
생물학적 모방에 따른 물고기 로봇의 빠른 방향 전환 연구

박진현* · 이태환** · 최영규***

A study on the C-shape Sharp Turn of fish robot according to biological mimic

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

이 논문은 2011년도 경남과학기술대학교 기성회연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

CST(C-shape sharp turn)는 물고기가 수영 시 빠른 방향 전환을 위해 물고기 꼬리 부분을 빠르게 C-형태로 구부려 빠르게 방향 전환을 하는 모션을 나타낸다. 그러나 CST와 관련된 모션 궤적 함수는 아직 일반화된 함수가 없다. 본 연구에서는 생물학자들이 실제 물고기의 관측으로부터 나온 순차적인 물고기의 모션 기록을 통하여 CST를 위한 매우 단순한 모션 함수를 제안하였다. 그리고 이를 모의실험을 통하여 제안된 함수의 유용성을 확인하였다.

ABSTRACT

CST(C-shape sharp turn) represented the motion whereby fish bend their tail quickly in a C-shape to achieve an emergent changing of its swimming direction on fish swimming. But there is not yet the general motion trajectory functions related to CST. In this paper, we proposed the very simple motion functions related to CST sequence recorded from a real fish by biologists. Through the computer simulations, we confirmed the usefulness of the proposed function.

키워드

생물학적 모방, 빠른 방향 전환

Key word

biological mimic, CST(C-shape sharp turn)

* 중신회원 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

접수일자 : 2011. 04. 12

** 중신회원 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 (교신저자)

심사완료일자 : 2011. 06. 07

*** 정회원 : 부산대학교 전자전기공학부

I. 서 론

물 속에서의 추진체나 추진력에 관한 연구는 일반적으로 프로펠러에 한정되어왔다. 그러므로 추진체의 추진력을 향상하기 위하여 엔진이나, 추진체의 구조적 형태를 변화시켜 개발되어왔다[1]. 그러나 보다 뛰어난 수중 추진체를 개발하기 위해서는 여러 세대를 걸쳐 수중 환경에 최적화된 운동 메커니즘을 가지고 있는 수중 동물의 운동 메커니즘을 연구 분석하여야 한다. 그러므로 물 속에서 물고기의 추진 능력은 많은 로봇 연구자들에게 새로운 종류의 추진체 설계에 아이디어와 영감을 주었다[2].

물고기의 유형 형태는 몸체와 꼬리 지느러미를 사용하는 BCF(Body and/or Caudal Fin)와 가슴지느러미와 배지느러미를 사용하는 MPF(Median and/or Paired Fin) 등으로 구분되어진다[3]. BCF의 경우, 빠른 속도와 효율이 뛰어나며, MPF의 경우 안정성이 뛰어나다. 일반적인 로봇 물고기들은 BCF 모델 중 carangiform과 thunniform에 대한 연구가 많이 진행되었으며[2,4~5], 이는 빠른 동작 특성과 에너지 효율에 기인한다.

BCF 모델 중 carangiform 로봇 물고기는 유영 형태에 따라 직진, 방향 전환, 빠른 방향 전환(CST : C-shape Sharp Turn) 등의 패턴으로 나누어진다. 직진 유영의 경우, 생물학자인 Lighthill[6]에 의해 정의된 모션 함수를 사용하여 로봇 물고기의 관절 궤적을 생성하는 연구를 많이 하였으며, 방향 전환은 Lighthill의 직진 모션 함수에서 로봇 물고기의 첫 번째 관절에 일정 각도를 가감하여 방향을 설정하는 연구가 대부분이다[7~8]. 그러나 CST에 대한 연구의 경우, Liu[2] 등이 생물학자인 Spierts[9] 등의 CST를 위한 실제 잉어의 순차적 꼬리 모션 기록으로부터 물고기 모션을 모사하여, 새로운 모션 궤적 함수를 제안하였으나 함수가 복잡하고, 설정해야 할 파라미터들을 정하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 CST를 위해 Liu 등이 제안한 방법과 같이 잉어의 순차적 꼬리 모션 기록으로부터 모방한 단순한 모션 궤적 함수를 제안하였다. 제안된 모션 궤적 함수는 Liu 등이 제안한 함수에 비하여 단순하고, 설정하여야 할 파라미터들이 적은 장점을 갖는다. 또한 모의실험을 통하여 제안된 모션 궤적 함수의 유용성을 확인하고자 한다.

II. 물고기 로봇의 관절 좌표 및 유체 동역학 해석

2.1 물고기 로봇의 관절 좌표 표현

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]. 그러나 CST와 관련된 일반적인 모션 궤적 함수는 존재하지 않는다.

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.

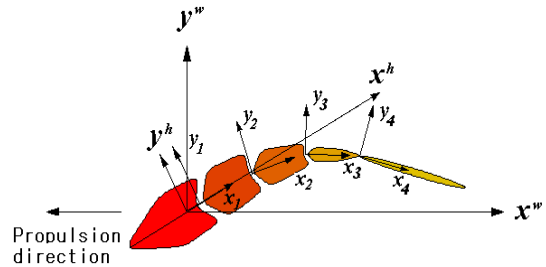


그림 1. 좌표 시스템의 정의
Fig. 1 Coordinate system definitions

물고기 로봇의 꼬리 관절 각은 그림 2와 같이 정의하였다. 물고기의 중심 궤적을 따라 관절들을 설정하였다. 관절의 링크 길이는 l_j 로 정의하고, 각 링크의 좌표는 (x_{ij}, y_{ij}) 로 정의하였다. 시작점과 끝점의 좌표는 꼬리 모션 궤적 함수 값 위에 존재하며, 최초의 링크 시작 좌표는 고정된 로봇 물고기의 머리 원점에 붙어있으며, 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.

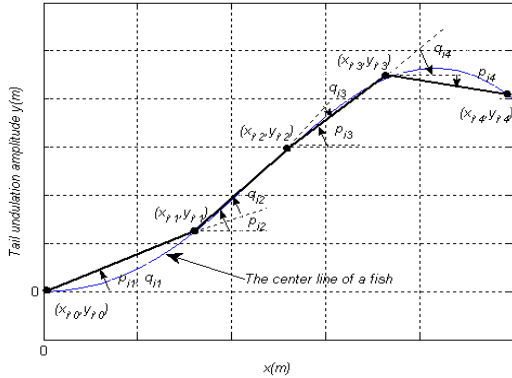


그림 2. 관절 각의 정의
Fig. 2 The definition for joint angles

2.2 유체 동역학 해석

물속에 잠겨 있는 다 관절 몸체는 정수역학적 힘(hydrodynamic force)과 중력의 영향을 받는다. 이러한 물체의 거동은 고체역학을 통하여 선 및 각운동량에 대한 상미분 방정식으로 수식화된다.

유체역학에서는 점성의 유무, 밀도의 변화 유무에 따라 유체를 분류하기도 하며, 점성을 무시할 수 있는 비점성 유체(inviscid fluid)와 밀도 변화가 없는 비압축성 유체(incompressible fluid)의 성질을 동시에 가지고 있는 유체를 완전유체(perfect fluid)라고 한다. 본 연구에서는 와동(vortex)이 없는 비회전 유동(irrotational flow)의 완전유체를 대상으로 한다. 이러한 유체의 거동을 포텐셜 유동(potential flow)이라고 하며, 이때 개입되는 포텐셜 함수(potential function)를 사용하면 연속 방정식(continuity equation)이 자동으로 만족되는 장점이 있다. 운동량 방정식 및 경계 조건은 아래의 식 (1)과 같이 된다.

$$\Delta\phi = 0 \text{ (경계 조건: } \partial\phi = b) \tag{1}$$

단, ϕ 및 b 는 각각 포텐셜 함수 및 고체-유체 경계에서의 상수를 나타내며, θ 는 고체 벽면에서 바깥쪽(유체) 법선 방향의 미분을 나타낸다.

따라서 이러한 노이만 경계치 문제(NBVP: Neumann boundary value problem)를 풀면 유체가 몸체에 미치는 영향을 파악할 수 있다[10~11].

본 연구에서는 유체에 잠겨 있는 관절 몸체의 설계,

모의 실험, 분석 등 일련의 작업이 가능하도록 Matlab 프로그래밍으로 쉽게 적용할 수 있는 Biohydrodynamics Toolbox를 사용하였다[10~11].

Biohydrodynamics Toolbox는 유체 속에서 다 관절 몸체에 대한 추력 및 모션 등을 연구할 수 있는 소프트웨어로써, 기본적인 고체역학(solid mechanics)과 유체역학(fluid mechanics)을 기반으로 하며, 이들을 결합한 유체-구조 상호 작용 시스템(fluid-structure interaction system)에 대한 해석도 가능하다.

III. CST 유영 패턴

본 장에서는 CST에 대한 모션 궤적 함수를 제안하고, 제안된 모션 궤적 함수를 사용한 모의실험을 통하여 그 유용성을 확인하고자 한다.

CST는 물고기가 유영 시 빠른 방향 전환을 위해 물고기 꼬리 부분을 빠르게 C-형태로 구부려 빠르게 방향 전환을 하는 모션을 나타낸다. 그림 3은 실제 잉어의 빠른 방향전환을 나타내는 CST의 순차적인 그림이다[10].

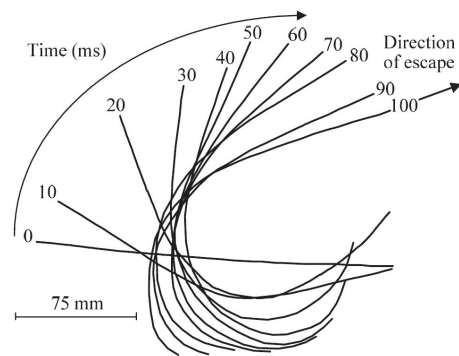


그림 3. 잉어의 CST를 위한 순차적 기록[10]
Fig. 3 A CST sequence recorded from carp[10]

현재 CST와 관련된 일반화된 모션 궤적 함수는 없다. 최근에 Liu 등은 생물학자들이 실제 물고기의 관측으로부터 나온 순차적인 물고기의 모션 기록을 통하여 CST에 관련된 모션 궤적 함수를 제안하였다[2]. 그러나 이렇게 제안된 CST의 모션 궤적 함수는 복잡하고, 함수에 포함된 파라미터들을 결정하기 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서도 그림 3을 자세히 관찰함으로써 Liu 등이 제안한 CST 모션 궤적 함수보다 간단하며 파라미터 설정이 용이한 궤적 함수를 제안하고자 한다. 그림 3에서 CST 모션을 만들기 위하여 0 ~ 40 (msec)까지는 매우 빠른 굽힘 관절 궤적을 생성하고, 40 ~ 100 (msec)까지는 굽힘 궤적을 천천히 풀어냄을 알 수 있다. 이러한 CST 모션을 로봇 물고기의 꼬리 모션 궤적에 적용하기 위하여 그림 3의 잉어의 순차적 기록을 머리 부분을 기준으로 하여 꼬리 모션 궤적 관점으로 그림 4와 같이 표시하여 보았다.

위에서 살펴본 것과 같이 0 ~ 30 (msec)까지는 4개의 꼬리 관절 궤적이 빠르게 회전하며, 30 ~ 40 (msec) 사이는 4번째 관절 각만이 빠르게 회전함을 할 수 있었다. 이후 40 ~ 100 (msec)까지는 굽힘 관절들을 서서히 풀어냄을 확인할 수 있었다.

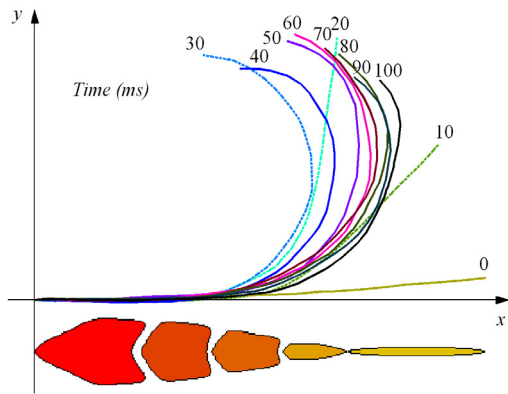


그림 4. CST를 위한 순차적 꼬리 모션
Fig. 4 The sequence tail motion for CST

따라서 이러한 관측을 통하여 빠른 굽힘 모션 동작은 단순한 3차의 방정식으로 근사하고, 굽힘 궤적을 천천히 풀어가는 모션 동작은 완만한 코사인 함수로 근사하여 식 (2)와 같이 간결한 CST 모션 궤적 함수를 근사하였다.

$$\begin{cases} q_j(t) = a_j t^3 & 0 \leq t < t_0 \\ q_j(t) = A_j \cos(\omega t + \theta) & t_0 \leq t \leq t_1 \end{cases} \quad (2)$$

단, t_0 는 빠른 굽힘 궤적 시간, t_1 는 CST를 위한 전

체 시간, A_j 는 로봇 물고기의 꼬리 링크의 최대 피치 값이다.

식 (2)는 $t = t_0$ 일 때, 두함수의 연속성과 코사인 함수의 최대 값과 꼬리 관절의 최대 피치 값이 같기 위하여 아래 조건 식 (3)를 만족하여야 한다.

$$\begin{cases} A_j = a_j t_0^3 \\ \omega = \frac{\pi}{2(t_1 - t_0)} \\ \theta = -\frac{\pi t_0}{2(t_1 - t_0)} \end{cases} \quad (3)$$

그림 5는 $t_0 = 0.06$ (sec), $t_1 = 0.16$ (sec), $A = [0.20, 0.48, 0.65, 0.78]$ 일 때의 CST 모션 함수의 꼬리 궤적을 나타내었다. A 행렬의 값은 모의 실험에 사용될 로봇 물고기의 제원에 맞추어 Lighthill[7]에 의해 정의된 직선 유영 실험에서 가장 좋은 성능을 갖는 최대 피치 값으로 설정하였다.

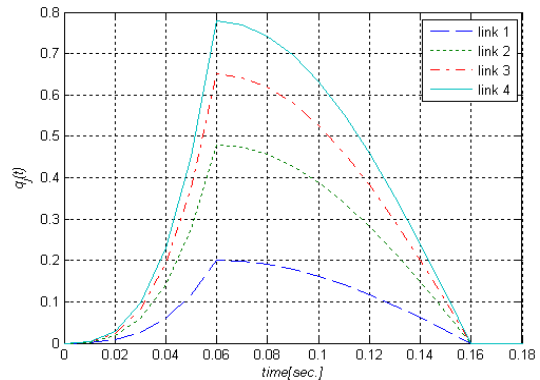


그림 5. CST 모션 꼬리 궤적
Fig. 5 CST motion tail trajectories

IV. 모의실험 및 결과 분석

모의실험은 유체 속에서 관절 몸체의 설계 및 모의 실험과 분석이 가능하도록 Matlab 프로그래밍으로 쉽게 적용할 수 있는 Biohydrodynamics Toolbox[11~12]를 사용하였다. 2장에서 설명과 같이 Biohydrodynamics

Toolbox는 유체 속에서 다 관절 몸체에 대한 추력 및 모션 등을 연구할 수 있는 소프트웨어로써, 기본적인 고체 역학과 유체 역학을 기초로 유체-구조 상호 작용 시스템에 대한 해석도 가능하다. 유체 모델은 비점성과 압축성이 없는 완벽한 유체모델을 사용하였으며, 이러한 포텐셜 함수는 노이만 경계 값 문제를 사용하여 유체 내의 역학을 해결하였다[11~12].

로봇 물고기의 몸체 설계는 carangiform 형태로 앞선 그림 1과 같이 설계하였다. 로봇 물고기의 제원은 표 1과 같으며, 로봇 물고기 머리 부분의 무게 중심을 원점으로 놓았으며, 각 꼬리 관절은 독립적인 좌표를 가지고 있다.

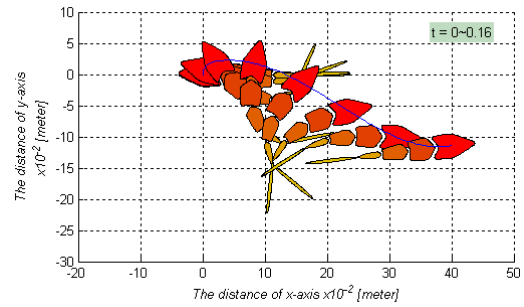
표 1. 로봇 물고기 제원
Table. 1 The characteristics of fish robot

항목		크 기
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

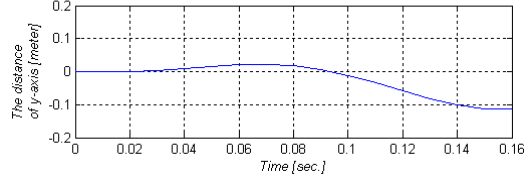
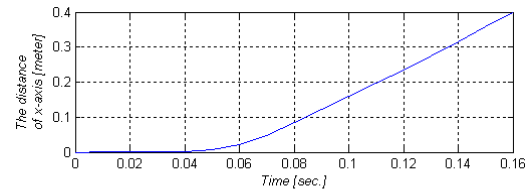
CST의 실험은 식 (2)~(3)에 의하여 구해진 그림 (5)의 꼬리 관절 궤적을 사용하여 설정하였다. 그림 6은 그림 1과 표 1에 의하여 모델링된 로봇 물고기를 그림 5와 같은 CST 모션 꼬리 궤적을 적용할 경우, 유체 내에서의 로봇 물고기의 방향과 머리 부분의 궤적을 0초부터 0.16초까지 20(msec) 간격으로 표시하였다.

초기에 $-x$ 축 방향으로 (0, 0)에 있는 로봇 물고기가 CST의 꼬리 관절 궤적을 적용함에 따라, 0.16초 후 유체 속의 로봇 물고기의 머리는 좌표 값 (0.39, -0.11)으로 $+x$ 축의 방향으로 180° 회전함을 알 수 있다. 그림 6-(b)는 0초에서 0.16초까지 로봇 물고기 머리 부분의 무게 중심의 x, y 좌표를 표시하였다.

본 모의실험을 통하여 CST을 위한 로봇 물고기 꼬리 관절 궤적을 매우 단순한 함수로 제안하고, 제안된 함수가 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 6. CST 모의실험
(a) 방향 전환 궤적 (b) 로봇 물고기의 방향 전환
Fig. 6 CST simulation
(a) The change direction of fish robot
(b) The trajectories of change direction

V. 결론

CST는 물고기가 수영 시 빠른 방향 전환을 위해 물고기 꼬리 부분을 빠르게 C-형태로 구부러 빠르게 방향 전환을 하는 모션을 나타낸다. 그러나 CST와 관련된 모션 궤적 함수는 아직 일반화된 함수가 없다.

본 연구에서는 생물학자들이 실제 물고기의 관측으로부터 나온 순차적인 물고기의 모션 기록을 통하여

CST를 위한 매우 단순한 모션 궤적 함수를 제안하였다. 그리고 이를 유체 내에서 모의실험을 통하여 제안된 함수의 유용성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

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] Webb P W. Form and function in fish swimming. *Scientific American*, Vol. 25, pp. 58-68. 1984.
- [4] N. Nato, "Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 25, 121 - 129, 2000.
- [5] 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
- [6] Lighthill M J, "Note on the swimming of slender fish." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 305-317, 1960.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] Spierts I L Y, Leeuwen J L V, "Kinematics and muscle dynamics of C- and S-starts of carp (*Cyprinus carpio* L.)," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 393-406, 1999.
- [10] Biohydrodynamics MATLAB Toolbox, A. Munnier and B. Pinçon, <http://bht.gforge.inria.fr/>
- [11] Mathworks, matlabcentral File Exchange page [2009-04-04], <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21872>

저자소개



박진현(Jin-Hyun Park)

한국정보통신학회 논문지
제15권 제8호 참조



이태환(Tae-Hwan Lee)

한국정보통신학회 논문지
제15권 제8호 참조



최영규(Young-Kiu Choi)

한국정보통신학회 논문지
제15권 제8호 참조