[UCI]I804:24011-200000239367

2010년 2 월
석사학위 논문

불연속적인 궤적에서 로봇 점 배치 작업에 사용된 비젼 제어기법의 실용성에 대한 실험적 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

손 재 경

불연속적인 궤적에서 로봇 점 배치 작업에 사용된 비젼 제어기법의 실용성에 대한 실험적 연구

An experimental study on the practicality of vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory

2010년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

손 재 경

불연속적인 궤적에서 로봇 점 배치 작업에 사용된 비젼 제어기법의 실용성에 대한 실험적 연구

지도교수 장 완 식

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함.

2009년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

손 재 경

손재경의 석사학위논문을 인준함

위원장　조선대학교 교수　이 규 태　인

위　원　조선대학교 교수　정 상 화　인

위　원　조선대학교 교수　장 완 식　인

2009년　11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Photos ····· Ⅲ
List of Figures ····· Ⅲ
List of Tables ····· Ⅴ
Nomenclature ····· Ⅶ
Abstract ····· Ⅷ

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 ····· 1
1.2 연구목적 및 내용 ····· 4

제 2 장 비젼 제어기법 모델

2.1 로봇의 기구학 모델 ····· 8
2.2 비젼 시스템 모델 ····· 12
2.3 매개변수 추정 모델 ····· 13
2.4 로봇 회전각 추정 모델 ····· 16

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치 ····· 18
3.1.1 실험장치 구성 ····· 18

3.1.2 시험모형 ····· 21
3.2 실험 방법 ····· 22
3.2.1 로봇 운동궤적 ····· 22
3.2.2 실험 절차 ····· 23

제 4 장 로봇 비젼 제어기법 실험결과

4.1 장애물영역이 존재하지 않는 경우 ····· 26
4.1.1 비젼 시스템 모델 적합성 ····· 26
4.1.2 로봇 점 배치작업 실험결과 ····· 27
4.2 장애물영역이 존재하는 경우 ····· 30
4.2.1 초기 장애물영역 A가 존재하는 경우 ····· 30
가. 비젼 시스템 모델 적합성 ····· 30
나. 로봇 점 배치작업 실험결과 ····· 36
4.2.2 중간 장애물영역 B가 존재하는 경우 ····· 41
가. 비젼 시스템 모델 적합성 ····· 41
나. 로봇 점 배치작업 실험결과 ····· 47
4.2.3 최종 장애물영역 C가 존재하는 경우 ····· 52
가. 비젼 시스템 모델 적합성 ····· 52
나. 로봇 점 배치작업 실험결과 ····· 58
4.3 실험 종합결과 ····· 63

제 5 장 결 론 ····· 69

REFERENCES ····· 70

List of Photos

Photo 1 Experimental apparatus ····· 19
Photo 2 1 - cue test model for experiment ····· 21

List of Figures

Fig. 2-1 Correlation of 4 models used for robot's vision control scheme ····· 7
Fig. 2-2 Dimensions of Samsung SM7 4-axis robot ····· 9
Fig. 2-3 Geometric configuration of Samsung SM7 4-axis robot ····· 9
Fig. 3-1 Experimental set-up ····· 20
Fig. 3-2 Dimensions of 1-cue test model used for experiment ····· 21
Fig. 3-3 Types of obstacle regions in robot's trajectory ····· 22
Fig. 3-4 Experimental procedure for vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory ····· 25
Fig. 4-1 For each camera, comparison of the actual and estimated vision system model value in no obstacle region ····· 27
Fig. 4-2 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 1 ····· 31
Fig. 4-3 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 2 ····· 33
Fig. 4-4 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 3 ····· 35
Fig. 4-5 For each case of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 40

Fig. 4-6 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 1 ····· 42
Fig. 4-7 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 2 ····· 44
Fig. 4-8 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 3 ····· 46
Fig. 4-9 For each case of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 51
Fig. 4-10 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 1 ····· 53
Fig. 4-11 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 2 ····· 55
Fig. 4-12 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 3 ····· 57
Fig. 4-13 For each case of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 62
Fig. 4-14 For camera 1, comparison of C parameters in 3 obstacle regions ·· 65
Fig. 4-15 For camera 2, comparison of C parameters in 3 obstacle regions ·· 66
Fig. 4-16 For camera 3, comparison of C parameters in 3 obstacle regions ·· 67
Fig. 4-17 For all cases, average errors between the actual and estimated values of target point in x-y-z coordinate ····· 68

List of Tables

Table 2-1 Link parameters of Samsung SM7 4-axis robot ····· 8

Table 3-1 Specification of experimental apparatus ····· 18

Table 4-1 For no obstacle, six estimated parameters of each camera ····· 28

Table 4-2 For no obstacle, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 29

Table 4-3 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 1 ····· 32

Table 4-4 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 2 ····· 34

Table 4-5 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 3 ····· 36

Table 4-6 For case 1 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 37

Table 4-7 For case 2 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 38

Table 4-8 For case 3 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 39

Table 4-9 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 1 ····· 43

Table 4-10 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 2 ····· 45

Table 4-11 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 3 ····· 47

Table 4-12 For case 1 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 48
Table 4-13 For case 2 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 49
Table 4-14 For case 3 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 50
Table 4-15 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 1 ····· 54
Table 4-16 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 2 ····· 56
Table 4-17 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 3 ····· 58
Table 4-18 For case 1 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 59
Table 4-19 For case 2 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 60
Table 4-20 For case 3 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 61
Table 4-21 For all cases, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate ····· 68

NOMENCLATURE

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

ABSTRACT

An experimental study on the practicality of vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory

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

This study is concerned with the application of the vision control scheme for robot's point placement task in discontinuous trajectory caused by obstacle. The proposed vision control scheme consists of four models. These are : a) the robot kinematics model developed based on Denavit-Hartenberg notation, b) the vision system model with six-parameters showing the relationship between 2-D camera image plane and 3-D robot kinematics model, c) the parameters estimation model developed by minimizing the performance index explaining error between actual vision data and vision system model, and d) the joint angle estimation model developed by minimizing the performance index explaining error between target point and vision system model based on the parameter estimation model.

For the experiment of this study, the discontinuous trajectory by obstacle is divided into three obstacle regions. These are : a) initial obstacle region, b) intermediate obstacle region, and c) final obstacle region. Each obstacle region consists of 3 cases according to the variation of number of cameras that can

not acquire the vision data. Then, the effects of number of cameras on the proposed robot's vision control scheme are investigated in each obstacle region.

Finally, the practicality of the proposed robot's vision control scheme is demonstrated experimentally by performing the robot's point placement task in discontinuous trajectory by obstacle.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

로봇 기술은 로봇 및 제어기 설계와 제작, 센서기술, 센서와 로봇간의 인터페이스 기술, 제어알고리즘기술, 음성 인식, 화상처리 등 정보통신 기술의 융합 기술로서 이동산업 간의 시너지 효과를 창출할 수 있는 기술이다. 즉, 기계기술과 전기·전자기술이 수평적 혹은 수직적으로 상호 연계되어 부가가치를 창출한다.

로봇은 산업용 로봇과 지능형로봇으로 크게 2개로 분류 할 수 있다. 1960년대에 산업현장에 적용하기 위해 개발된 산업용 로봇은 신뢰성에 가장 큰 비중을 두고 고정밀도가 요구되지 않은 비교적 쉬운 단순 반복 작업, 물건이송, 페인팅 및 용접 등에 사용되었다. 반면 지능형로봇은 산업용 로봇에 비해 산업현장의 악조건에 견뎌야 할 필요성이 낮고, 산업 현장보다 다양한 변화요소가 존재하는 공간에서 행동하기 때문에 인식 및 인공지능 등에 보다 중점이 맞춰지게 된 것이다. 산업용 로봇과 지능형 로봇에 적용되는 기술은 다른 것처럼 느껴지지만, 기본적인 바탕은 다르지 않다. 또, 최근 개발되고 있는 지능형 로봇 적용기술들은 향후 산업용 로봇에서도 적용될 수 있어, 그 구분 개념이 점차 통합되고 있는 상황이다.

지능형 로봇에서의 카메라는 주위환경을 인식하거나, 사용자가 어디 있는지, 사용자가 누구인지 등 시각 인식을 위해 사용된다. 지능형 로봇에서의 카메라는 산업용 로봇과 같은 고성능보다는 가격대비 성능이 우수한 CCD 카메라 등 PC에서 사용되는 일반적인 카메라가 많이 사용된다.

인간의 두뇌기능 중 60%는 두 눈으로 감지하는 시각정보를 처리하는 데 사용된다. 그만큼 눈으로 보는 시각은 인간의 오감 중 가장 중요한 감각이다. 이처럼 인간의 활동에 긴요한 시각기능이 로봇분야에 적용된 역사는 그리 오래지 않다. 공학자들은 일찍부터 로봇분야에 시각기능을 부여하는 갖가지 연구를 했지만 온갖 사물의 형태를 기계 눈으로 인식시키는 작업은 난관의 연속이었다. 기계 눈은 똑같은 물건이라도 조명조건이 조금만 달라지면 전혀 못 알아볼 정도로 눈썰미가 형편없었다. 또 온갖 변수를 고려해 시각처리 알고리즘을 만들어도 당시 컴퓨터 용량으로 실시간 처리하기 어려워서 늘 벽에 부딪혀야 했다.

이후 90년대에 들어 컴퓨터 기능이 비약적으로 발전되어 메모리와 처리속도에 대한 문제를 상당수 해결하였으며 기계적 영상처리에 대한 노하우가 쌓이면서 로봇과 비전기술의 결합에도 종래보다 더 많은 기능을 수합할 수 있는 환경이 조성되었다. 이리하여 로봇 비젼을 이용한 물체형태의 인식, 로봇위치를 파악해 자율적으로 주행경로 결정기술, 2차원 시각정보의 3차원공간재현, 움직이는 물체를 추적하는 기술 등에 대한 연구가 많은 연구진에 의해서 수행되고 있다[2][3][4][7][8][9][11][12].

Bacakoglu와 Kamel[1]은 렌즈 왜곡 현상을 고려하여 카메라 내부의 기하학적, 광학적 특성(내부 매개변수)과 특정한 기준 좌표계에 대한 카메라 프레임의 3차원 위치와 방위(외부 매개변수)를 결정하는 과정에 대한 최적화된 2단계 카메라 보정 알고리즘을 개발하였으며, 매개변수들을 선형해법과 반복해법을 통해서 추정하는 기법을 연구하였고, Tsai[13]는 정확하게 위치가 알려진 큐를 이용하여 카메라를 보정하고 3차원 직교 좌표계를 2차원 영상 좌표계로 일치시켜 매개변수를 추정하는 방법을 연구하였다. Machiko등[16]은 알려지지 않은 반경을 가지는 원에 대해 카메라의 위치와 방위와의 관계를 추정하여 착륙할 지점의 원에 대한 자신의 위치와 방위를 추정해 내는 헬리콥터의 자동 착륙 장치에 적용한 제어기법을 연구하였다.

Papp[17]은 자동 형상 인식을 수단으로 하여 인간이 감독하지 않고 기계적인 시각이 부여된 로봇에 의해 복잡한 조립 작업을 할 수 있는 기법을 연구하였으며, Kundrak[18]는 로봇의 지적능력을 강화하기 위해 화상 처리 시스템에 두 개의 카메라를 갖는 비젼 시스템을 적용하여 유연 자동화 조립에 대해 연구하였다. 또한, Hafez[20]등은 능동 비젼 시스템에서 효율적인 위치결정 작업을 위해 이미지 영역과 공간영역사이 관계식을 설명해주는 자코비안 행렬을 정의하고 이에 대한 오차를 최소화하기 위해 적응학습 제어방법을 제안하였다.

Yoshihiro Toda등[14]의 연구에서는 카메라와 로봇 매니퓰레이터 베이스 사이의 상대적인 위치 변화가 있는 경우에도 어떠한 보정도 필요하지 않는 퍼지 논리(fuzzy logic)를 사용하였으며, Bijan Shirinzadeh[19]는 머신 비젼에 근거하여 원격제어차량을 조이스틱을 사용하여 추적·제어를 하는 기술에 대해 연구하였다. 그리고 Mishro[21]등은 산업현장의 동적인 작업환경에서 장애물을 피하면서 로봇이 지정된 작업을 훌륭히 수행할 수 있도록 로봇 비젼에 퍼지제어 알고리즘을 도입하였다.

Kelly[10]는 카메라를 로봇의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 제어기반 알고리즘을 제시하였는데 제어입력이 로봇의 기

구학적 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 약화될 수 있다.

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

이리하여 기존 로봇 비젼 제어기법의 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서 사용되는 비젼 제어기법은 6개의 시각 매개변수를 갖는 비젼 시스템을 개발하여 이를 근간으로 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델을 개발하였다. 이 추정모델을 로봇 점 배치작업에 적용함에 있어서, 장애물 출현 등에 의해 비젼 데이터를 획득하지 못함으로써 로봇이 불연속적인 운동궤적을 따라 이동하게 된다. 이때 로봇이동시 장애물영역과 영역 내에서 영향을 받는 카메라 개수의 변화가 로봇 점 배치작업을 위해 사용되는 비젼 제어기법에 어떠한 영향을 미치는가를 연구 하고자 한다.

1.2 연구목적 및 내용

로봇에 비젼 시스템을 적용할 때에는 카메라의 위치, 방향 및 초점거리에 대한 보정이 가장 중요한 요소 중의 하나가 되며, 만약 이 보정이 정확하게 되어 있지 않으면 로봇은 정상적인 위치 보정을 하지 못하고 오동작을 할 우려가 있다.

본 연구는 카메라와 로봇과의 상대적인 위치가 알려지지 않아도 제어가 가능하고, 위와 같은 보정 문제점을 해결하기 위해 제안된 6개의 시각매개변수를 갖는 비젼 시스템 모델을 사용하여 불확실한 작업환경의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 실용적인 로봇 비젼 제어기법을 제시하고, 비젼 데이터를 얻음에 있어서 장애물 출현으로 인하여 불연속적인 상황이 발생한 경우에 대해 로봇 점 배치작업에 사용된 로봇 비젼 제어기법의 적합성과 실용성을 확인하고자 한다.

제안된 매개변수 추정모델과 회전각 추정모델은 모두 비선형방정식의 형태를 가지며, 특히 회전각 추정모델의 경우에는 많은 제한조건을 포함한다. 따라서 카메라의 개수가 증가함에 따라서 비젼 시스템 추정모델을 통한 위치 결정에서 오차가 줄어든다고 보기는 힘들다는 연구결과[22] 카메라 배치가 로봇 위치제어에 큰 영향을 미치지 못하나 좀 더 높은 정밀도를 갖기 위해서는 로봇의 작업영역에 카메라를 집중적으로 배치하는 것이 바람직하다는 선행된 연구결과[23]에 따라서 좀 더 향상된 정밀도를 가질 수 잇도록 로봇이 이동하는 방향에 집중적으로 2.0M~2.5M사이에 3대의 카메라를 배치하였다.

본 연구를 수행하기 위해 로봇이 이동하는 임의의 로봇 운동궤적에서 장애물영역을 초기, 중간, 최종 3개영역으로 구분하고, 각각 영역에 3개 경우를 설정하였다. 즉, 1대의 카메라에서 데이터 획득실패, 2대의 카메라에서 데이터 획득실패와 3대의 카메라에서 데이터 획득실패로 설정하여 매개변수 추정모델에 의해 추정되는 각 카메라에 대한 매개변수를 추정하여 비젼 시스템 모델의 적합성을 보였다. 또한 이 결과를 회전각 추정 모델을 이용한 로봇 점 배치작업에 적용하여 장애물 3개 영역에서 3개 경우의 각각에 대하여 로봇 점 배치작업 결과를 조사하여 제시된 비젼 제어기법의 실용성을 조사하였다. 이에 대한 주요한 연구내용은 다음과 같다.

(1) 비젼 제어기법 모델

① 로봇의 기구학 모델

② 비젼 시스템 모델

③ 매개변수 추정모델

④ 회전각 추정모델

(2) 실험장치 구성 및 실험방법

① 실험장치 구성 및 시험모형

② 로봇 운동궤적 및 실험절차

(3) 로봇 비젼 제어기법 실험결과

① 장애물영역이 존재하지 않는 경우

- 비젼 시스템 모델 적합성
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
- 로봇 점 배치작업 실험결과
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우

② 초기 장애물영역 A가 존재하는 경우

- 비젼 시스템 모델 적합성
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
- 로봇 점 배치작업 실험결과
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우

③ 중간 장애물영역 B가 존재하는 경우

- 비젼 시스템 모델 적합성
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
- 로봇 점 배치작업 실험결과
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우

④ 최종 장애물영역 C가 존재하는 경우

- 비젼 시스템 모델 적합성
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
- 로봇 점 배치작업 실험결과
  - 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우
  - 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우

(4) 실험결과 고찰 및 결론

제 2 장 비젼 제어기법 모델

본 연구에서 제시된 비젼 제어기법은 로봇 기구학 모델, 비젼 시스템 모델, 매개변수 추정 모델 및 회전각 추정모델 등 크게 4개의 모델로 구성된다. Fig. 2-1은 각 모델에 대한 상호관계를 보여주며, 각 모델의 유도과정은 2.1절~2.4절에서 설명한다.

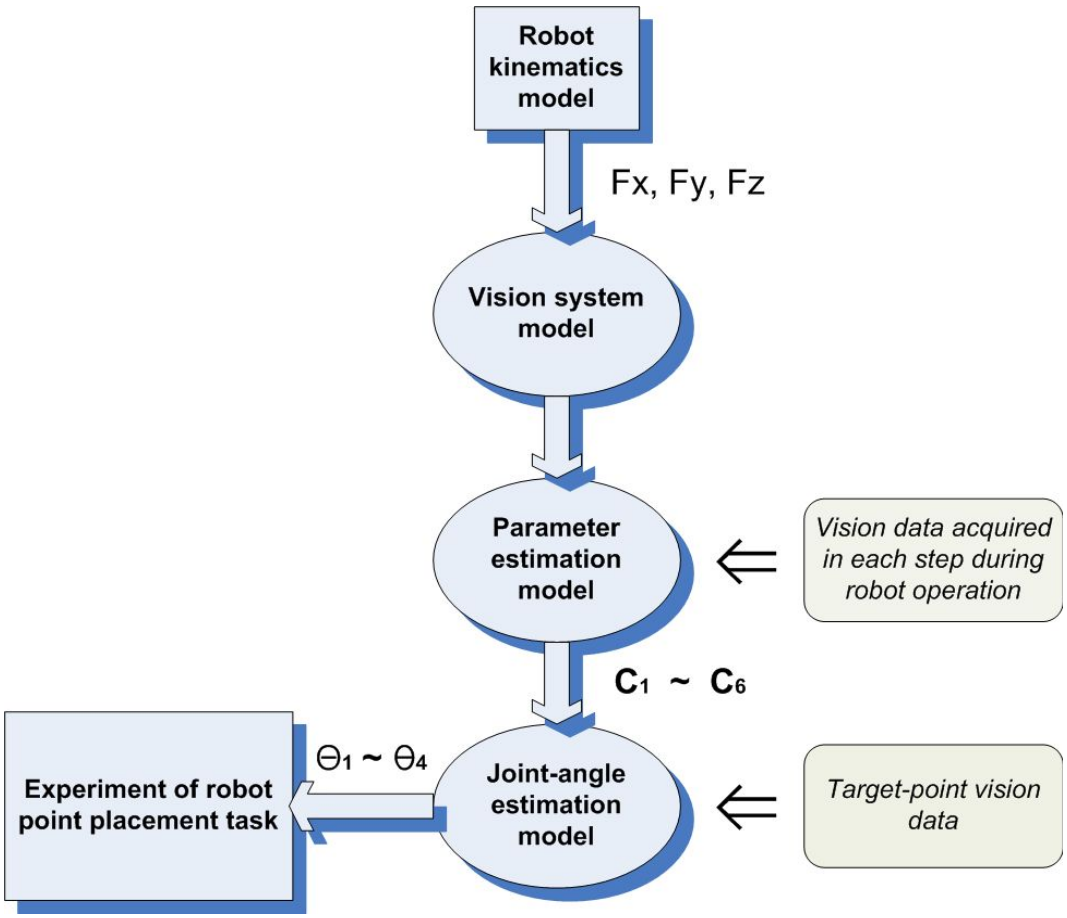


Fig. 2-1 Correlation of 4 models used for robot's vision control scheme

2.1 로봇의 기구학 모델

로봇의 정기구학은 3차원 공간에서 로봇의 각 관절에 대한 회전각($\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4$)이 주어졌을 때 베이스 좌표계에 대한 로봇 말단부의 위치 (Fx, Fy, Fz)를 구하는 것이다.

Fig. 2-1과 Fig. 2-2는 각각 본 연구에 사용한 삼성 SM7 4축 로봇의 치수, 기하학적 형상 및 각 관절 좌표계를 보여주며, 4×4 요소를 갖는 행렬 ${}_{i}^{i-1}T$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 2-1은 삼성 SM7 4축 로봇의 각 관절에 대한 4개의 Denavit-Hartenberg 링크 인자 값을 보여준다. Eq.(2-1)과 Table 2-1을 이용하여 베이스 좌표계에서 마지막 관절까지의 변환행렬 ${}_{4}^{0}T$ 는 Eq.(2-2)와 같다.

Table 2-1 Link parameters of Samsung SM7 4-axis robot

axis	α_{i-1}(degree)	a_{i-1}(mm)	d_i(mm)	Θ_i(degree)
1	0	0	387	θ_1
2	0	400	0	θ_2
3	180	250	d_3	0
4	-180	0	-67.05	θ_4

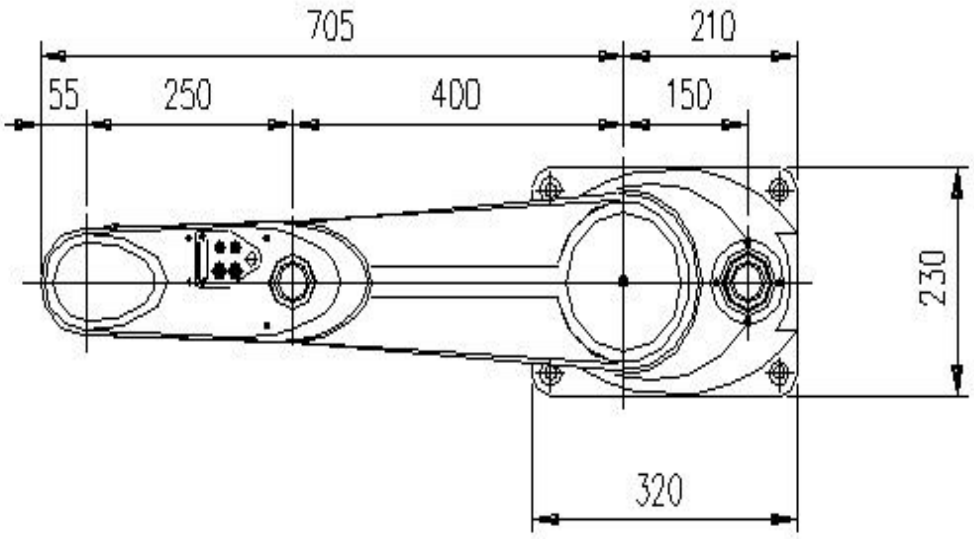


Fig. 2-2 Dimensions of Samsung SM7 4-axis robot

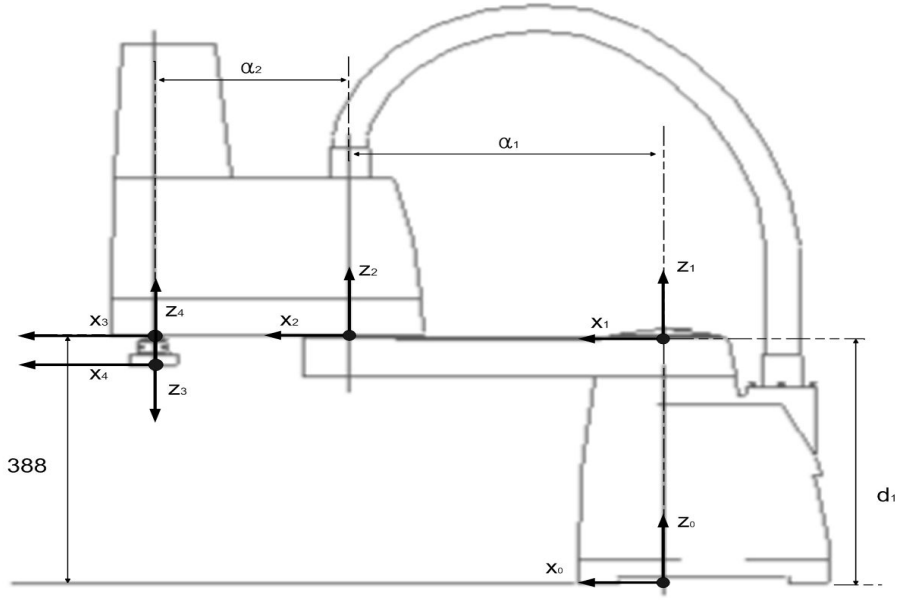


Fig. 2-3 Geometric configuration of Samsung SM7 4-axis robot

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

$$ {}^{0}_{4}T = {}^{0}_{1}T^{1}_{2}T^{2}_{3}T^{3}_{4}T \quad \cdots (2\text{-}2) $$

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

$$ {}^{0}_{4}T = {}^{0}_{1}T^{1}_{2}T^{2}_{3}T^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & g_x \\ l_y & m_y & n_y & g_y \\ l_z & m_z & n_z & g_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \cdots \quad (2\text{-}3) $$

여기서,

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

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

$l_z = 0$

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

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

$m_z = 0$

$n_x = 0$

$n_y = 0$

$n_z = 1$

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

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

$g_z = 388 - d_3 - 67.05$

이며, 마지막 좌표계 원점에 부착된 1개 큐의 끝점 P까지의 위치벡터는 다음과 같다.

$$^4P = (P_x, P_y, P_z, 1)^T = (0, 0, -46.6, 1)^T \quad \cdots \quad (2\text{-}4)$$

따라서, 로봇 베이스 좌표계에 대한 로봇 끝점 P의 위치벡터는 Eq.(2-5)과 같이 계산된다.

$$\overline{F} = {}^0_4T \bullet {}^4P \quad \cdots (2\text{-}5)$$

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

$$F_x = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y + 250\cos(\theta_1 + \theta_2) + 400\cos\theta_1$$
$$F_y = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_x + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4)P_y + 250\sin(\theta_1 + \theta_2) + 400\sin\theta_1$$
$$F_z = P_z + 388 - d_3 - 67.05 \quad \cdot (2\text{-}6)$$

2.2 비젼 시스템 모델

본 논문에서 사용된 비젼 시스템 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수를 사용하여 3차원 공간상의 로봇 끝점 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계 위치로 변환한다. 6개의 매개변수를 포함하는 비젼 시스템 모델은 다음과 같다[22][23][24][25].

$$X_m = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)F_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)F_y \quad \cdots(2\text{-}7)$$
$$+ 2(C_2C_4 - C_1C_3)F_z + C_5$$

$$Y_m = 2(C_2C_3 - C_1C_4)F_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)F_y \quad \cdots(2\text{-}8)$$
$$+ 2(C_3C_4 + C_1C_2)F_z + C_6$$

여기서, X_m 과 Y_m 는 6개의 시각 매개변수가 알려졌다고 가정할 때, 2.1절의 로봇의 기구학모델에서 계산된 Eq.(2-6)의 3차원 로봇 끝점 위치벡터(F_x, F_y, F_z)가 2차원 카메라 좌표계로 변환된 값을 나타낸다. 여기서 6개 매개변수들은 카메라 방위 및 초점거리의 변화성에 대해서 매개변수 $C_1 \sim C_4$가 설명하고, 매개변수 $C_5 \sim C_6$는 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타낸다.

2.3 매개변수 추정 모델

비젼 시스템 모델에 포함된 6개의 매개변수 $C_1 \sim C_6$를 추정하는 과정은 다음과 같다. 로봇이 주어진 운동궤적을 따라 이동할 때 각 이동단계에서 로봇 끝 점에 대한 비젼 데이터와 로봇 회전각$(\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$이 동시에 연속적으로 얻어진다면, 3차원 로봇 끝 점 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개의 시각 매개변수를 추정하기위해 각 카메라에 대하여 다음과 같이 성능지수 $J(C_k)$를 정의한다.

$$J(C_k) = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[X_m^i - X_c^i \right]^2 + \left[Y_m^i - Y_c^i \right]^2 \right\} \quad \cdots (2\text{-}9)$$

여기서, $i(i = 1,\ 2, \cdots, n)$는 로봇 운동궤적에서 이동단계수를 나타내며, 본 연구에서는 20단계를 사용하였다. 또한, X_c^i와 Y_c^i 는 각 이동 단계에서 얻어진 실제 큐에 대한 비젼 데이터 값, X_m^i과 Y_m^i 은 2.2절의 Eq.(2-7)과 Eq.(2-8)에서 매개변수 $C_1 \sim C_6$를 포함한 비젼 시스템 모델 값을 나타낸다.

Eq.(2-9)에 주어진 성능지수 $J(C_k)$ 를 최소화시키면 다음과 같다.

$$g = \begin{bmatrix} g_x^i \\ \\ g_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m^i - X_c^i \\ \\ Y_m^i - Y_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \\ 0 \end{bmatrix} \quad \cdots (2\text{-}10)$$

위 식에 매개변수 C_k를 계산하기 위해 Newton-Raphson 공식을 적용하면

$$\begin{aligned} C_{k,n+1} &= C_{k,n} - \left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k} \right]^{-1} g(C_{k,n}) \\ &= C_{k,n} + \Delta C \end{aligned} \quad \cdots (2\text{-}11)$$

여기서, n은 계산과정 중 반복횟수를 나타낸다.

Eq.(2-11)에서의 역행렬 $\left[\frac{\partial g(C_{k,n})}{\partial C_k}\right]^{-1}$을 포함한 ΔC 는 식(2-12)와 같다[6].

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad \cdots (2\text{-}12)$$

Eq.(2-12)에서 W는 가중행렬(weighting matrix)을 나타내며, 본 연구는 단위행렬을 사용하였다. 또한, R 은 유수벡터(Residual vector)로서 Eq.(2-13)과 Eq.(2-14)와 같이 주어지며, 자코비안 행렬 A는 Eq.(2-15)와 Eq.(2-16)과 같다[22][23][24][25].

$$R_{2\ell-1} = X_m^i - X_c^i \quad \cdots (2\text{-}13)$$

$$R_{2\ell} = Y_m^i - Y_c^i \quad \cdots (2\text{-}14)$$

$$A_{2\ell-1,\,k} = \partial X_m^i / \partial C_k \quad \cdots (2\text{-}15)$$

$$A_{2\ell,\,k} = \partial Y_m^i / \partial C_k \quad \cdots (2\text{-}16)$$

여기서, i는 로봇이동 단계 수$(i = 1,\ 2,\cdots,\ n)$, ℓ은 로봇이 이동하는 동안 측정된 데이터의 총 수$(\ell = 1, 2, \ldots i)$, k는 매개변수의 수$(k = 1,2,\cdots,6)$이다. 그리고, R 행렬은 $(2\ell \times 1)$, A 행렬은 $(2\ell \times 6)$크기를 같는다. A 행렬을 수식으로 나타내면 Eq.(2-17)과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial X_m^i}{\partial C_6} \\ \\ \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_1} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_2} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_3} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_4} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_5} & \frac{\partial Y_m^i}{\partial C_6} \end{bmatrix} \quad \cdots (2\text{-}17)$$

여기서,

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_1} = \ 2[C_1F_x^i + C_4F_y^i - C_3F_z^i],$$

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_2} = \ 2[C_2F_x^i + C_3F_y^i + C_4F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_3} = \ 2[-\,C_3F_x^i + C_2F_y^i - C_1F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_4} = \ 2[-\,C_4F_x^i + C_1F_y^i + C_2F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_5} = \ 1\ ,$$

$$\frac{\partial X_m^i}{\partial C_6} = \ 0\ ,$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_1} = \ 2[-\,C_4F_x^i + C_1F_y^i + C_2F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_2} = \ 2[C_3F_x^i - C_2F_y^i + C_1F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_3} = \ 2[C_2F_x^i + C_3F_y^i + C_4F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_4} = \ 2[-\,C_1F_x^i - C_4F_y^i + C_3F_z^i\,],$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_5} = \ 0\ ,$$

$$\frac{\partial Y_m^i}{\partial C_6} = \ 1$$

이다.

2.4 로봇 회전각 추정 모델

2.3절의 매개변수 추정 모델 절차에 의해서 각 카메라에 대한 매개변수 $C_1 \sim C_6$가 얻어지면, 이를 이용하여 목표지점에 대한 로봇의 회전각$\theta_i (= \theta_1, \theta_2, d_3, \theta_4)$을 추정한다. 회전각 추정 모델은 Eq.(2-18)에 정의된 성능지수 $J(\theta_i)$를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J(\theta_i) = \sum_{q=1}^{3} \{ [X_m^q (F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - X_t^q]^2 + [Y_m^q (F_x(\theta_i), F_y(\theta_i), F_z(\theta_i); C_k^q) - Y_t^q]^2 \} \quad \cdots (2\text{-}18)$$

여기서, $q(=1,2,3)$는 카메라의 수, $k(=1,2,...6)$는 매개변수의 수를 나타낸다. 또한 X_t^q와 Y_t^q는 목표지점의 q번째 카메라의 좌표 값을 나타내며, X_m^q와 Y_m^q는 추정된 매개변수 C_k에 근거한 q번째 카메라의 비젼 시스템모델 값을 나타낸다.

Eq.(2-18)에 주어진 성능지수$J(\theta_i)$를 최소화하기 위하여, 2.3절에 설명되어진 매개변수 추정 방법을 회전각 추정 방법에 적용하면 회전각 수정벡터$\Delta\theta$는 Eq.(2-19)에 보여준다[6].

$$\Delta\theta = (B^T W B)^{-1} B^T W R \quad \cdots (2\text{-}19)$$

여기서, 가중행렬 W는 단위행렬을 사용하였으며, 또한 $(2\times q)\times 4$의 크기를 갖는 자코비안 행렬 B는 Eq. (2-20)에 주어지며, $(2\times q)\times 1$의 크기를 갖는 유수벡터 R 은 Eq.(2-21)과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial d_3} & \frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad \cdots (2\text{-}20)$$

$$R = \begin{bmatrix} X_m^q - X_t^q \\ \\ Y_m^q - Y_t^q \end{bmatrix} \quad \cdots (2\text{-}21)$$

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

$$\frac{\partial X_m^q}{\partial \theta_i} = \left\{ [(C_1^q)^2 + (C_2^q)^2 - (C_3^q)^2 - (C_4^q)^2] \frac{\partial F_x}{\partial \theta_i} + 2(C_2^q C_3^q + C_1^q C_4^q) \frac{\partial F_y}{\partial \theta_i} \right.$$
$$\left. + 2(C_2^q C_4^q - C_1^q C_3^q) \frac{\partial F_z}{\partial \theta_i} \right\}$$

$$\frac{\partial Y_m^q}{\partial \theta_i} = \left\{ 2(C_2^q C_3^q - C_1^q C_4^q) \frac{\partial F_x}{\partial \theta_i} + [(C_1^q)^2 - (C_2^q)^2 + (C_3^q)^2 - (C_4^q)^2] \frac{\partial F_y}{\partial \theta_i} \right.$$
$$\left. + 2(C_3^q C_4^q + C_1^q C_3^q) \frac{\partial F_z}{\partial \theta_i} \right\}$$

로봇의 회전각 추정도 매개변수 추정과 같이 Eq.(2-20)에 주어진 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 계산한다.

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta \quad \cdots (2\text{-}22)$$

이리하여, Eq.(2-22)에서 구해진 로봇 회전각 $\theta_1 \sim \theta_4$를 사용하여 로봇 점 배치작업 실험을 행한다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험 장치는 비젼 시스템, 로봇 시스템 및 Host PC 크게 3 부분으로 구분하였으며, 이에 대한 세부사양은 Table 3-1에서 보여준다. 실험 장치의 전체적인 구성은 Photo 1과 Fig. 3-1에 나타내었다.

Table 3-1 Specification of experimental apparatus

System	Specification	
Vision system	CCD camera	Sony XC-ES51
		Avenir TV zoom lens
	Vision board	MATROX black-white meteor2-MC4
		Resolution : 640 ×480
		Image level : 256
		Maximum sampling rate : 30MHz
	Library	Matrox Imaging Library 8.0DEV
Robot system	Robot	Samsung SM7 4axis Robot
	Robot controller	MMC-BDPO41PNB
PC	● MB800V for industry	
	● CPU : 2.8GHz	
	● 512MB	

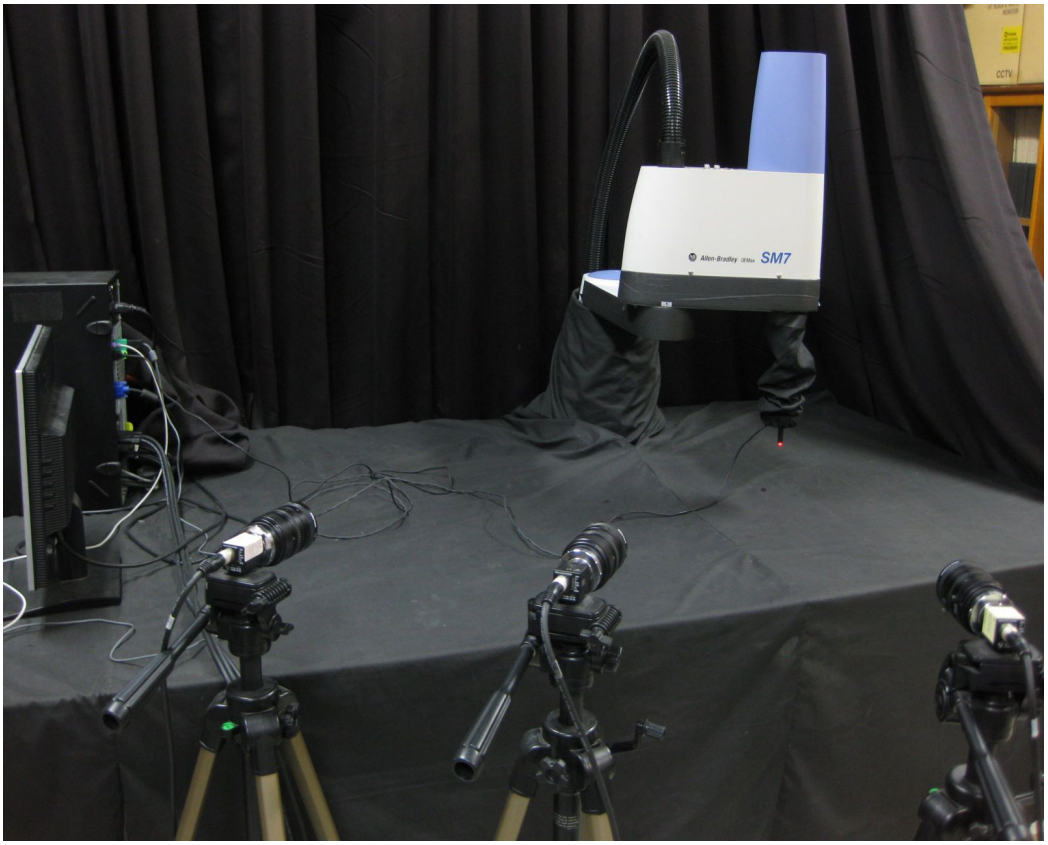


Photo 1 Experimental apparatus

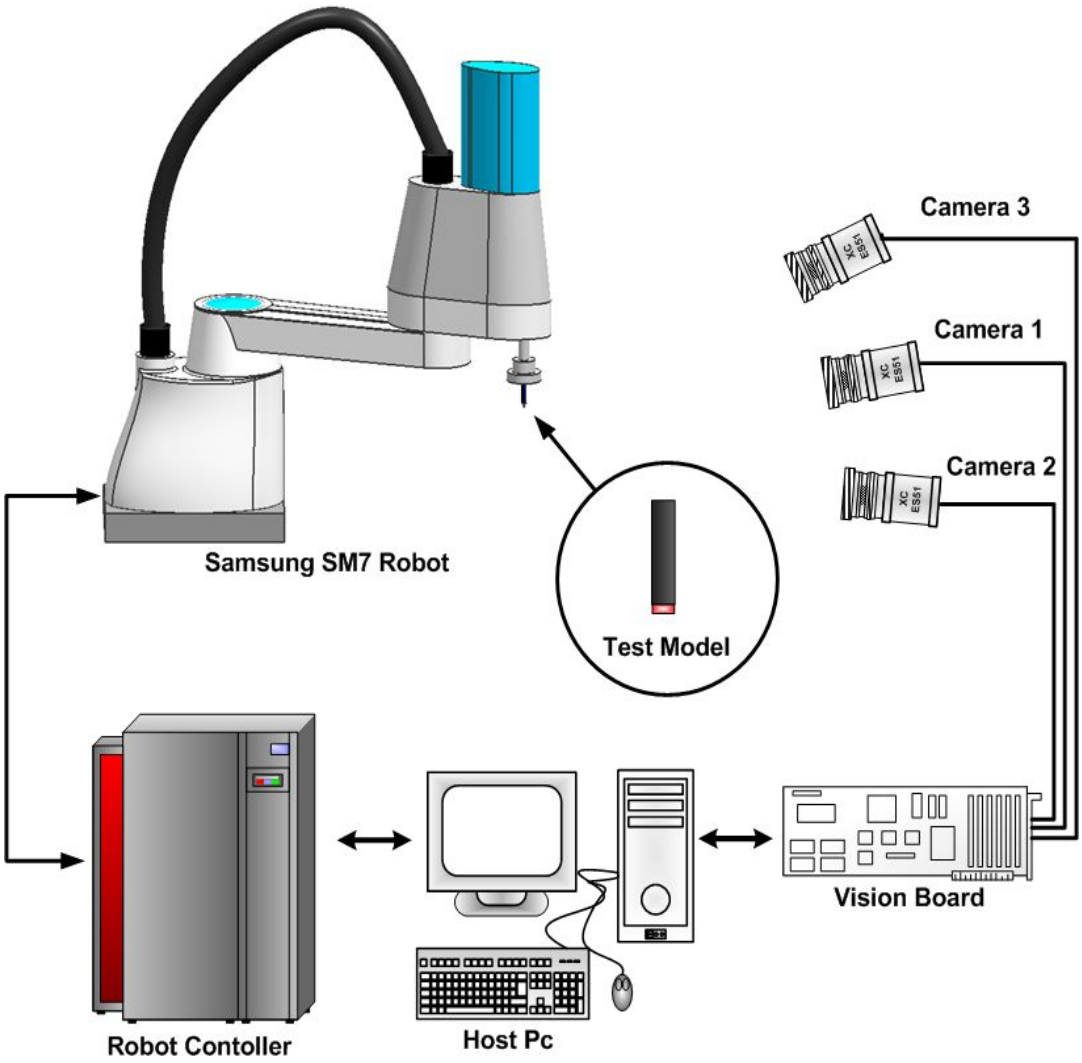


Fig. 3-1 Experimental set-up

3.1.2 시험 모형

시험 모형은 로봇의 허용 중량과 제작 시에 발생할 수 있는 오차와 비젼 데이터 획득 시 발생할 수 있는 오차를 줄이도록 플라스틱 봉과 LED를 조합하여 제작하였고, Fig. 3-2와 Photo 2는 각각 시험 모형의 치수와 실제 형상을 보여준다.

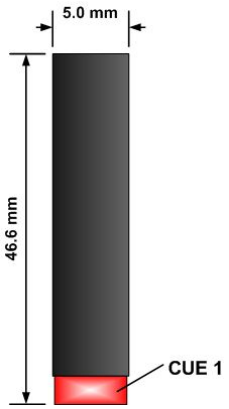


Fig. 3-2 Dimensions of 1-cue test model used for experiment

Photo 2 1-cue test model for experiment

3.2 실험 방법

3.2.1 로봇 운동궤적

Fig. 3-3은 본 실험에서 사용된 삼성 SM7 로봇의 운동궤적을 보여주며, 로봇이 목표지점에 도달하기 까지 20이동단계로 설정하였다. 로봇이 운동궤적을 따라 이동하는 동안 장애물 출현 등으로 인해 CCD카메라로부터 비젼 데이터를 획득하지 못하는 영역을 초기, 중간, 최종 등 3개 장애물영역으로 구분하며, 각 장애물 영역에서 비젼 데이터를 획득하기위해 사용된 카메라들이 장애물에 의해 영향을 받은 카메라 개수의 변화를 3개의 경우로 구분하여 실험 할 수 있도록 로봇 운동궤적을 설정하였다.

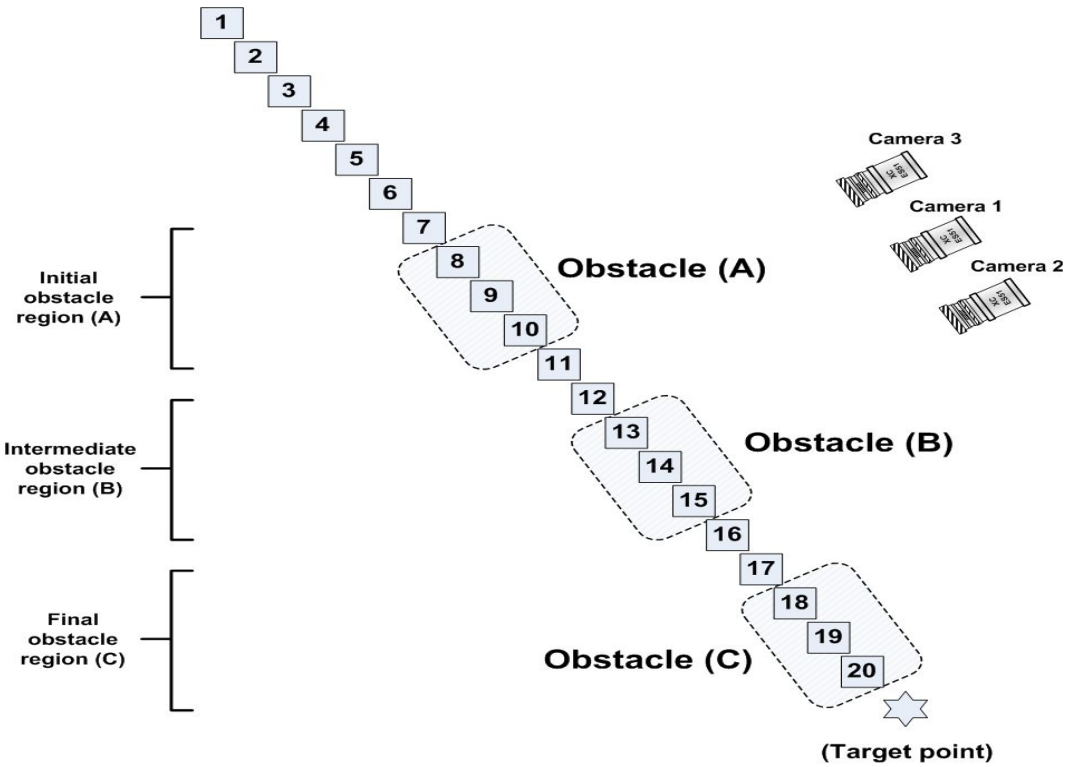


Fig. 3-3 Types of obstacle regions in robot's trajectory

3.2.2 실험 절차

본 실험은 로봇 구동 시 장애물 등에 의해 불연속적인 로봇 운동궤적이 발생되는 경우, 본 논문에서 제시된 로봇 비젼 제어기법이 로봇 점 배치작업에 적용하였을 때 어떠한 영향을 받는지를 실험을 통하여 조사하고자 한다.

Fig. 3-3에서 보여준 것 같이 로봇 운동궤적에 3개 장애물영역(초기:8~10단계, 중간:13~15단계, 최종:18~20단계)을 설정하고, 각 장애물영역에서 데이터획득에 실패한 카메라 개수에 따른 영향을 조사하고자 한다. 또한, 실험의 정확성을 향상시키고자 3개의 카메라를 작업영역에 집중배치 하였다.

실험절차는 Fig. 3-4에 나타낸 것과 같이 크게 9단계로 구분되고 그 내용은 다음과 같다.

(1) 단계 1

시스템 초기화 및 로봇의 말단부분에 부착되어 있는 1개의 큐와 목표지점이 3개의 카메라 이미지 평면상에서 벗어나지 않도록 카메라와 로봇간의 거리, 카메라의 초점 및 방위 등을 임의적으로 조절한다.

(2) 단계 2

시작점에서 목표지점에 다가가는 임의의 로봇의 운동궤적을 결정하며, 초기구간인 장애물영역 A, 중간구간인 장애물영역 B와 최종구간인 장애물영역 C를 설정한다.

(3) 단계 3

3개의 카메라를 사용하여 1개의 목표지점의 비젼 데이터를 각각 획득한다.

(4) 단계 4

로봇이 임의의 운동궤적을 따라 이동시 장애물영역 A, 장애물영역 B와 장애물영역 C의 각각에 대해, 처음에는 1개의 카메라에서 비젼 데이터가 획득되지 않는 경우(Case 1), 2개의 카메라에서 데이터를 획득하지 못한 경우(Case 2), 마지막은 3개의 카메라 모두 데이터를 획득하지 못한 경우(Case 3)가 나타날 수 있도록 실험장치를 구성한다.

(5) 단계 5

로봇을 단계2에서 결정한 임의의 운동궤적을 따라 구동한다.

(6) 단계 6

로봇이 여러 경우의 장애물이 배치된 불연속 운동궤적을 따라 이동할 때 3개의 카메라로부터 비젼 데이터를 획득한다.

(7) 단계 7

카메라로부터 획득된 로봇 끝점 큐의 2차원 비젼 데이터와 비젼 시스템 모델 값 사이의 오차 값을 최소화 하는 매개변수 추정 모델을 사용하여 시각 매개변수 $C_1 \sim C_6$을 구하여 비젼 시스템 모델의 적합성을 조사한다.

(8) 단계 8

단계 7에서 추정한 6개의 시각 매개변수 $C_1 \sim C_6$를 사용하여 로봇의 말단부분의 큐에 대한 비젼 시스템 모델과 목표지점의 비젼 데이터사이의 오차를 최소화 하는 회전각 추정모델을 사용하여 로봇 각 축의 회전각을 추정한다.

(9) 단계 9

단계 8에서 추정된 로봇 각 축의 회전각과 로봇의 실제 회전각을 로봇 정기구학 모델에 적용하여 추정된 좌표 값과 실제 좌표 값의 차이를 비교하여, 초기, 중간, 최종 영역의 각각 3경우에 대해 결과를 고찰함으로써 로봇 점 배치작업에 사용된 비젼 제어기법의 실용성을 조사한다.

위에 설명된 실험 절차는 임의의 운동궤적을 로봇이 이동할 때 미리 설정된 1개의 장애물영역만 배치하며, 작업이 끝마치면 다른 영역의 장애물을 배치하여 단계4 ~단계9를 반복하여 실험을 행한다.

장애물 출현 시 목표지점에 도착했을 때 로봇 실제 위치 값과 모델 추정 값을 비교하기 위해 사용된 평균오차는 rms방법을 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$e_{avg} = \sqrt{\frac{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}{3}} \qquad \cdots (3\text{-}1)$$

여기서, e_x는 x성분 오차, e_y는 y성분오차, e_z는 z성분 오차를 나타낸다.

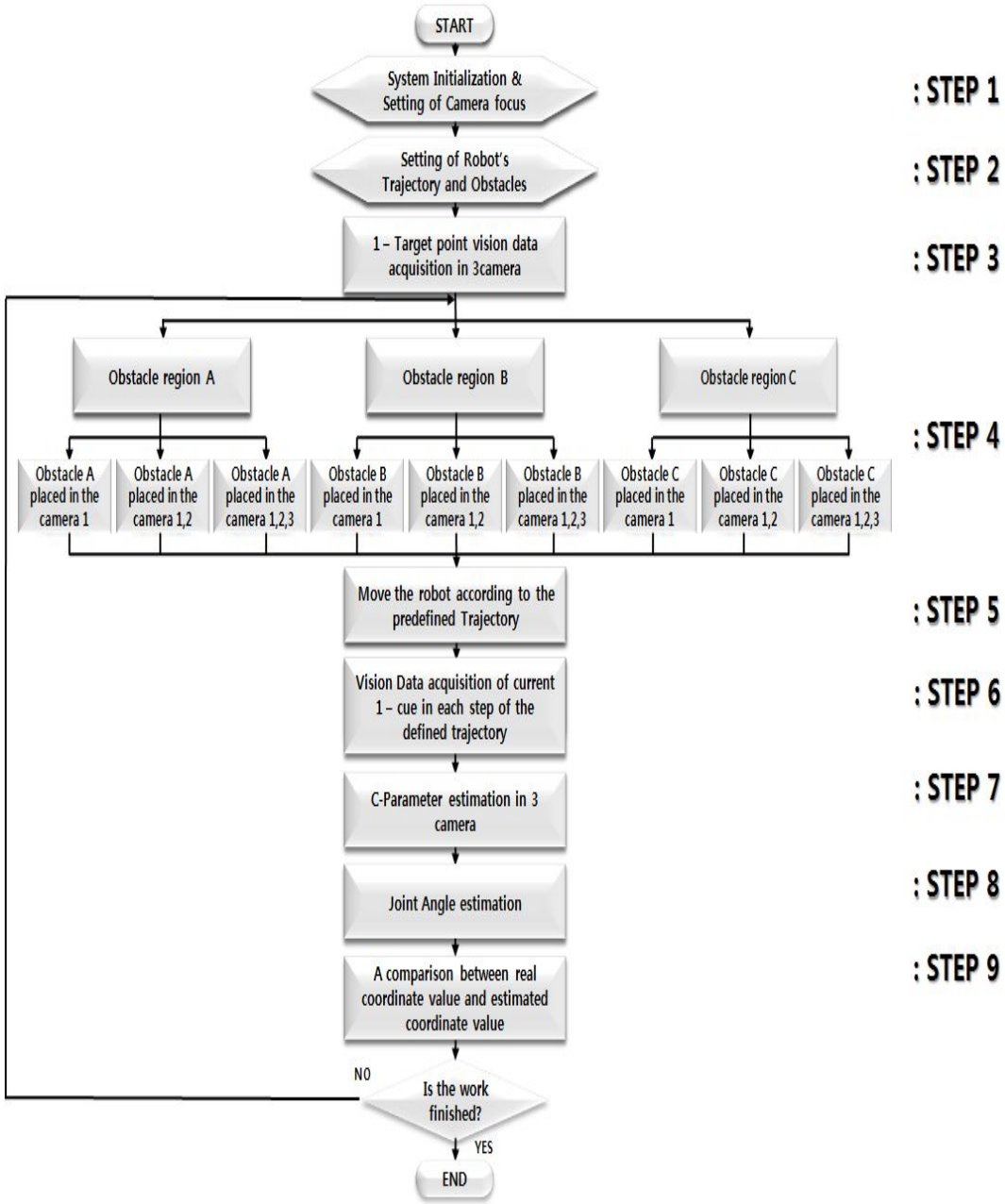


Fig. 3-4 Experimental procedure for vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory

제 4 장 로봇 비젼 제어기법 실험결과

4.1 장애물영역이 존재하지 않는 경우

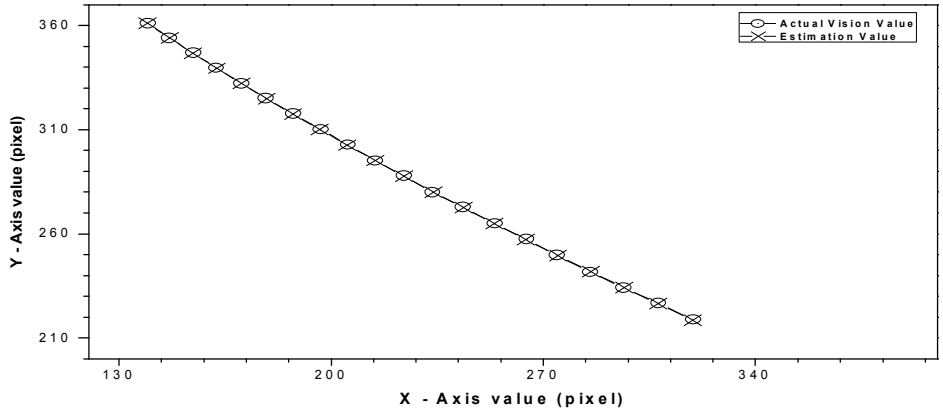
본 실험은 제시된 비젼 제어기법의 실용성을 보이기 위해 로봇의 끝점에 존재한 큐가 장애물영역이 없는 연속적인 운동궤적을 따라 목표지점으로 이동할 때 각각의 카메라에 대해 매개변수 추정 모델의 적합성 및 로봇 점 배치작업 실험을 수행하였다.

4.1.1 비젼 시스템 모델 적합성

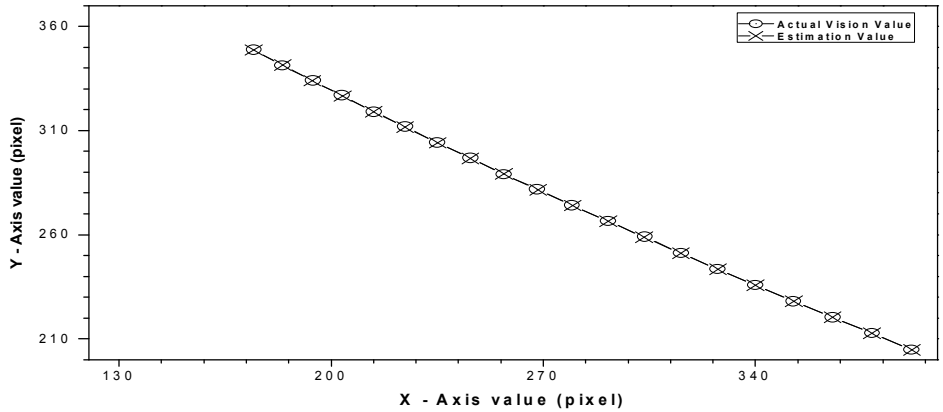
로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m떨어져 작업영역에 집중배치 된 3개 카메라에 대해 로봇 끝점 큐가 장애물영역이 없는 20단계의 연속적인 운동궤적을 따라 목표지점으로 움직이는 동안, 이때 카메라로부터 얻어진 20단계의 실제 비젼 데이터와 3대 카메라에 대해 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-1의 6개 매개변수에 근거를 둔 비젼 시스템 모델의 추정된 결과 값을 비교하여 Fig. 4-1에 제시하였다.

Fig. 4-1에서 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 각각 나타내며, 각 그림에서 ○는 20단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 동안 비젼 시스템을 이용하여 측정된 실제 비젼 데이터이고, 부호 ✡는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

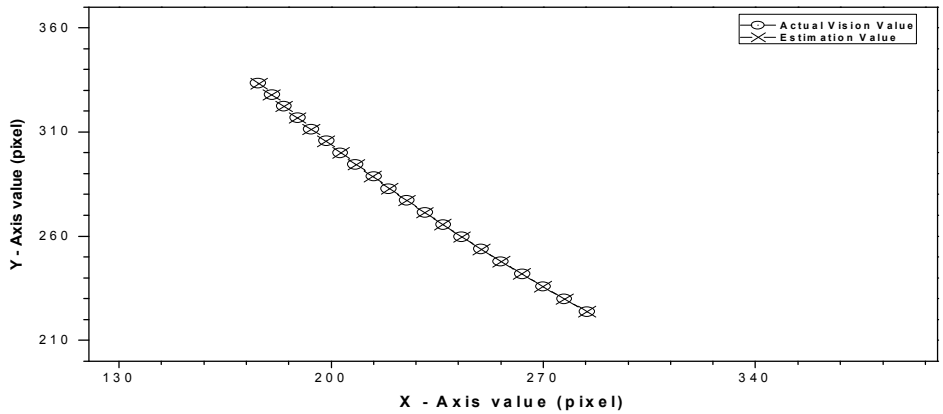
장애물영역이 존재하지 않는 20단계의 연속적인 로봇 운동궤적을 가지는 본 실험은 Fig. 4-1에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정모델의 결과 값은 실제 얻어진 비젼 데이터 값과 ±0.001pixel~±0.352pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-1 For each camera, comparison of the actual and estimated vision system model value in no obstacle region

Table 4-1 For no obstacle, six estimated parameters of each camera

Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29726323	0.38315257	0.18842325
	C2	0.41406745	0.45839119	0.32848477
	C3	0.9894278	0.95320094	0.88611495
	C4	0.9089278	0.88509762	0.81511724
	C5	949.6244507	883.4371338	851.1001587
	C6	-188.8627777	-154.0651398	-122.2458115

4.1.2. 로봇 점 배치작업 실험결과

로봇의 끝점에 있는 큐가 목표지점을 향하여 움직이는 동안 Table 4-1에서 얻어진 매개변수 C를 근간으로 로봇 회전각 추정 모델에서 계산된 회전각을 이용하여 로봇 점 배치작업을 수행하였다.

본 실험은 로봇을 장애물이 없는 연속적인 운동궤적을 따라 점 배치작업을 수행하기위해 로봇이 목표지점으로 이동하였을 때 실제 목표지점과의 차이를 비교함으로서, 향후 3개의 장애물영역에서 로봇이 불연속적인 운동궤적을 따라 목표지점으로 향하는 로봇 점 배치 실험 시, 점 배치작업 실험의 표준 비교 군으로 활용하고자 행하였다.

장애물영역이 없는 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값과 실제 목표지점의 좌표 값을 비교 하여 Table 4-2에 나타내었다.

결과적으로 X축에서 -0.130mm, Y축에서 -0.082mm Z축에서 0.708mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였으며, 평균 ±0.418mm의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었다.

Table 4-2 For no obstacle, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error(mm)
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated value with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418

4.2 장애물영역이 존재하는 경우

본 실험은 로봇의 끝점에 위치한 큐가 3개의 장애물영역에서 불연속적인 로봇운동궤적을 따라 이동할 때 각각의 카메라에 대해 매개변수 추정모델의 적합성 및 로봇 점 배치작업의 실용성을 보이고자, 장애물영역 A에 3개의 경우를 설정하였으며, 장애물영역 B와 영역 C에도 각각 3개의 경우를 설정하였다.

실험을 위하여 각각의 카메라를 통해 얻은 비젼 데이터를 매개변수 추정모델에 적용하여 각각의 카메라에 대한 6개의 시각 매개변수($C_1 \sim C_6$)를 계산하고 계산된 시각 매개변수를 비젼 시스템 모델에 적용하여 추정 모델 값을 구한다. 마지막으로 계산된 매개변수를 회전각 추정모델에 적용하여 추정된 로봇 회전각을 이용하여 로봇 점 배치작업 실험을 행하였다.

4.2.1 초기 장애물영역 A가 존재하는 경우

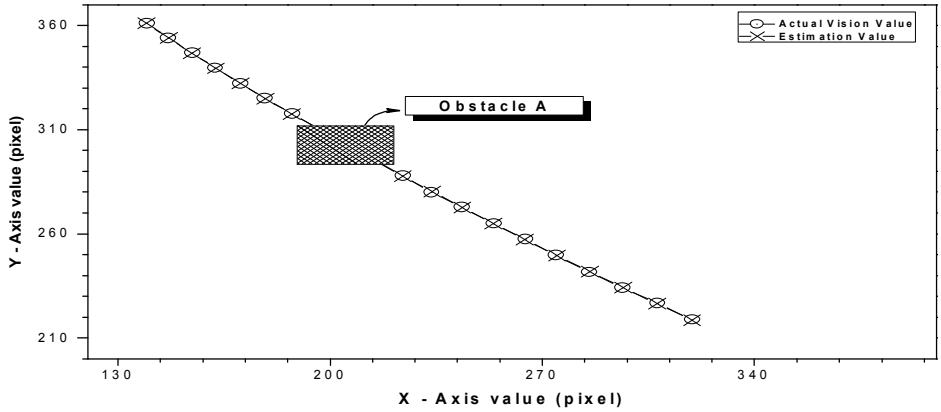
가. 비젼 시스템 모델 적합성

(1) 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

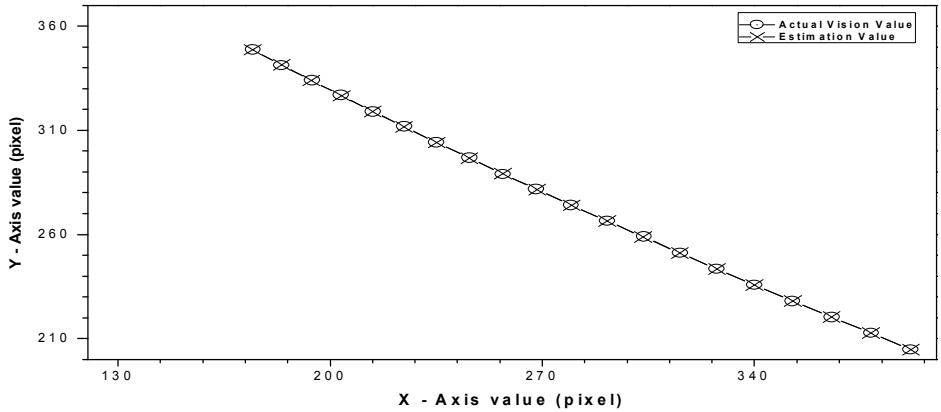
로봇의 끝점 큐가 Fig. 3-3에서 보여준 것 같이 8~10단계에 장애물영역 A가 있는 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적을 움직이는 동안 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 3대의 카메라를 집중배치 하였다. 3개의 카메라 중 camera 1은 장애물영역 A에 의하여 얻지 못한 비젼 데이터를 제외한 17단계 비젼 데이터, camera 2와 3은 20단계에서 얻어진 모든 비젼 데이터를, 매개변수 추정모델을 이용하여 구해진 Table 4-3의 매개변수에 근거를 둔 비젼 시스템 추정모델 값과 비교하여 Fig. 4-2에 제시하였다.

Fig. 4-2에서 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 각각 나타내며, 각 그림에서 ○는 17단계와 20단계의 로봇이 이동하는 경로를 비젼 시스템을 이용하여 측정된 실제 데이터이고 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

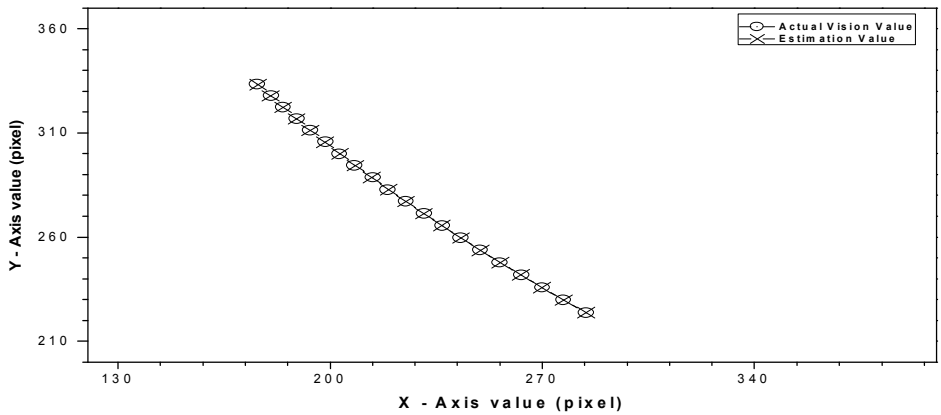
장애물영역 A에 의하여 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우를 가지는 본 실험은 Fig. 4-2에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정모델 값은 실제 측정된 비젼 데이터와 비교한 결과 ±0.002pixel~±0.316pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-2 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 1

Table 4-3 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 1

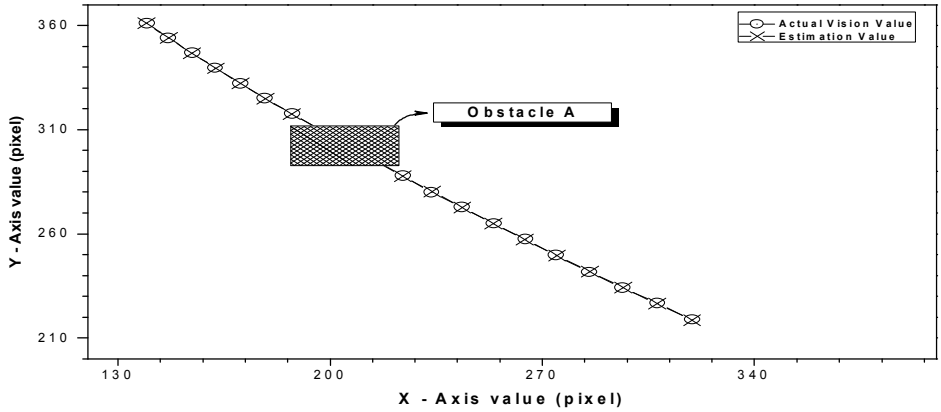
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29544234	0.38315263	0.18842325
	C2	0.41230705	0.4583911	0.32848483
	C3	0.996544	0.95320106	0.88611484
	C4	0.912292	0.88509768	0.81511724
	C5	962.4054565	883.4370117	851.1001587
	C6	-194.2825623	-154.0647583	-122.2456741

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

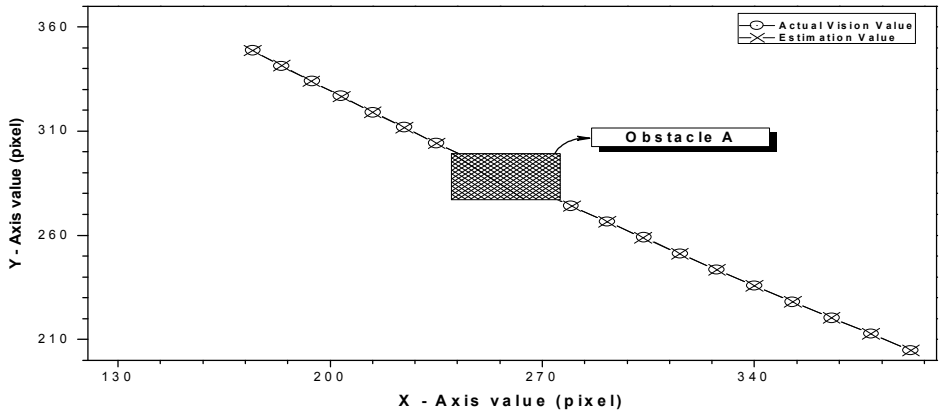
Fig. 3-3의 8~10단계에 장애물영역 A가 있는 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적에서 로봇 끝점 큐가 움직이는 동안, 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 집중배치 된 3개의 카메라 중 camera 1과 2는 장애물영역 A가 존재한 8~10단계에서 비젼 데이터를 얻지 못하고 camera 3은 모든 단계에서 비젼 데이터를 획득하였다. Table 4-4에서 보여준 것 같이 각 카메라에 대해 매개변수 추정모델을 통하여 얻어진 매개변수 C_k를 이용한 비젼 시스템 추정모델 값을 실제 얻어진 비젼 데이터 값과 비교하여 Fig. 4-3에 제시하였다.

(a)는 camera 1, (b)와 (c)는 각각 camera 2와 camera 3에 대한 결과를 나타내는 Fig.4-3에서 ○는 17단계와 20단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 추정 경로를 비젼 시스템을 이용한 측정된 실제 비젼 데이터, 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

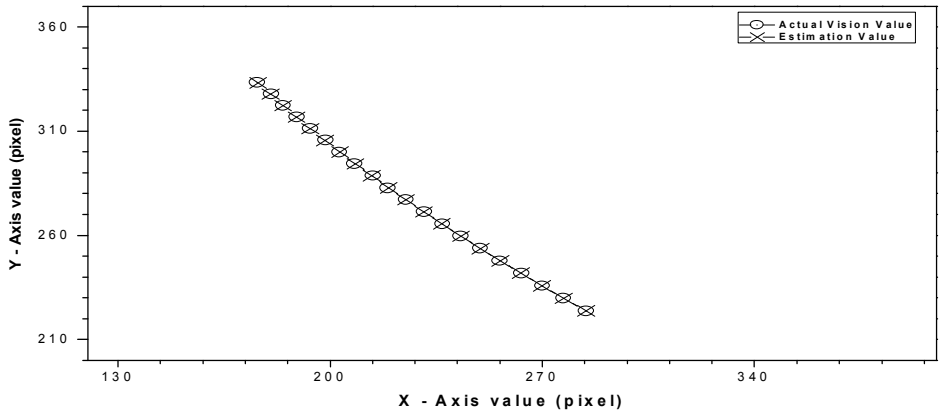
Fig. 4-3에서 보여준 것과 같이 장애물영역 A에 의하여 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 비젼 시스템 추정모델 값은 실제 얻어진 비젼 데이터 값과 비교하면 ±0.002pixel~±0.319pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-3 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 2

Table 4-4 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 2

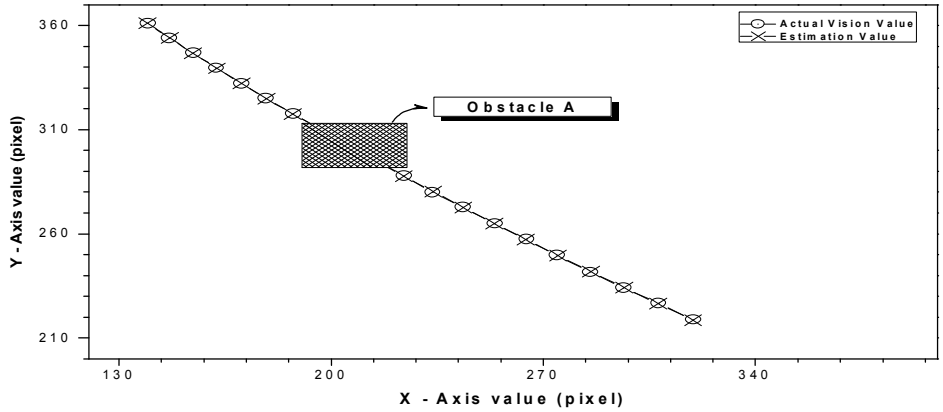
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29544234	0.3836982	0.18842322
	C2	0.41230705	0.45927122	0.32848483
	C3	0.996544	0.95133924	0.88611513
	C4	0.912292	0.88404226	0.81511736
	C5	962.4054565	879.571167	851.1003418
	C6	-194.2825623	-153.1468658	-122.245903

(3) 3개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

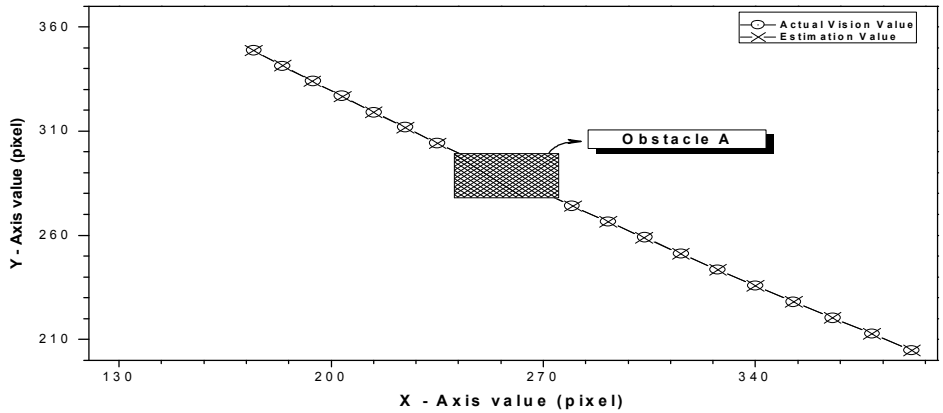
Fig. 3-3에서 보여준 장애물영역 A에서 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적을 로봇이 이동하는 동안 3대의 카메라는 case 1과 case 2같이 작업영역에 집중배치하였다. 3개의 모든 카메라에서 장애물영역 A에 의하여 얻지 못한 3단계의 비젼 데이터를 제외한 17단계에서 비젼 데이터를 획득하였다. 각 카메라에서 얻어진 비젼 데이터를 가지고 매개변수 추정모델을 이용하여 추정된 각 카메라 매개변수는 Table 4-5에 제시하였다. Fig 4-4는 추정된 매개변수 값을 이용한 비젼 시스템 추정모델 값과 실제 비젼 데이터를 비교한 결과를 보여준다.

Fig. 4-4에서 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 각각 나타내며, 각 그림에서 ○는 17단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 추정 경로를 비젼 시스템을 이용한 측정된 실제 비젼 데이터이고 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 비젼 시스템 추정모델의 결과 값이다.

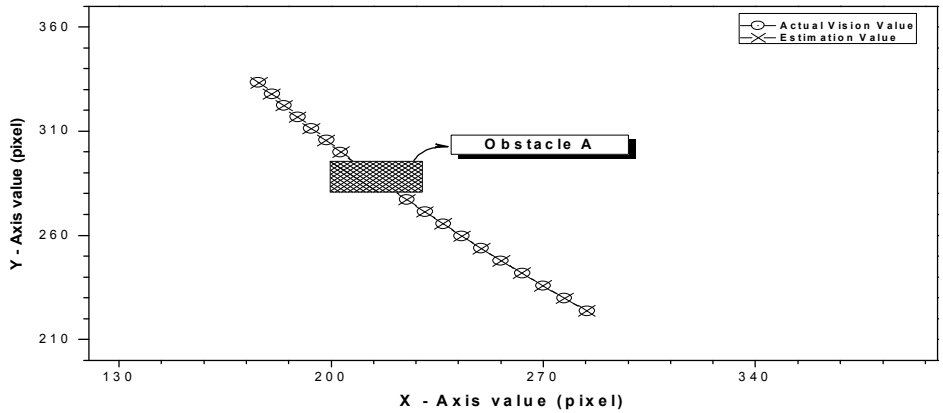
3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우를 가지는 본 실험에서 비젼 시스템 모델의 추정 값은 획득된 실제 비젼 데이터와 비교하여 ±0.002pixel~±0.295pixel의 정밀도를 Fig. 4-4에서 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-4 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region A with case 3

Table 4-5 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region A with case 3

Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29544234	0.3836982	0.1884868
	C2	0.41230705	0.45927122	0.33040494
	C3	0.996544	0.95133924	0.88309115
	C4	0.912292	0.88404226	0.81336737
	C5	962.4054565	879.571167	845.2733765
	C6	-194.2825623	-153.1468658	-121.9021835

나. 로봇 점 배치작업 실험결과

본 실험은 Fig. 3-3에서 보여준 것과 같이 장애물영역 A가 포함된 불연속적인 로봇 운동궤적을 따라 점 배치작업을 수행하고자 로봇을 목표지점으로 이동하였을 때 장애물의 영향을 받은 카메라 개수에 따라 실제 목표지점과의 차이를 비교함으로서 장애물이 제시된 비젼 제어기법에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

(1) 1 개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

로봇 끝점의 큐가 장애물영역 A를 통과하여 목표지점을 향하여 이동하는 동안 장애물이 1개의 카메라에만 영향을 미치는 경우에 대해 점 배치 작업 실험을 행하였다. 이 실험을 위해 필요한 로봇 회전각은 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-3의 결과를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 계산되어진다.

로봇 운동궤적의 초기 장애물영역 A에서 장애물이 1개의 카메라에 영향을 미치게 배치되었을 경우에 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교하여 Table 4-6에 나타내었다.

장애물영역 A에서 case 1의 로봇 점 배치작업은 X축에서 -0.079mm, Y축에서 -0.053mm Z축에서 0.702mm의 오차를 가지고 수행하였으며, 평균 ±0.409mm의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여

보여주었다. 또한, 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적에서의 평균오차인 ±0.418mm과 비교하여 거의 비슷함을 알 수 있다.

Table 4-6 For case 1 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 1	Ⓒ	559.150	166.762	113.502	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.079	-0.053	0.702	0.409

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

장애물영역 A를 포함한 불연속적인 운동궤적에서 장애물이 2개의 카메라에 영향을 미치는 경우에 대해 매개변수 추정모델을 이용하여 계산된 Table 4-4의 결과를 근간으로, 회전각 추정모델을 사용하여 목표지점의 로봇 회전각을 추정하며, 추정된 로봇 회전각을 사용하여 로봇 점 배치 작업을 수행하였다.

장애물영역 A에서 장애물이 2개의 카메라에 영향을 미치게 배치되었을 경우, 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값에 비교하여 Table 4-7에 나타내었다.

Table 4-7의 실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교 한 결과에서 보여준 것 같이, X축에서 -0.052mm, Y축에서 -0.017mm Z축에서 0.698mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였으며, 평균 ±0.404mm의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었다. 또한, 실험결과 평균오차 ±0.418mm를 갖는 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적과 비교하면 거의 비슷한 오차를 갖는다.

Table 4-7 For case 2 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 2	Ⓒ	559.177	166.798	113.498	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.052	-0.017	0.698	0.404

(3) 3개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

3개의 모든 카메라에 영향을 미치는 장애물영역 A를 통과하여 목표지점으로 로봇이 이동하는 동안 필요한 로봇 회전각은 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-5의 결과를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 계산되었으며, 추정된 로봇 회전각으로 로봇 점 배치작업 실험을 행하였다.

운동궤적의 장애물영역 A에서 장애물이 3개의 모든 카메라에 영향을 미치게 배치되었을 때 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교하여 Table 4-8에 나타내었다.

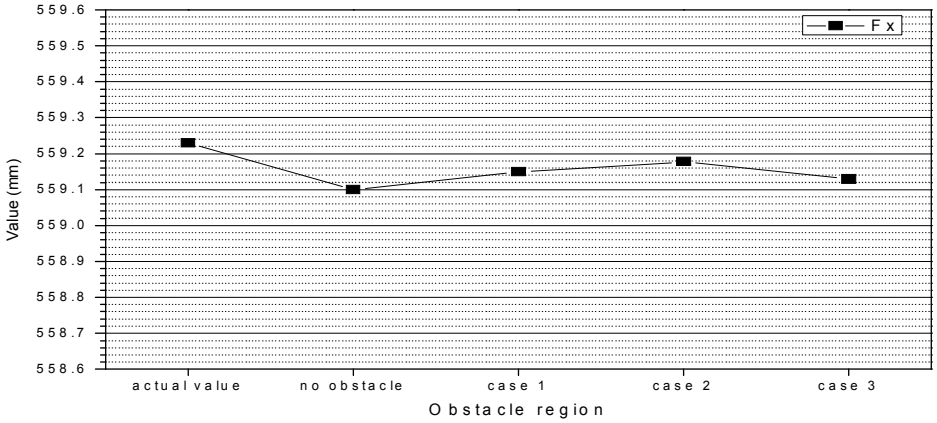
결과적으로 실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교하면 X축에서 -0.1mm, Y축에서 -0.062mm Z축에서 0.707mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였으며, 평균 ±0.414mm의 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었으며, 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적과 비교하면 평균오차가 ±0.418mm로 거의 비슷함을 알 수 있다.

Table 4-8 For case 3 of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

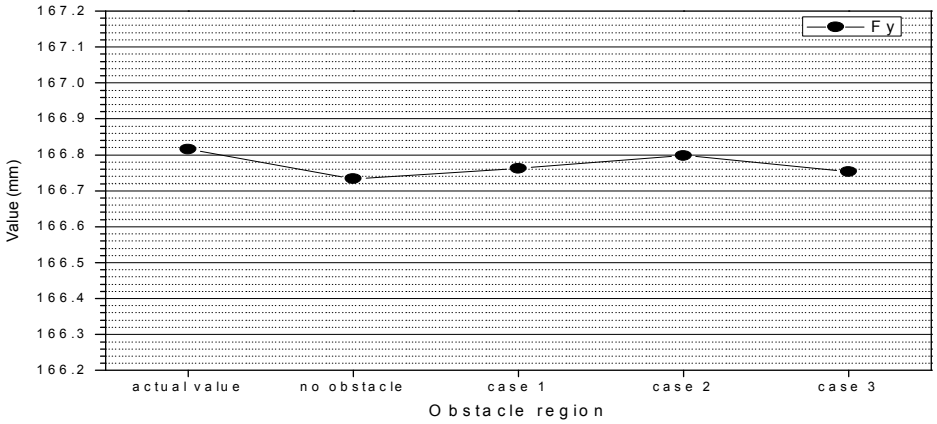
Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 3	Ⓒ	559.129	166.753	113.507	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.1	-0.062	0.707	0.414

Table 4-6, Table 4-7, Table 4-8에서 보여준 장애물영역 A에 설정된 3경우의 로봇 점 배치작업 실험에서 추정된 로봇 회전각의 좌표 값들을 실제 회전각의 좌표 값과 장애물영역이 없는 경우 추정된 회전각의 좌표 값과 비교하여 각 성분별로 Fig. 4-5에 나타내었다.

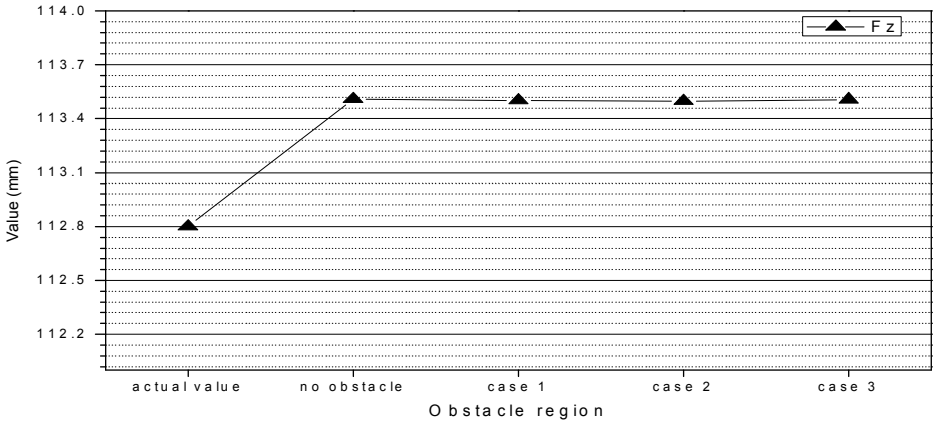
Fig 4-5에서 (a)는 Fx, (b)는 Fy, (c)는 Fz를 나타내며, 초기 장애물영역 A에서 장애물에 의하여 비젼 데이터를 획득하지 못하는 카메라의 개수가 늘어나는 경우에 거의 동일한 결과를 나타낸다. 또한, 장애물이 없는 경우와 같이 불확실한 작업환경에서 충분히 안정적으로 로봇 점 배치작업을 수행하였다.



(A) Fx



(B) Fy



(C) Fz

Fig. 4-5 For each case of obstacle region A, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

4.2.2. 중간 장애물영역 B가 존재하는 경우

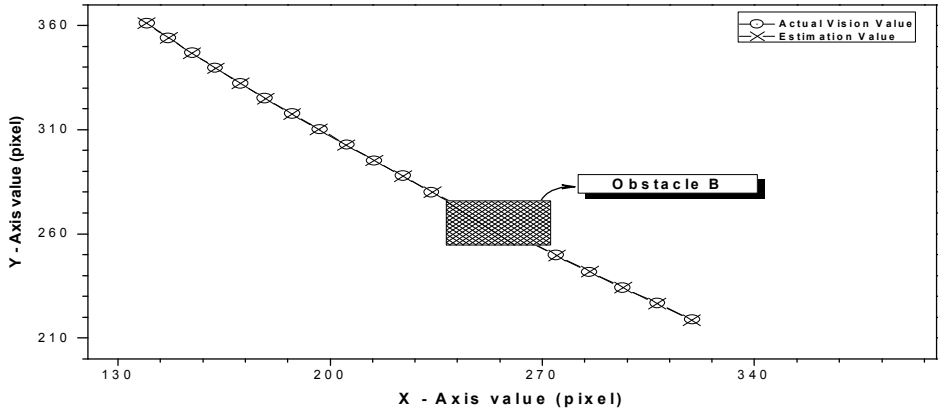
가. 비젼 시스템 모델 적합성

(1) 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

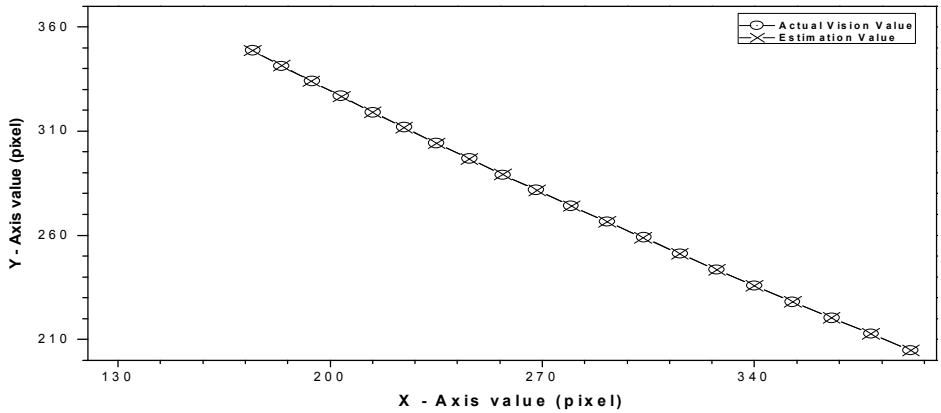
로봇이 Fig. 3-3에 보여준 것과 같이 20단계의 로봇 운동궤적에서 13~15단계에 장애물영역 B가 있는 임의의 불연속적인 운동궤적을 움직이는 동안 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 3대의 카메라를 집중배치 하였다. 3개의 카메라 중 camera 1에는 장애물영역 B가 존재한 13~15단계에서 비젼 데이터를 얻지 못하고 camera 2와 3은 모든 단계에서 비젼 데이터를 획득하였다. Fig. 4-6은 Table 4-9에서 보여준 것 같이 각 카메라에 대해 매개변수 추정모델을 통하여 얻어진 매개변수 C_k를 이용한 비젼 시스템 추정모델 값을 실제 얻어진 비젼 데이터 값과 비교 한 결과를 보여준다.

Fig. 4-6에서 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 각각 나타낸다. 각 그림에서 ○는 로봇이 이동하는 동안 비젼 시스템을 이용해 얻은 실제 비젼 데이터이며, 부호 ×는 비젼 시스템 모델을 통해 추정된 추정 값이다.

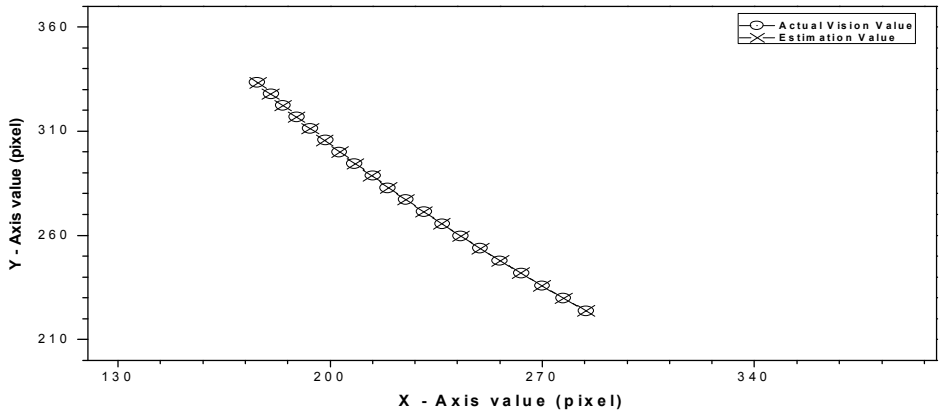
또한, 비젼 시스템 추정모델의 결과 값은 실제 비젼 시스템을 이용하여 얻어진 값과 비교하여 ±0.002pixel~±0.326pixel의 정밀도를 가짐을 Fig. 4-6에서 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-6 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 1

Table 4-9 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 1

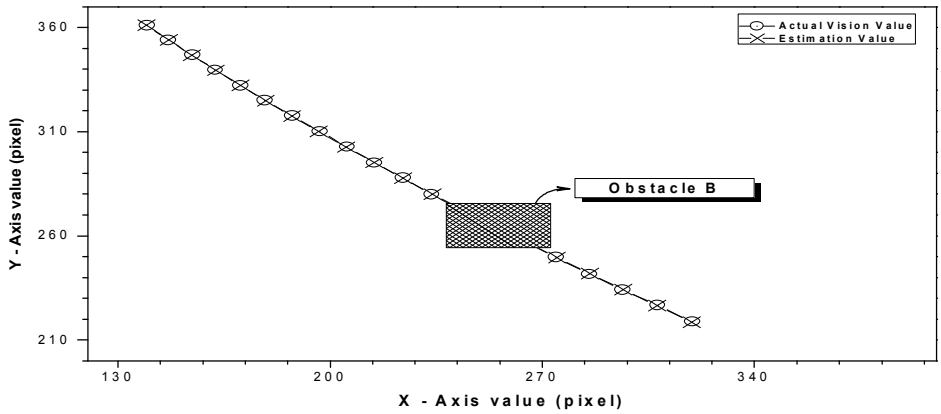
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29767594	0.3831524	0.18842325
	C2	0.41241777	0.45839122	0.3284848
	C3	0.9897359	0.95320141	0.88611495
	C4	0.90968496	0.8850978	0.8151173
	C5	952.0198364	883.4378662	851.0999146
	C6	-186.8059845	-154.0657349	-122.2456741

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

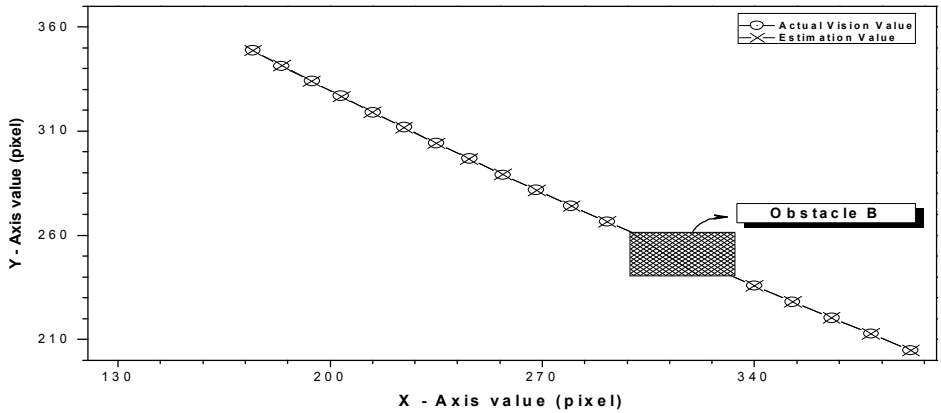
Fig. 3-3의 로봇 운동궤적에서 보여준 것 같이 장애물영역 B를 포함한 불연속적인 운동궤적을 로봇이 이동하는 동안, 3대의 카메라는 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 집중배치 하였다. Camera 1과 2에는 장애물영역 B에 의하여 얻지 못한 13~15단계의 비젼 데이터를 제외한 나머지 비젼 데이터를 획득하였고, case 1과 같이 camera 3은 모든 단계에서 비젼 데이터를 획득하였다. Table 4-10은 각 카메라에서 얻어진 비젼 데이터를 가지고 매개변수 추정모델을 이용하여 추정된 각 카메라 매개변수를 제시하였으며, Fig. 4-7은 추정된 각각의 카메라에 대한 6개의 매개변수 값을 이용한 비젼 시스템 추정모델 값과 실제 비젼 데이터를 비교한 결과를 보여준다.

Camera 1, camera 2와 camera 3에 대한 결과는 Fig. 4-7에서 보여주며, 각 그림에서 ○는 장애물영역이 있는 17단계와 장애물영역이 없는 20단계를 로봇이 이동한 경로를 측정한 실제 값이고, 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 비젼 시스템 모델에 의해 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

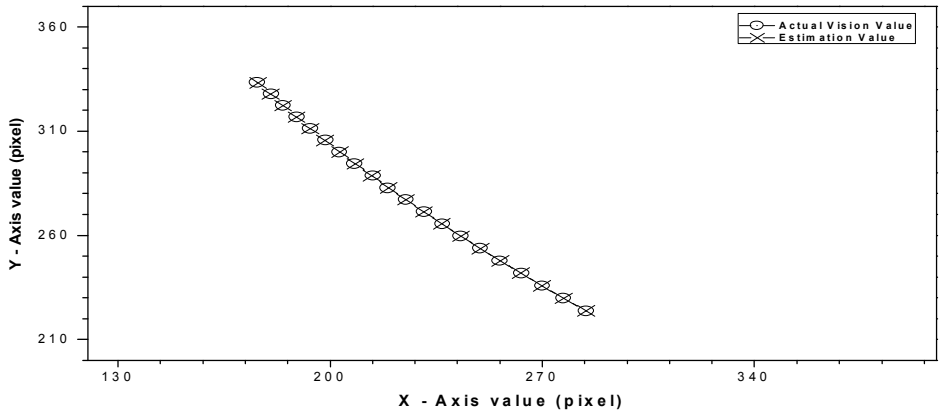
장애물영역 B에 의하여 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우를 가지는 본 실험은 Fig. 4-7에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정모델의 결과 값은 실제 비젼 시스템을 이용하여 얻어진 값과 ±0.002pixel~±0.324pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-7 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 2

Table 4-10 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 2

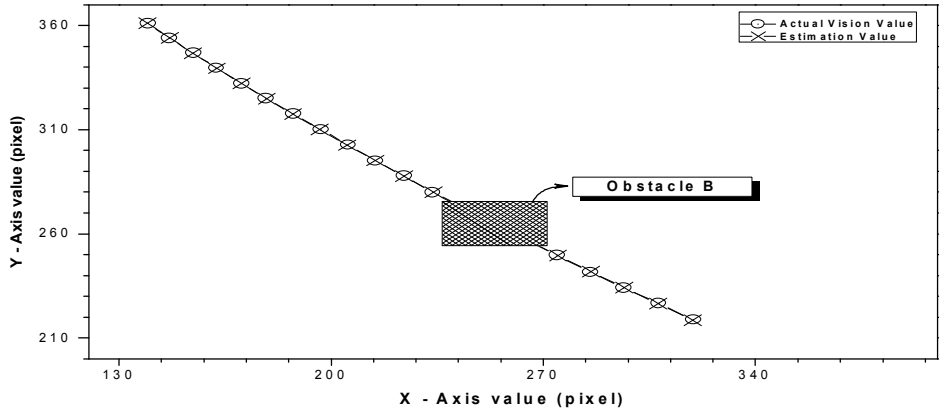
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29767594	0.38209525	0.18842325
	C2	0.41241777	0.45678326	0.32848483
	C3	0.9897359	0.9565323	0.8861149
	C4	0.90968496	0.8869763	0.81511742
	C5	952.0198364	890.4043579	851.1002197
	C6	-186.8059845	-155.7332611	-122.2457581

(3) 3개의 모든 카메라 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

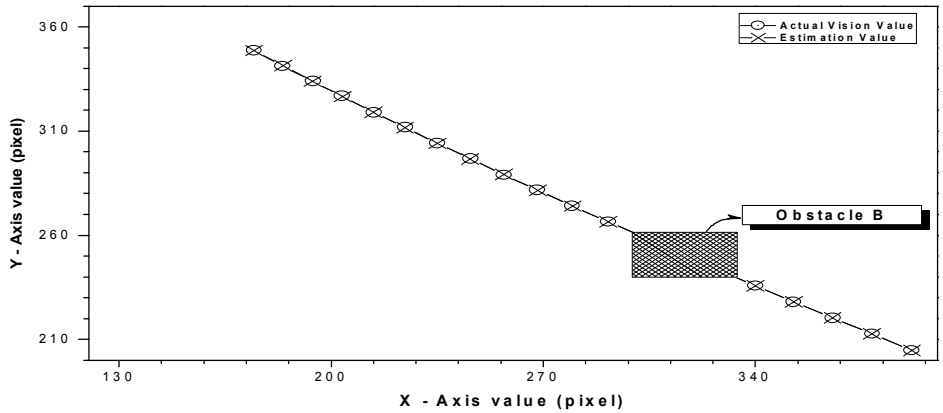
로봇이 Fig. 3-3에서 보여준 13~15단계에 장애물영역 B를 포함한 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적을 따라 이동하고 있다. 이때 사용된 3대의 카메라는 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 집중배치 하였다. 3개의 카메라 모두 장애물영역 B에서 얻지 못한 3단계의 비젼 데이터를 제외한 17단계 비젼 데이터만 획득되며, 매개변수 추정모델을 이용하여 얻어진 Table 4-11의 3개의 카메라의 각각에 대한 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 비젼 시스템 추정모델의 결과 값과 비교하여 Fig. 4-8에 제시하였다.

Fig. 4-8이 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 보여주며, 각 그림에서 ○는 비젼 시스템으로 측정한 실제데이터이고 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 비젼 시스템 모델의 추정 값이다.

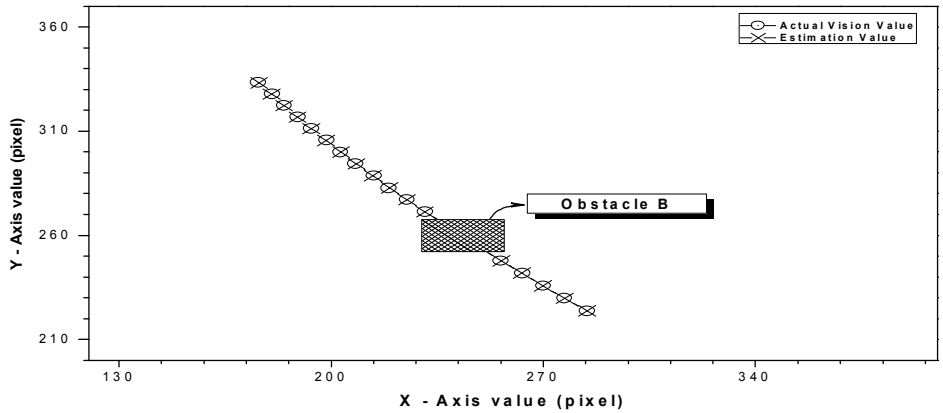
3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우, Fig. 4-8에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정 결과 값은 얻어진 실제 비젼 데이터 값과 ±0.002pixel~±0.327pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-8 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region B with case 3

Table 4-11 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region B with case 3

Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29767594	0.38209525	0.18897673
	C2	0.41241777	0.45678326	0.32783145
	C3	0.9897359	0.9565323	0.88526517
	C4	0.90968496	0.8869763	0.81501681
	C5	952.0198364	890.4043579	850.6452026
	C6	-186.8059845	-155.7332611	-120.527565

나. 로봇 점 배치작업 실험결과

장애물영역 B를 고려한 불연속 운동궤적이 존재하는 경우 로봇이 이 궤적을 따라 목표지점으로 이동 할 때 장애물로 인해 영향을 받는 카메라 개수 변화에 따른 로봇 점 배치작업을 수행하였다. 이로 인해 제안된 로봇 비젼 제어기법이 어떠한 영향을 받는가를 조사하기 위해 본 실험을 행하였다.

(1) 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-9의 시각매개변수를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 목표지점의 로봇 회전각을 추정하며, 여기서 추정된 목표지점의 로봇 회전각을 사용하여 장애물영역 B를 포함한 불연속적인 운동궤적을 따라 로봇 끝점 큐가 이동하는 동안 장애물이 1개의 카메라에 영향을 미치는 경우의 로봇 점 배치 작업을 수행하였다.

장애물이 1개의 카메라에 영향을 미치는 장애물영역 B의 경우, 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교하여 Table 4-12에 나타내었다.

실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교하면 X축에서 -0.142mm, Y축에서 -0.087mm Z축에서 0.709mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행한 결과는

Table 4-12에서 보여준다. 이때 평균 ±0.420mm의 향상된 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 실험을 통하여 보여주었다. 또한 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적에서의 평균오차인 ±0.418mm과 비교하여 거의 비슷함을 알 수 있다.

Table 4-12 For case 1 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 1	Ⓒ	559.087	166.728	113.509	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.142	-0.087	0.709	0.420

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

로봇 끝점 큐가 장애물영역 B를 통과하여 목표지점으로 이동하는 동안 필요한 로봇 회전각은 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-10의 결과를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 계산되었으며, 추정된 로봇 회전각으로 영역내의 장애물이 2개의 카메라에 영향을 미치는 경우의 로봇 점 배치작업 실험을 행하였다.

장애물이 2개의 카메라에 영향을 미치는 경우의 장애물영역 B에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교하여 Table 4-13에 나타내었다.

로봇 회전각의 실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교하면 X축과 Y축에서 -0.152mm, -0.101mm, Z축에서 0.709mm의 차이를 가지며, 평균 ±0.423mm의 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업 실험을 완료하였다. 또한 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적에서 ±0.418mm의 오차와 비교하여 매우 근사함을 알 수 있다.

Table 4-13 For case 2 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 2	Ⓒ	559.077	166.714	113.509	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.152	-0.101	0.709	0.423

(3) 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

로봇이 장애물영역 B를 통과하여 목표지점으로 이동하는 동안 장애물이 3개의 모든 카메라에 영향을 미치는 경우에 대해 점 배치 작업 실험을 행하였다. 이 실험을 위해 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-11의 결과를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 필요한 로봇 회전각이 계산되어진다.

장애물영역 B에서 장애물이 3개의 모든 카메라에 영향을 미치며 배치되었을 경우의 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값과 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값에 비교한 데이터를 Table 4-14에 나타내었다.

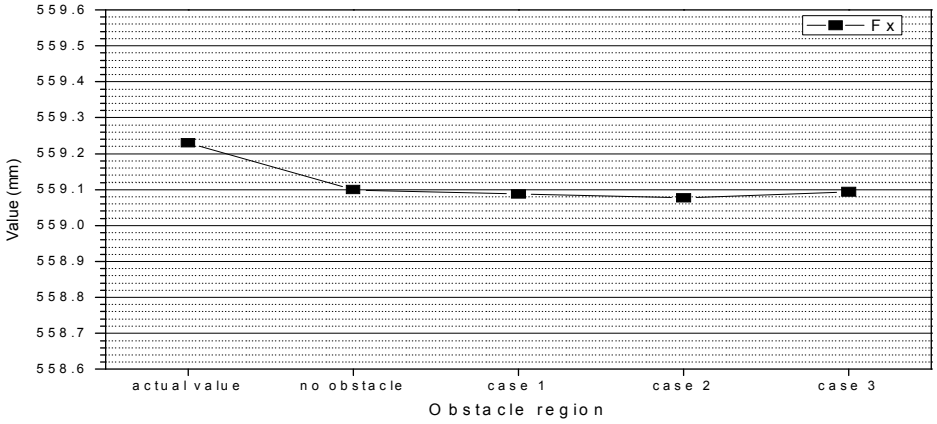
Table 4-14에서 보여준 것 같이 X축에서 -0.136mm, Y축에서 -0.085mm Z축에서 0.707mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였으며, 평균 ±0.419mm의 정밀도를 보여준다. 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적에서 점 배치작업 수행 시 나타난 평균오차 ±0.418mm과 비교하여 거의 비슷함을 알 수 있다.

Table 4-14 For case 3 of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

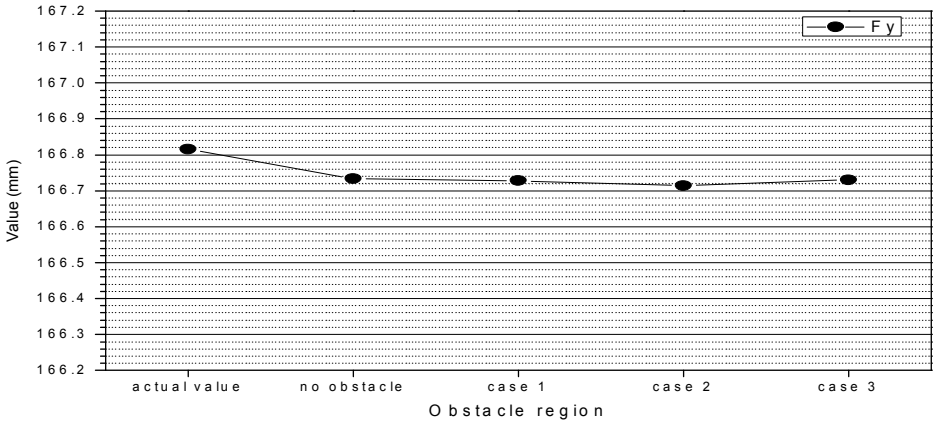
Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 3	Ⓒ	559.093	166.730	113.507	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.136	-0.085	0.707	0.419

장애물영역 B에서 3경우의 로봇 점 배치작업 실험의 결과인 Table 4-12~ Table 4-14에서 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 회전각의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 회전각의 좌표 값과 비교하여 Fig. 4-9에 각 성분별로 나타내었다.

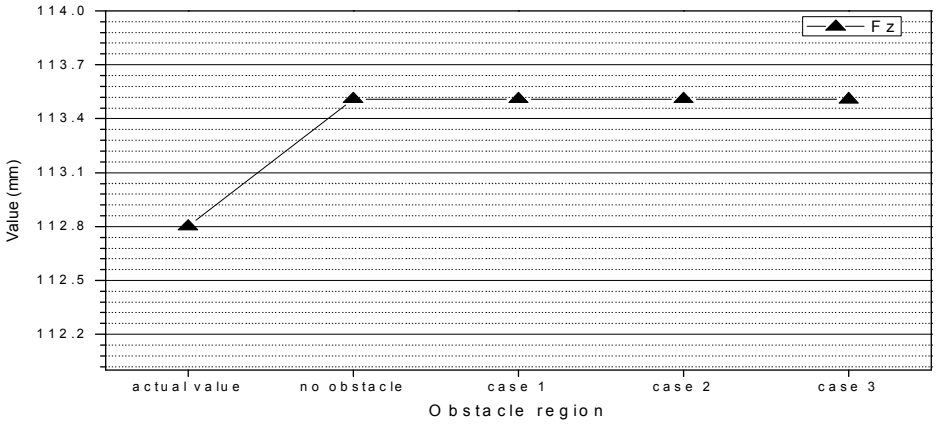
Fig 4-9에서 (a)는 Fx, (b)는 Fy, (c)는 Fz를 나타내며, 초기 장애물영역 A와 같이 중간 장애물영역 B에서도 장애물에 의하여 비전 데이터를 획득하지 못하는 카메라의 개수와 무관하게 거의 동일한 결과를 나타낸다. 또한, 장애물영역이 없는 경우 및 초기장애물영역 A의 경우와 같이 불확실한 작업환경에서 충분히 안정적으로 로봇 점 배치작업을 수행하였다.



(A) Fx



(B) Fy



(C) Fz

Fig. 4-9 For each case of obstacle region B, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

4.2.3 최종 장애물영역 C가 존재하는 경우

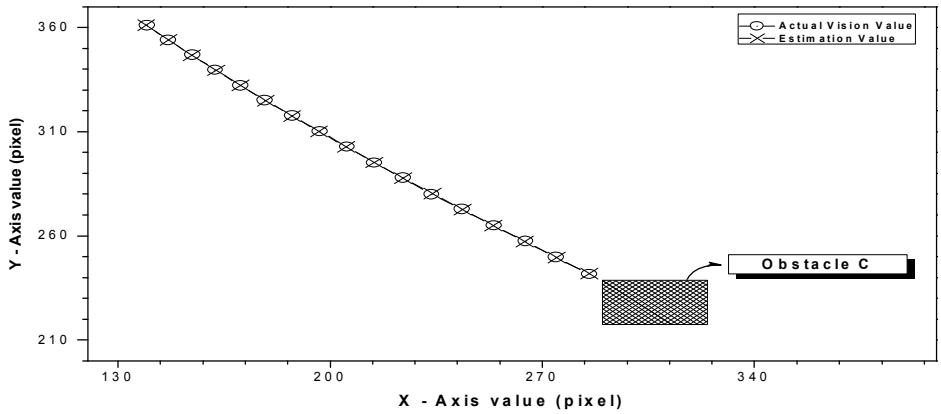
가. 비전 시스템 모델 적합성

(1) 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

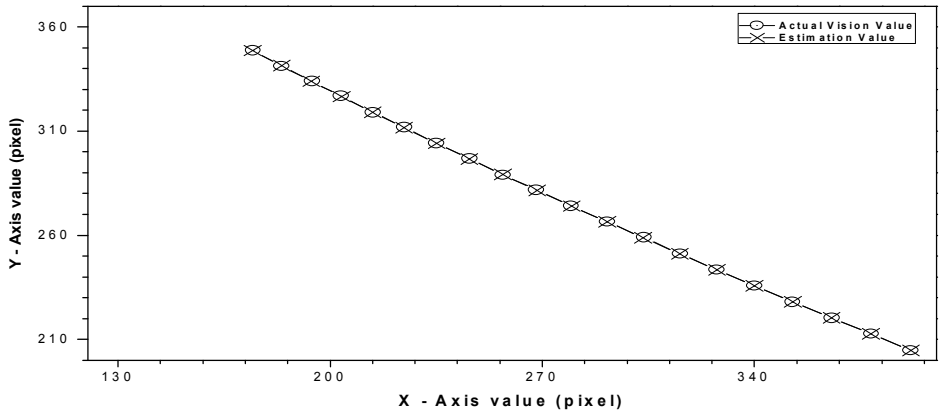
Fig. 3-3에서 보여준 장애물영역 C의 영역 내의 18~20단계 장애물을 포함한 임의의 불연속적인 운동궤적을 로봇이 이동하는 동안 3대의 카메라는 작업영역에 집중배치 하였다. 1개 카메라에서 장애물영역 C에 의하여 얻지 못한 3단계의 비전 데이터를 제외한 17단계 비전 데이터를 획득하였으며, 나머지 2개 카메라는 장애물의 영향을 받지 않고 20단계의 비전 데이터를 획득하였다. 각 카메라에서 얻어진 비전 데이터를 가지고 매개변수 추정모델을 이용하여 추정된 각 카메라 매개변수는 Table 4-15에 제시하였다. Fig 4-10은 추정된 매개변수 값을 이용한 비전 시스템 추정모델 값과 실제 비전 데이터를 비교한 결과를 보여준다.

Fig. 4-10에서 결과를 (a) camera 1, (b) camera 2, (c) camera 3로 나타내며, ○는 장애물영역을 통과하여 이동하는 로봇 추정 경로를 비전 시스템으로 측정된 실제 데이터이고 부호 ×는 Table 4-15의 결과 값을 가지고 계산된 추정 모델의 추정값이다.

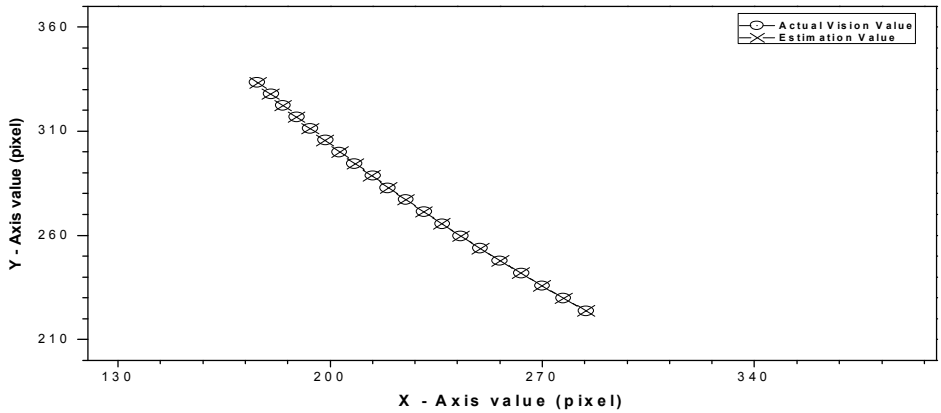
장애물의 영향으로 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우를 가지는 본 실험은 Fig. 4-10에서 보여준 것과 같이 비전 시스템 추정모델의 결과 값은 실제 얻어진 비전 데이터 값을 비교하여 ±0.002pixel~±0.320pixel의 정밀도를 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-10 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 1

Table 4-15 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 1

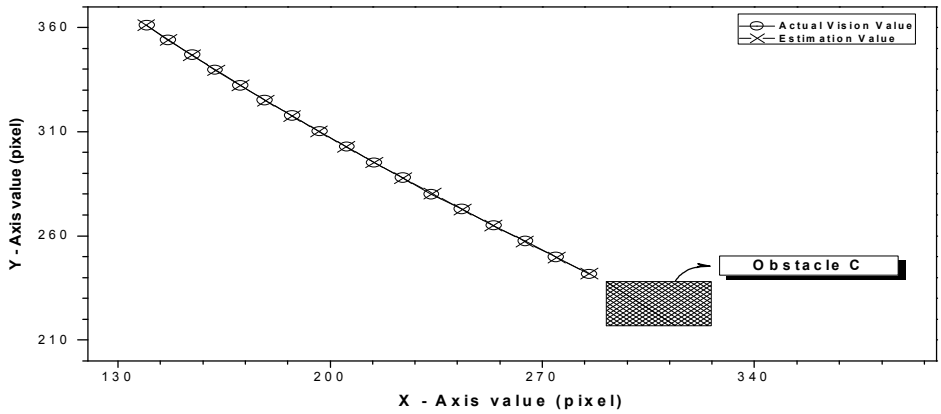
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29236016	0.38315269	0.18842332
	C2	0.43173742	0.45839101	0.32848474
	C3	0.98298204	0.95320094	0.88611495
	C4	0.90049726	0.88509768	0.81511736
	C5	919.9494629	883.4370117	851.1002197
	C6	-208.424118	-154.0646973	-122.245575

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

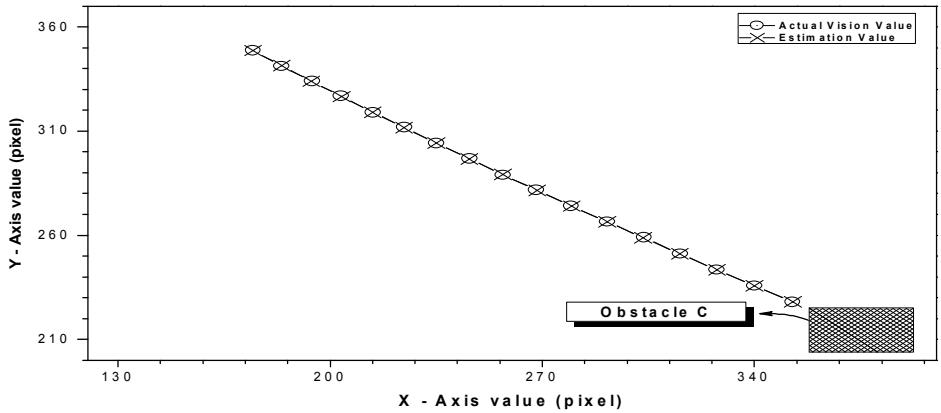
로봇의 끝점 큐가 Fig. 3-3에서 보여준 것 같이 18~20단계에 장애물영역 C가 있는 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적을 움직이는 동안 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 3대의 카메라를 집중배치 하였다. Fig. 4-11은 3개의 카메라 중 camera 1과 3의 장애물영역 C에 의하여 얻지 못한 3단계의 비젼 데이터를 제외한 17단계 비젼 데이터와 camera 3의 20단계에서 얻어진 모든 비젼 데이터를 매개변수 추정모델을 이용하여 얻어진 Table 4-16의 3개의 카메라의 각각에 대한 6개 시각 매개변수에 근거를 둔 비젼 시스템 추정모델의 결과 값과 비교하여 나타내었다.

Fig. 4-11의 (a)는 camera 1, (b)와 (c)는 각각 camera 2와 camera 3에 대한 결과를 각각 나타내며, 각 그림에서 ○는 17단계와 20단계를 걸쳐서 로봇이 이동하는 추정 경로를 비젼 시스템을 이용하여 측정된 실제데이터이고 부호 ×는 6개의 추정된 매개변수를 가지고 계산한 추정 모델의 결과 값이다.

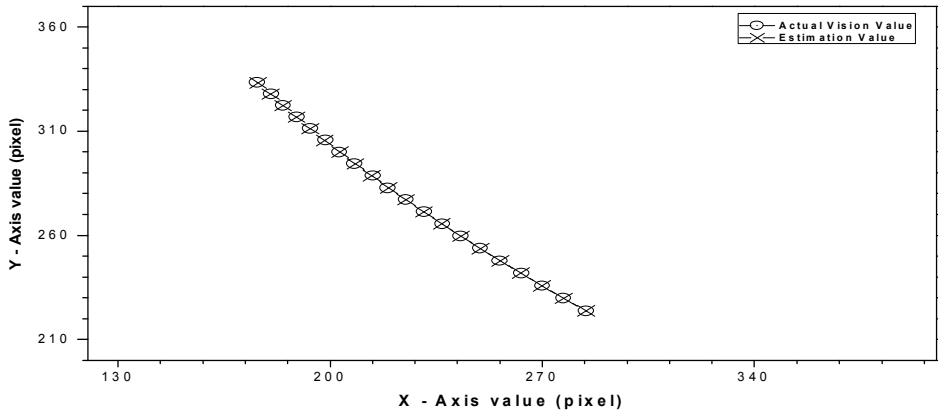
2개의 카메라가 장애물영역에서 데이터 획득을 하지 못한 경우의 실험은 Fig. 4-11에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정모델의 결과 값은 획득된 비젼 시스템의 실제 값과 비교하여 ±0.003pixel~±0.320pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-11 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 2

Table 4-16 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 2

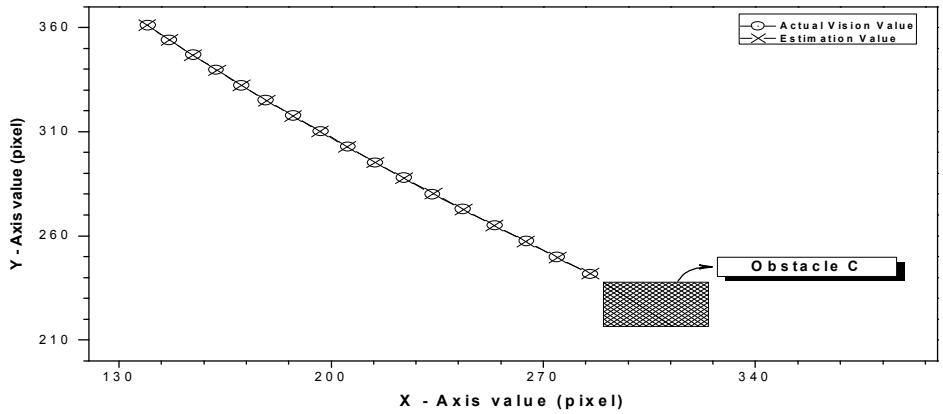
Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29236016	0.37952957	0.18842319
	C2	0.43173742	0.46426046	0.32848477
	C3	0.98298204	0.95654935	0.88611507
	C4	0.90049726	0.88392723	0.8151173
	C5	919.9494629	881.6694946	851.1000366
	C6	-208.424118	-166.9514618	-122.2458572

(3) 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

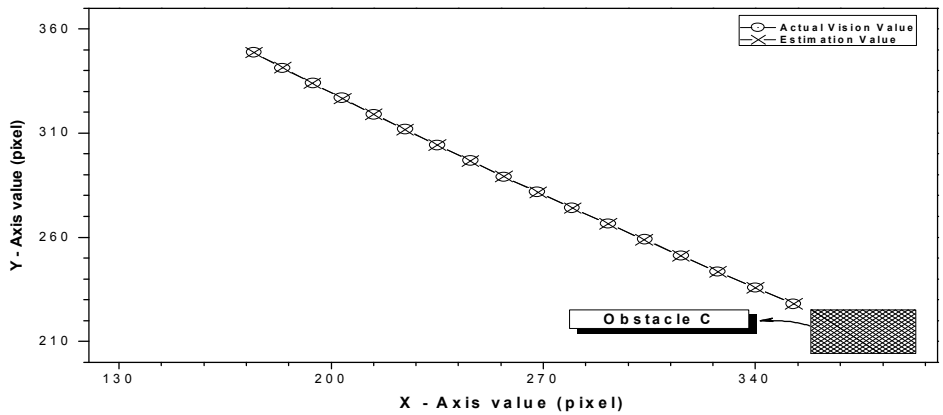
Fig. 3-3의 18~20단계에 장애물영역 C가 있는 20단계의 임의의 불연속적인 운동궤적을 로봇이 움직이는 동안 다른 두 경우와 같이 로봇 베이스로부터 2.0m~2.5m사이의 작업영역에 집중배치 된 3개의 카메라에서 장애물에 의해 비젼 데이터를 얻지 못한 나머지 17단계 비젼 데이터를 획득하였다. Table 4-17에서 보여준 것 같이 각 카메라에 대해 매개변수 추정모델을 통하여 얻어진 매개변수를 이용한 비젼 시스템 추정모델 값을 실제 얻어진 비젼 데이터 값과 비교하여 Fig. 4-12에 제시하였다.

Fig. 4-12의 (a)는 camera 1, (b)는 camera 2, (c)는 camera 3에 대한 결과를 나타낸다. 각 그림에서 ○는 로봇이 이동하는 동안 측정된 실제데이터이고 부호 ×는 추정된 6개의 매개변수를 가지고 계산된 추정 모델의 결과 값이다.

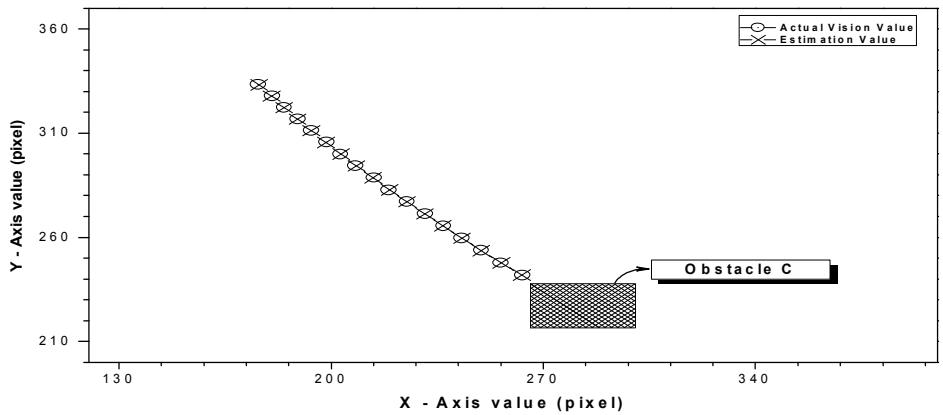
3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 장애물영역 C경우를 가지는 본 실험은 Fig. 4-12에서 보여준 것과 같이 비젼 시스템 추정모델의 결과 값은 실제 비젼 시스템을 이용하여 얻어진 값과 ±0.003pixel~±0.329pixel의 근사함을 보여준다.



(a) *camera 1*



(b) *camera 2*



(c) *camera 3*

Fig. 4-12 Comparison of the actual and estimated vision system model value for each camera in the obstacle region C with case 3

Table 4-17 Six estimated parameters of each camera in the obstacle region C with case 3

Six parameter		Camera No.1	Camera No.2	Camera No.3
C-value	C1	0.29236016	0.37952957	0.18987493
	C2	0.43173742	0.46426046	0.32974213
	C3	0.98298204	0.95654935	0.87816584
	C4	0.90049726	0.88392723	0.81157833
	C5	919.9494629	881.6694946	839.3745728
	C6	-208.424118	-166.9514618	-116.5180512

나. 로봇 점 배치작업 실험결과

로봇이 목표지점에 가까이 도달했을 때 장애물이 발생하는 경우를 고려하여 Fig. 3-3과 같이 장애물영역 C를 설정하였다. 불연속적인 운동궤적의 장애물영역 C에 존재하는 장애물로 인해 사용된 3대 카메라가 데이터를 획득 할 수 없는 3경우를 설정하여 데이터 획득에 실패한 카메라 개수 변화에 따라서 로봇 점 배치작업을 수행하여, 카메라 개수 변화에 따른 제시된 비젼 제어기법의 적합성을 조사하기 위해 본 실험을 행하였다.

(1) 1개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 1

로봇 끝점 큐가 장애물영역 C를 통과하여 목표지점으로 이동하는 동안 영역내의 장애물이 1개의 카메라에 영향을 미치는 경우의 로봇 점 배치작업 실험을 행하는데 필요한 로봇 회전각은 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-15의 결과를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 계산되어진다.

로봇 운동궤적에서 목표지점과 가까운 장애물영역 C에서 장애물이 1개의 카메라에 영향을 미치며 배치되었을 경우의 로봇 점 배치작업 실험에서 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교하여 Table 4-18에 나타내었다.

실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교하면 X축에서 -0.154mm, Y축과 Z축에서 각각 -0.021mm, 0.792mm의 차이를 가지고 실험을 수행하였으며, 평균 ±0.466mm의 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하였다. 또한 장애물영역이 없는 경우의 평균오차 ±0.418mm와 비교하여 근사하다는 것을 알 수 있다.

Table 4-18 For case 1 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 1	Ⓒ	559.075	166.794	113.592	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.154	-0.021	0.792	0.466

(2) 2개의 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 2

로봇 끝점의 큐가 작업영역에 집중배치 된 3개 카메라 중 2개 카메라에 영향을 미치는 경우를 가진 장애물영역 C를 통과하여 목표지점으로 이동하는 동안 로봇 점 배치작업 실험을 행하였다. 이 실험을 위해 매개변수 추정모델에 의해 계산된 Table 4-16의 결과를 가지고 회전각 추정모델을 사용하여 필요한 목표지점의 회전각이 계산되어진다.

목표지점에 가까운 장애물영역 C에서 장애물이 2개의 카메라에 영향을 미치며 배치되었을 때 Table 4-19에 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값 및 실제 목표지점의 좌표 값과 장애물영역이 없을 경우의 로봇 회전각의 좌표 값을 비교한 결과를 나타내었다.

Table 4-19에서 실제 좌표 값과 추정된 좌표 값을 비교하면 X축에서 -0.243mm, Y축에서 -0.126mm Z축에서 0.848mm의 오차를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행하

였다. 또한 평균 ±0.514mm의 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다는 것을 본 실험에서 보여준다. 또한, 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적에서의 평균오차인 ±0.418mm과 비교하여 약 0.1mm의 오차가 발생할 정도로 거의 유사함을 나타내었다. 거의 비슷함을 알 수 있다.

Table 4-19 For case 2 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 2	Ⓒ	558.986	166.689	113.648	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.243	-0.126	0.848	0.514

(3) 3개의 모든 카메라에서 데이터가 획득되지 않는 경우 : Case 3

Table 4-17의 매개변수 추정모델에 의해 계산된 시각매개변수를 근간으로 회전각 추정모델을 사용하여 목표지점의 로봇 회전각을 추정하였으며, 여기서 추정된 로봇 회전각을 사용하여 로봇 끝점 큐가 장애물영역 C를 포함한 불연속적인 운동궤적을 따라 이동하는 동안 영역 내 장애물이 3개의 모든 카메라에 영향을 미치는 경우의 로봇 점 배치 작업을 수행하였다.

장애물이 3개의 모든 카메라에 영향을 미치게 배치된 장애물영역 C의 로봇 점 배치작업 실험을 통하여 목표지점에 대해 추정된 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 목표지점의 좌표 값 및 장애물이 없는 경우 추정된 좌표 값과 비교하여 Table 4-20에 나타내었다.

Case 3에서 로봇 점 배치작업은 X축에서 -0.578mm, Y축에서 -0.441mm Z축에서 0.9mm의 오차와 평균 ±0.668mm의 정밀도를 가지고 수행할 수 있다는 것을 실

험을 통하여 보여주었다. 또한, 장애물영역이 없는 연속적인 로봇 운동궤적의 평균 오차 ±0.418mm와 비교하여 약0.2mm정도 평균오차가 상승함을 알 수 있다.

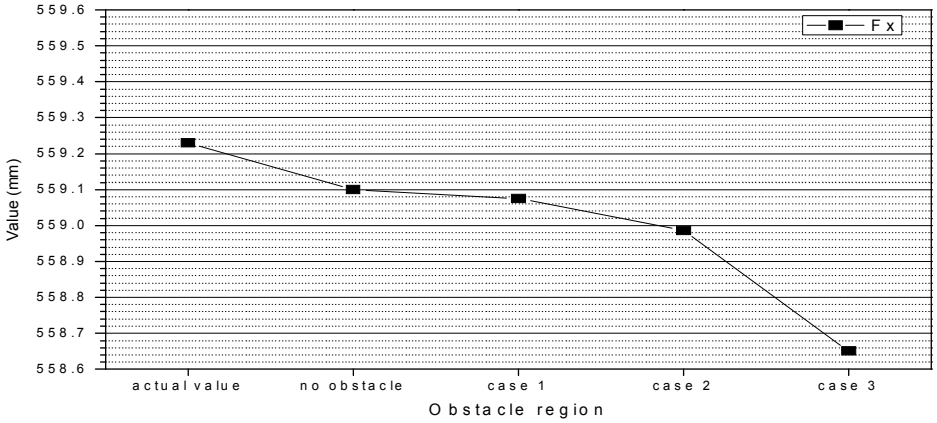
Table 4-20 For case 3 of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Measurement data		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error
Actual value	Ⓐ	559.229	166.815	112.8	
Estimated values with no obstacle	Ⓑ	559.099	166.733	113.508	
Estimated values in case 3	Ⓒ	558.651	166.374	113.700	
Errors	Ⓑ - Ⓐ	-0.13	-0.082	0.708	0.418
	Ⓒ - Ⓐ	-0.578	-0.441	0.9	0.668

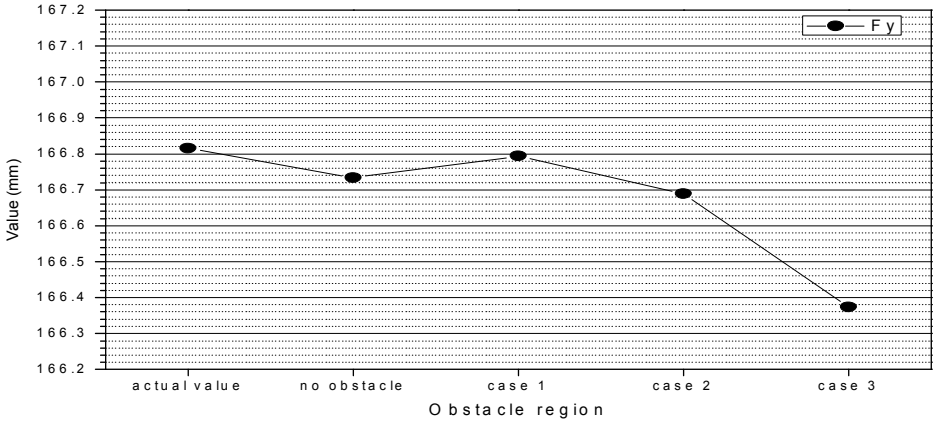
최종 장애물영역 C에서 장애물이 독립적으로 카메라에 영향을 주는 3경우 로봇 점 배치작업 실험에서 추정한 로봇 회전각의 좌표 값을 실제 회전각의 좌표 값 및 장애물영역이 없는 경우의 회전각의 좌표 값에 비교하여 각 성분별로 Fig. 4-13에 나타내었으며, (a)는 Fx, (b)와 (c)는 각각 Fy, Fz를 나타낸다.

초기 및 중간 단계 장애물영역과는 다르게 최종 장애물영역 C에서는 장애물에 의하여 비전 데이터를 획득하지 못하는 카메라의 개수가 늘어남에 따라 오차 값이 상승하였다.

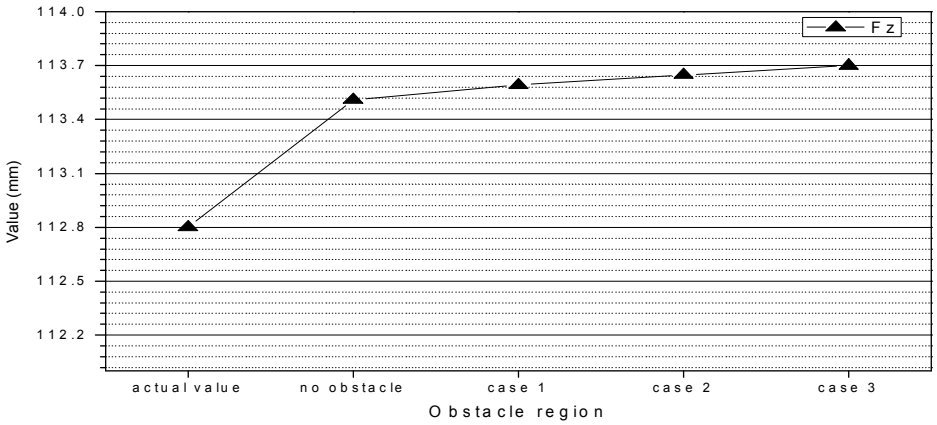
그러므로 정밀함을 요하는 작업 시 다른 두 영역보다 정밀도가 떨어지는 최종영역에서 비전 데이터를 획득하지 못하는 경우를 피해야 한다.



(a) Fx



(b) Fy



(c) Fz

Fig. 4-13 For each case of obstacle region C, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

4.3 실험 종합결과

3개의 장애물영역과 각 영역 내에서 3경우를 설정한 불연속적인 운동궤적을 로봇이 이동 할 때, 목표지점에 대해 로봇 점 배치작업 실험에서 장애물이 배치되어 있는 영역과 장애물에 영향을 받는 카메라 개수에 따라 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다.

비젼 시스템 모델의 적합성을 보이기 위해 사용된 6개 매개변수의 변화에 대한 실험결과는 Fig. 4-14, Fig. 4-15와 Fig. 4-16에서 보여준다.

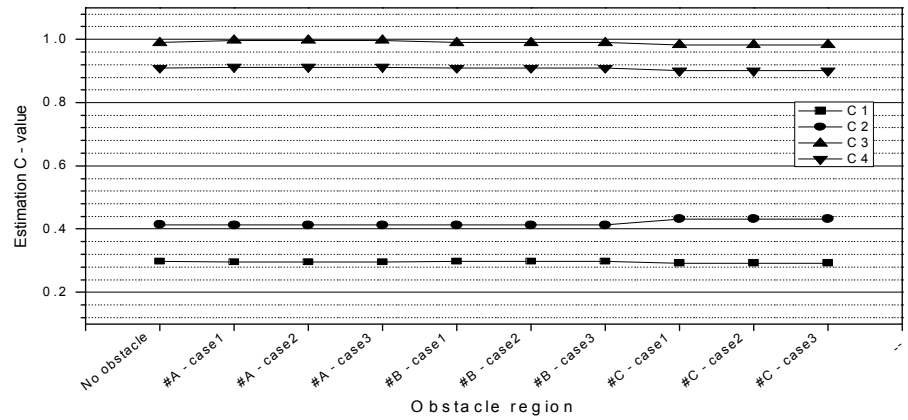
Fig. 4-14는 camera 1이 3개의 장애물영역의 각 3경우 모두에서 데이터를 얻지 못했을 때의 $C_1 \sim C_6$ 의 변화를 보여준다. 카메라 방위 및 초점거리의 변화성에 대한 매개변수 $C_1 \sim C_4$ 는 영향을 받지 않지만, 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타내는 매개변수 $C_5 \sim C_6$ 가 장애물로 인하여 3경우에서 모두 영향을 받는다. Fig. 4-15는 camera 2가 3개의 장애물영역의 각 case 2와 case 3에서 데이터를 얻지 못했을 때의 $C_1 \sim C_6$ 의 변화이며, 카메라 방위 및 초점거리의 변화성에 대한 매개변수 $C_1 \sim C_4$ 는 camera 1과 같이 영향을 받지 않지만, 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타내는 매개변수 $C_5 \sim C_6$ 가 장애물의 방해를 받는 2개 경우에서 영향을 받는다. Camera 3이 3개의 장애물영역의 각 case 3에서 데이터를 얻지 못한 경우 $C_1 \sim C_6$ 의 변화를 Fig 4-16에서 보여준다. Camera 1과 camera 2와 같이 카메라 방위 및 초점거리의 변화성에 대한 매개변수 $C_1 \sim C_4$ 는 영향을 받지 않지만, 장애물의 방해를 받는 case 3에서만 카메라에 대한 로봇 위치의 불확실성을 나타내는 매개변수 $C_5 \sim C_6$ 가 영향을 받는다.

로봇 점 배치작업 실험을 수행하여 목표지점에 대해 추정된 회전각 좌표 값과 실제 좌표 값을 비교하여 Table 4-21에 나타내었다. 또한, 장애물이 배치된 영역내의 각 경우에 대한 평균오차를 Fig. 4-17에 나타내었다. 로봇 운동궤적에서 초기구간에 해당하는 장애물영역 A의 3경우에서 평균오차는 ±0.409mm, ±0.404mm와 ±0.414mm로 장애물이 없을 때 의 오차인 ±0.418mm와 거의 비슷한 안정된 오차를 가지며, 중간구간에 해당하는 장애물영역 B에서도 3경우의 평균오차는 ±0.420mm, ±0.423mm와 ±0.419mm로 장애물이 없을 때와 장애물이 초기영역에 있을 때와 거의 비슷한 안정된 오차를 가진다. 마지막으로 상대적으로 목표지점에 가까운 최종

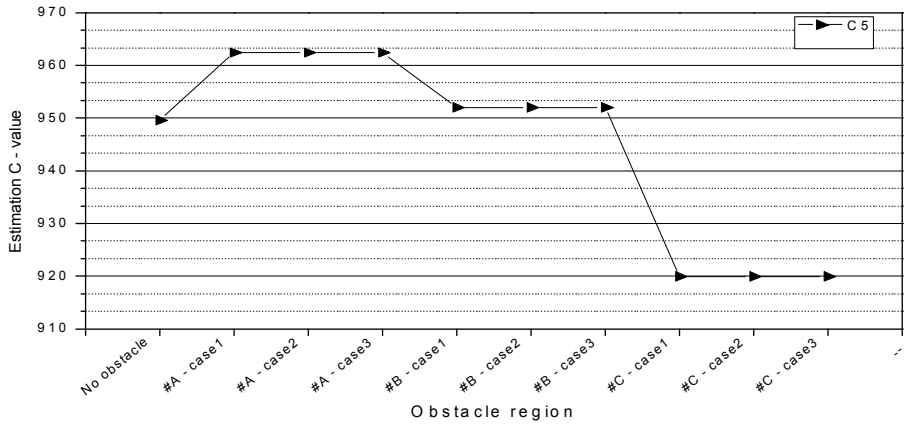
장애물영역 C에서 3개 경우의 평균오차는 ±0.466mm, ±0.514mm와 ±0.668mm로 충분히 안정된 오차를 가지지만 초기 장애물영역이나 중간 장애물영역에 장애물이 있을 때보다 약간 상승된 오차를 가짐을 알 수 있다.

실험결과를 종합하면, 장애물에 의해 데이터를 획득하지 못한 카메라 개수의 영향은 장애물영역 A와 장애물영역 B에서는 모두 비슷한 평균 오차로 안정된 로봇점 배치작업을 수행하고 있다. 다만 목표지점에 가까운 최종 장애물영역 C에서는 장애물의 영향으로 3개의 모든 카메라에서 데이터획득을 방해받았을 때보다 2개의 카메라에서 데이터 획득을 방해 받았을 때 향상된 오차를 가지며, 1개의 카메라에서 데이터 획득을 방해 받았을 때 좀 더 향상된 오차를 가지는 것을 알 수 있다.

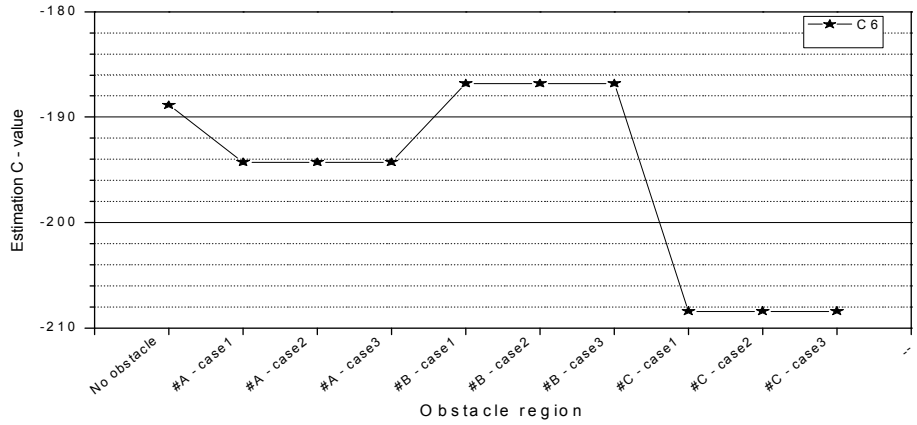
결론적으로 장애물 C영역보다 장애물 A와 B 영역의 정밀도가 높게 나타나는 이유는 초기와 중간 장애물 A와 B영역에서 비젼 데이터를 획득하지 못하여도 그 후에 획득한 비젼 데이터에서 충분히 보정을 하지만, 최종 장애물 영역 C에서는 장애물에 의해 획득하지 못한 부분을 보정해주는 장애물영역 이후의 비젼 데이터를 획득하지 못하기 때문이다.



(a) $C_1 \sim C_4$

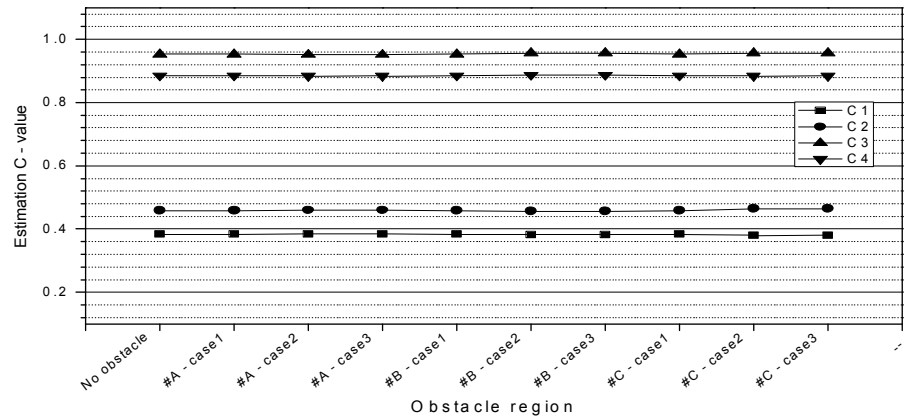


(b) C_5

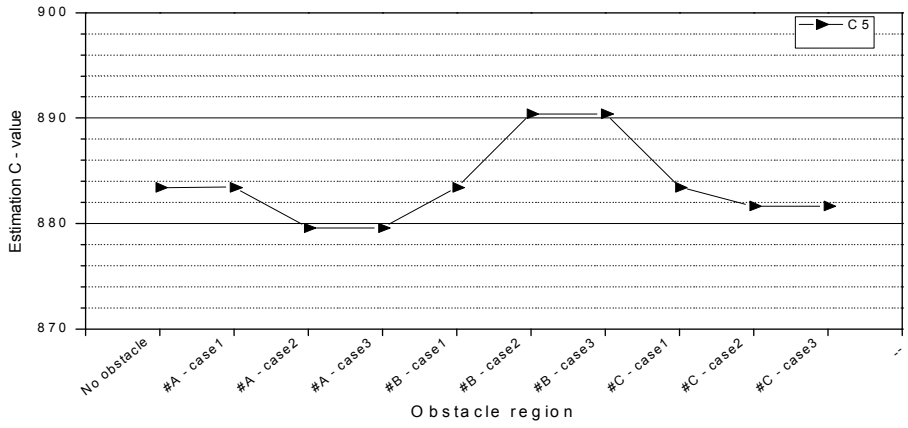


(c) C_6

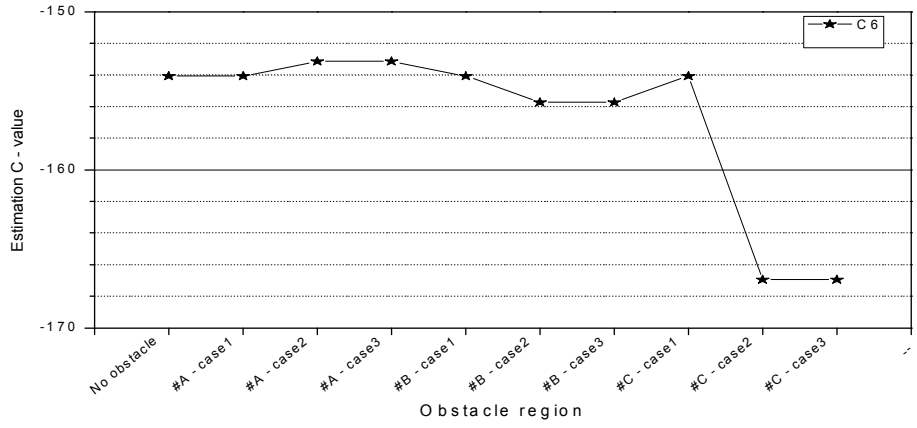
Fig. 4-14 For camera 1, comparison of C parameters in 3 obstacle regions



(a) $C_1 \sim C_4$

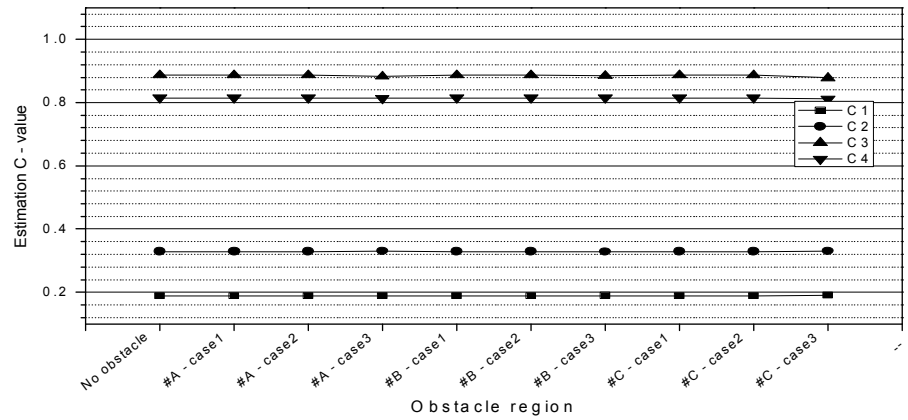


(b) C_5

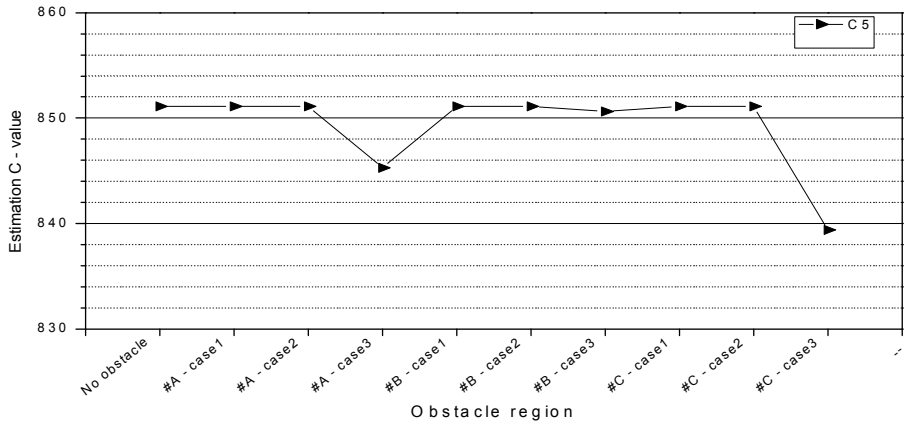


(c) C_6

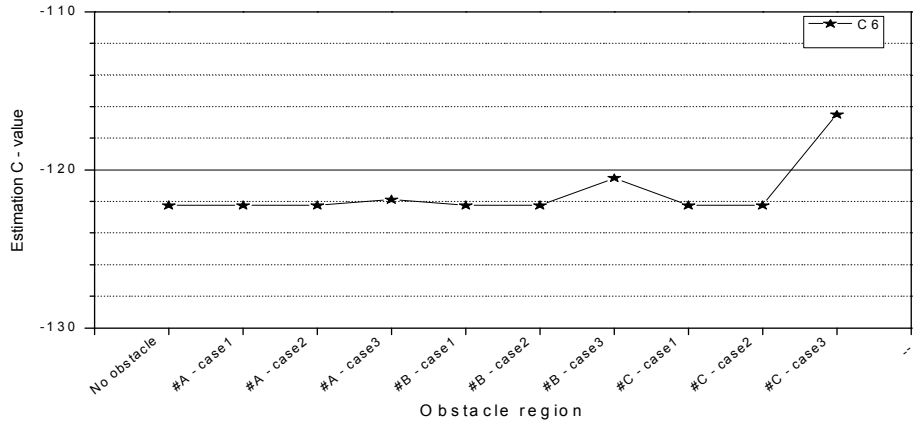
Fig. 4-15 For camera 2, comparison of C parameters in 3 obstacle regions



(a) $C_1 \sim C_4$



(b) C_5



(c) C_6

Fig. 4-16 For camera 3, comparison of C parameters in 3 obstacle regions

Table 4-21 For all cases, comparison of the actual and estimated values for target point in x-y-z coordinate

Obstacle region #		Fx(mm)	Fy(mm)	Fz(mm)	Average error(mm)
No obstacle		559.099	166.733	113.508	0.418
#A	Case 1	559.150	166.762	113.502	0.409
	Case 2	559.177	166.798	113.498	0.404
	Case 3	559.129	166.753	113.507	0.414
#B	Case 1	559.087	166.728	113.509	0.420
	Case 2	559.077	166.714	113.509	0.423
	Case 3	559.093	166.730	113.507	0.419
#C	Case 1	559.075	166.794	113.592	0.466
	Case 2	558.986	166.689	113.648	0.514
	Case 3	558.651	166.374	113.700	0.668
Actual value		559.229	166.815	112.8	

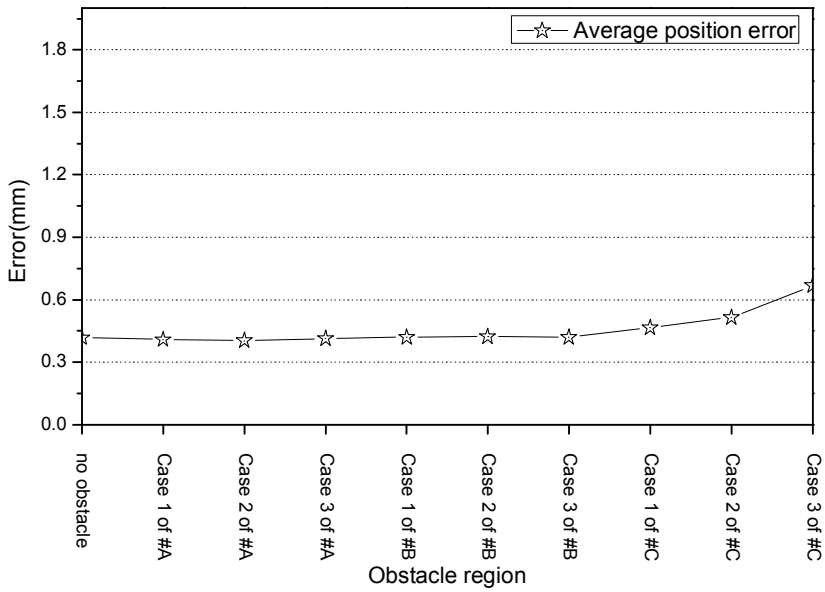


Fig. 4-17 For all cases, average errors between the actual and estimated values of target point in x-y-z coordinate

제 5 장 결 론

본 논문은 제시된 로봇 비젼 제어기법이 불확실한 작업환경에서 장애물배치에 따른 비젼 시스템 모델의 영향과 실용성을 연구하였다. 이를 위해 20단계를 가지는 임의의 운동궤적에 대해 3개의 장애물영역을 설정하고, 각 장애물영역 내에서 카메라들이 비젼 데이터를 획득 할 수 없는 3경우에 대해서 로봇 점 배치작업을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 영역별 장애물이 있는 불연속적인 로봇 운동궤적을 이동하는 로봇 점 배치작업을 수행한 실험결과 로봇이 이동하는 도중 장애물 출현 등으로 인하여 비젼 데이터 획득이 불가능하게 되는 불확실한 작업환경에서도 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다. 특히, 장애물의 영향으로 독립적으로 데이터획득에 실패한 카메라 수에 무관하게 최대 평균오차 ±0.67mm 정밀도를 가지고 충분히 안정되게 로봇 점 배치작업을 수행할 수 있다.

(2) 특히, 본 논문에서 사용되는 로봇 비젼 제어기법은 목표지점에 아주 가까운 위치에 장애물이 나타나는 것을 피하면 평균오차 ±0.42mm이내의 높은 정밀도를 가지고 로봇 점 배치작업을 수행 할 수 있다는 결론을 얻었다.

(3) 로봇이 이동하는 운동궤적에서 목표지점 근처에서 발생한 최종 장애물영역보다 초기나 중간 장애물영역에서 장애물에 의해 비젼 데이터 획득에 실패했을 경우가 좀 더 향상된 정밀성을 갖는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 장애물에 의해 데이터 획득에 실패하여도 다음 단계들의 비젼 데이터에 의해 충분히 보정이 이루어지기 때문이다.

(4) 로봇 제어 시 로봇 끝점에 대한 위치(position)및 방위(orientation)를 일반적으로 고려하여야 하는데, 본 논문은 로봇 점 배치작업 실험을 행한 결과 로봇에 대해 위치만을 고려하고 방위는 무의미하므로 고려하지 않았다. 향후 로봇 제어 시 2개 이상 큐를 사용한 얇은 막대(2큐 이상) 및 강체배치(4큐 이상)실험에 장애물 출현에 의한 불연속적인 로봇 운동궤적에서 로봇 끝점의 위치 및 방위를 고려한 실험을 통해 본 논문에서 제시된 비젼 제어기법의 실용성을 연구하고자 한다.

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," I*nternational 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 machanics 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) 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.

(16) Machiko, Sato., Aggarwal, J.K. :"Estimation of Position and Orientation from Image sequence of a Circle," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2252~2257. April, 1997.

(17) Temas Papp : "Integrated Robot Control System with a Cision module using Two Cameras," Proceeding of 5th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, pp.137~139, 1996.

(18) Kundrak J, Temas Papp, Strelecz L.: "Flexible Automatization by Robots and Vision System," Proceeding of 5th International Workshop on Robotics in

Alpe-Adria-Danube Region, pp.265~268, 1996.

(19) Bijan Shirinzadeh:"Vision-based tracking and control of remotely controlled vehicles," Industrial robot, Vol. 24, No. 4: pp.297~301, 1997.

(20) A. H. Abdul Hafez, Enric Cervera, C.V. Jawahar : "Optimizing Image and Camera Trajectories in Robot Vision Control using On-line Boosting," Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, pp.352~357, Oct 29 - Nov 2, 2007

(21) Prabhakar Mishra, H. N. Shankar, Jayesh Sudhir Bhat, Sumanth R. Kubair, Sameera Bharadwaja H, Anudhan S, Divya Kamath Hundi, Goutham Kamath, "Multi-Sensor Autonomous Robot based Manipulation of Valves for Process Control", 2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation, pp. 442~447, 2009

(22) Wan-Shik Jang, Kyoung-Suk Kim, Ki-Young Kim, Him-Chan Ahn "An Experimental Study on the Optimal number of Cameras used for Vision Control System", KSMET, Vol.13, No.2, pp.94~103, 2004.

(23) W. S. Jang, K. U. Min, J. k. Son "A study on the effectiveness of vision system Varying with location of Camera", KSPE Spring Conference, pp. 21~22, 2008.

(24) W. S. Jang, J. k. Son, K. U. Min "An experimental study on the effectiveness of robot vision control scheme in discontinuous robot's trajectory caused by obstacle", KSPE Spring Conference, pp. 297~298, 2009.

(25) K. U. Min "A study on the effectiveness of vision system according to the arrangement of cameras used for robot's position control", A Thesis of Master of Engineering, School of Mechanical Engineering, Chosun university, 2009

감사의 글

논문의 마지막 마무리를 글로 남기려 하니 옛일이 스쳐 지나가면서 베풀지는 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다. 저를 도와주신 분이 이렇게도 많았음에도 불구하고 일일이 찾아뵙고 감사드리지 못하는 점 용서를 구합니다.

참으로 부족한 저를 학문의 길로 불러들여 오늘의 제가 있게 해 주신 평생의 스승인 지도교수 장완식 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊이 감사드립니다. 학문과 삶에 대한 교수님의 진심 어린 말씀 하나하나 새겨가며 최선을 다해 살아가겠습니다. 그리고 졸업논문 심사를 해주신 이규태, 정상화 교수님께 감사드립니다.

대학원 생활에 있어서 많은 조언을 해주신 김재명 선배, 박성일 선배 그리고 실험실 선배이자 친구인 민관웅에게 감사의 마음을 전합니다. 대학원 생활에 있어서 도움을 많이 받고 소중한 추억을 간직하게 해 준 승철 선배, 광호 선배, 철우 선배, 주홍이 형, 미애 그리고 여러 대학원 동료들에게 고마움을 전합니다.

무엇보다 저의 대학원 생활을 조용히 응원해주신 아버지, 늘 사랑하는 어머니와 철없는 동생을 응원해준 형님과 형수님 그리고 예쁜 조카 경은에게 감사함과 고마움을 전합니다. 멀리 있지만 항상 신경 써주고 아낌없이 응원을 보내준 가족과 같은 친구 윤재원, 이재욱, 이승욱, 김성윤과 항상 옆에서 보살펴준 사랑하는 지영과 이 기쁨을 같이 하고 싶습니다.

길의 끝은 언제나 또 다른 길의 시작을 의미합니다. 대학원을 마치고 제 앞에 어떠한 길이 나타나도 저에게 힘을 주는 분들이 있기에 이제는 그 길을 해쳐나갈 수 있는 용기가 생겼습니다. 대학원에서 보고 배우고 느낀 것들을 디딤돌 삼아 이 세상에 소금과 같은 존재가 되겠습니다. 모두 감사합니다.

2009 년 12 월

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20087081	과 정	석사
성 명	한글: 손 재 경 한문 : 孫 載 璟 영문 : Son Jae Kyeong				
주 소	광주광역시 광산구 신창동 647-27 다인빌 401호				
연락처	E-MAIL : son0217@paran.com				
논문제목	한글 : 불연속적인 궤적에서 로봇 점 배치작업에 사용된 비젼 제어 기법의 실용성에 대한 실험적 연구 영어 : An experimental study on the practicality of vision control scheme used for robot's point placement task in discontinuous trajectory				

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(o) 반대( )

2009년 12 월 8 일

저작자: 손 재 경 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하