

2009년 2 월
석사학위 논문

로봇 위치 제어를 위해 사용된
카메라의 배치에 따른 비전 시스템
모델의 효율성에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

민관웅

로봇 위치 제어를 위해 사용된 카메라의
배치에 따른 비전 시스템 모델의
효율성에 관한 연구

*A study on the effectiveness of vision system
according to the arrangement of cameras used for
robot's position control*

2009년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

민관응

로봇 위치 제어를 위해 사용된 카메라의
배치에 따른 비전 시스템 모델의
효율성에 관한 연구

지도교수 장완식

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함.

2008년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

민관응

민관응의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 규 태 인

위 원 조선대학교 교수 장 완 식 인

위 원 조선대학교 교수 정 상 화 인

2008년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Photos	IV
List of Figures	IV
List of Tables	XI
Nomenclature	XIII
Abstract	XIV

제 1 장 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	4

제 2 장 시스템 모델 개발

2.1 로봇의 기구학 모델	6
2.1.1 로봇 정기구학 모델	6
2.1.2 로봇 역기구학 모델	9
2.2 비전 시스템 모델	12
2.3 매개변수 추정 모델	13
2.4 로봇 회전각 추정 모델	16

제 3 장 실험 장치

3.1 실험 장치	19
3.2 시험 모형	22
3.3 실험 방법	23

제 4 장 로봇의 점 위치제어 실험

4.1 실험 방법 및 절차	25
4.2 실험 결과	28
4.2.1 각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 적합성	28
(1) 로봇 좌측 작업영역	28
(2) 로봇 중앙 작업영역	42
(3) 로봇 우측 작업영역	56
4.2.2 카메라 배치에 따른 로봇의 점 위치제어 실험결과	70

제 5 장 로봇의 얇은 막대 위치제어 실험

5.1 실험 방법 및 절차	76
5.2 실험 결과	77
5.2.1 비전 시스템 모델의 적합성	77
5.2.2 로봇의 얇은 막대 위치제어 실험결과	85

제 6 장 결론 88

REFERENCES 90

Appendix 92

LIST OF PHOTOS

Photo 1	Experimental apparatus	20
---------	------------------------------	----

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Structure of this thesis	5
Fig. 2	Samsung SM7 4-axis robot	7
Fig. 3	Experiment set-up	21
Fig. 4	1 cue test model for experiment	22
Fig. 5	2 cue test model for experiment	22
Fig. 6	Setting positions of cameras	23
Fig. 7	Experimental procedure of the point position control based on the robot vision system	26
Fig. 8	Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's left work space	30
Fig. 9	Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's left work space	30
Fig. 10	Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's left work space	31
Fig. 11	Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's left work space	31
Fig. 12	Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's left work space	32

Fig. 13	Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's left work space	32
Fig. 14	Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's left work space	33
Fig. 15	Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's left work space	33
Fig. 16	Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's left work space	34
Fig. 17	Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's left work space	34
Fig. 18	Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's left work space	35
Fig. 19	Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's left work space	35
Fig. 20	Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's left work space	36
Fig. 21	Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's left work space	36
Fig. 22	Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's left work space	37
Fig. 23	Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's left work space	37
Fig. 24	Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's left work space	38
Fig. 25	Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's left work space	38

Fig. 26	Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's left work space	39
Fig. 27	Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's left work space	39
Fig. 28	Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's left work space	40
Fig. 29	Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's center work space	44
Fig. 30	Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's center work space	44
Fig. 31	Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's center work space	45
Fig. 32	Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's center work space	45
Fig. 33	Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's center work space	46
Fig. 34	Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's center work space	46
Fig. 35	Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's center work space	47
Fig. 36	Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's center work space	47
Fig. 37	Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's center work space	48
Fig. 38	Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's center work space	48

Fig. 39	Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's center work space	49
Fig. 40	Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's center work space	49
Fig. 41	Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's center work space	50
Fig. 42	Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's center work space	50
Fig. 43	Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's center work space	51
Fig. 44	Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's center work space	51
Fig. 45	Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's center work space	52
Fig. 46	Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's center work space	52
Fig. 47	Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's center work space	53
Fig. 48	Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's center work space	53
Fig. 49	Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's center work space	54
Fig. 50	Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's right work space	58
Fig. 51	Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's right work space	58

Fig. 52	Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's right work space	59
Fig. 53	Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's right work space	59
Fig. 54	Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's right work space	60
Fig. 55	Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's right work space	60
Fig. 56	Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's right work space	61
Fig. 57	Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's right work space	61
Fig. 58	Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's right work space	62
Fig. 59	Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's right work space	62
Fig. 60	Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's right work space	63
Fig. 61	Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's right work space	63
Fig. 62	Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's right work space	64
Fig. 63	Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's right work space	64
Fig. 64	Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's right work space	65

Fig. 65	Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's right work space	65
Fig. 66	Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's right work space	66
Fig. 67	Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's right work space	66
Fig. 68	Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's right work space	67
Fig. 69	Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's right work space	67
Fig. 70	Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's right work space	68
Fig. 71	Average position error according to the arrangement of camera in left work space	74
Fig. 72	Average position error according to the arrangement of camera in center work space	74
Fig. 73	Average position error according to the arrangement of camera in right work space	75
Fig. 74	Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's left work space	79
Fig. 75	Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's left work space	79
Fig. 76	Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's left work space	80
Fig. 77	Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's center work space	81

Fig. 78	Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's center work space	81
Fig. 79	Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's center work space	82
Fig. 80	Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's right work space	83
Fig. 81	Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's right work space	83
Fig. 82	Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's right work space	84
Fig. 83	Average position error(1 ; left work space, 2 ; center work space, 3 ; right work space)	87

List of Tables

Table 1	Link parameters of Samsung SM7 4-axis robot	7
Table 2	Specification of experimental apparatus	19
Table 3	Case of camera setting for the experiment	24
Table 4	The estimated six parameters of each camera in robot's left work space	41
Table 5	The estimated six parameters of each camera in robot's center work space	55
Table 6	The estimated six parameters of each camera in robot's right work space	69
Table 7	Estimation values of each joint angle in robot's left work space	72
Table 8	Estimation values of each joint angle in robot's center work space	72
Table 9	Estimation values of each joint angle in robot's right work space	72
Table 10	Error values between actual and estimated coordinate values in robot's left work space	73
Table 11	Error values between actual and estimated coordinate values in robot's center work space	73
Table 12	Error values between actual and estimated coordinate values in robot's right work space	73
Table 13	The estimated six parameters of each camera in robot's left work space	80

Table 14 The estimated six parameters of each camera
in robot's center work space 82

Table 15 The estimated six parameters of each camera
in robot's right work space 84

Table 16 Estimation values of each joint angle 86

Table 17 Error values between physical coordinate values
and estimated coordinate values 87

NOMENCLATURE

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

ABSTRACT

A study on the effectiveness of vision system according to the arrangement of cameras used for robot's position control

Min Kwan Ung

Advisor : Prof. Jang Wan Shik Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The objective of this thesis is to investigate the effectiveness of the vision system according to the arrangement of cameras used for robot's position control.

The used vision system model with six parameters involves two estimation models, which are the parameter estimation and robot's joint angle estimation models. The parameter estimation model is developed based on a model that generalizes the known robot kinematics to accommodate the unknown relative camera position and orientation.

Also, the robot's joint angle estimation model is developed based on the parameter estimation depending on each camera.

In order to perform this study, robot's working region divided into three work spaces such as left, center and right space. Also, cameras are positioned on circular arcs with radius of 1.5m, 2.0m and 2.5m. Seven cameras are placed on each circular arc. For the experiment, nine cases of camera arrangement are

selected in each robot's work space, and each case uses three cameras.

Six parameters are estimated for each camera using the developed parameter estimation model in order to show the suitability of the vision system model in nine cases of each robot's work space. Then, the robot's joint angles are estimated using the joint angle estimation model according to the arrangement of cameras for robot's position control. Thus, the effect of camera arrangement to the vision system model is investigated for robot's point position control.

Finally, the robot's slender bar position control is performed using the optimal arrangement of cameras in each robot's work space, based on the above results of robot's point position control, in order to demonstrate the effectiveness of the vision system experimentally.

제1장 서론

1.1 연구배경

로봇은 컴퓨터와 제어공학의 발달을 빼놓고서는 생각할 수 없다. 컴퓨터는 제2차 세계 대전중에 고사포의 명중 정도를 높이기 위해 많이 연구되었으며, 제어기술은 레이더와 원자폭탄이 개발되는 가운데 보다 고도로 발달하였다. 이와 같은 연구에서 소위 피드백을 포함한 시스템의 행동 또는 반응·반사를 수학적으로 기술하는 사이버네틱스도 등장하였고 대전중의 무선통신기술 등의 발달과 더불어 진공관 성능도 비약적으로 향상되었다. 이런 것들이 어떤 의미에서 오늘의 로봇공학의 바탕을 만들었지만 진공관을 이용한 컴퓨터 단계에서는 오늘날의 로봇탄생이 무리였다.

오늘날의 로봇에는 하나의 작업을 되풀이하는 능력뿐만 아니라, 작업 사이클의 프로그램을 쉽게 변경할 수 있는 기능까지 요구된다. 즉, 로봇마다 컴퓨터를 장치해서 각각의 로봇을 통제하는 것이 필요하게 된다. 로봇의 두뇌라고 할 수 있는 부분이 컴퓨터이며, 컴퓨터의 기술수준은 로봇기술에 큰 영향을 준다. 이와 같은 이유로 진공관 컴퓨터 수준에서는 오늘날과 같은 로봇은 실현 불가능한 것이었다. 진공관의 약점을 극복하는 첫 단계로 트랜지스터와 다이오드가 등장하였다. 트랜지스터는 진공관의 기능을 모두 대체할 수 있으며 열이 발생하지 않고 진공관에 비하여 아주 작게 소형화할 수 있어 컴퓨터는 급속히 소형화되고 신뢰성도 높아졌다.

1960년대에는 집적회로(IC)가 개발되었고, 집적회로 1개가 트랜지스터 수십 개의 기능을 함으로 인해 소형화가 되어가는 한편 접촉 불량이란 마이너스 요인도 없어져 더욱 신뢰성이 높아졌을 뿐만 아니라 가격도 안정되고 소비전력도 진공관에 비해 크게 감소하였다. 또한 칩의 집적도가 더욱 높아지고, LSI·VLSI가 출현함에 따라 컴퓨터 연산속도는 향상되고 소형화가 더욱 촉진되었다. 이런 여러 가지 발달이

로봇발달을 촉진하여 인간의 오감(五感 ; 시각·청각·촉각·후각·미각)에 상응하는 기능을 가진 장치, 즉 센서가 로봇기술의 새로운 과제로서 대두되었다.

그 중 로봇 비전(Robot Vision)이란 앞에서 말한 인간의 오감 중에 시각에 해당하는 대표적인 비접촉센서인 CCD 카메라를 이용해 2차원의 위치 데이터를 입력받아 로봇을 제어하는 장치를 말하는데 초기의 비전 시스템은 처리할 데이터의 양이 방대하며 제어기법의 개발이 복잡하고 어려워 많은 관심을 끌지 못하고 단지 제품의 검사, 주변의 감시등의 단순한 작업에만 사용되어 오다가 최근에 컴퓨터의 비약적 발전과 새로운 광학 센서 등의 개발에 힘입어 비전을 활용한 기술은 인간의 시각기능을 능가하는 수준으로 발전하고 제어하고자 하는 대상을 중심으로 주변 작업환경을 통합적으로 인지하여 처리함과 동시에 주변 작업환경의 변화에 따른 상황을 예측하여 처리할 수 있는 장점과 여러 제어알고리즘에의 안정된 이식성 때문에 로봇 비전 시스템의 연구는 더욱더 활발하게 진행되고 있다⁽⁴⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾.

그러나 비전 시스템을 로봇에 적용시키기 위해서는 해결해야 할 많은 문제들이 있는데 첫째로 방대한 데이터를 저장하기 위한 메모리의 확보와 메모리 손실에 따른 처리속도의 저하이고, 두 번째로는 로봇과 비전 시스템간의 효과적인 보정을 위해서 3차원 공간에서 움직이는 로봇의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 매핑하기 위한 로봇 좌표계와 카메라 좌표계 상호간의 관계에 대한 정보가 정확해야 한다는 것이다⁽²⁾⁽⁷⁾⁽¹²⁾.

컴퓨터의 비약적인 발달로 메모리와 처리속도에 대한 문제를 상당수 해결하였으며, 로봇과 카메라 좌표계간의 보정 문제에 대해서도 많은 연구진에 의해 연구되고 있다.

Kelly⁽¹⁰⁾는 카메라를 로봇의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 제어기반 알고리즘을 제시하였는데 제어입력이 로봇의 기구학적 특성이 포함되지 않는 단순한 구조를 갖는 특성이 있다. 그러나 이 구조는 기구학적 특성이 제어 입력에 반영되지 않으므로 특징점 오차의 크기에 민감하게 되어 외란이나 잡음이 있는 경우 제어 성능이 악화될 수 있다.

Goncalves와 Pinto⁽⁸⁾는 Kelly⁽¹⁰⁾의 제어알고리즘을 확장시켜 로봇의 움직임에 따라 변화하는 카메라의 위치에 상관없이 제어 가능한 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법 또한 제어입력에 로봇의 기구학적 특성이 포함되지 않기 때문에 제어 성능이 약화될 수 있다.

Tsai⁽¹³⁾는 정확하게 위치가 알려진 큐를 이용하여 카메라를 보정하고 3차원 직교 좌표계를 2차원 영상 좌표계로 일치시켜 매개변수를 추정하는 방법을 연구하였고, Bacakoglu와 Kamel⁽¹⁾은 카메라 내부의 특성(내부 매개변수)과 특정 기준 좌표계에 대한 카메라의 위치와 방위(외부 매개변수)를 결정하는 카메라 보정 알고리즘을 개발하였다.

Yoshihiro TODA⁽¹⁴⁾등은 카메라와 로봇의 베이스 좌표계 사이의 상대적인 위치 변화에도 보정을 필요로 하지 않는 퍼지 논리(fuzzy logic)를 적용한 보정방법을 발표하였으며, Beardsley⁽³⁾등은 카메라에 대한 보정이 필요하지 않을 뿐만 아니라 초점거리와 같은 카메라의 내부 매개변수가 작업도중 변경될 수 있는 보정 방법을 제시하였다.

그러나 이들의 연구에는 카메라 위치, 방향 또는 내부 파라미터들이 카메라 보정 단계와 로봇 매니플레이션 단계 중에 변한다면 초기의 보정은 더 이상 유효하지 않는다. 라는 한계와 오차가 크고 제어 방법이 복잡하다는 단점이 나타났다.

이리하여 기존 로봇 비전 제어기법의 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서 사용되는 비전 시스템은 기존의 방법들과 달리 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델로 구성하여, 이에 대한 추정모델을 개발하였다. 이 추정모델을 위치제어를 위한 로봇 비전 제어기법에 적용함에 있어서, 이때 사용되는 카메라 배치 변화가 로봇 위치 제어를 위해 사용되는 비전 시스템 모델에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하고자한다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구는 로봇 위치제어를 위해서 사용되는 카메라 배치에 따른 비전 시스템 모델의 효율성을 조사하기 위한 것이다.

제안된 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델은 모두 비선형방정식의 형태를 가지며, 특히 회전각 추정모델의 경우에는 많은 제한조건을 포함한다. 따라서 카메라의 개수가 증가함에 따라서 비전 시스템 추정모델을 통한 위치 결정에서 오차율이 줄어든다고 보기는 힘들다는 결론을 선행된 연구⁽¹⁷⁾에서 확인하였다. 선행된 연구결과에 따라서 3대의 카메라를 하나의 카메라 배치 경우로 설정하였다.

본 연구를 수행하기 위해 로봇 작업영역을 좌측, 중앙 및 우측영역 3개로 구분하여 각각의 영역에 9개의 가능한 카메라 배치(각 배치에 3대 카메라 사용)를 설정하여 매개변수 추정모델에 의해 추정되는 각 카메라에 대한 매개변수를 추정하여 비전 시스템 모델의 적합성을 보였다. 또한 이 결과를 회전각 추정 모델을 이용한 로봇 점 위치제어에 적용하여 카메라 각 배치에 따른 결과를 조사한다.

최종적으로 위 실험을 통하여 로봇의 점 위치제어에 대한 카메라 배치의 최적의 효율성을 충족시키는 환경을 결정하여 로봇의 얇은 막대 위치제어에 적용하여 실험 하고자 한다.

Fig. 1은 본 논문의 연구 내용과 방법에 대한 체계적인 구성도를 보여주며 이에 대한 주요한 연구 내용은 다음과 같다.

- ◆ 사용된 각 카메라에 대한 비전 시스템 매개변수 추정모델의 타당성 확인
- ◆ 1~21개 카메라로 구성된 각각의 경우에 대해 비전 제어기법 적용
- ◆ 로봇 작업 영역을 3가지로 나누고 그에 대한 각각의 동일한 로봇의 경로에서 카메라 배치만을 변화시켜 비전 제어기법 적용
- ◆ 점 위치제어에 대한 최적의 카메라 배치를 선정
- ◆ 최적의 카메라 배치에서 얇은 막대 위치제어에 대한 적용 실험

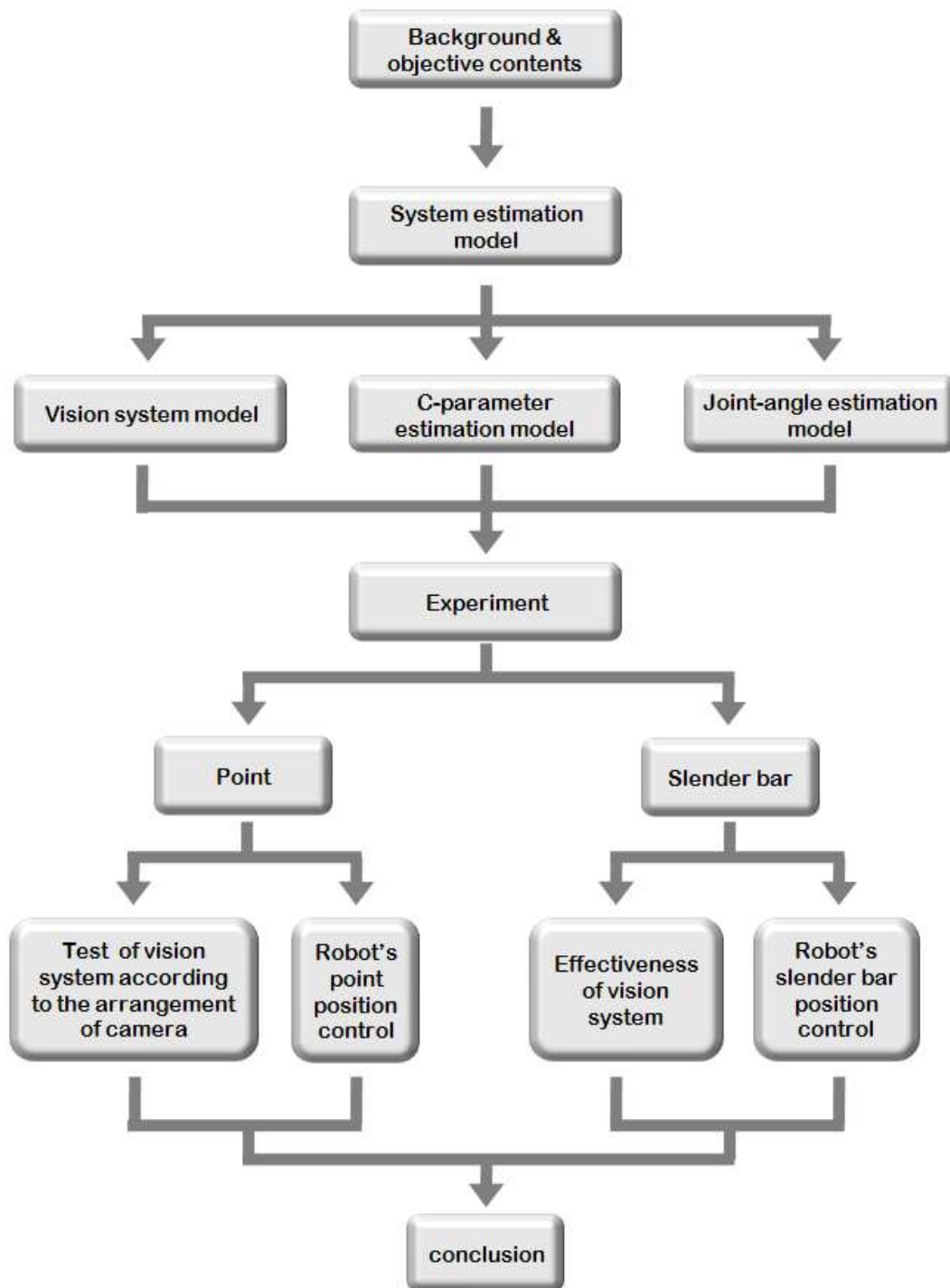


Fig. 1 Structure of this thesis

제 2 장 시스템 모델 개발

2.1 로봇의 기구학 모델

로봇의 기구학은 로봇 베이스로부터 말단부까지의 관계를 수학적으로 나타낸 것으로서 로봇을 이용하기 위해 가장 기초적인 모델이며 대부분의 경우 정형화되어 있다. 또한 로봇을 목표지점으로 이동시키기 위해 로봇 회전각을 계산하는 방법으로 기하학적인방법과 수치해석적인방법 등이 많이 사용되고 있다.

2.1.1 로봇 정기구학 모델

정기구학은 3차원 공간에서 로봇의 각 관절에 대한 회전각($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$)이 주어졌을 때 베이스 좌표계에 대한 로봇 말단부의 위치(X, Y, Z)를 구하는 것이다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 삼성 SM7 4축 ROBOT의 기하학적 형상 및 각 관절 좌표계를 보여주며, 4×4 요소를 갖는 행렬 ${}^{i-1}_i \mathcal{T}$ 는 $i-1$ 링크와 i 링크 사이의 상대적인 위치와 자세를 나타내는 4개의 링크 인자($a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i, \theta_i$)의 함수로서 Eq.(2-1)과 같이 주어진다⁽⁵⁾. Table 1은 삼성 SM7 4축 ROBOT의 각 관절에 대한 4개의 Denavit-Hartenberg 링크 인자 값을 보여준다. Eq.(2-1)과 Table 1을 이용하여 베이스 좌표계에서 마지막 관절까지의 변환행렬 ${}^0_4 \mathcal{T}$ 는 Eq.(2-2)와 같다.

Table 1 Link parameters of Samsung SM7 4-axis robot

<i>axis</i>	$a_{i-1}(\text{degree})$	$a_{i-1}(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(\text{degree})$
<i>1</i>	0	0	388	θ_1
<i>2</i>	0	400	0	θ_2
<i>3</i>	180	250	d_3	0
<i>4</i>	-180	0	79	θ_4

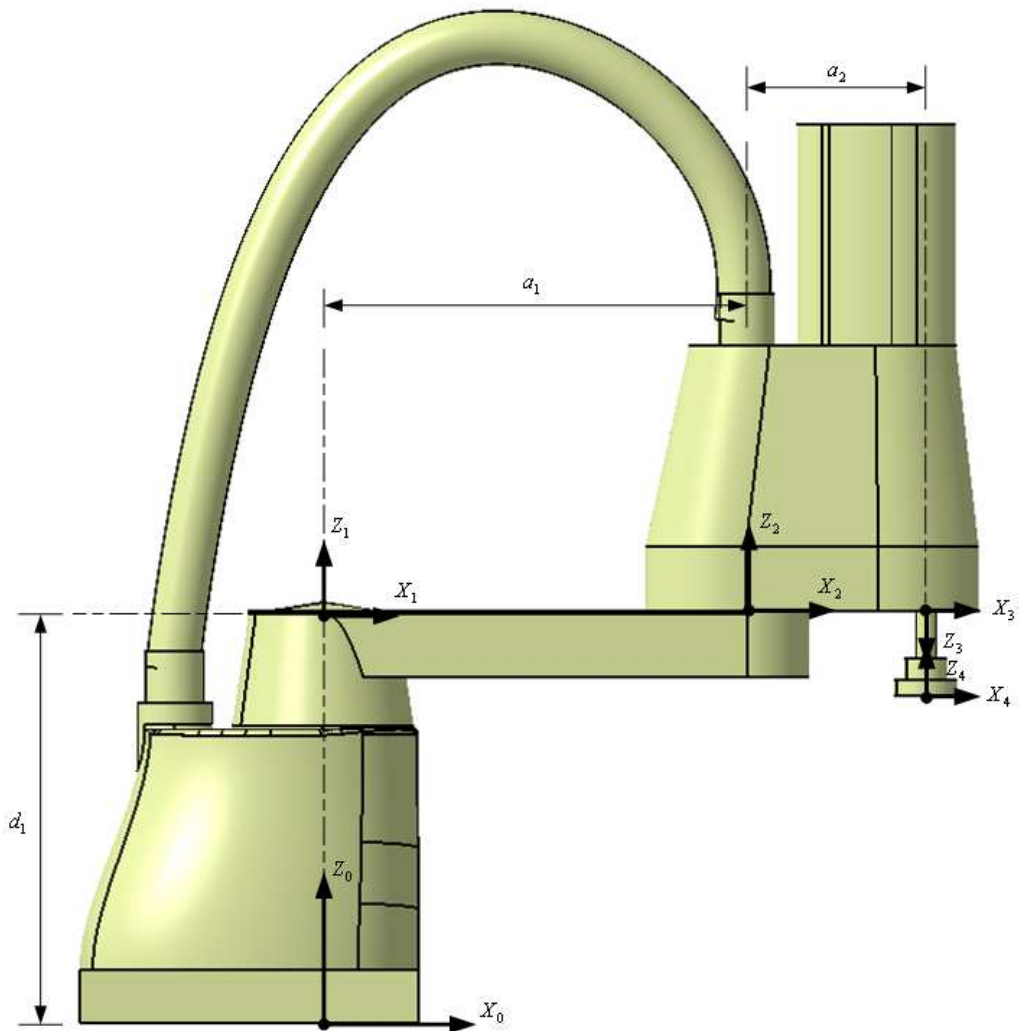


Fig.2 Samsung SM7 4-axis robot

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

$${}^0_4T = {}^0_1T_1^1T_2^2T_3^3T_4^4T \dots (2-2)$$

Table 1의 각 축에 대한 링크인자 값을 Eq.(2-1)과 Eq.(2-2)에 대입하여 계산하면 다음과 같이 주어진다.

$${}^0_4T = {}^0_1T_1^1T_2^2T_3^3T_4^4T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (2-3)$$

여기서,

$$l_x = \cos\theta_4\cos(\theta_1 + \theta_2) - \sin\theta_4\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$l_y = \cos\theta_4\sin(\theta_1 + \theta_2) - \sin\theta_4\cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$l_z = 0$$

$$m_x = -\sin\theta_4\cos(\theta_1 + \theta_2) - \cos\theta_4\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$m_y = -\sin\theta_4\sin(\theta_1 + \theta_2) - \cos\theta_4\cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$m_z = 0$$

$$n_x = 0$$

$$n_y = 0$$

$$n_z = 1$$

$$p_x = 250\cos(\theta_1 + \theta_2) + 400\cos\theta_1$$

$$p_y = 250\sin(\theta_1 + \theta_2) + 400\sin\theta_1$$

$$p_z = 388 - d_3 + 79$$

이며, 마지막 좌표계 원점에 부착된 큐의 끝점까지의 위치벡터는 다음과 같다.

$${}^4P^i = (P_x^i, P_y^i, P_z^i, 1)^T \quad \dots (2-4)$$

여기서, $i = \text{큐(Cue)의 수}(i=1,2)$

따라서, 로봇 베이스 좌표계에 대한 큐의 끝점 P^i 까지의 위치벡터는 Eq.(2-5)와 같이 계산된다.

$$\bar{F}^i = {}^0_4T \cdot {}^4P^i \quad \dots (2-5)$$

Eq. (2-5)를 베이스 좌표계에 대해 x, y, z 성분별로 나타내면 다음과 같다.

$$f_x^i = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x^i - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y^i + 250\cos(\theta_1 + \theta_2) + 400\cos\theta_1$$

$$f_y^i = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x^i + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y^i + 250\sin(\theta_1 + \theta_2) + 400\sin\theta_1$$

$$f_z^i = P_z^i + 388 - d_3 + 79 \quad \dots (2-6)$$

2.1.2 로봇 역기구학 모델

역기구학은 주어진 로봇의 목표지점 $F_d^i(X_d^i, Y_d^i, Z_d^i)$ 에 대한 로봇 각 관절의 회전각을 구하는 것이다. 여기서 사용되는 비선형 방정식의 해를 구하기 위하여 Newton-Raphson법을 이용하기 위해 Eq.(2-7)과 같은 함수를 정의하였다.

$$\underline{f} = {}^0T \cdot {}^4P^i - F_d^i \quad \dots (2-7)$$

Eq.(2-7)을 Newton-Raphson방법을 적용하면 다음과 같다.

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

또는,

$$\begin{pmatrix} \Theta_{1k+1} \\ \Theta_{2k+1} \\ d_{3k+1} \\ \Theta_{4k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta_{1k} \\ \Theta_{2k} \\ d_{3k} \\ \Theta_{4k} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x^i}{\partial \Theta_1} & \frac{\partial f_x^i}{\partial \Theta_2} & \frac{\partial f_x^i}{\partial d_3} & \frac{\partial f_x^i}{\partial \Theta_4} \\ \frac{\partial f_y^i}{\partial \Theta_1} & \frac{\partial f_y^i}{\partial \Theta_2} & \frac{\partial f_y^i}{\partial d_3} & \frac{\partial f_y^i}{\partial \Theta_4} \\ \frac{\partial f_z^i}{\partial \Theta_1} & \frac{\partial f_z^i}{\partial \Theta_2} & \frac{\partial f_z^i}{\partial d_3} & \frac{\partial f_z^i}{\partial \Theta_4} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} f_x^i(x_k) \\ f_y^i(x_k) \\ f_z^i(x_k) \end{pmatrix} \quad \dots (2-8)$$

여기서,

$$\frac{\partial f_x^i}{\partial \theta_1} = -s_{124}P_x - c_{124}P_y - 250s_{12} - 400s_1$$

$$\frac{\partial f_x^i}{\partial \theta_2} = -s_{124}P_x - c_{124}P_y - 250s_{12}$$

$$\frac{\partial f_x^i}{\partial d_3} = 0$$

$$\frac{\partial f_x^i}{\partial \theta_4} = -s_{124}P_x - c_{124}P_y$$

$$\frac{\partial f_y^i}{\partial \theta_1} = c_{124}P_x - s_{124}P_y + 250c_{12} + 400c_1 \quad \dots (2-9)$$

$$\frac{\partial f_y^i}{\partial \theta_2} = c_{124}P_x - s_{124}P_y + 250c_{12}$$

$$\frac{\partial f_y^i}{\partial d_3} = 0$$

$$\frac{\partial f_y^i}{\partial \theta_4} = c_{124}P_x - s_{124}P_y$$

$$\frac{\partial f_z^i}{\partial \theta_1} = 0$$

$$\frac{\partial f_z^i}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\frac{\partial f_z^i}{\partial d_3} = -1$$

$$\frac{\partial f_z^i}{\partial \theta_4} = 0$$

특히, Eq.(2-8)에서 역행렬을 계산할 경우 정방 행렬이 아닌 관계로 Gauss 소거법과 같은 일반적인 방법으로는 역행렬 계산을 할 수가 없으므로, Lagrange 승수법칙(multiplier rule)을 적용하여 얻어진 최소 노름해(Minimum norm solution)를 이용하여 $A(m \times n)$ 가 정방 행렬이 아닌 $y = A \cdot x$ 에서 x 값을 계산하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 해를 구하였다⁽⁶⁾.

$$x = A^T (A A^T)^{-1} y \quad (m < n) \quad \dots (2-10)$$

$$x = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (m > n)$$

2.2 비전 시스템 모델

본 논문의 비전 시스템모델은 6개의 불확실한 시각 매개 변수를 사용하여 3차원 공간상에 움직이는 로봇 끝점의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계 위치로 변환한다. 6개의 매개변수를 포함하는 비전 시스템 모델은 다음과 같다⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.

$$X_m = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y \quad \cdot \cdot \cdot (2-11)$$

$$+ 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z + C_5$$

$$Y_m = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y \quad \cdot \cdot \cdot (2-12)$$

$$+ 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6$$

여기서, X_m 과 Y_m 는 6개의 시각 매개변수가 알려졌다고 가정할 때 3차원 공간에서 움직이는 로봇 끝의 위치벡터(f_x, f_y, f_z)가 카메라 좌표계로 변환된 값을 나타낸다. 6개의 매개변수들은 로봇에 대한 카메라 위치, 방위 및 초점거리등의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 3차원 공간에서 움직이는 로봇 끝점 위치를 2차원 카메라 좌표계로의 변환 관계를 나타낸다. 여기서 매개변수 ($C_1 \sim C_4$)는 카메라 방위 및 초점거리의 변화성을 나타내고, 매개변수 ($C_5 \sim C_6$)는 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타낸다.

2.3 매개변수 추정 모델

비전 시스템 모델에 포함된 6개의 시각 매개변수는 3차원 공간에 있는 로봇의 끝점의 실제 좌표계를 2차원의 카메라 좌표계로 변환하는데 매우 중요한 인자이며, 매개변수 C_k ($k=1, 2, \dots, 6$)를 추정하는 과정은 다음과 같다. 로봇이 주어진 궤적을 이동할 때 각 이동단계에서 로봇끝점에 부착된 임의의 점에 대한 비전 데이터와 로봇 관절의 회전각($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$)이 동시에 연속적으로 얻어진다면 3차원 공간상의 임의의 점 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개의 시각 매개변수를 추정하기 위해 각 카메라에 대하여 아래 주어진 성능지수 $J(C_k)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \{ [X_m^{i,j} - X_c^{i,j}]^2 + [Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j}]^2 \} \quad \dots (2-13)$$

여기서, i ($i=1, 2, \dots, n$)는 측정된 데이터의 개수 (이동 단계 수)

j ($=1, 2$)는 각 이동 단계에서 측정된 큐의 개수

$X_c^{i,j}$ 와 $Y_c^{i,j}$ 는 각 이동 단계에서 얻어진 실제 큐에 대한 비전데이터 값

$X_m^{i,j}$ 과 $Y_m^{i,j}$ 는 매개변수 C_k 를 포함한 비전 시스템 모델 값

Eq.(2-13)에 주어진 성능지수 $J(C_k)$ 를 최소화시키면 다음과 같다.

$$g = \begin{bmatrix} g_x^{i,j} \\ g_y^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m^{i,j} - X_c^{i,j} \\ Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots (2-14)$$

위 식에 매개변수 C_k 를 계산하기 위해 Newton-Raphson 공식을 적용하면

$$\begin{aligned} C_{k,n+1} &= C_{k,n} - \left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k} \right]^{-1} g(C_{k,n}) \\ &= C_{k,n} + \Delta C \end{aligned} \quad \dots (2-15)$$

여기서, n 은 계산과정 중 반복횟수를 나타낸다.

Eq.(2-15)에서 $\left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k} \right]^{-1}$ 부분을 계산하기 위해 Eq.(2-10)을 적용하면 ΔC 는

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad \dots (2-16)$$

과 같이 된다⁽¹²⁾. Eq.(2-16)에서 W 는 가중행렬(weighting matrix)로서 단위행렬을 사용하였으며, R 은 유수벡터(Residual vector)이며 $2m \times 1$ 요소를 갖는 Eq.(2-17)과 Eq.(2-18)같이 주어진다.

$$R_{2m-1} = X_m^{i,j} - X_c^{i,j} \quad \dots (2-17)$$

$$R_{2m} = Y_m^{i,j} - Y_c^{i,j} \quad \dots (2-18)$$

또한, $2m \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 Eq.(2-19)와 Eq.(2-20)같이 주어진다.

$$A_{2m-1, k} = \partial X_m^{i,j} / \partial C_k \quad \dots (2-19)$$

$$A_{2m, k} = \partial Y_m^{i,j} / \partial C_k \quad \dots (2-20)$$

여기서, i 는 로봇이동 단계 수 ($i = 1, 2, \dots, n$), j 는 큐의 수 ($j = 1, 2$), m 은 로봇이 이동하는 동안 측정된 데이터의 총 수 ($m = 1, 2, \dots, (i \times j)$), k 는 매개변수의 수 ($k = 1, 2, \dots, 6$)이다. 즉,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_6} \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad \cdot \cdot \cdot (2-21)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_1} &= 2[C_1 f_x^{i,j} + C_4 f_y^{i,j} - C_3 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_2} &= 2[C_2 f_x^{i,j} + C_3 f_y^{i,j} + C_4 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_3} &= 2[-C_3 f_x^{i,j} + C_2 f_y^{i,j} - C_1 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_4} &= 2[-C_4 f_x^{i,j} + C_1 f_y^{i,j} + C_2 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_5} &= 1, \\ \frac{\partial X_m^{i,j}}{\partial C_6} &= 0, \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_1} &= 2[-C_4 f_x^{i,j} + C_1 f_y^{i,j} + C_2 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_2} &= 2[C_3 f_x^{i,j} - C_2 f_y^{i,j} + C_1 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_3} &= 2[C_2 f_x^{i,j} + C_3 f_y^{i,j} + C_4 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_4} &= 2[-C_1 f_x^{i,j} - C_4 f_y^{i,j} + C_3 f_z^{i,j}], \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_5} &= 0, \\ \frac{\partial Y_m^{i,j}}{\partial C_6} &= 1 \end{aligned}$$

이다.

2.4 로봇 회전각 추정 모델

2.3절의 매개변수 추정모델 절차에 의해서 각 카메라에 대한 매개변수 C_k 가 얻어지면, 이를 사용하여 목표지점에 대한 로봇의 회전각 $(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 추정이 필요하게 된다. 회전각 추정은 Eq.(2-22)에 정의된 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J_a(\theta) = \sum_{q=1}^3 \sum_{j=1}^2 \{ [X_m^{q,j}(f_x^j(\theta), f_y^j(\theta), f_z^j(\theta); C_k^q) - X_t^{q,j}]^2 + [Y_m^{q,j}(f_x^j(\theta), f_y^j(\theta), f_z^j(\theta); C_k^q) - Y_t^{q,j}]^2 \} \quad \dots (2-22)$$

여기서, $q(=1,2,3)$ 는 카메라의 수, $j(=1,2)$ 는 로봇 끝점의 임의의 점에 대한 위치벡터의 수 혹은 큐의 수, $k(=1,2,\dots,6)$ 는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한 $X_t^{q,j}$ 와 $Y_t^{q,j}$ 는 목표지점의 j 번째 큐에 대한 q 번째 카메라의 좌표 값을 나타내며, $X_m^{q,j}$ 와 $Y_m^{q,j}$ 는 추정된 매개변수 C_k 에 근거한 q 번째 카메라에 대해 j 번째 큐의 비전 시스템 모델 값을 나타낸다.

Eq.(2-22)에 주어진 성능지수 $J_a(\theta)$ 를 최소화하기 위하여 2.3절에 설명되어진 매개변수 추정 방법을 회전각 추정 방법에 적용하면 회전각 수정벡터 $\Delta\theta$ 는

$$\Delta\theta = (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad \dots (2-23)$$

이다.

여기서, 가중행렬 W 는 단위행렬을 사용하였으며, 또한 $(2 \times j \times q) \times 4$ 의 요소를 갖는 자코비안 행렬 B 는 Eq. (2-24)와 같다.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_l} \\ \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (2-24)$$

여기서, $l(=\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$ 은 로봇 회전각의 수를 나타내며, $\frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_l}$ 과 $\frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_l}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial X_m^{q,j}}{\partial \theta_l} = \left\{ [(C_1^q)^2 + (C_2^q)^2 - (C_3^q)^2 - (C_4^q)^2] \frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_l} + 2(C_2^q C_3^q + C_1^q C_4^q) \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_l} + 2(C_2^q C_4^q - C_1^q C_3^q) \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_l} \right\}$$

$$\frac{\partial Y_m^{q,j}}{\partial \theta_l} = \left\{ 2(C_2^q C_3^q - C_1^q C_4^q) \frac{\partial f_x^j}{\partial \theta_l} + [(C_1^q)^2 - (C_2^q)^2 + (C_3^q)^2 - (C_4^q)^2] \frac{\partial f_y^j}{\partial \theta_l} + 2(C_3^q C_4^q + C_1^q C_3^q) \frac{\partial f_z^j}{\partial \theta_l} \right\}$$

또한, $(2 \times j \times q) \times 1$ 의 요소를 갖는 유수벡터 행렬 R 은 Eq.(2-25)와 같다.

$$R = \begin{bmatrix} X_m^{q,j} - X_t^{q,j} \\ Y_m^{q,j} - Y_t^{q,j} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (2-25)$$

로봇의 회전각 추정도 매개변수 추정 방법과 같이 Newton-Raphson 반복법이 사

용되므로 적절한 초기 값을 가지고 다음과 같은 관계식을 사용하여 계산한다.

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta \quad \cdot \cdot \cdot (2-26)$$

제 3 장 실험 장치

3.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 크게 비전 시스템, 로봇 시스템 및 PC로 크게 3부분으로 구분하였으며 실험 장치에 대한 사양은 Table 2에 나타내었다. 실험 장치에 대한 전체적인 구성도는 Photo 1과 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2 Specification of experimental apparatus

System	Parts	Specification
Vision System	CCD Camera	· XC-ES51 (SONY)
		· AVENIR TV 줌 렌즈
		· 756(H)×485(V)의 유효 화소수
	Vision Board	· 흑백Meteor2-MC4 (MATROX)
		· 해상도 - 640(H)×480(V)
		· 화상도 - 256계조
		· 최대 Sampling rate - 30MHz
Library	· Three 256×8-bit LUTs	
Library	· Matorx Imaging Library 8.0DEV	
Robot System	Robot	· SM7 Robot (삼성)
	Robot controller	· MMC-BDPO41PNB
PC	Main Board	· MB800V(산업용)
	CPU	· 2.8GHz
	RAM	· 256MB



Photo 1 Experimental apparatus

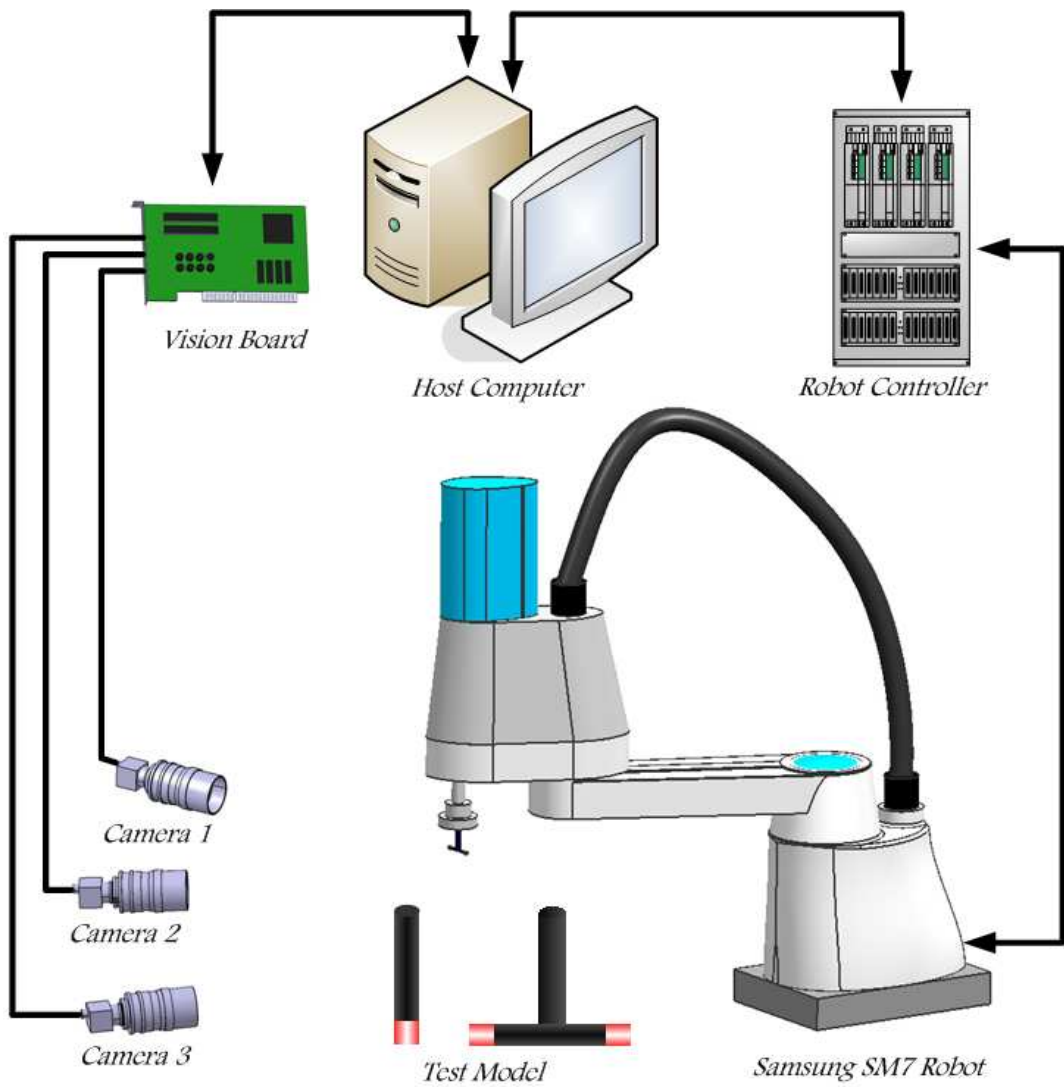


Fig. 3 Experiment set-up

3.2 시험 모형

로봇의 허용 중량과 제작 시에 발생할 수 있는 오차와 비전 데이터 획득 시 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 플라스틱 봉과 LED를 조합하여 제작하였고, 그 전체적인 모형의 형상을 Fig. 4와 Fig. 5에 보였다.



Fig. 4 1 cue test model for experiment

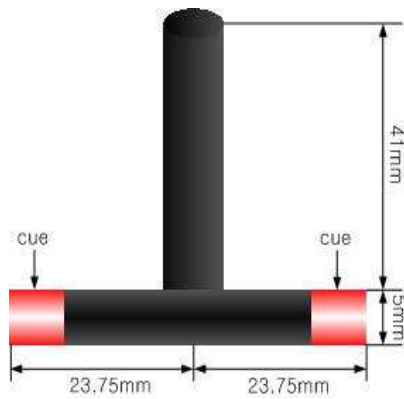


Fig. 5 2 cue test model for experiment

3.3 실험 방법

로봇 위치제어를 위해 사용한 비전 시스템 모델이 카메라의 배치 형태에 따라서 어떠한 영향을 미치는가를 보기 위해서 로봇의 작업 영역을 Fig. 6과 같이 좌측, 중앙 및 우측 등 3개 영역으로 구분하여 로봇 운동 궤적을 설정하였다.

카메라는 로봇 베이스로부터 3개의 동심원(1.5m, 2.0m, 2.5m)을 설정하여 21개의 지점에 설치하였다. 최종적으로 Table 3에서 보여준 것 같이 각각의 작업영역에 모든 상황을 설명할 수 있도록 9개 경우의 카메라 배치형태를 설정하여 Fig. 4와 Fig. 5의 2종류의 시험모형을 사용하였으며, 각 경우에 모두 3대의 카메라를 사용하였다.

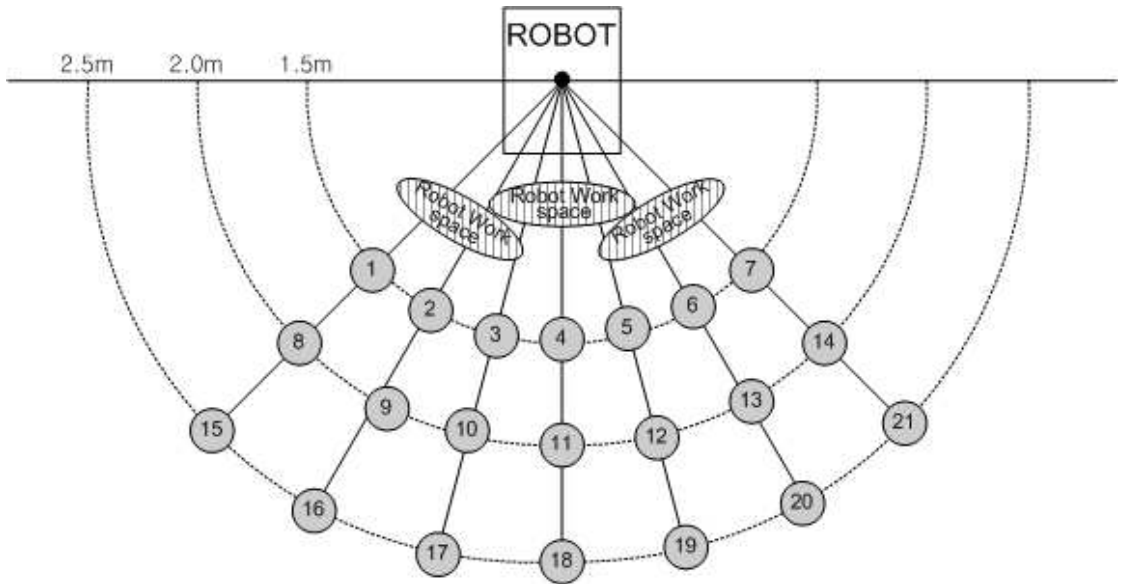


Fig. 6 Setting positions of cameras

Table 3 Cases of camera setting for the experiment

Work space	Camera arrangement #	Setting position number	Characteristic
Robot's left-work space	case #1	1, 2, 3	1.5m 좌측 편중 배치
	case #2	3, 4, 5	1.5m 중앙 배치
	case #3	5, 6, 7	1.5m 우측 편중 배치
	case #4	8, 9, 10	2.0m 좌측 편중 배치
	case #5	10, 11, 12	2.0m 중앙 배치
	case #6	12, 13, 14	2.0m 우측 편중 배치
	case #7	15, 16, 17	2.5m 좌측 편중 배치
	case #8	17, 18, 19	2.5m 중앙 배치
	case #9	19, 20, 21	2.5m 우측 편중 배치
Robot's center-work space	case #1	1, 2, 3	1.5m 좌측 편중 배치
	case #2	3, 4, 5	1.5m 중앙 배치
	case #3	5, 6, 7	1.5m 우측 편중 배치
	case #4	8, 9, 10	2.0m 좌측 편중 배치
	case #5	10, 11, 12	2.0m 중앙 배치
	case #6	12, 13, 14	2.0m 우측 편중 배치
	case #7	15, 16, 17	2.5m 좌측 편중 배치
	case #8	17, 18, 19	2.5m 중앙 배치
	case #9	19, 20, 21	2.5m 우측 편중 배치
Robot's right-work space	case #1	1, 2, 3	1.5m 좌측 편중 배치
	case #2	3, 4, 5	1.5m 중앙 배치
	case #3	5, 6, 7	1.5m 우측 편중 배치
	case #4	8, 9, 10	2.0m 좌측 편중 배치
	case #5	10, 11, 12	2.0m 중앙 배치
	case #6	12, 13, 14	2.0m 우측 편중 배치
	case #7	15, 16, 17	2.5m 좌측 편중 배치
	case #8	17, 18, 19	2.5m 중앙 배치
	case #9	19, 20, 21	2.5m 우측 편중 배치

제 4 장 로봇의 점 위치제어 실험

4.1 실험 방법 및 절차

본 실험은 논문에 제시된 비전 제어기법을 사용하여 카메라 배치에 따른 비전 시스템 모델의 영향을 조사하기 위해 로봇의 점 위치제어 실험을 통하여 확인하고자 한다.

본 실험을 위해 로봇의 3개 작업영역 각각에 대해 설정된 9개 경우의 카메라 배치 형태를 이용하고, 이에 대한 시험모형은 Fig. 4의 단일 큐 모형을 가지고 실험을 행하였다.

실험절차는 Fig. 7에서 나타낸 것과 같이 크게 7단계로 구분되고 그 내용은 다음과 같다.

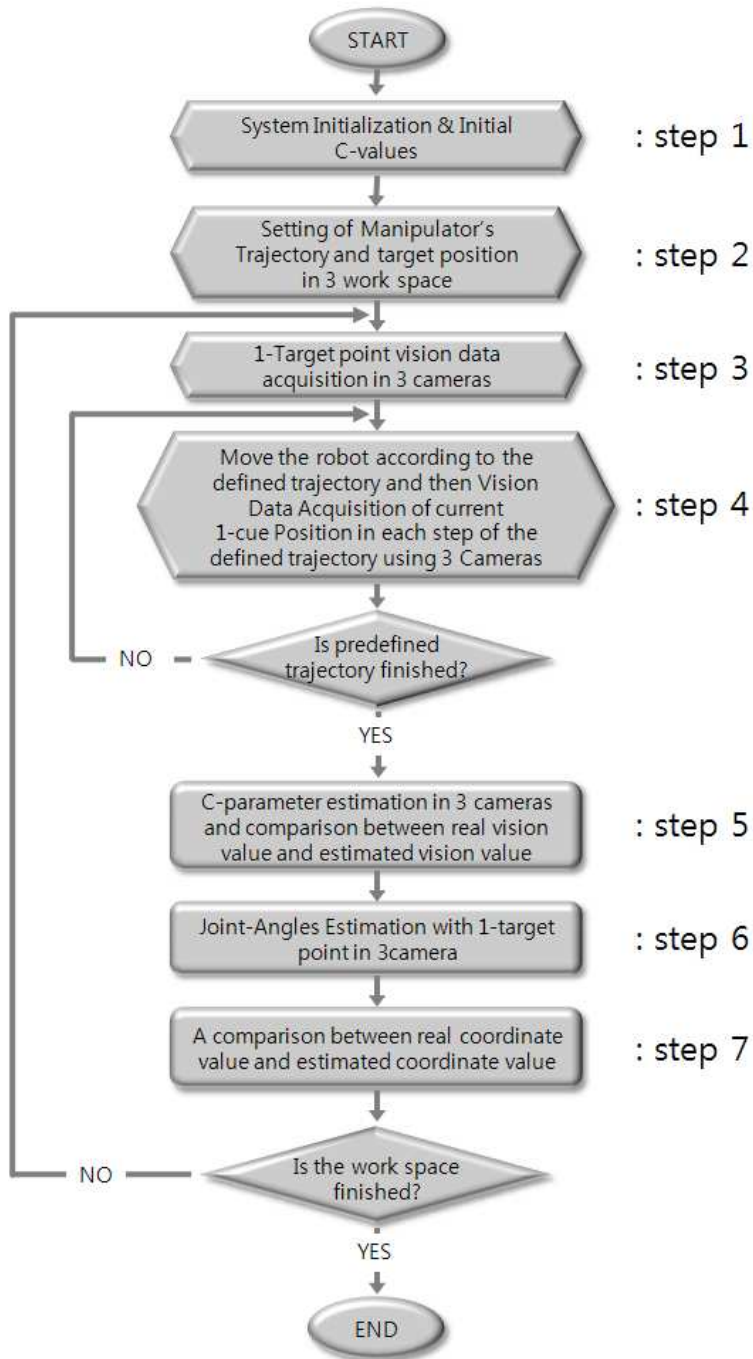


Fig. 7 Experimental procedure of the point position control based on the robot vision system

(1) 단계 1

시스템 초기화 및 매개변수 추정모델을 위한 초기C 값과 회전각 추정모델을 위한 초기 θ 값을 선택한다.

(2) 단계 2

설정된 3경우의 작업영역에서 로봇 끝점에 부착되어있는 큐와 목표점이 3개의 카메라 이미지 평면상에서 벗어나지 않도록 카메라의 초점 및 방위 등을 임의적으로 설정하여 선택된 3개의 작업영역에서 전체적인 경로가 각각의 카메라 이미지 평면에서 벗어나지 않도록 한다.

(3) 단계 3

3개의 카메라에 대하여 목표점의 비전 데이터를 획득한다.

(4) 단계 4

3개의 작업 영역에서 로봇을 19스텝 구동하여 로봇 끝점에 부착되어있는 큐가 이동할 때 각각의 카메라로부터 비전 데이터를 획득한다.

(5) 단계 5

카메라로부터 획득된 3차원 공간상에 있는 큐의 비전 데이터와 2차원 카메라 평면에서의 비전 데이터 X, Y 의 오차 값이 최소가 되는 6개의 시각 매개변수 $C_1 \sim C_6$ 를 수치 해석적인 반복법에 의해서 구하여 허용오차 이내인가를 검사하여 비전 시스템 모델의 적합성을 조사한다.

(6) 단계 6

단계 5에서 추정된 6개의 시각 매개변수 $C_1 \sim C_6$ 를 사용하여 로봇 끝점에 부착되어있는 큐에 대한 비전 데이터와 목표점의 비전 데이터 사이의 오차를 최소화할 수 있는 로봇 각 축의 회전각을 수치 해석적인 반복법에 의해 추정한다.

(7) 단계 7

단계 6에서 추정된 로봇 각 축의 회전각과 로봇의 실제 회전각을 로봇 정기구학 모델에 적용하여 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값의 차이를 비교하여 카메라 배치에 따른 영향을 조사한다.

위에서 설명된 실험 절차는 3경우의 작업영역이 끝나기 전까지는 단계3~단계7을 반복하여 실험을 행한다.

4.2 실험 결과

4.2.1 각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 적합성

(1) 로봇 좌측 작업영역

로봇이 좌측 작업영역에서 이동할 때 사용한 각각의 카메라에 대해 매개변수 추정모델의 적합성을 보이고자 한다.

각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 영향을 조사하기 위하여 로봇의 운동은 좌측 작업영역에 19단계를 갖는 이동궤적을 설정하였다. Fig. 6에 따라 카메라를 선택하고 각 카메라에 대하여 비전 데이터를 획득한 다음 2.3절의 매개변수 추정방법에 따라서 계산된 비전 시스템 모델 값과 실제 데이터 값을 비교하여 비전 시스템 모델의 적합성을 조사하였다.

실험을 위하여 각각의 카메라를 통해 얻은 비전 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 비전 시스템 모델에 적용하여 추정 모델 값을 구한다.

로봇 베이스로부터 1.5m떨어진 7개 카메라 각각에 대해 19단계를 갖는 로봇의 이동궤적과 Table 4의 1~7번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 8~Fig. 14에 제시하였다. 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값의 오차는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m떨어진 각 카메라에 대해 설정된 로봇 이동궤적의 실제 비전 데이터와 Table 4의 8~14번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하였다. 비교 결과는 Fig. 15~Fig. 21에 제시하였으며, 각 카메라에 대하여 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.3\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 각 카메라에 대해 로봇이 19단계에 걸쳐 이동할 때 획득된 실제 비전 데이터와 Table 4의 15~21번 카메라의 6개 시각 매개변수에

근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 22~Fig. 28에 제시하였다. Fig. 22~Fig. 28에서 보여준 것 같이 각 카메라에 대한 실제 값과 추정 모델 값의 오차는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 3.7\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 있다.

결과적으로 로봇이 좌측 작업영역에서 이동할 때 비전 시스템 모델이 사용되는 모든 카메라에 대해서 적합함을 알 수 있다.

Fig. 8~Fig. 28의 실험결과에서 부호 Δ 는 19단계를 걸쳐서 로봇이 이동할 때 이동하는 경로를 비전 시스템을 이용하여 측정한 데이터이고, 부호 \times 는 추정된 6개의 시각 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

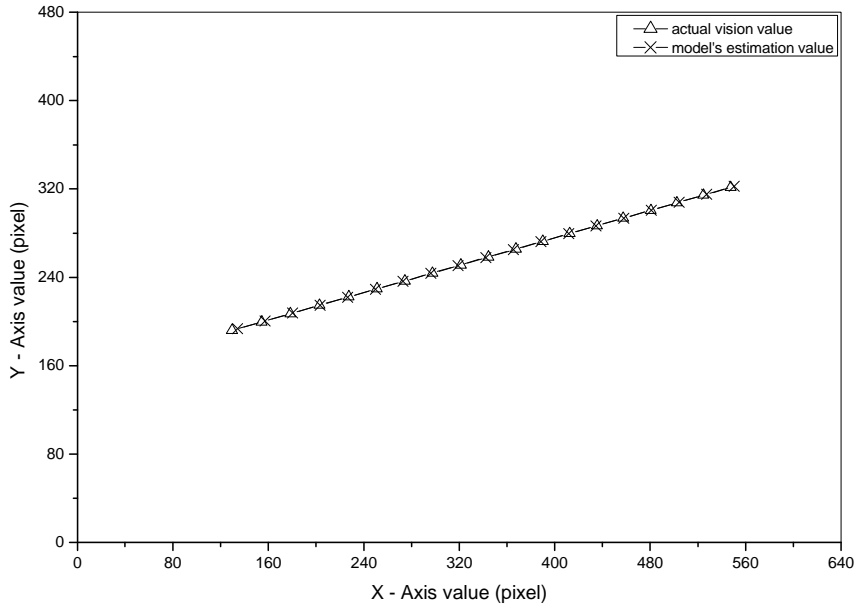


Fig. 8 Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's left work space

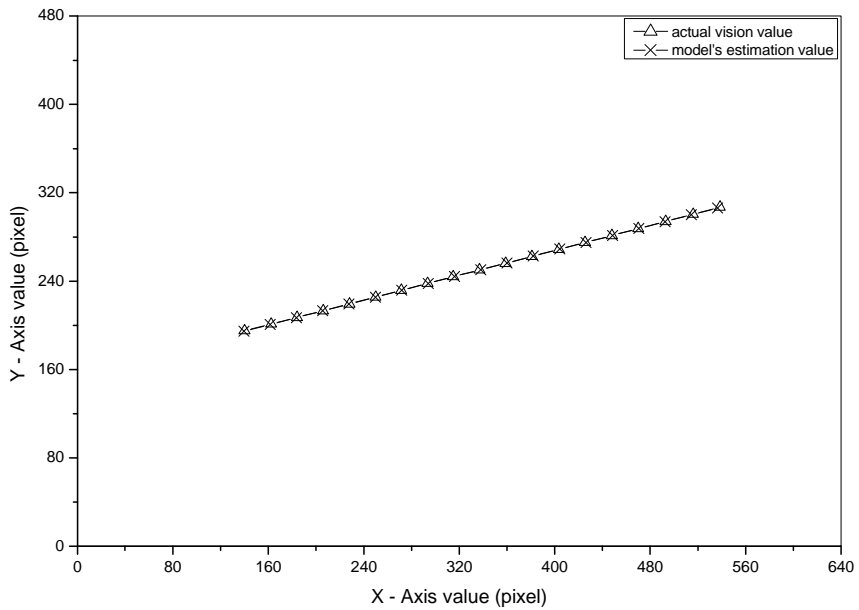


Fig. 9 Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's left work space

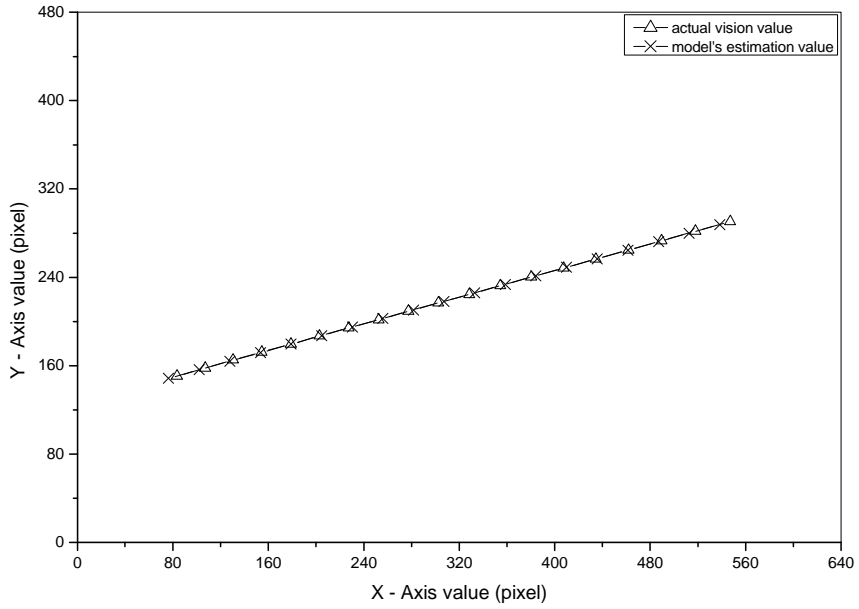


Fig. 10 Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's left work space

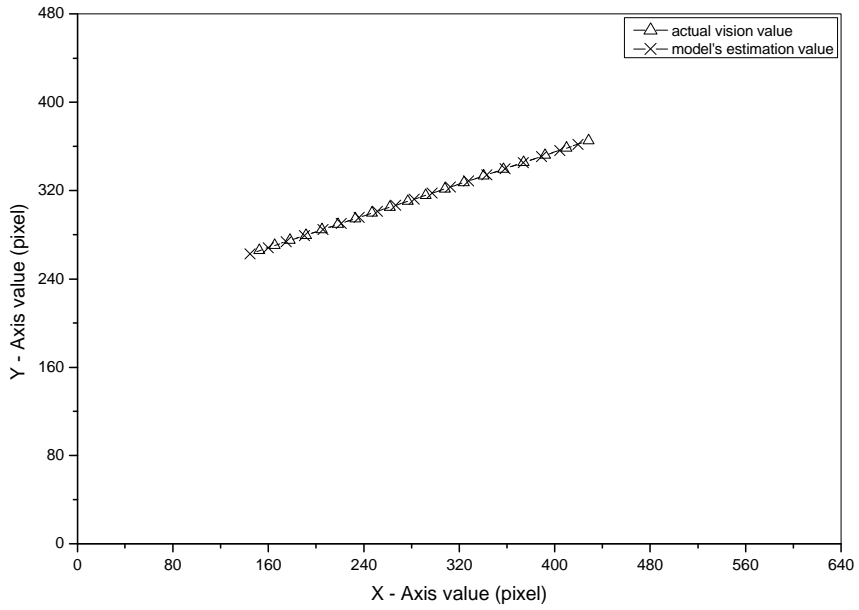


Fig. 11 Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's left work space

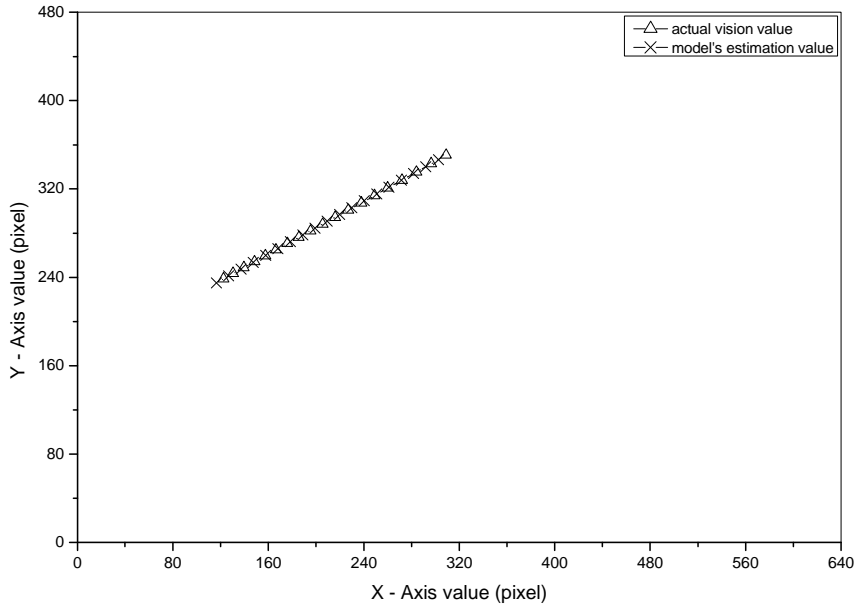


Fig. 12 Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's left work space

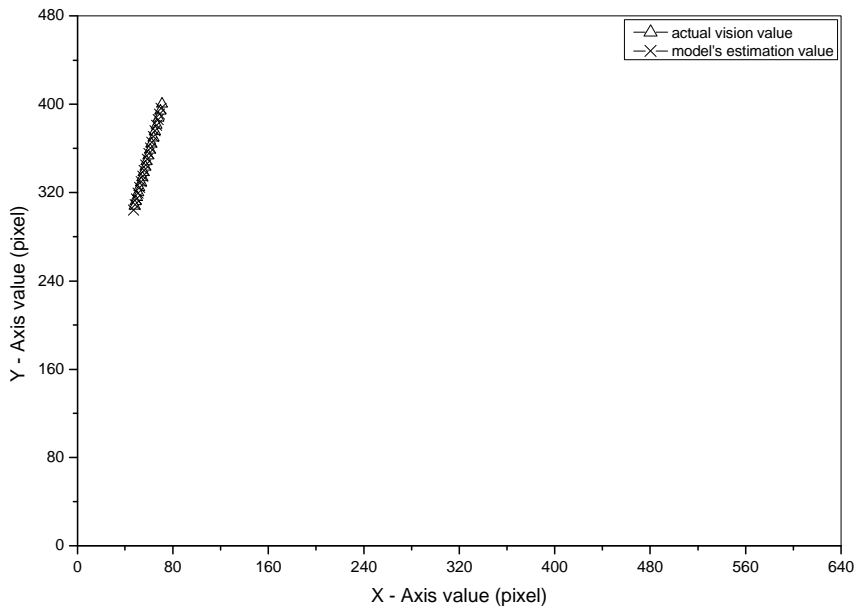


Fig. 13 Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's left work space

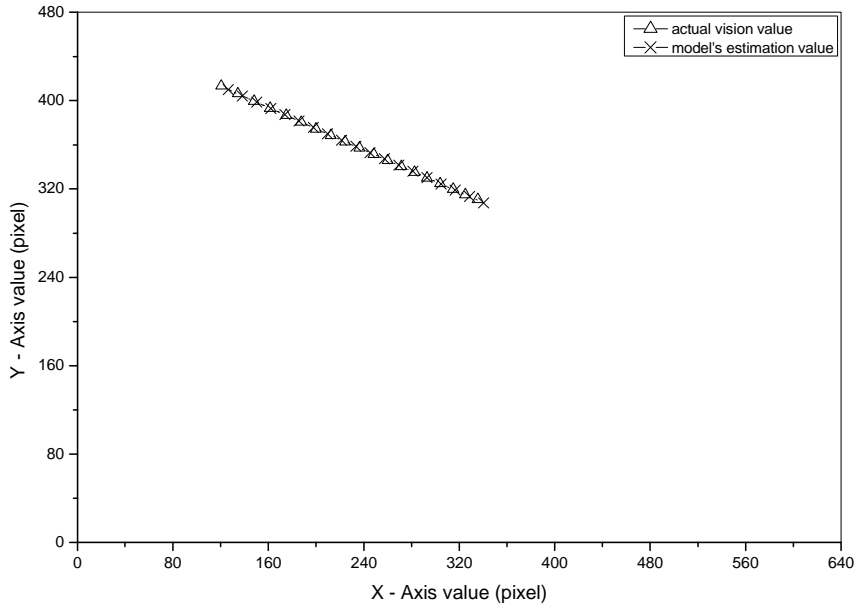


Fig. 14 Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's left work space

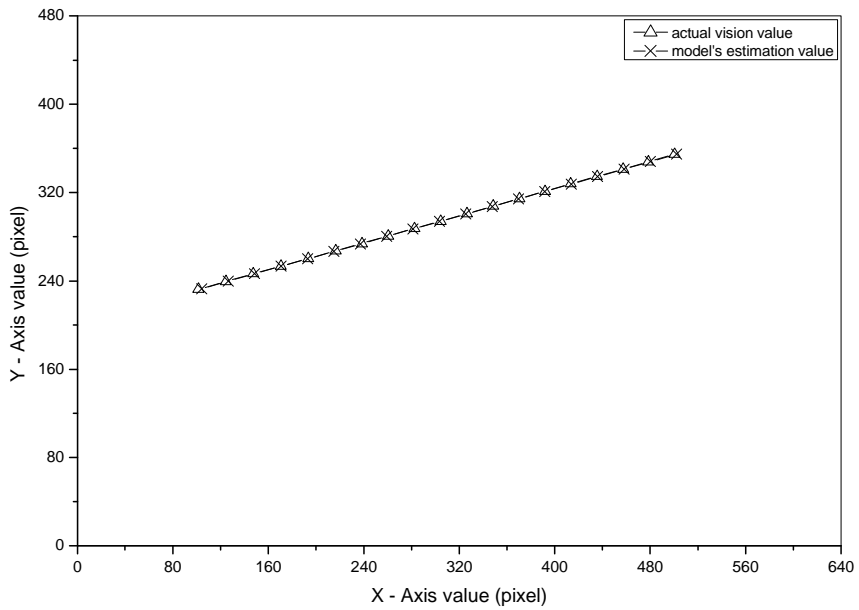


Fig. 15 Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's left work space

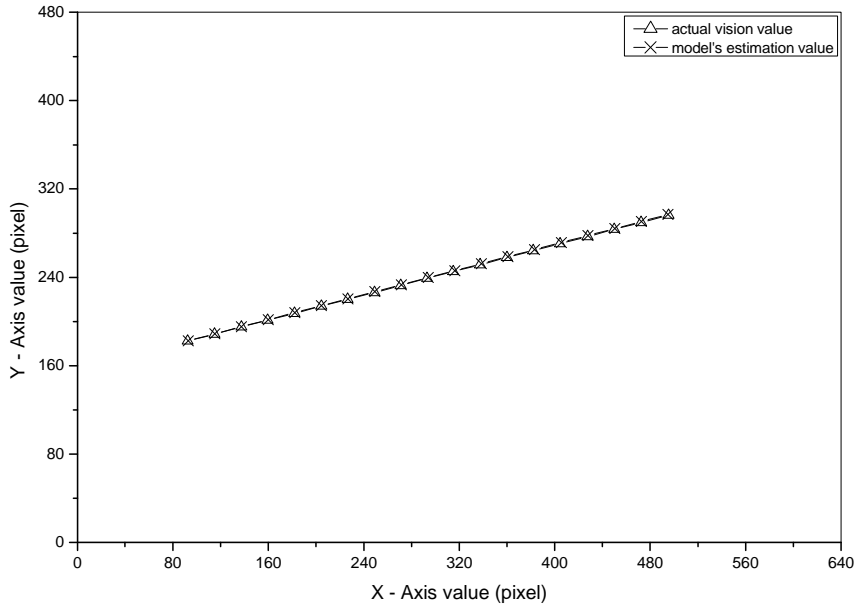


Fig. 16 Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's left work space

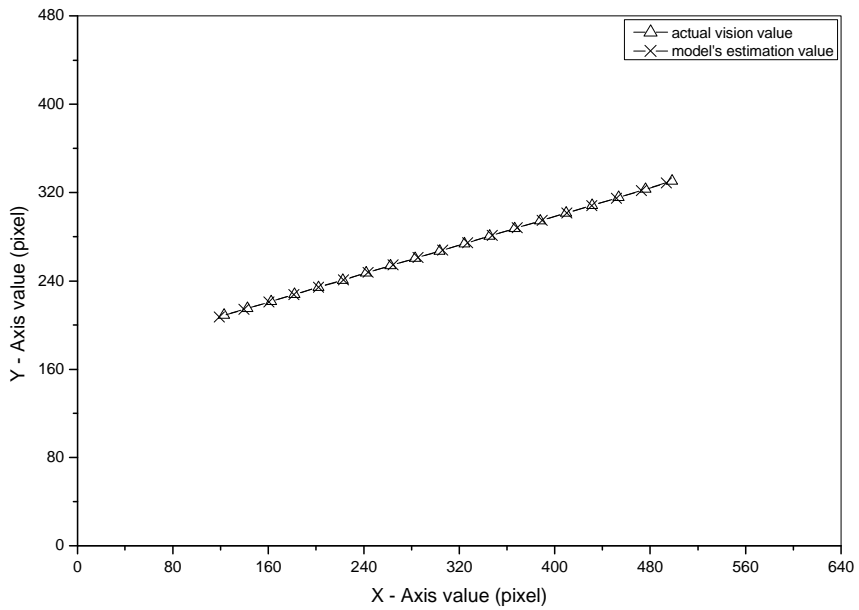


Fig. 17 Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's left work space

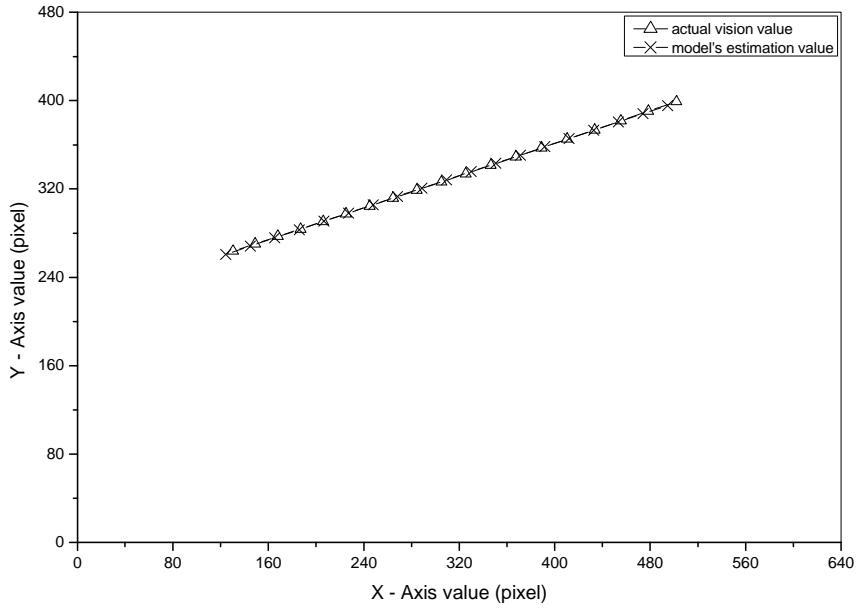


Fig. 18 Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's left work space

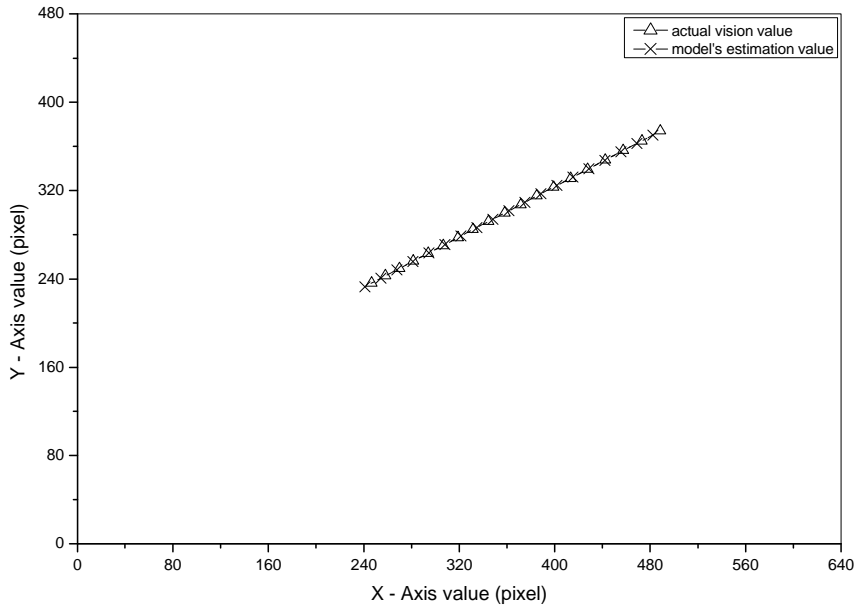


Fig. 19 Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's left work space

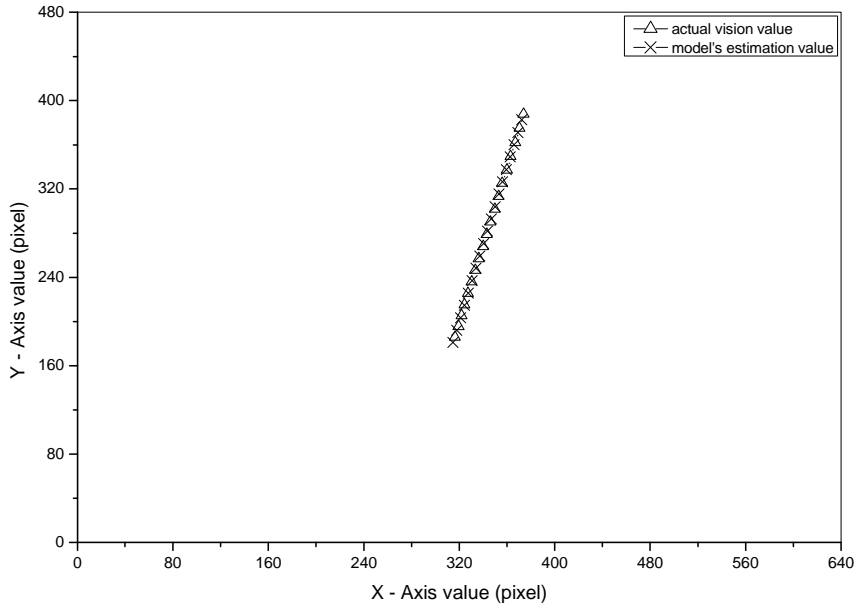


Fig. 20 Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's left work space

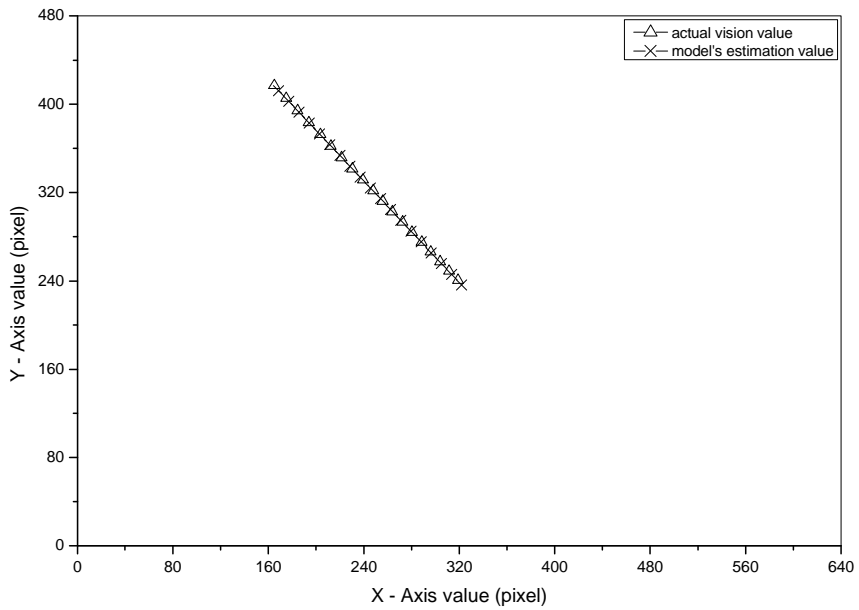


Fig. 21 Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's left work space

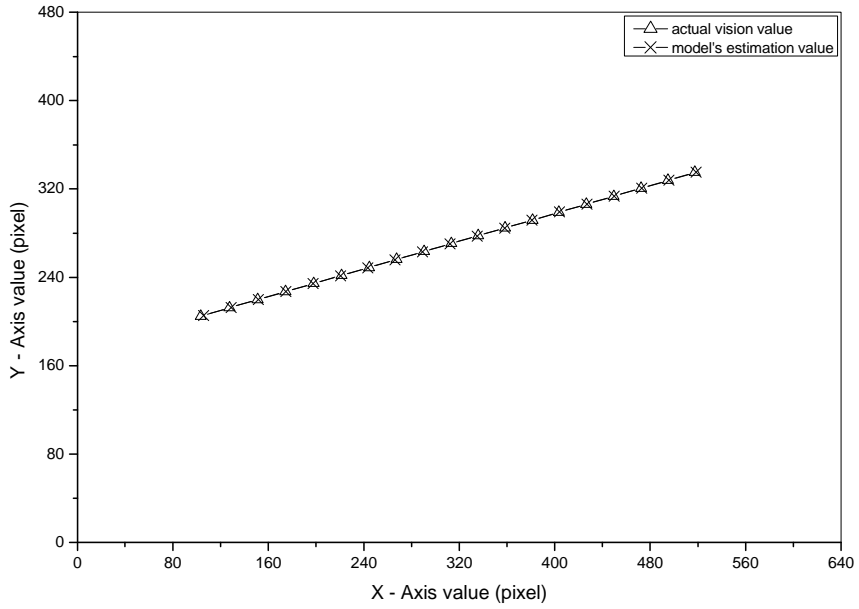


Fig. 22 Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's left work space

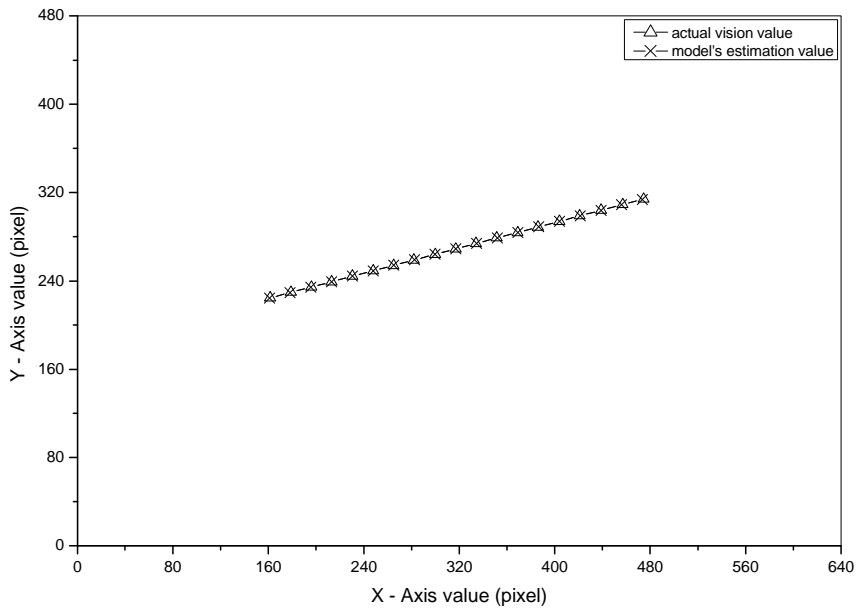


Fig. 23 Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's left work space

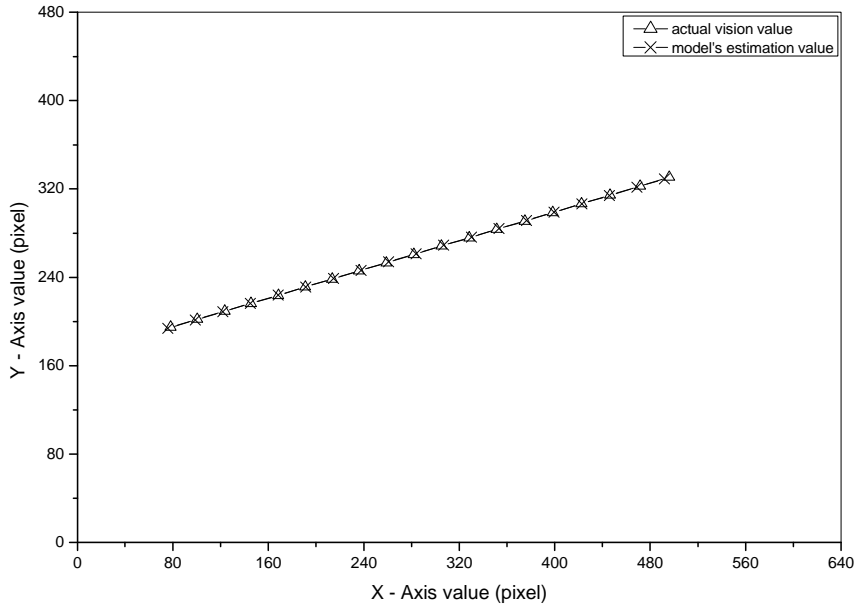


Fig. 24 Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's left work space

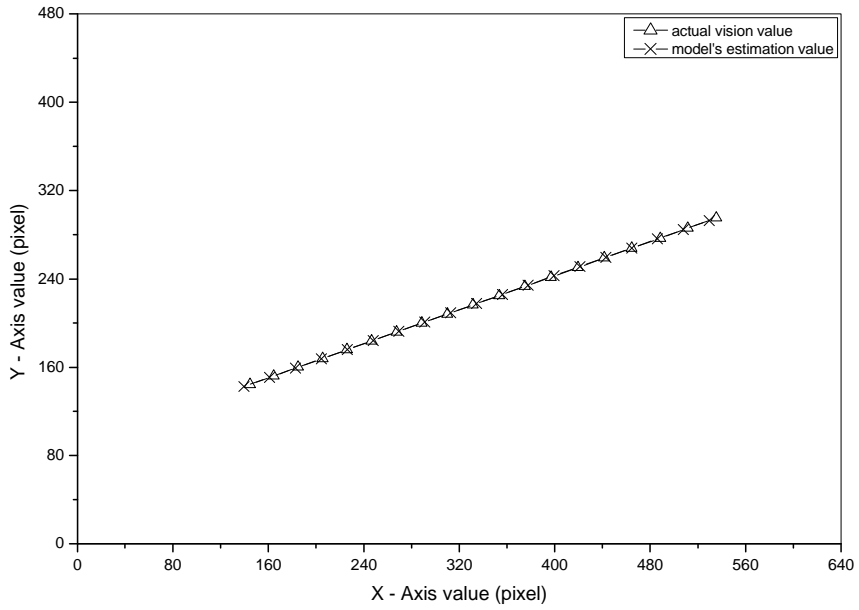


Fig. 25 Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's left work space

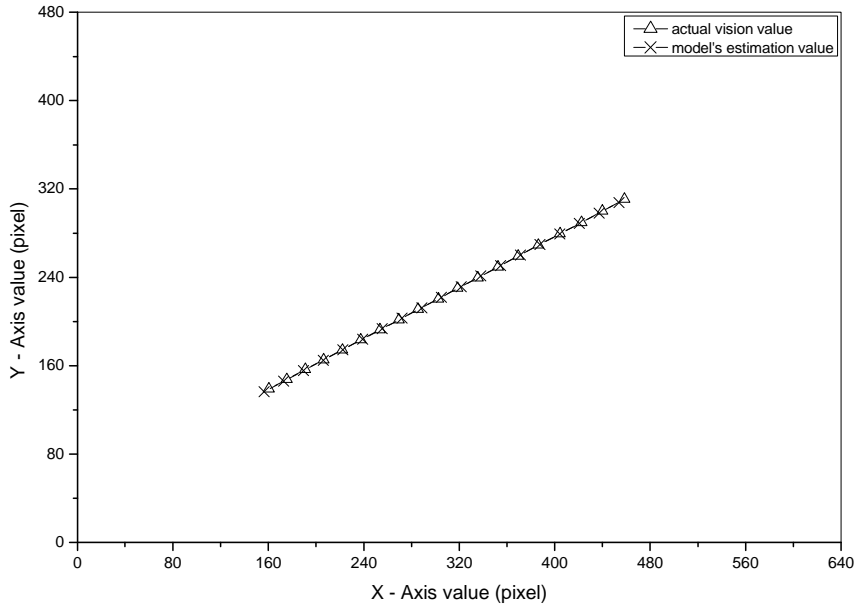


Fig. 26 Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's left work space

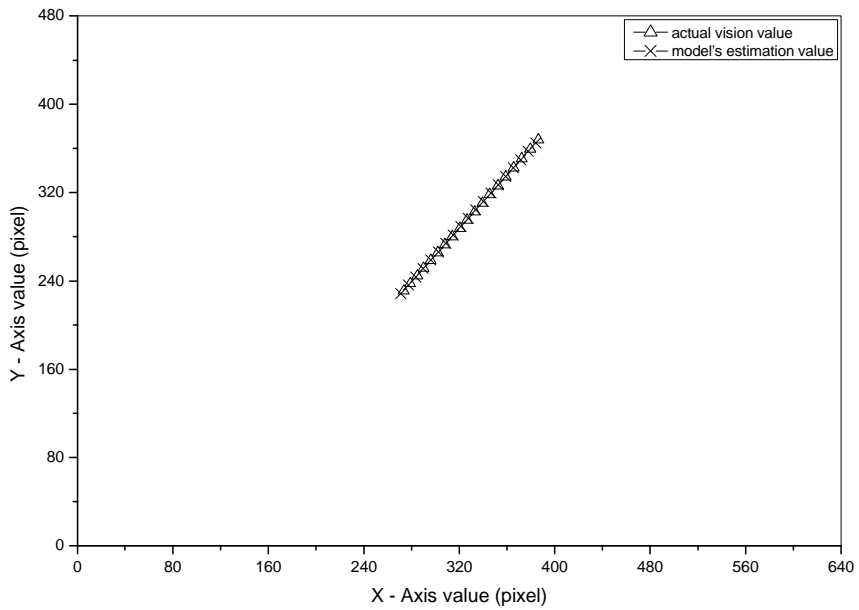


Fig. 27 Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's left work space

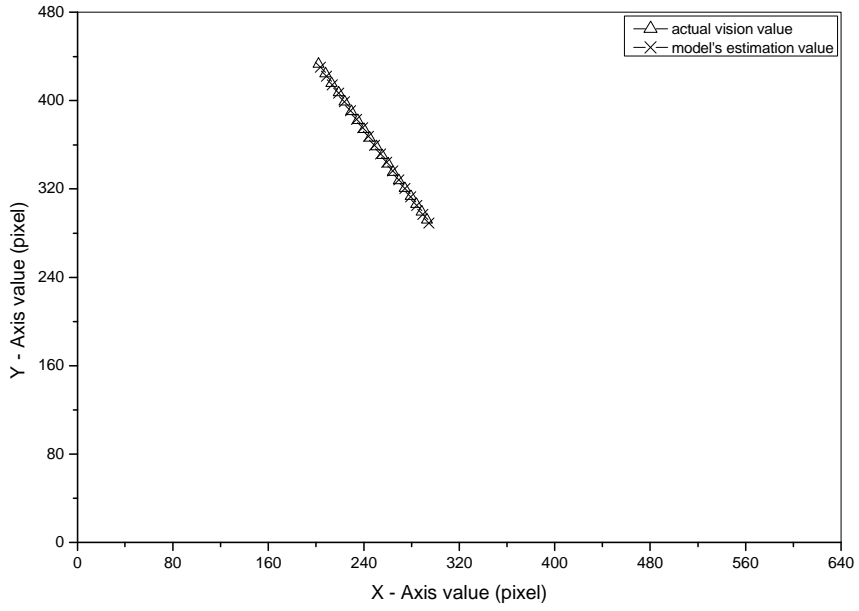


Fig. 28 Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's left work space

Table 4 The estimated six parameters of each camera in robot's left work space

Camera No.	C-value		Camera No.	C-value		Camera No.	C-value	
CAM1	C_1	0.78139216	CAM2	C_1	0.70335889	CAM3	C_1	0.32897669
	C_2	0.80040812		C_2	0.81952900		C_2	1.51771307
	C_3	0.49308166		C_3	0.48963842		C_3	0.77506071
	C_4	0.47758359		C_4	0.47427812		C_4	-0.82305825
	C_5	106.77635193		C_5	119.93138885		C_5	379.10092163
	C_6	-41.41937256		C_6	-93.05249786		C_6	-1290.23107910
CAM4	C_1	0.37470567	CAM5	C_1	0.39179271	CAM6	C_1	2.90663385
	C_2	1.52100039		C_2	1.42333663		C_2	5.83233166
	C_3	0.75891203		C_3	0.73988038		C_3	0.45229217
	C_4	-0.86028934		C_4	-0.88182306		C_4	-3.35162210
	C_5	390.83123779		C_5	419.71173096		C_5	-10178.68066406
	C_6	-1371.50683594		C_6	-1287.63476562		C_6	-20644.37695312
CAM7	C_1	3.02871633	CAM8	C_1	1.33067143	CAM9	C_1	0.78657442
	C_2	6.04192924		C_2	0.71789384		C_2	0.70902514
	C_3	0.44772089		C_3	-0.72152913		C_3	0.65244365
	C_4	-3.53487921		C_4	0.23797219		C_4	0.72101921
	C_5	-10566.84863281		C_5	-954.38604736		C_5	412.53720093
	C_6	-22381.23046875		C_6	1048.93371582		C_6	16.46973610
CAM10	C_1	1.30084038	CAM11	C_1	-9.57810974	CAM12	C_1	0.62886000
	C_2	0.56576604		C_2	8.21599674		C_2	-1.38137674
	C_3	-0.81237864		C_3	-1.97715926		C_3	-0.76253426
	C_4	0.29030108		C_4	5.75917196		C_4	-1.49771738
	C_5	-736.18096924		C_5	-84164.57812500		C_5	-227.35748291
	C_6	1139.42700195		C_6	-10175.65234375		C_6	-2116.10278320
CAM13	C_1	0.28063336	CAM14	C_1	2.59312129	CAM15	C_1	0.68212432
	C_2	-0.71261054		C_2	0.01161226		C_2	0.91153353
	C_3	-0.72091448		C_3	2.89574957		C_3	0.46670952
	C_4	-0.97167796		C_4	2.60005140		C_4	0.35660237
	C_5	543.29064941		C_5	8211.89843750		C_5	-31.79991531
	C_6	-750.63769531		C_6	5441.29492188		C_6	-192.36637878
CAM16	C_1	0.47698578	CAM17	C_1	0.69404358	CAM18	C_1	-2.40439272
	C_2	0.89479339		C_2	0.90388829		C_2	0.72415292
	C_3	0.40868047		C_3	0.47849259		C_3	-1.37376893
	C_4	0.20418513		C_4	0.36983889		C_4	-0.66839820
	C_5	3.99459600		C_5	-45.46767044		C_5	-313.09893799
	C_6	-207.76237488		C_6	-196.82217407		C_6	3753.52075195
CAM19	C_1	-2.51470089	CAM20	C_1	0.67556232	CAM21	C_1	0.59327000
	C_2	0.87119555		C_2	1.00102651		C_2	1.22582304
	C_3	-1.44432747		C_3	0.19935782		C_3	0.52854586
	C_4	-0.54933065		C_4	-0.42056781		C_4	-0.98977834
	C_5	-698.17199707		C_5	-131.85530090		C_5	453.55502319
	C_6	4045.29248047		C_6	-445.36694336		C_6	-1125.98535156

(2) 로봇 중앙 작업영역

로봇이 중앙 작업영역에서 운동할 때에 대한 각각의 카메라에 대해 매개변수 추정모델의 적합성을 보이고자 한다. 각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 적합성을 조사하기 위해 Fig. 6에 따라 카메라를 선택하고 각 카메라에 대하여 비전 데이터를 획득한 다음 2.3절의 매개변수 추정방법에 따라서 계산된 비전 시스템 모델 값과 실제 데이터 값을 비교하여 비전 시스템 모델의 적합성을 조사하였다. 이때 운동계는 19단계를 가지고 로봇이 작업영역 중앙에서 운동하도록 설정하였으며 카메라는 로봇 베이스로부터 반경 1.5m, 2.0m 및 2.5m의 원호상에 각각 7대를 배치하였다.

실험을 위하여 각각의 카메라를 통해 얻은 비전 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 비전 시스템 모델에 적용하여 추정 모델 값을 구한다. 그 결과는 Fig. 29~Fig. 49에 보여주며, 각 Fig에서 부호 Δ 는 19단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 경로를 비전 시스템을 이용하여 측정한 데이터이고, 부호 \times 는 추정된 6개의 시각 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다. 카메라가 배치된 원호상별로 실험결과를 살펴보면 다음과 같다.

로봇 베이스로부터 1.5m 떨어진 각 카메라에 대한 19단계를 갖는 로봇 위치 시퀀스와 Table 5의 1~7번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 29~Fig. 35에 제시하였으며, 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.8\text{pixel} \sim \pm 7.8\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m 떨어진 각 카메라에 대한 결과는 Table 5의 8~14번 카메라의 6개 시각 매개변수에 근거한 추정모델의 값을 각 카메라에 대하여 로봇이 19단계에 걸쳐서 이동할 때 획득된 실제 값과 비교하여 Fig. 36~Fig. 42에 나타내었으며, 각 카메라에 대한 실제 값과 추정 모델의 값이 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 3.9\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.5m 떨어진 각 카메라에 대하여 획득된 19단계의 로봇이동

궤적의 실제 비전 데이터와 Table 5의 15~21번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 43~Fig. 49에 제시하였으며, 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 3.4\text{pixel}$ 의 정밀도를 보여 주었다.

결과적으로 로봇 중앙 작업영역에서의 비전 시스템 모델이 사용되는 모든 카메라에 대해서 적합함을 알 수 있다.

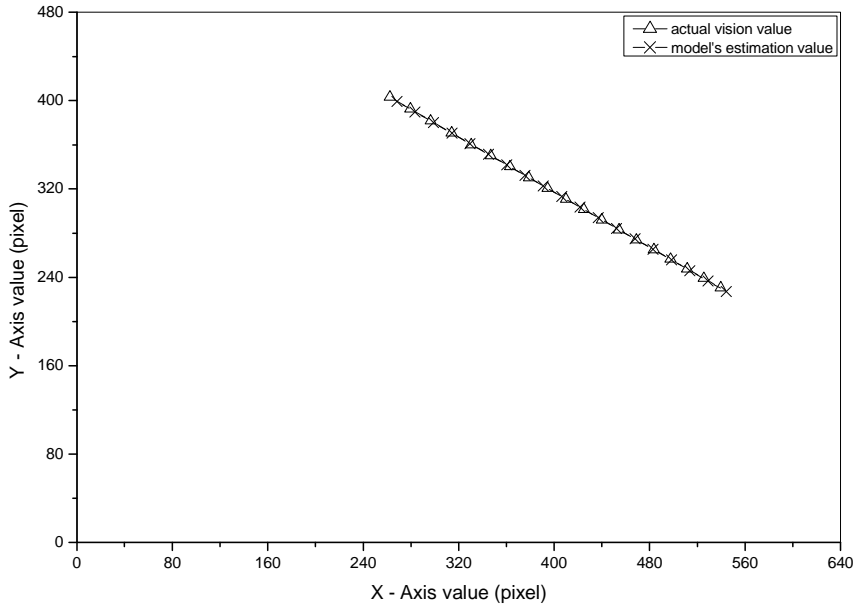


Fig. 29 Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's center work space

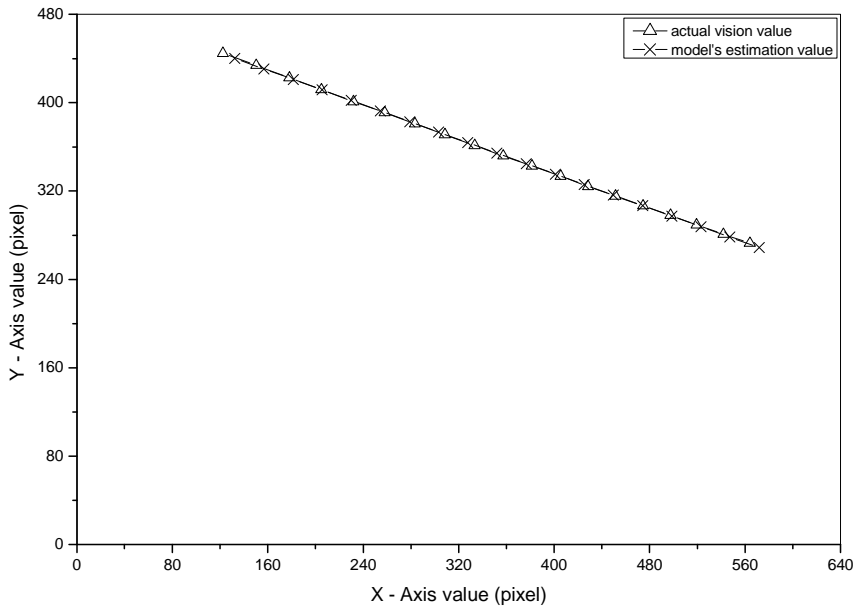


Fig. 30 Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's center work space

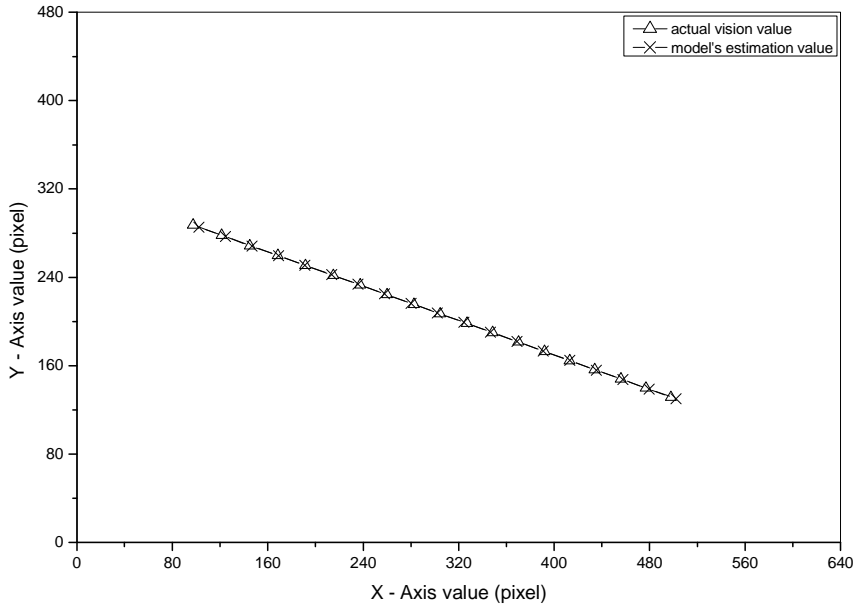


Fig. 31 Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's center work space

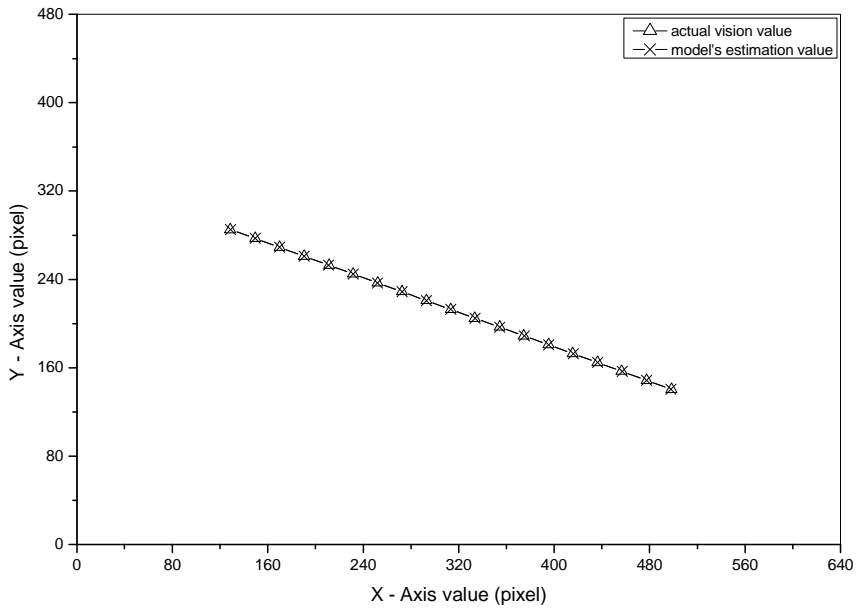


Fig. 32 Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's center work space

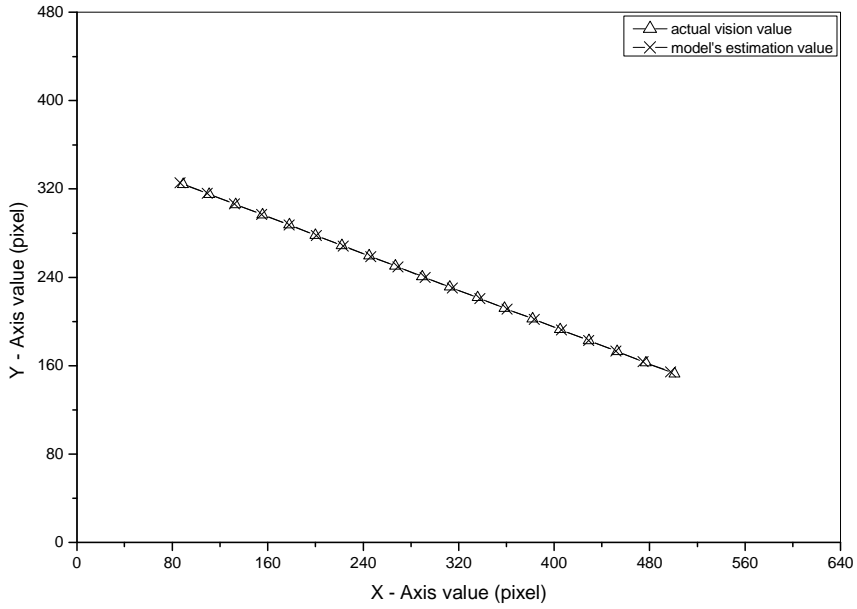


Fig. 33 Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's center work space

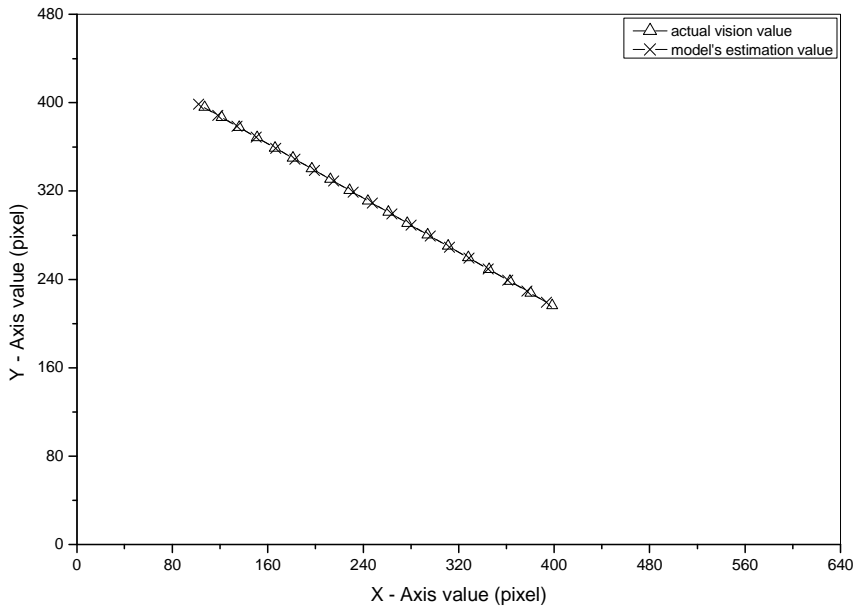


Fig. 34 Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's center work space

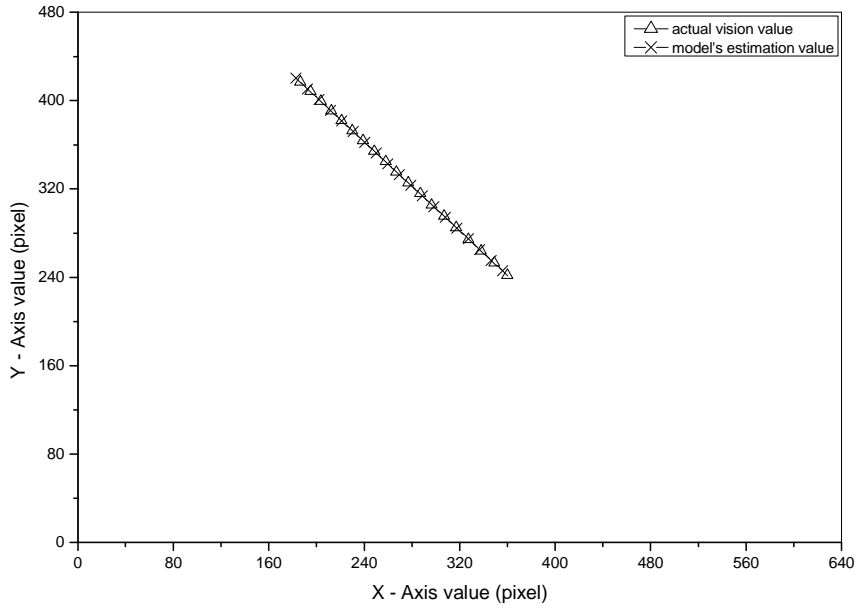


Fig. 35 Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's center work space

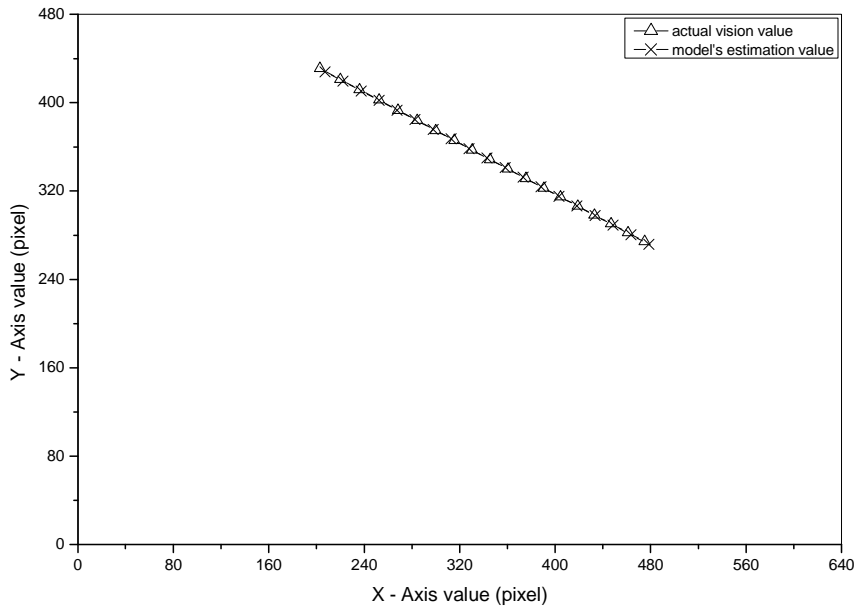


Fig. 36 Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's center work space

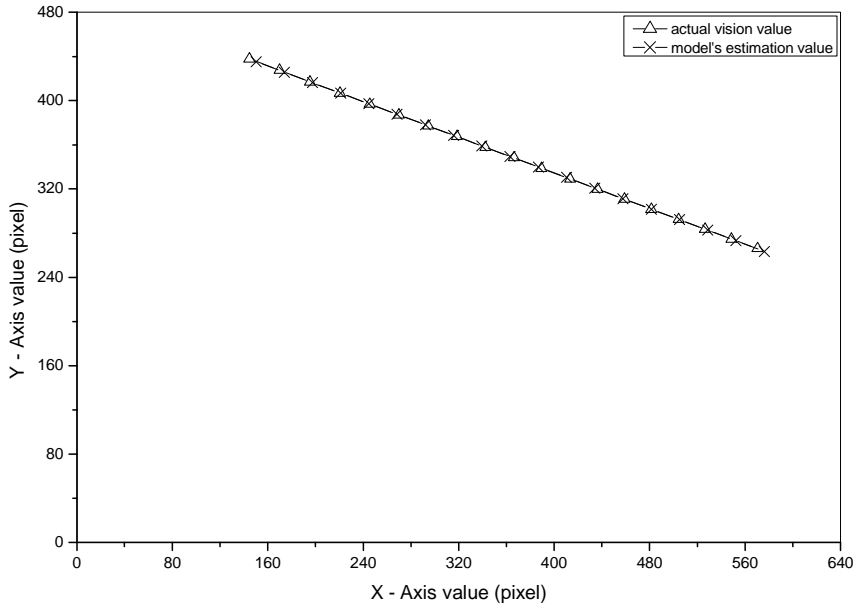


Fig. 37 Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's center work space

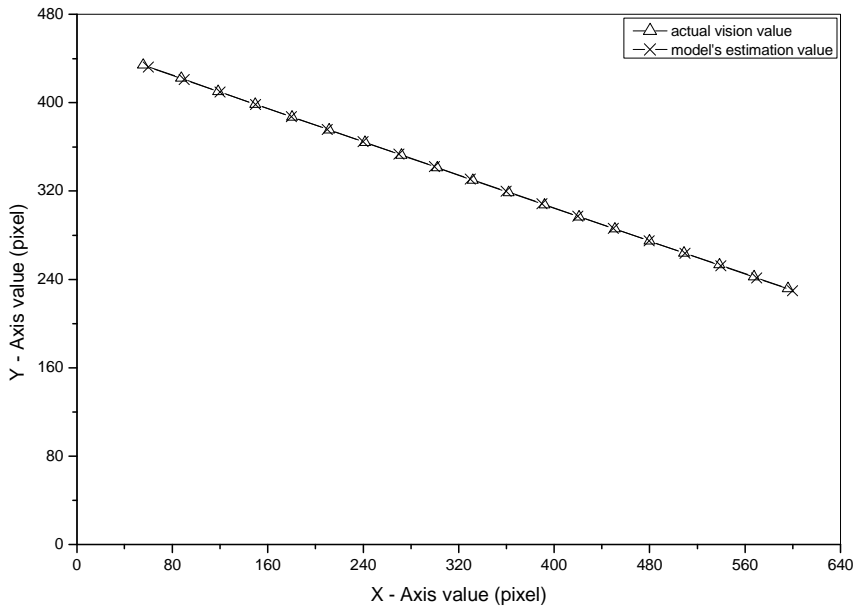


Fig. 38 Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's center work space

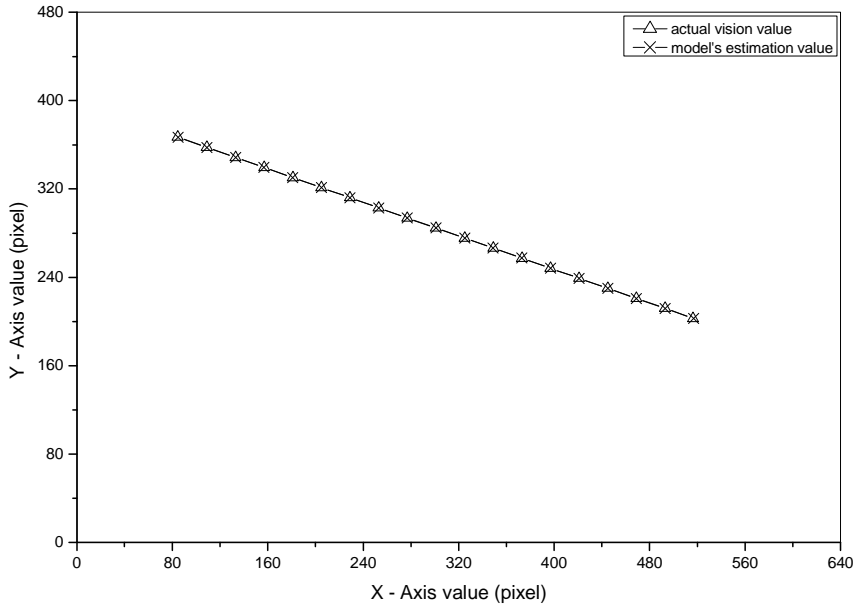


Fig. 39 Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's center work space

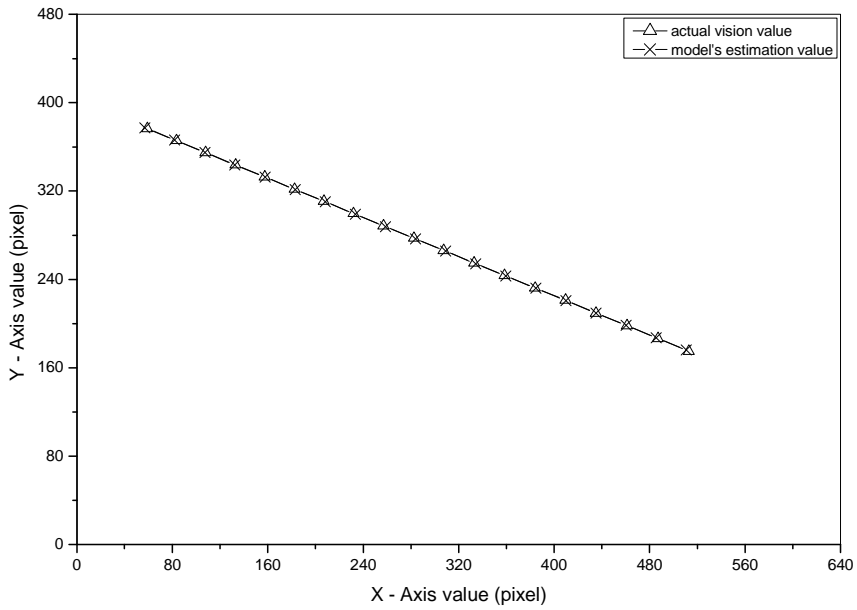


Fig. 40 Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's center work space

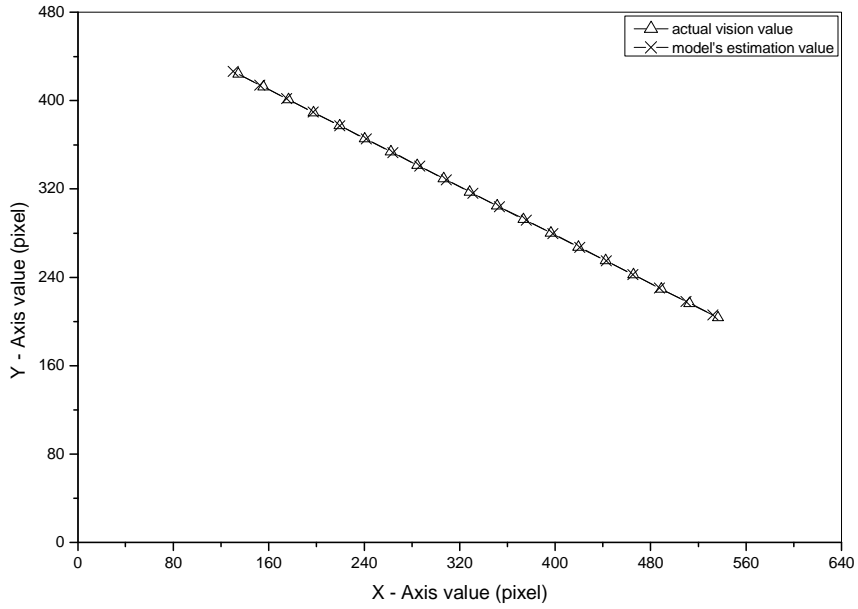


Fig. 41 Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's center work space

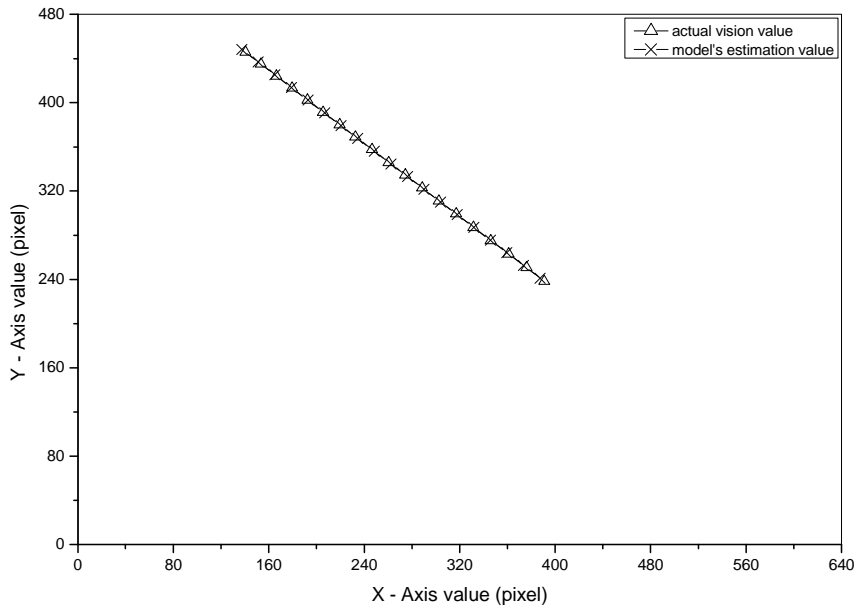


Fig. 42 Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's center work space

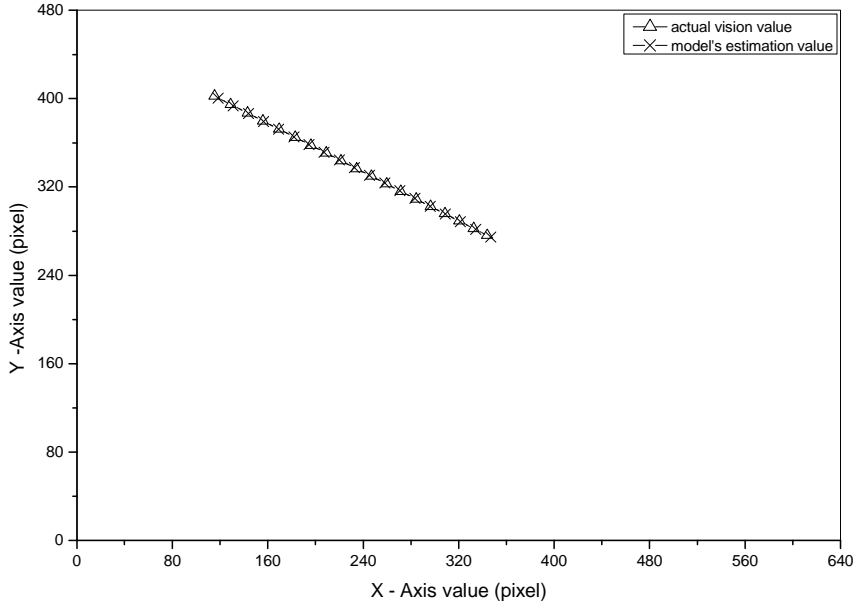


Fig. 43 Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's center work space

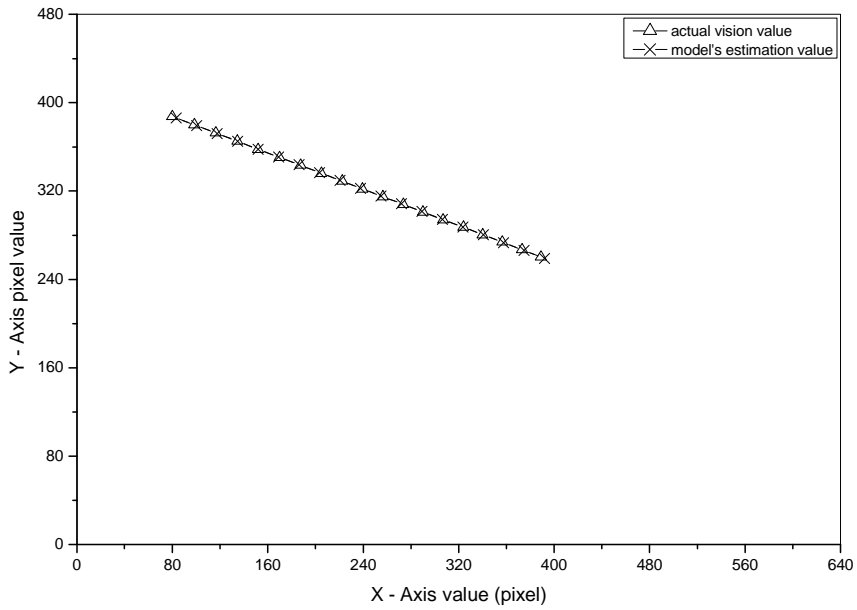


Fig. 44 Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's center work space

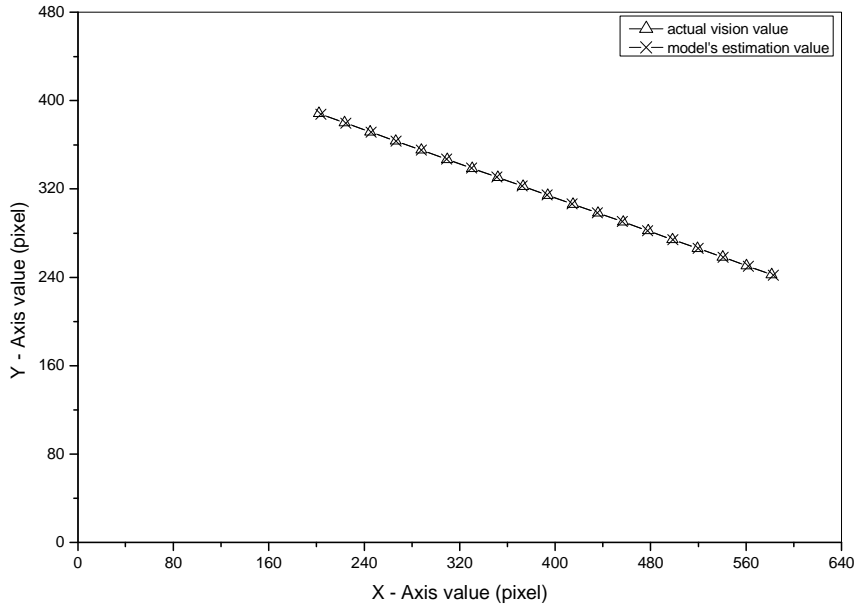


Fig. 45 Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's center work space

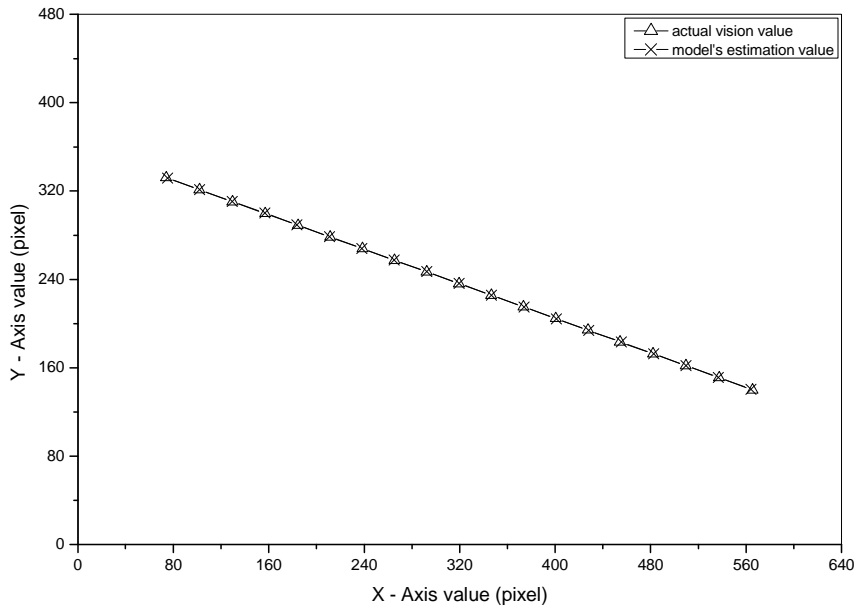


Fig. 46 Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's center work space

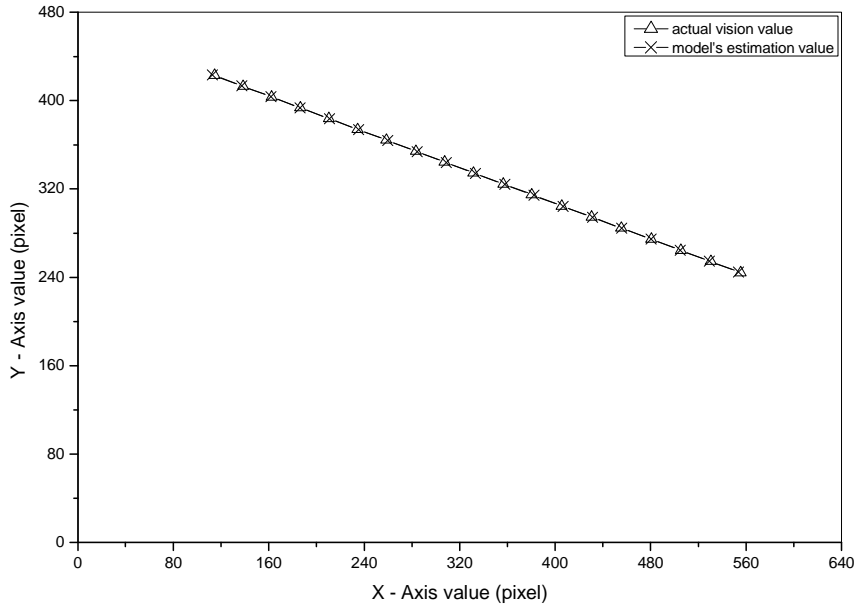


Fig. 47 Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's center work space

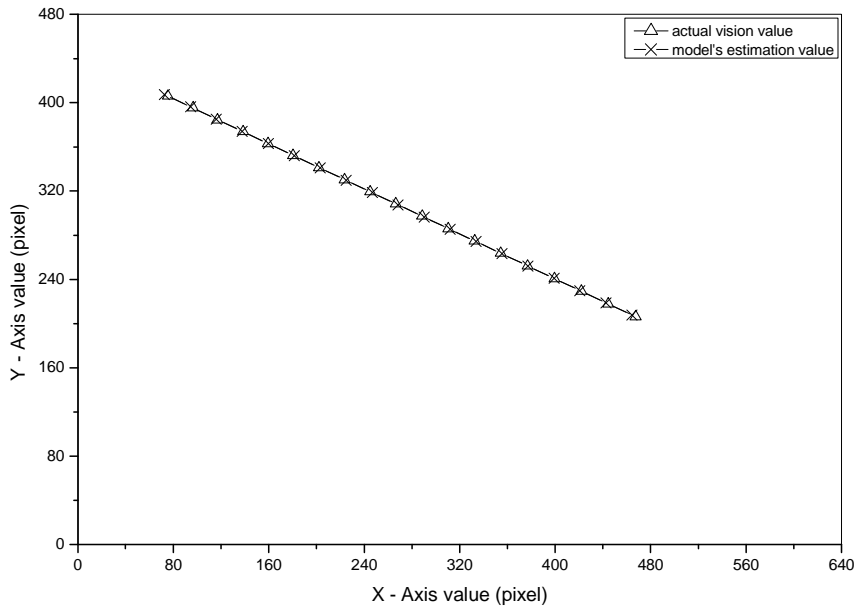


Fig. 48 Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's center work space

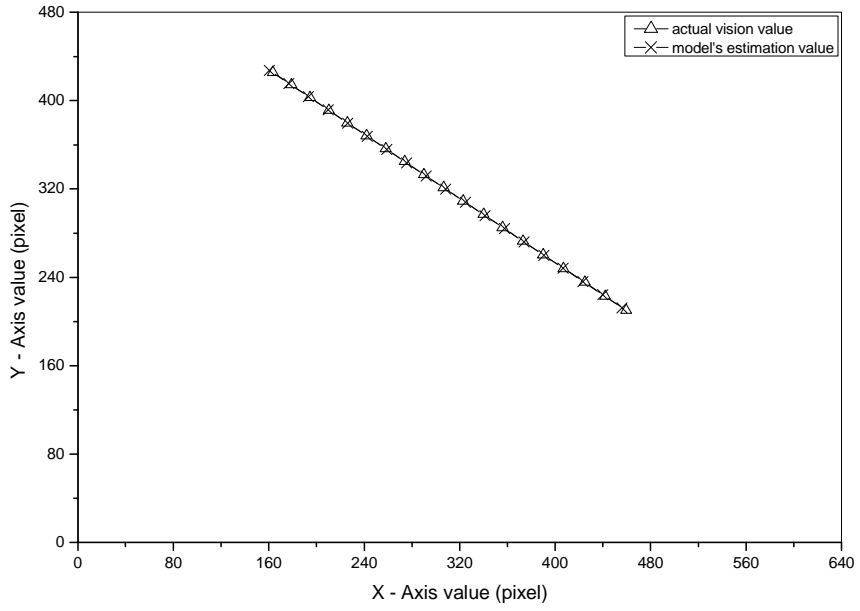


Fig. 49 Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's center work space

Table 5 The estimated six parameters of each camera in robot's center work space

Camera No.	C-value	Camera No.	C-value	Camera No.	C-value			
CAM1	C_1	2.49679589	CAM2	C_1	2.48155904	CAM3	C_1	2.02797198
	C_2	1.87717557		C_2	1.88394809		C_2	1.62011242
	C_3	0.27949783		C_3	0.42385909		C_3	0.49629307
	C_4	-0.02090381		C_4	0.00075561		C_4	0.05271088
	C_5	-4680.67285156		C_5	-4550.99023438		C_5	-2953.37231445
	C_6	-1823.98840332		C_6	-2022.69323730		C_6	-1516.14147949
CAM4	C_1	0.93276542	CAM5	C_1	1.07619298	CAM6	C_1	0.99459535
	C_2	0.77660441		C_2	0.67490631		C_2	1.03193974
	C_3	0.51905930		C_3	0.33071002		C_3	0.41236413
	C_4	0.68812913		C_4	0.96283209		C_4	0.37889689
	C_5	-104.30691528		C_5	-119.90138245		C_5	-703.49005127
	C_6	128.35557556		C_6	798.89666748		C_6	-124.06555176
CAM7	C_1	8.57425785	CAM8	C_1	0.92102784	CAM9	C_1	0.92542493
	C_2	5.86294222		C_2	0.85284120		C_2	0.70579392
	C_3	0.74782103		C_3	0.34683084		C_3	0.58747256
	C_4	-1.03840625		C_4	0.56882846		C_4	0.85601616
	C_5	-54158.02734375		C_5	-332.74111938		C_5	191.50128174
	C_6	-30171.18750000		C_6	285.42706299		C_6	393.69845581
CAM10	C_1	1.00157630	CAM11	C_1	0.92197245	CAM12	C_1	0.77286530
	C_2	0.68466139		C_2	0.76198912		C_2	1.01272619
	C_3	0.70088530		C_3	0.63146937		C_3	0.79383624
	C_4	1.01537001		C_4	0.78737944		C_4	0.57414591
	C_5	359.64901733		C_5	68.66697693		C_5	-70.67333221
	C_6	473.32785034		C_6	168.91548157		C_6	-517.07135010
CAM13	C_1	0.75517195	CAM14	C_1	0.37866130	CAM15	C_1	0.64213771
	C_2	0.84227777		C_2	0.77785027		C_2	0.83566427
	C_3	0.68816233		C_3	0.69512671		C_3	0.49145052
	C_4	0.78590351		C_4	0.72902071		C_4	0.31766051
	C_5	181.79563904		C_5	311.25509644		C_5	-173.82489014
	C_6	-46.33337784		C_6	-203.62397766		C_6	-112.21878052
CAM16	C_1	0.84510332	CAM17	C_1	1.31787133	CAM18	C_1	1.13211763
	C_2	0.80455917		C_2	0.85845661		C_2	0.57824200
	C_3	0.51053005		C_3	0.19870025		C_3	0.32302818
	C_4	0.52427167		C_4	0.99067295		C_4	1.13831079
	C_5	-213.52816772		C_5	-663.97906494		C_5	106.86331177
	C_6	54.04160309		C_6	1037.50280762		C_6	1120.27844238
CAM19	C_1	1.24305952	CAM20	C_1	0.77534920	CAM21	C_1	0.98498881
	C_2	0.50049353		C_2	0.88426441		C_2	0.50525588
	C_3	-0.43661731		C_3	0.67063725		C_3	-0.29454976
	C_4	1.59224987		C_4	0.68115079		C_4	1.38756359
	C_5	414.87194824		C_5	-16.15355873		C_5	422.77328491
	C_6	2775.09228516		C_6	-130.49957275		C_6	1958.46081543

(3) 로봇 우측 작업영역

로봇 우측 작업영역에서 로봇이 운동할 때 매개변수 추정 모델의 적합성을 각각의 카메라에 대하여 조사하고자 한다.

각 카메라에 대한 비전 시스템 모델의 영향을 조사하기 위해 좌측 및 중앙 작업영역에서와 같이 카메라를 선택 및 추정방법을 통하여 비전 시스템 모델의 적합성을 조사 하였으며, 로봇 이동은 19단계를 갖는 운동궤적을 우측 작업영역에 설정하였다.

실험을 위하여 각각의 카메라를 통해 획득된 비전 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 비전 시스템 모델에 적용하여 추정 모델 값을 구한다. 카메라가 배치되어있는 원호상별로 비전 시스템 적합성을 실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

로봇 베이스로부터 1.5m떨어진 각 카메라에 대한 19단계를 갖는 로봇 위치 시퀀스와 Table 6의 1~7번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 50~Fig. 56에 제시하였다. $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 5.2\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값을 보여 주었다.

로봇 베이스로부터 2.0m떨어진 각 카메라에 대하여 로봇이 19단계로 이동할 때 비전 프로그램에 의해서 획득된 실제 데이터 값과 Table 6의 8~14번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 57~Fig. 63에 제시하였다. $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 3.6\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 거의 일치하였다.

로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 각 카메라에 대하여 Fig. 64~Fig. 70에는 로봇이 19단계로 이동할 때의 비전 데이터와 Table 6의 15~21번 카메라의 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 제시하였다. 그에 대한 정밀도는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 2.7\text{pixel}$ 로서 각 카메라에 따른 실제 값과 추정 모델 값이 거의 일치하였다.

결과적으로 로봇 우측 작업영역에서의 비전 시스템 모델이 사용되는 모든 카메라에 대해서 적합함을 알 수 있다.

로봇의 우측 작업영역에서 얻어진 결과를 보여주는 각 Fig에서 부호 Δ 는 19단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 경로를 비전 시스템을 이용하여 측정한 데이터이고, 부호 \times 는 추정된 6개의 시각 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

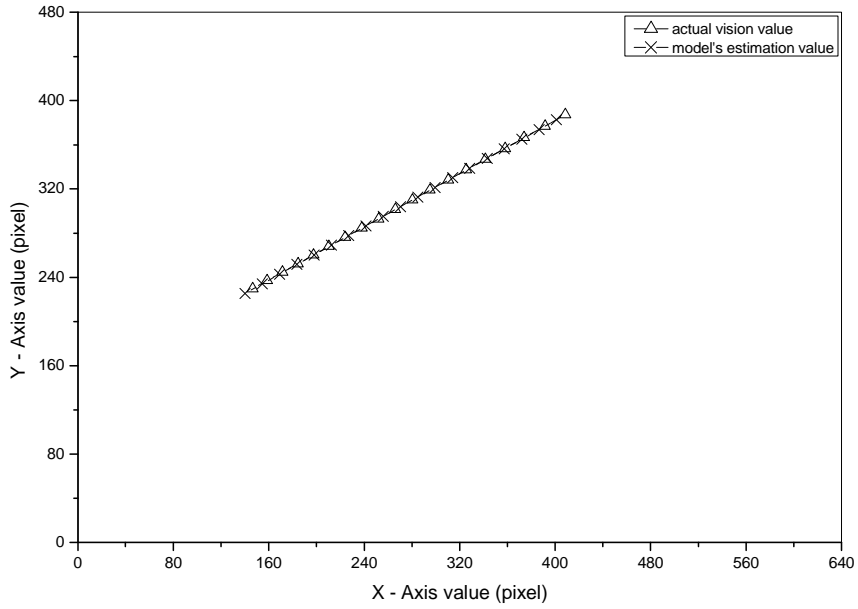


Fig. 50 Comparison between estimation values and actual values of camera 1 in robot's right work space

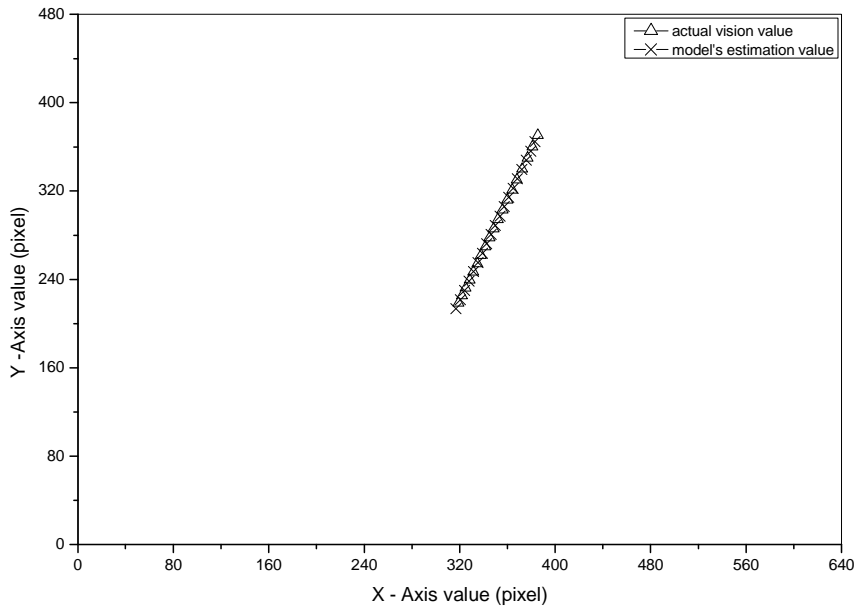


Fig. 51 Comparison between estimation values and actual values of camera 2 in robot's right work space

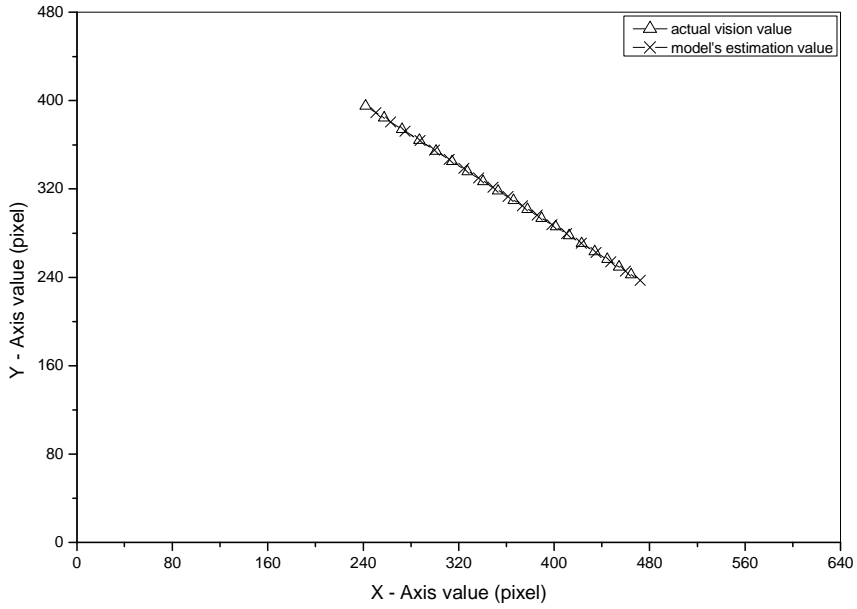


Fig. 52 Comparison between estimation values and actual values of camera 3 in robot's right work space

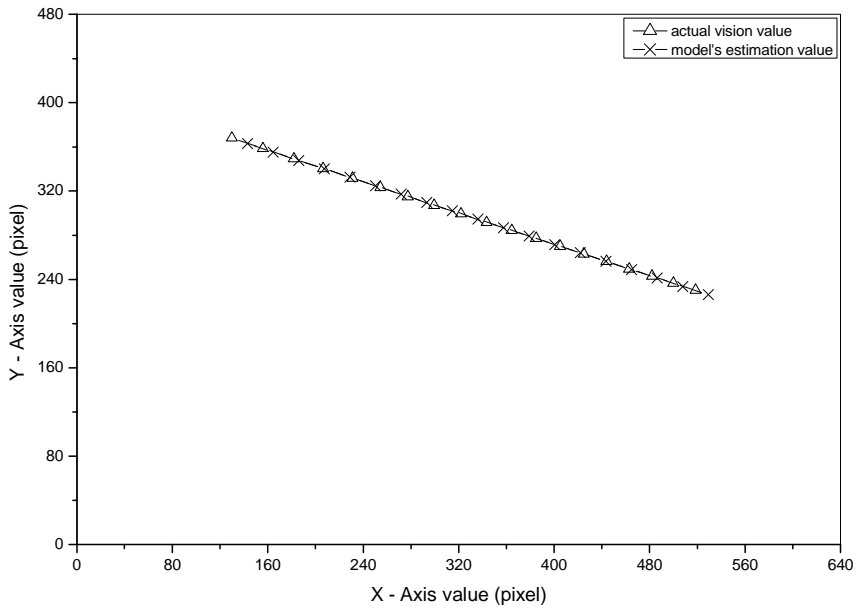


Fig. 53 Comparison between estimation values and actual values of camera 4 in robot's right work space

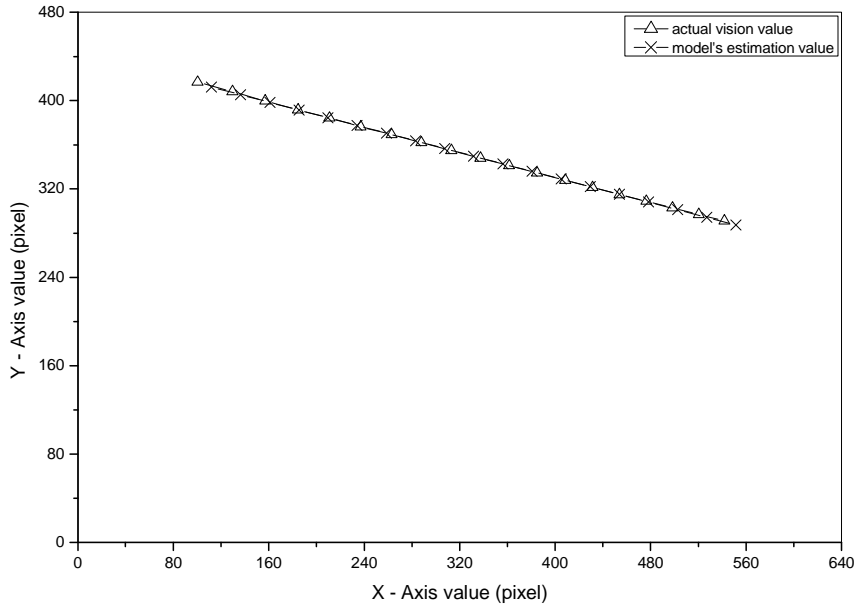


Fig. 54 Comparison between estimation values and actual values of camera 5 in robot's right work space

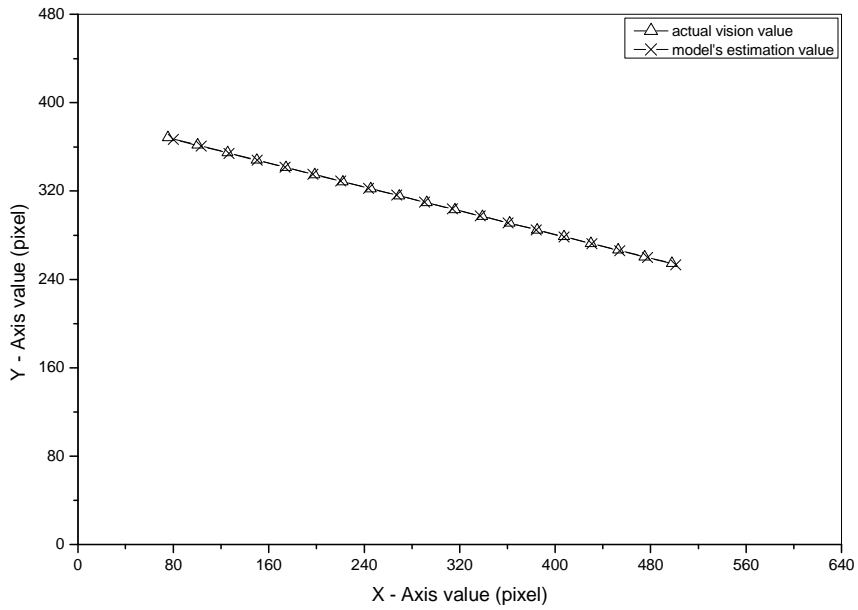


Fig. 55 Comparison between estimation values and actual values of camera 6 in robot's right work space

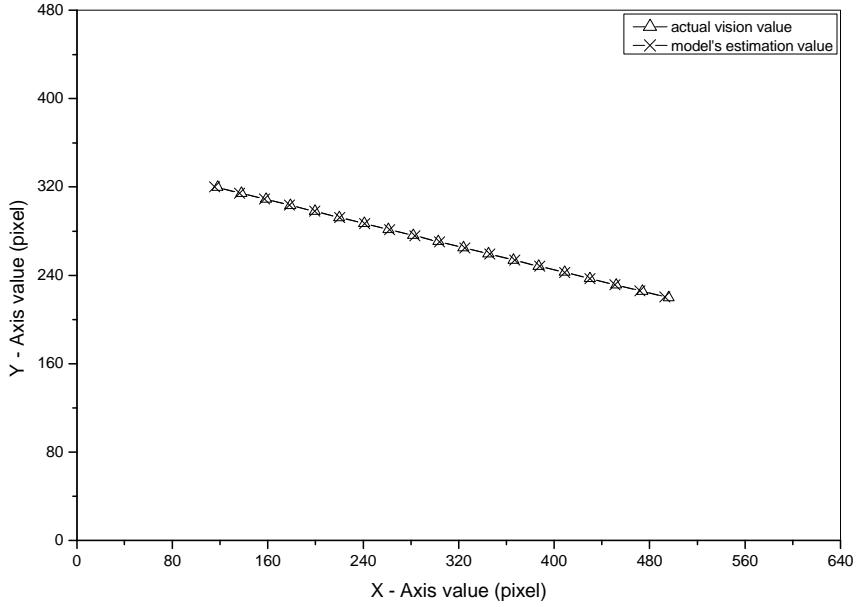


Fig. 56 Comparison between estimation values and actual values of camera 7 in robot's right work space

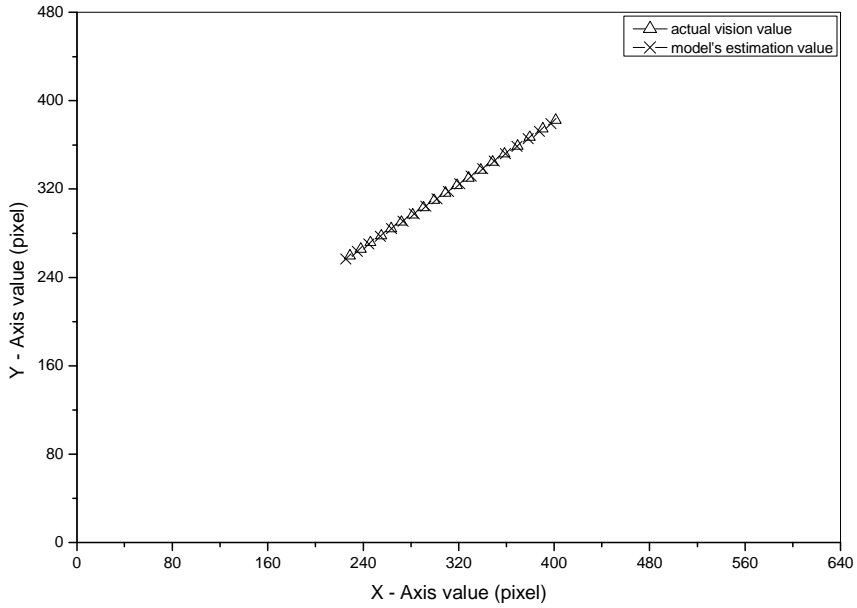


Fig. 57 Comparison between estimation values and actual values of camera 8 in robot's right work space

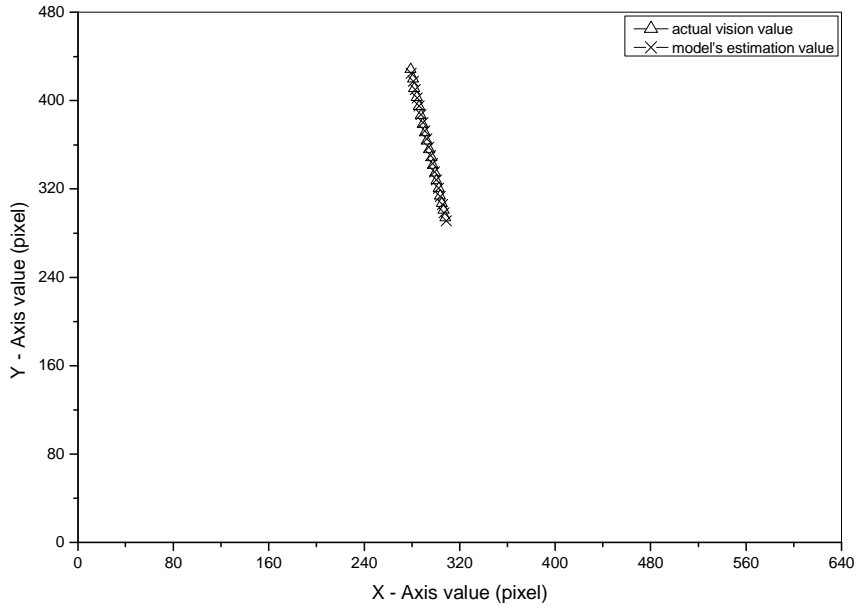


Fig. 58 Comparison between estimation values and actual values of camera 9 in robot's right work space

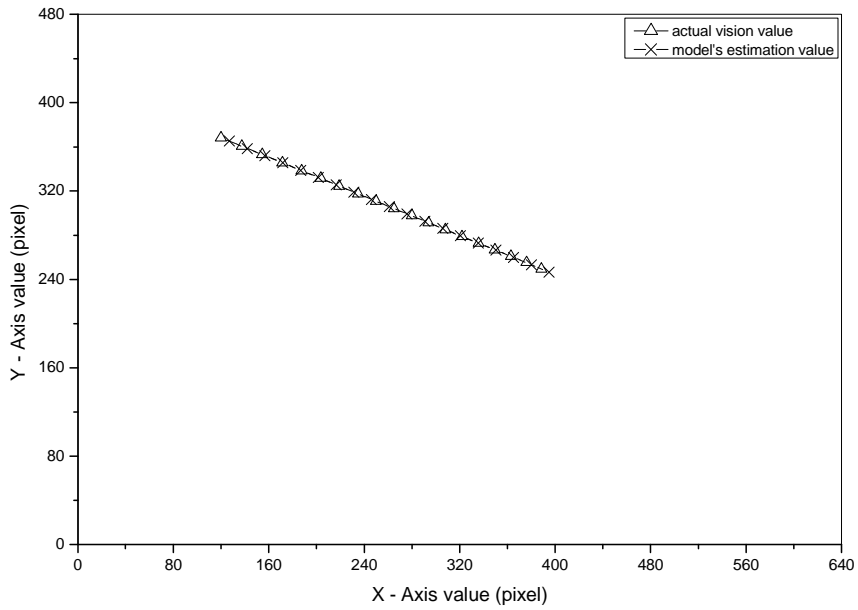


Fig. 59 Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's right work space

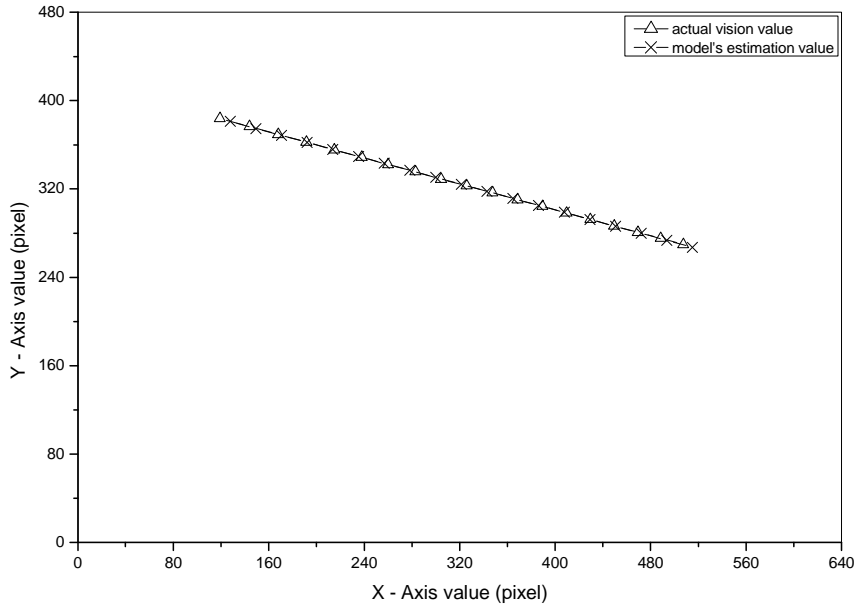


Fig. 60 Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's right work space

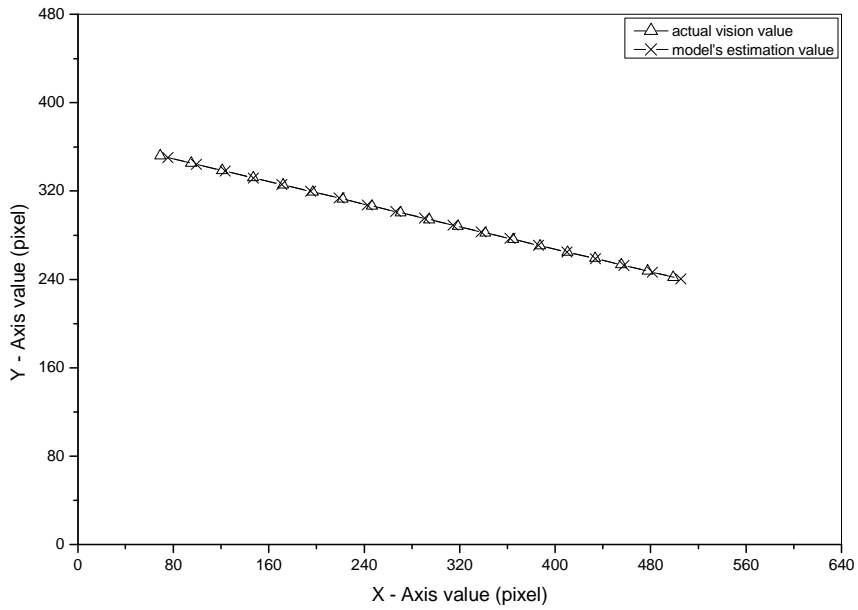


Fig. 61 Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's right work space

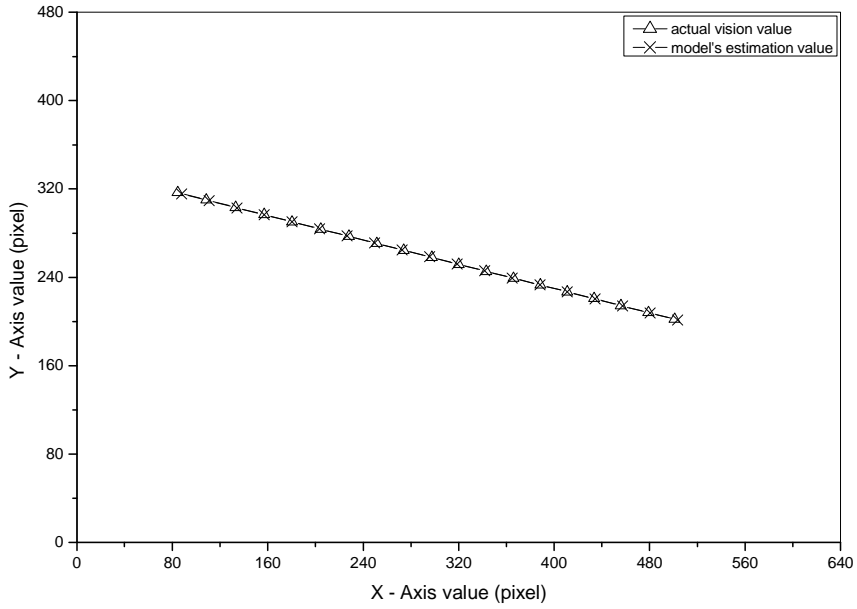


Fig. 62 Comparison between estimation values and actual values of camera 13 in robot's right work space

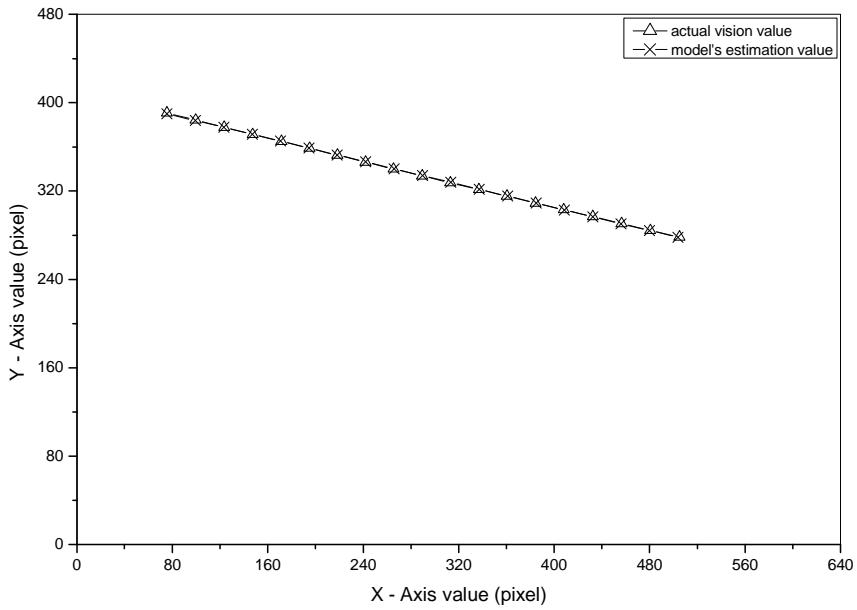


Fig. 63 Comparison between estimation values and actual values of camera 14 in robot's right work space

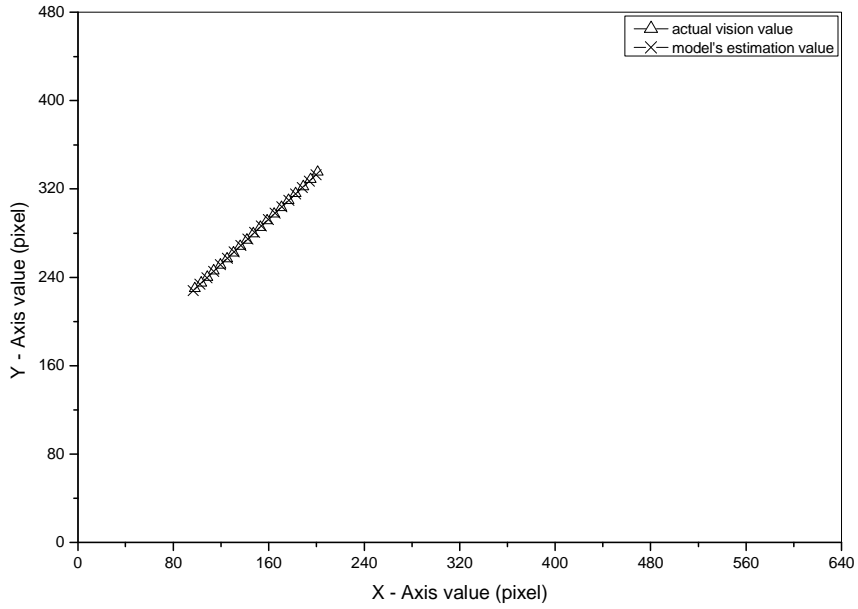


Fig. 64 Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's right work space

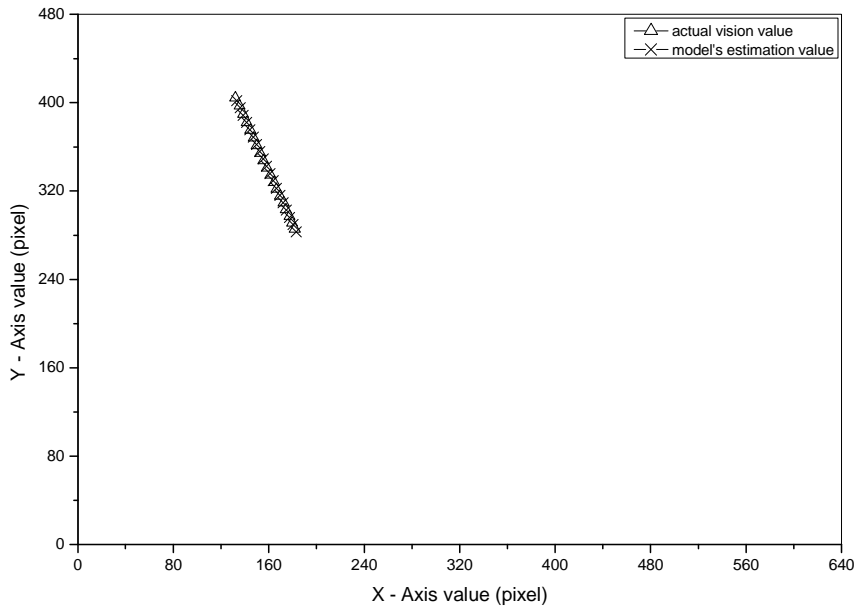


Fig. 65 Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's right work space

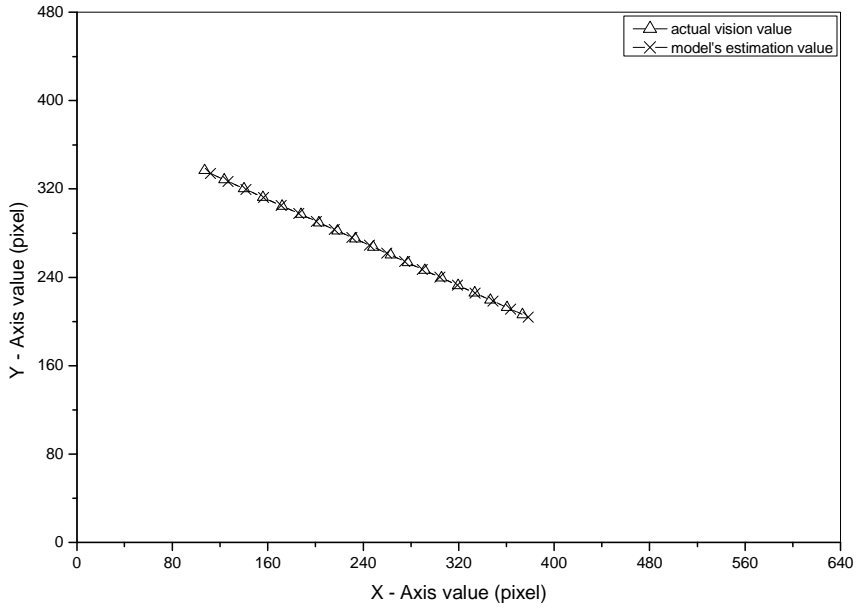


Fig. 66 Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's right work space

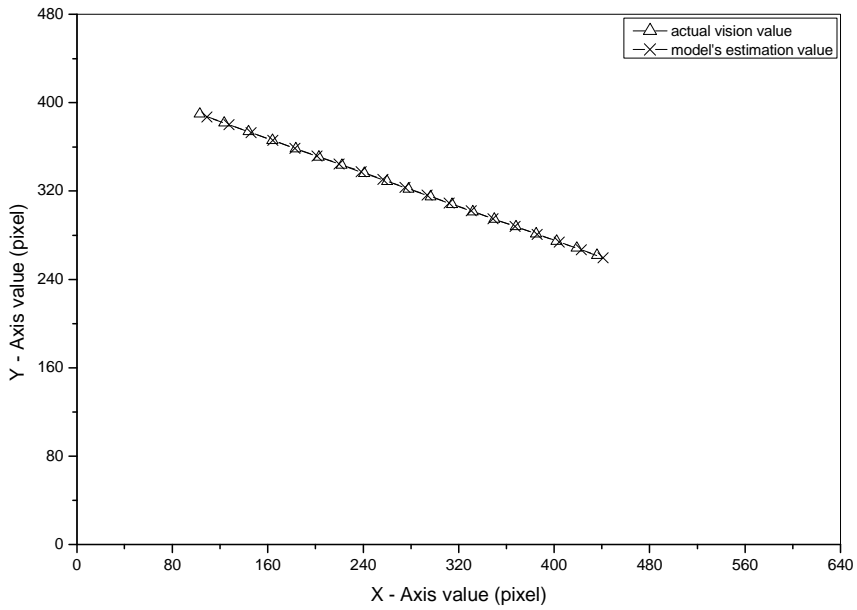


Fig. 67 Comparison between estimation values and actual values of camera 18 in robot's right work space

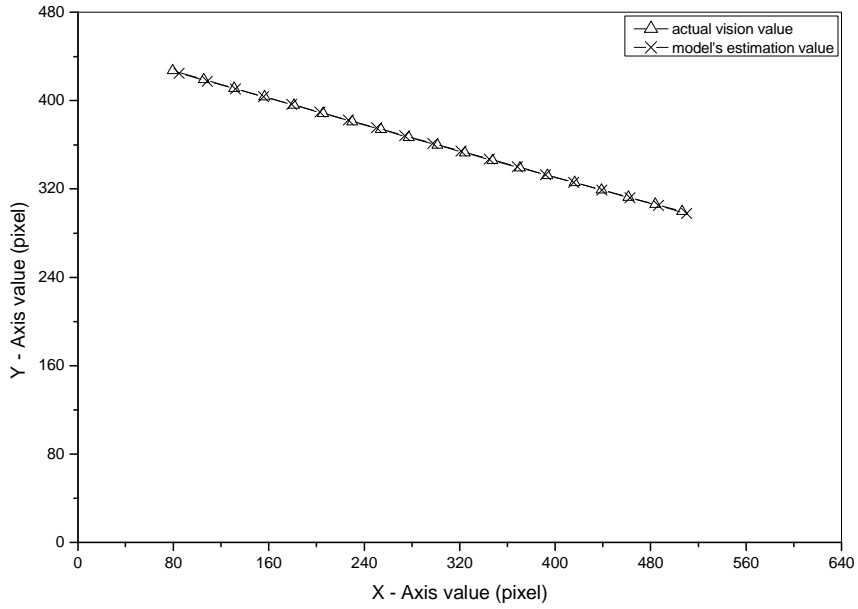


Fig. 68 Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's right work space

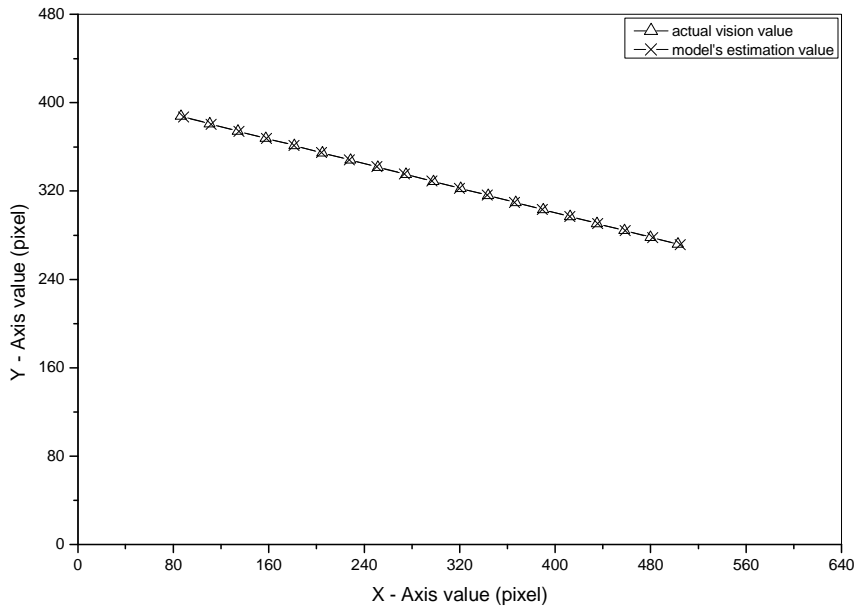


Fig. 69 Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's right work space

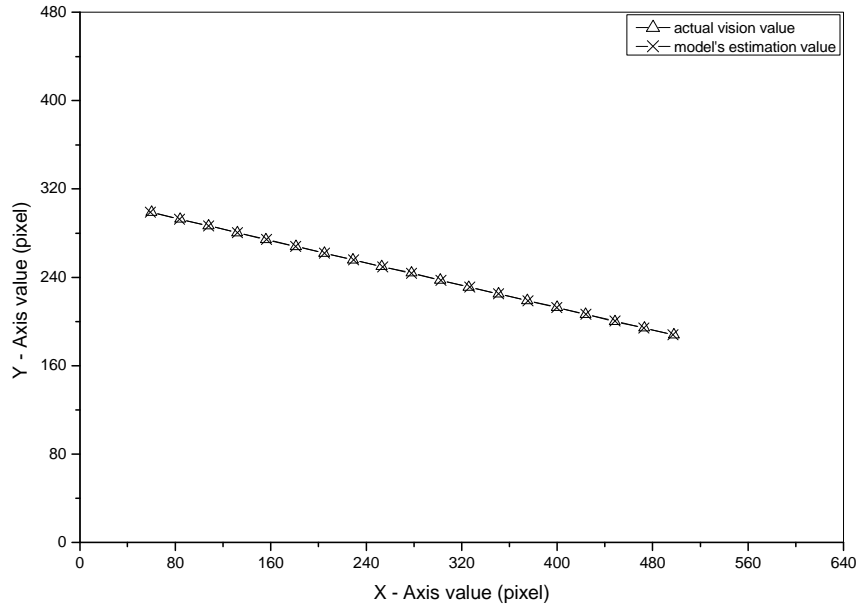


Fig. 70 Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's right work space

Table 6 The estimated six parameters of each camera in robot's right work space

Camera No.	C-value		Camera No.	C-value		Camera No.	C-value	
CAM1	C_1	6.35320663	CAM2	C_1	0.84796131	CAM3	C_1	6.26769352
	C_2	-3.02472401		C_2	1.07246065		C_2	-3.12394714
	C_3	-8.77948952		C_3	0.14796330		C_3	-8.69426537
	C_4	-3.12527108		C_4	0.69320506		C_4	-2.99331260
	C_5	-3341.35424805		C_5	-681.04260254		C_5	-4058.94262695
	C_6	-58598.77734375		C_6	482.31570435		C_6	-57292.62890625
CAM4	C_1	4.41010857	CAM5	C_1	4.34163809	CAM6	C_1	1.03997815
	C_2	-2.22284341		C_2	-2.21114612		C_2	0.85673982
	C_3	7.02940989		C_3	6.96021080		C_3	0.81178033
	C_4	-8.71322918		C_4	-8.63975906		C_4	0.62427300
	C_5	65351.89843750		C_5	64155.30859375		C_5	-260.56295776
	C_6	1501.15417480		C_6	1837.98815918		C_6	-284.98452759
CAM7	C_1	1.12071288	CAM8	C_1	1.03108346	CAM9	C_1	0.73693943
	C_2	0.92060286		C_2	0.83615035		C_2	0.81230968
	C_3	0.81487644		C_3	0.82816136		C_3	0.35678986
	C_4	0.70160967		C_4	0.56442738		C_4	0.37402034
	C_5	-404.60083008		C_5	-207.09095764		C_5	-300.01434326
	C_6	-226.47935486		C_6	-340.07812500		C_6	121.64942932
CAM10	C_1	-2.32092285	CAM11	C_1	-3.83685875	CAM12	C_1	-3.81195545
	C_2	3.35154057		C_2	-2.72502136		C_2	-2.49499774
	C_3	1.18449557		C_3	-1.56411803		C_3	-1.80580485
	C_4	-1.27517593		C_4	-1.26231885		C_4	-0.83068830
	C_5	-7430.61718750		C_5	-9731.12304688		C_5	-8102.12158203
	C_6	2884.37304688		C_6	-3899.57568359		C_6	-5665.69628906
CAM13	C_1	1.20834470	CAM14	C_1	13.03629112	CAM15	C_1	-2.86185336
	C_2	0.94454998		C_2	11.92135334		C_2	-4.70089483
	C_3	0.92934030		C_3	2.05389833		C_3	1.58525622
	C_4	0.52369058		C_4	9.28756142		C_4	-5.85230589
	C_5	-411.93084717		C_5	-16651.95312500		C_5	-8761.49609375
	C_6	-624.78912354		C_6	46335.62890625		C_6	27705.14062500
CAM16	C_1	0.60686231	CAM17	C_1	-1.22189331	CAM18	C_1	-1.25007832
	C_2	0.71794778		C_2	2.55047774		C_2	2.54737973
	C_3	0.34429196		C_3	-0.10275420		C_3	-0.06871910
	C_4	0.37533870		C_4	-1.60160303		C_4	-1.64529741
	C_5	-268.47561646		C_5	-1430.78894043		C_5	-1398.37097168
	C_6	158.68966675		C_6	4239.91894531		C_6	4304.00292969
CAM19	C_1	-0.01533097	CAM20	C_1	0.10077456	CAM21	C_1	0.40298384
	C_2	-0.09060046		C_2	-0.06670381		C_2	0.28729698
	C_3	0.63176250		C_3	0.81446987		C_3	1.07266819
	C_4	-1.35885406		C_4	-1.43992591		C_4	-1.09293008
	C_5	1384.73461914		C_5	1693.23559570		C_5	1594.19482422
	C_6	831.34155273		C_6	757.43640137		C_6	-169.51068115

4.2.2 카메라 배치에 따른 로봇의 점 위치제어 실험결과

4.2.1절에서는 로봇의 점 위치제어에서의 카메라 배치형태에 따른 비전 시스템 모델의 적합성을 보여주었다. 4.2.1절의 결과 값을 근거로 2.4절의 로봇 회전각 추정 모델 방법을 이용하여 점 위치에 대한 로봇 위치제어를 수행하였다.

본 실험에서 로봇 점 위치제어를 수행하였는데 카메라 배치가 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위해 Fig. 6과 Table 3과 같이 3개의 로봇 작업영역별 각 9개의 경우를 적용하였다. 각 경우에 로봇 회전각 추정모델을 적용하여 로봇 점 위치제어를 수행하여 로봇을 목표지점으로 이동하였을 때 목표지점과의 차이를 비교함으로써 비전 시스템에 사용되는 카메라 배치가 어떠한 영향을 가지는지 확인하였다.

로봇 작업영역이 좌측일 때 로봇 베이스로부터 카메라가 각 1.5m, 2.0m, 2.5m떨어진 거리의 좌측, 중앙 및 우측에 카메라를 배치한 9개의 경우에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값과 비교하여 Table 7에 나타내었다. Table 7의 회전각을 정기구학 모델에 적용하여 목표지점에 대한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 10에 나타내었다. Table 10에서 보여준 것 같이 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 $\pm 0.3\text{mm} \sim \pm 1.5\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치제어를 수행하였다.

로봇 작업영역이 중앙일 때 로봇 베이스로부터 카메라가 각 1.5m, 2.0m, 2.5m떨어진 거리의 좌측, 중앙 및 우측에 카메라를 배치하여 9개의 경우에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값과 비교하여 Table 8에 나타내었다. Table 8의 회전각을 로봇 정기구학 모델에 적용하여 목표지점에 대한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 11에 보여주었다. 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 Table 11에서 보여준 것같이 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 1.8\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치제어를 수행하였다.

로봇 작업영역이 우측일 때 로봇 베이스로부터 카메라를 좌측 및 중앙과 같이 카메라를 배치한 9개의 경우에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 값

과 비교하여 Table 9에 나타내었고, 이 결과를 이용하여 목표지점에 대한 추정모델의 좌표 값과 실제의 좌표 값을 Table 12에 나타내었다. Table 12에서 보여준 것 같이 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값이 $\pm 0.8\text{mm} \sim \pm 1.6\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 위치제어를 수행하였다.

Fig. 71~Fig. 73 9개의 카메라 배치 형태에 따른 3개의 로봇 작업영역에서 점 위치 제어를 수행했을 때 각각에 대한 오차를 보여준다.

결과적으로 Table 10~Table 12 및 Fig. 71~Fig. 73을 종합하여 볼 때 모든 경우에서 만족할만한 로봇 점 위치제어를 수행하였다. 다만 같은 반경에서 카메라를 배치할 때 로봇이 작업하는 영역의 정면에 집중 배치한 영역에서는 평균 $\pm 0.7\text{mm}$ 의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 위치제어를 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었다.

Table 7 Estimation values of each joint angle in robot's left work space

Camera Placement		θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)
Robot's left-work space	case #1 (left, 1.5m)	7.024	-96.581	147.866	0.000
	case #2 (center, 1.5m)	7.245	-96.133	149.131	0.000
	case #3 (right, 1.5m)	7.179	-95.997	146.146	0.000
	case #4 (left, 2.0m)	7.176	-96.553	146.672	0.000
	case #5 (center, 2.0m)	7.059	-96.539	147.326	0.000
	case #6 (right, 2.0m)	7.530	-96.834	147.868	0.000
	case #7 (left, 2.5m)	7.152	-96.434	146.768	0.000
	case #8 (center, 2.5m)	7.235	-96.430	147.445	0.000
	case #9 (right, 2.5m)	7.412	-96.941	145.913	0.000
actual value		7.1779	-96.4595	147.5000	0.0000

Table 8 Estimation values of each joint angle in robot's center work space

Camera Placement		θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)
Robot's center-work space	case #1 (left, 1.5m)	-13.433	63.526	146.042	0.000
	case #2 (center, 1.5m)	-13.278	63.670	147.964	0.000
	case #3 (right, 1.5m)	-12.860	63.053	148.238	0.000
	case #4 (left, 2.0m)	-13.709	64.152	146.603	0.000
	case #5 (center, 2.0m)	-13.283	63.403	146.820	0.000
	case #6 (right, 2.0m)	-13.163	63.899	148.093	0.000
	case #7 (left, 2.5m)	-13.569	63.429	145.913	0.000
	case #8 (center, 2.5m)	-13.133	63.350	147.813	0.000
	case #9 (right, 2.5m)	-13.015	63.160	147.871	0.000
actual value		-13.2342	63.2563	147.5000	0.0000

Table 9 Estimation values of each joint angle in robot's right work space

Camera Placement		θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)
Robot's right-work space	case #1 (left, 1.5m)	-7.386	97.098	146.125	0.000
	case #2 (center, 1.5m)	-7.422	96.237	146.310	0.000
	case #3 (right, 1.5m)	-7.343	96.679	146.347	0.000
	case #4 (left, 2.0m)	-7.493	96.509	148.791	0.000
	case #5 (center, 2.0m)	-7.367	96.381	146.378	0.000
	case #6 (right, 2.0m)	-7.327	96.338	146.580	0.000
	case #7 (left, 2.5m)	-7.450	96.582	146.386	0.000
	case #8 (center, 2.5m)	-7.013	96.856	147.267	0.000
	case #9 (right, 2.5m)	-7.312	96.326	147.053	0.000
actual value		-7.1779	96.4595	147.5000	0.0000

Table 10 Error values between actual and estimated coordinate values in robot's lift work space

Camera Placement set		estimated value			average error(mm)
		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	
Robot's left-work space	case #1 (left, 1.5m)	398.928	-201.081	119.634	0.904214
	case #2 (center, 1.5m)	401.660	-199.508	118.369	1.373345
	case #3 (right, 1.5m)	402.012	-199.958	121.354	1.404833
	case #4 (left, 2.0m)	399.464	-200.256	120.828	0.588525
	case #5 (center, 2.0m)	399.237	-200.833	120.174	0.659894
	case #6 (right, 2.0m)	399.587	-197.563	119.632	1.442518
	case #7 (left, 2.5m)	400.021	-200.179	120.732	0.435161
	case #8 (center, 2.5m)	400.331	-199.597	120.055	0.302436
	case #9 (right, 2.5m)	398.713	-198.390	121.587	1.504882
actual value		400.000	-200.000	120.000	

Table 11 Error values between actual and estimated coordinate values in robot's center work space

Camera Placement set		estimated value			average error(mm)
		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	
Robot's center-work space	case #1 (left, 1.5m)	549.442	98.847	121.458	1.120596
	case #2 (center, 1.5m)	548.689	100.735	119.536	0.908061
	case #3 (right, 1.5m)	550.017	103.024	119.262	1.797130
	case #4 (left, 2.0m)	547.815	97.956	120.897	1.803502
	case #5 (center, 2.0m)	549.595	99.941	120.680	0.457869
	case #6 (right, 2.0m)	547.713	102.470	119.407	1.973503
	case #7 (left, 2.5m)	549.997	97.277	121.587	1.819938
	case #8 (center, 2.5m)	549.510	101.229	119.687	0.785195
	case #9 (right, 2.5m)	549.937	101.838	119.629	1.082995
actual value		550.000	100.000	120.000	

Table 12 Error values between actual and estimated coordinate values in robot's right work space

Camera Placement set		estimated value			average error(mm)
		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	
Robot's right-work space	case #1 (left, 1.5m)	397.938	198.576	121.375	1.650277
	case #2 (center, 1.5m)	401.822	198.273	121.190	1.604060
	case #3 (right, 1.5m)	399.615	198.862	121.153	0.961283
	case #4 (left, 2.0m)	400.878	197.801	118.709	1.556920
	case #5 (center, 2.0m)	401.000	198.671	121.122	1.158403
	case #6 (right, 2.0m)	401.047	198.953	120.920	1.006476
	case #7 (left, 2.5m)	400.410	198.107	121.114	1.290125
	case #8 (center, 2.5m)	397.691	201.161	120.233	1.498016
	case #9 (right, 2.5m)	401.049	199.057	120.447	0.854429
actual value		400.000	200.000	120.000	

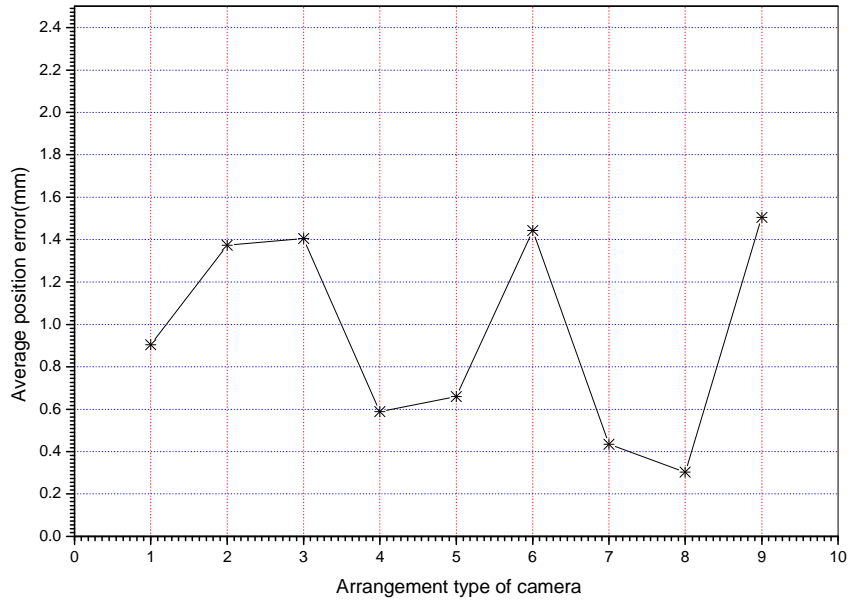


Fig. 71 Average position error according to the arrangement of camera in left work space

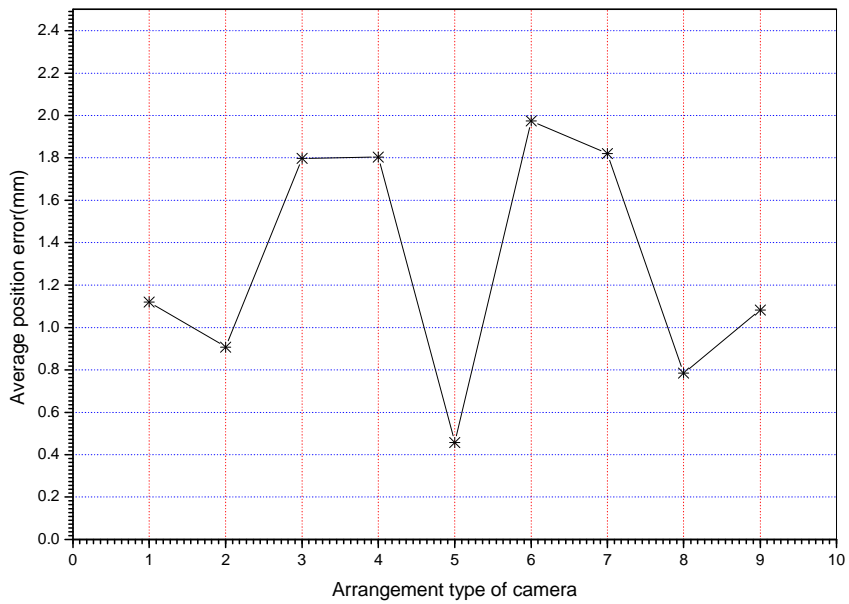


Fig. 72 Average position error according to the arrangement of camera in center work space

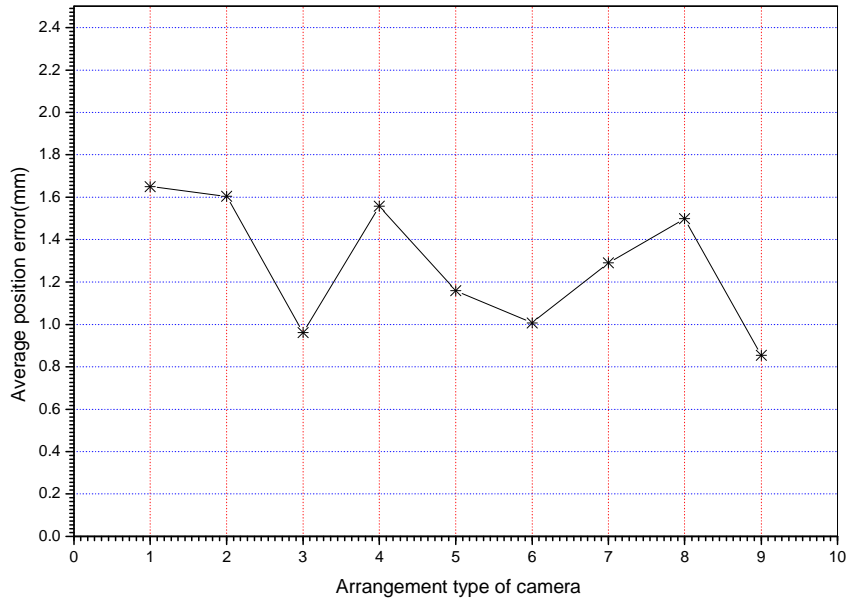


Fig. 73 Average position error according to the arrangement of camera in right work space

제 5 장 로봇의 얇은 막대 위치제어 실험

5.1 실험 방법 및 절차

본 실험은 1큐를 갖는 점 위치제어 실험에서의 최적의 카메라 배치 형태를 로봇 작업 영역별로 선택하여, 제시된 비전 제어기법을 2큐를 갖는 얇은 막대 위치제어 실험에 적용하여 비전 시스템 모델의 적합성을 실험을 통하여 확인하고자 한다.

얇은 막대 위치제어 실험에서 비전 시스템 모델의 적합성을 보이기 위한 실험 방법은 제4장의 점 위치제어 실험 결과 보여준 로봇 작업영역의 정면에 위치한 최적의 카메라 배치를 선택하여 Fig. 5의 2큐를 갖는 시험모형으로 실험을 행하였다. 실험절차는 로봇의 점 위치제어 실험과 같은 방법으로 진행한다.

5.2 실험 결과

5.2.1 비전 시스템 모델의 적합성

본 실험은 로봇의 점 위치제어 실험결과에서 보여준 최적의 카메라 배치형태를 이용하여 2큐를 갖는 얇은 막대 위치제어 실험을 통하여 사용된 비전 시스템 모델의 적합성을 보이고자한다.

비전 시스템 모델의 적합성을 보이기 위해 로봇이 19단계를 갖는 운동궤적을 따라 이동할 때 각 단계에서 카메라에 의하여 얻어진 비전 데이터를 매개변수 추정 모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수 ($C_1 \sim C_6$)를 계산한다. 계산된 시각 매개변수를 비전 시스템 모델에 적용하여 2큐에 대해 비전 시스템 모델 값을 구하여 2큐에 대해 얻어진 실제 값과 비교 한다.

로봇 작업영역이 좌측인 경우, 점 위치제어 실험에서 최적의 카메라 배치로 보여준 로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 거리에서 좌측 편중 배치한 3대의 카메라(case #7)를 사용하여 로봇이 19단계로 설정된 운동궤적을 따라 이동할 때 각 단계에서 각 카메라에 의하여 얻어진 2큐에 대해 비전 데이터와 Table 13에 제시한 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여 Fig. 74~Fig. 76에 제시하였다. 각 Fig에서 보여준 것 같이 비교한 오차 값은 cue 1에 대해서는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.8\text{pixel}$ 의 오차를 보여주고 cue 2에 대해서는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 4.2\text{pixel}$ 의 오차를 보여준다.

로봇 작업영역이 중앙인 로봇 베이스로부터 2.0m떨어진 거리에서 중앙 배치한 3대의 카메라(case #5)를 사용하여 실험을 행하였는데 이는 로봇의 점 위치 제어 실험에서 최적의 카메라 배치형태를 보여준 결과이다. 로봇이 설정된 19단계 궤적을 따라 운동할 때 모든 단계에서 2큐에 대해 각 카메라에서 얻어진 비전 데이터와 Table 14에 제시한 6개의 시각 매개변수에 근거를 둔 추정모델의 결과를 비교하여

Fig. 77~Fig. 79에 제시 하였다. 비교한 오차 값은 cue 1에 대해서는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 4.0\text{pixel}$ 의 오차, cue 2에 대해서는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 4.6\text{pixel}$ 의 오차를 나타낸다.

로봇 작업영역이 우측인 경우, 로봇 점 위치제어 실험의 최적의 결과인 로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 거리에서 우측에 집중 배치한 3대의 카메라(case #9)를 사용하였다. 로봇의 좌측 및 중앙 작업영역과 같은 방법으로 실험을 행하여 얻어진 결과를 Fig. 80~Fig. 82에 제시 하였다. Fig. 80~Fig. 82에서 보여준 것 같이 비교한 오차 값은 cue 1에 대해서는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 3.4\text{pixel}$ 의 오차를 보여주고 cue 2에 대해서는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 3.2\text{pixel}$ 의 오차를 보여주며, 화살표는 로봇이동 방향을 나타낸다.

실험 결과를 보여준 Fig. 74~Fig. 82에서 부호 Δ 은 cue 1에 대한 실제 비전 값, 부호 \times 는 cue 1에 대한 추정모델 값, 부호 \square 는 cue 2에 대한 실제 비전 값, 부호 $+$ 는 cue 2에 대한 추정 모델 값을 보여준다.

위의 실험 결과를 통하여 최적의 배치를 사용한 2큐를 갖는 얇은 막대에 대한 실험은 2개 큐에 대한 실제 값과 추정모델 값이 거의 일치함으로서 사용된 모든 카메라에 대해서 비전 시스템 모델이 적합함을 알 수 있다.

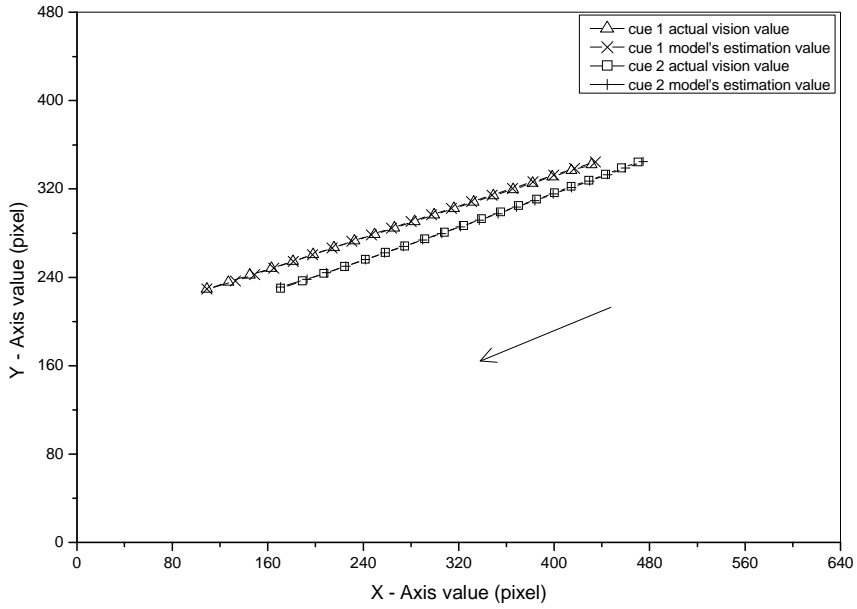


Fig. 74 Comparison between estimation values and actual values of camera 15 in robot's left work space

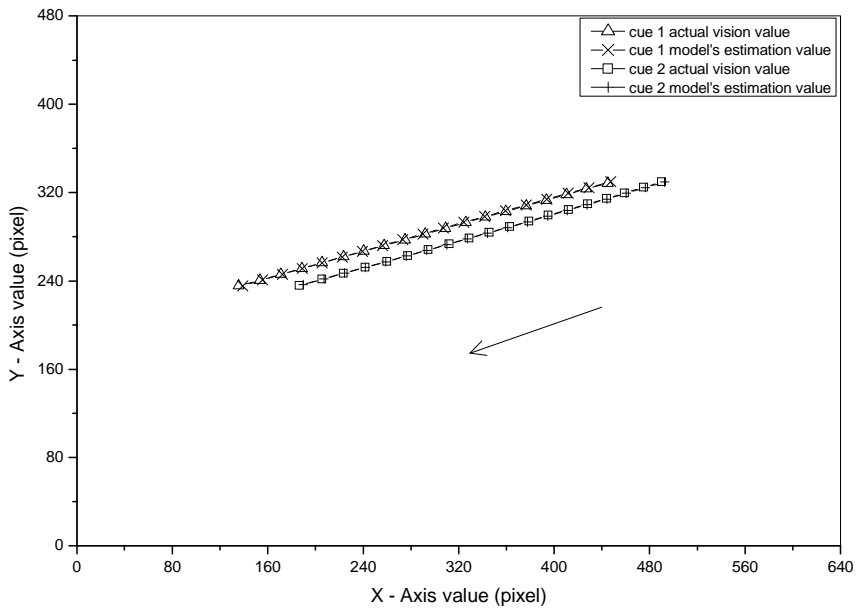


Fig. 75 Comparison between estimation values and actual values of camera 16 in robot's left work space

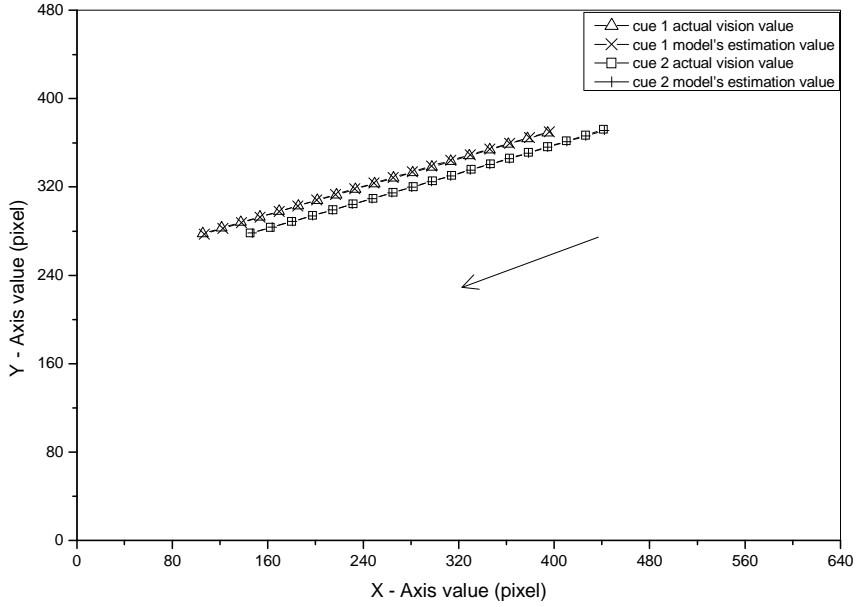


Fig. 76 Comparison between estimation values and actual values of camera 17 in robot's left work space

Table 13 The estimated six parameters of each camera in robot's left work space

<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>	<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>
CAM15	C_1	0.83889067	CAM16	C_1	0.77582663
	C_2	0.85377532		C_2	0.79487449
	C_3	0.07464306		C_3	0.17496087
	C_4	0.05053414		C_4	0.16029310
	C_5	-376.04013062		C_5	-216.19920349
	C_6	36.66397095		C_6	58.91637421
CAM17	C_1	0.72603965			
	C_2	0.71678859			
	C_3	0.26044697			
	C_4	0.23988655			
	C_5	-107.15373993			
	C_6	127.17906189			

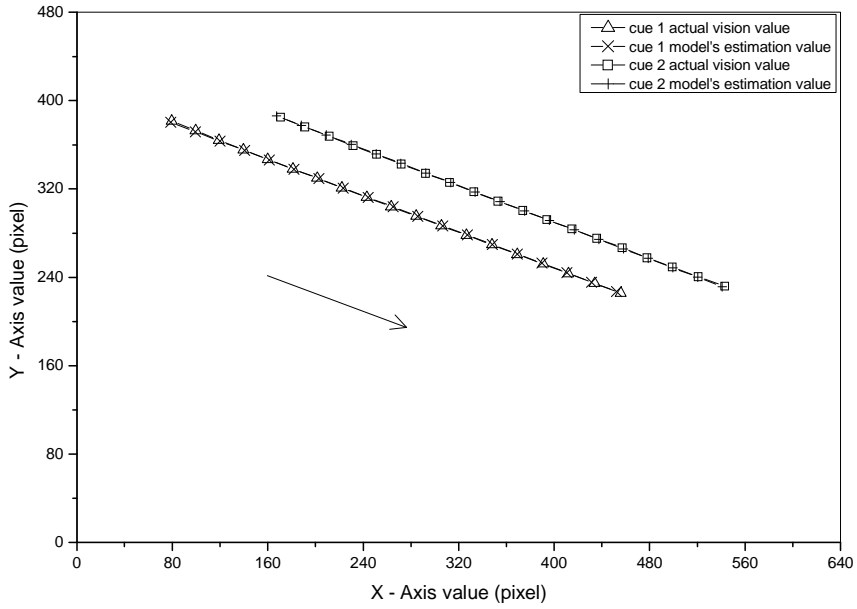


Fig. 77 Comparison between estimation values and actual values of camera 10 in robot's center work space

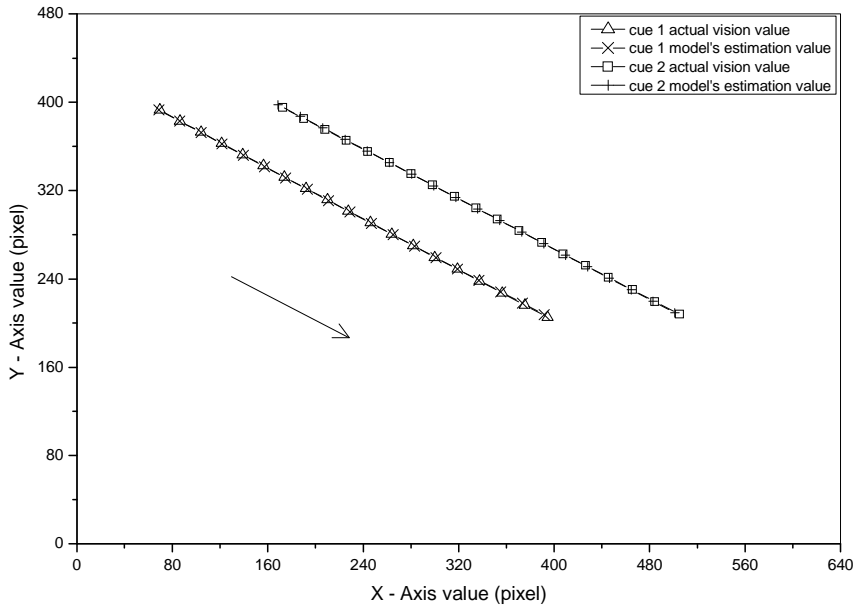


Fig. 78 Comparison between estimation values and actual values of camera 11 in robot's center work space

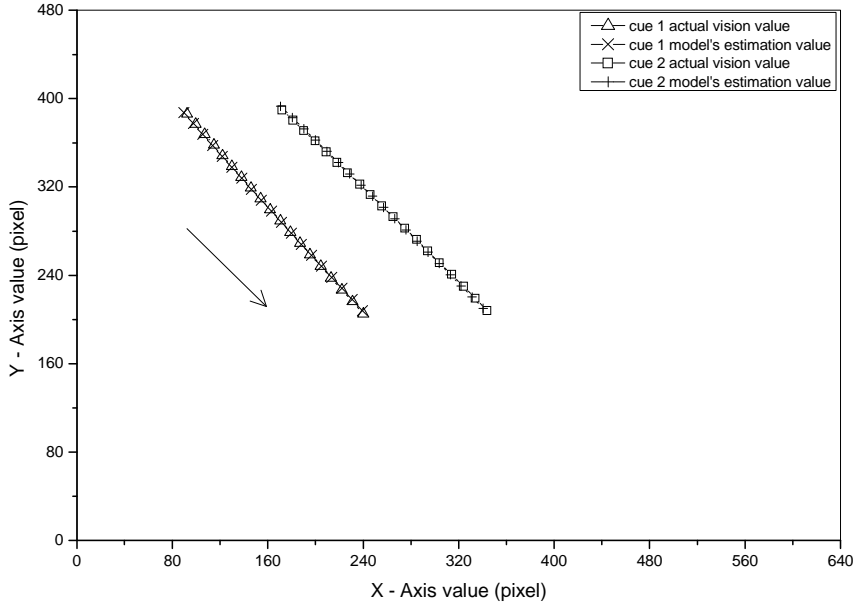


Fig. 79 Comparison between estimation values and actual values of camera 12 in robot's center work space

Table 14 The estimated six parameters of each camera in robot's center work space

<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>	<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>
CAM10	C_1	0.50197273	CAM11	C_1	0.35673407
	C_2	0.46694925		C_2	0.38782841
	C_3	1.08114815		C_3	1.27502966
	C_4	1.00181580		C_4	1.16060829
	C_5	1270.19250488		C_5	1766.27685547
	C_6	-118.38260651		C_6	-305.47271729
CAM12	C_1	0.15605146			
	C_2	0.20624116			
	C_3	1.32248163			
	C_4	1.20035851			
	C_5	1914.48168945			
	C_6	-313.64306641			

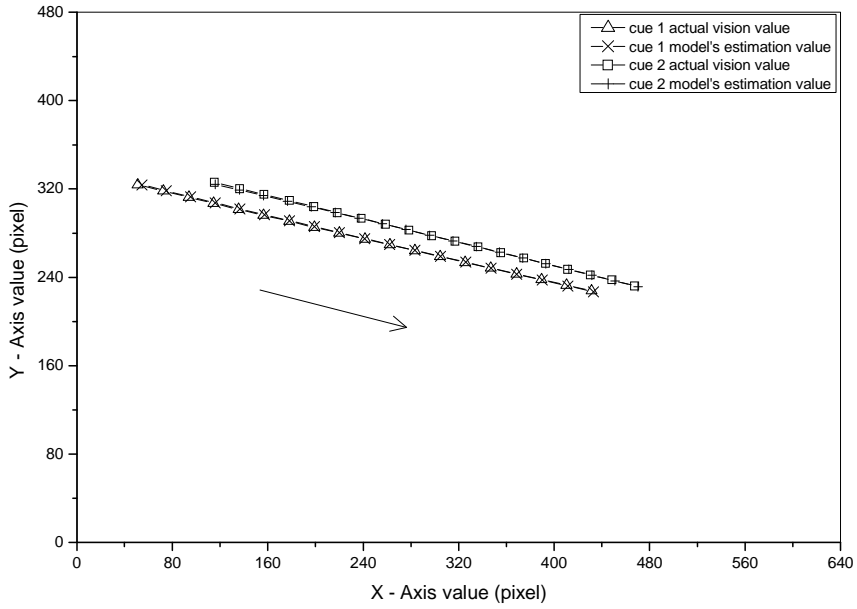


Fig. 80 Comparison between estimation values and actual values of camera 19 in robot's right work space

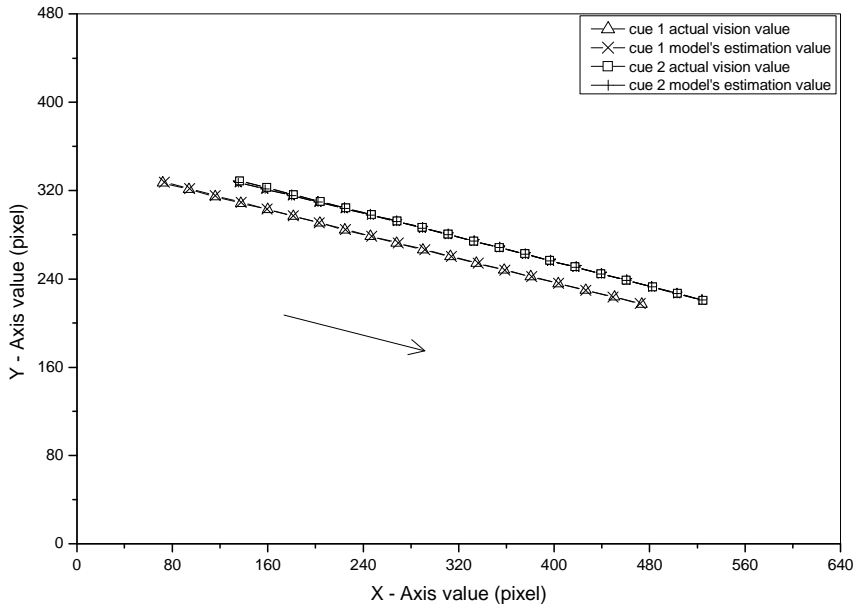


Fig. 81 Comparison between estimation values and actual values of camera 20 in robot's right work space

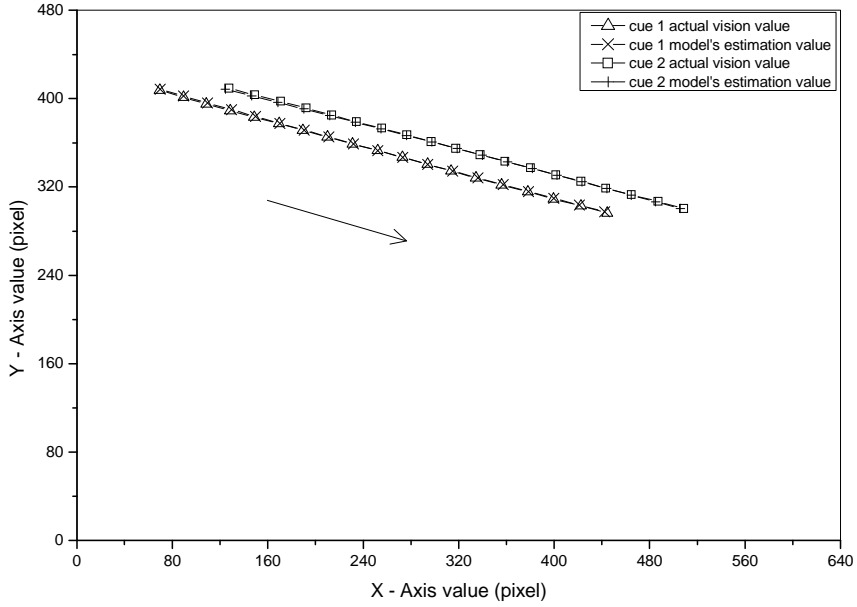


Fig. 82 Comparison between estimation values and actual values of camera 21 in robot's right work space

Table 15 The estimated six parameters of each camera in robot's right work space

<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>	<i>Camera No.</i>		<i>C-value</i>
CAM19	C_1	0.42061743	CAM20	C_1	0.31591585
	C_2	0.37753591		C_2	0.28573227
	C_3	0.72404367		C_3	0.80072069
	C_4	0.78548533		C_4	0.85079783
	C_5	561.04534912		C_5	796.58190918
	C_6	106.23905182		C_6	72.40045166
CAM21	C_1	0.19022235			
	C_2	0.15273798			
	C_3	0.85650820			
	C_4	0.89307147			
	C_5	969.77520752			
	C_6	143.38513184			

5.2.2 로봇의 얇은 막대 위치제어 실험결과

본 실험은 5.2.1절의 매개변수 추정모델 결과 값을 근거로 로봇 회전각 추정모델 방법을 이용하여 2큐를 갖는 얇은 막대에 대한 로봇 위치제어를 수행하였다.

각 작업영역에서 최적의 카메라를 배치하여 2큐를 갖는 얇은 막대를 이용한 로봇 위치제어 실험을 행하였다.

각 작업영역에서 최적의 카메라 배치에 사용된 3대의 카메라를 이용하여 목표지점에 대한 2큐의 실제 비전 데이터 값을 획득한다. 얻어진 목표지점에 대한 비전 데이터 값을 로봇 회전각 추정모델을 적용하여 로봇 회전각을 추정하였으며, 추정된 회전각에 의하여 로봇을 목표지점으로 이동하였을 때 실제 목표지점의 위치 값과 추정된 목표지점 값을 비교한 로봇의 얇은 막대 위치제어에 대한 결과는 다음과 같다.

좌측인 로봇 작업영역의 경우, 최적의 카메라 배치로 보여준 로봇 베이스로부터 2.5m떨어진 거리에서 좌측 편중 배치한 3대의 카메라(case #7)를 사용하여 목표지점에 대해 추정된 로봇회전각을 실제 값과 비교하여 Table 16의 ①에 제시 하였으며, Table 17의 ①은 Table 16의 ①번의 결과를 로봇 정기구학 모델에 적용하여 목표지점의 추정모델 좌표 값과 실제 좌표 값을 비교하여 제시 하였다. Table 17에서 보여준 것 같이 비교한 오차 값은 cue 1과 cue 2에 대해서 $\pm 0.4\text{mm}$ 이다.

중앙인 로봇 작업영역의 경우, 최적의 카메라 배치로 보여준 로봇 베이스로부터 2.0m떨어진 거리에서 중앙 배치한 3대의 카메라(case #5)를 사용하여 목표지점에 대해 추정된 로봇회전각과 실제 회전각을 비교한 결과를 Table 16의 ②에 제시 하였으며, Table 17의 ②는 Table 16의 ②번의 결과를 로봇 정기구학 모델에 적용하여 목표지점의 추정모델 좌표 값과 실제 좌표 값을 비교하여 제시 하였다. Table 17에서 보여준 것 같이 비교한 오차 값은 cue 1에 대해서는 $\pm 0.8\text{mm}$ 의 오차, cue 2에 대해서는 $\pm 0.9\text{mm}$ 의 오차를 보여준다.

우측인 로봇 작업영역의 경우, 최적의 카메라 배치로 보여준 로봇 베이스로부터

2.5m떨어진 거리에서 우측 편중 배치한 3대의 카메라(case #9)를 사용하였다. 목표 지점에 대해 추정된 로봇 회전각을 실제 로봇 회전각과 비교하여 Table 16의 ③에 제시 하였으며, Table 17의 ③은 Table 16의 ③번의 결과를 로봇 정기구학 모델에 적용하여 목표지점의 추정모델 좌표 값과 실제 좌표 값을 비교하여 제시 하였다. 비교한 오차 값은 cue 1과 cue 2에 대해서 $\pm 0.8\text{mm}$ 이다.

결과적으로 로봇 작업영역별 각각의 오차 값을 Fig. 83에 나타내었으며, 이 결과를 종합하여 볼 때 모든 경우에서 만족할만한 로봇의 얇은 막대 위치제어를 성공적으로 수행하였다.

Table 16 Estimation values of each joint angle

Robot work space			θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	d_3 (mm)	θ_4 (rad)
①	Robot's left-work space	Estimation value	7.311	-97.106	146.856	0.000
		actual value	7.1779	-96.4595	146.6500	0.0000
②	Robot's center-work space	Estimation value	-13.151	63.409	147.170	0.000
		actual value	-13.2342	63.2563	146.6500	0.0000
③	Robot's right-work space	Estimation value	-7.1779	96.4595	146.6500	0.000
		actual value	-7.160	96.136	146.867	0.0000

Table 17 Error values between physical coordinate values and estimated coordinate values

Robot work space				1		2	
①	Robot's left-work space	Real value (mm)	Fx	378.252	Average error(mm)	421.748	Average error(mm)
			Fy	-200.273		-199.727	
			Fz	120.000		120.000	
		estimated value(mm)	Fx	378.898	0.447487	421.392	0.407767
			Fy	-199.353		-200.300	
			Fz	119.794		119.794	
②	Robot's center- work space	Real value (mm)	Fx	563.602	Average error(mm)	536.398	Average error(mm)
			Fy	88.596		111.404	
			Fz	120.000		120.000	
		estimated value(mm)	Fx	562.768	0.815279	535.919	0.921146
			Fy	89.610		112.835	
			Fz	119.480		119.480	
③	Robot's right-work space	Real value (mm)	Fx	421.748	Average error(mm)	378.252	Average error(mm)
			Fy	199.727		200.273	
			Fz	120.000		120.000	
		estimated value(mm)	Fx	423.099	0.797287	379.599	0.796898
			Fy	199.531		200.055	
			Fz	119.795		119.795	

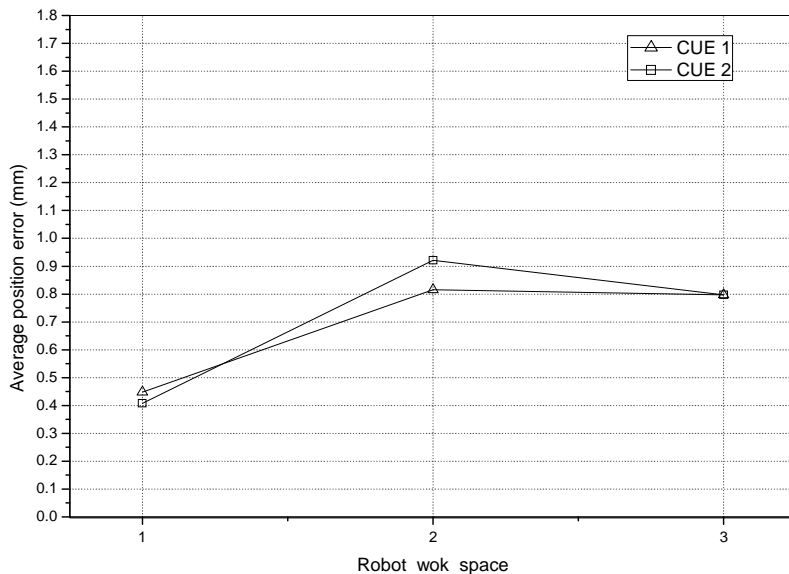


Fig. 83 Average position error (1 ; left work space, 2 ; center work space, 3 ; right work space)

제 6 장 결 론

본 논문은 로봇 위치제어를 위해 사용된 비전 제어기법이 카메라 배치에 따라 어떠한 영향을 받는가를 연구하였다. 이를 위해 로봇 작업영역을 3개로 구분하여 각각의 영역에 9개의 가능한 카메라 배치를 설정하여 로봇 점 위치제어를 수행하였다. 점 위치제어 수행 결과에서 얻은 최적의 카메라 배치를 가지고 로봇을 이용하여 2큐를 갖는 얇은 막대 위치제어를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 카메라 배치에 따른 로봇의 점 위치제어 실험결과

① 3개의 각각 작업영역에서 사용된 21개의 카메라 위치에서 매개변수 추정모델을 통한 비전 시스템 모델의 적합성을 보이는 실험에서 모든 경우에 실제 값과 비전 시스템 모델 값은 좌측 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.0\text{pixel}$ 의 정밀도, 중앙 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 7.8\text{pixel}$ 의 정밀도 및 우측 작업영역에서 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.2\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 일치함을 보여주었다.

② ①의 매개변수 추정 결과를 토대로 3개 작업영역의 각각에 9개의 가능한 카메라 배치를 설정하여 회전각 추정모델을 이용한 로봇 점 위치제어 실험을 수행한 결과 실제 값과 모델 값이 좌측 작업영역에서 $\pm 0.3\text{mm} \sim \pm 1.5\text{mm}$, 중앙 작업영역에서 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 1.8\text{mm}$, 우측 작업영역에서 $\pm 0.8\text{mm} \sim \pm 1.6\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 배치를 성공적으로 수행하였고, 같은 반경에서 카메라를 배치할 때 로봇이 작업하는 영역의 정면에 집중 배치한 영역에서는 $\pm 0.4\text{mm} \sim \pm 0.8\text{mm}$ 의 오차를 가지고 점 배치를 성공적으로 수행함으로써 제안된 비전 시스템 추정모델의 카메라 배치에 따른 효율성을 조사하여 비전 시스템 추정모델을 적용하기 위한 최적의 환경을 확인하였다.

(2) 카메라 배치에 따른 로봇의 얇은 막대 위치제어 실험결과

① 점 위치제어 실험의 최적의 카메라 배치 실험결과를 이용하여 3개의 작업 영역의 각각에서 최적 카메라 배치를 사용하여 비전 시스템 모델의 적합성을 실험한 결과 실제 값과 비전 시스템 모델 값의 오차는 좌측영역의 cue 1은 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 5.8\text{pixel}$, cue 2는 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 4.2\text{pixel}$, 중앙영역의 cue 1은 $\pm 0.1\text{pixel} \sim \pm 4.0\text{pixel}$, cue 2는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 4.6\text{pixel}$ 이고 우측영역의 cue 1은 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 0.4\text{pixel}$, cue 2는 $\pm 0.2\text{pixel} \sim \pm 3.4\text{pixel}$ 의 정밀도를 가지고 거의 일치함을 보여주었다.

② ①의 실험결과를 이용하여 회전각 추정모델을 이용한 로봇 얇은 막대 위치제어 실험결과는 좌측영역의 cue 1은 $\pm 0.4\text{mm}$, cue 2는 $\pm 0.4\text{mm}$, 중앙영역의 cue 1은 $\pm 0.9\text{mm}$, cue 2는 $\pm 0.9\text{mm}$ 이고 우측영역의 cue 1은 $\pm 0.8\text{mm}$, cue 2는 $\pm 0.8\text{mm}$ 의 오차를 가지고 성공적으로 수행하였다.

(3) 2종류 로봇 위치제어를 수행한 실험결과 카메라 배치가 로봇 위치제어에 큰 영향을 미치지 못하나 좀 더 높은 정밀도를 갖기 위해서는 로봇의 작업영역에 카메라를 집중적으로 배치하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

(4) 본 논문에서 사용한 Samsung SM7 ROBOT이외의 어떠한 다축 로봇에 대해서도 그 로봇에 맞는 기구학 모델링만 변경하면 제시된 비전 제어기법을 적용할 수 있다.

REFERENCES

- (1) Bacakoglu, H., Kamel, M., "An Optimized Two-Step Camera Calibration Method", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1347~1352, April 1997.
- (2) Bales J. and Barker L., "Marking Parts to Aid Robot Vision", *NASA Technical Paper 1819*, April, 1981
- (3) Beardsley, P.A., Zisserman, A. and Murray, D.W. "Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 23, No. 3: pp.235~259, 1997.
- (4) Chen, W.Z., Korde,U.A., Skaar,S.B., "Position Control Experiments Using Vision," *Int. J. Robotics Research*, Vol. 13, No. 3: pp. 199~208. 1994.
- (5) John J. Craig, "Introduction to Robotics mechanics and control, second edition", *Addison-Wesley Publishing Company*,1989, pp.84.
- (6) Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems. Sijthoff and Noordhoff International Publishers", *Alphen Aan Den Rijn*, 1978, pp. 29~33.
- (7) Masaki. I., "Method and Apparatus for Manipulator Welding Apparatus with Vision Correction for Workpiece Sensing", *United States Patent* 4,380,696, April 19, 1983.
- (8) P. J. Sequeira Goncalves and J. R. Caldas Pinto, "Dynamic Visual Servoing of Robotic Manipulators", *IEEE Conf. on Emerging Technologies and factory Automation*, Vol.2, pp. 560-565, Sept. 2003
- (9) Philip W. Smith, N. Nandhkumar, A.K. Ramadorai., "Vision Based Manipulation of Non Rigid Objects", *IEEE Internatioanl Conference on Robotics and Automation*. pp.3191~3196, April, 1996.

- (10) R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisis, B. Kuchen, and F.Reyes, "Stable Visual servoing of camera-inhand robotics systems", *IEEE/ASME Trsns. on Mechatronics*, Vol. 5, no. 1, pp.39-48, Mar. 2000
- (11) Sukir S. Kumaresan, Hua Harry Li., "Hand-Eye Coordination of A Robot Manipulator Based on Fuzzy Logic", *IEEE Comput. Soc. Vol.3*, pp.221~225, 1994.
- (12) Tani, K., Abe, M. and Ohno, T. : "High Precision Manipulator with Visual Sense," *Proceedings 7th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, Japan, pp.19~21, October, 1977.
- (13) Tsai, R.Y., "Synopsis of recent progress on camera calibration for 3D machine vision", *The Robotics Review, Cambridge: MIT Press.*, pp.146~159, 1989,
- (14) 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.
- (15) 장완식, 유창규, "비전시스템을 이용한 로봇시스템의 점 배치 실험에 관한연구", *한국정밀공학회지*, 제13권 제8호 pp.175~183, 1996.
- (16) 장완식 · 신광수 · 안철봉, "강체 배치 실험을 위한 로봇 비전시스템의 응용", *한국정밀공학회지*, 제 15권, 제 11호: 100~108, 1998.
- (17) 장완식, 김경석, 김기영, 안힘찬 "비전 제어시스템에 사용된 카메라의 최적개수에 대한 실험적 연구", *한국공작기계학회지*, 제13권 제2호 pp.94~103, 2004.

Appendix

Image processing program

```
#include "iostream.h"
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <process.h>
#include "Mil.h"

/* Grab scale. */
#define GRAB_SCALE 1.0

int i,j,max;

/* main function */
void main()
{
    MIL_ID  MilApplication;
    MIL_ID  MilSystem;
    MIL_ID  MilDigitizer;
    MIL_ID  MilDisplay;
    MIL_ID  MilImageDisp;

    double yv,yy,xvalue,yvalue;
    double count,m_count,x,y;
    int px;
    unsigned char array[480];
    int counter=0;
    long Channel[3] = {M_CH0, M_CH1, M_CH2};
    int k,n=1;
    char yn;
    // FILE *out;
```

```

//      out=fopen("cent6.out","a+");

MappAlloc(M_DEFAULT, &MilApplication);
MsysAlloc("M_DEFAULT", M_DEFAULT, M_DEFAULT, &MilSystem);
MdigAlloc(MilSystem, M_DEV0, "M_DEFAULT", M_DEFAULT, &MilDigitizer);
MdispAlloc(MilSystem, M_DEV0, "M_DEFAULT", M_DEFAULT, &MilDisplay);

MbufAlloc2d(MilSystem,
            (long)(MdigInquire(MilDigitizer, M_SIZE_X, M_NULL)*GRAB_SCALE),
            (long)(MdigInquire(MilDigitizer, M_SIZE_Y, M_NULL)*GRAB_SCALE),
            8+M_UNSIGNED,
            M_IMAGE+M_GRAB+M_PROC+M_DISP, &MilImageDisp);
MbufClear(MilImageDisp, 0x0);
MdispSelect(MilDisplay, MilImageDisp);

    for(k=1;k<=3;k++)
    {
        printf("\n ***** Adjust your Camera NO. %d . And press any key.",k);
//      fprintf(out,"\n ***** Adjust your Camera NO. %d . And press any key.",k);
        MdigChannel(MilDigitizer, Channel[k-1]);
        MdigControl(MilDigitizer, M_GRAB_SCALE, GRAB_SCALE);
        MdigGrabContinuous(MilDigitizer, MilImageDisp);
        getch();
        MdigHalt(MilDigitizer);
//      InCAM++;
    }
    MdigChannel(MilDigitizer, Channel[0]);

    while(1)
    {
        if(counter==3)
        { printf("\n\n ##### Next point (y/n)? #####");
//      fprintf(out,"\n\n ##### Next point (y/n)? #####");
        yn=getch();
        if(yn=='n') break;

```



```

        counter=0;
            n++;
        }

MdigChannel(MilDigitizer, Channel[counter]);
MdigControl(MilDigitizer, M_GRAB_SCALE, GRAB_SCALE);
MdigGrabContinuous(MilDigitizer, MilImageDisp);

        for(i=0;i<640;i++)
    {
        MbufGet2d(MilImageDisp, i, 0, 1, 480, array);
        for (j=0;j<480;j++)
            if(max <= array[j])
                {
                    max=array[j];
                }
    }
printf("\n Pixel-Max=%d",max);

xvalue=yvalue=m_count=0.;

for(i=0; i<640; i++)
{

    MbufGet2d(MilImageDisp, i, 0, 1, 480, array);
    yv=0.;
    yy=0.;
    count=0.;
    px=0;
    {
        for(j=0; j<480; j++)
            {
                if( max - array[j] <= 5 )
                    {
                        yv = yv + j;

```

```

        count = count + 1.;
        yy = yv / count;
        px = 255;
    }
}
}
if(px == 255) {
    xvalue = xvalue + i;
    yvalue = yvalue + yy;
    m_count =m_count + 1;
}
}
x=xvalue/m_count + 1.;
y=480. - yvalue/m_count + 1.;

printf("\n %d Point, %d Camera ==> Center(x,y)=(%f,%f)",n,counter+1,x,y);
// fprintf(out,"\n %d Point, %d Camera ==> Center(x,y)= %f %f",n,InCAM+1,x,y);
MdigHalt(MilDigitizer);

counter++;

} //while END

MbufFree(MilImageDisp);
MdispFree(MilDisplay);
MdigFree(MilDigitizer);
MsysFree(MilSystem);
MappFree(MilApplication);

} //main END

```

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 연구의 자세와 학문의 올바른 길을 일깨워주시며 많은 조언과 격려를 해주신 장완식 교수님께 진심으로 감사드립니다.

오늘의 결실을 맺게 되기까지 많은 조언을 해주신 여러 교수님들께 감사드립니다. 특히 저에게 대학원이란 길을 알려주신 이성백 교수님께 진심으로 감사드립니다.

언제나 저를 믿으시고 말없이 뒷바라지 해주신 부모님께 형언할 수 없는 고마움을 느끼면서 이작은 결실을 바치며, 저에게 항상 따뜻한 관심을 보여준 선양이누나, 수정이누나, 서희누나와 친척분들께 감사의 뜻을 전합니다.

실험실에서 지내온 시간동안 너무나 부족한 저에게 많은 조언을 해주신 김재명 선배, 박성일 선배, 안힘찬 선배 그리고 실험실에서 밤낮으로 같이 고생한 손재경에게 감사를 드립니다.

용기와 의욕을 북돋우어 주던 고향 친구들과 선후배 그리고 기계공학과 대학원생분들에게 깊은 감사를 드립니다. 특히 자신의 일처럼 같이 고민해준 시스템 제어 실험실의 김광호박사님께 깊은 감사를 드립니다.

제 나름대로 열심히 생활하고 노력했다지만 부족한 점이 너무나도 많고 아쉬움이 남습니다. 제어공학 실험실에 학부 2학년에 들어와 지금에 이르기까지 많은 것을 배웠고 뜻 깊은 소중한 시간들이었습니다. 저를 아끼고 사랑하시는 모든 분들의 사랑과 우정을 항상 마음속 깊이 새기면서 언제나 흔들리지 않고 성실한 자세로 저의 앞에 펼쳐진 미래를 향해 나아가겠습니다. 진심으로 감사드립니다.

2008 년 12 월

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20077077	과 정	(석사) 박사
성 명	한글: 민 관 응 한문 : 閔 琯 雄 영문 : Min Kwan Ung				
주 소	경기도 성남시 분당구 서현동 풍림아이원 A동 1609호				
연락처	E-MAIL : mku3578@nate.com				
논문제목	한글 : 로봇 위치제어를 위해 사용된 카메라의 배치에 따른 비전 시스템 모델의 효율성에 관한 연구 영어 : A study on the effectiveness of vision system according to the arrangement of cameras used for robot's position control				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대()

2008년 11 월 26 일

저작자: 민 관 응 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하