

신경회로망 예측 PID 제어법을 이용한 컨테이너 크레인의 자동주행제어

서진호*, 이진우**, 이영진***, 이권순#

An Automatic Travel Control of a Container Crane using Neural Network Predictive PID Control Technique

Jin Ho Suh*, Jin Woo Lee**, Young Jin Lee*** and Kwon Soon Lee#

ABSTRACT

In this paper, we develop anti-sway control in proposed techniques for an ATC system. The developed algorithm is to build the optimal path of container motion and to calculate an anti-collision path for collision avoidance in its movement to the final coordinate. Moreover, in order to show the effectiveness in this research, we compared NNP PID controller to be tuning parameters of controller using NN with 2 DOF PID controller. The experimental results for an ATC simulator show that the proposed control scheme guarantees performances, trolley position, sway angle, and settling time in NNP PID controller than other controller. As a result, the application of NNP PID controller is analyzed to have robustness about disturbance which is wind of fixed pattern in the yard. Accordingly, the proposed algorithm in this study can be readily used for industrial applications

Key Words : Automated transfer crane (ATC, 자동이송크레인), Neural network predictive(NNP, 신경회로망 예측기), Anti-sway control(흔들림 제어), Collision avoidance path(충돌 회피경로), NN self-tuner(신경회로망 자기동조)

기호설명

XYZ = the fixed coordinate system

x_T, y_T, z_T = the trolley coordinate system which moves with the trolley

θ = the swing angle of the load in an arbitrary direction in space

(x_m, y_m, z_m) = the position of the load

l = the length of rope

$M_x, M_y, M_l = x, y,$ and l components of the crane mass and the equivalent masses of the rotating parts such as motors and their drive trains

접수일: 2004년 4월 8일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 동아대학교 전기공학과 국가지정연구실(NRL)

** 동아대학교 전기공학과 국가지정연구실(NRL)

*** 항공기능대학 전기계측공학과

교신저자: 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

E-mail kslee@portal.donga.ac.kr Tel. (051) 200-7739

- m = the load mass
- g = the gravitational acceleration
- v_m = the load speed
- D_x, D_y, D_l = the viscous damping coefficient associated with x , y , and l motions
- f_x, f_y, f_l = the driving forces for the x , y , and l motions
- x_S, y_S = start node coordinate value
- x_G, y_G = goal node of container coordinate value
- x_n, y_n = standard coordinate value of current node
- x_l, y_l = contiguity node from current node
- x_p, y_p = standard node value

1. 서론

최근 초대형 컨테이너선의 출현에 따른 해상물동량의 증가로 터미널 운영 효율의 향상과 해상수송 물류비용을 절감하기 위한 컨테이너 부두시설의 자동화의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 초대형 컨테이너선(super post-panamax vessel)의 출현에 따른 재항시간의 최소화는 동북아 메가 허브항(mega hub-port)의 최대관건으로서 국가전략사업으로 추진 중에 있다. 특히, 최근에 싱가포르의 PSA 의 신규 컨테이너 터미널에는 무인 자동운전 크레인인 OHBC(overhead bridge crane)을 개발하여 적용함으로써 항만 운용효율을 극대화시키고 있다.¹

이와 같은 크레인 시스템은 항만 하역장비뿐만 아니라 일반 산업현장에서도 다양한 중량의 물체를 이송시키는데 이용되는 시스템으로서, 주위의 작업환경에 따라서 크레인을 이송하는 트롤리(trolley)의 이동속도, 운반하고자 하는 물체의 무게 및 이송거리 변화에 의하여 진자운동과 같은 흔들림과 그에 따른 위치오차도 함께 발생되므로, 생산성이 저하되거나 작업성이 크게 떨어지는 문제를 발생시키고 있다. 특히, 항만에서는 해풍에 의한 스프레더의 흔들림으로 인하여 시설물과의 충돌은 물론이고 운반물체의 파괴 및 손상을 초래할 뿐 아니라 인명피해를 야기 시킬 수 있는 원인이 되기도 한다. 따라서 이러한 여러 문제점들을 해결하기 위하여, 여러 가지 PID 제어기,

퍼지이론(fuzzy theory), 유전자 알고리즘(genetic algorithm)등의 제어기법들이 적용되고 있지만 아직까지 실제 산업현장에서는 숙련자의 판단에 의존하고 있는 실정이다.

더구나 제어이론의 눈부신 발달로 인하여 여러 가지 이론들이 크레인 시스템에 적용되고 있지만, 대부분의 연구결과들은 크레인의 비선형성(nonlinearity)을 고려하지 않은 선형시스템에 대한 해석과 설계에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 따라서 주어진 시스템에 대한 수학적 표현이 단순하면서도 비선형 시스템에 대한 동적 특성을 잘 표현하는 지능제어(intelligent control)에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 이러한 연구들에는 신경회로망(neural network, NN), 퍼지이론, 그리고 유전자 알고리즘 등을 제어이론에 응용한 것을 의미한다.^{2,3}

본 논문에서는, 자동이송크레인(automated transfer crane, ATC) 시스템의 비선형성을 잘 내포하고 수학적 표현이 비교적 간단한 신경회로망을 이용한 예측 제어(predictive control) 시스템을 구성하였다. 특히 본 연구에서 제안되어진 예측 제어시스템은 신경회로망 예측기(neural network predictor, NNP)와 PID 제어기 그리고 제어기의 파라미터들을 산출하는 신경회로망 자기동조기(neural network self-tuner)로 구성되어진다. 본 논문에서 구성되어진 제어 알고리즘은, ATC 시스템의 자동화를 위한 컨테이너 이동의 최적경로 설정 및 컨테이너 입출장소와 적재장소를 연결하는 충돌회피 경로를 효율적으로 검색할 수 있는 알고리즘 개발과 설정된 충돌회피 경로를 추종함과 동시에 최단 시간 내에 컨테이너 이송작업을 완료하기 위한 제어기로 2 자유도(degree of freedom, DOF)를 가진 PID 제어기를 구성하였다. 마지막으로 제안된 제어 알고리즘의 유효성은 실제로 제작되어진 ATC 시뮬레이터를 통한 실험결과로서 보여진다.

2. ATC 모델링

2.1 ATC 의 일반화 좌표

ATC 시스템과 하중에 대한 좌표 시스템은 Fig. 1 과 같이 보여줄 수 있다. 또한 컨테이너 흔들림 현상과 크레인 시스템에 대하여 우리는 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 구름 마찰 저항이나 드라이브 메커니즘에서 발생하는 감쇠적인 영향력은 미세하다.
- (2) 컨테이너는 질량이 없는 로프에 매달려 있는 질점(point mass)으로 간주한다.

특히, Fig. 1 에서, 고정된 좌표 시스템 내에 트롤리 좌표의 원점은 $(x, y, 0)$ 이고, 트롤리 좌표의 각 축은 고정된 좌표시스템의 대응부에 평행이다. 또한 하중의 흔들림각을 의미하는 θ 는 다음과 같은 두 개의 성분을 가진다: $\theta = (\theta_x, \theta_y)^T$

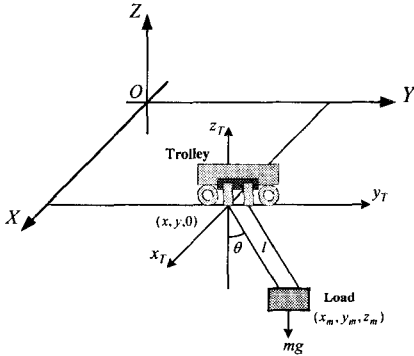


Fig. 1 Coordinate system of an ATC

이때, 고정된 좌표 시스템 내에 하중의 위치는 다음과 같이 주어진다.

$$x_m = x + l \sin \theta_x \cos \theta_y \quad (1)$$

$$y_m = y + l \sin \theta_y \quad (2)$$

$$z_m = -l \cos \theta_x \cos \theta_y \quad (3)$$

2.2 ATC 의 운동방정식

이 단원에서, ATC 시스템의 운동 방정식은 라그랑제 방정식(lagrange's equation)을 이용하여 유도되어진다.^{4,5} 특히, 하중은 앞에서 가정되었던 것처럼 질점으로서 고려되고 로프의 질량과 강도는 무시되어진다. 이때, 주어진 ATC 시스템과 하중의 기계적 에너지(kinetic energy) K 와 하중의 포텐셜 에너지(potential energy) P 는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \frac{1}{2} (M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{1}{2} m v_m^2 \quad (4)$$

$$P = mgl(1 - \cos \theta_x \cos \theta_y) \quad (5)$$

단, 위의 식(4)에서 하중속도(load speed)를 의미하는 v_m 는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\begin{aligned} v_m^2 &= \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2 \\ &= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{l}^2 + l^2 \dot{\theta}_x^2 \cos^2 \theta_y + l^2 \dot{\theta}_y^2 \\ &\quad + 2(l \sin \theta_x \cos \theta_y + l \dot{x} \cos \theta_x \cos \theta_y - l \dot{\theta}_y \sin \theta_x \sin \theta_y) \dot{x} \\ &\quad + 2(l \sin \theta_y + l \dot{y} \cos \theta_y) \dot{y} \end{aligned} \quad (6)$$

또한 Rayleigh's dissipation function F 은 다음과 같이 정의되어진다.

$$D = \frac{1}{2} (D_x \dot{x}^2 + D_y \dot{y}^2 + D_l \dot{l}^2) \quad (7)$$

이때, ATC 시스템의 운동 방정식은 일반화 좌표들에 결합한 라그랑제 방정식들에 위의 식들을 대입하여 정리함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} (M_x + m) \ddot{x} + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \cdot \ddot{\theta}_x \\ - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{\theta}_y + m \sin \theta_x \cos \theta_y \cdot \ddot{l} \\ + D_x \dot{x} + 2m \cos \theta_x \cos \theta_y \cdot \dot{l} \dot{\theta}_x - 2m \sin \theta_x \sin \theta_y \cdot \dot{l} \dot{\theta}_y \\ - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \cdot \dot{\theta}_x^2 - 2ml \cos \theta_x \sin \theta_y \cdot \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \\ - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \cdot \dot{\theta}_y^2 = f_x \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} (M_y + m) \ddot{y} + ml \cos \theta_y \cdot \ddot{\theta}_y + m \sin \theta_y \cdot \ddot{l} + D_y \dot{y} \\ + 2m \cos \theta_y \cdot \dot{l} \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_y \cdot \dot{\theta}_y^2 = f_y \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (M_l + m) \ddot{l} + m \sin \theta_x \cos \theta_y \cdot \ddot{x} + m \sin \theta_y \cdot \ddot{y} \\ + D_l \dot{l} - ml \cos^2 \theta_y \cdot \dot{\theta}_x^2 - ml \dot{\theta}_y^2 - mg \cos \theta_x \cos \theta_y \\ = f_l \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} ml^2 \cos^2 \theta_y \cdot \ddot{\theta}_x + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \cdot \ddot{x} \\ + 2ml \cos \theta_y \cdot \dot{l} \dot{\theta}_x - 2ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \cdot \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y \\ + mgl \sin \theta_x \cos \theta_y = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} ml^2 \ddot{\theta}_y + ml \cos \theta_y \cdot \ddot{y} - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \cdot \ddot{x} \\ + 2ml \dot{l} \dot{\theta}_y + ml^2 \cos \theta_y \sin \theta_y \cdot \dot{\theta}_x^2 \\ + mgl \cos \theta_x \sin \theta_y = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

실제로, ATC 시스템의 최대속도는 중력가속도보다 더 작고, 그리고 로프길이는 크레인이 움직이는 동안에는 상수(constant)이거나 천천히 변화함을 유지한다. 그러므로 작은 흔들림에 대하여 다음과 같은 조건들이 만족되어짐을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin \theta_x &\approx \theta_x, \quad \sin \theta_y \approx \theta_y \\ \cos \theta_x &\approx 1, \quad \cos \theta_y \approx 1 \end{aligned} \quad (13)$$

이러한 경우에, 간소화되어진 삼각함수들에 대하여 비선형 모델 내에 고차항(high order term)들은 무시되어진다. 그때, ATC 시스템의 비선형 모델들의 나타내는 식(8)-(12)들은 선형화 모델(linearized model)로서 다음과 같이 간략화 되어진다.

$$(M_x + m)\ddot{x} + m\ddot{\theta}_x + D_x\dot{x} = f_x \quad (14)$$

$$(M_y + m)\ddot{y} + m\ddot{\theta}_y + D_y\dot{y} = f_y \quad (15)$$

$$(M_l + m)\ddot{l} + D_l\dot{l} - mg = f_l \quad (16)$$

$$l\ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g\theta_x = 0 \quad (17)$$

$$l\ddot{\theta}_y + \ddot{y} + g\theta_y = 0 \quad (18)$$

이러한 선형 동적모델은 travel 동적 방정식인 식(14)와 식(17), traverse 동적 방정식인 식(15)와 식(18), 그리고 독립적인 하중의 호이스트(hoisting) 동적 방정식인 식(16)으로서 구성되어짐을 알 수 있다.

3. ATC 시스템의 경로계획 방법

3.1 경로계획의 문제설정

일반적으로, ATC 시스템이 컨테이너를 야드 내에서 화물을 내리거나 올릴 경우에 Fig. 2 에서 보여지는 것처럼 5 가지의 동작으로서 구분될 수 있다. 특히, AB 구간은 B 지점까지의 호이스트의 수직운동만 존재하며, 최대 수직속도만 가진다. BC 구간은 트롤리의 속도가 0 에서 최대로 증가하며, 반대로 호이스트의 속도는 최대에서 최소로 줄어든다. C 지점에서는 흔들림 각이 가급적 0 이 되어야 하고, CD 구간은 흔들림 각이 적게 존재하면서 트롤리의 최대 수평적 이동만 존재하게 된다. 그 이외의 구간인 DE 와

EF 구간은 AB 구간과 BC 구간의 반대동작을 가지게 된다.

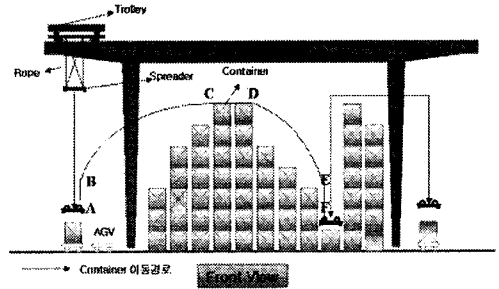
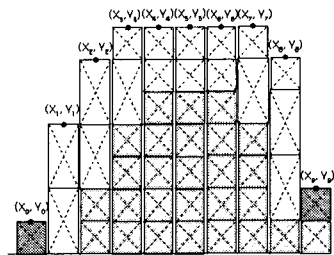


Fig. 2 Each transportation path of an ATC

이 논문에서는, 이와 같은 트롤리의 이동 경로문제를 바탕으로 하여 컨테이너가 가장 빠르게 다른 컨테이너와의 충돌 없이 최적의 경로로서 이동하는 문제를 제기하고자 한다. 따라서, 컨테이너 이송을 위한 최적경로(optimal path)을 설정하기 위한 충돌회피경로는 추종함과 동시에 최단시간 내에 컨테이너를 이송하기 위한 정밀주행 알고리즘을 개발하고자 한다^{7,8}.

3.2 경로검색 및 최소거리 계산



■ : Target container □ : Container profile ⊕ : The space for anti-collision

Fig. 3 An imaginary transportation path and an ATC profile

먼저, 야드 지도개념을 적용하여 컨테이너 운송할 때 야드 내에 적재되어 있는 컨테이너 및 기타 시설물들과 충돌하지 않기 위한 경로탐색 방법은 다음과 같이 구성된다.

- ① 먼저, 야드 내의 각종 장애물 분포를 나타내는 야드 지도를 작성하여야 한다. Fig. 3 에서 보이는 것처럼, 지도를 작성하기 위하여 직육면체의 2 차원 격자들을

사용하였고 야드를 분화하여 각 격자에 고유번호를 부여하는 방법을 사용한다.

- ② 야드 내의 지도에 표시된 적재 컨테이너의 주변을 크레인 이 이동하는 컨테이너 크기만큼 확장하여 컨테이너를 하나의 점으로 표시하는 형상공간기법을 이용하여 야드 내 지도를 탐색공간형태로 재작성한다.
- ③ 야드 공간 내에서 충돌회피경로를 탐색하기 위하여, 본 논문에서는 여러 가지 탐색방법 중에서 경험적 지식을 바탕으로 하여 목표점을 찾아갈 수 있는 최적 우선방법을 채택하였다.

이러한 경로탐색 방법을 사용하여 목표점을 효율적으로 찾기 위해서는 평가함수(evaluation function)의 선정해야 하는데, 본 연구에서 평가함수를 다음과 같이 선정하였다.

$$F = \alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2 + \alpha_3 d_3 \quad (19)$$

여기에서, 가중치(weight value) $\alpha_i (i=1,2,3)$ 는 야드 상태에 따라 함수값 d_i 의 중요도가 변화하게 되므로 이를 고려하여 설정한다. 그리고 함수값 d_i 는 다음과 같이 정의된다.

- ① d_1 : 이동가능한 인접노드 t 에서 목표노드 G 까지의 거리를 XY 평면상에 투영한 값으로 정의한다.

$$d_1 = \sqrt{(x_G - x_t)^2 + (y_G - y_t)^2} \quad (20)$$

- ② d_2 : XY 평면상에 투영되어진 인접노드에서 출발노드와 목표노드를 연결하는 선분까지의 수직거리로 정의된다. 이때 XY 평면에서의 출발노드와 목표노드를 연결하는 직선방정식은 식(21)과 같다.

$$\begin{aligned} ax + by + c &= 0 \\ a &= y_G - y_S, \quad b = x_S - x_G \\ c &= (x_G - x_S)y_S - (y_G - y_S)x_S \end{aligned} \quad (21)$$

이때, d_2 의 값은 다음과 같이 유도된다.

$$d_2 = \frac{|ax_t + by_t + c|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (22)$$

- ③ d_3 : 직진노드 p 와 현재노드 n 이 이루는 직선 L_1 과 현재노드와 인접노드가 이루는 직선 L_2 가 형성하는 각도로 정의된다.

$$\begin{aligned} L_1: \frac{x-x_p}{l_1} &= \frac{y-y_p}{m_1} = \frac{z-z_p}{n_1} = t_1 \\ L_2: \frac{x-x_p}{l_2} &= \frac{y-y_p}{m_2} = \frac{z-z_p}{n_2} = t_2 \end{aligned} \quad (23)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} l_1 &= x_n - x_p, \quad l_2 = x_t - x_n \\ m_1 &= y_n - y_p, \quad m_2 = y_t - y_n \\ n_1 &= z_n - z_p, \quad n_2 = z_t - z_n \end{aligned} \quad (24)$$

또한 각도 d_3 값은 식(25)로서 표현된다.

$$\cos d_3 = \frac{l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2} \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}} \quad (25)$$

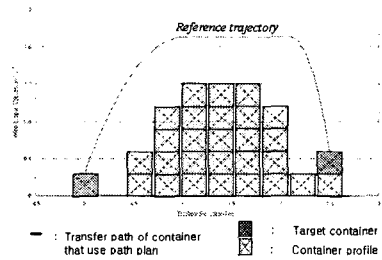


Fig. 4 The path search of reference trajectory for an ATC profile

특히, 평가함수에 사용된 가중치 $\alpha_i (i=1,2,3)$ 을 선택하는 방법에 따라 충돌회피경로가 다르게 선정되며, 평가함수의 값이 최적일 수 있는 경로를 구할 수 있게 된다. 따라서 평가함수에서 제시된 d_1 항은 목표노드를 찾아갈 수 있는 접근성을 보장하기 위한 것이고, d_2 항은 설정하고자 하는 경로가 출발점과 목표점이

직선으로부터 멀리 벗어나지 않도록 하기 위한 것이며, 마지막으로 d_3 항은 설정된 노드들을 연결하는 직선들에 대한 방향각의 변화량이 작은 경로를 선택하기 위하여 설정하였다. 그러므로 식(19)와 같은 평가함수를 사용함으로써, 주어진 야드 환경 내에서 최적의 충돌회피경로를 설정할 수 있을 것이다.

4. 신경회로망 예측 PID 제어기의 설계

4.1 PID 제어기

본 연구에서 고려되어진 ATC 시스템의 제어법으로서, 외란을 고려하지 않는 일반적인 경우에는 P 나 PI 제어기와 같은 단순한 제어법으로도 충분히 제어할 수 있음에도 불구하고, 설정치가 변화하거나 풍향과 같이 예측할 수 없는 환경변화에 대하여 원활한 제어가 어려우므로 운전자의 작업환경에 그만큼의 부담을 주게 됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서, 우리는 설정치 추종성능뿐만 아니라 외란제거 능력도 매우 우수한 것으로 알려진 2 자유도 PID 제어기를 Fig. 5 와 같이 피드백형(feedback type)으로 구성하여 ATC 시스템의 위치 및 운반물의 흔들림 제어계를 적용하는 문제를 연구하였다.^{8,9}

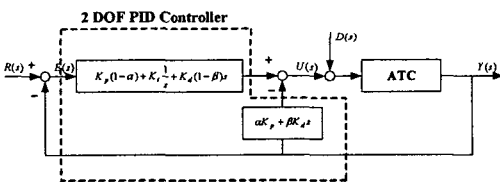


Fig. 5 PID controller with 2 DOF for an ATC

먼저, Fig. 5 에서 제어기 출력 $U(s)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(s) = E(s) \left\{ K_p(1-\alpha) + \frac{K_i}{s} + (1-\beta)K_d s \right\} - (\alpha K_p + \beta K_d s) Y(s) \quad (26)$$

단, K_p , K_i , 그리고 K_d 는 각각 PID 제어기의 이득(gain)이고, $Y(s)$ 는 트롤리 최종위치 및 운반물의 진동각으로 설정하였으며, α 와 β 는

여러가지 형태의 PID 제어기 변형을 유도하는 파라미터이다. 본 논문에서는, 2 자유도 PID 제어기 설계에 필요한 파라미터들을 NN 으로서 자기동조 하였으며, 위치오차, 로프의 길이오차 및 흔들림 오차에 대한 제어기를 각각 구성하여 15 개의 파라미터들을 추정하였다. 또한 외란 $D(s)$ 는 다음과 같이 항상 일정한 주기를 가지는 풍향을 고려하였다.

$$F_\omega = p(3\sin \omega t + 7\sin 2\omega t + 5\sin 3\omega t + 4\sin 4\omega t) \quad (27)$$

단, ω 는 바람의 기본주파수(fundamental frequency of wind)이고 p 는 바람의 크기(wind magnitude)를 나타낸다.

4.2 NN 모델링 및 예측 시스템

NN 예측시스템은 플랜트에 대한 모델링 학습이 이루어진 후에 학습된 NN 에 현재의 입출력 정보를 바탕으로 예측시스템을 구성할 수 있다.⁶ 이러한 NN 의 모델링 학습에 대한 블록선도는 Fig. 6 에서 나타내어지고, NN 모델링은 플랜트의 입력을 동일입력으로 NN 에 인가하여 플랜트의 출력과 NN 의 출력에 대한 오차를 주어진 학습법에 의해 줄여가는 것을 의미한다. NN 의 입력은 플랜트의 현재 입력뿐만 아니라 플랜트의 지연된 입출력까지 인가함으로써 플랜트의 동특성을 잘 내포할 수 있는 모델을 얻을 수 있다.

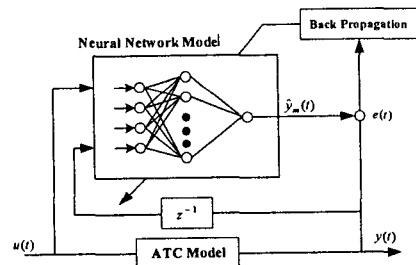


Fig. 6 Modeling of neural network

NN 모델이 플랜트의 동특성을 충분히 내포할 수 있도록 학습이 완료되면, NN 모델은 예측기로 구성할 수 있다. 이러한 NN 예측기의 구조는 Fig. 7 에서 나타내어진다.

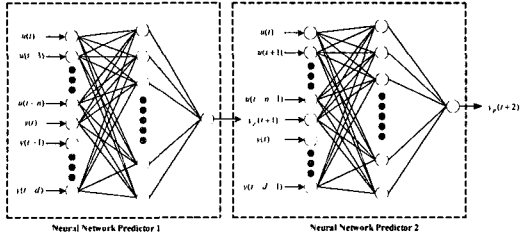


Fig. 7 Structure of neural network predictor

Fig. 7 에서 나타내어진 NN 예측기는 플랜트의 현재 입출력을 입력정보로 하여 플랜트에 대한 미래출력을 예측할 수 있고, NN 을 직렬로 구성하여 다단계 예측기도 구성을 할 수 있다.

4.3 신경회로망 예측 PID 제어기

Fig. 8 은 본 논문에서 제안되어진 NNP PID 제어 시스템의 블록선도로 나타낸 것이다. 시스템의 구성은, NNP 와 PID 제어기 그리고 제어기의 파라미터를 산출하는 NN 자기동조(self-tuner)로 나눌 수 있다. NNP 는 NN 모델에 플랜트의 현재 입출력을 입력정보로 하여 플랜트의 미래출력을 예측하며, 산출된 예측출력과 플랜트의 현재출력에 대한 오차를 보상하기 위해 NN 자기동조는 온라인(on-line) 학습을 통해 제어기의 파라미터를 산출하게 된다.

일반적으로, PID 제어기는 선형제어기로서 구현하기가 쉽고 구조가 간단하여 널리 이용되어 있지만 플랜트가 비선형성을 많이 내포하거나 외란이나 시스템 자체의 노화로 인한 플랜트의 동특성이 변화하는 경우에는 제어기기의 파라미터를 재조정해야 하는 어려움도 가지고 있다. 따라서, 적응성이 요구되는 제어 시스템의 동작점에서는 충분한 제어성능을 발휘하지 못한다.

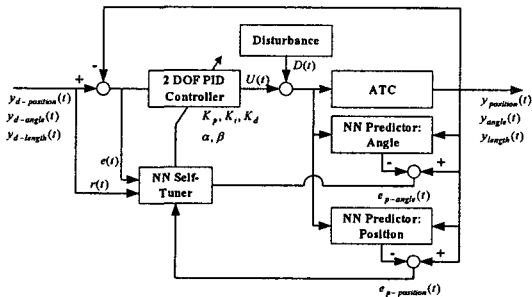


Fig. 8 A block diagram of NNP PID controller

본 논문에서는 이러한 문제점들을 보완하기 위하여, NN 을 이용하여 PID 제어기의 파라미터들을 자기동조방식으로 산출하게 된다. Fig. 9 는 이러한 NN 자기동조의 구조를 나타내고 있다. 여기에서, NN 학습을 위하여 모멘텀 오차 역전과 학습 알고리즘을 이용하였으며, 입력층 벡터는 오차, 오차의 변화, 그리고 목표치로 하였고 출력은 PID 파라미터들로 구성되었으며 Fig. 9 의 우측 파라미터들을 의미한다.

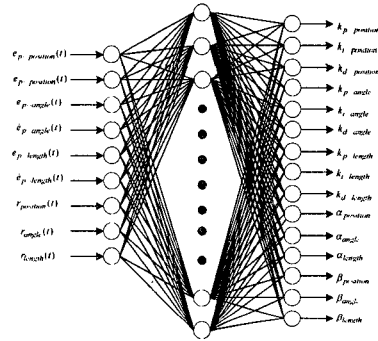


Fig. 9 Neural network self-tuner

이때 PID 제어기의 제어입력은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u(t) = & \{(1-\alpha_p)k_{p_p}(e_p(t)-e_p(t-1))+k_{i_p}e_p(t) \\
 & + (1-\beta_p)k_{d_p}(e_p(t)-2e_p(t-1)+e_p(t-2))\} \\
 & + \{(1-\alpha_a)k_{p_a}(e_a(t)-e_a(t-1))+k_{i_a}e_a(t) \\
 & + (1-\beta_a)k_{d_a}(e_a(t)-2e_a(t-1)+e_a(t-2))\} \\
 & + \{(1-\alpha_l)k_{p_l}(e_l(t)-e_l(t-1))+k_{i_l}e_l(t) \\
 & + (1-\beta_l)k_{d_l}(e_l(t)-2e_l(t-1)+e_l(t-2))\} \\
 & - \{\alpha_p k_{p_p}(y_p(t)-y_p(t-1)) \\
 & + \beta_p k_{d_p}(y_p(t)-2y_p(t-1)+y_p(t-2))\} \\
 & - \{\alpha_a k_{p_a}(y_a(t)-y_a(t-1)) \\
 & + \beta_a k_{d_a}(y_a(t)-2y_a(t-1)+y_a(t-2))\} \\
 & - \{\alpha_l k_{p_l}(y_l(t)-y_l(t-1)) \\
 & + \beta_l k_{d_l}(y_l(t)-2y_l(t-1)+y_l(t-2))\} \quad (28)
 \end{aligned}$$

단, 식 (28)에서 사용되어진 파라미터들은 Fig. 9 에서 기술되어진 파라미터들의 아래첨자의 첫글자 부분으로서 간략하게 기술한 것이며 특히 $e_{p-position}(t)$, $e_{p-angle}(t)$, $e_{p-length}(t)$ 는 각각

$e_p(t)$, $e_a(t)$, $e_l(t)$ 로써 기술되어짐에 유의하자. 또한 식 (28) 부분에 대한 평가함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

식(29)에서 나타내어진 오차함수 E 는 하중값을 조정하기 위하여 최소화되어질 수 있다. 특히, 최급경사법에 의해 출력층과 은닉층의 가중치는 식(30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} [y_{d-position}(t) - x(t)]^2$$

$$E = \frac{1}{2} [\theta_{d-angle}(t) - \theta(t)]^2 \quad (29)$$

$$E = \frac{1}{2} [y_{d-length}(t) - y(t)]^2$$

$$\Delta W_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} + \varepsilon \Delta W_{jk}(t-1) \quad (30)$$

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} + \varepsilon \Delta W_{ij}(t-1)$$

단, η 는 학습률(learning rate)이고 ε 는 모멘텀 상수(momentum constant)이다. 이때 출력층의 오차신호는 다음과 같다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k}$$

$$= -\frac{\partial E}{\partial y(t+1)} \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} \frac{\partial u(t)}{O(k)} \frac{\partial O(k)}{\partial net_k} \quad (31)$$

단,

$$net_k = \sum_j W_{jk} O_j + \theta_k \quad (32)$$

$$o_{pj}(k) = f_j(net_{pj}) = f_j(\sum_j w_{ji} o_j) \quad (33)$$

또한 연쇄법칙(chain rule)을 사용하여 은닉층과 출력층의 가중치를 다음과 같이 변형한다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \eta \delta_k O_j + \varepsilon \Delta W_{jk}(t) \quad (34)$$

5. 실험

5.1 ATC 시스템의 구성

본 논문에서 제작된 ATC 시뮬레이터는 Fig. 10 에서 나타내어진 것처럼, 총 크기는 $W3580 \times D540mm \times H1640mm$ 이고 본 실험에 사용되어진 컨테이너는 $W600 \times D240 \times H130mm$ 로 제작되었다. 또한 본 실험장치의 구성도는 Fig. 11 에서 보여지는 것처럼 크게 제어부, 구동부, 통신부, 그리고 센서부인 4 가지 부분으로 나눌 수 있다. 특히, 주행오차에 대한 정보는 RS232 통신을 통하여 DSP 로 전송되어 제어기 구동에 필요한 정보를 교환하도록 구성되었고, DSP 에서는 제어 알고리즘과 트롤리와 호이스트의 거리와 위치 등에 대한 엔코더 데이터를 수신하여 각 모터의 구동신호를 발생시키도록 구성하였다.



Fig. 10 Structure of an ATC simulator system

Fig. 11 에서 구성되어진 ATC 시스템의 자동주행 제어 동작과정을 살펴보면, 흔들림은 포텐션미터를 이용하여 흔들림 각을 측정하였고, 트롤리 구동모터에 달린 엔코더로 위치를 산출하였으며 DSP 에서 up/down 카운터하여 PC 로 입력한다. PC 는 입력 받은 측정값으로부터 제어입력을 계산하고, 이렇게 계산된 제어입력을 다시 DSP 를 통하여 모터로 속도 명령을 내보내게 되는 것이다.

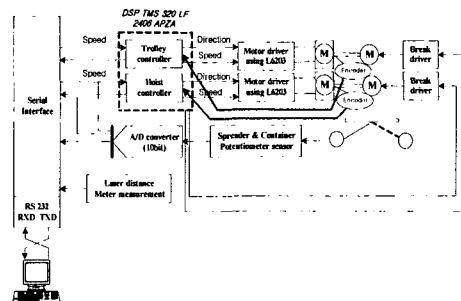


Fig. 11 Schematic diagram of an ATC system

5.2 NN 모델의 학습 및 테스트

시스템 예측을 위해 Fig. 8 에 나타난 바와 같이 두 NN 모델을 구성하였으며, 이에 대하여 학습하였다. 또한 그 특성을 잘 내포하고 있는지 확인하기 위하여 동정결과를 테스트하였다. 흔들림과 위치에 대한 NN 모델의 학습관련 파라미터들은 다음과 같다.⁹

- Hidden Layer Size: 38
- No. Delayed Plant Inputs: 3
- No. Delayed Plant Outputs: 8
- Training samples: 10000
- Epochs: 50

두 NN 모델에 대하여 10000 쌍의 학습데이터는 각각 Fig. 12, 13 에 나타내었다. NN 위치 모델은 바로 위치값을 출력으로 이용할 경우, 학습시 랜덤 입력에 대한 출력 범위가 광범위하게 나타나 학습 회수에 비해 그 특성을 잘 내포하지 못하였다.

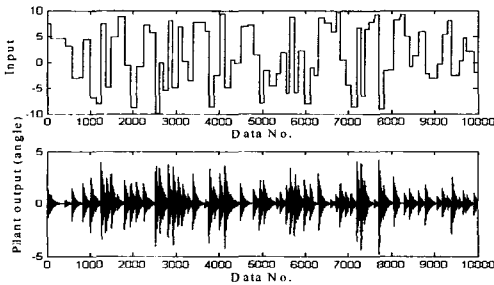


Fig. 12 Training data for NN angle model

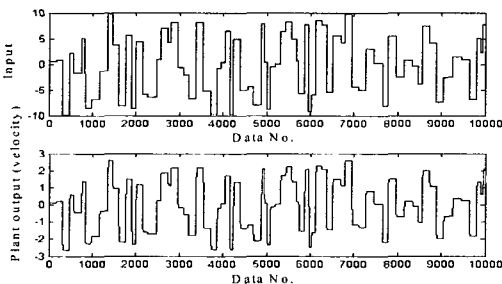


Fig. 13 Training data for NN position model

따라서 본 논문에서는 NN 모델의 출력을 속도라고 두고 학습시켰으며, 그 출력을 적분기를 이용하여

위치를 계산하도록 하였다. 또한 두 NN 모델의 학습후 실제모델과의 비교를 위하여 테스트한 결과를 Fig. 14, 15 에 각각 나타내었다. 모두 오차는 10^{-6} 안에서 존재하므로 실제 모델과의 차이를 거의 보이고 있지 않다고 할 수 있다.

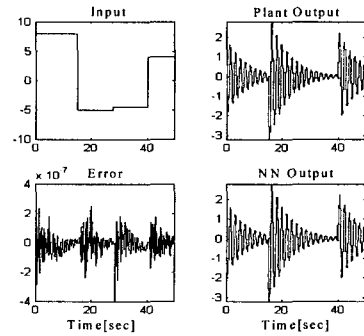


Fig. 14 Test result of NN angle model

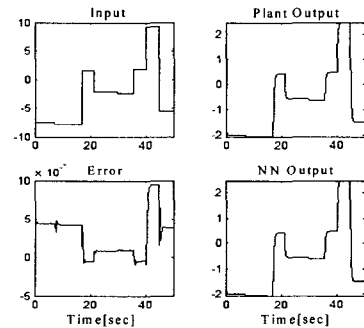


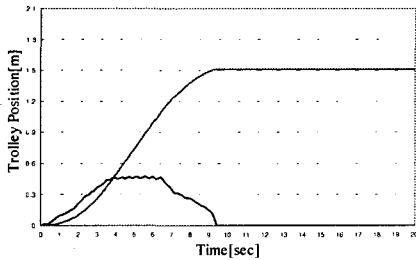
Fig. 15 Test result of NN position model

5.3 실험결과

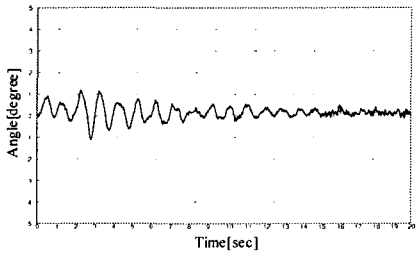
이전의 연구에서, 우리는 제안된 NNP PID 제어기의 성능평가를 위하여 PID 제어기와 NN PID 제어기를 트롤리의 위치 이동시 와이어 로프에 매달린 컨테이너의 흔들림에 대한 외란을 적용하였을 때에 대한 모의실험을 통하여 성능을 비교 분석하였다. 특히 이러한 모의실험 결과에서, 우리는 제안되어진 NNP PID 제어기의 결과가 트롤리 위치와 흔들림 각에 대하여 Es-tuned PID 제어기보다 각각 91.8%, 58.7%, 그리고 NN PID 제어기보다는 각각 60.1%, 48.3%의 성능개선이 이루어짐을 확인하였다.⁷

본 논문에서 수행된 실험결과는, 일반적인 PID 제어기와 본 연구에서 제안된 NNP PID 제어기를

이용한 컨테이너 위치 및 진동제어 그리고 외란 및 컨테이너 하중변화에 대한 결과를 비교 분석하였다. 특히, 먼저, 로프 길이와 컨테이너 하중 변화를 적용하지 않은 경우에 대한 두 가지 제어기에 대한 성능분석을 각각 Fig. 16 과 Fig. 17 에서 나타낸다.



(a) trolley position[m]

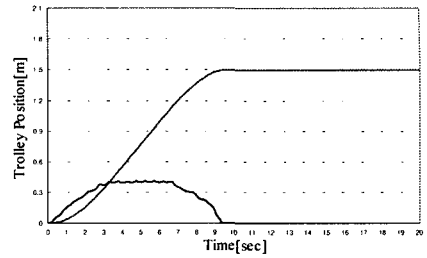


(b) angle[degree]

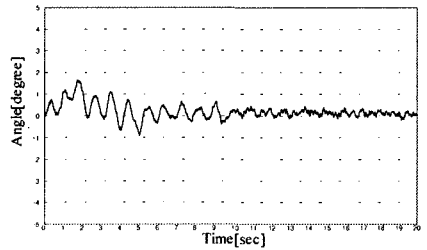
Fig. 16 Response characteristics of PID control

이러한 실험결과들에서 사용된 컨테이너 하중은 10[kg]일 때 ATC 시스템의 최종 목표치를 1.5[m], 초기 진동각을 0[degree]으로 설정하여 트롤리의 목표위치의 추정상태를 실험한 결과이다. 또한 이러한 결과들을 비교해보면, 흔들림 각의 끝부분(peak)의 경우에 NNP PID 제어기가 PID 제어기보다 약 0.0252[degree]만큼의 흔들림을 더 가지지만, 흔들림 각의 크기는 NNP PID 제어기가 약 0.0978[degree]정도 감소되어짐을 알 수 있다.

Fig. 18 과 Fig. 19 는 로프 길이를 변화하지 않고 컨테이너 하중 변화를 적용한 경우에 대한 제어기들의 성능 분석을 나타낸 것이다. 이때, 사용된 컨테이너 하중은 15[kg]으로 설정하여 실행하였다.

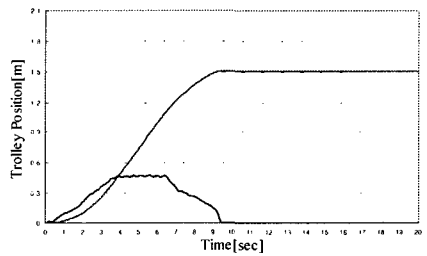


(a) trolley position[m]

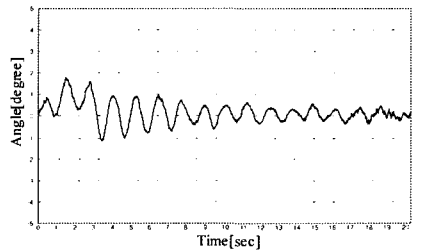


(b) angle[degree]

Fig. 17 Response characteristics of NNP PID control



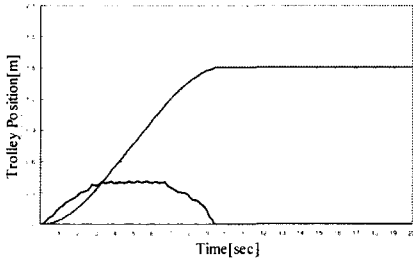
(a) trolley position[m]



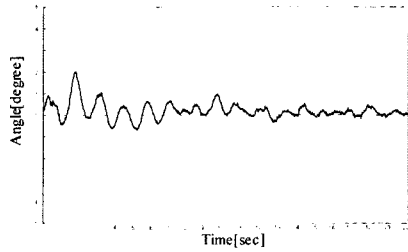
(b) angle[degree]

Fig. 18 Response characteristics of PID control

특히 Fig. 19 에서, 우리는 NNP PID 제어기의 성능이 흔들림 각과 흔들림 각의 크기에서 기존의 PID 제어기보다 각각 0.2252[degree], 0.294[degree] 정도 감소되어짐을 알 수 있다.



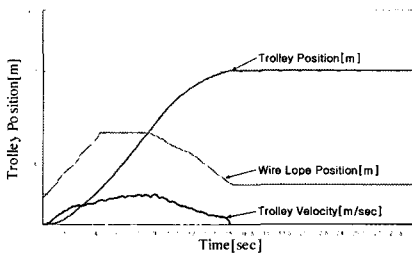
(a) trolley position[m]



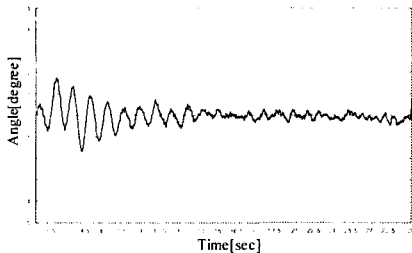
(b) angle[degree]

Fig. 19 Response characteristics of NNP PID control

마지막으로, 로프의 길이와 컨테이너의 하중 변화를 적용한 경우에 대한 제어기들의 성능분석 결과는 Fig. 20 과 Fig. 21 에서 각각 나타내어진다.

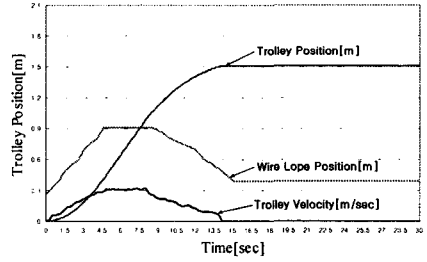


(a) trolley position[m]

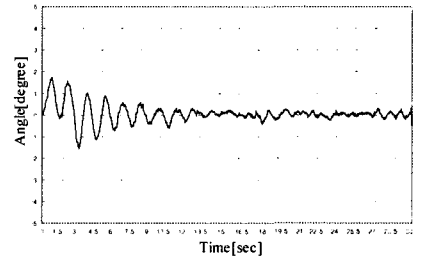


(b) angle[degree]

Fig. 20 Response characteristics of PID control



(a) trolley position[m]



(b) angle[degree]

Fig. 21 Response characteristics of NNP PID control

이 실험에서, 컨테이너 하중은 15[kg], ATC 시스템의 최종 목표치를 1.5[m]로 그리고 초기 진동각은 0[degree]으로 설정하였다. 이때 적재되어진 컨테이너를 회피하면서 트롤리를 0.26~0.91[m]까지 이동시키면서 변화시킬 때, 트롤리의 목표위치까지 이동하면서 추종상태를 각각 실험하였다. 또한 이러한 실험결과들에 대한 주요 구동특성들을 PID 제어기와 NNP PID 제어기를 비교 분석하면 다음과 같은 Table 1 로서 간략하게 나타낼 수 있다.

Table 1 Comparison performances between PID control and NNP PID control

Response characteristics	PID	NNP PID
Position settling time[sec]	14.95	14.20
Position error[m]	0.005785	0.004992
Swing angle[degree]	-1.6704 ~ 1.7302	-1.4896 ~ 1.7248
Amplitude of swing angle[degree]	-0.3376 ~ 0.2994	-0.3430 ~ 0.2450

위에서 기술된 각 제어기의 성능들을 비교해보면, 흔들림 각의 끝부분의 경우에 본 논문에서

제안되어진 2 자유도를 가진 NNP PID 제어기가 일반적인 PID 제어기보다 0.1826[degree]정도 감소되었음을 알 수 있다. 또한 흔들림 각의 크기도 NNP PID 제어기가 PID 제어기보다 약 0.049[degree]정도 감소하였다.

6. 결론

본 논문에서, 우리는 ATC 시스템의 무인 자동화를 위한 컨테이너 이동의 최적경로 설정 및 컨테이너 입출장소와 적재장소를 연결하는 충돌회피경로를 효율적으로 검색할 수 있는 알고리즘 개발과 설정된 충돌회피경로를 추종함과 동시에 최단시간 내에 컨테이너 이송작업을 완료하기 위한 제어기로서 2 자유도 PID 제어기를 구성하였다. 또한 주어진 시스템의 컨테이너를 이송할 때 적재된 컨테이너와 충돌을 방지할 수 있는 이동경로를 검색하기 위한 방법으로 최적우선탐색법을 이용하였다.

그리고 제안되어진 제어기의 파라미터를 NN 을 이용하여 동조하는 NNP PID 제어기를 설계하였고, 제안되어진 제어법의 유효성을 검증하기 위하여 PID 제어기와 비교한 실험결과를 보여주었다. 이러한 실험결과들에서, 우리는 일반적인 PID 제어기보다 본 논문에서 제안되어진 NNP PID 제어기로서 흔들림 각과 트롤리가 목표점에 도달한 후의 흔들림 각의 크기에 대하여 각각 약 6%와 8%정도의 성능을 개선할 수 있었다.

추후의 연구과제로는, 시뮬레이터를 이용한 실험의 한계성을 극복하기 위하여 실제크기의 ATC 시스템에 제안되어진 제어법을 실행해야 할 것이고, 본 실험에서 사용되어진 DC 서버모터가 아닌 현재 실제 크레인에서 사용되고 있는 AC 모터에 대한 연구가 수행되어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Sakawa, Y. and Shindo, Y., "Optimal Control Container Crane," Trans. on IFAC, Vol. 18, No. 3, pp. 257-266, 1982.
2. Werbos, P. J., "Neural Networks and Human Mind; New mathematics fits humanistics insight," Trans. on IEEE Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 1, pp. 78-83, 1992.
3. Lee, J. K., Park, Y. J., Lee, S. R., "Development of a motion control algorithm for the automatic operation system of overhead cranes," Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 20, No. 10, pp. 3160-3172, 1996.
4. Lee, H. H., "Modeling and Control of a Three-Dimensional Overhead Crane," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, No. 4, pp. 471-476, 1998.
5. Kwok, K. S. and Drissen, B. J., "Path Planning for Complex Terrain Navigation via Dynamic Programming," Proc. of the American Control Conference, pp. 2941-2944, 1999.
6. Tag, Y., Su, C. Y., Cauwenbergh, A. V., "Neural Network Based Smith Predictive Control for Nonlinear Process with Time-delay," Proc. Of Asian Control Conference, pp. 315-320, 2000.
7. Sohn, D. S., Lee, J. W., Lee, Y. J., Lee, K. S., "A Study on Development ATCS of Transfer Crane using Neural network Predictive Control," J. of Korean Navigation and Port Research, Vol. 26, No. 5, pp. 537-542, 2002.
8. Sohn, D. S., Min, J. T., Lee, J. W., Lee, J. M., Lee, K. S., "A Study on Development of ATCS for Automated Transfer Crane using Neural Network Predictive PID Controller," Proc. of SICE Annual Conference, pp. 3170-3175, 2003.
9. Lee, Y. J., Suh, J. H., Lee, K. S., "A Study on Driving Control of an Autonomous Guided Vehicle using Humoral Immune Algorithm Adaptive PID Controller based on Neural Network Identifier Technique," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2004, Accepted.