

RBF 신경망과 강인 항을 적용한 I-PID 기반 2 자유도 뱀 로봇 머리 제어에 관한 연구

A Study on I-PID-Based 2-DOF Snake Robot Head Control Scheme Using RBF Neural Network and Robust Term

김성재¹, 서진호[†]
Sung-Jae Kim¹, Jin-Ho Suh[†]

Abstract: In this paper, we propose a two-degree-of-freedom snake robot head system and an I-PID (Intelligent Proportional-Integral-Derivative)-based controller utilizing RBF (Radial Basis Function) neural network and adaptive robust terms as a control strategy to reduce rotation occurring in the snake robot head. This study proposes a two-degree-of-freedom snake robot head system to avoid complex snake robot dynamics. This system has a control system independent of the snake robot. Subsequently, it utilizes an I-PID controller to implement a control system that can effectively manage rotation at the snake robot head, the robot's nonlinearity, and disturbances. To compensate for the time delay estimation errors occurring in the I-PID control system, an RBF neural network is integrated. Additionally, an adaptive robust term is designed and integrated into the control system to enhance robustness and generate control inputs responsive to signal changes. The proposed controller satisfies stability according to Lyapunov's theory. The proposed control strategy was tested using a 9-degree-of-freedom snake robot. It demonstrates the capability to reduce rotation in Lateral undulation, Rectilinear, and Sidewinding locomotion.

Keywords: Snake Robot, I-PID, RBF Neural Network, Robust Term, Narrow Space

1. 서 론

자연 재해, 인적 재난으로 발생하는 붕괴 사고로 많은 협소 공간들이 발생한다. 이 협소 공간 내 수색은 현재 구조진, 서치 탭과 같은 간접적인 수단에 의존하고 있다. 이러한 재난 사고에 대응하기 위해 로봇 기술들이 많이 응용이 되고 있으며, 뱀 로봇은 이러한 협소 공간을 직접적으로 수색할 수 있는 가능성이 있기에 많은 주목을 받고 있다^[1]. 특히, 뱀 로봇은 뱀의 생물학적 움직임에 영감을 받아 고안된 로봇으로써, 많은 자유

도를 가지고 있으며, 정현파 신호 조합으로 움직임을 구현한다. 이러한 특징으로 험지, 수직 관 등 도전적인 환경을 극복할 수 있는 능력을 갖고 있으며^[2-5], 이러한 장점으로 인해 많은 연구가 진행되었고, 협소 공간 탐색에 두각을 보였다. 특히, 대표적인 연구사례로, [4]에서 2017년도에 발생한 멕시코 대지진 현장에 뱀 로봇을 투입하였고, 성공적으로 협소 공간을 탐색하였다. 최신 연구로는 [1,5]에서 개발한 뱀 로봇으로 카메라 외에 다양한 센서를 부착하여 협소 공간 탐지 성능을 비약적으로 상승시켰다.

뱀 로봇은 움직임 특성상, 정현파 조합으로 움직임을 생성하기에 카메라가 장착되는 머리부 또한 정현파 회전이 발생한다. 이러한 원인으로 카메라 이미지 데이터가 크게 흔들리면 조종사가 원격으로 제어하기가 어렵다. 이는 원격으로 조종하는 뱀 로봇의 조작성을 크게 떨어뜨리며, 이동 로봇으로 뱀 로봇을 활용하기 위해서는 해결해야하는 문제이다^[6-8].

뱀 로봇 머리를 제어하기 위한 기존 연구사례가 존재한다. [9,10]에서는 영상처리 기법을 적용한 방법이 제시가 되었다.

Received : Apr. 30. 2024; Revised : May. 20. 2024; Accepted : May. 21. 2024

※ This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 20018110, "Development of a wireless teleoperable relief robot for detecting searching and responding in narrow space") funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

1. Senior Researcher/Post-Doctor, The Industrial Science Technology Research Center, Pukyong National University, Busan, Korea (bbman7020@gmail.com)

† Professor, Corresponding author: Major of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea (suhgang@pknu.ac.kr)

이 방법은 많은 카메라를 요구하고 큰 회전에 대해서는 성능이 좋지 못하다. [11-17]에서는 움직임과 기구학을 기반한 제어 방법을 제시하였다. 이 방법은 뱀 로봇의 모듈 일부를 선택한 다음, 뱀 로봇 주행 움직임을 변형하여 회전을 억제한다. 연구 결과에서 이들이 제시하는 제어 전략은 효과적이다. 하지만, 뱀 로봇은 다양한 움직임이 존재하지만, *Lateral undulation* 움직임을 대상으로 하였고, 로봇의 움직임이 변형 되었지만, 주행 속도 등 주행에 대한 분석은 진행되지 않았다.

따라서, 이 연구에서는 다양한 움직임에 적용하기 위해 오차 신호를 활용한 CTC (Computed Torque Control) 기반 제어를 제안한다. 이러한 제어 방법은 움직임에 관계없이 회전에 따라서 제어 입력을 생성하여 보정할 수있기에 다양한 움직임에 확장할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 하지만, 뱀 로봇에서 CTC 제어를 구현하기 위해서는 두 가지 큰 어려움이 존재한다. 뱀 로봇을 수학적 모델로 표현하는 것과 적절한 제어를 선정하는 것이다.

뱀 로봇에 대한 수학적 표현으로는 기존의 연구사례가 존재한다. 대표적인 연구사례로써, [2,3,18-20]에서 뱀 로봇의 동역학을 유도하기 위해 VSOP (Virtual Structure for Orientation and Position)와 D-H 매개변수(Denavit-Hartenberg Parameter)를 사용하여 뱀 로봇의 기구학을 설명하고, 동역학을 유도한다. 시스템을 이해하고, 제어를 하는 것에 있어서 이러한 동역학을 파악하는 것은 중요하다. 하지만, 연구 사례에서 보듯이 뱀 로봇의 동역학은 매우 복잡하다. 이러한 요인은 수학적 표현을 어렵게 만들며, 제어 법칙을 설계하는 것에 많은 어려움과 높은 컴퓨팅 파워를 요구할 수 있다.

다음으로 제어기 선정이다. 오차 신호를 활용하여 뱀 로봇 머리에서 발생하는 회전, 뱀 로봇의 비선형성과, 외란을 효과적으로 제어할 수 있는 제어기가 필요하다. 이 논문에서는 I-PID (Intelligent Proportional-Integral-Derivative) 기반 제어기를 제안한다. 이 제어기는 이전 시간 정보를 사용하는 제어기로써, 기존의 PID 제어기와 마찬가지로 비 모델 기반 제어기(Model-Free Control)이다. 그렇기에 쉽게 설계가 가능하고 이전 시간 정보를 활용하여 불확실성과 비선형성에 강한 제어기이다. 이러한 장점을 많은 연구사례를 통해 그 효과를 입증하였다^[21-23].

하지만, 이 제어기는 이전 시간 정보를 사용하기에 시간 지연 추정 오차(Time-Delay Estimation Error)가 발생하며, 주변 환경과의 상호 작용 및 운동 방향의 변화를 일으키는 회전이 지속적으로 발생하는 이 시스템에서 제어 성능의 하락 원인이 될 수 있다^[24].

시간 지연 추정 오차를 보상하기 위해 다양한 방법으로 시도된 연구사례들이 존재하며^[24-26], 모두 훌륭한 결과를 보여준다. 하지만, 제어 구조의 복잡성을 야기하거나, 강한 구속력을

생성하는 형태를 취한다. 이 논문에서는 RBF 신경망(Radial Basis Function Neural Network)과 강인 항(Robust Term)을 사용하는 제어기법을 제안한다. RBF 신경망은 각각 하나의 레이어로 구성된 간단한 구조를 가지고 있다. 이 신경망은 인공 신경망의 장점인 외란 관측기와 같은 복잡한 수학적 해석 없이 근사할 수 있으며, 시스템과 독립적으로 구성할 수 있기에 구조적인 복잡함을 해소할 수 있는 능력이 있다. 또한, 최적화 기능까지 수행이 가능하다^[27,28]. 특히, RBF 신경망은 수학적 분석이 가능하며, 연산량이 작아 메카트로닉스 시스템(Mechatronic System) 제어에 많은 응용이 되었다^[7,8,27-32]. 이렇듯 인공 신경망을 이용한 제어 기법은 많은 장점이 있지만, 단점 또한 존재한다. 신경망을 활용하는 제어 시스템은 초기 값에 영향을 크게 받을 수 있으며, 신경망 추정 오차 등으로 인해 학습 과정에서 시스템 불안정성을 야기할 수 있는 문제점이 있다. 이에 대해 강인 항을 사용하는 제어 기법이 사용되었고, 신경망이 가지고 있는 단점을 억제하고, 제어기의 강인성을 증가시킬 수 있다^[7,8,33-38].

이 논문에서는 뱀 로봇 머리를 오차 신호에 기반한 CTC 제어를 통해 흔들림을 억제하는 연구를 제안한다. 이 연구는 다음과 같은 기여를 갖는다.

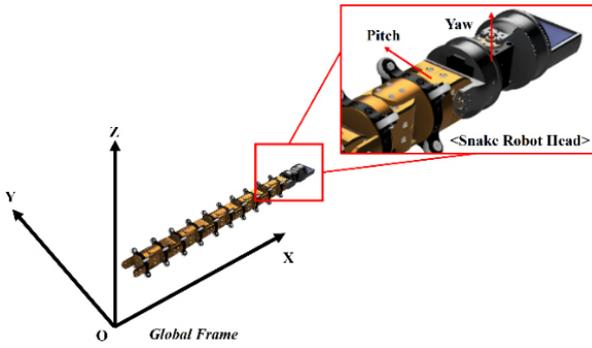
- 뱀 로봇의 복잡한 동역학을 회피하기 위해 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 활용한 제어 전략을 제시한다.
- 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 효과적으로 제어하기 위해 I-PID 제어와 RBF 신경망, 강인 항을 사용한 제어를 사용한다. 이러한 제어 기법의 결합은 뱀 로봇 시스템에서 발생하는 회전과 외란을 효과적으로 보상할 수 있으며, I-PID 제어 기법의 단점을 보완하여 보다 더 견고한 제어 시스템을 구성할 수 있다.
- 뱀 로봇에 제안하는 제어 시스템을 탑재하여, *Lateral undulation*, *Rectilinear*, *Sidewinding* 움직임에 대한 실험을 통해 이 제어 전략에 대한 유효성을 입증한다.

이 논문은 2장에서 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템과 제어 전략을 제시한다. 3장에서는 제안하는 제어기의 설계를 진행하고 4장에서는 Lyapunov 함수 후보를 활용하여 안정도를 증명한다. 5장에서는 *Lateral undulation*, *Rectilinear*, *Sidewinding* 움직임에 대한 실험을 통해 제어 전략의 유효성을 입증한다. 6장에서는 이 연구의 결론에 대해 서술한다.

2. 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템

2.1 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템

이 논문에서는 뱀 로봇 머리부의 회전을 억제하기 위한 제어 시스템으로 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 제안한다. 뱀



[Fig. 1] 2-DoF Snake robot head system

로봇의 전체 동역학은 서론에서 언급했듯, 매우 복잡하다. 이 연구에서는 기존연구 사례^[11-17]에서 제시한 제어 전략을 참고하여 상대적인 저 자유도 시스템으로 제어 시스템을 간소화하고, 독립적인 제어 구조를 갖는 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 이용한 제어전략을 제시한다.

[Fig. 1]은 본 논문에서 제안하는 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템이다. 제안하는 시스템은 주행 성능에 영향을 줄이기 위해 주행 모듈보다는 길이와 지름이 작은 사이즈로 구성된다. 그리고 뱀 로봇에서 발생하는 pitch 회전과 yaw 회전을 보상하기 위한 2개의 모듈의 모듈로 구성되어 있으며, 이 시스템은 뱀 로봇의 제어 시스템과 독립적으로 운용한다.

이렇게 구성된 시스템은 매니퓰레이터(Manipulator)와 유사한 시스템이 되며, 식 (1)과 같이 일반적인 동역학 시스템으로 표현할 수 있다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}}_{M(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{q}_{pitch} \\ \ddot{q}_{yaw} \end{bmatrix}}_{\ddot{q}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \end{bmatrix}}_{C(q, \dot{q})} + \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \end{bmatrix}}_{G(q)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{pitch} \\ \tau_{yaw} \end{bmatrix}}_{\Gamma(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}}_{D(t)} \quad (1)$$

여기에서, q_{pitch} 는 pitch 회전을 보정하는 모듈의 각도, q_{yaw} 는 yaw 회전을 보정하는 각도이다. $M(q)$ 은 관성 행렬, $C(q, \dot{q})$ 는 코리올리스 행렬(Coriolis Matrix), $G(q)$ 는 중력 행렬, $\Gamma(t)$ 는 제어 입력 행렬, $D(t)$ 는 덩어리 외란 행렬이다^[7-8].

2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템은 복잡한 뱀 로봇 동역학을 회피하며 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 뱀 로봇과는 독립적으로 구성된 제어 시스템이므로 뱀 로봇의 역학을 포함하기 어렵다. 그렇기 때문에, 뱀 로봇에서 발생하는 회전을 억제하기 위해 피드포워드(Feedforward) 제어를 활용한 제어 시스템은 구축하기는 쉽지 않다. 이 연구에서는 뱀 로봇에서 오는 회전을 외란으로 간주하여 적절한 제어기 선정을 통해 회전을 억제하는 방법을 택한다.

결론적으로, 이 연구에서 뱀 로봇 머리 회전을 억제하기 위한 제어전략으로 뱀 로봇 제어 시스템과 독립적인 2-자유도 뱀

로봇 머리 시스템을 구성한다. 다음으로, 로봇에 의한 회전을 외란 성분으로 취급하여 이를 제어할 수 있는 강인 제어기를 설계하여 뱀 로봇 머리 회전을 억제하는 제어전략을 활용한다.

3. 제어기 설계

3.1 I-PID 제어

오차 신호 기반 CTC를 구현하기 위해 이 연구에서는 I-PID 제어기를 기반으로 설계한다. 제안하는 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템은 복잡한 뱀 로봇의 동역학 문제를 간소화할 수 있지만, 여전히 강한 회전에 의한 영향과 주변 환경과의 상호작용, 모델 불확실성에 대해 자유롭지 못하다. 이 연구에서 사용하는 I-PID 제어기는 PID 제어기와 유사한 제어 구조를 가지며, 모델 정보를 필요치 않는다. 이러한 장점과 함께 제어대상에 존재하는 모델 불확실성이나 외란에 대한 영향에 대해서도 대응할 수 있는 능력을 가지고 있다^[21-23]. 이 제어기를 설계하기 위해서 식 (1)을 식 (2)와 같은 비선형 방정식으로 변형한다.

$$\ddot{q}(t) = F(t) + M^{-1}u(t) \quad (2)$$

단, $F(t) = M^{-1}(q) \cdot [C(q, \dot{q}) + G(q) + D(t)]$ 이며, $u(t) = \Gamma(t)$ 이다. 만약, 신호가 연속적이고, 제어 주기가 매우 짧으면, $F(t)$ 를 이전 시간 정보를 사용하여 식 (3)과 같이 근사할 수 있다.

$$F(t) \approx \ddot{q}(t) - M^{-1}u(t-h) \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 I-PID 제어 식을 유도하면 식 (4)와 같다.

$$e(t) = q_a - q \quad (4)$$

$$u(t) = u(t-h) + \bar{M} [\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t)]$$

여기에서, q_a 는 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템의 각 모듈의 기준 각도이며, h 는 샘플링 시간이다. \bar{M} 는 무차원의 상수 제어 파라미터이며, M^{-1} 을 대응하는 역할을 한다.

이 제어 입력을 사용하면 식 (5)와 같은 페루프 오차 방정식을 구성할 수 있으며, 이 오차방정식을 통해 페루프 성능을 보장한다.

$$\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) = 0 \quad (5)$$

단, K_p, K_I, K_D 는 제어 이득이다. 이렇게 구성된 제어 입력은 TDE (Time-Delayed Estimation)를 기반한 제어기와 같은 구조를 가진다. 따라서, 식 (6)과 같은 조건을 만족하면 이 제어기는

안정하다^[24-26].

$$\|I - M^{-1}(q)\bar{M}\| < 1 \quad (6)$$

하지만, 식 (3)이 완벽히 $F(t)$ 를 추종할 수 없다면 이 제어기 또한 시간 지연 추정 오차문제를 갖게된다. 이는 제어성능 하락의 원인이 될 수 있다^[24]. 이것을 억제하기 위한 많은 연구가 진행되었다^[24-26]. 이 논문에서는 RBF 신경망을 통해 근사한다.

3.2 RBF 신경망

이 연구에서는 시간 지연 추정을 억제하기 위해 RBF 신경망을 사용한다. 신경망을 사용한 제어는 복잡한 루프 해석 없이 독립적으로 시스템에 추가할 수 있으며, 높은 비선형 근사 능력을 갖출 수 있다^[28,29].

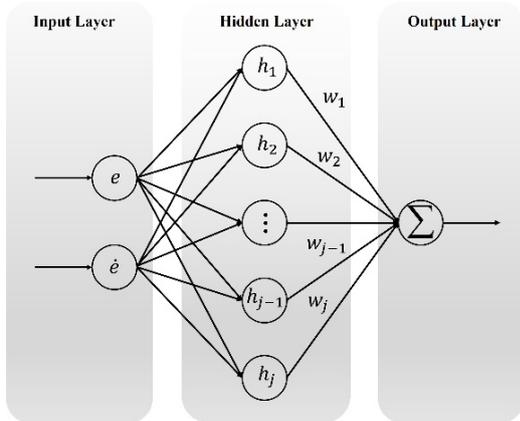
[Fig. 2]은 RBF 신경망 구조이다. 이 신경망의 활성화 함수(Activation Function)는 가우시안 함수(Gaussian Function)이며, 식 (7)과 같이 정의된다.

$$h_{ij} = \exp(-\|x_i - c_j\|^2 / 2b_j^2) \quad (7)$$

단, $x_i = [e \ \dot{e}]$ 로 신경망 입력이며, W_j 는 신경망 가중치이다. c_j 는 j 번째 가우시안 함수 중심이며, b_j 는 j 번째 가우시안 함수 폭이다. 가우시안 함수의 초매개변수(Hyper Parameter)는 오버 피팅(Over Fitting)을 억제하기 위해 적절히 설정한다.

신경망을 활용한 시간 지연 추정 오차를 억제하기 위해 식 (5)의 페루프 오차 방정식을 식 (8)과 같이 재정의한다.

$$\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) = \Delta H \quad (8)$$



[Fig. 2] RBF neural network structure

식 (8)의 ΔH 는 시간 지연 추정 오차이다. ΔH 를 신경망을 통해 억제하기 위해 ΔH 의 최적 값과 신경망 출력을 식 (9)과 같이 정의한다.

$$\Delta \bar{H} = \bar{W}^T H(E) + \varepsilon, \Delta \hat{H} = \hat{W}^T H(E) \quad (9)$$

단, E 는 이 오차 신호 벡터이고, H 는 활성화 함수 출력 벡터이다. $\Delta \bar{H}$ 는 최적 시간 지연 추정 오차이며, \bar{W} 는 최적 가중치, ε 는 신경망 추정 오차이다. $\Delta \hat{H}$ 는 신경망의 출력으로써, 신경망이 추정한 시간 지연 추정 오차이다. \hat{W} 은 현재의 가중치이다. 식 (5)와 같이 구성되는 페루프 식을 이용하여 식 (10)와 Lyapunov 방정식을 만족하는 P 를 도출한다.

$$A^T P + PA = -Q \quad (10)$$

여기서, A 는 페루프 오차 방정식 이득 행렬이며, Q 는 양의 정정 행렬이다. P 는 Lyapunov 방정식을 만족하는 행렬이며, 추후 가중치 업데이트항의 이득이 된다.

식 (9)와 식 (10)을 활용하여 본 논문에서는 식 (11)과 같이 Lyapunov 이론^[39]을 기반한 가중치 업데이트 규칙을 사용한다.

$$\dot{\hat{W}} = \gamma(E_i^T P B H(E) - \sigma \hat{W}) \quad (11)$$

단, 식 (11)에서 \hat{W} 는 가중치 오차이며, γ 와 σ 는 양의 제어 이득이다.

3.3 적응 강인 항

신경망 추정 오차는 대부분 작기 때문에 제어기 시스템 설계에서 크게 비중있게 다루진 않는다. 기존 연구 결과에서도 신경망이 충분히 학습 된다면 만족할 수 있는 제어 성능을 보여준다. 하지만, 신경망 학습 과정이나 큰 외란 신호 인가, 기준 신호의 변경 등에 다양한 요인에 의해 신경망 추정 오차가 유의미한 값을 가지게 된다면 제어 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 악영향을 줄이고, 제어 시스템을 보다 강인하게 만들기 위해 신경망과 추가적인 제어 입력인 강인 항(Robust Term)을 사용하는 제어 기법이 존재한다^[33-38]. 강인 항은 제어 시스템에 부가적으로 사용되는 제어 입력으로써, 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control)의 스위칭 텀(Switching Term)과 유사하게 구성된다. 따라서, 강인 항은 오차 신호에 따라 제어 입력을 추가적으로 생성할 수 있는 능력이 있지만, 슬라이딩 모드 제어에서 발생하는 단점도 함께 공유한다^[7-8]. 이 연구에서는 적응 강인 항으로 구성하여, 이러한 단점이 억제된 강인 항을 제안한다.

적용 강인항을 구성하기 위하여 식 (12)와 같은 오차 평면의 정의한다.

$$s = E + \mu \dot{E} \quad (12)$$

단, μ 는 양의 상수이다. 적용 강인항을 정의하기 위해 식 (13)과 같이 신경망 추정 오차를 정의한다.

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\rho} \cdot s \quad (13)$$

여기에서, $\bar{\varepsilon}$ 은 최적 신경망 추정 오차이며, $\bar{\rho}$ 는 최적 적응 항이다. 적용 강인 항의 특징으로는 오차 평면과 신경망 추정 오차를 추정할 수 있는 적응 항의 곱으로 표현하여, 발생하는 오차에 따라 신호를 생성할 수 있는 항으로 구성된 점이다. 따라서 적용 강인 항을 수식으로 정의하면 식 (14)와 같이 구성된다.

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\rho} \cdot s \quad (14)$$

단, $\hat{\varepsilon}$ 은 적응 강인 항이며, $\hat{\rho}$ 적응 항이다. 이 적응 항의 업데이트 규칙은 식 (15)와 같이 Lyapunov 이론을 기반으로 정의한다.

$$\dot{\hat{\rho}} = \kappa (E_i^T PBs - \beta \tilde{\rho}) \quad (15)$$

단, κ 와 β 는 제어 이득이며, $\tilde{\rho}$ 는 적응 항 오차이다.

식 (4)와 식 (9), 식 (14)를 활용하면 식 (16)와 같은 제어 입력을 얻을 수 있다.

$$u(t) = u(t-h) + \bar{M}[\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t)] + \bar{M}\Delta\hat{H} + \bar{M}\hat{\varepsilon} \quad (16)$$

4. 안정성 증명

이 장에서 앞장에서 고안한 제어 시스템을 Lyapunov 함수 후보(Lyapunov Function Candidate)를 활용하여 안정도를 증명한다.

먼저, 식 (2)에 식 (16)를 대입하여, 식 (17)과 같은 페루프 오차 방정식을 얻는다.

$$\dot{E}_i = AE_i + B \cdot N \quad (17)$$

단, $N = \tilde{W}H(E_i) + \tilde{\rho}s$ 이며, E_i 는 i 번째 모듈의 각도 오차이다. 이 논문에서는 pitch와 yaw 회전을 보정하는 모듈이다.

다음으로 제어 시스템의 안정도를 분석하기 위해 식 (18)과

같은 Lyapunov 함수 후보를 고려한다.

$$V = \frac{E_i^T PE_i}{2} + \frac{\tilde{W}^T \tilde{W}}{2\gamma} + \frac{\tilde{\rho}^T \tilde{\rho}}{2\kappa} \quad (18)$$

식 (18)을 시간에 대해 미분을 하고, 식 (17)을 활용하면 식 (19)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\dot{E}_i^T PE_i}{2} + \frac{E_i^T P \dot{E}_i}{2} + \frac{\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}}{\gamma} + \frac{\tilde{\rho}^T \dot{\tilde{\rho}}}{\kappa} \\ &= \frac{(AE_i + B \cdot N)PE_i}{2} + \frac{E_i^T P(AE_i + B \cdot N)}{2} + \frac{\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}}{\gamma} + \frac{\tilde{\rho}^T \dot{\tilde{\rho}}}{\kappa} \\ &= \frac{E_i^T (A^T P + PA)E_i}{2} + E_i^T PN + \frac{\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}}{\gamma} + \frac{\tilde{\rho}^T \dot{\tilde{\rho}}}{\kappa} \\ &= -\frac{E_i^T QE_i}{2} - E_i^T P \tilde{W}^T BH(E) + \frac{\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}}{\gamma} - E_i^T PB \tilde{\rho}^T s + \frac{\tilde{\rho}^T \dot{\tilde{\rho}}}{\kappa} \\ &= -\frac{E_i^T QE_i}{2} - \tilde{W}^T \left(E_i^T PBH(E) - \frac{\dot{\tilde{W}}}{\gamma} \right) - \tilde{\rho}^T (E_i^T PBs - \dot{\tilde{\rho}}/\kappa) \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에 식 (11)과 식 (15)를 대입하면, 식 (20)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{V} = -\frac{E_i^T QE_i}{2} - \sigma \tilde{W}^T \tilde{W} - \beta \tilde{\rho}^T \tilde{\rho} \leq 0 \quad (20)$$

식 (18)의 Lyapunov 함수 후보와 식 (20)을 통해 제안하는 제어입력은 Lyapunov 안정도 ($V > 0, \dot{V} \leq 0$)를 만족하기에 안정하다^[38,40-43].

하지만, 앞의 본문에서 언급했듯, 신경망의 사용한 제어기는 신경망이 충분히 학습된다면 만족할만한 성능을 보인다. 이런 경우, 본 논문에서 제안하는 적응 강인 항은 불필요한 제어 입력을 생성할 가능성이 있다. 따라서, 적응 강인 항은 큰 오차가 발생할 경우에만 작동하고, 정상상태 시 적응 강인 항의 제거하여 성능에 미치지 않도록 구성되어야 한다. 이 논문에서는 이러한 기능을 구현하기 위해 식 (21)과 같은 역 포화 필터(Reverse Saturation Filter)를 사용하여 달성한다.

$$sat_{rev}(u) = \begin{cases} -|u| & \text{if: } u < -N \\ 0 & \text{if: } -N \leq u \leq N \\ +|u| & \text{if: } u > N \end{cases} \quad (21)$$

단, N 은 역 포화 필터의 임계 값(Threshold Value)이며, 설계자가 오차 신호를 활용하여 적절히 선정한다. 따라서, 최종적인 제어 입력은 식 (22)와 같다.

$$u(t) = u(t-h) + \bar{M}[\ddot{e}(t) + K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t)] + \bar{M}\Delta\hat{H} + \bar{M}sat_{rev}(\hat{\varepsilon}) \quad (22)$$

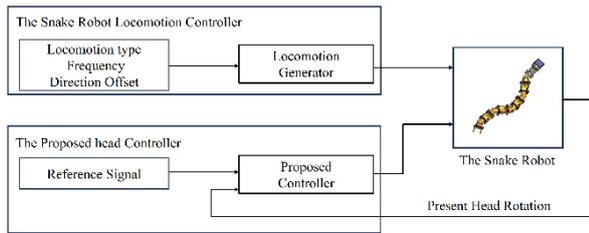
5. 뱀 로봇을 활용한 실험

5.1 실험 준비

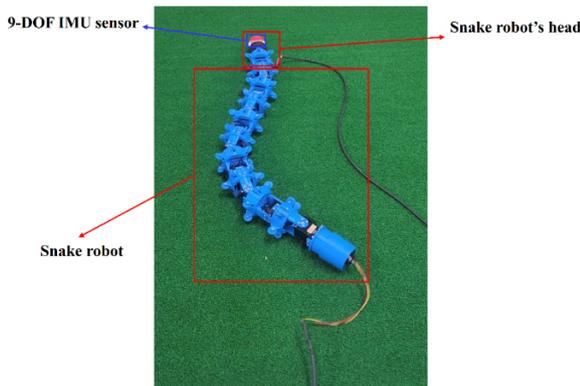
이 장에서는 뱀 로봇에 제안하는 제어기를 적용하여 이 논문에서 제안하는 제어 전략이 유효한지 검증한다.

[Fig. 3]은 이 논문에서 제안하는 제어 전략을 도식화한 것이다. 이 논문에서 언급했듯, 뱀 로봇 움직임 제어기와, 회전을 억제하기 위한 제어기가 독립적으로 존재하는 시스템 구성하였다. [Fig. 4]는 이 실험에서 사용되는 뱀 로봇 시스템과 주행 환경이다. 이 실험에서 사용하는 뱀 로봇은 9 자유도를 가지고 있으며, 주행 성능을 위해 수동 휠(Passive Wheel)을 장착한 모델을 사용한다. 뱀 로봇 머리 부에는 본 논문에서 제안하는 2 자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 부착 하였다. 이 시스템에는 9 자유도 IMU (Inertial Measurement Unit)을 부착하여 회전을 측정한다. 뱀 로봇이 주행하는 환경은 불특정한 외란의 영향을 반영하기 위해 인공 잔디와 불특정한 경사가 있는 지형을 사용한다.

실험에 사용되는 움직임으로는 기존 연구사례에서 다뤘던, yaw 회전을 하는 Lateral undulation을 포함한 pitch 회전이 있는 Rectilinear, yaw 회전과 pitch 회전이 모두 존재하는 Sidewinding으로 총 3가지 움직임을 대상으로 실험한다. 이 움직임은 식 (23)을 따른다^[2,18-20,44]. 회전은 뱀 로봇 머리에 부착된



[Fig. 3] The snake robot control system block diagram



[Fig. 4] The snake robot system

IMU 센서를 통해서 측정하고, 피드백 신호로 사용한다.

$$q_{i,ref}^{lat}(i,t) = \underbrace{\alpha_{lat} \sin(\omega_{lat}t + (i-1)\delta_{lat})}_{\text{module wave}} + \underbrace{\phi_{lat}}_{\text{heading}} \quad (23)$$

$$q_{i,ref}^{dor}(i,t) = \underbrace{\alpha_{dor} \sin(\omega_{dor}t + (i-1)\delta_{dor})}_{\text{module wave}}$$

여기에서, α_{lat} 와 α_{dor} 는 움직임의 진폭, ω_{lat} 와 ω_{dor} 는 진동수, δ_{lat} 와 δ_{dor} 는 위상차를 나타내며, ϕ_{lat} 는 방향을 조절하기 위한 요소이다. 이 논문에서는 Lateral undulation 움직임 매개변수로 $\alpha_{lat} = 0.7$ 과 $\omega_{lat} = 0.6$, $\delta_{lat} = 1.26$, $\phi_{lat} = 0$ 을 사용한다. Rectilinear 움직임 매개변수로 $\alpha_{dor} = 0.105$ 이며, $\omega_{dor} = 1.2$, $\delta_{dor} = 1.57$ 이다. Sidewinding 움직임 매개변수로 $\alpha_{lat} = 0.52$, $\omega_{lat} = 0.6$ 이고 $\delta_{lat} = 1.8$, $\alpha_{dor} = 0.52$, $\omega_{dor} = 0.6$, and $\delta_{dor} = 1.4$ 이다.

주행 성능 테스트를 위해 사전에 제안하는 제어기를 적용하지 않은 뱀 로봇으로 주행 테스트를 진행했다. 직선 거리 기준으로 측정하였고, 각각 10번의 반복 실험을 통해 도출한 움직임 당 평균 속도는 [Table 1]와 같다.

다음으로, 이 연구에서 사용하는 신경망의 구조는 2-5-1이며, 제안하는 제어기의 매개변수는 [Table 2]과 같다. 매개변수는 반복적인 시뮬레이션과 실험을 통해 선정했으며, 설계 순서는 I-PID부터 순차적으로 설계한다.

[Table 1] The snake robot speed for each locomotion

Locomotion Type	Speed [m/s]
Lateral Undulation	0.062 [m/s]
Rectilinear	0.0041 [m/s]
Sidewinding	0.071 [m/s]

[Table 2] Control parameters

Parameter Group	Parameter	Value
I-PID Parameters	\bar{M}	0.01
	K_p	30
	K_f	0.01
	K_D	1.5
Neural Network Update Parameters	γ	0.09
	σ	0.3
Adaptive Term Update Parameters	μ	0.6
	κ	0.9
	β	0.5
	N	0.1
P		[200.8, 26.9, 28.6; 26.9, 51.9, 4.6; 28.6, 4.6, 11]
RBF Neural Network Parameters	ω	[0.1, 0.01, 0.1, 0.01, 0.1]
	c	[-1, 0.5, 0, 0.5, 1]
	b	15

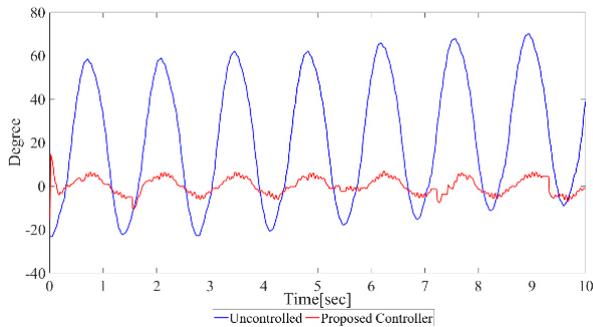
5.2 실험 결과

[Fig. 5]는 Lateral undulation 움직임에 대한 실험결과이다. 제어를 하기 전에는 $-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 로 흔들리던 뱀 로봇 머리가 $-6^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 로 흔들림을 볼 수 있다. 이는 83.75%의 회전이 개선된 것이다.

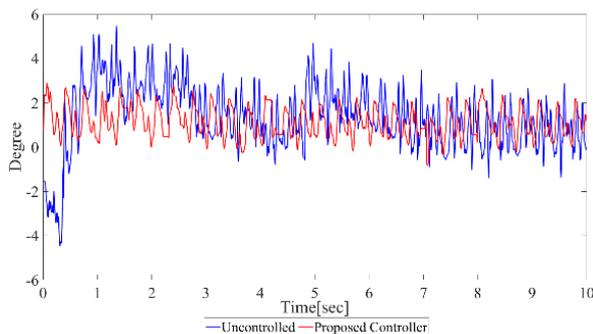
[Fig. 6]는 Rectilinear 움직임에 대한 실험결과이다. 제어를 하기 전에는 $-1.4^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 로 흔들리던 뱀 로봇 머리가 $-0.2^{\circ}\sim 2.4^{\circ}$ 로 흔들림을 볼 수 있다. 이는 40.91% 개선된 것이다. 이 움직임에선 Lateral undulation 움직임에 비해 개선 폭이 적다. 이는 움직임 특성상 진폭이 매우 작고, 특성상 주파수가 높은 점과 지면과 연속적인 접촉에 의해 IMU 센서 데이터가 고르지 못한 점이 요인이 되는 것으로 보인다. 하지만, 제어 전후로 회전이 억제됨은 확인할 수 있다.

마지막으로, [Fig. 7]과 [Fig. 8]은 Sidewinding 움직임에 대한 실험결과이다. 먼저, yaw 회전에서는 제어를 하기 전, $-20.4^{\circ}\sim 29.5^{\circ}$ 로 흔들리던 뱀 로봇 머리가 $-5.8^{\circ}\sim 5.6^{\circ}$ 로 흔들림을 볼 수 있다. 이는 77.2%의 회전이 개선된 것이다. 다음으로 pitch 회전에서는 제어를 하기 전, $-5.1^{\circ}\sim 2.2^{\circ}$ 로 흔들리던 뱀 로봇 머리가 $-0.2^{\circ}\sim 2.4^{\circ}$ 로 흔들림을 볼 수 있다. 이는 31.1%의 회전이 개선된 것이다.

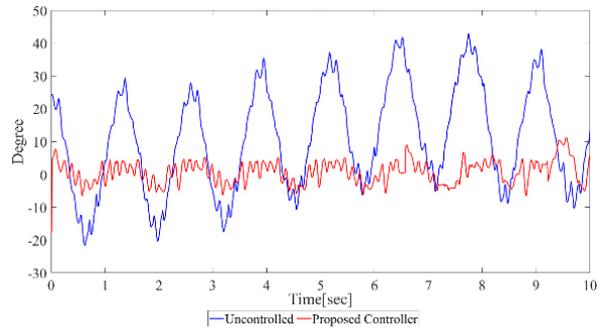
이 움직임에선 Lateral undulation 움직임처럼 yaw 회전 억제는 뛰어났지만, pitch 회전은 상대적으로 부족하다. 이는



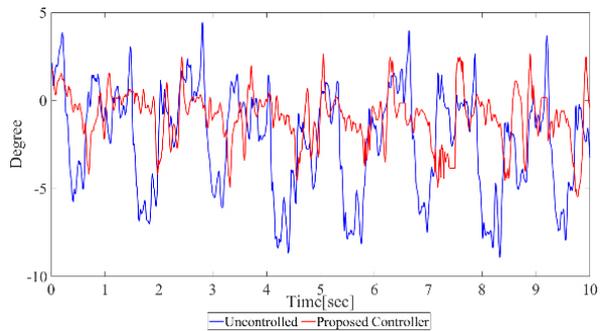
[Fig. 5] Yaw response from lateral undulation experiment



[Fig. 6] Pitch response from rectilinear experiment



[Fig. 7] Yaw response from sidewinding experiment



[Fig. 8] Pitch response from sidewinding experiment

[Table 3] The snake robot speed for each locomotion

Lateral Undulation	0.054 [m/s]
Rectilinear	0.0041 [m/s]
Sidewinding	0.07 [m/s]

Rectilinear 움직임과 같은 원인으로 보인다. 또한 yaw 회전과 pitch 회전이 공존하는 이 시스템은 단일 회전만 생기는 움직임에 비해 개선 폭이 조금 부족하다. 하지만, 이 움직임에 대해서도 제안하는 제어 방법은 회전을 억제함을 보인다.

[Table 3]은 제안하는 제어기를 적용한 뱀 로봇의 주행속도를 나타낸 것이다. 해당 실험은 총 5회 반복 했으며, 직선 거리 기준으로 측정하였다. 측정 결과, 제어 전과 비교하여 주행 속도의 감소나 변화 폭은 크지 않았다.

따라서, 실험 결과, 뱀 로봇 머리 회전을 억제하기 위해 제안하는 제어기와 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 활용하는 방법은 회전을 억제시킬 수 있고, 주행 속도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 뱀 로봇 머리에서 발생하는 회전을 억제하기 위한 제어 전략으로 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템과 RBF

신경망과 강인 항을 활용하는 I-PID 기반 제어기를 제안한다. 이 연구에서는 복잡한 뱀 로봇 동역학을 회피하기 위해 2-자유도 뱀 로봇 머리 시스템을 제안한다. 이 시스템은 뱀 로봇 주행 모듈보다 작은 사이즈로 제작되며, 뱀 로봇과 독립적인 제어 시스템을 갖는다. 다음으로, 오차 신호를 활용하여 뱀 로봇 머리에서 발생하는 회전, 뱀 로봇의 비선형성과, 외란을 효과적으로 제어할 수 있는 제어기로 I-PID 제어기를 활용하여 제어 시스템을 구현한다. I-PID 제어 시스템에 발생하는 시간 지연 추정 오차를 보상하기 위해 RBF 신경망을 결합한다. 추가적으로 제어 시스템을 보다 견고하게 만들며, 신호 변화에 따라 제어 입력을 생성할 수 있는 적응 강인 항을 추가로 설계하여 제어 시스템과 결합하여 사용한다. 제안하는 제어기는 Lyapunov 이론에 따라 안정도를 만족한다.

이 논문에서 제안하는 제어전략의 유효성을 확인하기 위해 9 자유도를 갖는 뱀 로봇을 이용하여 실험을 진행한다. Lateral undulation, Rectilinear, Sidewinding 3 가지 움직임을 대상으로 실험을 진행했다. 실험결과, 주행 속도 변화에는 큰 차이가 없으며, Lateral undulation에서 83.75%, Rectilinear에선 40.91%, Sidewinding의 yaw 회전은 77.2%, pitch 회전은 31.1%가 개선되었다.

따라서, 이 논문에서 제시하는 제어전략은 유효하다는 것을 알 수 있었다. 향후에는 본 논문에서 강인 제어에 초점을 맞춰 제어기를 구성했다면, 최적 제어와 같은 제안하는 방법과 함께 제어 파라미터를 줄이는 등 다양한 제어 이론을 시도할 예정이다. 이와 함께 다양한 제어 방법을 강구하여 최종적으로 성능을 더욱 향상시킬 계획이다.

References

- [1] S. Kim, D.-G. Shin, J. Pyo, J. Shin, M. Jin, and J. Suh, "A Multi-Sensor Module of Snake Robot for Searching Survivors in Narrow Space," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 16, no. 4, pp. 291-298, Nov., 2021, DOI: 10.7746/jkros.2021.16.4.291.
- [2] R. Ariizumi and F. Matsuno, "Dynamic Analysis of Three Snake Robot Gaits," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 5, pp. 1075-1087, Oct., 2017, DOI: 10.1109/TRO.2017.2704581.
- [3] J. Mukherjee, S. Mukherjee, and I. N. Kar, "Sliding Mode Control of Planar Snake Robot with Uncertainty Using Virtual Holonomic Constraints," *IEEE Robot. Automation Letter*, vol. 2, no. 2, pp. 1077-1084, Apr., 2017, DOI: 10.1109/LRA.2017.2657892.
- [4] J. Whitman, N. Zevallos, M. Travers, and H. Choset, "Snake Robot Urban Search After the 2017 Mexico City Earthquake," *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Philadelphia, PA, USA, pp. 1-6, 2018, DOI: 10.1109/SSRR.2018.8468633.
- [5] J. H. Pyo, M. S. Lee, D. G. Shin, K.-H. Seo, H. Joe, J.-H. Suh, and M. Jin, "Generation of snake robot locomotion patterns using genetic algorithm," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 38, no. 10, pp. 717-724, Oct., 2021, DOI: 10.7736/JKSPE.021.057.
- [6] J. Windau and L. Itti, "Multilayer real-time video image stabilization," *2011 IEEE/RSJ Conference on Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, pp. 2397-2402, 2011, DOI: 10.1109/IROS.2011.6094738.
- [7] S.-J. Kim, M. Jin, and J.-H. Suh, "A Study on the Design of Error-Based Adaptive Robust RBF Neural Network Back-Stepping Controller for 2-DOF Snake Robot's Head," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 23146-23156, 2023, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3249346.
- [8] S.-J. Kim and J.-H. Suh, "Adaptive Robust RBF-NN Nonsingular Terminal Sliding Mode Control Scheme for Application to Snake Robot's Head for Image Stabilization," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, pp. 4899, Apr., 2023, DOI: 10.3390/app13084899.
- [9] C. Au and P. Jin, "Investigation of serpentine gait of a snake robot with a wireless camera," *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, Auckland, New Zealand, pp. 1-6, 2016, DOI: 10.1109/MESA.2016.7587132.
- [10] M. Mutlu, K. Melo, M. Vespignani, A. Bernardino, and A. J. Ijspeert, "Where to place cameras on a snake robot: Focus on camera trajectory and motion blur," *2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, West Lafayette, IN, USA, pp. 1-8, 2016, DOI: 10.1109/SSRR.2015.7442948.
- [11] N. Sergienko and L. Chen, "Adaptive head stabilization system for a snake-like robot," *International Conference on Robot. Automation*, Melbourne, Australia, pp. 1-7, Dec., 2014, [Online], <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18654568>.
- [12] G. Qiao, G. Song, Y. Zhang, J. Zhang, and Y. Li, "Head stabilization control for snake-like robots during lateral undulating locomotion," *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, Bali, Indonesia, pp. 392-397, 2014, DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090362.
- [13] Z. Bing, L. Cheng, K. Huang, Z. Jiang, G. Chen, F. Röhrbein, and A. Knoll, "Towards autonomous locomotion: Slithering gait design of a snake-like robot for target observation and tracking," *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 2698-2703, 2017, DOI: 10.1109/IROS.2017.8206095.
- [14] S. Gay, A. Ijspeert, and J. Santos Victor, "Predictive gaze stabilization during periodic locomotion based on Adaptive Frequency Oscillators," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, pp. 271-278, 2012, DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225001.
- [15] J. Florez, F. Calderon, and C. Parra, "Video stabilization taken with a snake robot," *Symposium of Signals, Images and Artificial Vision - 2013: STSIVA - 2013*, Bogota, Colombia, pp. 1-5, 2013, DOI: 10.1109/STSIVA.2013.6644937.
- [16] S. Hasanzadeh and A. Tootoonchi, "Ground adaptive and optimized locomotion of snake robot moving with a novel gait," *Autonomous Robot*, vol. 28, pp. 457-470, Mar., 2010, DOI: 10.1007/s10514-010-9179-y.

- [17] H. Yamada, M. Mori, and S. Hirose, "Stabilization of the head of an undulating snake-like robot," *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, pp. 3566-3571, 2007, DOI: 10.1109/IROS.2007.4399390.
- [18] A. A. Transteth, K. Y. Petterse, and P. Liljebeck, "A survey on snake robot modeling and locomotion," *Roboticka*, vol. 27, no. 7, pp. 999-1015, Mar, 2009, DOI: 10.1017/S0263574709005414.
- [19] P. Liljebeck, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl, and J. T. Gravdahl, "A review on modelling, implementation, and control of snake robots," *Robotics Autonomous System*, vol. 60, no. 1, pp. 29-40, Jan., 2012, DOI: 10.1016/j.robot.2011.08.010.
- [20] P. Liljeback, S. Oyvind, and K. Y. Pettersen, "Modular pneumatic snake robot 3D modelling, implementation and control, Model," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 38, no. 1, pp. 19-24, 2005, DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01274.
- [21] M. Fliess and C. Join, "Intelligent PID controllers," *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, France, pp. 326-331, 2008, DOI: 10.1109/MED.2008.4601995.
- [22] J. Wang, H. Mounier, A. Cela, and S.-I. Niculescu, "Event driven intelligent PID controllers with applications to motion control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 10080-10085, Jan., 2011, DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02960.
- [23] Y.-W. Choe, "Optimal Tuning Strategy for 2-Degree-of-Freedom i-PID Controllers," *Transactions on the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 9, pp. 1202-1209, Sept., 2018, DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.9.1202.
- [24] J. Baek, W. Kwon, B. Kim, and S. Han, "A Widely Adaptive Time-Delayed Control and Its Application to Robot Manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5332-5342, Jul., 2019, DOI: 10.1109/TIE.2018.2869347.
- [25] M. Jin, S. H. Kang, P. H. Chang, and J. Lee, "Robust Control of Robot Manipulators Using Inclusive and Enhanced Time Delay Control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 5, pp. 2141-2152, Oct., 2017, DOI: 10.1109/TMECH.2017.2718108.
- [26] M. Jin, J. Lee, P. H. Chang, and C. Choi, "Practical Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Robot Manipulators for High-Accuracy Tracking Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 9, pp. 3593-3601, Sept., 2009, DOI: 10.1109/TIE.2009.2024097.
- [27] J. Liu, *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems: Design, Analysis and Matlab Simulation*, 1st ed. Springer Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 1-280, [Online], <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-34816-7>.
- [28] J. Liu, *Intelligent Control Design and MATLAB Simulation*, 1st ed. Springer Singapore, 2018, pp. 113-233, [Online], <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-5263-7>.
- [29] Q. Song and L. Yin, "Robust adaptive fault accommodation for a robot system using a radial basis function neural network," *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 2, pp. 195-204, Nov., 2010, DOI: 10.1080/00207720119580.
- [30] A.-K. Seghouane and N. Shokouhi, "Adaptive Learning for Robust Radial Basis Function Networks," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 51, no. 5, pp. 2847-2856, May, 2021, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2951811.
- [31] H.-W. Kim, J. Park and S. H. Park, "Design of Error State-Based RBF Neural Network Adaptive Backstepping Controller for Estimation and Compensation of Various Unknown Errors," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 473-481, Jun., 2018, DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0040.
- [32] H. W. Kim, Y. Yoon, J. H. Jeong, and J. Park, "The Adaptive Backstepping Controller of RBF Neural Network Which is Designed on the Basis of the Error," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 125-131, Oct., 2016, DOI: 10.7736/KSPE.2017.34.2.125.
- [33] Y. Tian, W. Feng, M. Ouyang, H. Bian, and Q. Chen, "A positioning error compensation method for multiple degrees of freedom robot arm based on the measured and target position error," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 1-13, May, 2022, DOI: 10.1177/16878132221090094.
- [34] S. Slama, A. Errachdi, and M. Benrejeb, "Neural adaptive PID and neural indirect adaptive control switch controller for nonlinear MIMO systems," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, Aug., 2019, DOI: 10.1155/2019/7340392.
- [35] X. Cao, P. Shi, Z. Li, and M. Liu, "Neural-network-based adaptive backstepping control with application to spacecraft attitude regulation," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 29, no. 9, pp. 4303-4313, Sept., 2018, DOI: 10.1109/TNNLS.2017.2756993.
- [36] Y. Zhang, P.-Y. Peng, and Z.-P. Jiang, "Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 11, no. 6, pp. 1347-1360, Nov., 2000, DOI: 10.1109/72.883443.
- [37] W.-Y. Wang, M.-F. Kuo, T.-T. Lee, C.-M. Hong, and Y.-G. Leu, "RBF neural network adaptive backstepping controllers for MIMO nonaffine nonlinear systems," *2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio, TX, USA, 2009, pp. 4946-4951, DOI: 10.1109/ICSMC.2009.5346245.
- [38] S. Han, H. Wang, Y. Tia, and N. Christov, "Time-delay estimation based computed torque control with robust adaptive RBF neural network compensator for a rehabilitation exoskeleton," *ISA Transactions*, vol. 97, pp. 171-181, Feb., 2020, DOI: 10.1016/j.isatra.2019.07.030.
- [39] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, 2002, [Online], https://books.google.co.kr/books/about/Nonlinear_Systems.html?id=t_d1QgAACAAJ&redir_esc=y.
- [40] Y. Feng, J. Fei, and K. Ma, "Model reference adaptive sliding mode control using RBF neural network for active power filter," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 249-258, Dec., 2015, DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.05.009.
- [41] Q. Liu, D. Li, S. S. Ge, R. Ji, Z. Ouyang, and K. P. Tee, "Adaptive bias RBF neural network control for a robotic manipulator," *Neurocomputing*, vol. 447, no. 4, pp. 213-223, Aug., 2021, DOI: 10.1016/j.neucom.2021.03.033.

- [42] X. Yali and J. Changsheng, "Trajectory linearization control of an aerospace vehicle based on RBF neural network," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 799-805, Aug., 2008, DOI: 10.1016/S1004-4132(08)60156-5.
- [43] L. Wang, T. Chai, and L. Zhai, "Neural-Network-Based Terminal Sliding-Mode Control of Robotic Manipulators Including Actuator Dynamics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 9, pp. 3296-3304, Sept., 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2011350.
- [44] S. Hirose and M. Mori., "Biologically Inspired Snake-Like Robots," *2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenyang, China, pp. 1-7, 2005, DOI: 10.1109/ROBIO.2004.1521742.



김 성 재

2024 국립부경대학교 지능로봇공학과
(공학박사)

2024~현재 국립부경대학교 산업과학기술
연구소 선임연구원/Post-Doc

관심분야: 제어이론, 지능 제어, 강인 제어, 로봇 제어



서 진 호

2002 도쿄공업대학교(Tokyo Institute of
Technology) 제어공학과(공학박사)

2006~2018 한국로봇융합연구원 수석연구원/
단장

2018~현재 국립부경대학교 기계시스템공학
전공 교수

관심분야: 필드로봇, 재난대응로봇, 로봇 시스템 통합