

지하매설파이프 검사로봇의 적응퍼지 위치 제어

김 도우\*, 양 해원  
한양 대학교 전기공학과\*

A Adaptive and Fuzzy control of Inspection robot for Underground Pipes

Do-woo Kim\*, Hai-won Yang  
Dept. of Elec. Eng. , Hanyang University\*

**Abstract** - In this paper, we present a robust motion controller based on Adaptive-Fuzzy technique is proposed that multifunctional vehicle(MVR) for two DOF mobile robot can perform detailed inspection of physical conditions of sewage pipes as well as can effectively repair the damaged portions of the inner walls. The main difficulties in controlling this multifunctional robot vehicles lie in the fact that vehicles usually have three degrees of freedom in position and orientation in spite of having only two degrees of freedom for motion control in tracking mode. Decomposition of error between the reference posture and the current posture makes control of speed and steering possible. The Gyro compass part and Inclonometer of the robot is configured in order to realize position of robot. The proposed Adaptive-Fuzzy motion controller has two main characteristics: The one guarantees that the MVR follows the reference trajectory; the other one compensates the dynamics of the MVR. Simulation results are provided to validate the proposed controller. Experiments have been used to verify the effectiveness and robustness of the motion controller.

자유도가 높으며, 예기치 않은 불확실성 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는 적응퍼지 제어기 [4],[5],[6],[7]를 이용하여 기준궤적 추종에 따른 검사로봇의 센서 측정잡음, 외란과 불확실성 문제에 강인성을 갖도록 한다.

2. 본 론

2.1 검사로봇 이동부 시스템 모델링

본 논문의 2자유도 바퀴구동 검사로봇 이동부는 변형되지 않는 바퀴를 장착한 견고한 구조로 만들어진 장치로서 로봇의 위치는 식(2.1)과 같은 위치차표 벡터 P로 나타낸다.

$$P = [x \ y \ \theta]^T \tag{2.1}$$

여기서,  $x, y$  는 그림 1과 같은 고정된 수직관성 좌표계  $\{l_x, l_y\}$  상에 로봇의 측정위치점 P의 좌표를 나타내며,  $\theta$ 는 수직관성 좌표계의  $l_x$ 축에 대한 로봇의 운동좌표계  $\{l'_x, l'_y\}$ 의 방위각을 나타낸다.

1. 서 론

최근 지하수와 토양의 오염문제를 야기하는 파손된 하수관을 보수하기 위한 지하매설파이프 검사 원격조작 로봇의 개발이 본격화되고 있다. 따라서, 이러한 검사로봇이 하수관내의 현재 자세를 정확히 판단하며 원하는 경로대로 조향하며 주행하는 것이 필요하다. 그러나, 로봇 주행시 관의 대칭성으로 인해 관의 중심축에 대하여 주행중 로봇이 회전하거나 관로 내부의 예기치 않은 장애물 발생으로 인하여 초기 장입상태의 위치가 변위된다. 그러므로, 이러한 검사로봇 위치 추종 문제에 대하여 재빨리 대처하는 추종제어가 필요하다. 본 논문의 검사로봇은 두 개의 AC서보 모터로서 차동으로 바퀴를 구동하여 조향을 하는 2자유도 바퀴 구동로봇이다[1][2][3]. 일반적으로 바퀴 구동로봇의 위치는 위치차표 벡터  $P = (x, y, \theta)^T$ 로 나타내며,  $x, y$ 는 수직고정좌표계  $\{l_x, l_y\}$  상에서 로봇의 중심점을 나타내고,  $\theta$ 는 로봇의 운동좌표계  $\{l'_x, l'_y\}$ 의 로봇 방위각을 나타낸다. 따라서, 본 검사로봇의 위치제어는 위치측정 센서인 인크로노메터를 이용하여 측정된 현재위치 P에서 구성된 정적위치상태가 기준위치  $P_r$ 을 하는 추종제어이다. 추종 오차에 의한 상태식은 구동방향 오차와 이에 수직하는 측면방향 오차 그리고 방위각 오차로 구성되며, 이에의해 검사로봇의 속도와 조향 제어하는 제어 입력  $v = (v \ \omega)^T$ 를 설계한다. 따라서, 본 검사로봇 시스템의 이동부에서는 검사로봇의 근사모델에 의한 비선형성에 적응이 용이하고, 보다 더

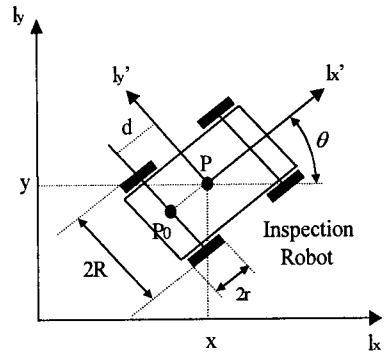


그림 1. 검사로봇 위치좌표계

그리고, 검사로봇의 두 차동바퀴에 의한 조향은 구동방향  $l'_x$  축에 수직인  $l'_y$  축의 범위로 한정한다[1].

$$y \cos \theta - x \sin \theta - d \dot{\theta} = 0 \tag{2.1}$$

따라서, 검사 로봇을 측정위치점 P의 좌표에 대한 정적 위치상태 모델로 나타내면 식(2.2)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

여기서, 제어 입력 벡터  $v = (v \ \omega)^T$ 는 검사로봇의 속도와 조향 제어하는 보조제어입력으로서  $v$ 는 이동속도를  $\omega$ 는 조향각속도를 의미한다. (2.2)식의 정적위치상태  $P = (x, y, \theta)^T$ 가 기준 위치  $P_r = (x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref})^T$ 와 기준속

도  $v_{ref} = (v_{ref}, \omega_{ref})^T$ 을 추종한다면, 이때 위치 추종 오차 벡터는 다음과 같다.

$$e_p = P_r - P = (e_x \ e_y \ e_\theta)^T \quad (2.3)$$

위의 추종 오차벡터를 방위각에 대하여 선형독립이 되도록 천이행렬  $T_c$ 에 의해 변형하면 식(2.4)와 같다.

$$T_c = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e_p^c = T_c e_p = (e_x \ e_y \ e_\theta)^T$$

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x \cos \theta + e_y \sin \theta \\ -e_x \sin \theta + e_y \cos \theta \\ e_\theta \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

여기서,  $e_p^c$ 는 검사로봇의 운동좌표  $\{l_x, l_y\}$ 상에서의 오차상태값이고,  $e_x$ 는 구동방향 오차,  $e_y$ 는  $e_x$ 에 수직하는 측면방향 오차 그리고  $e_\theta$ 는 방위각 오차를 나타낸다. 그리고, 식(2.4)의 검사로봇 운동좌표  $\{l_x, l_y\}$ 상의 위치오차를 미분상태식으로 나타내면 식(2.5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_y - v + v_{ref} \cos e_\theta - d\omega_{ref} \sin e_\theta \\ -e_x - d\omega + v_{ref} \sin e_\theta + d\omega_{ref} \cos e_\theta \\ \omega_{ref} - \omega \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

따라서, 식(2.5)에서 적절한 속도제어입력  $v = (v \ \omega)^T$ 를 식(2.6)과 같이 정하면

$$v = [f_x(e_x, e_y, e_\theta, v_{ref}, \omega_{ref}), f_\omega(e_x, e_y, e_\theta, v_{ref}, \omega_{ref})]^T \quad (2.6)$$

현재위치  $P$ 는 기준위치  $P_r$ 로  $t \rightarrow \infty$ 에서  $P_r \rightarrow P$ 가 된다.

그런데, 식(2.5)의 미분상태식을 보면 위치오차의 성분중  $e_\theta$ 는 식(2.1)에서 정한 제약조건에 의해 구동방향에 수직하는 측면방향 오차  $e_y$ 의 조향위치를 직접적으로 결정하는 성분이다. 따라서,  $e_y$ 와  $e_\theta$  사이의 이러한 커플링관계는 그림 2와 같은 상관관계를 갖는다[1].

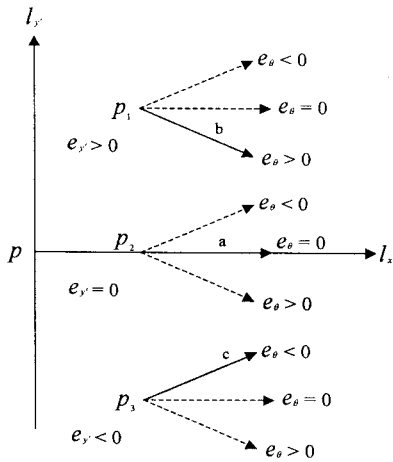


그림 2  $e_y$ 와  $e_\theta$ 의 상관관계

그림 2의  $p_1, p_2, p_3$ 중  $p_2$ 의  $a$  경우가  $e_y = 0$ 와  $e_\theta = 0$ 로 가장 이상적인 경우이다. 그러나, 실제의 경우에는 검사로봇이 기준체적을 따라 이동할 때 검사로봇이 회전하거나 판로 내부의 예기치 않은 장애물 발생으로 인한 외란이나 불확실성에의하여  $b$ 와  $c$ 의 경우가 발생된다. 따라서, 식(2.5)의 위치오차 미분상태식의  $e_y, e_\theta$ 가

$e_{y0} = 0, e_{\theta 0} = 0$ 로 추종되는 적절한 속도제어입력  $v = (v \ \omega)^T$  구하기 위해 인간의 사고와 많은 유사성을 가지고 있으며 실제계의 근사적이고 확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용되는 퍼지제어를 이용한다. 특히 본 논문에서는 [4]의 적응퍼지 제어를 이용하여 검사로봇의 위치 오차 근사모델에 의한 비선형성에 적용이 용이하고, 보나도 자유도가 높으며, 외란에 대하여 강한 제어입력을 설계한다.

## 2.2. 검사 로봇의 적응 퍼지 제어

먼저 제어대상 플랜트 식(2.5)이 식(2.7)과 같은  $n$ 차 비선형 방정식으로 표현된다고 가정한다.

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u \quad (2.7)$$

$$y = x$$

여기서,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ 는 측정가능한 상태벡터이고, 여기서  $f$ 와  $g$ 는 모르는 함수이다. 또한 이 시스템의 상대차수는  $n$ 이고, 식(2.5)이 제어가능하도록  $g(x) > 0$ 이라 가정한다

본질의 목적은 출력  $y = (e_y, e_\theta)^T$ 가 원하는 출력  $y_m = (e_{y0}, e_{\theta 0})^T$ 로 추종하도록, 퍼지 시스템에 근거한 제환 제어기  $u$ 와 파라미터 벡터  $\Theta$ 를 추정하는 적응칙을 구성하는 것이므로, 만약  $f$ 와  $g$ 를 정확히 알고 있다면, 검사로봇의 비선형성을 제거하고, 시스템의 모든근이 복소평면의 좌반면에 위치하도록 제어입력  $u^*$ 를 식(2.8)과 같이 정할 수 있다.

$$u^* = \frac{1}{g(x)} [-f(x) + y_m^{(n)} + k^T e] \quad (2.8)$$

여기서,  $y_m$ 는 원하는 출력이고,  $e = y_m - y$ ,  $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$ 는 오차벡터이며,  $k = (k_n, \dots, k_1)^T$ 는 상수행렬이다. 따라서, 식(2.8)의 제어입력을 식(2.7)에 대입하면 다음과 같은 페루프 시스템을 유도 할 수 있다.

$$e^{(n)} + k_n e^{(n-1)} + \dots + k_1 e = 0 \quad (2.9)$$

그러므로, 식(2.9)의 페루프 시스템에 상수벡터  $k$ 를 잘 선정하면  $t \rightarrow \infty$ 에 따라  $e(t) \rightarrow 0$ 으로 되고, 플랜트 출력  $y$ 도 점진적으로 원하는 출력  $y_m$ 에 도달하게 된다. 그러나,  $f$ 와  $g$ 를 정확히 알 수 없기 때문에 식(2.9)과 같은 이상적인 페루프 시스템을 갖는 이상적인 제어입력인 식(2.8)을 구성할 수 없다. 따라서, 퍼지 If-Then 규칙에 의해  $f$ 와  $g$ 사이의 입출력관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\text{If } x_1 \text{ is } F_1^r \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^r, \text{ Then } f(x) \text{ is } C^r \quad (2.10)$$

$$\text{If } x_1 \text{ is } G_1^s \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } G_n^s, \text{ Then } g(x) \text{ is } D^s \quad (2.11)$$

여기서,  $F_s^r, C^r, G_s^s, D^s$ 는 퍼지집합들이고,  $r=1, 2, \dots, L_f$ ,  $s=1, 2, \dots, L_g$ 이다. 퍼지시스템  $\hat{f}$ 와  $\hat{g}$ 는 실제 시스템  $f$ 와  $g$ 에 대한 부정확한 정보만을 가지고 있으므로 모델에 대한 정확한 근사가 불가능하다. 따라서,  $\Theta \in R^M$  이를 개선하기 위해  $\hat{f}$ 와  $\hat{g}$ 의 각각의 파라미터들,  $\Theta_g \in R^M$ 을 온라인 동작중에 자유롭게 변화시킨다. 그리고, 퍼지시스템을  $\hat{f}(x) = \hat{f}(x|\Theta_f)$ ,  $\hat{g}(x) = \hat{g}(x|\Theta_g)$ 라고 하고, 이를 식(2.8)의  $f$ 와  $g$ 대신 대입하면 다음과 같은 퍼지 제어를 구성 할 수 있다.

$$u^* = \frac{1}{\hat{g}(x|\Theta_g)} [-\hat{f}(x|\Theta_f) + y_m^{(n)} + k^T e] \quad (2.12)$$

파라미터  $\theta_f$ 와  $\theta_g$ 를 조정 할 수 있는 적응칙을 구성 하기 위해 식(2.12)을 식(2.7)에 대입하면 다음과 같은 폐루프 시스템이 유도된다.

$$\dot{e} = \Lambda e + b[\hat{f}(x|\theta_f) - f(x)] + [\hat{g}(x|\theta_g) - g(x)]u \quad (2.13)$$

여기서, 각 행렬값은 다음과 같다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \ddots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & \dots & \dots & -k_1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

최적 파라미터  $\theta_f^*$ ,  $\theta_g^*$ 를 식(2.15), 식(2.16)이라 할 때  $\hat{f}(x|\theta_f^*)$ ,  $\hat{g}(x|\theta_g^*)$ 는 각각  $f(x)$ ,  $g(x)$ 의 최적근사치이다.

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in R} [ \sup_{x \in R^n} |\hat{f}(x|\theta_f) - f(x)| ] \quad (2.15)$$

$$\theta_g^* = \arg \min_{\theta_g \in R} [ \sup_{x \in R^n} |\hat{g}(x|\theta_g) - g(x)| ] \quad (2.16)$$

그리고, 최소 근사오차를 식(2.17)와 같이 구성하면  $\omega = [\hat{f}(x|\theta_f^*) - f(x)] + [\hat{g}(x|\theta_g^*) - g(x)]u$  식(2.13)은 식(2.18)과 같이 된다.

$$\dot{e} = \Lambda e + b[\hat{f}(x|\theta_f) - \hat{f}(x|\theta_f^*) + [\hat{g}(x|\theta_g) - \hat{g}(x|\theta_g^*)]u + \omega] \quad (2.18)$$

따라서, 퍼지시스템  $\hat{f}(x|\theta_f) = \theta_f^T \mathcal{E}(x)$ ,  $\hat{g}(x|\theta_g) = \theta_g^T \Gamma(x)$ 가 다음과 같이 식(2.19), 식(2.20)를 만족할 때 식(2.18)은 식(2.21)이된다.

$$\mathcal{E}_{i_1 \dots i_n}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)}{\sum_{i_1=1}^{q_1} \dots \sum_{i_n=1}^{q_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i))} \quad (2.19)$$

$$\Gamma_{i_1 \dots i_n}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{B_i}(x_i)}{\sum_{i_1=1}^{q_1} \dots \sum_{i_n=1}^{q_n} (\prod_{i=1}^n \mu_{B_i}(x_i))} \quad (2.20)$$

$\dot{e} = \Lambda e + b[(\theta_f - \theta_f^*)^T \mathcal{E}(x) + (\theta_g - \theta_g^*)^T \Gamma(x)u + \omega]$  그러므로, 추종오차  $e$ 와 파라미터 오차  $\theta_f - \theta_f^*$ ,  $\theta_g - \theta_g^*$ 를 최소화하기 위한  $\theta_f$ 와  $\theta_g$ 의 적응칙을 구성하기 위해 식(2.22)과 같이 리아프노프 함수후보를 정한다.

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2\gamma_1} (\theta_f - \theta_f^*)^T (\theta_f - \theta_f^*) + \frac{1}{2\gamma_2} (\theta_g - \theta_g^*)^T (\theta_g - \theta_g^*) \quad (2.22)$$

여기서,  $\gamma_1, \gamma_2$ 는 양의 정수이고,  $P$ 는 식(2.23)를 만족하는  $P > 0$ 인 행렬이다.

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q \quad (2.23)$$

여기서,  $Q$ 는 임의의  $n \times n$ 을 갖는  $Q > 0$  행렬이다. 따라서, 식(2.21)의 폐루프 시스템에 대해 식(2.22)의 리아프노프 함수를 시간  $t$ 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{1}{2} e^T P e + e^T P b \omega \\ & + \frac{1}{\gamma_1} (\theta_f - \theta_f^*)^T [ \dot{\theta}_f + \gamma_1 e^T P b \mathcal{E}(x) ] \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (\theta_g - \theta_g^*)^T [ \dot{\theta}_g + \gamma_2 e^T P b \Gamma(x) u ] < 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

식(2.24)의 우변 첫째항은 음수이고, 최소 근사오차  $\omega$ 는 식(2.17)에 의해 작게 결정할 수 있으므로 식(2.24)을 음수이게하는 적응칙은 식(2.25), 식(2.26)과 같이 구성된다.

$$\dot{\theta}_f = -\gamma_1 e^T P b \mathcal{E}(x) \quad (2.25)$$

$$\dot{\theta}_g = -\gamma_2 e^T P b \Gamma(x) u \quad (2.26)$$

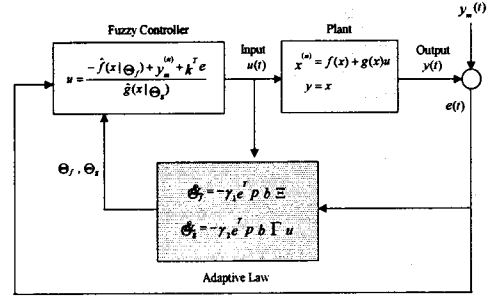


그림 3 검사로봇 적응퍼지 제어 블록도

### 2.3. 실험

본 검사로봇 시스템의 이동부는 모터의 관성모멘트가 작아야 하므로 기구부의 몸체재질은 가벼운 폴리우레탄 재질을 선택했다. 그리고, 바퀴축의 연결부분은 마찰을 줄여 바퀴의 회전성을 좋게하기 위하여 볼베어링을 사용하며, 바퀴의 회전중에 볼 베어링의 탈출을 방지하기 위해 볼베어링 부분에 단차기공을 한다. 본 이동부 시스템은 차동 바퀴구동을 위해 2개의 브러쉬리스 모터(1:60), 2개의 모터 드라이버(100W), 2채널 12비트 D/A보드, 2채널 16비트 A/D보드, 1스톱비트, 8데이타 비트의 9600보드레이트를 갖는 RS-232통신의 MEI보드가 PC 586에 장착된다. 따라서, 본 이동부 시스템은 A/D채널에서 입력되는 x, y축의 이동부 위치정보와 자이로컴파스에서 송신되는 x, y축 위치정보를 컴퓨터에 의해 차동 바퀴의 토오크 제어입력으로 계산하고, 이를 D/A 2채널을 통해 전류값으로 변환하여 모터 드라이버에 연결된 모터에 인가한다. 따라서, 이상의 시스템 개념에 의한 검사로봇 시스템의 이동부 개요도는 그림 3과 같다.

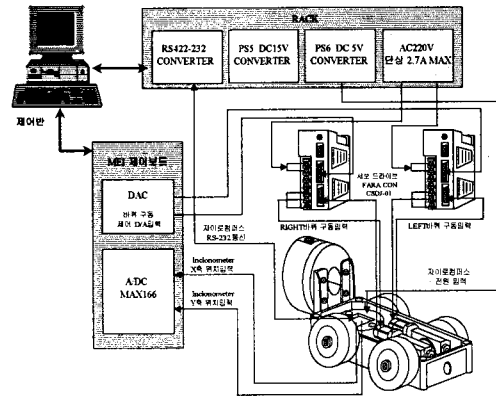


그림 4. 검사로봇 시스템의 이동부 개요도

검사로봇 시스템의 위치제어를 위한 시스템 매개변수들은 표1과 같다.

표 1. 검사로봇 시스템 매개변수

바퀴 지름(2r)	로봇 차체폭(2R)	P~P <sub>0</sub> 사이거리(d)
15.2cm	38 cm	12.5cm

샘플링주기는 T=0.05이고, 적응퍼지 제어입력  $v$ 에 대한 검사로봇의 두 차동 모터 속도입력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G}{r}(v+R\omega) \\ \frac{G}{r}(v-R\omega) \end{bmatrix}$$

여기서  $G$ 는 로봇바퀴에 연결된 웜기어의 기어비이고,  $r$ 은 두 바퀴의 반지름,  $R$ 은 로봇의 차체폭 길이의 반을 나타낸다. 그림 5는 이동점  $P_0$ 가 기준궤적  $x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref}, v_{ref}$ 을 추종하는 실험을 수행한 결과이다. 본 이동부 시스템은 실험장치 구성시 서보 모터웜셋을 결정하는 엔코더 입력을 채워지지 않은 관계로 바퀴의 초기 위치에서 토크의 불균형 현상이 발생했다. 따라서, 실험시 바퀴의 초기위치 웜셋은 모터 서보 드라이버의 펜던상에서 자동 튜닝 기능으로 결정하였다. 그리고, 그림 6은 이동부 시스템의 동작중 각각 5cm높이의 장애물예의한 외란이 발생했을 때 대한 강인한 추종 특성을 나타낸 그림이다.

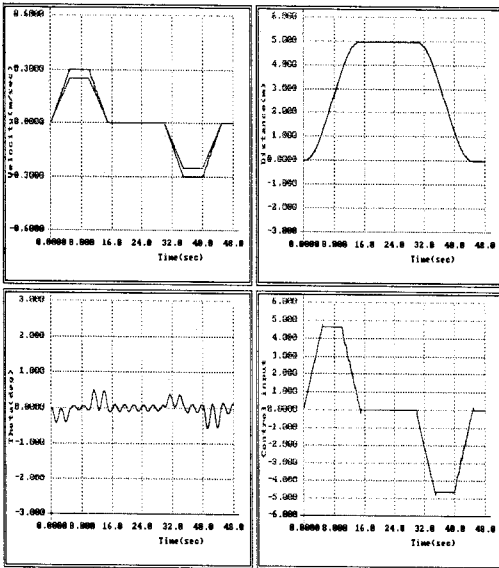


그림 5 이동점  $P_0$ 의 기준궤적  $x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref}, v_{ref}$  추종

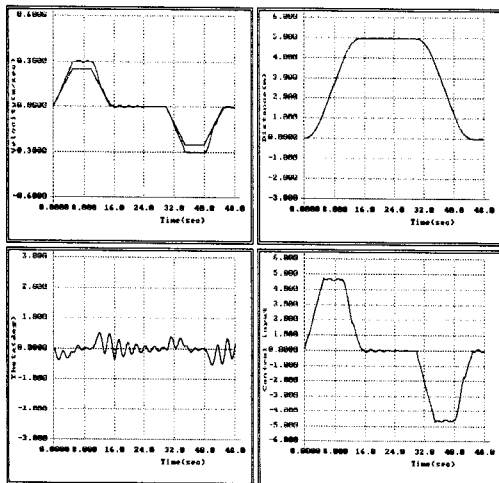


그림 6 이동부 시스템의 동작중 5cm높이의 장애물예의한 외란이 발생

### 3. 결 론

본 논문에서는 지하매설 파이프 검사로봇의 위치제어를 위하여 위치추정 센서인 인크로노메터를 이용하여 측정된 현재위치  $P$ 에서 구성된 정적위치상태가 기준위치  $P_r$ 을 하는 추종하도록 검사로봇의 속도와 조향 제어하는 제어 입력  $v=(v \ \omega)^T$ 을 적응 퍼지알고리즘을 이용 설계하였다. 따라서 본 논문에서는 궤환 제어기와 초기 추종 오차의 문제를 개선하기 위하여 시스템의 미지의 파라미터를 조정할 수 있는 적응칙을 구성, 이를 통해 초기 추종 특성을 개선하였고, 검사로봇의 근사모델예의한 비선형성에 적응이 용이하고, 보다더 자유도가 높으며, 기준궤적 추종에 따른 검사로봇의 센서 측정잡음, 외란과 불확실성 문제에 대하여 강인한 제어 특성을 갖음을 실험으로 보였다.

### (참고 문헌)

- [1] Qiuju Zhang, James Shippen, Barrie Jones, "Robust backstepping and neural network control of a low quality nonholonomic mobile robot", International Journal of Machine Tools & Manufacture, no.39, pp.1117-1134, 1999.
- [2] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space", Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California-April, pp.1136-1141, 1991.
- [3] B. d'Andrea-Novell, G. Bastin, and G. Campion, "Modelling and Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots", Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California-April, pp.1136-1141, 1991.
- [4] Z.Y. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controller", IEEE Trans. on Systems, man, and Cybern., 23, no. 5, pp.1392-1398, 1993.
- [5] C.Y. Su, and Y. Stepanenko, "Adaptive control of nonlinear systems with fuzzy logic", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol.2, no. 4, pp.285-294, 1994.
- [6] L.X. Wang, "Adaptive fuzzy systems and control", Prentice-Hall, 1994.
- [7] Kevin M. Passino, and Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison Wesley Longman, 1998.