다족형 생체모방 수중 로봇(CALEB10)의 각 자유도를 분리한 자세 제어

Posture Control through Decomposed Control for Multi-Legged Biomimetic Underwater Robot (CALEB10)

이 한 솔¹·이 지 홍[†] Hansol Lee¹, Jihong Lee[†]

Abstract: This paper describes a study on posture control of the multi-legged biomimetic underwater robot (CALEB10). Because the underwater environment has a feature that all degrees of freedom are coupled to each other, we designed the posture control algorithm by separating each degree of freedom. Not only should the research on posture control of underwater robots be a precedent study for position control, but it is also necessary to compensate disturbance in each direction. In the research on the yaw directional posture control, we made the drag force generated by the stroke of the left leg and the right leg occur asymmetrically, in order that a rotational moment is generated along the yaw direction. In the composite swimming controller in which the controllers in each direction according to the error angle along the yaw direction. The performance of the proposed posture control method is verified by a dynamical simulator and underwater experiments.

Keywords: Biomimetic, Multi-legged underwater robot, Posture control, Simulator

1.서 론

지구의 표면 중 육지가 약 30%를 차지하고, 해양이 70%를 차지한다. 하지만, 바다의 95%는 아직 지도조차 만들어지지 않았고, 바다 생명체 중 2/3는 아직 발견 조차 되지 않았다고 알려져 있다. 이것은 수중 환경이 인류가 아직도 쉽사리 접근 하기 어려운 영역이라는 것을 의미한다. 바다를 인간이 직접 탐사하기에는 높은 수압과 빛의 투과성이 제한되는 등의 문제 로 제한되는 사항이 많기 때문에, 인간을 대신해서 작업을 수 행할 다양한 형태의 수중 로봇들이 개발 중이다. 그 중에서 특 정 생명체를 모방하여 개발 중인 로봇을 생체모방 로봇이라 부른다. 수중 생명체가 가지는 특성은 수중 환경에서의 생존 활동에 최적화하기 위해 진화된 모습이기 때문에 일반적으로 프로펠러 형태의 추진체를 사용하는 ROV (Remotely Operated Vehicle), AUV (Autonomous Underwater Vehicle)과는 다른 형 태인 생체모방 수중 로봇에 대한 연구가 활발히 진행 중이다^[1-5].

[Fig. 1]은 수중 환경에서 다관절 형태의 다리를 이용하여 유영과 보행이 가능하다는 특징을 가진 다족형 생체모방 수중 로봇 CALEB10을 나타낸다^[68].

본 논문에서는 CALEB10의 유영 방법 중 자세 제어 방법에 초점을 맞춘 연구 내용을 담고 있다. CALEB10의 자세 제어 연 구의 필요성은 첫 째로, 수중 생명체인 물방개가 원하는 위치 로 유영하기 위해서 목표로 하는 위치의 방향으로 자신의 자 세를 제어하며 운동하는 것을 모방하기 위해서이다. 둘 째는, CALEB10의 유영 동작 시 하드웨어 특징으로 인해 각 방향으 로 발생하는 외란을 보상하며 안정적으로 유영하기 위해서이 다. CALEB10의 하드웨어 특징으로 인해 각 방향으로 외란이 발생하는 이유는 다음과 같다.

첫째, 전원 공급 및 센서 데이터 취득을 위해 CALEB10은 전선이 연결된 상태로 운용된다. 이 전선에 의한 외란과 물살

Received : Nov. 1. 2017; Revised : Dec. 26. 2017; Accepted : Jan. 16. 2018 * This work was supported by research fund of Chungnam National University.

Mechatronics Engineering, Chungnam National University (bigpine0507@naver.com)

[†] Corresponding author: Mechatronics Engineering, Chungnam National University Gung-Dong, Youseong-Gu, Daejeon, Korea (jihong@cnu. ac.kr)

에 의한 외란이 [Fig. 2]와 같이 Yaw 방향으로 영향을 끼치게 된다.

둘째, Pitch 방향으로는 전선과 물살에 의해 발생하는 외란 과 더불어 CALEB10의 다리 무게가 로봇 전체 무게의 약 40% 를 차지하는 상태에서 [Fig. 3]과 같이 유영 동작 시 4개의 다리 가 무게 중심점의 앞, 뒤에 위치하는 구간이 반복되기 때문에 발생하는 외란이 Pitch 방향으로의 불안정한 움직임에 영향을 끼친다.

셋째, 본 논문에서 제안하는 CALEB10의 Yaw 방향 자세 제 어 방법은 좌, 우측 다리에 비대칭적으로 추진력을 발생시키



[Fig. 1] CALEB10



[Fig. 2] Reasons for unstable movement along the yaw direction



[Fig. 3] Reasons for unstable movement along the pitch direction



[Fig. 4] Reasons for unstable movement along the roll direction

도록 유영 패턴을 입력한다. 이 때, [Fig. 4]와 같이 다리 무게 비중에 의한 외란과 전선 및 물살에 의한 외란이 Roll 방향으 로의 불안정한 움직임에 영향을 끼친다.

하지만, CALEB10은 Roll 방향에서 비교적 안정적인 범위 에서의 불안정한 움직임이 나타나는 것을 실험적으로 확인하 였기 때문에, Yaw와 Pitch 방향 유영 제어 방법에 대한 내용이 주를 이룬다. 본 논문에서 제시한 CAELB10의 자세 제어기는 모든 자유도가 커플링되어 있는 수중 환경의 특성을 고려하여 설계하였으며, 제어기의 성능을 수중 환경을 고려한 동역학기 반의 시뮬레이터에서의 실험과 수중 실험을 통해 검증하였다.

2. CAELB10

2.1 하드웨어 구조

[Fig. 5]는 [Fig. 1]에 나타난 다족형 생체모방 수중 로봇인 CALEB10의 다리 관절 구조와 각 관절의 회전 축을 나타낸다. [Table 1]은 CALEB10의 하드웨어와 전장부의 구성을 구체적 으로 나타낸다.



[Fig. 5] Joint structure of CALEB10

[Table 1] Configuration of CALEB10

Body size	1.15 m (L), 0.64 m (W), 0.35 m (H)	
Leg size	0.1 m (Link1), 0.325 m (Link2), 0.385 m (Link3)	
Mass	73.7 kg	
Power	External power via cable (48 V, 12 V, 5 V)	
Operating System	OS: Linux (Ubuntu 12.04 with Xenomai) Middle ware: ROS	
Sensor	IMU (Spatial Evaluation Kit)	
Actuator	tor Motor: Maxon EC60 Flat BLDC (14 EA) Gear: Harmonic Drive (100:1, 160:1)	

2.2 SPG (Swimming Pattern Generator)

선행 연구에서는 물방개의 다양한 유영 동작을 관측하고, 식 (1-2)와 같이 수식으로 모델링하여 SPG (Swimming Pattern Generator)라 이름 붙였다^[9,10]. 상수 $A_{1,2}$, $C_{1,2}$, $\theta_{1,2}$ 는 물방개 의 유영 동작을 관측한 데이터를 기반으로 산출한 값이다^[9,10]. 변수 $U_{1,2}$, $M_{1,2}$, $\psi_{1,2}$, $k_{1,2}$ 에 의해 SPG 유영 패턴이 결정되며, 각각 Offset, Amplitude, Phase delay, Frequency를 담당한다^[9,10]. 식 (1-2)의 출력 값은 각각 [Fig. 5]에 나타난 4개 다리의 Joint2, 3에 입력된다.

$$\theta_{joint2} = U_1 A_1 + M_1 C_1 \cos(w k_1 t + \theta_1 + \psi_1)$$
(1)

[Table 2] Name and role of ESPG control variables

Parameter	Explanation		
ROx	ROP	ROW	
(P, W)	(Region of power stroke)	(Region of weak stroke)	
i (Index)	(Range) <i>i</i> =1 ↔ <i>i</i> =8 (Role) Determine the drag force intensity of the swimming pattern		
n (Phase)	(Range) <i>n</i> =2 ↔ <i>n</i> =8 (Role) Determine the phase angle difference of joints 2,3		

$$\theta_{joint3} = U_2 A_2 + M_2 C_{2COS} (w k_2 t + \theta_2 + \psi_1)$$
(2)

2.3 ESPG (Extended Swimming Pattern Generator)

[Fig. 5]의 SPG는 변수가 상당히 많아 사용하기가 불편하다 는 단점이 있다. 선행 연구에서는 SPG 변수의 상관 관계를 공 간 좌표 상에서 분석하여 4가지 변수로 식 (3)과 같이 간편하 게 유영 패턴을 생성할 수 있는 방법을 개발하였고, ESPG라 이름 붙였다^[9,10]. [Table 2]는 ESPG의 제어 변수의 명칭과 역 할에 대해 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \theta_{joint2} \\ \theta_{joint3} \end{bmatrix} = f_{ESPG}(ROx, i, n, k)$$
(3)

식 (3)의 출력 값은 각각 [Fig. 5]에 나타난 4개 다리의 Joint 2, 3에 입력된다. Joint 1은 보행을 위한 관절이며 유영에 활용 될 수 있지만, 현재는 초기 값이 입력된 상태로 운용되고 있다. [Fig. 6]은 본 논문에서 사용된 ESPG의 제어 변수에 따른 유영 패턴의 궤적을 나타낸다.

3. CALEB10의 자세 제어

[Fig.. 7]은 본 논문에서 제시하는 자세 제어 알고리즘을 나 타내고, [Table 3]은 [Fig. 7]에 나타난 표기와 그에 대한 설명을



[Fig. 6] Trajectory of swimming pattern

나타낸다.

수중 환경은 모든 자유도가 커플링되어 있다는 특징을 가 지기 때문에, 본 논문에서 제시하는 유영 자세 제어 방법은 Yaw 방향 목표 각도에 대한 오차 각도 (e_{ψ}) 에 따라 각 자유도 에 대한 자세 제어기의 가중치가 결정되도록 Control weight planner를 [Fig. 8]과 같이 설계하였다. [Fig. 8]에서 확인 할 수 있듯이, w_{ψ} 와 w_{θ} 는 e_{ψ} 에 의해 결정되는 함수이다. [Fig. 9]는 수중 실험 데이터인 e_{ψ} 와 e_{θ} 가 Control weight planner에 의해 변환되는 과정과 출력 값을 나타낸다.



[Fig. 7] Posture control algorithm for CALEB10

Notation	Explanation	
$\psi, heta$	Yaw, pitch angle of the IMU sensor	
$T_{\psi},\ T_{\theta}$	Target angle of yaw, pitch direction	
e_ψ,e_θ	Error angle of yaw, pitch direction	
$w_\psi, w_ heta$	Control weight of yaw, pitch direction	
$ heta_{ m pid}, heta_{ m Final}$	Output of PID controller, Converting block for pitch directional control	



[Fig. 8] Control weight planner

3.1 Yaw 방향자세 제어 방법

Yaw 방향 자세 제어는 Yaw 방향 오차 각도 (e_{ψ}) 의 범위에 따라 ESPG 제어 변수 중 유영 패턴의 추진력을 조절하는 i (Index) 변수를 왼쪽 다리와 오른쪽 다리에 비대칭적으로 입력 되는 방법을 사용한다. n (Phase) 변수는 [Table 2]에 나타난 것 과 같이 Joint 2,3의 위상 차를 결정하는 변수이며 2~8까지의 범위에서 중간 값인 4로 고정하여 입력하였다. [Fig. 10]과 [Table 4]는 수중 실험을 통해 구성한 Yaw 방향 자세 제어기와 ESPG 변수 선택기의 구성을 구체적으로 나타낸다.

[Table 4]에서 Safety zone을 제외한 회전(Rotating) 유영 구 간인 Area1~10은 [Fig. 11]과 같이 반대 쪽 다리를 초기 자세로 유지한다. 그 이유는 CALEB10의 다리의 무게 비중이 크기 때 문에 발생하는 Pitch 방향과 Roll 방향으로 불안정한 움직임을 발생시키지 않기 위해서이다.



[Fig. 9] Conversion by control weight planner



[Fig. 10] Outline of yaw directional posture control method

	Scope of Error (°)	ESPG control variables		
Area 1	$\textbf{-50} < e_\psi \times w_\psi$	(Right): ROP, <i>i</i> =7, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 2	$\textbf{-50}\!\leq\!e_\psi\!\times\!w_\psi\!<\!\textbf{-40}$	(Right): ROP, <i>i</i> =6, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 3	$\textbf{-40} \!\leq\! e_\psi \!\times\! w_\psi \!<\!\textbf{-30}$	(Right): ROP, <i>i</i> =5, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 4	$\textbf{-30} \!\leq\! e_\psi \!\times\! w_\psi \!<\!\textbf{-20}$	(Right): ROP, <i>i</i> =4, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 5	$\textbf{-20} \!\leq\! e_\psi \!\times\! w_\psi \!<\! \textbf{-10}$	(Right): ROP, <i>i</i> =3, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Safety zone	$\textbf{-10} \! \leq \! e_\psi \! \times \! w_\psi \! \leq \! \textbf{+10}$	(Right): ROP, <i>i</i> =3, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1 (Left): ROP, <i>i</i> =3, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 6	$+\!10\!<\!e_\psi\!\times\!w_\psi\!\leq\!+\!20$	(Left): ROP, <i>i</i> =3, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 7	$+\!20\!<\!e_\psi\!\times\!w_\psi\!\leq\!+\!30$	(Left): ROP, <i>i</i> =4, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 8	$+30 < e_\psi \times w_\psi {\leq} +40$	(Left): ROP, <i>i</i> =5, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 9	$+40 < e_\psi \times w_\psi {\leq} +50$	(Left): ROP, <i>i</i> =6, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		
Area 10	+50 < $e_\psi\!\times\!w_\psi$	(Left): ROP, <i>i</i> =7, <i>n</i> =4, <i>k</i> =1		

[Table 4] ESPG control variables according to error range



[Fig. 11] Swimming patterns in rotational stroke area

3.2 Pitch 방향 유영 제어 방법

이전 연구에서 진행한 Pitch 방향 유영 제어 방법은 [Fig. 7] 에서 확인 할 수 있듯이, ESPG 유영 패턴에서 Hip-pitch 관절 을 추가로 제어하여 Pitch 방향 목표 각도(T_{θ})로 추진 모멘트 를 발생시키도록 구성하였다^[13].

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이터의 구성

동역학 기반의 시뮬레이터는 Fossen의 수중 운동체에 대한 저서 내용을 바탕으로 구성하였으며^[11], 시뮬레이터의 구성은 이전 연구 내용과 동일하다^[12-13].

4.2 Yaw 방향자세 제어 시뮬레이션

본 시뮬레이션의 목적은 Yaw 방향 자세 제어 방법을 동역 학 기반의 시뮬레이터 환경에서 실험하여 수중 실험 전에 경 [Table 5] Control input for simulation



[Fig. 12] Disturbance force along the yaw direction

향성을 확인하기 위함이다.

[Table 5]는 시뮬레이션에서의 제어 입력을 나타내며, 로봇 이 완전히 물에 뜬 상태인 양성 부력 상태라 가정하고 시뮬레 이션 환경을 구성하였다.

또한, 테더와 물살에 의한 외란을 [Fig. 12]와 같이 평균이 0 (Nm)이며, 분산이 $\left(\frac{5}{3}\right)^2$ 인 확률적인 가우시안 모델로 설계하 여 Yaw 방향으로 입력하였다.

4.3 Yaw 방향자세 제어 시뮬레이션 결과 및 분석

[Fig. 13]은 Yaw 방향 자세 제어 시뮬레이션 결과이다. 5 가지 제어 입력(T_{ψ})에 대한 실험 결과 모두 Safety zone ($T_{\psi} - 10^{\circ} \sim T_{\psi} + 10^{\circ}$)으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

5. 수중 실험

5.1 Yaw 방향자세 제어 수중 실험

Yaw 방향 유영 제어 실험은 Pitch와 Roll 방향의 영향 없이 실험하기 위해서 로봇이 물에 완전히 뜬 상태인 양성 부력 상 태로 실험하였다. 제어 입력은 시뮬레이션과 동일하게 [Table 5]와 같이 입력하였다.

5.2 Yaw 방향 자세 제어 수중 실험 결과 및 분석

[Fig. 14]는 Yaw 방향자세 제어 수중 실험 결과를 나타낸다. 각 실험 데이터에서 점이 찍힌 부분은 Yaw 방향 오차 각도 (e_{ψ}) 에 따라 ESPG 유영 패턴이 선택된 시점을 나타낸다. 유영 패

[Table 4]에서 Safety zone에 속하기 때문에 직진 유영 패턴이 선택되었음을 나타낸다. 직진 유영 패턴이 선택된 시점에서 직진 명령을 내렸지만, 전선에 의한 외란과 물살에 의해 발생 하는 외란으로 점점 Safety zone에서 벗어나게 되면 다시 동그 란 음영으로 표시된 회전 유영 패턴이 선택되어 Yaw 방향목 표 각도(T_{ψ})로 수렴하기 위해 회전하는 과정이 반복되는 것을 5가지 제어 입력에 대한 수중 실험 결과인 [Fig. 14]를 통해 확



[Fig. 14] The data of IMU along yaw direction

턴이 선택되면 그 다음의 유영 패턴이 선택되기 전까지는 선 택된 유영 패턴에 의존적으로 동작한다. 그 위에 동그란 음영 으로 표시된 것은 그 시점의 상태가 [Table 4]에서 Safety zone 이 아닌 Area 1~10에 속하기 때문에 회전 유영 패턴이 선택되 었음을 나타낸다. 5가지 결과에서 회전 유영 패턴이 선택된 시 점에서는 Yaw 방향 목표 각도(T_{ψ})로 회전하는 것을 확인 할 수 있다. 사각형 음영으로 표시된 것은 그 시점의 상태가



[Fig. 13] Simulation data along yaw direction

인할수있고, 본실험의 결과 분석을 통해 Yaw 방향자세 제어 기의 성능을 검증하였다.

5.3 복합 자세 제어 실험

복합 자세 제어 실험은 로봇이 물에 완전히 잠긴 상태로 로 봇의 무게와 부력이 거의 일치하는 중성 부력 상태로 실험하 였다. 제어 입력은 [Table 6]과 같이 입력하였다.

5.4 복합 자세 제어 실험 결과 및 분석

[Fig. 15]는 수중에서 촬영한 복합 자세 제어 실험 결과를 나 타낸다. 점선은 Yaw 방향 0° 기준을 나타내며, Yaw 방향 목표 각도(*T*..)에 따라 화살표 방향으로 유영한 것을 확인할 수 있다.

[Fig. 16]은 복합 자세 제어 실험 결과를 나타낸다. (a)~(e) 실 험 결과에서 나타난 직진(Straight) 구간은 Yaw 방향 오차 각 도 (e_{ψ}) 가 Safety zone에 수렴하여 Pitch 방향 자세 제어 가중치 (w_{θ}) 가 1인 구간이고, 회전(Rotation) 구간은 Yaw 방향 자세 제어 가중치 (w_{ψ}) 가 1인 구간이다.

Yaw 방향으로는 로봇이 물에 뜬 양성 부력 상태에서의 실 험인 5.2절의 결과와 동일하게 Yaw 방향 자세 제어를 적용하 여총 5가지 제어 입력에 대해 모두 Safety zone에 수렴하는 것 을 로봇이 완전히 물에 잠긴 중성 부력 상태에서의 실험에서 도확인 할 수 있었다.

Roll 방향으로는 회전(Rotation) 구간에서는 약 5도 이하의 크기로, 직진(Straight) 구간에서는 약 1도 이하의 크기로 상당 히 안정적으로 유영 한 것을 확인 할 수 있다.

Number of ESPG iteration (times)	10
T_ψ (Degree)	-60, -30, 0, +30, +60
T_{θ} (Degree)	-6
PID gain for pitch directional posture control	P=10, I=1, D=7

[Table 6] Control input for experiment



[Fig. 15] Experiment result



[Fig. 16] The data of IMU



[Fig. 17] The data of IMU which is not applied with pitch directional posture control

	Variance	Control performance ratio
Without control	30.3921	1
(a) $T_{\psi} = -60^{\circ}, T_{\theta} = -6^{\circ}$	15.6388	1.9434
(b) $T_{\psi} = -30^{\circ}, T_{\theta} = -6^{\circ}$	16.4090	1.8522
(c) $T_{\psi} = 0^{\circ}, T_{\theta} = -6^{\circ}$	16.1355	1.8836
(d) $T_{\psi} = +30^{\circ}, T_{\theta} = -6^{\circ}$	13.2472	2.2942
(e) $T_{\psi} = +60^{\circ}, T_{\theta} = -6^{\circ}$	11.7912	2.5775

[Table 7] Tracking error variance of pitch direction data

Pitch 방향으로는 (a)~(e) 실험 결과에서 Pitch 방향 자세 제 어의 가중치(w_θ)가 1인 구간인 직진(Straight) 유영 구간의 데 이터만 추려내어 Pitch 방향 자세 제어 목표 값(T_θ)에 대한 추 종 오차(e_θ)의 분산으로 제어의 성능을 나타내었다. 이것을 [Fig. 17]에 나타난 Pitch 방향 자세 가중치(w_θ)를 0으로 설정 하고 직진(Straight) 유영 시킨 데이터의 추종 오차 분산 값과 비교하였을 때, [Table 7]과 같이 추종 오차의 분산이 감소한 것으로 본 논문에서 제안한 Pitch 방향 자세 제어 알고리즘의 성능을 나타낼 수 있다.

6.결 론

본 논문에서 제안한 CALEB10의 자세 제어 방법은 수중 환 경이 모든 자유도가 커플링되어 있다는 특징을 가지기 때문 에, 각 방향에 대한 제어기를 설계하고 제어 가중치를 조절하 는 방식을 사용하였다.

Yaw 방향자세 제어는 모든 실험에서 Safety zone으로 수렴 하는 것으로 제어 성능을 검증하였다. 제어 방법은 ESPG의 제 어 변수 중 추진력의 세기를 담당하는 i (Index) 변수를 Yaw 방 향오차 각도에 따라 좌, 우측 다리에 비대칭적으로 입력하여 Yaw 방향 목표 각도(T_{ψ})로 회전 모멘트를 발생시킬 수 있도 록 하였다. 이 때, 한쪽 다리가 초기 자세를 유지하도록한 이유 는 Pitch와 Roll 방향으로 불안정한 움직임을 최소화하기 위해 서이다. Roll 방향으로는 CALEB10은 약 1도에서 5도 이하의 크기 로 매우 안정적으로 유영하는 것을 복합 유영 제어 수중 실험 결과를 통해 확인하였다.

Pitch 방향 자세 제어는 총 5가지 복합 유영 제어 실험 결과 의 직진 유영 구간의 추종 오차 분산의 값이 제어를 적용하지 않았을 때에 비해 1.8~2.5배 감소한 것으로 제어 성능을 검증 할 수 있었다.

추후에는 CALEB10의 위치 제어 연구로 이어나갈 것이다. 현재는 각 방향 자세 제어기의 가중치가 완전히 분리되어 있 지만, 후속 연구 주제인 위치 제어 연구를 진행하며 본 논문에 서 제안한 CALEB10의 자세 제어기 설계를 위치 제어기에 맞 추어 보완해 나갈 계획이며, 각 방향 자세 제어기의 가중치 최 적화 방법에 관한 연구도 진행할 계획이다.

References

- C. Zhou, and K.H. Low, "Design and locomotion control of a biomimetic underwater vehicle with fin propulsion," *IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 25-35, 2012.
- [2] J. Ayers, and N. Rulkov, "Controlling biomimetic underwater robots with electronic nervous systems," *Bio-mechanisms of Swimming and Flying*, Kato N., Kamimura S. eds., Springer, Tokyo, 2008, ch. 24, pp. 295-306.
- [3] Z. Wang, G. Hang, Y. Wang, J. Li, and W. Du, "Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: a module for biomimetic underwater propulsion," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 2, 2008.
- [4] J. Guo, F.C. Chiu, S.W. Cheng, and Y.J. Joeng, "Motion control and way-point tracking of a biomimetic underwater vehicle," 2002 International Symposium on Underwater Technology, Tokyo, Japan, pp. 73-78, 2002.
- [5] O.M. Curet, N.A. Patankar, and G.V. Lauder, and M.A. Maclver, "Mechanical properties of a bio-inspired robotic knifefish with an undulatory propulsor," *The Journal of Bioinspiration & biomimetics*, Vol. 6, No. 2, pp. 026004, 2011.
- [6] H.-J. Kim, and J. Lee, "Design, swimming motion planning and implementation of a legged underwater robot (CALEB10: D. BeeBot) by biomimetic approach," *The Journal of Ocean Engineering*, Vol. 130, pp. 310-327, 2017.
- [7] H.-J. Kim, B.-H. Jun, and J. Lee, "Multi-functional Bio-inspired Leg for Underwater Robots," 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, pp. 1087-1092, 2014.
- [8] H.-J. Kim, and J. Lee, "Designing diving beetle inspired underwater robot (D. BeeBot)," 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision, Singapore, pp. 1746-1751, 2014.
- [9] H.-J. Kim, and J. Lee, "Swimming plans for a bio-inspired

articulated underwater robot," *The Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 782-790, 2013.

- [10] H.-J. Kim, and J. Lee, "Swimming pattern generator based on diving beetles for legged underwater robots," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 2, No. 2, pp. 101-106, 2014.
- [11] T.I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*, 1 ed. Wiley, 1994.
- [12] H.-J. Kim, B.-H. Jun, and J. Lee, "Bio-inspired walking and swimming underwater robot designing concept and simulation by an approximated model for the robot," *The Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 9, No. 1, pp. 57-66, 2014.
- [13] H.-S. Lee, and J. Lee, "Pitch directional swimming control of multi-legged biomimetic underwater robot (CALEB10)," *The Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 228-238, 2017.



이 한 솔 2016 충남대학교 메카트로닉스공학과(공학사) 2016~현재 동 대학원 석사과정

관심분야: 수중 로봇, 항법, 로봇 위치 추정



이 지 홍

 1983 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1985 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1991 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

관심분야: 로봇 위치 추정, 양팔 로봇, 수중 로봇, 야지 주행 로봇