

신경회로망을 이용한 지능형 로봇 제어 시스템 설계

Design of an Intelligent Robot Control System Using Neural Network

정동연¹, 서운학¹, 차보남², 한성현³

1. 경남대학교 대학원 (TEL: 0551-249-2590; FAX: 0551-249-2617)
2. (주) 대우중공업 (TEL: 0551-280-4225; FAX: 0551-280-3768)
3. 경남대학교 기계자동화공학부 (TEL: 0551-249-2624; FAX: 0551-249-2617)

Abstract

In this paper, we have proposed a new approach to the design of robot vision system to develop the technology for the automatic test and assembling of precision mechanical and electronic parts for the factory automation.

In order to perform real time implementation of the automatic assembling tasks in the complex processes, we have developed an intelligent control algorithm based-on neural networks control theory to enhance the precise motion control. Implementing of the automatic test tasks has been performed by the real-time vision algorithm based-on TMS320C31 DSPs. It distinguishes correctly the difference between the acceptable and unacceptable defective item through pattern recognition of parts by the developed vision algorithm.

Finally, the performance of proposed robot vision system has been illustrated by experiment for the similar model of fifth cell among the twelve cell for automatic test and assembling in S company.

1. 서론

본 연구에서는 21세기에 대두될 생산제품의 추세에 대응해 개발해야 될 필수적인 자동화 기술은 제품을 지능적으로 제조하고, 모든 요소를 자동 검사하는 기술의 개발이 매우 중요한 핵심기술이라 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 시스템 자동화 기술 중 정밀기계 및 전자부품의 자동조립기술과 자동검사 기술의 개발에 관한 연구가 수행된다. 자동조립기술의 실현을

위해서는 조립용 로봇을 이용한 부품의 정밀이동·삽입 등의 작업을 수행하기 위한 신경회로망이론을 이용한 지능형 제어 알고리즘의 개발이 수행된다. 그리고, 자동검사기술의 수행을 위해서는 우선 머신 비전 기술을 이용한 불량 및 양품을 패턴인식을 통하여 부품의 불량상태를 구별해 낼 수 있는 실시간 비전 기술에 대한 연구가 수행된다[1].

본 논문에서는 신경망의 특성과 응용성을 바탕으로 하는 다층 구조 신경회로망을 이용한 로봇제어 알고리즘을 개발한다[2][3]. 시스템의 특성이 불확실한 경우에서도 신경회로망 학습 원리를 통하여 전체 시스템에 많은 영향을 미치는 제어 이득을 보상해 주는 가변 제어 이득의 역할을 수행하도록 하면서 전체 제어 시스템의 빠른 수렴성을 보장할 수 있는 구조로 설계된다[4][5].

본 연구에서 채택한 신경 제어 기법은 제어 대상체인 매니퓰레이터의 근사화된 모델링이 가능하여 신경 제어기만으로는 늘어날 수 있는 목표 학습까지의 시간을 단축하면서, 운동 상태에 따라 변화되는 관성 파라미터 및 마찰항 등을 추정하는 오차 역동역학 기법으로 유도된 신경 제어 알고리즘을 개발한다.

자동검사를 위한 비전기술은 개발된 신경회로망 제어 기술을 바탕으로 실시간 실현을 위해 디지털 신호 처리기를 사용한 새로운 비전 알고리즘을 개발해서 S사의 전자부품 조립검사라인, 즉 카메라 조립검사라인에서 라인을 따라 흘러 들어오는 백커버들을 정해진 위치를 따라 로봇을 이동하여 자동인식하고, 인식된 백커버의 납땜상태를 다양한 위치 및 이동공정에서 대해서도 유연하게 검사를 자동으로 수행하고 품질기준 통과여부를 자동 판단할 수 있는, 이른바 다공정 제품

의 형상인식 및 자동검사용 로봇 통합제어 기술을 개발한다. 그리고, 제안된 로봇 비전 시스템의 성능을 실험을 통하여 S사의 조립라인중 5번 Cell의 유사 공정을 구축하여 그에 대한 유사한 실험을 통해 그 신뢰성을 입증하고자 한다.

2. 신경회로망을 이용한 지능 제어 알고리즘 개발

2.1 학습 방법

매니플레이터 동적 방정식은 다음과 같은 다층 구조의 신경망으로 모델링 될 수 있다.

$$n_k = \sum_{j=1}^{N_j} w_{jk} y_j \quad (1)$$

$$\dot{x}_k = -m_k(x_k)[l_k(x_k) + n_k] \quad (2)$$

$$y_k = f(x_k) \quad (3)$$

여기서, y_k, y_j 는 각각 k 및 j 층의 출력을 나타내고, x_k 는 K층에서의 뉴런 동적 상태변수로 정의한다. 그리고 m_k 와 l_k 는 각각 상수 및 선형함수로 정의되고, w_{jk} 는 k층과 j층사이의 연결강도를 나타낸다. 또한 N_k, N_j 는 각각 k층 및 j층에서의 뉴런의 총 갯수를 나타낸다.

식 (1)에서의 연결강도의 갱신은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{w}_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}(t)} \quad (4)$$

$$\dot{w}_{jk}(t) = -\eta \delta_k y_j \quad (5)$$

여기서, 오차 함수 E는 식 (6)과 같이 정의되고, 그리고 오차 신호 δ_k 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} \sum (d_k - y_k)^2 \quad (6)$$

$$\delta_k = \frac{\partial E}{\partial n_k} \quad (7)$$

따라서, 식 (4)로부터 각층 사이의 오차 신호를 다음과 같은 방법으로 계산 할 수 있다.

i) 출력층에서의 연결강도의 갱신.

체인룰에 따라 오차 신호 δ_k 을 정리하면 다음과 같다.

$$\delta_k = \frac{\partial x_k}{\partial n_k} \frac{\partial y_k}{\partial x_k} \frac{\partial E}{\partial y_k} \quad (8)$$

여기서,

$$\frac{\partial E}{\partial y_k} = -(d_k - y_k) = -e_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial x_k} = f'(x_k) \quad (10)$$

$$\frac{\partial x_k}{\partial n_k} \frac{\partial n_k}{\partial t} = \dot{x}_k \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_k}{\partial t} &= \frac{\partial (\sum_{j=1}^{N_j} (w_{jk} y_j))}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N_j} (w_{jk} \frac{\partial y_j}{\partial x_j} \dot{x}_j) \\ &= \sum_{j=1}^{N_j} (w_{jk} f'(x_j) [-m_j(x_j)[l_j(x_j) + n_j]]) \quad (12) \end{aligned}$$

ii) 은닉층에서의 연결강도의 갱신.

은닉층과 출력층사이의 연결강도 갱신은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{w}_{ij}(t) = -\eta \delta_j y_i$$

여기서,

$$\begin{aligned} \delta_j &= \sum_{k=1}^{N_k} \left(\frac{\partial E}{\partial n_k} \frac{\partial n_k}{\partial y_j} \right) \frac{\partial y_j}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial n_j} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^{N_k} [(\delta_k w_{jk}) f'(x_j) [-m_j(x_j)[l_j(x_j) + n_j]]}{\sum_{i=1}^{N_i} (w_{ij} f'(x_i) [-m_i(x_i)[l_i(x_i) + n_i]])} \quad (13) \end{aligned}$$

2.2 뉴럴 네트워크 제어계 구성

Fig. 1. 는 전체 제어계의 구성을 나타내는 블록선도이다.

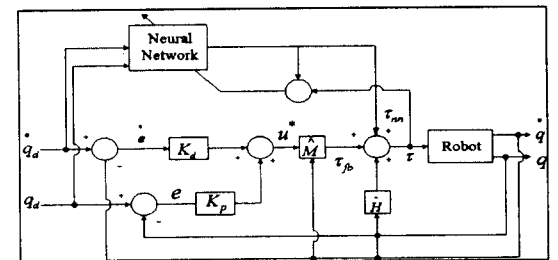


Fig. 1. The block diagram of proposed neural control Structure for robot manipulator

구조 불확실성 및 비 구조적 불확실성으로부터 발생되는 오차를 보상하기 위한 뉴럴 피이드포워드 제어신호 및 피이드백 제어신호를 이용하여 전체제어기의 오차 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\hat{M}(q)u^* + \hat{h}(q, \dot{q}) + \tau_{mn} = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) \quad (14)$$

$$u^* = \ddot{q}_d + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) \quad (15)$$

이를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = & \hat{M}(q)^{-1} [\Delta M(q)\ddot{q} \\ & + \Delta h(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) - \tau_{mn}] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, 우변의 항을

$$\Delta M(q)\ddot{q} + \Delta h(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) = \tau_{learning} \quad (17)$$

로 정의하여, 신경망의 학습 신호로 적용하면 점진적으로 우변이 영으로 수렴하게 되어 이상적인 시스템에 접근하게 된다.

만약, $\Delta M = \Delta h = 0$ 그리고 $F = 0$ 이 되는 것과 같은 결과가 되도록 제어 입력 값이 갱신되어 진다면 가장 이상적인 상태로서 우변 항은 영이다, 그러나 이상적인 상태가 되지 않는다면 학습하여 갱신되어져야 할 오차 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau - \tau_{mn} = & [\Delta M(q)\ddot{q} + \Delta h(q, \dot{q}) + F(\dot{q})] - \tau_{mn} \\ = & \hat{M}(q)^{-1} [\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e] \end{aligned} \quad (18)$$

3. 자동검사용 로봇 비전 기술 개발

3.1 실시간 형상인식 및 납땜검사 알고리즘

본 연구에서는 기존의 윤곽선 추적 알고리즘을 수정하여 이진화과정이 없이 윤곽선을 추출할 수 있는 윤곽선 추적 알고리즘을 사용하여 윤곽선을 추출하였다. 실영상에서 배경과 추출해내고자 하는 물체가 어느 정도 구분할 수 있다고 가정하면, 배경과 물체사이의 경계는 뚜렷이 대비된다. 따라서, 영상의 50pixel(y축) 등간격으로 x축 방향으로 스캔을 하면서 농도차가 크게 나는 부분을 경계의 시작위치로 정하고, 이때부터 윤곽선 추적을 알고리즘을 적용하여 윤곽선을 추출한다. 이와 동시에 체인코드값을 추출하여 특징추출의 기본 데이터로 활용한다. Fig.2는 윤곽선 추적의 초기위치 설정과 체인코드를 보여준다.

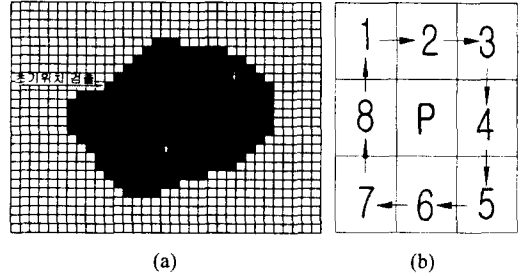


Fig. 2 (a) Initial position of edge following, (b) Chain code

영상인식의 전단계로 수행되는 과정 중 인식대상의 특징적인 부분을 찾아내는 과정을 특징추출이라고 한다. 영상에서 특징 파라미터로는 면적, 원주길이, 원형도 등을 이용하는 방법, 가중치가 인가된 매트릭스를 통해 입력된 영에서 추출된 윤곽선과 정합시켜 영상의 특징값을 정하는 방법 등이 있다. 이것은 얻고자 하는 대상에 따라 추출해낸다.

본 연구에서는 윤곽선 추출후 윤곽선의 꼭지점에 해당하는 Pixel들의 데이터를 특징성분으로 정의한다. 꼭지점을 판단하는 알고리즘의 프로우차트는 Fig. 3과 같다

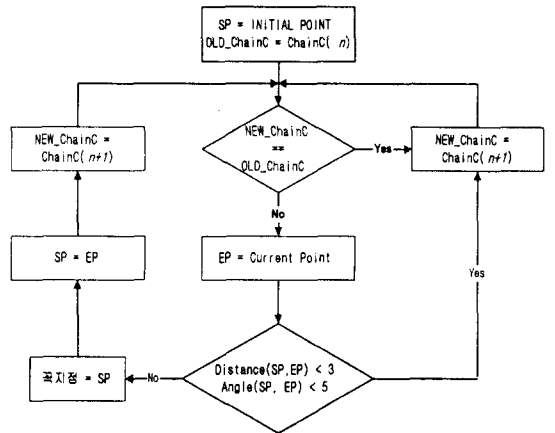


Fig. 3 Flowchart of algorithm

분류된 특정점의 데이터를 선성분과 호성분으로 분류한다. 선성분과 호성분으로 분류하여 선성분과 호성분 데이터를 이용하여 원형패턴과 비교하여 패턴인식을 수행한다.

부품에 대한 형상인식후 납땜위치는 정해져 있으므로 정해진 위치에서의 50x50 Pixel의 Window로 납땜검사영역을 결정하고 납땜상태를 검사한다. 납땜검사는 납땜영역의 Thresholding과 납땜중심과 Window 중심을 비교하여 납땜의 양/불량을 판단한다. Fig. 4는 납땜검사 흐름도를 나타낸다.

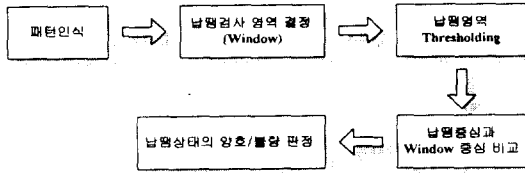


Fig. 4 Flowchart of solder test.

4. 자동 납땜 알고리즘 개발

생산공정 자동화의 실현을 위해 필수적인 핵심 기술인 정밀기계·전자부품 등의 자동조립에 있어서 End-Effector에 Soldering System을 장착하여 납땜 공정 작업을 자동으로 수행하게 한다.

백 카바(Back Cover)의 납땜 및 납땜검사작업을 위해 전문 솔더링 시스템(SOLDER KING III)을 사용하여 보다 정확한 납땜 및 검사작업을 수행하고, 납땜불량의 발생시에 한번의 재 납땜 작업에 의해 불량률 최소화 시킴으로서, 보다 유연한 생산공정 자동화의 실현을 가능하게 하고자 한다. Fig. 5는 Solder King III를 나타내고 있다.

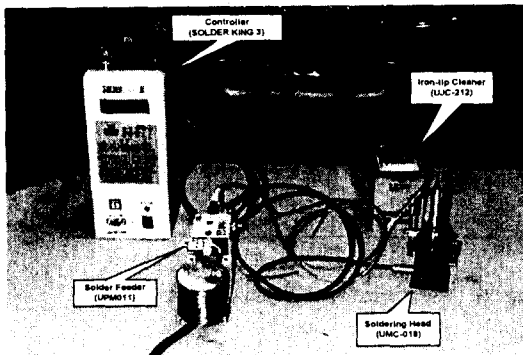


Fig. 5 Figure of solder king III

납땜 작업을 할 때 로봇제어기(SRC)의 USER I/O를 이용하여 Solder KING III를 동기화한다. 그리고, SOLDER KING III의 알고리즘을 개발할 때 온도설정은 330° C로 하였고 납땜 Point는 Teaching Pendant를 이용하여 지정한다.

5. 성능 실험

5.1 실험 장치의 구성

제어기의 전체 구조는 INTEL Pentium 프로세서들 기반으로 하고 real-time OS 사용하여 제어기와 주변기

기를 동시 제어하도록 하고 있다. 본 실험에서 사용한 Joint 제어기의 CPU는 TI사의 DSP TMS320C31를 채용하였다. TMS320C31은 33MHZ clock으로 동작하고 1 instruction 수행 시간이 60ns에 이르는 32bit 고속 CPU로, 이를 토대로 1ms의 샘플링 time으로 프로그램을 실행하도록 하였다.

Fig. 6은 제어기의 전체 구조를 나타낸다. 전체 제어기의 구성은 power supply, servo BSI, noise filter 및 각각의 역할을 수행하는 보드들로 구성되어 있다. 각 구성체간의 통신은 주제어기가 주(host)가 되고 BSC동 나머지는 종(slave)이 되어 명령을 수행한다. Fig. 7은 전체 실험 장치를 나타낸다.

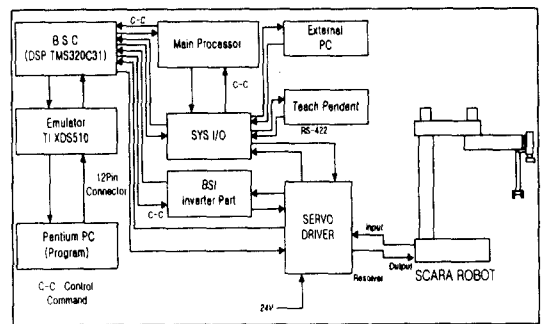


Fig. 6. The block diagram of control system.

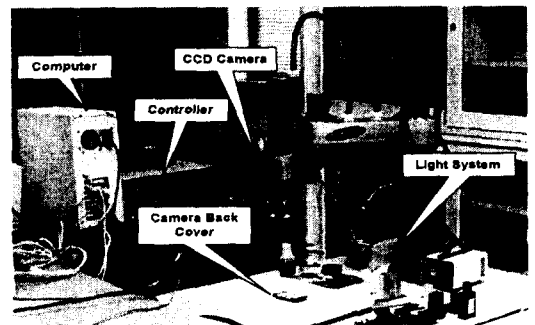


Fig. 7. Experimental set-up.

5.2 위치 및 속도 제어 실험 및 결과

제안된 제어 알고리즘은 C 코드로 작성하여 컴파일하고, TI XDS510 에뮬레이터를 사용하여 Pentium PC와 통신하도록 하여 실험된 데이터를 2ms마다 메모리 순환저장방식으로 저장하고, 이를 intel hex object format 방식으로 전환하여 10진수로 데이터를 분석할 수 있도록 하였다.

제안된 동적 뉴런을 갖는 신경제어기와 기존의 정적 뉴런 상태에서 학습이 진행되어 지던 방식과의 성능 비교를 위하여 부하하중상태에서 비교 실험을 수행하

었다. 이를 바탕으로 제안된 제어기와 기존의 PID 제어기와의 성능 비교를 수행하였다. 실험 방법을 위치 제척은 정현파 함수(로봇 작동 : 좌우 $\pm 45^\circ$)로 하였으며, 속도 제척은 증속-등속-감속 형태(사다리꼴 파형)로 하여, 최고 속도 상태(100%)에서 1,2축에 대하여 각각 무부하 일 때와 부하 (중량: 2.0 kg를 end effector에 부착) 일 때를 구분하여 실험하였다. 그리고 3, 4축은 1, 2축과 동일한 조건하에 작동 영역을 각각 0mm ~ 50mm 와 $0^\circ \sim 90^\circ$ 에서 실험을 수행하였다.

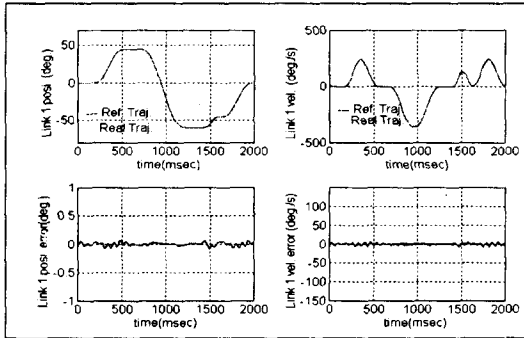


Fig. 8 The experiment result of neural controller with dynamic neurons for position and velocity trajectory tracking of joint 1 with payload (2.0kg)

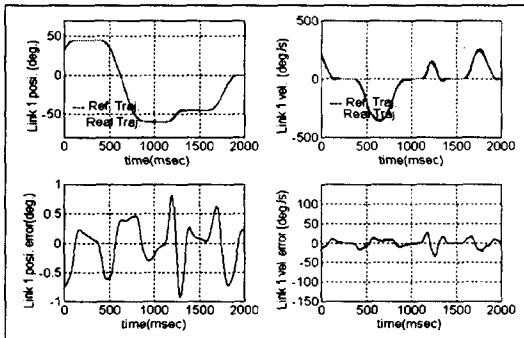


Fig. 9 The experiment result for position and velocity trajectory tracking of joint 1 with payload(2.0kg)

5.3 자동 형상 인식 실험 및 결과

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실제 현장에서 생산되는 카메라 back cover을 CCD카메라로 취득하여 처리하는 방식의 모의 실험을 수행하였다. 먼저 윤곽선추출방법은 기존에 많이 사용하고 있는 Sobel에 의한 방법과 본 연구에서 제안한 수정된 윤곽선 추적 알고리즘을 비교하며 다음과 같다.

Table. 1은 Sobel에 의한 방법과 윤곽선추적에 의한 방법의 수행시간을 나타내며, Fig. 10과 Fig. 11은 그 결과를 나타낸다.

Table. 1 Compare of Edge Following Algorithm and Sobel

Source Image	Sobel	윤곽선 추적
NO. 1	490 ms	66.4 ms
NO. 2	490 ms	40.7 ms

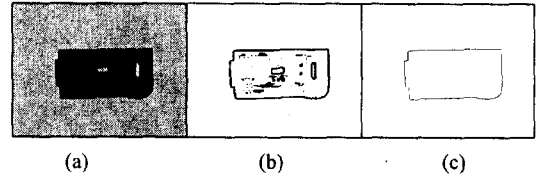


Fig. 10 (a) Real image(NO.1), (b) Sobel image(NO.1), (c) Edge following image(NO.1)

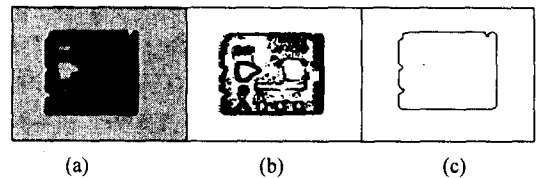


Fig. 11 (a) Real image(NO.2), (b) Sobel image(NO.2), (c) Edge following image(NO.2)

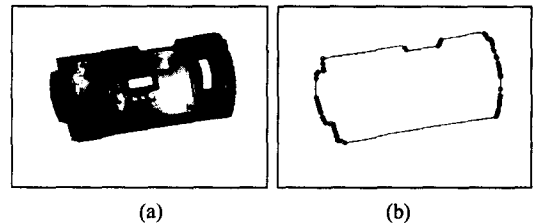


Fig. 12 (a)Source Image, (b)Result of Particular Points

Fig. 12는 각 기본영상과 영상의 특징점을 추출한 결과이다. 추출된 영상의 특징점을 토대로 패턴인식을 위한 패턴 표현식으로 변환한다. 변환내용은 다음의 표. 2와 같다. 이 패턴을 미리 정의된 패턴원형과 비교하여 패턴인식을 수행한다.

Table. 2 Pattern data

NO	TYPE	길이	각도
1	LINE	178.22	11.24
2	LINE	69.12	10.86
3	LINE	91.14	12.12
4	LINE	43.99	101.95
5	LINE	342.527	190.65
...

카메라 백 커버에서 납땜 위치는 항상 일정하므로 취득된 영상에서 납땜 부위 영상을 확대하고 이진화를 시켜 이진화된 원형화상과 비교하여 납땜검사를 수행한다.

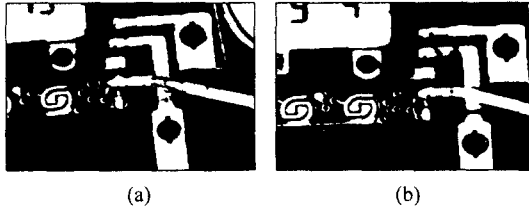


Fig. 13 (a)Initial image (b)Comparing image

6. 결론

본 논문에서는 공장 자동화의 실현을 위해 필수적인 핵심기술인 정밀기계·전자부품 등의 자동조립 및 검사를 위한 지능형 로봇 비전 시스템의 설계에 대한 연구를 수행하기 위해 일반적으로 고정된 위치에서 검사하는 비전 시스템이 아닌 카메라를 로봇의 말단 효과부에 장착하여 랜덤하게 움직이는 물체를 추적하여 지능적으로 매니플레이터의 위치 및 속도를 제어하여 정확한 위치에 납땜 작업을 한 후 비전 검사를 실시하는 로봇 비전 시스템을 설계하였다. 이를 위해 지금까지 수행된 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 다양한 부품 모델의 실시간 조립·이동 및 모델 변경에 능동적으로 적용할 수 있는 동적 뉴런을 갖는 다중 신경회로망을 이용한 지능형 신경 제어 알고리즘의 개발을 통해 부품 모델을 변경에 유연하게 대처할 수 있고 외란 및 주변환경의 변화에 견실한 제어 기능이 유리될 수 있는 지능형 신경회로망 제어 알고리즘을 개발하였다.

제안된 신경제어기의 특징은 제적 추적 성능을 향상시키기 위한 뉴럴피이드포워드 제어신호 및 피이드백 제어신호를 이용하여 적용성을 향상시켜 두었다. 따라서, 제안된 뉴런 제어 시스템은 다관절 로봇 매니플레이터와 같이 시스템이 복잡하여 동작상태의 물리적인 파라미터가 정확하게 측정될 수 없거나 혹은 부하 질량이 실질적으로 매우 많이 변화되는 경우에서도 실시간 제어가 가능한 제어 구조로 설계되었다.

제어의 실현은 직접 C 프로그램을 작성하여 컴파일한 어셈블리어로 구성하여 에뮬레이터를 통하여 알고리즘을 제어기에 다운로드해서 로봇의 성능 평가를 수행한 결과 제어 성능이 기존의 제어 방식에 비하여 상당히 향상되었음을 입증하였다. 따라서 생산라인에서의 신뢰성에 대한 평가가 보완된다면 상품화될 수

있는 가능성을 제시하였다.

둘째, 카메라 백 커버 등의 정밀부품의 자동검사기능을 수행하기 위해 디지털 신호처리기(TMS320C31)를 사용하여 전처리(preprocessing) 과정이 없는 실시간 형상인식용 비전 기술을 개발하였다.

실시간 부품의 형상인식 및 자동 검사를 위해 개발된 비전 기술에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 실시간 처리를 위해 CPU를 디지털 신호 처리기인 TMS320C31을 사용하여 비전 보드상의 제한된 메모리를 사용하는데 있어서 효율성을 높이기 위하여 별도의 후처리 알고리즘의 적용 없이 1차적인 처리의 결과에서 얻은 거친 에지맵으로부터 필요한 정보를 추출하여, 이 정보들을 이용하여 형상인식 및 납땜상태 등을 검사하는 실시간 알고리즘을 개발하였다.

② S사의 제품인 카메라 및 납땜 등의 실 모델에 대한 실험 결과 제안된 디지털 비전 시스템이 카메라 형상의 파손 및 변형 상태 등의 자동 인식 성능이 보다 더 정밀하고 신속하게 처리됨을 확인함으로써 기존의 실제 라인에서의 불량률 감소 및 조립공정의 성능 향상에 적용될 수 있는 가능성을 검증하였다.

향후 연구계획은 제안된 기법을 실 시스템의 응용 대상을 확대하여 실제 생산라인에서의 적용에 따른 신뢰성 향상에 대한 연구를 계속 보완하여 상품화에 대한 연구를 계속할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Markhlin, "Robot control and inspection by multiple camera vision", 11th ISIR, pp.121-128,1981.
- [2] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama, and R. Suzuki, "Feed-back Error Learning Neural Networks for Trajectory Control of a Robotic Manipulator", *Neural Networks*, Vol.1, pp. 251-265, 1988.
- [3] W. S. McCulloch and W. A. Pitts, "A logical Calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, pp. 115 - 133, 1943.
- [4] Moshe Shoham, "An optical sensor for real time positioning tracking and teaching of industrial robots", *IEEE Trans*, Vol IE-31, NO,2, May 1984.
- [5] Takayuki Yamada, "Remarks on Hybrid Neural Network Controller Using Different Vonvergence Speeds", *IEEE International Conference on Robotics Automation*, pp. 562 - 568, 1995.