

수면 주행 로봇의 안정성 향상을 위한 정적 꼬리 기구변수 최적화

이동규^a, 장재형^a, 서태원^{a*}

Robust Optimal Design of Tail Geometry for Stable Water-running Robots

DongGyu Lee^a, JaeHyung Jang^a, TaeWon Seo^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Yeungnam University,
280, Daehak-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk-do, 38541, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	March	2016
Revised	13	April	2016
Accepted	14	April	2016

Keywords:

Basilisk lizard
Static tail
Optimal design
Stability

ABSTRACT

Biomimetics involves the design of robotic platforms inspired from living creatures to achieve efficient operation under environmental conditions. A development within biomimetics involves investigating the function of a tail and applying it to robot design. This study aims to define the function of a static tail for water-running robots, and optimize its geometric and compliance parameters. The rolling angle of the tail is determined by the objective function, while the area and fillet ratio are used for geometric design and compliance parameters in the rolling and yawing directions. Repeated motion of the water-running robot's footpads at frequencies of 9 and 10 Hz is used as the operating condition. Robust design based on the Taguchi methodology is performed via orthogonal arrays. The optimized tail design derived in this study will be implemented in a robotic platform to improve steering and balancing functions in the pitching direction.

1. 서론

최근 생체 모방 관련 로봇 연구가 활발히 진행되고 있다. 생체 모방 로봇 연구는 생명체들이 환경에 적응하기 위해 자연 진화한 상태를 모방하여 유사한 환경에서 로봇이 활용될 수 있도록 한다. 생체 모방 연구^[1,2]는 일부 영역에서 자연 진화한 상태가 효율적으로 문제를 해결할 수 있는 방법으로 제시되고 있다. 예로 바질리스크 도마뱀을 모방한 연구와 생체 모방 꼬리 로봇 연구가 있다. 바질리스크 도마뱀을 모방한 water runner^[3]는 항력을 이용하여 물위를 달릴 수 있도록 개발되었다. 이 로봇의 특징은 다리는 4절 기구를 이용하였고 4족 로봇으로 개발되었다. 수륙양용으로 개발된 로봇^[4]은 6족 로봇으로 다리를 klann기구를 사용하였고, 발을 구형으

로 제작하여 항력과 부력을 동시에 이용하여 육지와 수면에서 효과적으로 달릴 수 있다.

생체 모방 연구 중에서 꼬리는 로봇이 움직이는 동안 노이즈나 충격에 의해 균형이 무너지지 않도록 안정성을 효과적으로 증가시키고 자세를 제어하고 방향을 조정할 수 있다. 치타를 모방한 로봇은 균형이 무너지면 센서를 통해 들어온 정보 값으로 꼬리를 이용하여 무게 중심을 이동시켜 균형이 돌아오도록 한다^[5]. 도마뱀이 공중에서 떨어질 때 꼬리를 사용해 몸을 바로 잡는 것을 모방하여 로봇이 공중에서 회전할 수 있는 연구가 있다^[6]. TailBot^[7]은 도마뱀의 점프를 모방하여 꼬리를 사용해 공중에서 로봇의 피치 자세를 제어할 수 있게 해준다. TAILRoACH^[8]는 바퀴벌레를 모방한 6족 로봇으로 몸체에 꼬리를 장착하여 방향을 제어할 수 있게 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-53-810-4378

Fax: +82-53-810-4627

E-mail address: taewon_seo@yu.ac.kr (TaeWon Seo).

꼬리를 사용하여 수면 주행 로봇의 안정성을 향상시키는 연구가 최근 시도되었다. 본 논문 저자들은 꼬리의 주기적인 움직임을 사용하여 물의 안정성을 향상시키는 연구를 발표한 바 있다⁹⁾. 이 로봇은 꼬리 끝에 질량을 추가하여 꼬리의 주기적인 움직임에 의해 생성되는 토크가 로봇 발에 의해 생성되는 토크를 상쇄시켜 로봇의 안정성을 향상시킨다. Park et al.¹⁰⁾은 꼬리의 피치방향 움직임을 사용하여 수면 주행 로봇의 피치안정성을 향상시킨 연구를 발표하였다. 이러한 로봇들은 꼬리의 움직임을 통해 안정성을 효과적으로 향상시킬 수 있지만 제어가 어렵고 에너지의 효율이 좋지 않다.

본 연구는 도마뱀의 꼬리를 관찰하여 정적인 꼬리가 수면 주행 로봇의 안정성을 향상시킬 수 있다는 점에서 시작하였다. 도마뱀의 꼬리는 회전 중심에서 중심의 앞쪽과 뒤쪽이 서로 반대방향으로 회전하는 원리에 의해 몸체의 회전방향과 반대방향으로 수중의 꼬리에서 물의 저항력이 발생하여 몸체의 롤링을 감소시키는 역할을 한다. 이러한 원리를 이용하여 로봇에 정적 꼬리를 부착하여 수중에 있게 함으로써 로봇의 안정성을 향상시킬 수 있다. Fig. 1에 본 연구에서 활용하는 로봇과 꼬리가 도시되어 있다. 이전 연구¹¹⁾에서 꼬리의 여러 형상과 유연성의 방향에 대한 영향을 실험적으로 측정하였다. 하지만, 위 연구는 최적화를 수행하지 못하였고, 본 연구에서는 정적 꼬리를 이용하여 롤링을 감소시키는 꼬리 기구변수의 최적화를 수행하고자 한다. 로봇다리 기구의 움직이는 주파수가 항상 일정한 것이 아니기 때문에, 이를 고려한 견실 최적화¹²⁻¹⁴⁾를 수행한다.

본 논문은 다음과 같은 순으로 진행된다. 2장에서는 로봇의 플랫폼을 제시하고, 3장에서는 최적화 설계의 문제 정의, 다구찌 방법론, 실험장치에 대해서 제시하고, 4장에서는 최적화 설계변수, 사용조건, 실험 및 실험결과를 도출, 분석하여 5장에서 결론을 제시한다.

2. 로봇 플랫폼

본 연구는 바질리스크 도마뱀을 모방하여 수면 주행이 가능한 로봇을 설계하였다. 바질리스크 도마뱀은 다리의 빠른 교차와 넓은



Fig. 1 Water running robot and a tail for enhancing stability

표면적을 이용하여 물의 항력을 발생시켜 수면 주행이 가능하도록 한다. 로봇은 가로 75 mm 세로 250 mm 높이 15 mm의 크기로 설계되었다.

Fig. 2와 같이 로봇은 항력을 발생시키도록 로봇 발을 설계하였으며, 로봇 전체 몸체의 재료는 2 mm의 아크릴을 사용하였고 두 개의 모터(Motor bank-GM12FL-06)를 사용하여 동력을 전달한다. 로봇의 다리는 4절 기구로 구성되어 있으며 로봇의 발은 면적 20 mm로 제작되었다. 또한, 로봇의 수면 주행에는 빠른 발의 교차가 필요한데, 이를 위해 9 Hz 이상을 공급한다. 로봇의 물 안정성 향상을 위해 꼬리가 부착되어 있다. 꼬리는 수면 주행 시 30 mm가 잠기도록 설계하였으며, 모양은 꼬리 모양의 최적 실험을 통해 정하였다.

3. 최적 설계

3.1 문제정의

바질리스크 도마뱀 로봇의 수면 주행을 위해서는 빠른 발의 교차가 필요하다. 발의 교차에는 필연적으로 롤링이 발생하는 문제가 있다. 이러한 롤링을 안정화시키기 위해 꼬리를 이용할 수 있다. 꼬리의 종류에는 질량 혹은 물의 저항력 등과 같은 외력을 이용할 수 있는 형태가 있다. 외력을 이용한 꼬리는 추가적인 액츄에이터 없이 로봇을 안정화시켜 로봇의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 반면에 꼬리의 형태에 따라 안정화의 차이가 크게 나타나는 단점이 존재한다. 따라서, 단점을 보완하기 위해 로봇의 수면 주행 시 가장 좋은 안정성을 가질 수 있도록 해주는 꼬리를 최적 설계하였다.

3.2 설계변수 및 목적함수

꼬리가 로봇의 안정성에 영향을 줄 수 있는 기구변수 4개를 선정하였다. 꼬리에서 발생하는 힘이 면적에 비례해서 발생되기 때문에 안정성에 영향을 크게 미친다. 면적을 최적화 할 수 있는 length



Fig. 2 3D modeling of water running robot

(l)를 설계변수로 선정하였다. 이전 연구^[11]에서 꼬리 모양에 대한 실험을 한 결과 꼬리 모서리에 fillet(R)이 있는 실험의 안정성이 가장 향상되는 것을 확인할 수 있었다. Fillet의 크기 또한 면적에 영향을 주기 때문에 설계변수로 선정하였다. 마지막으로 compliance에 대한 실험결과, 요방향으로 compliance가 생성되면 안정성이 감소하고, 롤방향으로 compliance가 생성되면 안정성이 향상되는 것을 확인하였다. Compliance가 안정성에 영향을 미치기 때문에 롤과 요방향의 두께(t_r , t_y)를 설계변수로 선정하였다. Fig. 3에 각 변수에 대해서 표현하였다.

로봇의 안정성을 향상시키기 위해서 수면 주행 시 발생하는 롤링 각도를 최소화 하는 것이 목적이다. 수면 주행 동안 발생하는 각도를 측정하여 RMS으로 나타낸 값을 최적화 목적함수로 설정하였다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i^2} \quad (1)$$

여기서 θ 는 샘플링 된 롤링 각도를 의미하며, n 은 샘플링 개수를 의미한다.

3.3 다구찌 방법론

견실최적설계란 외부로부터 제품의 기능을 변동시키는 요인이 있음에도 불구하고 가장 좋은 상태를 항상 유지시킬 수 있는 설계 변수의 최적 값을 찾는 작업이다. 견실최적설계를 하기 위해서는 모든 설계 변수에 대한 경우의 수를 모두 실험하여야 하는데, 이는 실험 불가능한 경우의 수가 많거나 실험을 실행하여도 많은 시간이 걸리는 경우가 대부분이다. 다구찌 방법론은 수직행렬을 사용하여 각 설계변수의 민감도를 구하여 실험을 실행하여 효율적으로 견실 최적설계를 할 수 있도록 한다.

3.4 실험 장치

본 연구의 목적은 다구찌 방법론을 이용하여 수면 주행 로봇을

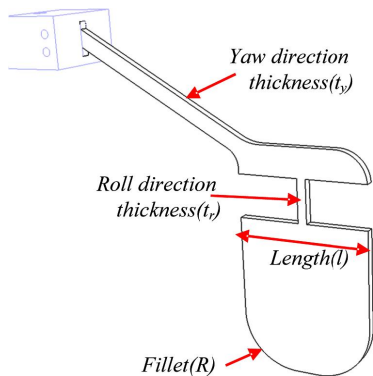


Fig. 3 A tail's geometric and compliance parameters

안정화시킬 수 있는 꼬리를 최적화하는 것이다. 다구찌 방법론을 사용하기 위해 로봇의 수면 주행 환경 및 롤방향의 기울기 데이터 값 측정장치를 필요로 한다.

Fig. 4에서 보이듯이 실험을 위해 수조를 사용하여 수면 주행 환경을 조성하였다. 수조는 알루미늄 프로파일과 아크릴을 이용하여 제작하였으며, 로봇의 크기를 고려하여 가로 100 cm, 세로 50 cm로 제작되었으며, 롤방향의 정확한 데이터 값 측정을 위해 지지대를 통해 피치와 요의 자유도를 제한한다. 또한 데이터를 얻기 위해 로봇에 Gyro sensor(RUVA Tech-RTxQ, sampling frequency: 125 Hz)를 부착하여 실험한다.

4. 최적화 실험 및 결과

4.1 설계변수 및 사용자조건 수준 정의

앞서 선정된 설계변수의 수준을 Table 1과 같이 선정하였다. 각 변수들의 수준은 이전 연구^[11]에서 수행되었던 꼬리의 크기 및 두께를 기준으로 선정하였다. 기준이 되었던 수준은 compliance(t_y , t_r)는 2 mm, fillet(R)은 10 mm, length(l)는 30 mm로 각각의 영향을 생각해서 compliance(t_y , t_r) 1 mm, fillet(R) 2.5 mm, length(l) 5 mm로 수준의 범위를 정하였다.

사용자조건인 경우 로봇이 물에 뜰 수 있도록 하는 항력을 발생 시키도록 하는 최소한의 로봇 발의 Hz 기준인 9 Hz와 1 Hz 증가시킨 10 Hz로 지정하였다. 실험값은 롤링의 모든 값들을 식(1)의 RMS로 나타낸다. RMS란 어떤 실험값이나 경향을 나타내는 대표

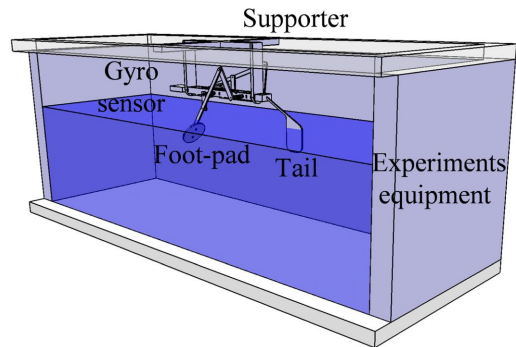


Fig. 4 Experimental set-up

Table 1 Design parameters and operating condition

Level	Design variable (mm)				Operating condition (Hz)
	t_y	R	t_r	l	
1	2	7.5	1	25	9
2	3	10	2	30	10
3	4	12.5	3	35	

값이다. 실험의 정확성을 높이기 위해 한 번의 실험 당 20초간 총 5번의 실험을 실행하였다.

4.2 최적화 실험 및 분석

꼬리의 안정성을 향상시키기 위해 롤링을 최소화 시킬 수 있도록 설계한다. 롤링을 최소화 시키도록 설계하기 위해 식 (2)와 같이 망소 설계목표 기능변수를 사용한다.

$$SN\ ratio = -10\log_{10} \left(\theta_{(S,9Hz)}^2 + \frac{\theta_{(S,10Hz)}^2}{2} \right) \quad (dB) \quad (2)$$

최적화 실험은 수직행렬을 통해 실험 횟수를 지정하였으며, 수직행렬은 실험 자유도를 기준으로 선정한다. 본 연구의 자유도는 설계변수가 4개이므로 총 8개의 자유도를 가진다. 따라서 8자유도까지 수용할 수 있는 수직행렬 $L_9(3)$ 를 사용하여 Table 2와 같이 총 9번의 실험값이 도출되었다.

Table 3을 이용하여 민감도를 분석한 결과 Fig. 5와 같이 R 이 가장 민감하지 않게 반응함을 알 수 있다. 또한, 요방향 및 롤방향 두께와 꼬리의 면적이 클수록 좋은 실험값을 얻는다. 따라서, 두 번째 실험은 Table 4와 같이 민감도가 가장 낮은 R 을 제외한 후 증가한 값들을 기준으로 실행한다. 2차 실험의 결과는 Table 5와 Fig. 6과 같은 결과 값 및 민감도가 나온다.

4.3 실험결과

2차 실험을 통해 민감도를 분석한 결과 Table 6과 같이 모든 변수들이 민감하지 않게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 실험이 제대로 되었는지 확인하기 위해서 2차 실험결과로 추정 값(3)을 구한다.

$$SN_{max} = \bar{T} + (A_3 - \bar{T}) + (B_2 - \bar{T}) + (C_3 - \bar{T}) \quad (3)$$

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array and the result of 1st experiment

Number	Design variable (mm)				RMS values (degree)		SN ratio (dB)
	t_y	R	t_r	l	9 Hz	10 Hz	
1	2	7.5	1	25	11.50	10.30	-20.76
2	2	10	2	30	8.61	8.19	-18.49
3	2	12.5	3	35	7.60	7.55	-17.59
4	3	7.5	2	35	6.33	5.51	-15.46
5	3	10	3	25	7.13	5.98	-16.36
6	3	12.5	1	30	9.29	8.85	-19.16
7	4	7.5	3	30	5.99	5.20	-14.98
8	4	10	1	35	6.78	6.81	-16.64
9	4	12.5	2	25	7.46	6.20	-16.73

여기서 \bar{T} 는 모든 SN ratio의 평균값이고, A_3, B_2, C_3 는 각 변수의 민감도 최대 값이다. 식 (3)의 추정 값을 통해 나온 값이 -12.69이

Table 3 Level and sensitivity analysis

Level	Response			
	t_y	R	t_r	l
1	-18.9	-17.1	-18.9	-17.9
2	-17.0	-17.2	-16.9	-17.5
3	-16.1	-17.8	-16.3	-16.6
Difference	2.8	0.8	2.5	1.4

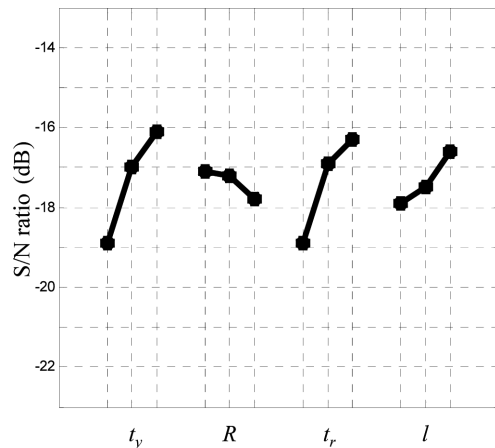


Fig. 5 Sensitivity graph of first experiment

Table 4 Design parameters and Operating condition

Level	Design variable (mm)			Operating Condition
	t_y	R	t_r	l
1	4	3	35	9
2	5	3.5	37.5	10
3	6	4	40	

Table 5 $L_9(34)$ orthogonal array and the result of the second experiment

Number	Design variable (mm)			RMS values (degree)		SN ratio (dB)
	t_y	R	t_r	l	10 Hz	
1	4	3	35	5.50	4.54	-14.05
2	4	3.5	37.5	4.80	4.34	-13.21
3	4	4	40	4.66	4.26	-12.99
4	4.5	3.5	40	4.76	4.42	-13.25
5	4.5	4	35	4.95	4.69	-13.66
6	4.5	3	37.5	4.94	4.70	-13.66
7	5	4	37.5	4.57	4.48	-13.11
8	5	3	40	4.49	4.29	-12.86
9	5	3.5	35	4.68	4.58	-13.31

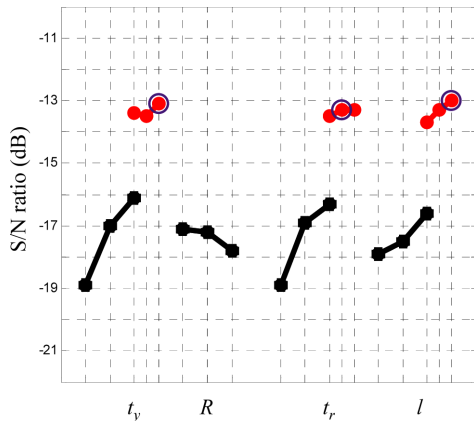


Fig. 6 Sensitivity graph of second experiment

Table 6 Level and sensitivity analysis

Level	Response		
	t_y	t_r	l
1	-13.4	-13.5	-13.7
2	-13.5	-13.3	-13.3
3	-13.1	-13.3	-13.0
Difference	0.4	0.3	0.6

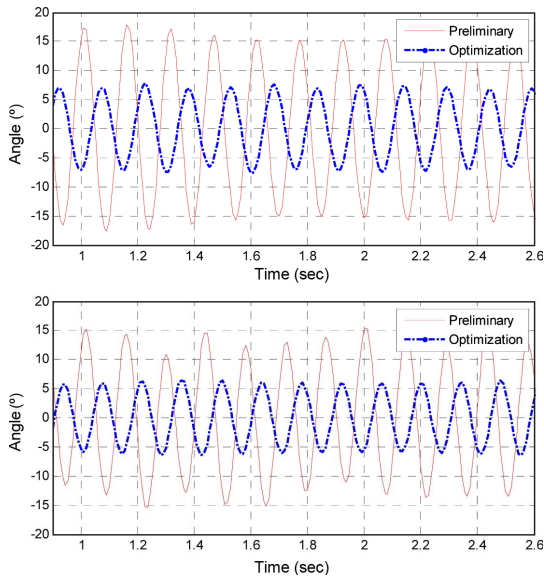


Fig. 7 A comparison of existing experimental and experimental optimization

다. 추정 값의 값이 조합번호 8번의 값과 비슷한 것을 확인할 수 있다. 하지만 롤방향 두께가 실험 결과 값과 다르기 때문에 최종 실험을 실시한다.

최종 실험결과 SN ratio의 값이 -12.42가 나오는 것을 확인할 수 있다. 추정 값과 실험 값의 차이가 없기 때문에 여기서 실험을 마치고 최적화된 설계변수를 선택한다. 최종적으로 선택된 설계변수들은 증가한 값들인 $t_y = 5 \text{ mm}$, $R = 7.5 \text{ mm}$, $t_r = 3.5 \text{ mm}$,

$l = 40 \text{ mm}$ 이다. 파라미터들의 값이 커질수록 안정성은 높아지지만 위와 같은 최종 값을 선택한 이유는 수면 주행에 있어서 로봇 무게가 중요한데 꼬리가 커지는 만큼 무게가 증가하여 로봇이 수면을 주행을 하는데 방해가 된다.

망소조건에 만족하는 최적화된 변수로 최종 실험한 결과 9 Hz일 때의 롤링의 RMS 값은 4.32, 10 Hz일 때의 롤링의 RMS값은 4.01이 나온다. 각각의 최적화된 값은 가장 안정성이 좋지 않은 Table 2의 조합번호 1번 값에 비해 9 Hz일 경우 62%만큼 안정성이 향상되었으며, 10 Hz는 61%만큼 안정성이 향상되었음을 알 수 있다. 최적화된 실험과 기존 실험의 결과는 Fig. 7과 같다.

5. 결론

이 연구는 수면 주행 로봇의 안정성향상을 위해 바질리스크 도마뱀 꼬리를 모방하여 설계하였다. 바질리스크 도마뱀 로봇 꼬리를 안정성 향상에 최적화시키기 위해 다구찌 방법론을 이용하여 건설 최적설계 하였다.

(1) 최적화 결과로 각 변수의 값이 길이 $length(l)=40 \text{ mm}$, fillet(R)=7.5 mm, 롤방향 compliance(t_r)=3.5mm, 요방향 compliance(t_y)=5mm로 선정되었다.

(2) 최적화된 변수 값을 이용하여 실험한 결과는 9 Hz에서 롤링의 RMS값은 4.32, 10 Hz에서 롤링의 RMS값은 4.01이 측정되었다.

(3) 최적화 후 초기 값에 비해 안정성이 9 Hz의 경우 62%, 10 Hz의 경우 61% 증가하였다.

결론적으로 본 연구는 바질리스크 도마뱀 꼬리를 모방하여 수면 주행 시 발생하는 롤링을 안정화시킨다. 또한, 추가적인 액츄에이터 없이 정적 꼬리를 사용하여 로봇을 안정화시켜 로봇의 에너지 효율을 증가시킨다. 이것은 제어가 쉽고 호환성이 높아 기존 수면 주행 로봇들이 효율적으로 안정성을 향상시키는 것을 도울 것이다.

후기

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력 기술개발 사업, 2015 M2A8A4049951).

References

[1] He, Q., Yu, M., Li, Y., Chen, X., Zhang, H., Gong, L., Dai, Z., 2014, Adhesion Characteristics of a Novel Synthetic Polydimethylsiloxane for Bionic Adhesive Pads, Journal of Bionic Engineering, 11:3 371-377.

- [2] Wang, G., Guo, Z., Liu, W., 2014, Interfacial Effects of Superhydrophobic Plant Surfaces: A Review, *Journal of Bionic Engineering*, 11:3 325-345.
- [3] Floyd, S., Sitti, M., 2008, Design and Development of the Lifting and Propulsion Mechanism for a Biologically Inspired Water Runner Robot, *IEEE Transaction on Robotics*, 24:3 698-709.
- [4] Kim, H., Lee, D., Jeong, K., Seo, T., 2015, Water and Ground-running Robotic Platform by Repeated Motion of Six Spherical Footpads, *IEEE-ASME Transaction on Mechatronics*, 21:1 175-183.
- [5] Briggs, R., Lee, J., Haberland, M., Kim, S., 2012, Tails in Biomimetic Design: Analysis, Simulation, and Experiment, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1473-1480.
- [6] Fisher, C., Patel, A., 2014, Preparation of Papers for IFAC Conferences & Symposia: Flip Bot: A Lizard Inspired Stunt Robot, *The International Federation of Automatic Control*, 4837-4842
- [7] Libby, T., Moore, T., Chang-siu, E., Cohen, D., Jusufi, A., Full, R., 2012, Tail-assisted Pitch Controin Lizards, Robots and Dinosaurs, *Nature*, 481 181-184.
- [8] Kohut, N., Zarrouk, D., Peterson, K., Fearing, R., 2013, Aerodynamic Steering of a 10cm High-speed Running Robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5593-5599.
- [9] Kim, H., Lee, D., Seo, T., 2015, Rolling Stability Enhancement Via a Balancing Tail for Water-running Robots, *Journal of Bionic Engineering*, 12:3 395-405.
- [10] Park, H., Floyd, S., Sitti, M., 2009, Roll and Pitch Motion Analysis of a Biologically Inspired Quadruped Water Runner Robot, *International Journal of Robotics Research*, 29:10 1281-1297.
- [11] Lee, D. G., Kim, H., Seo, T., 2016, Experimental Study on Drag-induced Balancing Via a Static Tail for Water-running Robot, *Journal of Bionic Engineering*, Accepted for Publication.
- [12] Lee, S.-J., Lee, J. H., Lee, D. Y., Seo, T., Kim, J. H., 2014, Optimal Parametric Design of Coil Gun to Improve Muzzle Velocity, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:4 408-412.
- [13] Choi, J. H., Kim, J. H., Park, S.-S., Seo, T., 2014, Robust Optimum Design of Resonance Linear Electric Generator for Vehicle Suspension, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:4 403-407.
- [14] Liu, Y., Shin, M., Seo, T., 2014, Optimization Design of Dry Adhesion for Wall-climbing Robot on Various Curvatures Based on Experiment, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:4 398-402.