

가상 수족관 물고기의 추진과 회전 유영 생성 방법

Propelling and Turning Motions of Fish for Virtual Aquarium

한윤석, 윤재홍, 김은석
동신대학교

Han yoon-seok, Yoon jae-hong, Kim eun-seok
DongShin Univ.

요약

물고기와 수중환경의 상호작용과 물고기의 사실적인 움직임 표현은 가상 수족관을 구축할 때 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 가상 수족관의 물고기 움직임은 3D 저작도구를 이용하여 일정한 형태의 움직임을 단순히 반복하는 유영을 보여 왔다. 본 논문에서는 물고기의 유영을 생물학적으로 분류하여 추진과 회전 특성을 분석하고, 각각의 특징에 따른 가상 물고기의 기본유영과 회전유영 생성 방법을 제안한다. 제안 방법은 사용자의 제어에 따라 다양하고 자연스러운 물고기 움직임을 생성함으로써 수중환경을 효과적으로 표현할 수 있고, 상호작용 인터페이스와 함께 사용하여 체험형 가상 수족관의 몰입감을 높일 수 있을 것이다.

■ 중심어 : | 가상 수족관 | 물고기 움직임 | 상호작용 |

Abstract

The interaction between artificial fish and aquatic surroundings and the fish's realistic locomotion are very important elements to construct virtual aquariums. In general, the artificial fish in virtual aquariums used to be created by 3D modeling tools, and was repeatedly showing the simple and constant form of swimming. This paper will analyze the sorts of biological forms of fish-swimming and the propelling and turning characteristics. Then, we propose a method of the basic swimming and turning of artificial fish to generate various and natural-looking locomotion. It is possible to make a explorable virtual aquarium more immersive by using interactive interfaces together.

■ keyword : | Virtual Aquarium | Fish Locomotion | Interaction |

I. 서론

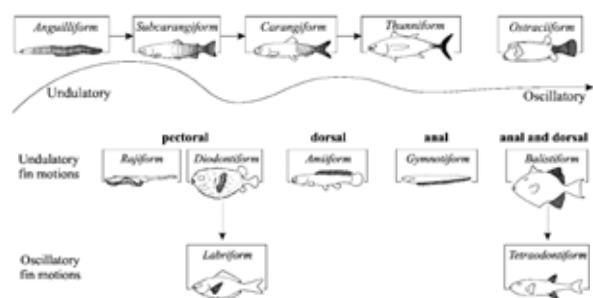
컴퓨터 그래픽 기술의 발달로 여러 가지 콘텐츠에서 특수효과들이 사용되고 있다. 특히 유체 표현은 그 특유의 복잡성 때문에 자연스러운 표현이 어렵지만, 다양한 연구로 꾸준히 발전하고 있다. 지금까지의 물고기를 이용한 애니메이션이나 게임 등의 분야를 보면 물속을 표현할 때 시각적으로 가장 활발한 움직임을 보이는 물고기 객체는 가장 역동적이고 콘텐츠의 중심이 되는 요소이다. 그러나 일반적으로 가상 물고기는 3D 저작도구를 이용하여 모델링되고, 정해진 움직임을 단순히 반복하는 형태로 만들어지기 때문에, 다른 응용으로 변형시켜 적용하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 물고기의 유영을 생물학적으로 분류하고, 추진 형태와 회전의 특성을 분석함으로써 가상 물고기의 기본유영과 회전유영 생성 방법을 제안한다. 가상 수족관을 구축할 때 환경의 변화에 따른 물고기의 자연스러운 움직임은 시각적으로 사용자에게 큰 효과를 줄 수 있다. 제안된 방법은 가상현실을 구현하는 상호작용 인터페이스와 함께

본 연구는 문화관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 지역문화산업연구센터(CRC) 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

사용할 수 있도록 개발함으로써, 체험형 가상 수족관으로 구축하여 몰입감을 증대 시킬 수 있다.

II. 관련연구

1978년 C.C Lindsey[2]는 물고기의 추진발생 위치 구분을 BCF(Body and /or Caudal fin)와 MPF(Median and/or Paried) 두 가지 추진 형태로 구분하고, 이를 파동(undulatory)과 진동(oscillatory)의 형태로 세분류하였다.



▶▶ 그림 1. BCF, MPF 구분 및 각각의 추진력 발생 위치

그림 1은 BCF추진 형태와 MPF추진 형태에서 추진력 발생 위치와 파동과 진동의 구분을 도식화하여 표현한 것이다.

1999년 Sfakiotahis[3]는 기계 공학의 Robotic 물고기를 연구하였고, 생물학적 자료를 기초로 움직임을 제어하였다. BCF와 MPF로 분류된 물고기 각각 특성에 따른 추진을 분석하고, 파동과 진동의 움직임 방법을 제안하였다.

2003년 Stephens[2]는 물고기의 기본유형을 그림 2와 같이 등뼈 애니메이션으로 표현하였다. 물고기는 유영을 할 때 파동을 생성하는 곡선운동을 하므로 유형은 Sine이나 Cosine 형태로 표현될 수 있다. 유영시간, 뼈 접합부분의 사이각, 최대진폭, 파동 등을 고려하여 물고기의 움직임을 생성하였다. 등뼈(Skeleton)를 구성하는 n개의 뼈 조각들의 움직임은 애니메이션이 된다. 물고기 메쉬 위에 텍스처 매핑 과정을 거쳐 물고기 모델에 등뼈를 부착하여 움직임을 생성했다. 그리고 물고기의 시야에 따라 수중 환경과 상호작용하여 감지하는 능력과, 생물학적인 특성인 감각, 생각, 행동의 능력을 갖는 인공지능 가상 물고기를 연구하였다.



▶▶ 그림 2. Stephens의 물고기 뼈대 애니메이션

III. 물고기의 유영 형태 분류

물고기는 몸체의 외부 형태, 서식하는 장소, 먹이를 얻는 방법 등에 따라 다양하게 분류가 가능하다. 본 논문에서는 물고기의 추진력이 발생하는 위치를 기준으로 유영형태를 분류한다. 추진의 형태에는 파동과 진동 두 가지의 형태로 나눌 수 있다.

1. 물고기 추진력 발생 위치

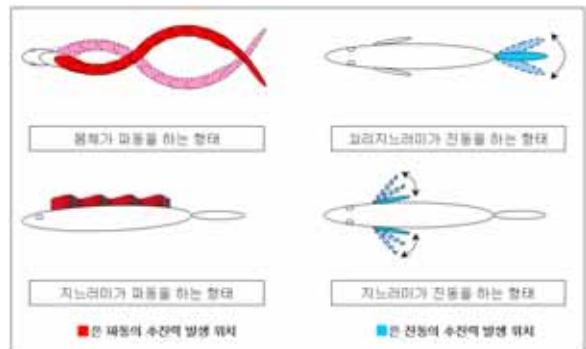
물고기는 추진에 따라 BCF, MPF 두 가지로 구분되며 이것은 다시 하위 단계로 세분류된다[2]. BCF는 물고기 전체의 약 75%를 차지하고, 몸통의 일정한 위치에서부터 꼬리지느러미까지 파동이나 진동의 형태로 추진력이 발생한다[13]. BCF는 anguilliform인 장어형, subcarangiform인 송어형, carangiform인 전갱이형, thunniform인 다랑어형, ostraciiform인 거북복형의 5가지의 유영 형태로 분류할 수 있다. 장어형은 머리 부분, 송어형은 몸체의 1/3 지점, 전갱이형은 몸체의 2/3 지점, 다랑어형은 꼬리지느러미의 근육부터 추진을 생성하고, 꼬리지느러미까지의 파동으로 추진력을 발생시킨다. 거북복형은 꼬리지느러미의 진동으로 추진력이 발생한다[3,4]. MPF는 BCF추진을 제외한 다른 유영 형태의 물

고기이고, 꼬리지느러미가 아닌 다른 지느러미에서 파동이나 진동의 형태로 추진력이 발생한다[13]. MPF에는 rajiform인 가오리형, diodontiform인 가시복어형, amiiform인 갈치형[5], gymnotiform인 블랙고스트형[6,7], balistiform인 쥐치형, labriform인 놀래기형[8], tetraodontiform인 개복치형의 7가지 유영 형태로 분류할 수 있다. 가오리형, 가시복형, 놀래기형은 가슴지느러미에서, 갈치형은 등지느러미에서, 블랙고스트형은 배지느러미에서, 개복치형은 등과 항문지느러미에서 동시에 추진력을 생성한다[4].

2. 물고기 추진의 파동과 진동

BCF는 몸체의 움직임이 파동(undulatory motion)이나 진동(oscillatory motion)하는 형태를 보인다[3, 13]. 장어형, 송어형, 전갱이형, 다랑어형은 추진이 시작되는 위치부터 꼬리지느러미까지 파동 곡선을 유지하면서 유영한다. 대부분의 물고기가 몸체의 파동 형태로 움직임을 생성한다. 거북복형은 꼬리지느러미가 좌/우로 진동을 하며 추진력을 생성하고, BCF에서 유일하게 진동하는 형태다.

MPF는 꼬리지느러미가 아닌 다른 지느러미가 파동(undulatory fin motion)이나 진동(oscillatory fin motion)하는 형태를 보인다[3, 13]. 가오리형, 가시복형, 갈치형, 블랙고스트형, 쥐치형은 가슴, 등, 배, 항문지느러미가 파동 형태로 유영하는 물고기다. 놀래기형, 개복치형은 가슴, 등, 배, 항문지느러미가 진동 형태로 유영하는 물고기다. 그리고 MPF 물고기는 BCF 물고기와 달리 독특한 외형을 갖는다.



▶▶ 그림 3. 파동과 진동의 추진형태

그림 3은 BCF와 MPF물고기의 파동과 진동의 유영 형태를 도식화한 것이다.

3. BCF 추진의 특징

본 논문에서 물고기의 대부분을 차지하는 BCF[3,4,13]에 중점을 두고 가상 물고기의 움직임을 생성한다.

장어형은 머리 부분부터 파동이 시작되기 때문에 몸 전체에

서 파동을 그리며 유연하고, 몸체가 가늘고 길어서 좌우 진폭은 크다. 송어형은 몸체의 전반부 1/3에서 파동이 시작되어 꼬리지느러미까지 전개되며, 후반부 1/3지점에서 활발한 움직임으로 유영을 한다. 전갱이형은 몸체 끝의 1/3에서 파동이 시작되어 꼬리지느러미까지 진행되며, 물을 밀고 나아가는 힘은 장어형과 송어형보다 크지만 회전 능력은 떨어진다. 다랑어형의 외형은 잘빠진 유선형이고, 몸체 끝부분인 꼬리지느러미의 근육에서부터 추진이 시작된다. 넓고 단단한 꼬리지느러미에서는 추진력의 90%이상 생성하며 다른 형태의 물고기보다 더 큰 추진력을 발생한다.

III. 물고기의 움직임 생성 방법

가상 물고기의 움직임을 표현하기 위해서 물고기 몸체에 등뼈(skeleton)를 생성한다. 물고기 유영의 특징에 따라 기준점(pivot)을 설정하고, 가상 물고기 등뼈에 식(1)의 파동 방정식 [1]을 이용하여 기본 유영과 회전 유영을 생성한다.

$$f(x,t) = A(x)\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \times (x - \omega t)\right) \quad (1)$$

$$A(x) = \frac{x}{\lambda} \times \max Amp$$

$f(x,t)$ 는 시간 t 에서 등뼈의 위치 x 에 따름 진폭을 나타낸다. 식(1)을 이용하여 파동을 생성할 때 사용된 기호들의 의미는 다음과 같다.

- nS : 뼈(Segment)의 개수
- s : 물고기의 속도
- λ : 파장
- ω : 주파수
- $\max Amp$: 최대진폭
- $pivot$: 기준점 (추진력 발생 지점)
- L : 물고기의 길이

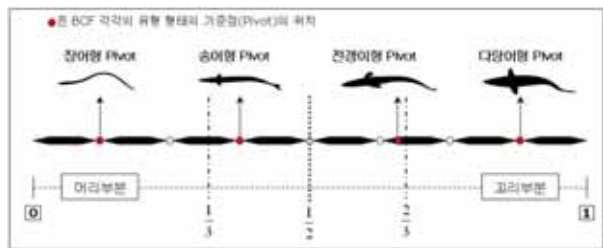
BCF 추진을 하는 물고기 유영을 생성할 때 진폭은 물고기의 기준점과 길이에 따라 달라진다. 물고기의 파동은 기준점 이후부터 생성되므로 각각의 유영마다 최대 진폭은 기준점 이후의 길이와 비례해야 한다. 따라서 최대 진폭은 식(2)와 같이 생성할 수 있다.

$$\max Amp = L \times \frac{1 - pivot}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

빠른 회전을 제외하고는 90도 이상의 각도로 파동을 생성하기 어렵기 때문에 최대 진폭은 45도를 넘지 않도록 설정하였다.

1. 가상 물고기의 기준점 설정

파동으로 움직임을 생성하는 4가지의 BCF 유영의 특징에 따라 등뼈에 설정되는 기준점의 위치는 물고기의 길이와 비례하여 주어진다. 기준점 생성 위치는 장어형은 머리 부분, 송어형은 몸체 전반부 1/3과 1/2 사이, 전갱이형은 몸체 후반부 1/3 지점, 다랑어형은 몸체와 꼬리지느러미의 연결된 근육이 된다. 본 논문에서는 0~1사이 상대적인 값으로 기준점을 설정하고 [1], 장어형은 0.15, 송어형은 0.35, 전갱이형은 0.65, 다랑어형은 0.8로 지정하였다. 그림 4는 유영 특징에 따른 등뼈의 기준점 위치를 보여준다.



▶▶ 그림 4. BCF 유영의 기준점 위치

2. 가상 물고기의 기본 유영

가상 물고기 기본 유영은 기준점부터 꼬리지느러미까지의 파동으로 움직임을 생성한다. 기준점 이전의 움직임은 기준점 이후 움직임의 반작용으로 나타나며, 진폭의 크기는 서로 차이가 있기 때문에 기준점 이전과 이후의 움직임을 구분하였다.

2.1 기준점 이후의 파동

기준점부터 꼬리지느러미까지의 파동은 물고기의 추진력을 생성하는 중요한 움직임이다. 장어형처럼 기준점이 머리에 가까울수록 몸체의 파장은 길고 크지만, 속력은 느리다. 반대로 기준점이 꼬리에 가까울수록 파장은 짧고 작지만, 속력은 빠르다. 속도와 기준점 위치에 따른 파동방정식 생성을 위해 식(1)을 수정한 기준점 이후의 파동 방정식은 식(3)과 같고, 주파수 ω' 은 속도 s 와 기준점 위치에 비례한다.

$$f_{after}(x,t) = A(x)\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \times (x - \omega' \times t)\right) \quad (3)$$

$$\omega' = s \times pivot \times \omega, \quad x \in [pivot, L]$$

물고기 움직임은 뼈 전체가 아닌 등뼈의 접합부(관절)의 위치를 계산함으로써 생성된다. [1]에서는 움직임 시작되기 전 n 개의 뼈(Segment) 위치를 $f(x,0) = 0$ 으로 설정 하였다. 물고기가 움직임을 시작하여 완벽한 유영으로 파동을 생성할 때 x 의 변화 없이 진폭만의 변화로 파동을 생성하는 형태였다.

따라서 가상 물고기 파동 생성은 진폭의 변화에 따라 관절간의 거리가 변하여 등뼈 전체가 늘어나는 현상을 보였다. 물고기의 몸체(등뼈) 길이를 유지하는 관절 위치를 계산하기 위해 식(4)와 같이 간단한 수치 적분을 이용하였다.

$$L_k(t) = \sum_{i=1}^k \sqrt{(f(x_i, t) - f(x_{i-1}, t))^2 + (\Delta x)^2} \quad (4)$$

- x_i : 0~L 사이 값, $x_i \in [0, L]$
- Δx : x_i 와 x_{i+1} 의 간격

시간 t에서 물고기의 머리($x_0 = 0$)부터 x_k 까지의 길이는 $L_k(t)$ 가 된다. 따라서 움직임이 시작되기 전 k번째 관절의 위치를 $Init_Joint_k$ 라 하면, 우리는 시간 t에 따른 관절의 위치를 $L_{i-1} < Init_Joint_k < L_i$ 인 x_i 를 찾아 x_{i-1} 과 x_i 의 중간값으로 근사 시킬 수 있다. Δx 값은 물고기의 등뼈길이 L을 일정한 간격으로 나눔으로써 얻을 수 있는데, 여러 가지로 실험 결과 자연스러운 움직임을 위해서는 샘플링수를 5배 이상으로 설정하면 되지만, 품질을 향상시키기 위해서는 10배 정도가 적당하였다. nS가 고정되면 샘플링 수는 일정이상 증가시켜도 큰 차이를 보이지 않았다.

2.2 기준점 이전의 파동

기준점부터 머리까지 파동은 물고기가 수영하는데 큰 역할을 하지는 않지만 기준점 이후의 움직임에 따라 자연스러운 움직임을 생성해야 한다. 장어형처럼 기준점이 머리에 가깝고 몸체가 길어 진폭이 큰 경우 기준점 이전의 움직임이 클 것이고, 다랑어형처럼 기준점이 꼬리에 가까울수록 움직임은 거의 일어나지 않을 것이다. 기준점 이전의 파동은 기준점 이후의 파동과 자연스럽게 연결하기 위해서 최대 진폭을 조절하는 대신 파장의 길이를 길게 하여 움직임의 크기를 조절하였다.

$$f_{prev}(x, t) = A(x) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda'} \times (x - \omega' \times t)\right) \quad (4)$$

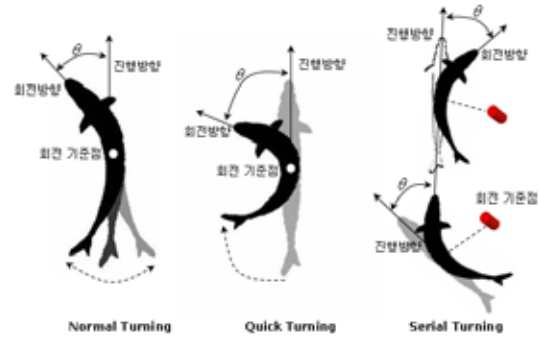
$$\lambda' = (152.3 \times pivot - 21.8)\lambda, \quad x \in [0, pivot]$$

식(4)는 기준점 이전의 파동 생성을 위한 방정식으로서 파장 λ' 는 기준점 이후의 움직임이 비교적 큰 장어형은 $\lambda' = \lambda$ 가 되게 설정하고, 움직임이 가장 작은 다랑어형은 $\lambda' = 100\lambda$ 가 되도록 하여 중간 형태들이 기준점 위치에 따라 변할 수 있도록 만든 것이다.

3. 가상 물고기의 회전 유형

물고기 회전은 생물학적으로 일반 회전(Normal Turning

Motion), 빠른 회전(Quick Turning Motion), 연속 회전(Serial Turning Motion)의 3가지 형태로 분류한다[12]. 가상 물고기의 회전 유형은 회전방향(Turning Direction), 회전각(Turning Angle), 회전축(Turning Axis of Rotation), 유영속도(Speed) 등을 고려하여 움직임을 생성한다.



▶▶ 그림 5. 물고기 회전의 형태에 따른 몸체의 변화

그림 5는 가상 물고기의 일반 회전, 빠른 회전, 연속 회전에 대한 몸체 변화와 중요한 요소들을 도식화한 것이다.

물고기 회전 유형은 회전 기준점을 중심으로 회전각도 θ 만큼 회전함으로써 생성된다. 회전축은 기본 유영을 생성하는 평면(xz축)에 수직인 벡터(y축)가 된다. 회전 기준점은 일반 회전과 빠른 회전의 경우 물고기의 등뼈에 설정되고, 연속 회전의 경우는 물고기의 회전방향 쪽으로 떨어진 지점에 생성되는데, 물고기와 회전 기준점과의 거리는 유영속도에 비례한다.

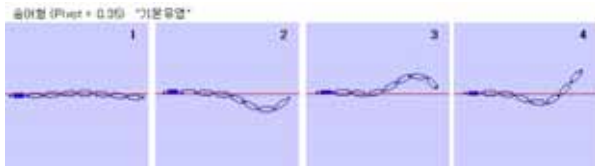
일반 회전은 유영을 하던 물고기가 회전 방향을 선택하면 머리가 회전각만큼 이동을 하고 꼬리지느러미의 지속적인 파동을 유지하면서 회전하는 형태이다. 물고기의 회전에서 기본이 되는 회전 유형이다.

빠른 회전은 기본 유영을 하던 물고기가 순간 정지된 상태에서 회전 방향으로 빠르게 회전하는 형태이다. 회전 방향을 결정하면 머리와 꼬리지느러미가 회전각만큼 이동을 하여 회전 기준점을 중심으로 몸통이 활처럼 휘어진다.

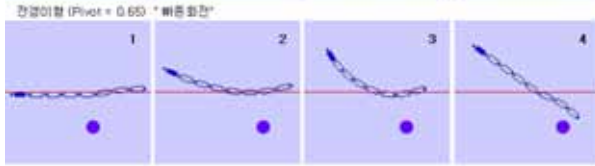
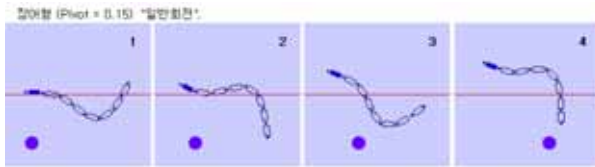
연속 회전은 빠른 회전과 유사한 형태로 회전 운동을 한다. 하지만 방향 전환을 여러 차례 반복하면서 회전 전체를 생성한다.

IV. 실험결과

제안된 방법은 C++와 OpenGL 라이브러리를 이용하여 팬티엄4 PC에서 시뮬레이션 하였다. 그림 6은 송어형이 기본 유영을 할 때 시간흐름에 따른 정지 영상을 보여준다. 그림 7은 장어형의 일반회전, 전갱이형의 빠른회전, 송어형의 연속회전에 대한 각각의 등뼈 정지 영상을 보여준다. 애니메이션에서 어두운색의 등뼈 노드는 머리 부분을 나타낸다.



▶▶ 그림 6. 장어형의 기본유형 애니메이션



▶▶ 그림 7. 회전유형 애니메이션

V. 결론 및 향후방향

본 논문에서는 기본 파동 함수를 이용하여 물고기의 다양한 기본 유영과 회전 유영을 표현하는 방법을 제안하였다. 기준점을 설정하여 물고기의 기분이 되는 움직임을 표현 하였고, 파동과 주파수의 변경으로 물고기 움직임을 실제 물고기의 유영과 근사하도록 표현함으로써 자연스러운 움직임이 생성되었다. 본 논문의 제안 방법으로 가상 수족관의 물고기의 다양한 움직임을 표현하고, 가상 수족관과 상호작용 하는 인터페이스를 함께 사용함으로써 체험형 가상 수족관을 구축한다면 시각적인 몰입감을 높일 수 있을 것이다.

향후 지느러미에서 추진력을 얻는 MPF형태의 물고기의 다양한 움직임을 생성 방법을 연구하고, 가상 물고기에 인공지능을 추가함으로써, 가상 수족관에서 다양하게 반응할 수 있는 가상 물고기를 구현하고자 한다.

■ 참고 문헌 ■

[1] 한운석, 김은석, "가상수족관 구축을 위한 자연스런 물고기 움직임 생성 방법" 한국 콘텐츠 학회 춘계 종합학술대회 논문집, Vol.5 No.1, pp157, 2007.
 [2] C.C Lindsey, "form, function and locomotory habits in fish" in Fish Physiology Vol.VII Locomotion, edited by W.S. Hoar and D.J. Randall. New York: Academic Press, 1978, pp.1-100.

[3] Michael Sfakiotahis, David M. Lane, and J. Bruce C. Davies "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion" IEEE, April 1999.
 [4] Kingsley Stephens, Bin Pham and Aster Wardhani "Modelling Fish Behaviour" ACM, 2003.
 [5] http://rps.uvi.edu/VIMAS/oarfish_facts.htm.
 [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Black_ghost_knifefish.
 [7] http://www.aquax.com/gnuboard4/bbs/board.php?bo_table=tip&wr_id=5798&page=5.
 [8] <http://www.amonline.net.au/fishes/fishfacts/fish/gvarius.htm>.
 [9] Adam Martin Twibell "Using Programmable Hardware to Render and Animation Fish" May 2005.
 [10] X. Tu and D. Terzopoulos, "Artificial Fish: Physics, Locomotion, Perception, Behavior" ACM SIGGRAPH 94, July 1994.
 [11] K. H. LOW and A. WILLY "Biomimetic Motion Planning of an Undulating Robotic Fish Fin" Journal of Vibration and Control 2006; 12; pp1337-1395.
 [12] Koichi Hirata, Tadanori Takimoto and Kenkichi Tamura, "Study on turning performance of a fish robot.", Proceedings of the 1st International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms, pp287-292, 2000.
 [13] William F. Gates "Animation of Fish Swimming, University of British Columbia", Vancouver, BC, Canada, 2002.