

적응형 슬라이딩 모드 제어를 이용한 위상 궤적 해석 기반 굴삭기의
 안전제어 알고리즘 개발

Phase Portrait Analysis-Based Safety Control for Excavator
 Using Adaptive Sliding Mode Control Algorithm

오광석^{1,2*} · 서자호³ · 이근호⁴

Kwang Seok Oh, Ja Ho Seo and Geun Ho Lee

Received: 1 Jun. 2018, Accepted: 10 Jul. 2018

Key Words : Adaptive Sliding Mode Control(적응형 슬라이딩 모드 제어), Recursive Least Squares(순환최소자승), Forgetting Factor(망각인자), Adaptive Rule(적응규칙), Safety Control(안전제어)

Abstract: This paper presents a phase portrait analysis -based safety control algorithm for excavators, using adaptive sliding mode control. Since working postures and material types cause the excavator's rotational inertia to vary, the rotational inertia was estimated, and this estimation was used to design an adaptive sliding mode controller for collision avoidance of the excavator. In order to estimate the rotational inertia, the recursive least-squares estimation with multiple forgetting was applied with the information of the swing velocity of the excavator. For realistic evaluation, an actual working scenario -based performance evaluation was conducted. Based on the estimated rotational inertia and an analysis of estimation errors, sliding mode control inputs were computed. The actual working scenario -based performance evaluation of the designed safety algorithm was conducted, and the results showed that the developed safety control algorithm can efficiently avoid a collision with an object in consideration of rotational inertia variations.

기호 설명

θ : estimated value

ψ : regressor

θ_{sw} : swing angle, rad

J_t : total rotational inertia, kgm^2

b : damping coefficient, Nm/rad

T_{sw} : swing torque, Nm

T_t : total torque, Nm

C : clearance, m

r_{obj} : object radius, m

V : Lyapunov candidate function

T_f : frictional torque, Nm

x_1, x_2 : state variable

σ : sliding variable

* Corresponding author: oks@hknu.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Korea

2 Institute of Machine Convergence Technology, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong-si, Gyeonggi-do 17579, Korea

3 Department of Automotive, Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Ontario Institute of Technology Oshawa, L1H 7K4, Canada

4 Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, Korea.

Copyright © 2018, 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

굴삭기는 건설현장에서 평탄화 및 굴착작업 등의 다양한 작업을 수행하는 중요한 건설 건설장비 중 하나이다. 일반적으로 주변 작업자와 함께 작업을 수

행하는 경우가 많으며, 장비운영자는 전방을 주시하면서 작업을 수행하기 때문에 부주의 및 동적인 작업환경으로 인해 작업자를 인지하지 못하고 충돌과 같은 치명적 사고가 빈번히 발생한다. 이러한 굴삭기의 치명적 사고를 줄이기 위해 J. Hinze 외 2명은 실제로 공사현장에서 발생할 수 있는 다양한 사고사례를 분석함으로써 충돌에 의해 발생할 수 있는 사고 사례 중 작업자 및 장비 운영자의 부주의에 의해 발생할 수 있는 사고가 약 87% 정도의 높은 수치로 발생한다고 분석하였다.¹⁾ 또한 건설 현장에서의 충돌과 같은 치명적 사고를 예방하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. U. Lee는 건설현장에서의 모바일 안전 모니터링 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템은 초음파 센서, 적외선 센서, 그리고 무선통신 시스템으로 구성되어 있다.²⁾ 그리고 Y. Cho는 모델기반 automatic dynamic object recognition 방법을 제안하였고, 3차원 공간에서 작업자가 신속히 동적물체를 인지할 수 있도록 projection - recognition - projection (PRP) 기법을 제안하였다.³⁾ 더불어 F. Vahdatikhaki는 연속 모니터링 기법 기반 동적 작업공간을 표현하는 새로운 방법을 제안하였다.⁴⁾

본 연구에서는 굴삭기와 작업자를 포함하는 주변 위험 물체와의 충돌에 의한 치명적 사고를 예방할 수 있는 적응형 안전제어 알고리즘을 제안한다. 또한, K. Oh는 굴삭기의 작업 위험도를 합리적으로 평가하기 위해 레이저 스캐너 기반 확률 및 예견 안전도 평가 알고리즘을 제안하였다.⁵⁾ 회전관성 추정을 기반으로 적응형 제어전략을 수립하였으며 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 사용하였다. 회전관성 추정은 다중 망각인자 기반 순환최소자승 기법을 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 기반으로 위상 궤적 해석을 수행하였고, 위상 궤적을 이용하여 작업 안전도를 안전, 경고 그리고 긴급제동 총 3가지로 구분하였다. 개발된 적응형 제어 알고리즘은 실제 작업 조건 하에서 물체와의 충돌회피 시나리오 기반 성능이 평가되었다. 개발된 적응형 안전제어 알고리즘은 MATLAB / Simulink 환경에서 구성되었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 적응형 안전제어 알고리즘에 대해 기술하고, 3 장에서는 실 작업 기반 성능평가 결과에 대해 설명한다. 4 장에서는 향후계획과 함께 결론에 대해 기술한다.

2. 적응형 안전제어 알고리즘

본 연구에서는 굴삭기의 안전제어 알고리즘 개발

을 위해 회전관성 추정을 통한 적응형 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하였다. 굴삭기의 회전관성 추정을 위해 망각인자 기반 순환최소자승 알고리즘을 이용하였다.

2.1 회전관성 추정 알고리즘

굴삭기의 회전관성 추정을 위해 적용된 다중 망각인자 기반 순환최소자승 알고리즘은 굴삭기의 회전 속도 정보를 이용하며 굴삭기의 회전 동역학 모델을 이용한다.

$$J_t \ddot{\theta}_{sw} = -b \dot{\theta}_{sw} - T_f + T_{sw} \quad (1)$$

J_t , θ_{sw} , b , T_f , T_{sw} 는 각각 굴삭기의 회전관성, 회전각도, 댐핑, 마찰토크, 회전토크를 나타낸다. 회전관성의 추정을 위해 output은 0 그리고 regressor(ψ)와 estimate(θ)는 아래와 같이 정의하였다.

$$\psi = [\hat{\theta}_{sw} \hat{\theta}_{sw} - 1]^T \quad (2)$$

$$\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T = [J_t b T_t]^T \quad (3)$$

T_t 는 $T_{sw} - T_f$ 를 의미한다. 정의된 output, regressor, estimate을 이용하여 구성된 목적함수를 최소화하는 최적 추정치는 아래와 같이 도출될 수 있다.⁶⁾

$$[\hat{\theta}_1(k) \hat{\theta}_2(k) \hat{\theta}_3(k)] = A^{-1} B \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & L_1(k)\psi_2(k) & L_1(k)\psi_3(k) \\ L_2(k)\psi_1(k) & 1 & L_2(k)\psi_3(k) \\ L_3(k)\psi_1(k) & L_3(k)\psi_2(k) & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1(k-1) + L_1(k)(y(k) - \psi_1(k)\hat{\theta}_1(k-1)) \\ \hat{\theta}_2(k-1) + L_2(k)(y(k) - \psi_2(k)\hat{\theta}_2(k-1)) \\ \hat{\theta}_3(k-1) + L_3(k)(y(k) - \psi_3(k)\hat{\theta}_3(k-1)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

수식 (2)에서 사용된 굴삭기의 회전 각속도 및 각 가속도는 선형 칼만 필터를 이용하여 추정하였으며, 순환최소자승 알고리즘의 추정성능을 향상시키기 위해 갱신규칙을 적용하였다.⁷⁾ 추정성능 확보를 위해 공칭 댐핑과 해석적으로 도출된 굴삭기 작업자세에 따른 회전관성 기반 추정 초기값이 적용되었다. 참고 문헌 7)에서는 모델 기반 선형예측을 통해 제어입력 시점을 결정하였지만 본 연구에서는 비선형 제어 알고리즘인 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용하여 보다 합리적인 제어시점 결정 및 고도화된 안전제어 알고

리즘을 제안한다. 회전관성을 이용하여 추정된 굴삭기의 회전관성(θ_1)은 오차에 의한 제어 성능저하를 최소화하기 위해 재귀평균기법을 이용하여 평균값을 도출하였고, 안전제어 알고리즘에 사용되었다.

2.2 적응형 슬라이딩 모드 제어 알고리즘

적응형 안전제어 알고리즘을 구성하기 위해 굴삭기의 회전 동역학 모델을 이용하여 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하였다. 제어 알고리즘의 설계를 위해 정의된 상태변수는 Fig. 1에 표현된 굴삭기와 물체와의 Clearance를 기반으로 정의되었다.

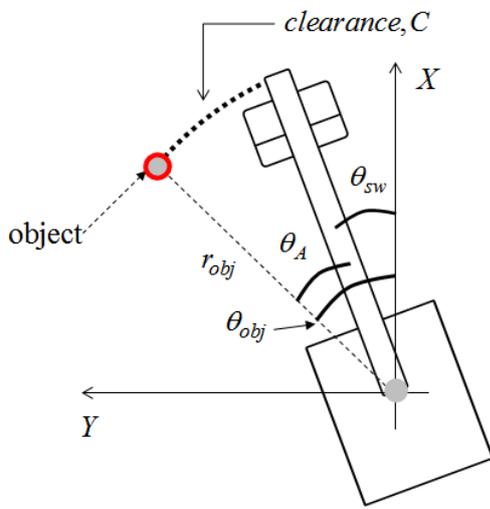


Fig. 1 Clearance and defined angles for control

θ_{obj} 는 X-Y 축에 대한 물체의 각도를 나타낸다. r_{obj} 는 물체와 회전 중심과의 거리를 나타내며, θ_{ATC} 는 $\theta_{obj} - \theta_{sw}$ 를 나타낸다. 정의된 상태변수 관계식은 아래 수식과 같다.

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{C} = r_{obj} \dot{\theta}_{ATC} = r_{obj} (\dot{\theta}_{obj} - \dot{\theta}_{sw}) \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{C} = r_{obj} \ddot{\theta}_{ATC} = r_{obj} (\ddot{\theta}_{obj} - \ddot{\theta}_{sw}) \quad (8)$$

물체가 정지상태라고 가정한다면 $\dot{\theta}_{obj}$ 와 $\ddot{\theta}_{obj}$ 은 0으로 간주할 수 있고, 수식 (7)과 (8)은 회전동역학 모델을 기반으로 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{x}_1 = -r_{obj} \dot{\theta}_{sw} \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = -r_{obj} \ddot{\theta}_{sw} = \frac{r_{obj}(b\dot{\theta}_{sw} + T_f)}{J_t} - \frac{T_{sw}}{J_t} \quad (10)$$

슬라이딩 모드 제어 기법을 적용하기 위해 변수 (σ)를 이용하여 슬라이딩 표면을 정의하였다.

$$\sigma = x_2 + \lambda_s x_1, \lambda_s > 0 \quad (11)$$

λ_s 는 상태변수 x_1 와 x_2 의 수렴속도를 정의하는 값이며 안전제어 시스템을 위한 상태변수 x_1 와 x_2 의 근사적 수렴은 σ 값이 0으로 수렴되면서 가능해진다. 유한시간 내 수렴을 위해 Lyapunov candidate 조건이 적용되었다.

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (12)$$

$$\dot{V} \leq -\alpha V^{1/2} \quad (13)$$

수식 (13)의 조건을 최종 V의 값이 0으로 수렴되는 조건을 반영하면 아래와 같이 수렴범위를 도출할 수 있다.

$$t_c \leq 2V^{1/2}(0)/\alpha \quad (14)$$

t_c 는 σ 의 수렴시간을 나타낸다. 수식 (9),(10),(11)을 이용하여 V의 변화율을 도출하면 아래와 같다.

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} = \sigma(\lambda_s x_2 + f(x_2, t) + u) \quad (15)$$

$f(x_2, t) = r_{obj}(b\dot{\theta}_{sw} + T_f)/J_t$ 와 $u = -T_{sw}/J_t$ 는 수렴시간을 나타낸다. 수식 (9),(10),(11)을 이용하여 V의 변화율을 도출하면 외란 $f(x_2, t)$ 의 최대 경계값을 L로 정의하고, 입력 u를 $u = -\lambda_s x_2 + v$ ($v = -\rho \text{sign}(\sigma)$)로 정의하면 수식 (15)는 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V} = \sigma f(x_2, t) + \sigma v \leq -|\sigma|(\rho - L) \quad (16)$$

여기서 수식. (13)과 (16)을 이용하여 ρ 를 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$\rho = L + \alpha/\sqrt{2} \quad (17)$$

위 수식과 회전동역학 모델을 이용하여 상태변수 수렴을 위한 입력을 도출하면 아래와 같다.

$$u = -\lambda_s x_2 - (L + \alpha / \sqrt{2}) \text{sign}(\sigma) \quad (18)$$

$$T_{sw} = -\lambda_s J_t \dot{\theta}_{sw} + r_{obj} J_t (L + \alpha / \sqrt{2}) \text{sign}(\sigma) \quad (19)$$

2.3 적응규칙

추정된 회전관성과 추정오차 그리고 굴삭기 최대 회전 속도값을 이용하여 수식. (16)의 최대 경계값 L 기반 시변하는 적응 규칙을 정의하였다.

$$L_k = r_{obj} (b \dot{\theta}_{sw, \max} + T_f) / \hat{J}_{t, \text{avg}, k} (1 - 3\sigma_{est}) \quad (20)$$

$\dot{\theta}_{sw, \max}$ 는 굴삭기의 최대 회전속도, σ_{est} 는 회전관성의 추정오차 비율에 대한 표준편차를 나타낸다. 표준편차의 세배를 적용한 것은 99.7%의 확률로 발생할 수 있는 추정오차의 최대값을 반영한 경계값 도출을 위한 것이다.

2.4 충돌회피 알고리즘

굴삭기와 물체의 충돌방지 작업을 위해 회전하는 동안의 안전도 평가에 따른 제어전략이 필요하다. 본 연구에서는 슬라이딩 모드 제어를 위해 정의된 상태 변수를 이용하여 안전영역과 긴급정지가 필요한 영역을 구분하고, 긴급정지 영역에서는 수식. (19)에서 정의된 제어입력을 이용하여 충돌을 회피하는 제어 전략을 적용하였다. 이론적으로 제어입력이 인가되었을 때의 phase portrait을 예측함으로써 굴삭기와 물체와의 clearance와 clearance의 변화율을 예측할 수 있다. Fig. 2 는 제어입력이 인가되었을 때 이론적으로 예측된 굴삭기의 거동을 나타낸다.

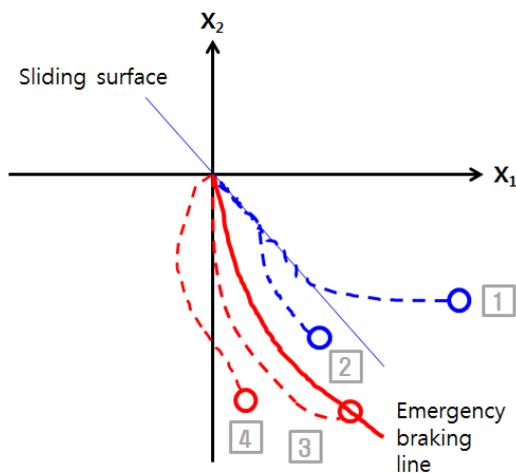


Fig. 2 Predicted phase portrait with control input

Fig. 2 의 포인트 1 과 2 는 제어 입력이 인가되었을 때 정의된 Sliding surface로 안전하게 수렴할 수 있는 상태이다. 하지만 포인트 4 는 물체와의 clearance를 의미하는 상태변수 x_1 가 음수값이 되면서 물체와의 충돌이 발생할 수 있는 영역을 나타낸다. 하지만 포인트 3은 안정적으로 x_1 과 x_2 를 0으로 수렴시킬 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 포인트 3과 같은 조건으로 x_1 과 x_2 를 0으로 수렴시킬 수 있는 Emergency braking line을 이론적으로 도출하여 긴급정지가 필요한 조건으로 정의하였다. Emergency braking line을 도출하기 위한 조건은 아래 수식과 같다.

$$x_1(t) = 0 \text{ with } \sigma < 0 \quad (21)$$

$$x_2(t) = 0 \text{ with } \sigma < 0 \quad (22)$$

임의의 시간 t 에 대해 위 두 수식을 만족하는 x_1 과 x_2 를 도출하면 0 으로 수렴시킬 수 있는 Emergency braking line을 이론적으로 도출하였으며 도출된 line을 물체와의 충돌회피 기준으로 정의하였다. 그리고 현실적인 적용을 위해 안전시스템에 존재할 수 있는 불확실성(센서의 잡음 및 시스템의 불확실성)을 고려하여 Safety margin(C_{margin})을 적용할 수 있도록 도출된 line의 x_1 을 아래와 같이 정의하였다.

$$x_{1, \text{line}, \text{margin}} = x_{1, \text{line}} + C_{margin} \quad (23)$$

다음 장에서는 실 작업 기반 추정 알고리즘과 안전제어 알고리즘의 성능평가에 대해 기술한다.

3. 실 작업 기반 성능평가

성능평가를 위해 적용된 실제 작업조건은 전형적인 굴삭기의 덤핑작업 시나리오다.

5.5톤 급 굴삭기의 제원을 사용하였으며 작업 상황에서 해석적으로 도출된 회전관성의 값을 이용하여 추정된 회전관성과 비교하였다. 굴삭기가 회전하는 동안 재료를 내려놓기 위해 작업장치의 자세를 변화시키며 본 과정에서 회전관성의 값은 크게 변한다. 상황에서 운전자는 Fig. 3 은 4단계로 구분된 덤핑작업 시나리오를 나타낸다.

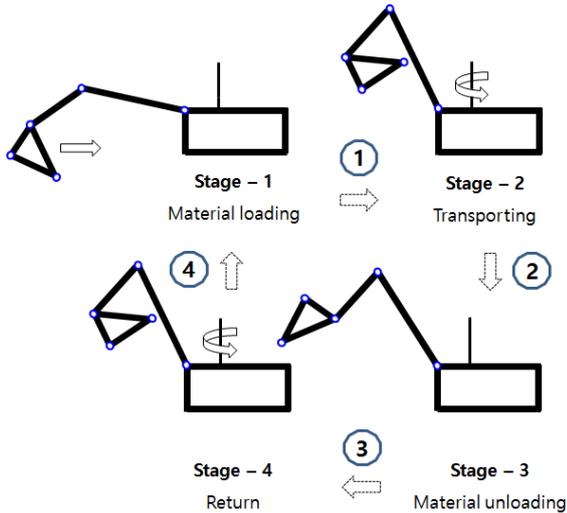
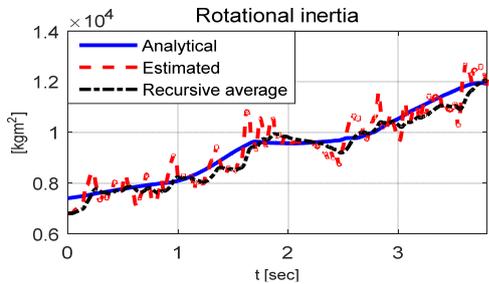
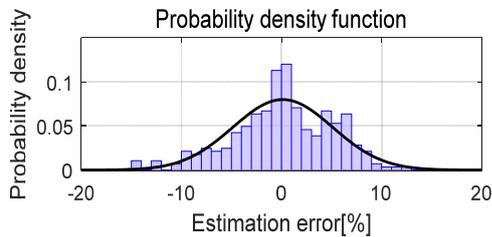


Fig. 3 Working stages: typical dumping



(a) Rotational inertia



(b) Estimation error distribution

Fig. 4 Estimation results: rotational inertia

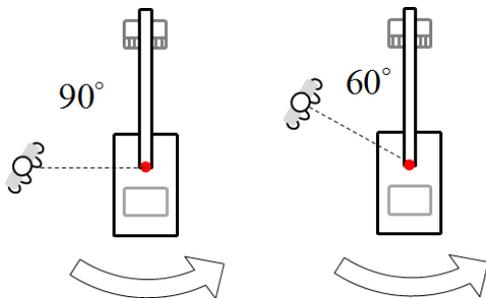
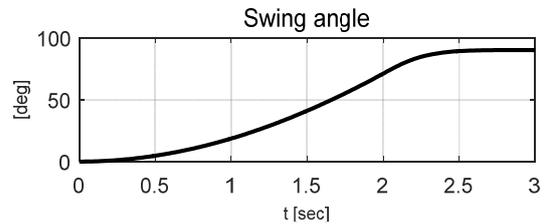
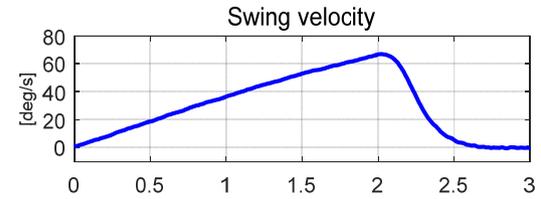


Fig. 5 Two evaluation conditions

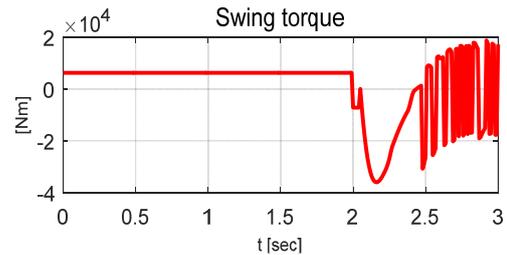
추정결과 상태량에 대한 잡음과 갱신규칙에 의한 오차 평균은 0 에 가깝고 표준편차는 약 4.99 %의 값을 갖는다. 표준편차와 재귀 평균값은 수식 (20) 적용규칙에 적용되었다. 충돌회피를 위한 안전제어

알고리즘의 성능평가를 위해 굴삭기 주변 가상의 물체를 정의하고 실 작업조건 하에서 충돌회피 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 성능평가를 위해 적용된 두 가지 성능평가 조건을 나타낸다.

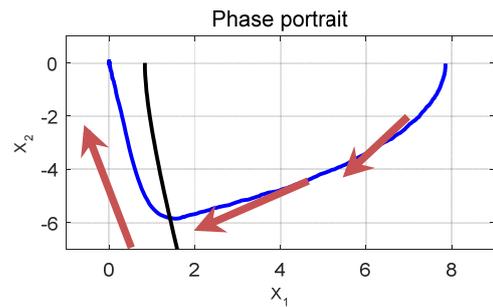
Fig. 6 은 물체가 굴삭기를 기준으로 90도 각도일 때의 성능평가 결과를 보여준다.



(a) Swing dynamic behaviors



(b) Swing torque



(c) Phase portrait

Fig. 6 Evaluation results: object angle, 90 deg

Fig. 7는 주변 물체가 굴삭기를 기준으로 60도의 각도에 있을 때 안전제어 결과를 나타낸다.

Fig. 6와 7의 결과는 제안된 안전제어 알고리즘이 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 작업안전도를 합리적으로 평가하고 충돌회피를 위한 제어입력을 인가할 수 있음을 보여준다. 그리고 설계된 적응규칙의 적용을 통해 회전관성 추정에 따른 L 값의 최대값을

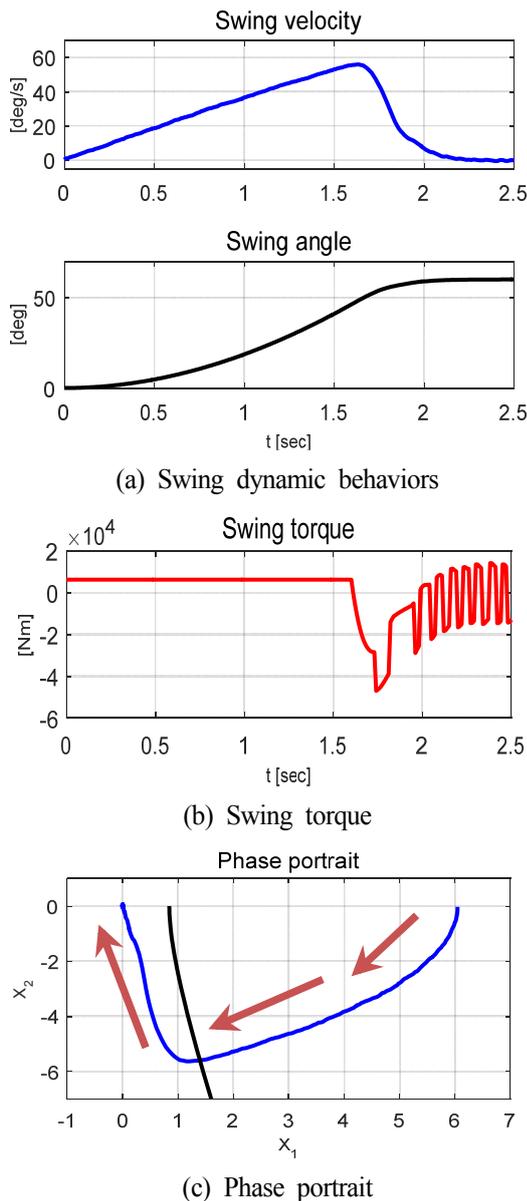


Fig. 7 Evaluation results: object angle, 60 deg

실시간으로 적응시킴으로써 제어입력의 크기가 합리적으로 결정되었음을 확인할 수 있었다. 안전제어 알고리즘은 긴급정지 시 모든 작업장치가 정지되고 마지막 추정된 회전관성 값을 이용하여 슬라이딩 모드 제어 입력 결정하였다.

4. 결론

본 논문에서는 회전관성 추정을 이용한 슬라이딩 모드 제어 기반 굴삭기의 적응형 안전제어 알고리즘 개발에 관한 것이다. 굴삭기의 회전관성을 순환최소자승 기법을 이용하여 추정하였고, 추정된 회전관성은 적응형 슬라이딩 모드 제어 입력 결정하기 위해 사용되었다. 정의된 적응형 슬라이딩 모드 제어의 위

상 궤적 해석을 기반으로 굴삭기의 작업안전도를 긴급정지 상태와 안전상태로 구분하였다. 위상 평면에서 이론적으로 도출된 긴급정지를 위한 경계선은 실 안전제어 알고리즘 적용을 위해 시스템의 불확실성을 고려하는 Safety margin이 반영되어 도출되었다. 실 작업 시나리오를 이용하여 알고리즘의 성능이 평가되었으며, 평가결과 물체와의 충돌을 합리적으로 예방하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 적용을 위해 제어입력의 물리적 한계를 고려하고, 진동을 최소화할 수 있는 알고리즘의 고도화가 필요할 것이다. 제안된 안전제어 알고리즘은 향후 주변물체의 인지를 위한 적절한 탐지용 센서와 함께 실제 굴삭기에 적용되어 충돌에 의한 치명적 사고를 효율적으로 줄일 수 있을 것이라 기대한다.

References

- 1) J. W. Hinze and J. Teizer, "Visibility-related fatalities related to construction equipment", Safety Sci., Vol.49, No.5, pp. 709-718, 2011.
- 2) U. K. Lee et al., "Development of a mobile safety monitoring system for construction sites", Automation Constr., Vol.18, No.3, pp. 258-264, 2009.
- 3) Y. K. Cho and M. Gai, "Projection - Recognition - Projection method for automatic object recognition and registration for dynamic heavy equipment operations", J. Comput. Civil Eng., Vol.28, No.5, A4014002, 2014.
- 4) F. Vahdatikhaki and A. Hammad, "Dynamic equipment workspace generation for improving earthwork safety using real-time location system", Adv. Eng. Inform., Vol.29, No.3, pp. 459-471, 2015.
- 5) K. S. Oh et al., "Laser-Scanner-based Stochastic and Predictive Working-Risk-Assessment Algorithm for Excavators", J. Drive and Control, Vol.13, No.4, pp.14-22, 2016.
- 6) A. Vahidi, A. Stefanopoulou, and H. Peng, "Recursive least squares with forgetting for online estimation of vehicle mass and road grade: theory and experiments", Vehicle Syst. Dyn., Vol.43, No.1, pp. 31-55, 2005.
- 7) K. S. Oh, J. H. Seo and G. H. Lee, "Model-prediction-based-collision-avoidance algorithm for excavators using RLS estimation of rotational inertia", J. Drive and Control, Vol.13, No.4, pp. 59-67, 2016.