

CONTENTS

머릿말 12

PART  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  실습 준비

01 CHAPTER NVIDIA Jetson Nano 2GB 소개 43

1. Ubuntu Linux 설치 44

CONTENTS

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 rosrun 55
2.3 rosbag 57

PART III 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. 텁스 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



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

CONTENTS

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

03
CHAPTER

비선형 최적화 이론(Non-linear optimization theorem) ··· 100

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-마퀴트 방법 (Levenberg-Marquardt method)	108
5. 실습	109
5.1 가우스-뉴턴 방법	110
5.2 Ceres 라이브러리 실습	113

04
CHAPTER

회전 표현, 117

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
CHAPTER

사영기하학(Projective geometry), 132

02
CHAPTER

특징점, 키포인트, 기술자, 140

03
CHAPTER

카메라 파라미터, 148

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

04 CHAPTER / **에피폴라 기하학** 161

05 CHAPTER / **Perspective-3-points** 167

1. 문제 정의	168
2. 투영 광선의 길이 계산	169
2.1 벡터 간의 각도 계산	169
2.2 코싸인 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

06 CHAPTER / **삼각측량법(Triangulation)** 181

1. 비선형 근사 방법 (Non-linear approximation method)	182
2. 선형 방법 (Linear method)	186
3. 실습	189

07 CHAPTER / **이상치 제거 알고리즘과 RANSAC** 196

1. RANSAC	198
2. M-Estimator	201

08 CHAPTER / **루프 폐쇄 검출(Loop closure detection)** 204

1. 시각적 단어 가방 (Bag of visual words) 방법	204
2. K-클러스터 군집화	208
3. 유사성 측정 방법	210
3.1 유clidean 거리	210
3.2 맨하탄 거리	210
3.3 코싸인 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

CONTENTS

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

베이즈 필터(Bayes filter) 271

1. 베이즈 필터 동작 원리	271
2. 베이즈 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



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 역사339

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

CONTENTS

03 CHAPTER Visual inertial odometry의 역사 346

1. MSCKF 347
2. OKVIS 348
3. IMU pre-integration 349
4. Rovio/Rovioli/Maplab 350
5. VINS-Mono 352
6. Kimera 353

04 CHAPTER RTAB MAP 리뷰 355

05 CHAPTER HDL-graph-slam 리뷰 360

PART VIII SLAM 기술의 미래 발전 방향

01 CHAPTER 의미론적 장면 이해 368

02 CHAPTER 초경량 위치 추정 및 지도 작성 370

03 CHAPTER 다중 개체 및 협력 위치 추정 및 지도 작성 372

04 CHAPTER 위치 추정 및 지도 작성 기술의 자동화 파이프라인 구축 374

PART IX SLAM 관련 커뮤니티

01 CHAPTER SLAM 커뮤니티 381

02 CHAPTER SLAM 관련 블로그 383

03 CHAPTER SLAM 관련 스터디 자료 384

04 CHAPTER 강의 387

05 CHAPTER 기술 서적 391

06 CHAPTER Youtube 채널 392

07 CHAPTER Visual SLAM 공부 로드맵 393



맺음말 401