

안센 메커니즘 기반의 4족 로봇의 보행 궤적의 최적화

[글] 배준석, 유성민, 김민준,
정은식, 한상민, 황우정,
최재능, 이춘열*
영남대학교
cylee@yu.ac.kr

1. 서 론

오지탐사, 우주탐사, 군사작전 등과 같이 사람이 접근하기 어려운 환경에서 사람 대신 주어진 임무를 수행하기 위해 로봇들이 많이 개발되어 왔다. 로봇의 적용 범위를 넓히기 위해서 크기와 형태가 다양한 장애물 극복 능력을 함양하는 것은 지금까지도 중요한 과제로 남아 있다.

다양한 장애물을 극복 하기 위해서 많은 보행 메커니즘이 연구 되어왔고 그 중 기구 구조를 로봇에 이용 하는 연구가 많이 진행 되었다. Crawl 메커니즘은 헤엄치는 듯한 모습의 기어가는 메커니즘으로 배수관과 같이 작은 통로 구멍에 이용 가능한 메커니즘이다[1]. Klann 메커니즘은 곤충류, 갑각류의 형상을 가지는 메커니즘이다. 이 메커니즘은 육지 주행도 가능하며 최근에는 수면 주행을 할 수 있도록 적용 된 연구가 나와 있다 [2]. 이 외에도 많은 보행 메커니즘이 연구되어 왔지만 본 논문에는 Jansen 메커니즘과 4족 보행기구 [3~5]를 이용한 장애물 극복 방법을 다루고 있다.

Jansen 메커니즘은 동물 다리의 골격을 모방한 방식이다. 또한 같은 링크 구조를 단순히 연결하여 4족, 6족, 8족등 의 보행로봇을 구현 해낼 수 있다는 장점이 있다 [6]. 그리고 Jansen 기구는 보행에 있어 이상적인 궤적을 그리는 특징이 있다. 따라서 Jansen 메커니즘과 4족보행 기구를 함께 적용을 하게 되면 균형감각에 있어 안정적이고 최상의 궤적을 맞추는데 손쉽게 접근을 할 수 있기 때문에 채택을 하였다.

본 연구에서는 로봇 다리의 궤적의 최적을 찾기 위해 Working model, Linear equation solution software와 JansenOptSolver S/W를 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 여기서 우리는 각 링크의 Joint 좌표를 구하였다. 이렇게 구한 좌표를 가지고 제한된 조건 속에서 로봇 다리의 궤적마다 보행 보폭을 최대로 하는 각각의 링크 길이를 찾는 연구를 진행 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다리 및 몸통의 각 설계과정을 제시하고 있으며 M.sketch를 이용한 다리궤적을 찾는 방법을 보여주고 있다. 3장에서는 수준평균 분석법, Linear equation, Edison Software를 이용하여 최적설계 결과를 제시하고 4장에서는 결론을 제시한다.

2. 설계 과정

2.1 연구 진행 방법

보행 로봇을 제작하기 앞서 본 연구의 주 목표와 전제 조건, 그리고 단계별 연구 목적은 다음과 같다. Fig. 1에서 제시된 것 과 같이 설계된 보행 로봇은 요철과 언덕을 지나 최단 시간 내에 거리를 왕복하여야 하므로 최대한 긴 보행 보폭과 장애물을 넘을 수 있을 정도의 보행 높이를 갖추어야 한다. 따라서 설계된 로봇은 Fig. 2와 같이 보행 궤적을 그리는 것이 이상적이라고 볼 수 있다 [7]. 이는 4족 보행 동물의 다리 궤적으로 생체모방 로봇이 가지고 있는 이점이기도 하다.

본 연구를 진행함에 있어서 전제조건으로는 첫 번째로 실제 보행로봇을 설계하는데 사용되는 재료는 모두 과학상자 부품을 이용하고, 두 번째로 다리의

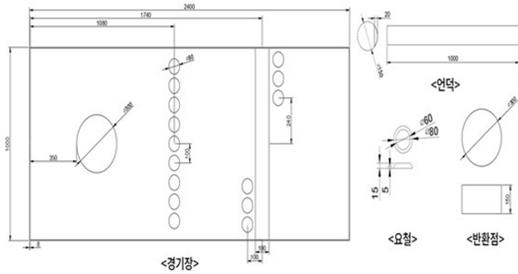


Fig. 1 Contest track

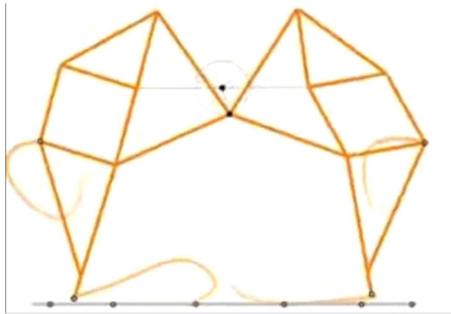


Fig. 2 Jansen mechanism of movement

초기 설계는 Edison S/W 중 M.Sketch 프로그램을 통해 수행하는 것이다. 그러므로 본 연구의 1차 연구목적은 M.sketch 프로그램을 사용하여 과학상자 제원에 맞는 다리길이들을 설정, 이상적인 궤적을 경험적인 방법으로 찾아보고, 2차 연구목적으로 설계된 다리구조를 바탕으로 로봇의 몸체를 구성하며 동시에 몸체 구성에 대한 타당성을 제시할 것이다. 이때 로봇의 직접설계에는 Edison S/W 중 Designer 프로그램을 사용한다.

마지막 최종 연구로써 초기 설계된 다리구조를 기준으로 하여 최적화 설계를 2가지 방법으로 수행, 연구목표에 적합한 결과를 도출 해냈는지에 대한 비교와 평가를 진행할 것이다.

2.2 로봇의 구성

M.sketch 프로그램은 각 링크 길이를 과학상자 부품 제원에 맞게 자동으로 조정해주며 인터페이스가 쉽고 직관적이기 때문에 빠른 시간 안에 여러 가지 Jansen Mechanism 구조를 시도하고 궤적을 살펴 볼

Table 1. Linkage structure of initial model

| Link | Length [mm] | Link | Length [mm] |
|------|-------------|------|-------------|
| L0 | 12.7 | L6 | 38.1 |
| L1 | 88.9 | L7 | 50.8 |
| L2 | 76.2 | L8 | 38.1 |
| L3 | 63.5 | L9 | 50.8 |
| L4 | 50.8 | L10 | 76.2 |
| L5 | 50.8 | | |

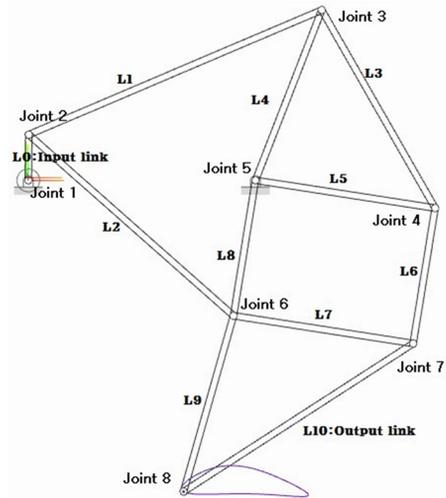


Fig. 3 Linkage structure of a Jansen mechanism

수 있다. 다양한 링크 길이들을 조정하며 궤적을 살펴본 결과 Fig. 3의 구조를 최적화 전 초기 설계된 구조로써 선정하였다. 초기 선정된 다리의 제원은 Table 1에 제시되어 있으며 자세한 보행 보폭과 높이는 본 연구의 3장 최적설계과정에서 자세히 설명하도록 한다. Fig. 3에서 구동부의 링크에 각 번호를 지정하였으며 본 연구에서는 모터 구동기어에 해당하는 L0의 링크 길이를 고정하였다.

2.2.1 다리의 제어

본 연구에서 설계된 보행로봇의 제어는 Fig. 4와 같이 좌측과 우측에 모터가 위치하여 정 방향과 역 방향으로 모터가 구동되는 방식이다. 따라서 모터의 회전과 위상 차를 이용하여 전후 좌우로 방향을 쉼

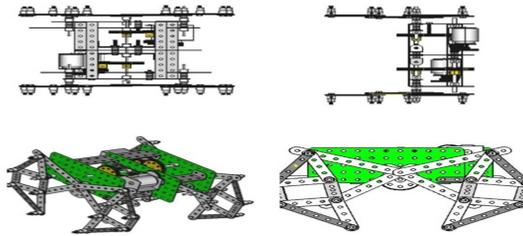


Fig. 4 3D modeling using Edison designer program

계 전환 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 모터가 두 개의 다리와 연결 되어있어 모터가 회전할 때 다리가 엇갈리면서 지면을 이동, 기존의 관절운동의 로봇과 달리 몸체의 흔들림이 최소화 되는 장점을 지닌다 [8]. 로봇의 구성은 지면을 이동하는 다리와 구동부인 몸체로 구성되며 모터의 제어를 위해서 4.5V 모터 컨트롤러 2개를 사용한다.

3. 최적 설계

3.1 최적화 문제 정의

수준평균 분석법을 진행하기 위해 설계변수를 설정한다. 앞서 진행하였던 M. sketch 다리 선정단계에서 선정된 링크들을 설계변수로서 설정하며 그 대상은 모터에 의해 직접 회전하는 링크L0를 제외한 10개의 링크들이다[5]. 진행해 나갈 최적화 설계단계는 알고리즘으로써 Fig 5에 제시되어 있다

최적화의 목적함수로서는 보행보폭의 최대값이며 설계변수로 회전 링크를 제외한 나머지의 링크길이를 최적화 하였다 [5]. 보행높이는 장애물을 타고 넘을 수 있는 최소 높이 5mm를 제한조건으로 두고 그 이하의 결과값을 보이는 조합번호는 버린다. 최소 높이를 이와 같이 설정한 데에는 요철과 언덕이 모두 완만한 경사를 이루고 있으며 5mm의 보행높이를 가지더라도 충분히 마찰을 이용해 타고 넘어갈 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다.

3.1.1 수준평균 분석법-민감도 분석

최적화 방법 중 수준평균 분석법은 명확한 함수관계를 모르는 경우에 실험을 통하여 나온 데이터를

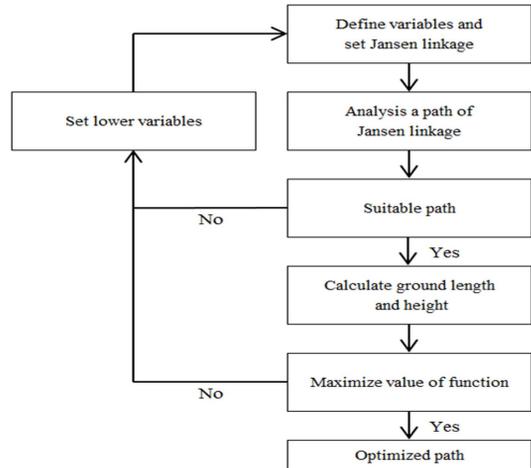


Fig. 5 Algorithm for optimal design

분석하여 해석하는 방법이다. 최적설계 과정은 먼저 어떠한 최적 목표 값을 구하기 위해 설계가 필요한 설계변수들을 지정하고 수준을 지정하여 수직행렬을 만든다. 본 논문에서는 설계 변수로써 Jansen 메커니즘의 링크 L1부터 L10까지를 설정하고 수직행렬 $L_{27}(3^{10})$ 을 이용하여 최적화 실험의 횟수를 정한다. 이러한 수직행렬을 사용하면 각각의 링크에 대한 수많은 실험의 수를 다 수행하지 않아도 최적 값을 얻을 수 있다 [9]. 앞서 선정하였던 링크 길이를 기준으로 최적 설계를 진행하므로 수준2로 지정한다. 본 연구에서는 1mm미만의 미세한 길이변화에서도 보행보폭이 어느 정도 향상이 되는지 알아 보고자 수준 1과 수준 3을 각각 수준2에서 ± 1 mm로 설정한다.

Fig. 6에 1차 최적 설계 결과의 각각의 설계 변수에 대한 민감도 그래프가 도시되어 있다. 대부분의 링크가 수준 별로 보행보폭이 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있으며 특히 1번 링크가 1mm의 변화에 보행보폭이 매우 민감하게 반응하고 있다. 최적화전 보행보폭이 약 33.546mm인 것을 비교했을 때 아직까진 눈에 띄는 성능개선이 이루어 지지 않았으며 1차 분석의 결과값에 따라 수준을 재설정하고 2차 최적설계를 진행한다 [10]. 2차 최적화 설계는 좀더 정밀한 ± 0.5 mm 범위로 진행하며 그 결과값은 Fig. 7과 같다.

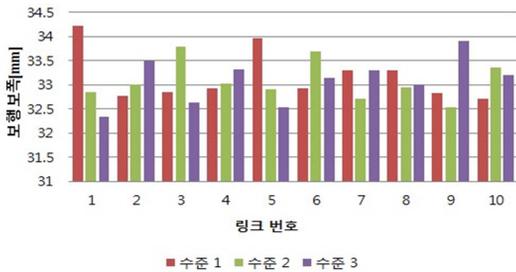


Fig. 6 Sensitivity analysis 1st

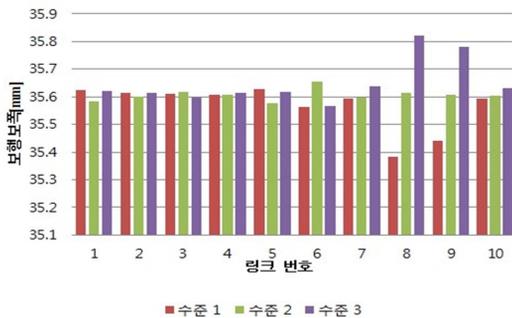


Fig. 7 Sensitivity analysis 2nd

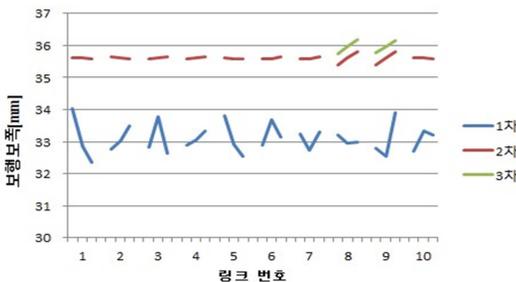


Fig. 8 Results of sensitivity analysis

2차 최적화 설계에서는 목적함수인 보행보폭이 1차와 비교하여 크게 상향평준화 된 것을 확인할 수 있었다. 또한 주목할 점은 다른 링크들과 다르게 링크8번과 9 번은 아직까지 목적함수 값이 매우 민감하게 반응하고 있다는 점이다. 이 결과는 링크 8번과 9번이 아직까지 보폭의 증감에 크게 관여한다는 결과를 도출한다.

3차 최적설계는 설계변수로서 민감도가 아직까지 매우 큰 링크 8번과 9번만 선정하며 수직행렬로써 $L_9(3^2)$ 사용한다. 결과값은 Fig. 8에 도시되어 있다.

Table 2. Optimization result via a level average analysis

| Variables | Before optimization | After optimization |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| L1 | 88.9 mm | 87.9 mm |
| L2 | 76.2 mm | 77.7 mm |
| L3 | 63.5 mm | 63.5 mm |
| L4 | 50.8 mm | 51.3 mm |
| L5 | 50.8 mm | 48.8 mm |
| L6 | 38.1 mm | 38.6 mm |
| L7 | 50.8 mm | 51.8 mm |
| L8 | 38.1 mm | 38.1 mm |
| L9 | 50.8 mm | 53.3 mm |
| L10 | 76.2 mm | 75.7 mm |
| Value of object function | 33.546 mm | 36.395 mm |
| Improved ratio | | 7.828% |

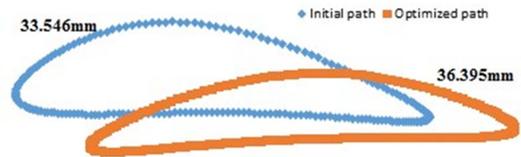


Fig. 9 Optimized trajectory

3.1.2 수준평균 분석법-결과

Fig. 8에 도시된 것 과 같이 3차 최적 설계의 보행 보폭 값은 2차 때보다 향상되어 8, 9번 링크의 수준이 3일 때 보행 보폭의 최대값인 36.395 mm로 나타났다. 결과값에 따라 선정된 각 링크의 길이는 Table 2에 나와있으며 최적화 전보다 보행 보폭이 약 7.828% 개선되었음을 알 수 있다. 이 수치는 1 mm 미만의 링크길이변화 안에서 이루어낸 목적함수 값의 향상이라는 점에서 주목할 만한 결과이다. 또한 보폭의 높이는 처음 조건인 5 mm 이상을 충족하는 6.621 mm로써 장애물을 극복하는 데에 문제가 없음을 확인했다. 최종적으로 최적화 전후의 보폭 궤적의 결과 비교가 Fig. 9에 도시되어 있다.

3.2 Edison software를 이용한 최적설계

앞서 수행했던 최적화 설계는 수준평균 분석법을 이용하여 목적함수 값을 도출하였다. 이번에 수행할 최적설계 방법은 Edison의 S/W를 사용하여 최적의 링크길이를 산출해내는 방법이다.

사용할 S/W는 Theo Jansen Mechanism Optimization Solver이며 이를 사용하기 위해서는 각 링크의 좌표 값을 Input으로써 넣어야 하므로 좌표를 알아내기 위해 Linear Programming Solver S/W를 사용할 것이다.

3.2.1 Linear Programming Solver

이 S/W는 사용자가 설계 변수와 목적 함수, 구속 조건을 텍스트 파일로 입력하면 선형 프로그래밍 문제의 최적 해를 찾아 주는 프로그램이다.

Fig. 10에 L1과 L4가 만나는 Joint의 좌표를 알아내기 위해 설계변수로서 선형 방정식을 세워 텍스트

```

Maximize 4 5
s.t 12.7 >= -0.4234 1
s.t -163.792 >= -2.5794 1
    구속 조건[lp]

81.860855
47.359886 x,y 좌표값[Op]
    
```

Fig. 10 Linear programming solver

Table 3. Optimized linkage size

| Variables | Before optimization | Afer optimization |
|--------------------------|---------------------|-------------------|
| L0 | 12.7 mm | 13.70 mm |
| L1 | 88.9 mm | 89.15 mm |
| L2 | 76.2 mm | 77.35 mm |
| L3 | 63.5 mm | 63.93 mm |
| L4 | 50.8 mm | 51.12 mm |
| L5 | 50.8 mm | 51.29 mm |
| L6 | 38.1 mm | 38.43 mm |
| L7 | 50.8 mm | 51.19 mm |
| L8 | 38.1 mm | 38.50 mm |
| L9 | 50.8 mm | 51.32 mm |
| L10 | 76.2 mm | 76.90 mm |
| Value of object function | 33.546 mm | 36.158 mm |
| Improved ratio | 7.224% | |

파일로 입력 한 것과 그 결과값이 도시되어 있다. 선형 식을 세우기 위해 Joint를 공유하는 링크 간의 각도를 측정, 기울기 값을 알아내고 L0의 위치를 원점으로 좌표를 지정하면 L1과 L4의 설계변수 값을 도출해낼 수 있다. 이때 설계변수는 계수만을 구속조건 항으로 입력한다. 주의할 점은 Maximize 문제를 해결하는 S/W로서 목적함수의 값이 음수라면 대체 변수를 사용하여 조건을 양수로 변경하여 입력해야만 한다. 위의 과정을 L9와 L10이 만나는 Joint의 좌표를 알아내기까지 반복하며 결과값은 Table 3에 도시되어있다.

3.2.2 Jansen Mechanism Optimization Solver

앞 절에서 구한 좌표들은 이제 사용할 최적화 S/W의 Input이 된다. Fig. 11과 같이 텍스트 파일로써 좌표들을 입력하면 S/W에서 민감도 FDM계산을 통해 수치적으로 계산, 최적화된 Joint의 위치를 출력하여 줄 것이다. 그 결과값을 토대로 M.sketch 프로그램에서 궤적을 살펴보았다.

3.2.3 Edison S/W optimization-결과도출

Table 3과 같이 보행 보폭은 36.158mm 이며, 초기 설계 보폭보다 7.2% 증가된 것으로 확인되었다.

```

angle_weight 1
length_weight 0.1
0 0 1 1
0 12.7 1 1
81.8609 47.3599 1 1
113.7274 -7.551 1 1
63.5 0 1 1
57.2561 -37.5881 1 1
107.4781 -45.1465 1 1
43.484 -86.486 1 1

0.000000 0.000000
0.059394 13.700000
82.457649 47.729736
114.533318 -7.583736
63.822102 0.130401
57.703846 -37.875977
108.318596 -45.506031
43.747715 -87.266876
    
```

Input

Output

Fig. 11 Result of Linear programming solver

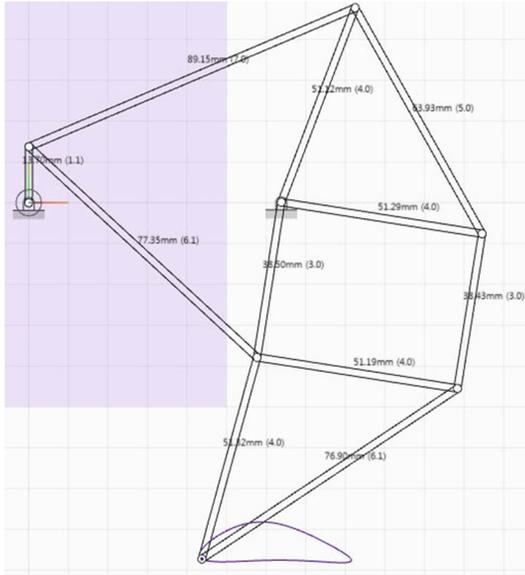


Fig. 12 Optimized trajectory using M.sketch

최종적으로 M.sketch를 이용한 보폭 궤적은 Fig. 12에 도시되어 있다.

전 과정에서 수행한 수준 평균 분석법에서 L0의 길이를 고정하고 Joint 1과 Joint 5 사이의 거리를 구속조건으로 사용하였지만 S/W는 따로 조건을 두지 않고 최적화가 진행 되었기 때문에 고정된 링크 길이였던 L0부터 길이가 조정되었다. 변화폭은 대부분 1 mm내외로 이루어졌으며 수준 평균 분석법과 비슷한 범위를 두고 링크가 조정 되었지만 그 궤적은 상당히 다른 점을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 Edison 에서 제공되는 Software를 사용하여 Jansen Mechanism 기반 4족 보행이 가능한 로봇을 설계하여보고 과학상자를 이용하여 직접 제작을 진행하였으며 로봇의 보행보폭을 늘리기 위해 2가지 방법으로 최적화를 진행, 다리를 재설계 하고 그 결과를 측정, 비교 하였다. 이때 Output point의 궤적이 Linkage Length의 미세한 변화에도 민감하게 반응하는지 알아보고자 최적화 수준범위를

1 mm미만으로 설정하였으며 민감도 그래프를 통해 보폭의 증감에 크게 관여하는 요소 또한 확인할 수 있었다.

최적화를 진행하기 위하여 첫 번째로 수준 평균 분석법을 적용, 설계변수로서 Linkage를 설정하고 보행보폭의 최대값을 목적함수로서 정의 하였다. 3차레에 걸쳐 결과값 반복 측정하고 이를 민감도 그래프를 사용하여 해석하였다. 결과적으로 최적화전보다 7.8%증가한 보행보폭 36.395 mm를 얻었으며 이로써 1 mm미만의 정밀한 길이변화에서도 만족할만한 목적함수 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

두 번째 방법으로 Linear Equation S/W와 Optimization S/W를 사용하여 Joint의 좌표를 정밀하게 측정하고 이에 따른 최적화된 좌표 값을 도출하였다. 보행보폭의 결과값으로 36.158 mm를 얻었으며 이는 최적화 전보다 7.2%증가한 값이다.

본 연구에서는 S/W를 사용할 때에 선형 방정식을 이용하였지만 Joint를 공유하는 링크들이 그리는 궤적을 바탕으로 원 방정식을 세워 그 접점을 구하는 S/W가 사용된다면 같은 좌표 값을 얻어 동일한 연구를 진행할 수 있을 것이다 [11].

참고문헌

1. Park, H.J. and Kim, B.K., 2006, a Crawling Based Locomotive Mechanism for Pipe Inspection Microbot, *the Korean Society of Mechanical Engineers*, 7-13.
2. Kim, H.G., Jung, M.S., Shin, J.K and Seo, T.W., 2013, Optimal design of Klann-linkage based walking mechanism for amphibious robot running on water and ground, *Institute of control robotics and systems*, 20(9), 936-941.
3. Kim, S.K. and Kim, D.H., 2011, Kinematic Analysis of a Legged Walking Robot Based on Four-bar Linkage and Jansen Mechanism, *Korean Institute of Intelligent Systems*, 21(2), 159-164.
4. Kim, S.W., Kim, Y.G., Jung, H.M., Lee, S.H., Hwang, S.H. and Kim, D.H., 2010, Development of a Legged Walking Robot Based on Jansen

- Kinetics, *Korean Institute of Intelligent Systems*, 20(4), 509-515.
5. Kim, S.W. and Kim, D.H., 2011, Design of Leg Length for a Legged Walking Robot Based on Theo Jansen Using PSO, *Korean Institute of Intelligent Systems*, 21(5), 660-666.
 6. Jung, H.S., Choi, Y.H. and Park, J.B., 2010, Posture Control of Quadruped Robot Using Gyroscope, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 1836-1837.
 7. Komoda. K. Wagatsuma. H. 2013, A proposal of the extended mechanism for Theo Jansen linkage to modify the walking elliptic orbit and a study of cyclic base function, Department of Brain Science and Engineering, *Kyushu Institute of Technology*, 1-2.
 8. Kim S.W., Kim Y.G., Jung H.M., Lee S.H., Kim H.S., Han S.H. and Kim D.H., 2010, Implementation of a Biologically Inspired Crab Robot Walking in Marshland, *Korean Institute of Intelligent Systems*, 404-405.
 9. Choi J.N., Lee S.H., Jeong K.M. and Seo T.W., 2015, Kinematic Parameter Optimization of Jumping Robot Using Energy Conversion of Elastic Body, *Institute of Korea Atomic Energy Research*, 55-58.
 10. Kim J.W., 2008, Development Methodology about new creative product, *Mumundang*, 316-321.
 11. Kim S.W., Han S.H. and Kim D.H., Analysis of a Crab Robot Based on Jansen Mechanism, 2011, *Institute of Control Robotics and Systems*, 858-859.