

PSO를 이용한 테오안센 기반의 보행로봇 다리설계

Design of Leg Length for a Legged Walking Robot Based on Theo Jansen Using PSO

김선욱* · 김동헌***

Sun-Wook Kim* and Dong Hun Kim***

* 경남대학교대학원 첨단공학과

** 경남대학교 전기공학과

요 약

본 논문에서는 절 기구(bar linkage)형 다관절 보행로봇(multi-legged walking robot)의 최적다리 길이선정을 위하여 입자 군집 최적화(PSO: Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하였다. PSO 알고리즘을 적용하기 위해서 제안한 보행로봇의 기구학적인 해석이 필요하다. 게 로봇은 4절 링크 이론(four-bar linkage)과 안센 메커니즘(Jansen mechanism)을 기반으로 설계되었다. 이러한 기구학적인 해석을 바탕으로 로봇의 보행보폭을 정의한다. 그리고 PSO의 학습 및 군집 특성을 이용하여 최대의 보행보폭을 가지는 10개(EA)의 링크(link)길이를 구한다. 시뮬레이션을 통해 각 링크의 위치와 다리 끝단의 보행보폭을 확인할 수 있다. 결과로서, PSO기법이 절 기구형 다관절 보행로봇의 최적다리 길이 선정에 효율적임을 보여 준다.

키워드 : 입자 군집 최적화, 보행로봇, 4절 링크 이론, 안센 메커니즘

Abstract

In this paper, we proposed a Particle Swarm Optimization(PSO) to search the optimal link lengths for legged walking robot. In order to apply the PSO algorithm for the proposed, its walking robot kinematic analysis is needed. A crab robot based on four-bar linkage mechanism and Jansen mechanism is implemented in H/W. For the performance index of PSO, the stride length of the legged walking robot is defined, based on the propose kinematic analysis. Comparative simulation results present to illustrate the viability and effectiveness of the proposed method.

Key Words : PSO, Legged walking robot, For-bar linkage, Jansen mechanism

1. 서 론

기존의 보행로봇 연구는 2족 보행로봇(biped-robot)과 다족, 다관절 보행로봇 위주로 연구 되었다. 또한, 그 영역 범위를 확대 하여 보행로봇의 안정성[1], 걸음새 연구[2], 보행로봇의 경로계획[3] 등 많은 연구가 있어 왔다. 환경과 실험 조건에 따라 보행로봇의 보폭개선이 요구된다. 불균형 지형(irregular terrain)에서 좀더 효율적인 걸음을 위해서, 제안된 다관절 보행로봇의 보폭개선에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 기존의 제안된 절 기구(bar linkage)형 다관절 보행로봇의 다리 길이를 PSO 알고리즘을 사용하여 최적화한다. 그리고 시뮬레이션 결과로 최적화된 다리 길이의 보행보폭이, 기존의 제안된 로봇보다 개선되었

다는 것을 보여 줄 것이다. 제안된 보행로봇은 해안가의 모래 환경과 습지를 걸을 수 있는 생물체를 모방한 게(crab)로봇[4]이다. 게 로봇은 4절 링크 기구(four-bar linkage)[5]이론과 안센 메커니즘(Jansen mechanism)[6]을 기반으로 한다.

기존의 안센 메커니즘을 기반으로 한 연구에서는 로봇이 아닌 기계(machine)적인 다리 장치를 설계하였다. [7]의 연구는 시행착오(trial and error)와 비용함수(cost function) 방법을 이용하여 다리 길이를 최적화 하였다. 다리 길이를 시행착오로 선정하는 것은 기구학적으로 좋은 접근 방법이 아니다. 그리고 제시한 비용함수는 다리 길이 선정에서 에너지 효율만 고려되었다. 그 결과, 최소의 에너지 효율로 다리 길이가 결정되었고, 보행보폭이 시행착오 결과보다 작아 졌다는 것을 보여준다. [8]은 기계장치의 다리에 유전자 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)을 적용하여 구조를 최적화 하였다. 다리 구조는 금속 막대(bar)로 이루어졌다. 여기서, 막대는 링크(link)이다. 실험에서는 회전 링크를 제외 한 나머지의 링크 길이를 진화 알고리즘을 사용하여 최적화 하였다. 두 가지 유형의 논문은 서로 다른 설계 내용이며 설계 또한 매우 다르다. 하지만, 모두 안센 메커니즘의 구조

접수일자 : 2011년 6월 3일

완료일자 : 2011년 9월 20일

+ 교신 저자

감사의 글 : 이 연구결과물은 2011학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것이다.

에 기반을 둔다.

본 연구는 안센 메커니즘의 기반으로 만들어진 절기구형 다관절 보행로봇인 게 로봇의 보행보폭을 개선하고자 한다. 게 로봇의 최적 다리길이를 선정하기 위해 효율성과 간결함을 가진 PSO 알고리즘을 적용하였다. 본 논문의 구성 내용은 다음과 같다. 2장에서는 게 로봇에 대한 기구학적인 배경과 게 로봇의 움직임에 대해 설명한다. 3장에서는 PSO 알고리즘을 적용하기 위해 설계 내용을 다룬다. 4장은 시뮬레이션 및 결과 분석으로 PSO기법을 이용한 최적에 다리 길이 선정으로 로봇의 보행보폭이 개선되었다는 것을 보여준다. 마지막으로 결론에 대해서 기술한다.

2. 로봇모델

2.1 다리 구조와 움직임

게(crab) 로봇의 다리 구성은 다음과 같다. 게 로봇은 베벨기어(bevel gear)가 장착된 양축 DC모터(dual-axis DC motor)를 사용한다. 좌·우 다리는 하나의 모터로 회전한다. 양축 DC모터는 좌·우 회전축에 180° 위상 차이가 있는 다리들의 결합 구조로 되어있다. 한 개의 다리는 링크(link)들로 이루어지며 하나의 연결 장치(linkage) 형태를 갖추고 있다. 두 개의 다리가 1조(set)를 이룬다. 따라서, 양축 DC모터 두 개를 사용하면 4조로 이루어진 다리를 움직일 수 있다. 구조적으로는 모터의 양축 중에 한 축의 다리 끝단(foot-point)이 지면에 닿아 있고, 다른 한 축의 다리는 지면에 떠 있다. 나머지 1조의 다리 구조도 이와 같다. 두 번째 모터에 부착된 다리 구조들도 그림 1과 같이, 한 축은 지면에 접촉해 있고 한 축은 지면으로부터 떠 있다. 이러한 링크들의 구조로써 다리가 연결되어 4조를 갖는다.

일반적인 2축 로봇의 보행 경우 좌·우로 흔들린 부자연스러운 몸체의 움직임을 보여준다. 이와 다르게, 게 로봇의 다리는 테오안센 메커니즘(Theo Jansen mechanism)의 다리 구조를 모방하였고, 자연스러운 보행으로 몸체의 균형 상태를 유지한다. 또한, 작은 회전 반경으로 제자리에서 좌·우 축 회전이 용이하다.

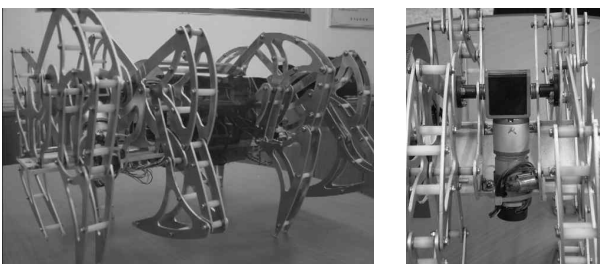


그림 1. 게 로봇: 절기구형

Fig. 1. The crab robot: bar linkage type

2.2 기구학 분석

게 로봇 다리의 기구학적인 분석을 하기 위해 그림 2를 기준으로 수식과 함께 설명한다.

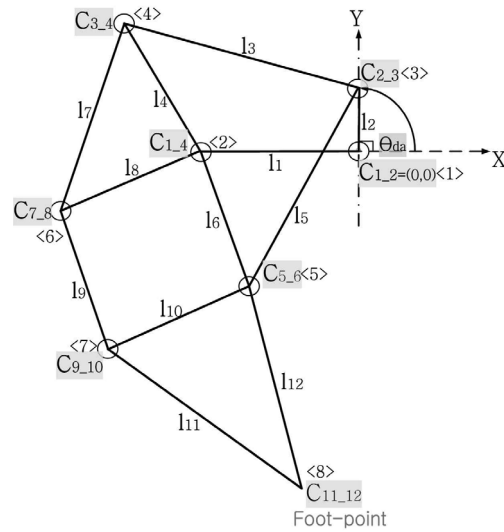


그림 2. 게 로봇 다리구조

Fig. 2. Twelve-bar linkage structure of a crab robot

그림 2는 직교 좌표 면에서 주어진 링크 l_2 끝단의 $C_{2,3}$ 절점(node)이 θ_{da} (driving angle)값 만큼 좌측으로 이동하여 멈춰진 상태이다. 그림에서 $C_{2,3}$ 절점이 Y축과 동축(same axle) 일 때 θ_{da} 값은 90°이다. 여기서, 구동각 θ_{da} 값은 모터의 회전각이다. 게 로봇의 다리구조에서 각 마디 점에 해당하는 관절(joint)을 절점(node)이라 한다. <1>~<8>은 절점 번호이다. 여기서, 구해야 할 절점은 기본 두 절점 <2>, <3>과 다리끝단을 찾을 때 중요시 되는 다섯 개의 절점 <4>~<8>이다. 최종적으로 구해야 할 것은 로봇의 다리 끝단(foot-point)이다. 로봇의 다리끝단 절점 <8>은 $C_{11,12}$ 라 한다. 연결된 절점(node)은 두 원의 점선방정식을 이용하여 구할 수 있다. 로봇 다리 끝단(foot-point) 위치를 알아내기 위해서 5개 X, Y 절점 좌표와 각 절점 θ_j 값을 구한다. 여기서 θ_j 의 j 값은 식 (1)에서 j 값이다. 그림 2에서 찾아야 할 절점 각들은 $\theta_{3,4}$, $\theta_{5,6}$, $\theta_{7,8}$, $\theta_{9,10}$, $\theta_{11,12}$ 이다. 위의 해석 순서에 따라 번호를 부여 하여 표기한다. 두 원간의 교점에 따른 로봇 관절 θ_j 값과 위치를 구하기 위해서 다음 식 (1)을 사용한다.

$$\theta_j = \text{Atan2}(C_{2y} - C_{1y}, C_{2x} - C_{1x}) \quad (1)$$

$$j = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$$

식 (1)에서 C_{1x} , C_{1y} , C_{2x} , C_{2y} 는 표1의 2번째, 3번째 열(column)에 해당한다. 그림 3(a)에서 θ_j 를 보여준다. 표 1은 연결된 로봇 다리의 각 절점들을 두 원의 교점

으로부터 구하기 위해, C_1 (the first circle)첫 번째 원과 C_2 (the second circle)두 번째 원 중심점(x, y)의 원점으로부터 반지름을 표로 나타냈다.

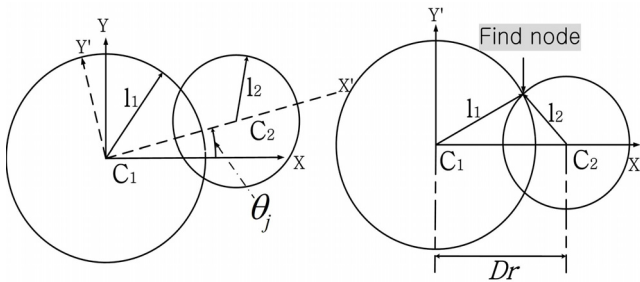
표 1. 두 원의 중심점과 반지름

Table 1. Pivot point of two circles and radius

| Find no- des | C_1 (C_{1x}, C_{1y}) | C_2 (C_{2x}, C_{2y}) | l_1 radius of circle | l_2 radius of circle |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ① C _{3,4} | C _{1,4} | C _{2,3} | l_4 | l_3 |
| ② C _{7,8} | C _{1,4} | C _{3,4} | l_8 | l_7 |
| ③ C _{5,6} | C _{1,4} | C _{2,3} | l_6 | l_5 |
| ④ C _{9,10} | C _{7,8} | C _{5,6} | l_9 | l_{10} |
| ⑤ C _{11,12} | C _{5,6} | C _{9,10} | l_{12} | l_{11} |

표 1에 원의 반지름이 그림 2에서 막대(bar)의 길이 (l_1, \dots, l_{12})이며, 게 로봇에 다리의 연결 구조를 이루고 있는 링크들이다. 그림 3(b)는 두 원의 중심점간 거리는 Dr 이며, 거리를 구하기 위해서 두 원의 접선의 방정식을 이용한 것이 식 (2)이다. 여기서 r 값은 그림 3(b)에서 두 원의 중심점간 거리($D_{1,2}$)를 의미하며, 연고자 하는 변수 j 값은 앞에서 정의한 절점들이다. 식 (2)에서 $C_{1x}, C_{1y}, C_{2x}, C_{2y}$ 는 표 1의 2번째, 3번째 열(column)에 해당한다.

$$Dr = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2}, r = 1, 2, j \quad (2)$$



(a) 기준 X좌표와 θ_j 값에 따른 X' (b) 두 원의 반지름과 찾을 절점

그림 3. 두 원에 따른 C, X-Y 좌표계

Fig. 3. C, X-Y coordinate system of two circles

식 (1)과 (2)는 로봇 다리의 절점을 구하기 위한, 두 개의 변수를 계산하는 식이다. 여기서, Pjx 와 Pjy 는 $Pj(Pjx, Pjy)$ 의 X-Y축 좌표이다. j 는 앞서 정의 하였다. 식 (3)에서 l_1, l_2 는 표 1의 4번째, 5번째 열(column)에 해당한다. 식 (3)은 두 원에서 절점을 찾기 위한 삼각함수 공식이다. 수평한 두 원에서 Pjy 는 \pm 해(solution)가 2개이다.

$$Pjx = \frac{Dr^2 + l_1^2 - l_2^2}{2Dr}, \quad Pjy = \pm \sqrt{l_1^2 - (Pjx)^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 그림 3에 (b)의 수평한 두 원에서 절점의 좌표를 찾았다. 이에 그림 3의 (a)에서 변화된 θ_j 값에 따른 현재 위치의 각 절점 좌표 값(Xt, Yt)을 구하기 위해서, 식 (4)에서는 지금까지 구한 변수들을 이용하여 Ct (find node)에 대한 좌표(Xt, Yt)를 구한다. t 는 1_2, 1_4, 2_3, j 에 대한 좌표점이다.

$$(4) Xt = \cos\theta \times Pjx - \sin\theta \times Pjy + C_{1x}$$

$$Yt = \sin\theta \times Pjx + \cos\theta \times Pjy + C_{1y}$$

$$t = 1_2, 1_4, 2_3, j.$$

기구학적인 분석에 대한 자세한 내용은 저자가 제안한 [9]에서 확인 할 수 있다.

3. PSO를 이용한 설계

게 로봇의 보행보폭을 개선하기 위해서는 다음과 같은 설계 방법이 적용되었다. 게 로봇의 각 다리 길이는 링크들로 이루어진 절 기구(bar linkage) 형태이다. 기존의 게 로봇은 보행보폭이 최적화 되어 있지 않다. 걸음걸이에 대한 효율성을 위해 기존의 로봇 구조를 바탕으로 다리 길이에 영향을 미치는 각 링크 길이를 변형 하여 보폭을 크게 하려고 한다. 일반적으로 절 기구형의 기계 장치와 로봇들은 시행착오나, 로봇 팔의 길이를 직접 계산하여 작업 영역에 대한 로봇의 크기를 결정한다. 여기서, 작업 영역은 로봇 팔의 끝단인 엔드 이펙터(end-effector)의 위치 및 자세 정보로 결정된다. 게 로봇의 작업영역은 보행보폭이며, 보행보폭은 다리 끝단(foot-point)의 위치로 결정된다. 시행착오적 방법은 시간적으로 비효율 적이며, 정확성이 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 로봇의 몸체에 해당하는 링크(l_1)를 제외하고 로봇의 다리에 영향을 주는 10개의 링크 길이에 PSO 알고리즘의 최적화 방법을 적용하여 개선된 최대의 보폭을 얻었다. PSO의 운동 방정식은 기존의 방법을 사용하였고, d 차원 벡터는 설계에서 요구하는 로봇의 다리인 링크 10개의 길이이며 프로그램에서 정의하였다. 그리고 게 로봇에 대한 각 링크의 위치 및 자세 정보가 필요하므로, 기구학 수식을 이용하여 PSO 프로그램에서 계산을 수행 할 수 있게 하였다. 또한 적합도 함수를 설계하여 최대 보폭으로 게 로봇이 걸을 수 있도록 하였으며, 기구학적인 수식이 프로그램 수행에서 수학적으로 제한된 문제들을 발생하는 것에 대한 제한 요소들을 설계하여 문제를 해결하였다. 3장에서는 PSO 기법을 이용하여 제안한 게 로봇의 다리 설계에 요구되는 보폭에 대한 정의, PSO, 적합도 함수, 제한 요소에 대한 내용을 다룬다.

3.1 지표면과 보행보폭의 정의

제안한 게 로봇의 링크 길이를 PSO 알고리즘으로 최적화 하기위하여 로봇이 걷는 지표면(surface)과 실제 보폭(stride length)에 대한 정의가 필요하다. 그림 4의 X, Y 직교 좌표계를 기준으로 다음과 같이 정의한다. 시뮬레이션에서 회전 링크 l_2 가 1회전 하였을 때, 그림 4와 같은 보행궤적(trajjectory)이 그려진다. 따라서, 보행궤적에서 지표면 S_f (Surface for Foot-point)는 회전 링크 l_2 의 C_{2,3}절점이 Y축과 동축이며 (-)방향을 가질 때, 다리가 지표면과 접촉하여 실제 게 로봇이 서 있는 것과 같다. 이 지점을 평행하게 선으로 그었을 때, 이어지는 수평선이 지표면이 된다. 지표면 S_f 의 기준으로 위의 궤적은 다리가 지면에서 떠 있는 상태이며, 아래의 궤적은 다리가 지면에 접촉하여 정지된 상태이다. 여기서, S_f 은 그림 5와 같이 보행보폭(Stride Length)을 의미한다. 모터에 의한 회전 링크 l_2 가 1회전 하였을 때, 시뮬레이션에서는 X, Y데이터(data) 값으로 보행

케적을 그림 5와 같이 그래프로 나타낸다. X데이터 값은 수평거리(horizontal distance)이다. Y데이터 값은 수직거리(vertical distance)이며, 다리를 들어 올릴 수 있는 높이를 말한다.

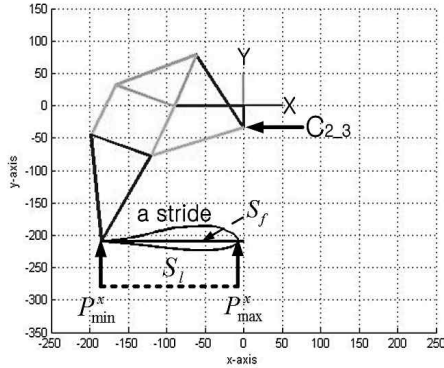


그림 4. 지표면과 보행보폭
Fig. 4. Surface and stride length

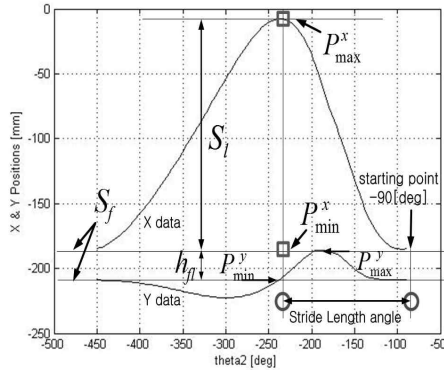


그림 5. 보행 궤적 X, Y
Fig. 5. Walking trajectory X, Y

보행보폭 S_l 과 보행높이 h_{fl} (foot lift)를 식(5)로 정의한다.

$$\begin{aligned} S_l &= (P_{max}^x - P_{min}^x) \\ h_{fl} &= (P_{max}^y - P_{min}^y) \end{aligned} \quad (5)$$

두 사각형은 보행거리에 대한 보행보폭 X 데이터 값의 최대 P_{max}^x 와 최소 P_{min}^x 지점을 뺀 것으로 보행보폭 S_l 이 된다. 두 원의 표시는 로봇이 움직일 때, 보행한 거리에 대한 회전링크 l_2 의 회전각이다. Y 데이터 값은 보행높이 h_{fl} 이다. 보행높이 h_{fl} 는 보행한 거리에 대한 보행높이 Y 데이터 값의 최대 P_{max}^y 지점과 최소 P_{min}^y 지점을 뺀 값이다.

3.2 PSO

PSO는 1995년 Eberhart와 Kennedy에 의해 제안되었다. PSO는 일반적인 인공생명(artificial life), 개체의 군집이론을 근본으로 하여 개체의 현재 위치와 다른 동반 개체들의 현재 위치를 이용하여 자신의 위치를 결정하는 자연계 생물의 사회적 행동양식에 기반 해서 제안된 알고리즘이다. 설계에 사용된 PSO입자(particle)의 운동방정식은 (6),(7)과 같다.

$$v_{id}(n+1) = \omega v_{id}(n) + c_1 rand() (p_{id}(n) - x_{id}(n)) + c_2 rand() (p_{gd}(n) - x_{id}(n)) \quad (6)$$

$$x_{id}(n+1) = x_{id}(n) + v_{id}(n+1) \quad (7)$$

여기서, $v_{id}(n+1)$ 는 수정된 입자 i 의 속도벡터이며, $x_{id}(n+1)$ 는 수정된 입자 i 의 위치벡터이다. d 는 D-차원 벡터(D-dimensional vector)이다. 즉, 본 논문에서 최적화하고자 하는 보행로봇의 다리가 되는 링크 10개가 된다. i 는 입자번호(particle number)이고, n 은 반복 횟수(iteration)를 의미한다. ω 는 관성가중치(inertia weight)이며, c_1 와 c_2 는 보정계수(correction factor)이다. $v_{id}(n)$ 는 현재의 입자 i 의 속도벡터이고, $x_{id}(n)$ 는 현재의 입자 i 의 위치벡터이다. $rand()$ 는 [0,1]의 랜덤 한 수(random number)이다. $p_{id}(n)$ 는 pbest이며, $p_{gd}(n)$ 는 gbest가 된다. PSO에 대한 내용은 [10]을 참고 한다.

3.3 적합도 함수

적합도 평가(fitness evaluation)는 목적 함수(object function)를 이용하여 군집에 대한 적합도를 평가하여 최적화된 군집화를 수행한다. 본 연구에서는 모터에 의해서 회전링크 l_2 가 1회전 하였을 때, 목적함수 J_m 을 최대의 보폭으로 걷게 하는 것이다. 다음 식(8)과 같이 정의 한다.

$$J_m = S_l \quad (8)$$

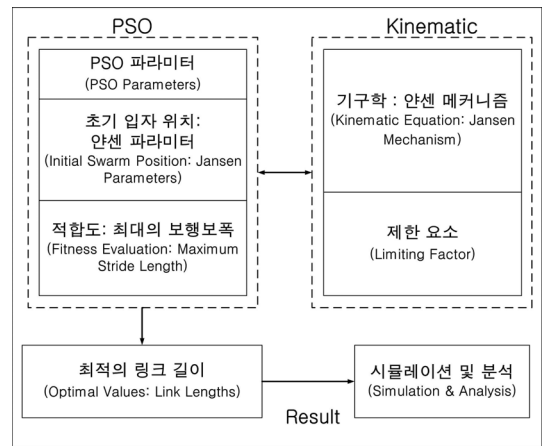


그림 6. PSO를 이용한 설계
Fig. 6. Design using PSO

그림 6은 PSO 알고리즘과 안센 메커니즘의 기구학을 적용한 설계 과정이다. 적합도 평가에서 목적 함수를 만족하여 다음 반복 횟수로 넘어가게 되며, 반복 횟수에 따라 최적에 다리길이 값이 선정 된다.

3.4 제한 요소

기구학적인 수식을 직접적으로 PSO 알고리즘에 적용하는 것은 프로그램의 계산에서 여러 가지 문제가 발생한다. 문제 해결을 위해서 다음과 같은 제한 요소(limiting factor)를 정의한다.

- a) PSO 알고리즘을 수행 하는데 있어서 최적화된 링크 값은 항상 양(+)의 수이다.
- b) 그림 4의 다리 끝단(foot-point)처럼 보행보폭(X 데이터: X data)와 보행높이(Y 데이터: Y data)의 시작점 값은 0 보다 작은 위치의 값이다. 즉, 계산하고자 하는 3 사분면의 좌표영역에 위치하게 된다. 만족 할 때, 처음 시작점(X, Y)좌표 P_{min}^x 와 P_{min}^y 의 값이 결정된다.
- c) 또한, Y data < -500 값을 가져야 한다. 만족 할 때, 시작점(X)좌표 P_{min}^x 와 같은 위치의 지점인 최대 보행거리인 P_{max}^x 의 값이 결정된다.
- d) $-300 > Y$ data를 가져야 한다. 만족 했을 때, P_{max}^y 값이다.
- e) d)를 만족한 값은 $-300 < h_{fl} < -100$ (Y data) 범위 안에 들면, 보행보폭 값 S_l 이 결정된다. 만족 하지 못 할 경우 보행보폭 값은 0이다.
- f) 시뮬레이션 중 그림 2의 두 절점 $C_{5.6}$ 과 $C_{7.8}$ 의 충돌을 방지하기 위해 두 원의 거리 Dr 은 50으로 둔다. (관절과 관절사이의 안전거리 유지)
- g) 로봇의 기구학에서 삼각함수의 계산식이 적용됨에 따라, 복소수의 허수 부분을 0으로 한다. 만족 할 경우 보행보폭 값은 e) 조건에 의해 계산되고, 그렇지 않으면 보행보폭은 0으로 한다. 프로그램에서 아크탄젠트 (arctange nt)는 계산 방향에 따라 하나 이상의 값을 갖는다[5]. 따라서, 복소수 편각 계산시 생기는 오차를 해결하기 위한 것이다.

4. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이션을 하기 위해 사용한 컴퓨터의 성능은 Intel(R) Core(TM) i5 CPU 760@ 2.80 GHz, RAM DDR3 4GB 메모리, 64-bit win7 운영체제를 가진 PC이다. 프로그램은 MatLab을 사용하였다. PSO 알고리즘에 사용된 파라미터 값은 표 2와 같다.

표 2. PSO 파라미터

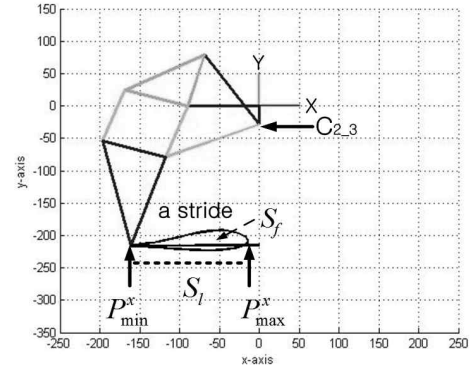
Table 2. Parameter setting for PSO

| 파라미터 | 설정 값 |
|-------------------------------------|------|
| 반복 횟수(Iteration) | 30 |
| 관성가중치(Inertia weight): ω | 1 |
| 보정계수(Correction factor): c_1, c_2 | 2 |
| 입자 개수(Swarm size) | 1024 |

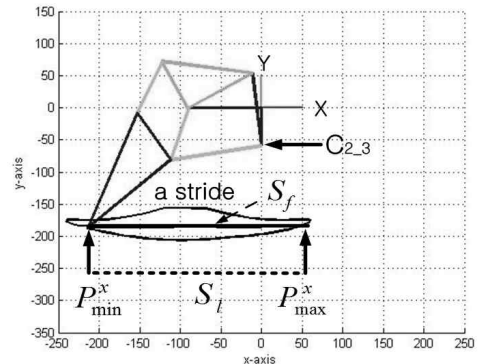
표 2와 같이 PSO 알고리즘의 관성가중치는 1이며, 보정 계수는 2로 두었다. 프로그램에서 링크 10개의 길이를 구하기 위해 입자들의 개수는 1024로 지정 하였으며, 반복 횟수는 30으로 하였다.

본 논문에서는 기존의 게 로봇의 다리길이에 대한 시뮬레이션과 보폭제한을 두지 않고 다리길이에 대해 최적화 한 결과와 비교 하였다. 그 결과에 따라, 최대 보행보폭의 결과 값을 얻을 수 있다는 것을 제시한다. 그림 7(a)는 기존의 게 로봇의 실제 크기를 적용한 시뮬레이션이고, 그림 7(b)의 그림은 PSO 알고리즘을 적용하여

최적화 한 것이다. 분석을 위해 그림 7에 대한 보행궤적을 다음 그림 8과 같이 X, Y 데이터 값으로 나타낸다. 그림 8에서 X data는 보행 보폭을 의미하고, Y data는 보폭의 높이를 의미한다.

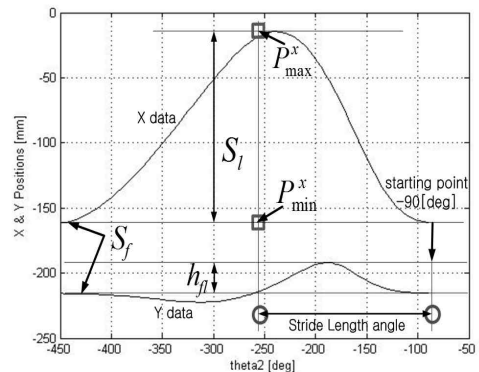


(a) 기존 모델

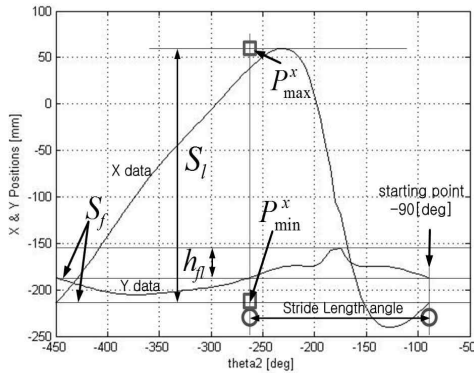


(b) 제안된 모델

그림 7. 시뮬레이션
Fig. 7. Simulation



(a) 기존 모델의 보행궤적



(b) 제안된 모델의 보행궤적

그림 8. X, Y 데이터 값

Fig. 8. X and Y data values

그림 8(a)는 기존 모델의 보행궤적으로 데이터 수치 값을 비교 하면, 보행 길이에 해당 하는 보행보폭이 그림 8(b)보다 짧다는 것을 알 수 있다. 그리고 제안된 모델은 기존의 모델 보다 보폭의 높이도 감소 시켰다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 8(a)와 그림 8(b)를 통해서, 실제 움직인 보행 각이 비슷한 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

표 3은 기존 모델과 제안된 모델과의 보행보폭에 대한 데이터 분석 결과이다. 기존 모델과 최적의 다리길이를 선정하기 위해 다음 사항이 고려되었다. 로봇모델 프레임(frame)에 해당하는 l_1 링크는 고정 값으로 두었다. l_1 링크를 최적화 하면 로봇의 크기는 더욱 더 커진다. 이에 기존의 모델의 프레임은 변경하지 않는다. 회전링크 l_2 의 힘을 전달하기 위한 l_3, l_5 링크는 같은 길이를 가지고 있어야 한다. 그 결과 PSO 알고리즘으로 구해야 할 링크의 수는 10개이다.

표 3. 기존 모델과 제안된 모델

Table 3. Existing model and the proposed model

| 링크 번호[mm] | 기존 모델 | 제안된 방법에 의한 모델 |
|---------------|-------|---------------|
| l_1 (고정 값) | 90 | 90 |
| l_2 | 28 | 58.6360 |
| l_3 | 128 | 113.6977 |
| l_4 | 83 | 96.5080 |
| l_5 | 128 | 113.6977 |
| l_6 | 83 | 83.2158 |
| l_7 | 115 | 113.5385 |
| l_8 | 83 | 79.9676 |
| l_9 | 83 | 86.5854 |
| l_{10} | 83 | 83.4597 |
| l_{11} | 166 | 189.2900 |
| l_{12} | 144 | 148.2384 |
| Stride Length | 140.5 | 300.7444 |

데이터 분석 결과는 회전링크 l_2 와 다리 끝단의 l_{11}, l_{12} 링크길이 값이 많은 차이를 보였다. 즉, 회전링크가 길어지고, 다리 끝단의 두 링크가 길어지기 때문에 보행보폭이 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 나머지의 각 링크들은 비율

조건에 맞춰 조절된다. 그 결과로서, 표 3과 같이 기존 모델보다 PSO를 이용하여 구한, 제안된 모델의 보행보폭이 두 배 이상 좋아진 것을 알 수 있다. 따라서, 기존 로봇과 제안된 방법에 의한 설계 모델의 몸체는 변경되지 않은 상태에서 다리 길이가 최적화 되었기에 에너지 효율 면에서 개선이 되었다. 보행보폭에서 모터 1회전시 회전링크의 전달각이 개선되었고, 연결된 링크 길이의 최적화된 선정으로 걸을 수 있어 보폭이 커졌다. 행동반경을 고려하여 좀 더 큰 로봇을 만들고자 하면 로봇의 몸체인 고정된 프레임의 크기(표 3의 l_1 길이값)를 조절하면 되고 PSO 알고리즘으로 계산된 값으로 각 링크를 최적화하여 다리 길이를 개선 할 수 있다. 또한 로봇의 크기와 그에 따른 출력이 바뀌게 되므로 설계시 모터 선정을 다시 고려해 주어야 한다. 이와 같이 설계시 로봇의 크기에 따라 다리를 선정하여 최대 보행보폭으로 최적화 할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 PSO 알고리즘을 사용하여 절 기구형 게 로봇의 최적보행을 위하여, 다리 길이를 최적화하고 보행보폭 개선을 제안한다. 최적화된 다리 길이를 구하기 위하여 GA와 같은 최적화 알고리즘을 이용하는 것도 가능하다. 하지만, 본 연구에서는 간접하게 이루어진 기존의 PSO기법을 이용한 설계 방법을 적용하였다. 게 로봇의 보행보폭인 다리끝단(foot-point)과 각 링크의 절점각, 위치, 자세를 구하기 위한 기구학적인 수식을 정의하여 프로그램에 적용하였고, PSO 프로그램을 수행하기 위해서 기구학적인 제한요소를 해결함으로써, 기존의 게 로봇 다리인 링크길이를 최적화하여 보폭을 개선시켰다. 따라서, 절 기구 유형의 기계장치와 로봇의 작업환경에 맞는 크기로 다리를 설계 할 때 효율적이다. 이 논문은 다음과 같은 관점에서 의미가 있다. PSO를 이용하여 설계 하였다는 것에 비중을 두는 것 보다 최적화된 다리 길이를 구하기 위하여 목적에 맞는 적합도 함수를 설계하고, 설계시 제한이 되는 일곱 가지 요소를 제안 하여 설계의 가이드라인을 제안하였다. 또한 최적화된 다리 길이의 선정으로 보행보폭이 개선되어 졌음을 시뮬레이션 결과를 통해 얻을 수 있었다. 그리고, 명확하지 않은 기존의 방법인 시행착오에 의한 선정법 보다 제안된 PSO 알고리즘에 의한 최적다리 길이 선정법을 사용하면, 테오안센 기반의 보행로봇이 적은 에너지 비용으로 최적보행을 할 수 있다는 것을 보여 주었다. 활용 분야로는 절 기구 유형의 기계, 로봇의 정밀 작업영역에 따른 기계 설계, 팬더그래프 메커니즘(pantograph mechanism)[11], KLANN 메커니즘[12] 등과 같이 로봇 다리의 보행보폭 개선에 적용 할 수 있다.

참고 문헌

[1] M. Gornier and G. Hirzinger, "Analysis and evaluation of the stability of a biologically inspired, leg loss tolerant gait for six and eight-legged walking robots," *IEEE international conference on Robotics and Automation*, pp. 4728-4735, May 2010.

[2] Y. Yanagihara, T. Takubo, K. Ohara, and T. Arai, "Optimization of grid wall walking by genetic algorithm," *Proc. IEEE international conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1466-1470, Aug. 2009.

[3] K. Okada, M. Inaba, and H. Inoue, "Walking navigation system of humanoid robot using stereo vision based floor recognition and path planning with multi-layered body image," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2155-2160, Oct. 2003.

[4] 김선욱, 김연균, 정하민, 이세한, 황승국, 김동현, "안센키네틱스를 기반으로 한 보행 로봇 개발," *한국 지능시스템학회 논문지*, 제 20권, 4호, pp. 509-515, 2010.

[5] R. L. Norton, *Design of Machinery*, New York, Mc Graw-Hill, 1991.

[6] Theo Jansen, "Theo Jansen's strandbeest," Available: <http://www.strandbeest.com/>, [Accessed: December 7, 2009].

[7] D. Giesbrecht, Design and optimization of a one-de gree-of-freedom eight-bar leg mechanism for a walking machine, *Canada, University of Manitoba: M. S Thesis*, 2010.

[8] A. J. Ingram, A new type of mechanical walking machine, *South Africa, University of Johannesburg: Ph. D. Thesis*, 2006.

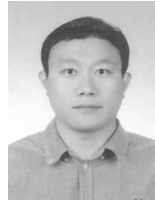
[9] 김선욱, 김동현, "4절 링크 이론과 안센 메커니즘을 기반으로 한 보행 로봇의 운동학 해석," *한국지능시스템학회 논문지*, 제 21권, 2호, pp. 159-164, 2011.

[10] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," *Proc. IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.69-73, May 1998.

[11] T. Cristina, O. Erika, C. Marco, and D. R. Alessandro, "Analysis and Design of a 1-DOF Leg for Walking Machines," *Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, pp. 183-188, 2006.

[12] Joe Klann, "Klann linkage," Available: <http://www.mechanicalspider.com/index.html>, 2010, [Accessed: October 15, 2010].

저자 소개



김 선 욱 (Sun-Wook Kim)

2010년 : 경남대학교 전기공학과(공학사)
2010년~현재 : 동 대학원 첨단공학과 석사 과정

관심분야 : 지능로봇, 생물체모방로봇, 지능제어 알고리즘
Phone : 055-249-2629
E-mail : sunsamsa@naver.com



김 동 현 (Dong Hun Kim)

2001년 : 한양대학교 전기공학과(공학 박사)
2001년~2003년 : 미국 듀크 대학교 연구원
2003년~2004년 : 미국 보스턴 대학교 연구원
2004년~2005년 : 일본 동경대학교 박사후 과정
2005년~현재 : 경남대학교 전기공학과 부교수

관심분야 : 스웸 시스템, 이동로봇 경로 계획, 지능 로봇 제어, 비선형 적응제어
Phone : 055-249-2629
E-mail : dhkim@kyungnam.ac.kr