

팬-틸트 카메라의 저 진동 마이크로스텝핑 제어기 설계

Design of a Low-Vibration Micro-Stepping Controller for Pan-Tilt Camera

유종원¹, 김정한^{2,✉}
Jong-won Yoo¹ and Jung-han Kim^{2,✉}

¹ 서울산업대학교 NID 융합기술대학원 (Department of Nano & IT Fusion Program, Seoul National University of Technology.)

² 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (Department of mechanical design & Automation Engineering, Seoul National University of Technology.)

✉ Corresponding author: hankim@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6397

Manuscript received: 2010.1.5 / Revised: 2010.4.15 / Accepted: 2010.6.25

Abstract - Speed, accuracy and smoothness are the important properties of pan-tilt camera. In the case of a high ratio zoom lens system, low vibration characteristic is a crucial point in driving pan-tilt mechanism. In this paper, a novel micro-stepping controller with a function of reducing vibration was designed using field programmable gate arrays (FPGA) technology for high zoom ratio pan-tilt camera. The proposed variable reference current (VRC) control scheme reduces vibration decently and optimizing coil current in order to prevent the step motor from occurring missing steps. By employing VRC control scheme, the vibration in low speed could be significantly minimized. The proposed controller can also make very high speed of 378kpps micro-step driving, and increase maximum acceleration in motion profiles.

Key Words: Step Motor (스텝모터), Micro-stepping (마이크로 스텝), Controller (제어기), Dome-Camera (돔 카메라), Missing-step (탈조), FPGA (현장 프로그래머블 게이트 어레이)

기호설명

T = torque generated by the motor phase

k = motor constant

i_A, i_B = current through motor phase

θ_m = mechanical position of rotor

θ_e = electrical position of rotor

I_0 = coil reference current

1. 서론

최근 급격히 증가하는 범위를 예방하고 사회질서를 유지하기 위한 대책의 일환으로, 많은 공공 장소에서 무인카메라를 설치하게 되었다. 그에 따라 넓은 영역을 효율적으로 감시할 수 있는 줌렌

즈가 장착된 팬-틸트 카메라의 수요가 급격히 증가하고 있다. 이러한 팬-틸트 카메라는 일반적으로 고배율의 줌렌즈가 장착되므로, 선명한 화질을 위해서는 회전 및 이동시 빠르고 부드럽게 움직여야 하며 동시에 진동을 최소화 하여야 한다.¹

팬-틸트 카메라 시스템에서는 스텝모터가 많이 사용되고 있는데, 스텝모터는 입력펄스에 동기화되어 정해진 각도로 움직이기 때문에 일반적으로 위치 피드백 센서를 필요로 하지 않으며, 저 가격의 드라이버를 사용하기 때문에 가격에 대한 경쟁력을 갖추고 있다. 반면 높은 속도 및 가속도로 구동할 때, 탈조 현상이 발생할 수 있으며, 입력펄스에 대한 모터의 회전각이 정해져 있어, 적은 속도 맥동과 세밀한 위치 제어에는 어려움이 존재한다.²

이러한 스텝모터의 문제점을 개선하기 위해 스텝모터의 한 스텝각을 다량의 마이크로 스텝으로 잘게 나누어 구동하는 방식이 1970 년대 중반에 제안되었으며, 그 이후로 마이크로스텝핑 구동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.³ 마이크로스텝핑 구동은 스텝모터의 코일에 흐르는 전류를 정현파 형식으로 제어하여 일반 구동 방식에서의 스텝회전각보다 더 정밀한 각으로 회전시키는 방식으로, 결과적으로 고 정밀 위치제어가 가능해지며, 공진 영역에서의 문제점들을 개선할 수 있고, 결과적으로 속도 맥동을 줄일 수 있는 특징이 있다.⁴

하지만 이러한 마이크로스텝핑 구동방식은 고속으로 회전 시 매우 높은 구동 주파수를 요구하여 최대 회전속도가 제한되는 단점과, 여전히 엔코더 등을 일반적으로 사용하지 않으므로 탈조가 발생하지 않도록 토크 사용을 매우 보수적으로 설계하여야 하는 문제점이 있다.^{5,6}

본 논문에서는, 팬-틸트 카메라 시스템의 마이크로스텝핑 구동 시 탈조가 발생하지 않는 조건을 찾아내어 코일에 흐르는 기준전류를 모션 프로파일에 따라 제어함으로써, 기존의 무조건적으로 안전계수를 높이는 설계방식을 탈피하여, 탈조가 발생하지 않으면서도 진동을 최소화할 수 있는 VRC(Variable Reference Current) 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 진동을 최소화 해 줄 뿐 아니라, 스텝모터 회전 시의 전류 소비를 상당부분 감소시켜준다. 또한 본 논문에서 제안된 마이크로스텝핑 제어기는 고속 FPGA 를 사용하여 구현하여 스텝모터를 8 ~ 256 마이크로 스텝으로 구동할 수 있으며 동시에 378kpps 의 높은 최대 속도로 스텝모터를 구동할 수 있게 설계하였다. 다음 장에서는 VRC 제어기의 구체적인 설계와 실험결과에 대하여 설명한다.

2. 시스템 기술

2.1 마이크로 스텝핑 구동

마이크로스텝핑 구동은 Fig. 1 에서 보여지는 바와 같이 코일에 정현파를 흘려줌으로써 스텝각 중간에 많은 평형위치를 만들어 모터의 위치 분해능을 높이고, 저속에서도 부드러운 속도 맥동을 얻을 수 있는 방법이다.^{7,9} Fig. 1 에 도시된 두 개의 정현파 곡선은 모터의 A, B 상에 흐르는 전류를 의미하며, 이의 벡터합은 도시된 바와 같이 각도에 따라 회전하며 일정한 토크를 발생시킨다. 하이브

리드형 2 상 스텝 모터의 토크 방정식은 다음과 같이 회전자의 위치와 모터의 코일에 흐르는 전류의 함수로 표현된다.⁵

$$T = k(-i_A \sin \theta_e + i_B \cos \theta_e) \tag{1}$$

여기서 전기각 θ_e 는 샤프트의 기계적인 각 θ_m 과 다음과 같은 관계가 있다(N_r 은 회전자의 치수).

$$\theta_e = N_r \theta_m \tag{2}$$

만약 스텝 모터의 각 상의 전류를 식(3)과 같이 전류각 ϕ 로 제어해 주면, 모터의 토크 방정식 (1)은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} i_A = I_0 \cdot \cos \phi \\ i_B = I_0 \cdot \sin \phi \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} T &= -kI_0 \{ \cos \phi \sin(N_r \theta_m) - \sin \phi \cos(N_r \theta_m) \} \\ &= -kI_0 \sin(N_r \theta_m - \phi) \end{aligned} \tag{4}$$

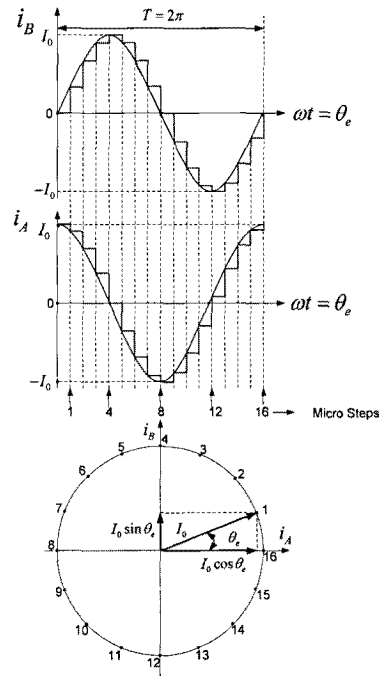


Fig. 1 Coil current profile of micro-stepping

식(4)에서와 같이 무부하 상태시 토크가 평형을 이루는 점은 ϕ 와 $N_r \theta_m$ 이 같아지는 지점이므로, 식(5)와 같이 코일에 흐르는 전류각 ϕ 를 미세하게 조정해주면, 샤프트의 기계각 θ_m 을 원하는 위치로 회전시킬 수 있다.

$$\theta_m = \frac{\phi}{N_r} \quad (5)$$

정리하면, 모터의 각 상의 전류들은 식(3)과 같이 서로 90° 위상차가 나는 정현파가 되도록 구성하며, 전류각 ϕ 를 이용하여 미세하게 샤프트각 θ_m 를 제어하게 된다.

2.2 마이크로스텝의 속도 프로파일

일반적으로 스텝 모터는 피드백 센서가 없이 사용되므로, 탈조가 발생하지 않도록 모션 프로파일을 설계하여 사용한다. 속도 프로파일은 그 시스템에 따라서 다양한 형상이 존재하는데, 직선의 가속도를 가지는 사다리꼴 속도 프로파일을 많이 사용하며, 구현이 쉽기 때문에 마이크로 스텝 구동에 많이 사용된다.¹⁰

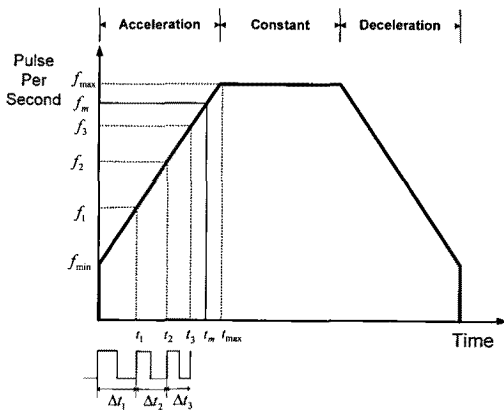


Fig. 2 Trapezoidal velocity profile

스텝모터에서는 한 스텝각의 구동이 한 입력 펄스에 대응하므로 스텝모터의 회전 속도는 주기적인 입력펄스의 주파수에 의해서 결정되며, AC 나 DC 모터와는 다르게 초기 기동속도와 구동종료 부분에 오프셋이 있는 것이 특징이다. Fig. 2는 본 논문에서 사용한 마이크로스텝핑 사다리꼴 프로파일을 도시한 것이다. 여기서 최저 펄스 주파수를

f_{\min} , 최대 펄스 주파수를 f_{\max} 라고 가속도는 다음의 식(6)과 같이 표현된다.

$$a = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{t_{\max}} \quad (6)$$

전술한 바와 같이 스텝모터에서는 입력펄스주파수 자체가 회전 속도가 되므로, 가감속 구동시 생성되는 펄스는 균등한 시간 배분이 되지 않고, 기준시간(t_1, t_2, \dots)이 주파수의 상승에 따라 Fig. 2와 같이 달라지게 된다.

m 은 펄스의 순서를 나타내며, t_m 시점에서의 주파수 f_m 과 f_{\min} 의 평균, 그리고 Δt_k 의 관계를 이용하면,

$$\frac{f_m + f_{\min}}{2} \times \frac{1}{m} = \frac{1}{\sum_1^m \Delta t_k} = \frac{1}{t_m} \quad (7)$$

식(7)과 가속구간에서의 직선의 방정식을 이용하여, m^{th} 펄스의 생성시간을 수식으로 표현하면,

$$t = \frac{\sqrt{2am + f_{\min}^2} - f_{\min}}{a} \quad (8)$$

여기서 m^{th} 펄스와 $(m-1)^{th}$ 펄스의 간격을 계산하면,

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= t_m - t_{m-1} \\ &= \frac{\sqrt{2am + f_{\min}^2} - \sqrt{2a(m-1) + f_{\min}^2}}{a} \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)과 (9)를 사용하면 FPGA 혹은 마이크로 컨트롤러에서 속도 변화에 따른 기준 펄스를 손쉽게 수식으로부터 생성할 수 있다.

스텝모터의 탈조는 Fig. 2와 같은 프로파일 중 주로 가감속 구간에서 가장 많이 발생하는데, 본 연구에서는 최대 가속도에 따른 탈조의 원인을 분석하여 탈조가 발생되지 않도록 제어하면서 동시에 가장 진동이 적게 발생하도록 시스템을 설계하였고, 마이크로 스텝핑의 해상도는 64 채배와 128 채배를 사용하여 실험하였다.

2.3 팬-틸트 카메라 시스템

Fig. 3 에 본 실험에서 사용한 팬-틸트 카메라를 도시하였다. 일반적인 팬-틸트 카메라는, 줌 카메라를 Yaw 방향으로 회전하는 모터 1(Yaw), 줌 카메라를 Pitch 방향으로 회전하는 모터 2(Pitch)로 구성되어 있다.

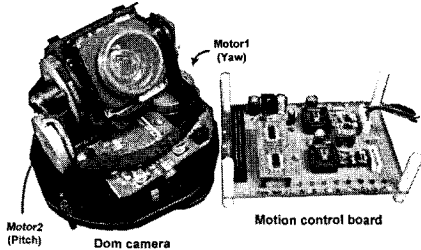


Fig. 3 Dome-camera body and driver

팬-틸트 카메라 시스템은 PC 에서 회전 각도와 회전 변수(속도, 가속도)를 주어지게 되며 주어진 데이터를 가지고 FPGA 로 구성된 모션 제어기에서 모션 프로파일을 생성하여 팬-틸트 카메라가 회전하게 된다.

3. 가변 기준 전류 제어기

3.1 모터탈조와 가변전류간의 관계

스텝모터는 일반적으로 토크와 PPS(pulse per second)가 반비례의 관계를 가지며, 코일에 흘려주는 전류, 모션 프로파일 그리고 최대 가속도값은 탈조와 밀접한 관련이 있다.¹¹

Fig. 4 는 일반적인 스텝모터의 구동 시 PPS 변화에 대하여 토크의 변화를 나타낸 그래프이다.¹² 그림에서 풀인(Pull-in) 범위이라고 표시된 영역은 스텝모터가 멈추어 있다가 기동할 시 탈조 없이

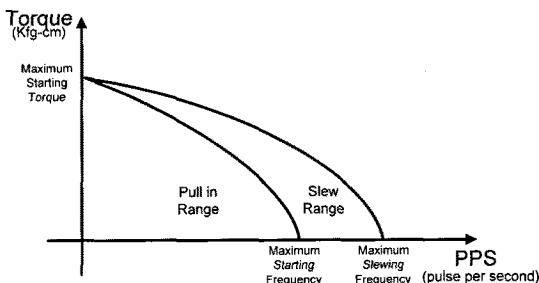


Fig. 4 PPS-Torque characteristic of a step motor

구동할 수 있는 영역을 표시하는데, 급격한 가속을 사용하면 슬루(Slew) 영역으로 진입하므로 모터가 기동시 탈조를 일으키게 된다.

스텝모터의 탈조는 기동시에만 일어나는 현상은 아니며, 모션 프로파일의 구동 중에도 발생하는데, 그 원인도 최대 가속도, 최대속도, 부하토크의 변동 등 다양하게 분류할 수 있다. 또한 일반 사각펄스 구동이 아닌 마이크로스텝핑 구동에서는 한 치차를 1/4 주기로 전류제어를 하므로 전류각에 따라 탈조 현상이 달라질 수 있다.

일반적으로 사용되는 속도 구간에서는, 마이크로스텝핑 구동시 스텝모터가 낼 수 있는 최대 가속도는 그 코일에 흘려주는 전류와 밀접한 관련이 있는데, 이는 모터에서 순간적으로 발생하는 토크가 코일에 흘려주는 전류와 비례하기 때문이다.

본 연구에서는 스텝모터 탈조의 여러 가지 원인 중 가장 주요한 원인이라고 판단되는 최대 가속도에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 5 는 팬틸트 카메라의 모터 1 번에서 마이크로 스텝핑 구동시 사용하는 식(3)의 기준전류 I_0 를 바꾸어 가면서 그 상태에서 탈조가 발생하는 최소 가속도를 찾아내어 도시한 것이다.

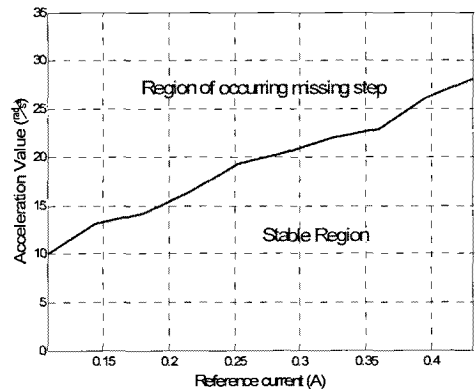


Fig. 5 Missing step and stable region

Fig. 5 에서 마이크로스텝핑의 기준전류 I_0 를 높이면 높일수록 탈조가 발생하지 않는 최대가속도 값이 같이 상승하는 것을 볼 수 있다. 예를 들어 기준 전류 I_0 를 약 200mA 로 입력 시에는 스텝모터의 최대 가속도는 15 rad/s^2 이 되며, 이보다 높은 가속도를 내려면 기준전류를 높여 주어야 탈조가 발생하지 않는다. 하지만 기준전류를 높일수록 구동 시 진동이 매우 심해져서 카메라의 영상

떨림현상이 증폭되며, 구동 시 사용하는 전류소모량도 커진다.

Fig. 5의 데이터를 가지고 최소자승법을 사용하여 선형화 시키면 식(10)과 같이 표현할 수가 있으며, 이를 해당 가속도에서 필요한 최소 전류의 형식으로 표현하면 식(11)과 같다.

$$\ddot{\theta}_{\max} = 55.72i + 5.12 \quad (10)$$

$$i_m = \frac{|\ddot{\theta}| - 5.12}{55.72} = f(\ddot{\theta}) \quad (11)$$

식(11)을 사용하면 감가속 구간에서 탈조가 발생하지 않는 최소 전류량을 계산할 수 있으므로, 가속도에 따른 해당구간에서의 기준전류 I_0 값을 계산할 수 있다. 속도 프로파일을 미분하면 가속도 프로파일을 얻을 수 있으므로, 구동 프로파일에 따라 최소 전류를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 구동방법을 가변기준전류 (Variable Reference Current) 제어방식이라 칭하였으며, 식(3)의 마이크로 스텝핑의 기준전류 I_0 값을 현재 모션 프로파일의 가속도에 따라 자동 조정하게 된다. 사다리꼴 타입의 구동프로파일을 사용할 때의 VRC 제어의 기준전류의 개략적인 파형을 도시하면 Fig. 6의 (c)와 같다.

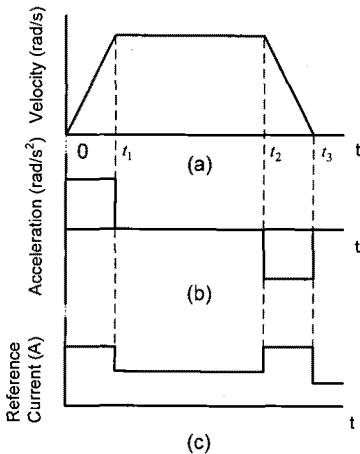


Fig. 6 Motion profiles of VRC controller: (a) velocity, (b) acceleration, (c) reference current

일반적으로 탈조를 방지하기 위하여 충분한 안전계수를 두어 설계하는 방법과는 달리, 본 연구

에서는 실제 안전영역을 측정하여 식(11)에서 정의한 함수 $f(\ddot{\theta})$ 를 활용한 기준전류 계산식을 제안하였다.

$$I_{rc,a} = I_{offset,a} + k_a f(\ddot{\theta}_r) \quad (12)$$

여기서 회전자의 치차의 수를 N_r , 마이크로 스텝핑의 해상도를 r_m 이라 하면, 회전속도는

$$\dot{\theta} = \frac{f}{N_r r_m} \quad (13)$$

와 같이 표현되며, 가속구간에서의 기준전류는 실제적으로

$$I_{rc,a} = I_{offset,a} + k_a f\left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{N_r r_m t_1}\right) \quad (14)$$

와 같은 형태로 구현된다(t_1 은 가속이 끝나는 시점). $I_{rc,a}$ 는 식(11)에서 구한 최소 전류 값에 일정량의 여유분을 고려한 계수로 설계되며, 본 실험에서는 단순화 여유분을 약 20%로 고려하며 $k_a = 1.2$ 정도의 값이 사용되었다. $I_{offset,a}$ 는 기본적으로 작동토크를 추가하고 싶을 경우 추가적으로 사용할 수 있으며, 본 실험에서는 최대 전류의 약 10% 정도의 값을 사용하였다. 이러한 기본 오프셋 전류는 동작에 따른 기구부의 무게중심 변화에 의한 부하변화에 대한 보상으로도 작용한다.

등속구간에서의 VRC 설계는, 마이크로 스텝핑의 정속구동에서 탈조를 방지하는 최소한의 전류를 계산하는 곳에서 출발한다.

$$I_{rc,c} = I_{offset,c} + k_v |\dot{\theta}| \quad (15)$$

일반적인 모터의 경우에는 기구적인 마찰력만 상쇄시켜주면 되지만, 마이크로 스텝핑 구동에서는 등속구간에서도 마이크로 스텝핑에 필요한 속도에 비례하는 일정량의 전류를 공급하여 주어야 한다. 식(15)를 구현된 수식으로 나타내면 식(16)과 같다.

$$I_{rc,c} = I_{offset,c} + k_v \left| \frac{f_{\max}}{N_r r_m} \right| \quad (16)$$

Fig. 5 의 토크-속도 곡선에서 볼 수 있듯이, 고속구동에서는 스텝모터의 발생 토크가 감소하는데, 기구적인 가공오차, 마찰력의 변화 및 구동시 무게중심의 이동등을 고려하면, 등속구간의 경우에도 역시 여유도를 고려하여 k_v 를 결정해야 하며, 구동이 끝난 경우에도 일정량의 홀딩 토크 I_{hold} 를 지속적으로 가해주어야 한다. 이를 구간에 따라 정리하면 다음과 같다.

$$I_{rc} = \begin{cases} I_{offset,a} + k_a f \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{N_r r_m t_1} \right) & 0 < t < t_1 \text{ or } t_2 < t < t_3 \\ I_{offset,c} + k_v \left| \frac{f_{max}}{N_r r_m} \right| & t_1 < t < t_2 \\ I_{hold} & t_3 < t \end{cases} \quad (17)$$

Fig. 7 의 플로우차트는 가속도 구간의 변화에 따른 VRC 제어기의 출력 I_{rc} 의 계산을 나타낸 것이다. 모터의 감속이 완료가 되면 모터 드라이버에 최소 홀딩 토크만 흐를 수 있도록 기준전류를 낮추어 주게 된다.

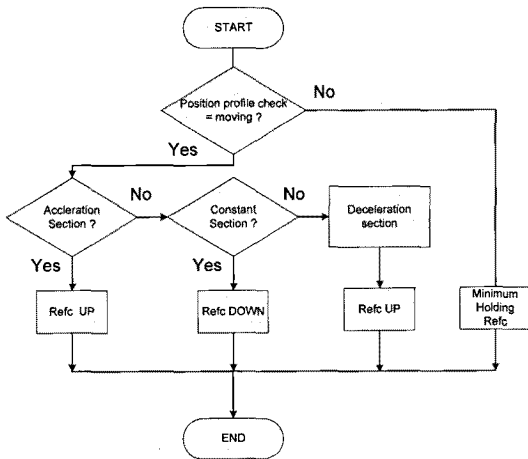


Fig. 7 Flowchart of VRC control scheme

3.2 VRC 제어기의 구현

VRC 제어기는 스텝 모터가 낮은 가속도로 회전시에는 기준 전류를 변경해 주므로 진동 및 소리 잡음을 줄일 수 있고, 또한 탈조의 발생을 억제하며, 전류 소모량 또한 줄이는 효과를 가져온다. 본 VRC 제어기는 FPGA (Altera cyclone II, DE2 board 사용)를 사용하여 구현하였으며, Fig. 8 은 본

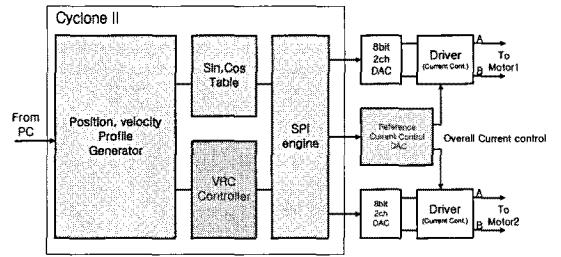


Fig. 8 Block diagram of VRC controller

연구에서 제안한 팬-틸트 카메라 모션 제어기의 하드웨어 블록도를 나타낸 것이다.

FPGA 상에 프로파일 생성부, 마이크로 스텝핑 구동 테이블 및 로직, SPI 통신 모듈, VRC 제어 로직이 있으며, 외부에 두 개의 8bit DAC 와 기준 전류 제어용 DAC, 마지막으로 모터 출력제어를 위한 드라이버(H-Bridge)로 구성되어 있다.

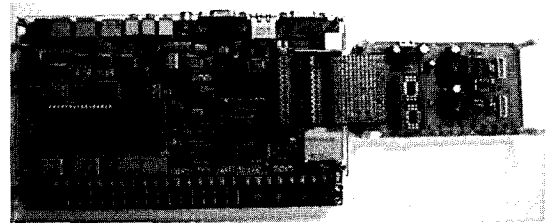


Fig. 9 FPGA board and driver board

VRC 의 전류 제어는 기준전류 제어용 DAC 를 사용하여, 식(3)의 코일에 흐르는 기준전류 I_0 를 제어하며, 드라이버 특성을 고려한 A 상에서의 출력 전류를 구하면, 식(18)과 같다.¹³

$$I_A = 0.18 \cdot (I_{rc} \cdot \sin \theta / R_S) \quad (18)$$

4. 실험

4.1 진동실험

본 연구에서 설계, 제작한 VRC 제어기의 저진동 성능을 수치적으로 검증하기 위하여 팬-틸트 카메라 몸체에 3 축 가속도계를 부착하여 0~180° 회전 시에 고정 기준 전류가 흐를 때와 VRC 제어를 사용하여 기준 전류를 제어할 때에 Z 방향으로의 진동의 차이를 측정하였다. Fig. 10 은 실험장치에서의 출력단 부분의 신호 블록선도이며, Fig. 11 은 구동시 본체의 진동 측정을 위하여 가속도계가 부착된 모습이다.

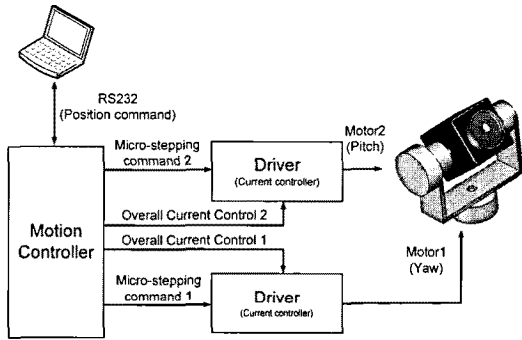


Fig. 10 Block diagram of the experimental system

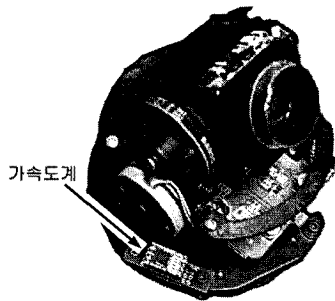


Fig. 11 Experimental system with an accelerometer

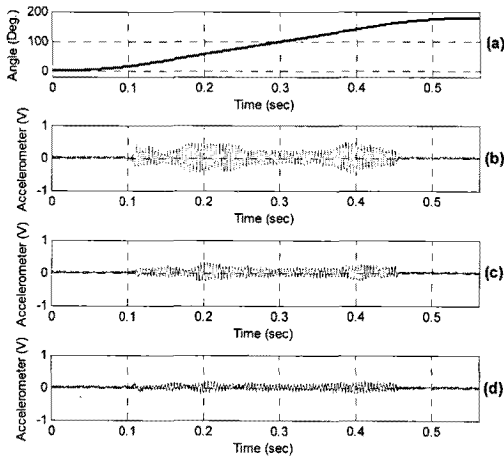


Fig. 12 Vibration test(64 micro-step), (a) position profile, (b) vibration at const. reference current 430mA, (c) vibration at const. reference current 180mA, (d) vibration by VRC control scheme

Fig. 12, Fig. 13 은 각각 64 채배와 128 채배의 마이크로 스텝핑 구동시 카메라 몸체에 발생하는 진동의 양을 가속도계로 진동량을 측정하여 그래프로 도시한 것이다. 비교의 대상이 되는 기준전

류 값으로는 고정 430mA 와 180mA 를 사용하였는데, 이를 안전계수로 환산하면 가속시 탈조가 일어나지 않는 상한선의 3 배 및 1.2 배 정도의 값이다.

Table 1 은 Fig. 12, Fig. 13 의 진동 측정값을 m/s^2 으로 환산하여 RMS 값으로 표현한 것이며, VRC 제어를 사용했을 때 평균적으로 진동량이, 430mA 사용시보다 약 63%, 180mA 사용시보다 약 30% 정도 감소하였다.

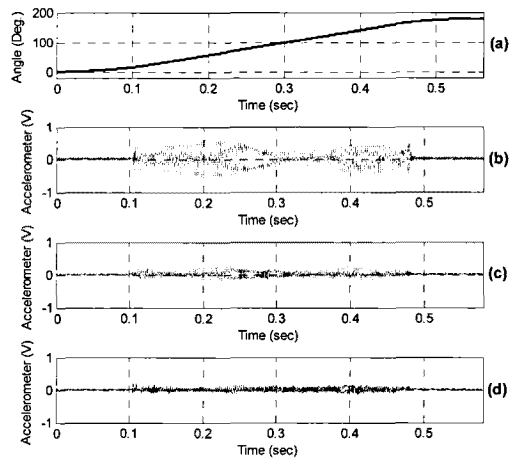


Fig. 13 Vibration test(128 micro-step), (a) position profile, (b) vibration at const. reference current 430mA, (c) vibration at const. reference current 180mA, (d) vibration by VRC control scheme

Table 1 RMS values of vibration

Micro-stepping resolution	Fixed 430mA	Fixed 180mA	VRC
RMS value of 64 micro-step	3.16 m/s^2	1.78 m/s^2	1.26 m/s^2
RMS value of 128 micro-step	3.08 m/s^2	1.50 m/s^2	1.04 m/s^2

4.2 전류 소비량 측정

전류 소비는 팬-틸트 카메라 시스템의 진동 및 소리 잡음에 밀접한 관계가 있다.¹⁴ 일반적으로 동일 프로파일로 구동시 전류소비가 많을수록 본체의 진동은 심해진다. 본 실험에서는 팬틸트 카메라의 Yaw 축을 0~180° 로 3.5 초간 6 번 회전시키면서, 고정 기준전류로 430mA 와 180mA 사용시의 전류 소비량과 VRC 제어기사용시의 전류 소비량을 측정하였다.

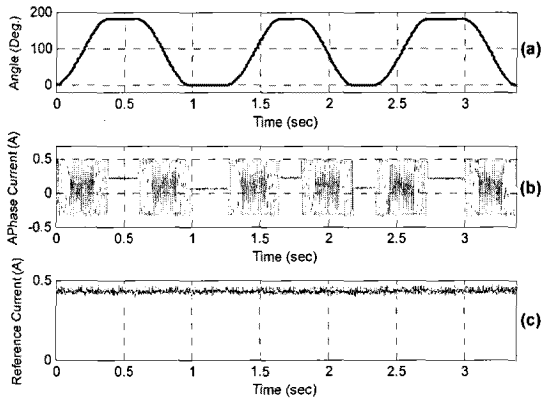


Fig. 14 Coil current consumption test(constant 430mA reference current), (a) position profile, (b) phase A coil current, (c) reference current input

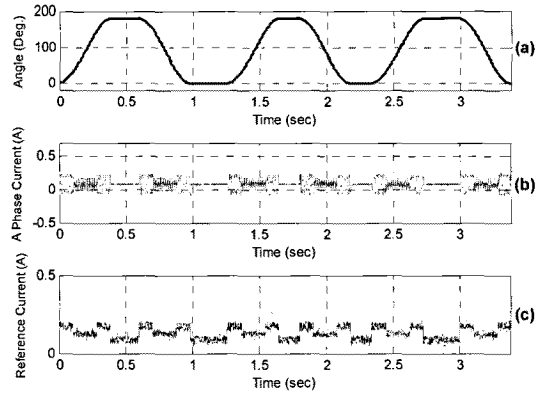


Fig. 16 Coil current consumption test(VRC control scheme), (a) position profile, (b) phase A coil current, (c) reference current input

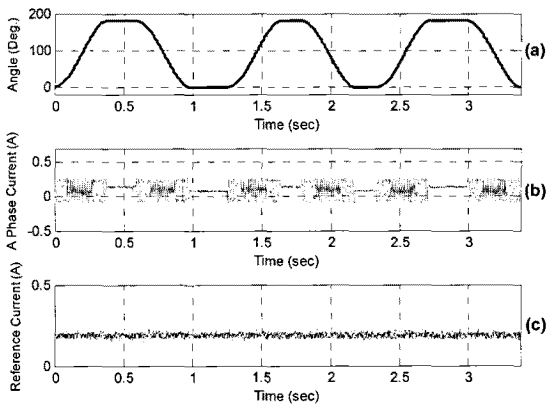


Fig. 15 Coil current consumption test(constant 180mA reference current), (a) position profile, (b) phase A coil current, (c) reference current input

Table 2 는 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 의 데이터를 RMS 값으로 수치화 하여 나타낸 것이다. 다른 두 가지 경우보다 VRC 제어기를 사용했을 때 전류 소모가 각각 57%, 16% 감소한 결과를 확인할 수 있다.

Table 2 RMS value of phase A current at each condition

	Fixed 430mA	Fixed 180mA	VRC
RMS value of A phase current in motor	250mA	128mA	107mA

5. 결론

본 논문에서는 팬-틸트 카메라의 고속 마이크로 스텝핑 구동시 보다 진동이 적으면서도 탈조를 방지할 수 있는 VRC 제어기를 설계 및 구현하고 이를 실험하였다. VRC 마이크로 스텝핑 제어기는 탈조가 일어나지 않는 안정영역 내에서, 자동으로 모터의 구동 프로파일의 구동가속도에 따라 기준 전류를 바꾸어 주어 진동 및 소음을 감소시킨다.

본 연구의 실험결과, 최소의 고정적인 기준 전류값(180mA)을 가지는 경우의 제어보다도 진동의 RMS 값과 전류소모 값이 각각 30%, 16% 정도 감소함을 확인할 수 있었으며, 진동의 감소는 저속으로 움직이는 고배율의 팬-틸트카메라의 성능을 확연히 향상시킨다.

VRC 제어기는 팬-틸트 카메라뿐 아니라 일반적인 고속 마이크로 스텝핑의 저진동 제어에도 사용가능하며, 본 연구에서는 FPGA 기술을 사용하여 저진동과 동시에 고속운전(378kpps) 제어가 가능하도록 구현하였다. 실험 결과는 VRC 제어기의 진동 및 전류 감소 효과를 잘 보여준다.

참고문헌

1. Shin, G. B., Lee, J. W. and Oh, J. H., "A Study on the Micro Stepping Drive to Reduce Vibration of Step Motor," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 118-127, 1997.
2. Takashi, K., "Stepping motors and their

- microprocessor controls,” Clarendonpress Oxford, 1984.
3. Fredrikson, T. R., “Microstepping - a new control concept for rotary step motors,” Proc. of 4th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. HH-1-HH-6, 1975.
 4. Leenthouts, A. C., “Compensation techniques in micro-stepping,” Proc. of 15th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 175-180, 1986.
 5. Zhang, X., He, J. and Sheng, C., “An Approach of Micro-stepping Control for the Step Motors Based on FPGA,” IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 125-130, 2005.
 6. Chen, W., Wen, Z., Xu, Z. and Wang, J., “Implementation of 2-axis Circular Interpolation for a FPGA-based 4-axis Motion Controller,” IEEE International Conference on Control and Automation, pp. 600-605, 2007.
 7. Kuo, B. C., Kelemen, A., Crivii, M. and Trifa, V., “The Incremental Motion Control Systems,” Editura Tehnica, 1981.
 8. Lee, K.-W., Chang, W.-S. and Yoo, J.-Y., “Development of Micro-stepping Drive Circuit of Step Motor and Parallel Operation Controller,” KIPE, pp. 56-59, 1996.
 9. Albu, M., “Micro-stepping System for Low Speed Step Motor Control,” Proceedings of the 9th National Conference on Electrical Drives, pp. 247-250, 2005.
 10. Chen, T.-C. and Su, Y.-C., “High Performance Algorithm Realization on FPGA for stepper Motor Controller,” SICE Annual Conference, pp. 1390-1395, 2008.
 11. Jeong, Y. H., Yun, S. H. and Cho, D.W., “Analysis of the Characteristics of the Feed motor Current for the Estimation of the Cutting Force in General Cutting Environment,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 93-100, 2002.
 12. Clarkson, P. J. and Acarnley, P. P., “Closed-Loop Control of Stepping Motor Systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 4, pp. 685-691, 1988.
 13. New Japan Radio, “NJM3771 Dual Stepper Motor Driver,” New Japan Radio Datasheets.
 14. Kim, J. H. and Lee, H. I., “High Precision Stepping Motor Using Terfenol-D Actuators: Its Performance Test,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 220-226, 2000.