

# Pi-Sigma 신경 회로망을 이용한 로봇의 역 보정

정재원\*, 김수현\*, 곽윤근\*

## The Robot Inverse Calibration Using a Pi-Sigma Neural Networks

Jae Won Jeong\*, Soo Hyun Kim\*, Yoon Keun Kwak\*

### ABSTRACT

This paper proposes the robot inverse calibration method using a neural networks. A high-order networks called Pi-Sigma networks has been used. The Pi-Sigma networks uses linear summing units in the hidden layer and product unit in output layer. The inverse calibration model which compensates the difference of joint variables only between measuring value and analytic value about the desired pose(position, orientation) of a robot is proposed. The compensated values are determined by using the weights obtained from the learning process of the neural networks previously. To prove the reasonableness, the SCARA type direct drive robot(4-DOF) and anthropomorphic robot(6-DOF) are simulated. It shows that the proposed calibration method can reduce the errors of the joint variables from  $\pm 5^\circ$  to  $\pm 0.1^\circ$ .

**Key Words:** Robotics(로봇 공학), Pi-Sigma neural networks(Pi-Sigma 신경 회로망), Inverse calibration(역 보정), Joint variable(조인트 변수).

### 1. 서론

점차 정밀하고 정교한 작업이 요구되는 산업용 로봇에 있어서 위치 정밀도(accuracy)는 로봇의 성능을 향상시키는 데 중요한 요소가 되고 있다. 이러한 로봇의 위치 정밀도는 반복 위치 정밀도(repeatability)와 절대 위치 정밀도(absolute accuracy)로 구분될 수 있다. 이중 전자는 주로 제어기 분해능(controller resolution)에 의해 좌우되는데, 현재 사용되고 있는 로봇의 대부분은 만족할 만한 수준을 보이고 있다. 반면 절대 위치 정밀도는 로봇의 구조, 재질 등에 따라 다양하게 제작, 사용되고 있기

때문에 결국 사용자에 의한 보정(calibration) 작업이 이루어져야 한다.

절대 위치 정밀도에 영향을 미치는 요소로는 각 조인트 간의 관계를 정의하는 로봇 인자(robot parameters)들의 기하학적인 오차(geometric error)와 로봇의 특성에 의해 생기는 비기하학적인 오차(nongeometric error)로 분류될 수 있으며, 이들은 모델링(modeling), 측정(measurement), 동정(identification) 및 보상(compensation)의 절차를 통해 이루어진다<sup>(1)</sup>.

기하학적 오차 보정에 대해서는 Denavit-Hartenberg<sup>(2)</sup>가 4개의 인자에 의한 기구학적 모델 표현 방법을

\* 한국과학기술원 기계공학과

제시한 이후 Veitschegger<sup>(3)</sup>, Hayati<sup>(4)</sup>, Stone<sup>(5)</sup> 등에 의해 다양한 보정 모델이 제시되었다.

비기하학적인 오차에 대한 보정으로 Whitney 등<sup>(1)</sup>은 조인트 컴플라이언스(joint compliance), 백래쉬(backlash) 등에 대한 보정을 실시한 바 있고, Judd 등<sup>(6)</sup>은 온도 구배(temperature gradient), 서보 오차(servo error), 구조 변형(structure deformation), 기어의 오차 및 마모 등에 대한 오차 보상 모델을 제시한 바 있다.

그러나 이러한 기하학적 및 비기하학적 오차 모델들은 실제 사용자 측면에 볼 때 보정 방법이 복잡할 뿐만 아니라 보상할 인자의 수도 많아 비효율적이어서, Shama 등<sup>(7)</sup>은 조인트 변수와 로봇 말단부의 자세와의 관계를 블랙박스(black box)로 나타내어 비교적 간단히 보정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이후 Menq 등<sup>(8)</sup>은 가관측성(observability) 추정을 통한 보정 방법을, Mirman 등<sup>(9)</sup>은 반복 보상 알고리즘(iterative compensation algorithm)을 사용하여 조인트 변수만으로 비교적 간단하며 점적으로 보정할 수 있는 방법을 제시하였다.

이러한 단순한 보정 기법은 90년대를 전후로 하여 로봇의 보정에 신경 회로망(neural networks)이 사용되면서, 로봇의 각 조인트 변수만으로 보정하기 위한 연구가 많이 진행되었다. Ahmad 등<sup>(10)</sup>은 로봇의 역 기구학을 구하기 위하여 역 오류 전파 알고리즘(back error propagation algorithm)에 의한 신경 회로망과 수치해석적 방법이 병행된 하이브리드 방법(hybrid method)을 각각 사용한 바 있으며, Kieffer 등<sup>(11)</sup>은 SOM (self-organizing mapping) 알고리즘을 사용하여 로봇 팔의 역 기구학을 구한 바 있고, Watanabe 등<sup>(12)</sup>은 백프로퍼게이션(back-propagation) 학습 과정(learning process)의 속도 향상을 위해 2단 학습 신경 회로망(two-step learning neural networks)을 사용하였다. 그러나 이러한 백프로퍼게이션 알고리즘은 로봇과 같이 비선형성이 강한 경우에는 은닉층(hidden layer) 및 유니트(units)의 수에 따라 학습 시간이 많이 소요되고 지역 최소값(local minimum)에 빠지기 쉽다는 단점이 있어, Ghosh 등<sup>(13)</sup>은 1992년에 고차 다항식(higher order polynomial)과 유사한 형태로 구성된 Pi-Sigma 신경 회로망을 제시하여 기존의 백프로퍼게이션 방법에 비해 좋은 결과를 얻은 바 있다.

따라서 본 논문에서는 Ghosh 등이 제시한 Pi-Sigma 신경 회로망을 사용하여 비교적 단순하면서도 정확하게 보정할 수 있는 보정 방법을 제시하고자 한다.

보정은 기존의 모델링 - 보상의 4단계를 본 연구에서는 측정 및 보상의 2단계로 실시하고, 보상할 인자로는 역 보정으로 기하학 및 비기하학적 오차 요인이 모두 포함되어 보상될 수 있도록 Pi-Sigma 신경 회로망을 사용하여 조인트 변수만으로 보상이 가능토록 한다. 제시된 방법의 타당성 검증을 위하여 4자유도 및 6자유도 로봇에 대한 모의 실험을 실시한다.

## 2. 신경 회로망

본 논문에서 사용된 Pi-Sigma 신경 회로망의 구조는 Fig.1과 같다.

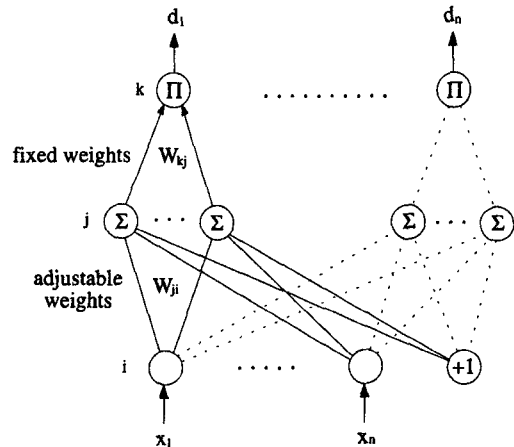


Fig. 1 Pi - Sigma neural networks architecture

이 구조는 1개의 은닉층이 사용되어 각 유니트에서는 더해지고, 출력층(output layer)에서는 각 유니트가 곱해지는 형태로 고차(higher order)의 비선형 방정식을 가지는 경우에 비교적 적합한 것으로 이미 증명된 바 있다<sup>(13)</sup>. 이때 가중치(weights)는 은닉층에서만 갱신(update)되고, 출력층에서는 고정된 값(fixed weights)을 가지며, 출력층 유니트의 각각에 대하여 개별적(asynchronously)인 학습이 이루어지는 특징이 있다.

학습은 다음과 같이 이루어진다. 우선  $\mu$  번째의 입력 데이터에 대하여  $j$  번째 은닉층 유니트 및  $k$  번째 출력층 유니트에서의 출력을 각각,  $h_j^\mu, h_k^\mu$  라고 하면,  $h_j^\mu$  및  $h_k^\mu$  는 은닉층 유니트의 수,  $m$  개에 대하여 식(1) 및 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_j^\mu = \sum_i w_{ji} x_i^\mu \quad (1)$$

$$h_k^\mu = \prod_j w_{kj} h_j^\mu = \prod_j w_{kj} \left( \sum_i w_{ji} x_i^\mu \right) \quad (2)$$

그리고  $\mu$  번째 입력 데이터에 대한  $k$  번째 출력층에서의 목표치(desired value)를  $d_k^\mu$ 라고 했을 때, 에너지 함수(energy function),  $E$ 를 식(3)과 같이 정의하면,

$$E = \frac{1}{2} \sum_\mu (d_k^\mu - h_k^\mu)^2 = \frac{1}{2} \sum_\mu (d_k^\mu - \prod_j w_{kj} h_j^\mu)^2 \quad (3)$$

식(3)으로부터 갱신되는 가중치,  $\Delta W_{ji}$ 는 최급 하강 규칙(gradient descent rule)을 사용하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 은닉층과 출력층간의 가중치,  $W_{kj}$ 는 일정하므로  $\Delta W_{kj}$ 는 고려할 필요가 없다.

$$\Delta W_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial h_j^\mu} \frac{\partial h_j^\mu}{\partial W_{ji}} \quad (4)$$

여기서

$$\frac{\partial E}{\partial h_j^\mu} = -\sum_\mu (d_k^\mu - \prod_j w_{kj} h_j^\mu) \cdot \prod_{i \neq j} w_{ki} h_i^\mu \cdot w_{kj}$$

$$\frac{\partial h_j^\mu}{\partial W_{ji}} = x_i^\mu$$

이고,  $\eta$ 는 학습율 (learning rate)이다.

### 3. 역 보정 모델

#### 3.1 로봇의 자세 측정

로봇의 보정을 위해서는 우선 로봇의 정확한 자세 측정이 중요하다. 현재 주로 사용되고 있는 로봇의 자세 측정 장치로는 좌표 측정기(CMM, coordinate measuring machine), 레이저 트래킹 시스템(laser tracking system), 레이저 경위의(laser theodolite) 및 비전 시스템(vision system)등을 들 수 있으며, 이러한 측정 장치는 현재  $\pm 0.01\text{mm} \sim \pm 0.1\mu\text{m}$ 까지 측정이 가능하다<sup>(14)</sup>. 이러한 위치 정밀도는 산업용 로봇의 사양, 즉 산업용 로봇의 위치 정밀도( $\pm 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ )를 고려할 때 만족할 만한 수준으로 사용자의 선택에 의하여 정확한 자세 측정이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 측정장치로부터 얻은

데이터는 오차가 없는 정확한 값으로 가정하였으며, 측정 방법 및 그에 따른 각종 오차는 본 논문의 범주에서 벗어나므로 고려하지 않았다.

#### 3.2 보상

측정된 데이터, 즉 로봇의 정확한 자세로부터 로봇의 인자를 보상하는 로봇의 역보정은 D-H인자를 근거로 한 오차 모델의 모든 인자들을 보상하는 방법과, 각 조인트의 변수만을 보상하는 방법으로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 비교적 간단한 후자의 방법을 사용하여 주어진 로봇의 자세에 대한 역 기구학과 측정을 통하여 얻은 데이터와의 차이를 보상하도록 하였다.

실제 로봇에 있어서 요망하는 자세(위치, 방위)에 대한 로봇의 각 조인트 변수의 값은 로봇의 역 기구학에서 해석적으로 얻은 값( $\theta_a$ )과 실제 측정을 통해 얻은 값( $\theta_m$ )과는 식(5)와 같은 조인트 변수의 오차( $\Delta\theta$ )를 가지게 된다.

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_a \quad (5)$$

따라서 이러한 조인트 변수의 오차를 어떻게 보상해 주느냐에 따라 보정 방법이 결정되는데, 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 역 보정 모델을 사용하였다.

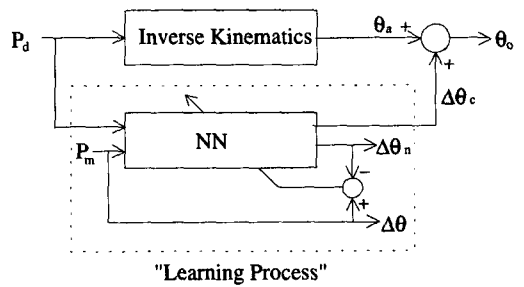


Fig. 2 Inverse calibration model

Fig. 2에서  $P_d$ 는 요망하는 자세,  $\theta_a$ 는  $P_d$ 에 대한 역 기구학의 해(solution)이며  $\Delta\theta_n$ 는 조인트 변수의 보상 값이다. 그리고 Learning process에서  $P_m$ 은 학습을 위해 측정된 로봇의 자세이고,  $\Delta\theta$ 는 식(5)에서 구한 값이며,  $\Delta\theta_n$ 은 신경 회로망(NN)의 학습 단계에서 계산된 값이다.

학습은 Fig. 2의 Learning process에서 측정치( $P_m$ )

와 식(5)에서 얻은 조인트 변수의 오차 ( $\Delta\theta$ )를 각각 입력, 출력으로 하여 앞의 2장에서 설명된 Pi-Sigma 신경 회로망(NN)에 대하여 이루어진다. 이때 학습은 역 오류 전파 알고리즘에 의해 각 층간의 가중치  $W_{kj}$ ,  $W_{ji}$ 를 결정한다.

따라서 이렇게 결정된 가중치를 이용하면 요망하는 로봇의 자세에 대하여 조인트 변수의 오차 ( $\Delta\theta_c$ )를 직접적으로 보상이 가능하게 된다.

### 4 모의 실험

모의 실험은 현재 본 연구실에서 보유한 수평 다관절 로봇인 KIRO-3와 수직 다관절형 로봇인 KIRO-4에 대하여 실시하였다<sup>15)</sup>.

#### 4.1 수평 다관절형 로봇

사용된 KIRO-3로봇은 4자유도를 가지는 SCARA형 직접 구동 방식(direct-drive type) 로봇으로 그 형상은 Fig. 3과 같다.

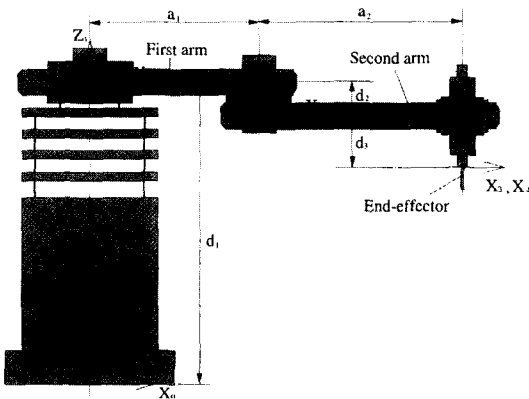


Fig. 3 Coordinate systems of the KIRO-3 robot

KIRO-3 로봇의 역 기구학(부록 A 참조)에서 살펴보면, 로봇의 Z방향 변위,  $P_z$  및 Z축에 대한 회전각,  $\phi$ 는 각각 조인트 변수 중  $d_3$ 와  $\theta_4$ 에 대하여 1:1 매핑(mapping)이 가능함을 알 수 있으므로, 여기서는 Pi-Sigma 신경 회로망의 타당성 검증을 위해  $x, y$  좌표 값 ( $P_x, P_y$ )에 대한 조인트 변수의 오차  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 를 보정하는 경우만을 제시한다.

#### 4.1.1 데이터 획득

KIRO-3로봇에서 2차원 평면상의 reachable workspace는 극좌표계(polar coordinates system,  $r, \theta$ )에서  $125(mm) \leq r \leq 640(mm)$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 의 범위를 가지므로, 본 논문에서는 로봇의 오차를 대표적으로 나타내 줄 수 있다고 생각되는 1사분면(first quadrant)에 대해서만 고려하였다.

데이터는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 등 간격 ( $r = 40mm$ ,  $\theta = 8.18^\circ$ )으로 100개의 학습 데이터를 얻었으며, 조인트 변수의 오차,  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 는  $\pm 5^\circ$ 이내의 값을 사용하였다. 이때 로봇의 요망하는 자세에 대하여 1축과 2축의 조인트 변수가 상호 상쇄 혹은 보완되는 경우를 고려하여,  $\Delta\theta_1$ 는 +, - 양방향의 오차를,  $\Delta\theta_2$ 는 + 방향의 오차만 가지도록 하였다.

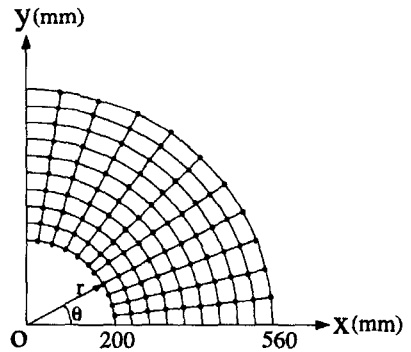


Fig. 4 Data acquisitions

#### 4.1.2 학습 및 보정

100개의 패턴(pattern)에 대한 학습을 통하여 가장 적절한 은닉층의 유니트 수로 3개를 사용하였으며,  $\theta_1$  및  $\theta_2$ 의 학습율은 각각 0.05, 0.5였다.

Fig. 5는 에포크(epoch)수에 따른 에너지 함수의 수렴 정도를 보여주는 것으로 대체로 빨리 수렴함을 알 수 있다. 그러나 조인트 변수의 오차 범위, 즉 +, - 양방향으로

Table 1 The results of the inverse calibration in the KIRO-3 robot unit: degree

Joint variable	Before calibration			After calibration		
	Average	Deviation	Maximum	Average	Deviation	Maximum
$\theta_1$	0.4750	0.3179	1.2758	0.0971	0.0746	0.1921
$\theta_2$	2.6125	0.6760	3.5895	0.0372	0.0283	0.0748

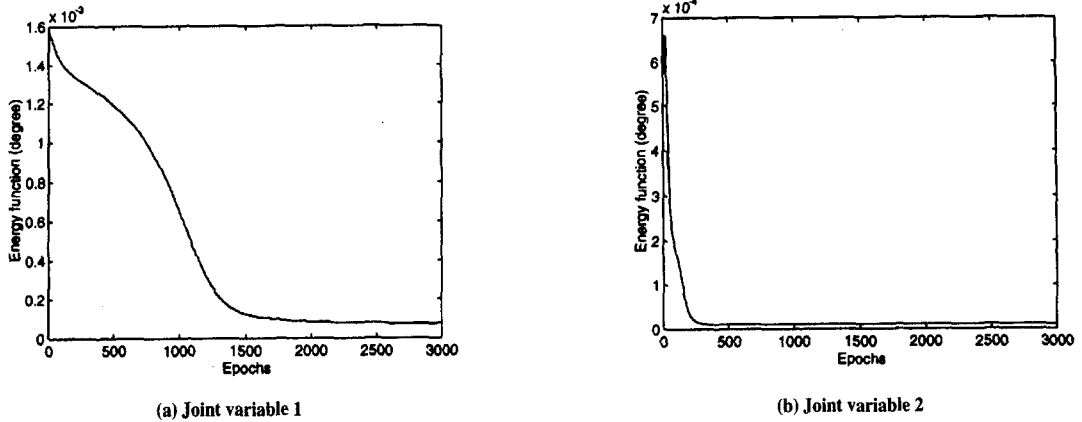


Fig. 5 The results of learning of the KIRO-3 robot.

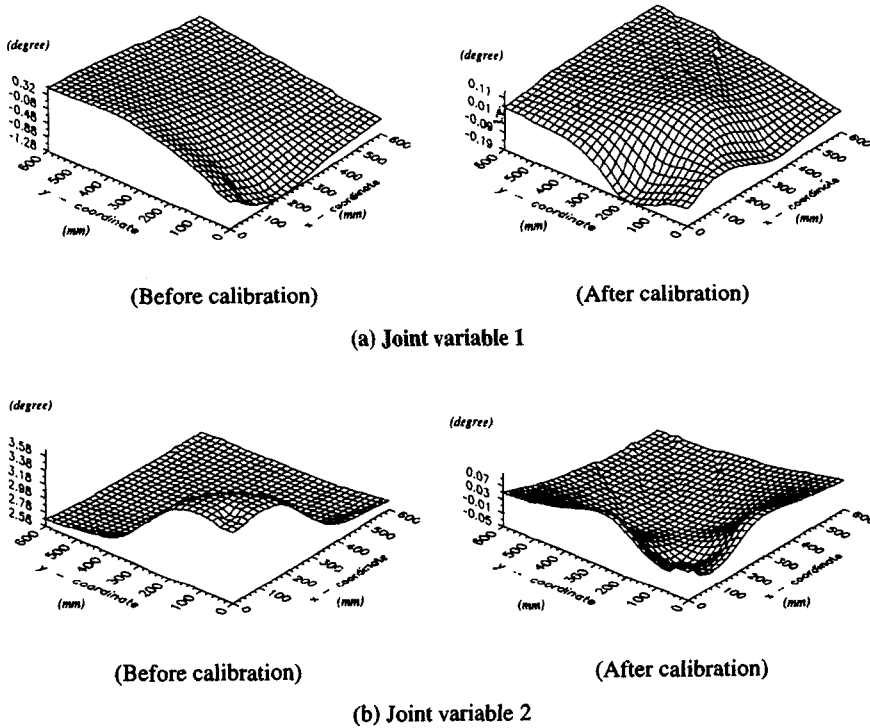


Fig. 6 Comparison of the errors of before & after calibration in the KIRO-3 robot

로 준 경우와 그렇지 않은 경우를 비교해 볼 때, 한 방향으로 오차를 준 경우가 빨리 수렴하면서 에너지 함수도 적음을 알 수 있었다.

Table 1 및 Fig. 6은 3000 에포크로 학습된 결과를

이용하여 역 보정 모델에 의해 보상된 결과를 보여 주고 있다.

Table 1에서 보면, 보정 전에 각 조인트의 절대 오차 평균이 0.475°, 2.6125°이던 것이 보정 후에는 0.0971°

및 0.0372°로 감소됨을 알 수 있다. 이는 KIRO-3 로봇 조인트의 레졸버 분해능(resolver resolution) 2048 pulse/rev. (0.1756°)을 고려하면 만족할 만한 값으로, 보 상 가능한 최소 단위까지 보정될 수 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 6에서  $x, y$ 좌표가 400mm이하인 위치에 대해서는 보정 후에도 오차의 변화가 큼을 알 수 있는데, 이는 로봇의 작업 영역(workspace)에서 로봇의 두 번째 팔(second arm)의 조인트 변수, 즉  $\theta_2$ 가 큰 값을 가지기 때문에 상대적으로 큰 변화를 보이는 것으로 사료된다.

#### 4.2 수직 다관절형 로봇

KIRO-4 로봇의 형상은 Fig. 7과 같으며, 6개의 조인트 변수에 대해 보정을 실시하였다.

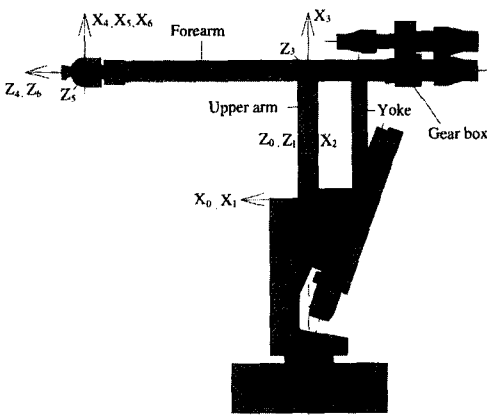


Fig. 7 Coordinate systems of the KIRO-4 robot

##### 4.2.1 데이터 획득

6자유도인 KIRO-4 로봇의 학습 데이터 획득은 ISO 9283<sup>(16)</sup>의 측정 방법을 만족하도록 하기 위하여 로봇의 작업 영역 내에서 한 변이 400mm인 정6면체(cube)를 선택하였다. 사용된 데이터는 총 125개로  $x, y$  및  $z$ 축을 각각 5등분하여 취하였으며, 사용된 각 축(axis)의 구간은 다음과 같다.

$$600(mm) \leq x \leq 1000(mm), 0 \leq y \leq 400(mm),$$

$$400(mm) \leq z \leq 800(mm)$$

이때 로봇 말단부의 Roll, Pitch 및 Yaw각( $\Psi, \theta, \phi$ )은  $\pm 45^\circ$ 범위 내에서 무작위로 선택하였다.

조인트 변수의 오차는 위치에 영향을 미치는 1, 2 및 3축에 대해서는  $\pm 3^\circ$ 이내로, 그리고 로봇 말단부의 방위(orientation)에 영향을 미치는 4, 5 및 6축에 대해서는  $\pm 7^\circ$ 이내의 오차를 주었다. 이때 오차의 부호(sign)는 KIRO-3 로봇의 경우와 유사하게 2축과 3축에 대해서만 +, - 양방향의 오차를 주고 나머지 축에 대해서는 한 방향으로 오차를 주었다.

##### 4.2.2 학습 및 보정

KIRO-4와 같은 6자유도의 로봇인 경우 로봇 말단부의 위치는 손목(wrist) 부분의 조인트 변수와는 무관하다 [부록 B 참조]. 이는 역 보정 학습모델에서, 손목 부분을 제외한 조인트 변수는 입력 유니트로 로봇의 위치만 사용될 수 있음을 의미하는 것으로, 학습 속도의 향상을 위하여 위치에 영향을 미치는 조인트 변수와 그렇지 않은 조인트 변수로 구분하여 학습을 실시하였다.

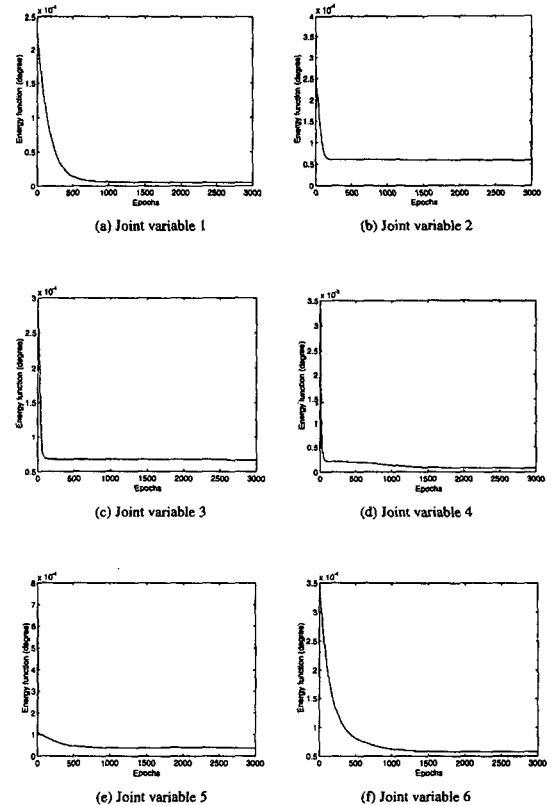


Fig. 8 The results of learning of the joint variables in the KIRO-4 robot

$\theta_1 \sim \theta_3$  는  $x, y$  및  $z$  좌표 값을 입력 유니트로 사용하여, 125개의 패턴에 대한 반복 학습을 통하여 가장 적절한 값으로 3개의 은닉층 유니트의 수를 결정하였으며, 학습율은 모두 0.5로 하였다.

$\theta_4 \sim \theta_6$  는 입력 유니트로  $x, y, z$  좌표 값 및 Roll, Pitch, Yaw각을 사용하여, 125개의 패턴에 대한 반복 학습을 실시한 결과, 가장 적절한 값으로 3개의 은닉층 유니트 수와 0.07, 0.5 및 0.3의 학습율을 각각 결정하였다.

Fig. 8은 각 조인트 변수의 학습 결과를 보여주는 것으로, 각 조인트는 1500 epochs 이내에서 모두 만족할 만한 수렴 정도를 나타내고 있다. 특히 앞 절의 KIRO-3 로봇과는 달리 오차의 방향(+, -)과는 무관하게 2축과 3축에서도 좋은 결과를 보여주고 있는데, 이는 KIRO-4로봇의 각 조인트 변수가 상호 커플링되어 있기 때문으로 생각된다. 이러한 결과는 결국 본 논문에서 사용한 Pi-Sigma신경 회로망의 장점을 보여주는 것으로, 로봇과 같이 고차 다항식을 가지는 경우에 적합함을 알 수 있다.

3000 에폭크의 학습 결과를 토대로 역 보정된 결과는 Table 2와 같다.

**Table 2 Comparison of the results of before & after calibration in the KIRO-4 robot**

Joint variable	Before calibration			After calibration		
	Average	Deviation	Maximum	Average	Deviation	Maximum
$\theta_1$	1.1876	0.8509	2.8072	0.0191	0.0161	0.0683
$\theta_2$	0.9398	0.5516	1.9469	0.0807	0.0559	0.2292
$\theta_3$	1.1101	0.7793	3.0000	0.0835	0.0611	0.2816
$\theta_4$	4.8342	0.6857	6.0643	0.0901	0.0701	0.4134
$\theta_5$	5.2472	0.8301	6.8945	0.0554	0.0473	0.2545
$\theta_6$	2.4334	1.0621	4.6107	0.0752	0.0594	0.3813

Table 2의 결과에서 보면, 보정 후의 각 조인트 변수의 오차는 KIRO-4로봇 조인트의 엔코더 분해능 2500pulse/rev.(0.1440°)을 고려할 때 대체로 만족할 만한 수준까지 보상 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 신경 회로망을 이용하여 로봇의 기구학적 오차를 보정해 줄 수 있는 역 보정 기법을 제시하였다.

신경 회로망은 Pi-Sigma 구조를 사용하였으며, 학습은 요망하는 로봇의 자세(위치, 방위)에 대하여, 로봇의 역 기구학에서 얻은 해석 치와 실제 측정치와의 오차를 학습시켜, 이를 보상하는 역 보정 모델을 제시하였다.

제시된 모델의 타당성 검증을 위해 SCARA형 수평 다관절 로봇(KIRO-3) 및 6자유도 수직 다관절형 로봇(KIRO-4)의 2가지 경우에 대한 역 보정을 실시하여, 보정 전  $\pm 5^\circ$ 내외의 조인트 변수 오차를 0.1°이하로 줄일 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) Pi-Sigma 신경 회로망은 비교적 빨리 수렴하면서 정확도 면에 있어서 대체로 만족할 만한 수준을 가져 로봇과 같이 복잡한 기구학을 가지는 경우에 있어서 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 제안된 로봇의 역 보정 모델을 이용하여 수평 다관절형 로봇(4 자유도)에 대해서 보정 전  $0.475^\circ \sim 2.6125^\circ$ 인 조인트 변수의 절대오차를 0.1°이하로 줄일 수 있었으며, 6자유도의 수직 다관절형 로봇에 대해서도 보정 전  $0.9398^\circ \sim 5.2472^\circ$ 를 0.1°이하로 줄일 수 있었다.

## 참고 문헌

1. D. E. Whitney, C. A. Lozinski and J. M. Rourke, "Industrial Robot Forward Calibration Method and Results," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, No. 1, pp. 1-8, 1986.
2. J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *ASME J. of Applied Mechanics*, pp. 215-221, 1955.
3. W. K. Veitschegger and C. H. Wu, "Robot Accuracy Analysis Based on Kinematics," *IEEE J. of Robotics & Automation*, Vol. RA-2, No. 2, pp. 171-179, 1986.
4. S. Hayati and M. Mirmirami, "Improving the Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators," *J. of Robotic System*, Vol. 2, No. 4, pp. 397-413, 1985.
5. H. W. Stone and A. C. Sanderson, "A Prototype Arm Signature Identification System," *IEEE Conf. of Robotics & Automation*, pp.

175-182, 1987.

6. R. P. Judd and A. B. Knasinsk, "A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 1, pp. 20-30, 1990.
7. J. S. Shamma and D. E. Whitney, "A Method for Inverse Robot Calibration," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, pp. 36-43, 1987.
8. C. H. Menq, J. H. Borm and J. Z. Lai, "Identification and Observability Measure of a Basis Set of Error Parameters in Robot Calibration," *ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 111, pp. 513-518, 1989.
9. C. R. Mirman and K. C. Gupta, "Compensation of Robot Joint Variables Using Special Jacobian Matrices," *J. of Robotics Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 113-137, 1992.
10. Z. Ahmad and A. Guez, "On the Solution to the Inverse Kinematic Problem," *IEEE Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1692-1697, 1990.
11. S. Kieffer, V. Morellas and M. Donath, "Neural Network Learning of the Inverse Kinematic Relationship for a Robot Arm," *IEEE int. Conf. on Robotics & Automation*, California, pp. 2418-2425, 1991.
12. T. Watanabe, H. Tokumaru, K. Kurokawa, S. Kubo and K. Kawata, "The Calibration of Position and Orientation of Robot Manipulators Using a Neural Network," *ASME JAPAN/USA Symp. on Flexible Automation*, Vol. 1, pp. 219-225, 1992.
13. J. Ghosh and Y. Shin, "Efficient Higher-order Neural Networks for Classification and Function Approximation," *Int. J. of Neural Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 323-350, 1992.
14. 정 재원, 김 수현, 락 윤근, "와이어 병렬 메카니즘

에 의한 로봇의 완전 자세 측정," 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 5, pp. 134-142, 1997.

15. 락 윤근외, 직접 구동 방식 로봇트의 개발과 그 응용에 관한 연구I~V), 과학기술처 위탁과제 연구결과 보고서, 한국과학기술원, 1988~1992.
16. ISO 9283, Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test method-, International Organization for Standardization, pp. 1-11, 1990.

## 부 록

### A. KIRO-3 로봇의 역 기구학

$$\theta_2 = \text{atan}2(S_2, C_2)$$

$$C_2 = \frac{P_x^2 + P_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}, S_2 = \pm\sqrt{1 - C_2^2}$$

$$\theta_1 = \text{atan}2(P_y, P_x) - \text{atan}2(K_2, K_1)$$

$$K_1 = a_1 + C_2a_2, K_2 = S_2a_2$$

$$d_3 = P_z - d_1 - d_2$$

$$\theta_4 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

여기서,

$$S_i = \text{Sin}(\theta_i) \quad C_i = \text{Cos}(\theta_i), \quad a_1 = a_2 = 320(\text{mm}),$$

$$d_1 = 536(\text{mm}), \quad d_2 = -89(\text{mm}) \quad \text{이다.}$$

### B. KIRO -4 로봇의 역 기구학

$$\theta_1 = \text{atan}2(P_y, P_x)$$

$$\theta_3 = \text{atan}2(S_3, C_3)$$

$$S_3 = \frac{d_4^2 + a_2^2 - (P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)}{2a_2d_4}, \quad C_3 = \pm\sqrt{1 - S_3^2}$$

$$\theta_2 = \text{atan}2(S_{23}, C_{23}) - \theta_3$$

$$C_{23} = \frac{(C_1P_x + S_1P_y)(d_4 - a_2S_3) + P_z a_2 C_3}{P_z^2 + (C_1P_x + S_1P_y)^2}$$

$$S_{23} = \frac{(C_1P_x + S_1P_y)a_2C_3 - (d_4 - a_2S_3)P_z}{P_z^2 + (C_1P_x + S_1P_y)^2}$$

$$\theta_4 = \text{atan}2(S_4S_5, C_4S_5)$$

$$S_4S_5 = R_{23}C_1 - R_{13}S_1,$$



$$\begin{aligned}
 C_4 S_5 &= -R_{33} C_{23} - R_{13} C_1 S_{23} - R_{23} S_1 S_{23} \\
 \theta_5 &= \text{atan2}(S_4 S_5, S_4 C_5) \\
 S_4 C_5 &= S_4 (R_{13} C_1 C_{23} + R_{23} S_1 C_{23} - R_{33} S_{23}) \\
 \theta_6 &= \text{atan2}(S_6, C_6) \\
 S_6 &= -(C_1 S_{23} S_4 R_{11} - S_1 C_4 R_{11} \\
 &\quad + S_1 S_{23} S_4 R_{21} + C_1 C_4 R_{21} + C_{23} S_4 R_{31}) \\
 C_6 &= -(C_1 S_{23} S_4 R_{12} - S_1 C_4 R_{12} + S_1 S_{23} S_4 R_{22} \\
 &\quad + C_1 C_4 R_{22} + C_{23} S_4 R_{32})
 \end{aligned}$$

여기서  $a_2 = 600(mm)$ ,  $d_4 = 800(mm)$ 이며,  $R_{ij}$ 는 행렬  $\mathbf{R}$ 의 각 요소로서,  $R_{Z,Y,X}(\phi, \theta, \psi)$ 의 Roll, Pitch, Yaw각에 대하여 다음과 같다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot R_{Z,Y,X}(\phi, \theta, \psi)$$