

# 종이 접기 구조를 활용한 단일 구동기 보행 로봇의 설계, 제작 및 분석

## Design, Fabrication and Analysis of Walking Robot Based on Origami Structure

김태연<sup>1</sup>, 이석훈<sup>1</sup>, 이기중<sup>1</sup>, 이대영<sup>2</sup>, 김지석<sup>2</sup>, 조규진<sup>2</sup>✉  
Tae-Yeon Kim<sup>1</sup>, Seok-Hun Lee<sup>1</sup>, Gi-Jung Lee<sup>1</sup>, Dae-Young Lee<sup>2</sup>, Ji-Suk Kim<sup>2</sup>, and Kyu-Jin Cho<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> 경기과학기술대학교 (Gyeonggi Science High School)

<sup>2</sup> 서울대학교 기계항공공학부 (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University)

✉ Corresponding author: kjcho@snu.ac.kr, Tel: +82-2-880-1663

Manuscript received: 2014.8.1 / Revised: 2014.10.21 / Accepted: 2014.11.5

*Recently, there have been many researches about applications of origami to mechanical engineering, which realizes a 3D structure by folding a 2D plane material. With this simple manufacturing process, origami was even adopted by some roboticists as a way to build an entirely new robot with benefits in terms of cost, weight, and structural simplicity. In this paper, we propose a new type of a walking robot based on origami structure. Because all the components of the robot that generate gait motion are mechanically connected, it can actually walk forward with only a single actuator. We also showed the similarity of gait trajectories between a kinematic analysis and the actual gait motion measured by video tracking. This result proved the possibility of designing an origami-based robot with the identical gait trajectory as we plan.*

Key Words: Origami structure (종이 접기 구조), Walking robot (보행 로봇), Plane-based mechanism (평면 기반 메커니즘)

### 1. 서론

소형 로봇 연구의 선두 그룹인 미국 Harvard의 R. J. Wood 교수 팀은 최근 2 cm 내외 크기의 초소형 비행 로봇의 비행에 성공하였다.<sup>1</sup> 이러한 형태의 초소형 로봇은 사람이 탐사하기 힘든 재난 현장이나 전장에서 정찰 로봇으로 활용되는 등 다양한 분야에서 높은 활용 가능성을 가지고 있다.

초소형 비행 로봇의 제작은 그에 앞서 소형 로봇에 특화된 새로운 로봇 설계 및 제작 방법의 개발이 있었기 때문에 가능하였다. 다양한 부품들의

조립으로 메커니즘을 구성하였던 기존의 로봇 제작에서 벗어나, 로봇을 이루는 몸체 구조는 단순히 재료들을 ‘종이접기’처럼 쌓고 접어서 구현되었으며, 이는 로봇의 소형화에 문제로 작용하였던 가공, 조립 등과 같은 기존의 제작 방법의 한계를 극복하도록 해주었다. 이러한 새로운 제작 방법은 Wood 그룹 외에도 세계적으로 다양한 그룹에서 시도 되고 있으며 주목할만한 성과들을 보여주고 있다.<sup>2,7</sup>

종이 접기는 접는 순서, 접는 선의 위치, 접는 방법에 따라 같은 2차원 평면에서 여러 가지 3차

원 구조물을 만들어 낼 수 있다는 특성을 가지고 있다.<sup>8,9</sup> 이 독특한 특성은 수학, 교육, 디자인 등의 분야에서 많이 활용되어 왔으며, 앞서 언급하였던 예시처럼 최근 이를 공학적으로 활용하고자 하는 시도가 활발히 이루어 지고 있다.<sup>10</sup>

하나의 관절 구조를 만든다고 하였을 때, 기존의 기계 구조에서는 링크 두 개를 조립하여 만들지만, 종이 접기를 이용한다면 단순히 접는 것만으로 이를 구현할 수 있다.<sup>11,12</sup> 이러한 구조는 관절 구조의 마찰이 없고, 전체 도면이 평면상에서 제작 될 수 있기 때문에 기존의 메커니즘에 비해 확대 및 축소가 용이하다. 이와 더불어 종이 접기 구조를 연결하여 마치 기계구조를 설계하는 것처럼 단순한 구동기로도 복잡한 움직임을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 종이 접기 구조를 활용하여 보행을 할 수 있는 로봇을 제작하고자 한다. 보행은 대표적인 로봇 움직임 중 하나로서, 보행 모션을 구현하기 위해서는 다리 끝이 2차원 평면 내에서 원이나 사각형 등의 순환궤도를 그리는 걸음걸이 궤도 설계가 필요하다. 또한 좌 우 다리 모션에 180도의 위상 차이를 줄 수 있어야 자연스러운 움직임을 구현하는 것이 가능하다. 종이 접기 구조를 활용하여 보행 로봇을 구현한 선행 연구로는 두 축에 각각 구동기를 달아 궤도를 구현하거나 7 볼 조인트처럼 자유로운 각도변화가 가능한 다리를 제작한 뒤 모터를 장착하여 원 궤도를 구현하는 연구가 있었다.<sup>2</sup>

본 연구에서는 종이 접기 구조를 활용하여 선행 연구들과는 다른 형태로 단일 구동기를 이용하여 보행 모션을 구현한다. 본 연구를 통하여 우리는 독립된 4절 링크 구조, 상하 운동을 위한 패터닝, 쌍 안정성 구조의 활용 등 종이 접기 구조에 활용 가능한 다양한 디자인 요소들을 제안하며 이를 적절하게 연결시킴으로써 복잡한 구동이 단순한 구동기로 해결될 수 있음을 보여준다.

## 2. 보행 메커니즘의 설계

보행은 특정한 모션들의 반복으로써 도출되는 결과로, 로봇의 다리 끝점은 보행에 필요한 순환 궤도를 주기적으로 반복하여 만들어내야 한다.

한 주기 안에서 로봇의 다리는 Fig. 1에서 나타낸 것처럼 총 네 단계를 수행하게 된다. 이 중 Fig. 1①과 ③ 화살표는 양쪽 다리의 높이를 바꾸는 상

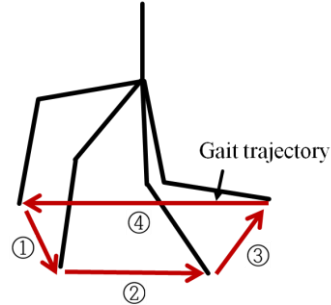


Fig. 1 Square shaped gait trajectory

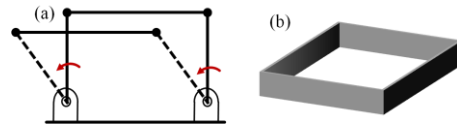


Fig. 2(a) Parallelogram linkage (b) Origami pattern

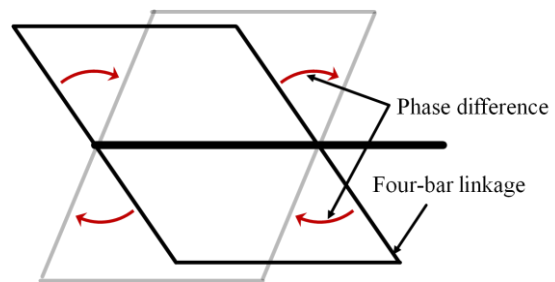


Fig. 3 Realizing a forward movement

하 모션에 해당하고, Fig. 1②와 ④는 다리를 진행 방향으로 이동시키는 전후진 모션에 해당한다.

따라서 로봇 구조는 이러한 상하 모션과 전후진 모션을 구현할 수 있어야 하며 최소한의 구동기 사용을 위하여 이를 기계적으로 연결시켜 자동적으로 주기를 이루도록 하여야 한다. 또한 보행을 위하여 좌우 다리는 180도의 위상차이를 가져야 하며 이 역시 최소 구동기 활용을 위하여 기계적으로 연결되어야 한다.

### 2.1 전후진 모션의 구현

Fig. 2(a)의 4절 링크는 링크의 길이가 고정된 채로 좌 우로 기울어지며 한정된 원호 궤도만을 그리며 링크 사이의 각도를 조절할 수 있다. 직사각형 형태로 제작할 경우 고정된 링크와 마주보는 링크는 항상 서로 평행하다. 이러한 4절 링크는 Fig. 2(b)와 같이 넓은 직육면체의 옆면과 같은 형태로 종이 접기 구조를 이용하여 쉽게 제작이 가

능하다. 또한 4절 링크의 특성을 이용하면, Fig. 3과 같이 좌우 180도의 위상차가 있는 다리 끝의 전후진 모션을 구현하는 것이 가능하다.

**2.2 상하 모션의 구현**

4절 링크는 운동계적이 형성되는 평면을 벗어나 다른 방향으로 모션을 만들어 낼 수 없다. 즉 앞서 구현한 다리 끝의 전후진 모션에 상하 모션을 더하기 위해서는 새로운 구조의 추가가 필요하다. 이를 위하여 종이접기 구조로 이루어진 Fig. 4 (a)와 같은 구조를 추가하였다. 이 다리 구조는 각도  $\theta$  가 커지면 다리 끝이 올라가고 작아지면 다리 끝이 내려가도록 제작되어, 4절 링크의 꼭지점에 부착할 경우 4절 링크의 각도 변화에 따라 다리 끝의 높이를 변화시킬 수 있다.

상하 방향의 움직임은 전후진 방향의 움직임과 같은 위상을 가지면 안되므로 이를 분리시키기 위하여 다음과 같이 기존의 4절 링크의 내부에 Fig. 4(b)와 같이 새로운 4절 링크를 추가한 뒤, 그 안에 제작된 다리 구조를 부착하였다.

**2.3 보행 모션의 기계적 연결**

이렇게 제작된 로봇 구조는 상하 모션을 구현하는 안쪽 4절 링크가 바깥쪽 4절 링크와 한 면을 공유할 뿐 모터의 동력이 전달되지 않은 채 상하 모션이 독립되어있다. 따라서 안쪽 4절 링크의 각도를 조절하는 메커니즘이 필요하며, 이 메커니즘은 외부 4절 링크의 전후진 모션과 적절하게 연결되어 있어야 한다.

두 모션을 합성시켰을 때 Fig. 5(a)처럼 두 모션이 같은 위상을 가지는 것은 원활한 보행을 이끌어낼 수 없으며, 좋은 보행을 위해서는 Fig. 5(b)와 같이 한 모션은 연속적으로 부드럽게 진동하고 다른 한 모션은 상, 하 두 상태 사이를 진동하며 넓은 궤도를 만들어야 한다.

본 연구에서는 쌍안정이라는 개념을 도입하여 이러한 움직임을 구현하였다. 상하 모션을 구현하는 안쪽 4절 링크는 다리가 올라간 상태와 내려간 상태를 각각 전진과 후진 주기에서 유지하여야 한다. 이 문제는 자석의 척력을 이용하여 다리 구조에 쌍안정을 부가함으로써 해결하였다.

Fig. 6은 자석의 척력을 이용한 쌍안정이 구동되는 과정을 보여준다. Fig. 6에서 ①, ②부분에 네오디뮴 자석이 설치되어있고, 두 자석은 서로 밀는 방향으로 힘을 가하고 있다. 이 척력에 의해

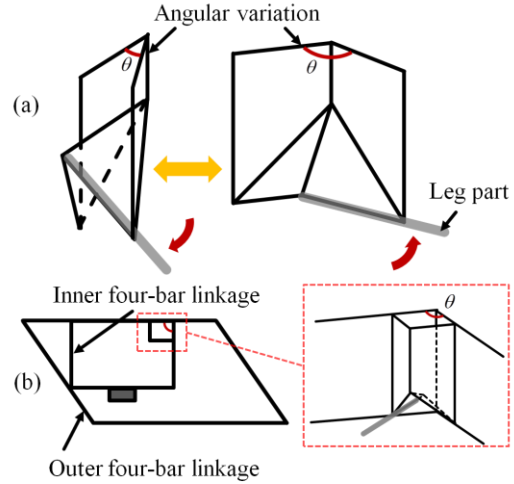


Fig. 4 Square shaped gait trajectory

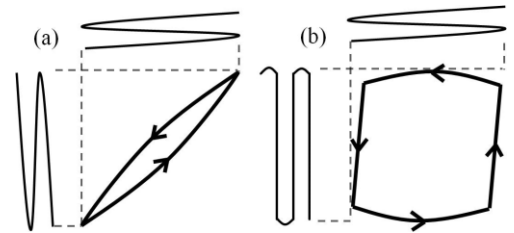


Fig. 5 Compound trajectories of two specific motions

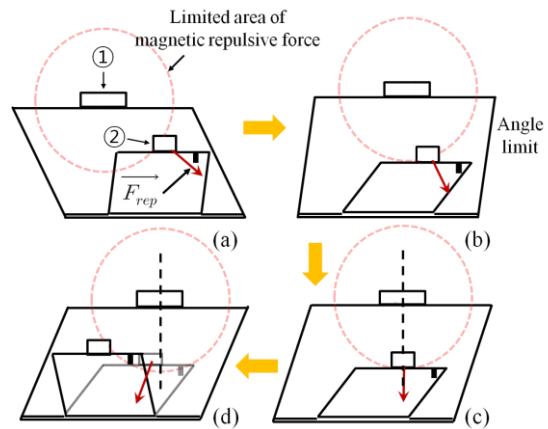


Fig. 6 Performing of the magnetic bi-stable

안쪽 4절 링크는 항상 한 쪽으로 기울어져 밀려있으며, 자석의 척력에 의해 Fig. 6에서의 파선 안으로 자석②가 들어갈 수 없다(Fig. 6(a)).

안쪽 4절 링크에 각도의 한계를 부여한다면, 한계각도에 이르렀을 때 안쪽 4절 링크와 바깥쪽

4절 링크의 접촉이 떨어지며 안쪽 4절 링크의 각도가 고정된다(Fig. 6 (b)). 이 때 바깥쪽 4절 링크가 같은 쪽으로 기울어져 ①이 ②를 지나가는 순간 ②에 가해지는 척력  $\vec{F}$ 의 수평방향이 기울어진 방향의 반대쪽으로 작용하고, 안쪽 4절 링크는 힘을 받아 반대쪽으로 빠르게 넘어간다(Fig. 6(c)~6(d)). 결과적으로 바깥쪽 4절 링크가 연속적인 등속도 진동을 하더라도 안쪽 4절 링크는 오직 왼쪽 또는 오른쪽으로 기울어진 상태 만을 가지게 된다.

이러한 메커니즘의 결과로 바깥쪽 4절 링크가 구현하는 전후진 모션과 안쪽 4절 링크의 다리가 구현하는 상하 모션이 Fig. 5(b)와 같은 궤도를 그리며 합성된다. 바깥쪽 4절 링크가 기울어지며 전진한 다음 다리를 내리고, 내려간 다리를 유지하며 후진한 뒤 다시 다리를 올린다.

**2.4 선형 구동의 구현**

쌍안정에 의해 합성된 두 모션은 바깥쪽 4절 링크의 진동운동을 기반으로 구현되므로, 특정한 동력을 부가하여 바깥쪽 4절 링크를 진동시켜야 한다. 본 연구는 간단한 구동기로 보행을 구현하고자 하였으므로, 단일 선형 구동기를 이용하여 바깥쪽 4절 링크를 진동시키고자 한다.

선형 구동기는 로봇의 규모나 동력의 필요치에 따라 다양한 구동 방법을 택할 수 있으며, 본 연구에서 제작될 로봇의 규모나 재질 등을 고려하였을 때 모터 수준의 동력을 이용하는 것이 적합하다고 판단하였다. 따라서 Fig. 7(a)와 같이 모터에 원판을 연결하고, 원판과 강체 링크의 한 점을 링크로 연결시켜 모터의 회전에 따라 강체 링크의 반대쪽 점이 특정 궤도를 진동하도록 하였다.

Fig. 7(b)는 이러한 구동방법을 로봇의 바깥쪽 4절 링크에 설치하는 방법이다. 강체 링크와 바깥쪽 4절 링크가 연결된 점 B는 AB를 반지름으로 하는 원호를 그리며 진동하게 되고, 이는 적절한 각도 내에서 진행방향에 대한 선형 진동으로 생각할 수 있다. 이러한 동력을 바탕으로, Fig. 8과 같은 과정을 반복하였을 때 본 연구에서 설계한 로봇은 단일 구동기를 통해 앞으로 걸어갈 수 있다.

**3. 보행 로봇의 제작**

**3.1 종이 접기 구조 제작**

보행 물체를 제작하기 위해서는 종이 접기에서의 면에 해당하는 강성을 가진 골격 재질과, 접는

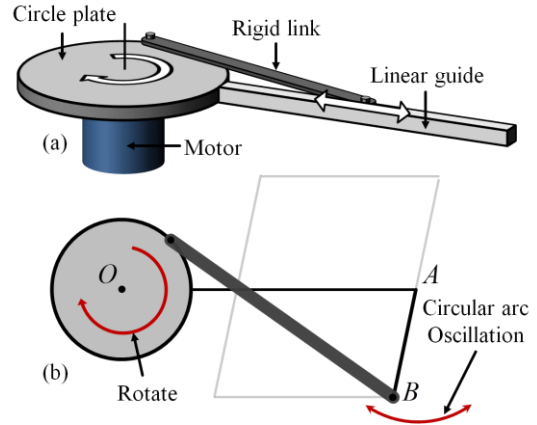


Fig. 7 (a) Making linear drive (b) Installation linear drive at the outer four-bar linkage

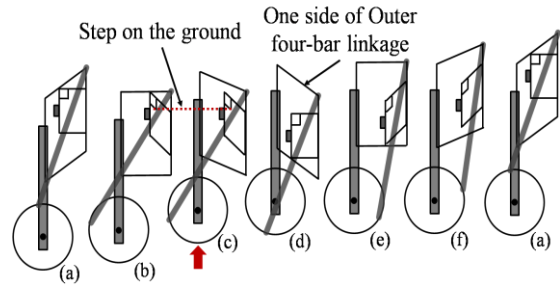


Fig. 8 Six steps of origami robot's walking process

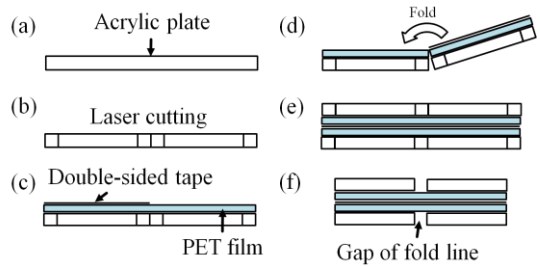


Fig. 9 Planar fabrication process

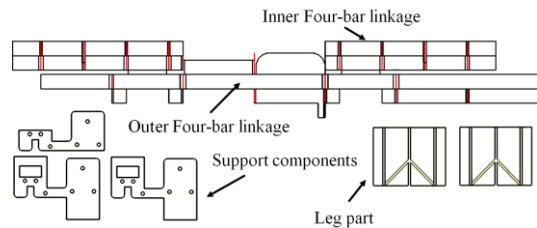


Fig. 10 Planar figure of the robot

선에 해당하는 면 사이의 유연한 관절 재질이 필요하다. 본 연구에서는 평면 기반의 재질을 전개도의 형태로 자른 후 접어 올려 보행 몸체를 제작하였다. Fig. 9와 같이 관절을 이루는 PET 필름 양면에 골격을 이루는 아크릴판을 적층하여 전개도를 제작하였다(Fig. 10). 면과 면 사이가 접히는 각도를 고려하여 접히는 부분에서 아크릴 판의 빈 공간인 유격을 두었다 (Fig. 9(f)). 링크가 작은 각도 범위 내에서 움직인다면 유격을 짧게 하여 비틀림이 줄어들도록 하였다.

### 3.2 로봇 구조 제작

자석은 캐속 조형법(rapid Prototyping)으로 제작된 소형 케이스를 이용하여 외부 및 내부 4절 링크에 설치되었다(Fig. 11(a)). 이렇게 제작된 모델은 좌우 대칭이지만 다리가 두 개이기 때문에 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 한 쪽이 지면과 떨어지기 위해서는 중심에 새로운 지지대가 필요하다. 따라서 모터 하단에 지지대를 설치하여 로봇의 무게를 지탱하며 보행하도록 하였다.

안쪽 4절 링크에 부착되는 다리 역시 종이 접기를 기반으로 제작되었다. Fig. 11(b)와 같이 골격을 형성하는 면 부분은 얇은 알루미늄 판을 사용하였고, 보행 몸체와는 달리 알루미늄 판의 양면에 테이프를 접착시켜 골격의 바깥쪽에 관절을 형성하였다. 전개도를 이루는 알루미늄 판의 한 조각을 길게 연장시킨 후 길이 방향으로 ‘ㄱ’자로 접음으로써 다리가 힘을 받을 때 휘어지지 않도록 하였다.

### 3.3 로봇 구동부 제작

로봇은 Fig. 13과 같이 제작되었다. 몸체의 중심 링크와 연결된 지지대에 장착된 모터는 바깥쪽 4절 링크의 한 꼭지점과 링크로 연결되어 모터의 중심과 꼭지점을 잇는 경로에서의 왕복을 구현하였다. 이러한 왕복 구동은 앞서 설계된 보행 메커니즘에 의하여 보행 모션으로 전환되었고, Fig. 14와 같이 보행하는 로봇을 제작할 수 있었다.

## 4. 보행 로봇의 분석 및 실험 결과

### 4.1 로봇 구조 해석

모델은 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 모터로 이루어진 단일 선형 진동 구동기의 동력을 직접 전달받아 움직이는 1단

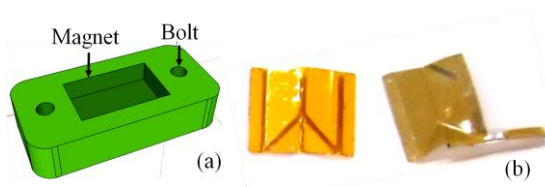


Fig. 11 Magnet case and manufactured leg part

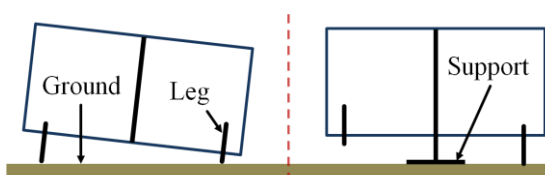


Fig. 12 Robot support structure



Fig. 13 A complete robot with actuator

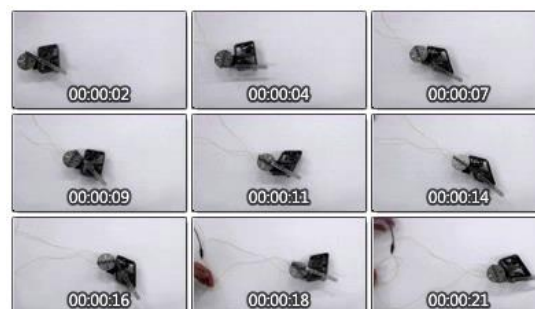


Fig. 14 Snap shot of the walking robot

계(Fig. 15(a)), 바깥쪽 4절 링크와 안쪽 4절 링크 사이의 상호작용으로 작동하는 2단계(Fig. 15(b)), 안쪽 4절 링크에 부착되어 각도에 따라 다리 구조가 움직이는 3단계(Fig. 15(c))로 구성된다.

기준 좌표축을 설정하고, 각 단계에서 원점O와 구하고자 하는 궤도의 이동점 P를 설정한다. 한 단계의 이동점은 다음 단계에서의 원점이 되도록 하여, 각 단계에서의 원점에 대한 이동점의 벡터를 시간에 따라 구한다. 결과적으로 각 단계에서

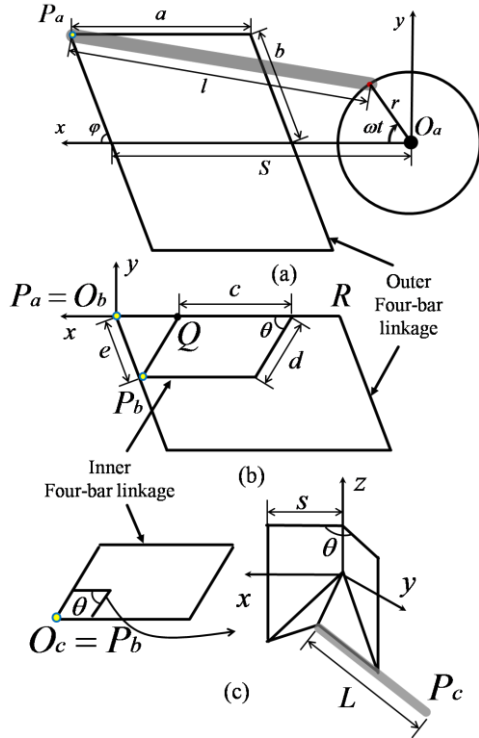


Fig. 15 The sections for geometrical analyze

도출된 벡터를 총합한다면, 1단계의 원점에 대한 3 단계의 이동점, 즉 모터에 대한 다리 끝의 궤도를 예측할 수 있게 된다. Fig. 15에는 기하학적 해석에 사용된 수치 및 변수들을 그림에 표시하였다. 각 단계의 그림은 모두 같은 축을 공유한다. x축은 로봇의 진행방향, y축은 로봇의 오른쪽, z축은 로봇의 윗방향이다.

1단계(Fig. 15(a))에서 모터의 각속도는 일정하다고 가정하였다. 모터와 4절 링크를 연결하는 강제 링크의 길이가 일정하므로 (1)과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 이를 정리하면  $\sin\varphi$ 에 대한 이차방정식이 얻어지고, 해를 구한 뒤 (2), (3), (4)로 치환하여 나타내면 (5)의 결과가 산출된다. 따라서 좌표 축에서  $P_a$ 의 위치는 (6)과 같다.

$$(S - r\cos\omega t + b\sin\varphi)^2 + (b\sin\varphi)^2 = l^2 \quad (1)$$

$$A = b^2 + R^2 + S^2 - l^2 - 2R(L + b)\cos\omega t \quad (2)$$

$$B = 2Sb \quad (3)$$

$$C = 2bR\sin\omega t \quad (4)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{2AC - B^2 \sqrt{(B^2 - 2AC)^2 - 4C^2(A^2 - B^2)}}{2C^2} \quad (5)$$

$$\therefore P_a = (S + b\cos\varphi, L\sin\varphi) \quad (6)$$

2단계는 일정한 주기를 가지고 앞서 Fig. 6으로 언급한 과정을 거치며 불연속적으로 움직이므로, 불연속점을 기준으로 나누어 각 구간을 분석해야 한다. 2단계의 한 주기는 안쪽 4절 링크가 자석의 척력에 밀려 기울어지며 바깥쪽 4절 링크와 접하는 구간, 안쪽 4절 링크의 한계각도에 의해 더 이상 기울어지지 않는 구간, 척력의 방향이 바뀌어 반대쪽으로 빠르게 기울어지는 순간과 다시 반대쪽으로 바깥쪽 4절 링크와 접하는 구간 등으로 반복된다.

먼저 안쪽 4절 링크자석의 척력에 밀려 바깥쪽 4절 링크와 접한 상 구간을 살펴보면, 접하면서 생긴  $\Delta O_b P_b Q$ 에 제 2 코사인 법칙을 적용시켜 (7)을 얻을 수 있다. 두 가지 방법으로 삼각형의 높이를 나타낸 (8)을 대입하여  $\sin\theta$ 에 대하여 정리하고, (9)의 치환을 거쳐 간단히 표현하면 (10)과 같다. 이를 이용하여  $P_b$ 를 구하면 (11)과 같다.

$$\overline{O_b P_b}^2 = \left(\frac{a-c}{2}\right)^2 + h^2 - 2h\left(\frac{a-c}{2}\right)\cos\theta \quad (7)$$

$$\overline{O_b P_b}\sin\varphi = h\sin\theta \quad (8)$$

$$D = \frac{a-c}{2h}, E = \tan\varphi, F = \csc^2\varphi \quad (9)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{4h^2 \tan\varphi - (a-c)^2} - (a-c)\tan\varphi}{2hc\sec^2\varphi} \quad (10)$$

$$\therefore P_b = \left(\frac{c-a}{2} + h\cos\theta, -h\sin\theta\right) \quad (11)$$

안쪽 4절 링크의 각도가 한계점에 도달한 구간은 안쪽 4절 링크의 상태가 변하지 않는다. 즉  $\overline{OR}$ 과 안쪽 4절 링크를 하나의 강체로 볼 수 있고,  $\overline{O_b P_b}$ 는 시간에 따라 일정한 값을 가진다. 한계각도  $\theta_{\text{limit}} = \alpha$ 라 하면 (12)를 만족한다.

$$P_b = \left(\frac{c-a}{2} + h\cos\alpha, -h\sin\alpha\right) \quad (12)$$

척력의 방향이 전환되는 순간 안쪽 4절 링크는 빠르게 반대쪽으로 기울어진 후, 다시 바깥쪽 4절 링크와 접하며 움직인다. 반대쪽으로 기울어지는 순간은 걸음걸이에 영향을 주지 않을 정도로 짧은

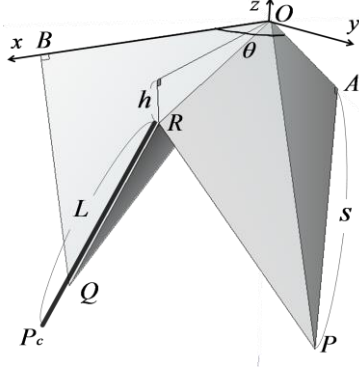


Fig. 16 The coordinate space for the leg part

시간이며, 궤도를 그리지 않고 단순히 반대쪽 접점으로 바뀌었다고 가정할 수 있다.

3단계는 다리 구조의 패턴이 입체적이기 때문에 좌표공간에서 해석해야 한다. Fig. 16과 같이 점을 잡으면 식 (13)을 만족한다. 이 때 원점 O는  $O_c(X_b)$ 와는 다른데, 점 P와 Q의 좌표는 (14)와 같고, 변 RQ의 길이를 구하는 (15)와 같은 식을 구한다. 이를 h에 대하여 정리하면 (16)과 같다. 따라서 R의 좌표에 (15)를 정리해 얻는 h를 대입하면 (17)과 같다. 변 RQ를 다리의 길이방향으로 연장시켜 그 끝점이  $P_L$ 이라 하면 외분점을 구하는 방법을 이용해  $P_L$ 을 (18)과 같이 구할 수 있다. 다리 구조가 안쪽 4절 링크에 부착되어 있으므로 구해진 다리 끝의 좌표 상의 원점은  $P_c$ 로 이동시켜야 한다.  $O_c$ 에 대한  $P_c$ 의 좌표는 (19)와 같다.

$$\overline{OA} = \overline{OB} = \overline{BQ} = \overline{QR} = \overline{RP} = \overline{PA} = s \quad (13)$$

$$P(s, 0, s), Q(s \cos \theta, s \sin \theta, s) \quad (14)$$

$$\left( \frac{s - \sqrt{s^2 - h^2} \cos \theta}{2} \right)^2 + (s^2 - h^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} + (s - h)^2 = s^2 \quad (15)$$

$$H = s \frac{(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2})}{(1 + \cos^2 \frac{\theta}{2})} \quad (16)$$

$$R = \left( \frac{2s \cos^2(\frac{\theta}{2})}{1 + \cos^2(\frac{\theta}{2})}, \frac{2s \cos(\frac{\theta}{2})}{1 + \cos^2(\frac{\theta}{2})}, s \frac{(1 - \cos^2(\frac{\theta}{2}))}{(1 + \cos^2(\frac{\theta}{2}))} \right) \quad (17)$$

$$P_L = \left( x_R + \frac{L}{s}(s - x_R), y_R \left(1 - \frac{L}{s}\right), z_R + \frac{L}{s}(s - z_R) \right) \quad (18)$$

$$\therefore P_c = (-s, -s, s - T) + P_L \quad (19)$$

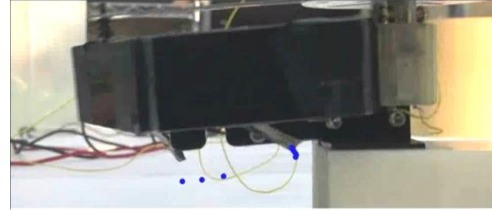


Fig. 17 Analyzing with 'measure Dynamics'

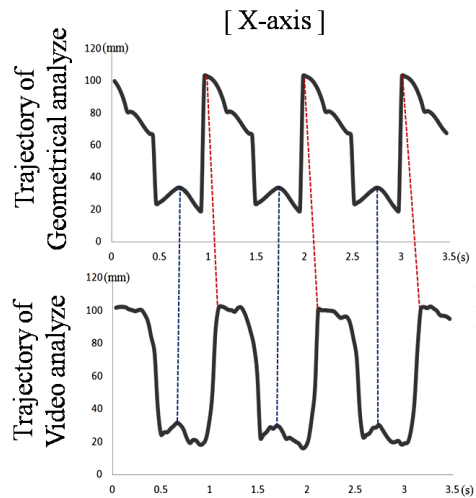


Fig. 18 Time-based graph showing the x-coordinates of the endpoint of the robot's leg part

이러한 방법으로  $P_a, P_b, P_c$ 를 구하여 세 벡터값을 더하면 모터의 중심을 원점으로 하는 다리 끝의 좌표를 시간에 따른 함수로 나타낼 수 있다.

#### 4.2 실험 결과 분석

본 연구에서는 모델을 기하학적으로 해석한 결과와 실제 로봇을 제작하여 동영상상을 통해 분석한 결과를 비교함으로써 로봇의 모델링으로부터 구현되는 보행궤도를 이론적으로 예측할 수 있음을 보이고자 한다.

영상 분석 시 본래 로봇이 지면에 놓여 보행하는 상태를 분석해야 하지만, 이론적 해석에 있어 각 부분에 가해지는 힘을 전부 고려하여 계산하는 것은 매우 복잡하므로, 지면으로부터 가해지는 수직항력을 배제시킨 상태에서 분석하기로 한다.

Fig. 17은 로봇의 옆모습을 촬영한 동영상에서 프레임 단위로 다리 끝에 파란색 점을 마우스로 찍어 트래킹하는 화면이다. Fig. 16의 좌표축과 일

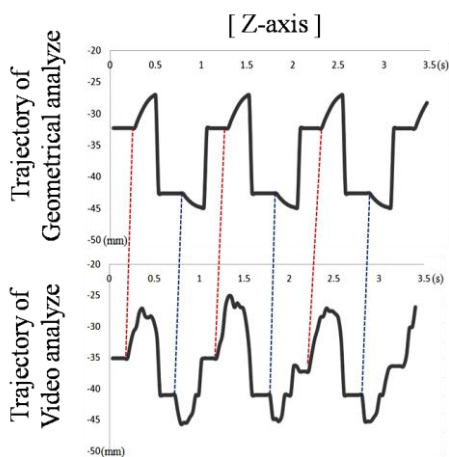


Fig. 19 Time-based graph showing the z-coordinates of the endpoint of the robot's leg part

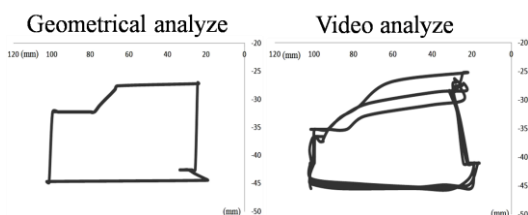


Fig. 20 Gait trajectories through analysis

치하도록 영상에서 x축과 z축을 설정하여 트래킹 하였다. 앞서 해석한 값을 이 과정으로써 얻은 실제 실험값과 비교하였을 때, 각 축에 대한 시간에 따른 그래프는 x축은 Fig. 18, z축은 Fig. 19와 같다. 이 때 가로축의 단위는 s, 세로축의 단위는 mm이다. 또한 Fig. 20은 이 그래프를 Fig. 5와 같이 합성함으로써 표현되는 순환궤도를 비교한 것이다.

### 5. 결론

본 연구의 목표는 종이 접기 구조를 활용한 단일 구동기 보행 로봇을 제작하는 것이다. 목표를 이루기 위하여 독립된 4절 링크 구조, 상하 운동을 위한 패터닝, 쌍 안정성 구조 등 종이 접기 구조에 활용 가능한 다양한 메커니즘들을 설계하였고 이를 적절하게 연결하여 복잡한 구동이 단순한 구동기로 해결될 수 있음을 증명하였다. 또한 이론적 분석을 통하여 로봇의 성능을 어느 정도 예측할 수 있음을 보여주었다.

본 연구 과제의 완성도를 높이기 위한 추후 과

제로는 다음과 같은 것들이 제시될 수 있다. 본 연구에서는 개념의 실험적 증명을 위하여 제작의 난이도를 낮추고자 비교적 큰 크기의 로봇을 비교적 두꺼운 재료를 활용하여 제작하였다. 하지만 이는 얼마든지 작고 얇아질 수 있는 요소이며 로봇을 더 소형화하는 것은 본 개념을 좀 더 강하게 주장할 수 있도록 하여줄 것이다. 또한 이 외에도 다양한 형태의 쌍안정성 구조와 보행 모션을 만들기 위한 링크 구조가 설계되고 분석, 활용 될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 미래창조과학부 경기과학고 심화 R&E 사업, 대학중점연구소 지원사업(2014048162), 및 미국 Air Force Research Laboratory (FA2386-13-1-4019)의 지원으로 수행되었음.

### REFERENCES

1. Ma, K. Y., Chirarattananon, P., Fuller, S. B., and Wood, R. J., "Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot," *Science*, Vol. 340, No. 6132, pp. 603-607, 2013.
2. Birkmeyer, P., Peterson, K., and Fearing, R. S., "DASH: A Dynamic 16g Hexapedal Robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, pp. 2683-2689, IEEE, 2009.
3. Koh, J.-S. and Cho, K.-J., "Omega-shaped Inchworm-inspired Crawling Robot with Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA Spring Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 419-429, 2013.
4. Kuribayashi, K., Tsuchiya, K., You, Z., Tomus, D., Umemoto, M., et al., "Self-Deployable Origami Stents Grafts as a Biomedical Application of Ni-rich TiNi SMA foil," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 419, No. 1, pp. 131-137, 2006.
5. Noh, M., Kim, S.-W., An, S., Koh, J.-S., and Cho, K.-J., "Flea-Inspired Catapult Mechanism for Miniature Jumping Robots," *IEEE Transactions on Robotics* 28, Vol. 28, No. 5, pp. 1007-1018, 2012.
6. Lee, D.-Y., Kim, J.-S., Park, J.-J., Kim, S.-R., and Cho, K.-J., "Fabrication of Origami Wheel using



- Pattern Embedded Fabric and its Application to a Deformable Mobile Robot,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), p. 2565, 2014.
7. Baisch, A. T., Heimlich, C., Karpelson, M., and Wood, R. J., “HAMR3 : An Autonomous 1.7g Ambulatory Robot,” IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5073-5079, 2011.
  8. Lang, R. J., “Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art,” CRC Press, 2<sup>nd</sup> Ed., 2011.
  9. Demaine, E. D. “Origami, Linkages, and Polyhedra: Folding with Algorithms,” Algorithms–ESA, Springer, 2006.
  10. Dureisseix, D., “An Overview of Mechanisms and Patterns with Origami,” International Journal of Space Structures, Vol. 27, No. 1, pp. 1-14, 2012.
  11. Tachi, T., “Geometric Considerations for the Design of Rigid Origami Structures,” in Proc. the International Association for Shell and Spatial Structures Symposium, pp. 458-460, 2010.
  12. Tachi, T., “Simulation of Rigid Origami,” Origami, Vol. 4, pp. 175-187, 2009.