

능동전륜조향장치를 채택한 사륜조향차량의 횡방향 안정성 강화에 대한 연구

송 정 훈*

동명대학교 메카트로닉스공학과

A Study on Lateral Stability Enhancement of 4WS Vehicle with Active Front Wheel Steer System

Jeonghoon Song*

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

(Received 11 July 2011 / Revised 26 August 2011 / Accepted 23 September 2011)

Abstract : This study is to propose and develop an integrated dynamics control system to improve and enhance the lateral stability and handling performance. To achieve this target, we integrate an AFS and a 4WS systems with a fuzzy logic controller. The IDCS determines active additional steering angle of front wheel and controls the steering angle of rear wheel. The results show that the IDCS improves the lateral stability and controllability on dry asphalt and snow paved road when double lane change and step steering inputs are applied. Yaw rate of the IDCS vehicle tracks reference yaw rate very well and body slip angle is reduced about by 50%. Response time of the IDCS vehicle is also decreased.

Key words : IDCS(Integrated Dynamics Control with Steering, 조향 통합운동제어), AFS(Active Front Steering, 능동전륜조향), 4WS(Four Wheel Steer, 사륜조향), Fuzzy logic control(퍼지 로직 제어), Yaw rate(요 속도), Body slip angle(차체 슬립 각도)

1. 서 론

사륜조향자동차(4WS, Four Wheel Steer)는 1962년 일본에서 제안되어진 기술로 보통의 차량이 전륜만을 조향하는 것에 비하여 후륜까지 조향하는 차량을 뜻한다. 많은 연구자 및 자동차 회사에서는 관련 연구를 진행하였으며 1980년 대 후반 혼다자동차 및 마쯔다자동차의 일부 차량에 장착되기 시작하였다. 4WS 차량은 타이어와 노면과의 마찰을 효과적으로 이용하기 때문에 조종 안전성과 빠른 응답성, 저속에서의 회전 반경 감소와 고속에서의 주행 안정성을 동시에 얻을 수 있는 장점이 있다. 초기 차량 속도 및 전륜 조향각을 이용하여 후륜 조향

각을 단순히 결정하는 것으로 부터 최근 yaw rate가 reference yaw rate를 추종하도록 후륜 조향각을 결정하는 장치까지 개발되고 있다.¹⁾

한편 능동전륜조향장치(AFS, Active Front Steering)는 안정성 및 조향성을 개선하기 위하여 기존 조향장치를 개량한 것으로 최근 많은 연구가 진행되고 있다. AFS는 보조 조향력을 제공함으로써 운전자가 쉽게 조향할 수 있도록 도와주며 운전자가 입력한 조향각에 적절한 양의 조향각을 추가함으로써 차량의 안정성을 개선시켜 주는 등의 역할을 수행한다.^{2,3)}

이러한 4WS 및 AFS는 모두 조향 장치를 이용하여 주행성능을 향상시키기 위한 장치이지만 두 장치의 통합제어를 통하여 차량 안정성 및 조향성의

*Corresponding author, E-mail: jhsong@tu.ac.kr

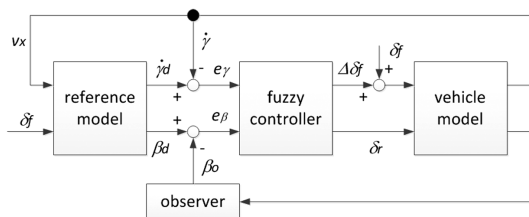


Fig. 1 System schematics

향상에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이는 타이어와 노면간의 점착 한계(adhesion limit)를 확장시키기 위해서는 타이어의 횡방향 힘 뿐만 아니라 종방향 힘까지 적절히 이용하여야 하지만 4WS 및 AFS는 주로 횡방향 힘을 이용하는 장치이기 때문이다.³⁾ 또한 종방향 힘을 이용하기 위하여 제동 장치를 사용할 경우 종방향 주행성능을 악화시킬 수 있는 단점이 있다. 하지만 최근 차량 사시 통합제어 관련 기술이 급속히 발전하고 있어 4WS 및 AFS의 통합제어에 관련된 연구가 조금씩 진행되고 있다.⁴⁾

이 연구에서는 4WS 제어기 및 AFS 제어기를 통합 제어하는 조향장치 통합운동제어장치(IDCS, Integrated Dynamics Control with Steering system)를 제안 및 개발하고자 한다. 통합제어가 필요한 이유는 AFS 및 4WS 장치가 독립적으로 제어되면 이들의 장점이 충분히 발휘되지 않을 뿐만 아니라 오히려 성능 악화를 발생시킬 수도 있기 때문이다.^{3,4)}

IDCS는 차량의 횡방향 안정성 및 조향성을 강화하기 위하여 yaw rate 및 body slip angle이 목표값을 추종하도록 제어한다. 이를 위하여 fuzzy logic 제어기를 개발하였으며 8자유도의 차량 모델을 사용하였다. Fig. 1은 이 연구에서 개발하고자 하는 시스템의 개념도를 나타낸다. 그림에서 조향 입력 δ_f 는 운전자의 조향입력을 의미한다. 이 연구를 통하여 AFS 및 4WS 장치로 구성된 사시 통합운동제어장치가 차량의 성능향상에 미치는 역할을 확인하고 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. 차량 모델

이 연구에서 사용되어질 차량 모델은 8자유도의 전체 차량 모델이다. 이 모델은 선행 연구에서 개발된 차량 모델에 AFS 및 4WS를 적용시킬 수 있도록

개선시킨 것이다.

먼저 Fig. 2는 차량의 좌표계 및 slip angle을 나타낸다. 그림에서 전륜 및 후륜의 tire slip angle은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{5,6)}

$$\alpha_{1,2} = \delta_f - \tan^{-1} \left(\frac{v_y + a\dot{\gamma}}{v_x \mp \frac{t_f}{2}\dot{\gamma}} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{3,4} = \delta_r + \tan^{-1} \left(\frac{b\dot{\gamma} - v_y}{v_x \pm \frac{t_r}{2}\dot{\gamma}} \right) \quad (2)$$

한편 body slip angle은 Fig. 3으로부터

$$\beta = \delta_f - \alpha_{1,2} - \frac{a\dot{\gamma}}{v_x} \approx -\alpha_{3,4} + \frac{b\dot{\gamma}}{v_x} \quad (3)$$

와 같이 구할 수 있다. 식 (1)-(3)에 사용된 기호는 Figs. 2-4에 표시되어 있다. 이 연구에서 사용된 차량 모델은 Fig. 4에 나타내었다. 그 외 8자유도 전체 차

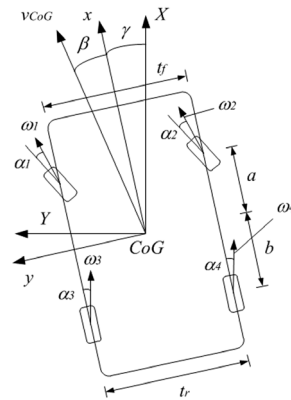


Fig. 2 Vehicle coordinates, velocity components and slip angle components^{5,6)}

량에 대한 자세한 사항은 참고문헌 (6-9)를 참고하기 바란다.

3. 퍼지제어법을 이용한 통합제어장치

퍼지 제어는 비선형 고차 미분 방정식을 풀지 않고 고도 제어시스템의 제어 규칙을 만들 수 있으며 전문가의 직감이나 경험상의 법칙, 실제 실험 또는 모의 실험 자료를 통해서 제어에 필요한 규칙들을 유

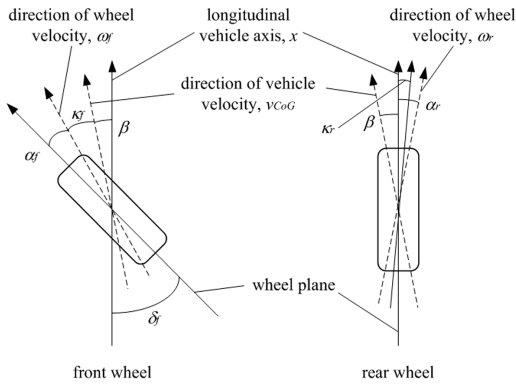


Fig. 3 Body slip angle and tire slip angle^{5,6)}

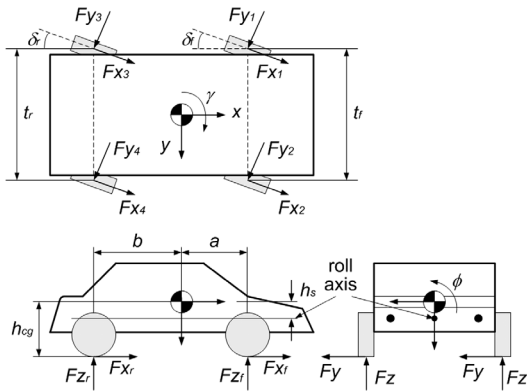


Fig. 4 Vehicle model⁶⁻⁹⁾

도해 낼 수 있다. 그리고 정밀한 수학적 모델이 필요하지 않으며 애매한 언어적 표현으로 제어를 실시함으로 차량 안정성 및 주행성능 판별과 같이 한계를 명확하게 구분 짓기 어려운 분야의 제어에 알맞은 장점이 있다.¹⁰⁾

특히 비선형성이 심하며 차량 운동에 관련된 모든 변수들의 정확한 값을 알기 어려운 차량 운동 제어에 fuzzy control 방법은 매우 알맞다. 또한 두 개 이상의 입력 및 출력이 존재하고(MIMO, multi-input multi-output) 모든 출력이 제어 목적에 동시에 부합하는 최적의 값을 가지도록 제어하여야 하는 통합 운동제어(IDC) 장치의 경우 퍼지 규칙을 조정함으로써 쉽게 원하는 결과를 얻을 수 있다.

fuzzy controller는 크게 세 단계로 구성된다.¹¹⁾ 먼저 fuzzification이라 불리는 단계는 fuzzy controller의 수학적 입력을 언어화하는 과정이며 fuzzy decision

process는 입력을 퍼지 규칙에 맞추어 출력으로 변환하는 것이다. defuzzification은 언어적 출력을 다시 수학적 출력으로 변환하는 것이다.

먼저 IDCS의 퍼지 입력은 다음과 같이 정의한다.

$$e_\gamma = \text{yaw rate} - \text{reference yaw rate}$$

$$e_\beta = \text{body slip angle} - \text{reference body slip angle}$$

여기서 e_γ 은 yaw rate error이며 e_β 은 body slip error이다. yaw rate는 센서 혹은 observer를 이용하여 측정 혹은 추정 가능하나 body slip angle은 observer를 이용하여 추정하여야 한다. 한편 reference yaw rate은 다음 수식을 이용하여 계산하며 reference body slip angle은 0으로 가정한다.^{8,10)}

$$\dot{\gamma}_{ref} = \frac{v_x \delta_f}{a + b + Km_{total} v_x^2} \quad (4)$$

여기서

$$K = \frac{bC_{or}\mu_r - aC_{of}\mu_f}{2(C_{of}\mu_f)(C_{or}\mu_r)(a+b)}$$

여기서 a 및 b 는 차량 무게 중심에서 전륜 중심 및 후륜 중심까지의 거리를 나타내며 c_{of} 및 c_{or} 와 μ_f 및 μ_r 은 전륜 및 후륜의 lateral stiffness와 마찰계수를 의미한다.

fuzzy controller로 전달된 e_γ 및 e_β 는 Fig. 5에 나타난 membership function에 따라 언어적 입력으로 변환된다. 이 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 Mamdani 퍼지 추론 모델을 사용하였다. 한편, Fig. 5의 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB의 의미는 Table 1에 나타내었다.

fuzzy decision process는 퍼지 규칙에 맞추어 언어적 입력을 언어적 출력으로 변환하는 것이다. 이 연

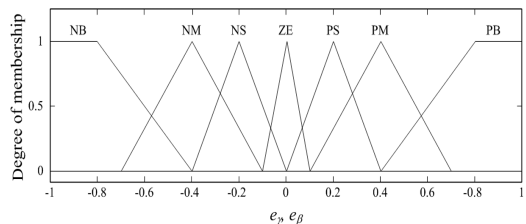


Fig. 5 Membership functions for inputs e_γ and e_β

Table 1 Linguistic terms

NVB	Negative Very Big	PS	Positive Small
NB	Negative Big	PM	Positive Medium
NM	Negative Medium	PB	Positive Big
NS	Negative Small	PVB	Positive Very Big
ZE	Zero Equal		

Table 2 Fuzzy rules

e_γ	e_β	$\Delta\delta_f$	δ_r	e_γ	e_β	$\Delta\delta_f$	δ_r
NB	PB	NVB	PVB	ZE	NS	ZE	NS
NB	PM	NVB	PB	ZE	NM	PS	NM
NB	PS	NB	PB	ZE	NB	PS	NB
NB	ZE	NB	PM	PS	PB	ZE	NS
NB	NS	NM	PM	PS	PM	PS	NS
NB	NM	NM	PS	PS	PS	PS	NM
NB	NB	NS	PS	PS	ZE	PM	NM
NM	PB	NVB	PVB	PS	NS	PM	NB
NM	PM	NB	PB	PS	NM	PB	NB
NM	PS	NM	PB	PS	NB	PB	NVB
NM	ZE	NM	PM	PM	PB	ZE	NS
NM	NS	NS	PM	PM	PM	ZE	NS
NM	NM	ZE	PS	PM	PS	PS	NM
NM	NB	ZE	PS	PM	ZE	PM	NM
NS	PB	NB	PVB	PM	NS	PM	NB
NS	PM	NB	PB	PM	NM	PB	NB
NS	PS	NM	PB	PM	NB	PVB	NVB
NS	ZE	NM	PM	PB	PB	PS	NS
NS	NS	NS	PM	PB	PM	PM	NS
NS	NM	NS	PS	PB	PS	PM	NM
NS	NB	ZE	PS	PB	ZE	PB	NM
ZE	PB	NM	PB	PB	NS	PB	NB
ZE	PM	NS	PM	PB	NM	PVB	NB
ZE	PS	ZE	PS	PB	NB	PVB	NVB
ZE	ZE	ZE	ZE				

구에서 퍼지 규칙은 저자의 경험과 여러 번의 trial and error를 거쳐 설정되었다. 언어적 출력은 다음과 같이 계산된다.

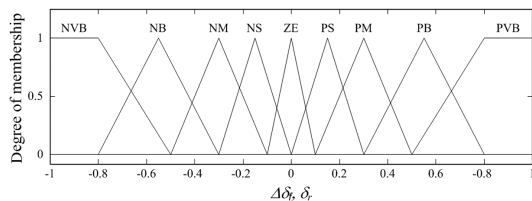


Fig. 6 Membership functions for outputs $\Delta\delta_f$ and δ_r .

IF $e_\gamma = NB$ and $e_\beta = PB$, then $\Delta\delta_f = NVB$ and $\delta_r = PVB$

Table 2는 IDCS의 퍼지 규칙을 나타낸다. 계산된 언어적 출력은 Fig. 6에 나타낸 membership function에 따라 출력값인 $\Delta\delta_f$ 및 δ_r 을 계산한다. 이 단계가 defuzzification이며 $\Delta\delta_f$ 및 δ_r 은 차량 모델의 입력으로 전달된다.

4. 연구 결과

이 연구에서 개발된 IDCS의 성능 평가는 건조한 아스팔트와 눈길에서 차선 변경 조향 입력과 회전 조향 입력을 이용하여 실시되었다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하여 실시하였다.

4.1 차선 변경(double lane change) 조향 입력

운전자에 의하여 차선 변경(double lane change)을 위한 조향입력이 가해질 경우 IDCS의 성능 평가를 위하여 Fig. 7(c) 및 8(c)에 나타낸 것과 같은 조향입력을 가하였다. Fig. 7은 건조한 아스팔트, Fig. 8은 눈길 노면 조건에서의 차량 및 IDCS의 응답이다. 초기 속도는 각각 30m/s와 15m/s이다.

Fig. 7(a) 및 8(a)는 IDCS를 장착한 차량 및 장착하지 않은 차량의 yaw rate를 나타내고 있다. 노면 조건에 관계없이 IDCS를 장착한 차량의 yaw rate는 reference yaw rate를 거의 일치하게 추종하는 것을 볼 수 있다. 또한 조향 입력에 대한 yaw rate의 변화가 빨라진 것을 확인할 수 있다. 이러한 응답성의 개선은 횡방향 가속도(lateral acceleration)의 변화에서도 확인할 수 있다(Fig. 7(d) 및 8(d)).

한편 IDCS를 장착한 차량의 body slip angle은 IDCS를 장착하지 않은 차량에 비하여 최대값을 기준으로 건조한 노면에서 약 49%, 눈길에서 약 47% 감소하였다(Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)). body slip angle은 차량이 진행하는 방향과 차량이 향하고 있는 방향의 차이각을 의미하므로 body slip angle이 감소한 것은 운전자의 의도대로 차량이 진행하는 것을 의미한다.^{5,12)} 이 결과는 횡방향 가속도의 크기가 거의 비슷한 상태에서 얻어진 것으로 차량의 회전 반경 및 회전 속도는 거의 비슷하지만 조향 성능은 상당히

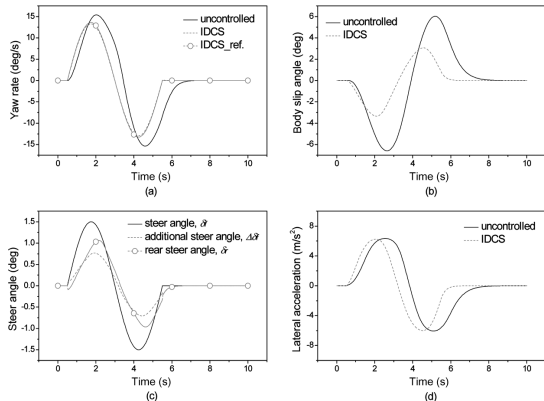


Fig. 7 Vehicle performances on dry asphalt with double lane change steering input

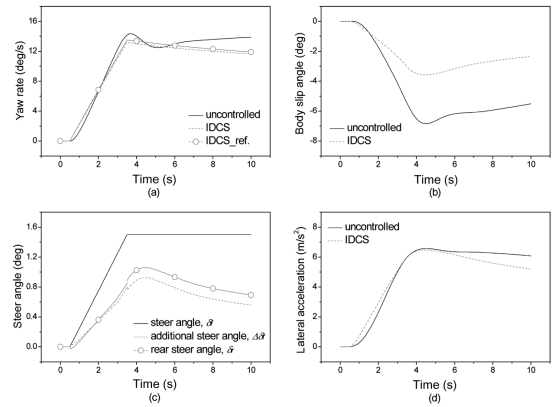


Fig. 9 Vehicle performances on dry asphalt with step steering input

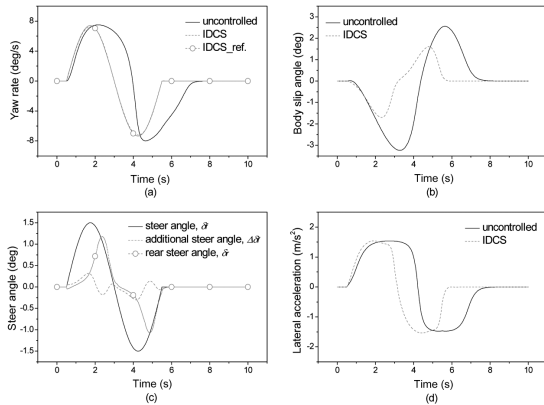


Fig. 8 Vehicle performances on snow paved road with double lane change steering input

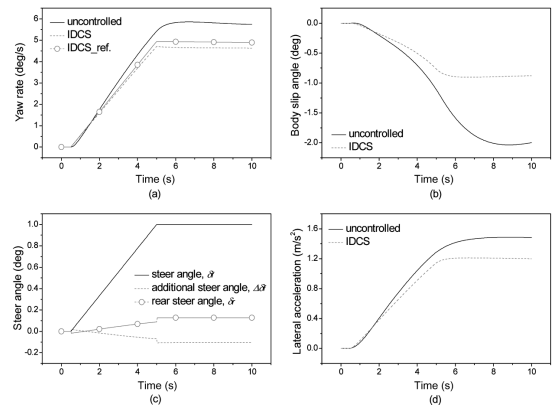


Fig. 10 Vehicle performances on snow paved road with step steering input

개선된 것을 뜻한다.⁵⁾

한편 운전자의 조향각에 대한 IDCS에 의한 전륜 추가 조향각과 후륜 조향각은 각각 Fig. 7(c) 및 8(c)에 나타내었다. 전륜 추가 조향각 및 후륜 조향각은 적절한 값을 유지하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 운전자의 전륜 조향 입력이 없을 경우, 전륜 추가 조향각 및 후륜 조향각은 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

4.2 차량 회전(step) 조향 입력

Fig. 9 및 10은 차량 회전을 위한 조향 입력이 가하여질 경우 IDCS를 장착한 차량과 그렇지 않은 차량의 응답을 나타낸다. 이 때 조향입력은 Fig. 9(c) 및 10(c)에 나타내었다. 노면 조건은 건조한 아스팔트

및 눈길로 가정하였으며 초기 속도는 각각 30m/s, 15m/s로 설정하였다.

앞의 실험 결과와 비슷하게 IDCS를 장착한 차량의 yaw rate는 reference yaw rate를 잘 추종하였다 (Fig. 9(a), 10(a)). body slip angle의 경우 최대값을 기준으로 건조한 아스팔트 노면에서는 약 48%, 눈길에서는 약 56% 이하로 감소하였다. 특히 눈길에서는 전륜 추가 조향각이 운전자의 조향 입력에 비하여 약 7%, 후륜 조향각은 약 9%에 불과하지만 차량 성능의 개선은 매우 우수한 것을 나타내고 있다.

횡방향 가속도는 건조한 아스팔트에서 IDCS를 장착한 차량과 그렇지 않은 차량이 거의 비슷한 값을 보여주지만 눈길에서는 IDCS를 장착한 차량이 약간 감소한 결과를 보여주고 있다(Fig. 9(d), 10(d)).

5. 결 론

이 연구는 차량의 횡방향 안정성 및 조향성을 개선시키기 위하여 능동 전륜 조향각 제어 장치인 AFS 및 4WS 차량의 후륜 조향각 제어 장치의 통합 제어장치를 개발하기 위한 것이다. 이를 위하여 yaw rate error 및 body slip angle error를 입력으로 하고 전륜 추가 조향각 및 후륜 조향각을 출력으로 하는 IDCS fuzzy logic controller를 개발하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) IDCS를 장착한 차량에 차선 변경 조향 입력이 가해지면 yaw rate는 목표값을 거의 일치하게 추종하였으며 body slip angle은 최대값을 기준으로 약 50% 가까이 감소시킬 수 있었다. 또한 조향 입력에 대한 차량의 반응 속도도 매우 빨라짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 차량 회전 조향 입력이 가해질 경우 IDCS를 장착한 차량은 그렇지 못한 차량에 비하여 body slip angle이 건조한 아스팔트 노면에서 약 48%, 눈길에서 약 56% 감소된 것을 볼 수 있다. 또한 yaw rate는 referece yaw rate를 잘 추종하였다.
- 3) 이러한 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서 개발되어진 차량 사시 통합제어장치인 IDCS는 차량의 횡방향 안정성 및 조향성 개선 그리고 응답성 향상에 큰 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0021973).

References

- 1) T. Chengwei, Z. Changfu, Z. Hongyu, Z. Tianjun and M. Li, "4WS the Integrated Control of SBW and 4WS," SAE 2007-01-3674, 2007.
- 2) W. Klier, G. Reimann and W. Reinelt, "Concept and Functionality of the Active Front Steering System," SAE 2004-21-0073, 2004.
- 3) J. He, D. A. Crolla, M. C. Levesley and W. J.

- Manning, "Coordination of Active Steering, Driveline, and Braking for Integrated Vehicle Dynamics Control," Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, Vol.220, pp.1401-1421, 2006.
- 4) B. Mashadi, P. Ahmadizadeh and M. Majidi, "Integrated Controller Design for Path Following in Autonomous Vehicles," SAE 2011-01-1032, 2011.
- 5) U. Kiencke and L. Nielsen, Automotive Control Systems, SAE, New York, 2000.
- 6) J. Song and W. S. Che, "Comparison and Evaluation of Brake Yaw Motion Controllers with an Antilock Brake System," Proc. IMechE, Part D : J. Automobile Engineering, Vol.222, No.7, pp.1273-1288, 2008.
- 7) J. Song, "Comparison and Evaluation of Steer Yaw Motion Controllers with an Anti-lock Brake System," Proc. IMechE, PartD : J. Automobile Engineering, Vol.223, No.4, pp.503-518, 2009.
- 8) J. Song and W. S. Che, "Comparison between Braking and Steering Yaw Moment Controllers Considering ABS Control Aspects," Mechatronics, Vol.19, No.7, pp.1126-1133, 2009.
- 9) J. Song, "Design of a Robust Controller to Enhance Lateral Stability of a Four Wheel Steer Vehicle with a Nonlinear Observer," Transactions of KSAE, No.15, No.6, pp.120-127, 2007.
- 10) M. J. L. Boada, B. L. Boada, A. Munoz and V. Diaz, "Integrated Control of Front-wheel Steering and Front Braking Forces on the Basis of Fuzzy Logic," Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, Vol.220, pp.253-267, 2006.
- 11) H. T. Nguyen, N. R. Prasad, C. L. Walker and E. A. Walker, A First Course in Fuzzy and Neural Control, Chapman & Hall/CRC, New York, 2003.
- 12) R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York, 2006.