

## 6 자유도 수중로봇 플랫폼의 백스텝핑 제어를 위한 제어이득 최적화

### Gain Optimization of a Back-Stepping Controller for 6-Dof Underwater Robotic Platform

김지훈<sup>1</sup>, 김종원<sup>1</sup>, 진상록<sup>1</sup>, 서태원<sup>2,✉</sup>, 김종원<sup>3</sup>  
Jihoon Kim<sup>1</sup>, Jong-Won Kim<sup>1</sup>, Sangrok Jin<sup>1</sup>, TaeWon Seo<sup>2,✉</sup>, and Jongwon Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 기계항공공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

<sup>2</sup> 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

<sup>3</sup> 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.)

✉ Corresponding author: taewon\_seo@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2442

Manuscript received: 2013.3.19 / Revised: 2013.8.19 / Accepted: 2013.9.11

*This paper presents gain optimization of a 6-DOF underwater robotic platform with 4 rotatable thrusters. To stabilize the 6-DOF motion of the underwater robotic platform, a back-stepping controller is designed with 6 proportional gains and 6 derivative gains. The 12 gains of the back-stepping controller are optimized to decrease settling time in step response in 6-DOF motion independently. Stability criterion and overshoots are used as a constraint of the optimization problem. Trust-region algorithm and hybrid Taguchi-Random order Coordinate search algorithm are used to determine the optimal parameters, and the results by two methods are analyzed. Additionally, the resulting controller shows improved performance under disturbances.*

Key Words: Gain optimization (게인 최적화), Underwater robotic platform (수중로봇 플랫폼), Back-stepping control (백스텝핑 제어), Trust-region algorithm (신뢰-구간 알고리즘), Taguchi method (다구찌 방법론)

#### 1. 서론

제어기의 이득은 안정성, 성능, 견실성 등에서 큰 역할을 한다. 상용 제어기로 많이 쓰이는 비례-적분-미분 (PID) 제어기의 경우에도 각각 이득은 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히, 비례 이득은 시스템의 속도, 적분 이득은 정상상태 오차, 미분 이득은 댐핑에 영향을 미치며 각각의 이득은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이들 이득을 선정하는 방법으로는 근궤적을 이용한 방법,<sup>1</sup> Ziegler-Nichols tuning 방법,<sup>2</sup> 시간지연을 모델링 하여 tuning 하는 방법<sup>3</sup> 등이 많이 알려져 있다.

단일입출력 시스템이 아닌 다중입출력 시스템의 경우 이득을 정하는 것이 쉽지 않다. 많이 쓰

이는 방식 중 하나는 다중입출력 시스템을 여러 개의 단일입출력 시스템으로 분리(decoupling) 시킨 후 그 시스템에 대해 위의 근궤적법 등을 이용하여 이득을 정하는 방식이다.<sup>4</sup> 하지만, 많은 경우 각 입출력을 분리시키는 것이 쉽지 않고, 모델링 오차가 있는 경우 성능이 많이 하락하는 결과를 보인다.

최근 최적 이득을 구하기 위한 다양한 방향의 연구가 진행되고 있다. Thangaraj et al.<sup>5</sup>은 유도전동기 드라이버의 비례-적분 (PI) 제어기의 이득을 Particle Swarm Optimization (PSO)를 이용하여 최적화하였고, Liu and Hsu<sup>6</sup>는 정지형 무효전력 보상장치(static synchronous compensator)의 PI 제어기 가변 이득(tunable gain) 최적화에 PSO를 적용하였다. 또

한 Soltani and Piltan<sup>7</sup>은 가변 이득을 이용한 유사토크 제어(computed-torque-like-controller)에 관한 연구를 진행한 바 있고, Hunnenkens et al.<sup>8</sup>은 모델 기반의 구간 가변 이득을 이용한 제어기에 대한 연구를 진행하였다. 하지만, 이들은 단일 입출력 시스템에 적용한다는 한계가 있다.

다중 입출력 시스템에 대한 최적 제어 이득선정 연구도 진행되고 있다. Seo<sup>9</sup>와 Lee and Kim<sup>10</sup>은 실험을 통하여 각각 3 자유도 마이크로 병렬기구와 동시 다축 공작 기계의 제어 이득을 각각의 상관관계를 고려하여 선정하는 연구를 진행하였다. 하지만 실험을 통한 방법은 모델링 정보를 사용하지 않아 많은 시간이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 4개의 회전하는 추진기를 가지는 6 자유도 수중로봇 플랫폼<sup>11</sup>의 이득 선정을 다룬다. 4개의 추진기 입력과 2개의 회전입력을 이용하여 백스테핑(back-stepping) 제어를 통해 모델의 6 자유도 안정성을 보장한다. 총 12개의 비례 이득, 미분 이득이 최적화 과정을 통하여 결정되며, 6 자유도 운동의 스텝 응답에 따른 정착 시간을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 안정성 및 오버슈트는 제한 조건으로 작용한다. 상용 프로그램인 Matlab (Mathworks Co.)의 Trust-Region Algorithm (TRA)<sup>12</sup>와 저자가 개발한 Hybrid Taguchi-Random order Coordinate search Algorithm (HTRCA)<sup>13</sup>의 두 가지 방식으로 각각 최적화를 수행하여 결과를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중로봇 플랫폼의 구성과 모델링을 제시한다. 3장에서는 백스테핑 제어 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 본 논문의 목적인 제어 이득 최적화 문제를 정의한다. 5장에서는 TRA와 HTRCA 최적화 방법을 간단히 설명한다. 6장에서는 최적화 결과에 대해 토의한다. 최종 결론은 7장에 제시한다.

## 2. 수중로봇 플랫폼

Fig. 1에 본 연구에서 사용할 수중로봇 플랫폼이 도시되어 있다. 플랫폼은 직사각형 모양의 메인바디의 꼭지점에 4개의 추진기를 가지고 있다. 플랫폼 전면부의 두 추진기와 후면부의 두 추진기는 각각 서로 동기화되어 같은 각으로 회전하여, 시스템은 2개의 자유도를 더 가진다. 이는 회전하는 추진기를 통해 4개의 추진기를 하나의 평면에 부착할 수 있어 공간적으로 매니플레이터나 보관

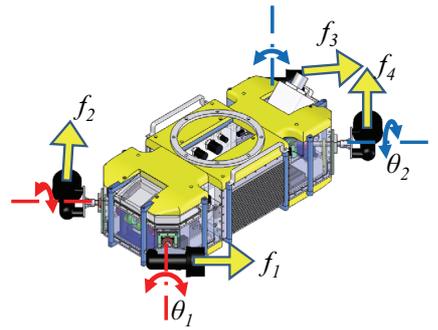


Fig. 1 Underwater robotic platform.  $f_i$ : force of thrusters,  $\theta_i$ : rotation of thrusters

장소를 부착할 수 있다는 장점이 있다. 또한 4개의 추진기를 동시에 한 방향으로 이용할 수 있어, 힘적인 측면에서도 장점을 가진다.

제어기 설계를 위한 수중로봇 플랫폼의 일반적인 동역학 모델은 다음과 같이 표현된다.<sup>13</sup>

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (1)$$

여기서  $M$ 은 강체와 부가질량이 포함된 inertia 행렬이고( $M_{RB}+M_A$ ),  $C(v)$ 는 강체와 부가질량에 의한 코리올리 행렬의 합으로 나타난다( $C_{RB}+C_A$ ). 이 중 부가질량에 의한 inertia행렬  $M_A$  과 부가질량에 의한 코리올리 행렬  $C_A$ 는 Newman<sup>14</sup>의 스트립 이론을 응용하여 계산하였다. 실제 계산된 파라미터들을 appendix에 정리하였다. 댐핑 행렬  $D(v)$ 는 수중항력에 의한 반력과 모멘트를 포함하는데, 이 중 반력은 상용프로그램인 ANSYS의 유체해석 시뮬레이션을 통하여 계수를 구하였고, 수중항력에 의한 모멘트는 Georgiades<sup>15</sup>의 방법으로 그 계수를 계산하였다.  $g(\eta)$ 는 중력과 부력 벡터이며, 그 값이 0이 되도록 플랫폼을 설계하였다. 좌변의  $\eta$ 는 고정좌표계에서의 로봇의 위치자세 벡터이며,  $v$ 는 그 미분 값이다.  $\tau$ 는 플랫폼 제어의 네 추진기의 출력  $f_1, f_2, f_3, f_4$ 와 앞 뒤 추진기 회전 모터의 입력  $\theta_1, \theta_2$ 를 포함하는 6x1 벡터이다.

식(1)의 양변에 자코비안 역행렬의 전치행렬  $J^T(\eta)$ 을 곱하고 식을 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta, \quad (2)$$

여기서 추진기 입력을 도시하는  $\tau_\eta$ 에서 본 연구에서의 수중 로봇 플랫폼의 특징이 존재하며, 그 값은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\tau_\eta = \mathbf{J}^{-T}(\eta) [\mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) \quad \mathbf{0}_{6 \times 1} \quad \mathbf{0}_{6 \times 1}] \tau, \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{B}(\theta_1, \theta_2)$ 는 추진기의 회전( $\theta_2$ )에 따른  $f_i$ 의 매핑 행렬을 나타내며, 그 값은 아래와 같다.

$$\mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{2}} & \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{2}} & \frac{\cos \theta_2}{\sqrt{2}} & \frac{\cos \theta_2}{\sqrt{2}} \\ \frac{\cos \theta_1}{\sqrt{2}} & -\frac{\cos \theta_1}{\sqrt{2}} & \frac{\cos \theta_2}{\sqrt{2}} & -\frac{\cos \theta_2}{\sqrt{2}} \\ -\sin \theta_1 & -\sin \theta_1 & -\sin \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \frac{d \sin \theta_1}{2} & -\frac{d \sin \theta_1}{2} & \frac{d \sin \theta_2}{2} & \frac{d \sin \theta_2}{2} \\ \frac{l \sin \theta_1}{2} & \frac{l \sin \theta_1}{2} & -\frac{l \sin \theta_2}{2} & -\frac{l \sin \theta_2}{2} \\ \frac{l+d}{2\sqrt{2}} \cos \theta_1 & -\frac{l+d}{2\sqrt{2}} \cos \theta_1 & -\frac{l+d}{2\sqrt{2}} \cos \theta_2 & \frac{l+d}{2\sqrt{2}} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(2)에서 도시된 바와 같이 4개의 추진기로 6개의 자유도를 접근하기 때문에 두 행이 제로벡터 ( $\mathbf{0}_{6 \times 1}$ )로 구성되어 있음을 알 수 있다.

### 3. 백스테핑 제어

2장에서 제시된 수중로봇 플랫폼의 가장 큰 특징은 4개의 회전하는 추진기를 이용하여 6 자유도 동작을 제어하는 것이다. 실제 제시된 모델링에서 보이듯이 2개의 자유도를 추진기 회전으로 구현하기 때문에 2개의 행이 영벡터로 모델링 되어 있고, 이는 안정성을 보장하는 데에 문제가 된다.

본 연구에서는 아래와 같은 백스테핑 제어 이론을 적용하여 6 자유도 안정성을 보장한다.<sup>16</sup> 로봇의 입력 힘 벡터는 아래와 같이 정의된다.

$$f_c = \mathbf{K}_2 \dot{e} + \mathbf{K}_1 e + g_\eta(\eta) + v_e, \quad (5)$$

여기서  $e(= \eta - \eta_d)$ 는 위치자세의 오차벡터이며,  $v_e$ 는 백스테핑을 위한 상태벡터이다.  $\mathbf{K}_1$ 과  $\mathbf{K}_2$ 는 제어를 위한 비례, 미분 이득행렬이다. (5) 식을 (2)에 대입한 후, Lyapunov 함수를 정리하면 아래와 같다.

$$V = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \dot{e} \\ e \end{pmatrix}^T \mathbf{Q} \begin{pmatrix} \dot{e} \\ e \end{pmatrix} + \frac{1}{2\gamma} v_e^T v_e, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_\eta & \varepsilon \mathbf{M}_\eta \\ \varepsilon \mathbf{M}_\eta & \mathbf{K}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

다음으로, 백스테핑 제어식을 아래와 같이 정

의를 한다.

$$\dot{v}_e = -\gamma(\dot{e} + \varepsilon e) - \lambda v_e \quad (7)$$

결과적으로 위의 백스테핑 제어기를 통하여 Lyapunov 함수의 미분 값은 아래와 같이 정의되며 항상 음이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = - \begin{pmatrix} \dot{e} \\ e \end{pmatrix}^T \mathbf{Q} \begin{pmatrix} \dot{e} \\ e \end{pmatrix} - \frac{\lambda}{\gamma} v_e^T v_e \leq 0 \quad (8)$$

여기서  $\lambda$ 와  $\nu$ 는 음이 아닌 실수이다. (4)식과 (5)식을 (7)식에 대입하면 최종 제어식이 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) & \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \theta_1} \bar{f} & \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \theta_2} \bar{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{f}} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{J}^T(\eta) [-\mathbf{J}^{-T}(\eta) \mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) \bar{f} - \mathbf{K}_2 \ddot{e} - \mathbf{K}_1 \dot{e} + \frac{\partial g_\eta}{\partial \eta} \dot{\eta} - \gamma(\dot{e} + \varepsilon e) - \lambda \{ \mathbf{J}^{-T}(\eta) \mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) \bar{f} + \mathbf{K}_2 \dot{e} + \mathbf{K}_1 e - g_\eta(\eta) \}], \quad (9)$$

여기서  $\bar{f} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$ 이다. (9)의 좌변 행렬이 항상 full-rank이면 입력을 unique하게 계산할 수 있다.

### 4. 최적화 문제정의

본 수중 로봇 플랫폼과 같은 비선형 다중입출력 시스템에 대해서는 임의의 이득을 시행착오법으로 정하여 안정성만을 보장하는 제어기를 사용하는 경우가 많다. 이와 같은 경우는 시스템의 성능을 향상시키는 데에 한계가 존재한다. 본 연구에서는 식(4)의  $\mathbf{K}_1$ 과  $\mathbf{K}_2$ 를 최적화하여 로봇 플랫폼의 위치 결정 성능을 최적화 한다.

#### 4.1 목적함수

제시된 수중로봇 플랫폼은 총 6개의 자유도를 가진다. 제어기의 이득은 이 6개의 동작에 대해 couple이 되어 영향을 미치므로 이 6 자유도의 동작을 모두 고려한 최종 제어 이득을 선정하여야 한다. 하지만, 6개의 동작을 복합적으로 인가한 경우, 각 동작과 이득의 연관관계를 정확히 파악할 수 없으며, 현실적인 로봇의 이동과도 차이가 있다는 문제가 있다.

본 연구에서는 6개 자유도의 입력을 독립적으로 인가하여 그 영향을 합쳐 고려하는 방식을 택한다. 제시된 목적함수는 아래와 같다.

$$\min \left( 10 \log \left( \sum_{x,y,z} \left( \frac{t_s}{t_{s,i}} \right)^2 + \sum_{\varphi,\theta,\psi} \left( \frac{t_s}{t_{s,i}} \right)^2 \right) \right) \quad (10)$$

여기서  $t_s/t_{s,i}$  는 초기 이득값에 대하여 무차원화된 정착 시간(settling time)을 의미한다. 위 목적함수는 다구찌 방법론의 신호잡음비에서 차용한 식으로, 이는 평균과 표준편차를 동시에 고려할 수 있어 견실한 답을 낼 수 있다는 장점이 있다.<sup>17</sup>

목적함수를 계산하기 위해서는 스텝의 크기를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 x, y, z 방향으로 각각 3 m, 1.75 m, 1.75 m의 스텝을 입력하였다. 이는 각 방향의 최대속도를 고려하여 비례적으로 결정한 값이다. 회전 세 방향( $\varphi, \theta, \psi$ )으로는 각각 30도의 스텝을 입력하였다.

### 4.2 제한조건

본 연구에서는 두 종류의 제한조건을 정의하였다. 우선 시스템의 안정성을 보장하기 위하여 식 (7)의 Q 행렬이 항상 양의 정부호 행렬(positive definite matrix)이어야 한다. 또한, 시스템 초기응답 변수 중 하나인 오버슈트(overshoot)가 10% 이내라는 제한 조건을 정의하였다. 위 제한 조건을 수학적으로 표현하면 아래와 같다.

$$Q > 0 \text{ and overshoot} < 10\%, \quad (11)$$

지금까지 정의된 최적화 문제에 대하여 다음 장에 제시된 방법론에 의거하여 최적화를 진행한다.

## 5. 최적화 방법

### 5.1 Trust-Region Algorithm (TRA)

첫 번째 최적화 방법으로 상용 프로그램인 Matlab의 Trust-Region Algorithm (TRA)을 사용하였다. 이는 최적화 toolbox의 fmincon() 함수를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다.<sup>18</sup> 이 함수를 이용하면 sequential quadratic programming을 통하여 쉽게 국소 최소점(local minimum)을 구할 수 있다는 장점이 있다.

### 5.2 Hybrid Taguchi-Random order Coordinate search Algorithm (HTRCA)

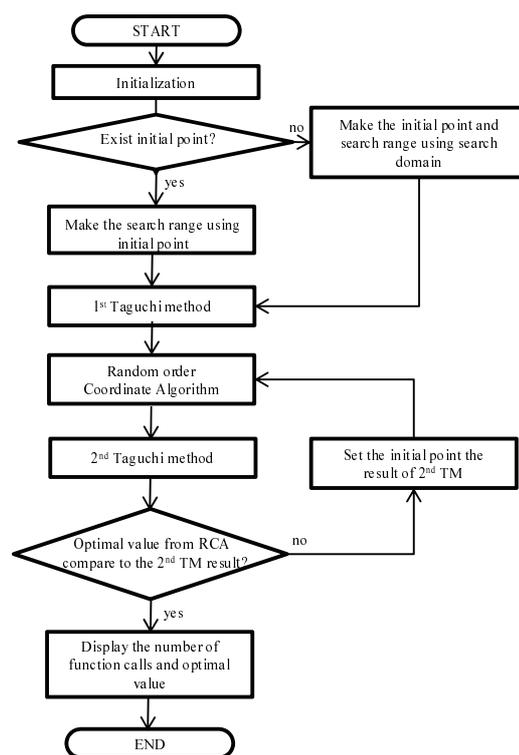


Fig. 2 Hybrid Taguchi-Random order Coordinate Algorithm

본 연구에서 사용한 두 번째 최적화 방법은 저자들이 고안한 Hybrid Taguchi-Random order Coordinate search Algorithm (HTRCA)이다. 이 알고리즘이 Fig. 2에 도시되어 있다. 요약해서 이 알고리즘은 다구찌 방법론(Taguchi method)을 이용하여 초기값을 설정한 후, Random order Coordinate search algorithm과 다구찌 방법론을 순차적으로 이용하여 전역 최소점(global minimum)을 찾아내는 알고리즘이다. 기본적으로 변수들을 무작위로 변화시켜 최적 값을 찾는 RCA 기법을 바탕으로 한다. 초기 다구찌 방법론은 RCA의 단점인 속도를 높여주는 역할을 하며, 두 번째 다구찌 방법론은 변수간의 상관관계를 고려하여 국소 최소점을 벗어나게 하는 역할을 한다.

## 6. 최적화 결과 및 토의

본 장에서는 최적화 결과를 제시하며 결과에 대한 토의를 다룬다. 최적화를 위한 상수 값들은 모두 기존 reference<sup>19</sup>에 제시된 값을 사용하였다.

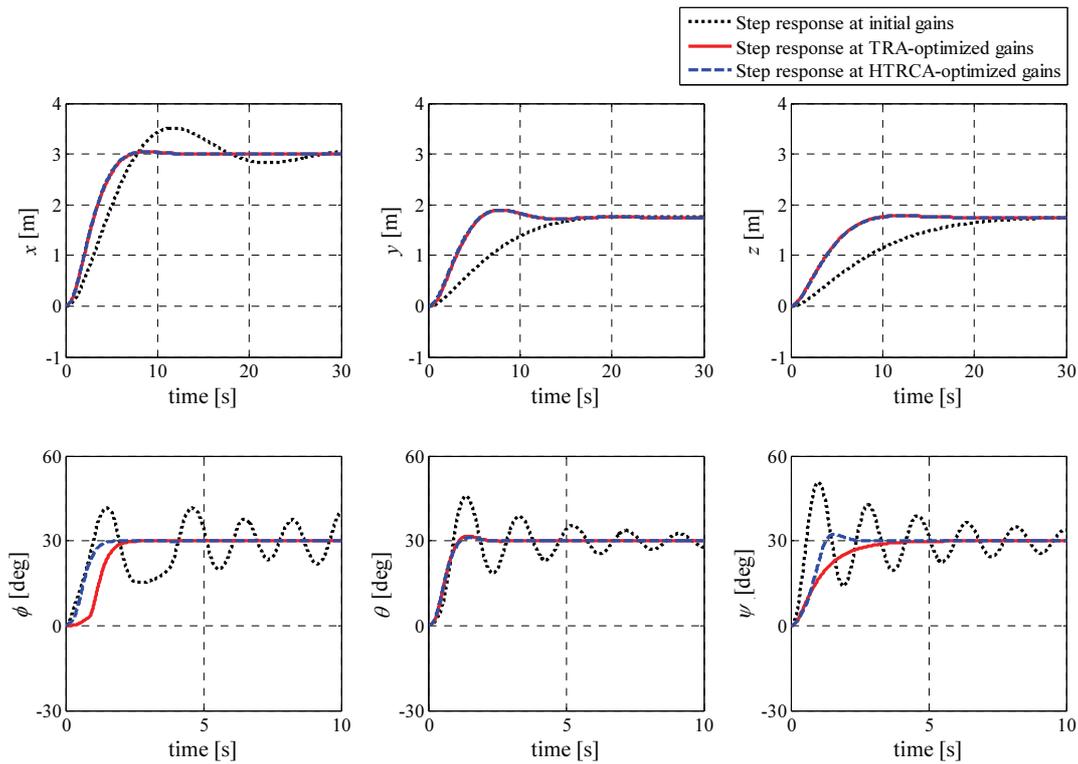


Fig. 3 Step responses of initial gains and optimized gains

Table 1 Optimization results

Initial gain						
$K_1$	10.0	10.0	10.0	100	100	100
$K_2$	39.0	52.2	73.3	30	30	30
$f$	59.64					
Optimized gain by TRA						
$K_1$	42.6	42.6	37.2	86.9	107	54.4
$K_2$	90.2	62.4	101	39.5	39.5	58.6
$f$	37.89					
Optimized gain by HTRCA						
$K_1$	45.0	42.0	37.0	78.0	107	99.0
$K_2$	93.0	62.0	102	34.0	43.0	40.0
$f$	36.16					

6.1 스텝응답 결과 분석

최적화 결과로 도출된 이득과 그 때의 목적함수 값이 Table 1에 도시되어 있다. 초기 이득은 안정성을 물리적인 의미를 고려하여 임의로 결정하였고, 최적화는 TRA와 HTRCA를 이용하여 수행하였다. 결과적으로 목적함수 값을 각각 36.5%와 39.4%를 감소시킬 수 있었다.

Fig. 3에 각각의 스텝 응답이 도시되어 있다. 각각의 스텝 응답에 대해 TRA를 통하여 정착 시간이 크게 감소됨을 확인할 수 있다. HTRCA를 적용한 경우에는 TRA의 경우와 비교해서 roll과 yaw 방향의 정착 시간이 더 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 TRA에서의 국소 최소점에서 HTRCA를 통하여 전역 최소점을 찾아냄으로 해석할 수 있다.

6.2 해류 및 반력 모멘트에 대한 견실성 분석

스텝응답에 부가적으로 최적화된 이득의 견실성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 해류가 존재하는 경우와 매니플레이터 반력 모멘트가 존재하는 경우에 대하여 수행하였다.

해류가 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과가 Fig. 4에 도시되어 있다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 로봇의 정면에서 가우스 백색 소음(Gaussian white noise) 형태의 불규칙한 해류를 가정하였다. 이 상황에서 pitch 각을 30도 스텝으로 인가 하였다. 결과적으로 최적 값이 우수한 성능을 보였으며, 특히, 출력의 진동이 많이 감소함을 확인하였

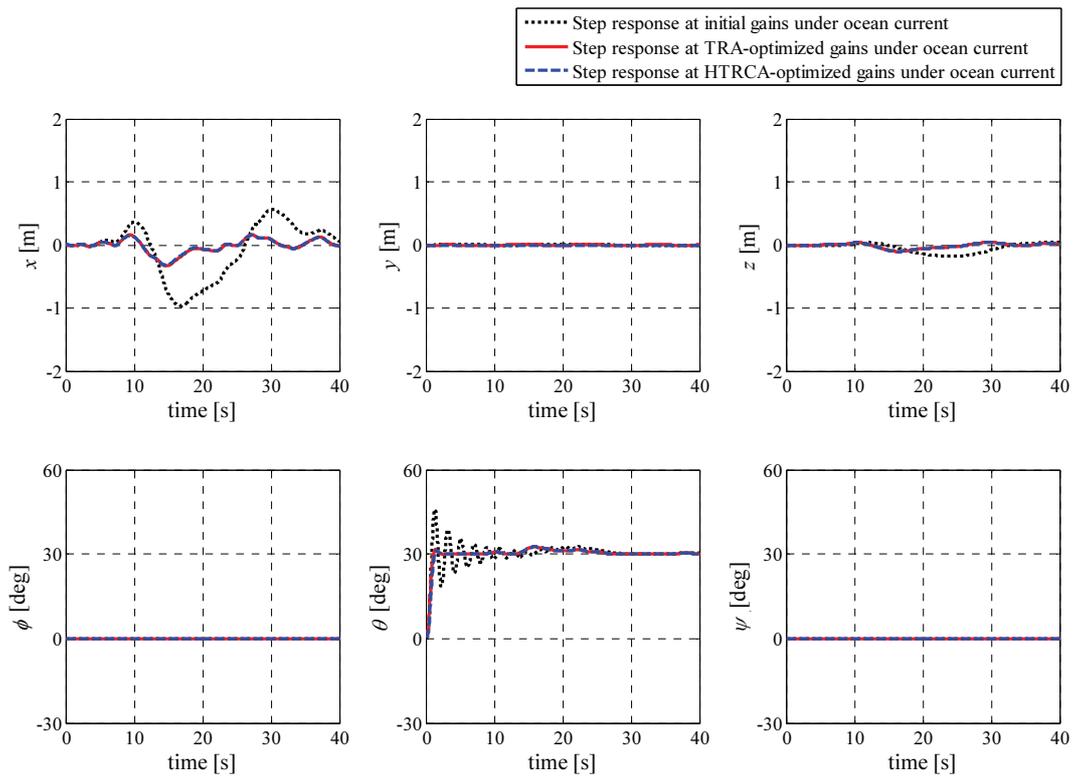


Fig. 4 Step response of the initial gains and optimized gains under ocean current

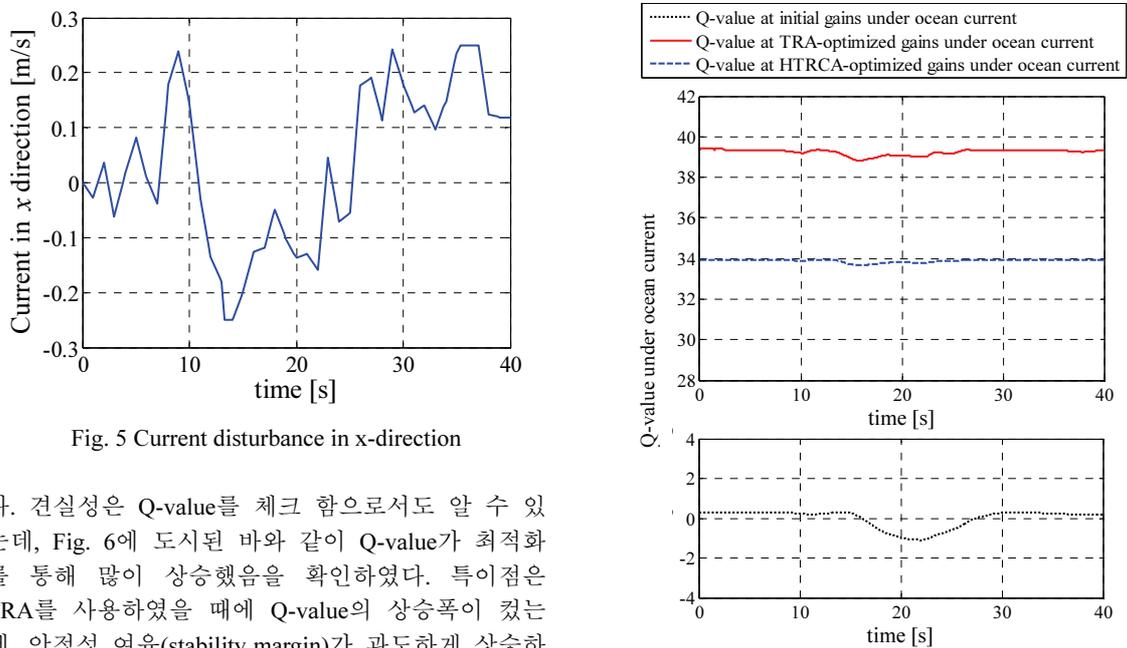


Fig. 5 Current disturbance in x-direction

Fig. 6 Q-value in the simulation under ocean current

다. 견실성은 Q-value를 체크 함으로서도 알 수 있는데, Fig. 6에 도시된 바와 같이 Q-value가 최적화를 통해 많이 상승했음을 확인하였다. 특이점은 TRA를 사용하였을 때에 Q-value의 상승폭이 컸는데, 안정성 여유(stability margin)가 과도하게 상승하여 성능이 줄어들므로 해석할 수 있다.

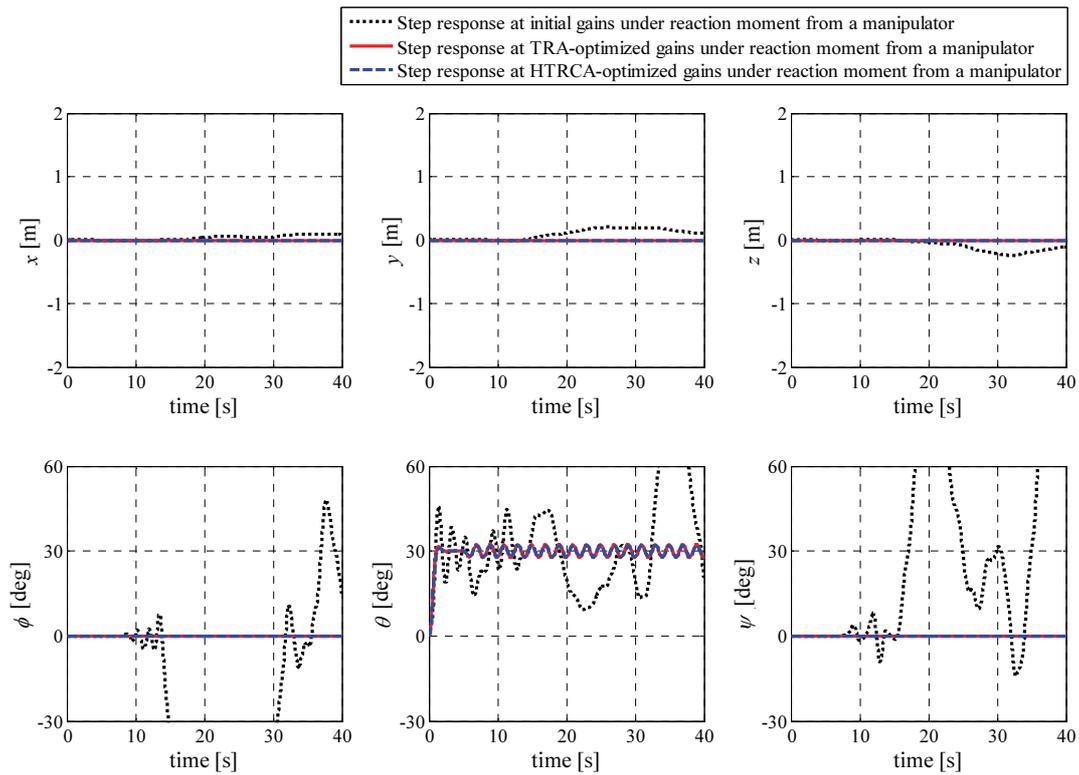


Fig. 7 Step response of the initial gains and optimized gains under reaction moment from a manipulator

본 수중로봇 플랫폼은 궁극적으로는 매니플레이터를 장착하여 작업하는 데에 목적이 있다. 따라서 매니플레이터에서 반력 모멘트가 작용할 때의 성능을 확인할 필요가 있다. Fig. 7에 결과가 도시되어 있다. 반력 모멘트가  $y$  축을 중심으로  $5\sin(\pi t)$ 로 존재할 때에 pitch각을 30도 스텝으로 인가하였다. 결과적으로 이득값이 반력 모멘트에 아주 민감하게 반응하였으며, 초기이득의 경우 안정성도 보장하지 못하는 결과를 나타내었다. 최적화된 이득의 경우 안정한 결과를 보장하였으며, pitch각의 경우 작용 모멘트와 제어 입력이 진동하는 결과를 보이는 것을 확인하였다. 추후, 반력 모멘트에 대한 안정성 마진이 얼마인지 확인하는 시뮬레이션 및 실험이 필요할 것이다.

**7. 결론**

본 연구에서는 회전하는 추진기를 가지는 6자유도 수중로봇 플랫폼의 백스테핑 제어기 이득을 최적화하는 연구를 수행하였다. 백스테핑 제어 기

법을 응용하여 입력 추진기가 4개인 로봇 플랫폼의 6 자유도 동작을 안정화 시켰으며, 이 때의 이득을 최적 선정하였다. 총 12개의 이득이 스텝 응답에서의 정착 시간을 최소화하는 방향으로 선정되었으며, TRA 방식과 HTRCA 방식의 두 가지 방식으로 최적화를 진행, 결과를 분석하였다. 결과적으로 HTRCA를 이용하였을 때 성능향상이 높았으며, 목적함수 기준 39.4%의 성능향상을 확인하였다. 목적함수 기준과 더불어, 해류가 존재할 때와 반력 모멘트가 존재할 때에 대한 해석을 수행하여 최적 제어 이득이 더 견실한 성능을 보임을 확인하였다. 연구 결과, 높은 성능과 견실성을 위하여 비선형 제어기를 설계 시 안정성 해석과 더불어 반드시 이득의 최적화가 수행되어야 함을 확인하였다.

**후 기**

이 논문은 2013 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0009596).

**APPENDIX: Parameters of the dynamic model**

1. Inertia and added mass matrix

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} 96.30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 133.04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 168.57 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.47 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8.10 \end{bmatrix}$$

2. Coriolis matrix

$$\mathbf{C}(v) = \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -168.57w \\ 0 & 0 & 0 & 133.04v \\ 0 & 168.57w & -133.04v & 0 \\ -168.57w & 0 & 96.30u & -8.10r \\ 133.04v & -96.30u & 0 & 9.26q \\ & & 168.57w & -133.04v \\ & & 0 & 96.30u \\ & & -96.30u & 0 \\ & & 8.10r & -0.26q \\ & & 0 & 4.47p \\ & & -4.47p & 0 \end{bmatrix}$$

3. Hydrodynamic damping matrix

$$\mathbf{D}(v) = \begin{bmatrix} 34.55|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 104.4|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 146.5|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.68|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.34|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.07|r| \end{bmatrix}$$

4. Gravity and buoyancy

$$g(\eta) = 0_{6 \times 1}$$

**참고문헌**

1. Franklin, G. F., Powell, J. D., and Emami-Naeini, A., "Feedback Control of Dynamic Systems," Prentice

Hall, 6<sup>th</sup> ed., pp. 243-336, 2009.  
 2. Ziegler, J. G. and Nichols, N. B., "Optimum Setting for Automatic Controllers," Transaction of ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.  
 3. Skogestad, S. and Postlethwaite, I., "Multivariable Feedback Control: Analysis and Design," Wiley-Interscience, 2<sup>nd</sup> ed., pp. 15-66, 2005.  
 4. Lurie, B. and Enright, P., "Classical Feedback Control with Matlab," CRC Press, pp. 31-51, 2000.  
 5. Thangaraj, R., Chelliah, T. R., Pant, M., Abraham, A., and Grosan, C., "Optimal Gain Tuning of PI speed Controller in Induction Motor Drives Using Particle Swarm Optimization," Logic Journal of the IGPL, Vol. 19, No. 2, pp. 343-356, 2010.  
 6. Liu, C. and Hsu Y., "Design of a Self-Tuning PI Controller for a STATCOM using Particle Swarm Optimization," IEEE Transactions of Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 702-715, 2010.  
 7. Soltani, S. and Piltan, F., "Design Artificial Nonlinear Controller Based on Computed Torque Like Controller with Tunable Gain," World Applied Sciences Journal, Vol. 14, No. 9, pp. 1306-1312, 2011.  
 8. Hunnekens, B. G. B., Heertjes, M. F., van de Wouw, N., and Nijmeijer, H., "Model-Based Piecewise Affine Variable-Gain Controller Synthesis," 2013 American Control Conference(ACC), 2013.  
 9. Seo, T., "Control Gain Tuning of the 3-DOF Micro Parallel Mechanism Platform via Design of Experiment Methodology," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 11, pp. 1207-1213, 2012.  
 10. Lee, K. and Kim, J., "Control Gain Tuning of a Simultaneous Multi-Axis PID Control System by Taguchi Method," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 16, No. 6, pp. 25-35, 1999.  
 11. Jin, S., Lee, S., Kim, J., and Seo, T., "Starfish Capture Robotic Platform: Conceptual Design and Analysis," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 9, pp. 978-985, 2012.  
 12. MathWorks, "MATLAB," <http://www.mathworks.co.kr/html> (Accessed 17 March 2013)  
 13. Fossen, T. I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles," John Wiley & Sons, pp. 5-56, 1994.  
 14. Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics," MIT Press, pp. 328-384, 1997.  
 15. Georgiades, C., "Simulation and Control of an

- Underwater Hexapod Robot,” M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill Univ., 2005.
16. Khalil, H. K., “Nonlinear Systems,” Prentice-Hall, pp. 589-603, 3<sup>rd</sup> ed., 2001.
  17. Peace, G. S., “Taguchi Methods,” Addison-Wesley, pp. 273-291, 1993.
  18. MathWorks, “fmincon,” <http://www.mathworks.co.kr/help/optim/ug/fmincon.html> (Accessed 17 March 2013)
  19. Jin, S., Lee, S., Kim, J., Kim, J., and Seo, T., “Design of Hovering Underwater Robotic Platform to Capture Harmful Marine Organisms,” Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp. 1747-1751, 2012.

