



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 2 월

석사학위 논문

이동 타겟 추적 및 얇은 막대  
배치를 위한 N-R과 EKF방법을  
이용한 로봇비전제어기법 개발

조선대학교 대학원

기계공학과

홍 성 문

# 이동 타겟 추적 및 얇은 막대 배치를 위한 N-R과 EKF방법을 이용한 로봇비전제어기법 개발

Development of robot vision control schemes using the N-R  
and EKF methods for the moving target tracking and  
slender bar placement tasks

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

홍성문

# 이동 타겟 추적 및 얇은 막대 배치를 위한 N-R과 EKF방법을 이용한 로봇비전제어기법 개발

지도교수 장 완 식

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

홍 성 문

## 홍성문의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    이 규 태    (인)

위    원    조선대학교    교수    장 완 식    (인)

위    원    조선대학교    교수    성 윤 경    (인)

2014년    11월

조선대학교 대학원

# 목 차

List of Photos .....	V
List of Tables .....	V
List of Figures .....	IX
Nomenclature .....	XIV
Abstract .....	XV

## 제 1 장 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 및 내용 .....	5

## 제 2 장 비전시스템 모델

2.1 기구학 모델 .....	8
2.2 비전시스템 모델 .....	9

## 제 3 장 로봇 비전알고리즘의 수학적 모델링

3.1 N-R방법 .....	11
3.1.1 카메라 매개변수 모델 .....	11
3.1.2 로봇 관절각 모델 .....	13
3.2 EKF방법 .....	15

3.2.1 카메라 매개변수 모델 .....	16
가. 측정모델의 보정 .....	16
나. 예측 모델 .....	17
3.2.2 로봇 관절각 모델 .....	17
가. 측정모델의 보정 .....	18
나. 예측 모델 .....	19
3.2.3 EKF방법의 초기 값 추정 .....	20

## 제 4 장 로봇 비전알고리즘의 제어기법

4.1 고정 타겟에 대한 제어기법 .....	22
4.1.1 N-R방법의 일괄처리기법 .....	22
가. 장애물이 없는 경우 .....	22
나. 장애물이 출현하는 경우 .....	26
4.1.2 EKF방법의 순환기법 .....	32
가. 장애물이 없는 경우 .....	32
나. 장애물이 출현하는 경우 .....	36
4.2 이동 타겟에 대한 제어기법 .....	41
4.2.1 N-R방법의 일괄처리기법 .....	41
4.2.2 N-R방법의 데이터 이동기법 .....	45
4.2.3 EKF방법의 순환기법 .....	50

## 제 5 장 실험장치 및 실험방법

5.1 실험장치 구성 .....	53
-------------------	----

5.2 시험모형 ..... 54

5.3 실험방법 ..... 55

    5.3.1 점 이동 타겟 추적 ..... 55

    5.3.2 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 ..... 56

## 제 6 장 실험 결과

6.1 점 이동 타겟 ..... 57

    6.1.1 비전 시스템 모델의 적합성 비교 ..... 57

        가. N-R방법의 일괄처리기법 결과 ..... 58

        나. N-R방법의 데이터 이동기법 결과 ..... 60

        다. EKF의 순환기법 결과 ..... 62

    6.1.2 점 이동 타겟 추적 결과 ..... 65

        가. N-R방법의 일괄처리기법 결과 ..... 65

        나. N-R방법의 데이터 이동기법 결과 ..... 71

        다. EKF방법의 순환기법 결과 ..... 77

    6.1.3 점 이동 타겟에 대한 실험 결과 비교 ..... 83

6.2 고정된 얇은 막대 배치 ..... 85

    6.2.1 비전 시스템 모델의 적합성 비교 ..... 85

        가. N-R방법의 일괄처리기법 결과 ..... 85

        나. EKF기법의 순환기법 결과 ..... 94

    6.2.2 장애물이 없는 경우 고정된 얇은 막대 배치 결과 ..... 102

        가. N-R방법의 일괄처리기법 결과 ..... 102

        나. EKF방법의 순환기법 결과 ..... 103

    6.2.3 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 결과 ..... 105



가. N-R방법의 일괄처리기법 결과 .....	105
나. EKF방법의 순환기법 결과 .....	115
6.2.4 고정된 얇은 막대 배치 실험 결과 비교 .....	124
제 7 장 결 론 .....	128
REFERENCES .....	131

## List of Photos

Photo 1	Experimental apparatus .....	53
---------	------------------------------	----

## List of Tables

Table 2-1	Link parameters of 4 axis robot .....	8
Table 4-1	For an example, vision data with no obstacle .....	23
Table 4-2	For an example, vision data with case 1 .....	28
Table 4-3	For an example, vision data with no obstacle .....	33
Table 4-4	For an example, vision data with case 1 .....	37
Table 4-5	For an example, vision data of moving target in the batch scheme of N-R method .....	42
Table 4-6	For an example, vision data of moving target in the data moving scheme of N-R method .....	46
Table 6-1	For the moving target tracking, the estimated six parameters using the batch scheme of N-R method in each camera .....	58
Table 6-2	For the moving target tracking, the estimated six parameters using the data moving scheme of N-R method in each camera .....	60
Table 6-3	For the moving target tracking, the estimated six parameters using the recursive scheme of EKF method in each camera .....	63
Table 6-4	For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the batch scheme of N-R method .....	68

Table 6-5	For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the data moving scheme of N-R method .....	74
Table 6-6	For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the recursive scheme of EKF method .....	80
Table 6-7	For the moving target tracking, comparison of errors and processing thime using the batch and data moving schemes of N-R method, and the recursive scheme of EKF method .....	84
Table 6-8	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with no obstacle in each camera .....	86
Table 6-9	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with case1 in each camera .....	88
Table 6-10	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with case2 in each camera .....	90
Table 6-11	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with case3 in each camera .....	92
Table 6-12	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with no obstacle in each camera .....	94
Table 6-13	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with case1 in each camera .....	96
Table 6-14	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with case2 in each camera .....	98
Table 6-15	For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with case3 in each camera .....	100

Table 6-16	For the fixed slender bar placement, the estimated joint angle using the N-R method with no obstacle .....	102
Table 6-17	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with no obstacle .....	103
Table 6-18	For the fixed slender bar placement, the estimated joint angles using the EKF method with no obstacle .....	104
Table 6-19	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with no obstacle .....	104
Table 6-20	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 1 .....	109
Table 6-21	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 2 .....	111
Table 6-22	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 3 .....	113
Table 6-23	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 1 .....	118
Table 6-24	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 2 .....	120

Table 6-25	For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 3 .....	122
Table 6-26	For the fixed slender bar placement, comparison of errors and processing time using the batch scheme of N-R method, and the recursive scheme of EKF method .....	127

## List of Figures

Fig. 2-1	Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot .....	8
Fig. 3-1	Schematic diagram of N-R Method .....	11
Fig. 3-2	Schematic diagram of EKF Method .....	15
Fig. 3-3	Procedures of Monte-Carlo method .....	20
Fig. 4-1	Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with no obstacle .....	23
Fig. 4-2	Batch control scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with no obstacle .....	24
Fig. 4-3	Obstacle regions of N-R method .....	26
Fig. 4-4	Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with obstacles .....	27
Fig. 4-5	Data processing procedures for numbering vision data using the batch scheme with obstacles N-R method .....	27
Fig. 4-6	Batch control scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with obstacles .....	29
Fig. 4-7	Matching method of joint angles and cue positions .....	30
Fig. 4-8	Data processing procedures of the recursive scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with no obstacle .....	32

Fig. 4-9	Recursive control scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with no obstacle .....	34
Fig. 4-10	Obstacle regions of EKF method .....	36
Fig. 4-11	Data processing procedures of the recursive scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with obstacles .....	37
Fig. 4-12	Recursive control scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with obstacles .....	38
Fig. 4-13	Data processing procedures in obstacle regions using the recursive scheme of EKF method .....	39
Fig. 4-14	Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the moving target tracking .....	41
Fig. 4-15	Batch control scheme of EKF method for the moving target tracking .....	43
Fig. 4-16	Data processing procedures of the data moving scheme of N-R method for the moving target tracking .....	45
Fig. 4-17	Data moving control scheme of N-R method for the moving target tracking .....	47
Fig. 4-18	Reassignment of data array .....	48
Fig. 4-19	Data processing procedure of the recursive scheme of EKF method for the moving target tracking .....	50
Fig. 4-20	Recursive control scheme of EKF method for the moving target tracking .....	51
Fig. 5-1	Experimental set-up .....	53
Fig. 5-2	Test model of the point .....	54
Fig. 5-3	Test model of the slender bar .....	54
Fig. 5-4	Trajectory of the moving target .....	55

Fig. 5-5 Robot trajectory for the fixed slender bar placement ..... 56

Fig. 6-1 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method ..... 59

Fig. 6-2 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the data moving scheme of N-R method ..... 61

Fig. 6-3 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method ..... 64

Fig. 6-4 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the batch scheme of N-R method ..... 66

Fig. 6-5 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the data moving scheme ..... 72

Fig. 6-6 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the recursive scheme of EKF method ..... 78

Fig. 6-7 For the moving target tracking, comparison of position errors using the batch and data moving schemes of N-R method, and the recursive scheme of EKF method ..... 83

Fig. 6-8 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with no obstacle ..... 87



Fig. 6-9 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case1 ..... 89

Fig. 6-10 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case2 ..... 91

Fig. 6-11 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case3 ..... 93

Fig. 6-12 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with no obstacle ..... 95

Fig. 6-13 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with case1 ..... 97

Fig. 6-14 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with case2 ..... 99

Fig. 6-15 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with case3 ..... 101

Fig. 6-16 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 1 ..... 106

Fig. 6-17 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 2 ..... 107

Fig. 6-18 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 3 ..... 108

Fig. 6-19 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 1 ..... 115

Fig. 6-20 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 2 ..... 116

Fig. 6-21 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 3 ..... 117

Fig. 6-22 For the fixed slender bar placement, comparison of position errors using the batch scheme of N-R method and the recursive scheme of EKF method in three cases ..... 126

## NOMENCLATURE

${}^{i-1}T_i$	Transfer matrix from frame $\{i-1\}$ to frame $\{i\}$
$P^i$	Position vector of the cue at the tool frame
$\bar{F}$	Position vector of the cue at the robot base frame
$C_k$	View parameter
$X_m$	$X$ component of estimation model
$Y_m$	$Y$ component of estimation model
$F_x$	$\hat{X}$ component of position vector $\bar{F}$
$F_y$	$\hat{Y}$ component of position vector $\bar{F}$
$F_z$	$\hat{Z}$ component of position vector $\bar{F}$
$J(C_k)$	Performance index in parameter $C$
$X_c^i$	$X$ component of vision data for acquired at step $i$
$Y_c^i$	$Y$ component of vision data for acquired at step $i$
$X_m^i$	$X$ component of estimation model for computed at step $i$
$Y_m^i$	$Y$ component of estimation model for computed at step $i$
$\Delta C$	Parameter correction vector
$A$	Matrix of $2\ell \times 6$
$A^T$	Transpose of matrix $A$
$J(\theta_i)$	Performance index in joint angle
$\Delta\theta$	Joint angle correction vector
$R$	Residual vector
$B$	Matrix of $(2 \times q) \times 4$
$B^T$	Transpose of matrix $B$

## ABSTRACT

### Development of robot vision control schemes using the N-R and EKF methods for the moving target tracking and slender bar placement tasks

Hong, Sung Mun

Advisor : Prof. Jang, Wan Shik Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

This thesis presents the robot vision control schemes using batch and data moving schemes of Newton-Raphson (N-R) method, and the recursive scheme of Extended Kalman Filter (EKF) method for a moving target tracking, and slender bar placement in the uncertainty of circumstance. The vision system model used for this study involves the six camera parameters( $c_1 \sim c_6$ ).  $c_1 \sim c_4$  explains the uncertainty of camera's orientation and focal length, and  $c_5 \sim c_6$  explains the unknown relative position between the camera and the robot. In order to develop the robot vision control scheme, the batch and moving data schemes of N-R, and a the recursive schemes of EKF are developed for the estimation of the six camera parameters. Then, based on the estimated six parameters using three cameras, control schemes of the robot's joint angles are developed for the moving targets tracking and slender bar placement using both N-R and EKF methods. Especially, for the placement of slender bar in the uncertainty of circumstance, the discontinuous trajectory caused by obstacles is divided into three obstacle regions, which are beginning region, middle region, and near target region. Each obstacle region involves of 10 obstacles. Then, the effects of number of obstacles using the proposed robot's vision control schemes are investigated in each obstacle region.

Finally, in order to evaluate its strengths and weaknesses of three robot vision control schemes. the proposed three robot's vision control schemes is demonstrated experimentally by performing the moving target tracking, and the slender bar placement in discontinuous trajectory by obstacle.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 필요성

현대사회에서 조립공장의 노동자를 대신한 산업용 로봇의 등장은 환영받고 있는데 반해, 효율성과 경제성 등을 고려하면 로봇이 활용될 수 있는 환경은 제한될 수밖에 없음에도 불구하고 로봇은 지속적으로 연구·개발되었고, 최근 들어서는 인간과 일상생활을 함께 할 수 있는 휴머노이드 로봇 및 지능형 로봇에 대한 관심이 고조되고 있는데, 휴머노이드 로봇이 사람과 비슷한 모습과 동작을 구사해서 사람에게 친숙한 형태로 만들어져서 가정, 공공장소 등의 일상생활에서 사람에게 거부감 없이 서비스를 제공하는 로봇이라 한다면, 지능형 로봇은 여기에서 더 나아가 외형뿐만이 아니라 기능적으로도 사람과 유사하게 생각하고 사람과도 상호 작용을 할 수 있는 로봇으로 일반 사용자가 로봇을 직접 조작하거나 프로그래밍하지 않아도 외부환경을 인식하고 스스로 상황을 판단하여 자율적으로 동작할 수 있는 로봇을 의미한다.

이러한 지능형 로봇은 사람이 수행하기에 복잡하고 위험한 일을 대신하는 공업용 로봇과 군사용 로봇을 포함하여 가사를 지원하는 가사 로봇, 사람들과 게임을 즐기고 간단한 상호작용을 제공하는 엔터테인먼트 로봇, 회사나 공공장소 내에서 안내나 서류전달 등을 대신해주는 업무지원 로봇으로 다양하게 개발되고 있으며, 지능형 로봇을 구현하기 위한 핵심기술로는 인공지능을 빼놓을 수 없는데, 인공지능은 영상, 음성, 주위 환경 등 다양한 정보를 종합하여 판단하고 상황에 맞게 대처할 수 있도록 하는 기술로, 이러한 기술은 지능형 로봇 개발에서 가장 어려운 부분이며, 로봇의 현재 위치 추정, 상황에 대한 반응, 입력된 센서정보 파악 등에 활용되고 있다. 특히, 비전 센서의 정보를 통해 로봇 스스로 외부환경을 인식하고 상황을 판단할 수 있도록 하는 로봇 비전 연구는 지능형 로봇 분야의 핵심적인 기술로써 그 중요성이 강조되면서 세계적으로 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

컴퓨터와 센서기술의 발전은 산업용 로봇이 더 정밀하고 다양한 작업을 할 수 있도록 연구되고 있는데, 수동적인 작업을 벗어나기 위한 프로그래밍 기술 외에 복잡한 작업환경에 대처하기 위한 센서 결합기술이 필수적이다. 인간의 시각기능을 로봇분야에 적용하기 위해서 사용되는 비전시스템은 로봇에게 지능을 부여하여 다

양하고 복잡한 작업조건을 판단하고 정확하게 처리하도록 하는 기술로, 1990년 대부터 활발해진 로봇비전에 대한 연구는 미국에서 시작되었고 거의 같은 시기에 일본에서도 Tokyo 대학의 그룹을 중심으로 로봇의 시각기능으로서 주목할 만한 Realtime Vision에 대한 연구가 이루어졌으며, 같은 시기에 로봇의 시각에 대한 연구가 활발해진 것은 Panoramic Vision이나 전방위 시각(Omni-directional vision)이라고 불리는 연구 때문으로, OSAKA 대학을 중심으로 활발히 전개되어 워크숍으로 발전되었는데, 실제 산업현장에서 비전시스템을 결합한 로봇을 적용하는 데에는 2 가지의 문제점이 대두되고 있다.

첫 번째로는, 로봇과 비전시스템 간의 효과적인 보정을 위해 3차원 공간에서 움직이는 로봇의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 매핑하기 위한 로봇 좌표계와 카메라 좌표계 상호간의 관계에 대한 정보가 정확해야 한다는 것인데, 이 문제에 대한 대표적인 연구는 Kelly<sup>(1)</sup>가 평면상의 카메라 이미지에서 특징점 오차를 사용하는 제어기반 알고리즘을 제시하였으며, Yoshihiro<sup>(2)</sup>등은 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치변화가 있는 경우에도 보정이 필요하지 않는 퍼지논리를 사용하였으며, Bacakoglu<sup>(3)</sup>등은 카메라 내부 매개변수와 외부 매개변수를 결정하는 과정에 대한 최적화된 3단계 카메라 보정 알고리즘을 개발하였다. 또한, Tsai<sup>(4)</sup>는 정확하게 알려진 물리적인 공간의 점들에 대해 매니폴레이션을 하기 전에 카메라에 대한 보정과 이러한 점들의 3차원 직교좌표계를 2차원 영상평면좌표계로 일치시키기 위한 모델에서 매개변수들을 추정하는 방법을 제시하였으며, Beardsley<sup>(5)</sup>등은 보정된 카메라와 3차원 기하학적 구조를 기본으로 하는 기존의 연구방법과 달리 카메라에 대한 보정이 필요하지 않고 초점거리와 같은 카메라의 내부 매개변수가 도중에 자유로이 변경될 수 있는 연구 방법을 제시하였다.

두 번째로는, CCD카메라에 의해서 촬영된 많은 양의 데이터를 저장하기 위한 메모리의 확보와 처리속도의 저하인데, 1970년대 후반부터 이루어진 LSI(Large Scale Integrate)로 대표되는 대규모 기억소자의 꾸준한 개발로 인해 메모리 문제를 해결하였으며, Microprocessor의 발달은 많은 양의 데이터와 복잡한 알고리즘에 의한 처리속도 저하에 대한 문제를 상당부분 해결하였다. 또한 이치화 기법이나 큐(cue)를 사용하여 데이터의 양을 최소로 하며 작업의 조건과 특성을 명확히 함으로써 비전시스템을 특정 작업에만 적합하도록 적용하고, 획득되어지는 데이터의 양을 최소로 줄이는 등의 물리적인 작업환경을 통해 데이터 처리시간을 줄이는 방법들이<sup>(6,7)</sup> 연구되었으며, 연구된 다양한 제어기법 중 수치 해석적으로 분석하기 위해서

N-R방법과 EKF방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데,

첫 번째로, 반복기법인 N-R방법을 사용한 여러 가지 제어기법이 연구되었는데, Skaar<sup>(8)</sup>등이 2개 이상의 카메라를 이용한 공간상 로봇 구동 알고리즘을 연구하였으며, Wedepohl<sup>(9)</sup>등은 주파수의 변환 매트릭스를 평가하는데 사용하였고, Shahamiri<sup>(10)</sup>는 Newton 방법을 사용하여 궤적이 단수 또는 단수지역을 피하도록 온라인으로 궤적이 수정되는 방법과 간단한 시각 장애물의 회피를 위한 바이어스 방법을 제안하였고, Yang<sup>(11)</sup>등은 6축 평형로봇에 N-R방법을 적용하여 정기구학에 대한 해석을 하였다. Makoto<sup>(12)</sup>등은 단일 변수 Newton-Raphson방법이 전통적인 방법보다 더 정확하고 빠르다는 것을 증명하고, 태양전지 어레이의 가동점을 얻기 위해 비선형 방정식에 Newton-Raphson법을 적용하였고, 배민지<sup>(13)</sup>등은 도파관 안테나 복사평판 설계이론으로 Elliott이 제안한 수식을 기반으로 슬롯 파라미터를 계산하는 프로그램을 작성하고, 비선형방정식의 해를 구하기 위해 Newton Raphson 방법을 사용하였다.

두 번째로, 최근 들어 화상처리기법에 많이 사용되는 순환기법인 EKF방법을 사용한 연구들로, Kalman<sup>(14,15)</sup>이 선형 필터링 및 예측 문제에 대한 새로운 제시를 하였으며, Kerr<sup>(16)</sup>는 레이더에서 목표의 추적에 사용하였고, Shademan<sup>(17)</sup>등은 비전기반 위치제어에 EKF를 사용하였고, Lippiello<sup>(18)</sup>등은 이동물체의 위치와 방위에 대한 비전시스템을 이용한 실시간 추정값을 향상시키기 위해 적응EKF(Adaptive EKF) 방법을 사용하였으며, Chen<sup>(19)</sup>은 EKF를 이용하여 휴머노이드 로봇비전 시스템에서 사용할 수 있는 카메라 교정방법을 제시하였다. Ling Chen<sup>(20)</sup>등은 EKF를 이용하여 이동로봇의 위치를 연구하고 위치인식을 위한 레이저 범위 정보와 주행거리 측정법을 융합시키기 위해 EKF를 사용하였고, Gabriele Ligorio<sup>(21)</sup>등은 단안 비전시스템에서 기준점을 기준으로 자체운동에 상대적인 관성측정 유니트(IMU)와 카메라센서의 움직임의 자세추측을 위해 2개의 EKF를 개발하였으며, Hamzah Ahmad<sup>(22)</sup>등은 이동로봇 위치추정에서 몇몇 특정값들을 잃어버림에도 불구하고 좋은 추정을 유지하기 위해 EKF의 이론적인 분석을 제안하였고, Neda Parnian<sup>(23)</sup>등은 다중 카메라 비전시스템과 관성항법장치의 통합을 위해 개선된 EKF에 대해 연구하였으며, Shengli Zhou<sup>(24)</sup>등은 관성센서와 비전센서의 융합을 통해 실시간 자체운동의 정확도를 향상시키고 Hand-Writing 모션추적에서 관성센서와 비전센서의 융합을 위해 EKF를 사용하였다.

본 연구에서는, 각각의 장단점을 가지고 있는 N-R방법과 EKF방법을 사용하여



제시된 비전시스템을 적용한 로봇 비전제어 알고리즘을 개발하였다.

첫 번째로, 오직 위치만을 고려한 점이동 타겟추정을 위한 실험에서는 N-R방법에 근거한 일괄처리기법과 데이터 이동기법 및 EKF방법을 적용한 3개의 비전 제어기법을 개발하고 장단점을 비교 및 평가하여 효율성을 알아보고자 한다.

두 번째로, 위치와 방위를 고려하는 고정된 얇은 막대 추정실험은 불확실한 작업 환경에서 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법을 적용한 로봇 비전 제어기법을 비교하여 상황에 맞는 제어기법의 효과적인 선택과 실험결과를 통해 위치 정밀도와 데이터 처리시간을 향상 시키고자 한다.

## 1.2 연구목적 및 내용

상황이 시시각각 변하는 복잡한 작업환경에서 인력으로 작업하기 어려운 상황에 효율적인 작업을 위한 시스템에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있으며, 로봇에 사람의 오감 중 하나인 시각을 적용하려는 연구가 활발하다. 그러나 비전시스템을 제어기법에 적용하기 위해선 많은 문제들이 발생하는데, 우선적으로 물체 형상을 인식하기 위한 데이터의 양에 따른 처리속도와 작업 동선에서 기타 상황에 따른 데이터 획득 실패 시 발생하는 문제들의 해결이 필요하다.

본 연구에서는 위의 문제점들을 해결하고자 카메라 방위와 초점거리의 불확실성 뿐만 아니라, 알려지지 않은 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치를 설명해주는 6개의 매개변수를 포함한 비전시스템 모델을 다양한 제어 기법에 적용하여 로봇 비전제어 알고리즘을 개발하여 상황에 맞게 사용자가 선택할 수 있는 폭을 넓히고자 한다. 여기서, 좀 더 정밀도를 높이기 위해 카메라의 위치선정을 로봇 말단부에 부착된 타겟이 임의의 운동궤적을 따라 이동하는 구간이 본 연구에 사용된 3대의 카메라 각각의 이미지 평면상에서 벗어나지 않으면서 화면에 가득 차도록 배치하고 물체형상 전체를 인식하지 않고 큐를 사용하여 데이터의 양을 최소화 시키고자 하였다.

이리하여 문제점들을 최소화한 제 2장의 비전시스템을 요즘 들어 활발히 연구되어지고 있는 제 3장의 N-R방법과 EKF방법을 적용하는 수학적 모델링을 기초로 하여 제 4장에서 고정 타겟에 대한 로봇 비전알고리즘의 제어기법과 점 이동 타겟 추적에 대한 제어기법을 개발하고자 한다. 고정 타겟에 대한 제어기법은 장애물이 없는 경우와 장애물이 출현하는 경우에 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 각각 사용하였고, 이동 타겟에서는 N-R방법의 일괄처리기법, 데이터 이동기법과 EKF방법의 순환기법을 이용하여 로봇 비전알고리즘의 제어기법을 개발하였다.

개발된 제어기법을 사용하여 제 6장에서 각 제어기법의 비전시스템 모델의 적합성을 비교하고 점 이동 타겟 추적 실험에 N-R방법의 일괄처리기법, 데이터 이동기법과 EKF방법의 순환기법을 적용하여 데이터의 양이 처리 시간에 미치는 영향을 비교하고, 고정된 얇은 막대 배치 실험에는 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 이용하여 장애물이 없는 경우와 장애물이 출현하는 경우 정밀도와

처리시간에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

일반적으로 고정 타겟에 대한 실험이 선행되어야 하지만 본 연구에서는 방위를 고려하지 않고 위치만을 고려하는 1cue를 사용하는 점 이동 타겟에 대한 실험을 먼저 수행하고 나서 방위까지 모두 고려해야하는 2cue를 사용하는 얇은 막대 배치 실험을 진행하였다.

이에 대한 주요 연구내용은 다음과 같다.

(1) 비전시스템 모델

(2) 로봇 비전알고리즘의 수학적 모델링

- ① N-R방법
- ② EKF방법

(3) 로봇 비전알고리즘의 제어기법

- ① 고정 타겟
  - 장애물이 없는 경우 N-R방법의 일괄처리기법
  - 장애물 출현 시 N-R방법의 일괄처리기법
  - 장애물이 없는 경우 EKF방법의 순환기법
  - 장애물 출현 시 EKF방법의 순환기법
- ② 이동 타겟
  - N-R방법의 일괄처리기법
  - N-R방법의 데이터 이동기법
  - EKF방법의 순환기법

(4) 실험장치 구성 및 방법

(5) 실험결과

- ① 점 이동 타겟 추적
  - N-R방법의 일괄처리기법을 이용한 점 이동 타겟 추적
  - N-R방법의 데이터 이동기법을 이용한 점 이동 타겟 추적

- EKF방법의 순환기법을 이용한 점 이동 타겟 추적
- ② 고정된 얇은 막대 배치
- 장애물이 없는 경우 N-R방법의 일괄처리기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치
  - 장애물 출현 시 N-R방법의 일괄처리기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치
  - 장애물이 없는 경우 EKF방법의 순환기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치
  - 장애물 출현 시 EKF방법의 순환기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치

## 제 2 장 비전시스템 모델

### 2.1 기구학 모델

로봇의 기구학은 로봇에 대한 관절각이 주어졌을 때, 로봇 베이스 좌표계에 대한 로봇의 위치 벡터를 구하는 것이다.

Fig. 2-1은 본 연구의 점 이동 타겟 추적실험에 사용한 4축 스카라 타입 로봇의 링크 인자와 관절 좌표계의 설정을 보여주며, Table 2-1은 로봇의 4개의 관절에 대한 Denavit- Hartenberg(D-H) 링크인자<sup>(25)</sup>를 보여준다.

Table 2-1 Link parameters of 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	$\theta_3$

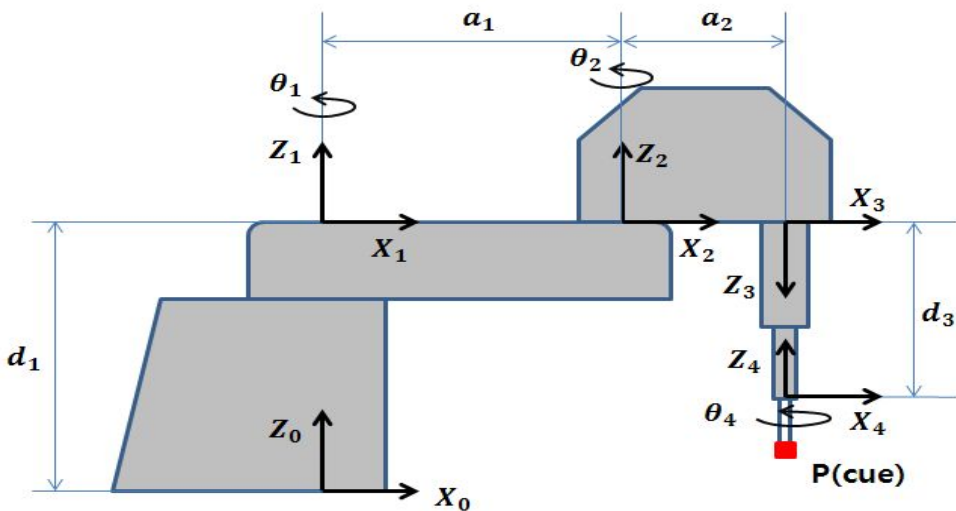


Fig. 2-1 Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot

Table 2-1의 링크인자를 사용하여 계산된 로봇기구학모델의 성분 별 위치는 식(1)과 식(2)에 나타내었다<sup>(25,26)</sup>.

$$\begin{aligned}
 F_x^{i,j} &= \cos(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i)P_x^j - \sin(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i)P_y^j \\
 &\quad + a_2\cos(\theta_1^i + \theta_2^i) + a_1\cos\theta_1^i \\
 F_y^{i,j} &= \sin(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i)P_x^j + \cos(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i)P_y^j \\
 &\quad + a_2\sin(\theta_1^i + \theta_2^i) + a_1\sin\theta_1^i \\
 F_z^{i,j} &= P_z^j + d_1 - d_3 - d_4
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $i$ 는 로봇의 운동궤적에서의 이동단계 수이며,  $a_1, a_2, d_1, d_4$ 는 D-H 링크인자를 나타내며,  $\theta_1^i, \theta_2^i, d_3^i, \theta_4^i$ 는  $i$ 이동단계에서의 로봇 관절각,  $j$ 는 cue의 수를 나타낸다. 또한, 마지막 관절 좌표계의 원점에 부착된 시험모형의 끝점 P에 대한 cue들의 위치벡터( $P_x^j, P_y^j, P_z^j$ )는 다음과 같다.

여기서,

- 점 (1cue)

$$P = (P_x, P_y, P_z) = (0, 0, -96)$$

- 얇은 막대(2cue)

$$P^1 = (P_x^1, P_y^1, P_z^1) = (15, -18.5, -96)$$

$$P^2 = (P_x^2, P_y^2, P_z^2) = (-15, 18.5, -96) \tag{2}$$

## 2.2 비전시스템 모델

본 연구에서 제안된 비전시스템 모델은 6개의 카메라 매개변수( $C_1 \sim C_6$ )를 포함하고 있다. 여기서,  $C_1 \sim C_4$ 는 카메라의 초점거리 및 방향의 불확실성을 설명하는 카메라 내부 매개변수이며,  $C_5$ 과  $C_6$ 은 카메라와 로봇사이의 상대위치에 대한 불확실성을 설명하는 카메라 외부 매개변수이다. 이에 대한 비전시스템 모델은 다음 식(3)에 나타내었다<sup>(25,26)</sup>.

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

여기서,

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2, & C_{12} &= 2(C_2C_3 + C_1C_4), \\ C_{13} &= 2(C_2C_4 - C_1C_3), & C_{21} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4), \\ C_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2, & C_{23} &= 2(C_3C_4 + C_1C_2), \end{aligned} \quad (4)$$

$X_m^{i,j}$ 과  $Y_m^{i,j}$ 는  $i$ 이동단계에서 로봇 끝점  $P^j$ 에 대한 2차원 카메라 좌표를 나타낸다. 여기서,  $j(=1,2)$ 는 큐의 개수이다. 또한  $F_x^{i,j}, F_y^{i,j}, F_z^{i,j}$ 는 2.1절의 식(1)과 식(2)와 같이 큐에 대한 성분별 위치값을 나타낸다.

## 제 3 장 로봇 비전알고리즘의 수학적 모델링

본 연구의 로봇 비전 제어 알고리즘은 2.1절의 성분별 위치 벡터를 이용하여 2.2절의 비전시스템 모델에 포함된 각 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수를 추정하며, 추정된 매개변수를 이용하여 점 이동 타겟에 대한 로봇의 관절각을 추정하는 것이다. 본 논문에서는 N-R방법과 EKF방법을 각각 적용한 2가지 로봇비전 제어 알고리즘을 개발하고자 하며, 3.1절에는 N-R방법을 이용한 로봇비전 제어 알고리즘, 3.2절에는 EKF방법을 이용한 로봇비전 제어알고리즘을 각각 설명한다.

### 3.1 N-R방법

본 연구에 사용된 N-R방법은 카메라 매개변수 추정 기법과 로봇 관절각 추정 기법에 사용된다. 이에 대한 전체적인 흐름은 Fig. 3-1에서 보여주고 있다.

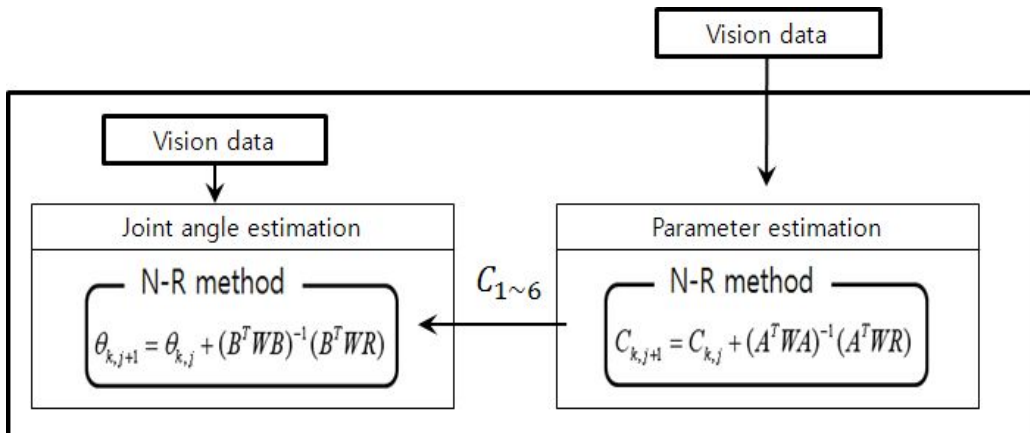


Fig. 3-1 Schematic diagram of N-R Method

#### 3.1.1 카메라 매개변수 모델

로봇이 점 이동 타겟이 주어진 운동 궤적을 따라 이동 할 때 각 이동 단계에서 로봇 끝점  $P^j$ 에 대한 비전 데이터와 로봇 관절각이 얻어진다면, 6개의 매개변수를



추정하기 위해 각 카메라에 대하여 식(5)과 같이 성능지수를 정의한다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1} [X_m^{i,j} - X_c^{i,j}]^2 + [Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j}]^2 \quad (5)$$

여기서,  $k(=1,2,\dots,6)$ 는 매개변수의 개수,  $i$ 는 로봇 운동궤적에서의 이동단계 수를 나타내며,  $j$ 는 로봇의 말단부에 부착된 큐의 개수이다.  $X_c^{i,j}$ ,  $Y_c^{i,j}$ 는 로봇의 각 이동 단계에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점  $P^j$ 에 대한 실제 비전데이터 값들이다.  $X_m^{i,j}$ ,  $Y_m^{i,j}$ 은 2.2절의 비전시스템 모델에서 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 을 포함한 비전시스템 모델 값을 나타낸다.

식(5)를 N-R 방법을 적용하여 최소화 시키면 식(6)과 같이 나타낸다<sup>(27,28)</sup>.

$$\begin{aligned} C_{k,l+1} &= C_{k,l} + \Delta C \\ &= C_{k,l} + (A^T W A)^{-1} A^T W R \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $l$ 은 계산과정에서 반복된 횟수이며,  $W$ 는 일반적으로 단위행렬을 사용하는 가중행렬이다. 또한,  $A$ 는  $(2n \times j) \times 6$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식(7)과 같이 주어지며,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial C_6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$R$ 은  $(2n \times j) \times 1$ 요소를 가지는 유수벡터로 식(8)과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^{1,1} - X_c^{1,1} \\ Y_m^{1,1} - Y_c^{1,1} \\ X_m^{1,2} - X_c^{1,2} \\ Y_m^{1,2} - Y_c^{1,2} \\ \vdots \\ X_m^{i,j} - X_c^{i,j} \\ Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(6)의  $\Delta C$ 가 0에 근접할 때까지 반복적인 계산이 이루어지며, 유수벡터  $R$ 이 허용오차를 만족하였을 때 최종적으로 3대 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수가 추정된다.

### 3.1.2 로봇 관절각 모델

3.1.1절에서 각각의 3대 카메라에 대한 6개의 카메라 매개변수가 추정되면, 이를 이용하여 타겟에 대한 로봇 관절각  $\theta_i (i = 1 \sim 4)$ 을 추정하기 위해 다음 식(9)과 같이 성능지수를 정의하였다.

$$J(\theta_i) = \sum_{q=1} \sum_{j=1} [X_m^{q,j}(F_x^j(\theta_i), F_y^j(\theta_i), F_z^j(\theta_i)) - X_c^{q,j}]^2 + [Y_m^{q,j}(F_x^j(\theta_i), F_y^j(\theta_i), F_z^j(\theta_i)) - Y_c^{q,j}]^2 \quad (9)$$

여기서,  $q$ 는 카메라의 개수,  $k$ 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한,  $X_c^{q,j}$ 와  $Y_c^{q,j}$ 는 타겟에 대한  $q$ 번째 카메라에서  $j$ 번째 큐의 카메라 좌표값을 나타내며,  $X_m^{q,j}$ 와  $Y_m^{q,j}$ 는 추정된 카메라 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 에 근거한  $q$ 번째 카메라에서 끝점  $P^j$ 의 추정된 비전시스템 모델값이다.

식(9)를 N-R방법으로 최소화시키면 식(10)과 같다<sup>(27,28)</sup>.

$$\begin{aligned}\theta_{i,l+1} &= \theta_{i,l} + \Delta\theta \\ &= \theta_{i,l} + (B^T W B)^{-1} B^T W R\end{aligned}\quad (10)$$

여기서,  $l$ 은 계산과정 중 반복된 횟수이며,  $W$ 는 가중행렬로서 본 연구에서는 단위행렬을 사용하였다. 또한,  $B$ 는  $(2 \times q \times j) \times 4$ 의 크기를 가지는 자코비안 행렬로 식(11)과 같이 주어지며,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^{1,2}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^{1,2}}{\partial \theta_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \end{bmatrix}\quad (11)$$

$R$ 은  $(2 \times q \times j) \times 1$ 의 크기를 가지는 유수벡터로 식(12)과 같이 주어진다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^{1,1} - X_t^{1,1} \\ Y_m^{1,1} - Y_t^{1,1} \\ X_m^{1,2} - X_t^{1,2} \\ Y_m^{1,2} - Y_t^{1,2} \\ \vdots \\ X_m^{q,j} - X_t^{q,j} \\ Y_m^{q,j} - Y_t^{q,j} \end{bmatrix}\quad (12)$$

식(10)의  $\Delta\theta$ 는 3.1.1절의 카메라 매개변수 추정 기법과 마찬가지로 0에 근접할 때까지 반복적인 계산을 하며, 유수벡터  $R$ 이 허용오차를 만족하였을 때 최종적으로 타겟에 대한 로봇 관절각( $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$ )이 추정된다.

### 3.2 EKF방법

Fig. 3-2는 본 연구에 사용된 EKF 방법의 전체적인 흐름을 보여주며, EKF 방법의 칼만 이득값  $K_k$ 를 구하기 위해 사용된 방정식의 자코비안  $H_k$ 는 측정데이터를 정확히 전달하거나 확대하기 위하여 사용된다. 또한, Fig. 3-2에서 보여준 EKF방법의 측정모델 보강과 예측모델을 사용하여 각 카메라에 대한 매개변수와 타겟에 대한 로봇 관절각을 추정한다.

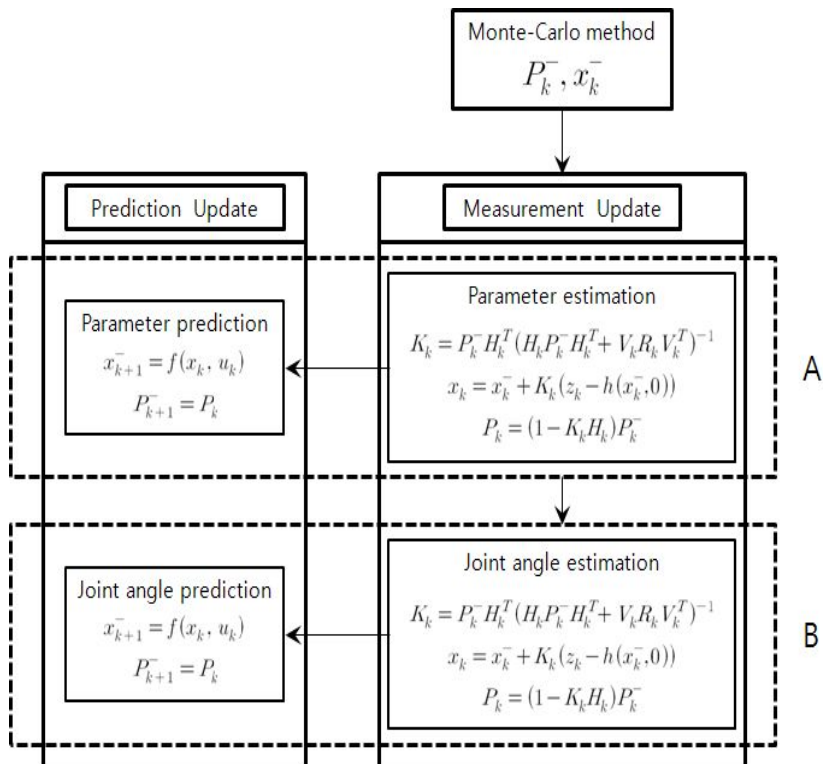


Fig. 3-2 Schematic diagram of EKF Method

### 3.2.1 카메라 매개변수 모델

비전시스템 모델에 포함된 불확실한 6개 카메라 매개변수를 EKF방법을 이용하여 추정하기 위해서는 Fig. 3-2의 A에서 보여준 비선형 함수인  $f$ 와  $h$ 를 정의하는 것이 필요하다.

예측 모델에 대한 함수  $f$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$f(x_k, u_k) = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6]^T \quad (13)$$

또한, 측정 모델에 대한 함수  $h$ 는 2.2절에 주어진 비전시스템 모델을 사용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} h(x_k^-, 0) &= \begin{bmatrix} h_x^{i,j} \\ h_y^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m^{i,j} \\ Y_m^{i,j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)F_x^{i,j} + 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_y^{i,j} + 2(C_2C_4 - C_1C_3)F_z^{i,j} + C_5 \\ 2(C_2C_3 - C_1C_4)F_x^{i,j} + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)F_y^{i,j} + 2(C_3C_4 - C_1C_2)F_z^{i,j} + C_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $i$ 는 로봇이 이동한 단계를 나타내며,  $j(=1,2)$ 는 로봇 말단부에 부착된 큐의 개수이다. 이렇게 정의된  $f$ 함수와  $h$ 함수를 이용하여 6개의 카메라 매개변수를 추정한다.

#### 가. 측정모델의 보정

측정모델의 보정 방정식은 칼만 이득값  $K_k$ , 각각의 카메라에 대한 매개변수  $x_k$  및 오차 공분산  $P_k$ 로 크게 3개로 구성된다.

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (15)$$

$$x_k = x_k^- + K_k (z_k - h(x_k^-, 0)) \quad (16)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (17)$$

여기서,

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

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial h_x^{i,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial h_y^{i,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_2} & \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_3} & \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_4} & \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_5} & \frac{\partial h_x^{i,2}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_1} & \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_2} & \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_3} & \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_4} & \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_5} & \frac{\partial h_y^{i,2}}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Z_k = [X_c^{i,1} \ Y_c^{i,1} \ X_c^{i,2} \ Y_c^{i,2}]^T \quad (19)$$

또한, 식(17)의 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분  $V_k R_k V_k^T$ 는 단위행렬을 사용하였으며, 식(21)의  $X_c^{i,j}$ 와  $Y_c^{i,j}$ 는 로봇이 이동하는 동안 각 단계에서 j번째 큐에 대한 카메라에서 측정된 비전 데이터 x성분과 y성분을 나타낸다.

## 나. 예측 모델

공정모델의 예측 방정식은 잡음에 의한 영향성분을 모두 단위행렬을 사용하였으므로 매개변수 예측  $x_{k+1}^- = x_k$ 와 오차 공분산값  $P_{k+1}^- = P_k$ 로 정의되어 다음 단계의 초기값으로 정의된다.

### 3.2.2 로봇 관절각 모델

3.2.1절에서 추정된 3대의 카메라 매개변수( $C_1 \sim C_6$ )를 사용하여 로봇의 4개 관절각( $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$ )을 Fig. 3-2의 B에서 보여준 EKF방법으로 추정한다. 관절각 추정을 위해 비전시스템 모델식 (3)과 (4)를 변형하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_c^{q,j} &= (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)F_x^{q,j}(\theta_i) + 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_y^{q,j}(\theta_i) \\
 &\quad + 2(C_2C_4 - C_1C_3)F_z^{q,j}(\theta_i) + C_5^q \\
 Y_c^{q,j} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4)F_x^{q,j}(\theta_i) + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)F_y^{q,j}(\theta_i) \\
 &\quad + 2(C_3C_4 - C_1C_2)F_z^{q,j}(\theta_i) + C_6^q
 \end{aligned} \tag{20}$$

여기서,  $q(=1 \sim 3)$ 는 사용된 카메라 개수이고,  $X_t^{q,j}$ 와  $Y_t^{q,j}$ 는 로봇이 이동하는 동안  $q$ 번째 카메라에서 큐에 대한 측정된 비전 데이터의  $x$ 성분과  $y$ 성분을 나타내며,  $\theta_i(=\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 는 로봇을 구동하기 위해 추정되어야 할 알려지지 않은 로봇 관절 각이다.

3.2.1절에서 EKF방법의 카메라 매개변수 추정과 같이 관절각을 추정하기 위해서는 Fig. 3-2 B에서 보여준 공정 및 측정모델에 대한 방정식 식(13), 식(14)의 함수  $f$ 와  $h$ 를 정의하는 것이 필요하며, 식(13)에 주어진 공정 모델에 대한 함수  $f$ 는 다음 식(21)과 같이 정의한다.

$$f(x_k, u_k) = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad d_3 \quad \theta_4]^T \tag{21}$$

또한, 식(14)에 주어진 측정 모델에 대한 함수  $h$ 는 식(22)에 주어진 식을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$h(x_k, 0) = \begin{bmatrix} h_x^{q,1} \\ h_y^{q,1} \\ h_x^{q,2} \\ h_y^{q,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{C_t}^{q,1} \\ Y_{C_t}^{q,1} \\ X_{C_t}^{q,2} \\ Y_{C_t}^{q,2} \end{bmatrix} \tag{22}$$

### 가. 측정모델의 보정

측정모델의 보정 방정식은 칼만 이득값  $K_k$ , 사용한 카메라의 매개변수  $x_k$  및 오차 공분산  $P_k$  등 크게 3개로 구성된다.

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (23)$$

$$x_k = x_k^- + K_k (z_k - h(x_k^-, 0)) \quad (24)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (25)$$

여기서,

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h^{q,j}}{\partial \theta_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_x^{q,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_x^{q,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_x^{q,1}}{\partial d_3} & \frac{\partial h_x^{q,2}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial h_y^{q,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_y^{q,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_y^{q,1}}{\partial d_3} & \frac{\partial h_y^{q,2}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial h_x^{q,2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_x^{q,2}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_x^{q,2}}{\partial d_3} & \frac{\partial h_x^{q,2}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial h_y^{q,2}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial h_y^{q,2}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial h_y^{q,2}}{\partial d_3} & \frac{\partial h_y^{q,2}}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Z_k = [X_c^{i,1} \ Y_c^{i,1} \ X_c^{i,2} \ Y_c^{i,2}]^T \quad (27)$$

또한,  $q$ 는 사용한 카메라 개수를 나타내며, 측정모델의 잡음에 의한 영향 성분  $V_k R_k V_k^T$ 는 동등한 가중치를 주는 단위행렬로 정의하였다.

## 나. 예측 모델

공정모델의 예측 방정식은 잡음에 의한 영향성분을 모두 단위행렬을 사용하였으므로 매개변수 예측  $x_{k+1}^- = x_k$ 와 오차 공분산값  $P_{k+1}^- = P_k$ 로 정의되어 다음 단계의 초기값으로 정의된다.



### 3.2.3 EKF방법의 초기값 추정

EKF방법을 카메라 매개변수 및 로봇 관절각 추정기법에 적용하고자 할 때, 초기 상태 변수와 초기 오차 공분산을 효과적으로 계산하는 것이 매우 중요하다. 이리하여 본 연구에서는 EKF방법에 필요한 초기값의 정확한 계산을 위해 Monte-Carlo 방법을 이용한다. 이에 대한 절차는 Fig. 3-3에서 보여준다.

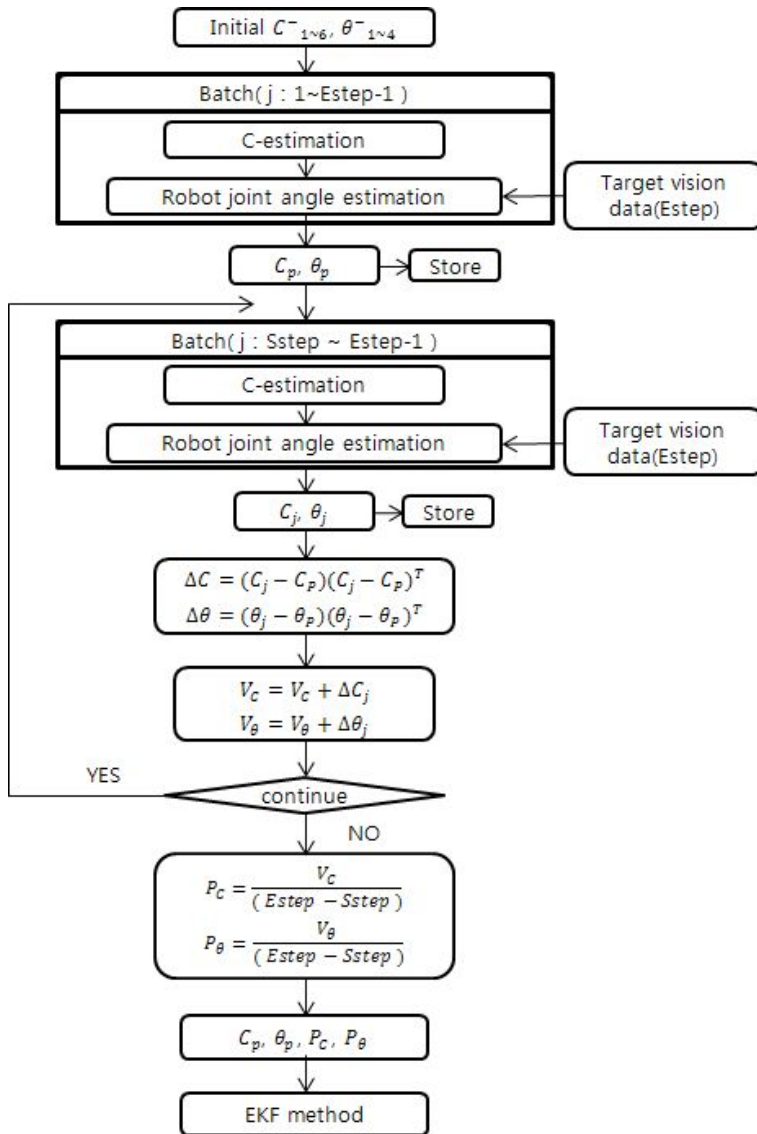


Fig. 3-3 Procedures of Monte-Carlo method

여기서, 본 논문의 제어 알고리즘을 적용하는데 있어서 초기 구동 단계는 10단계로 설정하였다. 위 EKF방법의 초기값 추정을 위해 사용한 Monte-Carlo방법은 일괄처리(Batch)방법을 적용하는데, 컴퓨터 시뮬레이션 결과 초기 상태변수인 카메라 매개변수  $C$ 값과 관절각  $\theta$ 값을 계산하는데 최소 5단계 데이터가 필요하였다. 이리하여 오차공분산 행렬을 계산하기 위해 Sstep은 6번째 단계, 초기구동의 마지막 단계인 Estep은 10번째 단계로 설정하고, 이 단계는 타겟으로 이용하였다. 그리하여 계산되어진 카메라 매개변수 초기값  $C_p$ , 로봇 관절각 초기값  $\theta_p$ , 초기 오차 공분산 행렬  $P_c$ ,  $P_\theta$ 는 3.2.1절과 3.2.2절의 EKF방법의 초기값으로 사용된다.

## 제 4 장 로봇 비전알고리즘의 제어기법

앞 절에서 제시된 로봇 비전시스템의 수학적 모델링에 대한 효율성을 보이기 위해 방위와 위치를 모두 고려하는 얇은 막대를 이용한 고정 타겟 추정실험과 위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정 실험에 적용하여 서로 비교 및 평가하였다.

### 4.1 고정 타겟에 대한 제어기법

얇은 막대 고정 타겟에는 반복적인 기법을 사용하는 N-R방법과 순환적 기법을 사용하는 EKF방법을 적용한 제어 기법을 개발하였다.

#### 4.1.1 N-R방법의 일괄처리기법

N-R방법의 일괄처리기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정실험은 로봇이 운동궤적을 따라 이동하는 동안 장애물이 발생하지 않았다는 가정 하에 비전데이터를 처리하는 방법이 기본이 되고 로봇 이동 도중에 장애물이 3가지 구역으로 나뉘어 출현하였을 경우 비전데이터를 획득하지 못해도 이미 획득된 비전데이터를 처리하는 과정을 설명한다.

#### 가. 장애물이 없는 경우

##### (1) 비전데이터 획득 및 처리

Fig. 4-1에서는 고정 타겟에 대한 N-R방법의 일괄처리기법에 대한 데이터 처리 방법을 보여주고 있다. N-R방법은 정밀도에 초기값이 큰 영향을 미치지 않는으나 EKF방법과 비교를 위해 초기 단계를 설정하고 얇은 막대 고정 타겟을 향해 로봇이 운동궤적을 따라 이동하는 동안 카메라 3대를 이용하여 비전데이터를 측정한다.

측정된 비전데이터를 이용하여 고정된 타겟을 추정하기 위해서 N-R방법의 일괄처리기법은 로봇이 이동하는 첫 번째 데이터부터 타겟 이전까지의 모든 데이터를

용하여 계산한다.

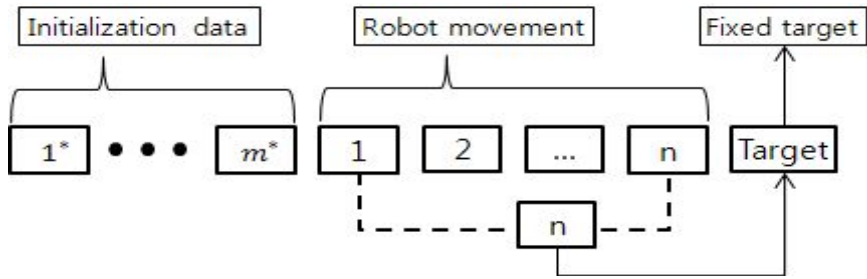


Fig. 4-1 Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with no obstacle

Table 4-1은 장애물이 없는 일반적인 상태에서 얇은 막대에 대한 비전데이터가 축적되어지는 표를 예시로 보여주고 있다. 장애물이 발생하지 않았기 때문에 한 단계 당 cue 2개의 데이터가 차례로 축적되어 41개의 단계 동안 총 82개의 데이터를 획득한다.

Table 4-1 For an example, vision data with no obstacle

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	1	2	x	y
3	2	1	x	y
4	2	2	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	40	1	x	y
80	40	2	x	y
81	41	1	x	y
82	41	2	x	y

(2) 제어기법

Fig. 4-2에서는 로봇이 고정된 타겟까지 이동하는 동안 장애물이 발생하지 않았다는 가정 하에 N-R방법의 일괄처리기법을 적용한 고정된 얇은 막대 배치 작업을 위한 제어기법의 흐름을 보여주고 있다.

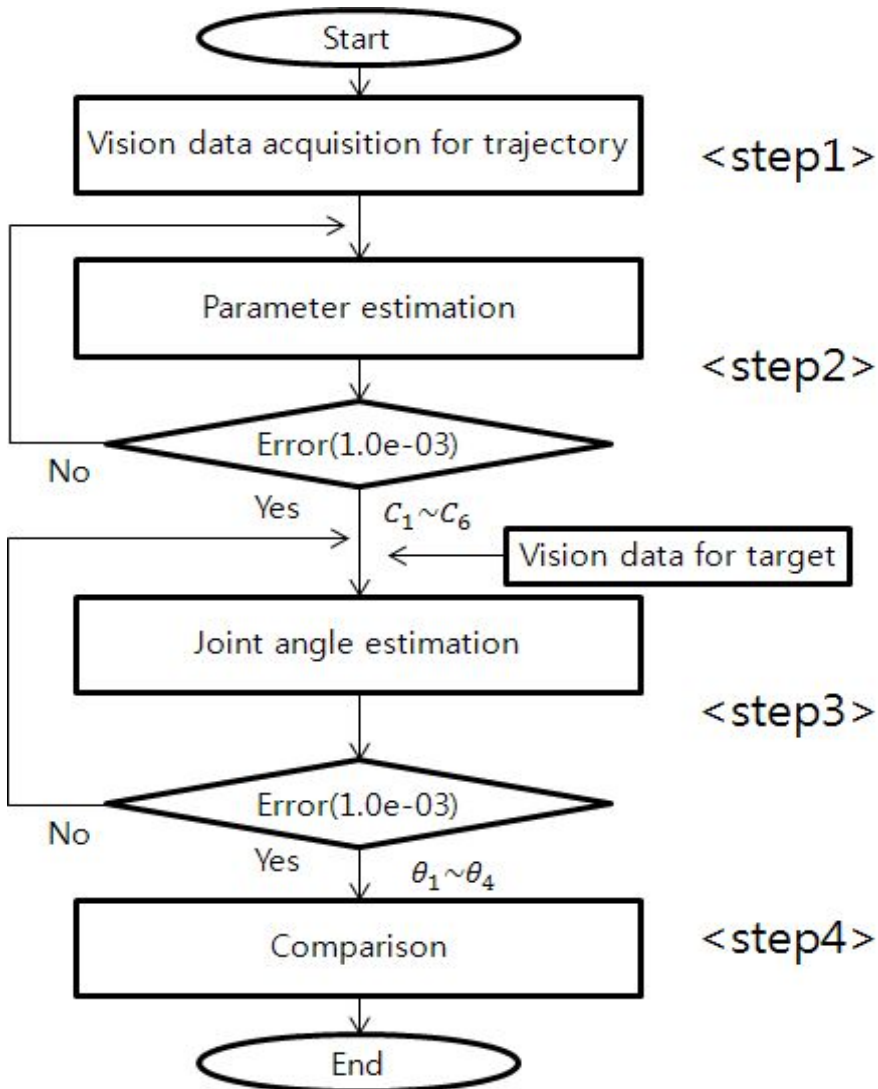


Fig. 4-2 Batch control scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with no obstacle

① 단계 1

앞 절의 (1) 비전데이터 획득 및 처리에서 설명하였던 것처럼 로봇이 설정된 로봇 운동 궤적을 따라 고정된 얇은 막대 타겟을 향해 이동하는 동안 지정된 step에서 3대의 카메라 각각의 비전데이터를 획득한다.

② 단계 2

단계1에서 획득된 비전데이터와 초기 값을 3.1.1절에서 설명한 매개변수 추정 모델에 의하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다.

③ 단계 3

추정된 각 카메라에 대한 매개변수와 얇은 막대 고정 타겟에 대한 비전데이터를 로봇 관절각 추정 모델에 적용하여 얇은 막대 고정 타겟에 대한 로봇의 관절각을 추정한다.

④ 단계 4

추정된 관절각과 실제 관절각을 비교하기 위해 오차값을 계산한다.

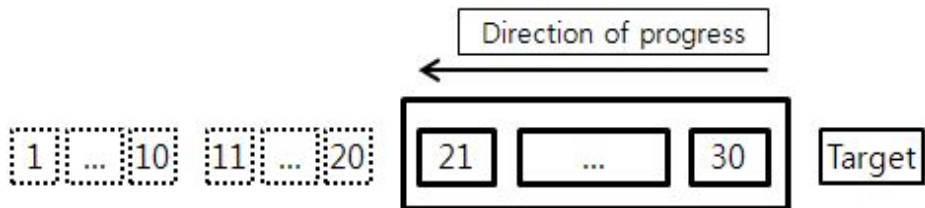
⑤ 단계 5

장애물이 없는 경우의 오차 값을 기본으로 하여 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 실험의 결과가 타당한지를 판단한다.

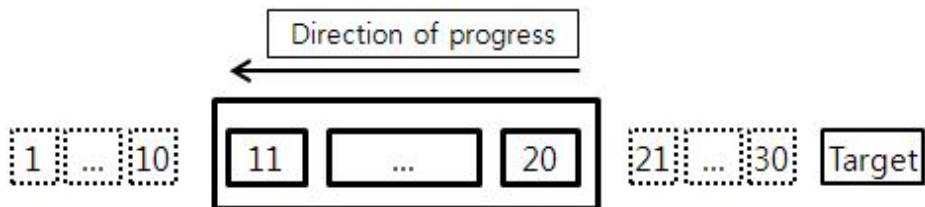
## 나. 장애물이 출현하는 경우

### (1) 비전데이터 획득 및 처리

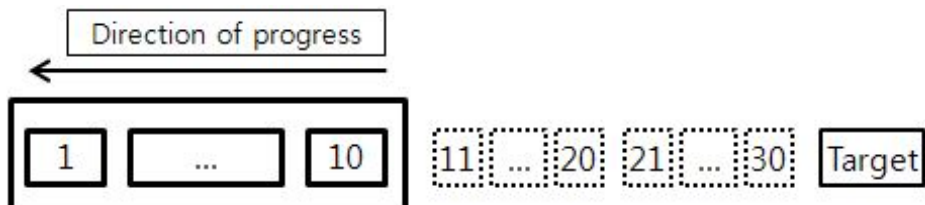
로봇이 타겟까지 이동하는 동안 장애물이 출현 하였을 경우 비전데이터 처리 방법을 Fig. 4-3과 Fig. 4-4에서 보여주고 있다. Fig. 4-3에서 보여주는 것처럼 장애물 구간을 크게 Case 1번 타겟 근처, Case 2번 운동궤적의 중간 영역, Case 3번 운동궤적 시작 영역 3구간으로 나누고 각 구간에서 장애물이 하나씩 증가하여 10개 단계 동안 장애물이 출현하도록 설정하여 총 30번의 실험을 진행하였다. Fig. 4-4는 일정 간격  $z$ 개 동안 장애물이 출현 하였을 때 N-R방법의 일괄처리기법을 이용하여 고정 타겟 추정 시 사용하는 비전데이터의 범위를 나타내고 있다.



(a) Case 1; Obstacles region near target



(b) Case 2; Intermediate obstacles region



(c) Case 3; Beginning obstacles region

Fig. 4-3 Obstacle regions of N-R method

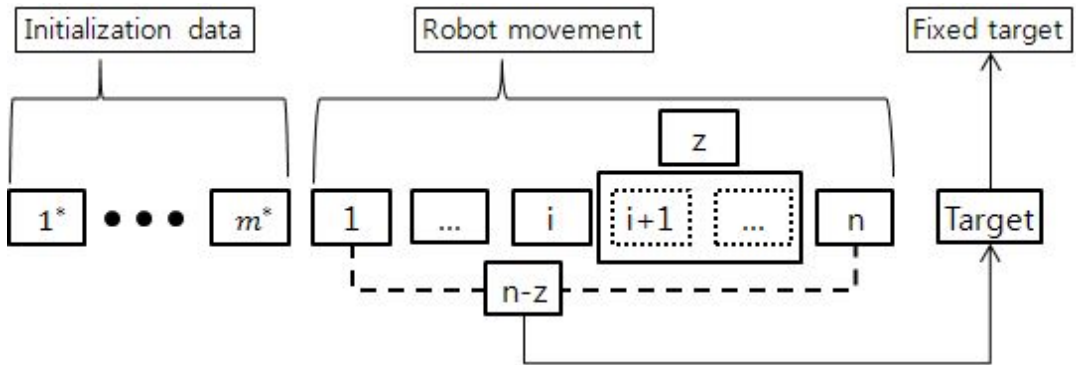


Fig. 4-4 Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with obstacles

Fig. 4-5에서는 장애물이 출현했을 경우 비전데이터를 새로 넘버링 하고, 로봇이 이동하는 동안 장애물을 제외한 전체 데이터의 개수를 확인하는 알고리즘을 보여 주고 있다. 여기서 nd는 Data number, po는 Position, cu는 큐 번호, xi와 yi는 비전데이터를 의미한다.

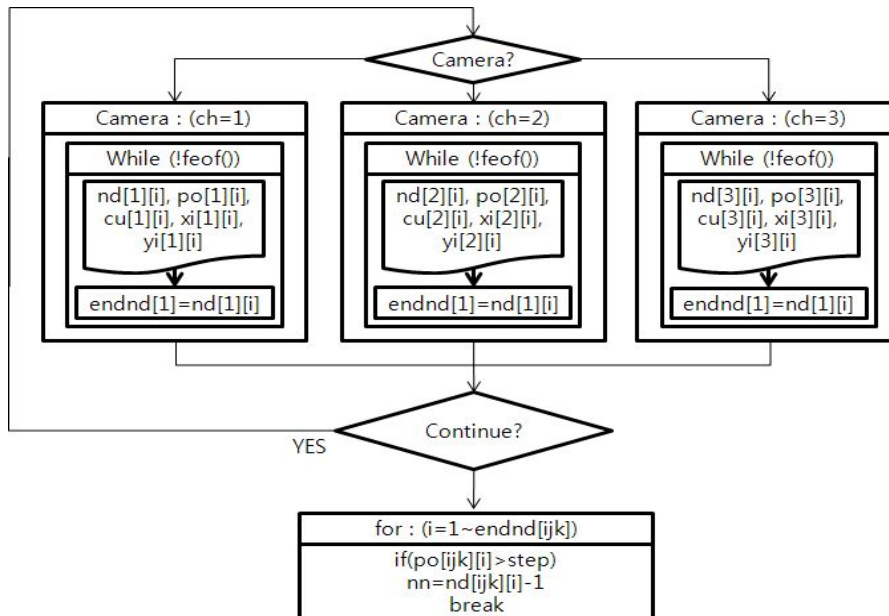


Fig. 4-5 Data processing procedures for numbering vision data using the batch scheme with obstacles N-R method



Table. 4-2는 Fig. 4-5를 통해 장애물이 출현하는 상황 중 타겟 근처 10단계 동안 비전데이터를 획득하지 못하였을 경우 축적되는 예시를 표로 보여주고 있다. 한 단계 당 cue  $i$ (2개)개의 데이터가 차례로 축적되어  $n$ 개의 단계 동안 장애물 출현  $z$ 개(10개)를 제외한 총  $(n-2) \times i$ 개의 데이터를 획득한다.

Table 4-2 For an example, vision data with case 1

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	1	2	x	y
3	2	1	x	y
4	2	2	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	30	1	x	y
60	30	2	x	y
61	41	1	x	y
62	41	2	x	y

(2) 제어기법

장애물 출현 시 N-R방법의 일괄처리기법을 적용한 고정된 얇은 막대 배치 작업의 순서도를 Fig. 4-6에서 보여주고 있다.

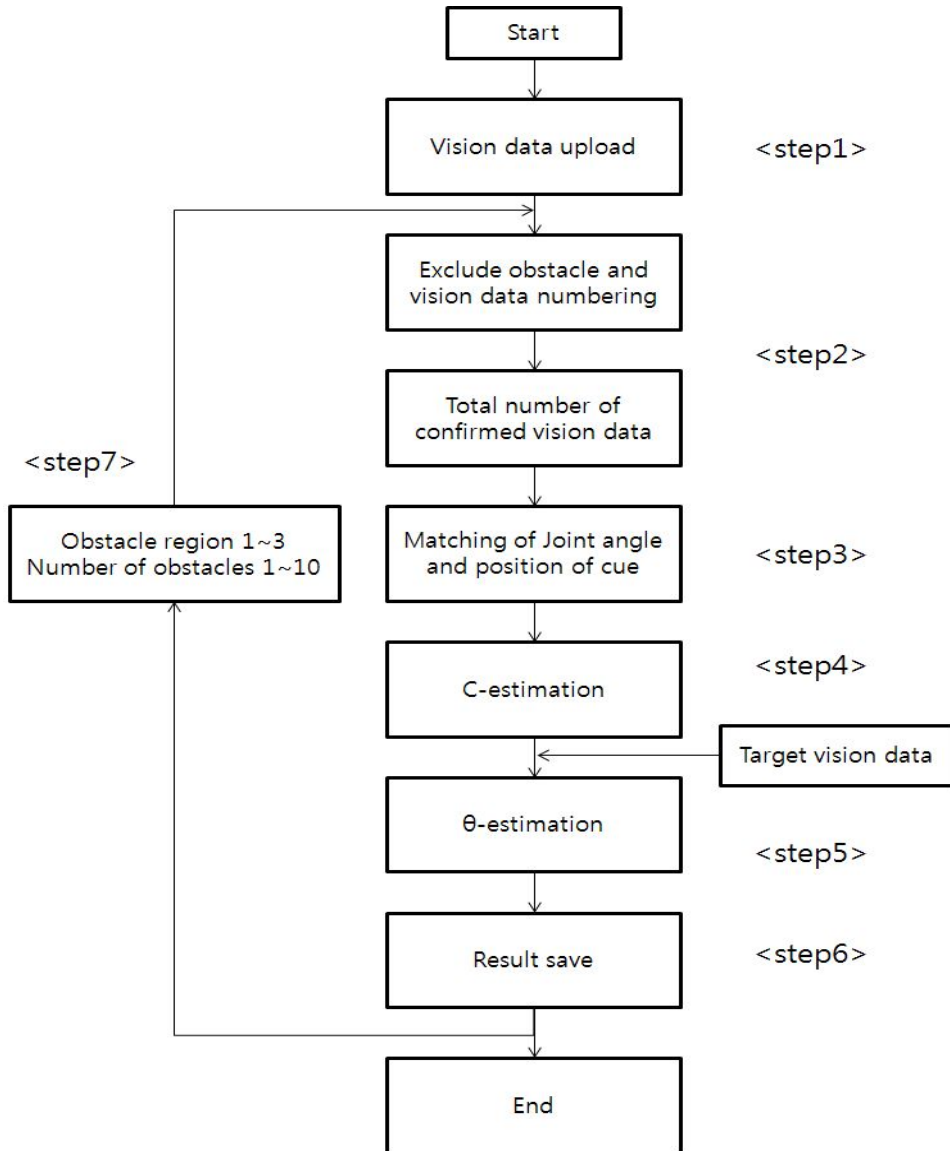


Fig. 4-6 Batch control scheme of N-R method for the fixed slender bar placement with obstacles

① 단계 1

얇은 막대 고정 타겟을 향해 로봇이 이동하는 동안 각 카메라에 대해서 측정된 비전데이터를 배열에 맞게 업로드 시킨다.

② 단계 2

앞 절의 (1)비전데이터 획득 및 처리 부분에서 설명 하였듯이 로봇이 이동하는 동안 측정되어진 카메라 비전데이터를 Data number, Position, Cue number, x-y좌표를 순서대로 저장하고 저장된 비전데이터의 총 데이터 개수를 확인하여 다음 계산에 필요한 데이터의 개수를 정한다.

③ 단계 3

Fig. 4-7에 보여준 알고리즘을 통해 로봇 정기구학 계산을 위해 큐의 Position값에 해당하는 관절각을 매칭시킨다.

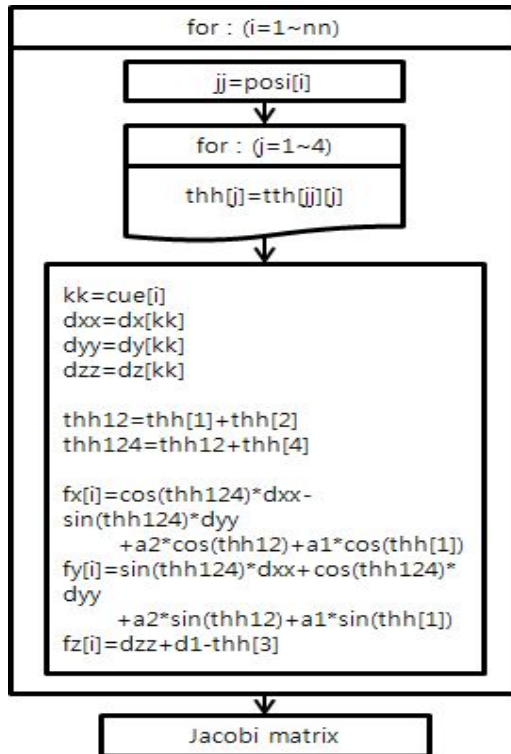


Fig. 4-7 Matching method of joint angles and cue positions

④ 단계 4

매칭된 데이터를 토대로 3.1.1에서 설명한 매개변수 추정모델에 적용하여 C매개변수를 계산한다.

⑤ 단계 5

계산된 C매개변수와 타겟 비전데이터를 로봇 관절각 추정모델에 적용하여 얇은 막대 고정 타겟의 관절각을 추정한다.

⑥ 단계 6

관절각 추정 모델에서 추정된 관절각 값과 실제 관절각 값을 비교하여 계산된 결과값을 저장한다.

⑦ 단계 7

한 장애물 구간 당 장애물 개수가 하나씩 증가하면서 10번의 실험을 반복하여 진행한다.

### 4.1.2 EKF방법의 순환기법

방위와 위치를 고려하는 2cue를 이용한 얇은 막대 고정타겟에 EKF방법의 순환 기법을 적용하여 로봇이 이동하는 동안 장애물이 발생하지 않았다는 가정 하에 비전데이터를 처리하는 실험과 로봇 이동 도중에 장애물이 발생하여 비전데이터를 획득하지 못하는 경우에 데이터를 처리 하는 과정을 설명한다.

#### 가. 장애물이 없는 경우

##### (1) 비전데이터 획득 및 처리

순환적 기법을 사용하는 EKF방법은 Fig. 4-8에서 보여주는 것과 같이 초기 단계를 이용해 첫 번째 단계의 초기값을 계산한다. 그 계산된 초기값을 이용하여 첫 번째 로봇 이동 단계의 비전데이터를 이용하여 고정된 타겟  $n$ 을 추정한다. 다음 두 번째는 이전단계에서 추정된 값을 초기값으로 사용하여 고정된 타겟  $n$ 을 추정하고, 타겟 이전의 마지막 데이터까지 위 과정을 되풀이하며 위치를 보정해 나간다.

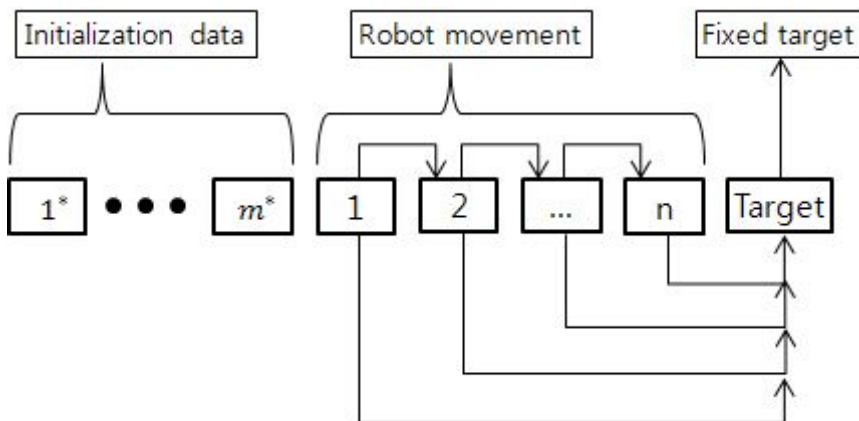


Fig. 4-8 Data processing procedures of the recursive scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with no obstacle

EKF방법의 순환기법을 적용한 고정된 얇은 막대 추정 시 장애물이 발생하지 않았을 경우에 각 카메라에 비전데이터는 Table 4-3과 같이 획득되어진다. 로봇이 고정된 타겟을 향해 이동하는 동안 40단계로 비전데이터를 획득한 결과 총 데이터의 개수는 80개를 획득하고 타겟인 41단계의 비전데이터 2개가 추가로 축적된다.

Table 4-3 For an example, vision data with no obstacle

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	1	2	x	y
3	2	1	x	y
4	2	2	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	40	1	x	y
80	40	2	x	y
81	41	1	x	y
82	41	2	x	y

(2) 제어기법

Fig. 4-9는 장애물이 없는 경우 EKF방법의 순환기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치 작업에 대한 순서도를 보여주고 있다.

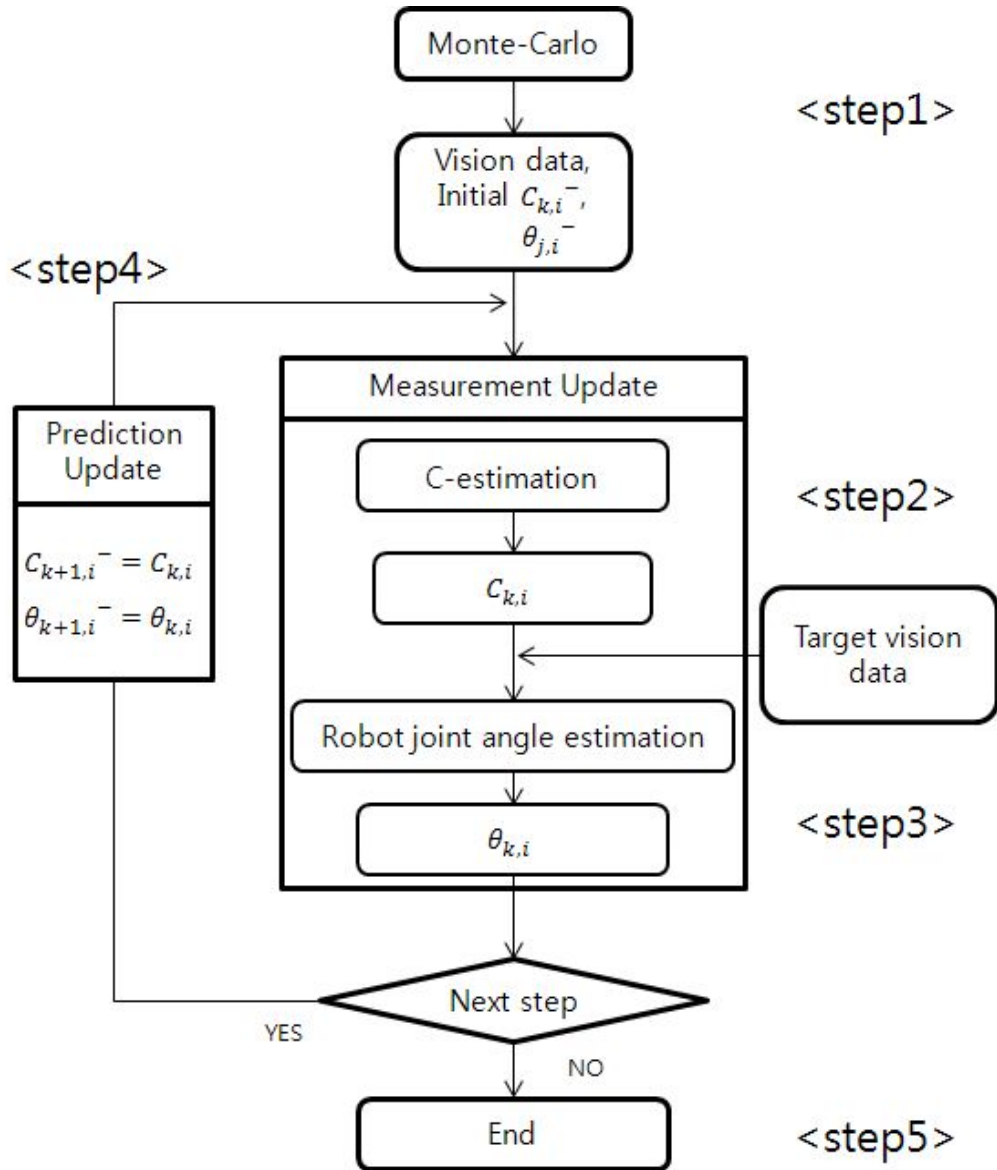


Fig. 4-9 Recursive control scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with no obstacle

① 단계 1

Monte-carlo 방법을 통하여 각각의 카메라에 대한 매개변수의 오차공분산 행렬과 관절각 오차 공분산 행렬 및 초기 매개변수와 초기 관절각 값을 구한다.

② 단계 2

구해진 초기 값들을 EKF방법을 적용시킨 매개변수 추정모델에 대입하여 11번째 단계에 대한 매개변수를 추정한다.

③ 단계 3

추정된 매개변수와 고정된 타겟의 비전데이터를 EKF방법을 적용시킨 로봇 관절각 추정모델에 대입하여 타겟에 대한 관절각을 추정한다.

④ 단계 4

단계 4와 단계 5에서 추정된 값들은 Prediction Update 단계를 거쳐 다음 step의 초기 값으로 사용된다. 다만, 본 논문에서는 Prediction Update에 단위행렬을 사용하였기 때문에 추정된 값들 그대로 초기 값으로 사용된다.

⑤ 단계 5

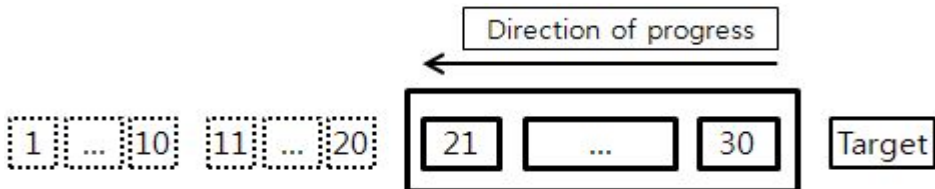
단계 4 ~ 단계 6을 반복하여 최종 step 관절각을 추정하고, 실제 관절각 값과 비교하여 오차를 나타낸다.



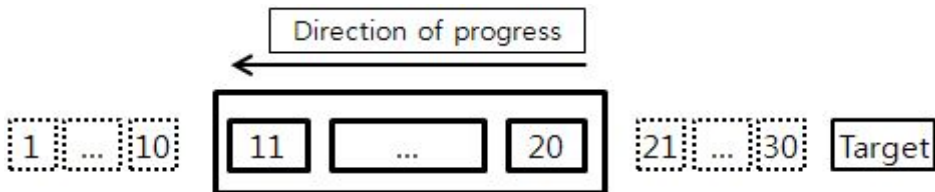
## 나. 장애물 출현하는 경우

### (1) 비전 데이터 획득 및 처리

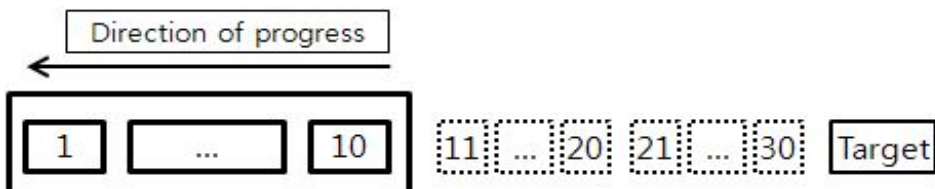
순환적 기법을 사용하는 EKF방법을 적용한 고정된 얇은 막대 추정 실험 시 N-R방법과 마찬가지로 로봇이 타겟까지 이동하는 동안 장애물이 출현 하였을 경우 비전데이터 처리 방법을 Fig. 4-10과 Fig. 4-11에서 보여주고 있다. Fig. 4-10에서 보여주는 것처럼 장애물 구간을 크게 Case 1번 타겟 근처, Case 2번 운동궤적의 중간 영역, Case 3번 운동궤적 시작 영역 3구간으로 나누고 각 구간에서 장애물이 하나씩 증가하여 10개 단계 동안 장애물이 출현하도록 설정하였다. Fig. 4-11은 일정 간격  $z$ 개 동안 장애물이 출현 하였을 때 EKF방법을 이용하여 고정 타겟 추정 시 사용하는 비전데이터의 범위를 나타내고 있다.



(a) Case 1; Obstacles region near target



(b) Case 2; Middle obstacles region



(c) Case 3; Beginning obstacles region

Fig. 4-10 Obstacle regions of EKF method

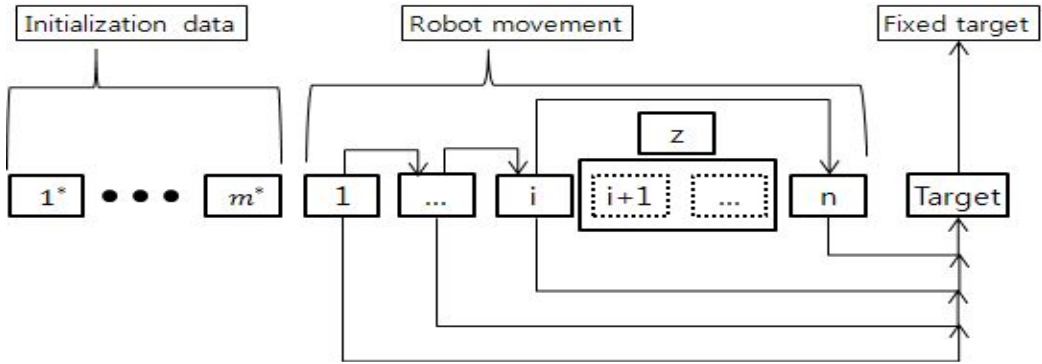


Fig. 4-11 Data processing procedures of the recursive scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with obstacles

Table 4-4에서는 타겟 근처에서 10개의 단계 동안 장애물이 발생하였을 경우에 얻어진 비전데이터의 예시 표를 통해 보여주고 있다. data number는 중간에 장애물이 발생하여도 순서대로 체크되지만 30 단계에서 마지막 타겟인 41 단계 사이에는 데이터가 축적되지 않았다. 그리하여 41번째 1큐의 data number는 61번으로 넘버링하였다.

Table 4-4 For an example, vision data with case 1

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	1	2	x	y
3	2	1	x	y
4	2	2	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	10	1	x	y
20	10	2	x	y
21	11	1	x	y
22	11	2	x	y
23	12	1	x	y
24	12	2	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	30	1	x	y
60	30	2	x	y
61	41	1	x	y
62	41	2	x	y

(2) 제어기법

Fig. 4-12에서는 장애물 출현 시 EKF방법의 순환기법을 이용한 고정된 얇은 막대 배치 작업에 대한 순서도를 보여주고 있다.

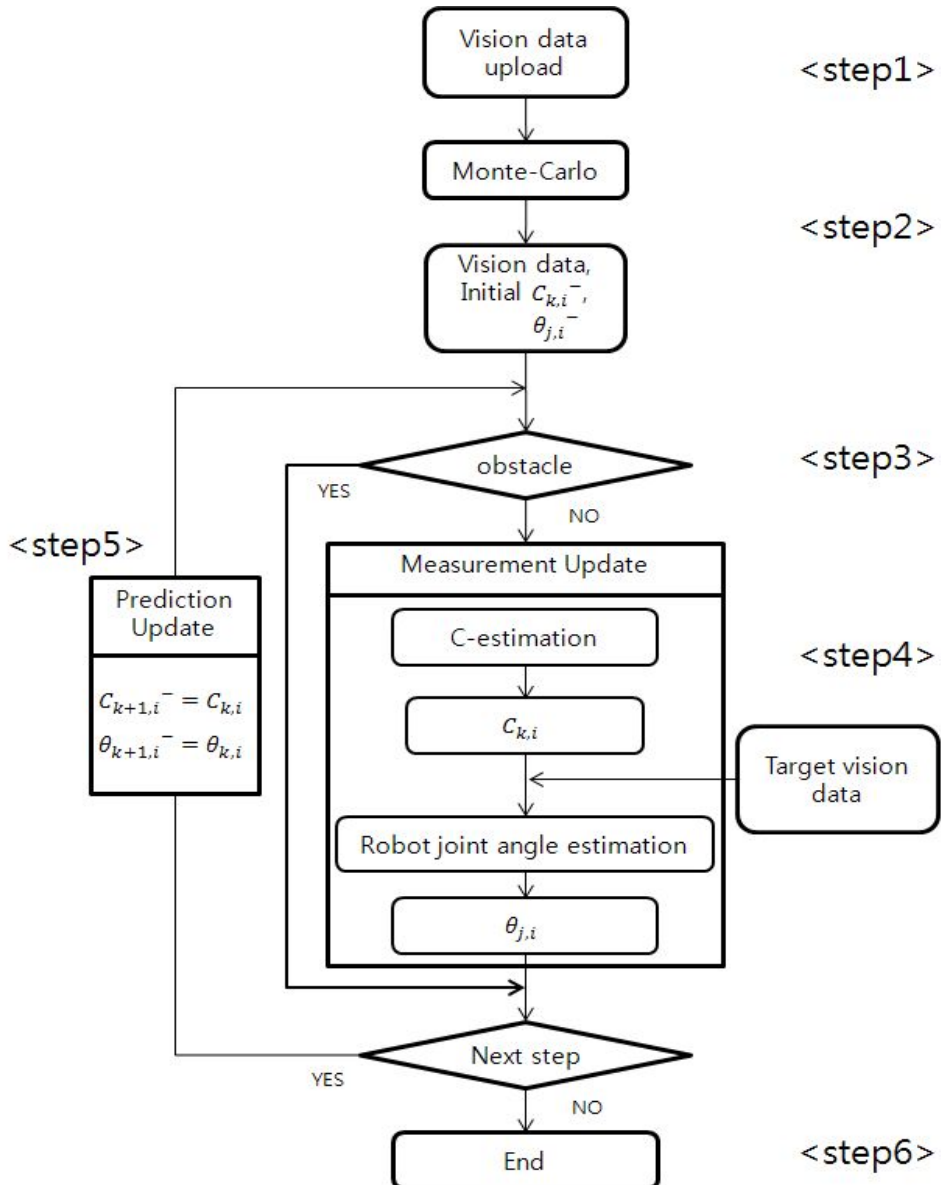


Fig. 4-12 Recursive control scheme of EKF method for the fixed slender bar placement with obstacles

① 단계 1

로봇이 설정된 로봇 운동 궤적을 따라 고정된 얇은 막대 목표물을 향해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 각각의 비전데이터를 획득한다. 자세한 내용은 앞에 (1) 비전데이터 획득 및 처리 부분에서 설명하였다.

② 단계 2

정확한 초기 값 계산을 위해 3.2.3에서 설명한 Monte-Carlo기법을 이용하여 초기 값을 계산한다.

③ 단계 3

Fig. 4-13에서와 같이 If문을 사용하여 장애물이 발생하였을 경우에는 계산에 참여하지 않고 다음 단계로 넘어간다.  $casss$ 는 장애물이 증가할 때마다 1씩 증가하고,  $scas$ 는 장애물 구간을 결정하는 변수이다. 예로 타겟 근처일 때  $scas=40$ 이고, 장애물이 하나이면  $39 < iii <= 40$ 일 경우에는 계산을 하지 않고 다음 단계로 넘어간다. 장애물이 두 개이면  $38 < iii <= 40$ 이므로 2단계 동안 계산에 참여하지 않는다. 반복하여 10개의 장애물을 건너뛰면 다음 장애물 구간이 시작된다.

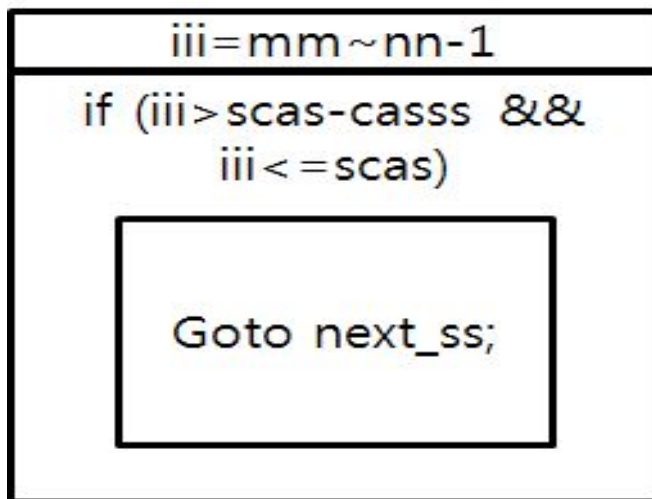


Fig. 4-13 Data processing procedures in obstacle regions using the recursive scheme of EKF method

④ 단계 4

단계 2에서 계산한 초기값과 단계 3에서 출현한 장애물을 제외하고 얻어진 비전 데이터를 3.2.1의 매개변수 추정 모델과 3.2.2의 관절각 추정모델을 통하여 장애물이 발생하지 않은 구간에 한하여 초기 데이터를 가지고 매개변수를 추정하고 추정되어진 매개변수와 타겟 비전데이터를 사용하여 로봇 관절각을 추정한다.

⑤ 단계 5

계산되어진 매개변수와 로봇 관절각은 다음단계 위치 추정을 위해 초기값으로 지정되어 사용한다.

⑥ 단계 6

추정된 관절각과 실제 관절각을 비교하여 오차값을 계산한다.

## 4.2 이동 타겟에 대한 제어기법

위치만을 고려하는 점 이동 타겟에 대하여 N-R방법의 일괄처리기법, 데이터 이동기법과 EKF방법의 순환기법을 적용한 비전제어기법을 개발하였다.

### 4.2.1 N-R방법의 일괄처리기법

#### 가. 비전데이터 획득 및 처리

Fig. 4-14에서 보여준 것과 같이 N-R방법의 일괄처리기법에서는 초기  $m$ 단계를 비전데이터로 사용하여 1번째 타겟을 추정한다. 2번째 타겟을 추정할 때는 1번째 타겟이 비전데이터로 추가되어  $m+1$ 개를 이용하여 계산한다. 이 후 계산도 마찬가지로 계산된 타겟 값이 다음 단계의 타겟을 추정하는데 사용하는 비전데이터로 사용한다.

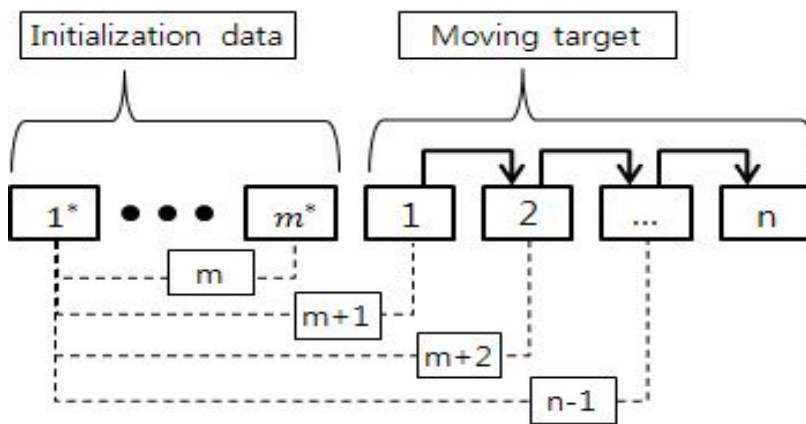


Fig. 4-14 Data processing procedures of the batch scheme of N-R method for the moving target tracking

본 논문에서 사용하는 비전데이터는 Table 4-5에서 10개는 초기 단계이고, 12번부터 41번까지 총 30개의 타겟을 나타내고 있다. 초기단계에서 11번 데이터를 타겟으로 잡고 계산할 때에는 Data number 1번부터 10번까지의 비전데이터를 사용하고, 첫 번째 타겟인 12번을 추정할 때는 1번부터 11번까지의 비전데이터를 사용하여 추정한다.

타겟이 넘어갈 때마다 비전데이터의 개수는 하나씩 들어가면서 마지막 41번째인 30번 타겟을 추정할 때는 Data number 1번부터 40번까지의 비전데이터를 이용하여 계산한다.

Table 4-5 For an example, vision data of moving target in the batch scheme of N-R method

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	2	1	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	9	1	x	y
10	10	1	x	y
11	11	1	x	y
12	12	1	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	40	1	x	y
41	41	1	x	y

### 나. 제어기법

Fig. 4-15에서는 점 이동 타겟에 대한 N-R방법의 일괄처리기법에 대한 흐름을 나타내고 있다.

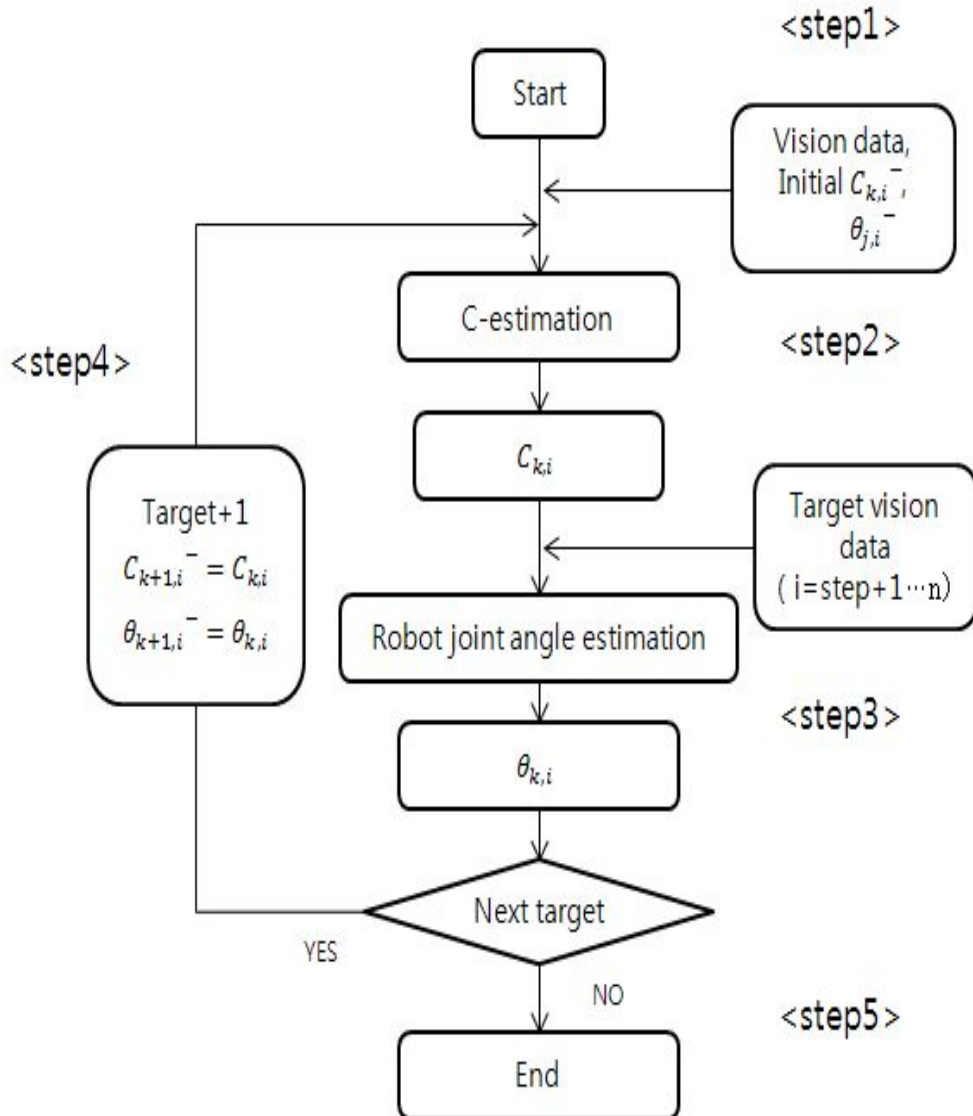


Fig. 4-15 Batch control scheme of EKF method for the moving target tracking



① 단계 1

EKF방법과 비교를 위해 설정한 초기 단계 동안 로봇이 운동하는 궤적을 지정된 step내에서 비전데이터를 획득한다.

② 단계 2

여러 실험을 통해 얻어진 초기 값을 매개변수 추정 기법에 적용하여 첫 번째 타겟에 대한 매개변수를 계산한다.

③ 단계 3

계산된 매개변수와 타겟에 대한 비전데이터 값을 이용하여 로봇 관절각 추정기법으로 관절각을 추정한다.

④ 단계 4

첫 번째 타겟에 관하여 구해진 매개변수와 로봇 관절각을 다음 타겟을 추정하는데 필요한 초기 값으로 지정한다.

⑤ 단계 5

위 과정을 반복 계산하여 마지막 타겟에 대한 관절각을 추정하고, 구해진 관절각들과 실제 관절각들의 오차를 계산한다.

⑥ 단계 6

실험결과를 토대로 데이터 이동기법과 EKF기법을 통해 얻어진 결과를 서로 비교 평가한다.

## 4.2.2 N-R방법의 데이터 이동기법

Newton-Raphson방법을 이용한 데이터 이동기법의 경우 반복적 기법인 N-R방법을 기초로 하지만 동시에 순환적 기법인 EKF방법에서 데이터의 양을 줄이는 방향으로 실험하기 때문에 고정 타겟에 적용하기에는 의미가 없다고 판단되었다. 그래서 이동타겟에 대한 실험에 데이터 이동기법을 적용하였기 때문에 이전 타겟의 비전데이터가 다음 타겟 추정 시 비전데이터로 추가되므로 장애물이 발생 하였을 경우에는 실험을 할 수가 없다고 판단되어 장애물이 발생하지 않는다는 가정 하에 진행하였다.

### 가. 비전데이터 획득 및 처리

Fig. 4-16에서 보여준 것과 같이 N-R방법의 데이터 이동기법은 EKF방법의 순환기법과 비교를 위한 초기  $m$ 단계를 설정하여 첫 번째 타겟을 추정한다. 이후 2번째 타겟을 계산하기 위해서 계산에 필요한 비전데이터 개수를  $P$ 개로 제한하여 실험을 진행한다. 여기서, 로봇 관절각 추정 모델에서 필요로 하는 최소 비전데이터의 개수를 채우지 못하였을 경우 계산 과정에서 오류가 발생하였다.

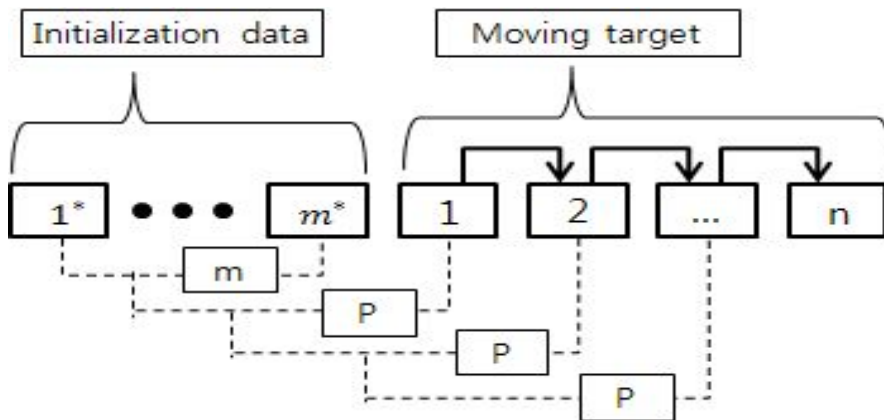


Fig. 4-16 Data processing procedures of the data moving scheme of N-R method for the moving target tracking

본 논문에서는 Table 4-6에서 10개는 초기 단계이고, 12번부터 41번까지 총 30개의 타겟을 나타내고 있다. 초기단계에서는 11번째 데이터를 타겟으로 잡고 계산할 때에는 data number 1번부터 10번까지의 비전데이터를 사용하여 초기값을 계산한다.

타겟으로 지정한 12번째 데이터 즉, 첫 번째 타겟 계산 시에는 Fig.4-16에서 지정한 P개를 본 논문에서는 10로 지정하였기 때문에 2번부터 11번까지의 비전데이터를 사용하여 추정한다. 마지막 41번째인 30번 타겟을 추정할 때는 Data number 31번부터 40번까지의 비전데이터를 이용하여 계산한다.

Table 4-6 For an example, vision data of moving target in the data moving scheme of N-R method

Data No.	Position	Cue	x	y
1	1	1	x	y
2	2	1	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	9	1	x	y
10	10	1	x	y
11	11	1	x	y
12	12	1	x	y
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	40	1	x	y
41	41	1	x	y

## 나. 제어기법

Fig. 4-17에서는 점 이동 타겟에 대한 N-R방법의 데이터 이동기법 처리과정을 나타내고 있다.

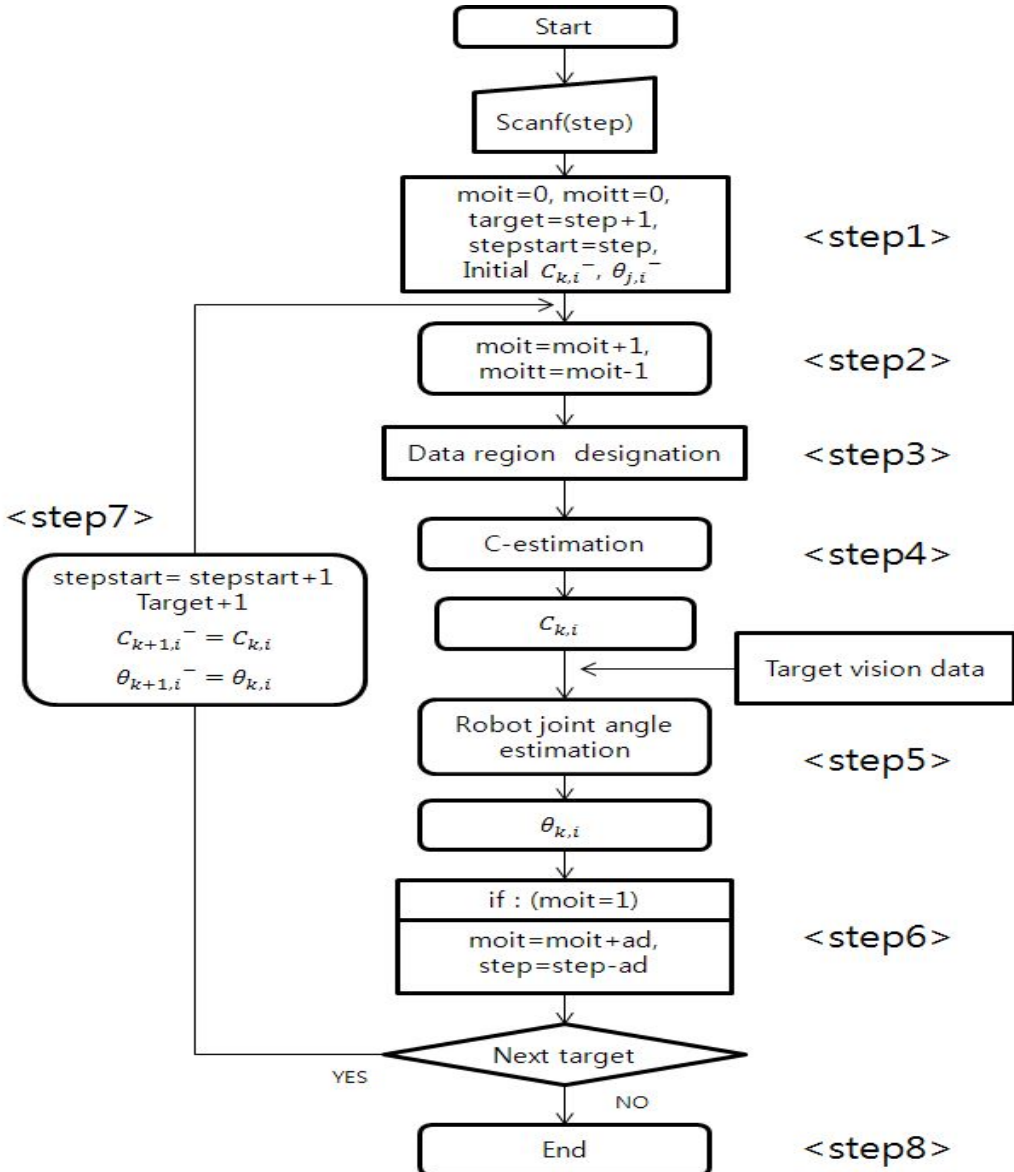


Fig. 4-17 Data moving control scheme of N-R method for the moving target tracking

① 단계 1

N-R방법의 데이터 이동기법에 필요한 초기 값과 변수들을 지정한다.

② 단계 2

첫 번째 타겟 계산 시에는 타겟 이전의 비전데이터를 모두사용하기에  $moit+1$ 과  $moitt=moit-1$ 에서  $moitt$ 를 0으로 지정하였다. 이후 2번째 타겟부터 계산에 필요한 데이터의 시작 범위를 지정하기 위해 단계 6에서  $moit=moit+ad$ 를 사용하여 원하는 값을 배치한다.

③ 단계 3

Fig. 4-18에서 보여준 것과 같이 매개변수를 계산하기 위해 필요한 비전데이터의 2배열 상태를 1배열 상태로 지정한다. 첫 번째 타겟에서는  $moitt$ 값이 0이기 때문에 초기단계의 첫 번째 비전데이터부터 모두 사용하고 2번째 타겟부터는 타겟이전의 비전데이터의 범위를 임의로 정한 데이터개수를 사용하기 위하여 시작 범위를  $moitt$ 만큼 증가시켜 오래된 데이터는 삭제한다. 여기서,  $ad$  변수를 이용하여 계산에서 필요로 하는 비전데이터의 양을 조절한다.

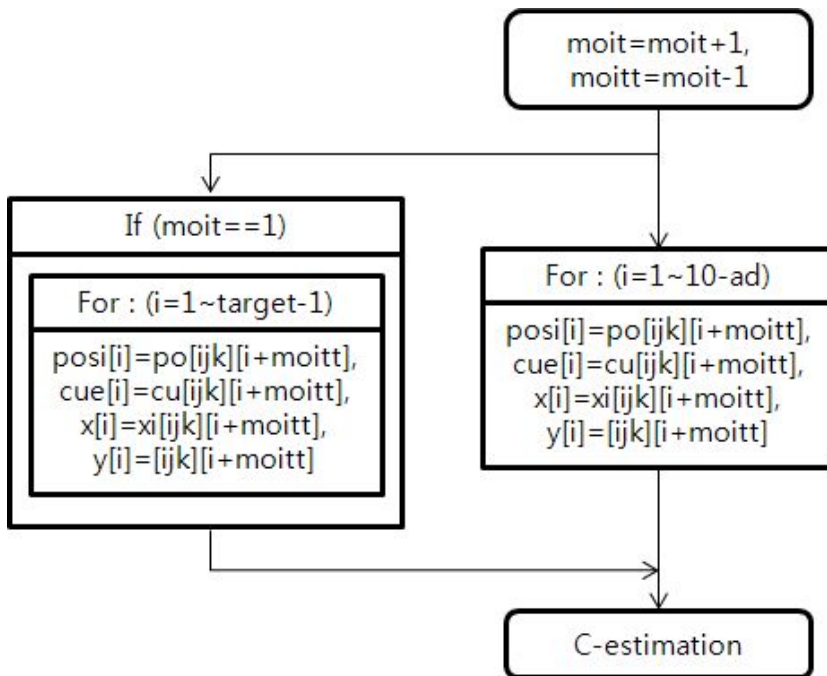


Fig. 4-18 Reassignment of data array

④ 단계 4

지정된 비전데이터를 이용하여 3.1.1절에 설명한 매개변수 추정모델에 대입하여 매개변수를 추정한다.

⑤ 단계 5

추정된 매개변수와 타겟 비전데이터를 이용하여 3.1.2절에서 설명한 로봇 관절각 추정모델에 대입하여 관절각을 추정한다.

⑥ 단계 6

첫 번째 타겟은 다른 기법들과 비교를 위해 계산에 필요한 데이터의 개수를 10개로 제한하였다. 두 번째 타겟부터는 일정하게 지정한 데이터의 개수를 사용하기 위하여 변수  $ad$  값을 이용하여 타겟과 먼 오래된 데이터를 삭제하였다. 만약  $ad$  값을 2로 지정하였을 경우  $moit = moit(1) + ad(2) = 3$ 이 되어 단계 2에서  $moit = moit(3) + 1 = 4$ 를  $moitt = moit(4) - 1 = 3$ 로 계산되어 단계 3에 사용된다. 그리하여  $i+3$ 번째 비전데이터부터 사용하게 된다.  $i$ 가 1일 경우 4번째 데이터부터 11번째 데이터까지 총 8개의 비전데이터를 이용하여 계산을 하는 것이다. 변수  $ad$  값이 0일 경우 10개의 데이터, 1일 경우 9개의 데이터, ... 사용자가 원하는 개수를 지정하여 실험을 한다.

⑦ 단계 7

스텝이 증가하면서 추정모델을 통해 추정된 매개변수와 관절각을 다음 타겟의 초기 값으로 지정한다.

⑧ 단계 8

3번째 타겟부터는 임의로 지정한 데이터의 개수를 유지시키면서 마지막 타겟까지 관절각을 추정하고 각 step에 관절각들을 실제 관절각과 비교하여 오차 값을 계산한다.

### 4.2.3 EKF방법의 순환기법

#### 가. 데이터 획득 및 처리

EKF방법의 순환기법을 적용한 점 이동 타겟 추적 실험은 Fig. 4-19와 같이 초기단계와 이동 타겟 단계로 나뉘어 있다. 초기단계에서 EKF방법을 위한 초기 값을 계산하고 첫 번째 타겟을 계산한다. 계산된 추정 값은 다음 타겟을 계산하기 위한 초기 값으로 사용되고, 마지막 타겟까지 순환적으로 추정해 나간다.

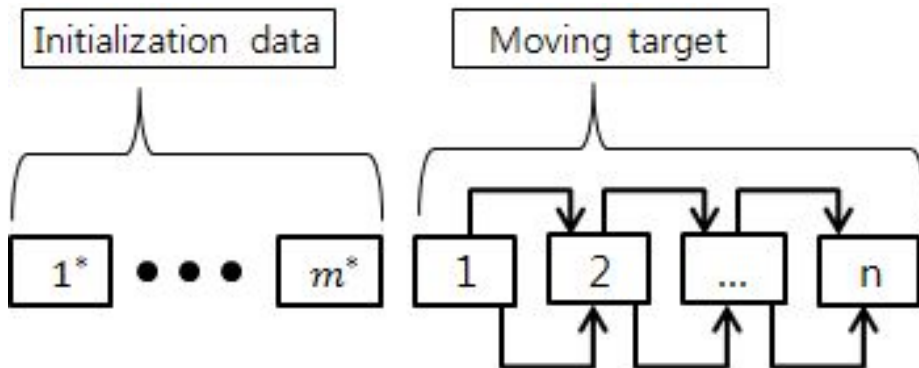


Fig. 4-19 Data processing procedure of the recursive scheme of EKF method for the moving target tracking

Table 4-6과 같이 10개는 초기 단계이고, 12번부터 41번까지 총 30개의 타겟을 나타내고 있다. 초기단계에서는 11번째 데이터를 타겟으로 잡고 계산할 때에는 data number 1번부터 10번까지의 비전데이터를 사용하여 초기 값을 Mote-carlo 방법으로 계산한다.

타겟으로 지정한 12번째 데이터 즉, 첫 번째 타겟 계산 시에는 초기 단계에서 계산한 초기 값을 이용하고, 13번째 데이터인 두 번째 타겟부터는 첫 번째 타겟이 비전데이터로 사용하여 계산을 한다.

### 나. 제어기법

Fig. 4-20은 EKF방법의 순환기법을 적용한 점 이동 타겟 추적 제어기법의 순서를 단계별로 보여주고 있다.

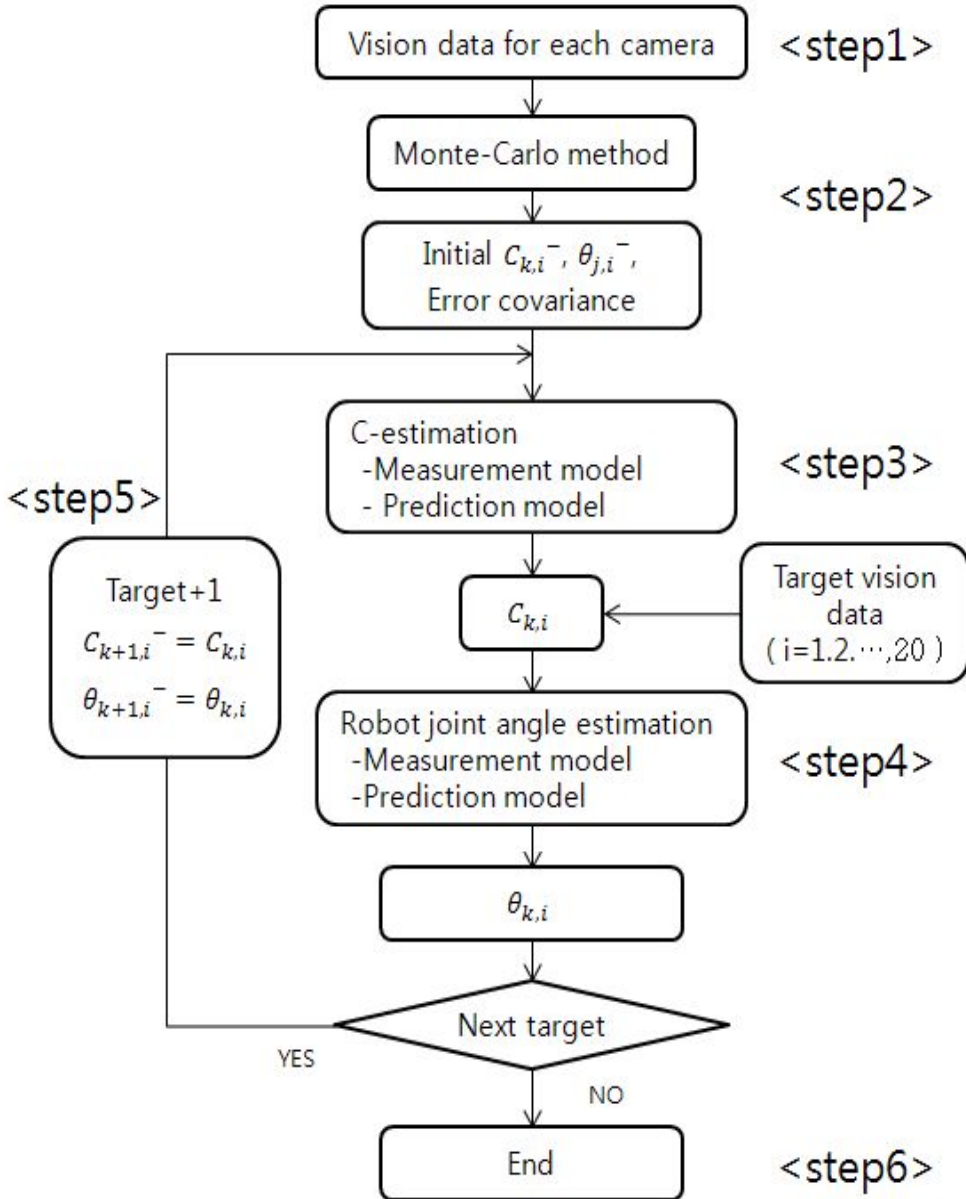


Fig. 4-20 Recursive control scheme of EKF method for the moving target tracking



① 단계 1

로봇이 설정된 EKF방법의 로봇 운동 궤적에서 초기 점 목표물까지 이동하는 동안 3대의 카메라에서 비전 데이터를 획득한다.

② 단계 2

정확한 초기 값을 계산하기 위해 Monte-Carlo방법을 적용하여 EKF방법에 사용할 초기 오차 공분산들을 계산한다.

③ 단계 3

단계 2에서 계산된 초기 매개변수들과 오차 공분산들을 EKF를 적용한 매개변수 추정모델에 대입하여 매개변수를 추정한다.

④ 단계 4

단계 3에서 추정된 카메라 매개변수와 타겟에 대한 비전데이터를 EKF기법을 적용한 로봇 관절각 추정모델에 대입하여 관절각을 추정한다.

⑤ 단계 5

단계 3과 단계 4의 Process model은 단위행렬을 사용하였으므로 추정된 매개변수와 관절각은 다음 타겟의 계산을 위한 비전데이터로 이용한다.

⑥ 단계 6

마지막 타겟에 대한 추정된 관절각 값과 실제 관절각을 비교하여 오차를 계산한다.

## 제 5 장 실험장치 및 실험방법

### 5.1 실험장치 구성

본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 Photo 1과 Fig. 5-1과 같이, 3대의 카메라를 포함한 640×480해상도를 갖는 비전시스템, 4축 스카라 타입 로봇과 시험모형을 포함하는 로봇 시스템, PC 시스템으로 구성되었다.



Photo 1 Experimental apparatus

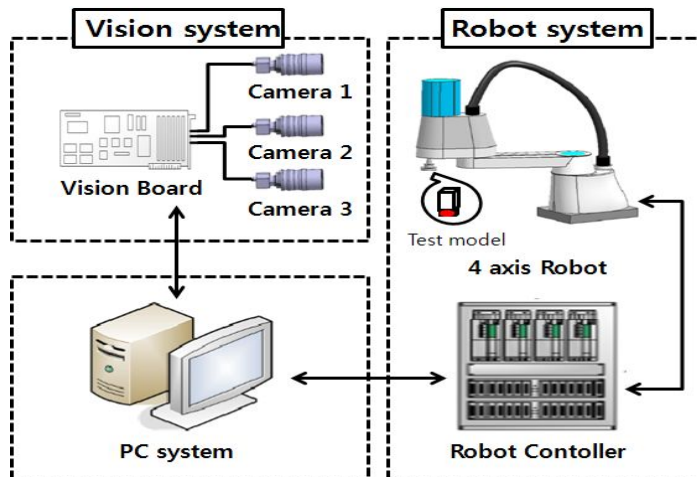


Fig. 5-1 Experimental set-up

## 5.2 시험모형

본 연구에서는 점 이동 타겟 실험을 위한 위치만을 고려하는 1cue 시험 모형과 얇은 막대 고정 타겟 실험을 위한 방위와 위치를 모두 고려해야하는 2cue 시험 모형을 제작하였다. Fig. 5-3은 로봇의 끝점에 1개의 LED를 플라스틱 봉 끝에 조합한 점 시험모형이고, Fig. 5-4는 2개의 LED를 플라스틱 봉 양 끝에 부착하여 만든 얇은 막대 시험모형을 보여 주고 있다. 물체 형상 전체를 사용하지 않고 cue를 이용하는 것은 비전데이터의 양을 최소화시킴으로 인해 처리 속도를 향상 시키고자 하였다.

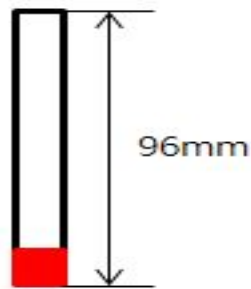


Fig. 5-2 Test model of the point

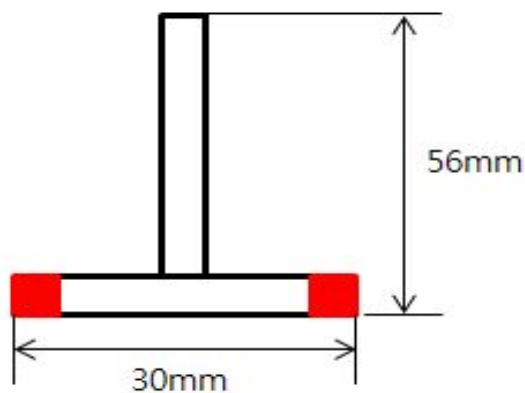


Fig. 5-3 Test model of the slender bar

## 5.3 실험방법

위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정과 위치와 방위를 모두 고려해야 하는 얇은 막대 고정 타겟 추정에 대한 실험을 진행하였다. 여기서, 모든 결과값에 대하여 허용오차범위는  $\pm 1\text{mm}$ 를 기준으로 미만일 경우 안정적인 결과를 나타내고 있다고 판단한다고 정의하였다.

### 5.3.1 점 이동 타겟 추정

Fig. 5-4는 사용된 로봇 운동궤적을 보여준다. 두 개의 로봇비전 제어기법을 이동 타겟 추적에 적용하기 위한 로봇 운동궤적은 10개의 초기 구동 단계와 20개의 이동 타겟으로 설정 되어 있다. 본 실험은 점 이동 타겟을 추적하는 과정을 수행하였으므로 오직 로봇 끝점 P의 위치만을 고려하고 방위는 고려하지 않았다. 선행된 두 개의 연구결과<sup>(26)</sup>에 의해 좀 더 향상된 실험결과를 얻기 위해 로봇으로부터 2.0m~2.5m거리에 3대의 카메라를 작업방향에 집중되도록 배치하였다.

실험에 앞서 정확한 값을 측정하기 위하여 초기화 단계를 통해 정확한 초기값을 얻어야 한다. 그러나 C값을 계산하기 위한 초기 단계에서 로봇 운동궤적이 짧을 경우 카메라 매핑 도중에 오류가 발생하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 통해서 초기 구동 단계에서 로봇 운동 구간이 최소 26mm~30mm 이상이 되어야 안정적인 것을 확인하여 본 논문에서는 10단계에 거쳐 초기화 단계를 구성하였다.

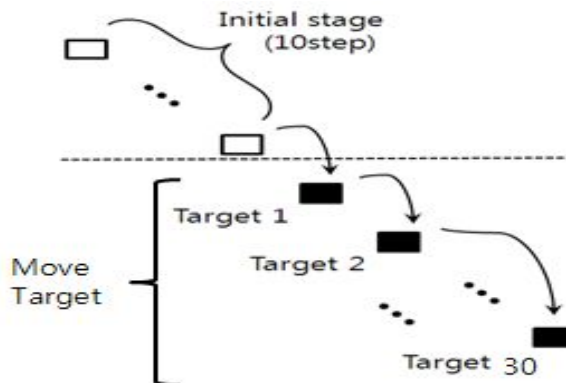


Fig. 5-4 Trajectory of the moving target

### 5.3.2 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치

장애물 출현 시 2cue를 이용한 고정된 얇은 막대 배치 실험에 관한 로봇 운동 궤적을 Fig. 5-5과 Table 5-1에서 보여 주고 있다. 실험 관점을 타겟 근처에 장애물이 발생 하였을 경우에 중점을 두고 있으므로 Obstacles region Near target을 타겟 근처로 지정하였고, 로봇 운동궤적의 중간에는 Intermediate obstacles region, 운동궤적 시작 부분에는 Beginning obstacles region으로 지정하였다. 단, 장애물 출현 시 얇은 막대 고정 타겟 추정은 장애물이 없는 경우를 기본으로 비교하여 결과의 안정성을 판단하고 있다.

Fig. 5-5의 진행 방향에 따라 각 영역별로 장애물이 타겟 근처 1개 단계 동안 발생했을 경우부터 타겟과 멀어지면서 1개 단계씩 증가하여 총 10개 단계 동안 발생하였을 경우까지 총 10번의 실험을 하여 총 N-R방법의 일괄처리기법 30번, EKF방법의 순환기법 30번의 실험에 걸쳐 서로 비교하였다.

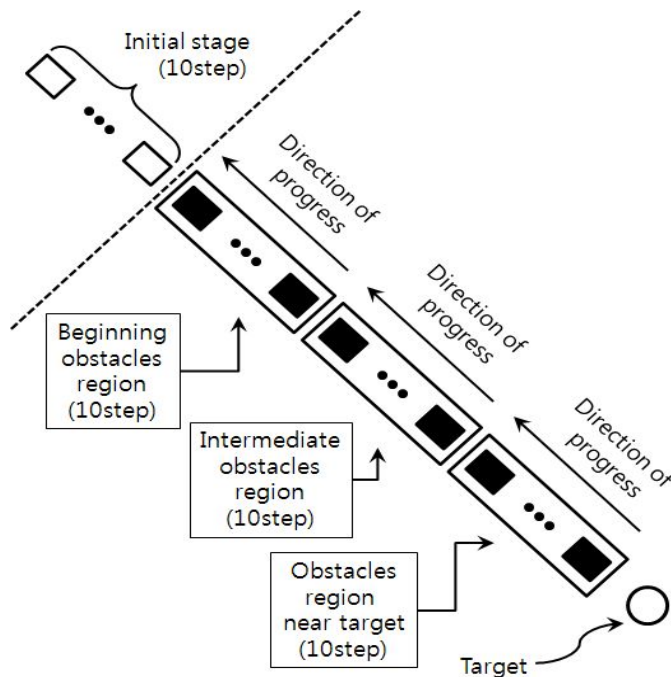


Fig. 5-5 Robot trajectory for the fixed slender bar placement

## 제 6 장 실험 결과

첫 번째 1cue를 사용하여 위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정 실험은 N-R방법의 일괄처리기법, 데이터이동기법과 EKF방법의 순환기법을 로봇 비전 제어기법에 적용한 실험결과를 서로 비교하였다. 두 번째 2cue를 사용하여 위치와 방위를 모두 고려해야하는 장애물 출현 시 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 결과는 장애물 영역을 3가지로 나누어 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 적용한 로봇 비전제어기법을 사용하여 장애물이 작업에 미치는 영향을 비교하였다.

### 6.1 점 이동 타겟

본 연구에서 매개변수 추정을 위한 N-R방법의 일괄처리 기법, 데이터이동기법과 EKF방법의 순환기법을 비전시스템 모델에 적용하여, 사용된 3대의 카메라에 대한 실제 비전데이터 값과 추정된 비전시스템 모델 값을 6.1.1절에서 비교하였다. 또한, 6.1.2절에서는 추정된 카메라 매개변수들을 사용하여 N-R방법의 일괄처리 기법, 데이터이동기법과 EKF방법의 순환기법을 통해 추정된 점 이동 타겟에 대한 관절각의 위치 정밀도와 데이터 처리시간을 비교하였다.

#### 6.1.1 비전 시스템 모델의 적합성 비교

N-R방법과 EKF방법을 각각 사용하여 각 이동타겟 추적단계에서 카메라 매개변수를 이용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 매개변수를 추정하는데 사용한 각 이동단계에서의 실제 획득된 비전 데이터를 비교하여 제안된 비전 시스템 모델의 적합성을 보이고자 한다.

3대 카메라 각각에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의 오차는 식(30)과 같이 r.m.s.<sup>(29)</sup>을 정의하여 사용하였다.

$$e_{r.m.s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(e_x^i)^2 + (e_y^i)^2\}}{n}} \quad (30)$$

여기서,  $e_x^i, e_y^i (i = 1, 2, \dots, 30)$ 는 큐에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델

의 추정 값 사이의  $x$  및  $y$ 축 오차 값,  $n$ 은 로봇이 이동 타겟이 이동하는 동안 비전데이터가 얻어진 단계 수이다.

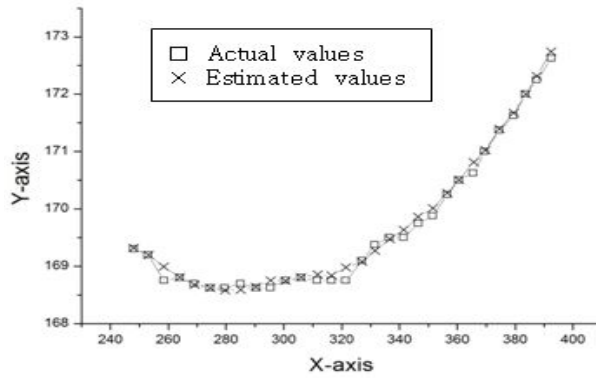
### 가. N-R방법의 일괄처리기법 결과

위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정 시 일괄처리 기법을 적용하여 총 30개의 이동 타겟에 대하여 실험한 결과는 다음과 같다. 제 3장의 식(6)을 이용하여 30개 타겟에 대해 계산 하였지만, Table 6-1에서는 30개의 이동 타겟 중 3등분 되는 지점의 10번째 타겟, 20번째 타겟 그리고 마지막 30번째 타겟을 추려 표기하였다.

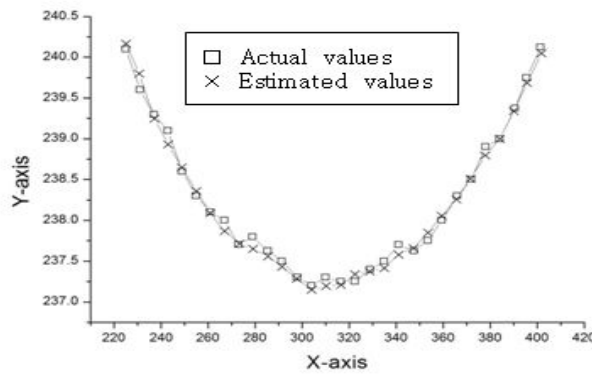
Table 6-1의 매개변수를 식(3)에 적용하여 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델 값과 로봇이 운동궤적을 따라 점 이동 타겟의 마지막 타겟까지 초기 구동 단계를 제외한 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-1에서 보여주고 있다.

Table 6-1 For the moving target tracking, the estimated six parameters using the batch scheme of N-R method in each camera

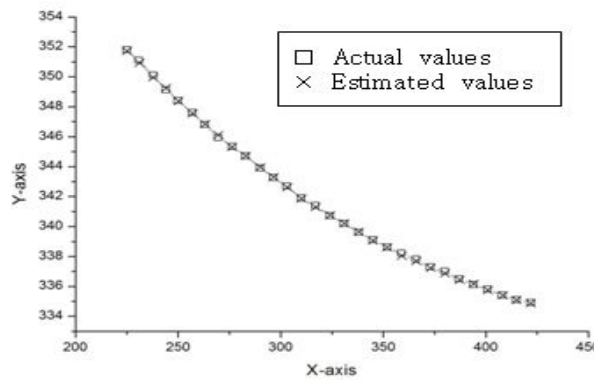
Camera number	C-value	Target 10	Target 20	Target 30
Camera No.1	C1	0.6385	0.6538	0.6695
	C2	0.4658	0.4845	0.5037
	C3	0.7781	0.7654	0.7566
	C4	0.8685	0.8573	0.8476
	C5	559.923	507.096	458.4774
	C6	186.0731	182.8489	176.9807
Camera No.2	C1	0.5281	0.5431	0.5567
	C2	0.3569	0.3642	0.3792
	C3	0.8906	0.8715	0.8578
	C4	0.9937	0.9885	0.9801
	C5	963.0636	918.8589	872.2028
	C6	260.8648	281.2602	284.346
Camera No.3	C1	0.4097	0.4231	0.4416
	C2	0.3195	0.3285	0.3453
	C3	0.9967	0.9776	0.9556
	C4	1.08	1.0706	1.0585
	C5	1294.3162	1243.8611	1177.9047
	C6	242.7607	258.7598	272.0877



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-1 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method



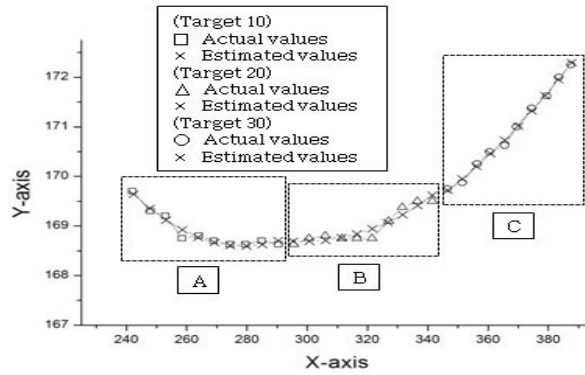
Fig. 6-1에서 보여준 것처럼 각 카메라에서 오차범위 camera1에서  $\pm 0.129\text{pixel}$ , camera2에서  $\pm 0.339\text{pixel}$ , camera3에서  $\pm 0.198\text{pixel}$  정도의 근사함을 확인하여 비전 시스템 모델에 적합함을 알 수 있었다. 여기서, □는 각 카메라에 대한 실제 비전 데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델 값이다.

### 나. N-R방법의 데이터 이동기법 결과

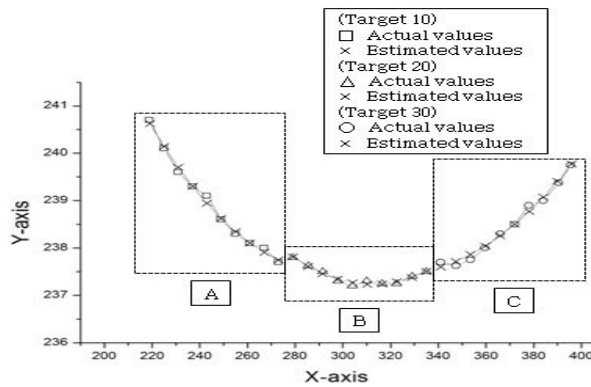
Fig. 6-2 (a)에서 보여준 A는 10번째 타겟 추정 시 사용한 10개의 비전데이터, B는 20번째 타겟 추정 시 사용한 10개의 비전데이터, C는 30번째 타겟 추정 시 사용한 10개의 비전데이터를 카메라 1에 대해서 나타내고 있다. Fig. 6-2의 (b)와 (c)에 나타난 카메라 2번과 3번도 1번과 마찬가지로 보여주고 있다.

Table 6-2 For the moving target tracking, the estimated six parameters using the data moving scheme of N-R method in each camera

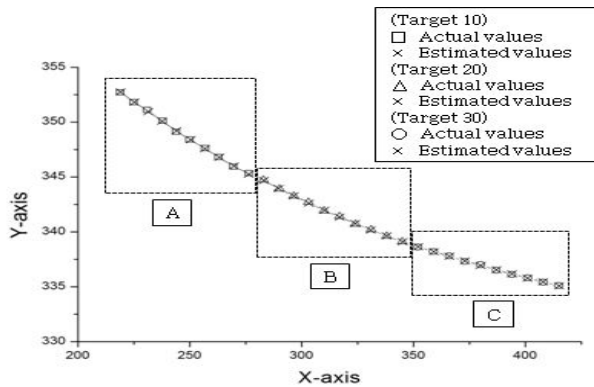
Camera number	C-value	Target 10	Target 20	Target 30
Camera No.1	C1	0.6169	0.6825	0.5686
	C2	-0.6556	-0.8122	-0.6641
	C3	-0.5608	-0.6679	-0.7256
	C4	0.9748	0.9015	0.853
	C5	417.7892	170.6797	410.45
	C6	750.1223	581.1782	430.417
Camera No.2	C1	0.6832	0.6303	0.7252
	C2	0.4925	0.4389	0.5606
	C3	0.7563	0.7842	0.8251
	C4	0.9759	1.0189	0.9954
	C5	551.8292	720.6921	526.3288
	C6	382.535	394.276	298.8398
Camera No.3	C1	0.4871	0.4122	0.5166
	C2	0.4002	0.3069	0.4302
	C3	0.9305	0.9664	0.9541
	C4	1.0397	1.0816	1.01
	C5	1049.2203	1267.9639	997.7743
	C6	268.7035	288.3189	221.8342



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-2 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the data moving scheme of N-R method

Fig. 6-2는 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터와 각 카메라에 대한 Table 6-2에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값을 비교하여 보여주고 있다. 여기서, □, △, ○는 순서대로 10번째, 20번째, 30번째 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다.

각 카메라에서 식 (30)을 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는 camera1에서  $\pm 0.0957\text{pixel}$ , camera2에서  $\pm 0.0812\text{pixel}$ , camera3에서  $\pm 0.0504\text{pixel}$  정도로 근사함을 보여주며, 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

#### 다. EKF방법의 순환기법 결과

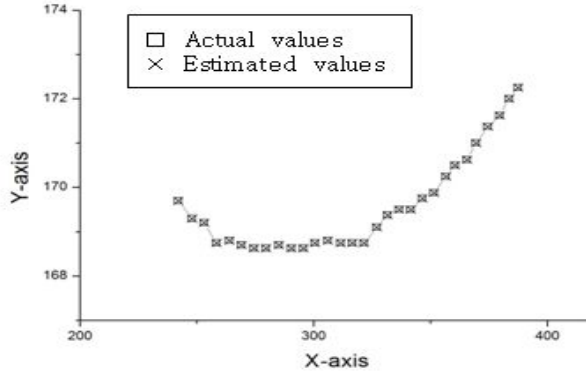
N-R방법과 마찬가지로 총 30개의 이동 타겟 중 이동궤적의 3등분 지점인 10번째 타겟, 20번째 타겟 그리고 마지막 30번째 타겟에 대한 식(3)을 통해 계산되어진 각 카메라 매개변수C를 Table 6-3에서 보여주고 있다.

Table 6-3의 매개변수를 식(16)을 통해 각 타겟에 대한 추정된 비전 시스템 모델 값과 로봇이 점 이동 타겟을 추정하기 위해 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하였다. 여기서, □는 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델이며, 초기 값들을 계산하는 초기 구동 단계를 제외한 EKF방법을 적용한 부분에 대해서만 실제 비전데이터와 비교하여 나타내었다.

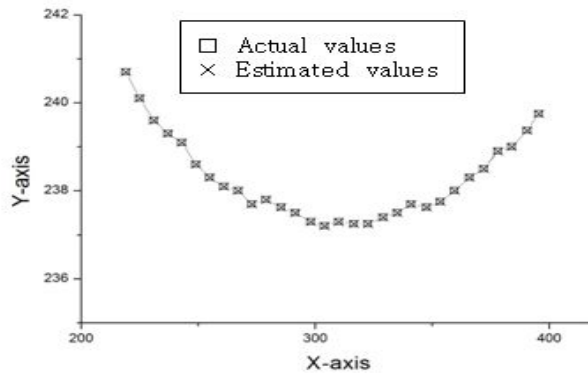
각 카메라에서 식 (30)을 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는 camera1에서  $\pm 0.292\text{pixel}$ , camera2에서  $\pm 0.339\text{pixel}$ , camera3에서  $\pm 0.198\text{pixel}$  정도로 근사함을 보여주며, 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-3 For the moving target tracking, the estimated six parameters using the recursive scheme of EKF method in each camera

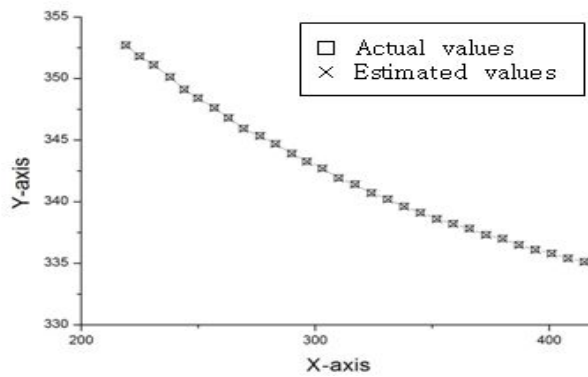
Camera number	c-value	Target 10	Target 20	Target 30
Camera No.1	C1	0.59903	0.59736	0.59446
	C2	0.44350	0.44210	0.43932
	C3	0.82649	0.82849	0.83166
	C4	0.89918	0.90031	0.90217
	C5	688.66589	688.66589	688.66577
	C6	153.81791	153.81791	153.81791
Camera No.2	C1	0.52646	0.52608	0.52489
	C2	0.35351	0.35329	0.35217
	C3	0.89370	0.89418	0.89563
	C4	0.99107	0.99133	0.99233
	C5	967.61938	967.61938	967.61938
	C6	258.62719	258.62719	258.62719
Camera No.3	C1	0.41241	0.41201	0.41080
	C2	0.32894	0.32876	0.32785
	C3	0.99276	0.99334	0.99507
	C4	1.07313	1.07345	1.07451
	C5	1271.58837	1271.58837	1271.58837
	C6	233.85092	233.85092	233.85092



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-3 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method

## 6.1.2 점 이동 타겟 추적 결과

점 이동 타겟에 대한 N-R에 근거한 일괄처리기법, 데이터 이동기법 두 가지 기법과 EKF방법을 적용하여 추정된 이동 타겟 위치 값과 실제 타겟 위치 값을 비교한 오차 값은 식(31)과 같이 r.m.s.<sup>(29)</sup>로 정의하였다. 특히, 공간상에서 이동 타겟에 대한 실제 위치 값은 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값, 추정된 위치 값은 관절각 추정기법에 의해 계산된 관절각을 식(1)과 식(2)의 4축 스카라 타입 로봇의 정기구학 모델에 적용하여 계산하였다.

$$e_{r.m.s} = \sqrt{\frac{\{(e_x^i)^2 + (e_y^i)^2 + (e_z^i)^2\}}{3}} \quad (31)$$

여기서,  $e_x^i$ ,  $e_y^i$ ,  $e_z^i$  ( $i = 1, 2, \dots, 30$ )는 각 이동 타겟에 대한  $x$ 성분 오차,  $y$ 성분오차,  $z$ 성분 오차를 나타낸다.

### 가. N-R방법의 일괄처리기법 결과

로봇이 일괄처리기법을 사용하여 점 이동 타겟 추정 실험을 수행 하였다. Table 6-1의 매개변수를 4.2.1절 Fig. 4-15에서 보여준 반복적인 기법을 사용하는 N-R방법의 일괄처리기법을 이용한 로봇 관절각 추정 기법에 대입하여 추정된 로봇 관절각 값은 Fig. 6-4에서 보여주고 있다.

Fig. 6-4에서 보여준 것과 같이 실제관절각과 측정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차범위는  $\theta_1 = -0.199 \sim 0.291$  (degree),  $\theta_2 = -0.526 \sim 0.387$  (degree),  $d_3 = -0.153 \sim 0.175$  (mm),  $\theta_4 = 0$  (degree)로, 각 관절각은 아주 작은 오차 범위 내에 존재한다. 특히, 본 연구는 하나의 cue를 부착하여 방위는 고려하지 않고 위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정 작업을 수행하였으므로, 스카라 형태의 로봇 특성상 방위를 결정하는  $\theta_4$ 값은 Fig. 6-4(d)에서 보여주는 것 같이 일정한 값을 보여준다.

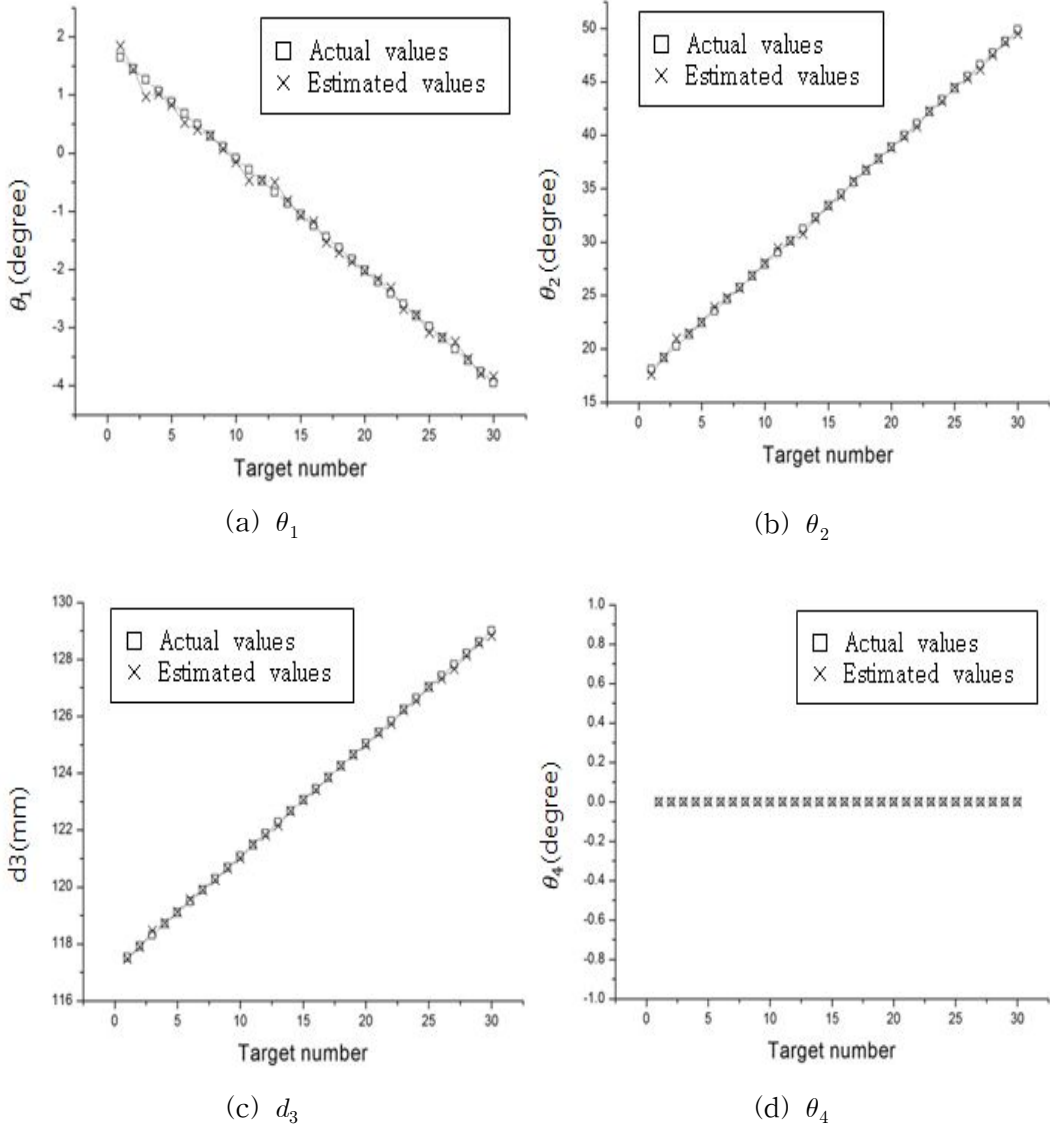


Fig. 6-4 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the batch scheme of N-R method

Fig.6-4의 추정된 로봇 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 관절각 값을 비교하여 Table 6-4에서 나타내고 있다.

Table 6-4에서 보여준 것 같이, 식(31) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 ㉕의 r.m,s 오차 값이 계산되었다. 총 30개의 이동타겟을 추정하는 동안 r.m.s 평균 오차 값은  $\pm 0.236\text{mm}$ 로 안정적인 결과를 얻었으며, 데이터 처리시간은 첫 번째부터 마지막 타겟까지 총 422ms이 걸려 타겟 하나당 평균 14ms 정도를 소요하였다.

위와 같이, r.m,s 오차 값을 자세히 살펴보면 이동 타겟의 수가 적은 초반에는 대체적으로 오차 값이 낮게 나타나고 미세한 차이이긴 하지만 이동 타겟의 수가 많아지면 오차 값이 상승되어 가고 있는 것을 알 수 있다.



Table 6-4 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the batch scheme of N-R method

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
1	$F_x$	635.180	635.501	0.321	0.284	32
	$F_y$	95.838	96.208	0.37		
	$F_z$	114.684	114.726	0.042		
2	$F_x$	633.857	633.823	-0.034	0.032	32
	$F_y$	98.190	98.147	-0.043		
	$F_z$	114.288	114.296	0.008		
3	$F_x$	632.472	631.838	-0.634	0.426	47
	$F_y$	100.520	100.175	-0.345		
	$F_z$	113.892	113.739	-0.153		
4	$F_x$	631.025	630.897	-0.128	0.078	63
	$F_y$	102.827	102.797	-0.03		
	$F_z$	113.496	113.467	-0.029		
5	$F_x$	629.516	629.452	-0.064	0.111	79
	$F_y$	105.111	104.932	-0.179		
	$F_z$	113.100	113.077	-0.023		
6	$F_x$	627.945	627.574	-0.371	0.274	79
	$F_y$	107.370	107.081	-0.289		
	$F_z$	112.704	112.640	-0.064		
7	$F_x$	626.313	626.193	-0.12	0.187	94
	$F_y$	109.603	109.302	-0.301		
	$F_z$	112.308	112.301	-0.007		
8	$F_x$	624.620	624.702	0.082	0.079	110
	$F_y$	111.810	111.709	-0.101		
	$F_z$	111.912	111.955	0.043		
9	$F_x$	622.867	622.829	-0.038	0.062	125
	$F_y$	113.990	113.892	-0.098		
	$F_z$	111.516	111.541	0.025		
10	$F_x$	621.054	620.968	-0.086	0.169	141
	$F_y$	116.141	115.868	-0.273		
	$F_z$	111.120	111.184	0.064		

(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
11	$F_x$	619.182	618.730	-0.452	0.381	141
	$F_y$	118.264	117.782	-0.482		
	$F_z$	110.724	110.694	-0.03		
12	$F_x$	617.250	617.358	0.108	0.085	157
	$F_y$	120.356	120.274	-0.082		
	$F_z$	110.328	110.387	0.059		
13	$F_x$	615.260	615.802	0.542	0.366	172
	$F_y$	122.418	122.727	0.309		
	$F_z$	109.932	110.042	0.11		
14	$F_x$	613.212	613.442	0.23	0.133	188
	$F_y$	124.448	124.435	-0.013		
	$F_z$	109.536	109.538	0.002		
15	$F_x$	611.106	611.158	0.052	0.126	204
	$F_y$	126.446	126.235	-0.211		
	$F_z$	109.140	109.143	0.003		
16	$F_x$	608.944	609.211	0.267	0.169	219
	$F_y$	128.411	128.520	0.109		
	$F_z$	108.744	108.797	0.053		
17	$F_x$	606.725	606.574	-0.151	0.248	235
	$F_y$	130.342	129.940	-0.402		
	$F_z$	108.348	108.348	0		
18	$F_x$	604.450	604.315	-0.135	0.210	250
	$F_y$	132.238	131.899	-0.339		
	$F_z$	107.952	107.949	-0.003		
19	$F_x$	602.119	602.115	-0.004	0.175	266
	$F_y$	134.099	133.795	-0.304		
	$F_z$	107.556	107.554	-0.002		
20	$F_x$	599.734	599.877	0.143	0.161	282
	$F_y$	135.923	135.689	-0.234		
	$F_z$	107.160	107.207	0.047		

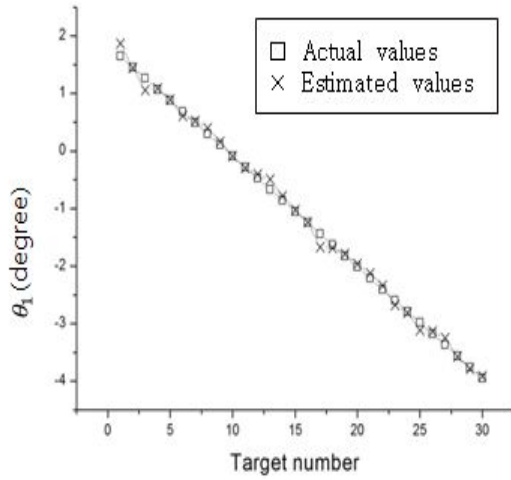
(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
21	$F_x$	597.294	597.589	0.295	0.175	282
	$F_y$	137.710	137.649	-0.061		
	$F_z$	106.764	106.804	0.04		
22	$F_x$	594.801	595.298	0.497	0.295	297
	$F_y$	139.459	139.509	0.05		
	$F_z$	106.368	106.473	0.105		
23	$F_x$	592.255	592.235	-0.02	0.322	313
	$F_y$	141.170	140.612	-0.558		
	$F_z$	105.972	105.974	0.002		
24	$F_x$	589.656	589.938	0.282	0.208	329
	$F_y$	142.841	142.628	-0.213		
	$F_z$	105.576	105.646	0.07		
25	$F_x$	587.006	586.917	-0.089	0.388	344
	$F_y$	144.472	143.806	-0.666		
	$F_z$	105.180	105.163	-0.017		
26	$F_x$	584.304	584.667	0.363	0.268	360
	$F_y$	146.062	145.787	-0.275		
	$F_z$	104.784	104.879	0.095		
27	$F_x$	581.552	582.366	0.814	0.481	391
	$F_y$	147.611	147.712	0.101		
	$F_z$	104.388	104.533	0.145		
28	$F_x$	578.750	579.168	0.418	0.274	391
	$F_y$	149.117	148.903	-0.214		
	$F_z$	103.992	104.065	0.073		
29	$F_x$	575.899	576.211	0.312	0.387	407
	$F_y$	150.580	149.989	-0.591		
	$F_z$	103.596	103.639	0.043		
30	$F_x$	573.000	573.891	0.891	0.525	422
	$F_y$	152.000	151.970	-0.03		
	$F_z$	103.200	103.375	0.175		

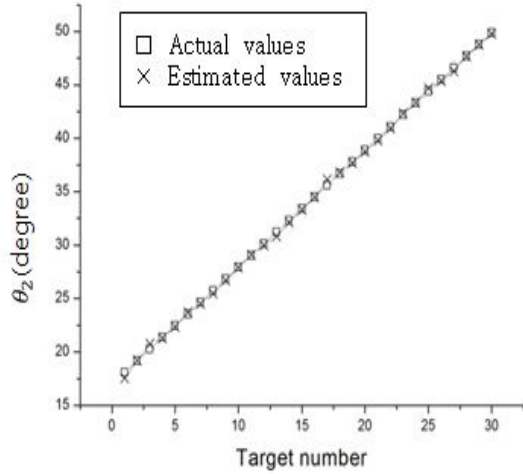
## 나. N-R방법의 데이터 이동기법 결과

로봇이 데이터 이동기법을 사용하여 점 이동 타겟 추정 실험을 수행 하였을 때, N-R방법에 근거하였기 때문에 일괄처리기법과 마찬가지로 Table 6-2의 매개변수를 4.2.2절 Fig. 4-17에서 보여준 N-R방법의 데이터 이동 기법을 이용한 로봇 관절 각 추정 기법에 대입하여 추정된 로봇 관절각 값은 Fig. 6-5에서 보여주고 있다.

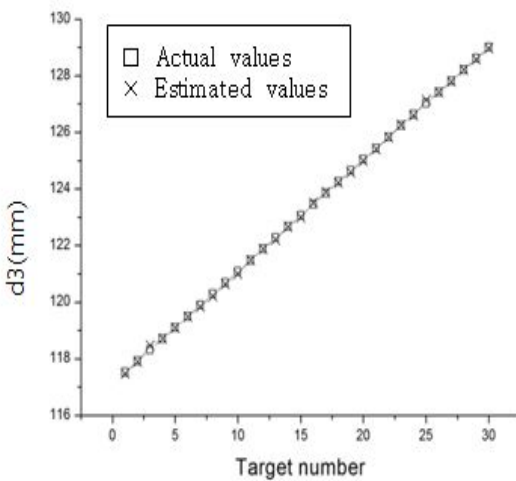
Fig. 6-5에서 보여준 것과 같이 실제관절각과 측정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차범위는  $\theta_1 = -0.218 \sim 0.233$  (degree),  $\theta_2 = -0.527 \sim 0.395$  (degree),  $d_3 = -0.157 \sim 0.086$  (mm),  $\theta_4 = 0$  (degree)로, 각 관절각은 아주 작은 오차 범위 내에 존재한다. 특히, 본 연구는 하나의 cue를 부착하여 방위는 고려하지 않고 위치만을 고려하는 점 이동 타겟 추정 작업을 수행하였으므로, 스카라 형태의 로봇 특성상 방위를 결정하는  $\theta_4$ 값은 Fig. 6-5(d)에서 보여주는 것 같이 일정한 값을 보여준다.



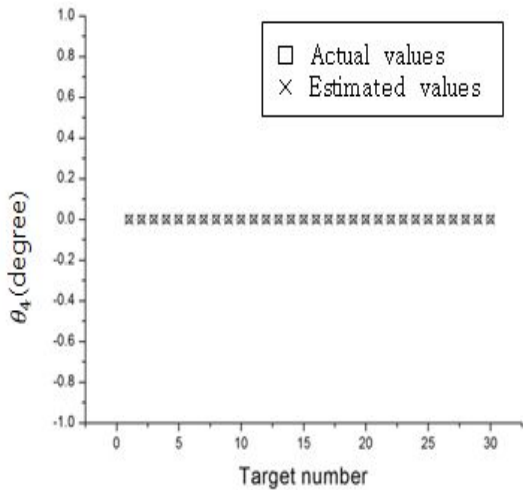
(a)  $\theta_1$



(b)  $\theta_2$



(c)  $d_3$



(d)  $\theta_4$

Fig. 6-5 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the data moving scheme

Fig.6-5의 추정된 로봇 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 관절각 값을 비교하여 Table 6-5에서 나타내고 있다.

Table 6-4에서 보여준 것 같이, 식(31) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 ㉕의 r.m.s 오차 값이 계산되었다. 총 30개의 이동 타겟을 추정하는 동안 r.m.s 평균 오차 값은  $\pm 0.168\text{mm}$ 로 안정적인 결과를 얻었으며, 데이터 처리시간은 첫 번째부터 마지막 타겟까지 총 187ms이 걸려 타겟 하나당 평균 6ms 정도를 소요하였다.

위와 같이, N-R방법의 데이터 이동기법은 본 연구에서 이동 타겟의 수가 많아져도 오차 값은 일정한 값을 유지하고 데이터 처리시간도 상당히 좋은 결과를 보여준다.

Table 6-5 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the data moving scheme of N-R method

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
1	$F_x$	635.180	635.529	0.349	0.312	15
	$F_y$	95.838	96.247	0.409		
	$F_z$	114.684	114.728	0.044		
2	$F_x$	633.857	633.823	-0.034	0.023	15
	$F_y$	98.190	98.207	0.017		
	$F_z$	114.288	114.297	0.009		
3	$F_x$	632.472	632.002	-0.470	0.300	15
	$F_y$	100.520	100.367	-0.153		
	$F_z$	113.892	113.735	-0.157		
4	$F_x$	631.025	631.044	0.019	0.066	15
	$F_y$	102.827	102.940	0.113		
	$F_z$	113.496	113.481	-0.015		
5	$F_x$	629.516	629.607	0.091	0.073	31
	$F_y$	105.111	105.024	-0.087		
	$F_z$	113.100	113.101	0.001		
6	$F_x$	627.945	627.798	-0.147	0.126	47
	$F_y$	107.370	107.209	-0.161		
	$F_z$	112.704	112.705	0.001		
7	$F_x$	626.313	626.477	0.164	0.123	47
	$F_y$	109.603	109.478	-0.125		
	$F_z$	112.308	112.362	0.054		
8	$F_x$	624.620	624.907	0.287	0.180	47
	$F_y$	111.810	111.909	0.099		
	$F_z$	111.912	111.989	0.077		
9	$F_x$	622.867	622.980	0.113	0.122	47
	$F_y$	113.990	114.161	0.171		
	$F_z$	111.516	111.566	0.050		
10	$F_x$	621.054	621.054	0.000	0.051	78
	$F_y$	116.141	116.163	0.022		
	$F_z$	111.120	111.206	0.086		

(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
11	$F_x$	619.182	619.092	-0.090	0.063	78
	$F_y$	118.264	118.322	0.058		
	$F_z$	110.724	110.706	-0.018		
12	$F_x$	617.250	617.442	0.192	0.140	78
	$F_y$	120.356	120.504	0.148		
	$F_z$	110.328	110.325	-0.003		
13	$F_x$	615.260	615.754	0.494	0.376	78
	$F_y$	122.418	122.839	0.421		
	$F_z$	109.932	109.986	0.054		
14	$F_x$	613.212	613.474	0.262	0.172	93
	$F_y$	124.448	124.591	0.143		
	$F_z$	109.536	109.530	-0.006		
15	$F_x$	611.106	611.232	0.126	0.082	93
	$F_y$	126.446	126.473	0.027		
	$F_z$	109.140	109.199	0.059		
16	$F_x$	608.944	608.954	0.010	0.058	93
	$F_y$	128.411	128.496	0.085		
	$F_z$	108.744	108.690	-0.054		
17	$F_x$	606.725	605.980	-0.745	0.547	109
	$F_y$	130.342	129.757	-0.585		
	$F_z$	108.348	108.308	-0.040		
18	$F_x$	604.450	604.247	-0.203	0.132	125
	$F_y$	132.238	132.136	-0.102		
	$F_z$	107.952	107.977	0.025		
19	$F_x$	602.119	602.267	0.148	0.098	125
	$F_y$	134.099	134.153	0.054		
	$F_z$	107.556	107.621	0.065		
20	$F_x$	599.734	599.956	0.222	0.143	125
	$F_y$	135.923	136.026	0.103		
	$F_z$	107.160	107.199	0.039		



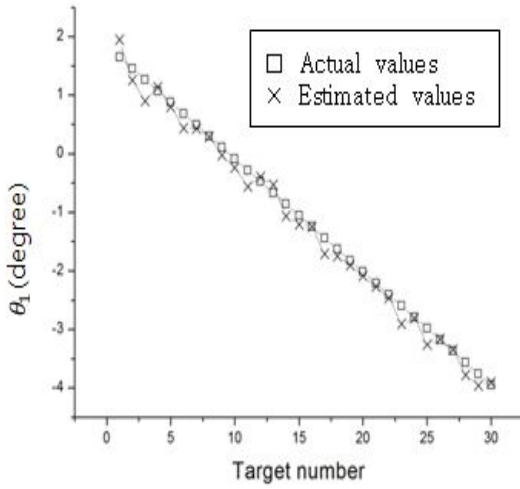
(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
21	$F_x$	597.294	597.614	0.320	0.233	125
	$F_y$	137.710	137.952	0.242		
	$F_z$	106.764	106.801	0.037		
22	$F_x$	594.801	595.068	0.267	0.183	140
	$F_y$	139.459	139.628	0.169		
	$F_z$	106.368	106.372	0.004		
23	$F_x$	592.255	592.032	-0.223	0.217	156
	$F_y$	141.170	140.870	-0.300		
	$F_z$	105.972	105.931	-0.041		
24	$F_x$	589.656	589.552	-0.104	0.063	156
	$F_y$	142.841	142.858	0.017		
	$F_z$	105.576	105.602	0.026		
25	$F_x$	587.006	586.458	-0.548	0.381	156
	$F_y$	144.472	144.126	-0.346		
	$F_z$	105.180	105.059	-0.121		
26	$F_x$	584.304	584.501	0.197	0.135	156
	$F_y$	146.062	146.189	0.127		
	$F_z$	104.784	104.789	0.005		
27	$F_x$	581.552	582.064	0.512	0.356	172
	$F_y$	147.611	147.954	0.343		
	$F_z$	104.388	104.404	0.016		
28	$F_x$	578.750	578.671	-0.079	0.047	187
	$F_y$	149.117	149.132	0.015		
	$F_z$	103.992	103.982	-0.010		
29	$F_x$	575.899	575.920	0.021	0.127	187
	$F_y$	150.580	150.364	-0.216		
	$F_z$	103.596	103.628	0.032		
30	$F_x$	573.000	573.160	0.160	0.117	187
	$F_y$	152.000	152.120	0.120		
	$F_z$	103.200	103.230	0.030		

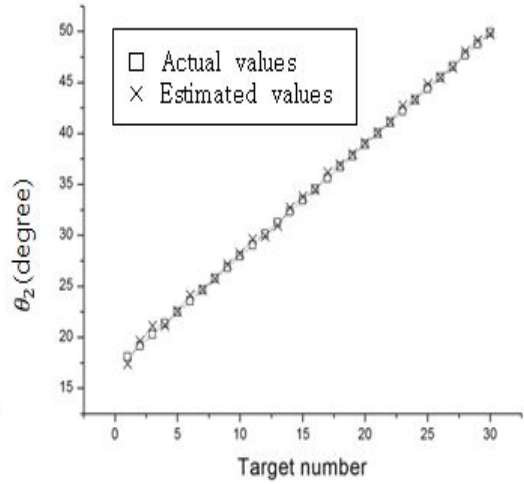
## 다. EKF방법의 순환기법 결과

순환적 기법을 사용하는 EKF방법을 적용하여 점 이동 타겟 추정 실험 결과는 다음과 같다. Fig. 6-6에서 보여준 결과는 Table 6-3의 매개변수를 4.2.3절 Fig. 4-20에서 보여준 EKF방법의 순환기법을 이용한 로봇 관절각 추정모델에 대입하여 추정된 관절각 모델 값과 실제 관절각 값을 비교하여 나타내고 있다.

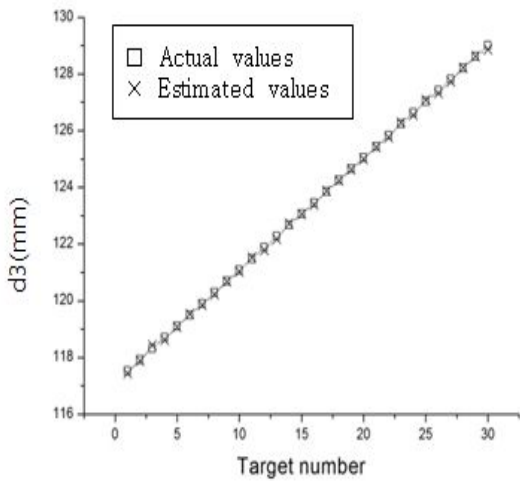
Fig. 6-6에서 보여준 것과 같이 실제 관절각 값과 측정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차범위는  $\theta_1 = -0.295 \sim 0.358$  (degree),  $\theta_2 = -0.585 \sim 0.696$  (degree),  $d_3 = -0.123 \sim 0.134$  (mm),  $\theta_4 = 0$  (degree)로, 각 관절각은 아주 작은 오차 범위 내에 존재한다. 여기서,  $\theta_2$ 의 값이 초기에는 조금 불안정하게 나타나고 있으나, 다른 값들에서 보정하기 때문에 이동 타겟 수가 증가 할수록 실제 값과 근사하게 접근함을 보이고 있다.



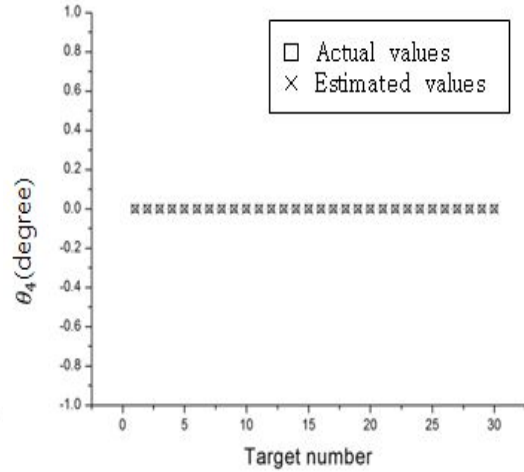
(a)  $\theta_1$



(b)  $\theta_2$



(c)  $d_3$



(d)  $\theta_4$

Fig. 6-6 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates for each camera using the recursive scheme of EKF method

Fig. 6-6의 추정된 로봇 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-6에서 나타내고 있다.

Table 6-4에서 보여준 것 같이, 식(31) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 ㉕의 r.m.s 오차 값이 계산되었다. 총 30개의 이동 타겟을 추정하는 동안 r.m.s 평균 오차 값은  $\pm 0.334\text{mm}$ 로 안정적인 결과를 얻었으며, 데이터 처리시간은 첫 번째부터 마지막 타겟까지 총 109ms가 걸려 타겟 하나당 평균 처리시간 3.6ms의 결과를 얻었다.

위와 같이, EKF방법의 순환기법을 이용하여 r.m.s 평균 오차 값과 데이터 처리 시간은 본 연구에서 만족할만한 결과를 보여준다.

Table 6-6 For the moving target tracking, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the recursive scheme of EKF method

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
1	$F_x$	635.180	635.699	0.519	0.385	0
	$F_y$	95.838	96.252	0.414		
	$F_z$	114.684	114.749	0.065		
2	$F_x$	633.857	633.499	-0.358	0.293	0
	$F_y$	98.190	97.832	-0.358		
	$F_z$	114.288	114.307	0.019		
3	$F_x$	632.472	631.680	-0.792	0.518	0
	$F_y$	100.520	100.120	-0.4		
	$F_z$	113.892	113.769	-0.123		
4	$F_x$	631.025	631.242	0.217	0.141	16
	$F_y$	102.827	102.743	-0.084		
	$F_z$	113.496	113.569	0.073		
5	$F_x$	629.516	629.480	-0.036	0.245	16
	$F_y$	105.111	104.689	-0.422		
	$F_z$	113.100	113.126	0.026		
6	$F_x$	627.945	627.344	-0.601	0.396	16
	$F_y$	107.370	107.042	-0.328		
	$F_z$	112.704	112.663	-0.041		
7	$F_x$	626.313	626.357	0.044	0.295	16
	$F_y$	109.603	109.096	-0.507		
	$F_z$	112.308	112.351	0.043		
8	$F_x$	624.620	624.597	-0.023	0.036	16
	$F_y$	111.810	111.815	0.005		
	$F_z$	111.912	111.970	0.058		
9	$F_x$	622.867	622.497	-0.37	0.238	16
	$F_y$	113.990	113.809	-0.181		
	$F_z$	111.516	111.518	0.002		
10	$F_x$	621.054	620.775	-0.279	0.337	16
	$F_y$	116.141	115.631	-0.51		
	$F_z$	111.120	111.168	0.048		

(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
11	$F_x$	619.182	618.527	-0.655	0.587	31
	$F_y$	118.264	117.487	-0.777		
	$F_z$	110.724	110.663	-0.061		
12	$F_x$	617.250	617.493	0.243	0.165	31
	$F_y$	120.356	120.486	0.13		
	$F_z$	110.328	110.409	0.081		
13	$F_x$	615.260	615.552	0.292	0.322	47
	$F_y$	122.418	122.884	0.466		
	$F_z$	109.932	110.024	0.092		
14	$F_x$	613.212	612.730	-0.482	0.467	47
	$F_y$	124.448	123.802	-0.646		
	$F_z$	109.536	109.478	-0.058		
15	$F_x$	611.106	610.597	-0.509	0.343	47
	$F_y$	126.446	126.141	-0.305		
	$F_z$	109.140	109.141	0.001		
16	$F_x$	608.944	609.012	0.068	0.069	47
	$F_y$	128.411	128.337	-0.074		
	$F_z$	108.744	108.808	0.064		
17	$F_x$	606.725	605.995	-0.73	0.661	47
	$F_y$	130.342	129.461	-0.881		
	$F_z$	108.348	108.320	-0.028		
18	$F_x$	604.450	604.134	-0.316	0.282	78
	$F_y$	132.238	131.865	-0.373		
	$F_z$	107.952	107.955	0.003		
19	$F_x$	602.119	601.834	-0.285	0.197	78
	$F_y$	134.099	133.913	-0.186		
	$F_z$	107.556	107.561	0.005		
20	$F_x$	599.734	599.507	-0.227	0.175	78
	$F_y$	135.923	135.729	-0.194		
	$F_z$	107.160	107.210	0.05		

(Continue)

Target number	Coordinate value	ⒶActual	ⒷEstimated	ⒸError (mm)	Ⓓr.m.s (mm)	ⒺTime (ms)
21	$F_x$	597.294	597.228	-0.066	0.186	78
	$F_y$	137.710	137.395	-0.315		
	$F_z$	106.764	106.781	0.017		
22	$F_x$	594.801	594.752	-0.049	0.210	78
	$F_y$	139.459	139.107	-0.352		
	$F_z$	106.368	106.443	0.075		
23	$F_x$	592.255	591.513	-0.742	0.899	78
	$F_y$	141.170	139.801	-1.369		
	$F_z$	105.972	105.912	-0.06		
24	$F_x$	589.656	589.593	-0.063	0.059	78
	$F_y$	142.841	142.796	-0.045		
	$F_z$	105.576	105.643	0.067		
25	$F_x$	587.006	586.276	-0.73	0.805	94
	$F_y$	144.472	143.285	-1.187		
	$F_z$	105.180	105.122	-0.058		
26	$F_x$	584.304	584.342	0.038	0.064	94
	$F_y$	146.062	146.095	0.033		
	$F_z$	104.784	104.883	0.099		
27	$F_x$	581.552	581.795	0.243	0.152	109
	$F_y$	147.610	147.550	-0.06		
	$F_z$	104.388	104.469	0.081		
28	$F_x$	578.750	578.209	-0.541	0.656	109
	$F_y$	149.117	148.118	-0.999		
	$F_z$	103.992	103.980	-0.012		
29	$F_x$	575.899	575.339	-0.56	0.641	109
	$F_y$	150.580	149.621	-0.959		
	$F_z$	103.596	103.579	-0.017		
30	$F_x$	573.000	573.321	0.321	0.201	109
	$F_y$	152.000	152.012	0.012		
	$F_z$	103.200	103.334	0.134		

### 6.1.3 점 이동 타겟에 대한 실험 결과 비교

점 이동 타겟 추정 시 N-R방법에 근거한 일괄처리기법, 데이터 이동기법과 EKF기법 총 3개 기법을 사용하여 실험을 수행한 결과는 다음과 같다. 3개 제어기법의 각각 이동 타겟 전체 오차 값을 비교하기 위해 Fig. 6-7에 타겟에 대한 오차 값을 그래프로 나타내었다. 인접한 타겟과의 오차 변화를 비교하며, EKF방법의 순환기법은 N-R방법의 일괄처리기법, 데이터 이동기법과 비교하면 순환기법의 특성상 다소 불안정한 상태를 보이고 있다. N-R방법의 일괄처리기법과 데이터 이동기법을 비교하며, 이동 타겟의 수가 늘어갈수록 오차 값이 상승하는 반면, 데이터 이동기법은 이동 타겟의 수가 늘어가도 오차 값이 안정적으로 나타나고 있다.

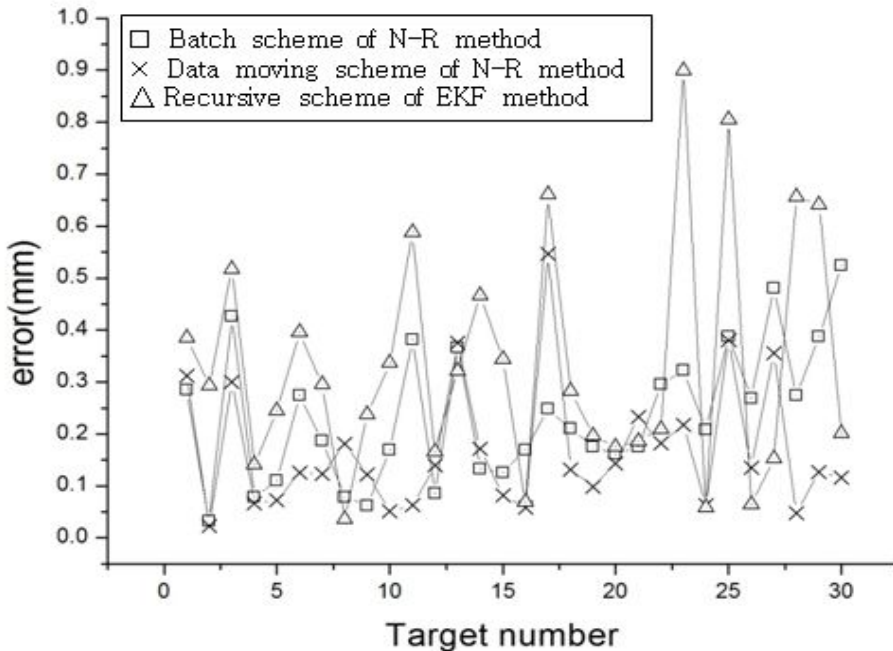


Fig. 6-7 For the moving target tracking, comparison of position errors using the batch and data moving schemes of N-R method, and the recursive scheme of EKF method



Table 6-7에서는 Fig. 6-7의 이동 타겟 30개의 r.m.s 평균 오차 값은 N-R방법의 일괄처리기법  $\pm 0.236\text{mm}$ , 데이터 이동기법 168mm과 EKF방법의 순환기법  $\pm 0.334\text{mm}$ 의 결과를 보이고, 데이터 처리시간에서는 일괄처리기법 422ms, 데이터 이동기법 187ms, EKF방법의 순환기법 109ms의 결과를 나타내고 있다. 타겟 하나 당 평균 데이터 처리시간으로 보면 일괄처리기법 14ms, 데이터이동기법 6ms, EKF방법의 순환기법 3.6ms이다.

Table 6-7 For the moving target tracking, comparison of errors and processing thime using the batch and data moving schemes of N-R method, and the recursive scheme of EKF method

Scheme	Total processing time(ms)	Average time(ms)	Average error(mm) (r.m.s)
Batch scheme of N-R method	422	14	0.236
Data moving scheme of N-R method	187	6	0.168
Recursive scheme of EKF method	109	3.6	0.334

위 결과를 바탕으로 분석해보면 상대적으로 N-R방법의 일괄처리기법은 평균오차 값이 좋으나 데이터 처리시간이 오래 걸리고, EKF방법의 순환기법은 데이터처리시간은 빠르나 정밀도는 다소 불안정했다. 반면, N-R방법의 데이터 이동기법은 정밀도 값의 변화 폭도 적고, 데이터 처리시간도 빨랐다. 그리고 일괄처리기법에서 이동 타겟의 수가 증가할수록 오차 값이 상승하는 흐름도 N-R방법의 데이터 이동기법에서는 보이지 않았다.

작업환경에서 시간에 구속되지 않고 정확한 값을 얻고자 할 때는 N-R방법에 근거한 로봇 제어기법을 선택하는 것이 좋으며, 정밀도보다 데이터 처리시간을 중요시 할 경우에는 EKF방법을 선택하는 것이 옳다고 판단된다.

## 6.2 고정된 얇은 막대 배치

얇은 막대를 고정된 타겟 지점에 배치작업은 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 사용하여 장애물이 없는 경우와 장애물이 출현하는 경우로 구분하였다. 장애물 출현시 장애물 영역을 타겟 근처 영역, 운동궤적의 중간 영역, 운동궤적의 시작 영역등 3개 영역으로 구분하고, 각 영역에서 장애물이 1개 단계에서 10개 단계까지 출현하도록 배치하여 실험을 행하였다.

### 6.2.1 비전 시스템 모델의 적합성 비교

N-R방법과 EKF방법을 사용하여 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 작업을 위해 이동하는 동안 카메라 매개변수를 이용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 매개변수를 추정하는데 사용한 실제 획득된 비전 데이터를 비교하여 제안된 비전 시스템 모델의 적합성을 보이하고자 한다. 3대 카메라 각각에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의 오차는 식(32)와 같이 r.m.s.<sup>(29)</sup>를 정의하여 사용하였다.

$$e_{r.m.s}^j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(e_x^{i,j})^2 + (e_y^{i,j})^2\}}{n}}, \quad e_{avg} = \frac{e_{r.m.s}^1 + e_{r.m.s}^2}{2} \quad (32)$$

여기서,  $e_x^{i,j}$ ,  $e_y^{i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )는 큐( $j = 1, 2$ )에 대한 실제 비전 데이터와 비전 시스템 모델의 추정 값 사이의  $x$  및  $y$ 축 오차값,  $n$ 은 로봇이 이동 타겟이 이동하는 동안 비전 데이터가 얻어진 단계 수이다.

#### 가. N-R방법의 일괄처리기법 결과

##### (1) 장애물이 없는 경우

장애물 출현 시 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험의 비교 대상으로 사용하기 위해

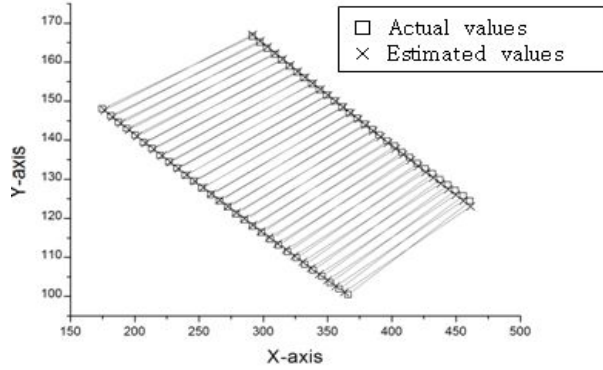
장애물이 존재하지 않는 경우 N-R기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟에 대한 실험을 수행하였다.

각 카메라에 대한 Table 6-8에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-8에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다.

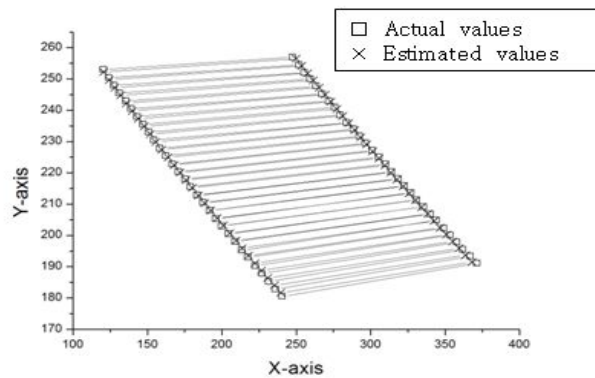
각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는 camera1에서  $\pm 0.0957\text{pixel}$ , camera2에서  $\pm 0.0812\text{pixel}$ , camera3에서  $\pm 0.0504\text{pixel}$  정도로 근사함을 보여주며, 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-8 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with no obstacle in each camera

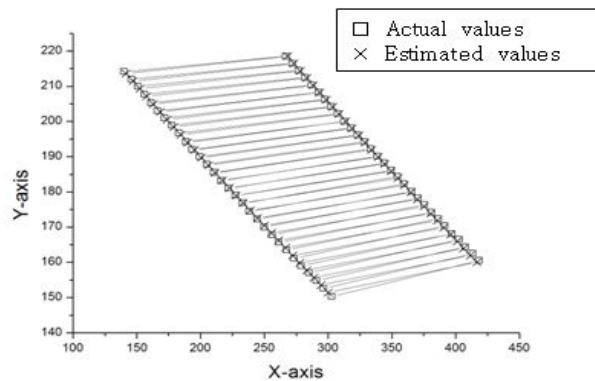
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
No obstacle region	C1	0.664	0.258	0.448
	C2	0.509	0.156	0.396
	C3	0.980	1.009	1.012
	C4	1.131	1.270	1.188
	C5	722.754	1582.067	1115.839
	C6	-20.139	100.340	-46.377



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-8 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with no obstacle

(2) 장애물이 출현하는 경우

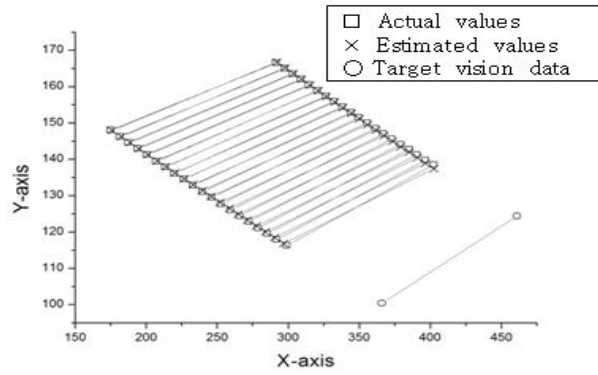
①Case 1; Obstacles region near target

장애물 출현 시 N-R기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 타겟 근처에서 장애물이 출현 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행하였지만 아래 Fig. 6-9에서 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

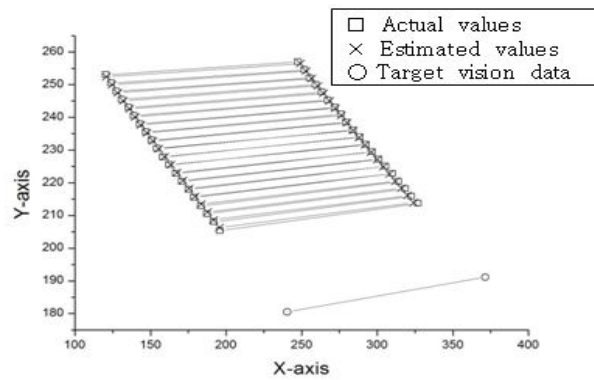
각 카메라에 대한 Table 6-9에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-9에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-9 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with casel in each camera

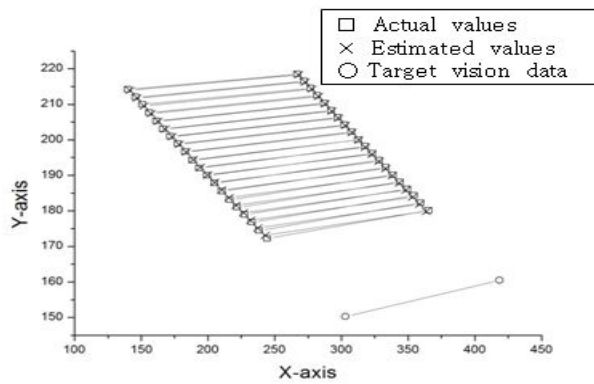
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
Obstacles region near target	C1	0.652	0.252	0.437
	C2	0.500	0.153	0.388
	C3	0.984	1.009	1.015
	C4	1.132	1.263	1.186
	C5	751.002	1579.705	1134.577
	C6	-26.229	93.433	-53.951



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-9 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case1

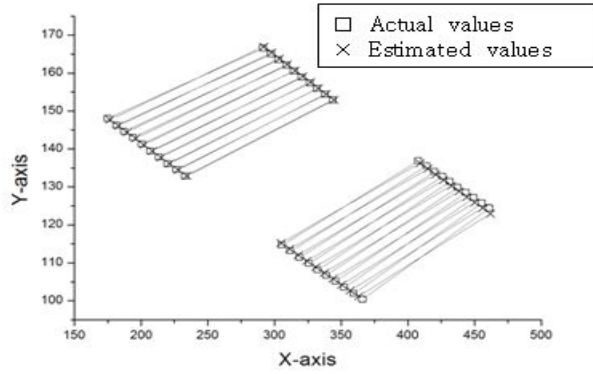
②Case 2; Intermediate obstacles region

장애물 출현 시 N-R기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 이동 궤적 중간에 출현하는 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행하였지만 아래 Fig. 6-10에서는 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

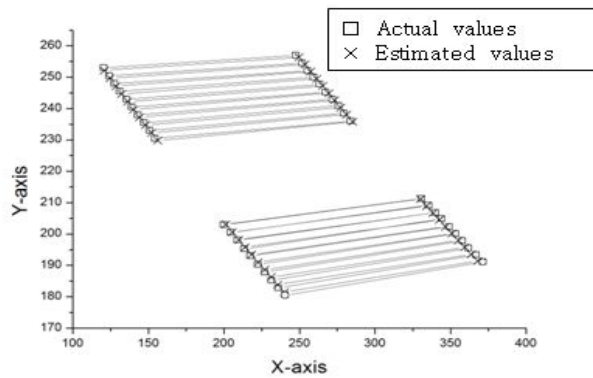
각 카메라에 대한 Table 6-10에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-10에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-10 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with case2 in each camera

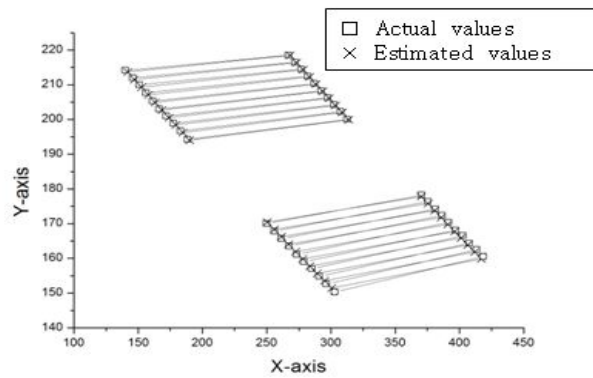
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
Intermediate obstacles region	C1	0.664	0.260	0.449
	C2	0.510	0.158	0.398
	C3	0.982	1.006	1.012
	C4	1.131	1.269	1.188
	C5	723.624	1573.002	1110.692
	C6	-24.592	103.544	-47.895



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-10 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case2



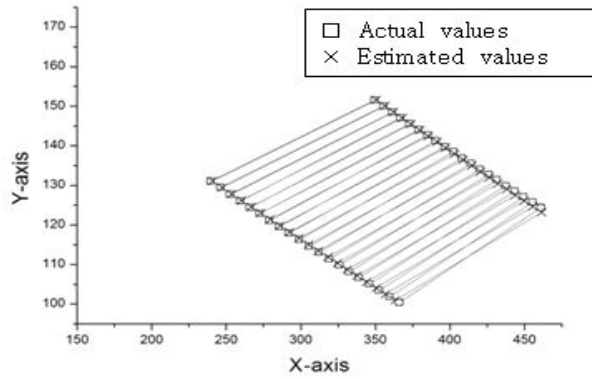
### ③Case 3; Beginning obstacles region

장애물 출현 시 N-R기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 초기단계 이후 이동궤적 초반에 장애물이 출현하는 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행하였지만 아래 Fig. 6-11에서는 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

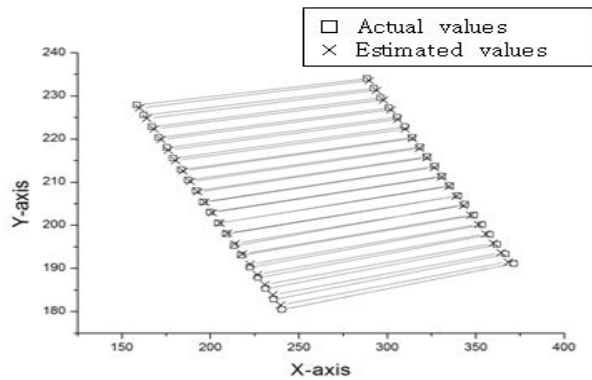
각 카메라에 대한 Table 6-11에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-11에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-11 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the N-R method with case3 in each camera

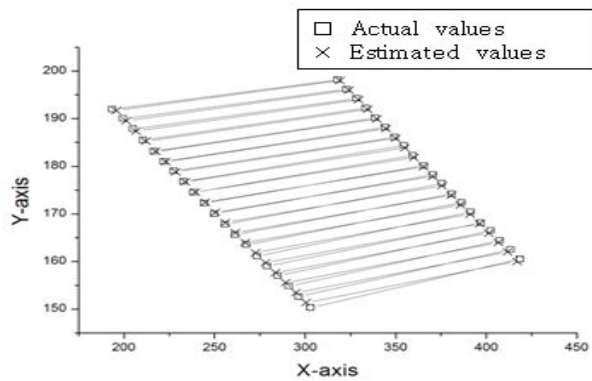
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
Beginning obstacles region	C1	0.666	0.256	0.448
	C2	0.509	0.153	0.395
	C3	0.977	1.012	1.011
	C4	1.131	1.271	1.188
	C5	717.115	1591.027	1115.657
	C6	-15.508	99.398	-42.804



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-11 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the batch scheme of N-R method with case3

## 나. EKF방법의 순환기법 결과

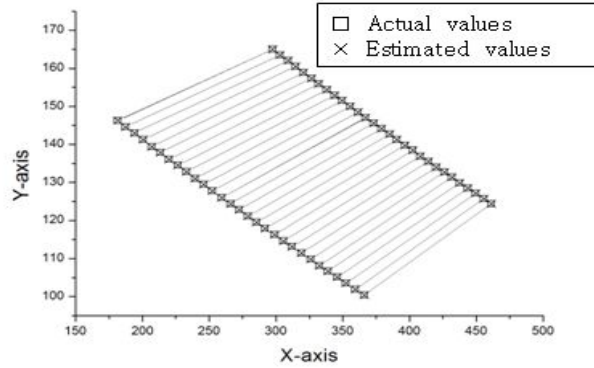
### (1) 장애물이 없는 경우

장애물 출현 시 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험의 비교 대상으로 사용하기 위해 장애물이 존재하지 않는 경우 EKF기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟에 대한 실험을 수행하였다.

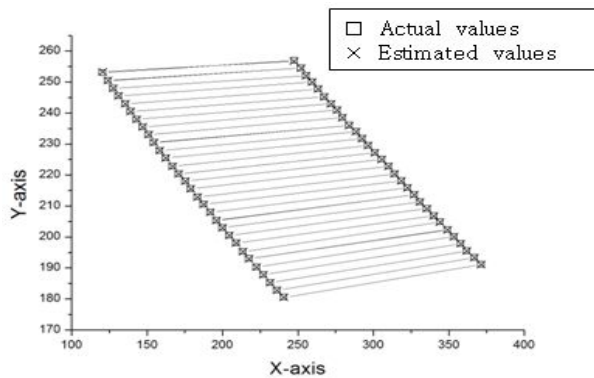
각 카메라에 대한 Table 6-12에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-12에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-12 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with no obstacle in each camera

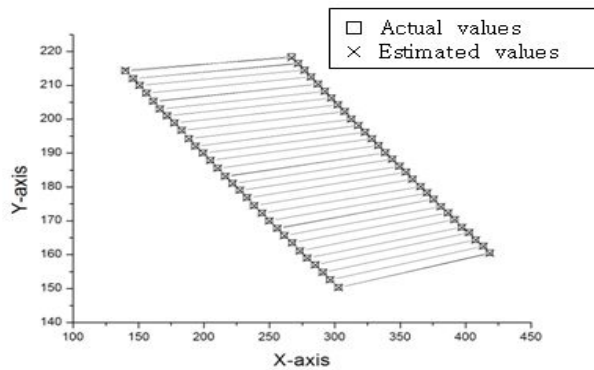
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
No obstacle region	C1	0.647	0.280	0.433
	C2	0.443	0.178	0.354
	C3	0.997	1.033	1.035
	C4	1.069	1.272	1.154
	C5	802.895	1577.435	1175.190
	C6	-45.139	77.446	-70.996



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-12 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with no obstacle

(2) 장애물이 출현하는 경우

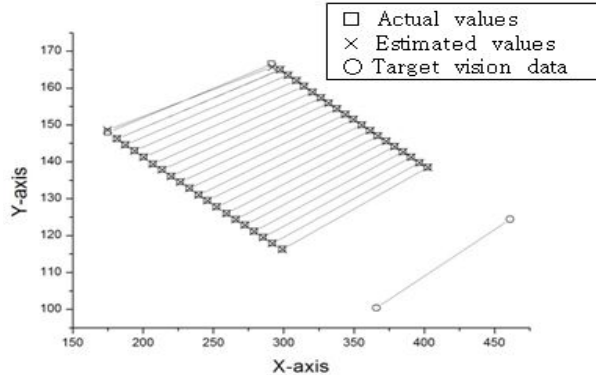
① Case 1; Obstacle region Near target

장애물 출현 시 EKF방법의 순환기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 타겟 근처에서 장애물이 출현하는 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행하였지만 아래 Fig. 6-13에서는 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

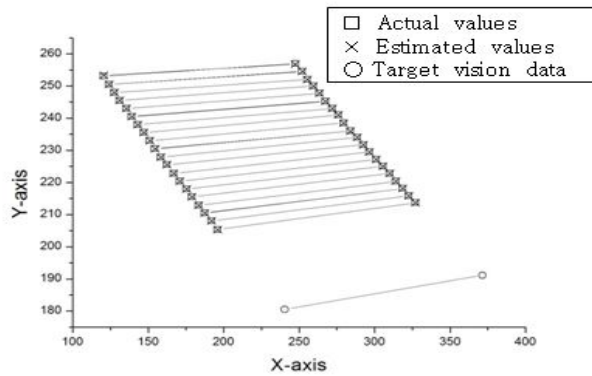
각 카메라에 대한 Table 6-13에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-13에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-13 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with casel in each camera

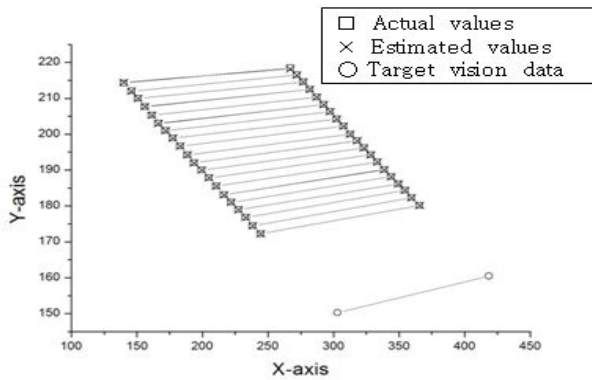
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
Obstacles region near target	C1	0.642	0.271	0.430
	C2	0.460	0.172	0.367
	C3	1.000	1.028	1.033
	C4	1.094	1.267	1.172
	C5	802.894	1577.434	1175.191
	C6	-45.139	77.446	-70.996



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-13 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with casel

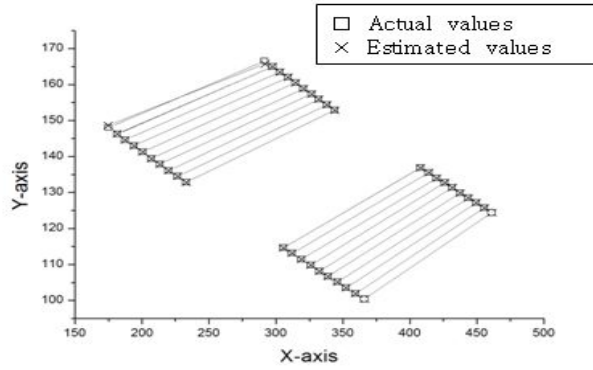
② Case 2; Intermediate obstacles region

장애물 출현 시 EKF기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 로봇이 이동하는 궤적 중간에 장애물이 출현하는 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행하였지만 아래 Fig. 6-14에서는 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

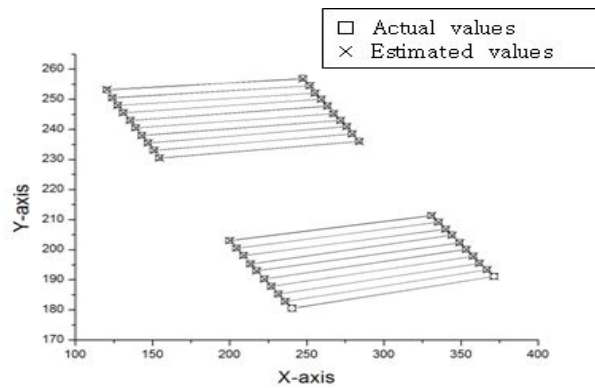
각 카메라에 대한 Table 6-14에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-14에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-14 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with case2 in each camera

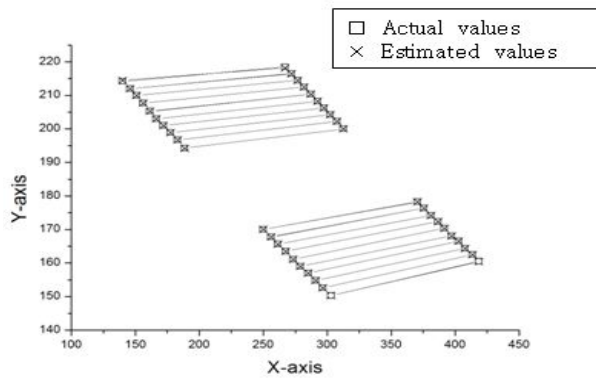
Obstacles region	C-value	Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
Middle obstacles region	C1	0.647	0.280	0.433
	C2	0.443	0.178	0.354
	C3	0.997	1.033	1.035
	C4	1.069	1.272	1.154
	C5	802.898	1577.445	1175.181
	C6	-45.139	77.447	-70.996



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-14 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with case2



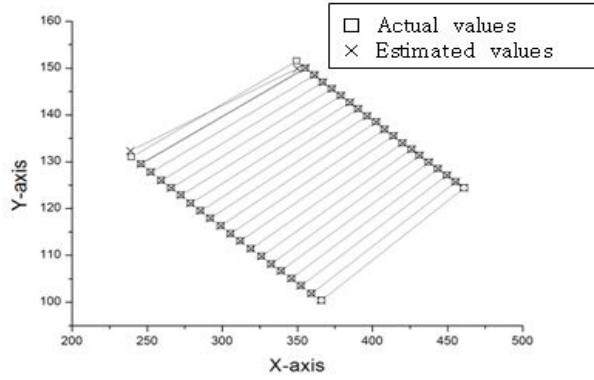
### ③ Case 3; Beginning obstacles region

장애물 출현 시 EKF기법을 이용한 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 중 초기단계 이후 로봇이동 궤적 시작부분에서 장애물이 출현하는 경우이다. 여기서, 장애물이 하나가 출현 하였을 때부터 10개가 출현 하였을 경우까지 총 10번의 실험을 진행 하였지만 아래 Fig. 6-15에서는 장애물 10이 출현 한경우의 비전데이터의 흐름을 보여주고 있다.

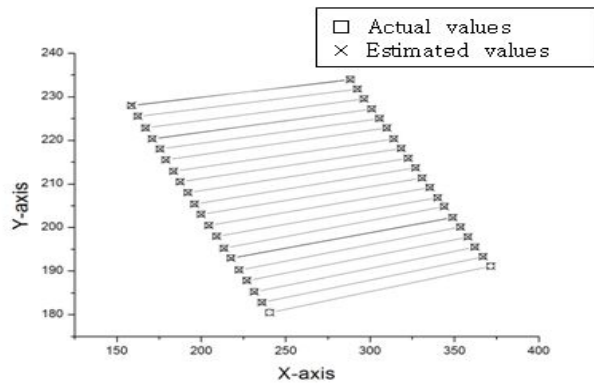
각 카메라에 대한 Table 6-15에서 나타낸 매개변수를 식(3)에 적용하여 추정된 비전 시스템 모델 값과 추정하기 위해 이동하는 동안 3대의 카메라에서 획득된 실제 비전 데이터를 비교하여 Fig. 6-15에서 보여주고 있다. 여기서, □는 타겟 추정을 위해 이동하는 동안 각 카메라에 대한 실제 비전데이터를 나타내며, ×는 각 카메라에 대한 추정된 비전 시스템 모델을 나타낸다. 각 카메라에서 식 (32)를 통해 전체 이동 타겟에 대한 오차는  $\pm 1\text{pixel}$  미만으로 비전시스템 모델에 적합함을 알 수 있다.

Table 6-15 For the fixed slender bar placement, the estimated six parameters using the EKF method with case3 in each camera

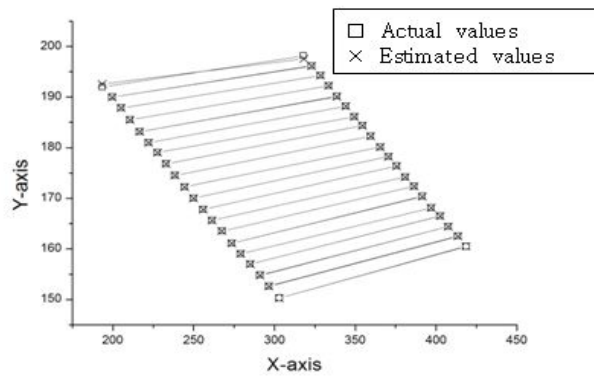
Obstacles region	C-value	Camera No,1	Camera No,2	Camera No,3
Beginning obstacles region	C1	0.650	0.271	0.432
	C2	0.447	0.166	0.354
	C3	0.997	1.034	1.035
	C4	1.071	1.272	1.153
	C5	796.636	1597.318	1176.373
	C6	-44.791	78.403	-71.057



(a) Camera 1



(b) Camera 2



(c) Camera 3

Fig. 6-15 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values of the vision system model for each camera using the recursive scheme of EKF method with case3

## 6.2.2 장애물이 없는 경우 고정된 얇은 막대 배치 결과

N-R과 EKF방법에 의한 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 실험 결과 추정된 타겟 위치 값과 실제 타겟 위치 값을 비교한 오차 값은 식(33)과 같이 r.m.s.<sup>(29)</sup>로 정의하였다. 특히, 공간상에서 고정 타겟에 대한 실제 위치 값은 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값, 추정된 위치값은 관절각 추정기법에 의해 계산된 관절각을 식(1)과 식(2)의 4축 스카라 타입 로봇의 정기구학 모델에 적용하여 계산하였다.

$$e_{r.m.s}^j = \sqrt{\frac{\{(e_x^j)^2 + (e_y^j)^2 + (e_z^j)^2\}}{3}}, \quad e_{avg} = \frac{e_{r.m.s}^1 + e_{r.m.s}^2}{2} \quad (33)$$

여기서,  $e_x^j$ ,  $e_y^j$ ,  $e_z^j$ 는 각 큐( $j=1,2$ )에 대한  $x$ 성분 오차,  $y$ 성분오차,  $z$ 성분 오차를 나타낸다.

### 가. N-R방법의 일괄처리기법 결과

로봇이 N-R기법을 사용하여 고정된 얇은 막대 배치 실험을 수행 하였을 때, Table 6-8의 매개변수를 4.1.1절 Fig. 4-2에서 보여준 반복적인 기법의 N-R방법을 이용한 로봇 관절각 추정 기법에 대입하여 추정된 로봇 관절각 값은 Table 6-16에서 보여주고 있다.

Table 6-16에서 보여준 것과 같이 실제관절각과 측정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차는  $\theta_1 = 0.385$  (degree),  $\theta_2 = -1.132$  (degree),  $d_3 = -0.25$  (mm),  $\theta_4 = -0.757$  (degree)로, 각 관절각은 아주 작은 오차 범위 내에 존재한다.

Table 6-16 For the fixed slender bar placement, the estimated joint angle using the N-R method with no obstacle

	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
Estimated	15.172	20.724	128.750	3.945
Actual	15.557	19.592	128.500	3.188

Table 6-16의 추정된 로봇 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여

로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-17에서 나타내고 있다.

Table 6-17에서 보여준 것 같이, 식(33) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉕의 r.m.s 오차 값은  $\pm 0.785\text{mm}$ 로 안정적인 결과를 얻었으며, 데이터 처리시간은 N-R기법의 특성상 타겟 이전의 모든 데이터를 한 번의 계산하기 때문에 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위인 1ms미만의 값이 측정되고 있다.

Table 6-17 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with no obstacle

Cue No.	Coordinate value	㉓ Actual	㉔ Estimated	㉕ Error (mm)	㉖ r.m.s (mm)	㉗ Average (mm)	㉘ Time (ms)
1	$F_x$	613.001	611.949	-1.052	0.734	0.785	☆
	$F_y$	245.998	246.669	0.671			
	$F_z$	160.000	159.750	-0.250			
2	$F_x$	566.519	565.210	-1.309	0.833		
	$F_y$	256.412	255.859	-0.553			
	$F_z$	160.000	159.750	-0.250			

(주) ☆ : 1ms이하로 사용하는 프로그램에서 측정할 수 없는 시간으로 나타남

## 나. EKF방법의 순환기법 결과

순환적 기법을 사용하는 EKF방법을 적용하여 얇은 막대 고정 타겟 추정 실험 결과는 다음과 같다. Table 6-18에서 보여준 결과는 Table 6-12의 매개변수를 4.1.2절 Fig. 4-9의 EKF방법을 이용한 로봇 관절각 추정모델에 대입하여 추정된 관절각 모델 값과 실제 관절각 값을 비교하여 나타내고 있다.

Table 6-18에서 보여준 것과 같이 실제 관절각 값과 추정된 관절각 값을 비교한 결과, 오차는  $\theta_1 = -0.01$  (degree),  $\theta_2 = -0.021$  (degree),  $d_3 = -0.112$  (mm),  $\theta_4 =$

-0.079 (degree)로, 각 관절각은 아주 작은 오차 범위 내에 존재한다.

Table 6-18 For the fixed slender bar placement, the estimated joint angles using the EKF method with no obstacle

	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
Estimated	15.567	19.613	128.612	3.267
Actual	15.557	19.592	128.500	3.188

Table 6-18의 추정된 로봇 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-19에서 나타내고 있다.

Table 6-19에서 보여준 것 같이, 식(31) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉑의 실제 관절각 값을 대입하여 ㉕의 r.m,s 오차 값이 계산되었다. ㉕에 보여진 것처럼 2개의 cue에 대한 평균 오차 값은  $\pm 0.137\text{mm}$ 로 안정적인 결과를 얻었으며, 데이터 처리시간은 359ms이 소요되었다.

Table 6-19 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with no obstacle

Cue No.	Coordinate value	㉑ Actual	㉔ Estimated	㉕ Error (mm)	㉖ r.m.s (mm)	㉗ Average (mm)	㉘ Time (ms)
1	$F_x$	613.001	612.913	-0.088	0.154	0.137	359ms
	$F_y$	245.998	246.224	0.226			
	$F_z$	160.000	159.888	-0.112			
2	$F_x$	566.519	566.411	-0.108	0.119		
	$F_y$	256.412	256.548	0.136			
	$F_z$	160.000	159.888	-0.112			

### 6.2.3 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 결과

N-R과 EKF방법에 의한 장애물 출현 시 고정된 얇은 막대 배치 실험 결과 추정된 타겟 위치 값과 실제 타겟 위치 값을 비교한 오차 값은 식(34)와 같이 r.m.s.로 정의하였다. 특히, 공간상에서 고정 타겟에 대한 실제 위치 값은 로봇제어기로부터 얻어진 엔코더 값, 추정된 위치값은 관절각 추정기법에 의해 계산된 관절각을 식(1)과 식(2)의 4축 스카라 타입 로봇의 정기구학 모델에 적용하여 계산하였다.

$$e_{r.m.s}^j = \sqrt{\frac{\{(e_x^j)^2 + (e_y^j)^2 + (e_z^j)^2\}}{3}}, \quad e_{avg} = \frac{e_{r.m.s}^1 + e_{r.m.s}^2}{2} \quad (34)$$

여기서,  $e_x^j$ ,  $e_y^j$ ,  $e_z^j$ 는 각 큐( $j=1,2$ )에 대한  $x$  성분 오차,  $y$  성분 오차,  $z$  성분 오차를 나타낸다.

#### 가. N-R방법의 일괄처리기법 결과

장애물 출현 시 로봇이 N-R기법을 사용하여 고정된 얇은 막대 배치 실험을 수행 하였을 때, 타겟 근처에 장애물 10개가 출현 하였을 경우 추정되었던 매개변수 처럼 각 장애물 영역에서 장애물이 하나 출현하였을 때부터 10개 출현 할 때까지 추정된 매개변수들을 4.1.1절 Fig. 4-6의 반복적인 기법을 사용하는 N-R방법을 이용한 로봇 관절각 추정 기법에 대입하여 추정된 로봇 관절각 값들은 Fig. 6-16~ Fig. 6-18에서 보여주고 있으며, X축은 장애물 개수를 보여주고 Y축은 그에 상응하는 각 관절각 값들 나타낸다. 여기서, Fig. 6-16은 타겟 근처 영역(case 1), Fig. 6-17은 중간 영역(case 2), Fig. 6-18은 시작 영역(case 3)에서 장애물개수 증가에 따른 각 관절각의 변화를 보여준다.

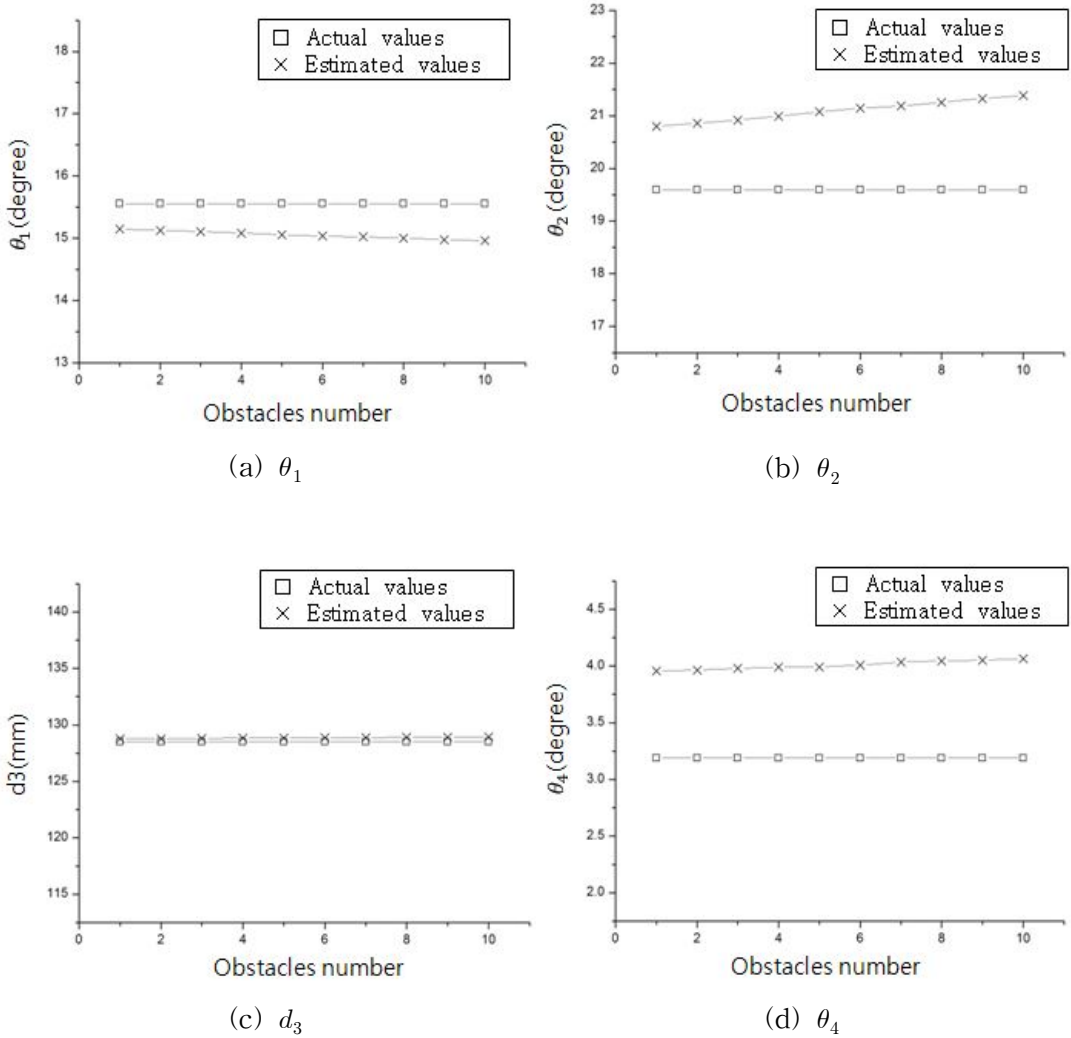
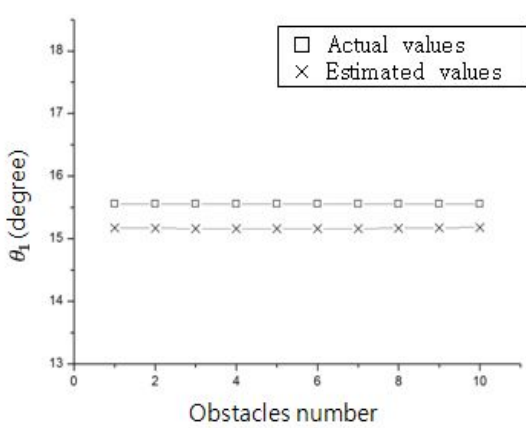
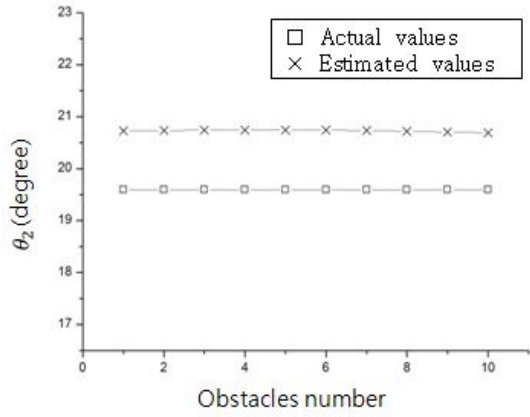


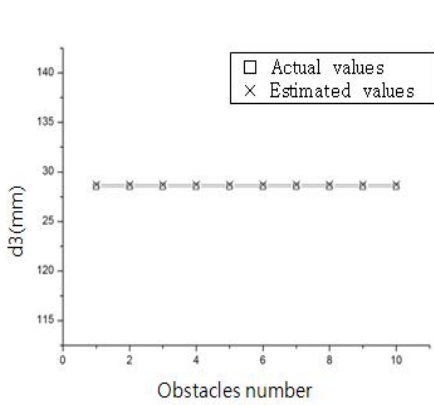
Fig. 6-16 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 1



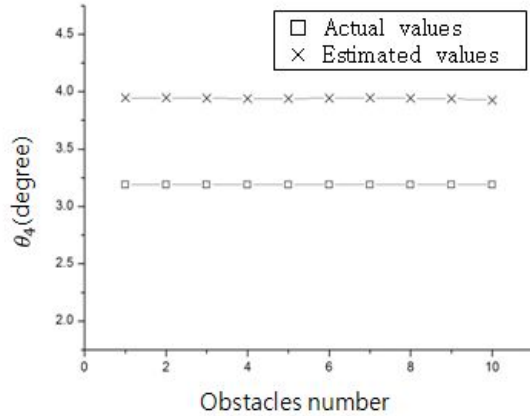
(a)  $\theta_1$



(b)  $\theta_2$



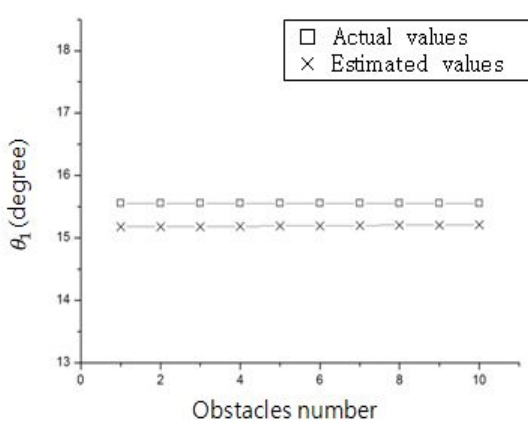
(c)  $d_3$



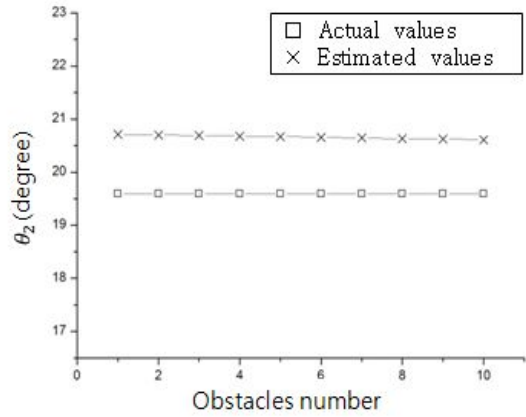
(d)  $\theta_4$

Fig. 6-17 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 2

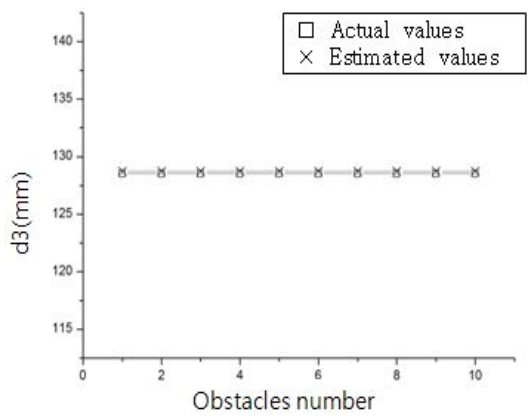




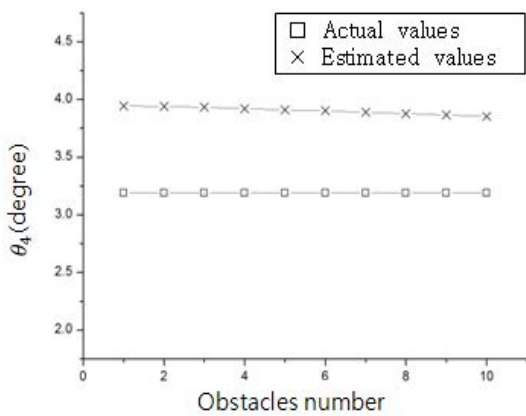
(a)  $\theta_1$



(b)  $\theta_2$



(c)  $d_3$



(d)  $\theta_4$

Fig. 6-18 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the batch scheme of N-R method in case 3

Fig. 6-16의 추정된 로봇 관절각 값 중 타겟 근처에서 장애물이 발생하였을 때의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-20에서 나타내고 있다. Table 6-20에서 보여준 것 같이, 식(38) r.m.s 오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉑의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉕의 r.m.s 오차 평균값은 장애물 개수가 증가 할수록  $\pm 0.834\text{mm}$ 에서  $\pm 1.261\text{mm}$ 로 증가되었다. 허용 오차 범위를  $\pm 1\text{mm}$ 미만 기준으로 하면, 4개의 장애물이 발생하였을 때까지만 안정적인 결과를 얻었다고 볼 수 있다. 데이터 처리시간은 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위인 1ms미만의 값이 측정되고 있다.

Table 6-20 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 1

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉑ Actual	㉒ Estimated	㉓ Error (mm)	㉔ r.m.s (mm)	㉕ Average (mm)	㉖ Time (ms)
1	1	$F_x$	611.875	613.001	1.126	0.781	0.834	☆
		$F_y$	246.699	245.998	-0.701			
		$F_z$	159.731	160	0.269			
	2	$F_x$	565.126	566.519	1.393	0.883		
		$F_y$	255.841	256.412	0.571			
		$F_z$	159.731	160	0.269			
2	1	$F_x$	611.804	613.001	1.197	0.829	0.879	☆
		$F_y$	246.738	245.998	-0.740			
		$F_z$	159.714	160	0.286			
	2	$F_x$	565.047	566.519	1.472	0.927		
		$F_y$	255.838	256.412	0.574			
		$F_z$	159.714	160	0.286			
3	1	$F_x$	611.738	613.001	1.263	0.875	0.924	☆
		$F_y$	246.778	245.998	-0.780			
		$F_z$	159.695	160	0.305			
	2	$F_x$	564.972	566.519	1.547	0.970		
		$F_y$	255.831	256.412	0.581			
		$F_z$	159.695	160	0.305			
4	1	$F_x$	611.66	613.001	1.341	0.926	0.974	☆
		$F_y$	246.815	245.998	-0.817			
		$F_z$	159.676	160	0.324			
	2	$F_x$	564.885	566.519	1.634	1.021		
		$F_y$	255.82	256.412	0.592			
		$F_z$	159.676	160	0.324			

5	1	$F_x$	611.575	613.001	1.426	0.976	1.028	☆
		$F_y$	246.838	245.998	-0.840			
		$F_z$	159.652	160	0.348			
	2	$F_x$	564.792	566.519	1.727	1.077		
		$F_y$	255.798	256.412	0.614			
		$F_z$	159.652	160	0.348			
6	1	$F_x$	611.504	613.001	1.497	1.025	1.076	☆
		$F_y$	246.879	245.998	-0.881			
		$F_z$	159.632	160	0.368			
	2	$F_x$	564.711	566.519	1.808	1.125		
		$F_y$	255.788	256.412	0.624			
		$F_z$	159.632	160	0.368			
7	1	$F_x$	611.443	613.001	1.558	1.074	1.119	☆
		$F_y$	246.94	245.998	-0.942			
		$F_z$	159.617	160	0.383			
	2	$F_x$	564.64	566.519	1.879	1.162		
		$F_y$	255.798	256.412	0.614			
		$F_z$	159.617	160	0.383			
8	1	$F_x$	611.369	613.001	1.632	1.124	1.168	☆
		$F_y$	246.979	245.998	-0.981			
		$F_z$	159.596	160	0.404			
	2	$F_x$	564.557	566.519	1.962	1.210		
		$F_y$	255.793	256.412	0.619			
		$F_z$	159.596	160	0.404			
9	1	$F_x$	611.293	613.001	1.708	1.172	1.217	☆
		$F_y$	247.012	245.998	-1.014			
		$F_z$	159.577	160	0.423			
	2	$F_x$	564.474	566.519	2.045	1.259		
		$F_y$	255.782	256.412	0.630			
		$F_z$	159.577	160	0.423			
10	1	$F_x$	611.227	613.001	1.774	1.218	1.261	☆
		$F_y$	247.052	245.998	-1.054			
		$F_z$	159.557	160	0.443			
	2	$F_x$	564.4	566.519	2.119	1.302		
		$F_y$	255.781	256.412	0.631			
		$F_z$	159.557	160	0.443			

(주) ☆ : 1ms이하로 사용하는 프로그램에서 측정할 수 없는 시간으로 나타남

Fig. 6-17의 추정된 로봇 관절각 값 중 운동궤적 중간에 장애물이 출현 하였을 경우의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-21에서 나타내고 있다. Table 6-21에서 보여준 것 같이, 식(38) r.m.s오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉕의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉖의 r.m.s오차 평균값은 장애물 개수가 증가해도 평균  $\pm 0.778\text{mm}$  전후로 장애물의 영향을 거의 받지 않는 결과를 나타냈다. 데이터 처리시간은 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위인 1ms미만의 값이 측정되고 있다.

Table 6-21 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 2

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉕ Actual	㉔ Estimated	㉖ Error (mm)	㉗ r.ms (mm)	㉘ Average (mm)	㉙ Time (ms)
1	1	$F_x$	611.945	613.001	1.056	0.738	0.788	☆
		$F_y$	246.672	245.998	-0.674			
		$F_z$	159.75	160	0.250			
	2	$F_x$	565.205	566.519	1.314	0.835		
		$F_y$	255.858	256.412	0.554			
		$F_z$	159.75	160	0.250			
2	1	$F_x$	611.941	613.001	1.060	0.737	0.790	☆
		$F_y$	246.663	245.998	-0.665			
		$F_z$	159.75	160	0.250			
	2	$F_x$	565.201	566.519	1.318	0.840		
		$F_y$	255.847	256.412	0.565			
		$F_z$	159.75	160	0.250			
3	1	$F_x$	611.939	613.001	1.062	0.735	0.791	☆
		$F_y$	246.653	245.998	-0.655			
		$F_z$	159.751	160	0.249			
	2	$F_x$	565.198	566.519	1.321	0.844		
		$F_y$	255.836	256.412	0.576			
		$F_z$	159.751	160	0.249			
4	1	$F_x$	611.941	613.001	1.060	0.732	0.790	☆
		$F_y$	246.648	245.998	-0.650			
		$F_z$	159.752	160	0.248			
	2	$F_x$	565.201	566.519	1.318	0.843		
		$F_y$	255.834	256.412	0.578			
		$F_z$	159.752	160	0.248			

5	1	$F_x$	611.945	613.001	1.056	0.728	0.787	☆
		$F_y$	246.641	245.998	-0.643			
		$F_z$	159.755	160	0.245			
	2	$F_x$	565.205	566.519	1.314	0.842		
		$F_y$	255.829	256.412	0.583			
		$F_z$	159.755	160	0.245			
6	11	$F_x$	611.947	613.001	1.054	0.728	0.786	☆
		$F_y$	246.632	245.998	-0.634			
		$F_z$	159.756	160	0.244			
	12	$F_x$	565.207	566.519	1.312	0.842		
		$F_y$	255.817	256.412	0.595			
		$F_z$	159.756	160	0.244			
7	13	$F_x$	611.959	613.001	1.042	0.715	0.779	☆
		$F_y$	246.624	245.998	-0.626			
		$F_z$	159.76	160	0.240			
	14	$F_x$	565.22	566.519	1.299	0.838		
		$F_y$	255.811	256.412	0.601			
		$F_z$	159.76	160	0.240			
8	15	$F_x$	611.974	613.001	1.027	0.704	0.769	☆
		$F_y$	246.614	245.998	-0.616			
		$F_z$	159.765	160	0.235			
	16	$F_x$	565.237	566.519	1.282	0.828		
		$F_y$	255.812	256.412	0.600			
		$F_z$	159.765	160	0.235			
9	17	$F_x$	611.993	613.001	1.008	0.691	0.757	☆
		$F_y$	246.602	245.998	-0.604			
		$F_z$	159.771	160	0.229			
	18	$F_x$	565.258	566.519	1.261	0.817		
		$F_y$	255.813	256.412	0.599			
		$F_z$	159.771	160	0.229			
10	19	$F_x$	612.01	613.001	0.991	0.677	0.744	☆
		$F_y$	246.584	245.998	-0.586			
		$F_z$	159.776	160	0.224			
	20	$F_x$	565.278	566.519	1.241	0.806		
		$F_y$	255.812	256.412	0.600			
		$F_z$	159.776	160	0.224			

(주) ☆ : 1ms이하로 사용하는 프로그램에서 측정할 수 없는 시간으로 나타남

Fig. 6-18의 추정된 로봇 관절각 값 중 운동궤적 시작부분에서 장애물이 출현 하였을 경우의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-22에서 나타내고 있다. Table 6-22에서 보여준 것 같이, 식(38) r.m.s오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉕의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉖의 r.m.s오차 평균값은 장애물 개수가 증가해도 평균  $\pm 0.740\text{mm}$  전 후로 장애물의 영향을 거의 받지 않는 결과를 나타냈다. 데이터 처리 시간은 N-R기법의 특성상 타겟 이전의 모든 데이터를 한 번의 계산하기 때문에 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위인 1ms미만의 값이 측정되고 있다.

Table 6-22 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the N-R method with case 3

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉕ Actual	㉔ Estimated	㉖ Error (mm)	㉗ r.m.s (mm)	㉘ Average (mm)	㉙ Time (ms)
1	1	$F_x$	611.963	613.001	1.038	0.726	0.776	☆
		$F_y$	246.664	245.998	-0.666			
		$F_z$	159.753	160	0.247			
	2	$F_x$	565.226	566.519	1.293	0.823		
		$F_y$	255.864	256.412	0.548			
		$F_z$	159.753	160	0.247			
2	1	$F_x$	611.977	613.001	1.024	0.718	0.767	☆
		$F_y$	246.659	245.998	-0.661			
		$F_z$	159.757	160	0.243			
	2	$F_x$	565.241	566.519	1.278	0.814		
		$F_y$	255.868	256.412	0.544			
		$F_z$	159.757	160	0.243			
3	1	$F_x$	611.985	613.001	1.016	0.710	0.761	☆
		$F_y$	246.649	245.998	-0.651			
		$F_z$	159.76	160	0.240			
	2	$F_x$	565.252	566.519	1.267	0.808		
		$F_y$	255.868	256.412	0.544			
		$F_z$	159.76	160	0.240			
4	1	$F_x$	611.994	613.001	1.007	0.703	0.753	☆
		$F_y$	246.639	245.998	-0.641			
		$F_z$	159.762	160	0.238			
	2	$F_x$	565.264	566.519	1.255	0.800		
		$F_y$	255.875	256.412	0.537			
		$F_z$	159.762	160	0.238			

5	1	$F_x$	612.006	613.001	0.995	0.694	0.744	☆
		$F_y$	246.631	245.998	-0.633			
		$F_z$	159.765	160	0.235			
	2	$F_x$	565.279	566.519	1.240	0.790		
		$F_y$	255.883	256.412	0.529			
		$F_z$	159.765	160	0.235			
6	11	$F_x$	612.016	613.001	0.985	0.687	0.737	☆
		$F_y$	246.624	245.998	-0.626			
		$F_z$	159.768	160	0.232			
	12	$F_x$	565.291	566.519	1.228	0.783		
		$F_y$	255.886	256.412	0.526			
		$F_z$	159.768	160	0.232			
7	13	$F_x$	612.027	613.001	0.974	0.679	0.728	☆
		$F_y$	246.617	245.998	-0.619			
		$F_z$	159.771	160	0.229			
	14	$F_x$	565.305	566.519	1.214	0.773		
		$F_y$	255.896	256.412	0.516			
		$F_z$	159.771	160	0.229			
8	15	$F_x$	612.036	613.001	0.965	0.673	0.720	☆
		$F_y$	246.611	245.998	-0.613			
		$F_z$	159.773	160	0.227			
	16	$F_x$	565.318	566.519	1.201	0.764		
		$F_y$	255.906	256.412	0.506			
		$F_z$	159.773	160	0.227			
9	17	$F_x$	612.044	613.001	0.957	0.667	0.713	☆
		$F_y$	246.606	245.998	-0.608			
		$F_z$	159.775	160	0.225			
	18	$F_x$	565.328	566.519	1.191	0.756		
		$F_y$	255.915	256.412	0.497			
		$F_z$	159.775	160	0.225			
10	19	$F_x$	612.052	613.001	0.949	0.662	0.706	☆
		$F_y$	246.601	245.998	-0.603			
		$F_z$	159.777	160	0.223			
	20	$F_x$	565.34	566.519	1.179	0.748		
		$F_y$	255.926	256.412	0.486			
		$F_z$	159.777	160	0.223			

(주) ☆ : 1ms이하로 사용하는 프로그램에서 측정할 수 없는 시간으로 나타남

### 나. EKF방법의 순환기법 결과

장애물 출현 시 EKF방법의 순환기법을 사용하여 로봇을 이용한 고정된 얇은 막대 배치 실험을 수행하였다. 각 장애물 영역에서 장애물이 1개 출현하였을 때부터 10개 출현 할 때까지 추정된 매개변수들을 4.1.2절 Fig. 4-12의 EKF방법의 순환기법을 이용한 로봇 관절각 추정 기법에 대입하여 장애물 개수 증가에 따른 추정된 로봇 관절각 값들이 Fig. 6-19~Fig. 6-21에서 보여주고 있다.

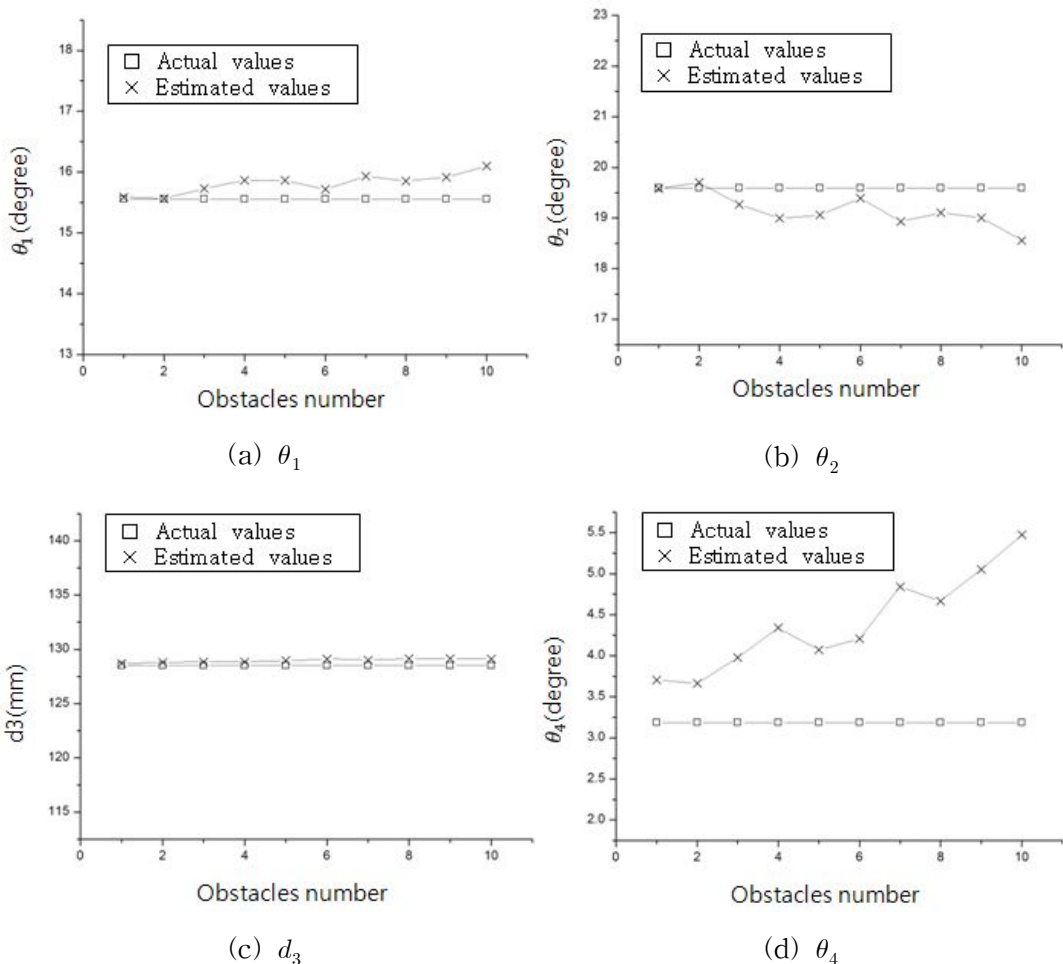


Fig. 6-19 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 1



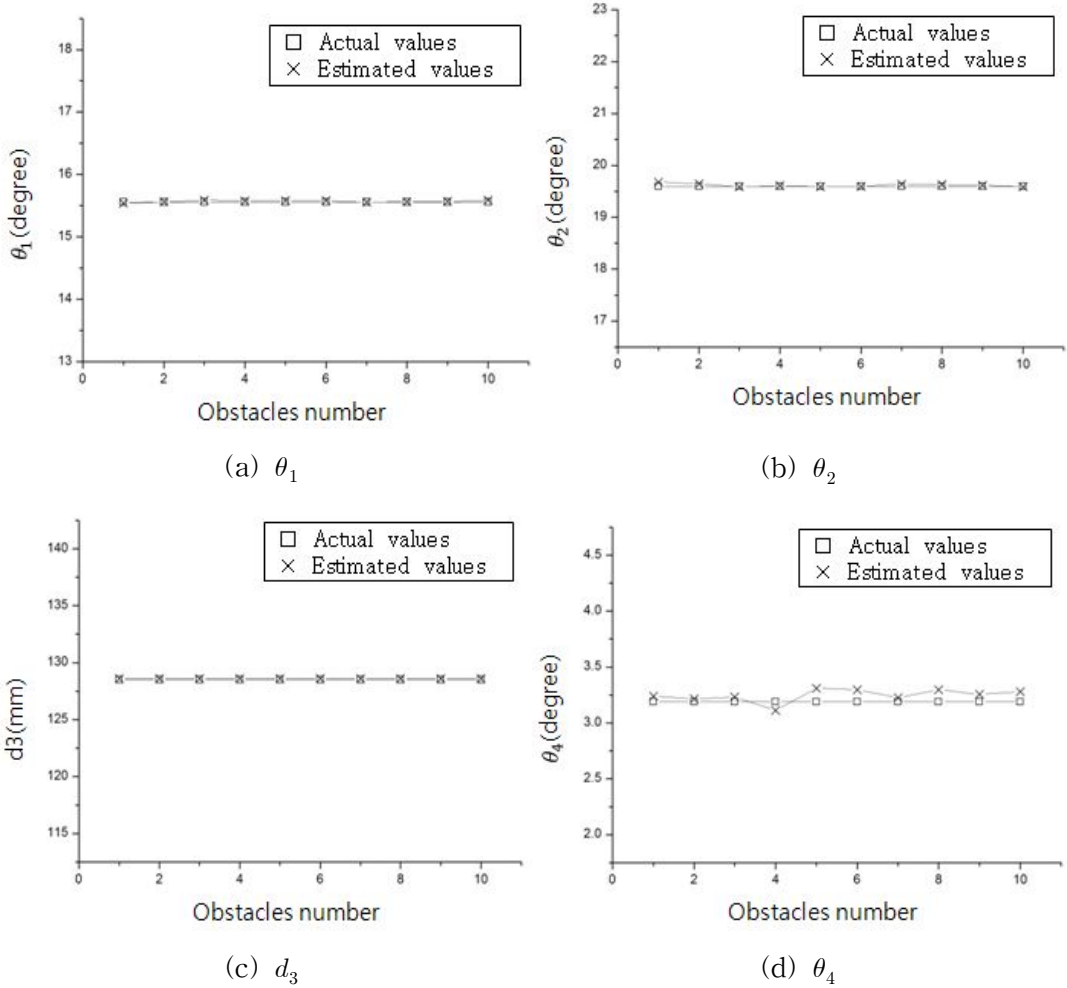


Fig. 6-20 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 2

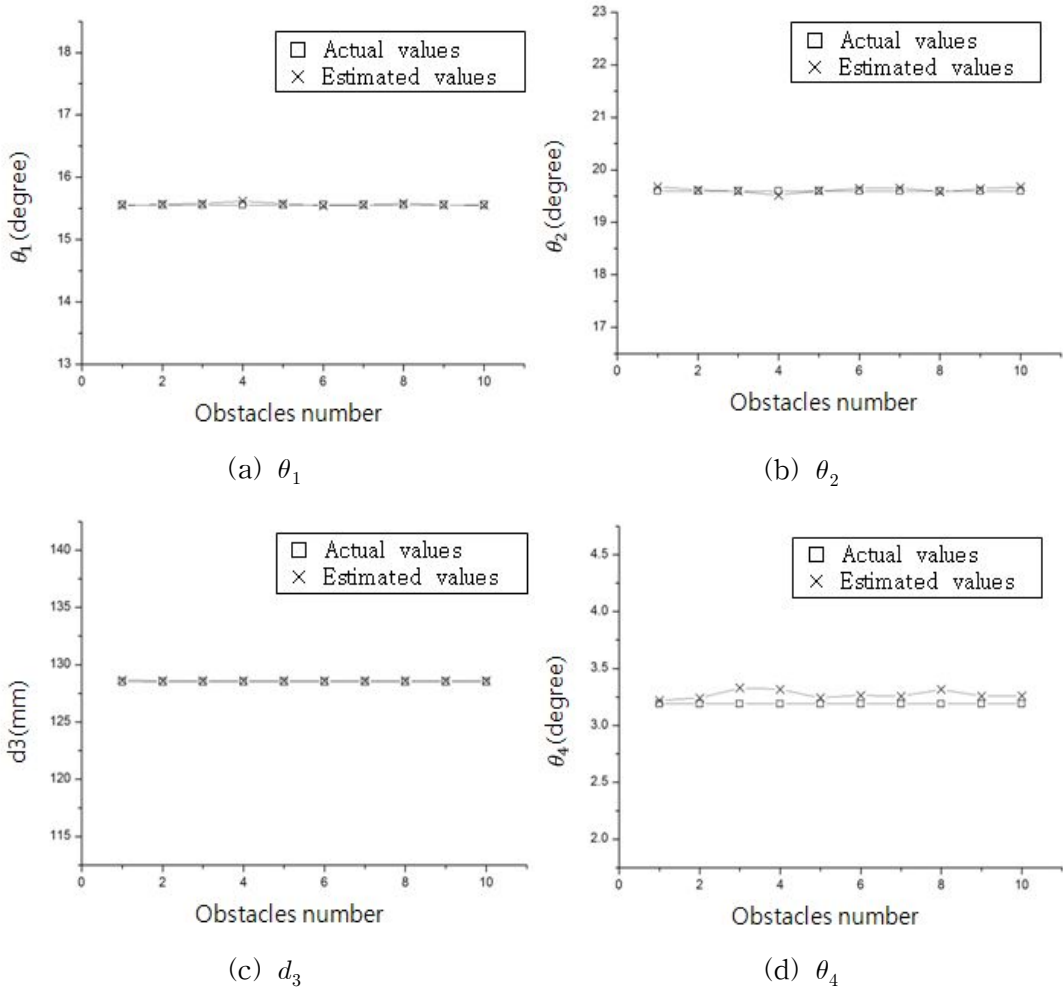


Fig. 6-21 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in joint coordinates using the recursive scheme of EKF method in case 3

Fig. 6-19의 추정된 로봇 관절각 값 중 타겟 근처에서 장애물이 발생하였을 때의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-23에서 나타내고 있다. Table 6-23에서 보여준 것 같이, 식(38) r.m.s오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉑의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉕의 r.m.s오차 평균값은 장애물 개수가 증가 할수록  $\pm 0.252\text{mm}$ 에서  $\pm 1.222\text{mm}$ 로 증가되었다. 허용 오차 범위를  $\pm 1\text{mm}$ 미만을 기준으로 하면, 8개의 장애물이 발생하였을 때까지만 안정적인 결과를 얻었고 데이터 처리시간은 장애물개수가 증가할수록 344ms에서 234ms까지 시간이 빨라지고 있는 것을 볼 수 있다.

Table 6-23 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 1

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉑ Actual	㉒ Estimated	㉓ Error (mm)	㉔ r.m.s (mm)	㉕ Average (mm)	㉖ Time (ms)
1	1	$F_x$	613.001	612.932	-0.069	0.321	0.252	344
		$F_y$	245.998	246.514	0.516			
		$F_z$	160	159.804	-0.196			
	2	$F_x$	566.519	566.354	-0.165	0.155		
		$F_y$	256.412	256.488	0.076			
		$F_z$	160	159.804	-0.196			
2	1	$F_x$	613.001	612.747	-0.254	0.466	0.392	328
		$F_y$	245.998	246.7	0.702			
		$F_z$	160	159.694	-0.306			
	2	$F_x$	566.519	566.16	-0.359	0.301		
		$F_y$	256.412	256.632	0.220			
		$F_z$	160	159.694	-0.306			
3	1	$F_x$	613.001	613.121	0.120	0.254	0.428	312
		$F_y$	245.998	246.853	0.855			
		$F_z$	160	159.653	-0.347			
	2	$F_x$	566.519	566.526	0.007	0.279		
		$F_y$	256.412	256.748	0.336			
		$F_z$	160	159.653	-0.347			
4	1	$F_x$	613.001	613.214	0.213	0.840	0.673	313
		$F_y$	245.998	247.396	1.398			
		$F_z$	160	159.66	-0.340			
	2	$F_x$	566.519	566.581	0.062	0.448		
		$F_y$	256.412	257.107	0.695			
		$F_z$	160	159.66	-0.340			

5	1	$F_x$	613.001	613.051	0.050	0.910	0.780	281
		$F_y$	245.998	247.505	1.507			
		$F_z$	160	159.538	-0.462			
	2	$F_x$	566.519	566.453	-0.066	0.624		
		$F_y$	256.412	257.386	0.974			
		$F_z$	160	159.538	-0.462			
6	11	$F_x$	613.001	612.885	-0.116	0.848	0.695	281
		$F_y$	245.998	247.327	1.329			
		$F_z$	160	159.385	-0.615			
	12	$F_x$	566.519	566.232	-0.287	0.498		
		$F_y$	256.412	256.944	0.532			
		$F_z$	160	159.385	-0.615			
7	13	$F_x$	613.001	613.122	0.121	1.225	0.972	282
		$F_y$	245.998	248.052	2.054			
		$F_z$	160	159.48	-0.520			
	14	$F_x$	566.519	566.404	-0.115	0.624		
		$F_y$	256.412	257.352	0.940			
		$F_z$	160	159.48	-0.520			
8	15	$F_x$	613.001	613.034	0.033	1.119	0.896	250
		$F_y$	245.998	247.827	1.829			
		$F_z$	160	159.359	-0.641			
	16	$F_x$	566.519	566.33	-0.189	0.594		
		$F_y$	256.412	257.194	0.782			
		$F_z$	160	159.359	-0.641			
9	17	$F_x$	613.001	613.027	0.026	1.364	1.076	250
		$F_y$	245.998	248.273	2.275			
		$F_z$	160	159.361	-0.639			
	18	$F_x$	566.519	566.267	-0.252	0.673		
		$F_y$	256.412	257.354	0.942			
		$F_z$	160	159.361	-0.639			
10	19	$F_x$	613.001	613.351	0.350	1.558	1.222	234
		$F_y$	245.998	248.601	2.603			
		$F_z$	160	159.38	-0.620			
	20	$F_x$	566.519	566.566	0.047	0.750		
		$F_y$	256.412	257.552	1.140			
		$F_z$	160	159.38	-0.620			

Fig. 6-20의 추정된 로봇 관절각 값 중 운동 궤적 중간에서 장애물이 발생하였을 때의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-24에서 나타내고 있다. Table 6-24에서 보여준 것 같이, 식(34) r.m.s오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉕의 r.m.s오차 평균값은 오차 평균값은 장애물 개수가 증가해도 평균  $\pm 0.165\text{mm}$  전 후로 장애물의 영향을 거의 받지 않는 결과를 나타냈다. 데이터 처리시간은 장애물개수가 증가할수록 처리하는 데이터의 양이 줄어들기 때문에 344ms에서 235ms까지 시간이 빨라지고 있는 것을 볼 수 있다.

Table 6-24 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 2

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉓ Actual	㉔ Estimated	㉕ Error (mm)	㉖ r.ms (mm)	㉗ Average (mm)	㉘ Time (ms)
1	1	$F_x$	613.001	612.888	-0.113	0.124	0.116	344
		$F_y$	245.998	246.136	0.138			
		$F_z$	160.000	159.881	-0.119			
	2	$F_x$	566.519	566.385	-0.134	0.107		
		$F_y$	256.412	256.457	0.045			
		$F_z$	160.000	159.881	-0.119			
2	1	$F_x$	613.001	612.858	-0.143	0.186	0.174	328
		$F_y$	245.998	246.264	0.266			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
	2	$F_x$	566.519	566.361	-0.158	0.161		
		$F_y$	256.412	256.610	0.198			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
3	1	$F_x$	613.001	612.888	-0.113	0.204	0.192	312
		$F_y$	245.998	246.317	0.319			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
	2	$F_x$	566.519	566.393	-0.126	0.178		
		$F_y$	256.412	256.673	0.261			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
4	1	$F_x$	613.001	612.875	-0.126	0.165	0.172	313
		$F_y$	245.998	246.230	0.232			
		$F_z$	160.000	159.891	-0.109			
	2	$F_x$	566.519	566.401	-0.118	0.179		
		$F_y$	256.412	256.677	0.265			
		$F_z$	160.000	159.891	-0.109			

5	1	$F_x$	613.001	612.907	-0.094	0.198	0.174	297
		$F_y$	245.998	246.311	0.313			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
	2	$F_x$	566.519	566.399	-0.120	0.145		
		$F_y$	256.412	256.605	0.193			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
6	11	$F_x$	613.001	612.902	-0.099	0.194	0.172	281
		$F_y$	245.998	246.300	0.302			
		$F_z$	160.000	159.888	-0.112			
	12	$F_x$	566.519	566.396	-0.123	0.146		
		$F_y$	256.412	256.601	0.189			
		$F_z$	160.000	159.888	-0.112			
7	13	$F_x$	613.001	612.893	-0.108	0.143	0.132	266
		$F_y$	245.998	246.189	0.191			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
	14	$F_x$	566.519	566.396	-0.123	0.120		
		$F_y$	256.412	256.534	0.122			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
8	15	$F_x$	613.001	612.882	-0.119	0.193	0.170	265
		$F_y$	245.998	246.289	0.291			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
	16	$F_x$	566.519	566.372	-0.147	0.143		
		$F_y$	256.412	256.576	0.164			
		$F_z$	160.000	159.886	-0.114			
9	17	$F_x$	613.001	612.885	-0.116	0.184	0.167	250
		$F_y$	245.998	246.274	0.276			
		$F_z$	160.000	159.889	-0.111			
	18	$F_x$	566.519	566.384	-0.135	0.149		
		$F_y$	256.412	256.600	0.188			
		$F_z$	160.000	159.889	-0.111			
10	19	$F_x$	613.001	612.899	-0.102	0.204	0.184	235
		$F_y$	245.998	246.319	0.321			
		$F_z$	160.000	159.893	-0.107			
	20	$F_x$	566.519	566.396	-0.123	0.162		
		$F_y$	256.412	256.639	0.227			
		$F_z$	160.000	159.893	-0.107			

Fig. 6-21의 추정된 로봇 관절각 값 중 운동 궤적 시작부분에서 장애물이 발생하였을 때의 관절각 값을 2.1절의 식(1) 정기구학 모델에 적용하여 로봇 위치 값과 실제 위치 값을 비교하여 Table 6-25에서 나타내고 있다. Table 6-25에서 보여준 것 같이, 식(34) r.m.s오차 계산식에 ㉔의 추정된 관절각 값과 ㉓의 실제 관절각 값을 대입하여 계산된 ㉕의 r.m.s오차 평균값은 오차 평균값은 장애물 개수가 증가해도 평균  $\pm 0.158\text{mm}$  전 후로 장애물의 영향을 거의 받지 않는 결과를 나타냈다. 데이터 처리시간은 장애물개수가 증가할수록 처리하는 데이터의 양이 줄어들기 때문에 328ms에서 235ms까지 시간이 빨라지고 있는 것을 볼 수 있다.

Table 6-25 For the fixed slender bar placement, comparison of the actual and estimated values in x-y-z coordinate using the EKF method with case 3

Number of obstacles	Target No.	Coordinate value	㉓ Actual	㉔ Estimated	㉕ Error (mm)	㉖ r.m.s (mm)	㉗ Average (mm)	㉘ Time (ms)
1	1	$F_x$	613.001	612.830	-0.171	0.197	0.183	328
		$F_y$	245.998	246.267	0.269			
		$F_z$	160.000	159.879	-0.121			
	2	$F_x$	566.519	566.328	-0.191	0.167		
		$F_y$	256.412	256.592	0.180			
		$F_z$	160.000	159.879	-0.121			
2	1	$F_x$	613.001	612.891	-0.110	0.171	0.157	328
		$F_y$	245.998	246.251	0.253			
		$F_z$	160.000	159.889	-0.111			
	2	$F_x$	566.519	566.393	-0.126	0.142		
		$F_y$	256.412	256.592	0.180			
		$F_z$	160.000	159.889	-0.111			
3	1	$F_x$	613.001	612.936	-0.065	0.162	0.138	328
		$F_y$	245.998	246.248	0.250			
		$F_z$	160.000	159.892	-0.108			
	2	$F_x$	566.519	566.426	-0.093	0.108		
		$F_y$	256.412	256.533	0.121			
		$F_z$	160.000	159.892	-0.108			
4	1	$F_x$	613.001	612.943	-0.058	0.232	0.210	297
		$F_y$	245.998	246.385	0.387			
		$F_z$	160.000	159.906	-0.094			
	2	$F_x$	566.519	566.441	-0.078	0.186		
		$F_y$	256.412	256.709	0.297			
		$F_z$	160.000	159.906	-0.094			

5	1	$F_x$	613.001	612.906	-0.095	0.170	0.157	297
		$F_y$	245.998	246.256	0.258			
		$F_z$	160.000	159.892	-0.108			
	2	$F_x$	566.519	566.409	-0.110	0.141		
		$F_y$	256.412	256.602	0.190			
		$F_z$	160.000	159.892	-0.108			
6	11	$F_x$	613.001	612.924	-0.077	0.110	0.101	281
		$F_y$	245.998	246.130	0.132			
		$F_z$	160.000	159.885	-0.115			
	12	$F_x$	566.519	566.421	-0.098	0.090		
		$F_y$	256.412	256.447	0.035			
		$F_z$	160.000	159.885	-0.115			
7	13	$F_x$	613.001	612.861	-0.140	0.184	0.167	266
		$F_y$	245.998	246.260	0.262			
		$F_z$	160.000	159.883	-0.117			
	14	$F_x$	566.519	566.355	-0.164	0.147		
		$F_y$	256.412	256.568	0.156			
		$F_z$	160.000	159.883	-0.117			
8	15	$F_x$	613.001	612.929	-0.072	0.178	0.155	265
		$F_y$	245.998	246.279	0.281			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
	16	$F_x$	566.519	566.422	-0.097	0.127		
		$F_y$	256.412	256.577	0.165			
		$F_z$	160.000	159.894	-0.106			
9	17	$F_x$	613.001	612.889	-0.112	0.156	0.141	250
		$F_y$	245.998	246.218	0.220			
		$F_z$	160.000	159.887	-0.113			
	18	$F_x$	566.519	566.386	-0.133	0.124		
		$F_y$	256.412	256.535	0.123			
		$F_z$	160.000	159.887	-0.113			
10	19	$F_x$	613.001	612.849	-0.152	0.185	0.167	235
		$F_y$	245.998	246.254	0.256			
		$F_z$	160.000	159.881	-0.119			
	20	$F_x$	566.519	566.341	-0.178	0.148		
		$F_y$	256.412	256.552	0.140			
		$F_z$	160.000	159.881	-0.119			



## 6.2.4 고정된 얇은 막대 배치 실험 결과 비교

고정된 얇은 막대 배치 실험 시 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 사용하여 실험한 결과는 다음과 같다.

### (1)N-R방법의 일괄처리기법의 경우

①장애물이 없는 경우 오차 값은  $\pm 0.785\text{mm}$ 이고 데이터 처리시간은 반복적인 기법의 특성상 고정 타겟의 경우 타겟 이전의 모든 데이터를 한 번에 계산하기 때문에 프로그램의 최소 측정시간인 1ms이하로 측정되었다.

②장애물이 없는 경우를 기준으로 장애물이 발생한 경우의 각 영역에서 오차 값을 비교하면, 운동궤적의 시작 영역에서 평균 오차 값이  $\pm 0.778\text{mm}$ 이고 중간 영역에서는  $\pm 0.740\text{mm}$ 로 2개 영역에서는 큰 영향이 미치지 않은 것으로 나타났다.

③반면에, 장애물이 타겟 근처에 있을 경우에는 Fig. 6-22 (a)에서 보여준 것 같이, 장애물의 개수에 따라 그 결과가 변화되고 있다. 이 영역에서 장애물의 개수가 4개까지는 허용오차  $\pm 1\text{mm}$ 미만인  $\pm 0.974\text{mm}$ 의 값을 보였지만 5개부터는  $\pm 1\text{mm}$ 이상의 결과로 장애물이 10개가 출현하였을 경우는 장애물이 없는 경우에 비해 오차 값이  $\pm 0.476\text{mm}$ 정도 차이가 났다.

④3개 영역에서 데이터 처리시간은 반복적 기법의 특성상 타겟 이전의 모든 비전 데이터를 이용하여 한 번에 계산하기 때문에 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위 1ms이하로 측정되었다.

### (2)EKF방법의 순환기법의 경우

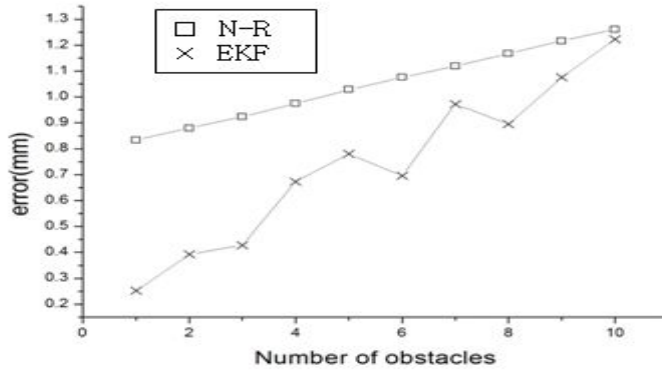
①장애물이 없는 경우 오차 값은  $\pm 0.137\text{mm}$ 이고 데이터 처리시간은 359ms가 소요되었다.

②장애물이 없는 경우를 기준으로 장애물이 발생한 경우의 각 영역에서 운동궤적의 시작 영역에서 평균 오차 값은  $\pm 0.158\text{mm}$ 이고, 중간 영역에서 평균 오차 값은  $\pm 0.165\text{mm}$ 로 2개 영역에서는 큰 영향이 미치지 않은 것으로 나타났다.

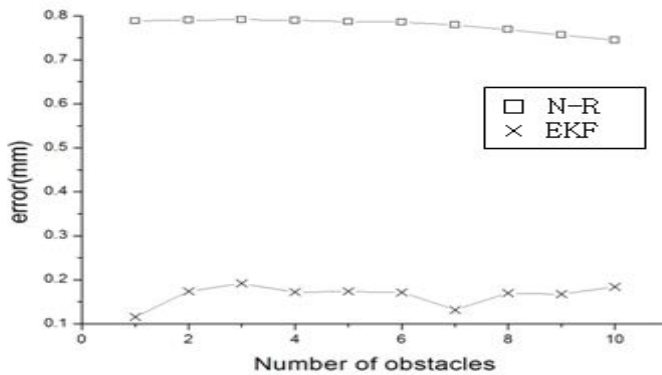
③반면에, 타겟 근처에 장애물이 출현 했을 경우에는 Fig. 6-22 (a)에서 보여준 것과 같이 장애물 개수가 1개일 경우  $\pm 0.252\text{mm}$ 에서 장애물개수가 10개일 경우  $\pm 1.222\text{mm}$ 로 큰 상승폭을 보였다. 본 연구에서 지정한 허용오차 범위  $\pm 1\text{mm}$  미만

으로 보면 오차 값이  $\pm 0.896\text{mm}$ 인 장애물이 8개가 출현 하는 경우까지 시스템은 안정하였다. 장애물이 없는 경우와 장애물이 10개 출현 한 경우의 오차 값 차이는  $\pm 0.97\text{mm}$ 로 크게 상승하였다.

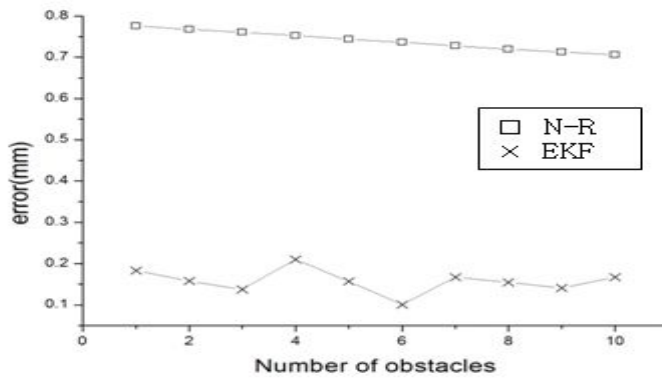
④3개 영역에서 데이터 처리시간은 장애물이 1개일 경우 평균 375ms에서 장애물이 10개일 경우 평균 250ms로 장애물이 많아질수록 시간은 짧게 걸렸다. 순환적 기법인 EKF방법의 경우 장애물이 많아질수록 위치 보정하는 단계의 수가 줄어들만큼 데이터 처리시간이 짧아졌다.



(a) Obstacles region near Target



(b) Middle obstacles region



(c) Beginning obstacles region

Fig. 6-22 For the fixed slender bar placement, comparison of position errors using the batch scheme of N-R method and the recursive scheme of EKF method in three cases

### (3)결과비교

고정 타겟 추정 시 결과 값에 영향을 미치는 타겟 근처에 장애물이 출현 하였을 경우를 N-R방법의 일괄처리 기법과 EKF방법의 순환기법을 비교해 보면 다음과 같다.

Table 6-26에서 보면 장애물 개수가 하나씩 증가하면 오차 값은 N-R방법의 일괄처리 기법은  $\pm 0.834 \sim \pm 1.261\text{mm}$  ( $\pm 0.427\text{mm}$ ) 상승하였고, EKF방법의 순환기법은  $\pm 0.252 \sim \pm 1.222\text{mm}$  ( $\pm 0.97\text{mm}$ )만큼 상승하는 결과를 나타내고 있다.

N-R방법의 일괄처리기법은 장애물개수가 5개부터 허용오차 범위를 넘었지만, 장애물 1개와 10개가 미치는 영향의 차이는 높지 않았다. EKF방법의 순환기법은 장애물 개수가 9개부터 허용오차 범위를 넘었지만, 장애물 1개와 10개가 미치는 영향은 N-R방법의 일괄처리기법보다 더 많은 차이를 보이고 있다.

Table 6-26 For the fixed slender bar placement, comparison of errors and processing time using the batch scheme of N-R method, and the recursive scheme of EKF method

Number of obstacles	N-R		EKF	
	error(mm)	time(ms)	error	time(ms)
1	0.833606	☆	0.252022	344
2	0.879439	☆	0.391919	328
3	0.923686	☆	0.428015	312
4	0.974315	☆	0.672996	313
5	1.028047	☆	0.780205	281
6	1.075812	☆	0.695112	281
7	1.118883	☆	0.972205	282
8	1.167764	☆	0.895730	250
9	1.216589	☆	1.075770	250
10	1.261006	☆	1.222454	234

(주) ☆ : 1ms이하로 사용하는 프로그램에서 측정할 수 없는 시간으로 나타남

## 제 7 장 결 론

본 논문은 비전시스템을 이용하여 점 이동 타겟 추적과 장애물 출현 시 얇은 막대를 고정된 타겟에 배치하기 위해 로봇 비전 제어기법을 개발하였다. 점 이동 타겟 추정에 N-R방법의 일괄처리기법 및 데이터이동기법과 EKF방법의 순환기법등 3개의 제어기법을 개발하였으며, 장애물 출현 시 얇은 막대 배치작업에 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법등 2개의 제어기법을 개발하여 실험에 적용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

### (가) 점 이동 타겟 추적

점 이동 타겟을 추적하는 연구는 30개의 이동 타겟을 배치하여 로봇이 각 이동 타겟을 추적하는 제어기법을 N-R방법의 일괄처리기법 및 데이터이동기법과 EKF방법의 순환기법등을 사용하여 개발하고, 3대의 카메라를 사용하여 실험에 적용하였다

(1) N-R방법의 일괄처리기법 : 로봇이 연속적인 점 이동 타겟을 추적하는 동안 추정하고자 하는 현재 타겟 이전까지 각 카메라에서 획득한 모든 데이터를 일괄적으로 사용하여 처리하는 기법으로, 실험을 통해 r.m.s 평균 오차 값은  $\pm 0.236\text{mm}$ , 평균 데이터 처리시간은 14ms 결과를 얻었다. 시험결과를 분석한 결과, 반복기법인 N-R방법의 일괄처리기법은 타겟 이전의 모든 데이터를 처리하여 타겟을 추정하므로 초반 오차 값은 상당히 좋은 결과를 보였다. 그러나 이동 타겟이 증가 할수록 처리해야하는 데이터의 개수가 증가함에 따라 데이터 처리 시간이 증가하면서, 오차 값도 상승하는 현상을 보이고 있다.

(2) N-R방법의 데이터 이동기법 : 로봇이 연속적인 점 이동 타겟을 추적하는 동안 추정하고자하는 현재 타겟 이전의 각각의 카메라에서 획득한 가장 최근의 일정한 데이터를 사용하는 기법으로, 본 연구에서는 10단계의 데이터를 사용하였다. 실험을 통해 r.m.s 평균 오차 값은  $\pm 168\text{mm}$ , 평균 데이터 처리시간은 6ms 결과를 얻었다. N-R방법의 데이터 이동기법은 일괄처리기법과 같이 반복기법을 사용하지만 획득된 데이터 중 오래된 데이터를 삭제하고 타겟 근처의 최근 데이터를 일정 개수만 사용하기 때문에 안정적인 정밀도를 바탕으로 데이터 처리시간도 줄일 수가

있었다.

(3) EKF방법의 순환기법 : EKF방법은 N-R방법과 다르게 순환적인 기법으로 추정하고자하는 현재 타겟 이전의 한 단계에 대한 비전데이터를 사용하여 타겟을 추정하므로 정확한 초기 값을 필요로 한다. 본 연구에서는 Monte-Carlo방법으로 초기 값을 계산하여 실험한 결과 r.m.s 평균오차 값은  $\pm 0.334\text{mm}$ , 평균 데이터 처리 시간은 3.6ms이다. 정확한 초기 값을 필요로 하는 순환적 기법을 사용하는 EKF방법은 앞서 다른 기법으로 초기 값을 계산하여 사용하는 번거로움이 있지만, 이후 처리하는 데이터의 개수를 타겟 이전의 한 단계만을 이용하기 때문에 데이터처리 시간을 최소화 하였다.

(4) 결론적으로 작업환경에서 사용자가 시간의 제약을 받지 않고 정밀한 작업을 수행하고자 하면 N-R방법의 일괄처리 기법이나 데이터 이동기법을 선택하고, 정밀도는 떨어지지만 빠른 시간 내에 작업을 수행해야 할 경우에는 EKF방법을 이용하여 작업 수행 하는 것이 좋다고 판단된다.

#### (나) 얇은 막대 배치작업

얇은 막대를 고정된 타겟 지점에 배치작업은 N-R방법의 일괄처리기법과 EKF방법의 순환기법을 사용하여 장애물이 없는 경우와 장애물이 출현하는 경우로 구분하였다. 장애물 출현 시 장애물 영역을 타겟 근처 영역, 운동궤적의 중간 영역, 운동궤적의 시작 영역 등 3개 영역으로 구분하고, 각 영역에서 장애물이 1개 단계에서 10개 단계까지 출현하도록 배치하여 실험을 행하였다.

(1) N-R방법의 일괄처리기법 : 데이터 처리시간은 반복적 기법의 특성상 타겟 이전의 모든 데이터를 이용하여 한 번에 추정하기 때문에 데이터처리시간이 프로그램에서 측정할 수 있는 최소 단위 1ms이하로 측정되고 있다. 각 장애물 영역에서 위치에 대한 오차범위는 장애물이 없는 경우 오차 값은  $\pm 0.785\text{mm}$ , 타겟 근처의 경우 오차 값은  $\pm 0.834 \sim \pm 1.261\text{mm}$ , 운동궤적 중간의 경우 오차 값은  $\pm 0.788 \sim \pm 0.744\text{mm}$ , 운동궤적 시작부분의 경우 오차 값 :  $\pm 0.776 \sim \pm 0.705\text{mm}$ 이다.

(2) EKF방법의 순환기법 : 순환적 기법인 EKF방법의 경우 장애물이 많아질수록 위치 보정하는 단계의 수가 줄어든 만큼 데이터 처리 시간이 짧아졌다. 각 장애물 영역에서 위치에 대한 오차범위는 장애물이 없는 경우 오차 값은  $\pm 0.137\text{mm}$ , 타겟 근처의 경우 오차 값은  $\pm 0.252 \sim \pm 1.222\text{mm}$ , 운동궤적 중간의 경우 오차 값은

$\pm 0.116 \sim \pm 0.184 \text{mm}$ , 운동궤적 시작부분의 경우 오차 값은  $\pm 0.183 \sim \pm 0.167 \text{mm}$  이다.

(3) 2개의 제어기법의 결과를 비교하면, 첫 번째, 운동궤적의 중간영역과 시작영역에서는 N-R방법과 EKF방법을 이용한 얇은 막대 배치 실험 결과 장애물이 없는 경우와 거의 유사한 결과를 얻었다. 그 이유는 로봇이 타겟으로 이동하는 동안 새로운 비전데이터를 획득하여 위치를 보정해주기 때문이다.

두 번째, 타겟 근처 영역에서 장애물이 발생하였을 경우는 보정해 나갈 수 있는 새로운 비전데이터를 획득할 수 없으므로 운동궤적의 시작영역 및 중간영역의 경우와는 다른 결과를 얻었다. 이 경우 N-R방법은 장애물이 한 개 있을 경우  $\pm 0.834 \text{mm}$ , 10개인 경우  $\pm 1.261 \text{mm}$ 로  $\pm 0.427 \text{mm}$  상승하였으나, EKF방법은  $\pm 0.252 \text{mm}$ 에서  $\pm 1.222 \text{mm}$ 로  $\pm 0.97 \text{mm}$  상승하였다.

(4) 결론적으로 타겟 근처 영역에서 장애물이 발생하였을 경우에는 허용오차를  $\pm 1 \text{mm}$  이내로 할 경우 N-R방법의 일괄처리기법에서는 장애물이 몇 4개(이 영역의 40%) 존재, EKF방법의 순환기법의 경우 장애물이 몇 8개(영역의 80%)가 존재할 경우 이 기법을 사용 할 수 있다. 또한 데이터 처리시간을 비교하면 N-R방법의 일괄처리기법은 고정된 하나의 타겟에 대해 로봇이 이동하는 동안 얻어진 모든 비전데이터를 한 번에 처리하기 때문에 처리시간이 1ms이하로 빠르고, EKF방법의 순환기법은 로봇이 이동하는 각 지점마다 고정된 타겟 값을 여러 번 추정하기 때문에 데이터 처리시간이 344ms으로 N-R방법보다 더 느리게 나타난다.

(5) 이리하여 장애물이 놓여 있는 범위와 오차 값을 기준으로하면 EKF방법의 순환기법이 N-R방법의 일괄처리기법보다 더 효율적이고, 처리시간을 기준으로하면 N-R방법의 일괄처리기법이 EKF방법의 순환기법보다 더 효율적이다.

본 논문은 점 이동 타겟 추적과 장애물 출현 시 얇은 막대 배치 작업을 수행하기 위해 제시된 3개의 로봇 비전제어기법을 개발하여 실험을 통해 제시된 제어기법의 효율성을 보여주었다. 향후, 이 결과를 토대로 작업환경이 급변하는 산업 현장에서 사용자가 상황에 맞는 제어기법을 선택 할 수 있도록 제시하였다.

## REFERENCES

- (1) R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisis, B. Kuchen, and F.Reyes, "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems", IEEE/ASME Trsns. on Mechatronics, Vol. 5, no. 1, pp.39-48, Mar. 2000
- (2) Yoshihiro, TODA., Yasuo, KONISHI., Hiroyuki, ISHIGAKI. "Positioning-Control of Robot Manipulator Using Visual Sensor," Int. Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp.894~898, December. 1996.
- (3) 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.
- (4) Tsai, R.Y., "Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision", The Robotics Review, Cambridge: MIT Press., pp.146~159, 1989.
- (5) Beardsley, P.A., Zisserman, A. and Murray, D.W. "Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion," International Journal of Computer Vision, Vol. 23, No. 3, pp.235~259, 1997.
- (6) Berthold, K. P. H., "Robot vision", Cambridge, Massachusetts, The MIT Press., pp.46~48, 1986.
- (7) Peter, A. S., "Control of eye and arm movements using active, attentional vision", Applications of AI, machine vision and robotics., pp.1471~1491, 1993.
- (8) 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.
- (9) 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, 1996.



- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 배민지., “Extraction of Slot Parameters for Waveguide Antennas Using the Newton Raphson Method(Newton Raphson Method를 이용한 도파관 안테나 슬롯 파라미터 추출)” 한국정보기술학회지 Vol. 12, No. 5, pp.33~41, 2014.
- (14) Kalman, R. E., “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems“, J. basic Rng. Trans. ASEM., pp.35~45, 1960.
- (15) Kalman, R. E., “New Method In Wiener Filtering Theory”, John Wiley&Sons Inc., New York., pp.35~45, 1963.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) Chen, G., Xia, Z., Ming, X., Lining, S., Ji, J., Du, Z., “Camera Calibration based on Extended Kalman Filter using Robot’s Arm Motion”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics pp.1839~1844, 2009.

- (20) Chen L., Huosheng Hu, Klaus McDonald-Maier, "EKF Based Mobile Robot Localization", 2013 Fourth International Conference on Emerging Security Technologies, pp. 149-154, 2013.
- (21) 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.
- (22) 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.
- (23) 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.
- (24) Zhou, S., Fei, F., Zhang, G., Liu Y., Li, W. J., "Hand-Writing Motion Tracking with Vision-Inertial Sensor Fusion: Calibration and Error Correction", Sensors., pp.15641~15657, 2014.
- (25) John, J. C., "Introduction to Robotics mechanics and control", 2nd ed., U.S.A: Addison-Wesley., pp.84. 1989.
- (26) K. U. Min, W. S. Jang, "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.
- (27) W. S. Jang, K. S. Kim, K. Y. Kim, and H. C. Ahn, "An Experimental Study on the Optimal number of Cameras used for Vision Control System", KSMTE, Vol. 13, No. 2, pp. 94~103, 2004.
- (28) Junkins , J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems", Sijthoff and Noordhoff, Alphen Aan Den Rijn, pp. 29~33, 1978.
- (29) David, F., Robert, P., Roger, P., "Statistic", Canada: W.W.Norton, pp.58~59, 1978.