

수면 지면 동시보행을 위한 Klann 기구 기반 주행메커니즘 최적설계

Optimal Design of Klann-linkage based Walking Mechanism for Amphibious Locomotion on Water and Ground

김현규, 정민석, 신재균, 서태원*
(Hyun-Gyu Kim¹, Min-Suck Jung¹, Jae-Kyun Shin¹, and TaeWon Seo^{1*})

¹School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

Abstract: Walking mechanisms are very important for legged robots to ensure their stable locomotion. In this research, Klann-linkage is suggested as a walking mechanism for a water-running robot and is optimized using level average analysis. The structure of the Klann-linkage is introduced first and design variables for the Klann-linkage are identified considering the kinematic task of the walking mechanism. Next, the design problem is formulated as a path generation optimization problem. Specifically, the desired path for the foot-pad is defined and the objective function is defined as the structural error between the desired and the generated paths. A process for solving the optimization problem is suggested utilizing the sensitivity analysis of the design variables. As a result, optimized lengths of Klann-linkage are obtained and the optimum trajectory is obtained. It is found that the optimized trajectory improves the cost function by about 62% from the initial one. It is expected that the results from this research can be used as a good example for designing legged robots.

Keywords: water-running robot, Klann-mechanism, level average analysis, optimal design, orthogonal array

I. 서론

다양한 종류의 기구에 대한 연구는 오랫동안 이루어져 왔다. 이러한 연구는 기구를 이용하여 함수발생장치와 경로발생장치를 목적에 맞게 최적화하기 위해 주로 이루어졌다. 이러한 연구들의 예시로는 4절 기구를 이용한 함수발생장치를 다구치 기법을 통해 최적화 한 연구가 있으며[1], 6절 기구 중 활용도가 높은 Watt기구를 경로발생기를 설계하기 위해 다구치 기법을 이용하여 최적화한 연구도 있다[2].

이러한 기구 구조들은 또한 다양한 목적으로 로봇에서 사용되고 있다. 적절한 기구 구조의 사용은 다양하고 복잡한 움직임을 하나의 자유도로 가능하게 만들 수 있기 때문이다. 그 예로는 수중에서 불가사리를 채집하기 위한 4절 기구 최적화 과정에서 HTRCA (Hybrid Taguchi-Random order Coordinate search Algorithm)기법을 사용한 연구[3], 하나의 모터와 몸체 전체의 기구학적 구조를 이용하여 빠른속도로 이동하는 DASH 또한 기구의 구조를 로봇에 적용한 예라고 볼 수 있다[4].

기구 구조가 로봇에 적용되는 이유중 하나는 보행메커니즘을 구현하기 위해서 이다. 앞에서 언급했듯이 기구 구조는 하나의 모터 회전만으로 원하는 보행 궤적을 만들어 낼 수 있는 장점이 있기 때문에 로봇의 경량화가 가능하고 원하는

보행 궤적을 표현하기에 적절하다. 이러한 연구들의 예로는 도마뱀의 보행을 구현하기 위해 4절 기구를 최적 설계한 연구[5]가 있다. 그리고 보행 메커니즘의 새로운 기구에 대한 연구도 많이 이루어 지고 있다. 이러한 기구의 예로는 Jansen, Klann 기구 등이 보행 메커니즘을 구현하는데 많이 이용되고 있다[6-9]. 이 외에도 보행 메커니즘을 위한 수많은 기구들이 현재 연구되고 있다.

보행 메커니즘에 기구 구조가 사용된 로봇 중 이 연구에서는 water-running 로봇에 집중한다. 이 로봇은 Basilisk lizard의 물위를 달리는 특성을 모방하기 위해 연구 되었고, 링크구조의 다리를 이용하는 로봇이다[10]. 이 로봇의 다리구조는 4절 기구로 이루어져 있으며 이 링크의 구조와 발의 궤적이 그림 1에 제시되어 있다. 이 발의 궤적을 만들기 위해 사용된 4절 기구의 최적설계결과는 Floyd와 Sitti의 연구를 참조하였다 [11]. 이 4절 기구를 이용한 수면 주행 원리는 빠른 발의 움직임을 이용해 수면을 차고 물속에서 움직이면서 물의 저항력을 발생시켜 수면 위에서 주행을 할 수 있다[12].

하지만 그림 1(b)와 같이 4절 기구에 의해 생성된 궤적의 아랫부분이 곡선을 이루고 있어 로봇이 보행 중 안정적인 주행이 힘들다. 물론 이 궤적의 아랫부분이 곡선인 이유는 발이 물속에서 움직이면서 로봇을 물에 뜰 수 있게 하는 수직방향힘과 앞으로 나아가기 위한 수평방향힘 두가지를 동시에 생성하기 위해서이다. 하지만 현재 우리는 이 로봇이 수면과 육지 두 가지 환경에서 주행이 가능하도록 연구하고 있고 현재의 궤적은 육지주행시에 안정성 면에서 취약하다. 그래서 우리는 육지주행에서도 안정적인 보행이 가능한 궤적을 만들기 위해 보행메커니즘으로 많이 사용되는 Klann 기구를 사용한다. Klann 기구는 궤적의 아랫부분이 수평에 가까운

* Corresponding Author

Manuscript received June 9, 2014 / revised June 30, 2014 / accepted July 7, 2014

김현규, 정민석, 신재균, 서태원: 영남대학교 기계공학부
(hyungyu8066@naver.com/yusae14@gmail.com/jkshin@yu.ac.kr/taewon_seo@yu.ac.kr)

※ 본 연구는 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력기술개발사업, No. 2013 M2A8A1051061).

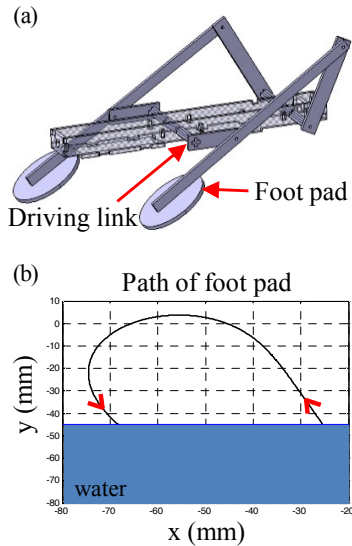


그림 1. (a) 4절 링크 구조, (b) 발의 경로.
Fig. 1. (a) Structure of four-bar linkage (b) path of foot-pad.

특징을 가지고 있어 육지주행에서 안정적인 주행이 가능하다. 그러므로 수면주행에서는 수평방향의 힘만 생성하고 로봇이 물에 뜨기 위한 수직방향의 힘은 생성하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 향후 연구에서는 발 재료의 부력을 이용한다. 그래서 이 Klann 기구를 수준평균 분석법을 사용하여 다리 메커니즘을 최적 설계한다.

본 논문은 다음의 순서로 구성된다. II 장에서는 다리 메커니즘을 최적설계 하기 위한 Klann 기구 구조 소개 및 변수, 목적함수를 정의한다. 그리고 III 장에서는 최적설계를 진행하기 위해 사용한 알고리즘을 제시하고 이 알고리즘과 수준평균 분석법을 이용하여 최적설계 과정을 소개한다. IV 장에서는 최적설계의 결과를 제시하고 V 장에서는 결론을 제시한다.

II. 최적화 문제 정의

이 장에서는 Klann 기구의 구조를 설명하고 이 기구의 기구학적 해석 방법을 설명한다. 그리고 수준평균 분석법을 이용해 최적설계 과정을 수행하기 위한 변수 및 목적함수 정의에 대해 설명한다.

1. Klann 기구

Klann 기구는 6절 기구의 일종인 Watt II에 해당하는 기구이며 Klann 기구의 구조가 그림 2에 도시되어있다. 이 기구는 전체 10개의 링크로 이루어져있고 로봇 몸체에 해당하는 가운데 삼각형의 의해 3점에서 l_1, l_3, l_7 이 로봇의 몸체와 연결된다. l_1 의 링크는 모터와 연결되어 구동 링크가 된다. 그리고 l_2, l_3 와 l_6, l_h 는 α, β, γ 에 의해 결정된 일정한 각도를 이루고 고정되어 있다. 이 기구의 해석을 위해서 input link (l_1)의 입력 점을 원점으로 각각의 링크를 벡터로 치환하여 각 링크의 각도들을 구한다. 그리고 벡터의 합으로 output link (l_h)의 궤적을 계산 하였다. 이 기구의 해석과정은 그림 4의 알고리즘에서 두번째 과정(그림 4(B))에 해당한다.

2. 변수 및 목적함수 설정

그림 2에 제시된 그림과 같이 Klann 기구의 링크 중 궤적의 변화에 영향을 미치는 링크의 개수는 총 13개이다. 그러

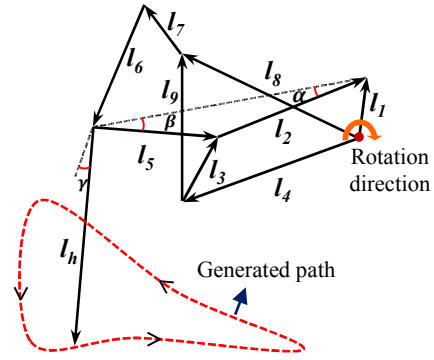


그림 2. Klann 기구 구조(입력: l_1 , 출력: l_h).
Fig. 2. Klann-linkage structure (Input link: l_1 , Output link: l_h).

표 1. 초기 설계 변수.

Table1. Variables and initial values.

Types	Variables	values
Length variables	l_1 (Input Link)	13mm
	l_2	30mm
	l_3	20mm
	l_5	26mm
	l_6	27mm
	l_7	28 mm
	l_h (Output Link)	23mm
Fixed length	l_4	30.72mm
	l_8	28.82mm
	l_9	22.77mm
Angle variables	α	8°
	β	6°
	γ	18°

므로 전체 변수는 13개이고 이 변수들 중에서 중간 삼각형의 3변의 길이(l_4, l_8, l_9)를 고정하고 7개의 링크길이와 3개의 각도를 최적화할 변수로 설정 하였다. 이 변수 정의의 부분은 그림 4의 알고리즘에서 첫 번째 과정(그림 4(A))에 해당된다.

연구 결과인 최적화 된 값은 각 변수의 초기 값에 따라 민감하게 영향을 받아 값이 변화 한다. 하지만 수준 평균 분석법의 S/N비 정의상 반복 횟수가 증가하면 목적함수의 값이 감소하게 된다. 이 부분은 III 장에 설명되어 있다. 그러므로 임의의 변수조합을 초기값과 함께 표 1에 정리 하였다.

최적화를 위한 목적함수를 정의하기 위하여 아래 변의 길이 L 을 갖고 높이 H 를 갖는 삼각형을 정의한다. 삼각형의 밑변인 L 은 기존 로봇의 물속행정 길이인 45mm로 정하고 높이 또한 기존 로봇의 물 밖에서의 행정 높이와 물의 진동 높이 및 부착할 발의 크기(Diameter = 50mm)를 고려하여 50mm로 정의하였다[10]. 그리하여 목표로 하는 삼각형과 Klann 기구에 의해 생성된 궤적 사이의 error를 목적함수로 정의 한다. 목적함수는 Eq. (1)에 정의되어있고 그림 3에 도시되어 있다. 이 과정은 그림 4의 알고리즘에서 변수의 정의와 같이 첫 번째 과정(그림 4(A))에 해당된다.

$$y_n = \int \left(\sqrt{(x_{G,i} - x_{O,i})^2 + (x_{G,i} - x_{O,i})^2} \right)^2 \quad (1)$$

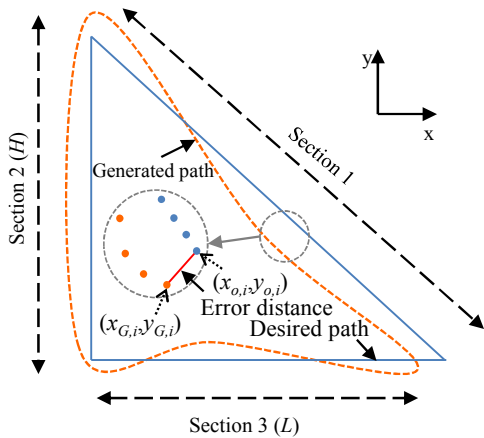


그림 3. 목적함수의 정의 ($L: 45\text{mm}, H: 50\text{mm}$).
 Fig. 3. Definition of object function ($L: 45\text{mm}, H: 50\text{mm}$).

앞에서 언급한 것과 같이 Klann 기구의 해석에서 input link의 미소 회전각도에 따라 끝점의 좌표를 계산하였다. 그러므로 결과 값은 모두 점으로 주어진다. 그림 3에 도시된 것과 같이 3개의 구간마다 이 점들의 개수는 주어지고 목적으로 하는 삼각형도 3개의 꼭지점을 기준으로 3구간으로 나누어진다. 삼각형의 3개 구간을 생성된 궤적의 각 구간에서의 점의 개수만큼 점으로 나누어 생성된 궤적의 점의 개수와 삼각형의 점의 개수를 동일하게 만들었다. 그리고 동일한 순서의 점 사이 거리를 오차거리로 정의 하였고 목적함수를 이 오차거리의 제곱으로 정의하였다.

III. 최적화 수행

이 장에서는 앞에서 정의한 10개의 변수와 목적함수를 수준평균 분석법을 이용해 최적화하는 과정을 알고리즘과 함께 소개한다. 그리고 수준평균 분석법을 사용함에 있어 사용된 수직행렬 또한 설명한다.

1. 알고리즘

최적화 과정은 수직행렬의 각 조합마다 목적함수를 구하고 이 값을 이용하여 signal to noise (S/N)비를 계산한다. 그리고 변수들의 민감도 분석을 통해 최적값에 가까운 새로운 변수들을 정의한다. 이 계산 과정에서 구해진 목적함수의 값을 비교하면서 목적함수 값이 최소값이 나올 때까지 반복계산을 함으로써 진행 되었다. 이 반복 계산을 위한 알고리즘이 그림 4에 제시 되어 있다.

이 알고리즘의 반복계산 부분은 5부분으로 이루어져 있다. 첫 번째(그림 4(A))와 두 번째(그림 4(B)) 과정인 변수 및 목적함수 정의와 Klann 기구의 해석과정은 II 장에서 설명 되었다. 이 장에서는 그 후의 과정인 S/N비 계산 및 민감도 분석, 새로운 변수 정의 대해 설명한다. 수행과정을 설명하기 전에 먼저 이 최적화 과정에서 사용된 수직행렬을 먼저 제시 한다.

2. 수직행렬

이 최적화 과정에서는 앞에서 정의 한 것과 같이 10개의 변수를 사용 하므로 $L_{32}(2^1 \times 4^9)$ 의 수직 행렬을 사용하였다. 이 수직 행렬은 2수준과 4수준이 혼합되어 있다. 첫 번째 변수인 l_1 은 주로 기구가 생성하는 궤적의 전체 크기를 결정함으

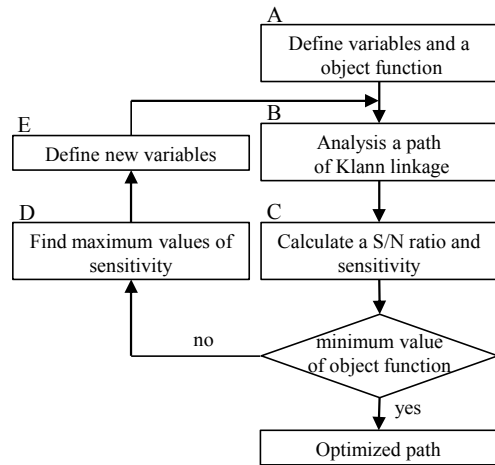


그림 4. 최적화 알고리즘
 Fig. 4. Algorithm for optimization.

로 많은 값의 변화가 필요 없다. 그래서 이 변수를 2수준으로 설정하였다. 나머지 9개의 변수는 궤적의 형상을 결정함으로 4수준으로 설정 하였다.

이때 각 수준의 값의 차이는 길이변수의 경우 0.001mm이며 각도의 경우는 0.0001°로 설정하였다. 기구를 구성함에 있어 각도의 변수는 길이의 변수보다 민감하게 영향을 미침으로 각도변수의 변화폭을 작게 하였다. 그러므로 수준 변화에 따른 각 변수들의 값들은 2수준 길이변수의 경우 $l_i+0.001, l_i-0.001$ 이고 4수준 길이변수의 경우 $l_i+0.002, l_i+0.001, l_i-0.001, l_i-0.002$ 이며, 각도변수의 경우 $\alpha, \beta, \gamma+0.0002, \alpha, \beta, \gamma+0.0001, \alpha, \beta, \gamma-0.0001, \alpha, \beta, \gamma-0.0002$ 이 된다.

3. 수준평균 분석법

이 최적화 과정에서는 목적함수인 각 점 사이 오차 거리 제곱의 합을 최소화 하는 것이 목적이다. 그러므로 망소특성의 S/N 비를 사용하였다. 망소특성의 S/N비는 Eq. (2)에 정의 되어 있다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{y_1^2 + y_1^2 + \dots + y_n^2}{n} \right] [dB] \quad (2)$$

앞 절에서 정의한 수직행렬의 변수들의 조합마다 S/N 비를 구하고 10개의 변수의 각 수준들의 S/N비 평균을 계산함으로써 민감도 분석을 진행 하였다. 이 과정은 그림 4(C)에 해당한다. 그리고 Eq. (2)에서 정의된 S/N비는 음수 값이므로 목적함수의 값(y_n)이 최소화 되려면 S/N비 값이 최대가 되어야 한다. 그러므로 민감도 분석이 완료되면 다음 단계에서 각 수준마다 변수의 S/N 비가 가장 클 때의 변수 값을 새로운 변수로 재정의 한다. 반복 계산으로 인한 S/N비 값의 변화와 민감도 변화가 그림 5에 제시되어있다. 이 S/N비는 반복 횟수가 증가 함에 따라 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다.

반복계산의 각 횟수마다 수직행렬의 32개의 변수 조합 중 목적함수의 값이 가장 작은 조합을 선택한다. 그리고 그 목적함수의 값이 전체 반복계산의 과정 중 가장 작은 값인지 확인한다. 만약 최소의 목적함수 값이 아니라면 다음 단계로 넘어가 새로운 변수를 재정의 하게 된다. 이 과정이 그림 4(D)와 (E)과정에 해당한다.

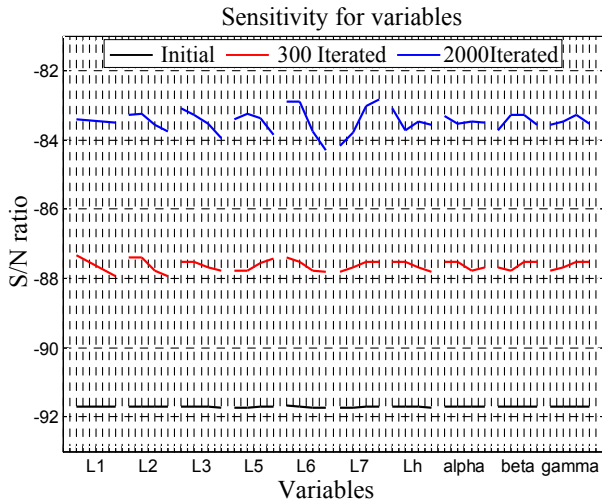


그림 5. 반복 계산에 따른 민감도 분석.
 Fig. 5. The sensitivity analysis for variables according to a number of iterating calculation.

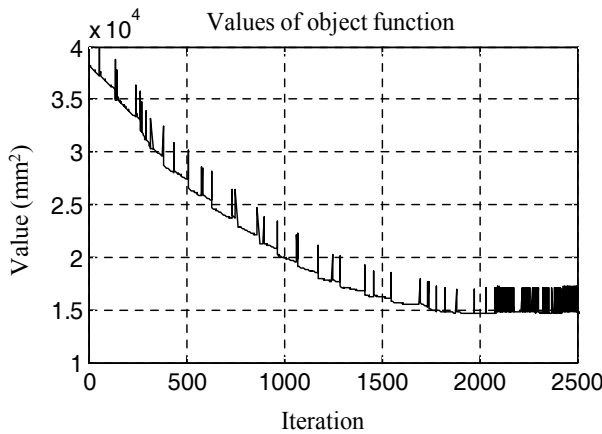


그림 6. 반복계산에 따른 목적함수 값.
 Fig. 6. Values of object function according to Iteration.

계산의 반복 횟수가 증가함에 따라 변수들은 최적 값에 가까워진다. 최적 값에 가까워 질수록 특정 변수 값의 변화는 결과값에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. 하지만 반복계산의 횟수가 작은 초기값에서의 경우 반대로 영향이 크지 않다. 이것은 그림 5에 나와있다. 그리고 최적 값에 가까워 질수록 S/N비는 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 6은 반복계산 횟수 증가에 따른 목적함수 값의 변화를 나타내고 있다. 변수들의 변화에 따라 궤적이 순간적으로 변화되어 목적함수 값이 증가되는 구간이 있었다. 이 증가되는 구간은 수렴한 후에 더욱 빈번하게 발생하는 경향을 보였다. 그리하여 우리는 최적 값으로 수렴하기 전의 최소값인 1900번째의 값을 사용하였다.

IV. 최적화 결과

초기궤적과 최적화된 궤적은 그림 7에 제시 되어있다. 그리고 초기변수들과 최적화된 변수들이 표 2에 제시되어 있다. 목적함수 값은 앞에서 언급한 것과 같이 목표궤적과 생성된 궤적 사이의 오차를 의미한다. 알고리즘을 통한 반복계

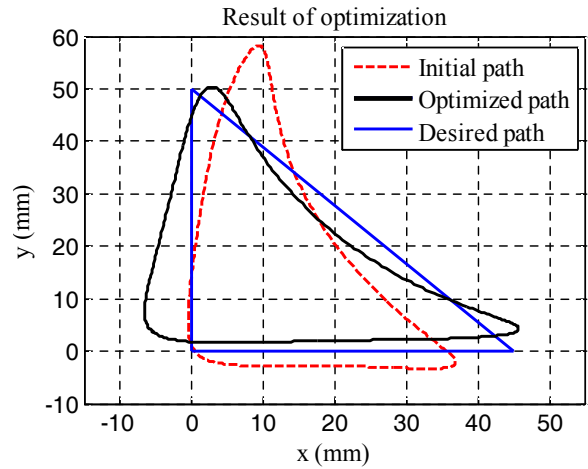


그림 7. 최적화 결과 (61.53% 향상).
 Fig. 7. The result of optimization (the optimized path is improved from 61.53%).

표 2. 최적화 전후의 설계변수 값.

Table 2. Variables of before and after optimization.

Variables	Before optimization	After optimization
l_1	13mm	13.2760 mm
l_2	30 mm	29.8030 mm
l_3	20 mm	19.8020 mm
l_5	27 mm	28.7700 mm
l_6	28.5 mm	26.0300 mm
l_7	23 mm	25.5600 mm
l_h	55 mm	52.4800 mm
α	8°	7.7922°
β	6°	5.9874°
γ	18°	27°
Value of object function	$3.8450 \times 10^4 \text{ mm}^2$	$1.4793 \times 10^4 \text{ mm}^2$
Improved ratio	61.53%	

산을 통해 이 목적함수 값은 최적화 된 변수들일 때 초기 변수들일 때 보다 61.53% 향상됨을 표 2에서 알 수 있다.

앞에서 목적함수는 높이 50mm 길이 45mm의 삼각형으로 정의 하였다. 최적화 결과로 나온 궤적 높이는 약 47mm 이고 길이는 약 50mm 이다. 최적화된 궤적의 높이는 앞에서 제시한 지름이 50mm인 발이 완전히 물에 잠기지 않는다고 가정하면 로봇이 수면보행 시 적절한 높이이다. 그리고 최적화된 궤적의 길이는 기존 궤적보다 수중에서의 행정길이가 길어졌으므로 더 많은 힘을 생성 할 수 있다. 그리고 궤적의 아래 부분이 직선에 가까워 로봇이 육지를 보행 시 안정성이 확보된다.

초기값의 변수와 최적화된 변수로 구성된 Klann 기구가 그림 8에 제시되어 있다. 실제 링크 길이와 각도의 변화가 아주 미세함에도 불구하고 말단부 추종 궤적에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. Klann 기구를 바탕으로 한 메커니즘을 제작할 때에는 링크별로 정확한 길이 및 각도의 제작이 필요하다 할 수 있다.

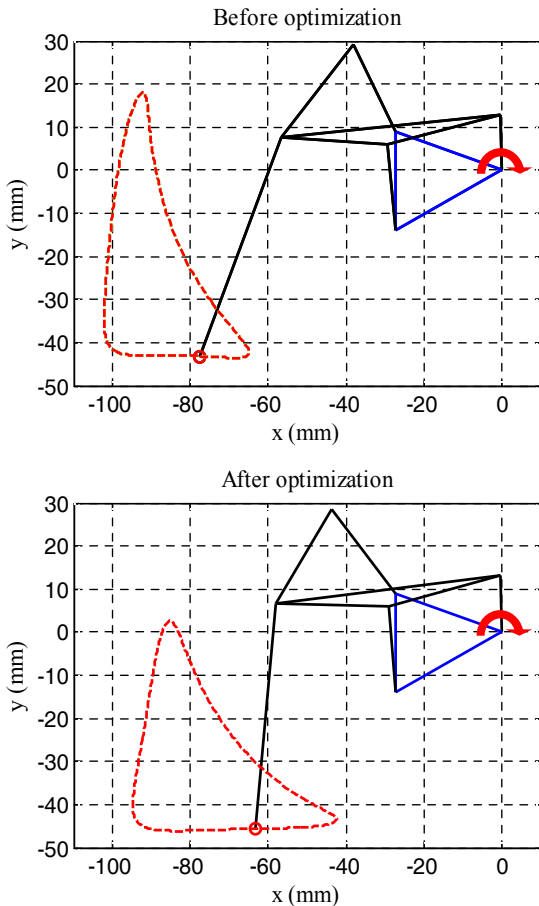


그림 8. 최적화 전후의 Klann 기구 구조의 형상.
Fig. 8. Klann-linkage of before and after optimization.

V. 결론

이 연구는 Water-running 로봇의 다리 메커니즘 최적설계를 위해 수준 평균법을 사용하였다. 다리 메커니즘으로는 Klann 기구를 사용하였고 변수는 Klann 기구의 각 링크인 총 10개를 선정하였다. 목적함수의 경우 목적으로 하는 궤적과 기구에 의해 생성되는 궤적 사이의 거리의 제곱으로 정의하였다. 최적화 과정의 수행 중 망소특성에 의한 S/N비를 구하고 민감도를 분석하였다. 이 민감도 분석에서 가장 큰 값의 S/N비를 가지는 수준의 변수를 초기 값으로 재정의 함으로써 반복 계산을 하였다. 반복계산의 횟수가 증가 할수록 목적함수의 값은 최소화 되어 목적으로 하는 궤적에 가까워 진다. 결과적으로 약 62%의 성능 향상을 도출하였다. 이 연구 결과는 기존의 water-running 로봇의 다리 메커니즘을 대체할 것이며, 육지와 수면 주행이 가능한 로봇 제작에도 적용 될 것이다.

REFERENCES

[1] X. Huang and Y. Zhang, "Robust tolerance design for function generation mechanisms with joint clearances," *Journal of Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, no. 9, pp. 1286-1297, 2010.
[2] F. C. Chen, Y. F. Tzeng, W. R. Chen, and M. H. Hsu, "The use of the Taguchi method and principal component analysis for the sensitivity analysis of a dual-purpose six-bar mechanism," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of*

Mechanical Engineering Science, vol. 223, no. 3, pp. 733-741, 2009.
[3] J. H. Kim, S. R. Jin, J. W. Kim, T. W. Seo, and J. W. Kim, "Optimal design of a four-bar linkage manipulator for starfish-capture robot platform," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 30, no. 9, pp. 961-968, 2013.
[4] P. Birkmeyer, K. Peterson, and R. S. Fearing, "DASH: a dynamic 16g hexapedal robot," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. USA, 2009.
[5] J. R. Kim, J. W. Kim, D. K. Choi, and J. W. Kim, "Optimization of hind foot trajectory using four bar linkage for lizard inspired robot," *Conference on Korean Society for Precision Engineering, September, Korea*, 2012.
[6] S. W. Kim and D. H. Kim, "Kinematic analysis of a legged walking robot based on four-bar linkage and jansen mechanism," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 159-164, 2011.
[7] S. W. Kim and D. H. Kim, "Design of leg length for a legged walking robot based on the jansen using PSO," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 5, pp. 660-666, 2011.
[8] N. G. Lokhande and V. B. Emche, "Mechanical spider by using Klann mechanism," *International Journal of Mechanical Engineering & Computer Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 13-16, 2013.
[9] L. Xu, K. Cao, X. Wei, and Y. Shi, "Dynamic analysis of fluid-structure interaction for a biologically-inspired biped robot running on water," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 373-379, 2013.
[10] H. G. Kim, J. H. Kim, B. H. Seo, and T. Seo, "Experimental study on rolling stability of quadruped and hexapedal water running robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 30, no. 10, pp. 1023-1029, 2013.
[11] S. Floyd and M. Sitti, "Design and development of the lifting and propulsion mechanism for a biologically inspired water running robot," *IEEE Transaction on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 698-709, 2008.
[12] J. W. Glasheen and T. A. McMahon, "A hydrodynamic model of locomotion in the Basilisk Lizard," *Nature*, vol. 380, no. 28, pp. 340-342, 1996.



김현규

2014년 영남대학교 기계공학부(공학사). 2014년~현재 영남대학교 대학원 기계공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 Water-running 로봇 설계 및 해석, 계단 등반로봇.



정민석

2013년 영남대학교 기계시스템전공(공학사). 2014년~현재 영남대학교 대학원 기계공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 기구 설계 및 해석, 최적설계.

**신재균**

1978년 서울대학교 원자핵공학전공(공학사). 1985년 KAIST 기계공학전공(공학박사). 1985년~현재 영남대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 기구학, 최적설계.

**서태원**

2003년 서울대학교 기계항공공학부(공학사). 2008년 서울대학교 기계항공공학부(공학박사). 2010년~현재 영남대학교 기계공학부 조교수. 관심분야는 기계설계, 최적설계, 제어, 로봇의 경로 계획.