

무인 ATV 엔진 스로틀 액츄에이터의 안티 와인드업 PID 제어

김 순 태, 정 진 구, 좌 동 경, 홍 석 교
아주대학교 전자공학과

Anti-windup PID Control of Engine Throttle Actuator in Autonomous ATV

Soontae Kim, JinGu Jung, Dongkyoung Chwa, and Suk-Kyo Hong
Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

Abstract - 본 논문에서는 무인화 ATV 엔진 액츄에이터의 시스템 특수성을 고려한 PID 제어기의 설계를 통하여 종방향 구동을 담당하는 DC 모터의 위치제어 성능을 향상시켰다. DC 모터의 문턱 전압과 마찰력으로 인한 데드존(Dead zone)을 고려하였으며, DC 모터에 연결된 액츄에이터 와이어에 의한 복원력에 대한 영향을 최소화 시켰다. 또한 DC모터의 위치를 판별하는 엔코더의 분해능을 감안하여 제어기 설계에 반영하였고, 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

1. 서 론

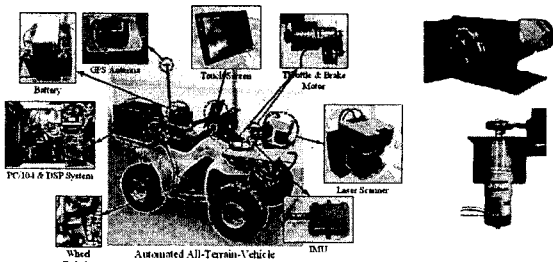
차량의 자동화에 있어서 가장 중요한 요건은 무엇보다도 안전하고 신뢰할 수 있는 제어 알고리즘이다. 특히 차량의 엔진 구동을 담당하는 액츄에이터의 제어는 더욱더 정확성과 신속성을 요구한다. 본 논문에서는 DC모터를 이용, PID 제어를 통하여 스로틀 밸브의 열림과 브레이크의 잠김을 조절함으로써 무인화 ATV의 엔진 구동을 담당하는 액츄에이터를 제어하였다. PID 제어는 그 역사가 오래되었고, 이미 많은 논문에서 그 신뢰성과 효율성이 입증되어왔기 때문에 여러 분야에서 널리 사용되는 기법이다.

그러나 실제 시스템은 이상적일 수 없고, 또한 시스템을 구성하는 하드웨어의 특수성에 의존하기 때문에 이를 고려한 보상된 PID 제어기의 설계가 필요하게 되었다. DC모터가 동작하기 위한 최소의 문턱 전압과 모터에 연결된 각종 로드(Load)에 의하여 데드존이 형성된다[1]. 게다가 DC모터가 스로틀과 브레이크를 당기는 와이어에 연결되어 있기 때문에 와이어의 복원력에 영향을 받는다. 따라서 출력의 신속한 오차 수렴과 안정을 위해서는 시스템 모델의 특징을 고려하지 않은 단순한 PID 이득의 튜닝으로는 수행 능력에 한계가 있다[2]. 또한 차체의 진동은 DC 모터의 위치 정보를 전송하는 엔코더에 영향을 주기 때문에 안전성을 고려하여 인크레멘탈 방식이 아닌 절대값 산출 방식의 엔코더를 사용하였는데, 절대 엔코더는 진동에 의해 잘못된 위치 정보가 오는 것을 막을 수 있지만 인크레멘탈 엔코더에 비해 분해능이 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 절대 엔코더의 분해능에 기인하는 출력값의 불연속성을 고려하여 PID 제어기를 설계한 후 그 성능을 검토하였다.

2. 시스템 구성

2.1 하드웨어 구성

엔진과 브레이크를 구동하기 위해서 그림과 같이 두 개의 DC모터를 설치하였다. 스로틀(throttle) 밸브를 조절하는 스로틀 와이어(wire)를 엔코더(encoder)가 포함된 DC 모터에 연결하였으며 비슷하게 브레이크 토르크를 조절하는 브레이크 와이어에 다른 DC 모터를 연결하였다. 따라서, 모터의 회전 각도를 조작함으로써 스로틀 밸브의 열림량 또는 브레이크 토르크를 조절할 수 있다. 이 때, 모터의 위치각을 절대 엔코더를 사용하여 획득하였다. 이 밖에 제어 알고리즘을 수행하는 프로세서를 비롯하여 ATV의 액츄에이터 제어를 위해 사용된 하드웨어는 <표1>과 같다.



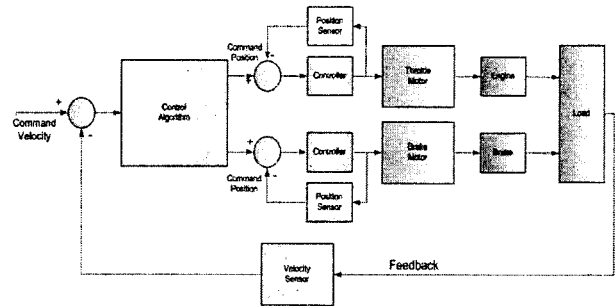
<그림 1> 무인 ATV의 하드웨어 시스템 구성도

<표 1> 하드웨어 구성

Type	Model	Manufacturer
Absolute Encoder	TRD-NA720NW	Koyo Electronics
DC Motor	IG-42GM	D&J Corp
DSP	DSP2811	Realsys

2.2 종방향 제어 시스템 구성

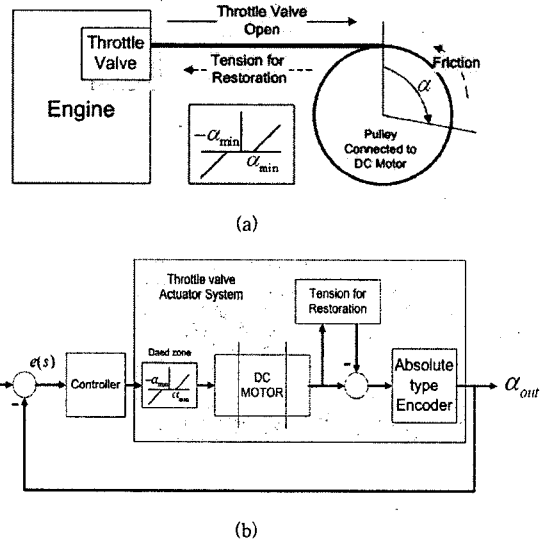
무인 ATV의 종방향 속도를 제어하기 위하여 <그림1>과 같이 시스템을 구성하였다. 여기에는 최종적인 바퀴 속도를 제어하기 위한 상위제어기와 목표 속도를 제어하기 위해 스로틀과 브레이크 액츄에이터를 제어하는 로컬제어기(Local controller)가 포함되어있다. DSP(Digital signal processor)를 사용하여 각 제어기를 구현하였으며, 본 논문의 대상인 로컬제어기에서는 명령각과 출력각을 입력받아 제어 알고리즘을 수행하고, 이 때 연산된 모터 인가 전압을 PWM 방식으로 출력한다.



<그림 1> 종방향 제어 시스템의 개요도

2.3 스로틀 액츄에이터 모델의 분석

<그림2> (a)에 스로틀 액츄에이터 모델의 개략도를 나타내었다. DC모터의 오프셋 전압과 마찰력으로 인하여, 입력값과 출력값에 대한 데드존이 형성된다. 또한, 모터 풀리(Pulley)에 연결된 와이어에 의한 복원력은 DC모터의 출력에 대한 저항성분으로 정의될 수 있다.



<그림 2> 스로틀 액츄에이터의 (a) 모델 개략도와 (b) 시스템 블록도

모델의 개략도를 기반으로 <그림2> (b)와 같이 시스템 제어를 위한 블록도를 구성하였다. 시스템에 존재하는 데드존의 문턱값 α_{min} 은 모터가 동작하기 위한 최소 입력값을 측정함으로써 구할 수 있고, $\alpha_{min} = 1.28$ 의 값을 얻었다. 또한 모터 회전에 반작용하는 와이어의 복원력은 시스템에 존재하는 불확실 성분으로 간주할 수 있고, 비례제어기의 이득의 조정을 통하여

이 불확실성에 대한 오차 성분을 감소시킬 수 있다[3]. 본 논문에서는 불확실성을 포함한 시스템을 먼저 Ziegler-Nichols의 방법으로 PID제어 이득을 결정한 후에, 보상을 통하여 불확실성과 데드존의 영향으로 인한 불안정을 최소화 시켰다.

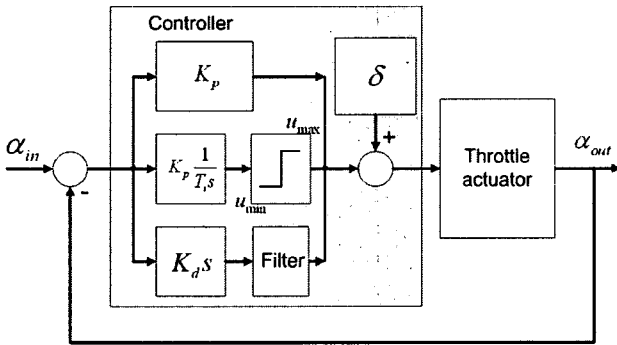
3. 제어기 설계

ATV 동작의 안전성을 고려하여, 스톱를 액츄에이터 제어기 설계를 위한 수행 성능의 조건을 다음과 같이 제한하였다.

1. 시스템의 오버슈트가 5%를 초과하지 않도록 한다.
2. 과도응답의 상승시간이 0.5초 이하가 되도록 한다.
3. 오차의 허용 범위는 엔코더의 분해능을 고려하여 ± 0.5 도 이하로 제한하고, 수렴 시간이 1초를 넘지 않도록 한다.

3.1 제어기 설계 구성도

모델의 불확실성에 의한 PID제어기의 불안정을 보상하기 위하여 <그림3>과 같이 제어 시스템을 구성하였다.



<그림 3> 제어기 설계 구성도

3.2 제어 이득의 결정

임의의 비례 제어 이득을 0에서부터 증가시키면서 진동이 시작되는 이득 값을 구하면, $K_{cr} = 0.26$ 이고, 이 때 진동의 주기 $P_{cr} = 2$ 가 된다. 이 상승 값과 제어기 성능을 토대로 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 PID 제어기의 이득을 구하였다[4].

$$K_p = 0.6 \times K_{cr} = 0.16$$

$$T_i = 0.5 \times P_{cr} = 1.0$$

$$T_d = 0.125 \times P_{cr} = 0.25$$

3.3 데드존(Dead zone)의 보상

스톱를 액츄에이터 모델에 존재하는 데드존은 시스템의 응답이나 오차 수렴 시간을 현저하게 떨어뜨린다. 데드존의 영향을 제거하기 위하여 보상기 δ 를 제어기의 출력단에 추가하였고, 앞에서 구한 α_{min} 을 통하여 δ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta = \begin{cases} \alpha_{min} = 1.28 & \text{if } 0 < e < 1.28 \\ 0 & \text{if } e = 0 \\ -\alpha_{min} = -1.28 & \text{if } -1.28 < e < 0 \end{cases}$$

3.4 적분 성분의 한계점 설정

PID제어기의 적분 값이 일정 수준 이상으로 벗어나게 되면 오차가 0이 되는 지점 부근에서 수렴하지 못하고 진동하는 와인드업(Windup) 현상이 발생하게 된다. 따라서 적분의 한계점을 설정하고, 적분 값이 한계점을 넘지 못하도록 조건적인 적분을 수행하여 오차를 빠르게 수렴시키도록 하였다. 이 때 적분 값의 한계점 u_{max} 와 u_{min} 은 다음과 같이 구할 수 있다 [5-6].

$$K_p \left(0.5 + \frac{1}{T_i} \times u_{max} + T_d \times \frac{\Delta e}{\Delta t} \right) = \delta = 1.28$$

$$K_p \left(-0.5 + \frac{1}{T_i} \times u_{min} + T_d \times \frac{\Delta e}{\Delta t} \right) = \delta = -1.28$$

이 때 오차 허용 범위 $-0.5 \sim 0.5$ 영역에서 $\frac{\Delta e}{\Delta t} = 0$ 이므로,

$$u_{max} = 7.5 T_i = 7.5, \quad u_{min} = -7.5 T_i = -7.5 \text{가 된다.}$$

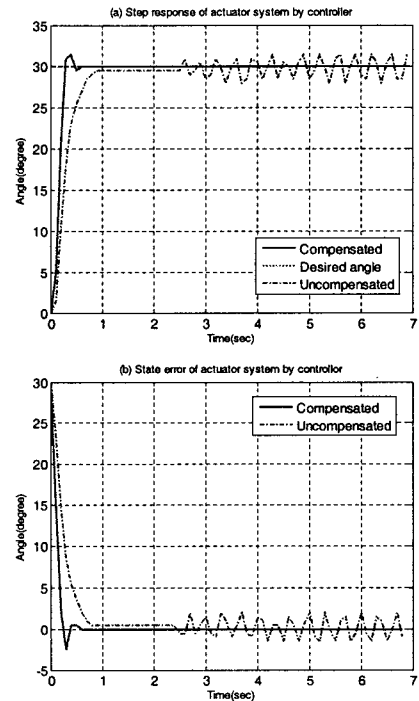
3.5 미분 제어를 위한 필터 설계

미분기에 의한 잡음의 영향을 줄이기 위해 필터를 설계하였다. 필터가 추가된 미분 제어기의 함수는 $T_d s \left(\frac{N}{T_d s + N} \right)$ 이고, PID 제어기 원점의 분석

을 통하여 미분 제어기의 필터를 설계하였다. 실험을 통하여, $N=100$ 으로 결정하였다[7-8].

4. 실험 결과

3장에서 보상된 PID 제어시스템에 대한 단위 응답과 오차에 대한 응답을 <그림4>의 (a)와 (b)에 나타내었다. 데드존과 와인드업 현상을 고려하지 않은 PID 제어시스템에서는 일정 시간동안 오차가 수렴하지 못하는 현상이 발생하였고, 시간이 지나면서 진동하는 현상이 지속되었다. 그러나 보상 설계된 시스템에서는 이 진동 현상이 제거되었고 오차 수렴시간은 0.56초를 보였으며, 상승시간은 0.32초, 초과응답 5%로써 수행 성능 조건에 부합한 결과를 얻었다.



<그림 4> 시스템의 단위 응답(a)와 오차의 응답(b)

5. 결론

본 연구에서는 ATV 종방향 구동 제어를 위한 스톱를 액츄에이터 모델의 특수성을 감안하여, 기존의 PID 제어기의 한계를 보상하고 문제점을 해결하였다. 실험적 방법을 통하여 시스템에 존재하는 불확실성과 비선형성을 극복하고자 하였다. 마찰력과 와이어의 장력으로인한 데드존과 와인드업 현상을 보상하는데 중점을 두었고, 실험을 통하여 향상된 성능을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 R01-2006-000-11373-0 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] Norman S. Nise, "Control Systems Engineering", 4th Edition, pp. 97-99, 2004.
- [2] B. W. Bequette, "Process Control-Modeling, Design, and Simulation", Prentice Hall, USA, 2003.
- [3] K. H. Ang, G. Chong and Y. Li. "PID control systems analysis, design, and technology". IEEE Transactions on Control Systems Technology 13, 559-576, 2005.
- [4] Åström, K. J. and T. Häggglund, "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control", Journal of Process Control 14, 635-650, 2004.
- [5] M. V. Kothare, P. J. Campo, M. Morari and C. N. Nett, "A Unified Framework for the Study of Anti-windup Design", Automatica 30, 1869-1883, 1994.
- [6] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID anti-windup Strategies", IEEE Control Systems Magazine pp. 34-40, 1995.
- [7] J. Garry and F. G. Shinskey, "PID Controller Specification", available on-line at www.expertune.com/PIDspec.htm, 2005.
- [8] A. Leva and A. M. Colombo, "IMC-based Synthesis of The Feedback Block of ISA-PID Regulators", Proceeding 6th European Control Conference, Porto, P.pp. 196-20, 2001.