

스마트 홈 서비스 로봇 맥봇II의 설계에 관한 연구

김승우^{1*}, 김하이준¹
¹순천향대학교 전자정보공학과

A Study on Design of Smart Home Service Robot McBot II

Seung-Woo Kim^{1*} and Hijun Kim¹

¹Department of Electrical Information Engineering, Soonchunhyang University

요 약 본 논문에서는 스마트 홈 서비스 로봇인 맥봇II(Mess-Cleanup Robot; McBot II)를 설계한다. 그것은 맥봇I에 비하여 더욱 지능적이고 실용적인 시스템으로 개발하였다. 지금까지 진공청소기는 가사 노동의 부담을 덜어주었지만 진공청소기를 운용하는 점에서 노동의 강도는 차이가 없다. 최근에 이 문제의 해결을 위해 상용화된 청소로봇이 나왔지만 큰 시장을 형성하지는 못했다. 왜냐하면 여전히 진공청소 이전에 큰 부피의 쓰레기나 신문, 옷가지 등을 정리정돈 하지 못하는 문제를 가지고 있다. 따라서 우리는 실제 환경에서 이 문제를 해결하기 위해 더 발전된 새로운 정리정돈 로봇 맥봇II를 개발한다. 특히, 본 논문에서는 로봇의 기계적인 설계와 기본적인 제어에 초점을 맞추어 논문을 구성한다. 맥봇II는 인간이 허리 및 손을 이용하여 정리 정돈 작업을 수행하는 메커니즘을 모델로 하여 설계되어진다. 작업 시 인간의 허리 기능은 변화 범위가 큰 수직형 리프트와 전후진이 가능한 어깨 조인트 구조로 구현한다. 정리정돈 작업을 직접 수행하는 로봇 팔과 핸드는 실용성을 위하여 최소 자유도를 갖는 시스템으로 설계한다. 또한 맥봇II가 좁은 면적의 실내에서 장애물과의 충돌을 방지하면서 고속의 이동 능력을 갖기 위하여 홀로노믹(Holonomic) 특성의 이동로봇으로 설계한다. 끝으로 최적화 설계로 구현된 로봇의 몸체/이동/로봇팔/핸드의 동작 제어 실험 결과들을 통하여 맥봇 II의 향상된 성능을 확인한다.

Abstract In this paper, a smart home service robot McBot II is newly developed in much more practical and intelligent system than McBot I which we had developed a few years ago. Thus far, vacuum-cleaners have lightened the burden of household chores but the operational labor that vacuum-cleaners entail has been very severe. Recently, a cleaning robot was commercialized to solve but it also was not successful because it still had the problem of mess-cleanup, which pertained to the clean-up of large trash and the arrangement of newspapers, clothes, etc. Hence, we develop a new home mess-cleanup robot McBot II to completely overcome this problem on real environments. The mechanical design and the basic control of McBot II, which performs mess-cleanup function etc. in house, is actually focused in this paper. McBot II is mechanically modeled in the same method that the human works in door by using the waist and the hands. The big-ranged vertical lift and the shoulder joints to be able to forward move are mechanically designed for the operating function as the human's waist when the robot works. The mobility of McBot II is designed in the holonomic mobile robot for the collision avoidance of obstacle and the high speed navigation on the small area in door. Finally, good performance of McBot II, which has been optimally desinged, is confirmed through the experimental results for the control of the robotic body, mobility, arms and hands in this paper.

Key Words : Mess-Cleanup Robot II, Robotic Waist, Mobile Robot, Robotic Arms, Robotic Hands

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성산업으로 수행된 연구결과임.

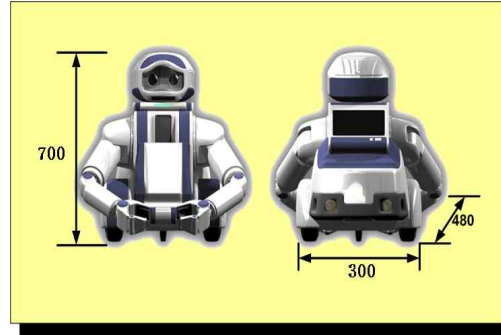
*교신저자 : 김승우(seungwo@sch.ac.kr)

접수일 10년 12월 28일 수정일 (1차 11년 03월 24일, 2차 11년 04월 01일, 3차 11년 04월 06일) 게재확정일 11년 04월 07일

1. 서론

미래의 가정에서 홈 서비스 로봇은 복잡한 가정환경에서 실제적으로 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 실제 두 팔을 가진 인간형 로봇의 최적 운동학을 위해서는 바퀴가 달린 모바일 플랫폼에 로봇 팔이 장착되어진 디자인으로 설계가 이루어져야 한다. 인간과 함께 생활하면서 인간 생활에 필요한 활동들을 지원하는 로봇의 개발은 맞벌이 등의 가사 전담 노동력이 부족해지는 현대 사회의 가정에서 그리고 노인 인구의 급증으로 인하여 노인들만으로 구성된 가정에서는 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 응용로봇[1] 또는 두발로 걷는 휴머노이드 로봇 기술에 치우쳐 있으며 [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 서비스로봇 레디봇(ReadyBot)과 일본 와세다 대학에서 개발한 범용 홈 서비스로봇 트웬디원(Twenty-One) 그리고 한국에서 개발한 실내 정리정돈을 위한 맥봇 I(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.

본 논문에서는 맥봇II의 기구학적인 설계 최적화와 동작 제어에 그 초점을 맞추고 있다. 로봇의 기구학적(Kinematic & Dynamic) 설계는 실제로 가정에서 정리정돈 작업을 할 수 있는 실용성에 그 첫 번째 목표를 두었다.



[그림 1] 홈 서비스 로봇 맥봇 I (2009년)

맥봇II는 인간이 허리 및 손을 이용하여 정리 정돈 작업을 수행하는 메커니즘을 모델로 하여 설계되어진다. 인간은 작업 대상 물체가 허리보다 아래에 있을 경우, 허리를 숙인 다음 대상 물체로 팔과 손을 접근 시켜 원하는 작업을 완수 한 후 허리를 펴고 다음 작업을 위하여 이동한다. 그러나 로봇의 허리를 인간과 똑 같은 형태로 설계할 경우 로봇허리의 굽힘에 따른 무게 중심점의 이동이 심하여 변하여 제어에 큰 어려움이 따른다. 그러므로 본 논문에서는 정리정돈 작업 시 인간의 허리 기능은 변화 범위가 큰 수직형 리프트와 전후진이 가능한 어깨 조인트 구조로 구현한다. 또한 정리정돈 작업을 직접 수행하는 로봇 팔과 핸드는 실용성을 위하여 최소 자유도를 가지면서 적절한 파워는 유지할 수 있는 시스템으로 설계한다. 특히 맥봇II는 좁은 면적의 실내에서 장애물과의 충돌을 방지하면서 고속의 이동 능력을 가져야 하므로, 다항 바퀴를 이용한 홀로노믹(Holonimic) 특성의 이동로봇으로 설계한다. 홀로노믹 시스템은 별다른 회전과정 없이 단순히 좌우로 이동만 하면 된다. 이러한 특성으로 민첩하게 주행할 수 있고 좁은 공간에서 비홀로노믹 로봇보다 효율적이고 자유로운 주행이 가능하다. 본 논문에서는 세 개의 옴니휠(Omni-wheels)을 사용한 홀로노믹 이동로봇 시스템을 개발한다. 세 개의 옴니휠을 사용한 이동로봇의 동역학과 모터 비선형 운동방정식을 고려한 정밀한 비선형 동역학 모델을 유도하여 제시한다. 유도된 식을 통해 각각의 모터 속도를 계산하고, 기본 속도제어로는 PID방식을 사용한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 맥봇II의 기구학적 최적 설계와 그것의 운동역학적 해석을, 3장에서는 제어 알고리즘과 제어 시스템을 설명한다. 끝으로 4장에서는 본 논문에서 구현된 로봇의 몸체/이동/로봇팔/핸드의 동작 제어 실험결과를 통하여 맥봇II의 향상된 성능을 확인한다.

2. McBot II의 운동학적 디자인

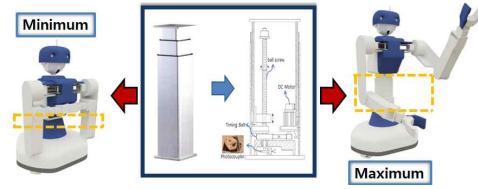
홈 서비스 로봇은 인간과 같은 공간에서 함께 생활하기 때문에 정밀한 로봇제어 못지않게 로봇의 외형 및 기구학적 설계의 최적화가 필요하다. 맥봇II는 가정에서 정리정돈을 수행하는 서비스 로봇이므로 더욱 로봇의 최적화 설계가 강조되고 있다. 정리정돈 서비스 로봇에게 필요한 로봇의 최적화 설계 요소들은 아래와 같다.

- ① McBot II의 키(height) 크기와 베이스 프레임(이동 로봇기능부)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 주로 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.

2.1 로봇몸체의 운동학적 설계

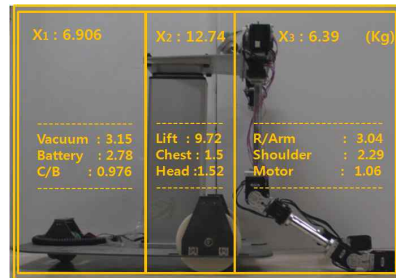
바퀴를 기반으로 하는 홈 서비스 로봇에서 몸체의 기구학적인 핵심 기능은 인간의 허리부분이다. 홈 서비스 로봇을 인간의 허리와 같은 형태의 자유도로 설계할 경우 하이토크의 모터를 사용해야 되고 바닥의 물체를 정리정돈할 경우 상체를 90도로 굽힐 경우 주변 환경과의 충돌 문제와 로봇 전체의 무게중심점의 변화가 커지게 되는 단점을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 로봇 몸체의 기구학적 구조는 리프트 방식을 이용하여 바닥에서 작업을 할 경우에도 무게중심 변화와 주변 환경과의 충돌도 방지할 수 있게 설계하며, 무게중심점의 변화로 인하여 발생하는 모터 제어의 부담도 최소화되도록 설계한다. 맥봇 II의 몸체(허리) 설계에 사용된 리프트의 기본 구조와 맥봇II에 적용된 모습은 그림 2와 같다. 볼스크류와 나사봉이 결합된 방식으로 위치제어 피드백을 위한 센서는 포텐서미터와 포토커플러를 사용하였다. 테이블과 식탁에서의 정리정돈이 가능하면서도 로봇의 바퀴에 부하 부담은 최소화하기 위한 최적화 설계를 시도하면 최대 승강 길이는 750mm이고 최저 하강 길이는 400mm이다. 정격 부하(load)는 약 300Kg(3000N)이다.



[그림 2] 맥봇II 몸체(로봇 허리)의 기구학적 설계

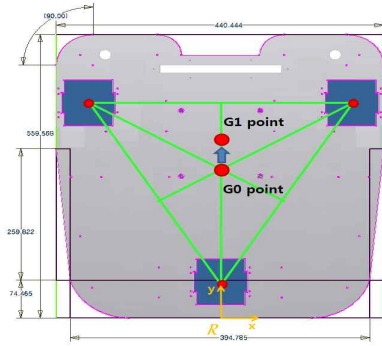
2.2 이동로봇의 운동학적 설계

이동로봇 파트는 로봇의 네비게이션 기능을 수행하는 부분으로 3개의 상호 대칭을 이루는 다방향 바퀴(Omni-Directional Wheel)들로 이루어져 있다. 가정 내의 협소한 공간과 다양한 장애물의 회피 등을 고려한다면 이 파트의 수평 면적을 최소화하여야 한다. 그러나 이 베이스 프레임에는 바퀴, 모터, 제어보드, 몸체, 배터리, 진공벤트(Vacuum Vent) 등의 많은 부품들이 바퀴의 제어 성능 확보를 위한 적절한 무게중심점 확보와 로봇 동작 시 그 점의 변화 범위를 최소화할 수 있도록 배치되어야 한다. 결국 최소의 면적에 최대의 부품들을 최적의 분포로 배치하는 기구학적 설계를 본 논문에서 제시해야 한다.



[그림 3] 세 종류로 구분된 질량 군

맥봇II의 정면을 기준으로 좌우 대칭의 설계를 가정하면 무게중심에 영향을 주는 것은 로봇의 앞에서 뒤에까지 배치되는 부품요소들의 질량 분포가 될 것이다. 그러므로 본 논문에서는 그것을 그림 3과 같이 세 개의 주요 파트로 나누어 무게중심점 계산 방식을 이용한 무게중심 최적화를 시도한다. 로봇이 정지한 상태에서 무게 중심점은 세 바퀴를 꼭지점으로 하는 삼각형에서 보조바퀴 꼭지점에서 밑변에 내린 수선의 내분점(y 좌표값)이 될 것이다.

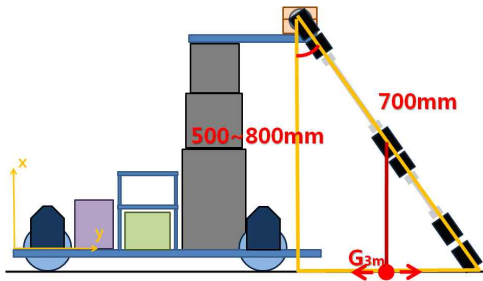


[그림 4] 맥봇II COG 평면도

맥봇II의 무게중심점 목표치 $G_0(y)$ 는 세 파트들의 각각의 무게중심점들 $G_1(y)$, $G_2(y)$, $G_3(y)$ 을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$G_0(y) = \frac{(G_1(y) \times M_1) + (G_2(y) \times M_2) + (G_3(y) \times M_3)}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (1)$$

이 때 최적 무게중심점은 로봇이 동작할 때의 변화 폭을 최소화하는 것이 기준함수(Criterion Function)가 된다. 로봇 동작 시 무게중심점의 변화는 파트들의 무게중심점과 질량의 변화에 대한 함수이고, 그 변화 개념이 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 6에서 나타나듯이 파트 X_3 가 무게중심 위치의 가장 큰 변화 폭을 갖는다.



[그림 5] 로봇팔 동작에 따른 무게중심 변화

그림 5에서 볼 수 있듯이 리프트 최저위치에 있으면서 로봇 어깨와 팔이 최대한 로봇으로부터 바닥에 접촉되는 순간이 파트 X_3 의 무게중심점이 전방으로 최대 이동한다. 이 때 무게중심점 $G_{3m}(y)$ 는 744mm 지점이다. 반대방향인 후방으로 파트 X_3 무게중심점의 최대 이동은 로봇팔이 몸체에 붙어 있을 때이다. 그때의 X_3 의 무게중심점은 529.1mm 지점이다. 그러므로 X_3 의 두 경우의 무게중

심의 평균을 적용함으로써 맥봇II의 무게중심의 변화를 최소화 할 수 있다. 무게중심점 변화율의 최소 연산을 통하여 네비게이션 파트를 설계한 결과가 표 1에서 나타난다.

[표 1] 무게중심 최적 점

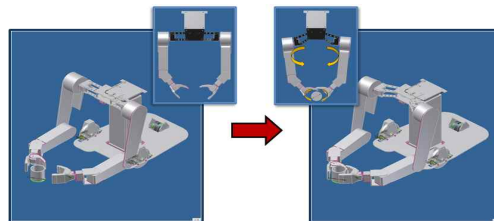
System	Components	Mass (kg)	Centroid (mm)
$G_1(y)$	Vacuum, Battery PCB Board	6.906	137.5
$G_2(y)$	Lift, Chest Head	12.74	387.0
$G_3(y)$	Robot Arm Shoulder, Motor	6.39	Max:744 Min:529.1
$G_{op}(y)$	McBot II	26.036	382.07

2.3 로봇 팔의 운동학적 설계

홈 서비스로봇이 실내에서 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 매니퓰레이터(Manipulator)의 작업공간이 최대한 확보되어야 한다. 그러나 큰 작업공간은 로봇팔 자체의 부하를 크게 만들고 로봇 어깨 조인트의 최대 토크 값이 커져야 한다. 이를 최적화하기 위하여 어깨 조인트 구조를 전후진 가능 시스템으로 설계하여 전방으로의 작업공간을 스스로 확보할 수 있게 하고, 양쪽 핸드들 간의 협업이 가능하도록 핸드를 설계하여 매니퓰레이터의 자유도를 최소화하였다.

2.3.1 어깨(Shoulder) 파트

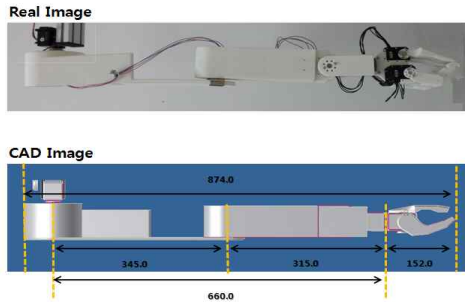
어깨파트는 로봇팔의 최대 부하를 높이고 전진 이동 기능을 통하여 넓은 작업 공간을 확보할 수 있도록 설계되어진다. 맥봇II 어깨의 기구학적 구조가 그림 6에서 보여진다. 사다리꼴 법칙을 이용하여 마주보는 두 링크가 평행하게 만들어진 4개의 링크 구조물을 활용하여 어깨를 내밀어 팔을 내미는 듯한 동작과 두 로봇팔간의 간격이 좁아지는 동작을 함으로써 로봇핸드의 악력뿐만 아니라 어깨의 힘이 더해져 로봇팔로만 물체를 파지했을 때보다 물체에 대한 파지력 및 최대부하의 향상을 기대할 수 있다.



[그림 6] 로봇 어깨의 기구학적 구조

2.3.2 로봇 팔 파트

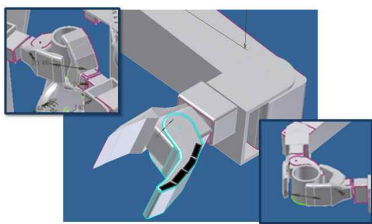
어깨를 제외한 로봇팔 파트는 정리정돈 작업을 효율적으로 할 수 있는 범위에서 기구학적 자유도를 최소화한다. 일반적으로 로봇팔은 4개 이상의 조인트로 핸드의 위치를 결정하지만, 맥봇II는 상박과 하박에 관절을 최적화하여 총 3개의 회전 관절과 특별한 구조의 어깨로 핸드의 위치가 결정된다. 그림 7을 보면 상박과 하박의 구동기만을 이용하여 물체를 파지하고 밀거나 당기는 동작에 용이하게 제어를 할 수 있다.



[그림 7] 최소 자유도의 로봇팔 기구학적 구조

2.3.3 로봇 핸드의 운동학적 설계

로봇 핸드 파트는 아래의 그림 8과 같이 기본적인 물건을 파지 할 수 있는 기능과 손의 다른 한 면을 쓰레박기처럼 디자인하여 바닥에 붙어있는 물체를 집을 때도 용이하도록 하였다. 그 외에도 손바닥에 청소기 기능을 두어 바닥이 아닌 위치에서도 청소 기능을 수행하도록 하였다. 그 밖에도 그림 8과 같이 한 손뿐만이 아닌 두 손으로 상호 협동작을 할 수 있는 매커니즘을 갖고 있다.



[그림 8] 로봇 핸드의 기구학적 구조

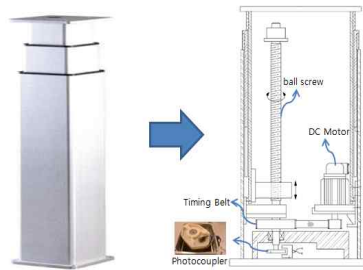
3. 맥봇II의 제어

맥봇II 제어는 로봇몸체, 이동로봇, 로봇팔과 핸드로 나눌 수 있다. 제어 시스템은 고속의 마이크로프로세서 (AVR)에 의하여 구현이 되어 지며, 많은 수의 입출력 장

치들로 인하여 최적시킹 입출력맵(Optimum-Seeking IO-Mapped) 방법으로 설계한다.

3.1 몸체 파트의 제어

중전의 시스템은 바닥위주의 정리정돈을 위하여 개발되어졌다면 본 논문에서 다루는 맥봇II는 좌식생활과 입식 생활이 공존하는 한국형 생활패턴을 고려하여 좌식생활과 입식생활이 공존하는 한국형 생활패턴에 적합한 로봇 몸체 디자인을 구축하였다. 실제로 가정에서 사용되는 가구의 높이를 고려하여 신장을 650mm-1100mm 까지 변화 시킬 수 있도록 리프트 시스템을 설계하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 DC모터와 타이밍 벨트 동력 전달 방식을 이용하여 볼스크류를 돌려 로봇 신장을 페루프 피드백 제어하는 방식을 사용한다.



[그림 9] 리프트 제어 시스템

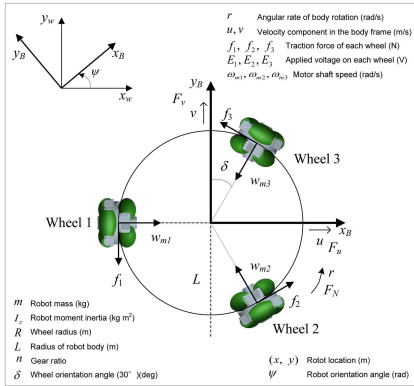
로봇 허리 기능의 제어시스템의 위치제어를 위해 엔코더를 제작하여 설치하였다. 포토커플러와 프로펠러를 이용하여 측정되어지는 펄스를 계수하는 방식으로 최고점과 최저점 그 밖의 원하는 높이까지 위치를 제어할 수 있도록 하였다.

3.2 이동로봇의 제어

옴니휠은 바퀴의 축에 연결된 동력에 축 수직방향으로 일반적인 바퀴와 똑같이 회전을 하고, 외부의 힘에 의해 축방향으로 슬립이 발생할 수 있는 구조로 되어 있다. 보조 바퀴의 회전축 방향(주바퀴와 직각)으로 슬립이 발생하는 특이한 구조 덕분에 자율 이동 로봇에 옴니휠을 적절히 배치하고 서로의 속도비를 이용하여 홀로노믹 시스템이 구현되며, 이것을 사용하는 로봇은 회전 없이 어느 방향으로 움직일 수 있다. 옴니휠을 그림 10과 같이 배치하여 각 바퀴의 속도비를 이용하여 어느 방향으로도 이동 가능한 홀로노믹 시스템을 구현한다.

3개의 옴니휠을 사용하였을 경우는 한 개의 모터는 에너지 효율이 좋지만 나머지 2개의 모터는 모든 회전 에너

지가 직진으로만 전달되지 않는다. 하지만 바닥의 상태에 관계없이 항상 3개의 바퀴가 지면에 접지하게 되고 항상 제어가 가능한 상태가 된다. 지면의 굴곡에서도 우연한 주행을 할 수 있도록 설계한다. 이러한 점들을 고려하였을 때 바닥면에 항상 접지할 수 있는 3개의 옴니휠을 사용하여 주행 시스템을 구성한다.



[그림 10] 힘 해석과 변수 및 기호

그림 11에서 전역 좌표와 로봇 좌표는 각각 $[x_w, y_w]$, $[x_B, y_B]$ 로 정의한다. 로봇의 회전각은 ψ 로 표현한다. 각 바퀴의 구동력은 f_i 로봇 무게중심에서 바퀴까지의 거리는 L , 바퀴의 배치 각도는 δ , r 은 이동로봇의 각속도이다. 로봇의 구동력(F)을 행렬식 형태로 변환하면 다음식과 같다.

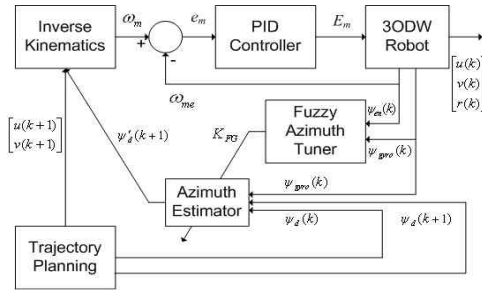
$$\begin{bmatrix} F_u \\ F_v \\ F_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \delta & -\cos \delta \\ -1 & \sin \delta & \sin \delta \\ L & L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)를 뉴턴의 법칙과 결합하면 직각좌표에서의 속도와 방향 벡터 $[\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{r}]^T$ 에 대해 관계식을 식(3)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r v \\ -r u \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_u \\ F_v \\ F_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

홈 서비스로봇의 이동 기능을 담당하는 이동로봇은 정형화된 규칙이 없는 실내 환경에서 보다 자유로운 이동성을 요구한다. 일반적으로 사용되는 미분형(Differential)

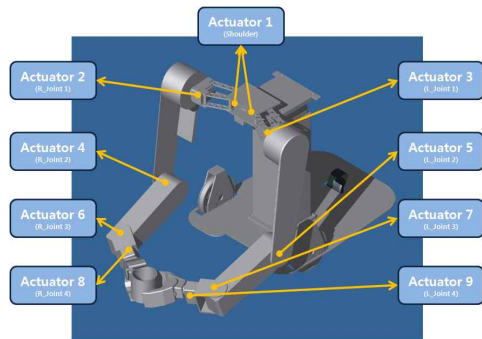
바퀴 기반 이동로봇들의 자유로운 움직임에 반하여 이동성 제어에서 많은 제약을 갖고 있다. 그러므로 그림 11의 구성도와 같이 체계적인 제어 알고리즘을 적용하여 좋은 추적제어 성능을 확보 한다.



[그림 11] 이동로봇 추적 제어기 구조

3.3 로봇 팔과 핸드의 구동 제어

본 논문에서 다루는 맥봇II의 로봇 팔은 기구학적 자유도를 최소화하여 로봇팔의 제어 대상 조인트 수를 줄임으로서 구동 제어의 부담을 최소화하였다. 맥봇I의 로봇 팔은 불필요한 관절을 가지고 있어서 그만큼의 로봇 팔 무게도 무거워 지고, 동작을 제어함에 있어서도 힘들어지게 되기 때문에 맥봇II에서는 역할 수행에는 지장이 없으면서 최소한의 액츄에이터만 사용하는 그림 12와 같은 메니플레이터 제어 구동 시스템을 디자인하였다.



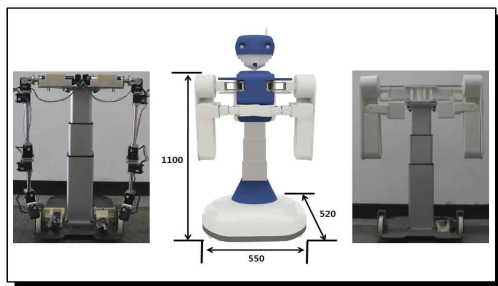
[그림 12] 로봇 팔 구동 제어 시스템

로봇핸드와 어깨 이외에 4개의 액츄에이터만 제어하도록 제어시스템을 간략화 하였다. 각각의 관절들은 독립적으로 제어 되며, Denavit-Hartenberg 표기법을 사용하여 우리는 위치 방향을 최종 목적 위치까지를 변위 함수로 표현할 수 있다.

각각의 구동기(Actuator)들은 독립적이고 정확하게 점대점(Point-To-Point) 방식에 의해 제어되어 진다.

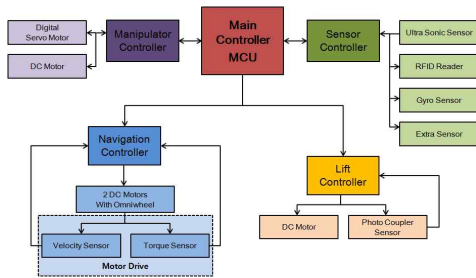
4. 실험 및 결과

본 논문에서 개발한 맥봇II의 외형도를 그림 13에서 볼 수 있다. 맥봇II의 사이즈는 440×560×1100 이다. 그리고 민첩한 이동시스템을 위해 두 개의 모터 기반의 바퀴로 동작이 이루어지며 바퀴 반경은 60이며 이론적으로 두 개의 로봇팔의 크기는 각각 상박은 400.6mm, 하박은 340.7mm, 손은 98.82mm로 설계되었다. 실험 편의를 위하여 거실공간을 2400×4800으로 제한하여 진행하였다. 또한 맥봇II의 기계적인 매개변수(Parameter)들 $M = 15.86\text{kg}$, $d = 0.126\text{m}$, $r = 0.052\text{m}$, $L = 0.308\text{m}$ 그리고 $I = 0.86\text{kgm}^2$ 로 실측하여 지정하였고, 이를 이용한 동적 방정식을 이론값에 근사하게 동작하는 것을 확인하였다.



[그림 13] 본 논문에서 개발한 맥봇 II

맥봇II를 정밀하게 제어하기 위해서는 우리는 새로운 제어시스템 아키텍처가 필요하다. 새로운 제어시스템 구성도를 그림 14에서 볼 수 있다.



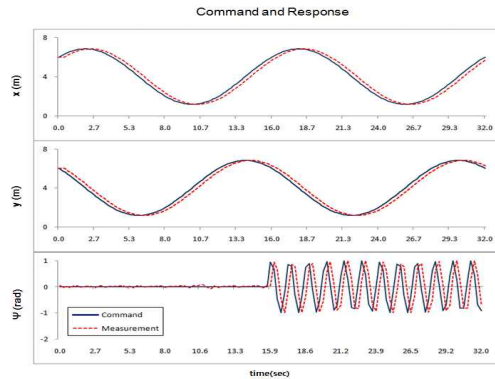
[그림 14] 통합 제어 시스템 구성도

로봇 몸체(허리) 제어의 경우 앞에서 설명했듯이, 볼스크류를 이용한 동작을 기본으로 하여 DC모터의 정·역회전을 이용하여 높이를 제어하는데. 이때 로봇의 몸체의 높이를 알 수 없기 때문에 우리는 리프트 내에 포토커플러와 프로펠러를 이용한 계수방식을 이용하여 높이를 제어한다.

홀로노믹 특성의 옴니휠을 이용한 베이스 이동로봇의 제어에서는 첫 번째와 두 번째 모터를 위한 제어이득은 $K_P = 15.3$, $K_I = 0.2$, $K_D = 3.2$ 로 같은 값으로 설정하였고, 세 번째 모터를 위한 제어계수는 $K_P = 14.6$, $K_I = 0.25$, 그리고 $K_D = 3.9$ 로 결정하여 PID컨트롤러를 조정하였다. 구현된 시스템의 동작 제어 결과를 확인하기 위하여 추적제어 실험을 실시하였고, 원하는 궤적을 점(6,6)을 시작점으로 하여 반지름이 $2\sqrt{2}\text{m}$ 인 원을 그리도록 하였다.

처음 반원 즉 시작점(6,6)에서 반원중점(2,2)까지는 자체회전(Self-Rotation)없이 전체 원을 돌게 하였고 나머지 반원시점(2,2)에서 중점(6,6)까지는 회전속도 $\pi/3 \text{ rad/s}$ 로 자체회전하며 원의 궤적을 따라 움직이게 하였다.

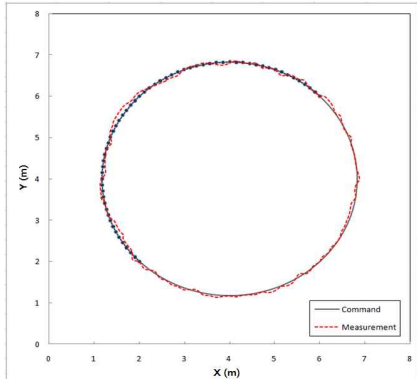
결국 본 실험에서는 다양한 속도변화, 가속도, 3개 바퀴를 사용한 이동로봇의 방향과 각도, 3 자유도의 궤적으로 제어 된다.



[그림 15] 원하는 위치 및 방향과 추적 결과

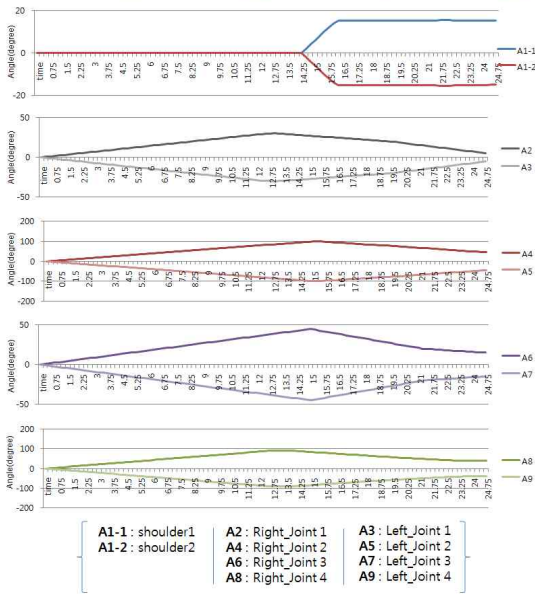
본 실험에서는 궤적의 추적응답특성과, 추적오류, 입력모터전압 및 로봇의 궤적을 결과로 확인한다. 그림 15은 로봇 응답과 명령 사이의 차이를 보여준다. 위치 제어에서는 10cm 미만의 바운딩(Bounding) 현상을 확인할 수 있고 추적 방향각도 제어에서는 6도 미만의 좋은 성능을 보여주었다.

그림 16은 로봇의 기준궤적 대비 응답궤적을 보여주고 있다. 명령궤도와 실제 로봇의 응답궤도의 차이가 그리 크기 않다는 것을 확인할 수 있습니다. 추적 제어 결과들에서 확인할 수 있듯이, 이동로봇의 홀로노믹 위치제어가 완벽하고 안정적으로 진행되어진 것을 확인할 수 있다.



[그림 16] 기준궤적 대비 응답궤적

정리정돈 작업에서 실제로 대상물체와 접촉하여 작업을 수행하는 로봇팔과 핸드들의 제어 실험 결과를 그림 17에서 볼 수 있다.



[그림 17] 물병 파지 작업을 수행하는 로봇 팔/핸드

본 논문에서 시도하는 정리정돈 실험은 테이블 위에 있는 물병을 인식하여 양 팔과 핸드들을 제어하여 물체를 파지하는 동작 실험이다. 그것의 그림 결과를 그림 17에서 볼 수 있다.

그림 17은 양 팔 구동 모터들의 응답특성을 양 팔 대

칭 형태의 그래프로 보여 주고 있다. 그래프에서의 A1~A9의 요소들은 로봇팔의 각각의 구동모터를 의미하며 그림 12과 같이 양팔 대칭으로 구성이 되어있다. 실험 결과 그래프에서 각각의 구동모터들(A1~A9)의 움직임 그래프로 볼 수 있듯이 두 손을 이용하여 좌우 대칭 형태로 물병을 감싸쥐는 동작을 효율적으로 수행하고 있으며, 양 팔과 핸드들이 적절하게 협동 제어를 수행하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 홈 서비스 로봇 맥봇II이 실내 환경에서 자동으로 정리 정돈을 하는 실용적인 기능을 가지도록 개발되었다. 홈 서비스 로봇은 인간과 함께 생활해야 하기 때문에 기구학 및 운동학적인 설계의 최적화가 필요하고 동작 제어가 정밀하게 이루어져야 한다. 맥봇II은 인간이 허리 및 손을 이용하여 정리 정돈 작업을 수행하는 메커니즘을 모델로 하여 설계되었다. 인간의 허리와 같은 동작 기능은 변화 범위가 큰 수직형 리프트와 전후진이 가능한 어깨 조인트 구조로 구현하였다. 정리정돈 작업을 직접 수행하는 로봇 팔과 핸드들은 실용성을 위하여 최소 자유도를 갖는 시스템으로 설계하였다. 또한 맥봇II가 좁은 면적의 실내에서 장애물과의 충돌을 방지하면서 고속의 이동 능력을 갖기 위하여 홀로노믹(Holonomic) 특성의 이동로봇으로 설계하였다. 특히, 본 논문에서 설계한 로봇의 몸체/이동/로봇팔/핸드의 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, 2004, pp.3189-3194
- [2] K. Harada et al., "Dynamics and Balance of a Humanoid Robot during Manipulation Tasks," IEEE Trans. on Robotics, vol. 22, no. 3, 2006, pp. 568-575
- [3] T. Asfour, 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, December

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] Seung-Woo Kim, Sang-Dae Kim, Byung-Ho Kim, Hong-Rae 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] Gabriel Ramirez, Said 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] Kantor, G., Singh, S. "Preliminary Results in Range-Only Localization and Mapping." *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp 1818-1823, 2002.
- [8] Hahnel, D., Burgard, W., Fox, D., Fishkin, K., Philipose, M. "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] Itiro Sii. "User Position Detection using RFID Tags", *Technical Report Proceedings of Japanese Information Processing Society, 00-HI-88*, pp 45-50, 2000.
- [10] Maeyama, S., Yuta, S., Harada, A. "Experiments on a Remote Appreciation Robot in an Art Museum" *Proceedings of IROS 2000, 2000*, pp 1008-1013, 2000.

김 승 우 (Seung-woo Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 연세대 전자공학과 (전자공학 학사).
- 1989년 2월 : 동 대학원 공학석사 (제어공학 석사).
- 1994년 2월 : 동 대학원 공학박사 (로봇공학 박사).
- 1989 ~ 1990년 : 삼성종합기술원 선임연구원 (DD로봇)

- 1998 ~ 1999년 : Case Western Reserve Univ. 박사후과정.
- 2003년 : 일본 나고야대학 로봇 연구소 방문교수.
- 2007 ~ 2008년 : 캐나다 British Columbia 대학 교환교수.
- 1994년 ~ 현재 : 순천향대학교 정교수

<관심분야>

로봇제어, 퍼지제어시스템, SFFS Tech, 유비쿼터스 서비스로봇, 엔터테인먼트 로봇.

김 하 이 준 (Hi-jun Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 순천향대학교 정보기술공학부 전기전자공학과 (전기전자공학 학사)
- 2010년 ~ 현재 : 순천향대학교 대학원 전기로봇공학과 석사 재학중 (전기로봇)

<관심분야>

로봇제어, 이동로봇, 서비스 로봇, 엔터테인먼트 로봇