

역진자 기구에 기반한 직립주행 가능 이동로봇용 구동 플랫폼 개발

Development of a Moving Platform for a Upright Running Mobile Robot Based on an Inverted Pendulum Mechanism

이세한* · 이상용**

Se-Han Lee and Sang-Yong Rhee[†]

*경남대학교 기계공학부

**경남대학교 컴퓨터공학과

요 약

본 논문에서는 역진자 기구와 기립 암을 이용하여 직립주행이 가능한 이동로봇용 구동 플랫폼을 개발한다. 기존에 주류를 이루고 있는 이동로봇은 4륜 혹은 3륜으로 구동되고 있으므로 그 몸체는 정역학적으로 용이하게 안정성이 확보되는 특징을 갖고 있다. 기존의 이동로봇의 형태는 평면적으로 넓적한 형태의 정사각형 혹은 직사각형 형태를 갖고 있으므로 몸체의 조향을 위해서 독립구동륜형 혹은 조향형 차륜을 장치하고 있다. 이동로봇은 협소한 지형에서 90도로 굽은 통로를 주행할 때, 전후진을 반복하는 등 특별한 조향기법을 필요로 하거나 몸체의 평면적 때문에 물리적으로 조향이 불가능한 경우에 처하게 된다. 이 때, 이동로봇은 평면적이 작은 방향 즉, 직립된 상태로 몸체의 형상을 변형시켜 해당 지형을 주행함으로써 주행곤란 문제를 회피할 수 있다. 본 연구에서는 이동로봇의 몸체를 직립시킬 수 있는 기립 암과 역진자 기구가 결합된 구동 플랫폼을 제안한다.

키워드 : 직립주행, 기립 암, 차륜형 역진자

Abstract

In this research a moving platform for a mobile robot which can run with upright posture is proposed. It is able to stand with standing arms and run uprightly based on an inverted pendulum mechanism. Conventional mobile robots generally may equip 4 wheels or 3 wheels including a caster and have good statistic stability. They need a steering mechanism to choose which way to go since they have a square or rectangular configuration with multiple wheels. When a mobile robot meets a sharply perpendicular and narrow crossroad, it may need a special steering scheme such as going forward and backward repeatedly or it sometimes cannot even pass through the crossroad because of its size. The proposed moving platform for a mobile robot changes to a upright posture which has a small planar area and is able to pass through the crossroad. We propose a moving platform for a mobile robot with a inverted pendulum mechanism and standing arms which can make the mobile robot upright.

Key Words : Upright running, Standing arm, Wheeled inverted pendulum.

1. 서 론

본 연구에서는 차륜형 역진자 기구와 기립 암을 이용하여 직립주행이 가능한 이동로봇용 구동 플랫폼이 개발되었다. 차륜형 역진자 기구는 능동적 평형제어 기능을 갖고 있으므로 외형적으로 평면적을 줄이면서 높이를 증가시킬 수 있는 가능성을 갖고 있다.

차륜형 역진자 기구는 선천적으로 불안정한 특성을 갖고 있다. 뿐만 아니라 역진자 기구는 중력의 영향으로 인하여 비선형성을 포함하고 있으므로 차륜형 역진자 기구는 시스템의 제어대상으로 널리 사용되고 있다 [1,2].

역진자 기구가 선천적 불안정 특성에도 불구하고 이동 플랫폼으로 응용된 다양한 사례[3,4,5]들이 존재한다. 이러한 사례들은 역진자 기구가 이동로봇의 이동 플랫폼으로 응용될 수 있는 가능성을 보여주는 것이다.

역진자 기구가 이동 플랫폼[6,7]으로 시도되고 있는 이유의 한 가지로 작은 평면적을 들 수 있다. 차륜형 역진자 기구의 능동적인 평형유지 기능을 이용하여 안정성을 개선하면서 기구부의 높이를 비교적 높게 하고

접수일자: 2012년 5월 1일

심사(수정)일자: 2012년 10월 7일

게재확정일자: 2012년 10월 8일

† 교신 저자

본 연구는 2011년 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어 졌음.

평면적을 줄여서 협소한 지역을 원활하게 주행할 수 있는 주행 원활성이 높은 이동 플랫폼 구성은 가능하게 된다.

차륜형 역진자 기구를 이동 플랫폼으로 채용한 이동 로봇은 몸체의 평형유지를 위해서 추가의 제어비용을 필요로 하게 되며, 이 평형유지 기능은 과도한 외란에 대해서는 제대로 된 성능을 발휘할 수 없게 된다.

한편, 일반적인 이동로봇은 주로 보조 캐스터와 구동 차륜 2개의 형태, 4개 차륜의 형태 혹은 필요에 따라서 그 이상의 차륜을 장착한 형태로 구성되어 있으므로 정역학적으로 매우 안정된 지지 형태[8]를 갖는다. 뿐만 아니라 일반적인 이동로봇은 넓은 평면적을 갖고 있어서 좀 더 안정된 정역학적인 지지특성을 갖게 된다. 이러한 이유로 기존의 이동로봇은 주행 안정성이 높다고 할 수 있다.

이동로봇의 중요한 성능지표의 하나로 원활한 주행 특성을 들 수 있다. 특히, 협소한 지역에서의 조향성능도 그에 포함될 수 있다. 이동로봇의 조향성능은 이동로봇이 개활지를 주행하는 경우에는 거의 원활하게 발휘되지만, 이동로봇이 몸체 폭 정도로 제한된 주행로에서 직각방향으로 진입할 때에는 이동로봇의 평면적 때문에 문제가 발생할 소지가 있다. 이 경우 다양한 주행 알고리즘을 통해서 이동로봇은 지정된 주행로로 이동할 수 있겠지만, 이동로봇의 평면적 크기 때문에 물리적으로 조향자체가 불가능한 경우가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 차륜형 역진자 기구를 이동 플랫폼으로 채택한 이동로봇의 주행 원활성과 기존의 이동로봇의 주행 안정성 장점을 동시에 갖는 이동로봇용 구동 플랫폼을 개발하고자 한다. 본 연구의 아이디어는 협소한 주행로에서는 기존 형태의 이동로봇을 직립시켜서 로봇몸체를 주행 원활성이 높고 평면적이 작은 형태가 되게 하고 개활지에서는 주행 안정성이 높은 원래의 상태로 복귀시키는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 이동로봇의 몸체를 기립 및 복귀시킬 수 있는 기립 압과 동작 알고리즘이 개발되었다.

본 연구의 내용으로 2장에서는 다양한 주행로의 상태에 따른 각 형태의 이동로봇 조향성능들이 비교, 제시되고, 3장에서는 본 연구의 핵심인 기립 압 작동원리와 설계과정이 고찰된다. 4장에서는 기립 압을 부차한 상태를 전제로 이동로봇의 기립과정과 복귀과정이 구체적으로 서술되며, 마지막으로 5장에는 본 연구의 결론이 제시되었다.

2. 주행로 상태와 조향성능

이동로봇은 소정의 목적을 갖고 미리 알려진 혹은 미지의 지역을 주행하게 된다. 이동로봇이 장애물이 전혀 없는 개활지를 주행하는 경우 이동로봇은 목적지를 향하여 최단거리를 따라서 이동할 수 있다. 그렇지만 이동로봇이 제한된 주행로를 따라서 이동할 때에는 다양한 문제들이 발생하게 된다. 그림1은 매우 협소한 주행로의 직각방향 교차로에 대한, 평면적인 넓은 이동로봇과 평면적이 좁은 로봇에 대한 조향사례를 나타내고 있다.

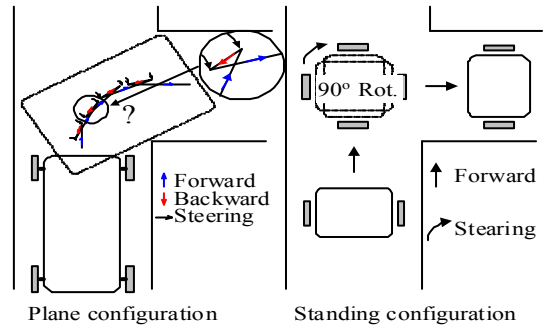


그림1. 평면형 및 직립형 이동로봇의 조향
Fig. 1. Steering of a plane and standing configuration

위 그림1의 좌측사례에 해당하는 넓은 평면적과 4륜 지지형태를 갖는 이동로봇은 경우 정적인 안정성이 보장되는 장점이 있지만 그림과 같이 매우 협소한 주행로에서 직각방향으로 형성된 통로로 진입할 때, 이동로봇은 수많은 전진(forward)과 후진(backward) 그리고 조향(steering) 동작을 반복하여야 한다. 이동로봇의 전진이 극단적으로 길어지는 경우 직각방향의 통로로 진입이 불가능할 수 있는 경우가 발생하기도 한다. 반면에 위 그림1의 우측사례에 해당하는 매우 좁은 평면적과 2륜 지지형태를 갖는 이동로봇은 단순히 전진, 조향, 전진과 같이 매우 단순한 과정을 통해서 직각방향으로 진입할 수 있다.

2.1 개활지에 대한 조향성능

이동로봇이 장애물이 존재하지 않는 개활지에서 주행하는 경우 이동로봇은 출발지점에서 지정된 목적지점까지 직선형태의 최적 주행로를 선택할 수 있다. 이동로봇의 개활지에서의 주행은 가장 이상적인 경우에 해당한다. 이 때, 이동로봇의 주행성능 및 조향성능은 이동로봇 자체의 기구학 및 동역학적 특성에 완전히 의존하게 된다.

2.2 일반 주행로에 대한 조향성능

장애물 및 제한된 통로가 존재하는 일반적인 주행로에서 대부분의 이동로봇들은 주행계획 탐색 및 장애물 회피 등 일반적인 이동로봇관련 기술들을 구사하게 된다. 이 때, 주행 알고리즘의 우열에 따라서 주행 및 조향성능의 차이가 발생하지만 주행 혹은 조향자체가 불가능한 경우는 발생하지 않게 된다.

2.3 극단적으로 좁은 주행로에 대한 조향성능

주행로의 너비가 이동로봇이 간신히 통과할 정도로 좁은 경우, 이 때, 이동로봇이 할 수 있는 동작은 단순히 전진과 후진이 대부분이다. 그림1의 좌측의 평면형(plane configuration)과 같이 길이가 긴 이동로봇은 조향자체가 거의 불가능한 상태에 도달하는 반면, 우측의 직립형(standing configuration)과 같이 종횡비가 1에 근접하는 형태를 갖는 이동로봇의 경우는 협소한 주행로에서 회전동작이 가능해진다.

조향성능이 우수한 그림1의 우측의 직립형은 평면적이 작아서 실장공간을 증가시키기 위해서는 높이를 증가시킬 필요가 있다. 이동로봇의 높이가 증가될 경우 몸체의 무게중심이 상승하고 높아진 무게중심은 이동로

봇의 주행 안정성을 열화시키는 역할을 하게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 능동적 평형제어 기능을 갖는 역진자 기구의 형태를 갖는 이동로봇이 채택되었다.

역진자 기구는 선천적으로 불안정한 구조 때문에 과도한 외란에 대해서는 취약한 단점을 갖고 있다. 그러므로 협소한 지역에서 신속한 조향성이 요구될 때에만 이동로봇은 역진자 기구 형태로 전환되고 일반적인 주행면 조건에서는 4륜 구동형태를 가져야 한다. 이동로봇을 필요에 따라서 2륜 구동의 역진자 기구형태와 4륜 구동형태로 전환할 수 있는 특별한 기구가 요구된다. 그림2는 제작 계획 중인 직립 주행형 이동로봇의 개념도를 나타내고 있다.

3. 기립 압 동작원리 및 설계과정

평면 4륜 구동형태와 2륜 구동 역진자 기구의 차이점은 단순히 평면형 혹은 직립형 여부에 있다. 이 두 가지 형태를 전환할 수 있는 장치의 후보로 기립 기구를 들 수 있다. 본 연구에서는 구체적인 기립 기구로 기립 압을 제안하고자 한다.

3.1 기립 기구

평면적인 넓은 수평형태의 이동로봇은 평면적이 좁은 수직형태의 이동로봇으로 물체를 전환시키기 위해서 물체를 직립시킬 수 있는 기구를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 목적을 달성할 수 있는 기립 기구를 기립 압으로 명명하도록 한다.

기립 압은 이동로봇의 물체를 기립시킬 수 있는 기능 및 초기상태로 복귀시킬 수 있는 기능을 가져야 한다. 기립 압은 재사용 가능해야 하며, 이동로봇이 통상적으로 주행할 때와 주어진 고유의 동작을 수행할 때, 방향이 되지 않아야 한다. 이동로봇의 물체를 기립시킬 수 있는 기구의 후보로 다음의 그림3과 같이 회전형 구동장치와 직선형 구동장치를 들 수 있다.

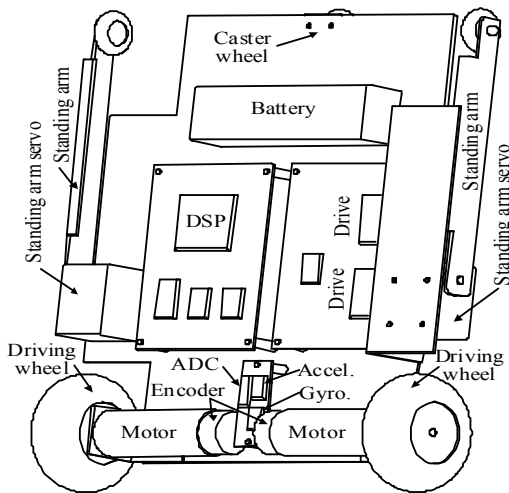


그림 2. 직립 주행형 이동로봇의 예상도
Fig. 2. A prospective mobile robot which can run uprightly

회전형 구동장치의 경우 이동로봇이 기립하는데 필요한 기립 압의 각도는 구동장치의 각도와 동일하고 기립 압의 발생력 F_s 와 구동장치의 토크 τ_a 는 선형관계에 있으므로 기립 압 구동장치의 제어가 용이한 특징이 있는 반면에 직선형 구동장치의 경우 필요한 기립 압의 각도와 구동장치의 직선변위와의 관계뿐만 아니라 기립 압의 발생력 F_s 와 구동장치의 추력 F_a 사이에도 복잡한 비선형 관계가 있으므로 기립 압 구동장치의 제어가 복잡해지는 특징이 있다. 본 연구에서 구형 및 제어의 편리성을 위하여 회전형 구동장치가 기립 압의 구동장치로 채택되었다.

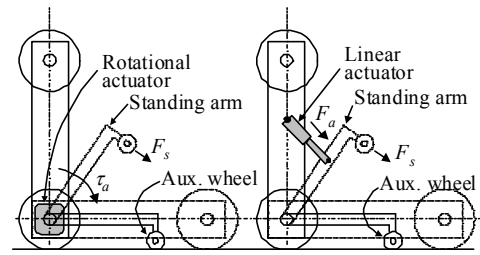


그림 3. 회전 및 직선형 구동장치를 이용한 직립 기구
Fig. 3. Standing arm mechanism with revolute and linear actuator

3.2 기립 기구의 정역학

기립 기구는 이동로봇의 중량을 충분히 지지할 수 있으며, 신속히 물체를 기립시킬 수 있어야 한다. 기립 압 구동장치로 회전형이 채택되었다. 기립 압 구동장치 설계에 있어서 구체적인 파라미터로 기립 압의 길이, 기립 압의 회전축 위치와 회전형 구동장치의 최대토크를 들 수 있다.

그림3과 그림4에 의하면 기립 압의 회전축과 차륜 구동축이 일치하면 자연스러운 동작이 예상되지만, 그림2에 의하면 구조적으로 차륜 구동장치와 자세센서가 해당위치에 존재하므로 기립 압 구동장치가 추가로 설치될 수 있는 공간이 부족하게 된다. 그러므로 기립 압 구동장치는 다음의 그림4와 같이 차륜 구동축의 상부로 d 만큼 이동 배치되어야 한다. 기립 압의 회전축이 차륜 구동축과 나란할 경우 기립 압 구동장치는 $0 \sim 90^\circ$ 범위에서 회전하는 반면에 그림4와 같이 기립 압 회전축이 차륜 구동축에서 d 만큼 단차를 갖는 경우 기립 압 구동장치는 90° 이상 회전할 수 있어야 한다.

편의상 그림4에서 이동로봇 물체의 초기상태는 수평에 해당한다고 가정한다. 즉, 초기 물체각도는 $\theta_i = 0^\circ$ 로 설정된다.

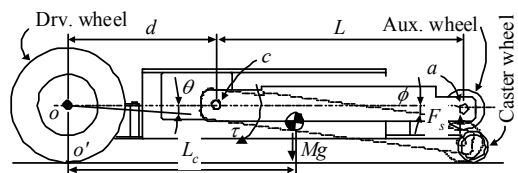


그림 4. 직립 주행형 이동로봇의 초기자세
Fig. 4. Initial posture of the upright-running mobile robot

그림5는 그림4를 기구학적인 4절 기구 형태로 간단히 표시하고 있다. 이 때, d 는 구동차륜의 회전중심 o 와 기립 암 회전중심 c 까지의 거리를, L 은 c 와 보조차륜 회전중심 a 까지의 거리를, L_c 는 o 와 이동로봇의 무게중심까지 거리를, R 과 r 은 구동 및 보조차륜의 반지름을 나타낸다. 이동로봇 몸체와 주행면 사이의 각도는 θ 이며, 이동로봇 몸체와 기립 암 사이의 각도는 ϕ 로 설정되어 있다. τ 는 기립 암 구동장치의 구동토크를, M 은 기립 암을 포함한 이동로봇의 질량을, g 는 중력가속도를, F_s 는 기립 암 발생력을 나타내고 있다.

기립 암 기구의 동작은 4절 기구의 일종인 편심 슬라이더-크랭크 기구학을 이용하면 다음과 같이 구체적으로 표현될 수 있다. 이 때, 기립 암이 일정각도 ϕ_i 만큼 회전한 상태에서 기립 암 기구는 4절 기구와 등가상태가 됨에 유의한다.

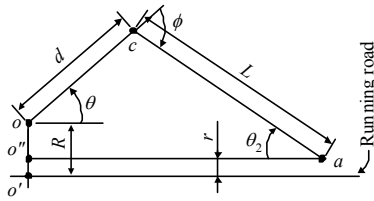


그림 5. 편심 슬라이더-크랭크 기구
Fig. 5. Offset slider-crank mechanism

이동로봇의 기립 과정에서 차륜은 회전하면서 회전중심 o 가 전진하게 되는데, 이 때, 보조차륜(aux. wheel)은 아이들 상태가 되어서 그 중심 a 도 o 의 전진분량만큼 전진하게 된다. 기립 암 기구는 편심 슬라이더-크랭크 기구 $ocao''$ 로 등가 된다[9].

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left[\frac{(R-r) + d \sin \theta}{L} \right] \quad (1)$$

$$\phi = \theta + \theta_2 \quad (2)$$

계속해서 이동로봇이 기립하기 위해서 필요한 기립 암 구동장치의 구동토크는 다음과 같이 구해진다. 다음의 그림6은 이동로봇의 몸체와 기립 암 기구의 자유물체도를 나타내고 있다. 그림6에서 물체1 (object 1)의 자유물체도에 대하여 다음과 같이 힘 및 모멘트 평형방정식 구성되었다.

$$N_o - N_c - Mg = 0 \quad (3)$$

$$d \cos \theta N_c + \tau + L_c \cos \theta Mg = 0 \quad (4)$$

계속해서 물체2 (object 2)의 자유물체도에 대하여 다음과 같이 힘 및 모멘트 평형방정식이 구성되었다.

$$N_a + N_c = 0 \quad (5)$$

$$L \cos(\theta - \phi) N_c - \tau = 0 \quad (6)$$

이 때, N_o 와 N_c 는 구동차륜과 보조차륜에 작용하는 주행면의 반력을, M 은 이동로봇 전체의 질량을, g 는 중력가속도를, d 와 L_c 는 구동차륜 중심에서 기립

암 회전중심과 몸체의 질량중심까지의 거리를, L 과 τ 는 기립 암의 길이와 구동토크를 나타낸다.

식 (3)~(6)로 주어진 연립방정식의 근들 중에서 기립 암 구동장치의 구동토크 τ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{LL_c Mg \cos \theta \cos(\theta - \phi)}{d \cos \theta + L \cos(\theta - \phi)} \quad (7)$$

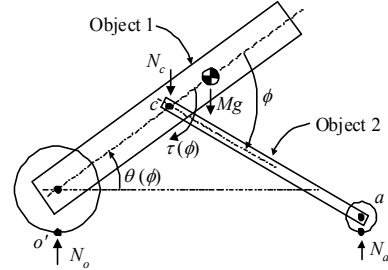


그림 6. 기립 암 기구의 자유물체도
Fig. 6. Free body diagram of the standing arm mechanism

다음의 그림7은 이동로봇 몸체의 기울기 θ 에 대한 기립 암의 회전각도 ϕ 를 나타내고 있다. 이 때, 표 1에 제시된 기립 암 기구 파라미터가 사용되었다. 몸체의 기울기가 초기상태 $\theta_i = 0^\circ$ 에서 최종상태인 직립한 상태 $\theta_f = 90^\circ$ 까지에 해당하는 기립 암 회전각도는 $\phi_i = 8.9^\circ$ 에서 $\phi_f = 139.1^\circ$ 에 달하는 것을 알 수 있다. 그 θ 와 ϕ 각도들 사이에 약 1.5배 관계가 있는 것은 그 회전중심들이 일치하지 않고 그 회전중심들 사이에 d 만큼 단차가 존재하기 때문이다. 이 단차는 나중에 기립 암 구동장치 토크를 저감시키는 역할을 하게 된다.

계속해서 다음의 그림8은 이동로봇이 초기상태 $\theta_i = 0^\circ$ 로부터 직립상태 $\theta_f = 90^\circ$ 까지 발생된 기립 암 구동장치의 토크분포를 나타내고 있다. 이 때, 표 1에 제시된 기립 암 기구 파라미터가 사용되었다. 구체적으로 기립 암의 회전중심과 구동차륜의 회전중심 사이에 단차가 존재하는 ($d = 97\text{mm}$) 경우와, 존재하지 않는 ($d = 0\text{mm}$) 경우에 대하여 각각 해당 토크분포를 나타내고 있다. 단차가 존재하지 않는 경우는 존재하는 경우보다 약 1.6배 큰 토크를 필요로 함을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해서 적절한 단차를 도입함으로써 기립 암 구동장치의 발생토크를 저감시키는 효과가 얻어질 수 있다.

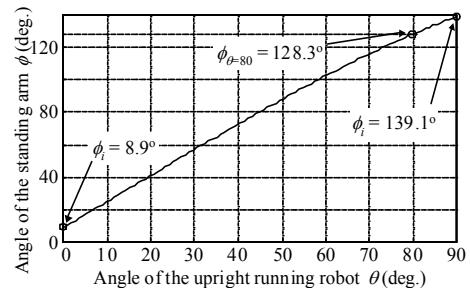


그림 7. 몸체 기립각도에 대한 기립 암의 각도 분포
Fig. 7. Standing arm angle with respect to the angle of the upright running robot

기립 압 구동장치 구현을 간단히 하기 위해서 기성품 서보가 사용될 수 있는데, 국내 R社에서 제공하는 서보는 12V 전원에서 최대 약 2.8Nm 토크를 출력하고 있다. 이러한 제원을 갖는 서보는 그림8과 같이 단차 (d=97mm) 가 존재하는 기립 압 기구의 구동장치로 사용될 수 있다.

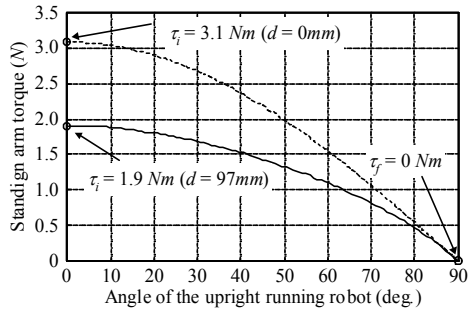


그림 8. 기립과정에 대한 기립 압 토크분포
Fig. 8. Standing arm torque with respect to the angle of the upright running robot

표 1. 기립 압 기구 파라미터
Table 1. Standing arm mechanism parameters

변수	값	내용
M	2.1kg	이동로봇 몸체질량
R	38mm	구동차륜 반지름
r	14mm	보조차륜 반지름
d	97mm	구동차륜중심과 기립 압 회전중심까지 거리
Lc	150mm	구동차륜중심과 몸체중심까지 거리
L	160mm	기립 압 길이

4. 기립 및 복귀동작

이동로봇의 기립 및 복귀동작은 다음과 같이 서로 다른 특징이 있다. 기립동작의 경우 수직이라는 몸체의 기립방향이 이미 결정되어 있는 반면에 복귀동작의 경우 임의의 방향으로 몸체가 복귀될 가능성이 있다. 이동로봇이 기존형태로 주행하는 경우 몸체의 구조상 하부와 상부가 결정되어 있으므로 몸체는 항상 지정된 방향으로 복귀되어야 한다. 항상 일정한 방향으로 몸체가 복귀되기 위해서 기립 압 구동과정은 특별한 동작형태로 제한되어야 한다.

4.1 기립동작

기립동작은 이동로봇의 몸체가 정상적인 초기상태에 놓여있다고 가정된 상태에서 진행된다. 몸체가 어떤 상태로 놓여져 있는가 여부에 관계없이 몸체가 기립하는 방향은 중력의 반대방향인 수직방향으로 유일하므로 기립 압 동작은 단순해진다.

기립동작이 개시되면 주행면에 놓여진 초기상태에서 기립 압은 회전하여 지면으로부터 몸체를 이격시키게 된다. 이 때, 지면을 접촉하는 기립 압과 그 반대방향에 부착된 기립 압은 동시에 회전하게 된다. 몸체의 기립 과정은 동역학적 관성력을 이용하는 역진자 기구의 평

형제어와는 달리 순수하게 정역학적 구동력을 이용하므로, 동적토크를 유발하는 몸체의 각가속도가 무시되어 매우 정속하게 진행될 수 있다. 이러한 설정은 기립 동작의 안정성을 증대시킬 수 있다.

기립 압이 그림9의 좌측과 같이 몸체를 수직방향으로 기립시키는 것이 바람직하지만 다음과 같은 이유로 그림9의 우측과 같이 비대칭 형상으로 몸체를 기립시키게 된다. 이동로봇의 몸체의 기립이 완료되어 자세 평형제어가 개시될 때, 그 과도상태에서 몸체가 흔들리게 된다. 이 때, 기립 압이 계속해서 지면과 접촉하고 있으면, 기립 압 말단과 지면의 충돌이 평형제어에 심각한 영향을 미치게 된다. 그러므로 몸체의 평형제어가 개시되면 신속히 기립 압은 원래의 상태로 복귀될 필요가 있다.

그림9의 우측과 같이 몸체가 시계방향으로 약간 기울어져 있는 경우 평형제어가 개시되면 몸체는 필히 반시계방향으로 회전하기 시작한다. 이 때, 기립 압은 지면과 이격되게 되는데, 이 순간 기립 압은 원래 위치로 신속하게 복귀할 기회를 갖는다. 다음의 그림10은 주어진 몸체의 각각의 초기 기울기 각도 ±10° 에 대한 몸체 기울기각도의 과도응답을 표시하고 있다. 이 때, 표2에 제시된 역진자 기구의 파라미터와 다음의 동역학 방정식[2]이 사용되었다.

$$(M_b + M_w + \frac{J_w}{R^2})\ddot{x}_0 + M_b L_c \ddot{\theta} \cos\theta - M_b L_c \dot{\theta}^2 \sin\theta = \frac{1}{R} u \quad (8)$$

$$M_b L_c \cos\theta \ddot{x}_0 + (J_b + M_b l^2)\ddot{\theta} - M_b g L_c \sin\theta = -u \quad (9)$$

시뮬레이션 결과에 의하면 몸체는 초기 기울기 방향에 대하여 반대방향으로 회전하는 과도상태를 보이므로 그 사이 기립 압은 충분히 복귀할 수 있다.

4.2 복귀동작

복귀동작은 기립동작과는 달리 지정된 방향으로만 몸체가 복귀되도록 하는 과정을 추가로 필요로 한다. 역진자 기구의 평형제어가 해제되면, 몸체는 어느 방향으로도 넘어질 수 있다. 이 때, 몸체가 지정된 방향으로 기울어지도록 하기 위해서 다음의 그림9의 우측과 같이 역진자 기구의 좌우에 부착된 2개의 기립 압은 각각 다른 각도로 기울어질 필요가 있다.

몸체가 항상 정해진 방향(시계방향)으로 복귀하도록 몸체의 무게중심이 대칭위치에서 Δθ만큼 시계방향으로 기울어지도록 기립 압을 비대칭으로 동작시킨다. 이 때, 복원력은 그림9의 우측에 표시한 바와 같이 시계방향으로 작용한다.

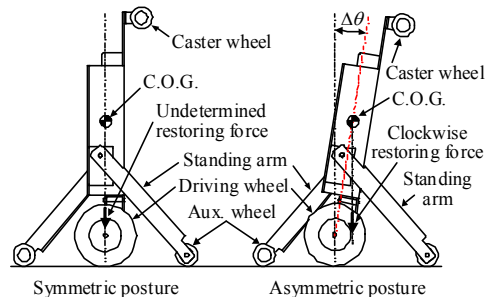


그림 9. 대칭 및 비대칭 기립 압 자세
Fig. 9. Symmetric and asymmetric posture of the upright running robot with standing arms

복귀개시 시점에서 평형제어를 해제하여 몸체가 넘어지면서 몸체가 $\Delta\theta$ 부근에 접근할(넘어질) 때까지 소요되는 시간이 시뮬레이션으로 구해져 그림11에 표시되었다. 이 때, 몸체는 정상상태에서 약 $\pm 1^\circ$ 흔들림 기울기(정상상태 오차)를 갖는다고 가정하였다.

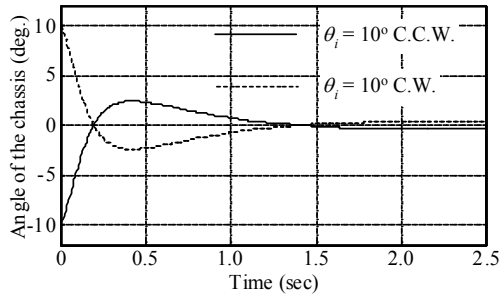


그림 10. 초기각도 $\pm 10^\circ$ 에 대한 몸체 기울기의 과도응답

Fig. 10. Transient angle response of the inverted pendulum with respect to the initial of $\pm 10^\circ$

그림11은 몸체의 평형제어가 해제되어 몸체가 자유낙하여 10° 로 기울어지는데 약 $0.232s$ 가 소요됨을 나타내고 있다. 이 때, 기립 압은 $0.232s$ 이내로 보조차륜을 지면에 도달시켜야 한다. 그림7에 의하면 몸체가 10° 가 되는 $\theta = 80^\circ$ 에 해당하는 기립 압의 회전각도는 약 128.3° 에 해당함을 알 수 있다. 구체적으로 필요한 기립 압 구동장치의 구동 각속도는 $128.3^\circ \div 0.232s = 553^\circ/s$ 이상이 되어야 한다.

한 편, 적용 예정인 국내 R社의 서보는 12V 전원에서 약 $350^\circ/s$ 의 최대 각속도를 제공하고 있으므로 그 서보는 그대로 기립 압 구동장에 적용되기 곤란하다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 복귀동작을 위해서 기립 압이 소정의 위치로 미리 이동한 상태에서 몸체의 평형제어는 해제되어야 한다. 예를 들면, 기립 압은 최고 각속도 $350^\circ/s$ 로 $0.232s$ 동안에 약 81° 회전하므로 기립 압이 미리 $47.3^\circ (= 128.3^\circ - 81^\circ)$ 만큼 회전한 후에 몸체의 평형제어가 해제될 필요가 있다.

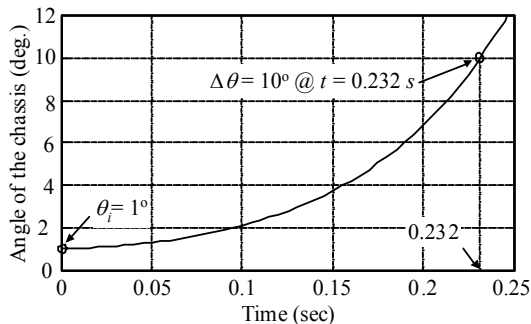


그림 11. 초기각도 $\pm 1^\circ$ 에 대한 몸체 기울기 응답($u = 0$)
Fig. 11. Time response of the angle of the upright running robot with respect to the initial of $\pm 1^\circ$ ($u = 0$)

표 2. 역진자 기구의 파라미터
Table 2. Inverted Pendulum parameters

변수	값	내용
M_w	0.20 kg	차륜 질량
M_b	1.9 kg	몸체 질량
J_w	$1.54 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	차륜 회전관성
J_b	$1.20 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	몸체 회전관성

5. 결 론

본 연구에서는 역진자 평형원리를 이용한 직립주행 가능한 이동로봇용 구동플랫폼을 개발하였다. 기존의 이동로봇은 캐스터 등 보조차륜을 이용한 2륜, 4륜 혹은 안정성 등 특별한 목적으로 그 이상의 차륜으로 구성된 형태의 이동수단을 장치하고 있었다. 이동로봇은 목적에 따라서 안정성을 개선하기 위해서 넓은 평면적과 납작한 형태를 갖거나 조향성을 고려하여 작은 평면적을 갖는 형태를 지니고 있었다. 작은 평면적을 갖는 이동로봇은 실장공간을 증가시키기 위해서 높이를 증가시킬 경우 주행 안정성이 열화되는 경향이 있다. 본 연구에서는 이동로봇이 안정성이 우수한 형태에서 주행 원활성이 우수한 이동로봇 형태로 전환되도록 하는 기립 압 기구가 개발되었다. 조향성이 우수한 평면적이 작은 이동로봇의 형태로는 역진자 기구가 채택되었다. 역진자 기구는 능동적 평형제어 기능을 갖고 있으므로 이동로봇의 실장공간을 증가 시키면서 주행 안정성을 증가시킬 수 있다. 이동로봇은 대부분 무인으로 동작되므로 급격한 자세변동은 이동로봇 운용에 결정적인 지장을 초래하지 않을 것으로 예상된다.

References

- [1] J. Huang, Z-H. Guan, T. Matsuno, T. Fukuda, and K. Sekiyama, "Sliding-Mode Velocity Control of Mobile-Wheeled Inverted-Pendulum Systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, Aug. pp. 750-758, 2010.
- [2] Se-Han Lee, Sang-Yong Rhee, "A Mixed H_2/H_∞ State Feedback Controller Based on LMI Scheme for a Wheeled Inverted Pendulum running on the Inclined Road," *Journal of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 617-623, 2010.
- [3] http://www.segway.com/aboutus/press_releases/pr_120301.html.
- [4] http://www.toyota.co.jp/jp/news/08/Aug/nt08_0805.html.
- [5] <http://world.honda.com/news/2009/c090924New-Personal-Mobility-Device/>
- [6] J. Searock, B. Browning, and M. Veloso, "Turning Segways into Soccer Robots," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, pp. 1029-1034,

2004.

[7] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Dftler, I. and Spain, N. Radford, "Mobile Manipulation using NASA's Rbonaut," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, US, pp. 2104-2109, 2004.

[8] The Robotics Society of Japan, *Robotics Hand Book*, in Japanese, Coronasha, pp. 375, 2005.

[9] D. H. Myszka, *Machines and Mechanisms: Applied Kinematic Analysis 3rd Ed.*, Prentice Hall, pp. 89, 2004.

관심분야 : 강인제어, 자동화 로봇, 메카트로닉스
 Phone : 055-249-2149
 Fax : 0505-999-2160
 E-mail : leesehan@kyungnam.ac.kr



이상용(Sang-Yong Rhee)

1982년 : 고려대 산업공학과 졸업
 1984년 : 고려대 대학원 산업공학(공학석사)
 1992년 : 포항공대 대학원 산업공학(공학박사)
 1992년~현재 : 경남대학교 컴퓨터공학부 교수

관심분야 : 컴퓨터 비전, 뉴로-퍼지, 지능로봇, 생체인식
 Phone : 055-249-2706
 E-mail : syrhee@kyungnam.ac.kr

저 자 소 개



이세한(Se-Han Lee)

1989년 : 고려대 기계공학과 졸업
 1991년 : 고려대 대학원 기계공학(공학석사)
 2002년 : 고려대 대학원 기계공학(공학박사)
 2004년~현재 : 경남대학교 기계공학부