

## 로봇 매니플레이터의 오프라인 영상피드백 제어

### Off-line Visual Feedback Control of Robot Manipulator

신행봉<sup>1</sup>, 정동연<sup>1</sup>, 이종두<sup>2</sup>, 이강두<sup>3</sup>, 한성현<sup>4</sup>

1. 경남대학교 대학원 기계설계학과(TEL : 055-249-2590, FAX : 055-249-2617)
2. 거창전문대학 기계설계과
3. 진주전문대학 정보통신과
4. 경남대학교 기계자동화공학부(TEL : 055-249-2624, FAX : 055-249-2617)

#### Abstract

The equipment of industrial robot in manufacturing and assembly lines has rapidly increased. In order to achieve high productivity and flexibility, it becomes very important to develop the visual feedback control system with Off-Line Programming System(OLPS). We can save much efforts and time in adjusting robots to newly defined workcells by using Off-Line Programming System.

A proposed visual calibration scheme is based on position-based visual feedback. The visual calibration system is composed of a personal computer, an image processing board, a video monitor, and one camera. The calibration program firstly generates predicted images of objects in an assumed end-effector position. The process to generate predicted images consists of projection to screen-coordinates, visible range test, and construction of simple silhouette figures. Then, camera images acquired are compared with predicted ones for updating position and orientation data. Computation of error is very simple because the scheme is based on perspective projection, which can be also expanded to experimental results. Computation time can be extremely reduced because the proposed method does not require the precise calculation of three-dimensional object data and image Jacobian.

#### 1. 서 론

로봇을 효율적으로 사용하고, 생산라인의 작업중단을 방지하고, 복잡한 작업에의 적용을 용이하게 하기 위해서는 오프라인 프로그래밍 시스템(Off-Line Programming System, OLPS)의 개발이 절실히 요구되고 있다.

오프라인 프로그래밍 시스템을 이용하면 작업변경에 따르는 시간과 비용을 절감할 수 있음은 물론이고 각종 문제나 위험요소를 사전에 제거할 수도 있다. 컴퓨터 상에서 구현된 로봇과 작업환경에서의 각종 시뮬레이션 결과를 현장의 작업에 적용하기 위해서는 이 결과와 실제 시스템과의 일치가 확인될 때만 가능하다. 그러므로 오프라인 프로그래밍 시스템에는 시뮬레이션 기능 외에도 오프라인과 온라인의 상태를 일치시킬 수 있는 보정기능이 필수적이므로 본 논문에서는 비전정보를 이용한 보정기능을 갖는 오프라인 프로그래밍 시스템을 개발하여 물체의 형상을 스스로 인식할 수 있는 영상피드백제어 기술을 개발하고자 한다.

본 논문에서 제시한 비전정보에 의한 방법은 위치기반 비주얼 피드백 위치 계산의 범위에서 두 이미지를 비교하는 이미지 기반 비주얼 피드백의 방법을 혼용하여 사용한다. 또한 물체의 알려진 크기, 위치, 자세 등을 가지고 예측된 로봇의 위치에서 만들어진 예측 이미지와 현재의 카메라 위치에서 인식되는 이미지를 비교하여 오차를 계산하는 방법을 제시하였다. 그리고 두 이미지의 비교에는

경계추출에 의한 경계를 이용하였으며 경계는 연속되고 단위 두께를 가진다고 가정하였고, 카메라에서의 투영방법은 카메라 방향의 수직거리에만 영향 받는 원근법을 사용할 수 있다고 가정하였다.

제안된 방법은 직접적인 3차원 정보의 계산을 요구하지 않고 원근 투영법에 근거한 간단한 계산으로 실시간 적용가능성을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한, 시각정보를 이용하여 시물레이션 결과를 현장에 직접 적용할 수 있다. 이 방법은 물체의 위치 파악에도 사용할 수 있어 로봇을 이용한 실제의 생산공정의 조립·검사라인의 자동화 기술에 크게 기여하리라 판단되므로 본 논문에서는 이에 대한 기본연구를 수행하였다.

## 2. 오프라인 프로그래밍 시스템의 구성

### 2.1 오프라인 프로그래밍 시스템의 구성요소

본 논문의 프로그램은 편리한 사용자 인터페이스를 위하여 다양한 그래픽 기능들을 보유하고 있다. 이러한 기능들을 위해서는 3차원적 데이터베이스의 구축 및 그래픽 알고리즘의 구축이 필요하게 된다.

은선 및 은면제거기술이나 음영처리기술은 PC에서 이용되기가 상당히 까다로우며, 시뮬레이터에 적용하기 위해서 기존의 알고리즘을 수정·보완하여 적용하였다. 3차원적 그래픽을 위한 알고리즘의 개발로 시물레이션 결과를 3차원 영상으로 볼 수 있게 된다. 이를 위해서 실제 좌표계에서 시각 좌표계로의 변환 및 원근 투영 기술이 포함되었다.

그래픽을 이용한 시뮬레이터의 경우 가장 빈번히 사용되는 기능중의 하나가 시각위치 변경기능이므로 본 논문에서는 보다 편리하게 시각위치를 변경할 수 있는 기능을 갖추었다.

오프라인 프로그램 내의 로봇과 다른 물체들에 대해 은선, 은면을 제거하고 음영 처리한 결과는 와이어 프레임으로 물체를 표현한 그림들에 비해 상당히 현실감을 높일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 처리속도의 저하로 인하여 은선, 은면 제거와 음영 처리된 상태로서 실시간 처리는 힘든 상황이므로 사용자가 한 화면을 지정하여 음영 처리된 화면을 볼 수 있도록 프로그램이 구성되어 있다. 은선 및 은면의 제거를 위하여 스캔

라인 z-버퍼 방식을 채택하였고 개인용 컴퓨터 상에서 구현이 가능하게 하였다. 이 방식은 메모리 사용을 극단적으로 줄여 개인용 컴퓨터에서 실현이 가능하지만 실행속도의 저하를 감수해야만 한다. 음영처리 알고리즘으로는 Goraud 음영처리 방식을 사용하였다.

### 2.2 오프라인 프로그래밍 시스템의 구성 및 기능

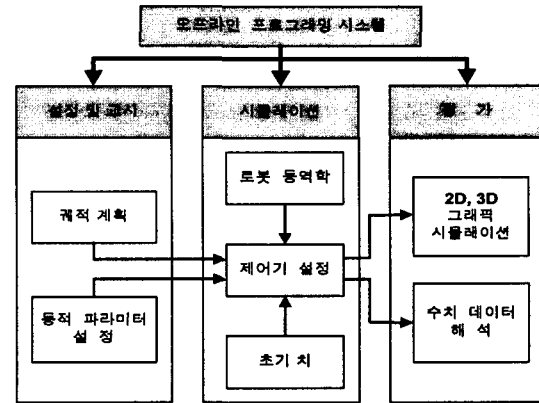


Fig. 1 Architecture of Off-Line Programming System

Fig. 1은 개발된 오프라인 프로그래밍 시스템의 전체 구성을 나타낸다. 오프라인 프로그래밍 시스템은 크게 Setting 및 Teaching, 시물레이션, 성능 평가의 3부분으로 크게 나눌 수 있다.

개발된 오프라인 프로그래밍 시스템의 풀다운 메뉴구성 중 실행 메뉴는 DSP 보드를 이용한 오프라인 프로그래밍 시스템과 실제 스카라 로봇의 연결을 위한 것으로서 아직 기능을 연구 중에 있다.

교시는 교시 메뉴(Teaching)에서 대화 상자를 통해 교시 정보를 저장할 교시 파일을 만들고, 여러 교시정보를 입력한 후, 교시 파일을 저장함으로써 이루어진다. 입력하여야 할 교시 정보로는 관절 좌표계나 절대 좌표계에서의 로봇 경유점, 통과 시간, 그리고 경유점 사이의 궤적 계획법이 있다.

관절 좌표계에서의 로봇 경유점 입력은 네 관절의 위치를 각각 입력함으로써 이루어지고, 절대 좌표계에서의 로봇 경유점 입력은 로봇 말단 효과 장치의 3차원 좌표와 회전 각도를 각각 입력함으로써 이루어진다. 통과시간은 초 단위로 입력하여야 하고 궤적 계획법으로는 Cubic Spline법, LFPB법, B-Spline법, 직선 보간법, 원호 보간법 등이 준

비되어 있어 이중에서 한가지를 선택한다.

Fig. 2는 경유점 교시를 하고 궤적계획을 선택한 후의 작업내용을 나타내는 화면이다.

510,000	0,000	408,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Cubic
247,487	507,487	358,000	90,000	45,000	45,000	90,000	90,000	0,560	Cubic
610,000	0,000	358,000	0,000	0,000	0,000	90,000	0,000	1,120	Cubic
247,487	507,487	408,000	90,000	45,000	45,000	90,000	1,680	Cubic	
610,000	0,000	408,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,240	Cubic	

Fig. 2 Contents of Correspondence task

시뮬레이션 메뉴에서는 궤적 계획에 이은 동역학 및 제어 시뮬레이션을 통해 수행하고자 하는 작업을 3차원과 2차원 그래픽으로 컴퓨터 화면상에서 미리 볼 수 있고 이에 이은 시뮬레이션 궤적 확인에 의해 제어 추종 성능 평가가 가능하므로 로봇에 적용될 제어 알고리즘 교시의 적합성을 판단할 수 있다.

시뮬레이션에 적용될 알고리즘으로는 비례-미분(PD)제어, 계산 토크 제어, 극배치 제어, 그리고 가변구조 제어이론을 근간으로 하는 슬라이딩 모드 제어가 준비되어 있는데 이 중 하나를 선택할 수 있다. Fig. 3은 시뮬레이션 메뉴에서 제어방식 선택을 하는 모습이다.

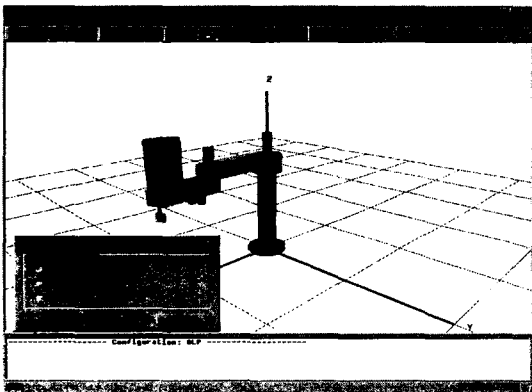


Fig. 3 Selection of control mode

Fig. 4는 기준 위치궤적에 대한 시간에 따른 추적의 예를 보여주는 화면이다. 윈도우 하나로 각 축에 대한 위치와 속도추종 및 각축의 위치오차와 속도오차를 선택해서 확인할 수 있다.

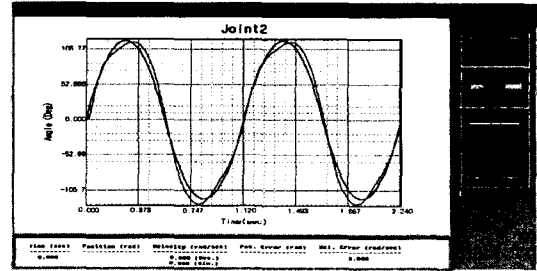


Fig. 4 Tracking of simulation trajectory

시뮬레이션 및 성능예상을 마친 다음에는 알고리즘 다운로드, 서보 온, 원점 복귀를 행하여 로봇의 온라인 구동을 위한 준비를 마친다. 로봇의 실시간 구동에 의하여 샘플링 시간마다 기준 궤적을 넘겨주고 온라인 구동궤적을 넘겨받은 후 서보 오프를 행하고 관절 제어기의 메모리를 깨끗이 한다. 온라인 구동을 마친 다음에는 기준 궤적과 온라인 구동궤적에 의하여 제어 추종 성능을 검증한다.

### 2.3 그래픽 처리

3차원 그래픽 알고리즘의 적용으로 시뮬레이션 결과를 3차원 영상으로 볼 수 있게 하였다. 이를 위해서 월드 좌표계에서 시야좌표계로의 변환 및 원근 투영기술이 포함되었다. 음영처리에 의하여 현실감을 높일 수 있는데 솔리드모델을 생성한 후 배면을 소거하고 스캔라인 Z-버퍼법으로 은선, 은면을 제거하고 Goraud방법으로 음영처리 한다.

## 3. 비전정보의 처리기술

시각정보를 이용하여 로봇의 위치 오차를 계산할 수 있다. 스카라 로봇의 엔드-이펙터에 설치된 카메라가 수직아래 방향을 향한다는 특성을 이용하면 두 개의 대응점만으로 로봇의 오차를 계산할 수 있다. 오차는 수직축에 대한 회전, 수직방향으로의 병진, 수평방향의 병진으로 구분된다.

본 방법의 적용단계는 다음과 같다. 알려진 3차원 물체의 정보를 이용하여 예측 이미지를 생성한다. 카메라를 이용하여 경계추출된 이미지, 즉 카메라 이미지를 얻는다. 예측 이미지에서 검색대상도형으로 선정된 도형의 꼭지점을 찾고, 모서리를 이용하여 도형의 도심을 구한다. 이 도심

의 좌표를 카메라 이미지에 적용하여 두 이미지에서 일치하는 도형을 찾아낸다. 카메라 이미지에서 도심을 중심으로 검색하여 예측 이미지와 대응되는 꼭지점을 검색하고, 꼭지점의 좌표를 비교하여 3차원 오차를 계산한다.

로봇의 단말효과기에 설치된 카메라에서 이미지를 획득하여 예측이미지와 비교함으로써 오차량을 계산할 수 있다. 카메라 이미지는 이치화(thres-holding)와 경계추출의 과정을 거쳐서 얻어질 수 있다.

예측 이미지와 카메라 이미지의 비교에서 얻어지는 2차원 오차로 3차원 좌표상에서의 오차를 계산해 낼 수 있다. 로봇 단말효과기의 예측된 위치에서 생성된 예측 이미지와 실제 로봇의 단말효과기가 위치한 곳에서 얻어진 카메라 이미지의 비교로 실제 로봇의 위치를 구한다. 본 논문에서는 원근 투영법을 사용하여 연관되어 있는 높이오차와 병진오차를 독립시킴으로써 간단히 오차를 계산하였다. 스카라 로봇이 수직 아래방향을 향한다는 특성을 이용하여 오차를 네 가지로 구분함으로써 두 개의 대응점만을 가지고 오차를 계산하였다.

예측 이미지를 생성하기 위해 가정된 로봇 단말효과기의 위치를 앞절에서 계산된 오차량만큼 수정함으로써 실제 로봇의 단말효과기 위치를 알아낼 수 있다. 이 결과를 이용하여 오프라인 프로그래밍 시스템 내의 로봇 위치 정보를 수정하거나 온라인상의 로봇의 위치를 보정할 수 있다.

#### 4. 영상 피드백 제어기술 개발

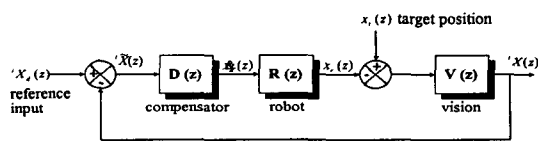


Fig. 5 System block diagram of a visual feedback control system

Fig. 5는 단순한 비주얼 피드백 시스템의 블록선도이다. 비전 subsystem의 출력은 목표물 도심의 이미지 평면 픽셀에러  $'X$ 이다.  $'X$ 는 보상기  $D(z)$ 의 입력이다. 보상기의 출력은 작업영역(직교좌표) 속도 명령  $\dot{x}_d$  이다. 이것은 용이한 조작을 위해 카메라

이동이나 카메라 회전과 같은 다양한 목표 궤적 추종을 허락한다. 로봇 위치와 목표 위치 즉,  $x_r$  과  $x_t$  는 사용된 궤적 추종에 의존한 1차 또는 2차원의 이동 또는 회전이라고 고려할 수 있다.

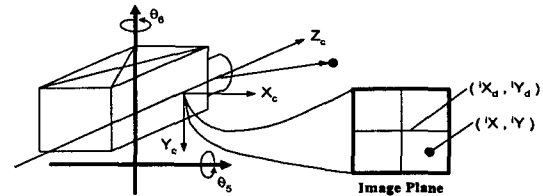


Fig. 6 Relevant coordinate systems. The camera is mounted joint 3

Fig. 6은 로봇의 손목관절의 카메라 배열을 보여주고 있다. 로봇제어기는 로봇이 직교 속도제어 장치로 나타내는 것과 같다. Target 위치  $x_t$ 와 로봇위치  $x_r$  간의 single-rate 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{x_r(z)}{x_t(z)} = \frac{K}{z^3 - z^2 - K} \quad (1)$$

여기서, 루프이득  $K = K_p K_{lens}$  그리고  $K_{lens}$ 는 이미지 평면에러에 대한 target 에러의 상대적인 스칼라 이미지 자코비안이다.

카메라가 로봇의 엔드 이펙터에 부착되어 있기 때문에, 그것은 로봇 위치에 관계하여 target을 항상 본다. 즉 식(2)와 같다.

$$'X = K_{lens} (x_t - x_r) \quad (2)$$

#### 4.1 전달함수

Fig. 6의 시스템에 대하여 두개의 유용한 전달함수가 쓰여질 수 있다.  $'X(z)/'X_d(z)$ 는 이미지 평면 도심에서 요구하는 도심으로의 응답을 실행한다. 그리고 이 식은 만약, 작업이 이미지 평면 특징점 궤적의 향으로 표현되어진다면 중요하다. 고정작업에 대해서(여기서,  $'X_d$ 는 상수이다)  $'X(z)/x_t(z)$ 는 target motion으로의 이미지 평면 오차 응답을 설명하고 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{'X(z)}{x_t(z)} = \frac{V(z)}{1 + V(z)R(z)D(z)} \quad (3)$$

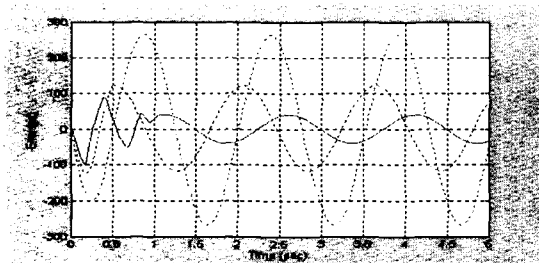
$$= \frac{K_{lens} z(z-1)D_D(z)}{z^2(z-1)D_D(z) + K_{lens} D_N(z)} \quad (4)$$

여기서,  $D(z) = D_N(z)/D_D(z)$  이고,  ${}^iX = {}^iX_d - {}^iX$  는 이미지평면 오차이다. 그리고  ${}^iX_d$  는 편의상 0이라 가정한다.

전통적으로 페루프 시스템의 성능은 대역폭의 향으로 측정된다. 그러나 본 연구에서는 성능을 정성적으로 측정하기 위해 peak-to-peak이나 RMS를 이용한 이미지평면 오차의 폭을 고려함을 선택했다. 이것은 추종작업이 이미지평면 오차의 향으로 정의되고 이상적으로 0이기 때문에 적합하다. 이미지평면 오차는 제어기에 의해 계산되고 쉽게 둔감해 질 수 있다. 그리고 이것은 페루프 대역폭 추정보다 훨씬 단순하다. Plotting 로봇과 이미지평면 오차라기보다 target 경로라고 하는 것이 위상차에 의한 효과로 가장할 수 있음을 주의한다.

#### 4.2 보상기 평가

동일한 사인파로 이동하는 타켓을 위한 각 보상기에 대한 이미지 평면 오차는 Fig. 7에 보여진다. 시뮬레이션은 4축 스카라 서보 시스템의 위치 및 속도 루프에 대한 상세한 multi-rate 비선형 모델에 기초한다. 이전에 고정된 비례제어기를 극배치 보상기로 교체하는 것은 이미 이루어진 것은 최고로 발견됐다. 높은 추종성능은 달성되었지만 응답초기의 오버슈트로 인해 견실함을 잃는다.



(- · - : 비례 제어기, - - - : PID 제어기, — : 극배치 제어기)  
Fig. 7 Comparison of image plane error for visual feedback control with various compensators

### 5. 컴퓨터 모의실험

Fig. 8은 비전시스템을 갖는 비주얼 피드백 시스템의 개략적인 구성을 나타낸다. 스테레오 비전을 갖는 핸드-아이(hand-eye) 시스템의 프레임은 스테레오 카메라의 표준 모델을 정의하고 사용한

다. 스테레오 카메라의 시각축은 서로 평행이고 베이스라인에 수직이다. 두 카메라의 초점은 베이스라인 상에서 거리  $d$ 만큼 떨어져 있고, 카메라 프레임의 원점은 두 카메라의 중앙에 위치한다.

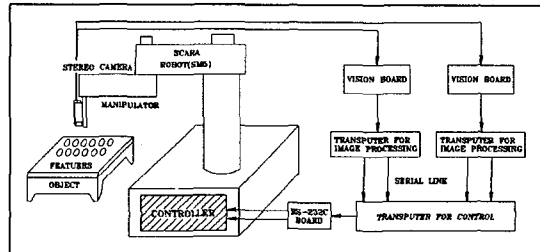


Fig. 8 Schematic diagram of visual feedback system

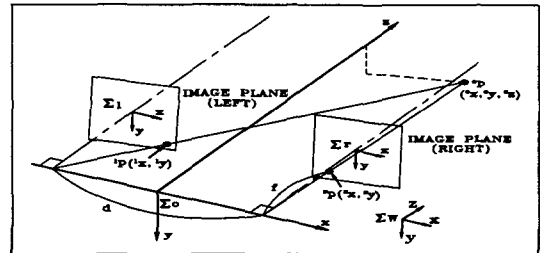


Fig. 9 The coordinates system of stereo vision model

Fig. 9는 스테레오 비전모델의 좌표계를 나타내고 있다. 비주얼 서보잉에서, 카메라의 이동속도와 이미지의 특징점의 속도간의 정확한 관계를 알아야 한다. 왜냐하면, 이미지 특징점의 속도에 기초한 매니플레이터의 피드백 명령을 발생하기 때문이다. 이미지 자코비안 형태로 표현할 수 있다.

이미지 프레임의 특징점 속도  ${}^i\dot{p}$  와 카메라 이동속도  $u$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} {}^i\dot{p} &= {}^iJ_c \dot{c} = J u \\ &= {}^iJ_c \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -c_z & c_y \\ 0 & -1 & 0 & c_z & 0 & -c_x \\ 0 & 0 & -1 & -c_y & c_x & 0 \end{pmatrix} u \end{aligned}$$

여기서,  $J$ 는 이미지 특징점의 속도  ${}^i\dot{p}$  와 카메라 이동속도  $u$ 간의 관계인 이미지 자코비안 행렬이다.

본 논문에서는 Monocular 비전을 갖는 비주얼 피드백과 스테레오 비전을 갖는 비주얼 피드백을 비교한다. 시뮬레이션 조건은 Table 2에 나타나 있고, 대상물의 특징점은 한번이 200(mm)인 정사각형의 네 꼭지점이다.

Table 2 Simulation Condition

초점거리	$f = 18 \text{ (mm)}$
베이스 라인	$b = 150 \text{ (mm)}$
샘플링 타임	$50 \text{ (msec)}$
개인	$\lambda = 1.5$
요구하는 위치	${}^cP_d = (150 \ 150 \ 600)^T \text{ (mm)}$
오일러 각에서 요구하는 방위	$(\varphi, \theta, \psi) = (0, 0, 0) \text{ (deg ree)}$
초기오차	$(-45 \ -45 \ -45)^T \text{ (mm)}$ : 병진 $(\varphi, \theta, \psi) = (15, 15, 15) \text{ (degree)}$ : 회전

시뮬레이션 결과인 Monocular 비전과 스테레오 비전의 이미지 상의 특징점 궤적이 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타나 있다.

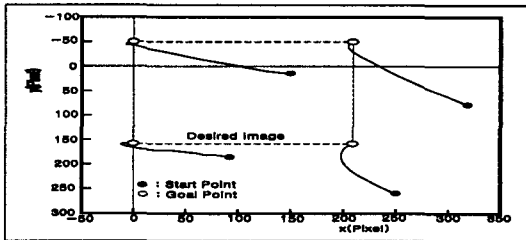


Fig. 10 Trajectories of the Feature Point on the image (Monocular)

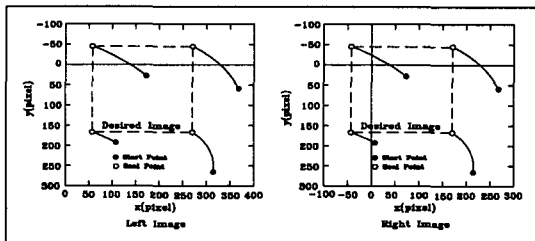


Fig. 11 Trajectories of the Feature Point on the image (Stereo)

Monocular 비전의 경우에 수렴속도가 느리고, 오버슈트가 큼을 알 수 있다. 반대로, 스테레오 비전의 경우는 monocular 비전의 경우보다 수렴속도가 빠르고, 오버슈트도 작음을 알 수 있다. 이것은 이미지 자코비안이 monocular 비전을 갖는 경우에 원하는 위치에서 이미지 자코비안이 고정되어 있기 때문이다. 이에 반해 스테레오 비전을 갖는 경우의 이미지 자코비안은 매 샘플링 시간마다 갱신할 수 있으므로 안정한 비주얼 피드백을 보장하는 정확한 피드백 신호를 발생시키는 것이 가능하다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 3차원 오프라인 프로그램에 의한 로봇 매니퓰레이터의 영상 피드백제어에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 수행된 세부적인 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오프라인 프로그래밍 시스템을 사용하여 수행하고자 하는 온라인 작업을 오프라인 상에서 미리 시뮬레이션하고 성능 평가할 수 있었고, 작업 자체와 제어 추종성능을 예상할 수 있었다.
- (2) 로봇의 작업환경이 변경될 때 본 시스템을 이용하여 적절한 작업환경을 구성하고, 이를 시뮬레이션 해봄으로써 효율을 높일 수 있는 방안을 제시하였다.
- (3) 영상 피드백 제어에서는 위치기반 비주얼 피드백과 이미지기반 비주얼 피드백을 혼용하여 간단하고 실제 적용이 용이한 위치 결정방법을 제시하였다. 제시된 방법을 사용하면 엔드-이펙터가 수직아래를 향하고 수직 방향 운동폭이 작은 스카라 로봇에서는 쉽게 로봇과 물체의 위치를 계산할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] P. I. Corke, "Visual Control of Robot Manipulators - A Review", K. Hasimoto, Visual Servoing, pp. 1-31, World Scientific, 1993
- [2] D. B. Westmore and W. J. Wilson, "Direct Dynamic Control of a Robot Using an End-Point Mounted Camera and Kalman Filter Position Estimation", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2376-2384, 1991.
- [3] J. T. Feddema, "Real Time Visual Feedback Control for Hand-Eye Coordinated Robotic Systems", Ph. D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 1989.
- [4] B.G. Donald, "Visual Tracking of Known Three-Dimensional Objects", Int. J. of Computer Vision, Vol. 3, pp. 243-270, 1992.
- [7] Peter I. Corke, and Malcolm C. Good, "Dynamic Effects in Visual Closed-Loop Systems", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, pp. 671-683, 1996.
- [8] P. K. Allen, A. Timcenko, B. Yoshimi, and P. Michelman, "Real-time visual servoing," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1850-1856, 1992.
- [9] 신영식, 김현석, 3차원 그래픽: C언어로 배우는 이론과 알고리즘, 가남사, 1991.