

수중 운항 플랫폼의 호버링 제어를 위한 선택적 스위칭 PD 제어기 설계

김지훈¹, 진상록², 김종원¹, 서태원³, 김종원^{1,*}

¹서울대학교 기계항공공학부, ²서울대학교 정밀기계설계공동연구소, ³영남대학교 기계공학과

Design of Selective Switching PD Control for the Hovering Underwater Robotic Platform

Jihoon Kim¹, Sangrok Jin², Jong-Won Kim¹, TaeWon Seo³, Jongwon Kim^{1,*}

¹Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University,

²Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul National University,

³School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

e-mail: hoonkim@rodel.snu.ac.kr, rokjin@rodel.snu.ac.kr, jwkim@rodel.snu.ac.kr,

taewon_seo@yu.ac.kr, jongkim@snu.ac.kr

요 약

본 논문은 수중 운항 플랫폼 TTURT(Tilt Thrusting Underwater RoboT)의 호버링 제어를 위한 선택적 스위칭 PD 제어기를 제시한다. 본 시스템은 4 개의 추진기와 2 개의 틸팅 모터를 사용하여 6 자유도를 제어하기 때문에 동역학 모델에 비선형성이 나타나고 제어기 구성에 어려움이 발생한다. 이를 극복하기 위하여 전체 시스템의 제어기를 두 개의 하위 제어 모드로 분리하고, 로봇의 상태를 실시간으로 파악하여 이 중 하나의 제어 모드를 선택함으로써 전체 6 자유도를 제어하는 상위 제어기로 구성하였다. 하위 제어 모드는 추진기의 틸팅 각도에 따라 각 3 자유도(x, y, yaw 와 z, roll, pitch)를 제어하는 두 개의 PD 제어기로 구분하였다. 두 하위 제어 모드 각각의 제어 안정성과 과도 시간에서의 제어 안정성을 확인하였고, 임의의 위치와 자세에서의 호버링 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

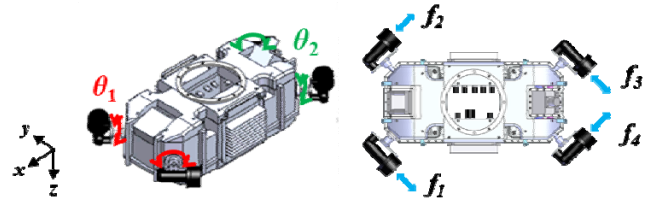
최근 해양 관련 산업이 발전하며 수중 로봇의 필요성과 수요가 증가함에 따라 다양한 수중 로봇이 활발하게 연구되고 있다. 이에 [그림 1]과 같이 수중 작업자의 수작업을 대체하기 위한 소형 수중 로봇 플랫폼을 제시한 바 있으며 [1], 이는 점점, 탐사 작업에 제한된 소형 수중 로봇들과 [2, 3], 그리고 그 외의 실질 작업이 가능한 대형 수중 로봇들과 차별성을 갖는다 [4, 5].



[그림 1] 수중 운항 플랫폼 TTURT

본 시스템은 [그림 2]와 같이 로봇의 네 귀퉁이에 비스듬하게 설치된 4개의 추진기와, 로봇의 전면부, 후면부에서 각각 두 개의 추진기를 틸팅하는 틸팅 모터 2개를 사용하여 전체 6자유도를 제어한다. 4개의 추진기가 로봇의 xy-평면과 수평할 때($\theta_1, \theta_2 = 0^\circ$)는 추진력 f_1, f_2, f_3, f_4 를 독립적으로 제어함으로써 x, y-방향의 위치와 yaw(z-방향 회전) 각도를 제어할

수 있다. 그리고 4개의 추진기가 z-방향과 평행하게 위치할 때($\theta_1, \theta_2 = 90^\circ$)는 남은 z-방향 위치, roll(x-방향 회전), pitch(y-방향 회전) 각도를 제어할 수 있다.



[그림 2] 추진기와 틸팅 모터의 구성

4개의 추진기를 사용함으로써 시스템의 소형화, 경량화에 이점이 있지만 추진기의 틸팅은 동역학 모델의 비선형성을 야기하여 제어의 측면에서는 제어 복잡성을 증가시킨다. 이에 본 연구에서는 이를 극복하는 방법으로 전체 6자유도를 두 개의 3자유도 하위 제어 모드로 분리하고 상황에 맞추어 제어 모드를 선택하는 선택적 스위칭 PD 제어기를 설계하였다. 스위칭 제어기는 일반적으로 여러 보드의 기구학/동역학 모델을 갖는 시스템의 제어를 위해 사용되며, 외벽 등반 로봇의 벽면 전환 [6], 하드 디스크 드라이브 [7] 등에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 추진기의 틸팅 각도에 따라 수평 제어 모드(x, y, yaw), 수직 제어 모드(z, roll, pitch)의 두 가지 하위 PD 제어기를 설계하였고, 실시간으로 로봇의 6자유도 위치/자세를 파악하여 모드 선택 알

고리즘에 따라 우선 제어 모드를 선택한다. 실시간으로 로봇의 6자유도 위치/자세를 파악하며 현재 제어하고 있는 모드의 3자유도 오차가 제어하고 있지 않은 다른 제어 모드의 3자유도 오차보다 적은 크기로 수렴하면 추진기를 틸팅하여 우선 제어 모드를 변경하고, 이를 반복하여 로봇은 6자유도 제어가 가능하다. 본 연구에서는 스위칭 제어기의 제어 이득과 모드 간 최대 이동 시간을 선정하여 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 스위칭 제어를 통한 로봇의 호버링 성능을 검증하였다.

2. 본론

2.1 동역학 모델링

수중 로봇의 일반적인 운동 방정식은 아래와 같다.

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

식 (1)의 $\boldsymbol{\eta}$ 는 공간 프레임에서 로봇의 위치 및 자세 벡터, \mathbf{v} 는 로봇 바디 프레임에서의 선속도와 각속도 벡터이다. \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{g} 는 각각 질량 및 관성 행렬, 코리올리 구심 행렬, 항력 행렬, 그리고 중력 및 부력 벡터이다. $\boldsymbol{\tau}_c$ 와 $\boldsymbol{\tau}_e$ 는 각각 추진력에 의한 힘과 모멘트 벡터, 반력과 외란에 의한 외력 벡터이다.

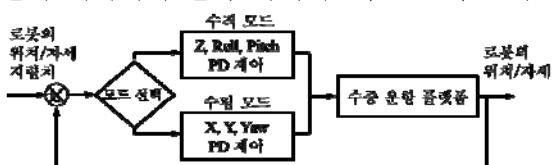
$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{B}(\theta_1, \theta_2) \mathbf{f}, \quad \text{where} \quad (2)$$

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

식(2)와 같이 $\boldsymbol{\tau}_c$ 는 추진력 \mathbf{f} 를 변환하여 생성되는데, 변환 행렬 \mathbf{B} 에 제어 입력인 틸팅각 θ_1 , θ_2 의 코사인, 사인 값이 포함되어 비선형 모델링이 된다.

2.2 선택적 스위칭 PD 제어기

로봇을 실제로 실시간 제어하는 데 있어 제어의 샘플링 시간은 제어 성능에 아주 큰 영향을 미친다. 따라서 실시간 제어의 계산량이 비교적 많은 비선형 제어 알고리즘은 본 시스템에 적합하지 않다. 이에 시스템을 선형화한 후 비교적 간단한 선형 PD 제어기를 기반으로, 두 개의 하위 제어 모드를 선택적으로 사용하는 스위칭 제어기를 대안으로 선택하였다. 전체 제어기의 블록 다이어그램은 그림 3과 같다.



[그림 3] 스위칭 제어기의 블록 다이어그램

로봇은 제어 지령치와 현재 위치/자세를 비교하여 수직 모드 3자유도(z , $roll$, $pitch$)와 수평 모드 3자유도(x , y , yaw) 중 우선적으로 제어해야 하는 모드를 선택하여, 그 결과에 따라 추진기를 틸팅하여 해당 모드의 3자유도를 제어한다. 해당 모드의 3자유도가 다른 모드의 3자유도보다 제어 지령치에 더 수렴하면 추진기를 틸팅하여 다른 제어 모드를 제어하고, 이를 반복하여 로봇이 지령 위치/자세에서 호버링 제어한다.

$$\mathbf{M}_{Ver} \dot{\mathbf{v}}_{Ver} + \mathbf{C}_{Ver}(\mathbf{v}_{Ver})\mathbf{v}_{Ver} + \mathbf{D}_{Ver}(\mathbf{v}_{Ver})\mathbf{v}_{Ver} = \mathbf{B}(90^\circ, 90^\circ) \mathbf{f}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{Hor} \dot{\mathbf{v}}_{Hor} + \mathbf{C}_{Hor}(\mathbf{v}_{Hor})\mathbf{v}_{Hor} + \mathbf{D}_{Hor}(\mathbf{v}_{Hor})\mathbf{v}_{Hor} = \mathbf{B}(0^\circ, 0^\circ) \mathbf{f}, \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_{Ver} = \mathbf{B}(90^\circ, 90^\circ)^T \mathbf{J}_{Ver}^T [\mathbf{K}_{P,Ver} \mathbf{e}_{Ver} + \mathbf{K}_{D,Ver} \dot{\mathbf{e}}_{Ver}], \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_{Hor} = \mathbf{B}(0^\circ, 0^\circ)^T \mathbf{J}_{Hor}^T [\mathbf{K}_{P,Hor} \mathbf{e}_{Hor} + \mathbf{K}_{D,Hor} \dot{\mathbf{e}}_{Hor}], \quad (6)$$

수직 모드와 수평 모드에서의 동역학 식은 각각 식 (3), (4)와 같이 선형화되고, 식 (5), (6)의 PD 제어식을 통해 추진기의 제어 입력을 결정하고 각각의 3자유도를 제어할 수 있다.

2.3 스위칭 제어기의 제어 안정성 검증

2.3.1 하위 PD 제어기의 안정성

두 개의 하위 PD 제어기는 각 3자유도의 비례 제어 이득, 미분 제어 이득이 존재하여 총 12개의 이득 값을 선정하여야 한다. 이와 같은 다중입출력 시스템에 대하여 임의의 이득을 시행착오법으로 선정한 제어기를 사용하는 경우, 제어 성능을 향상하는데 한계가 존재한다. 본 연구에서는 12개의 이득을 Matlab 최적화 툴박스의 fmincon() 함수가 제공하는 trust-region algorithm을 사용하여 최적화하였다.

각 하위 제어 모드에서는 3자유도의 제어 지령을 독립적으로 인가하여 시뮬레이션을 통한 수렴 시간을 계산하고, 3개의 수렴 시간을 무차원화한 값의 합을 최적화의 목적함수로 설정하였다. 최적화의 제한 조건으로는 모든 자유도의 오버슈트(overshoot)가 지령치의 10%를 넘지 않도록 하였고, 이론적 제어 안정성을 위하여 제어식 Lyapunov 함수의 \mathbf{Q} 행렬이 항상 양의 정부호 행렬(positive definite) 조건을 만족하도록 하였다.

두 하위 제어 모드의 각 제어 이득의 초기값과 최적값, 목적 함수의 향상 정도는 표1, 표2와 같다.

표 1 두 하위 PD 제어기의 이득 최적화

Initial gain							
Vertical mode			Horizontal mode				
$\mathbf{K}_{P,Hor}$	43	43	54	$\mathbf{K}_{P,Ver}$	37	87	107
$\mathbf{K}_{D,Hor}$	90	62	59	$\mathbf{K}_{D,Ver}$	101	39	39
f	40.00			f	40.00		
Optimized gain							
Vertical mode			Horizontal mode				
$\mathbf{K}_{P,Hor}$	44	150	12	$\mathbf{K}_{P,Ver}$	38	5	56
$\mathbf{K}_{D,Hor}$	89	200	12	$\mathbf{K}_{D,Ver}$	101	6	37
f	35.74			f	36.18		

2.3.2 과도 시간에서의 제어 안정성

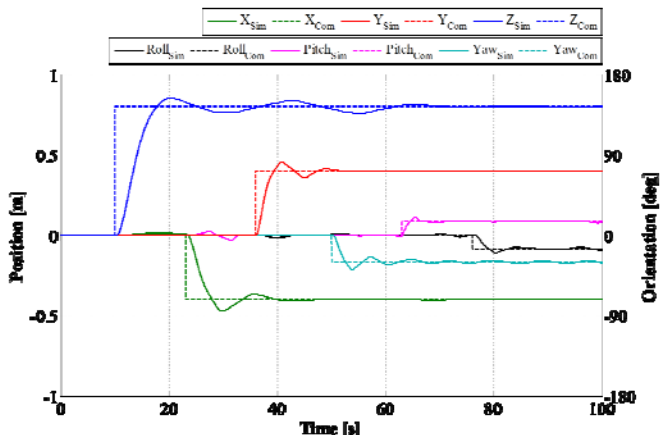
두 하위 제어 모드 간의 변경은 물리적으로 추진기 틸팅각의 0°, 90° 간의 이동을 뜻하고, 틸팅 모터의 위치 제어에는 시간이 소요되며 이를 과도 시간이라고 하였다. 앞 절에서는 두 하위 제어 모드 각각의 제어 안정성을 최적화 과정의 제한조건 설정을 통하여 해결하였으나, 전체 시스템의 제어 안정성을 보장하기 위해서는 이 과도 시간에서의 안정성 또한 확인하여야 한다. 즉 과도 시간이 너무 길어서 모드 변경 후의 위치/자세가 하위 PD제어기의 제어 불가능한 영역으로 이동하지 않도록, 추진기의 틸팅 속도에 제한을 두어야 한다. 본 연구에서는 과도 시간을 400ms에서 1200ms까지 200ms 간격으로 설정하여 시뮬레이션을 통한 제어 성능을 시험하였고, 과도 시간이 600ms 이하일 때 과도 시간 동안의 위치/자세 오차가 제어 가능 영역 내에 존재함을 확인하였다.

2.4 시뮬레이션 결과

앞 장에서 얻은 두 하위 PD제어기의 최적 제어 이득과 최대 과도 시간을 반영한 전체 시스템의 제어기의 제어 성능과 안정성을 아래와 같이 확인하였다.

초기의 위치/자세에서(0 m, 0°), x, y, z, roll, pitch, yaw의 6자유도의 제어 입력을 각각 -0.4 m, 0.4 m, 0.8 m, -15°, 15°, 30°의 스텝 입력으로 인가하였다. 그 결과 6자유도 모든 방향에서 적은 오버슈트로 빠른 시간 내에 수렴하고, 하위 제어 모드 간의 이동 시에도 제어 안정성이 깨지지 않음을 검증하였다.

그림4 첨자의 Sim과 Com은 각각 시뮬레이션 결과(Simulation), 제어 입력(Command)를 의미한다.



[그림 4] 시뮬레이션을 통한 제어 성능 검증

3. 결론

본 논문에서는 틸팅이 가능한 소형 수중 운항 플랫폼의 호버링 제어를 위한 선택적 스위칭 PD 제어기를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 설계한 제어기의 제어 성능을 확인하였다. 선택적 스위칭 PD 제어기는 두 개의 하위 제어 모드로 이루어지고, 하위 제어 모드는 추진기의 틸팅각에 따라서 수직 모드와 수평 모드로 구분된다. 선택적 스위칭 PD 제어기의 제어 성능 향상을 위하여 두 하위 제어 모드 각각의

비례제어이득, 미분제어이득 총 12개의 제어 이득을 최적화하였고, 전체 제어기의 제어 안정성을 위한 최대 과도 시간을 시뮬레이션을 통해 설정하였다. 최적 제어 이득과 최대 과도 시간을 사용한 제어기를 적용한 수중 운항 플랫폼의 호버링 제어 성능을 시뮬레이션을 통해 성공적으로 검증하였다.

후기

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

참고문헌

- [1] S. Jin, S. Lee, J. Kim, J. Kim, and T.W. Seo, "Design of Hovering Underwater Robotic Platform to Capture Harmful Marine Organisms," *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012 12th International Conference on*, 17-21 Oct. 2012, pp. 1747-1751.
- [2] F. Zhang, J. Thon, C. Thon, and X. Tan, "Miniature underwater glider: design and experimental results," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 19, no. 1, 2014, pp. 394-399.
- [3] F. G. Serchi, A. Arienti, and C. Laschi, "Biomimetic vortex propulsion: toward the new paradigm of soft unmanned underwater vehicles," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 2, 2013, pp. 484-493.
- [4] I.R. Hudson, D. Jones, and B.D. Wigham, "A review of the uses of work-class ROVs for the benefits of science: Lessons learned from the SERPENT project," *International Journal of the Society for Underwater Technology*, Vol. 26, No. 3, 2005, pp 51-56.
- [5] D.K. Das and J. Gonzalez, "Deep subsea oil and gas infrastructure development: some challenges and solutions," *Journal of Pipeline Engineering*, Vol. 9, Issue 3, 2010, pp. 161-166.
- [6] T.W. Seo, H.S. Kim, D.S. Kang, and J. Kim, "Gain-scheduled robust control of a novel 3-DOF micro parallel positioning platform via a dual stage servo system," *Mechatronics*, vol. 18, no. 9, 2008, pp. 495-505.
- [7] T. Yamaguchi, H. Numasato, and H. Hirai, "A Mode-Switching Control for Motion Control and Its Application to Disk Drives: Design of Optimal Mode-Switching Conditions," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 3, no. 3, Sept. 1998, pp. 202-209.