

진화적 알고리즘을 이용한 자율적 2족 보행생성

Autonomous Bipedal Locomotion with Evolutionary Algorithm

옥 수열

동명정보대학교 공과대학 게임공학과

Sooyol Ok

Department of Game Engineering, TongMyong University of Information Technology

E-mail : sooyol@tit.ac.kr

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

1. 서 론

생체 공학이나 신경생리학 등의 분야에서는 인간의 2족 보행에 대한 메커니즘을 알아내는 것이 중요한 연구내용 중 하나이고, 이에 대한 연구성과는 재활도구나 인간형 로봇과 같은 다양한 응용분야의 기초 기술로서 제공되어질 것이다. 그러나, 인간의 2보행 운동은 신경계와 역학계에 의한 복잡한 상호작용으로, 그 실현 메커니즘에 관계되는 신경계의 상세에 관해서는, 그 복잡성 때문에 아직 많은 부분이 불명확하게 남겨져 있다[1,2].

최근의 연구에서는, 인간이 행하는 협조적 보행운동은, 신체의 근골격 등의 역학계가 갖는 리듬과 신경계가 갖는 리듬과의 상호 리듬 동조현상(entrainment)에 의해서 발생하는 것으로 생각되어지고 있다. Taga등은[6,7] 신경 진동자로 이루어진 신경계와 신체의 근골격으로 구성된 역학계를 모델화하여 신경계와 신체 역학계의 리듬 동조현상으로부터 2차원의 유

연한 2족 보행동작을 자기 조직화적으로 생성하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 시스템은 원하는 운동을 실현하기 위해서는 전문가에 의해서 시행 착오에 의해서 신경진동자의 상세한 설계를 할 필요가 있다는 문제가 있다[3,6,7].

이에 본 연구에서는 전문가의 시행 착오적인 신경계의 구조와 parameter의 설계 없이, 2족 보행을 생성하기 위해, 진화형 탐색수법의 하나인 유전적 프로그래밍을 이용하여, 자동적으로 신경계를 최적화하는 수법을 제안한다.

2. 2족 보행운동 모델

동물의 보행운동에 관한 신경생리학적 연구의 발전으로부터 리듬적인 보행운동은 CPG(Central Pattern Generator)이라는 척수레벨의 리듬 패턴 생성 신경회로망의 활동에 의해서 발생되어 진다고 알려지고 있다. 본 연구에서는 이러한 연구 내용을 바탕으로, 자율

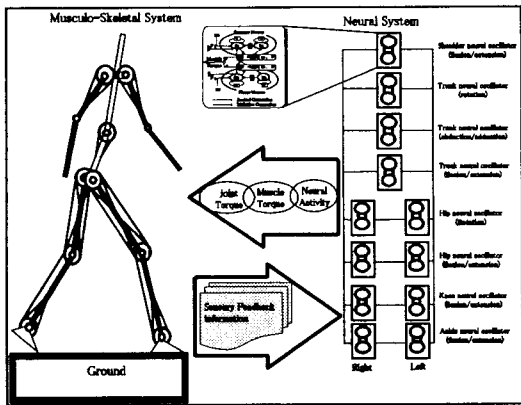


그림 1 자율적인 2족 보행생성 시스템의 개념도
적으로 2족 보행을 생성할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 이 모델은 신경 진동자는 이루어진 신경계는 신경자극으로부터 자율적으로 리듬패턴을 생성하고, 신체의 역학계는 이 신경계로부터 생성된 리듬패턴과 동조하면서 리듬적인 2족 보행운동을 생성한다. 또한 발의 접촉상태(발-지면)와 각 관절의 각도 상태등과 같은 생체 센서에 관한 정보는 신경계에 피드백 되어지고 신경자극의 리듬패턴은 이 정보를 기초로 하여 생성되어진다. 그림 1은 본 연구에서 구축한 시스템을 개념도를 나타내고 있다.

2.1 신체 역학계의 모델화

본 연구에서는 그림 2에서와 같이 2족 보행의 신체 역학계는 발, 하퇴부(종아리), 대퇴

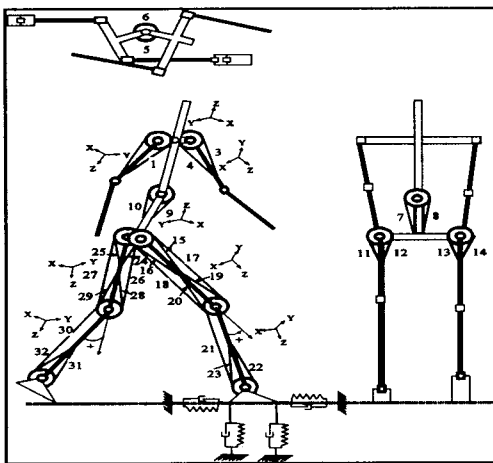


그림 2 신체의 역학계 모델

부(허벅지) 요부(허리), 머리를 포함한 흉부(가슴), 상완, 하완의 좌우합계 12관절로 이루어진 3차원 강제 연결구조로 모델화 하였다. 이 모델은 인간의 2족보행운동의 특징을 표현

하기 위해서 가장 단순하고 기본적인 모델이다.

2.2 신경 진동자를 이용한 신경계의 모델화

신경계의 모델로서는 Taga의 2족 보행 운동의 신경계 모델을 참고로 하여, 신경진동자의 네트워크를 기반으로 모델화하였다[6,7]. 이것은 신경계의 기본적인 리듬 생성기구(CPG)를 모델화한 것으로, 주기적인 리듬을 생성하는 신경 진동자(리듬 생성기)는 신체의 모델의 각 관절의 자유도마다 존재하는 것으로 간주했다.

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_j 는 j 번째의 신경진동자의 출력 신호; u_0 는 신경 진동자에의 정상입력 신호; τ_i, τ_i' 는 시상수; w_{ij} 는 신경 진동자 내의 뉴런끼리의 접속관계; 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 정보로 구성되어진다.

단일 신경 진동자의 구조는 뉴런의 상호억제 결합으로 구성되어 있지만, 타 신경 진동자로부터의 출력과 감각수용기로부터의 출력신호에 대한 네트워크의 연결 관계에 있어서는 아직 신경 생리학적으로 불분명한 상태이기 때문에, 인간의 보행패턴에 가까운 운동리듬을 생성하기 위한 인공적인 신경 진동자를 모델화할 경우 전문가들에 의한 시행 착오적으로 결정하였다. Taga[6,7]의 모델의 경우도 마찬가지로 시행 착오를 통해 결정하였다. 이에 본 논문에서는 이를 자동으로 결정하기 위해서 진화형 탐색수법의 하나인 유전적 프로그래밍 수법을 이용하였다.

3. 신경계의 진화형 계산에 의한 탐색

신체의 강제적 특성과 해부학적 특성에 관해서는 선행 연구에 의해서 많은 지식들이 얻어져 있다. 이에 반해 신경계에 있어서, 특히 감

각수용기로부터의 신호에 대한 연결관계에 있어서는 아직 불분명한 상태로 남아있다. 요건데, 실제 보행을 생성하고 있는 감각-운동 신경계 전체의 거동을 종합적으로 예측하는 것은 현 시점에서는 아직 불가능하며 어느 근육의 운동지능의 발생에 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 때에, 생물학적인 견지에서 최적적인 피드백 네트워크의 구성을 사전에 결정하기는 현재로서는 불가능하다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서, 신경계의 구조 특히 감각수용기와 네트워크 연결관계와 parameter의 결정을 유전적 프로그래밍을 이용한 진화적 탐색과정을 통해 최적화 하였다.

3.1 유전적 프로그래밍의 적용

유전적 프로그래밍(Genetic Programming)은 주어진 문제를 해결하기 위해서 적당한 계산기 프로그램을 탐색하는 진화형 탐색 알고리즘의 하나이다[5]. 유전적 프로그래밍에 있어서, 진화대상이 되는 개체는 가변의 길이와 형을 갖는 계층적인 계산기 프로그램이다. 유전적 프로그래밍은 프로그램을 유전자로 집단을 가지고, 이것에 대해서 재생, 교차, 돌연변이등의 유전자조작과 선택전략을 반복해가면서 최적의 프로그램을 탐색해 가는 수법이다.

본 연구에서는 2족 보행의 신경계의 피드백 네트워크를 구축하기 위해 각 관절의 자유도를 제어하는 12개의 신경 진동자에 대한 피드백 네트워크를 구축할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 각 신경 진동자의 피드백 네트워크를 유전적 프로그래밍으로 탐색하기 위해서 각각의 피드백 네트워크의 탐색공간에 해당하는 12개의 부분집단으로 나누고, 각각의 피드백 네트워크의 프로그램은 독립적으로 생성되도록 했다. 그런데 유전적 프로그래밍에 의해서 생성되어진 피드백 네트워크의 프로그램은 다른 신경 진동자의 피드백 네트워크와 분리해서 단독적으로 Fitness평가는 할 수 없다. 왜냐하면 보행운동은 신경계를 구성하는 신경 진동자의 전체에 의해서 생성되어지기 때문에, 유전적 프로그래밍의 부분집단에 의해서 생성된 피드백 네트워크 전체를 동시에 적용하여 평가할 필요가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같은 유전적 프로그래밍에 대한 부분집단 모델을 고안했다.

1. 초기집단 생성: 랜덤으로 각 신경 진동

자의 피드백 네트워크의 탐색공간에 해당하는 유전적 프로그래밍의 각 부분 집단을 생성

2. 그룹생성: 이 그룹은 생성되어진 부분집단으로부터 Fitness값에 따라 각각의 부분집단으로부터 선택되어진 12개의 개체 집합이다. 초기 세대에서의 그룹 생성은 랜덤으로 생성되어진 부분집단의 배열 순에 따라 생성했다.
3. 그룹 평가: 그룹내의 개체는 동시에 적용되어, 2족 운동의 평가함수를 통해서 그룹전체로 평가된다. 그룹내의 각 개체는 그룹전체의 평가 값과 동일한 값을 갖는다
4. 차 세대 생성: 차 세대의 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 방법이 다는 것을 실험적으로 확인 했다[4].

4. 2족 보행 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 이용한 유전적 프로그래밍의 중요한 parameter은 표 1과 같다. 본 시뮬레이션에서는 2족 보행운동의 fitness 평가를 2단계로 나누어 평가를 행하였다. 그 이유로는 유전적 프로그래밍의 초기 단계에서 무작위적으로 얻어진 피드백 네트워크와 parameter로는 일반적인 정상보행을 행할 수 없을 뿐 아니라 도중에 바로 넘어지기 때문에 지속적인 보행을 실현할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 지속적인 보행을 불가능한 상태에서 어느 정도의 안정적인 보행을 획득한 다음 생체역학적으로 타당한 보행을 획득해가는 학습 과정으로 평가 함수를 단계적으로 적용했다.

단, 제1단계의 평가함수(fitness function 1)에서 D는 넘어질 때까지의 보행거리, S는 넘어질 때까지의 보수, Z는 넘어질 때까지의 체중심 높이의 변위 평균, Y는 초기 체중심의 Y축에는 초기 체중심의 Y에 대한 변의 평균이다. 제2단계의 평가함수(fitness function 2)에서는 이동 일률(이동 에너지 최소화)을 적용하였다. 유전적 프로그래밍은 많은 반복 계산을 행하기 때문에 막대한 계산시간이 요구된다. 반면, 다점탐색을 행하기 때문에 병렬계산에 적합하다. 그래서 본 시뮬레이션에서는 64대로 이루어진 PC Cluster를 구축하여 병렬처리를 행하였다.

표 1 GP의 parameter

GP parameters			
Maximum generation	500	Reproduction	20%
Population size	3200	Mutation	10%
Maximum depth	10	Max mutant depth	5
Grow method	FULL	Crossover	70%
Selection method	Greedy over selection		
Termination Criterion	After completing eight walking steps		
Fitness Functions			
Fitness function1	$0.9D + 0.1S - 0.05Z - 0.05Y \rightarrow (\max)$		
Fitness function2	$\int (\sum_m \dot{E}_m + \dot{B}) dt / MgD \rightarrow (\min)$ <p><i>E</i> is the energy consumption rate in the muscle. <i>B</i> is the energy consumption rate in regions other than muscles (e.g., internal organs). <i>M</i> is the body mass, <i>g</i> is the acceleration due to gravity. <i>D</i> is the walking distance.</p>		
GP Terminals And Functions			
	Description	#num	
Function node	+, *, exp, log	5	
	$H(x) = 1$ (when $x \geq 0$), 0 (otherwise)	1	
	$Max0(x) = x$ (when $x \geq 0$), 0 (otherwise)	1	
	$S(1,2,3,4,5)$ Contact sensory at each side	5	
Terminal node	$q_{(x,y,z)}^{(r,j)}$ Toe positions in each foot	6	
	$\dot{q}_{(x,y,z)}^{(r,j)}$ Toe velocities in each foot	6	
	r_i^j Absolute angles at each side	8	
	\dot{r}_i^j Absolute angular velocities at each side	8	
	$\delta_{(x,y,z)}$ Position of center of gravity	3	
	$\dot{\delta}_{(x,y,z)}$ 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	

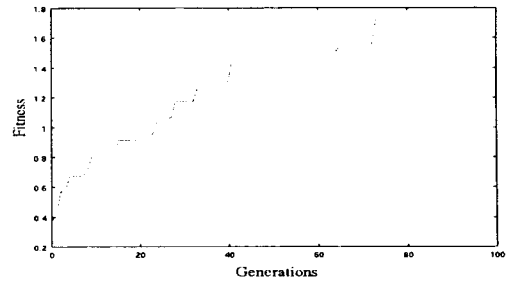


그림 3 fitness 추이

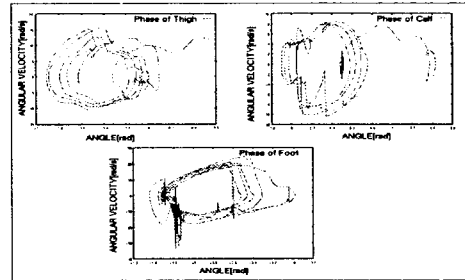


그림 4 limit cycle of thigh, calf and foot

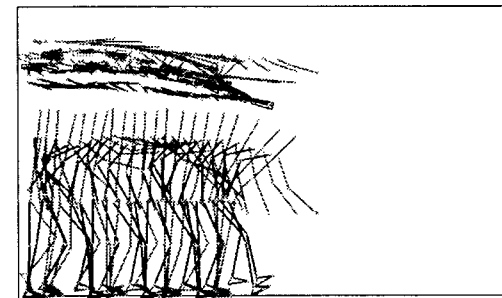


그림 5 Example of emerged walking pattern

5. 결론

그림 3은 보행의 획득과정에 있어서의 fitness 추이를 나타낸다. 세대가 진행해 감에 따라 fitness가 높아짐을 할 수 있다. 그림 4는 2족 보행 시뮬레이션에서 얻어진 최적의 2족 보행에 대한 대퇴부, 하퇴부, 발 관절의 limit cycle을 나타낸다. 황축은 각각의 관절의 각도이고, 종축은 각속도이다.

2족 보행운동에 대한 본 시뮬레이션 모델에서의 안정성은 신체 역학계와 신경 진동자로 이루어진 신경계의 비선형계 limit cycle로서 생성되어지기 때문에 그 허용범위가 좁고, 본 시뮬레이션에서는 안정적인 주기해에 도달하지 못하고 그림 5와 같이 10보 정도 걷은 후 넘어졌다. 그렇지만 시뮬레이션 결과와 같이 어느 정도의 리듬적인 보행운동 패턴의 생성에는 성공해, 앞으로 2족 보행운동의 평가함수 개선과 탐색 알고리즘 개선으로 보다 안정적인 2족 보행 운동을 실현이 가능하다고 생각되어진다.

6. 참고문헌

[1] Dimitrijevic, MR, Gerasimenko, Y, and Pinter, MM, "Evidence for a spinal central pattern generator in humans". Annals of the New York Academy of Sciences 860: 360-376, 1998.

[2] Duysens, J, and Van de Crommert, HWAA, "Neural control of locomotion; part 1. The central pattern generator from cats to humans." Gait Posture 7, 131-141, 1998.
 [3] Hase, K, and Yamazaki, N, "Computational evolution of human bipedal walking by a neuro-musculo-skeletal model", Artificial Life and Robotics, 3, 133-138, 1999.
 [4] Iba, H, "Evolving multiple agents by genetic programming", in Advances in Genetic Programming 3, 447-466, 1999.
 [5] Koza, J.R, "Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection". The MIT Press, 1992.
 [6] Taga, G, "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I. Emergence of basic gait", Biological Cybernetics, 73, 97-111, 1995.
 [7] Taga, G, "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. II. Real-time adaptability under various constraints", Biological Cybernetics, 73, 113-121, 1995.