論 文
49D-8-9

관로 검사로봇 자세의 퍼지 PID제어

A Fuzzy PID Posture Control of Robot for Pipes Inspection

金 度 佑* · 梁 海 元** · 尹 智 燮***
(Do-Woo Kim · Hai-Won Yang · Ji-Sup Yun)

Abstract - A fuzzy PID controller is proposed for the posture control of a two DOF robot vehicle inspecting the defects of the inner wall of sewage pipes. The main difficulty in controlling these kinds of vehicles lies in that the center of two mobile shafts does not coincide with the weight center of the vehicle due to its long and wide shape. In this case the previous controller, based on the assumption that the gap between these centers are small, can not guarantee satisfactory transient response characteristics. In this paper, this gap is included in the mathematical modelling of the robot kinematics, and in order to compensate the unsatisfactory transient response characteristics, the fuzzy PID controller is proposed. This controller tunes the PID control gains with respect to the current state of the errors between the reference and the current postures. A series of simulations has been performed to investigate the tracking performance of the proposed controller for the lane changing path and the robustness to the external disturbance. The simulation results show that the proposed controller has a satisfactory tracking performance in the transient state as compared with that of the backstepping control given in reference [7].

Key Words : sewage inspection robot, two DOF robot vehicle, fuzzy control

1. 서 론

국내 지하에 매설된 하수관은 이음부 접속불량, 나무뿌리 및 지관의 돌출 등으로 인한 파손 상태가 심각하다. 이와 같은 파손은 지하수 또는 빗물의 유입으로 하수의 양을 증가시켜 하수 처리의 비용을 증대시키며, 더욱이 하수가 지하로 유출되어 지하수를 오염시킨다. 현재 국내 산.학.연의 여러 기관에서는 이동 로봇의 개발이 진행되고있으나, 지하에 매설된 관로검사에 대한 이동로봇의 연구사례는 찾기 어렵다. 이에 반하여 국외의 경우는 독일, 일본등에서 다양한 유형의 검사로봇을 개발 상용화하고 있다.

독일의 경우 COBRA[2] Technologies사가 개발한 COBRA 로봇이 상용화 되어있으며, 이 로봇은 150~600mm, 200~2500mm등 관의 크기에 따라 여러 종류가 있으며 로봇은 좌우 270° 와 상하 360° 회전 가능한 카메라와 50W,100W의 조명으로 구성된 검사장치, 감속기어와 자동 클러치가 장착된 DC 기어 모터 , 앞과 뒤 바퀴사이의 동력을 전달하는 원형고무벨트, 4개의 바퀴로 구성되어있다. 그리고 GMD German National Research Center[3]가 개발중인 KURT은 2개의 DC 모터를 이용 6개의 바퀴를 구동하고, 경사계를 이용하여 수평각도를 측정하여 전복을 방지하고, 4개의 초음파 센서를 이용 근접거리의 물체와 교차로를 검출하도록 되어있다.

일본의 경우 KANTOOL사에서는 다양한 관 크기와 모양에 맞게 무한궤도형이며, 후단의 스프라켓을 전기 모터로 구동하는 로봇을 생산하고, 상용화하고 있다. 그러나 이들 외국의 로봇은 단지 CCD 카메라나 초음파 센서와 같은 장비만을 탑재하여 관로를 검사하고 있으며 국내와 같이 하수관로의 상태가 불량한 곳에 적용하기에는 로봇 차체의 길이가 길다는 문제점이 있다. 따라서, 이러한 국외 추세에 따라 최근 국내에서는 국내 하수관 상황을 고려하여 하수관 내부의 파손상태를 검사하고 이를 보수하기 위한 하수관 검사/보수 로봇의 개발이 본격화되고 있다.

한국원자력연구소에서는 후미에 레이져 센서 검사장치를 장착하고, 두 개의 AC 서보모터를 로봇 전륜에 장착하여 차동으로 바퀴를 구동함으로서 조향과 주행을 제어하는 4바퀴 2자유도 전륜 바퀴구동 검사로봇을 제작하였다[1]. 일반적으로 연구되고 있는 2자유도 바퀴구동로봇에서 B. d'Andrea Novel, G. Bastin 과 G. Campion[4],[5]는 평지 상에서 로봇 구동축의 중심점과 로봇의 무게중심점이 일치하는 이상적인 경우의 가정으로, 로봇을 기구학적 모델링하고, Path 궤적 추종 제어와 상태궤환 선형화 방법을 이용 로봇의 위치제어를 구하였다. 그리고 Zhong Ping. Jiang 와 Henk Nijmeijer[6]는 B. d'Andrea Novel, etc[4],[5]의 기구학적 모델링을 이용 백스탭핑 방법으로 선속도와 각속도로 디커플링하여 속도출력을 구하였고, Qiuju Zhang, James Shippen 과 Barrie

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博
*** 正 會 員 : 韓國 原子力 研究所
遠隔取扱裝置開發室 責任研究員/室長 · 工博
接受日字 : 2000年 4月 21日
最終完了 : 2000年 7月 11日

Jones[7]는 Zhong Ping. etc[6]의 디커플링 속도출력을 신경망 이론에 의한 DC서보 모터의 차동 바퀴의 토크 입력이 되도록 하고 있다. 그러나, 본 검사 로봇은 차체의 폭과 길이가 크기 때문에 이와 같이 양 중심점의 거리차를 무시하는 일반적 가정에 대하여 설계된 이상의 제어 이론을 적용할 수 없다. 또한, 하수관 검사로봇에서는 로봇 주행시 관로가 꺾어진 이음부에서 로봇이 회전하여 전복될 수 있고, 관로 내부의 장애물(흙, 돌 등)에 의해 로봇의 조향 각도가 변화하여 조향 성능이 저하된다.

따라서, 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서, 본 논문에서는 일반적인 주행로봇의 기구학적 모델링에서는 고려하지 않는 양 중심점 사이의 거리차(λ)를 포함하여 기구학적 모델링을 수행하고, 이를 고려함에 따른 로봇 조향각 및 속도의 응답에 발생하는 과도상태 오차를 해결하고자 하였다. 또한, 관로 내부의 장애물에 의한 외란에도 강인한 제어기를 개발하고자 하였다. 이를 위하여, 비선형 시스템에 적용이 용이하며, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는 퍼지 제어기를 도입하여 기존의 PID이득을 조정하는 데 사용하였다[8],[9][10].

본 논문의 구성은 2장에서 설계 제작된 검사로봇의 구동제어 시스템을 간략히 설명하고, 3장에서 관로 주행 로봇의 제어변수를 설정하고, 거리차를 포함한 기구학적 모델링을 수행한다. 4장에서는 운동좌표상 오차를 퍼지 입력으로 하여, 주행 조향시 실시간으로 PID이득을 조정하는 퍼지 PID제어기를 설계하고, 5장에서는 꺾어진 이음부를 방향전환할 경우와 직선 주행시 관로 내부의 예기치 않은 장애물에 의하여 로봇의 조향각도가 변화할 경우에 대하여 전산모사를 수행하여 제안한 제어기의 성능을 조사하고, 이를 백스텝핑제어[7]의 결과와 비교하여 제안한 제어기의 성능을 검증한다.

2. 검사로봇 구동 제어시스템 구성

본 검사로봇은 그림 1에서 보는 바와 같이, 원 휠구동의 몸체부, 조향센서부, 검사부의 구조로 이루어지며 450mm하수관 내부에서 구동할 수 있도록 설계되었다. 로봇 몸체의 중량과 크기는 각각, 35kg, 270W×432L×150H mm (검사부를 포함할 경우 270W×553L×283H mm)이며, 검사부의 최대하중 20kg을 견딜 수 있도록 하였다.

본 검사로봇 몸체는 구동시 모터의 관성모멘트를 작게하기 위해 FRP로 제작되었으며, 후미에 장착된 하수관 검사장치와 무게 균형을 위하여 바퀴구동모터(삼성 CSM-01B)와 드라이버(삼성 CSM-01B)를 몸체의 전방에 장착하였다. 따라서, 로봇은 두 개의 별도 구동되는 전륜바퀴에 의하여 주행 및 방향전환을 하며 각각의 바퀴에는 감속비 60:1의 웜 기어가 장착되어 있다.

몸체 내부에는 로봇의 roll, yaw 및 pitch(조향각)를 측정하는 Precision Navigation사의 자이로컴파스 (TCM2)를 탑재하였다. 후미의 검사부는 회전하는 두 개의 레이저 거리측정센서로 구성되어 하수관내의 파손부를 정밀 인식한다. 전체 모터와 센서의 입출력 신호는 Motion Engineering사의 다축제어보드(PCX/DSP-400)를 이용하여 제어 PC와 접속한다.

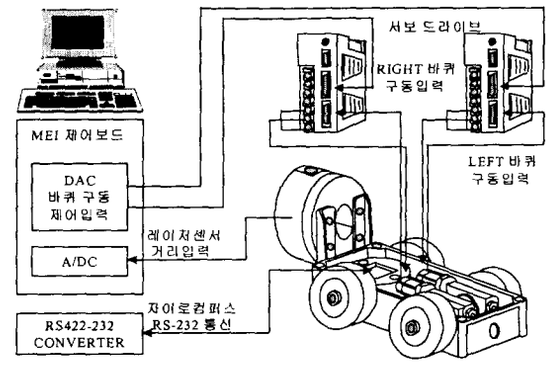


그림 1 전륜구동 관로검사 로봇의 제어시스템

Fig. 1 Control system of pipe inspection robot

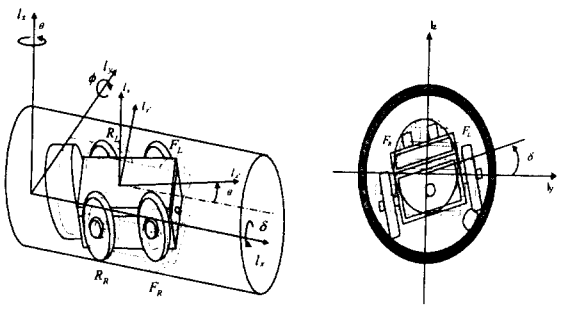
3. 검사로봇의 제어변수 설정 및 기구학적 모델링

검사로봇은 관로 내부에서 예기치 않은 장애물 또는 바퀴의 미끄러짐 등으로 인하여 전복되지 않고, 평형자세를 유지하며 주행하여야 한다. 또한, 두 개의 관로가 서로 비틀어져 이어진 이음부에서 로봇이 관로에 끼이거나, 전복되지 않고 관로를 따라 주행할 수 있어야 한다.

관로 내부의 장애물에 의하여 비틀어진 로봇의 자세는 그림 2에서 보는 바와 같다. 그림은 로봇의 왼쪽 앞(FL) 바퀴가 들려진 모습으로 한쪽 바퀴의 상승만으로도 로봇의 모든 자세각(roll(δ), pitch(θ), yaw(ϕ))이 바뀜을 알 수 있다. 그림에서 로봇이 장애물에 의하여 전복되지 않고 주행하려면 δ가 0이 되도록 로봇을 제어하는 것이 다른 자세각을 제어하는 것보다 유리한 것처럼 보인다.

그러나 그림에서와 같이 왼쪽 앞(FL) 바퀴가 들려진 상태에서 δ =0 이 되려면, 왼쪽 앞(FL) 바퀴의 전진 속도가 오른쪽 앞(FR) 바퀴의 속도보다 빨라져서, 로봇의 전면부가 오른쪽(조향각 θ<0)을 향하도록 하여야 한다. 이 후, 로봇이 계속 전진하면, 로봇의 조향각이 0이 아닌 상태에서 주행하게 되므로, 로봇은 오른 쪽 관로의 내벽을 타고 올라가게 되어 roll 각이 다시 0이 아닌 상태로 변화하게 된다. 이 상태에서, 로봇은 roll 각을 다시 0으로 하기 위하여 로봇의 전면부가 왼 쪽을 향하도록 하여 이번에는 왼쪽 관로의 내벽을 타고 내려오게 된다. 결국, 로봇은 관로 내부에서 직진 운동을 하지 못하고, 나선형의 형태를 따라 관로의 내벽을 타고 올라가다가, 다시 내려오는 동작을 반복하게 된다.

또한, δ =0 인 제어 목표는 관로가 꺾어진 이음부를 주행할 경우에도 적합하지 않다. 즉, 로봇이 δ =0 인 상태로 이음부를 통과하면, 로봇의 몸체가 꺾어진 관로에 끼일 수 있기 때문이다. 만약, 로봇이 오른쪽으로 꺾어진 관로를 통과한다고 하면, 이음부를 통과할 때 로봇의 오른쪽 바퀴가 꺾어진 관로를 따라 자연스럽게 들려야지만($\delta \neq 0$) 관로에 끼이지 않고 통과할 수 있다. 따라서, 이와 같이 여러 가지의 불확실성을 갖는 roll 각을 0으로 하는 제어 목표(δ =0)보다는 로봇이 전복되지 않는 범위(δ<35°)내에서 로봇의 조향각 오차를 0으로 제어하는 것이 바람직하다.



(a) 측면도 (b) 정면도

그림 2 장애물에 의한 로봇의 자세 변화
Fig. 2 Posture change of robot by obstacle.

일반적으로 바퀴구동형 로봇은 후륜 구동 방식으로 모델링 하지만[6],[7], 본 검사로봇의 기구학적 모델링에 있어서는 후미에 하수관 검사장치를 장착한 관계로 전륜 구동형으로 모델링한다. 따라서, 그림 3은 이러한 전륜 구동형 검사로봇의 중심점 $P=[x, y, \theta]^T$ 에 대한 기구학적 모델링을 위한 위치 좌표계를 나타낸 것이다.

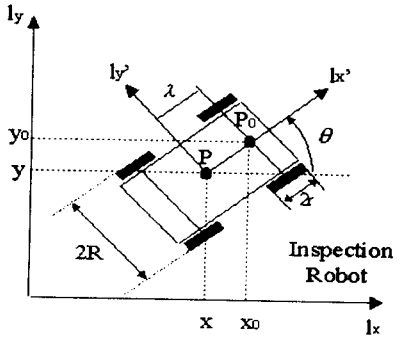


그림 3 전륜 구동형 검사로봇의 위치좌표계
Fig. 3 Coordinate of forward wheel driven robot

그림 3에서 x, y는 고정 좌표계{ l_x, l_y}에서의 로봇 중심점, θ는 고정 좌표계의 l_x축에 대한 로봇 조향각을 나타낸다. 그리고 P_0는 구동축의 중심점으로서 측정이 가능하다. λ은 로봇의 중심점 P와 구동축의 중심점 P_0사이의 거리차이다. 그림에서 고정 좌표상 거리오차 $\Delta x, \Delta y$, 거리차 λ 그리고 조향각 θ의 관계는 다음과 같다.

$$\lambda = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$\Delta x = \lambda \cos\theta, \quad \Delta y = \lambda \sin\theta \tag{1}$$

$$\Delta y \cos\theta = \Delta x \sin\theta \tag{2}$$

식(2)에 거리오차 $\Delta x = x_0 - x$와 $\Delta y = y_0 - y$를 대입하고 시간 t 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta = -[\Delta y \sin\theta + \Delta x \cos\theta]\frac{d\theta}{dt} \tag{3}$$

식(3)과 식(1)로 부터 전륜 바퀴구동 검사로봇의 기구학적 위치 상태식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{y}\cos\theta - \dot{x}\sin\theta + \lambda\dot{\theta} = 0 \tag{4}$$

그런데 일반적으로 바퀴구동형 로봇의 기구학적 모델링에서는 구동축의 중심점을 로봇의 중심점과 일치한다고 가정(λ=0)하는 이상적인 경우에 대하여 제어기를 설계한다[4],[5],[6],[7]. 그러나 본 2자유도 바퀴 구동검사 로봇은 차체 폭과 길이가 크기 때문에 거리차를 무시하는 일반적 가정에 대한 적용이 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 주행/조향제어의 영향을 미치는 거리차를 포함하여 제어기를 설계한다. 식(4)의 기구학적 위치 상태식을 주행선속도(ν)와 조향 각속도(ω)의 제어입력 $v=[\nu, \omega]^T$에 의한 중심점 P의 상태 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \lambda\sin\theta \\ \sin\theta & -\lambda\cos\theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu \\ \omega \end{pmatrix} \tag{5}$$

식(6)의 천이행렬(T_c)을 사용하여 고정 좌표계에서 기준점 $P_r=[x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref}]$T과 중심점 $P=[x\ y\ \theta]^T$의 오차(e_p)를 운동좌표계의 오차(e_p^c)로 변환하면, 식(8)과 같다.

$$T_c = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$e_p = P_r - P = (e_x\ e_y\ e_\theta)^T \tag{7}$$

$$e_p^c = T_c e_p = (e_x\ e_y\ e_\theta)^T \tag{8}$$

where

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

여기서 e_p^c는 운동좌표{ l_x, l_y}상의 오차로 e_x는 구동방향 오차, e_y는 e_x에 수직하는 측면방향 오차 그리고, e_θ 는 조향각의 오차를 나타낸다. 식(8)을 시간 t 에 대해 미분하면 식(9)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_y - \nu + \nu_{ref}\cos e_\theta + \lambda\omega_{ref}\sin e_\theta \\ -e_x + \lambda\omega + \nu_{ref}\sin e_\theta - \lambda\omega_{ref}\cos e_\theta \\ \omega_{ref} - \omega \end{pmatrix} \tag{9}$$

식(9)로부터 e_x는 로봇의 주행 선속도(ν), e_y, e_θ는 로봇의 조향각속도(ω)에 관련된 오차임을 알 수 있고, 특히, e_x와 e_y는 거리차(λ)에 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 거리차에 영향을 받는 오차에 대해 주행/조향 제어시 강인성을 갖는 제어입력 $v=[\nu, \omega]^T$을 구하여야 한다. 4장에서는 이와 같은 제어기를 설계하기 위하여, 비선형 시스템에 적용이 용이하며, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는 퍼지 제어기를 도입하여 기존의 PID 이득을 조정하는 데 사용하였다.

4. 검사 로봇의 퍼지 PID제어

일반적으로 PID제어는 구조가 간단하여 구현이 용이하지만 제어대상의 특성이 변화되는 제어환경에 적응능력이 부족하다. 그리고, 퍼지제어는 인간 사고와의 유사성으로 실세계

의 근사적이고 불확실한 현상을 효과적으로 기술하기 때문에 정확한 모델에 근거하여 설계된 제어기보다 비선형 시스템에의 적용이 용이하고, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는다. 따라서, 본 절에서는 돌발적인 장애물에 의한 외란에 대해 강인성을 보장하기 위해 실시간으로 PID이득을 조정하는 퍼지 PID제어기를 그림 4에서와 같이 설계한다. 퍼지 PID제어기는 식(10)과 같이 일반적 PID제어기와 같다[8],[9],[10].

$$G_c(s) = K_p^j + \frac{K_i^j}{s} + K_d^j s \tag{10}$$

여기서 K_p^j, K_i^j, K_d^j ($j=p, v$)는 각각 비례, 적분, 및 미분 이득값을 나타내며, $j=p$ 및 $j=v$ 경우는 각각 조향각속도 및 주행선속도의 제어 경우를 나타낸다.

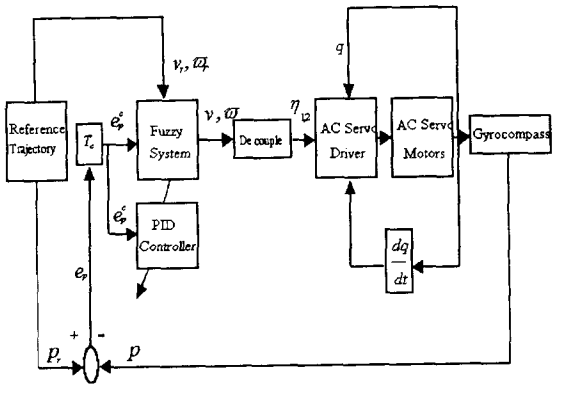


그림 4 검사로봇의 퍼지 PID 제어 시스템
Fig. 4 Fuzzy-PID control system of inspection robot

식(10)에서 적분 시상수 T_i^j 와 미분 시상수 T_d^j 의 관계를 $T_i^j = \alpha^j T_d^j$ 로 정의하면 적분이득 K_i^j는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_i^j = \frac{K_p^j}{\alpha^j T_d^j} = \frac{K_p^{j\,2}}{\alpha^j K_d^j} \tag{11}$$

먼저, 퍼지시스템을 구성하기 위하여, 식(10)과 (11)의 PID 제어이득(K_p^j, K_d^j, α^j)을 0과 1사이의 값으로 정규화하여 $K_p^{j\prime}, K_d^{j\prime}, \alpha^{j\prime}$를 구한다. 이들은 퍼지 시스템에 의해 조정되는 상수로서 이들을 결정하기 위해 $x_i=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4]=[e_x\ e_y\ \dot{e}_x\ \dot{e}_y]$를 퍼지입력으로 정하고, 그림 5과 같은 삼각형 입력 소속함수($\mu(x_i)$)를 정한다. 마찬가지로 퍼지출력 $K_p^{j\prime}, K_d^{j\prime}, \alpha^{j\prime}$에 대한 출력소속함수를 그림 6 및 7과 같이 정한다.

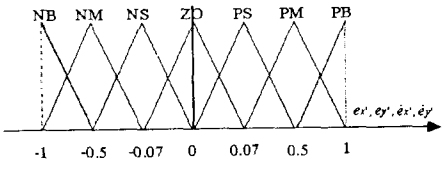


그림 5 입력 소속함수
Fig. 5 Input membership function

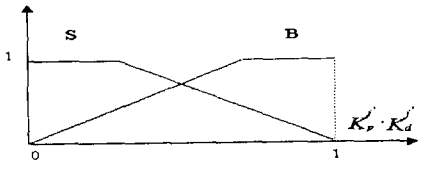


그림 6 $K_p^{j\prime}, K_d^{j\prime}$의 출력소속함수
Fig. 6 Output membership function of $K_p^{j\prime}, K_d^{j\prime}$

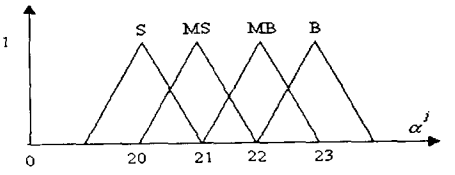


그림 7 α^j의 출력소속함수
Fig. 7 Output membership function of α^j

이상의 입, 출력 소속함수에 대하여 운동좌표상의 오차 e_y와 e_θ의 상관 관계로부터 조향각 제어를 위한 퍼지규칙을 정하고, 운동좌표상의 오차 e_x로부터 주행 선속도제어를 위한 퍼지규칙을 정한다.

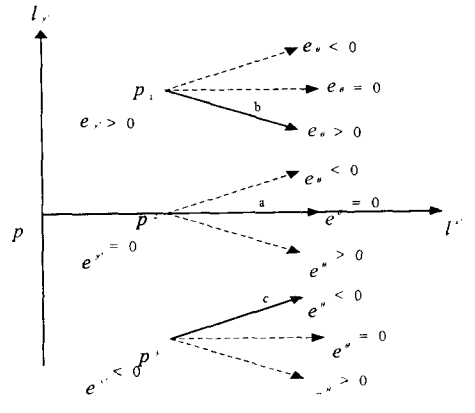


그림 8 e_y 와 e_θ 의 상관관계 e_θ
Fig. 8 Possible combination of e_y and

그림 8는 조향각을 제어하기 위하여 로봇이 취할 수 있는 조향각 오차(e_θ)와 y 방향의 위치오차(e_y)와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 p_1의 b경우($e_y>0, e_\theta>0$)와 p_3의 c경우($e_y<0, e_\theta<0$) 그리고 p_2의 a경우($e_y=0, e_\theta=0$)는 검사로봇의 기준궤적에 대한 주행시 적절한 조향 방향을 나타낸 경우로서, 이중 b의 경우와 c의 경우는 기준궤적을 따라 이동할 때 조향각 오차가 큰 경우로 PID제어에서는 과도상태로 볼 수 있다. 반대로 a의 경우는 PID제어에서 정상상태로 볼 수 있다. 따라서, 과도 상태인 p_1, p_3의 b, c 경우에는 조향 비례이득($K_p^{b\prime}$)과 조향 적분이득(K_i^b)은 크게, 조향 미분이득($K_d^{b\prime}$)은 작게 하여야 하고, 조향 적분이득은

α^p에 반비례하므로 α^p는 작게 하여야 한다. 따라서, b와 c의 경우, 퍼지입력 e_y에 대한 조향 PID 제어이득의 퍼지 규칙을 다음과 같이 정할 수 있다.

(p_1의 b경우) *If* $e_y(t)$ *is PB and* $\dot{e}_y(t)$ *is ZO*
Then $K_p^{p\prime}$ *is B,* $K_d^{p\prime}$ *is S,* α^p *is S*

(p_3의 c경우) *If* $e_y(t)$ *is NB and* $\dot{e}_y(t)$ *is ZO*
Then $K_p^{p\prime}$ *is B,* $K_d^{p\prime}$ *is S,* α^p *is S*

그리고 p_1, p_3의 b, c경우가 p_2의 a근처에 도달된 정상상태 근처의 경우에서는 과도응답이 커지는 것을 방지하기 위해 제어 신호가 작아야하므로, 비례이득 $K_p^{p\prime}$작고, 미분이득 $K_d^{p\prime}$와 α^p는 커져야한다. 따라서, p_2의 a근처에서는 다음과 같은 퍼지규칙을 설정한다.

(p_2의 a경우) *If* $e_y(t)$ *is ZO and* $\dot{e}_y(t)$ *is NB*
Then $K_p^{p\prime}$ *is S,* $K_d^{p\prime}$ *is B,* α^p *is B*

주행 선속도제어의 경우에서도, 주행속도를 결정하는 오차(e_x)가 $e_x>0$, $e_x<0$인 경우는 그림 8의 b, c의 경우와 같은 과도상태로 볼 수 있고, $e_x=0$에 근처일 때는 그림 8의 a 경우와 같은 정상상태로 볼 수 있다. 따라서, e_x에 대한 주행 PID 제어이득의 퍼지규칙도 조향시의 규칙과 같이 유사하게 설계할 수 있다. 이와 같은 과정으로 설계한 e_x, e_y, 에 의한 주행/조향제어 이득 $K_p^{j\prime}$ $K_d^{j\prime}$ α^j에 대한 퍼지규칙은 표1, 표2, 및 표3과 같다. 여기서, i= 1, 2 , $j=p,v$ 이다

표 1 주행/조향 비례이득 $K_p^{j\prime}$에 대한 퍼지규칙

Table 1 Fuzzy rule of proportional gain $K_p^{j\prime}$

x_i \ x_{i+2}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	S	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

표 2 주행/조향 미분이득 $K_d^{j\prime}$에 대한 퍼지규칙

Table 2 Fuzzy rule of differential gain $K_d^{j\prime}$

x_i \ x_{i+2}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	S	S	S	S	S	B
NS	B	B	S	S	S	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	S	S	S	B	B
PM	B	S	S	S	S	S	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

표 3 α^j에 대한 퍼지규칙

Table 3 Fuzzy rule of gain α^j

x_i \ x_{i+2}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	MS	MS	S	S	S	MS	MS
NS	MB	MS	MS	S	MS	MS	MB
ZO	B	MB	MS	MS	MS	MB	B
PS	MB	MS	MS	S	MS	MS	MB
PM	MS	MS	S	S	S	MS	MS
PB	S	S	S	S	S	S	S

비퍼지화 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심을 구하여, 그에 해당하는 제어값을 제어입력으로 취하는 최대 평균법을 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$K_p^{j\prime}(t)=\frac{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))\cdot B^j_{K_p}}{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))}$$

$$K_d^{j\prime}(t)=\frac{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))\cdot B^j_{K_d}}{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))} \qquad (12)$$

$$\alpha^j(t)=\frac{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))\cdot B^j_{\alpha}}{\sum_{k=1}^{49}\mu_{e^k}(x_i(t))\mu_{\Delta e^k}(x_{i+2}(t))}$$

여기서, e^k와 Δe^k는 그림 5의 입력 퍼지집합이고, $B^j_{K_p}$, $B^j_{K_d}$, B^j_{α} 는 그림 6과 그림 7의 출력 퍼지 집합의 중심 값이다. 따라서, 퍼지시스템으로 조정, 출력되는 PID이득($K_p^{j\prime}$, $K_d^{j\prime}$, α^j)에 의한 검사로봇의 주행선속도 제어입력(ν)과 조향 각속도 제어입력(ω)은 다음과 같다.

$$\nu=K_p^v e_x(t)+K_i^v\int_0^t e_x(t)\,dt+K_d^v\frac{de_x(t)}{dt} \qquad (13)$$

$$\omega=K_p^p e_y(t)+K_i^p\int_0^t e_y(t)\,dt+K_d^p\frac{de_y(t)}{dt}$$

식(13)의 선속도 제어입력(ν)과 각속도 제어입력(ω)은 실제 검사로봇 시스템에 있어 무한정 제어입력을 크게 할 수가 없다. 따라서, 본 검사 로봇의 주행 선속도(ν) 최대 입력은 0.4 m/sec이 되도록 설계하고, 검사로봇 주행과 조향이 동시에 발생되는 경우, 로봇 구동 바퀴의 속도에 대해 식(14)와 같은 제약조건을 설정하였다[8]. 즉, 식(14)의 제약 식은 실험에 의한 제약 식으로서 관로 검사로봇의 방향전환 특성을 결정짓는 여러 요소 중 바퀴의 지름이 각속도에 미치는 영향이 크기 때문에 이를 바탕으로 로봇 양 바퀴의 최대 속도 결정의 상한과 하한을 제한하도록 하는 식이다.

$$\nu+\omega(\frac{R}{2})\ <\ 0.6m/\sec \qquad (14)$$

최종적으로 식(13)의 속도출력을 다음의 식을 사용하여 차동 바퀴의 토크 제어입력 η_1, η_2로 환산한다.

$$\begin{bmatrix}\eta_1\\ \eta_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G(\nu+R\omega)/r\\ G(\nu-R\omega)/r\end{bmatrix} \qquad (15)$$

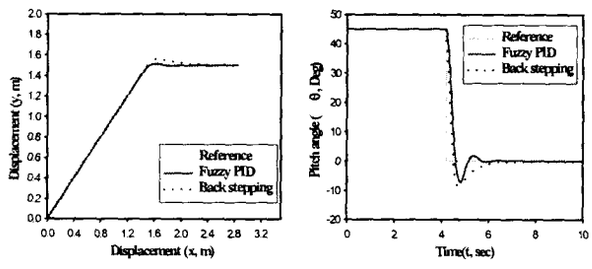
여기서, G는 로봇바퀴에 연결된 웜 기어의 기어비이고, r은 두 바퀴의 반지름(7.6cm), R은 로봇 차체폭의 1/2 값(13.5cm)을 나타낸다.

5. 성능해석

4장에서 설계한 주행/조향 속도 퍼지 PID제어기의 성능을 검증하기 위하여, 관로상에 발생될 수 있는 여러 가지 요인을 고려할 수 있으나, 가장 보편적인 상황이라 할수 있는 두가지 사례를 다음과 같이 설정하였다. 첫째, 우리나라에 매설된 하수관로의 꺾어진 정도를 감안하여, 로봇이 꺾어진 관로를 주행하며 방향을 전환하는 경우[사례 1], 둘째, 기존 관로 검사 장비를 통해 확인된, 하수관의 이음부 접속불량, 나무뿌리 및 지관의 돌출 등과 같은 실제 하수관로의 내부상태를 감안하여, 직선 주행시 관로 내부의 예기치 않은 장애물에 의하여 로봇의 조향각이 틀어질 경우[사례 2]를 설정하였다. 이와 같은 각각의 경우에 대하여 전산모사를 수행하고 이의 결과를 백스탭핑 로봇 구동 제어[7] 결과와 비교하였다. 전산모사에서 PID제어이득(K_p^i , K_d^i , α^i)의 범위는 각각 선속도 이득으로 $K_p^v \in [5,1]$, $K_d^v \in [5,1]$, $\alpha^v \in [20,23]$와 같이 정하였고, 각속도 이득으로 $K_p^p \in [100,1]$, $K_d^p \in [5,1]$, $\alpha^p \in [20,23]$와 같이 정하였다. 그리고, 백스탭핑 제어[7]의 제어 이득은 α=2, k_1=10, k_2=4 를 사용하였다.

[사례 1] 꺾어진 관로에서의 방향 전환 경우

기준 조향각(θ_{ref})는 그림 9에서 보는 바와 같이, 초기에 θ_{ref}=45° 이고, x거리가 1.5m지점에서 θ_{ref}=0° 로 바뀌게 된다. 기준 선속도(ν_{ref})는 0.4m/sec를 갖는 사다리꼴의 형태를 갖도록 설정하고, 기준 각속도(ω_{ref})는 0으로 하였다. 또한, 주행전 로봇의 위치오차와 조향각 오차가 없다고 가정하였다(로봇의 초기 위치 및 자세 x=0 m, y=0 m, θ=45°). 먼저, 이와 같은 조건에서 본 2자유도 바퀴 구동검사 로봇에서 고려된 거리차 λ를 0으로 하는 이상적인 경우에 대한 로봇의 퍼지 PID제어와 백스탭핑 제어 추종 결과는 그림 9에서 보는 바와 같다.

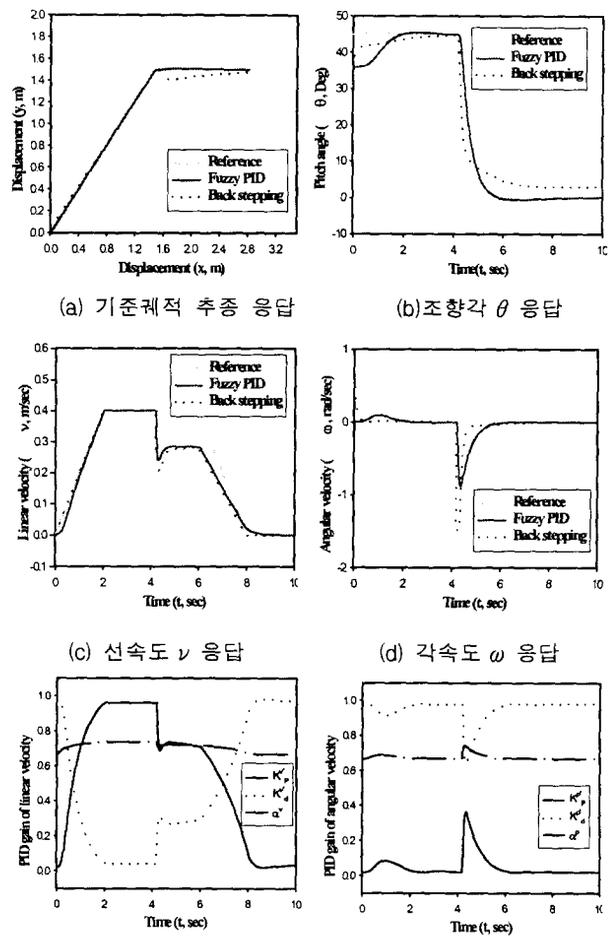


(a) 기준궤적 추종 응답 (b) 조향각 θ 응답

그림 9 퍼지 PID와 백스탭핑 제어의 성능 비교[λ= 0]

Fig. 9 Responses of fuzzy pid control and back stepping control[7] [λ= 0]

그림 9-(a)에서 보는 바와 같이, 거리차 λ가 0인 이상적인 경우에 퍼지 PID제어의 위치 응답은 백스탭핑 제어의 위치 응답에 비하여 기준 위치를 다소 빠르게 추종함을 볼 수 있다. 또한, 그림 9-(b)에서 보는 바와 같이 조향 응답에 대해 두 가지 제어의 경우 모두 이음부 통과후 꺾어진 관로를 잘 따라감을 알 수 있다. 다음에는 거리차 λ(=0.15 m)를 고려함에 따른 영향을 살펴본다. 이 경우에는 실제 관로의 상황을 반영하기 위하여, 주행전(관로 투입초기)에 로봇의 위치오차는 없으나, 로봇이 관로에 대하여 비틀어져 있다고 가정하였다(로봇의 초기 위치 및 자세각은 x=0 m, y=0 m, θ=36°). 그림 10에서는 이와 같은 조건에 대한 각각 제어기의 응답을 나타낸 것이다.



(a) 기준궤적 추종 응답 (b)조향각 θ 응답

(c) 선속도 ν 응답 (d) 각속도 ω 응답

(e) 선속도 PID 제어이득변화 (f) 각속도 PID 제어이득변화

그림 10 퍼지 PID와 백스탭핑 제어의 성능 비교[λ≠0,사례1]

Fig. 10 Responses of fuzzy PID control and back stepping control[7] [λ≠0, case 1]

그림 10-(a),(b)에서 보는 바와 같이 λ≠0인 경우의 위치 응답과 조향 응답은 그림 9-(a),(b)의 λ=0인 이상적인 경우의 응답과 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, 백스탭핑 제어의 경우, 조향각 응답 (그림 10-(b))은 퍼지 PID제어에 비해 주행 초기와 이음부 통과후의 조향 오차를 빠르게 제거하지

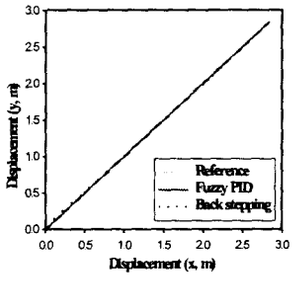
못함을 알 수 있다. 또한, 백스탭핑 제어의 경우, 그림 10-(a)와 같이 이음부 통과시 기준 위치에 대해 로봇의 위치응답이 y 축 방향으로 최대 16 cm 정도의 큰 오차를 갖는 데, 이를 관로 내의 로봇 자세로 환산할 경우, 로봇의 roll각(δ)이 약 45.3° 정도에 해당하여 로봇이 전복되는 조건(δ > 35°)에 해당된다. 이와 같은 사실로부터, 거리차 λ는 관로 내 로봇의 위치와 조향에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있고, 이를 고려하지 않는 기존의 백스탭핑 제어는 평지와는 상황이 다른 관로 내부에서의 로봇의 주행 제어에 적합하지 않음을 알 수 있다. 이에 반하여, 제안한 퍼지 PID 제어는 백스탭핑 제어의 경우와 비교하여, $\lambda \neq 0$인 경우에도 과도 상태(주행 초기와 이음부 통과후)에서의 위치 및 조향 오차를 빠르게 제거하는 만족할 만한 특성을 나타낸다. 이는 그림 10-(e),(f)에서 보는 바와 같이, 퍼지규칙에 의하여 PID 이득값이 과도 상태에서 크게 조정되기 때문이다.

로봇의 주행속도(ν)는 그림 10-(c)에서 보는 바와 같이 퍼지 PID제어와 백스탭핑 제어의 경우 모두, 관로의 이음부를 통과하기 위하여 감소됨을 알 수 있고, 마찬가지로 로봇의 각속도(ω)도 그림 10-(d)에서 보는 바와 같이 꺾어진 관로를 추종하기 위하여 변화됨을 알 수 있다. 그러나, 로봇의 각속도 응답의 경우에서 퍼지 PID 제어 응답은 식(14)에서 제시된 속도의 제한 조건 범위내에서 제어입력을 로봇에 가하는 데 반하여, 백스탭핑 제어는 속도 제한 범위를 넘어 제어입력을 가함으로서 실제 로봇 시스템에 무리한 과부하를 야기 할 수 있음을 나타낸다.

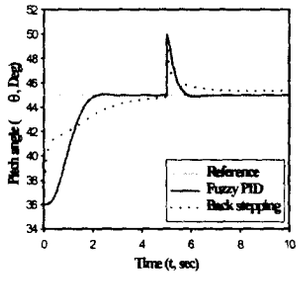
이와 같은 결과로부터, 사례 1의 경우와 같이 로봇의 초기 조향 오차가 있거나, 꺾어진 관로가 있는 실제 관로 상황을 반영한 경우에, 거리차 λ 요소를 고려한 퍼지기 PID제어기는 거리차 λ 요소를 무시한 백스탭핑 제어기에 비해 제어 성능이 우수함을 알 수 있다.

[사례 2] 장애물에 의하여 조향각도가 틀어진 경우

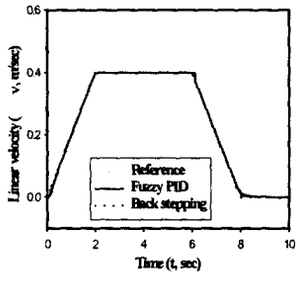
그림 11은 로봇의 직선운동중 장애물에 의한 돌발상황에 대한 추종 결과를 나타낸 그림이다. 전산모사시 선속도와 조향 각속도 및 위치의 기준값은 사례1의 조건과 동일하고, 거리차 λ(=0.15 m)를 고려하였으며, 로봇 주행 시작후 3.5 ~ 3.6 sec에서 관로내의 예기치 않은 장애물에 의하여 로봇의 자세가 직선 관로에 대하여 5 ° 정도 비틀어진 것으로 가정하였다.



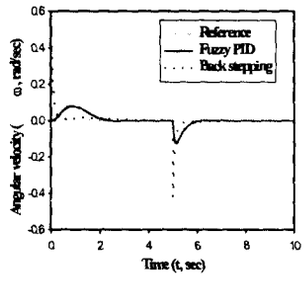
(a) 기준궤적 추종 응답



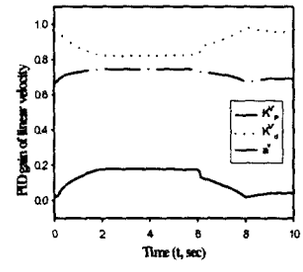
(b) 조향각 θ 응답



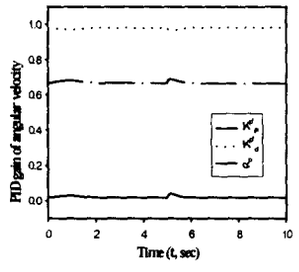
(c) 선속도 ν 응답



(d) 각속도 ω 응답



(e) 선속도 PID 제어이득변화



(f) 각속도 PID 제어이득변화

그림 11 퍼지 PID와 백스탭핑 제어의 성능 비교[$\lambda \neq 0$,사례2]

Fig. 11 Responses of fuzzy PID control and back stepping control[7] [$\lambda \neq 0$, case 2]

사례1의 경우와 마찬가지로 그림11-(a)의 위치 응답은 그림 10-(a)의 직선관로 주행시 위치응답과 동일한 응답특성을 보인다. 또한, 그림 11-(b)의 로봇 조향각(θ)응답에서는 퍼지 PID제어의 경우가 백스탭핑 제어의 경우에 비하여 주행초기의 오차를 빨리 제거하듯이, 예기치 않은 장애물에 의하여 발생한 조향오차의 경우에서도 빨리 제거함을 알 수 있다. 이와 같이, 거리차 λ 요소를 고려한 퍼지 PID제어의 관로내 조향제어 성능은 돌출 장애물 발생시에도 백스탭핑 제어에 비하여 우수함을 알 수 있다. 그림 11-(c)에서의 로봇의 주행속도(ν)는 두 가지 경우 모두, 돌출 장애물을 통과시 직선 관로 진행 특성에 의해 큰 변화가 없음을 알수 있으나, 그림 11-(d)의 로봇의 각속도(ω)응답의 경우에서는 그림 10-(d)의 이음부 통과시 경우와 마찬가지로 백스탭핑 제어의 경우는 퍼지 PID 제어에 각속도 제어 입력이 순간 크게 가해지기 때문에 실제 로봇 시스템에 무리한 과부하를 야기 할 수 있다.

사례 1과 2의 전산모사 결과를 통하여 4바퀴 2자유도 로봇과 같이 크기와 체적이 큰 로봇에서의 주행/조향 제어에는 거리차 요소를 반드시 고려하여야 함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 파손된 하수관의 위치를 검사하는 4바퀴 2자유도 전륜 바퀴구동 검사로봇의 조향각 및 주행속도를 제어하는 데 있어서의 문제점을 기술하고, 이를 해결할 수 있는 퍼지 PID 제어기를 제안하였다. 즉, 검사 로봇은 차체의 폭과 길이가 크기 때문에, 주행로봇의 제어기 설계시 일반적으로 사용하는 로봇 구동축의 중심점과 로봇의 무게중심점이 일치

한다는 이상적인 가정을 적용할 수 없고 또한, 관로 내부의 장애물에 의한 외란에 의하여 로봇의 위치와 자세가 바뀔 경우에도 이를 효율적으로 제어할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 양 중심점사이의 거리차를 고려하고, 이를 고려함에 따른 로봇 조향각 및 속도의 응답에 발생하는 과도상태 오차를 해결하고, 장애물에 의한 외란에도 강인한 퍼지 PID 제어기를 제안하였다.

제안한 퍼지 PID제어기의 성능을 꺾어진 관로를 주행할 때의 방향 전환하는 경우와 관로 내부의 예기치 않은 장애물이 있을 경우에 대해 [7]의 백스텝핑 제어와 비교한 결과, 기존의 백스탭핑 제어에 비하여 로봇의 초기 과도 상태에서의 위치 및 조향각의 추종특성이 개선되고, 또한, 외란에도 강인한 제어 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 그런데, 본 검사로봇 제어에서 실험에 의한 PID게인의 적절한 상하한치 설정의 문제와 안정도 문제는 개선되어야 할 점이라 할 수 있다. 따라서, 이러한 문제는 향후 가변구조 퍼지 Sliding surface 이론을 적용하여 개선하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었음.

본 결과는 정보통신부의 정보통신 우수시범 학교 지원사업에 의하여 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

[1] 윤지섭 외 5인, 지하매설파이프의 검사/보수용 다기능 이동로봇 개발, KAERI/CR-52/97. 1998.

[2] " Specializing in sewer maintenance information management software and TV inspection equipment", Cobra Technologies.

[3] "An investigation into the feasibility of adaptive, autonomous, cooperating robot platforms for the inspection and maintenance of municipal sewage system", GMD German National Research Center.

[4] B. d'Andrea Novel, 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, pp.1130-1135, April 1991.

[5] B. d'Andrea Novel, G. Bastin, and G. Campion, "Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state feedback linearization", The International Journal of Robotics Research, Vol. 14, No. 6, pp.543-559, 1995.

[6] Zhong Ping. Jiang and Henk Nijmeijer, "Tracking control of mobile robot : a case study in backstepping", Automatica, Vol. 33, No. 7, pp.1393-1399, 1997.

[7] 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.

[8] Z. Y. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controller", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyber, No. 5, pp.1392-1398, 1993.

[9] Kevin M. Passino, and Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, 1998.

[10] Yutaka Kanayama, Yoshihiko Kimura, Fumio Miyazaki and Tetsuo Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyber, pp.384-389, 1990.

저 자 소 개

김 도 우 (金 度 佑)

1969년생. 1995년 한양대 전기공학과(학사). 1995년~1996년 (주)쌍용자동차 근무. 1998년 한양대 전기공학과(석사). 1998년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 및 한국원자력 연구소 박사 학연과정. 관심분야 : 자율 주행 로봇제어 및 응용, 비선형 적응제어, 적응 퍼지슬라이딩모드 제어등

TEL : 042-868-8259, Fax : 042-868-2854

E-mail : kimdowoo@mail.hanyang.ac.kr

양 해 원 (梁 海 元)

1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공박). 1993년 미국 Yale대 교환교수. 1993년~현재 한양대 전자컴퓨터 공학부 교수. 제어 자동화 시스템 공학회 학술이사. 대한전기학회 편집위원장

Tel : 031-400-5162, Fax : 031-406-7769

E-mail : hwyang@email.hanyang.ac.kr

윤 지 섭 (尹 智 燮)

1958년생, 1980년 서울대 기계공학과 (학사), 1982년 한국과학기술원 기계공학과(석사), 1987년 한국과학기술원 기계공학과(공박), 1987년~ 현재 한국원자력연구소 핵연료주기단 원격취급장치개발실 책임연구원/실장, 1991년 3월~1992년 3월 Post Doc. 지능제어연구실, Oak Ridge 국립연구소, 관심 분야 : 산업공정 원격취급기술, 생산자동화 및 계측제어, 로봇 및 센서 적용 기술등

Tel : 042-868-2855, Fax : 042-0868-2854

E-mail : jsyoon@kaeri.re.kr