

능동 시각 시스템을 위한 저크 발생 억제 제어기 설계

김도윤, 김도형, 정명진
한국과학기술원 전자전산학과

Design of A Controller For Reducing Jerk-Motion
In An Active Vision System

Do Yoon Kim, Do Hyoung Kim, Myung Jin Chung
Dept. of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST

Abstract - 능동 시각 시스템은 카메라 시선 방향을 조절할 수 있는 장치로, 기존의 고정식 스테레오 카메라가 가질 수 없는 여러 가지 장점으로 인해 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 능동 시각 시스템을 이용하여 움직이는 물체를 추적하는 경우, 목표 위치가 제어 주기마다 바뀌게 되는데 이 때 시스템의 현재 속도를 고려하지 않는다면, 급격한 속도의 변화로 인해 저크(jerk)가 크게 발생하게 된다. 저크는 물체 추적 성능에도 영향을 미칠 뿐만 아니라, 전원단의 잡음 발생을 유발시켜 제어기의 동작을 방해하며, 시스템에 기계적인 손상을 주기도 한다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 기존의 방법들은 스플라인이나 고차 다항식의 계산 방법을 사용하였으나 계산량의 복잡도로 인해 다축 제어가 필요한 능동 시각 시스템에서 구현하기가 어렵다. 본 논문에서는 삼각 함수를 이용한 종(bell) 모양의 속도 프로파일을 이용해서 저크 발생을 억제할 수 있는 제어기 구조를 제안한다. 제안된 방법은 간단한 계산량으로 저가의 마이크로프로세서에서도 실시간으로 동작이 가능하며 임의의 시점에 임의의 속도로 움직이고 있는 시스템에 저크를 최소화할 수 있는 지령 속도를 만들어 낼 수 있다. 제안된 방법은 시뮬레이션과 실제 시스템에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 각광받고 있는 지능형 시스템에서 환경에 대한 많은 정보를 수집할 수 있는 센서 시스템으로는 시각 시스템이 거론되고 있다. 시각 시스템이 작업 환경에서 움직이지 않고 고정되어 있는 경우에 영상 처리 과정은 비정규성, 비선형성, 불안정성들의 문제점들을 가지고 있다. 반면 시각 시스템의 위치를 능동적으로 바꿀 수 있는 경우에는 이러한 문제점들이 정규성, 선형성, 안정화로 바뀌게 되어 문제 해결이 쉬워지기 때문에 능동 시각 시스템은 지능형 시스템 분야에서 매우 중요한 연구 분야로 자리잡아가고 있다[1][2].

능동 시각 시스템이 가지는 많은 특질 중에서 가장 두드러지는 부분은 움직이는 물체의 추적(tracking) 분야이다. 기존의 고정식 스테레오 카메라일 경우, 카메라의 시야각이 한정되기 때문에 움직이는 물체를 추적하는데 한계가 있었다. 하지만 시선 방향을 바꿀 수 있는 능동 시각 시스템은 이러한 한계점을 뛰어 넘을 수 있기 때문에 인간-컴퓨터 인터페이스, 감시 시스템, 이동 로봇 등에 유용하게 사용될 것으로 기대되고 있다.

움직이는 물체를 추적하는 과정은 그림 1과 같이 스테레오 카메라에서 영상이 갱신될 때마다 물체의 위치를 파악하는 30Hz 샘플링을 갖는 페루프와, 파악된 물체의 위치를 이용하여 물체가 영상의 중심으로 오도록 시스템의 기구학에 맞추어 각 관절을 제어하는 1kHz로 동작하는 페루프가 존재하게 된다. 물체 위치를 파악하는 루프에서 새로운 목표점이 갱신되면 관절 제어기는 새로운 목표점으로 관절을 이동시키기 위한 속도 프로파일을 생성하게 되는데, 이 때 동작 중인 각 관절의 속도

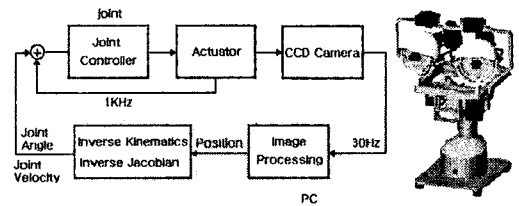


그림 1. 능동 시각 시스템과 블록 다이어그램

는 고려가 되지 않기 때문에 목표 위치가 바뀌는 시점에서 급격한 가속도 변화로 인해 저크(jerk)가 큰 값으로 발생하게 된다. 저크는 가속도의 미분값으로 실제 물리적인 시스템이 받아들일 수 있는 저크는 한계가 있기 때문에 이러한 저크 발생을 억제하도록 속도 프로파일을 생성하는 것이 추적 속도와 정밀도를 향상시키고, 시스템의 파손을 막는데 중요한 역할을 한다[6].

이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 기존의 방법은 가속도 함수를 등가속도나, 사다리꼴의 고정된 가속도로 제한하고, 새로운 목표 위치가 갱신이 되면, 현재 진행 속도, 가속도를 고려하여 최대한 부드러운 속도 변화를 만들어 내는 속도 프로파일을 3차원 스플라인 함수로 묘사하는 방법이 있다[4]. 또 다른 방법으로 Lloyd[3]는 3계 미분까지 가능한 5차 다항식의 조합으로 이러한 문제를 해결하는 방법을 제시하였고, Macfarlane[6]은 s-커브 형태의 가속도 함수를 제안하였다. 하지만 이러한 방법들은 복잡한 계산량을 가지고 있어 6축 이상의 다관절을 갖는 능동 시각 시스템에 실시간으로 동작하도록 구현하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 계산량이 고려된 실제 시스템에 적용할 수 있는 제어기가 필요하다.

2. 저크 발생을 억제하는 종 모양의 속도 프로파일

2.1 저크(jerk) 발생과 영향

저크는 가속도의 미분값으로 저크가 크다는 것은 급격한 가속도의 변화가 있다는 것이고, 저크가 작다는 것은 가속도의 변화가 적어서 부드럽게 움직인다고 해석할 수 있다[5][6][7]. 여기서 부드럽다는 표현은 미분 가능하다는 말로 바꾸어 볼 수 있다. 일정 가속도로 속도 프로파일이 만들어지는 경우, 동작 중에 목표 위치가 바뀔 때 위치, 속도, 가속도, 저크의 그래프는 그림 2와 같다.

가속도 방향이 바뀌는 경우 미분 불가능한 형태이기 때문에 큰 값의 저크가 발생하게 되는데, 이러한 저크는 액추에이터에 무리를 주며, 시스템의 운동 방향이 급격히 바뀌게 되어 시스템의 파손까지 이어질 수 있다. 또한 목표 속도로 추종하는 추적 성능에도 많은 영향을 미치기 때문에 새로운 목표 위치가 갱신될 때 저크가 발생하지 않는 속도 프로파일을 생성하는 방법이 필요하다.

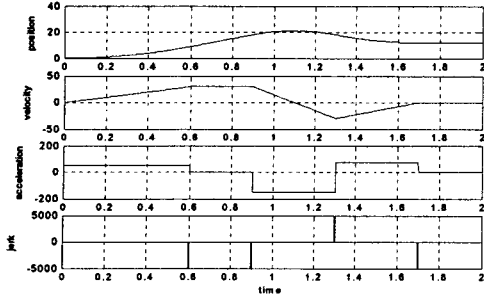


그림 2. 등가속도로 움직이는 액추에이터에서 목표 위치가 바뀌는 경우의 위치, 속도, 가속도, 저크 그래프

2.2 종 모양 형태 속도 함수

최근 지능형 시스템 연구에서 기본 연구 방법으로 잘 해결되지 않는 문제를 풀기 위해 인간에 대한 연구로부터 돌파구를 찾으려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 인간의 경우 움직이는 물체를 손으로 잡는 운동(reaching)이 원활히 이루어지는데, 물체가 생각했던 경로에서 바뀌더라도 인간의 손끝은 부드러운 제적으로 현재 진행 중인 속도를 고려해 물체를 잡을 수 있는 위치로 이동한다. 이 운동을 어떠한 수학 모델로 표현할 수 있는가에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다 [7][8][9]. 이 분야의 연구 결과는 인간이 움직이는 물체를 손으로 잡을 때 손끝의 운동은 종 모양(bell-shape)의 속도 함수로 모델링이 가능하다는 사실을 보여주고 있다. 종 모양의 속도 함수는 미분 가능한 형태의 특성으로 인해 저크가 크게 발생하지 않으며, 위치 함수는 산업체에서 많이 사용하는 s-곡선의 형태의 부드러운 곡선으로 나타나는 장점이 있다. 또한 목표 위치가 새롭게 바뀐 경우에는 원래 목표 위치에서 새로 갱신된 목표점까지의 이동 경로에 해당하는 속도 함수를 기존의 함수에 더하면 되는 간단한 과정으로 저크 발생을 억제하면서 목표 위치를 갱신할 수 있다는 장점이 있다. 시간에 따른 위치, 속도, 가속도 함수를 각각 $p(t)$, $v(t)$, $a(t)$ 로 놓고, 목표 위치를 $p_T(t)$, 움직이는데 소요되는 시간을 T 로 놓는다면, 기존의 연구에서 제안한 모델은 다음 식 (1)과 같다.

$$\dot{a}(t) = -9\frac{a(t)}{T} - 36\frac{v(t)}{T^2} + 60\frac{(p_T - p(t))}{T^3} \quad (1)$$

이 모델은 수학적으로 종 모양의 속도 함수 특성을 잘 나타내지만, 실제 시스템에서 가속도를 직접 측정하기 어렵기 때문에 대부분 엔코더(encoder)를 이용한 위치 측정값을 두 번 미분한 값을 사용하는데, 이럴 경우 관측 노이즈와 엔코더 해상도에 민감하다는 단점과 함께, 부동 소수점 연산이 반복된다는 단점이 있다.

2.3 디지털 제어기에 적합한 종 모양 함수

본 연구는 위 연구 결과에 착안하여 능동 시간 시스템의 제어에 종 모양의 속도 함수를 도입하여 저크 발생을 억제하면서 움직이는 물체를 지속적으로 추적하는 시스템을 구현한다. 종 모양의 속도 함수를 구성하는데 있어서 제한 조건은 (1) 모양이 종 모양의 형태로 구현되어야 하며, (2) 연속적으로 미분이 가능해야 한다. 삼각 함수에서 sine과 cosine은 연속적으로 미분을 취해도 계속 반복적인 형태로 나온다는 사실에 착안하여, cosine 함수를 적절히 변형하여 종 모양의 속도 함수를 다음과 같이 구성하였다.

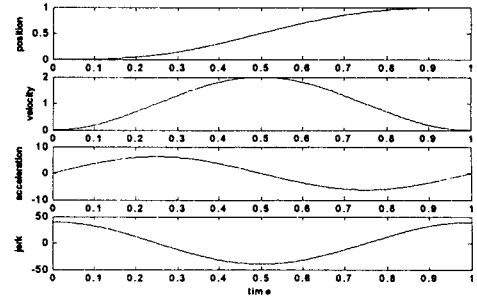


그림 3. 제한한 속도 함수를 적용했을 때 위치, 속도, 가속도, 저크 함수의 그래프

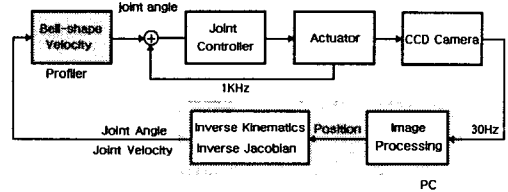


그림 4. 제안한 전체 시스템 구성과 링 버퍼에 속도 프로파일을 저장하는 과정

$$v(t) = 1 - \cos 2\pi t$$

$$p(t) = \int_0^1 v(t) dt = t - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi t \quad (2)$$

$$a(t) = \dot{v}(t) = 2\pi \sin 2\pi t$$

$$\dot{a}(t) = 4\pi^2 \cos 2\pi t$$

(단, $0 \leq t \leq 1$)

cosine 함수로 구성된 종 모양의 속도 $v(t)$ 는 1계, 2계 미분 가능하며, 2계 미분값인 저크 함수도 삼각 함수로 구성되는 미분 가능한 형태로, 부드러운 변화를 가지는 특징이 있다.

위 수식에서 실제적으로 사용하는 수식은 $p(t)$ 로서 관절 제어기는 매 제어 주기에 추종해야 할 위치 데이터를 받아 제어를 하는 형태가 된다. 따라서 기존의 제어기 앞단에 피드 포워드 형태의 제어기가 부작되는 것으로, 액추에이터와 제어기가 일체형으로 되어 있는 상업용 제품에도 손쉽게 구현이 가능하다. 또한 링 버퍼(ring buffer)에 생성된 속도 값들을 저장해 두고, 새롭게 속도가 갱신될 때 기존의 링 버퍼 값에 더하는 식으로 간단히 디지털 제어를 구현할 수 있어 저가의 프로세서로도 구현이 가능하다는 장점이 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 모의 실험

모의 실험은 능동 시간 시스템의 한 관점을 대상으로 했으며, $t=0, p(0)=0$ 에서 $p_{T1}(t)=40$ 위치로 이동 중에 $t_1=1s$ 시점에서 목표 위치가 $p_{T2}=-10$ 으로 바뀌고 다시 $t_2=1.5s$ 일 때 목표 위치가 $p_{T3}=-30$ 으로 바뀌는 경우를 실험하였다. 새롭게 목표 위치가 바뀌는 시점에서 속도 함수는 계산되고, 기존의 속도 함수와 더해지게 된다. 따라서 최종적으로 시스템의 속도 그래프는 그림 5의 마지막 그래프와 같다.

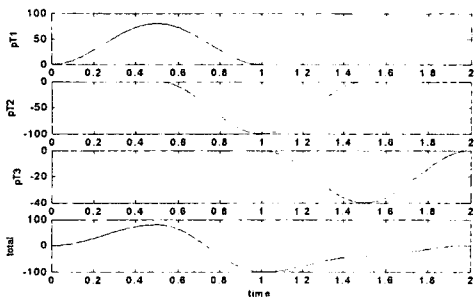


그림 5. 각 시점에서 생성된 속도 함수와 최종 결과

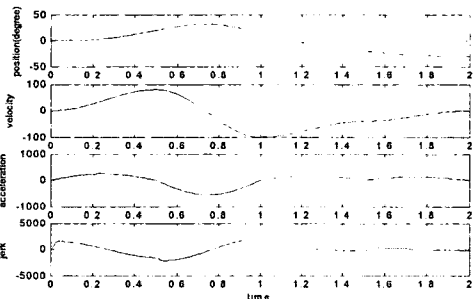


그림 6. 모의실험 결과 (위치, 속도, 가속도, 저크)

이러한 속도로 움직였을 때 위치와 가속도, 저크의 형태는 그림 6에 나와 있다. 속도 함수가 부드럽게 변하기 때문에 저크가 크게 발생하지 않으며, 시스템이 동작 중 이며도 최종 목표 위치로 부드럽게 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

3.2 실험

실험을 위해 제작된 능동 시각 시스템은 DC모터와 위치 제어가 내장된 R/C 서보를 액츄에이터로 사용하며, 총 12개의 구동 부분을 가지고 있다. 영상 처리는 PC에서 이루어지며, 영상으로부터 계산된 각 관절의 최종 위치는 TI사의 DSP인 TMS320LF2407을 사용한 제어기에 전달된다. 이 제어기에서 제안한 중 모양의 속도 함수를 동시에 12개를 생성하고, 매 제어 샘플마다 출력하도록 시스템을 구성하였다. 실험은 모의실험에서 수행한 내용과 3차원 공간 상의 원으로 구성되는 궤적을 추적하는 성능을 실험해 보았다. 그림 7에서는 그림 6에서 보여주는 모의실험 내용을 실제로 모터 측에 가변저항을 추가하여 모터의 회전 위치 변화를 측정하였고 목표 위치가 급격히 바뀌는 경우에 대해 모터의 회전 위치의 변화를 기존의 방법과 비교해 본 결과를 보여주고 있다. 그림 8은 미리 계산된 3차원 공간 상의 원형 궤적을 추종하는 경우, 기존의 방법과 제안한 방법의 비교 결과이다. 기존 방법의 경우 목표점이 바뀌는 순간 궤적 오차가 크게 발생하지만, 제안한 방법은 전체적으로 균일함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 인간 팔 운동을 모델링 하는데 사용되었던 중 모양의 속도 함수를 이용하여 저크 발생을 억제하면서 목표점으로 추종할 수 있는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 액츄에이터가 임의의 속도로 움직이고 있는 상황에도 임의의 시점에 임의의 위치로 이동이 필요할 때 저크를 크게 발생시키지 않고 부드러운 움직임을 만들 수 있는 속도 프로파일을 생성시킨다. 기존의 연구에서는 저크 발생을 억제하기 위해 스플라인이

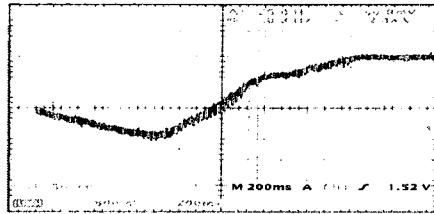


그림 7. 모의실험 내용의 실제 실험 결과 (위-기존 방법, 아래-제안한 방법)

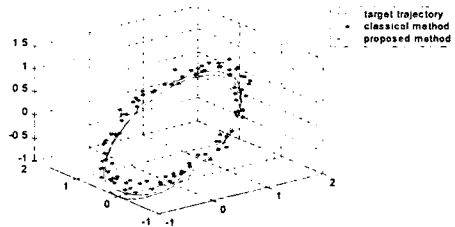


그림 8. 3차원 궤적 추적 실험

나 복잡한 근사화 과정을 통해 많은 계산량을 필요로 했으나 제안된 방법은 간단한 8비트 마이크로 콘트롤러에서 처리할 수 있는 정도의 계산량을 보인다. 이러한 계산량의 감소는 다수의 액츄에이터를 필요로 하는 능동 시각 시스템에서는 더욱 더 장점이 부각된다. 그림 7과 그림 8에서 보여주는 것과 같이 제안된 방법은 모의실험을 통해 이상적인 환경에서의 동작과 실제 시스템에 적용하여 실제 환경에서의 실험 결과를 통해 그 성능의 우수성을 보였다. 제안된 방법은 RC 서보뿐만 아니라 위치 제어를 가지고 있는 일반적인 시스템을 제어할 때, 저크 발생을 억제하면서 임의의 시점에 목표 위치를 바꾸고자 할 때 유용하게 사용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김도윤, 유정래, 박현근, 정명진, "여자유도를 갖는 능동시각시스템의 설계," KIEE 하계학술대회, 2000
- [2] Do Yoon Kim, J. Ryoo, H. Park, and M. Chung, "Real Time Gaze Control of Active Head-eye System without Calibration," AROB, 2001
- [3] J. Lloyd and V. Hayward, "Real Time Trajectory Generation Using Blend Functions," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.784 789, 1991
- [4] S. Bazaz and B. Tondu, "Minimum time on-line joint trajectory generator based on low order spline method for industrial manipulators," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 29, pp.257-268, 1999
- [5] Y. Tanaka, T. Tsuji, and M. Kaneko, "Bio mimetic Trajectory Generation of Robotics using Time Base Generator," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1310 1315, 1999
- [6] S. Macfarlane and E. Croft, "Design of Jerk Bounded Trajectories for On-Line Industrial Robot Applications," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.979 984, 2001
- [7] A. Hauck, "Vision Based Reach-To Grasp Movements: From the Human Example to an Autonomous Robotic System," Ph.D thesis, Munich University, 2000
- [8] S. R. Gutman, G. Gottlieb, and D. Corcos, "Exponential model of a reaching movement trajectory with nonlinear time", Comments Theoretical Biology, vol. 2, no. 5, pp. 357 383, 1992
- [9] R. Caminiti, "Control of Arm Movement in Space: Neurophysiological and Computational Approaches", Springer Verlag, pp.285 306 ,1991