





2017년 8 월

박사학위 논문

# 얇은막대 배치작업을 위한 N-R 및 EKF방법을 사용한 로봇 비젼제어기법 개발

# 조선대학교 대학원

기계공학과

손 재 경



# 얇은막대 배치작업을 위한 N-R 및 EKF방법을 사용한 로봇 비젼제어기법 개발

Development of the robot vision control schemes for slender bar placement task based on N-R and EKF method

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

손 재 경





# 얇은막대 배치작업을 위한 N-R 및 EKF방법을 사용한 로봇 비젼제어기법 개발

## 지도교수 장 완 식

## 이 논문을 박사학위신청 논문으로 제출함

#### 2017년 4월

## 조선대학교 대학원

#### 기계공학과

## 손 재 경

Collection @ chosun



손재경의 박사학위논문을 인준함

조선대학교 교수	양 인 영
조선대학교 교수	장 완 식 (연)
조선대학교 교수	성 윤 경 🔍
조선대학교 교수	김 경 석
동강대학교 교수	양 용 준
	조선대학교 교수 조선대학교 교수 조선대학교 교수 동강대학교 교수

2017년 6월

# 조선대학교 대학원



## 목 차

List of Tables	· IV
List of Photos	· VII
List of Figures	· VII
Nomenclature	ΧI
Abstract	XIII

## 제 1 장 서 론

1.1	국내외 로	봇	산업 육성정책 동향	1
1.2	연구배경	및	필요성	4
1.3	연구목적	및	내용	9

## 제 2 장 로봇 기구학 해석

2.1 정기구학해석	11
2.1.1 이론적 배경	11
2.1.2 정기구학 모델	14
2.2 역기구학 해석	18
2.2.1 이론적 배경	18
2.2.2 역기구학 모델	19



## 제 3 장 로봇 비젼시스템의 수학적 모델링

3.1 비젼시스템 모델	24
3.2 N-R방법을 사용한 수학적 모델링	26
3.2.1 카메라 매개변수 추정 모델	26
3.2.2 로봇 관절값 모델	29
3.3 EKF방법을 사용한 수학적 모델링	31
3.3.1 카메라 매개변수 추정 모델	32
(1) 측정모델	32
(2) 예측모델	33
3.3.2 로봇 관절값 모델	34
(1) 측정모델	35
(2) 예측모델	36
3.3.3 EKF방법의 초기 값 추정	37

## 제 4 장 로봇 비젼알고리즘의 제어기법

4.1 N-R방법을 사용한 로봇 비젼제어기법	39
4.1.1 데이터 처리방법	39
4.1.2 제어기법	40
4.2 EKF방법을 사용한 로봇 비젼제어기법	42
4.2.1 데이터 처리방법	42
4.2.2 제어기법	43





Collection @ chosun

# 제 5 장 실 험

5.1	실험장치	구성	45
5.2	시험모형		47
5.3	실험방법		48

## 제 6 장 실험 결과

6.1 비젼시스템 모델 적합성	49
6.1.1 N-R방법 제어기법 결과	50
6.1.2 EKF방법 제어기법 결과	61
6.1.3 2개 제어기법 결과비교	80
6.2 얇은막대 배치 실험 결과	84
6.2.1 로봇 역기구학 해석 결과	84
6.2.2 N-R방법 제어기법 결과	88
6.2.3 EKF방법 제어기법 결과	91
6.2.4 로봇 역기구학 해석 및 2개 제어기법 실험결과 비교…	94
제 7 장 결 론	96

REFERENCES		98
------------	--	----



#### List of Tables

Table 2-1	Link parameters describing the relationship $(a_{i-1}, \alpha_{i-1})$ and the	
	relationship( $\theta_i, d_i$ ) between the neighboring links	12
Table 2-2	Convention of intermediate link frame $\{i\}$ attachment	12
Table 2-3	Link parameters of 4 axis robot	14
Table 5-1	System specification	46
Table 5-2	Position values of 2 cues used for experiment	47
Table 6-1	The estimated 6 parameters of camera 1 in initial stage, based	
	on the N-R method	50
Table 6-2	The estimated 6 parameters of camera 1 in robot movement	
	stage, based on the N-R method	50
Table 6-3	For camera 1, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	51
Table 6-4	The estimated 6 parameters of camera 2 in initial stage, based	
	on the N-R method	54
Table 6-5	The estimated 6 parameters of camera 2 in robot movement	
	stage, based on the N-R method	54
Table 6-6	For camera 2, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	54
Table 6–7	The estimated 6 parameters of camera 3 in initial stage, based	
	on the N-R method(unit: pixel)	57
Table 6-8	The estimated 6 parameters of camera 3 in robot movement	
	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	57
Table 6-9	For camera 3, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	





	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	58
Table 6–10	The estimated initial 6 parameters of camera 1 using the	
	Monte-Carlo method for EKF method in initial stage	62
Table 6-11	For camera 1, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	65
Table 6-12	The estimated initial 6 parameters of camera 2 using the	
	Monte-Carlo method for EKF method in initial stage	68
Table 6-13	For camera 2, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	71
Table 6-14	The estimated initial 6 parameters of camera 3 using the	
	Monte-Carlo method for EKF method in initial stage	74
Table 6-15	For camera 3, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	77
Table 6-16	For camera 1, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	80
Table 6-17	For camera 2, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	81
Table 6-18	For camera 3, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	82
Table 6-19	Comparison of the actual and estimated values robot's joints	
	for the target, based on the robot's inverse kinematic analysis	
		85
Table 6-20	The estimated position values for the target, based on the	
	robot's inverse kinematic analysis(unit: mm)	86





Table	6-21	Comparison of the actual and estimated values robot's joints	
		for the target, based on the N-R method	88
Table	6-22	Comparison of the actual and estimated position values for the	
		target, based on the N-R method(unit: mm)	89
Table	6-23	Comparison of the actual and estimated values robot's joints	
		for the target, based on the EKF method	91
Table	6-24	Comparison of the actual and estimated position values for the	
		target, based on the EKF method(unit: mm)	92
Table	6-25	For the r.m.s errors and processing time, comparison of the	
		inverse kinematic method, N-R method and EKF method	94



#### List of Photos

Photo	5-1	Experimental	set-up ·····	45
	~ ~	man por minoritori		

#### List of Figures

Fig. 1-1	Structure of thesis	10
Fig. 2-1	Link frame $\{i\}$ and link parameters $\cdots\cdots\cdots$	11
Fig. 2-2	Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot	14
Fig. 2-3	Newton-Raphson method	18
Fig. 2-4	Block diagram of inverse kinematics model	19
Fig. 3-1	Overall flow of mathematical system modeling based on the	
	N-R method	26
Fig. 3-2	Overall flow of mathematical system modeling based on the	
	N-R method	31
Fig. 3-3	Procedures of Monte-Carlo method	37
Fig. 4-1	Data processing method in N-R method	39
Fig. 4-2	Robot's vision control scheme of N-R method	40
Fig. 4-3	Data processing method in EKF method	42
Fig. 4-4	Robot's vision control scheme of EKF method	43
Fig. 5-1	Experimental set-up	45
Fig. 5-2	Schematic diagram of system configuration	47
Fig. 5-3	Robot's trajectory	48
Fig. 6-1	For camera 1, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	52
Fig. 6-2	For camera 1, the r.m.s errors in each point of robot movement	
	stage, based on the N-R method(unit: pixel)	53
Fig. 6-3	For camera 2, comparison of actual vision data and the	



estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel) ..... 56 Fig. 6-4 For camera 2, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel) ..... 56 Fig. 6-5 For camera 3, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel) ..... 59 Fig. 6-6 For camera 3, the r.m.s errors in each point of robot movement 60 stage, based on the N-R method(unit: pixel) ..... Fig. 6-7 The estimated  $c_1$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 63 Fig. 6-8 The estimated  $c_2$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 63 Fig. 6-9 The estimated  $c_3$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 63 Fig. 6-10 The estimated  $c_4$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 64 Fig. 6-11 The estimated  $c_5$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 64 Fig. 6-12 The estimated  $c_6$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method ..... 64 Fig. 6-13 For camera 1, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel) ..... 66 Fig. 6-14 For camera 1, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel) ..... 67 Fig. 6-15 The estimated  $c_1$  parameter of camera 2 in each point of robot

- VIII -



		movement stage, based on the EKF method	69
Fig.	6-16	The estimated $c_2$ parameter of camera 2 in each point of robot	
		movement stage, based on the EKF method	69
Fig.	6-17	The estimated $c_3$ parameter of camera 2 in each point of robot	
		movement stage, based on the EKF method	69
Fig.	6-18	The estimated $c_4$ parameter of camera 2 in each point of robot	
		movement stage, based on the EKF method	70
Fig.	6-19	The estimated $c_5$ parameter of camera 2 in each point of robot	
		movement stage, based on the EKF method	70
Fig.	6-20	The estimated $c_6$ parameter of camera 2 in each point of robot	
		movement stage, based on the EKF method	70
Fig.	6-21	For camera 2, comparison of actual vision data and the	
		estimated vision system model's values in robot movement	
		stage, based on the EKF method(unit: pixel)	72
Fig.	6-22	For camera 2, the r.m.s errors in each point of robot movement	
		stage, based on the EKF method(unit: pixel)	73
Fig.	6-23	stage, based on the EKF method (unit: pixel)	73
Fig.	6-23	stage, based on the EKF method(unit: pixel) $\cdots$ The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$	73 75
Fig. Fig.	6-23	stage, based on the EKF method(unit: pixel) $\cdots$ The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$ The estimated $c_2$ parameter of camera 3 in each point of robot	73 75
Fig. Fig.	6-23	stage, based on the EKF method(unit: pixel) $\cdots$ The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$ The estimated $c_2$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$	73 75 75
Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25	stage, based on the EKF method(unit: pixel) $\cdots$ The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$ The estimated $c_2$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method $\cdots$ The estimated $c_3$ parameter of camera 3 in each point of robot	73 75 75
Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	73 75 75 75
Fig. Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25 6-26	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	73 75 75
Fig. Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25 6-26	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	<ul><li>73</li><li>75</li><li>75</li><li>75</li><li>76</li></ul>
Fig. Fig. Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25 6-26 6-27	stage, based on the EKF method(unit: pixel) The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_2$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_3$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_4$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_4$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_5$ parameter of camera 3 in each point of robot	73 75 75 75
Fig. Fig. Fig. Fig.	6-23 6-24 6-25 6-26 6-27	stage, based on the EKF method(unit: pixel) The estimated $c_1$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_2$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_3$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_4$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_4$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method The estimated $c_5$ parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method	<ul> <li>73</li> <li>75</li> <li>75</li> <li>76</li> <li>76</li> </ul>

Fig. 6-28 The estimated  $c_6$  parameter of camera 3 in each point of robot



	movement stage, based on the EKF method	76
Fig. 6-29	For camera 3, comparison of actual vision data and the	
	estimated vision system model's values in robot movement	
	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	78
Fig. 6-30	For camera 3, the r.m.s errors in each point of robot movement	
	stage, based on the EKF method(unit: pixel)	79
Fig. 6-31	For camera 1, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	81
Fig. 6-32	For camera 2, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	82
Fig. 6-33	For camera 3, comparison of the r.m.s errors in N-R method	
	and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)	83
Fig. 6-34	Comparison of the actual and estimated position values for the	
	target, based on the robot's inverse kinematic analysis(unit: mm)	
		87
Fig. 6-35	Errors between the actual and estimated values of robot joint	
	values for the target, based on the N-R method	88
Fig. 6-36	Comparison of the actual and estimated position values for the	
	target, based on the N-R method(unit: mm)	90
Fig. 6-37	Errors between the actual and estimated values of robot joint	
	values for the target, based on the EKF method	91
Fig. 6-38	Comparison of the actual and estimated position values for the	
	target, based on the EKF method(unit: mm)	93
Fig. 6-39	For the r.m.s errors, comparison of the inverse kinematic	
	method, N-R method and EKF method(unit: mm)	95
Fig. 6-40	For the processing time, comparison of the inverse kinematic	
	method, N-R method and EKF method(unit: ms)	95



### NOMENCLATURE

$_{i}^{i-1}T$	Transformation matrix from frame $\{i-1\}$ to frame $\{i\}$
$P^i$	Position vector of the $i$ th cue in the $\{i\}$ frame
$\overline{F}$	Position vector of the cue in the robot base frame $\{0\}$
$F_x$	${\mathcal X}$ component of position vector $\overline{F}$ for $j$ th cue of $i$ th moving
	point
$F_y$	$\Upsilon$ component of position vector $\overline{F}$ for <i>j</i> th cue of <i>i</i> th moving
	point
$F_z$	$Z$ component of position vector $\overline{F}$ for <i>j</i> th cue of <i>i</i> th moving
	point
$C_{k}$	Camera parameter
$X_m$	X component of vision system model for $j$ th cue of $i$ th moving
	point
$Y_m$	Y component of vision system model for $j$ th cue of $i$ th moving
	point
$I_C(C_k)$	Performance index for camera parameter estimation $C$
$X_c^i$	X component of vision data acquired for $j$ th cue of $i$ th moving
	point
$Y^i_c$	Y component of vision data for acquired for $j$ th cue of $i$ th
	moving point
$\Delta C$	Camera parameter correction vector
J	Jacobian matrix of $(2 \times i \times j) \times 6$ for camera parameter estimation
$J^T$	Transpose of matrix $J$
R	Residual vector for camera parameter estimation
$I_{\!P}(\theta_i)$	Performance index for robot's joint estimation





- $\Delta \theta$  Robot's joint angle correction vector
- $J^*$  Jacobian matrix of  $(2 \times q \times j) \times 4$  for robot's joint values estimation
- $J^{*T}$  Transpose of matrix  $J^{*}$
- $R^*$  Residual vector for robot's joint values estimation





#### ABSTRACT

#### Development of the robot vision control schemes for slender bar placement task based on N-R and EKF method

Son, Jae Kyung

Advisor : Prof. Jang, Wan Shik Ph.D.Department of Mechanical Engineering,Graduate School of Chosun University

This study uses the vision system model which is proved in previous studies to efficiently transform the three-dimensional position values of the robot to the two-dimensional camera plane values using the software method. The vision system model has six camera parameters. Among six parameters, the first four parameters indicating the camera inner parameters, explain the uncertainty of the camera's orientation and focal length, and the other two parameters indicating the camera and the robot. In order to increase the precision of the vision system model, the positions of the cameras are selected so that the object attached to the end-effector of the robot is filled in the image plane of each of the three cameras while the robot moves along the arbitrary motion trajectory. In particular, to minimize the amount of data, the test model using an LED-cues representing the entire object shape is manufactured.

Thus, using this vision system model, the two robot vision control schemes, based on the N-R and EKF methods, are proposed for object placement task to the fixed target point. The spatial position value of this target is unknown but only the vision data is known. The experiments of slender bar placement with two cues are performed in order to show the effectiveness of the proposed





two vision control schemes. From the experimental results of slender bar placement involving positional accuracy and processing time, we would like to identify the advantages and disadvantages of the proposed two robot vision control schemes with different numerical analysis characteristics. Also, for the judgement of the vision system model's fitness in EKF method, the changes of the estimated six camera parameters used in the vision system model are observed, and their characteristics are identified. Additionally, the robot inverse kinematic analysis is carried out for the estimation of robot's joint values to the fixed target with the known spatial position value, in order to set the criterion for the judgement of positional accuracy of the two robot vision control techniques.



#### 제1장서론

#### 1.1 국내외 로봇 산업 육성정책 동향

단순 반복 작업을 하던 과거의 로봇은 AI기술 개발의 가속화에 따라 다양하게 변하는 환경을 스스로 인식, 판단하여 자율적으로 업무를 수행하는 등의 지능형 로 봇의 형태로 발전되고 있다. 이러한 지능형 로봇은 산업현장 적용에 따라 산업분야 의 효율성 및 경쟁력이 강화 되어 생산성이 향상되며, 인간의 3D작업에 대한 부담 을 해소시킴과 더불어 저출산, 고령화 및 건강과 안전을 중요한 삶의 요소로 생각 함에 따라 간호, 교육, 가정, 재난 로봇에 대한 수요 증대로 신산업이 창출된다. 지 능형 로봇은 국제로봇연맹 (IFR; International Federation of Robotics)의 분류와 국내 로봇 산업화 방향을 고려하여 개인 서비스용, 전문서비스용, 제조업용, 네트워 크 기반 서비스용 등 4개 분야로 구분되고 있으나, 현재는 주로 자동차 제조용과 전자제품 제조용 등 제조업용 로봇을 중심으로 형성되어 있어 세계적으로 제조업 용 로봇의 시장 성장률은 한계성을 보이고 있으나, 지속적인 지능형로봇 기술발전 에 따라 다양한 분야에서 수용이 요구됨으로서 향후 로봇산업은 활성화 될 것으로 예상되어진다. 이리하여, 로봇은 사회 전반에 걸친 문제의 해결책으로도 주목을 받 고 있어 국가차원의 문제 해결을 위한 로봇 산업의 정책을 국내외로 진행하고 있 다.

국내 로봇 산업은 1970년 후반 최초로 제조업에 로봇이 도입된 이후 40여년의 역사를 가지고 있다. 40여년의 역사를 세부적으로 구분하여 보면 로봇 산업의 태동 기, 제조용 로봇 기반 조성기, 지능형 로봇으로의 전환기, 지능형 로봇 산업 지원 본격화 및 정부지원이 규모화·체계화기, 지능형 로봇 관련 법·제도적 기반 강화기 로 나누어 볼 수 있다<sup>(1)</sup>. 1978~1989년도 로봇 산업의 태동기에는 자동차용 다점용 접 로봇이 국내 최초로 도입되었으며, 정부지원이 없는 상태에서 산업, 학계 자체 적으로 로봇 R&D를 진행하였고, 1990~1996년도는 제조용 로봇 기반 조성기로 국 내 자동차 및 반도체 산업의 발전에 따라 제조용 로봇 산업이 활성화되어 기반을 형성 하였으며, 정부의 제조용 로봇 분야 공통 핵심기술 개발 사업에 대한 지원을 시작하였다. 1997~2001년도에는 IMF위기에 따라 제조용 로봇 사업을 철수하였으 며, IT 산업의 성장에 따라 지능형 로봇으로 로봇산업 패러다임이 변화하는 지능형

- 1 -

로봇으로의 전환기를 맞이하게 되고, 정부에서는 퍼스널 로봇 기반기술 개발에 대 한 사업을 추진하였다. 지능형 로봇 산업에 대한 정부 지원이 본격화 되고 체계화 된 시기로서 2002~2007년 기간에는 지능형 로봇을 10대 차세대 성장 동력 산업으 로 선정하여 산업자원부, 과학기술부, 정보통신부 등 여러 정부 부처에서 지능형 로봇 사업을 지원하여 지능형 로봇 산업 비전과 발전전략 수립과 서비스용 로봇기 술개발사업을 추진하였다. 2008년부터는 최근 2015년까지는 지능형 로봇 관련 법· 제도적 기반이 강화되는 시기로써 로봇 특별법 제정 및 후속조치가 시행 되었으며, 로봇 보급사업 마스터플랜 발표 및 8개 부처의 MOU가 맺어졌다. 또한, 이시기에 2009년, 2014년에 1,2차 지능형 로봇 기본계획을 수립하였다.

해외 주요국가의 로봇산업 활성화를 위해 수립한 최근 육성정책의 동향<sup>(2)</sup>을 살펴 보면, 미국은 '제조업부흥'에 로봇을 적극 활용하는 첨단제조 파트너십 (AMP; Advanced Manufacturing Partnership)을 발표하여 2013년도에 협동로봇·혁신적 제 조공정·첨단소재에 중점을 두고 첨단제조기술 R&D분야에 22억 달러 투자를 하였 다. 또한, 국방, 우주 등 로봇시장 발전을 주도하고 있으며 2020년까지 병력의 30% 를 로봇으로 대체할 계획을 수립 하였다. 최근에는 헬스 케어 및 의료분야 로봇 기 술개발을 위해 2,000만 달러를 투자하기도 하였다.

유럽의 경우에는 전 로봇분야에 걸쳐 산학연관이 모두 참여하는 세계 최대 규모 의 로봇 프로그램(SPARC)에 21억 700만유로 투자를 발표하여 제조, 농업, 헬스, 교통, 사회안전 등 타산업과 융합을 통해 세계 로봇시장에서 EU의 시장선점 강화 정책을 추진함으로써 24만명 일자리를 창출하고자 하였다. 의료·제활 등 복지분야 전문 서비스용 로봇시장에도 집중 지원하여 Horizon 2020프로젝트 통해 로봇분야 10억 유로 투자(2014년), 복지를 위한 로봇 동반자(RobotCom)프로젝트를 추진하였 다.

일본은 2014년에 '로봇혁명실현회의'를 출범시켜 로봇 신전략 5개년 계획을 2015 년도에 발표하여 2020년 도쿄올림픽에 맞춰 로봇 올림픽 개최를 추진하고 있으며, 중소기업 로봇 설비 도입세액 공제 및 설치규제 완화, 로봇도입 비용 지원 등 로봇 도입 실증사업을 추진하였다. 일본의 제조업용 로봇경쟁력을 바탕으로 서비스용 로 봇 육성을 적극 지원 하여 도요타, 야스카와 전기 등의 제조업용 로봇기업의 재활· 간병 로봇 분야 사업의 다각화를 도모하고 있다.

중국은 제조업용 로봇 연간 공급대수 기준 2003년도에 세계 9위에서 2012년에 세 게 2위로 급부상 하였으며, 세계1위 로봇장국으로 도약하기 위해 2014년 시진핑 주

- 2 -





석이 발표한 중국 '제조2025계획'중 로봇을 10대 집중육성 대상에 포함 시켰다. 이 에 따라 공업정보화부에서 2020년까지 세계 로봇 시장 점유율 45% 달성을 위해 로봇집중 육성 계획을 2014년도에 발표 하였다.

앞에서 살펴본 것과 같이, 해외 주요국은 로봇 산업 관련하여 다양한 육성정책을 활발히 추진하고 있는 상황 속에 국내 로봇 산업은 최고 수준의 IT 인프라를 보유 하여 제조업용 로봇 분야는 상당한 경쟁력을 보유하고 있으나, 전체 로봇 산업 기 술에 대한 수준은 선진국들의 80% 수준이며, 원천기술의 격차는 3~5년 정도 차이 가 난다. 특히, 핵심원천기술인 센서, 시각, 음성인식 등과 같은 인지관련 기반기술 에 대한 연구는 매우 약하다.



#### 1.2 연구배경 및 필요성

세계 주요 국가들의 로봇육성 정책에 따라 로봇 지능화에 대한 연구가 최근 들 어 활발히 진행되고 있다. 지능형 로봇의 주요 세부기술은 운동 역학, 센서응용기 술, 인식, 알고리즘, 부품 기술, 통합시스템 기술로 분류 가능하며, 이중에서 센서응 용기술과 알고리즘 기술은 로봇에 지능을 부여하는 매우 중요한 기술이다. 뇌 정보 처리 기능 중 가장 중요하고 인간의 지적활동에 가장 중요한 기능인 시각은 지능 형 로봇에서도 시각센서를 이용하여 중요한 정보를 처리하고 있다. 로봇에 시각기 능을 부여하는 주요 기술은 물체 및 사람의 인식, 자율 주행경로의 결정 기술, 2차 원 시각정보의 3차원 공간정보로의 매핑기술, Tracking 기술로서, 이에 대한 다양 한 연구가 많은 연구진에 의해서 수행되고 있다. 특히, 시각센서로서 CCD카메라를 로봇에 부착하여 카메라부터 얻어진 데이터를 처리하는 화상처리기법을 개발하여 다양한 작업에 적용시키는 로봇제어기술이 활발히 진행되고 있으며, 이에 대한 주 요 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

일반적인 비젼시스템에 대한 연구의 동향을 살펴보면, Park<sup>(3)</sup>등은 ISiMI라고 불 리는 자율 수중 차량(AUV)에 있는 도킹스테이션 입구에 설치된 조명과 CCD카메 라 및 프레임 그래버로 구성된 비젼 시스템에 의하여 AUV 플랫폼에 대한 수중 도 킹 절차를 소개하였다. Bacakoglu와 Kamel<sup>(4)</sup>은 렌즈 왜곡 현상을 고려하여 카메라 내부의 기하학적 및 광학적 특성(내부 매개변수)과 특정한 기준 좌표계에 대한 카 메라 프레임의 3차원 위치와 방위(외부 매개변수)를 결정하는 과정에 대한 최적화 된 2단계 카메라 보정 알고리즘을 제안하였으며, Tsai<sup>(5)</sup>는 공간 좌표가 정확히 알 려진 큐를 사용하여 카메라를 보정하여 3차원 직교 좌표계를 2차원 카메라 좌표계 로 매핑하여 카메라 매개변수를 추정하는 방법에 대하여 연구하였다.

비젼시스템과 로봇 융합에 대한 기초 연구동향을 살펴보면, Bao<sup>(6)</sup>등이 지형 이미 지에서 추출한 시각적 특징과 IMU(onboard inertia measurement unit)로 측정한 지형 샘플을 지속적으로 업데이트 하여, 새로운 지형을 추정하고 입자의 최적화로 최적의 경로를 추정 하는 방법으로 비젼을 이용한 학습과 상호 작용을 통하여 로 봇이 지형을 선택하도록 함으로서 최적의 경로를 계획하기 위한 지형 추정에 대한 연구를 수행하였다. Pomares<sup>(7)</sup>등은 미츠비시 사의 PA-10로봇 끝점에 카메라가 부 착된 3자유도 미니로봇을 부착하여 연결된 로봇을 안내하기 위한 동적 이미지 기 반 제어시스템에 대하여 연구하였다. Stelzer<sup>(8)</sup>등은 네비게이션 알고리즘의 시각오 차에 대한 견고성을 보여주기 위하여 스테레오 비젼 기반의 SGM(semi-global matching)방법으로 시각적 주행 오차를 측정을 하여 거친 지형에서의 6족 보행 로 봇 DLR크롤러의 적절한 보행 선택을 가능하게 하는 시각적 네비게이션 알고리즘 에 대한 연구를 하였다. Xu<sup>(9)</sup>등은 로봇 손이 밸브 근처에 있을 때 로봇 끝점의 카 메라를 통한 새로운 시각적 위치 지정 방식을 이용한 스테레오 비젼을 사용하여 물체 위치를 추정한 후 밸브의 위치와 로봇의 포즈를 결정 하는 연구를 하였다. Kellv<sup>(10)</sup>는 카메라를 로봇의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오 차를 사용하여 제어입력이 역기구학 및 역자코비안 행렬 같은 로봇의 기구학적 특 성이 포함되지 않는 단순한 구조를 갖는 특성을 갖는 이미지 제어기반 알고리즘을 제시하였다. Hafez<sup>(11)</sup>등은 측정과정에 불확실성이 있는 2개의 시각제어 알고리즘에 온라인 부스팅 알고리즘을 적용하여 이미지와 직교공간에서 뛰어난 성능을 발휘하 는 로봇 비젼제어 알고리즘에 대해서 연구하였다. Mishra<sup>(12)</sup>등은 밸브 조작과 같은 위험한 환경에서 동적 경로를 계획하고 장애물을 회피하면서 로봇이 지정된 작업 을 정확하게 수행할 수 있도록 로봇 비젼시스템에 퍼지제어 알고리즘을 도입하는 방법을 연구하였다.

산업현장의 다양한 작업에 시각센서를 로봇에 결합한 응용기술을 효율적으로 적 용하기 위해서는 로봇과 시각센서 사이의 관계를 설명해주는 전형적인 비젼시스템 모델을 설정하는 것이 필요하다. 이러한 비젼시스템 모델을 사용하여 로봇 제어기 법을 개발하기 위해 많은 연구자들이 다양한 방법 등을 사용하여 연구하고 있다. 특히, 본 연구에서 사용되고 있는 수치 해석적 방법인 N-R(Newton-Raphson)방법 과 EKF(Extended Kalman Filter)방법에 대한 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

반복적 계산에 의하여 해를 도출하는 N-R방법에 대한 일반적인 연구에는 Wedepohl<sup>(13)</sup>등이 고 주파수와 저 주파수에서 전송선의 변환 행렬의 주파수 종속 특성을 조사하여, 주파수 라인 구성을 위한 변환 매트릭스 평가에 N-R방법을 도입 하는 연구를 수행하였다. Makoto<sup>(14)</sup>등은 PV(photovoltaic) 어레이의 동작점을 얻기 위한 MPPT(maximum power point tracking)알고리즘의 비교 및 평가에 N-R방법 을 사용하였다.

N-R방법을 로봇에 적용하는 연구 동향을 살펴보면 Skaar<sup>(15)</sup>등이 최소 2개 이상 의 카메라를 이용하여 3차원 작업으로 확장한 공간에서의 로봇 구동 알고리즘을 통하여 카메라 왜곡 같이 특정 오차에 민감하지 않은 로봇 제어 방법을 보여주는

- 5 -



시뮬레이션 연구를 하였으며, Shahamiri<sup>(16)</sup>는 특이 지역을 피하도록 온라인으로 로 봇 궤적을 수정하고 간단한 시각 장애물의 회피를 위하여 Nullspace-biased Newton 방법을 PUMA560 매니퓰레이터에 적용하는 연구를 수행하였다. Yang<sup>(17)</sup> 등은 발산 없이 실시간으로 6축 parallel 로봇의 포즈를 얻기 위하여 GNR(Global Newton-Raphson) 방법을 적용하여 정기구학에 대한 해석을 하였으며, Altamirano<sup>(18)</sup>는 3SPS-1S 병렬 매니퓰레이터를 기반으로 감시 및 방위 시스템을 제안하기 위해 정기구학에 대한 해석에 신경망회로 방법과 N-R방법을 적용하였으 며, 이때 얻어진 자코비안 행렬을 분석하여 매니퓰레이터의 특이점을 계산하고 기 존의 방법과 비교하였다. 또한, Jeong<sup>(19)</sup>은 와이어 평형 로봇의 디자인과 로봇 자세 측정에 필요한 정기구학의 비선형 방정식에 대한 수치 해석적 방법에 N-R방법 적 용하여 로봇의 포즈를 낮은 비용과 노력으로 측정하고자 하였으며, Lin<sup>(20)</sup>은 휴머노 이드 로봇 손가락의 모션에 필요한 속도 프로파일과 보간점 생성을 위해 DBLA(real-time look-ahead)알고리즘에 적절한 초기값을 가진 반복적 N-R방법을 이용하여 역기구학의 해를 구하는데 사용하였다.

순환적 계산에 의하여 해를 도출하는 EKF방법을 이용한 일반적인 연구는 Kalman<sup>(21,22)</sup>이 랜덤 프로세스의 Bode-Shannon표현과 상태 전이 방법을 사용하여 다이내믹 시스템 해석을 사용하는 고전적인 방법을 재검토하여, 선형 필터링 및 예 측 문제에 대한 새로운 방법을 제시를 하였으며, Kerr<sup>(23)</sup>는 레이더의 타겟 추적에 사이클 당 또는 시간 당 더 적은 연산으로 적은 계산 부담을 갖는 반복 EKF방법 을 사용하였고, Wan<sup>(24)</sup>은 비선형 다이내믹 시스템에서 결정적인 샘플링 접근법을 사용하는 UKF(Unscented Kalman Filter)의 강점에 대해 소개 하고, 비선형 시스템의 식별, 신경망 훈련 및 이중 추정 문제 등이 포함된 더 광범위한 비선형 추정 에 대해 확장 하고자 하였다.

비젼시스템을 사용하여 화상처리 및 카메라 매개변수 추정에 EKF방법을 적용한 연구는 Shademan<sup>(25)</sup>등은 필터 파라미터, 카메라보정과 이미지처리의 튜닝에 매우 민감한 실시간 자세추정에 사용되는 PBVS(position-based visual servoing)시스템 에 EKF방법을 적용하여 해를 구하는 방법을 제시하였으며, Parnian<sup>(26)</sup>등은 느리게 이동하거나 거의 정적인 휴대형 이동 장치의 추적을 위하여 여러 대의 비젼시스템 과 관성 항법 시스템(SDINS)을 통합하는 수정된 EKF에 대한 연구를 하였다. Lippiello<sup>(27)</sup>등은 고정된 단일 비젼시스템에 대한 실험을 통하여 움직이는 물체의 위치와 방위에 대한 실시간 추정을 위해 측정 잡음 및 모델링 오류에 알고리즘의

- 6 -



전고성을 향상시킬수 있는 적응EKF(Adaptive EKF)방법을 사용하였다. Gabriele Ligorio<sup>(28)</sup>등은 관성측정장치에 연결된 움직이는 카메라의 자세 추정을 위해 IMU (inertia measurement unit) 기반의 EKF방법과 DLT(direct linear transformation) 기반의 EKF방법을 개발하여 비교하는 연구를 하였다. 또한, Shengli Zhou<sup>(29)</sup>등은 비젼시스템과 관성센서의 융합을 통하여 모션 추적의 정확성을 향상 시키는 연구 를 수행하기위해 EKF방법을 사용하여 웹 기반 비젼시스템의 낮은 샘플링 속도와 관성 센서의 오류 누적에 의한 느린 모션 추적과 시간 경과에 따른 정확도 저하 문제를 해결하였다.

EKF방법을 로봇에 적용하는 연구에 대한 경향을 살펴보면, Guodong Chen<sup>(30)</sup>은 EKF방법을 이용하여 휴머노이드 비젼시스템에 사용가능한 카메라 보정 방법을 제 시하였다. Ling Chen<sup>(31)</sup>등은 모바일 로봇의 자율 주행에 중요한 역할을 하는 localization을 수행하고자 할 때 EKF방법과 지도 기반의 특징(레이저 범위 정보 및 주행거리 측정법)을 이용하여 모바일 로봇의 위치를 분석 하였고, Hamzah Ahmad<sup>(32)</sup>등은 로봇의 위치 측정데이터가 누락되거나 로봇의 이동 중에 위치 파악 에 불확실성이 존재하는 경우 측정데이터의 특성을 분석하여 로봇의 위치를 효과 적으로 추정하기 위하여 EKF를 사용하였다. Oriolo<sup>(33)</sup>는 관성 측정 유닛, 카메라, 엔코더, 압력센서 등에 의한 휴머노이드 로봇의 국지화에 카메라에서 얻은 실제 측 정값과 예측된 값을 비교하여 추정치를 수정하기 위해 EKF방법을 사용 하였다. Xu<sup>(34)</sup>는 레이저 센서와 로봇의 인코더로부터 받은 정보를 통합하여 모바일 로봇의 위치제어의 정확성 향상을 위해 UKF(Unscented Kalman Filter)를 사용 하였으며, Nguyen<sup>(35)</sup>은 모바일 로봇에 마이크 어레이를 사용하여 간헐적으로 움직이는 모바 일 로봇의 모션 정보와 다른 포즈에서 취득된 음원 측정 정보의 융합을 위해 MKF(Mixture Kalman Filter)를 사용 하였다. 또한, Lippiello<sup>(36)</sup>등은 카메라 시스템 을 갖춘 다중 암 로봇의 위치 기반 비주얼 서보잉에 대하여 타겟의 움직임을 EKF 방법을 사용하여 실시간으로 추정하는 방법을 제시하였으며, 이 방법은 이미지 특 징 추출을 위하여 최적의 이미지 특징 집합만 고려하므로 카메라 수에 관계없이 정확도가 보장되는 특징이 있다.

위에서 보여준 것 같이 비젼시스템을 사용한 로봇제어기술에 대한 많은 연구자 들에 의해서 다양한 방법들이 제시되어 연구되고 있으나, 상당수 연구들은 크게 2 개 문제점을 가지고 있다. 첫째로, 방향 및 초점거리 등을 나타내는 내부 파라미터 와 카메라와 로봇 사이의 상대적 위치를 나타내는 외부 파라미터에 대한 카메라

- 7 -





매개변수들의 정확한 보정이 필요하며, 정확한 보정이 되었다고 할지라도 로봇 매 니퓰레이션 중 카메라 위치, 방향, 초점거리들이 변하면 더 이상 초기 보정 값은 유효하지 않는다는 한계가 있다. 두 번째로, 컴퓨터 성능향상과 효율적인 화상처리 알고리즘 등이 개발되었지만 비젼센서로부터 획득되어지는 많은 데이터 양으로 인 해 처리속도 저하의 문제점으로 실시간 데이터 처리에 한계가 있다. 따라서 본 연 구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 공간상 위치 값이 알려지지 않고 오직 비젼 데이터만 알려진 타겟에 대해 로봇을 이용한 물체 배치작업을 수행하기 위하여 N-R과 EKF방법을 이용한 2개 로봇 비젼제어 기법을 개발하였다.





#### 1.3 연구목적 및 내용

다품종 소량 생산의 시대에 부응하기 위해 로봇 제어시스템도 시시각각 변화하는 다양한 작업환경에 빠르게 적응하여 효율적인 작업을 해야 하므로 로봇과 다양 한 센서들의 통합제어가 필수이다. 공학자들의 다양한 통합제어 연구 중에 로봇에 시각센서를 적용하여 통합 제어하는 연구가 가장 활발히 진행되고 있지만, 시각센 서를 이용한 비젼시스템을 로봇에 적용하기에는 많은 문제점들이 발생한다. 먼저 수많은 변수를 고려하여 시각센서에서 획득되어지는 데이터를 효율적으로 처리하는 알고리즘을 개발하였지만 여전히 방대한 데이터 양으로 인해 처리속도를 극복하지 못하여 실시간 로봇제어에 어려움이 발생한다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여, 하드웨어(HW)적인 방법으로는 컴퓨터의 기능 향상과 고속 비젼보드(frame grabber)와 고속 카메라를 이용 하는 방법이 있지만 비싼 가격이 걸림돌이 된다. 다음으로, 3차원 공간상에서 운동하는 로봇 위치와 시각센서로 사용되는 2차원 카메라 이미지 평면 사이에 정확한 보정이 필수적이다. 정확한 보정이 이루어졌다고 할지라도 로봇 매니퓰레이션 동안 로봇과 카메라 사이에 상황변화가 발생하면 최초의 보정은 더 이상 효율성을 가지지 못하므로 다시 보정을 해야 한다.

본 연구는 알고리즘 및 소프트웨어(SW)적인 방법으로 위의 문제점들을 해결하 고자 로봇의 3차원 공간상 좌표값을 2차원 카메라 좌표계 값으로 효율적인 변환을 시키기 위해 선행연구에서 합리성이 증명된 비젼시스템 모델을 사용하고자 한다. 사용된 비젼시스템 모델은 카메라의 방위와 초점거리의 불확실성을 알려주는 4개 의 카메라 매개변수와 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치의 불확실성을 나타내 는 2개 카메라 매개변수를 가진 총 6개의 카메라 매개변수를 가지고 있다. 그리고 비젼시스템 모델의 정확성을 높이기 위해 카메라의 위치선정을 로봇 말단부에 부 착된 물체가 임의의 운동궤적을 따라 이동하는 동안 본 연구에 사용된 3대의 카메 라 각각의 이미지 화면상에서 벗어나지 않으면서 화면에 가득 차도록 배치하였으 며, 특히, 데이터양을 최소화하기 위해 물체 형상 전체을 나타내는 LED 큐를 사용 한 시험모형을 제작하였다.

이리하여, 효율성이 증명된 비젼시스템 모델을 이용하여, 공간상 위치값이 알려 지지 않고 오직 비젼데이터만 알려진 타겟에 대해 로봇을 이용한 물체 배치작업을 수행하기 위하여 N-R과 EKF 방법을 이용한 2개 로봇 비젼 제어기법을 제시하였





다. 제시된 2개 제어기법의 효율성을 보이기 위해 고정된 타겟에 대해 로봇의 2개 큐를 갖는 얇은막대 배치 실험에 적용하였다. 실험을 통해 서로 다른 수치해석 특 성을 가진 N-R방법과 EKF방법을 적용한 비젼시스템 모델의 적합성과 얇은 막대 배치 시 작업의 정확성에 대한 결과를 비교함으로서, 각각의 장단점을 파악하여 다 양한 환경에 효율적이고 알맞은 기법 적용에 대하여 알아보고자 하였다. 이와 더불 어 타겟에 대한 공간상 위치가 알려진 경우에 대한 로봇의 관절값을 추정하는 로 봇 역기구학 모델을 개발하고, 얻어진 해석결과는 2개 로봇 비젼 제어기법의 정확 성을 파악하는 기준으로 설정하였다. 특히, EKF방법에 사용된 비젼시스템 모델의 적합성을 분석하기 위해 비젼시스템 모델에 포함된 6개의 카메라 매개변수의 변화 를 관찰하여 그 특성을 파악하고자 하였다.

이리하여, 본 논문의 목적을 위해서 연구내용을 각 장별로 다음과 같이 구성하였다. 제2장에서는 로봇 기구학 해석, 제3장 로봇 비젼제어기법을 위한 수학적 모델 링, 제4장 물체 배치작업을 위한 비젼제어기법 개발, 제5장 실험장치 및 실험방법, 제6장 실험결과 및 제7장에 결론으로 구성하였으며 Fig. 1-1과 같이 구성된다.



Fig. 1-1 Structure of thesis

- 10 -



#### 제 2 장 로봇 기구학 해석

#### 2.1 정기구학 해석

#### 2.1.1 이론적 배경

로봇의 기구학은 3차원 공간에서 로봇의 각 관절에 대한 관절값( $\theta_i$ )이 주어졌을 때 베이스 좌표계에 대한 로봇 끝점의 위치 ( $F_x, F_y, F_z$ )를 구하는 것이다. 로봇 끝 점 위치( $F_x, F_y, F_z$ )를 구하기 위해서는 로봇의 링크 연결에 대해서 정의해야 한다. 관심상 관절축  $\{i\}$ 에 대해서 4개 링크인자는 Denavit-Hartenberg(D-H) 규약에 따 라 정의하는 링크인자들은 Table 2-1에 따라 관절축 $\{i\}$ 가 관절축 $\{i-1\}$ 에 대한 상 대적 위치 관계는 링크길이(link length)  $a_{i-1}$ 과 링크 뒤틀림(link twist)  $\alpha_{i-1}$ 로 표 현하며, 관절축  $\{i\}$ 에 대해 이웃하는 링크 $\{i-1\}$ 과 링크 $\{i\}$ 의 연결 상태는 링크 오 프셋트  $d_i$ 와 관절값(joint value)  $\theta_i$ 등 4개 인자로 표현하며, Fig. 2-1에서 보여준다.

일반적으로 D-H 규약에 따른 4개 링크인자를 사용하여 링크에 계{i}를 부착하는 규약은 Table 2-2와 Fig. 2-1에서 보여주는 것과 같이  $Z_i$ 는 관절축 i와 일치하며, 계{i}의 원점은  $a_i$ 가 관절축 i를 수직으로 교차하는 지점을 말한다. 또한,  $X_i$ 축은 관절축{i}에서 관절축 {i+1}을 가르키는  $a_i$ 방향이며,  $Y_i$ 축은 플레밍의 오른손법칙에 따름으로 정의한다<sup>(37)</sup>.



Fig. 2-1 Link frame {i} and link parameters

- 11 -





Table 2-1 Link parameters describing the relationship $(a_{i-1}, \alpha_{i-1})$  and the relationship $(\theta_i, d_i)$  between the neighboring links

Link parameter	Convention			
$a_{i-1}$	The distance measured along a line that is mutually perpendicular to both axis $\{i\}$ and axis $\{i-1\}$			
$\alpha_{i-1}$	The angle of the twist of $link\{i-1\}$ relative to $link\{i\}$			
$d_i$	The distance measured along the common $axis\{i\}$ from $link\{i-1\}$ to $link\{i\}$			
$\theta_i$	The angle of rotation about the common $xis\{i\}$ between $link\{i-1\}$ and $link\{i\}$			

Table 2–2 Convention of intermediate link frame  $\{i\}$  attachment

Frame	axis and origin	Convention			
	$Z_i$ -axis	Assign the $Z_i$ -axis along the joint axis $\{i\}$			
	origin	The point located where the $a_i$ perpendicular intersects the joint axis $\{i\}$			
$\{i\}$	$X_i$ -axis	Assign the $X_i$ -axis pointing along $a_i$ in the direction from joint $\{i\}$ to joint $\{i+1\}$			
	$Y_i$ -axis	Assign the $Y_i$ -axis by the right-hand rule			

좌표계의 설정을 보여주는 Fig. 2-1과 같이 계{i}를 계{i-1}에 기준하여 표현하 면 아래와 같다.

$${}^{i-1}_{i}T = {}^{i-1}_{W}T{}^{W}_{U}T{}^{U}_{S}T{}^{P}_{P}T{}^{I}_{i}$$
(2-1)

여기서,  ${}^{i-1}_{W}T \leftarrow X_{i-1}$ 축에 대하여  $\alpha_{i-1}$  회전,  ${}^{W}_{U}T \leftarrow X_{W}$ 을 따라  $a_{i-1}$  전위,  ${}^{U}_{S}T$ 는  $Z_{U}$ 축에 대하여  $\theta_{i}$ 만큼 회전,  ${}^{S}_{P}T \leftarrow Z_{p}$ 축을 따라  $d_{i}$ 만큼 전위를 나타내고 있으 며, Eq.(2-2)와 같이 4×4행렬들로 표현된다.





$${}^{i-1}_{W}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i-1} & \sin\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{W}_{U}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{U}_{S}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i} & -\sin\theta_{i} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{i} & \cos\theta_{i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{S}_{i}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{S}_{i}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이리하여, Eq.(2-2)식의 행렬들을 곱하면 Eq.(2-3)식을 얻게 된다.

$${}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i} & -\sin\theta_{i} & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_{i}\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_{i}\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_{i} \\ \sin\theta_{i}\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_{i}\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2-3)



#### 2.1.2 정기구학 모델

본 연구는 삼성 SM7 4축 SCARA로봇을 사용하여 연구를 진행 하였으며, 삼성 SM7 4축 SCARA로봇의 치수, 기하학적 형상 및 각 관절 좌표계는 Fig. 2-2에 나 타낸 것과 같다. 또한, 삼성 SM7 4축 SCARA로봇에서 각 관절에 대한 4개 링크인 자 값은 Table 2-3과 같이 기술하였다.

Table 2	-3 Link	parameters	of 4	4	axis	robot
---------	---------	------------	------	---	------	-------

Axis	$\alpha_{i-1}$ (degree)	$a_{i-1}(mm)$	$d_i(mm)$	$\theta_i$ (degree)
1	0	0	387	$\theta_1$
2	0	400	0	$\theta_2$
3	180	250	$d_3$	0
4	-180	0	0	$\theta_3$



Fig. 2-2 Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot





본 연구에 사용된 삼성 SM7 4축 SCARA로봇의 4개의 관절에 대한 Table 2-3에 서 보여준 링크인자(37) 값을 Eq.(2-3)에 대입하여 각 관절에 대한 변환행렬을 계 산하면 Eq.(2-4)와 같다.

이리하여 베이스 좌표계{0}에서 마지막 관절{4}까지의 변환행렬  ${}^0_4T$ 는 Eq.(2-5)와 같이 나타낼 수 있다.

$${}^{0}_{4}T = {}^{0}_{1}T^{1}_{2}T^{2}_{3}T^{3}_{4}T$$
(2-5)

Eq.(2-4)의 각 관절에 대한 변환행렬을 Eq.(2-5)에 대입하여 계산하면 Eq.(2-6) 과 같이 주어진다.

$${}^{0}_{4}T = {}^{0}_{1}T_{2}^{1}T_{3}^{2}T_{4}^{3}T = \begin{bmatrix} l_{x} & m_{x} & n_{x} & g_{x} \\ l_{y} & m_{y} & n_{y} & g_{y} \\ l_{z} & m_{z} & n_{z} & g_{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2-6)

여기서,





$$\begin{split} l_x &= \cos\theta_4 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) - \sin\theta_4 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ l_y &= \cos\theta_4 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) - \sin\theta_4 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ l_z &= 0 \\ m_x &= -\sin\theta_4 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) - \cos\theta_4 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ m_y &= -\sin\theta_4 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) - \cos\theta_4 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ m_z &= 0 \\ n_x &= 0 \\ n_y &= 0 \\ n_z &= 1 \\ g_x &= 250 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) + 400 \cos\theta_1 \\ g_y &= 250 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) + 400 \sin\theta_1 \\ g_z &= 388 - d_3 - 67.05 \end{split}$$

마지막 좌표계{4}에 부착된 얇은 막대의 양 끝에 부착된 2개 큐의 위치벡터는 다음 과 같다.

$${}^{4}P^{j} = \begin{bmatrix} {}^{4}P^{1} \\ {}^{4}P^{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{x}^{1} P_{y}^{1} P_{z}^{1} \\ P_{x}^{2} P_{y}^{2} P_{z}^{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15 & -18 & -103 \\ -15 & 18 & -103 \end{bmatrix}$$
(2-7)

따라서, 로봇 베이스 좌표계{0}에 대한 로봇 끝점 <sup>4</sup>P의 위치벡터는 Eq.(2-8)과 같이 계산된다.

$${}^{0}\overline{F} = {}^{0}_{4}T \bullet {}^{4}P^{j} \tag{2-8}$$

Eq.(2-8)에 Eq.(2-6)과 Eq.(2-7)을 대입하여 i번째 이동지점에서 j번째 큐에 대한 로봇 정기구학 식을 성분 별 $(F_x^{i,j}, F_y^{i,j}, F_z^{i,j})$ 로 나타내면 다음과 같다.<sup>(40,41)</sup>





$$F_{x}^{i,j} = \cos(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i} + \theta_{4}^{i})P_{x}^{j} - \sin(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i} + \theta_{4}^{i})P_{y}^{j} + a_{2}\cos(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i}) + a_{1}\cos\theta_{1}^{i} F_{y}^{i,j} = \sin(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i} + \theta_{4}^{i})P_{x}^{j} + \cos(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i} + \theta_{4}^{i})P_{y}^{j} + a_{2}\sin(\theta_{1}^{i} + \theta_{2}^{i}) + a_{1}\sin\theta_{1}^{i}$$
(2-9)  
$$F_{z}^{i,j} = P_{z}^{j} + d_{1} - d_{3}^{i} - d_{4}$$

여기서,  $a_1, a_2, d_1, d_4$ 는 링크인자,  $\theta_1^i, \theta_2^i, d_3^i, \theta_4^i$ 는 i번째 이동지점에서의 로봇 관절 값, j는 큐의 번호를 나타낸다.




### 2.2 역기구학 해석

#### 2.2.1 이론적 배경

미분 가능한 함수 f(x) = 0에서 근의 근사값을 빠르게 구할 때 일반적으로 많이 사용하는 방법이 Newton-Raphson(N-R)법이다. 이 방법은 Fig. 2-3과 같이 초기점  $x_0$ 를 잡고  $x_0$ 에서 이 곡선위의 점  $(x_0, f(x_0))$ 에서의 접선과 x축에서의 교차점  $(x_{1,0})$ 을  $x_1$ 이라 하며, 다시  $x_1$ 에서 곡선위의 점  $(x_1, f(x_1))$ 에서의 접선이 x축과 교 차하는 점을  $x_2$ 라 한다<sup>(44)</sup>.



Fig. 2-3 Newton-Raphson method

여기서,  $x_0$ 로부터  $x_1$ 을 구하는 식을 정리하면,  $x_0$ 에서 접선의 기울기는  $f'(x_0)$ 이므 로 접선의 방정식은  $y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0)$ 이다. 이 접선이 x 축과 만나는 점의 좌표를  $(x_1, 0)$ 라 하면  $-f(x_0) = f'(x_0)(x_1 - x_0)$ 이므로  $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$ 가 된다. 위 식을 정리하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{2-10}$$

이렇게 얻은  $x_{n+1}$ 을 새로운  $x_n$ 으로 놓고 위의 계산을 허용오차  $\varepsilon$ 에 만족할 때까지 반복하면  $x_{n+1}$ 은 근에 접근하게 되며, 2.2.2절의 역기구학 모델의 해를 구하는데 사용 하였다.



### 2.2.2 역기구학 모델

본 절에서는 2.2.1절에서 서술한 N-R방법을 이용하여 본 연구에서 사용한 삼성 SM7 4축 SCARA로봇의 역기구학 모델을 제시하고자 한다. 로봇 역기구학은 고정 된 얇은 막대의 타겟 지점의 공간상 좌표값  $F_d^{j(=1,2)} = (x_d^j, y_d^j, z_d^j)$ 가 알려졌을 때 삼성 SM7 4축 SCARA로봇의 관절값  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $d_3$ ,  $\theta_4$ 를 계산하기 위해 개발하였으 며, 이에 대한 계산 과정은 Fig. 2-4와 같다. 여기서 계산된 로봇 관절값은 본 논문 에서 연구한 타겟에 대한 비젼데이터만을 사용하여 N-R방법과 EKF 방법으로 추 정한 SCARA로봇의 관절값  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $d_3$ ,  $\theta_4$ 의 결과를 해석하기 위한 기본 데이터로 하고자 한다.



Fig. 2-4 Block diagram of inverse kinematics model

- 19 -



① Step 1 : 타겟 지점 설정

로봇의 고정된 얇은막대 타겟  $x_d^j, y_d^j, z_d^j (j=1,2)$ 를 설정한다.

② Step 2 : 새로운 함수 정의

N-R 방법을 적용하기 위해 함수 f를 Eq.(2-11)과 같이 정의 한다.

$$f^{j} = {}^{0}_{4}T \bullet {}^{4}P^{j} - F^{j}_{d} \tag{2-11}$$

Eq.(2-9)와 (Step 1)을 Eq.(2-11)에 적용하면 함수 f는 Eq. (2-12)과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_x^j \\ f_y^j \\ f_z^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_x^j - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_y^j + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos\theta_1 - x_d^j \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_x^j + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_y^j + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin\theta_1 - y_d^j \\ P_z^j - d_4 - d_3 + d_1 - z_d^j \end{bmatrix} (2-12)$$

③ Step 3: Newton-Raphson 방법 적용

Eq.(2-12) 함수 f에 Eq.(2-10)의 Newton-Raphson 방법을 적용하면 다음과 같 다.

$$x_{k+1} = x_k - \left[\frac{\partial f}{\partial x}(x_k)\right]^{-1} f(x_k) \tag{2-13}$$

여기서,

$$x = (\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)^T$$
$$f = (f_x^j, f_y^j, f_z^j)^T$$

Eq.(2-13)에 정의된 x와 f 함수를 적용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.





$$\begin{bmatrix} \theta_{1,l+1} \\ \theta_{2,l+1} \\ d_{3,l+1} \\ \theta_{4,l+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1,l} \\ \theta_{2,l} \\ d_{3,l} \\ \theta_{4,l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_x^j}{\partial d_3} & \frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_y^j}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_z^j}{\partial d_3} & \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_4} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_x^j(\theta_n) \\ f_y^j(\theta_n) \\ f_z^j(\theta_n) \end{bmatrix}$$
(2-14) 
$$= \begin{bmatrix} \theta_{1,l} \\ \theta_{2,l} \\ d_{3,l} \\ \theta_{4,l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R \end{bmatrix}$$

④ Step 4 : 역행렬 계산방법

Eq.(2-14)의 A행렬은 정방행렬이 아니므로 일반적인 역행렬을 계산하는 Gauss 소거법 같은 방법으로는 해를 구할 수 없다. 이리하여, A행렬의 크기가  $n \times m$  일 때, 아래와 같은 방법으로 계산한다<sup>(42)</sup>.

case1) 
$$n > m$$
 일 경우  $A^{-1} \Rightarrow (A^T A)^{-1} A^T$  (2-15)  
case2)  $n < m$  일 경우  $A^{-1} \Rightarrow A^T (AA^T)^{-1}$ 

⑤ Step 5 : Newton-Raphson 방법 재구성

본 논문에서 A행렬은 n > m이므로, Eq.(2-14)에 Eq.(2-15)의 casel을 적용하면 Eq.(2-16)와 같이 재구성 할 수 있다.

$$\theta_{n,l+1} = \theta_{n,l} - (A^T A)^{-1} A^T R_I \tag{2-16}$$

여기서,  $\theta_{n,l}$ 은 임의로 주어진 초기값이며, A행렬과 R행렬은 Eq.(2-17)과 Eq.(2-18)에 나타낸 것과 같다.





$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x^1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_x^1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_x^1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_x^1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_y^1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_y^1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_y^1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_z^1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_z^1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_z^1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_z^1}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_x^2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_x^2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_x^2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_x^2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_y^2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_z^2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_z^2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial f_z^2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_z^2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_z^2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^2}{\partial \theta_4} \end{bmatrix}$$

$$(2-17)$$

$$R = \begin{bmatrix} f_{x}^{1}(\theta_{n}) \\ f_{y}^{1}(\theta_{n}) \\ f_{z}^{1}(\theta_{n}) \\ f_{z}^{2}(\theta_{n}) \\ f_{y}^{2}(\theta_{n}) \\ f_{z}^{2}(\theta_{n}) \end{bmatrix}$$
(2-18)

여기서,

$$\begin{split} &\frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_1} \!=\! -\sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_x^j - \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_y^j - a_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) - a_1 \sin\theta_1 \\ &\frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_2} \!=\! -\sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_x^j - \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_y^j - a_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ &\frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_3} \!=\! 0 \\ &\frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_4} \!=\! -\sin\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_x^j - \cos\left(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4\right) P_y^j \end{split}$$



$$\begin{split} \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_1} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_x^j - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_y^j + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos\theta_1 \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_2} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_x^j - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_y^j + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_3} &= 0 \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_4} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_x^j - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) P_y^j \\ \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_1} &= 0 \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_2} &= 0 \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_3} &= -1 \\ \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_4} &= 0 \end{split}$$

⑥ Step 6 : 허용오차

(Step 5)에서 계산 되어진 값은 Eq.(2-19)을 이용하여 주어진 허용오차 ( $\epsilon$ ) 를 만족할 때까지 (Step 5) 절차를 반복하여 계산하며, 이때 (Step 5)에서 계산되어진 값은 다음 반복계산을 위한 초기값으로 배치된다.

$$\sum_{i=1}^{4} \left| \theta_{n,l+1} - \theta_{n,l} \right| < \varepsilon \tag{2-19}$$





## 제 3 장 로봇 비젼시스템의 수학적 모델링

본 장에서는 고정타겟에 얇은 막대 배치작업을 위해 N-R방법과 EKF방법을 적용 한 2개 로봇비젼 제어 기법 개발을 위해 필요한 수학적 모델링을 제시한다. 3.1절 에는 본 연구에 사용되는 로봇 비젼제어의 필수 요소인 비젼시스템 모델에 대하여 설명하며, 3.2절에는 N-R방법을 이용한 로봇 비젼시스템의 수학적 모델링, 3.3절에 는 EKF방법을 이용한 로봇 비젼시스템의 수학적 모델을 보여준다.

### 3.1 비젼시스템 모델

본 연구에서 제안된 비젼시스템 모델은 6개의 카메라 매개변수( $C_1 \sim C_6$ )를 포함하 고 있다. 여기서, 카메라 내부매개변수  $C_1 \sim C_4$ 는 카메라의 초점거리 및 방향의 불 확실성을 설명하며, 카메라 외부 매개변수인  $C_5$ 과  $C_6$ 은 카메라와 로봇사이의 상대 위치에 대한 불확실성을 설명한다. 이에 대한 비젼시스템 모델은 Eq.(3-1)에서 보 여준다<sup>(25,26)</sup>.

$$\begin{bmatrix} X_m^{i,j} \\ Y_m^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x^{i,j} \\ F_y^{i,j} \\ F_z^{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \end{bmatrix}$$
(3-1)

여기서,

$$C_{11} = C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 , \quad C_{12} = 2(C_2C_3 + C_1C_4) ,$$
  

$$C_{13} = 2(C_2C_4 - C_1C_3) , \quad C_{21} = 2(C_2C_3 - C_1C_4) ,$$
  

$$C_{22} = C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 , \quad C_{23} = 2(C_3C_4 + C_1C_2) ,$$
(3-2)

Eq.(3-2)를 Eq.(3-1)에 대입하여 정리하면 2차원 카메라 좌표계에서 성분별 비 젼시스템 모델 방정식은 Eq.(3-3)과 같다.





$$\begin{split} X_m^{i,j} &= (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2) F_x^{i,j} + 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) F_y^{i,j} \\ &+ 2(C_2 C_4 - C_1 C_3) F_z^{i,j} + C_5 \\ Y_m^{i,j} &= 2(C_2 C_3 - C_1 C_4) F_x^{i,j} + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2) F_y^{i,j} \\ &+ 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) F_z^{i,j} + C_6 \end{split}$$

여기서,  $F_x^{i,j}, F_y^{i,j}, F_z^{i,j} \leftarrow i$ 번째 이동지점에서 j번째 큐에 대한 3차원 공간 좌표상 의 위치를 나타내며,  $X_m^{i,j}$ 과  $Y_m^{i,j} \leftarrow i$ 번째 로봇 이동지점에서 로봇 끝점의 j번째 큐 에 대한 2차원 카메라 상의 좌표계에서 성분별 비젼시스템의 모델식을 나타낸다.



### 3.2 N-R방법을 사용한 수학적 모델링

N-R방법은 반복적인 계산 방식을 취하는 특징을 가지며, 본 절에서 N-R방법을 사용한 수학적 모델링은 카메라 매개변수 추정 모델과 로봇 관절값 추정 모델식을 제시한다. 이에 대한 전체적인 흐름은 Fig. 3-1에서 보여주고 있다.



Fig. 3–1 Overall flow of mathematical system modeling based on the N–R method

### 3.2.1 카메라 매개변수 추정 모델

로봇이 운동 궤적을 따라 얇은막대 고정 타겟으로 이동 할 때 각 이동 단계에서 로봇 끝점  $P^{j}$ 에 대한 비젼 데이터와 로봇 관절값이 얻어진다면, 6개의 매개변수를 추정하기 위해 각 카메라에 대하여 Eq.(3-4)과 같이 성능지수를 정의한다.

$$I_{c}(C_{k}) = \sum_{i=1}^{i^{*}} \sum_{j=1}^{j^{*}} \left[ X_{m}^{i,j} - X_{c}^{i,j} \right]^{2} + \left[ Y_{m}^{i,j} - Y_{c}^{i,j} \right]^{2}$$
(3-4)

- 26 -

Collection @ chosun

여기서, k(=1,2,...,6)는 매개변수의 개수, i는 로봇 운동궤적에서의 ith이동지점, j는 로봇의 말단부에 부착된 j번째 큐를 나타낸다.  $X_c^{i,j}$ ,  $Y_c^{i,j}$ 는 로봇의 각 이동 단 계에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점  $P^j$ 에 대한 실제 비젼데이터 값들이다.  $X_m^{i,j}$ ,  $Y_m^{i,j}$ 은 3.1절의 비젼시스템 모델에서 매개변수 $C_1 \sim C_6$ 을 포함한 비젼시스템 모델 값을 나타낸다.

N-R 방법을 적용하여 Eq.(3-4)를 최소화 시키면 아래 Eq.(3-5)과 같이 나타낼 수 있다<sup>(40,41)</sup>.

$$C_{k,l+1} = C_{k,l} + \Delta C$$

$$= C_{k,l} + (J^T W J)^{-1} J^T W R$$
(3-5)

여기서, *l*은 계산과정에서 반복된 횟수이며, *W*는 가중행렬로 본 연구에서는 획 득한 모든 비젼데이터에 동일한 가중치를 주기위해서 단위행렬을 적용하였다. 또 한, *J*행렬은  $(2i \times j) \times 6$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 Eq.(3-6)과 같이 주어지 며,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_2} & \cdots & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_6} \\ \end{bmatrix}$$
(3-6)

R행렬은 Eq.(3-7)과 같이 (2i×j)×1요소를 가지는 유수벡터로 나타낸다.

Collection @ chosun



$$R = \begin{bmatrix} X_m^{1,1} - X_c^{1,1} \\ Y_m^{1,1} - Y_c^{1,1} \\ X_m^{1,2} - X_m^{1,2} \\ Y_m^{1,2} - Y_c^{1,2} \\ \vdots \\ X_m^{i,j} - X_c^{i,j} \\ Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j} \end{bmatrix}$$
(3-7)

위에 제시된 카메라 매개변수 모델식은 사용된 카메라 각각에 대해 적용되어 본 연구에 필요한 카메라 매개변수가 추정된다.



#### 3.2.2 로봇 관절값 모델

3.2.1절에서 3대 카메라에 대한 각각의 6개 카메라 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 가 추정되면, 이를 이용하여 타겟에 대한 로봇 관절값 $\theta_n = (\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 을 추정하기 위해 다음 Eq.(3-8)과 같이 성능지수를 정의한다.

$$\begin{split} I_{P}(\theta_{n}) &= \sum_{q=1} \sum_{j=1} \left[ X_{m}(C_{k})^{q,j} (F_{x}^{j}(\theta_{n}), F_{y}^{j}(\theta_{n}), F_{z}^{j}(\theta_{n})) - X_{c}^{q,j} \right]^{2} \\ &+ \left[ Y_{m}(C_{k})^{q,j} (F_{x}^{j}(\theta_{n}), F_{y}^{j}(\theta_{n}), F_{z}^{j}(\theta_{n})) - Y_{c}^{q,j} \right]^{2} \end{split}$$
(3-8)

여기서, q는 카메라의 개수를 나타내며,  $X_c^{q,j}$ 와  $Y_c^{q,j}$ 는 타겟에 대한 q번째 카메라 에서 *j*번째 큐의 카메라 좌표값을 나타내며,  $X_m^{q,j}$ 와  $Y_m^{q,j}$ 는 추정된 카메라 매개변 수  $C_k(C_1 \sim C_6)$ 에 의하여 계산된 q번째 카메라에서 *j*번째 큐에 대한 추정된 비젼 시스템 모델 값이다.

결국, Eq.(3-8)를 N-R방법으로 최소화시키면 Eq.(3-9)과 같다<sup>(40,41)</sup>.

$$\theta_{n,l+1} = \theta_{n,l} + \Delta\theta$$

$$= \theta_{n,l} + (J^{*T}WJ^{*})^{-1}J^{*T}WR^{*}$$
(3-9)

여기서, *l*은 계산과정 중 반복된 횟수이며, *W*행렬은 가중행렬을 나타내며, 본 연 구에서는 사용된 카메라에 동등한 가중치를 주기위해 단위행렬을 사용하였다. 또 한, *J*<sup>\*</sup>행렬은  $(2 \times q \times j) \times 4$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 Eq.(3-10)과 같이 주 어지며,





$$J^{*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial X_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial X_{m}^{1,1}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial X_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial Y_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,1}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,1}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial X_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial X_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial X_{m}^{1,2}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial X_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial Y_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,2}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial Y_{m}^{1,2}}{\partial \theta_{4}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial X_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial X_{m}^{q,j}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial X_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial Y_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial Y_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial Y_{m}^{q,j}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial Y_{m}^{q,j}}{\partial \theta_{4}} \end{bmatrix}$$
(3-10)

 $R^*$ 행렬은 Eq.(3-11)과 같이  $(2 \times q \times j) \times 1$ 의 크기를 가지는 유수벡터로 나타낸다.

$$R^{*} = \begin{bmatrix} X_{m}^{1,1} - X_{c}^{1,1} \\ Y_{m}^{1,1} - Y_{c}^{1,1} \\ X_{m}^{1,2} - X_{c}^{1,2} \\ Y_{m}^{1,2} - Y_{c}^{1,2} \\ \vdots \\ X_{m}^{q,j} - X_{c}^{q,j} \\ Y_{m}^{q,j} - Y_{c}^{q,j} \end{bmatrix}$$
(3-11)





## 3.3 EKF방법을 사용한 수학적 모델링

매개변수를 추정하는 여러방법 중 Kalman Filter는 순환방법으로 불확실한 측정 값을 명쾌하게 해석하여 결과값을 계산한다. 또한, 계산 절차가 간단하고 계산을 통하여 우선시 하는 정보를 구할 수 있다. 다시 말해, 오직 이전 상태 추정 단계에 서 함수와 그에 대응하는 예측한 위치에서의 관측된 함수에 대한 선형 테일러 근 사화만을 생각하면 된다. 이러한 접근 방법은 비선형 모델의 해를 구하고자 할 때 간단하고 효율적인 알고리즘을 얻을 수 있다. 그러나, 초기값에 대한 추측이 불안 하거나 외란이 부적절하게 높다면 해를 구하지 못하는 경우도 있다.

본 절에서는 EKF방법을 사용한 수학적 모델링은 측정모델과 예측모델로 구분되며, 각 모델에서는 카메라에 대한 매개변수와 타겟에 대한 로봇 관절값을 추정하기 위한 모델식을 제시한다. EKF 방법의 전체적인 흐름은 Fig. 3-2에서 보여주며, 불 안한 초기값에 대한 문제를 보완하기 위하여 Monte-Calro 방법을 사용하여 초기값 을 설정하였으며 이에 대한 설명은 3.3.3절에 하였다. 또한, EKF 방법의 칼만 이득 값  $K_k$ 를 구하기 위해 사용된 방정식의 자코비안  $H_k$ 는 측정데이터를 정확히 전달 하거나 확대하기 위하여 사용된다.



Fig. 3-2 Overall flow of mathematical system modeling based on the EKF method

- 31 -



### 3.3.1 카메라 매개변수 모델

비젼시스템 모델에 포함된 불확실한 6개 카메라 매개변수를 EKF방법을 이용하여 추정하기 위해서는 Fig. 3-2의 보여준 함수  $x_k^-$ 와 h를 정의하는 것이 필요하다. 첫 번째로, 예측모델에 대한 함수  $x_k^-$ 는 다음 Eq.(3-12)와 같이 정의한다.

$$x_k^- = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \end{bmatrix}^T$$
(3-12)

또한, 측정모델에 대한 함수h는 3.1절에 주어진 비젼시스템 모델을 사용하여 Eq.(3-13)과 같이 정의한다.

$$h(x_{k}^{-},0) = \begin{bmatrix} h_{x}^{i,j} \\ h_{y}^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{m}^{i,j} \\ Y_{m}^{i,j} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} (C_{1}^{2} + C_{2}^{2} - C_{3}^{2} - C_{4}^{2})F_{x}^{i,j} + 2(C_{2}C_{3} + C_{1}C_{4})F_{y}^{i,j} + 2(C_{2}C_{4} - C_{1}C_{3})F_{z}^{i,j} + C_{5} \\ 2(C_{2}C_{3} - C_{1}C_{4})F_{x}^{i,j} + (C_{1}^{2} - C_{2}^{2} + C_{3}^{2} - C_{4}^{2})F_{y}^{i,j} + 2(C_{3}C_{4} - C_{1}C_{2})F_{z}^{i,j} + C_{6} \end{bmatrix}$$
(3-13)

여기서, *i*는 로봇이 이동한 단계를 나타내며, *j*(=1,2)는 로봇 말단부에 부착된 큐의 개수이다. 이렇게 정의된  $x_k^-$ 함수와 *h*함수를 이용하여 6개의 카메라 매개변수 를 추정하게 된다.

#### (1) 측정모델

측정모델의 보정에 대한 방정식은 크게 칼만 이득값  $K_k$ 와 각각의 카메라에 대한 매개변수  $x_k$  및 오차 공분산  $P_k$ 로 구성되어지며, Eq.(3-14) ~ Eq.(3-16)과 같이 주 어진다.

$$K_{k} = P_{k}^{-} H_{k}^{T} (H_{k} P_{k}^{-} H_{k}^{T} + V_{k} R_{k} V_{k}^{T})^{-1}$$
(3-14)

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - h(x_k^-, 0))$$
(3-15)

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \tag{3-16}$$

- 32 -





여기서, H<sub>k</sub>와 Z<sub>k</sub>는 각각 Eq.(3-17)와 Eq.(3-18)와 같이 정의 된다.

$$H_{k} = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^{i,j}}{\partial C_{1 \ 6}}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial C_{1}} \\ \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial C_{1}} \\ \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial C_{1}} \\ \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial C_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial C_{1}} \\ \end{bmatrix}$$
(3-17)

$$Z_{k} = \begin{bmatrix} X_{c}^{i,1} & Y_{c}^{i,1} & X_{c}^{i,2} & Y_{c}^{i,2} \end{bmatrix}^{T}$$
(3-18)

또한, Eq.(3-14)의 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분  $V_k R_k V_k^T$ 는 본 연구에서는 단위행렬을 사용하였으며, Eq.(3-15)의  $X_c^{i,j}$ 와  $Y_c^{i,j}$ 는 로봇이 이동하는 동안 각 단 계에서 j번째 큐에 대한 카메라에서 측정된 비젼데이터 x성분과 y성분을 나타낸다.

#### (2) 예측모델

공정모델의 예측 방정식은 노이즈에 의한 영향에 관련된 성분을 모두 단위행렬을 사용함으로써 매개변수 예측  $x_{k+1}^- = x_k$ 와 오차 공분산 값  $P_{k+1}^- = P_k$ 로 정의되어 다음 계산 단계의 초기값으로 정의 된다.





#### 3.3.2 로봇 관절값 모델

는 아래 Eq.(3-20)과 같이 정의한다.

3.3.1절에서 추정된 3대의 카메라 매개변수( $C_1 \sim C_6$ )는 Fig. 3-2에서 보여준 EKF 방법으로 로봇의 관절값( $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$ )을 추정하기 위해 사용되어진다. 로봇의 관절각 추정을 위해 비젼시스템 모델식 Eq.(3-3)을 변형하면 Eq.(3-19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{c_{t}}^{q,j} &= (C_{1}^{2} + C_{2}^{2} - C_{3}^{2} - C_{4}^{2})F_{x}^{q,j}(\theta_{i}) + 2(C_{2}C_{3} + C_{1}C_{4})F_{y}^{q,j}(\theta_{i}) \\ &+ 2(C_{2}C_{4} - C_{1}C_{3})F_{z}^{q,j}(\theta_{i}) + C_{5}^{q} \end{aligned}$$
(3-19)  
$$Y_{c_{t}}^{q,j} &= 2(C_{2}C_{3} - C_{1}C_{4})F_{x}^{q,j}(\theta_{i}) + (C_{1}^{2} - C_{2}^{2} + C_{3}^{2} - C_{4}^{2})F_{y}^{q,j}(\theta_{i}) \\ &+ 2(C_{3}C_{4} - C_{1}C_{2})F_{z}^{q,j}(\theta_{i}) + C_{6}^{q} \end{aligned}$$

여기서, q(=1~3)는 사용된 카메라 개수이고, X<sup>q,j</sup>와 Y<sup>q,j</sup>는 로봇이 이동하는 동 안 q번째 카메라에서 큐에 대한 2차원 비젼데이터를 나타내며,  $\theta_i(=\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 는 로봇을 구동하기 위해 추정되어야 할 알려지지 않은 로봇 관절값이다. 3.3.1절 EKF방법에서의 카메라 매개변수 추정과 같이 관절값을 추정하기 위해서는 Fig. 3-2에서 보여준 공정 및 측정모델에 대한 방정식 Eq.(3-12), Eq.(3-13)의 비선 형  $x_k^-$ 함수와 h함수를 정의하는 것이 필요하다. 그러므로, Eq.(3-12)에 주어진 공정 모델에 대한 함수  $x_k^-$ 는 로봇 관절값 모델에서

$$x_{k}^{-} = [\theta_{1} \ \theta_{2} \ d_{3} \ \theta_{4}]^{T} \tag{3-20}$$

또한, Eq.(3-13)의 측정 모델에 대한 비선형 함수 *h*는 아래 Eq.(3-21)과 같이 정 의한다.





$$h\left(x_{k},0\right) = \begin{bmatrix} h_{x}^{q,1} \\ h_{y}^{q,1} \\ h_{y}^{q,2} \\ h_{y}^{q,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{c_{l}}^{1,1} \\ Y_{c_{l}}^{1,2} \\ Y_{c_{l}}^{1,2} \\ \vdots \\ X_{c_{l}}^{3,1} \\ Y_{c_{l}}^{3,1} \\ Y_{c_{l}}^{3,2} \\ Y_{c_{l}}^{3,2} \\ Y_{c_{l}}^{3,2} \end{bmatrix}$$
(3-21)

(1) 측정모델

로봇 관절값 모델에서의 측정모델 보정 방정식 또한 칼만 이득값  $K_k$ ,사용한 카메 라의 매개변수  $x_k$  및 오차 공분산  $P_k$ 등 크게 3부분으로 구성되어지며, Eq.(3-22) ~ Eq.(3-24)와 같이 나타내어진다.

$$K_{k} = P_{k}^{-} H_{k}^{T} (H_{k} P_{k}^{-} H_{k}^{T} + V_{k} R_{k} V_{k}^{T})^{-1}$$
(3-22)

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - h(x_k^-, 0))$$
(3-23)

$$P_{k} = (1 - K_{k}H_{k})P_{k}^{-}$$
(3-24)

여기서, H<sub>k</sub>와 Z<sub>k</sub>는 각각 Eq.(3-25)와 Eq.(3-26)과 같이 정의 된다.

$$H_{k} = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^{i,j}}{\partial \theta_{i}}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial h_{x}^{i,1}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial h_{x}^{i,2}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial \theta_{4}} \\ \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial \theta_{1}} & \frac{\partial h_{y}^{i,1}}{\partial \theta_{2}} & \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial d_{3}} & \frac{\partial h_{y}^{i,2}}{\partial \theta_{4}} \end{bmatrix}$$

$$(3-25)$$





$$Z_{k} = \begin{bmatrix} X_{c}^{i,1} & Y_{c}^{i,1} & X_{c}^{i,2} & Y_{c}^{i,2} \end{bmatrix}^{T}$$
(3-26)

여기서,  $i(=1 \sim 3)$ 는 본 연구에 사용된 카메라 개수이며, 로봇 관절값 모델에서 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분  $V_k R_k V_k^T$ 는 본 연구에서는 균일한 가중치를 주 는 단위행렬로 정의하였다.

#### (2) 예측 모델

노이즈에 의한 영향에 관련된 성분을 모두 단위행렬을 사용하였으므로 공정모델의 예측 방정식에서 예측된 매개변수는  $x_{k+1}^- = x_k$ 와 오차 공분산값  $P_{k+1}^- = P_k$ 로 정의 되어 다음 단계의 초기 값으로 정의된다.





## 3.3.3 EKF방법의 초기값 추정



Fig. 3-3 Procedure of Monte-Carlo method



① step A

*l*-1개의 비젼데이터를 이용하여 일괄처리 기법으로 각 카메라에 대한 매개 변 수 *C<sub>k</sub><sup>q</sup>*를 추정을 하며, *C<sub>k</sub><sup>q</sup>*와 *l*번째 타겟에 대한 비젼데이터를 사용하여 로봇 관절 값 *θ<sub>k</sub>*를 추정하여 최종적으로 *C<sub>k</sub><sup>q</sup>*와 *θ<sub>k</sub>*를 저장한다. 이렇게 저장된 카메라 매개변 수와 로봇 관절값은 카메라에 대한 매개변수와 로봇 관절값의 오차공분산을 계산 하는데 사용한다.

② step B

*l*-5개까지의 비젼데이터를 가지고 일괄처리 기법으로 각 카메라에 대한 6개 매 개변수 *C<sub>j</sub><sup>q</sup>*를 추정하고 *C<sub>j</sub><sup>q</sup>* 와 A 단계에서 저장된 *C<sub>k</sub><sup>q</sup>*를 이용하여 *V<sub>c</sub><sup>q</sup>*를 계산한다.
③ step C

B 단계에서 추정된 각 카메라에 대한 매개변수 *C<sub>j</sub><sup>q</sup>*와 초기화 단계에서의 타겟인 *l*번째 비젼데이터를 사용하여 로봇 관절값 *θ<sub>j</sub>*를 추정한다. 이렇게 추정된 *θ<sub>j</sub>*와 A 단계에서 저장된 *θ<sub>k</sub>*를 사용하여 *V<sub>θ</sub>*를 계산한다. 이후, 비젼데이터 개수를 *l*-1개까 지 증가시켜가면서 B 단계와 C 단계를 반복 계산한다.

④ step D

이 단계에서는 B, C 단계를 반복하면서 계산된 최종  $V_c^q$ 와  $V_{\theta}$ 를 사용하여 카메 라에 매개변수에 대한 오차공분산  $P_c^q$ 와 로봇 관절값에 대한 오차공분산  $P_{\theta}$ 를 계 산하여 저장한다.

(5) step E

A 단계에서 저장된 각 카메라에 대한 매개 변수  $C_k^q$ , l번째 타겟에 대한 로봇 관 절값  $\theta_k$ , D 단계에서 계산하여 저장된 카메라 매개변수에 대한 오차공분산  $P_c^q$  및 로봇 관절값에 대한 오차공분산  $P_{\theta}$ 는 Fig. 4-4의 step 1단계 EKF 제어기법의 초 기값  $C_k^{q^-}, \theta_k^-, P_{\sigma}^{q^-}, P_{\theta}^-$ 으로 사용한다.



# 제 4 장 로봇 비젼알고리즘의 제어기법

## 4.1 N-R방법을 사용한 로봇 비젼 제어기법

### 4.1.1 데이터처리방법

반복적 계산을 하는 N-R방법의 제어기법은 Fig.4-1에 보여준 것 같이 로봇운동 제적을 초기화 단계와 로봇 이동단계로 구분하여 필요한 비젼데이터를 획득하였다. 여기서, 초기화 단계는 2개의 중요한 관점 때문에 설정하였다. 첫 번째 관점은 4.2 절에서 제안된 EKF방법을 사용한 제어기법은 초기화 단계가 필요한 특성을 갖기 때문에 같은 조건을 갖기 위해 설정하였으며, 두 번째 관점은 실질적인 로봇 이동 단계에서 처리속도를 향상시키기 위해 로봇 이동단계에서 필요한 초기값을 계산하 기 위해 설정하였다.

Fig. 4-1과 같이 초기화 단계에서 초기 타겟 m에 대한 카메라 매개변수와 관절 값을 계산하여, 로봇 이동 단계에서 실제 타겟 지점 n<sup>\*</sup>에 대한 결과 값을 추정하기 위해서 필요한 초기값으로 사용 하여 처리속도를 향상시키고자 한다.



Fig. 4-1 Data processing method in N-R method



### 4.1.2 제어기법

초기화 단계와 로봇 이동 단계로 구성된 운동궤적을 가지고 N-R방법을 사용한 로봇 비젼 제어기법을 개발하여 고정된 타겟에 얇은 막대 타겟 배치작업을 수행하 고자 한다. 이에 대한 제어기법을 5단계로 구분하여 Fig. 4-2에서 보여주며, 각 단 계 별 설명은 다음과 같다.



Fig. 4-2 Robot's vision control scheme of N-R method

Collection @ chosun

① Step 1

초기화 단계에서 설정된 운동 궤적을 따라 고정된 얇은막대 타겟을 향해 이동하는 동안 2개 큐에 대해 1 지점부터 m-1지점까지 3대의 카메라부터 획득된 비젼 데이터를 사용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다. 각 카메라에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득된 초기 타겟값을 사용하여 타겟에 대한 로봇 관절값을 추정한다. 여기서 계산된 각 카메라에 대한 매개변수와 로봇 관절값은 로봇 이동 단계의 초기값으로 설정한다.

② Step 2

로봇 이동 단계에서 설정된 운동 궤적을 따라 고정된 얇은막대 타겟을 향해 이동 하는 동안 2개 큐에 대해 1<sup>\*</sup> 지점부터 (n−1)<sup>\*</sup>지점까지 3대 카메라부터 비젼데이터 를 획득한다.

③ Step 3

(Step 1)에서 추정된 카메라 매개변수 초기값과 Step 2에서 각 카메라에서 획득된 비젼데이터를 매개변수 추정 모델에 적용하여 1.0e<sup>-3</sup>의 오차값을 만족하는 각 카 메라에 대한 매개변수를 추정한다.

④ Step 4

(Step 1)에서 추정된 로봇 관절값 초기값과 (Step 3)에서 추정된 각 카메라 매개 변수 및 고정타겟에 대한 비젼데이터를 로봇 관절값 추정 모델에 적용하여 타겟에 대하여 1.0e<sup>-3</sup>의 오차값을 만족하는 로봇 관절값을 추정한다.

5 Step 5

추정된 관절값과 실제 관절값을 비교하기 위해 오차값을 계산한다.



## 4.2 EKF방법을 사용한 로봇 비젼제어기법

### 4.2.1 데이터처리방법

순환적 계산방법을 EKF방법의 제어기법은 Fig. 4-3에서 보여주는 로봇의 초기 화 단계에서 초기 타겟 m에 대하여 Monte-Carlo방법을 사용하여 로봇 이동단계에 서 얇은 막대 배치 작업 시 필요한 초기값을 계산한다. 로봇 이동단계에서 첫 번째 로봇 이동 지점 1<sup>\*</sup>의 비견데이터와 초기화 단계에서 계산된 초기값을 이용하여 고 정된 타겟 n<sup>\*</sup>을 추정한다. 다음 두 번째 지점에서는 이전지점의 추정된 값을 초기 값으로 사용하여 고정된 타겟을 추정하고, 타겟 이전의 마지막 데이터까지 위 과정 을 되풀이하며 위치를 보정해 나간다.



Fig. 4-3 Data processing method in EKF method





### 4.2.2 제어기법

Fig.4-4는 얇은막대 배치 작업을 위한 순환적 계산방법을 갖는 EKF방법의 제어 기법을 보여준다. Fig.4-4에서 보여준 것 같이 제안된 제어기법은 로봇 이동단계에 서 고정된 타겟값을 효율적으로 추정하기 위해 카메라 매개변수 및 로봇 관절값에 대한 초기 상태 변수와 초기 오차 공분산을 효과적으로 계산하는 것이 매우 중요 하다. 이리하여 본 연구에서는 EKF방법에 필요한 초기값의 정확한 계산을 위해 초 기화 단계에서 Monte-Carlo 방법을 이용한다.



Fig. 4-4 Robot's vision control scheme of EKF method

Collection @ chosun



① Step 1

초기화 단계에서 3.3.3절의 Fig.3-3에서 설명된 Monte-Carlo방법을 이용하여 카 메라 매개변수와 로봇 관절값에 대한 초기값 및 오차 공분산을 계산한다.

2 Step 2

(Step 1)에서 계산된 초기값들을 EKF방법을 적용시킨 매개변수 추정모델에 대입 하여 로봇 이동단계의 *j*번째 이동지점에 대한 각 카메라 매개변수 및 오차공분산 을 추정한다.

③ Step 3

(Step 2)에서 각 카메라에 대한 추정된 매개변수 및 오차공분산값과 타겟의 비젼 데이터를 로봇 관절값 추정모델에 대입하여 타겟에 대한 로봇 관절값 및 오차공분 산을 추정한다.

④ Step 4

(Step 2)와 (Step 3)에서 추정된 각각의 카메라에 대한 매개변수 및 오차공분산 과 타겟에 대한 로봇 관절값 및 오차 공분산을 예측모델을 통해 로봇 운동궤적의 다음 지점의 초기값으로 사용된다. 예측모델에 단위행렬을 사용하였기 때문에 추정 된 값들 그대로 사용된다. 이와 같이 (Step 2)~(Step 4)는 마지막 로봇 이동지점 인 (*n*−1)<sup>\*</sup>까지 반복되어 계산되어진다.

(5) Step 5

다음 이동 지점에 대하여 (Step 2) ~ (Step 4)를 반복하여 최종 로봇 이동지점 위치값까지 추정하며, 실제 목표지점에 대해 위치값과 비교하여 그 오차를 나타낸 다.





# 제 5 장 실 험

## 5.1 실험장치 구성

본 연구에 사용된 실험장치는 Photo 5-1과 Fig. 5-1과 같이 3대의 카메라를 사용하는 비젼 시스템, 삼성 SM7 SCARA타입 4축 로봇을 사용하는 로봇 시스템, 윈도우 기반 PC 시스템 등 3개 시스템으로 구성 하였다. 본 실험에서 사용된 3개 시스템에 대한 자세한 사양을 Table 5-1에 보여주고 있다.



Photo. 5-1 Experimental set-up



Fig. 5-1 Schematic diagram of system configuration





Table 0 I System specification	Table	5-1	System	specification
--------------------------------	-------	-----	--------	---------------

System		Specification
		<ul> <li>Matrox Meteor-II/Multi-Channel :</li> </ul>
		<ul> <li>sampling rates up to 30MHz</li> </ul>
	Frame grabber	<ul> <li>32-bit/33MHz PCI bus-master</li> </ul>
	Traine grabber	• three 256×8-bit LUTs
		<ul> <li>programmed using ActiveMIL with Microsoft Visual C++</li> </ul>
Vision system		• Sony XC-ES51 Monochrome CCD :
		• Size: 1/2" CCD
	Camera	<ul> <li>Resolution: 768×494</li> </ul>
		Frame Rate: 30fps
		<ul> <li>Avenir tv zoom lens</li> </ul>
	Lens	• 12.6-75mm
		• f1.8
		Samsung FARA robot SM7
	SCARA robot	• 4axis
		<ul> <li>Payload: 2.5 kgf</li> </ul>
		Absolute encoder
		Repeat accuracy: ±0.026mm
	Servo drive	<ul> <li>FARA CSD3 servo drive</li> </ul>
		PWM control using ASIPM
Robot system		<ul> <li>Speed Control Range: 1:5000</li> </ul>
		Frequency Banwidth: 550Hz
		Command voltage ±10VDC(16Bit A/D conversion)
		<ul> <li>MMC-BDPV41</li> </ul>
		CPU: TMS320C3X
	Motion controller	• Analog output: ±10V 16-bit Resolution
		• Operating Range: 32bit, ±2147483647
		<ul> <li>Acc/Dec setting: 0~25000(0~100 sec)</li> </ul>
		• PC
PC system	Computer	CPU: Intel pentium4 2.8GHz
i C system		<ul> <li>Memory: 512MB</li> </ul>
		Operating System: Windows xp





### 5.2 시험모형

카메라를 통하여 획득해야 할 비젼데이터의 양을 최소화시켜 시스템 처리 속도를 향상시키기 위하여 물체 형상 전체를 사용하지 않고 여러 가지 큐를 이용하여 다 양한 물체를 형상화 할 수 있도록 Fig. 5-2와 같이 제작하였다. 본 연구에서는 얇 은 막대로 형상화하기 위하여 1번과 2번 큐를 이용하여 실험을 진행하였으며, 2개 큐의 좌표계{4}에 대한 위치값은 Table 5-2와 같다.



Fig. 5-2 Test model used for the experiment

Table 5-2 Position values of 2 cues used for experiment

Cue	$P_x^i$	$P_y^i$	$P_z^i$
1	<b>15</b> mm	<b>-18</b> mm	-103 mm
2	<b>-15</b> mm	<b>18</b> mm	<b>-103</b> mm





## 5.3 실험방법

Fig. 5-3은 본 연구에 사용된 임의의 로봇 운동궤적을 보여준다. 제안된 2개의 로봇 비젼제어기법을 얇은막대 배치 실험에 적용하기 위한 로봇 운동궤적은 10개 의 초기 구동 단계와 20개의 로봇 이동 단계로 설정 하였다. 본 실험은 고정 타겟 에 2개큐를 갖는 얇은막대 배치실험을 수행하였으므로 로봇 끝점 P의 위치 뿐만 아니라 방위까지 고려하였다. 정확성이 향상된 실험결과를 얻기 위해 선행된 두 개 의 연구결과<sup>(38,39)</sup>에 의해 로봇으로부터 2.0m~2.5m거리에 3대의 카메라를 작업방향 에 집중되도록 배치하였다.



Fig. 5-3 Robot's trajectory



## 제 6 장 실험 결과

# 6.1 비젼시스템 모델 적합성

N-R방법과 EKF방법을 적용한 얇은막대 고정타겟 배치작업을 위해 로봇이 이동 하는 각 지점에서의 추정된 카메라 매개변수를 이용한 비젼시스템 모델값과 각 지 점에서 실제 획득된 비젼 데이터를 비교하여 비젼시스템 모델의 적합성을 보이고 자 한다. 2.2절에서 이미 언급하였듯이 비젼시스템 모델은 6개의 불확실한 카메라 매개변수로 나타내고 있으며, 이 매개변수는 로봇에 대한 카메라의 위치, 자세 및 초점거리의 불확실성을 설명하고 있다.

3대 카메라 각각에 대한 *i*번째 지점에서 실제 비젼데이터와 비젼시스템 모델의 추정값 사이의 오차는 Eq.(6-1)과 같이 r.m.s<sup>(43)</sup>를 정의하였으며, 평균 오차  $e_{avg}$ 를 Eq.(6-2)와 같이 사용하였다.

$$e_{r.m.s}^{i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j^{*}} \left\{ (e_{x}^{i,j})^{2} + (e_{y}^{i,j})^{2} \right\}}{2 \times j^{*}}}$$
(6-1)

$$e_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_{r\cdot m\cdot s}^{i}}{n} \tag{6-2}$$

여기서,  $j^*$ 는 큐의 개수( $j^*=2$ ), n은 로봇 이동 단계의 이동 지점수(n=20)를 나타 내며,  $e_x^{i,j}, e_y^{i,j}$ 는 i번째 이동 지점에서 j번째 cue에 대한 실제 비젼데이터와 비젼 시스템 모델의 추정값 사이의 x축과 y축 오차값이다.



### 6.1.1 N-R방법 제어기법 결과

반복적 계산을 하는 N-R방법의 초기화 단계는 4.2절에서 제안된 EKF방법이 초 기화 단계가 필요한 특성을 갖기 때문에 같은 조건을 갖기 위해 설정하였으며, 또 한, 로봇 이동단계에서 처리속도를 향상시키기 위해 설정하였다.

#### (1) 카메라 1

카메라 1에 대해서 추정된 C의 초기값은 Table 6-1과 같으며, Table 6-1의 초기 C값을 가지고 로봇 이동단계에서 추정된 카메라 매개변수는 Table 6-2에서 보여준 다. 또한, Eq.(2-20)에 적용하여 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실 제 비젼데이터를 비교한 결과를 Table 6-3과 Fig. 6-1에서 보여주며, Eq.(6-1)를 통해 각 카메라의 로봇 이동단계의 각 지점에서 계산된 r.m.s 오차값을 Fig. 6-2에 서 보여주고 있다. Table 6-1의 초기 카메라 매개변수와 타겟에 대한 카메라 매개 변수인 Table 6-2의 값을 비교하면  $C_1 \sim C_4$ 는 거의 변화가 없음을 보인다. 이는 카메라의 방위와 초점거리의 변화가 적었음을 나타내고 있다. 또한,  $C_5$ ,  $C_6$ 중에  $C_5$ 의 변화량이 상대적으로 많음을 보이고 있는데 이는 카메라 1 화면 내에서 로봇 말단부의 움직임이 x축으로 많이 움직였다는 것을 나타내고 있다.

N-R방법을 사용한 카메라 1에서의 비젼시스템 모델 추정값의 평균 오차는 Table 6-3과 같이 0.1514(pixel)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델이 로봇비젼 제어기법에 사용되기에 충분히 적합하다는 것을 보여주고 있다.

Table 6-1 The estimated 6 parameters of camera 1 in initial stage, based on the N-R method

$C_{\#}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Camera 1	0.722677	0.260449	0.785957	1.027803	621.669434	684.228149

Table 6-2 The estimated 6 parameters of camera 1 in robot movement stage, based on the N-R method

$C_{\#}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Camera 1	0.754746	0.304084	0.767480	1.029749	527.699951	685.336304





Table 6-3 For camera 1, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

Robot		Actual		Estimated		Error		
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	RMS
1	1	172.000	329.500	171.985	329.582	0.016	-0.082	
	2	261.500	374.375	261.248	374.416	0.252	-0.041	0.1344
	1	176.000	329.500	175.973	329.416	0.027	0.084	
2	2	265.500	374.250	265.162	374.282	0.338	-0.032	0.1756
2	1	180.000	329.300	179.962	329.254	0.038	0.046	0.01.41
3	2	269.500	374.125	269.077	374.153	0.423	-0.028	0.2141
4	1	184.000	329.100	183.954	329.097	0.046	0.003	0.0407
4	2	273.000	374.100	272.993	374.029	0.007	0.071	0.0427
_	1	188.000	329.000	187.946	328.945	0.054	0.055	0.0500
5	2	277.000	373.900	276.911	373.908	0.089	-0.008	0.0590
	1	191.500	328.750	191.940	328.797	-0.440	-0.047	0.0416
6	2	281.000	373.700	280.830	373.793	0.170	-0.093	0.2416
7	1	195.500	328.625	195.936	328.654	-0.436	-0.029	0.2516
	2	285.000	373.700	284.750	373.682	0.250	0.018	
_	1	199.500	328.500	199.932	328.515	-0.432	-0.015	0.2358
8	2	288.500	373.500	288.672	373.576	-0.172	-0.075	
0	1	203.500	328.375	203.930	328.381	-0.430	-0.006	
9	2	292.500	373.500	292.595	373.474	-0.095	0.026	0.2208
10	1	208.000	328.400	207.930	328.252	0.070	0.148	0.0925
10	2	296.500	373.375	296.518	373.376	-0.018	-0.001	0.0825
11	1	212.000	328.100	211.930	328.127	0.070	-0.027	0.0400
11	2	300.500	373.250	300.443	373.284	0.057	-0.034	0.0499
12	1	216.000	328.000	215.932	328.007	0.068	-0.007	0.1070
12	2	304.000	373.200	304.369	373.195	-0.369	0.005	0.1878
12	1	220.000	327.900	219.935	327.892	0.065	0.008	0.1590
13	2	308.000	373.200	308.296	373.112	-0.296	0.088	0.1580
14	1	224.000	327.800	223.940	327.781	0.060	0.019	0.1014
14	2	312.000	373.100	312.225	373.033	-0.225	0.067	0.1214



((	Con	tinı	(b91

	1	228.000	327.600	227.945	327.675	0.055	-0.075	
15	2	316.000	373.000	316.154	372.958	-0.154	0.042	0.0922
	1	232.000	327.500	231.952	327.573	0.048	-0.073	
16	2	320.000	372.900	320.084	372.888	-0.084	0.012	0.0611
17	1	236.000	327.500	235.959	327.476	0.041	0.024	
	2	324.000	372.900	324.015	372.822	-0.015	0.078	0.0460
18	1	240.500	327.500	239.968	327.384	0.532	0.116	
	2	328.000	372.700	327.947	372.761	0.053	-0.061	0.2753
10	1	244.000	327.200	243.978	327.296	0.022	-0.096	
19	2	332.000	372.700	331.880	372.705	0.120	-0.005	0.0776
20	1	248.500	327.167	247.989	327.213	0.511	-0.046	0.0010
	2	335.500	372.625	335.814	372.653	-0.314	-0.028	0.3013
Average error								0.1514



Fig. 6-1 For camera 1, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)



**CHOSUN UNIVERSI** 



Fig. 6-2 For camera 1, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

#### (2) 카메라 2

N-R 방법 사용 시 3대의 카메라 중 카메라 2에 대해서 얇은막대 배치작업을 위 한 고정타겟 추정을 위해 사용된 초기화 단계에서 로봇 이동단계의 데이터 처리시 간을 줄이기 위해서 추정된 C의 초기값을 Table 6-4에 나타내었으며, 이 초기 C값 을 가지고 로봇 이동단계에서 추정된 타겟에 대한 카메라 매개변수는 Table 6-5와 같다. 이 매개변수를 이용하여 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실 제 비젼데이터를 비교한 결과를 Table 6-6과 Fig. 6-3에서 나타내었으며, Eq. (6-1)를 통해 각 카메라의 로봇 이동단계의 각 지점에서 계산된 r.m.s 오차값을 Fig. 6-4와 같다.

카메라 2에서의 Table 6-4의 초기 카메라 매개변수와 타겟에 대한 카메라 매개 변수인 Table 6-5의 값을 비교하면 카메라 1의 경우와 비슷하게  $C_1 \sim C_4$ 의 변화량 이 적다. 이 역시 카메라 1의 경우와 같이 카메라 2의 방위와 초점거리의 변화가 적었음을 나타내고 있다. 카메라와 로봇사이 거리의 불확실성을 설명하는  $C_5$ ,  $C_6$ 를 보면  $C_5$ 가  $C_6$ 보다 변화량이 많음을 보이고 있으며, 이는 카메라 2 화면 내에서 로 봇 말단부의 움직임이 y축 보단 x축으로 많이 움직였다는 것을 나타내고 있다.  $C_5$ 




와 C<sub>6</sub>의 움직임 특성은 Fig. 6-3에서도 확인 가능하다.

두 번째 카메라에서의 비젼시스템 모델 추정값이 평균 오차는 Table 6-6과 같이 0.1366(*pixel*)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델이 로봇비젼 제어기법에 사용되 기에 충분히 적합함을 보여주고 있다.

Table 6-4 The estimated 6 parameters of camera 2 in initial stage, based on the N-R method

$C_{\#}$	$C_1$ $C_2$ $C_3$		$C_4$	$C_4$ $C_5$		
Camera 2	0.559816	0.174101	0.695954	0.974892	788.226868	692.636780

Table 6-5 The estimated 6 parameters of camera 2 in robot movement stage, based on the N-R method

$C_{\#}$	$C_1$ $C_2$ $C_3$		$C_4$	$C_4$ $C_5$		
Camera 2	0.586184	0.209680	0.684622	0.984977	735.400269	700.507385

Table 6-6 For camera 2, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

Robot		Actual		Estimated		Error		
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	r.m.s
	1	260.500	375.000	260.142	374.958	0.358	0.042	
1	2	338.000	405.571	338.080	405.750	-0.080	-0.178	0.2048
	1	263.500	374.500	263.163	374.498	0.337	0.002	
2	2	341.000	405.286	341.058	405.326	-0.058	-0.041	0.1723
	1	266.500	374.000	266.185	374.042	0.315	-0.042	
3	2	344.000	404.857	344.038	404.907	-0.038	-0.050	0.1618
	1	269.500	373.583	269.211	373.590	0.289	-0.007	
4	2	347.000	404.500	347.020	404.492	-0.020	0.008	0.1451



_	1	272.000	373.143	272.239	373.143	-0.239	0.000	0.110.4
5	2	350.000	404.071	350.005	404.081	-0.005	-0.009	0.1194
c	1	275.000	372.857	275.269	372.699	-0.269	0.158	0.1.670
6	2	353.000	403.786	352.992	403.673	0.008	0.113	0.1659
_	1	278.000	372.286	278.302	372.259	-0.302	0.027	
7	2	356.000	403.214	355.982	403.270	0.018	-0.055	0.1542
	1	281.000	371.857	281.337	371.823	-0.337	0.034	
8	2	359.000	402.929	358.973	402.870	0.027	0.059	0.1722
_	1	284.000	371.286	284.374	371.391	-0.374	-0.106	
9	2	362.000	402.571	361.968	402.474	0.032	0.097	0.2011
	1	287.000	370.929	287.414	370.963	-0.414	-0.035	
10	2	365.000	402.000	364.964	402.083	0.036	-0.083	0.2127
	1	290.500	370.583	290.457	370.539	0.043	0.044	
11	2	368.000	401.643	367.963	401.695	0.037	-0.052	0.0445
12 1 2 1	1	293.500	370.167	293.501	370.120	-0.001	0.047	
	2	371.000	401.214	370.964	401.311	0.036	-0.097	0.0569
	1	296.500	369.833	296.549	369.704	-0.049	0.130	
13	2	374.000	401.000	373.967	400.931	0.033	0.069	- 0.0791
	1	299.500	369.250	299.598	369.292	-0.098	-0.042	0.0044
14	2	377.000	400.714	376.972	400.555	0.028	0.159	0.0966
	1	303.000	368.929	302.650	368.884	0.350	0.045	
15	2	380.000	400.143	379.979	400.183	0.021	-0.041	0.1780
1.6	1	305.500	368.500	305.704	368.480	-0.204	0.020	0.11.10
16	2	383.000	399.714	382.989	399.815	0.011	-0.101	0.1143
17	1	309.000	368.000	308.760	368.080	0.240	-0.080	0.1000
17	2	386.000	399.500	386.001	399.451	-0.001	0.049	0.1288
10	1	312.000	367.786	311.818	367.684	0.182	0.102	
18	2	389.000	399.214	389.015	399.091	-0.015	0.123	0.1213
10	1	315.000	367.143	314.879	367.292	0.121	-0.149	0.1002
19	2	392.000	398.786	392.031	398.735	-0.031	0.051	0.1003
•	1	318.000	366.714	317.942	366.903	0.058	-0.189	0.100-
20	2	395.000	398.357	395.049	398.382	-0.049	-0.025	0.1027
Average error 0.1								



조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY





Fig. 6-3 For camera 2, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)



Fig. 6-4 For camera 2, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)



#### (3) 카메라 3

N-R 방법 사용 시 카메라 3에 대한 고정된 얇은막대 배치작업을 위해 사용된 초기화 단계에서 로봇 이동단계의 데이터 처리시간을 줄이기 위해서 추정된 C의 초기값은 Table 6-7에 나타내었으며, 이 초기 C값을 가지고 로봇 이동단계에서 추 정된 타겟에 대한 C 매개변수는 Table 6-8과 같다. 이 매개변수를 이용하여 계산 된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비젼데이터를 비교한 결과를 Table 6-9와 Fig. 6-5에서 나타내었으며, Eq.(6-1)를 통해 각 카메라의 로봇 이동 단계의 각 지점에서 계산된 r.m.s 오차값을 Fig. 6-6와 같다.

세 번째 카메라에서의 초기 카메라 매개변수와 타겟에 대한 카메라 매개변수인 Table 6-7과 Table 6-5의 값을 비교하면 카메라 2의 경우와 비슷하다. 카메라 2 의 경우와 같이 카메라 3의 방위와 초점거리의 변화가 적었음을 나타내며, 카메라 3 화면 내에서 로봇 말단부의 움직임이 *x*축과 *y*축으로의 변화량을 알 수 있다. 이 러한 *C*<sub>5</sub>와 *C*<sub>6</sub>의 움직임 특성은 Fig. 6-5에서도 확인 가능하다.

N-R 방법에서 카메라 3에서의 비젼시스템 모델 추정값의 평균오차는 Table 6-9 과 같이 0.2576(*pixel*)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델이 로봇비젼 제어기법에 적용하기에 충분히 적합하다는 것을 보여주고 있다.

Table 6-7 The estimated 6 parameters of camera 3 in initial stage, based on the N-R method(unit: pixel)

$C_{\#}$	$C_1$ $C_2$ $C_3$		$C_3$	$C_4$	$C_5$ $C_6$	
Camera 3	0.451753	0.080631	0.743282	1.039226	953.611816	649.563110

Table 6-8 The estimated 6 parameters of camera 3 in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

$C_{\#}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Camera 3	0.476856	0.105613	0.725722	1.055405	916.831909	675.841492





Table 6-9 For camera 3, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

Robot	~	Actual		Estin	nated	En	ror	DMC
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	RMS
	1	157.500	335.833	156.587	335.769	0.913	0.064	
1	2	242.000	361.600	242.141	361.895	-0.141	-0.295	0.4860
	1	159.500	334.917	159.346	335.012	0.154	-0.095	0.2174
2	2	244.500	361.083	244.883	361.182	-0.383	-0.099	
_	1	162.500	334.333	162.110	334.258	0.391	0.075	
3	2	247.500	360.417	247.629	360.473	-0.129	-0.057	0.2109
	1	165.500	333.500	164.878	333.509	0.622	-0.009	0.3172
4	2	250.500	359.750	250.379	359.769	0.121	-0.019	
_	1	167.500	332.750	167.650	332.764	-0.150	-0.014	0.3258
5	2	252.500	359.083	253.134	359.069	-0.634	0.015	
	1	170.500	332.167	170.427	332.023	0.073	0.144	0.2215
6	2	255.500	358.500	255.892	358.372	-0.392	0.128	
7	1	173.500	331.417	173.208	331.286	0.292	0.130	
	2	258.500	357.583	258.656	357.680	-0.156	-0.097	0.1843
	1	176.000	330.600	175.994	330.554	0.006	0.046	
8	2	261.000	357.000	261.423	356.992	-0.423	0.008	0.2127
	1	178.500	329.750	178.783	329.825	-0.283	-0.075	
9	2	264.000	356.400	264.194	356.309	-0.194	0.091	0.1817
10	1	181.500	329.167	181.577	329.101	-0.077	0.066	
10	2	266.500	355.583	266.970	355.629	-0.470	-0.046	0.2413
	1	184.500	328.500	184.376	328.381	0.124	0.119	0.1.50
	2	269.500	354.917	269.749	354.953	-0.249	-0.037	0.1526
10	1	187.000	327.700	187.179	327.665	-0.179	0.035	0.00.00
12	2	272.500	354.333	272.533	354.282	-0.033	0.051	0.0960
	1	189.500	326.917	189.985	326.953	-0.485	-0.037	0.2598
13	2	275.500	353.583	275.321	353.615	0.179	-0.031	
14	1	192.500	326.333	192.797	326.246	-0.297	0.088	0.0.100
	2	278.500	353.000	278.113	352.952	0.387	0.048	0.2488



10.1	: 1)	
CONT	inned	l
(0011)	maccoa)	

1.5	1	195.500	325.583	195.612	325.542	-0.112	0.041	0.0046	
15	2	281.500	352.583	280.909	352.292	0.591	0.291	0.3346	
16	1	198.500	324.833	198.432	324.843	0.068	-0.010	0.0050	
16	2	284.500	351.667	283.710	351.638	0.790	0.029	0.3970	
17	1	201.500	324.000	201.255	324.148	0.245	-0.148	0.1454	
17	2	286.500	350.917	286.514	350.987	-0.014	-0.070	0.1474	
	1	203.500	323.417	204.083	323.457	-0.583	-0.041	0 2055	
18	2	289.500	350.333	289.322	350.340	0.178	-0.007	0.3055	
10	1	206.500	322.583	206.915	322.770	-0.415	-0.187	0.0004	
19	2	292.500	349.667	292.134	349.698	0.366	-0.031	0.2924	
20	1	209.500	321.917	209.751	322.088	-0.251	-0.171	0.0107	
20	2	295.500	349.167	294.950	349.059	0.550	0.107	0.3186	
Average error									



Fig. 6-5 For camera 3, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)



소입내의 CHOSUN UNIVERSIT



Fig. 6-6 For camera 3, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the N-R method(unit: pixel)

### 6.1.2 EKF방법 제어기법 결과

순환기법인 EKF방법 사용 시 적절한 초기값 선정은 로봇제어의 정확성을 결정 하는데 있어서 매우 중요한 요소이므로, 본 연구는 초기화 단계를 설정하여 EKF방 법에서 필요한 카메라 매개변수와 로봇 관절값 각각에 대한 초기값 및 오차공분산 의 초기값을 Monte-Carlo방법을 사용하여 계산하고자한다. 특히, 제시된 제어기법 에서 중요한 비젼시스템 모델은  $C_1 \sim C_4$ 의 내부 매개변수와  $C_5$ 와  $C_6$ 의 카메라 외 부 매개변수 등 카메라 매개변수 6개를 포함하고 있다. 제시된 Monte-Carlo방법이 효율적으로 구성된다면, 6개 카메라 매개변수는 내부 매개변수와 외부 매개변수로 구분되어 독립적으로 로봇이 이동에 따라 이중선형적(bilinear)형태로 변화할 것이 다.

이리하여 본 절에서는 초기화단계에서 3개 카메라 각각에 대해 Monte-Carlo방법 에 의해 계산된 6개 매개변수 변화과정을 통한 Monte-Carlo방법의 적합성과 이에 따른 비젼시스템 모델의 적합성을 조사하고자 한다.

#### (1) 카메라 1

카메라 1에 대한 초기 카메라 매개변수는 3.3.3절의 Fig. 3-3에서 나타낸 Monte-Carlo방법을 사용하여 Table 6-10에 보여주며, 이 초기 카메라 매개변수를 이용한 로봇이 이동하는 각 지점에서의 추정된 6개 카메라 매개변수 변화는 Fig. 6-7 ~ Fig. 6-12에서 보여준다.

첫 번째, 추정된 카메라 매개변수의 흐름을 조사하고자 한다. 먼저 내부 매개변 수  $C_1$ 은 초기값 0.722677을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방 법을 사용하여 추정된  $C_1$ 값은 0.720974로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하 여 로봇 이동단계 전체에서 0.720559~0.724563의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으며,  $C_2$ 은 초기값 0.260449을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_2$ 값은 0.259547로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.251280~0.259547의 범위로 부드러운 변화를 보 이고 있다. 또한, 매개변수  $C_3$ 는 초기값 0.785957을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점 으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_3$ 값은 0.784086로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.781607~0.787054의 범위로 부



드러운 변화를 보이고 있으며, 매개변수  $C_4$ 는 초기값 1.027803을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_4$ 값은 1.025113로서 때 우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 1.015249~1.025113 의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있다. 그리고 카메라 외부 매개변수인  $C_5$ 는 초 기값 621.669373을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_5$ 값은 620.171265로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 620.171265로 변화가 거의 없으며,  $C_6$ 는 초기값 684.228149을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_6$ 값은 682.586426으로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 620.171265로 변화가 거의 없으며,  $C_1 \sim C_4$ 와 외부 매개변 수  $C_5$ ,  $C_6$  모두 발산하지 않고 이중선형적인 흐름을 보이고 있으며, 초기값 계산에 사용된 Monte-Carlo방법의 적합성을 증명하고 있다. 또한, 바로 이전 단계의 데이 터를 초기값으로 사용하는 EKF방법에서는 이전 단계의 로봇의 움직임에 비하여 현 단계의 로봇의 움직임이 적어 각 단계에서의 카메라 매개변수의 변화량 또한 적음을 알 수 있다.

두 번째, 로봇의 각 이동지점에서 추정된 카메라 매개변수를 사용한 비젼시스템 모델의 적합성을 조사하고자 한다. Fig. 6-7 ~ Fig. 6-12에서 보여준 매개변수를 Eq.(2-20)에 적용하여 계산된 비젼 시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비젼 데이터를 비교한 결과를 Table 6-11과 Fig. 6-13에서 보여주고 있으며, Eq.(6-1)을 통해 계산된 각 카메라의 로봇 이동단계의 각 지점의 r.m.s 오차값은 Fig. 6-14에 서 보여주고 있다. Eq.(6-2)를 통해 계산된 카메라 1의 평균 오차값은 Table 6-11 과 같이 0.0110(*pixel*)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델의 적합성을 충분히 보 여준다.

Table 6-10The estimated initial 6 parameters of camera 1 using theMonte-Carlo method for EKF method in initial stage

$C_{\#}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Camera 1	0.722677	0.260449	0.785957	1.027803	621.669373	684.228149

- 62 -







Fig. 6–7 The estimated  $c_1$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-8 The estimated  $c_2$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-9 The estimated  $c_3$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method







Fig. 6-10 The estimated  $c_4$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–11 The estimated  $c_5$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–12 The estimated  $c_6$  parameter of camera 1 in each point of robot movement stage, based on the EKF method





Table 6-11 For camera 1, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)

Robot		Actual	(pixel)	Estimate	Estimated(pixel)		pixel)	RMS
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	(pixel)
_	1	172.000	329.500	171.881	329.723	0.119	-0.223	
1	2	261.500	374.375	261.615	374.133	-0.115	0.242	0.1840
	1	176.000	329.500	175.998	329.499	0.002	0.001	
2	2	265.500	374.250	265.498	374.249	0.002	0.001	0.0015
	1	180.000	329.300	180.000	329.300	0.000	0.000	
3	2	269.500	374.125	269.500	374.125	0.000	0.000	0.0001
	1	184.000	329.100	184.003	329.097	-0.003	0.003	0.0030
4	2	273.000	374.100	273.003	374.097	-0.003	0.003	
-	1	188.000	329.000	188.000	329.000	0.000	0.000	0.0005
5	2	277.000	373.900	277.000	373.899	0.000	0.001	
	1	191.500	328.750	191.506	328.749	-0.006	0.001	0.0042
6	2	281.000	373.700	281.006	373.699	-0.006	0.001	
7	1	195.500	328.625	195.500	328.625	0.000	0.000	0.0000
	2	285.000	373.700	285.000	373.700	0.000	0.000	0.0002
0	1	199.500	328.500	199.504	328.502	-0.004	-0.002	0.0000
8	2	288.500	373.500	288.504	373.502	-0.004	-0.002	0.0030
	1	203.500	328.375	203.500	328.375	0.000	0.000	0.0000
9	2	292.500	373.500	292.500	373.500	0.000	0.000	0.0002
10	1	208.000	328.400	208.002	328.402	-0.001	-0.002	0.0000
10	2	296.500	373.375	296.502	373.378	-0.002	-0.003	0.0022
	1	212.000	328.100	212.000	328.100	0.000	0.000	0.0000
11	2	300.500	373.250	300.500	373.250	0.000	0.000	0.0003
10	1	216.000	328.000	216.003	327.999	-0.003	0.001	0.000
12	2	304.000	373.200	304.004	373.199	-0.004	0.001	0.0026
12	1	220.000	327.900	220.000	327.900	0.000	0.000	0.0002
13	2	308.000	373.200	308.000	373.200	0.000	0.000	
	1	224.000	327.800	224.000	327.800	0.000	0.000	0.0000
14	2	312.000	373.100	312.000	373.100	0.000	0.000	0.0002



(cor	tinu	ed)
(COI.	uniu	cu)

1.5	1	228.000	327.600	228.000	327.600	0.000	0.000	0.0002	
15	2	316.000	373.000	316.000	373.000	0.000	0.000	0.0002	
1.6	1	232.000	327.500	232.000	327.500	0.000	0.000		
16	2	320.000	372.900	320.000	372.900	0.000	0.000	0.0002	
1.5	1	236.000	327.500	236.000	327.500	0.000	0.000	0.0001	
17	2	324.000	372.900	324.000	372.900	0.000	0.000	0.0001	
10	1	240.500	327.500	240.501	327.503	-0.001	-0.003	0.000	
18	2	328.000	372.700	328.001	372.704	-0.001	-0.004	0.0026	
10	1	244.000	327.200	244.004	327.204	-0.004	-0.004		
19	2	332.000	372.700	332.005	372.705	-0.005	-0.005	0.0046	
•	1	248.500	327.167	248.513	327.169	-0.013	-0.002	0.01.01	
20	2	335.500	372.625	335.515	372.627	-0.015	-0.002	0.0101	
			Ave	rage error				0.0110	



Fig. 6-13 For camera 1, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)





Fig. 6-14 For camera 1, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)

#### (2) 카메라 2

카메라 2에 대한 초기 카메라 매개변수 역시 3.3.3절의 Fig. 3-3에서 나타낸 Monte-Carlo방법을 사용하여 Table 6-12에서 보여주며, 이 초기 C 매개변수를 이용한 로봇이 이동하는 각 지점에서의 추정된 6개 카메라 매개변수 변화는 Fig. 6-15 ~ Fig. 6-20에서 보여준다.

첫 번째, 추정된 카메라 매개변수의 흐름을 조사하고자 한다. 먼저 내부 매개변 수  $C_1$ 은 초기값 0.559816을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방 법을 사용하여 추정된  $C_1$ 값은 0.562071로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하 여 로봇 이동단계 전체에서 0.562071~0.567222의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으며,  $C_2$ 은 초기값 0.174101을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_2$ 값은 0.174376로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.174376~0.181000의 범위로 부드러운 변화를 보 이고 있다. 또한, 매개변수  $C_3$ 는 초기값 0.695954을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점 으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_3$ 값은 0.697999로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.697618~0.702027의 범위로 부



드러운 변화를 보이고 있으며, 매개변수  $C_4$ 는 초기값 0.974892을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_4$ 값은 1.025113로서 때 우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.977509~0.983611 의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있다. 그리고 카메라 외부 매개변수인  $C_5$ 는 초 기값 788.226868을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_5$ 값은 790.776428로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 790.774109~790.776428의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으며,  $C_6$ 는 초기값 692.636780을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF 방법을 사용하여 추정된  $C_6$ 값은 694.876831로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 694.875427~694.876831의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으며, 로기값 계산에 사용된 Monte-Carlo방법 의 적합성을 증명하고 있다. 또한, 순환방법을 사용하는 EKF의 특성으로써 이전 단계에서의 카메라 위치, 자세 및 초점거리가 현 단계의 것과 비교하여 변화량이 적음을 나타내고 있다.

두 번째, 로봇의 각 이동지점에서 추정된 카메라 매개변수를 사용한 비젼시스템 모델의 적합성을 조사하고자 한다. Fig. 6-15 ~ Fig. 6-20에서 보여준 매개변수를 Eq.(2-20)에 적용하여 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비젼데 이터를 비교한 결과를 Table 6-13과 Fig. 6-21에서 보여주고 있으며, Eq.(6-1)을 통해 계산된 카메라의 로봇 이동단계의 각 지점의 r.m.s 오차값은 Fig. 6-22에서 보여주고 있다. 또한, Eq.(6-2)를 통해 계산된 카메라 2의 평균 오차값은 Table 6-13과 같이 0.0054(*pixel*)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델의 적합성을 충분히 보여준다.

Table 6-12The estimated initial 6 parameters of camera 2 using theMonte-Carlo method for EKF method in initial stage

$C_{\#}$	$C_1$ $C_2$		$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Camera 2	0.559816	0.174101	0.695954	0.974892	788.226868	692.636780







Fig. 6-15 The estimated  $c_1$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-16 The estimated  $c_2$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–17 The estimated  $c_3$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method







Fig. 6–18 The estimated  $c_4$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–19 The estimated  $c_5$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–20 The estimated  $c_6$  parameter of camera 2 in each point of robot movement stage, based on the EKF method





Table 6-13 For camera 2, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)

Robot		Actual	(pixel)	Estimate	ed(pixel)	Error(	pixel)	RMS	
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	(pixel)	
	1	260.500	375.000	260.546	374.908	-0.046	0.092	0.0705	
l	2	338.000	405.571	337.937	405.656	0.063	-0.085	0.0735	
	1	263.500	374.500	263.501	374.500	-0.001	0.000	0.0006	
2	2	341.000	405.286	341.001	405.286	-0.001	0.000	0.0006	
_	1	266.500	374.000	266.500	374.000	0.000	0.000		
3	2 344.00		404.857	344.000	404.857	0.000	0.000	0.0001	
	1	269.500	373.583	269.500	373.584	0.000	0.000		
4	2	347.000	404.500	347.000	404.500	0.000	0.000	0.0001	
	1	272.000	373.143	272.009	373.141	-0.009	0.002		
5	2	350.000	404.071	350.009	404.069	-0.009	0.002	0.0064	
	1	275.000	372.857	275.000	372.857	0.000	0.000		
6	2	353.000	403.786	353.000	403.786	0.000	0.000	0.0001	
_	1	278.000	372.286	278.000	372.286	0.000	0.000		
7	2	356.000	403.214	356.000	403.214	0.000	0.000	0.0002	
	1	281.000	371.857	281.000	371.858	0.000	0.000		
8	2	359.000	402.929	359.000	402.929	0.000	0.000	0.0004	
_	1	284.000	371.286	283.999	371.286	0.001	-0.001		
9	2	362.000	402.571	361.999	402.572	0.001	-0.001	0.0007	
	1	287.000	370.929	286.998	370.928	0.002	0.001		
10	2	365.000	402.000	364.998	402.000	0.002	0.000	0.0016	
	1	290.500	370.583	290.505	370.584	-0.005	-0.001		
11	2	368.000	401.643	368.006	401.644	-0.006	-0.001	0.0040	
	1	293.500	370.167	293.500	370.167	0.000	0.000		
12	2	371.000	401.214	371.000	401.214	0.000	0.000	0.0001	
1.5	1	296.500	369.833	296.500	369.834	0.000	0.000	0.000	
13	2	374.000	401.000	374.000	401.000	0.000	0.000	0.0003	



(Con	tinue	d)
	unnere	~

	1	299.500	369.250	299.498	369.251	0.002	-0.001		
14	2	377 000	400 714	376 998	400 715	0.002	-0.001	0.0015	
	1	202.000	268 020	202.002	268 026	0.002	0.008		
15	1	303.000	308.929	303.003	308.930	-0.003	-0.008	0.0061	
	2	380.000	400.143	380.004	400.151	-0.004	-0.008		
10	1	305.500	368.500	305.508	368.498	-0.008	0.002	0.0050	
16	2	383.000	399.714	383.008	399.712	-0.008	0.002	0.0059	
	1	309.000	368.000	309.003	367.994	-0.003	0.006		
17	2	386.000	399.500	386.003	399.493	-0.003	0.007	0.0052	
	1	312.000	367.786	312.000	367.785	0.000	0.000		
18	2	389.000	399.214	389.000	399.214	0.000	0.000	0.0003	
	1	315.000	367.143	315.000	367.143	0.000	0.000		
19	2	392.000	398.786	391.999	398.786	0.001	0.000	0.0005	
	1	318.000	366.714	318.000	366.714	0.000	0.000		
20	2	395.000	398.357	395.000	398.357	0.000	0.000	0.0001	
			Ave	rage error				0.0054	



Fig. 6-21 For camera 2, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)



**조선대학교** CHOSUN UNIVERSITY



Fig. 6-22 For camera 2, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)

#### (3) 카메라 3

카메라 3에 대한 초기 카메라 매개변수도 3.3.3절의 Fig. 3-3에서 나타낸 Monte-Carlo방법에 의한 절차로 구하여 Table 6-14에 나타내었으며, 이 초기 카메라 매개변수를 이용한 로봇이 이동하는 각 지점에서의 추정된 6개 카메라 매개변 수 변화는 Fig. 6-23 ~ Fig. 6-28에서 보여준다.

첫 번째, 추정된 카메라 매개변수의 흐름을 조사하고자 한다. 먼저 내부 매개변 수  $C_1$ 은 초기값 0.451753을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방 법을 사용하여 추정된  $C_1$ 값은 0.455168로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하 여 로봇 이동단계 전체에서 0.455168~0.464844의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으며,  $C_2$ 은 초기값 0.080631을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_2$ 값은 0.081445로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.081445~0.092690의 범위로 부드러운 변화를 보 이고 있다. 또한, 매개변수  $C_3$ 는 초기값 0.743282 을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점 으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_3$ 값은 0.746313로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 0.746104~0.751965의 범위로 부 드러운 변화를 보이고 있으며, 매개변수  $C_4$ 는 초기값 1.039226을 사용하여 로봇의



첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용하여 추정된  $C_4$ 값은 1.043005로서 때 우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 1.043005~1.051845 의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있다. 그리고 카메라 외부 매개변수인  $C_5$ 는 초 기값 953.611816을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF방법을 사용 하여 추정된  $C_5$ 값은 958.335754로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 958.335754~958.340698의 범위로 부드러운 변화를 보이고 있으 며,  $C_6$ 는 초기값 649.563110을 사용하여 로봇의 첫 번째 지점으로 이동할 때 EKF 방법을 사용하여 추정된  $C_6$ 값은 652.782776로서 매우 부드럽게 변화하였다. 이로 인하여 로봇 이동단계 전체에서 652.782288~652.782776의 범위로 부드러운 변화를 보인다. 위와 같이 내부 매개변수  $C_1 ~ C_4$ 와 외부 매개변수  $C_5$ ,  $C_6$  모두 발산하지 않고 이중선형적인 흐름을 보이고 있으며, 초기값 계산에 사용된 Monte-Carlo방법 의 적합성을 증명하고 있다. 이 역시 전체가 아닌 이전 단계와 현 단계의 카메라의 위치, 자세 및 초점거리의 불확실성만을 다루는 EKF방법의 특성에 의하여 카메라 3에서도 이전 단계에서의 카메라 위치, 자세 및 초점거리가 현 단계의 것과 비교하 여 변화량이 적음을 나타내고 있다.

두 번째, 로봇의 각 이동지점에서 추정된 카메라 매개변수를 사용한 비젼시스템 모델의 적합성을 조사하고자 한다. Fig. 6-23 ~ Fig. 6-28에서 보여준 매개변수를 Eq.(2-20)에 적용하여 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비젼데 이터를 비교한 결과를 Table 6-15와 Fig. 6-29에서 보여주고 있으며, Eq.(6-1)을 통해 계산된 카메라의 로봇 이동단계의 각 지점의 r.m.s 오차값은 Fig. 6-30에서 보여주고 있다. 또한, Eq.(6-2)를 통해 계산된 카메라 3의 평균 오차값은 Table 6-15와 같이 0.0110(*pixel*)로 본 논문에 사용된 비젼시스템 모델의 적합성을 충분히 보여준다.

Table 6-14The estimated initial 6 parameters of camera 3 using theMonte-Carlo method for EKF method in initial stage

$C_{\#}$	$C_1$ $C_2$		$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	
Camera 3	0.451753	0.080631	0.743282	1.039226	953.611816	649.563110	







Fig. 6-23 The estimated  $c_1$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-24 The estimated  $c_2$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-25 The estimated  $c_3$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method







Fig. 6–26 The estimated  $c_4$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6-27 The estimated  $c_5$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method



Fig. 6–28 The estimated  $c_6$  parameter of camera 3 in each point of robot movement stage, based on the EKF method





Table 6-15 For camera 3, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)

Robot		Actual	(pixel)	Estimate	ed(pixel)	Error(	pixel)	RMS
moving point #	Cue #	Х	Y	Х	Y	Х	Y	(pixel)
	1	157.500	335.833	157.460	335.678	0.040	0.155	
1	2	242.000	361.600	242.068	361.741	-0.068	-0.141	0.1120
	1	159.500	334.917	159.506	334.918	-0.006	-0.001	
2	2	244.500	361.083	244.506	361.084	-0.006	-0.001	0.0043
	1	162.500	334.333	162.499	334.333	0.001	0.000	0.0005
3	2	247.500	360.417	247.499	360.416	0.001	0.000	0.0005
	1	165.500	333.500	165.500	333.501	0.000	-0.001	
4	2	250.500	359.750	250.500	359.751	0.000	-0.001	0.0005
_	1	167.500	332.750	167.500	332.750	0.000	0.000	0.0001
5	2	252.500	359.083	252.500	359.083	0.000	0.000	0.0001
	1	170.500 332.167 170.500 332.167 0.000		0.000	0.0001			
6	2	255.500	358.500	255.500	358.500	0.000	0.000	0.0001
_	1	173.500	331.417	173.498	331.416	0.002	0.001	
7	2	258.500	357.583	258.498	357.583	0.002	0.000	0.0017
	1	176.000	330.600	175.998	330.600	0.002	0.000	0.0011
8	2	261.000	357.000	260.998	357.000	0.002	0.000	0.0011
	1	178.500	329.750	178.512	329.757	-0.012	-0.007	0.0006
9	2	264.000	356.400	264.012	356.407	-0.012	-0.007	0.0096
10	1	181.500	329.167	181.509	329.177	-0.009	-0.010	0.0006
10	2	266.500	355.583	266.509	355.594	-0.009	-0.010	0.0096
	1	184.500	328.500	184.500	328.500	0.000	0.000	
	2	269.500	354.917	269.500	354.917	0.000	0.000	0.0002
10	1	187.000	327.700	187.012	327.706	-0.012	-0.005	0.0001
12	2	272.500	354.333	272.512	354.339	-0.012	-0.005	0.0091
	1	189.500	326.917	189.511	326.914	-0.011	0.003	
13	2	275.500	353.583	275.511	353.580	-0.011	0.003	0.0079
1.4	1	192.500	326.333	192.500	326.333	0.000	0.000	0.0001
14	2	278.500	353.000	278.500	353.000	0.000	0.000	0.0001



(Cor	ntinu	led)
(COI	lunn	ieu)

	1	195.500	325.583	195.497	325.585	0.003	-0.002		
15	2	281.500	352.583	281.497	352.585	0.003	-0.002	0.0026	
1.6	1	198.500	324.833	198.498	324.833	0.002	0.000	0.001.0	
10	2	284.500	351.667	284.498	351.666	0.002	0.000	0.0016	
15	1	201.500	324.000	201.541	323.990	-0.041	0.010	0.0001	
17	2	286.500	350.917	286.542	350.906	-0.042	0.011	0.0301	
10	1	203.500	323.417	203.539	323.407	-0.039	0.010		
18	2	289.500	350.333	289.539	350.323	-0.039	0.011	0.0285	
10	1	206.500	322.583	206.500	322.584	0.000	0.000	0.0004	
19	2	292.500	349.667	292.500	349.667	0.000	0.000	0.0004	
•	1	209.500	321.917	209.500	321.917	0.000	0.000	0.000 <i>T</i>	
20	2	295.500	349.167	295.500	349.167	0.000	0.000	0.0005	
			Ave	rage error				0.0110	



Fig. 6–29 For camera 3, comparison of actual vision data and the estimated vision system model's values in robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)



소신내역 CHOSUN UNIVERSIT



Fig. 6-30 For camera 3, the r.m.s errors in each point of robot movement stage, based on the EKF method(unit: pixel)



# 6.1.3 2개 제어기법 결과비교

Table 6-16과 Fig. 6-31은 첫 번째 카메라에서 로봇 이동단계의 각 지점에서 N-R 방법과 EKF방법을 통해 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비 젼데이터에 대한 r.m.s 오차를 보여주고 있다. 또한, Table 6-17과 Fig. 6-32은 두 번째 카메라에서, Table 6-18과 Fig. 6-33은 세 번째 카메라에서 로봇 이동단계의 각 지점에서 N-R방법과 EKF방법을 통해 계산된 비젼시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비젼데이터에 대한 r.m.s 오차를 보여주고 있다.

첫 번째 카메라에서는 첫 번째 단계를 제외하곤 각 카메라의 모든 단계에서 EKF 방법이 N-R 방법에서 더 낮은 오차를 보이고 있음을 보인다.

Table 6-16For camera 1, comparison of the r.m.s errors in N-R method andEKF method for robot movement stage(unit: pixel)

Robot moving point #	N-R	EKF	Robot moving point #	N-R	EKF
1	0.1344	0.1840	11	0.0499	0.0003
2	0.1756	0.0015	12	0.1878	0.0026
3	0.2141	0.0001	13	0.1580	0.0002
4	0.0427	0.0030	14	0.1214	0.0002
5	0.0590	0.0005	15	0.0922	0.0002
6	0.2416	0.0042	16	0.0611	0.0002
7	0.2516	0.0002	17	0.0460	0.0001
8	0.2358	0.0030	18	0.2753	0.0026
9	0.2208	0.0002	19	0.0776	0.0046
10	0.0825	0.0022	20	0.3013	0.0101





Fig. 6-31 For camera 1, comparison of the r.m.s errors in N-R method and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)

Table 6–17	For	camera	2,	comparison	of	the	r.m.s	errors	in	N-R	method	and
	EKF	method	fo	r robot mov	eme	ent s	stage(1	unit: pi	xel)	)		

Robot moving point #	N-R	EKF	Robot moving point #	N-R	EKF	
1	0.2048	0.0735	11	0.0445	0.0040	
2	0.1723	0.0006	12	0.0569	0.0001	
3	0.1618	0.0001	13	0.0791	0.0003	
4	0.1451	0.0001	14	0.0966	0.0015	
5	0.1194	0.0064	15	0.1780	0.0061	
6	0.1659	0.0001	16	0.1143	0.0059	
7	0.1542	0.0002	17	0.1288	0.0052	
8	0.1722	0.0004	18	0.1213	0.0003	
9	0.2011	0.0007	19	0.1003	0.0005	
10	0.2127	0.0016	20	0.1027	0.0001	





Fig. 6-32 For camera 2, comparison of the r.m.s errors in N-R method and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)

Table 6–18	For	camera	З,	comparison	of	the	r.m.s	errors	in	N-R	method	and
	EKF	method	for	robot mov	vem	ent :	stage(1	anit: pi	xel)	)		

Robot moving point #	N-R	EKF	Robot moving point #	N-R	EKF	
1	0.4860	0.1120	11	0.1526	0.0002	
2	0.2174	0.0043	12	0.0960	0.0091	
3	0.2109	0.0005	13	0.2598	0.0079	
4	0.3172	0.0005	14	0.2488	0.0001	
5	0.3258	0.0001	15	0.3346	0.0026	
6	0.2215	0.0001	16	0.3970	0.0016	
7	0.1843	0.0017	17	0.1474	0.0301	
8	0.2127	0.0011	18	0.3055	0.0285	
9	0.1817	0.0096	19	0.2924	0.0004	
10	0.2413	0.0096	20	0.3186	0.0005	





Fig. 6-33 For camera 3, comparison of the r.m.s errors in N-R method and EKF method for robot movement stage(unit: pixel)





### 6.2 얇은막대 배치실험 결과

본 논문에서는 얇은막대 타겟에 대한 공간좌표  $F_x^j$ ,  $F_y^j$ ,  $F_z^j(j=1,2)$ 가 이미 알려 졌을 때, 역기구학 해석을 통하여 연구에 사용된 4축 스카라 로봇의 관절값을 계산 하는 방법의 결과를 기본 비교데이터로 활용하였으며, 얇은막대 타겟에 대한 어떠 한 정보 없이 오로지 카메라를 통해 얻어진 비젼데이터만을 이용하여 로봇 관절값 및 정기구학 결과값을 추정하여 비교하였다. 이 때, N-R방법, EKF방법 등 2개의 방법을 이용하여 얇은막대 타겟에 대한 위치값을 계산하고 있다.

각각의 방법으로 추정된 얇은막대 타겟 위치 값과 실제 타겟 위치값을 비교한 오 차값은 Eq.(6-3)과 같이 r.m.s<sup>(43)</sup>를 사용하여 정의하였으며, N-R 및 EKF방법에서 관절값 추정기법에 의하여 계산된 로봇 관절값은 Eq.(2-9)의 로봇 정기구학 모델에 적용하여 계산하였다.

$$e_{r.m.s}^{j} = \sqrt{\frac{\left(e_{x}^{j}\right)^{2} + \left(e_{y}^{j}\right)^{2} + \left(e_{z}^{j}\right)^{2}\right)}{3}} \tag{6-3}$$

$$e_{avg} = \frac{e_{r.m.s.}}{j^*} \tag{6-4}$$

여기서, j(=1,2)는 큐의 번호,  $j^*$ 는 큐의 개수 $(j^*=2)$ ,  $e_x^j, e_y^j, e_z^j$ 는 j번째 큐에 대한 x성분, y성분, z성분 오차를 나타낸다.

# 6.2.1 로봇 역기구학 해석 결과

로봇 역기구학 해석을 위하여 얇은막대 타겟에 대한 좌표값을  $F_x^1 = 660, F_y^1 = 60,$  $F_z^1 = 160, F_x^2 = 660, F_y^2 = 60, F_z^2 = 130$ 로 설정한 후, 4축 스카라 로봇의 얇은막대 타 겟에 대한 관절값 추정을 2.2.1절의 역기구학 모델을 이용하였다. 이에 대한 결과는 Table 6-19와 같이  $\theta_1$ 의 실제값은 12.700°인데 결과값은 12.699°로 오차값은 0.001°





이고, θ<sub>2</sub>의 실제값은 19.330°인데 결과값은 19.329°로 θ<sub>1</sub>의 오차값과 마찬가지로 0.001°이다. d<sub>3</sub>의 실제값은 128.000mm인데 결과값 역시 128.000mm로 오차값은 0.000mm이며, θ<sub>4</sub>의 실제값과 결과값은 -10.068°로 오차값은 0.000°로 계산되서 역 기구학 해석 결과값은 실제값과 매우 유사함을 알 수 있다.

Table 6–19 Comparison of the actual and estimated values robot's joints for the target, based on the robot's inverse kinematic analysis

	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$d_3(mm)$	$\theta_4(^{\circ})$
Actual	12.700	19.330	128.000	-10.068
Estimated	12.699	19.329	128.000	-10.068
Error	0.001	0.001	0.000	0.000

Table 6-19의 로봇 관절값을 Eq.(2-9)에 나타낸 정기구학 모델에 적용하여 계 산한 타겟 좌표값과 실제 타겟 좌표값의 비교를 위하여 Table 6-20에 보여주고 있 다. Table 6-20에 보여준 좌표값들을 Eq.(6-3)을 이용하여 r.m.s 오차값을 계산하 면 0.0004mm로 실제 타겟 좌표값과 거의 유사함을 알 수 있으며, 본 논문의 로봇 역기구학 모델은 타겟의 공간 좌표값이 이미 알려져 있을 때 로봇의 관절값을 추 정하는데 적합하다는 것을 보여준다. 이에 대한 각각의 큐에서 실제 좌표값과 추정 된 좌표값의 차이를 Fig. 6-34에  $F_x, F_y, F_z$ 로 구분하여 그래프로 나타내었다.

이리하여, 로봇 기구학적 해석을 통해 추정된 타겟에 대한 로봇 관절값은 타겟의 알려진 공간상 위치값을 이용하여 추정한 결과이므로, 타겟의 공간상 위치값에 대 한 정보 없이 오직 카메라를 통해 얻어진 비젼데이터만을 가지고 N-R방법과 EKF 방법을 이용하여 추정된 타겟에 대한 로봇 관절값을 비교하기 위한 실제 관절값으 로 설정한다.





Cue No.	x-y-z value	Actual	Estimated	Error	r.m.s error
1	$F_x$	623.001	623.001	0.000	
	$F_y$	208.999	208.999	0.000	
	$F_{z}$	156.000	156.000	0.000	
	$F_x$	581.317	581.316	0.001	0.0004
	$F_y$	232.052	232.052	0.000	
	$F_z$	156.000	156.000	0.000	

Table 6-20 The estimated position values for the target, based on the robot's inverse kinematic analysis(unit: mm)







- 86 -









Fig. 6-34 Comparison of the actual and estimated position values for the target, based on the robot's inverse kinematic analysis(unit: mm)



### 6.2.2 N-R방법 제어기법 결과

#### (1) 관절값 추정

N-R방법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값의 오 차는 Table 6-21에 보여준다. θ<sub>1</sub>의 실제값은 12.700°인데 추정된 값은 12.581°로써 오차값은 0.119°이며, θ<sub>2</sub>의 실제값은 19.330°인데 추정된 값은 19.630°으로 오차값이 -0.300°이다. d<sub>3</sub>의 실제값은 128.00mm인데 추정된 값은 128.192mm으로써 오차값 은 -0.192mm이며, θ<sub>4</sub>의 실제값은 -10.068°인데 추정값은 -9.892°로써 오차값은 -0.176°로 계산되어, 이와 같이 실제 로봇 관절값과 추정된 관절값은 거의 유사하 게 계산됨을 알 수 있다. Fig. 6-35는 4개의 관절값에 대한 오차를 그래프로 보여 주고 있다.

Table 6-21 Comparison of the actual and estimated values robot's joints for the target, based on the N-R method

	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_1(^{\circ}) \qquad \qquad \theta_2(^{\circ})$		$\theta_4(^{\circ})$
Actual	12.700	19.330	128.000	-10.068
Estimated	12.581	19.630	128.192	-9.892
Error	0.119	-0.300	-0.192	-0.176



Fig. 6-35 Errors between the actual and estimated values of robot joint values for the target, based on the N-R method





# (2) 타겟 위치 추정

Table 6-21의 실제 관절값과 추정된 관절값을 Eq.(2-9)과 같이 정기구학에 적용 하여 계산된 타겟 위치값과 실제 타겟 위치값은 Table 6-22에서 보여준다. 오차 값은 cuel의  $F_x$ 에서 0.179mm,  $F_y$ 에서 0.034mm,  $F_z$ 에서 0.192mm의 오차를 보이 며 Eq.(6-3)을 사용한 1번 큐의 r.m.s 오차값은 0.1528mm이다. 또한, 2번 큐는  $F_x$ 에서 0.298mm,  $F_y$ 에서 0.252mm,  $F_z$ 에서 0.192mm의 오차를 보이며, Eq.(6-3)을 사용한 2번 큐의 r.m.s 오차값은 0.2507mm이다. 최종적으로 Eq.(6-4)를 사용한 2개 cue의 평균 r.m.s 오차값은 ±0.2018mm으로 실제 타겟 위치값에 거의 유사하다는 것을 보이고 있다.

Table 6-22 Comparison of the actual and estimated position values for the target, based on the N-R method(unit: mm)

		Actual			Estimated			Error			Averag
Cue #	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	r.m.s	r.m.s
1	623.001	208.999	156.000	622.822	208.965	155.808	0.179	0.034	0.192	0.1528	
2	581.316	232.052	156.000	581.019	231.800	155.808	0.298	0.252	0.192	0.2507	0.2018



(a) X-value






(b) Y-value



(c) Z-value

Fig. 6-36 Comparison of the actual and estimated position values for the target, based on the N-R method(unit: mm)



## 6.2.3 EKF방법 제어기법 결과

#### (1) 관절값 추정

N-R방법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값의 오차는 Table 6-23에 보여준다. θ<sub>1</sub>의 실제값은 12.700°인데 추정된 값은 12.625°로 써 오차값은 0.075°이며, θ<sub>2</sub>의 실제값은 19.330°인데 추정된 값은 19.521°으로 오차 값이 -0.191°이다. d<sub>3</sub>의 실제값은 128.00mm인데 추정된 값은 128.143mm으로써 오 차값은 -0.143mm이며, θ<sub>4</sub>의 실제값은 -10.068°인데 추정값은 -10.234°로써 오차값 은 -0.166°로 계산되어, 실제 로봇 관절값과 추정된 관절값이 거의 유사하게 계산 됨을 알 수 있다. Fig. 6-37은 4개의 관절 모두에 대한 오차를 그래프로 보여주고 있다.

Table 6-23 Comparison of the actual and estimated values robot's joints for the target, based on the EKF method

	$\theta_1(^{\circ})$	$ heta_2(^{\circ})$	$d_3(mm)$	$ heta_4(^{\circ})$
Actual	12.700	19.330	128.000	-10.068
Estimated	12.625	19.521	128.143	-10.234
Error	0.075	-0.191	-0.143	0.166



Fig. 6-37 Errors between the actual and estimated values of robot joint values for the target, based on the EKF method





### (2) 타겟 위치 추정

Table 6-23의 실제 관절값과 추정된 관절값을 Eq.(2-9)와 같이 정기구학에 적용 하여 계산된 타겟 위치값과 실제 타겟 위치값은 Table 6-24에서 보여준다. 오차 값은 1번 큐의 F<sub>x</sub>에서 0.179mm, F<sub>y</sub>에서 0.115mm, F<sub>z</sub>에서 0.143mm의 오차를 보 이며 Eq.(6-3)을 사용한 1번 큐에 대한 r.m.s 오차값은 0.1480mm이다. 또한, 2번 큐는 F<sub>x</sub>에서 0.135mm, F<sub>y</sub>에서 0.037mm, F<sub>z</sub>에서 0.143mm의 오차를 보이며, Eq.(6-3)을 사용한 2번 큐의 r.m.s 오차값은 0.1155mm이다. 최종적으로 Eq.(6-4)를 사용한 2개 큐의 평균 r.m.s 오차값은 ±0.1318mm으로 실제 타겟 위치값과 거의 유사함을 보이고 있다.

Table 6-24 Comparison of the actual and estimated position values for the target, based on the EKF method(unit: mm)

	Actual		Estimated		Error			Averag			
Cue #	Х	Y	Z	Х	Y	Z	Х	Y	Z	r.m.s	r.m.s
1	623.001	208.999	156.000	622.822	208.884	155.857	0.179	0.115	0.143	0.1480	
2	581.316	232.052	156.000	581.181	232.015	155.857	0.135	0.037	0.143	0.1155	0.1318



(a) X-value







(b) Y-value



(c) Z-value

Fig. 6-38 Comparison of the actual and estimated position values for the target, based on the EKF method(unit: mm)



#### 6.2.4 로봇 역기구학 해석 및 2개 제어기법 결과 비교

로봇의 관절값을 추정하는 방법 중의 하나인 6.2.1절의 타겟에 대한 공간상의 좌 표가 이미 알려져 있는 경우에 역기구학을 통한 해석결과와 타겟에 대한 좌표가 알려져 있지 않고 오로지 타겟에 대한 비젼데이터만을 가지고 로봇의 관절값을 추 정하는 방법인 6.2.2절의 N-R방법 및 6.2.3절의 EKF방법에서의 얇은막대 타겟에 대한 실제 좌표값과 추정된 좌표값을 Eq.(6-3)을 이용하여 계산된 r.m.s 오차값과 계산에 소요된 처리시간을 Table 6-25에 나타내었다.

본 논문에 제시된 2개 제어방법의 효율성을 비교하기 위한 기준 결과치인 역기구 학적인 해석결과는 정확성에서 ±0.0004mm로 거의 실제값과 같다. 이를 기준으로 2개 제어방법에서 r.m.s 오차값을 비교해보면, 오로지 타겟에 대한 비젼데이터에만 의존하여 로봇의 관절값을 추정하는 방법인 N-R과 EKF방법에서의 오차는 0.2018 mm와 0.1318mm로 역기구학 시뮬레이션 결과에 비교하여 오차값은 상승하였지만 거의 유사하게 추정되어짐을 알 수 있다.

N-R 방법과 EKF 방법의 결과만으로 비교를 해보면 EKF 방법에서 N-R 방법보 다 조금 더 향상된 정확성을 나타냄을 알 수 있다. 하지만 계산에 걸린 처리시간으 로 비교해보면, N-R 방법에서 62*ms*로 EKF 방법에서 걸린 141*ms*보다 거의 2배 이상 빠른시간으로 처리되어짐을 알 수 있다. 이에 대한 사항은 Fig. 6-39과 Fig. 6-40에서 그래프로 확인할 수 있다.

Table 6–25	For the r.m.s errors and processing time, comparison of the inverse
	kinematic method, N-R method and EKF method

	r.m.s(mm)	Processing time(ms)
Inverse kinematics	0.0004	
N-R method	0.2018	62ms
EKF method	0.1318	141ms



Collection @ chosun





Fig. 6-39 For the r.m.s errors, comparison of the inverse kinematic method, N-R method and EKF method(unit: mm)



Fig. 6-40 For the processing time, comparison of the inverse kinematic method, N-R method and EKF method(unit: ms)



## 제 7 장 결론

본 논문에서는 3차원 공간상의 위치값을 2차원의 카메라 좌표값으로 변환시키기 위해 효율성이 증명된 6개 매개변수를 갖는 비젼시스템 모델을 사용하였다. 제시된 비젼시스템 모델을 이용하여 타겟에 대한 공간상 위치값이 알려지지 않고 오직 비 젼데이터만 알려진 타겟에 대해 로봇을 이용한 얇은막대 배치작업을 수행하였다. 로봇을 이용하여 타겟지점에 얇은 막대 배치작업을 수행하기 위해 N-R과 EKF 방 법을 이용한 2개 로봇비젼 제어기법을 제시하였으며, 제시된 제어기법의 효율성을 평가하기 위해 타겟에 대한 공간좌표가 이미 알려져 있는 경우에 로봇의 관절값을 추정하는 역기구학 해석결과를 기준으로 설정하였다.

제시된 2개 제어기법을 각각 적용한 얇은막대 배치작업 실험을 통해 얻어진 결과 를 해석하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- N-R방법에서 매개변수의 변화를 비교한 결과 매개변수가 로봇의 시작부터 마지막 이동단계까지의 로봇과 카메라 사이의 위치, 자세 및 초점거리에 관한 전체특성을 파악할 수 있는 척도가 될 수 있으며, EKF방법에서 매개변수는 로봇의 현 단계와 바로 이전 단계에서의 로봇과 카메라 사이의 위치, 자세 및 초점거리에 관한 특성을 파악할 수 있는 척도가 됨을 알 수 있었다.
- 2) N-R방법과 EKF방법을 평균 오차값(*pixel*) 관점에서 조사하면 2개 방법 모두 비젼시스템 모델이 충분히 적합함을 보이고 있지만, 특히 N-R방법 보단 EKF방 법에서 카메라 1에서 약 11배, 카메라 2에서는 약 25배, 카메라 3에서는 약 22배 좋은 결과를 보여주고 있다.
- 3) EKF방법에서 Monte-Calro방법으로 계산된 초기값을 사용하여 카메라 매개변수 를 추정한 결과, 3개 카메라 모두에서 내부 매개변수와 외부 매개변수로 구분되 어 이중선형적 변화를 보이는 특성과 추정된 매개변수를 사용한 비젼시스템 모 델의 적합성을 통해 본 연구에 사용된 Monte-Calro방법의 타당성을 입증하였 다.





- 4) 얇은막대 타겟에 대한 로봇의 실제 관절값에 N-R방법을 적용하여 추정된 관 절값과 EKF방법을 적용하여 추정된 관절값을 비교하면 2개의 방법 모두 실제 관절값과 거의 유사하게 추정됨을 보이고 있다.
- 5) 타겟에 대한 공간상의 좌표가 이미 알려져 있는 경우에 역기구학에 의한 해석 결과의 오차값은 실제값과 매우 근접하나, 오직 타겟에 대한 비젼데이터만을 사 용하는 2개 로봇비젼 제어기법의 정확도는 역기구학에 의한 해석결과보다 조금 낮아졌으나 만족할마한 결과를 얻었다. 특히, N-R방법과 EKF방법을 비교하면 EKF방법이 약 1.5배의 높은 정확도를 보여주었다. 이리하여 본 연구에서 얇은 막대 배치작업에 적용한 2개 제어기법의 효율성을 입증하였다.
- 6) 로봇의 얇은막대 배치작업에 2개 제어기법을 수행한 결과, N-R방법은 처리 속 도가 EKF방법보다 2배 이상 빠른 처리속도를 보였으나, 정확성은 EKF방법보다 더 낮게 나타난다. 그러므로, 정확성보다 빠른 작업 처리를 원하는 환경에서는 로봇제어에 N-R방법을 이용하는 것이 좋을 것으로 사료되며, 정확성을 추구하 는 환경에서는 로봇제어에 EKF방법을 적용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.





# REFERENCES

- (1) 정만태, *지능형 로봇산업의 국내외 동향과 육성정책 및 시사점*; KEIT: KOREA, 2015; pp 20-27
- (2) 관계부처 합동, 제2차 지능형 로봇 기본계획(안); KOREA, 2014; pp 1-23
- (3) Park, J. Y., Jun, B. H., Lee, P. M. and Oh, J. H., "Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera", Ocean Engineering, Vol. 36, Issue 1, pp.48–61, Jan. 2009.
- (4) Bacakoglu, H., Kamel, M., "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1347~1352, April 1997.
- (5) Tsai, R.Y., "Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision", TheRobotics Review, Cambridge: MIT Press., pp.146~159, 1989.
- (6) Bao, J., Tang, H. and Song, A., "Combining Vision Learning and Interaction for Mobile Robot Path Planning", Int J Adv Robotic Sy, Vol. 9, issue 4, pp. 1–8, Jun. 2012.
- (7) Pomares, J., Corrales, J. A., Garcia, G. J. and Torres, F., "Direct Visual Servoing to Track Trajectories in Human-Robot Cooperation", Int J Adv Robotic Sy, Vol 8, No. 4, PP. 129–138, Aug. 2011.
- (8) Stelzer, A., Hirschmuller, H. and Gorner, M., "Stereo-vision-based navigation of a six-legged walking robot in unknown rough terrain", The International Journal of Robotics Research, Vol. 31, No 4, PP. 381-402, Apr. 2012
- (9) Xu, D., Tan, M., Jiang, Z. and Hu, H., "Use of Colour and Shape Constraints in Vision-based Valve Operation by Robot", The International Journal of Advanced Robotics Systems, Vol. 3, No. 3, PP. 267–274, Sep. 2006.
- (10) Kelly, R., Carelli, R., Nasisis, O., Kuchen, B. and Reyes, F., "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems", IEEE/ASME





Trsns. on Mechatronics, Vol. 5, no. 1, pp.39-48, Mar. 2000.

- (11) Hafez, A., Cervera, E. and C. V. Jawahar, "Optimizing Image and Camera Trajectories in Robot Vision Control using On-line Boosting", IEEE/RSJ, PP. 352–357, OCT. 2007.
- (12) Mishra, P., Shankar, H. N., Bhat, J. S., Kubair, S. R., Bharadwaja H, S., Anudhan S, Hundi, D. K. and Kamath, G., "Multi-Sensor Autonomous Robot based Manipulation of Valves for Process Control", IEEE/Modelling & Simulation, PP. 442-447, June. 2009.
- (13) Wedepohl, L. M., Nguyen, H. V., Irwin, G. D., "Frequency-Dependent Transformation Matrices for Untransposed Transmission Line using Newton-Raphson method", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 11, No. 3, 1538–1546, Aug. 1996.
- (14) Makoto U., Koizumi H., "A Calculation Method of Photo voltaic Array's Operational Point for MPPT Evaluation Based on One Variable Newton-Raphson Method", Sustainable Energy Technologies (ICSET), IEEE Third International Conference pp.451~456, 2012.
- (15) Skaar, S. B., Brockman, W. H., Jang, W. S., "Three-dimensional camera space manipulation", International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 4, pp.22~39, 1997.
- (16) Shahamiri, M., Jagersand, M., "Uncalibrated Visual Servoing using a Biased Newton method for On-line Singularity Detection and Avoidance", IEEE/RSJ International Conference., pp.3953~3958, 2005.
- (17) Yang, C., Huang, Q., Ogbobe, P. O., Han, J., "Forward Kinematics Analysis of Parallel Robots Using global Newton-Raphson Method", Proceedings of 2009 Second ICICTA., pp.407~410, 2009.
- (18) Daniel, C. A., Ricardo Z. Y. and Ricardo R. M., "Kinematic and Workspace Analysis of Parallel Robot Used in Security Applications", IEEE/Electronics and Automotive Engineering, PP. 3–8, Jan. 2014.
- (19) Jeong, J. W., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., "Design and Kinematic Analysis of the Wire Parallel Mechanism for a Robot Pose Measurement", IEEE/ICRA, PP. 2941–2946, May. 1998.





- (20) Lin, M. T., Lin, H. B., Liu, C. C., Lin, U. L., Wu, C. H. and Tung, C. W., "Algebraic-elimination Based Solution of Inverse Kinematics for a Humanoid Robot Finger", IEEE/ICMA, PP.46–51, Aug. 2001.
- (21) Kalman, R. E., "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", J. basic Rng. Trans. ASEM., pp.35~45, 1960.
- (22) Kalman, R. E., Bucy, R. S., "New Results in Linear Filtering and Prediction", ASME, J. Basic Eng, Vol. 83(1), PP.95–108, May. 1961.
- (23) Kerr, H. T., "Streamlining Measurement Iteration for EKF Target Tracking", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 27, NO. 2, pp.408~421, 1991.
- (24) Wan, Eric A. and Merwe, Rudolph van der, "The unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation", IEEE, PP. 153–158, Oct. 2000.
- (25) Shademan, A. and Janabi-Sharifi, F., "Sensitivity Analysis of EKF and Iterated EKF Pose Estimation for Position-Based Visual Servoing," IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada, August 28-31, pp.755~760, 2005.
- (26) Parnian, N., Golnaraghi, F., "Integration of a Multi-Camera Vision System and Strapdown Inertial Navigation System (SDINS) with a Modified Kalman Filter", Sensors, pp.5378~5394, 2010.
- (27) Lippiello, V., Siciliano, B., Villani, L., "Adaptive extended Kalman filtering for visual motion estimation of 3D objects", Control Engineering Practice 15 pp.123~134, 2007.
- (28) Ligorio, G., Angelo, M. S., "Extended Kalman Filter-Based Methods for Pose Estimation Using Visual, Inertial and Magnetic Sensors: Comparative Analysis and Performance Evaluation" Sensors., Vol. 13, pp.1919~1941, 2013.
- (29) Zhou, S., Fei, F., Zhang, G., Liu, Y. and Li, Wen J., "Hand-Writing Motion Tracking with Vision-Inertial Sensor Fusion: Calibration and Error Correction", Sensors(Basel), Vol. 14(9), pp.15641~15657, Sep. 2014.
- (30) Chen, G., Xia, Z. and Ming, X., "Camera Calibration based on Extended Kalman Filter using Robot's Arm Motion", IEEE/ASME International





Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, PP.1839–1844, Sep. 2009.

- (31) Chen, L., Hu, H. and McDonald-Maier, K.D., "EKF Based Mobile Robot Localization", IEEE/EST, 2012 Third International Conference, PP. 149-154, Sep. 2012.
- (32) Ahmad, H., Namerikawa, T., "Extended Kalman filter-based mobile robot localization with intermittent measurements", Systems Science & Control Engineering, An Open Access Journal., Vol. 1, No, 1, pp.113~126, 2013.
- (33) Oriolo, G., Paolillo, A., Rosa, L. and Vendittelli, M., "Vision-Based Odometric Localization for Humanoids using a Kinematic EKF", IEEE/RAS, International Conference on Humanoid Robots, PP. 153–158, 2012.
- (34) Xu, Q., Ren, C., Yan, H. and Ji, J., "Laser Sensor Based Localization of Mobile Tobot Using Unscented Kalman Filter", IEEE/ICMA, PP.1726-1731, Sep. 2016.
- (35) Nguyen, Q. V., Colas, F., Vincent, E. and Charpillet, F., "Localizing and Intermittent and Moving Sound Source Using a Mobile robot", IEEE/RSJ IROS, PP. 1986–1991, Oct. 2016.
- (36) Lippiello, V., Siciliano, B. and Villani, L., "Position-Based Visual Servoin in Industrial Multirobot Cells Using a Hybrid Camera Configuration", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 23, Issue 1, PP.73-86, Feb. 2007.
- (37) John, J. C., "Introduction to Robotics mechanics and control", 2nd ed., U.S.A: Addison-Wesley., pp.84. 1989.
- (38) Min, K. U., Jang, W. S., "An Experimental Study on the Optimal Arrangement of Cameras used for the Robot's Vision Control Scheme", KSMTE, Vol. 19, No. 1, pp.15~25, 2010.
- (39) Jang, W. S., Kim, K. S., Kim, K. Y. and Ahn, H. C., "An Experimental Study on the Optimal number of Cameras used for Vision Control System", KSMTE, Vol. 13, No. 2, pp. 94~103, 2004.
- (40) Son, J. K., "An experimental study on the practicality of vision control





scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory , Thesis of Master, school of mechanical engineering, chosun university., 2010.

- (41) Son, J. K., Jang, W. S. and Hong, S. M., "Evaluation of Two Robot Vision Control Algorithms Developed Based on N-R and EKF Methods for Slender Bar Placement", KSME, Vol. 37, No. 4, PP. 447-459, 2013.
- (42) Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems", Sijthoff and Noordhoff, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29~33, 1978.
- (43) David, F., Robert, P., Roger, P., "Statistic", Canada: W.W.Norton, pp.58~59, 1978.
- (44) 홍준균, 컴퓨터 수치해석; 문운당: KOREA, 1991; pp 14-15