

# 유전 알고리즘을 이용한 IWR 이족 보행 로봇의 균형추 제어 Control of Balancing Weight for IWR Biped Robot by Genetic Algorithm

°심 경 흠\*, 이 보 희\*, 김 진 걸\*

\*인하대학교 자동화공학과(Tel: 032-860-7384; Fax: 863-4386; E-mail: khsim@dragon.inha.ac.kr)

**Abstracts** In this paper we present a genetic approach for trajectory control algorithm of balancing weight for IWR biped walking robot. The biped walking robot, IWR that was made by Automatic Control Lab. of Inha University has a trunk which stabilizes its walking by generating compensation moment. Trunk is composed of a revolute and a prismatic joint which roles balancing weight. The motion of balancing weight is determined by the gait of legs and represented by two linear second order ordinary differential equations. The solution of this equation must satisfy some constraints simultaneously to have a physical meaning. Genetic algorithm search for this feasible motion of balancing weight under some constraints. Simulation results show that feasible motion of balancing weight can be obtained by genetic algorithm.

**Keywords** genetic algorithm, balancing weight, IWR

## 1. 서론

이족 보행 로봇이 안전한 보행을 하기 위해서는 안정도를 적절히 제어할 수 있어야 한다. 안정도를 제어하는 방법에는 크게 걸음새에 의한 방법과 걸음새와 무관한 독립 관절에 의한 방법이 있다. 이중 후자는 보행시 발생하는 모멘트를 균형추에 의해 보상하여, 균형점(ZMP: Zero Moment Point)을 지지면안에 유지시키는 방식으로 안정도를 확보한다. 본 논문의 대상은 본 연구실에서 개발한 이족 보행 로봇 IWR 로써, 회전 관절과 직진관절로 이루어진 몸통으로 균형점을 제어한다.

몸통의 운동은 지지각과 유각의 운동 특성과 직진 관절로 이루어진 균형추의 초기 위치 및 최종 위치에 의해서 결정되므로 걸음새가 정해지면 균형추의 위치만으로 궤적을 제어하여야 한다. 또한 균형추의 운동이 구현 가능하기 위해서는 부수적인 제한 조건도 함께 만족하여야 한다.

본 논문에서는 유전 알고리즘을 균형추의 궤적 제어에 적용하며, 모의 실험을 통해서 여러 개의 제한 조건을 동시에 만족하는 최적의 균형추 운동을 얻는다.

## 2. 이족 보행 로봇 시스템

걸음새와 무관하게 안정도를 유지하기 위해서는 보행시 발생하는 모멘트를 보상할 수 있는 독립 관절을 가져야 한다. 이러한 균형 관절에는 롤, 피치, 요의 회전 관절이나 회전과 직진 관절이 혼합된 형태가 일반적이나, 전자의 경우 균형추의 높이가 일정하지 않아 운동방정식의 해를 FFT와 같은 수치 해법으로 반복적으로 계산하여 구할 수 밖에 없다<sup>[1][2]</sup>. 이에 반해 IWR 이족보행 로봇의 균형 관절은 회전 관절과 직진 관절로 이루어져 있어 균형추의 높이 방향 가속도 성분을 가지지 않으므로 해의 반복 계산이 필요없는 장점이 있다.

### 5.1 IWR 모델링

IWR 을 모델링하기 위해 다음과 같이 가정한다.

- (1) 각 링크의 하중은 링크의 무게중심에 집중되어 있는 것으로 가정한다. 단,  $M_{10}$ 은 관성 모멘트를 고려하기 위하여 두개의 질량으로 가정한다.

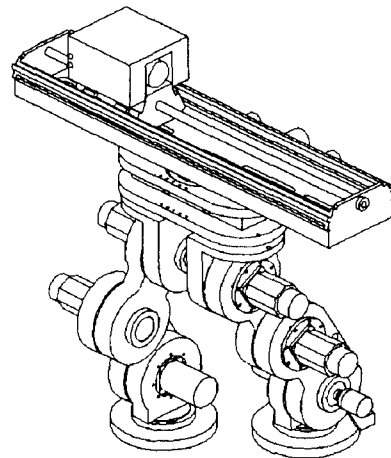


그림 1 이족 보행 로봇 IWR  
Fig. 1 IWR Biped Robot

- (2) 지지평면은 외력이나 외부 모멘트에 의해 변형되지 않는다. 따라서 지지면은 지면과 항상 평행하게 움직인다.
- (3) 지지평면과 지지면 사이의 미끄러짐은 일어나지 않는다. 그러므로 다리의 움직임으로 인한 몸체의 회전을 고려하지 않는다.

그림 3은 IWR의 질량모델을 나타낸 것으로서, 가정(1)의 결과를 보여주고 있으며 균형추  $M_0$ 를 비롯하여 12개의 질량중심이 설정되어 있다.

링크의 하중은 위의 가정과 같이 각각의 무게중심에 집중되어 있으므로 그림 2와 같이 임의의 점 P에서의 운동은 D'Alambert 원리에 의하여 식(1)과 같이 표현된다<sup>[2]</sup>.

$$\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{\vec{r}}_i - \ddot{\vec{P}}) \times (\ddot{\vec{r}}_i + \ddot{\vec{G}}) + \ddot{\vec{M}}_T = 0 \quad (1)$$

여기서  $\ddot{\vec{G}}$ 와  $\ddot{\vec{M}}_T$ 는 각각 중력가속도와 점 P에 작용하는 전체모멘트를 나타낸다. P점을 균형점,  $P_{zmp}(x_{zmp}, y_{zmp}, z_{zmp})$ 로 정의하고, 각 링크의 상대적인 운동만을 고려하기 위해서 그림 3과 같이 균형관절 중심의 좌표계를 설정하면, 식(1)은 식(2), (3)과 같이 정리된다.

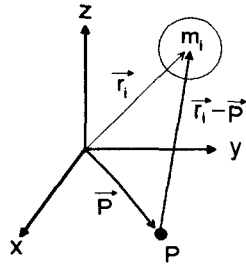


그림 2 기준좌표계에 대한 벡터량 표시

Fig. 2 Vector representation

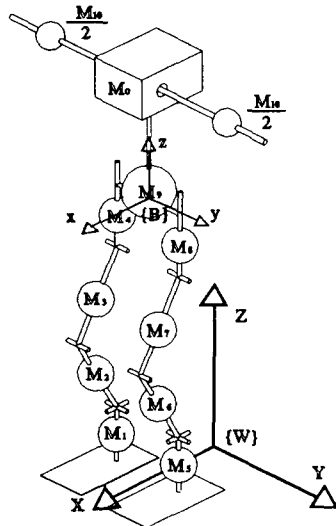


그림 3 IWR 질량모델

Fig. 3 Mass model of IWR

$$\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{z}_b + \ddot{z}_i + g_z)(x_{zmp} - x_i) + \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{x}_b + \ddot{x}_i + g_y)(z_b + z_i) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{z}_b + \ddot{z}_i + g_z)(y_{zmp} - y_i) + \sum_{i=0}^{10} m_i (\ddot{y}_b + \ddot{y}_i + g_y)(z_b + z_i) = 0 \quad (3)$$

위의 식(2)와 (3)은 시간의 함수인 항들이 서로 커플링되어 있는 비선형 미분방정식이다. 균형관절과 균형추가 지지평면과 평행한 궤적을 따라 운동하므로 균형추의 Z 방향 속도 및 가속도는 0임을 알 수 있다. 따라서 식(2)와 (3)을 결정된 항과 미지의 항,  $\alpha$  와  $\beta$  로 정리하면 각각 식(4), 식(5)와 같다.

$$\ddot{x}_0(t) - \frac{g_z}{z_0 + z_q} x_0(t) = \alpha \quad (4)$$

$$\ddot{y}_0(t) - \frac{g_z}{z_0 + z_q} y_0(t) = \beta \quad (5)$$

여기서  $\alpha$  와  $\beta$  는 균형추를 제외한 지지각과 유각의 운동특성으로 걸음새에 따라 결정된 값이다.

식(4)와 (5)는 디커플링된 선형 미분방정식으로 그 해는 각각 균형추의 x, y 방향 궤적을 의미한다. 위의 두 식은 2점 경계치 문제로서, 그 해는 사격법(shooting method), WR 법(weighted residual method), 유한차분법(finite difference method) 등과 같은 수치해법으로 구할 수 있다<sup>[9][11]</sup>. 본 논문에서는 균형추의 초기 위치와 최종 위치를 두 경계치로 하여 유한차분법을 이용하여 해를 구한다. 균형추의 초기 위치와 최종 위치는 각각 균형추 운동의 시작점과 끝점의 x-y 좌표를 의미한다. 초기의 모의실험에서는 지지각 전환에 따른 균형추의 운동을 연속화하기 위해서, 경계치

를 균형관절 기준좌표계 {B}의 원점으로 설정하였다. 그러나, 이 경우 보행의 시작과 끝에서 균형추의 급가속이나 급감속을 필요로 하여 구현이 불가능한 운동특성을 나타내었다.

균형추의 초기 위치와 최종 위치가 적절하게 선택되지 못하면, 몸통 운동에 과도한 가속이나 감속이 필요하여 시스템의 안정성에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있고, 경우에 따라서는 구현할 수 없는 운동특성을 얻을 수도 있다. 따라서 실제 보행을 실현하기 위해서는 적절한 경계치의 설정이 필요하며 이는 보행의 시작점과 끝점에서 균형추의 가속과 감속이 구현 가능함을 의미한다.

### 3. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연의 진화 모델인 자연선택과 적자생존의 원리를 바탕으로 하는 탐색 알고리즘으로<sup>[5]</sup>, Traveling Salesman Problem(TSP)이나 Bin Packing Problem(BPP)등의 최적화 문제에 성공적으로 적용된 바 있다. 최근에는 여유 자유도를 갖는 메니플레이터의 궤적 계획<sup>[7]</sup>이나 이동 로봇의 장애물 회피<sup>[8]</sup>등 로봇 분야에도 활발하게 적용되고 있다. 특히 로봇 분야는 그 형태적 특성상 비선형성이 강하며, 입력 파라미터와 출력 특성간의 관계가 명확하게 정의되지 않는 경우가 많으므로 유전 알고리즘이 적용될 유망한 분야라고 할 수 있다.

본 논문에서는 현재 개발중인 IWR의 균형추 궤적 제어에 유전 알고리즘을 적용하여 보고자 한다. 궤적 제어를 포함한 전체 보행 알고리즘은 그림 4와 같다.

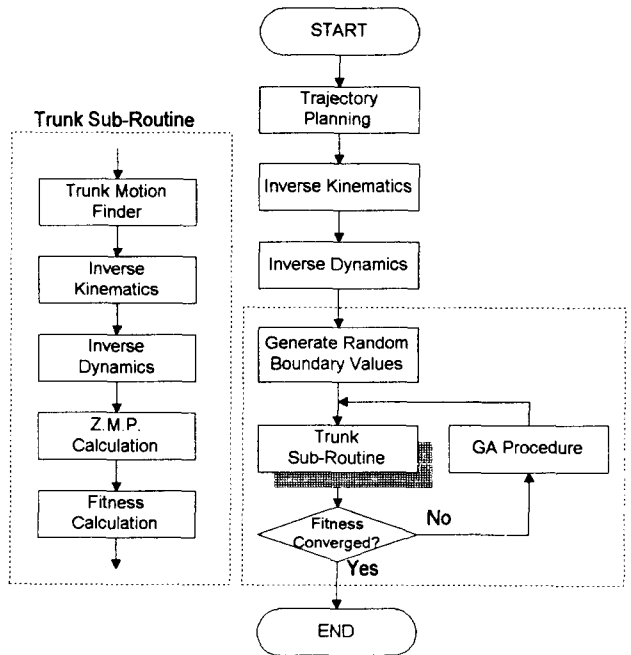


그림 4 유전 알고리즘이 적용된 보행 알고리즘

Fig. 4 Walking algorithm with genetic algorithm

#### 3.1 문자열 정의

전술한 바와 같이 균형추의 초기 위치와 최종 위치가 균형추의 운동 특성을 결정하는데 많은 영향을 미치므로 이 매개변수들로 문자열을 구성한다.

균형추의 위치는 균형 관절 변위,  $\theta_1$  과 균형추 변위,  $d_2$  로 결정되며,  $\theta_1$  은  $0^\circ$  에서  $180^\circ$  까지,  $d_2$  는 0m에서 0.4m까지의 범위로 각각 7자리와 6 자리 이진수로 나타내었다.

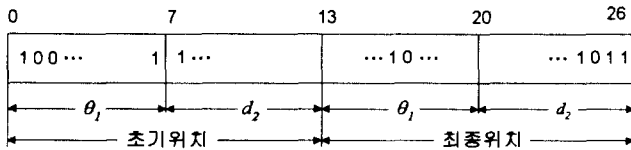


그림 4 문자열의 구성  
Fig. 4 Coding of string

이진수,  $b$ 를 관절 변위로 바꾸기 위해 다음과 같은 식을 적용한다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 181(b_1 + 1)/128 \\ d_2 &= 0.4(b_2 + 1)/64 \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.2 적합도

균형추의 운동을 결정하는 미분방정식의 경계치 설정에 유전 알고리즘을 사용하였으며 그 적합도 함수  $f$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$f = \frac{w_1}{f_a} + \frac{w_2}{w_2 + f_{p1}} + \frac{w_3}{w_3 + f_{p2}} \quad (7)$$

$w_1, w_2, w_3$ 는 가중치이며  $f_a, f_{p1}, f_{p2}$ 는 각각 다음과 같다.

$$f_a = a_{T1_0} + a_{T1_{final}} + a_{T2_0} + a_{T2_{final}} \quad (8)$$

$$f_{p1}(a_i) = \sum_{i=0}^{final} |a_{n_i}| \quad (9)$$

$$f_{p2}(d_{2_i}) = \sum_{i=0}^{final} |d_{2_i}| \quad (10)$$

$f_a$ 는 균형 관절의 초기 가속도와 최종 가속도의 합으로써, 보행 시작과 끝에서 받는 충격량에 비례하므로 이를 최소화시켜야 한다.  $f_{p1}$ 과  $f_{p2}$ 는 페널티 함수(penalty function)로써, 각각 가속도 제한 조건과 균형추의 변위 제한 조건을 고려한 것이다. 비록 제한 조건을 만족하지 않는 경우에도 일정 이상의 적합도를 갖도록 고려함으로써, 특정 문자열이 과도하게 선택되는 것을 피할 수 있다. 본 논문에서는 각 가중치를 적절히 조정함으로써, 최대 적합도와 최소 적합도의 차이가 3배 이상 되지 않도록 하였다.

### 3.3 선택과 교배

부모의 선택은 잘 알려진 룰렛 선택(roulette selection)을 사용하였다. 이 방법에서는 적합도에 따라 부모로 선택될 확률이 결정된다. 이 방법의 문제점은 적합도에 따라 조기 수렴(premature convergence)의 가능성이 발생한다는 것이다. 전술한 바와 같이 적합도의 차이를 조정하여 이러한 가능성을 감소시켰다.

선택된 문자열은 균등 교배(uniform crossover)를 거치게 되며, 교배율은 0에서 1의 값을 가질 수 있다. 즉, 적합도에 따라 선택된 문자열을 다시 교배율에 따라 임의로 선택하여 교배한다. 이 방법에 의하면 높은 적합도를 갖는 문자열이라 할지라도 실제로는 선택되지 않을 수 있다. 이와 같은 단점은 전 세대에서 적합도가 가장 큰 문자열을 다음 세대로 복사하는 엘리트 규칙(elitism)을 병행함으로써 극복할 수 있다.

교배가 끝난 문자열은 돌연변이(mutation)를 거쳐 기존의 세대를 교체하게 된다. 본 논문에서는 문자열을 이진수로 나타내었으므로 돌연변이는 발생 확률에 따라 임의 위치의 이진수를 바꾸도록 하였다.

교체는 전 세대 중 적합도가 가장 낮은 순서대로 교체하였다.

이상의 과정을 정리하면 그림 5와 같다.

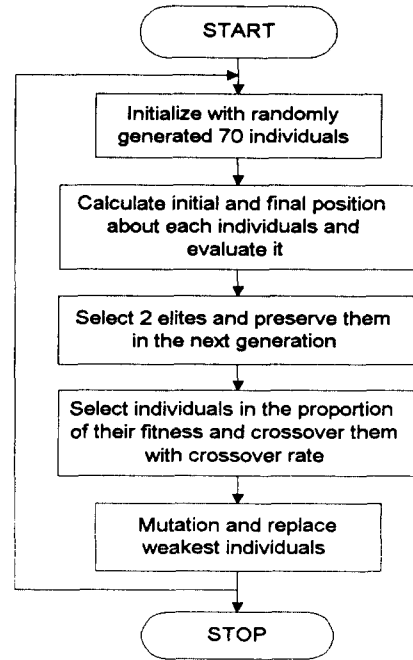


그림 5 유전 알고리즘 플로차트  
Fig. 5 Flow chart of GA

## 4. 모의 실험 및 결과

제적 제어 알고리즘에 적용된 유전 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 다음과 같이 모의 실험을 수행 하였다. 룰렛 선택과 임의의 선택, 균등 교배와 임의의 교배의 각 조합에 대하여 교배율과 집단 수를 조정하였다. 교배율은 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 그리고 집단의 수는 30, 70, 100으로 하여 총 48가지 조합에 대하여 실험하였다. 모의 실험 결과 적합도 함수가 적절하게 결정된 경우에는 룰렛 선택과 균등 교배 방법을 쓰더라도 조기 국부 수렴은 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 다음의 결과는 위의 선택 방법과 교배 방법에 대해서 집단의 수와 교배율을 변화시켜 얻은 것으로, 그림 6에서 알 수 있듯이 집단의 수가 어느 한계 이하가 되면 조기 국부 수렴하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그림 7은 교배율에 따른 적합도 그래프로써, 교배율이 낮으면 수렴속도가 늦어지나 국부 수렴은 나타나지 않고 있다. 이상의 실험 결과로부터 집단 수 100, 교배율 0.8인 경우 비교적 적은 반복 횟수로 수렴값을 얻을 수 있었다. 그림 8에 그 결과를 보였다. 그림 8의 결과로부터, 최대 적합도를 갖는 문자열로 얻은 균형추의 운동 특성이 그림 9와 10에 나타나 있으며, 각각 초기 집단과 25세대에서의 모의 실험 결과이다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

균형추의 제적 제어 알고리즘에 유전 알고리즘을 적용하여 제한 조건을 만족하는 균형추의 제적을 얻을 수 있었으며 기존에 경험적으로 알고 있던 최적값보다도 더 나은 결과를 나타냈다. 모의 실험은 한 가지의 걸음새에 대해서만 행한 것으로 앞으로 개발되는 다양한 걸음새에 대해서 균형추의 운동을 최적화시킬 수 있을 것이다. 그러나 전체적인 모의 실험의 성능을 평가하는데 연산시간 역시 고려대상이 되어야 할 것이며, 보다 빠른 수렴 속도를 갖도록 연구가 이루어져야 할 것이다.

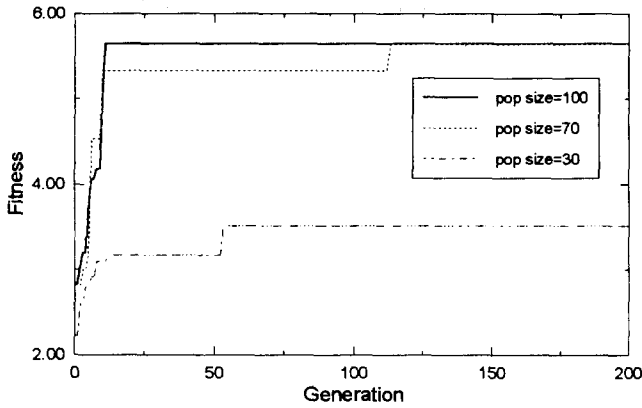


그림 6 개체수에 따른 적합도 추이  
Fig. 6 Fitness trends of population size

(roulette selection, uniform crossover, crossover rate = 0.8)

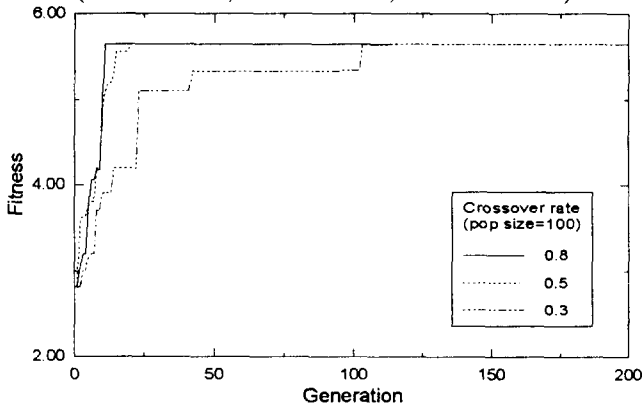


그림 7 교배율에 따른 적합도 추이  
Fig. 7 Fitness trends of crossover rate

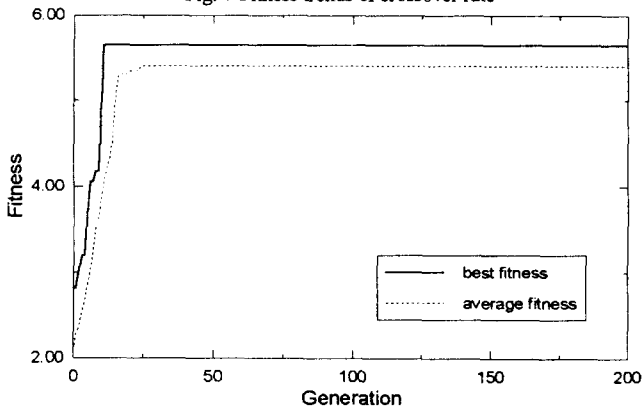


그림 8 개체수 100, 교배율 0.8에서의 적합도  
Fig. 8 Fitness with 100 population and 0.8 crossover rate

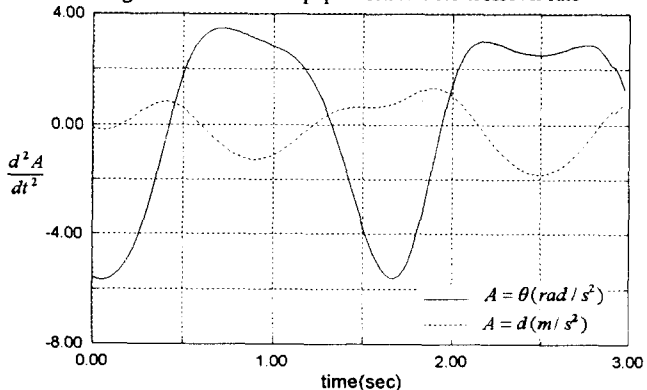


그림 9 0세대에서의 몸통 가속도  
Fig. 9 Acceleration of trunk at initial population

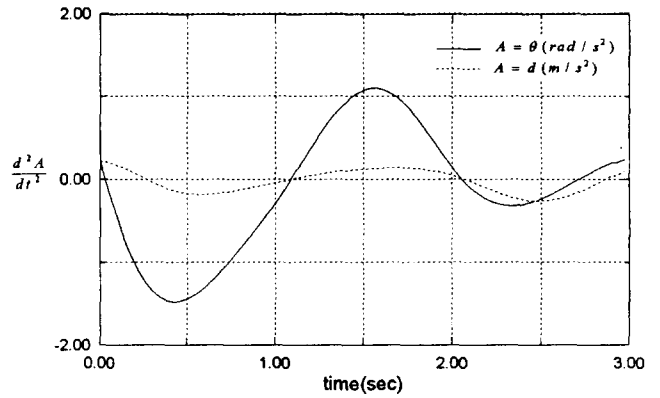


그림 10 25세대에서의 몸통 가속도  
Fig. 10 Acceleration of trunk at 25 generations

## 참고문헌

- [1] J.Yamaguchi, A.Takanishi, I.Kato, "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment by Trunk Motion", *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.1, pp.561-566, 1993.
- [2] A. Takanishi, J. Yamaguchi, M. Iwata, "Dynamic Quadruped Walking Stabilized with Trunk Motion", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol.3, pp.165-172, 1995.
- [3] S.H. Lim, J.G. Kim, "Adaptive Gait Algorithm for IWR Biped Robot", *Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 438-442, 1995.
- [4] B.Soucek, Y.Davidor, *Dynamic, Genetic, and Chaotic Programming*, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [5] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- [6] H. Zhuang, J. Wu, W. Hung, "Optimal Planning of Robot Calibration Experiments by Genetic Algorithms", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.2, pp.981-986, 1996.
- [7] K.Shimajima, N. Kubota, T.Fukuda, "Trajectory Planning of Reconfigurable Redundant Manipulator Using Virus-Evolutionary Genetic Algorithm", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, vol.2, pp.836-841, 1996.
- [8] C.H. Chung, K.S.Lee, "Path Coordinator by the Modified Genetic Algorithm", '91 *Korean Automatic Control Conference*, vol.2, pp.1939-1943, 1991.
- [9] B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.H. Press, W.T. Vetterling, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, New York, 1992.
- [10] 김진걸, 임선호, "이족보행로봇 IWR을 위한 균형점 제어 알고리즘", *전기학회논문집*, pp. 1365-1371, 1995.
- [11] 김창효, *수치해법과 전산프로그래밍*, 교학사, 1988.