

CPG 를 이용한 물고기 모사 로봇의 궤적 추종 제어

김동희* · 이승희* · 권종현* · 한철희** · 박종현†

Trajectory Tracking Control of a Fish-Mimetic Robot Using CPG

Donghee Kim, Seunghee Lee, Jonghyun Kwon, Cheolheui Han and Jong Hyeon Park

Key Words : Fish-mimetic Robot(물고기 모사 로봇), Trajectory tracking(궤적 추종), CPG

ABSTRACT

The main objective of this paper is to control a trajectory tracking of the fish-mimetic robot by CPG (Central Pattern Generator), which is biological approach. CPG is biological neural networks that generate rhythmic movements for locomotion of animals, such as walking, running, swimming and flying. Animals show marvelous ability of autonomous dynamic adaptation for an unsteady fluid dynamic environment or various environments. So, we propose the 3-DOF CPG controller to track the trajectory of the fish robot in plane motion. The conformity of the proposed control algorithm is validated by simulation for a fish robot model, which is made by a commercial dynamic package.

1. 서 론

산업 발달과 인구증가에 기인한 자원고갈, 대규모 식량창고인 해양 생태계 파괴 등의 에너지·환경문제로 인해 여러 연구자들은 해양자원 활용 및 해양생태계 보존에 점점 많은 관심을 가지고 연구를 수행해 왔다. 자연에 존재하는 생물체들은 적자생존의 치열한 경쟁과 극심한 자연환경에서 살아남기 위해 나름대로 진화과정을 통해 해결책을 모색해왔다. 따라서, 자연생물체들이 가지고 있는 다양한 특성을 잘 이해하고 이를 공학적으로 이용할 경우 해양 생태계에 대한 연구뿐만 아니라 다른 분야에 대해서도 효율적이며 새로운 접근 방법을 제공할 수 있다.

최근 지능형재료·MEMS 관련 기술의 급격한 발달과 함께, 자연생물체를 모사하려는 생체모사학(Biomimetics)관련 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구들 중에 물고기 모사 로봇(Fish-

Mimetic Robot)⁽¹⁾은 프로펠러로 구동되는 수중 탐사정에 비해 추진 효율이 높으며, 광범위한 지역의 해저 생태계관찰에 용이하기 때문에, 자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle) 및 어뢰 개발 등에 적용되는 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 단순히 물고기의 형상과 운동을 단순 모사하여 제작하여 연구를 수행하기 보다는 유체역학적 지식을 바탕으로 한 고성능 고효율의 물고기 로봇 관련 연구가 필요하며, 이를 위하여 이전 연구에서는 고등어를 모사한 3 자유도의 물고기 모사 로봇을 제작하고 로봇의 운동변수의 변화에 따라 로봇과 유체에서 발생하는 힘의 특성을 분석하여 이를 물고기의 운동에 이용하였다.

또한 신경학 및 생물학 분야에 대한 여러 연구 결과에 의하면 동물들의 거동은 중추신경계에 의하여 제어된다. 더욱이 동물들의 걷거나 뛰는 동작, 새들의 날갯짓 및 물고기가 물속에서 진행하기 위해 꼬리를 흔드는 행동들은 일정한 형태의 반복적인 운동을 통하여 이루어지게 되며, 이러한 반복적인 행동들은 척수에 존재하는 중추신경계인 CPG(Central Pattern Generator)에 의해 생성된다⁽²⁾. CPG 개념을 이용한 로봇에 대한 연구는 2 축 및 4 축 로봇에 대한 보행 및 주행 등 여러 분야에서 연구되고 있으며^(3,4,5), 로봇 제어 분야에 CPG 를

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jongpark@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0435 FAX : (02)2298-4634

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 충주대학교 항공기계설계학과

이용할 경우의 장점으로는 외부 환경의 변화나 외란에 대해서도 적응성이 뛰어나다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 비선형성이 매우 강한 유체 내에서 이동하는 물고기 모사 로봇이 원하는 궤적을 추종할 수 있도록 수학적인 CPG 모델을 이용하여 물고기의 꼬리에 대한 반복적인 운동을 생성하고 제어하도록 한다.

2. 물고기 로봇의 구조 및 유체 해석

2.1 물고기 모사 로봇의 구조

물고기 모사 로봇의 운동을 묘사하기 위하여 Fig. 1 과 같이 물탱크에 고정되어 있는 좌표계 OXY 와 물고기 로봇에 고정되어있는 좌표계 oxy 두 개의 좌표계를 사용한다. 그림에서 v_c 와 v_{water} 는 각각 물고기 로봇의 속도와 물의 흐름 속도를 나타내며, 본 연구에서는 물의 흐름은 정지해 있다고 가정한다. 유체 내부에서 동작하는 강체와 유체 사이에서 발생하는 힘의 대부분은 강체와 유체 사이의 상대 속도에 대한 함수이므로 물고기 로봇 꼬리 지느러미의 quarter-chord 에 작용하는 물과 꼬리 지느러미 사이의 상대속도를 v_p 로 정의한다.

물고기 고정좌표계 oxy 에 대한 물고기 로봇 꼬리 지느러미의 quarter-chord 의 위치는 식 (1)과 같이 각 링크의 상대 각도에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} P_p &= \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -l_1c(\theta_1) - l_2c(\theta_1 + \theta_2) - l_{3f}c(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ l_1s(\theta_1) + l_2s(\theta_1 + \theta_2) + l_{3f}s(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 물고기 로봇의 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_p = \frac{d}{dt}(P_p) \quad (2)$$

2.2 물고기 모사 로봇 제작

물고기 모사 로봇이 유체 안에서 어떻게 운동하는가에 대해 효율적이고 타당한 연구를 수행하기 위해서는 물고기 로봇 및 외부 환경에 대한 정확한 정보가 필요하다. 즉, 물고기 로봇의 외형에 대한 것뿐만 아니라 물고기 로봇의 운동이 이루어질 유체의 저항 계수 등과 같은 유체 특성에 대한 정확한 정보가 필요하게 된다. 따라서 본 절에서는 고등어를 모사한 로봇을 제작, 실험을 통하여 시뮬레이션에 사용될 유체의 특성을 파악하는 실험

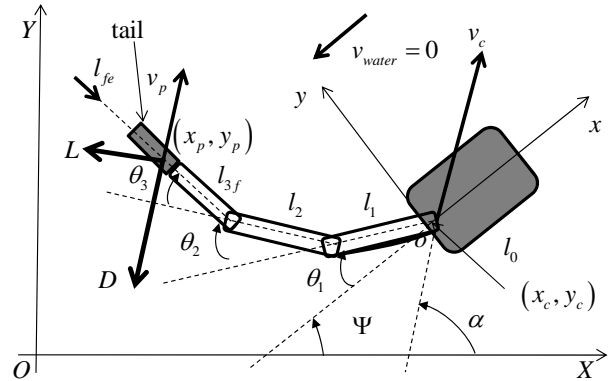


Fig. 1 Nomenclature of the robot fish kinematics

을 수행하였다. 이전 연구에서 3 개의 모터를 이용하여 카랑지폼(Carangiform) 운동을 할 수 있도록 모사한 로봇 BASEMACK I, II 를 제작하였으며, 머리 부분을 제외한 총 길이는 22cm 이며, 액츄에이터는 마이크로 DC 모터를 사용하였고, 꼬리의 aspect ratio 는 일반적 고등어와 비슷한 4.17 로 설계 제작하였다. BASEMACK 의 몸통 부분을 6 축 힘/토크 센서에 고정시킨 상태에서 카랑지폼 운동을 하도록 하여 이에 따른 힘과 토크를 측정하여 꼬리 지느러미의 양력계수 및 항력 계수를 구하였다.

Fig. 2 는 실제 고등어를 모사하여 제작한 물고기 로봇의 외형이다.

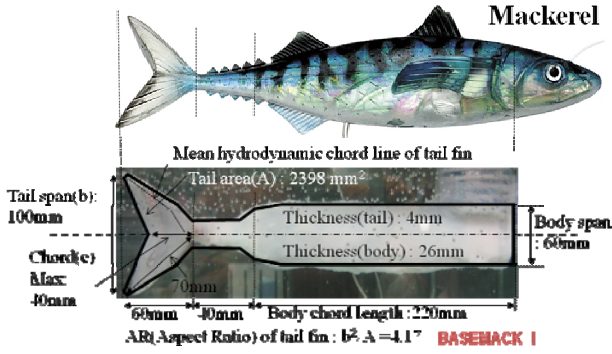
2.3 유체 해석

꼬리가 머리에 전달하여 물고기 로봇이 움직일 수 있도록 하는 주된 힘은 꼬리에 대한 물의 상대 속도 방향에 평행한 힘인 항력(drag force: D_f)과 직각인 양력(lift force: L_f)이다. Mason⁽⁶⁾과 Yu⁽⁷⁾의 결과를 응용하면 꼬리에 가해지는 항력과 양력은 다음의 식 (3)과 (4)로 유도된다.

$$D_f = -2\pi\rho_f l_f^2 \bar{v}_p \frac{\|\bar{v}_p\|^2 - (\bar{v}_p \cdot \bar{l}_{fe})^2}{\|\bar{v}_p\|} \quad (3)$$

$$L_f = \pi\rho_f l_f d (\bar{v}_p \times \bar{l}_{fe}) \times \bar{v}_p \quad (4)$$

여기서 ρ_f 는 유체의 밀도, l_f 는 꼬리의 chord, d 는 꼬리의 높이, \bar{l}_{fe} 는 꼬리 지느러미에 대한 접선방향의 단위 벡터이다. 또한 물고기 로봇의 진행이 있을 경우 몸통에도 항력과 양력이 작용하기 때문에 이에 대한 힘을 다음과 같이 식 (5)와 (6)으로 표현할 수 있다.



(a) Geometry specification



(b) Structure of the robot fish

Fig. 2 Fish-mimetic robot

$$D_i = C_{Di} \frac{\|\bar{v}_i\|^2 - (\bar{v}_i \cdot \bar{l}_{ie})^2}{\|\bar{v}_i\|} \quad (5)$$

$$L_i = C_{Li} (\bar{v}_i \times \bar{l}_{ie}) \times \bar{v}_i \quad (6)$$

여기서 \bar{v}_i 는 각 링크의 quarter-chord 위치에서의 물과의 상대속도, \bar{l}_{ie} 는 각 링크의 단위 벡터를 나타내며, C_{Di} 와 C_{Li} 는 각 링크의 항력과 양력 계수이다.

3. CPG (Central Pattern Generator)

신경학 및 생물학 분야에 대한 여러 연구결과에 의하면 동물들의 거동은 중추신경계에 의하여 제어된다. 더욱이 동물들의 걷거나 뛰는 동작, 새들의 날갯짓 및 물고기가 물속에서 진행하기 위해 꼬리를 흔드는 행동들은 일정한 형태의 반복적인 운동을 통하여 이루어지게 되며, 이러한 반복적인 행동들은 척수에 존재하는 중추신경계인 CPG 에 의해 생성된다. 따라서 본 연구에서는 수학적 방

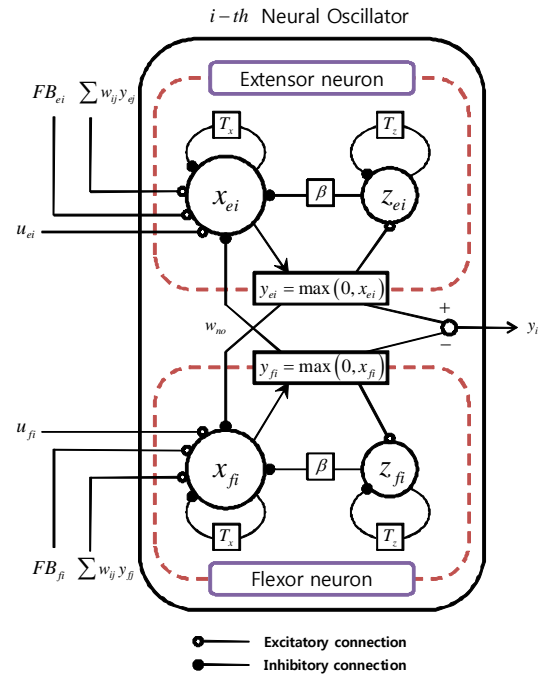


Fig. 3 Neural Oscillator model

법을 통한 CPG 모델을 이용하여 물고기의 꼬리에 대한 반복적인 운동을 생성하고 제어하도록 한다.

3.1 CPG 수학적 모델

현재까지 CPG 에 대한 수학적 모델은 여러 연구자들에 의해 다양한 형태로 제시되었으며, 이는 2 족 및 4 족 로봇과 같이 다리를 갖고 있는 로봇뿐만 아니라 물고기 로봇, 뱀 형태의 로봇 등 반복적인 운동을 필요로 하는 여러 분야에서 응용 발전되어 왔다. 본 연구에서는 많은 분야에서 다양하게 사용되고 있는 CPG 의 수학적 모델 중 하나인 Matsuoka 모델을 이용하여 물고기의 운동에 대한 연구를 진행하였다. CPG 와 Neural Oscillator 두 단어는 여러 연구에서 서로 혼합하여 사용되고 있어 정의를 내리기 어려운 점이 있기 때문에 본 논문에서는 Fig. 3 과 같이 서로 억제하려는 성질을 가지고 있는 신근뉴런(extensor neuron)과 굴근뉴런(flexor neuron) 두 개의 뉴런으로 구성된 모델을 Neural Oscillator 라고 정의하고 이러한 형태를 갖는 여러 개의 Neural Oscillator 로 구성된 시스템을 CPG 라고 정의하여 사용하도록 한다. 다음 식 (7) 은 Matsuoka 에 의해 제시된 수학적 모델⁽²⁾에 기반하여 Taga, Kimura 등에 의해 수정 발전된 Neural Oscillator 에 대한 수학적 모델이다. 이 수학적 CPG 모델을 통하여 반복운동을 수행 할 수 있도록 각 관절에서 토크 또는 조인트 각도를 생성하게 된다.

$$\begin{aligned}
T_x \dot{x}_{\{e,f\}i} &= -x_{\{e,f\}i} - \beta z_{\{e,f\}i} - w_{ef} y_{\{f,e\}i} \\
&\quad + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{e,f\}i} + u_{\{e,f\}i} + FB_{\{e,f\}i} \\
T_z \dot{z}_{\{e,f\}i} &= -z_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i} \\
y_{\{e,f\}i} &= \max(0, x_{\{e,f\}i}) \\
y_i &= y_{ei} - y_{fi}
\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 아래첨자 e, f 는 각각 신근뉴런과 굴근 뉴런을 나타내며, i 는 i 번째 Neural Oscillator 를 나타낸다. 또한 x 는 각 뉴런의 상태를 나타내며, z 는 각 해당 뉴런에 대한 자기 억제 영향의 정도를 나타내는 변수이다. 그리고 y_e 와 y_f 는 각 뉴런의 출력을 나타내며, y_i 는 Neural Oscillator 의 출력을 나타낸다.

T_x, T_z 는 각각 상태변수 x 와 z 에 대한 시정수 값이며, β 는 적응의 정도를 나타내는 상수이며, w_{ef} 는 하나의 Neural Oscillator 에 있는 신근뉴런과 굴근뉴런 사이의 연결 강도를, w_{ij} 는 여러 Neural Oscillator 사이의 연결 강도를 나타내는 파라미터이다. 각각의 Neural Oscillator 는 이러한 여러 파라미터 값에 따라 다양한 형태의 주기적인 운동을 발생시킬 수 있다.

CPG 를 사용하는 장점으로는 다양한 외부 환경의 변화에 대하여 적응성이 뛰어나다는 점이다. 이러한 환경요소의 변화나 외란 등에 대한 적응성을 높이기 위해서 로봇 또는 외부 환경 변수들의 획득을 통한 다양한 피드백 신호를 생성하여 Neural Oscillator 의 출력을 변화시킬 수 있도록 한다.

3.2 3자유도 CPG 모델 설계

앞 장에서 설명한 바와 같이 본 연구에서 사용된 물고기 로봇의 모델은 꼬리 부분이 3 자유도로 구성되어 있어 평면 운동을 수행할 수 있다. 평면 운동을 수행할 수 있도록 각 조인트에 대하여 Neural Oscillator 를 설계하고 각 Neural Oscillator 사이를 연결하여 물고기 로봇의 꼬리 부분에 대한 반복적인 운동을 생성하도록 하였다. Fig. 4 는 물고기 로봇의 각 관절에 상응하는 Neural Oscillator 의 개략적인 구조를 나타내었다. 그림에서 나타낸 좌표계는 x 는 물고기의 진행방향, y 는 좌우 방향을 나타낸다.

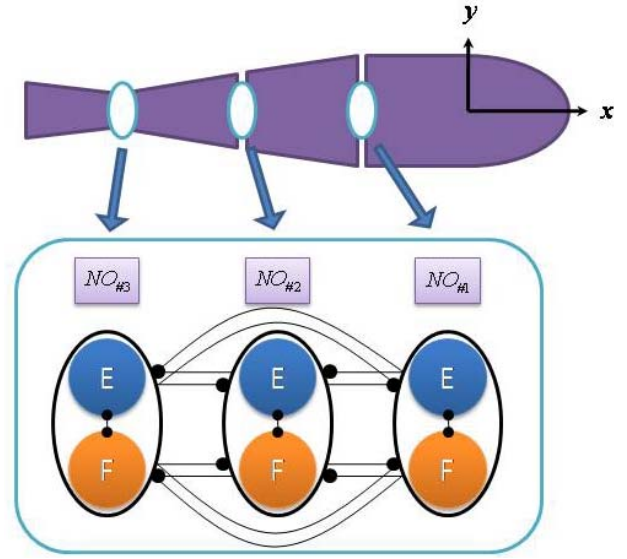


Fig. 4 3-DOF CPG model for the robot fish

물고기가 앞으로 진행을 하기 위해서는 각 관절은 적절한 위상 차이를 가지고 반복적인 운동을 수행하여야 하며, 또한 머리 쪽에서부터 꼬리 쪽으로의 관절의 각도가 점점 커져야 한다. 이러한 진폭 및 위상 차이를 갖기 위해서 본 연구에서는 각 Neural Oscillator 에 대한 파라미터를 다음의 Table 1 에서와 같이 설정하여 사용한다.

Table 1 CPG parameters

T_x	T_z	β
0.1	0.25	3
$u_e (= u_f)$	w_{ef}	w_{ij}
[1.5 1.7 2]	3	$\begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \\ -0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

물고기 로봇의 각 관절에 상응하여 반복적인 운동을 생성하는 Neural Oscillator 에 위에 설정한 파라미터 값을 입력하여 물고기 로봇의 궤적 추종 시뮬레이션을 수행하게 되면 유체의 비선형적인 특성 및 꼬리 운동에 의한 유체 특성의 변화 등으로 인하여 원하는 궤적을 추종하기가 힘들다. 따라서 물고기 로봇이 원하는 궤적을 따라가기 위해서는 꼬리 부분의 반복적인 운동을 원하는 궤적 및 외부 환경의 변화에 맞게 변화시켜야 될 필요가 있다. 이를 위해서 각 Neural Oscillator 에 피드백 신호를 이용하여 원하는 궤적을 추종할 수 있도록 반복 운동을 변화시키도록 한다. 본 연구에

서는 식 (8)과 같이 Y 방향에 대한 위치 및 속도를 피드백 하여 궤적을 추종하도록 하였다.

$$FB = K_p (y_d - y) + K_d (\dot{y}_d - \dot{y}) \quad (8)$$

4. 시뮬레이션

앞 장에서 설계된 물고기 모사 로봇에 대한 3 자유도 CPG 모델을 이용하여 유체 내에서의 물고기 로봇의 궤적 추종에 대한 시뮬레이션을 수행하여 CPG 제어기의 성능을 확인하도록 한다.

Fig. 5는 Y 방향으로의 움직임은 없는 ($y_d = 0$) 직진하는 궤적에 대하여 외부 환경에 대한 피드백 신호의 유무에 따른 물고기 로봇의 진행에 대한 시뮬레이션 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 피드백 신호가 없을 경우에는 유체의 비선형성 등으로 인하여 물고기 로봇이 원하는 직선 궤적을 제대로 추종하지 못하고 궤적에서 많이 이탈하는 것을 알 수 있다. 따라서 비선형성이 심한 외부 환경이나 또는 외란 및 환경의 변화에 따라 피드백 신호를 통하여 원하는 궤적을 추종할 수 있도록 하여야 함을 알 수 있다.

다음에 수행한 시뮬레이션은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 다양한 진폭과 주파수의 사인파 형태를 갖는 궤적을 물고기 로봇이 추종하도록 주어졌을 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 목표 궤적의 마지막 부분은 특정한 형태가 아닌 임의의 궤적이 주어졌으며, 시뮬레이션을 수행한 모든 궤적에 대하여 앞 장에서 설정한 CPG 모델의 동일한 파라미터를 이용하였다. Fig. 6의 (a), (b) 결과에서 보는 바와 같이 매우 긴 거리를 움직이는 궤적에 대해서도 CPG의 피드백 신호를 통하여 안정적인 추종 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

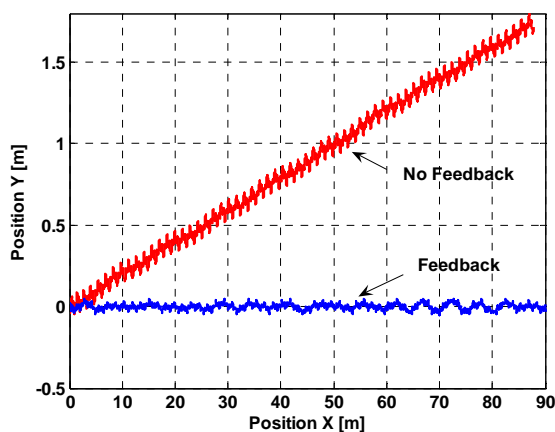
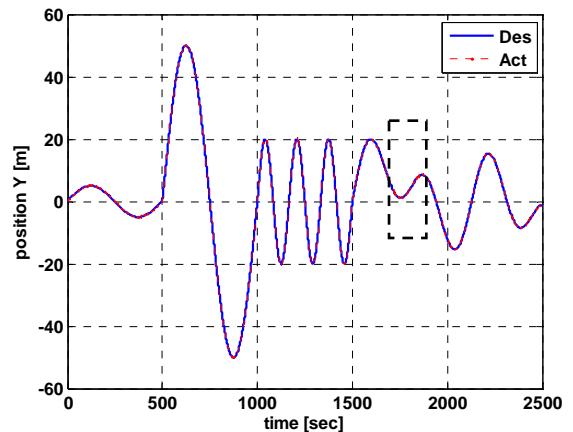
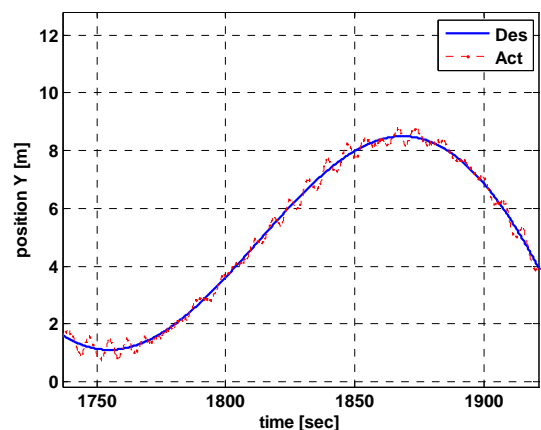


Fig. 5 Effect of feedback signal

물고기 로봇의 진행 속도는 CPG에 의해 출력되는 반복운동의 주기 및 진폭에 의해서 결정된다. 앞서 설정된 파라미터에 의해 발생하는 물고기 로봇의 진행 속도는 Fig. 7과 같다. 결과에서 보는 바와 같이 약 1.5 ~ 2m/s의 진행 속도를 갖는다. 따라서 로봇은 x 방향으로 약 4500m의 거리를 이동하게 된다. 또한 Fig. 8은 각 Neural Oscillator에 의해 발생하는 반복적인 형태의 각 관절각도를 x축에 표시된 시간 영역별로 확대하여 나타낸 결과이다. 앞 장에서 설명한 바와 같이 궤적의 변화 및 비선형적인 유체의 특성으로 인하여 피드백 신호가 생성되며, 이는 (a)에서 나타난 것과 같이 Neural Oscillator의 출력인 관절 각도에서 진폭의 변화 및 바이어스가 발생되어 원하는 궤적을 추종할 수 있도록 함을 보이고 있다. 또한 물고기 로봇이 진행을 하기 위해서 각 관절은 적절한 위상 차이를 가지고 반복적인 운동을 수행하여야 하며, 또한 머리 쪽에서부터 꼬리 쪽으로의 관절의 각도가 점점 증가하도록 주기적인 운동을 생성하고 있음을 (b)에서 보여준다.



(a) Result of trajectory tracking control



(b) Selected area of (a)

Fig. 6 Tracking control for various trajectory

5. 결론

물고기 모사 로봇의 유체 내에서의 평면 궤적 추종 성능을 확인하기 위해 이전 연구에서 추출된 유체 계수 등의 정확한 정보를 통하여 시뮬레이션 환경을 구축하였으며, 생물학적 개념을 이용하여 외부 환경의 변화 및 외란에 대해서도 뛰어난 적응성을 보이는 3 자유도 CPG 모델을 설계하여 물고기 로봇의 꼬리 지느러미에 대한 반복적인 운동을 생성하였다. 비선형성을 갖는 유체 내에서 먼 거리를 이동하는 물고기 로봇의 궤적 추종 성능 향상을 위하여 피드백 신호를 통한 주기적인 반복 운동의 패턴을 변화시켜 직진 궤적뿐 아니라 임의의 형태를 갖는 궤적에 대해서도 안정적인 추종 성능을 확보하였다.

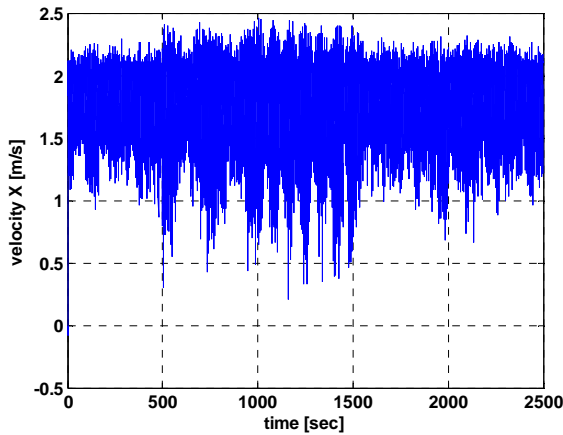
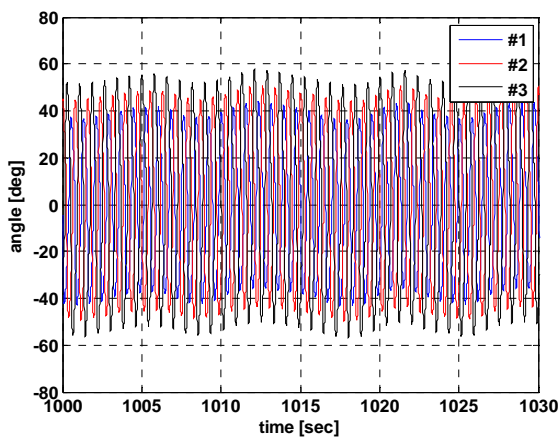


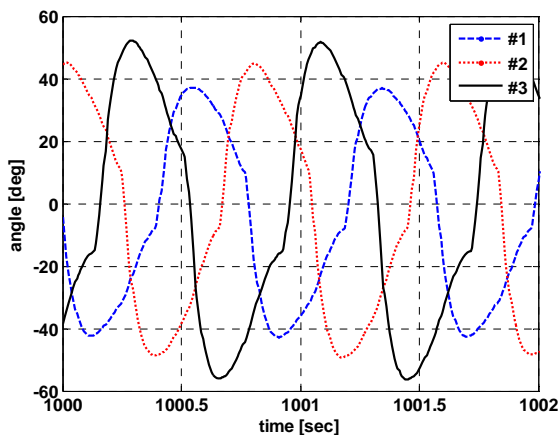
Fig. 7 Forward velocity of the fish robot

참고문헌

- (1) Lee, S. H., Park, J. H. and Han, C. H., 2007, "Optimal Control of a Mackerel-Mimicking Robot for Energy Efficient Trajectory Tracking," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 209-215.
- (2) Matsuoka, K., 1985, "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation," *Biological Cybernetics* 52, pp.367-376.
- (3) Kimura, H., Fukuoka, Y. and Cohen A. H., 2007, "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.26, No.5, pp.475-490.
- (4) Taga, G., Yamaguchi, Y. and Shimizu, H., 1991, "Self-organized Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment," *Biological Cybernetics* 65, pp.147-159.
- (5) Zhao, W., Yu, J., Fang, Y. and Wang, L., 2006, "Development of Multi-mode Biomimetic Robotic Fish Based on Central Pattern Generator," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3891-3896.
- (6) Mason, R., 2003, "Fluid Locomotion and Trajectory Planning for Shape-Changing Robots," *Ph.D. Thesis*, California Institute of Technology, USA.
- (7) Yu, J., Liu, L. and Wang, L., 2006, "Dynamic Modeling and Experimental Validation of Biomimetic Robotic Fish," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 4129-4134.



(a) Varying amplitude and Bias



(b) Phase difference between joints

Fig. 8 Joint angles