



2011年 2月

碩士學位論文

4개의 추진기를 가진 수중로봇의 제어

朝鮮大學校大學院

制御計測工學科

徐 榮 男

4개의 추진기를 가진 수중로봇의 제어

Control of Underwater Robot with 4 Thrusters

2011년 2月 25日

朝鮮大學校大學院

制御計測工學科

徐 榮 男

4개의 추진기를 가진 수중로봇의 제어

指導教授 高 樂 溶

이 論文을 碩士學位申請 論文으로 提出 함.

2010年 10月

朝鮮大學校大學院

制御計測工學科

徐 榮 男

徐榮男의 碩士學位論文을 認准함

| 委員 | 長 | 朝 | 鮮 | 大 | 學 | 校 | 教授 | 郭 | 根 | E E | 印 |
|----|---|---|---|---|---|---|----|---|---|--------|---|
| 委 | 員 | 朝 | 鮮 | 大 | 學 | 校 | 敎授 | 高 | 樂 | 溶 | 印 |
| 委 | 員 | 朝 | 鮮 | 大 | 學 | 校 | 教授 | 趙 | 昌 | 鉉 | 印 |

2010年 11月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

| 제 | 1장 | 서론1 |
|----|----|----------------------------|
| | 제 | 1절 연구 배경 및 목적 |
| | 제 | 2절 논문의 구성 |
| | | |
| 제 | 2장 | 수중로봇 개발 현황 |
| | 제 | 1절 국외 수중로봇 개발 현황4 |
| | | 1. AUV 개발 현황 ······4 |
| | | 2. ROV 개발 현황 |
| | 제 | 2절 국내 수중로봇 개발 현황6 |
| | | 1. AUV와 ROV의 개발 현황 ······6 |
| | | |
| 제 | 3장 | 수중로봇의 제어 계획 |
| | 제 | 1절 수중로봇의 제어 좌표계 및 제어 변수7 |
| | 제 | 2절 수중로봇 주행시 필요한 센서8 |
| | 제 | 3절 직진주행9 |
| | 제 | 4절 곡률주행 |
| | 제 | 5절 깊이주행 |
| | | |
| TH | ◢자 | 스조근보이 으도바저시 |

| 세 43 | 상 : | 수궁 | 도놋의 | 운동방성식 | | 6 |
|------|-----|----|-----|-------|---|---|
| - | 제 | 1절 | 좌표계 | | 1 | 6 |

| | 제 | 2절 | 수중로봇의 운동방정식 |
|----|----|-----|--------------------------------------------------|
| | | 1. | 무게중심을 주축으로 한 운동방정식 |
| | | 2. | 임의의 기준점에 대한 일반적인 운동방정식 |
| | | 3. | 오일러 각 변환 |
| | 제 | 3절 | 수중로봇에 적용된 운동방정식 |
| | | | |
| 제 | 5장 | 수중 | 로봇의 제어기 설계 |
| | 제 | 1절 | 레귤레이션 제어 |
| | 제 | 2절 | 트래킹 제어 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ |
| | 제 | 3절 | LQ제어 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ |
| | 제 | 4절 | 속도, 깊이, 헤딩제어 |
| | | | |
| 제 | 6장 | 제아 | · 시뮬레이션 ···································· |
| | 제 | 1절 | 가중치행렬 Q와R 디자인··································· |
| | 제 | 2절 | 시뮬레이션 방법 |
| | | | |
| 제 | 7장 | 결론 | |
| 참_ | 고문 | 헌 … | 45 |

표 목차

| 표 | 2.1 | 국외 AUV개발 현황 | 4 |
|---|-----|-------------------------------------------|---|
| 표 | 2.2 | 국외 ROV개발 현황 | 5 |
| 표 | 2.3 | 국내 AUV와 ROV 개발현황 ······ | 6 |
| 표 | 3.1 | 제어변수 | 7 |
| 표 | 3.2 | 센서보드 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | 3 |
| 표 | 6.1 | Q디자인 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | 5 |

그림 목차

| 그림 3.1 수중로봇의 제어 좌표계 | ···7 |
|------------------------------------|------|
| 그림 3.2 센서보드 | 8 |
| 그림 3.3 직진주행 | 9 |
| 그림 3.4.1 지그재그형식의 곡률주행 | ·10 |
| 그림 3.4.2 원 곡률주행 | ·11 |
| 그림 3.5.1 깊이주행 | 12 |
| 그림 3.5.2. 종동요 각 < 진행 각 | 13 |
| 그림 3.5.3 종동요 각 > 진행 각 | 13 |
| 그림 3.5.4 이상적인 수직 깊이주행①과 일반적인 깊이주행② | 14 |
| 그림 3.5.5. 동작불안정한 수직 깊이주행 | 15 |
| 그림 4.1 수중로봇의 좌표계 | -16 |
| 그림 4.2 오일러 각 표준 회전 순서 | 19 |
| 그림 4.3 수중로봇의 자세와 위치를 나타내는 방법 | 22 |
| 그림 5.1 레귤레이션 시스템 | 27 |
| 그림 5.2 트래킹 시스템 | 28 |
| 그림 5.3 수중로봇의 모터위치 | 30 |
| 그림 5.4 수중로봇의 운동방향 | 31 |
| 그림 6.1 Q값에 대한 속도 시스템 성능의 변화률 | 36 |
| 그림 6.2 Q값에 대한 깊이 시스템 성능의 변화률 | 36 |
| 그림 6.3 Q값에 대한 헤딩 시스템 성능의 변화률 | 37 |
| 그림 6.4 제어입력에 대한 속도의 결과 | 39 |
| 그림 6.5 제어입력에 대한 깊이의 결과 | 40 |
| 그림 6.6 제어입력에 대한 헤딩의 결과 | 41 |
| 그림 6.7 출력결과 | 42 |

| 그림 6.8 | 3차원 | 궤도 | | 43 |
|--------|-----|----|--|----|
|--------|-----|----|--|----|

ABSTRACT

Control of Underwater Robot with 4 Thrusters

Seo, Young Nam Advisor : Prof. Ko, Nak Yong, Ph. D. Dept. of Control and Instrumentation Eng., Graduate School of Chosun University

This paper presents speed, depth, and heading control algorithms for an autonomous underwater robot with four thrusters named the Dual Use Semi-Autonomous Underwater Vehicle (DUSAUV). The proposed algorithm adopts linear quadratic (LQ) controller to give an optimal solution including that of the algebraic Riccati equation (ARE). In order to facilitate the controller design, DUSAUV which is the generic nonlinear dynamic system of 6 degree of freedom is linearly parameterized in terms of the speed, pitch, and yaw to state-space representation model. In this paper the LQ control provides an optimal thrust distribution minimizing the performance indices to speed, depth, and heading control. The simulation result is executed on Simulink, MATLAB.

제 1장 서론

제 1절 연구 배경 및 목적

최근 들어 해양이 인류의 지속적인 발전을 위해서 반드시 개발해야 될 필요가 있다는 것을 확인했다. 육상 산업단지의 포화와 고갈되어 가는 육지자원 및 환경 문제를 해결하기 위하여 해상 플랜트 설치가 늘어나고 있다. 이러한 해양에 대한 개발 산업이 본격화 되면서, 잠수부를 대신하여 작업을 수행하기 위한 수중 로봇 에 대한 관심 또한 증가되고 있다. 수중로봇을 사용하게 되면 심해나 극지에서의 작업이 가능해지며 또한 잠수부에 비해 긴 작업시간을 가진다는 장점이 있다.

수중로봇(UUV:Unmanned Underwater Vehicle)은 크게 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 나눌 수 있다.

ROV는 모선과 케이블로 연결되어서 원격으로 조정하는 형태로 오퍼레이터가 잠수정에 부착된 수중 카메라의 화상 정보를 이용하여 직접 조종하는 잠수체로 수 중에서의 각종 작업, 수심이 얕은 곳의 검사에 적합하다. 하지만 케이블을 부착한 채 이동해야함으로, 이동가능 거리가 짧고, 작업공간이 제한적이다[1].

반면 AUV는 케이블의 제약이 없으며 센서 데이터 및 각종정보를 활용하여 자 신의 상황을 스스로 판단해가며 주어진 임무를 수행하는 자율성을 지니는 무인 잠 수정을 말한다[2].

AUV는 테더의 존재로 인해 유발되는 항력으로 운동 성능에 제약을 받는 ROV에 비해 보다 심해에서 탐사용 목적으로 유용하게 사용될 수 있다. 또한 ROV가 갈 수 없는 빙하 아래 영역의 탐사 목적으로도 사용되기도 한다. AUV는 또한 기뢰 탐지 및 제거, 잠수함 탐지 및 추적, 다수의 AUV를 동원한 짧은 시일 내의 광역 탐사 등 군사용 목적으로 사용되기도 한다. 하지만 AUV는 태양열 충전지를 가지고 수면 으로 부상하여 충전하는 일부 AUV를 제외하고는 전원의 공급이 탑재된 배터리용량 에 전적으로 의존하기 때문에 작동 시간에 한계가 있으며, 운용자가 실시간으로 AUV의 상태를 파악할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 효율적이고 안정적인 AUV의 운용을 위해서는 고도의 자율성이 요구된다[3]. 수중로봇의 주요 요소기술을 5가지로 분류하면 제어, 센싱, 통신, 제작, 위치 파악으로 분류할 수 있다[4].

제어 기술은 수중로봇의 자율 운항을 위한 필수 기술의 하나이다. 그러나 3차 원 공간에서 움직이는 수중로봇의 경우 운동 역학이 복잡하고 수학적으로 모델링 하기 어려운 요소들을 포함하고 있어서 쉽게 해결하기 어려운 문제이다.

수중로봇 제어에서 가장 어려운 문제는 입력과 출력의 불확실성이다. 센서들 의 노이즈가 크고 신뢰도가 낮으며, 추진기들의 추력 출력에 변수가 많은 것이다.

수중로봇의 운동방정식은 일반적으로 6자유도 비선형 운동방정식의 형태로 표 현된다. 이 운동방정식에는 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링 되어 있다. 모델링에 관한 대표적인 연구로는, Gertler와 Hagen, Feldman에 의한 운동 방정식 연구와 Fossen에 의한 수중로봇의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식, Healey와 Lienard에 의한 6자유도의 비선형 운동방정식에 대한 연구 등이 있다 [5][6][7][8].

본 논문은 네 대의 추진기를 사용하는 수중로봇의 속도, 깊이, 헤딩 동작을 위한 제어기 설계를 주목적으로 한다. 이를 위해 네 대의 추진기를 가지는 수중로 봇의 6자유도 운동방정식을 간략화 하여 속도, 종동요(pitch), 선수동요(yaw)운 동에 대한 선형화된 운동방정식을 유도한다. 이를 기반으로 다른 제어 기법에 비 하여 크게 어렵지 않지만 효과가 뛰어나다는 장점을 가지고 있는 LQ제어기를 설계 하였다. 설계된 제어기의 성능확인을 위하여 MATLAB SIMULINK를 사용하여 시뮬레 이션 한다.

제 2절 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 국내외 수중로봇의 개발 현황에 대 해서 간략하게 살펴보고, 3장에서는 수중로봇을 제어하기 위한 제어 계획을 수립 한다. 4장에서는 6자유도를 가지는 수중로봇의 운동방정식에서 논하고 5장에서는 운동방정식을 기반으로 LQ제어기를 설계하여 적용하는 과정을 보이며 6장에서는 설계된 제어기의 성능 확인을 위하여 시뮬레이션결과를 보여준다. 마지막 7장에서 는 결론 및 향후 계획에 대해서 설명한다.

제 2장 수중로봇 개발 현황

제 1절 국외 수중로봇 개발 현황

현재 미국이 선도하여 개발 및 운용하고 있으며, 12개 국가 이상에서 다양한 종류의 수중로봇이 개발 및 운동되고 있다. 대표적으로 개발 또는 운용중인 중형 수중로봇은 다음과 같다[9].

1. AUV 개발 현황

아래의 표 2.1은 국외 AUV 개발 현황을 나타낸다.

| | 21" MRUUV | MARLIN | AUV-62F | HUGIN-1000 |
|----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 구분 | Open System Concept | | | |
| 국가 | 미국 | 영국 | 스웨덴 | 노르웨이 |
| 개발 기관 | NUWC/ Martin Northrop | BAE Systems | Saab Bofors | FFI/Kongsberg |
| 중량 | 1,275(kg) | 1,200(kg) | 1,200(kg) | 500(kg) |
| 길이 | 6.1m | 6.0m | 7.0m | 4.5m |
| 직경 | 0,533m(21 inch) | 0,533m | 0,533m | 0,75m |
| 속력 | 최대 7노트 | 3~15노트 | 3~12노트, 정지/후진 | 1~6노트 |
| 운용 수심 | 450m | 350m | 3~200m | 1,000- |
| 운용 시간 | 40시간/4노트 | 4시간 이상 | 24시간(lì 전지)/ 1주일(연료전지) | 21시간/4노트 |
| 주요 탑재 센서 | · SAS/L-PUMA · 호밍 및 도킹소나 · INS, GPS | • SAS/호밍소나 • INS, GPS, 음속계 • 거리추적센서 등 | • SAS/호밍소나 • INS, GPS | SAS/Multi-beam Echo Sound INS, GPS |
| 통신 | RF, 수중통신, 위성통신 | RF, 수중통신, 광케이블, 위성통신 | RF, 수중통신, 광케이블, 위성통신 | RF, 수중통신, 광케이블, 위성통신 |
| 비고 | • '07~'11 : 체계개발 • '11~'12 : 운용시험 • '13 : 전력화 예상 | • '02 :1차 해상시험 • '03~'05 : 개량 (BAUUV 프로그램) | • '00~'03 : 체계개발 • '04 : 문용시험 • '05~'07 : 체계개량 | • '02~'05 : 체계개발 • '05~'07 : 운용평가 • '08 : 전력화 예상 |

표 2.1 국외 AUV개발 현황

2. ROV 개발 현황

아래의 표 2.2는 국외 ROV 개발 현황을 나타낸다.

| | Jason2 | Victor6000 | ROPOS | ISIS |
|----------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분 | | | | |
| 국가 | 미국 | 프랑스 | 캐나다 | 영국 |
| 개발 기관 | WHOI | IFREMER | CSSF | SOC |
| 운용 수심 | 6,500m | 6,000m | 5,000m | 6,500m |
| 시스템 | Buffer/ROV • 2-body launching | depressor/ROV 2-body launching | TMS/ROV • 1-body launching • Cage형 TMS | TMS/ROV • 1-body launching |
| 특징 | · Vessels of Opportunityy · 이동식 control van | · Vessels of Opportunityy · 이동식 control van | · Vessels of Opportunityy · 이동식 control van | Vessels of Opportunityy 이동식 control van Jason2와 동일 모델 운용방식이 다름 LARS운용 |

표 2.2 국외 ROV개발 현황

제 2절 국내 수중로봇 개발 현황

국내 연구현황은 민간 연구소, 산업체 및 학계에서 수중로봇에 많은 관심을 갖고 최근에 활발한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 국내 소요가 없어서 대부분 기초 또는 응용연구 수중에 머물러 있고, 산업계는 적극적인 연구개발에 투자를 꺼리고 있어 실용화는 거의 이루어지지 못하고 있다[9].

1. AUV와 ROV의 개발 현황

국내에서 연구 개발된 대표적인 AUV와 ROV의 개발현황은 표 2.3과 같으며, 대 부분 산업용 및 연구용이다.

| | OKPO-6000 | SAUV | FRM | 해미래 |
|----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 구분 | | | | |
| 개발 기관 | (주)대우조선해양 | 한국해양연구원/ 대양전기공업(주) | 국방과학연구소 | 한국해양연구원 |
| 중량 | 950(kg) | 450(kg) | 950(kg) | 182(kg) |
| 길이 | 3,8m | 3,188m | 5,89m | 1,2m |
| 직경 | 0,533m(21 inch) | 0,533m | 0,533m | 0,75m |
| 속력 | 순항 3노트 | 최대 7노트 | 최대 8노트 | 최대 3노트 |
| 운용 수심 | 6,000m (비내압구조형) | 200m (내압구조형) | 100m (내압구조형) | 6,000m (비내압구조형) |
| 운용 시간 | 10시간/3kts (Silver-Zinc) | 1시간 (연축전지) | 4시간/kts (연축전지) | 모선 전원공급 |
| 주요 탑재 센서 | ·TV Camera ·Side Scan Sonar ·회피소나 | · CCD Camera · Side Scan Sonar · 4-관절 로봇팔 | · 회피소나 · INS, GPS · 근거리추적 소나 | · CCD Camera · 도킹용 비전 |
| 통신 | RF, 수중통신 | RF, 광케이블 | RF, 수중통신, | 광케이블 |
| 개발 / 운용 | · '93~'95 : 체계개발 · '96~ : 운용 (해양탐사) | • '99~'03 : 민군겸용 과제(연구용) | • '96~'99 : 잠수함 모형시험(연구용) | · '01~'07 : 심해탐사 (연구용) |

표 2.3 국내 AUV와 ROV 개발현황

제 3장 수중로봇의 제어 계획

이 장에서는 수중로봇의 운동제어를 위한 제어 좌표계 및 제어 변수에 대해서 정의한다. 또한 수중로봇의 직진, 곡률, 깊이 주행에 대한 주행계획을 수립하고, 주행에 필요한 센서들에 대해 설명한다.

제 1절 수중로봇의 제어 좌표계 및 제어 변수

수중로봇을 제어하기 위해서는 제어 좌표계와 제어 변수를 정의해야한다. 아 래의 그림 3.1은 6자유도를 가지는 수중로봇의 제어 좌표계를 나타낸다.



그림 3.1 수중로봇의 제어 좌표계

수중로봇의 직진주행, 곡률주행, 깊이주행을 위해 4자유도가 필요하다. 따라 서 제어변수는 표 3.1과 같다.

표 3.1 제어변수

| 제어변수 | 기호 |
|------------------|--------------------|
| 직진속도 | u(surge) |
| 회전속도 | r(yaw),ψ |
| 깊이 | Ζ |
| 깊이제어를 위한 pitch 각 | $q(pitch), \theta$ |

제 2절 수중로봇 주행시 필요한 센서

수중로봇의 직진, 곡률, 깊이제어를 하기위해서는 기본적으로 속도센서, IMU(Inertial Measurement Unit), 압력센서, 기울기센서가 필요하다. 아래의 그림 은 속도센서(3축가속도센서), IMU, 마그네틱 컴파스, 압력센서, 기울기센서를 포 함하고 있는 센서보드이다.



그림 3.2 센서보드

아래의 표 3.2는 센서보드에 장착된 센서들을 나타내고, 사용목적에 대해서 정의한다.

표 3.2 센서보드

| 센서 | 측정 | 기호 |
|---------------|--------------|----------|
| IMU, 마그네틱 컴파스 | 수중로봇의 방위각 측정 | Ψ |
| 속도센서(3축가속도센서) | 수중로봇의 속도 측정 | и |
| 압력센서 | 수중로봇의 깊이 측정 | Ζ |
| 기울기센서 | 수중로봇의 기울기측정 | θ |

제 3절 직진주행

수중로봇이 surge방향으로 동작할 때 직진주행으로 정의한다. 또한 수중로봇 이 직진주행하기 위해서 아래와 같은 조건이 성립해야 만족한 성능을 얻을 수 있 다.

• $u \neq 0, \psi = 0, Z = 0, \theta$: keep



그림 3.3 직진주행

제 4절 곡률주행

수중로봇이 Z축을 중심으로 회전하면서 주행하는 것을 곡률주행으로 정의한 다. 수중로봇이 곡률주행하기 위해서 아래와 같은 조건이 성립해야 만족한 성능을 얻을 수 있다.

• $u \neq 0, \psi \neq 0, Z = 0, \theta$: keep

곡률주행으로는 그림 3.4.1과 같은 지그재그형식의 곡률주행과 그림 3.4.2와 같이 원을 그리며 곡률 주행하는 것이 있다. 원천적으로 두 그림은 동일한 방법으 로 곡률주행을 한다.



그림 3.4.1 지그재그형식의 곡률주행



그림 3.4.2 원 곡률주행

곡률주행방법에서의 주행궤적반지름 및 곡률 값은 다음과 같다.

제 5절 깊이주행

수중로봇이 종동요(pitch) 각을 사용하여 Z축 방향으로 주행하는 것을 깊이주 행으로 정의한다. 수중로봇이 깊이주행하기 위해서 아래와 같은 조건이 성립해야 만족한 성능을 얻을 수 있다.

• $u \neq 0, \psi = 0, Z \neq 0, \theta \neq 0$

그림 3.5.1는 깊이주행에 대해 나타낸다. 여기서 종동요 각과 진행 각의 방향 은 일치하는데 이 경우는 이상적인 깊이주행에 해당된다.



그림 3.5.1 깊이주행

깊이주행을 위한 명령을 주는 방법은 다음의 2가지가 있다.

(1) 원하는 깊이에 도달할 때가지 현재깊이에 일정한 목표깊이를 더하여 입력
(2) 원하는 깊이에 바로 도달할 수 있도록 원하는 깊이를 직접 입력

첫 번째 깊이주행방법을 사용하여 실제주행을 했을 경우 그림 3.5.2, 그림 3.5.3과 같이 종동요 각과 진행 각이 일치하지 않는 주행결과가 나올 수 있다.



그림 3.5.2. 종동요 각 < 진행 각



그림 3.5.3 종동요 각 > 진행 각

두 번째 깊이주행방법으로는 원하는 깊이에 바로 도달할 수 있도록 원하는 깊 이를 직접 입력하는 방법이다.

이와 같은 깊이주행방법을 사용할 경우 그림 3.5.4과 같은 이상적인 수직 깊 이주행과 일반적인 깊이주행 그리고 그림 3.5.5와 같은 동작불안정한 수직 깊이주 행 결과가 나올 수 있다.



그림 3.5.4 이상적인 수직 깊이주행①과 일반적인 깊이주행②



그림 3.5.5. 동작불안정한 수직 깊이주행

첫 번째 방법과 두 번째 방법을 비교했을 경우 두 번째 방법은 그림 3.5.5와 같은 수중로봇의 동작불안정을 유발할 수 있으므로 피하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

제 4장 수중로봇의 운동방정식

3장에서는 수중로봇을 제어하기 위한 방법과 제어계획을 수립하고, 제어변수 를 설정했다. 이 장에서는 수중로봇의 운동을 나타내기 위한 좌표계에 대해 설명 을 하고, 해양에서 수중로봇의 6자유도 운동방정식에 대해 논한다.

제 1절 좌표계

수중로봇의 운동을 나타내기 위해서는 먼저 기준 좌표계(Reference frame)와 물체 고정 좌표계(Body-fixed frame)를 정의해야한다. 물체 고정 좌표계는 수중로 봇이 운동하게 되면 좌표계가 움직이게 되므로 해양에서 실제 수중로봇의 위치, 거리, 방향등을 나타낼 수 없다. 따라서 물체 고정 좌표계는 기준 좌표계로의 변 환이 필요하므로 2개의 좌표계를 사용하게 되고, 좌표계변환을 위해 오일러 각 변 환을 사용한다.

여기서 기준 좌표계는 지구 고정 좌표계(Earth-fixed frame)를 타나내며 물체 고정 좌표계는 수중로봇의 좌표계를 나타낸다. 6개의 자유도를 가지는 수중로봇의 좌표계는 다음 그림과 같이 정의한다.



그림 4.1 수중로봇의 좌표계

좌표계를 설정하는 방법은 X축 방향은 전진방향의 축대칭 축으로 하며, Y축은 우현(starboard)방향으로 뻗어나가는 방향, Z축은 하방운동을 하는 방향으로 설정 한다.

위의 좌표계에서 surge는 수중로봇이 앞뒤로 움직이는 것, sway는 직선방향에 서 좌우로 움직이는 것, heave는 위아래로 움직이는 것을 말하며, u는 x축 방향의 속도, v는 y축 방향의 속도, w는 z축 방향의 속도를 나타내며, p는 roll방향의 각 속도, q는 pitch방향의 각속도, r은 yaw방향의 각속도를 나타낸다.

제 2절 수중로봇의 운동방정식

일반적으로 6개의 자유도를 가지는 수중로봇의 비선형 운동방정식은 무게중심 을 주축으로 한 운동방정식과, 임의의 기준점에 대한 일반적인 운동방정식으로 나 타낼 수 있다[10].

1. 무게중심을 주축으로 한 운동방정식

다음의 운동방정식은 수중로봇의 무게중심을 주축으로 한 비선형 운동방정식 을 타나낸다. 운동방정식은 물체(수중로봇)의 고정된 좌표계에서 정의한다.

Surge : $X = m(\dot{u} - r\upsilon + q\omega)$

Sway : $Y = m(\dot{\upsilon} + ru - p\omega)$

Heave: $Z = m(\dot{\omega} - qu + p\upsilon)$

$$Roll \quad : K = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr \tag{4.1}$$

$$Pitch : M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z) pr$$

Yaw : $N = I_z \dot{r} + (I_v - I_x)pq$

2. 임의의 기준점에 대한 일반적인 운동방정식

실제로 계측하는 물리량이 항상 질량중심에서 위치할 수 없다. 또한 수중로봇 이 이동할 때마다 질량중심이 이동하기 쉽다. 이러한 이유로 질량중심과 기준점이 다를 경우 일반적인 운동방정식이 필요하다. 아래의 식은 질량중심과 기준점이 다 를 경우 즉 임의의 기준점에 대한 일반적인 운동방정식이다. 운동방정식은 수중로 봇의 고정된 좌표계에서 정의된다.

$$\begin{split} X &= m \Big[\dot{u} - r\upsilon + q \omega - x_c (q^2 + r^2) + y_c (pq + \dot{r}) + z_c (pr + \dot{q}) \Big] \\ Y &= m \Big[\dot{\upsilon} + ru - q \omega + x_c (pq + \dot{r}) - y_c (p^2 + r^2) + z_c (qr - \dot{p}) \Big] \\ Z &= m \Big[\dot{\omega} - qu + p\upsilon + x_c (pr - \dot{q}) + y_c (qr + \dot{p}) - z_c (p^2 + q^2) \Big] \\ K &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr + I_{xy} (q^2 - pr) + I_{xz} (r^2 + pq) + I_{yz} (q^2 - r^2) \\ &+ m \Big[y_c (\dot{\omega} + \upsilon p - uq) + z_c (-\dot{\upsilon} + \omega p - ur) \Big] \\ M &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z) pr + I_{xy} (p^2 + qr) + I_{xz} (r^2 - p^2) + I_{yz} (r^2 - pq) \\ &+ m \Big[x_c (-\dot{\omega} + up - \upsilon p) + z_c (\dot{u} + \omega q - \upsilon r) \Big] \\ N &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq + I_{xy} (p^2 - q^2) + I_{xz} (p^2 + qr) + I_{yz} (q^2 + pr) \\ &+ m \Big[x_c (\dot{\upsilon} + ur - \omega p) + y_c (-\dot{\upsilon} + \upsilon r - \omega q) \Big] \end{split}$$

위의 운동방정식에서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

F = [X,Y,Z]^T: 수중로봇의 고정된 좌표계에서 작용하는 힘 벡터 M = [K,M,N]^T: 수중로봇의 고정된 좌표계에서 작용하는 모멘트 벡터 υ = [u,υ,w]^T: 수중로봇의 고정된 좌표계에서 속도벡터 ω = [p,q,r]^T: 수중로봇의 고정된 좌표계에서 각속도벡터 $r_c = [x_c, y_c, z_c]^T$: 수중로봇의 고정된 좌표계에서 무게중심 위치 벡터

$$I_{N} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{yx} & I_{zx} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{zy} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} : 관성 행렬$$

m:수중로봇의 질량

3. 오일러 각 변환

수중로봇의 고정된 좌표계를 지구의 고정된 좌표계로 표현하기 위해서 오일러 각을 사용한다. 오일러 각은 세 개의 yaw, pitch, roll의 각을 정의해야한다. 오 일러 각 변환은 회전 순서에 따라 값이 틀리므로 구체적인 회전 순서를 정의해야 한다. 본 논문에서는 해양공학과 항공공학에서 사용하는 표준 회전 순서를 따른 다.



그림 4.2 오일러 각 표준 회전 순서

• 1단계 : Yaw Angle

*z*축을 회전시켰을 때 *F* ₀좌표계를 *F* ₁좌표계로 변환



• 2단계 : Pitch Angle

y축을 회전시켰을 때 F_1 좌표계를 F_2 좌표계로 변환



• 3단계 : Roll Angle x축을 회전시켰을 때 F_2 좌표계를 F_3 좌표계로 변환



위의 yaw, pitch, roll의 좌표변환행렬을 곱하면 위치변환행렬 구할 수 있다.

위치변환행렬:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{/F3} = T_{\phi} T_{\theta} T_{\psi} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{/F0}$$

$$T_{E1(\phi,\theta,\psi) \triangleq} \left(T_{\phi} T_{\theta} T_{\psi} \right)^{T} = T_{\psi}^{T} T_{\theta}^{T} T_{\phi}^{T}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}$$
(4.3)

속도변환행렬:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = T_{E1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$(4.4)$$

u,υ,ω: 물체의 고정좌표계에서의 수중로봇의 속도 x,y,ż: 지구의 고정좌표계에서의 수중로봇의 속도 각속도변환행렬:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + T_{\phi} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + T_{\phi} T_{\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$
(4.5)
$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_{E2} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$
(4.6)
$$T_{E2} \triangleq \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix}$$



 $\begin{array}{l} T_{\mathbf{l}(\mathcal{E}/\mathcal{B})} : & \text{Euler Transformation Matrix} \\ & (\text{Linear Velocity Transformation}) \end{array}$

 $T_{2(E/B)}$: Euler Transformation Matrix (Angular Velocity Transformation)

그림 4.3 수중로봇의 자세와 위치를 나타내는 방법

제 3절 수중로봇에 적용된 운동방정식

일반적으로 잘 알려진 수중로봇의 6자유도 비선형 운동방정식은 Gertler and Hangen, Feldman에 의해 정리되었다[5][6]. 본 논문에서는 제어대상과 비슷한 DUSAUV(Dual Use Semi-Autonomous Underwater Vehicle)모델에 적용된 6자유도 비 선형 방정식을 사용한다. 이 운동방정식에서는 조류의 영향을 무시하였다 [11][12].

$$M\dot{v} = F_{cc} + F_{DL} + F_{rest} + F_{thurst}$$
(4.7)

위의 운동방정식에서 각 항을 구성하는 식들은 다음과 같이 정의한다.

·v={ u, v, w, p, q, r} ^T : 수중로봇의 고정된 좌표계에서의 가속도벡터 M: 부가질량을 포함하는 관성행렬

$$M = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2}l^{3}X_{i} & 0 & 0 & mz_{G} & -mz_{G} \\ 0 & m - \frac{\rho}{2}l^{3}Y_{i} & 0 & -mz_{G} - \frac{\rho}{2}l^{4}Y_{i} & 0 & mx_{G} - \frac{\rho}{2}l^{4}Y_{i} \\ 0 & 0 & m - \frac{\rho}{2}l^{3}Z_{ii} & my_{G} & -mx_{G} - \frac{\rho}{2}l^{5}Z_{ij} & 0 \\ 0 & -mz_{G} - \frac{\rho}{2}l^{4}K_{i} & my_{G} & I_{x} - \frac{\rho}{2}l^{5}K_{j} & -I_{xy} & -I_{xx} + \frac{\rho}{2}l^{5}K_{i} \\ mz_{G} & 0 & -mx_{G} - \frac{\rho}{2}l^{4}M_{ii} & -I_{xy} & I_{y} - \frac{\rho}{2}l^{5}M_{ij} & -I_{yz} \\ -my_{G} & -mx_{G} - \frac{\rho}{2}l^{4}Y_{i} & 0 & -I_{xx} - \frac{\rho}{2}l^{5}K_{i} & I_{yz} & I_{z} - \frac{\rho}{2}l^{5}N_{i} \end{bmatrix}$$

$$(4.8)$$

F _{CC} : 수중로봇에 작용하는 전향력 및 원심력

$$F_{CC} = \begin{bmatrix} X_{CC} & Y_{CC} & Z_{CC} & K_{CC} & M_{CC} & N_{CC} \end{bmatrix}^{T}$$

$$X_{CC} = mvr - mq\omega - my_{G}pq - mz_{G}pr + mx_{G}q^{2} + mx_{G}r^{2}$$

$$Y_{CC} = -mur + m\omega p - mx_{G}qp - mz_{G}qr + my_{G}p^{2} + my_{G}r^{2}$$

$$Z_{CC} = muq - mvp + mx_{G}rp - my_{G}rq + mz_{G}p^{2} + mz_{G}q^{2}$$

$$K_{CC} = my_{G}uq + mz_{G}ur - my_{G}vp - mz_{G}\omega p - (I_{z} - I_{y})qr + I_{yx}q^{2} - I_{yx}r^{2} + I_{xz}pq - I_{xy}pr$$

$$M_{CC} = mz_{G}vr + mx_{G}vp - mx_{G}uq - mz_{G}\omega q - (I_{x} - I_{z})rp - I_{zx}p^{2} - I_{yz}pq + I_{xy}qr + I_{zx}r^{2}$$

$$N_{CC} = -mx_{G}ur - my_{G}vr + my_{G}\omega q + mx_{G}\omega p - (I_{y} - I_{x})pq + I_{xy}p^{2} - I_{xy}q^{2} + I_{yz}rp - I_{zx}rq$$

(4.10)

$$\begin{split} M_{DL} &= \frac{\rho}{2} l^3 (M_{\nu\nu} v^2 + M_{\omega} \omega + M_{\omega|\omega|} \omega |\omega|) + \frac{\rho}{2} l^4 M_q q + \frac{\rho}{2} l^5 M_{q|q|} q |q|) \\ N_{DL} &= \frac{\rho}{2} l^3 (N_{\nu} v + N_{\nu|\nu|} v |\nu|) + \frac{\rho}{2} l^4 N_r r + \frac{\rho}{2} l^5 N_{r|r|} r |r|) \end{split}$$

$$F_{rest} : 수중로봇의 무게(중력)와 부력의 힘$$

$$F_{rest} = \begin{bmatrix} X_{rest} & Y_{rest} & Z_{rest} & K_{rest} & M_{rest} & N_{rest} \end{bmatrix}^{T}$$

$$X_{rest} = -(W - B)\sin\theta$$

$$Y_{rest} = (W - B)\cos\theta\sin\phi$$

$$Z_{rest} = (W - B)\cos\theta\cos\phi$$

$$K_{rest} = (Y_{G}W - y_{B}B)\cos\theta\cos\phi - (z_{G}W - z_{B}B)\cos\theta\sin\phi$$

$$M_{rest} = -(x_{G}W - x_{B}B)\cos\theta\cos\phi - (z_{G}W - z_{B}B)\sin\theta$$

$$N_{rest} = (x_{G}W - x_{B}B)\cos\theta\sin\phi + (y_{G}W - y_{B}B)\sin\theta$$

 $F_{\it thrust}$: 수중로봇의 네 대의 추진기의 추력

수중로봇의 자세와 위치는 오일러 각을 이용하여 다음 식으로 표현된다.

 $\dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta$

$$\dot{\theta} = q\cos\phi - r\sin\phi$$

$$\dot{\psi} = \frac{(q\sin\phi + r\cos\phi)}{\cos\theta}$$

 $\dot{X} = u\cos\psi\cos\theta + v(\cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\theta)$

(4.14)

 $+w(\cos\psi\sin\theta\sin\phi+\sin\psi\sin\phi)$

 $\dot{Y} = u\sin\psi\cos\theta + v(\sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\theta)$

 $+w(\sin\psi\sin\theta\cos\phi-\cos\psi\sin\phi)$

 $\dot{Z} = -u\sin\theta + v\cos\theta\sin\phi + w\cos\theta\cos\phi$

제 5장 수중로봇의 제어기 설계

본 장에서는 레귤레이션 컨트롤과 트레킹 컨트롤에 대해 간략하게 설명하고, 논문에 적용된 LQ제어에 대해 설명을 한다. 또한 4장에서 제시된 6자유도 비선형 운동방정식과 오일러 각에 의한 좌표변환 식에서, 교차유동(cross flow)항을 무시 하고 추력모델의 2차이상인 고차항을 무시한 속도, 종동요(pitch), 선수동요(yaw) 에 관한 식들을 정리한다.

제 1절 레귤레이션 제어

레귤레이션 제어(Regulation Control)은 선형시스템의 상태를 0(*x*→0)으로 가는 것을 목적으로 한다. 시스템 방정식은 식 5.1, 최적제어벡터 식 5.2로 정의 한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{5.1}$$

$$u = -Kx \tag{5.2}$$

위의 식에 의해서 레귤레이션 시스템을 블록다이어그램으로 표현하면 다음과 같다.



그림 5.1 레귤레이션 시스템

제 2절 트래킹 제어

트래킹 제어(Tracking Control)은 에러를 0으로 가는 것을 목적으로 한다.

$$e = r - y \tag{5.3}$$

그림 5.2는 트래킹시스템을 나타낸다.



그림 5.2 트래킹 시스템

제 3절 LQ제어

원하는 제어를 하면서도 제어기에 필요이상의 큰 입력을 하지 않기 위해서 최 적제어를 사용한다. LQ제어기는 선형 플랜트 모델의 다이나믹스(plant dynamics) 을 추정하는 것으로 알려져 있다. 아래의 식은 상태공간으로 표현된 플랜트 모델 을 나타낸다[13][14].

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{5.4}$$

$$y = Cx \tag{5.5}$$

위의 플랜트 모델에서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

상태벡터:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} (n \times 1)$$
(5.6)

- 28 -

입력벡터:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} (p \times 1)$$
(5.7)

출력벡터:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} (q \times 1)$$
(5.8)

수중로봇의 출력에러와 제어입력에 대한 LQ제어기의 성능지수는 다음과 같이 표현된다[10].

$$J = \frac{1}{2} \int_{0}^{T} (e^{T} Q e + u^{T} R u) d\tau = \frac{1}{2} \int_{0}^{T} (x^{T} C^{T} Q C x + u^{T} R u) d\tau$$
(5.9)

$$e = y - y_d = C(x - x_d)$$
(5.10)

위의 식에서 표현된 Q, R그리고 y_d 의 정의는 다음과 같다.

Q:상태벡터의 에러 가중치 행렬 (*Q*≥0)

- *Q*행렬은 상태벡터 *x*와 출력행렬 *C*에 의해 결정. *R*:제어입력벡터의 힘(크기)의 가중치 행렬 (*R*>0)

- *R*행렬은 입력벡터(*u*)에 의해 결정 *y_d*:기준입력 최적제어입력 u^{opt}는 다음과 같이 표현된다.

$$u^{opt} = G_1 x + G_2 y_d \tag{5.11}$$

$$G_{\rm I} = -R^{-1}B^T P \tag{5.12}$$

$$G_2 = -R^{-1}B^T (A + BG_1)^{-T} C^T Q$$
(5.13)

위의 식에서 P는 리카티(Riccati)방정식을 만족하는 해이다.

$$PA + A^{T}P - PBR^{-1}B^{T}P + C^{T}QC = 0 (5.14)$$

제 4절 속도, 깊이, 헤딩제어

수중로봇을 제어하기 위해서는 모터의 위치에 따른 운동방향을 정의해야한다. 아래의 그림 5.3은 제어대상인 수중로봇의 모터의 위치를 나타내며, 그림5.4는 수 중로봇의 모터위치에 따른 운동방향을 나타낸다.



그림 5.3 수중로봇의 모터위치

수중로봇이 우현(starboard)쪽으로 회전했을 경우 이를 양수로 정의하고 좌현 (port)쪽으로 회전했을 경우 이를 음수로 정의한다.



그림 5.4 수중로봇의 운동방향

LQ제어기는 선형시스템을 제어하는 기법으로 4장 3절에서 제시된 6자유도 비 선형 운동방정식을 선형 운동방정식으로 변환해야한다. 아래의 식은 선형 운동방 정식으로 유도된 속도, 종동요(pitch), 선수동요(yaw)의 운동방정식을 나타낸다.

$$\left(m - \frac{1}{2}\rho l^{3} X_{\dot{u}}\right) \dot{u} = \frac{1}{2}\rho l^{2} b_{X} (u_{L} + u_{R} + b_{L} + b_{R})$$
(5.15)

$$\left(I_{y} - \frac{1}{2}\rho l^{3}M_{\dot{q}}\right)\dot{q} = \frac{1}{2}\rho l^{4}uM_{q}q - \frac{1}{2}\rho l^{3}b_{M}(u_{L} + u_{R} - b_{L} - b_{R})$$
(5.16)

$$\left(I_{z} - \frac{1}{2}\rho l^{3}N_{r}\right)\dot{r} = \frac{1}{2}\rho l^{4}uN_{r}r - \frac{1}{2}\rho l^{3}b_{N}(u_{L} - u_{R} + b_{L} - b_{R})$$
(5.17)

수중로봇의 자세와 위치는 오일러 각을 이용하면 다음 식으로 표현된다 [10][15][16].

$$\dot{Z} = -u\sin\theta + v\cos\theta\sin\phi + w\cos\theta\cos\phi \approx -u\sin\theta \approx -u_0\theta$$
(5.18)

 $\dot{\theta} = q\cos\phi - r\sin\phi \approx q\cos\phi \approx q \tag{5.19}$

$$\dot{\psi} = \frac{(q\sin\phi + r\cos\phi)}{\cos\theta} \approx r\cos\phi \approx r \tag{5.20}$$

선형화된 운동방정식을 시스템방정식으로 변환하기 위하여 먼저 상태변수를 정의하고 시스템행렬과, 입력행렬, 입력벡터, 출력행렬을 구분해야 한다.

시스템방정식:

$$\hat{M}\dot{x} = A_{1}x + B_{1}u$$

$$\dot{x} = Ax + Bu, A = \hat{M}^{-1}A_{1}, B = \hat{M}^{-1}B_{1}$$

$$y = Cx$$
(5.21)

상태벡터:

$$x = \begin{bmatrix} u \\ q \\ r \\ Z \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} (6 \times 1)$$
(5.22)

관성행렬:

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2} l^3 X_{ii} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_y - \frac{\rho}{2} l^3 M_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_z - \frac{\rho}{2} l^3 N_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(6×6) (5.23)

시스템행렬:

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho l^{4}u_{0}M_{q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\rho l^{4}u_{0}N_{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -u_{0} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (6 \times 6)$$
(5.24)

입력행렬:

입력벡터:

$$u = \begin{bmatrix} u_L \\ u_R \\ b_L \\ b_R \end{bmatrix} (4 \times 1)$$
(5.26)

출력행렬:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (3 \times 6)$$
(5.27)

제 6장 제어 시뮬레이션

본 장에서는 5장에서 정리된 LQ제어기와 수중로봇의 시스템방정식을 이용하 여 속도, 깊이, 헤딩에 대한 시뮬레이션을 한다. 또한 한국해양연구원에서 제작된 DUSAUV의 수치모델을 이용한다. 시뮬레이션방법은 Matlab Simulink를 사용하였다.

아래의 시스템방정식은 DUSAUV의 수치모델을 이용하여 계산된 결과로 식 6.1 과 6.2와 같다.

| <i>x</i> = | $\begin{bmatrix} 0\\0\\0\\0\\0\\0\\0 \end{bmatrix}$ | 0 -31.0507 0 0 1 0 | 0 0 -39.3451 0 1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 -2 0 0 | $ \begin{array}{c} 0\\0\\0\\r\\0\\Z\\0\\\psi\end{array}\right + \left[\begin{array}{c} 0\\r\\0\\\psi\\\psi\end{array}\right] + \left[\begin{array}{c} 0\\r\\0\\\psi\end{array}\right] + \left[\begin{array}{c} 0\\r\\0\\\psi\end{array}$ | 24.9914 -0.1134 0.0671 0 0 0 | 24.9914 -0.1134 -0.0671 0 0 0 | 24.9914 0.1134 0.0671 0 0 0 | $ \begin{array}{c} 24.9914 \\ 0.1134 \\ -0.0671 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{bmatrix} u_L \\ u_R \\ b_L \\ b_R \end{bmatrix} $ | (6.1) |
|------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| C = | $\begin{bmatrix} 1\\0\\0 \end{bmatrix}$ | 0 0 0 0 0 1 0 0 0 | $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ | | | | | | | | (6.2) |

제 1절 가중치행렬 Q와R 디자인

LQ제어기의 최적의 성능을 보이기 위하여 제어기 이득 값과 가중치행렬인 *Q* 와 *R*를 설정해야한다. 최적 제어기 이득은 matlab control system toolbox를 이 용하면 구할 수 있다. 문제는 *Q*와 *R*의 가중치 행렬이 문제가 된다. 따라서 여러 차례 이 행렬을 조정함으로 시스템의 성능을 보기로 한다. 성능 척도는 빠른 시간 내에 기준입력에 수렴하는 것으로 하고, 기준입력 값은 다음과 같다.

$$y_d = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \frac{pi}{2} \end{bmatrix}^T \tag{6.3}$$

속도, 깊이, 헤딩에 대한 에러 가중치 행렬 Q는 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \begin{bmatrix} u_e & 0 & 0 \\ 0 & Z_e & 0 \\ 0 & 0 & \psi_e \end{bmatrix}$$
(6.4)

여기서 *R*의 행렬은 0.1인 대각행렬로 한다.

$$R = \begin{bmatrix} u_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_R \end{bmatrix}$$
(6.5)

아래의 표 6.1에 의해서 Q행렬을 조정하기로 한다.

표 6.1 Q디자인

| | Q | | | | | | |
|-----|----------------|-------|----------|--|--|--|--|
| | u _e | Z_e | Ψ_e | | | | |
| 실험1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 실험2 | 2 | 10 | 10 | | | | |
| 실험3 | 3 | 20 | 20 | | | | |
| 실험4 | 4 | 30 | 30 | | | | |
| 실험5 | 5 | 40 | 40 | | | | |
| 실험6 | 6 | 50 | 50 | | | | |

표 6.1에서 속도, 깊이, 헤딩의 에러가중치 Q값에 대한 시스템 성능의 변화률 은 그림 6.1, 그림 6.2, 그림 6.3과 같다.









그림 6.3 Q값에 대한 헤딩 시스템 성능의 변화률

위의 그래프들을 보고 Q값이 증가하면 시스템의 성능의 변화률은 더 좋아지 고, Q값이 감소하면 시스템의 성능은 떨어지는 것을 알 수가 있다.

Q값을 조정하여 시스템성능이 좋은 속도, 깊이, 헤딩에 대한 가중치 행렬을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$$
(6.6)

제 2절 시뮬레이션 방법

본 절에서는 속도, 깊이, 헤딩에 대한 시뮬레이션 실험을 한다. 실험방법은 다음과 같은 절차에 의해서 수행되어 진다.

1. 수중로봇의 속도 실험 : $y_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ 직진속도는 1ms로 입력

- 2. 수중로봇의 깊이 실험 : y_d = [0 2 0]^T
 깊이는 2m로 입력
- 3. 수중로봇의 헤딩 실험 : $y_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & pi/2 \end{bmatrix}^T$ 헤딩은 90도로 입력
- 4. 시간에 따른 수중로봇의 직진속도, 깊이, 헤딩 입력
 순서 : 직진속도 입력 → 20초 후 깊이 입력 → 50초 후 헤딩 입력

1. 수중로봇의 속도 실험



그림 6.4 제어입력에 대한 속도의 결과

그림 6.4에서는 속도의 입력을 1ms로 주었을 때 출력의 결과를 나타낸다. 결 과를 보면 입력에 대한 출력이 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 운동 방정식에서도 알 수 있듯이 속도시스템에 대한 댐핑(Damping)계수가 빠져 있기 때 문이다. 2. 수중로봇의 깊이 실험



그림 6.5 제어입력에 대한 깊이의 결과

그림6.5은 깊이의 입력을 2m로 주었을 때 출력의 결과를 나타낸다. 결과를 보 면 10초 이후에 원하는 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 하지만 값이 조금씩 흔들 리는 것을 알 수 있다. 3. 수중로봇의 헤딩 실험



그림 6.6 제어입력에 대한 헤딩의 결과

그림6.6은 헤딩의 입력을 90도로 주었을 때 출력의 결과를 나타낸다. 결과를 보면 25초 이후에 원하는 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 속도와 깊이의 결과에 비해 더 늦게 수렴하는 이유는 수중로봇의 길이와 트러스터 4개에 대한 힘의 관계 때문이다. 4. 시간에 따른 수중로봇의 속도, 깊이, 헤딩 입력 실험



그림 6.7 출력결과

위의 그림6.7은 시간에 따라서 수중로봇에 속도, 깊이, 헤딩명령을 주었을 때 출력결과를 나타낸다. 그림에서 ①과②는 속도에 대한 결과, ③은 깊이에 대한 결 과, ④는 헤딩에 대한 결과를 나타낸다. 속도에 대한 결과에서 ①은 ②의 결과에 서 0 ~ 0.5초까지만 확대해서 본 결과이다. 네 번째 실험을 가지고 수중로봇의 위치와 방향을 나타내기 위하여 3차원 궤 도로 표현하면 다음 그림과 같다.



그림 6.8 3차원 궤도

제 7장 결론

본 논문에서는 3차원 공간에서 움직이는 수중로봇의 속도, 깊이, 헤딩제어를 위하여 수중로봇의 제어 계획, 운동방정식, LQ제어기 설계에 관한 내용을 다루고 있다.

본 논문에서는 수중로봇을 제어하기 위한 기초적인 제어 계획을 세웠다. 운동 방정식은 기존의 여러 모델을 참고하여 그중 제어대상과 유사한 DUSAUV의 운동방 정식을 적용하였고, 수중로봇의 위치와 방향을 나타내기 위해 오일러 각 변환을 사용하였다. 또한 운동방정식과 DUSAUV의 수치모델 계수를 이용하여 LQ제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능은 원하는 값에 빠른 속도로 수렴하는 것으로 하였다. 시뮬레이션은 MATLAB SIMULINK를 사용하였다. 시뮬레이션 결과로 알 수 있는 것은 운동방정식에는 거의 모든 외란의 조건을 무시하였다는 것이다.

향후에는 설계된 LQ제어기를 수중로봇에 적용하여 필드 테스트를 통해 시스템 의 성능 검증이 필요하다.

참고문헌

- [1] 황아롬, "무향 칼만 필터를 이용한 동시 지도 작성/ 자가 위치 추적 기 법의 무인 잠수정 적용 연구", 서울대학교 박사 학위 논문, 2007년 8월.
- [2] 김기훈, "무인잠수정 SNUUV 1의 자율제어 비선형 운동에 대한 해석", 서 울대학교 박사 학위 논문, 2005년 2월.
- [3] Fossen, T. I., *Marine Control System*, Marine Cybernetics, 2002.
- [4] 이판묵, 유선철, "UUV(수중로봇)의 소개와 요소기술", 한국정밀공학회 지 제26권 제5호, pp.7-13, 2009년 5월.
- [5] Gertler, M. and Hagen, G. R., "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report, No. 2510, 1967.
- [6] Feldman, J., "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion," DTNSRDC Report, SPD-0393-09, 1979.
- [7] Healey, A. J. and Lienard, D., "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
- [8] Fossen, T. I., "Underwater Robotic Vehicle Dynamics," Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994.
- [9] 최중락, "수중로봇[UUV]", 로봇학회지 제6권 제4호, pp.35-45, 2009년 10월
- [10] Thor I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd. 1994
- [11] 전봉환, 이판묵, 이계홍, 홍석원, 이지홍, "네 대의 주 추진기를 이용 한 무인잠수정의 속도, 심도 및 방위각 제어", 한국해양공학회지 제 19 권 제2호, pp.67-73, 2005년.
- [12] Bong-Hwan Jeon, Pan-Mook Lee, Ji-Hong Li, Seok-Won Hong, Yeon-Gyu Kim, Jihong Lee, "Multivariable optimal control of an autonomous underwater vehicle for steering and diving control in variable

speed", IEEE Conferences of Oceans, Vol. 5, pp. 2659-2664, 2003.

- [13] Skogestad, S. Postlethwaite, L., Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, John wiley & Sons, 2005.
- [14] João P. Hespanha, *Linear systems theory*, Princeton University Press, 2009
- [15] Ji-Hong Li, Pan-Mook Lee, "Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle", *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 2165-2181, 2005.
- [16] Prestero, T., "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicles", *Masters Thesis*, MIT, USA, 2001.

논문을 쓰기까지 저에게 큰 힘이 됐던 분들께 감사의 말을 전하고자 합니다. 부족한 저에게 가르침과 격려 그리고 배려를 해주신 고낙용 교수님 정말 감사 드립니다. 그리고 대학원2년 동안 아낌없는 지도를 해주신 최한수 교수님, 장순석 교수님, 이진이 교수님, 반성범 교수님, 곽근창 교수님, 조창현 교수님께도 감사 의 말씀 드립니다.

집이자 안식처인 자율로봇실험실 가족들에게 감사의 말씀을 드리겠습니다. 항 상 웃으면서 칭찬해주시고 때로는 학문적으로 많은 도움을 주신 동진이형, 광진이 형에게 감사의 말씀드립니다. 모든 일에 최선을 다하시는 태균이형, 성우형에게 감사의 말씀드립니다. 듬직한 후배 정현이, 장난기가 많은 석기에게도 고마운 마 음을 전합니다.

이번 졸업논문을 쓰면서 조언과 격려를 해주신 정은이형, 마지막 학기에 실험 조교를 하면서 제 대신 많은 일 도맡아 했던 호윤이, 리라, 그리고 학부생 때 전 공에 대해 저에게 처음으로 이 길을 알려준 대영이형, 올해 같이 졸업하는 윤희, 승호에게도 고마운 마음을 전합니다.

제어계측공학과 실험실 식구들에게도 감사의 말씀을 드리겠습니다. 전정우 박 사님, 정민이형, 영민이, 현정이, 명원이, 영준이, 승훈이형, 해민이에게도 고마 운 마음을 전합니다.

행복할 때나 힘들 때 항상 나와 같이 했던 친구 동현이, 행중이, 진우, 정수, 용완이, 상석아 고맙다. 그리고 엊그제 결혼한 명완아!! 정말 축하하고 행복하게 잘 살아랑!!

끝으로 고등학교 때부터 지금까지 제 뒷바라지 해준 우리 누나, 아직도 저를 위해 고생하시는 아버지, 어머니 정말 사랑합니다.

2010.12

- 47 -

| 저작물 이용 허락서 | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|
| 학 과 | 제어계측공학과 학 번 20097094 과 정 석사 | | | | | |
| 성 명 | 한글:서영남 한문:徐榮男 영문: Seo Young Nam | | | | | |
| 주 소 | 광주광역시 광산구 운남동 주공아파트 103동 203호 | | | | | |
| 연락처 | E-MAIL : arcs.luckycharm@gmail.com | | | | | |
| 논문제목 | 한글 : 4개의 추진기를 가진 수중로봇의 제어 영어 : Control of Underwater Robot with 4 Thrusters | | | | | |
| 본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다. - 다 음 - 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집 · 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포 · 전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송 · 출력을 허락함. | | | | | | |
| 동의여부 : 동의(○) 반대() | | | | | | |
| 2011년 2월 | | | | | | |
| 저작자: 서 영 남 (서명 또는 인) | | | | | | |
| 조선대학교 총장 귀하 | | | | | | |