

인체 면역 피드백 메카니즘을 활용한 제어기 설계

박진현* · 김현덕* · 최영규**

*진주산업대학교 · **부산대학교

A controller Design using Immune Feedback Mechanism

Jin-Hyun Park* · Hyun-Duck Kim* · Young-Kiu Choi**

*Jinju National University · **Pusan National University

E-mail : uabut@jinju.ac.k

요 약

PID 제어기는 구조가 간단하고 적용이 용이하다는 장점으로 인하여 널리 사용되고 있는 제어방식이다. 이러한 선형 PID 제어기는 시스템의 파라메터가 변화가 있거나 부하 특성이 비선형적으로 변화할 때에 적절한 이득과 성능을 얻기 어려워 고성능 제어 특성을 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 세포성 면역 반응과 경사감소학습에 기초하여 비선형 PID 제어기를 설계하고, 설계된 제어기의 이득과 비선형 함수의 파라메터들을 실시간 적응적으로 학습할 수 있는 학습 알고리즘을 개발하고, 이를 제어시스템에 적용하였다. 제안된 비선형 PID 제어기는 비선형 직류 모터 시스템의 파라메터들이 변화하거나 주파수가 다른 추종 명령에 대하여, 적응적으로 이득을 변화 시키며 추종함을 보였다.

ABSTRACT

PID controllers, which have been widely used in industry, have a simple structure and robustness to modeling error. But They are difficult to have uniformly good control performance in system parameters variation or different velocity command. In this paper, we propose a nonlinear adaptive PID controller based on a cell-mediated immune response and a gradient descent learning. This algorithm has a simple structure and robustness to system parameters variation. To verify performances of the proposed nonlinear adaptive PID controller, the speed control of nonlinear DC motor is performed. The simulation results show that the proposed control systems are effective in tracking a command velocity under system parameters variation.

키워드

세포성면역반응(cell-mediated immune response), 비선형적응PID제어기(nonlinear adaptive PID controller)

1. 서 론

PID 제어기는 구조가 간단하고 적용이 용이하다는 장점으로 인하여 널리 사용되고 있는 제어방식이다. 이러한 선형 PID 제어기는 시스템의 파라메터가 변화가 있거나 부하 특성이 비선형적으로 변화할 때에 적절한 이득과 성능을 얻기 어려워 고성능 제어 특성을 기대하기 어렵다. 따라서 제어 시스템의 비선형성과 시변 특성에 강인한 제어기의 설계를 위하여 PID 제어기의 이득을 자동 동조하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근들어 많은 연구가 진행되는 비결정론적 알고리즘의 하나인 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)은 시스템의 각 요소가 자율적으로 환경에 대응하는 것을 모의 구성한 것이다. 이

러한 면역 시스템은 여러 공학 분야에서 체액성 면역 반응(Humoral Immune Response)과 세포성 면역 반응(Cell-Mediated Immune Response)으로 나누어 연구되고 있다[1-4].

세포성 면역 반응은 생물학적 메카니즘이 명확히 밝혀지지 않아 매우 복잡하나, T-림프구의 세포 분자 동역학을 바탕으로 면역 피드백 메카니즘 중 핵심 반응인 개체의 제거(Killer), 촉진(Helper), 억제(Suppress)와 같은 3가지 세포성 면역 반응에 대한 연구로 이루어지고 있다. 즉, T-림프구는 제거, 촉진, 억제의 기능으로 하는 3가지 세포로 구성되어, 외부 침입물질에 대하여 빠르게 반응하고, 내부 면역 체계를 보다 빠르게 안정화시킬 수 있다는 특성 면에서 하나의 피드백 메카니즘이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 세포성 면역 피드백 시스템 기초하여, 비선형 적응 PID 제어기를 제안하고자 한다. 또한 제안된 비선형 적응 PID 제어기의 이득과 면역 피드백 시스템의 비선형 함수를 경사감소법(gradient descent rule)에 의해 온라인 학습하는 방법을 제시하고자 한다. 이를 비선형 직류 모터 시스템에 적용하고 시스템 파라미터 변동에 대해서도 적응성을 보이고자 한다.

II. 세포성 면역 반응에 의한 비선형 PID 제어기 설계

생물학적 면역 시스템의 메카니즘은 아직까지 명확히 밝혀지지 않았으며, 또한 매우 복잡하다. 따라서 T-림프구에 의한 세포성 면역 피드백 메카니즘을 단순하게 고려하여 설계하면 그림 1와 같이 구성될 수 있다.

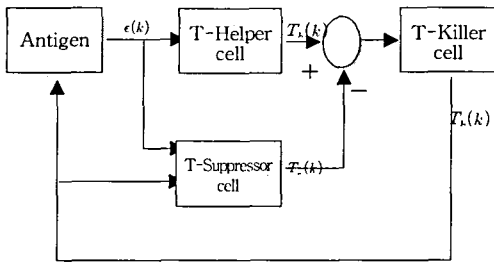


그림 1. T-림프구만을 고려한 세포성 면역 반응
Fig. 1 Cell-Mediated Immune Response focusing on the T-Lymphocytes

세포성 면역 반응은 주로 T-림프구로 반응으로 대표되며, T-killer 세포(T_k), T-suppressor 세포(T_s), T-helper 세포(T_h)로 구성된다. T_k 는 병원균을 직접 제거하는 역할을 하고, T_s 는 면역 반응을 억제하며, T_h 는 면역 반응을 촉진하는 역할을 담당한다. 이러한 3가지 역할을 담당하는 세포들의 세포성 면역 반응을 면역 피드백 메카니즘이라고 한다. 따라서 외부로부터 항원이 발생할 경우, 항원 제시 세포(Antigen Presenting Cell : APC)가 인터루킨(Interleukin-1:IL-1)를 분비하여 그 정보를 T_h 와 T_s 에 전달한다. APC에 의하여 IL-1이 분비되고, 이는 T_h 세포와 T_s 세포를 자극하게 된다. 자극을 받은 T_h 세포는 IL-1에 의한 증가하게 된다. 이러한 면역 피드백 메카니즘을 공학적인 관점에서 식 (1)과 같이 유도할 수 있다[1-2].

$$T_k(k) = K_1 \epsilon(k) - K_2 f[\Delta T_k(k-1)] \epsilon(k) \quad (1)$$

$$= K\{1 - \eta_0 f[\Delta T_k(k-1)]\} \epsilon(k)$$

여기서, K_1 은 T_h 세포 성장 속도에 관한 파라미터, K_2 은 T_s 세포 성장 속도에 관한 파라미터이고, $K = K_1$ 이며, $\eta_0 = K_2/K_1$ 이다.

$f[\cdot]$ 는 비선형 함수로 항원과 T_k 사이의 상호 작용에 의해 결정되는 함수이다. 일반적으로 T_k 세포가 갑자기 크게 증가하거나 감소할 경우, T_s 는 항원이 크게 감소하는 방향으로 설정되어야 한다. 따라서 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$f(x) = 1.0 - \exp(-x^2/a) \quad (2)$$

여기서, a 는 비선형 함수의 모양을 변화시키는 파라미터이다.

세포성 면역 반응을 공학적인 제어의 관점에서 해석하여 보면, 식 (1)로부터 $\epsilon(k)$ 를 k 샘플링 시간에서의 제어 오차 신호 $e(k)$ 로 가정하고, $T_k(k)$ 는 시스템을 제어하는 제어량 $u(k)$ 로 두고, K 는 제어기의 이득 K_p 로 간주한다면 식(1)은 아래 수식 (3)과 같이 비선형 항이 포함된 비례 이득만을 갖는 P-제어기로 둘 수 있다[1, 2].

$$u(k) = \bar{K}_p e(k) \quad (3)$$

여기서, $\bar{K}_p = K\{1 - \eta_0 f[\Delta u(k-1)]\}$ 이다.

이러한 면역 피드백 메카니즘에 의한 제어기는 단순히 제어 오차만을 가지는 제어기이므로, 비선형 시스템에 존재하는 노이즈나, 외란 등에 의한 제어 오차를 보상할 수 없다. 따라서 일반적인 PID 제어기와 같은 오차의 미분항과 적분항을 고려하여 제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 일반적인 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득을 면역 피드백 시스템의 비선형 이득값으로 대체하여 제어기를 다시 설계하면 식 (4)와 같다[1-2].

$$u(t) = \bar{K}_1 e(t) + \bar{K}_2 \int e(\tau) d\tau + \bar{K}_3 \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

$$\bar{K}_1 = K_p \{1 - \eta_1 f_1[\Delta u(t)]\}, \quad \bar{K}_2 = K_i \{1 - \eta_2 f_2[\Delta u(t)]\},$$

$$\bar{K}_3 = K_d \{1 - \eta_3 f_3[\Delta u(t)]\}$$

여기서, 파라미터 \bar{K}_1 , \bar{K}_2 , \bar{K}_3 는 제어기의 비례, 적분, 미분 이득을 나타내고, η_1, η_2, η_3 는 면역 억제 요소 비를 나타내며, 식 (5)을 만족하여야 한다.

$$(\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3) > 0, \quad \eta_1 \geq 0, \quad \eta_2 \geq 0, \quad \eta_3 \geq 0 \quad (5)$$

만약, $0 \leq \eta_i f_i[\Delta u(k)] \leq 1, (i=0, 1, 2)$ 이면 부귀환 제어가 되나, 1보다 크게 설정이 되면 정귀환 제어 시스템이 된다. 그러므로 제어 시스템의 안정을 위하여 η_1, η_2, η_3 의 한계값을 설정하여야 한다. 따라서 η_1, η_2, η_3 는 식(2)에서 $0 \leq f[\Delta u(k)] < 1$ 이므로 $0 \leq \eta_i < 1$ 로 정의하여야 한다.

III. 비선형 PID 제어기의 자동 동조

본 절에서는 식 (7)과 같은 세포성 면역 반응에 의한 면역 피드백 메카니즘을 갖는 비선형 PID 제어기를 적용할 때, 고려하여야 하는 제어기 이득 K_1, K_2, K_3 와 비선형 함수 $f[\cdot]$ 의 파라미터의 선정

이 제어기의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 제어기 이득들과 비선형 함수 파라미터 a_i 를 온라인 자동 동조하는 동조 알고리즘이 필요하다. 그림 2는 제안된 비선형 PID 제어기의 비선형 함수를 자동 동조하는 제어 시스템을 나타낸다.

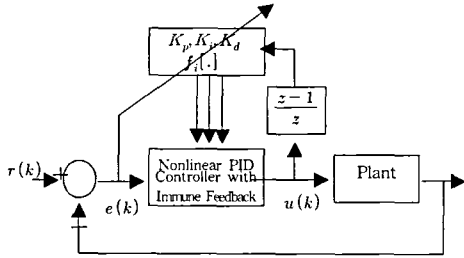


그림 2. 면역 피드백 메카니즘을 갖는 비선형 PID 제어기의 자동 동조 시스템

Fig. 2 Auto-tuning system of nonlinear PID controller with immune feedback mechanism

비선형 PID 제어기의 제어 이득들과 비선형 함수 파라미터의 자동 동조를 위하여 목표 입력 값과 플랜트 출력 값의 오차 신호를 사용한 오차 함수를 구성하여, 오차가 최소화되도록 제어기의 이득과 비선형 함수 파라미터 a_i 를 수정하도록 하였다. 즉, 오차 함수 $E_p(k)$ 를 식(6)와 같이 구성하였다.

$$E_p(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2}e(k)^2$$

여기서, $e(k)$ 는 샘플링 시간 k 에서의 오차 신호를 나타낸다.

PID 제어기의 이득 K_1, K_2, K_3 의 업데이트를 위한 $\Delta K_1(k), \Delta K_2(k), \Delta K_3(k)$ 은 경사 감소법에 의하여 아래 식(7)과 같이 정의하고, 이를 연쇄법(chain-rule)을 사용하면 다음과 같다.

$$\Delta K_i(k) = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial K_i(k)} \quad (7)$$

$$= -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial K_i(k)}$$

여기서, $i = 1, 2, 3$, ζ 는 학습율을 나타낸다.

식 (7)의 각 항들을 정리하면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)의 $\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}$ 는 시스템의 자코비안(Jacobian)을 구하는 문제가 되므로 수학적으로 근사인 $\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)}$ 를 사용하였다[5].

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)} \quad (8)$$

또한, $\frac{\partial u(k)}{\partial K_i(k)}$ 를 구하기 위하여, 식 (4)을 이산 시간 시스템으로 바꾸어 식 (9)와 같이 정리하였다.

$$\frac{\partial u(k)}{\partial K_1(k)} = (1 - \eta_1 f_1[\cdot])(e(k) - e(k-1)) \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial K_2(k)} = (1 - \eta_2 f_2[\cdot])e(k)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial K_3(k)} = (1 - \eta_3 f_3[\cdot])(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))$$

이상의 식 (8)~식 (9)로부터 비선형 PID 제어기의 이득 자동 동조를 위한 업데이트 식은 경사 감소법에 의하여 다음과 같이 구하여 진다.

$$K_i(k+1) = K_i(k) + \Delta K_i(k) \quad (10)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$ 이다.

또한, 비선형 함수 파라미터 a_i 의 업데이트를 위한 $\Delta a_i(k)$ 역시 연쇄법(chain-rule)을 사용하면 다음과 같다.

$$\Delta a_i(k) = -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial a_i(k)} \quad (11)$$

$$= -\zeta \frac{\partial E_p(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial f_i[\cdot](k)} \frac{\partial f_i[\cdot](k)}{\partial a_i(k)}$$

여기서, ζ 는 학습율을 나타낸다.

체인룰에 의한 식은 식(12), 식(13)과 같다.

$$\frac{\partial f_i[\cdot](k)}{\partial a_i(k)} = \frac{x^2}{a_i(k)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{a_i(k)}\right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial f_1[\cdot](k)} = -\eta_1 K_p (e(k) - e(k-1)) \quad (13)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial f_2[\cdot](k)} = -\eta_2 K_i e(k)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial f_3[\cdot](k)} = -\eta_3 K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))$$

따라서 비선형 함수 파라미터 a_i 의 온라인 자동 동조를 위한 업데이트 식은 경사 감소법에 의하여 다음과 같이 구하여 진다.

$$a_i(k+1) = a_i(k) + \Delta a_i(k) \quad (14)$$

IV. 비선형 직류 모터 시스템 및 모의 실험

앞에서 제안한 면역 알고리즘을 비선형 직류 모터의 속도제어에 적용하여, 그 타당성과 유용성을 본 절에서 보이고자 한다. 단, 부하토크는 비선형 형태로 두었다. 직류 모터 시스템 제어를 위한 샘플링 시간은 2(msec)로 하였으며, 속도 명령은 아래와 같이 시간에 따라 속도 명령이 변화하도록 설정하였다. 4초에서 6초까지의 속도 명령과 6초에

서 8초까지의 속도명령은 0초에서 4초까지의 속도 명령의 주파수보다 2배와 4배 빠르도록 설정하였다. 또한 경사 감소법의 학습을 $\zeta(i=1, 2, 3)$ 는 0.9로 설정하였다. 표 1은 시간에 따른 속도 명령을 나타내었다.

표 1. 속도 명령
Table 1. Velocity Command

시 간	속도명령 $=\omega(k)$ [rad/sec]
0초 ~ 4초	$32\sin(0.001\pi \times k)$
4초 ~ 6초	$32\sin(0.002\pi \times k)$
6초 ~ 8초	$32\sin(0.004\pi \times k)$

그림 3, 4는 표 1의 속도 명령에서 2초~4초, 5초~6초, 7초~8초 사이에 비선형 모터 시스템 파라미터 J, D, μ 를 25% 증가하였을 경우, 추적 오차와 비선형 제어 이득의 변화를 나타내었다. 결과에서 초기에 PID 제어기의 이득들이 학습이 되지 않은 상태에서 과도한 오차가 발생하나 경사감소법에 의해 이득이 적응적으로 학습된 0.3초 후, 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 시스템 파라미터가 변동이 일어나는 시간에 있어서 작은 떨림 현상이 나타나나, 짧은 시간에 이득이 적응적으로 변화하여 오차가 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 제안된 제어 시스템의 이득값이 시스템 파라미터 변동에 대하여 적응적으로 변화함을 보인다.

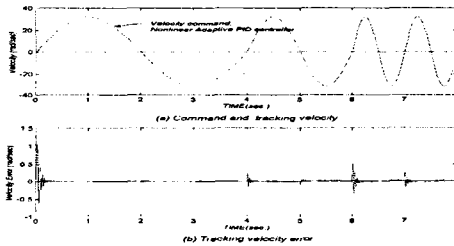


Fig. 3 Tracking velocity and error of Nonlinear Adaptive PID controller

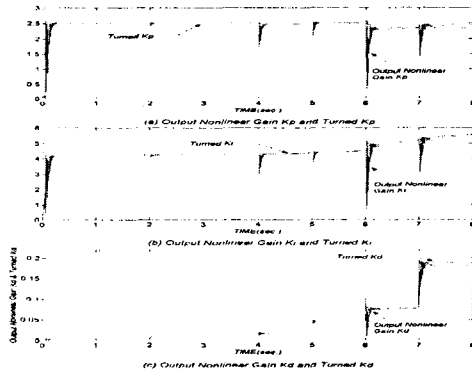


Fig. 4 Nonlinear output gains and tuned gains

V. 결 론

본 연구에서는 세포성 면역 반응의 면역 피드백 메카니즘에 기초하여 비선형 PID 제어기를 설계하였다. 면역 피드백 메카니즘에 의해 설계된 제어기가 일반적인 P-제어기와 유사하여 이를 근거로 면역 피드백 메카니즘을 비선형 PID 제어기로 확장하여 설계하였다. 확장된 비선형 PID 제어기는 임의의 속도 명령이나, 시스템 파라미터의 변동에 대해서도 일정이득의 PID 제어기에 비하여 주어진 궤적을 정확히 추적하는 강인성을 보였다. 이러한 강인성을 위하여 최적의 비선형 PID 제어기 이득과 세포성 면역 반응의 비선형 함수를 온라인 조정할 수 있는 학습 알고리즘을 개발하고 이를 적용하였다.

참고문헌

- [1] Motohiro Kawafuku, Minoru Sasaki, and Kasuhiko Takahashi, "Adaptive Learning Method of Neural Network Controller using an Immune Feedback Law," Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.641-646, 1999.
- [2] Jang-Sung Chun, Jeong-Pil Lim, Hyun-Kyo Jung and Joong-Suk Yoon, "Optimization Design of Synchronous Motor with Parameter Correction Using Immune Algorithm," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 610-615, September, 1999.
- [3] Kazuyuki Mori, Makoto Tsukiyama and Toyoo Fukuda, "Adaptive Scheduling System Inspired by Immune Algorithm," Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Vol. 4, pp. 3833-3837, 1998.
- [4] Manabu Kawana, Kunio Saito, Tomoyasu Hiramatsu, Michio Miyazaki, Noriyuki Nanba, "A Solving Method of Simultaneous Non-linear Equations by Using Dynamic Parametric IA with Meta GA," T. IEE Japan, Vol. 119-C, No. 4, pp. 488-495, 1999.
- [5] Satoshi Endoh, Naruaki Toma, Koji Yamada, "Immune algorithm for n-TSP," proceeding of the 1998 IEEE International Conference on System Man and Cybernetics Vol. 4, pp. 3844-3849, 1998.
- [6] A. Ishiguro, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "An Immunological Approach to Dynamic Behavior Control for Autonomous Mobile Robot," Proceeding of IROS'95, Vol. 1, pp.495-500, 1995.
- [7] A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe, and Y. Uchikawa, "Dynamic Behavior Arbitration of Autonomous Mobile Robot using Immune Networks," Proceeding of ICEC'95, Vol. 2, pp.722-727, 1995.
- [8] Yongshing Ding and Lihong Ren, "Fuzzy Self-Tuning Immune Feedback Controller for Tissue Hyperthermia," IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 1, pp.534-538, 2000.