

유영과 보행이 가능한 생체모방 수중 로봇의 설계개념과 근사모델을 활용한 모의실험

Bio-inspired Walking and Swimming Underwater Robot Designing Concept and Simulation by an Approximated Model for the robot

김희중¹, 전봉환², 이지홍[†]

Kim Hee-Joong¹, Jun Bong-Huan², Lee Jihong[†]

Abstract This paper describes the design concept of a bio-inspired legged underwater and estimating its performance by implementing simulations. Especially the leg structure of an underwater organism, diving beetles, is fully adopted to our designing to employ its efficiency for swimming. To make it possible for the robot to both walk and swim, the transformable kinematic model according to applications of the leg is proposed. To aid in the robot development and estimate swimming performance of the robot in advance, an underwater simulator has been constructed and an approximated model based on the developing robot was set up in the simulation. Furthermore, previous work that we have done, the swimming locomotion produced by a swimming pattern generator based on the control parameters, is briefly mentioned in the paper and adopted to the simulation for extensive studies such as path planning and control techniques. Through the results, we established the strategy of leg joints which make the robot swim in the three dimensional space to reach effective controls.

Keywords: diving beetle, bio-inspired legged underwater robot, swimming locomotion, simulator

1. 서론

수중로봇 개발은 여러 가지 환경적인 제약을 수반하고 있는 반면, 대체자원을 활용하기 위한 해저 탐사나 선박 침몰과 같은 수중사고에 대한 작업을 사람을 대신하여 원활히 수행하기 위한 목적을 가지고 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서 프로펠러나 캐터필러 형태의 추진체를 지닌 AUV(Autonomous Underwater Vehicle), ROV(Remotely

Operated Vehicle)와 같은 로봇은 이미 상용화가 이루어져 널리 사용되고 있고, 물고기, 게, 바닷가재, 자라, 문어, 해파리와 같은 수중 생명체들을 모사하는 생체모방로봇에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다^[1-4]. 생체모방관점에서 로봇을 개발하는 것은 수 천 년 전부터 진화해온 생명체의 방식을 모사하는 것으로, 로봇공학적인 관점으로 재해석되어 로봇이 최적화된 움직임을 발생 시키는 것을 주목적으로 하고 있다. 실제로 이와 같은 방식으로 육해공 영역에서의 로봇들이 다양하게 개발되고 있다.

대표적인 생체모방 수중 로봇의 형태로는 지느러미형태의 추진체를 지니고 물고기의 움직임을 모사하는 로봇으로, 실제로 소모 에너지 측면에서 프로펠러 형태의 추진체보다 효율적인 것으로 알려져 있다^[5]. 한국 해양연구원에서는 2013년 해저에서 보행하며 수중이라는 환경적인 제약점을 극복하며 로봇 팔을 지니고 있어 자원 채취나, 여러

Received : Dec. 5. 2013; Reviewed : Dec. 30. 2013; Accepted : Jan. 2. 2014

※ This project was funded by the Korea Ocean Research & Development Institute for the project "An optimal path generation and control for an articulated swimming robot"

¹ Mechatronics Engineering, Chungnam National University, (mainkhj@naver.com)

² Ocean System Engineering Research Department, MOERI, KORDI, (bhjeon@kiost.ac)

[†] Corresponding author: Mechatronics Engineering, Chungnam National University, (jihong@cnu.com)

가지 해저작업을 수행할 수 있는 뛰어난 동적 특성을 지닌 계와 바닷가재를 모방한 6족 보행로봇인 CR200 (CRABSTER)을 개발하였다^[6-8]. 그림 1은 개발된 CR200을 보여준다.

CR200은 수중 보행에 초점을 맞추고 이루어진 반면, 우리는 수중 다족 로봇의 보행 시 해저 장애물을 유영으로 극복하면서 효율적인 움직임을 갖기 위한 유영과 보행을 겸하는 로봇을 개발하는 것을 목표로 한다. 이에 따라 우리는 다리관절을 가지는 수중 유영 생명체인 물방개를 생체 모방 모델로 선정하였다.

그림 2는 로봇개발의 전체적인 과정을 보여주고 있으며, 먼저 (a)단계 에서는 모션 캡처 시스템을 구성하여 이미지 처리 소프트웨어(Image J)를 통해 물방개의 유영을 관찰하고 이를 로봇 공학적 관점에서 재해석하였다^[9]. 그리고 단계 (b)와 (c)에서는 물방개의 움직임을 수치 해석적 방식으로 접근하여 실제 물방개가 여러 가지 유영 동작을 발생시킬 때 필요한 특성들이 다른 파라미터들을 설정하고 이를 유영동작 생성 수식에 적용하여 만들어낸 동작들과 관측된 실제 물방개의 유영동작과의 비교분석을 통하여 적용 가능성에 대해 검증하였다^[10]. 본 논문에서는 단계 (e)와 (f)에서는 개발 중인 생명체의 구조적인 장점을 모사한 유



Fig. 1. CR200

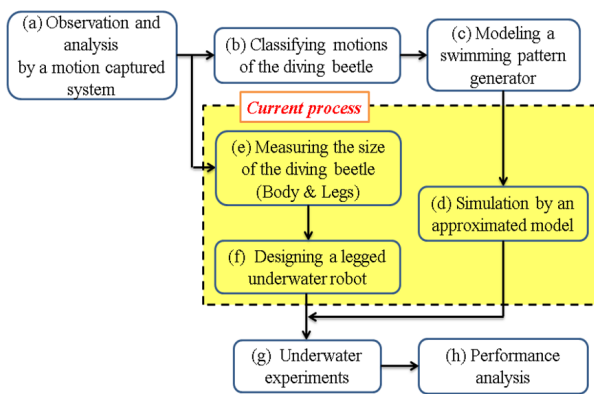


Fig. 2. Flow chart for developing procedures

영과 보행능력을 갖춘 로봇에 대해 소개하고, 지난 연구결과를 바탕으로 파라미터들을 활용한 검증된 유영동작 생성 기법을 적용하여, 로봇이 개발된 후의 분석과 실험 단계인 (g)와 (h)를 위한 단계 (f)에 있어 개발 중인 로봇의 근사모델을 활용한 3차원 유영모의실험에 대해 기술한다. 위와 같은 과정을 통해 우리는 각 다리관절들의 역할과 특성을 정립할 수 있었고, 관절공간에서의 경로계획 전략을 수립하였다.

2. 생체모방 다관절 로봇

로봇공학만으로 찾기 힘든 최적화된 로봇움직임의 해법을 찾기 위해 생체 모방 기술을 접목하여 생명체의 움직임을 모사하고, 이를 최대한 활용하기 위해서는 로봇의 설계 또한 생명체의 치수에 근간을 두고 이루어 져야한다. 2장에서는 위와 같은 사항을 고려하여 생체모방 모델로 선정한 물방개의 몸체와 다리에 대해 면밀히 관찰하고 이를 개발 중인 로봇설계에 적용하는 것에 대해 소개한다.

2.1 생체모방적 관점에서의 로봇설계

선행연구에서 제시한 물방개의 유영을 기반으로 한 생체모방 유영동작의 효율을 극대화시키기 위해 로봇을 설계함에 있어 몸체와 다리의 구조를 분석하는 과정은 필수적이라 할 수 있다. 그림 3과 그림 4는 이와 같은 내용을 바탕으로 물방개의 치수를 측정하고 이를 로봇 설계에 적용하는 것을 보여준다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 기본적으로 물방개 다리 치수

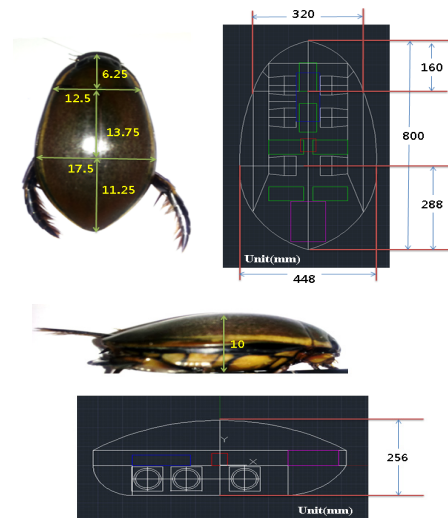


Fig. 3. Robot body design base inspired by the diving beetle

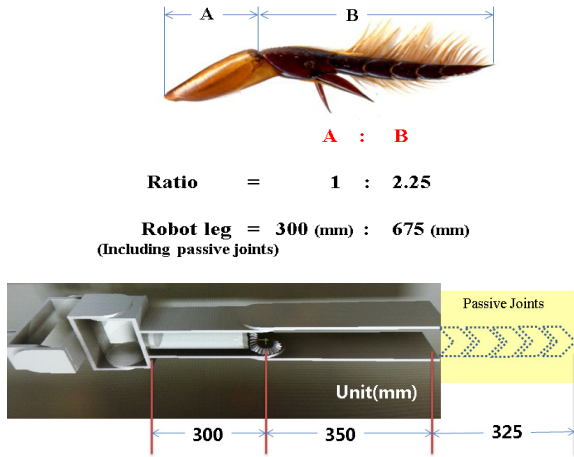


Fig. 4. Robot leg design inspired by the diving beetle

의 비율을 로봇 다리 설계에 적용하고 추가적으로 물방개 가 두 번째 다리 관절 부분에 위치하고 있는 수동적인 작은 관절들이 유선형을 그리며 유영 시 추진력을 극대화 할 수 있다는 구조적인 장점들을 고려하였다. 실제로 문어를 모방한 로봇의 연구결과에 있어서도 이와 같은 관절구조가 추진력을 향상 시킬 수 있다는 것은 입증된 바 있다^[11]. 따라서 수중 로봇 다리를 설계함에 있어서 그림 4와 같이 수동적인 관절마디 구조가 다리 끝에 위치하여 로봇이 보행 시에는 결합되어있고, 유영 시에는 다리관절 마디사이에서 솟아나와 추진력을 향상 시킬 수 있는 구조로 설계가 진행되고 있다. 유영과 보행을 겸할 수 있는 다리의 기구학적 구조에 대해서는 2장 2절에서 자세히 소개한다.

그림 4에서의 수동적인 관절들의 범위를 지정해 주기 위해 그림 5와 같이 물방개의 수동적인 다리관절 마디들이 이루는 각도를 구해내고, 총 다섯 개의 관절 마디로 이루어

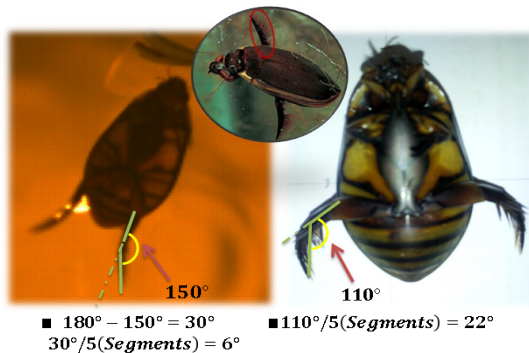


Fig. 5. Leg travel of the passive joints

진 것을 감안하여 각 관절 마디의 각도들을 계산해 낼 수 있다.

2.2 유영과 보행이 가능한 로봇 다리 기구학적 모델링

물방개의 유영에 있어서 주로 추진력을 발생시키는 부분은 상대적으로 긴 뒷다리 2개로, 앞 네다리의 움직임과는 달리 2차원 상에서 이루어진다. 지난 연구에서 우리는 물방개의 유영동작을 모사하기 위해 수치 해석적 방법으로 접근하여 유영 패턴 발생기를 정립하였고, 이는 물방개와 같이 2차원 평면상의 움직임만을 고려해서 만들어 졌다. 이에 따라 로봇이 보행을 겸하면서 3차원 유영이 가능할 수 있도록 그림 5와 같은 기구학적 모델링이 필요하다. 그림 6의 Hip roll과 Knee roll 관절 부분에 만들어낸 유영동작이 적용되고, Hip pitch 관절은 2차원 평면상의 운동을 3차원 상의 움직임으로 만들어주며 동시에 보행으로의 모드 전환이 가능하게 해주도록 하는 구조이다. Hip yaw 관절은 로봇이 보행 모드로 전환했을 경우 주로 쓰이며 로봇의 보행패턴이 적용되는 관절을 의미한다. 그림 6의 (a)는 앞다리 네 개에 적용되는 다리의 기구학적 모델링을 의미하고, (b)는 주로 추진력을 발생시키는 수동적인 관절마디가 결합된 형태의 뒷다리 두 개의 기구학적 모델링을 보여준다.

그림 7은 뒷다리 두 개만 결합된 형태의 로봇의 전체적

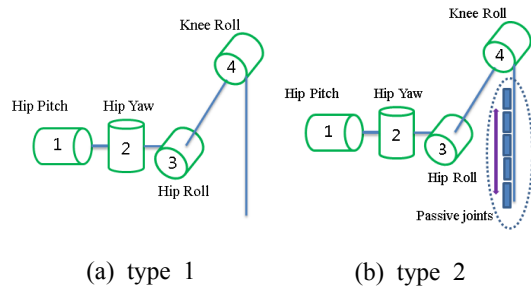


Fig. 6. Kinematic modeling of the robot leg. - (a) : Front four legs, (b) : Hind two legs with passive joints

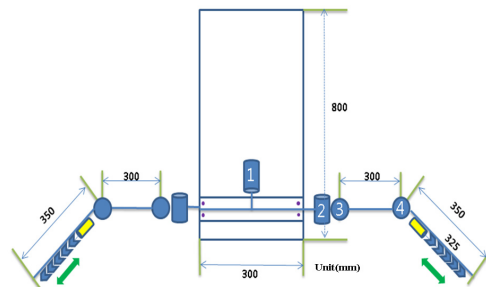


Fig. 7. Dimension of the robot

인 치수를 보여주며, 두 다리의 Hip pitch를 공유하여 구동기의 개수를 하나 줄여줌으로써 소비전력의 효율성을 높여 주면서 모드전환이나 3차원 유영에 적용 가능한 구조를 나타내고 있다.

표 1에는 보행과 유영시의 각 다리 관절의 운동을 예측하여 동작 범위를 표현하였다.

Table 1. Leg travel

Joint	Range of the motion
1. Hip pitch	-150 ° to +150 °
2. Hip yaw	Type 1 : -45 ° to +45 °
	Type 2 : -60 ° to +60 °
3. Hip roll	Walking : -27 ° to +105 °
	Swimming : -30 ° to +70 °
4. Knee roll	Walking : -165 ° to +15 °
	Swimming : 0 ° to +135 °

3. 유영동작 생성기법을 적용하기 위한 유영 모의실험 환경구축

개발 중인 로봇의 성능을 확인하고 로봇의 제어나 경로 계획 측면에서의 모의실험은 필수적인 로봇 설계 과정이라 할 수 있다. 3장에서는 유영 모의실험에 활용될 선행연구결과인 유영생성 기법에 대해 언급하고, 현재 제작중인 로봇과 근사한 모델과 모의실험 환경을 구축하는 것에 대해 중점적으로 설명한다.

3.1 유영생성기법

다리관절을 가지는 로봇에 유영패턴을 발생시키기 위해 선행연구^[10]로 유영생명체인 물방개의 유영방식을 모사한 유영동작 생성기를 설계하였던 과정을 간단히 요약하면, 복잡한 주기함수를 가지는 물방개의 각 다리관절 각도변화를 푸리에 최소자승 방식을 이용한 피팅 기법을 활용하여 각 다리관절에 대한 수식을 정립하고, 수식의 각 항에 파라미터들을 설정하고 이를 토대로 유영동작을 발생시킨다. 유영동작을 생성하는 파라미터들의 역할과 특성은 모션 캡처 시스템^[9]을 통해 재구성한 실제 물방개의 유영동작과의 비교 분석 과정을 통하여 정의 하였다. 그림 8은 유영동작 생성기법을 전진과 회전에서의 대표적인 유영패턴을 나타낸다.

식 (1)은 모델링한 각 위에서 언급한 유영동작 생성수

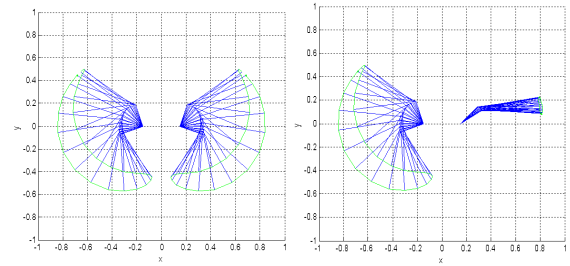


Fig. 8. locomotion produced by swimming pattern generator

식을 의미하고 이에 해당하는 변수들은 모두 모션 캡처 시스템으로 얻은 물방개의 관절 운동정보를 활용하여 피팅 기법을 통해 결정이 된다.

$$y = A_0 + C_1 \cos (wt + \theta) \tag{1}$$

식(2)와 식(3)에 식(1)의 각 항의 값들을 조절해주는 파라미터($U_1, U_{11}, U_2, U_{22}, k_1, k_2, \psi_1, \psi_2$)를 설정하였고, 이에 대한 값들은 그림 9를 통한 각 파라미터들의 활성화 영역을 기반으로 정의되며, 각 파라미터들의 특성은 표 2에 기술하였다.

$$\theta_1 = y_1 = U_1 A_0 + U_2 C_1 \cos (wk_1 t + \theta + \psi_1) \tag{2}$$

$$\theta_2 = y_2 = U_{11} A_0 + U_{22} C_1 \cos (wk_2 t + \theta + \psi_2) \tag{3}$$

발생시킨 유영동작들의 적용가능성을 파악하기 위해 유체환경적인 요소들을 고려한 3차원 모의실험의 환경구

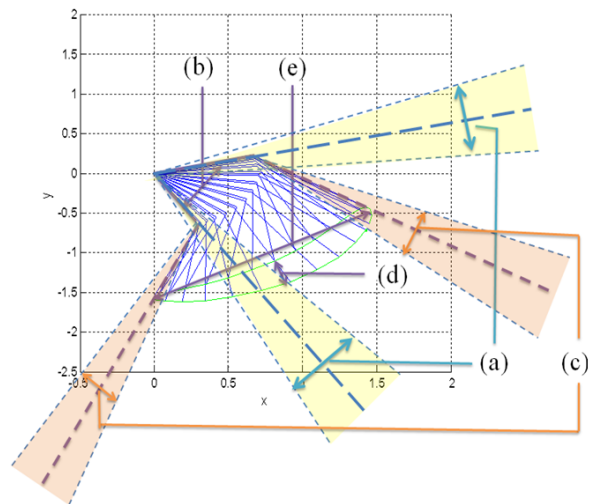


Fig. 9. Defining parameter characteristics.

- (a) : U_1 , (b) : U_2 , (c) : U_{11} , (d) : U_{22} , (e) : ψ_2 .

Table 2. Characteristics of determined parameters.

Parameters	Characteristics
U_1, U_{11}	<ul style="list-style-type: none"> Constant values for offset. It determines moving range of the leg trajectories.
U_2, U_{22}	<ul style="list-style-type: none"> Constant values for amplitude. It determines size of the leg trajectories.
k_1, k_2	<ul style="list-style-type: none"> Constant values for frequency. It determines the velocity of the leg
ψ_1, ψ_2	<ul style="list-style-type: none"> Constant values for phase delay. It change the leg trajectory adjusting the phase interval.

축에 관한 내용은 다음절에서 언급한다. 주 추진력을 발생시키는 물방개의 두 뒷다리는 2차원적인 운동을 하는데 이를 3차원 운동으로 확장하는 전략은 앞서 2장에서 언급했으므로 생략하고, 4장에서는 그림 7과 같은 검증된 유영 동작을 근사모델에 적용하여 각 운동 방향에서의 모의실험 결과에 대한 내용을 중점적으로 소개한다.

3.2 근사모델의 모델링과 모의실험 환경구축

로봇을 제작하는 과정에서 미리 로봇의 성능을 확인하여 설계를 보완하거나 제어의 기법을 미리 학습하기 위해 그림 8과 같이 개발 중인 로봇의 설계사항을 고려한 근사모델을 모델링하였다. 근사모델의 뒷다리 두 개는 주 추진력을 담당하는 부분으로 실제로 로봇이 유영 시 수동적인 관절구조로 인해 앞의 네다리보다 더 길게 될 것을 감안하여 근사모델에도 적용하였다. 그러나 수동관절에 대한 구조에 대한 움직임 모델링은 본 논문에서는 고려하지 않았지만 이는 실제 실험에서는 더 좋은 추진효과를 낼 수 있을

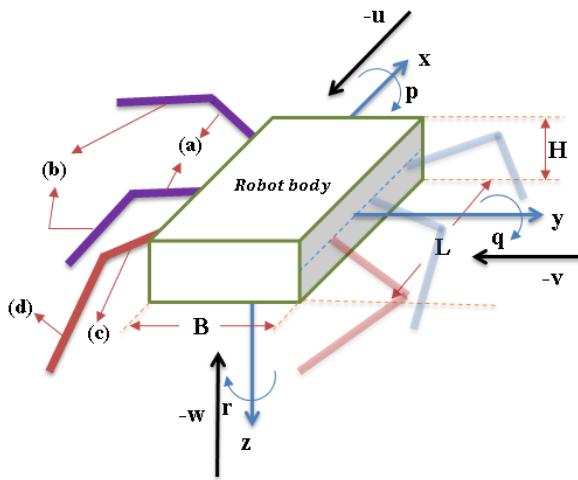


Fig. 10. Approximated model of the underwater robot

것으로 기대된다.

표 3은 그림 10에 표현한 모의실험에 적용한 근사모델의 파라미터들의 값을 나타낸다.

표 3에서 확인할 수 있듯이, 주 추진력을 발생시키는 뒷다리 두 개에 대한 질량과 길이의 값은 앞다리 네 개와 다르게 설정해주었다. 전체적인 로봇의 크기와 다리의 길이는 물방개의 치수를 반영하여 제작중인 로봇의 크기와 비슷하게 설정해주었다. 근사모델의 몸체와 다리에 대한 질량은 실제 로봇을 제작함에 있어 필요한 부품과 재료의 무게를 반영하였다. 추가로 모의실험의 환경적인 가정은 다음과 같다.

1) 모의실험에 활용한 로봇다리의 모델링은 링크 형상의 비대칭성에 따라 발생하는 유체의 영향력을 최소화하기 위해 실린더 형으로 가정하였다. 이에 따라 다리를 저을 때 발생하는 양력의 효과는 고려되지 않았다.

2) 물 밀도는 물의 물리적 성질을 고려하여 $15^\circ C$ 일 때의 값인 $1000 kg/m^3$ 으로 설정해주었고, 직육면체 형상의 근사모델의 각 면적에 대한 유체항력계수(C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz})와 실린더 형상의 다리관절의 유체항력계수(C_{Dl})는 표 3과 같이 설정해주었다^[12].

3) 근사모델의 부피중심과 질량중심은 일치하여 각 작용점사이의 거리(x_b, y_b, z_b)는 0으로 설정해 주었고, 중력은 근사모델의 무게중심점으로 작용하여 무게중심점에 대한 모멘트는 발생하지 않는다고 가정한다.

물체에 작용하는 힘과 모멘트를 표현하는 수중 운동 방정식은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. M 은 관성모멘트를 나타내며 로봇의 관성행렬과 부가관성행렬의 합($M_{RB} + M_A$)을 의미한다. $C(\vec{v})$ 는 코리올리스와 원심력을 나타내며 $C_{RB} + C_A$ 와 같이 표현된다. 그리고 \vec{v} 는 속도벡

Table 3. Approximated model for simulation

Parameters	Values
Link length of each leg	(a) : 0.250m, (b) : 0.350m (c) : 0.300m, (d) : 0.675m
Mass of the leg	<ul style="list-style-type: none"> front four legs - (m_1: 2kg, m_2: 3kg) hind two legs : (m_1: 3kg, m_2: 4kg)
Mass and volume of the body	m_b : 48kg, V : $0.048m^3$
Drag coefficients	<ul style="list-style-type: none"> body - C_{Dx}: 1.08, C_{Dy}: 0.90, C_{Dz}: 1.22 leg - C_{Dl}: 0.2
water density	$\rho = 1000 kg/m^3$
relative flow velocity	u, v, w
body dimension	B : 0.300m, L : 0.800m, H : 0.200m

터를 의미하며 $\vec{v} = [\vec{v}_{cm} \ \vec{w}_{cm}] = [uvvpqr]^T$ 와 같이 속도와 각속도 항들로 구성되어있다.

$$\vec{F} = M\vec{v} + c(\vec{v})\vec{v} \quad (4)$$

총 6자유도를 가지는 근사모델의 자세에 대한 운동 방정식은 식 (5)에서 식(10)과 같이 표현될 수 있고 이는 Fossen의 수중 운동체에 대한 저서를 기반으로 모델링 되었다¹²⁾. 식 (5)에서 식(10)의 로봇 몸체의 각 방향으로의 부가질량계수($X_u, Y_v, Z_w, L_p, M_q, N_r$)는 스트립 이론을 적용하여 계산하였으며 결과는 $X_u=20.57kg$, $Y_v=41.13kg$, $Z_w=81.15kg$, $L_p=1.87kgm^2$, $M_q=4.41kgm^2$, $N_r=2.33kgm^2$ 과 같다. 또한 직육면체 형태의 근사모델의 치수와 질량에 근거하여 각 항의 관성텐서($I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}$)를 계산하였다.

$$F_{cmx} = m_b(\dot{u} - vr + wq) - X_u\dot{u} - Z_w uq + Y_v vr \quad (5)$$

$$F_{cm y} = m_b(\dot{v} - vr + ur) - Y_v\dot{v} + Z_w w - X_u ur \quad (6)$$

$$F_{cm z} = m_b(\dot{w} - uq + vp) - Z_w\dot{w} - Y_v vp + X_u uq \quad (7)$$

$$M_{cmx} = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pq - \dot{q})I_{xy} - L_p\dot{p} + (Y_v - Z_w)vw + (M_q - N_r)qr \quad (8)$$

$$M_{cm y} = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} - M_q\dot{q} + (Z_w - X_u)uw + (N_r - L_p)pr \quad (9)$$

$$M_{cm z} = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (r\dot{q} - \dot{p})I_{xz} - N_r\dot{r} + (X_u - Y_v)uw + (L_p - M_q)pq \quad (10)$$

식 (11)의 \vec{F}_{cm} 와 \vec{M}_{cm} 는 x, y, z축에 대한 몸체의 무게 중심점에 작용하는 외부 힘과 모멘트의 총합을 나타낸다.

$$\vec{F}_{cm} = \vec{F}_g + \vec{B} + \vec{F}_p + \vec{F}_h, \quad \vec{M}_{cm} = \vec{M}_b + \vec{M}_p + \vec{M}_h \quad (11)$$

식 (12)부터 식 (16)을 통해 식 (11)의 각 항을 계산해 낼 수 있다.

- \vec{F}_g : 중력, \vec{B} : 부력, \vec{F}_p : 추진력, \vec{F}_h : 유체항력
- $\vec{M}_b, \vec{M}_p, \vec{M}_h$: 부력, 추진력과 유체항력에 대한 모멘트

$$\vec{F}_g = \begin{bmatrix} F_{gx} \\ F_{gy} \\ F_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_b g \sin\theta \\ m_b g \sin\theta \cos\theta \\ m_b g \cos\theta \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \vec{B} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \rho g \sin\theta \\ -V \rho g \sin\theta \cos\theta \\ -V \rho g \cos\theta \cos\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (13)은 부력에 관한 모멘트와 유체항력에 대한 수식을 나타내고, 부력에 관한 모멘트 항 \vec{M}_b 은 근사모델의 부피중심과 질량중심이 일정하게 설정해 주었기 때문에 0으로 설정되었다.

$$\vec{M}_b = \begin{bmatrix} M_{bx} \\ M_{by} \\ M_{bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \times \vec{B}, \quad \vec{F}_h = \begin{bmatrix} F_{hx} \\ F_{hy} \\ F_{hz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5\rho C_{Dx} B H u^2 \\ 0.5\rho C_{Dy} B H v^2 \\ 0.5\rho C_{Dz} B L w^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (14)는 각 방향으로의 근사모델의 몸체에 작용하는 유체항력 모멘트를 의미하며 이에 사용된 직육면체 형상의 모델의 각 면적에 대한 유체항력 계수(C_{Dx}, C_{Dy}, C_{Dz})를 적용하였다¹³⁾.

$$\vec{M}_h = \begin{bmatrix} M_{hx} \\ M_{hy} \\ M_{hz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho p^2 L (C_{Dz} B^4 + C_{Dy} H^4) / 64 \\ \rho q^2 B (C_{Dx} B^4 + C_{Dz} L^4) / 64 \\ \rho r^2 H (C_{Dx} B^4 + C_{Dy} L^4) / 64 \end{bmatrix} \quad (14)$$

추진력은 형상에 따라 항력과 양력으로 나눌 수 있지만, 모의실험 상에서는 지름이 일정한 실린더형태의 다리관절로 구성해 주었기 때문에 추진력이 항력에 관해서만 표현될 수 있고, 식 (15)와 식 (16)에 의해 표현될 수 있다. i 는 각 다리에 대한 정보를 의미하며 6족 로봇이기 때문에 6개의 다리의 추진력을 각각 구해 내었다. 유영 시에 사용하는 다리의 항력은 유영동작이 적용되는 몸체중심으로부터 세 번째와 네 번째 관절에 적용이 되므로, 이는 2절 링크의 로봇다리항력으로 나타낼 수 있다. 이 부분에 3장 도입부에서 설명했었던 물방개의 유영을 모사한 유영동작 발생기법을 적용시키게 되고 2차원적인 유영의 제약을 해결하기 위해 몸체로부터 첫 번째 관절인 Hip pitch관절 각도에 변화를 준만큼의 R (회전행렬)을 식 (16)과 같이 추진력 항에 곱해주어 3차원이 가능한 유영동작이 발생할 경우 z축으로의 힘의 성분이 발생하도록 하였다.

$$\vec{F}_{p,j} = \begin{bmatrix} F_{px,j} \\ F_{py,j} \\ F_{pz,j} \end{bmatrix}, \quad \vec{M}_{p,j} = \begin{bmatrix} x_{hip,j} \\ y_{hip,j} \\ z_{hip,j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{px,j} \\ F_{py,j} \\ F_{pz,j} \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (16)에 있어 J (자코비안 행렬)와 M (로봇다리 관성

행렬), D_i (유체항력)등의 중간유도과정은 생략하고, 최종식을 간단히 나타내면 식 (17)-(18)과 같다^[14].

$$\vec{F}_{p,i} = e_d^T J_i M_i^{-1} D_i, \quad \vec{F}_{p,i} = R \times \begin{bmatrix} F_{px,i} \\ F_{py,i} \\ F_{pz,i} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \rho \{ l_1^4 C_{D1} r_1 X_{21} |X_{21}| + l_2^4 C_{D2} r_2 X_{11} |X_{11}| \} \\ \frac{1}{4} l_2^4 C_{D2} r_2 X_{22} |X_{22}| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

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

식(18)에 쓰인 \dot{q}_i 는 각 관절의 각속도를 의미하고, C_{Di} 은 각 링크의 유체저항계수, e_x 와 e_y 는 x, y축 방향으로의 단위벡터이다. B_i 는 로봇 다리 기준 좌표계에서 번째 링크에 고정된 좌표계의 변환행렬을 의미한다.

4. 유형발생기법을 적용한 3차원 유형모의실험

근사 모델을 활용하여 다양한 방향으로의 운동을 위한 전략을 검토하는 것은 추후에 진행될 로봇의 경로 계획 및 제어기법에 대한 연구에 대한 중요한 절차라고 할 수 있다.

따라서 그림 8의 회전과 전진유형 동작을 이용하여 경로계획의 근간이 되는 다양한 방향(전진, 회전, 상승, 하강 등)으로 움직임을 분석하기 위한 모의실험을 실행하였다. 3차원 유형동작전략에 관해서는 앞서 언급한 바와 같이 Hip pitch 관절에 변화를 주어 진행하였고, 그림 11에서 최종적인 근사모델의 움직임 경로와 자세를 확인할 수 있으며, 운동방향을 결정짓기 위한 Hip pitch 관절은 로봇 앞쪽부터 1,2,3의 순서로 나타내었고, 각 Hip pitch 관절의 초기 각도는 표 4와 같이 설정해 주었다.

모의실험은 유형동작의 한 주기를 2.32초로 구성하여 총 두 번의 주기를 가지는 유형 동작에 대한 분석을 목적으로 진행되었다. 유형동작의 한 주기의 속도는 3장 도입부에서 언급한 유형동작을 발생시키기 위한 각 다리관절의 최

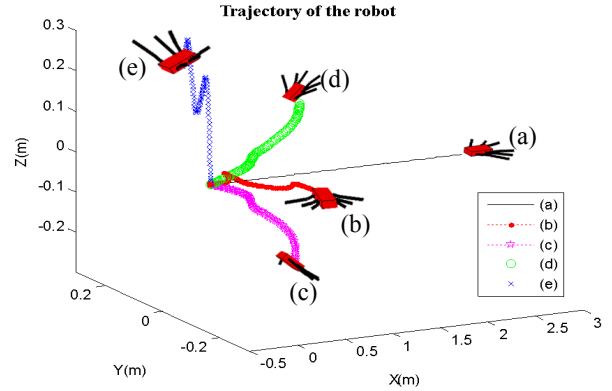


Fig. 11. 3-D simulation. - (a) : Forward, (b) : Turning, (c) : Gradual downward, (d) : Gradual upward, (e) : Vertical upward

Table 4. Setting for the simulation.

Simulation (4.64s)	Type of motion / Initial angle of Hip pitch [$\theta_{Hip-p1} \dots \theta_{Hip-p3}$]
(a)	Forward [0° 0° 0°]
(b)	Turning [0° 0° 0°]
(c)	Gradual downward [0° 0° -15°]
(d)	Gradual upward [0° 0° +15°]
(e)	Vertical upward [+90° +90° +90°]

종 수식에서의 파라미터 k_1 와 k_2 의 값을 조절하여 바꾸어 줄 수 있으며 위 파라미터의 값은 0.5로 설정해서 모의실험을 실시하였고 이는 개발 중인 유형로봇의 최대속도의 1/2에 해당하는 값이다.

각 방향으로의 유형동작에서 유심히 봐야 할 결과를 정리해보면, (a)에서는 근사모델의 전진방향인 x축의 이동거리, (b)에서는 회전방향인 Yaw의 결과, (c)와 (d)에서는 근사모델이 아래·위로 점차 하강과 상승하는 동작으로 Pitch의 결과, (e)에서는 모든 다리의 초기 Hip pitch 관절 각도를 모두 90°로 해주어 제자리 근처에서 상승을 유도하는 하는 동작으로 z축의 방향에 직관적으로도 주목해야 할 수 있고, 각 방향으로의 자세한 움직임 경로와 수치를 확인하기 위하여 표 5와 그림 12에 자세히 나타내었다.

이와 같이 근사모델을 활용한 모의실험을 통해 효율적인 경로계획에 근간이 되는 서로 다른 방향으로의 움직임을 유도하여 3차원 유형이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 또한 위의 결과를 토대로 로봇의 앞쪽 네 개의 다리와 뒤쪽

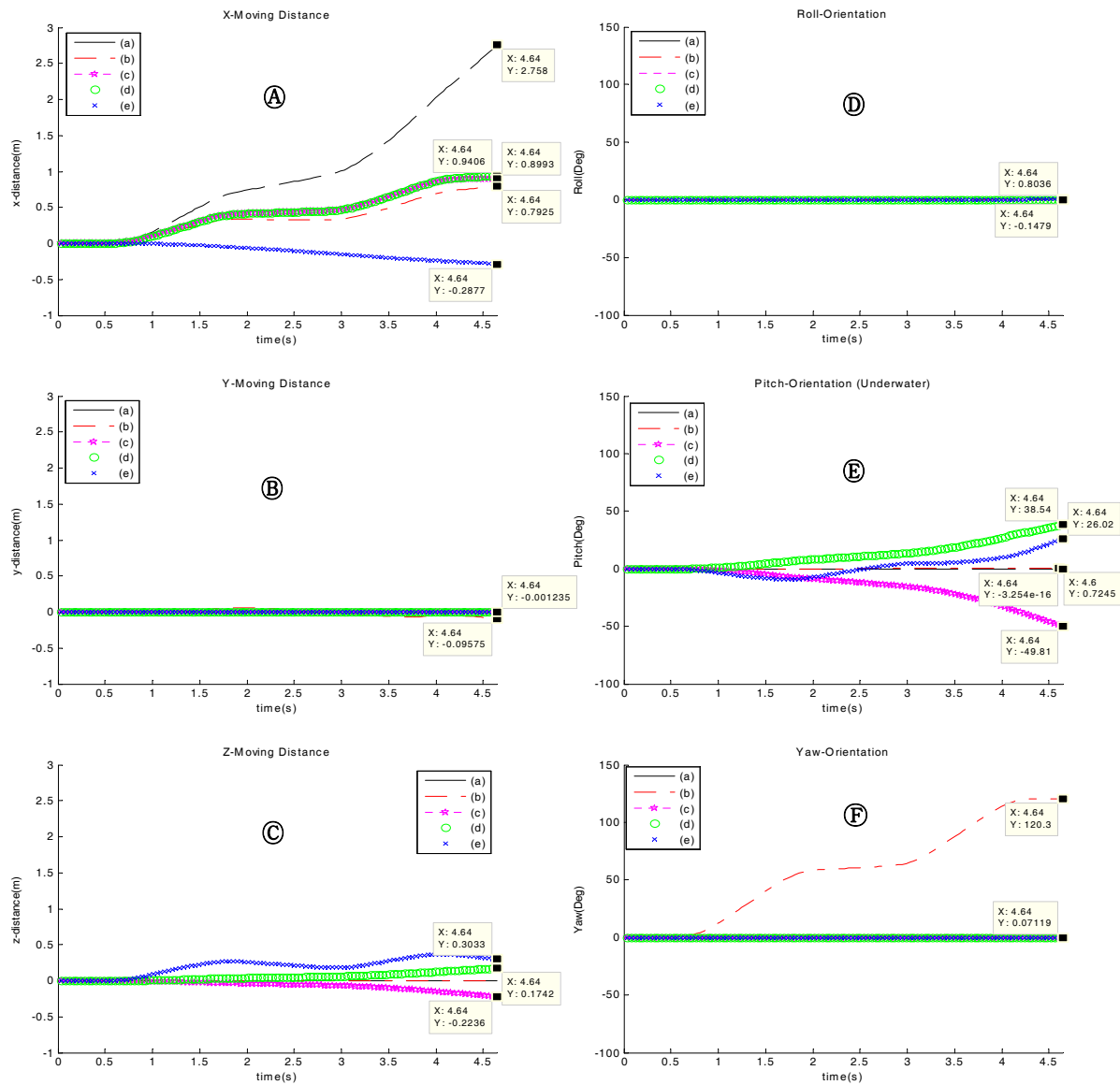


Fig. 12. Simulated Results in six different directions of the motions.

((A) : X-direction, (B) : Y-direction, (C) : Z-direction, (D) : Roll-direction, (E) : Pitch-direction, (F) : Yaw-direction)

두 개의 다리의 구조와 역할이 다르기 때문에 Hip pitch관절 각도를 잘 조절하여 수영에 활용해야 한다는 분석을 기반으로, z축으로 원하는 방향으로 이동할 경우에 모든 다리의 Hip pitch 관절 각도를 같게 바꾸면 유체환경에서의 로봇 몸체의 모멘트에 많은 영향을 주게 된다는 사실을 감안하여 상황에 맞게 적용해야 한다는 관절공간에서의 경로계획 전략이 이루어져야 한다는 결론을 도출해 낼 수 있다. 추후에는 유영생성 기법에 의해 만들어진 다양한 유영동작들을 활용하여 장애물 회피나 경로추정에 관한 연구를 지

속해서 진행할 예정이다.

5. 결론

본 논문에서는 생체모방 기술을 접목하여 개발 중인 유영과 보행을 결합할 수 있는 형태의 수중 다족 로봇에 대한 소개를 비롯하여 생명체의 유영동작을 모방한 유영동작 생성기법에 대한 선행연구와 관절공간에서의 경로계획 전략을 접목하여 근사모델을 통한 수중 유영실험에 초점을 맞추어 다양한 운동방향에 대해 검증하였다.

Table 5. Simulated results.

Simulations (4.64s)	Moving distance (x, y, z)	Orientation (Roll, Pitch, Yaw)
(a)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ x : 2.7581m ▪ y : 0m ▪ z : 0m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roll : $-0.0023 \times 10^{-16} \text{ }^\circ$ ▪ Pitch : $-0.0033 \times 10^{-16} \text{ }^\circ$ ▪ Yaw : $-0.4699 \times 10^{-16} \text{ }^\circ$
(b)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ x : 0.7925m ▪ y : -0.0957m ▪ z : 0.0036m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roll : 0.8036 ° ▪ Pitch : 0.7626 ° ▪ Yaw : 120.3357 °
(c)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ x : 0.8993m ▪ y : 0.0004m ▪ z : -0.2236m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roll : 0.3258 ° ▪ Pitch : -49.8127 ° ▪ Yaw : -0.0846 °
(d)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ x : 0.9406m ▪ y : -0.0006m ▪ z : 0.1742m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roll : -0.1479 ° ▪ Pitch : 38.5351 ° ▪ Yaw : 0.0781 °
(e)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ x : -0.2877m ▪ y : 0.0012m ▪ z : 0.3033m 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roll : 0.4429 ° ▪ Pitch : 26.0224 ° ▪ Yaw : 0.0712 °

모의실험 상에서는 근사모델의 다리관절형태에 추가적인 추진력을 발생시키면서 유체 저항력을 줄여줄 수 있는 개발 중인 실제 로봇 다리 구조가 완벽하게 반영되어 있지 않고 실린더 형태의 다리관절 구조로 이루어져 있기 때문에 실제 디자인한 다리 구조와 가까운 형태의 다리모델링에 대한 연구와 이를 활용한 경로계획 및 제어기법에 관한 연구가 진행될 예정이다. 이와 같은 과정을 통하여 좀 더 현실성 있고 최적화된 근사모델을 통하여 개발 중인 로봇의 성능을 신뢰성 있게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] 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.

[2] A. Crepsi, D. Lachat, A. Pasquier, and A. J. Ijspeert, "Controlling and crawling in a fish robot using a central pattern generator," *Autonomous Robots*, Vol. 25, no 1-2, pp. 3-13, 2008.

[3] 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.

[4] J. Guo, F. C. Chiu, S. W. Cheng, and Y. J.

Joeng, "Motion control and way-point tracking of a biomimetic underwater vehicle," Proc. of the IEEE Symposium on Underwater Technology, pp. 73-78, 2002.

[5] M. S. Traiantafyllou, and G. S. Traiantafyllou, "An efficient Swimming machine", *Scientific American*; Mar 95, Vol. 272, no. 3, pp. 64-70, June 1995.

[6] B. H. Jun, H. Shim, J. Y. Park, B. Kim, and P. M. Lee, "A New Concept and Technologies of Multi-Legged Underwater Robot for High Tidal Current", Proc. of Underwater Technology, IEEE Symposium on and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, April 5-8, 2011

[7] B. H. Jun, H. Shim, J. Y. Park, H. Beak, P. M. Lee, W. J. Kim, Y. S. Park, "Preliminary Design of the Multi-Legged Underwater Walking Robot CR200", Proc. of the MTS/IEEE Oceans, May 21-24, 2012

[8] H. Kang, H. Shim, B. H. Jun, and P. M. Lee, "Development of Leg with Arm for Multi-Legged Seabed Robot CR200", Proc. of the MTS/IEEE Oceans, October 14-19, 2012

[9] H. J. Kim, and J. Lee, "Swimming pattern analysis of a Diving beetle for Aquatic Locomotion Applying to Articulated Underwater Robots", *Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 7, no. 4, pp. 259-266, Dec 2012

[10] H. J. Kim, and J. Lee, "Swimming Plans for a Bio-inspired Articulated Underwater Robot", *Institute of Control Robotics and System*, Vol. 19, no. 9, pp. 782-790, Sep 2013

[11] M. Sfaloptakis, A. Kazakidi, N. Pateromichelakis, J. A. Ekaterinaris, and D. P. Tsakiris, "Robotic Underwater Propulsion Inspired by the Octopus Multi-arm Swimming", 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012

[12] Thor I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", Wiley, UK

[13] ESDU Fluid Forces, Pressures and Moments on Rectangular Blocks. Engineering Science Data Item No. 71016, ESDU International plc.,

London, 1971.

- [14] 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.



김희중

2013 충남대학교 메카트로닉스
공학과(공학사)
2013~현재 동 대학원 석사과정
관심분야: 로봇틱스, 수중 다관
절 로봇, 경로계획



전봉환

1994 부경대학교 기계공학과
(공학사)
1994 동 대학원 석사
2006 충남대학교 메카트로닉스
공학과 박사

2006~현재 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구
소 해양시스템연구부 책임연구원
관심분야: 무인잠수정 설계, 로봇틱스 수중응용



이지홍

1983 서울대학교 전자공학과
(공학사)
1985 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(석사)
1991 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(박사)

1994 ~ 현재 충남대학교 메카트로닉스 정교수
관심분야: 로봇틱스, 다관절 로봇, 야지고속주행로봇