

## 고속 LCD 이송 시스템의 진동감소를 위한 Finite Jerk 적용 가속도 최적화

정원지(창원대학교 기계설계공학과), 송태진\*(창원대학교 대학원 기계설계공학과)  
정동원(창원대학교 대학원 기계설계공학과), 조영덕(창원대학교 기계설계공학과)  
방덕제(쑤신성이엔지), 윤영민(쑤신성이엔지)

### Acceleration Optimization of a High-speed LCD Transfer Crane Using Finite Jerk

W. J. Chung(Changwon National Univ.), T. J. Song(Mech. Eng. Dept., CNU)  
D. W. Jung(Mech. Eng. Dept., CNU), Y. D. Cho(Mech. Eng. Dept., CNU)  
D. J. Bang(Shinsung ENG. Co.), Y. M. Yoon(Shinsung ENG. Co.)

#### ABSTRACT

This paper presents the acceleration optimization of a high-speed LCD (Liquid Crystal Display) transfer system for the minimization of vibration. To reduce vibration is one of key requirements for the dynamic control of a high-speed LCD transfer system. In this paper, the concept of finite jerk (the first derivative of acceleration) has been introduced for realizing input acceleration. The profile of finite jerk has been optimized using a genetic algorithm so that vibration effect can be minimized. In order to incorporate a genetic algorithm, the dynamic model of a LCD transfer system which is realized by using the ADAMS<sup>®</sup> software has been linked to the simulation system constructed by the MATLAB<sup>®</sup>. The simulation results illustrated that the duration of finite jerk can be optimized so as to minimize the magnitude of vibration. It has been also shown that the acceleration optimization with finite jerk can make the high-speed motion of a LCD transfer system result in low vibration, compared with the conventional motion control with trapezoidal velocity profile.

**Key Words** : Finite Jerk(유한 저크), Acceleration Optimization(가속도 최적화), Genetic Algorithms(유전자 알고리즘), ADAMS<sup>®</sup>, LCD Transfer System(LCD 이송 시스템)

#### 1. 서론

현재 웨어퍼 또는 LCD 생산 FAB 과 같은 첨단 제품의 생산 시스템에 있어 가장 중요한 논점은 빠른 속도로 공정을 진행시키면서 진동을 얼마나 감소시킬 수 있는가에 맞춰진다. (Abido 2003)[1]. 이 논문은 단지 유한 저크(Finite Jerk)의 개념에서 구동 가속도 곡선을 수정하는 방법만으로 고속 LCD 이송 시스템의 진동을 최소화하는데 목적을 두고 있다. 즉 가속도 제어만으로 이 시스템의 저진동을 실현하는데 초점을 맞추고 있다. 수정된 입력가속도 곡선은 연속된 저크(continuous jerk)를 이용하여 생성한 경우가 유한 저크(finite jerk)를 이용한 경우보다 서보모터의 가감속 특성을 변화시키는데 유효

하다는 연구결과가 있다. (Cahouet et al. 2002)[2] 하지만 연속되는 저크를 이용한 가속도 생성법은 가속도 곡선 생성을 위한 연산량이 방대하기 때문에 실제 적용에 있어서 큰 어려움이 있다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 유한 저크(finite jerk)를 이용한 가속도 최적화를 수행하고자 한다. 또한 시뮬레이션을 통해서 기존의 모터 구동 곡선인 사다리꼴형 속도 생성알고리즘(infinite jerk 발생)을 적용한 경우와 비교하여 제안한 가속도 생성 알고리즘의 효율성을 검증한다. 가속도 생성 및 시뮬레이션은 각각 MATLAB<sup>®</sup> [3] 과 ADAMS<sup>®</sup> 소프트웨어를 사용하였다

#### 2. 시스템 모델링

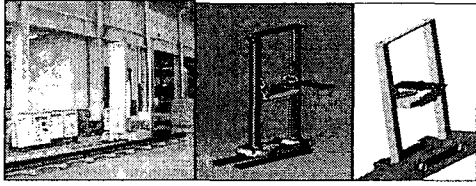


Fig. 1 Real LCD Transfer Crane and its Simplified Model

Fig. 1 의 좌측 그림은 실제의 LCD 이송 시스템을 나타내고 있으며 우측의 모델은 간략화한 모델을 나타내고있다. 적합도 함수를 평가하기 위한 모델은 유연체를 포함한 다물체 동역학 상용 소프트웨어인 ADAMS<sup>®</sup> (MSC. Software Cooperation. 2000)[4]를 이용하여 구성하였다. 유연체로 생성한 컬럼부는 ANSYS<sup>®</sup>[5]의 모달해석을 통해 획득하였다. 모델링된 차량은 TFLM (Transverse Flux Linear Motor) (Kang et al. 2003).[6]을 적용한 전자기적인 추력을 이용하여 구동되므로 가속도 형태의 모션을 부여할 수 있도록 하였다.

### 3. FINITE JERK

본 논문에서 유한 저크(finite jerk) (Choi et al. 2003)[7] 의 개념을 수평 이동과 수직방향 이송 가속도를 생성하는데 도입하였다. 이전의 연구에서 소개된 연속되는 저크(continuous jerk) (Chung et al. 2003).[8]의 개념을 도입한 가속도 생성은 방대한 연산량에 의해서 실제 적용이 불가능하다. 따라서 유한 저크의 개념은 연속된 저크의 복잡한 계산을 대체할 수 있도록 제안되었다. 제안된 유한 저크 알고리즘은 서보 모터의 적용 면에서 효과적임을 실험에 의해 검증하였다. (Chung et al. 2005, submitted to SCI 2005).[9]

Fig.2 는 시간에 따른 유한 저크 알고리즘의 속도, 가속도, 저크 선도를 나타내고 있다. 그리고 가속구간인  $(0 \leq t \leq T_{rf})$  에서의 가속도와 속도식을 (1) 과 (2)에 각각 나타내었다.

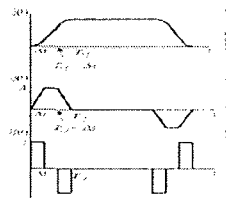


Fig.2 Profiles of Velocity, Acceleration and Jerk Profiles for Finite Jerk

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} Jt & (0 \leq t \leq \Delta t) \\ A & (\Delta t \leq t \leq T_{rf} - \Delta t) \\ -\frac{A}{\Delta t}t + \frac{A}{\Delta t}T_{rf} & (T_{rf} - \Delta t \leq t \leq T_{rf}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \frac{A}{2\Delta t}t^2 & (0 \leq t \leq \Delta t) \\ At - \frac{A}{2}\Delta t & (\Delta t \leq t \leq T_{rf} - \Delta t) \\ -\frac{A}{2\Delta t}(t - T_{rf})^2 + AT_{rf} - A\Delta t & (T_{rf} - \Delta t \leq t \leq T_{rf}) \end{cases} \quad (2)$$

등속구간에서의 속도 크기가 주어졌다고 하면 가속구간에서의 최대 가속도 크기  $A$  및 저크의 크기  $J$  는 각각 (3),(4)에서와 같이 정해진다.

$$A = \frac{V}{T_{rf} - \Delta t} \quad (3)$$

$$J = \frac{A}{\Delta t} \quad (4)$$

이것은 유한 저크를 이용한 가속도 곡선은 유한 저크의 시간  $\Delta t$  에 따라 다양한 유한 저크 가속곡선을 얻을 수 있음을 나타낸다.

### 4. 유전알고리즘

#### 4.1 적합도 함수 결정

적합도의 정의는 아래 식과 같다.

$$evaluation(n) = \frac{1}{f(t) + P(t)} \quad (5)$$

#### 4.1.1 목적함수

목적함수인  $f(t)$  는 구동 모션인 가속도의 영향으로 인해 생기는 LCD 이송 시스템의 진동 크기로 평가된다. Fig.3 은 측정을 위해 지정한 포인트를 나타내고 있다. 이 지점들은 시스템 운전시 구동 안정성을 지시하는데 효과적이다.

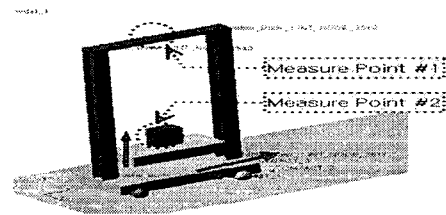


Fig.3 The location of spots for measurement

첫번째 지점은 구동시 가장 큰 진동 변위가 예상되는 크레인의 상단 가운데에 위치하고 있다. 두번째 지점은 로봇의 진동을 확인하기 위한 부분으로 로봇의 중심부에 위치하고 있다.

목적함수  $f(t)$  는 이 두 측정지점에서의 진동 변위와 관련이 있고 (6)에서와 같이 표현할 수 있다.

$$f(t) = w_1 \frac{f_1(t)}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2(t)}{f_2^*} + w_3 \frac{f_3(t)}{f_3^*} + w_4 \frac{f_4(t)}{f_4^*} \quad (6)$$

여기서  $f_1, f_2, f_3$  와  $f_4$  은 2 개의 측정지점에서 reference point 에 대한 상대변위를 나타낸다. 그리고  $f_1^*, f_2^*, f_3^*$  와  $f_4^*$  은 스케일을 맞추기 위한 인자들이고 결과를 반영하기 위한 가중치로  $w_1, w_2, w_3, w_4$  을 부가하였다.

#### 4.1.2 벌점함수

또한 벌점함수는 (7)과 같이 주었다.

$$P(t) = \varepsilon \cdot \delta \cdot \left[ w_1 \frac{\phi_1(t)}{\phi_1^*} + w_2 \frac{\phi_2(t)}{\phi_2^*} + w_3 \frac{\phi_3(t)}{\phi_3^*} + w_4 \frac{\phi_4(t)}{\phi_4^*} \right] \quad (7)$$

식의  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  와  $\phi_4$  은 측정지점 각각의 진동 피크의 횟수와 허용 진동 범위를 벗어난 횟수를 나타낸다. 또한  $\phi_1^*, \phi_2^*, \phi_3^*$  과  $\phi_4^*$  은 스케일을 맞추기 위한 인자이다.

#### 4.2 유전자 알고리즘 파라미터

유전자 알고리즘을 위해서 구속조건 (Gen and Cheng 1997). [10]이 있는 최적화에 좋은 효과를 발휘하는 실수 변수 코딩을 사용하였고 사용한 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Parameter	Value
Population Size	20
Probability of Crossover	0.8
Probability of Mutation	0.01
Crossover /Mutation	Simple Crossover Uniform Mutation
Reproduction Operator	Roulette Wheel Selection

### 5. 시뮬레이션

#### 5.1 시뮬레이션 인터페이스

Fig. 4 은 시뮬레이션 플로우 차트를 나타내고 있다. 본 논문에서는 종료 조건으로 최대 세대수를 선정하였다.

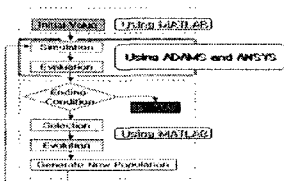


Fig. 4 Flowchart of Simulation Process

MATLAB<sup>®</sup> SIMULINK 와 ADAMS<sup>®</sup>/Control(MSC Working Knowledge 2000).[11]의 유전자 알고리즘 적용을 위한 데이터 교환 인터페이스는 Fig. 5 와 같다

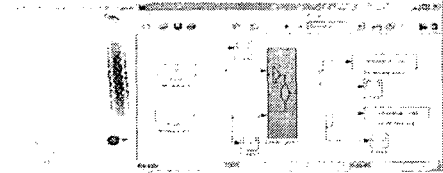


Fig. 5 Interface of ADAMS<sup>®</sup> with MATLAB<sup>®</sup>

#### 5.2 시뮬레이션 과정 및 결과

Fig.6 은 임의로 생성된 1 세대의 해집단 중 하나의 생성가속도 곡선을 보이고 있다. 이후 각 해집단의 목적함수 및 벌점함수를 포함한 적합도 함수의 평가가 이루어지고 다음 세대에 반영된다. 각 유전자 알고리즘 수행하는 과정에서 17 세대에서 진동 변위 결과들을 Fig. 7 에 나타내었다. 이후 Fig.8 와 같이 최적해 탐색과정을 계속 거치고 55 세대에서 수렴하였다. Fig.9 은 세대에 따른 진동 변위의 mean 과 피크값의 수렴과정을 나타내고있다.

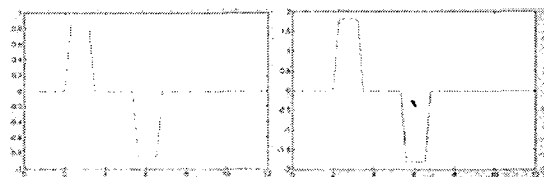


Fig. 6 One of Initial Acceleration Population

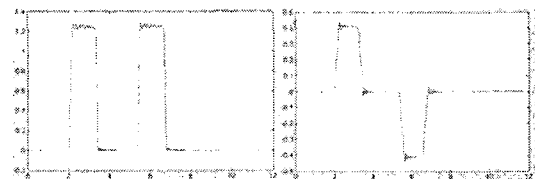


Fig. 7 One of Vibration Displacement at the 17th Generation

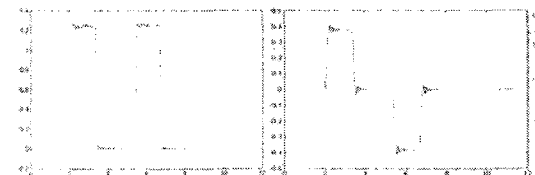


Fig. 8 Vibration Displacement at the 55th Generation (Convergence)

### 6. 비 교

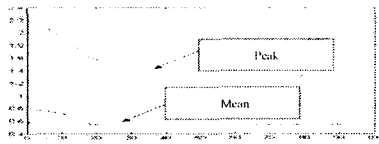


Fig. 9 Variations of the mean and peak values of vibration displacements according to  $\Delta t$

Fig. 10 는 사다리꼴 가속도 곡선으로 구동시켰을 때의 결과를 나타내고 있다. 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘의 결과 데이터를 Table 2 와 같이 비교하였다. 결과에서와 알 수 있듯이 유한 저크를 이용하여 최적화된 가속도 곡선은 진동 피크값과 진동횟수 면에서 감소됨을 알 수 있다.

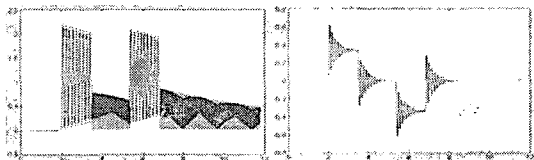


Fig. 10 Result of Vibration Using Trapezoidal Profile

Table 2 Comparison of Conventional Profile with Optimized Profile with Finite Jerk

	Conventional profile	Optimized Profile using Finite Jerk
Maximum (Displacement)	2.2153 mm	1.2928mm(41.6% decrease)
	5.5269 mm	5.3141mm(3.9% decrease)
Mean (Displacement)	0.7937 mm	0.5460mm(31.2% decrease)
	0.1952 mm	0.1690mm(13.4% decrease)
Numbers of Vibration Peaks	268	253(5.6% decrease)
	529	525(1.0% decrease)

## 7. 결 론

본 논문은 고속 LCD 이송 시스템의 진동 감소를 위한 가속도 최적화 방법에 대해 제시하였다. LCD 이송 시스템의 시뮬레이션 모델은 ADAMS<sup>®</sup> 소프트웨어를 사용하여 구성하고 MATLAB<sup>®</sup> 를 이용해서 유전자 알고리즘 최적화를 수행하였다. 결과 진동의 크기와 횟수면에서 감소를 가져올 수 있는 저크 시간 최적화를 수행할 수 있었다. 따라서 본 연구가 LCD 이송 시스템과 같이 더 이상의 기계 디자인에서의 수정이 허용되지 않는 기계시스템의 동적 제어에 대해 유용할 것으로 생각한다

## 후 기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원 및 산업자원부 지방기술혁신 사업[RT104-01-03]지원으로 수행되었습니다. 또한 본 과제는 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역 전략산업 석·박사 연구인력 양성사업의 연구결과입니다. 또한 본 연구는 에너지관리공단의 에너지 절약 기술개발 프로젝트형 사업의 지원 및 ㈜신성이엔지의 지원으로 수행된 연구결과임을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. Abido, M. A., niched Pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch,? Electrical Power and Energy Systems Vol.25, pp.97-105, 2003.
2. Cahouet, C., Luc, M. and David, A., static optimal estimation of joint acceleration for inverse dynamics problem solution,? Journal of Biomechanics Vol.35, pp.1507-1513, 2002.
3. Kim, Y. S., Design of Control System using MATLAB (Korean), 1997.
4. MSC. Software Cooperation., ADAMS/Flex Training Guide, 2000", 1997.
5. Swanson Analysis System, ANSYS Introduction to ANSYS, 1994.
6. Kang, D. H, Chun, Y. H. and Weh, H., nalysis and optimal design of transverse flux linear motor with PM excitation for railway traction,? IEEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 150, No. 4, 2003.
7. Choi, Y. H and Hong, J. H., "A Study on the Feed Rate Optimization of a Ball Screw Feed Drive System for Minimum Vibration," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp.962-966, 2004.
8. Chung, W.-J., Park C.-K., Hong, D.-S., Kim, D.-Y., Kwon J.-R and Park, B.-S., New Optimization Technique For Wafer-Transfer Crane Dynamic Control Using A Genetic Algorithm,? Proc. of Int. Conf. on Computer, Communication and Control Technologies (CCCT 2003), pp.388-393.,2003.
9. Chung, W. J., Kim, S. H., Jung, D.-W., Kim, G.-T., Park, M.-H., and Shin, K.-S., xperimental Study on AC Servomotor Acceleration Optimization Using Finite Jerk.? submitted to SCI 2005,2005.
10. Gen, M. and R. Cheng., Genetic Algorithms And Engineering Design. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC., 1997.
11. MSC.Working Knowledge, 2000, MSC. ADAMS / Control Tutorial Guide, 2000.