

〈논 문〉

자동조정 퍼지룰을 이용한 슬레이브 암의 시각서보

김주곤* · 차동혁** · 조형석* · 김승호***

(1995년 3월 11일 접수)

An Auto-Tuning Fuzzy Rule-Based Visual Servoing Algorithm for a Slave Arm

Joo Gon Kim, Dong Hyuk Cha, Hyung Suck Cho and Seung Ho Kim

Key Words : Image Feature(영상특징), Visual Servo(시각서보), Fuzzy Control(퍼지제어), Auto Tuning(자동조정)

Abstract

In telerobot systems, visual servoing of a task object for a slave arm with an eye-in-hand has drawn an interesting attention. As such a task is generally conducted in an unstructured environment, it is very difficult to define the inverse feature Jacobian matrix. To overcome this difficulty, this paper proposes an auto-tuning fuzzy rule-based visual servo algorithm. In this algorithm, a visual servo controller composed of fuzzy rules, receives feature errors as inputs and generates the change of slave position as outputs. The fuzzy rules are tuned by using steepest gradient method of the cost function, which is defined as a quadratic function of feature errors. Since the fuzzy rules are tuned automatically, this method can be applied to the visual servoing of a slave arm in real time. The effectiveness of the proposed algorithm is verified through a series of simulations and experiments. The results show that through the learning procedure, the slave arm can track object in real time with reasonable accuracy.

1. 서 론

원격조작에 관한 연구는 원자력발전소에서 방사능 물질을 취급하기 위한 동기에서 시작되었으며, 그 이후 심해, 우주공간 등 인간이 작업할 수 없는 위험한 환경에서 인간을 대신하여 여러 가지 작업을 행하기 위한 목적으로 발달되어 왔다. 로봇 매니플레이터의 눈부신 발전에 힘입어 최근에는 원격 로봇이 등장하였는데, 이것은 원격조작장치(teleoperator)로서의 기능뿐만 아니라 자율적인

(autonomous) 작업수행능력도 가지는 원격조작 시스템을 말한다.⁽¹⁾ 이 시스템은 작업자의 원격 작업지령을 따라 움직이며, 작업장에 장치되어 있는 여러 가지 센서들을 통해서 작업자에게 정보를 전달해 주는 기능뿐만 아니라, 이들 센서정보들을 이용하여 자율적으로 작업을 수행하는 기능도 가지고 있다.

여러 가지 센서정보 중에서 시각정보를 원격 작업에 이용하는 방법은 카메라를 통해 얻어지는 영상을 이용하여 작업장에 대한 3차원 입체영상을 구현하여 작업자에게 전달하는 방법이 있고,⁽²⁾ 영상정보를 처리하여 작업자의 명령없이 자율적으로 슬레이브 암을 직접 구동하는 방법이 있다.⁽³⁾ 이들 중에서 입체영상에 대한 연구는 많이 진행되었지

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

**삼성경영기술대학

***회원, 한국원자력연구소

만, 시각서보 기능을 갖는 슬레이브 암에 대한 연구는 아직 초보적인 수준에 머물고 있다.

시각서보방법은 Fig. 1(a)과 같이 물체의 정확한 위치를 이용한 방법(position-based visual servoing)과 Fig. 1(b)와 같이 영상특징을 이용한 방법(feature-based visual servoing)으로 나눌 수 있다.

위치를 이용한 시각서보방법은 입력된 영상에서 대상 물체의 3차원 거리를 구하여 로봇을 구동하는 방식으로써, 매 샘플링시간마다 물체의 정확한 위치계산이 요구된다. 환경에 대한 충분한 정보가 주어진 상태에서, 교정작업이 완료된 시각장치를 부착한 로봇시스템에서는 물체의 정확한 위치계산이 가능하겠지만, 실제 환경에서는 거리정보의 부족으로 인해 물체의 정확한 위치를 구하기도 어려울 뿐 아니라, 계산도 복잡하여 이 방법을 이용한 실시간 시각서보는 어렵다.

영상특징을 이용한 시각서보방법은 영상에서 간단한 영상특징들을 추출하여 로봇을 구동하는 방법으로써 환경에 대한 거리정보가 필요없고, 영상처리시간이 적게 소모되므로 실시간내에 계산가능하고, 실제 물체의 3차원 위치를 계산할 필요가 없는 장점이 있어 최근에 많이 연구되고 있다.^(4,5)

영상특징을 이용한 시각서보의 대표적인 연구 사례를 Sanderson 등이 참조모델 적응제어(model reference adaptive control) 방식을 채택하여 시각서보에 적용한 연구,⁽⁶⁾ 대상물체의 정확한 CAD 모델로부터 얻을 수 있는 정보를 영상 특징으로 이용하여 시각서보 시스템을 구현한 연구,^(7,8) 팽창하는 영상공간을 구현하는 연구,⁽⁹⁾ 교정되지 않은 카메라(uncalibrated camera)을 사용한 시각서보에

관한 연구,⁽¹⁰⁾ 정규화된 영상특징행렬(normalized feature matrix)를 이용한 연구,⁽¹¹⁾ 퍼지자기 조정을 사용한 로봇의 영상 추적,⁽¹²⁾ 영상특징과 적응제어를 이용한 2차원 물체의 경계추종에 관한 연구⁽¹³⁾ 등이 있었다.

그러나 이런 방법에서도 영상의 변화와 로봇의 구동 사이의 비선형적인 관계식을 선형화 함으로써 생기는 오차와 카메라의 교정(calibration) 작업시 발생하는 오차가 여전히 존재하며, 이를 보완할 수 없다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 교정되지 않은 카메라를 이용한 원격로봇의 시각제어제어에 대해 제안하였다.⁽¹⁴⁾

본 논문에서는 앞서서 제안한 알고리즘을 확장하여 3차원의 공간상에서도 시각서보가 가능한 자동조정 퍼지룰을 이용한 시각서보 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에서 퍼지룰로 구성된 시각서보 제어기는 영상특징의 에러를 입력을 하며, 슬레이브 암의 위치변화를 출력으로 생성시킨다. 제안된 퍼지룰의 학습을 위해 영상특징 에러의 2차함수로 표현되는 가격함수를 정의하였으며, 또한 최급 강하법을 사용하여 이 가격함수가 최소가 되도록 퍼지룰을 학습시켰다. 제안된 알고리즘의 효용성을 보여주기 위하여 공간상의 여러 위치에 대해서 모의실험과 실험을 행하였다. 실험결과로 학습이 진행됨에 따라 슬레이브 암이 대상 물체를 점점 더 빠른 시간내에 잘 추적함을 알 수 있다.

2. 원격로봇 시스템의 구성

Fig 2는 본 연구에서 개발한 원격로봇 시스템을 보여준다.⁽¹⁵⁾ 이 시스템은 크게 마스터 암, 슬레이

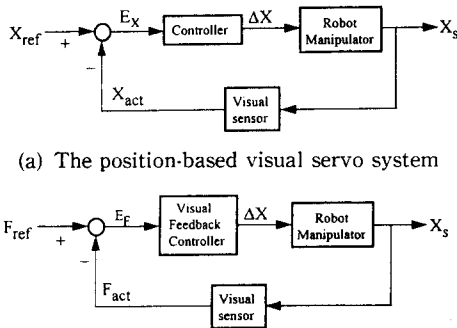


Fig. 1 Two types of visual servo system

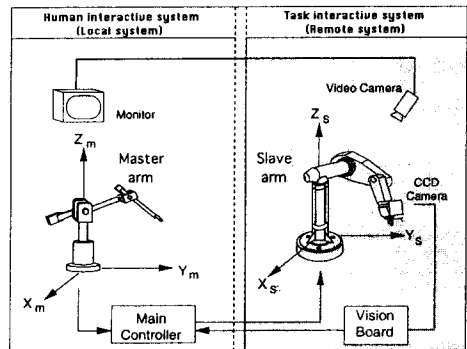


Fig. 2 The configuration of the telerobot system

브 암, 시각센서, 영상처리 시스템 그리고 원격시스템 제어기로 구성되었다. 매스터 암은 3자유도의 수직 다관절구조를 가졌으며, 슬레이브 암은 상용화된 산업용 로봇(삼성전자, FARA AI-U)를 이용하였다. 시각센서는 CCD 카메라(SONY, XC-77 RR)를 사용하였으며, 영상처리 시스템은 DSP가 부착된 상용화된 비전 보드(삼성전자, MVB-02)를 사용하였다.

전체의 동작은 크게 두 부분으로 이루어진다. 첫 동작은 작업자가 작업환경을 보여 주는 모니터를 보고 매스터 암을 조작하여 작업을 수행하는 동작으로 다음과 같다. 작업자가 매스터 암을 움직일 때 각 축에 부착된 엔코더로부터 각도를 측정하여 매스터 암의 위치를 계산한다. 매스터 암과 슬레이브 암의 작업영역이 상이하므로 작업영역 사상(workspace mapping)을 통해 매스터 암의 위치에 대응하는 슬레이브 암의 기준위치를 구할 수 있다. 이 값이 슬레이브 암 제어기에 전달되면 이에 따라 슬레이브 암이 운동을 한다. 그리고, 두 번째 동작은 슬레이브 암이 작업을 자율적으로 수행하는 것으로 다음과 같다. 슬레이브 암의 손목에 위치한 CCD 카메라로부터 입력되는 영상을 처리하여 영상 특징 값을 구하고, 이 값을 DPR(dual port ram)을 통해 중앙제어기에 전달한다. 중앙제어기에서 자동조정 퍼지룰 알고리즘을 사용하여 슬레이브 암이 움직여야 될 다음 위치까지의 이동거리를 구한다. 이 값을 슬레이브 암 제어기에 지령해 주면 슬레이브 암이 그 위치까지 운동하고 이를 반복한다.

3. 자동조정 퍼지룰을 이용한 시각서보 알고리즘

3.1 개요

Fig 3은 제안된 알고리즘의 블럭선도를 보여 준다

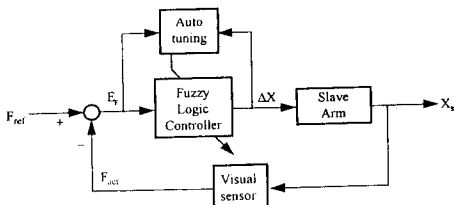


Fig. 3 The block diagram of an auto-tuning fuzzy rule-based visual servo system

다. 여기서 원하는 영상특징벡터(\vec{F}_{ref})와 현재의 영상특징벡터(\vec{F}_{act})를 비교하여 그 특징들의 차이(\vec{E}_F)를 구한다. 이런 영상특징들의 차이로부터 절대좌표계에서 슬레이브 암이 다음에 움직여야 할 위치 변화량($\Delta\vec{X}$)을 구하는데 자동조정 퍼지룰을 사용하였다.

3.2 자동조정 퍼지 알고리즘

자동조정 퍼지제어기를 구성하기 위해서 먼저 이 제어기의 입출력을 결정해야 한다. 원하는 영상특징벡터는

$$\vec{F}_{ref} = (f_{1, ref}, f_{2, ref}, f_{3, ref})^T \tag{1}$$

로 정의하고, 또 현재의 영상특징벡터는

$$\vec{F}_{act} = (f_{1, act}, f_{2, act}, f_{3, act})^T \tag{2}$$

로 정의하면, Fig 3에서처럼 제어기의 입력은

$$\vec{E}_F = \vec{F}_{ref} - \vec{F}_{act} \tag{3}$$

로 정의할 수 있다. 여기서, \vec{E}_F 는 영상특징의 에러를 나타낸다.

출력은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\vec{X} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3]^T \tag{4}$$

여기서, $\Delta\vec{X}$ 는 공간상에서 슬레이브 암이 현재의 위치에서 움직여야 할 거리를 나타낸다.

3.2.1 퍼지화

퍼지화(fuzzification)는 영상특징들의 오차를 입력으로 받아들여 이에 대응하는 룰을 활성화시킨다. 퍼지화는 크리스프(crisp)한 입력을 적절한 퍼지 변수로 바꾸어 주는 작업을 말한다. 지금부터 퍼지 변수는 대응되는 크리스프변수의 위에 ~(tilde sign)을 붙여 표시하기로 한다. 입력 퍼지변수들은 측정된 크리스프 값을 스케일링(scaling)하여 얻어지며, 이것은 다음과 같이 표시된다.

$$\tilde{e}_i = g_i - e_{F_i} \tag{5}$$

여기서, \tilde{e} , e_{F_i} 는 각각 퍼지입력과 영상특징 에러이고, g_i 는 영상특징 에러의 입력과 퍼지입력에 대한 스케일 값이다.

3.2.2 룰 베이스

룰 베이스는 영상특징들의 오차 값과 실제로 로봇이 움직여야 하는 위치변화량 사이의 관계를 정

의해 주는 룰들로 구성되어 있으며 다음과 같다.

RULE K : IF \bar{e}_1 is E_1^k , \bar{e}_2 is E_2^k , \bar{e}_3 is E_3^k
 THEN u_1 is U_1^k , u_2 is U_2^k , u_3 is U_3^k
 ($K=1, 2, \dots, l-1, l$) (6)

여기서, l 은 룰의 갯수를 나타내고, $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ 와 E_1^k, E_2^k, E_3^k 은 각각 퍼지입력변수들과 그에 해당하는 퍼지값들이고, u_1, u_2, u_3 와 U_1^k, U_2^k, U_3^k 은 각각 출력변수들과 그에 해당하는 퍼지값들이다. 그리고 이 출력퍼지값은 퍼지 싱글톤(fuzzy singleton)으로 정의하였다.

3.2.3 퍼지추론 및 비퍼지화

퍼지추론방식은 product sum방식을 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 이 방법을 이용하면 추론에 소요되는 계산량이 줄어 실시간 적용에 유리하며 후술하는 룰의 학습이 간단해지는 장점이 있다. 비퍼지화는 중심법을 사용하였다. 이 경우 퍼지추론과 비퍼지화의 결과 (Δx_i)는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta x_i = \frac{h_1 U_1^i + h_2 U_2^i + \dots + h_l U_l^i}{h_1 + h_2 + \dots + h_l} \quad (i=1, 2, 3) \quad (7)$$

여기서, i 는 절대 좌표계의 방향을 나타낸 것이고, h 는 퍼지입력이 $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ 일 때 적합도(the degree of fitness)를 나타낸 것이고, k 번째 룰의 적합도는 다음과 같이 표현된다.

$$h_k = \mu_{E_1^k}(\bar{e}_1) \cdot \mu_{E_2^k}(\bar{e}_2) \cdot \mu_{E_3^k}(\bar{e}_3) \quad (8)$$

3.2.4 룰 자동조정 알고리즘

룰 자동조정 알고리즘의 목표는 위의 식 (6)에서 출력변수의 멤버쉽함수 값을 조정하는 것이다. 룰의 조정에는 최급 강하법(steepest gradient)을 이용하였다. 먼저 영상특징들의 오차로부터 다음과 같이 가격함수(cost function) J 를 정의한다.

$$J = \frac{1}{2} [a_1 (e_1)^2 + a_2 (e_2)^2 + a_3 (e_3)^2] \quad (9)$$

여기서, e_1, e_2, e_3 는 각각의 영상특징 에러를 나타내고, a_1, a_2, a_3 는 각각의 영상특징 에러 e_1, e_2, e_3 에 대한 가중치이다. 룰의 출력퍼지값은 다음과 같이 갱신된다.

$$U_i^k(t+1) = U_i^k(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial U_i^k(t)} \quad (10)$$

여기서, η 는 양의 학습상수이고, t 는 샘플링시간

을 나타낸다. 식 (10)에서 $\frac{\partial J(t)}{\partial U_i^k(t)}$ 는 체인 룰을 적용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial J(t)}{\partial U_i^k(t)} = \frac{\partial J(t)}{\partial e_1(t)} \cdot \frac{\partial e_1(t)}{\partial U_i^k(t)} + \frac{\partial J(t)}{\partial e_2(t)} \cdot \frac{\partial e_2(t)}{\partial U_i^k(t)} + \frac{\partial J(t)}{\partial e_3(t)} \cdot \frac{\partial e_3(t)}{\partial U_i^k(t)} \quad (11)$$

식 (11)에서 $\frac{\partial e_j(t)}{\partial U_i^k(t)}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial e_j(t)}{\partial U_i^k(t)} = \frac{\partial e_j(t)}{\partial \Delta x_1(t)} \cdot \frac{\partial \Delta x_1(t)}{\partial U_i^k(t)} + \frac{\partial e_j(t)}{\partial \Delta x_2(t)} \cdot \frac{\partial \Delta x_2(t)}{\partial U_i^k(t)} + \frac{\partial e_j(t)}{\partial \Delta x_3(t)} \cdot \frac{\partial \Delta x_3(t)}{\partial U_i^k(t)} \quad (j=1, 2, 3) \quad (12)$$

한편, 식 (7)으로부터 $\frac{\partial \Delta x_i(t)}{\partial U_i^k(t)}$ 의 값은

$$\frac{\partial \Delta x_i(t)}{\partial U_i^k(t)} = \frac{h_k}{h_1 + h_2 + \dots + h_l} \quad (i=1, 2, 3) \quad (13)$$

로 구해진다.

위에서 식 (10)을 구하는데 식 (6) 및 식 (11) ~ (13)을 사용하였으며, 모두 체인룰을 적용하였다. 여기서 구한 새로운 퍼지출력값과 식 (8)에서 구한 현재 영상특징 입력에 대한 적합도로부터 식 (7)을 사용하여 현재의 위치에서 움직여야 할 거리 Δx 를 구하여 슬레이브 암을 움직인다.

4. 모의실험

4.1 모의실험과 실험의 목적

공간상에 있는 사각기둥 윗면의 절대위치를 측정하지 않고, 카메라를 통해서 얻은 영상만으로 그 물체를 시각서보하는 실험에 제안한 자동조정 퍼지룰을 이용한 시각서보 알고리즘을 적용하였다. 그리고, 영상특징 자코비안행렬을 구하여 시각서보하

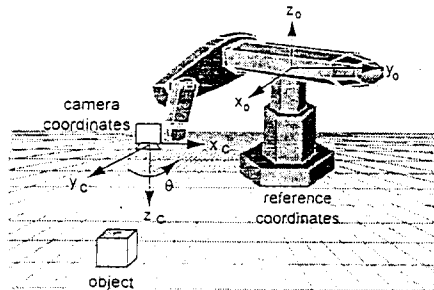


Fig. 4 The reference coordinates and the camera coordinates

Table 1 The conditions of simulation and experiment

Items	Value
Scale factor(K)	0.012343913(simulation)
Object area	625 mm ² (simulation) 640 mm ² (experiment)
Focal length	12 mm
Desired feature	$\bar{F}_{ref} = (0, 0, 55)^T$

는 방법⁽¹¹⁾과 비교하였다.

4.2 모의실험과 실험의 조건과 방법

모의실험 및 실험의 기준좌표계는 Fig. 4와 같다. 모의실험시에는 카메라를 로봇의 6축 끝에 부착한 것으로 하였다. 자세는 고정되고 절대좌표계에서 x, y, z 방향의 운동만을 고려하였다. 여기서 학습계수는 영상 픽셀상의 거리와 실제 거리와의 스케일상수를 내포한 값으로써 0.001로 하였으며,

가중치값은 x 축, y 축, z 축의 중요도를 모두 같다고 보고 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ 로 정하였고, 그 외 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 로봇의 좌표는 로봇에 부착된 엔코더값을 토대로 구한 것이고, 물체의 면적은 측정된 것이다. 영상특징은 카메라의 위치 변화에 따라 변화값의 차이가 큰 대상물체 표면의 중심위치(feature 1, feature 2)와 면적의 양의 제곱근(feature 3)으로 하였으며, Fig. 5에 나타내었다.

4.3 결과 및 토론

4.3.1 퍼지 룰의 학습성

퍼지 룰의 학습성을 살펴보기 위해서 사각기둥이 공간상의 특정한 위치에 있을 때 고정되지 않은 카메라를 부착한 슬레이브 암이 같은 초기 위치에서 출발하여 원하는 영상특징이 될 때까지 시각 서보하는 실험을 50회 하였다. Fig.7(a), (b), (c)는 초기임의의 물로 시작하여 로봇이 최종 영상이 될 때까지 움직일 때 영상특징 에러의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 7(d), (e), (f)는 움직이는 경로를 xy 평면, xz 평면, yz 평면에서 나타낸 결과이다. Fig 8은 학습이 50회 일어날 경우에 대하여 나타낸 것이다. 여기서, 1회의 학습은 로봇이 초기위치에서 시각서보하여 최종 목표점까지 도달하는 것을 의미하며, 초기 1회 실험시에 시각서보 시간이 1시간 이상 걸리어 실험자가 인위적으로 멈춘 것도 1회 학습을 한 것으로 간주하였다.

Table 2에 대상 표면의 중심위치, 로봇의 시작점과 최종점을 나타내었다. 이 결과에서 초기 학습시는 영상특징에러가 각각 모두 0으로 수렴하지 않았다. 이것은 초기실험시에 1시간 동안에 수렴하지 않아서 도중에서 시각서보를 멈추었기 때문이다. 50회 학습시에는 에러가 거의 0에 수렴하였고, 로

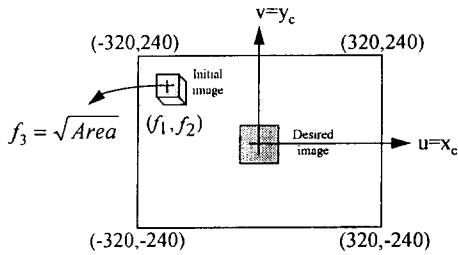


Fig. 5 Features of the object image

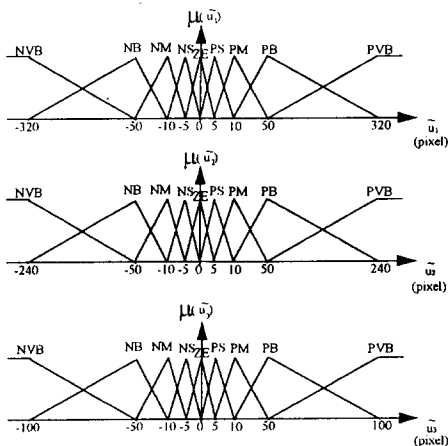


Fig. 6 Fuzzy input membership functions

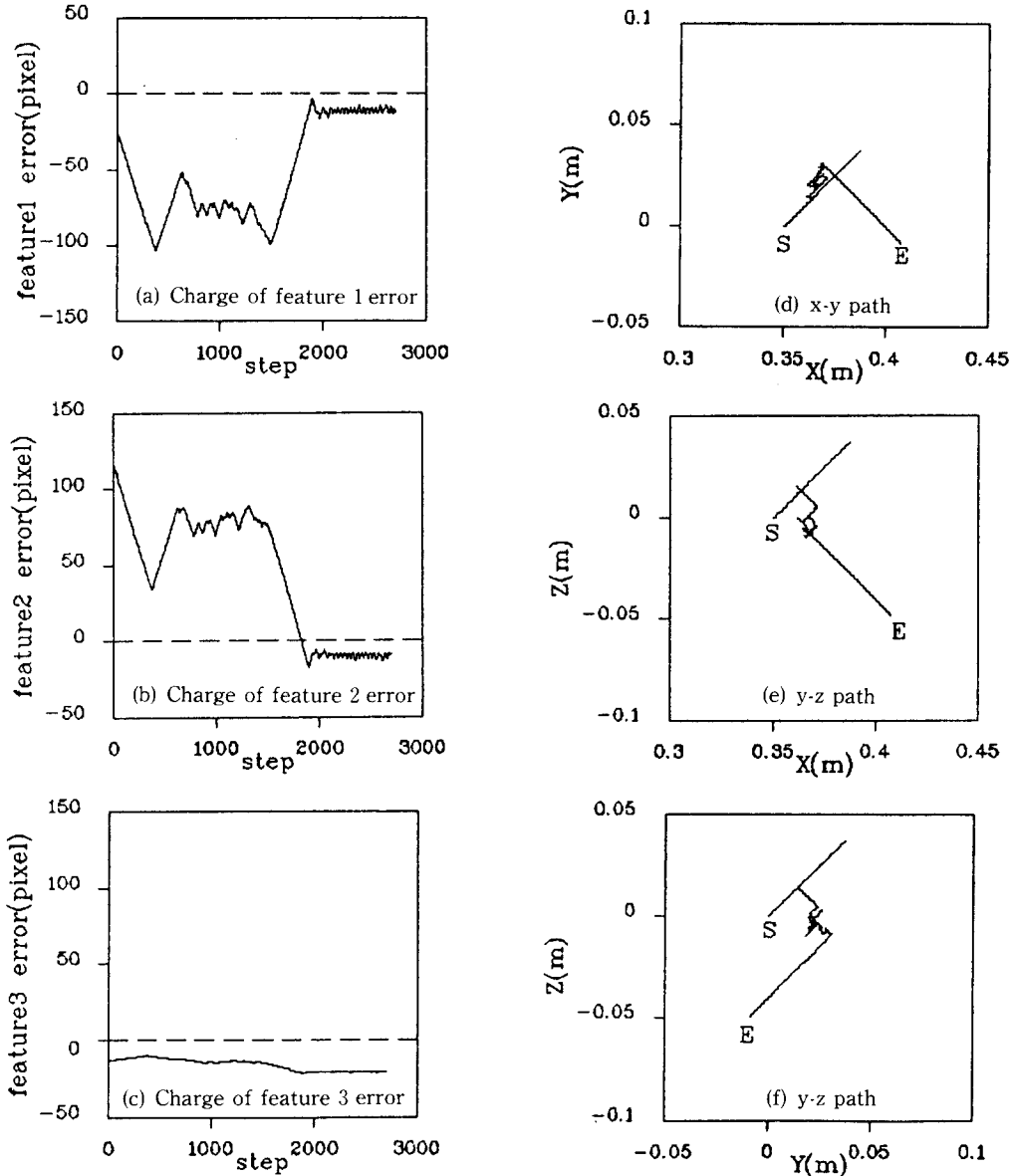


Fig. 7 The change of the feature errors and the corresponding paths of the slave arm(Experiments-the number of learning=0)

봇의 최종점과 원하는 목표점이 일치하였다.

이 결과로부터 초기에는 시작점에서 최종점까지 가는데 상당히 많은 시간(48초 정도)이 걸리고, 긴 이동 거리를 움직였지만, 학습이 진행됨에 따라 시간과 이동 거리는 줄어들어 학습이 50회 된 후에는 걸리는 시간이 약 8초로 줄었고, 이동거리도 거의 직선에 가까워짐을 알 수 있다. 여기서, 로봇의 출발점과 최종점의 거리는 66.89 mm인데 약 8초를

소모한 것은 로봇이 1회 움직임의 제한양을 x_0 축, y_0 축, z_0 축에 대해서 각각 0.15 mm로 하였으며, 로봇은 1회 움직이는데 16 msec가 걸린다는 것을 감안하면 거의 직선 경로로 최대한 움직인 것을 알 수 있다.

위의 한점 외 다른 위치에 대해서도 학습성을 알아보고자 사각기둥의 위치를 여러 위치(Fig 9 참조)로 옮기면서 시각서보하는 모의실험을 해 보았다.

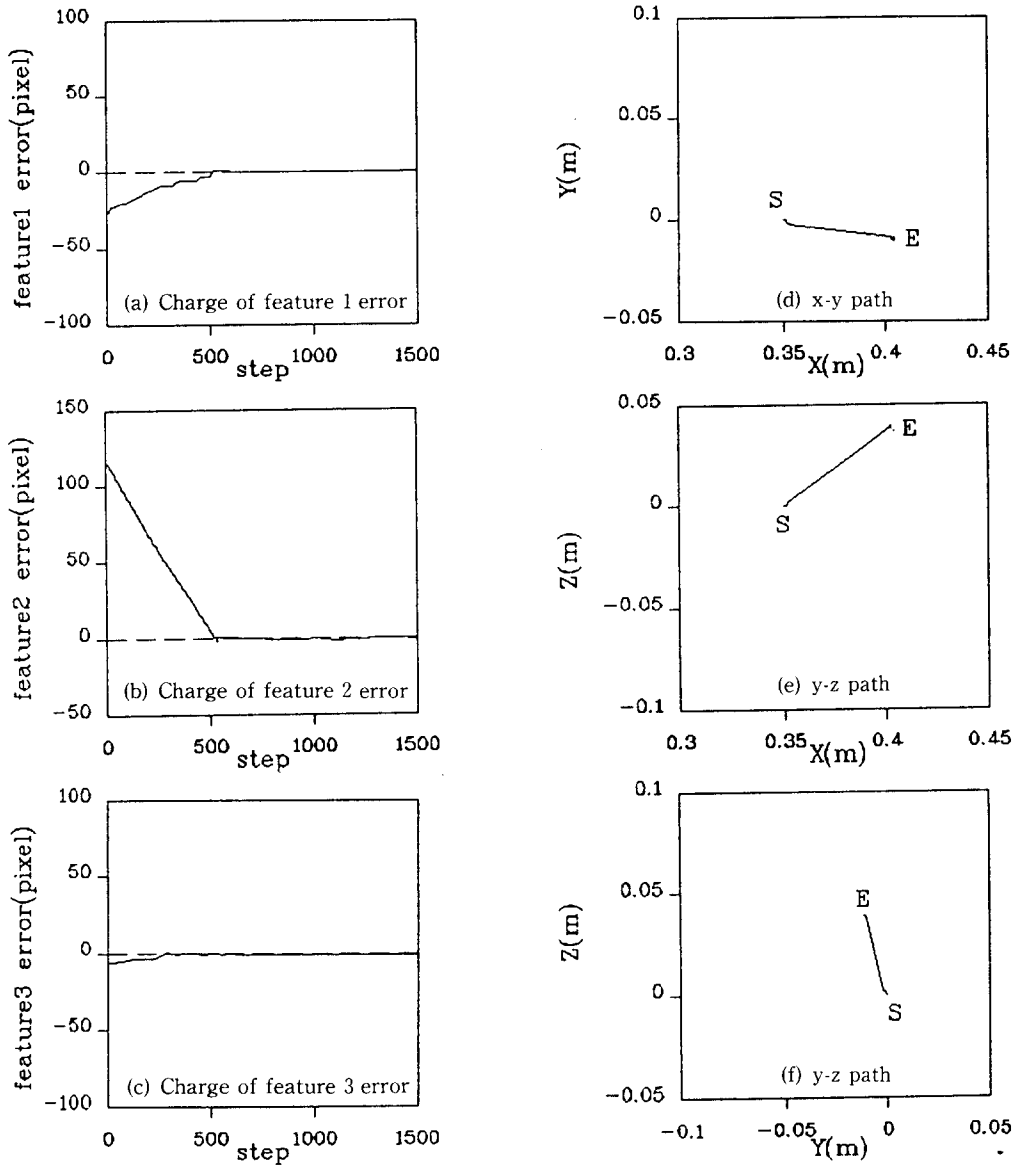


Fig. 8 The change of the feature errors and the corresponding paths of the slave arm (Experiments-the number of learning=50)

Table 2 Simulation results

Center value of the target object	(450, 100, -800)
Initial and final point of the robot	(350, 0, -100), (450, 100, -544)
Moving distance of the robot	(100, 100, 444)
Initial and final point of image features	(-173, 99, 35), (0, 0, 100)
Change of image features	(173, 99, 65)

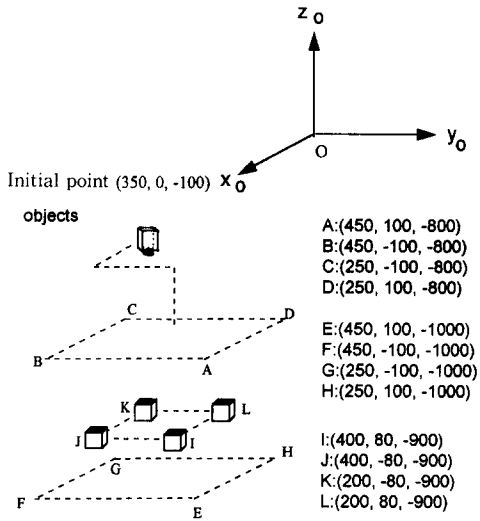


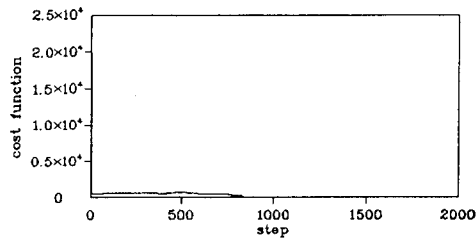
Fig. 9 The various points of the target objects

Fig. 10(a), (b), (c)는 각각 대상 물체 표면 중심의 위치가 Fig. 9의 A, B, D일 때 초기의 임의의 물로 로봇이 초기점에서 최종점까지 움직일 때 가격함수의 변화를 나타낸 것이다.

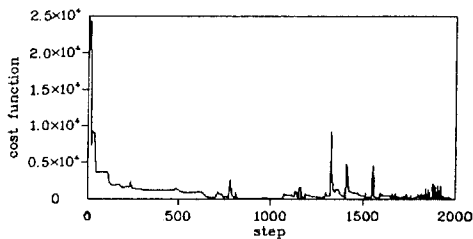
이들 결과로부터 초기에 올바르지 못한 방향의 물이 있어 물체 추적시 많은 스텝이 소요되고, 중간 중간에 틀린 방향으로 추적하는 경우도 있지만, 학습에 의해 이들이 올바른 방향의 물로 학습되어 추적하는데 성공함을 알 수 있다.

Fig. 11(a), (b), (c)는 각각 대상 물체 표면 중심의 위치가 Fig 9의 A, B, D일 때 학습이 20회 일어날 때의 가격함수의 변화를 나타낸 것이다. 이 경우는 대상 물체 추적시 약 15 스텝 정도가 소요되어 이것은 초기의 약 2000 스텝에 비해서 상당히 줄어들음을 알 수 있다.

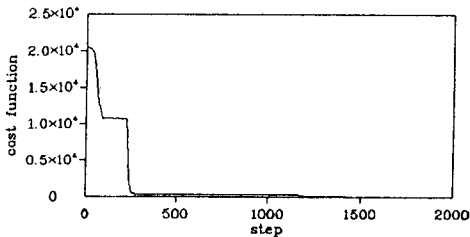
위의 결과로부터 여러 위치에 대해서 초기의 임



(a) Center point = (450, 100, -800)

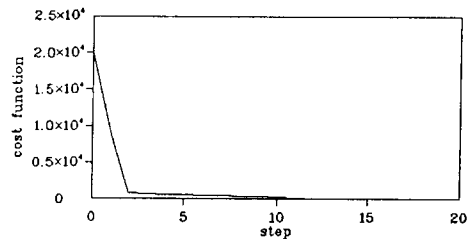


(b) Center point = (450, -100, -800)

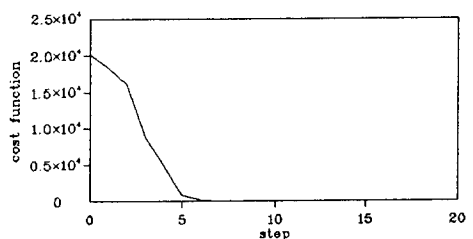


(c) Center point = (250, 100, -800)

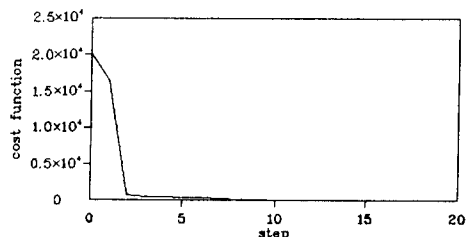
Fig. 10 The change of the cost function for the various position of the target object with initial rules (Simulation-learn number = 0)



(a) Center point = (450, 100, -800)

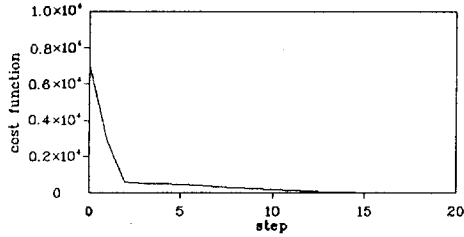


(b) Center point = (450, -100, -800)

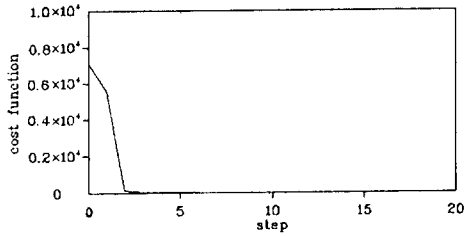


(c) Center point = (250, 100, -800)

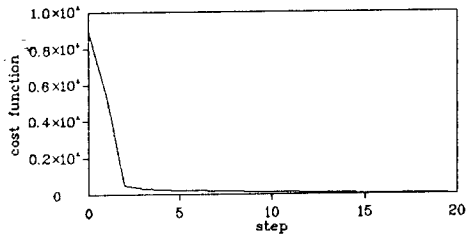
Fig. 11 The changes of the cost function for the various position of the target object (Simulation-learn number = 20)



(a) Center point = (400, 80, -900)



(b) Center point = (400, -80, -900)



(c) Center point = (200, -80, -900)

Fig. 12 The changes of the cost function for the various position of the target object with learned rules (Simulation-learn number=0)

의 물이 주어지더라도 충분히 학습이 진행되 후에 잘 추적하며 추적시간도 상당히 적게 걸린다는 것을 알 수 있다.

4.3.2 학습된 룰의 적용성

여기서는 학습된 룰의 적용성을 살펴보기 위하여 시각 장치의 초기위치는 일정하게 하고 대상 표면의 중심이 여러 위치에 있는 경우에 대하여 연속적으로 학습을 하였다. 이 경우의 카메라의 초기위치와 대상 물체의 위치는 Fig. 9에 나타나 있다. 학습은 다음과 같은 순서로 각 점에 대해 20회씩 실시하였다.

학습순서 : A → B → C → D → E → F → G → H

Fig. 12(a), (b), (c)는 위에서 학습된 룰을 이

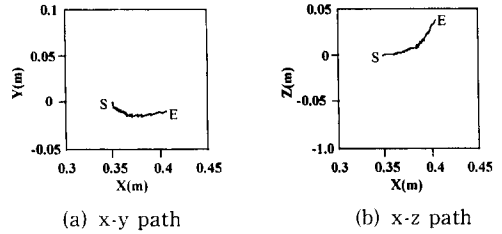


Fig. 13 The results of the moving paths when Jacobian matrix is used (Experiments)

용하여 목적 물체의 윗면 중심의 위치가 Fig. 9의 I, J, K일 때 시각서보의 결과를 나타낸 것이다. 여기서는 이 결과로부터 학습이 되는데 사용된 특정점(A, B, C, D, E, F, G, H)뿐만 아니라 그 점들의 근처에 있는 점(I, J, K)에서도 시각서보가 잘 되도록 룰이 학습되었다는 것을 알 수 있었고, 그 특정점이 학습되는 동안 지나온 다른 점에 대해서도 역시 올바른 방향의 물로 바뀌었다는 것을 알 수 있다.

4.3.3 자코비안행렬을 이용한 시각서보와 비교

영상특징 자코비안행렬을 이용한 시각 서보에 대한 결과를 Fig. 13에 나타내었다.⁽¹¹⁾ Fig 13의 (a)와 (b)에 각각 xy, xz의 로봇경로에 대해서 나타내었다. 자코비안행렬을 구함에 있어서 비선형식의 선형화과정에서 발행하는 오차와 모델화하는 과정에서 생기는 오차를 포함하기 때문에 영상특징오차에 대한 로봇의 위치오차를 정확하게 구하지 못한다. 실험결과에서도 그 영향이 나타나 직선경로로 움직이지 못하고, 곡선경로를 움직임을 볼 수 있다. Fig. 13의 (a), (b)를 각각 Fig. 8의 (d), (e)와 비교할 때 Fig 8의 결과가 좀 더 직선경로에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 자동조정 퍼지룰을 이용한 방법이 자코비안행렬의 역행렬을 구하여 시각서보하는 경우 나타나는 오차를 학습을 통하여 보정하였다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동조정 퍼지룰을 이용하여 실시간내 슬레이브 암이 대상 물체를 시각서보하는 알고리즘을 제안하였다. 학습 알고리즘은 퍼지 룰을 초기에 랜덤하게 주고 미리 정의된 가격함수를 최소화할 수 있는 최급 강하법을 이용하였다. 제안

된 알고리즘은 x 축, y 축, z 축의 3자유도의 슬레이브 암에 대하여 적용하였으며, 그 효용성을 살펴보기 위해 여러 위치에서 실험과 모의실험을 행하였다. 그리고, 그 결과로 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

(1) 초기에 학습되지 않은 임의의 물로 시각서보 할 때에는 추적 시간도 많이 소요되며, 대상 물체도 잘 추적하지 못하였지만, 충분히 학습된 물을 이용할 때에는 실시간 내에 거의 직선경로로 대상 물체를 잘 추적하였다.

(2) 학습된 물을 이용하면 학습시 실험하지 않은 다른 임의의 위치에 대상 물체가 있는 경우에도 잘 추적함으로써 본 연구에서 제안한 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

(3) 제안된 알고리즘은 자코비안을 이용한 시각서보 기법에서 선형화된 자코비안 행렬의 사용에 기인하는 오차를 감소시켰다.

앞으로의 연구 과제는 6자유도의 실시간 시각서보가 가능하도록 제안된 알고리즘을 확장하는 것과 실제 원격 작업에 적용하는 것이다.

참고문헌

- (1) Pennington, J.E., 1986, "Space Telerobotics: a few more Hurdles," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 813~816.
- (2) Lee, S.H., 1993, "Intelligent Sensing and Control for Advanced Teleoperation," *Proc. IEEE Int. Sym. on Intelligent Control*, June, pp. 19~28.
- (3) Iasegawa, Suehiro, Ogasawara, 1990, "An Integrated Tele-Robotics System With a Geometric Environment Model and Manipulation Skills," *IEEE Internation Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 335~341.
- (4) Hashimoto, K., Kimoto, T., Ebine, T. and Kimura, H., 1991, "Manipulator Control with Image-Based Visual Servo," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Sacramento, California*, April, pp. 2267~2272.
- (5) Schrott, A., 1992, "Feature-Based Camera-Guided Grasping by an Eye-in-Hand Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nice, France-May, pp. 1823~1837.
- (6) Lee, E., Sanderson and Charles, P., 1987, "Dynamic Sensor-Based Control of Robot with Visual Feedback," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Oct, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404~417.
- (7) Feddema, 1989, "Automatic Selection of Image Features for Visual Servoing of a Robot Manipulator," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, May, pp. 832~837.
- (8) Feddema, John, T. and Mitchell, O. R., 1989, "Vision-Guided Servoing with Feature-Based Trajectory Generation," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, Oct, Vol, No. 5, pp. 691~700.
- (9) Jang, W., "Concepts of Augmented Image Space and Transformed Feature Space for Efficient Visual Servoing of an Eye-In-Hand Robot," Accepted for Publication in *Robotica*.
- (10) Yoshimi, B. H. and Allen, P.K., 1994, "Active, Uncalibrated Visual Servoing," *Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May, pp. 156~161.
- (11) 장 원, 1991, "영상특징을 이용한 로봇의 시각적 구동방법," Ph. D dissertation, KAIST.
- (12) 박종철, 1991, "퍼지논리를 이용한 로봇의 영상추적," 석사논문, 한국과학기술원.
- (13) 김용건, 1992, "영상특징과 적응제어를 이용한 2차원 물체의 경계추종에 관한 연구," 석사논문, 한국과학기술원.
- (14) 김주곤, 차동혁, 김재선, 조형석, 김승호, 1994, "교정되지 않은 카메라를 이용한 원격로봇의 시각궤환제어," 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 473~478.
- (15) 김동수, 1994, "영상 불변량을 이용한 능동비전 시스템 구현에 관한 연구," 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (16) Mizumoto, M., 1992, "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods," *Proc. of IEEE*, pp. 709~715.
- (17) 김주곤, 1995, "자동조정 퍼지논리를 이용한 슬레이브 암의 시각서보기법," 석사학위논문, 한국과학기술원.