

적응 PID 제어를 이용한 이동로봇의 군집제어

박진현¹ · 최영규^{2*}

Formation Control of Mobile Robots using Adaptive PID Controller

Jin-Hyun Park¹ · Young-Kiu Choi^{2*}

¹Department of Mechatronics Engineering, Kyeognam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea

^{2*}Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

요 약

본 연구에서는 이동 로봇의 군집제어기에 관한 연구로써 구조가 단순한 PID 제어기의 장점을 살리고, 추종 로봇의 동역학 특성에 강인한 성능을 내는 적응 PID 제어를 제안하고자 한다. 모의실험을 통하여 제안된 적응 PID 제어가 일반적인 PID 제어기에 비하여 군집 제어에서 추종 로봇의 추종 성능인 일정 거리와 일정 각도를 잘 유지하며, 추종 로봇의 무게가 변화될 경우에도 잘 추종함을 알 수 있다. 이는 제안된 적응 PID 제어가 이득을 변화시켜 최적의 성능을 나타냄을 알 수 있다. 이를 통해 제안된 적응 PID 제어기의 성능이 우수함을 검증할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we strengthen the advantages of a simple PID controller as a study on the formation control of mobile robots and propose an adaptive PID controller with robust performance at the dynamics characteristics of following robot. Simulation studies show that the adaptive PID controller has better keeping constant distance and angle such as tracking performance of following robot for the formation control than a conventional PID controller. This is the proposed adaptive PID controller to change the gains is found to represent the best performance. This is able to verify that the performance of the proposed adaptive PID controller is excellent.

키워드 : 군집제어, PID 제어기, 적응 PID 제어기

Key word : formation control, PID controller, Adaptive PID controller

Received 29 July 2015, Revised 07 August 2015, Accepted 20 August 2015

* Corresponding Author Young-Kiu Choi(E-mail:ykichoi@pusan.ac.kr, Tel:+82-51-510-2371)

Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2554>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

자연계에서는 독립적인 개체로서 해결하기 어려운 복잡한 문제들을 군집(formation) 생활을 통하여 해결하는 생물체들이 많이 존재한다. 이러한 생물들의 군집 행동은 한 대의 로봇으로 해결하기 어려운 문제들을 여러 대의 로봇을 사용하여 해결하는 협력 제어와 유사하여 군집제어에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 최근에는 군집 제어로 하는 미로 탐색, 협력 운반, 전투기 자율 비행 등 다양한 분야에서 널리 연구되어 왔다[1].

이동 로봇의 군집 제어 방법 중 선도 로봇 추종 방식은 선도 로봇(leader robot)은 주어진 경로를 이동한다고 가정하고, 추종 로봇(follower robot)이 선도 로봇을 추종하도록 제어하는 방식이다. 이러한 제어방식은 확장성이 매우 용이하여 많은 연구가 이루어 졌다[2, 3]. 특히 이러한 연구는 선도 로봇과 추종 로봇의 기구학적인 모델만을 고려함으로써 실제 추종 로봇의 동적 특성에 따른 추종 제어 및 성능 분석에 한계가 존재한다. 그러므로 실제 추종 로봇의 동역학을 고려하여 제어를 설계할 필요가 있다[4-7]. 군집제어는 선도 로봇에 대한 추종 로봇의 기구학적 제어를 위한 상위 제어기와 추종 로봇의 동역학이 포함된 하위 제어기로 구성하였다. 상위 제어기는 Aveek K. Das의 입출력 피드백 선형화(Input-output feedback linearization) 기법을 사용해서 구성하고[6], 하위 제어기는 각종 산업 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 PID 제어로 구성하였다. 일반적으로 PID 제어 방식은 시스템 부하 및 동적 특성이 비선형적으로 변화할 경우 적절한 이득과 성능을 얻기 어려워 고성능 제어 특성을 기대하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 추종 로봇의 동역학 특성이 고려된 강인한 제어를 설계하기 위하여 PID 제어기의 이득을 자동 동조하는 적응 PID 제어를 제안하고자 한다.

본 연구에서는 구조가 단순한 PID 제어기의 장점을 살리고, 추종 로봇의 동역학 특성에 강인한 성능을 내는 적응 PID 제어를 개발하고자 한다. 또한 제안된 적응 PID 제어기의 초기 제어 구간에서 안정한 스타트-업(start-up)을 보장하기 위해 초기에 적절한 이득을 갖도록 제어기를 구성하였다[8]. 모의실험을 통하여 적응 PID 제어기가 일반적인 PID 제어기에 비하여 군집 제

어에서 추종 로봇의 추종 성능인 일정 거리 l_{ij} 와 일정 각도 ψ_{ij} 를 잘 유지함을 확인할 수 있다.

II. 이동 로봇의 군집 제어

2.1. 군집제어 이동 로봇 모델

Fig. 1은 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 기구학적 관계를 나타낸다. 선도 로봇 추종 방식의 군집 제어는 선속도 v_i 와 각속도 ω_i 를 갖는 선도 로봇이 존재할 경우, 선도 로봇과 추종 로봇의 상대 거리 l_{ij} 와 추종 각도 ψ_{ij} 를 일정하게 유지되도록 제어하는 문제이다.

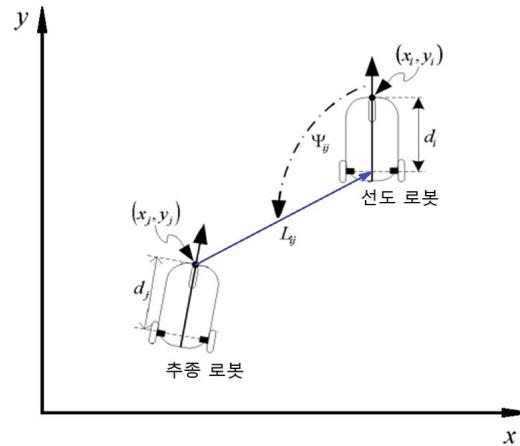


Fig. 1 Leader-follower based formation robots

Fig. 1에서 기구학적 관계를 고려하여 선도 로봇과 추종 로봇의 위치 관계는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_j &= x_i - d \cos \theta_i - l_{ij} \cos(-\pi + \psi_{ij} + \theta_i) \\ &= x_i - d \cos \theta_i + l_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_i) \\ y_j &= y_i - d \sin \theta_i - l_{ij} \sin(-\pi + \psi_{ij} + \theta_i) \\ &= y_i - d \sin \theta_i + l_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $[x_i \ y_i \ \theta_i]^T$ 는 선도 로봇의 자세, $[x_j \ y_j \ \theta_j]^T$ 는 추종 로봇의 자세를 나타내고, ψ_{ij} 는 선도 및 추종 로봇 사이의 각도, 그리고 l_{ij} 는 두 로봇 사이의 거리를 나타낸다.

식 (2)는 선도 로봇의 선속도 v_i 와 각속도 ω_i 에 대한 선도 로봇의 자세 $[x_i \ y_i \ \theta_j]^T$ 와의 관계식을 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ \theta_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -d \sin\theta_i \\ \sin\theta_i & d \cos\theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_i \cos\theta_i - d\omega_i \sin\theta_i \\ v_i \sin\theta_i + d\omega_i \cos\theta_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

또한 추종 로봇의 선속도 v_j 와 각속도 ω_j 에 대한 왼쪽, 오른쪽 바퀴의 각속도는 아래 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{1}{r} (v_j + R\omega_j) \\ \omega_l &= \frac{1}{r} (v_j - R\omega_j) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 R 은 바퀴와 바퀴 사이의 거리이며, w_r, w_l 은 추종 로봇의 왼쪽 오른쪽 바퀴의 각속도이다.

2.2. 기구학 제어기 설계

Fig. 1에서 선도 로봇과 추종 로봇의 제어 대상인 ψ_{ij} 와 l_{ij} 에 대해 기구학적 방정식을 나타내면 아래 식 (4)와 같다[6].

$$\begin{aligned} \dot{l}_{ij} &= v_j \cos\gamma_{ij} + d\omega_j \sin\gamma_{ij} - v_i \cos\psi_{ij} \\ \dot{\psi}_{ij} &= -v_j \frac{\sin\gamma_{ij}}{l_{ij}} + d\omega_j \frac{\cos\gamma_{ij}}{l_{ij}} + v_i \frac{\sin\psi_{ij}}{l_{ij}} - \omega_i \\ \dot{\beta}_{ij} &= \omega_i - \omega_j \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\gamma_{ij} = \beta_{ij} + \psi_{ij} = (\theta_i - \theta_j) + \psi_{ij}$ 이다.

위 식(4)를 선도 로봇과 추종 로봇에 대한 선속도와 각속도의 벡터 행렬(vector matrix)로 표현하면

$$\begin{aligned} \dot{z}_{ij} &= G_1(z_{ij}, \beta_{ij})u_j + F_1(z_{ij})u_i \\ \dot{\beta}_{ij} &= \omega_i - \omega_j \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\dot{z}_{ij} = \begin{bmatrix} \dot{l}_{ij} \\ \dot{\psi}_{ij} \end{bmatrix}$, $u_j = \begin{bmatrix} v_j \\ \omega_j \end{bmatrix}$, $u_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}$,

$$G_1(z_{ij}, \beta_{ij}) = \begin{bmatrix} \cos\gamma_{ij} & d \sin\gamma_{ij} \\ -\frac{\sin\gamma_{ij}}{l_{ij}} & \frac{d \cos\gamma_{ij}}{l_{ij}} \end{bmatrix}, F_1(z_{ij}) = \begin{bmatrix} -\cos\psi_{ij} & 0 \\ \frac{\sin\psi_{ij}}{l_{ij}} & -1 \end{bmatrix}$$

이다.

그러므로 추종 로봇의 속도 제어 입력 값 $[v_j \ \omega_j]^T$ 을 구하기 위하여 입출력 피드백 선형화 기법을 사용하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\begin{aligned} u_j &= G_1^{-1}(z_{ij}, \beta_{ij})(p_1 - F_1(z_{ij})u_i) \\ &= G_1^{-1}(z_{ij}, \beta_{ij})(K(z_{ij}^d - z_{ij}) - F_1(z_{ij})u_i) \end{aligned} \quad (6)$$

2.3. 동적 제어기 설계

이동 로봇의 선도 로봇 추종 방식은 선도 로봇이 주어진 경로를 이동할 때, 추종 로봇이 선도 로봇과 일정 거리 l_{ij}^d 와 일정 각도 ψ_{ij}^d 를 유지하는 것을 목적으로 한다. 이러한 연구는 선도 로봇과 추종 로봇의 기구학적인 관계만을 고려하여 제어기를 설계할 경우, 실제 추종 로봇의 동적 특성에 의하여 정밀한 추종 성능을 보장할 수 없다. 그러므로 실제 추종 로봇의 동역학을 고려한 제어기를 설계하여야 한다.

본 논문에서 고려하는 비 홀로노믹(nonholonomic) 이동 로봇의 동역학 모델은 식 (7)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d \\ = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $q = [x \ y \ \theta]^T$, $M(q)$ 은 관성(inertia) 행렬, $V_m(q, \dot{q})$ 은 원심력과 코리올리스 행렬, $F(\dot{q})$ 은 마찰력(friction), $G(q)$ 는 중력(gravity), τ_d 는 미지의 외란(disturbance), $B(q)$ 은 입력 변환 행렬, τ 는 입력 토크, $A(q)$ 은 구속 조건 행렬, λ 는 구속력 벡터를 나타낸다.

본 논문에서 이동 로봇의 운동은 수평면에 제한되어 있으므로 중력 $G(q) = 0$, 마찰력과 외란은 무시하였다.

Fig. 2는 식 (7)의 추종 로봇 동역학을 고려한 전체 제어 시스템의 블록선도를 나타내었다. 제어 시스템은 2개의 제어 시스템으로 구성되며, 선도 로봇에 대한 추종 로봇의 기구학 제어를 위한 상위 제어기와 추종 로

봇의 동역학을 고려한 동적 하위 제어기로 구성하였다. 상위 제어기는 식 (6)과 같이 입출력 피드백 선형화 기법을 사용해서 구성하고, 하위 제어기는 각종 산업 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 PID 제어기로 동적 제어기를 구성하였다.

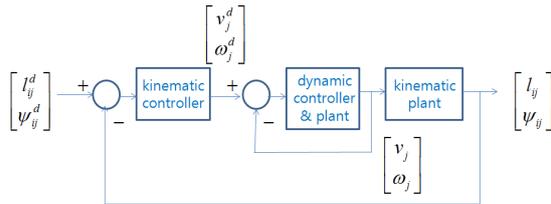


Fig. 2 Block diagram of the total system

2.4. 적응 PID 제어기 설계

Fig. 3은 추종 로봇의 동역학 제어기로서 경사 감소법에 기초한 적응 PID 제어기를 갖는 선도 추종 방식의 군집 로봇 제어시스템을 나타내었다.

일반적으로 PID 제어 방식은 외란이 인가되거나 시스템 부하 및 동적 특성이 비선형적으로 변화할 경우 적절한 이득과 성능을 얻기 어려워 고성능 제어 특성을 기대하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 추종 로봇의 동역학 특성이 고려된 강인한 제어기를 설계하기 위하여 PID 제어기의 이득을 자동 동조하는 적응 PID 제어기를 제안하고자 한다[8].

제어 입력 $\tau_j(t)$ 는 식 (8)과 같이 설계할 수 있다. PID 제어기의 초기 이득은 매우 중요하여 성능에 많은 영향을 줄 수 있다. 따라서 초기 제어 구간에서 안정된 스타트-업을 보장하기 위하여 식 (8)과 같이 제어기의 이득

을 적절한 값으로 설정하고, 그 이득의 변화량을 경사 감소법(gradient descent method)에 의하여 학습하는 방법으로 제안하고자 한다.

$$\tau_j(t) = (K_p + dK_1)e_j(t) + (K_i + dK_2) \int_0^t e_j(\tau) d\tau + (K_d + dK_3)\dot{e}_j(t) \quad (8)$$

여기서, $\tau_j(t) = [\tau_r(t) \ \tau_l(t)]^T$ 파라미터 K_p, K_i, K_d 는 PID 제어기의 일정한 비례, 적분, 미분 이득을 나타내고, dK_1, dK_2, dK_3 는 학습하고자하는 이득의 변화량을 나타내었다.

추종 로봇 바퀴의 희망하는 각속도와 추종 로봇의 동역학에 의해 출력된 각속도의 오차 신호를 사용하여 오차 함수를 구성하고, 오차가 최소화되도록 PID 제어기의 이득 변화량 dK_1, dK_2, dK_3 를 수정하도록 하였다.

오차 함수 $E_p(k)$ 는 식 (9)와 같이 구성하였다.

$$E_p(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 [q_j^d(k) - q_j(k)]^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 e_j^2(k) \quad (9)$$

여기서, $q^d(k) = [\omega_r^d \ \omega_l^d]^T$ 는 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 각속도 목표 값이고, $q(k) = [\omega_r \ \omega_l]^T$ 는 각속도 측정 값이다. 그러므로 $e_j(k)$ 는 샘플링 시간 k 에서의 추종 로봇 바퀴의 각속도 오차를 나타낸다.

PID 제어기의 이득 변화량 dK_1, dK_2, dK_3 의 업데이트를 위한 $\Delta dK_1(k), \Delta dK_2(k), \Delta dK_3(k)$ 는 연쇄법을 사용하여 다음과 같이 정의한다.

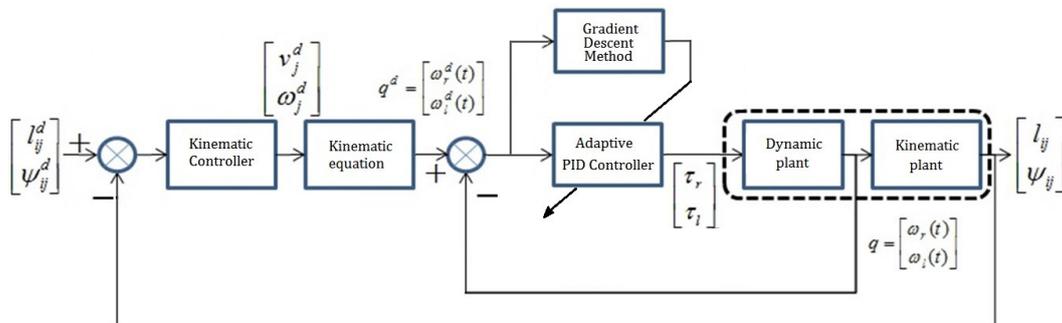


Fig. 3 Leader-follower based formation robots

$$\begin{aligned} \Delta dK_i(k) &= -\zeta_i \frac{\partial E_p(k)}{\partial dK_i(k)} \\ &= -\zeta_i \frac{\partial E_p(k)}{\partial q_j(k)} \frac{\partial q_j(k)}{\partial \tau_j(k)} \frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_i(k)} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2$, ζ_i 는 학습률을 나타낸다. 식 (10)의 각 항들을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E_p(k)}{\partial q_j(k)} = -(q_j^d(k) - q_j(k)) = -e_j(k) \quad (11)$$

그리고 $\frac{\partial q_j(k)}{\partial \tau_j(k)}$ 는 시스템의 자코비안(Jacobian)을 의미한다. 그러므로 수학적으로 근사인 $\frac{\Delta q_j(k)}{\Delta \tau_j(k)}$ 를 사용하였다. 또한 경사 감소학습법의 특성상 크기보다는 이 값이 갖는 부호의 정보가 중요하므로 식 (12)와 같이 사용하였다.

$$\frac{\partial q_j(k)}{\partial \tau_j(k)} = \text{sgn}\left(\frac{\Delta q_j(k)}{\Delta \tau_j(k)}\right) \quad (12)$$

여기서, $\Delta q_j(k) = q_j(k-1) - q_j(k-2)$, $\Delta \tau_j(k) = \tau_j(k-1) - \tau_j(k-2)$ 이다.

$\frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_i(k)}$ 를 구하기 위하여, 먼저 식 (8)를 이산 시간 시스템으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_j(k) &= \tau_j(k-1) + (K_p + dK_1)(e_j(k) - e_j(k-1)) \\ &\quad + (K_i + dK_2)e_j(k) \\ &\quad + (K_d + dK_3)(e_j(k) - 2e_j(k-1) + e_j(k-2)) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)으로부터 $\frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_i(k)}$ 는 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_1(k)} &= (e_j(k) - e_j(k-1)) \\ \frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_2(k)} &= e_j(k) \\ \frac{\partial \tau_j(k)}{\partial dK_3(k)} &= (e_j(k) - 2e_j(k-1) + e_j(k-2)) \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 적응 PID 제어기 이득의 변화량 dK_i 의 온라인 자동 동조를 위한 업데이트 식은 다음과 같다.

$$dK_i(k+1) = dK_i(k) + \Delta dK_i(k) \quad (15)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$ 이다.

III. 제어시스템 구성 및 모의실험

본 장에서는 군집 제어를 위해 선도 로봇과 추종 로봇 1대씩으로 구성하였다. 제안된 적응 PID 제어기의 성능 평가를 위해 선도 로봇이 각기 다른 두 가지 궤적(S 궤적, 직선 궤적)을 가지고 추종 로봇의 무게를 변화시킨 경우에 대하여 추종 로봇의 추종 성능을 평가하고자 한다. 또한 제안된 제어기의 성능 비교를 위해 실험적으로 구한 적절한 이득을 갖는 일반적인 PID 제어기와 비교 평가하였다.

아래 table 1은 선도 로봇과 추종 로봇의 제원 및 초기 자세를 표시하였다. 두 로봇은 3.5(m) 떨어진 위치에서 서로 다른 방향으로 향하여 위치하고 있다. 본 연구에서 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 목표 거리 및 각도를 각각 $l_{ij}^d = 1.5(m)$, $\psi_{ij}^d = 3\pi/4(rad/sec)$ 로 설정하였다.

Table. 1 Robot's dimension and posture

Robot's dimension	Value	
The distance between wheels (m)	$2R = 1$	
Radius of wheel (m)	$r = 0.05$	
Robot's length (m)	$d = 0.1$	
Robot's weight(kg)	10	20
Robot's Inertia ($kg\ m^2$)	5	10
Leader robot's posture (x_i, y_i, θ_i)	$(0, 0, \pi/2)$	
Follower robot's posture (x_j, y_j, θ_j)	$(3.5, 0, -\pi/2)$	

추종 로봇의 PID 제어 입력은 앞의 식 (8)과 같이 설정하였으며, 이것은 PID 제어기의 초기 이득이 성능에 많은 영향을 끼치므로 초기 제어 구간에서 안정된 스타트-업을 보장하기 위해 실험적으로 구한 제어기의 이득을 사용하였다. 본 연구에서 설정된 PID 제어기의 이득

은 $K_p = 1.506$, $K_i = 0.02$, $K_d = 0.0326$ 로 설정하여 사용하였다.

비교 실험은 선도 로봇이 아래 식 (16)과 같이 두 가지 궤적을 가지고, 추종 로봇의 무게와 관성이 변화할 경우에 대한 모의실험이다. S자 궤적은 선도 로봇이 반원을 그릴 후, 다시 반대 방향의 각속도를 가지고 반원을 그리는 궤적을 나타낸다.

$$S \text{ 궤적} : v_r = 0.5(m/sec), w_r = \begin{cases} 0.1(rad/sec) \\ -0.1(rad/sec) \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{직선 궤적} : v_r = 0.5(m/sec), w_r = 0(rad/sec)$$

Fig. 4는 추종 로봇의 무게가 $20kg$, 관성이 $10kg\ m^2$ 일 때, 제안된 적응 PID 제어를 적용하여 S 궤적에 대한 추종 로봇 성능을 0초부터 4초까지 표시하였다. Fig. 4의 약 1.5초 지점에서 추종 로봇이 목표 궤적을 정확히 추종함을 알 수 있다.

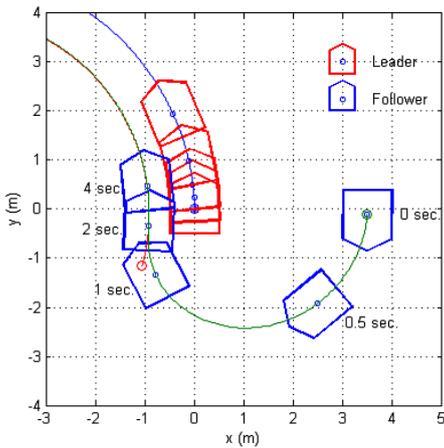


Fig. 4 Trajectories of the leader and follower robots (Adaptive PID controller)

Fig. 5는 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 목표 거리 오차와 각도 오차로 표시하였다. Fig. 5-(a)는 선도 로봇과 추종 로봇의 초기 자세에서 목표 거리 및 각도 오차가 큰 0초에서 6초 사이를 표시하였고, Fig. 5-(b)는 선도 로봇이 각속도 $w_r = 0.1(rad/sec)$ 의 속도로 반원을 그릴 후, 음의 각속도 $w_r = -0.1(rad/sec)$ 를 갖는 반원의 궤적이 주어졌을 때의 30초에서 36초 사이의 오차를 표시하

였다. Fig. 5-(a)는 약 1.5초가 지난 후, 목표 거리 및 각도 오차가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5-(b)는 31.41초 지점에서 선도 로봇의 각속도가 바뀌는 지점으로 두 로봇 사이의 거리 및 각도 오차가 커졌다가 빠르게 줄어들음을 알 수 있다.

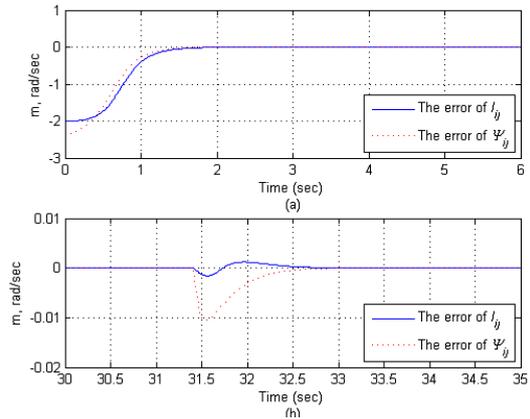


Fig. 5 Tracking distance and angle errors (Adaptive PID controller) (a) 0sec-6sec (b) 30sec-36sec

Fig. 6은 Fig. 4,5와 같이 추종 로봇이 추종할 경우, 제안된 적응 PID 제어기의 이득을 표시하였다. 초기에 설정된 이득값이 선도로봇의 목표거리 및 각도 오차가 클 때 따라 매우 능동적으로 PID 이득값들이 변화됨을 알 수 있다. 이러한 이득값의 변화는 고정된 이득을 사용한 PID 제어 결과에 비해 매우 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

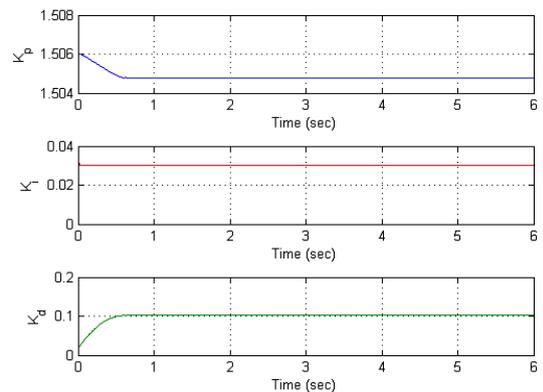


Fig. 6 Gains of adaptive PID controller

Fig. 7은 제안된 적응 PID 제어기의 성능 평가를 위해 일정한 이득을 갖는 일반적인 PID 제어기의 성능을 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 7을 비교하면 제안된 적응 PID 제어기가 일반적인 PID 제어기에 비하여 추종 로봇이 목표 궤적을 더 잘 추종함을 알 수 있다. 특히, 선도 로봇의 각속도가 바뀌는 부분에서의 추종 성능은 제안된 적응 PID 제어기가 일반적인 PID 제어기에 비하여 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다.

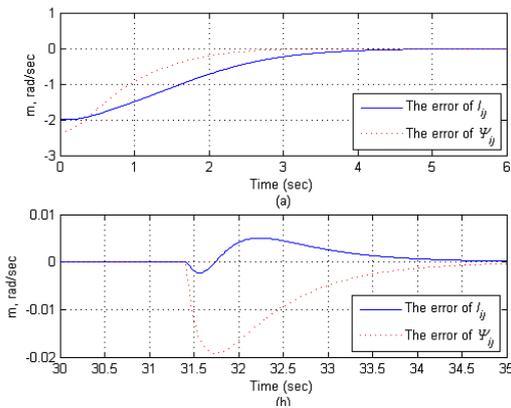


Fig. 7 Tracking distance and angle errors (Conventional PID controller) (a) 0~6sec (b) 30~36sec

Fig. 8은 제안된 적응 PID 제어기와 일반적인 PID 제어기에 대하여 추종 로봇의 무게와 관성이 2가지로 변화할 경우([10kg, 5kg m²], [20kg, 10kg m²]), 0초~6초까지의 거리 및 각도 오차를 표시하였다. 제안된 적응 PID 제어기가 일반적인 PID 제어기에 비하여 거리 오차와 각도 오차가 현저히 줄어들음을 알 수 있으며, 로봇의 질량과 관성이 바뀌어도 빠른 추종 성능을 나타냄을 보였다. 제안된 PID 제어기는 추종 거리 및 추종 각도 모두 약 1.5초 내에서 목표 궤적을 정확히 추종하였으며, 일반적인 PID 제어기는 추종 거리에서는 약 4초, 추종 각도에서는 약 2.5초 후부터 추종함을 알 수 있다.

Fig. 9는 직선 궤적에 대한 두 가지 제어 방법에 대한 궤적 추종 결과이다. 제안된 적응 PID 제어 방법이 일반적인 제어 방법에 비해 빠른 추종 성능을 보임을 알 수 있다. 앞의 궤적 추종 결과와 같이 제안된 적응 PID 제어기는 추종 거리 및 각도 오차를 줄이는 방향으로 PID 제어기의 이득을 변화시켜 최적의 성능을 나타냄을 알 수 있다.

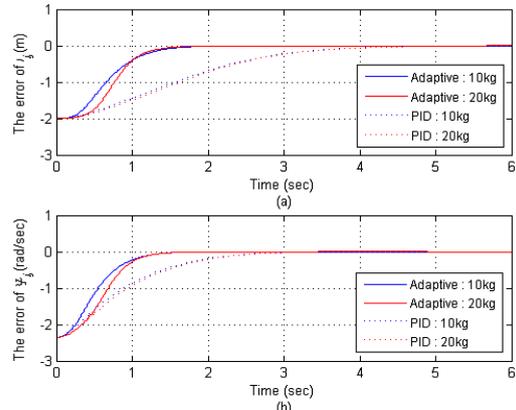


Fig. 8 Tracking errors of S trajectory (a) Distance errors (b) Angle errors

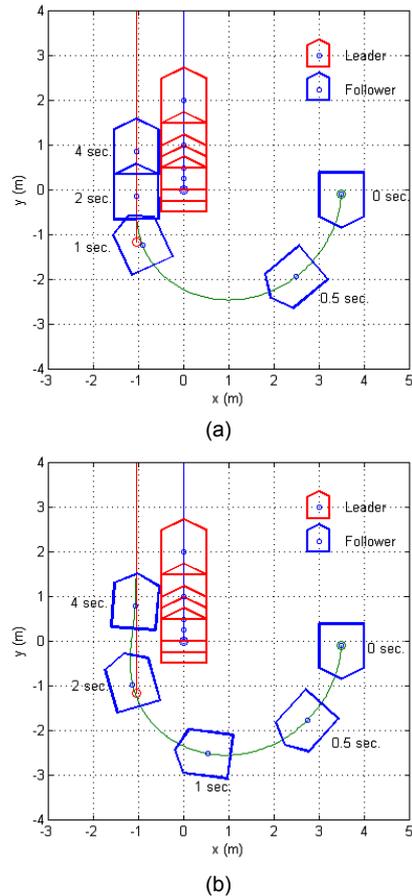


Fig. 9 Trajectories of the leader and follower robots (a) Adaptive PID controller (b) Conventional PID controller

IV. 결 론

본 연구에서는 이동 로봇의 군집제어기에 관한 연구로써 구조가 단순한 PID 제어기의 장점을 살리고, 추종 로봇의 동역학 특성에 강인한 성능을 내는 온라인 적응 PID 제어를 개발하고자 하였다. 모의실험을 통하여 제안된 적응 PID 제어기가 일반적인 PID 제어기에 비하여 군집 제어에서 추종 로봇의 추종 성능인 일정 거리와 일정 각도를 잘 유지함을 확인할 수 있었다. 또한 추종 로봇의 무게가 변화가 될 경우에도 잘 추종함을 알 수 있었다. 이는 제안된 적응 PID 제어기가 추종 거리 및 각도 오차를 줄이는 방향으로 PID 제어기의 이득을 변화시켜 최적의 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 이를 통해 제안된 적응 PID 제어기가 성능이 우수함을 검증할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2014

REFERENCES

[1] Y. Q. Chen and Z. Wang, "Formation control: a review and a new consideration," *Proc. IEEE International Conference*

on Intelligent Robots and systems, pp. 3181-3186, Aug 2005.

[2] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics," *Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3805-3810, 1995.

[3] A. M. Bloch, M. Reyhanoglu and N. H. McClamroch, "Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, pp. 1746-1757, 1992.

[4] N. Sarkar, X. Yun and V. Kumar, "Control of mechanical system with rolling constraints: Application to dynamical control of mobile robots," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 55-69, 1994.

[5] E. R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans on Neural Networks*, vol. 9, no. 4, July 1998.

[6] Aweek K. Das et. al., "A vision-based formation control framework," *IEEE Trans on Robotics and Automaton*, vol. 18, no. 5, Oct 2002.

[7] Y. B. Kim, J. H. Park and Y. K. Choi, "Design of PID controller with adaptive neural network compensator for formation control of mobile robots," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 3, Mar 2014.

[8] J. H. Park, H. D. Kim and Y. K. Choi, "An Adaptive PID Controller Design based on a Gradient Descent Learning," *Journal of the Korean Institute of Maritime Information and Commucation Sciences*, vol. 10, no. 2, Feb 2006.



박진현(Jin-Hyun Park)

1992년 2월 부산대학교 전기공학과 공학사
 1994년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 1997년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학박사
 1997년 3월 ~ 1999년 2월 부산정보대학 전기전자계열 전임강사
 1996년 7월 ~ 1997년 8월 Dept. of System Engineering, Arkansas Univ., at Little Rock, Visiting Scholar
 1999년 3월 ~ 현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수
 ※ 관심분야: 지능제어, 최적제어, 로봇틱스, 제어계측



최영규(Young-Kiu Choi)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 공학사
 1982년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
 1987년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
 1986년 ~ 현재 부산대학교 전기공학과 교수
 ※ 관심분야: 로봇제어, 지능제어, 신경회로망 등