

적응시스템과 가속도정보를 이용한 이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정

박태식*, 이준호*, 신은철*, 유지윤*, 이정욱**

*고려대학교 전기공학과 산업전자 연구실

** (주) Poscon 기술 연구소

Parameter Estimation of Two-mass System using Adaptive System and Acceleration Information.

Tae-Sik Park*, Jun-Ho Lee*, Eun-Chul Shin*, Ji-Yoon Yoo*, Jeong-Uk Lee**

*Industrial electronic laboratory, Electrical engineering, Korea university.

**Poscon

ABSTRACT

In this paper, a novel estimation algorithm of mechanical parameters in two-mass system is proposed. The inertia of a load and a motor and the stiffness are estimated by using RLS (Recursive Least Square) algorithm and acceleration information of motor. The effectiveness of the proposed scheme is verified with simulation and experiments results.

1. 서 론

이관성 시스템은 구동축과 부하축이 작은 강성의 축으로 연결되어 있어 갑작스런 부하 변동이나 속도 지령치 변화 등의 과도 상태에서 구동축과 부하축의 속도차로 인해 진동(oscillation)이 발생하는 시스템이다. 대표적인 시스템으로는 철강 압연 시스템, 운송 시스템, 엘리베이터 구동시스템 등이 있으며 과도 상태에서 발생하는 진동은 축을 손상시키거나 생산되는 제품의 품질을 저하시켜 생산 설비의 이용률을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

과도 상태에서 발생하는 진동을 억제하고 높은 제어 특성을 얻기 위해 여러 가지 속도제어기가 제안되었으며 정확한 제어기의 설계를 위해서는 기계계 파라미터의 정보가 필수적이다. 따라서 기계계 파라미터 정보를 획득하기 위한 방식이 다양하게 연구되어 왔다.

1992년 Ichiro는 외란 관측기와 단일관성 시스템 모델을 사용하여 관성을 추정해 내었다.^[1] 이 방식은 연산량이 작고 구현이 간단하나 노이즈에 민감

하고 수렴 특성을 해석할 수 없다는 단점이 있다. 1993년 Hori는 적응 이론을 이용해서 관성을 추정하였는데 이 방식은 구현이 간단하고 수렴 특성이 우수하지만 축강성 추정에서는 그 효과를 보지 못하고 있는 실정이다.^[2] 1997년 Schutte는 칼만 필터 방식을 적용하여 기계계 파라미터를 추정하였다.^[3] 이 방식은 노이즈에 강할 뿐만 아니라 파라미터 정보와 더불어 상태 정보를 동시에 추정할 수 있는 장점이 있으나, 연산량이 많고 각종 이득 행렬의 선정에 어려움이 있어 실제 산업 현장에서는 응용이 어렵다. 1997년 Schutte는 신경망 이론을 이용하여 기계계 파라미터를 추정하였다.^[4] 이 방식은 전동기 관성과 톨 관성, 축의 댄핑과 축강성의 모든 파라미터 정보를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 각각의 시스템에 대해 특징량을 추출하여 지식 기반(Knowledge Base)을 구축하여야 하므로 다양한 시스템에 적용하기 어려움이 있으며 연산량이 많은 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고 정확한 기계계 파라미터 정보를 얻기 위해 구현이 간편하고 추정 특성이 우수한 RLS 알고리즘과 이관성 시스템의 가속도로부터 얻어지는 정보를 통해 파라미터를 추정하는 새로운 방식을 제안하고 시뮬레이션과 이관성 시스템의 등가 실험 장치를 통해 제안한 방식의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 이관성 시스템의 모델링

작은 강성의 축으로 부하와 전동기가 연결되어 있는 이관성 시스템을 블록도로 나타내면 그림 1과

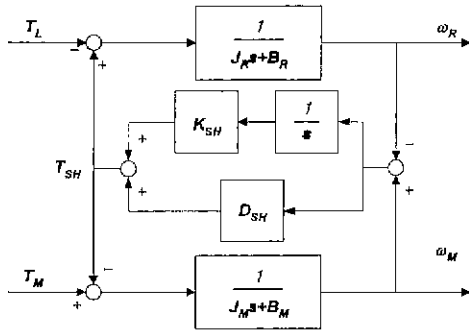


그림 1. 이관성 시스템의 블록도

같다. 이 모델에서는 1차측과 2차측 관성 (J_M, J_R), 축강성 (K_{SH}), 축댐핑 (D_{SH}) 그리고 1차측과 2차측 마찰계수 (B_M, B_R)를 포함하고 있다. 그림에서와 같이 축의 비틀림토크 (T_{SH})가 존재하며 이 비틀림토크로 인해 속도 응답 상에 진동이 발생하게 된다.

3. 이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정

3.1 가속도 정보를 이용한 1차측 관성의 추정

이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 보고 RLS 알고리즘을 이용해 관성을 추정할 경우 1차측과 2차측을 물리적으로 분리하여야만 1차측 관성을 추정할 수 있다. 물론 시스템을 설치하는 과정이나 1차측과 2차측의 분리가 용이한 경우에는 각각의 구조물을 순차적으로 연결하면서 관성을 추정하여 1차측과 2차측의 관성을 추정할 수 있다. 하지만 실제로는 1차측과 2차측의 분리가 쉽지 않은 경우가 많다. 따라서 1차측과 2차측의 분리 없이 1차측의 가속도를 이용해서 1차측의 관성을 추정하는 새로운 방식을 다음과 같이 제안한다.

마찰 손실과 축의 댐핑(Damping)을 고려한 이관성 시스템의 입력 토크에 대한 가속도의 전달함수는 (1)과 같다.

$$\frac{\omega'_M(s)}{T_M(s)} = \left[\begin{aligned} & \left(\frac{J_M}{J_M + J_R} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{B}{J_M + J_R}} \right) \\ & + \left(\frac{J_R}{J_M + J_R} \right) \left(\frac{s}{s^2 + D_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) s + K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)} \right) \end{aligned} \right] \quad (1)$$

여기서 ω_M : 전동기 속도 [rad/sec]

T_M : 전동기 토크 [N·m]

J_M : 전동기 관성 [kg·m²]

J_R : 롤 관성 [kg·m²]

K_{SH} : 전동기와 롤 사이의 축강성 [N·m²/rad]

D_{SH} : 축의 Damping 계수

B : 마찰계수

(2)는 (1)로부터 유도된 크기가 T_M 인 단위 계단 입력에 대한 가속도이다. $\omega'(t)$ 는 $J_M/(J_M + J_R)$ 의 크기로부터 시정수 τ_1 으로 감소하는 성분과 ω_r 주파수로 진동하며 $J_R/(J_M + J_R)$ 의 크기로부터 시정수 τ_2 로 감소하는 성분의 합을 T_M/J_M 배한 파형이다. 진동하는 성분에는 $\cos \omega_r t$ 와 $\sin \omega_r t$ 성분이 있다. $1/\gamma \omega \ll 1$ 이며 $\cos \omega_r t = 1$ 일 때의 값을 추정해 사용하면 이때 $\sin \omega_r t = 0$ 이므로 $\sin \omega_r t$ 성분은 무시 가능하다.

$$\omega'(t) = \frac{T_M}{J_M} \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{J_M}{J_M + J_R} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \\ & + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left(\frac{J_R}{J_M + J_R} \right) \left(\cos \omega_r t - \frac{1}{\tau \omega_r} \sin \omega_r t \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서

$$\tau_1 = \frac{J_M + J_R}{B}, \quad \tau_2 = \frac{1}{\frac{D_{SH}}{s} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)}$$

$$\omega_r = \sqrt{K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) - \frac{D_{SH}^2}{4} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)^2}$$

그림 2는 이관성 시스템의 1차측 가속도를 시뮬레이션한 파형이다. 그림에서 이관성 시스템은 전체 관성이 $J_M + J_R$ 인 단일관성 시스템에 진동하는 성분이 합해진 것으로 볼 수 있다.

전달함수로부터 $t=0$ 인 순간의 가속도를 구해 보면

$$\omega'(0) = \frac{T_M}{J_M} \Rightarrow J_M = \frac{T_M}{\omega'(0)} \quad (3)$$

이므로 $t=0$ 인 순간의 가속도로부터 1차측의 관성을 계산해 낼 수 있다. 하지만 실제 실험에서는 $t=0$ 인 순간의 값은 많은 편차를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 $t=0$ 인 순간의 값은 잡음(noise)을 제거하기 위한 저역 통과 필터를 통과하면 값이 작아짐을 확인할 수 있었다. 때문에 두 번째 최고점과 세 번째 최고점의 시간과 가속도 값으로부터 시정수를 계산하여 첫 번째 값을 추정하는 방식을 취하였다.

3.2 RLS를 이용한 전체 관성 추정

이관성 시스템에 대해 RLS 방식을 적용할 경우

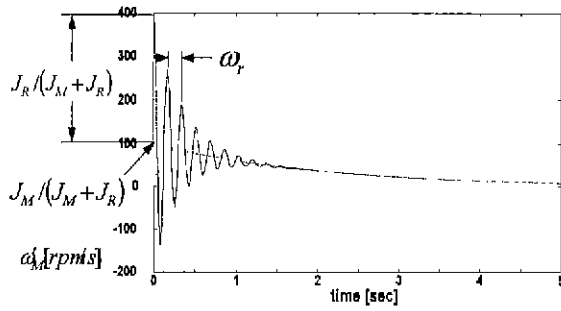


그림 2. 이관성 시스템의 가속도 시뮬레이션 파형

세 개의 파라미터를 동시에 추정하기 때문에 노이즈와 환경적인 요인으로 인하여 정확한 파라미터 정보를 얻을 수 없었다. 따라서 본 논문에서는 이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 등가하여 RLS 방식을 적용하고 이관성 시스템의 전체 관성을 추정하였다. 따라서 가속도 정보로부터 얻어낸 1차측 관성값과 RLS 방식을 이용하여 추정된 전체 관성값을 통해 2차측 관성값을 추정할 수 있다. (4)는 단일관성 시스템의 상태 방정식이다.

$$J \frac{d\omega_M(t)}{dt} = -B\omega(t) + T_M(t) - T_L(t) \quad (4)$$

여기서 J : 모터와 부하의 관성
 B : 마찰계수
 T_M : 전기적 토크
 T_L : 부하 외란 토크

$T_L=0$ 으로 가정하였을 때 (4)로부터 (5)의 전달 함수를 구할 수 있다.

$$\frac{\omega(s)}{T_M(s)} = \frac{1/J}{s + B/J} \quad (5)$$

(5)의 전달 함수를 ZOH(Zero-Order Hold)를 이용하여 Z 변환하면 다음과 같다.

$$Z \left\{ \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{1/J}{s + B/J} \right\} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \quad (6)$$

여기서

$$a_1 = e^{-\frac{B}{J}T_s}, \quad b_1 = \frac{1}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{J}T_s} \right)$$

T_s = 샘플링 주기

(6)을 정리하면 단일관성 시스템의 이산치 모델은 (7)과 같아진다.

$$\omega_M(k+1) = a_1 \omega_M(k) + b_1 T_M(k) \quad (7)$$

시스템의 출력을 전동기 속도로 하면 Regressor 벡터와 파라미터 벡터는 각각 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$C(k) = [\omega_M(k) \quad T_M(k)] \quad (8)$$

$$\theta(k) = [a_1 \quad b_1]$$

평가 함수 (9)가 최소가 되도록 (10)을 반복 연산하여 기계계 파라미터를 추정한다.

$$V(\theta, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda(i)^{k-i} (y(i) - C(i-1)\hat{\theta}(k))^2 \quad (9)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) [\omega_M(k) - C(k)\hat{\theta}(k-1)]$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)C(k-1)^T}{1 + C(k-1)P(k-1)C(k-1)} \quad (10)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)C(k-1)^T C(k-1)P(k-1)}{1 + C(k-1)P(k-1)C(k-1)} \right]$$

따라서 (10)으로부터 이산치 모델에서의 a_1 , b_1 을 추정할 수 있으며 (6)에 이산치 모델과 연속치 모델 사이의 관계를 이용하여 전체 시스템의 관성과 마찰계수를 추정할 수 있다. 또한 이관성 시스템을 단일관성 시스템으로 근사화하기 위해서는 동일한 응답 특성을 보이는 입력 주파수를 선택하여야 한다. 그림 3을 보면 반공진점 이하의 저역 주파수에서 동일한 주파수 응답 특성을 보임을 알 수 있으며 따라서 이 영역에 주파수를 입력 신호의 주파수로 한다면 이관성 시스템과 단일관성 시스템을 근사화할 수 있다.

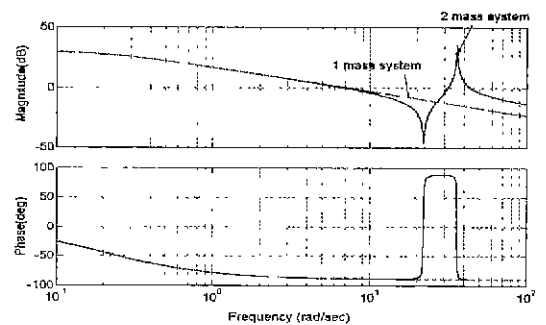


그림 3. 단일관성 시스템과 이관성 시스템의 보드선도

3.3 축강성 계산

가속도 정보로부터 공진주파수를 알아낼 수 있기 때문에 (11)로부터 축강성값을 계산할 수 있다. 여기서 D_{SH}^2 의 값은 아주 작으므로 D_{SH}^2 가 포함된 항을 무시하면 K_{SH} 를 (12)로부터 구할 수 있다.

$$\omega_r = \sqrt{K_{SH} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right) - \frac{D_{SH}^2}{4} \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)^2} \quad (11)$$

$$K_{SH} = \frac{\omega_r^2}{\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_R} \right)} \quad (12)$$

4. Simulation을 통한 검증

4.1 가속도 정보를 이용한 1차측 관성 추정

그림 4는 (2)를 통해 구한 1차측의 가속도 파형이다. 또한 1차측 가속도 파형으로부터 추정된 1차측 관성값은 $0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 으로 매우 정확한 추정 특성을 얻을 수 있었다.

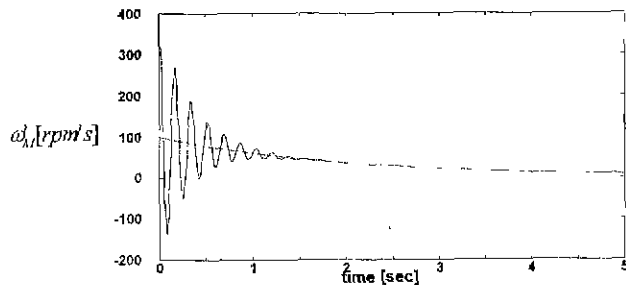


그림 4. 이관성 시스템의 가속도 파형

4.2 RLS방식을 통한 관성의 추정

그림 5는 1차측관성+2차측관성(원판 1개)을 추정한 것으로서 설정한 1차측관성은 $0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 원판의 관성은 $0.093 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이며 추정된 값은 $0.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이었다. 그림 6은 1차측관성+2차측관성(원판 2개)을 추정한 것으로서 추정된 $0.263 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 으로서 추가된 원판의 관성값은 $0.093 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 을 얻음으로써 100% 정확한 값을 추정할 수 있었다.

4.3 축강성의 계산

(12)로부터 계산된 축강성은 45.04 [Nm/rad] 로서 시뮬레이션에 사용한 수치 44 [Nm/rad] 에 대해 3.2%의 오차가 발생하였으나 매우 우수한 추정 성능을 보여주고 있다.

5. 실험 결과

5.1 이관성 시스템 실험 장치

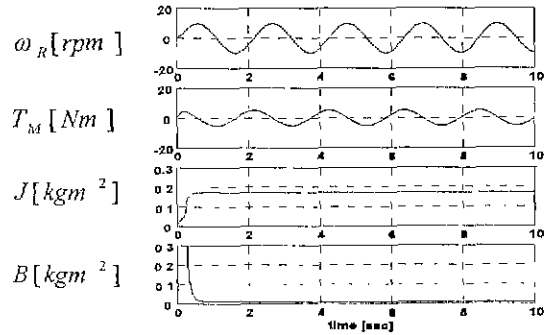


그림 5. 1차측관성+2차측관성(원판 1개)의 추정 시뮬레이션 파형

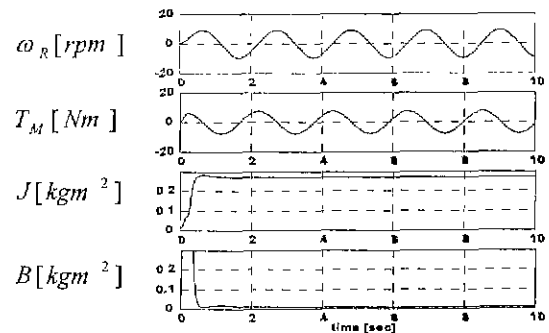


그림 6. 1차측관성+2차측관성(원판 2개)의 추정 시뮬레이션 파형

이관성 시스템의 기계계 파라미터 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 등가된 실험 장치를 제작하였다. 주전동기는 5.5 kW 유도전동기를 사용하였고 비틀림축을 실제로 구현함에 있어 직경이 작은 축을 사용하였을 경우 실험 장치가 길어지고 실험 도중 파손의 위험이 있어 이를 방지하기 위하여 4개의 비틀림 막대로 구성된 비틀림축을 사용하였으며 또한 비틀림 막대의 개수를 조정함으로써 원하는 축강성의 가변이 가능하도록 제작하였다. 또한 롤 관성을 증가하고 가변이 가능하도록 하기 위하여 직류전동기의 뒷단에 관성 원판을 가감할 수 있도록 설계하였다.

5.2 가속도 정보를 이용한 1차측 관성 추정

그림 7은 관성 원판을 1개 달았을 경우에 가속도 정보를 이용하여 1차측 관성을 추정한 실험 파형이며 그림 8은 그림 7의 단위 계단 토크 인가 순간을 확대한 파형이다. 전동기의 속도는 0, 100, 200 rpm으로 유지하며 단위 토크 입력을 1초 동안 인가하여 그때의 가속도 정보를 관측하고 기계계 파라미터 값을 추정하였다. 또한 여러 번의 반복을 통해 추정된 값의 평균값을 취하였다. 추정된 1차측 관성의 오차율은 5%로 우수한 성능을 보였다. 표 1

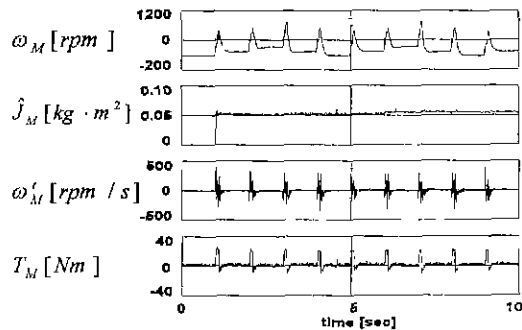


그림 7. 가속도 정보를 이용한 관성 추정

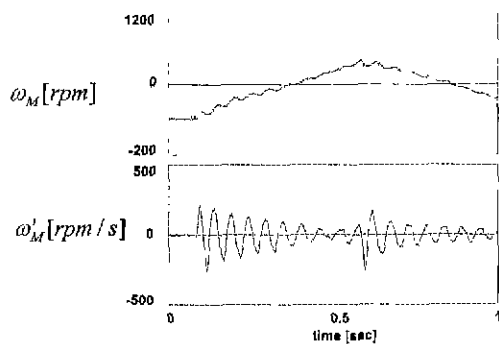


그림 8. 그림 11의 계단 입력 인가시의 확대 파형

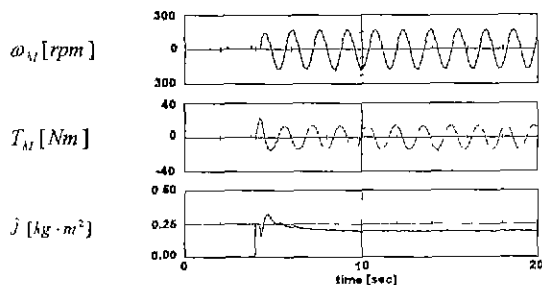


그림 9. RLS를 이용한 관성 추정
1차측+2차측(관성 원판 1개)

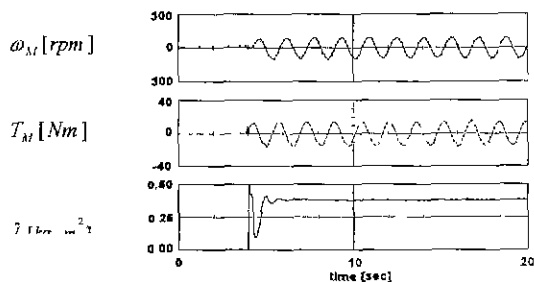


그림 10. RLS를 이용한 관성 추정
1차측+2차측(관성 원판 2개)

은 계산으로 얻은 관성과 추정을 통해 얻은 관성값 사이의 오차율을 보여주고 있다.

5.3 RLS방식을 이용한 전체 관성 추정

그림 9와 10은 RLS를 이용하여 전체 관성을 추정된 실험파형이다. 실험 장치의 각 부분을 순차적으로 결합하며 관성을 추정하였다. 추정된 관성의

정확성을 판단하기 위한 실험 장치의 실제 관성은 전동기의 관성은 제조 회사에서 제시한 값이며 원판의 관성은 물리적인 값으로부터 계산을 통해 구했다. 추정된 관성의 오차 범위는 5% 이내로서 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

표 1. 구조물의 설계값과 추정된 관성값

구조물	추정값 $kg \cdot m^2$	설계값 $kg \cdot m^2$	오차 (%)
1차측 관성	0.054	0.057	5.0
2차측 관성	0.039	0.040	2.5
관성 원판	0.093	0.094	1.1

5.4 축강성 계산

관성 원판을 1개, 2개 달았을 경우에 대하여 (12)에 의해 축강성을 계산하고 그 평균을 취한 값이 47 [Nm/rad]로써 설계치 44 [Nm/rad]에 대해 10% 이내의 오차율을 가지는 값이 나왔다.

6. 결론

본 논문에서는 RLS 방식과 전동기의 가속도 정보를 이용하여 압연기 구동시스템의 관성과 축강성을 추정하기 위한 기계계 파라미터 추정방식을 제안하였다. 또한 압연기 구동시스템의 등가 실험장치를 통해 제안한 방식이 우수한 재현성과 추정 성능을 가짐을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] Ichiro Awaya, Yoshiki Kato, Iwao Miyake, and Masami Ito, "New Motion Control with Inertia Identification Function Using Disturbance Observer", IECON Proc., pp.77, 1992
- [2] Yoichi Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor using Low Precision Shaft Encoder", IECON Proc., pp.73, 1993
- [3] F.Schutte, S.Beineke, A.Rolfmeier, and H.Grotstollen "Online Identification of Mechanical Parameter Using Extended Kalman filters", IAS Proc., pp501, 1997
- [4] F.Schutte, S.Beineke, and H.Grotstollen "Structure and Parameter Identification for a Two-Mass System with Backlash and Friction Using a Self-Organizing Map", EPE Proc., pp3.358, 1997