

진화적 알고리즘을 이용한 자율적 2족 보행생성

Autonomous Bipedal Locomotion with Evolutionary Algorithm

옥수열*

Soo-youl Ok

* 동명정보대학교 게임공학과

요 약

생체 공학이나 신경생리학, 로봇공학에서는 인간의 2족 보행 메커니즘을 알아내는 것이 중요한 연구과제이며 그에 대한 연구 성과는 재활도구나 컴퓨터 애니메이션 및 인간형 로봇과 같은 다양한 응용분야에 있어서의 기초 기술로서 제공되어질 것을 기대하고 있다. 반면에 인간의 2보행 운동은 신경계와 역학계에 의한 복잡한 상호작용으로, 그 실현 메커니즘에 있어 신경계의 구체적인 제어방법에 관해서는 그 복잡성 때문에 아직 많은 부분이 불명확하게 남겨져 있다. 따라서 전문가에 의한, 매번 시행착오를 통해 신경계의 상세한 설계를 할 필요가 있다. 이 논문은 유전자 프로그래밍을 이용하여 신경계의 구조와 Parameter를 자동적으로 최적화하는 모델을 제안하고 시뮬레이션을 통해 타당성을 확인하였다.

Abstract

In the research of biomechanical engineering, robotics and neurophysiology, to clarify the mechanism of human bipedal walking is of major interest. It serves as a basis of developing several applications such as rehabilitation tools and humanoid robots. Nevertheless, because of complexity of the neuronal system that interacts with the body dynamics system to make walking movements, much is left unknown about the details of locomotion mechanism. Researchers were looking for the optimal model of the neuronal system by trials and errors. In this paper, we applied Genetic Programming to induce the model of the nervous system automatically and showed its effectiveness by simulating a human bipedal walking with the obtained model.

Key words : 2족 보행운동, CPG(Central Pattern generator), 신경 진동자, 유전적 프로그래밍, 반사기구(Reflex)

1. 서 론

2족 보행은 인간의 가장 특징적인 신체 운동으로서 그 메커니즘은 생물학과 공학의 양면에서 폭넓게 연구되고 있다. 특히 생체 공학이나 신경생리학, 로봇공학에서의 연구 성과는 재활도구나 인간형 로봇 및 컴퓨터 애니메이션 과 같은 다양한 응용분야에 기초 기술로서 제공되어질 수 있다. 그러나 인간의 2보행 운동은 신경계와 신체역학계의 복잡한 상호작용의 결과로 그 제어 복잡성 때문에 아직까지 많은 부분이 불분명하다[1,2].

한편, 최근 신경생리학의 연구에서는 인간이 행하는 협조적 보행운동을 근골격 등으로 이루어진 신체역학계가 갖는 리듬과 신경계가 갖는 리듬과의 상호 리듬 동조현상(Entrainment)에 의해 발생하는 것으로 간주되고 있다[3, 4]. 특히 신경계의 리듬생성은 척수에 리듬적인 패턴을 생성하는 Central Pattern Generator(CPG)라는 신경세포 망에 의해서 생성되는 것으로 알려지고 있다[5~9]. CPG는 중추신경계에 존재하는 신경세포의 그룹으로 서로 상호작용하면서 자율협조적인 패턴 신호를 생성해 근육을 순차적으로 자극하여, 리듬적인 운동을 생성하는 역할을 한다. 생체공학이나 로봇공학에서는 이 CPG의 기능을 표현하기 위한 계산모델로서, 상호억제의 형태로 결합되어진 신경 진동자(Neural Oscillator)

를 이용해 모델화하고 있다[10, 11, 12].

신경 진동자를 이용한 운동생성에 관한 기존연구에서, Yuasa[14, 15]등은 신경 진동자의 위상차다이나믹스를 유도하여, 위상정보에 의한 운동패턴을 나타내는 Potential 함수를 부여해, 위상차 공간에서의 이들 함수로부터 각 신경 진동자의 상호작용을 결정하는 방법으로 4족 보행의 다양한 보행 패턴을 실현하였다. 또한 Taga[16, 17]는 신경 진동자로 이루어진 신경계와 신체의 근골격으로 구성된 역학계를 모델화하여 신경계와 신체 역학계의 리듬 동조현상으로부터 2차원의 유연한 2족 보행동작을 자기 조직화적으로 생성하는 방법을 제안하였다.

위와 같이 신경 진동자를 이용해 자립적이고 적응성 있는 보행운동을 실현하기 위해서는 지면 변화나 외력에 따른 환경변화에 적응하도록 하는 신경 진동자 네트워크에 대한 반사기구(Reflex)의 설계가 중요하다. 그렇지만 지금까지 대부분의 기존연구에서는 이 반사 기구의 구축을 전문가의 시행착오를 통해 설계하였다. 이것은 전문가에게 많은 시간과 노력을 필요로 할 뿐만 아니라 원하는 운동을 실현하기 위해서는 매번 시행착오의 반복을 통한 신경 진동자의 상세한 설계를 할 필요가 있다는 문제가 있다.

이에 본 연구에서는 신경 진동자 네트워크에 대한 반사기구의 구조와 parameter를 전문가의 시행착오적인 개입 없이 자동적으로 설계하기 위해 진화형 탐색수법의 하나인 유전자 프로그래밍(Genetic Programming:이하 GP)을 이용하여, 자동적으로 그 구조와 Parameter를 최적화하는 모델을 제안한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 2족 보행운동 모델에 관해

접수일자 : 2004년 3월 31일

완료일자 : 2004년 5월 31일

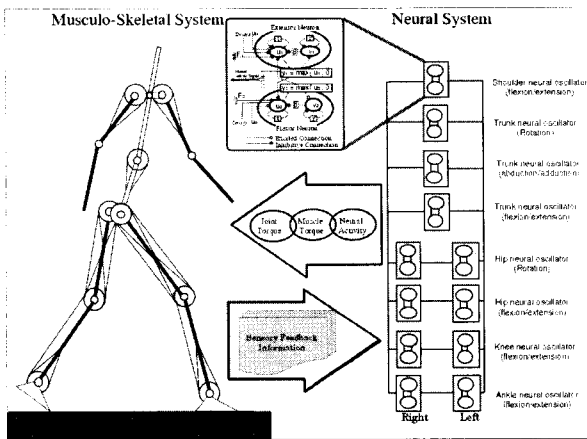


그림 1. 신경 진동자를 이용한 자율적인 3차원 2족 보행운동 모델
 Fig. 1. Overview of 3D autonomous bipedal locomotion model.

서술하고 3장에서는 신경 진동자 네트워크에 대한 반사기구의 진화형 계산(Evolutionary Computation)에 의한 탐색 방법에 관해서 논한다. 그리고 4장과 5장에서는 제안 방법을 통한 2족 보행 생성에 대한 시뮬레이션 및 결과에 관해서 서술하고 마지막으로 6장에서는 결론과 앞으로의 과제에 대해서 논한다.

2. 2족 보행운동 모델

2.1 2족 보행 운동 생성

걸기, 달리기, 뛰기와 같은 운동은 일반적으로 이동운동인 동시에 동물에 있어서 가장 중요하고도 기본적인 운동이다. 이동운동은 자기 자신을 유지하고, 추진하는 다리를 주기적으로 움직여 이루어지는 것으로 그 기본은 각 다리의 리듬운동과 다리간의 협조기구에 있다. 지금까지 2족 보행 운동 생성에 관한 연구는 다양한 관점에서 연구되어져 오고 있지만 크게 2가지의 접근방법으로 나누어 볼 수 있다.

하나는 각 다리가 체간을 어떻게 추진하고 그 때 각 관절이나 근육 등의 기관이 어떻게 일하고 있는가를 역학적 관점에서 명확히 하려는 접근방법이다. 이 접근방법에 대한 제어의 표준적 방법은 먼저 각 관절의 운동의 궤도 계획한 다음 이것을 안정적으로 실현하도록 피드-포워드시스템(feed forward system) 또는 피드백시스템(feedback system)을 설계하는 것이다. 특히 지면과 발사이의 접촉점 주위의 자유도는 직접적으로 제어할 수 없기 때문에, 지면 반력에 관한 센서 정보를 이용해서 지면 반력의 작용점 중심의 궤도를 모니터링해서 시스템 전체의 안정성을 확보하기 위해 운동궤도의 일부를 실시간으로 수정한다. 이와 같은 메커니즘이 있으면 원리적으로는 안정적 보행이 가능하고, 그 대표적인 예가 혼다의 아시모(ASIMO)라 할 수 있을 것이다.

그러나 이 접근의 근본적인 문제점은 보행 방법의 변화 혹은 지면상태 변화 및 외력에 따른 환경의 변화가 있을 때마다 운동궤도부터 재조정하지 않으면 안 된다는 것이다. 물론 모든 상황에 적응하게끔 모든 운동의 궤도를 기억해두면 되겠지만, 이런 방법만으로는 제어가 불가능하다.

다른 하나는 이동운동을 제어하고 있는 신경계 및 제어회로

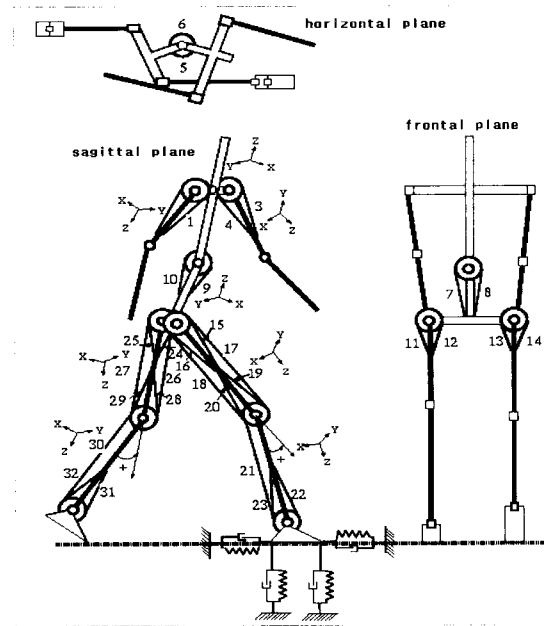


그림 2. 3차원 신체 역학계 모델
 Fig. 2. The three-dimensional body dynamics

가 어떻게 구성이 되어 있는가 또는 어떤 메커니즘으로 움직이고 있는가를 분명히 하고자 하는 접근방법이다. 최근 관련 분야에서는 신경계의 자율적인 행동에 주목해 보행운동을 생성하려는 시도가 행하여지고 있다. 이것은 CPG (Central Pattern Generator)라는 신경계의 리듬 발생 기구를 비선형 진동이론을 기초로 해서 모델화하여 보행운동을 생성하는 것이다. Bay[19]등은 비선형진동의 기본적인 Van der pol방정식을 이용해서 2족 보행운동 패턴을 생성했다. 또한 Taga[16, 18]는 인간의 2족 보행에 있어서의 근육결계 역학 모델과 신경 진동자모델을 통합시켜 신체역학계가 갖는 진자적인 진동리듬과 신경계가 갖는 리듬과의 상호동조현상으로부터 자율적인 보행운동을 발생하는 모델을 제안하였다.

본 연구에서도 Taga의 연구 내용을 바탕으로, 자율적으로 2족 보행을 생성할 수 있는 시뮬레이션 모델을 그림 1과 같이 구축하였다. 이 모델은 신경 진동자로 이루어진 신경계의 신경자극으로부터 자율적으로 리듬패턴을 생성하고, 이 신경계로부터 생성된 리듬패턴과 동조하면서 신체의 역학계는 리듬적인 2족 보행운동을 생성한다. 또한 발의 접촉상태(발-지면)와 각 관절의 각도 상태등과 같은 생체 센서에 관한 정보는 신경계에 피드백 되어지고, 신경자극의 리듬패턴은 이 정보를 기초로 하여 생성되어진다.

2.2 신체 역학계의 모델화

본 연구에서는 그림 2에서 보는 것과 같이 2족 보행의 신체 역학계 모델로서 상체의 진자운동과 체간절의 회전 운동도 표현할 수 있도록 발, 하퇴부(종아리), 대퇴부(허벅지) 요부(허리), 머리를 포함한 흉부(가슴), 상완, 하완의 좌우합계 12개의 관절로 이루어진 3차원 강체 연결구조로 모델화 하였다. 이 모델은 인간의 2족보행운동의 특징을 표현하기 위해서 가장 단순하고 기본적인 모델이다.

각 관절은 회전 자유도만 가지는 것으로 하고 허벅지는 굴신과 내외전의 2자유도, 허리관절은 전후굴신, 측면굴신, 내외전의 3자유도, 그 외 관절들은 굴신의 1자유도로 하였다.

표 1. 신체역학계 모델의 parameter

Table 1. Body dynamics parameters

Name	Mass(kg)	Moment of inertia (kgm ²)			Link length (m)			Center of gravity (m)		
		[x, y, z]	[x, y, z]	[x, y, z]	[x, y, z]	[x, y, z]				
Lower torso	8.5	0.0425, 0.0410, 0.0500	0.00, 0.00, 0.170	0.00, 0.00, 0.085						
Upper torso	29.482	1.6193, 1.0876, 0.3785	0.00, 0.00, 0.658	0.00, 0.00, 0.333						
Right thigh	6.523	0.1137, 0.1157, 0.0224	0.00, 0.25, 0.405	0.00, 0.00, 0.157						
Right calf	2.685	0.0391, 0.0392, 0.0029	0.00, 0.00, 0.415	0.00, 0.00, 0.176						
Right foot	0.837	0.0033, 0.0030, 0.0007	0.00, 0.00, 0.150	0.00, 0.00, 0.050						
Left thigh	6.523	0.1137, 0.1157, 0.0224	0.00, -0.25, 0.405	0.00, 0.00, 0.157						
Left calf	2.685	0.0391, 0.0392, 0.0029	0.00, 0.00, 0.415	0.00, 0.00, 0.176						
Left foot	0.837	0.0033, 0.0030, 0.0007	0.00, 0.00, 0.150	0.00, 0.00, 0.050						
Right upper arm	1.842	0.0133, 0.0132, 0.0022	0.00, 0.00, 0.282	0.00, 0.00, 0.145						
Right forearm	1.513	0.0133, 0.0133, 0.0010	0.00, 0.00, 0.360	0.00, 0.00, 0.120						
Left upper arm	1.842	0.0133, 0.0132, 0.0022	0.00, 0.00, 0.282	0.00, 0.00, 0.145						
Left forearm	1.513	0.0133, 0.0133, 0.0010	0.00, 0.00, 0.360	0.00, 0.00, 0.120						

발은 지면과 상호 작용하는 부분으로서 2등변삼각형으로 표현하였다. 삼각형의 後부는 발과 지면과의 접촉상태가 시작되는 부분으로 발의 뒤꿈치를 나타내고 삼각형의 前부는 발과 지면과의 접촉상태가 끝나는 부분으로서 발의 앞꿈치를 나타낸다. 그리고 발과 지면과의 상호작용은 스프링과 댐퍼의 조합으로 모델화하였다. 각 발의 지면반력(Ground Reaction Force)은 뒤꿈치에 2점, 앞꿈치에 2점이 작용하는 것으로 가정하여 스프링과 댐퍼를 이용한 점탄성체모델에 의해서 구해진다. 인대와 같은 관절수동구조는 비선형 탄성요소로서 모델화하였다. 근육에 대한 모델은 신체의 해부학적 근주형의 상태를 나타내는 모델로서 그림 2와 같이 전신을 32근으로 이루어진 근골격 모델로 하였다. 신체 모델을 간단히 하기 위해서 근의 모멘트 암은 관절회전축에 대해서 수직으로 하고, 관절각도에 좌우되지 않도록 일정하게 하였다. 각 근은 신경계로부터의 자극에 의해서 힘을 발휘하여 강체의 링크구조로 표현한 신체역학계를 구동한다. 근의 역학특성으로는 길이와 힘의 관계식과 속도와 힘의 관계식으로 나타내었다.

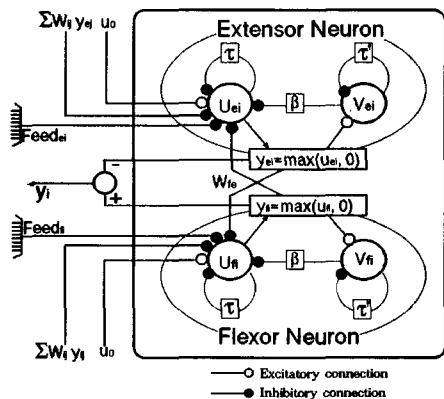


그림 3. 신경 진동자
Fig 3. Neural Oscillator

2.3 신경 진동자를 이용한 신경계의 모델화

본 연구의 신경계 모델은 Matsuoka[20]의 보행 운동의 제어 기구모델을 참고로 하여, 신경 진동자의 네트워크로서 모델화 하였다. 이것은 신경계의 기본적인 리듬 생성기구

(CPG)를 모델화 한 것으로 상호주기적인 리듬을 생성하는 신경 진동자(리듬 생성기)는 신체 모델의 각 관절의 자유도마다 존재하는 것으로 간주하였다. 단일 신경 진동자는 그림 3과 같이 자기억제와 피로효과를 갖는 뉴런을 상호 억제적 결합으로 구성되어있다. 신경 진동자의 중요한 특징은 진동자를 상호 결합하면 진동수에 맞추어 상호동조현상이 일어나는 것이다. 다시 말하면 신경 진동자의 자기흥분진동은 진동 입력에 대해서 어떤 진동범위에서 일정한 주기와 진폭을 유지하면서 진동한다는 것이다.

본 연구에서 이용한 신경 진동자는 2변수로 이루어진 연립미분 방정식으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\tau_i \dot{u}_i = -u_i - \sum_j w_{ij} y_j - \beta v_i + u_0 + Feed_i, \dots (1)$$

$$\tau_i \dot{v}_i = -v_i + y_i, \quad y_i = \max(u_i, 0) \dots \dots (2)$$

여기서 u_i 는 i 번째 신경 진동자의 내부 상태; v_i 는 i 번째의 자기억제를 나타내는 피로도; y_i 는 i 번째의 신경 진동자의 출력 신호; u_0 는 신경 진동자에의 정상입력 신호; τ, τ' 는 시상수; w_{ij} 는 제 i 번째 신경 진동자와 제 j 번째 신경 진동자간의 연결 관계; β 는 피로상수; $Feed_i$ 는 감각수용기로부터의 출력신호;

본 논문에서는 $Feed_i$ 을 신경 진동자에의 피드백 네트워크(feedback network)라 부른다. 피드백 네트워크는 각 관절의 각도, 각속도, 발의 접촉상태의 신체 센서들의 감각 정보등으로 구성되어진다.

단일 신경 진동자의 구조는 뉴런의 상호억제결합으로 구성되어 있지만, 타 신경 진동자로부터의 출력과 감각수용기로부터의 출력신호에 대한 네트워크의 연결 관계에 있어서는 아직 신경 생리학적으로 불분명한 점이 많이 있다. 또한 CPG가 주기운동을 생성하고 감각수용기로부터의 정보와 반사를 통해 CPG의 리듬을 조절하는 것은 폭넓게 받아들여지고 있지만 그 구체적인 메커니즘에 관해서 충분하게 밝혀지는 않았다[21, 22].

그래서 지금까지는 인간의 보행패턴에 가까운 운동리듬을 생성하기 위한 인공적인 신경 진동자를 모델화 할 경우 전문

가들에 의해 감각정보의 반사 기구를 시행착오적으로 결정하였다. Taga 모델도 마찬가지로 인위적인 시행착오를 통해 결정하였다. 이에 본 논문에서는 이를 자동으로 결정하기 위해서 진화형 탐색수법의 하나인 GP를 이용하였다. 다음은 GP를 이용한 반사기구 결정 방법에 관해서 설명하고자 한다.

3. 신경계의 진화형 계산에 의한 탐색

신체의 강제적인 특성과 해부학적인 특성에 관해서는 선행 연구에 의해서 많은 지식들이 축적되어 있다. 이에 반해 신경계에 있어서, 특히 감각수용기로부터의 신호에 대한 연결 관계에 관해서는 아직 불분명한 상태로 남아있다. 다시 말하면, 실제 보행을 생성하고 있는 감각-운동 신경계 전체의 거동을 종합적으로 재추하는 것은 현 시점에서는 아직 불가능하며, 어느 근육의 운동발생에 어떤 감각정보가 어느 시점에서, 어느 정도의 영향을 미치고 있는가라는 구체적인 활동에 관해서는 신경 생리학적으로 확실히 밝혀지지 않았다. 그렇기 때문에 2족 보행 등의 운동에 관한 컴퓨터 시뮬레이션을 실현할 시, 생물학적인 견지에서 최적인 반사기구(피드백 네트워크)의 구성을 사전에 결정하기에는 현재로서는 불가능하다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서, 신경계의 구조 특히 감각수용기와의 네트워크 연결 관계와 parameter의 결정을 GP를 이용한 진화적 탐색과정을 통해 최적화 하였다.

3.1 유전자 프로그래밍(GP)의 적용

최근 다양한 최적화 문제를 해결하기 위해서 진화적 계산수법(Evolutionary Computation)이 많이 이용되고 있다. 특히 로봇의 제어기를 뉴럴 네트워크(Neural Network)등의 저차 레벨의 제어기 기술법을 사용해 진화적 계산수법을 통해 구축하는 진화 로봇분야가 주목을 받고 있다[21]. 이 분야에서는 로봇의 신체성을 특별히 의식하지 않고서도 제어기의 구축을 행할 수 있다는 장점 때문에 새로운 제어기 설계론을 제공할 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서도 반사 기구를 설계하기 위해 진화적 탐색방법인 GP를 이용하였다. GP는 주어진 문제를 해결하기 위해서 적당한 프로그램을 탐색하는 진화형 탐색 알고리즘의 하나이다[24, 25]. GP에 있어서, 진화대상이 되는 개체는 가변의 길이와 형을 갖는 계층적인 프로그램이다. GP은 프로그램을 유전자로 하는 집단을 가지고, 이것에 대해서 재생, 교차, 돌연변이 등의 유전자조작과 선택전략을 반복해가면서 최적의 프로그램을 탐색해 가는 수법이다.

본 논문에서는 신경계의 피드백 네트워크를 구축하기 위해 각 관절의 자유도를 제어하는 12개의 신경 진동자에 대한 피드백 네트워크를 구축할 필요가 있다. 이에 각 신경 진동자의 피드백 네트워크를 GP로 탐색하기 위해서 각각의 피드백 네트워크의 탐색공간에 해당하는 12개 부분집단으로 나누고, 각각의 피드백 네트워크에 해당하는 프로그램을 독립적으로 생성되도록 하였다. 그런데 GP에 의해서 생성되어진 피드백 네트워크 프로그램은 다른 신경 진동자의 피드백 네트워크와 분리해서 단독적으로 적합도(Fitness)를 계산할 수 없다. 왜냐하면 보행운동은 신경계를 구성하는 신경 진동자의 전체에 의해서 생성되기 때문에, GP의 각 부분집단들에서 생성되어진 피드백 네트워크의 전체(12개)를 동시에 적용하여 적합도를 평가할 필요가 있다.

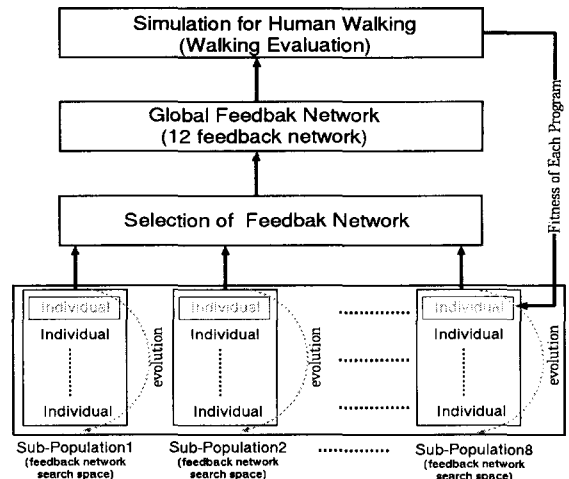


그림 4. GP를 이용한 피드백 네트워크의 탐색
Fig. 4. Evolving feedback network using GP

이 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 GP에 대한 부분집단 모델을 고안하였다.

1. 초기집단 생성: 랜덤으로 각 신경 진동자의 피드백 네트워크에 대한 탐색공간에 해당되는 GP의 각 부분 집단을 생성하였다.
2. 그룹생성: 이 그룹은 생성되어진 부분집단으로부터 적합도 값(Fitness value)에 따라 각각의 부분집단에서 선택되어진 12개 개체들의 집합이다. 초기 세대의 그룹 생성은 랜덤으로 생성되어진 부분집단의 배열 순서에 따라 생성하였다.
3. 그룹 평가: 그룹 내의 개체는 동시에 적용되어, 2족 운동의 평가함수를 통해서 그룹전체로 평가된다. 그룹 내의 각 개체는 그룹전체의 평가 값과 동일한 값을 갖는다.
4. 차세대 부분집단 생성: 차세대의 생성은 부분집단마다 동일한 유전자 조작과 선택전략을 적용하여 생성한다.

이 수법은 유전적 프로그래밍을 이용한 이질 부분집단을 동시에 생성하기 위한 가장 간단한 방법의 하나이지만, 본 연구의 2족 보행운동 생성을 위한 피드백 네트워크 탐색에 있어서는 유용한 방법이라는 것을 실험적으로 확인하였다.

4. 2족 보행운동생성 시뮬레이션

본 연구에서는 2족 보행운동을 생성하는 신경 진동자에 대한 피드백 네트워크의 구조와 parameter를 자동적으로 결정하기 위한 GP를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션시스템을 실현하였다. 표 2는 2족 보행운동생성 시뮬레이션에서 이용한 GP의 중요 parameter들이다. GP의 말단노드와 함수노드는 운동역학적인 고려에 의해 표 3과 같이 정의하였다.

본 시뮬레이션에서는 2족 보행운동의 적합도 평가를 두 단계로 나누어 행하였다. 그 이유로는 GP의 초기 단계에서 무작위로 얻어진 피드백 네트워크 구조와 parameter로는 정상보행을 행할 수 없을 뿐 아니라 도중에 바로 넘어지기 때문에 생체 역학적인 적합도 함수를 적용하기 어렵다. 그리하여 본 연구에서는 지속적인 보행을 불가능한 상태에서 어느 정도의 안정적인 보행을 획득하는 단계와 그 다음에 생체 역학적으로 타당한 보행을 획득해가는 단계로 표 4와 같은

표 2. GP의 중요한 parameters
Table 2. Genetic Programming Parameters

Maximum generation	500
Reproduction	20%
Mutation	10%
Crossover	70%
Population size	3200
Grow method	FULL
Maximum depth	10
Max mutation depth	5
Selection method	fitness-proportionate greedy overselection
Termination Criterion	After completing 10 walking steps

표 3. GP의 말단 노드와 함수 노드
Table 3. GP terminals and functions

GP Terminals And Functions			
	Description	#num	
Function node	+r, *, exp, log	5	
	H(x) = 1(when x 0), 0(otherwise)	1	
	Max0(x) = x (when x 0), 0(otherwise)	1	
	S {1, 2, 3, 4, 5}	Contact sensory at each side	5
	a {r, l}, {x, y, z}	Toe positions in each foot	6
Terminal node	a {r, l}, {x, y, z}	Toe velocities in each foot	6
	r _i ^y	Absolute angles at each side	8
	ṙ _i ^y	Absolute angular velocities at each side	8
	g(x, y, z)	Position of center of gravity	3
	ḡ(x, y, z)	Velocity of center of gravity	3
	C{1, 2, 3, 4}	Ephemeral random constant	4
	ADF1	Angle sensory module	1
	ADF2	Angular velocity sensory module	1
	ADF3	Contact sensory module	1

표 4. 적합도 함수
Table 4. Fitness functions

Fitness Functions	
Fitness function1	$0.9D + 0.1S - 0.05Z - 0.05Y \rightarrow (\max)$ D: 넘어질 때까지의 보행거리 S: 넘어질 때까지 보수 Z: 넘어질 때까지의 체중심의 높이 변화의 시간적 평균 Y: 초기 체중심의 y축 위치와 넘어질 때까지의 체중심의 y축 위치와의 변화
Fitness function2 (이동일률)	$\int (\sum_m \dot{E}_m + \dot{B}) dt / MgD \rightarrow (\min)$ E _m : m번째 근 소비 에너지 E: 내장물 근 이외에서 소비되어지는 선진대사 에너지 B: 신체 열량, k: 중력가속도 D: 이동거리

적합도 평가 함수를 단계적으로 적용하였다.

GP는 많은 반복 계산을 행하기 때문에 막대한 계산시간이 요구된다. 특히 본 시뮬레이션에서는 GP의 개체군을 평가하기 위해 매번 2족 보행운동생성에 대한 동역학 시뮬레이션을 행할 필요가 있다. 반면, GP는 다점탐색을 행하기 때문

에 병렬계산에 적합하다. 이에 본 시뮬레이션에서는 GP의 개체군에 대해 64대로 이루어진 PC Cluster를 구축하여 병렬처리를 수행하였다. 또한 신체 역학계의 운동방정식과 신경계를 나타내는 연립미분 방정식(1)~(2)을 수치적분하기 위해 개량 Euler 방법을 이용하였으며 적분시간간격은 0.5ms로 해서 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 본 시뮬레이션에서 필요한 신체역학계와 신경계의 초기조건에 관해서는 기존의 연구에서 얻어진 결과를 이용하였다[26].

5. 실험결과

그림 5는 시뮬레이션을 통한 보행 획득과정에 있어서 개체의 최고적합도 추이가 어떻게 변화하고 있는지를 나타낸다. 그림 5에서와 같이 유전자의 세대가 진행됨에 따라 개체의 최고적합도가 높아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 진화과정에서 신경계의 피드백 네트워크에 대한 탐색이 잘 이루어지고 있음을 나타낸다. 그림 6은 2족 보행 시뮬레이션에서 얻어진 최적의 2족 보행에 대한 대퇴부, 하퇴부, 발 관절의 위상상태를 나타낸다. 보행횡축은 각각의 관절 각도이고, 종축은 각속도이다. 이 위상도는 시상면(Sagittal Plane)내의 2족 보행운동의 안정성을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 본 실험결과에서는 비교적 주기적인 보행운동 패턴의

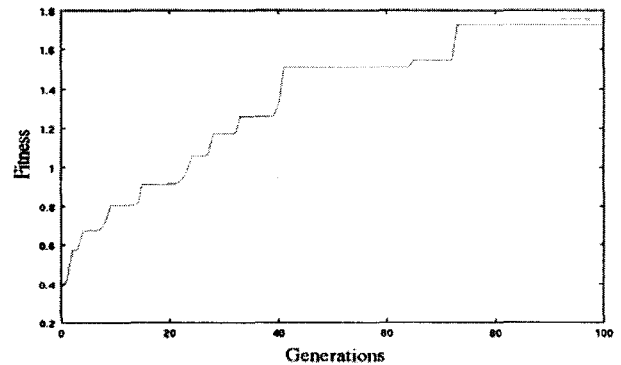


그림 5. 개체의 최고 적합도 추이
Fig. 5. Fitness transition

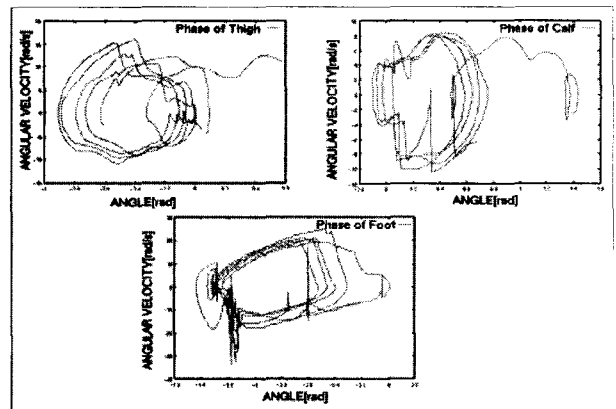


그림 6. 각 관절(허벅지, 무릎, 발)의 위상상태
Fig. 6. Phase plots of thigh, calf and foot

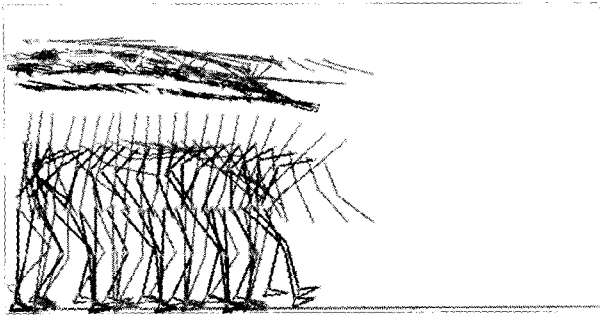


그림 7. 생성되어진 보행패턴
Fig. 7. Emerged walking pattern

생성을 할 수 있었다. 그러나 본 시뮬레이션 모델의 안정성은 신체 역학제와 신경 진동자로 이루어진 신경계의 비선형계 리미트 사이클(Limit Cycle)로서 생성되어지기 때문에 그 허용범위가 매우 좁다. 그리하여, 안정적인 주기 해에 도달하지 못하고 그림 7에서 보듯이 10보정도 걸은 후 넘어졌다. 그렇지만 실험 결과에 나타나듯 어느 정도의 리듬적인 보행 운동 패턴의 생성에는 성공하여, 앞으로 2족 보행운동의 평가함수 개선과 탐색 알고리즘 개선으로 보다 안정적인 2족 보행 운동의 실현이 가능하다고 생각되어진다.

통상의 제어모델에서는 보행운동을 생성하기 위해 목표궤도가 존재하고 동시에 그 궤도는 좌우 발의 이동에 있어서 항상 동일하다. 이에 반해 본 논문에서는 보행의 주기성을 전제로 하지 않았으며 그림 7과 같이 보행 패턴이 조금씩 다르게 나타났다. 이것은 역학적 조건에 따라 다양한 보행 패턴을 생성할 수 있는 능력을 시사하는 것으로 생물의 보행과 유사하다고 간주된다. 따라서 시뮬레이션 모델이 생물의 다양한 체형의 운동패턴을 생성할 때에도 유연하게 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

본 논문에서는 2족 보행운동 생성을 위한 신경계의 반사기구인 감각정보에 대한 피드백 네트워크 구조와 parameter를 자동적으로 획득하는 계산 모델을 제안하고 개발한 2족 보행운동 시뮬레이션 시스템을 통해 제안 모델의 유효성에 관해서 논하였다. 제안 모델은 GP를 이용해 인위적인 시행착오 없이 2족 보행운동을 생성할 수 있는 감각정보에 대한 피드백 네트워크의 구조와 parameter를 자동적으로 획득할 수 있었다. 특히, 본 논문에서는 적합도 함수로서 단순한 2족 보행운동의 평가기준을 적용했음에도 불구하고 비교적 안정적인 보행운동을 생성한 제안 모델이 자동적인 반사기구의 구조를 결정하는데 유용하다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 반사기구의 구조를 시행착오적으로 결정했던 기존연구와 비교해 제안 모델은 인위적인 노력과 시간을 많이 삭감할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 모델을 응용하면, 다양한 운동에 적합한 신경계 구조를 갖는 자율적인 운동생성 기구를 간단하게 구축할 수 있기 때문에 장애동작의 회복예측이나 훈련 효과 예측과 같은 재활운동 분야뿐만 아니라 로봇 제어 등의 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 응용분야에 적용하기 위해서는 안정적인 동시에 생체 역학적으로 타당한 보행을 생성시킬 수 있는 적절한 신

경계의 구조를 결정하지 않으면 안 된다. 이를 위해 합목적적인 운동평가기준을 설정할 필요가 있다. 그러나 본 논문에서 적용한 운동평가기준이 합목적적이라고는 말할 수 없다. 이에 추후의 연구과제로서 생체 역학적 특성을 고려해 합목적적인 운동평가 기준을 적용해 보다 안정성 있는 2족 보행운동을 생성하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] E. Marder, N. Kopell and K. Sigvardt, How computation aids in understanding biological networks. In: *Neurons, Networks and Motor Behavior*, Eds. P.S.G. Stein, S. Grillner, D.G. Stuart and A.I. Selverston. MIT Press: Cambridge. pp. 139-150, 1997.
- [2] A. I. Selverston, "Are central pattern generators understandable?", *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, pp. 535-571, 1980.
- [3] MR. Dimitrijevic, Y. Gerasimenko, and MM. Pinter, "Evidence for a spinal central pattern generator in humans", *Annals of the New York Academy of Sciences* Vol. 860 360-376, 1998.
- [4] J. Duysens, and , H.W.A.A. Van de Crommert, "Neural control of locomotion; part I. The central pattern generator from cats to humans" *Gait and Posture* Vol 7(2), 131-141, 1998.
- [5] S. Grillner, "Locomotion in vertebrates: central mechanisms and reflex interaction", *Physiological Reviews*, vol. 55, pp 247-304, 1975.
- [6] S. Grillner, "Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates", *Science*, vol. 228, pp. 143-149, 1985.
- [7] K.G. Pearson, "Common principles of motor control in vertebrates and invertebrates", *Annual Review of Neuroscience*, vol. 16, pp. 265-297, 1993.
- [8] E. Marder and R. L. Calabrese, "Principles of rhythmic motor pattern generation", *Physiological Reviews*, vol. 76, pp. 687-717, 1996.
- [9] R.J. Full and D.E. Koditschek, "Templates and Anchors: Neuromechanical Hypothesis of Legged Locomotion", *Journal of Experimental Biology*, vol. 202(23), pp. 3325-3332, 1999.
- [10] J.J. Collins and I.N. Stewart, "Coupled Nonlinear Oscillators and The Symmetries Of Animal Gaits", *Journal of Nonlinear Science*, vol. 3, pp. 349-392, 1993.
- [11] W.O. Friesen, "Reciprocal inhibition: A mechanism underlying oscillatory animal movements" *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol 18(4), pp. 547-553, 1994.
- [12] FK. Skinner, N. Kopell, E. Marder, "Mechanisms for oscillation and frequency control in reciprocally inhibitory model neural networks", *Journal of Computational Neuroscience* vol 1, pp. 69-87, 1994.
- [13] J.J. Collins and S.A. Richmond, "Hard-Wired Central Pattern Generators For Quadrupedal

- Locomotion", *Biological Cybernetics*, vol. 71, pp. 375-385, 1994.
- [14] H. Yuasa and M. Ito, "A Theory on Structures of Decentralized Autonomous Systems(in Japanese)", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineering*, vol. 25(2), pp 180-187, 1991.
- [15] Y. Ito and H. Yuasa, "Autonomous Distributed Systems which Generate Various Patterns Using Bifurcations(in Japanese)", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineering*, vol. 27(11), pp 1307-1314, 1991.
- [16] G. Taga, "A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion I: Emergence of Basic Gait". *Biological Cybernetics*, vol. 73(2), pp. 97-111, 1995.
- [17] G. Taga, "A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion II: Real-Time Adaptability Under Various Constraints", *Biological Cybernetics*, vol. 73(2): pp. 97-111, 1995.
- [18] G. Taga, "A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Anticipatory Adjustment of Human Locomotion During Obstacle Avoidance", *Biological Cybernetics*, vol. 78(1), pp. 9-17, 1998.
- [19] J.S. Bay, H. Hemani, "Modeling of Neural Pattern Generator with Coupled Nonlinear Oscillators", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, BME-34-4, pp 297-306, 1987
- [20] K. Matsuoka, "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators", *Biol., Cybern.*, vol. 56, pp. 345-353, 1987.
- [21] K. Akazawa, J. Aldridge, J. D. Steeves, and R.B. Stein, "Modulation of stretch reflexes during locomotion in the mesencephalic cat", *Journal of Physiology* vol. 329, pp. 553-567. 1982.
- [22] A. H. Cohen, and D. L. Boothe, "Sensorimotor interactions during locomotion: principles derived from biological systems" *Autonomous Robots* vol. 7(3), pp. 239-245, 1999.
- [23] H. Garis, "Genetic Programming: building artificial nervous systems using genetically programmed neural networks modules", In *Proc of the 7th International Conference on Machine Learning*, pp. 132-139, 1990.
- [24] J.R. Koza and J.P. Rice, "Genetic Generation of Both the Weights and Architecture for a Neural Network", In *Proc. of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 2 pp. 397-404, 1991.
- [25] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [26] K. Hase, N. Yamazaki, "Computational evolution of human bipedal walking by a neuro-musculo-skeletal model", *Artificial Life and Robotics* vol. 3, pp. 133-138, 1999.

저 자 소 개

옥수열(Soo-youl Ok)

1994 : 동아대 산업공학과 졸업(공학사).

1998 : 쯔쿠바 대학 이공학 연구과 석사
(병렬처리 전공)

2001 : 쯔쿠바 대학 공학 연구과 박사
(인공지능 및 컴퓨터 그래픽 전공)

2001-2003 : 일본 독립행정법인 통신종합
연구소 전공 연구원

2004-현재 : 동명정보대학 게임 공학과 전임강사

관심분야 : 유전자 프로그래밍, 2족 로봇 제어, 가상현실, 컴퓨터 애니메이션, 컴퓨터 게임.

Phone : 051-610-8926

Fax : 051-610-8848

E-mail : sooyol@tit.ac.kr