



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

무인잠수정의 조류 외란을
고려한 경로 추종 제어기 설계

2017년 8월

서울대학교 대학원
조선해양공학과
이 주 호

초 록

작동기수가 부족한 대표적인 운동체인 어뢰형 무인잠수정의 경로 추종 문제는 비선형성이 큰 시스템의 특성으로 인해 비선형 제어 분야에서 다양하게 연구되었다. 운항속도가 느리고 제어판의 크기가 상대적으로 작아 외란의 영향이 큰 구조적 특징으로 인해 조류와 같은 미지의 환경 외란과 모델링 불확실성은 어뢰형 무인잠수정의 경로 추종 문제에 있어서 극복해야하는 과제로 떠올랐다. 이를 해결하기 위해 복합 시선각 유도(Augmented LOS guidance) 기법 등 외란의 영향을 보상할 수 있는 유도 방식을 채택하거나 리아프노프 기법(Lyapunov method)을 활용한 제어 기법, 적응 제어 기법(Adaptive control) 등을 활용한 다양한 경로 추종 제어가 제안되어왔다.

본 논문은 경로에 접하고 있는 경로 좌표계상에서의 경로 이탈 오차 값과 무인잠수정의 선체고정좌표계에서 측정되는 속도 성분들을 이용하여 목표 선수각(Desired angle)을 계산하는 새로운 형태의 비선형 유도 방식을 제안하였다. 시스템의 안정성을 위해 유도 법칙 계수가 이용되었으며, 리아프노프 안정성 이론을 이용하여 제안된 유도 방식의 경로 수렴성을 증명하였다. 제안된 유도 방식은 미끄러짐 속도(Side-slip velocity)가 존재하지 않는 경우 경로 추종에 가장 많이 활용되는 방식인 시선각 유도 법칙(LOS guidance)과 같은 형태를 띠게 된다.

2차원 직선 경로에 대한 경로 추종 시뮬레이션을 통해 시선각 유도(LOS guidance), 그리고 강화 시선각 유도 기법의 하나인 적분-시선각 유도(Integral-LOS guidance) 방식과 성능을 비교분석 하였다. 퍼센트 오버슈트(% Overshoot)와 경로 이탈 오차에 대한 비용 함수, 정상상태 오차(Steady-state error), 방향타 속도(Rudder rate)에 대한 비용 함수 등을 비교 분석한 결과, 제안된 유도 방식은 조류의 영향이 없는 환경에서는 다른 유도 방식과 비슷한 성능을 보였지만 조류가 있는 환경에서는 오버슈트와 경로 이탈 오차의 측면에서 성능이 뛰어난 모습을 보였다.

모델링 불확실성과 미지의 외란을 고려하기 위해 제안된 유도 방식을 신경회로망 기반 적응 제어 기법에 적용하여 최종적인 경로 추종 제어기를 설계하였다. 작동기의 위치와 속도 포화도(saturation)에 따른 시스템의 비선형성에 신경회로망이 적용하여 성능이 저하되는 것을 방지하기 위해 PCH 기법을 사용하였다.

무인잠수정의 일반적인 구조적 특징에 따라 횡동요 운동이 생략된 5자유도 운동을 고려하였다. 또한 크기가 일정하고 비회전성인 조류 조류의 속력이 무인잠수정의 속력보다 작고 무인잠수정의 추력은 일정하다는 가정 하에 조류에 대한 외력을 조류에 대한 상대속도를 이용하여 단순화하였다. 조류에 대한 상대속도와 관련된 유체력 미계수와 조류 속도를 미지의 값으로 설정한 후, 운동방정식을 모델링이 된 항과 모델링되지 않은 항으로 구분하였다. 3차원 곡선 경로에 대한 경로 추종 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안된 경로 추종 제어기의 적응 신호(Adaptive signal)가 운동방정식의 모델링 되

지 않은 항에 수렴하는 것을 보였으며, 수평방향 경로 이탈 오차 0.1m 이내, 중력의 영향이 작용하는 수직방향의 경로 이탈 오차는 2m 이내로 충분히 우수한 경로 추종 성능을 보였다.

주요어: 어뢰형 무인잠수정, 3차원 경로 추종, 조류 외란, 모델링 불확실성, 유도 법칙, 인공신경망, 적응 제어, PCH 기법

학 번: 2015-21173

목 차

제 1 장 서론	9
제 2 장 무인잠수정의 운동방정식	14
제 1 절 좌표계 설정	14
제 2 절 운동학(Kinematics)	17
제 3 절 운동방정식(Equations of Motion)	18
제 3 장 유도 법칙(Guidance Law)	22
제 1 절 유도-항법-제어 (GNC) 시스템	22
제 2 절 제어 목표(Control Object)	26
제 3 절 시선각 유도 법칙	27
제 4 절 적분-시선각 유도 법칙	29
제 5 절 비선형 시선각 유도 방식	30
제 1 항 유도 법칙	30
제 2 항 경로 수렴성 증명	31
제 3 항 비선형 시선각 유도 방식 특성 분석	34
제 4 장 제어기 설계	37
제 1 절 의사제어(Pseudo Control) 기법	37
제 2 절 신경회로망 기반 적응 제어	40
제 3 절 Pseudo Control Hedging (PCH) 기법	43
제 4 절 제어기 구성	45
제 5 장 시뮬레이션	47

제 1 절 시뮬레이션 조건	47
제 2 절 오픈루프 시뮬레이션	49
제 3 절 유도 방식에 따른 비교	53
제 4 절 3차원 곡선 경로 추종	57
결 론	62
참고문헌	64
Abstract	68

표 목차

Table 1 Guidance Logic and Controller of Previous Researches	25
Table 2 Parameters of REMUS 100.....	48
Table 3 Current Conditions.....	48
Table 4 Open-loop Simulation Conditions (Presto, 2001)....	50
Table 5 Simulation Results by Guidance Law	57

그림 목차

Figure 1 Coordinate System.....	14
Figure 2 GNC System.....	22
Figure 3 Position Error in Path-tangential Frame.....	26
Figure 4 Illustration of LOS Guidance.....	28
Figure 5 Illustration of Proposed Nonlinear LOS Guidance	31
Figure 6 Illustration of Proposed Nonlinear LOS Guidance when $v = 0$	34
Figure 7 Structure of a Neural Network with a Single Hidden Layer.....	41
Figure 8 Path-following System Block Diagram.....	46
Figure 9 The REMUS 100 Autonomous Underwater Vehicle	47

Figure 10 Horizontal Open-loop Simulation Result	51
Figure 11 Vertical Open-loop Simulation Result	52
Figure 12 Trajectory of Path-following Systems in Case 1	53
Figure 13 Control Input of Path-following Systems in Case 1	54
Figure 14 Trajectory of Path-following Systems in Case	54
Figure 15 Control Input of Path-following Systems in Case 2	54
Figure 16 Trajectory of Path-following Systems in Case 3	55
Figure 17 Control Input of Path-following Systems in Case 3	55
Figure 18 Trajectory of AUV for 3D Curved Path	58
Figure 19 Trajectory of AUV in x-y/x-z plane for 3D Curved Path	58
Figure 20 Command and Reference angle	59
Figure 21 Unknown Terms and Adaptive Signal in Horizontal and Vertical plane	59
Figure 22 Control Input and Control Input Rate	60

제 1 장 서 론

해양무인체계에 대한 관심이 확대됨에 따라 무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 무인체계는 극한의 환경과 같이 위험도가 높은 임무 또는 단순 반복 작업과 같이 복잡한 의사결정이 필요하지 않은 임무에 대해 기존의 유인체계를 효율적으로 대체할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 환경 모니터링, 해저 탐사 및 매핑(mapping), 해양플랜트 설치 및 검사, 심해 케이블 또는 파이프라인 모니터링 등 민간 분야의 수요뿐만 아니라, 특히 무인잠수정의 은밀성으로 인해 정찰, 감시와 같은 국방 분야에서 필요성이 증대되었다.

무인잠수정은 지형과 장애물과 같은 임무 수행 환경을 고려하여 지정된 경로를 따라 운용이 되기 때문에 경로를 이탈할 시 충돌 위험과 유실 위험이 높아진다. 또한 최적화된 경로를 벗어나는 것은 임무 수행시간의 증가로 이어지기 때문에, 제한된 배터리를 사용하여 운행되는 무인잠수정의 안전하고 효율적인 임무 수행에 있어서 높은 경로추종 성능은 중요한 요소 중 하나이다.

어뢰형 무인잠수정의 경우 일반적인 형상의 선박과 더불어 대표적인 작동기수가 부족한(underactuated) 시스템이다. 이러한 시스템 특성으로 인해 어뢰형 무인잠수정의 경우 비선형성이 크고, 이로 인해 선박 또는 어뢰형 무인잠수정의 경로 추종 문제는 비선형제어 분야에서 각광을 받았다. 또한 어뢰나 미사일과 같은 운동체에 비해

운용 속도가 느리고 제어판의 크기가 상대적으로 작아 조류와 같은 환경외란에 매우 민감하다는 특징을 가지고 있기 때문에 모델의 비선형성, 모델링 불확실성, 그리고 조류 외란을 고려한 다양한 경로 추종 제어기의 연구가 진행되었다.

대부분의 자율운행 운동체들은 제어 시스템을 유도(Guidance), 항법(Navigation), 그리고 제어(Control)를 담당하는 세 개의 블록으로 이루어진 GNC (Guidance-Navigation-Control) 구조로 구성된다 (Fossen, 2002; Breivik, 2010). 이들의 블록들은 서로 상호작용하며 앞선 블록에서 다음 블록으로 정보를 전달하는 Cascaded 형태를 지닌다. 어뢰형 무인잠수정의 경우 운동학적인 역할을 하는 유도블록에서 기준 자세(reference attitude)를 계산하고, 동역학적인 역할을 하는 제어블록에서 이를 추종하도록 제어명령을 생성한다. 유도 방식과 제어기의 종류에 따라 다양한 연구가 진행되어왔으며, 조류 외란의 영향을 보상할 수 있는 유도 방식과 무인잠수정의 비선형성과 모델링 불확실성을 고려할 수 있는 제어기가 주로 연구되어왔다.

전통적으로 항해사들이 사용하는 경로 추종 방식에서 착안된 시선각 유도(Line-of-sight guidance)는 직관적인 개념으로 인해 활발히 사용되었다. Healey와 Lienard (1993)는 수평면 운동과 수직면 운동의 연성 효과가 작다고 가정하고 시선각 유도법칙과 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 수평면, 수직면, 그리고 속도 제어기를 설계하였다. 또한 조류의 영향을 고려하기 위해 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)를 사용하여 조류에 대한 잠수정의 상대 속도를 추정하였고, 추정값을 제어기에 사용하였다. Breivik와

Fossen (2003)은 시선각 유도법칙과 백스테핑 제어기를 이용하여 선박의 수평면 경로 추종을 수행하였으며, 설계한 경로 추종 제어기의 안정성을 증명하였다.

Borhaug 외 (2008)은 시선각 유도방식이 곡선 경로 추종 또는 일정한 외란이 작용하는 경우 정상상태 편차가 발생한다는 것을 지적하고 적분 시선각 유도방식(Integral LOS guidance)를 제안하였다. 적분 시선각 유도방식은 비례-적분-미분 제어기(PID controller)에서 적분 제어기를 통해 정상상태 오차를 줄이는 것과 비슷한 원리로서 시선각 유도에 적분기를 추가한 형태이다. Lekkas (2014)는 외란 관측기 기반의 적응 제어 기법을 적분 시선각 유도방식에 적용하여 경로 추종 성능을 개선하였다.

Moe 외 (2016)은 기존의 연구들이 운동체의 실제 운용에서 측정이 어려운 조류에 대한 운동체의 상대속도를 비선형 제어기에 사용한다는 점을 지적하고, 일반적으로 계측되는 지구절대좌표계 상에서의 속도만을 피드백하는 적응 제어기 기반 피드백 선형화 제어기를 통해 경로 추종을 수행하였다.

이와 같이 시선각 유도 기반의 경로 추종 연구는 운동학(kinematic) 단계에서 조류의 영향을 보상하기 위한 방향으로 진행되었다. 운동 모델의 비선형성을 고려하기 위하여 대부분 궤환 선형화 제어(feedback linearizing control)을 사용하였으며, 몇몇 연구들에서 모델링 불확실성을 고려하기 위해 강인 제어(robust control) 기법의 한 종류인 슬라이딩 모드 제어(sliding-mode control) 기법을 적용하였다. 하지만, 대부분의 연구가 작동기의 위치/속도 포화도

(saturation)를 제어기 설계에 반영하지 않았다는 단점이 존재한다. 일부 연구에서 작동기의 위치 포화도를 고려하긴 하였지만, 시스템의 비선형성을 높이는 시간 지연(time-delay)의 원인 중 하나인 작동기의 속도 포화도를 고려하지 못했다.

지상 모바일 로봇의 경로 추종에 사용되는 방식을 무인잠수정에 적용한 연구도 존재한다. Lapierre 와 Soetanto (2007)은 지상 모바일 로봇의 경로 추종에 사용되는 방식을 응용하여 무인잠수정의 운동방정식을 고려한 비선형 경로 추종 방식을 제안하였다. Lapierre 와 Jouvencel (2008)은 모델링 불확실성을 고려하여 개선된 경로 추종 제어를 제안하였다. 또한 Bibuli 외 (2009)은 조류의 영향을 고려하여 경로 추종 성능을 높였으며 이를 실험을 통해 검증하였다.

하지만 유도 방식의 특이점(singularity) 발생을 해결하기 위해 경로를 Serret-Frenet 좌표계로 변환하고 경로 위의 가상 목표를 설정했기 때문에 좌표계 변환에 따른 복잡함이 존재한다. 또한 제어기 설계에서 작동기의 위치/속도 포화도를 고려하지 않았으며, 경로 추종 제어기의 안정성이 수학적으로 완벽하게 증명되지 않았다는 단점이 있다.

본 연구는 기존에 경로 추종 연구에 활발히 응용되었던 시선각 유도방식을 변형한 비선형 시선각 유도방식을 제안한다. 무인잠수정과 경로의 운동학을 통해 제안하는 유도방식의 경로 수렴성을 보이고, 조류가 존재하는 환경에서의 경로 추종 성능을 타 유도 법칙과 비교분석하였다. 최종적으로 제안된 유도방식과 모델링 불확실성과 미지의 조류 영향을 보상하기 위해 신경회로망 기반 적응 제어 기

법을 결합하여 경로 추종 제어를 설계하였다. 작동기의 위치/속도 포화도를 고려하고 신경회로망이 이와 같은 시스템의 비선형성에 적응하여 성능이 저하되는 것을 방지하기 위해 PCH(Pseudo control hedging) 기법을 적용하였으며, 곡선 경로에 대한 경로 추종 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

제 2 장 무인잠수정의 운동방정식

제 1 절 좌표계 설정

경로 추종 제어기 설계에 앞서 3가지 좌표계를 정의한다. 관성좌표계인 지구고정좌표계는 x 축과 z 축이 각각 진북 방향과 지구 중심 방향을 나타내는 직각우수좌표계이다. 선체고정좌표계는 x 축이 무인잠수정의 길이방향 중심과 평행하며 연직하방을 z 축으로 하는 직각우수좌표계이다. 선체고정좌표계의 중심은 부력 중심에 위치한다. 경로좌표계의 원점은 선체고정좌표계의 원점에서 경로 C 로 내린 수선의 발에 위치하며, 경로의 접선방향을 x 축으로 한다. 아래의 그림 1은 정의된 좌표계를 나타낸다.

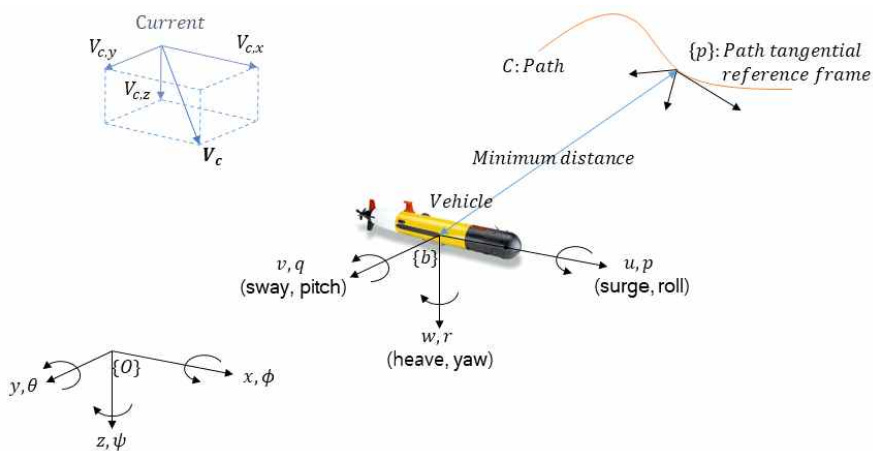


Figure 1. Coordinate System

여기서 u, v, w 는 각각 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 상하동요(heave) 속도를 나타내며, p, q, r 은 각각 x, y, z 축을 중심으로 하는 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw) 회전 속도를 나타낸다. ϕ, θ, ψ 는 횡동요, 종동요, 그리고 선수동요 각을 의미한다. 정의된 좌표계를 이용하여 지구고정좌표계에 대한 5자유도 무인잠수정의 위치와 자세를 나타내는 상태 벡터 η 와 선체고정좌표계에서의 속도와 각속도를 나타내는 벡터 ν 를 정의하면 다음과 같다

$$\eta \equiv [x \ y \ z \ \theta \ \psi]^T \quad (1)$$

$$\nu \equiv [u \ v \ w \ q \ r]^T \quad (2)$$

운동방정식을 서술하기에 앞서 본 연구에서 운동모델 설정을 위해 사용한 가정들을 기술하면 다음과 같다.

가정 1) 일반적으로 무게중심이 부력중심보다 낮게 설계되는 무인잠수정의 특성상 횡동요 운동은 복원성을 지닌다(Caharija, et.al, 2012). 본 연구에서도 이러한 가정을 적용하여 무인잠수정의 횡동요 운동을 제외한 5자유도를 고려한다.

가정 2) 무게중심과 부력중심은 선체고정좌표계 상에서 같은 수직축에 위치한다.

가정 3) 무인잠수정의 xz 평면을 기준으로 대칭(symmetric)이며, 폭에 대한 길이의 비가 매우 크다.

가정 4) 선체고정좌표계 상에서의 x 축 방향 운동은 다른 운동과 연성되지 않는다.

가정 5) 무인잠수정은 일정한 추력으로 추진하며, 속도의 크기는 설계 속도의 일정 범위 내에 한정된다.

가정 6) 조류는 일정하고 비회전성이다. 조류 속도의 크기는 한정되며 이는 무인잠수정의 설계 속도보다 작다.

$$\mathbf{v}_c^T \equiv [V_{c,x} \ V_{c,y} \ V_{c,z} \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

$$V_{design} > V_{c,max} \geq \sqrt{V_{c,x}^2 + V_{c,y}^2 + V_{c,z}^2} \geq 0 \quad (4)$$

가정 1) ~ 4)는 어뢰형 무인잠수정의 조종 제어 분야에서 일반적이며, 이는 REMUS와 ISiMI에서 타당하다(Prestero, 2001; Jun, et.al., 2009). 또한 가정 5)와 6)에 의해 무인잠수정에 작용하는 조류에 의한 외란은 조류에 대한 상대속도를 운동방정식에서 사용하여 고려한다.

제 2 절 운동학(Kinematics)

선체고정좌표계에서 지구고정좌표계로의 속도 회전변환 행렬은 zyx 회전에 따라 아래와 같이 정의된다(Fossen, 2002).

$$J(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} J_1(\boldsymbol{\eta}) & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & J_2(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J_1(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad J_2(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

속도 회전변환 행렬을 이용하면 무인잠수정의 운동학은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \\ &= J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}_r + J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}_c \\ &= J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}_r + [V_{c,x} \ V_{c,y} \ V_{c,z} \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\nu}_r = \boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\nu}_c \quad (8)$$

이때 아래첨자 r 은 조류에 대한 상대값을 의미하며, 아래첨자 c 는 조류의 값을 의미한다.

제 3 절 운동방정식(Equations of Motion)

무인잠수정의 운동방정식을 정의하기 위해 무인잠수정을 강체(rigid body)로 가정하면, 무인잠수정의 5자유도 운동방정식은 다음과 같다.

$$(M_{RB} + M_A)\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu + C_A(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau_{thrust} + \tau_{current} + \tau_{control} \quad (9)$$

이때 $M_{\{.\}}$ 은 관성행렬(inertia matrix), $C_{\{.\}}$ 는 코리올리 힘과 원심력(Coriolis - centrifugal matrix), D 는 감쇠행렬(damping matrix), $g(\eta)$ 는 정유체력과 중력(buoyancy-gravitational forces and moments), 그리고 $\tau_{\{.\}}$ 는 외력을 의미한다.

정유체력과 중력의 경우 무인잠수정의 부력중심 $[x_b \ y_b \ z_b]$ 과 무게중심 $[x_g \ y_g \ z_g]$, 자세, 그리고 부력 B 와 무게 W 에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} -(W-B)\sin\theta \\ 0 \\ (W-B)\cos\theta \\ -(z_g W - z_b B)\sin\theta - (x_g W - x_b B)\cos\theta \\ -(y_g W - y_b B)\sin\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

수중운동체의 감쇠력은 경계층(boundary layer)에 의한 표면 마찰 (skin friction)과 보텍스 shedding(vortex shedding)을 주요 항으로 한다. 수면 아래를 고속으로 움직이는 운동체의 경우 비선형성이 크고 연성이 심한 감쇠행렬을 가진다. 하지만 무인잠수정의 비교적 느린 운용 속도와 구조적 대칭성을 고려할 때, 고차항과 연성항을 무시하여 감쇠행렬을 간소화할 수 있다. 폭에 대한 길이의 비가 큰 어뢰형 무인잠수정의 알몸선체의 경우, x 방향 감쇠력은 경험식을 통해 구할 수 있으며, 그 이외의 항들은 스트립 이론(strip theory)과 세장체 이론(slender body theory)을 적용하여 이론적으로 감쇠행렬의 각 항을 구할 수 있다. 또한 수조 모형 시험을 통해 이론적으로 구한 유체력 미계수에 수정계수(correction factor)를 적용하여 더 실제 모델에 가깝도록 한다. 고차항과 연성항을 제외하고 감쇠행렬을 구성하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \begin{bmatrix} X_{u|u} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v} & 0 & 0 & Y_{r|r} \\ 0 & 0 & Z_{w|w} & Z_{q|q} & 0 \\ 0 & 0 & M_{w|w} & M_{q|q} & 0 \\ 0 & N_{v|r} & 0 & 0 & N_{r|r} \end{bmatrix} \quad (11)$$

부가질량력과 부가관성모멘트는 무인잠수정이 전진하며 유체장을 가속시키기 때문에 무인잠수정의 운동을 방해하는 방향으로 작용하는 힘과 모멘트이다. 관성 행렬 M 과 코리올리-원심력 행렬 C 는 무인잠수정의 관성 항과 부가질량에 의한 항을 합하여 다음과 같이

나타낸다.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m - Y_v & 0 & 0 & mx_g - Y_r \\ 0 & 0 & m - Z_w & -mx_g - Z_q & 0 \\ mz_g & 0 & -mx_g - M_w & I_y - M_q & 0 \\ -my_g & mx_g - N_v & 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -mr & mq & -mx_g q - X_{wq} w & -mx_g r - X_{vr} v \\ mr & 0 & 0 & mz_g r & -my_g r - Y_{ur} u \\ -mq & 0 & 0 & -mz_g q - Z_{uq} u & my_g q \\ mx_g q - M_{uw} w & -mz_g r & mz_g q & 0 & 0 \\ mx_g r - N_{uv} v & my_g r & -my_g q & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

추진기에 의한 힘 τ_{thrust} 의 크기는 정상상태 속도를 가질 때의 x 방향 항력 $X_{u|u} u_{norm} |u_{norm}|$ 과 같고, 편에 의한 제어력 $\tau_{control}$ 은 양력 이론에 의해 계산된다.

조류의 영향에 의한 외력은 조류에 대한 상대속도를 운동방정식에 고려하는 것으로 단순화할 수 있다(Fossen, 2002). 앞 절의 가정 6)에 의해 조류와 함께 움직이는 좌표계는 관성좌표계로 간주할 수 있고, 이때 관성력은 관성좌표계 상에서 같다.

$$M_{RB} \dot{\boldsymbol{v}} + C_{RB}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} = M_{RB} \dot{\boldsymbol{v}}_r + C_{RB}(\boldsymbol{v}_r)\boldsymbol{v}_r \quad (14)$$

이에 따라 조류에 대한 상대속도를 이용하여 운동방정식을 단순화하면 다음과 같다.

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}} + C_{RB}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + C_A(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + D(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + g(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{thrust} + \boldsymbol{\tau}_{control} \quad (15)$$

5자유도 운동방정식을 성분별로 다시 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(\dot{q}^2 + r^2) - y_g\dot{r} + z_g\dot{q}] &= X \\ m[\dot{v} + ur + x_g\dot{r} - y_g r^2 + z_g qr] &= Y \\ m[\dot{w} - uq - x_g\dot{q} + y_g rq - z_g q^2] &= Z \\ I_y\dot{q} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq)] &= M \\ I_z\dot{r} + m[x_g(\dot{v} + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 m 은 운동체의 질량을 의미하고, I_y, I_z 는 각각 y, z 방향으로의 질량 2차 모멘트를 의미한다. $[x_g, y_g, z_g]$ 는 운동체 무게중심의 각 축 방향 위치를 뜻하며 가정 2)와 가정 3)에 의해 $x_g = y_g = 0$ 이다. 식 (16)의 우변에 있는 X, Y, Z, M, N 는 각 방향의 외력을 뜻하며 정유체력, 동유체력, 복원력, 그리고 추력과 제어력을 포함한다.

유도 법칙 (Guidance Law)

제 1 절 유도-항법-제어(GNC) 시스템

본 연구에서 제안하는 유도 법칙에 대한 소개에 앞서 GNC 시스템에 대한 간략한 설명을 기술한다. 선박 또는 수중 운동체의 운동 제어 시스템은 대부분 GNC 시스템으로 구성되어있다(Fossen, 2002; Fossen, et.al., 2015). GNC 시스템은 서로 데이터와 신호를 주고받으며 상호작용하는 유도, 항법, 제어 블록으로 구성된다. GNC 시스템은 운동체의 제어를 수행함에 있어서 개념이 직관적이고, 각각 발전해온 유도 이론과 제어 이론, 그리고 항법 이론을 각각의 블록에 적용하여 다양한 GNC 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있다. 다음의 그림은 GNC 시스템의 예를 나타낸다(Fossen, 2002).

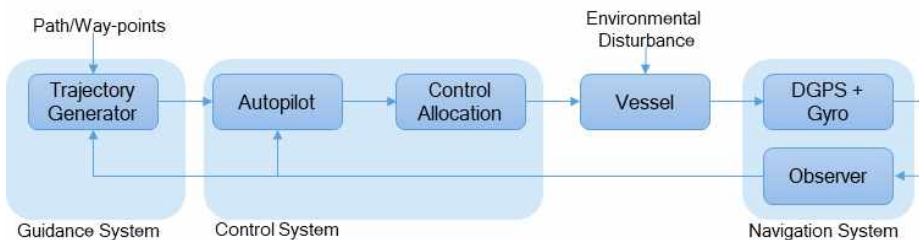


Figure 2. GNC System

유도 블록은 위치/자세/속도/가속도 명령(command)을 계산하여

제어 블록에서 사용할 수 있도록 하며, 운용속도가 비교적 느리고 선미에 추진기와 작동기를 가지고 있는 어뢰형 무인잠수정의 경로 추종 문제에서는 일반적으로 유도 블록을 통해 선수각 명령(heading angle command)을 계산한다. 경로 추종 문제의 유도 블록을 구성하는 것으로는 운동체의 상태 벡터와 속도 벡터, 그리고 경로 정보이며, 때로는 외란 관측기를 통해 관측한 환경 외란 정보를 이용하기도 한다.

운동체를 경로 위로 위치시키는 유도 문제는 경로가 시간의 함수로 표현되는 경로 추적(trjectory tracking)문제와 시불변(time-invariant) 경로를 다루는 경로 추종(path following)문제로 분류된다(Aguiar, et.al., 2007). 어뢰형 무인잠수정과 같은 작동기수가 부족한 시스템에 대한 경로 추적 문제는 특이점이 발생하는 문제가 존재하므로 경로 추종 문제를 다루는 것이 일반적이다.

항법 블록은 운동체의 위치, 자세 및 속도를 결정하여 유도 블록과 제어 블록에서 사용할 수 있도록 한다. 일반적인 수상선의 경우 위성 항법 시스템(GPS)과 동작 센서(motion sensor)인 가속도계, 그리고 회전 센서(rotation sensor)인 자이로 등을 센서 융합하여 항법 블록을 구성한다. 무인잠수정과 같이 위성 항법 시스템의 사용이 불가능한 경우 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)와 도플러 속도측정 센서(DVL), 그리고 조류의 속도를 측정하는 초음파해류계(Acoustic Doppler Current Profiler, ACDP), 조류에 대한 상대속도를 측정하는 paddle wheel flow meter 등을 융합하여 항법 블록을 구성하게 된다(Han, et.al., 2015).

제어 블록은 유도 블록을 통해 계산한 명령값과 항법 블록을 통해 얻은 운동체의 현재 상태를 통해 제어 목적에 맞는 제어력을 계산하고 이를 할당하는 역할을 한다. 유도 블록으로부터 계산된 자세 명령값은 운동체의 동역학을 고려하지 않고 계산된 값이고, 또한 제어를 위해서는 자세 명령값의 미분값 등을 사용해야 하기 때문에, 유도 블록과 제어 블록 사이에 자세 명령값으로부터 운동체가 추종해야 하는 기준(reference) 자세를 계산하는 기준 모델을 두는 것이 일반적이다. 비선형성이 크고 외란의 영향이 큰 어뢰형 무인잠수정의 경우, 대부분의 연구들은 슬라이딩 모드 제어기, 궤환 선형화 제어기, 적응 제어기 등을 이용하여 경로 추종 제어기를 구성하였다. 아래의 표는 기존의 연구들에서 사용된 유도 방식과 제어기를 정리한 표이다.

Table 1. Guidance Logic and Controller of Previous Researches

	유도방식	제어기
Healey & Lienard, 1993	시선각 유도방식	슬라이딩 모드 제어기
Lapierre & Soetanto, 2007	가상 목표물 기반 유도방식	백스테핑 제어기
Borhaug, et.al., 2008	적분-시선각 유도방식	궤환 선형화 제어기
Jantapremjit & Wilson, 2008	시선각 유도방식 + 벡터 필드 방식	슬라이딩 모드 제어기
Lapierre & Jouvencel, 2008	가상 목표물 기반 유도방식	백스테핑 제어기
Fossen & Lekkas, 2015	적분-시선각 유도방식 + 외란관측기	슬라이딩 모드 제어기
Moe, et.al., 2016	시선각 유도방식	적용 궤환 선형화 제어기 + 슬라이딩 모드 제어기

실제 운동체는 작동기의 포화도가 존재하기 때문에, 실제 운용과 비슷한 환경을 조성하기 위하여 제어 블록에서 작동기 모델을 통해서 이러한 작동기의 위치, 그리고 속도 포화도를 고려하여야한다. 작동기의 속도 포화도는 시간 지연 관점에서 시스템의 안정성에 영향을 미친다.

제 2 절 제어 목표 (Control Object)

제어 목표를 설정하기 위해 지구고좌표계에서 매개변수화된 3차원의 연속된 경로 $C = \{x_p(s), y_p(s), z_p(s)\}$ 를 고려한다. 이때 매개변수 s 는 0을 포함한 양수이다. 경로좌표계의 원점과 무인잠수정의 위치를 잇는 벡터인 경로 오차는 다음과 같이 경로좌표계 상에서 표현된다.

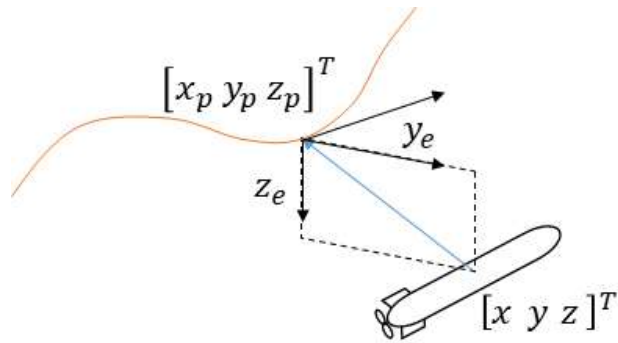


Figure 3. Position Error in Path-tangential Frame

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = J_1^T(\theta_p, \psi_p) \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ z - z_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{z}_p}{\sqrt{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2}}\right), \quad \psi_p = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{y}_p}{\dot{x}_p}\right)$$

아래첨자 e 는 경로 오차를 의미한다. 무인잠수정의 위치에서 경로에 직교(orthogonal)하는 점을 원점으로 하는 경로좌표계의 특성상 진

행방향 오차 x_e 는 0이다. $y_e = z_e = 0$ 는 운동체가 경로 위에 위치함을 의미하고, 따라서 경로 추종 제어의 목적은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} z_e(t) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

제 3 절 시선각 유도 법칙

시선각 유도 법칙은 경로 추종 연구에서 가장 활발히 응용되는 방식으로 미사일 유도 분야의 시선각 유도에 기반을 두고 있다. 빔조정유도(beam-rider guidance)라고도 불리는 시선각 유도는 미사일의 타격 정밀도를 높이기 위해 기준 위치에서 레이더 등을 이용하여 목표물을 정밀 추적하고 전파나 레이저 등을 이용하여 기준 위치와 목표물을 잇는 시선각에 미사일이 위치하도록 유도하는 방식을 일컫는다. 기준 위치와 미사일, 그리고 목표물의 세 개의 포인트가 이용되기 때문에 삼점 유도(three-point guidance)에 속하며, 일반적으로 지대공 미사일에 활용된다. 유도 방식의 개념이 직관적이라는 장점 덕분에 목표물 추종 문제뿐만 아니라 경로 위에 기준 위치를 설정하는 방식을 통해 경로 추종 문제에도 활용되었고, 해양무인체계의 경로 추종 문제뿐만 아니라 호밍 및 도킹 등 운용 관점의

연구에서도 사용되고 있다(Jantapremjit, et.al., 2008).

시선각 유도는 그림 4와 같이 경로좌표계의 원점에 기준 위치를 설정하고, 기준 위치로부터 경로 접선 방향으로 일정한 거리 Δ 만큼 떨어진 지점에 목표점을 설정한다. 운동체를 기준 위치와 목표점을 잇는 직선에 위치시키도록 하는 목표 선수각을 생성하며, 수식으로 나타내면 수식 (19)와 같다(Breivik, et.al., 2009; Fossen, et.al., 2003; Healey, et.al., 1993).

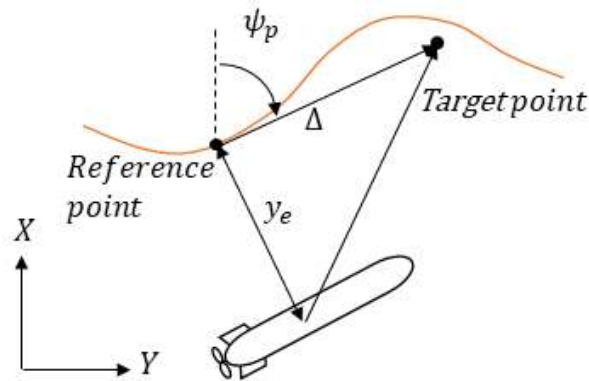


Figure 4. Illustration of LOS Guidance

$$\psi_d = \psi_p + \tan^{-1}\left(\frac{-y_e}{\Delta}\right) \quad (19)$$

작동기수가 부족한 무인잠수정의 경우 길이 방향에 수직한 제어력을 직접 생성할 수 없다. 때문에 표류력(drift force)이 작용하거나 곡률이 있는 곡선 경로를 추종하는 경우 무인잠수정의 미끄러짐 현상(side-slip)이 발생하여 편차가 발생하는 단점이 있다. 이를 해결하

기 위해 적분-시선각 유도 법칙 등 다양한 방식이 제안되었다.

제 4 절 적분-시선각 유도 법칙

적분-시선각 유도 법칙은 시선각 유도 법칙의 단점인 편차 발생을 줄이기 위해 고안되었다(Borhaug, et.al., 2008; Lekkas, 2014). 기존의 시선각 유도에서 계산되는 목표 선수각에 적분항을 추가한 것으로, 비례-적분-미분 제어기(PID controller)에서의 적분 제어기(I-controller)를 통해 정상상태 오차를 보정하는 것과 비슷한 원리이다. 경로 추종을 수행하면서 경로 이탈 오차와 몇 가지 변수로 구성된 적분항을 계속 업데이트 해줌으로써 시선각 유도방식에서 경로 이탈 오차의 정상상태 값을 보상해주게 된다. 적분항을 구성하는 방식에 따라 다양한 연구가 진행되었으며, 적분항에 외란관측기로부터 얻은 조류의 데이터를 포함하여 경로 추종 성능을 높이기도 한다. 아래의 수식 (20)은 Borhaug, 외 (2008)에서 제안한 적분 시선각 유도 법칙을 나타낸다.

$$\begin{aligned}\psi_d &= \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{1}{\Delta}(y_e + \sigma y_{int})\right) \\ \dot{y}_{int} &= \frac{\Delta y_e}{(y_e + \sigma y_{int})^2 + \Delta^2}\end{aligned}\tag{20}$$

제 5 절 비선형 시선각 유도 방식

제 1 항 유도 법칙

본 논문에서는 시선각 유도와 유사한 형태를 지닌 비선형 시선각 유도 방식을 제안한다. 곡선 경로 또는 표류력에 의한 미끄러짐 속도를 운동학 단계에서 정의하는 유도 방식에 고려함으로써 미끄러짐 현상을 보상해주는 특성을 가진다. 제안하는 유도 방식에 의한 목표 선수각은 아래와 같다.

$$\psi_d = \psi_p + \tan^{-1}\left(\frac{-uw - ky_e \sqrt{u^2 + v^2 - k^2 y_e^2}}{u^2 - k^2 y_e^2}\right) \quad (21)$$

여기서 유도 상수 k 는 k'/L 이며, L 은 그림 5와 같이 가상의 목표 위치와 운동체 사이의 거리를 의미한다. 삼각형의 특성에 따라 L 은 항상 y_e 보다 큰 값을 가지게 되며, 특이점 발생을 방지하기 위해 임의의 상수인 k' 과 L 는 수식 (22)을 만족하도록 업데이트한다.

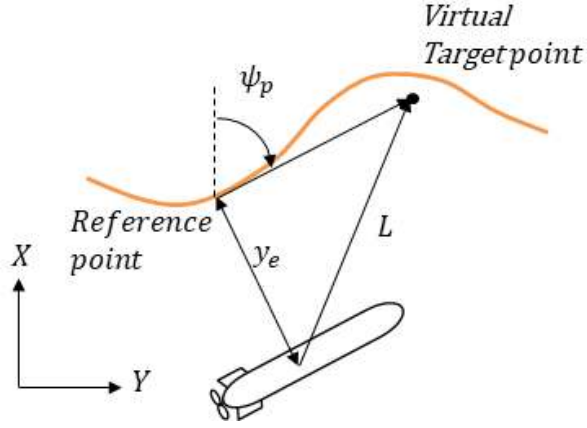


Figure 5. Illustration of Proposed Nonlinear LOS Guidance

$$u^2 - \frac{k'^2 y_e^2}{L^2} > 0 \quad (22)$$

제 2 항 경로 수렴성 증명

제안된 유도 방식의 경로 수렴성을 증명하기 위해 경로좌표계 상에서의 경로 오차와 경로 오차의 변화량을 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = J_1^T(\psi) \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = J_1^T(\psi - \psi_p) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} y_e &= -(x - x_p)\sin\psi + (y - y_p)\cos\psi \\ \dot{y}_e &= u\sin(\psi - \psi_p) + v\cos(\psi - \psi_p) \end{aligned} \quad (24)$$

또한, 경로 오차에 대한 리아푸노프 함수 후보(Lyapunov function candidate)를 고려한다.

$$V = \frac{1}{2} y_e^2 > 0 \quad (25)$$

$$\dot{V} = y_e \dot{y}_e \quad (26)$$

이때 경로 오차의 변화량은 수식 (21)과 수식 (24)를 사용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= u \sin(\psi - \psi_p) + v \cos(\psi - \psi_p) & (27) \\ &= u \sin(\tilde{\psi} + \tan^{-1} X) + v \cos(\tilde{\psi} + \tan^{-1} X) \\ &= \sin \tilde{\psi} [u \cos(\tan^{-1} X) - v \sin(\tan^{-1} X)] \\ &\quad + \cos \tilde{\psi} [u \sin(\tan^{-1} X) + v \cos(\tan^{-1} X)] \\ &= f(u, v, X) + g(u, v, X, \tilde{\psi}) \tilde{\psi} \end{aligned}$$

이고, 이때 함수 $f(u, v, X)$ 와 $g(u, v, X, \tilde{\psi})$ 는

$$\begin{aligned} f(u, v, X) &= u \sin(\tan^{-1} X) + v \cos(\tan^{-1} X) & (28) \\ g(u, v, X, \tilde{\psi}) &= \frac{\sin \tilde{\psi}}{\tilde{\psi}} [u \cos(\tan^{-1} X) - v \sin(\tan^{-1} X)] \\ &\quad + \frac{\cos \tilde{\psi} - 1}{\tilde{\psi}} [u \sin(\tan^{-1} X) + v \cos(\tan^{-1} X)] \end{aligned}$$

이다. 여기서 $\tilde{\psi}$ 는 선수각 오차($\psi - \psi_d$)를 의미하고, X 는 수식 20에

서 아크탄젠트 내부를 치환한 것이다.

가정 5)와 가정 6), 그리고 수식 (22)을 고려할 때, $g(u, v, X, \tilde{\psi})$ 의 크기는 유계(bounded)이다. 따라서 선수각 오차 $\tilde{\psi}$ 의 동역학이 경로 이탈 오차 y_e 의 동역학보다 빠르도록 제어기가 튜닝 되었다고 가정하면 경로 오차의 변화량은

$$\dot{y}_e = f(u, v, X) = u \sin(\tan^{-1}X) + v \cos(\tan^{-1}X) \quad (29)$$

이고, $\sin(\tan^{-1}X) = \frac{X}{\sqrt{1+X^2}}$ 와 $\cos(\tan^{-1}X) = \frac{1}{\sqrt{1+X^2}}$ 을 대입하고 치환했던 X 를 다시 대입하여 정리하면,

$$\dot{y}_e = \frac{uX + v}{\sqrt{1+X^2}} = -ky_e \quad (30)$$

이다.

수식 (30)을 수식 (26)에 대입하여 정리하면,

$$\dot{V} = y_e \dot{y}_e = -ky_e^2 < 0 \quad (31)$$

이다. Positive definite 인 리아푸노프 함수 후보의 미분값이 negative definite 이므로, 리아푸노프 안정성 이론(Lyapunov

stability theory)에 의해 리아푸노프 함수 후보를 구성하는 변수는 점근적으로 안정(asymptotically stable)하다. 따라서 경로 오차 $y_e = 0$ 은 점근적으로 안정하고, 이는 제안하는 유도 방식이 경로에 수렴하는 것을 의미한다.

제 3 항 비선형 시선각 유도방식 특성 분석

제안된 유도 방식을 분석해보기 위해 두 가지 경우를 살펴본다.

case 1 $y_e = 0$

경로 이탈 오차가 0이 되는 경우 목표 선수각은 아래의 수식과 같이 미끄러짐 속도를 고려한 시선각 유도와 같은 형태가 되며, 경로에 도달한 운동체는 미끄러짐 속도를 0으로 만들기 위한 자세를 취하게 된다.

$$\psi_d = \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{v}{u}\right) \quad (32)$$

case 2 $v = 0$

미끄러짐 속도가 없는 경우 목표 선수각은 다음과 같다.

$$\psi_d = \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{ky_e}{\sqrt{u^2 - k^2 y_e^2}}\right) \quad (33)$$

만일 유도 상수 k 를 u/L 로 설정하고, 이때 L 은 아래의 그림 6과 같다고 가정하자.

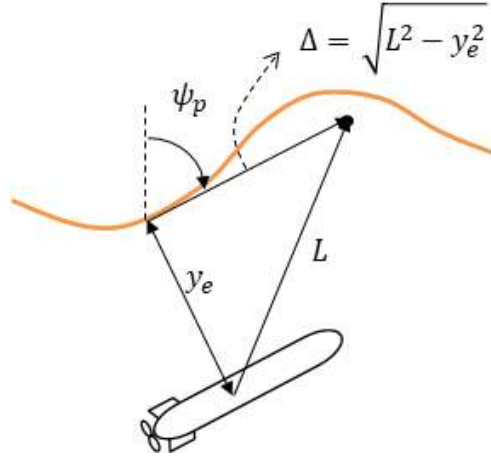


Figure 6. Illustration of Proposed Nonlinear LOS Guidance when $v = 0$

이때 목표 선수각은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{\frac{u}{L}y_e}{\sqrt{u^2 - \frac{u^2}{L^2}y_e^2}}\right) \\
 &= \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{y_e}{\sqrt{L^2 - y_e^2}}\right) \\
 &= \psi_p + \tan^{-1}\left(-\frac{y_e}{\Delta}\right)
 \end{aligned} \tag{34}$$

수식 (34)는 수식 (19)와 같은 형태로, 미끄러짐 속도가 0인 경우

비선형 시선각 유도방식이 시선각 유도방식과 같은 명령값을 계산
함을 의미한다.

제 4 장 제어기 설계

무인잠수정의 운용 환경과 동적 거동의 특성을 고려할 때, 안정적인 임무 수행을 위한 경로 추종 제어기 설계를 위해서는 무인잠수정의 비선형성과 모델링 불확실성, 그리고 미지의 외란의 영향 등을 고려할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이들을 고려하기 위해 의사제어 기법과 신경회로망 기반 적응제어 기법을 사용한다.

제 1 절 의사제어(Pseudo Control) 기법

의사제어 기법이란 운동방정식의 비선형 항을 의사제어(pseudo control)로 치환하여 비선형 운동방정식을 선형화하는 제어기법이다 (Hovakimya, et.al., 2002; Kim, 2003; Park, et.al., 2016). 운동체의 동역학을 모델링된 항과 모델링되지 않은 항으로 나눈 후, 모델링이 된 항은 역변환을 통해 피드백 선형화를 하고 모델링되지 않은 항은 적응 신호로 보상하게 된다. 제어기를 설계하기 위해 다음과 같이 2차 비선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\
&= \hat{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Delta \\
&= \nu + \Delta
\end{aligned} \tag{35}$$

이때 함수 f 는 실제 동역학을 의미하며, \hat{f} 와 Δ 는 각각 모델링 된 항과 모델링되지 않은 항을 의미한다. 모델링 된 항을 의사제어 신호 ν 로 치환한 후, 의사제어 신호를 \dot{x}_2 의 기준 값인 $\dot{x}_{2,ref}$ 와 선형보상기 신호 ν_{pd} , 그리고 적응제어 신호 ν_{ad} 를 이용하여 나타낸다.

$$\nu = \dot{x}_{2,ref} + \nu_{pd} - \nu_{ad} \tag{36}$$

의사제어 신호를 앞서 고려한 2차 비선형 시스템에 대입한 후 정리하면 아래와 같은 오차 동역학을 얻게 된다.

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + B(\nu_{ad} - \Delta) \tag{37}$$

여기서 오차 벡터 \mathbf{e} 는 x_1 과 x_2 의 기준 값과 실제 값의 차이이고, 시스템 행렬 \mathbf{A}, B 는 다음과 같다. 이때 k_p 와 k_d 는 선형보상기 (PD-controller)의 제어이득(control gain)이다.

$$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2]^T = [x_{1,ref} - x_1 \ x_{2,ref} - x_2]^T \tag{38}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

만일 적응제어 신호 ν_{ad} 가 모델링되지 않은 항 Δ 를 완벽히 보상하고, 행렬 A 가 Hurwitz 하면, 이 시스템은 안정하게 된다. 이 때 제어 입력값 \mathbf{u} 는 의사제어 신호를 다시 역변환하여 얻을 수 있다.

본 연구에서는 미지의 외란과 모델링 불확실성을 고려하기 위하여, 무인잠수정의 운동방정식 중 조류에 대한 상대속도 벡터 $[u_r \ v_r \ w_r]^T$ 와 관련된 항을 모델링되지 않은 항 Δ 로 설정한다. 제 2장 3절에서 기술한 무인잠수정의 5자유도 운동방정식 중에서 수평타와 수직타로 제어를 수행하는 종동요(pitch) 운동과 선수동요(yaw) 운동을 다음과 같이 조류에 대한 상대속도와 관련된 항인 Δ 와 그렇지 않은 항인 \hat{f} 으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \hat{f}_\theta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Delta_\theta(\mathbf{x}_r) \\ \ddot{\psi} &= \hat{f}_\psi(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \Delta_\psi(\mathbf{x}_r) \end{aligned} \quad (40)$$

여기서 상태변수 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}_r 는 각각 $[u \ v \ w \ q \ r \ \theta \ \psi]^T$ 와 $[u_r \ v_r \ w_r \ q_r \ \theta \ \psi]^T$ 이고, 제어입력 \mathbf{u} 는 $[\delta_\theta \ \delta_\psi]^T$ 이다. 모델링 되지 않은 항인 Δ_θ 와 Δ_ψ 를 적응 신호 $\nu_{ad,\theta}$ 와 $\nu_{ad,\psi}$ 가 각각 보상하고 적절한 선형 보상기의 제어 이득을 선정하게 되면 종동요 운동과 선수동요 운동은 안정하게

된다.

제어이득은 다음과 같은 2차 오차 동역학을 고려했을 때 감쇠비 ζ 와 고유주파수 ω_n 으로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{e}_1 + K_d \dot{e}_1 + K_p e_1 = 0 \quad (41)$$

$$K_p = 2\zeta\omega_n, \quad K_d = \omega_n^2$$

본 연구에서는 감쇠비로 0.7075, 고유주파수로 2.12를 사용하였고, 이에 따라 종동요 운동과 선수동요 운동의 선형 보상기 제어이득은 $K_p = 3$, $K_d = 4.5$ 으로 계산된다.

제 2 절 신경회로망 기반 적응 제어

신경회로망은 구조를 알 수 없는 함수를 어떠한 입력 변수에 대하여 근사화 하는 역할을 한다. 신경회로망은 입력층(input layer)과 출력층(output layer), 그리고 이 둘 사이의 은닉층(hidden layer)로 이루어지며, 은닉층의 개수, 각 층(layer)에서의 뉴런의 개수, 그리고 각 노드에서의 가중치나 bias 항 등에 따라 성능과 안정성이 달라진다. 때문에 설계자는 목적에 맞는 성능을 가지는 은닉층의 수, 그리고 각 층의 뉴런 수 등을 결정해야 한다. 신경회로망을 적응제어에

적용하는 경우 무엇보다 시스템의 안정성이 중요시 된다. 때문에 본 연구에서는 시스템의 안정성이 증명되어 적응제어 기법에 다양하게 활용되고 있는 한 개의 은닉층이 존재하는 Single hidden layer(SHL)을 이용한다(Hovakimyan, et.al., 2002; Kim, 2003).

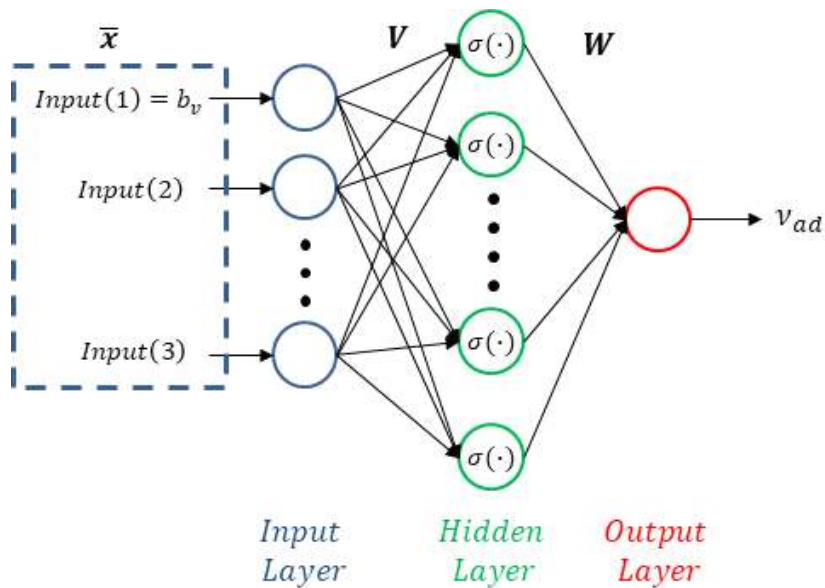


Figure 7. Structure of a Neural Network with a Single Hidden Layer

여기서 \bar{x} 는 신경회로망에 들어가는 입력 변수로 bias 항 b_v 를 포함한다. 신경회로망에 입력된 \bar{x} 는 입력 가중변수 V 에 의해 가중되어 은닉층으로 들어가게 된다. 은닉층은 여러 개의 뉴런으로 구성되며, 뉴런의 개수가 많아질수록 신경회로망의 근사정도가 높아지지만 계산 시간 또한 길어진다는 단점이 있다. 따라서 효율적인 계산이 가

능하도록 적절한 개수의 뉴런을 선정해야 한다. 은닉층에서는 활성화 함수에 의해 입력된 변수가 활성화 되며, 본 연구에서는 활성화 함수로써 시그모이드 함수를 사용하였다.

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-az}} \quad (42)$$

여기서 activation potential a 는 각 뉴런별로 활성화 정도를 다르게 하는 변수로써 설계자에 의해 결정되는 값이다.

은닉층에서 출력된 값은 출력 가중변수 W 에 의해 가중되어 최종적인 적응제어 신호가 계산된다.

$$\nu_{ad} = W^T \sigma(V^T \bar{x}) \quad (43)$$

입력 가중변수와 출력 가중변수를 업데이트 하는 방식으로는 수식 (44)과 같이 σ -modification 방식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\Gamma_V (\bar{x} e^T P B W \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \lambda V) \\ \dot{W} &= -\Gamma_W ((\sigma - \frac{\partial \sigma}{\partial z} V^T \bar{x}) e^T P B + \lambda W) \end{aligned} \quad (44)$$

여기서 λ 는 변수의 발산을 막아주는 댐퍼의 역할을 하고, Γ_V 와 Γ_W 는 적응 속도를 결정한다. P 는 수식 (45)와 같이 표현되는 리아프노

프 방정식의 해를 뜻한다.

$$A^T P + PA + Q = 0 \quad (45)$$

행렬 A 와 B 는 앞서 의사제어를 이용하여 도출한 시스템의 오차 동역학에서의 시스템 행렬이고, Q 는 항등행렬을 사용하였다.

입력 변수와 activation potential은 설계자가 결정하는 값으로 이들에 따라 신경회로망의 근사정도가 달라지게 된다. 또한 근사정도와 계산 시간을 최적화할 수 있는 은닉층의 뉴런 개수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 입력 변수 \bar{x} 로서 모델링되지 않은 항에 영향을 줄 것으로 예상되는 $[1 \ u \ v \ w \ q \ r \ \theta \ \psi \ \delta_\theta \ \delta_\psi]$ 을 사용하였다. 또한 은닉층의 개수는 5개, 그리고 각 은닉층마다의 활성화 정도를 나타내는 activation potential로는 Park, 외 (2016)에서와 같이 $a = 1, 2, 4, 8, 16$ 을 사용하였다. 적응 성능에 따라 가중변수의 업데이트를 위한 변수 Γ_V 와 Γ_W , 그리고 λ 를 튜닝하였고 각각 1, 40, 7을 사용하였다.

제 3 절 Pseudo Control Hedging (PCH) 기법

작동기의 포화도(saturation)나 시간지연 등에 의한 시스템의 비선형성에 신경회로망이 적응하게 되면 신경회로망의 근사화 성능이

저하되거나 불안정하게 된다. 무인잠수정의 경우 러더와 엘리베이터의 위치, 그리고 속도가 제한되고 이에 따라 시스템의 비선형성이 발생하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위하여 본 연구에서는 Pseudo Control Hedging (PCH) 기법을 적용하였다. PCH 기법은 작동기 모델에 따라 작동기의 포화만큼을 미리 계산하고, 이를 기준 모델에서 제거해줌으로써 신경회로망의 입력 변수에 해당하는 작동기의 위치값 δ 를 작동기 모델에 부합하도록 업데이트하는 방식이다.

PCH 기법을 적용하기 위해 우선 작동기의 위치, 그리고 속도 최대값에 따라 다음과 같이 무인잠수정의 작동기 모델을 선정한다.

$$\delta = \begin{cases} \delta & , |\delta| \leq \delta_{\max} \\ \text{sign}(\delta)\delta_{\max} & , |\delta| > \delta_{\max} \end{cases} \quad (46)$$

$$\dot{\delta} = \begin{cases} \dot{\delta} & , |\dot{\delta}| \leq \dot{\delta}_{\max} \\ \text{sign}(\dot{\delta})\dot{\delta}_{\max} & , |\dot{\delta}| > \dot{\delta}_{\max} \end{cases} \quad (47)$$

작동기 모델을 통해 추정된 작동기의 위치를 $\hat{\delta}$ 라 하고, 헤징 신호를 적용하기 이전에 운동방정식의 역변환을 통해 계산한 작동기 명령값을 δ_{cmd} 라고 할 때, 헤징 신호 ν_h 는 다음과 같이 운동체의 모델링 된 항을 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} \nu_h &= \hat{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \delta_{cmd}) - \hat{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \hat{\delta}) \\ &= \nu - \hat{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \hat{\delta}) \end{aligned} \quad (48)$$

여기서 \hat{f} 는 무인잠수정의 실제 모델 중 모델링 된 항을 의미한다.

목표 경로의 정보와 운동체의 현재 상태 정보를 통해 유도 법칙으로부터 계산한 자세 명령 값인 θ_{cmd} , ψ_{cmd} 을 시스템이 따라야 하는 기준 값 θ_{ref} , ψ_{ref} 으로 변환하기 위한 기준 모델을 2차 시스템으로 가정한다. 이때 기준 모델은 감쇠비(damping ratio) ζ 와 고유주파수 ω_n 을 갖는다. 앞서 계산한 해징 신호를 기준 모델에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{ref} &= -2\zeta\omega_n\dot{\theta}_{ref} - \omega_n^2(\theta_{ref} - \theta_{cmd}) - \nu_{h,\theta} \\ \ddot{\psi}_{ref} &= -2\zeta\omega_n\dot{\psi}_{ref} - \omega_n^2(\psi_{ref} - \psi_{cmd}) - \nu_{h,\psi}\end{aligned}\quad (49)$$

본 연구에서는 시스템의 속도와 안정성을 고려하여 감쇠비 0.9, 그리고 고유주파수 3을 갖는 기준 모델을 가정하였다.

제 4 절 제어기 구성

신경회로망 기반 적응제어와 PCH 기법을 이용하여 설계한 경로 추종 제어기의 블록다이아그램은 다음과 같다. Healey 와 Lienard (1993)에서와 같이 수평면 운동과 수직면 운동의 연성이 적다고 가정하였고, 이에 따라 수평면 제어기와 수직면 제어기를 각각 구성하

였다.

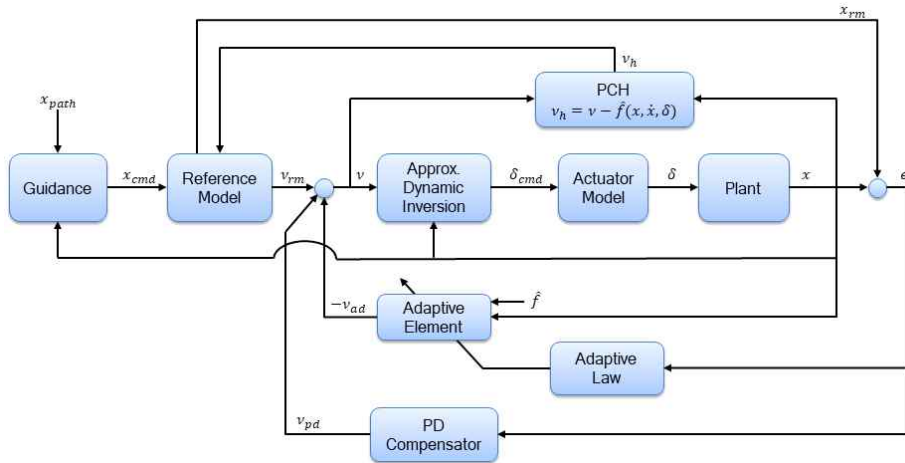


Figure 8. Path-following System Block Diagram

경로의 정보 x_{path} 와 무인잠수정의 현재 상태 x 를 이용하여 유도 법칙으로부터 무인잠수정이 따라야 할 자세 명령 값 x_{cmd} 을 계산한다. 자세 명령 값과 해징 신호가 기준 모델로 입력되어 기준 신호 v 가 계산되고, 기준 신호와 선형 보상기 신호 v_{pd} , 그리고 적응 신호 v_{ad} 를 합하여 의사 제어 신호 v 를 계산한다. 의사 제어 신호를 역변환하여 작동기의 명령값 δ_{cmd} 를 계산한다. 작동기의 명령값은 작동기 모델을 통과하여 최종적으로 플랜트에 입력되는 제어입력 신호 δ 가 계산된다. 제어입력 신호와 무인잠수정의 운동 모델에 의해 다음 스텝의 상태 변수가 계산이 되고, 이 과정이 반복되며 경로 추종을 수행하게 된다.

제 5 장 시뮬레이션

제 1 절 시뮬레이션 조건

본 연구에서 제안하는 유도 방식의 경로 추종 성능을 비교분석하고, 미지의 외란과 모델링 불확실성, 그리고 작동기의 위치, 속도 포화도가 존재하는 환경에서의 3차원 곡선 경로 추종 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 무인잠수정은 어뢰형 무인잠수정 중 동역학 모델이 공개되어있어 무인잠수정의 모델링과 동역학 제어 관련한 연구에 활발히 사용되는 REMUS 100 (Presto, 2001)이다. REMUS 100의 외형과 세부 정보는 각각 그림 9와 표 2에 나타나있다.



Figure 9. The REMUS 100 Autonomous Underwater Vehicle (T.Presto, 2001)

Table 2. Vehicle Parameters (REMUS 100)

Parameter	Value	Units	Description
L_{pp}	1.386	m	Hull Length
d	0.191	m	Maximum Hull Diameter
W	299	N	Weight
B	306	N	Buoyancy
U_{norm}	1.54	m/s	Operating Speed
δ_{max}	15	$^{\circ}$	Maximum Fin Angle
$\dot{\delta}_{max}$	0.5	rad/s	Maximum Fin Rate

무인잠수정의 초기 상태변수 $\mathbf{x}_0 = [x \ y \ z \ \theta \ \psi]^T$ 와 속도 및 각속도 벡터 $\mathbf{v}_0 = [u \ v \ w \ q \ r]^T$ 는 모두 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 으로 가정하였다. 또한 표 3와 같이 앞선 제 2 장의 가정 6)을 만족하는 3가지 조건의 조류를 고려하였다.

Table 3. Current Condition

Case	Parameter	Value (m/s)
1	$V_{c,x} / V_{c,y} / V_{c,z}$	0
2	$V_{c,x} / V_{c,y} / V_{c,z}$	0.1
3	$V_{c,x} / V_{c,y} / V_{c,z}$	0.2

유도 방식에 따른 경로 추종 성능을 비교하기 위해 2차원 직선 경로에 대한 경로 추종 시뮬레이션을 수행하였으며, 최종적으로 설계한 제어기의 성능을 확인하기 위해 3차원 곡선 경로를 고려하였다. 시뮬레이션에 사용한 목표 경로는 다음과 같이 매개변수화 하였다.

$$\begin{cases} x_p(s) = s \\ y_p(s) = 5 \end{cases} ; 2D \text{ linear path} \quad (50)$$

$$\begin{cases} x_p(s) = s \\ y_p(s) = 2\sin(0.03s) \\ z_p(s) = 0.05s + 10 \end{cases} ; 3D \text{ Curved path} \quad (51)$$

곡선 경로의 곡률은 기존의 연구(Moe, et.al., 2014; 2016)에서 제어기 검증에 사용한 곡률보다 2.5배에서 5배 더 큰 값인 0.03으로 선정하였다.

제 2 절 오픈루프 시뮬레이션

본 연구에서 제안하는 유도 법칙의 성능과 경로 추종 제어기의 성능을 검증하기에 앞서 오픈루프 시뮬레이션을 통해 시뮬레이션을 통해 구현한 무인잠수정의 거동을 확인하고 이를 타 연구의 결과와 비교하여 검증하고자 한다. REMUS 100 무인잠수정의 동역학을

모델링하고 자유항주 시험 결과와 분석한 Presto (2001)의 논문과 비교를 수행하였다. Presto (2001)은 작동기의 스텝 입력(step input)에 대한 수평방향 운동과 수직방향 운동을 각각 분석하였다. Presto (2001)에서 오픈루프 시뮬레이션에 적용한 수평방향, 수직방향 작동기 명령은 표 4과 같다.

Table 4. Open-loop Simulation Condition (Presto, 2001)

	수평타(δ_r [deg])	수직타(δ_s [deg])
수평방향	$\begin{cases} \delta_{r,cmd} = 0, & t < 10 \\ \delta_{r,cmd} = 4, & 10 \leq t < 35 \\ \delta_{r,cmd} = -4, & 35 \leq t \leq 65 \end{cases}$	P제어기(Outer loop) +PD 제어기(Inner loop)
수직방향	$\delta_{r,cmd} = 0$	$\begin{cases} \delta_{s,cmd} = 0, & t < 2 \\ \delta_{s,cmd} = 8, & 2 \leq t \leq 4 \end{cases}$
초기조건	$x_g = 0.0196m, u_0 = 1.54m/s, \phi_0 = -5.3^\circ$	

그림 10은 5자유도, 6자유도 시뮬레이션과 Presto (2001)의 수평방향의 오픈루프 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다. 수평방향의 경우 자유 항주 시험 결과가 있지 않아 시험 결과와의 비교는 불가하였다. 횡동요 운동(roll)을 제외한 5자유도 운동의 경우, 무인잠수정의 경로가 Presto (2001)의 결과와 다소 차이가 있었다. 이는 선회 운동에 따른 횡동요 운동과 이와 연성된 영향이 무시되었음에 따른 결과로 보인다.

좀 더 정확한 원인을 살펴보기 위하여 6자유도 운동을 구현해보았다(그림 10의 초록색 점선). 횡방향 속도 v 가 0인 시뮬레이션 초

기에 상대적으로 횡동요 각속도 p 의 영향이 지배적이고, 이로 인해 타각이 입력되기 전에 ($t < 10\text{sec}$) 양의 y 방향으로 움직이려는 횡방향 힘을 받게 된다. 시뮬레이션 초기에 작용한 이 힘의 영향으로 인해 5자유도 시뮬레이션 결과보다 6자유도 시뮬레이션 결과가 $+y$ 방향으로 평행이동 되었다. 하지만 이러한 횡동요 각속도 p 의 영향은 횡방향 속도 v 가 발생함에 따라 급격하게 감소되었다. 이 때문에 그림 10에 표시된바와 같이 초기에 발생한 수평방향 오차가 시뮬레이션 전반에 걸쳐 일정하게 유지되었다. 따라서 오픈루프 시뮬레이션이 아닌 제어를 수행하는 경로 추종 제어 시뮬레이션에는 이러한 초기 횡동요 속도에 의한 영향이 미미할 것으로 추정된다.

조종성능의 척도 중 하나인 선회 지름(Tactical diameter)을 고려해보았을 때, 5자유도 시뮬레이션과 Presto (2001)의 시뮬레이션 결과가 유사하였다.

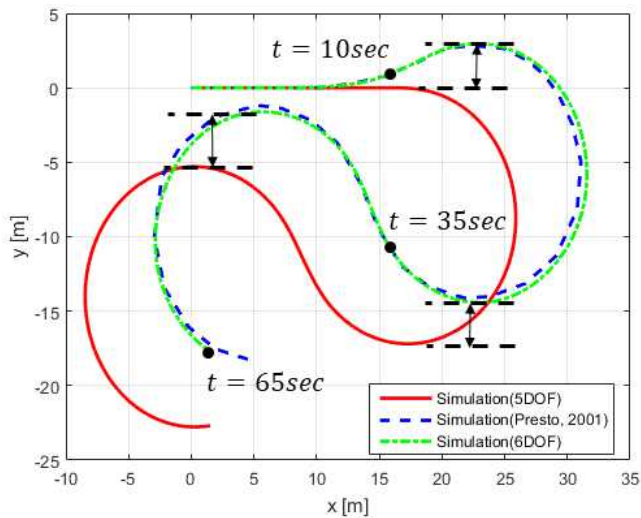


Figure 10. Horizontal Open-loop Simulation Result

그림 11은 수직방향의 오픈루프 시뮬레이션 결과와 자유항주 시험 결과를 비교한 그래프이다. 수직방향 경로와 종동요각(pitch angle) 모두 Presto (2001)의 결과와 거의 유사한 결과를 보였다. 약간의 오차가 존재하는데, 이 또한 수평방향 시뮬레이션과 마찬가지로 횡동요 운동의 연성 효과로 인한 오차로 추정되며 그 영향이 크지는 않았다.

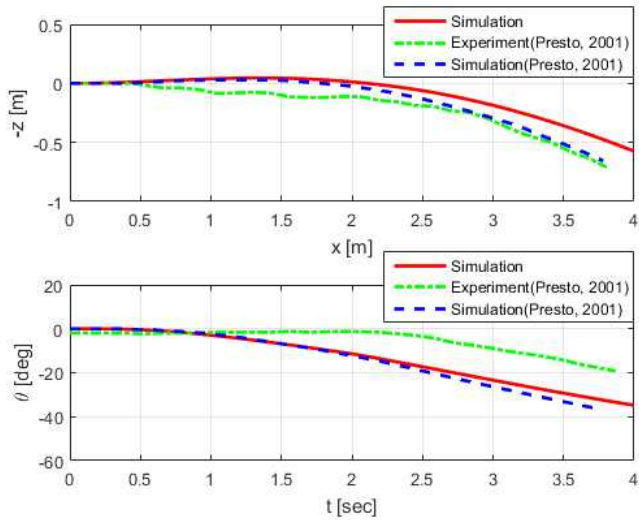


Figure 11. Vertical Open-loop Simulation Result

제 3 절 유도 방식에 따른 비교

유도 방식에 따른 경로 추종 성능을 비교 분석하기 위하여 시선각 유도 방식(LOS guidance), 적분 시선각 유도 방식(Integral-LOS guidance), 그리고 제안하는 비선형 시선각 유도 방식(Proposed method)을 각각 비례-미분 제어기(PD controller)와 결합하여 2차원 직선 경로 추종 시뮬레이션을 진행하였다. 세 가지 유도 방식 모두에서 같은 비례-미분 제어기의 제어 이득값을 사용하여 유도 방식에 따른 차이만을 확인할 수 있도록 하였다. 또한 유도 상수에 따른 영향을 최소화하기 위해서 x 방향의 변위가 60m가 될 때까지의 소요 시간이 비슷하도록 유도 상수들을 튜닝한 후 시뮬레이션을 진행하였다. 조류의 크기와 방향, 무인잠수정의 위치와 자세, 그리고 속도와 각속도는 측정이 가능하다고 가정하였으며 측정값에는 노이즈와 오차가 존재하지 않는다고 가정하였다.

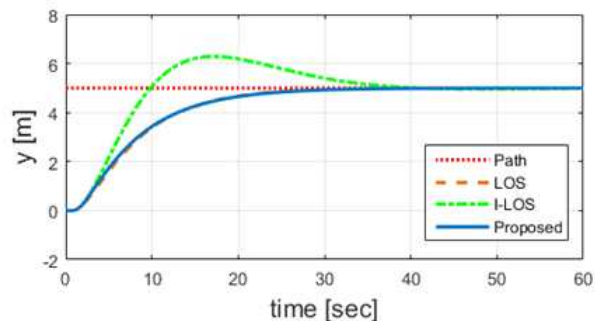


Figure 12. Trajectory of Path-following Systems in Case 1

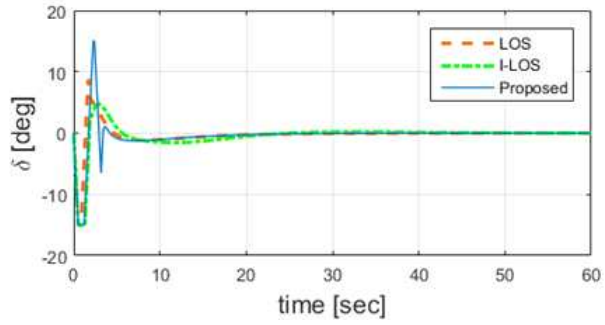


Figure 13. Control Input of Path-following Systems in Case 1

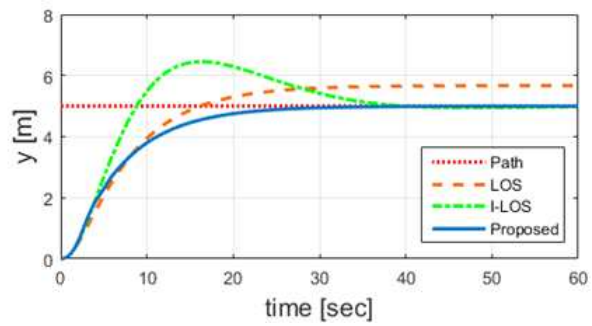


Figure 14. Trajectory of Path-following Systems in Case 2

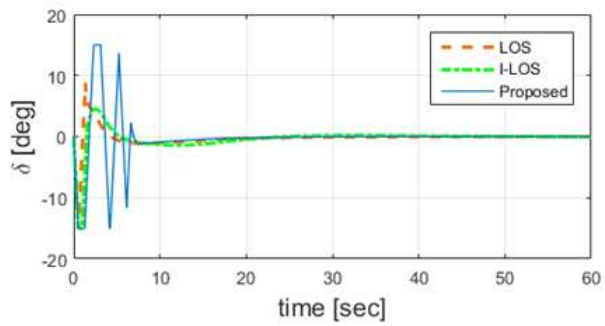


Figure 15. Control Input of Path-following Systems in Case 2

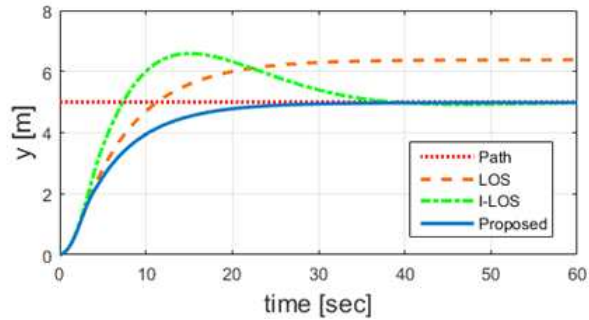


Figure 16. Trajectory of Path-following Systems in Case 3

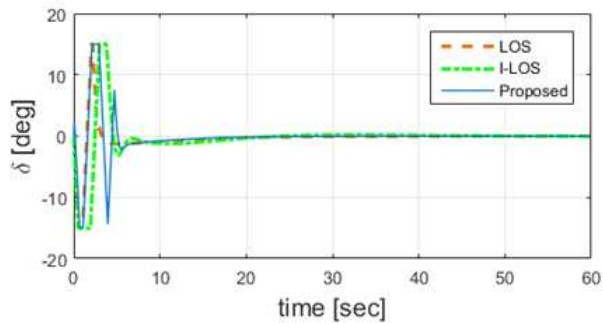


Figure 17. Control Input of Path-following Systems in Case 3

그림 12 ~ 그림 17는 각각 case 1, 2, 3에 대한 경로와 제어 입력 결과를 나타낸다. 시선각 유도방식의 경우 조류가 작용하지 않을 때 우수한 경로 추종 성능을 보이지만, 조류가 존재하는 환경에서는 조류의 크기만큼의 일정한 정상상태오차가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 적분-시선각 유도방식의 경우에는 정상상태오차 측면에서 경로 추종 성능이 개선되었지만, 적분 항에 의한 오버슈트가 발생함을

관찰할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 비선형 시선각 유도방식의 경우 정상상태오차와 오버슈트가 발생하지 않고 부드럽게 목표 경로에 수렴함을 확인할 수 있다. 하지만 제어 입력을 비교해보았을 때, 타 유도방식에 비해 더 많은 제어 입력이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이는 조류가 작용할수록 정상상태오차와 오버슈트를 줄이기 위해 더 큰 제어력을 생성해내기 때문으로 풀이된다.

표 5은 세 가지 유도방식의 경로 추종 결과를 정리한 표이다. 퍼센트 오버슈트(% Overshoot)와 정착시간(settling time), 정상상태오차(steady-state-error), 그리고 경로 이탈 오차에 대한 비용 함수 J_{dev} 와 에너지 소비와 관련된 비용 함수 J_{eng} 를 비교하였다. J_{dev} 와 J_{eng} 는 다음과 같이 계산한다.

$$J_{dev} = \int |y_e(t)|dt \quad (52)$$

$$J_{eng} = \int |\dot{\delta}(t)|dt \quad (53)$$

본 연구에서 제안하는 유도방식은 에너지 비용 함수가 타 유도방식의 최대 약 3배정도까지 도달하였다. 하지만 오버슈트와 정착시간, 그리고 정상상태오차 측면에서 경로 추종 성능이 우수하였다.

Table 5. Simulation Results by Guidance Law

Case	Guidance	OS	T_s (sec)	$J_{dev.}/J_{dev,p}$	$J_{eng.}/J_{eng,p}$	E_{ss} (%)
		(%)				
1	LOS	0.00	27.65	1.68	0.59	0.00
	I-LOS	25.74	36.36	1.80	0.64	0.07
	Prop.	0.00	13.79	1.00	1.00	0.00
2	LOS	13.43	-	2.50	0.26	13.43
	I-LOS	29.01	36.02	1.98	0.28	0.16
	Prop.	0.00	13.31	1.00	1.00	0.03
3	LOS	27.62	-	3.83	0.55	27.62
	I-LOS	31.76	35.38	2.09	0.89	0.27
	Prop.	0.00	12.96	1.00	1.00	0.20

제 4 절 3차원 곡선 경로 추종

제 3장에서 제안한 비선형 시선각 유도방식과 제 4장에서 서술한 신경회로망 기반 적응 제어 기반의 제어기를 조합한 경로 추종 제어기의 성능을 확인하기 위하여 3차원 곡선 경로 추종 시뮬레이션을 수행하였다. 무인잠수정의 위치와 자세, 그리고 속도와 각속도는 측정이 가능하다고 가정하였고, 조류의 크기와 방향, 그리고 조류에 대한 상대속도와 관련된 유체력 미계수들은 미지의 값으로 설정하였다. 또한 미지의 조류에 대한 성능을 확인하기 위해 조류의 크기가 가장 큰 case 3을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

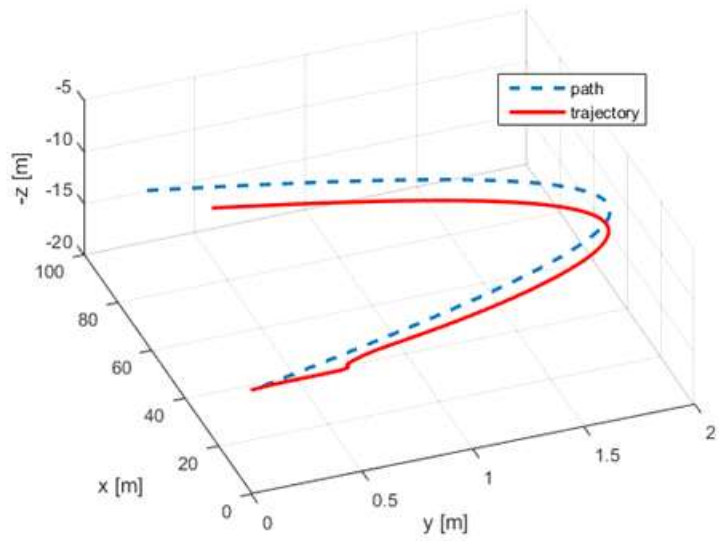


Figure 18. Trajectory of AUV for 3D Curved Path

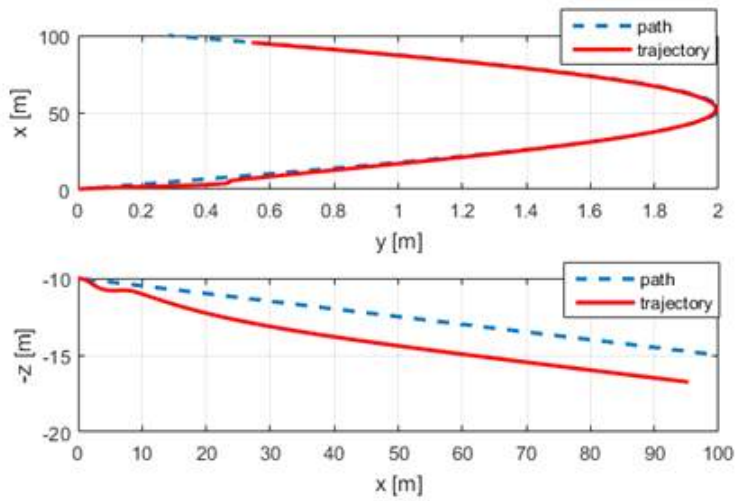


Figure 19. Trajectory of AUV in x - y / x - z plane for 3D Curved Path

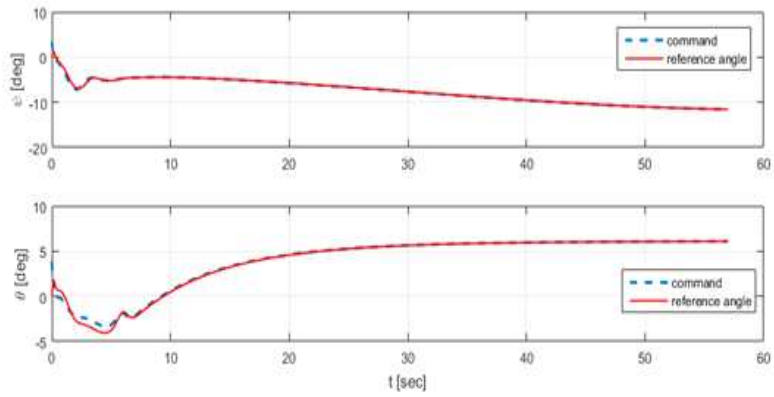


Figure 20. Command and Reference angle

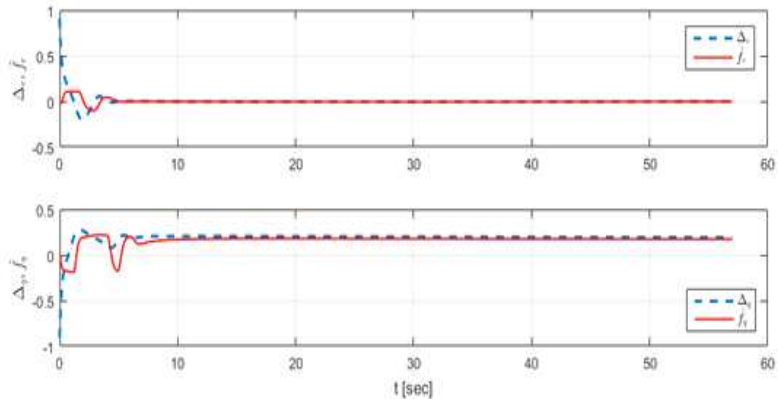


Figure 21. Unknown Terms and Adaptive Signal in Horizontal and Vertical Plane

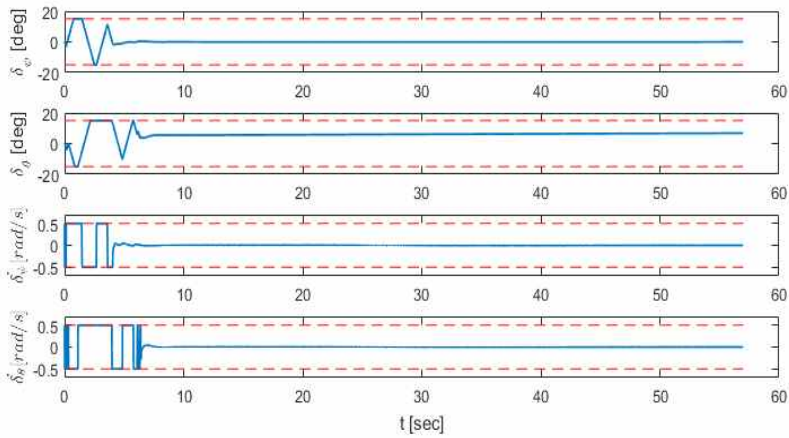


Figure 22. Control Input and Control Input Rate

그림 18과 19는 무인잠수정의 경로를 보여준다. 파란색 점선은 목표 경로를 나타내며, 빨간색 실선은 무인잠수정의 경로를 나타낸다. 그림 20은 유도법칙에서 계산된 자세 명령값을 나타내는 파란색 점선과 기준 모델을 통해 계산된 기준 자세를 나타내는 빨간색 실선을 비교한 그래프이다. 그림 21에서 파란색 점선은 모델링 되지 않았다고 가정한 Δ 이고, 빨간색 실선은 신경회로망을 통해 근사한 적응신호를 나타낸다. 마지막으로 그림 22에서 파란색 실선은 수평방향, 그리고 수직방향의 타각과 타각속도를 나타내며, 빨간색 점선은 각각의 포화도를 의미한다.

그림 18과 19를 볼 때, 미지의 외란이 작용하는 환경에서도 3차원 곡선 경로 추종이 비교적 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. 경로 추종 초반에는 적응신호가 수렴하지 못하여 목표 경로에서 멀어지는 방향으로 운행하는 모습을 보인다. 경로가 발산함에 따라 유도법칙으

로부터 더 큰 자세 명령값이 계산되어 타각의 위치와 속도가 포화에 이르게 되고, 이에 따라 자세 명령값과 기준 자세 사이의 차이가 발생하게 된다.

시뮬레이션이 진행되어 적응신호가 수렴해감에 따라 안정적으로 경로를 추종하게 된다. 특히 수평면 경로를 보면 경로 이탈 오차가 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 수직면 경로에는 약 2m의 경로 이탈 정상상태오차가 발생하였다. 이는 그림 21에서 확인할 수 있듯이, 수직방향 적응신호와 Δ 사이의 오차가 발생하는 것에 기인하는 것으로 보인다. 무인잠수정이 양성부력이고, 수직방향의 위치를 직접 제어하지 못하고 자세를 변화시켜 제어해야하기 때문에 자세의 변화에 따라 수직방향 모멘트가 변화하여 발생하는 비선형성에 신경회로망이 적응하여 이러한 정상상태오차가 발생하는 것으로 추정된다.

제 6 장 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 경로 추종 문제를 다루었다. 무인잠수정의 구조적 특성에 따라 횡방향 복원성이 있다는 가정 하에 무인잠수정의 5자유도 운동을 고려하였다. 무인잠수정의 추력이 일정하고 무인잠수정의 최대 속력보다 조류의 속력이 작다고 가정하였으며, 크기가 일정하고 비회전성의 조류를 가정하였다. 이러한 가정 하에 조류에 의한 외력을 조류에 대한 상대속도 개념으로 운동방정식에서 고려할 수 있었다.

시선각 유도 방식의 단점을 보완하기 위해 이를 변형한 비선형 시선각 유도방식을 제안하였다. 비선형 시선각 유도방식의 경우 미끄러짐 속도를 운동학 단계에서의 유도 방식에 사용함으로써 곡선 경로나 외란에 의한 미끄러짐의 영향을 보상할 수 있다. 경로 접선 좌표계 상에서의 경로 이탈 오차와 그 미분값을 수학적으로 나타내었으며, Lyapunov 안정성 이론을 통해 제안된 유도방식의 경로 수렴성을 증명하였다. 시선각 유도방식, 적분-시선각 유도방식, 그리고 비선형 시선각 유도방식과 PD제어기를 각각 결합하여 조류 외란이 작용하는 환경에서의 2차원 직선 경로 추종 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 비선형 시선각 유도방식은 타 방식에 비해 더 큰 타각 명령을 생성하여 에너지 관점에서 단점을 보였지만, 경로 추종 성능을 나타내는 오버슈트와 정착시간, 그리고 경로 이탈 오차 측면에서 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

비선형 시선각 유도방식과 더불어 미지의 조류 외란과 모델링 불확실성 등을 고려하기 위해 신경회로망 기반 적응제어기법을 적용하여 경로 추종 제어기를 설계하였다. 이 때 신경회로망이 작동기의 포화도에 따른 시스템 비선형성에 적응하여 성능이 저하되는 것을 방지하기 위하여 PCH 기법을 적용하였다.

경로 추종 시뮬레이션에 앞서 오픈루프 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 사용한 무인잠수정 5자유도 모델을 검증하였다. 5자유도 모델은 횡동요 각속도의 영향이 지배적인 시뮬레이션 초기에 발생하는 미끄러짐 현상을 구현하지는 못했지만 시뮬레이션 전반에 걸쳐 6자유도 모델과 거의 동일한 조종 성능을 보였다.

설계한 경로 추종 제어기를 이용하여 3차원 곡선 경로 추종 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 초기 적응 신호가 모델링되지 않은 항에 수렴하지 못하여 경로가 발산하는 경향을 보이다가, 점차 적응 신호가 수렴해감에 따라 무인잠수정의 경로 또한 목표 경로에 수렴하였다. 또한 PCH 기법을 활용하여 작동기의 위치, 그리고 속도 포화도가 잘 적용이 되었음을 확인할 수 있었다. 경로 추종 제어 결과, 외란과 유체력 미계수의 일부가 주어지지 않은 환경에서도 3차원 곡선 경로에 대하여 충분히 좋은 경로 추종 성능을 보였다.

참고문헌

- [1] Aguiar, A. P., & Hespanha, J. P., 2007, Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(8), pp.1362-1379.

- [2] Bibuli, M., et.al., 2009, Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 26, pp.669-688.

- [3] Bibuli, M., et.al., 2012, Guidance of unmanned surface vehicles: Experiments in vehicle following. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), pp.92-102.

- [4] Borhaug, E., et.al., 2008, Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents. In *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on, IEEE*, pp.4984-4991.

- [5] Breivik, M., & Fossen, T. I., 2005, Guidance-based path following for autonomous underwater vehicles. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, IEEE*, pp.2807-2814.

- [6] Breivik, M., 2010, Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles (Doctoral dissertation, NTNU).
- [7] Fossen, T. I., 2002, Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles.
- [8] Fossen, T.I., & Pettersen, K.Y., 2014, On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws, 50(11), pp.2912-2917.
- [9] Fossen, T. I., & Lekkas, A. M., 2015, Direct and indirect adaptive integral line of sight path following controllers for marine craft exposed to ocean currents. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing.
- [10] Han, Y., et.al., 2015, Effectiveness Analysis for the Precision Guided and Controlled Underwater Vehicle system with Integrated Navigation System, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng., 19(11), pp.2751-2757.
- [11] Healey, A.J., & Lienard, D., 1993, Multivariable Sliding-Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles.

- [12] Hovakimyan, N., et.al., 2002, Adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems using single-hidden-layer neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(6), pp.1420-1431.
- [13] Jantapremjit, P., & Wilson, P. A., 2008, Guidance-control based path following for homing and docking using an autonomous underwater vehicle. In *Oceans 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, IEEE, pp.1-6.
- [14] Johnson, E. N., & Calise, A. J., 2000, Pseudo-control hedging: A new method for adaptive control. In *Advances in navigation guidance and control technology workshop*, pp.1-2.
- [15] Jun, B.H., et.al., 2009, Development of the AUV 'ISiMI' and a free running test in an Ocean Engineering Basin, *Ocean Engineering*, 36(1), pp.2-14.
- [16] Kim, N., 2003, Improved methods in neural network-based adaptive output feedback control, with applications to flight control (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- [17] Lapierre, L., & Soetanto, D., 2007, Nonlinear path-following control of an AUV. *Ocean engineering*, 34(11), pp.1734-1744.

- [18] Lapierre, L., & Jouvencel, B., 2008, Robust nonlinear path-following control of an AUV. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2), pp. 89-102.
- [19] Lekkas, A. M., 2014, Guidance and path-planning systems for autonomous vehicles (Doctoral dissertation, NTNU).
- [20] Moe, S., et.al., 2016, Line-of-Sight Curved Path Following for Underactuated USVs and AUVs in the Horizontal Plane under the influence of Ocean Currents, *Control and Automation (MED)*, 2016 24th Mediterranean Conference, pp.38-45.
- [21] Park, J.Y., et.al., 2016, Adaptive depth controller design for a submerged body moving near free surface, *Applied Ocean Research*, 58, pp.83-94.
- [22] Presto, T., 2001, Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle (Doctoral dissertation, MIT).

Abstract

Path-Following Controller Design for AUV under Unknown Ocean Current

Jooho Lee

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The torpedo type AUV is characterized by high nonlinearity and susceptibility to environmental disturbance due to its structural characteristics and low operating speed. For this reason, path-following controller for Torpedo type AUV should have robustness for environmental disturbances, modeling uncertainties, and saturation of control fin angle and rate. This paper proposes nonlinear LOS guidance that improves LOS guidance, the most popular guidance logic for path-following problem of underactuated vehicle such as USV and AUV. Using the Lyapunov stability theory, we proved the path convergence of the

proposed guidance scheme. As a result of the comparison with LOS guidance and Integral-LOS guidance, the proposed method showed better performance in terms of percent-overshoot, settling time, and path deviation error.

To consider unknown disturbances and modeling uncertainties, neural network based adaptive controller was used with the nonlinear LOS guidance. In addition, in order to prevent the neural network from adapting to the system nonlinearity due to saturation of control fin and degrading its performance, the pseudo control hedging(PCH) scheme was used.

Five degrees of freedom motion was considered according to the structural characteristics of AUV. Under the assumption that the speed of current is constant and smaller than the speed of AUV, AUV propelled constantly, and the ocean current is irrotational flow, the effect of ocean current was considered by using the relative velocity with respect to ocean current in the equation of motion. The AUV model was verified through comparison of open-loop simulation with previous research.

Path-following simulation was conducted for 3D curved path. The terms related to the relative velocity to the current was assumed to be an unknown value. In the early stage when the adaptive signal did not converge to unknown term, the trajectory of AUV diverged. However, as the adaptive signal converged, the

trajectory converged to the desired path. As a result of the path following simulation using the proposed controller, the path following performance is sufficiently good with horizontal error of less than 0.1m and vertical error of less than 2m.

Keyword: AUV, 3D Path Following, Ocean Current Disturbance, Modeling Uncertainty, Guidance Logic, Neural Network based Adaptive Control, PCH

Student Number: 2015-21173