

4족 보행로봇의 걸음새 생성에 대한 GP와 CPG 기법의 비교 연구

서기성, 현수환
서경대학교 전자공학과

A Comparative Study between GP and CPG Methods of Gait Generation for Quadruped Robots

Kisung Seo, Soohwan Hyun
Dept. of Electronic Engineering, Seokyeong University

Abstract - 본 논문에서는 진화연산 기법중 GP(Genetic Programming)를 이용한 관절좌표계 상에서의 걸음새 자동생성 기법과 생물체의 신경발생 신호 원리를 이용한 CPG(Central Pattern Generator) 기법을 구현한다. 바이올로이드로 구성된 4족 보행로봇에 대하여 Webots기반의 ODE 시뮬레이션을 통해 접근 기법들에 대한 최적화를 수행하고 결과를 비교 분석한다. 그리고 구현된 시뮬레이션과 결과를 실제 로봇에 대해서 각 동작을 실행시켜 보면서 CPG와 GP 기반의 걸음새 방식의 실제적인 성능 및 특성도 고찰한다.

1. 서 론

진화로봇 연구(evolutionary robotics)는 지능적이고 자율적인 로봇 시스템을 자동적으로 구현하는 방법을 개발하는 것이다. 로봇의 컨트롤러, 몸체, 또는 컨트롤러와 몸체를 동시에 진화시키는 것을 목적으로 한다. 현재 진화로봇 연구의 대부분이 컨트롤 프로그램의 자동적인 구현을 다루고 있으며, 이중에서도 로봇 걸음새(gait)의 자동생성에 중점을 두고 있다[1].

4족 보행 로봇의 걸음새 제어는 보행 계획을 결정하는 핵심적인 부분으로서 발의 궤적, 궤적의 크기, 다리의 움직임 사이의 위상차 등 많은 파라미터를 동시에 고려해야 하는 복잡한 문제이다[2,3].

기존에 주로 사용된 방법으로는 로봇의 발끝이 그리는 자취의 모양을 사전에 결정한 후, 자취에 대한 크기나 모양에 대한 여러 가지 파라미터를 최적화 하는 기법이 주로 사용 되었다[2,3]. 그러나 이러한 걸음새 생성기법은 특정 자취에 대한 최적화만 이루어지기 때문에 그 결과가 전역적인 최적화하는 거리가 있다.

위의 문제점을 해결하기 위해서 GP를 이용하여 관절좌표계상에서의 걸음새를 생성하는 기법이 제안되었다. 기존 GA 기반의 방법들이 특정 궤적에 대한 계수 최적화에 중점을 둔 방식인 반면, 구조와 파라미터에 대한 최적화가 동시에 이루어지는 기법으로서 속도 면에서 가장 우수한 성능을 보여주고 있다[4,5]. 최근 주목을 받는 CPG(Central Pattern Generator)를 사용한 기법은 기존의 방법과는 달리, 동물들의 신경활동에 의해 보행의 리듬 패턴을 생성하는 원리를 수학적으로 모델링한 기법이다[6-8]. CPG는 관절좌표계상의 제어가 이루어지며, 자연스러운 보행이 가능하고 안정성 면에서 우수한 것으로 알려져 있다[8].

본 논문에서는 GP와 CPG를 사용한 걸음새 자동생성 기법을 구현하고 비교 실험한다. 먼저, Webots기반의 시뮬레이션[9]을 통해 해당 기법들에 대한 진화 최적화를 수행하고, 시뮬레이션 상에서 결과를 비교 및 분석한다. 그리고 시뮬레이션과 동일한 형태로 구성된 실제 바이올로이드 로봇 [10]을 통해 실제적인 성능 및 특성, 시뮬레이션과 실제 로봇간의 차이, 그리고 실제 로봇에서 나타나는 걸음새의 문제점에 대해서 고찰한다.

2. 4족 보행 로봇의 걸음새 생성 기법

4족 보행 로봇의 걸음새 생성 문제는 로봇 보행 계획을 결정하는 핵심적인 부분으로서 발의 자취(locus), 스텝수, 초기 자세등 수많은 파라미터를 동시에 설계해야 하는 복잡한 문제이다. 기존의 주요 걸음새 생성 기법은 다음과 같다. Hornby 는 Sony ERS-110 모델을 대상으로 20여개의 걸음새 파라미터를 정의하여 직교 좌표 공간에서 스핑과 계인의 조절을 통해 주기적인 걸음새를 생성 하였다[2]. UNSW팀은 17-18 개의 파라미터를 미리 결정된 사각형의 자취에 대해 조절하는 방식을 사용하였다.

이러한 방법들은 발끝의 자취 형태에 따라 걸음새가 다른 양상으로 나타나며, 해당 궤적에 대해서만 최적화가 이루어지므로 전체적인 최적화라고 할 수 없다. 또한, 그 결과로서 걸음걸이가 자연스럽지 않거나 속도나 안정성 면에서 우수하지 않은 단점이 있다.

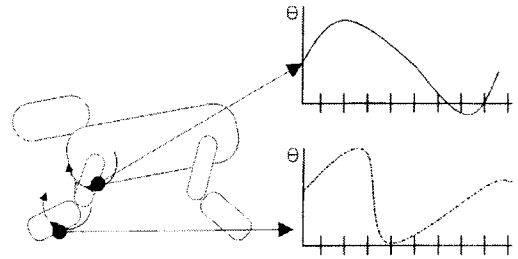
3. GP 기반의 걸음새 생성 기법과 CPG

3.1 GP 기반 관절 좌표계에서의 걸음새 생성

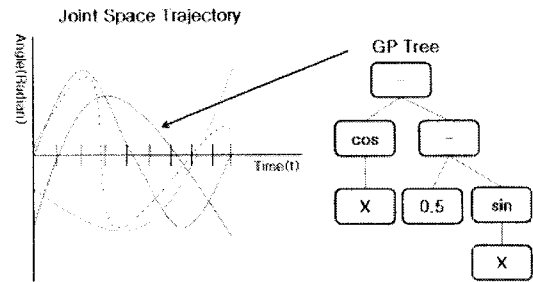
유전 프로그래밍(GP)[11]은 큰 부류에서 유전 알고리즘(GA)과 함께 진화연산(Evolutionary Computation)에 속하지만, GA와는 몇 가지 다른 특징이 있다. 가장 큰 차이점으로는 GA는 일반적으로 비트스트링 혹은 실수형태로 개체를 표현하지만, GP는 트리로 개체를 표현하는 것이 있다. 이때 트리의 노드는 하나의 함수를 나타내며 각 개체는 이러한 함수들의 집합으로 표현된다. 이 함수의 집합은 하나의 컴퓨터 프로그램으로서 나타나게 된다. 그러므로 GA는 개체가 하나의 해의 표현의 구성요소를 표현하고, GP는 해

자체를 생성하는 하나의 프로그램을 표현하게 된다. 이러한 차이 외에도 GA가 대부분 고정 크기의 염색체를 이용하는데 반해, GP는 가변크기의 염색체를 사용하는 등의 차이가 있다.

GP 기반의 관절공간 걸음새 생성법은 다음과 같이 이루어진다. 직교좌표계상에서 발끝의 자취 대신에 그림 1과 같이 관절좌표계상의 궤적을 대상으로 하며, 그림 2처럼 GP의 트리구조를 이용하여 로봇의 각 관절 궤적을 생성한다. 이러한 GP 기반의 관절공간 걸음새 생성 방법은 구조 및 파라미터의 동시적인 최적화가 이루어지기 때문에 전체적인 최적화에 근접할 수 있으며, Sony Aibo 4족 보행 로봇을 통한 시뮬레이션 결과, 속도면에서 가장 우수한 성능을 보여주고 있다[4].



〈그림 1〉 4족 보행로봇의 관절좌표계 궤적



〈그림 2〉 관절의 궤적 그래프 및 GP 트리 표현

3.2 CPG(Central Pattern Generator) 기반 걸음새 생성

CPG(Central Pattern Generator) 모델은 생물체의 신경들이 서로 정보를 주고 받으며, 비선형적인 주기신호를 발생시키는 원리를 모델링한 것이다[4-6]. CPG에 사용되는 수식은 많은 모델이 있으며, 본 논문에서는 각각의 뉴런에 대해 아래와 같은 식을 사용한다.

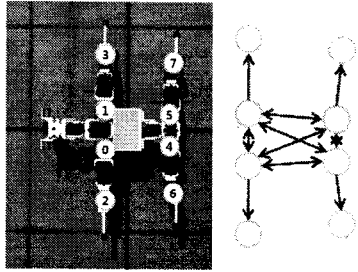
$$\dot{\nu} = -\alpha \frac{x^2 + \nu^2 - E}{E} \nu - x, \quad \dot{x} = \nu \quad (1)$$

여기서 x, ν 는 진동식의 현재 상태, E 는 진동식의 에너지, α 는 최적해로의 수렴율, τ 는 진동의 주기이다.

개별적 뉴런들은 각각 다리의 관절 한 부분이나 머리의 관절 한 부분 등을 표현하게 되며, 전체 뉴런들의 연결 관계를 해석하게 되면, 일정한 비선형적 주기 신호가 발생하게 된다. 이때의 연결 관계를 종합하여 정리하면 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\nu}_i = -\alpha \frac{x_i^2 + \nu_i^2 - E}{E} \nu - x + \sum_j \frac{(a_{ij}x_j + b_{ij}\nu_j)}{x_j^2 + \nu_j^2} \quad (2)$$

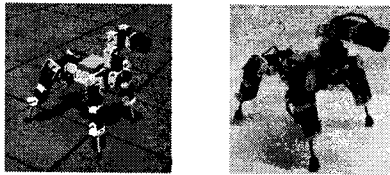
여기서 a, b 는 연결 강도 값으로서, 결합된 뉴런으로부터 나타나는 주기 신호 사이의 위상 이동을 결정하게 된다[7]. 그림 3의 CPG 모델의 결합구조에 대해서, 식(2)의 계수 a, b 값을 최적화하기 위해 PSO[12] 알고리즘을 사용하였다.



〈그림 3〉 CPG 결합 구조

4. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 및 실제 실험을 위하여 로보티즈사의 바이올로이드 부품으로 조립된 4족 보행로봇을 사용하였으며, 효율적인 보행을 위하여 발목 부분을 높게 수정하였다(그림 4). 바이올로이드는 국내에서 개발한 교육 및 연구용 로봇 키트로서 센서, 모터, 조립용 프레임등이 모듈형 부품으로 구성되어 있기 때문에 다양한 형태의 로봇 구성이 용이하고, 모터의 개별적인 제어가 가능하다[10]. 시뮬레이션 환경은 ODE(Open Dynamics Engine) 라이브러리가 제공되는 Cyberbotics사의 Webots[9]을 사용하였다.



〈그림 4〉 시뮬레이션 모델과 실제 모델

GP 는 아래와 같은 파라미터를 사용하였다.

- Number of generations: 100
- Population sizes: 30 * 5 (Multi-pop), ring migration
- Max depth: 15
- Selection: Tournament (size=7)
- Crossover: 0.6
- Mutation: 0.1
- Reproduction: 0.3
- Function Set : { sin, cos, +, -, *, / }
- Terminal Set : { X, etc }

시뮬레이션 상에서 GP 기반 걸음새 생성기법과 CPG의 최적화를 수행하였다. 각 실험은 속도를 적합도로 사용하여 모두 10회 반복 되었으며, 또한 실험의 공정성을 위해 PSO와 GP는 서로 동일한 횟수의 평가연산을 수행하도록 했다.

〈표 1〉 GP와 CPG의 속도 비교

기법	평균속도	최고속도
GP	19.84	26.53
CPG	22.71	26.02

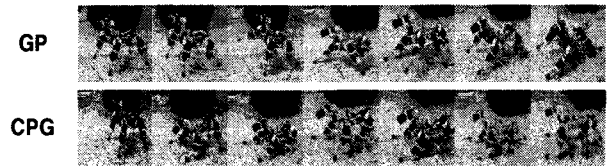
표 1은 GP와 CPG 기법의 결과를 비교한 것이다. 기반 걸음새 생성기법의 사이클 당 보간수에 변화를 주어 실험한 결과를 나타내고 있다. 여기서, 속도의 단위는 cm/s 이다. 시뮬레이션 결과, 최고속도 면에서는 GP 기반의 걸음새 생성 방식이 가장 우수한 성능을 보여 주었고, CPG는 평균적인 면에서 우수한 움직임을 보여주었다.



〈그림 5〉 GP와 CPG의 움직임 비교

그림 5는 GP와 CPG를 사용한 방법중 가장 우수한 결과를 보인 실험을 320ms 간격으로 캡처한 그림이다. 상단은 GP, 하단은 CPG를 사용한 실험이다. 최고 속도를 기록한 두 결과는 서로 거의 동일한 형태의 움직임을 보였다. CPG 결과는 앞다리를 높게 사용하여 걸어가는데 형태를 보여주었으며, GP의 결과는 상체는 높지만 앞, 뒷다리의 움직임은 최대한 낮게 사용하여

움직이는 형태를 보여주었다.



〈그림 6〉 GP와 CPG의 실제 움직임 비교(바닥)

그림 6는 연구실 바닥위에서 GP와 CPG의 실제 움직임을 비교 실험한 것이다. GP의 경우에는 실제와 시뮬레이션이 모두 큰 움직임을 보여 주었다. CPG 또한 시뮬레이션과 마찬가지로 작은 움직임들이 반복적으로 나타났다. GP의 실제 결과는 시뮬레이션과 비슷하게 앞으로 진행하는 형태로 나타났다. 이동중에 조금씩 왼쪽 방향으로 틀어지는 현상이 보였으나, 무난한 움직임을 보여 주었다. CPG의 실제 실험 결과는 짧은 주기를 반복적으로 순환하는 것 외에는 시뮬레이션과는 매우 다른 현상이 나타났다. 앞으로 조금씩 전진하기는 했지만, 오른쪽으로 심하게 회전하는 형태로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 GA 기반의 걸음새 파라미터 최적화 방식보다 우수한 성능을 보이는 GP 기반의 관절공간에서의 걸음새 생성방식과 신경활동에 의해 보행의 리듬 패턴을 생성하는 CPG 방식 두 가지를 구현하고 비교하였다.

바이올로이드로 구성된 4족 보행로봇에 대하여 Webots기반의 ODE 시뮬레이션과 실제 로봇에의 적용을 통해 제안된 기법들에 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 최고속도 면에서는 GP 기반의 걸음새 생성 방식이 가장 우수한 성능을 보여 주었고, CPG는 평균적인 면에서 우수한 움직임을 보여 주었다. 그러나 시뮬레이션 결과의 실제 로봇에의 적용에서는, GP 기법의 결과가 CPG 보다 시뮬레이션과의 차이가 적게 나고 전반적인 움직임이 우수함을 보였다.

향후 GP 탐색기법과 CPG의 결합구조 및 파라미터의 최적화가 개선되어야 하며, 시뮬레이션과 실제 실험과의 차이를 보완할수 있는 모델링 및 걸음새 생성이 필요하다.

감사의 글 : 본 논문은 2007년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음. (KRF-2007-314-D00176)

〈참 고 문 헌〉

- [1] A. L. Nelson, G. J. Barlow, L. Doitsidis, "Fitness functions in Evolutionary Robotics: A Survey and Analysis", Robotics and Autonomous Systems, 57(2009) pp 345-370
- [2] G. S. Hornby, S. Takamura, T. Yamamoto, M. Fujita, "Autonomous Evolution of Dynamic Gaits with Two Quadruped Robots", IEEE Trans. Robotics, Vol. 21, No. 3, pp.402-410, 2005
- [3] Z. D. Wang, J. Wong, T. Tam, B. Leung, M. S. Kim, J. Brooks, A. Chang, N. V. Huben, The 2002 rUNSWift Team Report, 2002
- [4] 서기성, 현수환, "관절 공간에서의 GP 기반 진화기법을 이용한 4족 보행로봇의 걸음새 자동생성", 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제 14 권, 제 6 호, pp. 573-579, 2008.
- [5] K. Seo, S. Hyun, "Genetic Programming Based Automatic Gait Generation for Quadruped Robots" Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2008, Atlanta, July 12-16, 2008, pp. 293-294.
- [6] K. Matsuoka, "Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators", Biological Cybernetics, vol. 56, issue 5, pp. 345-353, 1987.
- [7] A. J. Ijspeert, A. Crespi, J.-M. Cabelguen, "Simulation and robotics studies of salamander locomotion", Neuroinformatics, vol. 3. no. 3, pp. 171-195, 2005.
- [8] Y. Fukuoka, H. Kimura, A. H. Cohen, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts", The International Journal of Robotics Research, vol. 22, no. 3-4, pp. 187-202, 2003.
- [9] L. Hohl, R. Tellez, O. Michel, A. J. Ijspeert, "Aibo and Webots: Simulation, wireless remote control and controller transfer", Robotics and Autonomous Systems, 54(2006), pp. 472-485, 2006.
- [10] 로보티즈사, <http://www.robotis.com/>
- [11] J. R. Koza, Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992
- [12] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", In Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948, 1995.