

8.5G 솔라셀 평판 핸들링 로봇의 진동 제어

박동일^{a*}, 박철훈^a, 박찬훈^a, 김두형^a

Vibration Analysis of the Large Substrate Handling Robot

Dong Il Park^{a*}, Cheolhoon Park^a, Chanhun Park^a, Doohyung Kim^a^a Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM),
156, Gajeongbuk-ro, Yeseong-gu, Daejeon 34103, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	14	October	2016
Revised	14	November	2016
Accepted	21	November	2016

Keywords:

Substrate handling robot
Vibration analysis
Vibration control
Dynamic simulation

ABSTRACT

Many types of robot systems are used in the mass production line of thin film solar cells and flat panel displays. There are some issues such as the deflection and the vibration of the end-effector because robots handle large and heavy substrates at high speed. Heavy payload and high speed cause much vibration because the end-effector (fork) is made of carbon fiber reinforced polymer because of its light weightness and sufficient stiffness. This study performs a dynamic simulation of an 8.5G solar cell substrate handling robot, including rigid and flexible bodies and a vibration controller. The fifth polynomial trajectory and the zero vibration derivative input shaping algorithm are applied. The vibration reduction is also proved in the experiments.

1. 서론

평판 디스플레이, 박막형 솔라셀 등 평면 기판을 취급하는 생산 라인에서는 대량 생산을 위하여 대부분의 공정이 고속화, 자동화되고 있다. 또한 제품의 대형화 및 생산성 향상을 만족시키기 위하여 로봇 등의 생산 장비도 점차 대형화되고 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 대형 기판을 고속으로 핸들링 할 수 있는 기판 핸들링 로봇의 필요성이 증가되고 있다.

기판의 대형화에 따라 기존의 다관절 로봇 형태보다는 대형 기판을 핸들링 할 수 있는 핸드(포크)를 장착한 기판 핸들링 로봇의 활용성이 우수해졌다. 기존 로봇에서 그리퍼의 역할을 수행하는 핸드부는 보통 그리퍼와는 달리 넓은 기판을 이송해야 하기 때문에 그 활용처에 따라 2~8개의 다양한 개수의 포크를 지니고 있다. 무겁고 큰 기판을 지지하면서도 말단부에 부착되기 때문에, 충분히 가

벼우면서도 강한 강성을 지녀야 하므로 CFRP 등의 특수 재질을 사용하고 있다. 따라서 대형 기판을 지지하고 있는 상황에서의 포크 처짐과 고속 이송시의 진동 문제는 기판 핸들링 로봇에서 가장 큰 이슈가 되고 있다. 특히 본 논문에서 다루고자 하는 로봇은 8.5G 박막형 솔라셀 기판 핸들링 로봇으로, 솔라셀 기판은 LCD에 비하여 두께가 3~5배 정도 두껍기 때문에, 기판의 무게 역시 3~5배가량 무겁다. 따라서 같은 크기의 기판을 취급하기 위해서 핸드의 처짐과 진동에 대한 문제가 더욱 크게 나타나고 있어 이와 같은 문제점을 해결할 필요성이 있다.

기판 이송 로봇과 관련된 기존 연구들을 살펴보면, 기판 핸들링 로봇의 암과 핸드부의 기구적 처짐 해석과 보상에 관한 연구가 수행된 바 있다^[1-4]. 본 연구팀에서도 5.5G 솔라셀 기판 핸들링 로봇에 대한 진동 분석을 위해 유연체를 포함한 로봇의 모델링과 해석을 위한 연구를 수행해온 바 있다^[5-8]. 또한 잔류 진동 억제제를 위한

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7984

Fax: +82-42-868-7135

E-mail address: parkstar@kimm.re.kr (Dong Il Park).



Fig. 1 A kind of the substrate handling robot with forks

제어 알고리즘으로 잘 알려진 입력 명령 성형 기법에 관한 연구도 다수 수행된 바 있다^[9-11]. 본 논문에서는 기존 논문에서 다룬 5.5G 솔라셀 기판보다 수배 무겁고 큰 8.5G 솔라셀 기판 핸들링 로봇에 대하여 분석을 해보고자 한다. 보다 정확한 해석과 잔류 진동 제어를 위하여 유연한 CFRP의 특징을 고려한 핸드부 모델링과 로봇 모델링을 실험을 통하여 검증하였으며, 수립된 모델을 바탕으로 강체, 유연체, 제어 알고리즘이 통합된 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 잔류 진동 억제를 위하여 5차 궤적을 이용한 경로 계획과 입력 명령 성형 기법(Input shaping algorithm)을 적용하고, 실험을 통해 효과를 검증하였다.

2. 로봇 모델링

2.1 로봇 모델

본 논문에서 대상으로 하는 로봇은 Fig. 2에 나타난 8.5G 박막형 솔라셀 기판 핸들링 로봇이다. 이 로봇은 수직 이송축인 Z축, 테이블 전체를 회전시켜주는 R축, 그리고 기판을 이송하는 두 개의 암인 Upper arm축, Lower arm축의 4개의 능동 조인트를 가지고 있다. 여기서 Upper arm과 Lower arm은 각각 암 베이스 부의 회전 관절을 구동부로 하며 4절 링크 형태로 연결되어 각각의 암의 직선운동을 구현한다.

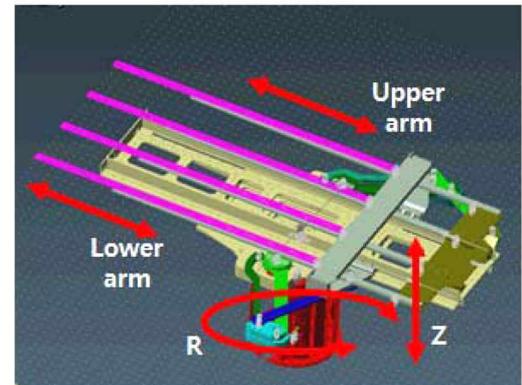
본 논문에서 다루는 기판 핸들링 로봇을 구성하는 대부분의 링크와 부품들은 알루미늄 등의 지지부로 구성되어 있어 강체로 모델링이 가능하나, 기판을 지지하는 부분은 CFRP로 이루어져 있어서 유연체 모델링이 필요하다.

2.2 핸드 모델링

앞서 언급한 바와 같이 본 논문에서 다루는 기판 핸들링 로봇을 구성하는 대부분의 링크와 부품들은 강체로 가정하고 모델링해도 큰 오차가 발생하지 않으나, 말단장치로 활용되는 핸드는 유연한 파트가 포함되어 있어 유연체 모델링이 필요하다. 알루미늄으로 만들어진 핸드 베이스에 부착되는 다수개의 포크는 말단의 경량화를



(a) Handling Robot



(b) Joints of the robot

Fig. 2 8.5G Solar cell substrate handling robot

위하여 CFRP로 구성되어 있어, 구조적 강성을 포함하여 핸드의 거동을 정확히 모델링할 필요성이 있다. 핸드의 유연체 모델링을 위하여 Fig. 3과 같은 정적 처짐값에 대한 측정 실험을 수행하였고, 이 실험 결과를 이용하여 CFRP로 이루어진 핸드부의 대략적인 물성치를 파악할 수 있다.

$$E = \frac{Fa^3}{3\delta_a I} \quad (1)$$

여기서, E : Young's modulus

F : 외력

I : 단면 형상에 따른 관성 모멘트

a : Arm의 길이

δ_a : Arm의 변위

위와 같은 강성 시험결과를 식 (1)에 대입하여, 핸드의 중요한 물성치라고 할 수 있는 등가 Young's modulus 값을 계산해 낼 수 있다. 테이퍼가 저 있는 단면 형상에 따른 관성 모멘트값을 대입함으로써, Young's modulus의 값은 약 150 GPa~250 GPa사이의 값으로 나타났으며, 이와 같은 실험을 통해 실제 변위 값과 유사한 결과가 나오도록 선정할 수 있었다. 여기서 구한 물성치 값을 이용하여 Fig. 4와 같은 유연체 모델링을 구현하였다.

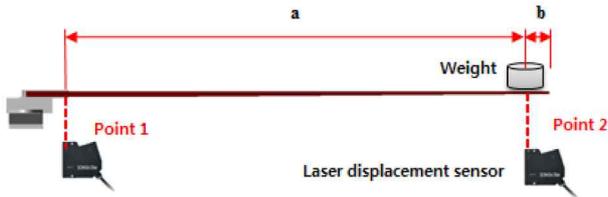


Fig. 3 Robot end-effector called Forks or hands

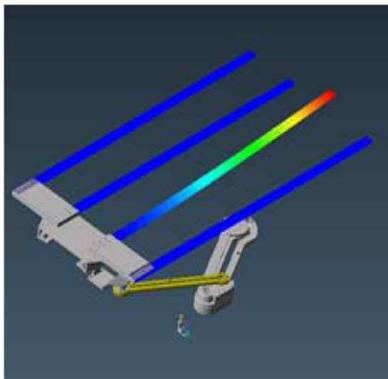


Fig. 4 Hand modeling with FEM

또한 핸드 위에 기판이 올라가는 상황에 대응하기 위하여, Fig. 5에 나타난 바와 같이 핸드를 구성하는 네 개의 포크 윗면에 기판의 무게를 부가할 수 있는 인터페이스 면을 선정하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델

대상 로봇은 총 4개의 능동 조인트와 4개의 수동 조인트로 구성된다. 로봇 베이스와 테이블 간의 직선 이동 조인트, 로봇 베이스와 테이블간의 회전 조인트, 테이블과 Upper arm과의 회전 조인트, 테이블과 Lower arm과의 회전 조인트의 4개의 능동 조인트가 있다. 여기서 Upper arm, lower arm 에는 각각 2개씩의 링크와 hand부가 부착되고 벨트를 이용한 2개씩의 수동 조인트가 부착되어 4절 링크 형태로 구현이 되어 핸드의 직선 운동이 가능한 구조를 가진다.

동역학 시뮬레이션 소프트웨어인 리카다인을 이용하여 Fig. 6과

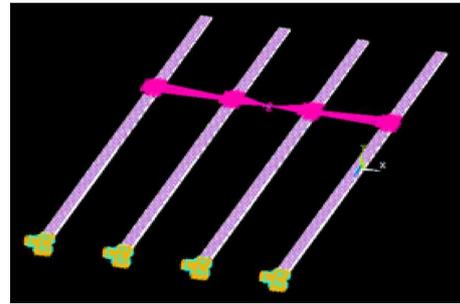


Fig. 5 FEM modeling with the substrate interface

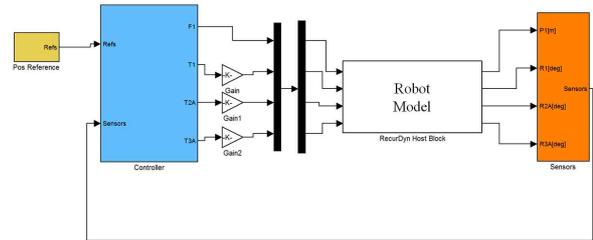


Fig. 6 Robot simulation modeling with controller

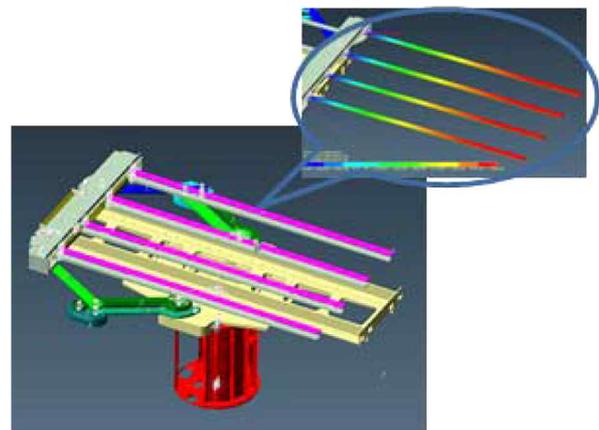


Fig. 7 Robot simulation model with flexible body

Fig. 7에 나타난 바와 같이 강체로 모델링 된 로봇 링크부와 유연체로 모델링 된 핸드부를 포함한 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 또한 계획된 경로를 생성할 수 있는 경로 생성부와 로봇 제어알고리즘을 탑재할 수 있는 제어부를 연계할 수 있도록 강체, 유연체, 제어알고리즘 통합 시뮬레이션 환경을 구현하였다.

3.2 제어 알고리즘

로봇의 시뮬레이션을 위하여 실제 현장에서 운영되는 경로점들을 모션 입력으로 선정하였으며, 시간 단위의 경로점들을 바탕으로 1 msec 단위의 경로 생성부를 구현하였다. 경로 생성은 trapezoidal 경로와 5th polynomial 경로로 구현할 수 있으며, 각각의 경로에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하였다. 특히 Fig. 8과 같이 경로 도달 시간 및 감가속 파라미터를 다양한 조건

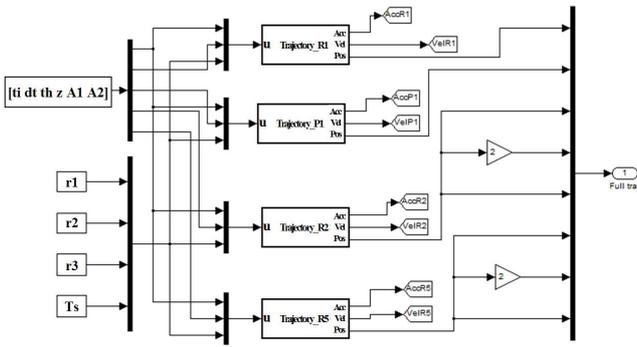


Fig. 8 Variable trajectory according to acceleration

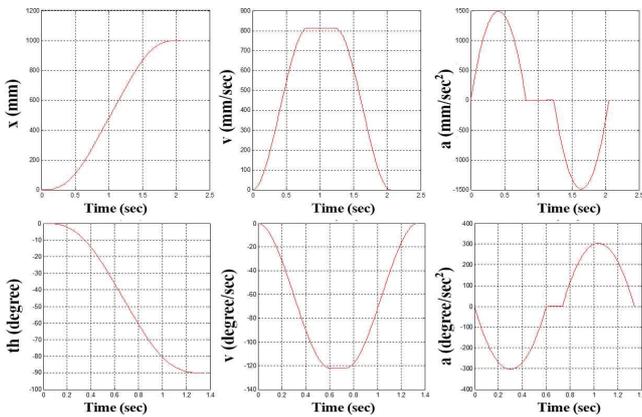


Fig. 9 5th polynomial trajectory between via points

으로 조절할 수 있도록 구현하였으며, 생성된 경로 결과는 Fig. 9에 나타낸 바와 같다.

또한 제어 알고리즘으로는 위치, 속도에 대한 PID loop를 구현하였으며, 모델을 비교적 정확히 구할 수 있을 경우 잔류 진동 억제에 효과적이라고 알려진 input shaping algorithm을 추가로 구현하였다. 잔류 진동 억제를 위하여 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 ZVD shaping algorithm을 적용하였으며, 다음과 같은 2차 모델을 기반으로 적용하였다.

유연체 시스템의 2차 모델식 $H(s)$ 는 식 (2)와 같으며, 이와 같이 가정된 모델에 ZVD input shaping algorithm을 적용하여 궤적을 수정한 $r_s(t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$r_s(t) = A_1 r(t) + A_2 r(t - T_2) + A_3 r(t - T_3) \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{1}{(1+K)^2}, \quad A_2 = \frac{2K}{(1+K)^2}, \quad A_3 = \frac{K^2}{(1+K)^2}$$

$$T_2 = \frac{\pi}{\omega_d}, \quad T_3 = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

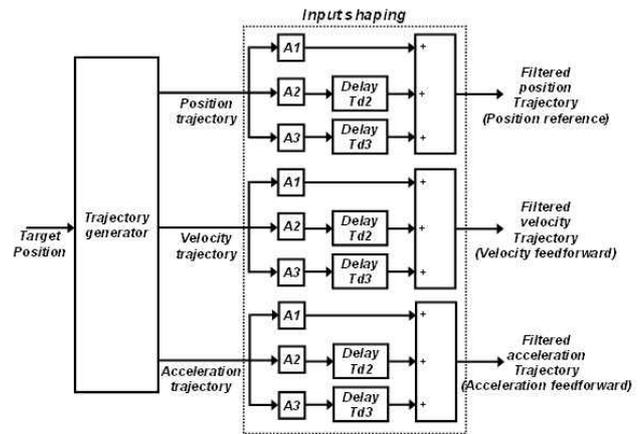


Fig. 10 ZVD input shaping controller

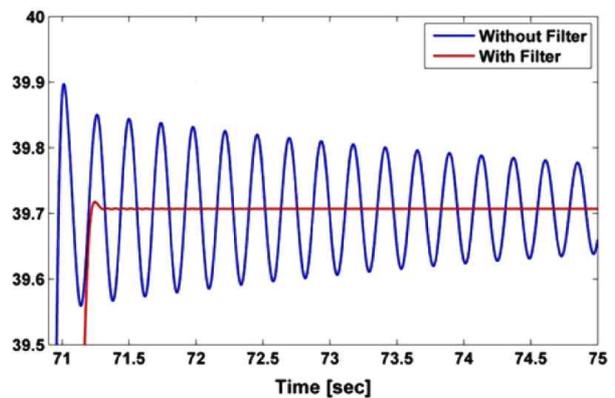
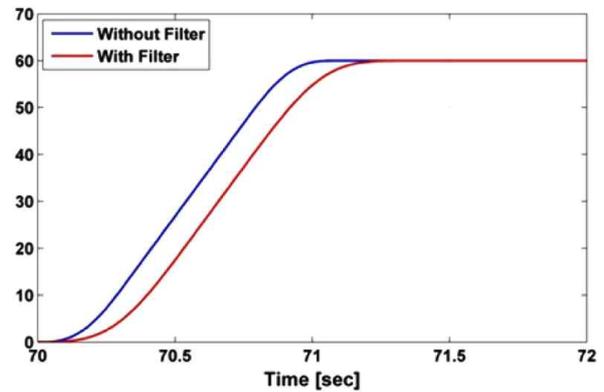


Fig. 11 An example of the simulation results

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad K = e^{-\frac{\zeta\pi}{1 - \zeta^2}}$$

ω_n : natural frequency, ζ : damping ratio

Fig. 11은 진동 제어 알고리즘을 적용하기 전의 궤적 변화와 핸드 끝단의 진동 변화의 한 예시를 보여주고 있다. 시뮬레이션을 통해 고유진동수를 구하고, 이를 이용하여 모델링 오차가 최소화될 수 있는 파라미터를 적용함으로써, 이론적으로 현저한 잔류 진동 억제 효과를 기대할 수 있음을 확인하였다.



Fig. 12 Experimental setup

4. 실험

로봇의 강체 모델링, 핸드부의 유연체 모델링, 궤적 생성부, 진동 제어 알고리즘 통합 시뮬레이션을 통해 다양한 환경에서의 고속 로봇 모션에 대한 진동 분석 및 진동 제어 효과를 분석하였다. 시뮬레이션을 통해서 구현된 경로 계획 및 제어 알고리즘을 실제 로봇에 적용하여 그 효과를 검증해보고자 하였다. 실험 환경은 Fig. 12와 같으며, 레이저 변위 센서를 이용하여 핸드 끝단의 진동을 정밀하게 측정, 분석하였다.

Fig. 13은 핸드부의 떨림이 가장 심하게 발생하는 경우의 진동 실험 결과를 보여준다. 기관의 중량에 해당하는 약 50 kg의 평판을 올린 상태에서 이동 실험을 통해 고유 진동수를 분석하였으며, 고유진동수에 적합한 파라미터를 이용하여 진동 억제 알고리즘을 적용하였다. 진동량만 고려할 경우 실제 실험 시에는 이론적 해석 시에 최대 3~4배가량 큰 초기 진동이 발생하고 있으나, 이는 기구적 마찰, 기구적 불확실성 및 감가속시의 제어 성능에 따라 과도한 진동이 발생하는 것으로 예측된다. 그러나 고유진동수의 경우 약 10% 정도의 오차로 비교적 정확히 나타났으며, 기구적 불확실성에도 불구하고 진동 감소 효과는 시뮬레이션 대비 약 80%의 성능을 보이는 것으로 나타났다. Fig. 13(a)의 경우와 Fig. 13(b)의 경우를 비교해 봄으로써 진동 억제 효과를 확인할 수 있다.

5. 결론

평판 디스플레이, 박막형 솔라셀 등 평면 기관을 취급하는 생산 라인의 단위 기관이 점점 대형화됨에 따라 로봇 등의 생산 장비도 점차 대형화되고 있다. 대형화, 고중량화에 따라 기관 핸들링 로봇의 고속 이송 시 많은 진동이 발생하게 되었고, 따라서 대형 기관 핸들링 로봇의 진동 해석 및 진동 제어 기술에 대한 중요성이 부각

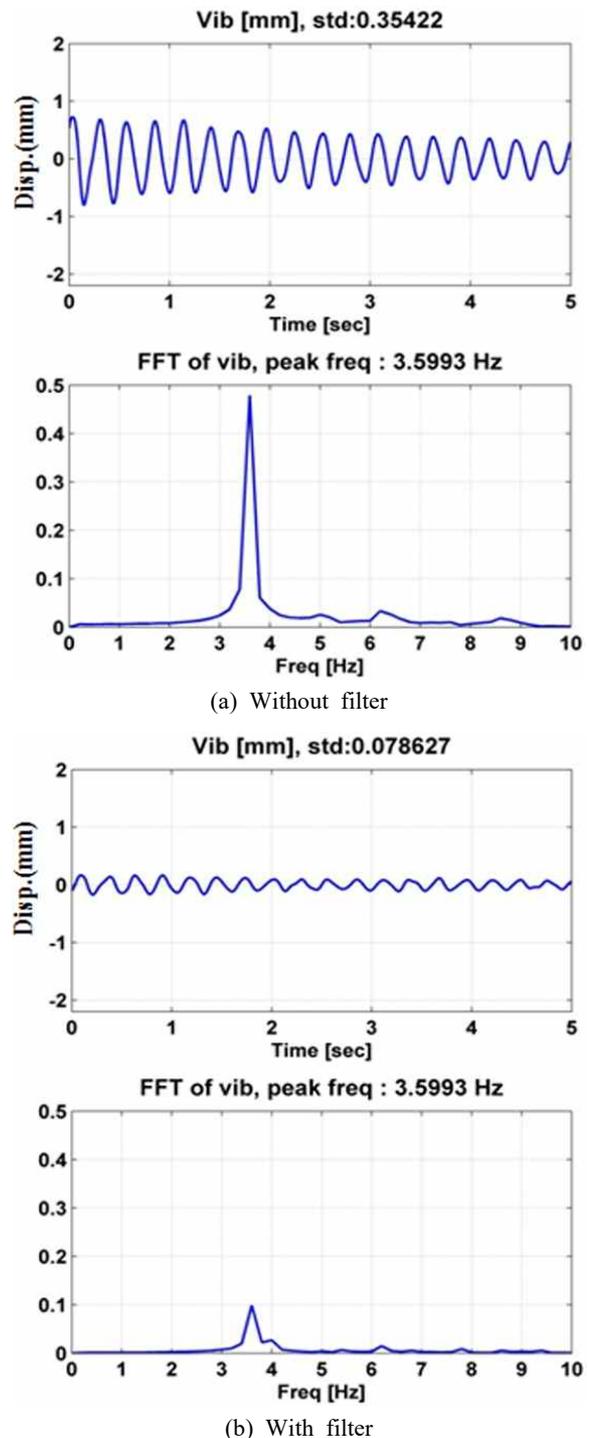


Fig. 13 Variable trajectory according to acceleration

되었다.

본 논문에서는 대형 기관 핸들링 로봇의 강체, 유연체, 제어알고리즘이 통합된 시뮬레이션 모델을 구축하고, 핸드부 유연체 물성치 등을 실제와 맞도록 구현하였다. 로봇의 현장 운영 환경에 맞추어 구동 시뮬레이션을 수행하여 다양한 구동 조건 하에서 핸드 끝단의 진동을 분석하였다. 또한 잔류 진동 억제를 위하여 5차 궤적을 이

용한 경로 계획과 입력 명령 성형 기법(input shaping algorithm)을 적용하고 시험을 통해 효과를 검증하였다.

References

- [1] Seo, J. H., Yim, H. J., Hwang, J. C., Choi, Y. W., Kim, D. I., 2008, Dynamic Load Analysis And Design Methodology of LCD Transfer Robot, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22:4 722-730.
- [2] Seo, J. H., Hwang, J. C., Choi, Y. W., Yim, H. J., 2009, Analysis and Design Study of LCD Transfer Robot using Dynamic Simulation And Experiment, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23:4 1035-1039.
- [3] Surdirovic, D., Vukobratovic, M., 1996, Deflection Compensation for Large Flexible Manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 31 317-329.
- [4] Shin, Y., Park, K., Ha, J., Shim, S., 1992, Performance Test of Large Telescopic Robot for LCD Glass Handling, *The IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2008)*, 436-441.
- [5] Park, D. I., Park, C., Yoo, Y., Do, H., Kyung, J., 2011, Dynamic Analysis of Beam Type Substrate Handling Robot in Solar Cell Manufacturing, *The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, 794-795.
- [6] Park, D. I., Park, C., Yoo, Y., 2012, Vibration Simulation of Hybrid Type Substrate Handling Robot in the Vacuum Environment, *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 2131-2134.
- [7] Park, D. I., Park, C., Park, J. H., Cheong, K. C., 2013, Vibration Control of the Hybrid Type Solar Cell Substrate Handling Robot, *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, 30:9 909-913.
- [8] Park, C., Park, D. I., Park, J. H., 2013, Vibration Control of Flexible Mode for a Beam-type Substrate Transport Robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10:303 1-7.
- [9] Singer, N. C., 1989, Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines, *MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical Report Number AITR-1030*.
- [10] Singhose, W. E., Mills, B. W., 1999, Command Generation using Specified-negative-amplitude Input Shapers, *Proceeding of American Control Conference*, 61-65.
- [11] Rhim, S., Book, W. J., 2004, Adaptive Time-delay Command Shaping Filter for Flexible Manipulator Control, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9:4 619-626.