

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1029

3 자유도 물고기 로봇의 동적해석 및 운동파라미터 최적화에 관한 연구

김형석* · Vo Tuong Quan* · 이병룡† · 유호영**

(2009년 3월 4일 접수, 2009년 9월 15일 수정, 2009년 9월 16일 심사완료)

A Study on Optimization of Motion Parameters and Dynamic Analysis for 3-D.O.F Fish Robot

HyoungSeok Kim, TuongQuan Vo and ByungRyong Lee

Key Words : Fish Robot(물고기로봇), Dynamics(운동방정식), SVD(특이치분해), GA(유전자알고리즘), HCA(언덕오르기법), Maximum Velocity(최대속도)

Abstract

Recently, the technologies of mobile robots have been growing rapidly in the fields such as cleaning robot, explosive ordnance disposal robot, patrol robot, etc. However, the researches about the autonomous underwater robots have not been done so much, and they still remain at the low level of technology. This paper describes a model of 3-joint (4 links) fish robot type. Then we calculate the dynamic motion equation of this fish robot and use Singular Value Decomposition (SVD) method to reduce the divergence of fish robot's motion when it operates in the underwater environment. And also, we analysis response characteristic of fish robot according to the parameters of input torque function and compare characteristic of fish robot with 3 joint and fish robot with 2 joint. Next, fish robot's maximum velocity is optimized by using the combination of Hill Climbing Algorithm (HCA) and Genetic Algorithm (GA). HCA is used to generate the good initial population for GA and then use GA is used to find the optimal parameters set that give maximum propulsion power in order to make fish robot swim at the fastest velocity.

1. 서론

일반적인 수중용 추진체나 추진력에 관한 연구는 프로펠러에 의한 추진으로 한정되어 있다. 더욱이 추진력을 향상 시키기 위해서 엔진이나 외부의 형태를 변화시켜 그 성능을 향상 시키고 있다. 하지만, 보다 효율적인 수중 로봇을 개발하기 위해서는 수중 동물의 운동 메커니즘을 우선적으로 연구, 분석하여야 한다.⁽¹⁾ 왜냐하면 수중동물은 여러 세대를 걸쳐 수중 환경에 최적화된 운동 메커니즘을 가지고 있기 때문이다.⁽²⁾ Yu 는 시뮬레이션

을 통해 2 관절 물고기의 최적화 비율을 계산하였으며 최적화 링크 비율을 가진 모델과 최적화가 고려되지 않은 링크 비율을 가진 모델의 속도를 비교하여 그 차이를 확인하였다.⁽³⁾ Kim 은 Lagrange's equation 을 이용하여 3 관절을 가진 물고기 로봇의 운동방정식을 유도하였으며 SVD 알고리즘을 이용하여 유체의 힘에 의한 물고기 로봇의 발산을 최소화하였다.^(4,5) Seo 는 carangiform 물고기 로봇의 평면상 2 차원 모델을 세워 NLPP(Non Linear Path Planning - Tool Box for Matlab) 를 이용하여 제어 파라미터를 최적화 하였다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 3 관절의 물고기 로봇 모델을 세워 꼬리와 꼬리 지느러미를 이용해서 추진력을 얻는 carangiform 운동 모델을 적용하였다. 그리고 Lagrange's equation 을 이용하여 운동방정식을 유도하였고 Lighthill's carangiform propulsion 을 이용한 유체의 힘에 대한 모델을 유도하여 운동방정식에

† 책임저자, 회원, 울산대학교 기계자동차공학부
E-mail : brlee@mail.ulsan.ac.kr
TEL : (052)259-2861 FAX : (052)259-1680

* 울산대학교 기계자동차공학과

** 울산과학기술대학 디지털기계학부

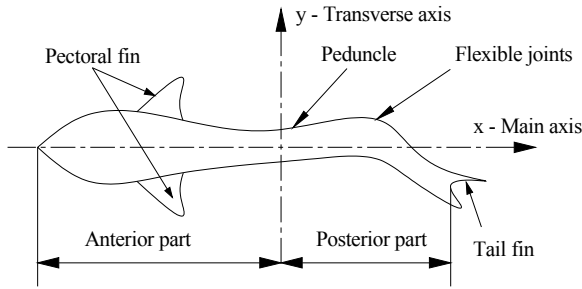


Fig. 1 Carangiform locomotion style

포함 시켜 물고기 로봇에 대한 수학적 모델을 세웠다.⁽⁷⁾ 또한, 입력 토크의 파라미터 변화에 따른 3 관절 물고기 로봇과 2 관절 물고기 로봇의 각 관절의 응답특성과 평균속도의 변화를 분석하였다. 마지막으로 분석된 특성을 기반으로 물고기 로봇의 입력 토크 함수를 위한 최적화 알고리즘을 개발하였다.

2. 물고기 로봇의 운동방정식

본 논문에서 제안된 물고기 로봇은 빠른 속도로 움직이기 위해 참치와 같은 carangiform 운동 모델을 적용하였다. Carangiform의 운동 메카니즘을 가진 물고기는 큰 단면 비의 꼬리를 가지고 있으며 좌우로 꼬리를 움직이면서 수영하기 때문에 꼬리 부의 근육이 발달되어져 있다. 하지만 Fig. 1 과 같이 물고기의 꼬리 부가 좌우로 움직일 때 몸통을 포함한 머리 부는 진행 방향으로 고정되어져 있다.

기존의 2 관절 물고기 로봇에 비해 부드러운 수영과 더 큰 추진력을 얻기 위해 3 관절을 가진 물고기 로봇을 모델로 정하였다. 물고기 로봇의 전체 길이는 4 개의 링크를 포함한 약 1200mm 이며 물고기 로봇의 머리와 몸통으로 이루어진 링크 0 은 고정된 부분으로 가정하였으며 링크 1, 2, 3 은 Fig. 2 에서 보는 바와 같다. 링크 0 은 링크 1 과 관절 1 로 연결되어져 있다. 링크 1 과 링크 2 는 관절 2 로 연결되어 있으며 관절 1 과 2 는 DC 서보 모터와 모터의 회전력을 물고기 꼬리와 같은 좌우의 운동으로 바꾸기 위한 기어박스로 구성되어져 있다. 기어 박스는 모터를 고정하기 위한 고정 부와 2 개의 straight bevel 기어, 샤프트로 이루어져 있으며 각 관절마다 그 크기는 다르다. 마지막으로 링크 3 은 꼬리 지느러미이며 링크 2 와 2 개의 인장 스프링으로 연결되어 있어 실제 물고기와 같이 부드러운 모션을 나타낼 수 있다. 링크 1, 2 의

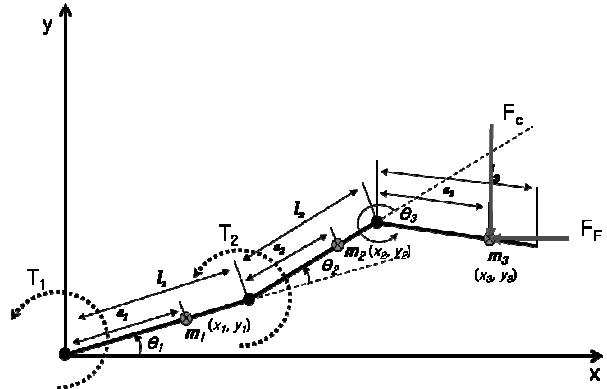


Fig. 2 Analytical model of fish robot

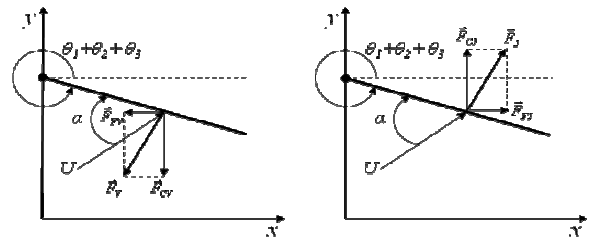


Fig. 3 Inertial fluid force and lift force

강성은 사각 단면의 알루미늄의 탄성을 고려하여 계산하였으며 링크 3 의 강성은 2 개의 인장스프링의 값을 이용하여 계산하였다.

물고기 로봇은 x 축 방향으로만 움직이며 Fig. 2 와 같이 추진력을 얻기 위한 꼬리 및 꼬리 지느러미의 운동은 2 차원의 평면상에서만 움직이는 것으로 가정하였다. T_1 과 T_2 는 DC 서보모터에 의해 발생되며 추진력은 링크 3 인 물고기 로봇의 꼬리 지느러미에서만 발생한다고 가정한다면 추진성분인 F_f 과 추진을 방해하는 측면방향의 힘인 F_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각 관절의 입력 토크에 대한 응답이다.

링크 3 에서 일정한 유속 U_m 이 발생한다면 링크 3 에서 발생되는 F_f 와 F_c 를 Fig. 3 과 같이 유도할 수 있다.⁽⁸⁾ 여기서, U 는 꼬리 지느러미에서 발생하는 상대 속도이며 α 는 attack angle 이다.

F_v 는 꼬리 지느러미의 운동에 의해서 발생하는 관성이며 크기는 (1)와 같이 꼬리 지느러미의 각 가속도의 크기에 비례하며 방향은 역방향이다. 여기서, C 는 꼬리 지느러미의 현의 길이이며 L 은 폭은 나타낸다. 그 값은 각각 0.06m, 0.02 m 이며 물의 밀도 ρ 는 998 kg/m³ 이다.

$$F_V = \pi\rho LC^2(\dot{U} \sin \alpha + \dot{\alpha} U \cos \alpha) \quad (1)$$

꼬리 지느러미의 회전 운동 시 U 에 의해 발생하는 양력은 U 의 수직으로 작용하며 실제 꼬리 지느러미에 발생하는 힘 F_J 는 (2)와 같다.

$$F_J = 2\pi\rho LC U^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

따라서, F_F 와 F_C 는 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} -F_F &= -F_{FV} - F_{FJ} \\ &= F_V \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + F_J \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -F_C &= -F_{CV} + F_{CJ} \\ &= F_V \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + F_J \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (4) \end{aligned}$$

물고기 로봇의 진행 방향을 x 축 방향으로 제한한다면 꼬리 지느러미의 중심점에서의 y 축 방향 상대속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \\ &+ a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \quad (5) \end{aligned}$$

x 축 방향의 유속인 U_m 과 u 는 서로 직교하기 때문에 U 는 다음과 같이 표현할 수 있다. U_m 은 0.08 m/s 이다.

$$U^2 = U_m^2 + u^2 \quad (6)$$

Lagrange's equation 을 이용하여 유도된 물고기 로봇의 운동방정식은 다음과 같다. 여기서, C 와 K 는 각 링크 및 관절의 스프링과 댐퍼의 상수 행렬이다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = N(\theta, \dot{\theta}) \quad (7)$$

M 과 N 은 Appendix 에 나타나져 있다.

3. SVD 를 이용한 발산 제한 알고리즘

물고기 로봇의 운동 방정식은 유체에 의해 많은 비선형 성분을 가지고 있다. 따라서 파라미터의 작은 변화에도 쉽게 발산되어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 특이치 분해알고리즘을 제안한다. 특이치 분해 알고리즘에 따라 (7)의 행렬 M

은 직교정규 행렬 U , V 그리고 pseudo diagonal 행렬 D 로 분해가 되며 (8)과 같다.

$$M = UDV^T, M, U, V, D \in R_{3 \times 3} \quad (8)$$

행렬 U 와 V 는 직교정규이기 때문에 역행렬은 $U^{-1} = U^T$, $V^{-1} = V^T$ 로 표현할 수 있다. 따라서 행렬 M 의 역행렬은 (9)와 같다.

$$M^{-1} = (V^T)^{-1} D^{-1} U^{-1} = V \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1}, \dots, \frac{1}{\sigma_p}\right) U^T \quad (9)$$

행렬 M 이 특이 치를 가진다면 행렬 D^{-1} 는 발산한다. 따라서, 매우 작은 특이 치의 역을 '0'로 수렴시킨다면 물고기 로봇의 발산을 막을 수 있다. 예를 들어, 행렬 D 의 i 번째 성분이 매우 작은 특이 치일 때 σ_i 을 무한대로 보내면 $1/\sigma_i$ 은 '0'로 수렴한다.

4. 입력 토크 함수의 파라미터에 따른 운동 특성 및 속도 변화

시뮬레이션을 위해 사용된 프로그램은 Matlab 이며 알고리즘은 Runge-Kutta 법을 사용하였다. 물고기 로봇의 관절 1, 2 에 입력되는 토크 함수는 다음과 같으며 입력된 토크에 의해서 링크 1, 2 가 각각 구동되어 추진력을 발생 시킨다.

$$T_1 = A_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad (10)$$

$$T_2 = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \beta) \quad (11)$$

여기서, A_1 , A_2 는 각 관절에 입력되는 토크의 크기를 나타내며 f_1 , f_2 는 주파수이고 β 는 관절 1 과 2 의 위상차를 나타낸다. 3 관절 물고기 로봇에 대한 파라미터 값은 Table 1 과 같으며 2 관절 물고기 로봇의 파라미터 값은 Table 2 와 같다. Table 1 에서 각각의 파라미터 값들은 실제 제작을 위한 설계의 치수와 알루미늄을 재료로 이용하여 계산된 값들이며 k_3 는 물속에서의 부드러운 모션을 보여주는 인장 스프링을 실험을 통해 찾아 내었다. 2 관절 물고기 로봇의 링크 1 은 3 관절 물고기 로봇의 링크 1 과 링크 2 가 결합된 형태이며 이를 설계의 치수에 적용하여 표 2 의 각각의 파라미터 값을 계산하였다.

Table 1 parameters of fish robot with 3 joints

	link 1	link 2	link 3
mass	$m_1=1.4\text{ kg}$	$m_2=0.45\text{ kg}$	$m_3=0.2\text{ kg}$
moment of inertia	$I_1=0.016\text{ kgm}^2$	$I_2=7.26\times 10^{-3}\text{ kgm}^2$	$I_3=1.307\times 10^{-3}\text{ kgm}^2$
length of link	$l_1=0.185\text{ m}$	$l_2=0.22\text{ m}$	$l_3=0.126\text{ m}$
center of gravity	$a_1=0.093\text{ m}$	$a_2=0.11\text{ m}$	$a_3=0.063\text{ m}$
spring	$k_1=5.13\text{ N/m}$	$k_2=4.95\text{ N/m}$	$k_3=1.05\times 10^2\text{ N/m}$
damper	$c_1=1\times 10^3\text{ Ns/m}$	$c_2=1\times 10^3\text{ Ns/m}$	$c_3=0\text{ Ns/m}$

Table 2 parameters of fish robot with 2 joints

	link 1	link 2
mass	$m_1=1.85\text{ kg}$	$m_2=0.2\text{ kg}$
Moment of inertia	$I_1=0.1\text{ kgm}^2$	$I_2=1.307\times 10^{-3}\text{ kgm}^2$
Length of link	$l_1=0.405\text{ m}$	$l_2=0.126\text{ m}$
center of gravity	$a_1=0.202\text{ m}$	$a_2=0.063\text{ m}$
spring	$k_1=2.52\text{ N/m}$	$k_2=1.05\times 10^2\text{ N/m}$
damper	$c_1=2\times 10^3\text{ Ns/m}$	$c_2=0\text{ Ns/m}$

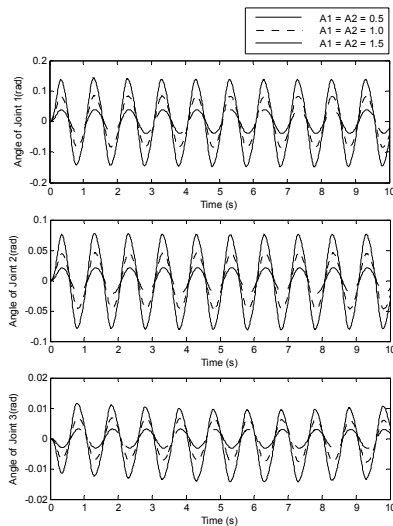


Fig. 4 Response of fish robot with 3 joints according to amplitude of input torque

Figure 4 는 진폭 A_1 과 A_2 의 변화에 따른 T_1 과 T_2 입력토크 함수에 대한 3 관절 물고기 로봇의 응답을 보여 주고 있으며 이 때 f_1 과 f_2 는 1.0Hz 이며 위상 차 β 는 30° 이다.

Figure 5 는 A_1 의 변화에 따른 T_1 입력 토크 함수에 대한 2 관절 물고기 로봇의 응답을 보여주고

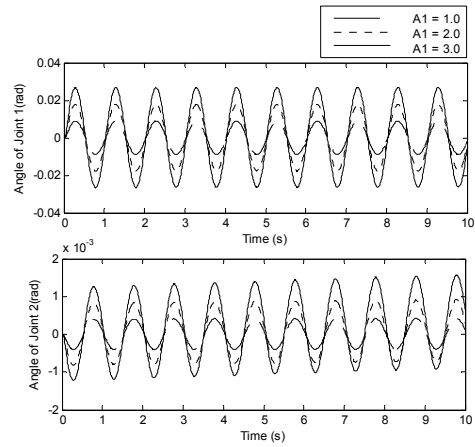


Fig. 5 Response of fish robot with 2joints according to amplitude of input torque

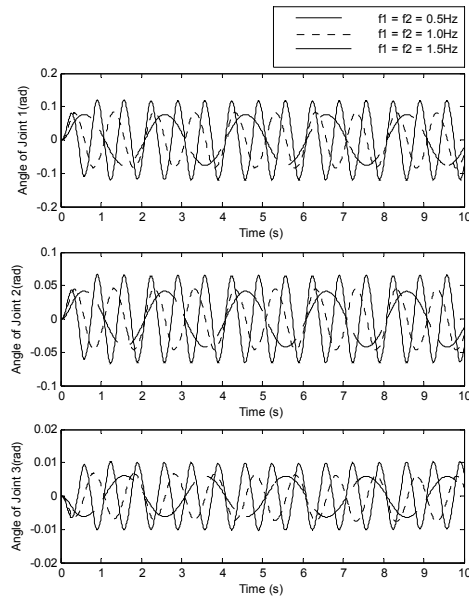


Fig. 6 Response of fish robot with 3 joints according to frequency of input torque

있으며 A_1 은 Fig. 4 의 A_1 과 A_2 의 합과 크기가 같 으며 f_1 은 1.0Hz 이다. 그리고 T_2 는 0 Nm 이다. Figure 4 와 Fig. 5 에서 같은 주파수의 토크 입력에 대해 제안된 3 관절 물고기 로봇의 진폭이 큰 것 을 볼 수 있다. 이는 보다 큰 힘을 발생하여 빠른 속도를 낼 수 있음을 의미한다.

Figure 6 은 주파수 f_1 과 f_2 의 변화에 따른 T_1 과 T_2 입력토크 함수에 대한 3 관절 물고기 로봇의 응답을 보여 주고 있으며 이 때 A_1 과 A_2 는 1.0 이 며 위상 차 β 는 0° 이다.

Figure 7 은 f_1 의 변화에 따른 T_1 입력 토크 함수에 대한 2 관절 물고기 로봇의 응답을 보여주고

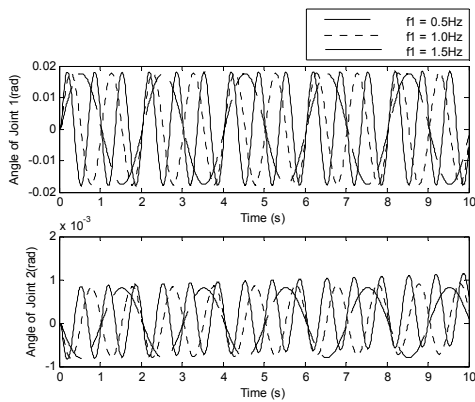


Fig. 7 Response of fish robot with 2 joints according to frequency of input torque

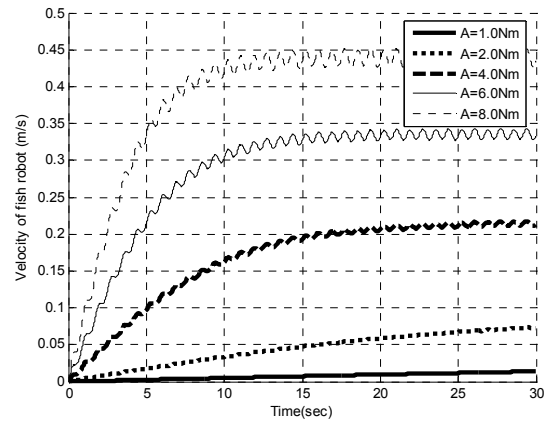


Fig. 9 Velocity of fish robot with 2 joints according to amplitude of input torque function

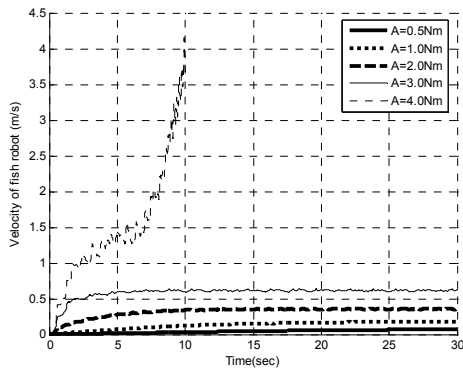


Fig. 8 Velocity of fish robot with 3 joints according to amplitude of input torque function

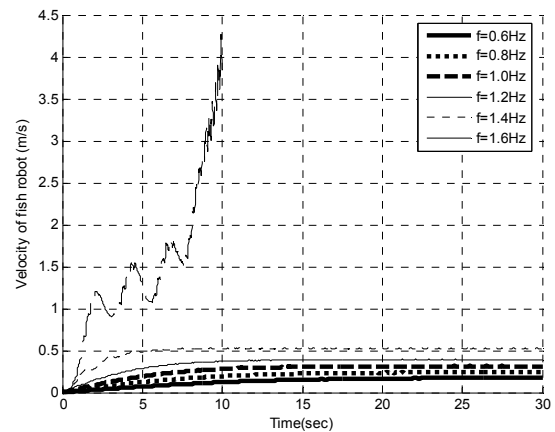


Fig. 10 Velocity of fish robot with 3 joints according to frequency of input torque function

있으며 입력 토크 함수의 A_1 은 2.0 이다. Figure 6 와 Fig. 7 에서도 보는 바와 같이 제안된 3 관절 물고기 로봇의 진폭이 큰 것을 볼 수 있으며 2 관절 물고기 로봇에 비해 빠른 속도를 낼 수 있다.

물고기 로봇의 이동 속도는 (12)와 같으며 M_{body} 는 수중에서의 물고기 로봇의 전체 질량이고 x_G 는 물고기 로봇의 전체의 질량 중심의 위치이며 F_F 와 F_D 는 추진력과 항력을 나타낸다.

$$M_{body} \ddot{x}_G = F_F - F_D \quad (12)$$

Figure 8 은 입력 토크 함수의 진폭 변화에 따른 3 관절 물고기 로봇의 이동 속도를 보여 주고 있다. 이 때 주파수는 1.0Hz 이고 위상차는 30° 이다. 3 관절 물고기 로봇은 최대속도가 진폭이 3.0Nm 일 때 약 0.63m/s, 평균속도는 약 0.58m/s 이며 4.0Nm 일 때 발산하는 것을 알 수 있다.

Figure 9 는 입력 토크 함수의 진폭 변화에 따른

2 관절 물고기 로봇의 이동 속도를 보여 주고 있으며 주파수는 1.0Hz 이다. 2 관절 물고기 로봇은 진폭이 8.0Nm 일 때 최대속도가 0.45m/s, 평균속도가 0.39m/s 이다. Figure 8 과 Fig. 9 에서 보는 바와 같이 3 관절 물고기 로봇이 2 관절 물고기 로봇에 비해 최대속도, 평균속도가 각각 0.18 m/s, 0.19 m/s 더 빠른 것을 알 수 있다.

Figure 10 은 입력 토크 함수의 주파수 변화에 따른 3 관절 물고기 로봇의 이동 속도를 보여 주고 있다. 이 때 진폭은 1.0Nm 이고 위상차는 30° 이다. 3 관절 물고기 로봇은 최대속도는 주파수가 1.4Hz 일 때 약 0.53m/s, 평균속도는 약 0.49m/s 이며 1.6Hz 일 때부터 발산하는 것을 볼 수 있다.

Figure 11 은 입력 토크 함수의 주파수 변화에 따른 2 관절 물고기 로봇의 이동 속도를 보여 주고 있다. 이 때 진폭은 2.0Nm 이며 주파수가

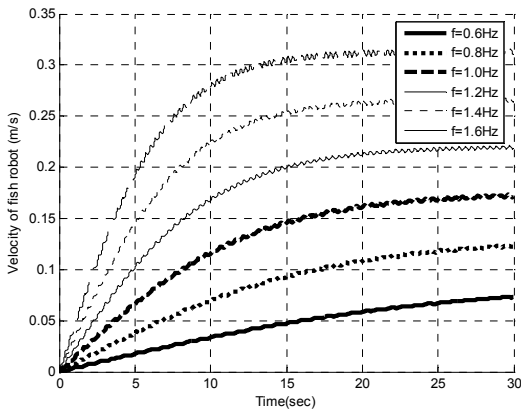


Fig. 11 Velocity of fish robot with 2 joints according to frequency of input torque function

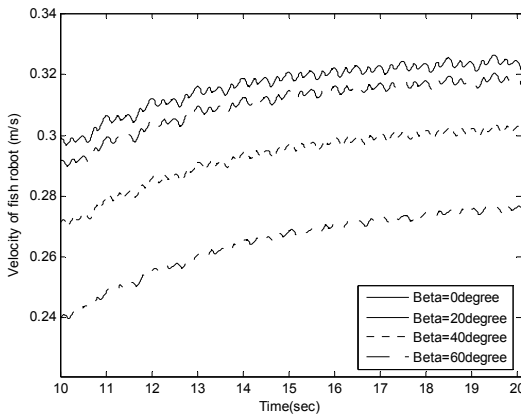


Fig. 12 Velocity of fish robot according to phase angle of input torque function

1.6Hz 일 때 최대속도가 0.32m/s, 평균속도가 0.26m/s 이다. Figure 10 과 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 3 관절 물고기 로봇이 2 관절 물고기 로봇에 비해 최대속도, 평균속도가 각각 0.21 m/s, 0.23 m/s 더 빠른 것을 알 수 있다. 따라서, 물고기 로봇의 빠른 속도를 위해서는 3 관절 물고기 로봇이 보다 효율적이라는 것을 알 수 있다.

Figure 12 는 입력 토크 함수의 위상차에 따른 3 관절 물고기 로봇의 속도변화를 보여 주고 있으며 입력 토크 함수의 다른 파라미터와 마찬가지로 물고기 로봇의 속도에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

5. 물고기 로봇의 최대 속도를 위한 입력 토크 함수의 최적화 알고리즘

3 관절의 물고기 로봇의 속도는 입력 토크 함수의

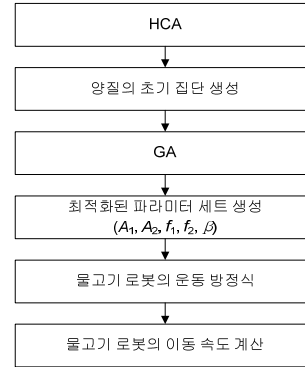


Fig. 13 Combination algorithm of HCA and GA for maximum velocity of fish robot

파라미터 $A_1, A_2, f_1, f_2, \beta$ 에 따라 변화하며 단순히 입력 토크 함수의 파라미터 값을 증가 시킨다고 해서 최대속도를 얻을 수 있는 것이 아니며 또한 경험적인 방법으로 최적 파라미터를 찾기는 어려움이 있다. 본 논문에서는 GA 를 이용하여 물고기 로봇의 최대속도를 위한 파라미터 최적화를 하였다. GA 는 임의의 게놈(genome)으로 이루어진 초기 해 집단(population)으로부터 연속적인 반복과정인 세대(generation)을 통하여 진화를 하게 되고 대부분의 게놈은 이진화된 비트로 표현하며 그 크기는 해의 정확도에 따라 선택할 수 있다. 어떤 초기 해 집단이 다음 세대로 넘어가기 위해서는 평가(evaluation), 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 연산을 거치게 된다. 여기서, 평가는 목적함수 값에 알맞은 적합도 함수를 만들어 게놈의 적합도를 계산하여 선택의 확률을 높이는 것을 의미하며 선택은 다음 세대를 위한 집단을 새롭게 연산하는 것을 말한다. 교배는 두 부모 게놈을 적절히 조합하여 자손을 생성하는 연산을 말하고 돌연변이는 게놈 내의 유전자를 임의 의로 변화시키는 연산이다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 하지만 GA 의 반복연산 중 국부 최소 점에서 수렴하여 최적의 해를 찾지 못하는 경우도 발생한다. 이러한 문제가 발생하는 대부분의 이유는 초기 집단의 임의 선택이다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 13 과 같이 HCA 를 이용하여 GA 를 위한 양질의 초기 집단을 생성하여 이와 같은 문제점을 해결 하였다.^(12,13)

Figure 14 는 HCA 의 전체 흐름도를 보여 주고 있으며 임의의 기존 세대집단을 생성하고 특정 개체를 이용하여 새로운 세대를 생성한 후 적합도를 서로 비교하여 새로운 세대의 적합도가 우수할 경우 기존 세대를 새로운 세대로 교체한다. 이와 같은 방법으로 전체 집단이 생성되면 GA 를 위한 양질의 초기 집단이 완성된다. HCA 에 의해

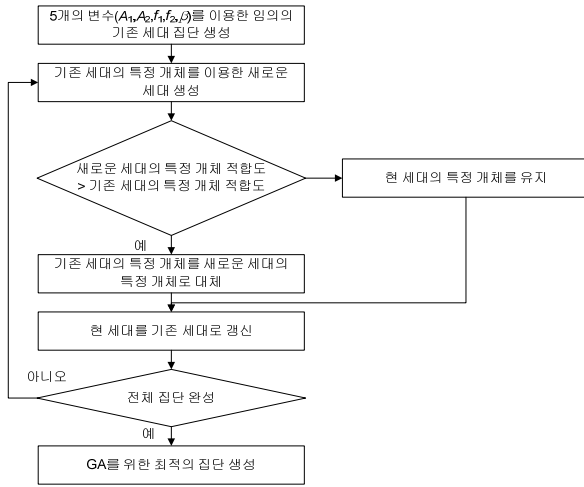


Fig. 14 Flowchart of HCA

생성된 양질의 초기 집단을 이용하여 GA 는 입력 토크 함수의 파라미터를 최적화하게 된다.

HCA 와 GA 의 적합도 함수는 (13)과 같으며 GA 의 구속조건은 다음과 같다.

$$V_{fishrobot} = \frac{\eta \bar{P}}{F_F} \quad (13)$$

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad P_1 = \dot{\theta}_1 \cdot T_1, P_2 = \dot{\theta}_2 \cdot T_2$$

1. $0 \leq A_1 \leq 10$
2. $0 \leq A_2 \leq 10$
3. $0 \leq f_1 \leq 2$
4. $0 \leq f_2 \leq 2$
5. $0 \leq \beta \leq 90$
6. 물고기 로봇의 운동방정식

본 논문에서 제안된 알고리즘에서 GA 를 위한 선택법은 normalized geometry, 교배는 arithmetic 법을 사용하였으며 multi-non-uniform 돌연변이법을 사용하였고 100 개의 집단과 500 세대 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 다만, 생물학적 측면에서 물고기의 꼬리와 꼬리 지느러미가 다른 진동수로 움직이는 것은 특수한 경우이기 때문에 일반적으로 2 개의 관절을 이루고 있는 두 모터의 입력 토크 함수의 주파수는 서로 같아야 한다. 따라서, 2 개의 입력 토크 함수의 주파수를 동일하게 함으로써 최적화를 위한 5 개의 파라미터를 4 개의 파라미터 세트 (A_1, A_2, f, β)로 줄여 계산하였다. Table 3 는 HCA-GA 를 이용한 최적화된 파라미터를 나타내고 있으며 Fig. 15 는 최적화된 파라미터를 이용한 3 관절 물고기 로봇의 속도 변화와 비최적화 파라미터($A_1=A_2=3.0Nm, f=1.0Hz,$

Table 3 The optimized parameters

A_1	A_2	f	β	Fitness function
1.1039	1.9079	1.2702	28.3056	3.4571

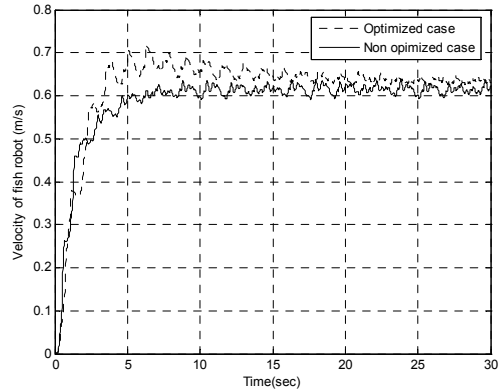


Fig. 15 Comparison of optimized case and non optimized case

$\beta=30^\circ$)를 이용한 3 관절 물고기 로봇의 속도 변화를 보여주고 있다. 최적화된 파라미터를 이용한 경우 최대속도, 평균속도가 각각 0.72m/s 0.62m/s 로 비최적화 파라미터를 이용한 경우 보다 각각 0.09m/s, 0.04m/s 빠른 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 carangiform 운동 메커니즘을 기초로 한 3 관절 물고기 로봇의 수학적 모델을 완성하였고 SVD 알고리즘을 이용하여 물고기 로봇의 운동이 발산하는 것을 효과적으로 제한하였다. 본 논문에서 제안한 3 관절 물고기 로봇의 운동방정식을 이용하여 2 관절 물고기 로봇의 운동특성과 비교, 분석하여 3 관절 물고기 로봇이 2 관절 물고기 로봇보다 최대 속도도 빠른 것을 알 수 있었다. 또한, HCA 와 GA 를 이용하여 물고기 로봇의 최대속도를 위한 두 개의 입력 토크 함수의 파라미터를 최적화하였으며 최적화 되지않은 파라미터 세트를 사용했을 보다 빠른 속도를 구현 할 수 있음을 시뮬레이션 결과로 알 수 있었다.

후기

본 논문은 2007 년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

부 록

(1) Lauder, G. V. and Drucker, E. G., 2004, "Morphology And Experimental Hydrodynamics Of Fish Fin Control Surfaces," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 556~571.

(2) Lighthill, M. J., 1969, "Hydromechanics Of Aquatic Animal Propulsion," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 413~446.

(3) Yu, J., Wang, L., 2005, "Parameter Optimization Of Simplified Propulsive Model For Biomimetic Robot Fish," *Proceeding of the 2005 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3306~3311.

(4) Kim, H. S., Lee, B. R., Vo, T. Q. and Choi, J. H., 2007, "A Study on 3-Joint FishLike Propulsion Mechanism," *The 11th International Conference On Mechatronics Technology*, pp. 197~202.

(5) Kim, H. S., Lee, B. R., Vo, T. Q. and Truong, Q. B., 2008, "A Study on Optimization of Fish Robot Velocity Using Genetic Algorithm," *International Conference on Smart Manufacturing Application*, pp. 441~446.

(6) Seo, K. H., Murray, R., Lee, J. S., 2005, "Exploring Optimal Gaits For Planar Carangiform Robot Fish Locomotion," *16th IFAC World Congress in Prague*.

(7) Lighthill, M. J., 1960, "Note On The Swimming of Slender Fish," *Journal of fluid mechanics*, Vol 9, pp. 305~317.

(8) Nakashima, M., Ohgishi, N. and Ono, K., 2003, "A Study On The Propulsive Mechanism Of A Double Jointed Fish Robot Utilizing Self-Excitation Control," *JSME International Journal*, Series C, Vol. 46, No. 3, pp. 982~990.

(9) Reeves, C. R., Rowe, J. E., 2003, "Genetic Algorithms – Principles And Perspectives, A Guide to GA Theory," *Kluwer Academic Publishers*.

(10) Haupt, R. L., Haupt, S. E., 2004, "Practical Genetic Algorithms – Second Edition," *A John Willey & Son, Inc., Publication*.

(11) Han, S. Y., Lee, T. H., Lim, J. K. and Ha, K. T., 1999, "Investigation of Proper Ranges and Influence of Parameters in Genetic Algorithms," *Transactions of KSME A*, Vol. 23, No. 4.

(12) Moore, A. W., "Iterative Improvement Search Hill Climbing, Simulated Annealing, WALKSAT, and Genetic Algorithms," *School of Computer Science Carnegie Mellon University*.

(13) Hagiwara, M., 1993, "Pseudo Hill Climbing Genetic Algorithm (PHGA) for Function Optimization," *Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks*.

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= I_1 + m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 + I_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 + I_3 + 2m_2 l_1 a_2 \cos \theta_2 \\
 &\quad + 2m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 + 2m_3 l_1 a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 &\quad + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_1 \cdot (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\
 &\quad \{ \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{12} &= I_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 + I_3 + m_2 l_1 a_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 \\
 &\quad + m_3 l_1 a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_1 \cdot (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
 &\quad + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \cdot \{ \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{13} &= m_3 a_3^2 + I_3 + m_3 l_1 a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \\
 &\quad \sin \alpha \cdot l_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot a_3 \cdot \{ \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{21} &= I_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 + I_3 + m_2 l_1 a_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 \\
 &\quad + m_3 l_1 a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_2 \cdot (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
 &\quad + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \cdot \{ \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 &\quad - \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{22} &= I_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 + I_3 + 2m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 \\
 &\quad + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_2 \cdot (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\
 &\quad \{ \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{23} &= m_3 a_3^2 + I_3 + m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 + \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_2 \cdot a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot \\
 &\quad \{ \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \} \\
 M_{31} &= I_3 + m_3 a_3^2 + m_3 l_1 a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 \\
 &\quad - \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot a_3 \cdot (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\
 M_{32} &= I_3 + m_3 a_3^2 + m_3 l_2 a_3 \cos \theta_3 - \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot a_3 \cdot (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
 &\quad + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\
 M_{33} &= I_3 + m_3 a_3^2 - \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot a_3^2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 N_1 &= \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \} \\
 &\quad - l_1 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ \pi \rho L C^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U - 2\pi \rho L C (U_m^2 + u^2) \sin \alpha \} \\
 &\quad - \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \} \\
 &\quad + l_1 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ \pi \rho L C^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U + 2\pi \rho L C (U_m^2 + u^2) \sin \alpha \} + T_1 \\
 &\quad + 2m_2 l_1 a_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 + 2m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 + 2m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_3 \\
 &\quad + 2m_3 l_1 a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cdot \dot{\theta}_1 + m_2 l_1 a_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 + m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 \\
 &\quad + 2m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_3 + m_3 l_1 a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cdot \dot{\theta}_2 \\
 &\quad + m_3 l_1 a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cdot \dot{\theta}_3 + m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_3^2 \\
 &\quad - (c_1 + c_2) \cdot \dot{\theta}_1 - (-c_2) \cdot \dot{\theta}_2 - (k_1 + k_2) \cdot \theta_1 - (-k_2) \cdot \theta_2 \\
 N_2 &= \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \} \\
 &\quad - l_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ \pi \rho L C^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U - 2\pi \rho L C (U_m^2 + u^2) \sin \alpha \} \\
 &\quad - \pi \rho L C^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \} \\
 &\quad + l_2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{ \pi \rho L C^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U + 2\pi \rho L C (U_m^2 + u^2) \sin \alpha \} \\
 &\quad + T_2 + 2m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_3 + m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 + 2m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_3 \\
 &\quad + m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_2^2 - m_2 l_1 a_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 - m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 - m_3 l_1 a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \dot{\theta}_2^2 \\
 &\quad - (-c_2) \cdot \dot{\theta}_1 - (c_2 + c_3) \cdot \dot{\theta}_2 - (-c_3) \cdot \dot{\theta}_3 - (-k_2) \cdot \theta_1 - (k_2 + k_3) \cdot \theta_2 - (-k_3) \cdot \theta_3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_3 = & -\pi\rho LC^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot a_3 \cdot \cos^2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
& + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2\} \\
& + a_3 \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{\pi\rho LC^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U - 2\pi\rho LC(U_m^2 + u^2) \sin \alpha\} \\
& - \pi\rho LC^2 \cdot \frac{u}{\sqrt{U_m^2 + u^2}} \cdot \sin \alpha \cdot a_3 \cdot \sin^2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{l_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
& + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2\} \\
& + a_3 \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \{\pi\rho LC^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot U + 2\pi\rho LC(U_m^2 + u^2) \sin \alpha\} \\
& - m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_3^2 - m_3 l_1 a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \dot{\theta}_1^2 - m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_2^2 \\
& - 2m_3 l_2 a_3 \sin \theta_3 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 - (-c_3) \cdot \dot{\theta}_2 - c_3 \cdot \dot{\theta}_3 - (-k_3) \cdot \theta_2 - k_3 \cdot \theta_3
\end{aligned}$$