

신경망을 이용한 공작기계 병렬 매니플레이터의 기구학 특성 분석

이제섭*, 고준빈⁺

(논문접수일 2007. 5. 2, 심사완료일 2007. 11. 14)

Analysis on Kinematic Characteristics of a Machine Tool Parallel Manipulator Using Neural Network

Je-Sub, Lee*, Jun-Bin, Ko⁺

Abstract

This paper describes the kinematics which is a new type of parallel manipulator, and the neural network is applied to solving the forward kinematics problem. The parallel manipulator called it as a Stewart platform has an easy and unique solution about the inverse kinematics. However, the forward kinematics is difficult to get a solution because of the lack of an efficient algorithm caused by its highly nonlinearity. This paper proposes the neural network scheme of an Newton-Raphson method alternatively. It is found that the neural network can be improved its accuracy by adjusting the offset of the obtained result.

Key Words : Neural network(신경망), Forward kinematics(순기구학), Parallel manipulator(병렬 매니플레이터), Stewart platform(스튜어트 플랫폼), Back-propagation(역전파), Calibration(교정)

1. 서론

스튜어트 플랫폼(Stewart platform)으로 대표되는 병렬 매니플레이터는 플랫폼과 베이스가 2개 이상의 직렬형 부속 관절에 의해 병렬로 연결되는 폐회로를 형성하므로 각 액추에이터의 구동오차가 로봇끝단에서 누적된 개념으로 나타

나는 것이 아니고 평균화된 개념으로 나타나므로 정밀도가 우수하며 외력이 복수개의 액추에이터에 분산되므로 강성이 좋아 고속, 고정밀, 고하중이 요구되는 작업에서 동역학적으로 효율이 좋은 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 병렬구조는 직렬구조에 비해 기구학적, 동역학적 모델링 및 해석이 복잡하고, 작업공간이 제한적이며 교

* LG 필립스

⁺ 교신저자, 한밭대학교 기계설계공학과 (kjb1002@hanbat.ac.kr)
주소: 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산16-1

정에 대한 구체적인 방법이 없다는 문제점을 안고 있다. 이외에도 해결해야 할 수많은 과제들이 산재해 있는 것이 현실이고 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

1965년 Stewart가 항공기의 운동시뮬레이터의 메카니즘으로 병렬구조를 제안한⁽¹⁾ 이후로 K. Cleary와 T. Brooks는 정기구학 해를 실시간에 구할 수 있는 병렬기구계를 고안하고 해석하였고⁽²⁾, E. Fischer는 스튜어트 플랫폼에 대한 일반적인 기구학적 이론 및 실제 설계시 고려할 사항을 연구 제시하였고⁽³⁾, B. Dasgupta는 스튜어트 플랫폼에 대한 고찰로서 기구학 해석과 특이값, 작업공간 그리고 동역학을 제시하였다⁽⁴⁾. 더불어 R. Boudreau는 Genetic Algorithm과 Holographic 신경망을 이용하여 순기구학을 해석하였다^(5,6). K. Hunt는 여러 가지 형태의 수정된 스튜어트 플랫폼을 고안하고 각각의 특성을 분석하였고^(7,8), H. Bruyninckx는 Hunt와 Primrose가 제안한 병렬기구에 대해 기구학을 수행하였고^(9,10), Lee는 가변형 병렬기구에 대한 작업공간과 힘/모멘트 전달 특성을 분석하였다⁽¹¹⁾. K. Sugimoto는 모터기하학을 이용한 순기구학 및 역기구학 해석 방법을 제안하였다⁽¹²⁾. Oiwa는 3차원 측정 장비에 병렬기구를 결합하여 순기구학을 해석하였다⁽¹³⁾.

국내에서도 새로운 6자유도 병렬기구에 대한 기구학 해석과 혼합형 매니플레이터에 대한 기구학 특성등을 분석하였고, 또한 유전알고리즘을 이용한 병렬기구의 순기구학을 해석하였다^(14,15).

본 연구에서는 새로운 형태의 공작기계, 즉 위치 구동은 병렬이, 방위 구동은 직렬이 담당하는 복합 매니플레이터에 대해 중앙축이 있고 유니버설 조인트를 사용한 병렬부의 기구학 해석을 수행하고 얻어진 순기구학의 비선형 다변수 방정식에 대해 신경망을 적용하여 실시간으로 단일 해를 구하고, 구해진 해를 역기구학과 되먹임으로 오프셋을 구해, 보다 정확한 순기구학 해를 구하고자 한다. 또한 기구학 해석을 통해 유도된 순기구학의 비선형 다변수 다항식에 대한 신경망을 적용하여 순기구학 해를 구함과 동시에 해의 정확도를 향상시키는 알고리즘을 적용하고자 한다.

2. 병렬 매니플레이터의 기구학 해석

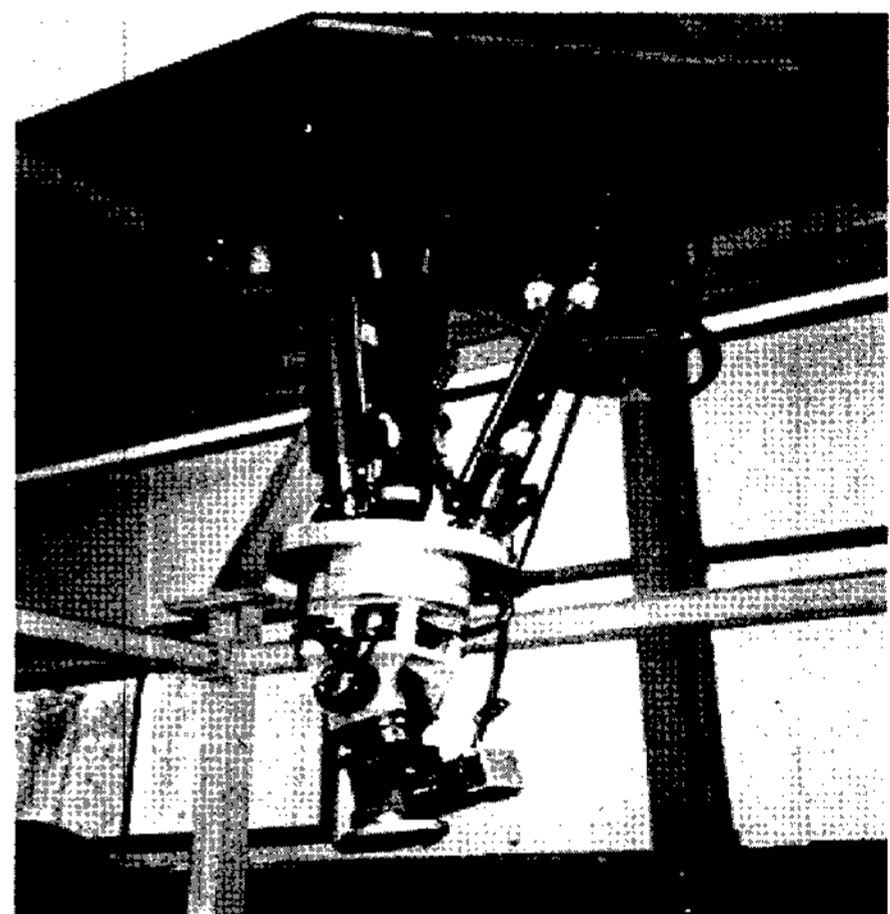
중앙축이 있는 병렬부에 대한 기구학은 구동 조인트와 중앙축 조인트, 그리고 작업 끝단간의 관계에 대한 기구학 해석으로 나누어진다. Fig. 1은 매니플레이터의 형태를 간략하게 도식화한 것이다. 병렬 매니플레이터는 Fig. 1 (b)와 같이 위치 구동은 병렬기구가, 방위 구동은 직렬기구가 분리해서 행해지도록 되어 있다. 병렬기구는 3개의 액츄에이터와 1개

의 중앙축으로 되어 있으며, 플랫폼까지 유니버설 조인트에 의해서 각각 연결되어 있다.

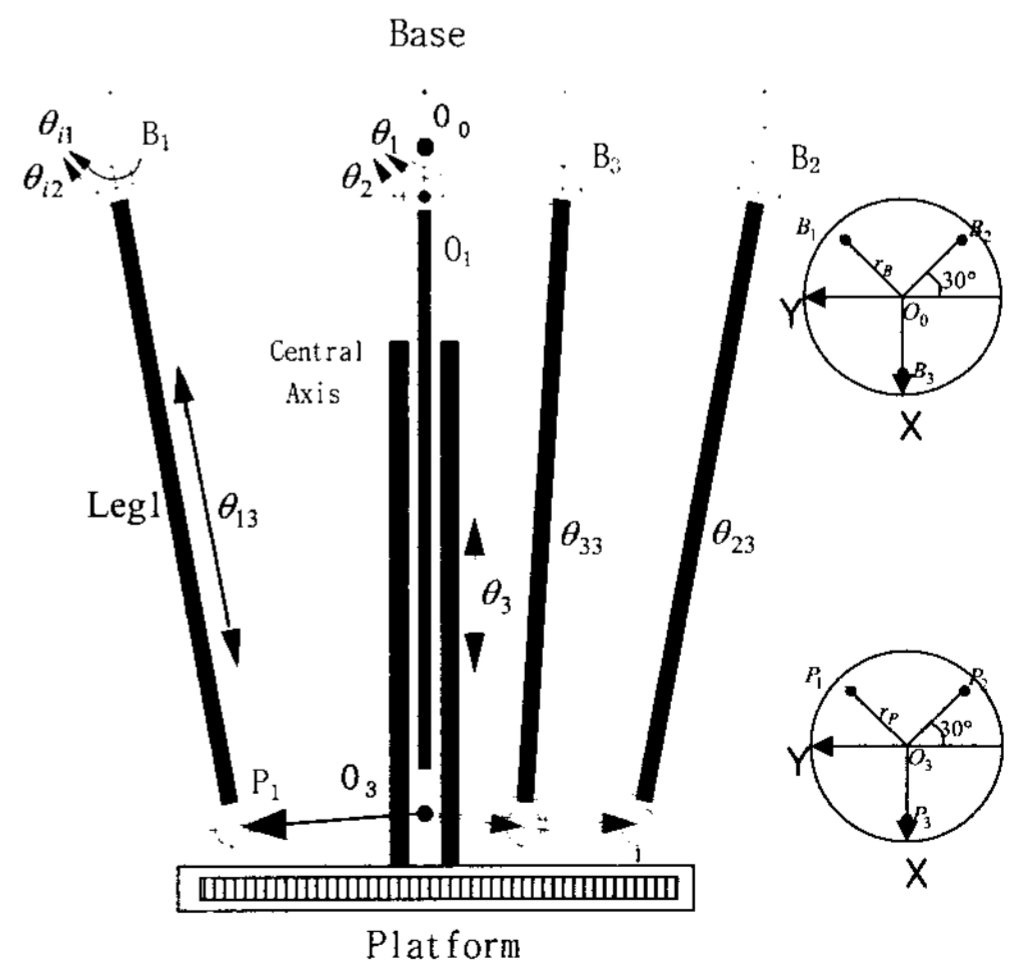
2.1 역기구학 해석

역기구학은 Fig. 1에서 보듯이 플랫폼의 위치로부터 직렬부인 중앙축의 조인트($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)를 해석적인 방법으로 구한 후 병렬부의 구동조인트($\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$)를 구하면 역기구학은 마무리된다. 확장 오프셋이 추가된 유니버설 조인트를 사용하였고 플랫폼의 위치와 중앙축의 좌표는 다음 식으로 표현된다.

$$(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \text{inverse_kin.}(T_{px}, T_{py}, T_{pz}) \quad (1)$$



(a) Manipulator set-up



(b) Schematic of Parallel manipulator

Fig. 1 3-DOF Parallel manipulator

$$\theta_1 = \tan^{-1}(T_{pz}, -T_{py}) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{T_{pz}}{\cos\theta_1} - cp, T_{px}\right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \left(\frac{T_{pz}}{\cos\theta_1} - cp\right) / \cos\theta_2 \quad (4)$$

여기서 T_p 는 작업 끝단의 좌표, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 중앙축의 조인트 변위, 그리고 cp 는 유니버설 조인트의 확장 오프셋을 의미한다. 위 식은 중앙축과 작업 끝단간의 관계에 대한 역기구학 식으로 구동 조인트와 중앙축간의 역기구학은 순기구학 식의 유도에서 함께 구해지며 구해진 중앙축의 조인트 변위와 순기구학 해석에서 유도된 식을 이용하면 역기구학은 쉽게 해결된다.

2.2 순기구학 해석

구동조인트($\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$) 변위로 작업 끝단의 좌표를 구하는 것으로 다음 순으로 해석된다.

$$(\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}) \xrightarrow{\text{step2}} (\theta_1, \theta_2, \theta_3) \xrightarrow{\text{step1}} (T_{px}, T_{py}, T_{pz})$$

step 1

Fig. 1에서 중앙축과 작업 끝단간은 직렬 구조이기에 해석적으로 구한다. 작업 끝단을 중앙축의 조인트변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{T}_p = {}^0O_0O_3 + {}^0R_3\vec{P} \quad (5)$$

$${}^0O_0O_3 = \left\{ \theta_3 \sin\theta_2, -\sin\theta_1 (cp + \theta_3 \cos\theta_2), \cos\theta_1 (cp + \theta_3 \cos\theta_2) \right\} \quad (6)$$

여기서 \vec{P} 는 $\{O_3\}$ 좌표계에서 본 작업 끝단의 좌표이다. 0O_0O_3 는 식 (6)과 같이 중앙축의 조인트변수로 나타낼 수

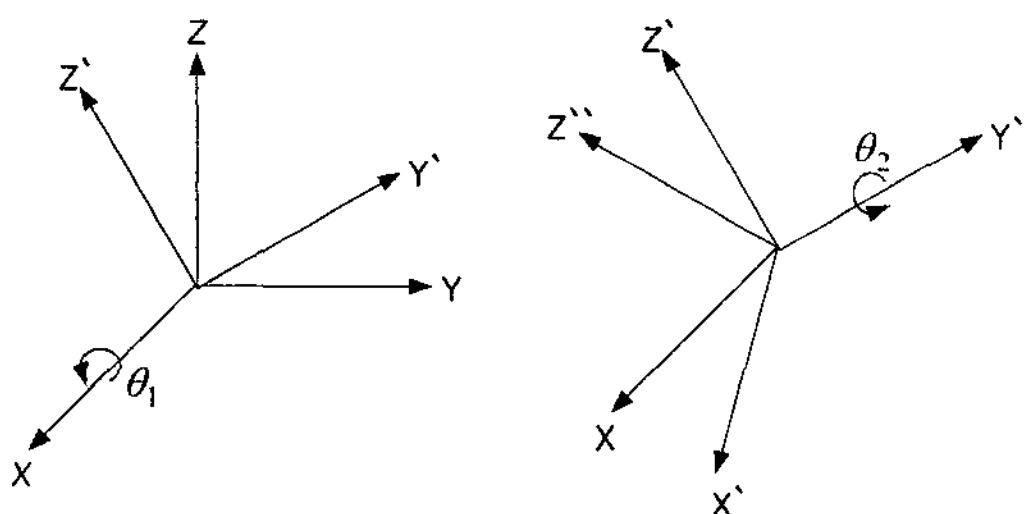


Fig. 2 X-Y Euler angles

있다. 0R_3 는 x축에 θ_1 , y축에 θ_2 회전하는 회전행렬이며 각 회전각은 Euler각이다(Fig. 2).

step 2

구동조인트로 중앙축의 조인트를 구하는 것으로 병렬기구의 페루프 관계에서 구동조인트 θ_{i3} 를 포함하는 링크 트레인 ${}^0B_iP_i (i=1,2,3)$ 는 식 (7)과 같이 표현되고 i -link의 조인트 변수로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{{}^0B_iP_i} &= \vec{{}^0O_0O_3} + \vec{{}^0O_0B_i} + \vec{{}^0R_3} \vec{{}^3O_3P_i} \\ &= \left\{ \theta_{i3} s\theta_{i2}, -(cp + \theta_{i3} c\theta_{i2}) s\theta_{i1}, c\theta_{i1} (cp + \theta_{i3} c\theta_{i2}) \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, 식 (7)의 벡터들을 간단히 나타내기 위해 다음과 같이 변수로 놓는다.

$$\begin{aligned} ss_i &= (cp + cb_i) s\theta_{i1}, \quad \alpha_i = (cp + cb_i) c\theta_{i1} \\ cb_i &= \theta_{i3} c\theta_{i2}, \quad sb_i = \theta_{i3} s\theta_{i2} \end{aligned} \quad (8)$$

정의된 변수로 식 (7)에 포함된 벡터들을 다시 나타내고, 각 벡터의 x-성분에 포함되어 있는 sb_i , y-성분에 포함되어 있는 ss_i , z-성분에 포함되어 있는 α_i 을 θ_i 로 다음과 같이 나타낸다.

$$(cp + cb_i)^2 = ss_i^2 + \alpha_i^2 \quad (9)$$

$$\alpha_i^2 + sb_i^2 = \theta_{i3}^2 \quad (10)$$

여기서 정의된 각각의 변수 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} sb_1 &= \theta_3 s\theta_2 + \frac{r_B}{2} - \frac{r_P}{2} c\theta_2 \\ ss_1 &= \frac{(\sqrt{3}r_B - \sqrt{3}r_P c\theta_1 + 2cp s\theta_1 + 2\theta_3 s\theta_1 c\theta_2 + r_P s\theta_1 s\theta_2)}{2} \\ \alpha_1 &= \frac{(2cp c\theta_1 + 2c\theta_1 c\theta_2 \theta_3 + \sqrt{3}r_P s\theta_1 + r_P c\theta_1 s\theta_2)}{2} \\ sb_2 &= \theta_3 s\theta_2 + \frac{r_B}{2} - \frac{r_P}{2} c\theta_2 = sb_1 \\ ss_2 &= \frac{(-\sqrt{3}r_B + \sqrt{3}r_P c\theta_1 + 2cp s\theta_1 + 2\theta_3 s\theta_1 c\theta_2 + r_P s\theta_1 s\theta_2)}{2} \\ \alpha_2 &= \frac{(2cp c\theta_1 + 2c\theta_1 c\theta_2 \theta_3 - \sqrt{3}r_P s\theta_1 + r_P c\theta_1 s\theta_2)}{2} \\ sb_3 &= \theta_3 s\theta_2 - r_B + r_P c\theta_2 \\ ss_3 &= cp\theta_1 - r_P s\theta_1 s\theta_2 + \theta_3 s\theta_1 c\theta_2 \\ \alpha_3 &= cp c\theta_1 - r_P c\theta_1 s\theta_2 + \theta_3 c\theta_1 c\theta_2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $-60^\circ < \theta_{i1}, \theta_{i2} < 60^\circ$ 이므로 양의 제곱근만 취하면

$$cb_i = \sqrt{ss_i^2 + cc_i^2} - cp \quad (12)$$

이고, $cc_i^2 + sb_i^2 = \theta_{i3}^2$ 이므로 아래와 같은 구속식이 유도되며

$$f_i = cb_i^2 + sb_i^2 - \theta_{i3}^2 = 0$$

$$f_i = sb_i^2 + ss_i^2 + cc_i^2 - 2cp\sqrt{ss_i^2 + cc_i^2} + cp^2 - \theta_{i3}^2 = 0 \quad (13)$$

유도된 구속식 (11)에 식 (13)을 대입하면 아래와 같은 순기구학을 표현되는 비선형 연립다항식이 아래와 같다.

$$f_1 = cpr_P s\theta_2 + r_P \theta_3 s\theta_2 + 2cp\theta_3 C\theta_2 + r_P^2 + \theta_3^2 + 2c_P^2 - \frac{3}{2}r_P r_B C\theta_1 + r_B^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}r_P r_B s\theta_1 s\theta_2 + \sqrt{3}r_B \theta_3 s\theta_1 C\theta_2 + \sqrt{3}cpr_B s\theta_1 - \frac{1}{2}r_P r_B C\theta_2 - cp(\sqrt{4cpr_P s\theta_2 + 8cp\theta_3 C\theta_2 + 4r_P^2 + 4cp^2 - 6r_P r_B C\theta_1} - r_P^2 C^2\theta_2 + 4\theta_3 r_P s\theta_2 C\theta_2 + 3r_B^2 - 2\sqrt{3}r_P r_B s\theta_1 s\theta_2 + 4\sqrt{3}r_B \theta_3 s\theta_1 C\theta_2 + 4cp\sqrt{3}r_B s\theta_1 + 4\theta_3^2 C^2\theta_2) - \theta_{i3}^2 = 0 \quad (14)$$

$$f_2 = cpr_P s\theta_2 + r_B \theta_3 s\theta_2 + 2cp\theta_3 C\theta_2 + r_P^2 + \theta_3^2 + \theta_3^2 + 2c_P^2 - \frac{3}{2}r_P r_B C\theta_1 + r_B^2 - \frac{1}{2}r_P r_B s\theta_1 s\theta_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}r_P r_B s\theta_1 s\theta_2 - \sqrt{3}r_B \theta_3 s\theta_1 C\theta_2 - \sqrt{3}cpr_B s\theta_1 - cp(\sqrt{4cpr_P s\theta_2 + 8cp\theta_3 C\theta_2 + 4r_P^2 + 4cp^2 - 6r_P r_B C\theta_1} - r_P^2 C^2\theta_2 + 4r_P^2 \theta_3 s\theta_2 C\theta_2 + 3r_B^2 - 2\sqrt{3}r_P r_B s\theta_1 s\theta_2 - 4\sqrt{3}r_B \theta_3 s\theta_1 C\theta_2 - 4\sqrt{3}cpr_B s\theta_1 + 4\theta_3^2 C^2\theta_2) - \theta_{23}^2 = 0 \quad (15)$$

$$f_3 = -2cpr_P s\theta_2 - 2r_P r_B C\theta_2 - 2r_B \theta_3 s\theta_2 + 2cp\theta_3 s\theta_2 + 2c_P^2 \theta_3 C\theta_2 + r_P^2 + \theta_3^2 + 2c_P^2 + r_B^2 - 2c_P(\sqrt{c_P^2 - 2c_P r_P s\theta_2 + 2c_P \theta_3 C\theta_2 + r_P^2 - r_P^2 C^2\theta_2} - 2r_P \theta_3 s\theta_2 C\theta_2 + \theta_3^2 C^2\theta_2) - \theta_{33}^2 = 0 \quad (16)$$

식 (14), (15), (16)은 구동 조인트($\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$)와 중앙축 조인트 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)간의 순기구학 및 역기구학 연립 비선형 방정식이다. 위 식에서 중앙축 조인트($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)로 구동 조인트 ($\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$)를 구하는 역기구학은 쉽게 해를 구할 수 있다. 그러나, 구동 조인트로 중앙축의 조인트를 구하는 순기구학

은 3차 연립 비선형 방정식이 된다.

3. 신경망을 이용한 순기구학 해석

병렬기구의 순기구학은 비선형 연립 방정식으로 표현이 되며 이는 주로 수치해석기법에 의존해 해를 구한다. 그러나 실시간에서 사용하기에 수치해석 기법은 초기치에 따라 시간이 많이 걸리고 국부적인 해가 되거나 발산하는 등 여러 가지 문제를 야기시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 신경망을 제안하고 순기구학의 비선형 방정식에 신경망을 적용하여 실시간으로 신뢰성 있는 유일한 해를 얻고 해의 정확도를 향상시키기 위해 신경망의 출력을 역기구학과 되먹임을 통해 보다 정확한 새로운 출력을 만드는 것을 제안하며 흐름도는 Fig. 3과 같다.

3.1 신경망의 구조

Fig. 4는 학습에 사용된 오차 역전파 신경망의 구조를 나타낸다. 입력층은 3개의 구동 조인트 변수 $\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$ 로 이루어지며 출력층도 중앙축 조인트 변수 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로 구성된다. 은닉층은 각각 1개와 2개로 나누어 최적의 구조를 찾으려 하였고 각 층의 활성화함수로는 시그모이드 함수를 사용하였다.

각 층은 세가 갖는 입력과 가중치 벡터를 곱해서 더한 결

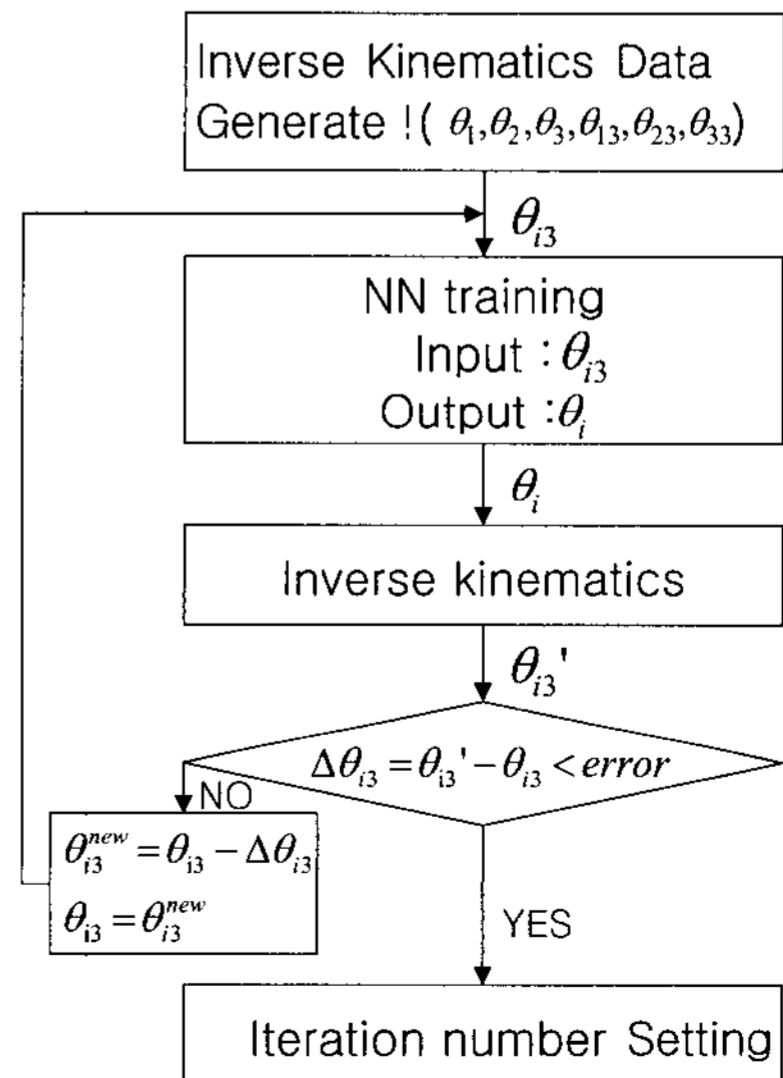


Fig. 3

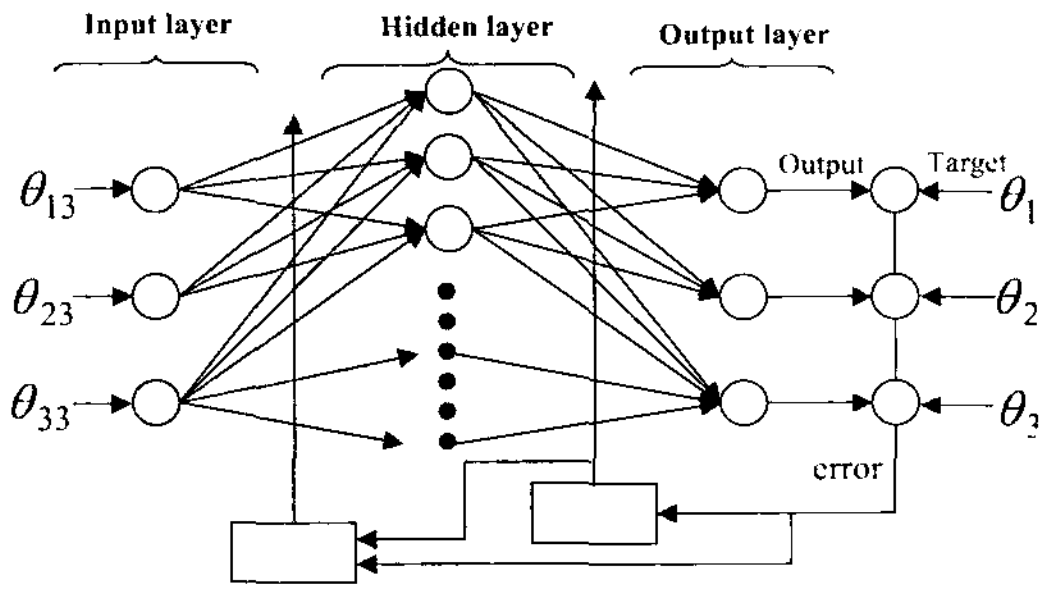


Fig. 4 The structure of the NN with BP

과를 하나의 활성화함수에 적용하는 방식으로 계산되는 처리 요소로 식 (17)과 같다.

$$y = f(\neq t), \neq t = \sum_{k=1}^n x_k w_k + b_k$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (17)$$

여기서 y 는 세포 출력, f 는 활성화함수, b_k 는 입력값(bias), β 는 1이다.

3.2 훈련 및 시험데이터 생성

역전파 신경망의 학습은 지도학습으로 신경망 입력과 출력에 대한 데이터, 즉 입·출력 패턴을 훈련용과 시험용으로 나누어 생성하였다. 신경망의 훈련 데이터는 네트워크 작동이 기대되는 전체 영역을 대표할 수 있는 방식으로 선택 또는 생성되어야 훈련 후 올바른 출력값을 기대할 수 있기에 먼저 병렬 매니플레이터의 작업공간을 고려하여야 한다.

Fig. 5와 같이 병렬 기구의 작업공간을 고려하여 작업끝단의 좌표를 랜덤하게 생성하여 이를 역기구학을 통해 중앙축의 조인트 변수를 구한 후 구동 조인트 변수를 구하였다. 중앙축의 조인트 변수($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)를 신경망의 출력, 구동 조인트 변수($\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}$)를 신경망의 입력으로 하고 1,000개의 훈련 패턴을 사용하였고 입력과 출력을 0~1 사이로 정규화 하였다.

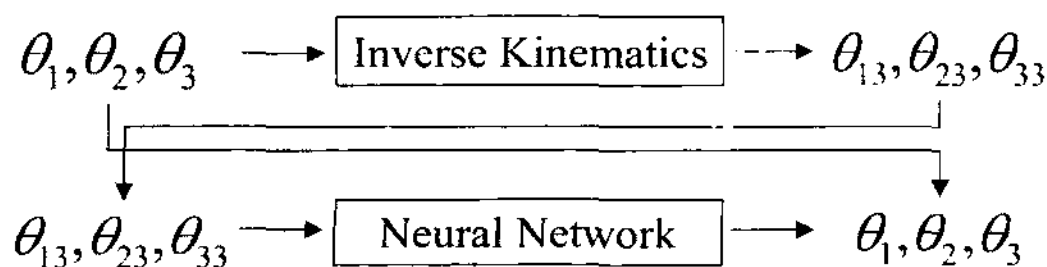


Fig. 5 Generation of training data

3.3 신경망의 학습

신경망의 학습은 원하는 출력을 얻기 위해 가중치들을 변화시키는 것을 의미한다. 선정된 1,000개의 훈련 패턴은 비선형 다변수 다항식의 해를 구하기 위해 신경망의 학습에 사용되며 학습을 위해 채택된 신경망은 다중 입력 다중 출력을 기본 구조로 하였으며, 학습 규칙으로 오차 역전파 알고리즘을, 활성화함수로 시그모이드 함수를 사용하여 지도 학습을 수행하였다. 오차 역전파 알고리즘은 목적함수의 최소화를 위해 고안된 방법으로 목적함수로 다음과 같이 정의되는 오차 제곱합을 사용하였다.

$$e = \sum \sum (t - f)^2 \quad (18)$$

여기서, t 는 목표 출력이고 f 는 NN의 출력이다. 학습의 조건으로 반복 학습 횟수를 400,000번으로 총 오차는 0.005로 고정하였다. 또한 BP학습의 성능을 향상시키기 위해 고정된 학습률에 모멘텀 항을 추가하였고 다른 방법론 학습의 정도에 따라 학습률을 자체적으로 변화시키는, 즉 적응성을 갖도록 가변적인 학습률을 사용하였다.

3.4 학습 결과

Table 1에서 보는 바와 같이 신경망 구조와 학습률, 모멘트비를 변화시켜가며 학습한 결과는 다음과 같다. 여러 가지 학습 변수를 변화시켜도 Table 1에 나타나듯이 오차가 모두 학습 목표치에 도달하지 못하였다. 조건(c)의 경우 은닉층의 수가 증가해도 학습이 잘 일어나지는 않았고 조건(d)의 경우처럼 가변적인 학습률이 사용되는 신경망은 학습이 잘 수행되지 못하면 학습률이 0으로 근접하게 되며 결국엔 학습률이 0이 되어 더 이상의 학습이 일어나지 않는 현상이 나타났고, 그림에 나타나지 않은 구조도 모두 학습 목표치에 오차가 수렴하지 못하였다. 제안한 신경망의 구조 중 조건(a), 즉

Table 1 Results of training

	(a)	(b)	(c)	(d)
Learning rate	0.7	0.3	0.2	0.5
Momentum	0.8	0.6	0.4	
Hidden layer	1	1	2	1
Neuron	41	50	first: 19 second: 13	43
Iteration	400,000	400,000	600,000	400,000
Error	0.0311	0.0765	0.0446	0.1295

1개의 은닉층에 0.7의 학습률과 0.8의 모멘텀을 갖는 신경망이 오차가 가장 낮게 나타났고 이를 비선형 다변수 다항식의 해를 구하는 최적의 신경망 구조로 채택하였다.

4. 신경망의 개선

신경망이 direct mapping function이라고 가정하면 신경망 출력은 입력값의 오프셋을 알기 위해 되먹임 할 수 있고 이 오프셋에 의해 입력값을 조절하여 신경망 출력을 원하는 수준으로 만들 수 있다. 즉 훈련된 신경망에 역기구학과 출력의 반복을 통해 오차를 줄이며 역기구학을 통해 검증하여 바람직하지 않는 신경망 출력이 병렬 매니플레이터에 대해 영향을 미치는 것을 최소화 할 수 있다.

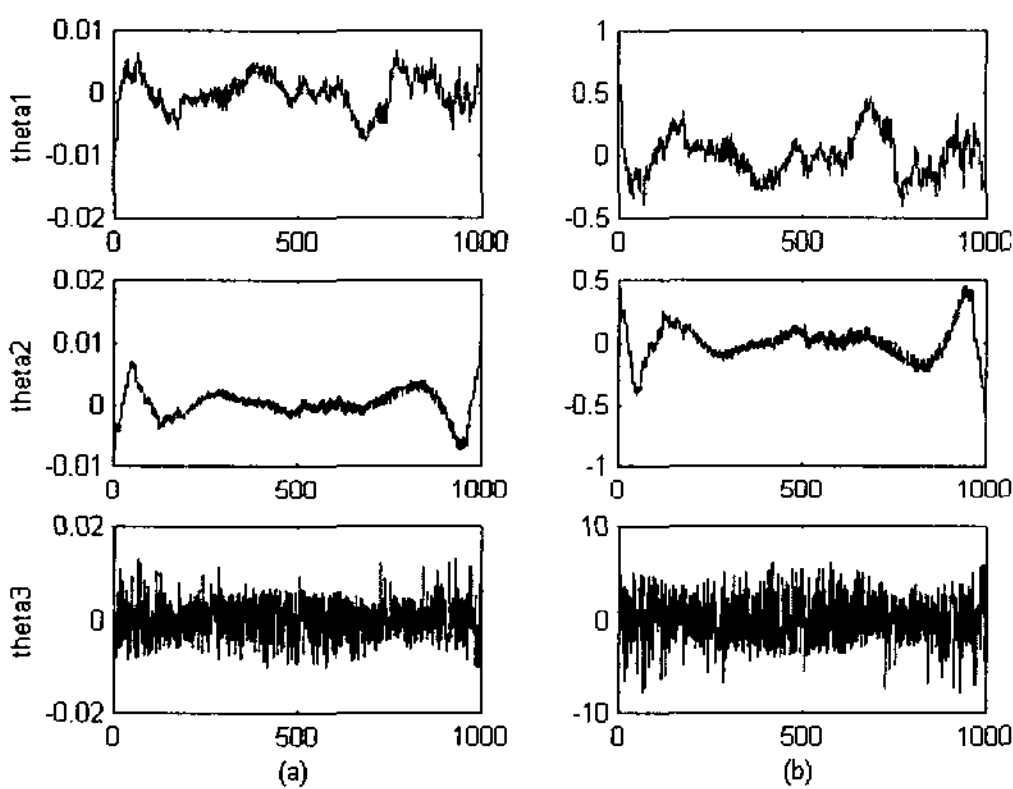


Fig. 6 NN output (a) normalizing (b) real scale

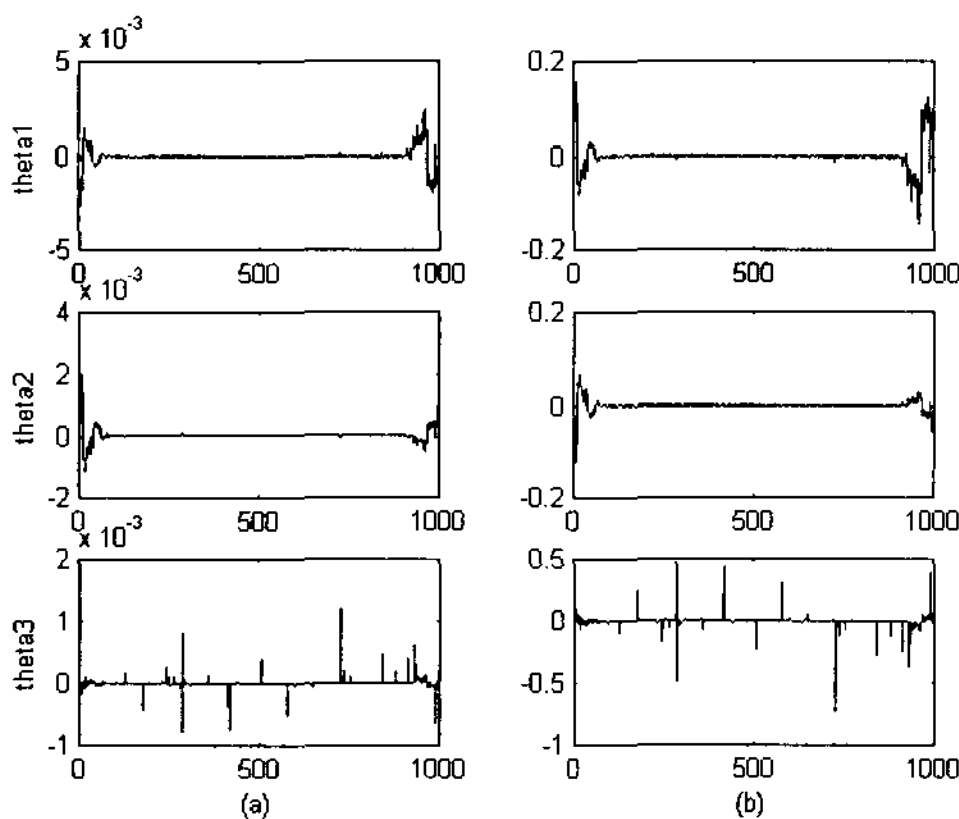


Fig. 7 Error of four iteration with testing data (a) normalizing (b) real scale

최적의 신경망 구조로 채택된 결과에 8번의 반복을 수행한 결과, 반복횟수가 증가할수록 오차는 감소하고 계산시간은 Pentium 233MHz PC일 경우 대략 20ms였고 원하는 수준의 오차는 4번의 반복으로 얻을 수 있었다. 랜덤하게 1,000개의 시험 데이터를 생성하여 반복수에 따른 수행한 결과는 Fig. 6, 7과 같다. Fig. 6, 7에서 보듯이 훈련된 신경망의 출력은 오차가 허용 오차보다 크게 나타나기에 이를 개선시키기 위해 반복과 역기구학을 이용하여 원하는 수준의 오차를 갖는 출력을 구할수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스튜어트 플랫폼으로 대표되는 병렬 매니플레이터에 대해 기구학 해석을 수행하였다. 또한, 해석된 순기구학의 비선형 다변수 연립 방정식에 대해 해를 구하는 방법으로 역전파 알고리즘의 신경망을 이용하였고, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 병렬부의 중앙축을 중심으로 구동부와 작업끝단의 두부분으로 나누어 역기구학 및 순기구학 해석을 수행하였다.
- (2) 순기구학은 연립 비선형 방정식으로 표현이 되며 이를 해석하기 위해 오차 역전파 알고리즘의 신경망을 사용하였다.
- (3) 제안된 신경망의 구조는 원하는 수준의 오차 범위를 벗어나므로 반복과 역기구학으로 순기구학 해의 정확도를 향상시켰다.
- (4) 반복수가 증가할수록 신경망 출력의 오차가 작아지며 반복의 시간 소모가 적어 실시간으로 신경망의 출력과 결부하여 적용할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Stewart, D., 1965, "A Platform with Six Degrees of Freedom," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, London, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371~386.
- (2) Cleary, K. and Brooks, T., 1993, "Kinematic Analysis of a Novel 6-DOF Parallel Manipulator," *Proc. IEEE Inst. Conf. Robotics and Automation*, pp. 708~713.
- (3) Ficher, E. F., 1982, "A Stewart Platform-base Manipulator : General Theory and Practical Construction," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157~182.

- (4) Dasgupta, B., 1998, "The Stewart Platform Manipulator: a Review," *Mechanism and Machine Theory*, No. 35, pp. 15~40.
- (5) Boudreau, R., 1996, "Solving The Forward Kinematics of Parallel Manipulators with a Genetic Algorithm," *J. of Robotic System*, Vol. 13, No. 2, pp. 111~125.
- (6) Boudreau, R., 1998, "Parallel Manipulator Kinematics Learning Using Holographic Neural Network Models," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, No. 14, pp. 37~44.
- (7) Hunt, K., 1983, "Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arm," *ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 105, pp. 705~712.
- (8) Lee, S. H., Lee, J. H., Kim, 2005, "Analysis on Kinematic Characteristics for Spatial 3-DOF Parallel Mechanisms Employing Stewart Platform Structure," *KSPE*, Vol. 22, No. 8, pp. 118~127.
- (9) Bruyninckx, H., 1999, "Forward Kinematics for Hunt- Primrose parallel manipulators," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 34, pp. 657~664.
- (10) Tahmasebi, F., 2004, "Direct and Inverse Kinematics of a Novel Tip-Tilt-Piston Parallel Manipulator," *NASA Goddard Space Flight Center*, pp. 10~25.
- (11) Lee, S. H., Kim, B. C., 2006, "Workspace and Force-Moment Transmission of a Parallel Manipulator with Variable Platform," *J. of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 138~144.
- (12) Sugimoto, K., 1987, "Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means for Motor Algebra," *ASME J. of Mech., Trans., and Auto. in Design*, Vol. 109, pp. 3~7.
- (13) Oiwa, T., 1997, "New Coordinate Measuring Machine Featuring a Parallel Mechanism," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 31, No. 3, pp. 232~233.
- (14) Yang, H. E., Lee, J. W., and Heo, W. H., 2004, "Parallel Manipulator Stiffness Matrix Extreme Articular Force Transformation Method," *KSMTE*, Vol. 13, No. 3, pp. 68~75.
- (15) Shin, W. J. and Cho, N. K., 2004, "Parallel Manipulator Error Compensation Coordinate Measuring Machine (CMM) Geometric Error," *KSMTE*, Vol. 13, No. 3, pp. 44~52.