논문 2009-46SC-5-1

세그웨이형 2륜 이동로봇의 하드웨어 설계방법

(Hardware Design Methods for Segway Type 2-Wheeled Mobile Robots)

조 정 우*, 박 귀 태*

(Jung-Woo Joh and Gwi-Tae Park)

요 약

본 논문에서는 세그웨이형 2륜 이동로봇을 어떻게 설계할 것인가에 대해 논한다. 실험목적에 적합한 성능의 2륜 이동로봇을 설계하기 위해 모터 선정, 배터리 선정, MCU 선정, 모터 배치, 외형 설계의 5가지 기준을 제시한다. 제시한 기준을 고려하여 2륜 이동로봇을 설계하면 정밀하고 정확한 테스트베드로써 실험 시 의미있는 결과를 얻는데 최고의 환경을 제공할 것이다.

Abstract

In this paper, hardware design methods for segway type 2-wheeled mobile robots are presented. Basically five guide lines are offered to build robots properly for the purpose of experiments; motor selection, battery selection, MCU selection, motor placement, and construction of body. The robots built with these five guide lines will give the best test environment to gain meaningful results in experiments as a precise and exact test-bed.

Keywords: 이동로봇, 세그웨이, 하드웨어, 설계

I. 서 론

직관적으로 구성하기 간편하고 이동이 용이한 로봇은 바퀴를 이용한 로봇이다. 다양한 형태의 로봇이 바퀴로 이동한다. 그림 1에 바퀴 4개 이상을 가진 대표적인 이동로봇의 예를 나타냈다. 이러한 구조의 이동로봇은 몸체의 균형과 안정성을 잘 유지할 수 있어 개발한 이론을 비교적 편하게 적용하고 결과를 관찰할 수 있다.

그러나 로봇을 구동하는 바퀴의 수가 많다는 것은 곧 로봇 몸체를 구성하는 하드웨어의 구성요소가 증가한다는 의미가 된다. 증가한 하드웨어 구성요소에 비례하여 로봇을 만드는데 필요한 비용이 같이 증가한다. 또한 하드웨어가 그만큼 복잡해지므로 유지, 보수에 필요한 시간과 노력도 많아지게 된다.[1~2]

2개의 바퀴만으로 구동 가능한 세그웨이형 이동로봇은 기존 이동로봇의 이러한 단점들을 보완할 수 있다. 그림 2에 세그웨이형 이동로봇의 예를 나타냈다. 2개의 바퀴만으로 이동이 가능하므로 4개 이상의 바퀴를 사용할 때에 비해 로봇 하드웨어 구성이 단순해진다. 즉 바퀴의 개수가 줄고 그에 따라 바퀴 구동을 위한 모터의 개수 역시 줄일 수 있다. 구동해야 할 모터의 개수가 감소하면 이를 제어하기 위한 회로와 부가적인 부품들도 감소한다. 이러한 하드웨어 구성요소의 변화는 곧 로봇 설계비용의 감소로 이어지고 유지, 보수 측면에서도 많은 이점이 있다.[1] 그러나 2륜 이동로봇의 가장 큰 단점은 바퀴가 2개 이므로 로봇이 넘어지지 않고 스스로 균형을 유지하도록 하는데 높은 수준의 이론과 기술이 필요하다는 점이다. 이러한 균형유지 조건의 성능향상을

* 정회원, 고려대학교 전기전자전파 공학과.
(Department of Electrical Engineering, Korea University)
접수일자: 2009년6월26일, 수정완료일: 2009년7월17일

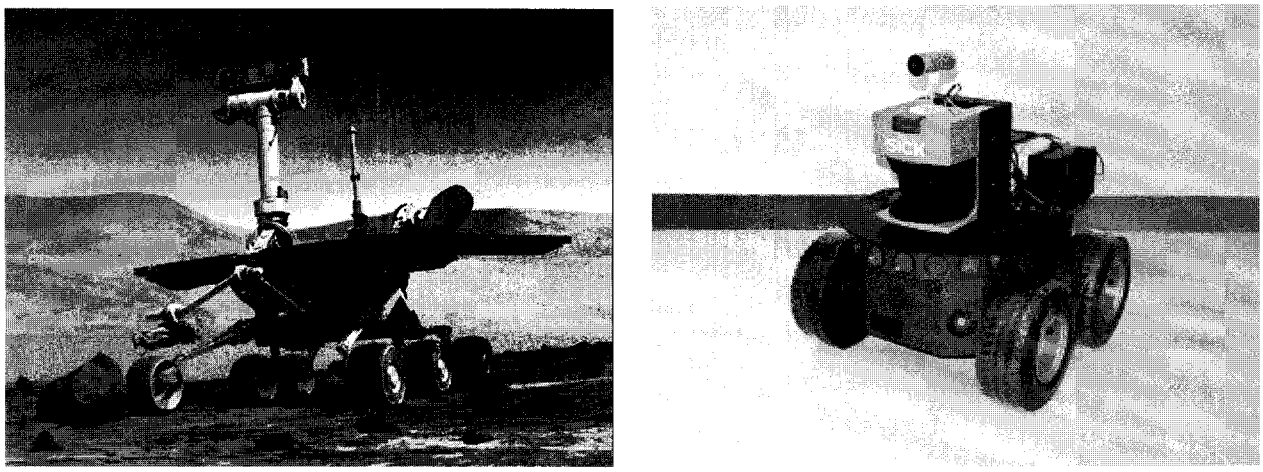


그림 1. 대표적인 이동로봇 구조. 위쪽은 화성탐사로봇 Spirit, 아래쪽은 상업용 연구로봇(Pioneer)
Fig. 1. Typical mobile robot structure. The top is the space probe on Mars 'Spirit', and the bottom is a commercial one for research.

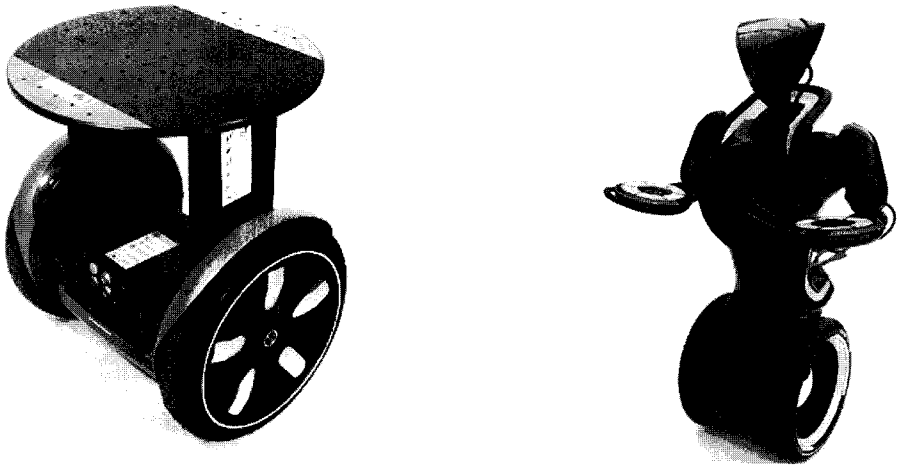


그림 2. 2개의 바퀴만으로 균형을 유지하면서 이동 가능한 로봇. 위쪽은 세그웨이 RMP, 아래쪽은 AMPbot
Fig. 2. Movable Robots balancing with 2 wheels only. The top is Segway RMP, and the bottom is AMPbot.

위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 새로 개발된 이론들은 실제로 설계된 2륜 이동로봇에 적용되고 테스트되어 결과를 관찰하게 된다.

이 때 고려해야 할 점이 2륜 이동로봇의 하드웨어 설계 방법이다. 고안한 이론이 아무리 뛰어나다 하더라도 이를 적용하여 테스트하는 하드웨어가 적절치 못하면 정확하고 의미있는 결과를 얻기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 2륜 이동로봇의 하드웨어를 설계할 때 고려해야 할 핵심 기준 요소들을 정하고 이를 토대로 합리적으로 로봇을 설계하는 방법에 대해 논한다. Ⅱ장에서 모터 선정, 배터리 선정, MCU 선정, 모터 배치, 그리고 로봇 외형에 대해 논하고 Ⅲ장에서 논문을 결론짓는다.

Ⅱ. 합리적인 하드웨어 구성 및 설계방법

2륜 이동로봇은 크게 5가지 하드웨어 구성으로 나누어 생각할 수 있다. ① 적절한 토크의 모터, ② 충분한 용량의 배터리, ③ 모터와 주변 장치를 무리없이 제어할 수 있는 MCU, ④ 모터 배치, ⑤ 외형 설계. 실험목적에 적합하게 로봇의 5가지 하드웨어 구성요소들을 설계하면 기본적인 2륜 이동로봇의 뼈대가 완성된다.

1. 모터

2륜 이동로봇을 비롯하여 모든 이동로봇의 구동부 역할을 하는 모터를 합리적으로 선정하는 과정은 5가지 하드웨어 설계과정 중에서 가장 중요하다. 모터를 제외한 4가지 하드웨어가 합리적으로 선정되었다 하더라도

이를 물리적으로 표현할 구동부 모터의 성능이 충분하지 못하면 로봇은 정지시나 이동시 균형을 유지하지 못한다. 로봇의 실험여건에 맞는 합리적인 모터 선정은 다음과 같은 과정으로 이루어진다.[3]

① 로봇의 전체 중량(*Weight*), 바퀴 지름(*Diameter*), 초당 바퀴회전수(*Frequency*), 가속시간(*Time*)을 정한다. 이 때 로봇의 전체 중량은 예상값을 사용하고 이후 모든 하드웨어들이 결정되면 다시 검증과정을 거친다. 초당 바퀴회전수는 1분당 원하는 이동거리를 기준으로 바퀴 지름을 고려하여 산출한다.

② 부하관성(또는 극관성) 모멘트를 계산한다.

$$J = \frac{Weight \times Diameter^2}{8} \tag{1}$$

여기서 부하관성 모멘트는 모터축 또는 감속기 축에 회전체인 바퀴가 직접 연결되어있을 때의 계산공식을 사용한다.

③ 등속토크를 계산한다. 등속토크란 로봇이 일정한 속도로 이동할 때 필요로 하는 토크를 말한다.

$$T_m = \frac{\mu \times Weight \times Diameter}{4} \tag{2}$$

여기서 μ는 마찰계수를 뜻한다. 정확한 마찰계수는 보통 알기 어렵고 상황에 따라 다양한 값을 가진다. 계산시 0.1 또는 0.09를 사용한다.

④ 가속토크를 계산한다. 가속토크란 가속시간(*Time*) 동안 로봇이 원하는 등속도를 달성하는데 요구되는 토크를 말한다.

$$T_a = \frac{J}{g} \times \frac{2\pi \times Frequency}{Time} + T_m \tag{3}$$

여기서 g는 중력가속도를 뜻한다.

⑤ 도출된 등속토크 T_m와 가속토크 T_a는 순수 이론적인 값으로 다양한 기계적 요소를 고려하지 않은 상태에서 얻어진 값이다. 그러므로 안전계수를 곱하여 필요로 하는 토크에 여유를 둔다.

$$\begin{aligned} T_a &= T_a \times 1.5 \\ T_m &= T_m \times 1.5 \end{aligned} \tag{4}$$

⑥ 최종적으로 계산된 토크 중 큰 값을 가지는 토크 T_a와 원하는 분당 바퀴회전수(RPM)를 만족하는 성능의 모터를 선택한다. 이 때 대부분의 모터는 높은 회전수와 낮은 토크 특성을 가지므로 감속기를 사용하여 도출된 토크와 원하는 분당 바퀴회전수를 맞춘다. 감속기를 사용하면 감속비에 비례하여 출력단의 회전수는 낮아지고 토크는 높아진다. 이 때 감속기는 기어의 조합으로 구성되므로 기어 간 마찰로 에너지 손실이 발생하게 된다. 이러한 에너지 손실은 곧 모터의 토크를 필요로 하므로 실제 감속기 출력단의 토크는 감속비를 곱한 토크의 50~60 %로 책정한다. 최종 토크가 T_a와 일치하는 토크 T를 가지는 모터를 선정한다.

$$T \times \text{감속비 역수} \times (50 \sim 60\%) \tag{5}$$
$$= \text{모터에서 감속기를 거친 최종 토크} = T_a$$

$$\text{모터 RPM} \times \text{감속비} = \text{감속기 회전축 RPM} \tag{6}$$

모터가 선정되면 모터 또는 감속기의 회전축이 앞에서 예상한 로봇의 전체 중량(*Weight*)을 물리적으로 견딜 수 있는지 여부를 확인한다. 견딜 수 있는 경우 선택한 모터로 2륜 이동로봇을 설계하면 된다. 견디지 못할 경우 모터 배치시 추가적으로 동력부 구성요소와 기어가 필요하게 된다. 동력부에 필요한 부품들의 무게를 로봇 중량에 포함하여 새로 예상값을 설정하고 감속기 외에 기어에 대한 감속비도 함께 고려하여 최종 토크를 다시 계산한다. 여기에 관한 내용은 4절 모터배치에서 다시 언급하므로 연관지어 모터를 선정하도록 한다.

2. 배터리

모터가 선정되면 모터, MCU 및 회로에 전원을 공급할 배터리를 선정한다. 적정 전압으로 일정하게 충분한 전류를 공급해주지 못하면 모터와 회로가 정상적으로 기능을 하지 못하므로 배터리 선정은 중요하다. 이 때 모터용 배터리와 MCU 및 회로용 배터리를 따로 선정해야 한다. 즉 이들 2 부류의 배터리를 물리적으로 분리한 상태에서 전원으로 활용해야 한다. 이렇게 하는 이유는 모터의 작동방식에 원인이 있다.

모터는 기본적으로 MCU와 주변회로에 비해 큰 용량의 전류를 소모한다. 그러나 이러한 전류소모량은 일정하지 않고 모터의 회전상태에 따라 매번 달라진다. 모터가 정지 상태에서 회전을 시작하게 되면 대량의 전류를 배터리로부터 사용하게 되고 반대로 회전 중 감속하게 되면 배터리로부터 끌어오던 전류를 급격히 줄이게 된다. 이 때 모터용 배터리를 MCU와 회로가 함께 사용할 경우 모터가 정지 상태에서 회전 시 필요로 하는 대

량의 전류를 순간적으로 MCU와 회로에 공급되는 전류로부터 보충하게 된다. 이런 경우 회로의 동작이 멈추거나 MCU가 초기화 되는 현상이 발생한다. 모터가 회전 중 감속하게 되면 모터로 들어가던 대량의 전류가 모터로 들어가지 못하고 남게 된다. 이 때 남는 전류가 MCU와 회로의 전선을 타고 유입될 수 있다. 이럴 경우 MCU와 주변회로에 과전류가 흘러 부품들이 파손된다.

이러한 이유로 모터용 배터리와 MCU 및 회로용 배터리는 필히 물리적으로 분리하여 구성해야 한다.

가. 모터용 배터리 선정

선정된 모터로부터 모터가 요구하는 전압과 정격 부하시 소모하는 전류량을 알 수 있다. 이를 기준으로 배터리를 선정한다. 배터리의 전압은 모터가 요구하는 전압과 동일한 값으로 설정한다. 전류값은 2개의 모터에서 각각 소모하는 전류량을 추산하여 총 필요로 하는 전류값을 결정한다. 이 때 로봇이 정지해있는 상태에서 처음 출발할 때와 가속할 때 필요로 하는 전류는 모터 정격 부하시 필요로 하는 전류의 수배에서 십 수배에 달한다. 그러므로 모터의 경우 정격 전류값의 5~10배가 되는 전류값을 추산하도록 한다. 정해진 전압과 최종적으로 추산된 전류를 충분히 공급해 줄 수 있는 배터리를 선정하면 로봇이 최초 기동시 원활하게 출발 후 가속하여 등속운동을 할 수 있다.

나. MCU 및 회로용 배터리 선정

대부분의 MCU와 회로 소자들은 $5V$ 내외의 전압을 사용한다. 그러므로 이들 소자용 배터리는 $8\sim9V$ 전압값으로 설정한다. 전압값 결정 후 전류값을 도출한다. MCU와 회로에서 소모하는 전류량를 추산하여 총 필요로 하는 전류값을 예상한다. 설정한 전압값과 추산한 전류량를 만족하는 배터리를 MCU와 회로용 배터리로 선정한다.

다. 방전율 C를 고려한 배터리 선정

실제 배터리 중에는 모터에서 필요로 하는 추산한 수십A의 전류를 만족하는 경우가 없다. 보통 고용량 배터리의 전류는 $5000mAh$ 전후가 대부분이다. mAh는 배터리 전류용량의 단위로 mA로 배터리 전류를 사용할 경우 1시간까지 전류를 일정하게 공급할 수 있다는 뜻이다. $5A$로는 수십A를 얻을 수 없다. 이 때 배터리의 방전율 C를 고려하게 된다. mA에 방전율 C를 곱한 값이 배터리가 모터에 제공할 수 있는 최대 전류가 된다. 그러므로 배터리 선정시 방전율 C를 고려하여 추산한 전류량을 맞추도록 한다. 대신 전류 공급시간은 C에 비례하여 감소하게 된다.

3. MCU

구현하고자 하는 로봇의 기능과 부가적인 장치들을 무리없이 구동하기 위해서는 그에 적합한 MCU를 선정해야 한다. 즉 올바른 MCU를 선정하기 위해서는 개발하고자 하는 로봇의 성능과 기능을 설계자가 잘 알고 있어야 한다. 그래야 해당하는 기능을 구현하기위해 요구되는 MCU의 특성이 무엇인지 알고 이로부터 선정기준을 세울 수 있다.[4] 요구되는 MCU의 특성이 정해지면 그림 3의 순서도를 따라 올바른 MCU를 선정할 수 있다.[5]

순서도에서 언급한 MCU의 충분한 명령어 처리속도는 MCU의 클럭과 MIPS, 데이터버스의 크기로 가늠할 수 있다. MIPS는 한 클럭 당 연산처리 개수를 나타내는 단위다. MIPS가 높으면서 클럭수가 높으면 더 빠른 연산성능을 보인다. 데이터버스의 크기는 데이터를 한

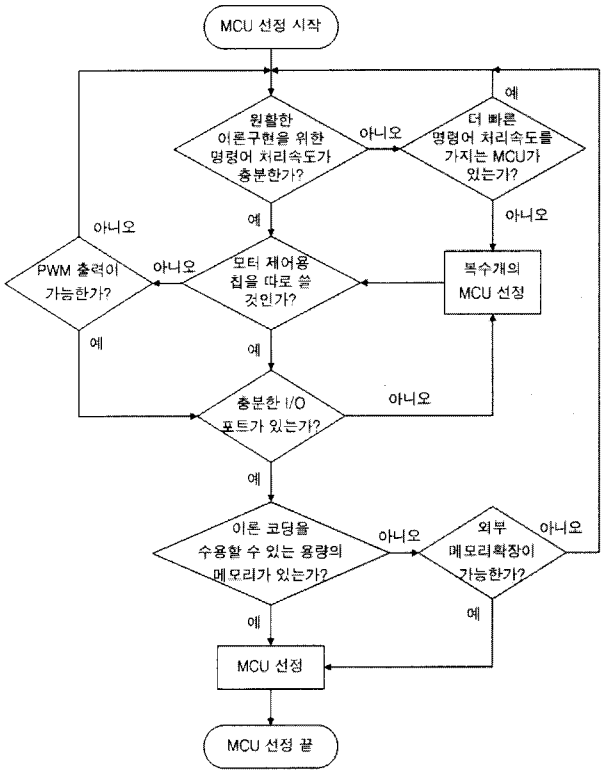


그림 3. MCU 선정 순서도
Fig. 3. Flow chart to select the fittest MCU.

표 1. MCU별 명령어 처리속도 비교 예
Table 1. Comparison of computational potential for some MCUs.

구 분	AVR ATMEGA128	ARM7 AT91SAM7S256
클럭	16 Mhz	최대 55 Mhz
MIPS	1 MIPS/Clock	0.9 MIPS/Clock
Data Bus	8 비트	32 비트
처리속도	16M × 1 × 8 = 128M	55M × 0.9 × 32 = 1584M

번에 읽고 쓸 수 있는 크기를 나타내는 것으로 MCU의 성능과 직결된다. 같은 클럭이라도 16비트의 데이터버스를 갖는 MCU가 한 번에 읽고 처리하는 데이터를 8비트의 데이터버스를 갖는 MCU는 두 번에 걸쳐 읽고 처리하게 된다.[4] 클럭과 MIPS, 데이터버스에 따른 MCU의 명령어 처리속도 비교 예를 표 1에 나타냈다.

4. 모터배치

MCU에서 연산을 거쳐 최종적으로 결과를 반영하고 외부로 나타내는 곳이 모터와 바퀴다. 이 때 모터가 몸체에 수평으로 고정되어 있지 않으면 결과적으로 2개의 바퀴는 서로 평행하지 않게 되고 지면에 수직이 아니게 된다. 이러한 상태에서는 연산결과를 정밀하게 로봇에 반영할 수 없고 정확한 실험결과를얻을 수 없다. 그림 4에 잘못된 모터배치와 그에 따른바퀴 상태의 예

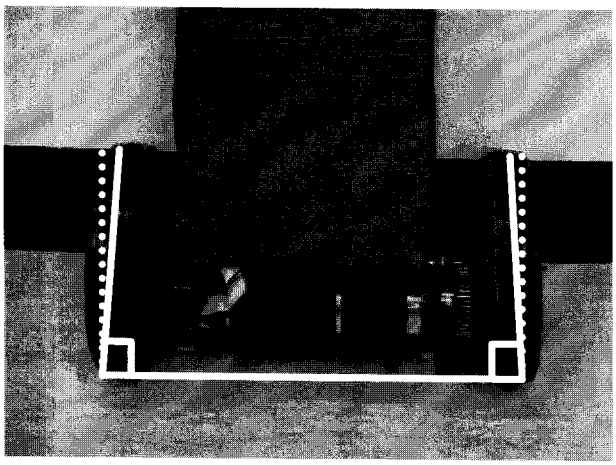


그림 4. 바퀴가 지면과 수직하지 않으므로 MCU의 정밀한 제어를 로봇에 정확히 반영하기 어렵다.
Fig. 4. Wheels in a robot are out of perpendicular to the ground. This makes a robot hard to use precise control signals exactly.

를 나타냈다.[6]

모터를 몸체에 수평하게 고정하고 바퀴가 지면에 수직이 되도록 하는 방법에는 기구학적 관점에서 여러 가지가 있다. 이 때 로봇 전체 중량과 감속기의 회전축이 견딜 수 있는 최고 중량을 비교해서 모터를 배치해야 한다.

가. 회전축이 로봇 전체 중량을 견딜 수 있는 경우

이러한 경우 회전축에 바퀴를 직접 연결하여 모터를 배치하면 된다. 그림 5에 하나의 가능한 모터배치 구성 예를 나타냈다.

제시한 그림에서 로봇의 몸체에 중력이 작용하여 바퀴에 힘이 가해지게 된다. 이 때 모터와 몸체를 서로 평행하게 접하도록 배치하고 이들을 모터 지지대로 수직으로 연결한다. 그러면 바퀴로부터 작용하는 힘이 서로 접해있는 모터와 몸체, 그리고 모터 지지대의 수직 구조에 의해 상쇄된다. 결과적으로 모터는 몸체와 평행상태를 유지하게 되고 바퀴는 지면과 수직하게 된다.

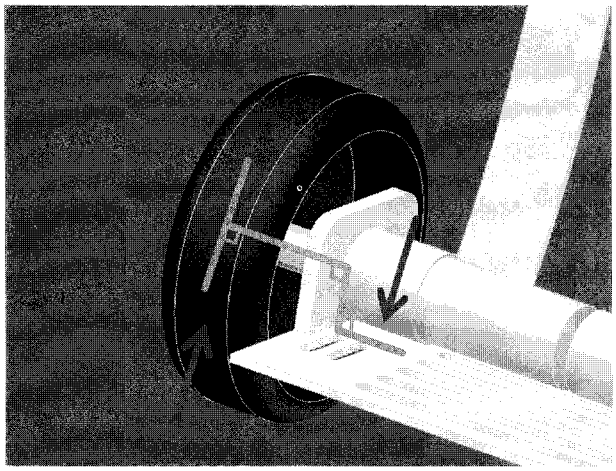


그림 5. 회전축이 로봇 전체 중량을 견딜 수 있는 경우 가능한 모터배치 구성 예
Fig. 5. Example of motor setting in case of rotor shaft can hold whole robot body mass.

나. 회전축이 로봇 전체 중량을 견딜 수 없는 경우

회전축이 로봇 전체 중량을 견딜 수 없는 경우 바퀴를 축에 직접 연결하면 축이 휘거나 부러지게 된다. 그러므로 감속기의 회전축과 바퀴의 회전축을 따로 분리하여 동력부를 구성하고 그에 맞춰 모터를 배치해야 한다. 그림 6에 가능한 모터배치 구성 예를 나타냈다.

이 때 바퀴 회전축은 로봇의 전체 중량에도 휘지 않고

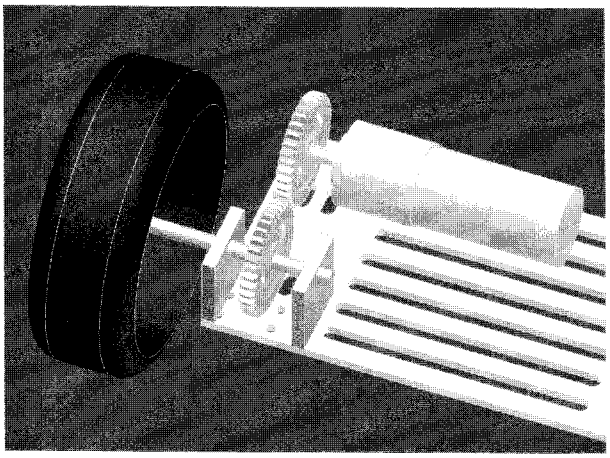


그림 6. 회전축이 로봇 전체 중량을 견딜 수 없는 경우 가능한 모터배치 구성 예

Fig. 6. Example of motor setting in case of rotor shaft can not hold whole robot body mass.

견딜 수 있는 두께와 강도의 재질로 선택한다. 회전축 지지대에는 베어링을 삽입하여 회전 마찰력을 최소화 한다. 모터는 그림 5에서와 동일하게 모터 지지대를 이용하여 몸체와 평행하도록 구성한다. 그림 6에서는 이해를 돕기 위해 모터 지지대를 생략했다.

그림 6과 같이 동력부를 구성하고 모터를 배치할 때 한 가지 주의할 점은 모터 선정시 사용한 변수들의 값이 달라진다는 점이다. 추가적으로 하드웨어들이 사용되었으므로 로봇의 전체 중량(*Weight*)을 다시 고려해야 한다. 그리고 모터 감속기 외에 동력부에도 기어가 사용되었으므로 이들의 기어비를 최종 모터 토크값 산출시 함께 고려해야 한다.

5. 외형설계

기존의 이동로봇과는 달리 2륜 이동로봇은 실험 중 몸체의 쓰러짐 현상이 필연적으로 동반된다. 이 때 몸체가 쓰러져 바닥과 충돌시 가해지는 충격은 로봇 몸체와 여러 민감한 하드웨어에 손상을 줄 수 있다. 또 정밀한 회로에 충격이 가해져 기능을 상실하게 될 수 있다. 이러한 쓰러짐에 대한 대비로 이동로봇의 외형을 타원형으로 설계하면 바닥과 충돌시 충격을 완화할 수 있고 하드웨어와 회로를 충격 손상으로부터 최대한 보호할 수 있다. 외형설계에 대한 예를 그림 7에 나타냈다. 이러한 외형은 다양한 3D CAD 프로그램으로 설계 가능하다.

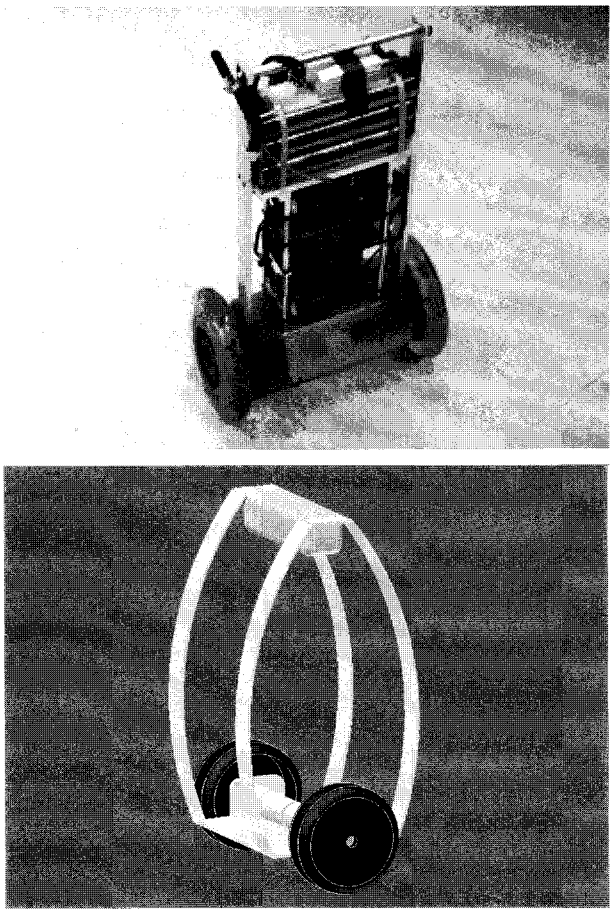


그림 7. 위쪽 2륜 이동로봇의 경우 바닥에 쓰러지면 하드웨어와 회로 전체가 심각한 손상을 받을 수 있다.[7] 반면 아래쪽 로봇은 쓰러져도 충격을 최대한 완화할 수 있다

Fig. 7. The top 2-wheeled mobile robot can have damage on its body(hardware) and control circuits when it collapses.[7] On the other hand, the bottom one can alleviate these damages in case of collapses.

Ⅲ. 결 론

2륜 이동로봇은 기존의 이동로봇에 비해 하드웨어 구성과 유지, 보수 측면에서 유리한 조건이 많다. 그러나 이러한 유리한 조건들은 2륜 이동로봇이 스스로 안정적으로 균형을 유지할 수 있을 때 얻어진다. 이에 최근 들어 정지시와 주행시 로봇이 안정적으로 균형을 유지하도록 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 다양한 이론들이 제안되고 실제로 실험되고 있는 반면 이론을 적용할 테스트베드에 대한 정교한 작업은 거의 이루어지지 않고 있다. 제안한 이론이 뛰어나더라도 이를 적용하는 하드웨어가 적절치 못하면 정확하고 의미있는

실험결과를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 2륜 이동로봇의 하드웨어를 실험목적에 적합하게 설계할 수 있는 5가지 기준에 대해 논하였다. 로봇 성능의 핵심이 되는 모터, 모터와 MCU 및 주변 회로에 충분한 전압과 전류를 공급할 수 있는 배터리, 구현할 이론과 주변장치들을 무리 없이 구동시킬 수 있는 능력의 MCU, 모터 배치시 고려해야 할 요소들, 그리고 마지막으로 소홀하기 쉬운 로봇 외형 설계에 대해 논하고 기준을 제시하였다. 이러한 5가지 기준을 고려하여 테스트베드를 설계하면 정밀하고 의미있는 실험결과를 얻는데 최고의 환경을 제공할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Hoa G. Nguyen, John Morrell, Katherine Mullens, Aaron Burmeister, Susan Miles, Nathan Farrington, Kari Thomas, and Douglas W. Gagee, "Segway Robotic Mobility Platform", SPIE Proc. 5609: Mobile Robots XVII, Philadelphia, PA, October 27-28, 2004.

[2] Dole, U., Beatty, S., Jamshidi, M., "Modified Hardware Design for Cooperative Mobile Robots", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4, pp. 3358-3363, October 5-8 2003.

[3] Maxon Catalogue, 1999

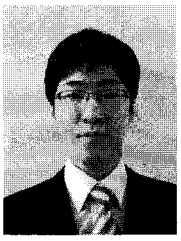
[4] 이재완, "내게 꼭 맞는 임베디드 프로세서 고르기", 마이크로소프트웨어, 2003. 5.

[5] 김종환, "로봇 축구 시스템", 2000.

[6] 김광일, 김봉석, 김영환, 박기남, 이승진, 정희욱, 진봉승, "DSP를 이용한 Two-Wheel Balancing System의 제작 및 제어", 창원대학교 제어계측공학과 학사학위논문, 2007.

[7] http://up-e.tistory.com/375

저 자 소 개



조 정 우(정회원)

2008년 고려대학교 전기전자전파공학과 학사 졸업.

2008년~현재 고려대학교 전기전자전파공학과 석사

<주관심분야 : 지능시스템, 뇌공학, 소프트 컴퓨팅>

박 귀 태(정회원)

1975년 고려대학교 전기공학과 학사 졸업.

1977년 고려대학교 전기공학과 자동제어전공 석사 졸업.

1981년 고려대학교 전기공학과 자동제어전공 박사 졸업.

1981년~현재 고려대학교 전기전자전파 공학과 정교수

<주관심분야 : 자동제어, 로보틱스, 소프트 컴퓨팅>