
생물학적 모방에 따른 물고기 로봇의 직진유영 연구

박진현* · 이태환** · 최영규***

A study on the straight cruise of fish robot according to biological mimic

Jin-Hyun Park* · Tae-Hwan Lee** · Young-Kiu Choi***

이 논문은 2010년도 경남과학기술대학교 기성회연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

본 연구에서는 생물학적 모방에 따른 물고기 로봇의 직진유영에 관한 연구로써, Liu 등이 제안한 꼬리 모션 함수를 푸우리에 급수 전개 7차 항까지 고려한 제안된 방법과 일반적인 사인함수만으로 근사한 방법과 비교하여 모의실험 하였다. 일반적으로 로봇 물고기의 꼬리 링크의 길이가 길어지고 링크가 많을 경우, 로봇 물고기의 꼬리 모션 함수의 말단 회전 관절 궤적은 사인 함수의 모양과 매우 다르다. 그러므로 로봇 물고기의 꼬리 궤적을 단순한 푸우리에 급수 전개의 기본파 성분만으로 근사하기에는 문제가 있다. 제안된 방법과 일반적인 사인함수만으로 근사한 방법의 모의실험 결과 제안된 방법이 로봇 물고기의 추력과 속도에서 10% 정도 뛰어난을 보였다.

ABSTRACT

This paper was researched the straight cruise of fish robot according to biological mimic, and it was compared the proposed method which was considered up to 7th order components in fourier series of Liu's tail motion function with the approximate method which was used general sine function by simulation. If fish robot has a large number of links and if the length of tail link is long. The end rotary joint trajectory of tail motion function generally is different from sine function. Therefore The approximate method which expresses tail motion trajectories as fundamental component in fourier series has a problem. Through the computer simulation, the proposed method showed 10% excellent propulsion and velocity than the conventional method.

키워드

생물학적 모방, 꼬리 모션 함수

Key word

biological mimic, tail motion function

* 종신회원 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

** 종신회원 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 (교신저자)

*** 정회원 : 부산대학교 전자전기공학부

접수일자 : 2011. 03. 04

심사완료일자 : 2011. 05. 04

I. 서론

일반적으로 물 속에서의 추진체나 추진력에 관한 연구는 프로펠러에 한정되어왔다. 또한 추진체의 추진력을 향상하기 위하여 엔진이나, 추진체의 구조적 형태를 변화시켜 개발되어왔다[1]. 그러나 보다 뛰어난 수중 추진체를 개발하기 위하여 수중 동물의 운동 메커니즘을 연구 분석하여야 한다. 왜냐하면, 수중 동물은 여러 세대를 걸쳐 수중 환경에 최적화된 운동 메커니즘을 가지고 있기 때문이다. 따라서, 물 속에서 물고기의 추진 능력은 많은 로봇 연구자들에게 새로운 종류의 추진체 설계에 아이디어와 영감을 주었다[2], 현재까지 물고기 로봇의 주 연구 테마로 물고기와 같은 추진 메커니즘[2-3], 꼬리지느러미의 재료[4], 무선 조정[5], 다중 협력[6], 메커니즘의 구조[7-9] 등이다.

물고기의 유형 형태는 기본적으로 2가지로 구분되어진다. 몸체와 꼬리 지느러미를 사용하는 BCF(Body and/or Caudal Fin)와 가슴지느러미와 배지느러미를 사용하는 MPF(Median and/or Paired Fin)이다[10]. BCF의 경우, 빠른 속도와 추진 효율이 뛰어나며, MPF의 경우 안정성이 뛰어나다. BCF 모델로 1994년 MIT에서 개발된 Robotuna는 초당 2m로 수영하였으며, Mason과 Burdick은 carangiform 모델을 개발하여 꼬리 지느러미의 추진력을 실험적으로 확인하였다. 또한 Liu 등은 생물학적 시스템에서 영감을 얻은 물고기 로봇을 개발하였다[2,11~13]. 특히, Lighthill이 제안한 시간과 거리에 따른 물고기 몸체 형상 함수[14]를 물고기 머리 부분의 몸체를 움직이지 않는 강체로 가정하여 수정 제안하였다. 이는 로봇 물고기를 제어 관점에서 제어 가능한 물고기의 꼬리 모션을 함수로 제안한 것이다. 이는 실제 물고기 꼬리 부분의 움직임에 매우 적절하다. 그러나, 이렇게 제안된 로봇 물고기의 꼬리 모션 함수의 궤적은 사인함수의 모양을 하고 있으나, 단순한 푸우리에 급수 전개와 기본파 성분만으로 근사하기에는 무리가 따른다. 특히, 링크의 길이가 길어지고 링크가 많을 경우, 말단 회전 관절에서는 사인 함수의 모양과 매우 다르다.

따라서 본 연구에서 Liu 등이 제안한 꼬리 함수를 푸우리에 급수 전개와 7차 항까지 고려하여 만든 꼬리 궤적과 일반적인 1차항 만을 사용하여 만든 꼬리 궤적을 비교하여 모의실험 하였다. 모의실험 결과 제안된 방법

이 로봇 물고기의 추력과 속도에서 더 뛰어난을 확인하고자 한다.

II. 물고기 로봇의 모델링 및 이산화

2.1. 물고기 로봇의 모델링

일반적인 carangiform 물고기는 기본적으로 수영하는 형태에 따라 직진, 방향 전환, 그리고 CST 등의 패턴으로 나눌 수 있다. 이러한 분류는 물고기 동작의 수학적 모델을 단순하게 하고, 각 수영 패턴에서의 물고기 몸체의 동작 함수가 독립적으로 나타낼 수 있다[2].

그림 1은 물고기 로봇에 대하여 좌표축을 정의하였다. (x^w, y^w) 로 표시되는 월드 좌표계(world coordinate)로 물고기 로봇의 진행 방향과 같이 정의하고, 또 다른 좌표는 (x^h, y^h) 로 정의된 물고기 로봇의 머리를 중심으로 한 몸체 좌표로 나타내었다. 또한 (x_i, y_i) 는 각 로봇 물고기의 꼬리 관절 좌표로 정의하였다.

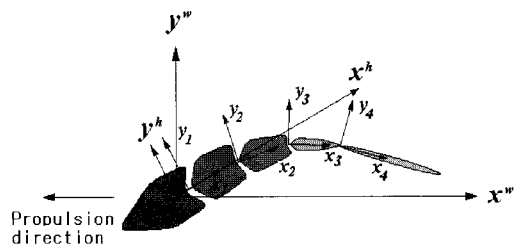


그림 1. 좌표 시스템의 정의
Fig. 1. Coordinate system definitions

물고기 로봇의 직진 유형 모션 함수는 많은 로봇 연구자들이 생물학자인 Lighthill에 의해 정의[14]된 월드 좌표에 의한 $f_B(x, t)$ 를 사용하였다. Liu 등도 이러한 모션 함수를 물고기 머리 부분의 몸체를 고정하여 꼬리의 움직임을 고려한 모션 함수를 제안하여 사용하였다. 이는 carangiform 물고기 로봇의 꼬리 모션이 실질적인 물고기 로봇의 추진력과 방향을 결정하는 요소이므로 제어의 관점에서 물고기 로봇의 꼬리 모션을 함수 $f_T(x, t)$ 로 제안하였다[2, 11~13]. 식 (1)은 $f_B(x, t)$ 와 $f_T(x, t)$ 를 나타내며, 그림 2는 두 함수를 나타내었다.

$$y = f_B(x,t) = (c_1x + c_2x^2)\sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

$$y = f_T(x,t) = \begin{cases} f_B(x,t) - c_3x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

단, y 는 t 시간에서의 월드 좌표계의 x 축 값에 대한 y 의 값, c_1, c_2 는 선형 및 2차 증가항에 대한 계수, ω 는 파동 운동의 각속도, k 는 파동차수를 나타낸다. 또한, c_3 는 $x=0$ 에서의 미분 값으로 정의하였다.

아래 식 (2)는 c_3 를 나타내었다[2].

$$c_3 = f'_B(x,t)|_{x=0} \quad (2)$$

$$= ((c_1 + 2c_2x)\sin(kx + \omega t) + (c_1x + c_2x^2)k\cos(kx + \omega t))|_{x=0}$$

$$= c_1\sin(\omega t)$$

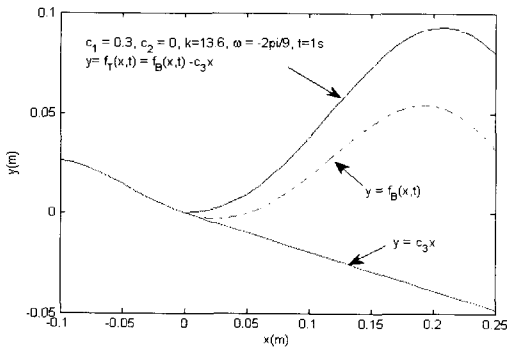


그림 2. 몸체 모션 함수와 꼬리 모션 함수와의 관계
Fig. 2. The relationship between the body motion function and the tail motion function

그림 3은 몸체 모션 함수 $f_B(x,t)$ 와 꼬리 모션 함수 $f_T(x,t)$ 의 결과이다. $f_T(x,t)$ 가 $f_B(x,t)$ 에 비하여 진폭의 크기가 작을 수 있다. 이는 물고기가 유연 시 머리도 같이 좌우로 움직이기 때문이다. 그러므로 물고기 로봇의 머리가 고정된 몸체 좌표 (x^h, y^h) 를 기준으로 꼬리 모션을 나타내는 것이 제어 대상인 로봇 물고기의 제어 함수로 사용한 것은 매우 적절하다. 따라서 꼬리 모션 함수 $f_T(x,t)$ 는 몸체 모션 함수 $f_B(x,t)$ 와 머리 부분을 움직이지 않는 강체로 가정하여 구한 $x=0$ 에서의 머리 부분의 일차 선형 함수 값의 차로 표현하였다.

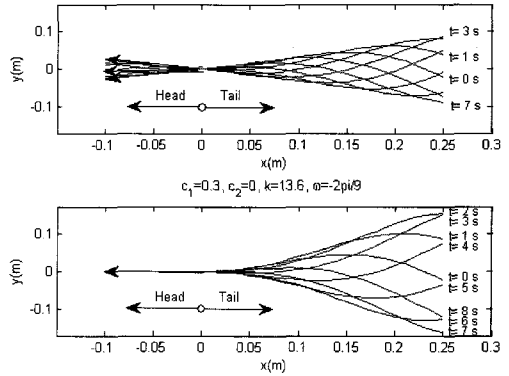


그림 3. 몸체 모션 함수와 꼬리 모션 함수
Fig. 3. A body motion function and a tail motion function

2.2. 물고기 로봇의 이산화

물고기 로봇을 공학적인 측면에서 간단하고 제어하기 편하게 하기 위하여 식 (1)의 꼬리함수를 이산시스템으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$y = f_T(x,i) = (c_1x + c_2x^2)\sin(kx - \frac{2\pi}{M}i) - c_1x \sin(-\frac{2\pi}{M}i) \quad (3)$$

단, $i = 0, 1, \dots, M-1$ 이며, M 은 양수로 이산화의 분해정도를 나타낸다.

식 (1)의 ω 가 식 (3)에서 $-2\pi/M$ 로 음수인 것은 $-x$ 방향으로 추력을 발생하기 위함이다.

III. 직진유영 패턴 모델링

실제 물고기는 많은 수의 관절로 이루어져 매우 부드럽게 유연한다. 그러나 로봇 물고기는 많은 수의 관절로 구성하기에는 구조적인 문제와 제어에 한계가 있다. 따라서 많은 연구자들은 로봇 물고기의 관절 수를 적은 수로 제한하여 사용하고 있으며, 본 연구에서도 로봇 물고기의 꼬리 관절 수를 4개로 사용하였다. 본 연구에서는 이를 직진유영에 대하여 각 관절의 궤적 설정과 설정된 궤적에 대한 성능에 관하여 논하고자 한다.

직진유영을 위한 물고기의 모션은 식 (1)의 $f_B(x, t)$ 에 의하여 묘사된다. 본 연구에서는 2장에서 기술한 식 (3)의 꼬리 모션 함수를 사용하여 꼬리 관절의 궤적을 설정하였다. 꼬리 관절 각은 그림 4와 같이 정의하였다. 관절의 링크 길이는 l_j 로 정의하고, 각 링크의 좌표는 (x_{ij}, y_{ij}) 로 정의하였다. 각 링크의 시작점과 끝점의 좌표는 꼬리 모션 함수 값 위에 존재하며, 최초의 링크 시작 좌표는 고정된 로봇 물고기의 머리 원점에 붙어있다. 그리고 다음 링크의 시작 좌표는 직전 링크의 끝점의 좌표와 같다. 각 관절 각도는 x 축에 대하여 p_{ij} 로 나타내며, 직전 링크에 대한 상대적인 관절 각도로 q_{ij} 로 표시하였다.

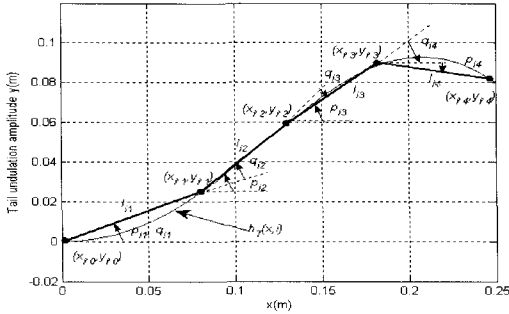


그림 4. 관절 각의 정의
Fig. 4. The definition for joint angles

로봇 물고기의 링크들은 강체로 간주하여 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$g(x, i, j) = a_{ij}x + b_{ij} \quad (4)$$

단, $i = 0, \dots, M-1, j = 1, \dots, K,$

$$a_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{i-1j}}{x_{ij} - x_{i-1j}}, \quad b_{ij} = \frac{x_{ii}y_{i-1j} - x_{i-1i}y_{ij}}{x_{ij} - x_{i-1j}}$$

따라서 앞의 정의에 의하여, 식 (5)를 만족해야하며, 식 (6)과 같은 제약조건을 갖는다.

$$\begin{aligned} f_T(x_{i-1j-1}, i) &= g(x_{i-1j-1}, i, j) \\ f_T(x_{ij}, i) &= g(x_{ij}, i, j) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (x_{ij} - x_{i-1j})^2 + (y_{ij} - y_{i-1j})^2 &= l_j^2 \\ l_j &> 0 \end{aligned} \quad (6)$$

본 연구에서는 $c_1 = 0.3, c_2 = 0, k = 13.6, M = 18, K = 4, [l_1, l_2, l_3, l_4] = [0.045, 0.045, 0.045, 0.085]$ 로 설정하여, 식 (4)~(6)을 뉴턴 램슨 방법(Newton Raphson Method)을 사용하여 로봇 물고기의 직진 유영에 대한 꼬리 관절 모션을 구하였다. 그림 5는 위의 조건에 의하여 구하여진 꼬리 관절 모션을 나타내었다.

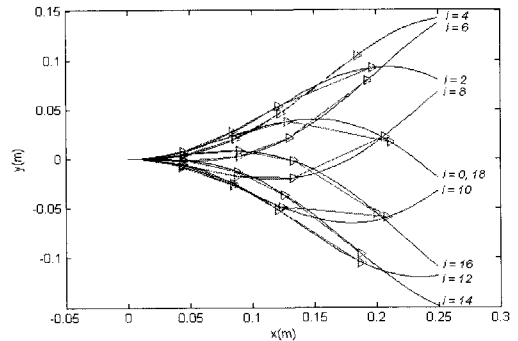


그림 5. 직진 유영 시 꼬리 관절 모션
Fig. 5. The tail motion for straight cruise

그림 5로부터 x 축에 대한 각 관절 각도 p_{ij} 와 직전 링크에 대한 상대적인 관절 각도 q_{ij} 는 식 (7)에 의하여 구하고, 각 관절에 대하여 그림으로 나타내면 그림 6과 같다.

$$\begin{cases} p_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{ij} - y_{i-1j}}{x_{ij} - x_{i-1j}} \right) \\ q_{ij} = p_{ij} - p_{i-1j} \end{cases} \quad (7)$$

단, $i = 1, \dots, 18, j = 1, \dots, 4, p_{i0} = 0$

그림 6에서 x 축에 대한 꼬리 관절 각도 p_{ij} 는 사인함수와 매우 유사하다. 그러나 상대적인 관절 각도 q_{ij} 는 식 (7)에서 알 수 있듯이 x 축에 대한 꼬리 관절 각도의 차로 나타남으로 말단의 링크로 갈수록 사인함수와 매우 다르다.

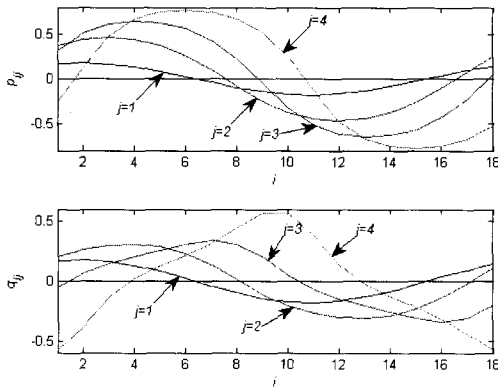


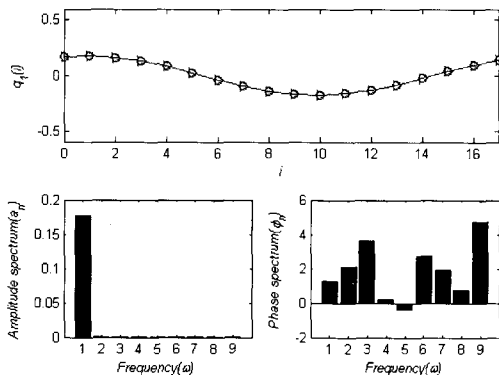
그림 6. 직진 유영시 관절 각도(p_{ij}, q_{ij})
Fig. 6. The joint angles for straight cruise

많은 논문에서 로봇 물고기의 관절 궤적을 단순한 사인 함수를 사용하고 있으나[2,3,5,6,11-13], 관절 링크의 길이와 수가 많아지고, 말단의 링크로 갈수록 링크의 회전 궤적이 사인 함수의 모양과 매우 다름을 알 수 있다.

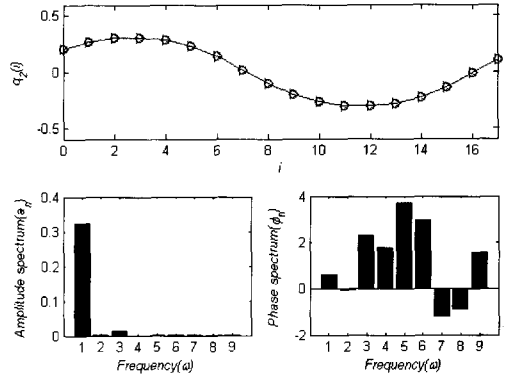
따라서 본 연구에서는 위의 로봇 물고기의 링크 궤적을 식 (8)과 같이 푸우리에 급수 전개를 통하여 표현하고 이를 각 링크의 궤적으로 선정하였다.

$$q_j(i) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{nj} \sin(n\omega i + \phi_{nj}) \quad (8)$$

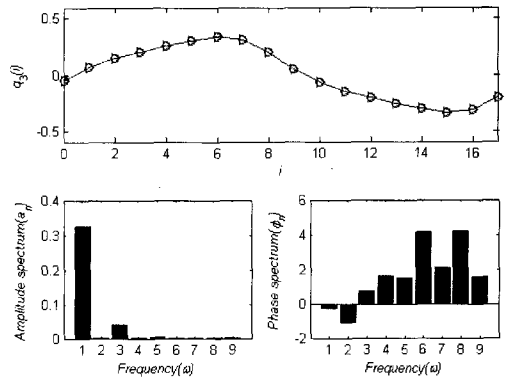
단, $i = 0, \dots, 17, j = 1, \dots, 4, a_{nj}, \phi_{nj}$ 는 푸우리에 급수 전개에 의한 진폭스펙트럼과 위상스펙트럼



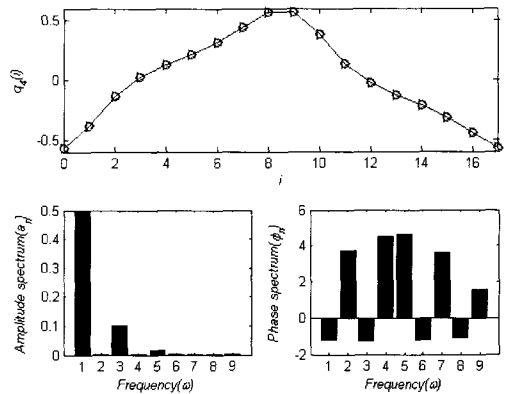
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 관절 각도와 푸우리에 분석
(a) 링크 1 (b) 링크 2 (c) 링크 3 (d) 링크 4
Fig. 7. Joint angles and Fourier analysis
(a) link 1 (b) link 2 (c) link 3 (d) link 4

그림 7은 각 링크의 상대적인 관절각도 $q_{i,j}$ 의 푸우리에 급수 전개에 의한 진폭스펙트럼($a_{n,j}$)과 위상스펙트럼($\phi_{n,j}$)을 나타내었다. 꼬리 링크 1, 2는 기본파의 주파수 성분이 주로 나타나며, 고조파 성분은 매우 적다. 그러나 링크 3, 4는 3, 5 고조파의 성분이 기본파 성분의 20%까지 차지하므로 무시할 수 없는 크기이다. 따라서 본 연구에서는 푸우리에 급수 전개의 7차 항까지 고려하여, 단순히 기본파 성분만을 사용한 방법과 비교하여 성능평가를 하고자 한다.

IV. 모의실험 및 결과 분석

모의실험을 위하여 유체 속에서 관절 몸체의 설계 및 모의실험 및 분석이 가능하도록 구성된 Biohydrodynamics Toolbox[15, 16]를 사용하였다. 로봇 물고기의 몸체 설계는 carangiform 형태로 앞선 그림 1과 같이 설계하였으며, 그 제원은 표 1과 같다. 로봇 물고기 머리 부분의 무게 중심을 원점으로 놓았으며, 각 꼬리 관절은 독립적인 좌표를 가지고 있다.

표 1. 로봇 물고기 제원
Table 1. The characteristics of fish robot

항목		크기
전체 크기		39x274mm
머리	길이	59mm
	무게	184 g
링크 1	길이	45mm
	무게	119 g
링크 2	길이	45mm
	무게	79 g
링크 3	길이	45mm
	무게	27 g
링크 4	길이	85mm
	무게	33 g

직진유영의 실험은 식 (3)의 꼬리 함수를 사용하여 구한 관절 각도 그림 (7)을 사용하여 설정하였다. 로봇 물고기의 속도는 식 (8)의 $\omega = 2\pi f$ 의 주파수 성분을 변화시켜 속도를 변화시켰다.

주파수 $f = [0.1, 0.2, 0.25, 0.33, 0.5, 0.75, 1]$ 로 변화하며, 제안된 방법과 하모닉 성분을 무시한 1차항의 사인 함수만을 사용한 일반적인 방법과 비교하였다.

아래 그림 8은 주파수 $f = 0.1Hz$ 일 경우, 50초간 직진유영의 모의실험 결과이다. 제안된 방법을 사용한 그림 8-(a)의 경우 $(-0.093, 0.007)$ 좌표에 도달하였으며, 일반적인 방법의 8-(b)는 $(-0.089, 0.009)$ 좌표에 도달하였다. 제안된 방법이 일반적인 방법에 비하여 y 축 방향에 대해서는 차이가 없으나, $-x$ 축 방향으로 4% 정도 더 멀리 진행함을 알 수 있다.

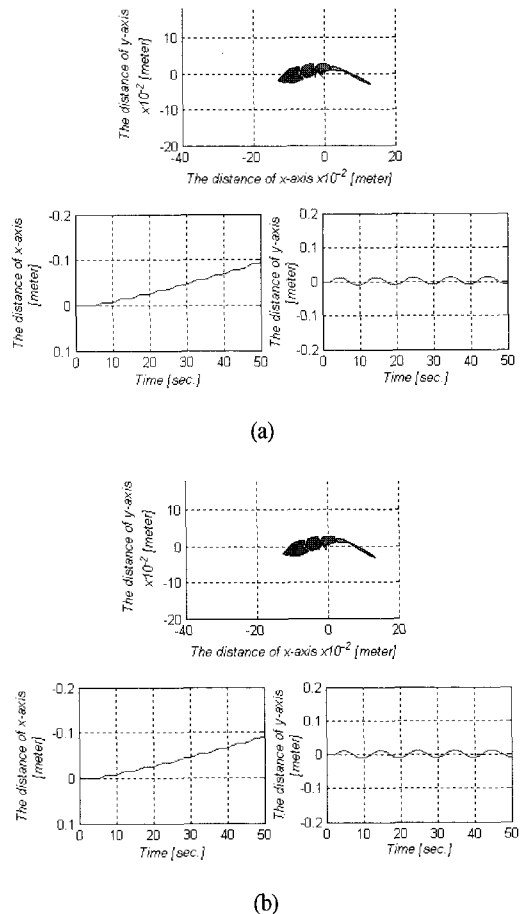


그림 8. $f = 0.1Hz$ 일 경우, 직진 유영 비교
(a) 제안된 방법 (b) 일반적인 방법
Fig. 8. The comparison of straight cruise in case $f = 0.1Hz$ (a) The proposed method (b) The general method

그림 9는 주파수 $f = 0.75 Hz$ 일 경우의 모의실험 결과이다. 제안된 방법을 사용한 경우 $(-1.629, 0.010)$ 좌표에 도달하였으며, 일반적인 방법의 경우 $(-1.466, 0.006)$ 좌표에 도달하였다. 제안된 방법이 $-x$ 축의 방향으로 10% 정도 더 멀리 진행함을 알 수 있다. 다른 주파수의 모의실험에서도 제안된 방법이 10% 이내의 성능 향상을 보였다.

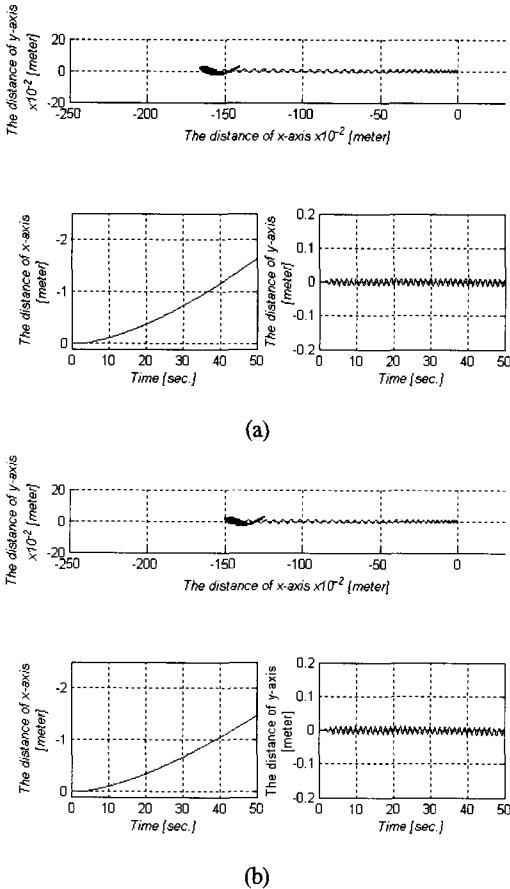


그림 9. $f = 0.75 Hz$ 일 경우, 직진 유영 비교
 (a) 제안된 방법 (b) 일반적인 방법
 Fig. 9. The comparison of straight cruise in case $f = 0.75 Hz$ (a) The proposed method (b) The general method

그림 10-(a)는 전체 주파수에 대하여 제안된 방법과 일반적인 방법에 대한 x 축에 대한 평균 속도를 나타내며, 10-(b)는 일반적인 방법에 대한 제안된 방법의 속도 개선율을 표시하였다. $f = 1 Hz$ 주파수에서는 4% 정도

의 개선 효과를 보이나, 꼬리 관절의 주파수가 올라감에 따라 10%까지 거리 및 속도에 대한 개선 효과를 보인다.

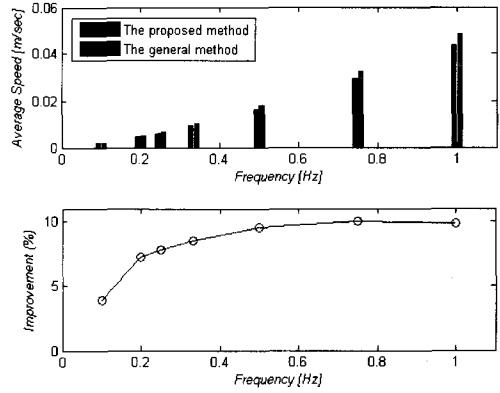


그림 10. 제안된 방법과 일반적인 방법의 평균 속도 및 개선율 비교
 Fig. 10. The comparison of the proposed method with the general method at average speed and improvement rate

감사의 글

이 논문은 2010년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

IV. 결론

본 연구에서는 생물학적 모방에 따른 물고기 로봇의 직진유영에 관한 연구로써, Liu 등이 제안한 꼬리 모션 함수를 푸우리에 급수 전개 7차 항까지 고려한 제안된 방법과 일반적인 사인함수만으로 근사한 방법과 비교하여 모의실험 하였다. 일반적으로 로봇 물고기의 꼬리 링크의 길이가 길어지고 링크가 많을 경우, 로봇 물고기의 꼬리 모션 함수의 발달 회전 관절 궤적은 사인 함수의 모양과 매우 다르다. 그러므로 로봇 물고기의 꼬리 궤적을 단순한 푸우리에 급수 전개의 기본과 성분만으로 근사하기에는 문제가 있다. 제안된 방법과 일반적인 사인 함수만으로 근사한 방법의 모의실험 결과 제안된 방법이 로봇 물고기의 추력과 속도에서 10% 정도 뛰어난 것을 보였다.

참고문헌

[1] Tunog Quan Vo, Hyoung Seok Kim and, Byong Ryong Lee, "Propulsive Velocity Optimization of 3-Joint Fish Robot Using Genetic-Hill Climbing Algorithm," *Journal of Bionic Engineering* 6, pp. 415~429, 2009

[2] Jinding Liu and Huosheng Hu, "Biological Inspiration: From Carangiform Fish to Multi-Joint Robotic Fish," *Journal of Bionic Engineering* 7, pp. 35~48, 2010

[3] Qun Yan, Zhen Han, Shi-wu Zhang, Jie Yang, "Parametric Research of Experiments on a Carangiform Robot Fish," *Journal of Bionic Engineering* 5, pp. 95~101, 2008

[4] J. Witting, K. Safak, G. Adams G, "Shape memory alloy actuators applied to biomimetic underwater robots," In: Ayers J, Davis J, Rudolph A (eds). *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, MIT Press, USA, 117-136, 2001.

[5] J. shao, L. Wang, J. Yu, "Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperation transportation," *Control Engineering Practice* 16, pp. 569~584, 2008.

[6] J. Yu, S. Wang, M. Tan, "A simplified propulsive model of biomimetic robot fish and its realization," *Robotica*, Vol. 23, pp. 101-107, 2005.

[7] S. Guo, T. Fukuda, N. Kato, K. Oguro, "Development of underwater microprobe using IMPF actuator," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1829-1834, 1998.

[8] National Maritime Research Institute. Welcome to Fish Robot Home Page, [2000-09-01], <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>

[9] Mitsubishi Heavy Industries Ltd News. MHI to Produce First Lifelike Robotic Fish Available on Market, [2001-01-19], http://www.mhi.co.jp/en/news/sec1/e_0898.html

[10] Webb P W. Form and function in fish swimming. *Scientific American*, Vol. 25, pp. 58-68. 1984.

[11] Liu J D, Dukes I, Hu H S, "Novel mechatronics design

for a robotic fish," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Canada, pp. 2077-2082. 2005.

[12] Liu J D, Hu H S, "A 3D simulator for autonomous robotic fish." *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 1, pp. 42-55. 2004.

[13] Liu J D, Hu H S. "Mimicry of sharp turning behaviours in a robotic fish." *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 3329-3334, 2005.

[14] Lighthill M J, "Note on the swimming of slender fish." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 305-317, 1960.

[15] Biohydrodynamics MATLAB Toolbox, A. Munnier and B. Pinçon, <http://bht.gforge.inria.fr/>

[16] Mathworks, matlabcentral File Exchange page [2009-04-04], <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21872>

저자소개



박진현(Jin-Hyun Park)

한국해양정보통신학회 논문지
제15권 2호참조



이태환 (Tae-Hwan Lee)

한국해양정보통신학회 논문지
제15권 2호참조



최영규(Young-Kiu Choi)

한국해양정보통신학회 논문지
제14권 7호참조