

농업용 트랙터의 작업 시 자동 운전 유도를 위한 횡방향 제어기 설계[§]

한건희* · 이지민* · 송봉섭*[†]

* 아주대학교 기계공학과

Design of Lateral Controller for Autonomous Guidance of a Farm Tractor in Field Operations

Kun Hee Han*, Ji Min Lee* and Bongsob Song*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received June 27, 2013 ; Revised February 25, 2014 ; Accepted February 25, 2014)

Key Words: Driving Guidance(운전 지원), Lateral Control(횡방향 제어), Dynamic Surface Control(동적 표면 제어), Steering Actuator(조향 액추에이터)

초록: 본 논문은 작업 시 농업용 트랙터의 운전지원을 위한 강인한 횡방향 제어기를 제안하고자 한다. 자동차와 달리 트랙터의 조향 방식은 유압실린더를 이용함으로써 상대적으로 큰 시간지연을 가지고 있으며 작업 시 지면 환경도 일반 도로와는 다르다. 조향 액추에이터 모델을 포함하는 기구학적 트랙터 모델을 기반으로 동적 표면 제어라는 비선형 제어기법을 적용하여 조향 액추에이터의 시간지연 및 노면 경사의 변화에 강인한 횡방향 제어기를 설계한다. 마지막으로 상용 트랙터 시뮬레이터를 이용하여 마찰 계수가 일정한 주어진 노면 상태에서 조향 액추에이터의 시간 지연 변경이나 오르막 또는 내리막과 같은 지형 조건 변화에 대한 횡방향 제어기의 성능 및 강인성을 검증한다.

Abstract: This paper presents a robust lateral controller for autonomous guidance of a farm tractor in field operations. Although mechanical steering actuators have recently been used for passenger vehicles, the steering actuator of the farm tractor is based on a hydraulic system, resulting in limited bandwidth and a larger time delay. Based on a kinematic tractor model with steering actuator dynamics, a nonlinear control technique called dynamic surface control is applied to design a robust lateral controller that compensates for uncertainty owing to steering actuator and road geometry. Finally, tracking performance and robustness of the proposed controller are validated via commercial tractor simulations, with respect to the time delay of the steering actuator and road geometry (e.g., up and down hills), on a given field with a constant friction coefficient.

- 기호설명 -

v : 트랙터의 속도
 x : 트랙터의 x 축 방향 위치
 y : 트랙터의 y 축 방향 위치
 ψ : 트랙터의 heading 각
 δ : 트랙터의 조향각 (steering angle)
 θ : 조향 핸들 각도 (steering wheel angle)
 l : 트랙터 축간 거리

R_s : 조향 핸들 각과 조향각 간의 비례상수
 τ_s : 조향 시스템의 시상수
 ψ_d : 원하는(Desired) heading 각
 d : ψ_d 을 설정하기 위한 거리(Preview distance)
 e_y : 횡방향 오차
 e_ψ : heading각 오차
 δ_{max} : 최대 조향각
 ω_{max} : 조향 최대 각속도
 μ : 지면마찰계수
 β : 차량의 횡방향 미끄럼각

§ 이 논문은 대한기계학회 동역학 및 제어부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 6. 4.-6., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, bsong@ajou.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

트랙터는 가장 넓은 용도로 사용되고 있는 농업

기계 중의 하나로 작업 시 운전지원 또는 무인 주행을 통하여 농업생산성을 증대시키고 작업자의 편의를 제고할 수 있다. 이러한 장점 때문에 1990년대부터 지속적으로 개발이 되고 적용 가능성을 실제 실험을 통하여 보여주고 있다.⁽¹⁾ 운전지원이나 무인 주행의 개념은 승용차나 트럭, 버스와 같은 차량을 대상으로 우선적으로 개발되었으나 주변 환경의 다양성과 운전자의 안전성 확보문제로 상용화 시기가 늦어지고 있다. 하지만, 상대적으로 주행 시 주변 외부환경이 단순하고 주행을 위한 안전 공간이 확보된 농업용 트랙터의 경우 운전지원 시스템이 먼저 상용화되고 있다.⁽²⁾

문헌에서 제안되고 있는 차량용 횡방향 제어기가 농업용 트랙터에 적용되기 위해서는 일반 차량과 다른 몇 가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째로 자동차의 경우 고속도로나 국도와 같이 포장도로를 주행한다고 가정하고 있지만 트랙터의 경우 잔디나 밭과 같이 다양한 토질 및 비탈길과 같은 다양한 형태의 경사면 위를 주행한다.⁽³⁾ 이로 인해서 지면과 트랙터와 미끄럼이 존재하면 이로 인한 성능저하가 예상된다. 두 번째로는 농업용 트랙터의 조향 시스템은 유압식 액추에이터가 사용되어 조향 핸들과 조향각 간의 시간지연이 발생하고 이로 인하여 작동 주파수(Bandwidth) 대역이 제한적이다.⁽⁴⁾

첫 번째 문제의 경우 Sliding Mode 제어나 Integrator Backstepping 과 같은 강인한 비선형 제어기법이 적용되고 있으며 지면과 트랙터와 미끄럼이 존재하더라도 성능저하를 최소화 시키는 방법이 제안되고 있다.^(3,5) 하지만 토질의 종류(잔디, 진흙, 자갈 등)에 따른 미끄럼 현상을 수학적으로 모델링한 문헌을 찾아보기 어려우며 대부분의 시뮬레이션을 통한 연구의 경우 지면마찰계수가 균일하다는 가정하에 이를 변화시키거나 노면의 경사를 변화시켜 미끄럼을 유도한 후 횡방향 제어기의 성능을 검증하고 있다. 두 번째 문제의 경우 조향 액추에이터를 모델링 하는 연구는 있지만 시간지연을 포함하고 있는 유압식 액추에이터의 동특성을 고려해서 횡방향 제어기를 설계하는 연구는 거의 찾아 볼 수 없다.

본 논문에서는 노면의 경사 변화와 조향 액추에이터의 동특성 변화에 강인한 횡방향 제어기 설계를 목적으로 한다. 이를 위해서 조향 액추에이터 모델을 고려하고 비선형 강인제어기법을 적용하여 환경의 불확실성에 강인한 횡방향 제어기를 설계하고자 한다. 더 나아가, 제안된 제어기의 성능을 검증하기

위하여 상용 트랙터 시뮬레이터를 사용한다. 이 시뮬레이터의 경우도 토질의 종류에 따른 지면상태 모델링을 지원하지는 않기에 잔디 위라는 가정하에(즉, 지면마찰계수를 고정하고) 지면 형태를 오르막이나 내리막과 같은 작업 환경을 구축하고 조향 액추에이터를 포함하여 트랙터의 모델 불확실성에 대한 횡방향 제어기의 강인성을 검증한다.

2. 하드웨어 구성

농업용 트랙터의 자동 운전 지원 시스템을 개발하기 위해서 우선 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 20kW (LSMtron 社)급 트랙터를 선정하였다. 좀 더 구체적인 사양은 4 장 시뮬레이션 결과 내 Table 1 에 정리하였다. 또한, 자동 운전 지원 시스템을 위해서 추가적인 센서와 액추에이터가 추가되었다. 트랙터의 위치정보를 측정하기 위한 DGPS(Novatel 社)와 조향각을 측정하기 위한 조향각 센서(BEI 社), 횡방향 제어를 위한 조향 액추에이터로 스텝모터가 추가적으로 장착되었다. 즉, 주어진 하드웨어 환경에서 횡방향 제어를 위하여 트랙터의 위치, heading 각, 조향각, 조향 핸들 각, 그리고 주행 속도가 측정될 수 있는 값이다.

트랙터의 조향 구조는 일반 차량과 달리 핸들을 조향 했을 시 랙 & 피니언 시스템 대신 유압실린더로 동력이 전달되어 스티어링 암과 타이로드를 움직여서 타이어의 방향을 전환하는 시스템이다 (Fig. 2 참조). 일반적으로 Fig. 2 에서 보는 바와 같은 유압식 복동식 양로드형 실린더가 사용되는데 이는 유압실린더로 압유를 공급하고 플런저 양측에 압유를 교대로 공급하여 계획된 유압으로 얻는 데에 있다. 여기서 유압 실린더의 압력차이를 이용하여 조향각이 타이로드로 전달되어 바퀴각으로 전달되는데 이때 실린더 내부의 차있던 기포로 인하여 리크가 발생되고 이로 인하여 상대적으로 큰 시간지연이 발생하게 된다.⁽⁶⁾

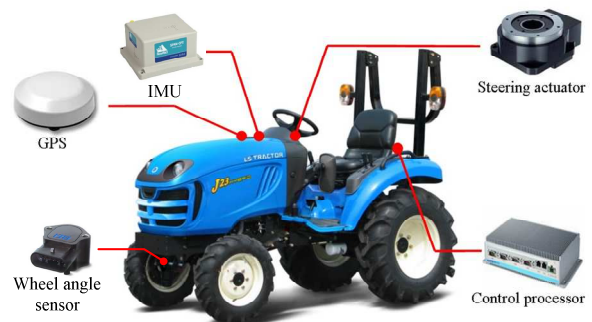


Fig. 1 Additional hardware for driving guidance of a farm tractor

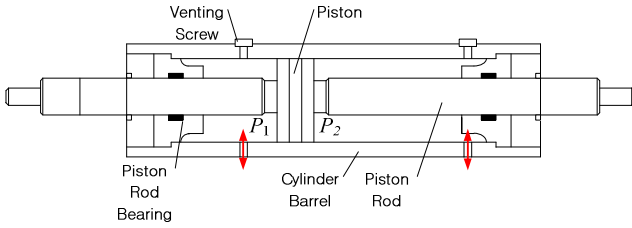


Fig. 2 Schematic of hydraulic steering actuator

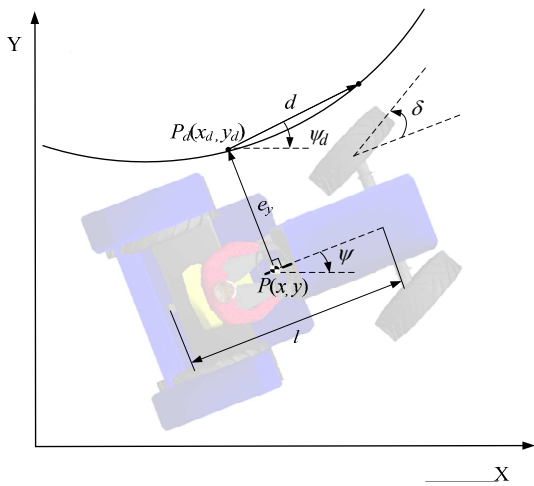


Fig. 3 Kinematic model and definitions of lateral error and desired heading angle

3. 횡방향 제어기 설계

3.1 트랙터 모델링

조향 액추에이터의 시간지연을 고려하며 다양한 환경에서 강인한 횡방향 제어를 개발하기 위해서는 우선적으로 제어기 설계를 위한 트랙터 모델이 필요하다. Fig. 1에 주어진 트랙터의 경우 최대 10(km/h) 내외로 주행하기에 횡방향 제어기 설계를 위하여 다음과 같은 기구학적(Kinematic) 모델을 사용하였다(Fig. 3 참조).^(7,8)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \psi \\ \dot{y} &= V \sin \psi \\ \dot{\psi} &= \frac{V}{l} \tan \delta \end{aligned} \quad (1)$$

다음으로 시간지연을 가진 조향 액추에이터에 대한 모델은 다차원 미분방정식으로 표현될 수 있으면 식 (2)와 같이 1 차 미분방정식으로 근사화하여 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾ 더 나아가 조향각과 조향각의 각속도가 물리적으로 제한되어 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

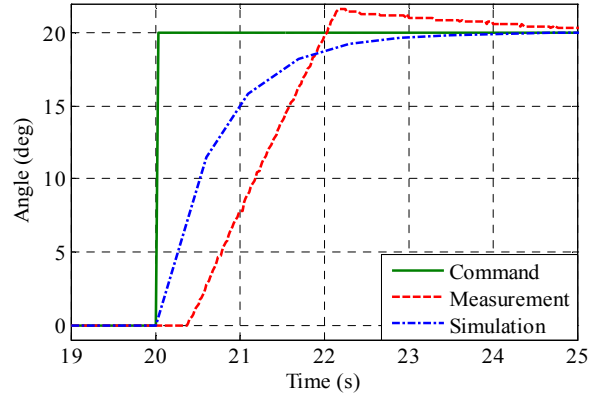


Fig. 4 Time response of steering angle in simulation and experimental test

$$\tau_s \dot{\delta} + \delta = \theta / R_s \quad (2)$$

$$|\delta| \leq \delta_{\max}, |\dot{\delta}| \leq \omega_{\max} \quad (3)$$

여기서 R_s 는 식 (3)을 만족하는 조건에서만 유효하며 식 (3)을 만족하지 못하는 조건에서는 θ 가 커져도 δ 가 포화상태에 이르러 경계 값을 지속적으로 유지한다.

조향 액추에이터의 동역학적 특성을 검증하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 계단함수의 입력 값이 주어진 상태에서 실제 측정된 조향각과 식 (2)에서 제시된 식을 사용하여 시뮬레이션 한 값을 비교하여 나타내었다. 실제 측정 값에서는 순수 시간 지연 현상을 보인 후 조향각이 증가하는 현상을 보였으며 식 (2)의 τ_s 를 0.7로 설정하였을 경우 입력 값의 90%에 해당하는 값에 도착하는 상승시간 기준으로 비슷한 결과를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 여기서 주어진 결과는 특정 시나리오에 해당하는 결과이며 입력 값의 크기가 변하거나 계단함수가 아닌 경우 τ_s 의 값이 다르게 설정되어야 한다. 따라서, 시간지연을 가지고 있는 조향 액추에이터를 고려한 횡방향 제어기를 설계할 필요하며 설계된 제어기가 조향 액추에이터의 동적 특성 변화에 강인함을 검증할 필요가 있다.

3.2 비선형 횡방향 제어기

바퀴와 노면 사이에 미끄럼이 발생하는 상황에 대해서 이를 보상하기 위한 제어기로 비선형 제어기가 설계되고 시뮬레이션을 통하여 이의 유용성이 검증되고 있다.⁽³⁾ 유사한 접근방법으로 횡방향 제어기를 설계하기 위해서 동적 표면 제어라는 비선형 제어기법 중 하나를 사용하였다.⁽⁹⁾ 더 나아가 조향 액추에이터 모델을 고려하여 다음과 같이 횡방향 제어기를 설계하였다.

우선 횡방향 제어기를 설계하기 위해 첫 번째 오차를 횡방향 오차(e_y)와 heading 각 오차(e_ψ)의 선형적 조합으로 다음과 같이 정의한다.^(8,10)

$$S_1 = e_y + de_\psi = e_y + d(\psi_d - \psi) \quad (4)$$

여기서 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 ψ_d 를 원하는 주행궤적의 접선방향이 아닌 d 만큼 떨어진 지점을 정하여 그 점과 이루는 각도로 정의하였다. 이는 preview 의 효과를 가져와서 곡선 주행 시 좀더 안정성을 확보할 수 있다.⁽⁸⁾

다음으로 식 (4)의 S_1 을 미분한 후 식 (1)을 적용하면 다음과 같다.

$$\dot{S}_1 = \dot{e}_y + d(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) = \dot{e}_y + d\dot{\psi}_d - \frac{dV}{l} \tan \delta \quad (5)$$

이때 S_1 을 0 으로 수렴시키기 위해 $\dot{S}_1 = -K_1 S_1$ 이라 놓으면 원하는 조향각(Synthetic steering angle)은 다음과 같다.

$$g(\bar{\delta}) = \tan \bar{\delta} = \frac{l}{dV} (\dot{e}_y + d\dot{\psi}_d + K_1 S_1) \quad (6)$$

여기서 K_1 는 제어상수이다. 다음으로 식 (6)의 값을 다음과 같이 저역(Low-pass) 필터를 이용하여 통과시키면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau \dot{g}_{des} + g_{des} = g(\bar{\delta}), g_{des}(0) = g(\bar{\delta})(0) \quad (7)$$

두 번째 오차 표면을 $S_2 = \tan(\delta) - g_{des}$ 로 정의하고 미분을 한 후 식 (2)에 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{S}_2 = \frac{\partial g}{\partial \delta} \dot{\delta} - \dot{g}_{des} = \sec^2 \delta \frac{\theta / R_s - \delta}{\tau_s} - \dot{g}_{des} \approx K_2 S_2 \quad (8)$$

따라서 조향 핸들 각도를 위한 명령값은 다음과 같다.

$$\theta_{cmd} = R_s \{ \delta + \tau_s \cos^2 \delta (\dot{g}_{des} - K_2 S_2) \} \quad (9)$$

마지막으로 식 (7)을 식 (9)에 적용하면 최종적인 명령값은 다음과 같다.

$$\theta_{cmd} = R_s \left\{ \delta + \tau_s \cos^2 \delta \left(\frac{g(\bar{\delta}) - g_{des}}{\tau} - K_2 S_2 \right) \right\} \quad (10)$$

여기서 K_2 는 제어상수이다. 이러한 제어기의 안정성을 보장하는 제어상수의 존재성 및 이를 전산적으로 Lyapunov 함수를 계산하는 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 (9)를 참조한다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 검증 환경 구성

횡방향 제어기의 검증을 위해서 CarSim 이라는 상용 차량 시뮬레이터에 있는 트랙터 모델을 이용하였다.⁽¹¹⁾ 또한 Fig. 1 의 트랙터 제원을 이용하여 Table 1 과 같이 트랙터 모델을 위한 모델 상수를 설정하였다. 더 나아가 트랙터 시뮬레이터의 모델은 조향 액추에이터에 대한 동역학적 모델을 포함하고 있지 않기에 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 식 (2)와 (3)의 조향 액추에이터 모델을 추가하여 구성하였다. 노면 상태를 잔디로 가정한 후 노면 마찰 계수를 Table 1 과 같이 설정하였다. 마지막으

Table 1 Simulation parameters of a tractor model

Parameter	Value	Parameter	Value
Engine Power	20 (kW)	Width	1.226 (m)
Overall length	2.66 (m)	Height	1.029 (m)
L	1.50 (m)	Weight	720 (kg)
R_s	10.8	δ_{max}	55
ω_{max}	0.5 (rad/s)	μ	0.4

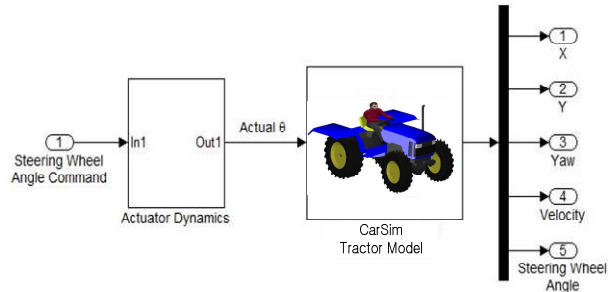


Fig. 5 Tractor model with actuator dynamics

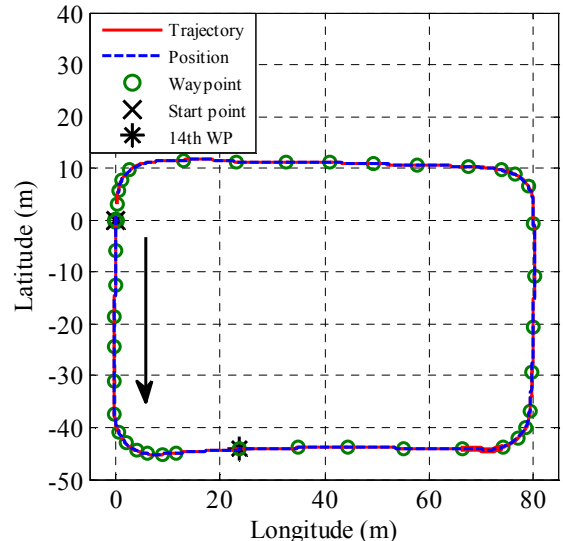


Fig. 6 Waypoint and trajectory for autonomous guidance

로 Fig. 6 은 트랙터의 주행 시뮬레이션을 위한 Waypoint 와 이를 연결하여 주행하고자 하는 주행 궤적(Trajectory)을 보여주고 있다.

4.2 제어기의 강인성 비교

횡방향 제어기의 성능 검증을 위해 세 가지의 인자 변화에 대하여 제안된 제어기의 강인성을 문헌에서 찾아볼 수 있는 다른 제어기와 비교하고자 한다. 다시 말해서 세 가지 인자 중 첫 번째는 트랙터의 속도 변화이고 두 번째는 조향 액추에이터의 동특성 변화, 그리고 마지막은 노면의 기울기 변화를 고려하였다.

문헌에서 다음과 같은 두 가지 제어기를 선정하였으며 첫 번째로는 조향 액추에이터의 동특성을 고려하지 않은 차량 모델에 대해서 Sliding Mode Control(SMC) 기법을 적용한 경우로 식 (6)을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\delta_{des} = \tan^{-1} \left\{ \frac{l}{dV} (\dot{e}_y + d\dot{\psi}_d + K_1 S_1) \right\}, \theta_{cmd} = R_s \delta_{des} \quad (11)$$

두 번째로는 액추에이터의 시간지연을 고려하여 액추에이터를 위한 하위제어기를 별도로 설계한 구조이다.⁽¹²⁾ 즉, 식 (11)의 SMC 와 다음과 같이 PI 제어기를 추가하였다.

$$e = \delta_{des} - \delta, \theta_{cmd} = R_s \left\{ \delta_{des} + (K_p e + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau) \right\} \quad (12)$$

또한 세 개의 횡방향 제어기를 위하여 Table 2 와 같이 제어기 설계 상수를 설정하였고 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 주어진 주행궤적의 형태가 비슷한 것이 네 번 반복되어서 첫 번째 Waypoint(Fig. 6 의 Start point)에서 14 번째 Waypoint 를 지나갈 때까지 만을 표시하였다.

우선 트랙터의 평균 작업속도인 3.6(km/h)와 최대속도인 10.8(km/h)에서 횡방향 제어기의 성능을 비교하였다. 이때 조향 액추에이터의 시간 상수는 $\tau_s = 0.5$ 로 설정하였다. 세가지 제어기는 3.6(km/h) 일 때 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 횡방향 오차 평균값이 0.01(m)로 정도의 차이를 보이며 비슷함을 알 수 있다. 곡선 주행 시 모두 최대 횡방향 오차가 발생하며 SMC 제어기가 0.21(m)로 가장 상대적으로 크음을 보여주고 있다. 또한 곡선로에서 직선로 들어서는 부분(약 49 초에서 51 초 사이)에서 SMC+PI 제어기의 조향각이 200° 에서 -70° 로 상대적으로 크게 움직이고 있음을 볼 수 있다. 트랙터의 주행 속도가 10.8(km/h)로 증가하였을 때에는 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 횡방향 오차 평균이

비슷하지만 DSC 제어기가 가장 적음을 보인다. 따라서, DSC 제어기가 속도변화에 따른 성능변화가 가장 작음을 확인할 수 있다.

다음으로 조향 액추에이터의 시간 상수를 0.5 에서 0.7 로 증가시켰을 경우 제안한 DSC 제어기와 SMC+PI 제어기의 강인성을 비교하고자 한다. Fig. 9 에서 보는 바와 같이 DSC 제어기가 횡방향 오차의 평균값 및 최대값 모두 더 적음을 확인할 수 있다. 또한 원하는 바퀴각과 실제 바퀴각의 차를

Table 2 Control design parameters for a farm tractor

	K_1	D	K_p	K_I	K_2	τ
SMC	1.2	2.6	-	-	-	-
SMC+PI	1.1	2.6	1	0.1	-	-
DSC	1.1	2.6	-	-	10	0.09

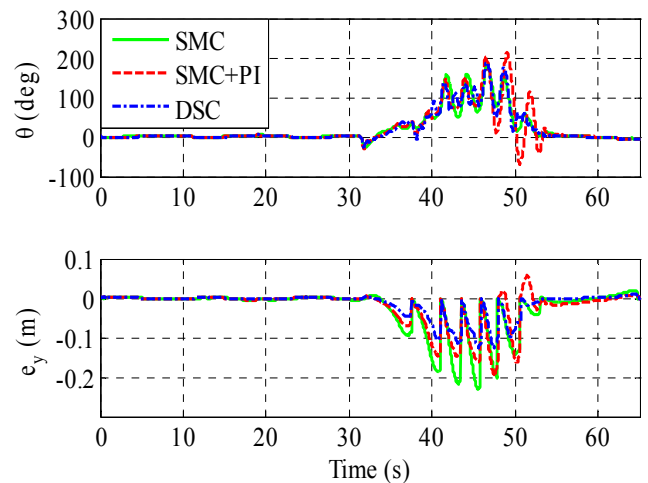


Fig. 7 Steering wheel angle and lateral error of three different controllers at the velocity of 3.6(km/h)

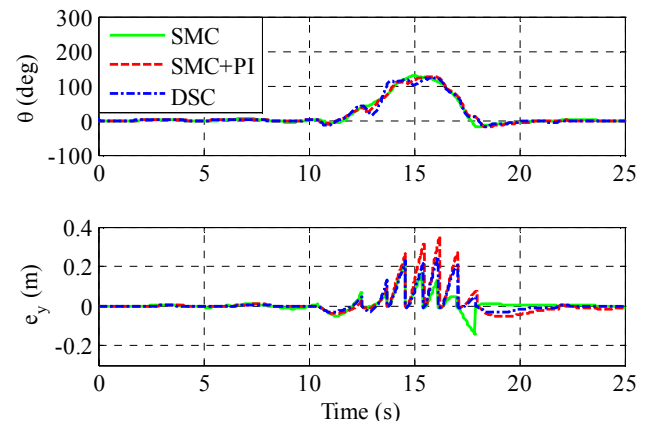


Fig. 8 Steering wheel angle and lateral error of three different controllers at the velocity of 10.8(km/h)

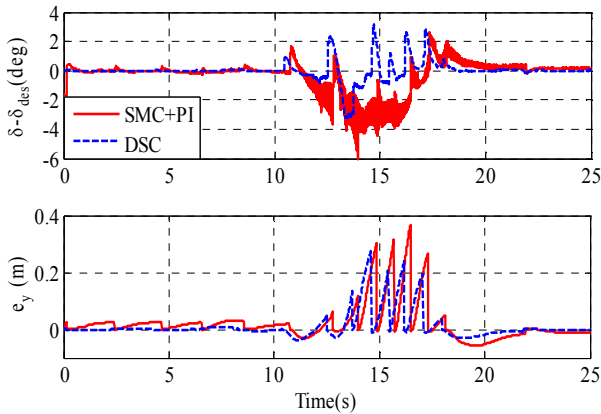


Fig. 9 Time responses of steering angle error and lateral error for $\tau_s = 0.7$

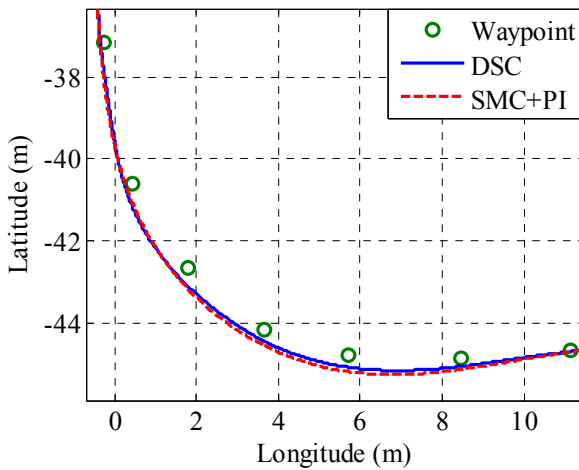


Fig. 10 Waypoint and tractor position at $\tau_s = 0.7$

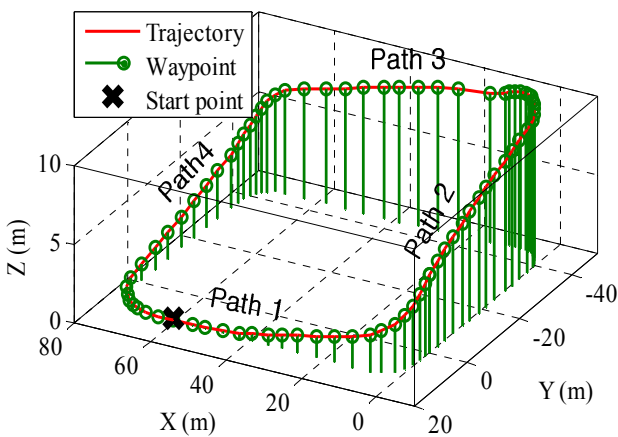


Fig. 11 3D Position of tractor and waypoint on sloped terrain

보면 SMC+PI 제어기의 경우 최대 6° 차이를 보이며 DSC 의 경우 3° 정도로 상대적으로 작은 차이를 보임을 확인할 수 있다. Fig. 10 에서 두 제어기의 커브구간에서 주행궤적을 살펴 보면 DSC

Table 3 Performance comparison between two lateral controllers

Path	DSC		SMC+PI	
	Mean(m)	Std. (m)	Mean(m)	Std.(m)
1	0.08	0.07	0.11	0.10
2	0.06	0.08	0.09	0.11
3	0.09	0.10	0.11	0.14
4	0.18	0.12	0.19	0.20

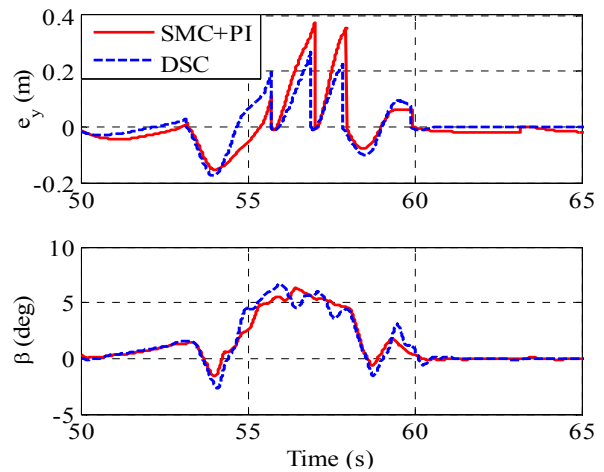


Fig. 12 Time responses of lateral error, slip angle for $\tau_s = 0.5$ in Path 3-4

제어기가 SMC+PI 제어기에 비해 주어진 waypoint 에 더 가깝게 주행하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 조향 액추에이터의 시간 상수가 0.5 뿐만 아니라 0.7 인 경우에도 모두 DSC 제어기가 더 좋은 추종 성능을 보여주고 있음을 확인하였다.

마지막으로 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 도로 높이의 변화를 주어 도로면의 기울기 생성시켜 트랙터의 바퀴와 지면 사이에 미끄럼을 발생시키도록 하였다. 트랙터 주행구간을 총 4구간으로 나누어 성능을 분석하고 한다. 즉, Path 1, 2 구간은 오르막으로 5° 경사 기울기를 추가하였으며 Path 3, 4 구간은 내리막으로 주어졌다. 각 구간별로 횡방향 오차 평균과 표준편차를 Table 3 에 정리하였다. Table 3 에서 보는 바와 같이 모든 구간에서 DSC 제어기가 SMC+PI 제어기보다 횡방향 오차관점에서 우수한 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 Path 3-4 구간에 대해서 실제 횡방향 미끄럼이 발생되었으며 DSC 제어기가 횡방향 오차가 작음을 보여주고 있다.

4. 결 론

트랙터의 자동운전유도를 위해 사용된 조향 액추에이터는 유압시스템과 모터가 결합된 형태로 차량의 조향 액추에이터와 차별화된다. 또한 저속 주행임에도 불구하고 농작업 시 지면 형태가 불규칙하고 미끄럼 발생이 불가피하다. 이러한 점을 고려하여 우선 조향 액추에이터의 동특성을 고려하한 비선형 횡방향 제어기를 설계하고 제안된 횡방향 제어기의 추종 성능 및 주행 환경에 대한 강인성을 검증하였다. 실제 농작업 시 주행 환경(토양 상태 및 지면 형태) 및 주행 속도를 고려한 검증 환경은 너무 다양하기에 대표적인 시나리오를 선택하여 제어기 검증을 수행하였다. 즉, 지면의 마찰계수가 일정하다는 가정하에서 트랙터의 속도 변화, 조향 액추에이터의 시간 상수 변화, 그리고 지면의 경사 변화에 대한 횡방향 제어기의 횡방향 추종 성능 및 강인성을 다른 제어기와 비교하여 상대적으로 우수함을 보였다. 향후 실제 농업용 트랙터에 적용을 하여 실험적으로 검증하고자 한다.

후 기

본 논문은 본 논문은 LS 엠트론의 산학과제 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K. and Yokoyama, S., 2009, "Review of Research on Agricultural Vehicle Autonomous Guidance," *Int. J. of Agric. & Bio. Eng.*, Vol. 2, No. 3, pp. 1~26.
- (2) Reid, J. F., Zhang, Q. and Noguchi, N., 2000, "Agricultural Automatic Guidance Research in North America," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 25, pp.155~167.
- (3) Fang, H., Fan, R., Thuilot, B. and Martinet, P., 2006, "Trajectory Tracking Control of Farm Vehicles in Presence of Sliding," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 54, pp. 828~839.
- (4) Zhang, Q., Wu, D., Reid, J. F. and Benson, E. R., 2002, "Model Recognition and Validation for an Off-road Vehicle Electrohydraulic Steering Controller," *Mechatronics*, 12, pp. 845~858.
- (5) Eaton, R., Katupotiya, J., Siew, K. W. and Howarth, B., 2010, "Autonomous Farming: Modeling and Control of Agricultural Machinery in a Unified Framework," Vol. 8, Nos 1-4, pp. 444~457.
- (6) Qiu, Q., Zhang, J., Reid, F. and Wu, D., 1999, "Modeling and Simulation of an Electrohydraulic Steering System," ASAS/CSAE-SCGR Paper, No. 993076.
- (7) Rajamani, R., 2006, *Vehicle Dynamics and Control*. Springer.
- (8) Rajamani, R., Zhu, C. and Alexander, L., 2003, "Lateral Control of a Backward Driven Front-Steering Vehicle," *Control Engineering Practice*, Vol. 11, No. 5, pp. 531~540.
- (9) Song, B. and Hedrick, J. K., 2011, *Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear Systems: An LMI Approach*, Springer.
- (10) Song, B., 2013, "Cooperative Lateral Vehicle Control for Autonomous Valet Parking," *Int. J. of Automotive Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 633~640.
- (11) 2011, CarSim Version 8.1. Available via <http://www.carsim.com>.
- (12) Kuo, T. C., Huang, Y. J., Chen, C. Y. and Cahng, C. H., 2008, "Adaptive Sliding Mode Control with PID Tuning for Uncertain Systems," *Engineering Letters*, Vol. 16.