

생체모방기술을 접목한 파라미터 공간에서의 로봇제어 기법

김희중^{1,†}¹국방과학연구소 제7기술연구본부

Robot Control Method in Parameter Space Adopting Biomimetics

Heejoong Kim^{1,†}¹The 7th R&D Institute, Agency for Defense Development

Abstract

In the paper, a robot control technique by employing Biomimetics is described. Rhythmic movements of the diving beetle's leg were analyzed and the formulated equations on the motion were drawn by applying Fourier least mean square fitting method. Simple control parameters were defined by comparing the observed locomotion through a motion capture system and reproduced motions according to changes in the values in the equation. Subsequently, the correlation of each parameter was discovered and expressed in a parameter space. Apparently, it was confirmed that various bio-mimicking motions can simply be generated for controlling the robot. Additionally, robot designing based on adopting structural advantages which the living organism possess have been briefly introduced. The proposed bio-mimicking motion generating technique was observed to be applicable to robot system developments under various environmental conditions.

초 록

본 논문에서는 생체모방기술을 적용한 로봇제어방법에 대해 기술한다. 물방개의 유영동작을 모방하고 발생시키기 위해 푸리에 최소자승기법을 적용하여 일반식을 정립하였다. 일반식의 계수의 값을 조정하여 관측된 물방개의 유영동작과 발생시킨 모방동작의 비교를 통해 제어 파라미터가 정의되었으며 각 파라미터들의 상관관계를 밝히고 이를 파라미터 공간상에 표현하여 다양한 생체모방 동작을 쉽게 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 추가로, 생물체의 구조적인 장점을 반영한 로봇설계에 대해 간략히 소개하였고 제안한 생체모방 발생기법은 다양한 환경에서의 로봇시스템 개발에 적용 가능성을 확인하였다.

Key Words : Biomimetics(생체모방기술), Parameter Space(파라미터 공간), Robot Control(로봇 제어), Bio-mimicking Motion(생체모방 동작), Bio-inspired Robot(생체모방 로봇)

1. 서 론

인간의 지원을 최소화하고 최대한의 효율을 얻기 위해 자율성을 극대화 하는 무인시스템에 대한 관심이 증대하고 있으며, 환경적인 제약요소들을 극복하기 위해 다양한 분야에서 오랜 시간동안 환경에 맞게 진화

해온 생명체의 방식을 모방하는 생체모방 기술을 접목하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 로봇공학적인 관점에서는 생명체의 움직임을 재해석하여 최적화된 동작을 발생시키는 것을 주목적으로 하는 것이 일반적이며, 육해공 영역에서의 로봇들이 다양하게 개발되고 있다[1-3].

본 논문에서는, 조류가 심한 해저환경에서 보행하며 조류를 피하면서 심해작업을 수행하는 로봇[4]의 수중 유영 기법을 적용하기 위한 연구절차에 대해 기술하고 있으며, 이는 로봇이 수중환경에서 장애물을 극복하기

Received: June. 11, 2018 Revised: Aug. 29, 2018 Accepted: Sep. 02, 2018

† Corresponding Author

Tel: +82-42-821-0949, E-mail: mainkhj@add.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

나 원거리 이동하기 위한 효율적인 동적 움직임을 확보하는 데 목적이 있다. 이와 같은 목적으로 생체모방 모델로 선정된 물방개의 유연동작 분석을 기반으로 생명체의 움직임 모방에 대한 일반식을 정립하고 이를 제어할 수 있는 파라미터들을 도출하는 과정을 집중적으로 소개하고 있으며, 파라미터 공간상에서 재해석하여 단순하고 직관적으로 로봇을 제어하는 방법에 대해 제안한다.

본 논문에서 제안하는 생체모방 동작 발생 기법은 그 목적성에 따라 다양한 환경에서의 로봇 시스템 개발 분야에서 활용 가능 할 것으로 기대된다.

2. 생명체의 유연동작 분석

2.1 생명체 동작관찰 환경 구축

생체모방관점에서 다리관절 형태를 가진 로봇의 움직임에 대한 해법을 찾기 위해 수중 유영에 적합한 생물체인 물방개를 선정하였다. 물방개는 상대적으로 뒷다리 두 개로 추진력을 발생시키고 앞 네다리로는 방향 전환 및 추진력을 보조하는 이유로 동작에 대한 관찰은 주 추진력을 발생시키는 뒷다리에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. Fig. 1과 같이 물방개는 투명한 수조에서 유영하도록 하고 초당 125프레임으로 초고속 카메라(MotionScope M1, REDRAKE)를 활용하여 물방개의 움직임에 대한 정보를 획득하여 영상처리 소프트웨어인 Image J를 이용하여 유영하는 물방개 다리관절사이의 각도를 추출해내었다.

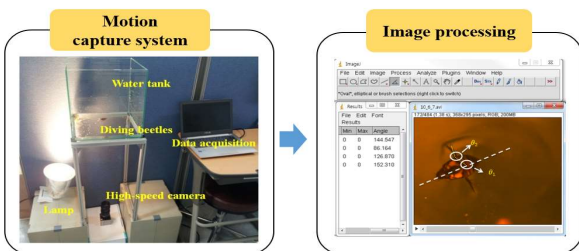


Fig. 1 Motion Capture System

2.2 물방개의 유연동작 분석 및 재구성

물방개 다리의 유연동작을 재구성하기 위해 물방개의 다리는 Fig. 2와 같이 두 개의 관절 마디로 이루어

진 형태로 모델링하고, 로봇공학적인 관점에서 획득된 물방개의 유연동작에서 추출한 다리관절 사이의 각도를 활용하여 D-H(Denavit-Hartenberg) 파라미터 링크 좌표계를 기반으로 여러 가지 유연동작을 로봇공학적인 관점에서 재구성하였다[5].

물방개의 뒷다리의 두 번째 관절에는 여러 수동관절들이 붙어있으나 물방개의 유연동작을 분석하는 과정에서는 하나의 관절로 간주하였다. 수동관절들은 수중에서 더 많은 추진력을 얻기 위한 물방개의 구조적인 장점으로 로봇설계에 적용하였으며 본 논문의 4장에서 언급한다.

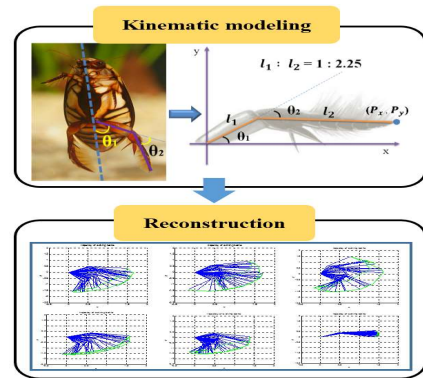


Fig. 2 Motion Reconstruction

3. 생체모방동작 발생 알고리즘 개발

3.1 푸리에 최소자승방식을 활용한 유연동작 발생 일반식 도출

본 논문에서 제안하는 직관적이면서 최소의 파라미터로 파라미터 공간에서의 로봇제어기법에 대해 기술하기 이전에, 생명체의 동작을 관찰한 결과를 기반으로 선행연구에서 제시한 생명체의 유연동작에 대한 일반식을 정립하는 과정에 대해 먼저 소개한다[6].

식 (1)은 사인과 형태의 주기성을 가지는 생명체의 유연동작에 푸리에 최소자승 방식을 활용한 피팅식 s_i 이며, 식(1)에서의 y_i 는 추출된 물방개의 관절데이터, N 은 관절데이터 개수, f 는 유연동작 한주기 에 대한 주파수 성분(1/0.28s)을 나타내며, w 값은 22rad/s 값으로 정의하였다.

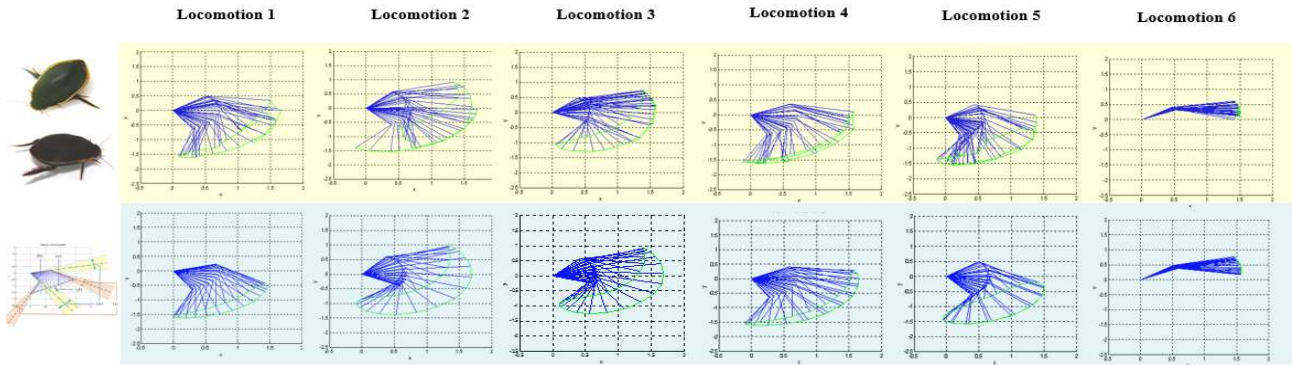


Fig. 3 Motion Comparison

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

식(1)의 미계수의 값 A_0, A_1, B_1 는 식 (2)에 의해 계산되며, 식(3)과 같은 코사인과 사인의 합으로 표현될 수 있다.

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

$$y = A_0 + A_1 \cos(wt) + B_1 \sin(wt) \quad (3)$$

다음으로, 식 (4)의 유도과정을 통해 식 (5)와 같이 간단 식으로 재정리 할 수 있다.

$$\theta = \text{artan}\left(\frac{B_1}{A_1}\right), C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (4)$$

$$y = A_0 + C_1 \cos(wt + \theta) \quad (5)$$

수학적으로 모델링된 물방개 다리의 두 개의 관절에 대한 일반식은 식(6)과 (7)과 같이 θ_1 과 θ_2 로 최종 유도 되었으며, 생명체의 유영동작 결정짓는 파라미터의 특성을 파악하기 위해 식의 대표 항에 미계수를 설정 하였다($U_1, M_1, U_2, M_2, k_1, k_2, \psi_1, \psi_2$)

$$\theta_1 = y_1 = U_1 A_0 + M_1 C_1 \cos(wk_1 t + \theta + \psi_1) \quad (6)$$

$$\theta_2 = y_2 = U_2 A_0 + M_2 C_1 \cos(wk_2 t + \theta + \psi_2) \quad (7)$$

다리관절에 대한 일반식의 파라미터 계수들의 값을 설정하여 발생시킨 유영동작과 실제 물방개의 유영동작을 관찰하여 재구성한 유영동작과의 비교결과는 Fig. 3과 같으며, 설정된 파라미터들의 특성은 Fig. 4에 도식화 하였고 Table 1에 정리하였다. 단, 첫 번째 다리관절은 위상차가 두 번째 관절에 비해 선행하므로 ψ_1 은 0으로 설정한다.

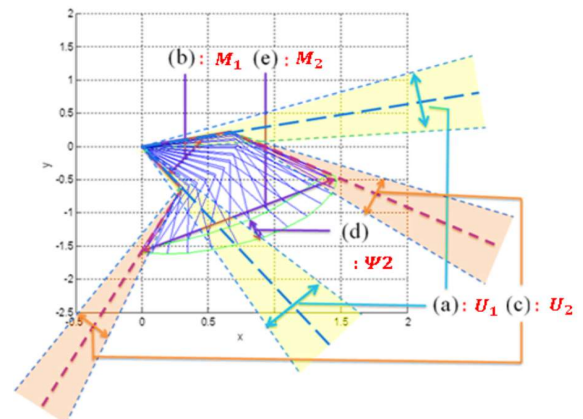


Fig. 4 Parameter Characteristics

Table 1 Defined Parameter Characteristics

Parameters	Characteristics
U_1, M_1	<ul style="list-style-type: none"> • Offset의 의미를 지닌 상수 • 다리궤적의 움직임 영역을 결정
U_2, M_2	<ul style="list-style-type: none"> • Amplitude의 변화를 주기위한 상수 • 다리 궤적의 높낮이를 결정
k_1, k_2	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency와 관련된 상수 • 다리의 휘젓는 속도를 담당
ψ_2 ($\psi_1=0$)	<ul style="list-style-type: none"> • Phase delay와 관련된 상수 • θ_1과 θ_2의 위상간의 차이를 조절하여 다리궤적을 변형

3.3 모방동작 발생을 위한 파라미터 공간 정의

물방개의 다양한 유연동작을 재구성 할 수 있는 파라미터 값들을 기반으로 물방개의 유연동작에 대해 심도 있는 분석과 각 유연동작과의 관계규명을 통해 직관적인 생체모방 동작발생기법에 대해 소개한다. 먼저 그림 Fig. 5의 (a)와 같이 x와 y축으로 구성된 공간에 Fig. 3의 다양한 유연동작을 발생시킬 수 있는 각 관절에 상응하는 파라미터 값들을 표현하고 이를 파라미터 공간이라고 정의한다. 물방개의 관측된 6가지 유연동작에 따른 파라미터 값을 나열한 후, 시물레이션을 통해 계산된 궤적의 크기와 향력[6, 7]에 따라 Fig. 5의 (b)와 같이 재배열한 후 각 관절의 유연동작 활성화 영역을 구분해 낼 수 있다. x축과 y축의 값이 (1,1)인 지점은 위 수식에서 파라미터 값을 설정하지 않은 기준 유연동작(Locomotion 1)일 때의 값을 의미하고, 유연궤적 속도(k)와 위상차를 의미하는 파라미터 (ψ_2)의 활용에 대해서는 Fig. 6과 Fig. 7에서 소개한다.

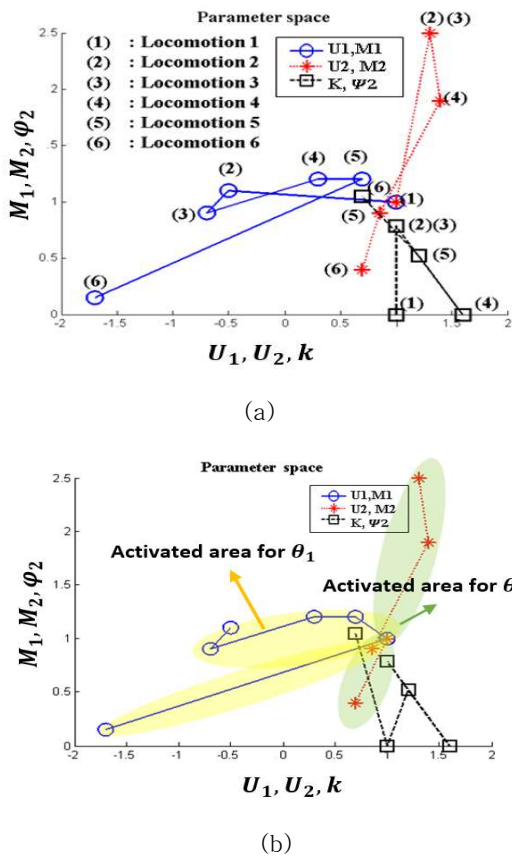


Fig. 5 Parameter Correlation

Fig. 5에서 언급한 활성화 영역을 식 (8)~(11)과 같이

선형 근사화 하여 Fig. 6과 같이 표현할 수 있다. 식 (8)과 식 (9)에서 PE_{θ_1} 과 PE_{θ_2} 는 Power stroke 영역 (ROP : Region of Power stroke)으로 설정하고, 기준유형을 기준으로 가장 약한 stroke에 해당하는 6번 유연동작은 WE_{θ_1} 과 WE_{θ_2} 의 수식에 해당하는 Weak stroke 영역(ROW : Region of Weak stroke)으로 분류하였다.

$$PE_{\theta_1} : M_1 = -0.067 \times U_1 + 1.067 \quad (8)$$

$$PE_{\theta_2} : M_2 = 5 \times U_2 - 4 \quad (9)$$

$$WE_{\theta_1} : M_1 = 0.3148 \times U_1 + 0.6852 \quad (10)$$

$$WE_{\theta_2} : M_2 = 2 \times U_2 - 1 \quad (11)$$

각 영역에서 임의로 8가지 포인트를 설정하고, 궤적의 크기를 결정하는 index 파라미터 i 를 새롭게 정의하여 한 다리의 두 관절에 해당하는 파라미터 값이 동시에 선택될 수 있도록 하고, 각 관절의 위상지연을 담당하는 파라미터를 하나로 표현하면서 phase 파라미터 $n(\psi = \frac{\pi}{n})$ 를 정의하여 Fig. 6과 같이 z축으로 설정함으로써 3차원 파라미터 공간으로 확장하였다.

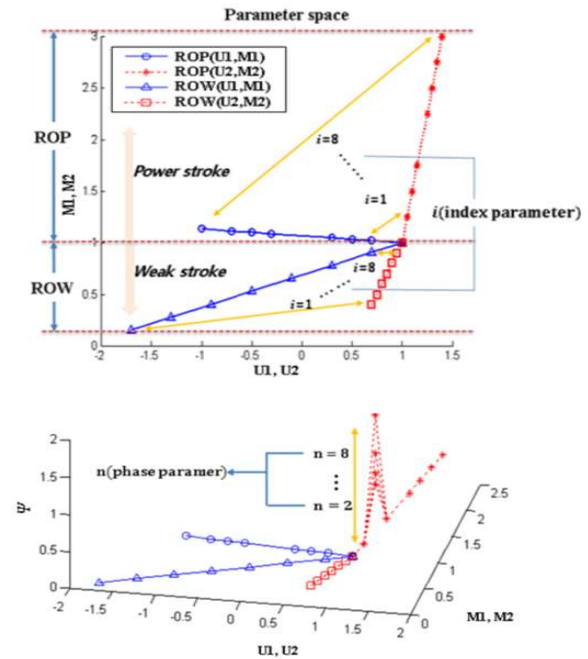


Fig. 6 Proposed Parameter Space

유영 궤적 속도를 담당하는 파라미터 k 는 ($k_1=k_2$) 유영 궤적의 모양을 바꿔주지 않기 때문에 독립적인 파라미터로 남겨두었다. 파라미터 k 는 기본적으로 유영 동작을 발생시키는 주파수 성분을 변화시킬 수 있기 때문에 로봇의 용도와 사양에 따라 유동적으로 맞춰서 사용할 수 있게 해주는 역할 또한 담당한다.

새롭게 정의된 파라미터 i 와 n 을 이용해 물방개의 대표적인 유영동작을 발생시키기 위해 같이 파라미터 공간상에서 Fig. 7과 설정해 주었고 각 파라미터의 수치는 Table 2 에 정리하였다. 이에 상응하는 유영동작은 Fig. 8과 같으며, 이는 물방개의 6가지 관측된 유영동작과 매우 유사함을 확인하였다. 생명체의 유영동작을 발생시키는 특성을 파악하고, 이를 공학적으로 해석하여 제어 파라미터를 줄이면서 효율적으로 동작을 발생시킬 수 있음을 입증하였다.

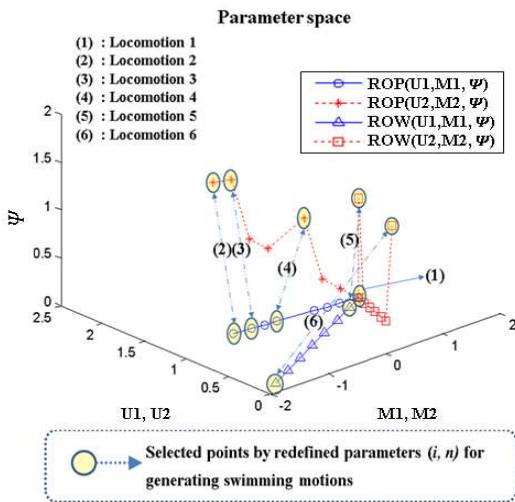


Fig. 7 Motion Control in Parameter Space

Table 2 Parameter Values in Parameter Space

Locomotion	Area	i	$\psi : \frac{\pi}{n}$	k
1	ROP	1	0	1
2	ROP	8	$\pi/4$	1
3	ROP	7	$\pi/6$	1
4	ROP	4	$\pi/6$	1.6
5	ROW	7	$\pi/3$	1.2
6	ROW	1	$\pi/3$	0.7

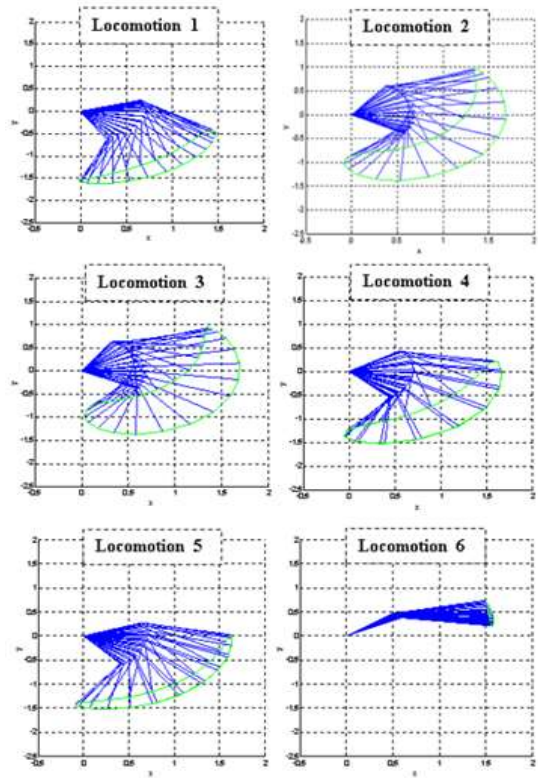


Fig. 8 Motion Generation by a Newly Proposed Method

파라미터 공간상에서의 ROP와 ROW의 power stroke 와 weak stroke는 index 파라미터의 번호가 증가함에 따라 stroke가 각 영역에서 커지는 역할을 하게 됨으로 직관적인 유영계획이 가능하다.

3.3 파라미터 공간을 이용한 로봇제어 전략

Fig. 9는 파라미터 공간상에서의 생체모방 유영동작 발생 기법을 적용하여 로봇의 유영계획에 적용되는 과정에 대한 흐름도를 나타낸다. 먼저 유영계획을 위한 제어변수는 파라미터 공간에서 정의한 i, n, k 와 더불어 c (cycle of repetitive motion)와 m (mode selection : ROP or ROW)이 추가적으로 설정되었다. c 는 같은 유영동작에 대한 동작을 반복시키기 위함이고, m 은 power stroke와 weak stroke의 영역을 정해 주기 위함이다. 즉, 전진유영에서의 먼 거리를 정해진 시간이 이동하려고 하면, 왼쪽과 오른쪽다리의 i 파라미터를 가장 큰 값인 8로 설정해 주면 되고, 회전유영에서 가장 큰 회전을 가지려면 두 다리 중 한쪽은

i 값을 ROP영역에서 8 반대쪽 다리는 ROW 영역에서 1를 선택한다. 이에 추가적으로 다리끼리의 간섭이나 정해진 동작에서의 속도 및 회전 정도를 추가적으로 보정하려면, n (phase delay) 파라미터와 k (velocity, frequency)파라미터로 보정한다. 이렇게 첫 번째 유영에 대한 계획이 끝나게 되면 로봇이 이동하게 되고 로봇은 바로 다음 유영에 대한 입력 값을 기다리게 되는데 두 번째 유영동작이 첫 번째와 다른 동작이 발생하게 되면 다음 동작에서의 연결동작이 필요하다. 이는 액추에이터가 짧은 시간에 위치 값을 극단적으로 바꾸게 될 경우에 속도변화 폭이 제어의 범위를 벗어나버리는 경우가 발생함으로, 다음 유영동작의 위상으로 부드럽게 이동해주기 위해 정해 시간 내에서 유영연결 동작을 수행하게 되고, 현재는 cubic spline 보간법으로 서로 다른 위상차를 매끄럽게 해결하는 방식으로 보상해 주고 있으며 적용결과는 Fig. 10과 같다. 이렇게 발생된 유영동작 보간법을 통한 연결동작을 포함하여 로봇에 입력 값으로 쓰이게 되고 이 같은 과정을 반복수행 하여 로봇이 목표한 위치에 도달하게 되면 종결 명령을 보내어 로봇 구동을 멈추게 된다.

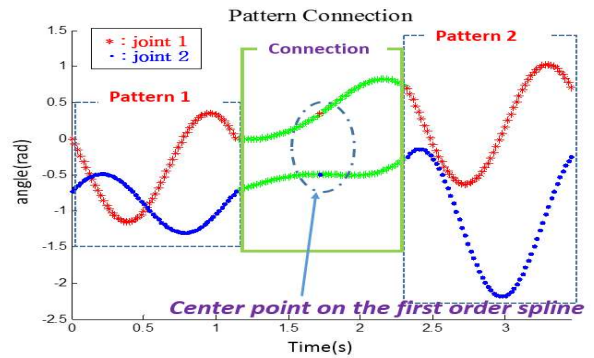


Fig. 10 Pattern to Pattern Connection

4. 생체모방 로봇 설계

4.1 생명체의 구조적인 장점을 활용한 로봇설계

물방개는 유영할 때 상대적으로 길고 힘이 센 뒷다리 두 개를 활용하여 추진력을 발생시키는데, 이 두 다리의 끝 부분에 위치한 수동관절과 작은 털로 인해 움직이는 방향으로 power stroke 시 추진력을 극대화하거나 recovery stroke 시 물이 닿는 면적을 조절해 줌으로써 유체 저항력을 줄여주는 구조적인 장점을 가지고 있다. 로봇다리 설계 시 위와 같은 구조에 착안하여 Fig. 11과 같이 단면적을 조절시켜줄 수 있는 경첩 구조와 유영 시 선 운동하며 로봇다리 끝 마디에서 수동관절들이 빠져나올 수 있는 구조로 설계를 하였다. 물방개의 수동관절들의 각 마디 움직임 역시 각각 계산하여 적용시켜주었고, 실제로 움직이는 각도는 조절 가능하도록 설계하였다.

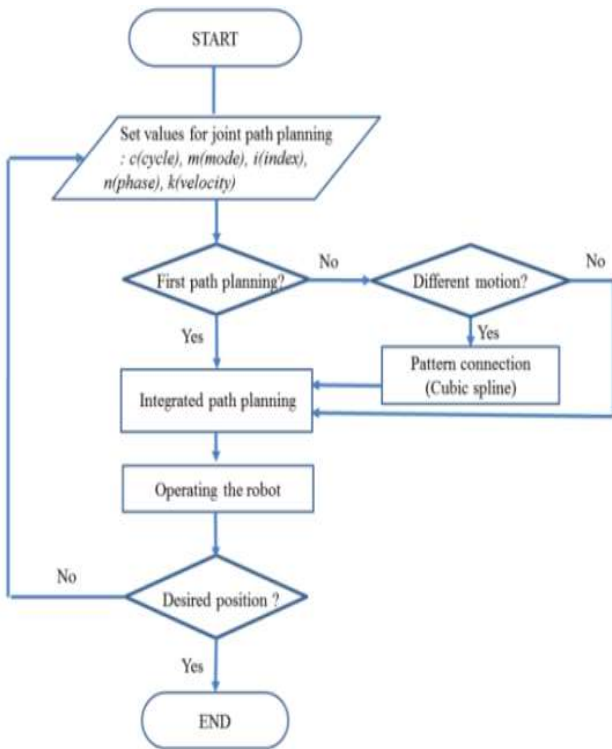


Fig. 9 Robot Control Strategy

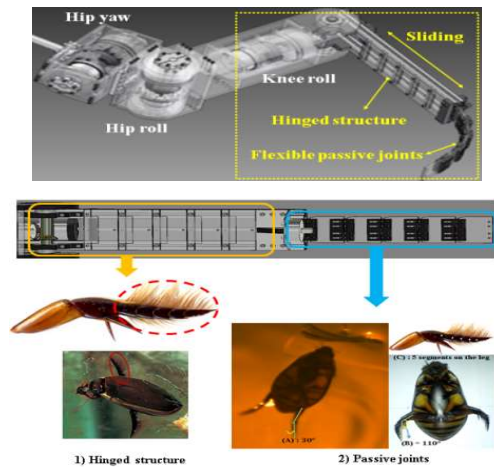


Fig. 11 Structural Advantages of the robot

Fig. 12는 물방개의 유연동작을 모사한 최대 stroke일 때 로봇다리의 움직임을 나타낸다. 더불어 위에서 언급한 두 가지의 물방개의 구조적인 장점이 적용된 메커니즘의 역할은 power stroke(1→3)와 recovery stroke(4→6)일 때로 나누어 확인할 수 있다.

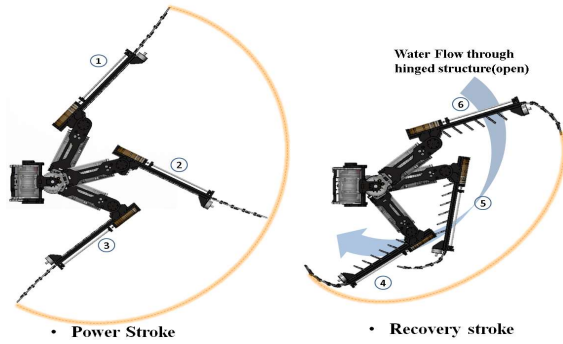


Fig. 12 Mechanism of the Robot Leg

Fig. 13은 개발한 로봇다리의 두 가지 형태를 보여준다. 유연모드에서 최대의 추진력을 이끌어 내기 위해 물방개의 수동관절을 적용한 다리는 Type 2로 물방개와 같이 뒷다리 두 개로 결정하였고, Type 1은 앞다리 네 개로 방향 전환 및 추진력을 보조하는 역할을 한다.

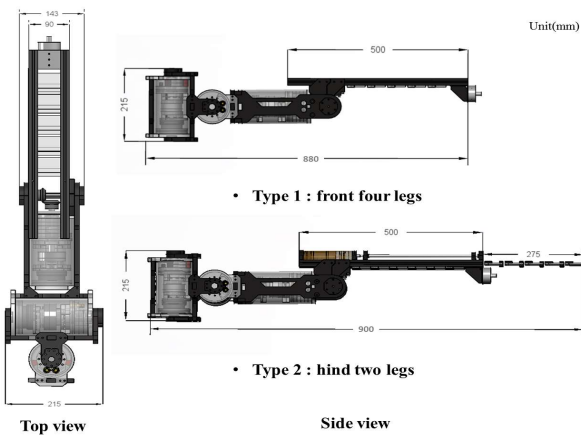


Fig. 13 Dimension of the Robot legs

로봇다리의 구동기가 위치하는 관절은 Fig. 14와 같이 설계하였으며, 이는 유지보수 측면과 효율적인 방안을 고려한 설계결과이다.

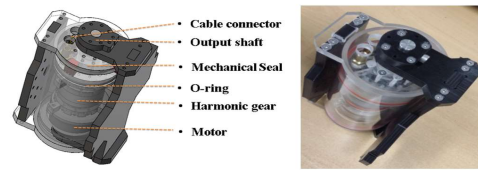


Fig. 14 Motion Comparison

위와 같이 설계한 생체모방 로봇다리의 성능과 기구적인 장점은 선행연구를 통해 입증된 바 있다[7].

Fig. 15의 Hip roll 관절과 Knee roll 관절은 발생시킨 유연동작이 적용될 관절들을 의미하고, Hip yaw 관절은 주로 보행 모드에서 쓰이게 된다. Hip pitch 관절은 로봇의 유연과 보행모드를 전환하고 물방개의 유연을 모사한 동작들을 활용하면서 3차원 유연이 가능하게 해주는 역할을 수행한다.

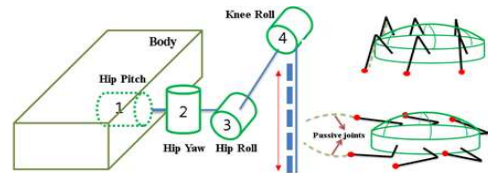


Fig. 15 Robot Designing Concept

4.2 로봇 어셈블리 및 아키텍처

Fig. 16에서는 6개의 각 다리가 어셈블리 될 부분과 커버를 제외한 몸체의 전체적인 치수를 보여준다. Fig. 16의 (3)은 로봇의 주제어기와 전원분배 모듈이 장착된 하우징이며, (2, 5, 6)은 로봇다리의 구동기 제어기 하우징이다. 아울러 (1, 4, 7)은 로봇의 양쪽 두 개의 다리의 자세를 바꿀 수 있는 Hip pitch 관절 모듈을 의미한다.

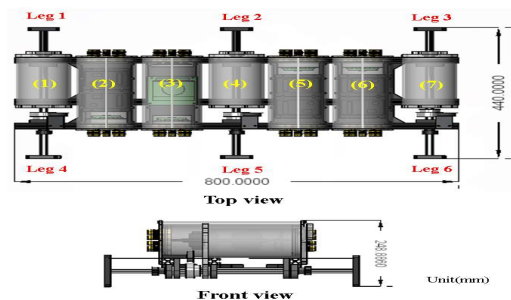


Fig. 16 Robot Body

보행과 유연 능력을 갖춘 로봇제작을 위해 각 구동기는 부하를 계산하여 설계가 진행되었으며, 외부전원을 사용하는 ROV(Remotely Operated Vehicle) 형태를 갖추고 있지만 추후에는 내부 전원 및 자율 수중 이동 형태로도 변경이 가능하다.



Fig. 17 Robot Assembly

Fig. 18은 Fig. 17과 같이 제작된 로봇의 시스템 아키텍처를 나타낸다. 소형 PC(PCM3363, Advantech)가 로봇 내에 탑재되어 주제어기 역할을 하고, CAN 컨트롤러 모듈(PCM-3690I, Advantech)이 PC와 결합되어 모터와 각 다리의 센서부를 담당하는 제어기들이 주제어기와 통신 할 수 있도록 구성되어있다. 추가로 IMU(Inertia Measurement Unit)센서가 RS-232통신으로 주제어기와 직접 연결되어 수중에서의 로봇의 자세정보를 획득할 수 있다. 로봇으로의 명령은 외부에서 Ethernet을 통해 모니터링과 함께 로봇 내의 주제어기에 전달할 수 있으며 각종 센서(초음파 및 수심센서)와 카메라 등을 추가로 장착할 수 있다.

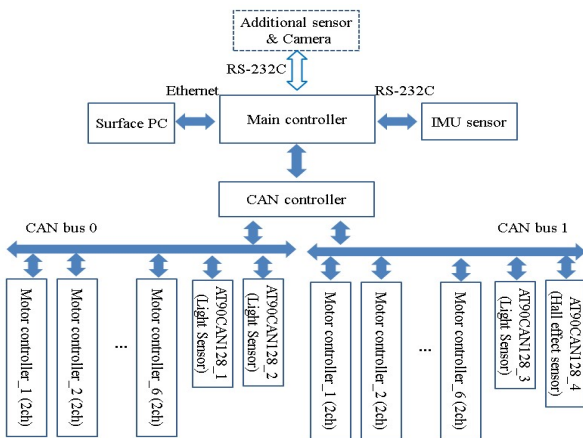


Fig. 18 System Architecture

결론 및 고찰

본 논문에서는 생명체의 유연방식을 공학적인 시각으로 분석하여 파라미터 공간에서 생체모방 유연동작을 발생시킬 수 있는 방법에 대해 소개하였고, 이를 활용한 로봇제어 전략에 대해 제안하였다. 더불어 생명체의 구조적인 특성을 로봇설계에 적용한 과정에 대해 기술하였다. 추후 연구로는 제안한 로봇제어 기법을 실험을 통해 입증하고 자율성을 고려한 지능적인 동작 발생 제어에 대한 심층적인 연구가 진행될 예정이다.

References

- [1] R. J. Wood, "Liftoff of a 60mg flapping-wing MAV," in *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1889-1894, 2007.
- [2] 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.
- [3] K. H. Low, C. Zhou, and Y. Zhong, "Gait planning for steady swimming control of biomimetic fish robots," *Advanced Robotics*, vol. 23, pp. 805-829, 2009.
- [4] B. Jun, "Multi-legged Seabed Robot Crabster(CR200) for the Exploration of High Tide and Low Visibility Environment," *Institute of Control Robotics and Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 14-25, Sep. 2013.
- [5] H. Kim and J. Lee, "Swimming Pattern Analysis of a Diving beetle for Aquatic Locomotion Applying to Articulated Underwater Robots," *Korea Robotics Society*, vol.7, no. 4, pp. 259-266, Dec. 2012.
- [6] H. Kim and J. Lee, "Swimming Plans for a Bio-inspired Articulated Underwater Robot," *Institute of Control Robotics and Systems*, vol. 19, no. 9, pp. 782-790, Sep. 2013.
- [7] H. Kim, B. Jun, and J. Lee, "Multi-functional bio-inspired leg for underwater robots," *Proc. of International Robots and Systems 2014*, Chicago, USA, pp. 1087-1092, Sep. 2014.