시스템 모델링 및 주행 시뮬레이션을 통한 인휠드라이브 타입 6WD/6WS 차량 플랫폼의 주행 거동 분석

Behavior Analysis of In-wheel Drive Type 6WD/6WS Vehicle Based on System Modeling and Driving Simulation

이 정 엽, 서 승 환, 손 웅 희, 유 승 남, 한 창 수*
(Jung-Yeob Lee, Seung-Whan Suh, Woong-Hee Shon, Seung-Nam Yu, and Chang-Soo Han)

Abstract: A skid-steering method which applied to the various mobile robot platforms currently shows its effectiveness in the specified field areas and purposes. This system contains however, several problems of its intrinsic properties such as slippages occurred by different moving direction between vehicle's driving and wheel's rotary and difficulties of driving performance control and so on. This paper deals with the suggestion of suitable control algorithm for 6WD/6WS skid steering wheeled vehicle and verified its feasibility by analyzing the behavior of 6WD/6WS skid-steered wheeled vehicle model and by applying the engineering analytical method to the considered mobile platform. The Performance of vehicle model is evaluated by using slip mode control to follow the steering input and, as a future work, this control algorithm could be applied to real 6WD/6WS in-wheel drive type vehicle finally.

Keywords: mobile robot, skid steering control, in-hub motor driving

I. 서론

과거의 6륜 차량의 연구는 주로 군용차량으로서의 연구에 집중이 되어왔으며 실제 사용된 차량의 대표적인 사례는 미국의 M38, 영국의 Alvis Saladin 및 프랑스의 Gendron Somua 등이 있다. 이들 차량은 궤도 차량인 탱크가 보유하는 험지 성능을 갖기 위해 독립 현가장치 및 6륜 구동방식을 적용하였다. 실제로 비궤도 차량이 진흙과 같은 지형을 제외하고는 험지 주행에 적합하고 궤도 차량과 같이 피봇팅 기능도 수행할 수 있음이 보고된바 있다[1,2].

한편, 최근에는 환경오염과 에너지문제의 강력한 해결책으로 전기자동차(electrical vehicles)에 관한 관심이 증대됨과 동시에, 실제 전기차를 연구하고 개발하는데 많은 검증과정이 있어왔고, 몇몇의 전기자동차는 고성능의 모터와 배터리를 적용함으로서, 아래에 열거하는 측면에서 내연기관 엔진 차량에 비해 우수한 성능을 발휘하고 있다. 첫째, 전기차에 적용되는 전기모터는 내연엔진보다 훨씬 짧은 시간에 보다 정밀한 제어를 할 수 있어서 전기자동차에서도 보다 효율적인 ABS (Anti-Skid Braking System)나 동력제어시스템(TCS: Traction Control System)이 적용될 수 있다[3,4]. 둘째로, 휠에 내장된 모터를 사용하는 전기자동차는 각 구동 휠의 토크를 독립적으로 제어할 수 있어서 차량의 횡 방향 동적 특성 개선에 유용하다. 셋째로, 트랜스미션이나 트랜스퍼케이스 등과 같은 동력전달요소를 제거하여 차량내부의 공간을 효율적으로 활용할 수 있다[5,6].

인휠 독립구동 전기식 이동로봇 또는 자동차는 파워트레인 요소를 제거하여 시스템의 효율을 높이는 장점 이외에도 바퀴에 모터를 직접 장착함으로써 회생제동으로 인한 제동에너지 회수를 극대화함으로써 연비 개선의 효과를 갖는다. 또한 바퀴에 독립적으로 장착된 모터의 효율적인 제어를 통하여 주행 안정성 개선이 가능하다. 인휠 독립구동 이동로봇에서의 안정성 제어는 각 바퀴에 장착된 모터를 이용하여 좌우측 바퀴의 토크차를 발생시켜 선회 운동(direct yaw moment)를 발생시킴으로써 직접 선회방향 모멘트를 정확히 가감할 수 있어 한계 영역에서의 안정성이 증가하며 또한 조향과 제동, 구동을 담당하는 액추에이터가 동일하므로 제어성이 향상된다는 장점을 가지고 이다[7]. 본 연구에서는 향후 필드 운용을 지향하는 인휠드라이브 시스템 기반 6륜 차량에 대해서 MATLAB Simulink®로 각 구성품과 제어로직을 모델화 하고, ADAMS와 연동함으로서 차량의 기본적인 제어 성능을 해석하고 검증하고자 하였다.

II. 시스템 모델링

1. 구성요소 모델링

1.1 6륜 인휠 독립구동 시스템 모델

그림 1은 회전차 조향방식의 6륜 인휠 전기식 독립구동 이동로봇의 동적거동 모델 개략도이다. 8kW급 인휠 모터가 각 바퀴에 삽입되어 있으며, 별도의 조향장치를 이용하지 않고 좌우 인휠 모터의 구동 토크 차이에 의한 회전차 조향에 의하여 선회하게 된다. 본 연구에서는 6륜 인휠 이동로봇 개발에 앞서 주행 및 조향성능 예측, 제어로직 개발

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2009. 10. 14., 수정: 2009. 11. 23., 채택확정: 2009. 12. 29.
이정엽, 손웅희: 한양대학교 메카트로닉스공학과
(yeobbi@naver.com/shon@kitech.re.kr)
서승환, 유승남, 한창수: 한양대학교 기계공학과
(solfa@daekhon.co.kr/hymecer@gmail.com/cshan@hanyang.ac.kr)
※ 본 연구는 (한양대학교 고기능로봇매니퓰레이션연구센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문인력양성사업 및 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경연구센터의 지원 (R11-2005-056-03003-0)에 의해 수행되었음.

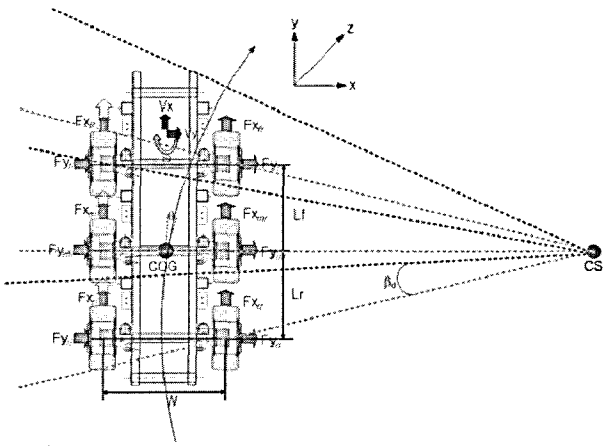


그림 1. 6륜 독립구동 이동로봇 동적거동 모델.
Fig. 1. Dynamic behavior model of 6WD/6WS vehicle.

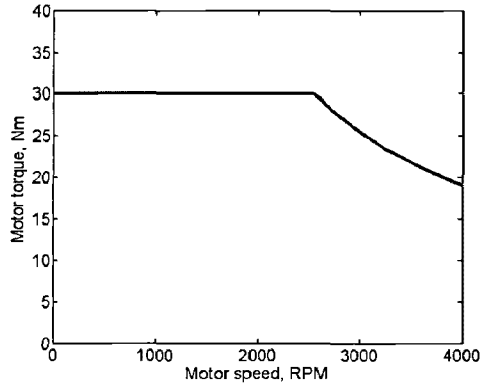


그림 2. 인휠 모터 모델 토크-속도 곡선.
Fig. 2. Torque-velocity curve of in-wheel motor model.

및 검증을 위한 성능 해석시뮬레이터 개발을 위하여 컴퓨터 해석 툴을 이용한 모델링을 수행한다. 모델링은 인휠 모터 및 타이어와 6개 바퀴의 회전과 3개 방향(x, y, z)의 운동(9-DOF)에 대한 것이다[8]. 각 바퀴를 표시하기 위한 첨자는 전방은 f, 중간은 m, 그리고 후방은 r로 두 자리 첨자의 첫째 자리에 표시한다. 두 번째 자리에는 좌측 방향 바퀴는 l, 우측 방향 바퀴는 r로 표시한다. F는 바퀴에 작용하는 힘을 나타내는 것으로 각 바퀴에는 종방향(X), 횡방향(Y)의 힘의 벡터로 작용하게 된다. 이때 무게중심은 휠베이스(W)와 축간(Lf=Lr)의 중심에 위치한다고 가정한다. 조향 요구각()에 대해 플랫폼이 각 으로 회전하게 된다.

1.2 인휠 모터 모델

인휠 모터는 구동조건에 따른 용량 산출을 통해 그림 2의 모터의 특징을 고려하여 아래와 같은 1차 시스템으로 모델링하였다.

$$\frac{T_{motor}}{T_{target}} = \frac{1}{1+\tau_{motor}S} \tag{1}$$

여기서 τ_{motor}는 인휠 모터의 시상수이다. 인휠 모터는 2500RPM 구간까지 최고 토크 30Nm의 정토크 구간을 가지며, 최고 회전속도는 4000RPM이다. 모터 모델은 제어기로부터 모터의 요구 토크 지령을 전달 받도록 구성되었다. 지령된 요구토크만큼 배터리로부터 구동에 필요한 동력을 전류로 소모하게 된다. 인휠 모터는 바퀴와 직결되어 있어 모터의 회전수는 로봇의 속도와 비례하며, 이동로봇이 감속하는 경우에는 모터가 발전기의 역할을 수행하여 제동에너지를 회수하여 배터리에 저장한다.

모터의 출력토크와 전압은 아래와 같다. K_t는 모터토크 상수, K_e는 모터역기전력 상수, w_m는 모터의 회전속도, i_m는 모터에 공급되는 전류이다.

$$\begin{aligned} T_{motor} &= K_t \bullet i_m \\ V_{motor} &= K_e \bullet w_m \end{aligned} \tag{2}$$

그림 3은 위의 식 (2)을 적용하여 구성한 인휠 모터 제어시스템을 나타내고 있다

1.3 타이어 모델

이동 체의 선회 특성은 타이어에서의 횡방향 접지력에 따라 달라진다. 실제 타이어의 특성은 타이어 미끄럼 각이 증가함에 따라 타이어의 횡력이 선형적으로 증가하다가 일정 미끄럼 각 이상에서는 횡력의 포화현상으로 인하여 비선형적으로 변화한다. 본 연구에서는 타이어에 작용하는 구

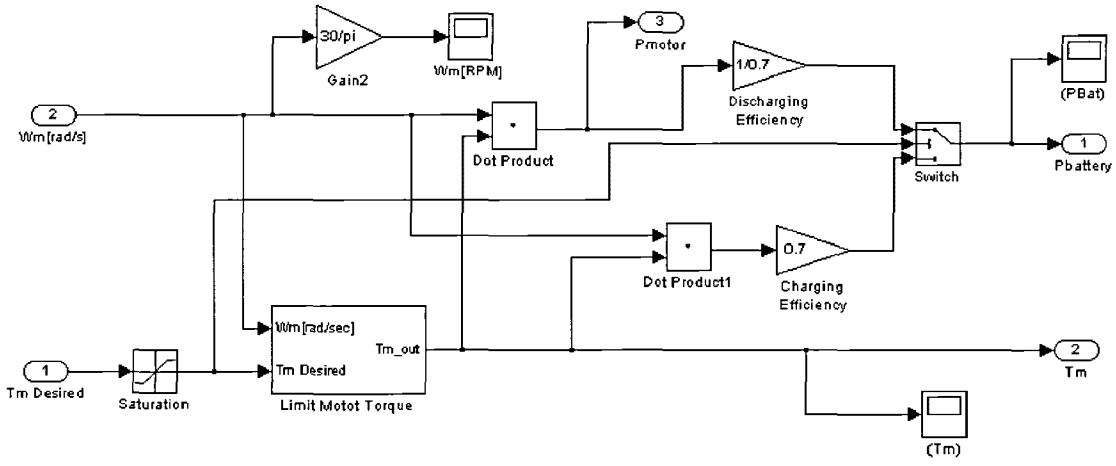


그림 3. 인휠모터 모델 (MATLAB Simulink).
Fig. 3. In-wheel motor model (MATLAB Simulink).

동력의 영향을 고려하여 국제자동차공학회(CAE)의 표준 비선형 타이어 모델을 사용하였다.

$$F_{yi} = K_\xi[-\frac{2}{\pi}\mu(N_i+\triangle N_i)]\tan^{-1}[\frac{\pi C_i\beta_i}{2\mu(N_i+\triangle N_i)}]$$
$$K_\xi = \sqrt{1-[\frac{F_\xi}{\mu(N_i+\triangle N_i)}]^2} \quad (3)$$

여기서 C_i는 타이어 코너링 강성, β_i는 타이어 미끄럼각, K_ξ는 제동에 의한 직진방향 작용력 감소로 인한 횡력의 증가를 나타내는 지수이다.

1.4 이동로봇 플랫폼 모델

시뮬레이션을 통한 이동로봇의 궤적제어 성능확인을 위해서는 실제 로봇의 구조와 조건 및 운동 식을 모델화 하여야 한다. 6륜 독립구동 이동로봇의 속도변화량은 전체중량(m)과 6개 바퀴의 관성(J_{wheel})에 대한 모터의 유효 작용력(F_{motor})와 주행저항력(F_{load})의 비로 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{6F_{motor}-F_{load}}{m+6J_{wheel}/r^2} \quad (4)$$

자동차 형상을 갖는 본 이동로봇이 주행 중에 받는 저항력은 구름저항(rolling resistance)과 공기저항(drag force) 그리고 등판저항(grade resistance)으로 이루어진다. f_R은 구름저항계수, ρ는 공기밀도, C_d는 공기저항계수, A는 전면 투영면적일 때 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{load} = f_R m g\cos\theta + \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 + m g\sin\theta \quad (5)$$

2. 제어 알고리즘

2.1 알고리즘 개요

관성계에서의 6륜 인휠 독립 구동 이동로봇의 제어는 기하학제어, 동역학제어, 구동제어로 3개의 하위 체계로 구성한다. 횡방향의 미끄러짐(skid)로 인하여 이동로봇의 속도에 미치는 제약이나 영향은 일반적인 조향 메커니즘을 가진 이동로봇과는 매우 다르다. 따라서 회전차 조향방식 이동로봇의 기동은 기하학 수준의 제어만으로는 충분하지 못하여서 동역학 모델을 통한 최적화된 제어알고리즘을 구성해야 한다.

주행에 관련한 물리적 현상의 동적모델 설계를 통한 개발은 구동제어 뿐만 아니라 항법과 장애물회피, 월드모델링 등의 자율주행 제어시스템 설계의 필수 과정이라 할 수 있다. 6륜 인휠 독립 구동 이동로봇의 동역학 모델은 지면에서의 슬립과 추진력 등의 수학적 모델과 타이어, 현가장치 등과 같은 플랫폼 모션과 관계된 구성품과 물리적인 무게중심이동, 저항력, 회전모멘트 등의 관성모델을 필요로 한다. 하지만 이러한 모든 제약조건을 포함한 모델의 표현은 매우 복잡해지기 때문에 각 모델이 전체 플랫폼 운동에 미치는 정도에 따라 중요 요소 모델을 기본으로 수식화 하여 제어알고리즘에 반영할 수 있다(그림 4).

운전자나 자율주행과 같은 상위 제어시스템에서는 로봇의 현재 상태와 앞으로의 변화 요구량에 대한 계산에 따른 이동 명령을 한다. 명령된 지령에 따른 전기에너지의 회전에너지 변환은 구동체 드라이버 단계 제어로 이루어지고 동역학 제어단계에서는 각 바퀴에 생성된 에너지와 지면과의 마찰에너지 간의 추진력과 요 모멘트를 제어한다. 각 바퀴의 운동벡터 조합에 따라 로봇의 운동에너지로 변환하여 관성계에서의 로봇의 위치이동이나 자세변화가 있게 된다. 기구학제어 단계에서는 구동플랫폼의 운동에너지의 변화량에 따라 관성계에 대해 로봇의 위치가 이동하는 변화량을 계산하거나 미리 계산된 변화량에 대한 정보를 제공한다.

상위제어시스템에서는 각종 센서로부터 제공된 데이터와 구동제어의 각 서브시스템으로부터 획득한 데이터로부터 새로운 구동명령을 계산하여 원활한 주행제어를 할 수 있다[9].

2.2 운전자 모델

로봇의 주행모드상의 목표 속도와 현재의 속도를 비교하여 가속과 감속 또는 제동 명령을 결정하고 선회 목표각을 제공하는 모델을 의미한다. 실제 운전자의 조종 장치의 조작이거나 자율주행 수준의 운전명령 모델인 것이다. 그림 5와 그림 6은 본 연구에서 사용한 PID 제어 기반의 운전자 모델을 도시하고 있다.

2.3 제어기 모델

이동로봇의 전체 거동을 제어하는 상위 제어로직을 그림 7과 같이 구성한다. 바퀴의 미끄러짐 상태를 추정하여 로봇의 종방향 미끄러짐을 방지하는 슬립제어로직과 선회명령에 따라 좌/우측 모터의 토크 차이를 제어하는 DYC (Direct Yaw Control), 제자리 선회(pivot turn) 제어로직 등을 구성하였다. 또한 주행 안정성확보를 위하여 측정된 횡방향의 가속도에 따른 종방향의 속도제한을 한다. 전진과 후진 및 제자리회전에 대한 선택으로 모터에 인가되는 토크와 회전

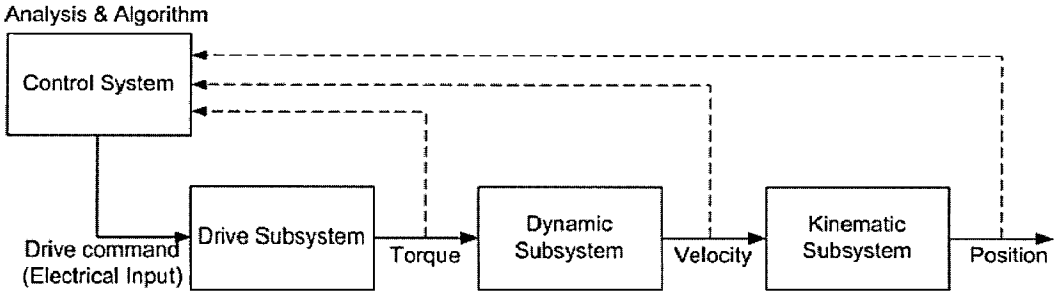


그림 4. 독립구동 주행제어 구조.

Fig. 4. Control architecture of independent wheel driving system.

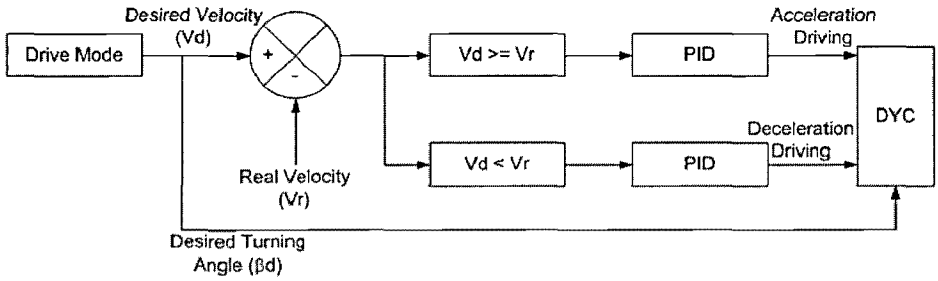


그림 5. 운전자 모델 알고리즘.

Fig. 5. Driver model algorithm.

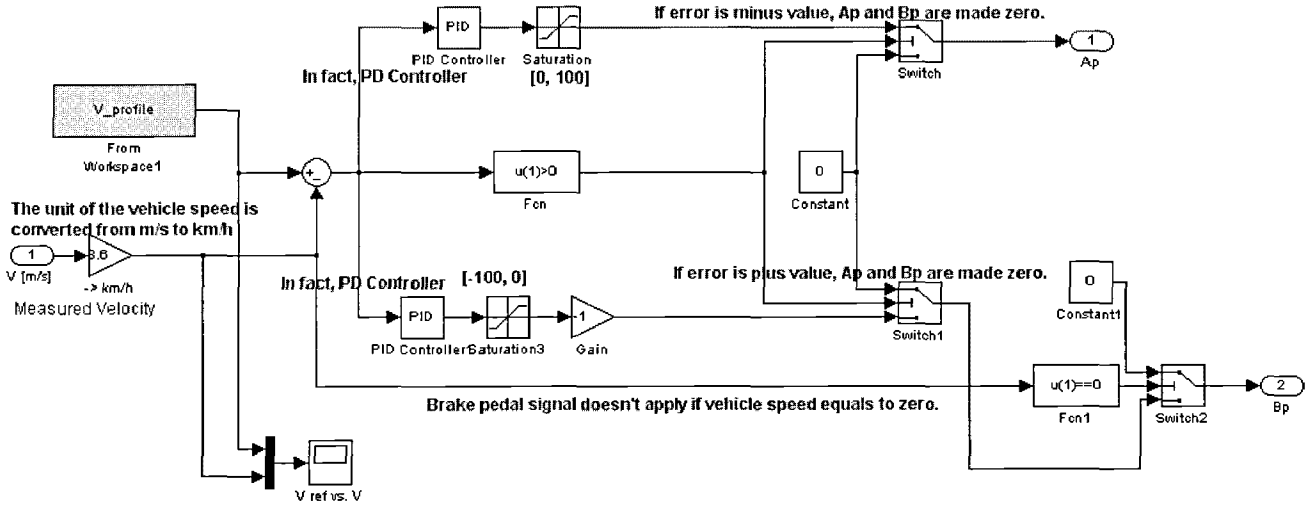


그림 6. 운전자 모델 (MATLAB Simulink).

Fig. 6. Driver model (MATLAB Simulink).

방향이 결정되어야 한다. 또한 상위제어 단계에서 로봇의 속도와 선회시의 요레이트 등의 귀환데이터를 처리하여 각 데이터의 처리 단계에 전달되어야 한다.

2.4 바퀴 운동방정식

이동로봇은 6개 바퀴의 회전 및 세 방향(x, y, z)의 운동(9-DOF)에 대한 운동을 고려하여야한다. 그림 8에 전륜 좌측 바퀴의 회전 운동을 도시하였으며, 이에 따른 회전 운동 방정식은 아래와 같다.

$$N_g T_{motor_fl} = (N_g^2 J_{motor} + J_{wheel})\dot{w}_{fl} + F_{fl} R \qquad (6)$$

식 (6)에서 N_g는 감속 기어비이고 T_{motor}, J_{motor} 는 모터 토크와 관성에너지이다. J_{wheel}, W, R, N은 바퀴의 관성력, 회전속도, 타이어 반경과 수직항력을 나타낸다.

바퀴의 구동력을 나타내는 F_{fl}은 지면과 바퀴사이의 마찰계수(μ)에 의하여 식 (7)과 같이 모터의 발생토크와 바퀴의 요구 반발력간의 최소량을 결정하는 것이다.

$$F_{fl} = minimum(N_{fl} \times \mu_{fl}, T_{motor_fl}) \qquad (7)$$

6개의 모든 바퀴에 대하여 적용하여, 각 바퀴의 구동력의 x, y 방향의 힘의 평형과 z방향의 모멘트 평형을 이용하

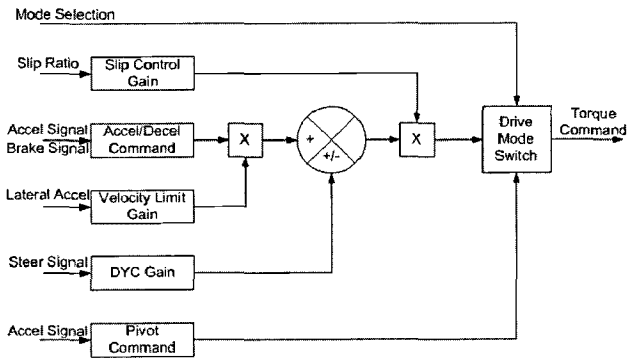


그림 7. 상위제어시스템의 블록 다이어그램.

Fig. 7. Block diagram of controller system.

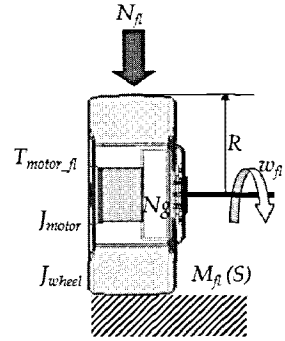


그림 8. 전방 좌측 바퀴 운동 다이어그램.

Fig. 8. Front left wheel motion diagram.

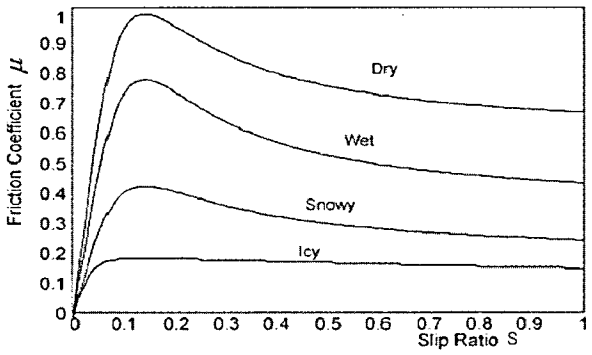


그림 9. 지면 상태별 마찰계수와 슬립율.

Fig. 9. Friction coefficient and slip ratio for various ground condition.

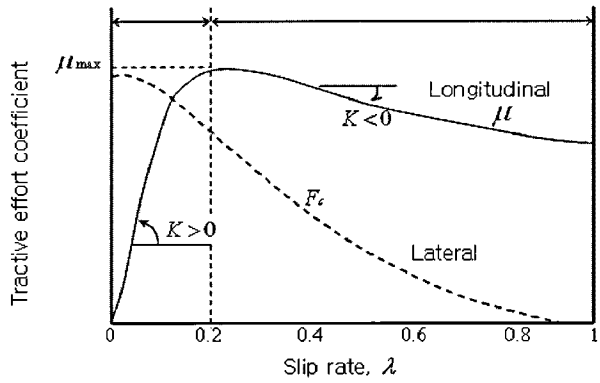


그림 10. 슬립율과 구동마찰력.

Fig. 10. Slip ratio and tractive effort coefficient.

여 세 방향(x, y, z)의 운동방정식을 아래와 같이 모델링 한다.

$$m\dot{V}_x = \sum_{fl}^{rr} F_x$$
$$m\dot{V}_y = \sum_{fl}^{rr} F_y \quad (8)$$
$$I\dot{\theta} = \sum_{fl}^{rr} M$$

2.5 슬립제어

그림 9는 지면의 상태에 따른 바퀴와 지면간의 미끄럼 비율은 바퀴의 슬립율에 따른 타이어의 마찰계수를 나타낸다.

그림 10은 최적의 종방향 구동력 확보를 위해서는 바퀴와 지면간의 슬립율을 15~20% 영역으로 유지해야함을 보여준다. 이를 위하여 각 바퀴의 슬립율을 식 (9)과 같이 구동 시(λ_{accel})와 제동 시(λ_{brake})로 정의하고 계산된 슬립율에 따라 목표치 $\mu = 0.2$ 이상일 때에는 각 바퀴의 출력토크를 줄여주어 현재의 바퀴와 지면간의 종 방향 미끄러짐 현상이 줄어들 수 있도록 구성한다.

본 연구에서는 비선형 제어에 널리 이용되고 있는 슬라이딩모드(sliding mode)제어 기법을 이용하였다. 식 (10)은 목표치(λ_d)와 실제 슬립율(λ_r)의 오차(e_λ)와 그 미분 값으로 슬라이딩 평면(sliding surface) σ_λ을 설정한 것이다. 이 슬라이딩 평면의 부호에 따라 슬립제어 가중치(u_λ)를 식 (11)과 같이 결정한다. 각 바퀴의 인휠 모터의 출력토크는 위의 상위 제어로직에서와 같이 가속명령에 의한 요구토크와 각 바퀴의 슬립제어 토크 가중치의 곱으로 계산된다.

$$\lambda_{accel} = \frac{r \cdot \omega - V_x}{r \cdot \omega}$$
$$\lambda_{brake} = \frac{V_x - r \cdot \omega}{V_x} \quad (9)$$

$$e_\lambda = \lambda_d - \lambda_r$$
$$\sigma_\lambda = k e_\lambda + \dot{e}_\lambda \quad (10)$$

$$u_\lambda = \begin{cases} 1.0 \text{ if } sgn(\sigma) \geq 0 \\ 0.2 \text{ if } sgn(\sigma) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.6 DYC (Direct Yaw moment Control) 선회제어

이동로봇의 선 회시 조향입력에 따른 목표 요레이트를 추종하기 위하여 좌, 우측 바퀴의 토크 차이를 생성하여 요모멘트(yaw moment)를 발생시킨다. 여섯 바퀴에 분배되는 로봇의 무게가 동일하다면 그림 1과 같이 중립선회 특성을

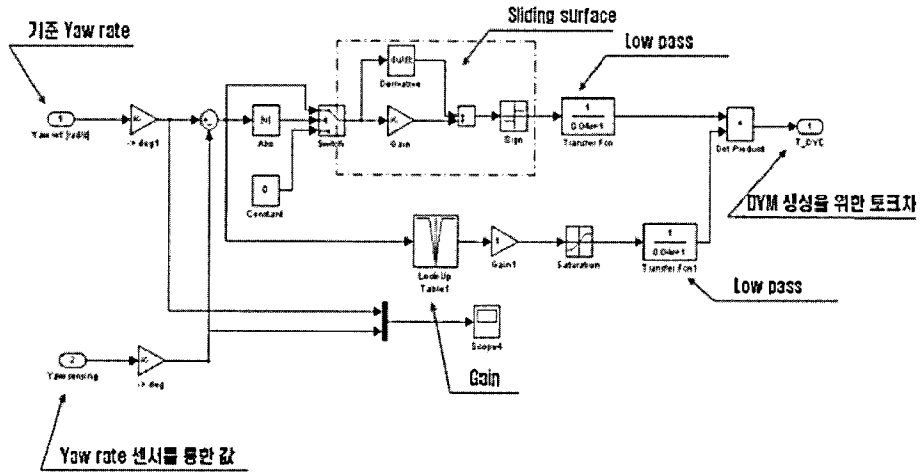


그림 11. DYC 슬라이딩 모드 제어 모델 (MATLAB Simulink).

Fig. 11. Model of DYC sliding mode control (MATLAB Simulink).

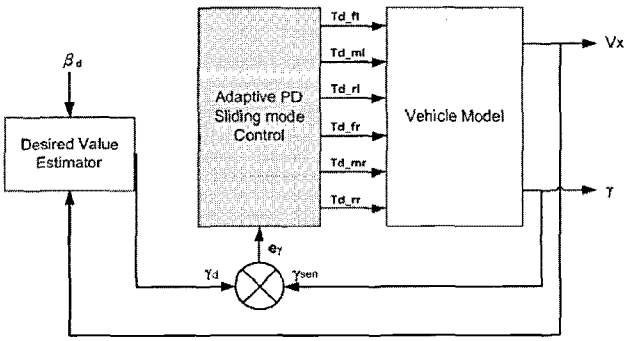


그림 12. 회전 차 조향방식의 DYC 선회제어 블록 선도.
Fig. 12. Block diagram for DYC differential steering control.

갖기 때문에 부족선회계수는 0 (understeer coefficient = 0)이라고 할 수 있고, 따라서 조향 각 입력(β_d)에 따른 목표 요레이트(γ_d)는 식 (12)와 같이 종 방향 속도(V_x)와 휠베이스($L=L_f+L_r$)의 관계로 계산 할 수 있다. 또한 식 (13), (14)에서와 같이 요레이트 센서로부터 실제 요레이트 값(γ_{sen})을 받아 그 차이(e_γ)를 보상하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기법으로 결정되는 요모멘트 가중치(u_γ)를 이용한다. 이때 $u_{\max}$는 모터에 요구할 수 있는 최대 토크 값이다.

$$\gamma_d = \beta_d \frac{V_x}{L_f + L_r} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} e_\gamma &= \gamma_d - \gamma_{sen} \\ \sigma_\gamma &= k e_\gamma - \dot{e}_\gamma \end{aligned} \tag{13}$$

$$u_\gamma = sgn(\sigma_\gamma) \cdot u_{\max} \tag{14}$$

식 (15)는 요모멘트 제어의 수학적 모델은 좌우측 토크 차이에 의한 회전모멘트(M_{diff})와 바퀴와 지면사이의 반력 모멘트(M_r)의 차이로 수직방향 관성력이 발생함을 나타낸다. 그림 11-12는 회전 차 조향방식의 DYC 선회제어 블록 선도와 슬라이딩 제어 모델을 도시하고 있다.

$$I\frac{d\gamma}{dt} = M_{diff} - M_r \tag{15}$$

III. 시뮬레이션 결과

1. DYC 결과

DYC 제어에 따라 시스템은 안정된 토크차를 가지게 된다. Adaptive PD 슬라이딩제어(APDS)로 요레이트 제어를 통하여 일정한 요레이트를 유지하게 하여 선회반경을 일정하게 할 수 있게 됨을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 APDS 제어와 단순한 비례(P)제어를 하였을 때에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 15는 노면이 미끄러운 얼음판조건 ($\mu=0.2$)에서 우 방향 선회 각 5도로 조향할 경우이다. 기준 요레이트까지 도달하는데 APDS 제어가 적합함을 알 수 있다[10]. 그림 16은 비례제어 시 각 휠의 모터 토크가 출렁이는 요레이트로 인해 불안정한 출력으로 나타남을 보여준다. 반면에 개선된 APDS 제어 시에는 그림 17과 같이 안정된 토크차를 갖게 된다.

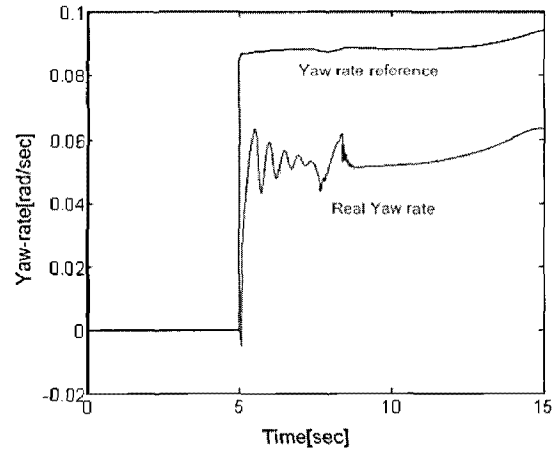


그림 13. P제어 요레이트.
Fig. 13. Yaw-rate for P-gain control.

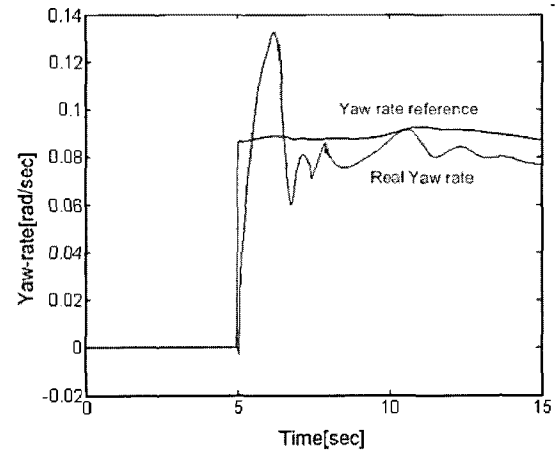


그림 14. APDS 제어 요레이트.
Fig. 14. Yaw-rate for APDS control.

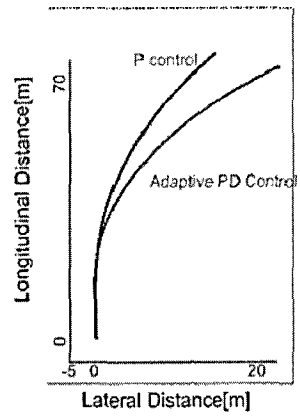


그림 15. 선회 궤적 ($\beta_d=5\text{deg}, \mu=0.2$).
Fig. 15. Cornering Trajectory ($\beta_d=5\text{deg}, \mu=0.2$).

2. 슬립제어 결과

일반적으로 도로($\mu=0.9$)에서는 미끄럼현상이 발생하지 않으므로 슬립제어가 필요 없다. 따라서 구름마찰이 작은 젖은 도로($\mu=0.5$)에서 차선변경(lane change)시의 구동력과 요레이트 제어로 시뮬레이션 하였다.

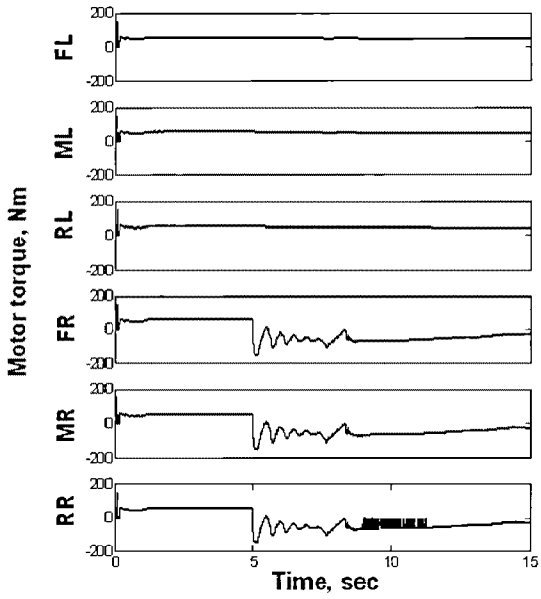


그림 16. P제어 시 각 휠의 모터 토크.
Fig. 16. Motor torque of each wheel for p-gain control.

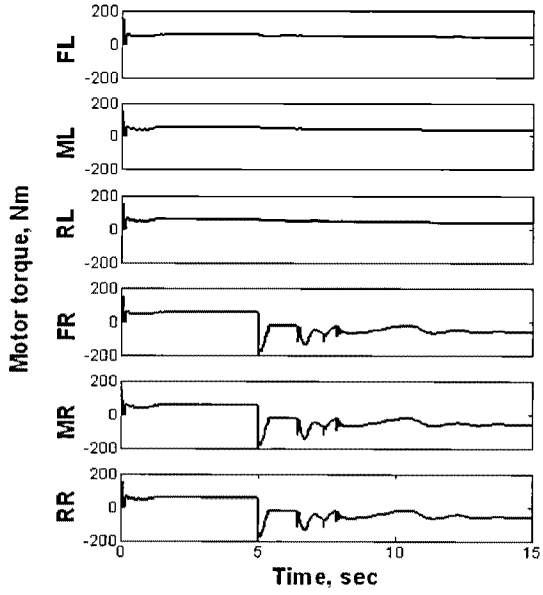


그림 17. APDS 제어 시 각 휠의 모터 토크.
Fig. 17. Motor torque of each wheel for apds control.

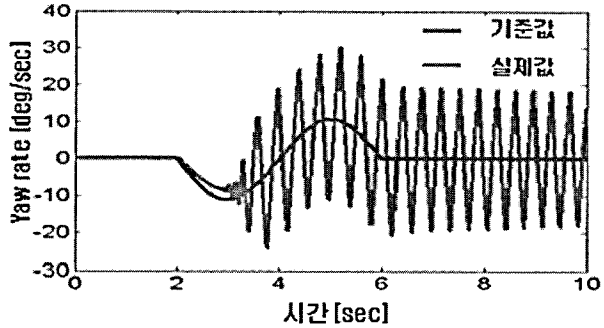


그림 18. 슬립제어 미적용 시 요레이트.
Fig. 18. Yaw-rate without slip control.

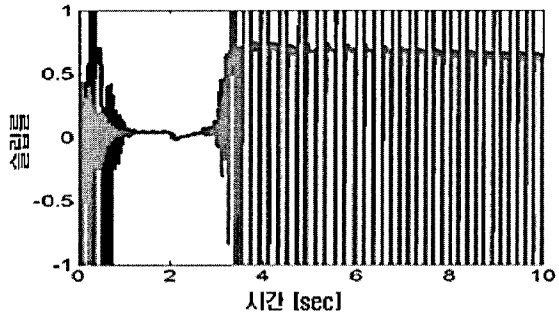


그림 19. 슬립제어 미적용 시 슬립율.
Fig. 19. Slip-ratio without slip control.

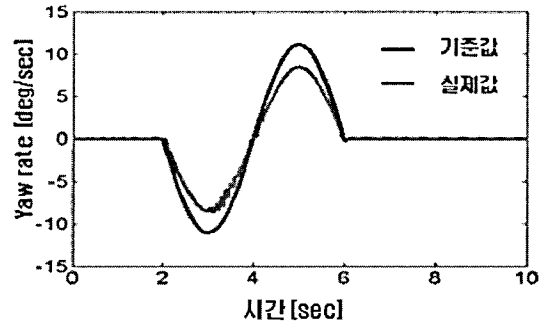


그림 20. 슬립제어 적용 시 요레이트.
Fig. 20. Yaw-rate with slip control.

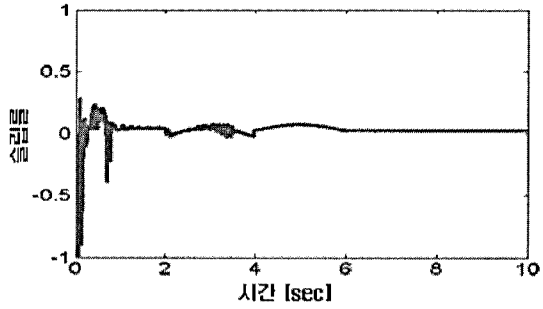


그림 21. 슬립제어 적용 시 슬립율.
Fig. 21. Slip-ratio with slip control.

그림 18-19는 슬립제어를 하지 않은 상태의 기준 요레이트에 대한 실제 발생한 요레이트와 그 때 발생되는 바퀴와 지면간의 미끄러짐 정도를 보여주는 결과이다. 슬립현상이 심하게 발생하면서 조향이 부드럽지 않게 되고 있음을 알 수 있다. 반면 그림 20과 그림 21은 슬립제어를 적용한 경우의 시뮬레이션 결과로서 동일한 조건에서 바퀴의 슬립율을 일정 수준으로 제어하여 미끄러짐이 없도록 하고 있으며, 조향입력에 대해서 비교적 잘 추종함을 확인하였다.

VI. 결론

본 연구에서는 6개의 바퀴에 구동용 모터를 삽입하여 각 바퀴의 독립적인 회전력을 제어하여 외부의 기계적인 장치를 대신하여 이동체의 기동성을 제공할 수 있는 회전차 조향방식을 수학적으로 모델링하고 제어알고리즘을 적용하여 시뮬레이션으로 효과를 검증한 것이다.

6륜형 이동로봇의 각 바퀴의 슬립제어와 로봇플랫폼의 회전모멘트에 의한 운동을 DYC 제어를 통해서 다양한 노면조건에서도 요구되는 조향각을 추종할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해서 획득된 이론적이거나 실험적인 결과를 토대로 전기식 6륜 독립구동 인휠구동체의 기동성을 개선하여 안정된 주행을 보장하고, 에너지효율을 증대할 수 있는 주행제어방식을 수학적이고 합리적인 방식 제안하고 연구하여 인휠 회전차 조향방식 로봇플랫폼의 기동성과 조작성을 개선할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] R. M. Ogorkiewicz, "Design and development of fighting vehicles," *Chapter 10, pp. 172-193, Macdonald and Co(publishers) Limited*, 1968.

[2] H. Nasu and H. Higasa, "Development of yonden electric vehicle PIVOT," *JSAE, Review* 16, pp. 77-82, 1995.

[3] 최영춘, 박치만, 김정민, 최서호, 김현수, "인휠 독립구동 전기자동차의 주행제어 알고리즘 개발," 한국자동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집, pp. 2054-2059, 2008.

[4] 이륙, 김정민, 김동현, 김현수, "인휠모터 독립구동 전기자동차의 제어 알고리즘 개발," 한국자동차공학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp. 1772-1777, 2006.

[5] S. Arimoto, "Linear controllable systems," *Nature*, vol. 135, pp. 18-27, July 1990.

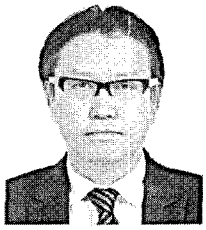
[6] R. C. Baker and B. Charlie, "Nonlinear unstable systems," *International Journal of Control*, vol. 23, no. 4, pp. 123-145, May 1989.

[7] G. S. Choi and C. S. Kim, "Linear stable systems," *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 33, no. 3, pp. 1234-1245, Dec. 1993.

[8] M. Young, The Technical Writer's Handbook, *Mill Valley*, Seoul, 1989.

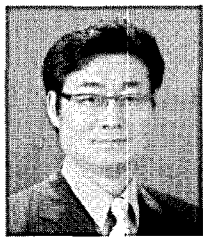
[9] 강창익, 하인중, "브러쉬없는 직류전동기의 궤한선형화제어," 대한전기학회 논문지, 제43권 제7호, pp. 982-990, 1994.

[10] 김창환, 허헌, "VR 모터의 토크 제어," 대한전기학회 논문지, 제43권 제3호, pp. 971-981, 1994.



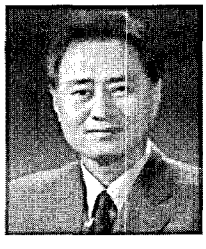
이 정 엽

1991년 한양대 기계공학과 졸업. 1993년 동 대학원 기계설계학과 석사. 2006년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정. 관심분야는 로봇제어, 차량동역학.



손 웅 희

1988년 서울산업대 기계설계학과 졸업. 1993년 한양대학교 기계설계학과 석사. 1997년 과학기술부 기계/차량 기술사. 1990년~현재 한국생산기술연구원 지능형로봇연구부 수석연구원. 현 지능형로봇연구부장. 관심분야는 필드형로봇, 생체역학, 수송기계.

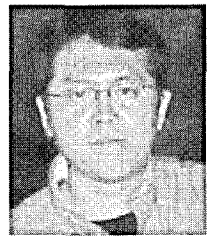


한 창 수

1983년 한양대 기계공학과 졸업. 1985년 University of Texas at Austin 기계공학과 석사. 1989년 동 대학원 기계공학과 박사. 1990년~현재 한양대 기계공학과 교수. 관심분야는 필드형 모바일 로봇, 인간-로봇 협업시스템, 초정밀 메커니즘.

서 승 환

1999년 한양대 기계공학과 졸업. 2001년 동 대학원 정밀기계공학과 석사. 2003년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 관심분야는 필드형 로봇, 나노모션 메커니즘, 정밀모션제어.



유 승 남

2004년 한양대 기계공학과 졸업. 2006년 동 대학원 정밀기계공학과 석사. 2009년 동 대학원 기계공학과 박사. 현재 한양대 BK21 혁신설계기계인력양성사업단 Post-doc. 관심분야는 필드형 모바일 로봇, 인체 착용형 로봇, 건설자동화 로봇.