

자기-기립 가능한 차륜형 역진자 기구 기반의 이동로봇 개발

A Development of the Self-Standable Mobile Robot Based on a Wheeled Inverted Pendulum Mechanism

이세한¹, 강재관^{1,✉}Se-Han Lee¹ and Jae-Gwan Kang^{1,✉}¹ 경남대학교 기계공학부 (Division of Mechanical Engineering, Kyungnam University)

✉ Corresponding author: jkkang@kyungnam.ac.kr, Tel: +82-55-249-2703

Manuscript received: 2012.7.3 / Accepted: 2012.11.5

In this research a Self-Standable mobile Robot with standing arms based on an Wheeled Inverted Pendulum is developed. Almost existing mobile robots have wide planar shape that is statistically stable and it is sometimes hard for them to run or steer on a narrow road. A Wheeled Inverted Pendulum based mobile robot has vertical shape that is upright-running and easily steering on a narrow road. It, however, requires actively balancing control and never restores the shape once it falls down. This research develops a Self-Standable mobile robot which equips standing arms and is able to change its chassis' posture freely from planar to vertical shape or vice versa.

Key Words: Self-Standable (자기-기립 가능), Upright-running (직립주행), Standing Arm (기립 암), Wheeled Inverted Pendulum (차륜형 역진자)

1. 서론

차륜형 역진자는 1965 년경 Kapitza¹ 에 의해서 처음으로 제안된 것으로 알려진 역진자 시스템에 기반한 이동이 가능한 로봇형태로 분류될 수 있다. 다양한 형태의 차륜형 역진자들이 제어이론 검증 뿐만 아니라 이동로봇의 이동플랫폼으로 사용되고 있다.

차륜형 역진자는 고유한 불안정한 평형상태를 갖고 있으며 진행 방향에 대하여 직각방향으로 배열된 회전축에 설치된 2 개의 차륜으로 구동되는 직립한 형태의 역진자 형태를 갖고 있으므로 주행 시 작은 평면적을 갖는 장점을 갖고 있으므로 조향성이 우수하다.

이동로봇의 성능지수로 주행 동특성뿐만 아니라 다양한 주행지형에 대한 원활성을 들 수 있다.

대부분 기존 이동로봇의 차륜은 구동차륜과 수동 차륜으로 구성되는데, 이동로봇은 조향 및 구동조건에 따라서 정역학적 평형이 보장될 수 있는 3 른 이상을 장착하고 있다. 뿐만 아니라 이동로봇은 정역학적 안정성을 개선하기 위해서 넓은 평면적을 갖는 외형을 요구하고 있는데, 이러한 외형은 개활지를 주행하는 경우에는 문제가 되지 않지만 매우 협소한 지면을 주행하는 경우에 주행 및 조향이 곤란해지는 문제를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 차륜형 역진자 기구의 장점과 기존 이동로봇의 장점을 동시에 보유할 수 있는 이동로봇을 개발하고자 한다. 차륜형 역진자는 점유면적이 최소화 된다는 특징을 이용하여 개인용 이동수단의 플랫폼^{2,4} 으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 2 인이 탑승할 수 있는 차륜형 역진자 형태의 운송수단으로 자기 주차기능이 부가된 PUMA⁵

도 개발되어 있다. 이러한 제품들은 선천적인 불안정성 때문에 넘어지는 경우 자기 복귀 불가능이라는 단점을 공통적으로 갖고 있다.

본 연구에서는 차륜형 역진자의 몸체를 정상 상태로 복귀시킬 수 있는 기능을 갖는 기구를 제안한 연구⁶를 기반으로 그 기구를 구체적으로 구현하고 그 기구를 이용하여 몸체의 형태를 기존의 평면형 이동로봇과 수직형 (차륜형 역진자) 이동로봇의 형태로 필요에 따라서 전환할 수 있는 혼합형 이동로봇을 구현하고자 한다.

개발된 혼합형 이동로봇은 개활지 혹은 충분히 넓은 주행면에서 이동로봇의 몸체형태를 정역학적 안정성이 우수한 평면형으로 전환하여 운용될 수 있고 주행면이 매우 협소하여 조향이 곤란한 경우 평면적이 작은 수직형 이동로봇으로 전환되어 운용될 수 있다.

본 연구에서는 차륜형 역진자에 관련된 동역학 및 제어에 관한 내용은 기존의 연구들^{7,9}을 참고하였으며, 2 장에 자기-기립 차륜형 역진자 시스템의 소개 및 구현, 3 장에 차륜형 역진자 기립동작 및 복귀동작의 과정 및 특징, 4 장에 실험결과 및 토론이, 마지막으로 5 장에는 본 연구의 결론이 제시된다.

2. 자기-기립 차륜형 역진자 시스템

다음의 Fig. 1은 본 연구의 대상이 되는 자기-기립이 가능한 차륜형 역진자의 개략적인 모습을 나타내고 있다. 자기-기립 차륜형 역진자는 기존의 형태와는 달리 본 연구의 핵심인 기립 암 (standing arm)을 몸체 좌우에 부착하고 있으며, 지면에 몸체를 착지 시켜서 주행할 때 필요한 몸체 지지용으로 캐스트 차륜 (caster wheel)을 부착하고 있다.

2.1 기립 암 기구

자기-기립 차륜형 역진자는 지면에 착지한 상태에서부터 수직방향으로 직립되어 평형을 유지하기 위해서는 몸체를 기립시킬 수 있는 기구적인 기립수단을 필요로 한다. 기립수단은 차륜형 역진자의 몸체를 지면으로부터 이격시킬 수 있을뿐만 아니라 다시 지면에 착지된 원래의 상태로 몸체를 복귀시킬 수 있어야 하고 1 회용이 아니라 반복적으로 재사용될 수 있어야 한다.

기립수단으로써 기존연구⁶에서는 기립 암 기구의 후보로 회전형과 직선형을 제시하고 그 중에서

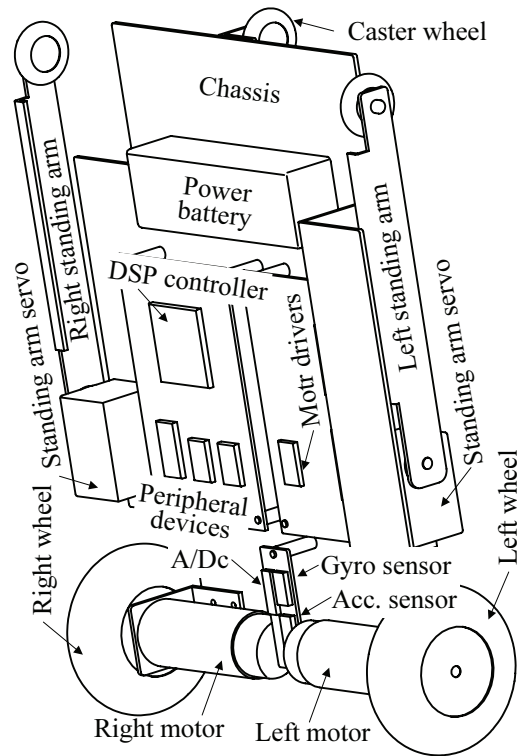


Fig. 1 A Self-Standable Wheeled Inverted Pendulum

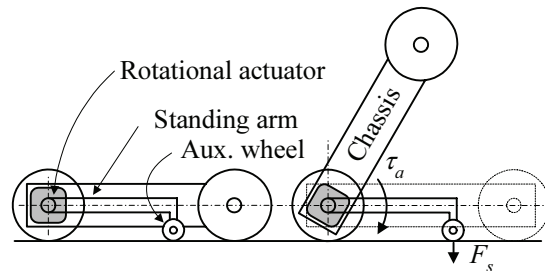


Fig. 2 Standing arm mechanism with revolute actuator

회전형이 구현측면에서 유리하다고 주장하고 있으므로 본 연구에서는 그림 2와 같이 제어 및 구현이 용이한 회전형 기립 암 기구가 채용되었다. 회전형 구동장치의 토크 τ_a 에 의해서 발생하는 힘 F_s 는 차륜형 역진자의 몸체 (chassis)의 중량을 지지할 수 있어야 한다.

2.2 기립 암 기구 구현

기립 암 구동장치를 구체적으로 구현하기 위해서 회전형 구동장치가 제작되어야 한다. 본 연구에서는 회전형 구동장치로 국내 R社에서 제공되는

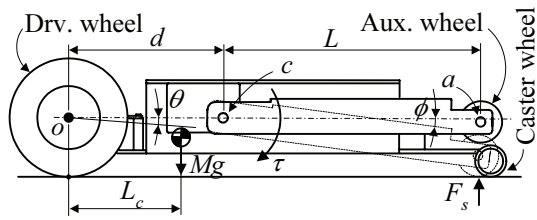


Fig. 3 Design parameters of the standing arm configuration

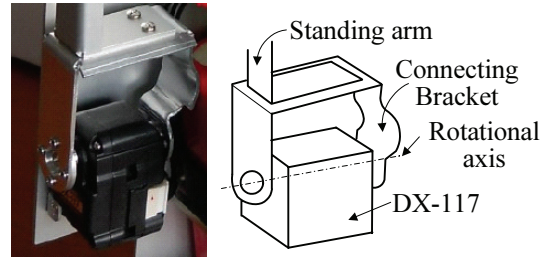


Fig. 4 Standing arm implemented base on DX-117

Table 1 Design parameters of the standing arm

d	97 mm	Distance between the centers of wheel and standing arm axis
L_c	87 mm	Distance between the center of the wheel and chassis
L	160 mm	Length of the standing arm
θ	90°	Tilting angle of the chassis
ϕ_{max}	139°	Maximum angle of the standing arm

기성품 서보(DX-117)가 사용되었다. 이 때, 선택된 서보는 12 V 전원에서 약 2.8 Nm 의 최대토크를 출력할 수 있다. 기존연구⁶에서 제시된 기립 압 설계 파라미터들이 Fig. 3 에 표시되어 있다. 이 때, M 은 차륜형 역진자의 질량, g 는 중력가속도, o 는 구동차륜의 회전중심, c 는 기립 압 구동장치의 회전중심, a 는 기립 압 말단의 보조차륜 회전중심을 나타낸다. Fig. 3 의 설계 파라미터는 토크의 최적화 여부에 따라서 다양하게 선택될 수 있는데, 선택된 서보의 출력토크를 감안하여 다음의 Table 1 과 같이 결정되었다. 이 때, 다음의 소요 토크⁶ 방정식에 의하면 최대 토크는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{max} = \frac{LL_c Mg \cos\theta \cos(\theta - \phi)}{d \cos\theta + L \cos(\theta - \phi)} \Big|_{\theta=0^\circ, \phi=0^\circ} = 1.11(Nm) \quad (1)$$

이 결과는 출력 가능한 최대토크 2.8 Nm 의 약 40%에 해당되며, 배터리 동력이 차륜형 역진자가 기립되는 과정에서 평형제어 및 주행 사용되지 않음을 감안하고 대부분의 배터리 동력이 서보구동을 전담한다고 가정하면 최대토크의 절반 정도가 기립에 소요되는 것은 합리적이라고 판단된다. 이 때, 사용된 차륜형 역진자의 중량은 배터리를 포함하여 약 2.1 kg 로 설정되었다. 제작된 기립 압 구동장치가 Fig. 4 에 표시되어 있다.

3. 차륜형 역진자의 기립 및 복귀

차륜형 역진자가 정역학적인 안정성이 우수한 평면형태에서 협소한 주행면에서 조향성이 우수한 수직형태로 몸체를 전환하기 위해서는 기립 압뿐만 아니라 기립 압이 운용되는 구체적인 과정이 필요로 한다.

초기 몸체가 평면형태로부터 수직형태로 기립되는 방향은 유일한 반면에 평형제어가 유지되는 수직형태에서 평면형태로 복귀하는 방향은 주행 방향(+ θ)과 그 반대방향(- θ) 등 2 가지로 존재하므로 차륜형 역진자의 복귀방향이 항상 일관되도록 하는 특별한 과정이 요구된다.

차륜형 역진자의 몸체가 기립하는 과정은 평형제어가 개시되는 단계와 연결되어 있으므로 평형제어의 과도응답에 따른 차륜형 역진자 몸체의 흔들림과 기립 압 말단의 기구적인 상호간섭 등이 고려되어야 한다.

3.1 기립동작 과정

초기에 이동로봇은 평면적이 넓은 상태로 대기하고 있다. 좌우측 기립 압을 회전시킴으로써 발생하는 보조차륜과 지면 사이의 반력 F_s 는 몸체의 기립토크를 유발하게 된다. 이 때, 기립 압 기구는 저속으로 회전하고 있으므로 동역학적 효과는 무시될 수 있다.

기립 압은 다음과 같은 이유로 차륜형 역진자 몸체를 정확한 수직방향으로 기립시키지 않음에 유의한다. 차륜형 역진자의 무게중심은 시각적으로 몸체외형의 중심에 존재하지 않을 뿐만 아니라 좌우대칭으로 배열된 기립 압은 차륜형 역진자 평형제어의 과도응답 동안에 기구적인 간섭을 발생할 우려가 있는 문제를 유발할 수 있다. 차륜형 역진자의 평형제어가 개시될 때, 역진자의 몸체가 초기 기울기를 상쇄하는 방향으로 구동되는 특징

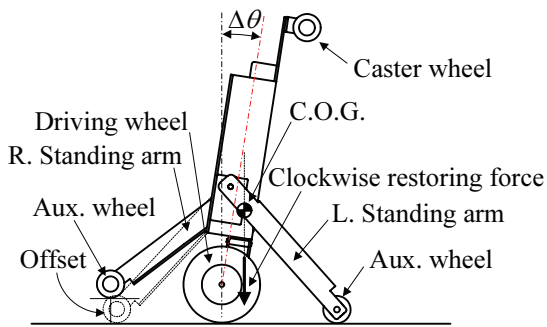


Fig. 5 An asymmetric posture of the Wheeled Inverted Pendulum

을 이용하여 Fig. 5 와 같이 초기 기울기 각도 $\Delta\theta$ 가 의도적으로 설정될 필요가 있다. 뿐만 아니라 우측 기립 압과 지면 사이의 단차(offset)가 생성될 필요가 있다.

차륜형 역진자의 몸체가 소정의 각도 $\Delta\theta$ 로 기울어진 상태에서 평형제어기는 활성화되고 기립 압은 평형제어의 몸체의 과도응답 과정에서 발생할 수 있는 지면과 충돌을 방지하기 위해서 신속히 원래 상태로 복귀해야 한다. 이 때, 기립 압은 무부하 상태이므로 DX-117 서보가 메이커에서 제시하는 제원의 최고 회전속도 ($360^\circ/s$)로 복귀하는 것은 충분히 가능하다.

3.2 복귀동작 과정

복귀동작은 기립동작과 달리 차륜형 역진자의 몸체가 임의의 방향으로 복귀될 수 있는 가능성을 포함하고 있다. 즉, 차륜형 역진자는 평형상태를 유지한 상태에서 평형제어가 해제되면 그 몸체는 임의의 방향으로 넘어지게 된다. 평형상태를 유지하고 있는 차륜형 역진자는 항상 소정의 초기상태로 복귀될 필요가 있다.

차륜형 역진자가 항상 일정한 방향으로 기울어지기 위해서는 몸체가 비대칭이 될 필요가 있으며 그림 5 에서 점선으로 표시된 우측 기립 압은 좌측 기립 압보다 더 많이 기울어질 필요가 있다.

4. 실험결과 및 토론

본 연구에서 구성한 실험장치는 기존의 차륜형 역진자를 그대로 포함하고 있으므로 차륜형 역진자 제어를 그대로 포함하고 있다. 뿐만 아니라 올바른 기립 압 제어를 위해서 기립 압과 평형제어

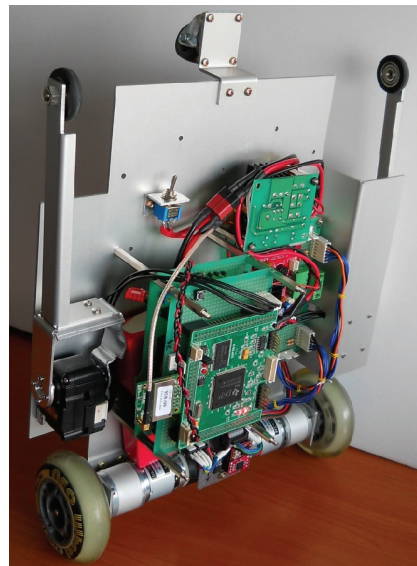


Fig. 6 Self-Standable Wheeled Inverted Pendulum setup

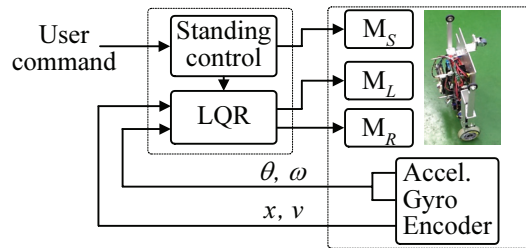


Fig. 7 Control schematic of the Self-Standable Mobile robot

동기를 위한 동기 제어부가 추가되어 있다. 기립 압의 구동장치인 DX-117 은 내부에 자체 제어기를 장착하고 있으므로 회전각도 명령은 외부로부터 통신을 통해서 입력 받는다. 주제어기로 사용되고 있는 TI 의 TMS320F2812 는 차륜형 역진자의 몸체 각도에 동기화된 기립 압의 회전각도 명령만 1:N 전송이 가능한 RS-485 통신을 통하여 DX-117 에 송신하고 있다.

4.1 제어기 선정

차륜형 역진자의 평형제어기는 기존연구⁹ 에서 사용된 LQR 에 기반하여 Fig. 7 과 같이 제어이득이 수정된 LQR 제어기와 기립제어기가 결합된 형태가 채택되었다. 기립 압 구동시점과 평형제어 개시 및 해제시점은 시간에 동기되어 결정되며 구체적인 시점은 반복적인 실험을 통하여 결정된다.

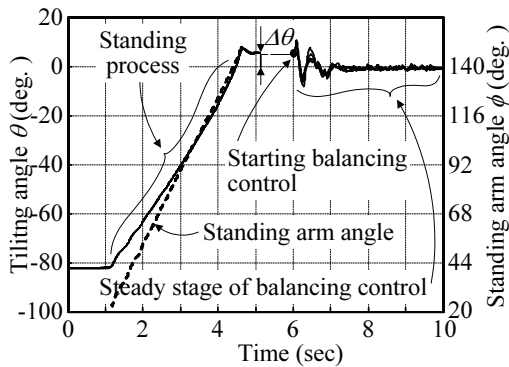


Fig. 8 Time responses of the tilting angle during the standing

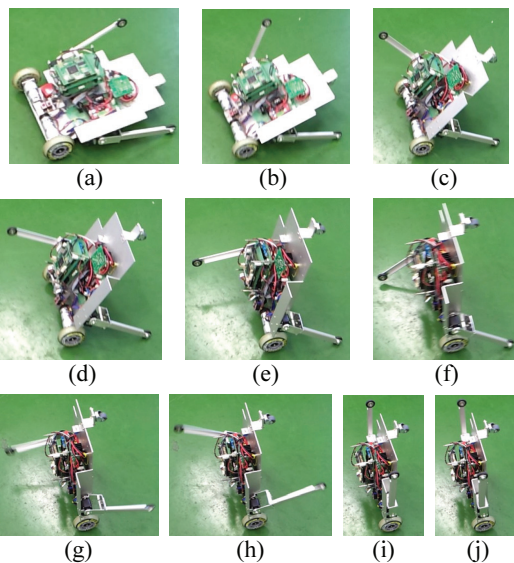


Fig. 9 Separated picture frames of the Self-Standable Wheeled Inverted Pendulum standing

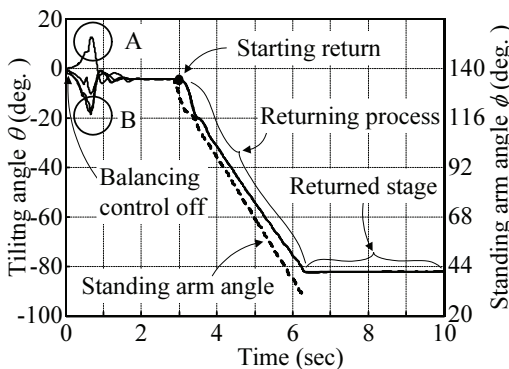


Fig. 10 Time responses of the tilting angle during the returning

4.2 기립동작 구현

기립동작은 기립 압의 의해서 몸체가 수직상태에서 $\Delta\theta$ 만큼 기울어진 상태로 기립 된 후에 약 1 초 후에 평형제어가 개시되는 과정으로 구성되어 있다. 구체적으로 4 회 반복 실행된 실험 결과가 Fig. 8 에 표시되어 있다. 실험결과에 의하면 기립동작 개시 후 약 4.5 초에서 몸체는 수직 방향에 근접하는 상태로 전환되고 약 6 초 부근에서 평형제어가 개시된 후 약 1.5 초의 과도 응답 과정을 거쳐서 몸체는 평형제어 상태로 진입하게 된다. 반복적인 실험을 통해서 기립동작은 예상한 바와 같이 매우 안정되게 실행됨을 알 수 있다.

다음의 Fig. 9 는 차륜형 역진자 기립동작 실험 동영상 일부를 캡처한 것으로 약 8 초 동안에 차륜형 역진자는 정상적으로 기립동작을 완료하고 있다.

4.3 복귀동작 구현

복귀동작은 평형제어가 수행되는 상태에서 평형제어를 해제함과 동시에 기립 압을 지면으로 내려서 소정의 상태로 몸체를 지지한 후에 몸체를 수평상태로 되돌리는 과정으로 구성되어 있다.

차륜형 역진자 몸체는 평형제어가 해제되면 과도응답을 거쳐서 주행면으로 넘어지게 된다. Fig. 10 의 전반부에 표시된 몸체 기울기 각도의 과도응답을 관찰해 보면 기립 압이 지면에 착지하기 전까지는 몸체 기울기 각도는 A 점과 같이 $+\theta$ 각 혹은 B 점과 같이 $-\theta$ 각도를 나타내게 된다. 이 때, 주행면으로 내려온 기립 압은 일관되게 몸체를 소정의 $-\theta$ 각도로 몸체를 지지하고 있음을 알 수 있다.

일단 차륜형 역진자의 몸체가 소정의 각도상태로 지지된 상태에서 기립 압은 원래 대기상태로 복귀하고 몸체는 중력에 의해서 약 3.5 초 동안에 초기상태로 복귀하게 된다. 반복적인 실험을 통해서 복귀동작은 예상한 바와 같이 일관된 방향으로 매우 안정되게 실행됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 이동로봇 형태와 차륜형 역진자 이동로봇의 형태로 서로 전환할 수 있는 이동로봇이 개발되었다. 기존 대부분의 이동로봇은 3 륜 이상의 차륜을 장착하면서 정역학적 안정성이 우수한 넓은 평면적을 갖고 있는 반면에 매우

협소한 주행면에서는 조향이 곤란한 단점을 갖고 있다. 차륜형 역진자 형태의 이동로봇은 협소한 주행면에서 우수한 조향 특성을 갖는 반면에 지속적으로 몸체의 평형제어를 수행해야 하는 단점을 갖고 있다. 차륜형 역진자는 평형제어에 문제가 발생하여 넘어진 경우 정상적인 주행상태로 복귀 불가능이라는 치명적인 문제를 갖고 있다. 본 연구에서는 정역학적인 안정성이 우수한 넓은 평면적과 주행 원활성을 동시에 갖는 자기-기립 차륜형 역진자 이동로봇이 개발되었다. 자기-기립 차륜형 역진자 이동로봇은 본 연구에서 개발된 기립압을 사용하여 자유자재로 기립 및 복귀가 가능하므로 주행면의 조건에 따라서 기존형 이동로봇 혹은 차륜형 역진자 이동로봇으로 그 형태를 전환할 수 있다.

후 기

이 논문은 2011 년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의하여 이루어졌음.

참고문헌

1. Kapitza, P. L. and ter Haar, D., "Collected Papers of P. L. Kapitza," Pergamon Press, p. 174, 1965.
2. Segway, <http://www.segway.com/>
3. Toyota, "Toyota Develops Personal Transport Assistance Robot Winglet," http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0801_1.html
4. Honda, "UNI-CUB," <http://world.honda.com/UNI-CUB/>
5. Segway, "Segway Advanced Development Project P. U. M. A.," <http://www.segway.com/puma/>
6. Lee, S.-H. and Rhee, S.-Y., "Development of a Moving Platform for a Upright Running Mobile Robot Based on an Inverted Pendulum Mechanism," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 22, No. 5, pp. 570-576, 2012.
7. Grasser, G., D'Arrigo, A., Colombi, S., and Rufer, A. C., "JOE A Mobile, Inverted Pendulum," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114, 2002.
8. Lee, S.-H. and Rhee, S.-Y., "A Mixed H_2 / H_∞ State Feedback Controller Based on LMI Scheme for a Wheeled Inverted Pendulum Running on the Inclined

Road," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 617-623, 2010.

9. Lee, S.-H. and Kang, J.-G., "A Development of the Equilibrium Point for a Controller of a Wheeled Inverted Pendulum Running on an Inclined Road," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 1, pp. 72-78, 2012.