

정리정돈용 서비스 로봇 플랫폼의 구현 연구

A Study on Implementation of Service Robot Platform for Mess-Cleanup

김 승 우*, 김 하 이 준
(Seung-Woo Kim¹ and Hi-Jun Kim¹)

¹Department of Electrical Information Engineering, Soonchunhyang University

Abstract: In this paper, a Smart Home Service Robot, McBot II, which performs mess-cleanup function etc. in house, is designed much more optimally than other service robots. It is newly developed in much more practical system than McBot I which we had developed two years ago. One characteristic attribute of mobile platforms equipped with a set of dependent wheels is their omni-directionality and the ability to realize complex translational and rotational trajectories for agile navigation in door. An accurate coordination of steering angle and spinning rate of each wheel is necessary for a consistent motion. This paper develops trajectory controller of 3-wheels omni-directional mobile robot using fuzzy azimuth estimator. A specialized anthropomorphic robot manipulator which can be attached to the housemaid robot McBot II, is developed in this paper. This built-in type manipulator consists of both arms with 4 DOF (Degree of Freedom) each and both hands with 3 DOF each. The robotic arm is optimally designed to satisfy both the minimum mechanical size and the maximum workspace. Minimum mass and length are required for the built-in cooperated-arms system. But that makes the workspace so small. This paper proposes optimal design method to overcome the problem by using neck joint to move the arms horizontally forward/backward and waist joint to move them vertically up/down. The robotic hand, which has two fingers and a thumb, is also optimally designed in task-based concept. Finally, the good performance of the developed McBot II is confirmed through live tests of the mess-cleanup task.

Keywords: mess-cleanup robot II, omni-wheeled mobilerobot, special-purpose manipulation, trajectory controller

I. 서론

오늘날 세계 여러 나라에서 많은 로봇들이 개발되어지고 있다. 이렇게 로봇산업이 발전함에 따라 제조용 로봇위주의 로봇산업에서 보다 인간 친화적인 개인용 로봇의 필요성이 증가 하였다. 그 중에서 홈서비스 로봇은 어떤 종류의 로봇보다도 인간의 생활을 윤택하게 해주는 실제적인 중요한 역할을 할 것으로 보여 진다.

실제 두 팔을 가진 인간형 로봇의 최적 운동학을 위해서는 바퀴가 달린 모바일 플랫폼에 로봇 팔을 탑재한 디자인으로 로봇이 이루어져야 한다. 인간과 함께 생활하면서 인간 생활에 필요한 기능들을 지원하는 로봇의 개발은 맞벌이 등의 가사 전담 노동력이 부족해지는 현대 사회의 가정에서 그 수요가 매우 크다고 할 수 있다. 그와 같은 목적의 홈 서비스 로봇은 정교한 작업능력과 정확한 이동능력을 가지면서 또한 인간 친화적인 인터페이스와 절대적인 안전성도 확보되어야 한다. 그러나 대부분의 로봇 연구는 엔터테인먼트 응용 중심의 로봇[1] 또는 특별한 목적성이 없는 두발로 걷는 휴머노이드 로봇 기술에 치우쳐 있다[2].

실내에서 인간과 함께 공존하는 홈 서비스 로봇의 설계 연구는 미흡한 실정에 있다[3,4]. 이것은 안전하면서도 쾌속이 가능한, 정교하면서도 높은 파워를 가져야 하는 설계상의 변증법적 어려움이 있기 때문일 것이다. 그럼에도 불구하고 미국 비영리 로봇센터가 제작한 바퀴 기반의 홈 서비스 로봇 레디봇(ReadyBot)과 일본 와세다 대학에서 개발한 범용 홈 서비스로봇 트웬디원(Twendy-One) 그리고 한국에서 개발한 실내 정리정돈을 위한 맥봇I(McBot I)은 이 분야의 훌륭한 연구 성과라고 볼 수 있다. 그러나 레디봇은 정교함과 파워에서 성능이 크게 떨어지고 있으며, 트웬디원은 정교함과 파워를 모두 갖추고 있으나 과도하게 큰 외형 사이즈와 전원독립성이 없다는 결정적인 단점을 갖고 있다. 한국의 맥봇I은 정교함과 정확한 이동성은 갖고 있으나 가정에서 정리정돈 서비스를 지원하기 위하여 필요한 적절한 파워와 외형 높이에 미치지 못하고 있다[5]. 그러므로 본 논문에서는 위의 세 로봇들이 갖고 있는 장단점을 고려하고 특히 맥봇I의 비실용적인 단점들을 극복하는 새로운 실내 정리정돈을 위한 홈 서비스 로봇 맥봇II(Mess-Cleanup Robot II; McBot II)를 설계한다.

사람이 생활하는 환경에서 일반적인 휠베이스 모빌리티(Mobility) 방식의 이동로봇은 장애물에 둘러싸여 로봇의 움직임에 있어 자유로운 주행 제약을 받는다. 이것은 비홀로노믹(Non-Holonomic) 시스템 특성으로 인해 발생하는 것으로 주행 중인 이동로봇이 장애물을 신속하게 피하려면 별

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 1. 17., 수정: 2012. 3. 27., 채택확정: 2012. 3. 30.

김승우, 김하이준: 순천향대학교 전자정보공학과

(seungwo@sch.ac.kr/lotus0909@sch.ac.kr)

※ 본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 지역혁신 인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

다른 회전과정 없이 좌우로 이동만 하면 되는 홀로노믹(Holonomic) 시스템이 필요하다. 이러한 특성은 옴니휠(Omni-Wheels)을 사용하면 비홀로노믹 로봇보다 민첩하며 좁은 공간에서 효율적이고 자유로운 주행이 가능한 이동로봇 시스템을 개발할 수 있다. 본 논문에서는 세 개의 옴니휠을 이용한 홀로노믹 이동로봇과 추적제어기를 개발한다.

옴니휠 이동로봇의 동역학과 모터 비선형 운동방정식을 고려한 정밀한 비선형 동역학 모델을 유도하고 각각의 모터 속도를 계산한다. 옴니휠을 이용한 홀로노믹 이동 로봇의 추적 제어는 제어 대상 시스템 파라미터의 불확실성(uncertainty)이 매우 강하다. 불확실성은 모바일 로봇의 왜란(disturbance)과 미끄러짐으로 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 퍼지 제어기의 강인성(robustness)과 방위각 추정기를 이용한 제어기를 설계하여 옴니휠 이동 로봇의 추적 제어 성능을 높인다.

또한 본 논문에서는 홈서비스 로봇인 맥봇 II의 빌트인(Built-in) 로봇 팔과 핸드를 설계한다. 이 빌트인 타입의 로봇 매니플레이터는 최적화된 자유도의 로봇팔과 로봇핸드로 구성되어 있다. 제한된 공간에서 인간과 함께 생활하는 홈서비스 로봇에 탑재되는 매니플레이터는 최소의 로봇 크기와 최대의 작업 공간이라는 상반된 설계 스펙이 요구되어 있다. 즉, 최소의 질량과 팔 길이에도 불구하고 효율적 작업을 위한 공간 확보가 필요한 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 상반된 문제를 해결하기 위하여 수직 방향으로 움직이는 로봇 허리 구조와 수평방향의 전후방으로 이동할 수 있는 어깨 관절을 이용한 태스크 기반의 설계 방법을 제안한다. 또한, 양손 협업시스템인 로봇 핸드도 4절 링크 평판을 이용한 작업 기반 설계를 시도한다. 끝으로 본 논문에서는 구현된 빌트인 매니플레이터의 실제 동작 실험을 통하여 그 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 II 장에서는 맥봇II의 기구학적 최적설계와 그것의 운동역학적 해석을, III 장에서는 제어 알고리즘과 제어 시스템을 설명한다. 끝으로 IV 장에서는 본 논문에서 구현된 로봇의 이동/로봇팔/핸드의 동작 제어 실험 결과를 통하여 맥봇II의 향상된 성능을 확인한다.

II. McBot II의 운동학적 디자인

홈 서비스 로봇은 인간과 같은 공간에서 함께 생활하기 때문에 정밀한 로봇제어 못지않게 로봇의 외형 및 기구학적 설계의 최적화가 필요하다. 맥봇 II는 가정에서 정리정돈을 수행하는 서비스 로봇이므로 더욱 로봇의 최적화 설계가 강조되고 있다. 정리정돈 서비스 로봇에게 필요한 로봇의 최적화 설계 요소들은 아래와 같다.

- ① McBot II의 키(height) 크기와 베이스 프레임(이동 로봇 기능부)의 면적 크기의 최적화
- ② McBot II의 Task 수행시에 발생하는 로봇 몸체의 무게 중심점 이동 범위의 최소화
- ③ McBot II의 로봇팔(manipulator) 길이 최적화 및 어깨 조인트(joint)의 정격부하 최적화

가정용 서비스 로봇은 테이블이나 식탁 같은 가구를 주

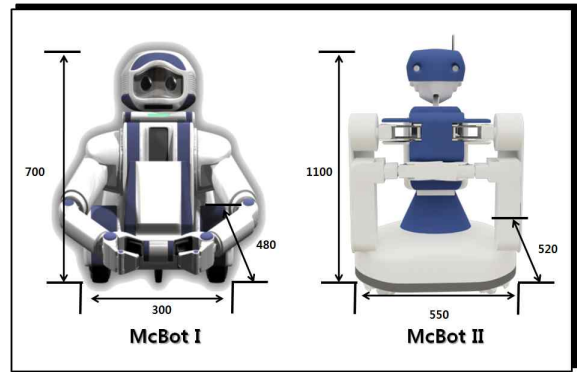


그림 1. 정리정돈용 서비스 로봇.

Fig. 1. Home Service Robots for mess-cleanup.

로 사용하는 입식 생활 패턴에서도 유용하게 동작할 수 있도록 작업공간의 높이와 범위를 확장해야만 한다. 그러나 상반된 논리로 가정에 산재해 있는 가구 등의 많은 장애물과 협소한 공간에서 인간에게 물리적인 피해 없이 서비스 기능을 수행하려면 로봇의 키와 부피는 최대한 제한되어야 한다. 이런 이유로 위에서 제시한 세 가지 기구학적 설계의 최적화가 필요하다.

맥봇 I의 비실용적인 단점들을 극복하는 새로운 실내 정리정돈을 위한 홈 서비스 로봇 맥봇 II의 그래픽 외형설계도(그림 1)를 통해서 로봇 크기를 비교할 수 있다.

1. 이동로봇의 기구학적 설계

옴니휠은 주 바퀴가 일반적인 바퀴와 같이 회전축을 중심으로 회전을 하며, 주 바퀴 주위에 롤러형태의 보조 바퀴가 위성처럼 달려있다. 옴니휠은 바퀴의 축에 연결된 동력에 축 수직방향으로 일반적인 바퀴와 똑같이 회전을 하고, 외부의 힘에 의해 축 방향으로 슬립이 발생할 수 있는 구조로 되어 있다. 특이한 구조 덕분에 자율 이동 로봇에 옴니휠을 적절히 배치하고 서로의 속도 비를 이용하여 홀로노믹 시스템이 구현되며, 이것을 사용하는 로봇은 회전 없

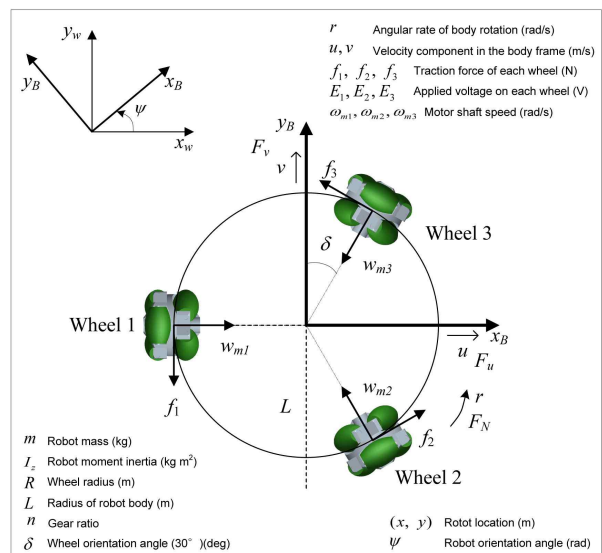


그림 2. 힘 해석과 변수 및 기호.

Fig. 2. Force analysis and nomenclature.

이 어느 방향으로도 움직일 수 있다.

움니휠을 그림 2와 같이 배치하여 각 바퀴의 속도비를 이용하여 어느 방향으로도 이동 가능한 홀로노믹 시스템을 구현한다. 그림 2에서 전역 좌표와 로봇 좌표는 각각 $[x_w, y_w]$, $[x_B, y_B]$ 로 정의한다. 로봇의 회전각은 ψ 로 표현한다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (1)$$

상태 공간 방정식 모델에서 $x(t)=[u \ v \ r]$ 와 $u(t)=[E_1 \ E_2 \ E_3]^T$ 이다. 이것은 시스템의 일부가 비선형 적임을 보여준다. 움니휠 이동 로봇의 모델 A 행렬은 식 (2)~ (5)와 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{11} = -\frac{3 \cdot K_2^2 \cdot I^2}{2 \cdot R^2 \cdot R_a \cdot m} - \frac{B_u}{m} \quad (3)$$

$$A_{22} = -\frac{3 \cdot K_2^2 \cdot I^2}{2 \cdot R^2 \cdot R_a \cdot m} - \frac{B_v}{m} \quad (4)$$

$$A_{33} = -\frac{3 \cdot L^2 \cdot K_t^2 \cdot n^2}{R^2 \cdot R_a \cdot I_z} - \frac{B_r}{I_z} \quad (5)$$

여기서 R_a 는 모터 저항이고, k_s 는 역기전력, k_t 는 토크상수이다. B행렬을 유도하면 식 (6)과 같다.

$$B = \frac{I \cdot K_2}{R \cdot R_a} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2 \cdot m} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot m} \\ \frac{1}{2 \cdot m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{2 \cdot m} \\ \frac{L}{I_z} & \frac{L}{I_z} & \frac{L}{I_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

B_u , B_v , B_r 는 각각 u , v , r 에 대한 점성 마찰력이다.

2. 매니플레이터의 기구학적 설계

2.1 어깨(shoulder) 파트

본 논문에서 다루는 서비스용 로봇 암의 목적인 경량화와 최적화를 위해 앞서 정해진 어깨 넓이 안에서 한 손과 양 손이 모두 작업공간을 자유로이 움직이고 두 손 파지시의 파지력을 높일 수 있도록 어깨 파트는 기존 로봇들의 팔이 고정되어진 방식과는 달리 유동적으로 움직일 수 있도록 설계한다. 이로서 로봇 팔과 손의 최대 부하와 파지력을 높이고 전후진 이동 기능을 통하여 작업 공간을 확보할 수 있도록 설계되어 진다.

어깨의 기구학적 구조는 그림 3과 같은 링크 구조를 이용하여 지면과 수평하게 움직이게 설계되어 진다. 링크 구조의 원리는 ‘마주보는 두 쌍의 변은 평행하다.’ 라는 평행 사변형의 원리에 의해 각 어깨에 두 개의 링크가 평행하게 만들어진 구조물을 활용하여 어깨 공유형으로 몸체와 결합되도록 설계하고, 어깨를 내밀어 팔을 내미는듯한 동작과 두 로봇 팔간의 간격이 좁아지는 동작을 함으로써 로봇한

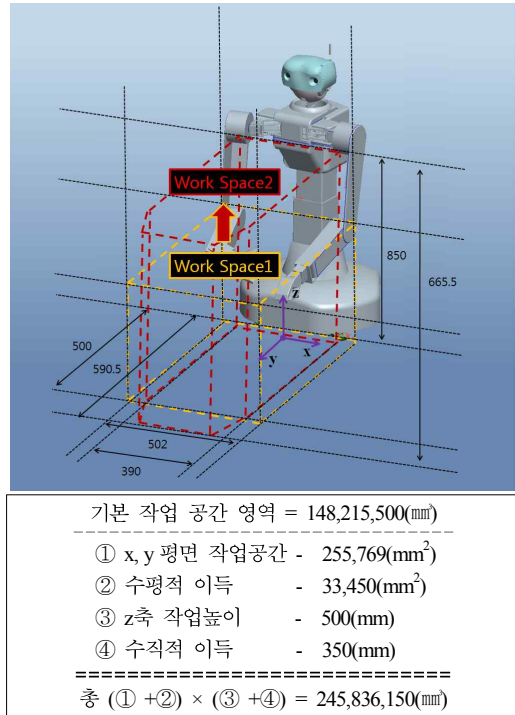


그림 3. 매니플레이터의 작업 공간최적화 설계.

Fig. 3. Optimal workspace design of manipulator.

드의 악력뿐만 아니라 어깨의 힘이 더해져 로봇팔로만 물체를 파지했을 때 보다 물체에 대한 파지력 및 최대부하의 향상을 기대할 수 있다.

앞서 설계 되어진 기구학적 요소들은 결과적으로 매니플레이터의 구동기수의 최적화에 따른 손실을 보안을 위해 제안되어진 빌트인(built-in) 타입의 이동형 어깨와 승하강구조의 허리 구조의 사용으로 인하여 작업공간의 이득을 얻게 된다. 위 그림 3과 같이 어깨의 이동에 따른 수평적 작업공간의 이득이 33,450 mm²이고 리프트의 승하강에 따른 수직적 작업공간의 이득이 350 mm로 계산되어진다. 두 이득을 3차원 작업공간(Workspace)의 개념으로 계산하면 11,075,500 mm³의 이득이 있다는 것을 확인할 수 있다. 이로 인하여 가구 위나 바닥에서 효율적인 작업을 할 수 있으며 작업 중 갑작스럽게 넘어지지 않도록 무게중심의 높이도 낮출 수 있다.

2.2 로봇 팔 파트

일반적인 범용 로봇 팔은 6개 이상의 조인트로 엔드이펙터(End-Effector)의 위치를 결정하지만, 맥봇 II의 매니플레이터 시스템은 상박과 하박에 관절을 최적화하여 총 4개의 회전 관절과 특별한 구조의 어깨로 엔드이펙터의 위치가 결정된다.

그림 4의 로봇팔 구조도에서 볼 수 있듯이, 상박과 하박의 구동기만을 이용하여 물체를 파지하고 밀거나 당기는 동작에 용이하게 제어할 수 있다. 그러므로 앞서 언급한 몸체와 결합된 어깨 파트와 팔 파트까지를 더하여 ‘4.5DOF’의 자유도를 가지도록 기구학적인 설계가 이루어진다. 표 1은 정역 기구학 해석을 위한 Denavit-Hartenberg 표현법에 의한 조인트 변환 행렬 파라미터를 구한 것이다.

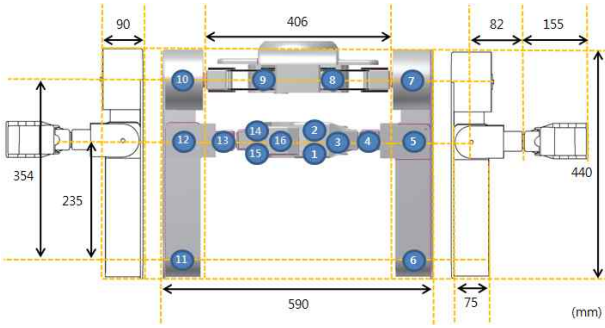


그림 4. 매니플레이터의 조인트 및 링크 구조.
Fig. 4. Joint and Link Configuration of Manipulator.

표 1. D-H 파라미터 값.

Table 1. Denavit-hartenberg parameter.

Joint i	a_i (각도)	α_i (각도)	d_i (mm)	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	145	90	0	θ_2
3	354	0	0	θ_3
4	235	90	0	θ_4
5	0	0	82	θ_5

표 2. 매니플레이터의 조인트 정의.

Table 2. Joint definition of manipulator.

	Left	Right
Shoulder	8	9
Arm	4, 5, 6, 7	10, 11, 12, 13
Hand	D.F ¹⁾	16
	4BLF ²⁾	1, 2

D.F¹⁾: Dustpan Finger, 4BLF²⁾: 4 Bar LinkFinger

우수형 직각좌표계에서 θ 는 Z축의 회전각도이고, d 는 두 개의 연속적인 공통법선의 Z축상의 거리를 나타내고, a 는 공통법선 사이의 길이를 나타낸다. 또한, α 는 조인트축과 Z축과의 비틀린 각도이다. 그림 4에서 볼 수 있는 매니플레이터의 기능과 위치를 표 1에서 정의한다. 어깨 자유도는 0.5DOF이고 로봇팔 자유도는 4DOF이다.

2.3 로봇 핸드 파트

실제 가정에서의 정리정돈 작업의 특성상 다양한 파지 기능을 필요로 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 로봇 핸드 파트를 두 가지(4절 링크형과 쓰레받이형)의 기구학적 설계 방법을 이용하여 두 종류의 손가락 타입을 이용한 특별한 핸드를 제안한다. 로봇 핸드의 각 조인트 정의도 표 1에서 확인할 수 있다.

첫째로 4절 링크 타입의 손가락은 첫 번째 마디와 두 번째 마디가 상호 연동되어지는 구조로 각 손가락 마디 1개의 자유도를 갖도록 설계하고, 횡 운동(abduction/adduction)은 무시하였다. 손가락의 길이는 성인 남자의 평균을 기준으로 길이를 결정하고, 손가락 마디는 두 개로 설계한다. 손가락의 경량화를 위하여 작은 구동기를 사용하고 다양한 형태의 물체를 잡을 수 있도록 손가락은 두 개로 설계한다.

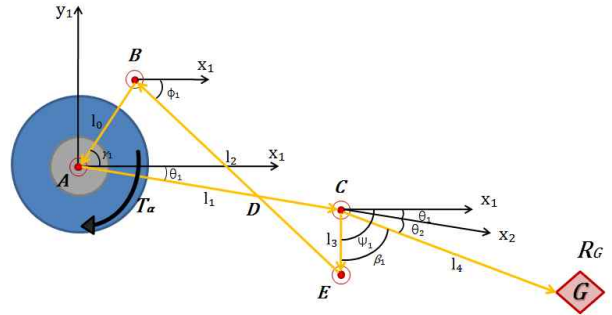


그림 5. 4절 링크 방식의 디자인 개념.
Fig. 5. Design concept of 4-bar-link.

그림 5는 첫 번째 타입의 손가락으로 4절 링크의 특성상 구동기 점 A와 고정되어진 점 B에 따라 점 C, D, E의 위치가 변하게 된다. 따라서 마디가 늘어나고 동작의 위치에 따라 전달된다.

토크 또한 변하는 특성을 고려하여 첫 번째 마디에 두 번째 마디가 동적으로 구속되는 구조를 사용하여 링크의 길이를 설계한다. 그림 5와 같은 기구학적 관계로부터 링크 2의 위치는 독립변수인 θ_1 에 대한 함수로 나타내어진다. 만약 다음 손가락 마디인 링크 4의 상대적 위치를 θ_2 로 나타내면 마디 관절각 사이의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta_2 = \psi_1 - \beta_2 - \theta_1 \tag{7}$$

그리고 그림 5에서 링크 2와 링크 3의 절대 위치 값을 나타내는 θ_1 과 ψ_1 각은 다음 식으로 결정되어 진다.

$$\psi_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2^2 - C_3^2}}{C_2 + C_3} \tag{8}$$

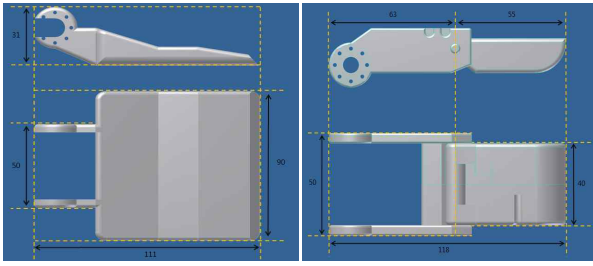
$$\theta_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{D_1 + \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - D_3^2}}{D_2 + D_3} \tag{9}$$

$$\begin{cases} C_1 = 2l_1 l_3 \sin \theta_1 + 2l_0 l_3 \sin \gamma_1 \\ C_2 = 2l_1 l_3 \cos \theta_1 - 2l_0 l_3 \cos \gamma_1 \\ C_3 = l_2^2 - l_0^2 - l_1^2 - l_3^2 + 2l_0 l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} D_1 = 2l_1 l_2 \sin \theta_1 + 2l_0 l_2 \sin \gamma_1 \\ D_2 = 2l_1 l_2 \cos \theta_1 - 2l_0 l_2 \cos \gamma_1 \\ D_3 = l_3^2 - l_0^2 - l_1^2 - l_2^2 - 2l_0 l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases} \tag{11}$$

식 (7)에서 β_2 는 초기 위치에서 각각의 손가락 마디를 직선상에 놓이도록 하기 위한 상수이고, 파라미터 값에 따라 다르게 설정되어야 한다. 위의 관계식들을 통하여 인간의 손가락 운동 범위를 만족시키는 무수한 파라미터 중에 처음에 결정되어진 손가락의 길이와 토크를 고려하여 적절한 l_2, γ_1 의 값과 위치를 결정할 수 있다.

두 번째로 맥북 II의 손가락 타입은 특별한 작업의 용도로 바닥에 있는 신문이나 옷가지 등을 쉽게 잡을 수 있도록 쓰레받이 모양의 손가락을 디자인한다. 쓰레받이의 길이는 첫 번째 디자인되어진 손가락의 길이와 대칭이 되도록 하여 100 mm 내외로 설계하고, 4절 링크 손가락과 쓰레받



(a) 쓰레받이형 핑거. (b) 4절링크 핑거.

그림 6. 로봇 핸드 구조 및 특징.

Fig. 6. Structure and characteristics of robot hand.

이형 손가락이 상호 작용하여 부피는 작으나 모양이 다양한 모든 물체들을 환손 파지 동작이 가능하도록 설계한다. 로봇 핸드는 로봇 팔에 사용되어진 구동모터보다 크기 및 토크가 작은 모터를 선정하여 엔드이펙터로서의 조건을 갖추도록 고려하고, 각각의 액추에이터는 그 중심을 정삼각형의 꼭짓점을 중심으로 배치하여 구성한다. 그림 7은 실제 로봇 핸드의 설계도이다.

III. McBot II의 제어

1. 이동 로봇의 제어

옴니휠의 특성으로 바퀴의 미끄러짐(slip) 현상이 발생한다. 미끄러짐(slip) 현상은 로봇의 왜란과 더불어 자율이동 로봇의 불확실성을 유발한다. 또한, 로봇의 자이로 센서와 엔코더 센서의 노이즈(noise)와 얼라이어싱(aliasing)으로 인하여 부정확성이 발생한다. 이 불확실성과 부정확성은 옴니휠의 비선형성과 시변성을 유발하며 이것은 정밀한 제어에 어려움이 있다. 그래서 본 장에서는 퍼지 방위각 추정기를 사용하여 3개의 옴니휠을 가진 이동 로봇의 정확한 방향 및 궤적 제어 방법을 제시한다.

본 논문의 이동로봇은 3개의 옴니휠이 120°의 간격으로 장착되어 있다. 각 바퀴는 광학 방식의 엔코더(Encoder)가 설치된 직류모터에 의해 구동되어 지고, 방위각 인식을 위하여 자이로 센서를 사용한다. 이것은 제어기의 설계에 있어 비선형적인 역학은 고려하지 않고, 각각의 모터가 역운동학의 속도 명령들을 수행하기 위해 독립적인 PID 제어 알고리즘을 사용한다. 퍼지 방위각 추정기를 사용한 이동로봇의 전체 제어 구조는 그림 7과 같이 구성되고, 상태 출력

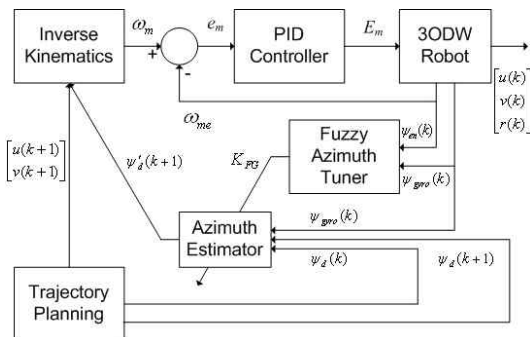


그림 7. 이동로봇 추적 제어기 구조.

Fig. 7. Tracking controller architecture of mobile robot.

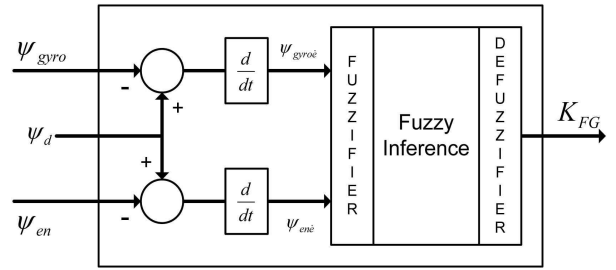


그림 8. 퍼지 방위각 추정기의 구조.

Fig. 8. Configuration of azimuth estimator.

방정식은 절대 좌표 시스템으로 표현된다. 이것은 제어의 입력신호가 운동 좌표계에서의 변화량이라는 것에 주목하여야 한다.

따라서 절대 좌표 시스템에서 제어 입력이 각 어셈블리에 대한 제어 입력으로 변환해야 한다, 즉, 입력 신호가 이동 좌표계로 표시되고, 각각의 입력에 대한 운동학적 변환을 아래의 식 (12)를 통하여 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi(k) & \sin\psi(k) & 0 \\ \sin\psi(k) & \cos\psi(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (12)$$

옴니휠 이동로봇의 방향 제어를 위하여 궤적 제어기는 방위각과 엔코더를 이용한 기준 방위각과의 차이를 정확하게 추정하기 위한 데이터를 필요로 한다. 그러나 옴니휠 이동로봇 시스템은 바퀴의 미끄러짐과 센서의 불확실성으로 정확한 방위각 데이터 확보가 어렵다. 이것을 극복하기 위하여 본 논문에서는 퍼지 방위각 추정기를 제시한다. 이때 사용되는 방위각 추정 방정식은 식 (13)과 같다.

$$\hat{\psi}_d(k+1) = \psi_d(k+1) + K_{FG}(\psi_d(k) - \psi_{gro}(k)) \quad (13)$$

$\psi_d(k)$ 는 궤적 경로에서 계간 되어진 K_{th} 방위 각도이고, $\psi_{gro}(k)$ 는 자이로 센서의 K_{th} 출력이다. 그리고 $\hat{\psi}_d(k+1)$ ($k+1$)번째 방위각의 새로운 값이다. 그 이득 K_{FG} 는 퍼지 방위각 추정기에 의해 실시간으로 조정되는 출력값이다.

그림 8은 퍼지 논리 추론 방식을 이용한 방위가 추정기의 구조를 보여 준다.

그림 8에서는 Mamdani의 추론 엔진을 사용한다. 입력신호는 기준방위각과 자이로/엔코더의 오차변화율 값이며, 출력신호는 방위각 추정기 이득값 K_{FG} 이다. 방위각 추정기의 퍼지 룰베이스는 다음 표 3과 같다.

표 3. 추정기의 퍼지 룰 베이스.

Table 3. Fuzzy Rule Base of estimator.

Change Rate of Error	$\psi_{\dot{e}_e}$			
	NE	ZE	PE	
$\omega_{\dot{e}_e}$	NE	PB	PS	NS
	ZE	PS	ZE	NS
	PE	PS	NS	NB

2. 매니플레이터의 제어

매니플레이터의 구현에서 사용되어진 구동기는 스마트 모터로 그림 9와 같이 구동기 내부에 마이크로컨트롤러(atmega8)가 내장되어 있다. 그리하여 주 제어기와 보조 제어기는 RS485 통신 방식을 사용하여 하나의 노드에 여러 개의 구동기를 동작할 수 있도록 다중 연결 링크 방식과 패키지 형태의 제어신호를 보내고, 각각의 관절들로부터 상태 신호를 피드백 받아 보상하는 방식으로 관절 각각의 독립적인 제어가 이루어진다.

로봇 매니플레이터는 3종류의 모터들을 사용한다. 부하에 따라 EX-106(106 kgf.cm), RX-64(64 kgf.cm), RX-28(28 kgf.cm)을 사용하며, ID는 오른팔과 왼팔로 나누어 1~8까지는 왼팔, 9~16까지는 오른팔로 순차적 배분을 하였다. 로봇

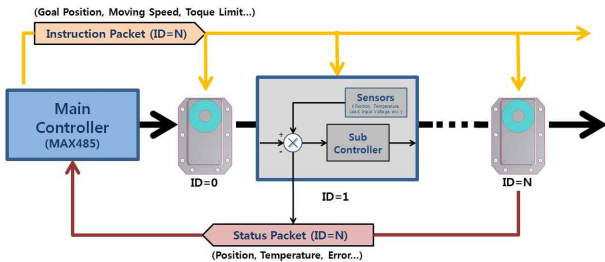


그림 9. 매니플레이터 조인트 모터 제어도. Fig. 9. Control block diagram of manipulator.

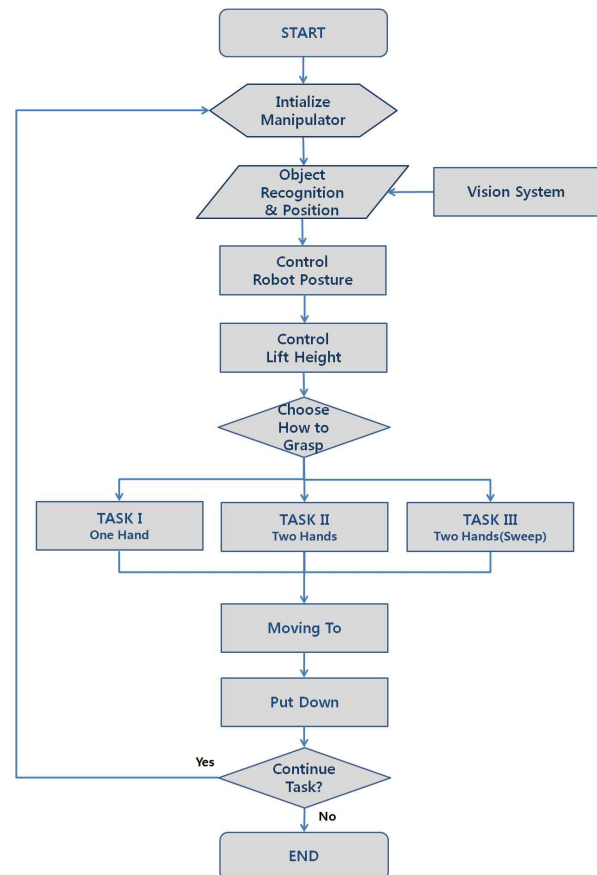


그림 10. 맥봇 II 제어 S/W 순서도. Fig. 10. Control S/W flowchart of McBot II.

팔의 목표 위치(Goal-Point)까지 이동하기 위하여 D-H 표기법을 사용한 위치 및 방향을 최종 목적 위치까지의 변위함수로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 각각의 구동기들을 독립적이고 정확하게 점대점(Point-to-Point) 방식으로 제어한다.

로봇 매니플레이터의 TASK 수행 알고리즘은 그림 10과 같은 제어 S/W 순서도에 의해 동작하도록 프로그래밍 되어진다. 각각의 관절 구동기는 시작점과 목표점 부근에서 가속 동작할 수 있도록 속도 패턴을 룩업(look-up) 테이블 방식으로 사용한다. 결국, 맥봇 II는 움니휠 이동로봇에 의하여 원하는 위치와 자세로 이동하고, 그곳에서 매니플레이터를 제어하여 정리정돈 TASK를 수행한다.

IV. 실험 및 결과

본 논문에서 개발한 맥봇 II의 외형도를 그림 11에서 볼 수 있다. 맥봇 II의 크기는 440x560x1100 이다. 맥봇 II의 총무게는 21.5 Kg이고, 정격부하질량은 2.7 kg이다. 민첩한 이동을 위해 세 개의 직류모터 기반의 움니휠 시스템으로 동작한다. 바퀴 반경은 60 mm이며, 두 개의 로봇 팔 크기는 각각 상박은 400.6 mm, 하박은 340.7 mm, 핸드는 98.82 mm로 설계되었다. 또한 맥봇 II의 주요 기구학적 매개변수들, M = 15.86 kg, d = 0.126m, r = 0.052 m, L = 0.308 m 그리고 I = 0.86 kgm²로 구현하였다.

맥봇 II의 통합 제어 시스템은 주 제어기와 보조 제어기로 구성되며, PCI 버스와 PLX PCI9054를 이용하여 설계하였다. 이동로봇과 매니플레이터에는 전용 타겟보드(atmega 128)를 장착하여 각각을 독립제어하고, 주제어기가 통합 및 감독하는 구조로 구현되어 있다.

1. 이동로봇의 실험결과

홀로노믹 특성의 움니휠을 이용한 이동로봇의 제어에서는 첫 번째와 두 번째 모터를 위한 제어 이득은 KP = 15.3, KI = 0.2, KD = 3.2로 설정하였고, 세 번째 모터를 위한 제어 계수는 KP = 14.6, KI = 0.25, 그리고 KD = 3.9로 결정하여 PID 제어를 설계하였다. 구현된 시스템의 동작 제어 결과를 확인하기 위하여 추적제어 실험을 실시하였고, 원하는 궤적은 점(6,6)을 시작점으로 하여 반지름이 2√2m



그림 11. 구현된 가정용 서비스 로봇 맥봇 II. Fig. 11. The implemented service robot McBot II.

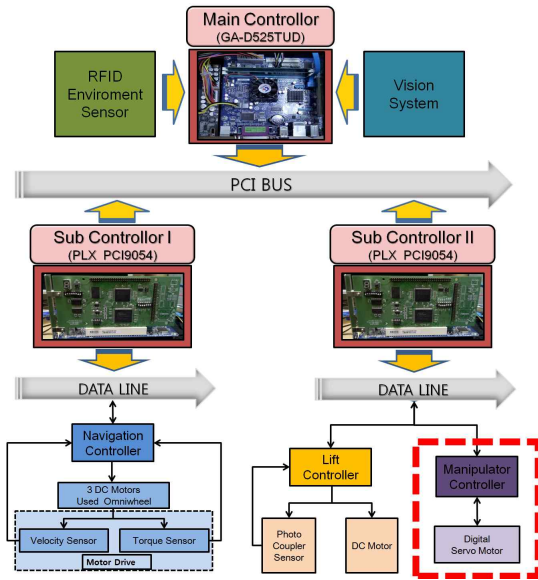


그림 12. 맥봇 II의 제어 시스템 구성도.
Fig. 12. Configuration of control system.

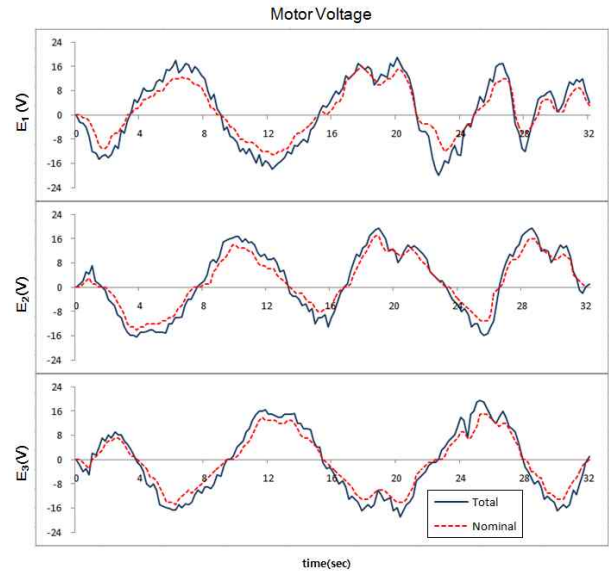


그림 14. 기준전압 대비 제어전압 비교.
Fig. 14. Comparison of reference and controlled voltage.

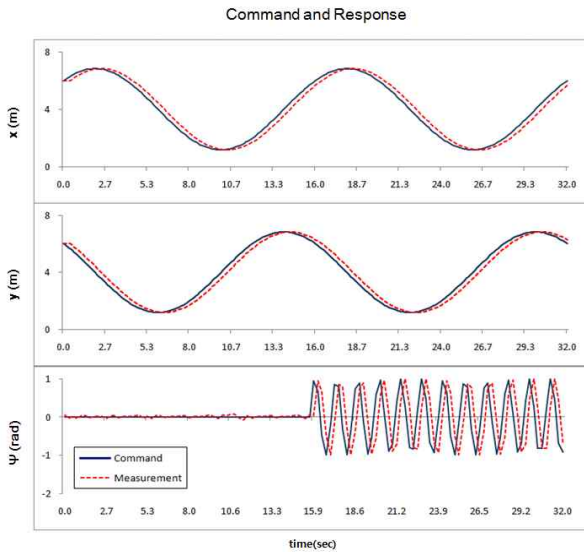
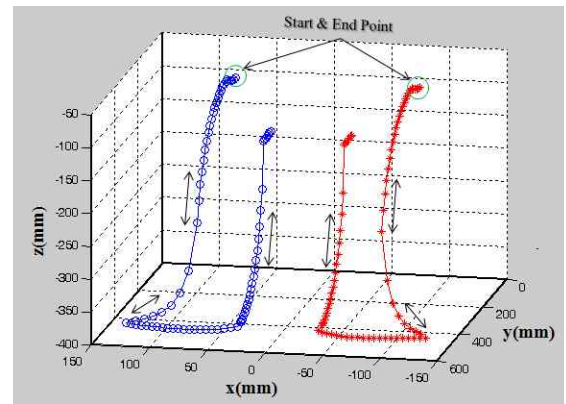


그림 13. 원하는 위치/자세와 추적 결과.
Fig. 13. Trajectory results of desired posture.

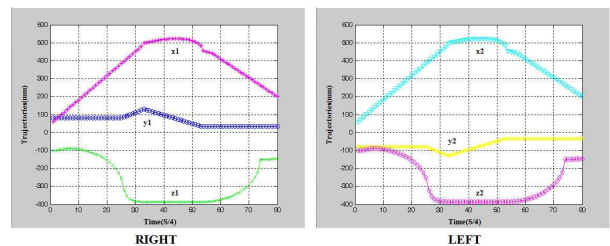
인 원을 그리도록 하였다.

처음 반원 즉 시작점(6,6)에서 반원중점(2,2)까지는 자체 회전(Self-Rotation)없이 전체 원을 돌게 하였고 나머지 반원 시점(2,2)에서 중점(6,6)까지는 회전속도 $\pi/3$ rad/s으로 자체 회전하며 원의 궤적을 따라 움직이게 하였다. 결국 본 실험에서는 다양한 속도변화, 가속도, 3개 바퀴를 사용한 이동 로봇의 방향과 각도, 3 자유도의 궤적으로 제어 된다.

그림 13에서 볼 수 있듯이, 궤적의 추적응답특성과, 추적 오류, 입력모터전압 및 로봇의 궤적을 결과로 확인한다. 그림 13은 로봇 응답과 명령 사이의 차이를 보여준다. 위치 제어에서는 10 cm 미만의 바운딩(Bounding) 현상을 확인할 수 있고 추적 방향각도 제어에서는 6도 미만의 좋은 성능을 보여주었다.



(a) Path control of hands for 3D task.



(b) Tracking results of core joints.

그림 15. 로봇팔과 핸드의 설정 경로 추적 결과.

Fig. 15. Tracking control results of the robotic arms and hands.

그림 14는 모터의 기준 전압과 제어 전압의 비교 그래프를 보여 준다. 이들 사이의 차이점은 외란 및 방해 그리고 모델링에 대한 오류 보상피드백을 제어하는 모터 입력값이다. 이 실험에서 기준 전압은 사전에 정의 영역 한계를 초과하지 않으므로, 시간변화 명령 필터 대역폭은 그것의 최대값으로 남는다. 추적 제어 결과들에서 확인할 수 있듯이, 이동 로봇의 홀로노믹 위치제어가 완벽하고 안정적으로 진행되어진 것을 확인할 수 있다.

2. 로봇 팔과 핸드의 실험결과

본 논문에서 구현된 로봇 팔과 핸드의 TASK 수행 실험을 실시한다. 이 실험을 통하여 두 개의 로봇 팔과 핸드의 구조 및 성능 그리고 상호동작을 분석한다.

최적화 설계를 통하여 구현된 매니퓰레이터의 기구학적 파라미터 값을 이용하여 실험을 진행하였다. 그림 15(a)는 매니퓰레이터 엔드이펙터에 설정된 3차원 운동경로 $p(x, y, z)$ 와 실제 진행 경로를 나타낸다. 또한 그림 15(b)는 로봇 팔의 주요 조인트들의 회전 각도를 측정하는 것이다. 이 때 x_1, y_1, z_1 은 오른팔의 경로를 x_2, y_2, z_2 는 왼팔의 경로를 나타낸다. 맥봇 II의 로봇 팔과 핸드의 동작 시 16개의 구동기가 동시에 동작하기 때문에 원하는 정확한 자세 제어를 위하여 각 동작을 동기화 시킬 필요가 있다. 즉, 목표 값을 주면 그 변위에 상관없이 같은 시간 동안 일정량씩 움직여 같은 시간에 그 목표 값에 도달하여야 한다. 그래서 사용되어진 EX-106, RX-64, RX-28 세 가지 구동기의 이동 각에 따른 사전 동기화 프로그램을 구축하였다.

V. 결론

본 논문에서는 홈 서비스 로봇 맥봇 II가 실내 환경에서 자동으로 정리정돈을 하는 실용적 기능을 가지도록 개발되었다. 홈 서비스 로봇은 인간과 함께 생활해야 하기 때문에 기구학 및 운동학적인 설계의 최적화가 필요하고, 동작 제어가 정밀하게 이루어져야 한다.

맥봇 II는 인간이 허리 및 손을 이용하여 정리 정돈 작업을 수행하는 메커니즘을 모델로 하여 설계하였다. 인간의 허리와 같은 동작 기능은 변화 범위가 큰 수직형 리프트와 전후진이 가능한 어깨 조인트 구조로 실현하였다. 정리정돈 작업을 직접 수행하는 로봇 팔과 핸드는 실용성을 위하여 최소 자유도를 갖는 시스템으로 설계하였다. 또한, 맥봇 II가 좁은 면적의 실내에서 장애물과의 충돌을 방지하면서 고속의 정밀 이동 능력을 갖기 위하여 홀로노믹(Holonomic) 특성의 이동로봇으로 설계하였다.

끝으로, 본 논문에서 설계한 서비스 로봇의 실시간 동작 제어 실험 결과들을 통하여 맥봇 II의 향상된 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1] K. Nagasaka, et al., "Integrated motion control for walking, jumping and running on a small bipedal entertainment robot," *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2004)*, New Orleans, pp. 3189-3194, 2004.
- [2] K. Harada et al., "Dynamics and balance of a humanoid robot during manipulation tasks," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 22, no. 3, pp. 568-575, 2006.
- [3] T. Asfour and R. Dillmann et al., "ARMAR-III: an integrated humanoid platform for sensory-motor control," *Prof. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2006)*, Genoa, Italy, Dec. 2006.
- [4] H. Iwata et al., "Design of humanoid surface sensor for

tactile interference with human," *Proc. of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication*, vol. 2, pp. 549-554, 1998.

- [5] S.-W. Kim, S.-D. Kim, B.-H. Kim, and H.-R. Kim, "A study on the development of a home mess-cleanup robot using an RFID tag-floor," *Journal of the KAIS*, vol. 11, no. 2, pp. 508-516, 2010.
- [6] G. Ramirez and S. Zeghloul, "A new local path planner for nonholonomic mobile robot navigation in cluttered environments," *Proceeding of the IEEE International Conference Robotics and Automation*, pp. 2058-2063, 2000.
- [7] G. Kantor and S. Singh, "Preliminary results in range-only localization and mapping," *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 1818-1823, 2002.
- [8] D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, and M. Philipose, "Mapping and Localization with RFID technology," *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 1015-1020, 2004.
- [9] I. Sio, "User position detection using RFID tags," *Technical Report Proceedings of Japanese Information Processing Society*, 00-HI-88, pp. 45-50, 2000.
- [10] S. Maeyama, S. Yuta, and A. Harada, "Experiments on a remote appreciation robot in an art museum," *Proceedings of IROS 2000*, pp. 1008-1013, 2000.
- [11] H.-K. Cha and S. W. Kim, "A study on implementation of ubiquitous home mess-cleanup robot" *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 12, pp. 1011-1019, 2005.
- [12] R. Baker, *Human Navigation and the Sixth Sense*, New York, Simon and Schuster, 1981.
- [13] D. S. Kim, H. C. Lee, and W. H. Kwon, "Geometric kinematics modeling of omni-directional autonomous mobile robot and its applications," *Proc. of the IEEE International Conference Robotics and Automation*, pp. 2033-2038, 2000.



김 승 우

1987년 연세대학교 전자공학과졸업(공학사). 1989년 연세대 대학원 전자과 석사졸업. 1994년 동 대학원 공학박사. 1989년~1990년 삼성종합기술원 선임연구원. 1998년~1999년 미국 Case Western Reserve Univ. 박사후 과정. 2003년 일본 나고야대학 로봇연구소 방문교수. 2007년~2008년 캐나다 British Columbia 대학 교환교수. 1994년~현재 순천향대학교 정교수. 관심분야는 로봇제어, 퍼지제어시스템, SFFS Tech., 유비쿼터스 서비스로봇, 엔터테인먼트 로봇.



김 하이 준

2010년 순천향대학교 정보기술공학부
전 기전자공학과졸업(공학사). 2012년
순천향대학교 대학원 전기로봇공학과
졸업(공학석사). 현재 신성ENG 주임연
구원. 관심분야는 로봇제어, 이동로봇,
서비스로봇, 엔터테인먼트 로봇.