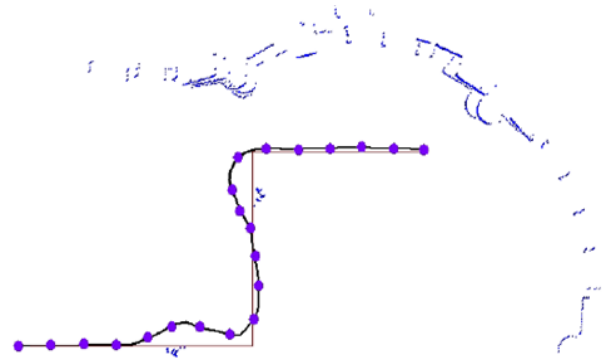


그림 10. 로봇의 경로 추종 및 정적 장애물 회피 결과.
Fig. 10. Trajectory of the mobile robot (path tracking and static obstacle avoidance).

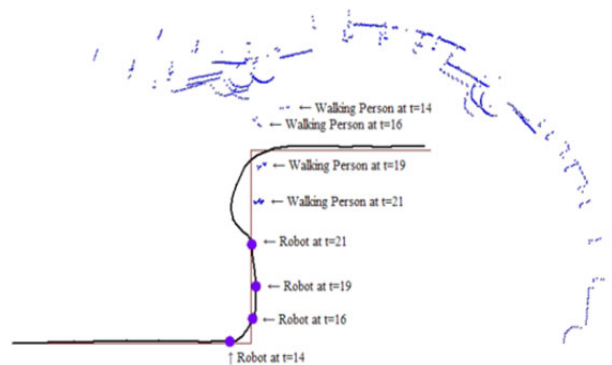


그림 11. 로봇의 경로 추종 및 동적 장애물 회피 결과.
Fig. 11. Trajectory of the mobile robot (path tracking and dynamic obstacle avoidance).

의 이동 로봇의 궤적과 같이 이동 로봇은 장애물을 인식하고 회피하였다. 또한 장애물 회피로 인해 이동 로봇의 각속도 변화가 경로 추종만을 수행하였을 때 보다 크게 발생하였으나, 피험자의 보행 훈련에는 지장이 없었다. 동적 장애물 회피 실험은 사람이 직접 이동 로봇을 향해 걸어오므로써 수행되었다. 그림 11에 나타난 바와 같이, 동작 시간이 약 14초일 때 레이저 스캐너의 센싱 영역에 사람이 감지되었으며 이동 로봇은 왼쪽으로 선회함으로써 사람을 회피하였다.

2. 경로 추종 및 동적 장애물 회피 실험

경로 추종만을 실험한 경우, 장애물을 만나지 않았으므로 예견 거리는 $L=1.146m$ 로 일정하였다. 하지만 정적 장애물 회

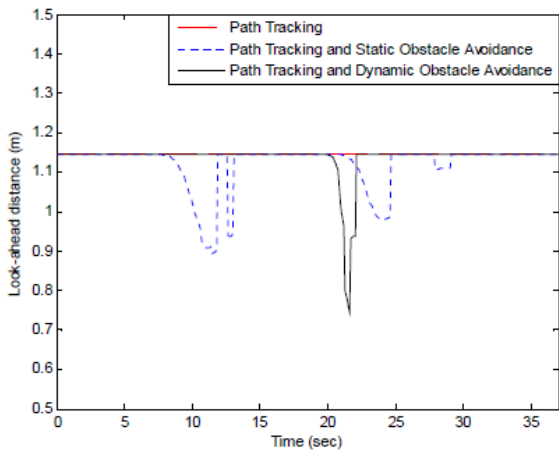


그림 12. 시간에 따른 예견 거리.
Fig. 12. Time versus look-ahead distance.

피까지 수행하였을 때에는 두 개의 장애물을 회피하였으므로, 두 번의 예견 거리의 감소가 있었다. 그리고 동적 장애물 회피의 경우에는 사람이 이동 로봇에 가까이 접근함에 따라 예견 거리가 급속하게 감소함을 그림 12에서 알 수 있다. 따라서 이를 통해, 예견 거리가 감소함으로써 이동 로봇의 목표 선속도가 감소하고, 이동 로봇은 최대 각속도 조건을 넘지 않으면서 작은 회전 반경으로 이동할 수 있었다.

3. BWS 성능 검증

본 시스템의 성능검증을 위해서 BWS의 지원 정도에 따른

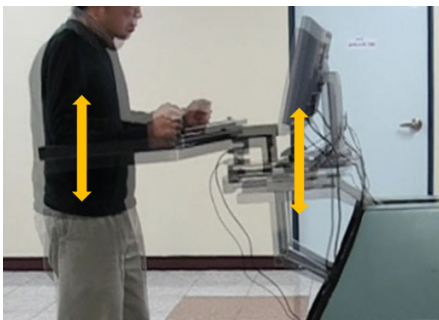


그림 13. BWS 운용 실험.
Fig. 13. The developed mobile-robot system Captured images of the BWS test.

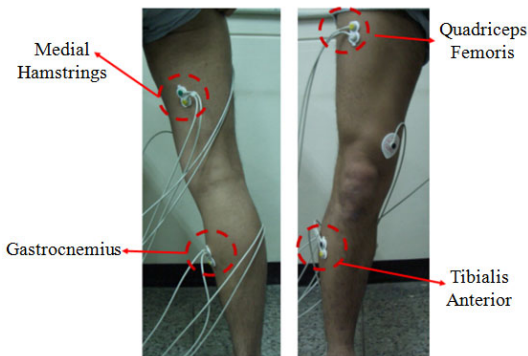
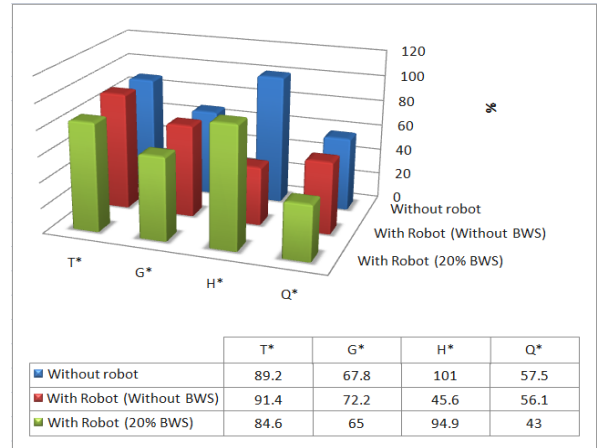
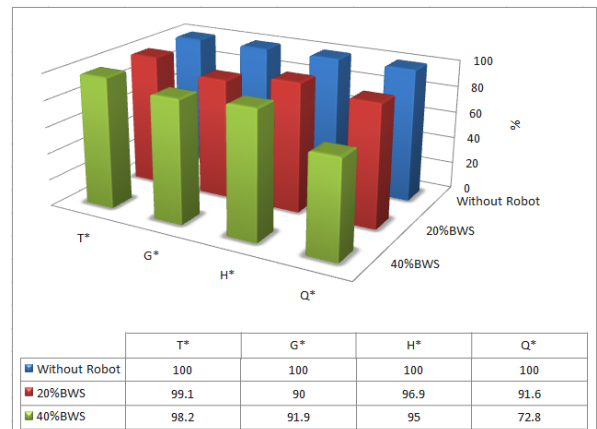


그림 14. 근전도 신호 측정을 위한 전극 부착 위치.
Fig. 14. Images of the surface electrodes placed on the lower-extremity muscles.

사용자 하지의 EMG를 측정하였다. 본 실험에서는 3단계의 자중 보상 레벨을 설정하여 실험하였으며, 각각은 보행속도는 0.5m/s로 설정하였다. 그림 13은 BWS의 실제 동작상태를 도시하고 있다.

본 연구에서는 사용자의 근골격계에 대한 정량적인 지원 성능을 평가하기 위하여 그림 14와 같이 사용자의 하지의 주요 근육 부위(QF: Quadriceps Femoris), MH: Medial Hamstrings), GA: gastrocnemius), and TA: Tibialis Anterior))에 대해 표면전극을 부착하여 보행 시 발생하는 근육활성화 정도를 EMG 측정 장치로 취득하였다. 전체적인 실험은 10미터의 거리를 0.5m/s 의 이동속도로 상체 하중 미 지원 (0% 지원), 20%, 40% 지원 등의 세 가지 경우에 대해 보행을 수행함으로써 이루어졌다. 실험에 사용된 측정장비는 Myosoft™ software (Noraxon USA®, Scottsdale, AZ®)를 사용하였다.

그림 15의 첫 번째 그래프는 BWS의 정도에 따른 인체 하지 근육 활성도를 5회 반복 실험 후의 평균치로 나타낸 것이다. 그림에 도시된 바와 같이 40% BWS 지원 시, Quadriceps에서의 28% 가량의 근력 경감효과가 나타난 것을 제외하면, 각각의 BWS 지원 정도에 따른 평균 근육활성도의 이질화가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 정상적인 보행을 위한 보행 훈련이 목적임을 감안하면, 정상 보행의 재현성이라는 측면



(*Q: quadriceps; H: hamstrings; G: gastrocnemius; T: tibialis anterior)

그림 15. 보행 중 하지 근전도 신호 측정 결과.
Fig. 15. Average muscle activity (EMG) expressed as a percentage of the FWB amplitude and 35 %MVIC of muscle activity (EMG).

에서 타당한 결과라고 할 수 있다.

그림 15의 두 번째 그래프는 동일 실험에 대한 MVIC (Maximum Voluntary Isometric Contraction)의 백분율을 나타낸 것으로서, 정상 보행 시 각 하지 근육이 동작하는 패턴을 기준으로 하였을 때, 본 시스템 사용자의 근육 활성화 패턴의 변화를 관찰한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 본 피험자는 20% 가량의 BWS를 적용하여 일반 보행시의 보행 패턴과 아주 유사한 하지 근력 패턴을 나타내는 보행훈련을 수행할 수 있었다. 이는 상체 하중에 대한 부담을 20% 정도 경감한 상태에서 취득한 결과로서 하지 근력이 약화된 피험자들이 상대적으로 적은 상체 하중 부담에 대해서도 일반 보행과 유사한 보행 패턴의 훈련이 가능함을 입증한 것이라 할 수 있다.

V. 결론 및 고찰

본 연구에서는 노약자 및 장애인의 보행 재활을 돕는 모바일 로봇을 제안하였으며, 사용자의 보행 훈련 시에 직관적인 수동조작 및 능동적인 자동주행 모드를 병행하여 운용할 수 있도록 고안하였다. 또한 인체 보행의 방향 전환에 기인하는 신체 각 부위의 동작 패턴을 분석하여 사용자 인터페이스를 통한 수동 운전 기법과 로봇의 경로 계획 알고리즘을 통한 자동 운전기법을 동시에 실증하였다. 특히, nonholonomic 이동로봇의 자율주행을 위한 기하학적 경로 추종 및 장애물 회피 방법을 제안함으로써 기하학적 경로 추종 방법인 Pure pursuit을 통해 경로를 추종하기 위한 회전 반경을 생성함과 동시에, 장애물로부터 생성되는 가상의 힘 또한 장애물로 간주하고 회피할 수 있는 회전 반경을 생성하였다. 최종적으로 이러한 두 개의 회전 반경으로부터 이동 로봇이 경로 추종 및 장애물 회피를 동시에 수행하기 위한 목표 운동경로를 도출할 수 있었다. 또한 별도의 실험을 통해 BWS를 통한 자중 보상이 이루어진 상태에서도 충분히 정상적인 패턴의 보행 재활 훈련이 가능함을 피험자의 로봇 재활보행 훈련 시의 하지 근전도 신호 측정 실험을 통해 확인할 수 있었다.

본 논문에서 검증한 위와 같은 기능들은 자율 훈련 능력이 상대적으로 떨어지는 노약자 및 장애인이 병원 및 가정과 같은 다양한 실내환경에서 자율적이고 반복적인 보행 훈련을 수행하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] N. Teasdale, C. Bard, J. LaRue, and M. Fleury, "On the cognitive penetrability of postural control," *Exp Aging Res*, vol. 19, no. 1, pp. 1-13, 1993.
- [2] J.L. Poole, "Age-related changes in the sensory system dynamics related to balance," *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, vol. 10, no. 2, pp. 55-66, 1992.
- [3] L. Wolfson, R. Whipple, and C. A. Derby, et al., "A dynamic posturography study of balance in healthy elderly," *Neurology*, vol. 42, no. 11, pp. 2069-2075, Nov. 1992.
- [4] P. R. Trueblood and L. Z. Rubenstein, "Assessment of instability and gait in elderly persons," *Comprehensive Ther*, vol. 17, no. 8, pp. 20-29, 1991.
- [5] A. Gabell, M. A. Simons, and U. S. L. Nayak, "Falls in healthy elderly: predisposing causes," *Ergonomics*, vol. 28, no. 7, pp.

956-975, Jul. 1985.

- [6] C. I. Gryfe, A. Ames, and M. J. Askey, "A longitudinal study of falls in an elderly population: incidence and morbidity," *Age & Ageing*, vol. 6, no. 4, pp. 201-211, 1977.
- [7] D. Prudham and J. G. Evans, "Factors associated with falls in the elderly: a community study," *Age & Ageing*, vol. 10, no. 3, pp. 141-146, 1981.
- [8] J. H. Sheldon, "On the natural history of falls in old age," *British Medical Journal*, vol. 2, no. 5214, pp. 1685-1690, Dec. 1960.
- [9] L. Z. Rubenstein, S. S. Robbins, and B. L. Schulman, et al., "Falls and instability in the elderly," *J Am Geriatr Soc*, vol. 36, pp. 266-278, 1964.
- [10] J. Woo, S. C. Ho, J. Lau, S. G. Chan, and Y. K. Yuen, "Age-associated gait changes in the elderly: pathological or physiological?," *Neuro-epidemiology*, vol. 14, pp. 65-71, 1995.
- [11] H. Barbeau, M. Wainberg, and L. Finch, "Description of a system for locomotor rehabilitation," *Med. Biol. Eng. Comp*, vol. 25, pp. 341-344, 1987.
- [12] S. Egawa, Y. Nemoto, A. Koseki, T. Ishii, and M. G. Fujie, "Gait improvement through the use of a power-assisted walking support device," *Human Friendly Mechatronics (ICMA 2000)*, pp. 117-122, 2000.
- [13] S. McLachlan, J. Arblaster, D. K. Liu, J. V. Miro, and L. Chenoweth, "A multistage shared control method for an intelligent mobility assistant," *Proc. of the 2005 IEEE 9th Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, Sydney, Australia, pp. 426-429, Jun. 2005.
- [14] Y. Jiang, B. Bai, and J. Yang, "A robust control strategy applied to the omnidirectional lower limbs," *Proc. of Chinese Control and Decision Conference*, Guilin, China, pp. 4638-4642, Jun. 2009.



유승남

2004년 한양대 기계공학과 졸업. 2006년 동 대학원 정밀기계공학과 석사. 2009년 동 대학원 기계공학과 박사. 현재 한양대 BK21 혁신설계기계인력양성사업단 Post-doc. 관심분야는 필드형 모바일 로봇, 인체 착용형 로봇, 건설자동화 로봇.



손응희

1988년 서울산업대 기계설계학과 졸업. 1993년 한양대학교 기계설계학과 석사. 1997년 과학기술부 기계/차량 기술사. 1990년~현재 한국생산기술연구원 지능형로봇연구부 수석연구원. 현 지능형로봇연구부장. 관심분야는 필드형로봇, 생체역학, 수송기계.



서승환

1999년 한양대 기계공학과 졸업. 2001년 동 대학원 정밀기계공학과 석사. 2003년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 관심분야는 필드형 로봇, 나노 모션 메커니즘, 정밀모션제어.



이 상 호

1998년 대전대 물리학과 졸업. 2002년 한양대 기전공학과 석사. 2007년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정. 2009년~현재 충남테크노파크 정책기획단 연구원. 관심분야는 군사로봇, 첨단산업 정책기획.



한 창 수

1983년 한양대 기계공학과 졸업. 1985년 University of Texas at Austin 기계공학과 석사. 1989년 동 대학원 기계공학과 박사. 1990년~현재 한양대 기계공학과 교수. 관심분야는 필드형 모바일 로봇, 인간-로봇 협업시스템, 초정밀 메커니즘.