

물고기형 수중로봇의 유영메커니즘 및 알고리즘 개발(1)

Development of Swimming Mechanism and Algorithm for Fish-Type Underwater Robot(1)

류 영 선[†]

Young-sun Ryuh[†]

Abstract Generally, underwater vehicle type of propeller shows low efficiency about 50%-55%. However, the efficiency of swimming mechanism of a fish is 60%-70%, more efficient about 20% than screw propellers. Recently, research of underwater vehicle type of fish increase due to its good efficiency and is regarded as a typical bio-mimical robot. In this research, a new algorithm and mechanism that show low energy consumption imitating swimming mechanism of fish proposed increasing speed and running time in field trial.

Keywords: underwater vehicle, fish type robot, swimming mechanism, bio-mimical robot, running time

1. 서 론

수중환경에 사용되는 로봇기술은 21세기 인간생활의 변화에 가장 능동적으로 대응이 가능하고 그 변화를 뛰어넘을 수 있는 매우 중요한 도구의 하나로 인식되고 있다. 특히, 수중환경에서의 로봇개발은 고유가로 인한 자원개발수요가 급증하여 매우 활발하게 추진되고 있으나 해저자원개발 및 탐사를 위한 특수목적의 로봇개발에 중점을 두고 있고 추진방식도 기존 프로펠러 추진방식으로 심해에서의 내압설계 및 방수기능의 강화에 초점을 두고 있는 상황이다. 그러나 최근 수중로봇의 급격한 관심과 연구에 따라 전통적인 로봇구동방식의 한계를 극복하기 위한 자연생물체의 움직임을 모방한 연구^[3,4]가 활발해지고, 특히 물고기의 움직임을 모방한 로봇물고기에 대한 연구가 관심을 집중하고 있다. 기존 프로펠러방식의 추진메커니즘이 가지는 한계를 극복하고 효율적인 이동이 가능한 물고기의 유영메커니즘은 지느러미의 효과적인 제어를 통해 인간이 만든 그 어떤 것보다도 성능면이나 효율면에서 뛰어나다. 실제 수중 이동체의 프로펠러형 추진메커니즘은 유체의 저항으로 인해 제한을 받아 효율이 50%-55%로 비교적 낮으나 물고기의 유영 메커니즘은 60%-70%정도로 일반적으로 사용하고 있는 프로펠러 식 추진방식보

다 20% 이상 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 최근 물고기의 유영방식을 모방하여 많은 수중이동체가 연구^[1]되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 물고기의 유영메커니즘을 이용하여 에너지효율을 높이고 장시간 물속에서 유영이 가능한 저에너지소비형 유영메커니즘과 유영알고리즘을 제시한다. 특히, 물고기의 유영방식을 모방한 유영 알고리즘을 구현을 위한 유영메커니즘을 구성함에 있어서 구동부 자유도를 최소화시켜 회전반경이 적으면서도 방향전환에 매우 빠르고 유연한 2자유도의 중속 메커니즘을 제시하고 시뮬레이션을 통한 동작을 검증한 후, 하드웨어 구현을 통한 실증을 해 보기로 한다

2. 로봇의 구성

먼저, 이 장에서는 로봇물고기 추진력의 기본인 몸통과 꼬리지느러미의 유영방식을 구현하기 위한 2자유

1) 1995년 미국 매사추세츠공대(MIT)는 세계 최초로 로봇 물고기 '찰리(Charlie)'를 개발, '로봇 참치 II'와 창꼬치를 모방한 '로보파이크(roboPike)'도 개발, 1999년 일본 미쓰비시 실러캔스를 재현, 2001년 미국 MIT 트레이퍼연구소는 '드레이퍼 참치', 캘리포니아 공대의 로봇 물고기 '캘리봇(Calibot)', 2005년 북경 우주항공대학 로봇연구소와 중국 과학원 자동화연구소에서 "SPC-II 모형 물고기 로봇 제작" 연구, 2005년 영국 에섹스대가 세계 최초의 지능형 물고기 로봇 피시봇(fish-bot) 개발

도 종속메커니즘의 설계와 이를 이용한 시뮬레이션, 또한 본 메커니즘과 유연알고리즘의 기구학적 구현, 그리고 각각의 Joint constraint에서 가능한 회전반경을 구하여 다자유도 유연메커니즘^[2]과의 비교를 해본다.

2.1 유연메커니즘의 구성

먼저, 여기서는 물고기의 유영을 위한 꼬리부의 설계방안을 제시한다. 물고기가 꼬리를 흔들 때 2개 이상의 링크가 위상 차이를 가지면서 양력과 항력, 그리고 관성력이 발생하여 물고기의 몸체를 전진시키는 추력이 발생하게 되며 이 추력에 의해 물고기가 전진하게 된다.^[1,2] 그리고 방향전환을 위해서 옆지느러미를 이용하거나 꼬리의 방향을 틀고 흔들어 몸체의 방향을 바꾸며 전진한다. 그림 1은 물고기의 몸체를 위상차를 가진 4-bar Linkage가 2단으로 연결된 구조로 물고기가 꼬리를 한쪽으로 구부리며 작게 흔들며 방향을 전진할 때 P_A 와 P_B 를 중심으로 몸체의 회전이 가능하여 로봇의 몸체, B_a , B_b , B_c 가 위상차를 가지고 유연하게 움직이며 추력을 발생시킬 수 있도록 구성하였다. 특히 P_B 를 중심으로 몸체 B_c 를 ϕ 만큼 회전시켜 꼬리부분의 몸체 B_c 가 θ 만큼 종속적인 요동운동이 가능하도록 하여 더욱 유연한 유영운동이 일어날 수 있도록 하고 몸체의 회전반경을 최소화 시켜 실제 물고기와 같이 유연한 동작이 가능하게 하였다.

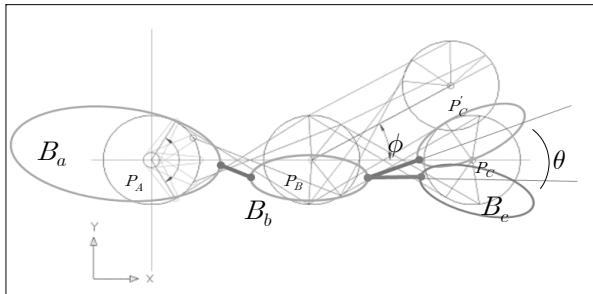


그림 1. 2단 4-bar linkage with variable joint.

2.2 유영운동의 분석

물고기의 유영운동시 꼬리의 움직임을 살펴보면 그림 2와 같이 위상차가 있는 연속적인 운동으로 꼬리에는 그림 2와 같이 힘이 발생하고 이 힘에 의한 유체저항의 반력으로 추력이 발생하여 물고기가 전진하게 된다.

이 힘은 관성력과 항력, 그리고 양력으로 구분할 수 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) $F_p = \Sigma F_{p_i}$
- 2) $F_{p_i} = F_l + F_d + F_i$

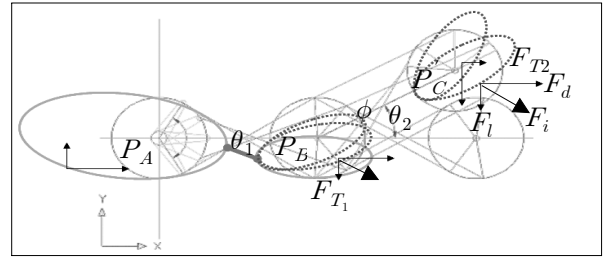


그림 2. 유영시 물고기의 몸체에 작용하는 힘 분석.

여기서, F_p =추진력, F_{p_i} = 1번째 관절의 Flapping으로 얻는 추력, F_l =양력, F_d =항력, F_i =관성력, C_l =양력계수, C_d =항력계수로서 각 힘에 대한 식은 아래와 같다.

$$3) F_l = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A, \quad F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A,$$

$$F_i = -\pi \rho L C^2 (v \sin \alpha + \dot{\alpha} v \cos \alpha)$$

(ρ : 밀도 v :유체상대속도 C :꼬리의 길이, α : A : 꼬리지느러미의 면적)

이렇게 생성된 추진력은 물고기의 몸체를 전진시키고 옆지느러미의 운동에 의해 방향제어를 하며 움직이게 되는데. 몸통과 꼬리부분의 연속적인 움직임은 위상차를 가지고 이루어지며 물고기의 몸체 길이에 따라 다양한 주기의 위상운동을 하고 있다. 일반적인 물고기는 1주기의 유연한 움직임을 통해 전진하는 것이 보통이지만 갈치나 곱치와 같이 긴 물고기는 2~3주기를 갖는 것이 보통이다. 여기서는 1주기의 Sinusoidal Motion을 통해 유영을 하는 일반적인 물고기를 대상으로 하며, 이를 위해 필요한 최소 3개의 관절을 이용한 제어가 필요하다. 그러나 본 연구에서는 이를 최소화하고 1개의 구동모터로서 연속적인 유영운동을 하도록 하고 2번째 모터로서 방향제어를 할 수 있도록하는 구조의 유연메커니즘을 구성하였다. 특히 본 연구에서 제시하는 2단으로 구성된 Flapping Mechanism은 좀더 유연한 유영운동이 되도록 구성하였고 이를 통해 회전반경을 최소화시켜 더욱 기민한 움직임이 가능하게 한 것이다.

그림 3과 4는 2단 Flapping Mechanism을 구성한 것으로서 그림 1에서의 B_a , B_b , B_c 3 부분으로 나뉘어진 몸통과 링크 구조를 가진 로봇의 기구부분으로 그림 6에서와 같이 제어기와 모터를 설치하여 로봇을 완성시켰다.

2.3 로봇물고기의 전원

로봇물고기의 가장 중요한 부분 중의 하나는 전원공급 장치이다. 수중에서 배터리를 갈아 끼우거나 충전하

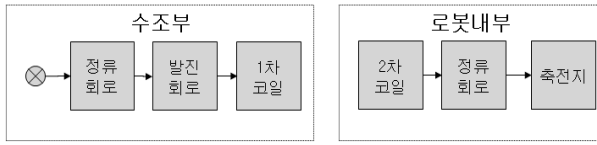


그림 8. 로봇물고기의 무선 동력 공급방식.

는 것이 쉽지 않고 방수 문제를 쉽게 해결하기 곤란한 상황이나 반드시 해결해야 할 부분이다.

본 연구에서는 무선 전원공급 장치를 통해 충전하는 방식을 택하였고 그림 8과 같이 수조에 1차 코일의 전원공급 장치를 두고 로봇내부에 2차 코일을 설치하여 로봇에 무선으로 전원을 공급할 수 있도록 구성하였다. 로봇물고기는 전원감지를 통해 외부에 설치되어 있는 Main 제어기에 잔여 충전량을 전달하고 충전이 필요한 경우 충전스테이지로 이동하여 무접점으로 충전이 가능하도록 구성할 예정이다. 현재는 수조부에 직접 충전 장치를 부착하지 못하였고 우선 별도의 충전판을 이용하여 무선충전이 가능하도록 하였다.

3. 동작분석 및 시뮬레이션

3.1 kinematic Analysis

그림 3과 4는 2단 Flapper Mechanism의 기본 구성이며, 시뮬레이션을 위한 기구분석 결과는 다음과 같다.

$$3) s = [r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\theta_2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{r_1^2 + s^2 - r_2^2}{2r_1s}$$

$$\psi = \cos^{-1} \frac{r_3^2 + s^2 - r_4^2}{2r_3s}$$

$$\lambda = \cos^{-1} \frac{r_4^2 + s^2 - r_3^2}{2r_4s}$$

여기서, $0 \leq \theta_2 \leq \pi$ 일 경우 $\theta_4 = \pi - \lambda - \beta$

$\pi \leq \theta_2 \leq 2\pi$ 일 경우 $\theta_4 = \pi - \lambda + \beta$

따라서,

$$4) \theta_5 = \theta_{ref} - \theta_4,$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \frac{r_5 \sin \theta_5}{r_6}$$

여기서 θ_{ref} 는 기구학적으로 고정된 초기위치값으로 본 실험에서는 103° 가 된다. 또한 2단 Flapper에 의한 허리관절의 변화로 발생하는 reference축의 변화는 다음과 같이 나타낸다.

$$5) r_1' = [(r_1 - b) + b \cos \gamma]^2 + (b \sin \gamma)^2)^{0.5}$$

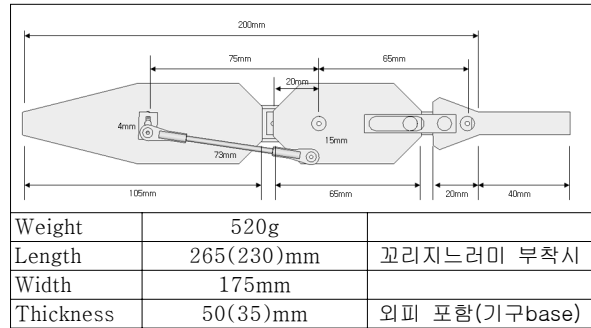


그림 3. 로봇 몸체의 기본 구성.

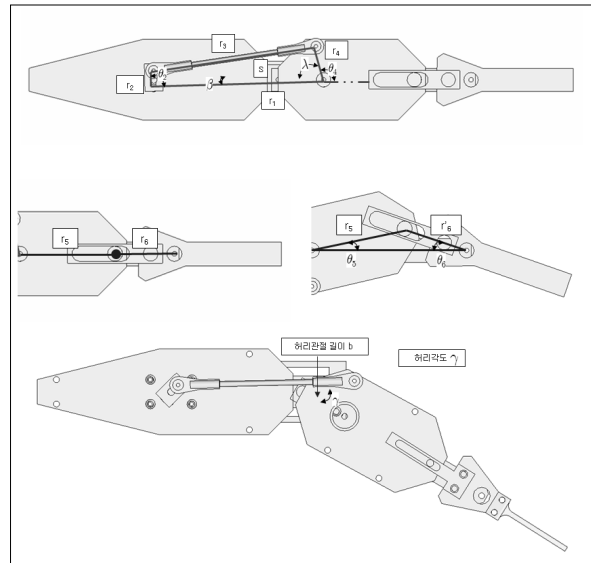


그림 4. 2단 Flapper 메커니즘의 구조.

이로 인해 발생하는 θ_4 의 원점 변화는,

$$6) \theta_4' = \theta_4 - \gamma + \cos^{-1} \left(\frac{r_1 - b + b \cos \gamma}{r_1} \right)$$

의 굽힘에 따라 Reference축이 변하고 꼬리 지느러미의 Flapping 각이 입력각 γ 의 종속식으로 나타내 진다.

3.2 Kinetic Analysis

수중에서의 로봇물고기의 동작분석을 위해 필요한 정보는 관성력, 중량 및 중력에 의한 영향력, 코리올리 효과, 유체저항 및 damping등인데 조[1] 등은 이의 상태방정식을 다음과 같이 정리 하였다.

$$7) c = I_R A + \Phi_C V + \Phi_D V + g(\eta)$$

$$(c = [F_P, M_P], V = \{u, v, \omega, p, q, r\}^T$$

여기서, F_p 는 꼬리지느러미에 의해 발생하는 추진력 F_τ 이며 M_p 는 $M_\tau = r \times F_\tau$ 로 추진력에 의해 생기는 모멘트로 7)식은 다시 로봇의 Local Coordinate를 Trans-

표 1. 로봇물고기 유영시물레이션 기초자료

Weight		520g
Length	Full	265mm
	Front	105
	Mid	65(60+5)
	End	45(40+5)
Tail fin		50
Width		175mm
Thickness		50mm

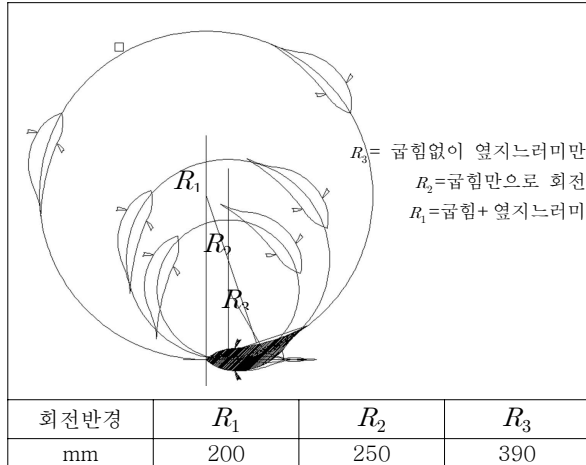


그림 5. 시물레이션에 의한 구조별 회전반경의 개선효과.

formation Matrix를 이용하여 Global Coordinate에서의 상태방정식으로 변환하였다.

$$8) \dot{\theta} = JV$$

$$V = J^{-1}\dot{\theta} \quad (J = \text{Jacobian Matrix})$$

이를 기본으로 Global Coordinate로 변환 후 동작 Simulation을 수행하여 회전반경을 도식화 한 것이 그림 5에 나타나있다.

3.3 로봇의 H/W구성

로봇물고기는 수중의 3차원공간 내에서 x, y, z 축 상으로 각각 Yawing, Pitching과 Rolling 및 Translation 이 이루어지게 되므로 이를 제어하기 위한 최소한의 Actuator로 구성하였다. 특히, 그림 4에서 보는 바와 같이 꼬리부분의 Flapping운동을 제어하기 위해 구성된 2단 구조의 4-bar 링크 메커니즘과 종속된 2번째관절의 각도조절로 몸체의 구부림을 통해 꼬리부분의 Flapping 및 방향제어가 가능한 구조로 설계하였으며 이를 위해 Flapping 및 굽힘제어용으로 각각 1개씩의 Actuator를 선정하였다. 옆지느러미의 제어를 통한 미세 운동 및 방향제어를 위해 2 개의 모터를 사용하였다. 그림 6은 실제 구성된 메커니즘의 사진이다.

그림 7은 물고기의 유영을 위한 2단 Flapping 메커

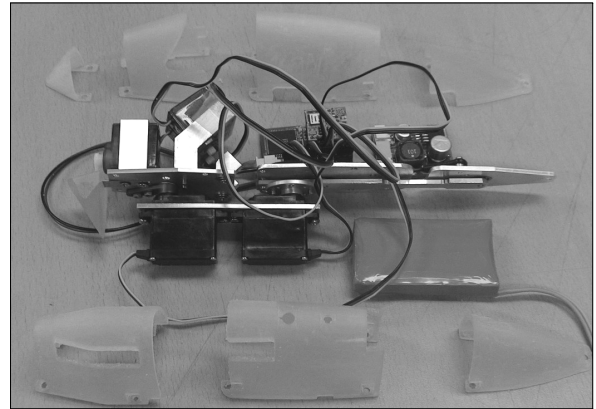


그림 6. 실제 로봇물고기 내부 조립 구조.

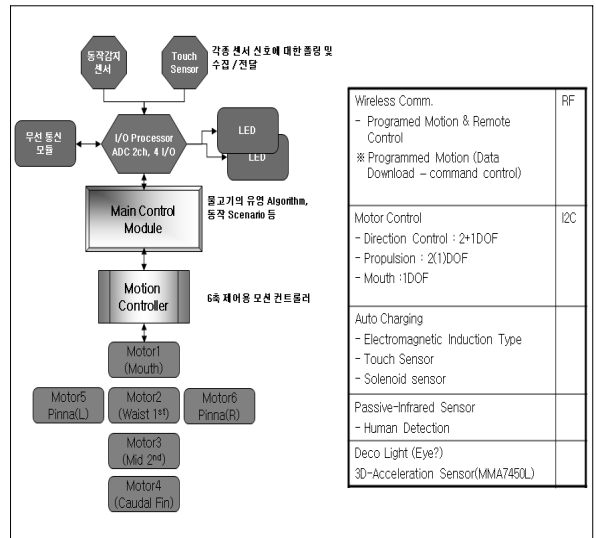


그림 7. 로봇물고기 하드웨어 구성.

니즘의 제어를 위한 블록다이어그램으로 이를 기반으로 로봇물고기를 설계하고 해당 로봇의 제작실험 및 수중환경에서의 검증실험을 통해 유영을 위한 최적화 알고리즘을 도출하여 실제 물고기와 유사한 운동성능을 갖도록 제어 알고리즘을 구성하였다.

3.4 실험

본 연구에서 식 3을 적용한 결과 실제 움직임과 달리 로봇의 동작이 제한적이며 계획한 성능을 충분히 발휘하지 못하였으나 방향제어를 위한 2단 Flapping Mechanism은 매우 효과적임을 확인하였다. 금번 실험을 통한 실제 로봇의 구동실험에서는 옆지느러미의 구동은 하지않고 몸통과 꼬리부의 2단 Flapping Mechanism만을 이용하여 전진과 방향전환 실험을 하였다.

여기서 로봇이 2단 Flapper Mechanism을 이용하여

유형을 할 경우 좁은 수조(폭 60cm)에서도 원활하게 회전이 가능함을 보여주었고, 회전반경이 더 작아짐을 확인할 수 있었다.(그림 8, 그림 9) 그러나 외피 부착에 따른 부하가 커지고 링크의 제작상 오차로 인해 발생하는 유격으로 원하는 성능(몸체길이의 1.5배 이하 : 약40cm)의 회전반경을 얻을 수는 없었다.

로봇물고기의 기능상 문제점으로, 유영시 모터감속기 소음이 예상외로 컸고 이의 개선이 요구되었다.

또한 무접점 충전방식의 효율이 떨어져 이의 개선이 필요함을 확인하였고 실용화를 위해서는 1차코일의 인가 전류를 높이고 충전효율을 제고하기 위해 충전장치의 개선을 하고 다음 실험에서 그 결과를 확인할 예정이다.

여기서, 배터리의 구동실험결과 2cell형 리튬폴리머 전지를 사용할 경우 동일 규격의 모터의 연속구동실험과 비교하였을 경우 유영운동은 수조내에서 4시간 이상 가능하여 2.5배 이상의 구동수명을 보였다. 그러나 무접점 충전실험은 동 전지의 충전시간이 24시간 가량 되는 등 매우 길어 실용화에 문제가 있음을 발견하였다.



그림 8. 로봇물고기의 2단 Flapper를 이용한 회전(1).



그림 9. 로봇물고기의 2단 Flapper를 이용한 회전(2).

4. 결 론

본 연구에서 2단 Flapping Mechanism을 적용한 로봇 물고기를 제작하였다. 로봇의 움직임을 제어하기 위해 필요한 명령은 블루투스 통신을 이용하여 수조내에서의 다양한 동작제어가 가능하도록 전달하고 전방에 설치된 IR센서를 통한 장애물회피, 무선충전이 가능하도록 구성되어 있으며, 옆지느러미와 입의 동작이 가능하도록 하여 다양한 움직임과 미션을 수행할 수 있도록 구성하였다.

최초 시뮬레이션 결과에서 기대했던 바와 같이 최소의 회전반경을 얻지는 못했으나 허리 굽힘을 통한 2단 Flapper Mechanism은 유용함을 확인하였다. 다만 외피로 인한 저항으로 인해 유영운동이 장애를 받아 회전반경이 원하는 수준에 도달하지 못하였다.

또한 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서는 옆지느러미를 부착하지 않은 상태에서 진행하여 2단 Flapper 메커니즘에 의한 회전반경 개선효과만을 실험하였기 때문에 옆지느러미로 인한 회전반경의 최소화를 위한 실험은 차후 실시하기로 한다.

전체적으로 2단 Flapper 메커니즘은 실제 물고기의 운동과 유사한 형태의 운동성을 보여주었고 소형 로봇 물고기의 제작에 유리한 것으로 보여주었다. 실제 본 연구에서 제작한 로봇물고기는 현재까지 연구된 로봇 물고기중 가장 작은 크기로 향후 보안을 통해 다양한 용도로 활용 가능하도록 할 예정이다.

참고문헌

- [1] 조강진, 박해원, 김석우, 양현석, 박영필, 박노철, 물고기의 추진을 모방한 로봇의 개발, 연세대학교 기계공학부, IMPL.
- [2] 김은정, “물고기 로봇-PoTuna의 설계 및 해석”, 포항공과대 대학원 석사학위논문, 2003.02.
- [3] N. Kato, S. Kamimura, “Bio-mechanisms of Swimming and Flying”, Springer 2008.
- [4] Norifumi OHGISHI, Kyosuke ONO and Motomu NAKASHIMA, 2003, “A study on the Propulsive Mechanism of a Double jointed Fish Robot Utilizing Self-Excitation Control”, Proceedings of The 6th Intl' Conf. on MOVIC2002, Vol. 46, No.3, pp 982-990.
- [5] TAKESUE NAOYUKI, WANG WEIMING, FUJIMOTO HIDEO, 2006, “Development of Fish Robot for River Survey and Experiments of Its Swimming Performance”, JROS Vol 2006, pp1P1-E28.

- [6] Motomu Nakashima, Yoshitaka Takahashi, Takahiro Tsubaki, 2004, "Three-Dimensional Maneuverability of the Dolphin Robot (Roll Control and Loop-the-Loop Motion)," Bio-mechanisms of Swimming and Flying, pp79-92, Springer.



류 영 선

1997 서울대학교 대학원 바이오
시스템공학(공학박사)

2000 주)삼주기계 연구소장/이사

2003 로보랜드(주) 대표이사

~ 현재 한국생산기술연구원 수석연구원/센터장, 과학
기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과 교수
관심분야: 로봇자동화, 개인서비스, 해양극한작업용
로봇