

오피스용 3 차원 실물 복제기를 위한 타이밍 벨트 시스템의 고속·고 정밀 제어

이현정*(부산대 대학원), 김정수(부산대 대학원), 이민철(부산대 기계공학부), 김동수(KIMM),
이원희(KIMM)

High Speed and Accuracy Control of Timing Belt System for SFFS of Office

H. J. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU), J. S. Kim(Mech. Eng. Dept., PNU), M. C. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU),
D. S. Kim(KIMM), W. H. Lee(KIMM)

ABSTRACT

The x-y table of the SFFS to move a printer head must be the system that has a high speed and accuracy. So we propose the SMCSPO algorithm on the timing belt system.

The major contribution is the design of a robust observer for the state and the perturbation of the timing belt system, which is combined with a robust controller. The control performance of the proposed algorithm is compared with PD control by the experiments. The results of SMCSPO algorithm showed more accuracy and better performance than PD control. Therefore we may apply the algorithms to a high speed and accuracy control for SFFS.

Key Words : SFFS(임의형상제작시스템), Perturbation(섭동), Sliding mode control(슬라이딩 모드제어)

1. 서론

3 차원 실물 복제기는 3 차원 스캐닝, 임의형상 제작시스템 및 네트워크 등의 복합기능이 내장된 장치로서 제품개발 및 사무자동화 등 다양한 분야에 적용 가능한 기기이다. 임의형상제작시스템(SFFS)은 다품종 소량생산 환경에 적합한 제품의 제작 방식으로서 실제 기능을 할 수 있는 제품을 직접 제작할 수 있는 장치이다.

SFFS 에 있어서 중요한 개발 요소는 정밀하고 고속의 제어 성능을 가진 X-Y 테이블이다. 타이밍 벨트 시스템은 정밀한 제어에는 부적합한 반면 고속의 제어 성능을 가질 수 있고 파우더 등의 분진에 대해 볼 스크류 타입의 시스템에 비해 높은 내구성을 지닐 수 있다. 따라서 고속의 특성을 지닌 타이밍 벨트 시스템에 고급 제어 알고리즘의 적용으로 정밀성을 높인다면 볼 스크류 타입의 시스템에 비해 저 비용으로 시스템을 구현 할 수 있다.

본 논문에서는 오피스용 3 차원 실물 복제기의 제어 시스템 구현과 함께 타이밍 벨트 시스템에서

고속·고 정밀을 구현하기 위한 고급 제어 알고리즘의 실험과 그 성능을 평가하고 오피스용 3 차원 실물 복제기의 제어에 적합한 제어 모델을 제시한다.

2. 오피스용 3 차원 실물 복제기

2.1 오피스용 3 차원 실물 복제기

오피스용 3 차원 실물 복제기는 복제물을 복제하기 위해서 약 100 μm 의 두께로 잘게 슬라이싱된 단면을 적층 시켜나가는 구조를 가지고 있다. 따라서 오피스용 3 차원 실물 복제기는 하나의 슬라이싱 표면 위에 바인딩 용액을 뿌리기 위한 프린터 헤드를 위치 제어하는 X,Y 의 2 축 테이블과 다음 슬라이싱 표면에 해당하는 파우더를 공급하기 위한 파우더 공급 축, 복제물이 제작되는 빌딩 룸 축, 파우더를 평탄화하는 플 축으로 총 5 축으로 구현 되었다.

X-Y 테이블의 각 축은 타이밍 벨트 시스템으로

제작 되었고 AC 서보 모터를 사용 하였다. 파우더 공급 룰과 빌딩 룰은 스텝 모터를 사용 하였고 파우더를 평탄화 하는 룰 측은 DC 모터를 사용 하였다.

2.2.5 축 제어 시스템

총 5 축의 축 제어를 위해 MMC 보드를 사용 하였다. 또한 X-Y 두 축은 AC 서보 Driver 를 파우더 공급 룰과 빌딩 룰의 두 축은 Step 모터 Driver 를 사용하고 파우더를 평탄화 하는 룰 측은 12V 릴레이 스위치를 사용 하였다.

MMC 보드는 8 축 위치 제어와 속도제어가 가능한 모델이며 8 축에 대해 위치 제어를 지원하며 그 외 ±10V 아날로그 출력 및 5V 출력의 user I/O 를 지원한다.

X,Y 축에 적용된 AC 서보 Driver 는 기본적으로 위치제어 모드가 가능하며 아날로그 전압 입력 방식의 토크 제어 모드와 속도 제어 모드가 가능하다. 따라서 AC 서보 Driver 의 아날로그 전압 입력 방식의 토크 제어 모드를 통해 제어 알고리즘을 적용 하였다.

파우더 공급 룰과 빌딩 룰은 MMC 보드의 위치 제어를 통해 100 μm 의 적층 동작을 수행하도록 구현 하였고 파우더의 평탄화를 위한 룰 측은 MMC 보드의 user I/O 를 이용하여 12V 릴레이 스위치가 동작하게 구현 하였다.

2.3 제어 알고리즘

슬라이딩 섭동 관측기를 가지는 슬라이딩 모드 제어는 슬라이딩 섭동 관측기를 통해 시스템이 가지는 운동방정식의 비선형적인 요소나 외란, 불확실성 등을 섭동으로 간주하여 그 섭동을 추정함으로써 원하는 위치 궤적을 추종하는 고급 제어 알고리즘이다.

오피스용 3 차원 실물 복제기를 제어 하는데 있어서 X-Y 테이블의 제어는 고속과 고정밀성을 요구하며 타이밍 벨트로 구현된 시스템에서 정밀성을 높이기 위한 방법으로 슬라이딩 섭동 관측기를 가지는 슬라이딩모드 제어 알고리즘을 적용하였다.

실험에서는 AC 서보 Driver 를 토크 제어 모드에서 MMC 보드의 아날로그 전압 출력을 이용하여 타이밍 벨트 시스템으로 구현된 X 축을 원하는 위치 궤적을 추종하는지를 실험하였고 그 성능을 PD 제어와 비교 평가 한다.

3. 슬라이딩 섭동 관측기를 갖는 슬라이딩 모드제어

3.1 섭동(Perturbation)의 정의

일반적으로 n 자유도를 가지는 이차 시스템의 운동방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\ddot{x}_j = f_j(x) + \Delta f_j(x) + \sum_{i=1}^n [(b_{ji}(x) + \Delta b_{ji}(x))u_i] + d_j(t) \quad j=1, \dots, n \quad (1)$$

여기서, i 는 각각의 제어 입력에 대해 영향을 받는 제어 계인 행렬의 요소를 표시하기 위한 것이고,

$x \equiv [X_1, \dots, X_n]^T$: 상태 벡터(state vector),

$X_j \equiv [x_j \dot{x}_j]^T$: 상태 변수,

$\Delta f_i(x)$: 비선형 요소와 불확실성,

$\Delta b_{ji}(x)$: 제어 계인 행렬 요소의 불확실성,

d_j : 외란, u_i : 제어입력,

$f_j(x), b_{ji}(x)$: 연속적인 상태함수이다.

주어진 운동방정식에서 비선형 요소와 불확실성, 외란등을 섭동(Perturbation)으로 정의하면 식(2)과 같이 정의 된다.

$$\Psi_j(x, t) = \Delta f_j(x) + \sum_{i=1}^n \Delta b_{ji}(x)u_i + d_j(t) \quad (2)$$

여기서, 섭동으로 정의된 항들이 알려진 임의의 연속 함수보다 작다고 가정하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.¹

$$\Gamma_j(x, t) = F_j(x) + \sum_{i=1}^n |\Phi_{ji}(x)u_i| + D_j > |\Psi_j(t)| \quad (3)$$

여기서, $F_j(x) > |\Delta f_j(x)|$, $\Phi_{ji} > |\Delta b_{ji}(x)|$, $D_j > |d_j|$ 로 섭동항이 각각 상한(upper bound)되어 있다.

슬라이딩 섭동 관측기의 전체 구조 식은 다음과 같은 형태로 정의 된다.²

$$\dot{\hat{x}}_{1j} = \hat{x}_{2j} - k_{1j} \text{sat}(\hat{x}_{1j}) - a_{1j} \hat{x}_{1j} \quad (4.1)$$

$$\dot{\hat{x}}_{2j} = a_{3j} \bar{u}_j - k_{2j} \text{sat}(\hat{x}_{2j}) - a_{2j} \hat{x}_{2j} + \hat{\Psi}_j \quad (4.2)$$

$$\dot{\hat{x}}_{3j} = a_{3j}^2 (-\hat{x}_{3j} + a_{3j} \hat{x}_{2j} + \bar{u}_j) \quad (4.3)$$

여기서, $\hat{\Psi}_j$ (섭동)는 아래와 같이 정의된다.

$$\hat{\Psi}_j = a_{3j} (-\hat{x}_{3j} + a_{3j} \hat{x}_{2j}) \quad (5)$$

따라서 위의 관계식에 의해 섭동을 추정할 수 있다.

3.2 슬라이딩 섭동 관측기를 가지는 슬라이딩 모드 제어기

슬라이딩 모드 제어기에 슬라이딩 섭동 관측기에서 추정된 결과를 반영하면 섭동에 의한 제어 성능 저하를 방지하는 제어기를 구성할 수 있다. 제어기의 슬라이딩 함수를 추정된 결과와 궤적의 오차함수로 정의하면 다음과 같다.

$$\delta_j = \hat{e}_j + c_{1j} \dot{e}_j \quad (6)$$

단, $c_{1j} > 0$, $\hat{e}_j = \hat{x}_{1j} - x_{1dj}$ 로써 추정된 위치 추종 오차이다. 제어입력 \bar{u}_j 는 $\dot{\delta}_j \delta_j < 0$ 를 만족하도록 해주어야 하고, \hat{x}_{2j} 의 영향을 고려해야 한다. 따라서, $\dot{\delta}_j$ 의 운동방정식은 다음과 같은 스위칭 함수와 \hat{x}_{2j} 의 조합으로 선정할 수 있다.

$$\dot{\delta}_j = -K_j \text{sat}(\delta_j) - K_{R1} \dot{\delta}_j - K_{R2} \delta_j - (k_{1j} / \varepsilon_{0j}) \hat{x}_{2j} \quad (7)$$

여기서, $sat(\hat{s}_j) = \begin{cases} \hat{s}_j / |\hat{s}_j|, & \text{if } |\hat{s}_j| \geq \varepsilon_{0j} \\ \hat{s}_j / \varepsilon_{0j}, & \text{if } |\hat{s}_j| \leq \varepsilon_{0j} \end{cases}$ 이다.

제어입력 \bar{u}_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{u}_j = \frac{1}{a_{2j}} \left\{ -K_j sat(\hat{s}_j) - (k_{1j} / \varepsilon_{0j}) \tilde{x}_{2j} + [k_2 / \varepsilon_{0j} + c_{\beta}(k_{1j} / \varepsilon_{0j}) - (k_{1j} / \varepsilon_{0j})^2] \tilde{x}_{1j} + \tilde{x}_{1d} - c_{\beta}(\tilde{x}_{2j} - \dot{\tilde{x}}_{1d}) - \beta_j \Psi_j - K_{R_1} \hat{s}_j - K_{R_2} s_j \right\} \quad (8)$$

여기서 $|\tilde{x}_{2j}|$ 는 관측기의 슬라이딩 조건에 의해 $|\tilde{x}_{2j}| \leq k_{1j}$ 로 상한 되어 있고, $\dot{\hat{s}}_j < 0$ 를 만족하기 위해서 $|\hat{s}_j| \leq \varepsilon_{0j}$ 를 만족하는 제어 계인을 선정한다.

운동방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$\dot{x}_{1j} = x_{2j} \quad (9.1)$$

$$\dot{x}_{2j} = a_{2j} \bar{u}_j + \Psi_j \quad (9.2)$$

$$y_i = x_{1j} \quad (9.3)$$

섭동의 정의를 이용한 관측기 오차 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}}_{1j} = \tilde{x}_{2j} - k_{1j} sat(\tilde{x}_{1j}) - a_{1j} \tilde{x}_{1j} \quad (10.1)$$

$$\dot{\tilde{x}}_{2j} = -k_{2j} sat(\tilde{x}_{1j}) - a_{2j} \tilde{x}_{1j} + \tilde{\Psi}_j \quad (10.2)$$

$$\dot{\tilde{x}}_{3j} = a_{3j}^2 (-\tilde{x}_{3j} + a_{3j} \tilde{x}_{2j}) + \tilde{\Psi}_j / a_{3j} \quad (10.3)$$

$$\tilde{\Psi}_j = a_{3j} (-\tilde{x}_{3j} + a_{3j} \tilde{x}_{2j}) \quad (11)$$

여기서, $sat(\tilde{x}_{1j}) = \begin{cases} \tilde{x}_{1j} / |\tilde{x}_{1j}|, & \text{if } |\tilde{x}_{1j}| \geq \varepsilon_{0j} \\ \tilde{x}_{1j} / \varepsilon_{0j}, & \text{if } |\tilde{x}_{1j}| \leq \varepsilon_{0j} \end{cases}$ 이다.

4. 실험 및 고찰

헤드의 위치를 알기 위해 1 회전 당 2048 Pulse를 가지는 엔코더 신호를 4 체배 하여 사용하였다. 또한 제어 주기의 일정함을 보장하기 위해 윈도우 환경에서 리얼타임을 구현 해주는 RTX를 이용하여 제어 주기를 5ms로 하였다.

$$u = T_m(t) \quad (12)$$

$$M\ddot{y} = u \quad (13)$$

제어 입력은 AC 서보모터의 토크 입력으로 식 (12)와 같이 정의 된다. 슬라이딩 모드 섭동관측기를 가지는 슬라이딩 모드 제어의 선형 모델로는 식 (13)을 적용 시켰다. 프린터 헤드는 3개의 카트리지로 되어있고 노즐의 폭은 약 4cm이다. 따라서 X축은 4cm식 스텝으로 레퍼런스 입력을 주었다. 실험은 PD 제어를 하여 SMCSPO 알고리즘과 비교하였다.

PD 제어에서는 P gain과 D gain을 각각 4와 2.5로 주었다. 그림 1.에서 PD 제어 알고리즘에서는 약 1.7cm의 큰 오버 슈트를 보였고 그림 2.에서 평균 약 0.9mm의 수렴 오차를 가지고 있다.

SMCSPO에서는 그림 3.에서 약 0.8cm의 오버 슈트를 보였다. 또한 그림 4.에서 약 0.14mm의 수

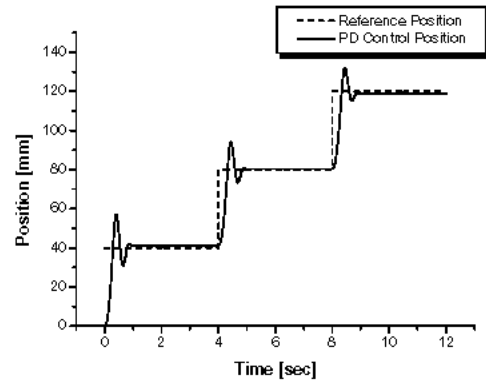


그림 1. PD 제어 알고리즘의 위치 출력
Fig 1. Output position of PD control algorithm

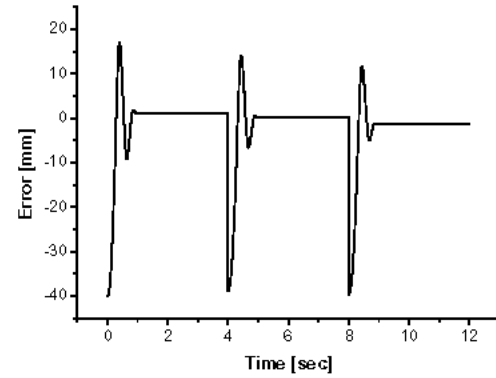


그림 2. PD 제어 알고리즘의 오차
Fig 2. Error of PD control algorithm

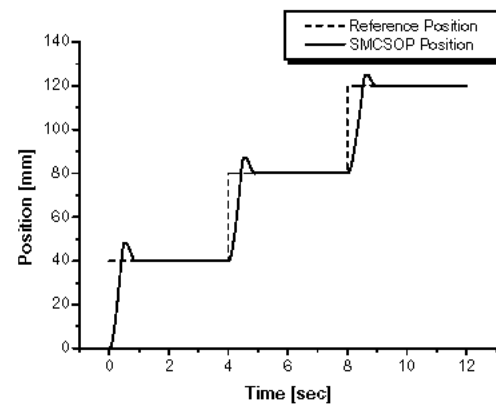


그림 3. SMCSPO의 위치 출력
Fig 3. Output position of SMCSPO

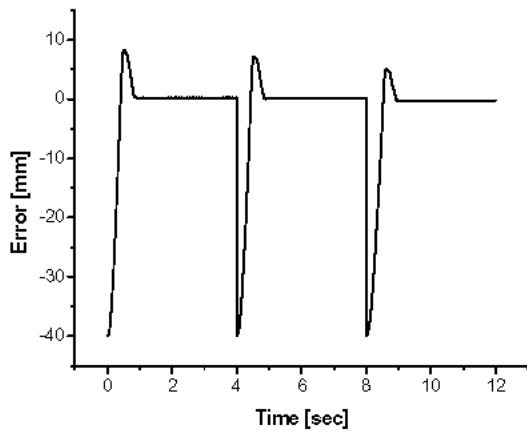
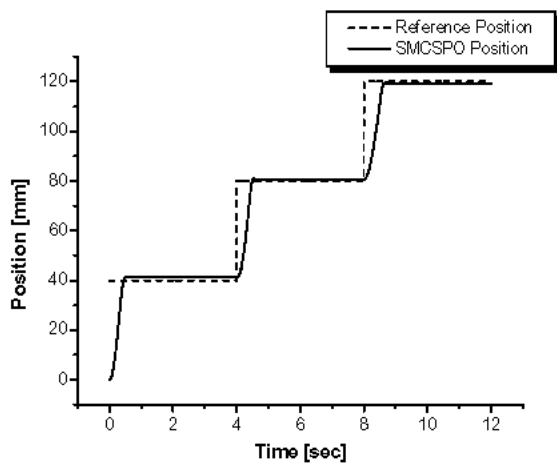


그림 4. SMCSPO 의 오차
Fig 4. Error of SMCSPO

그림 5. SMCSPO 의 낮은 시스템 게인에서 위치



출력

Fig 5. Output position in the low system gain of SMCSPO

럼 오차를 가지고 있다.

PD 제어의 경우 큰 오버슈트를 가지고 있다. AC 서보 모터를 이용한 아날로그 입력 전압 방식의 토크모드 제어가 일정 토크 이하에서는 움직이지 않는 모터 데드존 영역이 넓어서 P gain 을 크게 가져가고 이것에 대한 영향으로 나타난 것이다.

SMCSPO 에서도 역시 짧은 구간을 움직이기 위해 입력 토크가 적게 걸리는 실험에서 모터의 넓은 데드존 영역을 이기기 위해 시스템 게인을 크게 가져간 것이 오버슈트를 발생 시키는 원인이 되었다. 그러나 PD 제어에 비해 상대적으로 적은 오버슈트

를 가지고 있으며 수렴오차 역시 약 0.76mm 나 적은 성능을 보였다. 하지만 약 3.8cm 의 짧은 거리를 1m/s 정도로 고속으로 이동해야 하는 경우는 모터에 순간적으로 높은 토크가 걸려야 하기 때문에 SMCSPO 의 토크 모드 제어에는 그 한계가 보였다. 오버슈트를 줄이기 위해 적은 시스템 게인을 가져갈 경우 그림 5.에서 보듯이 오버슈트는 현저히 줄어들지만 수렴 오차가 PD 제어와 비슷하게 크게 나타난다.

5. 결론

SMCSPO 알고리즘의 토크 모드 제어는 PD 제어에 비해 나은 성능을 보이지만 오피스용 3 차원 실험 복제기의 짧은 거리에서 높은 토크로 고속 이동하는 경우 모터의 데드존 영역이 넓어서 원하는 정밀성과 고속의 응답성을 가질 수 없다고 판단 된다. 따라서 모든 속도 영역에서 최대의 토크를 가져서 모터의 데드존 영역이 적은 속도 모드 제어에 SMCSPO 알고리즘을 적용 할 경우 오피스용 3 차원 실험 복제기의 시스템 특성에 적합한 제어 응답을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

향후에는 SMCSPO 알고리즘을 아날로그 전압 입력 방식의 속도 제어 모드에 적용하여 그 성능을 평가해 성능 개선을 가져오고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점개발 사업(10006711)에 의해 지원되었으며, 이에 관련한 여러분께 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

1. Elmali, H. and Olgac, N., 1992. "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE)" *International Journal of Control*, Vol. 56, pp. 923-941.
2. Jairo Terra, M., Elmali, H. and Olgac, N., 1997, "Sliding Mode Control With Sliding Perturbation Observer", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 119, pp. 657-665.
3. Slotine, J. J., Hedrick, J. K. and Misawa, E. A., 1987, "On Sliding Observers for Non-Linear Systems." *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 109, pp. 245-252.
4. Lee, M. C. and Aoshima, N., 1993, "Real Time Multi-Input Sliding Mode Control of a Robot Manipulator Based on DSP," *Proc. of SICE*, pp. 1223-1228.