

망각 순환 최소자승을 이용한 다축 전지형 크레인의 적응형 모델 독립 제어
기반 조향제어 알고리즘

Adaptive Model-Free-Control-based Steering-Control Algorithm for
Multi-Axle All-Terrain Cranes using the Recursive Least Squares
with Forgetting

오광석¹ · 서자호^{2*}

Jaho Seo and Kwangseok Oh

Received: 18 Jan. 2017, Accepted: 05 May. 2017

Key Words : Adaptive model free control(적응형 모델 독립 제어), Recursive least square(순환최소자승), Forgetting factor(망각인자), Disturbance observer(외란관측기), Desired yaw rate(요구 요 변화율)

Abstract: This paper presents the algorithm of an adaptive model-free-control-based steering control for multi-axle all-terrain cranes for which the recursive least squares with forgetting are applied. To optimally control the actual system in the real world, the linear or nonlinear mathematical model of the system should be given for the determination of the optimal control inputs; however, it is difficult to derive the mathematical model due to the actual system's complexity and nonlinearity. To address this problem, the proposed adaptive model-free controller is used to control the steering angle of a multi-axle crane. The proposed model-free control algorithm uses only the input and output signals of the system to determine the optimal inputs. The recursive least-squares algorithm identifies first-order systems. The uncertainty between the identified system and the actual system was estimated based on the disturbance observer. The proposed control algorithm was used for the steering control of a multi-axle crane, where only the steering input and the desired yaw rate were employed, to track the reference path. The controller and performance evaluations were constructed and conducted in the Matlab/Simulink environment. The evaluation results show that the proposed adaptive model-free-control-based steering-control algorithm produces a sound path-tracking performance.

기호 설명

m : crane mass, kg

v : longitudinal velocity, m/s

L_i : distance between mass center and i th axle, m

C_i : cornering stiffness of i th wheel, N/rad

I_z : rotational inertia, kgm^2

y : lateral displacement, m

ψ : yaw angle, rad

y_p : plant output

u_{opt} : optimal output

d : lumped disturbance

y_d : desired output

λ : forgetting factor

* Corresponding author: seojaho@cnu.ac.kr

1 Department of Automotive Engineering, Honam University, 417 Eodeung-daero, Gwangsan-gu, Gwangju, 62399, Korea

2 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, 99 Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

Copyright © 2017, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

대상 시스템을 제어하기 위해서는 일반적으로 대상 시스템의 거동을 모사할 수 있는 선형 혹은 비선형 수학적 모델이 필요하며 도출된 수학적 모델을 이용하여 다양한 제어이론 기반 정의된 오차를 최소화할 수 있는 제어 입력을 계산한다. 하지만 현실에 존재하는 시스템은 보통 비선형 특성을 보이고 여러 시스템이 복합적으로 적용된 다중 시스템이 대부분이다. 그러므로 대상 시스템의 정확한 수학적 모델과 제어입력을 도출하기 어려우며 예를 들어 본 연구의 대상시스템인 다축 전지형 크레인의 경우도 마찬가지로 작업장치부와 크레인의 동적 상태변화에 따른 불확실성 그리고 비선형성이 주행 시 크게 변한다. 그러므로 정확한 수학적 모델 도출이 어려운 대상 시스템의 제어성능을 향상시키기 위한 제어전략이 많이 연구되어지고 있다.

W. Chen은 대상 시스템에 대한 외란의 영향도를 최소화하기 위한 외란추정기 기반 제어를 설계하고 두 단계로 구분하여 최적화하였다.¹⁾ C. Liu은 수학적 모델과 실제 시스템간의 외란과 불확실성을 포함하는 lumped disturbance를 정의하고 이를 기반으로 최적제어 전략을 제안하였다.²⁾ X. Wei는 외란이 존재하는 모델의 최적제어를 위해 외란추정기 기반 H-infinity control 기법을 이용한 새로운 제어전략을 제시하였다.³⁾ 그리고 J. Spall은 시변하는 대상 시스템을 정확한 수학적 모델 없이 이산 계측치만을 이용하여 제어하는 기법을 새롭게 개발하였다.⁴⁾ 또한 다축 전지형 크레인의 제어 알고리즘과 관련된 연구는 다음과 같다.

Wang은 대형차량의 agility performance향상을 위해 질량중심에 대한 zero side-slip angle과 비례제어를 이용한 조향제어 기술을 제안하였다.⁵⁾ Li는 안정적으로 슬립없이 정확한 조향제어가 가능할 수 있도록 networked control system(NCS)기반 multi-mode 조향제어 전략을 새롭게 제안하였다.⁶⁾

본 연구에서는 다축 전지형 크레인의 조향제어를 위한 적응형 모델 독립 제어를 설계하고 성능을 평가하였다. 일반적으로 마찰력에 의해 대상 시스템은 감쇠시스템인 경우가 많으며 비선형 그리고 다중 시스템의 경우 구간별로 입력과 출력만을 이용하여 1계 시스템으로 추정이 가능하다. 그러므로 본 연구에서는 시스템 특성을 추정하기 위해 순환 최소자승 기법을 이용하였으며 실제 시스템과 추정된 1계 시

스템의 불확실성은 외란추정기를 이용하여 추정하였다. 추정된 시스템과 외란을 이용하여 Lyapunov method 기반 최적제어입력을 도출하였으며 성능평가를 위해 크레인의 조향각 제어에 적용하여 기준 경로를 추종하는 성능결과를 분석하였다. 제안된 제어 알고리즘과 성능평가를 위한 크레인 모델은 Matlab/Simulink 환경에서 개발되었다.

2장에서는 사용된 다축 전지형 크레인 모델에 대해 기술하고, 3장에서는 개발된 적응형 모델 독립 제어 알고리즘에 대해 기술한다. 4장에서는 성능평가 결과에 대해 분석하고, 마지막 5장에서는 요약 및 결론에 대해 기술한다.

2. 다축 전지형 크레인

다축 전지형 크레인은 일반 차량에 비해 관성이 크고 축간 거리가 길어 동적반응성이 느리다. 본 연구의 대상 크레인은 60톤급 5축 크레인이며 crab steering과 road steering 등 다양한 조향모드가 있다. 적응형 모델 독립 제어알고리즘의 적용을 위해 일반적으로 주행 시 적용되는 road steering이 사용되었다. 1축 조향은 운전자 입력이며 2축 조향은 1축과 기계적 연결에 의해 종속된다. 아래 Fig. 1은 대상크레인의 1축과 2축 조향각 관계를 나타낸다.

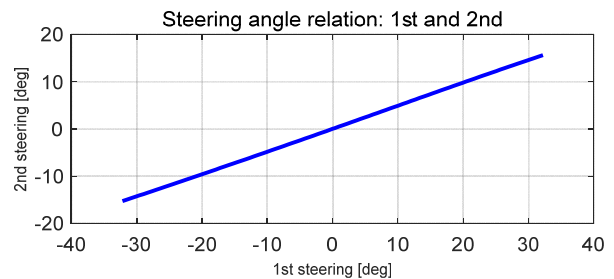


Fig. 1 Steering angle relationship between 1st and 2nd axis

3축, 4축, 그리고 5축은 road steering mode에서 크레인의 종방향 속도가 증가함에 따라 순차적으로 고정된다. 그리고 모든 조향각은 1축과 3축 조향각을 기준으로 결정되는 steering pole이 순간중심이 되도록 결정된다. Fig. 2는 속도에 따른 road steering mode를 나타낸다.

기존 조향시스템을 이용한 성능평가를 위해 bicycle모델 기반 크레인의 수학적 모델을 도출하였으며 아래 수식과 같이 state-space equation의 형태로

정리될 수 있다.⁷⁾

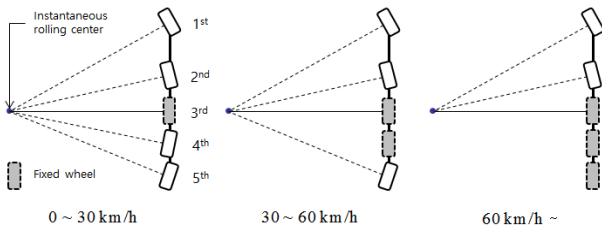


Fig. 2 Road steering mode of the crane

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

여기서 x 와 u 는 각각 상태변수($x = [y \dot{y} \psi \dot{\psi}]^T$)와 조향입력($\delta = [\delta_1 \delta_2 \delta_3 \delta_4 \delta_5]^T$)을 나타내며, 행렬 A 와 B 는 아래 수식과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$a_{22} = -\frac{2}{mv} \sum_{i=1}^5 C_i, \quad a_{24} = -\frac{2}{mv} \left(\sum_{i=1}^2 C_i L_i - \sum_{i=3}^5 C_i L_i \right) - v$$

$$a_{42} = -\frac{2}{I_z v} \left(\sum_{i=1}^2 C_i L_i - \sum_{i=3}^5 C_i L_i \right), \quad a_{44} = -\frac{2}{I_z v} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2C_1}{m} & \frac{2C_2}{m} & \frac{2C_3}{m} & \frac{2C_4}{m} & \frac{2C_5}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2C_1 L_1}{I_z} & \frac{2C_2 L_2}{I_z} & \frac{2C_3 L_3}{I_z} & \frac{2C_4 L_4}{I_z} & \frac{2C_5 L_5}{I_z} \end{bmatrix} \tag{3}$$

도출된 수학적 모델에는 실제 크레인의 물성치와 조향전략이 적용되었으며 3차원 다물체 동역학 해석 소프트웨어를 이용하여 검증되었다. Table 1은 적용된 parameter를 보여준다.

Table 1 The used parameters for crane model

Division	Unit	Value
m	kg	59,236
I_z	kgm^2	1,110,181
L_1	m	3.968
L_2	m	1.408
L_3	m	0.242
L_4	m	2.052
L_5	m	3.752
C_{1-5}	N/rad	300,000

다음 장에서는 본 연구에서 제안된 적응형 모델 독립 조향 제어 알고리즘에 대해 기술한다.

3. 적응형 모델 독립 조향 제어 알고리즘

본 연구에서 제안된 적응형 모델 독립 조향 제어 알고리즘은 시스템의 입력과 출력만을 이용하여 시스템과 외란을 추정하고, 추정된 값들을 이용하여 최적입력을 도출하도록 설계되었다. 알고리즘은 입력과 출력의 관계는 구간별로 1계 시스템으로 간주할 수 있다는 가정을 기반으로 설계되었고, 1계 시스템으로 추정하기 위해 망각인자 기반 순환최소자승 기법을 적용하였다. 그리고 추정과정에서 실제와 추정된 시스템 사이의 불확실성은 외란추정기를 이용하여 추정하였다. Fig. 3은 입력과 출력의 구간별 1계 시스템으로의 추정결과를 보여준다.

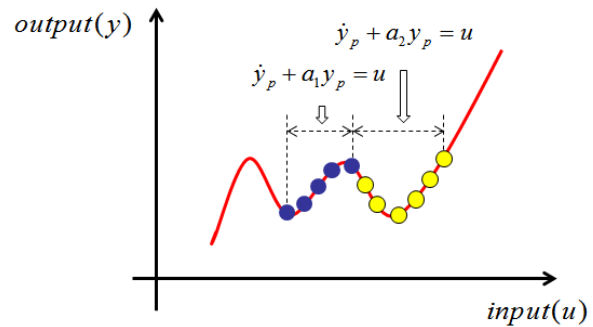


Fig. 3 System input(u) and output(y) relations considered as a 1st order system

대상 시스템을 입력과 출력을 이용하여 구간별 1계 시스템으로 추정하기 위해 망각인자 기반 순환최소자승 기법을 적용하였다. 망각인자를 이용하여 변하는 시스템의 계수 a 를 추정하는 변화율을 조절한다. Fig. 4는 제안된 적응형 모델 독립 조향 제어 알고리즘의 모델 개략도를 나타낸다.

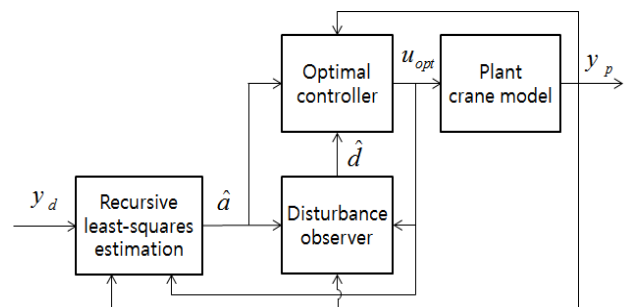


Fig. 4 Model schematics for control algorithm

순환최소자승 기법의 적용을 위해 1계 시스템을 아래와 같이 regressor와 estimate 그리고 output으로 구분하여 정리할 수 있다.

$$y_p a = u - \dot{y}_p \quad (4)$$

\dot{y}_p 는 y_p 기반 double integrator모형을 이용한 선형칼만필터를 적용하여 도출하였다. Extended Kalman filter와 같은 1계 시스템 변수를 추정하는 다양한 방법이 있지만 본 연구에서 제안하는 방법은 특정 수학적 모델 없이 적응제어가 가능한 단순모델로써 실시간 제어 적용에 유리한 장점이 있다. 수식 (4)의 y_p 와 a 를 각각 $\Phi = [y_p]$, $\theta = [a]$, $y_r = u - \dot{y}_p$ 로 정의하고, 망각인자(λ)를 이용하여 추정을 위한 목적함수를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$J(\hat{\theta}(k), k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} (y_r(i) - \psi(i)\hat{\theta}(k))^2 \quad (5)$$

정의된 목적함수를 최소화하기 위해 추정치로 편미분하고, 추정치와 실제값의 오차가 0에 가깝다는 가정 하에 다음과 같은 수학적 형태로 정리된다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L_r(k)(y_r - \Phi(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (6)$$

L_r 은 최적 이득값으로 공분산(P)을 이용하여 매 스텝마다 계산되며 계산 수식은 아래와 같다.

$$L_r(k) = P(k-1)\Phi(k)(\lambda + \Phi^T(k)P(k-1)\Phi(k))^{-1} \quad (7)$$

$$P(k) = (I - L(k)\Phi^T)P(k-1)/\lambda \quad (8)$$

이렇게 추정된 시스템 계수 \hat{a} 는 수렴성능의 한계가 있기 때문에 대상시스템을 정확히 모사할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 추정된 1계 시스템의 불확실성을 외란추정기를 기반으로 추정하였다. 추정된 1계 시스템의 lumped disturbance(d)를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\dot{y}_p + ay_p + d = u \quad (9)$$

외란추정을 위해 다음과 같은 수식으로 재정리하고, 오차 $e_y = \hat{y} - y$ 와 $e_d = \hat{d} - d$ 를 정의하였다.

$$\dot{y}_p = -ay_p + u - d \quad (10)$$

추정을 위한 error dynamics를 아래와 같이 정의하고, Lyapunov method 기반 외란을 추정할 수 있다.

$$\dot{e}_y = -ae_y - e_d + K_d(y_p - \hat{y}_p) \quad (11)$$

정의된 error dynamics의 시스템 행렬이 Hurwitz가 될 수 있는 외란추정기 이득 K_d 를 정의하고, 제어기의 성능확보를 위해 추정된 1계 시스템의 계수 \hat{a} 보다 추정기의 수렴성능이 좋도록 설계되었다.

추정된 시스템 계수 \hat{a} 와 외란 \hat{d} 을 이용해 desired output을 추종할 수 있는 최적제어 입력을 도출하기 위해 본 연구에서는 Lyapunov direct method를 이용하였으며 목적함수는 아래와 같다.

$$J = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (y_d - y_p)^2 \quad (12)$$

정의된 목적함수는 항상 양수의 값을 보이기 때문에 추종오차를 최소화하기 위해 변화율이 항상 음수의 값이 되도록 아래와 같이 정의하였다.

$$\frac{dJ}{dt} = e\dot{e} = (y_d - y_p)(\dot{y}_d - \dot{y}_p) = -M(y_d - y_p)^2 \quad (13)$$

M 은 양수으로써 목적함수의 감소정도를 나타낸다. 수식 (13)의 \dot{y}_p 를 수식 (9)의 정의를 이용하여 최적제어 입력을 도출하면 아래와 같이 정리된다.

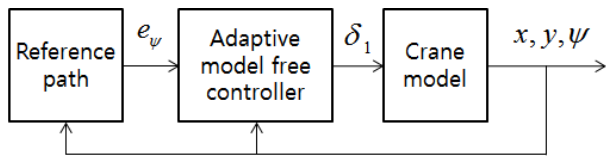
$$u_{opt} = \dot{y}_d + M\hat{y}_d + (\hat{a} - M)\hat{y}_p + \hat{d} \quad (14)$$

\dot{y}_d 와 \dot{y}_p 는 선형 칼만필터를 이용하여 추정되었으며 향후 실제 시스템 적용 시 잡음제거가 가능하다. 도출된 최적제어 입력 u_{opt} 는 입력과 출력만을 이용하여 시변하는(time-varying) 대상 시스템의 출력이 요구출력을 추종할 수 있게 한다. 다음 장에서는 크레인의 조향제어에 적용된 적응형 모델 독립 제어 알고리즘의 성능평가 결과에 대해 기술한다.

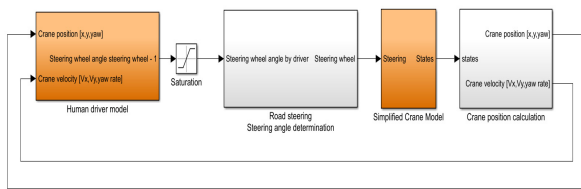
4. 조향 제어기 성능평가

개발된 적응형 모델 독립 제어 알고리즘의 성능평가를 위해 제어기가 크레인의 조향제어 시스템으로 적용되었다. 적용된 reference path는 다양한 곡률의 곡선경로이며 속도에 따라 성능평가를 수행하였다.

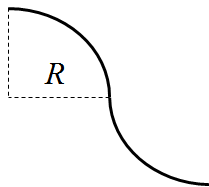
운전자가 주행 시 일반적으로 주시하는 preview point에서의 yaw angle error(e_ψ)를 system output(y_p)으로 정의하였으며, 오차를 0으로 만들기 위해 desired output(y_d)을 0으로 정의하였다. 최적입력(u_{opt})은 크레인의 조향입력(δ_1)으로 정의하였다. Fig. 5는 성능 평가를 위해 사용된 크레인과 제어를 포함하는 복합 모델 개략도, 시뮬레이션 모델 그리고 reference curved path를 나타낸다.



(a) Block diagram for integrated simulation model



(b) Simulation model: Matlab/Simulink



(c) Reference curved path: $R = 90$ m

Fig. 5 Integrated simulation model for performance evaluation and reference path

Fig. 6는 preview point에서의 desired output(yaw angle error) 도출 방법을 나타낸다.⁸⁾

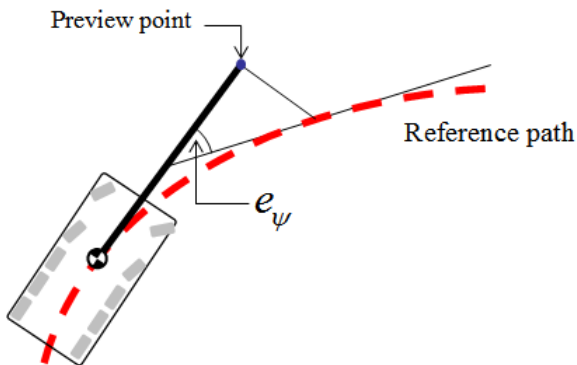
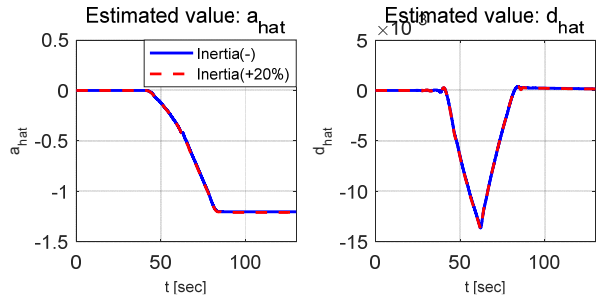
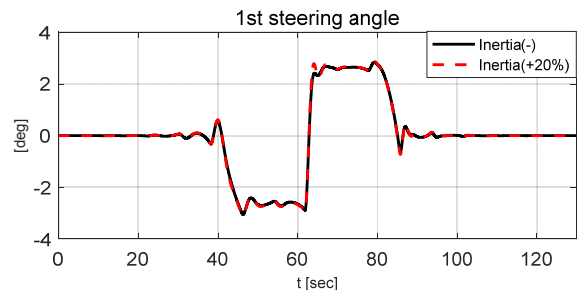


Fig. 6 Desired yaw rate

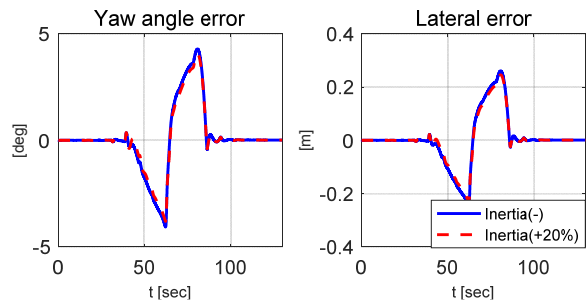
성능평가를 위해 곡률반경이 90m인 curved path에서 속도 25, 45, 65 km/h 시나리오에서 질량 및 회전 관성의 변화(10% 증가)에 따른 조향제어 성능을 비교/분석 하였다. Fig. 7, 8, 그리고 9는 속도에 따른 조향제어 성능평가 결과를 나타낸다.



(a) Estimated \hat{a} and \hat{d}

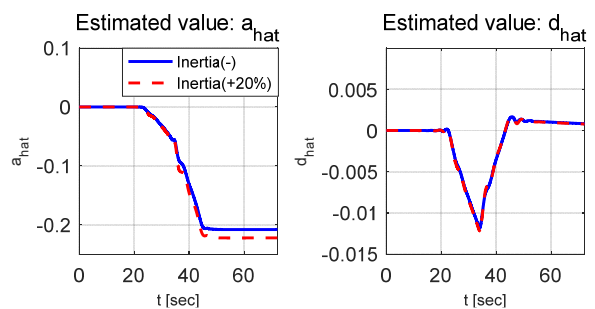


(b) Steering angle: δ_1

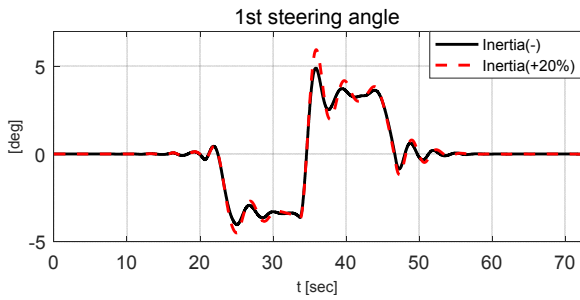


(c) Tracking error: lateral and yaw angle

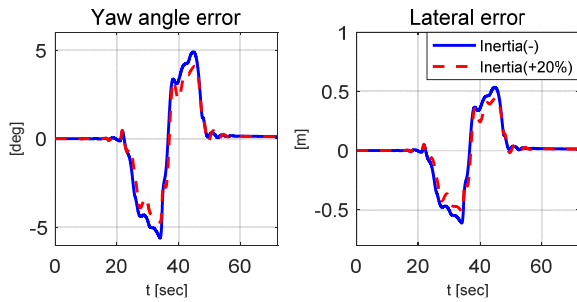
Fig. 7 Performance evaluation: 25 km/h



(a) Estimated \hat{a} and \hat{d}

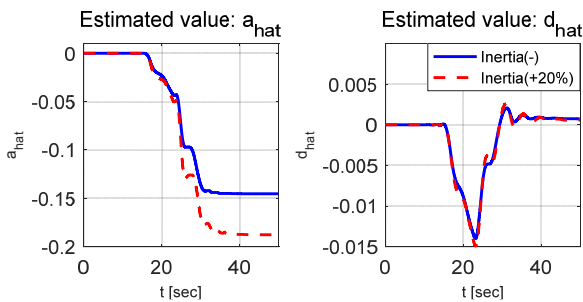


(b) Steering angle: δ_1

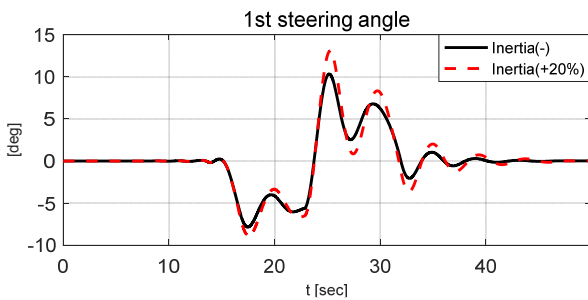


(c) Tracking error: lateral and yaw angle

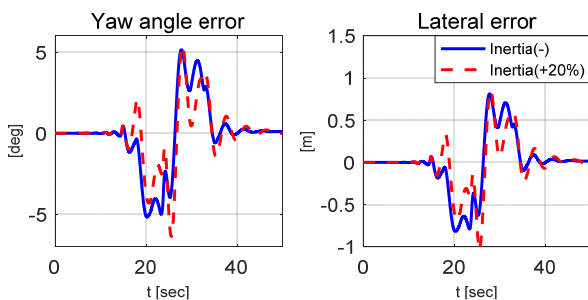
Fig. 8 Performance evaluation: 45 km/h



(a) Estimated \hat{a} and \hat{d}



(b) Steering angle: δ_1



(c) Tracking error: lateral and yaw angle

Fig. 9 Performance evaluation: 65 km/h

성능평가 결과는 크레인의 조향시스템은 속도구간에 따라 조향전략이 다르고, 관성의 변화는 동적 반응성을 변화시키지만 제안된 적응형 제어 알고리즘에 의해 모든 속도구간 별 시나리오에 대해 크레인이 합리적으로 reference path를 추종하는 것을 보여주고 있다. 직선 구간에서는 상대적으로 시스템 계수 (a)와 외란(d) 추정상태가 크게 변하지 않지만 곡선로 구간(중간부분)에서는 yaw angle error가 커지면서 추정상태가 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 20%의 질량 및 회전관성의 변화에도 합리적인 최적제어 입력을 도출함으로써 일정 수준의 오차 범위(lateral error: $\pm 0.9 m$, yaw angle error: $\pm 5 deg$)를 확보할 수 있었다. Fig. 10과 Table 2는 성능평가 추정오차를 정규화된 시간에 대해 나타낸 값과 RMS 값을 보여준다.

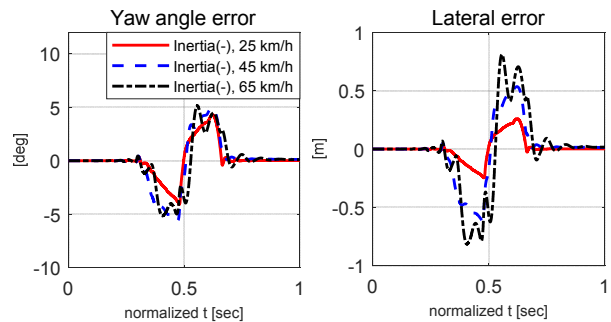


Fig. 10 Lateral and yaw angle errors

Table 2 Summary of performance evaluation

Division		Error [RMS]	
		Yaw angle [deg]	Lateral [m]
25 km/h	-	1.5673	0.0951
	+20%	1.4533	0.0882
45 km/h	-	2.2773	0.2489
	+20%	1.9122	0.2089
65 km/h	-	2.1343	0.3369
	+20%	1.8598	0.2936

속도가 증가할수록 횡방향 오차가 커지는 현상을 확인할 수 있지만 이러한 결과는 yaw angle error만을 고려한 제어전략이기 때문이다. 그러므로 향후 제안된 제어전략이 multi-variable에 적용될 수 있도록 알고리즘의 고도화를 계획하고 있다. 다음 장에서는 본 논문의 향후 계획과 함께 결론을 기술한다.

5. 결 론

본 논문은 다축 전지형 크레인의 조향제어를 위한 적응형 모델 독립 제어 알고리즘의 개발에 관한 것이다. 개발된 적응형 모델 독립 제어 알고리즘은 대상 시스템의 수학적 모델 없이 시스템의 입력과 출력만을 이용하여 시스템을 1계 시스템으로 추정한다. 이는 모든 입력과 출력의 관계는 구간별 1계 시스템으로 근사화가 가능하다는 것을 근간으로 한다. 구간에 따라 1계 시스템으로의 추정을 위해 망각인자 기반 순환최소자승 기법이 적용되었으며 수렴성능에 의한 실제 시스템과의 불확실성은 외란추정기를 이용하여 추정되었다. Desired output을 추종하기 위한 최적제어 입력은 Lyapunov method를 이용하여 도출되었다. 성능평가는 회전반역 90m의 곡선경로에서 속도의 변화와 관성(질량, 회전관성)이 변하는 시나리오에서 수행되었다. 성능평가 결과 모든 시나리오에서 개발된 알고리즘에 의해 경로를 합리적으로 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 개발된 알고리즘은 다변수 제어에 적용이 어렵고 망각인자가 고정되어 있다. 그러므로 향후 제어성능 향상을 위해 적응형 망각인자 적용 및 다변수 제어가 가능하도록 알고리즘의 고도화를 계획하고 있다. 본 연구에서 개발된 적응형 모델 독립 조향제어 알고리즘은 다양한 조향시스템을 갖는 차량의 조향제어 알고리즘 뿐 아니라 정확한 물성치를 모르는 다양한 Single-Input-Single-Output(SISO) 시스템의 적응형 제어 알고리즘으로 확대적용이 가능할 것이다. 또한 크레인의 실차기반 성능검증을 통해 주행 중 동적상태가 크게 변할 수 있는 크레인의 주행보조 및 자율주행을 위한 최적 스마트 조향제어 알고리즘으로 적용가능 할 것으로 기대한다.

References

- 1) W. Chen, "Composite disturbance observer based control for nonlinear systems," IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 9, No. 4, pp. 706-710, 2004.
- 2) C. Liu and H. Peng, "Disturbance observer based tracking control," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 2, pp. 332-335, 2000.
- 3) X. Wei and L. Guo, "Composite disturbance-observer-based control and H-infinity control for complex continuous models," Int. J. Robust Nonlinear Control, Vol. 20, pp. 106-118, 2010.
- 4) J. Spall and J. Criston, "Model-free control of nonlinear stochastic systems with discrete-time automatic control," IEEE Transactions on automatic control, Vol. 43, No. 9, pp. 1198-1210, 1998.
- 5) S. Wang et al. "Steering performance simulation of three-axle vehicle with multi-axle dynamic steering", IEEE Vehicle power and propulsion conference, pp. 1-5, 2008.
- 6) Y. Li et al. "Network-based coordinated motion control of large-scale transportation vehicles", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 12, No. 2, pp. 208-215, 2007.
- 7) C. Chen and M. Tomizuka, "Lateral control of commercial heavy vehicles", Vehicle System Dynamics, Vol. 33, No. 6, pp. 391-420, 2000.
- 8) A. Ungoren and H. Peng, "An adaptive lateral preview driver model", Vehicle System Dynamics, Vol. 43, No. 4, pp. 245-259, 2005.