

Sensory 피드백 시스템을 활용한 자율 적응 모션 생성

권재성⁽¹⁾⁽²⁾, 양우성⁽³⁾, 박귀태⁽¹⁾, 유범재⁽²⁾

⁽¹⁾고려대학교 전자전기공학부

⁽²⁾한국과학기술연구원 인지로봇연구단

⁽³⁾일본과학기술원 정보과학과

Self-adjusting Motion Generation Based on Sensory Feedback System

J.S. Kwon⁽¹⁾⁽²⁾, W. Yang⁽³⁾, G.T. Park⁽¹⁾, B.J. You⁽²⁾

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

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

⁽³⁾School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Ishikawa, Japan

Abstract - 이 논문에서 우리는 생체모방 시스템을 구현하기 위해 일반적인 기계 시스템과 인간의 신경 진동자 모델을 결합하였다. 이러한 시스템은 외부환경의 변화에 따른 효과적인 자율 적응 운동 형태를 생성할 수 있다. 인간 및 동물의 주기적 자율 운동을 관장하는 Central Pattern Generator (CPG)는 신경 진동자 네트워크에 의해서 표현가능하고 이는 신경 진동자 모델 내부의 sensory 피드백 신호를 통해, 주기성을 같은 외란에 상호 작용하여 적절한 운동을 생성해 낸다. 따라서 이를 기계 시스템에 결합하면 이러한 시스템은 변화되는 환경이나 잘 알지 못하는 외란에 대하여 자율적으로 적응된 운동을 보일 수 있다. 이를 위해 본 논문은 이러한 신경 진동자 모델과 결합된 realtime 시스템을 구현하고 그 자율 적응 운동의 생성 가능성을 살펴본다.

1. 서 론

최근에 들어와서 생물학적인 동작 행태를 로봇에서 이용하거나 생체 모방형 로봇을 개발하는 등 인간과 동물의 내재된 강인한 자율 적응 운동을 보이기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 휴머노이드 로봇의 이족 보행 모빌리티를 증진시키기 위해 생물학적인 보행 제어방법의 모방이 대안으로 고려되고 있는 등 생체 모방운동은 다양한 로봇 분야에서 자율 운동의 대안으로서 관심을 받는 것이 주지의 사실이다. 생물체의 척수신경 내에 존재 하는 Central Pattern Generator (CPG)는 주기적 자율 운동을 관장하는데 이를 통해 인간과 동물은 보행, 수영, 비행, 숨쉬기 등에서 미지의 외부 환경의 변화를 인지하지 못하는 가운데 스스로 대응하는 놀라운 주기적 자율 운동의 모습을 보인다. 그러한 CPG는 신경 진동자 네트워크에 의해서 구현되고 이는 기본적으로 생물체의 운동근육과 골격 그리고 신경 시스템과 함께 구성되어 자율 적응 운동을 보이게 된다. 그렇게 구성된 시스템은 진자에 스프링이 연결되어 있는 것으로 흔히 비유될 수 있고 이는 쉽게 인간의 팔, 다리의 움직임으로 연관 지어 생각할 수 있다.

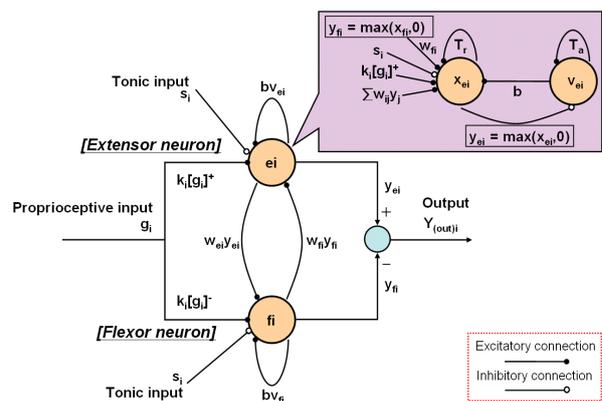
이러한 생체 모방형 운동 생성을 위한 시스템을 구현하기 위해서 우선 수학적으로 모델링 되어 있는 신경 진동자를 기계 시스템과 결합하고 신경 진동자 모델의 sensory 신호의 피드백을 통해 외부의 환경변화를 감지할 수 있는 시스템을 구현하여야 한다. 이 결합된 시스템은 신경 진동자에 의해서 적절한 주기적 운동 패턴을 보이고 이러한 운동 패턴은 피드백된 sensory 신호에 의해서 적절한 주기적 운동이 발생 가능하게 된다. 따라서 이러한 시스템을 로봇에 적용하게 되면 생물체의 신경과 근육 및 골격 시스템을 로봇으로 구현 할 수 있게 된다. 신경 진동자의 수학적 모델은 Matsuoka 논문[1]에서 자세하게 다루어져 있다. 그는 제안한 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 피드백은 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 변화시킨다는 것을 언급하였다. 결과적으로, 로봇은 외란에 따른 자율 운동을 적절히 보일 수 있음으로써 강인하게 되었다고 할 수 있다.

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 구현하기 위한 시도로써 신경 진동자 모델이 결합된 realtime 시스템을 보이고 1축 진자 모델의 동적 응답을 통해 그 생체 모방 시스템을 활용한 자율 운동 제어의 가능성을 살펴보기로 한다.

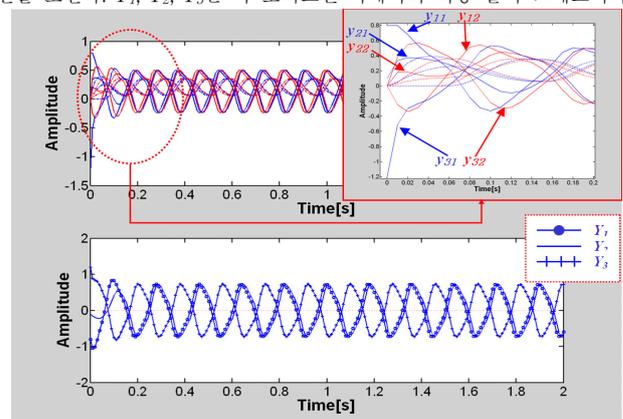
2. 본 론

2.1 신경 진동자



〈그림 1〉 신경 진동자 모델

인간이나 동물 내부의 척수 신경에 존재하는 CPG에 의한 기본적인 주기적 운동은 보통 운동 뉴런으로부터 오는 sensory 신호들에 의해 그 주기적인 운동이 변경 되어 진다. 인간이나 동물의 운동 뉴런을 조절하는 내부 신경 계통의 sensory 피드백 시스템과 유사하게 고려된 Matsuoka의 신경 진동자의 모델은 그림 1과 같다. 그림 1에서 sensory 피드백 신호는 proprioceptive input을 통해 들어오게 되고 이는 상호 억제되어 있는 extensor 와 flexor 뉴런을 자극시켜 기 발생된 주기 운동을 변화시키게 된다. 최종 출력은 각 뉴런의 출력을 조합하여 얻게 된다. 다음 그림 2는 안정된 신경 진동자 조건하에서의 기본적인 주기 패턴을 보인다. Y_1, Y_2, Y_3 은 각 초기조건 하에서의 최종 출력 그래프이다.



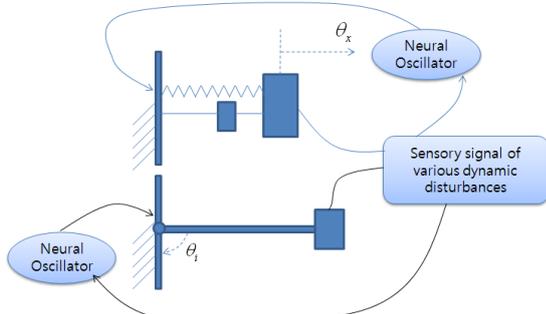
〈그림 2〉 신경 진동자 모델에 의해서 발생된 주기패턴

2.2 신경 진동자에 결합된 기계 시스템

신경 진동자 모델을 운동을 제어하고자 하는 기계 시스템에 결합하여 실제로 구현하기 위해서 그림 3과 같이 구성 될 수 있다. 그림 3에서는 기본적인 신경 진동자에 결합된 스프링-댐퍼 시스템과 조인트-링크 시스템을 살펴보았다. 신경 진동자의 출력에 의해서 가진된 기계 시스템은 임의의 주기적 운동을 보이게 되고 이때 기계 시스템의 최종 위치값은 피드백 되어 그 신경 진동자 모델로 들어가게 되는데 이를 sensory 피드백 시스템이라고 한다. 그 기계 시스템의 운동을 다루는 신경 진동자의 출력 (토크) 은 식 (1)과 같이 정의 된다[3].

$$\tau_i = k_i(\theta_{vi} - \theta_i) - b_i\dot{\theta}_i \quad (1)$$

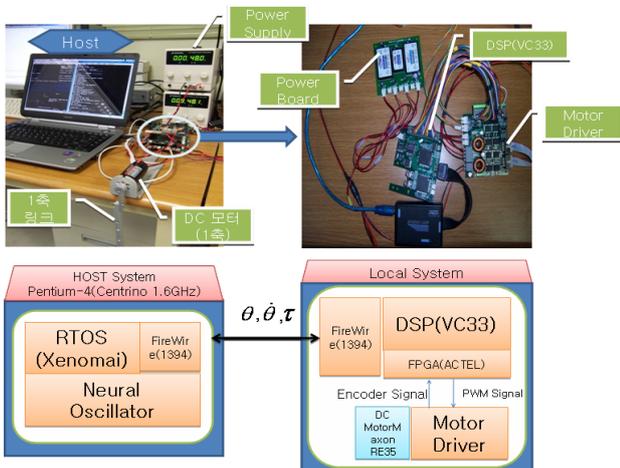
여기서 k_i 는 관절의 스프링 상수, b_i 는 댐핑 계수, θ_{vi} 는 관절의 각도, θ_i 는 신경 진동자에 의해서 발생된 관절의 목표 위치이다. 신경 진동자의 출력은 기계 시스템의 모터 엔코더 등과 같은 센서로부터 얻어진 최종 위치를 의미하는 sensory 신호 피드백에 상응하여 기계 시스템을 조절한다. 만약 최종 위치가 미지의 환경으로부터 운동의 주기변화가 발생하는 순간 이 변화된 정보는 피드백 되어 신경 진동자의 목표 주기 값을 순간 변화시키게 된다. 따라서 신경 진동자는 미지의 환경에서도 자율적으로 적응된 동작을 보일 수 있는 기계 시스템을 구현 가능하게 한다.



〈그림 3〉 신경 진동자에 결합된 기계 시스템 모델

2.3 Realtime 하드웨어 및 소프트웨어 구성

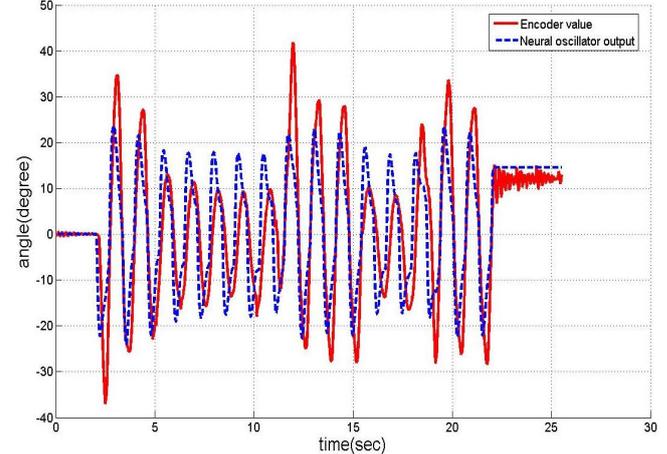
본 논문에서 실험에 사용된 하드웨어의 사양은 다음과 같다 (그림 4 참조). 호스트 시스템은 노트북 펜티엄-4(1.6GHz)이며 realtime 오퍼레이팅 시스템으로 Xenomai를 사용하였다. 호스트 시스템은 200Hz의 주기로 realtime 동작되며 신경 진동자 및 로컬 시스템을 제어하기 위한 알고리즘이 처리 된다. 통신은 대량의 데이터 전송이 가능한 1394 통신을 이용하여 로컬 시스템을 제어한다. 그 로컬 시스템은 컨트롤러부와 모터드라이버, 파워보드 3가지로 나뉜다. 컨트롤러부는 크게 마이크로프로세서인 DSP(TMS320VC33), 1394 통신 chip, FPGA로 이루어져 있고 4KHz의 주기로 동작한다. DSP는 모터를 제어하기 위한 PID제어 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.



〈그림 4〉 하드웨어 구성

호스트 시스템의 전체 프로그램 구성은 Kernel 프로그램과 User 프로그램으로 나뉜다. Kernel 프로그램에서는 실제로 처리되는 신경 진동자의 모델이 적용되어 있고, 로컬 시스템에 데이터를 넘겨주는 Firewire(1394) 부분이 있다. User 프로그램에서는 Kernel 프로그램에서 기 프로그래밍 된 함수를 실행 할 수 있도록 명령만을 넘겨주게 되어 있다. 또한 로컬 시스템에 각 모터 제어에 필요한 변수를 전달하고 모터가 작동 가능 하도록 하는 명령을 내려준다. 로컬 시스템의 전체 프로그램은 4KHz 마다 타임 인터럽트가 생성 되도록 구성 되었다. 200Hz 주기로 realtime 동작 되는 이 시스템은 호스트 컴퓨터에서 명령이 내려왔을 경우 그에 해당하는 함수를 실행하게 된다.

2.4 실험 결과



〈그림 5〉 실험 결과

그림 5는 2.3 절에서 보여준 시스템을 통해 얻어진 결과를 보여준다. 2.4s 후부터 신경 진동자에 의한 진자의 주기적 운동이 일어나는 것을 살펴 볼 수 있다. 이번 실험에서 신경 진동자는 크기는 $\pm 25^\circ$, 주기 1.2Hz 진동하도록 각 변수가 설정 되었고 이를 통해 진자를 실제 구동하는 모터의 엔코더 출력도 또한 같은 주기로 운동하게 된다. 그림 5. 결과를 통해 우리는 신경 진동자와 결합된 진자의 realtime 시스템이 효과적으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이와 더불어 이 생체 모방 시스템이 보여주는 외부 환경 변화에 잘 대응 되도록 하는 자율 적응 모션 생성 가능성을 살펴보기 위해 약 6초 후에 모터 축에 임의의 제약을 주기적으로 가하였다. 이 시스템은 움직임을 제약 받은 후, 신경 진동자의 목표 출력 크기는 엔코더의 출력과 동시에 줄어들고 다시 약 12s-15s의 시간구간에서 움직임에 대한 제약이 없어진 후, 원래 크기와 주기로 다시 운동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 15s-20s의 시간구간에서는 주기적 움직임 또한 외란에 적용되어 변화된 것을 살펴 볼 수 있다.

이와 같은 실험 결과를 통해 외부에서 임의의 주기적 외란이 기계 시스템의 움직임에 영향을 주었을 경우 신경 진동자의 출력이 그에 동기화 되어 적절히 변화되는 것을 확인할 하였다. 따라서 본 논문을 통해 우리는 신경 진동자를 활용한 생체 모방형 시스템이 미지의 환경 하에서 임의의 외란이 작용되는 경우 자율적으로 적절히 적용되어 운동 생성이 이루어지는 것을 확인할 수 있었고 그 적용 가능성을 검증할 수 있었다.

3. 결 론

이 논문에서 기본적인 신경 진동자의 주기적 출력을 시뮬레이션을 통해서 확인하였고 실험으로 자율적응 운동을 검증하기 위해 realtime 시스템을 구성하였다. 1축 진자 실험에서 신경 진동자의 출력이 피드백된 sensory 신호 (모터의 엔코더) 입력에 동기화되는 것이 최종적으로 검증되었다. 계속되는 연구에서 보다 복잡한 기계 시스템을 통해서 구현 할 것이고 보다 정밀한 시스템을 구현하기 위한 방법론 또한 연구될 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, "Entrainment-enhanced Neural Oscillator for Imitation Learning," *Proc. IEEE Int. Conf. on Information Acquisition*, pp. 218-223 (2006).