
유전자 알고리즘을 이용한 양방향 원격제어시스템의 동기화

Synchronization of Bilateral Teleoperation System using Genetic Algorithm

김병연, Byeongyeon Kim, 안효성, Hyosung Ahn

요약 ~ 본 논문은 유전자 알고리즘을 이용하여 네트워크의 시간지연을 고려한 양방향 원격제어시스템의 동기화를 제시하고 있다. 일반적으로 양방향 원격제어시스템에서는 안정성 및 투명성을 주 목표로 한다. 마스터와 슬레이브 사이에 시간지연이 존재하는 경우 시스템의 안정성을 보장하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 동기화 제어법칙의 파라미터를 최적화하고자 한다.

Abstract ~ This paper presents synchronization of bilateral teleoperation system with time delay using genetic algorithm. In general, bilateral teleoperation system has two main goals: stability and transparency. In the presence of time delay between the master and the slave, we guarantee stability, and optimize the parameter of synchronization control law using genetic algorithm.

핵심어: *Synchronization, Teleoperation, Genetic algorithm,*

본 논문은 2008년도 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성·지원사업의 연구로 수행되었음. (IITA-2008-C1090-0804-0002)

*주저자 : 광주과학기술원 기전공학과 석사 과정; e-mail: byeongyeon@gist.ac.kr

**공동저자 : 광주과학기술원 기전공학과 교수 ; e-mail: hyosung@gist.ac.kr

1. 서론

원격제어시스템에서 가장 중요한 목표는 시스템의 안정성 및 투명성이다. 특히 원격수술로봇의 경우에는 슬레이브 로봇에서 전해지는 힘을 시술자에게 전달하는 것이 중요하다. 이러한 힘반향 원격제어시스템에서는 네트워크의 시간지연으로 인해 시스템이 불안정하게 되며 성능도 감소하게 된다. 이에 2-포트 네트워크[1,2] 및 4-채널[3]을 기반으로 한 연구 및 마스터와 슬레이브 사이의 상호 동기화[4-7]에 관한 여러 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 시간지연이 있는 원격제어 시스템의 안정성 및 투명성, 즉 마스터와 슬레이브의 상호 동기화를 위한 제어기를 설계하고, 유전자 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터를 최적화하고자 한다.

2. 본론

2.1 시스템 모델

일반적으로 n-자유도의 마스터, 슬레이브 로봇의 동역학식은 다음과 같이 주어진다.

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + g_m(q_m) = F_h + \tau_m$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + g_s(q_s) = \tau_s - F_e$$
(1)

시간지연을 고려한 마스터와 슬레이브 로봇의 동기화 오차는 다음 식으로 나타내어진다.

$$e_m(t) = q_m(t-T) - q_s(t)$$

$$e_s(t) = q_s(t-T) - q_m(t)$$
(2)

양방향 원격제어시스템에서 동기화는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$e_m(t) \rightarrow 0, e_s(t) \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty$$
(3)

2.2 제어기 설계

마스터와 슬레이브 로봇의 동역학에서 모델의 불확실성을 고려하면 제어 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_m = -\hat{M}_m(q_m)\lambda\dot{q}_m - \hat{C}_m(q_m, \dot{q}_m)\lambda q_m + \hat{g}_m(q_m) - F_m$$

$$\tau_s = -\hat{M}_s(q_s)\lambda\dot{q}_m - \hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\lambda q_s + \hat{g}_s(q_s) + F_s$$
(4)

$\hat{M}_i, \hat{C}_i, \hat{g}_i$ ($i = m, s$) 는 추정된 파라미터를 나타내며 선형 파라미터화를 이용하면 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_m\dot{r}_m + C_m r_m = Y_m \tilde{\theta}_m + F_h + F_m$$

$$M_s\dot{r}_s + C_s r_s = Y_s \tilde{\theta}_s + F_s - F_e$$
(5)

$r_i = \dot{q}_i + \lambda q_i$ ($i = m, s$) 는 양방향 원격제어시스템의 수동성을 보장하기 위한 피드백 안정화 부분으로 마스터와 슬레이브의 새로운 출력신호가 된다. Y_i ($i = m, s$) 는 로봇 회귀행렬, $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$ ($i = m, s$) 로 주어지고 여기서 $\hat{\theta}_i$ ($i = m, s$) 는 추정된 파라미터 벡터를 나타낸다. 파라미터 적응법칙은 $\dot{\hat{\theta}}_i = \gamma Y_i^T r_i$ ($i = m, s; \gamma > 0$) 와 같다. 마스터와 슬레이브의 새로운 출력에 따른 동기화 오차는 $e_m = r_m(t-T) - r_s(t)$ 다음과 같이 표현할 수 있다. $e_s = r_s(t-T) - r_m(t)$ (6)

동기화 제어법칙은 다음과 같다.

$$F_i(t) = K_P e_i + K_I \int e_i dt + K_D \dot{e}_i \quad (i = m, s)$$
(7)

본 논문에서는 식(7)의 K_P, K_I, K_D 파라미터를 최적화하기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하고자 한다.

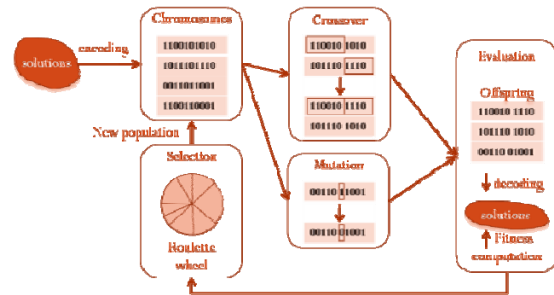


그림 1. 유전자 알고리즘

2.3 유전자 알고리즘에 의한 최적화

유전자 알고리즘은 자연환경에서의 자연적 선택과 유전의 메커니즘을 바탕으로 한 탐색 알고리즘으로, 주어진 문제에 대하여 후보 해의 공간을 확률적으로 탐색하여 최적 해를 찾을 수 있다. 유전자 알고리즘은 그림 1 과 같이 선택, 교배, 돌연변이의 세 연산자를 가진다. 선택은 적합도에 따라 최적 해를 선택하게 되며, 교차의 두 해의 일부분을 교환, 돌연변이는 탐색에 랜덤 요소를 부여하여 새로운 해를 생성하는 역할을 한다. 이에 제어시스템에서의 파라미터 추정이나 최적화에 사용될 수 있다[8-10].

2.4 시뮬레이션

시뮬레이션은 다음과 같이 1-자유도의 마스터, 슬레이브 로봇을 기반으로 하였다.

$$M_m\ddot{q}_m = F_h + \tau_m$$

$$M_s\ddot{q}_s = \tau_s - F_e$$
(8)

유전자 알고리즘에서 동기화를 위한 제어 파라미터의 탐색공간은 $K_P, K_I, K_D = [0, 30; 0, 30; 0, 5]$ 로 설정하였고 적합도 함수는 식(6)의 동기화 오차의 합으로 이루어진 누적제곱오차로 정의하였다. 선택은 순위선택방법으로 하고, 교차확률은 60%, 돌연변이확률은 5%로 설정하였다.

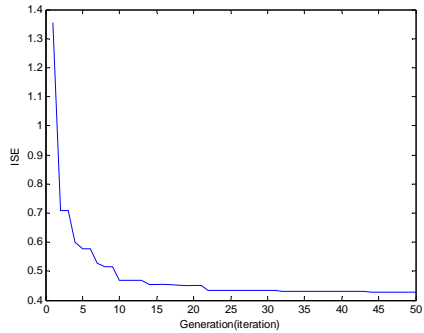


그림 2. 누적제곱오차

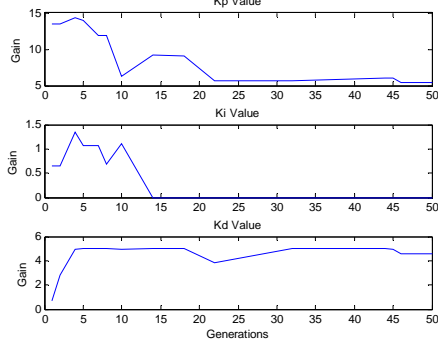


그림 3. 파라미터 최적화

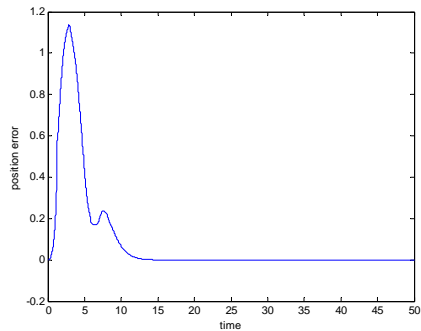


그림 4. 위치 오차

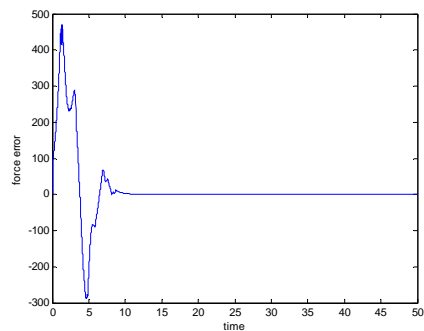


그림 5. 힘 오차

3. 결론

본 논문에서는 마스터와 슬레이브의 동기화를 위한 제어법칙의 파라미터를 최적화하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하였다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 마스터와 슬레이브 로봇의 동기화 및 유전자 알고리즘에 의한 제어 파라미터의 최적화도 좋은 성능을 보여주었다.

참고문헌

- [1] R.J. Anderson and M.W. Spong, "Bilateral control of teleoperators with time delay", *Decision and Control*, pp.167-173, 1988.
- [2] G. Niemeyer and J.J.E. Slotine, "Stable adaptive teleoperation", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, no. 1, pp.152-162, 1991.
- [3] D.A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation", *IEEE Trans. on Robot. Automat.* Vol. 9, no. 5, pp.625-637, 1993.
- [4] N. Chopra and M.W. Spong, "Output synchronization of nonlinear systems with time delay in communication", *Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.4986-4992, 2006.
- [5] N. Chopra and M.W. Spong and R. Lozano, "Synchronization of bilateral teleoperators with time delay", *Automatica*, Vol. 44, no. 8, pp.2142-2148, 2008.
- [6] N. Chopra and M.W. Spong, "On synchronization of networked passive systems with time delay and application to bilateral teleoperation", *Annual Conference of Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, pp.6-10, 2005.
- [7] H. Kawada and K. Yoshida and T. Namerikawa, "Synchronized control for teleoperation with different configurations and communication delay", *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.2546-2551, 2007.
- [8] L. Jie and X. Jian-ying and W. Zheng-mao, "Design of disturbance rejection PID controllers for time delay system based on genetic algorithms", *International Conference on Neural Networks and Brain*, Vol.2, 2005.
- [9] T. Hachino and Z.J. Yang and T. Tsuji, "On-line identification of continuous time-delay systems using the genetic algorithm", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 116, no. 6, pp.115-126, 1996.
- [10] D.S. Pereira and J.O.P. Pinto, "Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control", *Proc. IEEE/ASME Interantional Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.801-806, 2005.