



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](#)

2017년 8월

박사학위 논문

이동타겟 추적을 위한 실시간  
로봇비전 제어기법의 개발 및  
평가에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

김재명

# 이동타겟 추적을 위한 실시간 로봇비전 제어기법의 개발 및 평가에 관한 연구

A Study on the development and evaluation of the robot  
vision control schemes in real time for the tracking  
of the moving target

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

김재명

# 이동타겟 추적을 위한 실시간 로봇비전 제어기법의 개발 및 평가에 관한 연구

지도교수 장 완 식

이 논문을 박사학위신청 논문으로 제출함.

2017년 4월

조선대학교 대학원

기계공학과

김 재 명



## 김재명의 박사학위논문을 인준함

위원장      조선대학교    교수      양 인 영    (인)

위    원      조선대학교    교수      장 완 식    (인)

위    원      조선대학교    교수      성 윤 경    (인)

위    원      조선대학교    교수      김 경 석    (인)

위    원      동강대학교    교수      양 용 준    (인)

2017년    6월

조선대학교 대학원

## 목 차

List of Photo .....	IV
List of Figures .....	IV
List of Tables .....	X
Nomenclature .....	XV
Abstract .....	XVI
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 동향 .....	1
1.2 연구 필요성 및 목적 .....	5
1.3 연구 내용 .....	7
제 2 장 로봇 및 비전시스템 모델 .....	10
2.1 로봇 기구학 모델 .....	10
2.2 비전시스템 모델 .....	13
제 3 장 매개변수 추정을 위한 시스템의 수학적 모델링 ..	14
3.1 카메라 매개변수 모델 .....	15
3.2 가중치행렬 모델 .....	16
3.3 로봇 관절값 모델 .....	18

<b>제 4 장 이동타겟 추정을 위한 비전 제어기법 개발</b>	20
4.1 일괄처리 기법	20
4.1.1 데이터 처리방법	20
4.1.2 가중치행렬을 적용하지 않은 제어기법	21
4.1.3 가중치행렬을 적용한 제어기법	24
4.2 데이터이동 기법	27
4.2.1 데이터 처리방법	27
4.2.2 가중치행렬을 적용하지 않은 제어기법	28
4.2.3 가중치행렬을 적용한 제어기법	31
<b>제 5 장 실험장치 및 실험방법</b>	34
5.1 실험장치 구성	34
5.2 시험모형	36
5.3 실험방법	37
<b>제 6 장 비전시스템 모델의 적합성 결과</b>	39
6.1 가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 기법	40
6.1.1 초기단계	40
6.1.2 타겟 추적단계	41
6.2 가중치행렬을 적용한 일괄처리 기법	53
6.2.1 초기단계	53

6.2.2 타겟 추적단계 .....	55
6.3 가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 기법 .....	67
6.3.1 초기단계 .....	67
6.3.2 타겟 추적단계 .....	69
6.4 가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법 .....	81
6.4.1 초기단계 .....	81
6.4.2 타겟 추적단계 .....	83
제 7 장 강제 이동타겟 추정결과 .....	95
7.1 일괄처리 기법을 이용한 강제 이동타겟 추정 .....	96
7.1.1 가중치행렬을 적용하지 않은 경우 .....	96
7.1.2 가중치행렬을 적용한 경우 .....	102
7.2 데이터이동 기법을 이용한 강제 이동타겟 추정 .....	108
7.2.1 가중치행렬을 적용하지 않은 경우 .....	108
7.2.2 가중치행렬을 적용한 경우 .....	114
7.3 강제 이동타겟 추정실험 결과 비교 .....	120
제 8 장 요약 및 결론 .....	124
8.1 결과 요약 .....	124
8.2 결 론 .....	126
REFERENCES .....	128

## List of Photo

Photo 5-1 Experimental set-up .....	7
-------------------------------------	---

## List of Figures

Fig. 1-1 Structure of thesis .....	9
Fig. 2-1 Link parameters and link frame assignments of 4 axis robot .....	10
Fig. 3-1 Schematic diagram of the mathematical system modelling .....	14
Fig. 4-1 Data processing method of the batch scheme .....	20
Fig. 4-2 Robot's vision control scheme of the batch method without weighting matrix .....	22
Fig. 4-3 Block diagram of the batch scheme with weighting matrix .....	24
Fig. 4-4 Robot's vision control scheme of the batch method with weighting matrix .....	25
Fig. 4-5 Data processing method of the data moving scheme .....	27
Fig. 4-6 Block diagram of the data moving scheme without weighting matrix .....	28
Fig. 4-7 Robot's vision control scheme of the data moving method without weighting matrix .....	29
Fig. 4-8 Block diagram of the data moving scheme with weighting matrix .....	31
Fig. 4-9 Robot's vision control scheme of the data moving method with weighting matrix .....	32
Fig. 5-1 Schematic diagram for the experiment .....	35
Fig. 5-2 Test model used for the experiment .....	36
Fig. 5-3 Arbitrary trajectory for the robot moving points and the moving target points .....	38

Fig. 6-1 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 1 (unit: pixel) ..... 44

Fig. 6-2 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 2 (unit: pixel) ..... 47

Fig. 6-3 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 3 (unit: pixel) ..... 50

Fig. 6-4 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme without weighting matrix (unit: pixel) ..... 52

Fig. 6-5 Errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) in the robot's initial stage ..... 54

Fig. 6-6 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 1 (unit: pixel) .... 58

Fig. 6-7 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 2 (unit: pixel) .... 61

Fig. 6-8 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 3 (unit: pixel) .... 64

Fig. 6-9 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: pixel) ..... 66

Fig. 6-10 Errors according to the variation of robot moving points( $P$ ) using the data moving scheme with  $\alpha=0$  in the robot's initial stage (unit: mm) ..... 67

Fig. 6-11 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 1 (unit: pixel) ..... 72

Fig. 6-12 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 2 (unit: pixel) ..... 75

Fig. 6-13 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 3 (unit: pixel) ..... 78

Fig. 6-14 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: pixel) ..... 80

Fig. 6-15 For  $P=5$ , errors according to the variation of weighting factors ( $\alpha$ ) in the robot's initial stage (unit: mm) ..... 81

Fig. 6-16 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 1, (unit: pixel) ..... 86

Fig. 6-17 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 2, (unit: pixel) ..... 89

Fig. 6-18 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 3, (unit: pixel) ..... 92

Fig. 6-19 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: pixel) ..... 94

Fig. 7-1 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 97

Fig. 7-2 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 97

Fig. 7-3 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: mm) ..... 98



Fig. 7-4 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 98

Fig. 7-5 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: mm) ..... 101

Fig. 7-6 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree) ..... 103

Fig. 7-7 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree) ..... 103

Fig. 7-8 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree) ..... 104

Fig. 7-9 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree) ..... 104

Fig. 7-10 The *r.m.s* position errors of 20 target points using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: mm) ..... 107

Fig. 7-11 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 109

Fig. 7-12 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 109

Fig. 7-13 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: mm) ..... 110

Fig. 7-14 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree) ..... 110

Fig. 7-15 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: mm) ..... 113

Fig. 7-16 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree) ..... 115

Fig. 7-17 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree) ..... 115

Fig. 7-18 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: mm) ..... 116

Fig. 7-19 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree) ..... 116

Fig. 7-20 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: mm) ..... 119

Fig. 7-21 Comparison of the *r.m.s* position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm) ..... 122

## List of Tables

Table 2-1	Link parameters of 4 axis robot .....	11
Table 5-1	Specifications of the experimental apparatus .....	35
Table 5-2	Position values of 9 cues in x-y-z coordinate (unit: mm) .....	37
Table 6-1	For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the batch scheme without weighting matrix .....	40
Table 6-2	For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the batch scheme without weighting matrix .....	40
Table 6-3	For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 1 (unit: pixel) .....	42
Table 6-4	For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 2 (unit: pixel) .....	45
Table 6-5	For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 3 (unit: pixel) .....	48
Table 6-6	For the moving target tracking stage, comparison of the <i>r.m.s</i> errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme without weighting matrix (unit: pixel) .....	51
Table 6-7	Errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) using the batch scheme in the robot's initial stage .....	53

Table 6-8 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the batch scheme with $\alpha=0.21$ .....	54
Table 6-9 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the batch scheme with $\alpha=0.21$ .....	54
Table 6-10 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with $\alpha=0.21$ in camera 1 (unit: pixel) .....	56
Table 6-11 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with $\alpha=0.21$ in camera 2 (unit: pixel) .....	59
Table 6-12 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with $\alpha=0.21$ in camera 3 (unit: pixel) .....	62
Table 6-13 For the moving target tracking stage, comparison of the <i>r.m.s</i> errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme with $\alpha=0.21$ (unit: pixel) .....	65
Table 6-14 Errors according to the variation of robot moving points( <i>P</i> ) using the data moving scheme with $\alpha=0$ in the robot's initial stage (unit: mm) .....	67
Table 6-15 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ .....	68
Table 6-16 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ .....	68

Table 6-17 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ in camera 1 (unit: pixel) .....	70
Table 6-18 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ in camera 2 (unit: pixel) .....	73
Table 6-19 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ in camera 3 (unit: pixel) .....	76
Table 6-20 For the moving target tracking stage, comparison of the <i>r.m.s</i> errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ (unit: pixel) .....	79
Table 6-21 For $P=5$ , errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) in the robot's initial stage (unit: mm) .....	81
Table 6-22 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0.09$ .....	82
Table 6-23 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0.09$ .....	82
Table 6-24 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme $P=5$ and $\alpha=0.09$ in camera 1 (unit: pixel) .....	84

Table 6-25 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme $P=5$ and $\alpha=0.09$ in camera 2 (unit: pixel) .....	87
Table 6-26 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme $P=5$ and $\alpha=0.09$ in camera 3 (unit: pixel) .....	90
Table 6-27 For the moving target tracking stage, comparison of the <i>r.m.s</i> errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme $P=5$ and $\alpha=0.09$ (unit: pixel) ....	93
Table 7-1 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with $\alpha=0$ (unit: $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree, $d_3$ ; mm) .....	96
Table 7-2 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the batch scheme with $\alpha=0$ .....	99
Table 7-3 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with $\alpha=0.21$ (unit: $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree, $d_3$ ; mm) .....	102
Table 7-4 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the batch scheme with $\alpha=0.21$ .....	105
Table 7-5 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ (unit: $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree, $d_3$ ; mm) .....	108

Table 7-6	For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0$ .....	111
Table 7-7	For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0.09$ (unit: $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree, $d_3$ ; mm) .....	114
Table 7-8	For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the data moving scheme with $P=5$ and $\alpha=0.09$ .....	117
Table 7-9	Comparison of the <i>r.m.s</i> position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm) .....	121
Table 7-10	Comparison of the average <i>r.m.s</i> position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm) .....	121
Table 7-11	Comparison of the processing time for 20 target points using 4 robot vision control schemes(unit: ms) .....	123

## NOMENCLATURE

- ${}^{i-1}_i T$  Transformation matrix from frame  $\{i-1\}$  to frame  $\{i\}$
- $P^j$  Position vector of the  $j$ th cue
- $\bar{F}$  Position vector of the cue in the robot base frame  $\{0\}$
- $f_x^{i,j}$   $\bar{X}$  component of position vector  $\bar{F}$  for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $f_y^{i,j}$   $\bar{Y}$  component of position vector  $\bar{F}$  for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $f_z^{i,j}$   $\bar{Z}$  component of position vector  $\bar{F}$  for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $C_k$  Camera parameter
- $X_m^{i,j}$   $X$  component of vision system model for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $Y_m^{i,j}$   $Y$  component of vision system model for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $J(C_k)$  Performance index for camera parameter estimation
- $W$  Weighting matrix
- $X_c^{i,j}$   $X$  component of the actual vision data for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $Y_c^{i,j}$   $Y$  component of the actual vision data for  $j$ th cue of  $i$ th moving point
- $\Delta C$  Camera parameter correction vector
- $A$  Jacobian matrix of  $(2 \times i \times j) \times (6)$  for camera parameter estimation
- $A^T$  Transpose of matrix  $A$
- $R$  Residual vector for camera parameter estimation
- $J(\theta_n)$  Performance index for robot's joint value estimation
- $\Delta \theta$  Robot's joint value correction vector
- $B$  Jacobian matrix of  $(2 \times q \times j) \times (4)$  for robot's joint value estimation
- $B^T$  Transpose of matrix  $B$
- $R^*$  Residual vector for robot's joint value estimation



## ABSTRACT

A study on the development and evaluation of the robot vision control schemes in real time for the tracking of the moving target

Kim, Jae Myung

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

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The most important factor in the most studies of robot vision control that is currently being performed is to calibrate the camera parameters correctly. These camera parameters explain the relative distance between the robot and the camera, and the orientation and focal length of the camera. If the calibration is not correct, the robot can not perform the normal position control. In particular, if the relative position of the robot and the camera, and the orientation and focal length of the camera are changed during the robot movement, it is troublesome to recalibrate the camera parameters.

In order to solve the above problems, we use the vision system model of which effectiveness is verified by previous studies. Even if the conditions of the robot and the camera mentioned above are changed, this vision system model efficiently converts the robot position information in the three-dimensional space into the image information in the two-dimensional camera plane without recalibration.

This study proposes the two data processing methods to process a large number of vision data obtained from the camera while the robot is moving toward the moving target ,based on the proven vision system model. One method is the batch method that uses all the vision data acquired from the camera during the robot movement, and the other is the data moving method

that uses only limited vision data acquired from recent robot movement points near the target.

Thus, the two robot vision control schemes are developed in order to track the moving target. Based on the numerical N-R method, one is to use the data processing of the batch method, and the other is to use the data processing of the data moving method. Also, each robot vision control scheme is divided into two cases, one is using the weighting matrix that applies weight to recent data, and the other is not using weighting matrix that applies to equal weight to all data.

The experiments are performed for the track of moving targets, which are known only to the vision data value but not known in spatial position, based on the four robot vision control schemes. Then, we evaluate the effectiveness of the each control scheme by analyzing the accuracy and the processing time of the four control schemes through the experiment results.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구동향

산업현장에서 인간의 단순노동이나 3D 업종의 작업을 대체시킬 목적으로 1961년에 자동차 조립 공정용 로봇팔인 Unimate가 개발된 이래 산업용 로봇은 1970년대에 급격히 보급되기 시작하여 1980년대에 이르러 기술적 안정화시기를 거쳐 전성기를 맞이하였다. 우리나라의 주력 산업인 자동차 및 반도체 공장에도 수많은 산업용 로봇들이 24시간 쉬지 않고 조립작업을 하고 있으며, 이제는 로봇을 제외한 산업활동은 상상할 수 없을 정도로 일상적이고 당연한 것이 되었다.

1990년대 이전까지는 High speed, High precision, High power에 관심을 둔 산업용 로봇이 주류를 이루었고, 2000년대에 들어서면서 자율이동, 특정업무 수행, 인공지능의 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 인간을 대신하여 작업만 하는 개념에서 벗어나 외부환경을 스스로 인식하고 판단하고 행동하는 인공지능형태로 발전하면서 기계전자 부품 등의 산업용 제조분야와 심해, 군사, 우주, 농업, 재난구조 등의 전문분야로의 발전이 진행되었다. 최근 들어 로봇은 센서기술과 전자기술의 발전과 더불어 인간의 사회생활과 매우 밀접한 가정, 의료, 오락 등의 서비스 분야에 까지 그 영역을 꾸준히 넓혀 가고 있으며, 자율학습, 감성의 교환, Like Human 분야로의 기술발전이 획기적으로 발전하기 시작하여 인간과 동반자 관계의 시대로 접어들고 있다.

이러한 로봇의 활용영역 확대에 대한 요구에 부응하기 위해 초고속 CPU와 고해상도 카메라를 이용한 2D 및 3D 영상처리기술, 6축 센서를 이용한 고속 정밀제어기술, 충돌 검지와 다양한 물체를 잡을 수 있는 가변 스트로크 및 파지력 제어기술 등의 발전이 이루어지고 있다. 이러한 기술들의 발전을 기초로 하여 외모뿐만 아니라 손가락을 비롯한 각 관절의 모양과 움직임이 사람과 유사한 최초의 휴머노이드 로봇인 ASIMO가 개발되었으며, 이러한 로봇기술과 더불어 최근 이슈가 되었던 인공지능 기술 중 하나인 알파고와 유사한 인공지능 기술의 결합은 더욱 인간다운 자연스러운 움직임과 자율적인 판단이 가능한 고성능 로봇의 발전에 큰 원동력이 될 것이다.

다품종 소량생산이 주류를 이루고 점차 무인화 되어가는 다양한 산업현장의 조립작업에 로봇이 활용되기 위해서는 주위의 환경을 스스로 파악하고 행동할 수 있는 독립성과 시스템을 스스로 제어할 수 있어야 한다. 이러한 기능을 위해서는 인공지능 기술이 필수적이며 주변 환경을 인식하기 위해서는 사람의 눈과 같은 역할

을 하는 영상인식 및 처리기술은 매우 중요하다. 카메라로부터 획득된 영상정보에서 물체의 정보를 추출해 내는 영상처리 기술에 대한 다양한 방법들이 제안되어 국내외적으로 활발히 연구되고 있다.

이에 대해 국내외에서 활발히 진행되고 있는 연구를 순수 영상처리 기술과 로봇에 영상처리를 결합한 로봇 영상처리 기술 등 2개로 구분하였다. 첫 번째로, 영상처리 기술에 대한 연구동향을 살펴보면, Feddema<sup>[1]</sup>는 이동카메라 1개를 이용하여 움직이는 물체를 추적하기 위한 방법을 제시하였고, Assa<sup>[2]</sup>는 1개의 카메라를 기초로 하여 제안된 물체의 형상을 추정하는 방법들 중에서 몇 개의 물체형상을 추정하는 방법을 보완하여 정확도와 정밀도를 높인 실시간 센서융합기법을 제안하였으며, Lowe<sup>[3]</sup>는 곡면형상에서 이미지의 매개변수와 모델을 일치시키기 위한 방법을 제시하여 대부분의 비전을 기반으로 하는 프로그램에서 2차원 이미지와 3차원 모델 이미지를 일치시키는 기준에 대해 연구하였다. 또한, Yamashita<sup>[4]</sup>는 기하학적 모델이 알려진 움직이는 물체를 조작하는 능동적인 스테레오 비전시스템 모델을 가지고 빠르고 쉬운 카메라 교정방법과 3차원 측정방법을 제안하였고, Ginhoux<sup>[5]</sup>는 서보작업에서 반드시 필요한 사전 요구사항인 견고하고 정확한 물체인식과 추적에 대한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 사용하는 단안시각을 사용하지 않고 3차원 모델을 재구성해서 스테레오 비전시스템에 의해 제공된 서로 일치하지 않는 이미지를 사용하는 새로운 접근방법을 제시하였다. 그리고 Ruf<sup>[6]</sup>는 움직이는 다면체 물체에 대한 시각적인 추적 및 자세추정에 대한 시스템모델을 개발하고, 임의의 궤적을 따라 움직이는 물체의 연속적인 이미지를 통해 시각적인 자세 추정치를 사용하여 추적하는 제어 알고리즘을 제안하였으며, Murray<sup>[7]</sup>는 패드틸트(Padtilt) 플랫폼에 탑재된 능동적인 카메라를 사용하여 카메라의 위치노이즈가 있는 경우 감지 알고리즘의 감도를 낮추기 위해 운동이미지의 형태학적 필터링을 사용한 실시간 운동감지를 위한 방법을 제시하였다.

두 번째로, 로봇 영상처리 기술을 일상생활 및 산업현장에서 적용되는 응용기술과 물체인식 및 자세추정을 위한 로봇 제어기술 등 2개로 다시 분류하여 조사하였다. 먼저, 일상생활 및 산업현장의 응용기술의 연구동향을 살펴보면, Leroux<sup>[8]</sup>는 중증 장애인(사지 마비)에게 자신의 환경에서 사물을 파악할 수 있는 기능을 제공하기 위해, 중증 장애인의 요구와 상호작용 제약을 고려하여 특별히 고안된 인간과 기계 인터페이스를 포함하는 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)시스템을 제시하였고, Kang<sup>[9]</sup>은 양팔 로봇을 휴대전화 액세서리의 포장공정에 사용하기 위해 입체영상을 기반으로 무작위 후보영상으로부터 최상의 객체를 인식하고 객체의 위치와 방향을 추정하는 산업용 이중-암

로봇을 이용한 빈피킹(bin picking) 작업에 로봇 비전시스템을 제안하였다.

다음으로, 물체인식 및 자세추정을 위한 로봇 제어기술에 대한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Oliveira<sup>[10]</sup>는 속도측정을 사용하지 않고, 로봇 작업공간에 대해 수직인 광학축에 고정된 카메라의 보정되지 않은 카메라 보정 파라미터의 불확실성에 대한 처리와 알려지지 않은 카메라 방향각에 대한 제한을 없애기 위해 슬라이딩 모드제어(SMC)를 통한 시각 서보잉 전략과 스위칭 전략에 기반한 모니터링 함수를 제시하였고, Maeda<sup>[11]</sup>는 두 대의 카메라로 얻어진 2차원 영상 데이터로부터 로봇팔에 대한 3차원 편차량을 제공하는 데이터베이스를 통해 보정이 필요없는 로봇 시스템을 개발하고 동시교란 최적화방법을 사용하여 데이터베이스를 효과적으로 설정하고 업데이트하는 방법을 제시하였다. 또한, Erchao<sup>[12]</sup>는 알려지지 않은 환경에서 이미지에 대한 Jacobian 행렬을 추정하기 위해 SVR (Support Vector Regression)을 사용한 SVR-Jacobian 추정기를 기반으로 하는 보정되지 않은 시각적 서보를 제안하여 곡선의 이미지 특징과 로봇 관절값 사이가 비선형 맵핑이 구성된 보정되지 않은 로봇 임피던스의 제어에 적용하였으며, Ahmed<sup>[13]</sup>는 소형로봇의 인식시간을 단축시키는 적절한 이미지 전처리기술을 개발하여 SURF 기반 물체 인식기법의 최적화된 구현방법을 제시하였다. 그리고 Agrawal<sup>[14]</sup>은 복잡한 주변조명과 까다로운 반사환경에서 반투명이면서 질감이 없는 물체의 처리가 가능한 모델기반의 3차원 자세추정과 단일화된 3차원 객체의 선택을 위한 완벽한 비전 가이드 로봇시스템을 제시하였고, Ahn<sup>[15]</sup>은 일상생활에서 물건을 조작하는데 도움이 필요한 사람들을 돕기 위해 설계된 저가의 엔코더가 없는 유연한 경량 로봇암 시스템을 위한 비전기반 제어방법을 제시하였다. 또한, Sanchez-Lopez<sup>[16]</sup>는 독립형 쌍안으로 구성된 7 DOF 로봇팔의 말단장치에 대한 강건한 추적과 자세추정을 위한 실시간 제어기법을 제시하였으며, Maeda<sup>[17]</sup>는 두 대의 카메라로부터 획득된 2차원 영상 데이터를 사용하여 로봇팔에 지식 데이터베이스를 구축하여 로봇 시스템을 제어하는 방법을 제안하였다.

본 논문과 관련된 로봇에 영상처리 기술을 결합하여 물체의 위치를 추정하는 응용기술은 고정된 물체의 위치추정 기술과 이동하는 물체의 위치추정 기술로 크게 2개로 구분할 수 있다. 첫 번째로, 고정된 물체의 위치추정에 대한 연구들에 대해 살펴보면 다음과 같다. Sun<sup>[18]</sup>은 움직이는 물체의 시각범위 이탈을 조사·추적·감시하고 기하학을 기반으로 로봇눈 위치의 거리와 처짐각에 따라 물체를 포착 및 추정하기 위해 배경차이 방법을 제시하였고, Pizarro<sup>[19]</sup>는 로봇 외부에 부착된 단일

카메라에서 얻어진 정보를 기반으로 로봇이 초기화 궤적을 수행하는 동안 카메라의 자연스러운 모습을 투영하여 구해진 로봇의 기하학적 3D 모델을 이미지 측정과 자세추정 사이의 링크로 사용하는 순차 베이지안 추론에 기반한 온라인 위치인식 방법을 사용한 로봇 위치추정을 위한 센서시스템을 제안하였으며, Shin<sup>[20]</sup>은 로봇을 사용하여 다양한 속도로 움직이는 컨베이어 벨트의 물건을 잡는 작업을 수행하기 위해서 순차적 이미지 프레임에서 추출한 시각정보를 사용하는 로봇 추적시스템과 시각정보를 빠르게 추출하기 위해 시간간격이 작은 두 개의 연속 프레임 사이에서 연산을 수행하는 미분 영상기술을 적용한 로봇 추적시스템을 제안하였다. 그리고 Huang<sup>[21]</sup>은 로봇암과 한 쌍의 CCD 카메라와 컴퓨터를 사용하여 로봇암의 팁의 실제 3차원 위치를 측정하고 퍼지위치오차 보상기를 사용하여 목표위치를 조정하여 로봇암이 팁을 원하는 위치에 정확히 위치시킬 수 있는 로봇팔에 대한 3 차원 위치제어 방법을 제시하였으며, Saeedi<sup>[22]</sup>는 일반적인 환경에서 모바일 로봇의 3D 위치추정을 위해서 이전의 이미지 정보, 표식 또는 여분의 센서장치와는 독립적으로 로봇의 동작을 추정하는 기능을 갖는 비전기반 시스템을 제안하였다.

두 번째로, 최근 들어 단순히 물체의 형상과 위치추정만을 분석하는데서 한 걸음 더 나아가 움직이는 물체를 추적하는 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이에 대한 연구동향을 살펴보고자 한다. Mohamed<sup>[23]</sup>는 사람이 움직이는 물체에 시선을 집중하는 것과 비슷한 방식으로 로봇의 머리를 움직일 수 있도록 하기 위해 Baxter 로봇의 이동식 로봇 헤드에 의도적으로 설치한 시각추적 제어시스템을 개발했으며, Petrović<sup>[24]</sup>은 모바일 로봇이 동료인간을 따라갈 수 있도록 2D 스테레오 이미지에서 추출한 특성과 재구성된 3D 객체의 특성을 결합하여 로봇환경에서 사람을 탐지하는 실시간 시각기반 인간추적에 대해 연구하였고, Ruangpayoongsak<sup>[25]</sup>는 웹카메라와 거리센서가 포함된 2 DOF Pan-tilt 장치로 구성되고 저비용 추적시스템에서 검증된 이동로봇의 위치추적을 위한 시각 추적시스템의 응용방법에 대해 제시하였다. 또한, Nimmagadda<sup>[26]</sup>는 모바일 로봇의 실시간 처리조건을 만족시키기 위해 계산작업을 서버에서 하도록 하여 로봇에서의 계산시간을 줄여서 모바일 로봇이 실시간으로 이동물체를 인식하고 추적하도록 하는 시스템을 제시하였으며, Kobayashi<sup>[27]</sup>는 목표물체의 3차원 위치를 스테레오 비전시스템의 삼각측량 기술로 추정하고 카메라 좌표계에서 이동속도를 계산하여 추적지연 없이 움직이는 물체를 시각적으로 추적하는 방법을 제안하였고, Rodríguez Canosa<sup>[28]</sup>는 단일 카메라를 사용하여



무인항공기에서 움직이는 물체를 탐지하고 추적하기 위해 두 개의 후속 비디오 프레임 사이의 카메라 모션을 추정하여 인위적인 오티컬 플로우 필드를 생성하는 실시간 방법을 제시하였으며, Lin<sup>[29]</sup>은 움직이는 물체가 관측되지 않는 경우에 관찰할 수 있는 관측가능성 물체를 해결함과 동시에 위치추정, 매핑 및 물체 위치추적의 정확성을 높이기 위해 스테레오 기반의 SLAMMOT(Simultaneous localization, mapping and moving object tracking)을 제안하였다.

로봇비전 알고리즘을 개발하기 위한 여러 가지 수치해석적 기법들이 알려져 있는데, 본 논문에서 사용한 Newton-Raphson( $N-R$ )방법의 연구동향을 살펴보면, Durmus<sup>[30]</sup>는 6축 로봇 머니플레이터에서 로봇의 실제궤적과 예측궤적의 오차값을 최소화하기 위해 Newton-Raphson의 최소화 방법과 일반화 예측제어 알고리즘을 유도하였으며, Yang<sup>[31]</sup>은 6 DOF의 병렬로봇이 발산하지 않고 실시간으로 해답을 얻을 수 있도록 3 DOF의 선형운동과 3 DOF의 각운동을 생성하고 위치센서에 의해 실시간으로 측정된 액추에이터의 위치를 피드백 할 수 있도록 Global Newton-Raphson 방법을 제안하였다.

최근에는 국내 연구자들에 의해 정확도를 향상시키기 위해 Newton-Raphson 방법에 가중치행렬을 적용한 로봇비전 제어기법에 대한 연구가 진행되고 있는데, Jung<sup>[32]</sup>은 별도의 경로계획이나 계산을 위한 처리과정 없이 타겟위치만 주어지면 실시간으로 로봇의 주행이 가능한 알고리즘에 가중치행렬을 적용한 지능형 자율주행시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘을 검증하였으며, Kim<sup>[33]</sup>은 수중 환경에서 비전을 사용한 객체감지 시스템을 사용하기 위해 다양한 조명조건 아래에서 가중치행렬을 사용하여 템플릿 매칭을 효율적으로 할 수 있는 방법에 대한 연구를 진행하였다.

## 1.2 연구 필요성 및 목적

단순 반복작업 및 3D업종에 최초로 로봇이 적용된 이래 꾸준한 발전을 거듭하여 다양한 작업 환경에 대응하기 위해 각종 센서를 적용하기 시작하였다. 센서 중에서도 인간의 시각에 대응하는 카메라를 이용한 시각기능을 로봇기술에 적용시키기 시작하면서 로봇활동의 자율성 확보를 위한 로봇 비전시스템에 대한 연구가 활

발히 진행되었다. 비전센서를 이용한 로봇의 주행경로 자율결정기술, 2차원 이미지 정보를 3차원 공간으로 해석하는 기술, 이미지 내의 객체를 분석하고 추적하는 기술 등에 대한 수많은 연구가 수행되고 있다.<sup>[34,35]</sup>

특히, 로봇 비전시스템을 적용할 경우 대용량의 이미지 데이터의 처리로 인한 시스템의 전체적인 처리속도의 저하에 대한 문제는 LSI와 같은 기억소자의 발전과 정밀 공정기술의 발전에 의해 하드웨어적으로 상당부분 해결되었으며, 수행 작업의 특성과 조건 등을 고려해서 획득되는 데이터의 양을 최소화하여 이미지 처리시간을 줄이기 위한 이진화기법이나 cue(큐)를 사용하는 소프트웨어적인 방법들이 연구되었다.<sup>[36,37]</sup> 이와 같은 기술의 발전에 의해 2000년대부터는 시각기능을 가진 비전시스템을 로봇에 적용하여 다양하고 복잡한 작업 상황을 파악하고 정확하게 움직이도록 하는 기술이 산업현장에 적용되어 사용되어지고 있다.

현재 수행되고 있는 카메라를 이용한 비전시스템을 로봇에 적용할 때 대부분의 연구들이 가장 중요하게 고려해야 하는 요소는 로봇과 사용된 카메라까지의 상대적인 거리와 카메라의 방위 및 카메라의 초점거리 등에 대한 정확한 보정이 필요하며, 보정이 정확하지 않으면 로봇은 정상적인 위치제어를 할 수 없게 된다. 특히, 로봇과 카메라의 상대적인 위치와 카메라의 방위 및 초점거리가 변하게 되면 이에 대한 카메라 매개변수를 다시 보정해야 하는 번거로움이 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 카메라에 의해 획득된 2차원 이미지 데이터의 물체정보를 3차원 공간상의 로봇 위치정보로 효율적으로 변환시키고, 특히, 카메라와 로봇의 위치 및 자세가 변하여도 카메라의 매개변수를 능동적으로 조절할 수 있는 비전시스템 모델을 사용하였으며, 비전시스템 모델의 효율성은 고정된 강체타겟 추정에 대한 선행연구<sup>[41,42]</sup>를 통해 입증되었다.

본 연구는 선행연구를 통해 효율성이 입증된 비전시스템 모델을 이동타겟 추적에 사용하여 로봇이 이동타겟을 향해 이동하는 동안 사용된 카메라로부터 획득된 수많은 비전데이터를 처리하는 방법을 제안하였다. 로봇의 각 이동지점에서 획득한 모든 비전데이터를 사용하는 일괄처리 방법과 타겟 근처의 최근의 로봇 이동지점들에서 획득된 한정된 비전데이터만을 사용하는 데이터이동 방법 등 2가지의 경우로 구분하였다.

이리하여, 로봇이 이동타겟을 추적하기 위해 데이터 처리방법에 따른  $N-R$  방법에 기반을 둔 일괄처리 방법을 이용한 로봇비전 제어기법과 데이터이동 방법을 이용한 로봇비전 제어기법을 개발하였다. 특히, 2개의 제어기법 각각에서 사용



하는 데이터 중 최근 데이터에 비중을 두는 가중치행렬을 적용한 경우와 모든 데이터에 동등한 비중을 두는 가중치행렬을 적용하지 않은 경우로 세분하여 전체적으로 4 개의 로봇비전 제어기법을 제시하였다.

최종적으로 제시된 4 개의 로봇비전 제어기법들을 사용하여 공간상의 위치는 알려지지 않고 오직 비전데이터 값만 알려진 이동타겟에 대한 위치를 추정하는 실험을 수행하고, 실험을 통해 얻어진 결과를 통해 제시된 4 개의 제어기법들의 정확도와 처리시간을 비교 분석하여 각 제어기법의 효율성을 평가하고자 한다.

### 1.3 연구 내용

본 논문은 공간상 좌표값이 알려지지 않은 타겟을 카메라에서 얻어진 비전 데이터만을 이용하여 이동타겟에 대한 위치값을 추정하는 4 개 제어기법을 제안하였으며, 제안된 제어기법에 의해 도출된 추정된 값과 실제값을 비교하여 각 제어기법의 효율성을 판단하고자 한다. 제안된 제어기법의 효율성을 실험을 통해 판단하기 위해 로봇 말단부에 4 개 cue 를 갖는 시험모형을 부착한 다음 로봇이 임의의 운동궤적을 따라 시작점에서 끝점까지 이동하는 동안 3 대의 카메라의 영상에서 4 개의 cue 가 영상을 벗어나지 않고 화면에 가득 차도록 3 대의 카메라를 배치하였다. 본 논문내용을 요약하면, 2 장에서는 로봇 기구학 모델에 대한 설명으로 실험에 사용되는 로봇 시스템의 링크 파라메타와 3 차원 공간상의 물체의 위치를 2 차원 공간상의 좌표로 변환시키는 비전시스템 모델을 소개하였으며, 3 장에서는 카메라 방위와 초점거리의 불확실성뿐만 아니라 알려지지 않은 카메라와 로봇 사이의 상대적인 위치를 설명해주는 6 개의 카메라 매개변수를 추정하기 위한 카메라 매개변수 모델과 정밀한 로봇비전 제어를 위해 최근의 비전데이터에 더 큰 비중을 주기 위해 카메라 매개변수 모델에서 사용되어지는 가중치행렬 모델 그리고 추정된 카메라 매개변수 값을 이용하여 로봇 관절값을 추정하는 로봇 관절값 모델 등 총 3 개의 모델을 제안하였다.

4 장에서는 임의의 궤적을 따라 움직이는 이동타겟을 추정하기 위해  $N-R$  방법 중에서 일괄처리 기법과 데이터이동 기법에 대해 논하였으며, 이들 2 개의 기법을 타겟지점 근처에서 획득된 최근의 비전데이터에 더 큰 비중을 주기위해 사용한

가중치행렬을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 각각 구분하여 총 4개의 제어기법을 제안하였고, 본 연구를 위한 실험장치의 구성과 시험모형 및 실험방법에 대해서는 5장에 기술하였는데, 사용할 데이터의 양을 최소화하여 처리속도를 높이기 위해 물체의 전체형상을 인식시키지 않고 4개의 cue를 사용하도록 강체모델을 형상화하고, 이동타겟 추정을 위해 로봇 이동지점이 10개인 로봇 초기화단계와 타겟 이동지점이 20개인 이동타겟 추적단계로 나누어 실험을 진행하였다.

6장에서는 본 논문에서 개발된 4개의 제어기법을 이용하여 각 타겟지점에서 추정된 카메라 매개변수를 이용한 비전시스템 모델값과 각 타겟지점에서 실제 획득된 비전데이터의 오차값을 비교하여 비전시스템 모델의 적합성을 검토하였으며, 7장에서는 로봇이 이동하는 동안 각 타겟지점에서 실제 획득된 비전데이터와 가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 방법, 가중치행렬을 적용한 일괄처리 방법, 가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 방법, 가중치행렬을 적용한 데이터이동 방법 등 4개의 방법으로 추정된 관절값과 위치값을 비교하였으며, 마지막으로 8장에서는 본 연구에서 개발된 4개 제어기법들을 이동타겟 추적실험을 통해 각각의 장단점 및 효율성을 평가하였다.

Fig. 1-1은 본 논문의 연구방법과 내용에 대한 체계적인 구성도를 보여준다.

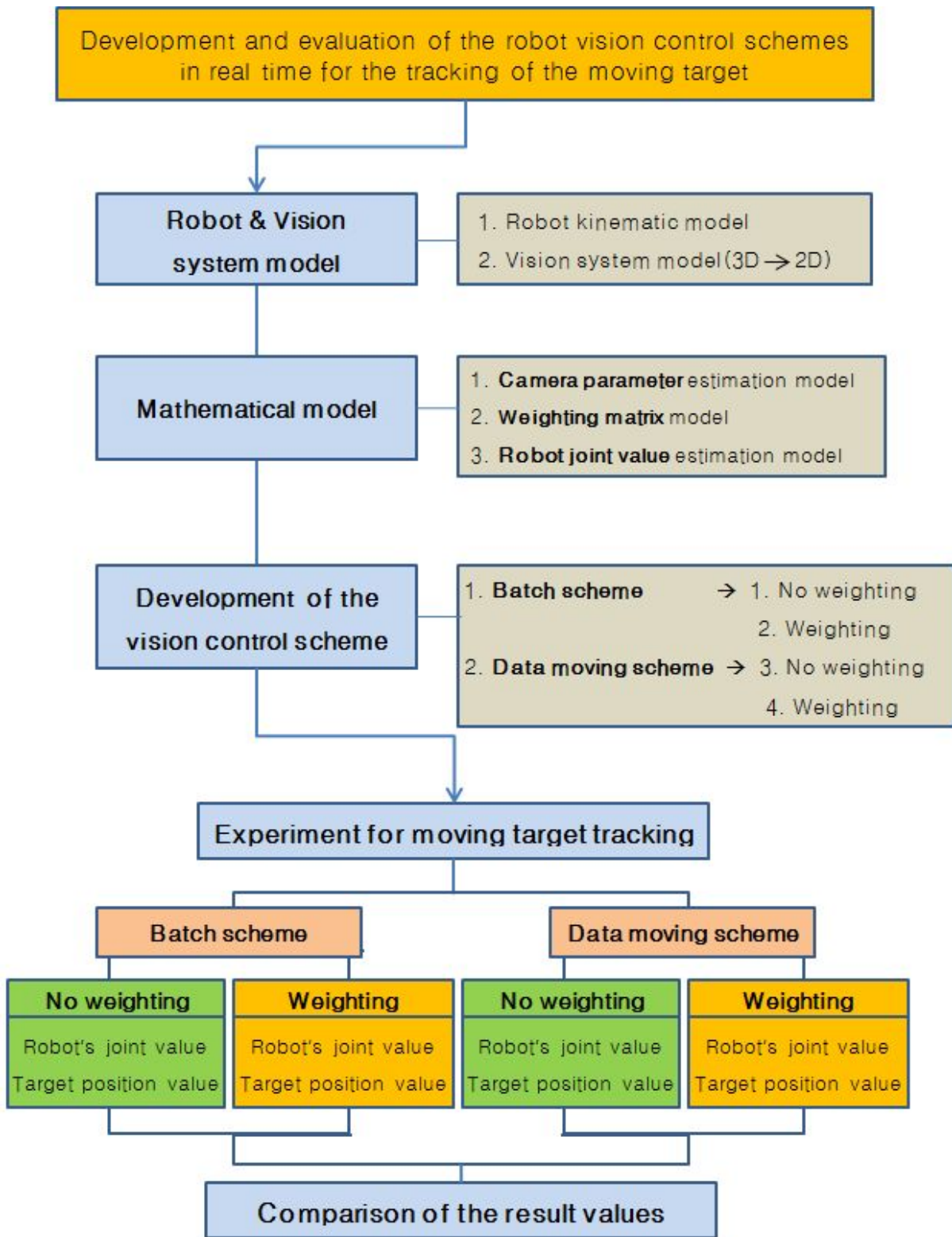


Fig. 1-1 Structure of thesis

## 제 2 장 로봇 및 비전시스템 모델

### 2.1 로봇 기구학 모델

로봇 정기구학이란 각각의 로봇 관절값이 주어졌을 때 로봇 기준점 좌표계에 대한 로봇 끝점의 위치벡터를 구하는 것을 말하는데, 계산된 정기구학 모델식은 2.2절의 비전시스템 모델에서 사용된다.

Fig. 2-1은 본 연구에서 사용한 삼성에서 제조한 SM7모델 중 4축 스카라 형식의 로봇에 대한 4개 관절의 링크계와 링크인자를 보여주고 있으며, Denavit-Hartenberg 규약에 따라 정의된 로봇 링크인자 값은 Table 2-1에서 보여준다.

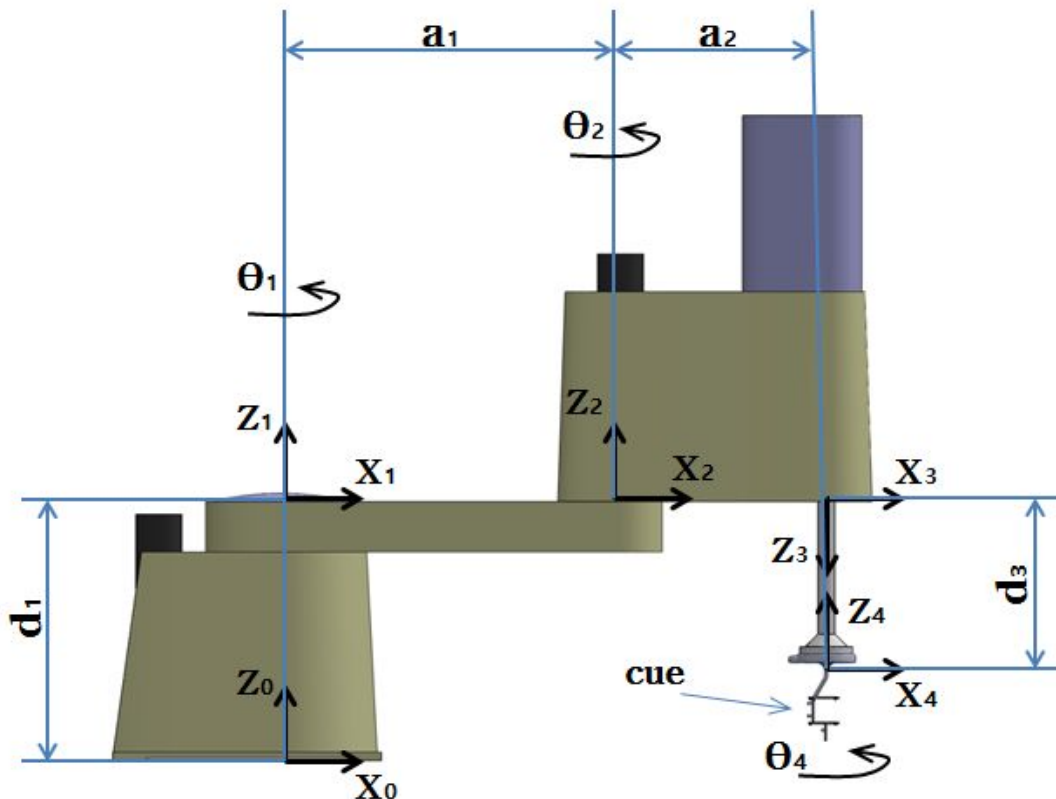


Fig. 2-1 Link parameters and link frame assignment of 4 axis robot

Table 2-1 Link parameters of 4 axis robot

axis	$\alpha_{i-1} (^{\circ})$	$a_{i-1} (mm)$	$d_i (mm)$	$\theta_i (^{\circ})$
1	0	0	387	$\theta_1$
2	0	400	0	$\theta_2$
3	180	250	$d_3$	0
4	-180	0	0	$\theta_4$

인접한 로봇의 링크계 $\{i\}$ 에 대한 링크계 $\{i-1\}$ 의 변환행렬은 식(2-1)과 같다.<sup>[39]</sup>

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Table 2-1에 기술된 링크 매개변수를 식(2-1)에 대입하여 각 링크에 대한 변환행렬  $T$  를 계산하면 식(2-2)와 같다.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

그 다음, 링크변환을 연결하기 위해 식(2-2)에서 계산된 각 링크에 대한 변환행렬  $T$  를 순차적으로 곱하면 로봇의 기준 좌표계 $\{0\}$ 에 대한 마지막 좌표계 $\{4\}$ 의 변환행렬은 식(2-3)과 같이 계산된다.

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 & a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_4 + d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

마지막 좌표계 {4}의 원점에 설치된 4개 cue들의 위치벡터  ${}^4P^j$ 는 식(2-4)와 같이 주어진다.

$${}^4P^j = (P_x^j, P_y^j, P_z^j)^T \quad (2-4)$$

이리하여 로봇 기준 좌표계 {0}에 대한 로봇 끝점에 설치된 4개 cue들의 위치벡터  $f$ 는 식(2-5)와 같이 계산된다.

$$f = {}^0T^4 P^j$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 & a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_4 + d_1 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x^j \\ P_y^j \\ P_z^j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

식(2-5)를  $i$ 번째 이동지점의  $j$ 번째 cue에 대한 로봇 정기구학 성분별 위치로 표현하면 식(2-6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_x^{i,j} &= \cos(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i) P_x^j - \sin(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i) P_y^j \\
 &\quad + a_2 \cos(\theta_1^i + \theta_2^i) + a_1 \cos \theta_1^i \\
 f_y^{i,j} &= \sin(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i) P_x^j + \cos(\theta_1^i + \theta_2^i + \theta_4^i) P_y^j \\
 &\quad + a_2 \sin(\theta_1^i + \theta_2^i) + a_1 \sin \theta_1^i \\
 f_z^{i,j} &= P_z^j - d_3^i + d_1
 \end{aligned} \quad (2-6)$$

여기서  $i$ 는 로봇이 이동하는 동안 로봇이동 지점수,  $\theta_1^i, \theta_2^i, d_3^i, \theta_4^i$ 는  $i$ 번째 이동지점에서 로봇 관절값,  $j$ 는 cue의 번호를 나타낸다. 또한,  $a_1, a_2, d_1, d_4$ 는 Table 2-1에서 보여준 링크인자를 나타낸다.

## 2.2 비전시스템 모델

본 연구에서 3차원 공간상에 있는 물체의 위치를 2차원 공간상의 좌표로 변환하기 위해 사용된 비전시스템 모델은 식(2-8)과 같이 주어지며, 이 모델은 선행연구<sup>[41]</sup>들을 통해 효율성이 입증되었다.

$$\begin{bmatrix} X_m^{i,j} \\ Y_m^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^{i,j} \\ f_y^{i,j} \\ f_z^{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2, & C_{12} &= 2(C_2C_3 + C_1C_4), \\ C_{13} &= 2(C_2C_4 - C_1C_3) & C_{21} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4), \\ C_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2, & C_{23} &= 2(C_3C_4 + C_1C_2) \end{aligned} \quad (2-8)$$

식(2-7)과 식(2-8)에서 보여준 비전시스템 모델은 6개의 카메라 매개변수 ( $C_1 \sim C_6$ )를 포함하고 있으며, ( $C_1 \sim C_4$ )는 카메라의 초점거리와 방향의 불확실성을 정의하고 ( $C_5$ 와  $C_6$ )은 로봇과 카메라사이의 상대적 위치에 대한 불확실성을 정의하는 매개변수이다.

상기의 식(2-8)을 식(2-7)에 대입하여 전개하면 식(2-9)와 같다.

$$\begin{aligned} X_m^{i,j} &= (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x^{i,j} + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y^{i,j} \\ &\quad + 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z^{i,j} + C_5 \\ Y_m^{i,j} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x^{i,j} + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y^{i,j} \\ &\quad + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z^{i,j} + C_6 \end{aligned} \quad (2-9)$$

여기서,  $f_x^{i,j}, f_y^{i,j}, f_z^{i,j}$ 는  $i$ 번째 이동지점에서  $j$ 번째 cue에 대한 3차원 공간상 위치를 나타내며,  $X_m^{i,j}$ 과  $Y_m^{i,j}$ 는  $i$ 번째 로봇 이동지점에서 로봇 끝점에 설치된  $j$ 번째 cue에 대한 2차원 카메라 좌표를 나타낸다.



### 제 3 장 매개변수 추정을 위한 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 제안하고자 하는 로봇비전 제어기법을 개발하기 위해서는 로봇 비전시스템에 대한 매개변수 추정을 위한 수학적 모델이 필요하다. 이리하여 필요로 하는 수학적 모델링은  $N-R$  방법을 사용하며, Fig. 3-1에서 보여준 것과 같이 3개 모델로 구성되어진다.

첫 번째 모델은 카메라 매개변수를 추정하는 모델이고, 두 번째 모델은 카메라 매개변수 추정모델에서 사용되어지는 가중치행렬 모델이며, 세 번째 모델은 추정된 매개변수 값을 이용하여 로봇 관절값을 추정하는 모델이다.

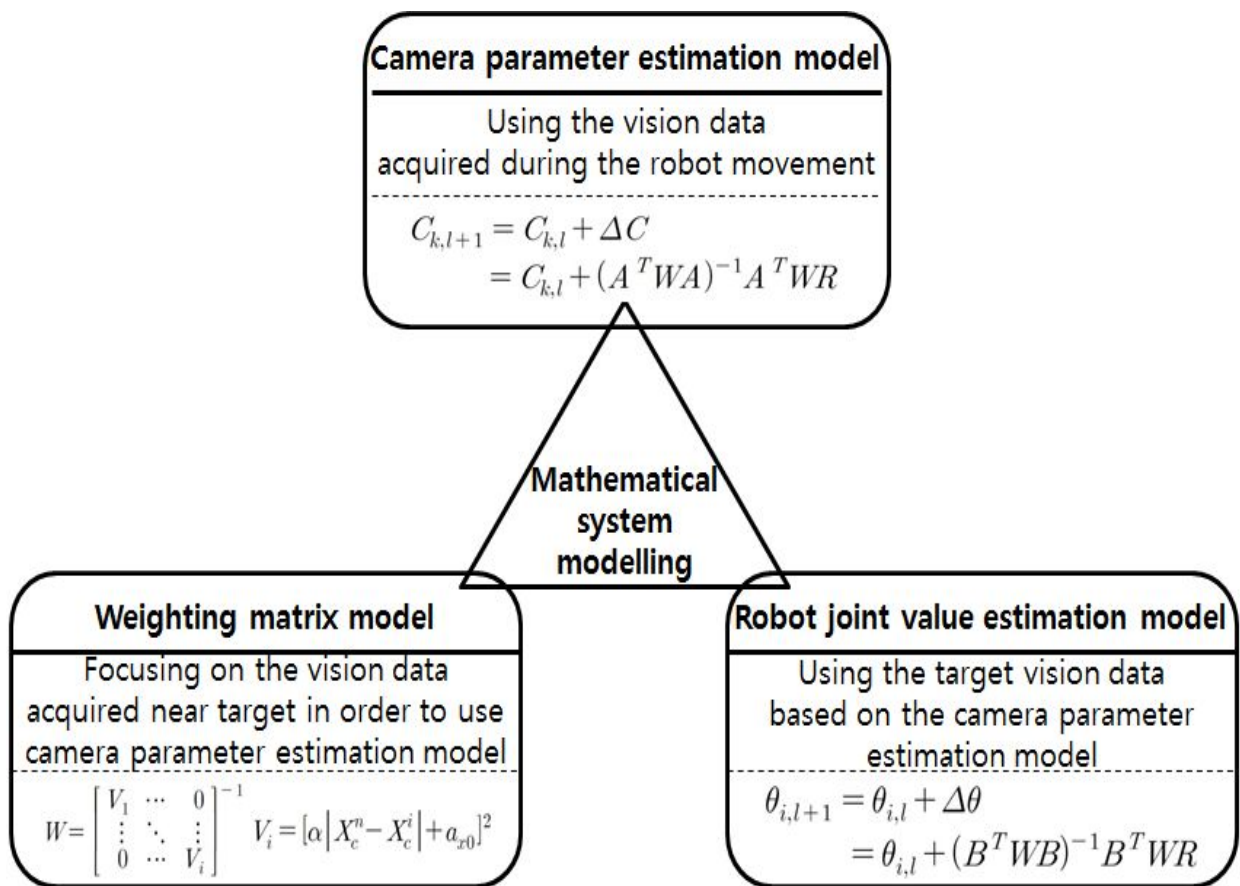


Fig. 3-1 Schematic diagram of the mathematical system modeling



### 3.1 카메라 매개변수 모델

로봇이 임의의 운동궤적을 따라 이동하는 동안 각 이동지점에서 획득된 비전데이터와 알려진 로봇 관절값과 알려지지 않은 카메라 매개변수를 포함하는 비전시스템을 매칭시켜서 로봇 끝점 위치의 3차원 좌표계를 2차원 카메라 좌표계로 변환하고자 한다. 이때 필요한 6개의 매개변수  $C_k$ 를 추정하기 위해 식(3-1)과 같이 성능지수  $J(C_k)$ 를 정의한다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^{n^*} \sum_{j=1}^4 [X_m^{i,j}(C_k) - X_c^{i,j}]^2 + [Y_m^{i,j}(C_k) - Y_c^{i,j}]^2 \quad (3-1)$$

여기서,  $k$ 는 매개변수의 개수(1~6),  $X_m^{i,j}$ 과  $Y_m^{i,j}$ 는  $i$ 번째 로봇 이동 지점에서  $j$ 번째 cue에 대한 6개 매개변수를 포함한 비전시스템 모델값이며,  $X_c^{i,j}$ 와  $Y_c^{i,j}$ 는  $i$ 번째 로봇 지점에서 카메라를 통해 얻어진 로봇 끝점  $P^j$ 에 대한 실제 비전데이터 값들이다.  $X_m^{i,j}(C_k)$ ,  $Y_m^{i,j}(C_k)$ 는 2.2절의 비전시스템 모델에서 6개의 매개변수( $C_1 \sim C_6$ )를 포함한 비전시스템 모델값을 나타낸다.

식(3-1)을  $N-R$  방법에 적용하여 최소화시키면 아래의 식(3-2)와 같다.<sup>[40]</sup>

$$\begin{aligned}
 C_{k,l+1} &= C_{k,l} + \Delta C \\
 &= C_{k,l} + (A^T W A)^{-1} A^T W R
 \end{aligned} \quad (3-2)$$

여기서,  $l$ 은 계산과정에서 반복된 횟수이며,  $A$ 는 크기가  $(2 \times i \times j) \times 6$ 인 자코비안 행렬로 식(3-3)과 같이 주어지며,  $R$ 은 크기가  $(2 \times i \times j) \times 1$ 인 유수벡터로 식(3-4)와 같다. 또한, 가중치행렬  $W$ 는 본 연구에서 제시하고자 하는 중요 요소로, 3.3절에서 자세히 설명되며 카메라 매개변수 모델은 사용된 3대의 카메라 각각에 적용한다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial C_6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$R = \begin{bmatrix} X_m^{1,1} - X_c^{1,1} \\ Y_m^{1,1} - Y_c^{1,1} \\ \vdots \\ X_m^{q,j} - X_c^{q,j} \\ Y_m^{q,j} - Y_c^{q,j} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

### 3.2 가중치행렬 모델

3.1절의 매개변수 추정모델의 식(3-2)에서 보여준 가중치행렬  $W$  는 로봇이동시 획득한 비전데이터 처리방법에 따라서 다르게 적용된다. 첫 번째 획득한 모든 데이터에 동일한 비중을 주는 경우 가중치행렬  $W$  는 단위행렬을 사용하며, 두 번째 획득한 데이터 중 타겟 근처의 데이터에 더 큰 비중을 주는 경우에는 새로운 가중치행렬 모델이 필요하다.

본 연구에서는 정밀한 로봇비전 제어를 위해 로봇이 목표점에 근접했을 때 획득된 최근의 비전데이터에 더 큰 비중을 주기 위해 식(3-5)와 같이 크기가  $(2 \times i \times j) \times (2 \times i \times j)$ 인 가중치행렬  $W$  를 대각행렬로 정의하였다.



### 3.3 로봇 관절값 모델

로봇 관절값 추정모델은 3.1절의 매개변수 추정모델을 통해 추정된 각 카메라의 6개의 매개변수를 사용한 비전시스템 모델값과 설정된 타겟에 대한 각 카메라의 비전데이터를 매칭시켜서 로봇의 관절값( $\theta_n$ )을 추정하고자한다. 이때 관절값 추정을 위해 식(3-7)과 같이 성능지수,  $J(\theta_n)$ 를 정의한다.

$$\begin{aligned}
 J(\theta_n) = & \sum_{q=1}^3 \sum_{j=1}^4 [X_m^{q,j}(f_x^j(\theta_n), f_y^j(\theta_n), f_z^j(\theta_n); C_k^q) - X_c^{q,j}]^2 \\
 & + [Y_m^{q,j}(f_x^j(\theta_n), f_y^j(\theta_n), f_z^j(\theta_n); C_k^q) - Y_c^{q,j}]^2
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

여기서,  $n$ 은 관절값의 수(1~4),  $q$ 는 카메라 번호,  $X_c^{q,j}$ 와  $Y_c^{q,j}$ 는 타겟에 대한  $q$ 번째 카메라에서 획득한  $j$ 번째 타겟의 cue에 대한 카메라 좌표계에서 비전데이터를 나타내며,  $X_m^{q,j}$ 와  $Y_m^{q,j}$ 는 추정된 카메라 매개변수  $C_1 \sim C_6$ 에 근거한  $q$ 번째 카메라에서  $j$ 번째 cue에 대해 추정된 비전시스템 모델값이다.

식(3-7)을  $N-R$  방법으로 최소화시키면 식(3-8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \theta_{n,l+1} &= \theta_{n,l} + \Delta\theta \\
 &= \theta_{n,l} + (B^T W B)^{-1} B^T W R^*
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

여기서,  $l$ 은 계산과정 중 반복된 횟수이고,  $B$ 는 크기가  $(2 \times q \times j) \times 4$ 인 자코비안 행렬로 식(3-9)와 같이 주어지며,  $R^*$ 은 크기가  $(2 \times q \times j) \times 1$ 인 유수벡터로 식(3-10)과 같이 나타낸다. 또한,  $W$ 는 가중치행렬을 나타내며, 사용된 3대의 카메라에 동등한 비중을 주기 위해 단위행렬을 사용하였다.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial X_m^{1,1}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Y_m^{1,1}}{\partial \theta_4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$R^* = \begin{bmatrix} X_m^{1,1} - X_c^{1,1} \\ Y_m^{1,1} - Y_c^{1,1} \\ \vdots \\ X_m^{q,j} - X_c^{q,j} \\ Y_m^{q,j} - Y_c^{q,j} \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

## 제 4 장 이동타겟 추정을 위한 비전 제어기법 개발

### 4.1 일괄처리 기법

#### 4.1.1 데이터 처리방법

$N-R$  방법의 데이터 일괄처리 기법에서 임의의 운동궤적을 갖는 로봇 초기화 단계를 설정하여 이동타겟 추적을 위한 초기의 카메라 매개변수와 로봇 관절값을 계산하기 위해 로봇이 이동하는 동안 비전데이터를 획득한다.

Fig. 4-1에서 보여준 것 같이  $m$ 개 이동지점의 로봇 초기화단계에서  $m$ 번째 이동지점을 타겟으로 설정하고 초기  $(m-1)$ 개 로봇 이동지점의 비전데이터를 사용하여 이동타겟 추적단계에서 필요한 초기 카메라 매개변수와 로봇 관절값을 추정한다. 첫 번째 이동타겟을 추정할 때는 로봇 초기화단계에서 사용된  $m$ 번째 데이터가 추가되어  $m$ 개 이동지점의 비전데이터를 사용하여 카메라 매개변수를 추정한다. 추정된 카메라 매개변수를 이용하여 타겟에 대한 로봇 관절값을 추정하여 타겟의 위치값을 계산한다. 두 번째 이동타겟 추정시 첫 번째 이동타겟에 대한 비전데이터가 추가되어  $(m+1)$ 개 이동지점의 비전데이터를 사용하여 카메라 매개변수를 추정하고, 추정된 카메라 매개변수를 이용해서 로봇 관절값을 추정하여 타겟의 위치값을 계산한다. 이 후, 다음 지점의 타겟을 추정시 이전 지점에서 획득된 타겟값을 추가하여 앞선 방법과 같이 계산한다.

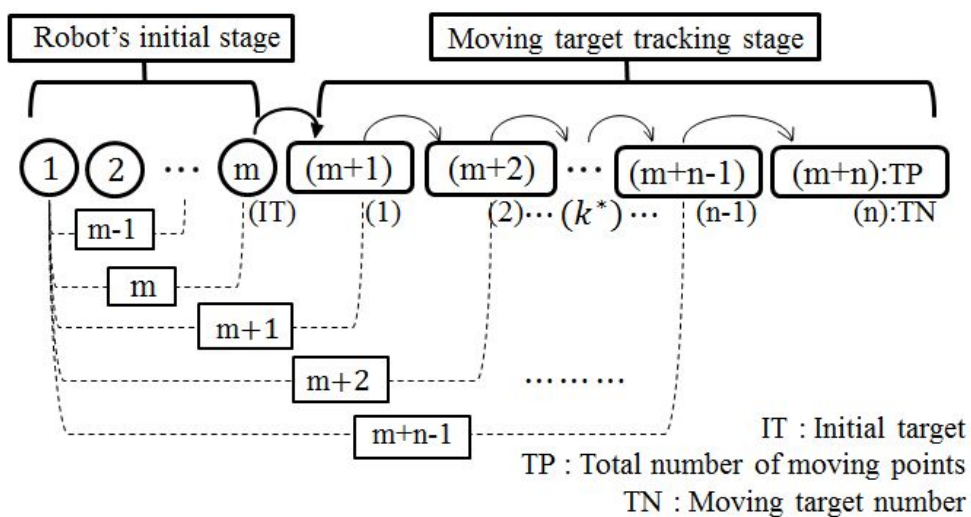
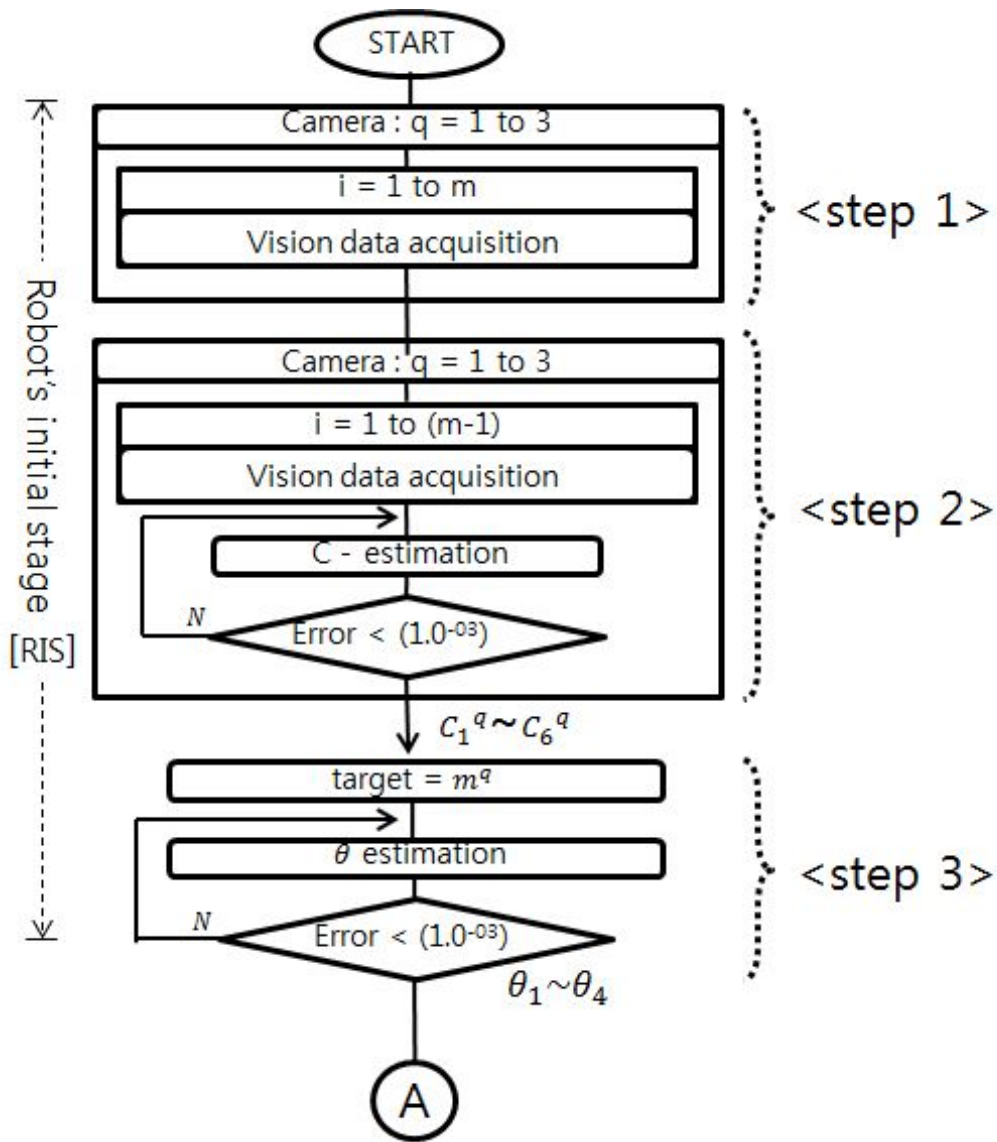


Fig. 4-1 Data processing method of the batch scheme

### 4.1.2 가중치행렬을 적용하지 않은 제어기법

가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 제어기법은 식(3-2)의 가중치행렬  $W$  를 단위행렬로 사용하여 카메라 매개변수를 추정하고 추정된 매개변수를 사용하여 이동타겟의 위치값을 추정한다. Fig. 4-2는 이 제어기법에 대한 전체적인 흐름을 보여주며, 각 단계별 설명은 다음과 같다.



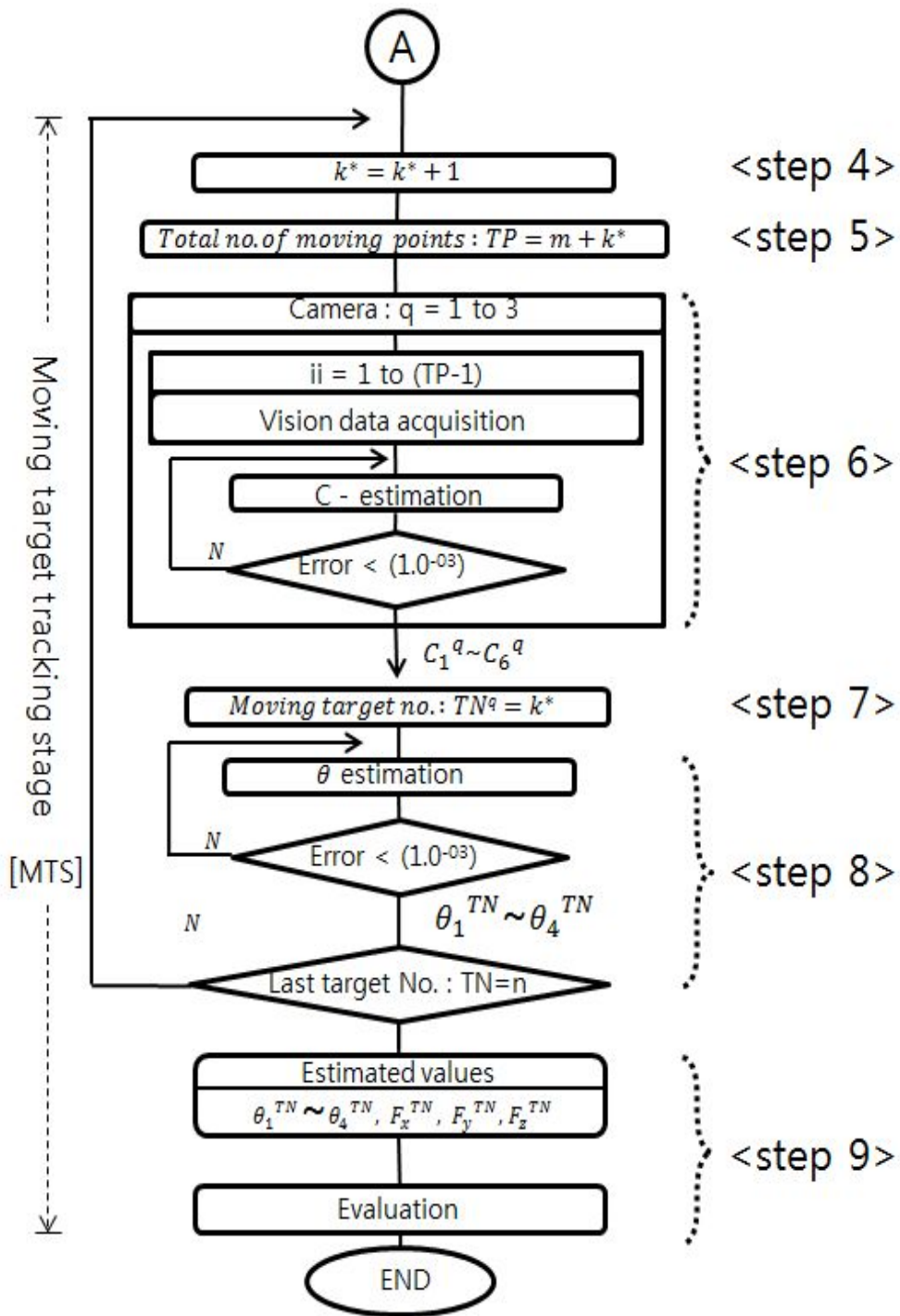


Fig. 4-2 Robot's vision control scheme of the batch method without weighting matrix



- Step 1; 로봇 초기화단계에서 초기 타겟지점( $m$ )으로 이동하는 동안, 3 대의 카메라를 사용하여 각 로봇 이동지점에서 4개의 cue에 대한 비전데이터를 획득한다.
- Step 2; 각 카메라에서 획득한 4개의 cue에 대한 ( $m-1$ )개 로봇 이동지점의 비전데이터를 사용하여 카메라 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다.
- Step 3; 각 카메라에 대해 (Step 2)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한 초기 타겟지점 ( $m$ )에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정한다. (Step 2)와 (Step 3)에서 추정된 카메라 매개변수와 로봇 관절값은 이동타겟 추정시 초기값으로 사용한다.
- Step 4; 이동타겟 추적단계에서 이동타겟의 지점( $k^*$ )을 정의하기 위해 사용되며 이동타겟의 지점을 1부터  $n$ 까지 1씩 증가시킨다.
- Step 5;  $k^*$ 번째 이동타겟 추정시 사용되는 비전데이터의 전체 이동지점 개수( $TP$ )를 생성하기 위해 정의하였으며, 이것은 로봇 초기화 단계에서 사용된  $m$ 개의 로봇 이동지점수와  $k^*$ 번째까지 이동타겟에 대한 지점을 합한 전체값을 나타낸다.
- Step 6; 각 카메라에서 획득한 4개의 cue에 대한 ( $TP-1$ )개 지점까지의 비전데이터를 카메라 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다.
- Step 7; 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째 타겟값을 정의한다.
- Step 8; 이동타겟 추적단계에서 각 카메라에 대해 (Step 6)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에 의해 획득된 (Step 7)에서 정의된 이동타겟번호 ( $TN$ )에 해당되는  $k^*$ 번째 이동타겟에 대한 획득된 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정하고, 이동타겟 번호( $TN$ )가 마지막 값( $n$ )이 아니면 (Step 4)로 되돌아가서 다음 이동타겟 지점에 대한 계산을 수행한다.
- Step 9; 각각의 타겟 이동지점에서 4개의 cue에 대해 계산된 위치값을 실제 위치값과 비교하여 오차값을 계산한다.

### 4.1.3 가중치행렬을 적용한 제어기법

가중치행렬을 적용한 일괄처리 제어기법의 개략적인 흐름은 Fig. 4-3에서 보여주며, 이에 따른 제어기법의 상세한 내용은 Fig. 4-4에 나타내었다. Fig. 4-4에서 보여준 것과 같이 로봇 초기화단계에서 가중치계수를 0부터 0.01단위로 증가시키면서 최적의 가중치계수( $\alpha$ )를 결정한 뒤, 식(2-3)의 가중치행렬을 새로이 계산하여 이동타겟 추적단계에서 타겟을 추적하는데 사용하였으며, 이에 대한 절차는 4.1.2절의 방법과 유사하다.

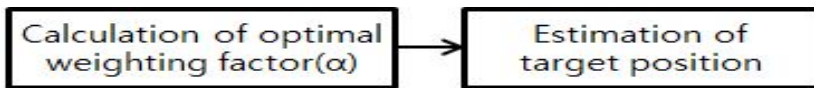
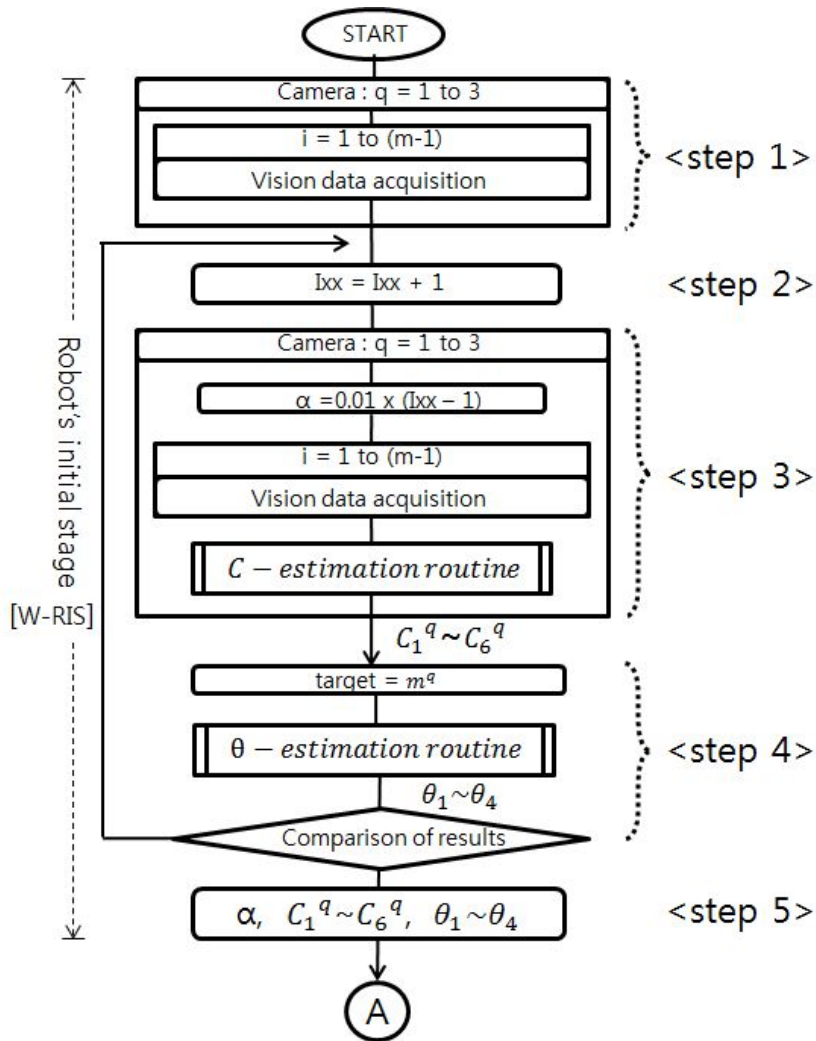


Fig. 4-3 Block diagram of the batch scheme with weighting matrix



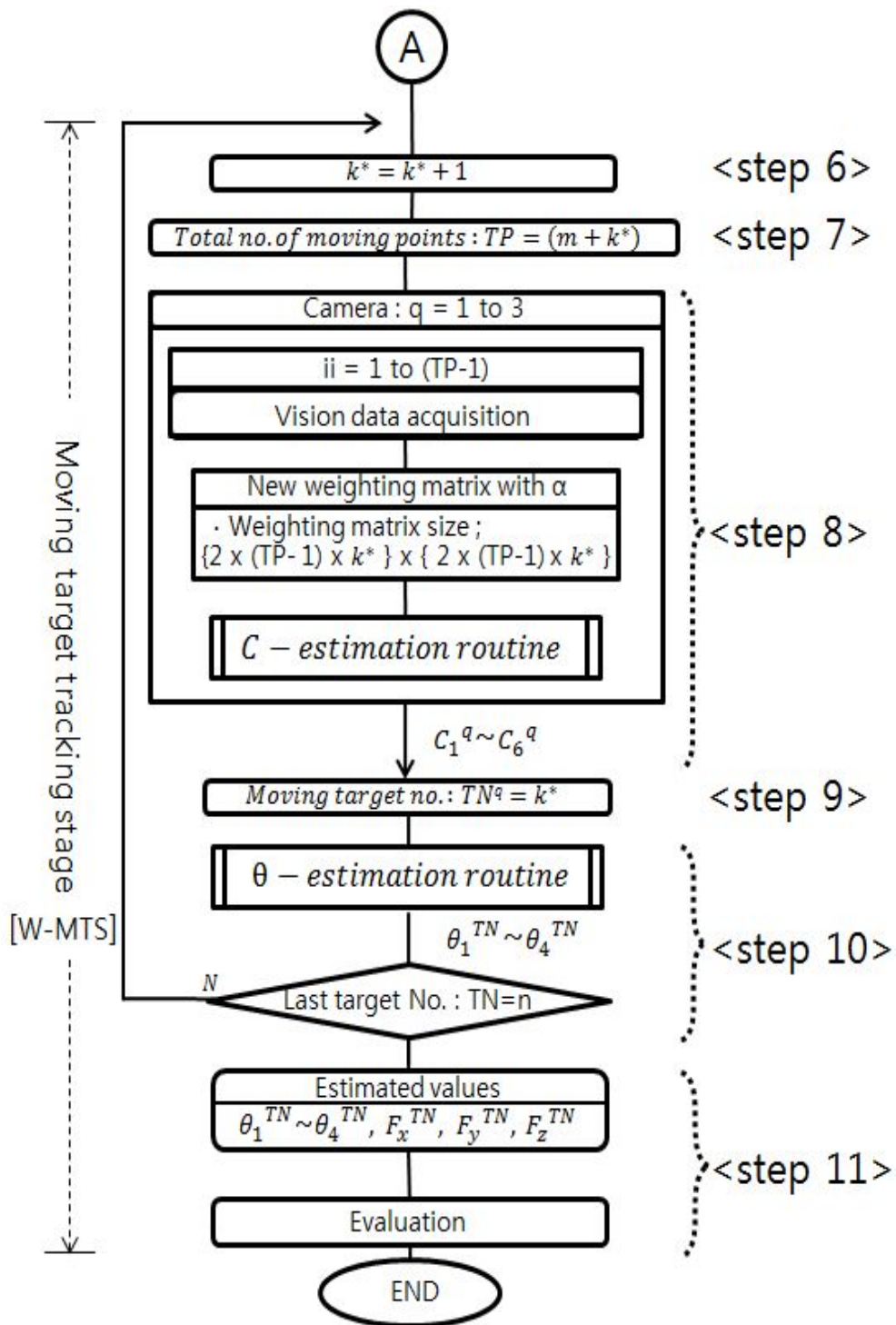


Fig. 4-4 Robot's vision control scheme of the batch method with weighting matrix

- Step 1; 로봇 초기화단계에서 초기 타겟 이동지점( $m$ )으로 이동하는 동안 3대의 카메라를 사용하여 각 로봇 이동지점에서 대한 4개의 cue에 대한 비전데이터를 획득한다.
- Step 2; 최적의 가중치계수를 계산하기 위해 가중치 계수값을 변화시키고자 정의하였다.
- Step 3; 각 카메라에서 획득한 4개의 cue에 대한 ( $m-1$ )개 로봇이동 지점까지 비전데이터를 카메라 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다. 이때, 가중치계수( $\alpha$ )를 0.01씩 증가시켜서 식(3-2)의 가중치행렬에 적용한다.
- Step 4; 각 카메라에 대해 (Step 3)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한 초기 타겟 이동지점 ( $m$ )에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정한다. 이때, 추정된 위치값과 실제 위치값을 비교하여 계산된 오차값이 이전 단계에서 계산된 오차값 보다 작을 때까지 (Step 2) 단계로 되돌아가 계산을 계속한다.
- Step 5; 이전단계에서 가중치계수( $\alpha$ )와 추정된 관절값 및 카메라 매개변수는 이동타겟 추정시 초기값으로 사용된다.
- Step 6; 이동타겟 추적단계에서 이동타겟의 지점수( $k^*$ )로 이동시키기 위해 사용되며 이동타겟의 이동지점수를 1부터  $n$ 까지 1씩 증가시킨다.
- Step 7;  $k^*$ 번째 이동타겟 추정시 사용되는 비전데이터의 이동지점 개수를 생성하기 위해 정의하였으며, 이것은 로봇 초기화 단계에서 사용된  $m$ 개의 로봇 이동지점수와  $k^*$ 번째까지 이동타겟에 대한 지점을 합한 전체값을  $TP$ 로 정의하였다.
- Step 8; 각 카메라에서 획득한 4개의 cue에 대한 ( $TP-1$ )개 지점까지의 비전데이터를 카메라 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 추정한다.
- 이때 가중치행렬의 크기는  $\{2 \times (TP-1) \times k^*\} \times \{2 \times (TP-1) \times k^*\}$ 이다.
- Step 9; 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째 타겟값을 정의한다.
- Step 10; 이동타겟 추적단계에서 각 카메라에 대해 (Step 8)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한 타겟 이동지점( $TP$ )의 이동타겟번호( $TN$ )에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정하고, 이동타겟 번호( $TN$ )가 마지막 값( $n$ )이 아니면 (Step 6)로 되돌아가서 다음 이동타겟 지점에 대한 계산을 수행한다.
- Step 11; 각각의 이동타겟 이동지점에서 4개의 cue에 대해 계산된 위치값을 실제 위치값과 비교하여 오차값을 계산한다.

## 4.2 데이터이동 기법

### 4.2.1 데이터 처리방법

$N-R$  방법을 사용하여 처리하고자 하는 데이터양을 최소화하기 위해 제안된 데이터이동 방법은 Fig. 4-5에서 보여준다.  $m$ 개 로봇 이동지점수를 갖는 로봇 초기화단계에서  $m$ 을 초기 타겟지점으로 설정하고  $(m-1)$ 개 이동지점의 비전데이터를 사용하여 이동타겟 추적단계에서 이용되는 최적의 로봇이동 지점 개수,  $P$ ,를 추정하고, 이에 상응하는 초기 카메라 매개변수와 로봇 관절값을 얻는다. 이동타겟 추적단계에서 첫번째 타겟을 추정할 때는 가장 최근 이동지점( $m$ )에서부터  $P$ 개의 이동지점 비전데이터만을 사용하여 계산을 수행한다. 이후, 다음 이동타겟 추정시의 계산도 이전단계에서 사용된 타겟값을 포함한 최근 이동지점 개수  $P$ 개의 비전데이터만을 사용하여 계산한다.

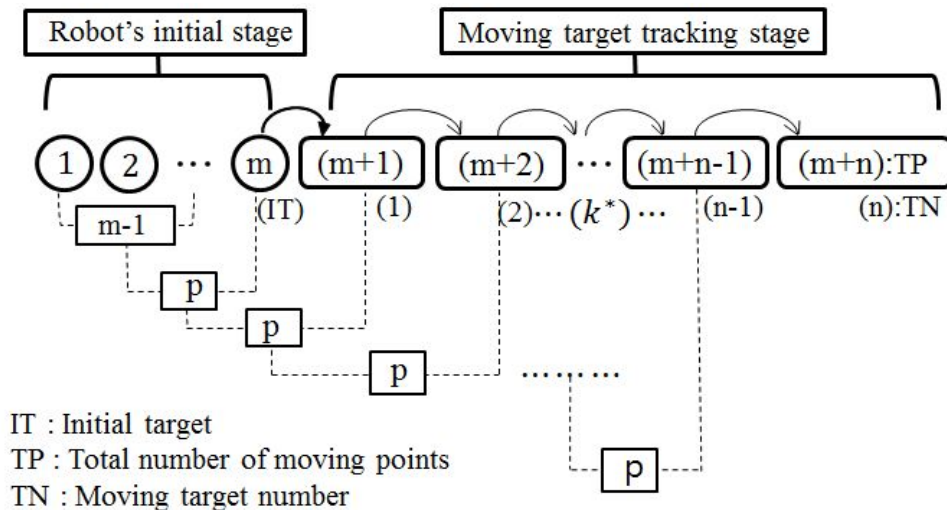


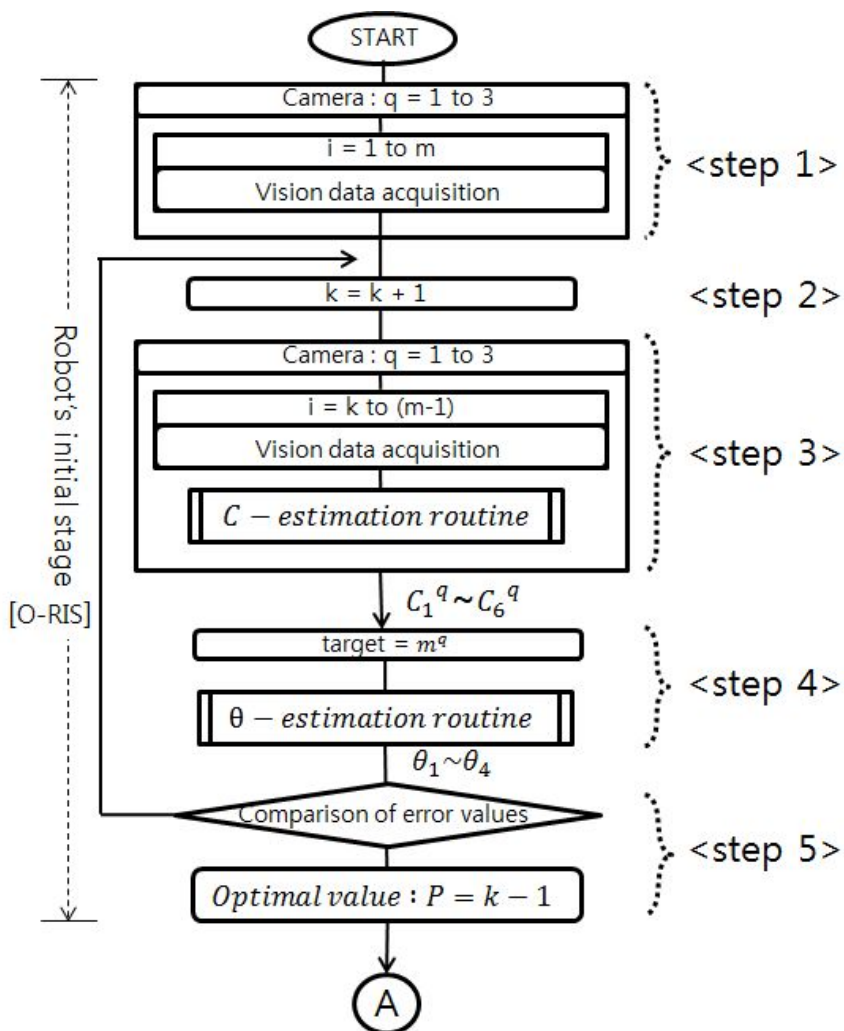
Fig. 4-5 Data processing method of the data moving scheme

### 4.2.2 가중치 행렬을 적용하지 않은 제어기법

이동타겟 추적을 위해 데이터이동 방법에 가중치행렬을 적용하지 않은 제어기법의 전체적인 흐름은 Fig. 4-6에서 보여준다. Fig. 4-7에서 보여준 제안된 제어기법의 핵심 포인트는 로봇 초기화단계에서 4.2.1절의 데이터 처리방법을 기초로 하여 이동타겟 추정의 정확도와 처리속도의 향상을 위해 최적 데이터 이동지점수( $P$ )를 계산하여, 이동타겟 추적단계에서 타겟 추정시 사용되는 비전데이터를 최소화 하고자 한다.



Fig. 4-6 Block diagram of the data moving scheme without weighting matrix





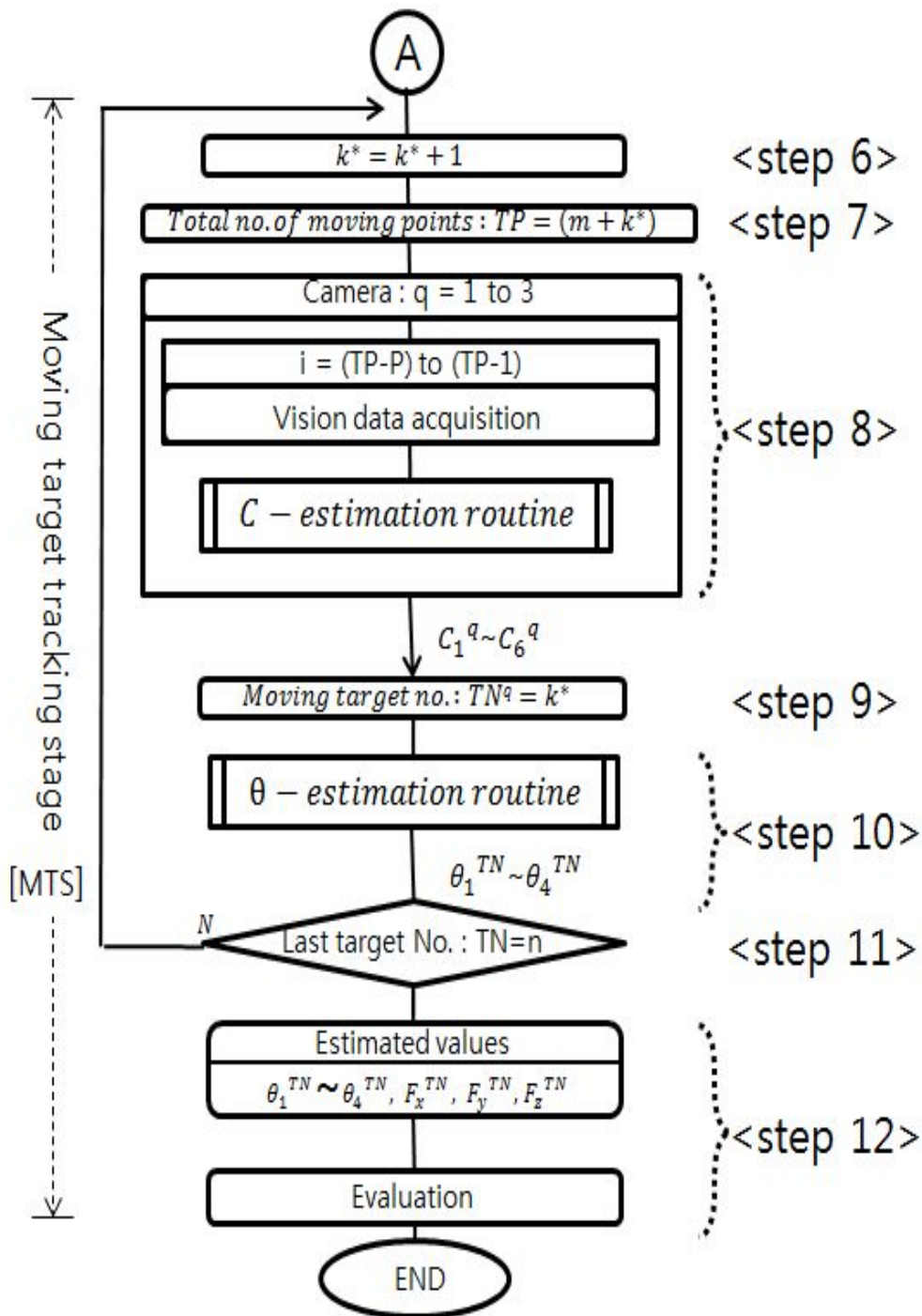


Fig. 4-7 Robot's vision control scheme of the data moving method without weighting matrix

Step 1; 로봇 초기화단계에서 초기 타겟지점(m)으로 이동하는 동안 3대의 카메라를 사용하여 각 로봇 이동지점에서 4개의 cue에 대한 비전데이터를 획득한다.

- Step 2; 최적의 이동지점수( $P$ )를 구하기 위해 로봇 이동지점수를 1씩 변화시키기 위해 정의하였다.
- Step 3; 각 카메라에서 로봇 이동지점 1부터  $(m-1)$ 지점까지  $(m-1)$ 개 이동지점수에서 4 cue에 대해 획득한 비전데이터를 매개변수 추정기법에 적용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 계산한다. 이후, 최적의 로봇 이동지점수를 계산하기 위해 로봇 이동지점수를 1씩 줄이면서 계산한다.
- Step 4; 각 카메라에 대해 (Step 3)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한 초기 타겟( $m$ )에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정한다.
- Step 5; 로봇 이동지점수의 변화에 따라 이동타겟에 대해 추정된 위치값과 실제 위치값에 대한 오차값이 이전에 계산된 오차값보다 작으면 (Step 2)로 되돌아가고, 크면 이전단계의 로봇 이동지점수를 최적의 로봇 이동지점수  $P = (k-1)$ 로 결정한다.
- Step 6; 이동타겟 추적단계에서 이동타겟의 지점( $k^*$ )을 정의하기 위해 사용되며 타겟의 이동지점을 1부터  $n$ 까지 1씩 증가시킨다.
- Step 7; 로봇 초기화단계에서 로봇 이동지점수 ( $m$ )개에 이동타겟 추적단계의  $k^*$ 번째 이동타겟지점까지  $k^*$ 개를 합한 총 이동지점수( $TP$ )를  $(m+k^*)$ 개로 지정한다.
- Step 8;  $TP = (m+k^*)$  이동지점수를 갖는  $k^*$ 번째 타겟을 추정하기 위해  $(TP-P)$ 부터  $(TP-1)$ 까지  $P$ 개 이동지점수의 비전데이터를 가지고 카메라 매개변수 추정기법을 사용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 계산한다.
- Step 9; 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째 타겟값을 정의한다.
- Step 10; 각 카메라에 대해 (Step 8)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째 타겟에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정한다.
- Step 11; 이동타겟  $k^*$ 가 마지막 지점( $n$ )이 아니면 (Step 6)로 되돌아가서 다음 이동 타겟지점에 대한 계산을 수행한다.
- Step 12; 각각의 이동타겟 이동지점에서 4개의 cue에 대해 계산된 위치값을 실제 위치값과 비교하여 오차값을 계산한다.



### 4.2.3 가중치행렬을 적용한 제어기법

가중치를 적용한 데이터 이동법을 사용한 제어기법의 개략적인 흐름은 Fig. 4-8과 같이 3단계로 연구하였는데, 첫 번째 단계에서 최적의 데이터 이동지점수( $P$ )를 계산하고, 두 번째 단계에서 최적의 가중치계수( $\alpha$ ) 계산하였으며, 마지막 세 번째 단계에서는 선행단계에서 결정된 결과값( $P, \alpha$ )을 이용하여 이동타겟 추정 실험을 하였다. Fig. 4-8에서 보여준 개략적인 흐름을 Fig. 4-9에서 9단계로 세분하여 보여준다.

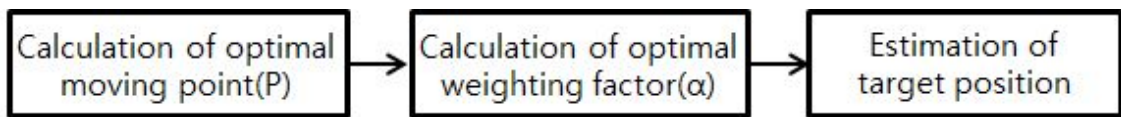
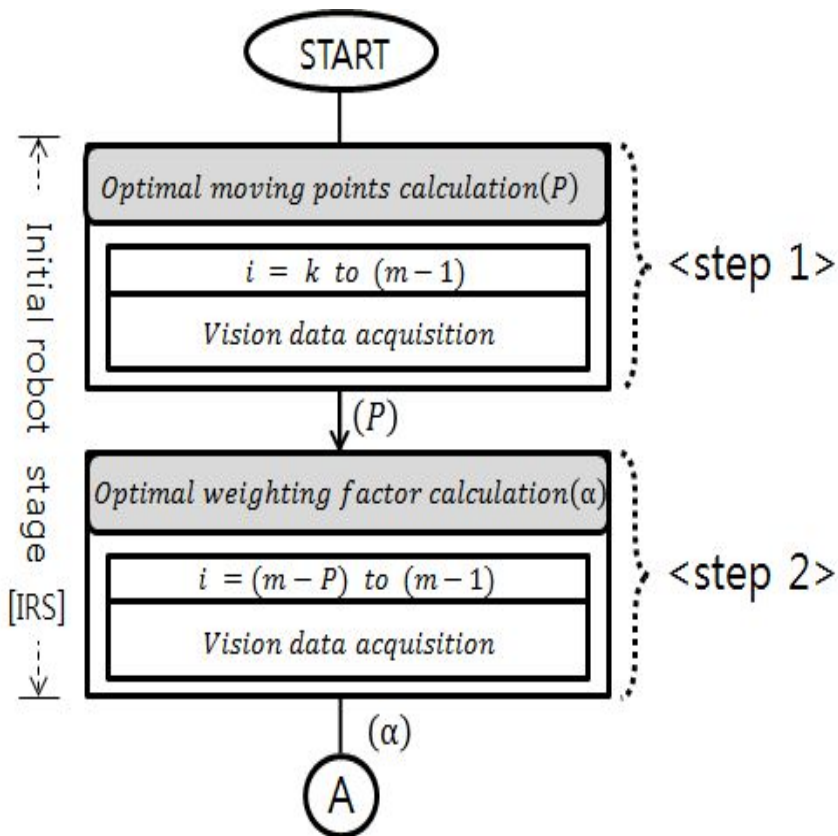


Fig. 4-8 Block diagram of the data moving scheme with weighting matrix



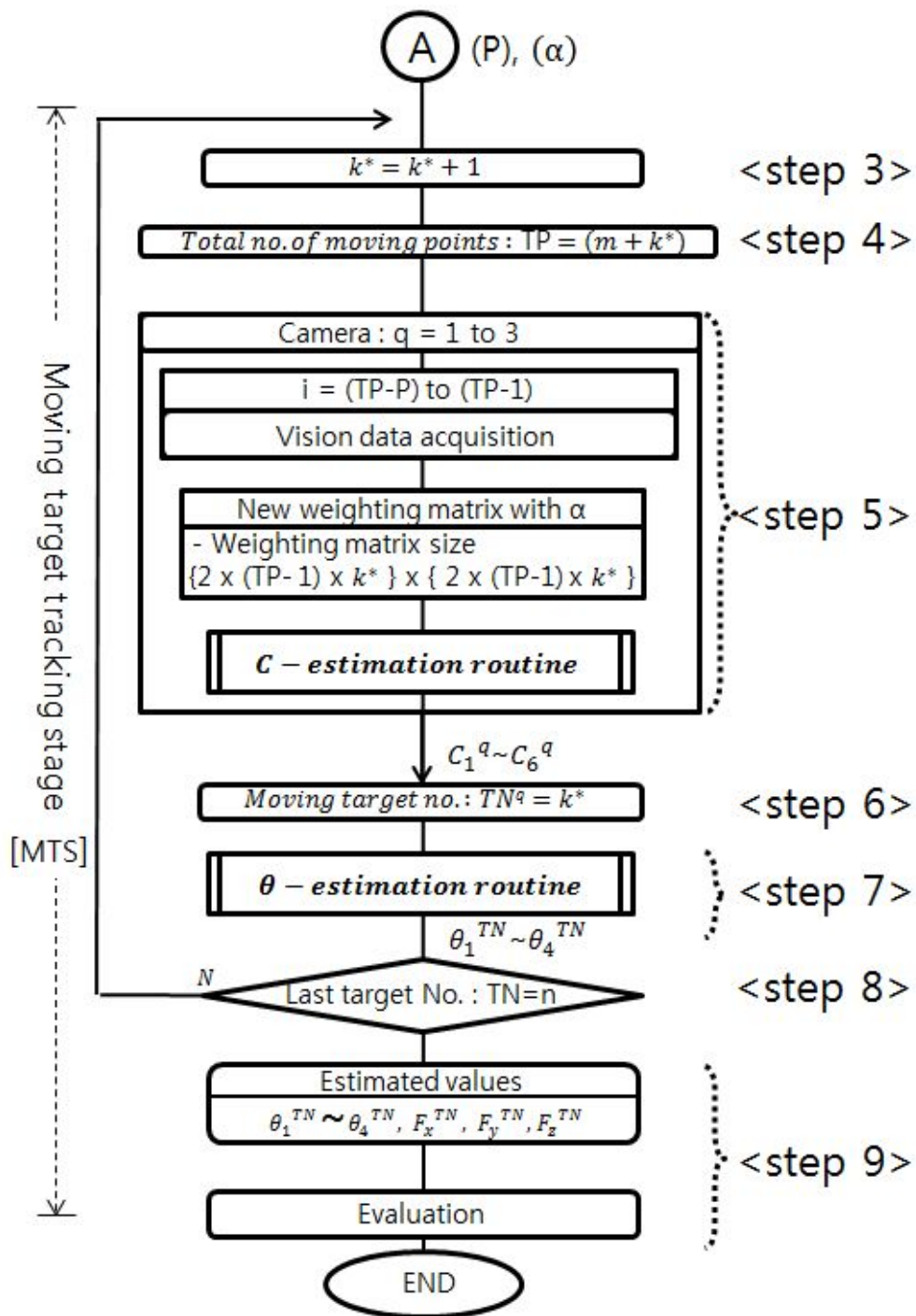


Fig. 4-9 Robot's vision control scheme of the data moving method with weighting matrix

- Step 1; 4.2.2절의 Fig. 4-7에서 보여준  $[O-RIS]$ 를 사용하여 최적의 이동지점수  $P$ 를 계산한다.
- Step 2; 이전 단계인 (Step 1)에서 결정된 최적의 이동지점수  $P$ 를 사용하여 4.1.3절의 로봇 초기화단계에서 보여준 Fig. 4-4의  $[W-RIS]$ 를 근거로 하여 최적의 가중치계수  $\alpha$ 를 계산한다. 이때, 가장 최근 이동지점( $m$ )에서부터  $P$ 개의 이동지점 비전데이터만을 사용하여 계산을 수행하기 위해서  $[W-RIS]$ 의 (Step 3)에서 계산에 사용할 데이터의 개수를  $(m-P)$ 에서부터  $(m-1)$ 까지로 한정한다.
- Step 3; 이동타겟 추적단계에서 이동타겟의 지점( $k^*$ )을 정의하기 위해 사용되며 타겟의 이동지점을 1부터  $n$ 까지 1씩 증가시킨다.
- Step 4; 로봇 초기화단계에서 로봇 이동지점수 ( $m$ )개에 이동타겟 추적단계의  $k^*$ 번째 이동타겟지점까지  $k^*$ 개를 합한 총 이동지점수( $TP$ )를  $(m+k^*)$ 개로 지정한다.
- Step 5;  $TP=(m+k^*)$  이동지점수를 갖는  $k^*$ 번째 타겟을 추정하기 위해  $(TP-P)$ 부터  $(TP-1)$ 까지  $P$ 개 이동지점수의 비전데이터를 가지고 카메라 매개변수 추정기법을 사용하여 각 카메라에 대한 매개변수를 계산한다. 이때 가중치행렬의 크기는  $\{2 \times (TP-1) \times k^*\} \times \{2 \times (TP-1) \times k^*\}$ 이다.
- Step 6; 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째 타겟값을 정의한다.
- Step 7; 각 카메라에 대해 (Step 5)에서 추정된 카메라 매개변수와 각 카메라에서 획득한  $k^*$ 번째에 대한 비전데이터를 관절값 추정기법에 적용하여 로봇 관절값을 추정한다.
- Step 8; 이동타겟  $k^*$ 가 마지막 지점( $n$ )이 아니면 (Step 3)로 되돌아가서 다음 이동타겟지점에 대한 계산을 수행한다.
- Step 9; 각각의 이동타겟 이동지점에서 4개의 cue에 대해 계산된 위치값을 실제 위치값과 비교하여 오차값을 계산한다.

## 제 5 장 실험장치 및 실험방법

### 5.1 실험장치 구성

본 연구를 위한 실제 실험환경은 Photo 5-1과 같이 설치하였고, 실험장치의 구성은 Fig. 5-1에서 보는 바와 같이 전체 시스템 운영을 위한 PC system, 4개의 cue를 갖는 시험모형을 부착한 Robot system 그리고 영상 획득을 위한 Vision system의 3부분으로 나눌 수 있으며, 각 시스템의 하드웨어적인 사양은 Table 5-1과 같다.

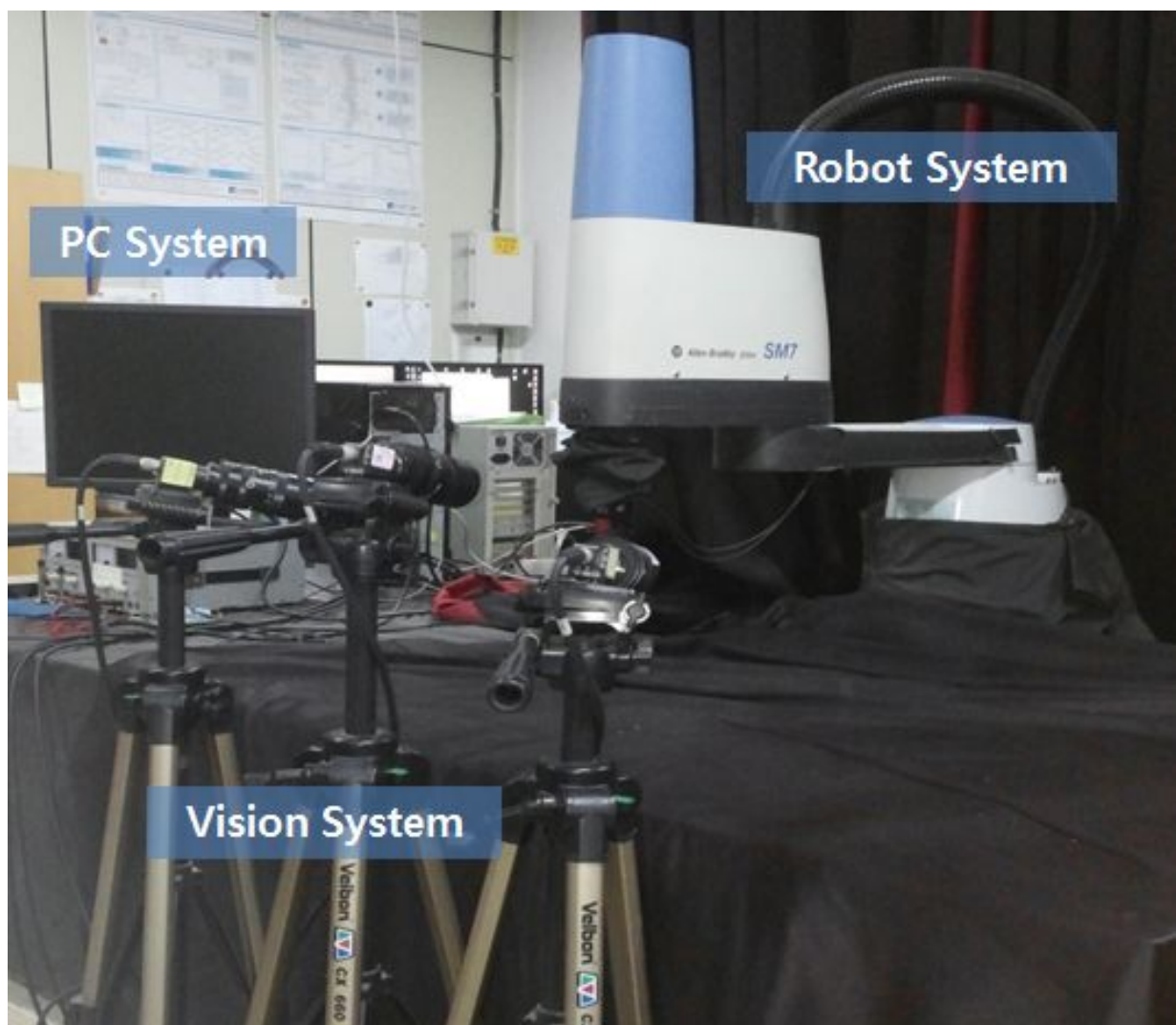


Photo 5-1 Experimental set-up

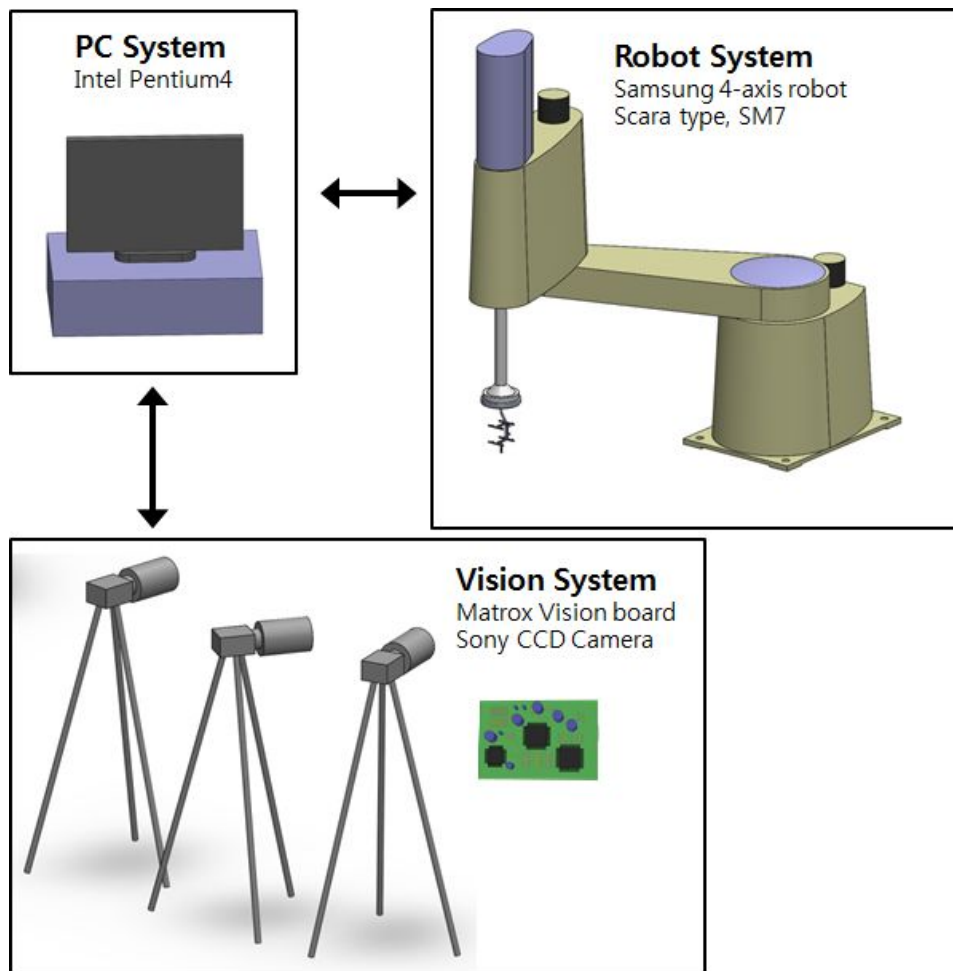


Fig. 5-1 Schematic diagram for the experiment

Table 5-1 Specifications of the experimental apparatus

System	Specification
Computer System	CPU : Pentium 2.8GHz RAM : 512Mbyte
Robot System	Maker : Samsung Model : SM7 Type : SCARA 4-Axis Actuator : Samsung CSD3 series servo drive
Vision System	Board : MATROX black-white metor-MC4 Resolution : 640 × 480 Color : 256 Color Camera : Sony XC ES51 CCD

## 5.2 시험모형

영상처리 시간을 줄여서 효율적인 시험을 위해, 물체형상을 전부 인식시키지 않고 필요한 일부만을 인식하도록 Fig. 5-2와 같이 와이어프레임 형태의 정육면체 모델 형상을 준비하고 각 꼭지점에 LED로 만들어진 9개의 cue를 부착하여 실험하고자 하는 cue를 자유롭게 선택할 수 있도록 제작하였다. Fig. 5-2에서 보여진 모델의 각 cue에 대한 위치 좌표값은 Table 5-2와 같은 값을 가진다. 본 연구에서는 강제로 형상화하기 위해 4개의 cue(1, 2, 3, 4)를 지정하여 진행하였다.

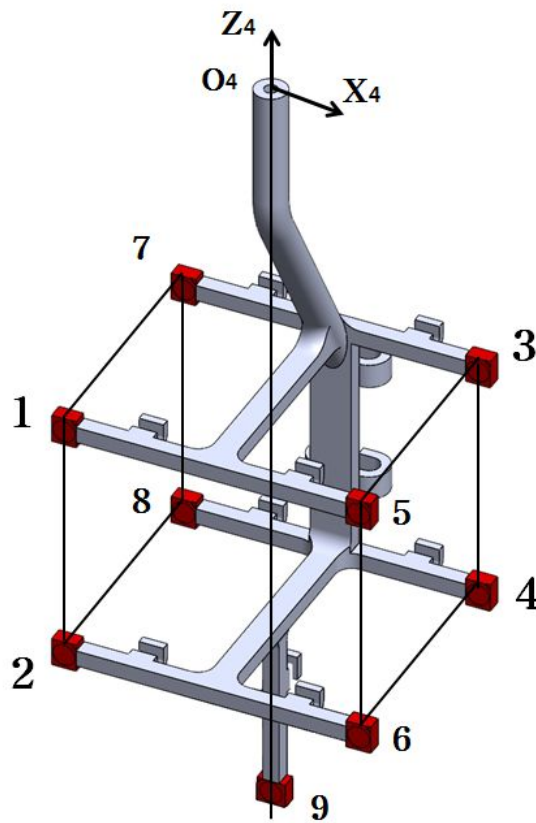


Fig. 5-2 Test model used for the experiment



Table 5-2 Position values of 9 cues in x-y-z coordinate (unit: mm)

cue (=i)	$P_x^i$	$P_y^i$	$P_z^i$
1	-15	18	-103
2	-15	18	-133
3	15	-18	-103
4	15	-18	-133
5	15	18	-103
6	15	18	-133
7	-15	-18	-103
8	-15	-18	-133
9	0	0	-155

Table 5-2로부터 본 실험을 위해 사용된 4개 cue들의 좌표계{4}에 대한 위치벡터는 식(5-1)과 같다.(단위: mm)

$${}^4P = \begin{bmatrix} P^1 \\ P^2 \\ P^3 \\ P^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x^1, P_y^1, P_z^1 \\ P_x^2, P_y^2, P_z^2 \\ P_x^3, P_y^3, P_z^3 \\ P_x^4, P_y^4, P_z^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15, & 18, & -103 \\ -15, & 18, & -103 \\ 15, & -18, & -103 \\ 15, & -18, & -103 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

### 5.3 실험방법

임의의 궤적을 움직이는 이동타겟을 실시간으로 추적하는 실험을 진행하기 위해, 삼성 SM7 로봇이 임의의 시작점에서 출발하여 끝점까지 이동하도록 하기 위해 각각의 관절값을 일정 범위만큼 변화시켜서 로봇이 움직이도록 설정하였으며, 로봇이 이동하는 동안 4개의 cue가 카메라 시야에서 벗어나지 않도록 3대의 카메라를 배치하였다.

본 연구에서는 시작점과 끝점의 관절값을 임의로 설정하여 식(5-2)과 같이 30개 지점을 갖는 궤적을 생성하여 처음 10개 지점은 초기화단계의 로봇 이동지점으로

사용하고, 나머지 20개 지점은 이동타겟 지점의 실제값으로 저장하여 향후 이동타겟 추정값을 비교하는데 기준으로 삼았다.

$$\begin{aligned}
 \theta_{1,i} &= \theta_{1,s} + \frac{(\theta_{1,e} - \theta_{1,s})}{29}(i-1) \\
 \theta_{2,i} &= \theta_{2,s} + \frac{(\theta_{2,e} - \theta_{2,s})}{29}(i-1) \\
 d_{3,i} &= d_{3,s} + \frac{(d_{3,e} - d_{3,s})}{29}(i-1) \\
 \theta_{4,i} &= \theta_{4,s} + \frac{(\theta_{4,e} - \theta_{4,s})}{29}(i-1)
 \end{aligned}
 \tag{5-2}$$

여기서,  $i$ 는 1~30까지 30개 지점,  $\theta_{k,s}$  ( $k=1\sim4$ )는 시작점에서의 각각의 관절값,  $\theta_{k,e}$  ( $k=1\sim4$ )는 끝점에서의 각각의 관절값을 나타낸다.

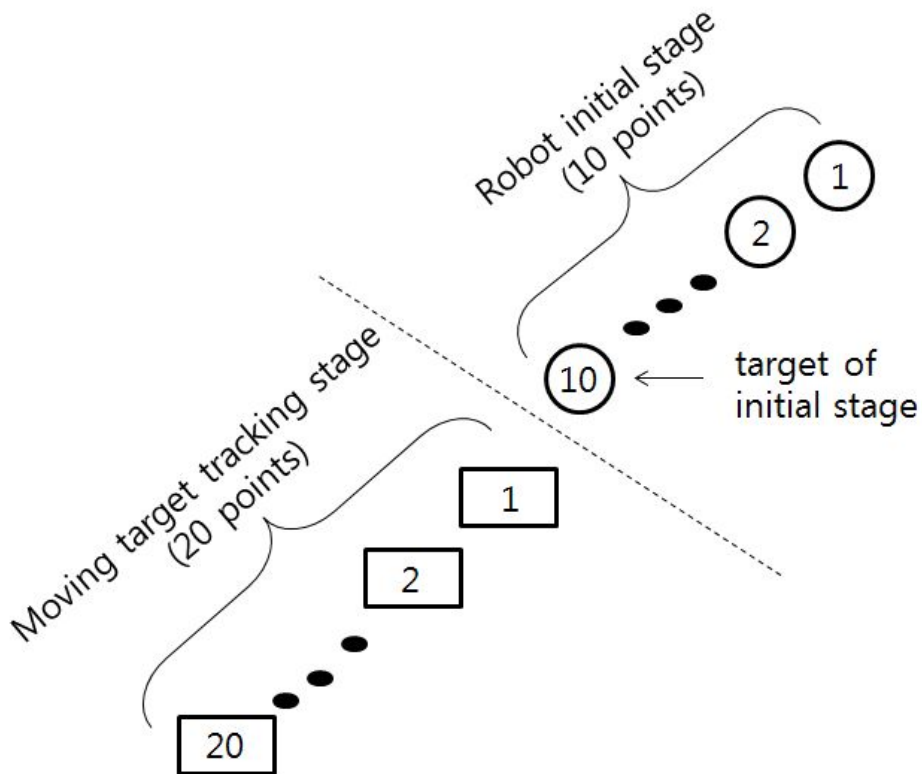


Fig. 5-3 Arbitrary trajectory for robot moving points and the moving target points



## 제 6 장 비전시스템 모델의 적합성 결과

본 연구는  $N-R$  방법을 사용한 일괄처리 기법과 데이터이동 기법의 각각에 대하여 가중치행렬을 적용하지 않은 경우와 가중치행렬을 적용한 경우로 구분하여 비전시스템 모델의 적합성을 보였다.

일괄처리 기법은 4.1.2절의 Fig. 4-2 제어기법에 따라 이동타겟 추적단계에서  $k^*$  번째 이동타겟을 추정하기 위해서는  $(k^* - 1)$  지점까지의 비전데이터를 사용한다. 다시 말하면, 로봇 초기단계 이동지점수( $m$ )와  $(k^* - 1)$  번째 이동지점까지를 합한  $(m + k^* - 1)$  이동지점에 대한 비전데이터를 사용하여 매개변수를 추정한다. 이리하여  $(k^* - 1)$  번째 이동지점에 대해 추정된 매개변수를 사용한 비전시스템 모델값과 획득된 실제 비전데이터값을 비교하여 비전시스템 모델의 적합성을 보였다.

데이터이동 기법은 4.2.2절의 Fig. 4-7 제어기법에 따라 로봇 초기화단계에서 계산된 최적의 이동지점수( $P$ )를 이용하여 이동타겟 추적단계에서  $k^*$  번째 이동타겟을 추정하기 위해서는  $(k^* - 1)$  지점까지  $P$  개 이동지점의 비전데이터를 사용한다. 다시 말하면, 로봇 초기화단계 이동지점수( $m$ )개를 포함한  $k^*$  번째 이동지점까지  $(m + k^*)$  이동지점수에서  $P$ 를 뺀  $(m + k^* - P)$ 로부터  $m$  개와  $(k^* - 1)$  번째 이동지점을 합한  $(m + k^* - 1)$  이동지점까지 비전데이터를 사용하여 카메라 매개변수를 추정한다. 이리하여,  $(k^* - 1)$  번째 이동지점에 대해 추정된 매개변수를 사용한 비전시스템 모델값과 실제 비전데이터값을 비교하여 비전시스템의 적합성을 보였다.

이리하여  $(k^* + 1)$  번째 이동타겟을 추정하기 위해서  $k^*$  번째 지점까지 비전데이터가 필요하므로, 3대 카메라 각각에 대한  $k^*$  번째 지점에서 추정된 비전시스템 모델값과 실제 비전데이터를 비교한 오차값  $e_{r.m.s}^{k^*}$  [38]를 식(6-1)과 같이 정의하였고, 평균 오차값  $e_{avg}$ 는 식(6-2)와 같이 정의하였다. 특히, 첫 번째 타겟을 추정하기 위해서, 로봇 초기화단계의  $m$  번째까지의 비전데이터를 사용하였다.

$$e_{r.m.s}^{k^*} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j^*} \{(e_x^{k^*,j})^2 + (e_y^{k^*,j})^2\}}{2 \times j^*}} \quad (6-1)$$

여기서,  $k^*$ 는  $k^*$ 번째 타겟지점,  $j^*$ 는 cue의 개수( $j^*=4$ ),  $e_x^{k^*,j^*}$ 와  $e_y^{k^*,j^*}$ 는  $k^*$ 번째 이동지점의  $j^*$ 번째 cue에 대한 실제 비전데이터와 비전시스템 모델의 추정값 사이의  $x$ 축과  $y$ 축의 오차값이다.

$$e_{avg} = \frac{\sum_{k^*=1}^n e_{r.m.s}^{k^*}}{n} \tag{6-2}$$

여기서,  $n$ 은 타겟 추적단계에서 필요한 이동 지점수( $n=20$ )을 나타내며,  $e_{r.m.s}^{k^*}$ 는  $k^*$ 번째 이동지점에서의  $r.m.s$ 오차값이다.

## 6.1 가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 기법

### 6.1.1 초기단계

가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 기법의 초기화 단계에서 계산된 각 카메라에 대한 매개변수는 Table 6-1과 같고, 초기화 단계에서 계산된 로봇 관절값은 Table 6-2와 같다.

Table 6-1 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the batch scheme without weighting matrix

Camera	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1	0.610465	0.206682	0.874881	0.963571	1082.751	585.2193
2	0.526424	0.129634	0.877627	1.038553	1250.781	606.5452
3	0.444091	0.086232	0.921116	1.098977	1421.286	556.5467

Table 6-2 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the batch scheme without weighting matrix

Estimated joint values	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$d_{3(mm)}$	$\theta_4(^{\circ})$
	7.920	17.485	106.731	-6.454

## 6.1.2 타겟 추적단계

4.1.2절에서 제시된 제어기법을 사용하여 6.1.1절의 초기단계에서 계산된 6개의 카메라 매개변수(Table 6-1)와 로봇 관절값(Table 6-2)을 타겟 추적단계의 초기값으로 지정하여 로봇이 타겟을 향해 이동하는 동안 각 타겟을 추정하기 위해 필요한 이동지점에서 3대 카메라에 대해 추정된 매개변수를 식(2-9)에 적용하여 계산된 비전시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비전데이터를 식(6-1)과 식(6-2)에 대입하여 계산된 각각의 *r.m.s*오차값은 Table 6-3~Table 6-5와 Fig. 6-1~Fig. 6-3에서 보여주며, 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-6과 Fig. 6-4와 같다.

20개 이동지점에 대한 *r.m.s*오차값은, Table 6-3과 Fig. 6-1에서 보여준 카메라 1에서 0.8382~1.2565(pixel), Table 6-4와 Fig. 6-2에서 보여준 카메라 2에서 0.8687~1.2828(pixel)로 나타났으며, Table 6-5와 Fig. 6-3에서 보여준 카메라 3에서는 0.7686~1.5692(pixel)로 나타났다.

또한, 20개의 이동지점에 대한 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-6과 Fig. 6-4에서 보여준 것 같이, 카메라 1에서 1.0500(pixel)이고, 카메라 2에서 1.0371(pixel)이며, 카메라 3에서 1.1438(pixel)로서 3대의 카메라 모두 작은 오차값을 가짐으로서 본 연구에 사용된 비전시스템 모델이 적합하다는 것을 보이고 있다.

Table 6-3 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 1 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	136.0	136.361	335.700	334.906	-0.361	0.794	0.9330
	2	146.0	146.585	239.500	241.186	-0.585	-1.686	
	3	266.5	267.839	359.625	359.786	-1.339	-0.161	
	4	277.0	278.063	266.333	266.067	-1.063	0.266	
1	1	145.5	145.445	332.500	331.724	0.055	0.776	0.9147
	2	155.0	155.610	236.500	238.079	-0.610	-1.579	
	3	275.5	276.677	356.500	356.648	-1.177	-0.148	
	4	285.5	286.842	263.125	263.002	-1.342	0.123	
2	1	154.5	154.525	329.375	328.561	-0.025	0.814	0.8657
	2	164.0	164.649	233.400	234.977	-0.649	-1.577	
	3	284.5	285.530	353.500	353.532	-1.030	-0.032	
	4	294.5	295.654	260.125	259.948	-1.154	0.177	
3	1	163.5	163.613	326.375	325.401	-0.113	0.974	0.9178
	2	173.0	173.697	230.000	231.860	-0.697	-1.860	
	3	293.5	294.410	350.375	350.420	-0.910	-0.045	
	4	303.5	304.494	257.000	256.880	-0.994	0.120	
4	1	172.5	172.724	323.250	322.271	-0.224	0.979	0.8382
	2	182.5	182.787	227.000	228.759	-0.287	-1.759	
	3	302.5	303.306	347.375	347.343	-0.806	0.032	
	4	312.5	313.370	254.000	253.831	-0.870	0.169	
5	1	182.0	181.835	319.900	319.116	0.165	0.784	1.0732
	2	191.5	191.870	223.625	225.661	-0.370	-2.036	
	3	310.5	312.162	344.500	344.258	-1.662	0.242	
	4	321.0	322.196	251.000	250.803	-1.196	0.197	
6	1	191.0	190.963	316.900	315.986	0.037	0.914	1.0909
	2	201.0	200.972	220.600	222.581	0.028	-1.981	
	3	319.5	321.021	341.500	341.188	-1.521	0.312	
	4	329.5	331.030	247.875	247.783	-1.530	0.092	
7	1	200.5	200.121	313.625	312.855	0.379	0.770	1.0461
	2	210.0	210.099	217.500	219.489	-0.099	-1.989	
	3	328.5	329.907	338.500	338.124	-1.407	0.376	
	4	338.5	339.885	244.875	244.758	-1.385	0.117	

(continued)

8	1	209.5	209.267	310.500	309.737	0.233	0.763	0.9868
	2	219.0	219.222	214.500	216.409	-0.222	-1.909	
	3	337.5	338.799	335.500	335.071	-1.299	0.429	
	4	347.5	348.754	241.875	241.743	-1.254	0.132	
9	1	218.5	218.427	307.500	306.647	0.073	0.853	0.9491
	2	228.5	228.371	211.500	213.349	0.129	-1.849	
	3	346.5	347.704	332.500	332.047	-1.204	0.453	
	4	356.5	357.649	239.000	238.749	-1.149	0.251	
10	1	227.5	227.586	304.500	303.552	-0.086	0.948	1.0098
	2	237.5	237.514	208.125	210.278	-0.014	-2.153	
	3	355.5	356.626	329.500	329.014	-1.126	0.486	
	4	365.5	366.555	235.750	235.741	-1.055	0.009	
11	1	237.0	236.788	301.300	300.462	0.212	0.838	0.9699
	2	247.0	246.697	205.100	207.202	0.303	-2.102	
	3	364.5	365.575	326.375	325.991	-1.075	0.384	
	4	374.5	375.483	232.750	232.731	-0.983	0.019	
12	1	246.5	245.993	298.375	297.368	0.507	1.007	1.1974
	2	256.0	255.870	201.800	204.135	0.130	-2.335	
	3	373.5	374.502	323.375	322.959	-1.002	0.416	
	4	382.5	384.379	229.875	229.725	-1.879	0.150	
13	1	255.5	255.178	295.250	294.290	0.322	0.960	1.0975
	2	265.0	265.034	198.900	201.086	-0.034	-2.186	
	3	382.0	383.426	320.300	319.941	-1.426	0.359	
	4	392.0	393.282	226.900	226.737	-1.282	0.163	
14	1	265.0	264.384	292.100	291.209	0.616	0.891	1.1197
	2	274.0	274.212	195.800	198.029	-0.212	-2.229	
	3	391.5	392.366	317.375	316.920	-0.866	0.455	
	4	400.5	402.194	223.875	223.740	-1.694	0.135	
15	1	274.0	273.598	289.000	288.144	0.402	0.856	1.2565
	2	284.0	283.405	192.700	194.994	0.595	-2.294	
	3	399.5	401.293	314.500	313.922	-1.793	0.578	
	4	409.5	411.100	220.875	220.772	-1.600	0.103	
16	1	283.5	282.847	285.875	285.076	0.653	0.799	1.1443
	2	293.0	292.628	189.500	191.938	0.372	-2.438	
	3	409.5	410.268	311.500	310.923	-0.768	0.577	
	4	418.5	420.049	217.875	217.786	-1.549	0.089	
17	1	293.0	292.092	282.900	282.024	0.908	0.876	1.2114
	2	302.0	301.851	186.500	188.904	0.149	-2.404	
	3	418.0	419.232	308.700	307.942	-1.232	0.758	
	4	427.5	428.991	215.000	214.822	-1.491	0.178	

(continued)

18	1	302.5	301.372	280.000	278.990	1.128	1.010	1.1861
	2	311.5	311.110	183.500	185.875	0.390	-2.375	
	3	427.5	428.227	305.625	304.973	-0.727	0.652	
	4	436.5	437.965	212.125	211.859	-1.465	0.266	
19	1	311.5	310.643	276.750	275.956	0.857	0.794	1.1910
	2	321.0	320.361	180.500	182.855	0.639	-2.355	
	3	436.0	437.211	302.700	302.011	-1.211	0.689	
	4	445.5	446.929	209.125	208.909	-1.429	0.216	

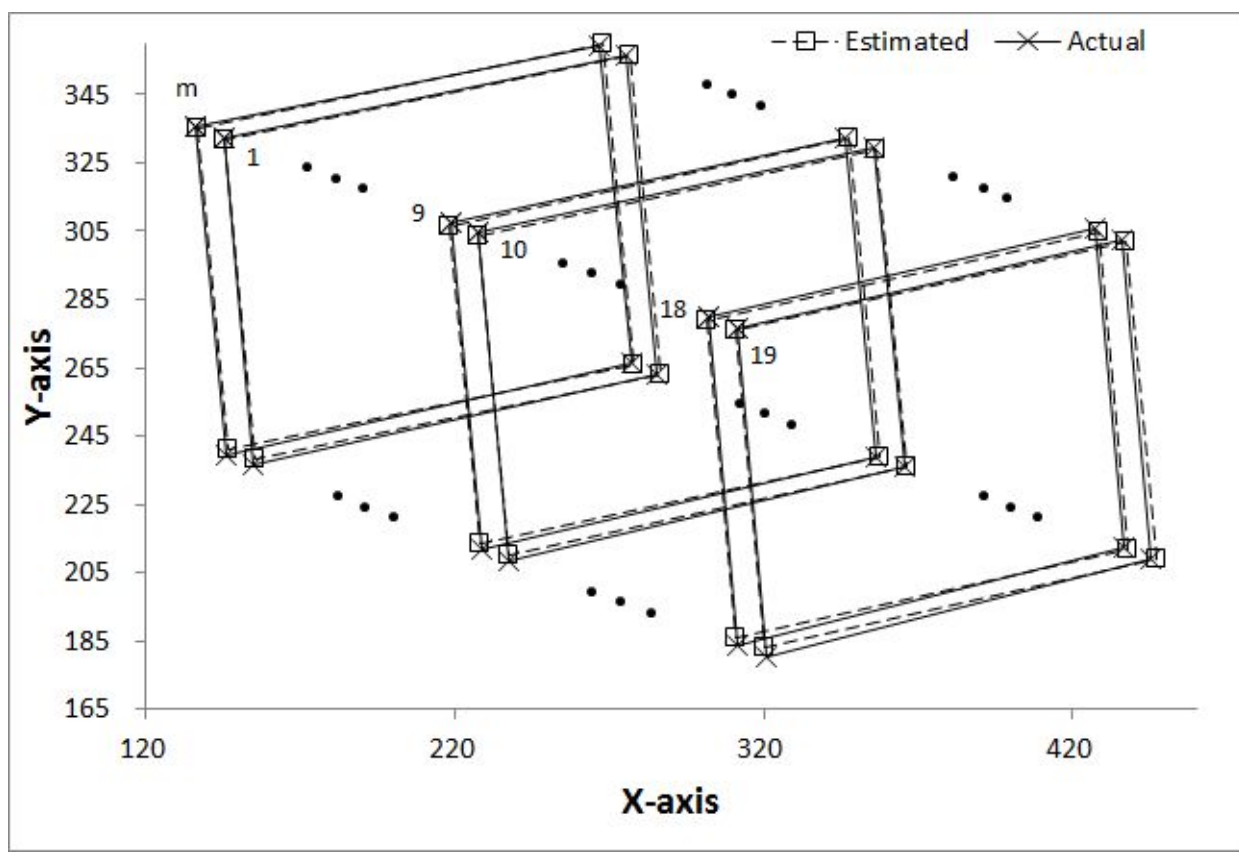


Fig. 6-1 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 1 (unit: pixel)

Table 6-4 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 2 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	151.5	151.522	298.500	297.952	-0.022	0.548	0.8687
	2	160.5	161.307	199.250	200.916	-0.807	-1.666	
	3	299.5	300.649	317.875	317.574	-1.149	0.301	
	4	309.5	310.434	220.375	220.538	-0.934	-0.163	
1	1	159.5	159.834	295.125	294.261	-0.334	0.864	0.8706
	2	169.0	169.637	195.500	197.266	-0.637	-1.766	
	3	308.0	308.936	314.200	313.921	-0.936	0.279	
	4	318.0	318.738	216.500	216.927	-0.738	-0.427	
2	1	168.5	168.232	291.500	290.556	0.268	0.944	0.9832
	2	177.0	178.023	191.500	193.579	-1.023	-2.079	
	3	316.5	317.299	310.625	310.258	-0.799	0.367	
	4	326.5	327.09	212.750	213.280	-0.590	-0.530	
3	1	176.5	176.613	287.500	286.830	-0.113	0.670	1.0005
	2	186.0	186.415	187.700	189.894	-0.415	-2.194	
	3	324.5	325.622	307.125	306.603	-1.122	0.522	
	4	334.5	335.424	209.250	209.668	-0.924	-0.418	
4	1	185.5	185.095	284.000	283.138	0.405	0.862	0.9057
	2	194.0	194.883	184.200	186.201	-0.883	-2.001	
	3	333.5	334.055	303.375	302.963	-0.555	0.412	
	4	343.5	343.843	205.500	206.026	-0.343	-0.526	
5	1	194.0	193.594	280.500	279.475	0.406	1.025	0.9867
	2	203.0	203.379	180.500	182.549	-0.379	-2.049	
	3	341.5	342.469	300.000	299.352	-0.969	0.648	
	4	351.5	352.254	201.875	202.426	-0.754	-0.551	
6	1	202.5	202.183	276.500	275.798	0.317	0.702	0.8815
	2	212.0	211.968	176.700	178.863	0.032	-2.163	
	3	350.5	350.975	296.500	295.764	-0.475	0.736	
	4	360.5	360.76	198.500	198.830	-0.260	-0.330	
7	1	211.5	210.751	273.000	272.108	0.749	0.892	1.0523
	2	220.0	220.52	172.900	175.187	-0.520	-2.287	
	3	358.5	359.449	292.625	292.132	-0.949	0.493	
	4	368.5	369.218	194.625	195.21	-0.718	-0.585	



(continued)

8	1	219.5	219.347	269.500	268.478	0.153	1.022	0.8901
	2	229.0	229.123	169.500	171.544	-0.123	-2.044	
	3	367.5	367.97	289.375	288.571	-0.470	0.804	
	4	377.5	377.746	191.250	191.637	-0.246	-0.387	
9	1	228.5	227.963	265.625	264.805	0.537	0.820	1.0270
	2	237.5	237.736	165.500	167.874	-0.236	-2.374	
	3	375.5	376.497	285.625	284.973	-0.997	0.652	
	4	386.0	386.27	187.500	188.042	-0.270	-0.542	
10	1	237.5	236.635	262.000	261.133	0.865	0.867	1.0538
	2	246.0	246.39	161.800	164.196	-0.390	-2.396	
	3	384.5	385.077	282.000	281.363	-0.577	0.637	
	4	394.5	394.832	183.625	184.426	-0.332	-0.801	
11	1	246.5	245.385	258.500	257.492	1.115	1.008	1.0386
	2	255.0	255.123	158.200	160.536	-0.123	-2.336	
	3	393.5	393.727	278.500	277.789	-0.227	0.711	
	4	403.5	403.465	180.250	180.833	0.035	-0.583	
12	1	254.5	254.055	254.500	253.828	0.445	0.672	1.0317
	2	263.5	263.789	154.500	156.876	-0.289	-2.376	
	3	401.5	402.304	275.000	274.194	-0.804	0.806	
	4	411.5	412.038	176.500	177.243	-0.538	-0.743	
13	1	263.5	262.774	251.250	250.187	0.726	1.063	1.1402
	2	272.0	272.501	150.600	153.224	-0.501	-2.624	
	3	410.5	410.94	271.50	270.617	-0.440	0.883	
	4	420.5	420.667	172.875	173.653	-0.167	-0.778	
14	1	272.5	271.559	247.500	246.548	0.941	0.952	1.0487
	2	281.0	281.272	147.100	149.566	-0.272	-2.466	
	3	419.5	419.632	267.625	267.042	-0.132	0.583	
	4	429.5	429.345	169.375	170.061	0.155	-0.686	
15	1	281.5	280.395	243.750	242.922	1.105	0.828	1.0762
	2	290.0	290.098	143.500	145.915	-0.098	-2.415	
	3	428.5	428.373	264.375	263.488	0.127	0.887	
	4	438.5	438.076	165.750	166.481	0.424	-0.731	
16	1	290.5	289.229	240.500	239.297	1.271	1.203	1.2331
	2	299.0	298.918	139.500	142.283	0.082	-2.783	
	3	436.5	437.088	260.625	259.926	-0.588	0.699	
	4	446.5	446.776	162.250	162.913	-0.276	-0.663	
17	1	299.5	298.122	236.500	235.658	1.378	0.842	1.2198
	2	308.0	307.792	135.800	138.628	0.208	-2.828	
	3	446.0	445.866	257.100	256.358	0.134	0.742	
	4	455.5	455.536	158.500	159.328	-0.036	-0.828	



(continued)

18	1	308.0	307.011	233.000	232.035	0.989	0.965	1.1496
	2	317.0	316.669	132.300	134.989	0.331	-2.689	
	3	454.5	454.647	253.500	252.804	-0.147	0.696	
	4	464.5	464.305	154.875	155.758	0.195	-0.883	
19	1	317.5	315.958	229.375	228.419	1.542	0.956	1.2828
	2	326.0	325.603	128.500	131.355	0.397	-2.855	
	3	463.5	463.476	250.125	249.261	0.024	0.864	
	4	473.5	473.121	151.375	152.196	0.379	-0.821	

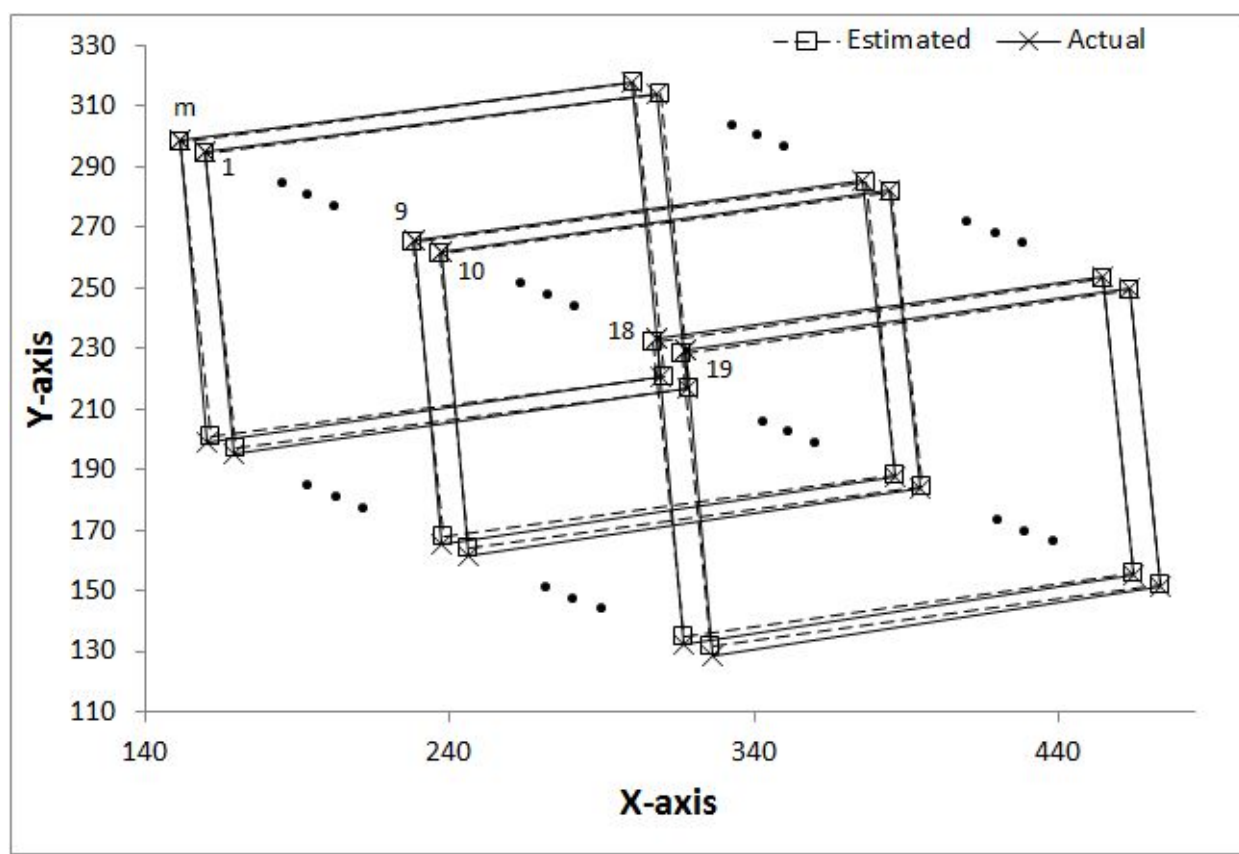


Fig. 6-2 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 2 (unit: pixel)

Table 6-5 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme without weighting matrix in camera 3 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	151.5	151.522	298.500	297.952	-0.022	0.548	0.7686
	2	160.5	161.307	199.250	200.916	-0.807	-1.666	
	3	299.5	300.649	317.875	317.574	-1.149	0.301	
	4	309.5	310.434	220.375	220.538	-0.934	-0.163	
1	1	159.5	159.834	295.125	294.261	-0.334	0.864	0.8214
	2	169.0	169.637	195.500	197.266	-0.637	-1.766	
	3	308.0	308.936	314.200	313.921	-0.936	0.279	
	4	318.0	318.738	216.500	216.927	-0.738	-0.427	
2	1	168.5	168.232	291.500	290.556	0.268	0.944	0.8759
	2	177.0	178.023	191.500	193.579	-1.023	-2.079	
	3	316.5	317.299	310.625	310.258	-0.799	0.367	
	4	326.5	327.090	212.750	213.280	-0.590	-0.530	
3	1	176.5	176.613	287.500	286.830	-0.113	0.670	1.0273
	2	186.0	186.415	187.700	189.894	-0.415	-2.194	
	3	324.5	325.622	307.125	306.603	-1.122	0.522	
	4	334.5	335.424	209.250	209.668	-0.924	-0.418	
4	1	185.5	185.095	284.000	283.138	0.405	0.862	0.9738
	2	194.0	194.883	184.200	186.201	-0.883	-2.001	
	3	333.5	334.055	303.375	302.963	-0.555	0.412	
	4	343.5	343.843	205.500	206.026	-0.343	-0.526	
5	1	194.0	193.594	280.500	279.475	0.406	1.025	0.9825
	2	203.0	203.379	180.500	182.549	-0.379	-2.049	
	3	341.5	342.469	300.000	299.352	-0.969	0.648	
	4	351.5	352.254	201.875	202.426	-0.754	-0.551	
6	1	202.5	202.183	276.500	275.798	0.317	0.702	1.0085
	2	212.0	211.968	176.700	178.863	0.032	-2.163	
	3	350.5	350.975	296.500	295.764	-0.475	0.736	
	4	360.5	360.760	198.500	198.830	-0.260	-0.330	
7	1	211.5	210.751	273.000	272.108	0.749	0.892	1.0613
	2	220.0	220.520	172.900	175.187	-0.520	-2.287	
	3	358.5	359.449	292.625	292.132	-0.949	0.493	
	4	368.5	369.218	194.625	195.210	-0.718	-0.585	

(continued)

8	1	219.5	219.347	269.500	268.478	0.153	1.022	1.1291
	2	229.0	229.123	169.500	171.544	-0.123	-2.044	
	3	367.5	367.970	289.375	288.571	-0.470	0.804	
	4	377.5	377.746	191.250	191.637	-0.246	-0.387	
9	1	228.5	227.963	265.625	264.805	0.537	0.820	1.0398
	2	237.5	237.736	165.500	167.874	-0.236	-2.374	
	3	375.5	376.497	285.625	284.973	-0.997	0.652	
	4	386.0	386.270	187.500	188.042	-0.270	-0.542	
10	1	237.5	236.635	262.000	261.133	0.865	0.867	1.1453
	2	246.0	246.390	161.800	164.196	-0.390	-2.396	
	3	384.5	385.077	282.000	281.363	-0.577	0.637	
	4	394.5	394.832	183.625	184.426	-0.332	-0.801	
11	1	246.5	245.385	258.500	257.492	1.115	1.008	1.1698
	2	255.0	255.123	158.200	160.536	-0.123	-2.336	
	3	393.5	393.727	278.500	277.789	-0.227	0.711	
	4	403.5	403.465	180.250	180.833	0.035	-0.583	
12	1	254.5	254.055	254.500	253.828	0.445	0.672	1.2478
	2	263.5	263.789	154.500	156.876	-0.289	-2.376	
	3	401.5	402.304	275.000	274.194	-0.804	0.806	
	4	411.5	412.038	176.500	177.243	-0.538	-0.743	
13	1	263.5	262.774	251.250	250.187	0.726	1.063	1.2517
	2	272.0	272.501	150.600	153.224	-0.501	-2.624	
	3	410.5	410.940	271.500	270.617	-0.440	0.883	
	4	420.5	420.667	172.875	173.653	-0.167	-0.778	
14	1	272.5	271.559	247.500	246.548	0.941	0.952	1.2962
	2	281.0	281.272	147.100	149.566	-0.272	-2.466	
	3	419.5	419.632	267.625	267.042	-0.132	0.583	
	4	429.5	429.345	169.375	170.061	0.155	-0.686	
15	1	281.5	280.395	243.750	242.922	1.105	0.828	1.2976
	2	290.0	290.098	143.500	145.915	-0.098	-2.415	
	3	428.5	428.373	264.375	263.488	0.127	0.887	
	4	438.5	438.076	165.750	166.481	0.424	-0.731	
16	1	290.5	289.229	240.500	239.297	1.271	1.203	1.3109
	2	299.0	298.918	139.500	142.283	0.082	-2.783	
	3	436.5	437.088	260.625	259.926	-0.588	0.699	
	4	446.5	446.776	162.250	162.913	-0.276	-0.663	
17	1	299.5	298.122	236.500	235.658	1.378	0.842	1.4730
	2	308.0	307.792	135.800	138.628	0.208	-2.828	
	3	446.0	445.866	257.100	256.358	0.134	0.742	
	4	455.5	455.536	158.500	159.328	-0.036	-0.828	

(continued)

18	1	308.0	307.011	233.000	232.035	0.989	0.965	1.4266
	2	317.0	316.669	132.300	134.989	0.331	-2.689	
	3	454.5	454.647	253.500	252.804	-0.147	0.696	
	4	464.5	464.305	154.875	155.758	0.195	-0.883	
19	1	317.5	315.958	229.375	228.419	1.542	0.956	1.5692
	2	326.0	325.603	128.500	131.355	0.397	-2.855	
	3	463.5	463.476	250.125	249.261	0.024	0.864	
	4	473.5	473.121	151.375	152.196	0.379	-0.821	

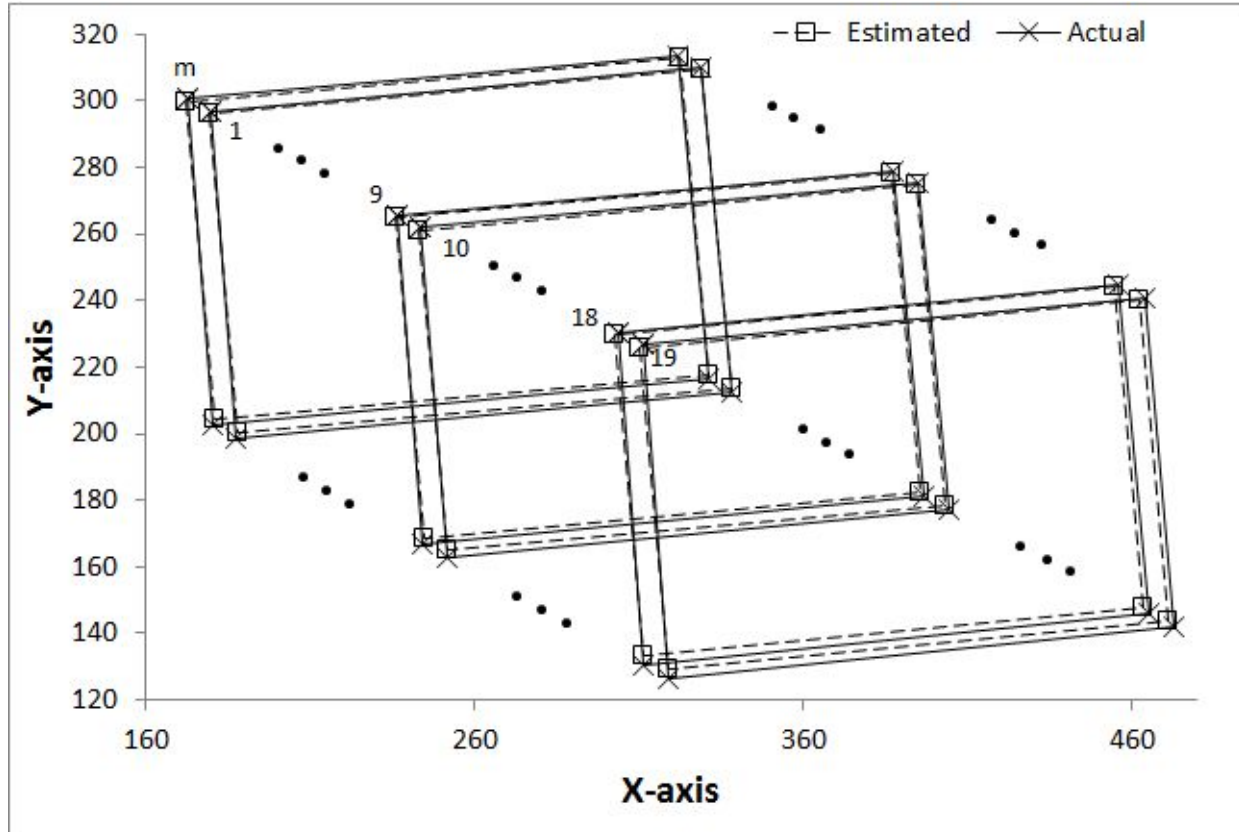


Fig. 6-3 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme without weighting matrix in camera 3 (unit: pixel)

Table 6-6 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme without weighting matrix (unit: pixel)

Moving point	Camera 1	Camera 2	Camera 3
m	0.9331	0.8687	0.7686
1	0.9147	0.8706	0.8214
2	0.8658	0.9832	0.8759
3	0.9178	1.0005	1.0273
4	0.8382	0.9057	0.9738
5	1.0732	0.9867	0.9825
6	1.0910	0.8815	1.0085
7	1.0461	1.0523	1.0613
8	0.9869	0.8901	1.1291
9	0.9491	1.0270	1.0398
10	1.0099	1.0538	1.1453
11	0.9700	1.0386	1.1698
12	1.1974	1.0317	1.2478
13	1.0976	1.1402	1.2517
14	1.1198	1.0487	1.2962
15	1.2565	1.0762	1.2976
16	1.1444	1.2331	1.3109
17	1.2114	1.2198	1.4730
18	1.1862	1.1496	1.4266
19	1.1911	1.2828	1.5692
Average	1.0500	1.0371	1.1438

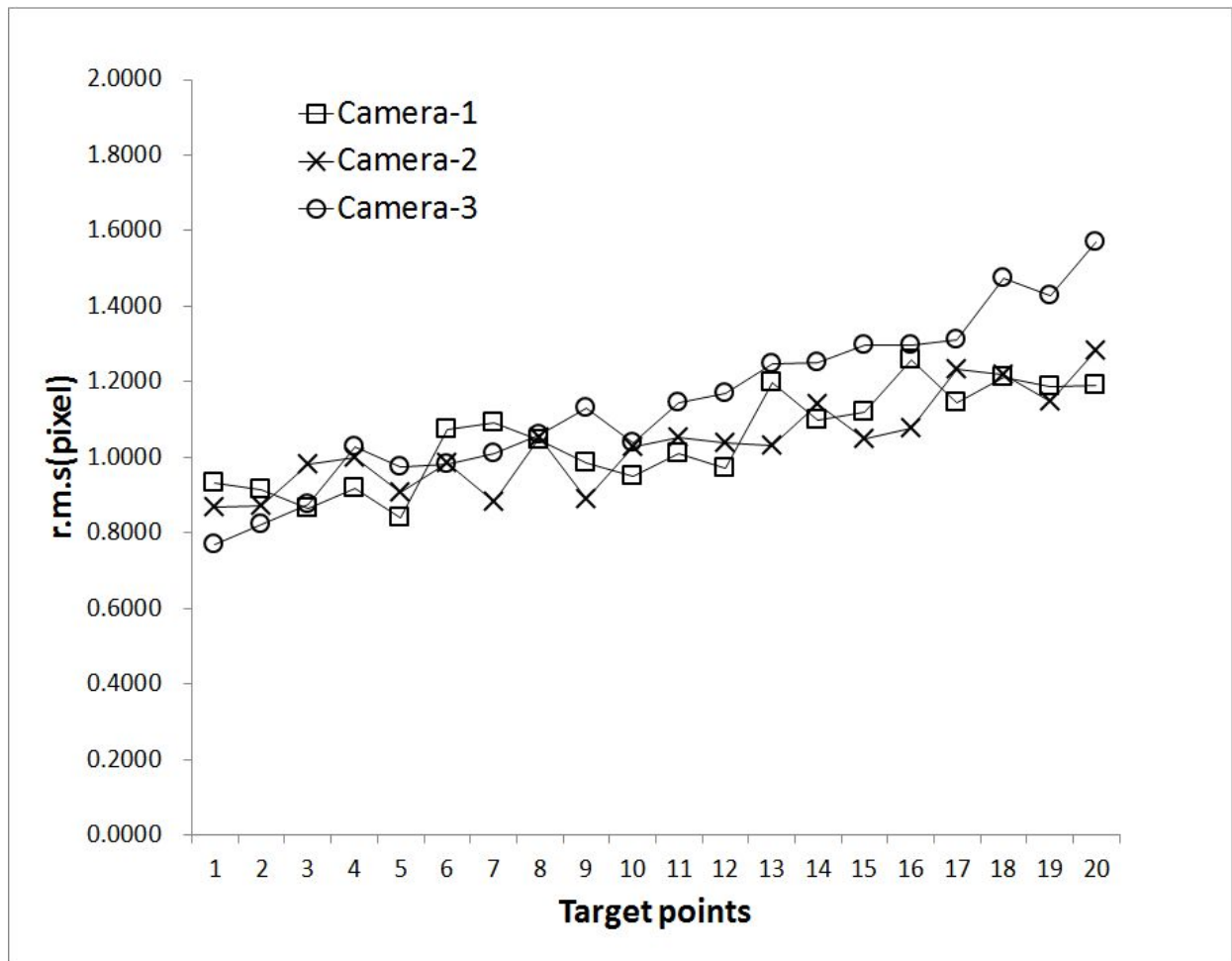


Fig. 6-4 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme without weighting matrix (unit: pixel)

## 6.2 가중치행렬을 적용한 일괄처리 기법

### 6.2.1 초기단계

실시간 이동타겟 추적실험을 위해, 로봇의 초기단계에서 Fig. 4-4의 (step1)~(step5)의 계산과정을 통해 최적의 가중치계수를 추정하였다. 초기 가중치계수의 변화에 따라 추정된 위치값과 실제 위치값에 대한 오차값의 변화는 Table 6-7과 Fig. 6-5와 같다. Fig. 6-5에서와 같이 오차값은 가중치계수가 0.00일 때 가장 큰 값에서 시작하여 점점 감소하다가 다시 증가하게 되는데, 본 연구에서는 가중치계수( $\alpha$ )가 0.21일 때 최소의 오차값을 보이고 있어 최적의 가중치계수( $\alpha=0.21$ )로 설정하였다. 또한, 식(3-5)과 식(3-6)을 통해 최적의 가중치행렬  $W$  를 계산하여 로봇 이동단계에서 실제 이동타겟 값을 추정할 때 사용한다.

Table 6-7 Errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) using the batch scheme in the robot's initial stage

$\alpha$	Error(mm)	$\alpha$	Error(mm)
0.00	0.4302	0.12	0.1981
0.01	0.3860	0.13	0.1923
0.02	0.3484	0.14	0.1872
0.03	0.3189	0.15	0.1831
0.04	0.2945	0.16	0.1791
0.05	0.2743	0.17	0.1758
0.06	0.2577	0.18	0.1729
0.07	0.2439	0.19	0.1691
0.08	0.2319	0.20	0.1668
0.09	0.2216	<b>0.21</b>	<b>0.1646</b>
0.10	0.2126	0.22	0.1654
0.11	0.2049		

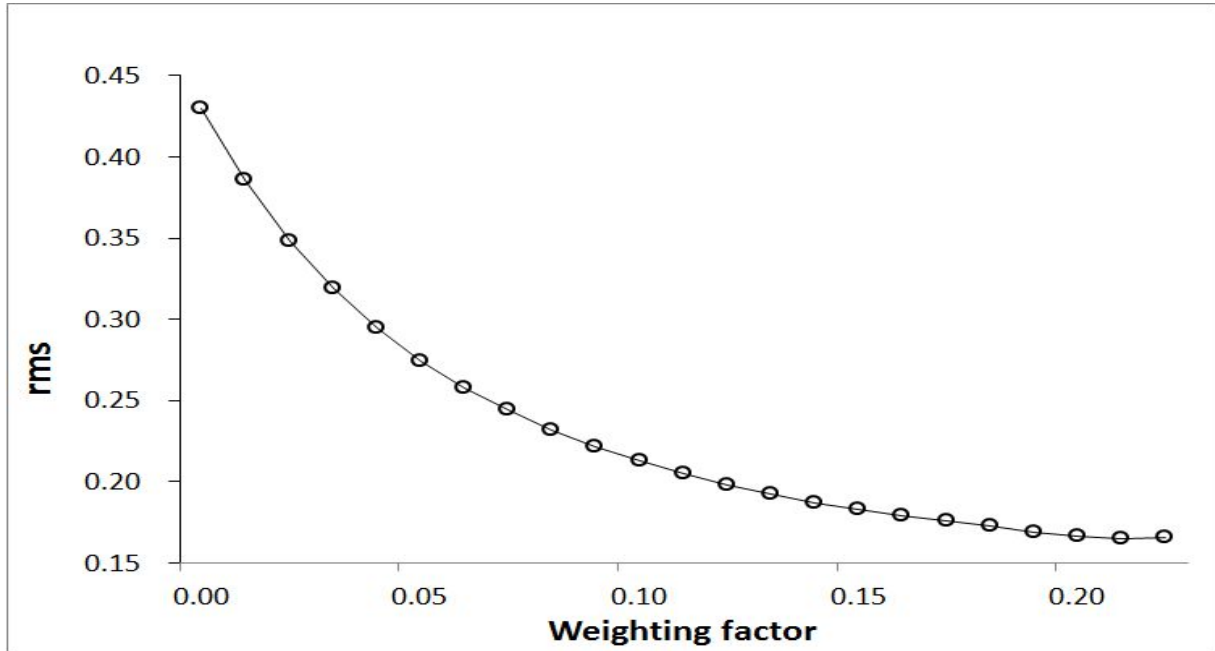


Fig. 6-5 Errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) in the robot's initial stage

가중치행렬을 적용한 일괄처리 기법의 로봇 초기화 단계에서 계산된 각 카메라에 대한 매개변수는 Table 6-8과 같고, 최적의 가중치계수( $\alpha$ )가 0.21일 때 로봇 관절값은 Table 6-9와 같다.

Table 6-8 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the batch scheme with  $\alpha=0.21$

Camera	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1	0.73820	0.52267	1.04145	1.14363	790.04614	153.68520
2	0.60524	0.42181	1.11765	1.23545	1272.89526	86.08708
3	0.38236	0.24021	1.18839	1.27253	1807.90979	7.24455

Table 6-9 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$

Estimated joint values	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$d_3(\text{mm})$	$\theta_4(^{\circ})$
	7.920	17.485	106.731	-6.454



## 6.2.2 타겟 추적단계

타겟 근처에서 획득한 최근의 비전데이터에 비중을 두기 위해 4.1.3절에서 제시된 제어기법을 사용하여 이동타겟 추적실험을 진행하였다. 6.2.1절에서 추정된 최적의 가중치계수를 사용하여 로봇이 타겟을 향해 이동하는 동안 각 타겟지점에서 3대 카메라에 대해 추정된 매개변수를 식(2-8)에 적용하여 계산된 비전시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비전데이터를 식(6-1)과 식(6-2)에 적용하여 계산된 각각의 타겟에 대한 *r.m.s*오차값은 Table 6-10~Table 6-12와 Fig. 6-6~Fig. 6-8과 같으며, 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-13과 Fig. 6-9에 나타내었다.

20개 타겟지점에 대한 *r.m.s*오차값은, Table 6-10과 Fig. 6-6에서 보여준 카메라 1에서는 0.4509~0.5899(pixel), Table 6-11과 Fig. 6-7에서 보여준 카메라 2에서는 0.4388~0.7109(pixel), Table 6-12와 Fig. 6-8에서 보여준 카메라 3에서는 0.5901~0.8317(pixel)로 나타났으며, 각 카메라의 평균 *r.m.s*오차값 역시 Table 6-13과 Fig. 6-9에서 보여준 것과 같이 카메라 1에서는 0.5174(pixel), 카메라 2에서는 0.5443(pixel), 카메라 3에서는 0.7065 (pixel)로, 3대의 카메라에서 모두 작은 오차값을 보임으로서 본 논문에서 제시한 비전시스템 모델 및 가중치행렬 모델이 적합함을 알 수 있다.

Table 6-10 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 1 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	136.0	136.005	335.700	335.004	-0.005	0.696	0.5401
	2	146.0	146.141	239.500	240.431	-0.141	-0.931	
	3	266.5	266.878	359.625	360.253	-0.378	-0.628	
	4	277.0	277.015	266.333	265.681	-0.015	0.652	
1	1	145.5	145.389	332.500	331.816	0.111	0.684	0.4856
	2	155.0	155.206	236.500	237.266	-0.206	-0.766	
	3	275.5	275.779	356.500	357.081	-0.279	-0.581	
	4	285.5	285.596	263.125	262.531	-0.096	0.594	
2	1	154.5	154.428	329.375	328.681	0.072	0.694	0.4790
	2	164.0	164.236	233.400	234.154	-0.236	-0.754	
	3	284.5	284.730	353.500	354.017	-0.230	-0.517	
	4	294.5	294.538	260.125	259.490	-0.038	0.635	
3	1	163.5	163.457	326.375	325.566	0.043	0.809	0.5528
	2	173.0	173.244	230.000	230.954	-0.244	-0.954	
	3	293.5	293.726	350.375	350.961	-0.226	-0.586	
	4	303.5	303.513	257.000	256.349	-0.013	0.651	
4	1	172.5	172.600	323.250	322.480	-0.100	0.770	0.5184
	2	182.5	182.521	227.000	227.858	-0.021	-0.858	
	3	302.5	302.655	347.375	347.960	-0.155	-0.585	
	4	312.5	312.576	254.000	253.338	-0.076	0.662	
5	1	182.0	181.861	319.900	319.241	0.139	0.659	0.5618
	2	191.5	191.721	223.625	224.647	-0.221	-1.022	
	3	310.5	311.104	344.500	344.962	-0.604	-0.462	
	4	321.0	320.964	251.000	250.369	0.036	0.631	
6	1	191.0	191.117	316.900	316.179	-0.117	0.721	0.5100
	2	201.0	200.960	220.600	221.528	0.040	-0.928	
	3	319.5	319.845	341.500	341.970	-0.345	-0.470	
	4	329.5	329.688	247.875	247.319	-0.188	0.556	
7	1	200.5	200.437	313.625	312.994	0.063	0.631	0.4759
	2	210.0	210.154	217.500	218.366	-0.154	-0.866	
	3	328.5	328.843	338.500	338.925	-0.343	-0.425	
	4	338.5	338.560	244.875	244.297	-0.060	0.578	

(continued)

8	1	209.5	209.478	310.500	309.875	0.022	0.625	0.4509
	2	219.0	219.207	214.500	215.284	-0.207	-0.784	
	3	337.5	337.808	335.500	335.899	-0.308	-0.399	
	4	347.5	347.537	241.875	241.307	-0.037	0.568	
9	1	218.5	218.632	307.500	306.839	-0.132	0.661	0.4611
	2	228.5	228.491	211.500	212.279	0.009	-0.779	
	3	346.5	346.736	332.500	332.949	-0.236	-0.449	
	4	356.5	356.595	239.000	238.389	-0.095	0.611	
10	1	227.5	227.677	304.500	303.779	-0.177	0.721	0.5011
	2	237.5	237.529	208.125	209.105	-0.029	-0.980	
	3	355.5	355.744	329.500	329.940	-0.244	-0.440	
	4	365.5	365.596	235.750	235.266	-0.096	0.484	
11	1	237.0	237.124	301.300	300.653	-0.124	0.647	0.4801
	2	247.0	246.931	205.100	205.987	0.069	-0.887	
	3	364.5	364.767	326.375	326.903	-0.267	-0.528	
	4	374.5	374.573	232.750	232.237	-0.073	0.513	
12	1	246.5	246.591	298.375	297.527	-0.091	0.848	0.5900
	2	256.0	256.055	201.800	202.856	-0.055	-1.056	
	3	373.5	373.519	323.375	323.858	-0.019	-0.483	
	4	382.5	382.983	229.875	229.188	-0.483	0.687	
13	1	255.5	255.537	295.250	294.460	-0.037	0.790	0.5529
	2	265.0	265.171	198.900	199.842	-0.171	-0.942	
	3	382.0	382.396	320.300	320.866	-0.396	-0.566	
	4	392.0	392.031	226.900	226.248	-0.031	0.652	
14	1	265.0	264.939	292.100	291.313	0.061	0.787	0.5358
	2	274.0	274.295	195.800	196.715	-0.295	-0.915	
	3	391.5	391.481	317.375	317.797	0.019	-0.422	
	4	400.5	400.837	223.875	223.199	-0.337	0.676	
15	1	274.0	274.212	289.000	288.305	-0.212	0.695	0.5369
	2	284.0	283.830	192.700	193.695	0.170	-0.995	
	3	399.5	400.003	314.500	314.941	-0.503	-0.441	
	4	409.5	409.621	220.875	220.330	-0.121	0.545	
16	1	283.5	283.628	285.875	285.154	-0.128	0.721	0.5243
	2	293.0	293.028	189.500	190.503	-0.028	-1.003	
	3	409.5	409.423	311.500	311.912	0.077	-0.412	
	4	418.5	418.822	217.875	217.261	-0.322	0.614	
17	1	293.0	292.901	282.900	282.124	0.099	0.776	0.5271
	2	302.0	302.283	186.500	187.463	-0.283	-0.963	
	3	418.0	418.256	308.700	309.012	-0.256	-0.312	
	4	427.5	427.638	215.000	214.351	-0.138	0.649	

(continued)

18	1	302.5	302.417	280.000	279.124	0.083	0.876	0.5619
	2	311.5	311.720	183.500	184.444	-0.220	-0.944	
	3	427.5	427.461	305.625	306.067	0.039	-0.442	
	4	436.5	436.765	212.125	211.387	-0.265	0.738	
19	1	311.5	311.608	276.750	276.051	-0.108	0.699	0.5025
	2	321.0	321.026	180.500	181.429	-0.026	-0.929	
	3	436.0	436.249	302.700	303.129	-0.249	-0.429	
	4	445.5	445.667	209.125	208.507	-0.167	0.618	

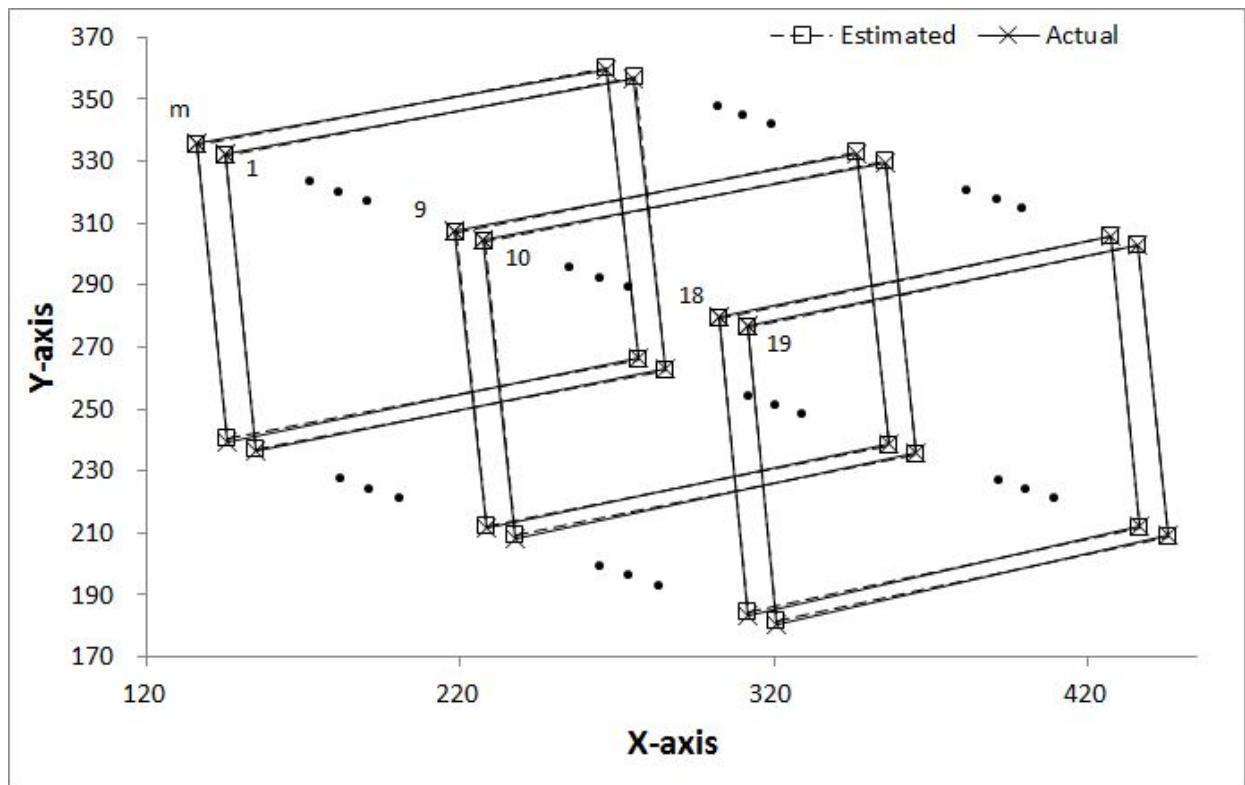


Fig. 6-6 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 1 (unit: pixel)

Table 6-11 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 2 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	151.5	151.338	298.500	298.003	0.162	0.497	0.4389
	2	160.5	160.801	199.250	200.041	-0.301	-0.791	
	3	299.5	300.153	317.875	318.060	-0.653	-0.185	
	4	309.5	309.616	220.375	220.097	-0.116	0.278	
1	1	159.5	159.529	295.125	294.443	-0.029	0.682	0.4542
	2	169.0	169.097	195.500	196.382	-0.097	-0.882	
	3	308.0	308.554	314.200	314.453	-0.554	-0.253	
	4	318.0	318.121	216.500	216.393	-0.121	0.107	
2	1	168.5	168.146	291.500	290.772	0.354	0.728	0.5535
	2	177.0	177.481	191.500	192.534	-0.481	-1.034	
	3	316.5	317.155	310.625	310.815	-0.655	-0.190	
	4	326.5	326.490	212.750	212.577	0.010	0.173	
3	1	176.5	176.503	287.500	286.899	-0.003	0.601	0.5143
	2	186.0	186.010	187.700	188.773	-0.010	-1.073	
	3	324.5	325.221	307.125	307.243	-0.721	-0.118	
	4	334.5	334.728	209.250	209.117	-0.228	0.133	
4	1	185.5	185.127	284.000	283.320	0.373	0.680	0.5005
	2	194.0	194.479	184.200	185.064	-0.479	-0.864	
	3	333.5	334.093	303.375	303.567	-0.593	-0.192	
	4	343.5	343.445	205.500	205.312	0.055	0.188	
5	1	194.0	193.788	280.500	279.751	0.212	0.749	0.5269
	2	203.0	203.167	180.500	181.473	-0.167	-0.973	
	3	341.5	342.277	300.000	300.063	-0.777	-0.063	
	4	351.5	351.656	201.875	201.785	-0.156	0.090	
6	1	202.5	202.448	276.500	275.947	0.052	0.553	0.4467
	2	212.0	211.982	176.700	177.669	0.018	-0.969	
	3	350.5	351.044	296.500	296.576	-0.544	-0.076	
	4	360.5	360.579	198.500	198.298	-0.079	0.202	
7	1	211.5	211.119	273.000	272.260	0.381	0.740	0.5923
	2	220.0	220.391	172.900	173.990	-0.391	-1.090	
	3	358.5	359.348	292.625	292.796	-0.848	-0.171	
	4	368.5	368.620	194.625	194.526	-0.120	0.099	

(continued)

8	1	219.5	219.490	269.500	268.756	0.010	0.744	0.4669
	2	229.0	229.044	169.500	170.411	-0.044	-0.911	
	3	367.5	368.058	289.375	289.414	-0.558	-0.039	
	4	377.5	377.612	191.250	191.069	-0.112	0.181	
9	1	228.5	228.206	265.625	264.945	0.294	0.680	0.5975
	2	237.5	237.700	165.500	166.643	-0.200	-1.143	
	3	375.5	376.470	285.625	285.749	-0.970	-0.124	
	4	386.0	385.964	187.500	187.447	0.036	0.053	
10	1	237.5	237.094	262.000	261.299	0.406	0.701	0.5617
	2	246.0	246.369	161.800	162.867	-0.369	-1.067	
	3	384.5	385.267	282.000	282.059	-0.767	-0.059	
	4	394.5	394.542	183.625	183.627	-0.042	-0.002	
11	1	246.5	246.070	258.500	257.738	0.430	0.762	0.5499
	2	255.0	255.348	158.200	159.213	-0.348	-1.013	
	3	393.5	394.177	278.500	278.576	-0.677	-0.076	
	4	403.5	403.455	180.250	180.050	0.045	0.200	
12	1	254.5	254.346	254.500	253.915	0.154	0.585	0.5304
	2	263.5	263.713	154.500	155.536	-0.213	-1.036	
	3	401.5	402.344	275.000	274.912	-0.844	0.088	
	4	411.5	411.711	176.500	176.534	-0.211	-0.034	
13	1	263.5	263.111	251.250	250.417	0.389	0.833	0.6172
	2	272.0	272.427	150.600	151.806	-0.427	-1.206	
	3	410.5	411.243	271.500	271.423	-0.743	0.077	
	4	420.5	420.559	172.875	172.813	-0.059	0.062	
14	1	272.5	272.074	247.500	246.740	0.426	0.760	0.5595
	2	281.0	281.374	147.100	148.145	-0.374	-1.045	
	3	419.5	420.173	267.625	267.781	-0.673	-0.156	
	4	429.5	429.473	169.375	169.186	0.027	0.189	
15	1	281.5	281.054	243.750	243.119	0.446	0.631	0.5071
	2	290.0	290.383	143.500	144.450	-0.383	-0.950	
	3	428.5	429.123	264.375	264.298	-0.623	0.077	
	4	438.5	438.451	165.750	165.629	0.049	0.121	
16	1	290.5	290.076	240.500	239.524	0.424	0.976	0.7109
	2	299.0	299.270	139.500	140.864	-0.270	-1.364	
	3	436.5	437.455	260.625	260.731	-0.955	-0.106	
	4	446.5	446.649	162.250	162.071	-0.149	0.179	
17	1	299.5	299.149	236.500	235.768	0.351	0.732	0.5685
	2	308.0	308.268	135.800	137.024	-0.268	-1.224	
	3	446.0	446.556	257.100	257.117	-0.556	-0.017	
	4	455.5	455.676	158.500	158.373	-0.176	0.127	

(continued)

18	1	308.0	307.827	233.000	232.180	0.173	0.820	0.5736
	2	317.0	317.091	132.300	133.433	-0.091	-1.133	
	3	454.5	455.292	253.500	253.573	-0.792	-0.073	
	4	464.5	464.556	154.875	154.826	-0.056	0.049	
19	1	317.5	317.070	229.375	228.571	0.430	0.804	0.6164
	2	326.0	326.263	128.500	129.724	-0.263	-1.224	
	3	463.5	464.290	250.125	250.096	-0.790	0.029	
	4	473.5	473.482	151.375	151.250	0.018	0.125	

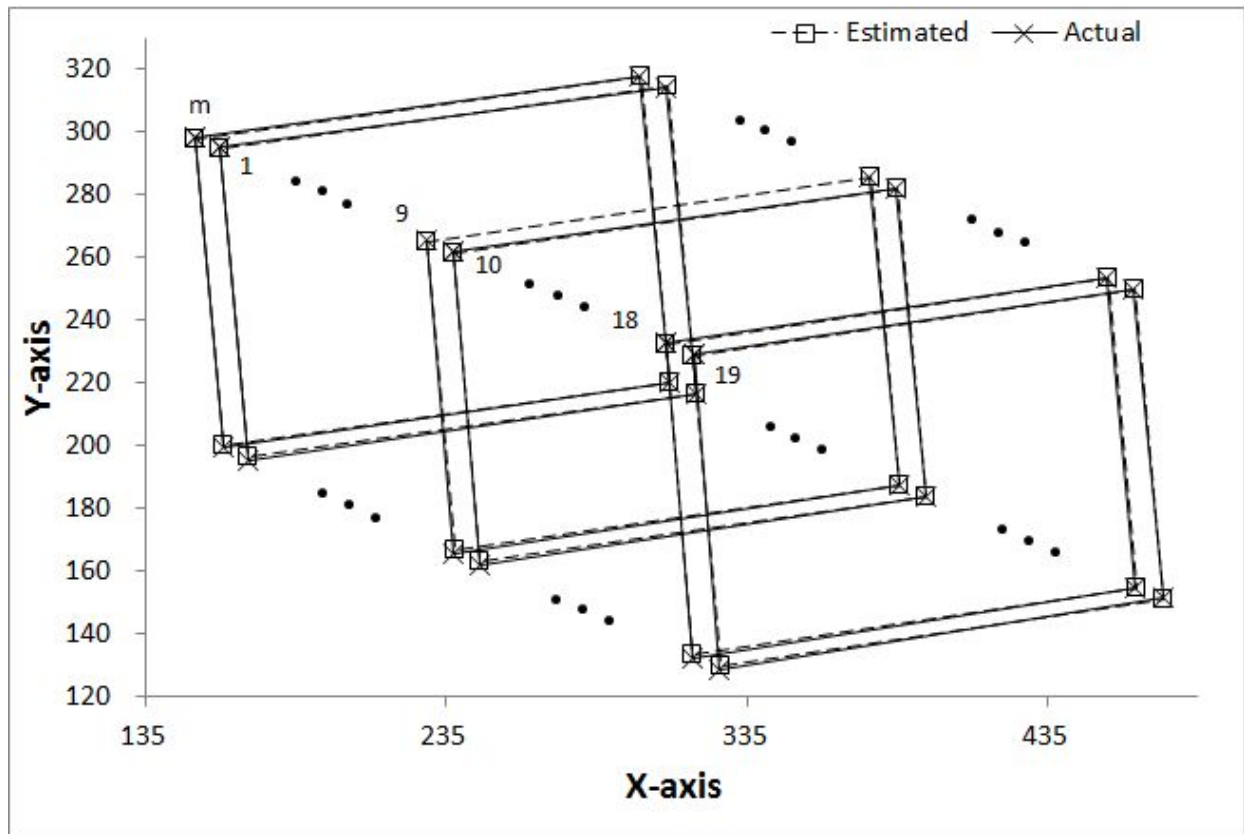


Fig. 6-7 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 2 (unit: pixel)



Table 6-12 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 3 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	172.5	171.596	300.625	300.034	0.904	0.591	0.5902
	2	180.5	180.661	202.500	203.622	-0.161	-1.122	
	3	322.0	322.531	313.333	313.197	-0.531	0.136	
	4	331.5	331.596	216.625	216.785	-0.096	-0.160	
1	1	179.5	178.438	296.625	296.111	1.062	0.514	0.6412
	2	187.5	187.556	198.500	199.636	-0.056	-1.136	
	3	329.0	329.552	309.833	309.434	-0.552	0.399	
	4	338.5	338.670	212.625	212.958	-0.170	-0.333	
2	1	186.5	185.410	292.875	292.307	1.090	0.568	0.6492
	2	194.0	194.322	194.500	195.710	-0.322	-1.210	
	3	336.5	336.865	305.750	305.519	-0.365	0.231	
	4	345.5	345.778	208.750	208.922	-0.278	-0.172	
3	1	194.0	192.614	289.000	288.395	1.386	0.605	0.7618
	2	201.0	201.506	190.600	191.709	-0.506	-1.109	
	3	343.5	344.335	302.000	301.757	-0.835	0.243	
	4	353.5	353.227	204.875	205.072	0.273	-0.197	
4	1	200.5	199.610	285.250	284.521	0.890	0.729	0.6272
	2	208.5	208.572	186.500	187.695	-0.072	-1.195	
	3	351.0	351.575	298.167	297.996	-0.575	0.171	
	4	360.5	360.537	201.000	201.170	-0.037	-0.170	
5	1	207.5	206.420	281.500	280.650	1.080	0.850	0.7464
	2	215.5	215.536	182.500	183.775	-0.036	-1.275	
	3	357.5	358.403	294.500	294.249	-0.903	0.251	
	4	367.5	367.519	197.125	197.374	-0.019	-0.249	
6	1	215.0	213.821	277.500	276.834	1.179	0.666	0.7131
	2	222.5	222.698	178.625	179.909	-0.198	-1.284	
	3	365.5	365.985	290.750	290.379	-0.485	0.371	
	4	374.5	374.863	193.250	193.454	-0.363	-0.204	
7	1	222.5	221.327	273.500	272.867	1.173	0.633	0.7032
	2	230.0	230.113	174.700	175.961	-0.113	-1.261	
	3	373.0	373.538	286.833	286.485	-0.538	0.348	
	4	382.0	382.324	189.333	189.579	-0.324	-0.246	



(continued)

8	1	229.5	228.337	269.500	269.017	1.163	0.483	0.6997
	2	236.5	237.127	170.625	171.889	-0.627	-1.264	
	3	380.5	380.929	283.000	282.674	-0.429	0.326	
	4	389.5	389.719	185.500	185.547	-0.219	-0.047	
9	1	236.5	235.436	265.625	265.064	1.064	0.561	0.6792
	2	244.0	244.279	166.700	167.933	-0.279	-1.233	
	3	387.5	388.045	279.125	278.758	-0.545	0.367	
	4	396.5	396.887	181.375	181.628	-0.387	-0.253	
10	1	243.5	242.629	261.875	261.180	0.871	0.695	0.6307
	2	251.5	251.603	162.625	163.830	-0.103	-1.205	
	3	395.0	395.596	275.333	275.067	-0.596	0.266	
	4	404.5	404.570	177.500	177.717	-0.070	-0.217	
11	1	251.5	250.294	258.000	257.274	1.206	0.726	0.7543
	2	259.0	259.081	158.700	160.013	-0.081	-1.313	
	3	402.5	403.127	271.500	271.094	-0.627	0.406	
	4	411.5	411.914	173.500	173.833	-0.414	-0.333	
12	1	258.5	257.436	254.125	253.416	1.064	0.709	0.7081
	2	266.0	266.338	154.600	155.911	-0.338	-1.311	
	3	410.0	410.665	267.667	267.385	-0.665	0.282	
	4	419.5	419.567	169.750	169.880	-0.067	-0.130	
13	1	266.0	264.846	250.100	249.437	1.154	0.663	0.7668
	2	273.5	273.703	150.500	151.932	-0.203	-1.432	
	3	417.5	418.092	263.875	263.430	-0.592	0.445	
	4	426.5	426.949	165.625	165.926	-0.449	-0.301	
14	1	273.5	272.335	246.375	245.596	1.165	0.779	0.7425
	2	281.0	281.202	146.700	147.968	-0.202	-1.268	
	3	425.0	425.765	260.000	259.654	-0.765	0.346	
	4	434.5	434.631	161.750	162.026	-0.131	-0.276	
15	1	281.0	279.918	242.300	241.670	1.082	0.630	0.7368
	2	288.5	288.678	142.625	144.028	-0.178	-1.403	
	3	433.0	433.370	256.167	255.718	-0.370	0.449	
	4	441.5	442.129	157.875	158.077	-0.629	-0.202	
16	1	288.5	287.323	238.500	237.694	1.177	0.806	0.7888
	2	296.0	296.188	138.600	140.023	-0.188	-1.423	
	3	440.0	440.844	252.167	251.881	-0.844	0.286	
	4	449.5	449.709	154.000	154.210	-0.209	-0.210	
17	1	296.5	295.083	234.500	233.825	1.417	0.675	0.8317
	2	303.5	303.921	134.625	136.019	-0.421	-1.394	
	3	448.0	448.785	248.667	248.145	-0.785	0.522	
	4	457.5	457.623	150.125	150.340	-0.123	-0.215	

(continued)

18	1	303.5	302.620	230.500	229.851	0.880	0.649	0.6660
	2	311.5	311.533	130.625	131.961	-0.033	-1.336	
	3	456.0	456.482	244.667	244.300	-0.482	0.367	
	4	465.0	465.394	146.200	146.410	-0.394	-0.210	
19	1	311.5	310.428	226.625	225.957	1.072	0.668	0.6945
	2	319.0	319.244	126.600	127.941	-0.244	-1.341	
	3	464.0	464.467	240.667	240.388	-0.467	0.279	
	4	473.0	473.283	142.200	142.371	-0.283	-0.171	

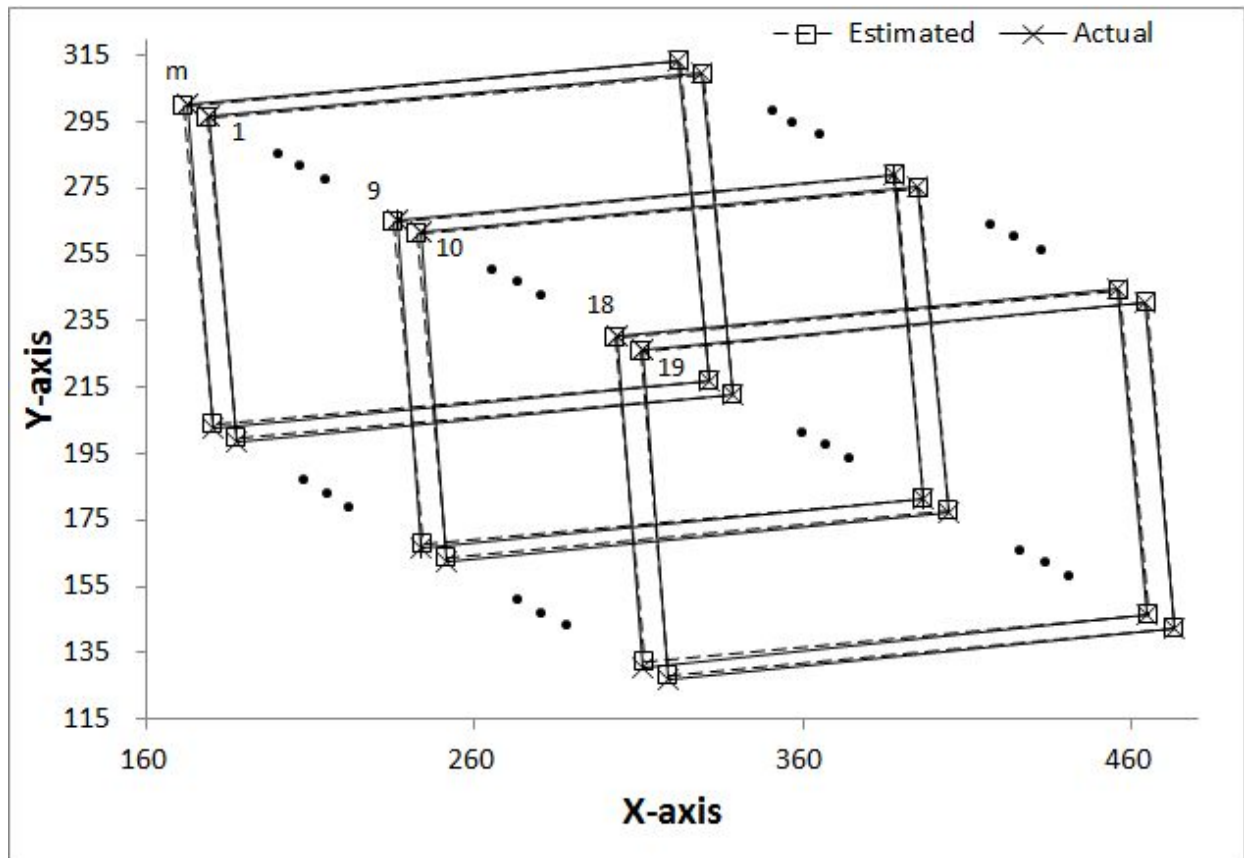


Fig. 6-8 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  in camera 3 (unit: pixel)

Table 6-13 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: pixel)

Moving point	Camera 1	Camera 2	Camera 3
m	0.5401	0.4388	0.5901
1	0.4856	0.4541	0.6412
2	0.4790	0.5535	0.6492
3	0.5527	0.5143	0.7617
4	0.5183	0.5005	0.6271
5	0.5617	0.5268	0.7463
6	0.5099	0.4467	0.7130
7	0.4758	0.5922	0.7031
8	0.4509	0.4668	0.6997
9	0.4611	0.5974	0.6791
10	0.5011	0.5617	0.6307
11	0.4801	0.5498	0.7543
12	0.5899	0.5303	0.7080
13	0.5528	0.6171	0.7667
14	0.5357	0.5595	0.7425
15	0.5368	0.5071	0.7367
16	0.5243	0.7109	0.7887
17	0.5270	0.5685	0.8317
18	0.5618	0.5736	0.6659
19	0.5024	0.6163	0.6944
Average	0.5174	0.5443	0.7065

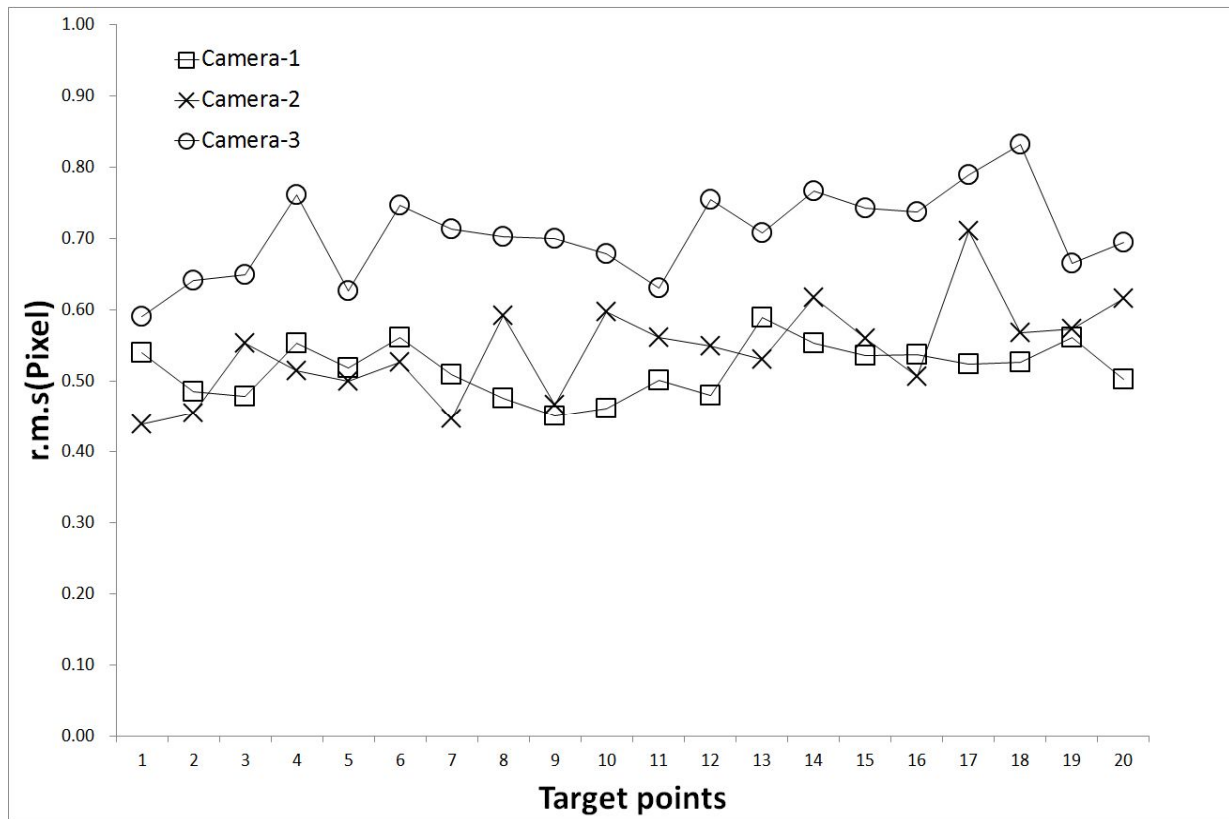


Fig. 6-9 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: pixel)

## 6.3 가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 기법

### 6.3.1 초기단계

데이터이동 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 가중치행렬을 단위행렬로 만들기 위해 가중치계수,  $\alpha=0$ 을 사용하고, 로봇의 초기단계에서 4.2.2절의 Fig. 4-7의 (step 1)~(step 5)를 이용하여 최적의 이동지점수를 추정하였다.

이동지점수의 변화에 따라 추정된 위치값과 실제 위치값에 대한 오차값의 변화는 Table 6-14와 Fig. 6-10에서 보여주며, 오차값은 데이터 개수가 10일 때 가장 크고 데이터 개수가 감소함에 따라 점점 감소하다가 일정 지점에서부터 다시 천천히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이리하여, 본 연구에서는 로봇이동 지점수가 5일 때 최소의 오차값을 보이기 때문에 최적의 이동지점수  $P$ 를 5로 설정하였다.

Table 6-14 Errors according to the variation of robot moving points( $P$ ) using the data moving scheme with  $\alpha=0$  in the robot's initial stage (unit: mm)

$P$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Error	0.4304	0.4288	0.4132	0.4060	0.3620	<b>0.3468</b>	0.3493	0.3614	0.3740	0.3751

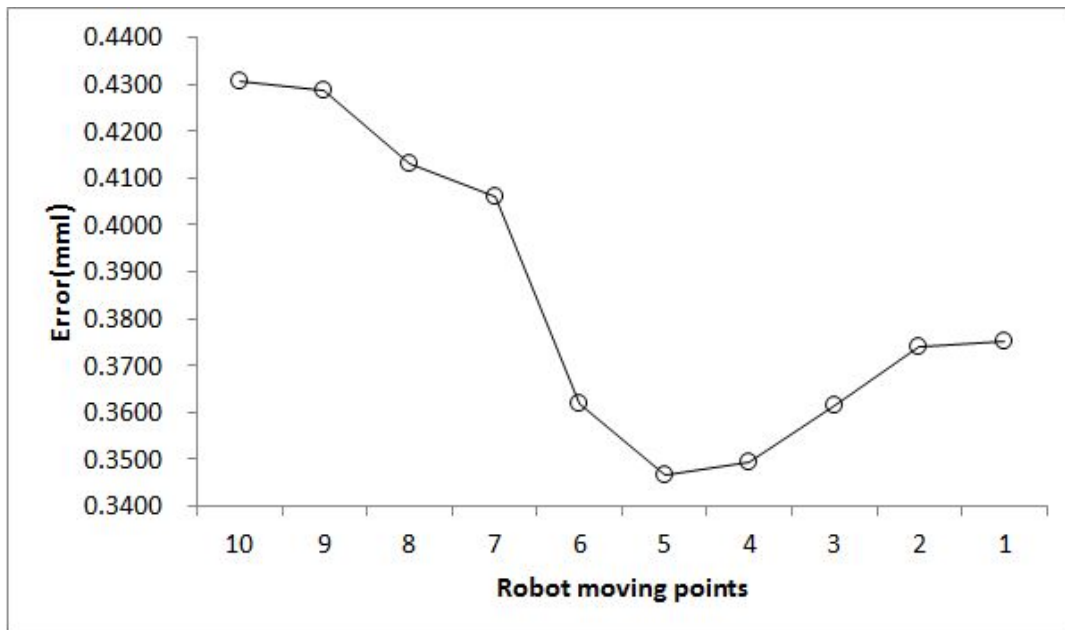


Fig. 6-10 Errors according to the variation of robot moving points( $P$ ) using the data moving scheme with  $\alpha=0$  in the robot's initial stage (unit: mm)

로봇 초기단계에서 최적의 로봇이동 지점수  $P$ 가 5일 때 추정된 카메라 매개변수는 Table 6-15와 같고, 초기 관절값은 Table 6-16과 같으며, 이동타겟 추적단계에서 실제 이동타겟 값을 추정할 때 초기값으로 사용된다.

Table 6-15 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$

Camera	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1	0.7348	0.5194	1.0430	1.1441	800.6839	153.1335
2	0.5978	0.4148	1.1220	1.2330	1291.4780	79.9846
3	0.3853	0.2478	1.1921	1.2629	1790.3260	-8.8394

Table 6-16 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$

Estimated joint values	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$d_{3(mm)}$	$\theta_4(^{\circ})$
	7.799	17.753	106.821	-6.479

### 6.3.2 타겟 추적단계

6.3.1절에서 계산된 최적 이동지점수( $P=5$ )를 사용하여 로봇이 이동하는 동안 획득된 비전데이터에 동등한 가중치를 주기위해 4.2.2절에서 제시된 제어기법을 사용하여 이동타겟 추적실험을 진행하였다. 로봇이 타겟을 향해 이동하는 동안 각 이동지점에서 3대의 카메라에 대해 추정된 매개변수를 식(2-9)에 적용하여 계산한 비전시스템 모델값과 카메라에서 획득된 실제 비전데이터를 식(6-1)과 식(6-2)에 적용하여 계산된 각각의 타겟에 대한 *r.m.s*오차값은 Table 6-17~Table 6-19와 Fig. 6-11~Fig. 6-13에서 보여주고 있으며, 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-20과 Fig. 6-14에 나타내었다.

20개 타겟에 대한 각 카메라의 *r.m.s*오차값은, Table 6-17과 Fig. 6-11에서 보여준 카메라 1에서 0.5191~0.7150(pixel), Table 6-18과 Fig. 6-12에서 보여준 카메라 2에서 0.5365~0.7965(pixel), Table 6-19과 Fig. 6-13에서 보여준 카메라 3에서 0.6585~0.8287(pixel)로 나타났으며, 각 카메라의 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-20과 Fig. 6-14에서 보여준 것과 같이 카메라 1에서는 0.6103(pixel), 카메라 2에서는 0.6938(pixel), 카메라 3에서는 0.7405(pixel)로 3대의 카메라에서 평균 *r.m.s*오차값이 작게 나타남으로서, 본 연구에 사용된 비전시스템 모델은 데이터이동 기법에서도 적합함을 보여주었다.

Table 6-17 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 1 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	136.0	136.295	335.700	335.058	-0.295	0.642	0.6807
	2	146.0	146.529	239.500	240.587	-0.529	-1.087	
	3	266.5	267.345	359.625	360.197	-0.845	-0.572	
	4	277.0	277.579	266.333	265.725	-0.579	0.608	
1	1	145.5	145.511	332.500	331.850	-0.011	0.650	0.6188
	2	155.0	155.578	236.500	237.386	-0.578	-0.886	
	3	275.5	276.146	356.500	357.074	-0.646	-0.574	
	4	285.5	286.213	263.125	262.609	-0.713	0.516	
2	1	154.5	154.615	329.375	328.722	-0.115	0.653	0.5764
	2	164.0	164.634	233.400	234.233	-0.634	-0.833	
	3	284.5	284.991	353.500	354.028	-0.491	-0.528	
	4	294.5	295.010	260.125	259.540	-0.510	0.585	
3	1	163.5	163.734	326.375	325.596	-0.234	0.779	0.6272
	2	173.0	173.703	230.000	231.028	-0.703	-1.028	
	3	293.5	293.848	350.375	351.000	-0.348	-0.625	
	4	303.5	303.817	257.000	256.432	-0.317	0.568	
4	1	172.5	172.905	323.250	322.467	-0.405	0.783	0.5587
	2	182.5	182.791	227.000	227.869	-0.291	-0.869	
	3	302.5	302.805	347.375	347.950	-0.305	-0.575	
	4	312.5	312.691	254.000	253.352	-0.191	0.648	
5	1	182.0	182.103	319.900	319.302	-0.103	0.598	0.7019
	2	191.5	191.931	223.625	224.716	-0.431	-1.091	
	3	310.5	311.655	344.500	344.900	-1.155	-0.400	
	4	321.0	321.482	251.000	250.314	-0.482	0.686	
6	1	191.0	191.261	316.900	316.195	-0.261	0.705	0.6768
	2	201.0	201.127	220.600	221.585	-0.127	-0.985	
	3	319.5	320.463	341.500	341.911	-0.963	-0.411	
	4	329.5	330.329	247.875	247.301	-0.829	0.574	
7	1	200.5	200.498	313.625	313.070	0.002	0.555	0.6009
	2	210.0	210.364	217.500	218.420	-0.364	-0.920	
	3	328.5	329.292	338.500	338.926	-0.792	-0.426	
	4	338.5	339.159	244.875	244.276	-0.659	0.599	



(continued)

8	1	209.5	209.722	310.500	309.948	-0.222	0.552	0.5558
	2	219.0	219.585	214.500	215.307	-0.585	-0.807	
	3	337.5	338.112	335.500	335.942	-0.612	-0.442	
	4	347.5	347.975	241.875	241.302	-0.475	0.573	
9	1	218.5	218.949	307.500	306.864	-0.449	0.636	0.5211
	2	228.5	228.837	211.500	212.185	-0.337	-0.685	
	3	346.5	346.922	332.500	333.004	-0.422	-0.504	
	4	356.5	356.810	239.000	238.325	-0.310	0.675	
10	1	227.5	228.123	304.500	303.798	-0.623	0.702	0.5863
	2	237.5	237.996	208.125	209.091	-0.496	-0.966	
	3	355.5	355.897	329.500	330.002	-0.397	-0.502	
	4	365.5	365.771	235.750	235.295	-0.271	0.455	
11	1	237.0	237.344	301.300	300.699	-0.344	0.601	0.5192
	2	247.0	247.205	205.100	205.983	-0.205	-0.883	
	3	364.5	364.916	326.375	326.994	-0.416	-0.619	
	4	374.5	374.776	232.750	232.278	-0.276	0.472	
12	1	246.5	246.617	298.375	297.607	-0.117	0.768	0.7151
	2	256.0	256.368	201.800	202.872	-0.368	-1.072	
	3	373.5	373.885	323.375	323.984	-0.385	-0.609	
	4	382.5	383.636	229.875	229.248	-1.136	0.627	
13	1	255.5	255.827	295.250	294.532	-0.327	0.718	0.6691
	2	265.0	265.571	198.900	199.817	-0.571	-0.917	
	3	382.0	382.797	320.300	320.969	-0.797	-0.669	
	4	392.0	392.540	226.900	226.254	-0.540	0.646	
14	1	265.0	265.132	292.100	291.416	-0.132	0.684	0.6483
	2	274.0	274.707	195.800	196.678	-0.707	-0.878	
	3	391.5	391.790	317.375	317.936	-0.290	-0.561	
	4	400.5	401.365	223.875	223.197	-0.865	0.678	
15	1	274.0	274.444	289.000	288.331	-0.444	0.669	0.6856
	2	284.0	284.013	192.700	193.635	-0.013	-0.935	
	3	399.5	400.598	314.500	314.951	-1.098	-0.451	
	4	409.5	410.168	220.875	220.254	-0.668	0.621	
16	1	283.5	283.805	285.875	285.251	-0.305	0.624	0.5507
	2	293.0	293.227	189.500	190.465	-0.227	-0.965	
	3	409.5	409.596	311.500	312.016	-0.096	-0.516	
	4	418.5	419.018	217.875	217.229	-0.518	0.646	
17	1	293.0	293.070	282.900	282.200	-0.070	0.700	0.5863
	2	302.0	302.500	186.500	187.395	-0.500	-0.895	
	3	418.0	418.554	308.700	309.090	-0.554	-0.390	
	4	427.5	427.984	215.000	214.285	-0.484	0.715	

(continued)

18	1	302.5	302.509	280.000	279.153	-0.009	0.847	0.5719
	2	311.5	311.817	183.500	184.293	-0.317	-0.793	
	3	427.5	427.629	305.625	306.169	-0.129	-0.544	
	4	436.5	436.937	212.125	211.309	-0.437	0.816	
19	1	311.5	311.828	276.750	276.128	-0.328	0.622	0.5555
	2	321.0	321.225	180.500	181.269	-0.225	-0.769	
	3	436.0	436.547	302.700	303.265	-0.547	-0.565	
	4	445.5	445.944	209.125	208.406	-0.444	0.719	

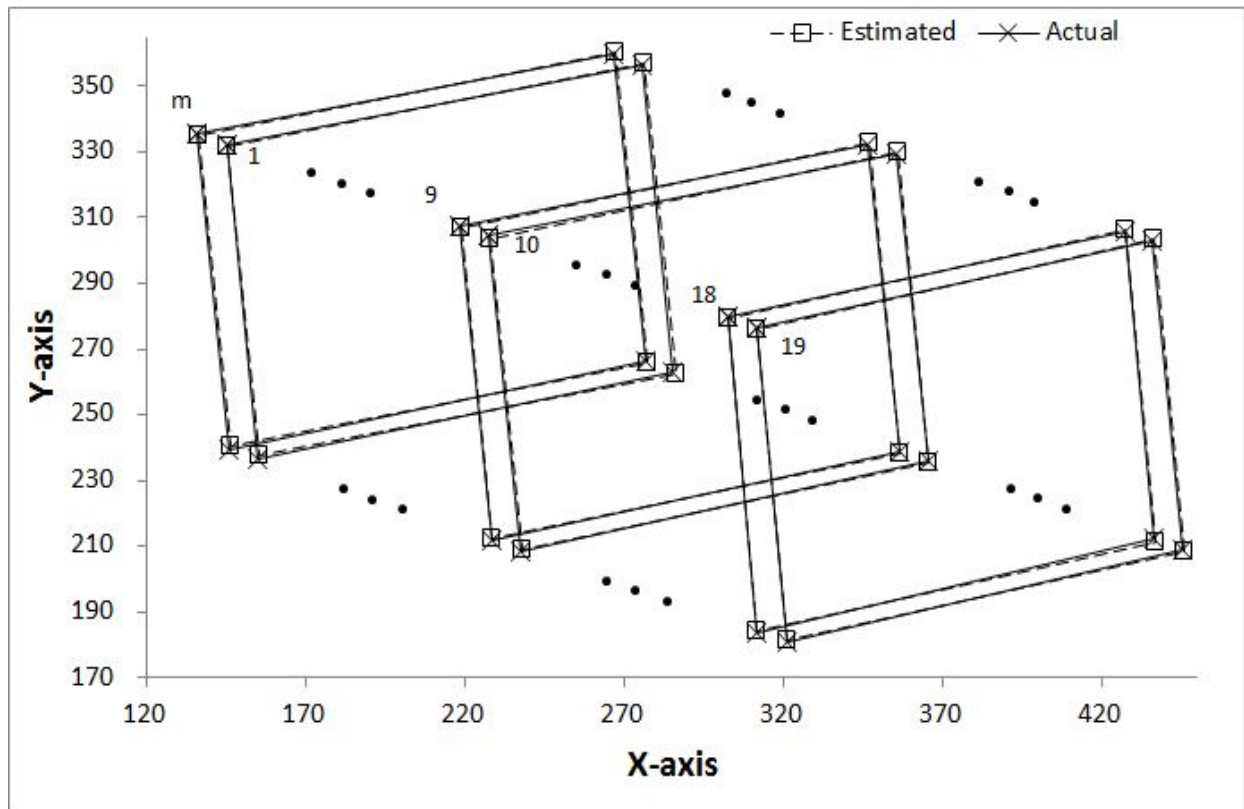


Fig. 6-11 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 1 (unit: pixel)

Table 6-18 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 2 (unit: pixel)

Moving point	cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	151.5	151.870	298.500	298.132	-0.370	0.368	0.7159
	2	160.5	161.424	199.250	200.245	-0.924	-0.995	
	3	299.5	300.674	317.875	318.052	-1.174	-0.177	
	4	309.5	310.228	220.375	220.165	-0.728	0.210	
1	1	159.5	160.191	295.125	294.468	-0.691	0.657	0.7123
	2	169.0	169.797	195.500	196.593	-0.797	-1.093	
	3	308.0	308.969	314.200	314.420	-0.969	-0.220	
	4	318.0	318.575	216.500	216.545	-0.575	-0.045	
2	1	168.5	168.613	291.500	290.802	-0.113	0.698	0.7775
	2	177.0	178.162	191.500	192.824	-1.162	-1.324	
	3	316.5	317.464	310.625	310.808	-0.964	-0.183	
	4	326.5	327.013	212.750	212.830	-0.513	-0.080	
3	1	176.5	177.110	287.500	287.079	-0.610	0.421	0.7864
	2	186.0	186.644	187.700	189.042	-0.644	-1.342	
	3	324.5	325.748	307.125	307.219	-1.248	-0.094	
	4	334.5	335.282	209.250	209.182	-0.782	0.068	
4	1	185.5	185.648	284.000	283.416	-0.148	0.584	0.6540
	2	194.0	195.141	184.200	185.234	-1.141	-1.034	
	3	333.5	334.236	303.375	303.682	-0.736	-0.307	
	4	343.5	343.728	205.500	205.499	-0.228	0.001	
5	1	194.0	194.224	280.500	279.849	-0.224	0.651	0.7097
	2	203.0	203.733	180.500	181.531	-0.733	-1.031	
	3	341.5	342.697	300.000	300.143	-1.197	-0.143	
	4	351.5	352.207	201.875	201.824	-0.707	0.051	
6	1	202.5	202.937	276.500	276.177	-0.437	0.323	0.5411
	2	212.0	212.455	176.700	177.733	-0.455	-1.033	
	3	350.5	351.265	296.500	296.655	-0.765	-0.155	
	4	360.5	360.783	198.500	198.211	-0.283	0.289	
7	1	211.5	211.599	273.000	272.473	-0.099	0.527	0.7873
	2	220.0	221.091	172.900	174.022	-1.091	-1.122	
	3	358.5	359.731	292.625	293.054	-1.231	-0.429	
	4	368.5	369.223	194.625	194.604	-0.723	0.021	

(continued)

8	1	219.5	220.199	269.500	268.888	-0.699	0.612	0.6241
	2	229.0	229.725	169.500	170.416	-0.725	-0.916	
	3	367.5	368.333	289.375	289.496	-0.833	-0.121	
	4	377.5	377.858	191.250	191.024	-0.358	0.226	
9	1	228.5	228.874	265.625	265.211	-0.374	0.414	0.7655
	2	237.5	238.441	165.500	166.711	-0.941	-1.211	
	3	375.5	376.824	285.625	285.967	-1.324	-0.342	
	4	386.0	386.392	187.500	187.467	-0.392	0.033	
10	1	237.5	237.586	262.000	261.490	-0.086	0.510	0.7263
	2	246.0	247.102	161.800	162.964	-1.102	-1.164	
	3	384.5	385.490	282.000	282.337	-0.990	-0.337	
	4	394.5	395.005	183.625	183.811	-0.505	-0.186	
11	1	246.5	246.491	258.500	257.930	0.009	0.570	0.5898
	2	255.0	255.900	158.200	159.184	-0.900	-0.984	
	3	393.5	394.224	278.500	278.835	-0.724	-0.335	
	4	403.5	403.633	180.250	180.090	-0.133	0.160	
12	1	254.5	255.102	254.500	254.212	-0.602	0.288	0.7901
	2	263.5	264.537	154.500	155.532	-1.037	-1.032	
	3	401.5	402.831	275.000	275.219	-1.331	-0.219	
	4	411.5	412.266	176.500	176.539	-0.766	-0.039	
13	1	263.5	263.895	251.250	250.572	-0.395	0.678	0.7818
	2	272.0	273.296	150.600	151.784	-1.296	-1.184	
	3	410.5	411.504	271.500	271.642	-1.004	-0.142	
	4	420.5	420.905	172.875	172.854	-0.405	0.021	
14	1	272.5	272.742	247.500	246.933	-0.242	0.567	0.6490
	2	281.0	282.056	147.100	148.074	-1.056	-0.974	
	3	419.5	420.332	267.625	268.045	-0.832	-0.420	
	4	429.5	429.645	169.375	169.186	-0.145	0.189	
15	1	281.5	281.628	243.750	243.316	-0.128	0.434	0.5366
	2	290.0	290.921	143.500	144.348	-0.921	-0.848	
	3	428.5	429.187	264.375	264.558	-0.687	-0.183	
	4	438.5	438.480	165.750	165.591	0.020	0.159	
16	1	290.5	290.539	240.500	239.740	-0.039	0.760	0.7965
	2	299.0	299.827	139.500	140.619	-0.827	-1.119	
	3	436.5	437.860	260.625	261.080	-1.360	-0.455	
	4	446.5	447.148	162.250	161.960	-0.648	0.290	
17	1	299.5	299.593	236.500	236.068	-0.093	0.432	0.6195
	2	308.0	308.762	135.800	136.894	-0.762	-1.094	
	3	446.0	446.820	257.100	257.491	-0.820	-0.391	
	4	455.5	455.989	158.500	158.317	-0.489	0.183	

(continued)

18	1	308.0	308.519	233.000	232.420	-0.519	0.580	0.6744
	2	317.0	317.732	132.300	133.293	-0.732	-0.993	
	3	454.5	455.614	253.500	253.886	-1.114	-0.386	
	4	464.5	464.828	154.875	154.759	-0.328	0.116	
19	1	317.5	317.607	229.375	228.818	-0.107	0.557	0.6387
	2	326.0	326.809	128.500	129.572	-0.809	-1.072	
	3	463.5	464.488	250.125	250.415	-0.988	-0.290	
	4	473.5	473.689	151.375	151.169	-0.189	0.206	

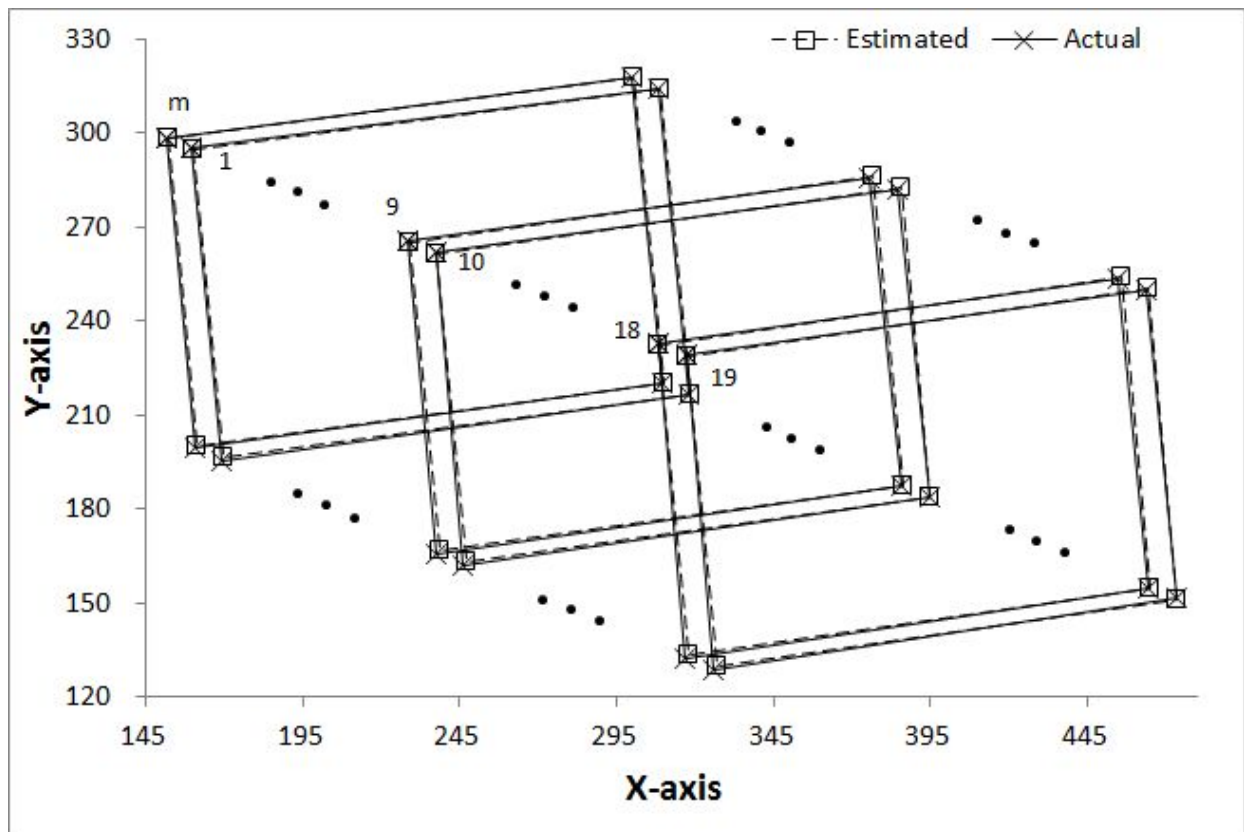


Fig. 6-12 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 2 (unit: pixel)

Table 6-19 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 3 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	172.5	171.811	300.625	300.217	0.689	0.408	0.6585
	2	180.5	180.692	202.500	204.008	-0.192	-1.508	
	3	322.0	322.415	313.333	313.383	-0.415	-0.050	
	4	331.5	331.297	216.625	217.174	0.203	-0.549	
1	1	179.5	178.571	296.625	296.339	0.929	0.286	0.6922
	2	187.5	187.516	198.500	200.000	-0.016	-1.500	
	3	329.0	329.385	309.833	309.603	-0.385	0.230	
	4	338.5	338.330	212.625	213.264	0.170	-0.639	
2	1	186.5	185.486	292.875	292.501	1.014	0.374	0.7126
	2	194.0	194.387	194.500	196.053	-0.387	-1.553	
	3	336.5	336.490	305.750	305.763	0.010	-0.013	
	4	345.5	345.392	208.750	209.316	0.108	-0.566	
3	1	194.0	192.680	289.000	288.595	1.320	0.405	0.8287
	2	201.0	201.500	190.600	192.089	-0.500	-1.489	
	3	343.5	343.896	302.000	301.971	-0.396	0.029	
	4	353.5	352.716	204.875	205.465	0.784	-0.590	
4	1	200.5	199.981	285.250	284.676	0.519	0.574	0.6911
	2	208.5	208.694	186.500	188.079	-0.194	-1.579	
	3	351.0	351.442	298.167	298.209	-0.442	-0.042	
	4	360.5	360.155	201.000	201.612	0.345	-0.612	
5	1	207.5	206.887	281.500	280.870	0.613	0.630	0.7836
	2	215.5	215.688	182.500	184.136	-0.188	-1.636	
	3	357.5	358.517	294.500	294.458	-1.017	0.042	
	4	367.5	367.318	197.125	197.724	0.182	-0.599	
6	1	215.0	214.076	277.500	277.066	0.924	0.434	0.7219
	2	222.5	222.834	178.625	180.214	-0.334	-1.589	
	3	365.5	365.882	290.750	290.666	-0.382	0.084	
	4	374.5	374.639	193.250	193.814	-0.139	-0.564	
7	1	222.5	221.470	273.500	273.155	1.030	0.345	0.7232
	2	230.0	230.193	174.700	176.257	-0.193	-1.557	
	3	373.0	373.383	286.833	286.852	-0.383	-0.019	
	4	382.0	382.106	189.333	189.953	-0.106	-0.620	



(continued)

8	1	229.5	228.782	269.500	269.234	0.718	0.266	0.7489
	2	236.5	237.446	170.625	172.239	-0.946	-1.614	
	3	380.5	380.868	283.000	283.010	-0.368	-0.010	
	4	389.5	389.532	185.500	186.014	-0.032	-0.514	
9	1	236.5	236.069	265.625	265.298	0.431	0.327	0.7386
	2	244.0	244.683	166.700	168.255	-0.683	-1.555	
	3	387.5	388.257	279.125	279.108	-0.757	0.017	
	4	396.5	396.871	181.375	182.065	-0.371	-0.690	
10	1	243.5	243.233	261.875	261.422	0.267	0.453	0.6977
	2	251.5	251.901	162.625	164.258	-0.401	-1.633	
	3	395.0	395.642	275.333	275.241	-0.642	0.092	
	4	404.5	404.309	177.500	178.077	0.191	-0.577	
11	1	251.5	250.667	258.000	257.533	0.833	0.467	0.7494
	2	259.0	259.305	158.700	160.284	-0.305	-1.584	
	3	402.5	403.166	271.500	271.408	-0.666	0.092	
	4	411.5	411.804	173.500	174.159	-0.304	-0.659	
12	1	258.5	258.146	254.125	253.634	0.354	0.491	0.7471
	2	266.0	266.729	154.600	156.220	-0.729	-1.620	
	3	410.0	410.837	267.667	267.650	-0.837	0.017	
	4	419.5	419.420	169.750	170.236	0.080	-0.486	
13	1	266.0	265.572	250.100	249.713	0.428	0.387	0.7989
	2	273.5	274.152	150.500	152.220	-0.652	-1.720	
	3	417.5	418.351	263.875	263.807	-0.851	0.068	
	4	426.5	426.931	165.625	166.314	-0.431	-0.689	
14	1	273.5	272.965	246.375	245.850	0.535	0.525	0.7546
	2	281.0	281.591	146.700	148.250	-0.591	-1.550	
	3	425.0	425.908	260.000	259.995	-0.908	0.005	
	4	434.5	434.534	161.750	162.395	-0.034	-0.645	
15	1	281.0	280.597	242.300	241.934	0.403	0.366	0.7481
	2	288.5	289.139	142.625	144.273	-0.639	-1.648	
	3	433.0	433.581	256.167	256.108	-0.581	0.059	
	4	441.5	442.123	157.875	158.447	-0.623	-0.572	
16	1	288.5	288.057	238.500	238.013	0.443	0.487	0.8118
	2	296.0	296.625	138.600	140.252	-0.625	-1.652	
	3	440.0	441.175	252.167	252.279	-1.175	-0.112	
	4	449.5	449.743	154.000	154.517	-0.243	-0.517	
17	1	296.5	295.943	234.500	234.124	0.557	0.376	0.8066
	2	303.5	304.404	134.625	136.227	-0.904	-1.602	
	3	448.0	449.049	248.667	248.519	-1.049	0.148	
	4	457.5	457.511	150.125	150.622	-0.011	-0.497	

(continued)

18	1	303.5	303.559	230.500	230.177	-0.059	0.323	0.6932
	2	311.5	312.037	130.625	132.201	-0.537	-1.576	
	3	456.0	456.797	244.667	244.679	-0.797	-0.012	
	4	465.0	465.275	146.200	146.703	-0.275	-0.503	
19	1	311.5	311.432	226.625	226.219	0.068	0.406	0.7039
	2	319.0	319.817	126.600	128.098	-0.817	-1.498	
	3	464.0	464.745	240.667	240.848	-0.745	-0.181	
	4	473.0	473.131	142.200	142.727	-0.131	-0.527	

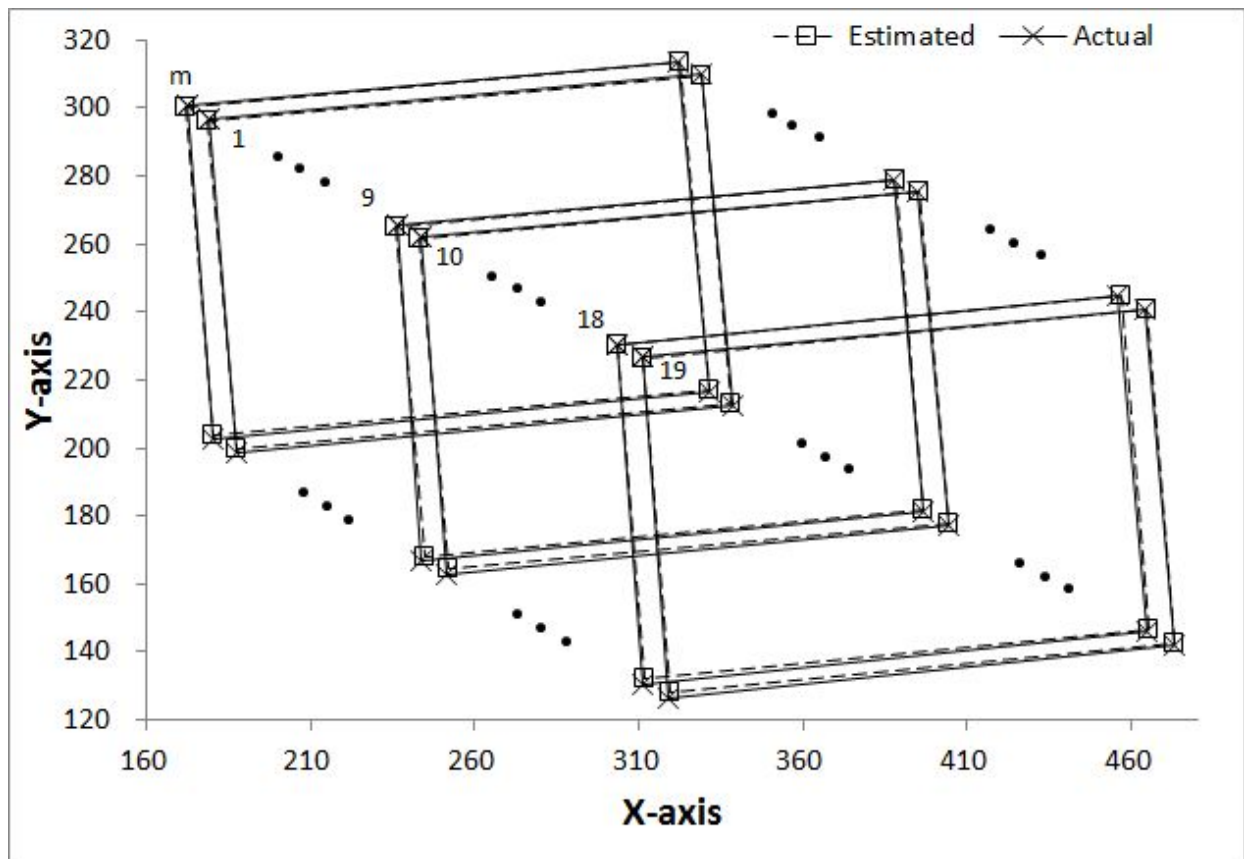


Fig. 6-13 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  in camera 3 (unit: pixel)



Table 6-20 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: pixel)

Moving point	Camera 1	Camera 2	Camera 3
m	0.6806	0.7158	0.6585
1	0.6187	0.7123	0.6922
2	0.5763	0.7774	0.7125
3	0.6272	0.7864	0.8287
4	0.5586	0.6540	0.6910
5	0.7018	0.7097	0.7836
6	0.6768	0.5410	0.7218
7	0.6009	0.7873	0.7231
8	0.5558	0.6240	0.7489
9	0.5211	0.7655	0.7386
10	0.5863	0.7262	0.6976
11	0.5191	0.5898	0.7493
12	0.7150	0.7900	0.7471
13	0.6690	0.7818	0.7988
14	0.6483	0.6489	0.7545
15	0.6855	0.5365	0.7480
16	0.5507	0.7965	0.8118
17	0.5863	0.6195	0.8065
18	0.5718	0.6744	0.6931
19	0.5555	0.6387	0.7038
Average	0.6103	0.6938	0.7405

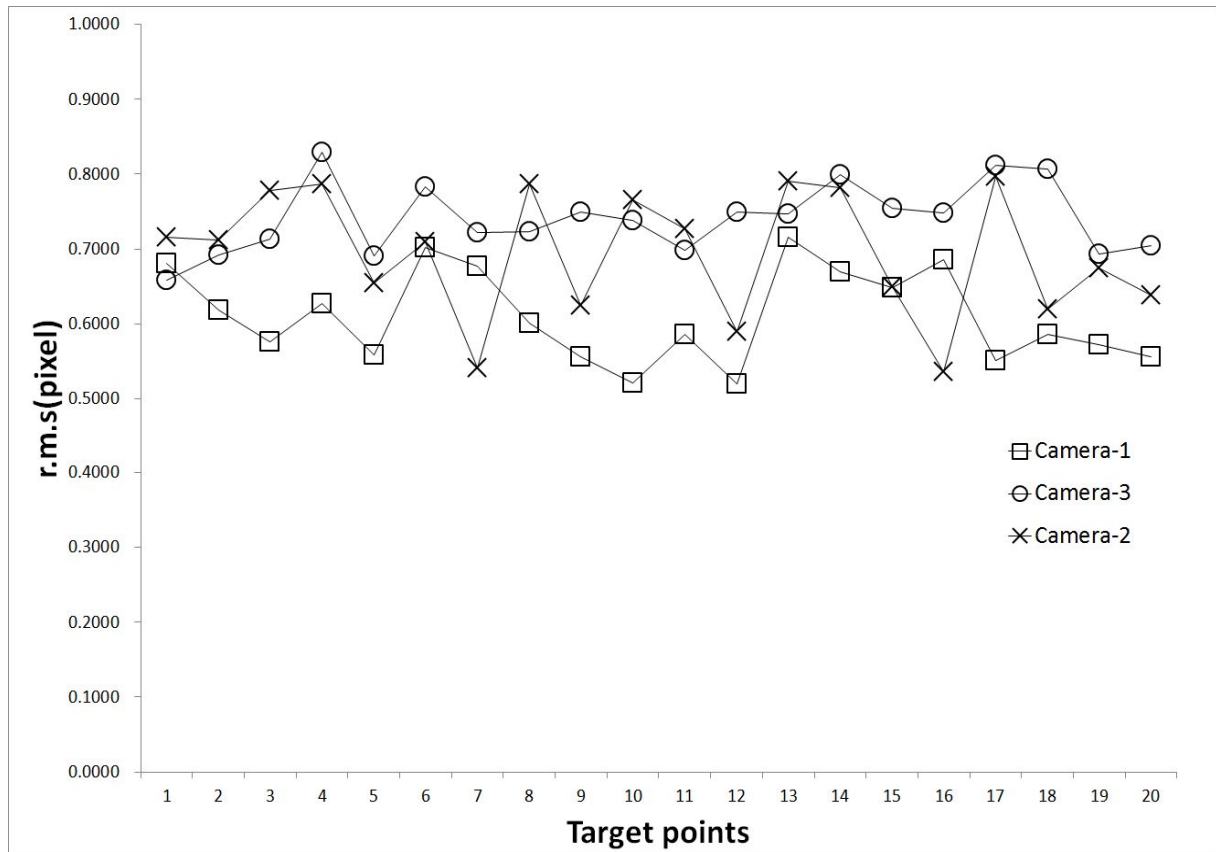


Fig. 6-14 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: pixel)

## 6.4 가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법

### 6.4.1 초기단계

6.3.1절의 로봇 초기단계에서 추정된 최적의 로봇이동 지점수,  $P=5$ ,를 사용하여 최적의 가중치계수,  $\alpha$ ,를 계산한다. 가중치계수의 변화에 따라 추정된 위치값과 실제 위치값에 대한 오차값의 변화는 Table 6-21과 Fig. 6-15에서 같이, 가중치계수가 0일 때 가장 큰 값을 보이다가 가중치계수가 증가함에 따라 감소하다가 일정 지점에서부터 다시 천천히 증가하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Table 6-21과 같이 가중치계수,  $\alpha$ 가 0.09일 때 최소의 오차값을 보이기 때문에 최적의 가중치계수,  $\alpha=0.09$ ,로 설정하고, 이를 식(3-9)과 식(3-10)에 대입하여 최적의 가중치행렬  $W$  를 계산하고 이동타겟 추적단계에서 이동타겟 값을 추정할 때 사용한다.

Table 6-21 For  $P=5$ , errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) in the robot's initial stage (unit: mm)

$\alpha$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
r.m.s	0.34426	0.31769	0.29601	0.27724	0.26610	0.25360	0.24285	0.23340	0.22501	0.21786	0.21981

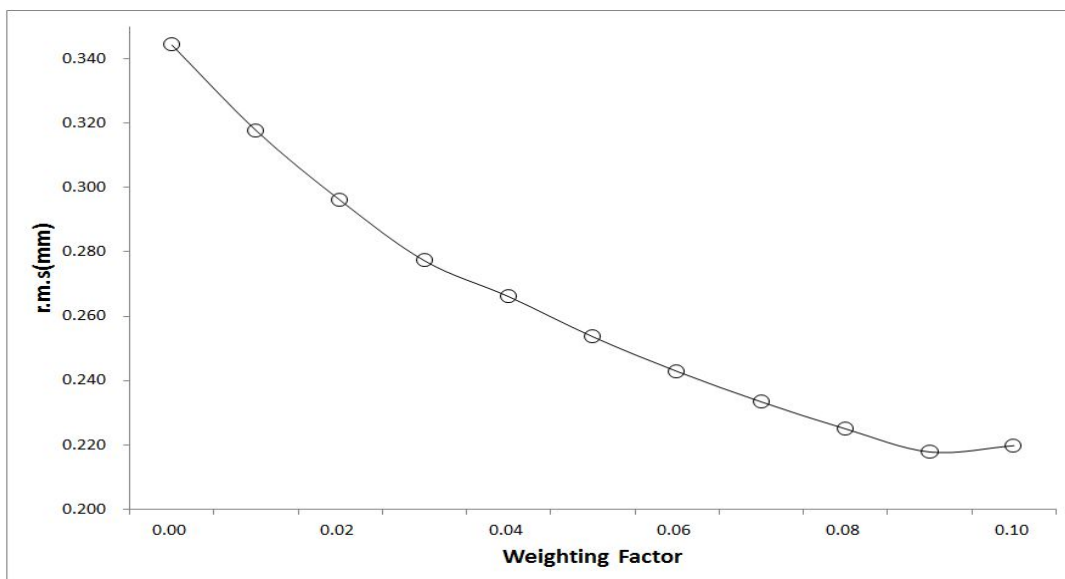


Fig. 6-15 For  $P=5$ , errors according to the variation of weighting factors( $\alpha$ ) in the robot's initial stage (unit: mm)

최적의 가중치계수,  $\alpha=0.09$ , 일 때 추정된 초기 카메라 매개변수 및 초기 관절 값은 Table 6-22와 Table 6-23과 같으며, 이동타겟 추적단계에서 이동타겟 값을 추정할 때 사용한다.

Table 6-22 For the robot's initial stage, the estimated 6 camera parameters using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$

Camera	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1	0.7382	0.5228	0.0419	0.1434	790.3771	152.6000
2	0.6068	0.4239	1.1193	1.2331	1268.6783	81.0441
3	0.3812	0.2433	1.1910	1.2652	1805.3525	-9.9323

Table 6-23 For the robot's initial stage, the estimated robot joint values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$

Estimated joint values	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$d_3(\text{mm})$	$\theta_4(^{\circ})$
	7.882	17.571	106.764	-6.514

## 6.4.2 타겟 추적단계

타겟 근처에서 획득한 비전데이터에 비중을 두기 위해 4.2.3절에서 제시된 제어 기법을 사용하여 이동타겟 추적실험을 실시하였다.

6.3.1절과 6.4.1절에서 계산된 최적의 이동지점수( $P=5$ )와 최적의 가중치계수( $\alpha=0.09$ )를 사용해서 타겟을 향해서 로봇이 이동하는 동안 각 이동지점에서 3대의 카메라에 대하여 추정된 매개변수를 식(2-8)에 대입하여 계산되어진 비전시스템 모델값과 카메라에서 얻어진 실제 비전데이터를 식(6-1)과 식(6-2)에 적용하여 계산된 각각의 타겟에 대한 *r.m.s*오차값을 Table 6-24~Table 6-26과 Fig. 6-16~Fig. 6-18에서 보여주고 있으며, 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-27과 Fig. 6-19에서 보여주고 있다.

3대의 카메라에서 *r.m.s*오차값은, Table 6-24와 Fig. 6-16에서 보여준 카메라 1에서는 0.4469~0.5880(pixel), Table 6-25와 Fig. 6-17에서 보여준 카메라 2에서는 0.3830~0.6169(pixel), Table 6-26과 Fig. 6-18에서 보여준 카메라 3에서는 0.532~0.746(pixel) 사이의 값을 갖는다. 또한, 평균 *r.m.s*오차값은 Table 6-27과 Fig. 6-19에서 보여준 것과 같이 카메라 1에서 0.5115(pixel), 카메라 2에서 0.4863(pixel), 카메라 3에서 0.6381(pixel)로서 3대의 카메라 모두에서 작은 오차값을 가지므로, 본 연구에서 사용된 비전시스템 모델과 가중치행렬 모델은 데이터이동 기법에서도 적합함을 알 수 있다.

Table 6-24 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 1 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	136.0	136.052	335.70	335.046	-0.052	0.654	0.5513
	2	146.0	146.255	239.50	240.420	-0.255	-0.920	
	3	266.5	266.927	359.63	360.280	-0.427	-0.655	
	4	277.0	277.130	266.33	265.654	-0.130	0.679	
1	1	145.5	145.379	332.50	331.852	0.121	0.648	0.4962
	2	155.0	155.294	236.50	237.227	-0.294	-0.727	
	3	275.5	275.802	356.50	357.144	-0.302	-0.644	
	4	285.5	285.717	263.13	262.519	-0.217	0.606	
2	1	154.5	154.472	329.38	328.714	0.028	0.661	0.4821
	2	164.0	164.315	233.40	234.092	-0.315	-0.692	
	3	284.5	284.735	353.50	354.084	-0.235	-0.584	
	4	294.5	294.578	260.13	259.461	-0.078	0.664	
3	1	163.5	163.531	326.38	325.596	-0.031	0.779	0.5520
	2	173.0	173.322	230.00	230.896	-0.322	-0.896	
	3	293.5	293.714	350.38	351.036	-0.214	-0.661	
	4	303.5	303.505	257.00	256.336	-0.005	0.664	
4	1	172.5	172.652	323.25	322.505	-0.152	0.745	0.5154
	2	182.5	182.563	227.00	227.782	-0.063	-0.782	
	3	302.5	302.635	347.38	348.024	-0.135	-0.649	
	4	312.5	312.546	254.00	253.300	-0.046	0.700	
5	1	182.0	181.874	319.90	319.305	0.126	0.595	0.5720
	2	191.5	191.778	223.63	224.597	-0.278	-0.972	
	3	310.5	311.188	344.50	345.019	-0.688	-0.519	
	4	321.0	321.092	251.00	250.311	-0.092	0.689	
6	1	191.0	191.106	316.90	316.226	-0.106	0.674	0.5127
	2	201.0	201.033	220.60	221.449	-0.033	-0.849	
	3	319.5	319.889	341.50	342.047	-0.389	-0.547	
	4	329.5	329.816	247.88	247.271	-0.316	0.604	
7	1	200.5	200.422	313.63	313.062	0.078	0.563	0.4716
	2	210.0	210.225	217.50	218.268	-0.225	-0.768	
	3	328.5	328.832	338.50	339.037	-0.332	-0.537	
	4	338.5	338.634	244.88	244.243	-0.134	0.632	

(continued)

8	1	209.5	209.533	310.50	309.933	-0.033	0.567	0.4469
	2	219.0	219.309	214.50	215.162	-0.309	-0.662	
	3	337.5	337.779	335.50	336.027	-0.279	-0.527	
	4	347.5	347.555	241.88	241.256	-0.055	0.619	
9	1	218.5	218.667	307.50	306.879	-0.167	0.621	0.4526
	2	228.5	228.596	211.50	212.126	-0.096	-0.626	
	3	346.5	346.661	332.50	333.075	-0.161	-0.575	
	4	356.5	356.590	239.00	238.322	-0.090	0.678	
10	1	227.5	227.743	304.50	303.827	-0.243	0.673	0.4895
	2	237.5	237.668	208.13	208.989	-0.168	-0.864	
	3	355.5	355.667	329.50	330.075	-0.167	-0.575	
	4	365.5	365.591	235.75	235.237	-0.091	0.513	
11	1	237.0	237.102	301.30	300.720	-0.102	0.580	0.4665
	2	247.0	247.013	205.10	205.869	-0.013	-0.769	
	3	364.5	364.680	326.38	327.056	-0.180	-0.681	
	4	374.5	374.591	232.75	232.204	-0.091	0.546	
12	1	246.5	246.587	298.38	297.596	-0.087	0.779	0.5880
	2	256.0	256.082	201.80	202.726	-0.082	-0.926	
	3	373.5	373.587	323.38	324.023	-0.087	-0.648	
	4	382.5	383.082	229.88	229.153	-0.582	0.722	
13	1	255.5	255.609	295.25	294.530	-0.109	0.720	0.5515
	2	265.0	265.261	198.90	199.690	-0.261	-0.790	
	3	382.0	382.412	320.30	321.024	-0.412	-0.724	
	4	392.0	392.065	226.90	226.184	-0.065	0.716	
14	1	265.0	265.015	292.10	291.389	-0.015	0.711	0.5200
	2	274.0	274.290	195.80	196.547	-0.290	-0.747	
	3	391.5	391.547	317.38	317.975	-0.047	-0.600	
	4	400.5	400.822	223.88	223.134	-0.322	0.741	
15	1	274.0	274.207	289.00	288.373	-0.207	0.627	0.5239
	2	284.0	283.898	192.70	193.535	0.102	-0.835	
	3	399.5	400.020	314.50	315.076	-0.520	-0.576	
	4	409.5	409.711	220.88	220.238	-0.211	0.637	
16	1	283.5	283.660	285.88	285.243	-0.160	0.632	0.5033
	2	293.0	293.030	189.50	190.342	-0.030	-0.842	
	3	409.5	409.375	311.50	312.096	0.125	-0.596	
	4	418.5	418.744	217.88	217.196	-0.244	0.679	
17	1	293.0	292.955	282.90	282.193	0.045	0.707	0.5063
	2	302.0	302.279	186.50	187.278	-0.279	-0.778	
	3	418.0	418.289	308.70	309.180	-0.289	-0.480	
	4	427.5	427.614	215.00	214.266	-0.114	0.734	

(continued)

18	1	302.5	302.465	280.00	279.176	0.035	0.824	0.5385
	2	311.5	311.635	183.50	184.223	-0.135	-0.723	
	3	427.5	427.490	305.63	306.258	0.010	-0.633	
	4	436.5	436.660	212.13	211.305	-0.160	0.820	
19	1	311.5	311.660	276.75	276.126	-0.160	0.624	0.4898
	2	321.0	321.044	180.50	181.220	-0.044	-0.720	
	3	436.0	436.269	302.70	303.324	-0.269	-0.624	
	4	445.5	445.653	209.13	208.419	-0.153	0.706	

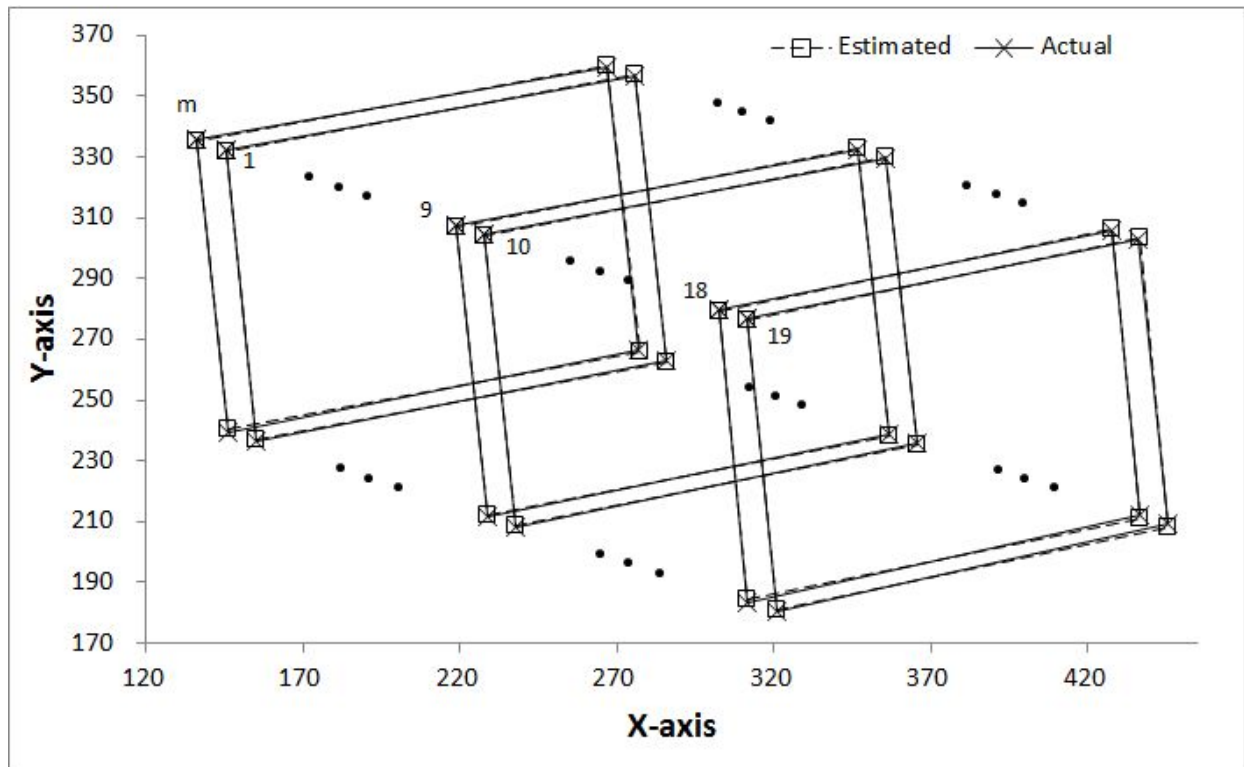


Fig. 6-16 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 1. (unit: pixel)



Table 6-25 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 2 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	151.5	151.508	298.50	298.113	-0.008	0.387	0.4684
	2	160.5	160.981	199.25	199.982	-0.481	-0.732	
	3	299.5	300.263	317.88	318.164	-0.763	-0.289	
	4	309.5	309.736	220.38	220.033	-0.236	0.342	
1	1	159.5	159.735	295.13	294.530	-0.235	0.595	0.4605
	2	169.0	169.324	195.50	196.311	-0.324	-0.811	
	3	308.0	308.579	314.20	314.575	-0.579	-0.375	
	4	318.0	318.168	216.50	216.356	-0.168	0.144	
2	1	168.5	168.312	291.50	290.868	0.188	0.632	0.5467
	2	177.0	177.671	191.50	192.451	-0.671	-0.951	
	3	316.5	317.165	310.63	310.974	-0.665	-0.349	
	4	326.5	326.523	212.75	212.557	-0.023	0.193	
3	1	176.5	176.706	287.50	287.088	-0.206	0.412	0.5036
	2	186.0	186.223	187.70	188.670	-0.223	-0.970	
	3	324.5	325.271	307.13	307.423	-0.771	-0.298	
	4	334.5	334.788	209.25	209.005	-0.288	0.245	
4	1	185.5	185.323	284.00	283.446	0.177	0.554	0.4738
	2	194.0	194.660	184.20	184.888	-0.660	-0.688	
	3	333.5	334.032	303.38	303.803	-0.532	-0.428	
	4	343.5	343.369	205.50	205.245	0.131	0.255	
5	1	194.0	193.947	280.50	279.915	0.053	0.585	0.4787
	2	203.0	203.377	180.50	181.257	-0.377	-0.757	
	3	341.5	342.268	300.00	300.299	-0.768	-0.299	
	4	351.5	351.698	201.88	201.641	-0.198	0.234	
6	1	202.5	202.620	276.50	276.178	-0.120	0.322	0.3830
	2	212.0	212.180	176.70	177.467	-0.180	-0.767	
	3	350.5	350.925	296.50	296.829	-0.425	-0.329	
	4	360.5	360.485	198.50	198.118	0.015	0.382	
7	1	211.5	211.311	273.00	272.459	0.189	0.541	0.5571
	2	220.0	220.642	172.90	173.751	-0.642	-0.851	
	3	358.5	359.336	292.63	293.122	-0.836	-0.497	
	4	368.5	368.666	194.63	194.414	-0.166	0.211	

(continued)

8	1	219.5	219.745	269.50	268.945	-0.245	0.555	0.4076
	2	229.0	229.321	169.50	170.167	-0.321	-0.667	
	3	367.5	367.945	289.38	289.674	-0.445	-0.299	
	4	377.5	377.521	191.25	190.896	-0.021	0.354	
9	1	228.5	228.423	265.63	265.205	0.077	0.420	0.5367
	2	237.5	237.990	165.50	166.412	-0.490	-0.912	
	3	375.5	376.391	285.63	286.085	-0.891	-0.460	
	4	386.0	385.957	187.50	187.292	0.043	0.208	
10	1	237.5	237.300	262.00	261.511	0.200	0.489	0.4938
	2	246.0	246.607	161.80	162.601	-0.607	-0.801	
	3	384.5	385.183	282.00	282.428	-0.683	-0.428	
	4	394.5	394.491	183.63	183.518	0.009	0.107	
11	1	246.5	246.260	258.50	257.945	0.240	0.555	0.4708
	2	255.0	255.518	158.20	158.895	-0.518	-0.695	
	3	393.5	394.044	278.50	278.925	-0.544	-0.425	
	4	403.5	403.302	180.25	179.875	0.198	0.375	
12	1	254.5	254.666	254.50	254.179	-0.166	0.321	0.4774
	2	263.5	264.016	154.50	155.239	-0.516	-0.739	
	3	401.5	402.356	275.00	275.285	-0.856	-0.285	
	4	411.5	411.706	176.50	176.345	-0.206	0.155	
13	1	263.5	263.415	251.25	250.623	0.085	0.627	0.5262
	2	272.0	272.699	150.60	151.466	-0.699	-0.866	
	3	410.5	411.156	271.50	271.787	-0.656	-0.287	
	4	420.5	420.440	172.88	172.631	0.060	0.244	
14	1	272.5	272.336	247.50	246.971	0.164	0.529	0.4891
	2	281.0	281.565	147.10	147.782	-0.565	-0.682	
	3	419.5	420.071	267.63	268.183	-0.571	-0.558	
	4	429.5	429.300	169.38	168.994	0.200	0.381	
15	1	281.5	281.300	243.75	243.342	0.200	0.408	0.4118
	2	290.0	290.526	143.50	144.082	-0.526	-0.582	
	3	428.5	429.016	264.38	264.680	-0.516	-0.305	
	4	438.5	438.243	165.75	165.419	0.257	0.331	
16	1	290.5	290.281	240.50	239.780	0.219	0.720	0.6169
	2	299.0	299.497	139.50	140.449	-0.497	-0.949	
	3	436.5	437.420	260.63	261.165	-0.920	-0.540	
	4	446.5	446.635	162.25	161.833	-0.135	0.417	
17	1	299.5	299.397	236.50	236.041	0.103	0.459	0.4552
	2	308.0	308.413	135.80	136.630	-0.413	-0.830	
	3	446.0	446.490	257.10	257.568	-0.490	-0.468	
	4	455.5	455.507	158.50	158.157	-0.007	0.343	

(continued)

18	1	308.0	308.123	233.00	232.458	-0.123	0.542	0.4745
	2	317.0	317.366	132.30	133.043	-0.366	-0.743	
	3	454.5	455.181	253.50	254.007	-0.681	-0.507	
	4	464.5	464.424	154.88	154.592	0.076	0.283	
19	1	317.5	317.296	229.38	228.851	0.204	0.524	0.4948
	2	326.0	326.478	128.50	129.310	-0.478	-0.810	
	3	463.5	464.143	250.13	250.540	-0.643	-0.415	
	4	473.5	473.325	151.38	150.999	0.175	0.376	

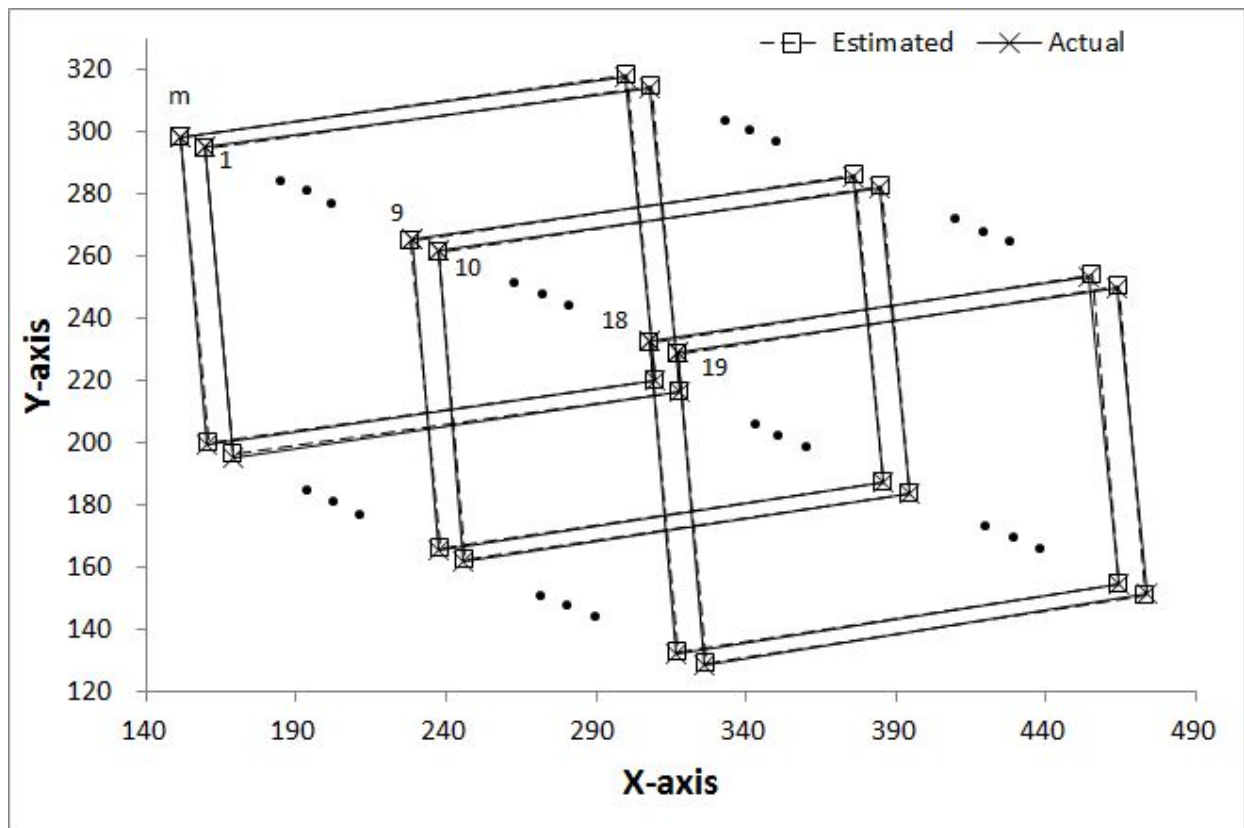


Fig. 6-17 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 2. (unit: pixel)

Table 6-26 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points using the data moving scheme  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 3 (unit: pixel)

Moving point	Cue	$x$		$y$		Error		r.m.s.
		Actual	Estimated	Actual	Estimated	$x$	$y$	
m	1	172.5	171.600	300.63	300.198	0.900	0.427	0.5708
	2	180.5	180.652	202.50	203.672	-0.152	-1.172	
	3	322.0	322.414	313.33	313.361	-0.414	-0.028	
	4	331.5	331.466	216.63	216.835	0.034	-0.210	
1	1	179.5	178.399	296.63	296.311	1.101	0.314	0.6142
	2	187.5	187.516	198.50	199.677	-0.016	-1.177	
	3	329.0	329.384	309.83	309.611	-0.384	0.222	
	4	338.5	338.500	212.63	212.978	0.000	-0.353	
2	1	186.5	185.420	292.88	292.455	1.080	0.420	0.6321
	2	194.0	194.339	194.50	195.757	-0.339	-1.257	
	3	336.5	336.740	305.75	305.722	-0.240	0.028	
	4	345.5	345.660	208.75	209.023	-0.160	-0.273	
3	1	194.0	192.713	289.00	288.504	1.287	0.496	0.7462
	2	201.0	201.475	190.60	191.766	-0.475	-1.166	
	3	343.5	344.330	302.00	301.944	-0.830	0.056	
	4	353.5	353.093	204.88	205.205	0.407	-0.330	
4	1	200.5	199.790	285.25	284.630	0.710	0.620	0.6129
	2	208.5	208.558	186.50	187.757	-0.058	-1.257	
	3	351.0	351.656	298.17	298.184	-0.656	-0.017	
	4	360.5	360.423	201.00	201.311	0.077	-0.311	
5	1	207.5	206.701	281.50	280.836	0.799	0.664	0.7362
	2	215.5	215.659	182.50	183.864	-0.159	-1.364	
	3	357.5	358.606	294.50	294.475	-1.106	0.025	
	4	367.5	367.564	197.13	197.503	-0.064	-0.378	
6	1	215.0	213.957	277.50	276.984	1.043	0.516	0.6736
	2	222.5	222.721	178.63	179.937	-0.221	-1.312	
	3	365.5	366.038	290.75	290.630	-0.538	0.120	
	4	374.5	374.802	193.25	193.582	-0.302	-0.332	
7	1	222.5	221.724	273.50	273.008	0.776	0.492	0.6326
	2	230.0	230.180	174.70	175.915	-0.180	-1.215	
	3	373.0	373.795	286.83	286.818	-0.795	0.015	
	4	382.0	382.251	189.33	189.724	-0.251	-0.391	

(continued)

8	1	229.5	228.805	269.50	269.098	0.695	0.402	0.6413
	2	236.5	237.254	170.63	171.854	-0.754	-1.229	
	3	380.5	381.205	283.00	282.953	-0.705	0.047	
	4	389.5	389.654	185.50	185.710	-0.154	-0.210	
9	1	236.5	235.824	265.63	265.177	0.676	0.448	0.6399
	2	244.0	244.386	166.70	167.921	-0.386	-1.221	
	3	387.5	388.317	279.13	279.029	-0.817	0.096	
	4	396.5	396.879	181.38	181.772	-0.379	-0.397	
10	1	243.5	242.950	261.88	261.310	0.550	0.565	0.6009
	2	251.5	251.670	162.63	163.871	-0.170	-1.246	
	3	395.0	395.753	275.33	275.279	-0.753	0.054	
	4	404.5	404.473	177.50	177.839	0.027	-0.339	
11	1	251.5	250.804	258.00	257.421	0.696	0.579	0.6614
	2	259.0	259.207	158.70	159.896	-0.207	-1.196	
	3	402.5	403.443	271.50	271.468	-0.943	0.032	
	4	411.5	411.846	173.50	173.943	-0.346	-0.443	
12	1	258.5	257.972	254.13	253.553	0.528	0.572	0.6489
	2	266.0	266.482	154.60	155.853	-0.482	-1.253	
	3	410.0	410.946	267.67	267.698	-0.946	-0.031	
	4	419.5	419.455	169.75	169.999	0.045	-0.249	
13	1	266.0	265.458	250.10	249.594	0.542	0.506	0.6742
	2	273.5	273.876	150.50	151.813	-0.376	-1.313	
	3	417.5	418.454	263.88	263.817	-0.954	0.058	
	4	426.5	426.872	165.63	166.036	-0.372	-0.411	
14	1	273.5	272.948	246.38	245.770	0.552	0.605	0.6539
	2	281.0	281.380	146.70	147.840	-0.380	-1.140	
	3	425.0	426.080	260.00	260.049	-1.080	-0.049	
	4	434.5	434.512	161.75	162.120	-0.012	-0.370	
15	1	281.0	280.646	242.30	241.834	0.354	0.466	0.5904
	2	288.5	288.893	142.63	143.801	-0.393	-1.176	
	3	433.0	433.761	256.17	256.175	-0.761	-0.008	
	4	441.5	442.008	157.88	158.142	-0.508	-0.267	
16	1	288.5	288.027	238.50	237.904	0.473	0.596	0.6965
	2	296.0	296.397	138.60	139.844	-0.397	-1.244	
	3	440.0	441.221	252.17	252.328	-1.221	-0.161	
	4	449.5	449.592	154.00	154.268	-0.092	-0.268	
17	1	296.5	295.925	234.50	234.047	0.575	0.453	0.6656
	2	303.5	304.162	134.63	135.730	-0.662	-1.105	
	3	448.0	449.134	248.67	248.657	-1.134	0.010	
	4	457.5	457.371	150.13	150.340	0.129	-0.215	

(continued)

18	1	303.5	303.428	230.50	230.072	0.072	0.428	0.5317
	2	311.5	311.760	130.63	131.717	-0.260	-1.092	
	3	456.0	456.844	244.67	244.789	-0.844	-0.122	
	4	465.0	465.175	146.20	146.435	-0.175	-0.235	
19	1	311.5	311.242	226.63	226.140	0.258	0.485	0.5380
	2	319.0	319.455	126.60	127.627	-0.455	-1.027	
	3	464.0	464.806	240.67	240.915	-0.806	-0.248	
	4	473.0	473.020	142.20	142.402	-0.020	-0.202	

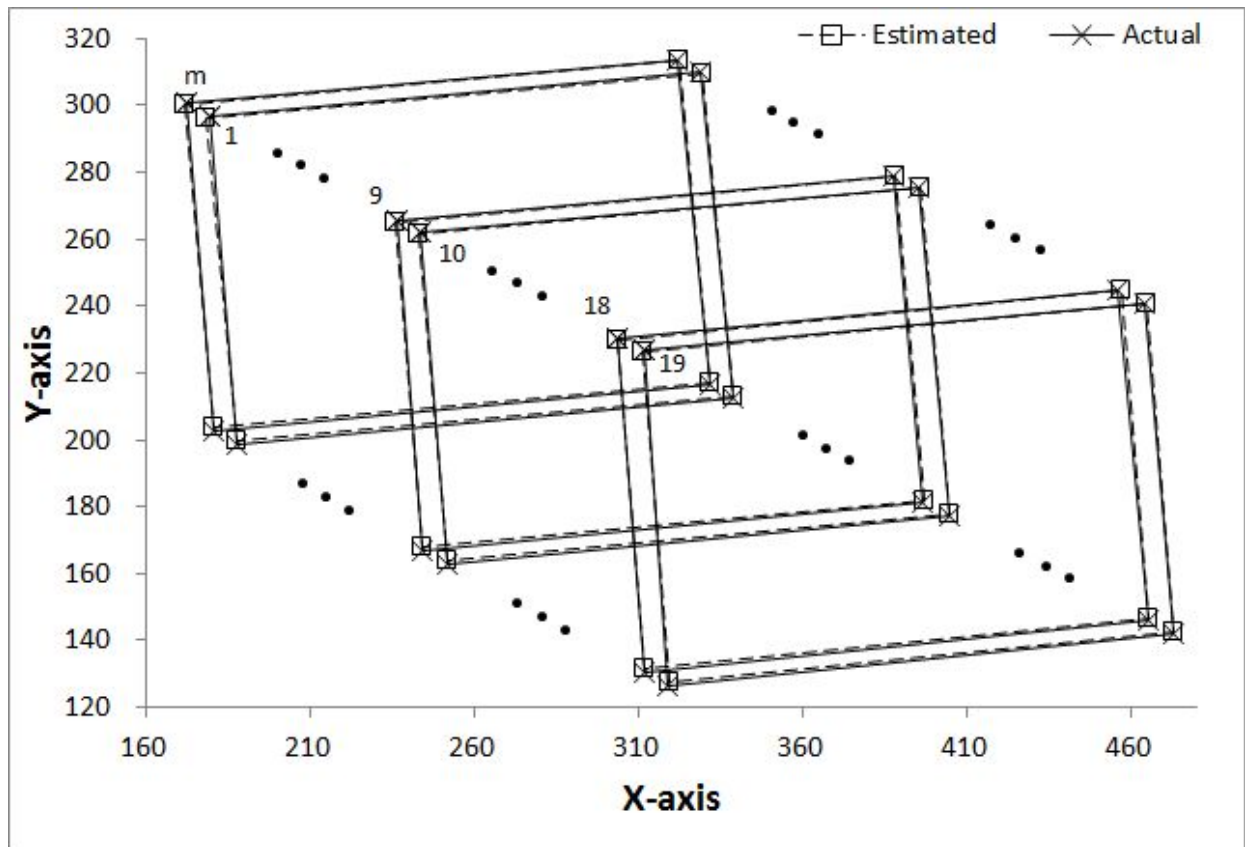


Fig. 6-18 For the moving target tracking stage, comparison of the actual values and the estimated values of the vision system model using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  in camera 3. (unit: pixel)

Table 6-27 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: pixel)

Moving point	camera 1	camera 2	camera3
m	0.5513	0.4684	0.5710
1	0.4962	0.4605	0.6140
2	0.4821	0.5467	0.6320
3	0.5520	0.5036	0.7460
4	0.5154	0.4738	0.6130
5	0.5720	0.4787	0.7360
6	0.5127	0.3830	0.6740
7	0.4716	0.5571	0.6330
8	0.4469	0.4076	0.6410
9	0.4526	0.5367	0.6400
10	0.4895	0.4938	0.6010
11	0.4665	0.4708	0.6610
12	0.5880	0.4774	0.6490
13	0.5515	0.5262	0.6740
14	0.5200	0.4891	0.6540
15	0.5239	0.4118	0.5900
16	0.5033	0.6169	0.6970
17	0.5063	0.4552	0.6660
18	0.5385	0.4745	0.5320
19	0.4898	0.4948	0.5380
Average	0.5115	0.4863	0.6381



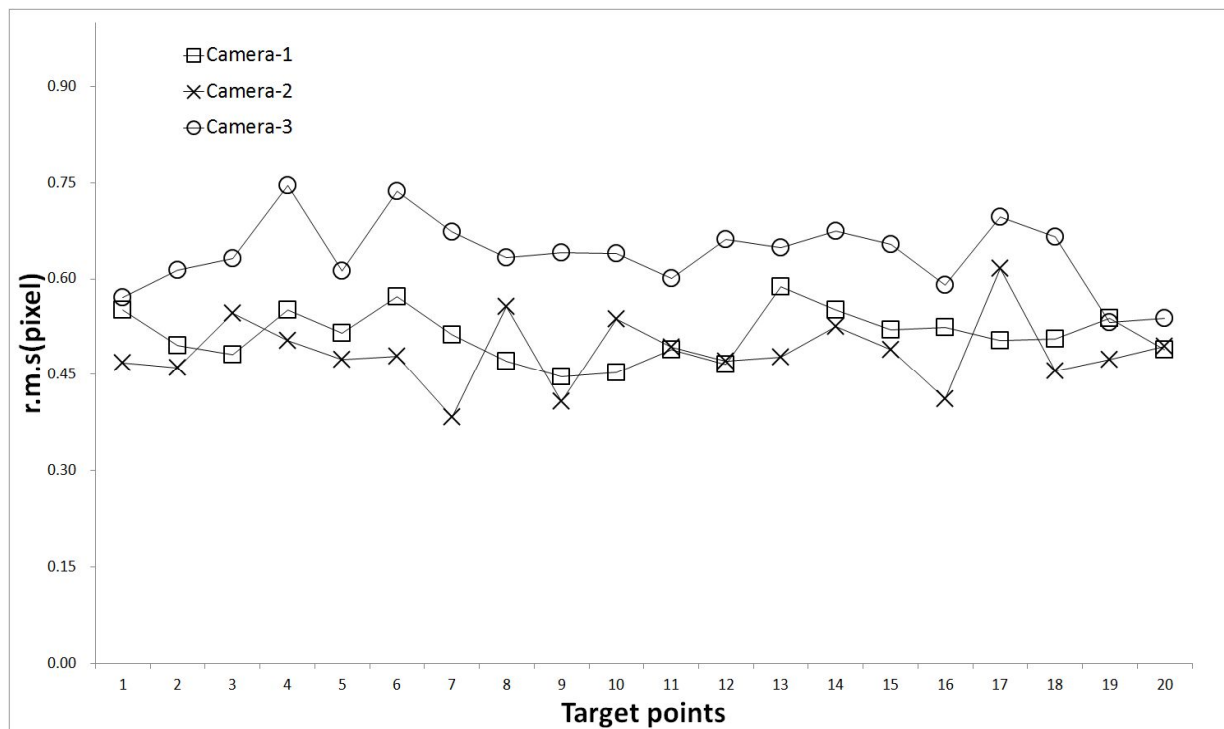


Fig. 6-19 For the moving target tracking stage, comparison of the *r.m.s* errors between the actual values and the estimated values of the vision system model for 20 moving points in 3 cameras using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: pixel)



## 제 7 장 강체 이동타겟 추정결과

이동타겟 추적단계에서 로봇이 이동하는 동안 공간상 위치가 알려지지 않은 각 타겟지점에서 획득된 실제 비전데이터만을 사용하여 가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 방법, 가중치행렬을 적용한 일괄처리 방법, 가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 방법, 가중치행렬을 적용한 데이터이동 방법 등 4개 제어기법을 적용하여 각 타겟지점에 대해 로봇 관절값과 위치값을 추정하였다.

$k^*$  번째 타겟에 대해 추정된 위치값과 실제 타겟지점 위치값에 대한 오차값은 식 (7-1)과 같이  $e_{r.m.s}^{k^*}$  [38]를 사용하여 정의하였다. 여기서, 관절값 추정기법에 의해 계산된 관절값을 식(2-6)의 로봇 정기구학 모델에 적용하여 타겟지점에 대해 추정된 위치값을 계산하였다.

$$e_{r.m.s}^{k^*} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j^*} \{(e_x^{k^*,j})^2 + (e_y^{k^*,j})^2 + (e_z^{k^*,j})^2\}}{3 \times j^*}} \quad (7-1)$$

여기서,  $k^*$ 는  $k^*$  번째 타겟지점,  $j^*$ 는 cue의 개수( $j^*=4$ ),  $e_x^{k^*,j}$ ,  $e_y^{k^*,j}$ ,  $e_z^{k^*,j}$ 는  $k^*$  번째 타겟지점의  $j$ 번 cue에 대한  $x$ 성분,  $y$ 성분,  $z$ 성분 오차를 나타낸다.

$$e_{avg} = \frac{\sum_{k^*=1}^n e_{r.m.s}^{k^*}}{n} \quad (7-2)$$

여기서,  $n$ 은 타겟 추적단계에서 필요한 이동 지점수( $n=20$ )를 나타내며,  $e_{avg}$ 는  $k^*$  번째 이동지점에서의  $r.m.s$  오차값이다.

## 7.1 일괄처리 방법을 이용한 강체 이동타겟 추정

### 7.1.1 가중치행렬을 적용하지 않은 경우

#### (1) 이동타겟 관절값 추정

가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 기법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값을 비교하여 Table 7-1과 Fig. 7-1~Fig. 7-4에 나타내었으며, 20개 타겟지점에서 각 관절값의 오차변화를 살펴보면,  $\theta_1$ 은 0.281~0.441,  $\theta_2$ 는 0.621~1.082,  $d_3$ 은 0.186~0.341,  $\theta_4$ 은 0.145~0.986으로서 만족할만한 결과를 얻었다.

Table 7-1 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit:  $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree,  $d_3$ ; mm)

Target point	Actual				Estimated				Error			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
1	8.2	17.466	107.833	-6.833	7.917	18.088	108.020	-6.339	0.283	-0.621	-0.186	-0.494
2	8.4	17.600	109.000	-7.000	8.119	18.225	109.195	-6.647	0.281	-0.625	-0.195	-0.353
3	8.6	17.733	110.166	-7.166	8.231	18.571	110.395	-6.875	0.369	-0.837	-0.228	-0.291
4	8.8	17.866	111.333	-7.333	8.468	18.633	111.542	-7.188	0.332	-0.766	-0.208	-0.145
5	9.0	18.000	112.500	-7.500	8.686	18.708	112.688	-6.645	0.314	-0.708	-0.188	-0.855
6	9.2	18.133	113.666	-7.666	8.821	19.011	113.881	-6.842	0.379	-0.877	-0.214	-0.824
7	9.4	18.266	114.833	-7.833	8.985	19.231	115.086	-6.989	0.415	-0.964	-0.252	-0.844
8	9.6	18.400	116.000	-8.000	9.227	19.269	116.213	-7.407	0.373	-0.869	-0.213	-0.593
9	9.8	18.533	117.166	-8.166	9.507	19.211	117.377	-7.356	0.293	-0.677	-0.210	-0.810
10	10.0	18.666	118.333	-8.333	9.645	19.498	118.586	-7.808	0.355	-0.831	-0.252	-0.525
11	10.2	18.800	119.500	-8.500	9.855	19.625	119.745	-7.874	0.345	-0.825	-0.245	-0.626
12	10.4	18.933	120.666	-8.666	10.028	19.801	120.929	-7.745	0.372	-0.867	-0.262	-0.921
13	10.6	19.066	121.833	-8.833	10.230	19.935	122.102	-8.163	0.370	-0.868	-0.268	-0.670
14	10.8	19.200	123.000	-9.000	10.404	20.143	123.281	-8.452	0.396	-0.943	-0.281	-0.548
15	11.0	19.333	124.166	-9.166	10.590	20.315	124.457	-8.268	0.410	-0.981	-0.290	-0.898
16	11.2	19.466	125.333	-9.333	10.879	20.236	125.606	-8.347	0.321	-0.769	-0.272	-0.986
17	11.4	19.600	126.500	-9.500	10.975	20.628	126.815	-8.634	0.425	-1.028	-0.315	-0.866
18	11.6	19.733	127.666	-9.666	11.245	20.603	127.960	-8.815	0.355	-0.869	-0.293	-0.851
19	11.8	19.866	128.833	-9.833	11.359	20.949	129.175	-8.974	0.441	-1.082	-0.341	-0.859
20	12.0	20.000	130.000	-10.000	11.644	20.885	130.331	-9.146	0.356	-0.885	-0.331	-0.854

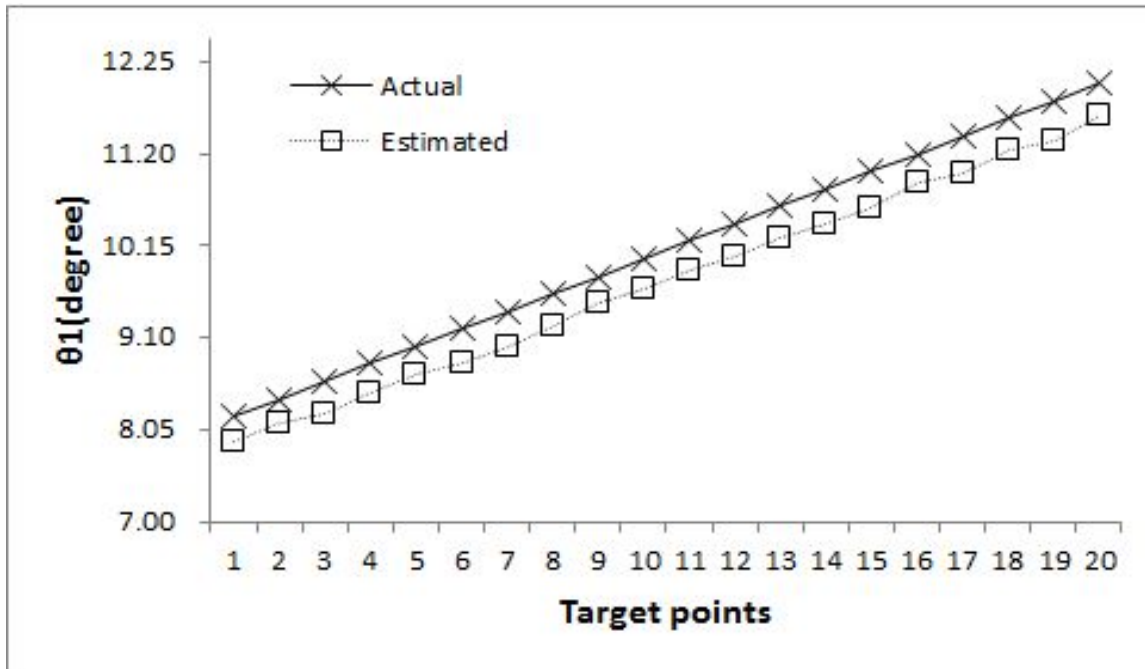


Fig. 7-1 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree)

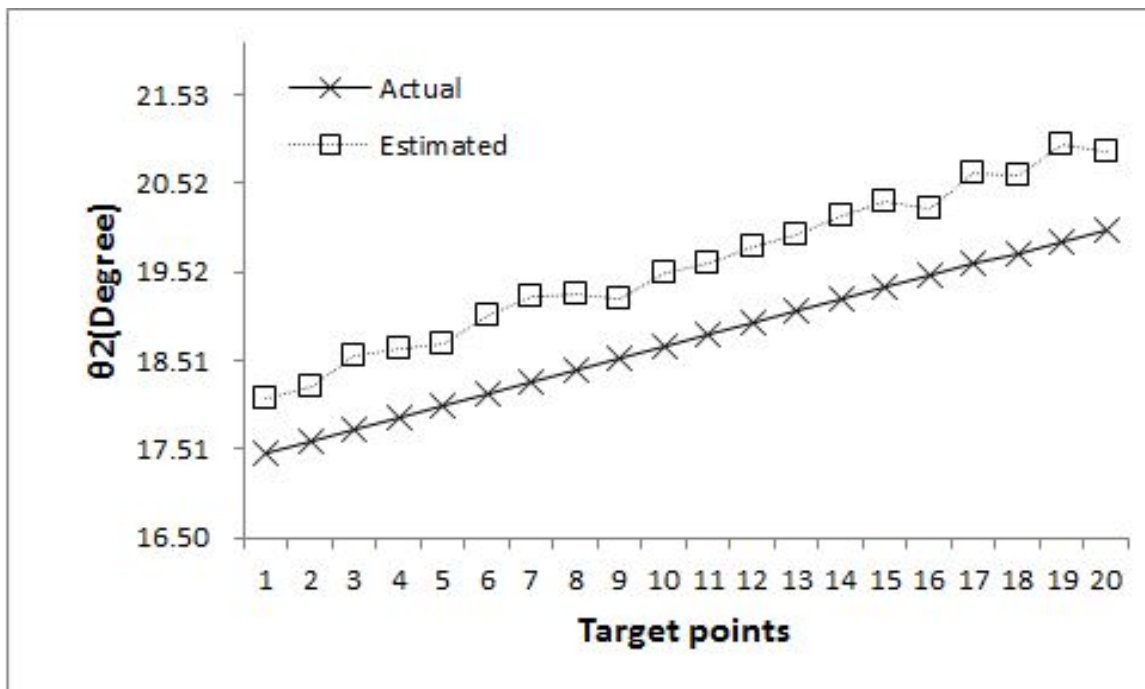


Fig. 7-2 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree)

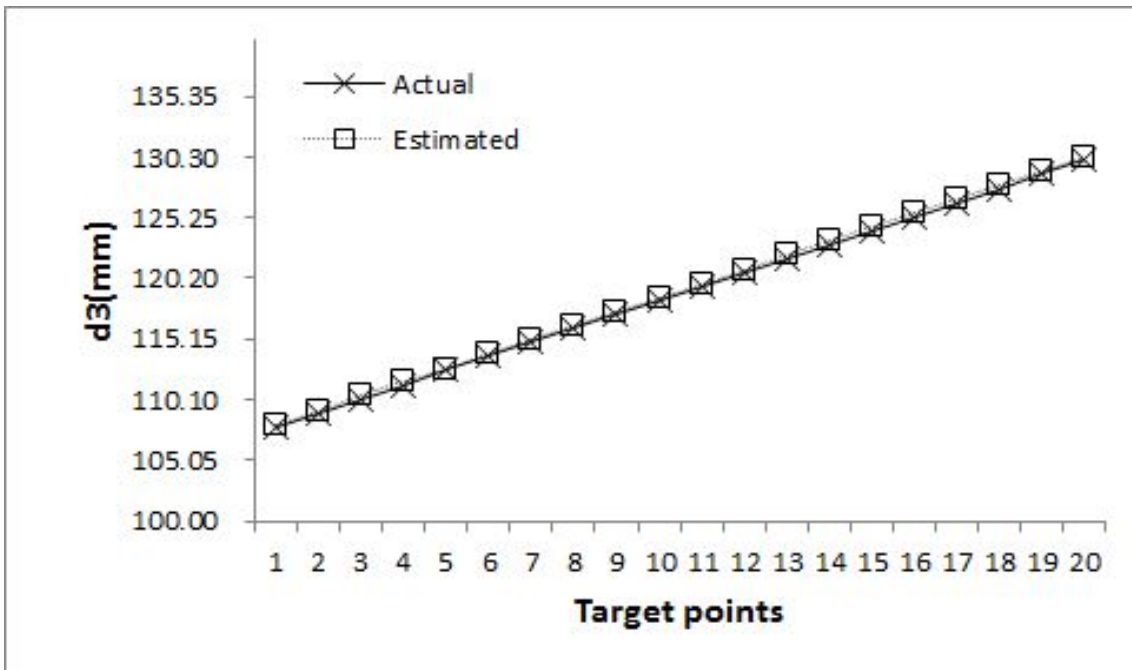


Fig. 7-3 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: mm)

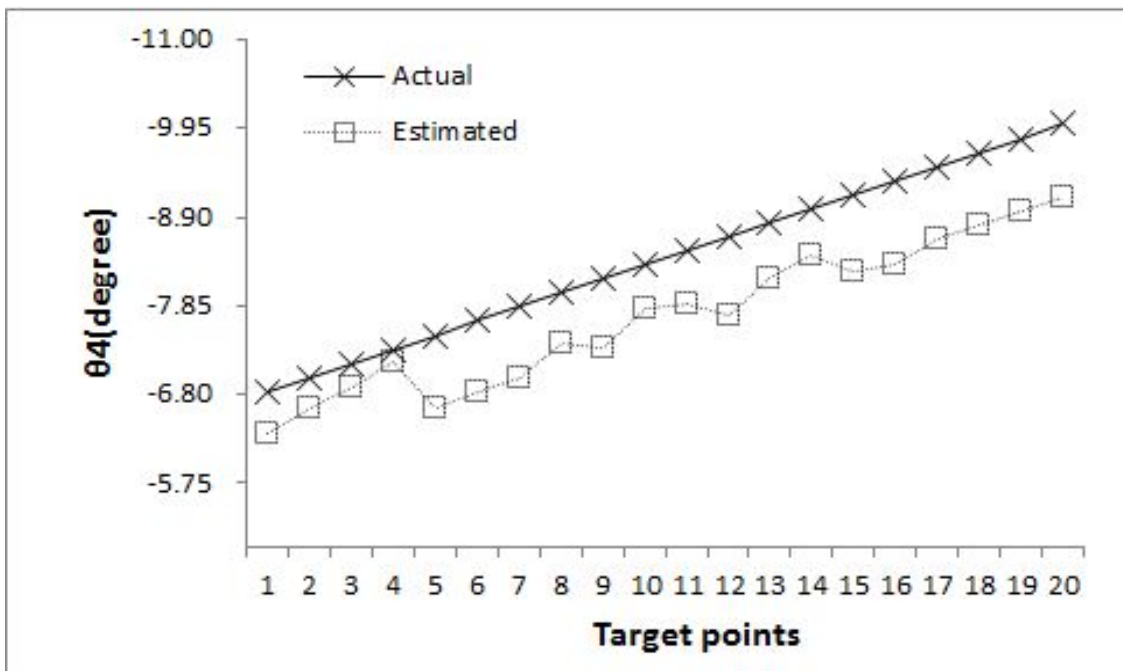


Fig. 7-4 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0$  (unit: degree)

(2) 이동타겟 공간상 위치추정

각 이동타겟에 대해 실제 타겟 위치값과 Table 7-1의 추정된 로봇 관절값을 식 (2-5)에 적용해서 계산된 공간상의 타겟 위치값은 Table 7-2와 Fig. 7-5에서 보여 준다. 각 이동타겟에 대한  $x$ 축의 오차값은 0.191~1.147(mm),  $y$ 축의 오차값은 0.020~1.239(mm),  $z$ 축의 오차값은 0.188~0.342(mm)로써 실제 타겟 위치값과 매우 근사한 값을 보여준다. 각 타겟에 대해 식(6-3)을 사용하여 계산된  $r.m.s$ 오차값의 변화를 Fig. 7-5에서 보여주며, 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값은 0.4541~0.7432(mm) 범위 내에 분포하고 전체 20개 타겟지점에 대한 평균  $r.m.s$ 오차값은 0.5955(mm)로 매우 만족할 만한 결과를 얻었다.

Table 7-2 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the batch scheme with  $\alpha=0$

Target point	Cue	Actual(mm)			Estimated(mm)			Error(mm)			r.m.s. (mm)	Proc. Time (ms)
		$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
1	1	641.250	153.141	176.167	641.059	152.804	175.980	0.191	0.337	0.187	0.4763	0
	2	641.250	153.141	146.167	641.059	152.804	145.980	0.191	0.337	0.187		
	3	601.235	177.529	176.167	600.694	176.608	175.980	0.541	0.921	0.187		
	4	601.235	177.529	146.167	600.694	176.608	145.980	0.541	0.921	0.187		
2	1	640.450	155.890	175.000	640.217	155.538	174.805	0.233	0.352	0.195	0.4541	16
	2	640.450	155.890	145.000	640.217	155.538	144.805	0.233	0.352	0.195		
	3	600.364	180.162	175.000	599.839	179.321	174.805	0.525	0.841	0.195		
	4	600.364	180.162	145.000	599.839	179.321	144.805	0.525	0.841	0.195		
3	1	639.638	158.635	173.833	639.259	158.180	173.605	0.379	0.455	0.228	0.5656	16
	2	639.638	158.635	143.833	639.259	158.180	143.605	0.379	0.455	0.228		
	3	599.481	182.790	173.833	598.786	181.799	173.605	0.695	0.991	0.228		
	4	599.481	182.790	143.833	598.786	181.799	143.605	0.695	0.991	0.228		
4	1	638.813	161.375	172.667	638.426	160.973	172.458	0.387	0.402	0.209	0.4912	31
	2	638.813	161.375	142.667	638.426	160.973	142.458	0.387	0.402	0.209		
	3	598.586	185.413	172.667	597.958	184.604	172.458	0.628	0.809	0.209		
	4	598.586	185.413	142.667	597.958	184.604	142.458	0.628	0.809	0.209		
5	1	637.975	164.111	171.500	637.782	163.916	171.312	0.193	0.195	0.188	0.5488	47
	2	637.975	164.111	141.500	637.782	163.916	141.312	0.193	0.195	0.188		
	3	597.679	188.032	171.500	596.974	186.953	171.312	0.705	1.079	0.188		
	4	597.679	188.032	141.500	596.974	186.953	141.312	0.705	1.079	0.188		

(continued)

6	1	637.125	166.842	170.333	636.801	166.628	170.119	0.324	0.214	0.214	0.6214	47
	2	637.125	166.842	140.333	636.801	166.628	140.119	0.324	0.214	0.214		
	3	596.759	190.646	170.333	595.897	189.492	170.119	0.862	1.154	0.214		
	4	596.759	190.646	140.333	595.897	189.492	140.119	0.862	1.154	0.214		
7	1	636.262	169.569	169.167	635.885	169.320	168.914	0.377	0.249	0.253	0.6773	63
	2	636.262	169.569	139.167	635.885	169.320	138.914	0.377	0.249	0.253		
	3	595.827	193.255	169.167	594.886	192.016	168.914	0.941	1.239	0.253		
	4	595.827	193.255	139.167	594.886	192.016	138.914	0.941	1.239	0.253		
8	1	635.387	172.291	168.000	635.010	172.011	167.787	0.377	0.280	0.213	0.5904	63
	2	635.387	172.291	138.000	635.010	172.011	137.787	0.377	0.280	0.213		
	3	594.884	195.860	168.000	594.066	194.806	167.787	0.818	1.054	0.213		
	4	594.884	195.860	138.000	594.066	194.806	137.787	0.818	1.054	0.213		
9	1	634.499	175.009	166.833	634.281	174.890	166.623	0.218	0.119	0.210	0.5131	78
	2	634.499	175.009	136.833	634.281	174.890	136.623	0.218	0.119	0.210		
	3	593.928	198.459	166.833	593.229	197.489	166.623	0.699	0.970	0.210		
	4	593.928	198.459	136.833	593.229	197.489	136.623	0.699	0.970	0.210		
10	1	633.599	177.721	165.667	633.220	177.452	165.414	0.379	0.269	0.253	0.5657	94
	2	633.599	177.721	135.667	633.220	177.452	135.414	0.379	0.269	0.253		
	3	592.959	201.054	165.667	592.178	200.071	165.414	0.781	0.983	0.253		
	4	592.959	201.054	135.667	592.178	200.071	135.414	0.781	0.983	0.253		
11	1	632.687	180.429	164.500	632.302	180.284	164.255	0.385	0.145	0.245	0.5544	94
	2	632.687	180.429	134.500	632.302	180.284	134.255	0.385	0.145	0.245		
	3	591.979	203.643	164.500	591.154	202.708	164.255	0.825	0.935	0.245		
	4	591.979	203.643	134.500	591.154	202.708	134.255	0.825	0.935	0.245		
12	1	631.762	183.132	163.333	631.434	182.967	163.071	0.328	0.165	0.262	0.6395	109
	2	631.762	183.132	133.333	631.434	182.967	133.071	0.328	0.165	0.262		
	3	590.987	206.228	163.333	590.100	205.047	163.071	0.887	1.181	0.262		
	4	590.987	206.228	133.333	590.100	205.047	133.071	0.887	1.181	0.262		
13	1	630.825	185.830	162.167	630.439	185.588	161.898	0.386	0.242	0.269	0.6100	125
	2	630.825	185.830	132.167	630.439	185.588	131.898	0.386	0.242	0.269		
	3	589.983	208.807	162.167	589.137	207.728	161.898	0.846	1.079	0.269		
	4	589.983	208.807	132.167	589.137	207.728	131.898	0.846	1.079	0.269		
14	1	629.876	188.524	161.000	629.397	188.258	160.719	0.479	0.266	0.281	0.6308	141
	2	629.876	188.524	131.000	629.397	188.258	130.719	0.479	0.266	0.281		
	3	588.967	211.381	161.000	588.059	210.330	160.719	0.908	1.051	0.281		
	4	588.967	211.381	131.000	588.059	210.330	130.719	0.908	1.051	0.281		
15	1	628.914	191.212	159.833	628.466	191.070	159.543	0.448	0.142	0.290	0.6905	141
	2	628.914	191.212	129.833	628.466	191.070	129.543	0.448	0.142	0.290		
	3	587.939	213.950	159.833	586.922	212.751	159.543	1.017	1.199	0.290		
	4	587.939	213.950	129.833	586.922	212.751	129.543	1.017	1.199	0.290		



(continued)

16	1	627.940	193.895	158.667	627.640	193.897	158.394	0.300	-0.002	0.273	0.5824	156
	2	627.940	193.895	128.667	627.640	193.897	128.394	0.300	-0.002	0.273		
	3	586.899	216.514	158.667	586.045	215.481	158.394	0.854	1.033	0.273		
	4	586.899	216.514	128.667	586.045	215.481	128.394	0.854	1.033	0.273		
17	1	626.954	196.573	157.500	626.442	196.446	157.185	0.512	0.127	0.315	0.7125	172
	2	626.954	196.573	127.500	626.442	196.446	127.185	0.512	0.127	0.315		
	3	585.847	219.073	157.500	584.772	217.884	157.185	1.075	1.189	0.315		
	4	585.847	219.073	127.500	584.772	217.884	127.185	1.075	1.189	0.315		
18	1	625.955	199.245	156.333	625.531	199.222	156.040	0.424	0.023	0.293	0.6147	172
	2	625.955	199.245	126.333	625.531	199.222	126.040	0.424	0.023	0.293		
	3	584.783	221.625	156.333	583.837	220.615	156.040	0.946	1.010	0.293		
	4	584.783	221.625	126.333	583.837	220.615	126.040	0.946	1.010	0.293		
19	1	624.945	201.912	155.167	624.366	201.808	154.825	0.579	0.104	0.342	0.7432	188
	2	624.945	201.912	125.167	624.366	201.808	124.825	0.579	0.104	0.342		
	3	583.708	224.173	155.167	582.561	222.982	154.825	1.147	1.191	0.342		
	4	583.708	224.173	125.167	582.561	222.982	124.825	1.147	1.191	0.342		
20	1	623.922	204.574	154.000	623.460	204.594	153.669	0.462	-0.020	0.331	0.6282	188
	2	623.922	204.574	124.000	623.460	204.594	123.669	0.462	-0.020	0.331		
	3	582.620	226.715	154.000	581.637	225.731	153.669	0.983	0.984	0.331		
	4	582.620	226.715	124.000	581.637	225.731	123.669	0.983	0.984	0.331		

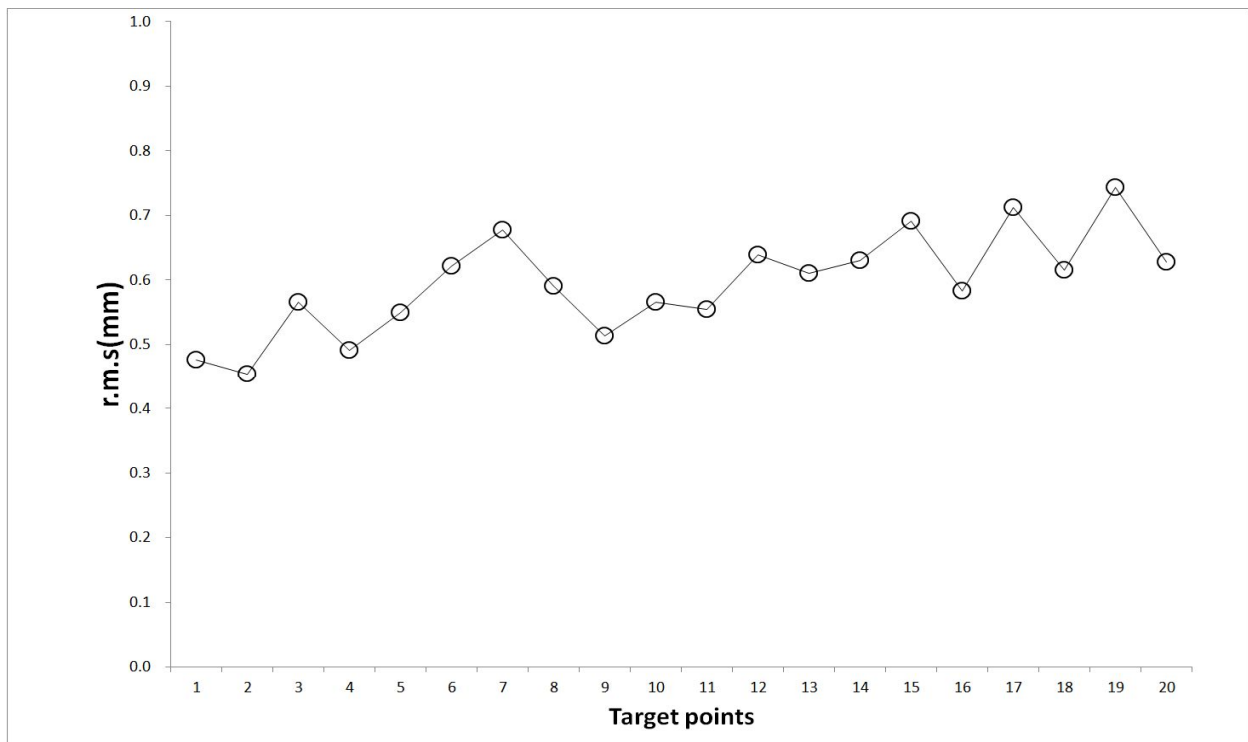


Fig. 7-5 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the batch scheme with  $\alpha=0$ . (unit: mm)

## 7.1.2 가중치행렬을 적용한 경우

### (1) 이동타겟 관절값 추정

가중치행렬을 적용한 일괄처리 기법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값을 비교하여 Table 7-3과 Fig. 7-6~Fig. 7-9에 나타내었으며, 20개 타겟지점에서 각 관절값의 오차변화를 살펴보면,  $\theta_1$ 은 0.008~0.206,  $\theta_2$ 는 0.001~0.468,  $d_3$ 는 0.037~0.111,  $\theta_4$ 는 0.011~0.665로서 만족할만한 결과를 얻었다.

Table 7-3 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit:  $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree,  $d_3$ ; mm)

Target point	Actual				Estimated				Error			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
1	8.2	17.466	107.833	-6.833	8.051	17.800	107.924	-6.819	0.149	-0.333	-0.090	-0.014
2	8.4	17.600	109.000	-7.000	8.262	17.911	109.094	-7.141	0.138	-0.311	-0.094	0.141
3	8.6	17.733	110.166	-7.166	8.394	18.202	110.273	-7.227	0.206	-0.468	-0.106	0.060
4	8.8	17.866	111.333	-7.333	8.705	18.083	111.396	-7.450	0.095	-0.216	-0.062	0.116
5	9.0	18.000	112.500	-7.500	8.905	18.191	112.545	-6.835	0.095	-0.191	-0.045	-0.665
6	9.2	18.133	113.666	-7.666	9.013	18.568	113.762	-7.533	0.187	-0.434	-0.095	-0.133
7	9.4	18.266	114.833	-7.833	9.233	18.642	114.945	-7.643	0.167	-0.375	-0.111	-0.190
8	9.6	18.400	116.000	-8.000	9.528	18.550	116.037	-8.060	0.072	-0.150	-0.037	0.060
9	9.8	18.533	117.166	-8.166	9.789	18.532	117.215	-7.806	0.011	0.001	-0.048	-0.360
10	10.0	18.666	118.333	-8.333	9.868	18.963	118.436	-8.381	0.132	-0.296	-0.102	0.047
11	10.2	18.800	119.500	-8.500	10.106	19.019	119.567	-8.311	0.094	-0.219	-0.067	-0.189
12	10.4	18.933	120.666	-8.666	10.276	19.189	120.748	-8.232	0.124	-0.255	-0.081	-0.434
13	10.6	19.066	121.833	-8.833	10.506	19.267	121.901	-8.845	0.094	-0.200	-0.067	0.011
14	10.8	19.200	123.000	-9.000	10.689	19.453	123.073	-8.936	0.111	-0.253	-0.073	-0.064
15	11.0	19.333	124.166	-9.166	10.895	19.567	124.227	-8.731	0.105	-0.233	-0.060	-0.435
16	11.2	19.466	125.333	-9.333	11.192	19.462	125.380	-8.965	0.008	0.004	-0.046	-0.368
17	11.4	19.600	126.500	-9.500	11.234	19.986	126.594	-9.372	0.166	-0.386	-0.094	-0.128
18	11.6	19.733	127.666	-9.666	11.569	19.791	127.704	-9.471	0.031	-0.057	-0.037	-0.195
19	11.8	19.866	128.833	-9.833	11.655	20.202	128.924	-9.620	0.145	-0.335	-0.090	-0.213
20	12.0	20.000	130.000	-10.000	11.992	20.004	130.053	-9.785	0.008	-0.004	-0.053	-0.215



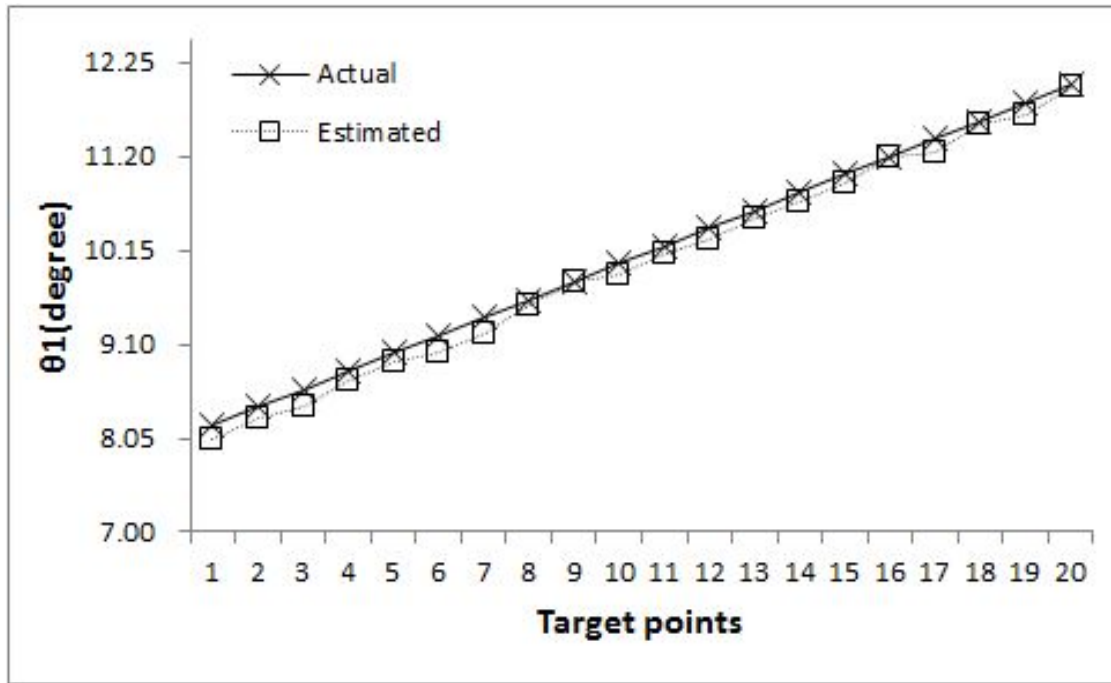


Fig. 7-6 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree)

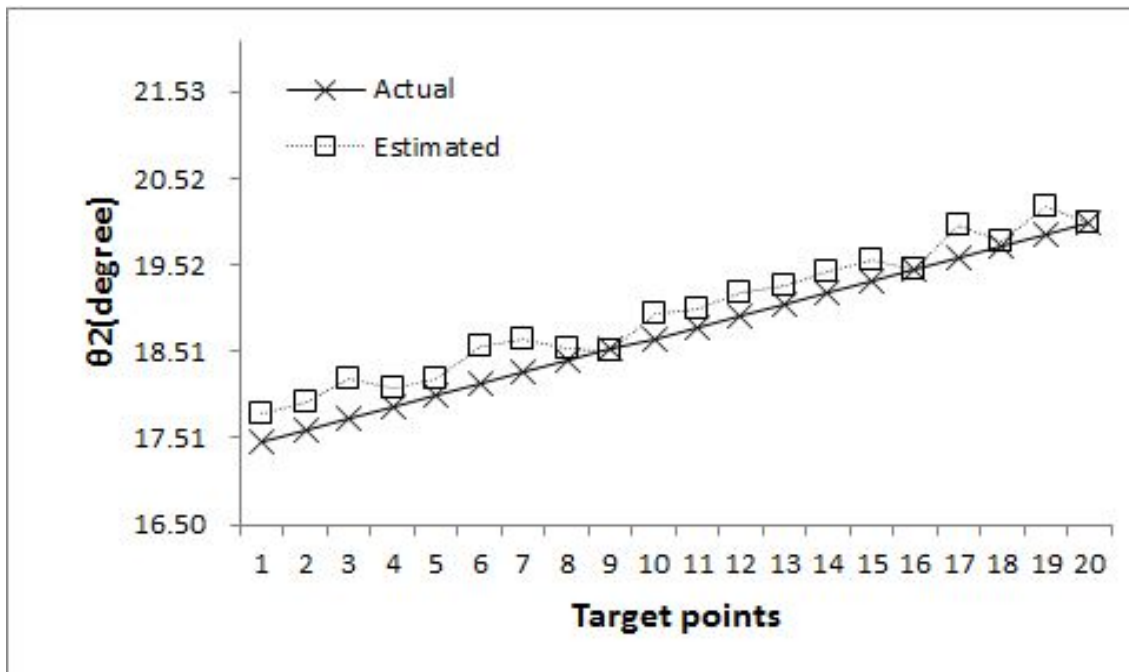


Fig. 7-7 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree)

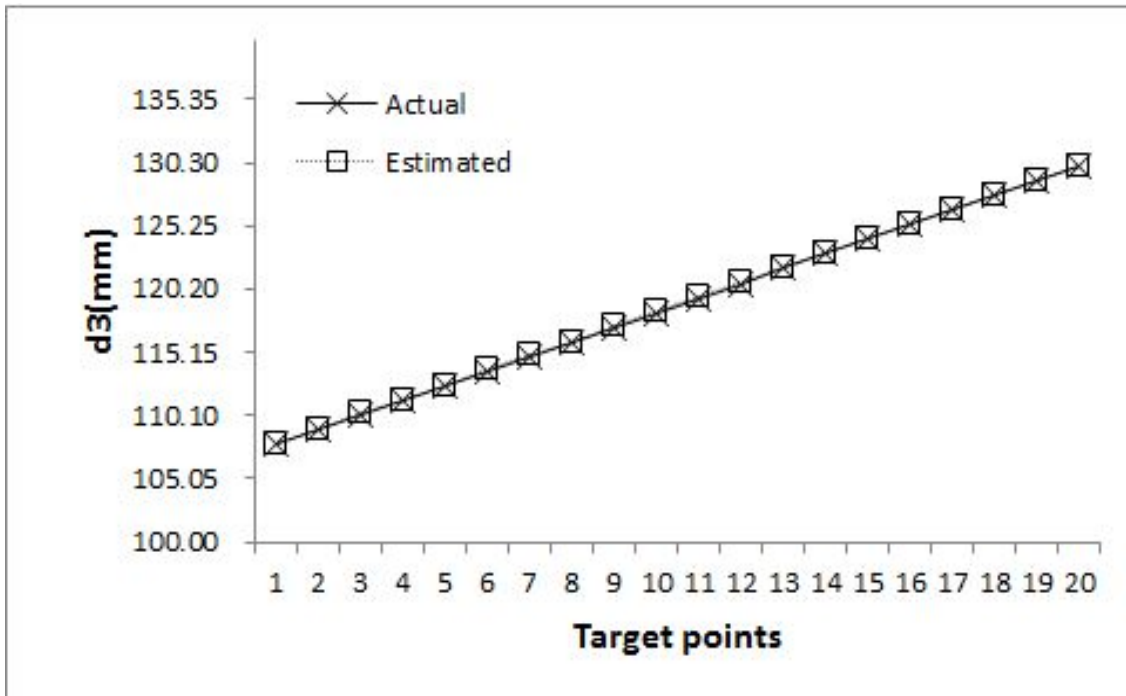


Fig. 7-8 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: mm)

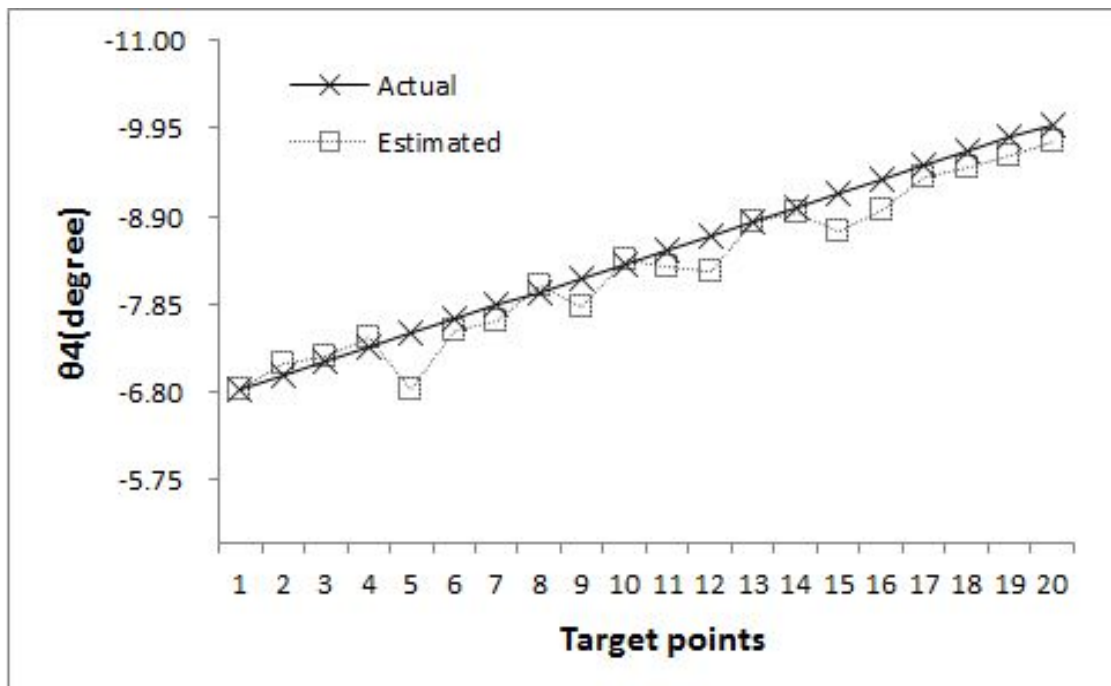


Fig. 7-9 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: degree)

(2) 이동타겟 공간상 위치추정

각 이동타겟지점에 대한 Table 7-3의 추정된 로봇 관절값을 식(2-6)에 대입하여 계산된 공간상의 타겟 위치값을 실제 타겟 위치값과 비교하기 위해 Table 7-4와 Fig. 7-10에 나타내었다. 각 이동타겟지점에 대한  $x$ 축의 오차값은 0.034~0.338(mm),  $y$ 축의 오차값은 0.003~0.554(mm),  $z$ 축의 오차값은 0.037~0.112(mm)로서 매우 근사한 값을 보여준다. 식(6-3)을 사용하여 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값의 변화를 Fig. 7-10에 나타내었으며, 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값은 0.0724~0.2962(mm) 범위에 존재한다. 또한, 전체 20개 타겟에 대한 평균  $r.m.s$ 오차값은 0.1905(mm)로 매우 작은 오차값으로서 만족할만한 결과를 보여주고 있다.

Table 7-4 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the batch scheme with  $\alpha=0.21$

Target point	Cue	Actual(mm)			Estimated(mm)			Error(mm)			r.m.s. (mm)	Proc. Time (ms)
		$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
1	1	641.250	153.141	176.167	641.091	152.900	176.076	0.159	0.241	0.091	0	16
	2	641.250	153.141	146.167	641.091	152.900	146.076	0.159	0.241	0.091		
	3	601.235	177.529	176.167	600.992	177.150	176.076	0.243	0.379	0.091		
	4	601.235	177.529	146.167	600.992	177.150	146.076	0.243	0.379	0.091		
2	1	640.450	155.890	175.000	640.265	155.624	174.906	0.185	0.266	0.094	0.2022	16
	2	640.450	155.890	145.000	640.265	155.624	144.906	0.185	0.266	0.094		
	3	600.364	180.162	175.000	600.166	179.873	174.906	0.198	0.289	0.094		
	4	600.364	180.162	145.000	600.166	179.873	144.906	0.198	0.289	0.094		
3	1	639.638	158.635	173.833	639.381	158.312	173.727	0.257	0.323	0.106	0.2962	31
	2	639.638	158.635	143.833	639.381	158.312	143.727	0.257	0.323	0.106		
	3	599.481	182.790	173.833	599.140	182.324	173.727	0.341	0.466	0.106		
	4	599.481	182.790	143.833	599.140	182.324	143.727	0.341	0.466	0.106		
4	1	638.813	161.375	172.667	638.678	161.190	172.604	0.135	0.185	0.063	0.1380	31
	2	638.813	161.375	142.667	638.678	161.190	142.604	0.135	0.185	0.063		
	3	598.586	185.413	172.667	598.450	185.225	172.604	0.136	0.188	0.063		
	4	598.586	185.413	142.667	598.450	185.225	142.604	0.136	0.188	0.063		
5	1	637.975	164.111	171.500	638.045	164.098	171.455	-0.070	0.013	0.045	0.2491	47
	2	637.975	164.111	141.500	638.045	164.098	141.455	-0.070	0.013	0.045		
	3	597.679	188.032	171.500	597.435	187.481	171.455	0.244	0.551	0.045		
	4	597.679	188.032	141.500	597.435	187.481	141.455	0.244	0.551	0.045		
6	1	637.125	166.842	170.333	636.912	166.646	170.238	0.213	0.196	0.095	0.2754	62
	2	637.125	166.842	140.333	636.912	166.646	140.238	0.213	0.196	0.095		
	3	596.759	190.646	170.333	596.389	190.181	170.238	0.370	0.465	0.095		
	4	596.759	190.646	140.333	596.389	190.181	140.238	0.370	0.465	0.095		

(continued)

7	1	636.262	169.569	169.167	636.109	169.367	169.055	0.153	0.202	0.112	0.2658	62
	2	636.262	169.569	139.167	636.109	169.367	139.055	0.153	0.202	0.112		
	3	595.827	193.255	169.167	595.510	192.771	169.055	0.317	0.484	0.112		
	4	595.827	193.255	139.167	595.510	192.771	139.055	0.317	0.484	0.112		
8	1	635.387	172.291	168.000	635.316	172.098	167.963	0.071	0.193	0.037	0.1250	78
	2	635.387	172.291	138.000	635.316	172.098	137.963	0.071	0.193	0.037		
	3	594.884	195.860	168.000	594.805	195.654	167.963	0.079	0.206	0.037		
	4	594.884	195.860	138.000	594.805	195.654	137.963	0.079	0.206	0.037		
9	1	634.499	175.009	166.833	634.608	175.012	166.785	-0.109	-0.003	0.048	0.1134	78
	2	634.499	175.009	136.833	634.608	175.012	136.785	-0.109	-0.003	0.048		
	3	593.928	198.459	166.833	593.894	198.215	166.785	0.034	0.244	0.048		
	4	593.928	198.459	136.833	593.894	198.215	136.785	0.034	0.244	0.048		
10	1	633.599	177.721	165.667	633.437	177.484	165.564	0.162	0.237	0.103	0.2043	94
	2	633.599	177.721	135.667	633.437	177.484	135.564	0.162	0.237	0.103		
	3	592.959	201.054	165.667	592.750	200.733	165.564	0.209	0.321	0.103		
	4	592.959	201.054	135.667	592.750	200.733	135.564	0.209	0.321	0.103		
11	1	632.687	180.429	164.500	632.601	180.372	164.433	0.086	0.057	0.067	0.1544	109
	2	632.687	180.429	134.500	632.601	180.372	134.433	0.086	0.057	0.067		
	3	591.979	203.643	164.500	591.767	203.363	164.433	0.212	0.280	0.067		
	4	591.979	203.643	134.500	591.767	203.363	134.433	0.212	0.280	0.067		
12	1	631.762	183.132	163.333	631.749	182.982	163.252	0.013	0.150	0.081	0.2581	109
	2	631.762	183.132	133.333	631.749	182.982	133.252	0.013	0.150	0.081		
	3	590.987	206.228	163.333	590.748	205.674	163.252	0.239	0.554	0.081		
	4	590.987	206.228	133.333	590.748	205.674	133.252	0.239	0.554	0.081		
13	1	630.825	185.830	162.167	630.734	185.624	162.099	0.091	0.206	0.068	0.1590	125
	2	630.825	185.830	132.167	630.734	185.624	132.099	0.091	0.206	0.068		
	3	589.983	208.807	162.167	589.854	208.533	162.099	0.129	0.274	0.068		
	4	589.983	208.807	132.167	589.854	208.533	132.099	0.129	0.274	0.068		
14	1	629.876	188.524	161.000	629.751	188.370	160.927	0.125	0.154	0.073	0.1746	125
	2	629.876	188.524	131.000	629.751	188.370	130.927	0.125	0.154	0.073		
	3	588.967	211.381	161.000	588.760	211.081	160.927	0.207	0.300	0.073		
	4	588.967	211.381	131.000	588.760	211.081	130.927	0.207	0.300	0.073		
15	1	628.914	191.212	159.833	628.878	191.185	159.773	0.036	0.027	0.060	0.2091	141
	2	628.914	191.212	129.833	628.878	191.185	129.773	0.036	0.027	0.060		
	3	587.939	213.950	159.833	587.681	213.518	159.773	0.258	0.432	0.060		
	4	587.939	213.950	129.833	587.681	213.518	129.773	0.258	0.432	0.060		
16	1	627.940	193.895	158.667	628.047	193.926	158.620	-0.107	-0.031	0.047	0.1065	156
	2	627.940	193.895	128.667	628.047	193.926	128.620	-0.107	-0.031	0.047		
	3	586.899	216.514	158.667	586.866	216.290	158.620	0.033	0.224	0.047		
	4	586.899	216.514	128.667	586.866	216.290	128.620	0.033	0.224	0.047		
17	1	626.954	196.573	157.500	626.752	196.386	157.406	0.202	0.187	0.094	0.2578	156
	2	626.954	196.573	127.500	626.752	196.386	127.406	0.202	0.187	0.094		
	3	585.847	219.073	157.500	585.509	218.636	157.406	0.338	0.437	0.094		
	4	585.847	219.073	127.500	585.509	218.636	127.406	0.338	0.437	0.094		
18	1	625.955	199.245	156.333	625.980	199.216	156.296	-0.025	0.029	0.037	0.0854	172
	2	625.955	199.245	126.333	625.980	199.216	126.296	-0.025	0.029	0.037		
	3	584.783	221.625	156.333	584.721	221.436	156.296	0.062	0.189	0.037		
	4	584.783	221.625	126.333	584.721	221.436	126.296	0.062	0.189	0.037		
19	1	624.945	201.912	155.167	624.791	201.774	155.076	0.154	0.138	0.091	0.2382	187
	2	624.945	201.912	125.167	624.791	201.774	125.076	0.154	0.138	0.091		
	3	583.708	224.173	155.167	583.398	223.743	155.076	0.310	0.430	0.091		
	4	583.708	224.173	125.167	583.398	223.743	125.076	0.310	0.430	0.091		

(continued)

20	1	623.922	204.574	154.000	623.984	204.580	153.947	-0.062	-0.006	0.053	0.0724	187
	2	623.922	204.574	124.000	623.984	204.580	123.947	-0.062	-0.006	0.053		
	3	582.620	226.715	154.000	582.601	226.568	153.947	0.019	0.147	0.053		
	4	582.620	226.715	124.000	582.601	226.568	123.947	0.019	0.147	0.053		

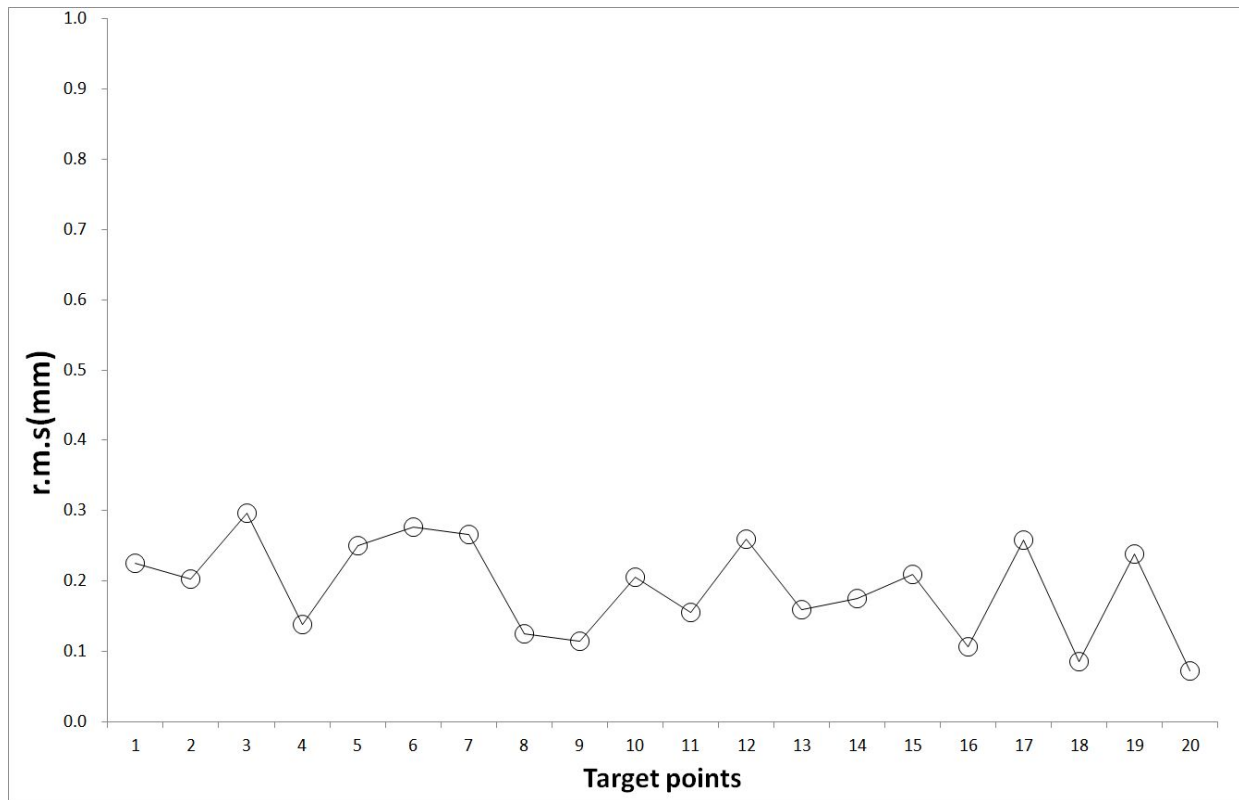


Fig. 7-10 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the batch scheme with  $\alpha=0.21$  (unit: mm)

## 7.2 데이터이동 방법을 이용한 강체 이동타겟 추정

### 7.2.1 가중치행렬을 적용하지 않은 경우

#### (1) 이동타겟 관절값 추정

가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 기법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값을 비교하여 Table 7-5과 Fig. 7-11~Fig. 7-14에 나타내었으며, 20개 타겟지점에서 각 관절값의 오차변화를 살펴보면,  $\theta_1$ 은 0.022~0.334,  $\theta_2$ 는 0.035~0.752,  $d_3$ 는 0.056~0.200,  $\theta_4$ 는 0.013~0.461로서 만족할만한 결과를 얻었다.

Table 7-5 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit:  $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree,  $d_3$ ; mm)

Target point	Actual				Estimated				Error			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
1	8.2	17.467	107.833	-6.833	7.951	18.007	108.000	-6.778	0.249	-0.540	-0.167	-0.055
2	8.4	17.600	109.000	-7.000	8.151	18.150	109.172	-7.176	0.249	-0.550	-0.172	0.176
3	8.6	17.733	110.167	-7.167	8.266	18.485	110.367	-7.375	0.334	-0.752	-0.200	0.208
4	8.8	17.867	111.333	-7.333	8.564	18.396	111.496	-7.697	0.236	-0.529	-0.163	0.364
5	9.0	18.000	112.500	-7.500	8.876	18.241	112.608	-7.039	0.124	-0.241	-0.108	-0.461
6	9.2	18.133	113.667	-7.667	8.980	18.618	113.812	-7.362	0.220	-0.485	-0.145	-0.305
7	9.4	18.267	114.833	-7.833	9.145	18.828	115.015	-7.553	0.255	-0.561	-0.182	-0.280
8	9.6	18.400	116.000	-8.000	9.438	18.739	116.126	-8.013	0.162	-0.339	-0.126	0.013
9	9.8	18.533	117.167	-8.167	9.755	18.586	117.277	-7.931	0.045	-0.053	-0.110	-0.236
10	10.0	18.667	118.333	-8.333	9.912	18.825	118.474	-8.463	0.088	-0.158	-0.141	0.130
11	10.2	18.800	119.500	-8.500	10.099	19.008	119.630	-8.515	0.101	-0.208	-0.130	0.015
12	10.4	18.933	120.667	-8.667	10.272	19.179	120.804	-8.397	0.128	-0.246	-0.137	-0.270
13	10.6	19.067	121.833	-8.833	10.530	19.172	121.951	-8.701	0.070	-0.105	-0.118	-0.132
14	10.8	19.200	123.000	-9.000	10.718	19.346	123.116	-8.985	0.082	-0.146	-0.116	-0.015
15	11.0	19.333	124.167	-9.167	10.902	19.520	124.278	-8.821	0.098	-0.187	-0.111	-0.346
16	11.2	19.467	125.333	-9.333	11.222	19.360	125.412	-8.889	-0.022	0.107	-0.079	-0.444
17	11.4	19.600	126.500	-9.500	11.316	19.759	126.609	-9.282	0.084	-0.159	-0.109	-0.218
18	11.6	19.733	127.667	-9.667	11.657	19.548	127.723	-9.354	-0.057	0.185	-0.056	-0.313
19	11.8	19.867	128.833	-9.833	11.767	19.902	128.925	-9.558	0.033	-0.035	-0.092	-0.275
20	12.0	20.000	130.000	-10.000	12.111	19.683	130.054	-9.703	-0.111	0.317	-0.054	-0.297



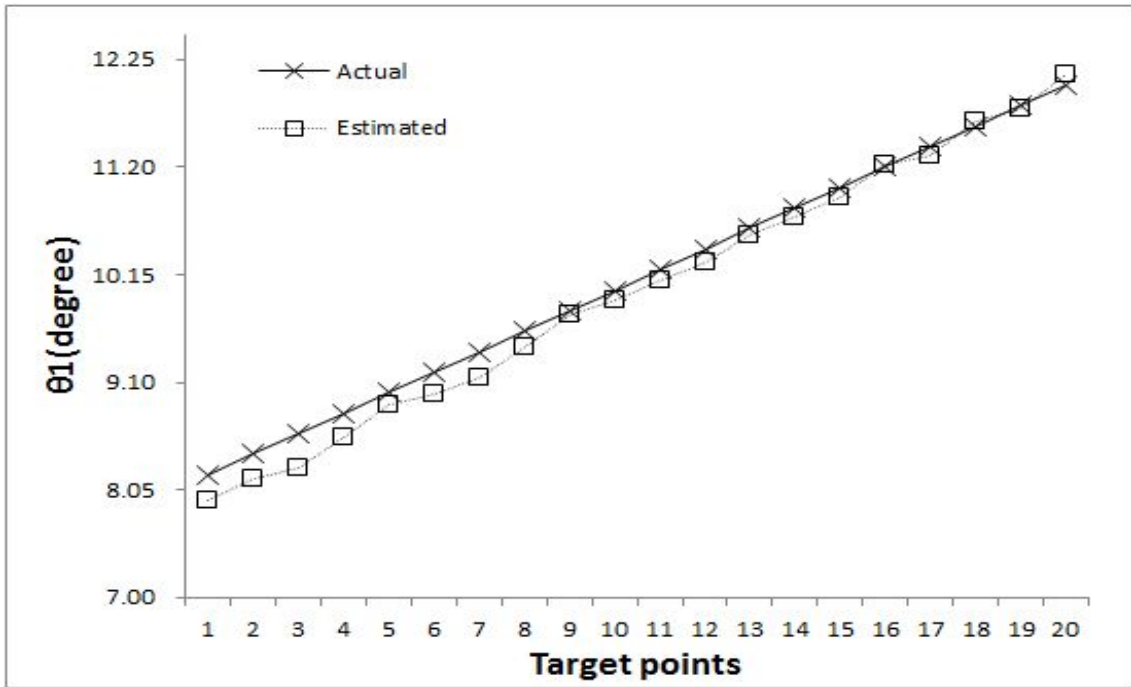


Fig. 7-11 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree)

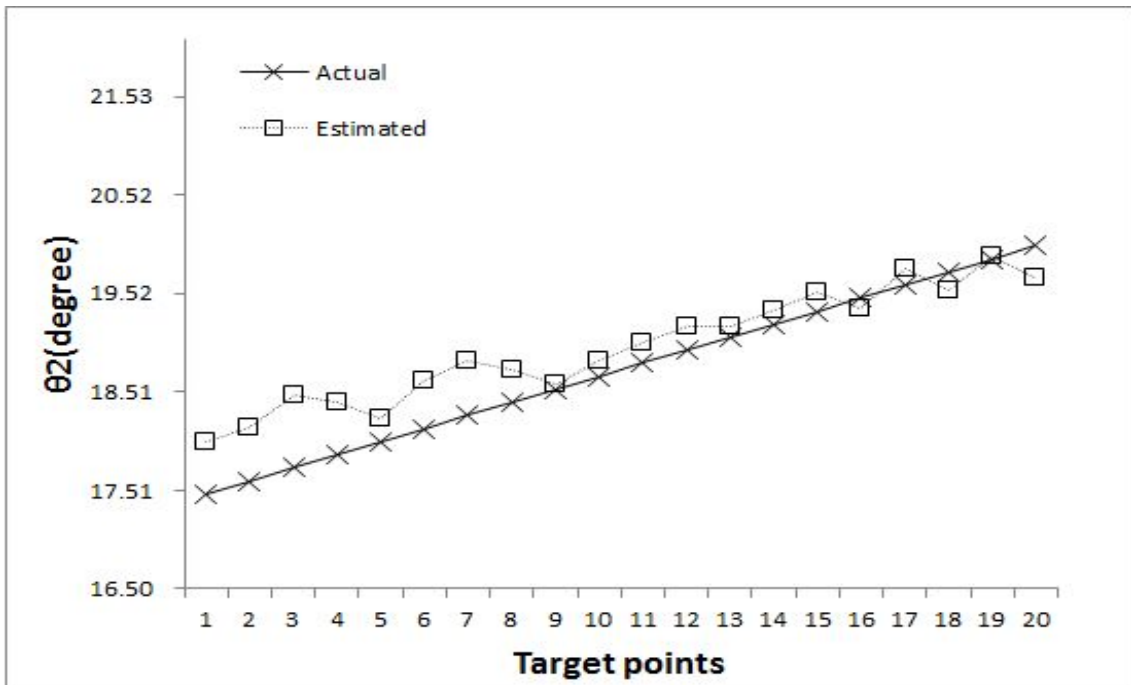


Fig. 7-12 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree)

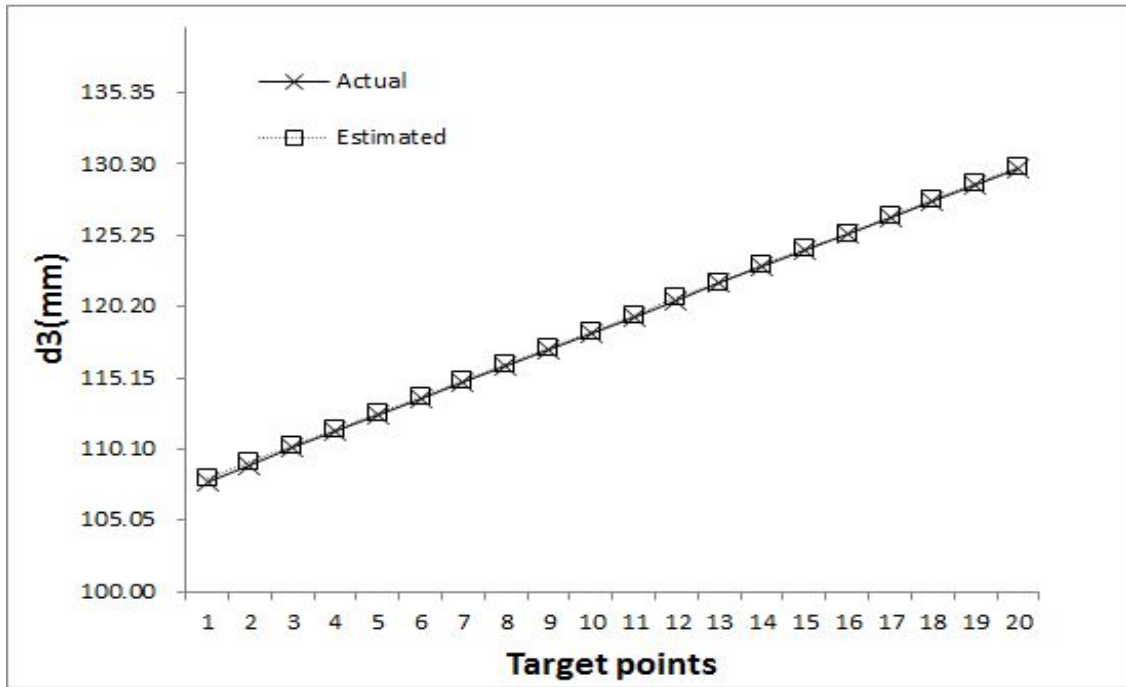


Fig. 7-13 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: mm)

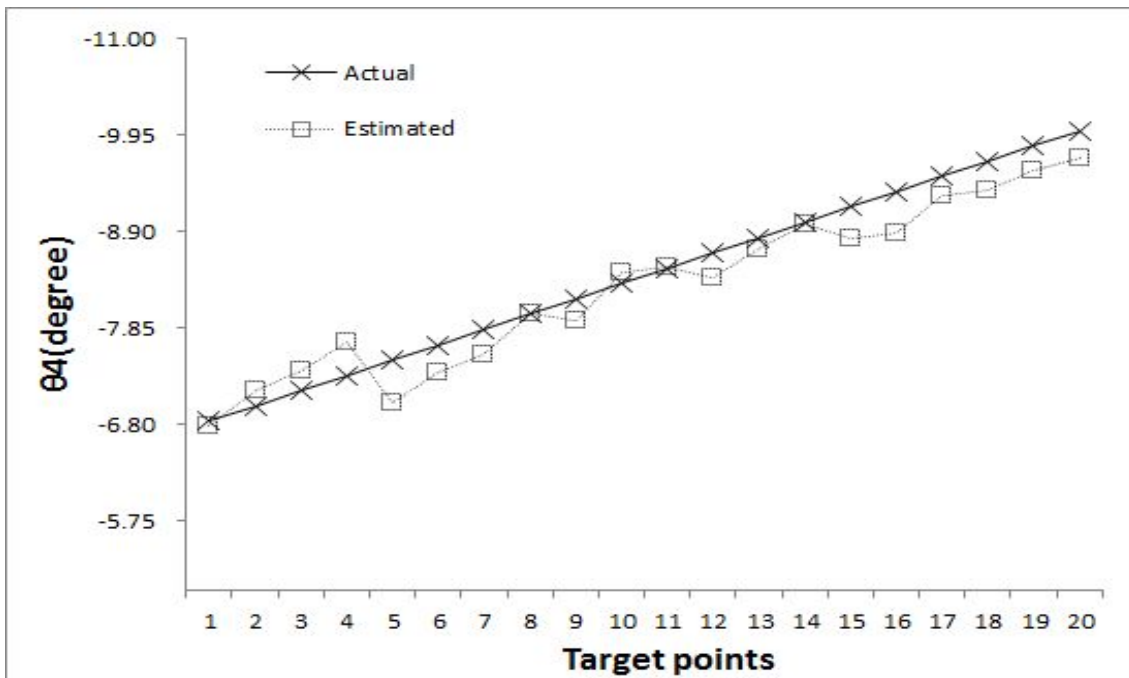


Fig. 7-14 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: degree)



(2) 이동타겟 공간상 위치추정

각 이동타겟지점에 대해 실제 타겟 위치값과 Table 7-5의 추정된 로봇 관절값을 식(2-6)에 적용하여 계산된 공간상의 타겟 위치값을 비교하여 Table 7-6과 Fig. 7-15에 나타내었으며, 각 이동타겟지점에 대한  $x$ 축의 오차값은 0.004~0.459(mm),  $y$ 축의 오차값은 0.023~0.777(mm),  $z$ 축의 오차값은 0.037~0.054(mm)로써 매우 근사한 값을 보여준다. 식(6-3)을 통해 계산된 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값의 변화를 Fig. 7-15에서 보여준다. 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값은 0.1429~0.4904(mm) 범위 내의 만족할만한 결과와 전체 20개 타겟에 대한 평균  $r.m.s$ . 오차값은 0.2668(mm)의 매우 작은 오차값을 보여준다.

Table 7-6 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$

Target point	Cue	Actual(mm)			Estimated(mm)			Error(mm)			r.m.s. (mm)	Proc. Time (ms)
		$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
1	1	641.250	153.141	176.167	641.014	152.690	176.000	0.236	0.451	0.167	0.3966	0
	2	641.250	153.141	146.167	641.014	152.690	146.000	0.236	0.451	0.167		
	3	601.235	177.529	176.167	600.851	176.835	176.000	0.384	0.694	0.167		
	4	601.235	177.529	146.167	600.851	176.835	146.000	0.384	0.694	0.167		
2	1	640.450	155.890	175.000	640.149	155.389	174.828	0.301	0.501	0.172	0.3814	15
	2	640.450	155.890	145.000	640.149	155.389	144.828	0.301	0.501	0.172		
	3	600.364	180.162	175.000	600.010	179.573	174.828	0.354	0.589	0.172		
	4	600.364	180.162	145.000	600.010	179.573	144.828	0.354	0.589	0.172		
3	1	639.638	158.635	173.833	639.208	158.038	173.633	0.430	0.597	0.200	0.4904	15
	2	639.638	158.635	143.833	639.208	158.038	143.633	0.430	0.597	0.200		
	3	599.481	182.790	173.833	598.963	182.046	173.633	0.518	0.744	0.200		
	4	599.481	182.790	143.833	598.963	182.046	143.633	0.518	0.744	0.200		
4	1	638.813	161.375	172.667	638.468	160.869	172.504	0.345	0.506	0.163	0.3503	31
	2	638.813	161.375	142.667	638.468	160.869	142.504	0.345	0.506	0.163		
	3	598.586	185.413	172.667	598.271	184.956	172.504	0.315	0.457	0.163		
	4	598.586	185.413	142.667	598.271	184.956	142.504	0.315	0.457	0.163		
5	1	637.975	164.111	171.500	637.998	163.912	171.392	-0.023	0.199	0.108	0.2824	31
	2	637.975	164.111	141.500	637.998	163.912	141.392	-0.023	0.199	0.108		
	3	597.679	188.032	171.500	597.463	187.425	171.392	0.216	0.607	0.108		
	4	597.679	188.032	141.500	597.463	187.425	141.392	0.216	0.607	0.108		

(continued)

6	1	637.125	166.842	170.333	636.953	166.548	170.188	0.172	0.294	0.145	0.3671	47
	2	637.125	166.842	140.333	636.953	166.548	140.188	0.172	0.294	0.145		
	3	596.759	190.646	170.333	596.353	189.949	170.188	0.406	0.697	0.145		
	4	596.759	190.646	140.333	596.353	189.949	140.188	0.406	0.697	0.145		
7	1	636.262	169.569	169.167	636.044	169.208	168.985	0.218	0.361	0.182	0.4200	47
	2	636.262	169.569	139.167	636.044	169.208	138.985	0.218	0.361	0.182		
	3	595.827	193.255	169.167	595.368	192.478	168.985	0.459	0.777	0.182		
	4	595.827	193.255	139.167	595.368	192.478	138.985	0.459	0.777	0.182		
8	1	635.387	172.291	168.000	635.245	171.912	167.874	0.142	0.379	0.126	0.2845	62
	2	635.387	172.291	138.000	635.245	171.912	137.874	0.142	0.379	0.126		
	3	594.884	195.860	168.000	594.674	195.364	167.874	0.210	0.496	0.126		
	4	594.884	195.860	138.000	594.674	195.364	137.874	0.210	0.496	0.126		
9	1	634.499	175.009	166.833	634.587	174.811	166.723	-0.088	0.198	0.110	0.1863	62
	2	634.499	175.009	136.833	634.587	174.811	136.723	-0.088	0.198	0.110		
	3	593.928	198.459	166.833	593.917	198.089	166.723	0.011	0.370	0.110		
	4	593.928	198.459	136.833	593.917	198.089	136.723	0.011	0.370	0.110		
10	1	633.599	177.721	165.667	633.546	177.367	165.526	0.053	0.354	0.141	0.2108	78
	2	633.599	177.721	135.667	633.546	177.367	135.526	0.053	0.354	0.141		
	3	592.959	201.054	165.667	592.930	200.741	165.526	0.029	0.313	0.141		
	4	592.959	201.054	135.667	592.930	200.741	135.526	0.029	0.313	0.141		
11	1	632.687	180.429	164.500	632.604	180.173	164.370	0.083	0.256	0.130	0.1928	78
	2	632.687	180.429	134.500	632.604	180.173	134.370	0.083	0.256	0.130		
	3	591.979	203.643	164.500	591.859	203.323	164.370	0.120	0.320	0.130		
	4	591.979	203.643	134.500	591.859	203.323	134.370	0.120	0.320	0.130		
12	1	631.762	183.132	163.333	631.749	182.835	163.196	0.013	0.297	0.137	0.2836	93
	2	631.762	183.132	133.333	631.749	182.835	133.196	0.013	0.297	0.137		
	3	590.987	206.228	163.333	590.819	205.655	163.196	0.168	0.573	0.137		
	4	590.987	206.228	133.333	590.819	205.655	133.196	0.168	0.573	0.137		
13	1	630.825	185.830	162.167	630.871	185.545	162.049	-0.046	0.285	0.118	0.2143	93
	2	630.825	185.830	132.167	630.871	185.545	132.049	-0.046	0.285	0.118		
	3	589.983	208.807	162.167	589.962	208.402	162.049	0.021	0.405	0.118		
	4	589.983	208.807	132.167	589.962	208.402	132.049	0.021	0.405	0.118		
14	1	629.876	188.524	161.000	629.860	188.227	160.884	0.016	0.297	0.116	0.2006	109
	2	629.876	188.524	131.000	629.860	188.227	130.884	0.016	0.297	0.116		
	3	588.967	211.381	161.000	588.920	211.029	160.884	0.047	0.352	0.116		
	4	588.967	211.381	131.000	588.920	211.029	130.884	0.047	0.352	0.116		
15	1	628.914	191.212	159.833	628.934	191.029	159.722	-0.020	0.183	0.111	0.2325	109
	2	628.914	191.212	129.833	628.934	191.029	129.722	-0.020	0.183	0.111		
	3	587.939	213.950	159.833	587.788	213.457	159.722	0.151	0.493	0.111		
	4	587.939	213.950	129.833	587.788	213.457	129.722	0.151	0.493	0.111		

(continued)

16	1	627.940	193.895	158.667	628.168	193.857	158.588	-0.228	0.038	0.079	0.1639	125
	2	627.940	193.895	128.667	628.168	193.857	128.588	-0.228	0.038	0.079		
	3	586.899	216.514	158.667	586.986	216.218	158.588	-0.087	0.296	0.079		
	4	586.899	216.514	128.667	586.986	216.218	128.588	-0.087	0.296	0.079		
17	1	626.954	196.573	157.500	626.958	196.383	157.391	-0.004	0.190	0.109	0.1971	140
	2	626.954	196.573	127.500	626.958	196.383	127.391	-0.004	0.190	0.109		
	3	585.847	219.073	157.500	585.736	218.672	157.391	0.111	0.401	0.109		
	4	585.847	219.073	127.500	585.736	218.672	127.391	0.111	0.401	0.109		
18	1	625.955	199.245	156.333	626.202	199.222	156.277	-0.247	0.023	0.056	0.1429	140
	2	625.955	199.245	126.333	626.202	199.222	126.277	-0.247	0.023	0.056		
	3	584.783	221.625	156.333	584.958	221.470	156.277	-0.175	0.155	0.056		
	4	584.783	221.625	126.333	584.958	221.470	126.277	-0.175	0.155	0.056		
19	1	624.945	201.912	155.167	625.040	201.795	155.075	-0.095	0.117	0.092	0.1532	156
	2	624.945	201.912	125.167	625.040	201.795	125.075	-0.095	0.117	0.092		
	3	583.708	224.173	155.167	583.696	223.855	155.075	0.012	0.318	0.092		
	4	583.708	224.173	125.167	583.696	223.855	125.075	0.012	0.318	0.092		
20	1	623.922	204.574	154.000	624.253	204.599	153.946	-0.331	-0.025	0.054	0.1853	156
	2	623.922	204.574	124.000	624.253	204.599	123.946	-0.331	-0.025	0.054		
	3	582.620	226.715	154.000	582.917	226.674	153.946	-0.297	0.041	0.054		
	4	582.620	226.715	124.000	582.917	226.674	123.946	-0.297	0.041	0.054		

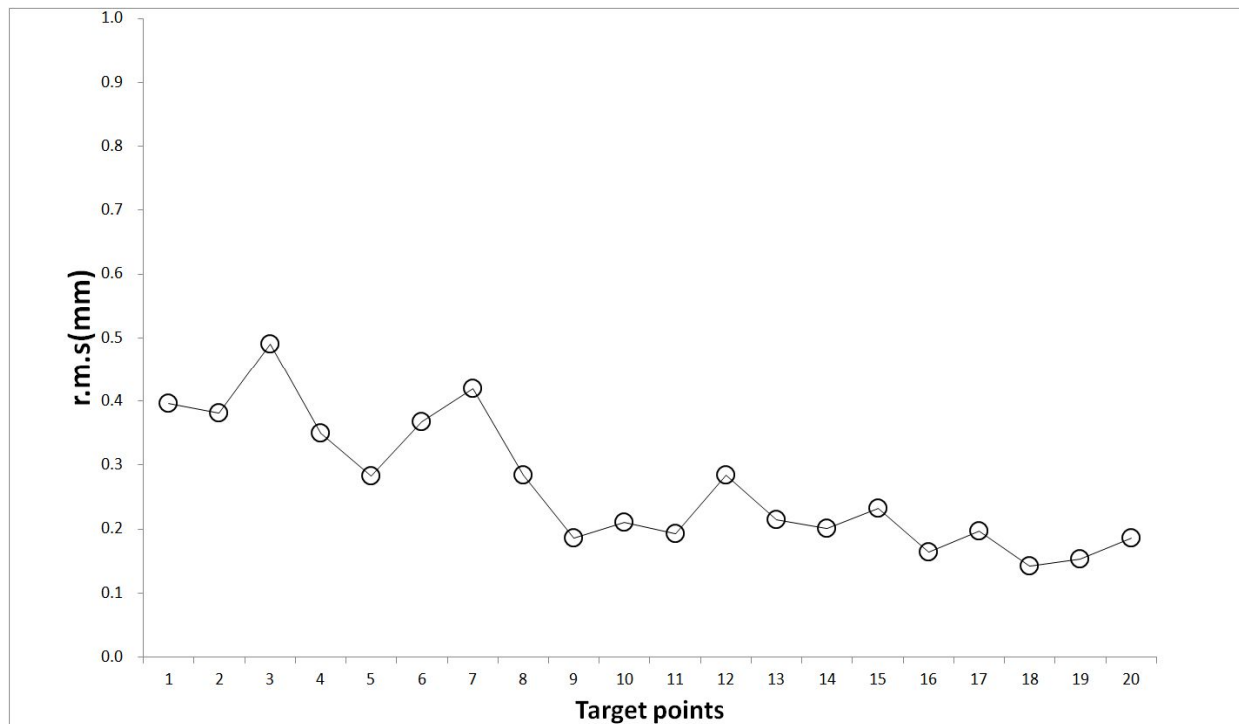


Fig. 7-15 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the batch scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0$  (unit: mm)

## 7.2.2 가중치행렬을 적용한 경우

### (1) 이동타겟 관절값 추정

가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법에서 로봇 관절값 추정기법에 의해서 계산된 관절값과 실제 관절값을 비교하여 Table 7-7과 Fig. 7-16~Fig. 7-19에 나타내었으며, 20개 타겟지점에서 각 관절값의 오차변화를 살펴보면,  $\theta_1$ 은 0.007~0.252,  $\theta_2$ 는 0.005~0.574,  $d_3$ 는 0.006~0.145,  $\theta_4$ 는 0.013~0.579로서 만족할만한 결과를 얻었다.

Table 7-7 For the robot joint values of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit:  $\theta_1, \theta_2, \theta_4$ ; degree,  $d_3$ ; mm)

Target point	Actual				Estimated				Error			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$
1	8.2	17.467	107.833	-6.833	7.951	18.007	108.000	-6.778	0.208	-0.466	-0.128	0.083
2	8.4	17.600	109.000	-7.000	8.151	18.150	109.172	-7.176	0.209	-0.475	-0.138	0.278
3	8.6	17.733	110.167	-7.167	8.266	18.485	110.367	-7.375	0.252	-0.574	-0.145	0.208
4	8.8	17.867	111.333	-7.333	8.564	18.396	111.496	-7.697	0.101	-0.222	-0.092	0.220
5	9.0	18.000	112.500	-7.500	8.876	18.241	112.608	-7.039	0.070	-0.124	-0.062	-0.579
6	9.2	18.133	113.667	-7.667	8.980	18.618	113.812	-7.362	0.158	-0.354	-0.113	-0.154
7	9.4	18.267	114.833	-7.833	9.145	18.828	115.015	-7.553	0.166	-0.367	-0.140	-0.132
8	9.6	18.400	116.000	-8.000	9.438	18.739	116.126	-8.013	-0.027	0.104	-0.038	0.013
9	9.8	18.533	117.167	-8.167	9.755	18.586	117.277	-7.931	-0.103	0.291	-0.037	-0.371
10	10.0	18.667	118.333	-8.333	9.912	18.825	118.474	-8.463	0.042	-0.068	-0.100	0.080
11	10.2	18.800	119.500	-8.500	10.099	19.008	119.630	-8.515	0.041	-0.080	-0.079	-0.106
12	10.4	18.933	120.667	-8.667	10.272	19.179	120.804	-8.397	-0.007	0.073	-0.065	-0.442
13	10.6	19.067	121.833	-8.833	10.530	19.172	121.951	-8.701	-0.010	0.067	-0.060	-0.080
14	10.8	19.200	123.000	-9.000	10.718	19.346	123.116	-8.985	-0.021	0.084	-0.052	-0.094
15	11.0	19.333	124.167	-9.167	10.902	19.520	124.278	-8.821	-0.022	0.087	-0.041	-0.469
16	11.2	19.467	125.333	-9.333	11.222	19.360	125.412	-8.889	-0.174	0.461	-0.004	-0.527
17	11.4	19.600	126.500	-9.500	11.316	19.759	126.609	-9.282	0.010	0.005	-0.063	-0.205
18	11.6	19.733	127.667	-9.667	11.657	19.548	127.723	-9.354	-0.164	0.434	0.009	-0.322
19	11.8	19.867	128.833	-9.833	11.767	19.902	128.925	-9.558	-0.021	0.082	-0.050	-0.267
20	12.0	20.000	130.000	-10.000	12.111	19.683	130.054	-9.703	-0.177	0.463	-0.006	-0.322

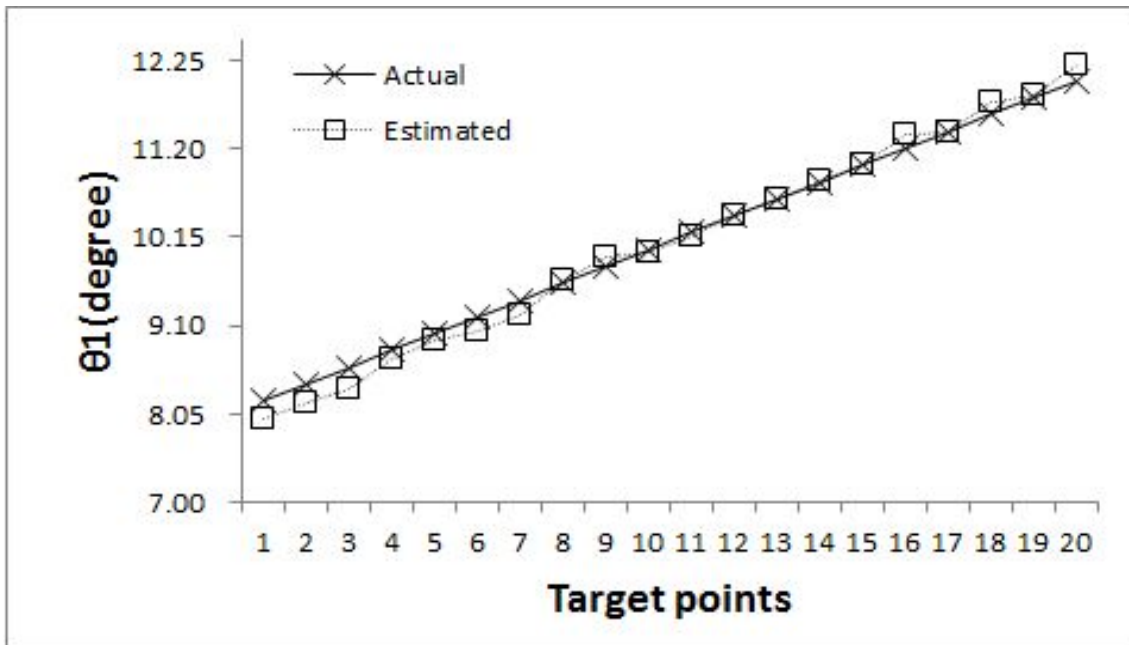


Fig. 7-16 For  $\theta_1$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree)

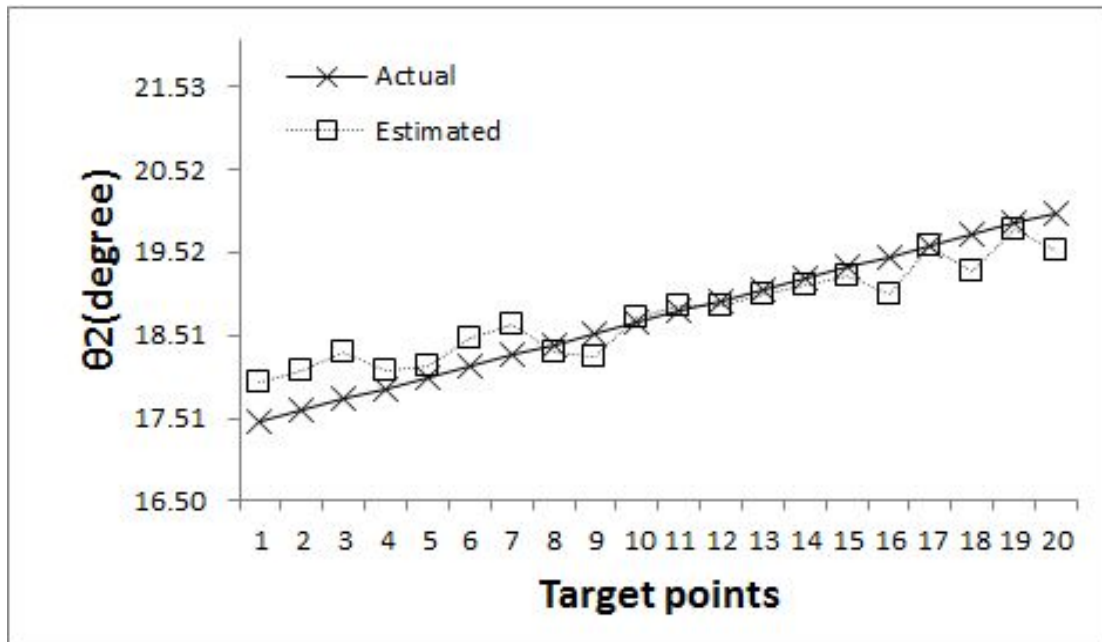


Fig. 7-17 For  $\theta_2$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree)

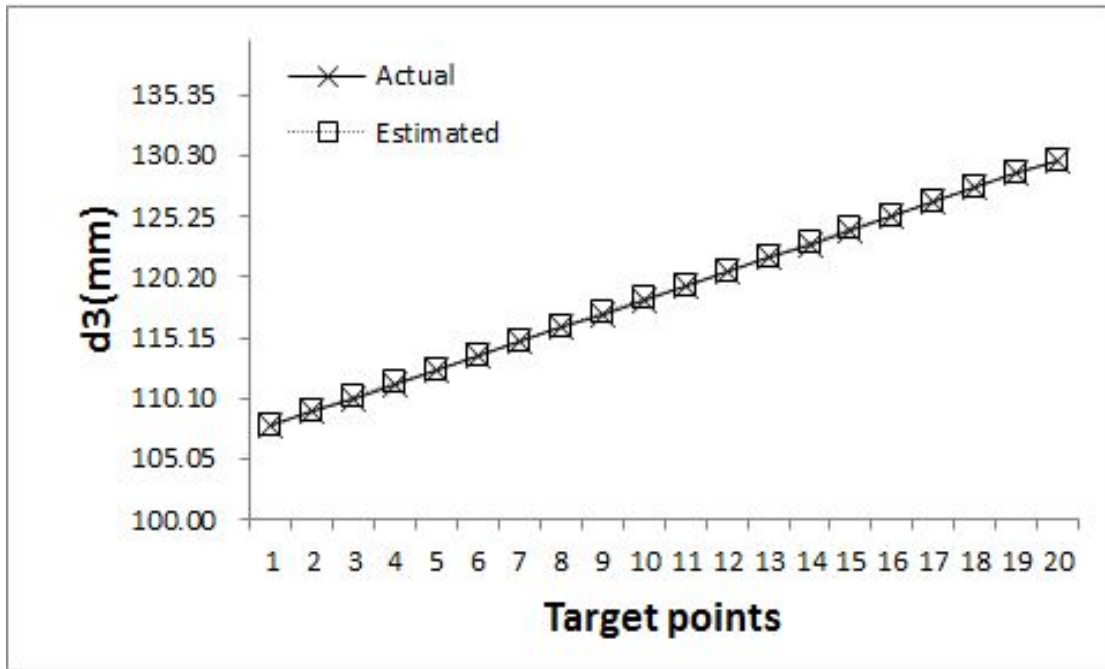


Fig. 7-18 For  $d_3$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: mm)

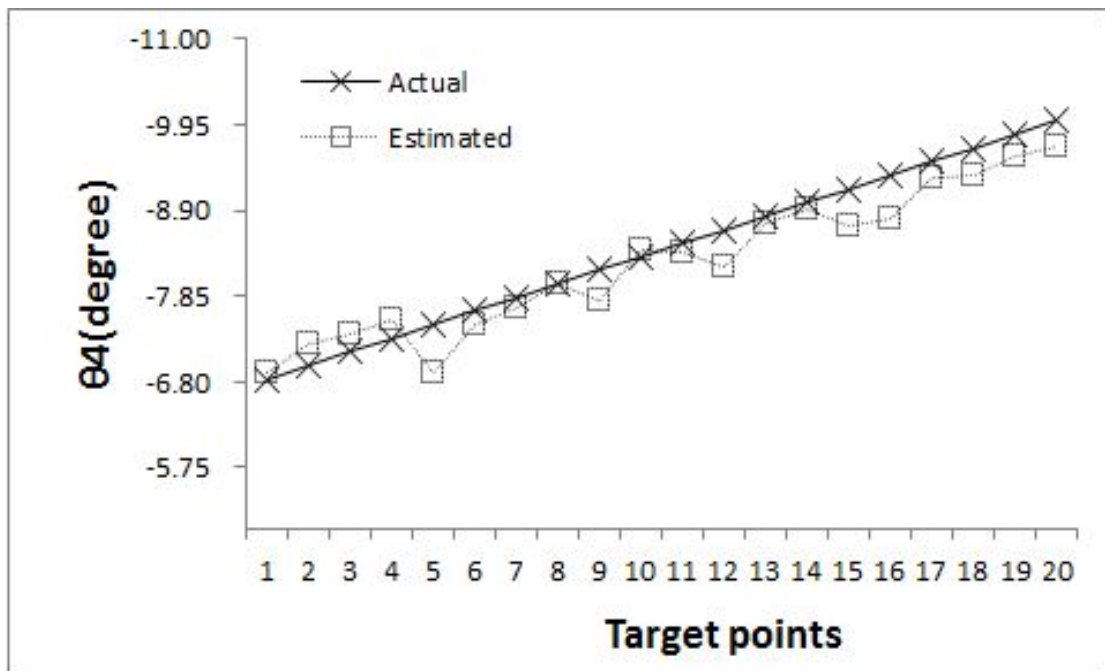


Fig. 7-19 For  $\theta_4$  of 20 target points, comparison of the actual values and the estimated values using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: degree)



(2) 이동타겟 공간상 위치추정

각 이동타겟지점에 대해 실제 타겟 위치값과 Table 7-5의 추정된 로봇 관절값을 식(2-6)에 대입하여 계산된 공간상 타겟 위치값을 비교하여 Table 7-6과 Fig. 7-15에 나타내었으며, 각 이동타겟지점에 대한  $x$ 축의 오차값은 0.004~0.447(mm),  $y$ 축의 오차값은 0.012~0.521(mm),  $z$ 축의 오차값은 0.005~0.145(mm)으로써 매우 근사한 값을 보여준다. 식(6-3)을 통해 계산된 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값의 변화를 Fig. 7-15에서 보여주며, 각 타겟에 대한  $r.m.s$ 오차값은 0.0871~0.2741(mm) 범위 내의 만족할만한 결과와 전체 20개 타겟에 대한 평균  $r.m.s$ 오차값 0.1887(mm)의 매우 작은 오차값을 보여준다.

Table 7-8 For 20 moving targets, the position errors between the actual values and the estimated values, and processing time using the data moving scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$

Target point	Cue	Actual(mm)			Estimated(mm)			Error(mm)			r.m.s. (mm)	Proc. Time (ms)
		$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$		
1	1	641.250	153.141	176.167	641.001	152.781	176.038	0.249	0.360	0.129	0.3059	0
	2	641.250	153.141	146.167	641.001	152.781	146.038	0.249	0.360	0.129		
	3	601.235	177.529	176.167	600.912	177.047	176.038	0.323	0.482	0.129		
	4	601.235	177.529	146.167	600.912	177.047	146.038	0.323	0.482	0.129		
2	1	640.450	155.890	175.000	640.147	155.487	174.862	0.303	0.403	0.138	0.2992	15
	2	640.450	155.890	145.000	640.147	155.487	144.862	0.303	0.403	0.138		
	3	600.364	180.162	175.000	600.066	179.767	174.862	0.298	0.395	0.138		
	4	600.364	180.162	145.000	600.066	179.767	144.862	0.298	0.395	0.138		
3	1	639.638	158.635	173.833	639.293	158.194	173.688	0.345	0.441	0.145	0.3607	15
	2	639.638	158.635	143.833	639.293	158.194	143.688	0.345	0.441	0.145		
	3	599.481	182.790	173.833	599.089	182.269	173.688	0.392	0.521	0.145		
	4	599.481	182.790	143.833	599.089	182.269	143.688	0.392	0.521	0.145		
4	1	638.813	161.375	172.667	638.661	161.115	172.574	0.152	0.260	0.093	0.1615	31
	2	638.813	161.375	142.667	638.661	161.115	142.574	0.152	0.260	0.093		
	3	598.586	185.413	172.667	598.476	185.222	172.574	0.110	0.191	0.093		
	4	598.586	185.413	142.667	598.476	185.222	142.574	0.110	0.191	0.093		
5	1	637.975	164.111	171.500	638.074	164.063	171.438	-0.099	0.048	0.062	0.2204	31
	2	637.975	164.111	141.500	638.074	164.063	141.438	-0.099	0.048	0.062		
	3	597.679	188.032	171.500	597.516	187.537	171.438	0.163	0.495	0.062		
	4	597.679	188.032	141.500	597.516	187.537	141.438	0.163	0.495	0.062		



(continued)

6	1	637.125	166.842	170.333	636.977	166.637	170.220	0.148	0.205	0.113	0.2516	47
	2	637.125	166.842	140.333	636.977	166.637	140.220	0.148	0.205	0.113		
	3	596.759	190.646	170.333	596.467	190.193	170.220	0.292	0.453	0.113		
	4	596.759	190.646	140.333	596.467	190.193	140.220	0.292	0.453	0.113		
7	1	636.262	169.569	169.167	636.111	169.314	169.026	0.151	0.255	0.141	0.2741	47
	2	636.262	169.569	139.167	636.111	169.314	139.026	0.151	0.255	0.141		
	3	595.827	193.255	169.167	595.539	192.765	169.026	0.288	0.490	0.141		
	4	595.827	193.255	139.167	595.539	192.765	139.026	0.288	0.490	0.141		
8	1	635.387	172.291	168.000	635.494	172.150	167.962	-0.107	0.141	0.038	0.1009	62
	2	635.387	172.291	138.000	635.494	172.150	137.962	-0.107	0.141	0.038		
	3	594.884	195.860	168.000	595.028	195.782	167.962	-0.144	0.078	0.038		
	4	594.884	195.860	138.000	595.028	195.782	137.962	-0.144	0.078	0.038		
9	1	634.499	175.009	166.833	634.800	175.065	166.796	-0.301	-0.056	0.037	0.1597	62
	2	634.499	175.009	136.833	634.800	175.065	136.796	-0.301	-0.056	0.037		
	3	593.928	198.459	166.833	594.154	198.385	166.796	-0.226	0.074	0.037		
	4	593.928	198.459	136.833	594.154	198.385	136.796	-0.226	0.074	0.037		
10	1	633.599	177.721	165.667	633.586	177.510	165.566	0.013	0.211	0.101	0.1259	78
	2	633.599	177.721	135.667	633.586	177.510	135.566	0.013	0.211	0.101		
	3	592.959	201.054	165.667	592.968	200.881	165.566	-0.009	0.173	0.101		
	4	592.959	201.054	135.667	592.968	200.881	135.566	-0.009	0.173	0.101		
11	1	632.687	180.429	164.500	632.683	180.351	164.421	0.004	0.078	0.079	0.0956	78
	2	632.687	180.429	134.500	632.683	180.351	134.421	0.004	0.078	0.079		
	3	591.979	203.643	164.500	591.917	203.463	164.421	0.062	0.180	0.079		
	4	591.979	203.643	134.500	591.917	203.463	134.421	0.062	0.180	0.079		
12	1	631.762	183.132	163.333	631.969	183.067	163.268	-0.207	0.065	0.065	0.1688	94
	2	631.762	183.132	133.333	631.969	183.067	133.268	-0.207	0.065	0.065		
	3	590.987	206.228	163.333	591.043	205.893	163.268	-0.056	0.335	0.065		
	4	590.987	206.228	133.333	591.043	205.893	133.268	-0.056	0.335	0.065		
13	1	630.825	185.830	162.167	630.941	185.690	162.106	-0.116	0.140	0.061	0.1128	94
	2	630.825	185.830	132.167	630.941	185.690	132.106	-0.116	0.140	0.061		
	3	589.983	208.807	162.167	590.090	208.651	162.106	-0.107	0.156	0.061		
	4	589.983	208.807	132.167	590.090	208.651	132.106	-0.107	0.156	0.061		
14	1	629.876	188.524	161.000	629.991	188.445	160.948	-0.115	0.079	0.052	0.0871	109
	2	629.876	188.524	131.000	629.991	188.445	130.948	-0.115	0.079	0.052		
	3	588.967	211.381	161.000	589.069	211.280	160.948	-0.102	0.101	0.052		
	4	588.967	211.381	131.000	589.069	211.280	130.948	-0.102	0.101	0.052		
15	1	628.914	191.212	159.833	629.108	191.262	159.792	-0.194	-0.050	0.041	0.1305	109
	2	628.914	191.212	129.833	629.108	191.262	129.792	-0.194	-0.050	0.041		
	3	587.939	213.950	159.833	587.973	213.710	159.792	-0.034	0.240	0.041		
	4	587.939	213.950	129.833	587.973	213.710	129.792	-0.034	0.240	0.041		

(continued)

16	1	627.940	193.895	158.667	628.387	194.089	158.662	-0.447	-0.194	0.005	0.2458	125
	2	627.940	193.895	128.667	628.387	194.089	128.662	-0.447	-0.194	0.005		
	3	586.899	216.514	158.667	587.252	216.537	158.662	-0.353	-0.023	0.005		
	4	586.899	216.514	128.667	587.252	216.537	128.662	-0.353	-0.023	0.005		
17	1	626.954	196.573	157.500	627.040	196.510	157.437	-0.086	0.063	0.063	0.0992	125
	2	626.954	196.573	127.500	627.040	196.510	127.437	-0.086	0.063	0.063		
	3	585.847	219.073	157.500	585.860	218.874	157.437	-0.013	0.199	0.063		
	4	585.847	219.073	127.500	585.860	218.874	127.437	-0.013	0.199	0.063		
18	1	625.955	199.245	156.333	626.343	199.380	156.343	-0.388	-0.135	-0.010	0.2284	140
	2	625.955	199.245	126.333	626.343	199.380	126.343	-0.388	-0.135	-0.010		
	3	584.783	221.625	156.333	585.150	221.722	156.343	-0.367	-0.097	-0.010		
	4	584.783	221.625	126.333	585.150	221.722	126.343	-0.367	-0.097	-0.010		
19	1	624.945	201.912	155.167	625.096	201.900	155.116	-0.151	0.012	0.051	0.0993	140
	2	624.945	201.912	125.167	625.096	201.900	125.116	-0.151	0.012	0.051		
	3	583.708	224.173	155.167	583.779	224.012	155.116	-0.071	0.161	0.051		
	4	583.708	224.173	125.167	583.779	224.012	125.116	-0.071	0.161	0.051		
20	1	623.922	204.574	154.000	624.331	204.730	153.994	-0.409	-0.156	0.006	0.2468	156
	2	623.922	204.574	124.000	624.331	204.730	123.994	-0.409	-0.156	0.006		
	3	582.620	226.715	154.000	583.016	226.845	153.994	-0.396	-0.130	0.006		
	4	582.620	226.715	124.000	583.016	226.845	123.994	-0.396	-0.130	0.006		

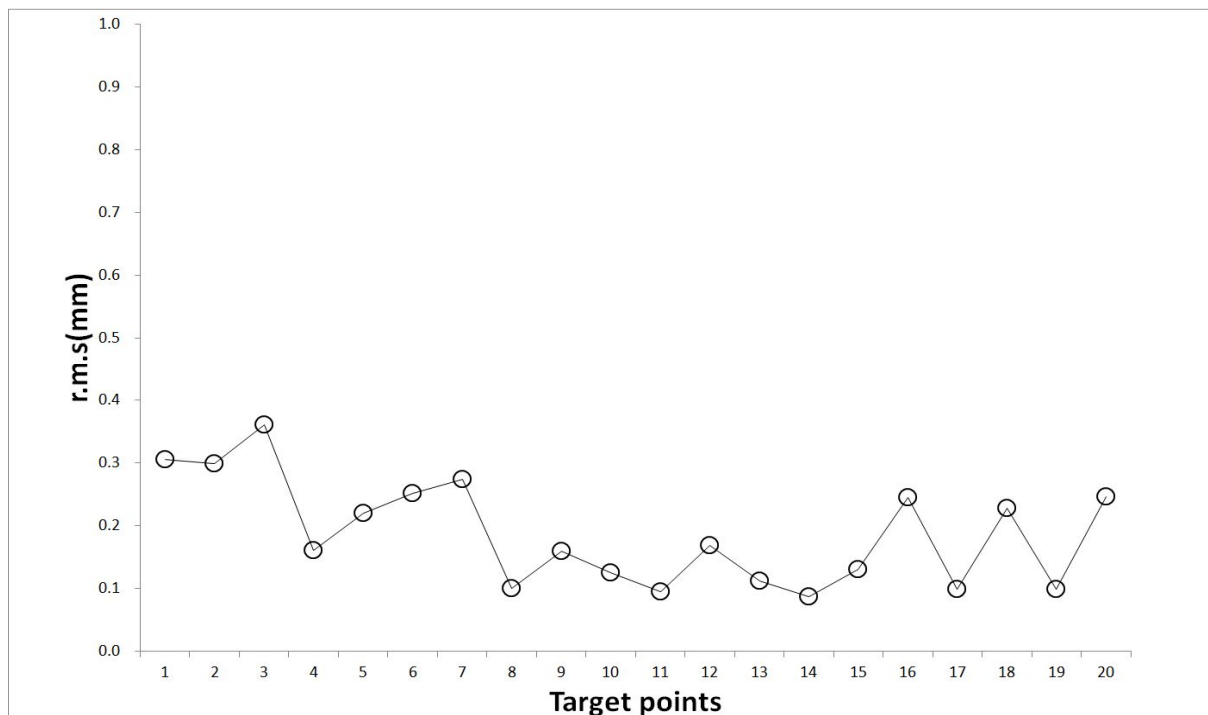


Fig. 7-20 The *r.m.s* position errors for 20 target points using the batch scheme with  $P=5$  and  $\alpha=0.09$  (unit: mm)

### 7.3 강체 이동타겟 추정실험 결과 비교

#### (1) 공간상 위치 정확도

Table 7-9와 Fig. 7-21에서는 제시된 제어기법들의 공간상 위치 정확도의 효율성을 판단하기 위해 각각의 타겟지점에서의 *r.m.s* 오차값을 비교한 결과를 보여주고 있는데, 자세히 살펴보면, 일괄처리 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 *r.m.s* 오차값이 0.4540~0.7432(mm) 범위 내에 있고, 가중치행렬을 적용한 경우에는 0.1310~0.2145(mm) 범위 내에 오차값이 있음을 알 수 있다. 데이터이동 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 *r.m.s* 오차값이 0.1428~0.4904(mm) 범위 내에 있고, 가중치행렬을 적용한 경우에는 0.0992~0.3059(mm) 범위 내에 오차값이 있음을 알 수 있다.

20개 이동타겟 전체에 대한 평균 *r.m.s* 오차값을 계산하면, Table 7-10과 같이 일괄처리 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 0.5955(mm)이고, 가중치행렬을 적용한 경우에는 0.1719(mm)로 나타났으며, 데이터이동 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 0.2668(mm)의 평균 *r.m.s* 오차값이 계산되었고, 가중치행렬을 적용한 경우에는 0.1887(mm)로 계산되었다.

위의 결과를 요약하면, 일괄처리 기법과 데이터이동 기법 모두에서 가중치행렬을 적용한 경우가 가중치행렬을 적용하지 않은 경우 보다 높은 위치 정확도를 보여 주었다. 또한, 가중치행렬을 적용하지 않은 경우의 데이터이동 기법이 일괄처리 기법보다 2배 이상의 위치 정확도를 보여 주고 있으며, 가중치행렬을 적용한 경우에는 일괄처리 기법이 데이터이동 기법보다 수치상으로는 향상된 정확도를 보여주고 있으나 거의 유사하다고 판단된다. 이리하여, 위치 정확도 관점에서 강체 이동타겟 추적시 가중치행렬을 적용한 제어기법을 사용하는 것이 적합함을 알 수 있다.

Table 7-9 Comparison of the *r.m.s* position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm)

Target point	Batch scheme		Data moving scheme	
	No weighting	Weighting	No weighting	Weighting
1	0.47625	0.13748	0.39665	0.30592
2	0.45408	0.13108	0.38145	0.29920
3	0.56565	0.16329	0.49044	0.36071
4	0.49119	0.14179	0.35030	0.16155
5	0.54882	0.15843	0.28242	0.22037
6	0.62144	0.17939	0.36713	0.25164
7	0.67734	0.19553	0.42002	0.27405
8	0.59038	0.17043	0.28451	0.10086
9	0.51306	0.14811	0.18627	0.15970
10	0.56573	0.16331	0.21083	0.12590
11	0.55440	0.16004	0.19280	0.09559
12	0.63948	0.18460	0.28357	0.16876
13	0.60995	0.17608	0.21434	0.11276
14	0.63076	0.18209	0.20062	0.08706
15	0.69053	0.19934	0.23252	0.13055
16	0.58245	0.16814	0.16386	0.24584
17	0.71252	0.20569	0.19706	0.09922
18	0.61468	0.17744	0.14286	0.22842
19	0.74320	0.21454	0.15325	0.09925
20	0.62816	0.18133	0.18525	0.24678

Table 7-10 Comparison of the average *r.m.s* position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm)

Average <i>r.m.s</i> error	Batch scheme		Data moving scheme	
	No weighting	Weighting	No weighting	Weighting
	0.59550	0.17191	0.26681	0.18871

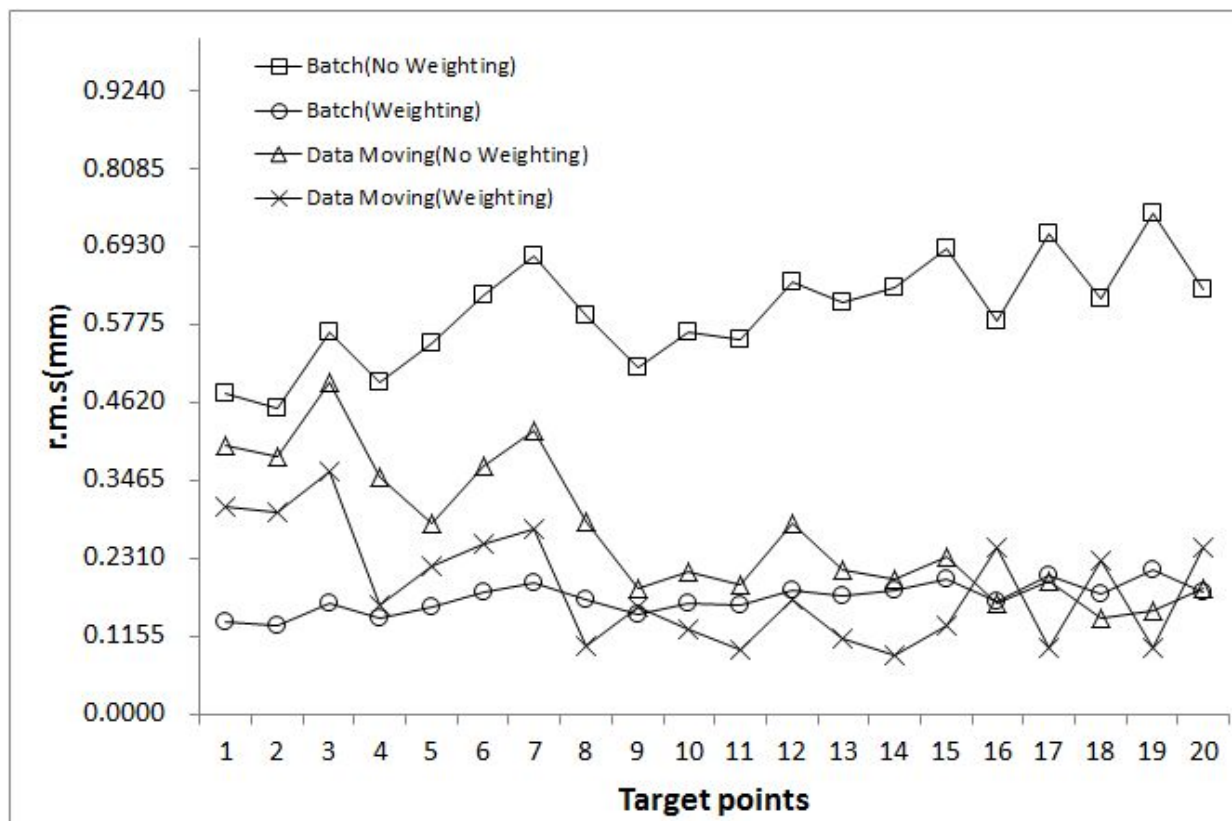


Fig. 7-21 Comparison of the *r.m.s* position errors for 20 target points in x-y-z coordinate using 4 robot vision control schemes (unit: mm)

(2) 처리시간

Table 7-11에서는 제시된 4개 제어기법들의 처리시간의 효율성을 판단하기 위한 결과를 보여주고 있으며, 일괄처리 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 188ms, 가중치행렬을 적용한 경우에는 248ms이고, 데이터이동 기법에서 가중치행렬을 적용하지 않은 경우에는 172ms, 가중치행렬을 적용한 경우에는 188ms로 측정되었다. 일괄처리 기법보다는 데이터이동 기법에서 처리 속도가 빠르며, 가중치행렬을 적용하지 않은 경우가 가중치행렬을 적용한 경우보다 처리시간이 빠르다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 비전데이터의 양과 처리시간 단축을 위해 로봇 운동궤적에서 제한된 이동지점수와 강체의 형상에서 4개 cue만을 사용하여 실험을 진행하였기 때문에 제시된 제어기법 간의 처리시간의 차이가 그리 크지 않으나, cue의 개수와 로봇 운동지점수가 증가하면 증가할수록 제어기법들 사이의 처리시간의 차이는 현격한 차이를 보일 것으로 예상된다. 본 연구에서 제한된 실험환경을 고려하여 처리시간의 관점에서는 가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법과 가중치행렬을 적용하지 않은 일괄처리 기법이 가장 적합함을 알 수 있다.

Table 7-11 Comparison of the processing time for 20 target points using 4 robot vision control schemes (unit: ms)

Processing time	Batch scheme		Data moving scheme	
	No weighting	Weighting	No weighting	Weighting
	188	248	172	188

## 제 8 장 요약 및 결론

본 연구는 공간상의 위치 좌표값이 알려지지 않은 이동타겟에 대해 카메라에서 측정된 비전데이터만을 가지고 공간상 위치값을 추정하기 위한 로봇비전 제어기법을 제안하였다. 로봇이 타겟을 향해 이동하는 동안 획득된 비전데이터의 처리를 위해  $N-R$  방법을 사용한 일괄처리 기법과 데이터이동 기법으로 구분하였으며, 2개의 제어기법의 각각에 가중치행렬을 적용한 경우와 가중치행렬을 적용하지 않은 경우로 나누어 4개 로봇비전 제어기법을 개발하였다.

최종적으로 개발된 4개 제어기법들을 이동타겟 추적실험을 통해 각각의 장단점과 효율성을 평가하였으며, 본 연구에서 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

### 8.1 결과 요약

#### (1) 가중치행렬 모델

- ①  $N-R$  방법 중 일괄처리 기법과 데이터이동 기법에서 최근에 획득한 비전 데이터에 더 큰 비중을 두기 위해 가중치행렬 모델을 제시하였다.
- ② 높은 정확도를 갖는 카메라 매개변수를 추정하기 위해 가중치행렬 모델을 이용하여 최적의 가중치계수( $\alpha$ )를 추정하였다.
- ③ 실시간 로봇 제어기법을 구현하기 위해 설정된 10개의 로봇 초기화단계에서 가중치계수를 0.01 단위로 증가 시키면서 추정된 위치값과 실제 위치값의 오차값이 가장 작을 때를 최적의 가중치계수  $\alpha$ 로 추정하였다. 본 연구 경우, 일괄처리 기법에서는  $\alpha=0.21$ , 데이터이동 기법에서는  $\alpha=0.09$ 를 최적 계수로 얻었다.
- ④ 추정된 최적의 가중치계수를 사용하여 새로운 가중치행렬  $W$  를 생성하여 이동 타겟값을 추정할 때 사용하였다.

#### (2) 최적의 로봇이동 지점수 추정

- ① 데이터이동 기법에서는 최적의 로봇이동 지점수,  $P$ 를 선정하기 위해 로봇 초기화단계(10개)에서 로봇이동 지점수의 변화에 따라 추정된 위치값과 실



제 위치값의 오차값을 비교하여 오차값이 가장 작을 때의  $P$ 값을 최적의 로봇이동 지점수로 선정하였다.

- ② 로봇이동 지점수  $P=5$ 일 때 오차값이 0.3468(mm)로 가장 작은값을 보여 최적의 로봇이동 지점수로 선정하여 데이터이동 기법에 적용하였으며, 이동타겟의 위치값을 추정할 때 사용하였다.

### (3) 비전시스템 모델 적합성

- ① 일괄처리 기법에서는  $r.m.s$ 오차값이 가중치행렬을 사용하지 않은 경우 카메라 1은 0.1050(pixel), 카메라 2는 1.0371(pixel), 카메라 3은 1.1438(pixel)이며, 가중치행렬을 사용하는 경우는 카메라 1은 0.5174(pixel), 카메라 2는 0.5443(pixel), 카메라 3은 0.7065(pixel)로, 2개의 경우 모두 만족할 만한 결과를 얻었다.
- ② 데이터이동 기법에서는  $r.m.s$ 오차값이 가중치행렬을 사용하지 않은 경우 카메라 1은 0.6103 (pixel), 카메라 2는 0.6938(pixel), 카메라 3은 0.7405 (pixel)이며, 가중치행렬을 사용하는 경우는 카메라 1은 0.5115(pixel), 카메라 2는 0.4863 (pixel), 카메라 3은 0.6381(pixel)로 2개의 경우 모두 만족할 만한 결과를 얻었다.

### (4) 강체 이동타겟 추정

일괄처리 기법과 데이터이동 기법을 사용한 이동타겟의 실제 위치값과 추정된 위치값을 계산해 보였으며, 결과값을 비교하여 요약하면 아래와 같다.

- ① 로봇이 이동하는 동안 획득된 모든 비전데이터를 사용하는 일괄처리 기법의 위치 정확도 관점에서 평균  $r.m.s$ 오차값은 가중치행렬을 적용하지 않는 경우 0.5955(mm), 가중치행렬을 적용한 경우 0.1719(mm)로서 가중치행렬을 적용한 경우가 2배 이상의 위치 정확도를 보여 주고 있다. 또한 데이터 처리시간은 가중치행렬을 사용한 경우 248(ms)이고, 가중치행렬을 적용하지 않은 경우 188(ms)로서 최적의 가중치를 계산하는데 소요되는 시간으로 인해 가중치행렬을 사용하는 경우에 처리시간이 더 소요됨을 알 수 있다.
- ② 로봇이 이동하는 동안 획득된 모든 비전데이터를 사용하지 않고 처리시간을 줄이기 위해 타겟 근처의 최적의 로봇이동 지점수를 추정하여 이에 상응하는 비전데이터만을 사용하는 데이터이동 기법의 위치 정확도의 관점에

서 평균  $r.m.s$  오차값은 가중치행렬을 적용하는 경우 0.1887(mm), 가중치행렬을 적용하지 않은 경우 0.2668(mm)로서, 정확도가 1.5배 향상되었다. 또한, 처리시간의 관점에서는 가중치행렬을 사용하지 않은 경우가 최적의 가중치계수를 계산하기 위해 추가적인 소요시간을 필요로 하는 가중치행렬을 사용하는 경우보다 1.1배 정도 빠름을 알 수 있었다.

## 8.2 결론

공간상의 위치 좌표값이 알려지지 않은 이동타겟의 추정을 위해 사용된  $N-R$  방법 중 일괄처리 기법과 데이터이동 기법에 대한 로봇 비전시스템 모델의 적합성 평가와 이동타겟 추정에 대한 최종적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 제시된 4개의 로봇비전 제어기법에서 사용한 비전시스템 모델의 평균  $r.m.s$  오차값은 0.5453~1.0769(pixel)로 매우 만족할만한 정확도를 보여주므로 비전시스템 모델의 적합성을 재확인 하였다. 특히, 4개 비전시스템 모델의 적합성 결과를 보면, 가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법에서 가장 낮은 오차값을 보여주었다.
- (2) 제시된 4개 로봇비전 제어기법의 이동타겟 추정값에 대한 정확도 부분에서 평균  $r.m.s$  오차가 0.1719~0.5955(mm)로 만족할 만한 결과를 보여주므로 본 연구에서 개발된 가중치행렬 모델과 데이터이동 기법 모델의 적합성을 증명하였다.
- (3) 제시된 4개의 로봇비전 제어기법 중 정확도만을 고려하면 가중치행렬을 적용한 일괄처리 기법이 정확도가 가장 높았고, 처리속도만을 고려하면 가중치행렬을 적용하지 않은 데이터이동 기법이 가장 빨랐다. 특히, 최적의 가중치계수를 사용한 가중치행렬을 적용한 경우가 가중치행렬을 적용하지 않은 경우보다 더 높은 정확도를 보여주므로, 제안된 가중치행렬 모델이 적합함을 알 수 있다.
- (4) 정확도와 처리시간을 모두 고려하면 일괄처리 기법보다 가중치행렬을 적용한 데이터이동 기법이 더 효율적임을 알 수 있다.

- (5) 본 연구에서 제안한 일괄처리 기법 및 데이터이동 기법에서 사용된 가중치행렬 모델의 적합성을 보여 주었고, 데이터이동 기법에 사용된 최적의 로봇 이동지점 추정방법의 적합성을 보여 주었다.
- (6) 본 연구는 카메라의 시야가 완전히 확보된 환경에서 이동타겟을 추정하기 위한 로봇비전 제어기법을 제시하였지만, 향후 타겟이 이동하는 동안 장애물에 의해 타겟에 대한 카메라의 시야가 확보되지 않은 경우에 대한 로봇비전 제어기법에 대한 연구를 수행할 예정이다. 제안된 4개의 로봇제어기법은 산업현장의 작업 환경에 따라 적절히 선택하여 사용하면 산업체의 기술경쟁력 향상에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- (1) Feddema, J. T., Lee, C. S. G., “Adaptive Image Feature Prediction and Control for Visual Tracking with a Hand-Eye Coordinated Camera”, IEEE Transactions on system, man and cybernetics, Vol. 20, No. 5, pp.1172-1183, 1990.
- (2) Assa, A., Janabi-Sharifi, F., “A Robust Vision-Based Sensor Fusion Approach for Real-Time Pose Estimation”, IEEE transactions on cybernetics, Vol. 44, No. 2, pp.217-227, 2014.
- (3) Lowe, D. G., “Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images”, IEEE transaction on pattern analysis and machine., Vol. 13, No. 5, pp.441-450, 1991.
- (4) Atushi Yamashita, Toru Kaneko, Shinya Matsushita, Kenjiro T. Miura and Suekichi Isogai, “Camera Calibration and 3-D Measurement with an Active Stereo Vision System for Handling Moving Objects”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 15, No. 3, pp. 304-313, June 2003.
- (5) Romuald Ginhoux, Jens-Steffen Gutmann, “Model-Based Object Tracking Using Stereo Vision”, IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1226-1232, 2001
- (6) A. Ruf, M. Tonkoy, R. Horaud, H.-H. Nagel, “Visual Tracking of An End Effector by Adaptive Kinematic Prediction”, Intelligent Robots and Systems, pp.1-5, 1997
- (7) Don Murray and Anup Basu, “Motion Tracking with an Active Camera”, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol. 16, no. 5, 1994
- (8) Christophe Leroux, Isabelle Laffont, Nicolas Biard, Sophie Schmutz, Jean François Désert, Gérard Chalubert and Yvan Méasson, “Robot grasping of unknown objects, description and validation of the function with quadriplegic people”, Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.35-42 ,2007

- (9) Sangseung Kang, Kyekyung Kim, Jaeyeon Lee and Joongbae Kim, "Robotic vision system for random bin picking with dual-arm robots", MATEC Web of Conferences 7 , 07003, pp.1-5, 2016
- (10) Tiago Roux Oliveira, Antonio Candea Leite, Alessandro Jacoud Peixoto, and Liu Hsu, "Overcoming limitations of uncalibrated robotics visual servoing by means of sliding mode control and switching monitoring scheme", Asian Journal of Control, Vol. 16, No. 3, pp. 1 - 13, May 2014
- (11) Yutaka Maeda and Hidetaka Ito, "Robot Control Using 2D Visual Information Via Database", The Second International Conference on Intelligent Systems and Applications, pp.83-88, 2013
- (12) Li Erchao, Li Zhanming and He Junxue, "Robotic adaptive impedance control based on visual guidance", International journal on smart sensing and intelligent systems Vol. 8, No. 4, pp.2159-2174, 2015
- (13) M Shuja Ahmed, Reza Saatchi and Fabio Caparrelli, "Vision Based Object Recognition and Localization by a Wireless Connected Distributed Robotic Systems", Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis 11(1), pp.54-67, 2012
- (14) Amit Agrawal, Yu Sun, John Barnwell, Ramesh Raskar, "Vision Guided Robot System for Picking Objects By Casting Shadows", International Journal of Robotics Research, pp.1-28, 2009
- (15) Seok Ahn, Forest Fraser, Jonathan Lee, Kazuki Nomura, Hye-Jong Kim, Sadao awamura, Bruce A. MacDonald, "Vision-based Control of an Encoderless Lightweight Robot Arm", In Proceedings of the 2016 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2016), Dec., pp.1-10, 2016
- (16) Jose Ruben Sanchez-Lopez, Antonio Marin-Hernandez, Elvia R. Palacios-Hernandez, "Visual Detection, Tracking and Pose Estimation of a Robotic Arm End Effector", ROSSUM 2011 Xalapa, Ver., Mexico, pp 41-48, June 27-28, 2011

- (17) Yutaka Maeda, Yuuya Tachibana, and Kyouhei Hisakawa, "Calibration-free Hand-eye System Using Visual Control", pp.1546-1550, SCIS & ISIS 2008
- (18) Jun Sun, "Positioning Study of the Robot Vision based on Geometry", AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications, pp.335-337, 2015
- (19) Daniel Pizarro, Manuel Mazo, Enrique Santiso, Marta Marron, David Jimenez, Santiago Cobreces and Cristina Losada, "Localization of Mobile Robots Using Odometry and an External Vision Sensor", Sensors 2010, pp. 3655-3680, 2010
- (20) Ik Sang Shin, Sang-Hyun Nam, Hyun Geun Yu, Rodney G. Roberts, Seungbin B. Moon, "Conveyor Visual Tracking using Robot Vision", pp.1-5, 2006 Florida Conference on Recent Advances in Robotics, 2006
- (21) 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.
- (22) Parvaneh Saeedi, Peter D. Lawrence, David G. Lowe, "Vision-Based 3D Trajectory Tracking for Unknown Environments", IEEE Transactions on Robotics(Volume: 22, Issue: 1), pp.1-18, 2006
- (23) Abdulla Mohamed, Chenguang Yang, Angelo Cangelosi, 'Stereo Vision based Object Tracking Control for a Movable Robot Head", Preprints of the 4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences, Reims, France, June 1-3, pp. 161-168, 2016
- (24) Emina Petrović, Adrian Leu, Danijela RistićDurrant and Vlastimir Nikolić, "Stereo Vision-Based Human Tracking for Robotic Follower", International Journal of Advanced Robotic Systems, pp.1-10, 2013
- (25) Niramon Ruangpayoongsak, "Mobile Robot Positioning by using Low-Cost Visual Tracking System", MATEC Web of Conferences 95, 08006, pp.1-5, 2017

- (26) Yamini Nimmagadda, Karthik Kumar, Yung-Hsiang Lu, and C. S. George Lee, "Real-time Moving Object Recognition and Tracking Using Computation Offloading", The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 18-22, pp.2449-2455, 2010
- (27) NOBUAKI KOBAYASHI and MASAOKI SHIBATA, "Visual Tracking of a Moving Object Using a Stereo Vision Robot", Electronics and Communications in Japan, Vol. 91, No. 11, pp.19-27, 2008
- (28) Gonzalo R. Rodríguez-Canosa, Stephen Thomas, Jaime del Cerro, Antonio Barrientos, and Bruce MacDonald, "A Real-Time Method to Detect and Track Moving Objects (DATMO) from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Using a Single Camera", Remote Sens. 2012, 4, pp.1090-1111, 2012
- (29) Kuen-Han Lin and Chieh-Chih Wang, "Stereo-based Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking", Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on, pp.1-6, 2010
- (30) Durmus, B., Temurtas, H., Yumusak, N., Temurtas, T., Kazan, R., "The Cost Function Minimization for Predictive Control by Newton-Raphson Method", proceeding of the international multiconference of engineers and computer scientists, Vol. 2, pp. 19-21, 2008.
- (31) 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.
- (32) Jung, Y. J., Kim, G. W., "Nonlinear Least Squares Method and The Normalized Weighting Matrix Navigation Algorithm for Mobile Robots Using", proceeding of conference on CICS, pp. 70-71, 2013.
- (33) Kim, D. H., Lee, D. H., Myung, H., Choi, H. T., "Vision based Localization for AUVs using Weighted Template Matching in a Structured Environment", journal of institute of control robotics and systems, Vol. 19, No. 8, pp.667-675, 2013.



- (34) R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisis, B. Kuchen, and F.Reyes, "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 5, no. 1, pp.39-48, Mar. 2000
- (35) 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.
- (36) Berthold, K. P. H., "Robot vision", Cambridge, Massachusetts, The MIT Press. pp.46-48, 1986.
- (37) Peter, "Control of eye and arm movements using active, attentional vision", Applications of AI, machine vision and robotics., pp.1471-1491, 1993.
- (38) Freedman, D., Pisani, R., Purves, R., "Statistic Fourth edition", Inc W.W.Norton & Company, pp.66-67, 2007
- (39) John J. Craig, "Introduction to robotics mechanics and control 2nd edition", Addison-Wesley Publishing Company, pp.83-84, 1989.
- (40) Tani, K., Abe, M. and Ohno, T., "high precision manipulator with visual sense", Proceedings 7th International symposium on industrial robotics, Tokyo, Japan, pp.19-21, October, 1977.
- (41) G.W. Min, "A study on the effectiveness of vision system according to the arrangement of cameras used for robot's position control", Chosun University, 2009.
- (42) M.W, Jang, "A study on the evaluation of the developed robot vision control schemes in real time for the estimation of the fixed target", Chosun University, 2017.