한국소음진동공학회 2011년 춘계학술대회논문집, pp.206~211

인휠모터 차량의 주행 안정화 제어 알고리즘 연구

A control algorithm for driving stability improvement of in-wheel motors vehicle

최 승 회*·김 진 성**·허 훈†

Seunghoe Choe, Jinsung Kim and Hoon Heo

Key Words : In-wheel motor vehicle(인휠 모터 자동차), PID control(PID 제어기), nonlinear gain(비선형 이득), integral control(적분제어기), yaw velocity control(요 속도 제어)

ABSTRACT

In this paper, a control algorithm for the improvement of yaw and velocity stability of electrical vehicle with two or four in-wheel motors is proposed. The vehicle is modeled with independently operative in-wheel motor wheels. Different frictions on the wheels are regarded as disturbances, which causes driving instability. In this situation the proposed algorithm enables stabilizing the yaw motion and velocity of vehicle simultaneously. The proposed PID controller is composed with two techniques, which enhance the disturbance reject and point tracking performances. One is nonlinear gain function and the other one is improved integral controller operating as time based weight function. Simulation is conducted to reveal its efficient performance.

기 호 설 명

m : 질량
I_v : 차량 이너셔 모멘트
a : 앞 축과 무게중심까지의 거리
b : 뒤 축과 무게중심까지의 거리
δ : 스티어링 각
$F_{y,lf}$: 왼쪽 앞 타이어의 세로축 힘
$F_{y,\ell r}$: 왼쪽 뒤 타이어의 세로축 힘
$F_{y,rf}$: 오른쪽 앞 타이어의 세로축 힘
$F_{y,rr}$: 오른쪽 뒤 타이어의 세로축 힘
$F_{x,lf}$: 왼쪽 앞 타이어의 가로축 힘
$F_{x,lr}$: 왼쪽 뒤 타이어의 가로축 힘
$F_{x,rf}$: 오른쪽 앞 타이어의 가로축 힘
$F_{x,rr}$: 오른쪽 뒤 타이어의 가로축 힘
$F_{y,f}$: 앞 바퀴 전체의 세로축 힘
$F_{y,r}$: 뒤 바퀴 전체의 세로축 힘
$F_{x,f}$: 앞바퀴 전체의 가로축 힘
$F_{x,r}$: 뒤바퀴 전체의 가로축 힘
$F_{x,lt}$: 왼쪽 바퀴 전체의 가로축 힘
$F_{x,rt}$: 오른쪽 바퀴 전체의 가로축 힘
F_t : 견인력
μ_r : 마찰계수
$\mu_{r,r}$: 오른쪽 부분의 마찰계수
$\mu_{r,l}$: 왼쪽 부분의 마찰계수
$\bar{a}$: 차량의 가속도
m_v : 차량의 질량
m_w : 바퀴의 질량
m_{front} : 차량 앞부분의 질량
m_{rear} : 차량 뒷부분의 질량
$F_{r,t}$: 차량 앞부분의 전체 마찰력
$F_{r,r}$: 차량 뒷부분의 전체 마찰력
g : 중력
e : 에러

† 고려대학교 제어계측공학과
E-mail : heo257@korea.ac.kr
Tel : (02) 3290-3995, Fax : (02) 929-7808
* 고려대학교 대학원 제어계측공학과
** 고려대학교 대학원 제어계측공학과

1. 서 론

자동차는 현대사회의 주요한 운송수단으로 자리 잡게 되었으며, 구조적인 면에서 계속 발전하고 있다.[1] 친환경성과 높은 차량 안정성을 동시에 만족시킬 수 있는 인휠모터 전기자동차는 미래 자동차 산업의 핵심기술로써, 선진각국은 친환경 자동차 개발에 총력을 기울이고 있다.

인휠모터 차량은 각 차륜을 독립적으로 제어하므로 이에 따른 제어기법이 필요하며, 많은 연구가 진행되고 있다.

이 논문에서는 각 차륜이 독립적으로 동작한다는 인휠모터 자동차의 장점을 이용하여, 오른쪽과 왼쪽 바퀴가 서로 다른 마찰력을 가지는 노면을 지나며 발생할 수 있는 Yaw와 velocity의 변화에 대하여, 두 가지 요소를 동시에 제어하는 기법을 소개하도록 한다.

2. 인휠모터 전기자동차 모델링

2.1 Dynamic and tire traction modeling

Figure 1에 본 논문에 사용된 차량 모델을 도시하였다. Conventional vehicle model을 사용하였으며, 4개의 휠을 가지는 차량의 수학적인 모델링을 이용하여 차량의 동적 방정식을 얻고 이를 바탕으로 축소차량에 적용하였다. 4개의 바퀴가 모두 독립적으로 동작하나 왼쪽 앞, 뒤와 오른쪽 앞, 뒤의 바퀴는 같은 힘을 가지며 동작한다고 가정하였다.

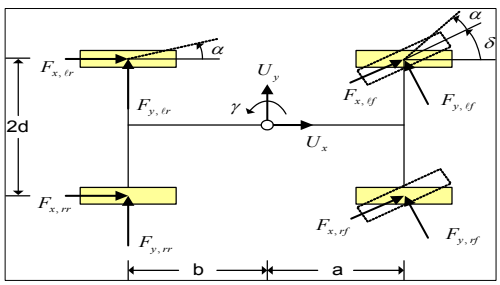

Figure 1. Conventional vehicle Model

종 방향과 횡 방향의 타이어력으로 구성성분을 나누었다. 종 방향은 motor에서 발생되는 구동력 또는 제동력을 포함하는 타이어 힘이며, 횡 방향의 경우 타이어의 미끄럼각과 비례하는 힘을 발생시키는 단순한 타이어 모델에 근거한다. 이에 따른 운동방정식은 다음과 같다.[2]

$$
\begin{aligned}
F_{x,f} &= (F_{x,\ell f} + F_{x,rf})\cos(\delta) - (F_{y,\ell f} + F_{y,rf})\sin(\delta) \\
F_{x,r} &= (F_{x,\ell r} + F_{x,rr}) \\
F_{y,f} &= (F_{y,\ell f} + F_{y,rf})\cos(\delta) + (F_{x,\ell f} + F_{x,rf})\sin(\delta) \\
F_{y,r} &= (F_{y,\ell r} + F_{y,rr}) \\
F_{x,\ell t} &= F_{x,\ell r} + F_{x,\ell f}\cos(\delta) - F_{y,\ell f}\sin(\delta) \\
F_{x,rt} &= F_{x,rr} + F_{x,rf}\cos(\delta) - F_{y,rf}\sin(\delta)
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

2.2 In-wheel motor vehicle

In-wheel motor가 장착된 차량의 동적 시스템은 Figure 2와 Figure 3을 이용하여 모델링 하였다.[2],[3],[4],[5]

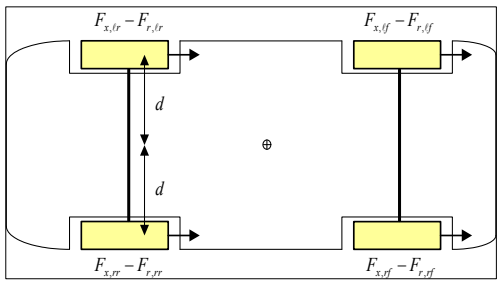

Figure 2. Conceptual diagram of four In-wheel motor vehicle

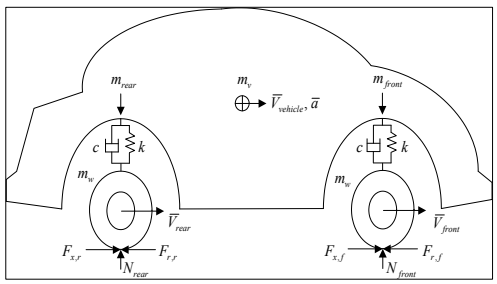

Figure 3. modeling of four In-wheel motor vehicle

위의 차량 모델에서의 가속도와 차량의 yaw motion은 다음과 같다.

$$F_{x,f}+F_{x,r}-(F_{r,f}+F_{r,r})=(m_v+4\cdot m_w)\bar{a}$$
$$F_{r,f}=\mu_r N_{front}$$
$$=\mu_{r,r}(m_w+\frac{1}{2}m_{front})g+\mu_{r,l}(m_w+\frac{1}{2}m_{front})g$$
$$F_{r,r}=\mu_r N_{rear}$$
$$=\mu_{r,r}(m_w+\frac{1}{2}m_{rear})g+\mu_{r,l}(m_w+\frac{1}{2}m_{rear})g$$

$$\bar{a}=\frac{F_{x,f}+F_{x,r}-(F_{r,f}+F_{r,r})}{(m_v+4\cdot m_w)} \quad (2)$$

$$\bar{a}=\frac{F_{x,f}+F_{x,r}}{(m_v+4\cdot m_w)}-\frac{(\mu_{r,r}(m_w+\frac{1}{2}m_{front})g+\mu_{r,l}(m_w+\frac{1}{2}m_{front})g}{(m_v+4\cdot m_w)}-\frac{\mu_{r,r}(m_w+\frac{1}{2}m_{rear})g+\mu_{r,l}(m_w+\frac{1}{2}m_{rear})g}{(m_v+4\cdot m_w)}$$

뉴턴의 제 2법칙에 따라 외력 계와 유효력 계는 등가이다. α_v^{yaw}는 차량에 대한 yaw의 각가속도이다. 따라서 yaw의 각가속도는 다음과 같다.[3]

$$+\curvearrowright \sum M_G=\sum(M_G)_{eff}$$
Let, $A=d\cdot(F_{f,\ell t}-F_{r,\ell t})$
Let, $B=d\cdot(F_{f,rt}-F_{r,rt})$
$$I_v\cdot\alpha_v^{yaw}=A-B \quad (3)$$

$$\alpha_v^{yaw}=\frac{A-B}{I_v}$$
$$=\frac{d\cdot(F_{x,\ell t}-F_{r,\ell t})-d\cdot(F_{x,rt}-F_{r,rt})}{I_v}$$

$$\alpha_v^{yaw}=\frac{d\cdot(F_{x,\ell t}-F_{r,\ell t})-d\cdot(F_{x,rt}-F_{r,rt})}{I_v}$$

3. 제어 알고리즘

3.1 개선된 PID 제어 알고리즘

(1) 개선된 Integral control

기존의 Integral 제어기의 Integral 구간은 0에서 현재의 시간까지를 적분하는 것으로 설정되어 있으나 개선된 Integral 제어기의 Integral 구간은 특정 과거시간에서부터 현재 시간으로 설정되어있다. 여기서 일정 간격의 시간 구간을 Window라 한다.

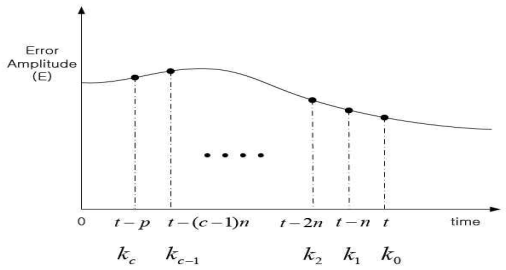

Figure 4. Integral section of advanced Integrator

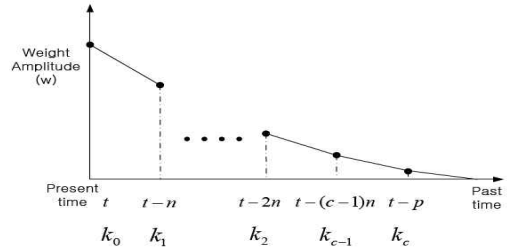

Figure 5. Weight in the window

Figure 4, 5에서의 weight function에 의하여 현재 발생하는 Error가 과거에 발생했던 Error보다 큰 Weight 값을 갖게 됨으로써, 현재의 Error가 과거의 Error보다 더 큰 가중치를 가지고 계산하게 된다. Figure 4에 근거해 추출된 weight 값들은 Window에 수집된 Error data들에 대해 각 발생 시간대 별로 Matching하여 Weight를 적용한 후 각 결과들을 합하며 이를 수식화 하면 아래와 같다.[6],[7]

$$I_{NEWTerm}=K_I\left\{\begin{matrix}(w_{K_0}E_{k_0})+(w_{K_1}E_{k_1})+(w_{K_2}E_{k_2})+\\ \cdots+(w_{K_{c-1}}E_{k_{c-1}})+(w_{K_c}E_{k_c})\end{matrix}\right\} \quad (4)$$

(2) Nonlinear gain

Nonlinear gain function은 Set point와 Process variable 사이에 발생하는 편차에 Proportional gain을 변화시켜 제어한다. 기존의 K_P gain에 Error Gap Width를 설정하여 설정해 놓은 범위를 벗어나

게 되면 K_{NP} gain을 적용하여 제어한다. Gap width가 설정되면 K_P에 대한 새로운 gain인 K_{NP}는 다음의 관계를 통해 결정된다.[6),7)] 이번 연구에서는 K_{NP} gain을 Yaw와 Velocity에 다른 방식으로 적용하였으며 다음과 같이 나타내었다.

$$\text{Yaw} : K_{NP} = \frac{|e|}{EGW} K_P \tag{5}$$

$$\text{Velocity} : K_{NP} = \frac{|e|}{EGW} K_P \,(\text{if } |e| \geq EGW)$$
$$K_{NP} = K_P (otherwise)$$

3.2 제안된 Yaw Velocity 제어 알고리즘

이 연구에서는 왼쪽과 오른쪽이 독립적으로 움직이는 인휠 모터 자동차의 특징을 가지고, 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 힘을 이용하여 Yaw 와 Velocity를 제어한다. 각 바퀴의 구동력은 각각 Yaw와 Velocity를 제어하기 위하여 연결된 PID 제어기를 통하여 왼쪽 바퀴는 속도를, 오른쪽 바퀴는 Yaw를 각각 제어하며 직선 운동하게 된다. 제어 알고리즘은 Figure 6와 같다.

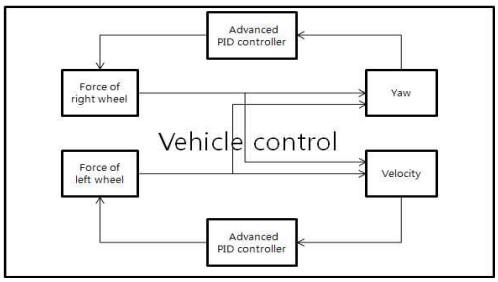

Figure 6. Vehicle Control algorithm

4. Simulation 결과

Simulation은 Matlab Simulink를 이용하여 수행하였으며, 노면의 상태, 즉 노면에 생기게 되는 마찰력의 변화에 따른 Yaw와 Velocity의 변화를 살펴보기 위하여, 왼쪽과 오른쪽 바퀴에 각각 다른 외란을 주고 Yaw와 Velocity의 Set point를 변경시켜가며 Yaw와 Velocity의 변화를 관찰하였다.

위의 상황을 Conventional PID 제어기와 새로이 제안한 개선된 PID 제어기를 비교함으로써 결론을 도출하였다.

4.1 Disturbance rejection 성능 비교

왼쪽과 오른쪽에 작용하게 되는 외란의 경우, 일반적인 마찰계수를 사용하였다. Square pulse 형태로 노면에서 발생할 수 있는 마찰력을 수치로 환산하여 주었으며 다음의 표에 의거하여 마찰력을 발생시켰다.

Table 1 Average peak values for friction coefficient for different road condition

Surface	Average peak
Asphalt and concrete (dry)	0.8-0.9
Asphalt (wet)	0.5-0.6
Concrete(wet)	0.8
Earth road(dry)	0.68
Earth road(wet)	0.55
Gravel	0.6
Ice	0.1
Snow(hard packed)	0.2

아스팔트가 건조했을 때(0.8)와 젖어있을 상태(0.6)의 외란을 왼쪽 바퀴에 주었을 때의 결과를 나타내었다. 오른쪽의 외란은 건조한 상태(0.8)로 고정하였다.

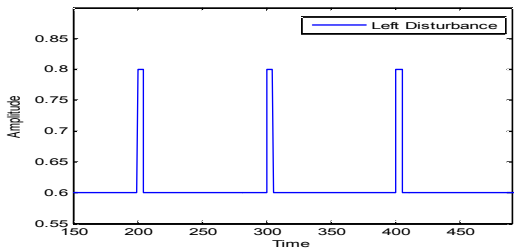

Figure 7. Left Disturbance

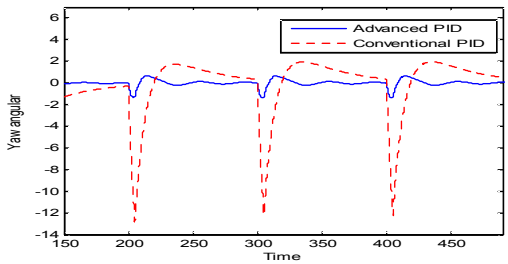

Figure 8. Yaw angular PID result Comparison

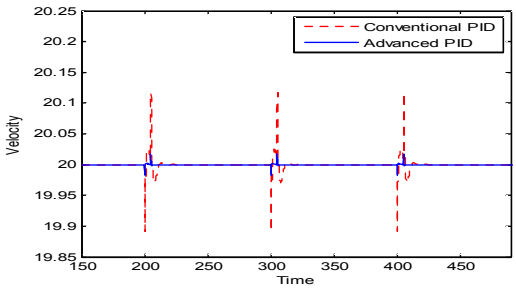

Figure 9. Velocity PID result Comparison

다음은 아스팔트가 건조했을 때(0.8)와 젖어있을 상태(0.6)의 외란을 오른쪽 바퀴에 주었을 때의 결과를 나타내었다. 왼쪽의 외란은 건조한 상태(0.8)로 고정하였다.

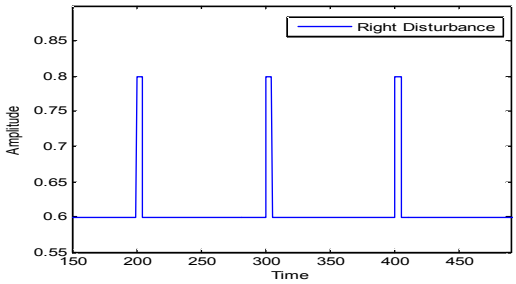

Figure 10. Right Disturbance

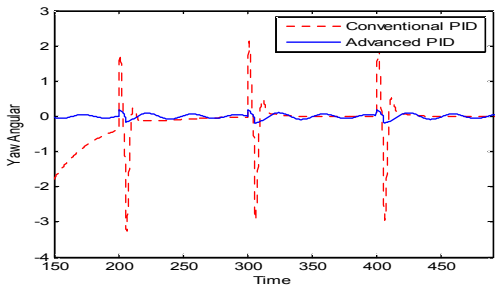

Figure 11. Yaw angular PID result Comparison

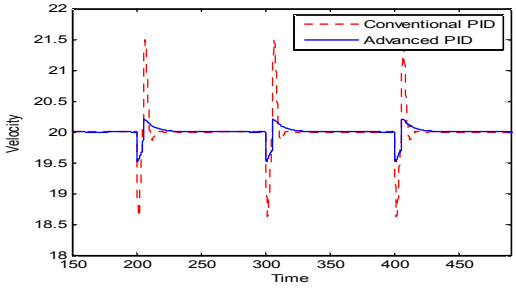

Figure 12. Yaw angular PID result Comparison

4.2 Set point Tracking

Velocity와 Yaw의 Set point를 변경시켜가며 Set point tracking에 관한 결과를 비교하였다. Velocity의 Set point를 변경하였을 경우, Velocity와 Yaw의 결과를 나타내었다.

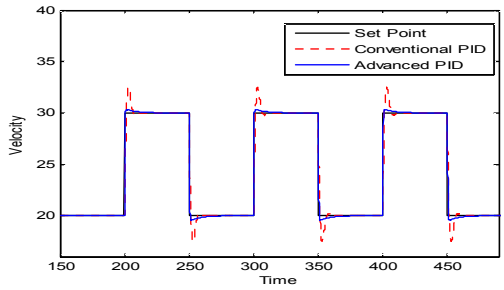

Figure 13. Velocity PID result Comparison

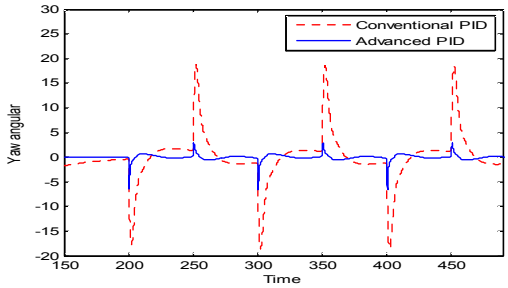

Figure 14. Yaw angular PID result Comparison

다음은 Yaw angular의 Set point를 변경하였을 경우, Yaw와 Velocity의 결과를 나타내었다.

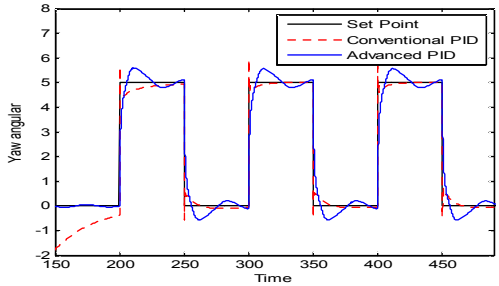

Figure 15. Yaw angular PID result Comparison

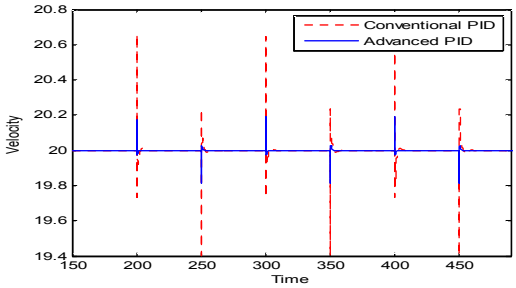

Figure 16. Velocity PID result Comparison

3. 결 론

인휠모터 전기자동차의 독립적인 모터 구동이 가능하다는 특징을 가지고, 직선 주행 시 각 바퀴에서 발생되는 힘으로 Yaw와 Velocity를 제어하였다.

일반적인 PID 제어기와 개선된 PID 제어기를 이용한 여러 Simulation을 비교한 결과, Yaw angluar의 Set Point를 변화시켰을 때의 Yaw를 제외하고는 보다 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, 각 바퀴와 연결된 Yaw와 Velocity를 제어하는 각각의 개선된 PID 제어기를 통해 Velocity와 Yaw를 일반적인 PID제어기보다 안정적으로 유지할 수 있으며 그 성능이 우수함을 입증할 수 있었다. 향후 연구로, 제안된 제어기를 모터의 모델에 적용하여 속도, Yaw 모터 사이의 관계성에 대한 Simulation과 실험이 진행되고 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업(10031770)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Sang-Gil Park, Won-Sik Park, Hae-jin Lee, Woo-Gyoung Hong and Jae-Eung Oh, 2007, Fault Sugnal Analysis of the Automotive Components using Experimental Mothod part 1 - Consideration of the Engine Signals, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring

(2) Hee-Jae Lee, Hoon Heo, 2009, Driving Stability Improvement of In-Wheel Motor Vehicle, M. S. Thesis, Korea University.

(3) Sungman Park, Ohshin Kwon and Hoon Heo, 2010, Development of dual controller for In-wheel Motor vehicle under irregular road condition, Annual Conference and Exhibition of KSAE, 3164-3166.

(4) Farzad Tahami, Reza Kazemi, Shahrokh Farhanghi, 2003, A Novel Driver Assist Stability System for All-Wheel-Drive Electric Vehicles, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 52, NO. 3.

(5) June-Young Ahn and Tae-Young Ji, 2006, Dynamic Characteristics of the Vehicle with Wheel In Motor Contorl System, Proceedings of International Conference on ICMATE.

(6) Jin-Sung Kim, Yeol Lee, O-Shin Kwon, Sung-Man Park, Hoon Heo, 2010, Design of Newly Robust PID Controller for Reverse Osmosis Plant, International Conference on Computing, Communications and Control Technologies, USA, April 6-9, 324-328

(7)Jin-Sung Kim, Yeol Lee, Yonghee Lee, Hoon Heo, 2010, Performance and Stability Simulation of RO plant using improved PID controller, Theories and Applications of Chem. Eng, Vol.16, No.1