두 개의 곡선형 펜듈럼 주행 메커니즘을 갖는 구형로봇

KisBot II : New Spherical Robot with Curved Two-pendulum Driving Mechanism

윤 중 철¹, 안 성 수², 이 연 정[†]

Joong-Cheol Yoon¹, Sung-Su Ahn², Yun-Jung Lee[†]

Abstract Due to the limited pendulum motion range, the conventional one-pendulum driven spherical robot has limited driving capability. Especially it can not drive parallel direction with center horizontal axis to which pendulum is attached from stationary state. To overcome the limited driving capability of one-pendulum driven spherical robot, we introduce a spherical robot, called KisBot II, with a new type of curved two-pendulum driving mechanism. A cross-shape frame of the robot is located horizontally in the center of the robot. The main axis of the frame is connected to the outer shell, and each curved pendulum is connected to the end of the other axis of the frame respectively. The main axis and pendulums can rotate 360 degrees inside the sphere orthogonally without interfering with each other, also the two pendulums can rotate identically or independent of each other. Due to this driving mechanism, KisBot II has various motion generation abilities, including a fast steering, turning capability in place and during travelling, and four directions including forward, backward, left, and right from stationary status. Experiments for several motions verify the driving efficiency of the proposed spherical robot.

Keywords: Spherical robot, Rolling robot, Two-pendulum driven robot, Curved-pendulum, Motion generation

1. 서론

군사, 보안, 서비스, 등 많은 분야에서 이용되고 있는 이동로봇은 주로 바퀴, 혹은 다리에 의해 이동하는 방법들을 채택하고 있다. 그러나 특정 지형 혹은 환경에 있어서 바퀴구동형 로봇은 전복의 위험이 있으며, 보행 로봇은 넘어짐으로 인해 이동불가의 상황이 발생할 수 있다. 또한 로봇을 제어하는 제어시스템이 외부와의 완전한 차폐가 어렵기 때문에 외부 환경에 의한 영향을 받기 쉽다. 이에 반해 구형(球形)로봇은, 구체의 외피로 인해 내부의 제어시스템을 액체, 먼지, 가스 등 외부 환경으로부터 보호할 수 있고, 구체 형태의 모양은 지면과 점 마찰을 가지므로 에너지 효율이 우수할 뿐만 아니라, 대칭적 형상

을 이루므로 전복의 우려가 없다. 또한 장애물과의 걸림으로 인한 이동불가능 현상이 발생하지 않는 장점이 있다^[1].

그러나 장애물을 회피하는 능력이나 경사로 주행능력 등은 족형이나 바퀴형 로봇이 구형로봇에 비해 우수하다고 할 수 있으며, 자세제어 및 주행 제어 측면에서도 족형 및 바퀴형 로봇이 구형로봇에 비해 상대적으로 쉽고 볼 수 있다. 그러나 앞서 언급된 구형로봇의 구조적인 장점들로 인해 많은 종류의 구형로봇들이 연구되고 있으며, 구동 메커니즘에 따라 크게 6가지 형태로 구분할 수 있다. 첫 번째는 단륜형(single wheel type)으로서 1996년에 Halme 등에 의해 개발된 이 구형로봇은 구동바퀴(driving wheel)와 평형바퀴(balance wheel)가 존재하는 IDU(Inside Driving Unit)가 구체 내부에서 이동함에 따라 로봇을 구동하는 구조를 가지고 있다^[2]. 두 번째는 1997년에 Bicchi 등이 개발하였으며, 구체 내부에 바퀴구동형 로봇을 포함하는 구조이다^[3]. 세 번째는 Javadi에 의해 개발된 구형로봇은 로봇의 내부에 고정된 내부 추진

Received : Aug. 10. 2011; Reviewed : Oct. 04. 2011; Accepted : Nov. 10. 2011
※ 이 논문은 한국 연구재단의 일반연구지원사업에서 지원하여 연구하였음(과제번호 : 2011-0002988)

[†] 교신저자 : 경북대학교 IT대학 전자공학부

¹ 경북대학교 IT대학 전자공학부

² (재)대구기계부품연구원

체(fixed internal propulsion)를 포함하는 구조로써, 내부에 존재하는 네 개의 축을 따라 움직이는 질량체를 이동하여 로봇의 무게중심을 변화시켜 구동하는 방법이다^[4]. 네 번째, 2000년 Bhattacharya에 의해 개발된 구형로봇은 구체내부에 부착된 두 개의 회전자(rotor)를 이용하여 구동된다^[5]. 다섯 번째는 로봇 내부의 수평축(horizontal axis) 중심에 위치한 하나의 펜듈럼(one-pendulum)을 움직여 로봇의 전체적인 무게중심에 변화를 주어 이때 발생하는 추진력을 이용하여 움직이게 된다^[6]. 이 구동 메커니즘은 여러 다른 구형로봇에도 적용된 바 있다^[7-10]. 마지막은 두 개의 펜듈럼(two-pendulum)을 이용한 것으로써, 구동 메커니즘은 앞서 설명한 하나의 펜듈럼과 동일하며, 두 개의 펜듈럼을 채용한 여러 가지 구형로봇들이 개발되었다^[11-13].

그러나 위와 같은 여러 가지 형태의 구형로봇들의 구동 메커니즘들은 각각 단점들을 가지고 있다. 단륜형의 경우 안정적인 방향전환과 균형 제어가 어려우며, 바퀴구동형 로봇을 포함하는 구조는 구체 내벽과 구체 내부에 위치한 로봇이 서로 비접촉이 발생할 경우, 동작불능 상태가 발생할 수 있다. 그리고 구체내부에 고정된 내부 추진체를 포함하는 구조와 로터 부착형은 빠른 방향전환이 어렵고, 기존의 하나의 펜듈럼 구동 메커니즘은 펜듈럼의 움직임이 제한되어 있으며, 두 개의 펜듈럼 구동 메커니즘은 안정적인 좌우 균형 제어가 어렵다.

본 논문에서는 여러 가지 구동 메커니즘들을 채용한 구형로봇들 중에서 현재 다수의 구형로봇에서 활발하게 활용되고 있는 two-pendulum 타입 구형로봇의 구동 메커니즘에 주안점을 두고 논한다. 이러한 펜듈럼 구동형 구형로봇들의 단점을 극복하고 로봇의 이동능력을 향상시키기 위해, 새로운 펜듈럼 구조를 가진 KisBot II (Kyungpook National University Intelligent Spherical roBOT II)라 이름 붙여진 구형로봇을 제안한다. KisBot II는 기존에 하나의 펜듈럼 혹은 두 개의 펜듈럼을 채용한 구형로봇의 펜듈럼 구동 범위가 제한되는 문제를 해결함으로써 로봇의 빠른 방향전환과 좌우 균형 제어가 용이하며, 정지 상태에서 전후좌우 주행이 가능하다. 또한 직진 주행 중에 주행방향과 좌우 직교된 방향으로 주행이 가능한 장점을 지니고 있다. 이러한 KisBot II의 주요한 모션생성은 두 개의 곡선형 펜듈럼 구동 메커니즘에 의해 가능해진다.

이 연구의 초기 기본적인 내용은 2011년 6월에 슬로바

키아 포프라드에서 열렸던 15th IEEE International Conference On Intelligent Engineering Systems(INES 2011)에 소개되었다^[14].

본 논문의 구성은 먼저 KisBot II의 전반적인 디자인 아이디어와 구동 메커니즘을 설명하고, KisBot II의 모션생성과 프로토타입의 시스템 구현에 대해서 소개한다. 그런 후 몇 가지 실험을 통해 모션생성에 대한 부분을 검증하며, 마지막으로 결론을 맺는다.

2. KisBot II의 디자인

기존의 하나의 펜듈럼과 두 개의 펜듈럼으로 구동되는 펜듈럼 구동형 구형로봇의 특징을 그대로 유지하고, 주행 및 모션생성에 대한 단점을 극복하는 것에 주안점을 두고, KisBot II에 대한 기본적인 디자인 콘셉트 설계를 진행하였다.

그림 1(a)는 하나의 펜듈럼 구동형 구형로봇의 방향전환 시에 내부 펜듈럼의 구동범위를 나타낸 것이다. 하나의 펜듈럼 구동형 구형로봇은 펜듈럼이 달려 있는 베이스 프레임(base frame)과 평행한 방향으로 구동할 경우 베이스 프레임에 의해 더 이상 움직일 수 없는 상황이 발생하게 된다. 따라서 베이스 프레임과의 충돌을 피하기 위하여 펜듈럼의 각은 그림에서 볼 수 있듯이 항상 θ_1 보다 작아야 하며 이는 로봇의 방향전환 시 회전 반경 r' 을 줄이는데 있어 구조적인 문제점을 가지고 있다. 그림 1(b)는 일반적인 두 개의 펜듈럼 구동형 구형로봇의 펜듈럼 구조를 나타낸 것으로써 하나의 펜듈럼 구동형 구형로봇처럼 펜듈럼이 앞뒤로만 움직일 수 있다. 그리고 그림에서 알 수 있듯이 펜듈럼 구동을 위한 모터들이 외피에 고정되어 있어 펜듈럼들을 좌우로 움직일 수가 없으므로 방향전환이 어려운 문제점을 가진다. 하나의 펜듈럼

그림 1. 일반적인 펜듈럼 구동형 구형로봇

과 두 개의 펜들럼 구동형 구형로봇 두 경우 모두 전후방향으로 주행은 가능하지만 좌우방향으로의 주행은 불가능한 구조이다.

이러한 펜들럼 구조들의 문제점들을 해결하여 작은 회전주행 반경을 가지고, 전후좌우로 주행을 가능하게 하기 위해 몇 가지 아이디어를 시도하였다. 그림 2(a)에서와 같이 하나의 펜들럼 구조를 변경하여 베이스 프레임과 펜들럼의 충돌을 피하는 구조를 생각하였다. 그러나 이는 펜들럼의 무게추가 구체내부 중심에 위치하지 않게 됨으로 로봇의 전체적인 무게중심이 흐트러지는 문제점을 발생시킨다. 다음으로 그림 2(b)처럼 두 개의 펜들럼 구조로 변경하였다. 그림 2(a)와는 달리 로봇이 무게 균형을 잡을 수 있지만 외피에 펜들럼 구동용 모터를 고정시키게 되면 베이스 프레임의 회전이 불가능하게 된다. 그림 1(b)와 같이 기존 두 개의 펜들럼 구조와 동일하게 되며 베이스 프레임 자체를 회전하기 위해 모터를 외피에 고

(a) 펜들럼의 위치 변화

(b) 무게 균형을 위한 두 개의 펜들럼 구조

(c) 펜들럼 구동 모터의 위치 변경

그림 2. 펜들럼 구조적 문제점을 해결하기 위한 아이디어

정하지 않고 펜들럼을 회전시킬 경우 모터 몸체가 회전하여 결국 펜들럼은 회전하지 않는 문제점을 가진다. 그림 2(c)는 그림 2(b)의 구조를 개선한 것이며 베이스 프레임이 회전에 의해서 로봇이 구동할 수 있고 펜들럼 자체의 회전으로 로봇이 구동할 수 있는 구조이다. 그러나 이 구조에서는 펜들럼의 길이가 짧고 베이스 프레임이 회전할 경우 펜들럼 무게추들이 서로 멀리 떨어져있으므로 펜들럼에 의한 추진력 발생이 다소 어려운 문제점이 발생한다.

그림 2의 개선 아이디어를 바탕으로 도출된 KisBot II의 디자인 콘셉트 설계를 그림 3에서 볼 수 있다.

기존 펜들럼 구동형 구형로봇의 펜들럼 모양은 직선이지만, KisBot II에 채용된 두 개의 펜들럼은 구체 내부 모양을 따르는 곡선 형상을 띄고 있다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 십자가 모양의 베이스 프레임이 구체의 수평축에 위치하게 된다. 베이스 프레임 중 펜들럼이 달려 있지 않은 축이 로봇의 외피에 연결된다. 각각의 펜들럼들은 베이스 프레임에 포함된 보조 프레임(auxiliary frame)에 연결되어 있다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 정면에서 바라본 그림이며, 그림 3(c)는 그림 3(a)의 측면에서 바라본 그림이다. 각각의 펜들럼의 무게중심은 내부 구조를 따라 휘어진 펜들럼의 구조로 인해 무게추가 지면과 최대한 가깝도록 배치될 수 있어 로봇 하부 중심에 균형을 잡고 위

(a) 3차원도

(b) 정면도

(c) 측면도

그림 3. KisBot II의 디자인 콘셉트

치하고 있다.

그림 4 로봇내부에서 베이스 프레임과 펜듈럼의 회전 동작을 보여주는 디자인 콘셉트이다. 로봇내부에서 펜듈럼과 베이스 프레임은 서로 독립적으로 회전이 가능하며, 펜듈럼 구동시에는, 두 펜듈럼 사이의 공간으로 인해, 베이스 프레임과 충돌 없이 구체 내에서 자유롭게 회전할 수 있다.

이는 KisBot II가 베이스 프레임의 회전에 의한 펜듈럼 구동을 통해 주행할 수 있고 또한 베이스 프레임이 정지한 상태에서 두 개의 펜듈럼을 이용하는 펜듈럼 구동형 로봇과 같이 주행할 수 있음을 의미한다.

그림 4. 베이스 프레임과 펜듈럼의 회전

3. 모션생성 능력

앞 절에서 언급한 것과 같이, KisBot II는 베이스 프레임 구동에 의한 롤링(rolling)모션과 두 개의 펜듈럼을 이용하는 롤링모션의 두 가지 롤링 모션 모드를 가진다.

그림 5(a)는 베이스 프레임의 회전을 이용한 롤링모션을 나타낸 것이며, 베이스 프레임의 회전 시 펜듈럼들의 무게추는 최대한 가깝게 서로 마주보고 있고 하부에 위치하고 있으므로 등가적으로 하나의 펜듈럼을 가진 펜듈럼 구동형 구형로봇과 구동원리가 같다고 할 수 있다. 그림 5(b)는 두 개의 펜듈럼의 회전을 이용한 롤링모션을 보여주고 있다. 일반적인 두 개의 펜듈럼 구동형 구형로봇처럼 두 개의 펜듈럼을 동기화시켜 회전하여 롤링주행을 할 수 있으므로 이 경우 역시 하나의 펜듈럼 구동형 구형로봇과 구동원리가 같다. 따라서 KisBot II의 두 가지 롤링 주행은 모두 하나의 펜듈럼으로 구동되는 구형로봇과 같은 구동원리라고 볼 수 있다. 두 개의 롤링 주행이 지면에서 서로 직각으로 이루어질 수 있으므로 정지상태일 때의 KisBot II가 기존 펜듈럼 구동형 구형로봇에 비해 전후좌우의 네 방향으로 이동할 수 있는 우수한

그림 5. KisBot II의 롤링 모션

이동성을 가진다.

정지상태에서의 이동과 더불어 주행 중일 경우 수직방향으로 방향 전환에 대한 예를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서와 같이, KisBot II는 보조 프레임에 연결된 펜듈럼들의 회전을 통해 직선으로 주행하는 도중 베이스 프레임에 의한 회전을 이용하여 그전 주행방향에 수직하게 방향을 전환할 수 있으며, 베이스 프레임에 의해 주행하는 도중 펜듈럼에 의해 주행 방향을 수직으로 전환하는 것 역시 가능하다.

앞서 그림1(a)에서 설명된 하나의 펜듈럼 구동형 구형로봇의 펜듈럼 구동범위와 비교한 KisBot II의 펜듈럼 구동범위를 그림 7에 나타내었다. KisBot II의 두 개 펜듈럼은 베이스 프레임과 충돌하지 않고 회전가능하기 때문에 펜듈럼의 구동범위가 제한되지 않는다. 따라서 방향전환 시에 회전반경 r 이 하나의 펜듈럼으로 구동되는 구형로봇보다 현저하게 작음을 알 수 있고 이론상으로는 r 을

그림 6. KisBot II의 수직방향전환의 예

그림 7. KisBot II의 펜듈럼의 구동 범위

0에 가깝게 줄이는 것이 가능하다. 또한 베이스 프레임과 평행한 방향으로 주행하는 것이 가능하다.

4. 프로토타입 설계 및 제작

디자인 아이디어 콘셉트에 기반하여 KisBot II의 프로토타입을 제작하였고, KisBot II를 구성하고 있는 기계적 구조와 시스템적 구조를 아래에서 설명한다.

4.1 시스템 구조 설계

KisBot II의 디자인 콘셉트의 기계적 모델링은 3D 설계 툴의 하나인 CATIA를 이용하여 설계하였으며, 전체적인 기계적 구성요소들이 완전히 조립되기 전의 모습을 그림 8에 나타내었다.

그림 9(a)는 로봇에 외피를 장착하기 전, 2개의 원형 프레임(ring frame)과 4개의 반원 프레임(semi-ring frame) 및 기계적 구성요소들의 조립도이다.

수평 프레임(horizontal frame)이라고 불리는 한 쌍의 원형 프레임은 로봇의 수평축에 위치하고, 수직 프레임(vertical frame)이라고 불리는 두 쌍의 반원 프레임은 로봇의 중심에 위치한 수평 프레임에 수직으로 위, 아래에 연결되어 전체적인 메인 프레임을 구성하게 된다.

그림 8. 3D로 모델링된 KisBot II의 주요 기계 구성요소

그림 9. KisBot II의 기계적 구조도

메인 프레임 내부에는 베이스 프레임이라고 불리는 십자가 모양의 프레임이 위치하고 있으며 이 프레임은 수평 프레임과 평행하게 장착되어 있다. 베이스 프레임의 축은 하나의 모터, 모터샤프트 및 기타 기계적 구성요소를 가지고 있다. 베이스 프레임에 포함된 보조 프레임에 펜듈럼 구동을 위한 두 개의 모터들이 위치하고 있으며 두 개의 모터에는 구체 내부와 같은 곡률반경을 가지는 펜듈럼이 각각 연결되어 있다. 로봇제어를 위한 시스템은 베이스 프레임의 중심부 위에 위치한다. 이 로봇제어 시스템은 메인 프로세서 보드, 모터 드라이버 보드, 통신 인터페이스 보드를 포함하고 있다. 8개의 외피를 장착하면 그림 9(b)와 같이 KisBot II의 외형은 완전한 구체형상을 띄게 된다.

그림 10은 앞에서 묘사된 메인 프레임과 베이스 프레임을 상부에서 바라본 내부구성을 나타낸다.

그림 11(a)은 로봇의 측면에서 바라본 구동전의 베이스 프레임을 나타낸다. 그림 11(b)은 베이스 프레임과 메인 프레임에 연결된 모터를 이용하여 임의의 각만큼 회

그림 10. 상부에서 바라본 KisBot II의 내부구조

그림 11. 베이스 프레임의 구동 원리

전시킴으로써, 구체 내부의 무게중심이 변화된 것을 보여 준다. 이때, 베이스 프레임은 수직 프레임 안에서 아무런 충돌 없이 360° 회전할 수 있다.

그림 12는 로봇내부에서의 펜들럼이 구동되는 모습을 보여주는 모델링 도면이다. 여기서 그림 12(a)는 구동하지 않는 펜들럼의 정지상태를 나타내고, 그림 12(b)는 두 개의 펜들럼이 서로 반대방향으로 구동되는 상태를 나타내며, 12(c)는 두 개의 펜들럼이 서로 동기화되어 구동되는 모습을 나타내고 있다. 베이스 프레임과 마찬가지로 펜들럼은 로봇 내부에서 360° 회전이 가능하며 앞에서 설명한 대로 베이스 프레임과 펜들럼 간의 충돌을 서로 피할 수 있는 구조로 설계 되었다.

그림 12. 두 개의 펜들럼의 구동 원리

4.2 제어시스템 설계 및 제작

KisBot II에 대한 제어 시스템은 메인 제어기, 모터 드

라이버 모듈, 로봇 구동 명령을 위한 무선 조종기, 센서와 무선 통신모듈, 그리고 로봇의 상태를 모니터링하기 위한 GUI(Graphic User Interface)를 포함하는 다섯 부분으로 이루어져 있다. 무선 조종기를 통해 로봇에 대한 제어 신호가 블루투스 통신을 통해 PC로 전달되고 PC의 GUI에서는 로봇으로 제어 신호를 전달함과 동시에 로봇 상태 정보 및 각종 센서들의 상태를 보여주게 된다. 그림 13에 이러한 KisBot II의 전체 제어시스템의 동작에 대한 간략한 블록 다이어그램을 나타내었다.

실제 KisBot II의 제어시스템은 32bit DSP를 채용한 메인 제어보드, 로봇에 장착된 3개의 모터와 엔코더의 동작을 담당하는 모터 드라이버 보드, ARS(Attitude Reference System) 센서와 엔코더로부터 출력되는 로봇의 상태 정보와 무선 조종기로부터 입력되는 제어정보를 표시하는 PC와의 무선통신을 위한 통신보드로 이루어져 있다.

표 1에 앞서 설명한 로봇제어 시스템을 구성하는데 사

그림 13. 제어시스템의 블록 다이어그램

표 1. 시스템 구성요소의 사양

Contents	Specification
Main Processor	- TMS320F2812 - 32bit integer C28X Core - 150MHz / 150MMAC
ARS sensor	- 3-axis Acceleration sensor, 2-axis Gyro sensor, Temperature Sensor - 12bit resolution ADC - 100Hz output, Serial communication
Actuator	- 2.4Kgf-cm, 229rpm, 24V, 3.9W - 7.3Kgf-cm, 101rpm, 24V, 12.7W
Battery	- 22.2V(2,400mAh), 135g, Lithium polymer - 11.1V(800mAh), 69g, Lithium polymer

용되어진 주요 구성요소들의 사양을 간략하게 정리하였다.

4.3 기구제작 및 시스템 통합

KisBot II의 프로토타입 제작에 사용된 기계부품들은 그림 14(a)와 같이 알루미늄 가공을 통해 제작하였고 외피는 제작의 용이성과 비용적인 효율성을 감안하여 합성수지(resin)를 재료로 RP(Rapid Prototyping)가공을 통해 외피를 제작하였다. 그림 14(b)는 제작된 외피를 나타낸 것이다.

제작된 모든 기계 부품들 및 전자부품들이 조립된 KisBot II의 프로토타입을 그림 15에서 볼 수 있다. 그림 15(a)는 외피가 조립되기 전이며 그림 15(b)는 외피가 완전히 조립된 모습을 보여준다. 그림 15(c)는 지면과 적당한 마찰력을 가질 수 있도록 고무와 비슷한 재질인 폴리우레탄(Polyurethane)으로 코팅한 상태를 나타낸 것이며 마지막으로 그림 15(d)는 프로토타입을 조정하는 무선 조종기를 나타낸 것으로써 조종기 하부에 DSP를 채용한 무선 조종기용 제어보드가 장착되어 있다. 무선 조종기로 로봇의 전후좌우 주행 명령을 내릴 수 있으며, 조종기 손잡이를 앞으로 누히면 베이스 프레임이 회전함과 동시에 로봇 하부 중심에 위치한 펜들럼 주들의 위치변화로 인해 로봇이 직진하게 되며 후진은 직진 주행과 반대방향으로 조종기 손잡이를 조정하면 된다. 좌우주행은 조종기 손잡이를 좌우로 누혀서 이루어지게 되고 이때는 두 개

그림 15. KisBot II 프로토타입과 무선 조종기

의 펜들럼이 주행방향에 맞게 회전하게 된다. 로봇이 정지해 있을 경우 베이스 프레임과 펜들럼의 회전각은 지면과 수직중심선을 기준으로 -80° 에서 80° 의 범위를 가진다.

완전히 조립된 로봇의 지름은 31cm이며, 무게는 3.2kg이다.

5. 실험 및 결과

KisBot II의 기능적인 성능을 검증하기 위해 무선 조종기를 이용하여 몇 가지 실험들을 수행하였다.

5.1 직선 주행

베이스 프레임의 회전 및 펜들럼 회전을 이용하여 각각 직선주행에 대한 실험을 수행하였다. 지면에 가로 2m, 세로 2m의 정사각형을 만들어 중앙선을 따라 KisBot II가 주행하도록 제어하였다.

그림 16은 베이스 프레임을 이용하여 직선 주행을 하고 있는 모습을 나타내며 로봇이 펜들럼의 회전을 이용하여 직선 주행하는 것은 그림 17에서 보여주고 있다. 그림 16과 그림 17에서 로봇의 주행 방향은 서로 수직이다. 이 결과들은 주행 중 주행방향에 수직인 방향으로 방향 전환을 할 수 있는 가능성과 정지 상태에서 전후좌우 네 방향으로 주행이 가능함을 의미한다.

(a) 제작된 기계 구성 부품

(b) RP가공에 의한 외피

그림 14. 제작된 주요 기계 구성부품 및 외피

그림 16. 베이스 프레임 회전을 이용한 직선 구동

그림 17. 펜듈럼 회전을 이용한 직선(측면) 구동

5.2 원운동 주행

그림 18은 로봇이 지름 15cm의 원을 따라 주행하는 원운동 주行的 결과이다. 실험을 통해 KisBot II가 작은 반경을 가지는 원을 따라 주행할 수 있음을 알 수 있고 더불어 여러 형태의 곡선 경로를 따라 주행할 수 있는 가

그림 18. KisBot II의 원형 주행 모습

능성을 보여준다고 할 수 있다.

5.3 직선주행에 대한 로봇의 회전각 측정

그림 19는 무선 조종기를 이용한 수동 조정 및 로봇회전각(θ_s) 측정을 위한 내부 제어기를 도식화한 것이다. PI제어기를 사용하여 무선 조종기에서 수동으로 전달되는 베이스 프레임의 기준 회전각(θ_t)을 베이스 프레임의 실제 회전각(θ_r)이 추종하도록 설계되어져 있다.

그림 20(a)는 베이스 프레임의 회전을 이용한 직선구동 실험에서, 무선 조종기를 통해 조작자가 수동으로 입력하는 베이스 프레임의 기준 회전각(θ_t)에 대한 베이스 프레임의 실제 회전각(θ_r)을 나타낸 그래프이며 그때의 로봇의 회전상태를 동시에 명시하였다. 그림 20(a)는 4초부터 로봇을 직선주행시키기 위해, 무선 조종기에서는 베이스 프레임이 지면에 대해 약 40도의 값으로 유지하도록 명령을 내리고 있고 그때 베이스 프레임의 실제 회전각을 측정하는 것이다. 그래프에서 11초되는 시점에서는 무선 조종기를 진행방향과 반대 방향으로 조종기의 손잡이를 눌렀다가 서서히 세워 로봇을 정지시켰다. 그림 20(b)는 그림 20(a)의 베이스 프레임의 실제 회전각에 따른 로봇의 누적된 회전 이동각을 측정하는 그래프이다.

현재 외피 프레임과 베이스 프레임이 서로 독립적으로 회전하고 있기 때문에 외피 또는 기구 프레임에 로봇 회전각 측정용 전용센서를 따로 장착할 수 있는 상황은 아니며, 장착을 하였다 하더라도 설치 공간상의 문제와 제어보드간에 유선통신 연결이 이루어지게 되어 외피의 회전에 의해 배선이 엉키는 문제가 발생되게 된다. 따라서 로봇의 회전각은 베이스 축 구동용 모터에 장착된 엔코더에서 측정된 각(θ_e)과 ARS 센서에서 측정된 베이스 프레임의 상태 각(θ_r)을 아래의 식 1에 적용하여 간접적으로 측정할 수 있다.

$$\theta_s = \theta_r - \theta_e \quad (1)$$

그림 19. 무선 조종을 위한 제어 블럭도

그림 20. 베이스 프레임에 의한 직선 주행시 베이스 프레임의 상태 각(θ_r)과 로봇(θ_s)의 각 변위

베이스 프레임이 회전했을 경우 로봇중심부에 위치한 ARS센서도 같이 회전하게 되며 그 때 출력되는 엔코더 값과 ARS센서 값을 측정하면 두 값의 차이가 로봇의 회전각으로 볼 수 있다. 즉 로봇이 회전하지 않을 때는 베이스 프레임 구동 모터의 엔코더값과 ARS센서의 출력값

이 서로 같아서 θ_s 는 0이 된다. 로봇이 회전하게 되면 엔코더값과 센서 출력값은 서로 차이를 보이게 된다. 그림 21에 이를 도식화하여 나타내었다.

그림 22는 KisBot II의 직선 주행 모션에 대한 베이스 프레임과 로봇자체의 회전 각속도를 측정한 그래프이다.

그림 22. 베이스 프레임과 구체의 각변위에 대한 각속도

6. 결 론

기존의 하나의 펜들럼과 두 개의 펜들럼으로 구동되는 구형로봇의 이동 성능을 향상시키기 위해, 구체내부 모양과 같은 곡선모양을 가지는 두 개의 펜들럼으로 구동되는 KisBot II를 소개하였다. 펜들럼의 형상을 변경함으로써, 펜들럼의 구동 범위가 제한되는 문제점을 해결하였다. 그리고 펜들럼 구동방향과 수직으로 구동하는 베이스 프레임의 구동에 의해 로봇이 주행할 수 있도록 설계하여, 정지상태에서 전후좌우 네 방향으로 이동할 수 있음을 보였고, 짧은 회전 반경에서의 방향전환과 주행 중 주

행방향에 수직한 방향전환이 가능함을 실험을 통하여 유추할 수 있었다. 이 실험들은 KisBot II가 기존에 개발된 펜듈럼 구동형 구형로봇에 비해 향상된 이동성능을 가진 것을 보여준다.

그러나 직진주행 중 주행방향에 대한 수직한 방향으로 주행을 하기 위해서는 로봇이 완전히 정지해야만 하는 점과 펜듈럼이 차지하는 무게가 로봇전체 무게 비중보다 낮아 추력이 약한 점 등은 향후 개선이 필요한 부분이다. 향후 동역학 모델링을 통한 제어알고리즘 개발, 정밀 자세제어 연구와 로봇의 속도제어 등을 포함하는 성능개선 연구 및 기타 필요한 센서들을 보강하여 로봇의 완성도를 높여 나아갈 예정이다.

완성도가 높아진 KisBot II는 가깝게는 교육 및 엔터테인먼트 분야에 먼저 적용될 수 있을 것으로 생각되며 보안 및 경비용으로도 활용이 가능할 것으로 판단된다. 좀 더 긴 안목을 가지고 기대할 수 있는 적용분야로서는 행성탐사, 극지탐사, 군사분야 등을 들 수가 있으며 이와 관련된 특수한 환경에서의 임무를 수행할 수 있으리라 판단되어진다.

참고문헌

- [1] R. Armour and J. Vincent, "Rolling in nature and robotics: a review", *Journal of Bionic Engineering*, vol. 3, pp.195-208, 2006
- [2] A. Halme, T. Schonberg, and Y. Wang, "Motion Control of a Spherical Mobile Robot", 4th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control AMC'96, Mie University, Japan, vol. 1, pp.259-264, March, 1996.
- [3] A. Bicchi and A. Balluchi, "Introducing the 'SPHERICLE': an experimental testbed for research and teaching in nonholonomy", *Proceedings of the 1997 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, USA, vol. 3, pp.2620-2625, April, 1997.
- [4] A. Javadi and P. Mojabi, "Introducing august: a novel strategy for an omnidirectional spherical Rolling Robot", *Proceedings of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Washington DC, USA, vol. 4, pp. 3527-3533, May, 2002.
- [5] S. Bhattacharya and S. Agrawal, "Design, experiments and motion planning of a spherical rolling robot", *Proceedings of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, San Francisco, USA, vol. 2, pp. 1207-1212, April, 2000.
- [6] Francois Michaud and Serge Caron, "Roball: the rolling robot", *Autonomous Robot*, vol.12, pp. 211-222, 2002.
- [7] J.O. Kim, H. J. Kwon, and J. H. Lee, "A Rolling Robot: Design and Implementation", *Proceedings of the 7th Asian Control Conf.*, Hong Kong, China, pp. 1474-1479, August, 2009.
- [8] Qiang Zhan, Tingzhi Zhou, Ming Chen, and Sanlong Cai, "Dynamic Trajectory Planning of a Spherical Mobile Robot", 2006 IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics, Bangkok, Thailand, pp. 1-6, June, 2006.
- [9] M. Nagai, "Control system for spherical robot", Master's thesis, Helsinki University of Technology, 2008.
- [10] "Rotundus," <http://www.rotundus.se>
- [11] 안성수, 김영민, 이연정, "두 팔을 가지는 변형 가능한 구형로봇", *제어-로봇시스템학회 제16권, 제11호*, pp. 1060-1067, 11, 2010.
- [12] Bo Zhao, Mantian Li, Haitao Yu, Haiyan Hu, and Lining Sun, "Dynamics and motion control of a two pendulums driven spherical robot", *The 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, pp. 147-153, October, 2010.
- [13] A. Ghanbari, S. Mahboubi, and M. M. S. Fakhrabadi, "Design, dynamic modeling and simulation of a spherical mobile robot with a novel motion mechanism", 2010 IEEE/ASME Int. Conf. Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), Qingdao, China, pp. 434-439, July, 2010.
- [14] Joong-Cheol Yoon, Sung-Su Ahn, and Yun-Jung Lee, "Spherical Robot with New Type of Two-Pendulum Driving Mechanism", 2011 15th IEEE Int. Conf. Intelligent Engineering Systems (INES), Poprad, Slovakia, pp. 275-279, June, 2011.

윤 중 철

2010 경운대학교 전자공학과
졸업
2011~현재 경북대학교 전자공
학과 석사과정 재학
관심분야: 탐사 로봇, 서비스
로봇, 지능 제어, 동역학,
임베디드 시스템

E-mail : brandyjc@naver.com

이 연 정

1984 한양대학교 전자공학과
졸업
1986 한국과학기술원 전기 및
전자 공학 석사
1994 동 대학원 박사
1995~현재 경북대학교 IT대
학 전자공학부 교수.

관심분야: 보행 로봇, 서비스 로봇, 지능 제어, 임베
디드 시스템

E-mail : yjlee@ee.knu.ac.kr

안 성 수

1996 경북대학교 전자공학과
졸업
1998 동 대학원 석사
2005~현재 동 대학원 박사과
정 재학
1998~2002 LG산전 주임연구원

2002~2005 LG전자 선임연구원

2005~현재 (재)대구기계부품연구원 책임 연구원

관심분야: 서비스로봇, 임베디드 시스템, 지능제어,
동역학, 센서융합

E-mail : zecks@dmi.re.kr