

工學碩士 學位論文

B-스플라인 펄지 제어기를 이용한
센서 데이터 융합

2002年 2月

釜慶大學校 大學院

機 械 工 學 科

李 京 洙

工學碩士 學位論文

B-스플라인 퍼지 제어기를 이용한 센서 데이터 융합

Sensor Data Fusion Using
B-spline Fuzzy Controller

指導教授 安斗星

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2002年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

李京洙

李京洙의 工學碩士 學位論文을 認准함

2001年 12月 26日

主 審 工學博士 權 純 在 印

委 員 工學博士 李 一 永 印

委 員 工學博士 安 斗 星 印

목 차

ABSTRACT

1. 서 론	1
2. 퍼지 제어기	4
2.1 퍼지 이론의 개념	4
2.1.1 보통 집합과 퍼지 집합.....	5
2.2 B-스플라인 퍼지 모델.....	7
2.2.1 B-스플라인 기저 함수.....	7
2.2.2 B-스플라인 보간기.....	11
2.2.3 B-스플라인 퍼지 모델의 학습.....	13
3. 디지털 신호 처리기	16
3.1 디지털 신호 처리의 개념.....	16
3.2 하드웨어 구성	26
3.3 소프트웨어	29
4. 센서 데이터 융합	30
4.1. 센서 데이터 융합의 개념.....	30
4.2. 힘 센서	31
4.3. 비전 센서	34
5. 시뮬레이션 및 실험 결과	35
6. 결론	42
참고 문헌	44

Sensor Data Fusion Using B-spline Fuzzy Controller

Kyung-Soo Lee

School of Mechanical Engineering Graduate School

Pkyong National University, Busan, Korea

Abstract

The main object of this work is the development of an intelligent multi-sensor integration and fusion model that uses fuzzy inference system. Sensor data from different types of sensors are integrated and fused together based on the confidence which is not typically used in traditional data fusion methods. The information is fed as input to a fuzzy inference system(FIS). The output of the FIS is weights that are assigned to the different sensor data reflecting the confidence in the sensor's behavior and performance. We interpret a type of fuzzy inference system as an interpolator

of B-spline hypersurfaces. B-spline basis functions of different orders are regarded as a class of membership functions. This paper presents a model that fuses the data from two different types of sensors and extract the shape of object's surface.

1. 서 론

최근 반도체 산업의 급속한 진보로 인해 많은 양의 데이터를 고속으로 처리하는 것이 가능해 졌다. 특히 디지털 시그널 프로세서(DSP)는 디지털 신호를 빠른 속도로 처리하기 위한 전용 소자로서 그 활용 범위가 점차 확대되고 있다.

퍼지로지 시스템은 비선형 프로세스의 모델링이나 수학적 모델이 없는 시스템에 대해 일반적 메커니즘으로 널리 사용되고 있다. 대부분의 퍼지 시스템에서, 언어적 표현은 퍼지 집합에 의해 정의된다⁽¹⁾. 종래의 집합(크리스프 집합)에서는 어떤 요소가 그 집합에 속하는가 아닌가의 두 가지 값으로 규정하는 데 대해 퍼지 집합에서는 어떤 요소가 그 퍼지 집합에 속하는 그레이드로 규정된다. 근사화 이론들에 사용되는 퍼지 제어기는 일반적으로 단순한 질적 정보만 고려한다. 따라서, 그 추론 결과가 퍼지 집합의 그레이드나 형태에 많은 영향을 받지 않는다. 더욱이, 퍼지 제어기의 적응성은 인간의 뇌를 모델로 하기 때문에 구조적 방법으로 설계하기 어렵다. 따라서 많은 응용분야에서 제어 변수들을 실험적으로 얻으며 이렇게 얻어진 변수들의 수는 매우 많다. 퍼지 모델을 만드는 일반적인

해법은 이론적 관점에서 관심을 갖게 되었고, 이런 이론적 관심의 결과는 퍼지 제어기의 응용범위를 보다 복잡한 지능적인 제어 문제로 확대하여 적용할 수 있을 것이다. 퍼지 제어를 산업 현장에 적용하기 위해 다음 두 가지 주된 문제를 극복해야 한다. 먼저 퍼지 소속 함수의 형태를 어떻게 선택할 것인가 하는 문제와 두 번째로, 최적의 제어 효과를 얻기 위한 제어 변수 결정문제가 자동적인 과정에 의해 해결되어야 한다. 전자의 관점에서 대부분의 응용에서는 삼각형 형태나 사각형 형태의 소속 함수가 사용되어 왔고 최근에는 가우시안 퍼지 소속 함수가 사용되고 있다⁽²⁾. 그러나 이런 함수들은 부가적인 변수들을 필요로 하기 때문에 제어를 더욱 복잡하게 만드는 단점이 있다. Mamdani⁽³⁾ 퍼지 컨트롤러에서는 서로 다른 제어 분야에 대해 기호적인 규칙을 직접 사용하였다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 퍼지 제어기의 응용분야가 확대되면서, 최적 퍼지 제어기의 구조적인 설계문제가 더욱더 중요하게 되었다⁽⁶⁾. 최근에는 TSK 모델⁽⁷⁾⁽⁸⁾이 함수의 근사화와 교사학습에 많이 사용되고 있다⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. 그러나 TSK 모델은 입력 변수들의 다항식적인 결합을 이용하므로 전문가의 직관적인 지식을 쉽게 추출할 수 없다⁽¹¹⁾. J. Zhang과 A. Knoll은 퍼지 집합의 전제부를 구조적으로 설정할 수 있고, 학습을 통해 결론부를 제어 동작에 적용할 수 있도록

하는 B-스플라인 함수를 이용한 퍼지 모델을 제시 하였다⁽¹²⁾. 그러나 이 모델의 소속함수는 퍼지 소속함수의 필요조건을 완전히 만족시키지 못한다. 따라서 본 논문을 통해 B-스플라인 함수를 이용한 퍼지 모델을 수정하여 새로운 퍼지 모델을 개발하고, 이것을 센서 융합에 적용함으로써 개발된 퍼지 모델의 우수성과 센서 융합의 한 방법으로 퍼지 제어기가 응용될 수 있음을 보이려고 한다.

2. 퍼지 제어기

2.1 퍼지 이론의 개념

컴퓨터가 발달함에 따라 엄밀하고 정확한 이론으로 알려져 있는 현대 제어이론을 사용하고, 복잡한 시스템을 정형화 하려면, 광대한 노력이 필요하고, 또 그것을 실행하는 정밀한 컴퓨터 프로그램을 만들지 않으면 안 된다. 제어해야 할 대상이 점점 복잡하게 되는 이상, 컴퓨터가 아무리 고속화해도 대응할 수 없다. 즉 모든 것을 상세하게 하나하나 명확히 기술하지 않으면 안 된다는 결론에 도달한다. 게다가, 이런 문제를 해결했다고 해도, 시스템에 관한 항목의 전부를 보여주는 것이 불가능하고, 또 각종 파라미터의 값을 정확하게 결정해 주는 것도 불가능한 경우가 많다. 따라서, 애매한 것은 애매한 채 취급하는 이론의 필요성이 대두되고, 이것이 퍼지 집합론을 떠오르게 한 큰 계기가 된 것이다.

퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해 주는 방법으로서 1965년 미국 버클리 대학의 자데(Lofti A. Zadeh)교수에 의해서 처음 소개 되었다. 퍼지이론은 애매하게 표현된

자료를 우리에게 유용한 자료로 만들기 위하여, 퍼지집합(fuzzy set), 퍼지논리(fuzzy logic), 퍼지숫자(fuzzy number)등의 개념을 포함하고 있으며 수학적인 계산방법도 잘 개발되어 있다. 정확하게 알지 못하는 상황을 표현할 때 전통적으로 확률을 사용하였다. 그러나 불확실성도 단정적으로 나타내므로 옳은 표현이라 할 수 없다. 퍼지의 경우는 애매한 표현을 사용함으로써 불확실성 자체를 보다 잘 표현한다.

2.1.1 보통 집합과 퍼지 집합

보통 집합(crisp set)은 임의의 집합 X 에 임의의 원소 x 가 소속되어 있으면 이 관계를 $x \in X$ 와 같이 표시하고 x 가 집합 X 의 한 원소 또는 한 멤버(member)라고 말한다. 또한 원소 x 가 집합 X 의 원소가 아니면 $x \notin X$ 와 같이 표시한다. 일반적인 집합의 표시 방법은 각 원소의 이름을 나열하는 방법이다(원소 나열법). 이 방법은 원소의 개수가 유한개인 유한집합의 경우에 많이 사용되는데 예를 들어서 원소들의 이름이 a_1, a_2, Λ, a_n 이면 이것들로 이루어진 집합 A 는 $A = \{a_1, a_2, \Lambda, a_n\}$ 로 표시한다. 또 다른 집합의 표시방법은 원소의 특성들을 명시하는 방법이다(조건 제시법). 예를 들어서 어느 집합 B 에 소

속된 원소들이 특성 p 를 만족해야 한다면 집합 B 는 $B = \{b | b \text{는 특성 } p \text{ 만족}\}$ 이때 기호 “|”는 “~와 같다(such that)”의 뜻을 내포하고 있다.

퍼지 집합(fuzzy set)은 보통 집합과 달리 어떤 원소가 집합에 소속되어 있느냐(소속함수 $\mu(x)=1$) 아니냐 (소속함수 $\mu(x)=0$) 뿐만 아니라, 소속 함수의 값이 0과 1사이의 임의의 값을 가질 수 있도록 하는 집합이다. 원소 x 가 퍼지 집합 X 에 소속될 가능성을 $\mu(x)$ 로 표시하고 이 가능성은 0과 1사이의 값이 된다. 결국 보통 집합에 비하여 퍼지 집합은 집합의 경계가 애매한 집합이라 생각할 수 있다. 일반적으로 원소들이 이산(discrete)일 때는 각 원소별로 소속정도(membership degree, grade)를 $A = \{(2, 1.0), (3, 0.5)\}$ 또는 $A = 1.0/2 + 0.5/3$ 와 같이 표시할 수 있다. 여기서 ‘+’표시는 덧셈의 의미가 아니고 합집합의 의미를 가진다. 좀더 일반적으로 표현하면 $A = \{(x, \mu_A(x))\}$ 또는 $A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i$ 한편 원소들이 연속적일 때는 $A = \int \mu_A(x) |x$ 와 같이 나타낼 수 있다.

2.2 B-스플라인 퍼지 모델

2.2.1 B-스플라인 기저 함수

일반적으로, 퍼지 규칙 설정에 대한 평가는 보간법 과정으로 생각할 수 있다. 따라서, x 를 어떤 정의구역 $[x_0, x_m]$ 에서 정의되는 제어계의 일반적 입력 변수라고 가정하면 정렬된 매개변수들의 순서가 주어진다. 그리고 i 번째의 k 차수의 B-스플라인 기저 함수(즉, B-함수) $X_{i,k}$ 는 재귀적으로 다음과 같이 정의된다.

$$X_{i,k}(x) = \begin{cases} \begin{cases} 1 & \text{for } x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} & \text{if } k=1, \\ \frac{x-x_i}{x_{i+k-1}-x_i} X_{i,k-1}(x) + \frac{x_{i+k}-x}{x_{i+k}-x_{i+1}} X_{i+1,k-1}(x) & \text{if } k>1 \end{cases} \quad (1)$$

식(1)의 B-함수는 3차 이상의 차수를 가질 때 그 최대값이 차수에 영향을 받으며 일반적인 퍼지 소속함수가 그 퍼지 집합이 정규가 되기 위한 조건을 만족시키지 못한다.

퍼지 집합의 일반적 속성으로 퍼지 집합의 정규성, 불록성, 퍼지 집합 농도가 있다. 정규성은 한 원소가 그 집합내의 최대 소속함수 값이 1이 된다는 것이고, 불록성은 집합내의 두 원

소를 택했을 때 두 원소 사이의 다른 원소들의 소속 함수 값이 두 원소 중 소속 함수 값이 작은 원소의 소속 함수 값 보다 작은 소속 함수가 없다는 것이다. 퍼지 집합의 농도는 그 퍼지 집합에 속한 원소들의 소속함수의 합을 의미한다.

본 연구에서는 Z. Zhang 과 A. Knoll이 제시한 B-함수에 수정을 가해 정규성을 만족시킬 수 있도록 하였다. 이 때의 B-함수는 다음과 같이 주어진다.

$$X_{i,k}(x)_{\text{modified}} = \frac{X_{i,k}(x)}{\max(X_{i,k}(x))} \quad (2)$$

그림 1에서 보는 것과 같이 식(1)의 B-스플라인 기저 함수를 사용했을 때 3차 이상의 퍼지 집합에서 각 소속함수의 최대 정도값이 1이 아님을 알 수 있다. 즉 코어(core)가 존재하지 않는다. 그러나, 식 (2)의 수정된 B-스플라인 기저 함수를 사용했을 때는 그림 2와 같이 3차 이상의 퍼지 집합에서 각 소속함수의 정도값이 1이 되도록 수정을 가하여 퍼지 집합의 소속함수를 정의 하였다.

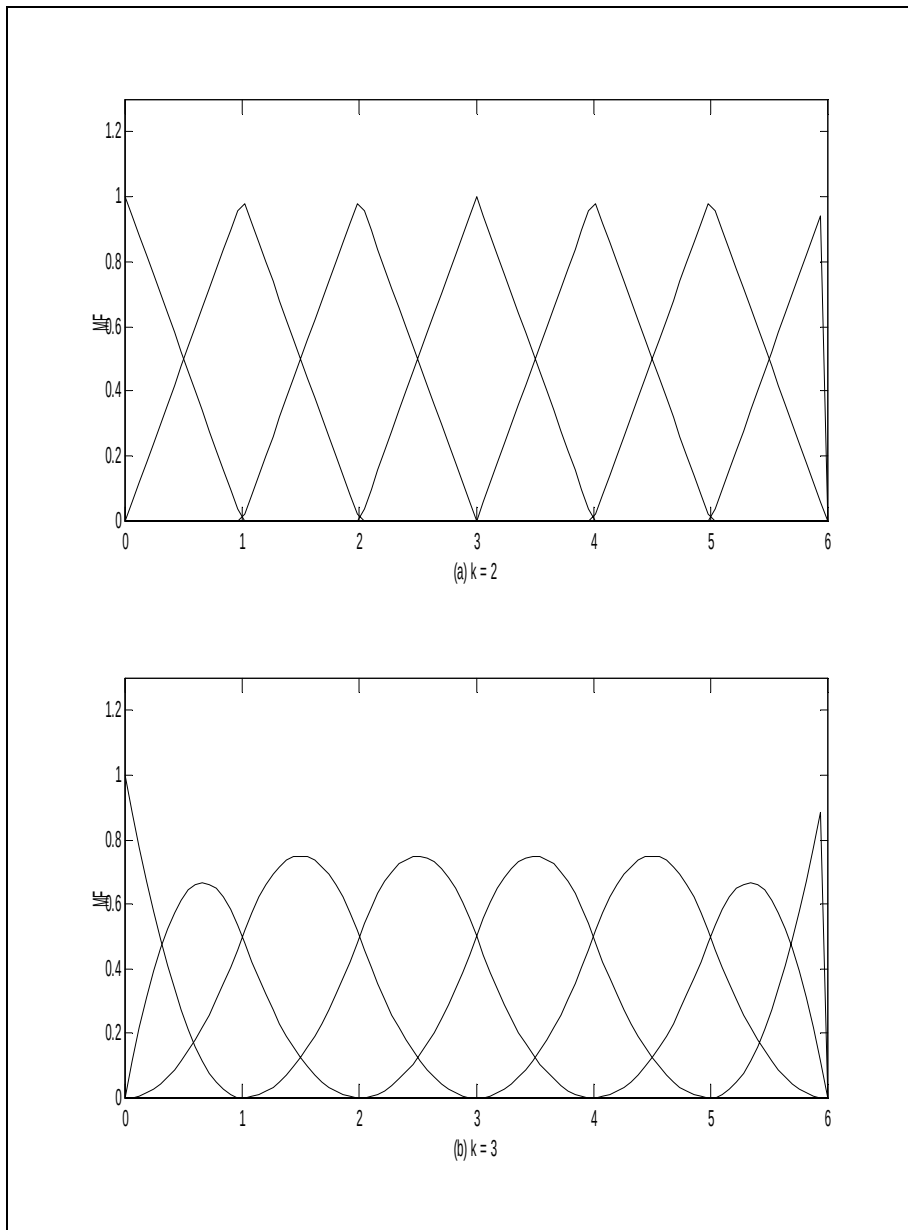


Fig. 1 . Fuzzy sets defined by B-spline basis function of different order.

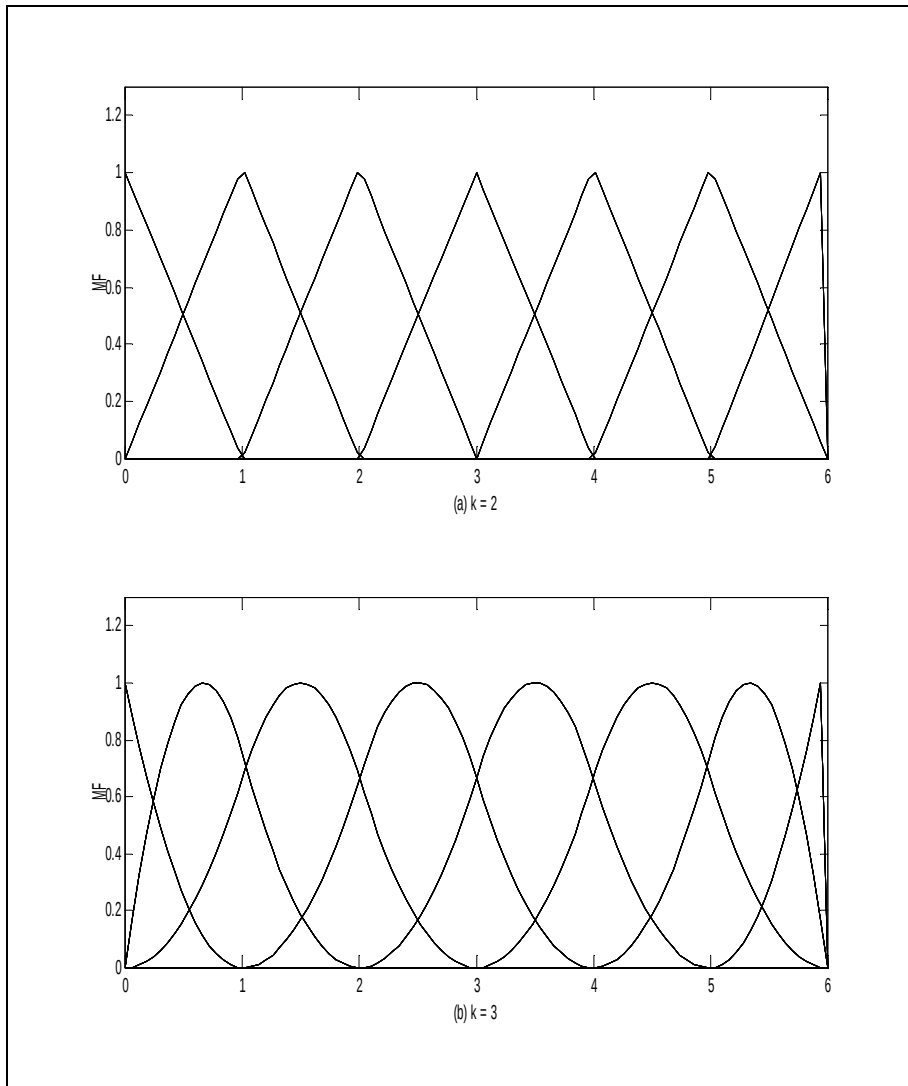


Fig. 2 . Fuzzy sets defined by modified B-spline basis function.

2.2.2 B-스플라인 보간기

먼저 파라미터 축이 입력변수 x , 출력 변수가 y 라고 가정한다. x 는 B-함수에 의해 정의된다. y 의 언어적 요소를 만족시키기 위해, 단순히 실제 들어오는 입력을 퍼지 집합으로 사상시켰을 때, 들어오는 입력에 해당하는 값만 소속도를 1로 하고 나머지 부분은 소속도를 0으로 하는 퍼지 싱글턴 y_i 가 사용된다.

본 논문에서는 식 (3)과 같이 언어적 규칙에 따른 퍼지 규칙 집합을 정의 한다.

$$\begin{aligned} \text{Rule (i): IF } x_1 \text{ is } X^1_{i,k} \text{ and } x_2 \text{ is } X^2_{i,k} \\ \text{THEN } y \text{ is } Y_j \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, x_1 과 x_2 는 1번째와 2번째의 입력이고, k 는 B-스플라인 기저 함수의 차수이며, X 는 x 에 대한 언어적 표현이다. 그리고 Y_j 는 출력에 대한 제어 점이 된다.

출력 y 는 다음 식으로 정의 된다.

$$y = \frac{\sum_{i_1=1}^{m_1} \cdots \sum_{i_n=1}^{m_n} (Y_{i_1 \cdots i_n} \prod_{j=1}^n X^j_{i,j,k_j}(x_j))}{\sum_{i_1=1}^{m_1} \cdots \sum_{i_n=1}^{m_n} \prod_{j=1}^n X^j_{i,j,k_j}(x_j)} \quad (4)$$

이 표현은 일반적인 NUBS(nonuniform B-spline)로 표현되

는 다변량의 B-스플라인 모델이다.

일부 퍼지 제어 시스템은 각 규칙에 가중치를 사용하기도 한다. 가중치를 사용하는 것은 Mamdani 형태의 제어기에 있어서 제어 공간의 형태를 보다 복잡하게 만든다. 그러나, 결과를 좋게 적응 시키기에는 적합하다. 위 식(3)식에서 각 B-스플라인 퍼지 제어기의 규칙에 가중치를 첨가하면 그 출력은 NURBS(non-uniform rational B-spline)형태와 일치하게 되고, 수식적인 표현은 식(5)과 같다.

$$y = \frac{\sum_{i_1=1}^{m_1} \cdots \sum_{i_n=1}^{m_n} w_{i_1, \dots, i_n} Y_{i_1, \dots, i_n} \prod_{j=1}^n X^{j_{i, k_j}}(x_j)}{\sum_{i_1=1}^{m_1} \cdots \sum_{i_n=1}^{m_n} w_{i_1, \dots, i_n} \prod_{j=1}^n X^{j_{i, k_j}}(x_j)} \quad (5)$$

CAD에서 사용된 B-스플라인은 B-스플라인 기저 함수가 매우 효과적임을 보여준다. 특히 NUBS는 비합리적인 어떤 정밀도의 형태도 근사화 시킬 수 있다. NURBS곡선은 주로 원과 사각형등과 같은 특별한 해석적 함수의 정확한 모델링에 사용된다. 각 B-스플라인 제어기의 규칙에서의 제어 꼭지점은 제어 동작과 같은 역할을 한다. 즉 제어 꼭지점은 제어 동작과 직접적으로 관련이 있다.

2.2.3 B-스플라인 퍼지 모델의 학습

일반적인 퍼지 제어기는 제어 대상을 표현하는 퍼지 규칙과, 제어 입력, 그리고 규칙과 입력에 적당한 사상관계를 표현하는 비퍼지화 방법이 결정되면 그것을 시스템에 적용하여 사용하게 된다. 본 논문에서는 퍼지 모델을 사용하면서 동시에 제어 꼭지점이라는 B-스플라인의 개념을 도입하여 제어 입력과 그에 따른 출력을 비교하여 그 오차를 수정할 수 있도록 제어 꼭지점을 수정한다.

학습은 크게 교사학습(supervised learning)과 비교사학습(unsupervised learning)으로 나눌 수 있다.

교사학습 알고리즘은 바라는 응답에 의해서 분류된 데이터가 필요하다. 즉 감독자가 모든 입력에 대해 계의 최적의 출력을 알려주어야 한다. 이 학습법은 입력과 출력쌍들의 집합을 기본으로 하여 제어기를 학습 시킨다.

일반적으로 원하는 출력과 제어기의 출력 사이의 오차는 다음과 같은 제곱오차를 사용한다.

$$E = \frac{1}{2} (y - y_d)^2 \quad (6)$$

여기서 y 는 학습중인 현재의 출력이고 y_d 는 원하는 출력이

된다. 식 (6)에서 표시된 오차를 사용하여 B-함수의 퍼지 규칙에서 제어 꼭지점 Y_i 를 수정한다. 오차를 이용한 수정 방법으로 최급 하강법(gradient descent)을 사용한다. B-스플라인 퍼지 모델의 최급 하강법은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta Y_{i_1, \dots, i_n} &= -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial Y_{i_1, \dots, i_n}} \\ &= -\varepsilon (y - y_d) \cdot \prod_{j=1}^n X_{i_i, k_j}(x_j)\end{aligned}\quad (7)$$

여기서 ε 은 학습률을 나타낸다.

비교사학습 알고리즘은 원하는 결과를 잘 모를 경우 사용하게 된다. 이 경우 평가 함수를 정의 하여 사용하는 것이 일반적이다. 평가 함수는 현재 계의 상태가 얼마나 좋은지를 표현할 수 있어야 한다. 각 입력에 대해 출력이 산출되고 그 출력은 현재의 상태를 변화 시킨다. 이렇게 변화된 새로운 상태를 이전의 상태와 비교하여 얼마나 좋아 졌는지를 판단한다.

만약 평가 함수를 단순히 $F()$ 라고 가정하면, 어떤 상태 A가 다른 상태 B보다 더 좋다면 그 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(A) \geq F(B) \quad (8)$$

상태 A가 출력 y 에 의해 상태 B로 변화되었고, 원하는 상태를 A_d 라고 가정하면, 함수 $F()$ 에 대해 다음 조건을 만족하는 시스템을 고려할 수 있다.

가정 : 상태 A – 현재의 상태

출력 y_1, y_2 – 임의의 출력

상태 B_1 – 출력 y_1 에 의해 변화된 상태

상태 B_2 – 출력 y_2 에 의해 변화된 상태

조건 : $y_1 \cdot y_2 \leq 0$

위의 경우 평가함수는 확실히 다음의 관계를 만족한다.

$$(F(B_1) - F(A)) \cdot (F(B_2) - F(A)) \leq 0 \quad (9)$$

직관적으로 주어진 두개의 시스템 출력은 다른 부호를 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 그 계는 평가 함수에 의해 두개의 출력이 상태 A를 두개의 다른 방향(better or worse)으로 변화 시켰음을 알 수 있다.

3. 디지털 신호 처리기

3.1 디지털 신호 처리의 개념

아날로그 신호라든가 디지털 신호라는 용어는 흔히 듣는 말이다. 전기의 세계에서는 전자회로가 지시하는 신호를 정해진 상태에 대응시켜 생각하는데, 여기서 그 생각하는 방법이 아날로그와 디지털에서는 크게 다르다.

아날로그 신호란 회로가 지시하는 전압이나 전류가 모든 정보에 대응시켜 생각하는데 비해, 디지털 회로에서는 '0' 과 '1'이라는 두 종류의 논리에 대응한 전압의 조합이 정보로 표현된다. 그러므로, 아날로그 신호에서는 미소한 잡음 등의 혼입도 정보에 영향을 주기 때문에 고도의 회로기술이 요구되는 경우가 적지 않다.

그러나 디지털 신호의 경우는 약간의 잡음이 혼입되어도 정보에는 영향을 주지 않는다. 그러므로 디지털 신호 쪽이 정보의 가공이나 보존 등을 간단히 할 수 있다.

아날로그 신호의 경우는 잡음을 제거하려고 하면 원래의 파형의 정보에까지 영향을 미칠지도 모르지만, 디지털 신호의 경우는 파형정형 처리를 하는 정도로, 원래 파형의 정보에 영향을 주지 않고 간단하게 잡음을 제거하여 정보를 전달할 수 있다

최근 전자 부품의 처리 속도의 향상에 따라, 종래에는 아날로그로 처리하지 않으면 안되었던 것도 디지털로 처리할 수 있게 되고 있다. 이러한 이점을 최대한으로 활용한 것이 디지털 신호 처리이다. 디지털 신호처리의 기본적인 흐름은 그림 3에 나타낸다.

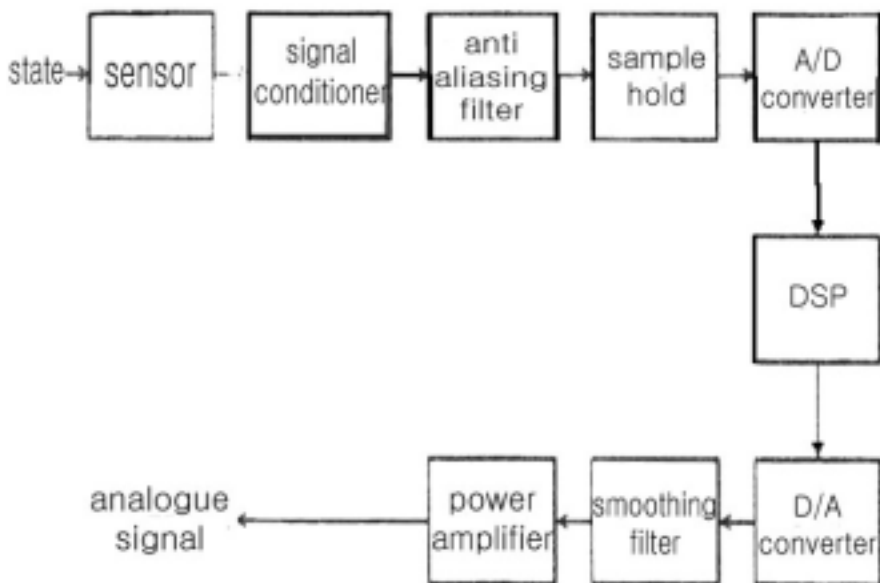


Fig. 3 . The flow of signal process

자연계의 물리 현상을 계측하여 컴퓨터 등으로 분석하려는 경우, 대상이 되는 물리 현상을 전용의 센서를 사용하여 전기신호로 변환하지 않으면 안 된다. 그러나, 이 신호는 아주 미약한 전압의 신호이거나, 센서의 입출력과 관계가 비선형인 경우도 있다. 게다가 센서에 따라서는 전압 출력형이 아니라, 전류 출력형 센서도 있다. 그러므로 후 처리를 고려한 크기의 전압신호로 변환할 필요가 있다. 이를테면 센서 출력 전압이 미소 신호의 경우는 프리 앰프를 사용하여 감쇠 시킨다. 센서의 출력이 전류 신호인 경우는 전압신호로 변환하지 않으면 안 된다. 이러한 신호의 컨디션을 맞추는 것이 시그널 컨디셔너 (Signal conditioner) 이며 그림 4는 동작을 나타내는 개략도이다.

후 처리에서 사용하는 전압으로서는 $\pm 10V$, $\pm 5V$ 가 일반적이다. 그 외에 비디오 신호 등의 고속신호를 취급하는 경우는 $\pm 1V$, $\pm 0.5V$ 등이 사용된다.

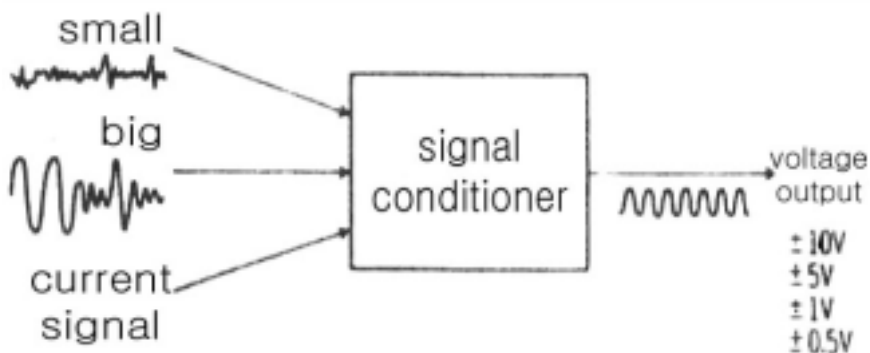


Fig. 4 . The action of signal conditioner

아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환할 때는 일정 간격마다 데이터를 변환해 간다. 이 변환시간을 T 라 하면 $1/T$ (시간)를 샘플링 주파수라 부른다. 샘플링 주파수를 고속으로 하면 할수록 원래의 아날로그 데이터에 가까운 형태의 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 샘플링 주파수를 너무 빠르게 하면 데이터 수가 방대한 수로 되어 버리기 때문에, 후 처리에 너무 많은 부하가 걸리는 문제점이 발생한다. 한편, 샘플링 주파수가 너무 느리면 원래 파형의 데이터를 수납하려고 할 때에는 입력의 신호정보를 잃지 않고 게다가 데이터 수가 가급적 적은 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이 기준을 정의한 것이 "샘플링의 정리"라 부르는 것이다. 샘플주기와 A/D 변환 데이터는 그림 4와 같이 나타나며 샘플링 정리는 다음과 같이 정의된다.

취급하는 신호의 주파수를 $f(\text{Hz})$, 샘플링 주기를 $t(\text{s})$ 라고 한 경우, 원래 신호 파형의 성분을 손상시키지 않기 위해서는 $t \leq 1/2f$ 를 만족시키지 않으면 안 된다.

그러면 샘플링 주파수가 샘플링의 정리를 만족시키지 않고 느린 경우는 원래의 신호 주파수 성분에 마치 높은 주파수가 겹쳐 있는 것 같은 A/D 변환 결과가 얻어지고 만다. 이와 같은 현상을 에일리어싱(aliasing)이라 부르고 있다. 에일리어싱

을 방지하고 A/D 변환을 하는 경우에는 A/D 변환에 입력하는 아날로그 신호의 높은 주파수 성분을 커트하고 나서 입력할 필요가 있다. 이 A/D 변환기의 전단에 설치하는 저역통과 필터를 안티 에일리어싱 필터(anti-aliasing filter)라 부른다. 간단한 곳에서는 콘덴서와 저항만으로 구성되는 저역통과 필터를 사용해도 된다.

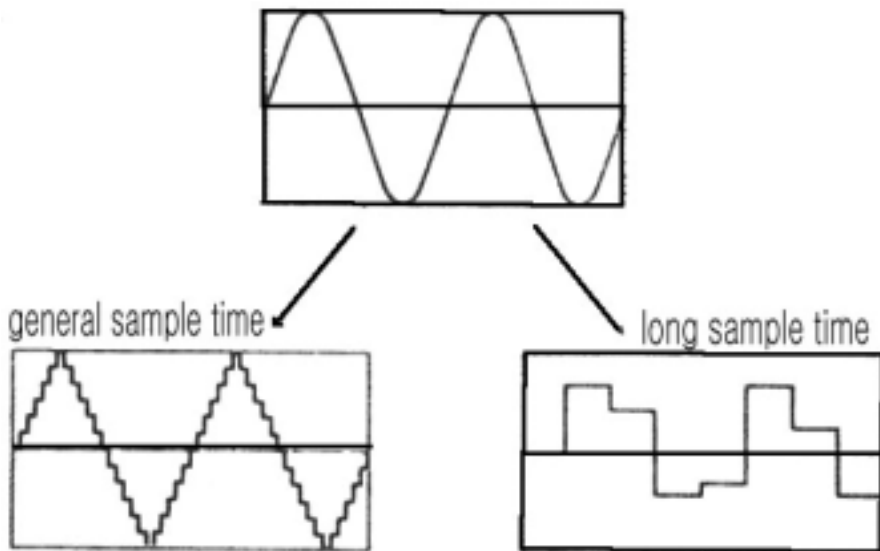


Fig. 5 . The period of sample and A/D conversion data

A/D 변환 실행 중에 입력전압이 변동하게 되면 A/D 변환 데이터가 부정의 값으로 되어 버리므로 A/D변환의 개시부터 종료까지는 입력전압을 같은 전압으로 유지해 둘 필요가 있다. 여기서 필요하게 되는 것이 샘플 홀드(sample & hold)회로이

며, 그림 6은 동작을 나타낸다. 샘플 홀드 회로는 통상 샘플 상태에 있고, 버퍼 앰프로서 동작하고 있지만, A/D 변환이 개시됨과 동시에 그 시점의 전압을 유지한다. 그리고 A/D 변환이 종료하면 다시 샘플 상태로 되돌아가며, 버퍼 앰프로 동작한다. 최근에는 A/D 변환기 칩에 샘플 홀드 회로를 내장하고 있는 것이 많으며, 샘플 홀드 회로를 외부에 부착하는 것이 적어지고 있다. 다채널의 A/D 변환 시스템에 있어서는 복수의 입력신호를 멀티플렉서로 전환하여, 하나의 A/D 변환기로 다채널의 신호를 취급한다. 그렇게 하면 여하튼, 채널간의 위상차가 생기고 만다. 이와 같은 문제를 해결하는 경우는 멀티플렉서 전단에 채널 수만큼 샘플 홀드 회로를 외부에 설치하는 경우도 있다.

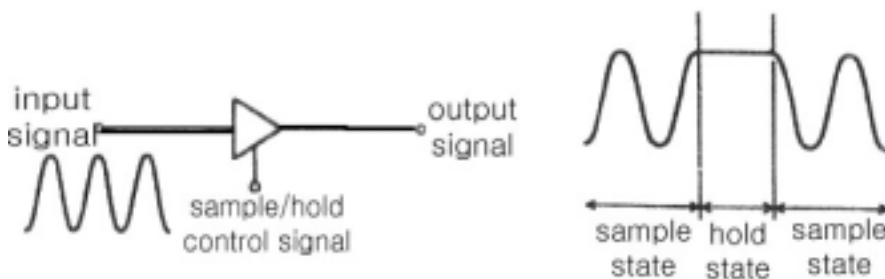


Fig. 6 . The action of sample hold.

우리 주변의 사건은 아날로그의 사상이 많다. 이들 사상을 컴퓨터에 받아들여 분석하려고 하면 어떤 수법을 사용하여 아

날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환하지 않으면 안 된다.
 그래서 등장한 것이 그림 7에서 보는 것과 같은 A/D 변환이
 다. A/D 변환이란, 연속적으로 변화하는 아날로그 데이터량을
 일정시간 간격으로 이산적인 디지털 데이터량으로 변화시키는
 수법을 말한다. 아날로그 데이터를 A/D 변환기를 사용하여 디
 지털화하는 것을 양자화 한다고 한다. A/D 변환을 할 때에 중
 요한 것은 입력신호의 성질 (dynamic range, 입력 레인지, 주
 파수 범위 등)을 고려하여, A/D 변환을 한다는 것이다. 이 성
 질을 무시하고 A/D 변환을 해 버리면 아날로그 신호와 디지
 털 신호간에 인과성이 없어져 무엇을 계측하고 있는지를 알
 수 없게 되는 경우가 일어난다.

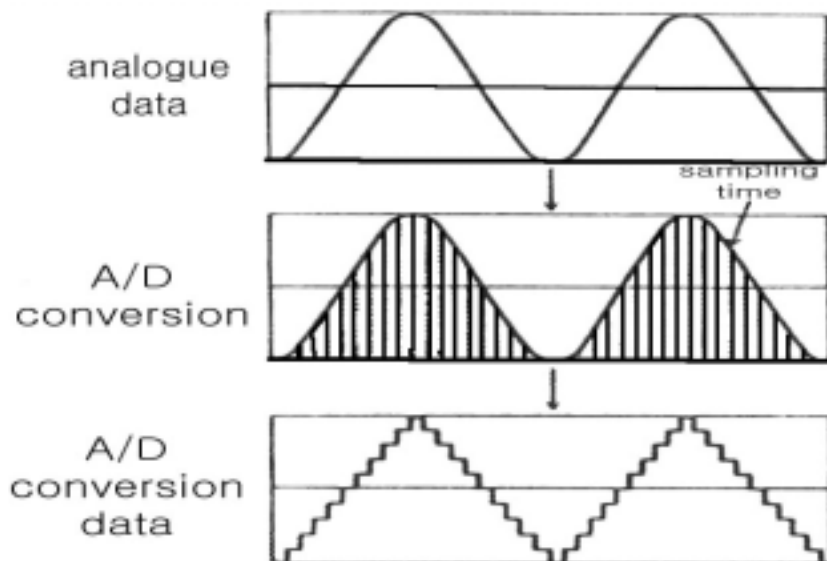


Fig. 7 . A/D converting.

A/D 변환기에 의해 디지털화 된 데이터는 퍼스널 컴퓨터 등에 입력되어 계산 처리된다. 계산 처리는 실시간으로 실시되며, 디스플레이 상에서 모니터 하면서 파일링을 한다. 여기서 문제가 되는 것이 퍼스널 컴퓨터의 처리속도다. 통상 신호처리에 사용되는 계산 알고리즘은 복잡한 것이 많기 때문에 퍼스널 컴퓨터가 실시간으로 처리를 할 수 없게 되어 버리는 경우가 있다. 그와 같은 문제를 해결하기 위해 등장한 것이 DSP라 부르는 전용의 소자이다. DSP의 특징으로는 내부 버스의 폭이 넓고, 1클럭으로 1명령이상의 실행이 가능하며, 승가산(sum of products) 연산처리를 아주 고속으로 할 수 있다는 점을 들 수 있다. 신호처리 전용의 칩이라 할 수 있을 것이다. DSP의 문제점으로는 통상적인 CPU에 비해 개발환경이 특수하고, 칩 메이커에 따라 각각 개발환경이 다르다는 점을 들 수 있다. DSP가 실시간 신호처리의 핵심 장치이다.

DSP에서 계산 처리된 결과를 이용하여 외부 기기를 제어하는 경우에는 A/D 변환과는 반대로 퍼스널 컴퓨터내의 디지털 데이터를 아날로그 전압이나 전류로 변환하여 외부 기기를 제어하게 된다. 이를 위한 방법을 D/A 변환이라 부르며, 그림 8과 같이 동작한다. D/A 변환기의 동작은 입력된 디지털 코드를 아날로그 전압이나 전류로 출력하는 것이다. A/D 변환기의

샘플링 속도에 대응하는 파라미터로 세트링 타임이라는 것이 있다. 세트링 타임이란, 입력에 디지털 코드가 세트 되고 나서 아날로그 전압이 출력되기까지의 시간을 나타내는 것으로, D/A 변환기 선택시의 가장 중요한 파라미터이다.

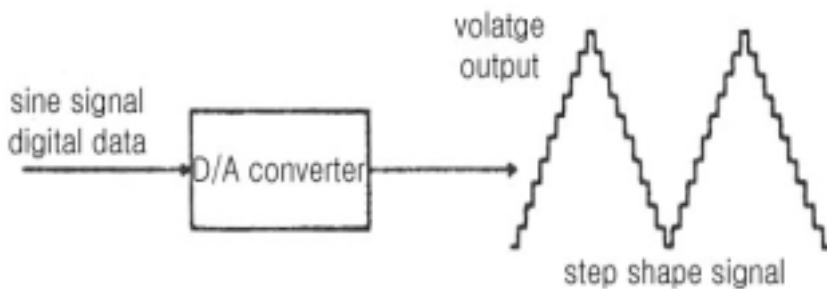


Fig. 8 . D/A converting.

D/A 변환후의 데이터는 계단 형상의 데이터이므로 불필요한 주파수 성분을 함유하고 있다. 이 주파수 성분을 위조 잡음 (spurious noise)이라 부른다. 위조 잡음을 제거하기 위해서는 안티 에일리어싱 필터와 동등한 저역통과 필터를 D/A 변환기의 출력에 그림 8과 같이 설치할 필요가 있다. 이 필터를 스무딩 필터 (smoothing filter)라 부르며, 필터의 차단주파수는 안티 에일리어싱 필터와 동일하게 하는 것이 일반적이다.



Fig. 9 . Smoothing filter.

D/A 변환된 아날로그 데이터는 최종적으로 외부 기기를 제어하는데 사용되는데 예를 들면 스피커나 모터 등을 들 수 있다. 이들 기기를 제어하기 위해서는 전력 증폭을 할 필요가 있다. 예를 들어 모터를 제어하는 경우는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식 등이 흔히 사용된다. PWM 제어는 직류 모터 등의 회전속도 제어에 많이 사용되는 방법으로, 모터를 저속으로 회전시키거나 할 때에 회전이 안정되고, 전체의 소비전력이 낮게 억제된다는 등의 이점이 있다.

디지털 신호처리의 이점은 소프트웨어의 변경만으로 시스템을 구축할 수 있다는 점, 설계부터 시공까지 아날로그 회로와 같은 섬세한 부분이 없다는 점, 설계대로 성능이 얻어진다는 점등을 들 수 있다.

3.2 하드웨어 구성

본 연구에서 사용된 키트는 Ohm 사의 TMS-32 Kit로 TI사의 초저가형 32비트 부동소수점 DSP인 TMS320C32기반으로 설계된 저가의 소규모 단일보드 컴퓨터 시스템으로 50MIPS의 처리 속도를 가진다. 12비트 A/D 변환기(MAX122BCNG) 1개와 12비트 D/A 변환기(AD664JN-BIP) 1개를 내장하고 있다⁽¹³⁾.

시스템의 블록도는 그림 10과 같다. 입력된 센서 신호를 TMS-32 보드에서 신호처리 한 후 로봇 제어용 출력 신호를 인터페이스 카드에 넘겨주면 인터페이스 카드에서 출력 신호에 따라 로봇을 제어한다. TMS-32 보드 내부에서는 입력된 아날로그 센서 신호를 디지털로 변환한 뒤 펄지 규칙에 따라 디지털 출력 신호를 발생시킨다. 이 디지털 값의 출력 신호는 D/A 변환기를 거쳐 아날로그 값으로 인터페이스 카드에 전달되고 인터페이스 카드는 전달된 신호에 따라 모터를 구동한다. 위의 TMS-32 보드 내부의 과정은 그림 11과 같다.

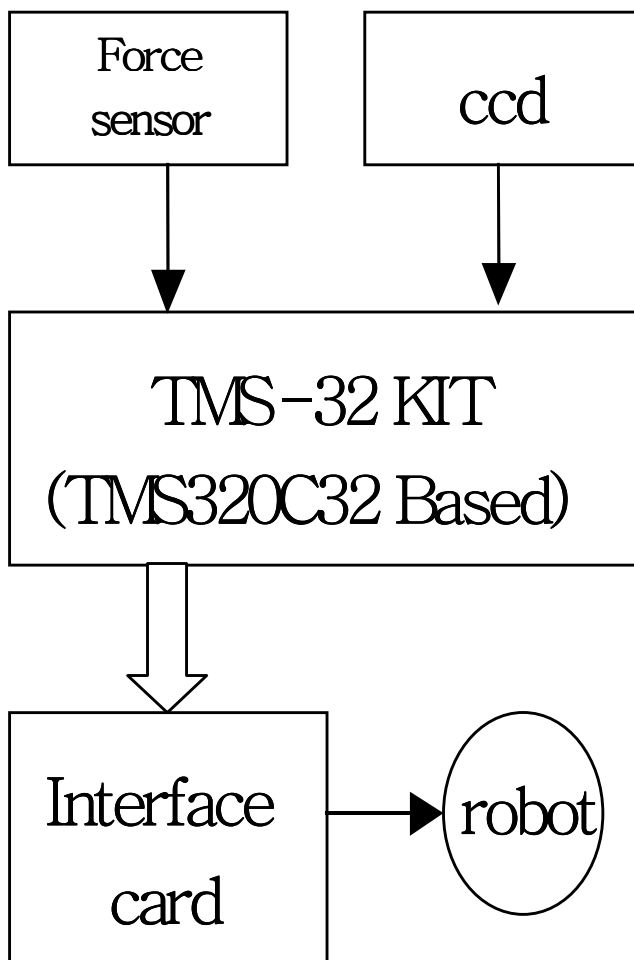


Fig. 1 0 . System block diagram

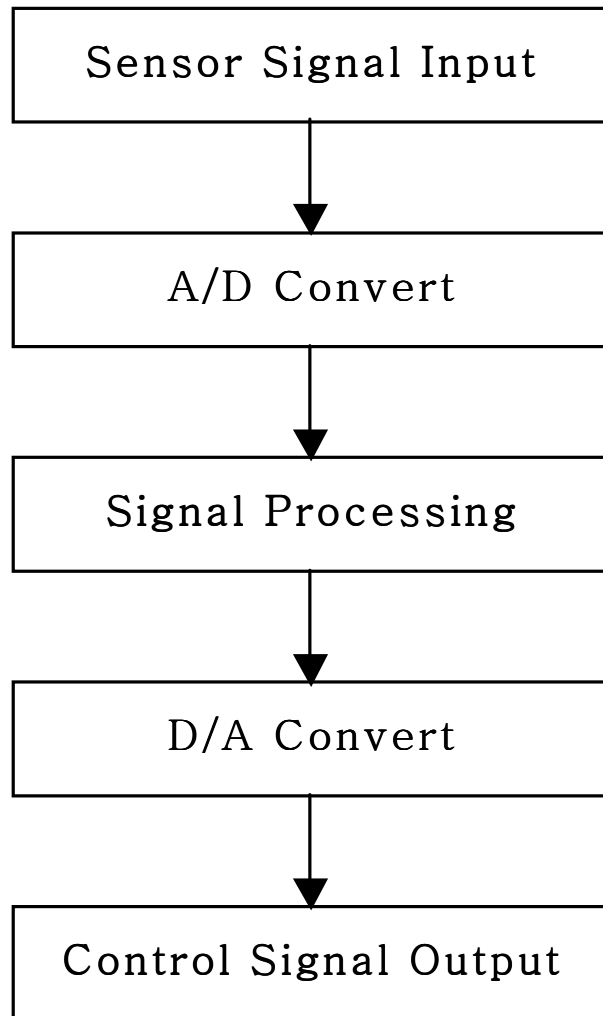


Fig. 1 1 . Digital signal processor block diagram.

3.3 소프트웨어

신호처리 및 로봇제어를 위한 소프트웨어는 C언어를 사용하였다. TMS320C32 DSP의 사용자 프로그램을 작성할 때는 일반적으로 어셈블리 언어를 사용하는 것이 가장 효율적인 프로그래밍이 가능하여 널리 사용되지만, 때로는 C언어를 사용하는 것이 편리할 경우도 있다. C언어를 사용하면 어셈블리 언어에 비하여 거시적인 처리를 용이하게 수행할 수 있다는 것과 TMS320C3X/4X DSP용의 개발 툴을 사용하면 C 언어에 인라인으로 어셈블리 언어를 혼용할 수도 있어서 매우 편리하다. 프로그램은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫째 부분은 펄스를 발생시키기 위한 Timer 인터럽트 부분이다. 이 부분에서 1kHz의 펄스를 발생시킨다. 두 번째 부분은 센서신호를 받아들여 퍼지화 하는 부분이다. 마지막으로 퍼지 제어기에 따라 출력된 값을 통해 로봇의 상태를 변환하는 부분으로 이 부분에서 발생된 신호가 D/A 변환기를 통해 인터페이스 카드에 전달되어 로봇을 제어한다

4. 센서 데이터 융합

4.1. 센서 데이터 융합의 개념

다중센서로 구성되어 있는 시스템에서 센서 융합은 환경의 감지 능력을 향상시키기 위해 센서 융합 기술이 매우 중요하다. 센서 융합이란 개념은 같은 환경에 대한 정보를 다수의 서로 다른 센서로 획득하게 되면서 발전하게 되었다. 서로 다른 센서로부터 불완전하고 일관되지 않는 부정확한 정보들을 통합하여 주위 환경을 인식하는 것이 인공 지능에 있어서 보다 많은 자율성과 효율성을 부여하는데 중요한 요소가 되었다. 즉 센서 융합이란, 센서 각각의 정보 보다는 그 정보들을 통합하여 보다 의미 있는 정보를 획득하는 과정이라 할 수 있다. 본 논문에서는 대상물의 굴곡에 대한 정보를 얻기 위해 힘 센서와 비전 센서의 정보를 통합하고 융합하여 로봇을 제어하면서 원하는 정보를 획득한다.

4.2. 힘 센서

힘 센서는 접촉센서로써 3차원 공간상의 축 방향으로 작용하는 힘을 검출하는 센서다. 힘 센서의 정보를 획득하고 처리하기 위해 먼저 센서 컨트롤러와 통신을 해야 한다.

힘 센서는 시리얼 통신을 통해 PC와 연결되어 있다. 이 통신 프로그램은 GUI환경으로 기본적으로 통신환경을 정해준 후 힘 센서 컨트롤러에 데이터를 보내라는 명령을 내림으로써 실시간으로 힘 센서의 데이터를 PC에서 받을 수 있다.

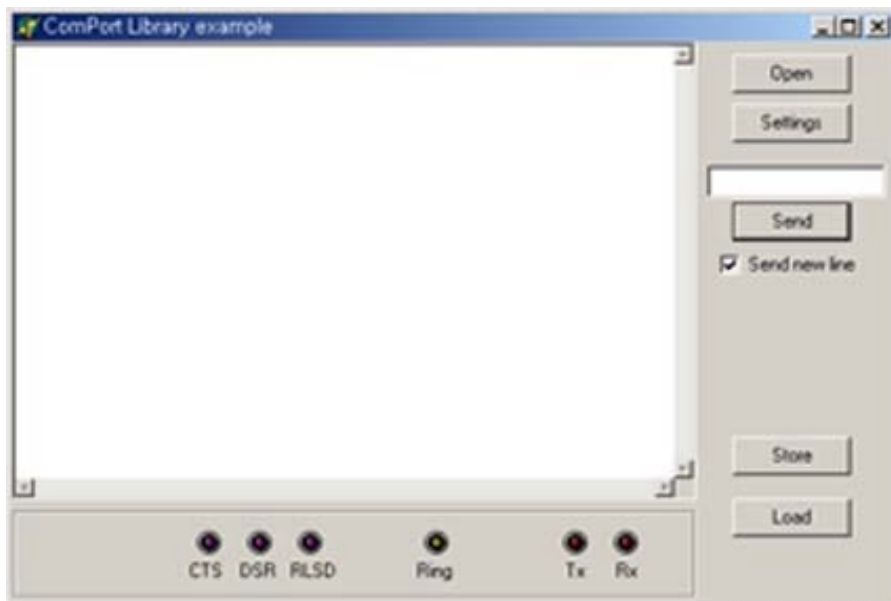


Fig.12. The GUI of force sensor communication program.

그림 12는 힘 센서와 통신을 하기 위한 프로그램이며 그림 13은 통신 프로그램 설정 창을 보여준다. 그림 14는 통신 프로그램을 이용하여 힘 센서와 연결되었을 땀의 모습이다. 그림 15는 통신을 통해 힘 센서의 정보를 받고 있는 모습이다. 그림 15와 같이 획득된 데이터는 파일로 보관하여 시뮬레이션을 하고, 또한 실시간으로 DSP에 데이터를 전송하여 본 논문에서 제시된 수정된 B-함수를 이용한 퍼지 제어기를 통해 비전 정보와 융합되고 융합된 데이터는 다시 로봇을 컨트롤 하기 위해 변환된다. 동시에 표면 굴곡에 대한 정보도 계산 된다.

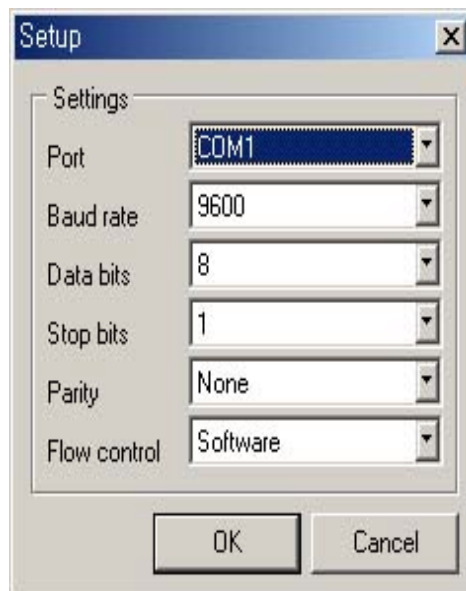


Fig.13. Communication settings.

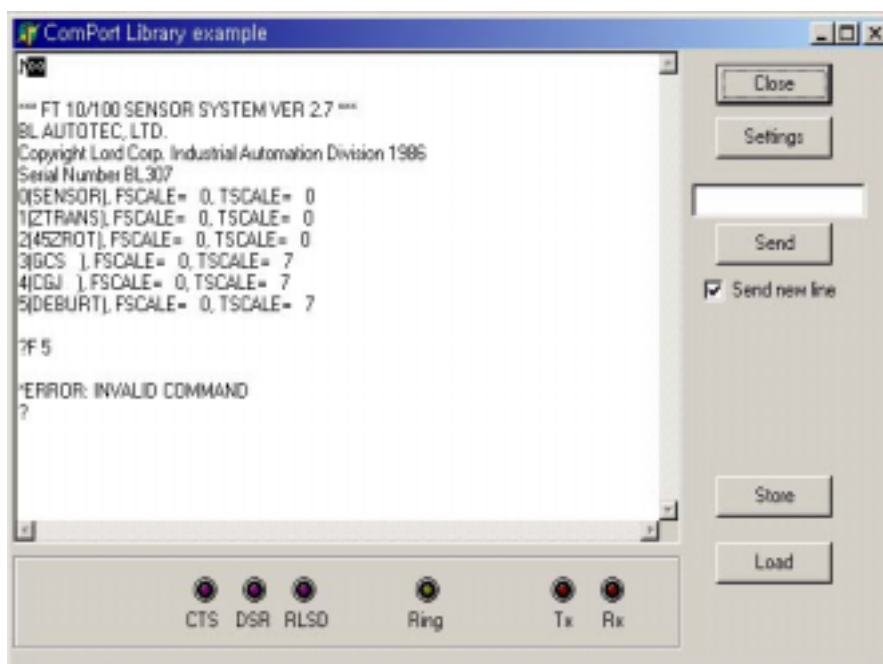


Fig.14. Initialization of force sensor

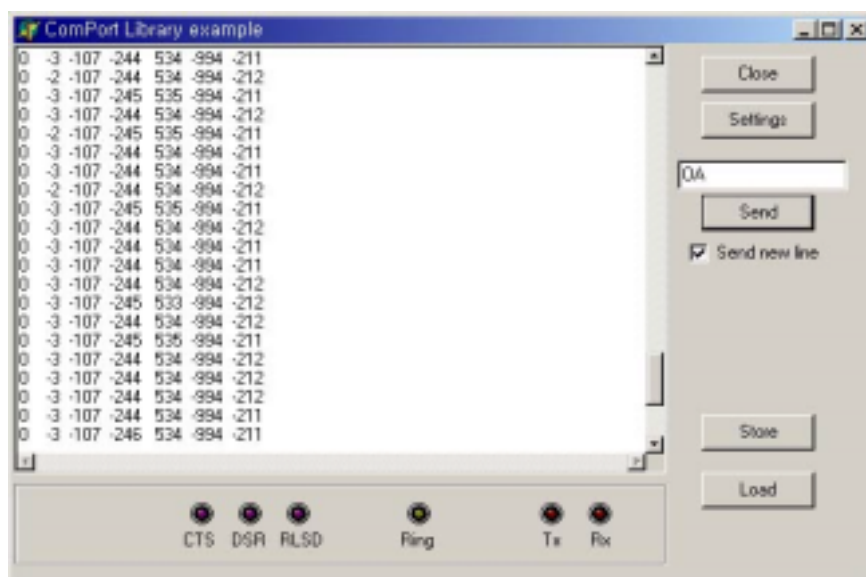


Fig.15. Force sensor data

4.3. 비전 센서

비전 센서장치는 2차원 화상 자료로부터 여러 가지 유용한 정보들을 얻는 것으로서, 광학계, 카메라, 프레임 그레버(frame grabber; 화상 캡처 보드)로 구성된다. 광학계는 3차원 장면을 2차원으로 투사 시킨다. 이미지 센서는 빛의 밝기를 전기적인 신호로 변환하는 것으로, 사용되는 센서로는 CCD(Charge Couple Device)를 이용한 카메라가 보편적으로 사용된다. 카메라는 광학계와 이미지 센서로 구성된다. 프레임 그레버는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 화상신호의 한 프레임을 메모리에 저장하는 장치이다. 그림 16은 비전 시스템의 구성을 나타내었다.

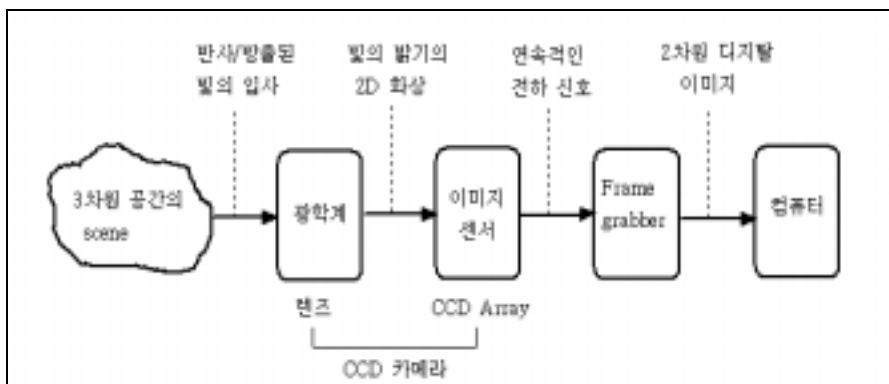


Fig.16. Vision system block diagram

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 17은 본 논문에서 사용한 장치의 구성도를 나타낸다. Table 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 시스템 사양을 나타낸다. CCD카메라는 전체 작업영역의 이미지를 획득하여 PC로 전송한다. 로봇 말단의 힘 변환기는 목적물의 표면에 접촉하였을 때부터 접촉력을 힘/모멘트 센서 제어기로 전송하고, 힘/모멘트 센서 제어기와 PC는 직렬 통신 프로그램을 통하여 힘 데이터를 실시간으로 송수신 한다. PC는 각 센서로부터 받은 신호를 DSP로 전달하고 이 신호를 바탕으로 DSP는 신호처리 및 퍼지 제어 알고리즘을 수행하여 표면의 굴곡과 로봇의 제어 신호를 계산하고 표면 굴곡 데이터는 다시 PC로 전송되어 시각화 하게 된다. 동시에 로봇은 DSP로부터 받은 제어신호로 z축 방향으로 일정한 힘을 유지 하면서 목적물의 표면을 따라 이동한다.

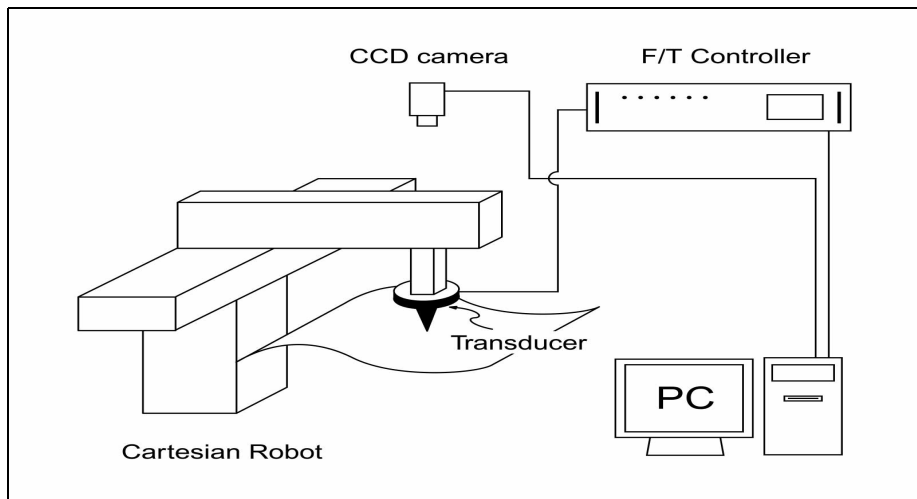


Fig.17. The experimental setup

Table 1. System Spec

구성요소	제품명	사양
PC	Pentium II -450(256MB)	윈도우98, Delphi 5.0
Frame grabber	Meteor-2/4 standard	60field/s, 30frame/s
Camera	SCC-420(삼성)	38만 화소
DSP	TMS320C32	50MHz
Force sensor	BI. Autotec 10/100	10 gf / 20 gf-cm

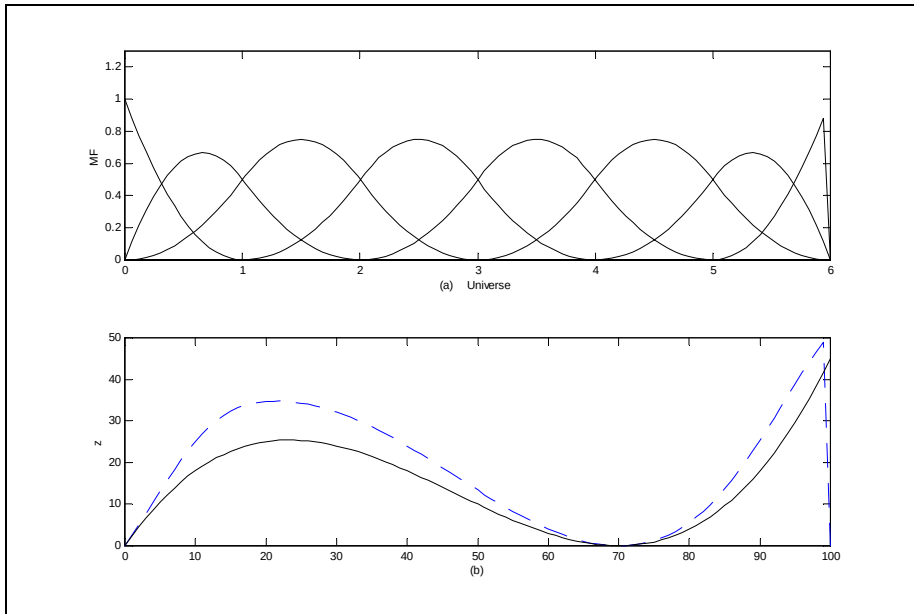


Fig.18. Simulation result. (a) Original B-spline MFs. (b) Input data(solid line) and result(dash line)

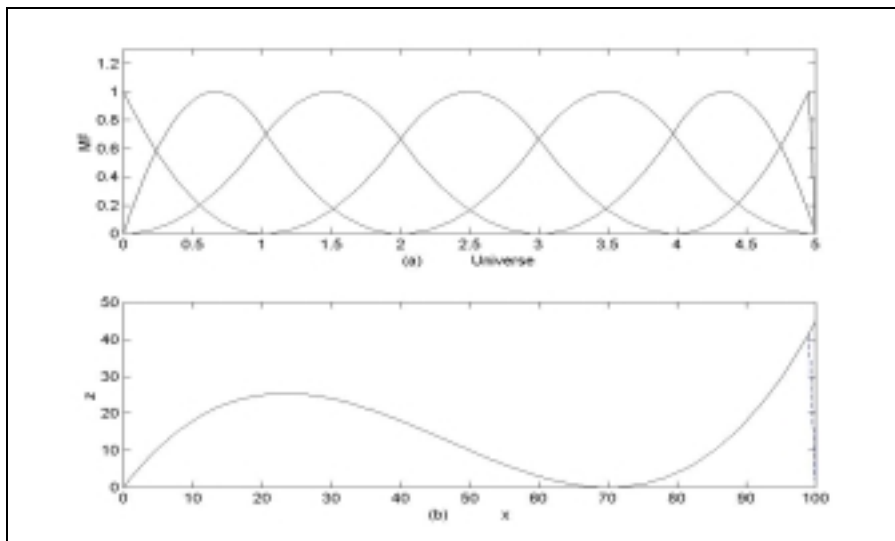


Fig.19. Simulation result. (a) Modified MFs. (b) Input data(solid line) and result(dash line)

B-스플라인 기저 퍼지 모델은 Pentium MMX-350Mhz PC와 TMS320C32 DSP 프로세서를 탑재한 TMS-32 키트를 이용하여 실험하였다. 학습을 위한 힘 센서의 입력 데이터는 100개이고 목적물의 표면은 3차 함수의 형태로 굴곡을 주었다. 비전 센서의 정보는 목적물의 영상을 미리 획득하여 처리한 것을 사용하였다. B-함수의 차수는 3차이다. 즉 정의구역을 7개의 영역으로 나누었으며(소속 함수의 개수 : 7) Zhang과 Knoll이 제시한 B-함수와 본 논문을 통해 제시한 수정된 B-함수를 사용했을 경우의 결과를 비교해 보았다.

Fig. 18. (a)는 이전의 B-스플라인 기저 함수를 이용하여 만들어진 퍼지 소속 함수를 보여주며, (b)는 그 출력 결과와 실제 표면의 굴곡을 보여준다. 여기서 실선은 주어진 표면의 굴곡이고 점선은 이전의 퍼지 제어기를 통한 출력 결과이다. Fig. 19. (a)는 본 논문에서 제시한 수정된 B-스플라인 기저 함수를 이용하여 만들어진 퍼지 소속 함수다. (b)는 결과와 주어진 표면의 굴곡을 나타낸다. Fig. 20.은 각각 다른 B-함수를 사용했을 때 실험 결과와 실제 표면의 곡선을 보여주고 있다. Fig. 21.은 다른 B-함수를 사용했을 때의 목적물의 실제 곡면과 추정된 곡면 사이의 차이를 보여준다. 또한, Fig.22.는 제곱 에러를 보여준다.

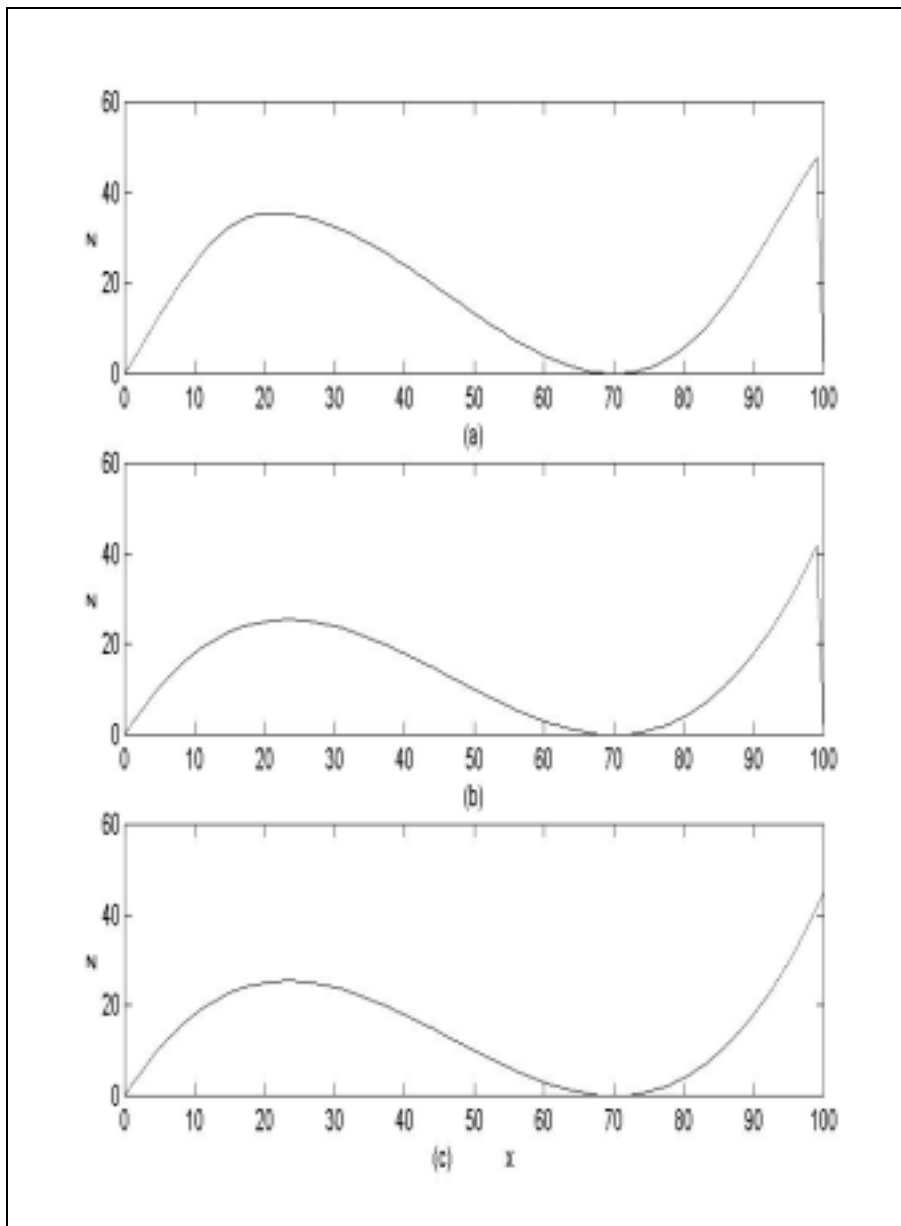


Fig. 20. Experimental result by using difference B-function

(a) Original. (b)Modified. (c) Real surface curve

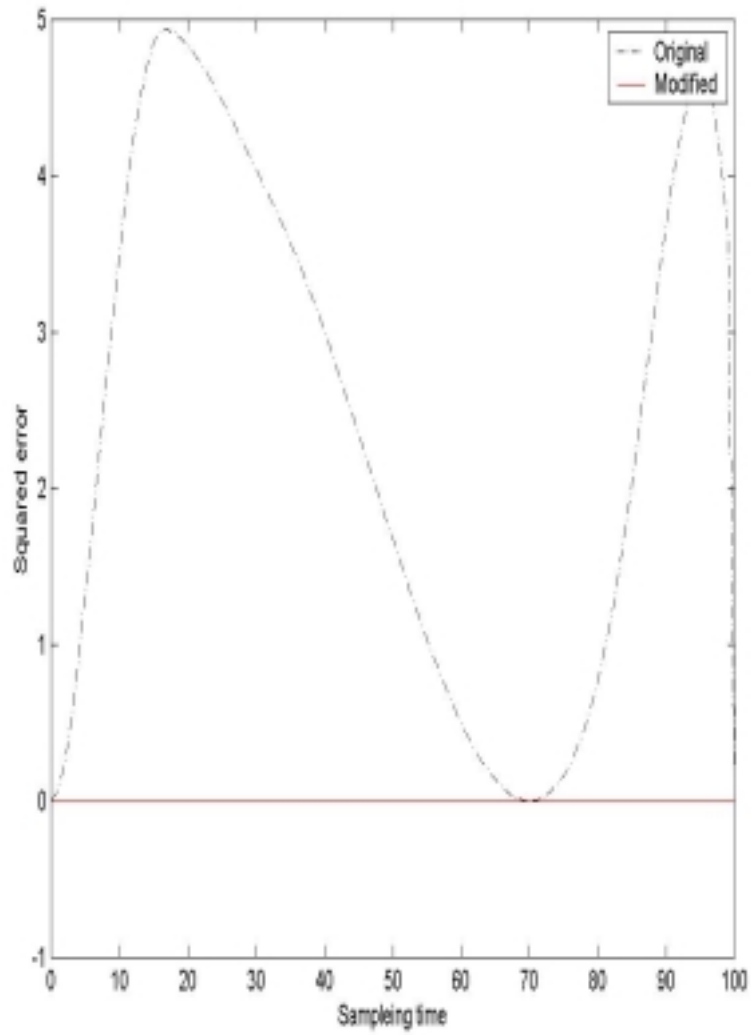


Fig. 21. Experimental errors used different MFs. (a) Original MFs. (b) Modified MFs

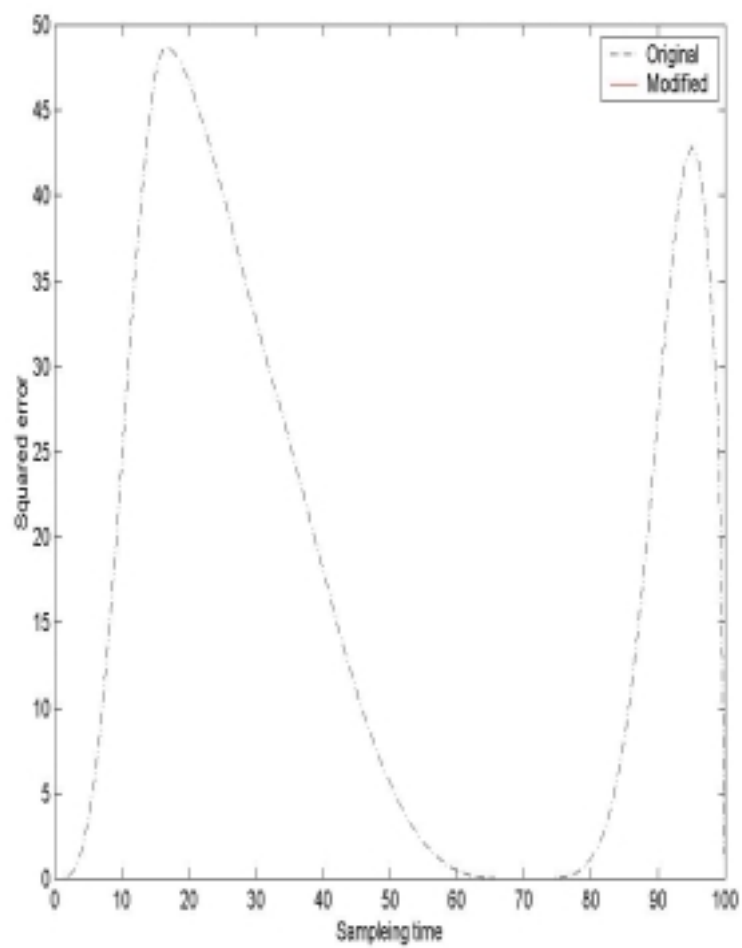


Fig. 22. Experimental squared errors used different MFs.

(a) Original MFs. (b) Modified MFs

6. 결론

본 논문은 퍼지 제어기의 단점의 보완을 위해 B-스플라인 기저 함수를 도입하였다. 그리고 목적물의 굴곡을 추출하기 위해 제안한 수정된 퍼지 제어기를 사용하였고, 그 결과를 J. Zhang과 A. Knoll이 제안한 퍼지 제어기의 결과와 비교해 보았다.

시뮬레이션 및 실험 결과 수정된 B-함수를 이용한 퍼지 모델이 이전의 B-함수를 이용한 퍼지 모델 보다 정확히 굴곡을 추출하는 것을 보였다. 수정된 B-함수를 이용한 퍼지 모델의 장점을 정리하면 다음과 같다.

(1) 입력 변수들의 정의 구역을 분할 하는 것과 소속함수의 수를 결정하는 것으로 입력을 퍼지화 할 수 있으므로 퍼지 컨트롤러의 IF-부분을 쉽게 정의 할 수 있다.

(2) 소속함수의 결정을 위해 정의해 주어야 할 파라미터의 수가 줄어 소속함수 결정이 단순하다.

(3) 입력에 대한 출력으로 NUBS의 출력과 같은 단순한 퍼

지 싱클턴을 얻을 수 있으므로 비퍼지화 과정이 단순하다.

(4) 비퍼지화 과정 중 일반적 퍼지 모델은 입력 정보가 무시 되는 경우가 발생하나 제시된 모델은 모든 입력 변수를 출력의 변화에 기여하므로 입력에 대한 출력이 정확하다.

또한 DSP를 이용하여 센서의 융합을 시도하여 두 가지 센서의 정보로부터 목적물의 표면 굴곡이라는 유용한 정보를 얻었다.

본 연구는 센서의 융합방법으로 보다 구조적이고 단순한 B-함수를 이용한 퍼지 모델을 사용하였다. 이 논문의 결과를 활용하면 중요한 정보를 얻기 위해 고가의 센서를 사용하기 보다는 저가의 다양한 여러 센서를 활용하여 정보를 획득할 수 있다.

그러나, 본 연구에서는 비전 정보를 미리 처리하여 비전 정보의 변화에 따라 실시간으로 처리하지 못하였다. 따라서 차후 실험 장치를 통합하여 비전 정보와 힘 센서 정보를 동시에 실시간으로 처리하는 연구가 계속 되어야 할 것이다. 또한 퍼지 규칙의 설정에서 전문가의 사전 지식을 B-함수의 제어점에 효율적으로 적용시킬 수 있는 방법과 제어점의 학습 방법으로 최급강화법을 사용하였으나 그 외 다른 방법을 이용한 최적화에 대해 계속된 연구가 이루어 져야 하겠다.

참고 문헌

- [1]J.S.R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing NJ, Prentice-Hall*, 1997.
- [2]L. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, NJ, 1994.
- [3] E. H. Mamdani, “Twenty years of fuzzy control : experiences gained and lessons learned”, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 339-344, 1993.
- [4]T. Terano, K. Asai and M. Sugeno, *Applied Fuzzy Systems*, AP Professional, Cambridge, MA, 1994.
- [5]J. Yen, R. Langari and L.A. Zadeh, *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, IEEE Press, New York, 1994. A.and B.Author, "Paper Title" ICASE Journal, vol. 1. no. 1., pp. 123-126, 1996
- [6]D. Driankov, H. Hellendoorn and R. Palm, “Some Research Directions in Fuzzy Control, Ch. 11, 281-312, New York, Wiley, 1995.
- [7]T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control”, IEEE Trans. System, Man

Cybernet. SMC-15(1) pp.116-132, 1985.

[8]L. H. Tsoukalas and R. E. Uhrig, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, New York, Wiley, 1996.

[9]G. Farin and J. Kahmann, *A survey of curve and surface methods in CAGD*, Computer Aided Geometric Des. 1, pp 1-60, 1984.

[10]J.-S.R. Jang, “ANFIS : Adaptive Network Based Fuzzy Inference System”, IEEE Trans. System, Man Cybernet. 23 (3) pp. 665-685, 1993

[11]H. Bersini and G. Bontempi, “Now comes the time to defuzzify neuro-fuzzy models”, Proc. FLINS Workshop on Intelligent Systems and Soft computing for Nuclear Science and Industry, pp. 130-139, 1996.

[12]J. Zhang and A. Knoll, “Designing Fuzzy Controllers by rapid learning”, Fuzzy Sets and Systems, Volume 101, Issue 2, pp. 287-301, 16 January 1999.

[13]윤덕용, “DSP마스터 시리즈2 TMS320C32 마스터”, 도서출판 Ohm사, 1999.

감사의 글

이 논문을 보면서 대학 및 대학원 생활 동안의 아쉬움과 기쁨이 교차합니다. 조금 더 열심히 하여 보다 훌륭한 연구가 되었으면 하는 아쉬움과 연구자의 첫걸음을 시작했다는 기쁨입니다.

지금까지 저를 위해 헌신하신 부모님께 먼저 감사를 드리고 싶습니다. 그리고, 대학 입학 후 8년이란 긴 기간동안 학문적으로 정신적으로 이끌어 주신 안두성 교수님께 깊이 감사드립니다. 기쁨과 슬픔을 함께 해 주신 신상운 교수님께도 감사드립니다.

대학원 생활동안 많은 헌신과 사랑으로 묵묵히 저를 지켜준 아내가 고맙습니다. 아내를 있게 해 주신, 장인어른과 장모님께도 감사드립니다.

그리고, 누나와 동생 현수, 박건태 형님과 아주머님, 큰처형, 작은처형, 그리고 이제 말을 시작하는 조카 민서, 마지막으로 세상에 첫걸음을 시작하는 조카 경민, 사랑하는 아들 정빈이와 함께 이 기쁨을 같이 하고 싶습니다.

지난 대학 생활과 대학원 생활 동안 항상 기쁨과 괴로움을 함께한 홍성우 동기님을 비롯하여 많은 도움을 주신 갈성택 선배님, 정원희 선배님, 최규종 선배님, 조월상 선배님, 박상후 선배님, 이규상 선배님, 그리고 같이 공부한 박광수 형님 모두에게 감사드리며, 또한 실험실 일에 적극 후원해 주시는 배효정님과 후배님들 모두와 기쁨을 함께하고 싶습니다. 그 외 저를 아는 모든 분들과도 기쁨을 나누고 싶습니다.