생체모방형 수중다관절 로봇의 유연계획

Swimming Plans for a Bio-inspired Articulated Underwater Robot

김 회 중, 이 지 홍*

(Hee-Jong Kim¹ and Jihong Lee¹)

¹Department of Mechatronics Engineering, Chung-nam National University

Abstract: In this paper, we propose a better solution for swimming plans of an articulated underwater robot, Crabster, with a view point of biomimetics. As a biomimetic model of underwater organisms, we chose diving beetles structurally similar to Crabster. Various swimming locomotion of the diving beetle has been observed and sorted by robotics technology through experiments with a high-speed camera and image processing software Image J. Subsequently, coordinated patterns of rhythmic movements of the diving beetle are reproduced by simple control parameters in a parameter space which make it easy to control trajectories and velocities of legs. Furthermore, a simulation was implemented with an approximated model to predict the motion of the robot under development based on the classified forward and turning locomotion. Consequently, we confirmed the applicability of parameterized leg locomotion to the articulated underwater robot through the simulated results by the approximated model.

Keywords: diving beetle, bio-inspired underwater robot, swimming pattern parameter setting, swimming locomotion

I. 서론

선박침몰사고나 해저의 대체에너지 자원에 대한 관심이 증대함에 따라 효율적인 해양탐사에 대한 연구가 진행되고 있지만 해양이라는 환경적인 제약 때문에 위와 같은 작업을 수행함에 있어 많은 어려움을 겪고 있다. 특히 보편적으로 사용하고 있는 에너지 원료인 화석에너지는 머지않아 한계를 드러낼 것으로 예상되고 있는 가운데, 해저 깊은 곳에 내장되어있는 자원확득에 많은 관심이 인간의 지원을 최소화하고 로봇의 자율성을 극대화한 자율 수중로봇인 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)이나 케이블에 연결되어 원격으로 조작되는 ROV (Remotely Operated Vehicle)와 같은 수중탐사로봇들에 대한 연구와 연계되어 이미 상용화가 이루어졌다. 그러나 이와 같은 수중로봇들은 대부분이 프로펠러 형식의 추진체를 사용함에 따라 비교적 협소한 공간에서의 동적 움직임이나 회전반경에 제약을 가지고 있어 이를 보완하면서 효율적인 탐사작업을 수행하기 위해 자연 속에서 오랜 시간동안 환경에 맞게 진화해온 생명체의 방식을 모방하는 생체모방기술과 접목한 유연로봇에 대한 연구들이 진행되고 있다. 대표적으로 1995년 미국의 MIT에서 개발한 Robotuna [1]를 비롯하여 영국의 Essex대학의 자율유형 물고기 로봇[2] 및 한국의 정부출연 연구기관인 생산기술 연구원에서 개발한 익투스[3] 등 물고기 모방 로봇이 주를 이루고 있으며 유연로봇의 유연패턴 및 제어에 관한 연구도 병행하여 이루어지고 있다[4-7]. 대부분의

생체모방 유연로봇들을 살펴보면 다리관절형태가 아닌 지느러미 형태를 지니고 있고 탐사목적에 초점을 맞추고 있지만 한국 해양연구원은 프로펠러나 캐터필러를 이용하여 이동하거나 지느러미나 노 젓기 형태의 수중 로봇과는 달리 다리관절로 해저보행 뿐만 아니라 수영까지 하며 심해작업을 수행할 수 있는 계와 바닷가재를 모방한 다관절 복합이동 해저로봇인 Crabster (Crab+Lobster)를 2010년 이후부터 개발하기 시작하였다. Crabster는 수심 200미터에서 6000미터의 운용목표를 가지고 있으며, 현재 개발 중인 다관절 로봇의 많은 연구 분야 중에서 유연파트에 중점적으로 연구를 진행해 왔다[8,9].

생체모방기술을 접목하기 위해 Crabster와 구조적으로 비슷하고 다리관절을 이용한 수영에 최적화 되어있는 생체모방 모델로서 물방개(그림 1)가 선정되었고, 본 논문에서는 다음과 같은 내용으로 다관절로봇의 수영에 관한 연구를 수행하였다.

1) 유연생명체인 물방개가 수영하는 패턴들을 실험을 통해 관찰하고, 로봇공학 관점에서 재해석 하여 공학적으로

그림 1. 개발 중인 Crabster와 생체모방 모델인 물방개.

Fig. 1. Pictures of CRABSTER(on the left) and a diving beetle named Cybister lateralis(on the right).

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

김회중, 이지홍: 충남대학교 메카트로닉스 공학과
 (mainkhj@naver.com/jihong@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 한국해양연구원에서 지원하여 연구하였음.

모델링한다.

2) 실제 물방개의 데이터를 기반으로 다양한 유영패턴을 발생시킬 수 있는 일반식과 파라미터들을 설정하고, 각각의 파라미터의 역할을 정의한다.

3) 파라미터들 각각의 특성을 기반으로 실제 실험을 통해 재구성한 물방개의 유영동작과 비교하여, 정립한 일반식을 검증하고 다양한 유영계획이 가능함을 확인한다.

4) 근사모델을 이용한 시뮬레이션 환경을 구축하고, 물방개의 유영방식과 비교·분석하여 현재 개발 중인 다관절 로봇의 유영계획에 적용할 수 있는 가능성을 제시한다.

II. 물방개 유영분석 시스템

1. 생체모방 모델 관찰 환경 조성

물방개의 유영패턴을 관찰하고 이를 분석하기 위한 실험 환경은 그림 2와 같다. 물방개의 유영동작을 획득하기 위해서 물방개(C)는 투명한 수조(A)에서 유영하도록 하고, REDRAGKE사에서 제작한 MotionScope M1 초고속 카메라(E)를 이용하여 초당 125프레임으로 물방개의 유영을 촬영

그림 2. 물방개 유영관찰을 위한 실험 환경 조성.

Fig. 2. Set up for experimental environment to get the motion data of diving beetles.

그림 3. Image J 소프트웨어를 통한 물방개의 다리관절 각도 θ_1 과 θ_2 추출.

Fig. 3. Image processing software, Image J, to get angular data θ_1 and θ_2 on the leg of diving beetles.

하였다. 초고속 카메라는 촬영 속도가 빨라질수록 화면의 밝기가 어두워지는 특성을 지니고 있어 이를 보정하기 위해 조명(D)을 설치하여 좀 더 나은 영상데이터를 확보할 수 있도록 하였다. 촬영된 영상은 REDRAKE사에서 제공한 MotionScope M1.0.3 소프트웨어[10]를 통해 컴퓨터(B)로 전송되었다.

전송된 영상데이터는 영상처리 소프트웨어인 Image J [11]는 그림 3과 같이 구성되어있으며 이를 이용하여 녹화된 각 프레임들 통해 물방개 다리 관절 사이의 각도인 θ_1 과 θ_2 를 추출해 내고 물방개는 주로 두 뒷다리로 추진력을 발생시켜 유영하는 특징을 바탕으로 두 뒷다리에 초점을 맞춰 분석이 이루어졌다.

2. 물방개 다리의 기구학적 모델링

물방개 다리의 유영패턴을 재구성하기 위해 물방개의 다리는 그림 4와 같이 총 두 개의 관절 마디로 이루어진 형태로 모델링하고 표 1과 같이 D-H (Denavit-Hartenberg)파라미터를 링크 좌표계를 기준으로 설정하였다.

다리의 각 링크의 변환행렬은 식 (1)과 같이 표현될 수 있고, 이를 모두 2절 다리의 최종 변환행렬은 식 (2)와 같이 전개할 수 있다.

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & L_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & L_i \sin(\theta_i) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_0^2 = A_0^1 \cdot A_1^2 = \begin{bmatrix} R_0^2 & P_0^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 나온 총 변환 행렬은 4×4행렬로 3×3의 크기의 회전행렬을 의미하는 R_0^2 과 3×1행렬의 크기인 다리 끝점 좌표계를 나타내는 P_0^2 를 포함하고 있고 이는 식 (3)과 식 (4)에 의해 표현될 수 있다.

$$R_0^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_0^2 = \begin{bmatrix} L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 4. 물방개 다리의 기구학적 모델링.

Fig. 4. Forward kinematics of the leg with two links and leg coordinates of the diving beetle.

그림 5. 전진유영(A)과 회전유영(B)에서의 물방개 다리의 궤적.
Fig. 5. Trajectory of forward(A) and turning(B) locomotion by the diving beetle.

위와 같은 과정을 거쳐 유도된 식을 이용하여 3절에서는 물방개의 유영패턴을 재구성하는 단계를 언급한다.

3. 공학적 기술로 재구성된 전진과 회전에서의 물방개 유영패턴

앞서 언급했던 내용과 같이 실험 장치를 통해 물방개의 유영동작을 면밀히 살펴본 결과, 물방개는 유영할 때 다른 다리보다 상대적으로 길고 큰 두 뒷다리를 이용하여 유영한다는 사실을 확인하였다. 이에 따라 물방개의 유영동작을 크게 전진과 회전유영으로 나누고, 각 유영 동작으로의 다양한 패턴을 분석하기 위해 실험 장치와 공학적인 도구를 이용하였고, 전진유영(A)과 회전유영(B)으로 나누어진 물방개의 실제 유영동작이 그림 5와 같이 재구성되었다. 이를 위해서 II 장 2절에서 물방개의 다리 끝점은 기구학적 모델링에 의해 Image J로부터 추출해낸 θ_1 과 θ_2 의 정보를 이용하여 계산이 되었고, MATLAB 소프트웨어를 통해 공학적으로 재구성하여 다양한 궤적을 나타내는 물방개의 유영동작이 분류되었다.

III. 유영파라미터 추출

1. 유영파라미터 설정

최소의 파라미터로 로봇을 제어하는 것은 효율적인 측면에 있어서 매우 중요한 문제이다. 특히 로봇의 보행과 유영에 있어서 균형과 안정도 또한 고려해야하는 제약조건들을 가지고 있어서 수 천 년 동안 자연스레 환경에 맞게 최적화 되어 진화해온 생물의 유영과 보행패턴을 적용시키는

연구가 많이 이루어지고 있다. 이에 따라 II 장에서 생체모방 유영생물체로 물방개를 선정하고 다리를 기구학적으로 모델링하여 공학적인 도구를 통해 유영패턴을 분석한 것을 토대로, 추출된 물방개의 각 다리관절의 각도정보는 주기적인 현상을 보이는 것을 확인하였다. 이를 수학적으로 모델링하기 위해 복잡한 주기함수를 일반식으로 정립하는 것을 목표로 각 다리의 θ_1 과 θ_2 를 간단한 코사인과 사인함수의 합으로 표현하는 과정을 수행하였다. 식 (5)는 사인과 형태의 주기성을 가지는 모델의 푸리에 최소자승 방식을 이용한 피팅 기법으로 y_t 는 실험과 이미지 처리 도구인 Image J를 통해 얻게 된 물방개 다리관절의 실제 각도정보를 의미하고 각각의 다리관절의 각도에 대해서 다음과 같은 수식에 적용한다.

$$S_r = \sum_{i=1}^N y_t - [A_0 + A_1 \cos(wt) + B_1 \sin(wt)]^2, w = 2\pi f \quad (5)$$

식 (5)에서 주파수 정보를 의미하는 f 는 물방개 다리 한 주기의 샘플링시간인 0.28초를 1로 나눈 값으로 표현할 수 있으며 이를 통해 w 는 22rad/sec의 값으로 정의하였다.

또한 일반식을 정립하기 위한 주기함수의 계수정보인 A_0, A_1, B_1 의 값을 정의하기 위해 식 (6)에 따라 계산하면 식 (7)과 같은 코사인과 사인함수의 합으로 도출된 일반식이 정립이 된다.

$$A_0 = \frac{\sum y_t}{N}, A_1 = \frac{2}{N} \sum y_t \cos(wt), B_1 = \frac{2}{N} \sum y_t \sin(wt) \quad (6)$$

$$y = A_0 + A_1 \cos(wt) + B_1 \sin(wt) \quad (7)$$

그러나 좀 더 최소의 제어파라미터 설정을 위해 식 (8)의 유도과정을 거쳐서 좀 더 간단한 식 (9)로 재정리 되었다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{B_1}{A_1}\right), C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (8)$$

$$y = A_0 + C_1 \cos(wt + \theta) \quad (9)$$

이는 물방개의 다리 관절의 각도정보를 통해 수학적으로 모델링된 수식으로 각 다리의 관절각도 정보인 θ_1 과 θ_2 는 식 (10)과 식 (11)에 의해 표 1에 서술한 제어파라미터들을 고려하여 최종적으로 정리되었다.

표 1. 결정된 파라미터들의 특성.

Table 1. Characteristics of determined parameters.

Parameters	Characteristics
U_1, U_{11}	• Offset의 의미를 지닌 상수 • 다리궤적의 움직임 영역을 결정
U_2, U_{22}	• Amplitude의 변화를 주기위한 상수 • 다리 궤적의 높낮이를 결정
k_1, k_2	• Frequency와 관련된 상수 • 다리의 휘짓는 속도를 담당
ψ_1, ψ_2	• Phase delay와 관련된 상수 • θ_1 과 θ_2 의 위상간의 차이를 조절하여 다리궤적을 변형

$$\theta_1 = y_1 = U_1 A_0 + U_2 C_1 \cos(wk_1 t + \theta + \psi_1) \quad (10)$$

$$\theta_2 = y_2 = U_{11} A_0 + U_{22} C_1 \cos(wk_2 t + \theta + \psi_2) \quad (11)$$

2. 파라미터로 발생시킨 유영패턴과 실제 물방개의 유영패턴 비교

파라미터 설정에 따른 궤적의 변화를 확인하기 위해 그림 6에 각각의 파라미터가 담당하는 영역을 그림으로 도식화 하였다. (a)와 (c)는 각 다리관절의 움직이는 궤적의 영역을 변화시키지 않고 offset시키는 역할을 하며, (b)와 (d)는 각 다리관절의 움직이는 궤적의 영역을 조절하는 역할을 한다. 다리관절이 전진하는 방향 유영하기 위해서는 θ_2 가 θ_1 에 비해 주기가 느린 형태로 되어야하는데 이는 (e)의 구간이 θ_2 의 위상 차이를 의미하는 ψ_2 로 조절될 수 있음을 확인하였다.

그림 7은 파라미터 공간에 설정 값들을 표현하고 실제 물방개의 여러 유영동작과 비교하여 그림 8과 그림 9에 유영궤적(a)과 다리관절의 각도변화(b)를 도시하였다.

그림 6. 파라미터 특성 - (a) U_1 , (b) U_2 , (c) U_{11} , (d) U_{22} , (e) ψ_1 , (f) ψ_2 .

그림 7. 파라미터 공간.
Fig. 7. Parameter space.

III 장 1절에서 수식으로 도출된 물방개 다리 한주기의 각 관절 각도정보인 θ_1 과 θ_2 는 여러 유영패턴발생을 위한 일반식을 정립할 때 활용했던 그림 8의 Swimming Locomotion 1의 왼쪽에 있는 물방개의 실제 유영을 표 2에 있는 유영파라미터들을 조절하는데 있어서 기준유영으로 정의하였고, 따라서 표 2에 명시되어있는 위상지연을 의미하는 ψ_2 는 0으로 그리고 이를 제외한 모든 파라미터들의 계수 값을 1로 정의하였다. 유영패턴 파라미터로 다양한 패턴을 만들어 내기위해 정립된 일반식의 각 파라미터들의 특성을 고려하고 파라미터 값을 변경함에 따라 실제 물방개의 유영동작과 비슷한 여러 유영들을 그림 9와 같이 만들어 낼 수 있다. 표 2의 Swimming Locomotion 4, 5, 6에서 주파수영역과 관련된 상수값인 k_1 와 k_2 는 다른 유영에 비해 값이 크거나 작는데 이는 실제 물방개의 다리 휘짓는 속도가 다른 유영과 비교하였을 때 다른 것을 의미한다.

결과적으로 기준유영으로부터 도출된 θ_1 과 θ_2 의 식 (10)과 (11)에서 각자의 특성을 지니고 있는 네 개의 파라미터

표 2. 다양한 유영패턴을 만들어내기 위한 파라미터값 설정.
Table 2. Parameter settings for generating various locomotion.

Generated Swimming Locomotion	θ_1				θ_2			
	U_1	U_2	ψ_1	k_1	U_{11}	U_{22}	ψ_2	k_2
1	1	1	0	1	1	1	0	1
2	-0.5	1.1	0	1	1.3	2.5	$\pi/4$	1
3	-0.7	1.3	0	1	0.9	2.5	$\pi/4$	1
4	0.3	1.2	0	1.6	1.4	1.9	0	1.6
5	0.7	0.85	0	1.2	1.2	0.9	$\pi/6$	1.2
6	-1.7	0.15	0	0.7	0.7	0.4	$\pi/3$	0.7

[Swimming locomotion 1]

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

그림 8. 파라미터 설정에 의한 물방개의 유영패턴 비교.

Fig. 8. Comparison between the observed swimming pattern of the diving beetle and regenerated locomotion by parameter settings.

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

(a) Comparison of leg trajectory.

(b) Comparison of joint-angle changes.

그림 9. 실제 물방개 유영패턴과 파라미터값 설정을 통한 다양한 유영 동작의 비교.

Fig. 9. Comparison between various observed swimming patterns of the diving beetle and regenerated locomotion by parameter settings.

들의 값들을 조정하여 물방개 유영동작들과 비슷한 여러 유영패턴들을 만들어 낼 수 있음을 확인하였다.

IV. 다관절 해저복합 이동로봇의 유영계획

1. 근사모델의 모델링

본장에서는 II 장 ~ III 장에서의 생물체의 유영동작을 모사하여 공학적으로 재구성한 다양한 유영패턴을 기반으로 각 다리의 운동방정식을 고려하여 각 다리의 항력을 유도해 내고, 이를 다리 관절을 가진 근사모델에 적용시켜 실제 로봇에 적용가능성을 제시한다. 본 논문에서의 시뮬레이션

그림 10. 시뮬레이션 상에서의 근사모델.

Fig. 10. An approximated model for the simulation.

은 2차원 평면상에서의 물방개의 두 개의 뒷다리의 유영 동작을 고려하여 진행되었으며 근사모델의 모델링에 있어 각 다리 링크는 각 다리의 운동방정식을 고려하여 유체항력을 유도해 내기 위해 모델링을 단순화하고 링크 형상의 비대칭성에 따라 발생하는 유체의 영향력을 최소화하기 위해 각 링크의 반지름(r_i)이 0.1인 실린더 형으로 가정하였다. 각 다리의 링크 길이(l_i)는 각각 0.7m과 1m로 실제 물방개의 다리길이의 비를 고려하여 설정하였다. 또한 각 링크의 질량은 각 다리링크의 길이의 비를 고려하여 m_1 과 m_2 는 0.7kg과 1kg, 그리고 근사모델의 몸체의 질량 m_B 는 5kg로 설정하였다(그림 10).

2절 링크 수중로봇다리의 동력학 모델링에 대한 선행연구[12]를 기반으로 식 (12)과 같이 각 다리의 항력은 다음과 같은 가정 하에 유도하였다.

1) 각 다리와 몸체의 부가질량은 무시하고 중성부력으로 가정하며 각 링크의 유체저항 계수 C_{Di} 는 0.2로 일정하게 해준다[13].

2) 로봇다리의 끝은 유도된 항력가속도에 영향을 받게 되고 그에 따른 반동력은 로봇팔의 기준좌표계에 반대방향으로 작용한다.

3) 반동력은 항력가속도에 따라서 비례함으로 항력가속도를 각 다리로 발생시키는 항력 $\vec{F}_d$ 로 가정하였다.

$$\vec{F}_d = \begin{bmatrix} F_{dl} \\ F_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d^T J_l M_l^{-1} D_l \\ e_d^T J_r M_r^{-1} D_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)의 각 다리의 자코비안 행렬(J_l, J_r), 관성항(M_l, M_r), 그리고 유체항력 토크(D_l, D_r)를 유도하는 과정은 선행연구에 있으므로 생략하고 최종식은 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_1l_1^2 + \frac{1}{3}m_2l_2^2 + m_2l_1^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2 & \frac{1}{3}m_2l_2^2 + \frac{1}{2}m_2l_1l_2\cos\theta_2 \\ \frac{1}{3}m_2l_2^2 + \frac{1}{2}m_2l_1l_2\cos\theta_2 & \frac{1}{3}m_2l_2^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}\rho\{l_1^4C_{Dl}r_1X_{21}|X_{21}| + l_2^4C_{Dr}r_2X_{11}|X_{11}|\} \\ \frac{1}{4}l_2^4\rho C_{Dr}r_2X_{22}|X_{22}| \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)에 쓰인 $\dot{q}$ 는 각 관절의 각속도를 의미하고 C_D 는 각 링크의 유체저항 계수, e_x 와 e_y 는 x, y 축 방향의 단위벡터를 의미한다. 또한 0B_i 는 로봇 다리 기준좌표계에서 i 번째 링크에 고정된 좌표계로의 변환행렬을 의미한다.

$$\begin{cases} X_{11} = e_x^T (V_{11}^T \dot{q}_1) {}^0B_1 e_y^T \\ X_{21} = e_x^T (V_{21}^T \dot{q}_1 + V_{22}^T \dot{q}_2) {}^0B_1 e_y^T \\ X_{22} = e_x^T (V_{21}^T \dot{q}_1 + V_{22}^T \dot{q}_2) {}^0B_2 e_y^T \end{cases} \quad (15)$$

두 다리의 항력의 합은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있으며, 근사모델의 각 축에 대한 가속도($\vec{acc}_R$)를 계산하고 이를 활용하여 속도($\vec{V}_R$)를 유도해 낼 수 있다.

$$\vec{F}_s = \vec{F}_d + \vec{F}_{dr} \quad (16)$$

$$\vec{acc}_R = \frac{\vec{F}_s - \vec{F}_h}{m_B}, \quad \vec{V}_R = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

근사모델의 가속도($\vec{acc}_R$)를 유도해내는 과정에서 근사모델의 유체저항력($\vec{F}_h$)은 식 (18)에서 물 밀도 ρ 는 물의 물리적 성질(SI단위)를 고려하여 온도가 15℃일 때 999.10 kg/m^3 의 값으로 입력하고, 직육면체 형상의 근사모델의 각 면적에 대한 유체항력계수 C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz} 는 각각 1.08, 0.90, 1.22로 설정해줌으로써 계산이 된다[14].

$$\vec{F}_h = \begin{bmatrix} F_{hx} \\ F_{hy} \\ F_{hz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5\rho C_{Dx}whV_x^2 \\ 0.5\rho C_{Dy}bhV_y^2 \\ 0.5\rho C_{Dz}bwV_z^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

각 다리의 회전력은 식 (19)으로 표현할 수 있으며 근사모델의 몸체에 대한 회전력은 식 (20)에 의해 두 다리의 회전력의 합력으로 표현한다. 몸체의 각 다리에 의한 선수각을 유도하는 과정에서의 변수들은 다음과 같이 정의한다.

- τ_B : 몸체가 받는 회전력
- τ_L : 왼쪽 다리에 의한 회전력
- τ_R : 오른쪽 다리에 의한 회전력
- $\dot{w}_B$: 몸체의 회전가속도
- β : 몸체가 진행방향에서 틀어진 각도(선수각)
- I_B : 근사모델 몸체의 관성 모멘트
- w, b, h : 근사모델 몸체의 너비(1m), 길이(2m), 높이(1m)

$$\vec{\tau} = \vec{R} \cdot \vec{F}_d \quad (19)$$

$$\tau_B = \tau_L + \tau_R = I_z \dot{w}_B \quad (20)$$

몸체의 각 축에 걸리는 모멘트 I_B 는 식 (21)에 의해 계산해 낼 수 있으며, 본 논문에서는 두 다리가 2차원운동을 함에 따라 몸체의 각가속도 식 (22)에 의한 $\dot{w}_B$ 를 유도하는

과정에서는 z축의 모멘트에 의해서만 선수각이 계산되었다.

$$\vec{I}_B = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{12} \times m_B \times (h^2 + w^2) \\ \frac{1}{12} \times m_B \times (h^2 + b^2) \\ \frac{1}{12} \times m_B \times (b^2 + w^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{w}_B = \frac{\tau_B}{I_z}, \quad \beta = \iint_0^t \dot{w}_B dt \quad (22)$$

2. 2족 근사모델을 활용한 시뮬레이션

실제 물방개의 유영패턴을 기반으로 여러 유영동작을 재구성할 수 있는 일반식과 파라미터들을 정립하고 이를 활용하여 본 논문에서는 IV 장 1절에서 다양한 유영계획을 진행하는데 필요한 근사모델을 모델링하였다. 근사모델을 이용한 2족 유영시뮬레이션에 쓰인 전진과 회전유영에서의 유영동작은 다리를 휘젓는 한주기를 기준으로 그림 11에서

(a) Forward locomotion.

(b) Turning locomotion.

그림 11. 근사모델의 유영 시뮬레이션에 적용시킨 유영동작.

Fig. 11. Motions for swimming simulation by the approximated model.

(a) Drag forces(left and right legs) of forward swimming.

(b) Drag forces(left and right legs) of turning swimming.

그림 12. 유영동작에 따른 각 다리의 항력 비교.

Fig. 12. Comparison of drag force on each leg according to different swimming locomotion.

확인할 수 있으며 각 유영동작에서의 로봇다리에 의한 항력은 그림 12와 같다.

그림 13은 전진(a)과 회전(b) 유영동작에서의 두 다리의 항력의 합력과 근사모델의 이동거리를 나타낸다. 전진유영에 있어서는 두 다리의 유영이 같으므로 x축에 대한 합력은 0이 되고, 이로 인해 진행방향인 y축으로의 이동거리

(a) Sum of drag forces(left and right leg) and moving distance in case of forward swimming.

(b) Sum of drag forces(left and right leg) and moving distance in case of turning swimming.

그림 13. 두 다리 항력의 합과 근사모델의 이동거리.

Fig. 13. Sum of drag forces on the legs and moving distance of the approximated model.

(a) Heading angle(β) according to forward swimming.

(b) Heading angle(β) according to turning swimming.

그림 14. 각 유영동작에 따른 근사모델의 선수각 변화.

Fig. 14. Changes of heading angle(β) in different swimming motions.

만 변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 회전 유영에서는 각 다리의 유영동작이 다르고, 이로 인해 x축과 y축에 대한 항력의 합과 근사모델의 이동거리에 대한 시뮬레이션 결과는 전진유영에서의 결과와는 달리 진행방향의 y축에 대한 이동거리의 변화량보다 z축 중심으로 회전한 회전방향 x축으로의 이동거리의 변화량이 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있다.

시뮬레이션에 적용된 회전유영은 실제 물방개의 90° 정도의 왼쪽방향으로의 제자리회전 유영동작이며, 시뮬레이션에 모델링된 근사모델의 여러 가지 가정에 의해 실제 물방개의 선수각과는 차이가 있지만 비슷한 양상을 보이는 것을 그림 14를 통해 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 생체모방 기술 관점에서 다관절로봇의 유영계획을 위한 연구를 수행하였다. 수 천 년에 걸쳐 환경에 최적화되어 변화해온 생물체 중에 다리관절을 가지고 있으며 유영에 최적화 되어있는 물방개를 생체 모방 모델로 선정하고 물방개의 유영패턴을 분석하기 위해 실험환경을 조성하였다. 그리고 여러 가지 공학적 도구를 이용하여 실제 유영동작을 재구성 하였고, 주기적인 성향을 지니고 있는 물방개 다리 관절사이의 각도변화를 일반식으로 정립하였고 이를 활용하여 여러 가지 유영패턴들을 만들어 낼 수 있는 파라미터공간을 설정하고 각 파라미터들의 역할과 특성에 대해 정리하였으며 유영 파라미터들을 조절하여 만들어 낸 여러 가지 유영패턴과 실제 물방개의 유영패턴을 비교·분석하는 과정을 통해 상당히 유사하게 생물체의 유영동작을 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 각 다리의 운동방정식을 고려한 2족 근사모델을 모델링하고 이를 토대로 개발 중인 다관절 유영로봇에 접목시키기 위한 유영 시뮬레이션 환경을 조성하고 전진과 회전에서의 생물체의 유영을 분석하였다.

추후 연구로는 파라미터 간의 상관관계에 관한 수식을 유도해내어 파라미터 개수를 줄여 유영제어에 좀 더 효율적인 수중 다관절로봇의 유영 방법을 정립하고, 실제 6족 다관절 로봇에 접목시키기 위해 유영 시 각 다리와의 간섭을 고려한 6개의 다리로 확장하고, 3차원 운동이 가능한 로봇다리 구조로 변형시키는 연구를 진행할 것이며 이를 통해 실제로 로봇에 적용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] D. Barrett, "MIT Ocean Engineering Testing Tank Biomimetics Project : RoboTuna," Citing Internet source URL <http://web.mit.edu/towtank/www/tuna/robotuna.html>, 2000.
- [2] H. Hu, "Biologically inspired design of autonomous robotic fish at Essex," *Proc. of the IEEE SMC UK-RI Chapter Conference on Advances in Cybernetic Systems*, Sep. 2006.
- [3] C. H. Chung, S. H. Lee, K. S. Kim, Y. S. Cha, and Y.

- S. Ryuh, "Optimization of input parameters by using DOE for dynamic analysis of bio-inspired robotic fish 'Ichthus'," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 8, pp. 799-803, Aug. 2010.
- [4] A. Crepsi, D. Lachat, A. Pasquier, and A. J. Ijspeert, "Controllong and crawling in a fish robot using a central pattern generator," *Autonomous Robots*, vol. 25, no 1-2, pp. 3-13, 2008.
- [5] K. K. Safak and G. G. Adams, "Dynamic modeling and hydrodynamic performance of biomimetic underwater robot locomotion," *Autonomous Robot*, vol. 13, pp. 223-240, 2002.
- [6] J. Guo, F. C. Chiu, S. W. Cheng, and Y. J. Joeng, "Motion control abd way-point tracking of a biomimetic underwater vehicle," *Proc. of the IEEE Symposium on Underwater Technology*, pp. 73-78, 2002.
- [7] C. Georgiades, M. Nahon, and M. Buehler, "Simulation of an underwater hexapod robot," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 39-47, Jan. 2009.
- [8] D. H. Kim, J. H. Lee, S. Y. Kim, J. H. Lee, and B. H. Jun, "Optimal swimming pattern research for underwater robot," *Information and Control Symposium*, Apr. 2011.
- [9] D. H. Kim, J. H. Lee, J. H. Lee, and B. H. Jun, "Underwater robot leg design based on analysis for the swimming pattern of underwater Biology," Department of Mechatronics Engineering Chung-Nam National University and Martime&Ocean Engineering Research Institute in Korea, 2011.
- [10] MotionScope M1.0.3, Software of transferring video images, Citing Internet sources URL <http://redrake.com/>
- [11] Image J, Image processing software, Citing Internet source URL <http://rsbweb.nih.gov/ij/>
- [12] B. H. Jun, J. H. Lee, and P. M. Lee, "Dynamic modeling and manipulability analysis of underwater robotic arms," *Journal of Control, Automation and System Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 688-695, Aug. 2005.
- [13] B. H. Jun, "Modeling and drag-optimized joint motion planning of underwater robotic arms," Ph. D dissertation, Chung-nam National University in Korea, 2006.
- [14] ESDU Fluid Forces, Pressures and Moments on Rectangular Blocks. Engineering Science Data Item No. 71016, ESDU International plc., London, 1971.

김희중

2013년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 석사과정. 관심분야는 로보틱스, 다관절 해저 복합이동로봇.

이 지 흥

1983년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1985년 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 대학원 석사. 1991년 동 대학
박사. 1994년~현재 충남대학교 메카트
로닉스 공학과 정교수. 관심분야는 로
보틱스, 힘지주행로봇.