

머릿말 ..... 12

**PART I**  **SLAM 소개**

**01** \ **CHAPTER** SLAM이란? ..... 17

**02** \ **CHAPTER** SLAM의 응용분야 ..... 20

**03** \ **CHAPTER** SLAM 알고리즘의 종류 ..... 25

**04** \ **CHAPTER** SLAM 알고리즘의 파이프라인 ..... 29

- 1. 시각적 주행 거리 측정 (Visual odometry) ..... 30
- 2. 루프 폐쇄 검출 (Loop closure detection) ..... 31
- 3. 백엔드 최적화 (Backend optimization) ..... 32
- 4. 맵 표현 (Map representation) ..... 33

**05** \ **CHAPTER** SLAM의 수학적 정의 ..... 34

**06** \ **CHAPTER** 본 교재의 목표 ..... 36

**PART II**  **실습 준비**

**01** \ **CHAPTER** NVIDIA Jetson Nano 2GB 소개 ..... 43

- 1. Ubuntu Linux 설치 ..... 44

**02** CHAPTER 도커(Docker) 소개 ..... 47

- 1. 도커 설치 ..... 47
- 2. 도커 명령어 실습 ..... 48
  - 2.1 docker images 명령어 ..... 48
  - 2.2 docker ps 명령어 ..... 48
  - 2.3 docker load 명령어 ..... 49
  - 2.4 docker run 명령어 ..... 50

**03** CHAPTER ROS 소개 ..... 51

- 1. 용어 설명 ..... 52
  - 1.1 노드 (Node) ..... 52
  - 1.2 패키지 (Package) ..... 52
  - 1.3 메시지 (Message) ..... 52
  - 1.4 토픽 (Topic) ..... 52
  - 1.5 서비스 (Service) ..... 53
  - 1.6 액션 (Action) ..... 53
  - 1.7 파라미터 (Parameter) ..... 53
  - 1.8 Bag 파일 ..... 53
- 2. ROS 명령어 실습 ..... 54
  - 2.1 roscore ..... 54
  - 2.2 rosrunc ..... 55
  - 2.3 rosbag ..... 57

**PART**  **SLAM에서 사용하는 센서**

**01** CHAPTER 센서 소개 ..... 63

**02** CHAPTER 자기 감지 센서 ..... 64

- 1. 휠 인코더 (Wheel encoder) ..... 64
- 2. IMU ..... 65

**03** CHAPTER 외부 감지 센서 ..... 67

- 1. 글로벌 내비게이션 위성 시스템 (GNSS, Global navigation satellite system)..... 67

2. 라이다 (LiDAR) .....	70
3. 레이더 (RADAR) .....	73
4. 초음파 (Ultrasound) .....	74
5. 카메라 (Camera) .....	75
6. 뎀스 카메라 (Depth camera, RGB-D camera) .....	77

**04** CHAPTER SLAM의 종류 ..... 78

1. 단안(Monocular) VSLAM .....	78
2. 양안(Stereo) / 멀티카메라(Multi-camera) VSLAM .....	79
3. RGB-D VSLAM .....	81

PART **IV**  SLAM을 이해하는데 필요한 기초 수학

**01** CHAPTER 확률 이론 ..... 85

1. 확률이란? .....	85
2. 확률에 관한 공리 .....	86
3. 확률변수 (Random variable) .....	87
3.1 이산 확률변수 (Discrete random variable) .....	87
3.2 연속 확률변수 (Continuous random variable) .....	87
4. 확률의 종류 .....	88
4.1 결합 확률 (Joint probability) .....	88
4.2 조건부 확률 (Conditional probability) .....	88
4.3 주변 확률 (Marginal probability) .....	89
4.4 예시 .....	90
5. 전확률 정리 (Law of total probability) .....	91
6. 베이즈 정리 (Bayes' theorem) .....	92
7. 정규분포 (Normal distribution) .....	93

**02** CHAPTER 선형대수(Linear algebra) ..... 95

1. 비동차 시스템 (Non-homogeneous system) .....	95
1.1 Full-rank 시스템 .....	96
1.2 Over-determined 시스템 .....	96
1.3 Under-determined 시스템 .....	97
2. 동차 시스템 (Homogeneous system) .....	97

2.1 고윳값과 고유벡터 ..... 97  
 2.2 특이값과 특이벡터 ..... 98  
 3. 반대칭 행렬 (Skew-symmetric matrix) ..... 99

**03** \ 비선형 최적화 이론(Non-linear optimization theorem) ...100  
CHAPTER

1. 최소 제곱 문제 (Least square problem) ..... 100  
 2. 경사 하강 방법 (Gradient descent method) ..... 104  
 3. 가우스-뉴턴 방법 (Gauss-Newton method)..... 106  
 4. 르벤버그-마쿼트 방법 (Levenberg-Marquardt method)..... 108  
 5. 실습 ..... 109  
     5.1 가우스-뉴턴 방법..... 110  
     5.2 Ceres 라이브러리 실습 ..... 113

**04** \ 회전 표현 .....117  
CHAPTER

1. 회전 행렬 (Rotation matrix) ..... 117  
 2. 오일러 각 표현 (Euler angle representation) ..... 118  
 3. 축-각도 표현 (Axis-angle representation)..... 123  
 4. 사원수 (Quaternion)..... 125  
 5. 회전 표현 요약..... 128

**PART**  **프론트엔드(Frontend)**

**01** \ 사영기하학(Projective geometry) .....132  
CHAPTER

**02** \ 특징점, 키포인트, 기술자 .....140  
CHAPTER

**03** \ 카메라 파라미터.....148  
CHAPTER

1. 카메라 외부 파라미터 ..... 150  
 2. 카메라 내부 파라미터 ..... 151  
     2.1 원근 사영 변환 ..... 151  
     2.2 영상 좌표에서 실제 센서 좌표 변환 ..... 153  
     2.3 렌즈 왜곡 변환 ..... 154  
 3. 카메라 파라미터 실습 ..... 156

<b>04</b> CHAPTER	<b>에피플라 기하학</b> .....	<b>161</b>
<b>05</b> CHAPTER	<b>Perspective-3-points</b> .....	<b>167</b>
	1. 문제 정의 .....	168
	2. 투영 광선의 길이 계산 .....	169
	2.1 벡터 간의 각도 계산 .....	169
	2.2 코사인 법칙을 사용해 방정식 구성 .....	170
	2.3 방정식 풀이 .....	171
	3. 점군 정합을 이용한 카메라의 자세 예측 .....	173
	3.1 닫힌 형태의 점군 정합 (Closed-form registration) .....	173
	4. 실습 .....	175
<b>06</b> CHAPTER	<b>삼각측량법(Triangulation)</b> .....	<b>181</b>
	1. 비선형 근사 방법 (Non-linear approximation method) .....	182
	2. 선형 방법 (Linear method) .....	186
	3. 실습 .....	189
<b>07</b> CHAPTER	<b>이상치 제거 알고리즘과 RANSAC</b> .....	<b>196</b>
	1. RANSAC .....	198
	2. M-Estimator .....	201
<b>08</b> CHAPTER	<b>루프 폐쇄 검출(Loop closure detection)</b> .....	<b>204</b>
	1. 시각적 단어 가방 (Bag of visual words) 방법 .....	204
	2. K-클러스터 군집화 .....	208
	3. 유사성 측정 방법 .....	210
	3.1 유클리디언 거리 .....	210
	3.2 맨하탄 거리 .....	210
	3.3 코사인 거리 .....	210
	4. 단어 빈도-역문서 빈도 (Term frequency-inverse document frequency) .....	211
	4.1 가중치 계산 .....	212
	4.2 비용 행렬 계산 .....	214
	4.3 전체 요약 .....	215
	5. 실습 .....	216

**09** CHAPTER 3차원 점군 데이터 처리 .....223

- 1. 영역 통과 필터 (Pass through filter) ..... 227
- 2. 복셀 격자 필터 (Voxel grid filter) ..... 228
- 3. 통계적 이상치 제거 필터 (Statistical outlier removal filter) ..... 229
- 4. K차원 트리 탐색 (KD-tree search) ..... 230
- 5. 법선 벡터 예측..... 231
- 6. K-평균 클러스터링..... 233
- 7. 유클리디언 클러스터링 (Euclidean clustering) ..... 234
- 8. 실습 ..... 235
  - 8.1 영역 통과 필터 실습..... 236
  - 8.2 복셀 격자 필터 실습..... 238
  - 8.3 통계적 이상치 제거 필터 실습 ..... 241
  - 8.4 법선 벡터 예측 실습..... 244
  - 8.5 클러스터링 실습 ..... 247

**10** CHAPTER 3차원 점군 정합 .....251

- 1. 닫힌 형태 정합 (Closed-form registration) 방법 ..... 252
- 2. 반복 형태 정합 (Iterative-form registration) 방법 ..... 254
  - 2.1 점대점 점군 정합 ..... 254
  - 2.2 점대면 점군 정합 ..... 256
- 3. 실습 ..... 258
  - 3.1 닫힌 형태 점군 정합 (closed-form registration) 방법..... 259
  - 3.2 반복 형태 정합 (iterative-form registration) 방법 ..... 264

PART  **백엔드 (Backend)**

**01** CHAPTER 베이지 필터(Bayes filter) .....271

- 1. 베이지 필터 동작 원리 ..... 271
- 2. 베이지 필터의 수학적 유도 ..... 274

**02** CHAPTER 칼만 필터(Kalman filter) .....277

- 1. 칼만 필터 소개..... 277
- 2. 선형 칼만 필터..... 279
  - 2.1 1차원의 경우 ..... 279

2.2 다차원의 경우 .....	282
2.3 결과 검증 .....	284
3. 확장 칼만 필터.....	285
4. 실습 .....	287

**03** CHAPTER 그래프 최적화 기반 SLAM(Graph-based SLAM).....294

1. 그래프 최적화 기반 SLAM 소개 .....	294
2. 1차원의 경우 .....	295
3. 다차원의 경우 .....	298
4. 포즈 그래프 최적화 (Pose graph optimization) .....	298
5. 실습 .....	302

**04** CHAPTER 번들 조정(Bundle adjustment) .....308

1. 번들 조정 소개.....	308
2. 수식 유도 .....	309
3. 실습 .....	314

PART VII  **오픈소스 SLAM 알고리즘 리뷰**

**01** CHAPTER Feature-based SLAM의 역사.....327

1. MonoSLAM .....	327
2. PTAM .....	329
3. Visual-SLAM, Why Filter? .....	332
4. ORB-SLAM .....	333
5. ProSLAM .....	338

**02** CHAPTER Direct SLAM의 역사 .....339

1. DTAM .....	340
2. LSD-SLAM .....	341
3. SVO .....	343
4. DSO.....	344

<b>03</b> CHAPTER	Visual inertial odometry의 역사.....	346
	1. MSCKF .....	347
	2. OKVIS .....	348
	3. IMU pre-integration .....	349
	4. Roviio/Rovioli/Maplab.....	350
	5. VINS-Mono .....	352
	6. Kimera.....	353
<b>04</b> CHAPTER	RTAB MAP 리뷰 .....	355
<b>05</b> CHAPTER	HDL-graph-slam 리뷰.....	360

**PART VIII**  **SLAM 기술의 미래 발전 방향**

<b>01</b> CHAPTER	의미론적 장면 이해 .....	368
<b>02</b> CHAPTER	초경량 위치 추정 및 지도 작성 .....	370
<b>03</b> CHAPTER	다중 개체 및 협력 위치 추정 및 지도 작성 .....	372
<b>04</b> CHAPTER	위치 추정 및 지도 작성 기술의 자동화 파이프라인 구축.....	374

**PART IX**  **SLAM 관련 커뮤니티**

<b>01</b> CHAPTER	SLAM 커뮤니티 .....	381
----------------------	-----------------	-----



<b>02</b> CHAPTER	SLAM 관련 블로그 .....	383
<b>03</b> CHAPTER	SLAM 관련 스터디 자료 .....	384
<b>04</b> CHAPTER	강의 .....	387
<b>05</b> CHAPTER	기술 서적 .....	391
<b>06</b> CHAPTER	Youtube 채널 .....	392
<b>07</b> CHAPTER	Visual SLAM 공부 로드맵 .....	393

PART  **맺음말**

<b>맺음말</b> .....	401
------------------	-----