

# 트랜스퓨터를 이용한 적응 제어기 구현

\* 이호상\* 김상길\* 길진수\*\* 홍석교\*  
 \*\*:아주대학교 제어계측공학과    \*\*:아주대학교 전자 공학과

## Implementation of Adaptive Controller Using Transputers

\* Ho-Sang Lee\*, Sang-Gil Kim\*, Jin-Soo Gil\*\*, Suk-Kyo Hong\*  
 \* Dept. of Control & Instrumentation Eng. AJOU University  
 \*\* Dept. of Electronics Eng. AJOU University

### Abstract

The performance of MODEL-BASED controller is influenced by model parameter errors and velocity measurement errors. To reduce this errors, Control methods by parameter adaptation and velocity estimation are studied. But because these controller has complex construction and need much computation time, the implementation of single processor system is difficult.

This paper proposes a control scheme which combines an adaptive control law with a sliding observer using transputer network.

### I. 서론

고속동작과 중부하를 다루고자하는 부분에 로봇을 적용하는 경우, 제어기의 구조는 실제 로봇의 역학 영향을 최대한 반영할 수 있는 MODEL-BASED 제어기의 구조가 바람직하다. 그러나 질량, 관성 모멘트, 질량중심 등과 같은 역학 파라미터들에 존재하는 불확실성으로 인하여 정확한 모델을 구한다는 것은 상당히 어려운 문제이다. 이러한 파라미터의 불확실성을 줄이기 위한 제어방식으로 적응 제어 방식에 대한 많은 연구가 있었다[2].

Craig et al(1986), Amestegui(1987), Spong & Ortega(1988) 등이 접근한 적응제어 방식은 역동역학 방식으로 조인트 가속도의 측정과, 추정된 관성행렬의 역변환을 보장해야 한다는 단점이 있다[1][2]. Slotine(1986, 1987)이 제시한 접근방식은 전체적으로 안정한 영역내에서 추종 오차로부터 가속도 측정과 관성행렬의 역변환을 보장하지 않는 새로운 적응 제어 알고리즘을 제시하였다[1]. 이러한 적응 제어기는 모든 상태(위치, 속도)를 측정 가능하다는 가정하에서 연구되었으나, 산업용 로봇의 경우 정확한 위치측정에 비하여 속도측정에는 많은 오차가 내포되어 있다. 이러한 이유에서 로봇의 조인트 속도 추정을 위한 비선형 관측기에 대한 연구도 이루어졌다[4][5][6]. C. Canudas De Wit와 N. Fixot는 Slotine이 제시한 적응 제어기 구조위에 접근적으로 안정한 슬라이딩 관측기(Sliding Observer)를 포함한 속도추정 적응제어기를 제시하였다[6].

본 논문에서는 Slotine이 제시한 적응 제어기 구조와[1] C. Canudas, N. Fixot가 제시한 속도 추정기[6]를 포함하는 적응 제어기를 병렬 처리용 프로세서인 트랜스퓨터를 사용하여 제어기 구조의 기능분산을 통한 병렬화를 통하여 파라미터의 추정과 속도의 추정을 실시간으로 처리할 수 있는 적응 제어기를 구현하고자 한다.

### II. 적응 제어기

#### [2.1] 파라미터 선형화

마찰력과 외란을 포함하지 않은 경우 Lagrange-Euler 방식으로 로봇의 역학식을 유도하면 다음과 같은 구조로 이루어져 있다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (2-1)$$

식(2-1)은 질량, 관성 모멘트, 질량중심등과 같은 역학 파라미터들에 대하여 기구학적 정보에 대한 선형 관계식으로 표현할 수 있다 [1][2].

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) a \quad (2-2)$$

여기서  $\begin{cases} a : \text{역학 파라미터 벡터 } (m \times 1) \\ Y : \text{기구학 정보 행렬 } (n \times m) \end{cases}$

MODEL-BASED 제어를 하는 경우, 시스템의 오차성분(위치오차, 속도오차)들은 역학 파라미터들에 포함되어 있는 불확실성에 기인한 역학 모델 오차에 기인하며, 이 역학모델 오차는 설정된 역학 파라미터들의 오차로 표현할 수 있다. 역학모델 오차성분을 각각  $\bar{D}(q)$ ,  $\bar{C}(q, \dot{q})$ ,  $\bar{G}(q)$  와, 파라미터 오차를  $\bar{a}$  로 표시하면 역학모델 오차에 대한 파라미터 선형식은 다음과 같다.

$$D(q) + \bar{C}(q, \dot{q}) + \bar{G}(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \bar{a} \quad (2-3)$$

$$\begin{cases} \bar{D}(q) : D(q) - D(q) \\ \bar{C}(q, \dot{q}) : C(q, \dot{q}) - C(q, \dot{q}) \\ \bar{G}(q) : G(q) - G(q) \\ \bar{a} : \bar{a} - a \\ \wedge : \text{추정모델} \end{cases}$$

본 논문에서는 질량특성에 관한 파라미터 이외에 비교적 정확한 값을 측정할 수 있는 기구학 파라미터 내에도 불확실성이 존재한다는 가정하에서 이를 포함하는 역학 파라미터를 분류하였다.

#### [2.2] SLOTINE의 적응 제어기

Craig(1985)가 제안했던 적응 제어기의 단점을 보완하여, Slotine은 비례분 배분 부분과 동역학 보상부분으로 제어기를 구성하고 시스템 오차들로부터 역학 파라미터의 보정을 온라인으로 수행하여, 로 보트 및 부하 파라미터들의 변동과 불확실성에 대처하여 시스템의 오차를 0으로 수렴하도록 하는 적응 제어기 구조를 제시하였다[1][2]. 제어법칙과 파라미터 적응법칙은 Lyapunov 안정도 판별법에 준하여 시스템 오차의 함수로 Lyapunov함수  $V(t)$ 를 정의하고, 원하는 궤적을 따라서 1차 미분함수  $\dot{V}(t)$ 를 구하여 시스템이 전체적으로 안정할 수 있도록 유도한다[1]. Slotine은 정상상태 위치오차의 수렴성을 보장하기 위하여 위치오차에 대한 슬라이딩 평면(Sliding Surface)을 식(2-4)과 같이 정의하였으며 궤적이 이 평면을 따라서 움직이도록 제어법칙과 적응법칙을 유도하였다.

$$\ddot{q} + \Lambda \dot{q} = 0 \quad (2-4)$$

( $\Lambda$  : 양의 상수 이득 행렬)

먼저 추종오차의 수렴성을 보장하기 위하여 실제 위치, 속도 오차의 함수로 가상의 기준궤적을 식(2-5)와 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \int \dot{q} dt \\ \ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \Lambda \dot{q} \\ \ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \Lambda \dot{q} \end{cases} \quad (2-5)$$

그리고 추종 정밀도 측정을 위하여 실제속도  $\dot{q}$ 와 기준속도  $\dot{q}_r$ 과의 오차를  $s$ 로 정의하면  $s$ 는 식(2-6)과 같이 나타난다.

$$s = \dot{q}_r - \dot{q} = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (2-6)$$

제어법칙과 추정법칙에 대한 Lyapunov 함수  $V(t)$ 는 기준 속도오차  $s$ 와 역학 파라미터 오차  $\hat{a}$ 의 함수로 재 정의하여

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T Ds + \hat{a}^T \Gamma \hat{a}] \quad (2-7)$$

Lyapunov 함수  $V(t)$ 의 1차 미분함수  $\dot{V}(t)$ 를 구하고 식(2-8)와 같이 제어법칙을 정의한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s^T Ds + \frac{1}{2}(s^T Ds) + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= s^T [\tau - C\dot{q} - G - D\dot{q} + C(q - \dot{q})] + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= s^T [\tau - D\dot{q} - C\dot{q} - G] + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \end{aligned}$$

제어법칙

$$\tau = D(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - K_D s \quad (2-8)$$

( $K_D$  = 양의 한정 이득 행렬)

식(2-8)의 제어신호를 1차 미분함수  $\dot{V}(t)$ 에 대입하여 정리하면,  $\dot{V}(t)$ 는 역학모델의 오차성분으로 나타낼 수있으며, 역학 파라미터의 오차에 대한 선형 관계식으로 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s^T [D\dot{q} + C\dot{q} + G - K_D s] + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= s^T [Y\hat{a} - K_D s] + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= -s^T K_D s + \hat{a}^T [\Gamma \dot{\hat{a}} + Y^T s] \end{aligned}$$

파라미터 적응 법칙은  $\dot{V}(t)$ 가 음의 한정이 되도록 식(2-9)과 같이 유도한다.

$$\text{적응 법칙} \quad \dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1} Y^T (q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}) s \quad (2-9)$$

식(2-8)와 식(2-9)의 제어법칙과 파라미터 적응법칙은 시스템 오차  $s$ 와 파라미터 오차  $\hat{a}$ 가 0으로 수렴하는 것을 보장하며,  $s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q}$  (의 슬라이딩 평면을 따라서 위치오차  $\tilde{q}$ 가 0으로 수렴하는 것을 보장한다[1].

### III. 관측기를 이용한 속도추정

관측기는 상태공간상에서 구현되므로 앞의 로보트 동력학식(2-1)을 상태변수  $x_1 = q, x_2 = \dot{q}$ 로 대치하면 다음과 같은 상태공간으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \beta(x_1, x_2) + D(x_1)^{-1} \tau \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서  $\beta$ 는 비선형 함수로써 다음과 같다.

$$\beta(x_1, x_2) = -D(x_1)^{-1} [C(x_1, x_2)x_2 + G(x_1)]$$

식(2-5)에서 정의된 기준궤적과 식(2-6)에서 정의된 슬라이딩 평면은 추정된 속도도써 다시 정의한다.

$$\dot{q}_r' = \dot{q}_d - \Lambda(\hat{x}_2 - \dot{q}_d) = \dot{q}_r - \Lambda \hat{x}_2 \quad (2-11)$$

$$s' = \hat{x}_2 - \dot{q}_r = s + \hat{x}_2$$

여기서  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 는  $x_1, x_2$ 의 추정값이며,  $\hat{x}_1 = \hat{x}_1 - x_1, \hat{x}_2 = \hat{x}_2 - x_2$ 는 추정오차벡터이다.

본 논문에서 사용한 슬라이딩 관측기는 C. Canudas De Wit에의해 [6]에서 제시된 것으로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 - \Gamma_1 \hat{x}_1 - \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\Lambda_2 \text{sgn}(\hat{x}_2) - W(x_1, \dot{q}_r, \hat{a})(s' - \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1)) + v \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\text{with } W(x_1, \dot{q}_r, \hat{a}) = -\hat{H}(x_1)\Lambda + C(x_1, \dot{q}_r)\hat{x}_2 - K_D \hat{x}_2$$

여기서  $\Gamma_1, \Lambda_1, \Lambda_2$ 는 양의 대각행렬이다. 그리고,  $v$ 는 파라미터 추정 오차에 대한 관측기의 강인성을 부여하기 위한 요소이며, 이 요소는 앞의 제어법칙과 관측기에 대한 Lyapunov의 안정도 판별에 의해서 결정된다.

슬라이딩 패치(Sliding Patch)를  $\hat{x}_1 = 0, \|\hat{x}_2\| \leq \lambda_1, (\Lambda_1 = \lambda_1 I)$ 의 영역[6]으로 설정하고, 이 영역에서  $s, \hat{x}_1, \hat{x}_2$ 가 점근적으로 영에 접근하도록  $v$ 와  $\hat{a}$ 에 대한 적응법칙을 설계하여야 한다. 이를 위해 다

음과 같은 제어법칙과 Lyapunov 함수[6]를 제시한다.

제어법칙

$$\tau' = D(x_1)\dot{q}_r' + C(x_1, \hat{x}_2)\dot{q}_r' + G(x_1) - K_D s' \quad (2-13)$$

$$V(t) = \frac{1}{2} [s'^T Ds' + \hat{x}_2^T \hat{x}_2 + \hat{a}^T \Gamma \hat{a}] \quad (2-14)$$

이에 대한 1차 미분함수는

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s'^T Ds' + s'^T \frac{D}{2} s' + \hat{x}_2^T \dot{\hat{x}}_2 + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= s'^T [Y\hat{a} - K_D s' - Cs + W\hat{x}_2] + s'^T \frac{D}{2} s' \\ &\quad + \hat{x}_2^T [-\Lambda_0 \hat{x}_2 - W^T s' + \eta + v] + \hat{a}^T \Gamma \dot{\hat{a}} \\ &= -s'^T K_D s' - \hat{x}_2^T \Lambda_0 \hat{x}_2 + \hat{a}^T [Y^T s' + \Gamma \dot{\hat{a}}] + \hat{x}_2^T [\eta + v] \end{aligned}$$

$$\text{with } \eta = -D^{-1}(x_1)C(x_1, x_2)x_2 - D^{-1}(x_1)G(x_1) + D^{-1}(x_1)\tau$$

$$\Lambda_0 = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}$$

이다. Lyapunov 안정도 판별법에 의하여 위의 식이 음의 한정이 되도록 파라미터  $\hat{a}$ 에 대한 적응법칙과  $v$ 를 제시하면 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}} &= f(x_1, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dot{q}_r, \dot{q}_r', s') \\ &= -\Gamma^{-1} Y(x_1, \hat{x}_2 - \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1), \dot{q}_r, \dot{q}_r', \\ &\quad + \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1))(s' - \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1)) \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$v = v(x_2, \tau, \hat{x}_1) = \begin{cases} -\frac{\psi(\hat{x}_2, \tau)}{\lambda_1} \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1) & \text{if } \|\Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1)\| \neq 0 \\ 0 & \text{if } \|\Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1)\| = 0 \end{cases} \quad (2-16)$$

$$\text{with } \|\eta\| \leq \sigma_0 \|\hat{x}_2 - \Lambda_1 \text{sgn}(\hat{x}_1)\|^2 + \sigma_1 + \sigma_2 \|\tau\|$$

$$\leq \sigma_0 \|\hat{x}_2\|^2 + \sigma_0 \lambda_1 + \lambda_1^2 + \sigma_1 + \sigma_2 \|\tau\| = \psi(\hat{x}_2, \tau)$$

여기서  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ 는 양의 상수로  $\eta$  각요소의 upper bound를 나타낸다.

정의된  $\hat{a}$ 와  $v$ 에 의하여  $\dot{V}(t)$ 는 다음과 같이된다..

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -s'^T K_D s' - \hat{x}_2^T \Lambda_0 \hat{x}_2 + \hat{x}_2^T [\eta + v] \\ &\leq -k_D \|s'\|^2 - \lambda_0 \|\hat{x}_2\|^2 + \|\hat{x}_2\| \psi - \frac{\hat{x}_2^T \hat{x}_2}{\|\hat{x}_2\|} \psi \\ &\leq -k_D \|s'\|^2 - \lambda_0 \|\hat{x}_2\|^2 \end{aligned}$$

$$\text{with } k_D = \lambda_{\min} K_D, \lambda_0 = \lambda_{\min} \Lambda_0$$

결과적으로  $\dot{V}(t)$ 는 음이 되고 Lyapunov의 안정도 판별에 의하여 전체 시스템은 안정하게 된다.

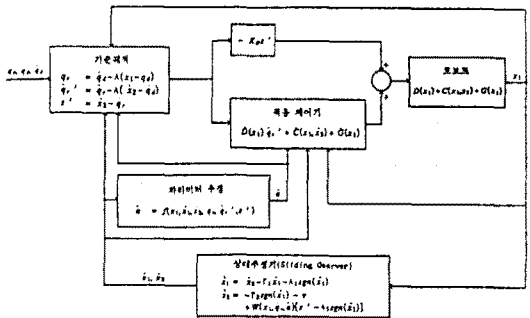


그림1) 제어기 블록도

### IV. 트랜스퓨터를 이용한 제어기 구현

#### [4.1] 트랜스퓨터

트랜스퓨터는 병렬처리를 목적으로 개발된 32bit RISC형의 MPU인 iXOS사의 T800으로 4Kbyte의 내부 메모리와 4Gbyte의 외부 어드레스 공간을 직접 Access할 수있으며, 부동 소수점 연산을 위한 64 bit의

FPU와 외부 접속을 위하여 전송속도 20Mbits/sec의 4개의 고속 링크 인터페이스와 타이머를 내장하고 있다[3]. 사용한 언어는 트랜스퓨터를 위하여 개발된 OCCAM언어를 사용하였다. 병렬구조의 트랜스퓨터를 위해 개발되어진 OCCAM은 기존의 프로그래밍 언어에 비하여 상당히 단순한 구조로 이루어져 있으며 트랜스퓨터의 동시성과 동기성을 효율적으로 개발할 수 있는 병렬 처리용 프로그래밍 언어이다.

[4.2] 제어기 기능모듈의 분산화

제어기능의 분산화를 통한 병렬 시스템을 구현하고자 제어기 구조에서 독립적으로 운영될 수 있는 제어기능을 분류하고 각 트랜스퓨터에 할당하여 병렬처리 한다. 제어기능은 다음과 같이 분류한다.

- HOST 인터페이스용 : HOST로 부터의 궤적 명령, GAIN입력 실행결과와 저장용
- MAIN 제어용 : 기준궤적의 발생과 조인트 입력력 제어
- 역학 계산용 : 선형 역학계산
- 파라미터 추정용 : 역학 파라미터 추정
- 속도 추정용 : 실제속도 추정

각 기능 모듈은 그림2)에 제시한 트랜스퓨터 NETWORK상에 할당되며, Chang과 Daniel(1993)이 제시한 트랜스퓨터간의 통신방식[7]을 참조하여 실선은 Manager - Worker방식을 나타내고, 점선은 Worker - Assistant 방식을 나타낸다.

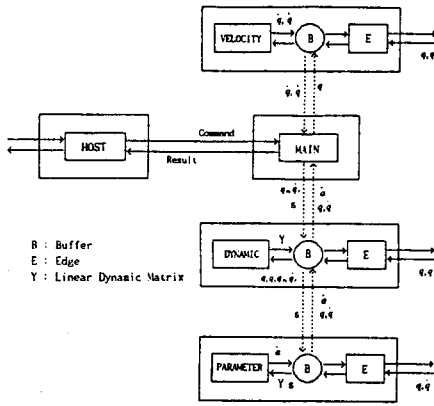


그림2) 트랜스퓨터 NETWORK

[4.3] 제안되는 제어기

제어기를 구현하기 위하여 10개의 트랜스퓨터 모듈(TRAM)을 장착할 수 있는 INMOS사의 B008 보드를 PC-386에 장착하여서 실험 하였다. 사용되는 TRAM은 5개이며, TRAM간의 NETWORK은 C004라는 링크 스위치를 프로그래밍하여 구성하였다. TRAM의 각 링크는 B008보드상에서 기본적으로 파이프 라인구조를 위하여 2개의 링크(링크1,2)가 상호 연결되어 있으며 링크 스위치 C004에 2개(링크0,3)가 연결되어 있다. B008보드는 외부 디바이스와 접속을 위하여 8개의 EDGE를 제공하고 있으며 각 TRAM은 외부 EDGE용으로 2개의 링크가 C004를 경유하여 연결될 수 있다.

로봇의 3축 위치 제어를 위하여 각 조인트에 하나의 외부 EDGE를 할당하며 V40 SERVO보드내의 C011과 연결한다. V40보드를 포함하는 SERVO단과 전체 제어기에 대한 블록도는 (그림3)과 같다.

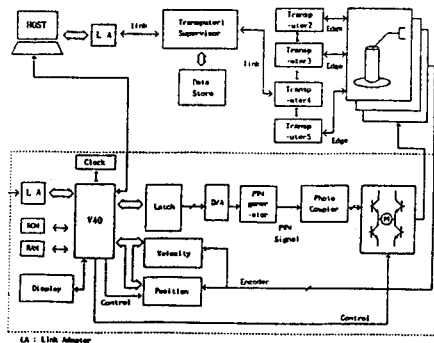


그림3) 전체 블록도

[4.4] 통신시간 및 계산시간

로봇의 역학식은 Lagrange-Euler 방식으로 유도하였으며, 각 조인트의 질량특성(질량, 모멘트, 질량중심)과 로보트의 기구학 파라미터의 함수로 34개의 역학 파라미터로 분류하여 선형화 역학식과 파라미터 추정에 대한 계산시간 및 통신시간을 측정해 보았다. 선형화 역학식 계산시간은 약 400  $\mu$ s, 파라미터 추정 시간은 약 13,500  $\mu$ s이 측정되었다. 역학식 계산모듈의 통신시간은 약 240  $\mu$ s, 파라미터 추정모듈의 통신시간은 약 80  $\mu$ s이 소요되었다.

각 조인트의 제어를 위하여 V40 보드와의 데이터 통신 인터럽트 처리시간(8 Byte)에는 약 100  $\mu$ s이 측정되었으며, 속도측정 인터럽트 처리시간은 약 220  $\mu$ s 가 측정되었다.

V. 결론

기구학 파라미터의 정확한 값을 알 수 없다는 가정하에서, 파라미터의 불확실성이 미치는 역학 영향의 비중을 고려하지 않고 역학식에 존재하는 파라미터를 분류하여 파라미터 적응 제어기를 구성하는 경우 보정되어지는 파라미터의 수가 많아서 많은 계산시간이 필요하였다. 또한 파라미터 수에 비례하는 통신 데이터의 증가도 통신에도 많은 시간이 필요하였다.

병렬 시스템을 이용하여 보다 개선된 적응 제어기를 구현하고자 하는 경우 파라미터의 수를 되도록 적게 구성하는 방식이 계산시간과 통신 측면에서 효율적임을 알 수 있다.

[참고문헌]

- [1] J.J.E. SLOTINE, Weiping Li, " On the Adaptive Control of Robot Manipulators ", Int.J.Robotics Res, pp49-59, June, 1987
- [2] R.Ortega, M.Spong, " Adaptive motion control of rigid robots: A Tutorial ", In Proc. 27th Conf. Decision Contr., Austin, TX., pp.1575-1584, Dec. 1988
- [3] INMOS, " TRANSPUTER DATABOOK ", Second Edition, 1989
- [4] C.Canudas De Wit, J.J.E. SLOTINE, " Sliding observers for robot manipulators ", Automatica, Vol.27, No.5, pp859 - 864, 1991
- [5] C.Canudas De Wit, N.Fixot, " Robot control via robust state estimated feedback ", IEEE Trans., Automat. Contr. , Vol.36, No.12, pp1497-1501, Dec., 1991
- [6] C. Canudas De Wit, N. Fixot, " Adaptive Control of Robot Manipulators via Velocity Estimated Feedback ", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.37, No.8, pp1234-1237, August, 1992
- [7] Y. -Z. Chang, R. W. Daniel, " Parallel Processing network for adaptive controllers ", IEEE PROCEEDINGS -D, Vol. 140, No.1, pp25-33, January, 1993