

6×6 가변 현수형 무인차량의 주행 분석 및 제어에 관한 연구

Study on Vehicle Motion Analysis and Control for Skid Steering UGVs with Articulating Arms

강신천* 허진욱* 이상훈* 지태영*
Sin-Cheon Kang Jinwook Huh Sang-Hoon Lee Tae-Young Jee

Abstract

Recently, skid steering methods have been increasingly applied to unmanned ground vehicles since they can provide a narrow turn that general steering methods like ackerman steering may not provide. However, dynamic behaviors of the skid steering vehicles with articulating arms which occur during a steering are very complicated and coupled. This makes it difficult to control vehicles and in severe case vehicles may lose stability. There are two methods to control unmanned ground vehicles. The first one is speed control method generally used with easiness and robustness in remote vehicle control. The next one is torque control allowing the vehicles to get better performance in several cases provided careful application is achieved. This paper addresses dynamic phenomena of skid steering vehicles during steering and compares with vehicle driving control methods between torque(traction force) control and speed control.

Keywords : Unmanned Ground Vehicles(무인지상차량), Skid Steering(스키드 조향), Articulating Arms(관절형 암), Torque Control(토크 제어), Speed Control(속도 제어)

1. 서론

최근에 군사용 무인차량 분야의 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있으며 군사용 무인차량은 야지에서 주로 운용되는 특성 때문에 스키드 조향을 채택하는 경우가 많다. 이는 스키드 조향방식이 야지 및 험

지를 주행할 때 주행 방향을 신속히 바꿀 수 있고 조향 반경이 작아 좁은 공간에서도 선회할 수 있다는 장점이 있기 때문에 감시정찰 및 타격, 폭발물 탐지/제거 등 야지에서 운용되는 무인차량이 임무를 수행하기에 유리한 점이 많기 때문이다.

이에 따라 스키드 조향 방식의 차량 주행제어 알고리즘에 대한 연구가 많이 이루어지고 있지만 대부분의 연구들이 시뮬레이션 상황에서 많이 이루어지고 있으며 특히 독립 휠 구동이 가능한 차량의 경우 토크 분배에 대한 연구를 통해 효율적인 주행이 가능하도록

† 2011년 6월 17일 접수~2011년 8월 26일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 강신천(ksc3413@yahoo.com)

록 하는 연구들이 대부분이다^{1~4)}. 이러한 연구에서는 지면의 종경사, 차량의 피치각 및 종 방향 가속도 등의 변동에 따른 각 휠의 지면 수직 하중 변화를 계산하고 계산된 수직 하중을 고려하여 각 휠에 인가할 추력을 재 분배하는 최적 토크분배 제어에 대한 연구에 초점이 맞춰져 있고 스키드 차량에서 가장 중요하다고 할 수 있는 조향 및 그에 따른 동특성에 대해서는 깊이 고려하지 않고 있다^{6,7)}.

그렇지만 스키드 조향 방식은 지면 외력의 크기 및 방향의 변동에 따라 현수장치의 거동 변화를 야기하며 이러한 거동 변화는 차체의 자세를 불안정하게 하고 예기치 않는 지면 접지력의 변화를 가져와 주행 안정성 및 주행성능에 심각한 영향을 끼치게 된다. 또한 타이어와 노면사이에는 모델링하기 어려운 많은 비선형적인 요소들을 포함하고 있어서 정밀한 주행 제어가 상당한 어려움을 수반하게 된다.

또한, 회전 가능한 암 형태의 현수장치를 적용하고 있는 차량의 경우 조향시 발생하는 지면 외력이 암을 회전시켜 롤 방향의 모션이 발생하고 결과적으로 차량 기움 현상이 발생하게 된다.

본 논문에서는 회전하는 암 현수장치가 적용된 스키드 조향방식의 무인차량인 견마로봇의 조향시 발생하는 동적 특성에 대해 주로 기술하였다. 특히 조향시 발생하는 차량 기움 현상의 문제점 및 원인에 대한 연구 결과와 스키드 조향 차량에서 가장 중요하다고 할 수 있는 타이어와 조향성과의 관계에 대해 기술하였다. 마지막으로 이와 같은 동적 특성을 갖는 스키드 조향 차량에서 동적 특성 및 문제점들을 고려한 최적의 조향 제어 방법을 제시하였다. 속도별로 조향 제어 기법을 달리하면서 특정 제어 기법을 적용했을 때 발생하는 장점과 문제점들을 다루었다.

2. 조향 동특성 분석

가. 시스템 구성

최근에 국·내외에서 개발되고 있는 무인차량은 야지 주행성 및 기동성을 고려하여 설계되고 있으며 6개의 독립 구동이 가능한 휠과 6개의 회전 가능한 가변 암을 가지고 있는 것이 일반적이다. 이 형태의 무인차량은 차체와 연결되어 있는 각 암에는 독립 구동이 가능한 휠이 포함되어 있어서 양측 휠의 속도 또는 토크 차이를 이용한 스키드 조향이 가능하다.

각 암들은 주행시 장애물 극복이 가능하도록 회전이 가능하고, 주행시 인가되는 충격을 흡수할 수 있는 현수장치 기능을 할 수 있도록 스프링 및 댐퍼장치가 구성되어 있다. 전방(차량의 전진방향)의 암은 암에 장착된 휠이 암의 회전 중심보다 앞에 위치한 구조인 리딩 타입이고 후방의 암은 암에 연결된 휠이 회전 중심보다 후방에 위치한 구조인 트레일링 타입으로 구성되어 있다. 또한 주행시 지면으로부터 가해지는 충격을 줄이기 위한 댐퍼로서 회전형 MR 댐퍼를 많이 적용하고 있다. MR 댐퍼는 자기장이 가해질 때 빙햄 유체 특성을 가지는 MR 유체를 사용하여 지지기장으로 댐퍼를 제어할 수 있는 능동형 댐퍼로서 댐핑력 제어가 용이하다.

이러한 형태의 무인차량은 야지를 주행할 때 작은 조향 반경으로 주행 방향을 신속히 바꿀 수 있고 장애물 극복 능력도 뛰어나지만 복잡한 시스템 및 조향시 발생하는 특성에 인한 제어의 어려움이 발생한다. 먼저 발생하는 지면 외력의 크기 및 방향에 따라 시스템을 불안정하게 되는 문제점이 있다. 또한 스키드 조향이 타이어의 미끄러짐으로 이루어지므로 저속 주행과 같이 충분한 미끄러짐을 생성하지 못할 경우에는 타이어의 단성에 의해 떨림 현상이 발생할 수 있다. 먼저 조향시 발생하는 특성과 문제점에 대해 설명하고자 한다.

나. 조향시 차량 기움 특성

일반적인 차량은 차량의 주행 방향을 바꾸고자 할 때 차량의 앞쪽 바퀴의 진행 방향을 직접 바꾸는 아커만 조향 방식을 채택하고 있으며, 조향시 앞쪽의 바퀴 혹은 뒤쪽의 바퀴를 통해 동력이 전달되기 때문에 조향시 지면을 통해 각 바퀴에 가해지는 외력의 크기 및 방향이 심하게 변하지 않는다⁸⁾.

그러나, 스키드 조향 차량의 경우 조향시 발생하는 외력의 크기 및 방향이 심하게 변하므로 이러한 외력에 의하여 현수장치의 스프링이 압축·팽창이 일어나면서 차체의 자세가 불안정하게 되는 문제점이 있다. 이에 따라 조향시 차량 기움 현상(Roll Motion)이 발생되고 이는 주행 성능을 상당히 저하시킬 수 있다.

Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)와 같이 직진 주행을 하다가 차량이 스키드 조향이 되는 경우, 각 휠에 작용하는 외력의 방향을 나타낸다. 차량이 주행 방향에 대해 좌측으로 조향되는 경우를 나타내며, 화살표는 바퀴에 작용하는 외력의 방향을 나타낸다.

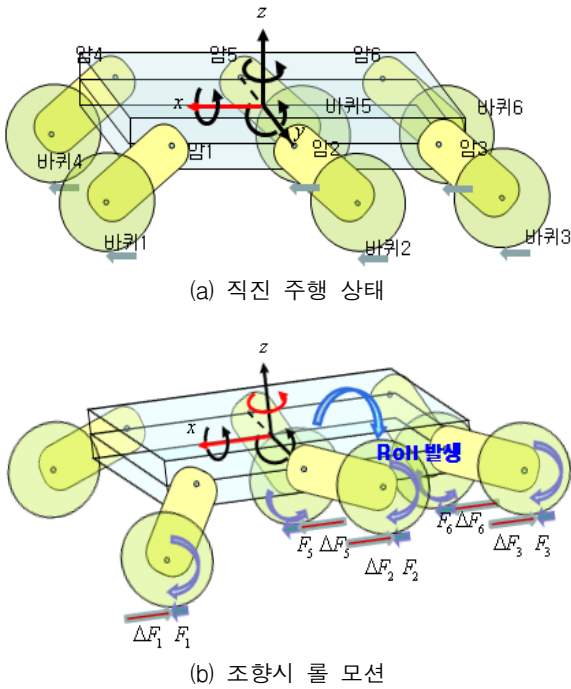


Fig. 1. 조향시 차량 기울음 현상

Fig 1(b)와 같이, 차체를 좌측으로 조향시키면, 차체의 우측 바퀴들(제4, 제5, 및 제6바퀴)은 차체의 속도보다 빠른 회전이 요구되고 이는 차체가 직진 주행시 필요로 하는 구동력보다 더 큰 구동력을 요구하게 되어 지면으로부터 전진 방향의 외력을 더 받게 된다. 또한 차체의 좌측 바퀴들(제1, 제2, 및 제3바퀴)은 차체의 속도보다 느리게 회전하고 직진 주행시 필요로 하는 구동력보다 작은 구동력을 요구하거나 반대 방향의 구동력을 발생하게 되어 지면으로부터 후진 방향의 외력을 받게 된다.

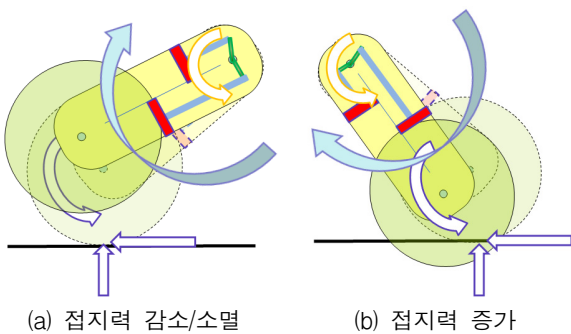


Fig. 2. 제자리 조향시 압 거동 현상

이때 차체의 우측 바퀴들은 지면으로부터의 전진 방향의 외력을 받아 Fig. 2와 같이 차체의 우측 압들을 시계 방향으로 회전시키려고 한다. 반면에, 차체의 좌측 바퀴들은 지면으로부터 후진 방향의 외력을 받게 되며, 이러한 외력은 차체의 좌측 압들을 반시계 방향으로 회전시키려고 한다. 이 때 회전시키려고 하는 압 회전 모멘트는 다음과 같이 계산할 수 있다. 먼저 차량의 자중에 의해 발생하는 수직하중에 의한 각 휠의 압 회전 모멘트는 식 (1)과 같이 된다. 여기서 L_a : 압의 길이, θ_{ai} : 압의 각도, N_i : 휠의 수직반력을 나타낸다.

$$M_{vi} = L_a \times \sin\theta_{ai} \times N_i \quad (1)$$

또한 바퀴가 회전하면서 발생하는 견인력에 의해 압 회전축으로 발생하는 모멘트는 다음과 같다. 여기서 R_w : 휠의 반경, F_i : 휠의 견인력을 나타낸다.

$$M_{li} = L_a \times (\cos\theta_{ai} + R_w) \times F_i \quad (2)$$

위 두 가지 외력에 의해 발행하는 모멘트는 압이 회전되면서 압축·팽창된 복동식 스프링의 복원하려는 모멘트와 평행을 이룰 때까지 압을 회전시키게 된다. 스프링의 복원하려는 힘은 압의 회전각에 따라 결정된다. 또한 외력과 스프링 힘을 제외하고 MR (Magnetorheology) 댐퍼와 현수장치 자체의 마찰력이 존재한다. 또한 타이어의 견인력은 바퀴에서 가해지는 토크를 가지고 구할 수 있으므로 따라서 전체 모멘트 평형식은 다음과 같다. 여기서 T_{wi} : 휠 토크, α_{wi} : 휠의 각가속도를 나타낸다.

$$M_i = L_a (\cos\theta_{ai} + R_w) \frac{(T_{wi} - I_{wi}\alpha_{wi})}{R_w} + L_a \sin\theta_{ai} N_i - f_{mi} - f_{fi} \quad (3)$$

MR 댐퍼에 의한 f_{mi} 와 마찰력에 의한 힘인 f_{fi} 은 압의 움직임에 대한 저항력으로 작용하며 f_{mi} 은 크기를 제어할 수 있으나 f_{fi} 은 실험으로 추정이 가능하다. N_i 는 차량의 하중이 골고루 분포되었다고 가정하면 각 바퀴에 걸리는 정적상태의 수직하중을 계산할 수 있다. 그렇지만 조향시 차량자세 변화 및 압의 움직임에 의해서 수직하중은 변하게 된다. 모멘트 평형

식에 의하면 스프링 강성과 MR 댐퍼에 의한 f_{mi} 이 클수록 암 회전이 적게 일어나는 것을 알 수 있다.

이러한 지면으로부터의 외력에 의하여, 좌조향시 제 1, 제5, 및 제6바퀴는 Fig. 2(b)와 같이 차체를 들어 올리려 하며, 제2, 제3, 및 제4바퀴는 Fig. 2(a)와 같이 지면으로부터 들려지려 하게 된다.

Fig. 2(a)의 경우, 암이 들어 올려짐으로서 접지력이 떨어지게 되고 모멘트 평형식에서 N_i 가 작아지게 될 뿐만 아니라 접지력이 충분치 못하게 되어 바퀴에서 낼 수 있는 토크도 떨어지게 되므로 T_{wi} 도 작아지게 된다. 즉, 암을 들어올리는 힘에 의해 발생하는 거동이 이 힘들을 작아지게 만들게 되므로 다시 거동이 줄어들게 되어 평형점을 찾아가게 되는 수렴성을 갖게 된다.

반면에 Fig. 2(b)의 경우 암의 거동은 세워지는 방향으로 거동함으로서 지면과의 접촉은 더 좋게 되고 바퀴에서 충분한 토크를 발생시킬 수 있게 된다. 따라서 암 거동이 더 크게 되거나 유지되는 현상이 발생한다. 타이어가 눌리면서 접지 면적이 더 커지는 현상까지 고려하면 식 (3)에서 암을 거동시키는 휠의 토크가 더 커지게 된다.

다. 조향시 차량 떨림 특성

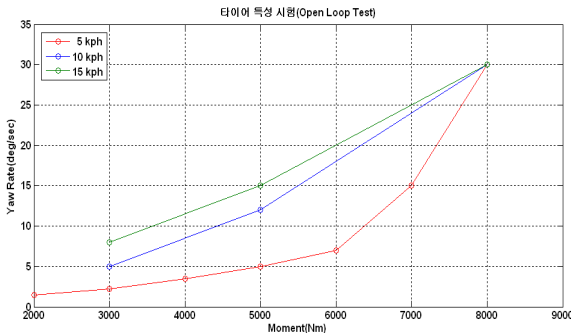


Fig. 3. 속도별 조향 특성 시험

Fig. 3은 타이어의 특성을 확인하기 위해 차량에 임의의 모멘트를 가했을 때 발생하는 차량 선회 각속도 (Yaw Rate)를 측정된 결과이다. 시험 결과 10, 15kph 인 경우 가해진 모멘트에 대해 Yaw Rate가 어느 정도 선형적으로 비례하지만 저속일 경우(5kph)에는 그런 경향을 보이지 않는다는 것을 알 수 있다. 시험 결과에서 알 수 있듯이 Yaw Rate를 발생하기 위해서는 어

느 정도 이상의 모멘트가 필요하며 속도가 높을 경우에는 슬립이 잘 발생하므로 작은 모멘트로도 상당히 큰 Yaw Rate를 발생시킬 수 있지만 저속일 경우에는 슬립까지 발생시키면서 Yaw Rate까지 만들어야 하므로 큰 모멘트를 필요로 한다는 것을 알 수 있다.

또한 타이어의 접지력을 극복하고 슬립을 야기시킬 수 있는 충분한 모멘트를 가하지 못할 경우에는 타이어의 탄성에 의해 모멘트가 가해지는 반대 방향으로 차량이 복원되면서 약 3Hz의 차량 떨림 현상이 발생하게 된다. Fig. 4는 5kph 주행 상태에서 10deg/s의 조향 명령에 대해 차량 떨림이 나타나는 현상을 보여주는 시험 결과이다.

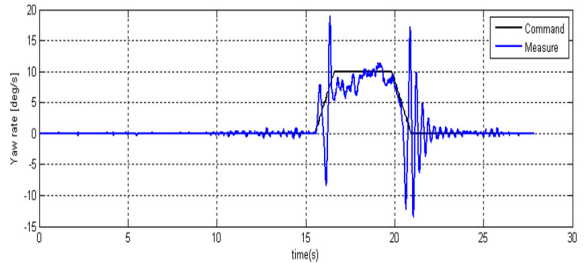


Fig. 4. 저속상태에서의 조향시 차량 떨림 현상

따라서 저속에서는 Yaw Rate를 만들기 위한 모멘트보다 접지력을 이겨내기 위한 모멘트를 포함하여 더 모멘트를 가해야 하지만 접지력을 이겨내기 위한 모멘트는 속도에 따라 달라지므로 속도에 따른 제어기 성능이 달라져야 한다.

3. 무인차량 주행 제어기

가. 주행 동역학 모델링

Fig. 5는 평지에서의 차량 주행 동역학 모델링을 수행하기 위해 도시한 그림이다.

종방향 및 횡방향 운동은 다음 식 (4, 5)로 나타낼 수 있다.

$$\text{종방향 운동 방정식 : } m(\ddot{x} - y\dot{\gamma}) = \sum_{i=1}^6 F_{xi} \quad (4)$$

$$\text{횡방향 운동 방정식 : } m(\dot{y} + \dot{x}\gamma) = \sum_{i=1}^6 F_{yi} \quad (5)$$

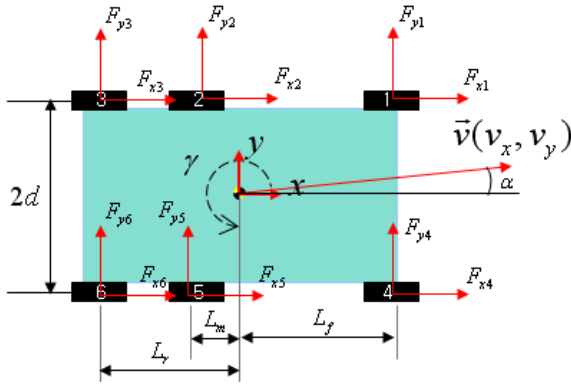


Fig. 5. Vehicle Driving Motion Modeling

요 운동 방정식은 아래 식 (6)과 같다.

$$M_{ff} = I_z \dot{\gamma} = \left(\sum_{i=4}^6 F_{x_i} - \sum_{i=1}^3 F_{x_i} \right) d + \sum_{i=1,4} F_{y_i} L_f - \sum_{i=2,5} F_{y_i} L_m - \sum_{i=3,6} F_{y_i} L_r \quad (6)$$

여기서 횡력은 식 (7)과 같이 타이어의 특성치인 Cornering Stiffness(c_i)와 슬립각(α_i)에 의해 계산된다고 가정하였다. 슬립각은 식 (8)과 같다. 여기서 l_f , l_m , l_r 는 차량 회전중심에서 각 휠까지의 x 방향 거리, F_{y_i} 는 각 휠의 횡력, v_x , v_y 는 차량의 종속도 및 횡속도를 나타낸다.

$$F_{y_i} \approx c_i \alpha_i \quad (7)$$

$$\alpha_f = \left(-\frac{v_y + l_f \gamma}{v_x} \right), \alpha_m = \left(-\frac{v_y - l_m \gamma}{v_x} \right), \alpha_r = \left(-\frac{v_y - l_r \gamma}{v_x} \right) \quad (8)$$

나. 무인차량 주행 제어기

Fig. 6은 제어기의 전체적인 구성도이다. 상위에서 내려온 속도 및 조향 명령에 따라 CDM(Controller Decision Maker)는 주행 상태에 따라 어떤 제어기가 더 적합한지를 결정하고 그 결정에 따라 토크제어 및 속도제어를 수행하게 된다. 실험에 사용된 무인차량은 독립 휠 구동이 가능하므로 각 휠은 선택에 따라 속도 및 토크제어가 가능하다.

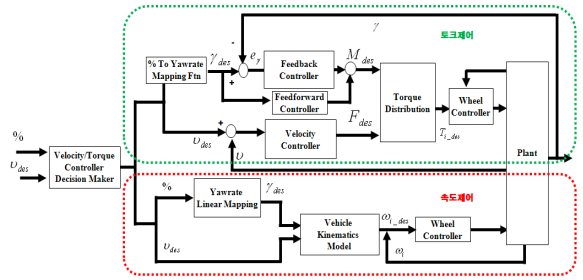


Fig. 6. Vehicle Controller Block Diagram

토크 제어의 경우 주어진 Yaw Rate와 항법센서에서 측정한 차량의 Yaw Rate를 비교한 후 각 바퀴에 필요한 소요 토크를 계산한 후 토크 명령을 내린다. 이러한 토크 제어인 경우 고속에서 조향시 적합하며 앞에서 설명한 차량 기움 현상이 작게 발생하고 발생하더라도 쉽게 해소되는 장점이 있다. Feedforward 항은 슬립각에 의해 발생하는 횡력을 고려한 항으로서 현재의 슬립을 유지하기 위해 필요한 모멘트이다.

Yaw Rate에 의한 Feedback 항 PID 제어를 적용하였으며 오차에 대한 요구 모멘트는 식 (8)과 같다.

$$e = \gamma - \gamma_d \quad (9)$$

$$M_{fb} = K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_0^t e dt \quad (10)$$

$$M_r = M_{ff} + M_{fb} \quad (11)$$

식 (11)에 의해 계산된 요구 모멘트를 각 바퀴의 토크로 분배하여 원하는 Yaw Rate가 나오도록 한다.

속도제어의 경우 주어진 Yaw Rate와 속도 명령에 따라 기구학적 모델을 계산한 후 각 바퀴에 필요한 휠 속도를 계산하여 명령을 내린다. 이러한 속도 제어의 경우 안정성이 뛰어나고 차량 떨림 현상이 발생하지 않기 때문에 저속 및 제자리 조향시 매우 유리하다.

또한 토크 제어의 성능과 속도 제어의 안정성을 모두 확보하기 위한 방법으로 조향시 내측은 속도 제어, 외측은 토크 제어를 하는 복합 조향 제어 방법이 있다. 이 방법은 안정성을 확보하면서 좋은 성능을 낼 수 있다는 장점이 있다. CDM이 각 속도 구간에 적합한 제어방법을 결정하기 위해서는 차량의 주행속도, 노면상태 등 여러 가지를 고려할 수 있으나 여기서는 주행속도를 고려하였다. 저속 및 제자리 조향일 경우

속도 제어를, 중속 구간에서는 복합 조향 제어를 적용하였고 고속에서는 토크제어를 적용하였다.

4. 결론

본 논문에서는 스키드 무인차량의 동특성과 그 동특성에 맞는 조향제어기법을 제시하였다. 특히 다른 연구에서 제시하지 않았던 스키드 무인차량에서 발생할 수 있는 문제점들을 분석하였고 본 연구에 적용된 조향 제어 기법은 차량의 상태(주행속도)에 따라 제어 기법을 달리 하는 새로운 기법을 도입하여 다른 제어를 실시간으로 적용하는 제어를 통해 스키드 무인차량의 조향시 발생할 수 있는 문제점들을 해결하였다. 무인차량의 주행 및 조향제어는 크게 속도제어와 토크제어 두 가지로 나눌 수 있는데 이러한 속도 및 토크제어는 차량상태(주행속도)에 따라 각기 장단점이 있다. 먼저 안정적인 속도제어를 통해 제자리 조향 및 저속구간에서 사용하였으며 고속에서는 추종성이 좋은 토크제어를 사용하였다. 또한 두 제어의 장점을 살리기 위해 혼합제어를 중속구간에서 사용하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청/민군기술협력지원단/지식경제부의 민군 겸용 기술개발 사업의 일환으로 수행되었음. [06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발]

References

[1] 허진욱, “6×6 이동로봇의 경로추종을 위한 동역학

시뮬레이션”, 한국군사과학기술학회지, Vol. 11, pp. 141~148, 2008.

- [2] Junya Y., Arkira K., and Keiji W., “A Method of Torque Control for Independent Wheel Drive Vehicles on Rough Terrain”, Journal of Terramechanics, Vol. 44, pp. 371~381, 2007.
- [3] Esmailzadeh E., Vossoughi G. R., and Goodarzi A., “Dynamic Modeling and Analysis of a Four Motorized Wheels Electric Vehicle”, Vehicle System Dynamics, Vol. 35, pp. 163~194, 2001.
- [4] J. R. Zhang, A. Rachid and S. J. Xu, “Velocity Controller Design for Autonomic Steering of Vehicles”, Proceeding of the American Control Conference, Arlington, VA, pp. 696~697, Jun. 2001.
- [5] Luca Caracciolo., Alessandro De Luca., and Stefano Iannitti., “Trajectory Tracking Control of a Four-Wheel Differentially Driven Mobile Robot”, Proceeding of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, pp. 2632~2638, May 1999.
- [6] Zhao Y., Zhang J., and Han X., “Development of a High-Performance Electric Vehicle With Four-Independent-Wheel Drives”, Proceeding of SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, Shanghai, China, Jun. 23~25, 2008.
- [7] Junya Y., and Keiji W., “A Method of optimal Wheel Torque Determination for Independent Wheel Drive Vehicles”, Journal of Terramechanics, Vol. 43, pp. 269~285, 2006.
- [8] Michael J. M., Eric B., Randolph B., and John R. B., “Static and Dynamic Roll Stability of Various Commercial Vehicles”, Proceeding of SAE International Truck and Bus Meeting and Exhibition, Detroit, Michigan, USA, Nov. 18~20, 2002.