

## 로커-보기 링크 구조를 갖는 전방향 이동로봇 시스템개발

Development of Omni-Directional Mobile Robot System  
with Rocker-Bogie Link Structure

강택기, 이수영\*

(Taig-Gi Gang and Soo-Yeong Yi)

**Abstract** : In this paper, development of an omni-directional mobile robot with rocker-bogie link structure is addressed. The overall mobile robot system consists of the robot mechanism with embedded control architecture, wireless communication with host graphic monitoring system, and the joy stick tele-controller. In the cluttered environment with various sizes of obstacles, the omni-directionality and the traversality are required for a mobile robot, so that the robot can go around or climb over the obstacles according to the size. The mobile robot mechanism developed in this paper has both of the omni-directionality and the traversality by 4 steerable driving wheels and the 2 additional passive omni-directional wheels linked with the rocker-bogie structure. The kinematic modeling for the mobile robot is described based on the well-known Sheth-Uicker convention and the instantaneous coordinate system.

**Keywords** : rocker-bogie, Sheth-Uicker convention, instantaneous coordinate system, inverse kinematics, jacobian matrix

## I. 서론

이동로봇은 제한된 에너지를 가지고 동작하기 때문에 효율적인 에너지 사용을 필요로 한다. 그러기 위해 로봇의 이동 자유도를 높이고, 이동시 불필요한 움직임이 없도록 제어해야 한다. 그러나 일반적으로 많이 사용하는 단순 2바퀴 구조를 가지는 이동로봇과 자동차와 같이 조향을 앞바퀴로만 하는 경우, 횡방향 주행이 불가능하고 평탄하지 않은 지형에서는 주행이 불안정하다는 기구상의 한계가 있게 된다. 이러한 이유로 인해 본 논문에서는 로봇이 전 방향으로 이동이 가능하도록 조향장치를 고려하였고, 비 평탄 지형이나 암석과 같은 장애물이 있는 험로를 주행 시 멀리 돌아가지 않고 이를 극복할 수 있도록 화성탐사 로봇(Rocky7)등에 사용된 로커-보기 링크 구조를 선택하여 로봇을 설계, 제작하였다[1-3]. 제작된 로봇을 제어하기 위하여 사용한 기구해석 방법으로 Denavit-Hartenberg(D-H) 규약과 동차변환행렬, 그리고 Sheth-Uicker(S-U) 규약을 사용하였다[4-6]. 동차변환행렬과 D-H 규약은 매니플레이터 형 로봇의 해석방법으로 많이 사용되고 있지만 이것만은 바퀴형 이동로봇의 기구해석을 하기엔 몇 가지 문제점이 있다. 그 중 하나로 기구구조상 링크들이 직렬로 연결되어 있는 매니플레이터와 달리 바퀴형 이동로봇은 하나의 몸체를 중심으로 여러 링크들이 병렬적으로 연결되어 있는 다중체인구조를 가지고 있다는 점이다. 또 다른 문제로 링크들 사이의 각 관절이 낮은 짝(lower pair)을 갖는 매니플레이터와 달리 바퀴형 이동로봇은 높은 짝(higher pair)으로 바퀴와 지면이 조인트를 이

루고 있다는 점이다[8,9]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Muir 등이 제시한 S-U 규약과 순간일치좌표계의 개념을 적용하여 로봇기구학을 해석하였다[6].

로커-보기 링크 구조를 갖는 기존의 Rocky 7과 같은 로봇의 경우에는 앞 2바퀴로만 조향을 하고, 나머지 4개의 바퀴는 조향이 불가능한 구조로 되어있다. 그래서 제자리 회전 또는 옆으로 주행을 할 수 없게 되어 이동성이 떨어지게 된다. 또한 로봇의 회전을 구할 때에도 고정된 4개의 바퀴로 인해 로봇이 회전 시 회전중심은 각 바퀴의 회전축과 일치하지 않아 회전중심을 정확하게 구할 수 없다는 단점이 있다. 하지만 본 논문을 통해 제작된 로봇은 앞뒤 4개의 바퀴 모두 조향이 가능하고 중앙에 위치한 2개의 전 방향성을 갖는 수동형 바퀴를 로봇 중심에 오도록 배치하여 제자리 회전뿐만 아니라 전 방향으로도 이동이 가능한 구조를 갖도록 하였다. 또한, 2개의 수동형 바퀴를 로봇 중심에 오도록 배치하여 로봇의 회전중심이 각 바퀴의 회전축과 일치하도록 설계하여 최대한 바퀴는 지면과 미끄러짐이 발생하지 않도록 하였다. 본 논문에서 로봇의 기구학을 해석하는 방법이 [1,2]에서와 유사한 과정을 갖지만 로봇을 실제 제작하고, 그에 맞게 기구학을 재해석 하는데 중점을 두고 서술하였다. 본 논문을 통하여 개발한 로봇 시스템은 로커-보기 링크 구조를 갖는 로봇 몸체와 각 구동/조향 모터들을 직렬 네트워크로 연결하는 CAN 임베디드 제어기, 원격의 호스트 모니터링 시스템과의 무선 통신 시스템 및 원격조작용 조이스틱 제어기로 구성된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다 2절에서 본 논문에서 채택한 로커-보기 기구 구조에 대해서 설명하고, 3절에서 기구학 및 역기구학의 해를 제시한다. 그리고 4절에서 본 논문을 통해 개발한 이동로봇 시스템에 대해 서술하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 앞서 구한 기구학 및 역기구학 해를 검증하며, 5절에서 결론을 맺는다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 11. 9., 채택확정 : 2006. 3. 6.

강택기 : 전북대학교 제어계측공학과(rkdxorrl@chonbuk.ac.kr)

이수영 : 전북대학교 전자정보공학부(suylee@chonbuk.ac.kr)

※ 본 논문은 기초전력연구원(과제번호 : R-2004-B-120)에서 지원하여 연구하였음.

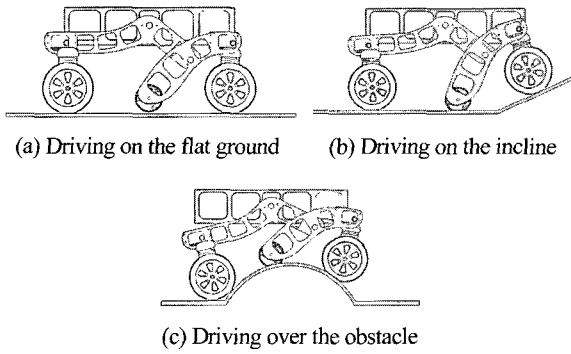


그림 1. 로커-보기 링크 구조의 기능.  
Fig. 1. The rocker-bogie link structure.

II. 이동로봇 기구구조

본 논문을 통해 제작된 로봇은 화성탐사 로봇등에 사용한 로커-보기 구조를 갖는다[2]. 로커-보기 구조는 로봇의 중심에 차동기어가 있고 기어축을 중심으로 로봇의 양 측면에 로커와 보기가 연결되어 있다. 로커와 보기 사이의 관절은 지면의 상태에 따라 유동적으로 움직일 수 있도록 되어 있다. 이동로봇이 주행하는 지면의 상태는 다음과 같은 3가지 경우를 생각할 수 있다. 먼저 가장 기본적인 평지와 경사면이 있는 지형, 그리고 장애물이 있는 지형이다. 로커-보기 기구 구조는 그림 1에서 보이듯이 관절이 지면에 따라 유연하게 작용하기 때문에 바퀴와 지면은 항상 접촉하게 되어 모터의 토크를 효율적으로 전달할 수 있을 뿐만 아니라 비평탄한 지형에서도 로봇이 안정하게 주행할 수 있도록 한다. 또한 일반적으로 바퀴의 크기에 비해 상대적으로 큰 장애물을 극복할 수 있다는 특징이 있다. 본 논문에서 개발한 로봇은 로커-보기의 양 끝에 있는 4개의 바퀴가 모두 구동 및 조향 모터를 가지고 있으며, 가운데 바퀴는 수동 전방향 바퀴로 구성되어 로봇이 전 방향으로 주행 가능한 구조를 갖는다.

III. 기구학 모델링

본 절에서는 자코비안을 사용하여 이동로봇의 속도기구학 및 역기구학의 해를 구하도록 한다. 속도기구학을 구하기 전에 기구해석을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다[6].

- 1) 로봇은 전고한 메카니즘으로 제작된다.
- 2) 조향축은 지면과 수직이다.
- 3) 바퀴와 지면사이 병진마찰은 매우 크다.
- 4) 바퀴와 지면사이 회전마찰은 충분히 작다.

가정 1은 타이어와 같은 유연성 있는 기구부를 강체로, 가정 2는 조향시 운동학적인 모델의 복잡함을 제한하였다. 가정 3과 4에 의해 바퀴는 지면과 항상 점접촉 하고 병진 및 조향시 발생할 수 있는 미끄럼을 고려하지 않도록 하였다.

속도 기구학을 구한 후, 이를 이용하여 이동로봇의 미소 운동(또는 속도)에 대해 각 바퀴 또는 관절에서 요구되는 미소운동(또는 속도)을 구하는 역기구학을 해석한다.

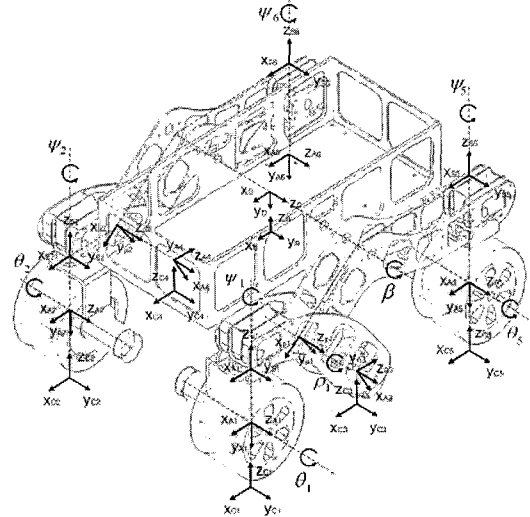


그림 2. 좌표계 설정.  
Fig. 2. The coordinate systems assignment.

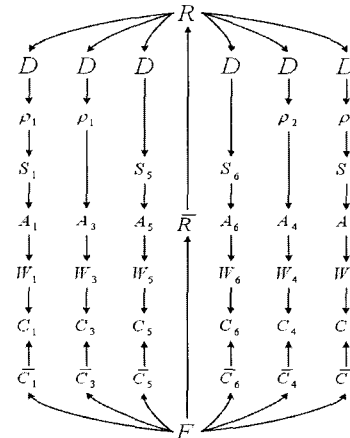


그림 3. 좌표계변환 루프.  
Fig. 3. The coordinate transformation loop.

그림 2에서  $\theta$ 는 바퀴의 회전각이고,  $\psi$ 는 조향각,  $\rho$ 는 로커-보기사이의 회전각,  $\beta$ 는 차동기어의 회전각을 나타낸다.

1. 기본 좌표계

Mure등이 제안한 S-U 규약은 D-H 규약과는 달리 이전 관절에 설정된 좌표계를 고려하지 않고, 관절을 구성하는 각 링크에 따로 좌표계를 설정하여 이들 사이의 상대변환 관계를 통해 관절의 운동을 구한다. 본 논문에서는 이동로봇의 중심과 바퀴와 지면사이에 S-U 규약에 따른 복수의 좌표계를 설정하였고, 나머지 관절에 대해서는 D-H 규약에 따라 좌표계를 설정하였다. 각 좌표계는 다음과 같다. R은 이동로봇의 중심 좌표계, D는 차동기어에 설정된 좌표계,  $\rho$ 는 로커-보기사이의 회전축 좌표계, S는 조향 좌표계, A는 바퀴의 회전축 좌표계, 마지막으로 C는 바퀴와 지면의 접촉점을 나타내는 좌표계이다. 이동로봇에 설정된 좌표계는 그림 2와 같다.

2. 순간일치좌표계

이동로봇은 메뉴플레이터와 달리 고정되어있지 않기 때문에 어떤 좌표계를 기준으로 움직임을 측정하게 된다. 따

표 1. 기호 테이블.  
Table 1. The symbol table.

기 호	정 의
$R$	로봇 중심 좌표계
$D$	차동기어 좌표계
$\rho$	로커-보기의 관절 좌표계
$S$	바퀴의 조향 좌표계
$A$	바퀴의 회전 좌표계
$W$	임시 좌표계
$C$	바퀴와 바닥 사이의 접촉 좌표계
$\bar{R}$	로봇의 순간일치 좌표계
$\bar{C}$	바퀴 접촉점의 순간일치 좌표계
$\gamma$	z 축에 관한 회전 - D-H 파라미터
$d$	z 축 방향으로의 이동 - D-H 파라미터
$a$	x 축 방향으로의 이동 - D-H 파라미터
$\alpha$	x 축에 관한 회전 - D-H 파라미터
$\phi$	z 축에 관한 회전 - yaw
$\theta$	y 축에 관한 회전 - pitch
$r$	x 축에 관한 회전 - roll
$\beta$	차동기어의 회전각
$\psi$	바퀴의 조향각
$v$	로봇의 선속도
$\omega$	로봇의 회전 각속도
$\dot{\theta}$	바퀴의 회전 각속도

라서 우리는 로봇의 중심에서 외부환경을 측정해야 할 필요가 있다. 이러한 이유로 도입된 것이 순간일치좌표계이다 [6]. 이동로봇의 바퀴와 지면사이에 이와 같은 순간일치좌표계를 적용하여 나타낼 수 있다. 그림 3은 순간일치좌표계 ( $\bar{R}, \bar{C}$ )를 고려한 좌표변환관계를 폐 루프 시스템으로 나타낸 것이다.

그림 3에서 보이듯이 로봇중심좌표계와 각 바퀴에 하나씩 순간일치좌표계를 설정하였다. 표 1은 본 논문에서 사용한 기호들을 정의한 것이다.

위와 같이 설정된 좌표계의 상대변환 관계식은 D-H 파라미터에 의거하여 (1)과 같은 동차변환행렬로 나타낼 수 있다. 표 2는 관련 매개변수들의 실제 값을 정리한 것이다.

$$T_{i,j} = \begin{bmatrix} c(\gamma_i) & -s(\gamma_i) \cdot c(\alpha_i) & s(\gamma_i) \cdot s(\alpha_i) & a_i \cdot c(\gamma_i) \\ s(\gamma_i) & c(\gamma_i) \cdot c(\alpha_i) & -c(\gamma_i) \cdot s(\alpha_i) & a_i \cdot s(\gamma_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)에 정의된 변수  $\gamma, d, a$  그리고  $\alpha$ 는 각각 z축 회전, z축으로 이동, x축으로 이동, 그리고 x축에 관한 회전을 나타낸다. 수식을 간략화하기 위하여  $\cos(\alpha)$ 와  $\sin(\alpha)$ 는 각각  $c(\alpha)$ 와  $s(\alpha)$ 으로 나타내었다. 예를 들어 바퀴 1의 지면과 접촉하는 좌표계를 구하기 위해선 로봇의 중심 좌표계에서 접촉 좌표계까지 모든 상대변환 관계식을 곱해야 한다. 따라서 다음과 같은 행렬식을 통해 구할 수 있게 된다.

표 2. D-H 파라미터.  
Table 2. The D-H parameters.

좌표계	$\gamma$ (deg)	$d$ (mm)	$a$ (mm)	$\alpha$ (deg)
$D$	0	0	0	-90
$\rho_1$	$\gamma_1 (39.5 + \beta)$	$d_1 (178)$	$a_1 (149)$	0
$\rho_2$	$\gamma_2 (39.5 - \beta)$	$-d_1 (-178)$	$a_1 (149)$	0
$S_1$	$\gamma_3 (-39.5 + \rho_1)$	0	$a_2 (109)$	90
$S_2$	$\gamma_4 (-39.5 + \rho_2)$	0	$a_2 (109)$	90
$S_5$	$\beta$	$d_1 (178)$	$a_3 (-224)$	90
$S_6$	$-\beta$	$-d_1 (-178)$	$a_3 (-224)$	90
$A_1$	$\phi_1$	$d_2 (-77.6)$	0	-90
$A_2$	$\phi_2$	$d_2 (-77.6)$	0	-90
$A_3$	$\gamma_5 (98.2 + \rho_1)$	0	$a_4 (155.5)$	0
$A_4$	$\gamma_7 (98.2 + \rho_2)$	0	$a_4 (155.5)$	0
$A_5$	$\phi_5$	$d_3 (-172.4)$	0	-90
$A_6$	$\phi_6$	$d_3 (-172.4)$	0	-90
$W_1$	$\delta_1$	0	0	90
$W_2$	$\delta_2$	0	0	90
$W_3$	$\gamma_6 (-137.7)$	0	0	90
$W_4$	$\gamma_6 (-137.7)$	0	0	90
$W_5$	$\delta_5$	0	0	90
$W_6$	$\delta_6$	0	0	90
$C_1$	0	$-R_{motor}$	0	0
$C_2$	0	$-R_{motor}$	0	0
$C_3$	0	$-R_{omni}$	0	0
$C_4$	0	$-R_{omni}$	0	0
$C_5$	0	$-R_{motor}$	0	0
$C_6$	0	$-R_{motor}$	0	0

$${}^R T_{C_1} = {}^R T_D \times {}^D T_{\rho_1} \times {}^{\rho_1} T_{\rho_2} \times {}^{\rho_2} T_{S_1} \times {}^{S_1} T_{A_1} \times {}^{A_1} T_{W_1} \times {}^{W_1} T_{C_1} \quad (2)$$

3. 자코비안 행렬식

로봇의 순방향 기구학을 수학적으로 모델링 하기 위하여 관절공간에서의 속도를 직교좌표공간의 속도로 표현하는 자코비안 행렬을 유도한다. 자코비안 행렬을 구하기 위하여 바퀴의 움직임을 로봇의 움직임으로 표현한다. 그림 3에서 보이는 순간일치좌표계( $\bar{R}, \bar{C}$ )는 기준좌표계 F에 대하여 상대적으로 정지되어있는 것과 같기 때문에 순간일치좌표계와 기준좌표계 F 사이의 모든 변환관계식은 일정한 값을 갖는 상수로 볼 수 있다. 반대로  $\bar{robot}-robot, \bar{contact}-contact$ , 그리고 조향장치의 변환을 나타내는 관계식들( ${}^{\bar{R}} T_R, {}^{\bar{C}} T_C, {}^S T_A$ )은 값이 변하는 변수로 볼 수 있다. 여기서  $\bar{R}$ 과  $\bar{C}$ 는 순간일치좌표계를 의미한다[6]. 따라서 순간일치좌표계의 성질( ${}^{\bar{R}} T_R = {}^{\bar{C}} T_C = I$ )을 이용하여 이동로봇의 미소운동을 간단하게 정리하면 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{R} \dot{T}_R = & {}^R T_D \times {}^D T_{\rho_1} \times {}^{\rho_1} T_{\rho_2} \times {}^{\rho_2} T_{S_1} \times {}^{S_1} T_{A_1} \times {}^{A_1} T_{W_1} \times {}^{W_1} T_{C_1} \times {}^{\bar{C}_1} \dot{T}_{C_1} \times {}^{C_1} T_R \\ & + {}^R T_D \times {}^D T_{\rho_1} \times {}^{\rho_1} T_{\rho_2} \times {}^{\rho_2} T_{S_1} \times {}^{S_1} T_{A_1} \times {}^{A_1} T_{W_1} \times {}^{W_1} T_{C_1} \times {}^{C_1} \dot{T}_R \end{aligned} \quad (3)$$

(3)으로부터 오일러 각을 이용하여 다음 (4)와 같이 로봇의 미소운동을 나타낼 수 있다.

$${}^R\dot{T}_R = {}^R T_{C_1} \times {}^{C_1} \dot{T}_{C_1} \times {}^{C_1} T_R + {}^R T_{C_1} \times {}^{C_1} \dot{T}_R = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\phi} & \dot{p} & \dot{x} \\ \dot{\phi} & 0 & -\dot{r} & \dot{y} \\ -\dot{p} & \dot{r} & 0 & \dot{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)에서  $\phi, p, r$ 은 오일러 각으로 요, 피치, 롤을 뜻한다. (4)를 왼쪽 항은 직교좌표공간의 속도성분, 오른쪽 항에는 관절공간에서의 속도성분으로 재편성한다. 그 결과로 이동로봇의 자코비안 행렬을 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\psi_1)c(r_1+r_3) & 0 & -a_1s(r_1) & -d_1c(r_1+r_3) \\ s(\psi_1) & 0 & 0 & a_2+a_1c(r_3) \\ -c(\psi_1)s(r_1+r_3) & 0 & -a_1c(r_1) & d_1s(r_1+r_3) \\ 0 & 0 & 0 & -c(r_1+r_3) \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s(r_1+r_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \dot{\beta} \\ \dot{\rho}_1 \\ \dot{\psi}_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(r_1+r_5+r_6) & 0 & -a_1s(r_1) & d_1c(r_1+r_5+r_6) \\ 0 & 0 & 0 & -a_4c(r_6)-a_1c(r_5+r_6) \\ -s(r_1+r_5+r_6) & 0 & -a_1c(r_1) & -d_1s(r_1+r_5+r_6) \\ 0 & 0 & 0 & c(r_1+r_5+r_6) \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s(r_1+r_5+r_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_3 \\ \dot{\beta} \\ \dot{\rho}_1 \\ \dot{\psi}_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\psi_5)c(\beta) & 0 & -d_1c(\beta) \\ s(\psi_5) & 0 & a_3 \\ -c(\psi_5)s(\beta) & 0 & d_1s(\beta) \\ 0 & 0 & -c(\beta) \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -s(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_5 \\ \dot{\beta} \\ \dot{\psi}_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 결과는 이동로봇의 왼쪽 바퀴에 대한 것이다. 나머지 오른쪽 바퀴에 대한 것은 같은 방법으로 구할 수 있으므로 생략하였다.

4. 역기구학

이동로봇의 미소운동(또는 속도)에 대해 각 바퀴 또는 관절에서 요구되는 미소운동(또는 속도)을 계산하기 위하여 역기구학의 해를 구한다. 바퀴의 조향각을 결정하기 위해서 기하학적인 방법을 사용하기로 한다[1].

4.1 바퀴의 선속도

각 바퀴의 선속도는 순방향 기구학에 의해 결정되어진다. 예를 들어 (5)에서 요구되어지는 이동로봇의 속도와 방향각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= c(\psi_1)c(r_1+r_3) \cdot v_1 - a_1s(r_1) \cdot \dot{\rho}_1 - d_1c(r_1+r_3) \cdot \dot{\psi}_1 \\ \dot{\phi}_d &= -c(r_1+r_3) \cdot \dot{\psi}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

바퀴 1과 5의 선속도는 다음과 같다.

$$v_1 = \frac{\dot{x}_d + a_1s(r_1) \cdot \dot{\rho}_1 - d_1 \cdot \dot{\phi}_d}{c(\psi_1)c(r_1+r_3)} \quad (9)$$

$$v_5 = \frac{\dot{x}_d - d_1 \cdot \dot{\phi}_d}{c(\psi_5)c(\beta)} \quad (10)$$

4.2 조향각

이번 절에서는 로봇의 회전중심을 찾고 그에 따른 각 모터의 조향각을 결정한다. 본 논문에서는 이동로봇의 회전중심은 바퀴 3과 4의 회전축 상에 있다고 가정한다. 그 이유는 바퀴 3과 4를 로봇의 가운데 위치해 있도록 설계했기 때문에 가능하다. 만약 회전중심이 로봇중심에 위치해 있다면 로봇은 제자리에서 회전할 것이고, 무한대로 떨어져 있다면 로봇은 직진할 것이다. 그림 4는 바퀴의 조향각을 결정하기 위한 기하학적인 방법을 보여준다.

다음 식들은 그 결과를 나타낸다.

$$r_i = {}^R T_{C_i}^{-1} \cdot L_R \quad i=1,2,3,4,5, \text{ and } 6 \quad (11)$$

$$L_3 = {}^R T_{C_3} \cdot [0 \quad r_3 \quad 0 \quad 1]^T \quad (12)$$

$$L_4 = {}^R T_{C_4} \cdot [0 \quad r_4 \quad 0 \quad 1]^T \quad (13)$$

$$L = \frac{L_3 + L_4}{2} \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_1 + a_4 \cdot K_3 + a_1 \cdot K_5\} \\ \frac{\dot{x}_d + a_1\{s(r_1) \cdot \dot{\rho}_1 + s(r_2) \cdot \dot{\rho}_2\}}{\dot{\phi}_d + 2\dot{\phi}_d} \\ \frac{1}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_2 - a_4 \cdot K_4 - a_1 \cdot K_6\} \\ 1 \end{bmatrix}$$

식을 간략화하기 위하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} r_{156} &= r_1 + r_5 + r_6 \\ K_1 &= s(r_1+r_5+r_6) + s(r_2+r_6+r_7) \\ K_2 &= c(r_1+r_5+r_6) + c(r_2+r_6+r_7) \\ K_3 &= c(r_1+r_5) + c(r_2+r_7) \\ K_4 &= s(r_1+r_5) + s(r_2+r_7) \\ K_5 &= c(r_1) + c(r_2) \\ K_6 &= s(r_1) + s(r_2) \end{aligned} \quad (15)$$

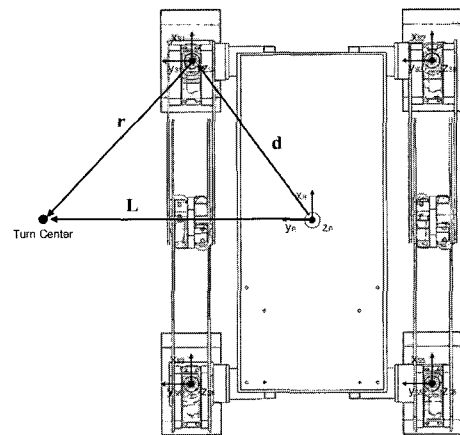


그림 4. 이동로봇의 회전중심을 구하는 기하학적 방법. Fig. 4. The geometric method for center of rotation.

(14)에 의해 회전중심의 위치를 구하고 (11)에 의해 각 바퀴의 조향각을 결정할 수 있다. 지면이 2차 평면으로 가정한다면 바퀴의 조향각은 다음과 같다.

$$r_{x1} = \frac{c(\gamma_{13})}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_1 + a_4 \cdot K_3 + a_1 \cdot K_5\} - \frac{s(\gamma_{13})}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_2 - a_4 \cdot K_4 - a_1 \cdot K_6\} - a_2 - a_1 c(\gamma_3) \quad (16)$$

$$r_{y1} = \frac{\dot{x}_d}{\dot{\phi}_d} + \frac{a_1 \{s(r_1) \cdot \dot{\rho}_1 + s(r_2) \cdot \dot{\rho}_2\}}{2\dot{\phi}_d} - d_1$$

$$r_{x5} = \frac{c(\beta)}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_1 + a_4 \cdot K_3 + a_1 \cdot K_5\} - \frac{s(\beta)}{2} \cdot \{-R_{omni} \cdot K_2 - a_4 \cdot K_4 - a_1 \cdot K_6\} - a_3 \quad (17)$$

$$r_{y5} = \frac{\dot{x}_d}{\dot{\phi}_d} + \frac{a_1 \{s(r_1) \cdot \dot{\rho}_1 + s(r_2) \cdot \dot{\rho}_2\}}{2\dot{\phi}_d} - d_1$$

(16), (17)에서 바퀴 1의 조향각은 다음과 같다.

$$\tan(\psi_1) = \frac{-sign(r_{y1}) \cdot r_{x1}}{|r_{y1}|} \quad (18)$$

IV. 이동로봇 시스템 및 컴퓨터 시뮬레이션

1. 로봇 기구 및 임베디드 제어 시스템

본 논문을 통해 제작된 이동로봇은 평탄한 지형에서만 주행하기 위한 것이 아니라 비평탄한 지형이나 장애물이 있는 곳에서도 안정된 주행을 할 수 있도록 하기 위하여 차동기어와 로커-보기 사이에 회전조인트들로 구성되는 링크 구조를 채택하였다.

제작된 로봇의 구조는 다음과 같다. 바퀴는 총 6개로 그 중 조향 및 구동이 가능한 4개의 바퀴와 전 방향 이동이 가능하고 구동력이 없는 2개의 보조바퀴를 사용하였다. 바퀴의 지름은 구동바퀴가 140mm 보조바퀴가 80mm이다. 로봇의 크기는 426mm의 폭, 590mm의 길이 그리고 298mm의 높이로 제작되었다. 두 개의 메인 로커는 로봇 몸체의 양 측면에 붙어있고, 각 메인 로커의 양 끝에는 조향 가능한 구동바퀴와 보기가 연결되어 있다. 보기 양끝에는 조향 가능한 구동바퀴와 전 방향 이동 가능한 보조바퀴로 구성되어 있다. 제작된 로봇은 그림 5와 같으며, 실제 동작상황은 [11]에서 볼 수 있다.

로봇을 제어하기 위한 시스템은 다음과 같다. 원하는 로봇의 이동경로에 대한 각 모터의 속도와 조향각을 생성하기 위한 주제어기로 SBC(Single Board Computer), 직접 모터를 제어하기 위한 DC모터 퀴환 제어기, 마지막으로 두 제어기 사이의 네트워크는 CAN(Controller Area Network)을 사용하여 그림 6과 같이 구성하였다.

2. 호스트 모니터링 시스템 및 조이스틱 원격 조작기

본 논문에서 개발한 이동로봇이 사람의 명령을 받아 작업을 수행하기 위해서는 사람과 로봇 사이에 정보를 주고 받을 수 있는 MMI(Man-Machine-Interface)가 필요하다. 개발

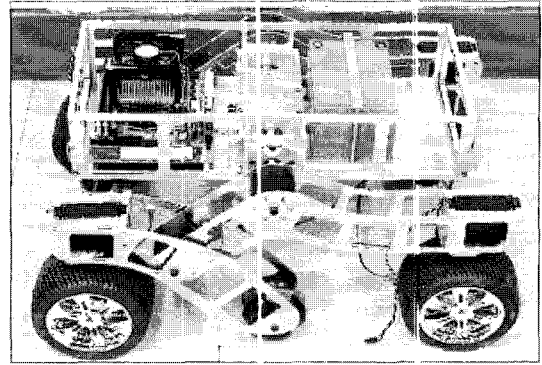


그림 5. 로커-보기 구조를 갖는 이동로봇.  
Fig. 5. The mobile robot with the rocker-bogie link structure.

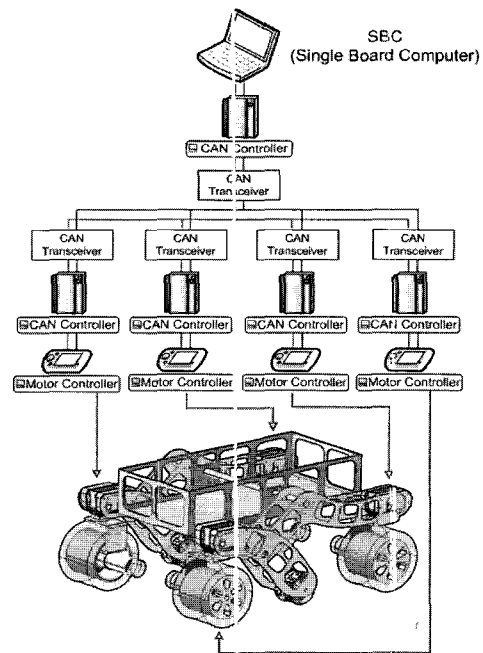


그림 6. 임베디드 제어시스템.  
Fig. 6. Embedded control system.

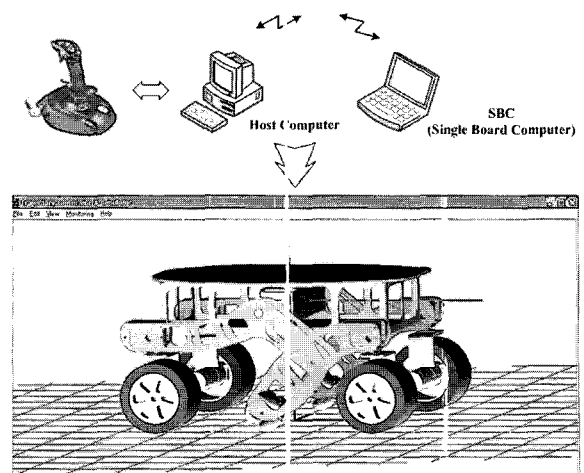


그림 7. MMI와 그래픽 시뮬레이터.  
Fig. 7. MMI and graphic simulator.

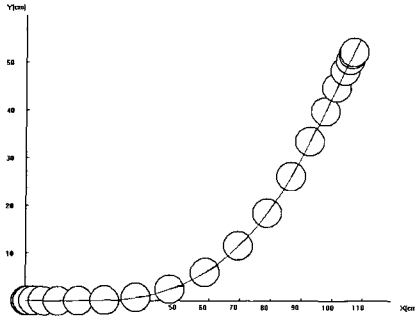
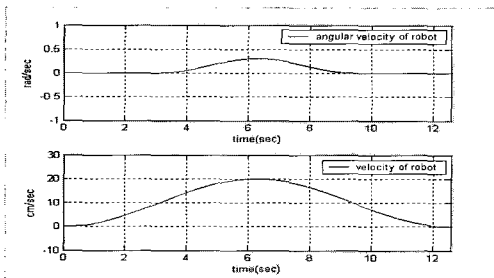
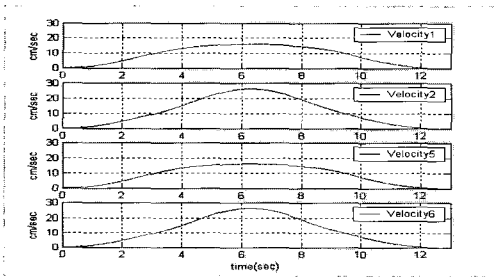


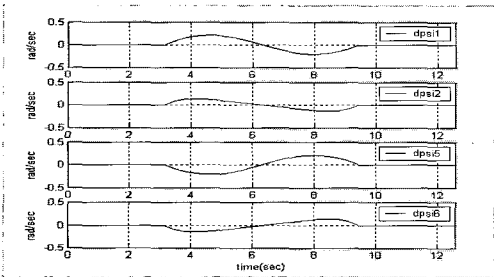
그림 8. 이동로봇의 궤적.  
Fig. 8. The trajectory of mobile robot.



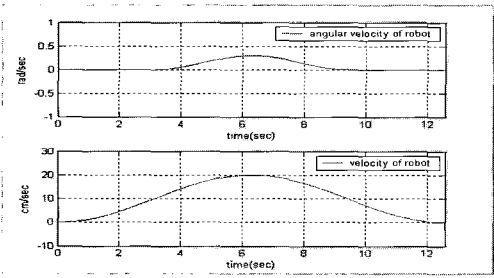
(a) Desired velocity and heading angle for mobile robot.



(b) The linear velocity of each wheel



(c) The angular velocity of each steering wheel



(d) Calculated velocity and heading angle for mobile robot.

그림 9. 컴퓨터 시뮬레이션 결과.  
Fig. 9. The result of computer simulation.

한 사용자 인터페이스는 로봇의 움직임을 그래픽 애니메이션으로 보여줌으로서 사용자가 상황에 맞게 적절한 명령을 내릴 수 있게 한다. 로봇에 대한 명령은 조이스틱을 이용한 원격조작이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 그림 7은 개발한 그래픽 시뮬레이터와 시스템 구성을 나타낸다.

MMI는 로봇의 이동경로 및 각 모터의 상태를 모니터링하고, 무선 랜을 통하여 원격에서 로봇에 접속한 후 명령을 전달할 수 있도록 하였다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 절에서는 3절에서 구한 기구모델을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증한다. 이동로봇이 그림 8과 같은 궤적을 그리며 이동할 때 그에 따른 기구학 및 역기구학을 해석하였다.

그림 9는 원하는 로봇의 속도명령에 대한 기구학 및 역기구학 시뮬레이션 결과이다. 그림 9(a)는 원하는 이동로봇의 속도 및 방향각 그림 9(b)와 (c)는 역기구학에 의해 계산되어진 각 바퀴의 속도와 조향각, 그리고 그림 9(d)는 기구학에 의해 다시 계산되어진 로봇의 속도 및 방향각을 나타낸다. 그림 9(a)와 그림 9(d)의 그래프에 나타나듯이 본 논문에서 해석한 이동로봇의 기구학과 역기구학의 해가 맞음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 이동로봇 시스템 개발과 기구학 및 역기구학의 해를 구하는 방법에 대해 서술하였다. 로봇은 전 방향으로 이동이 가능한 조향장치와 비 평탄 지형이나 암석과 같은 장애물이 있는 험로를 주행 시 이를 극복할 수 있는 로커-보기 링크 구조를 갖도록 제작하였다. 이러한 메커니즘은 이동로봇이 평탄하지 않은 지형을 이동할 경우 바퀴와 지면이 떨어지지 않고 항상 접지될 수 있도록 한다. 본 논문을 통해 제작된 로봇은 앞뒤 4개의 바퀴 모두 조향이 가능하고, 가운데 2개의 바퀴는 전 방향성을 갖는 수동형 바퀴를 사용하였기 때문에 제자리 회전뿐만 아니라 전 방향으로도 이동이 가능한 구조를 갖게 하였다. 또한 중앙에 위치한 2개의 바퀴를 로봇 중심에 오도록 배치하여 로봇의 회전중심이 각 바퀴의 회전축과 일치하도록 설계하였다. 따라서 바퀴들이 접촉면과 슬립이 발생하지 않으며, 상대적으로 높은 이동성을 갖는다.

본 논문에서 로봇의 기구학을 해석하는 방법이 [1,2]에서와 같이 기존에 방법과 유사한 과정을 갖지만 로봇을 실제 제작하고, 그에 맞게 기구학을 재해석 하는데 중점을 두었다. 기구해석을 위한 로봇모델링 방법으로는 매니플레이터형 로봇의 해석방법으로 많이 사용하는 동차변환행렬과 D-H 규약뿐만 아니라 순간일치좌표계와 S-U 규약을 도입하였다. 이는 바퀴형 이동로봇이 기구 구조상 링크들이 하나의 몸체를 중심으로 여러 링크들이 병렬적으로 연결되어 있는 다중체인구조이고, 높은 짝으로 바퀴와 지면이 관절을 이루고 있기 때문이다. 그래서 본 논문에서는 높은 짝을 이루는 바퀴와 지면에 대해서는 S-U 규약을 그리고 낮은 짝을 이루는 나머지 관절에 대해선 D-H 규약을 적용하였다. 또한 자코비안 행렬을 이용하여 로봇의 순방향 속도기구학

과 그 역기구학을 유도하였다. 또한 실제 제작된 로봇과 제어시스템을 보이고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 속도기구학에 대한 타당성을 검증하였다.

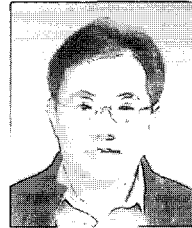
#### 참고문헌

- [1] M. Tarokh, G. McDermott, S. Hayati, and J. Hung, "Kinematic modeling of a high mobility mars rover," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, vol. 2, pp. 992-998, 10-15 May, 1999.
- [2] R. Volpe, J. Balaram, T. Ohm, and R. Ivlev, "The rocky 7 mars rover prototype," *IEEE. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1558-1564, 4-8 Nov, 1996.
- [3] M. Thianwiboon, V. Sangveraphunsiri, and R. Chancharoen, "Rocker-bogie suspension performance," *Proc. of 11th International Pacific Conference in Automotive Engineering*, Shanghai, 6-9 Nov, 2001.
- [4] N. Sheth, J. Uicker, and J. Jr, "A generalized symbolic notation for mechanism," *Journal of Engineering for Industry*, Series B, vol. 93, no. 70, pp. 102-112, Feb, 1971.
- [5] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 22, *Trans. on ASME*, vol. 77, Series E, pp. 215-221, 1955.
- [6] P. F. Muir and C. P. Neumann, "Kinematic modeling of wheeled robots," *Journal of Robotics System*, vol. 4 no. 2, pp. 281-340, April 1987.
- [7] T.-G. Gang and S.-Y. Yi, "Kinematic modeling of mobile robot with rocker-bogie link structure," *Proc. of Int'l Conf. on Mechatronics and Information Technology, Chongqing, China*, 20-23 Sept, 2005.
- [8] 신동현, 박경훈, "바퀴형 이동로봇의 속도기구학," *한국정밀공학회지*, 제19권, 제5호, pp. 118-125, 5. 2002.
- [9] 신동현, "페루프 체인 및 순간 일치 좌표계를 사용한 로봇의 속도 기구학," *한국정밀공학회지*, 제20권, 제4호, pp. 103-111, 4. 2003.
- [10] Siegart, "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain," *Journal of robotics and autonomous system*, 40:151-162, 2002
- [11] [http://irobot.chonbuk.ac.kr/avis/mobile\\_robot.wmv](http://irobot.chonbuk.ac.kr/avis/mobile_robot.wmv)



#### 강택기

1981년 2월 4일생. 2004년 2월 전북대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 2006년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사). 관심분야는 기구 모델링, 로봇 공학, 자동화 시스템, 지능제어.



#### 이수연

1964년 10월 2일생. 1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California, Dept. of CS, Post Doc. 1999년 9월~현재 국립전북대학교 전자정보공학부 교수. 관심분야는 인간형 로봇, 이동 로봇, 지능 제어.