

이미지 센서를 이용한 크레인의 흔들림 계측 및 제어 Measurement and Control of Swing Motion Using Image Sensor

김영복 · 카와이 히데키 · 최용운 · 이권순 · 채규훈
Y. B. Kim, H. Kawai, Y. W. Choi, K. S. Lee and G. H. Chae

Key Words : Swing Motion Control(흔들림 제어), Camera(카메라), Image Sensor(이미지 센서), Moving-Mass(가동질량체), Spreader(스프레더), Container Crane(컨테이너 크레인)

Abstract : In general, the swing motion of the crane is controlled and suppressed by activating the trolley motion. In many papers reported by us, we suggested a new type of anti-sway control system of the crane. In the proposed control system, a small auxiliary mass(moving-mass) is installed on the spreader and the swing motion is controlled by moving the auxiliary mass. The actuator reaction against the auxiliary mass applies inertial control forces to the container in order to reduce the swing motion in the desired manner. The measuring system is based on laser sensor or others. However it is not so useful in real world. Especially, in this paper, the image sensor is used to measures the motions of the spreader and the measured data are fed back to the controller in real time. The applied image processing technique is a kind of robust template matching method which is named Vector Code Correlation (VCC) and devised to consider the real environmental conditions. And the H_∞ based control technique is applied to suppress swing motion of the crane. And the experimental result shows that the proposed measurement system based on image sensor and control system is useful and robust to disturbances.

기호 설명

- α : 컨테이너부의 감쇠계수
- C_d : 액추에이터(actuator)부의 감쇠계수
- f_d : 장치가 컨테이너에 가하는 수평합력
- g : 중력가속도
- k_d : 액추에이터부의 강성계수
- l : 로프길이
- M : 컨테이너 질량
- m : 가동 질량체의 질량(moving mass)
- x : 스프레더 변위
- x_d : 가동 질량체의 이동거리
- T : 외란에 의한 강제 모멘트
- θ : 컨테이너 흔들림 각
- K_m : 모터 토크 상수
- v : 모터 인가 전압
- r_m : 폴리 반지름

1. 서 론

컨테이너 크레인은 항만에서 컨테이너를 선박에서 트럭으로 혹은 트럭에서 선박으로 하역 또는 선적하는데 필요한 장비이다. 이러한 컨테이너 크레인 에 요구되는 최대의 목표는 가장 짧은 시간에 가능한 많은 컨테이너 물량을 처리해야 하는 것이다. 이와 같이 신속한 물류처리는 항만자동화 등, 지능형 항만시스템 구축을 위한 많은 노력들로 상당한 결실을 얻고 있다. 예를 들어 저자들을 비롯한 많은 연구자들은 기존 시스템의 구조를 일부 개량하거나 또는 혁신적인 아이디어로 물류처리속도를 배가시킬 수 있음을 확인하였다. 현재 항만 등에서 물류처리를 위해 운용되고 있는 대부분의 크레인은 구조상 로프라는 매개체를 통해 하역작업을 행하고 있다. 이러한 구조 때문에 크레인을 이용한 화물이송 작업에서 흔들림 현상은 필연적으로 발생할 수밖에 없으며 결국 이것이 하역작업에서의 방해요인으로 작용하게 된다. 이러한 바람직하지 않은 현상이 물류처리 고속화를 지연시키는 가장 큰 요인이다. 따라서 물류처리 고속화라는 목적을 효과적으로 수행하기 위한 방안이 지금까지 여러 문헌을 통하여 소

접수일 : 2007년 10월 11일, 채택확정 : 2007년 11월 5일
 김영복(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
 E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr
 Tel : (051)620-1584 Fax : (051)620-1574
 카와이 히데키, 최용운 : 創備大學 工學部
 이권순 : 동아대학교 전기공학과
 채규훈 : 군산대학교 동력시스템공학전공

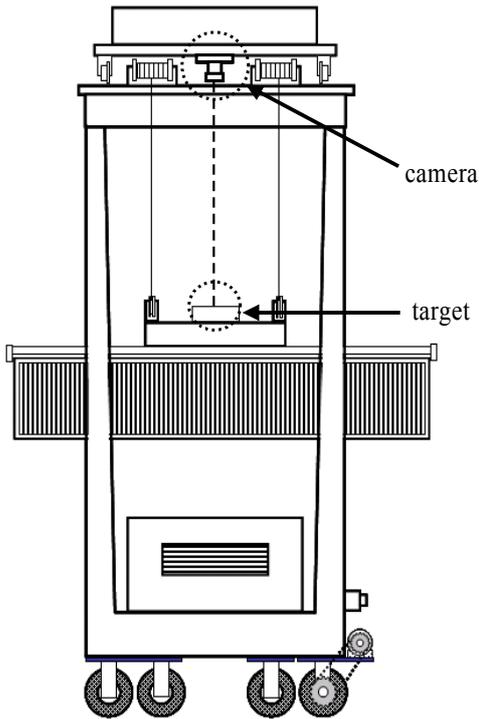


Fig. 1 A Crane with camera based measurement system

개되고 있으나 그 대부분이 트롤리 운동을 제어함으로써 컨테이너의 흔들림을 억제하는 방식이다.^{1~4)} 그래서 보다 효과적으로 흔들림을 억제하기 위해 저자들은 스프레더에 가동 질량체를 설치하여 흔들림을 억제하는 장치를 개발하였다.⁵⁾

이러한 시스템에서 흔들림 정도를 계측하기 위한 센서로는 레이저 센서 및 가속도 센서 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 단순히 하나의 센서를 사용하는 것이 아니라 수개의 레이저 및 초음파 센서 및 요구에 따라서는 이미지 센서 등을 동시에 사용하는 복합적인 계측시스템이 이용되고 있다.

항만환경의 지능화를 통해 물류처리의 효율성을 향상시키기 위해서는 계측시스템의 단순화 및 고기능화는 필수적일 것이다. 따라서 기존의 레이저 형 센서대신 독립적인 이미지 센서를 이용하여 스프레더의 흔들림, 위치, 특정 대상물을 파악할 수 있다면 지능적이고 고기능의 크레인 운용시스템을 구축할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 하나의 카메라로 크레인의 흔들림 및 다양한 운동특성을 계측하고 제어할 수 있는 시스템 구축에 대해 고찰한다. 이를 위해 Fig. 1과 같이 크레인 트롤리에 이미지 센서를 설치한다.

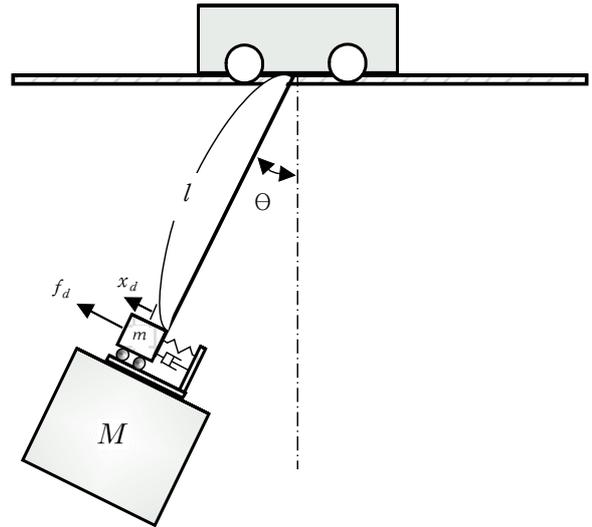


Fig. 2 A schematic diagram for the dynamic model

그리고 스프레더 상부에 목표가 되는 타겟을 지정하고 지정된 타겟을 추종하면서 스프레더의 흔들림을 계측하도록 한다. 이렇게 계측된 데이터를 이용하여 기존의 레이저센서를 이용한 경우와 제어특성을 비교 검토하고 계측시스템의 유용성을 확인하도록 한다.

2. 제어계 모델

제어대상에 대한 수학적 모델은 Fig. 2와 같이 나타낸 크레인의 운동특성을 기초로 한 기존의 연구 결과를 이용한다. 즉 이것은 아래 식으로 표현되는 모델을 이용한다.⁶⁾

$$(M+m)l^2\ddot{\theta} = -\alpha\dot{\theta} - Mgl\sin\theta - mg(x_d\cos\theta + l\sin\theta) + T - f_d l \quad (1)$$

$$m\ddot{x}_d = -mgsin\theta + f_d - C_d\dot{x}_d - k_d x_d \quad (2)$$

여기서 θ 가 미소하다면 $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$ 로 들 수 있고, 로프 길이 l 은 일정하다고 가정한다. 그리고 스프레더의 평면운동만 고려하여 $x = l\theta$ 로 두면, $\dot{x} = l\dot{\theta}, \ddot{x} = l\ddot{\theta}$ 이고, 결국 식(1)과 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (M+m)l\ddot{x} &= -\frac{\alpha}{l}\dot{x} - Mgx - mgx_d + mgx \\ &+ T - f_d l \\ &= -\frac{\alpha}{l}\dot{x} - (M+m)gx - mgx_d \\ &+ T - f_d l \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x}_d &= -mg\theta + f_d - C_d\dot{x}_d - k_d x_d \\
 &= -\frac{mg}{l}x + \frac{K_m}{r_m}i - C_d\dot{x}_d - k_d x_d
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

여기서 식(3)은 외력에 의해 발생하는 스프레더부의 운동을 나타내며, 식(4)는 스프레더부의 흔들림을 억제시키기 위한 제어력을 발생시키는 액추에이터부의 운동특성을 나타내고 있다. 식(3), (4)에서 사용된 파라미터 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Parameters for control system design

Parameters	Values
K_m	0.150[N · m/s]
C_d	1.5865[N · s/m]
k_d	0.00095[N/m]
M	0.565 [kg]
m	0.095 [kg]
r_m	0.015 [m]

2.2 전체시스템의 표현

위의 결과로부터 전체 시스템에 대한 상태공간표현은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_p &= Ax_p + Bu + Dw \\
 y_p &= Cx_p
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

단, 상태 $x_p = [x \ \dot{x} \ x_d \ \dot{x}_d]^T$, 제어입력을 전류(i)와 저항(R)의 곱인 모터에 가해지는 전압 $u = v$ 로 나타내었고, $\omega = T$ (외란에 의한 강제 모멘트)이다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{g}{l} - \frac{\alpha}{(M+m)l^2} & -\frac{mg}{(M+m)l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{g}{l} & 0 & -\frac{k_d}{m} & -\frac{C_d}{m} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_m}{r_m R (M+m)} \\ 0 \\ \frac{K_m}{r_m R m} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ (M+m)l \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. 제어기의 설계

식(5)로 표현된 제어대상에 대한 제어기 설계는 강인제어(Robust Control)⁶⁾기법을 이용한다. 즉, 외

란 등의 외부적 요인에 의해 발생하는 크레인의 흔들림을 최대한 억제하도록 제어기를 설계한다. 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 설계된 제어계의 유효성과 성능을 평가한다.

먼저 다음과 같이 표현되는 제어계를 고려하자.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_z &= Ax_z + B_1 w + B_2 u \\
 z &= C_1 x_z + D_{11} w + D_{12} u \\
 y_z &= C_2 x_z + D_{21} w + D_{22} u
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

단 $x_z = x_p$ 이다. 식(5)와 식(6)을 이용하면 각각의 시스템변수는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 B_1 &= D, \quad B_2 = B, \\
 C_1 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad C_2 = C \\
 D_{11} &= [1], \quad D_{12} = [0], \\
 D_{21}^T &= [0 \ 0], \quad D_{22}^T = [0 \ 0]
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

이와 같은 가정과 정의를 토대로 하여 외란에 강인한 제어기를 설계하였다. 제어기의 상태공간표현을

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c y \\
 u &= C_c x_c + D_c y
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

와 같이 두면 각 계수행렬은 다음과 같이 정리된다.

$$A_c = \begin{bmatrix} -8.8544 & -1.3779 & -0.3746 & -0.2245 \\ 11.9172 & -11.2673 & 17.9408 & -26.4625 \\ -1.4202 & 1.8062 & -5.8168 & 1.8712 \\ -1.0796 & 7.4617 & 35.1117 & -10.4310 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -0.9165 & 8.8098 \\ 0.3266 & -0.5598 \\ -5.3783 & -1.0668 \\ 29.2411 & 0.0909 \end{bmatrix}
 \quad (9)$$

$$C_c = [0.0891 \ -0.0754 \ -0.1705 \ 0.2185]$$

$$D_c = [0 \ 0]$$

4. 계측시스템

서론에서 기술하였듯이 본 연구에서는 흔들림을 계측하기 위한 계측시스템으로 카메라(이미지 센서)를 이용한다. 카메라는 트롤리에 설치하고 추종해야 할 목표지점(Land Mark)은 스프레더 상부에 두었고, 이것은 Fig. 3에서 L_1, L_2 로 나타내었다. 여기서 Fig. 3은 이미지센서를 이용한 계측방법을 나타내고 있다. Fig. 3의 (a)가 크레인 스프레더의 실제 흔들림에 의한 변위라고 한다면 이것을 이미지 센서를 이용하여 계측한 화상이 (b)가 된다.

Fig. 3의 (a)에서 좌표 (X_s, Y_s)는 스프레더 흔들림에 의한 원점 O_s 로부터의 중심점 변위를 나타내고 있다. 이에 대해 (b)의 좌표 (x_1, y_1), (x_2, y_2)는 스프레더 상부에 위치한 두 개의 랜드마크를 이미지 센서로 계측한 값을 나타내고 있다. 그리고 D 는

실제 스프레더에 위치한 두 개의 랜드마크 사이의 거리를 나타내며 d 는 이미지 센서를 이용하여 계측한 화상상의 랜드마크 사이의 거리를 나타낸다. 따라서 두 개의 랜드마크 사이의 거리 D 와 d 의 크기를 이용하면 스프레더 흔들림을 알 수 있게 된다. 이때 이미지 센서를 이용하여 취득한 화상상에서의 거리 d 와 두 개의 랜드마크 사이의 중심좌표 (x_s, y_s) 는 다음 식으로 계산된다.

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$(x_s, y_s) = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (10)$$

위에서 구한 거리 d 와 좌표 (x_s, y_s) 로부터 흔들림에 의한 스프레더의 실제 변위는 다음과 같이 간단히 구해진다.

$$(X_s, Y_s) = \left(\frac{D}{d} x_s, \frac{D}{d} y_s \right) \quad (11)$$

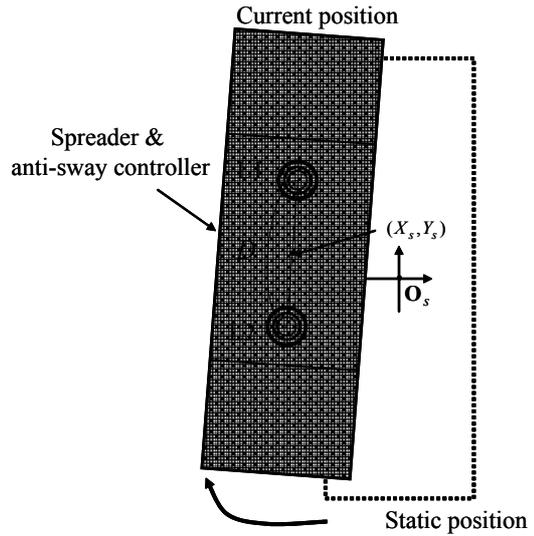
화상상의 목표물에 대한 위치를 획득하기 위한 화상처리 수법으로 템플릿 매칭(Template Matching)법이 일반적으로 이용된다. 템플릿 매칭법은 원리상 상당한 계산시간이 필요하기 때문에 실시간 처리를 요하는 경우에는 고성능의 하드웨어시스템 뿐만 아니라 계산량을 줄일 수 있는 대책이 필요하게 된다.

그래서 본 논문에서는 일반적으로 사용하고 있는 퍼서널 컴퓨터(PC) 정도의 성능으로 실시간 목표물 추적이 가능한 벡터부호상관법(Vector Code Correlation Method)^{7,8)}을 이용하여 목표지점인 랜드마크를 효과적으로 추종하고 스프레더의 흔들림을 실시간으로 계측한다. 벡터부호상관법이란 두 화상간의 상관관계를 구할 때 각 화소의 휘도값을 비교하는 것이 아니라 주어진 영역의 휘도가 변하는 경향을 부호화하고 그 부호를 비교함으로써 두 화상간의 상관정도(상이도)를 나타내는 방법이다. 앞서 기술하였듯이 이 방법은 자동접안시스템 구축 등의 동적운동계측 및 제어시스템구축에 적합한 계측방법으로 그 유효성은 검증되어 있다.

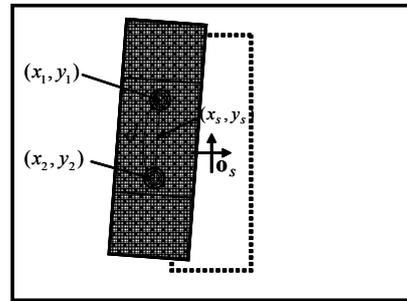
본 연구에서 계측에 사용한 카메라와 화상 처리용 보드는 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Specification of measurement system

Image processing board	Camera
Model : PIXCI-EL1 (PCI Express)	Model : PX-VGA120-LM(Mono)
Data processing speed : 240MB/s	Resolution : 640×480 Speed : 110~1000fps



(a) spreader displacement of the real plant



(b) spreader displacement obtained by image sensor
Fig. 3 Measurement technique using image sensor

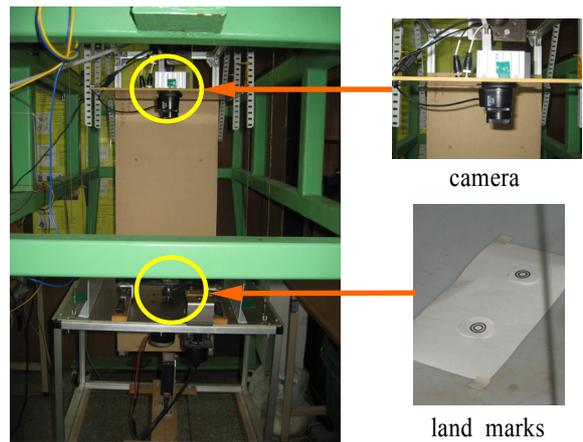


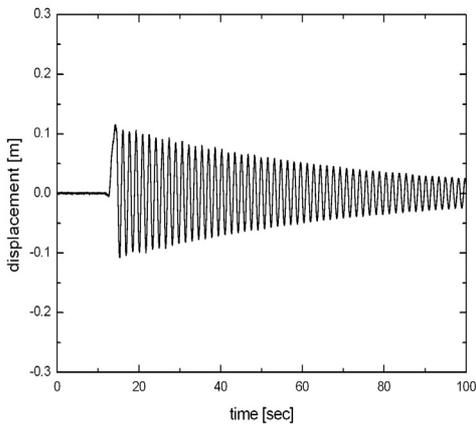
Fig. 4 Camera based measurement system

5. 실험결과 및 고찰

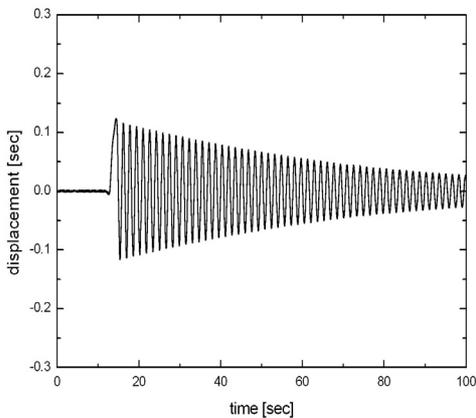
본 장에서는 크레인 시스템의 실제 운용환경을 고려하여 트롤리를 고속으로 이송할 때 발생하는

흔들림 현상을 억제하도록 설계된 제어계와 카메라를 이용한 계측시스템의 유용성을 실험으로 확인한다. 실험장치에서 이미지 센싱시스템은 Fig. 4와 같이 구성하였다. 카메라는 트롤리에 설치하고 목표지점(Target)으로 두 개의 랜드마크를 스프레더 상부에 부착하였다. 이와 같이 계측시스템을 구축하고 계측 및 제어실험(흔들림 억제)을 실행하였다. Fig. 5와 Fig. 6에 실험결과를 나타내고 있다.

먼저 Fig. 5는 이미지 센서와 기존의 레이저센서의 계측특성을 비교하기 위한 계측실험결과이다. 즉, 스프레더 자유진동 응답특성을 나타내고 있다. Fig. 5의 (a)는 레이저센서를 이용하여 계측한 스프레더의 흔들림을 나타내며, (b)는 카메라를 이용하여 스프레더의 응답을 계측한 결과를 나타내고 있다. 레이저센서의 응답속도는 0.05[ms] 이며, 카메라를 이용한 이미지 센서는 초당 45프레임의 처리속도(45[fps])로 화상을 처리하고 흔들림을 계산하였다. 거의 구분이 어려울 정도의 계측결과를 나타내

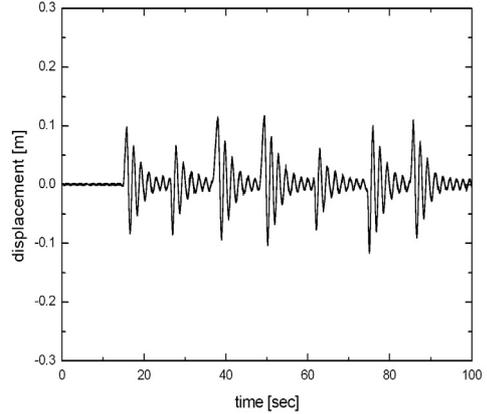


(a) displacement of spreader(using laser sensor)

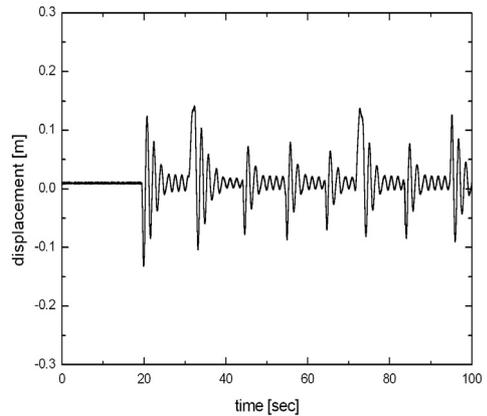


(b) displacement of spreader(using image sensor)

Fig. 5 System Responses(uncontrolled case)



(a) displacement of spreader(using laser sensor)



(b) displacement of spreader(using image sensor)

Fig. 6 System Responses(controlled case)

고 있으며 이미지 센서를 이용한 동적운동계측 및 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 3장에서 설계한 제어기를 포함한 폐루프계를 구성하여 제어실험을 수행한 결과를 나타내고 있다. 즉, 제어력을 가한 경우의 응답특성을 나타내고 있으며, (a)는 흔들림을 레이저센서로 계측한 정보를 이용한 경우이며, (b)는 이미지 센서로부터 계측한 정보를 이용한 경우를 나타내고 있다. 각각의 실험결과로부터 이미지 센서를 이용하더라도 제어 성능 악화 등의 문제가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

물류처리의 고속화를 위한 많은 노력들이 다양한 아이디어와 기술력을 동원하여 진행되고 있다. 동북아 허브항만으로서의 위치 선점과 확고한 자리매김을 위한 우리의 노력도 이러한 시대적 상황과 직접

적인 관계가 있다. 물류처리의 고속화와 효율성제고라는 시대적 요구에 따라 본 연구에서는 항만하역 작업의 자동화를 위한 핵심적인 연구로서 항만 하역장비의 하나인 크레인에 대한 흔들림 방지 시스템구축에 대해 고찰하였다. 특히 본 연구에서는 흔들림을 계측하기 위한 기존의 센싱 시스템과는 달리 하나의 카메라를 이용한 이미지 센싱 시스템을 개발하였다. 특히 본 연구에서 개발한 계측시스템은 레이저센서 및 초음파형 센서를 복합적으로 구성하여 구축한 센싱시스템과 달리 하나의 카메라로 크레인의 동특성을 계측 할 수 있어 단순하면서도 고기능의 센싱시스템이라 할 수 있다. 항만에서의 장비운용에 있어서의 무인화추세는 이러한 센싱 시스템 구축이 기본이 될 수밖에 없는 상황임을 고려하여 그 유용성을 실험을 통해 확인하였다. 기존 레이저 방식에 의한 계측 및 제어실험과의 비교검토를 통해 카메라를 이용한 이미지 센싱 시스템의 유용성을 충분히 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10418-0)지원으로 연구되었습니다.

참고 문헌

1. Chung, S. H. and Park, J. I., 1997, "Anti-Swing and Position Control of Crane Using Fuzzy Controller", Journal of Control, Automation, Systems Engineering, Vol. 3, No. 5, pp. 435~442.
2. Nomura, M., Hakamada, Y. and Saeki, H., 1997, "Anti-Sway Position Control of Crane Based on Acceleration Feedback and Predicted Pattern Following Method", Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan (D), Vol. 17, No. 11, pp. 1341~1347.
3. Hong, K. S., Shon, S. C. and Lee, M. H., 1998, "Sway Control of a Container Crane (Part II): Regulation of the Pendulum Sway through Patternizing Trolley Moving Velocity", Journal of Control, Automation, Systems Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 132~138.
4. Fujii, T., Fujii, M., Monzen, T., Honda, A. and

- Kusano, T., 1998, "Container Vibration against Wind and Its Control", Mitsubishi Juko Giho, Vol. 35, No. 2, pp. 140~143.
5. Ahn, S. B., Chae, G. H. and Kim, Y. B., 2004, "A Study on Swing Motion Control System Design for the Spreader of the Crane with Varying Rope Length", Journal of the KSPSE, Vol. 8, No. 1, pp. 55~61.
6. Skelton, R. E., Iwasaki, T. and Grigoriadits, K. M., 1998, "A Unified Algebraic Approach to Linear Control Design", Taylor & Francis, London.
7. Koyama, D., Choi, Y., Iyota, T. and Kubota, Y., 2003, "A Technique of High-speed Template Matching using Vector Code Correlation", Preprints of the 46th Japan Joit Automatic Control Conference, FA2-09-5.
8. Choi, Y., Ueno, K., Kamiuchi, M., Iyota, T., Watanabe, K. and Kubota, Y., 2005, "Detection of Uneven Brightness for LCD Panel Using Approximate Planes of Brightness in a CCD Image", Trans. of Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 41, No. 1, pp. 1~7.