

4 족과 6 족 보행을 하는 수면 주행 로봇의 안정성 실험 연구

Experimental Study on Rolling Stability of Quadruped and Hexapedal Water Running Robots

김현규¹, 김정현¹, 서병훈¹, 서태원^{1,✉}
HyunGyu Kim¹, Jung Hyun Kim¹, ByungHoon Seo¹, and TaeWon Seo^{1,✉}

¹ 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: taewon_seo@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2442, Fax: +82-53-810-4627

Manuscript received: 2013.7.16 / Accepted: 2013.9.5

Water running animals such as basilisk lizards have an advantage of high-speed movement and high power efficiency on water; so researchers in robotic fields have been interested in the water running locomotion. This paper presents prototype-design and experimental study on the four- and six-legged water running robot. Based on the previously proposed quadruped water running robot, we assemble a hexapedal water running robot. The legs of the water running robot are designed based on four-bar parallel link for repeated motion along to pre-defined path. Stability performance of the quadruped and hexapedal water running robot are investigated by experiments on rolling criterion. As a result, hexapedal robot performs better stability than quadruped robot. Based on the hexapedal robot design, we are planning to optimize the position of legs and operating frequency.

Key Words: Water running robot (수면보행로봇), Bio-inspired robot (자연모사로봇), Quadruped robot (4 족 로봇), Hexapedal robot (6 족 로봇), Experimental study (실험 연구)

1. 서론

최근 다양한 생체 모방 로봇들이 개발되고 있다.¹ 생체를 모방하는 것은 새로운 공학 제품을 개발하는 좋은 시작점이며, 세계에 존재하는 자연물들의 다양한 원리들을 파악할 수 있는 기회이기도 하다. 게코 도마뱀을 모사한 로봇²은 다양한 험지 탐험을 위한 로봇 플랫폼이며, 게코 도마뱀의 평지 및 수직벽 등반 알고리즘도 연구되었다.³ 벌새들의 날개짓을 모사한 소형 비행 로봇들도 제시되었으며, 이들은 기존 비행체에 비해 한 자리에 머무는 hovering 능력이 뛰어나다.⁴ 4족 보행을 하는 군사용 필드로봇도 생체 모방 로봇의 대표적인 예라고 할 수 있다.⁵

물 위를 이동하는 로봇들도 다양한 수상 이동 및 검사 등의 목적을 위하여 중요하다. 기존의 수상 이동체들은 물 위에 뜨기 위하여 배 형태의 구조를 통해 부력을 이용하였다. 하지만, 그 형태만큼 수중 저항력이 많이 생겨 이동 속도나 에너지 측면에서 단점이 많다. 최근 소금쟁이를 모사한 로봇이 제시되어 작은 동력원으로 이동할 수 있는 가능성을 제시하였다.⁶ 소금쟁이는 표면장력을 이용하여 물 위에 떠 있는 원리를 이용하며, 에너지 측면에서 장점이 있다. 하지만 그 이동 속도에는 물의 저항력만큼의 한계가 있다.

물 위를 주행하는 동물 중 basilisk 도마뱀은 아주 빠른 주행 속도로 유명하다.⁷ S. Floyd와 M. Sitti는 이 basilisk 도마뱀을 모사한 로봇을 제시하였

다.⁸ 도마뱀의 주행에 대한 이론적인 해석을 수행하였으며, 4개의 다리를 가지는 수면 주행 로봇을 설계, 개발하여 그 성능을 검증하였다. 여러 가지 footpad의 형상에 대한 성능 평가도 수행하였고, roll and pitch motion에 대한 안정성 해석도 개별적인 연구를 통하여 검증하였다.⁹ 결과적으로 안정된 수면 주행을 할 수 있는 로봇 개발에 성공하였다. 하지만 반복적 4족 보행의 특성상 안정성에 한계가 있고, 수면 위에서의 동작에 국한되어 설계되었다는 단점이 있다.

본 논문에서는 앞서 제시된 4족 수면 주행 로봇과 새로이 제작된 6족 수면 주행 로봇의 성능을 비교, 분석한다. 6족 보행 로봇은 육상 주행 시 4족 로봇에 비해 안정성에서 장점이 있다. 또한 compliant 한 다리 설계를 통한 반복적인 움직임으로 지면 주행이 가능함을 기존 연구에서 증명하였다.¹⁰ 하지만, 수면 보행에서는 6족 로봇의 장점이 실제 이론적으로나 실험적으로 증명된 바가 아직 없다. 6족 보행 로봇이 4족 로봇에 비해 안정성, 수직 상승 힘, 그리고 수면 및 지면 동시 주행 능력에서 장점이 있을 것이라 예상되며, 본 논문에서는 rolling stability에 집중하여 그 안정성을 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 basilisk 도마뱀의 수면 보행 능력에 대한 이론적인 해석을 review한다. 3장에서는 4족 로봇과 6족 로봇의 기본 및 상세 설계 과정 및 결과 시제품에 대한 설명이 제시된다. 4장에서는 두 로봇 플랫폼에 대한 실험 셋업 및 실험 결과 분석이 제시된다. 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론이 제시된다.

2. Basilisk 도마뱀의 수면 보행

2.1 Basilisk 도마뱀의 수면 보행 locomotion

J. W. Glasheen 과 T. A. McMahon의 연구⁷를 참고하면, basilisk 도마뱀은 빠른 다리 회전을 통하여 물 위를 반복적으로 차며 진행되는 동작을 한다. 도마뱀의 몸무게를 지탱하기 위한 수직방향 상승 힘의 일부는 물과 발이 접촉 할 때 발생하고, 대부분의 상승 힘은 수중에서 발의 행정에 의해 생성된다. 이 과정들을 Fig. 1에서와 같이 3단계로 나눈다. Fig. 1(a)는 발과 물의 표면이 접촉하는 단계이다. 이때 slap impulse가 발생하며 몸무게를 지탱하기 위한 수직방향 상승 힘의 일부가 발생한다. 두 번째 단계인 Fig. 1(b)에서는 발이 물속으로

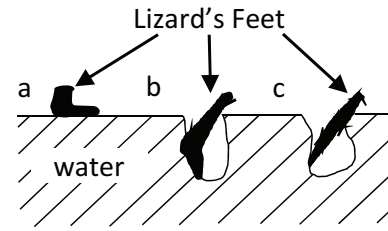


Fig. 1 Three stages of a basilisk lizard locomotion on water (re-organized from⁷)

들어가면서 공기가 발 뒤쪽으로 몰려 들게 되어 air cavity가 형성된다. 이때 stroke impulse가 형성되고 몸무게를 지탱하기 위한 수직방향 상승 힘의 대부분이 발생하게 된다. 마지막 단계는 Fig. 1(c)와 같이 형성된 air cavity가 없어지기 전에 빠르게 발을 몸 쪽으로 들어올려 하강 힘의 생성을 최소화하고 다음단계를 준비한다. 이와 같은 동작의 반복을 통하여 도마뱀은 상승 힘을 생성하며, 물 위를 주행할 수 있다.

2.2 Basilisk 도마뱀의 수면 보행 힘 분석

2.1장에서 설명한 3단계 동안 2가지의 힘이 발생한다. 첫 번째로 발과 물이 접촉할 때 발생하는 slap impulse이다. slap impulse는 발이 물과 접촉할 때 발생하는 가상질량(mv)과 접촉할 때 발의 속도(up)의 곱으로 표현된다.

$$\text{slap impulse} = m_s u_p \quad (1)$$

두 번째는 발이 물속에서 이동할 때 발생하는 stroke impulse이다. stroke impulse는 물의 정수압과 관성에 의해 발생하는 저항에 의해 발생한다. 이때 발생하는 저항으로 인해 basilisk 도마뱀의 몸무게를 지탱하는 수직방향 상승 힘과 앞으로 전진하는 수평방향의 힘이 발생하게 되고, stroke impulse는 물의 저항력(drag(t))에 발바닥의 normal방향 과 수직방향 사이 각도(θ(t))의 코사인 값을 곱하여 시간에 대해 적분하여 구한다.

$$\text{stroke impulse} = \int \text{drag}(t) \cos(\theta(t)) dt \quad (2)$$

Basilisk 도마뱀이 물위를 달리기 위해 필요한 힘(needed impulse)은 basilisk 도마뱀의 무게(M_g)와 발과 물이 접촉하고 다음에 발과 물이 접촉 할 때 사이의 속도(v_s)의 곱으로 표현 된다.

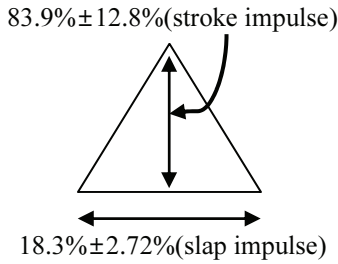


Fig. 2 Impulse relationship that a lizard can run on water (re-organized from⁷⁾)

$$\text{needed impulse} = M_g v_s \quad (3)$$

발생 된 slap impulse와 stroke impulse의 합이 needed impulse를 만족할 때 basilisk 도마뱀은 물에 뜨게 된다. J. W. Glasheen과 T. A. McMahon의 연구 결과⁷를 참고하면, 도마뱀이 물에 뜨기 위한 slap impulse와 stroke impulse의 범위는 Fig. 2와 같다. 도 시된 % 값은 needed impulse의 상대적인 배율을 의미하며, impulse 값이 삼각형 내에 존재하면, 도마뱀이 물 위에서 주행이 가능하다. 참조로 slap impulse와 stroke impulse의 합의 평균은 102%이다.

3. 수면 주행 로봇의 설계

앞서 제시된 impulse 값을 구현하기 위해서는 반복적인 빠른 발 동작이 필요하다. 로봇의 구성을 위해서는 빠른 발 동작을 하는 독립적 다리 메커니즘을 어떻게 구성하는지가 중요하다. 본 연구에서는 4절링크를 바탕으로 한 독립적 다리 메커니즘을 4족과 6족 로봇으로 설계하여 그 안정성을 분석한다.

설명한 대로, 본 연구에서는 4절링크를 바탕으로 한 다리 기구를 사용하였다. 이 기구 메커니즘은 S. Floyd 와 M. Sitti의 연구 결과⁸를 참고하였다. Fig. 3에 다리 메커니즘이 도시되어 있다. Fig. 3(b)에 도시된 바와 같이 모터가 L2 링크를 등속도로 회전시키게 되면, 원형의 발은 반복적으로 루프를 그리게 된다. 이 반복적인 동작을 통해 로봇은 발을 수면에 닿았다 떼는 동작을 구현한다.

Body의 길이와 폭은 사용하게 될 모터와 링크의 길이를 적용하여 결정한다. 4족 로봇과 6족 로봇의 전체길이와 폭은 동일하게 하여 rolling의 안정성 실험에 적절한 비교대상이 될 수 있게 한다. 몸체는 아크릴을 레이저로 절단하여 사용한다. 구

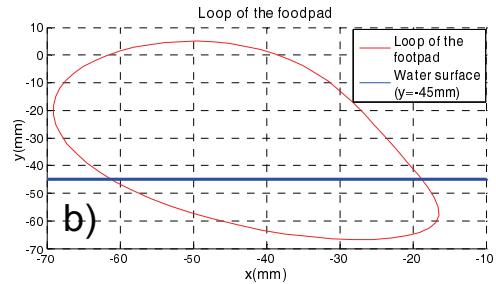
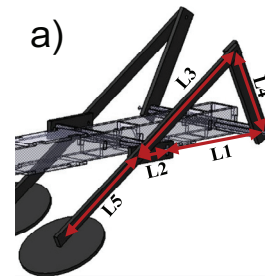


Fig. 3 Configuration of the leg mechanism. a) The length of the links: L1=65 mm, L2=21.8 mm, L3=74.8 mm, L4=45.4 mm, and L5=54.4 mm. b) Loop of the footpad when the L2 is rotated continuously

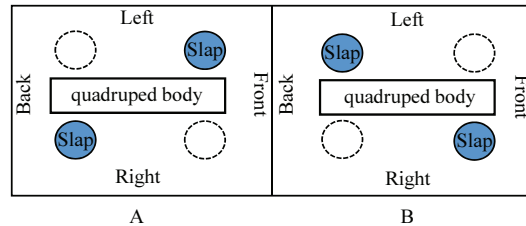


Fig. 4 Desired water running gait of the quadruped robot

동은 0.616W(600rpm, Motor bank - GM12FL-06)의 DC모터를 사용한다.

3.1 4족 주행 로봇의 설계

Quadruped 로봇의 발차는 순서를 Fig. 4와 같이 가정한다. Fig. 4 A와 같이 오른쪽과 왼쪽 앞, 뒤의 발이 대각선으로 물과 접촉하고 B와 같이 오른쪽과 왼쪽 앞, 뒤의 다른 두발이 물과 접촉한다. 이 과정이 반복될 수 있도록 로봇을 구동한다.

4족 로봇의 전체 모델링은 Fig. 5와 같다. L1의 두 축 사이에 motor를 부착하고 input shaft와 베벨 기어를 연결하여 동력을 전달한다. 그리고 4절링크를 이용하여 기구학적으로 발이 연속적으로 물

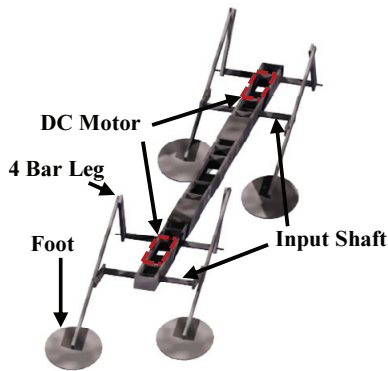


Fig. 5 3-D Modeling of the quadruped robot. Red color denotes the position of motors

을 잘 수 있게 구현한다. 발의 직경은 40 mm로 설계한다.

3.2 6족 주행 로봇의 설계

6족 로봇의 발차는 순서는 Fig. 6과 같이 가정한다. Fig. 6 A와 같이 오른쪽의 앞쪽과 뒤쪽의 발이 물과 접촉하고 동시에 왼쪽 중간 발이 물과 접촉한다. 그리고 B와 같이 왼쪽 앞, 뒤 발이 물과 접촉하고 오른쪽 중간 발이 물과 접촉한다. 이와 같은 구동이 가능하도록 로봇을 구동한다.

여기서 로봇의 gait에 대하여 집고 넘어가야 할 부분이 있다. 실제 로봇은 DC motor에 의해 구동되므로 그 동작 속도는 외력에 의해 변하게 된다. 독립적으로 다리가 구동되는 본 로봇의 경우에는 초기 gait를 셋팅하더라도 외력이 많이 변하는 경우에는 gait가 변할 수 있다. 본 연구에서는 외력이 물에서의 반력만 존재하므로, 이 힘은 일정하다고 가정하였고, 따라서 초기 gait가 항상 유지된다고 가정하였다. 이는 실험을 통해 확인하였다.

6족 로봇의 전체 모델링은 Fig. 7과 같다. 4족 로봇과 body의 길이와 폭은 동일하게 설계하였다. 로봇의 중간 지점에 다리를 추가하여 6족 로봇을 설계 하였다. 다리 추가로 인해 motor 1개를 추가로 부착하였으며 동력전달 방식, 기구학 구조, 발의 크기는 동일하다.

3.3 프로토타입 제작

앞의 설계 내용을 바탕으로 4족 로봇과 6족 로봇의 프로토타입을 제작하였다. 재료는 무게를 고려하여 아크릴(두께: 2 mm)을 사용 하였으며 모델링 결과를 적용하여 각각의 요소를 절단하고 접착

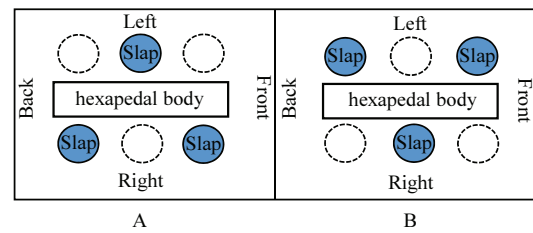


Fig. 6 Desired water running gait of the hexapedal robot

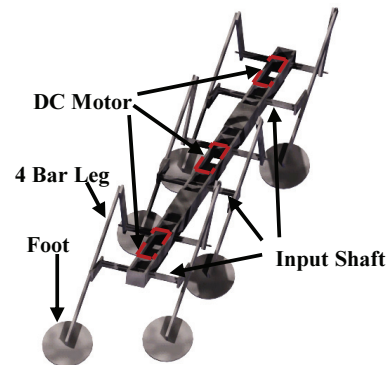


Fig. 7 Modeling of the hexapedal robot

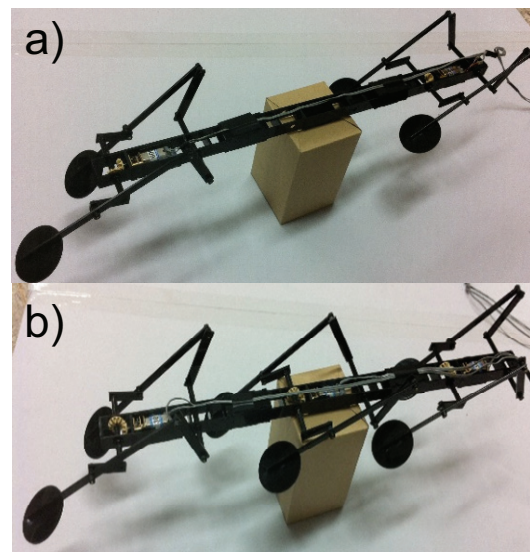


Fig. 8 Photos of the assembled prototypes. (a) quadruped and (b) hexapedal

하여 바디를 제작하였다. 링크 연결은 황동선을 이용하였다. 동력전달은 기어를 이용하여 모터에서 링크가 연결된 축으로 동력을 전달 하였다. 제작된 4족과 6족 로봇의 프로토타입이 Fig. 8에 도

Table 1 Design specifications of quadruped and hexapedal robot

Design Specification	values	
	quadruped	hexapedal
Length	400 mm	400 mm
Width	66.5 mm	66.5 mm
Number of Legs	4	6
Weight	96g	128g
Number of motors	2	3
Power	1.232 W	1.848 W

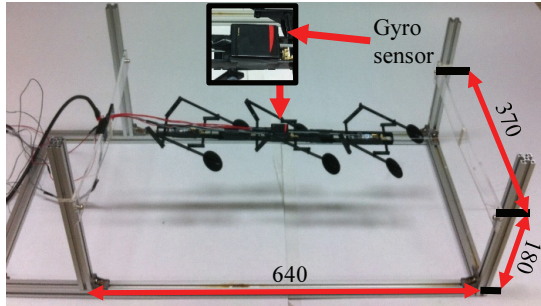


Fig. 9 Experimental set-up to measure the rolling stability of robot platform

시되어 있으며, 그 규격이 Table 1에 제시되어 있다. 모터는 몸체의 중심에 설치하여 두 로봇의 질량 모멘트의 차이를 최소화 하였다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1 실험 셋업

실험 장치가 Fig. 9에 도시되어 있다. 실험의 목적은 발이 물을 차는 동안 4족 로봇과 6족 로봇의 몸체 rolling의 안정성을 평가하는 실험이므로 rolling을 제외한 자유도는 구속하였다. 로봇의 자유도를 구속하기 위하여 양끝 단을 string을 이용하여 구속하였다. 로봇의 몸체 각도는 자이로 센서(sampling frequency : 25Hz, RUVA Tech - RTX)를 이용하여 측정하였다. 두 로봇의 실험은 수면에서의 높이(135mm), 다리의 링크가 회전하는 속도, 로봇의 고정 방식이 동일한 조건에서 이루어 졌다.

4.2 실험 결과

4족 로봇과 6족 로봇의 몸체 rolling각도 측정 실험을 하였다. 자이로 센서로 받은 데이터를 Matlab을 이용하여 원하는 frequency만 bandpass filtering (BPF) 하였다. 그리고 filtering 된 값의root

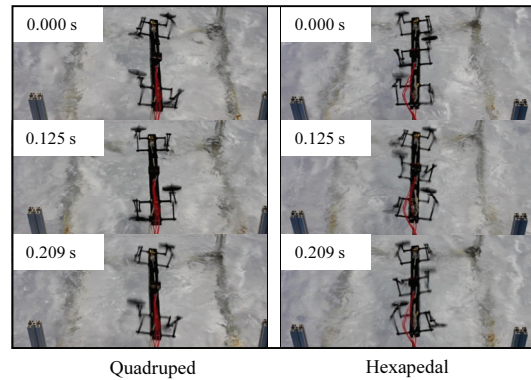


Fig. 10 Photo snapshot of the water running experiments

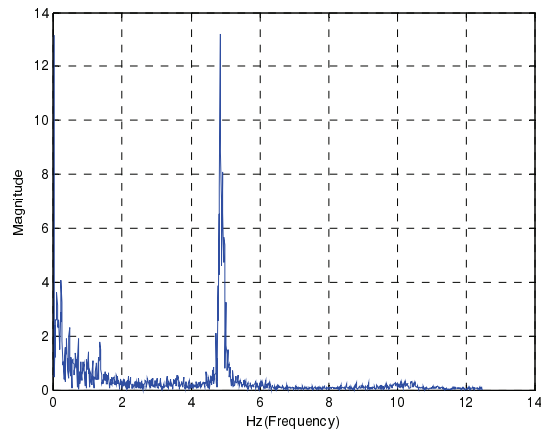


Fig. 11 Frequency spectrum of the measured rolling data

mean square (RMS) 값을 이용하여 4족 로봇과 6족 로봇의 rolling 안정성을 비교하였다.

실험에 촬영된 동영상으로 분석한 실제 로봇의 rolling 주파수는 Fig. 10과 같다. Rolling은 gait의 주기와 동일한 주기로 발생하며 로봇의 rolling 주기는 0.209초 (4.78 Hz)로 두 로봇 다 동일하게 측정되었다. 이는 앞서 가정한대로 물의 반력이 일정하여, 모터의 회전속도가 균일하게 유지됨을 의미한다.

측정된 데이터의 주파수 스펙트럼은 Fig. 11과 같다. 몸체 떨림의 주요 주파수는 5 Hz 부근임을 확인했다. 실제 모터의 무부하 회전수는 600 rpm이고 링크의 1회 회전당 발과 물이 2번 접촉 되면 20 Hz의 주파수이다. 물의 반력으로 인하여 실제 모터의 회전은 5 Hz로 유지됨을 알 수 있으며, 정확한 데이터를 추출하기 위하여 5 Hz의 BPF를 이용하여 데이터를 filtering 하였다.

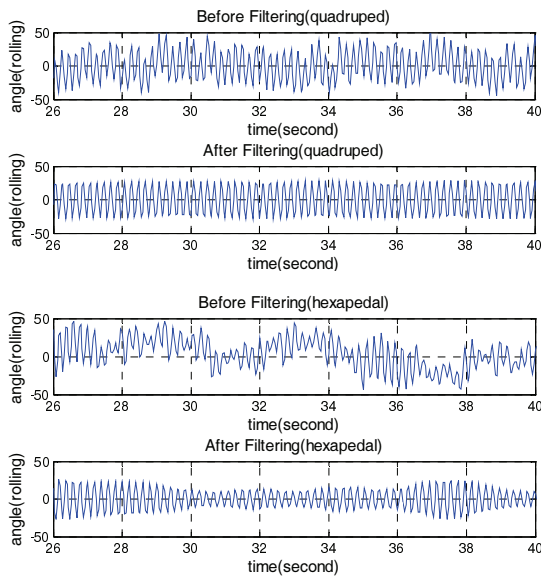


Fig. 12 Rolling data measured by gyro sensor

Experiment	RMS(degree)	
	quadruped	hexapedal
1	19.0035	12.6145
2	18.8951	15.5998
3	18.0266	16.2922

Filtering 전 후의 데이터가 Fig. 12에 도시되어 있다. 이 filtering 된 데이터를 바탕으로 RMS 값을 계산하였고 이 결과가 Table 2에 도시되어 있다. 총 3번의 실험을 수행하였으며, 이 세 번의 실험 결과를 Fig. 13에 정리하였다. 전반적으로 6족 로봇이 rolling angle이 더 작게 측정이 되었으며, 이는 rolling에 대하여 안정성이 더 좋음을 의미한다. 반복적인 측정에도 실험 데이터는 동일한 결과를 유지하였다.

4.3 결과 분석

Fig. 13은 3번의 실험에 대한 RMS 값의 평균과 최대, 최소 값을 보여준다. 4족 (quadruped) 로봇의 경우 좌, 우 에서 동일하게 한발씩 물과 접촉하지만, 6족 (hexapedal) 로봇의 경우 한쪽은 2발이 물과 접촉하고 반대쪽은 1발이 물과 접촉한다. 그러므로 힘의 평형이 4족과 다르게 맞지 않다. 그러므로 6족 로봇이 4족 로봇에 비해 rolling의 안정성 면에서 이론적으로는 취약할 수도 있다.

하지만 Fig. 13에 도시된 것과 같이 6족 로봇이

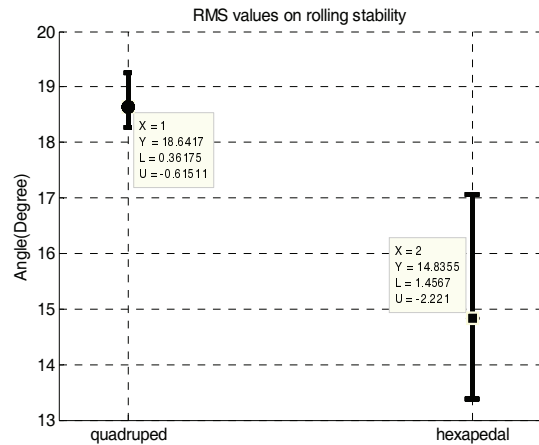


Fig. 13 RMS values on rolling stability

4족 로봇에 비해 편차가 크지만 전체적인 값이 4족 로봇의 값 보다 낮다. 그러므로 실험결과 4족 로봇에 비해 6족 로봇이 몸체의 rolling 면에서는 안정한 것을 알 수 있다. 이는 실험적으로는 Fig. 4에 도시된 trotting gait를 항상 유지하지 못하며 경우에 따라 앞뒤 발이 동시에 물에 접촉하는 passing gait가 일어나기 때문이라고 예상된다. 6족 로봇의 경우에도 passing gait가 형성될 수 있으나, 그 확률이 적어 좀 더 높은 rolling 안정성을 가짐을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 basilisk 도마뱀을 모사한 4족과 6족 수면 보행 로봇을 설계, 시제품을 제작 하여 그 성능을 실험적으로 분석하였다. 수면 보행을 위한 로봇 다리는 4절 링크 구조로 설계하여 반복 운동을 수행하며, 이 빠른 동작을 통하여 수면을 주행할 수 있다. 내디딤을 통하여 air cavity를 형성하며 이 air cavity가 사라지기 전에 빠른 다리올림을 통하여 아래방향 힘을 최소화한다. 4족 및 6족 로봇에 설계 변수를 선정하였으며, 두 로봇에 대한 프로토타입이 제작되었으며 로봇의 rolling안정성에 대한 실험적 분석이 수행되었다. 결과적으로 6족 로봇이 더 안정된 rolling performance를 보임을 실험적으로 증명하였다. 추후 본 6족 로봇을 바탕으로 중간다리의 위치 최적화와 동작주파수의 최적화를 진행 할 계획이다. 또한, 6족 로봇 메커니즘의 장점을 살려, 수면과 지면 보행을 동시에 할 수 있는 로봇 플랫폼도 제작할 계획이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력기술개발사업, No. 2013M2A8A1051061).

참고문헌

1. Chu, W. S., Lee, K. T., Song, S. H., Han, M. W., Lee, J. Y., and et al., "Review of Biomimetic Underwater Robots using Smart Actuators," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1281-1292, 2012.
2. Murphy, M. P., Kute, C., Mengüç, Y., and Sitti, M., "Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesive," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 118-133, 2011.
3. Son, D., Jeon, D., Nam, W. C., Chang, D., Seo, T., and Kim, J., "Gait Planning Based on Kinematics for a Quadruped Gecko Model with Redundancy," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, No. 5, pp. 648-656, 2010.
4. Arabagi, V., Hines, L., and Sitti, M., "Design and Manufacturing of a Controllable Miniature Flapping Wing Robotic Platform," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 785-800, 2012.
5. Hong, Y., Yoon, S., and Kim, M., "Landing Performance of a Quadruped Robot Foot Having Parallel Linked Toes on Uneven Surface," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 10, pp. 47-55, 2009.
6. Song, Y. S. and Sitti, M., "Surface-Tension-Driven Biologically Inspired Water Strider Robots: Theory and Experiments," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 23, No. 3, pp. 578-589, 2007.
7. Glasheen, J. W. and McMahon, T. A., "A Hydrodynamic Model of Locomotion in the Basilisk Lizard," *Nature*, Vol. 380, No. 6572, pp. 340-342, 1996.
8. Floyd, S. and Sitti, M., "Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot," *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 698-708, 2008.
9. Park, H. S., Floyd, S., and Sitti, M., "Roll and Pitch Motion Analysis of a Biologically Inspired Quadruped Water Runner Robot," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, No. 10, pp. 1281-1297, 2010.
10. Birkmeyer, P., Peterson, K., and Fearing, R. S., "DASH: A Dynamic 16g Hexapedal Robot," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2683-2689, 2009.

