

크레인 무인 자동 운전 시스템 개발

최진태*, 신길재**

기전자동화연구팀, 포항산업과학연구원*

기술연구소, WINXEN(주)**

Development of Automatic Coil-Handling Crane Control System

Chintae Choi* and K. Shin**

Department of Mechanical & Electrical Engineering , RIST*

Research Laboratories, WINXEN**

Abstract

Lots of researches and applications on the automated overhead cranes in shops have been done for some decades, but a few successful results are reported. Integrated crane control systems designed by famous engineering companies are still expensive and are not satisfactory in view of maintenance and reliability. A more reasonable control system fit to requirements of manufacturing industries is suggested in the study. The new deigned system has superior capabilities for anti-sway of rope and position control. The controller for automated operations is composed of a Linux-based PC for non real-time control and a high-speed PLC for hard real-time control. Some algorithms required for coil yard operations as well as main control algorithms such as reference position generation, position control and anti-sway control have been designed and fully tested on the new crane simulator. The designed crane control system showed satisfactory performance on positon control accuracy and anti-sway of rope. The maximum positional error is 8mm and the maximum sway error is 0.1 degrees. The suggested control strategies have been successfully applied to the 10-1 crane in No. 4 CGL of in the Kwangyang Steel Works and in commercial operation.

Key words : Control, Crane, Anti-sway, Position

1. 서론

코일 취급 크레인은 후판이나 슬라브 취급 크레인에 비해 로프의 길이가 길고 로프에 달려있는 리프터의 sheave 간격이 좁아서 리프터 흔들림이 쉽게 발생되고 발생후에도 소멸되는데 시간이 많이 걸린다. 그리고 코일의 흔들림은 곧바로 제품 표면의 손상으로 이어지므로 코일은 후판이나 슬라브에 비해 흔들림의 크기가 엄격히 제한된다.

크레인을 무인 운전 하려면 흔들림을 방지하면서 정확히 적재 위치로 옮길수 있는 제어 시스템이 필수적이다. 또한 무인 크레인은 사람이 탑승하지 않으므로 오동작에 의한 충돌, 코일 drop 에 대한 방지책이 철저히 구비되어 있어야 하고 오동작 발생시에도 충돌 등이 최소화 될수 있도록 제어 시스템이 구성되어야 한다.

본 무인화 방안에서는 크레인의 작업 생산성을 최대화하면서 안전 대책이 철저하도록 제어 시스템과 제어 프로그램이 구성된다. 기본적으로 지상국에는 무인 크레인에 작업 명령을 하달하고 크레인의 동작 상태를 실시간으로 감시하는 지상국 운전 제어기가 설치되고 차상국에는 크레인의 위치제어, 흔들림 제어, 리프터 제어, 모터 제어 및 각종 I/O 제어를 담당하는 크레인 제어기가 설치된다. 지상국 운전 제어기는 크레인 제어기와 작업 데이터를 안정성 있게 송수신하기 위해 TCP/IP 방식의 무선 Ethernet 통신에 의해 상호간에 주기적으로 데이터를 송수신한다.

무인 크레인의 성능을 결정하는 3대 핵심 기술은 속도 패턴 생성기술, 위치제어 기술, anti-sway 제어 기술이다(1)(2). 속도 패턴 생성 기술은 크레인이 이동하는 기준속도를 실시간으로 계산하고 이동시간과 흔들림 발생을 최소화하는 이동 위치 명령의 기준치를 실시간으로 생성하는 기능을 가지므로 크레인의 생산성을 결정하고 soft start와 soft stop이 가능하게 한다. 위치 제어는 각 구동축의 위치를 제어하여 크레인이 목표 위치에 정지하게 하고 위치 제어 정도를 결정한다. 선형 피드백 위치 제어 방식을 채택하여 제어 알고리즘은 디지털 PID로 구성된다(3).

로프 흔들림 제어는 로프의 흔들림을 제거하는 기술로서 목표 위치에서의 흔들림 량을 좌우한다(4). 각도를 검출하는 센서로부터 로프 흔들림을 피드백 받아서 로프 흔들림이 0 이 되도록 피드백 제어를 실시한다. 로프 흔들림 제어 알고리즘에서 도출된 제어 출력은 위치 제어기의 제어 출력과 합해져서 모터의 인버터로 입력되고 제어 프로그램은 디지털 PD로 구성된다.

본 무인화 방안에 의한 제어 시스템은 주 횡행 및 권상하축의 위치 제어 정도가 +/- 30mm 이내이고 코일 리프터의 흔들림은 목표 위치에서 +/- 5mm 이내이다. 그리고 크레인의 이동 시간은 최소 이동 시간으로 코일을 운반 할수 있으며 인버터에 의해 선형으로 속도를 제어하며 부드러운 가감속과 최소시간 이동을 위해 사다리꼴 속도 profile과 삼각형 속도 profile에 의해 주 횡행 권상 하 축의 이동이 이루어진다. 오 동작시에 크레인이 비상 정지되도록 주행 구간의 시작과 종단 지점에 급 정지 안정 장치를 가지도록 설계되었다.

본 연구를 통해 개발된 무인화 기술은 크레인 무인화에서 요구하는 제어 기능을 충족하였으며, POSCO 4 CGL 10-1 70ton 크레인 무인화 시스템에 적용되어 조업 운전중이다

2. 제어 시스템 설계

2.1 크레인의 동역학 해석

크레인은 거더(girder)가 주행방향으로 이동하고 트롤리(trolley)는 횡행 방향으로 이동한다. 로프에 매달린 물체는 아래 위로 이동한다. 이들의 움직임은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 X-Y-Z 직교 좌표계에서 그 위치와 속도를 나타낼 수 있다. 여기서 x 는 주행 방향을 Y는 횡행 방향을 나타내고 Z축은 물체의 상하 방향 이동 위치를 나타낸다.

트롤리와 이송 물체의 직교 좌표계에서 크레인에 매달린 이송 물체의 이동 위치에 대한 위치 관계식을 구하면

$$\begin{aligned}x_m &= x + l \sin \theta_x \cos \theta_y \\y_m &= y + l \sin \theta_y \\z_m &= -l \sin \theta_x \cos \theta_y\end{aligned}\quad (1)$$

이송 물체의 속도를 구하면

$$v_m^2 = \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2 \quad (2)$$

이송 물체의 이동에 대한 운동 방정식과 위치 에너지 식으로 부터 Lagrangian L 을 구하면

$$L = K - P = \frac{1}{2}(M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2) + \frac{m}{2}v_m^2 + mgl \sin \theta_x \cos \theta_y \quad (3)$$

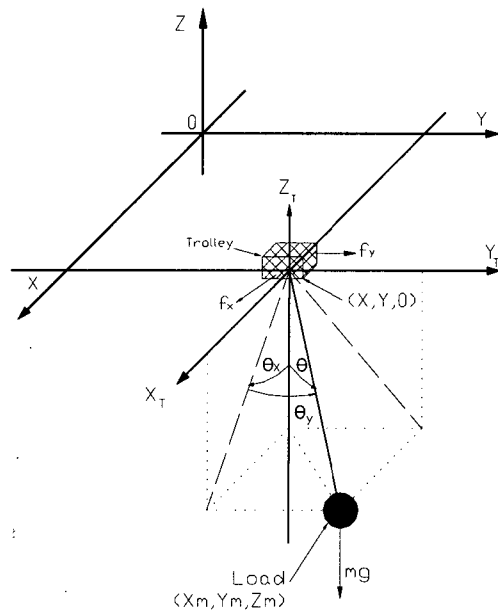


Fig. 1. 크레인 좌표계 및 이송물 흔들림 각의 정의

로프의 흔들림을 제어하는 순간에는 로프의 속도 변화가 없으므로 다음의 가정에 의해 식을 단순화 할 수 있다.

$$\dot{l} \approx \ddot{l} \approx 0$$

상기 식을 X 방향과 Y 방향에 대해 다시 쓰면

$$\begin{aligned} (M_x + m)\ddot{x} + D_x \dot{x} + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \ddot{\theta}_x \\ - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x^2 \\ - 2ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_y^2 = f_x \end{aligned} \quad (4)$$

$$l \cos \theta_y \ddot{\theta}_x + \cos \theta_x \dot{x} + g \sin \theta_x - 2l \sin \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y = 0 \quad (5)$$

$$(M_y + m)\ddot{y} + D_y \dot{y} + ml \cos \theta_y \ddot{\theta}_y - ml \sin \theta_y \dot{\theta}_y^2 = f_y \quad (6)$$

$$l \ddot{\theta}_y + \cos \theta_y \ddot{y} + g \cos \theta_x \sin \theta_y + l \cos \theta_y \sin \theta_y \dot{\theta}_x^2 - \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{x} = 0 \quad (7)$$

여기서 M_x, M_y, m 은 각각 거더, 트롤리 및 부하의 질량이고, D_x, D_y 는 점성마찰계수이다. 위의 식은 비선형 미분 방정식이므로 제어에 이용하기가 용이하지 한지 제어기 설계가 복잡해 지므로 이를 단순화하여 제어기 설계에 용이한 미분 방정식을 도출한다. 대부분의 경우 이송 물체의 흔들림 각도는 상당히 작은 크기를 가지고 흔들림의 각속도도 작은 크기를 가진다. 거더나 트롤리의 질량에 비해 이송 물체의 질량도 작으므로 아래의 가정이 가능하다.

$$|\theta| \ll 1,$$

$$|\dot{\theta}| \ll 1,$$

$$M \gg m$$

위의 가정을 이용하여 물체의 운동 방정식을 다시 쓰면 아래의 선형화 된 미분 방정식을 구할 수 있다.

$$M_x \ddot{x} + D_x \dot{x} = f_x \quad (8)$$

$$l \ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g \theta_x = 0 \quad (9)$$

$$M_y \ddot{y} + D_y \dot{y} = f_y \quad (10)$$

$$l \ddot{\theta}_y + \ddot{y} + g \theta_y = 0 \quad (11)$$

식 (8),(9) 및 (10),(11)을 Laplace 변환하면 구동 축의 속도에 대한 전달 함수와 로프 흔들림의 전달 함수를 구할 수 있다.

$$\frac{V(s)}{F(s)} \equiv G_t(s) = \frac{1}{Ms + D} \quad (12)$$

$$\frac{\Theta(s)}{X(s)} \equiv G_l(s) = \frac{-s^2}{ls^2 + g} \quad (13)$$

여기서 주행과 횡행 방향에 해당하는 아래첨자 x 및 y 는 생략한다.

제어기 설계를 위한 위치 동역학의 전달함수는 적분기를 가진 2차형으로 표시되므로 구동축의 속도 동역학은 1차형으로 나타내어진다. 1차형은 간단하게 게인과 시정수를 가지며 이들 계수는 전달함수를 구하는 방법에 의해 구해진다. 주행축과 횡행축의 인버터에 일정 크기의 스텝 입력을 가하고 구동축이 움직이게 되면 구동축에 장착되어 있는 encoder 의 펄스를 구하여 구동축의 응답을 얻을 수 있다. 이들 입력과 응답에 의해 구동축의 전달함수를 구하게 된다. 실험에 의해 구해진 각 구동축의 전달함수는 아래와 같다.

$$\text{X 축 트롤리의 속도 전달함수: } G_{vx}(s) = \frac{0.24}{3.12s + 1}$$

$$\text{Y 축 트롤리의 속도 전달함수: } G_{vy}(s) = \frac{0.19}{0.5s + 1}$$

크레인의 각 구동축이 구동 방향으로 흔들림 없이 물체를 원하는 위치로 이동 시키려면 각 구동축의 위치 제어와 로프 흔들림 제어가 동시에 실시 되어야 한다. 로프의 흔들림 동역학을 이론적으로 살펴 보면 가속도가 입력 변수로 작용하고 동역학 내부의 속도 위치 각속도 변동이 상태 변수로 작용하고 출력 변수는 로프 흔들림이다. 가속도는 역시 크레인 위치 동역학의 입력으로도 작용하게 되어, 즉 가속도에 의해 크레인의 위치와 흔들림을 영향을 줄 수 있는 가제어성(controllability) 이 형성된다.

2.2 제어기 설계

흔들림 동역학의 전달함수는 영점이 두개이고 감쇄가 전혀 없는 극점을 두개 가지고 있어 좋은 과도 응답을 얻기가 곤란하다는 점을 알 수 있다. 여기서 로프 흔들림 제어기와 구동축의 위치 제어기는 루프 형성 기법에 의해 구해진다. 위치 제어기는 cross-over 주파수 부근에서 roll-off rate 이 20 db/dec. 를 유지하도록 PI 제어 필터를 설계한다. 로프 흔들림 제어기가 roll-off rate 이 20 db/dec. 되게 하려면 너무 큰 제어 입력이 요구되므로 40 db/dec.되도록 제어기 PD 형태의 제어기를 설계한다.

각 구동축의 위치 제어계와 로프 흔들림 제어계를 포함한 전체 제어 시스템의 구성도는 Fig. 2 의 선형 제어시스템의 블록 다이어그램으로 나타내어 진다.

X축 방향의 트롤리 전달함수를 포함한 로프 흔들림 전달함수의 개루프 전달함수를 구하면 Fig. 3 과 같이 Bode plot 으로 나타내어 진다.

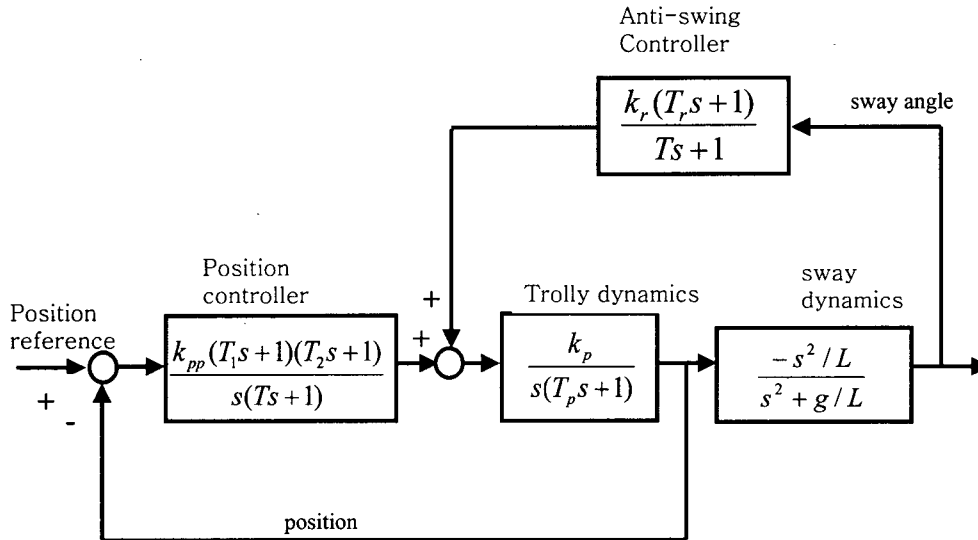


Fig.2 전체 제어시스템 블록 다이어그램

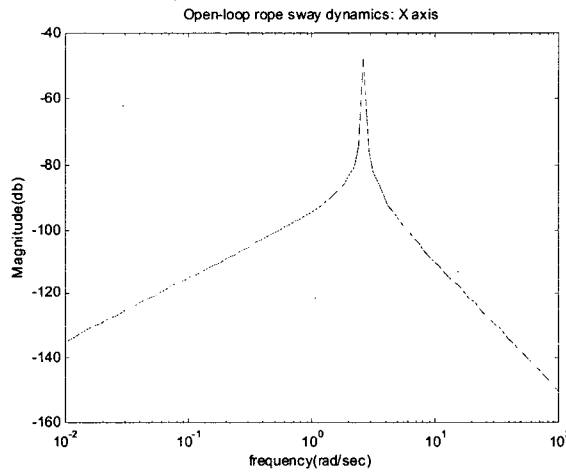


Fig.3 X 방향 로프 흔들림의 주파수 응답

X 방향의 로프 흔들림 전달함수는 0 db 아래의 크기를 가지므로 상당히 큰 비례게인에 의해 전체 루프를 위로 올리는 작업이 필요하다. 그리고 두개의 원점에 존재하는 영점에 의해 cross-over frequency에서의 루프 형상이 나쁜 응답이나 불안정성을 야기하므로 이를 개선하는 작업이 필요하다. 따라서 제어기는 극점과 영점을 하나씩 추가하고 큰 비례게인을 갖도록 설계한다. 루프 형성 기법에 의해 구해진 제어기와 로프 흔들림 동역학의 개루프를 주파수 응답으로 구해보면 Fig. 4로 주어진다.

다음은 트롤리의 위치 제어 동역학에 대해 제어기를 구한다. 먼저 각 축의 전달함수에 대한 주파수 응답을 구해 그 크기를 나타내어 보면 Fig. 5와 같이 roll-off rate가 40db이므로 적절한 게인을 선정하고 영점과 극점을 설치하여 roll-off rate가 20db되도록 설계가 필요하다. 각 루프 형성 기법에 의해 PID 제어기를 설계하면 Fig. 6의 Bode plot를 얻을 수 있다.

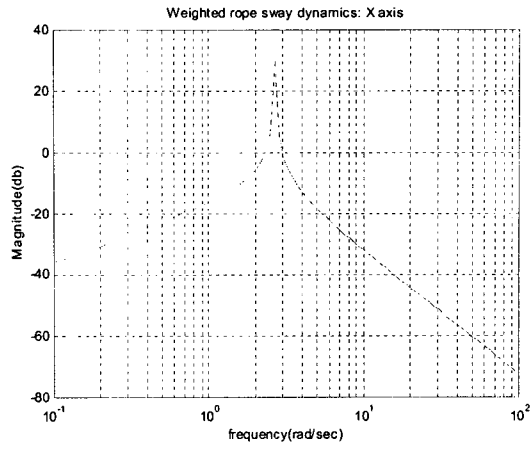


Fig.4 X 방향 로프 흔들림의 가중된 개루프 주파수 응답

비례게인의 크기조정에 의해 cross-over frequency 부근에서의 roll-off rate 가 20db 을 유지하고 있다. 보다 정밀한 계인은 제어를 실시하여 응답을 관찰한 뒤 직접 튜닝에 의해 선정되어 진다.

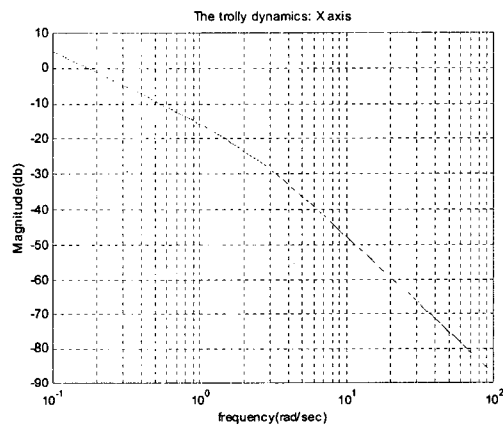


Fig.5 X 축 트롤리의 주파수 응답

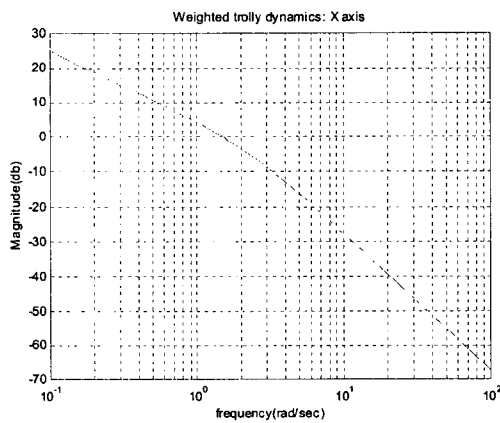


Fig.6 X 축 트롤리의 개루프 주파수 응답

4. 제어 테스트 결과

크레인 제어기는 리눅스 기반 PC 와 PLC로 구성되어 있다. PC는 비 실시간 제어를 수행하며 주로 지상국과의 작업명령 통신, 충돌 회피 이동 궤적의 생성, 코일을 파지하고 놓는 코일 처리 제적을 처리하고 PLC는 실시간 제어를 수행하여 위치제어, 흔들림 제어, 리프터 제어를 수행한다. PC에서 제어 프로그램은 C 언어로 작성되었으며 PLC에서의 프로그램은 Ladder 언어와 Structured Text 언어로 개발되었다. 구동 모터는 기존의 시스템은 좋은 제어 성능을 얻기 위해 서보 모터와 앰프로 구성되었으나 신규 개발 시스템은 현장의 크레인이 사용하는 동일한 종류인 유도 전동기를 사용하였다. 리프터는 냉연과 열연 코일을 파지 운반할수 있도록 매커니즘을 구성하였다. 레이저 거리 센서는 주행축과 횡행축의 절대 위치를 나타내는 기능을 수행하고 레일에 부착된 휠은 incremental encoder로 구성되어 있으며 위치제어를 수행하는 동안 상대 위치를 측정하는데 사용된다.

위치 제어와 anti-sway 제어를 동시에 실시하여 이동거리에 따른 위치 오차와 흔들림 오차를 측정하였다. 이동거리는 최소거리를 20mm 로 하고 주행축과 횡행축의 최대 이동 가능거리 범위까지 점차 증가시켰다. Table 1은 크레인이 코일을 파지하지 않은 경우와 파지한 경우에 대해 이동 거리에 따른 위치 오차를 정리한 것이고 Table 2는 이동하여 정지 후의 흔들림 오차의 크기를 각 구동축 별로 나타낸 것이다. Table 1에서 보는 바와 같이 위치에 무관하게 위치 제어 오차는 약 10mm 이내에 수렴함을 알수 있다. 흔들림 각도를 살펴보면 이동 후 목표 위치에 도달하였을 때 흔들림이 거의 제거되었음을 알 수 있다. 특히 먼 이동 거리 보다 짧은 이동 거리에서는 흔들림이 보다 크게 나타나는데 이것은 흔들림을 제거하는데 소요되는 시간이 작아서 생기는 현상이다. 근본적으로 흔들림 동역은 위치 동역학에 비해 댐핑이 전혀 없고 영점이 두개 존재하여 제어하기가 난이하기 때문이다.

Table 1. 위치 제어 오차

이동거리(mm)	위치 제어 오차(mm)			
	주행축(무부하)	주행축(부하)	횡행축(무부하)	횡행축(부하)
20	-2	-6	-1	-3
500	-4	-2	-3	-2
5000	-4	-4	-4	-6
20000	-9	-3	-5	-3
50000	-8	-7	-3	-5
80000	-6	-7	-7	-6
100000	-7	-11		
130000	-8	-8		

Table 2. 흔들림 제어 오차

이동거리(mm)	흔들림 제어 오차(도)	
	주행축	주행축
20	0.08	0.06
500	0.06	0.08
5000	0.07	0.08
20000	0.08	0.07
50000	0.05	0.08
80000	0.07	0.06
100000	0.08	0.07

5. 결론

무인 크레인의 성능을 결정하는 3대 핵심 기술인 속도 패턴 생성기술, 위치제어 기술, anti-sway 제어 기술이 개발되고 이를 포함한 크레인 자동 조업 운전 시스템이 구성되어 광양 제철소 3도금공장 4 CGL의 70톤 크레인에 적용되었다.

로프 흔들림 제어는 로프의 흔들림을 제거하는 기술로서 목표 위치에서의 흔들림 량을 좌우한다. 각도를 검출하는 센서로부터 로프 흔들림을 피드백 받아서 로프 흔들림이 0 이 되도록 피드백 제어를 실시한다. 로프 흔들림 제어 알고리즘에서 도출된 제어 출력은 위치 제어기의 제어 출력과 합해져서 모터의 인버터로 입력되고 제어 프로그램은 디지털 PD로 구성된다.

본 무인화 방안에 의한 제어 시스템은 주 횡행 및 권상하축의 위치 제어 정도가 +/- 30mm 이내이고 코일 리프터의 흔들림은 목표 위치에서 +/- 5mm 이내이다. 그리고 크레인의 이동 시간은 최소 이동 시간으로 코일을 운반 할수 있으며 인버터에 의해 선형으로 속도를 제어하며 부드러운 가감속과 최소시간 이동을 위해 사다리꼴 속도 profile과 삼각형 속도 profile에 의해 주 횡행 권상하 축의 이동이 이루어진다. 오 동작시에 크레인이 비상 정지되도록 주행 구간의 시작과 종단 지점에 급 정지 안정 장치를 가지도록 개발되었다.

본 연구를 통해 개발된 무인화 기술은 크레인 무인화에서 요구하는 제어 기능을 충족하였으며, POSCO 4 CGL 10-1 70ton 크레인 무인화 시스템에 적용되어 조업 운전중이다.

참고문헌

1. A. Gonzales et al, Robotics, McGraw-Hill, 1st edition, pp. 347-348 (1986).
2. J.W. Auernig and H. Troger, Automatica, vol. 23, no. 4, pp. 437-447(1987).
3. G.. A. Mason, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, U.K.(1977)
4. E. Ohinishi et al., 84IFAC, XIV 37-XIV 42.(1984).