

3개의 모터로 구동되는 극한작업용 이동로봇의 개발

권 대갑, 차 영업, 엄 도성
한국과학기술원 생산공학과

The Development of Mobile Robot for Hostile Environment Controlled by three motors

D.G.Gweon, Y.Y.Cha and D.S.Yeom

Dept. of Production Eng., KAIST

Abstract

This study presents the structure and the gate control algorithm of KAMOBOT (KAIST Mobile Robot). The mobile robot has a six-legged, cylindrical configuration, each leg of which is equipped with a wheel at the bottom. The robot can go up and down stairs, go over obstacles, move along curvilinear paths and rotate around its geometric center. Such maneuverability can be achieved by using only three electric motors.

1. 서론

1950년대 말에 처음으로 산업용 로봇이 등장한 이래 한 위치에 고정된 로봇이 자동화의 주역으로 많이 사용되었으나 이들은 고정된 위치에서만 사용이 가능하므로 작업범위가 상당히 제한적일 수 밖에 없었다. 해저탐사나 원자력 발전소 내부에서의 작업등 위험하면서도 이동이 필요한 작업환경 하에서 일을 수행하기 위해서는 이전의 로봇에 이동(mobile)기능을 추가시킬 필요가 있었는데 이에 따라서 나타난것이 이동 로봇(mobile robot)이다.

이동 로봇은 주행형식에 따라 크게 바퀴형(wheeled type)과 다리형(legged type)으로 나눌 수 있다. 바퀴형은 다리형에 비하여 에너지 효율이 좋고 기구가 간단하며 제어가 용이하고, 이에따라서 속도가 빠른점 등 여러가지 장점이 있으므로 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 바퀴형은 작업환경의 표면이 평탄하고 단단해야하는 제한조건이 있으므로 계단과 같은 장애물이 있는 경우에는 사용이 곤란하다. 다리형은 불규칙한 표면의 작업환경 하에서도 적응력이 뛰어나지만 구조가 복잡하고 제어가 어려우며

속도가 느리므로 실제 사용에는 아직 어렵다고 할수있다.

바퀴형의 장점에 지형 적응력을 첨가하면 좋은결과를 얻을수 있을것으로 기대되어 이에대한 연구로 일본 동경 대학에서 1983년에 TO-ROVER를 개발하였다[1]. 이는 120° 간격으로 벌어져있는 삼각틀(wheel-arm)에 각각 바퀴가 부착되어있어, 평면 주행시에는 바퀴로 이동하다가 계단을 만나면 wheel-arm 으로 계단을 이월하도록 설계되어있다. 이것은 넘어야할 계단의 폭과 높이에 제한을 크게받는다.

보통의 바퀴는 주행기능(driving)과 방향전환기능(steering)을 가지고 있는데, 여기에 바퀴를 들어 올리는 기능(lifting)을 첨가하여 바퀴의 자유도를 높이는 연구가 Hitachi 에서 1984년에 이루어졌다[2]. 이러한 이동 로봇트를 HLV(Hybrid Locomotion Vehicle)라고 하는데 이 경우에 5개의 바퀴에 각각 driving, steering, lifting속을 설치하여 평면주행은 물론 계단 승하강 그리고 장애물 이월을 할수 있도록 하였다. 이 경우 계단 승강과 장애물 이월등을 수평을 유지하면서 할수 있지만 제어해야할 속수가 15개 이므로 경제성에 문제가 있다.

이밖에 crawl type 이 있는데 이는 무한궤도등을 이용하여 장애물을 극복하는 형식이다[3]. 이것은 장애물 이월 시에 장애물과 접촉을 하여야한다. 만일 장애물의 강성이 그렇게 크지 않다면 장애물에 손상을 입힐 염려가 있으며 방향 전환시에도 상당한 마찰력이 작용되므로 바닥면이 손상되고 방향조절이 어렵게 된다. 국내에서는 KAIST 에서 1989년에 4-legged type 의 다리형 이동 로봇트를 개발하였다[4].

본 연구는 6개의 다리가 원통형상의 몸체에 부착되어 있고, 각 다리 끝에 바퀴가 장착되어 3개의 모터로 진행 기능과 방향전환기능 그리고 다리를 들어올리는 기능을

갖춘 HLV 개발에 대한 것이다. 이와같은 구조는 보다 저렴 하면서 평면 주행속도가 빠르고, 지형 적응력이 뛰어난 장점이 기대된다. 여기서는 그 구조설계와 주행분석 그리고 주행제어 알고리즘에 대하여 언급하려고 한다.

2. 구조설계

2.1 전체 구조

설계된 HLV 외관이 그림1에 나와있다. 윗판과 아랫판 그리고 내봉으로 프레임이 구성되며 보호막으로서 플라스틱 외봉이 부착되었다. 내봉과 외봉 사이에는 60° 간격으로 6개의 다리 및 바퀴구동기구가 장치 되었으며 그중 하나의 단면도가 그림에 도시되었다. 다리 및 바퀴 구동기구는 크게 3가지 부분 즉 바퀴주행유닛, 바퀴방향 전환유닛 그리고 다리 승강유닛으로 되어있으며 각 유닛의 구조 및 작동원리는 다음 절에서 상세히 설명된다. 주요사양을 보면 몸통외경이 70cm 이고, 몸통내경이 38cm 그리고 6개 바퀴의 축 중심경이 52cm 이고 다리의 최대 스트로크(stroke)는 42cm 이다. 몸통내경 안쪽에는 배터리 등의 전원장치와 구동모터의 드라이버(driver) 그리고 제어용 보드(board) 등이 내장된다.

로봇의 감각기능으로서의 다음과 같은 센서가 장착된다. 각 바퀴의 바로앞에 장애물이 있는지를 인식해서 다리의 승강여부를 판단하기 위해 광학식 근접센서가 각 바퀴에 장착되었다. 각 바퀴는 지면과 일정한 힘으로 접촉되어 있어야 미끄럼이 없이 이동이 가능하며 이를 위해서 다리 승강유닛에 승강방향과 같은 방향으로 스프링형 컴플라이언스(compliance)를 내장하고 스프링 변위를 감지할수있는 센서를 내장했다. 그외에 로봇트가 스스로 경로를 찾을수있게 하기위해 스테레오비전과 같은 3차원 시각시스템이 장착될 예정이다.

2.2 바퀴 주행 유닛 (wheel driving unit)

바퀴 주행유닛은 HLV 몸체를 전후좌우로 이동시키는 구동부이다. 그림2는 HLV의 6개 다리중 한개의 단면도이다. 다리로의 동력공급은 주행풀리(driving pulley)를 통해 이루어지며 6개의 주행풀리는 타이밍벨트를

통하여 한개의 구동모터(주행모터;그림에는도시되지않음)와 연결되어 있다. 주행모터의 동력은 주행풀리, 주행스플라인축, 중공축(hollow shaft), 베벨기어, 평치차를 통하여 바퀴에 전달된다. 그림에서 기어부와 바퀴를 달고 있는 중공축은 주행스플라인축과 함께 회전하지만 축방향으로는 상대운동을 일으키며 상하운동을 한다. 상하운동의 동력원은 2.4절의 다리 승강유닛에서 상세히 설명된다.

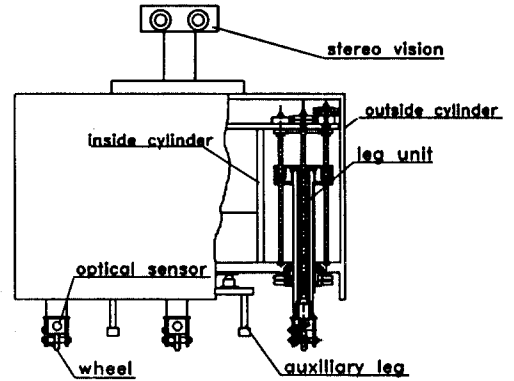


그림1. HLV의 구조

Fig.1 Structure of HLV

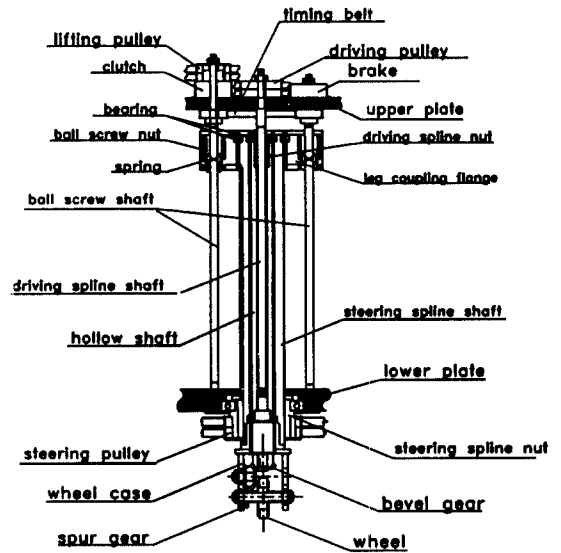


그림2. 다리 및 바퀴유닛의 단면도

Fig.2 Cross-section of a leg and wheel unit

2.3 바퀴 방향전환 유니트 (wheel steering unit)

바퀴 방향전환 유니트는 바퀴 주행유니트에서와 같이 한개의 구동모터 (방향전환모터;그림에는 도시되지않음) 는 타이밍벨트를 통하여 6개의 방향전환 풀리(steering pulley)를 동시에 회전시킨다(그림2). 방향전환 풀리의 회전은 방향전환 스플라인축(steering spline shaft) 및 축 하단부에 고정된 바퀴상자(wheel case)를 회전시켜서 바퀴의 진행방향을 결정한다. 여기서 방향전환 스플라인축을 사용한 이유는 다리의 하강 위치에서도 방향전환 풀리의 동력을 바퀴상자에 전달하기 위함이다.

2.4 다리 승강 유니트 (leg lifting unit)

하나의 다리 승강용 모터(lifting motor)의 동력은 타이밍 벨트를 통해서 6개의 승강풀리(lifting pulley)를 동시에 작동시킨다(그림2). 승강풀리에 전달된 동력은 클러치(clutch)를 통해서 왼쪽 볼스크류우축에, 그리고 타이밍 벨트에 의해 오른쪽 볼스크류우축에 동시에 전달 된다. 두개의 볼스크류우축의 동시회전은 볼스크류유니트를 장착하고있는 다리 연결플랜지(leg coupling plange)를 상하운동시키고 이에따라 다리부, 즉 중공축, 방향전환 스플라인축 그리고 바퀴상자가 상하운동을 하게된다. 승강 모터의 동력은 6개의 승강풀리에 동시에 전달되지만 클러치가 접속된 다리만 상하운동을하고 클러치가 단락된 경우에는 반드시 브레이크가 작동되어 다리의 상하운동이 방지된다.그림3은 다리가 내려갔을때 즉 몸체를 올린상태에서의 자세이다.

2.5 몸체 방향전환 유니트 (body steering unit)

앞에서 언급한 바퀴의 주행 유니트와 방향전환 유니트로서 평면상의 어느지점으로도 HLV 는 이동 할수있다. 그러나 이러한방법으로 이동할때에는 몸체의 방향을 전환 할수가 없다. 계단승강과 같이 몸체의 방향전환이 필요한 경우를 위해 보조다리와 같은 추가적인 장치가 필요한데 이것이 몸체의 방향전환 유니트로써 그림4 에 나와있다. 아랫판 중심부에 베어링으로 연결된 보조다리를 부착하여 6개의 다리가 모두 지면에서 떨어져있어도 보조다리

만으로 몸체를 지탱할수 있도록 하였다. 보조다리 만으로 몸체를 유지한 상태에서 한 다리만을 다시 땅에 접촉하여 바퀴를 구동시키면 보조다리를 축으로 하여 몸체가 회전 하게 된다. 그림에서는 2개의 지지점밖에 나타나있지 않지만 실제 보조다리는 120° 간격으로 3개의 지지점을 가지고 있어서 안정하다.

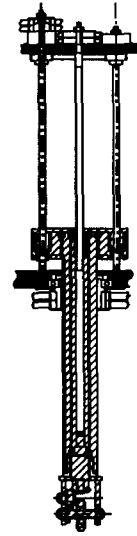


그림3. 다리 하강 위치

Fig.3 Down position of leg

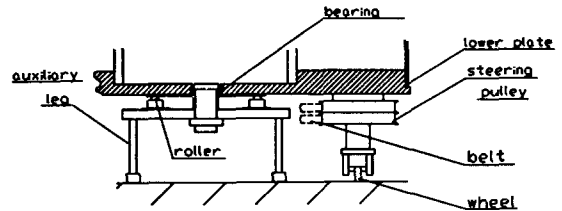
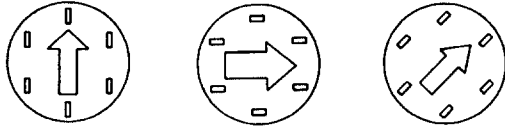


그림4. 몸체회전용 보조다리

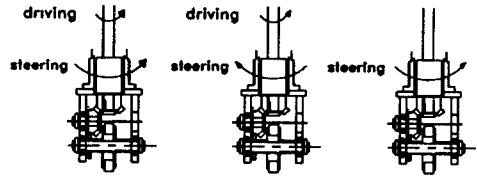
Fig.4 Auxiliary leg for body rotation



a) 전후이동 b) 좌우이동 c) 경사이동

그림5. 평면주행 모드

Fig.5 Mode of plane motion



a) 동일방향 운동 b) 반대방향 운동 c) 방향전환동작만

그림6. 바퀴의 방향전환과 주행과의 관계

Fig.6 Relation between steering and driving of wheel

있는경우

3. 주행분석과 주행제어 알고리즘

3.1 평면 이동시의 주행모드(mode)

평면주행 모드는 바퀴의 주행기능과 방향전환 기능의 조합으로 이루어지는 단순 평면주행과 보조다리와 다리의 상하운동 기능을 이용하는 몸체회전운동으로 나뉘어진다. 그림5 는 평면 주행모드를 보여준다. 바퀴 6개가 같은거리의 원주위에 있으므로 steering 을 하더라도 몸통중심의 자세는 변하지않는다. 여기서 단순 평면주행은 6개의 바퀴가 모두 같이 driving 되고 steering 되는것을 알수있다.

본 HLV 의 구조특성상 바퀴의 방향전환동작은 바퀴의 주행 동작에 영향을 끼치도록 되어있다. 그림6 에서 보면 a)의 경우에 실제 driving량은 driving 량 - steering 량 만큼 작아지게 되고, b)의 경우에 실제 driving 량은 driving 량 + steering 량 만큼 커지게 된다. 따라서 c)처럼 driving 없이 steering 모터만을 구동시킬 경우에도 steering 속도와 변위만큼의 driving 이 일어나게 된다. 따라서 실제 driving 각도 θ_{da} 및 각속도 $\dot{\theta}_{da}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{da} &= \theta_d - \text{sgn}[\theta_d, \theta_s] \theta_s \\ \dot{\theta}_{da} &= \dot{\theta}_d - \text{sgn}[\dot{\theta}_d, \dot{\theta}_s] \dot{\theta}_s \end{aligned} \quad (1)$$

where, θ_d : driving 각도

$\dot{\theta}_d$: driving 각속도

θ_s : steering 각도

$\dot{\theta}_s$: steering 각속도

steering각도와 각속도 앞의 부호는 steering과 driving 이 같은 방향일때는 음수(-)이고 서로 다른 방향일때는 양수(+)가 된다.

HLV 가 움직인 거리 S 와 속도 V 는

$$S = \theta_{da} * r_w$$

$$V = \dot{\theta}_{da} * r_w$$

where, r_w : wheel 의 반경

이지만 실제 제어(control) 하는것은 $\theta_d, \dot{\theta}_d, \theta_s, \dot{\theta}_s$ 이므로 (1)의 관계를 고려하여 보상해 주어야 한다.

몸체 회전운동은 driving과 보조다리에 의하여 이루어 지므로 steering 과 driving의 간섭관계는 고려할 필요가 없다. 몸체 회전각속도를 ω 라고 하면

$$\omega = V/R$$

where, V : driving 선속도

R : 회전중심(HLV 중심)에서 바퀴까지의 거리로 나타낼 수 있다.

3.2 몸체 방향전환 모드(mode)

그림7은 몸체방향전환운동의 작동원리를 나타내고있다. 바깥원은 몸체를 표시하고 6 개의 사각형은 바퀴를 표현 하며 중심의 삼각형꼴은 보조다리를 나타낸다. 보조다리에 있는 사각형은 지면에 닿게되는 패드(pad) 를 나타낸다. 여기서 검게 표시된것은 지면에 접하고 있음을 나타낸다. 그 과정을 설명하면, a)는 6개의 바퀴로 평면주행을 하고 있는 경우이고, b)는 방향전환이 필요한 경우에 6개의 다리를 들어올려 (즉, 몸체의 자세를 낮추어) 보조다리로 몸체를 지탱하도록 한다. c)는 다리가 모두 지면에서 떨어진 상태에서 바퀴의 방향전환동작으로 하나의 바퀴가 원주방향이 되도록 하며, d)에서는 원주방향의 하나의 바퀴를 지면에 접촉시키고 바퀴의 주행동작 한다. 그러면 e) 와같이 몸체를 회전시킬 수 있다.

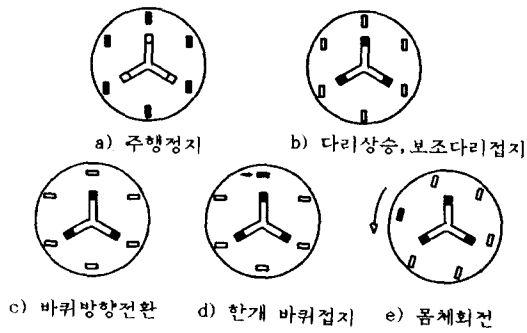


그림7. 몸체의 방향전환 순서

Fig.7 Sequence of body steering

3.3 장애물 극복 및 계단 승하강 모드(mode)

HLV가 평면 이동중에 장애물이나 계단등을 만났을 경우에 6개의 다리는 개별적인 lifting 기능이 있으므로 이를 극복할수있다. 그림8은 HLV의 옆에서본 다리의 개략도로써 장애물을 만났을 경우 이를 극복하는 순서를 보여준다. 먼저 맨앞쪽 다리 앞에 장애물이 있다는 것을 바퀴앞에 장착되어 있는 근접센서로 감지한 다음, 다리를 일정한 높이로 들어올린다. 그 후로 몸체를 앞으로 전진시키고 마지막 그림에서와 같이 볼스크류우 너트와 부시 사이에 장착된 on-off 센서에서 바퀴가 지면에 닿았음을 알릴때까지 다리를 하강 시킨다. 다음에 뒤에있는 다리도 순차적으로 이와같은 동작을 반복함으로써 장애물을 극복할수있다.

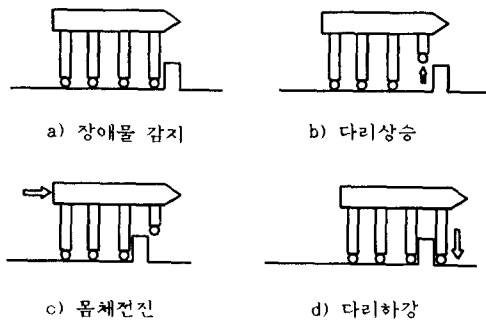


그림8. 장애물 이월 과정

Fig.8 Procedure of crossing obstacle

그림9는 HLV가 계단을 올라가는 순서를 나타낸것이다. 앞에서 언급한 장애물을 극복하는 방법과 비슷한 방법으로 계단도 올라갈수 있다.

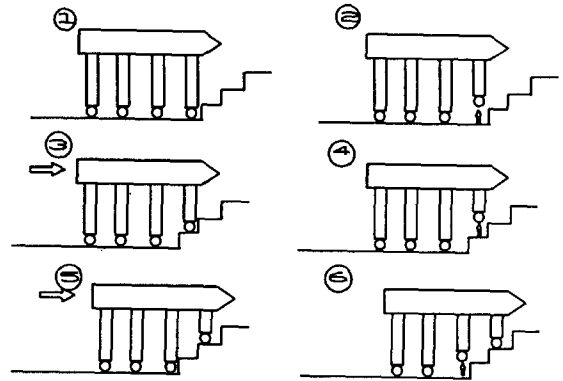


그림9. 계단 승강 과정

Fig.9 Procedure of climbing stairs

3.4 주행제어 알고리즘

그림10은 전체주행의 흐름도를 나타내고있다. 여기서 전체경로(long trajectory)는 HLV의 최종 목적지까지의 지도를 그리는 작업이다. 예로써 공장의 벽이나 계단등의 고정된 구조물을 기준으로 만들어진다. 이 경로를 모두 수행하면 HLV는 더이상 작동하지 않는다.구간경로(short trajectory)는 전체경로에서 작성한 지도를 몇개의 부분으로 나누어 여기서 알지 못했던 장애물등을 회피하는 경로를 만든다. 그리고 장애물(obstacle) 1은 작업하는 사람등 움직이는 장애물을 나타내는데 HLV는 장애물이 사라질때까지 그 자리에서 정지한다.장애물(obstacle)2는 계단과 같은 넘어야할 장애물이다. HLV의 구조상 계단과 같은 장애물을 넘어가려면 바퀴의 진행방향과 계단 전면과는 항상 수직이어야 한다.따라서 계단 승강시에는 계단과 바퀴와의 각도를 측정하여 수직이되도록 몸체를 회전시켜야한다(mode II). HLV가 넘어야할 장애물은 다리를

들어올려서 넘어가야할 경우(obstacle 1)가 있고 다리를
 뺀어 내려가야할 경우(obstacle b)가 있다. 목적지(goal)
 I 은 구간경로의 목적지이고, 만약 HLV가 여기에 도착한후
 구간작업등을 위하여 도킹(docking)이 필요한경우 몸체
 회전과 전후좌우 방향으로의 이동이 이루어진다. 그리고
 목적지(goal)II 는 HLV 가 도착해야할 전체경로의 최종
 위치를 나타낸다.

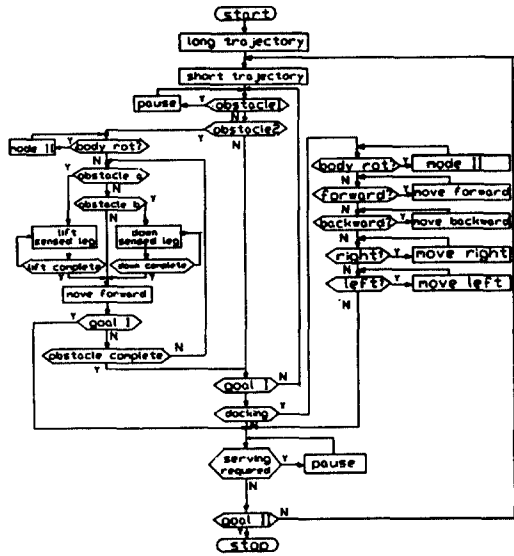


그림10. 주행제어 알고리즘의 흐름도

Fig.10 Flow-chart of motion control algorithm

4. 결론

본 논문에서는 원통형상의 몸체에 6개의 다리가 부착
 되고, 각 다리의 아래에는 바퀴가 장착되어 3개의 모터로
 바퀴의 주행, 방향전환 그리고 다리의 상하운동을 가능케
 하는 HLV 가 설계되었다. 본 HLV 는 3개의 모터로 구동
 되므로 제어가 간단하고 매우 저렴하게 제작이 가능하다.
 뿐만아니라 본 HLV 는 주행시 다리를 이용하지 않고 바퀴
 를 이용하기 때문에 바퀴형 이동로봇의 특징인 빠른
 주행속도를 낼수있으며 장애물 이월시에는 다리의 상하
 운동을 이용하기 때문에 다리형 이동로봇의 높은 지형
 적응력도 가지고 있다.

그러나 바퀴를 이용한 주행이기 때문에 주행시 바퀴와
 지면사이의 미끄럼으로인한 누적오차가 예상될수 있으나
 6개 바퀴가 동시에 지면과 접하고 있으며 또한 각 다리에
 장착된 스프링에 의한 쿠션때문에 지면이 고르지 못하
 더라도 일정한 압력으로 바퀴와 지면이 접촉하기 때문에
 일반 AGV 에서 생길수있는 미끄럼 오차보다 훨씬 작을것
 으로 예상된다. 본 HLV 의 또하나의 구조적인 취약점은
 다리의 기하학적인 형상에 있다. 즉 계단의 폭이 몸체의
 다리간격과 같은 13cm나 26cm인 경우에는 3개 또는 4개의
 다리를 동시에 들어야하므로 이 경우 계단 승하강이
 불가능하며 따라서 다리간격을 선정할때는 로봇트가
 투입될 작업환경이 고려되어야 한다.

참고 문헌

[1]. Masaharu Takano and Gotaro Odawara, "Development
 of new type of mobile robot TO-ROVER," Proceedings of
 13th ISIR, vol.2, pp(20)81-89, April 1983

[2]. Yoshiaki Ichikawa, Norihiko Ozaki and Kenichiro
 Sadakane, "A hybrid locomotion vehicle for nuclear
 powerplants," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol.SMC
 -13, no.6, pp.1089-1093, Nov. 1983

[3]. G.Clement and E. Villedieu, "Mobile robot for
 hostile environments,"Proc. of the Int.Nat.Meeting on
 Remote Systems and Robotic in Hostile Environment,
 pp.270-275,1987

[4]. 윤용산, 홍형주, "보행로봇 다리부의 기구학적설계,"
 전기학회 논문집 38권 12호, pp.1007-1013, Dec. 1989