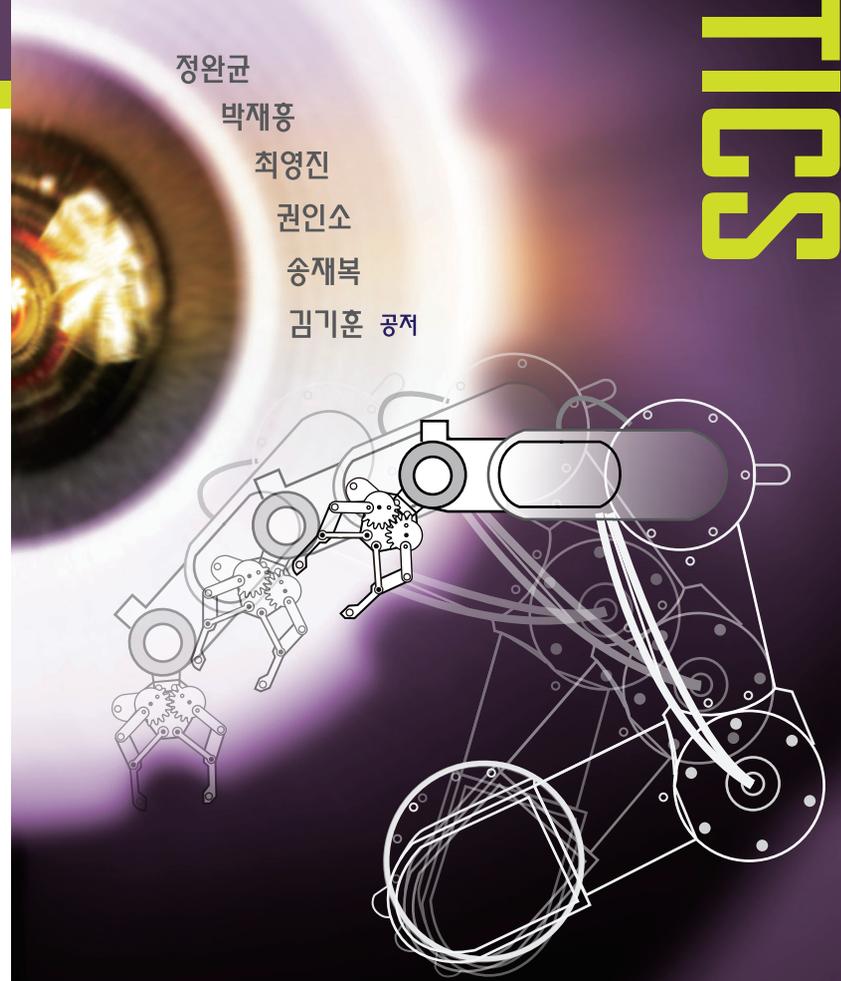


# ROBOTICS

## 실험 로보틱스 I 매니플레이션 및 비전

정완균  
박재홍  
최영진  
권인소  
송재복  
김기훈 공저



실험 로보틱스 I

매니플레이션 및 비전

한국로봇학회  
제이로봇시스템학회  
한국로봇산업진흥원



---

## 교재 소개

본 교재는 로봇 매니플레이터에 대한 이론 및 실험실습을 다루고 있다. 교재는 1장 기구학, 2장 로봇 동역학 및 궤적생성, 3장 위치제어, 4장 로봇 힘제어, 5장 영상센서를 이용한 매니플레이터 제어로 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 각 장은 이론에 대한 설명과 실험실습으로 나누어져 있다. 실험실습 부분은 학생들이 쉽게 따라해 볼 수 있도록 단계별로 상세한 설명이 되어 있고, 또한 예상 실험결과들을 포함하여 학생들 본인의 결과와 비교해 볼 수 있도록 하였다. 이론 부분은 뒤의 실험실습에 꼭 필요한 내용을 포함하여, 로봇 매니플레이터에 있어서 중요한 내용들을 담고 있다.

1장 기구학에서는 로봇 매니플레이터를 수학적으로 기술하는 방법들에 대해서 다루며, 관절각도와 로봇 끝단 간의 위치 및 회전과의 관계를 배우게 된다. 2장에서 설명되는 로봇 동역학은 로봇의 관절에 가해지는 토크와 관절들의 움직임의 관계에 관한 것이다. 동역학 유도 방법들, 순동역학 및 역동역학, 선형 동역학들의 주제들을 다룬다. 마지막으로 궤적생성에서는 주로 다항식을 이용한 방법을 설명한다. 3장 위치제어에서는 먼저 로봇제어에서 많이 사용되는 비례미분제어를 설명한 후, 로봇의 관절공간과 작업공간 각각에서의 위치제어 방법들을 소개한다. 4장 로봇 힘 제어에서는 로봇이 접촉을 하고 있는 경우에 있어서, 직접 힘을 제어하는 방법, 강성을 제어하는 방법, 마지막으로 임피던스 제어를 다룬다. 마지막 장은, 영상인식을 사용한 로봇제어 방법들, 그리고 이에 필요한 카메라 모델과 교정, 이미지 추출 및 매칭, 그리고 3차원 복원들의 내용으로 구성되어 있다.

---

# 목차

목차	vi
그림 목차	xi
표 목차	xviii
<b>1 기구학</b>	<b>1</b>
1.1 강체의 수학적 표현	2
1.1.1 회전행렬	2
1.1.2 오일러 각도	7
1.1.3 롤-피치-요 각도	10
1.1.4 쿼터니언 방향각	12
1.1.5 임의의 축에 대한 회전	14
1.1.6 동차 변환	16
1.2 순기구학 및 역기구학	21
1.2.1 순기구학	21
1.2.2 역기구학	28
1.3 속도 기구학	32
1.3.1 자코비안	33
1.3.2 여유자유도	39
1.4 (실습 1-1) 순기구학/역기구학/속도기구학 계산 실습	45
1.5 (실습 1-2) 여유자유도를 이용한 기구학 계산 실습	56

**참고 문헌 67**

**2 동역학 및 궤적생성 71**

- 2.1 라그랑주 운동방정식에 의한 로봇 동역학 모델 . . . . . 72
  - 2.1.1 1-링크 로봇 매니퓰레이터 동역학 모델 . . . . . 74
  - 2.1.2 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 모델 (점질량) . . . 77
  - 2.1.3 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 모델 (링크 관성) . 82
- 2.2 뉴턴-오일러 운동방정식에 의한 로봇 동역학 모델 . . . . . 83
  - 2.2.1 전진 순차 . . . . . 84
  - 2.2.2 후진 역차 . . . . . 85
  - 2.2.3 뉴턴-오일러 동역학 알고리즘 정리 . . . . . 88
  - 2.2.4 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 모델 . . . . . 89
- 2.3 순동역학과 역동역학 . . . . . 96
  - 2.3.1 역동역학 . . . . . 96
  - 2.3.2 순동역학 . . . . . 97
- 2.4 동역학 파라미터들에 관한 선형 동역학 . . . . . 98
  - 2.4.1 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 리그레서 . . . . . 100
  - 2.4.2 모멘텀에 기반한 리그레서 . . . . . 101
  - 2.4.3 동역학 파라미터 식별 알고리즘 . . . . . 103
  - 2.4.4 1-링크 로봇 동역학 모델에서 동역학 파라미터 식별 . . 107
  - 2.4.5 2-링크 로봇 동역학 모델에서 동역학 파라미터 식별 . . 110
- 2.5 궤적 생성방법 . . . . . 117
  - 2.5.1 3차 다항식기반 궤적생성 . . . . . 119
  - 2.5.2 5차 다항식기반 궤적생성 . . . . . 123
  - 2.5.3 최대가속도를 활용한 궤적생성법 . . . . . 126
- 2.6 (실습 2-1) 미분가능 연속 궤적 생성 실습 . . . . . 132
- 2.7 (실습 2-2) 로봇 동역학 파라미터 식별 실습 . . . . . 138

**참고 문헌 143**

**3 위치제어 145**

- 3.1 작업공간 위치제어 방법들 . . . . . 145

3.2	비례미분 위치제어기 . . . . .	147
3.3	비례적분미분 위치제어기 . . . . .	152
3.3.1	지글러-니콜스 이득 동조법 . . . . .	152
3.3.2	제어성능 향상을 위한 이득동조 방법 . . . . .	155
3.4	관절공간 위치제어 . . . . .	157
3.4.1	독립관절 비례미분 제어기 설계 . . . . .	158
3.4.2	중력보상 . . . . .	161
3.4.3	동역학을 고려한 제어기 설계 . . . . .	163
3.5	작업공간 위치제어 . . . . .	166
3.5.1	역기구학을 이용한 위치제어 . . . . .	166
3.5.2	자코비안 역행렬을 이용한 위치제어 . . . . .	167
3.5.3	자코비안 전치행렬을 이용한 위치제어 . . . . .	168
3.5.4	작업공간 동역학을 이용한 위치제어 . . . . .	170
3.6	(실습 3-1) 중력보상 위치제어 . . . . .	174
3.7	(실습 3-2) 관절공간에서의 로봇 위치제어 . . . . .	182
3.8	(실습 3-3) 동역학을 이용한 작업공간 로봇 위치제어 . . . . .	190
	<b>참고 문헌</b>	<b>195</b>
<b>4</b>	<b>힘제어</b>	<b>197</b>
4.1	서론 . . . . .	197
4.1.1	접촉 작업 . . . . .	198
4.1.2	학습 목표 . . . . .	200
4.2	힘제어 기초 이론 . . . . .	201
4.2.1	힘제어의 분류 . . . . .	201
4.2.2	힘제어를 구현하기 위한 매니플레이터 . . . . .	202
4.3	직접 힘제어 . . . . .	207
4.3.1	토크제어 기반 매니플레이터를 이용한 힘제어 . . . . .	208
4.3.2	위치제어 기반 매니플레이터를 이용한 힘제어 . . . . .	210
4.4	강성제어 . . . . .	213
4.4.1	1자유도 매니플레이터의 강성제어 . . . . .	213
4.4.2	$n$ 자유도 시스템의 강성제어 . . . . .	217

4.4.3	강성제어의 한계 . . . . .	219
4.5	임피던스 제어 . . . . .	220
4.5.1	임피던스 제어 . . . . .	220
4.5.2	토크제어 기반 임피던스 제어 . . . . .	223
4.5.3	위치제어 기반 임피던스 제어 . . . . .	225
4.6	(실습 4-1) 직접 힘제어 . . . . .	228
4.7	(실습 4-2) 강성 제어 . . . . .	238
4.8	부록: Robotics Toolbox를 이용한 힘제어 시뮬레이션 . . . . .	245
 <b>참고 문헌</b>		 <b>251</b>
 <b>5 영상 센서를 이용한 매니퓰레이터의 제어</b>		 <b>253</b>
5.1	카메라 모델 . . . . .	255
5.2	비주얼 서보잉 . . . . .	258
5.2.1	기본 이론 . . . . .	259
5.2.2	영상 기반 비주얼 서보잉 . . . . .	261
5.2.3	위치 기반 비주얼 서보잉 . . . . .	263
5.3	카메라 보정 . . . . .	265
5.3.1	호모그래피 추정 . . . . .	266
5.3.2	내부 변수 추정 . . . . .	268
5.3.3	외부 변수 추정 . . . . .	269
5.3.4	스테레오 보정 . . . . .	269
5.3.5	카메라-매니퓰레이터 보정 . . . . .	270
5.4	영상특징량 추출 및 매칭 . . . . .	273
5.4.1	영상특징 추출 . . . . .	273
5.4.2	지역기술자 . . . . .	281
5.4.3	지역특징량의 장점 . . . . .	285
5.4.4	매칭 . . . . .	287
5.5	3D 복원 . . . . .	289
5.5.1	초기화 과정 . . . . .	290
5.5.2	확장 과정 . . . . .	296
5.5.3	통합최적화 . . . . .	303

5.6 (실습 5) 비주얼 서보잉 . . . . .	304
5.7 (실습 5.1) 카메라 보정 . . . . .	307
5.8 (실습 5.2) 특징추출 및 매칭 . . . . .	314
5.9 (실습 5.3) 영상 센서를 이용한 매니플레이터 . . . . .	320
<b>참고 문헌</b>	<b>325</b>
<b>색인</b>	<b>331</b>