

구동기 동역학을 가지는 이동 로봇에 대한 FBFN을 이용한 강인 적응 퍼지 추종 제어

Robust Adaptive Fuzzy Tracking Control Using a FBFN for a Mobile Robot with Actuator Dynamics

신진호*, 김원호, 이문노
(Jin-Ho Shin, Won-Ho Kim, and Moonoh Lee)

Abstract: This paper proposes a robust adaptive fuzzy tracking control scheme for a nonholonomic mobile robot with external disturbances as well as parameter uncertainties in the robot kinematics, the robot dynamics, and the actuator dynamics. In modeling a mobile robot, the actuator dynamics is integrated with the robot kinematics and dynamics so that the actuator input voltages are the control inputs. The presented controller is designed based on a FBFN (Fuzzy Basis Function Network) to approximate an unknown nonlinear dynamic function with the uncertainties, and a robust adaptive input to overcome the uncertainties. When the controller is designed, the different parameters for two actuator models in the actuator dynamics are taken into account. The proposed control scheme does not require the kinematic and dynamic parameters of the robot and actuators accurately. It can also alleviate the input chattering and overcome the unknown friction force. The stability of the closed-loop control system including the kinematic control system is guaranteed by using the Lyapunov stability theory and the presented adaptive laws. The validity and robustness of the proposed control scheme are shown through a computer simulation.

Keywords: robust adaptive fuzzy control, FBFN (Fuzzy Basis Function Network), mobile robot, Lyapunov stability, actuator dynamics

I. 서론

공장 자동화, 사무 자동화, 발전소, 군사용, 원격 탐사용 등 산업용으로 많이 연구되어 왔던 이동 로봇이 청소기, 엔터테인먼트용, 가정용, 공공 서비스용, 경비용, 재난 방재용, 특수 목적 서비스용 등으로 그 응용 범위가 날로 더욱 확대되어 연구되고 있다.

이동 로봇의 연구 분야는 그 세부 분야에 따라 여러 가지로 나뉘어 질 수 있으며, 그 중에서 제어 문제는 기본적인 요소라고 할 수 있다. 특히, 논홀로노믹 이동 로봇의 기구학적 특성을 고려한 궤적 추종 제어 문제에 대하여 많은 연구 결과가 제시되어 왔다. 궤적 추종 문제는 로봇이 주어진 기준 궤적을 추종하며 따라가도록 하는 것이다. 논홀로노믹 이동 로봇의 기구학적 모델을 이용하여 다양한 방법들이 추종 제어 문제들을 풀기 위해 제안되어왔다[1-5]. 그러나 초기에 제시되었던 궤적 추종 제어 기법들은 로봇 동역학이 고려되지 않았고, 기구학적 모델만 고려하여 속도 제어 입력을 이용하였다. 그리고 대부분의 기구학적 궤적 추종 제어가 속도 제어 입력을 발생시키기 위하여 “완전한 속도 추종”을 가정하였다.

기구학적 모델만이 아니라, 로봇의 동적 특성을 고려할 필요성에 따라 동적 파라미터들을 정확하게 얻을 수 있다는 가정하에서 기구학 제어기와 통합된 동역학 토크 제어기가 제시되었다[6]. 그러나 동적 파라미터들을 정확하게 얻는 것이 매우 어려운 실제 상황에서는 이러한 가정이 성립하기는 쉽

지 않다. 강인 적응 제어[7], 슬라이딩 모드 제어[8], T-S모델 기반 모델참조 적응 퍼지 제어[9], 신경회로망[10], 적응 제어[11], 적응 퍼지 제어[12]등과 같은 여러 제어 기법들을 이용하여 이동 로봇에 대한 동역학 제어기를 제시하는 연구 결과가 제안되어왔다. 이러한 제어기들은 로봇 동역학 모델을 기반으로 하여 주로 로봇의 동적 파라미터 불확실성과 외란을 극복하도록 제안되었다. 그러나, 이러한 방법들은 구동기 동역학을 제어기 설계에서 고려하지 않았다. 일반적으로 구동기의 동적 특성도 로봇의 모션에 영향을 미치게 되며, 바퀴에 장착된 구동기의 제어 입력으로서 토크보다는 입력 전압을 사용하는 것이 더 효과적이며 실제적이다. 따라서 로봇 동역학에 구동기 동역학을 통합하여 제어기를 설계 할 필요가 있다.

이에 이동 로봇에 대하여 구동기 동역학을 고려한 동역학 제어기에 대한 연구가 제시되어왔다[13,14,18]. 하지만, 이러한 연구들은 구동기 파라미터와 로봇의 기구적 파라미터에 대한 불확실성에 대처하기 어렵다.

한편, 콤팩트 입력 공간에 걸쳐 비선형 함수를 균일하게 근사화하는 능력을 가진 퍼지 기저 함수망(FBFN: Fuzzy Basis Function Network)이 제안되어 왔다[15-17]. FBFN을 이용하여 이동 로봇의 동역학에 구동기 동역학을 고려하며 구동기와 로봇의 파라미터 불확실성 및 외란을 극복할 수 있는 궤적 추종 제어 기법에 대한 연구는 그리 많지 않다. 이러한 구동기 동역학을 고려하며 퍼지 기법에 기반한 적응 퍼지 제어기[18,19]에서 제안되었다. [18]에서 제안된 제어기는 로봇 동적 파라미터의 사전 정보를 요구하지 않지만, 구동기 파라미터와 로봇의 기구적 파라미터가 제어기에서 필요하고, 또한 양쪽 바퀴의 구동기가 동일한 파라미터를 사용하였다. 이러한 문제점을 [19]에서 제안된 제어 기법을 통하여 해결하였다.

하지만, [19]에서 제안된 제어기는 입력 떨림(input chattering)

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 30., 수정: 2009. 11. 30., 채택확정: 2010. 1. 11.

신진호, 김원호: 동의대학교 메카트로닉스공학과

(jshin7@deu.ac.kr/kwh@deu.ac.kr)

이문노: 동의대학교 컴퓨터공학과(mnlee@deu.ac.kr)

※ 이 논문은 2009학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

을 내재하고 있으며 적응 법칙에서 추정치는 이론적으로 시간이 무한대로 갈수록 계속 증가하므로 이런 현상을 개선할 필요가 있다. 또한 로봇 동역학 모델링에서 마찰력과 구동기 동역학에서 전압 외란을 각각 고려하여 제어기에서 극복할 필요가 있다. 제한적이지 않고 보다 다양한 기준 제적을 추종할 수 있는 기구학적 제어기가 제시될 필요가 있다.

본 논문에서는 논홀로노믹 이동 로봇에 대하여 강인 적응 퍼지 추종 제어 기법을 제안한다. 구동기 동역학을 포함한 통합된 로봇 동역학이 모델링되고 양쪽 바퀴의 구동기 파라미터를 다르게 모델링한다. 로봇 동역학에서 표면 마찰력이 고려되며 제안되는 제어기는 비선형 동역학 방정식을 근사하는 FBFN을 이용하며 구동기와 로봇의 기구적 및 동적 파라미터의 불확실성과 토크 및 전압 외란에 대처하며 정확한 값을 요구하지 않도록 구성된다. 리아푸노프 함수 이론에 기반하여 적응 법칙이 유도되고 입력 떨림이 완화된 제어 법칙이 제시되며, 기구학적 제어를 포함한 페루프 제어 시스템의 안정도가 보장된다. 제안된 제어 기법의 타당성과 강인성을 보이기 위해 파라미터 불확실성, 동적 파라미터의 변동과 외란이 존재하는 이동 로봇에 대한 시뮬레이션 결과를 보인다. 본 논문에서 제안된 적응 법칙과 제어기는 앞에서 언급 하였던 [19]에서 제시된 제어기에서 포함하지 않은 요소나 극복하지 못한 문제점들을 고려하고 해결한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II 장에서는 이동 로봇의 기구학, 동역학, 구동기 동역학 및 통합 모델링을 보인다. III 장에서는 FBFN에 기반한 강인 적응 퍼지 추종 제어기의 설계와 리아푸노프 함수 이론을 이용한 안정도 증명에 대해 제시하며, IV 장에서는 이동 로봇에 대한 시뮬레이션 결과가 주어지며, V 장에서 결론을 맺는다. 부록 A와 부록 B에서는 각각 기구학적 제어기의 안정도 증명과 기구학적 제어기에서의 제어 이득을 얻는 방법의 예가 보이며 이 방법으로 얻은 제어 이득이 시뮬레이션에서 이용된다.

II. 이동 로봇 시스템

1. 이동 로봇의 기구학과 동역학

본 논문에서 대상으로 하는 이동 로봇과 좌표계는 그림 1과 같으며, 전역적 기준 좌표계 $\{O, X, Y\}$ 에서 이동 로봇의 자세는 일반화된 좌표계 $q = [x \ y \ \theta]^T$ 에 의해 나타낼 수 있다. 여기서 x 와 y 는 전역적 기준 좌표계에 대하여 질량 중심점 C 의 좌표점을 나타내고, θ 는 전역 기준 좌표계의

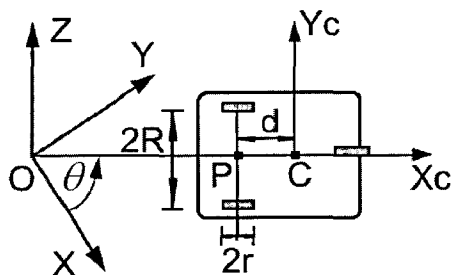


그림 1. 논홀로노믹 구륜 이동 로봇과 좌표계.
Fig. 1. A nonholonomic wheeled mobile robot and the coordinate frames.

X 축으로부터 측정된 로봇 플랫폼에 붙은 지역 좌표계 $\{C, X, Y\}$ 의 방향을 나타낸다.

n 개의 일반화된 공간 변수 (q_1, q_2, \dots, q_n) 와 m 개의 구속 조건을 가진 n 차원의 구성 공간 C 를 가진 논홀로노믹 이동 로봇 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A(q)\lambda \tag{1}$$

여기서 $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 대칭 양한정 관성 행렬, $V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 구심력과 코리올리력 행렬, $F(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ 는 표면 마찰력을 나타내는 벡터, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 는 중력 벡터, $\tau_d \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 는 $\|\tau_d\| \leq \tau_{d \max}$ 로서 모델링이 되지 않은 동역학을 포함한 미지의 외란, $\tau_{d \max}$ 는 미지의 상수, $B(q) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ 는 입력 변환 행렬, $\tau \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ 는 입력 토크 벡터, $A(q) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 는 구속조건과 연관된 행렬, 그리고 $\lambda \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 는 구속력 벡터를 나타낸다.

속도 관계를 나타내는 기구학적 방정식 또는 조향 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q} = S(q) \cdot v \tag{2}$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 $v = [v_1 \ w_a]^T$ 는 속도 벡터, v_1 과 w_a 는 로봇 축을 따라 P점에서의 각각 로봇의 선속도와 각속도를 나타낸다. 위의 행렬 $S(q)$ 는 구륜 이동 로봇의 순수 굴림(pure rolling)만 있고 옆으로의 미끄러짐이 없는 조건(non-slipping)에서 다음의 논홀로노믹 구속조건으로부터 쉽게 얻을 수 있다.

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

이동 로봇의 궤적은 수평면에 제한되어지기 때문에 $G(q) = 0$ 이다. 식 (2)를 위의 이동 로봇의 동역학 방정식 (1)에 대입하여 이동 로봇 플랫폼의 통합된 운동 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{M}\dot{v} + \bar{V}_m v + \bar{F} + \bar{\tau}_d = \bar{B}\tau \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \bar{M} &= S^T M S, \quad \bar{V}_m = S^T (M\dot{S} + V_m S), \\ \bar{F} &= S^T F, \quad \bar{\tau}_d = S^T \tau_d, \quad \bar{B} = S^T B \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$ 는 바퀴의 토크 벡터, τ_r 과 τ_l 은 각각 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 토크이다.

- 성질 1: \bar{M} 은 균일하게 대칭 양한정 행렬이다[7,10,18].
- 성질 2: $(\bar{M} - 2\bar{V}_m)$ 는 교대대칭(skew symmetric)이다[7,10,18].
- 성질 3: $\|S(q)\| \leq s_{1 \max}$, $\|\dot{S}(q)\| \leq s_{2 \max} \|\dot{\theta}\|$, $\|\bar{M}(q)\| \leq \bar{M}_{\max}$, $\|\bar{V}_m(q, \dot{q})\| \leq \bar{V}_{1 \max} \|\dot{\theta}\| + \bar{V}_{2 \max} \|\dot{q}\|$, $\|\bar{F}(\dot{q})\| \leq \bar{F}_{1 \max} + \bar{F}_{2 \max} \|\dot{v}\|$, $\|\bar{B}\| \leq \bar{B}_{\max}$, $\|\bar{\tau}_d\| \leq \bar{\tau}_{d \max}$ 를 만족하는 미지의 양의 상수 $s_{1 \max}$, $s_{2 \max}$, \bar{M}_{\max} , $\bar{V}_{1 \max}$, $\bar{V}_{2 \max}$, $\bar{F}_{1 \max}$, $\bar{F}_{2 \max}$, \bar{B}_{\max} , $\bar{\tau}_{d \max}$ 가 존재한다[7].

2. 구동기 동역학

구동기의 전기적인 부분과 동적 모델이 함께 고려된다. 여기서 고려되는 양쪽의 구동기들은 모두 DC 모터이다. 일반적으로 이동로봇의 양쪽 바퀴의 구동기는 각각 다른 파라미터들을 가질 수 있고, 각각의 구동기 파라미터들도 제어기 설계에서는 정확히 알려지지 않는다고 가정된다.

오른쪽과 왼쪽의 구동기 모터에 대한 기전방정식들은 다음과 같이 얻을 수 있다. 이 때, 모터 인덕턴스는 본 모델에서는 무시된다.

$$\tau_{sr} = K_{Tr}i_r, \quad u_r = R_{ar}i_r + K_{br}\dot{\theta}_{mr} + u_{dr} \quad (7)$$

$$\tau_{sl} = K_{Tl}i_l, \quad u_l = R_{al}i_l + K_{bl}\dot{\theta}_{ml} + u_{dl} \quad (8)$$

여기서 τ_{sr} 과 τ_{sl} 은 각각 오른쪽과 왼쪽의 모터에 생성된 토크, K_{Tr} 과 K_{Tl} 은 각각 오른쪽과 왼쪽의 모터 토크 상수, i_r 과 i_l 은 오른쪽과 왼쪽 모터에 흐르는 전류, R_{ar} 과 R_{al} 은 오른쪽과 왼쪽 모터의 전기 저항, K_{br} 과 K_{bl} 은 오른쪽과 왼쪽 모터의 역기전력 상수, $\dot{\theta}_{mr}$ 과 $\dot{\theta}_{ml}$ 은 오른쪽과 왼쪽 모터의 각속도, $u_d = [u_{dr} \ u_{dl}]^T$ 는 $\|u_d\| \leq u_{dmax}$ 로서 모델링이 되지 않는 미지의 전압 외란, $u = [u_r \ u_l]^T$ 은 구동기 입력 전압, u_r 과 u_l 은 각각 오른쪽과 왼쪽 구동기의 입력 전압이다.

한편, 구동기 모터의 각속도와 바퀴의 각속도의 관계, 모터 토크와 바퀴의 토크의 관계, 그리고 바퀴의 각속도와 이동로봇 플랫폼의 속도와의 관계를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\phi}_r = \frac{\dot{\theta}_{mr}}{N_r}, \quad \dot{\phi}_l = \frac{\dot{\theta}_{ml}}{N_l} \quad (9)$$

$$\tau_r = N_r \tau_{sr}, \quad \tau_l = N_l \tau_{sl} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = X \cdot v = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & R \\ 1 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $\dot{\phi}_r$ 과 $\dot{\phi}_l$ 은 각각 오른쪽과 왼쪽 바퀴의 각속도이며, N_r 과 N_l 은 오른쪽과 왼쪽 모터의 기어비이다. 또한, 그림 1에서 보여지듯이 r 은 바퀴의 반지름이며, R 은 p점에서 바퀴중심점까지의 거리이다. 이 때 $X = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & R \\ 1 & -R \end{bmatrix}$.

3. 구동기 동역학을 포함한 이동로봇의 통합 동역학 모델

앞에서 얻어진 구동기 동역학 관계식 (7)-(11)을 이동로봇의 운동방정식 (5)에 대입하여 구동기 동역학을 포함한 이동로봇의 통합 동역학 모델을 구할 수 있다.

결론적으로 구동기 동역학을 포함한 이동로봇의 통합 동역학 모델식은 다음과 같다.

$$\bar{M}\dot{v} + \bar{V}_m v + \bar{B}D_u v + \bar{F} + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d = H u \quad (12)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R & -R \end{bmatrix}, \quad H = \bar{B}D_u, \quad \bar{u}_d = H u_d, \\ D_u = \text{diag} \left(\frac{N_r K_{Tr}}{R_{ar}}, \frac{N_l K_{Tl}}{R_{al}} \right), \quad (13) \\ D_v = \text{diag} \left(\frac{N_r^2 K_{Tr} K_{br}}{R_{ar}}, \frac{N_l^2 K_{Tl} K_{bl}}{R_{al}} \right) \cdot X.$$

여기서 $\text{diag}(a_1, a_2)$ 는 대각 요소 a_i 의 2×2 대각 행렬, $u = [u_r \ u_l]^T$ 은 구동기 입력 전압 벡터로 바퀴의 토크 벡터 τ 대신에 로봇에 대한 실제 제어 입력으로 사용되며, 그리고 전압 외란의 노음의 상한 경계는 $\|u_d\| \leq u_{dmax}$ 이다.

로봇 동역학에 구동기 동역학을 포함하여 제어기 설계에 이용함으로써 실제적인 구동기 전압을 로봇에 입력으로 이용할 수 있게 되며 로봇 플랫폼의 동적 특성과 구동기의 동적 특성을 함께 고려할 수 있다.

III. FBFN을 이용한 강인 적응 퍼지 추종 제어기의 설계

1. 이동로봇에 대한 전체 제어 시스템

그림 2는 이동로봇에 대한 전체 제어 시스템의 블록 선도를 나타낸다. 기구학 제어기의 출력이 되는 로봇의 속도 명령 벡터가 동역학 제어기의 입력 명령으로서 작용한다.

이동로봇의 기구학 모델에 대해 "정확한 속도 추종"을 가정한다면 기구학 모델은 점근적으로 안정하게 된다.

이동로봇의 기준 목표 궤적 $q_r(t)$ 과 실제 위치와 방향 궤적 $q(t)$ 은 각각 $q_r(t) = [x_r(t) \ y_r(t) \ \theta_r(t)]^T$ 과 $q(t) = [x(t) \ y(t) \ \theta(t)]^T$ 로 나타낼 수 있다. 추종 오차는 이동로봇에 고정된 좌표계에 기반하여 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$E_p = T_e E_q = T_e (q_r - q), \quad E_q = q_r - q, \quad (14)$$

$$E_p = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = T_e E_q = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}. \quad (15)$$

여기서 E_q 는 이동로봇의 위치와 방향각에 대한 목표 기준 궤적과 실제 궤적 간의 위치 및 방향 추종 오차이다.

이동로봇의 기구학 모델에 대해 보조 속도 제어 입력 벡터는 [5]에서 제안된 제어기 형태와 유사하게 다음의 식 (16)과 같이 제시된다.

$$v_c = \begin{bmatrix} v_{lc} \\ w_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ w_r + k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} + k_3 k_3 e_3 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

여기서 v_r 과 w_r 은 이동로봇에 대한 각각 기준 궤적의 선속도와 각속도이고, $k_1 > 0$, $k_2 > 0$ 와 $k_3 > 0$ 는 제어 이득이다. 속도 제어 입력 (16)은 $d=0$ 일 때 시간이 무한대로 감에 따라 E_p 의 점근적인 추종이 보장되며 이것의 증명은 부록 A에서 보인다.

첨언 1: [1]에서 제안된 기구학적 제어기는 e_3 가 초기에 $n\pi$ (n : 정수) (rad)의 값을 가질 때 e_3 가 0으로 수렴하지 못하고 어떤 유한한 값에 수렴하므로 궤적 계획에서 $n\pi$ 를 회피하여야 하는 문제가 있으며 궤적 추종 중에 e_3 가 $n\pi$ 를 만나면 0으로 수렴하지 못할 수 있다. 또한, [1]에서의 제어기는 안정도 보장을 위해 $v_r > 0$ 을 요구하였지만 (16)의 제어기는 안정도 보장을 위해 $v_r \neq 0$ 만 필요하다. 다시 말해서 $v_r < 0$ 와 $v_r > 0$ 모두 가능하다는 장점을 가진다.

일단 보조 속도 제어 입력 벡터 $v_c(t) \in \mathbb{R}^{n-m}$ 가 (16)과 같

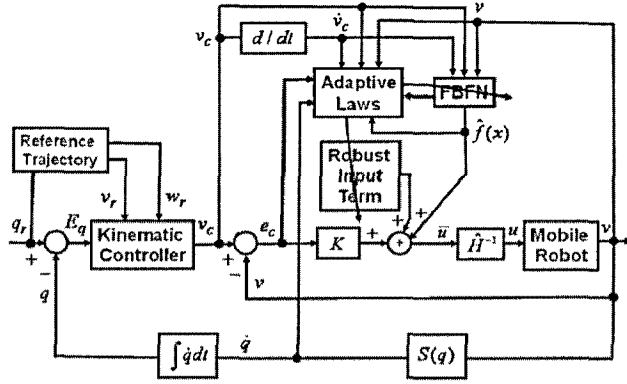


그림 2. 이동 로봇에 대한 전체 제어 시스템.

Fig. 2. The block diagram of the whole control system for a mobile robot.

이 얻어진다면, 미지의 로봇 및 구동기의 파라미터 불확실성과 외란을 극복하며 안정하고 강인한 궤적 추종을 보장하기 위한 구동기의 전압 제어 입력 u 를 설계한다.

보조 속도 추종 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$e_c = v_c - v \quad (17)$$

시간에 대해 (17)을 미분한 다음에 그것을 (12)에 대입하면 로봇 동역학은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{M}\dot{e}_c = -\bar{V}_m e_c + \bar{M}\dot{v}_c + \bar{V}_m v_c + \bar{B}D_v v + \bar{F} - Hu + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d \quad (18)$$

여기서 구동기와 로봇의 기구적 및 동적 파라미터를 포함한 로봇 비선형 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \bar{M}\dot{v}_c + \bar{V}_m v_c + \bar{B}D_v v + \bar{F} \quad (19)$$

위의 비선형 함수 (19)는 다음의 FBFN [15]을 사용하여 근사화될 수 있다.

$$f(x) \cong R_{\beta}(x)\Phi + \varepsilon(x) = \begin{bmatrix} \sum_{j_1=1}^{N_1} p_{v_{j_1}}(x)\phi_{v_{j_1}} \\ \sum_{j_2=1}^{N_2} p_{w_{j_2}}(x)\phi_{w_{j_2}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_v(x) \\ \varepsilon_w(x) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$p_{v_{j_1}}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i)}{\sum_{j_1=1}^{N_1} \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^1}(x_i)},$$

$$p_{w_{j_2}}(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^2}(x_i)}{\sum_{j_2=1}^{N_2} \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^2}(x_i)}, \quad (21)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j_1 = 1, 2, \dots, N_1; \quad j_2 = 1, 2, \dots, N_2.$$

여기서 $p_{v_{j_1}}(x)$ 와 $p_{w_{j_2}}(x)$ 는 퍼지 IF-THEN 규칙에 대응하는 퍼지 기저 함수(fuzzy basis functions)라고 한다. $x = (v_c, \dot{v}_c, v)$ 는 퍼지 기저 함수들의 입력 변수 벡터, n 은 입력 변수 (x_i) 의 개수, N_1 과 N_2 는 퍼지 규칙의 개수, $R_{\beta}(x) = R_{\beta}(v_c, \dot{v}_c, v) \in \mathfrak{R}^{2 \times \max(N_1, N_2)}$ 는 퍼지 기저 함수들의 행렬, $\Phi = [\phi_v^T \quad \phi_w^T]^T \in \mathfrak{R}^{2 \times \max(N_1, N_2)}$ 는 비선형 함수를 근사하기 위해 결정되는 미지의 상수 벡터인 목표 파라미터 벡터,

그리고 $\varepsilon(x)$ 는 근사화 오차 벡터이다. 또한, $\mu_{A_i^1}(x)$ 와 $\mu_{A_i^2}(x)$ 는 다음과 같이 정의되는 가우시안 멤버십 함수(Gaussian membership functions)이다.

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = a_i^j \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j} \right)^2 \right], \quad 0 < a_i^j \leq 1 \quad (22)$$

여기서 $\exp(\cdot)$ 는 지수함수를 나타내며, a_i^j , \bar{x}_i^j , σ_i^j 는 실수 파라미터들이다.

성질 4: 성질 3과 FBFN (20)와 (21)의 구조로부터 다음을 만족하는 미지의 양의 상수 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3, \bar{\theta}_4, \bar{\theta}_5$ 가 존재한다.

$$\|\varepsilon(x)\| \leq \bar{\theta}_1 + \bar{\theta}_2 \|\dot{v}_c\| + \bar{\theta}_3 \|\dot{\theta}\| \|v_c\| + \bar{\theta}_4 \|\dot{q}\| \|v_c\| + \bar{\theta}_5 \|v\| = \rho_e. \quad (23)$$

2. 강인 적응 퍼지 추종 제어기의 설계

구동기 파라미터와 로봇 기구적 파라미터를 포함한 입력 행렬 H 가 정확히 알려지지 않는다는 것이 고려된다. 따라서, 제어 입력은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$u = \hat{H}^{-1} \bar{u} \quad (24)$$

여기서 행렬 \hat{H} 은 행렬 H 의 추정되는 공칭 파라미터 값들(nominal parameter values)을 가지며, \bar{u} 는 강인 적응 퍼지 제어 입력이다.

식 (24)를 식 (18)에 대입하면, e_c 에 대한 페루프 오차 동역학 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{M}\dot{e}_c = -\bar{V}_m e_c + f(x) + (I - H\hat{H}^{-1})\bar{u} - \bar{u} + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d \quad (25)$$

가정 1: 다음을 만족하는 양의 상수 C_0 가 존재한다고 가정한다.

$$\|I - H\hat{H}^{-1}\| \leq C_0 < 1 \quad (26)$$

정리 1: 가정 1의 아래에서, 다음의 제어 법칙과 적응 법칙 (27)-(31)이 이동 로봇 시스템 (12)-(13)에 적용된다면, e_c 는 균등궁극유계(Uniformly Ultimately Bounded: 이하 UUB)이다. 그러므로 보조 속도 제어기 (16)에 의해 추종 오차들 e_1, e_2, e_3 도 UUB이다. 따라서 이동 로봇의 목표 기준 궤적 q_r 과 실제 궤적 q 간의 위치와 방향 추종 오차 $E_q (= q_r - q)$ 도 UUB가 된다.

$$u = \hat{H}^{-1} \bar{u} = \hat{H}^{-1} [\hat{f}(x) + u_s], \quad (27)$$

$$\hat{f}(x) = R_{\beta}(v_c, \dot{v}_c, v)\hat{\Phi}, \quad (28)$$

$$u_s = \hat{\rho} \frac{e_c}{\|e_c\| + \varepsilon} + K e_c, \quad \hat{\rho} = \hat{\Theta}^T \psi, \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\Phi}} = \Gamma_{\phi} R_{\beta}^T e_c, \quad \dot{\hat{\Theta}} = \Gamma_{\theta} (\psi \|e_c\| - \gamma \|e_c\| \hat{\Theta}) \in \mathfrak{R}^7, \quad (30)$$

$$\psi = [1, \|\dot{v}_c\|, \|\dot{\theta}\| \|v_c\|, \|\dot{q}\| \|v_c\|, \|v\|, \|R_{\beta} \hat{\Phi}\|, \|e_c\|]^T \in \mathfrak{R}^7. \quad (31)$$

여기서 $\hat{f}(x)$ 는 FBFN과 적응 법칙을 사용하여 추정된 비선

형 로봇 함수 $f(x)$ 의 추정치, u_s 는 강인 적응 제어 입력 항, $\hat{\Phi}$ 는 (30)에 의해 갱신된 추정치이다. 추정치 $\hat{\Phi}$ 의 차원은 FBFN에서 사용된 퍼지 기저 함수와 퍼지 규칙에 의해 결정된다. $\hat{\Theta}$ 도 (30)에 의해 갱신되며, $\hat{\Theta}(t)$ 의 초기값 $\hat{\Theta}(0)$ 은 양수로 정해져야 한다. ψ 는 안정도 증명에서 얻어지는 노름 경계 함수(norm-bounding function)이다. ε 과 γ 는 양의 작은 상수로 정의되며, K , Γ_ϕ , 그리고 Γ_θ 는 양의 대각 이득 상수 행렬이다. \square

3. 안정도 증명

증명: 다음과 같이 리아푸노프 함수 후보를 고려해보자.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (32)$$

여기서

$$V_1 = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{2k_2}e_3^2, \quad (33)$$

$$V_2 = \frac{1}{2}e_c^T \bar{M}e_c + \frac{1}{2}\tilde{\Phi}^T \Gamma_\phi^{-1} \tilde{\Phi}, \quad (34)$$

$$V_3 = \frac{(1-C_0)}{2} \tilde{\Theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \tilde{\Theta}. \quad (35)$$

파라미터 오차 벡터는 $\tilde{\Phi} = \hat{\Phi} - \Phi$ 이고, $\tilde{\Theta} = \hat{\Theta} - \Theta$ 이다.

식 (33)의 V_1 의 시간에 대한 미분인 \dot{V}_1 는 (15)-(16)에서의 추종 오차와 보조 속도 제어 입력을 적용하여 결과적으로 부록 A의 식 (A-4)에서 보여지듯이 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{k_2} \dot{e}_3 e_3 = -k_1 e_1^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (36)$$

시간에 대해 V_2 를 미분하고 오차 동역학 방정식 (25)을 제 여기 (27)-(31)에 적용하면, \dot{V}_2 는 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{1}{2} \dot{e}_c^T \bar{M} e_c + \frac{1}{2} e_c^T \dot{\bar{M}} e_c + \frac{1}{2} e_c^T \bar{M} \dot{e}_c + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\Phi}}^T \Gamma_\phi^{-1} \tilde{\Phi} \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{\Phi}^T \Gamma_\phi^{-1} \dot{\tilde{\Phi}} = e_c^T \bar{M} \dot{e}_c + \frac{1}{2} e_c^T \dot{\bar{M}} e_c + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\Phi}}^T \Gamma_\phi^{-1} \tilde{\Phi} \\ &= \frac{1}{2} e_c^T \dot{\bar{M}} e_c + e_c^T (-\bar{V}_m e_c + f - H\hat{H}^{-1} \bar{u} + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d) \\ &\quad + e_c^T R_\beta \Gamma_\phi \Gamma_\phi^{-1} \tilde{\Phi} \\ &= e_c^T \left(\frac{1}{2} \dot{\bar{M}} - \bar{V}_m \right) e_c + e_c^T (f - H\hat{H}^{-1} \bar{u} + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d) \\ &\quad + e_c^T R_\beta \tilde{\Phi} \end{aligned} \quad (37)$$

여기서 $\dot{\tilde{\Phi}} = \dot{\hat{\Phi}}$ 이며, 성질 2에 의해 $e_c^T \left(\frac{1}{2} \dot{\bar{M}} - \bar{V}_m \right) e_c = 0$ 이다. 위의 식 (37)을 정리하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_c^T \left[R_\beta \tilde{\Phi} + \varepsilon - H\hat{H}^{-1} (R_\beta \hat{\Phi} + u_s) + \bar{\tau}_d + \bar{u}_d \right] + e_c^T R_\beta \tilde{\Phi} \\ &= e_c^T (R_\beta \hat{\Phi} + \varepsilon) - e_c^T H\hat{H}^{-1} (R_\beta \hat{\Phi} + u_s) + e_c^T \bar{\tau}_d + e_c^T \bar{u}_d \\ &= e_c^T \varepsilon - e_c^T u_s + e_c^T \left[R_\beta \hat{\Phi} - H\hat{H}^{-1} (R_\beta \hat{\Phi} + u_s) + u_s \right] \\ &\quad + e_c^T \bar{\tau}_d + e_c^T \bar{u}_d \end{aligned}$$

$$= e_c^T \varepsilon - e_c^T u_s + e_c^T (I - H\hat{H}^{-1}) (R_\beta \hat{\Phi} + u_s) + e_c^T \bar{\tau}_d + e_c^T \bar{u}_d \quad (38)$$

성질 3, 성질 4 및 가정 1로부터, 식 (38)의 상한 경계는 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{V}_2 \leq \bar{\rho}_e \|e_c\| + C_o \|e_c\| \|R_\beta \hat{\Phi}\| + C_o \|e_c\| \|u_s\| - e_c^T u_s, \quad (39)$$

여기서 $\bar{\rho}_e = \rho_e + \bar{\tau}_{d\max} + \bar{u}_{d\max}$.

식 (29)에서 u_s 의 정의로부터 다음의 경계를 구할 수 있다.

$$\|u_s\| \leq \|\hat{\rho}\| + \|K\| \|e_c\| \leq \hat{\rho} + K_{\max} \|e_c\| \quad (40)$$

여기서 $\hat{\Theta}(0)$ 의 초기값은 양의 상수로 주어지며 따라서 항상 $\hat{\Theta}(t) > 0$ 이며 $\hat{\rho}(t) > 0$ 이다. 그리고 $\|K\| \leq K_{\max}$, K_{\max} 은 양의 상수이다.

식 (39)에 (29)와 (40)을 대입하여 다음 부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -e_c^T K e_c - \hat{\rho} \frac{\|e_c\|^2}{\|e_c\| + \varepsilon} + \bar{\rho}_e \|e_c\| + C_o \|e_c\| \|R_\beta \hat{\Phi}\| \\ &\quad + C_o K_{\max} \|e_c\|^2 + C_o \hat{\rho} \|e_c\| \\ &= -e_c^T K e_c - \hat{\rho} \frac{\|e_c\|^2}{\|e_c\| + \varepsilon} + \rho(1-C_o) \|e_c\| - \hat{\rho}(1-C_o) \|e_c\| \\ &\quad + \hat{\rho} \|e_c\| \\ &= -e_c^T K e_c - \tilde{\rho}(1-C_o) \|e_c\| - \hat{\rho} \frac{\|e_c\|^2}{\|e_c\| + \varepsilon} + \hat{\rho} \frac{\|e_c\|^2 + \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} \\ &= -e_c^T K e_c - \tilde{\rho}(1-C_o) \|e_c\| + \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} \end{aligned} \quad (41)$$

여기서

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{(1-C_0)} \left(\bar{\rho}_e + C_o \|R_\beta \hat{\Phi}\| + C_o K_{\max} \|e_c\| \right), \\ \tilde{\rho} &= \hat{\rho} - \rho = \hat{\Theta}^T \psi - \Theta^T \psi = \tilde{\Theta}^T \psi, \\ \Theta &= (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_7)^T, \theta_1 = \frac{\bar{\theta}_1 + \bar{\tau}_{d\max} + \bar{u}_{d\max}}{(1-C_0)}, \\ \theta_2 &= \frac{\bar{\theta}_2}{(1-C_0)}, \theta_3 = \frac{\bar{\theta}_3}{(1-C_0)}, \theta_4 = \frac{\bar{\theta}_4}{(1-C_0)}, \theta_5 = \frac{\bar{\theta}_5}{(1-C_0)}, \\ \theta_6 &= \frac{C_o}{(1-C_0)}, \theta_7 = \frac{C_o K_{\max}}{(1-C_0)}, \psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_7)^T \end{aligned}$$

이다.

식 (35)의 V_3 을 시간에 대해 미분하여 식 (41)과 함께 쓰면,

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \dot{V}_3 &\leq -e_c^T K e_c - \tilde{\rho}(1-C_o) \|e_c\| + \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} \\ &\quad + (1-C_o) \tilde{\Theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \dot{\tilde{\Theta}} \\ &= -e_c^T K e_c - \tilde{\Theta}^T \psi (1-C_o) \|e_c\| + \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} \\ &\quad + (1-C_o) \tilde{\Theta}^T \Gamma_\theta^{-1} \dot{\tilde{\Theta}} \end{aligned} \quad (42)$$

적용 법칙 (30)을 위의 식 (42)에 대입하여 정리하면,

$$\dot{V}_2 + \dot{V}_3 \leq -e_c^T K e_c + \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} - (1 - C_0) \gamma \|e_c\| \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} \quad (43)$$

여기서 $\frac{1}{2}(\tilde{\Theta} + \Theta)^T (\tilde{\Theta} + \Theta) \geq 0$ 의 관계가 성립하여, 결국 $\tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} + \tilde{\Theta}^T \Theta = \tilde{\Theta}^T \hat{\Theta} \geq \frac{1}{2}(\tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} - \Theta^T \Theta)$ 이다. 식 (43)은 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \leq & -e_c^T K e_c - \frac{1}{2}(1 - C_0) \gamma \|e_c\| \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} \\ & + \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} + \frac{1}{2}(1 - C_0) \gamma \|e_c\| \Theta^T \Theta \end{aligned} \quad (44)$$

식 (44)에 \dot{V}_1 에 대한 식 (36)을 합하여 최종적으로 \dot{V} 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \leq & -k_1 e_1^2 - k_3 e_3^2 - e_c^T K e_c \\ & - \frac{1}{2}(1 - C_0) \gamma \|e_c\| \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} + \eta(\hat{\rho}, \|e_c\|) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\text{여기서 } \eta(\hat{\rho}, \|e_c\|) = \frac{\hat{\rho} \|e_c\| \varepsilon}{\|e_c\| + \varepsilon} + \frac{1}{2}(1 - C_0) \gamma \|e_c\| \Theta^T \Theta.$$

위의 식 (45)로부터 보조 속도 추종 오차 e_c 가 UUB된다는 것을 리아푸노프 함수 이론과 UUB 정리로부터 알 수 있다. 그러므로, 추종 오차 e_1, e_2, e_3 는 (32)~(35)와 (45) 그리고 보조 속도 제어기 (16)에 의해 UUB된다. 따라서, 식 (14)~(15)에서 $E_q = T_c^{-1} E_p$ 이므로 결론적으로 이동 로봇의 목표 기준 궤적 q_r 과 실제 궤적 q 간의 추종 오차 $E_q (= q_r - q)$ 도 UUB된다. \square

첨언 2: 식 (45)에서 상수 ε 와 γ 가 각각 0으로 놓이게 되면, $\dot{V} \leq -k_1 e_1^2 - k_3 e_3^2 - e_c^T K e_c$ 이 된다. 이 때, $d=0$ 인 경우에, 보조 속도 추종 오차 e_c , 추종 오차 e_1, e_2, e_3 , 그리고 이동 로봇의 목표 기준 궤적 q_r 과 실제 궤적 q 간의 추종 오차 $E_q (= q_r - q)$ 가 모두 점근적으로 0으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. 부록 A에서는 $d=0$ 인 경우에, $e_c=0$ 일 때, 다시 말해서 “완전한 속도 추종”의 가정에서 $E_p = (e_1, e_2, e_3)^T$ 와 E_q 의 점근적 추종을 증명하였다.

첨언 3: 양의 상수 ε 은 입력 떨림(chattering)을 완화하기 위해 첨가하는 제어 파라미터이며, 적용 법칙 (30)에서 $\gamma \|e_c\|$ 항은 추정 오차 e_c 가 0으로 수렴할 때는 적분 동작을 멈추어 추정치 $\hat{\Theta}(t)$ 가 수렴하도록 하였으며, 추정 오차 e_c 가 0이 아닐 경우에는 적분 동작을 억제하여 시간이 무한대로 갈 때 추정치 $\hat{\Theta}(t)$ 의 발산을 방지할 수 있도록 하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 궤적 추종 제어기의 타당성과 강인성을 보이기 위해 이동 로봇에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

구동기 및 로봇의 파라미터 불확실성과 동적 파라미터의 변동 그리고 외란이 있을 때, 제안된 궤적 추종 제어기의 추종 성능 결과가 그림 3~그림 6에서 제시된다.

본 시뮬레이션에서는 기준 궤적의 선속도 (v_r)가 음수가 되는 목표 기준 궤적을 로봇의 실제 궤적이 추종하는 것을 채택하였다. 기존의 대부분의 궤적 추종 연구에서는 $v_r < 0$ 인 목표 기준 궤적의 추종 제어를 위한 시뮬레이션 또는 실험을 통한 검증은 많이 이루어지지 않았다. 따라서 $v_r < 0$ 인 기준 궤적의 추종 제어에 대한 검증을 수행함으로써 기준 궤적을 보다 다양하게 하며 확장을 가능하게 한다.

이동 로봇에 대한 목표 기준 궤적은 직선과 원호 경로를 함께 가지는 경로로서 네 개의 모서리에서 원호 경로를 가지는 정사각형 경로로서 80초 동안 이 경로를 한 바퀴 회전하는 궤적이다. 이 기준 궤적의 직선 궤적에서는 $v_r = -0.15$ (m/sec), $w_r = 0$ (rad/sec) 이고, 원호 궤적에서는 $v_r = -0.11781$ (m/sec), $w_r = 0.15708$ (rad/sec) 로 $v_r < 0$ 인 궤적이며 기준 궤적의 중심은 (0, 0), 직선 궤적의 한 변의 길이는 1.5(m), 각 네 개의 원호 궤적의 반지름은 0.75(m)이다. 또한, 각각의 직선 궤적과 원호 궤적을 이동하는 데 걸리는 시간은 동일하게 10초로 설정하였다. 기준 궤적의 초기 위치와 방향은 $q_r(0) = [-0.75, -1.5, 0]^T$ 이며, 이동 로봇의 실제 궤적의 초기 위치와 방향은 $q(0) = [-1, -1, \pi/2]^T$ 로 설정하였다.

이동 로봇 시스템의 모델에서 사용하는 구동기와 로봇의 기구적 및 동적 파라미터들은 $N_r = 100$, $N_l = 80$, $R_w = 2.5$ (Ω), $R_{al} = 1.5$ (Ω), $K_r = 0.0323$ (Nm/A), $K_{rl} = 0.0251$ (Nm/A), $K_{br} = 0.0323$ (volt · sec / rad), $K_{bl} = 0.0251$ (volt · sec / rad), $m = 15$ (kg), $I = 3$ (kgm²), $R = 0.25$ (m), $r = 0.1$ (m), $d = 0$ (m)로 설정되었다. 또한, $\bar{F}(v) = F_v v + F_d \text{sgn}(v)$ 의 마찰력이 고려되었으며, $\text{sgn}(v)$ 는 시그넘 함수(signum function)를 나타낸다. 마찰 계수는 $F_v = \text{diag}\{1, 1\}$ 와 $F_d = \text{diag}\{0.5, 0.5\}$ 를 설정하였다.

제어기에서 사용하는 구동기 파라미터와 로봇의 기구적 파라미터들의 사전 지식은 실제 값들의 70%로 가정하였으며 또한 사용되는 구동기에서의 전압 외란은 $u_d = 0.5 \cdot [\cos(t) + \sin(3t), \sin(3t) + \cos(2t)]^T$ 이며, x, y, θ 방향에서의 각각의 토오크 외란은 각각 크기가 최대 ± 0.5 가 되는 랜덤 잡음(random noise)으로 설정하였다.

로봇의 동적 파라미터 변동을 고려하여 시뮬레이션을 수행하기 위해 전체 제어 과정 동안 로봇의 질량과 관성 모멘트는 다음과 같이 변한다고 가정하였다.

- 1) $0(\text{sec}) \leq t < 20(\text{sec})$, $\Delta m = 0(\text{kg})$, $\Delta I = 0(\text{kgm}^2)$,
 $m = 15(\text{kg})$, $I = 3(\text{kgm}^2)$,
- 2) $20(\text{sec}) \leq t < 40(\text{sec})$, $\Delta m = 5(\text{kg})$,
 $\Delta I = 2.5(\text{kgm}^2)$, $m = 20(\text{kg})$, $I = 5.5(\text{kgm}^2)$,
- 3) $40(\text{sec}) \leq t < 60(\text{sec})$, $\Delta m = 10(\text{kg})$, $\Delta I = 5(\text{kgm}^2)$,
 $m = 25(\text{kg})$, $I = 8(\text{kgm}^2)$,

4) $60(\text{sec}) \leq t \leq 80(\text{sec}), \Delta m = 7(\text{kg}), \Delta I = 3(\text{kgm}^2),$
 $m = 22(\text{kg}), I = 6(\text{kgm}^2).$

제시한 FBFN에서 각각의 입력 변수에 대하여 3개의 가우시안 기저 함수를 사용하였으며 식 (22)에서의 가우시안 멤버십 함수 $\mu_{A_i}(x_i)$ 에서의 파라미터들은 모든 i 와 j 에 대해 $\alpha_i^j = 1.0, \bar{x}_i^j = (-0.5, 0, 0.5), \sigma_i^j = 0.8$ 이다. 또한, FBFN에서의 $R_{\beta}(v_c, \dot{v}_c, v)$ 구성에 있어 $v_c = (v_{lc} \ w_{ac})^T, v = (v_l \ w_a)^T$ 이므로 각각 3개의 $(v_{lc}, \dot{v}_{lc}, v_l)$ 에 대해 총 퍼지 규칙이 27개, 그리고 3개의 $(w_{ac}, \dot{w}_{ac}, w_a)$ 에 대해 총 퍼지 규칙이 27개가 사용되어 총 54개가 사용되었다.

본 시뮬레이션에서는 제안된 제어 시스템에서 사용된 제어 이득 중에서 기구학적 제어기 (16)의 제어 이득인 k_1, k_2, k_3 는 평형점 $E_p = (0, 0, 0)^T$ 에서 기구학적 제어 시스템을 선형화하여 얻는 방법의 예가 부록 B에서 제시된다. 기준 궤적으로 정해지는 선속도 v_r 과 각속도 w_r 의 값에 따라 부록 B에서 주어진 식 (B-10)~(B-12)에 의해 설정된 제어 이득은 변동하게 된다. 그 변동되는 값은 직선 궤적과 원호 궤적에 따라 각각 다음과 같이 다르게 설정된다.

• 직선 궤적:

$v_r = -0.15(\text{m/sec}), \ w_r = 0(\text{rad/sec}),$
 $\alpha = 1.5, \ k_1 = 1.5, \ k_2 = 100, \ k_3 = 0.03.$

• 원호 궤적:

$v_r = -0.11781(\text{m/sec}), \ w_r = 0.15708(\text{rad/sec}),$
 $\alpha = 1.5, \ k_1 = 1.11769, \ k_2 = 212.18497, \ k_3 = 0.01594.$

전체 제어 시스템에서의 성능은 기구학적 제어기의 이득 k_1, k_2, k_3 뿐만 아니라 식 (27)~(31)의 제어기에서의 이득 및 적응 이득들이 모두 영향을 미치게 된다. 여기서 적절히 선택된 제어 이득과 적응 이득은 $K = 15I_2, \ \Gamma_{\Phi} = 3500I_{54}, \ \Gamma_{\theta} = 0.0001I_7, \ \varepsilon = 0.05$ 과 $\gamma = 0.00001$ 이며, I_n 은 $n \times n$ 단위 행렬이다. 위에서 할당된 기구학적 제어기의 제어 이득 k_1, k_2, k_3 은 부록 B에서의 방법을 통하여 자동 계산된 제어 이득으로서 쉽게 설정할 수 있다는 장점을 가지며, 본 시뮬레이션에서 만족스러운 결과를 얻었다.

그림 3에서 이동 로봇의 실제 궤적이 기준 궤적을 매우 잘 추종하는 것을 보여주고 있으며, 그림 4에서는 오른쪽과 왼쪽 구동기에 입력되는 제어 입력 전압(u)을 나타내며, 그림 5에서는 보조 속도 추종 오차(e_c)를 보였다. 또한 그림 6은 이동 로봇의 x 축 방향과 y 축 방향에서의 위치 추종 오차($x_r - x, y_r - y$)와 방향 추종 오차($\theta_r - \theta$)를 보였다.

기존의 [19]에서 제시된 제어기의 궤적 추종 시뮬레이션에서는 로봇 및 구동기 동역학 모델에서 마찰력과 전압 외란을 고려하지 않았으며, $v_r > 0$ 인 원 궤적에 대한 궤적 추종 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 왜냐하면 $v_r < 0$ 인 기준 궤적에 대한 안정도를 보장하지 않기 때문이었다. 본 시뮬레이션은 기존 논문에서 포함하지 않은 요소들까지 고려하여 차별화된 시뮬레이션의 수행을 통하여 시뮬레이션 결과를 얻음

으로써 본 연구에서 제안된 제어기의 효과와 타당성을 보였다.

그림 3~그림 6으로부터, 기준 궤적의 선속도(v_r)가 음수가 되는 궤적이라 할지라도 우수한 궤적 추종 성능을 보이는 것을 알 수 있으며, 외란 및 파라미터 불확실성과 동적 파라미터 변동 아래에서도 궤적 추종 성능이 매우 우수하고, 불확실성과 외란에도 입력 떨림이 매우 완화되어 제어 입력으로

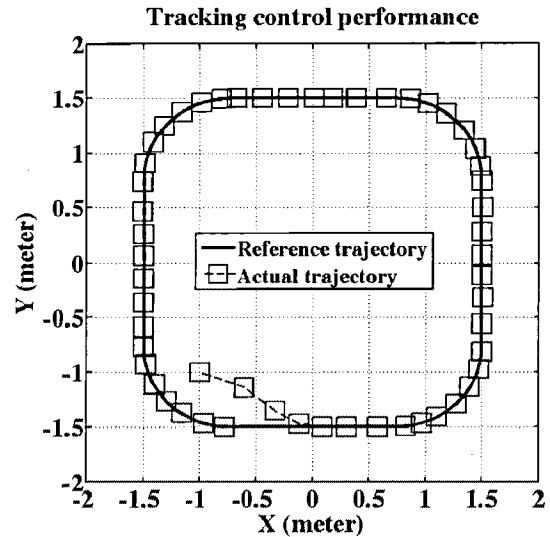


그림 3. 이동 로봇의 궤적 추종 제어 성능.

Fig. 3. Trajectory tracking control performance of a mobile robot.

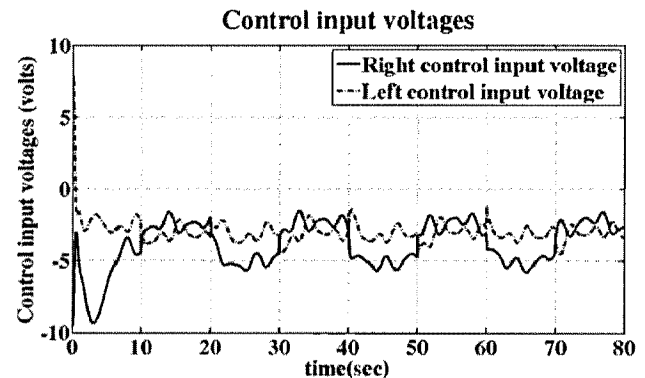


그림 4. 제어 입력 전압 (u).

Fig. 4. Control input voltages (u).

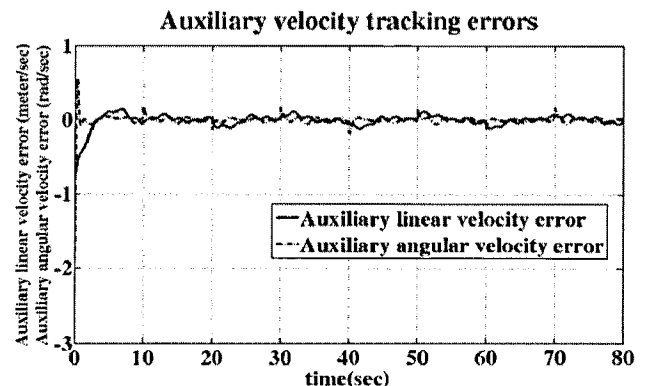


그림 5. 보조 속도 추종 오차 (e_c).

Fig. 5. Auxiliary velocity tracking errors (e_c).

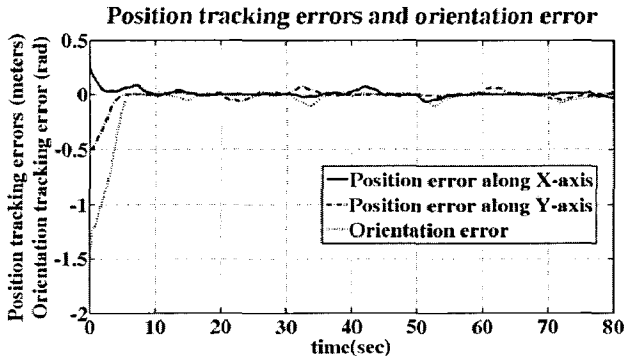


그림 6. 위치 추종 오차와 방향 추종 오차 (E_q).

Fig. 6. Position tracking errors and orientation tracking error (E_q).

서 실제 적용에의 타당성을 볼 수 있으며, 추종 오차들이 만족스럽게 작은 범위에서 안정하게 유지된다는 것을 볼 수 있다. 따라서 로봇의 기구학, 동역학 및 구동기의 동역학에 대한 파라미터 불확실성과 외란이 존재할 때에도 제안된 제어기는 로봇의 궤적이 기준 궤적을 안정하고 강인하게 추종하도록 한다는 것을 알 수 있다. 본 시뮬레이션을 통해 제안된 궤적 추종 제어기의 유용성과 강인성을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 이동 로봇의 위치와 방향 궤적이 목표 기준 궤적을 외란과 파라미터 불확실성과 동적 파라미터의 변동이 있을 때에도 안정하고 강인하게 추종하도록 하는 강인 적응 퍼지 궤적 추종 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 구동기 동역학과 로봇 동역학을 모두 고려하여 설계되었으며, 양쪽 바퀴의 구동기 모델에서 다른 파라미터들이 고려되었다. 이 구동기와 로봇의 기구적 및 동적 파라미터들은 제어기에서 미리 정확한 값이 요구되지 않는다. 비선형 동역학 함수는 FBFN을 이용하여 근사화되며 리아푸노프 함수 이론을 토대로 적용 법칙이 도출되었으며, 기구학적 제어기를 포함하여 제안된 페루프 제어 시스템의 안정도가 보장되었다.

제안된 제어기는 입력 떨림 현상을 완화하였으며, 마찰력과 진압 외란을 로봇 및 구동기 동역학 모델에 포함하여 이를 극복하였다. 기존 논문에서의 적용 법칙을 개선하여 추정치가 항상 증가하는 문제점을 해결하였다. 궤적 추종의 목표가 되는 기준 궤적의 다양화를 위해 기구학적 제어기를 개선하였다. 또한, 기구학적 속도 제어기의 제어 이득을 쉽게 체계적으로 얻기 위하여 기구학적 제어 시스템의 선형화를 통하여 제어 이득을 자동적으로 설정하는 예를 들었으며, 시뮬레이션에서 이를 사용하여 만족스러운 결과를 얻었다.

구동기 파라미터, 로봇의 기구적 및 동적 파라미터들이 정확히 알려지지 않으며 외란과 로봇의 동적 파라미터 변동이 있을 때 이동 로봇에 대한 궤적 추종 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 기준 궤적의 선속도(v_r)가 음수가 되며 직선 궤적과 원호 궤적을 동시에 가지는 기준 궤적을 채택하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 입력 진압의 떨림이 상당히 완화되면서 로봇 궤적이 목표 기준 궤적을 강인하고 안정하게 매우 잘 추종한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이동 로봇에 대한 제안된 제어기의 강인성과 유효성을 검증하였다.

부록 A

기구학적 제어기에 대한 안정도를 증명하기 위해, 오차 E_p 에 대한 식 (15)을 시간에 대해 미분하면,

$$\dot{E}_p = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_a e_2 + v_r \cos e_3 - v_l \\ -w_a e_1 + v_r \sin e_3 \\ w_r - w_a \end{bmatrix}. \quad (A-1)$$

여기서 목표 기준 궤적에 대한 기구학 방정식은 $\dot{x}_r = v_r \cos \theta_r$, $\dot{y}_r = v_r \sin \theta_r$, $\dot{\theta}_r = w_r$ 이며, $d=0$ 에 대해 실제 궤적에 대한 기구학 방정식은 $\dot{x} = v_l \cos \theta$, $\dot{y} = v_l \sin \theta$, $\dot{\theta} = w_a$ 이다. 이 때, 기준 궤적의 선속도 v_r 과 기준 궤적의 각속도 w_r 가 유계(bounded), 기준 궤적의 선가속도 \dot{v}_r 가 유계이며, 그리고 $v_r \neq 0$ 이라고 가정한다.

리아푸노프 함수 이론을 이용하여 안정도를 증명한다. 식 (33)의 $V_1(t)$ 를 시간에 대해 미분하면

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{k_2} e_3 \dot{e}_3. \quad (A-2)$$

식 (A-2)에 오차 동역학 방정식 (A-1)을 대입하고 정리하면,

$$\dot{V}_1 = e_1 (v_l \cos e_3 - v_r) + v_l e_2 \sin e_3 + \frac{1}{k_2} e_3 (w_r - w_a) \quad (A-3)$$

여기서 “정확한 속도 추종”을 가정하면 “ $v = v_r$ ”이므로, $v = (v_l \ w_a)^T = (v_{lc} \ w_{ac})^T$ 로 식 (16)의 보조 속도 제어 입력을 식 (A-3)에 대입하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & e_1 [v_l \cos e_3 - v_r \cos e_3 - k_1 e_1] + v_l e_2 \sin e_3 \\ & + \frac{1}{k_2} e_3 \left[w_r - \left(w_r + k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} + k_2 k_3 e_3 \right) \right] \\ = & -k_1 e_1^2 - k_3 e_3^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (A-4)$$

위의 식 (A-4) $\dot{V}_1(t) \leq 0$ 에 의해, $V_1(t) \leq V_1(0)$ 이며, 따라서 e_1, e_2 와 e_3 는 유계(bounded)이다. e_1 과 e_3 의 점근적 수렴성을 보이기 위하여, 위의 식 (A-4)을 한번 더 미분하여 \ddot{V}_1 을 구하고 (A-1)과 (16)을 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \ddot{V}_1 = & -2k_1 e_1 \dot{e}_1 - 2k_3 e_3 \dot{e}_3 \\ = & -2k_1 e_1 (w_a e_2 - k_1 e_1) - 2k_3 e_3 \left(-k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_3 \right) \\ = & 2k_1^2 e_1^2 - 2k_1 e_1 e_2 \left(w_r + k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} + k_2 k_3 e_3 \right) \\ & + 2k_2 k_3 v_r e_2 \sin e_3 + 2k_2 k_3^2 e_3^2 \\ = & 2k_1^2 e_1^2 + 2k_2 k_3^2 e_3^2 - 2k_1 e_1 e_2 w_r - 2k_1 k_2 v_r e_1 e_2^2 \frac{\sin e_3}{e_3} \\ & - 2k_1 k_2 k_3 e_1 e_2 e_3 + 2k_2 k_3 v_r e_2 \sin e_3 \end{aligned} \quad (A-5)$$

여기서 앞에서 e_1, e_2 와 e_3 가 유계라고 증명되어졌기 때문에 식 (A-5)의 \ddot{V}_1 도 유계가 된다. 그러면, \dot{V}_1 은 균일 연속

(uniformly continuous)이다. 따라서, Barbalat's lemma에 의해, $\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{V}_1(t)] = 0$ 이며, 식 (A-4)에서 $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_1(t)] = 0$ 와 $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_3(t)] = 0$ 이다.

다음에 e_2 의 점근적 수렴성을 보이기 위해, $\dot{e}_3 = w_r - w_a$
 $= -k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_3$ 에서 \dot{e}_3 이 유계이며, \dot{e}_3 을 시간에 대해 한 번 더 미분하여 \ddot{e}_3 을 구하면

$$\begin{aligned} \ddot{e}_3 = & -k_2 \dot{v}_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 v_r \dot{e}_2 \frac{\sin e_3}{e_3} \\ & - k_2 v_r e_2 \frac{\dot{e}_3 (e_3 \cos e_3 - \sin e_3)}{e_3^2} - k_2 k_3 \dot{e}_3 \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

식 (A-6)에서 $\lim_{e_3 \rightarrow 0} \left[\frac{\sin e_3}{e_3} \right] = 1$, $\dot{e}_2 = -w_r e_1 - k_2 v_r e_1 e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_1 e_3 + v_r \sin e_3$ 에 의해 \dot{e}_2 도 유계이다. 또한 $\lim_{e_3 \rightarrow 0} \left[\frac{e_3 \cos e_3 - \sin e_3}{e_3^2} \right] = 0$ 이므로 식 (A-6)식의 \ddot{e}_3 도 유계가 된다. 결국 Barbalat's lemma에 의해 \dot{e}_3 는 균일 연속이며 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{e}_3(t)] = 0$. 그러므로 식 $\dot{e}_3 = -k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_3$ 에서 앞에서 만족하는 $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_3(t)] = 0$ 과 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{e}_3(t)] = 0$ 이 성립해야 하므로, $v_r \neq 0$ 일 때, $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_2(t)] = 0$ 이 된다.

따라서 $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_1(t)] = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_2(t)] = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} [e_3(t)] = 0$ 이다. 다시 말해서, E_p 의 점근적 추종이 보장된다. 이 때 결론적으로 식 (15)에서 보인 T_e 는 항상 역행렬이 존재하며 $E_q = T_e^{-1} E_p$ 로서, 식 (16)의 기구학적 제어기에 의해 $\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t)] = x_r(t)$, $\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t)] = y_r(t)$, $\lim_{t \rightarrow \infty} [\theta(t)] = \theta_r(t)$ 로 E_q 의 점근적 추종도 보장된다.

부록 B

이동 로봇의 기구학적 제어에서 제어 이득 k_1, k_2, k_3 을 선정하는 방법은 가장 좋은 성능을 얻을 때까지 제어 이득을 수동으로 변경하며 조정하는 것이다. 또 다른 전형적인 방법은 비선형 시스템에서 이득 선정 방법으로 많이 쓰이는 평형점(equilibrium point)에서 시스템을 선형화(linearization)하여 제어 이득을 선정할 수 있다[1]. 이 선형화 방법은 일반적으로 전역적이지 못하며 원래의 비선형 시스템을 선형화하는 평형점 근방의 지역에서 설계한 대로의 우수한 성능을 보인다.

식 (16)의 속도 제어 입력 $v_{ic} = v_i$, $w_{ac} = w_a$ 를 오차 동역학 방정식 (A-1)에 대입하여 페루프 오차 동역학 방정식을 다음과 같이 정리하면,

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_r e_2 + k_2 v_r e_2^2 \frac{\sin e_3}{e_3} + k_2 k_3 e_2 e_3 - k_1 e_1 \\ -w_r e_1 - k_2 v_r e_1 e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_1 e_3 + v_r \sin e_3 \\ -k_2 v_r e_2 \frac{\sin e_3}{e_3} - k_2 k_3 e_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{B-1})$$

위 식을 평형점 $E_p = (e_1 \ e_2 \ e_3)^T = (0 \ 0 \ 0)^T$ 에서 선형화하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 & w_r & 0 \\ -w_r & 0 & v_r \\ 0 & -k_2 v_r & -k_2 k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}. \quad (\text{B-2})$$

위 식을 벡터-행렬 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{E}_p = A \cdot E_p. \quad (\text{B-3})$$

이 때 특성방정식은 $\det(A - sI) = 0$ 이며, 이것을 풀면,

$$\begin{aligned} s^3 + (k_1 + k_2 k_3)s^2 + (k_1 k_2 k_3 + k_2 v_r^2 + w_r^2)s \\ + (k_1 k_2 v_r^2 + k_2 k_3 w_r^2) = 0. \end{aligned}$$

Routh-Hurwitz의 안정도 판별법에 의해 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $k_3 > 0$ 이면 다음의 조건들이 모두 성립된다.

- 1) $k_1 + k_2 k_3 > 0$
- 2) $k_1 k_2 k_3 + k_2 v_r^2 + w_r^2 > 0$
- 3) $k_1 k_2 v_r^2 + k_2 k_3 w_r^2 > 0$
- 4) $(k_1 + k_2 k_3)(k_1 k_2 k_3 + k_2 v_r^2 + w_r^2) - (k_1 k_2 v_r^2 + k_2 k_3 w_r^2) = k_1^2 k_2 k_3 + k_1 w_r^2 + k_1 k_2^2 k_3^2 + k_2^2 k_3 v_r^2 > 0$

따라서 선형화된 시스템은 $v_r \neq 0$, $w_r \neq 0$ 일 때 점근적으로 안정하다.

제어 이득 k_1, k_2, k_3 를 선정하는 예를 다음과 같이 들 수 있다.

$$\begin{aligned} (s + \alpha_1)(s + \alpha_2)(s + \alpha_3) \\ = s^3 + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)s^2 + (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3)s + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \\ = 0. \end{aligned}$$

여기서 $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$, $\alpha_3 > 0$ 는 주어진 s -평면의 좌반면의 세 극점(pole)을 나타낸다. 이 때 다음의 세 방정식으로부터 제어 이득을 선정한다.

$$k_1 + k_2 k_3 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (\text{B-4})$$

$$k_1 k_2 k_3 + k_2 v_r^2 + w_r^2 = \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_3 \quad (\text{B-5})$$

$$k_1 k_2 v_r^2 + k_2 k_3 w_r^2 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \quad (\text{B-6})$$

여기서 v_r 와 w_r 는 각각 이동 로봇의 기준 궤적에 대한 선속도와 각속도를 나타내며 기준 궤적이 주어지면 이 값들도 정해진다.

위의 식 (B-4)~(B-6)에서 임계감쇠(critical damping)와 $(s + \alpha)^3 = 0$ 으로서 극점이 $s = -\alpha$ ($\alpha > 0$ 인 실수)인 삼중근의 응답을 가질 경우에 다시 쓰면

$$k_1 + k_2 k_3 = 3\alpha, \quad (\text{B-7})$$

$$k_1 k_2 k_3 + k_2 v_r^2 + w_r^2 = 3\alpha^2, \quad (\text{B-8})$$

$$k_1 k_2 v_r^2 + k_2 k_3 w_r^2 = \alpha^3. \quad (\text{B-9})$$

위의 식 (B-7)~(B-9)을 풀면

$$k_1^3 - 3\alpha k_1^2 + (3\alpha^2 - 2w_r^2)k_1 - \alpha^3 + 3\alpha w_r^2 = 0 \quad (\text{B-10})$$

$$k_2 = \frac{k_1^2 - 3\alpha k_1 - w_r^2 + 3\alpha^2}{v_r^2} \quad (\text{B-11})$$

$$k_3 = \frac{3\alpha - k_1}{k_2} \quad (\text{B-12})$$

위 식으로부터 얻어지는 제어 이득은 항상 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $k_3 > 0$ 인 실수이어야 한다.

식 (B-10)에서 $w_r \neq 0$ 인 경우에 k_1 의 해 중 실수와 복소수가 존재할 수 있는데 이 때 실수만 선택하고, 그에 따라 k_2 와 k_3 는 식 (B-11)~(B-12)에서 구한다.

한편 식 (B-10)에서 $w_r = 0$ 인 경우에는 k_1 의 해가 실수만 존재하며, 제어 이득은 $k_1 = \alpha$, $k_2 = \frac{\alpha^2}{v_r^2}$, $k_3 = \frac{2v_r^2}{\alpha}$ 을 얻는다.

참고문헌

- [1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, USA, vol. 1, pp. 384-389, 1990.
- [2] G. Yuan, S. X. Yang, and G. S. Mittal, "Tracking control of a mobile robot using a neural dynamics based approach," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Japan, vol. 1, pp. 163-168, 2001.
- [3] D. H. Kim and J. H. Oh, "Tracking control of a two-wheeled mobile robot using input-output linearization," *Control Engineering Practice*, vol. 7, no. 3, pp. 369-373, 1999.
- [4] Y. Hu and S. X. Yang, "A fuzzy neural dynamics based tracking controller for a nonholonomic mobile robot," *Proc. of the IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, vol. 1, pp. 205-210, 2003.
- [5] Z.-P. Jiang and H. Nijmeijer, "Tracking control of a mobile robots: a case study in backstepping," *Automatica*, vol. 33, no. 7, pp. 1393-1399, 1997.
- [6] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, USA, vol. 4, pp. 3805-3810, 1995.
- [7] M. S. Kim, J. H. Shin, S. G. Hong, and J. J. Lee, "Designing a robust adaptive dynamic controller for nonholonomic mobile robots under modeling uncertainty and disturbances," *Mechatronics*, vol. 13, no. 5, pp. 507-519, June 2003.
- [8] 박봉석, 유성진, 최윤희, 박진배, "새로운 슬라이딩 표면에 기반한 비홀로노믹 이동 로봇의 추종 제어," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제14권 제8호, pp. 842-847, 2008.
- [9] 김승우, 서기성, 조영완, "모델참조 적응 퍼지 제어를 이용한 휠베이스 이동 로봇의 궤적 추적 제어," 제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제15권 제7호, pp. 711-719, 2009.
- [10] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 589-600, 1998.
- [11] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 609-615, 2000.
- [12] S. Yu, S. Liu, and H. Xu, "Adaptive fuzzy trajectory tracking

control of uncertain nonholonomic mobile robots," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics*, Korea, pp. 481-486, 2008.

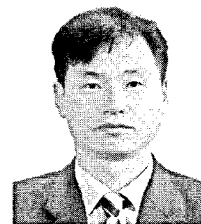
- [13] S. LeBel and L. Rodrigues, "Path following of a wheeled mobile robot combining piecewise-affine synthesis and backstepping approaches," *Proc. of the American Control Conference*, USA, pp. 4518-4523, 2007.
- [14] N. A. Martins, D. W. Bertol, D. R. De Pieri, and E. B. Castelan, "Neural dynamic control of a nonholonomic mobile robot incorporating the actuator dynamics," *Proc. of the Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation*, pp. 563-568, 2008.
- [15] L. X. Wang and J. M. Mendel, "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 807-814, 1992.
- [16] L. X. Wang, "Fuzzy systems are universal approximators," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, USA, pp. 1163-1170, 1992.
- [17] L. X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear system," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 146-155, 1993.
- [18] T. Das and I. N. Kar, "Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 501-510, 2006.
- [19] N. H. Giap, J. H. Shin, and W. H. Kim, "Adaptive robust fuzzy control for path tracking of a wheeled mobile robot," *Artificial Life and Robotics*, vol. 13, no. 1, pp. 134-138, 2008.



신진호

1991년 한양대학교 전자공학과(공학사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2002년~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 강인 적응 제어, 로봇

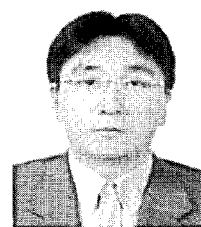
틱스, 지능 제어, 로봇 제어, 임베디드 시스템.



김원호

1985년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1988년 경북대학교 전자공학과(공학석사). 1999년 경북대학교 전자공학과(공학박사). 2005년~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 정밀 모션 제어, 로봇 제

어 시스템.



이문노

1991년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2001년~현재 동의대학교 컴퓨터공학과 교수. 관심분야는 강인 제어, 임베디드 시스템, 광 저장 장치 신호처리, 지능형 시스템.

시스템, 광 저장 장치 신호처리, 지능형 시스템.