

Neural Oscillator 특성을 활용한 2축 링크 로봇 팔 제어

권재성⁽¹⁾⁽²⁾, 양우성⁽²⁾, 박귀태⁽¹⁾, 유범재⁽²⁾

⁽¹⁾고려대학교 전자전기공학과

⁽²⁾한국과학기술연구원 인지로봇연구원

Neural Oscillator based Two-link Robot Arm Control

J.S. Kwon⁽¹⁾⁽²⁾, W. Yang⁽²⁾, G.T. Park⁽¹⁾, B.J. You⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea

⁽²⁾Center for Cognitive Robotics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract - 본 논문에서는 생물학적 운동 메커니즘을 유사하게 구현하기 위해 신경 진동자를 이용한 로봇 팔 제어 시스템을 제안한다. 인간 및 동물의 주기적인 자율 운동을 관장하는 Central Pattern Generator (CPG)를 수학적으로 모델링한 신경 진동자는 그 중요 특성의 하나인 entrainment 효과를 보여준다. 일반적으로 우리는 이 기능을 이용하여 미지의 외부 환경 변화와 같은 외란에 적절히 상호 작용할 수 있는 운동을 생성해 낼 수 있다. 이러한 결과를 보이기 위해, 각 관절에 가상의 신경 진동자 모델을 결합하였고 외부 환경의 변화나 외란의 감지를 위한 F/T센서를 팔의 말단에 부착하여 시스템을 구현하였다. 신경 진동자 모델을 결합한 2축 링크 로봇 팔 시스템(real time)은 주어진 목적운동을 (원 운동) 수행함과 동시에 미지의 외부 환경의 변화(임의의 벽)를 인지하여 적절한 모션을 생성하는 지를 살펴본다.

1. 서 론

반응성이 뛰어난 생물학적 운동과 같은 모션을 구현하기 위한 제어방법에 관한 연구는 최근에 많은 이슈가 되어오고 있다. 특히 미지의 환경에 대한 놀라운 적응 운동 능력을 보이는데, 이는 생물체의 근육-골격 시스템과 이를 구동하는 신경 진동자의 상호 작용을 통해서 구현된다. 따라서 이러한 메커니즘은 수많은 미지의 외란이 존재하는 로봇 시스템의 운동제어에 효과적이고 신뢰성 있는 대안을 제공 할 것으로 기대된다. 일례로 생물체의 척수신경 내에 존재 하는 신경진동자 네트워크로 구성된 Central Pattern Generator (CPG)는 주기적 자율 운동을 관장하고 이를 통해 인간과 동물은 보행, 수영, 비행, 숨쉬기 등의 운동을 특별히 인지하지 않으며 할 수 있다. 또한 이들 운동은 외부 환경 변화가 존재하는 가운데 스스로 대응하는 놀라운 자율 운동의 모습을 보인다.

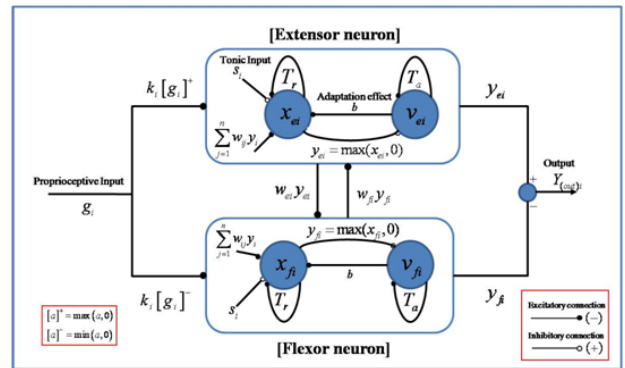
이러한 생체 모방형 운동 생성을 위한 시스템을 구현하기 위해서 우선 수학적으로 모델링 되어 있는 신경 진동자를 기계 시스템과 결합하고 신경 진동자 모델의 자율운동 반응을 위한 sensory 정보는 피드백을 통해 외부의 환경변화를 감지할 수 있는 시스템을 구현하여야 한다. 이 결합된 시스템은 신경 진동자에 의해서 적절한 주기적 운동 패턴을 보이고 이러한 운동 패턴은 피드백된 sensory 신호에 의해서 외부환경에 적합한 운동 발생이 가능하게 된다. 따라서 이러한 시스템을 로봇에 적용하게 되면 생물체에서 보이는 신경과 근육 및 골격 시스템의 효율적인 모션이 로봇으로 구현 될 수 있다.

신경 진동자의 수학적 모델은 Matsuoka 논문[1]에서 자세하게 다루어져 있다. 그는 제안된 신경 진동자의 수학적 모델을 이용해 주기적 신호 생성을 위한 기본적인 필요조건을 논문에서 제시하였고 또한 다수의 주기 패턴을 생성하고 그 주기의 주파수를 제어하기 위한 상호 억제된 네트워크를 연구 및 발표했다. 이때 sensory 신호 피드백과 entrainment 기능의 효과는 고려되지 않았으나 이는 Taga의 연구[2]를 통해 기본적인 방법론이 제시되었고, 특히 Taga는 휴머노이드 로봇의 이족보행 연구를 통해 신경 진동자 모델을 활용한 기계 시스템의 기본적 형태를 제시하였다. 시뮬레이션에서 이족 보행 로봇의 각 관절에서 오는 sensory 신호를 피드백 신호로 사용하였다. 그는 논문에서 피드백된 sensory 신호는 신경 진동자에서 발생된 주기 패턴을 자율적으로 변화 시킨다는 것을 언급하였다. 결과적으로, 로봇은 임의의 외란에 따른 자율 운동을 적절히 보일 수 있음을 주장 하였다.

신경 진동자 모델을 통한 생체 모방형 자율 운동 제어의 그 가능성은 지금까지 많은 연구를 통해 언급되고 있지만 실제 그 시스템을 구현함에 있어서 많은 변수들의 설정, 진동자의 비선형성 및 이로 인한 시스템 구현의 어려움 등으로 인해 많은 난관에 부딪혀 왔다. 따라서 본 논문은 이러한 시스템을 실제 환경에서 구현하고 2축 링크 로봇 팔에 신경 진동자를 결합하여 주어진 작업의 수행을 위한 방법론을 제안한다. 이와 더불어 외부의 환경의 변화나 외란 등에 적절히 대응하며 이에 적합한 운동을 생성할 수 있음을 검증 및 확인한다.

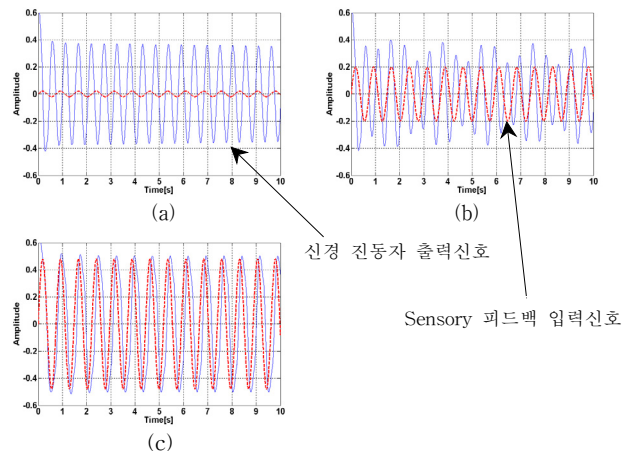
2. 본 론

2.1 신경 진동자



<그림 1> 신경 진동자 모델

위의 그림 1은 Matsuoka가 제안한 단위 신경 진동자 모델을 나타낸다. 여기서 sensory 피드백 신호는 proprioceptive input에 의해서 들어오게 되고 이는 상호 억제 운동을 유발하는 extensor 와 flexor 뉴런을 자극시켜 기 발생된 주기 운동을 변화시키게 된다. 최종 출력은 각 뉴런의 출력을 조합하여 얻게 된다. 여기서 우리는 안정된 신경 진동자 조건 하에서 신경 진동자의 파라미터를 설정하고 ($T_r = 0.1$, $T_a = 0.2$, $b = 2.4$, $\omega_e = 2.0$, $\omega_f = 2.0$, $s = 1.0$, $\omega_n = 8.5$), 입력 게인 k를 조절하여 신경 진동자의 sensory 피드백 신호에 대한 entrainment 기능을 살펴본다. 그림 2-(a)는 $k=0.02$ 일 경우, 입력 신호에 대한 진동자의 출력이 변화 없음을 보여주고, 2-(b)는 $k=0.2$ 일 경우, 입력신호에 의한 진동자의 불안정한 모션을 보여준다. 그림 2-(c)를 통해 입력 신호에 대해 충분히 entrainment 된 진동자의 운동 결과를 살펴볼 수 있다 ($k=0.48$).



<그림 2> 신경 진동자의 Entrainment 기능 결과 및 파라미터 설정

2.2 2축 링크 로봇 팔에 결합된 신경 진동자

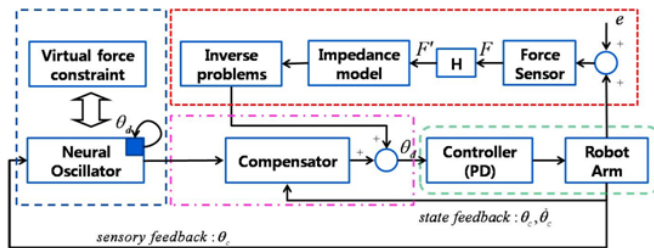
신경 진동자 모델을 기계 시스템인 2축 링크 로봇 팔에 결합하여 그

림 4 (a)과 같이 구성하였다. 전체 제어 시스템 블록은 그림 3에 나와 있다. F/T센서(C)로 외부 환경의 변화나 외란이 입력되었을 때, 측정된 값의 말단 부분(C) 좌표를 로봇 팔의 기준 좌표(A)로 변환한다. 변환된 값은 일반 임피던스 모델 식(1)을 통해 x, y 변위 값으로 계산된다. 다음 역기구학 식을 이용하여 각 관절(A, B)의 각도 값으로 연산 후 그 각도 값과 신경 진동자의 출력 값을 2축 링크 로봇팔과 신경 진동자가 결합된 지배 방정식(2)에 대입하여 외부 환경과 외란에 적용된 각 관절의 각도 값을 계산한다.

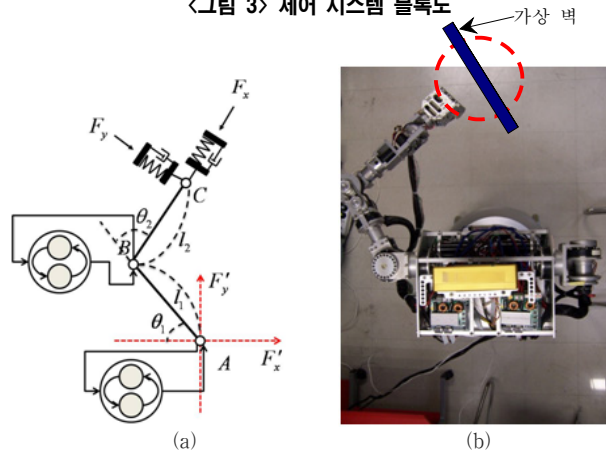
$$\ddot{x} = -\omega_n^2 x - 2\omega_n \dot{x} + \dot{F}_x, \quad \ddot{y} = -\omega_n^2 y - 2\omega_n \dot{y} + \dot{F}_y \quad (식 1)$$

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + (K_1 + K_T) \theta_1 - K_T \theta_2 \\ = K_1 \theta_{v1} + K_{P1} (q_{d1} - q_{c1}) - K_{D1} \dot{q}_{c1} \\ M_2 \ddot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_2 - K_T \theta_1 + (K_2 + K_T) \theta_2 \\ = K_2 \theta_{v2} + K_{P2} (q_{d2} - q_{c2}) - K_{D2} \dot{q}_{c2} \end{aligned} \quad (식 2)$$

위의 식(1)에서 \dot{F}_x, \dot{F}_y 는 좌표 변환된 힘 크기, 식(2)에서 M 는 관성행렬, C 는 댐핑 계수, K 는 스프링 상수, θ_v 는 신경 진동자 출력, q_d 는 외란에 의해 변화된 각도 값, q_c 는 현재 각 관절의 각도 값을 나타낸다. 이들에서 아래첨자 1, 2는 각 관절의 값임을 의미한다. 아래 그림 4 (a)에서 A, B, C는 차례대로 1, 2번째 관절과 F/T센서를, $l_1, l_2, \theta_1, \theta_2$ 는 1, 2번째 링크 길이와 관절 각도를 나타낸다. 이 개념도를 바탕으로 실제 로봇 시스템이 구성되었다 (그림 4 (b) 참조).



〈그림 3〉 제어 시스템 블록도

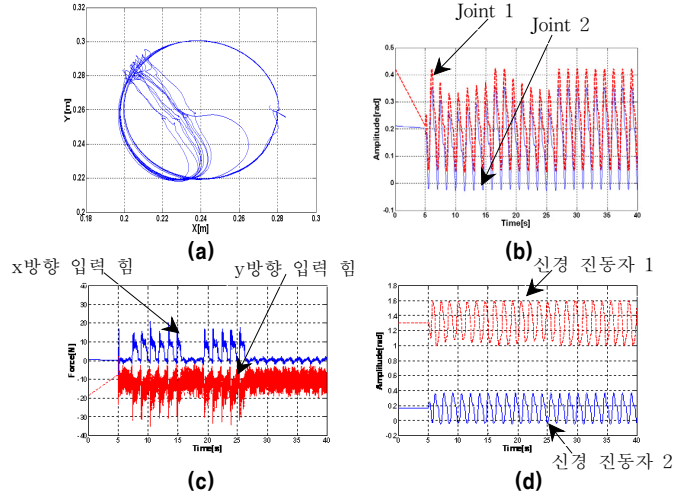


〈그림 4〉 하드웨어 구성

2.3 Realtime 하드웨어 구성

실험에 사용된 하드웨어의 사양은 다음과 같다(그림 4). 호스트 시스템은 노트북 펜티엄-4(1.6GHz)이며 RTOS 시스템으로 Xenomai를 사용하였다. 호스트 시스템은 200Hz의 주기로 동작되며 신경 진동자 및 로컬 시스템을 제어하기 위한 알고리즘이 처리 된다. 통신은 대량의 데이터 전송이 가능한 1394 통신을 이용하여 로컬 시스템을 제어한다. 그 로컬 시스템은 컨트롤러부와 모터드라이버, 파워보드 3가지로 나뉜다. 컨트롤러 부는 크게 DSP(TMS320VC33), 1394 통신 chip, FPGA로 이루어져 있고 4KHz의 주기로 동작한다. DSP는 모터를 제어하기 위한 PD제어 및 알고리즘을 수행하고 FPGA는 모터의 엔코더 읽기와 PWM 신호 생성, 1394 통신을 위한 신호 제어를 수행한다. 모터 드라이버 보드는 2개의 400W급 모터를 제어 할 수 있다. 또한 엔코더 신호와 전류 피드백이 가능하다. 파워보드는 로컬 시스템에서 필요한 전압과 전류를 공급한다. 모터는 Maxon사의 RE35로 90W급이며 동작 전압은 48V, 엔코더는 1000펄스이다.

2.4 실험 결과



〈그림 5〉 실험 결과 (a) 로봇 팔 end-effector의 궤적, (b) 로봇 팔 각 관절각의 출력, (c) F/T 센서의 외란 측정값 (x, y방향 힘), (d) 각 관절에 결합된 신경 진동자의 출력 값

그림 5는 2.2 절에서 보여준 제어 시스템을 통해 얻어진 결과를 보여 준다. 미지의 외부 변화나 외란 등이 존재하는 환경 하에서 추가 제어가 없이 적절히 대응하며 주어진 작업을 성공적으로 수행하는 것을 실험하기 위해서 우리는 주기 2s를 갖는 지름 8cm인 원 운동을 구현 하였다. 그 결과 그림 5 (a)에서 주어진 원운동을 잘 수행함을 확인 할 수 있다. 그 다음 주어진 원운동을 수행 중에 임의의 벽으로 원운동을 제한하였을 경우 제한된 시스템이 어떤 결과를 보이는지 살펴보았다. 그림 5 (c)로 부터 약 7.5s부터 임의의 벽과 로봇 팔의 말단부분이 접촉하여 생긴 힘이 측정 됐음이 확인되었고, 그 때 로봇 팔의 움직임은 벽 때문에 원 운동이 제한되었다. 하지만 외부 환경에 의해서 새롭게 발생한 힘은 sensory 피드백 신호에 의해 신경 진동자에 반영되고 이를 통해 신경 진동자에서 이에 적절한 모션이 새롭게 만들어져 외부환경에 적합한 반원 형태의 운동을 계속 수행하는 것을 볼 수 있다, 15.0s 이후에는 벽이 사라지는데 그때에 다시 원래 주어진 원 운동을 수행하는 것이 확인된다. 그림 5. 실험 결과를 통해 외부에서 임의의 주기적 외란이 신경 진동자와 결합된 기계 시스템의 움직임에 영향을 주었을 경우 신경 진동자의 출력이 그에 동기화 되어 적절히 변화되어 로봇 시스템에 영향을 주는 것이 확인 되었다. 따라서 본 논문을 통해 우리는 신경 진동자를 활용한 생체 모방형 시스템이 외란의 예측이나 미지의 환경의 특별한 모델링 없이 임의의 외란이 작용되는 경우 자율적으로 적절히 적응되어 운동 생성이 이루어지는 것을 확인할 수 있었고 그 적용 가능성을 살펴 볼 수 있었다.

3. 결 론

이 논문에서 기본적인 신경 진동자의 entrainment 기능을 시뮬레이션 을 통해서 확인하였고 외부환경의 변화와 외란에 자율 적용된 운동을 검증하기 위해 2축 링크 로봇 팔 시스템을 구성하였다. 위의 실험 결과에서 볼 수 있듯이 외부환경의 변화와 외란에 대응하여 적절히 적응된 움직임을 생성함과 동시에 주어진 운동을 성공적으로 수행하는 것을 검증하였다. 앞으로 계속되는 연구에서는 실생활에서 적용 가능한 작업을 수행할 수 있음을 보이고 다양한 움직임을 생성할 수 있는 방법론이 연구 될 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] K. Matsuoka, "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation," Biological Cybernetics, Vol. 52, pp. 367-376 (1985).
 [2] G. Taga, "A Model of the Neuro-musculo-skeletal System for Human Locomotion," Biological Cybernetics, Vol. 73, pp. 97-111 (1995).
 [3] W. Yang, N. Y. Chong and B. J. You, "Optimizing Neural Oscillators for Rhythmic Movement Control", Proc. IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication, pp. 804-814 (2007).
 [4] J.S. Kwon, W. Yang, G.T. Park, B.J. You, "Sensory 피드백 시스템을 활용한 자율 적응 모션 생성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 1789-1790 (2007).