

리니어 모터의 동적특성 분석 및 서보제어에 관한 연구

A Study on Dynamic Characteristics Analysis and Servo Control of Linear Motor

심현석^{1*}, 황원준², 이우송³

Hyun-Suk Sim, Won-Jun Hwang, Woo-Song Lee

〈Abstract〉

For high-accuracy position control of a linear motor, it has been proposed a nonlinear controller including a synchronization algorithm. Linear motors are easily affected by force ripple, friction, and parameter variations because there is no mechanical transmission to reduce the effects of model uncertainties and external disturbances. Synchronization error is also caused by skew motion, model uncertainties, and force disturbance on each axis. Nonlinear effects such as friction and ripple force are estimated and compensated for. The synchronization algorithm is used to reduce the synchronous error of the two side pillars. The performance of the controller is evaluated by computer simulations.

Keywords : Dynamic Characteristics Analysis, Servo Control, Linear Motor

¹정희원, 교신저자, (주)동산테크, 대표이사
E-mail : hs8388@dscast.co.kr
²정희원, 경남테크노파크 선임연구원
³정희원, (주)성산암테크 연구소장, 工博

¹CEO, DongSan Tech Co., Ltd
²Senior Researcher, Gyeongnam Technopark Industrial Co., Ltd.
³Director, R&D Center, SungSanamdeco Co. Ltd., Ph. D.

1. 서 론

일반적으로 선형 리니어 모터는 동력전달장치를 제거함으로 인해 파라미터 변화와 외란 등에 둔감한 동력 전달장치의 장점을 잃게 되어 모델의 불확실성이나 외란에 민감할 뿐만 아니라 마찰과 리플의 특성에 쉽게 영향을 받는다. 리니어 모터는 로터리 모터와 달리 동력전달 메카니즘이 없는 직접 구동방식을 취한다.

이는 로터리 모터에 비해 응답특성을 향상시킬 뿐만 아니라 백래쉬, 마찰력 등으로 인한 운동에너지 손실을 줄이며 동력장치가 필요 없기 때문에 접촉 시 발생할 수 있는 비선형 효과를 크게 줄일 수 있으며 구조가 간단하다. 마찰은 접촉에 의해 불가피하게 발생되며 정밀 위치제어를 구현하는데 주요한 장애물이 되고 있다. 마찰력은 보통 정적, 쿨롱, 점성 마찰과 stribeck 효과로 모델링하며, 특히 정적 마찰과 쿨롱 마찰은 속도에 대한 비선형 함수이다.

리플력은 코깅력과 릴렉턴스력에 의해 발생한다. 코깅은 자석과 이동자의 철심 사이의 상호인력의 결과로 발생하며 저속 또는 이동자에 적은 하중이 작용할 때 크게 발생한다. 릴렉턴스력은 자석과 이동자 사이의 상대위치에 대한 권선의 self-inductance의 변화에기인하여 발생된다. 리니어 모터에 지배적인 비선형성을 주는 악영향을 극복하기 위해서 모터자석의 공간배치나 모터구조의 대체설계, 공기 베어링등의 대안을 강구할 수 있지만 이러한 메커니즘은 시스템의 구조를 복잡하게 하거나 비용이 높아지는 단점이 있다.

젠티리형 리니어 모터는 Fig. 1 과 같이 횡 축을 포함한 젠티리와 수직인 방향으로 젠티리를 이송시키기 위한 주행 축으로 구성된다. 이러한 젠티리형 시스템에서는 일반적으로 횡 축의 길이가 길기 때문에 정밀한 이송을 위해 두 주행 축을 하나의 주행 축으로 가정하여 제어한다. 두 개의 주

행축은 반드시 일치해야 하며 그렇지 못할 경우에는 위치의 어긋남이나 불안정된 동작으로 인해 비대칭되어 동기오차 등이 발생한다. 비록 각각의 축의 서버 제어제인을 정확히 튜닝을 하였더라도 모터에 가해지는 부하하중 변동이나 두 축간의 서로다른 마찰력이나 리플력 등과 같은 불확실한 요인이 발생할 수 있다.

비선형 특성을 보상하여 리니어 모터의 고속·고정밀 이송을 가능하게 하는 연구가 진행되었다. Tan⁽¹⁾, Yao⁽²⁾ 그리고 Kim⁽³⁾ 등은 한 축의 PMLSM (PermanentMagnet Linear Synchronous Motor) 시스템에서 비선형성을 강인한 적응 제어를 이용하여 위치오차를 줄이는 연구를 수행하였다. 그러나 두 축 구동 시에는 이러한 기준의 알고리즘을 적용하기가 쉽지 않다. 두 축을 같은 기준궤적으로 구동 시에 축 간의 동기화는 고속·고정밀 선형 운동을 구현하기 필수적으로 고려되어야 한다.

Koren⁽⁴⁾은 교차 축 연동제어 알고리즘 (cross-coupling control algorithm)을 제안하였으며 Han 등⁽⁵⁾ Shen⁽⁶⁾은 각각 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용과 극 좌표계를 이용한 두 축 시스템의 불확실한 파라미터와 외란을 보상하며 윤곽 오차를 줄였다. 특히 젠티리형 시스템인 경우, 로봇의 안정적인 움직임을 위해 로봇 발의 움직임 동기화^(7,8)하거나 CNC서는 위치제어⁽⁹⁾를 위해서 동기 제어를 제안하였다.

본 논문은 이송로봇 리니어 모터의 주행 축을 대상으로 각각의 축 위치제어에 악영향을 주는 비선형 함수인 마찰력과 리플력을 추정하여 이를 보상하며 주행 축의 동기화를 위한 동기제어 (synchronization control)기를 이용하여 두 축간의 동기오차(synchronous error)를 줄였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2 장 본문에서는 리니어 모터를 이용한 제어시스템의 기본구조와 지배적인 비선형성을 포함한 리니어 모터의 모델

링을 하였으며 3 장에서는 비선형 적응 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 기반으로 한 주행 축의 동기제어기를 설계하였다. 4 장에서는 모의실험을 통하여 설계된 비선형 적응 제어기의 타당성을 검증하였다.

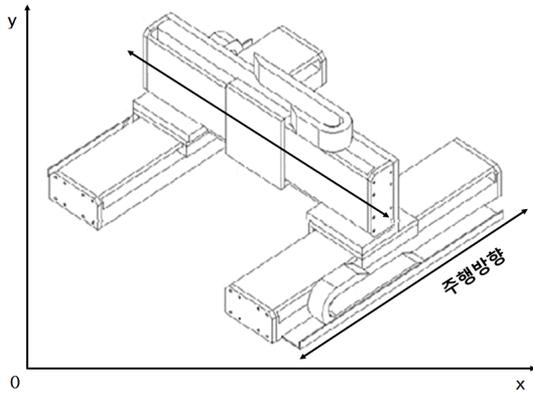


Fig. 1 Geometry of gantry-moving type linear motor

2. 본론

2.1 동적 모델링

모터의 주행 축 중에서 i 축의 비선형 모델링은 다음과 같다

$$M_i \ddot{x}_{mi} + F_{fi}(\dot{x}_{mi}) + F_{ri}(x_{mi}) = K_f i_{qi} \quad (1)$$

여기서 x_{mi} 는 i 축의 모터 이동변위, M_i 는 이동차의 무게, $F_{ri}(x_{mi})$ 와 $F_{fi}(\dot{x}_{mi})$ 은 외란 항으로 리플력 마찰력이며 K_f 는 모터의 전류당 발생추력을 나타내는 추력상수이다.

리플력은 주기적인 정현파 형식의 함수로 식(2)와 같은 일차 모델^(1,10)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{ri}(x_{mi}) &= A_i \sin(\omega x_{mi} + \phi) \\ &= a_{1i} \sin(\omega x_{mi}) + a_{2i} \cos(\omega x_{mi}) \quad (2) \end{aligned}$$

a_{1i} 와 a_{2i} 는 리플력의 크기이며 ω 는 리플의 주파수 이다.

마찰력은 정적, 쿨롱, 점성 마찰과 stribek 효과의 조합으로 식 (3)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{fi}(\dot{x}_{mi}) &= [F_{ci} + (F_{si} - F_{ci})e^{-\left|\frac{\dot{x}_{mi}}{x_s}\right|^2}] \\ &\quad \cdot \text{sign}(\dot{x}_{mi}) + B_i \dot{x}_{mi} \quad (3) \end{aligned}$$

F_{ci} 는 쿨롱마찰, F_{si} 는 정적마찰의 높이, x_s 는 stribek 속도 그리고 B_i 는 점성 마찰계수이다.

2.2 제어기 설계

적응 슬라이딩 모드 제어기는 시스템이 어느 정도 불확실성을 가지고 있을 때 시스템의 안정성을 보장 할 수 있는 제어기법이다. 주행 축에서 각각의 모터에 비선형 함수들의 계수들을 각각 추정하여 보상함으로써 비선형 요소에 의해 발생하는 위치추종 정밀도를 향상시키며 두 개의 주행 축을 동기화 시킴으로써 주행 축의 위치 어긋남과 불확실한 요인들로 인해 생기는 동기오차가 줄인다. 위치추정 오차는 다음과 같이 정의 한다.

$$e_i = x_{di} - x_{mi} \quad (4)$$

여기서 x_{di} 는 i 축의 기준위치이다.

Fig.1와 같이 두 개의 모터를 하나의 주행 축을 구동할 때 두 모터 사이에 동기가 어긋나게 되면 위치편차가 생긴다. 이러한 위치편차를 동기

오차(synchronous error)라 하며 식 (5)와 같다.

$$\epsilon = e_i - e_{i+1} \quad (5)$$

위치오차와 동기오차를 같이 줄이기 위해 식 (6)과 같이 두 오차를 커플 된 새로운 오차를 정의한다.

$$e_i^* = e_i + (-1)^{i+1} a\epsilon \quad (6)$$

여기서 e_i^* 는 동기오차를 줄이기 위한 각 구동 방향의 반대방향의 오차를 나타내며 a 는 양의 한정 값이다.

슬라이딩 모드 제어시스템 설계에서 먼저 선행되어야 할 것은 제어 대상에 대한 적절하고 안정한 슬라이딩 평면을 선정하는 것이다. 서보 시스템의 위치추종과 동기성능을 향상시키기 위해 식 (7)과같이 슬라이딩 평면을 선정하였다. 슬라이딩 평면은 위치오차와 위치오차의 미분값과 적분값 그리고 동기오차와 동기오차의 적분값으로 선정하였다.

$$s_i(t) = \dot{e}_i(t) + A_1 e_i^*(t) + A_2 \int_0^t e_i^*(\tau) d\tau \quad (7)$$

여기서 A_1 와 A_2 는 양의 한정 값이다.

슬라이딩 평면을 시간에 대해 미분한 후 $\ddot{e}_i = \ddot{x}_{di} - \ddot{x}_{mi}$ 을 이용하여 식 (8)과 같이 정리될 수 있다.

$$\ddot{x}_{mi} = A_1 \dot{e}_i^*(t) + A_2 e_i^*(t) + \ddot{x}_{di} - \dot{s}_i(t) \quad (8)$$

\ddot{x}_{di} 와 \ddot{x}_{mi} 는 기준 가속도와 모터의 가속도이다. 식 (2),(3) 그리고 식 (7)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 전개된다.

$$M_i(A_1 \dot{e}_i^*(t) + A_2 e_i^*(t) + \ddot{x}_{di} - \dot{s}_i) = K_f i_{qi} - [F_{ci} + (F_{si} - F_{ci})e^{-(x_{mi}/x_s)^2}] \text{sign}(\dot{x}_{mi}) - B_i \dot{x}_{mi} - a_{1i} \sin(\omega x_{mi}) - a_{2i} \cos(\omega x_{mi}) \quad (9)$$

이를 간략히 하면 식(10)과 같다.

$$M_i \dot{s}_i = -K_f i_{qi} + \theta_i^T Y_i \quad (10)$$

여기서

$$D_i = A_1 \dot{e}_i^* + A_2 e_i^* + \ddot{x}_{di} \quad (11)$$

$$\theta_i = [M_i \quad [F_{ci} + (F_{si} - F_{ci})e^{-(x_{mi}/x_s)^2}] \quad B_i \quad a_{1i} \quad a_{2i}]^T$$

$$Y_i = [D_i \quad \text{sign}(\dot{x}_{mi}) \quad x_{mi} \quad \sin(\omega x_{mi}) \quad \cos(\omega x_{mi})]^T$$

오차방정식의 안정성을 증명하기 위하여 리아프노프(Lyapunov function)함수를 아래와 같이 정의한다.

$$V(s_i, \tilde{\theta}_i, \epsilon) = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{1}{2} M_i s_i^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}_i^T \tilde{\theta}_i \right] + \frac{1}{2} k_\epsilon \epsilon^2 + \frac{1}{2} k_\epsilon A_2 (1+2a) \left(\int \epsilon \right)^2 \quad (12)$$

여기서 $\tilde{\theta}_i$ 는 리니어 모터의 비선형성 함수의 실제 파라미터와 추정 파라미터와의 오차이며 γ 는 적응이득(adaptation gain)이다. 리아프노프 함수를 시간에 대해 미분한 후 식 (10)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 [M_i s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_i^T \dot{\tilde{\theta}}_i] = k_\epsilon \dot{\epsilon} \epsilon + k_\epsilon A_2 (1+2a) \epsilon \left(\int \epsilon \right) = \sum_{i=1}^2 [(-K_f i_{qi} + \theta_i^T Y_i) s_i + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_i^T \dot{\tilde{\theta}}_i] + k_\epsilon \dot{\epsilon} \epsilon + k_\epsilon A_2 (1+2a) \epsilon \left(\int \epsilon \right) \quad (13)$$

식 (13)와 같이 리아프노프 함수를 시간에 대해 미분한 \dot{V} 은 적어도 $\dot{V} \leq 0$ 이고 추종오차를 0으로 수렴시키기 위해 제어입력인 전류명령 i_{qi} 과 적응칙(adaptation law)을 식 (14), (15)로 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qi} &= i_{eqi} + i_{si} \\ &= \frac{1}{K_f} [\hat{\theta}_i^T Y_i + Hs_i + \beta \text{sign}(s_i) + (-1)^{i+1} k_\epsilon \epsilon] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -\gamma Y_i s_i \quad (15)$$

여기서

$$\text{sign}(s_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } s_i > 0 \\ -1 & \text{if } s_i < 0 \end{cases}$$

H 와 β 는 양의 한정값이다.

Table 1 Control parameters

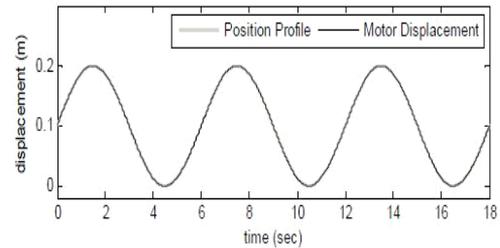
a	3
Λ_1	600
Λ_2	600
H	650
β	120
γ	550
k_ϵ	3200

Table 2 System parameters

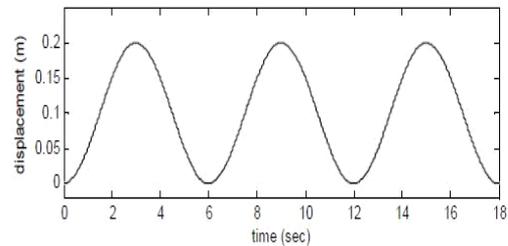
	i -axis	$(i + 1)$ -axis
M	2 kg	3.5 kg
F_c	12 N	10 N
F_s	12 N	12 N
\dot{x}_s	0.2 m/s	0.2 m/s
B	0.004	0.004
a_1	4 N	4 N
a_2	0.4N	0.4 N
ω	360 rad/m	330 rad/m

제어 입력을 식 (13)에 대입하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{v} = \sum_{i=1}^2 & [-Hs_i^2 - \beta \text{sign}(s_i) s_i + \tilde{\theta}_i^T (Y_i s_i + \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\theta}})] \\ & - k_\epsilon \epsilon (s_1 - s_2) + k_\epsilon \dot{\epsilon} + k_\epsilon \Lambda_2 (1 + 2a) \epsilon (\int \epsilon) \end{aligned} \quad (16)$$



(a) 1-axis

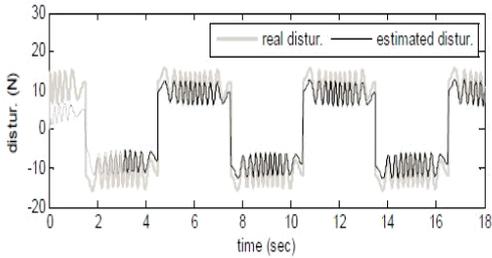


(b) 2-axis

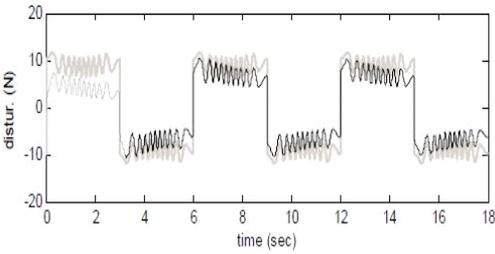
Fig. 2 Position profiles and motor displacements

식 (6)과 (7)로부터

$$\begin{aligned}
 s_1 - s_2 &= \dot{e}_1 - \dot{e}_2 + \Lambda_1(e_1 - e_2 + 2a\epsilon) + \Lambda_2 \int (e_1 - e_2 + 2a\epsilon) \\
 &= \dot{\epsilon} + \Lambda_1(1+2a)\epsilon + \Lambda_2(1+2a) \int \epsilon
 \end{aligned}
 \tag{17}$$



(a) 1-axis



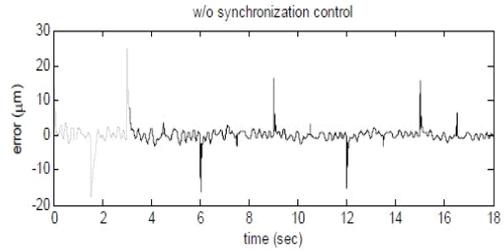
(b) 1-axis

Fig. 3 The estimated sum of friction force and force ripple

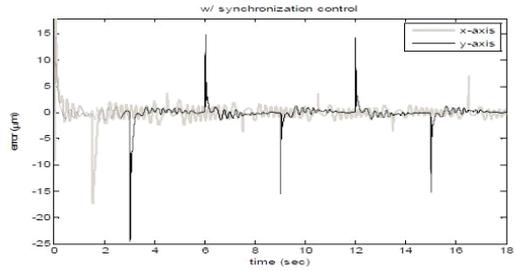
이며 이를 식(16)에 대입하면 아래와 같다.

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 [-Hs_i^2 - \beta \text{sign}(s_i)s_i] - k_c \Lambda_1(1+2a)\epsilon^2
 \tag{18}$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^2 [-Hs_i^2 - \beta \text{sat}(\frac{s_i}{\Phi})s_i] - k_c \Lambda_1(1+2a)\epsilon^2 \dot{V} \leq 0
 \tag{19}$$



(a) Position synchronization error($\epsilon = e_1 - e_2$)



(b) Position tracking error

Fig. 4 Position responses of independent nonlinear adaptive control without synchronization algorithm

슬라이딩 모드 제어기의 제어입력은 등가제어 입력과 i_{eqi} 와 외란을 극복하기 위한 스위칭 항 i_{si} 로 구성되어 있다.

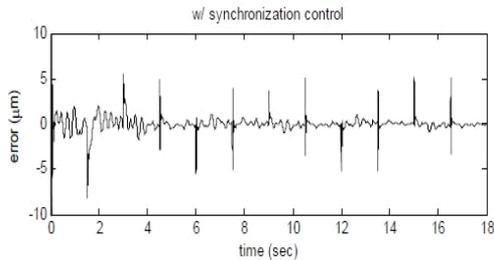
그러나 이러한 제어 입력은 $s_i(t) = 0$ 인 평면을 약간만 이탈해도 채터링 현상이 발생하게 된다. 이를 억제하기 위해 경계층 개념을 이용하여 제어입력을 다음과 같이 구성하였다.

$$i_{qi} = \frac{1}{K_f} [\hat{\theta}_i^T Y_i + Hs + \beta \text{sat}(\frac{s_i}{\Phi}) + (-1)^{i+1} k_c \epsilon]
 \tag{20}$$

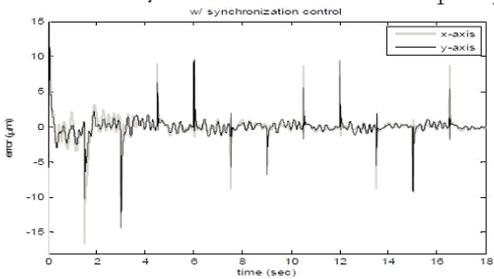
여기서 Φ 는 경계층의 두께이며 $\text{sat}(x)$ 함수는 $\text{sat}(x) = \begin{cases} x & \text{if } |x| \leq 1 \\ \text{sign}(x) & \text{if } |x| \geq 1 \end{cases}$

으로 정의된다. 이를 통해 리아프노프 함수의 도함수는 식 (20)과 같이 된다.

식 (20)은 음의 반한정이다. 이는 리아프노프 함수가 V 가 제한(bound)된다는 의미이며, 또한 식 (12)의 $s_i, \tilde{\theta}_i$ 그리고 ϵ 도 제한된다. 즉, 위치 추종오차와 동기오차를 시간이 지남에 따라 0으로 수렴한다는 것을 의미한다.



(a) Position synchronization error($\epsilon = e_1 - e_2$)



(b) Position tracking error

Fig. 5 Position responses of nonlinear daptive control whitout synchronization algorithm

3. 모의 실험

제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 주행 축의 각각 축에 모델을 바탕으로 MATLAB을 통해 모의실험을 수행하였다. 반경 120mm 인 i 축과 $i+1$ 축을 Fig. 2 와같이 각각 사인파와 코사인 파의 기준입력을 주어 18 초 동안 구동하였다. 각 축의 시스템 파라미터 값과 제안된 제어기에 선정된 게인값은 각각 Table 1 과 Table 2 와 같다. Fig. 3 은 각 축에 임의로 부여한 마찰력과 리플력을 적응 제어 알고리즘을 통해 추정된 결과이

다. 우수한 추정을 확인할 수 있으며 이는 제안된 제어기가 리니어 모터 구동에 악영향을 주는 비선형 효과를 보상할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4 에서는 동기오차를 고려하지 않고 각각의 주행 축을 개별적으로 제어했을 경우

때의 동기오차와 위치오차이다. 주행 축의 운동 방향이 바뀌었을 때 큰 동기오차와 위치오차가 발생하며 최고 동기오차는 1 초 후 약 $28\mu\text{m}$ 이다.

4. 결론

이송로봇 리니어 모터의 주행 축은 동기화가 필수적이며 그렇지 못할 경우에는 위치의 어긋남이나 불안동작으로 인해 동기오차가 발생하며 이는 고속·고정밀 선형운동에 악영향을 미친다. 또한 마찰과 리플 같은 외란은 추종성능을 저하시키며 이는적절한 알고리즘으로 보상되어 한다. 제안된 젠트리형 리니어 모터의 비선형 적응제어기는 외란추정을 고려한 제어기로 위치추종 뿐만이 아니라 두축간의 동기추종을 향상시켰으며 이를 모의 실험을통하여 확인하였다.

참고문헌

- 1) Sun, D. and Mills, J. K., 2002, "Adaptive Synchronized Control for Coordination of Two Robot Manipulators," Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 976~981.
- 2) Sun, D. and Mills, J. K., 2002, "Adaptive Synchronized Control for Coordination of Multi robot Assembly Tasks," IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 18, No. 4, pp. 498~510.
- 3) Kobatashi, H. and Inagaki. H. 1992, "ASynchronizing Control for Hexapod Walking Robot," IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, pp. 569~573.
- 4) Shen, S. L., Liu, H. L., and Ting, S. C., 2002, "Contouring Control of Biaxial Systems Based on Polar Coordinates," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7, No. 3, pp. 329~345.
- 5) Han, S. H. and Huh, K. S., 2010 "Position Control of Linear Motor by Using Enhanced Cross-Coupling Algorithm," KSME-A. 2010. 34.3.369, pp.369~374.
- 6) Koren, Y. and Lo, C. C., 1992, "Variable-gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 371~374.
- 7) Kim, H. B., Lee, B. H. Han, S. H. and Huh, K. S., 2005, "Nonlinear Adaptive Control for Linear Motor Through the Estimated Friction Force and Force Ripple," KSME International Journal, No. 05S201, pp.1144~1149.
- 8) Yao, B. and Xu, L., 2002, "Adaptive Robust Motion Control of Linear Motors for Precision Manufacturing," Mechatronics, Vol. 12, pp. 595~616.
- 9) Tan, K. K., Huang, S. N. and Lee, T. H., 2002, "Robust Adaptive Numerical Compensation for Friction and Force Ripple in Permanent-Magnet Linear Motor," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 1, pp. 221~228.
- 10) Backman, M., 2000, "Comparison of Linear and Rotary Servo Motor Systems," Small Motors and Motion Association, 2000 Fall Technical Conference

(접수:2015.01.22, 수정:2015.02.06, 게재확정:2015.02.13)