

미소운동 변환을 이용한 자율주행 자전거의 기구학 모델

Kinematic Modeling for Autonomous Bicycle Using Differential Motion Transformation

이 수 영¹

Yi Soo-Yeong¹

Abstract This paper presents a new method of kinematic modeling for autonomous bicycle by using the differential motion transformation. Kinematic model is indispensable to trajectory planning and control for an autonomous mobile robot. The conventional methods of kinematic modeling for an autonomous bicycle depend on intuition by geometry. On the contrary, the proposed method in this paper is based on the systematic differential motion transformation, thus applicable to various types of autonomous bicycles. The differential motion transformation gives Jacobian between two coordinate frames and the velocity kinematics as a result.

Keywords: kinematic model, autonomous bicycle, differential motion transformation, Jacobian

1. 서론

자전거는 사람에게 친숙하며 매우 오래된 이동수단이다. 이를 무인 자율 이동화하는데 있어서는 시스템 제어이론 측면의 여러가지 문제들이 있기 때문에 근래에는 제어 기법 개발의 테스트베드로서 새롭게 많은 관심을 받고 있다^[1]. 일반적으로 자율 이동로봇에 대한 운동경로 계획과 추종제어를 위해서는 기구학 모델이 필수적이다. 매니플레이터형 로봇의 경우에는 다양한 기구학 모델 방법이 개발되어 있지만, 자율이동 자전거를 포함한 바퀴형 이동로봇은 그 중요성에도 불구하고 체계적인 기구학 모델 방법이 부족한 편이다. 이는 현재 사용되는 대부분의 이동로봇이 단순 구조의 두 바퀴형(bi-wheel)이며, 이 경우에는 직관적으로 쉽게 기구학 모델을 구할 수 있기 때문이다^[2]. 그러나 단순 두 바퀴형태를 벗어난 다양한 형태의 이동로봇들의 경우에는 직관적인 방법으로 기구학 모델을 구하기는 어려우며, 분석과 검증에 위한 체계적인 기구학 모델링 방법이 필요하다.

이에 따라서 P. Muir 등은 매니플레이터형 로봇의 경우와 같이 바퀴형 이동로봇에 대해서도 변환행렬을 이용하여 기구학 모델을 구하는 체계적인 방법을 제안하였다^[3]. 이 방법의 특징은 로봇 각 관절에 좌표계를 설정하는데 있어서, Denavit-Hartenburg 규약 대신에 Sheth-Uicker 규약을 이용하고, 2 자유도 이상을 갖는 높은 짝(high pair) 관절에 대해서 순간일치좌표계(Instantaneous Coincident Coordinate System)의 개념을 도입하여 좌표계간의 상대속도를 표현하였다는데 있다. D. Shin 등은 바퀴와 지면을 포함한 이동로봇 전체의 페루프 체인에 대해서 [3]의 방법을 확장할 수 있음을 보였고, 이 방법을 이족로봇과 이동 매니플레이터 로봇의 기구학 모델을 얻는데 적용하였다^[4].

한편 [5]에서는 공(ball)과 같은 외관을 갖는 구형 로봇 개발과 함께 미소운동 변환방법(differential motion transformation)을 적용한 새로운 기구학 모델 방법을 제시하였다. 미소운동은 좌표계 각 축을 기준으로 미소시간 동안의 병진운동과 회전운동의 크기를 나타내는 것으로서, 곧 속도/각속도의 의미를 가진다. 따라서 미소운동 변환은 두 좌표계 사이의 자코비안을 나타내게 된다. 그러므로 미소운동 변환방법을 통해 구동모터의 속도를 로봇 몸체의 속도로 변환함으로써 이동로봇의 속도/각속도 기구학 모델을 구할 수 있다.

Received : Aug. 19. 2013; Reviewed : Sep. 25. 2013; Accepted : Oct. 11. 2013

※ "This study was financially supported by Seoul National University of Science & Technology."

¹ Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology (suylee@seoultech.ac.kr)

본 논문에서는 자율이동 자전거의 기구학 모델을 구하기 위한 미소운동 변환방법을 제안하고자 한다. 자율이동 자전거의 기구학 모델은 이미 [6][7]을 포함한 많은 문헌들에 제시되어 있다. 특히 [8]에서는 자전거 상의 위치에 따라 기구학 모델이 다르게 표현될 수 있음을 보였다. 그러나 기존의 방법들은 주로 기하학적 직관에 의존하는 것이 보통이었으며, 다양한 구조의 자율이동 자전거 시스템에 통일적으로 적용하기가 어려운 것이 사실이다. 반면에 본 미소운동 변환방법은 수학적으로 이미 잘 정립되어 있는 좌표변환 과정을 이용하므로 자율이동 자전거 기구학 모델 방법에 대한 체계적인 접근방법이 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 상대적인 좌표변환을 통해 구동바퀴의 속도로부터 이동 로봇 몸체에서의 속도를 구하게 되므로, 이미 [8]에서 지적된 바와 같이 구동모터가 앞바퀴, 혹은 뒷바퀴에 설치된 경우에 따라 로봇 몸체(탑승자의 위치)에서의 속도 기구학이 달라질 수 있음을 체계적으로 보일 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 로봇공학에서 이미 잘 알려진 미소운동 변환 방법에 대해서 개괄적으로 소개한다. 3장에서는 구동바퀴가 앞바퀴, 그리고 뒷바퀴인 각각의 경우에 대해서 미소운동 변환방법을 이용한 기구학 모델을 구한다. 그리고 4장에서 결론을 맺을 것이다.

2. 좌표계 사이의 미소운동 변환

본 절에서는 이미 잘 알려진 좌표계 사이의 미소운동 변환을 간단히 소개한다⁹⁾. 주어진 좌표계 A 에서 한 점의 회전운동 및 병진운동을 포함하는 미소운동은 다음과 같이 표현된다:

$$\Delta^A = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z^A & \delta_y^A & d_x^A \\ \delta_z^A & 0 & -\delta_x^A & d_y^A \\ -\delta_y^A & \delta_x^A & 0 & d_z^A \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 미소운동 벡터 $\delta^A = [\delta_x^A \delta_y^A \delta_z^A]^t$ 와 $d^A = [d_x^A d_y^A d_z^A]^t$ 는 $\delta t \rightarrow 0$ 일 때, 좌표계 A 의 각 축을 기준으로 한 회전속도 및 병진속도를 의미하게 된다.

이제 그림 1과 같이 두 좌표계 B 와 C 사이의 좌표변환이 T_B^C 로 주어질 때, B 좌표계에서의 미소운동 Δ^B 를 C 좌표계의 미소운동으로 다음과 같이 변환할 수 있다:

$$\Delta^C = T_B^C{}^{-1} \Delta^B T_B^C \quad (2)$$

두 좌표계 사이의 좌표변환 T_B^C 는 식 (3)과 같이 3×1 열벡터들($\mathbf{n}, \mathbf{o}, \mathbf{a}, \mathbf{p}$)로 표현할 수 있다:

$$T_B^C = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이제 식 (3)을 식 (2)의 우변에 대입하고 수식을 정리하면 다음의 행렬 항등식을 얻을 수 있다:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\delta_z^C & \delta_y^C & d_x^C \\ \delta_z^C & 0 & -\delta_x^C & d_y^C \\ -\delta_y^C & \delta_x^C & 0 & d_z^C \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\delta^B \cdot \mathbf{a} & \delta^B \cdot \mathbf{o} & \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} \\ \delta^B \cdot \mathbf{a} & 0 & -\delta^B \cdot \mathbf{n} & \mathbf{o} \cdot \mathbf{l} \\ \delta^B \cdot \mathbf{o} & \delta^B \cdot \mathbf{n} & 0 & \mathbf{a} \cdot \mathbf{l} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $\mathbf{l} = \delta^B \times \mathbf{p} + d^B$ 이다. 식 (4)에서 “ \cdot ”과 “ \times ”는 각각 벡터의 내적(inner product)과 외적(outer product)을 의미한다. 식 (4)에서 대응되는 항끼리 정리하면 식 (5)와 같이 좌표계 사이의 미소운동 변환식을 구할 수 있다:

$$\delta_x^C = \delta^B \cdot \mathbf{n} \quad (5-1)$$

$$\delta_y^C = \delta^B \cdot \mathbf{o} \quad (5-2)$$

$$\delta_z^C = \delta^B \cdot \mathbf{a} \quad (5-3)$$

$$d_x^C = \mathbf{n} \cdot (\delta^B \times \mathbf{p} + d^B) \quad (5-4)$$

$$d_y^C = \mathbf{o} \cdot (\delta^B \times \mathbf{p} + d^B) \quad (5-5)$$

$$d_z^C = \mathbf{a} \cdot (\delta^B \times \mathbf{p} + d^B) \quad (5-6)$$

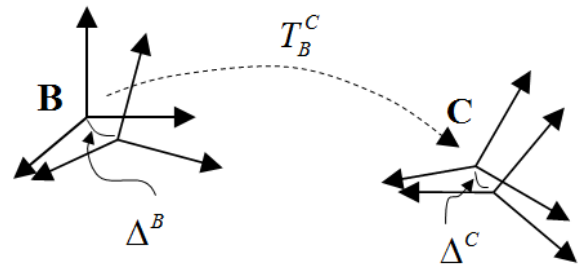


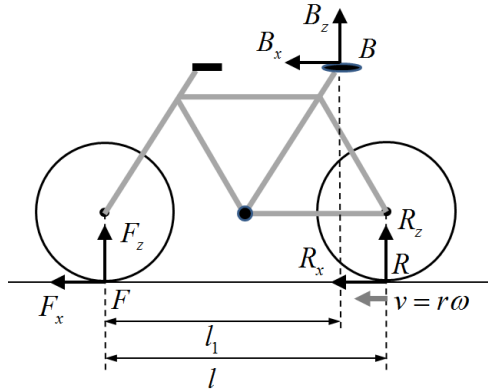
Fig. 1. Differential motion transformation between coordinate frames

3. 자율이동 자전거 기구학

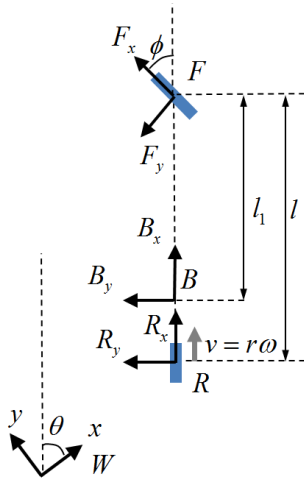
본 절에서는 앞서 설명한 미소운동 변환방법을 이용하여 앞바퀴 구동, 그리고 뒷바퀴 구동인 각각의 경우에 대해서 자율이동 자전거의 속도 기구학을 구한다. 먼저 자율이동 자전거는 2차원 지면상에서 지면에 대해 수직방향으로 균형을 유지하며 운동하는 것으로 가정한다. 본 논문은 기구학 모델링 방법에 관한 논의에 국한하므로 동역학 제어에 의한 균형 유지 문제는 다루지 않는다.

3.1 뒷바퀴 구동의 경우

그림 2에 자율이동 자전거의 개략적인 구조와 설정 좌표계를 보인다. 뒷바퀴에 설치된 좌표계의 R_x 방향 속도 $v = r\omega$ 가 자전거 구동 속도를 의미한다. 이를 $v_x^R = r\omega$ 와 같이 표시한다. 물론 횡방향 구동성분은 $v_y^R = 0$ 이다. 앞바



(a) Unmanned bicycle (Side view)



(b) Coordinate frames(Top view)

Fig. 2. Unmanned bicycle system

퀴에 설치된 좌표계의 F_x 축과 뒷바퀴 좌표계의 R_x 축이 이루는 각 ϕ 는 자전거의 조향각을 나타낸다. 실제 자전거의 경우, 조향을 위한 핸들 축은 지면과 수직이 아니라 뒤쪽으로 약간 기울여 설치되어 있지만, 실제로 자전거의 방향변화에 기여하는 조향각은 수직축을 중심으로 한 회전성분 ϕ 가 된다. 안장에 설치된 좌표계 B 는 탑승자의 이동 좌표계를 나타내며, 지면에 설치된 W 는 기준 좌표계이다. W_x 축과 B_x 축이 이루는 각 θ 가 자전거의 방향각을 의미하게 된다.

좌표계 R 과 F 사이의 미소운동 변환식과 좌표변환행렬은 다음과 같다:

$$\Delta^F = T_R^F{}^{-1} \Delta^R T_R^F \quad (6)$$

$$T_R^F = Trans(x, l) Rot(z, \phi) = \begin{bmatrix} c\phi - s\phi \ 0 \ l \\ s\phi \ c\phi \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $Trans(\cdot, \cdot)$ 과 $Rot(\cdot, \cdot)$ 은 각각 병진 및 회전 변환을 의미하며, $s\phi$ 와 $c\phi$ 는 각각 $\sin(\phi)$ 와 $\cos(\phi)$ 를 나타낸다. 이제 식 (5)에 따라 좌표계 F 에서의 미소운동을 구하면 다음과 같다:

$$\delta_x^F = c\phi \delta_x^R + s\phi \delta_y^R \quad (8-1)$$

$$\delta_y^F = -s\phi \delta_x^R + c\phi \delta_y^R \quad (8-2)$$

$$\delta_z^F = \delta_z^R \quad (8-3)$$

$$d_x^F = c\phi d_x^R + l s\phi \delta_z^R + s\phi d_y^R \quad (8-4)$$

$$d_y^F = -s\phi d_x^R + l c\phi \delta_z^R + c\phi d_y^R \quad (8-5)$$

$$d_z^F = d_z^R - l \delta_y^R \quad (8-6)$$

앞 바퀴 좌표계 F 에서의 운동은 $x-y$ 평면에서의 병진운동과 z 축 중심의 회전운동 성분으로 기술되고, 좌표계 R 에서 횡방향 구동 성분은 $d_y^R = 0$ 이므로 식 (8-3), (8-4), (8-5)로부터 다음을 얻을 수 있다:

$$\delta_z^F = \delta_z^R \quad (9-1)$$

$$d_x^F = c\phi d_x^R + l s\phi \delta_z^R \quad (9-2)$$

$$d_y^F = -s\phi d_x^R + l c\phi \delta_z^R \quad (9-3)$$

그런데 여기서 한가지 주목해야 할 것은 좌표계 F 에서의 횡방향 운동성분이 $d_y^F = 0$ 이어야 한다는 것이다. 이것이 자전거 시스템의 nonholonomy 특성의 원인이 된다. 그러므로 식 (9-3)으로부터 다음의 결과를 얻는다:

$$\delta_z^R = \frac{1}{l} \tan \phi d_x^R \quad (10)$$

이 결과를 다시 식 (9-1)~(9-3)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\delta_z^F = \frac{1}{l} \tan \phi d_x^R \quad (11-1)$$

$$d_x^F = \frac{1}{c\phi} d_x^R \quad (11-2)$$

$$d_y^F = 0 \quad (11-3)$$

식 (11)을 $\Delta t \rightarrow 0$ 에서 표현하면 다음과 같다:

$$\omega_z^F = \frac{1}{l} \tan \phi v_x^R \quad (12-1)$$

$$v_x^F = \frac{1}{c\phi} v_x^R \quad (12-2)$$

$$v_y^F = 0 \quad (12-3)$$

위 식은 좌표계 F 에서의 운동이므로 이를 기준 좌표계 W 의 운동으로 변환하기 위해서는 z 축을 중심으로 F_x 와 W_x 축이 이루는 각 $\theta + \phi$ 만큼 회전변환하면 된다:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \Big|_W &= \begin{bmatrix} c(\theta + \phi) - s(\theta + \phi) & 0 \\ s(\theta + \phi) & c(\theta + \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{v_x^R}{c\phi} \\ 0 \\ \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \end{bmatrix} \Big|_F \\ &= \begin{bmatrix} c(\theta + \phi) \frac{v_x^R}{c\phi} \\ s(\theta + \phi) \frac{v_x^R}{c\phi} \\ \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)은 좌표계 F 에서의 운동을 기준좌표계로 표현한 것이다.

이제 Δ^F 로부터 탐승자 좌표계의 미소운동 Δ^B 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta^B = T_F^{B^{-1}} \Delta^F T_F^B \quad (14)$$

좌표변환 T_F^B 는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} T_F^B &= Rot(z, -\phi) Trans(x, -l_1) Trans(z, h) \\ &= \begin{bmatrix} c\phi & s\phi & 0 & -l_1 c\phi \\ -s\phi & c\phi & 0 & l_1 s\phi \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

위 식에서 h 는 지면으로부터 좌표계 B 의 원점까지의 z 축 방향 높이를 나타낸다. 앞서와 같이 식 (5)를 통해 B 에서 $x-y$ 평면에서의 병진운동 속도와 z 축 회전운동 각속도를 구하면 다음과 같다:

$$v_x^B = v_x^R \quad (16-1)$$

$$v_y^B = \left(1 - \frac{l_1}{l}\right) \tan \phi v_x^R \quad (16-2)$$

$$\omega_z^B = \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \quad (16-3)$$

위 식을 기준좌표계 W 에서의 속도 기구학으로 표현하기 위해서는 B_x 축과 W_x 축이 이루는 각 θ 만큼 회전변환을 취해주면 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \Big|_W &= \begin{bmatrix} c\theta - s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^R \\ \left(1 - \frac{l_1}{l}\right) \tan \phi v_x^R \\ \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \end{bmatrix} \Big|_B \\ &= \begin{bmatrix} \{c\theta - (1 - \frac{l_1}{l})s\theta \tan \phi\} v_x^R \\ \{s\theta + (1 - \frac{l_1}{l})c\theta \tan \phi\} v_x^R \\ \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)에서 $l_1 = l$ 인 경우는 아래와 같이 뒷바퀴의 속도 기구학을 의미하게 된다:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \Big|_W = \begin{bmatrix} c\theta v_x^R \\ s\theta v_x^R \\ \frac{\tan \phi}{l} v_x^R \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.2 앞바퀴 구동의 경우

이 경우는 자전거 구동속도 $v = r\omega$ 가 앞바퀴에 설치된 좌표계의 F_x 방향 속도를 의미한다. 즉 F 좌표계에서 $v_x^F = r\omega$ 로 표시할 수 있으며, 횡방향 구동속도는 $v_y^F = 0$ 이다. 2절에서 설명한 바와 같이 다음 식 (19)에 따라 좌표계 F 에서의 운동을 좌표계 R 에서의 운동으로 변환할 수 있다:

$$\Delta^R = T_F^{R^{-1}} \Delta^F T_F^R \quad (19)$$

두 좌표계 사이의 변환행렬은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} T_F^R &= Rot(z, -\phi) \cdot Trans(x, -l) \\ &= \begin{bmatrix} c\phi & s\phi & 0 & -lc\phi \\ -s\phi & c\phi & 0 & ls\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

이제 식 (5)에 따라 좌표계 R 에서 $x-y$ 평면상의 병진 미소운동과 z 축 회전 미소운동을 구하면 다음과 같다:

$$\delta_z^R = \delta_z^F \quad (19-1)$$

$$d_x^R = c\phi d_x^F - s\phi d_y^F \quad (19-2)$$

$$d_y^R = s\phi d_x^F + c\phi d_y^F - l\delta_z^F \quad (19-3)$$

앞바퀴의 횡방향 구동성분은 $d_y^F = 0$ 이며, 또한 좌표계 F 에서 nonholonomy 특성에 따라 횡방향 운동은 $d_y^F = 0$ 이므로 식 (19-3)에서 다음의 결과를 얻는다:

$$\delta_z^F = \frac{s\phi}{l} d_x^F \quad (20)$$

이제 이 결과를 식 (19)에 다시 대입하고 $\Delta t \rightarrow 0$ 에서 표현하면 다음과 같다:

$$\omega_z^R = \frac{s\phi}{l} v_x^F \quad (21-1)$$

$$v_x^R = c\phi v_x^F \quad (21-2)$$

$$v_y^R = 0 \quad (21-3)$$

식 (21)을 기준좌표계 W 에서의 속도 기구학으로 표현하기 위해서는 다음과 같이 z 축을 기준으로 R_x 축과 W_x 축이 이루는 각 θ 만큼 회전변환하면 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \Big|_W &= \begin{bmatrix} c\theta - s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi v_x^F \\ 0 \\ \frac{s\phi}{l} v_x^F \end{bmatrix} \Big|_R \\ &= \begin{bmatrix} c\theta c\phi v_x^F \\ s\theta c\phi v_x^F \\ \frac{s\phi}{l} v_x^F \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

이제 이를 일반화하기 위해 탑승자 좌표계 B 에서의 미소운동을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta^B = T_R^{B^{-1}} \Delta^R T_R^B \quad (23)$$

좌표계 R 과 좌표계 B 사이의 변환행렬 T_R^B 은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} T_R^B &= Trans(x, l-l_1) Trans(z, h) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l-l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

앞서와 같은 방법으로 식 (5)에 따라 B 좌표계에서 $x-y$ 평면에서의 병진 및 z 축 회전 미소운동과 $\Delta t \rightarrow 0$ 에 따른 속도/각속도를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\omega_z^B = \frac{s\phi}{l} v_x^F \quad (25-1)$$

$$v_x^B = c\phi v_x^F \quad (25-1)$$

$$v_y^B = (1 - \frac{l_1}{l}) s\phi v_x^F \quad (25-1)$$

위 결과를 기준좌표계 W 로 변환하면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \Big|_W &= \begin{bmatrix} c\theta - s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi v_x^F \\ (1 - \frac{l_1}{l}) s\phi v_x^F \\ \frac{s\phi}{l} v_x^F \end{bmatrix} \Big|_B \\ &= \begin{bmatrix} \{c(\theta + \phi) + \frac{l_1}{l} s\theta s\phi\} v_x^F \\ \{s(\theta + \phi) - \frac{l_1}{l} c\theta s\phi\} v_x^F \\ \frac{s\phi}{l} v_x^F \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

이제 3-1절과 3-2절의 결과를 정리하면 기준좌표계 W 상에서 탑승자 좌표계 B 의 기구학은 식 (17)과 식 (26)으로부터 다음과 같이 표현된다.

- 뒷 바퀴 구동속도가 $v=r\omega$ 인 경우:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_W = \begin{bmatrix} \{c\theta - (1 - \frac{l_1}{l})s\theta \tan\phi\} r\omega \\ \{s\theta + (1 - \frac{l_1}{l})c\theta \tan\phi\} r\omega \\ \frac{\tan\phi}{l} r\omega \end{bmatrix} \quad (27)$$

- 앞 바퀴 구동속도가 $v=r\omega$ 인 경우:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_W = \begin{bmatrix} \{c(\theta + \phi) + \frac{l_1}{l}s\theta s\phi\} r\omega \\ \{s(\theta + \phi) - \frac{l_1}{l}c\theta s\phi\} r\omega \\ \frac{s\phi}{l} r\omega \end{bmatrix} \quad (28)$$

위 식에서 $l_1 = l$ 인 경우는 뒷 바퀴의 기구학을 의미하며, 기존의 기구학 모델 결과^[8]와 일치한다.

4. 결론

자율이동 자전거 시스템은 제어이론 개발의 테스트베드로서 다양한 구동방식 및 구조로 개발되고 있다. 자율이동 궤적 생성 및 추종제어를 위해서 체계적인 기구학 모델 방법이 필요하다. 기하학적 직관에 기반을 둔 기존의 방법들은 다양한 구조의 자율이동 자전거 시스템에 통일적으로 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 좌표계 사이의 미소운동 변환방법에 기반을 둔 체계적인 자율이동 자전거 기구학 모델 방법을 제시하였다. 특히 자전거의 기구학을 일반화하기 위해 탑승자 좌표계의 기구학 모델을 구하였으며, 기존의 기하학적 직관에 근거한 방법으로는 설명하기 어려운 nonholonomy 특성을 활용하였다. 본 기구학 모델방법은 다양한 구조의 자율이동 자전거에 대해서 기존의 기구학 모델 방법에 대한 체계적인 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. M. Gallaspy, Gyroscopic stabilization of an unmanned bicycle, M.S. Thesis, Auburn University, USA, 1999.
- [2] D. Shin and K. Park, "Generalized Kinematics

Modeling of Wheeled Mobile Robots," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, vol. 19, no. 5, pp. 118-125, 2002.

- [3] P. Muir and C. Neuman, "Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots," Technical Report No. CMU-RI-TR-80-12, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 15213, 1986.
- [4] D. Shin, "Robot Velocity Kinematics by Closed-loop Chain and ICC," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, vol. 20, no. 4, pp. 103-111, 2003.
- [5] J. Park, S. Kim, and S. Yi, "Development of Stable Ballbot with Omnidirectional Mobility," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 19, no. 1, pp. 40-44, 2013.
- [6] R. E. Klein, "Using Bicycles to Teach System Dynamics," IEEE Control Systems Magazine, vol. 1, pp. 4-8, 1989.
- [7] G. Indiveri, "Kinematic Time-invariant Control of a 2D Nonholonomic Vehicle," Proc. of IEEE International Conference on Decision and Control, vol. 4, pp. 2112-2117, 1999.
- [8] W. Ham, "Kinematics and Inverse Kinematics in Unmanned Bicycle System," Journal of Korea Robotic Society, vol. 1, no. 1, pp. 73-80, 2006.
- [9] P. McKerrow, Introduction to Robotics, Addison-Wesley, 1990.



이수영

1988 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990 KAIST 전기및전자공학과(공학석사)
1994 KAIST 전기및전자공학과(공학박사)

1995~1999 KIST 시스템연구부 선임연구원
1997~1998 Univ. of Southern California 박사후과정
1999~2007 전북대학교 전자정보공학부 부교수
2005~2006 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문 교수
2007~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
관심분야: 이동로봇, 로봇비전