

삼타어뢰의 퍼지 비연성 디지털 제어기 구현

원태현, 박병철, 구분순
국방과학연구소

Implementation of Fuzzy Decoupling Digital Controller for Three Fin Torpedo

Tae-Hyun Weon, Byung-Chul Kwak, Bon-Sun Koo
Agency for Defence Department

ABSTRACT

A fuzzy digital controller is combined an autopilot system for compensating the cross coupling effect of the induced roll due to the dynamic characteristic of three fin torpedo. However the utilization of fuzzy chip has many interfacing problems with typical microprocessors of the guidance and control unit.

Since a fuzzy digital controller on a microprocessor uses a finite word length A/D converters and D/A converters, ADC and DAC may generate nonlinear effects such as deadband and limit cycle phenomena.

In this paper, the robustness of fuzzy digital controller is tested with ADC a finite word length.

1. 서론

퍼지 제어는 강인성이 뛰어나 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있으나, 퍼지 칩(chip)의 단순한 기능으로 인하여 여러 가지 기능을 동시에 요구하는 복합 시스템에 적용하는 것은 매우 힘들며, 또한 적용하더라도 시스템이 복잡해지는 문제가 발생하게 된다.

또한 이러한 퍼지 제어에 관한 연구들이 실용화에 필요한 구체적인 제시들이 없으므로 본 논문에서는 디지털 마이크로 프로세서를 이용하여 복합 시스템들이 요구하는 기능을 제공하면서도 퍼지제어가 가능하도록 하였다.

그러나 마이크로 프로세서를 이용하여 제어기를 구현하는 경우에 필요한 A/D 변환기(ADC)와 D/A 변환기(DAC)로 인하여 양자화 오차(Quantization Error)가 발생하므로 이에 대한 분석이 요망된다.

본 연구에서는 마이크로 프로세서를 이용하여 디지털 퍼지 제어기를 설계하였을때 발생할 수 있는 여러가지 제한 요소들을 검토하고 유한 단어 길이를 갖는 A/D 변환기와 D/A 변환기가 퍼지 제어기의 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

이를 위하여 복합 시스템중 하나인 삼타 어뢰(three fin torpedo)에 마이크로 프로세서를 적용하여 퍼지 제어기를 설계하였을 경우 A/D 변환기와 D/A 변환기가 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

삼타 어뢰는 요(yaw) 평면 기동시에 미부(tail)에 발생하는 모멘트가 롤 운동에 상호 결합(cross coupling)현상이 심하여 성능에 심각한 영향을 미친다. 또한 상호 결합 현상을 수학적으로 모델링하기 어려울뿐 아니라 진진 속도와 부력동의 상태에 따라 변하는 동특성의 비선형성이 매우 커서 제한적인 선형화를 이루었다고 하더라도 설계된 제어기의 성능을 보장하기가 힘들다. 본 연구에서는 롤 제어기로 퍼지 제어기를 적용하였다.

2. 삼타 어뢰의 모델^[1]

삼타 어뢰의 6 자유도 운동 방정식을 Germann이 행진 속도(sideslip velocity) v , 롤 각속도 p , 요 각속도 r 의 3자유도로 축소한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m_2 \dot{v} = \frac{1}{2} \rho A C_D V_a^2 - m_1 r u + m_2 p w - m h_z (q r - \dot{p}) \quad (1)$$

$$J_x \dot{p} = \frac{1}{2} \rho A d C_L V_a^2 + K_p p - w h_z \sin \phi + m h_z (\dot{v} - p w + r u) \quad (2)$$

$$J_y \dot{r} = \frac{1}{2} \rho A L C_N V_a^2 - (J_y - J_x) p q \quad (3)$$

여기서 v 를 각과 y 각의 정의는 그림 1과 같고, i 번째 조종 날개의 조종각 δ_i 는 날개축이 시계 방향으로 회전하는 것으 양의 방향으로 정한다.

위의 비선형 상미분 방정식을 선형화하고, 구동 장치의 동특성을 합친 전달함수는 식(4)와 같은 2입력 2출력 다변수 시스템이 된다.

$$\begin{bmatrix} p(s) \\ r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SPLAY(s) \\ RUDD(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

전달 함수의 행렬 요소는 참고 문헌 [1]에서 인용한 삼타 어뢰의 제원을 이용하여 표 1과 같이 얻어진다.

3. 퍼지 제어기(Fuzzy Logic Controller)

삼타 어뢰의 모델에서 y 명령이 주어지면, 상호결합 효과에 의해 유도 롤(induced roll)과 롤 각속도가 발생한다. 롤 각도와 롤 각속도를 측정하여 퍼지 제어기는 유도 롤을 보상할 수 있는 SPLAY 명령을 결정한다. 그림 2는 삼타 어뢰의 전체 블록 선도이다.

본 논문은 비 퍼지 프로세서에 근기한 퍼지 제어기를 설계하기 위하여 단순화 추론 기법^{[2][3]}을 적용하였다. 퍼지 제어는 언어 변수를 이용하여 식(5)와 같은 비선형 디지털 제어기로 처리하였다.

$$SPLAY(k) = FLC\{R(e(k)), RR(ec(k))\} \quad (5)$$

FLC는 그림 3의 규칙 기반(Rule Base)에 의하여 정의되는 퍼지 제어기를 의미한다. 여기서 v 를 각도의 오차 $e(k)$ 와 롤 각속도 $ec(k)$ 는 크리스프한 값으로 측정되며, R 은 롤 각도의 언어 변수이고 RR 은 롤 각속도의 언어 변수이다.

퍼지 논리는 멤버십 함수와 규칙 기반을 이용한 퍼지 합과 규칙 추론을 합성하여 가장 가능성 높은 결론을 얻기 위한

일반적인 퍼지 규칙은 식(6)과 같다.

$$\text{ ALSO(IF } (R \text{ is } A_i \text{ AND } RR \text{ is } B_j) \text{ THEN } \text{SPLAY is } C_i) \text{ (6)}$$

여기서 A_i, B_j, C_i 는 "NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB"인 속성으로 멤버십 함수(Membership Function)에 의하여 정의된다. 그리고 아래첨자 i 는 규칙의 번호이다.

4. 제한요소들에 의해 발생하는 오차들

마이크로 프로세서를 이용하여 제어기를 구현하였을 경우 제어기의 성능을 저하시키는 요소들^(4,5,6,7)은 CPU의 유효 단어 길이, 샘플링 시간(sampling time), 제어 알고리즘을 수행하는데 소요되는 시간(delay time), 아날로그 입력 신호를 디지털로 변환할때 발생하는 양자화 오차 및 디지털 정보를 아날로그값으로 변환할때 발생하는 양자화 오차등이 있다.

이를 정리하면 다음과 같이 구분할 수 있다.

1. 샘플링되는 아날로그 신호에 의해 발생하는 오차 (ADC quantization error)
2. 산술 연산시 발생하는 truncation 혹은 roundoff 오차
3. 상수 및 변수 저장시 발생하는 오차
4. 제어 알고리즘 수행시 소요되는 시간 지연(time delay)
5. 제어기 출력을 아날로그 값으로 변환할때 발생하는 오차 (DAC quantization error)

마이크로 프로세서에서 일반적으로 실수 연산을 수행할 경우 수치 연산 프로세서의 도움을 받거나 에뮬레이션(emulation)을 이용하도록 되어 있다. 에뮬레이션을 이용하는 경우 제어 알고리즘을 수행하는데 소요되는 시간이 길어지므로 샘플링 주기를 길게해야 하는 문제가 있으므로 본 연구에서는 수치 연산 프로세서를 사용하는 것으로 가정하였다. 즉 산술 연산시 발생하는 오차나 상수 및 변수를 저장할때 발생하는 오차는 무시할 수 있다.⁽⁶⁾⁽⁸⁾ 특히 퍼지 제어기는 역퍼지화(Defuzzify)시에 나눗셈이 요구되는데 이를 고정 소수점 연산으로 처리할 경우 정확도가 떨어지는 문제가 있다.

제어 알고리즘 수행시 소요되는 계산 시간 지연은 샘플링 시간보다 작거나 같도록 결정해야 한다. 본 연구에서는 샘플링 시간을 5msec로 하고 계산 시간 지연은 최대 3msec이내로 하였다. 샘플링 시간은 하드웨어의 계산 능력을 고려하여 샘플링 시간의 80%이내가 되도록 결정하였다.

일반적으로 구현되는 디지털 제어기의 레환 신호들은 아날로그 신호들이므로 A/D 변환기가 요구되며, 구동 장치를 구동시키기 위하여 D/A 변환기가 요구된다.

ADC를 사용할 경우에 실제 측정된 값과 A/D 변환후의 값은 ADC의 유효 단어 길이로 인하여 오차가 발생한다.

ADC의 비트수를 $(C+1)$ 비트로 사용한다면 LSB q 는 2^{-C} 로 표현할 수 있다. 여기서 q 는 ADC의 해상도(resolution)를 나타내며 입력 신호의 범위(ADRANGE)와 함께 ADC의 deadband는 식(7)과 같이 결정된다.

$$\text{ADC deadband} = \text{ADC RANG E} \times q \quad (7)$$

ADC의 유효 단어 길이는 제어기의 설계 사양의 limit cycle과 ADCRANGE를 만족하도록 선택하여야 한다. 그러나 일반적으로 limit cycle에 대한 설계 사양이 제시되지 않으므로, 본 연구에서는 12비트와 16비트 ADC를 이용하고 플 각도인 경우 ADCRANGE를 $\pm 180^\circ$ 이내, 플 각속도는 $\pm 200^\circ/\text{sec}$ 이내에서 값을 조정하면서 ADCRANGE에 대한 영향을 검토한다.

DAC의 단어 길이는 구동 장치의 동작 영역에 의해 결정할

수 있다. 본 연구에서는 구동 장치의 최대 동작 각도를 $\pm 20^\circ$ 이내로 하고, 12비트와 16비트 DAC를 이용할 경우의 영향을 검토 분석한다.

5. 시뮬레이션

ADC의 양자화 오차가 퍼지 제어기의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 12비트 ADC와 16비트 ADC를 사용할 경우 발생하는 deadband를 검토하고 시뮬레이션하였다.

표 2는 시뮬레이션에 적용한 ADC의 ADRANGE와 ADC의 비트에 대한 deadband의 범위를 나타내고 있다.

표 2에서 보는 바와 같이 동일한 ADC 비트에서 ADCRANGE를 조정하면 ADC의 deadband가 작아짐을 알 수 있다.

그림 4는 ADC 12비트, DAC 12 비트를 적용하고 플 각도의 ADCRANGE를 180° , 각속도는 $\pm 200^\circ/\text{sec}$ 하고 요 명령이 1° 일때의 플 각도 및 플 각속도에 대한 ADCRANGE를 변경하면서 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

표 2와 그림 4를 검토하면 알 수 있듯이 시스템 최초 설계 시부터 감지기의 측정 범위를 잘 선택하여 적절히 조정하면 동일한 기능의 ADC로 제어기의 성능이 향상될 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 ADCRANGE는 최대값으로 두고 ADC와 DAC의 비트수에 의한 영향으로 발생하는 플 각도 limit cycle을 비교 검토하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 ADC의 비트수가 16비트인 경우에는 limit cycle이 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며, DAC의 영향은 거의 나타나지 않는다.

삼타 어뢰 플 제어기의 설계 사양은 90도의 요 스텝 명령에 대하여 유도 플이 2도이내로 유지하는 것이다.

본 연구 결과 ADC의 영향으로 인하여 비록 설계 사양에는 만족되나 정상 상태에서 약 0.04도 정도의 limit cycle이 발생하고 있다.

그러나 크기가 작은 limit cycle이 발생하였을 경우 시스템에 미치는 영향은 일반적으로 동작 영역이 저주파인 구동 장치의 역학적 특성에 의해 거의 나타나지 않는다.

6. 결론

본 연구에서는 삼타 어뢰의 요 운동에 의한 상호 결합에 의한 유도 플을 보상하기 위하여 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 퍼지 제어기를 설계하였고, 디지털 퍼지 제어기 설계하였을 경우 발생하는 제한 요소중 ADC 및 DAC의 영향에 대하여 분석하였다. 디지털 퍼지 제어기는 ADC의 양자화 오차에서 발생하는 영향에도 불구하고 그 성능에 큰 영향이 없음을 알 수 있으며, 그 설계 자유도도 다양함을 알 수 있다.

참고문헌

1. B.A. Stacey and M.A. Smith "Fuzzy Control of Three Fin Torpedo", American Control Conference, pp. 1474~1478, 1990
2. 원 태현, 남 세규, 구 본순, 이 만형, 유 완석, "삼타 어뢰의 퍼지 제어를 위한 실시간 시뮬레이션", KACC, pp.869~873, 1992
3. S.K. Nam and S.H. Kwon, W.S. Yoo, M.H. Lee, W.S. Jeon "Robust Fuzzy Control of a Three Fin Torpedo", J.SNAJ, Vol173, pp.231~235, 1993
4. C.L. Phillips and H.T. Nagle "Digital Control System Analysis and Design", prentice-hall, 1990
5. Paul Katz "Digital Control using Microprocessors", prentice-hall, 1981
6. H. Hanselmann, "Implementation of Digital Controllers - A Survey", Automatica Vol.23, No.1, pp7~32, 1987

7. 임 성훈, "유한 단어 길이 및 시간 지연이 제어 시스템에 미치는 영향에 관한 연구", 서울대 대학원 석사학위 논문, 1987
8. A.B. Sripad & D.L. Snyder "Quantization Errors in Floating Point Arithmetic" IEEE Trans. Acoust., Speech Signal Processing, Vol. ASSP-26, pp. 456-463, Oct. 1978.

표 1 삼타 어퍼 전달 행렬 요소

$$g_{11}(s) = \frac{7600}{s(s+40)}$$

$$g_{12}(s) = \frac{6514(s+6.85)}{s(s+1.91)(s+12.5)(s+40)}$$

$$g_{21}(s) = 0$$

$$g_{22}(s) = \frac{1067(s+3.28)}{(s+1.91)(s+12.5)(s+40)}$$

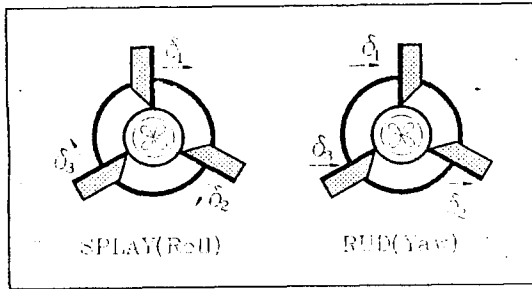


Fig. 1 Actuator Positive Sign Convention

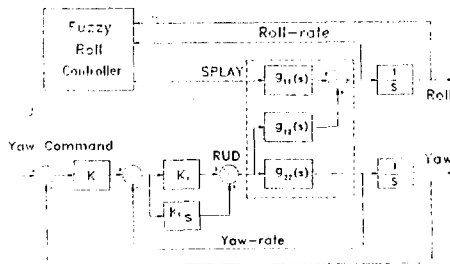


Fig. 2 System Block Diagram

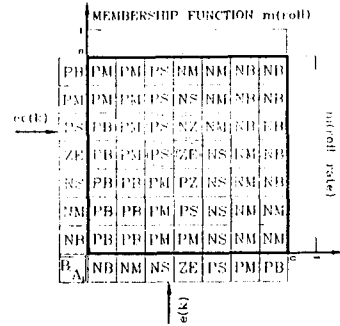


Fig. 3 Fuzzy Rule Base

표 2. ADC ADRANGE와 ADC비트에 대한 deadband의 변화

	ADCRANGE	ADC deadzone	
		12 bit	16 bit
요 각도	180	8.7891e-2	5.4932e-3
요 각속도	200	9.7656e-2	6.1035e-3
롤 각도	180	8.7891e-2	5.4932e-3
	90	4.3945e-2	2.7466e-3
	45	2.1973e-2	1.3733e-3
롤 각속도	200	9.7656e-2	6.1035e-3
	100	4.8828e-2	3.0518e-3
	50	2.4814e-2	1.5259e-3

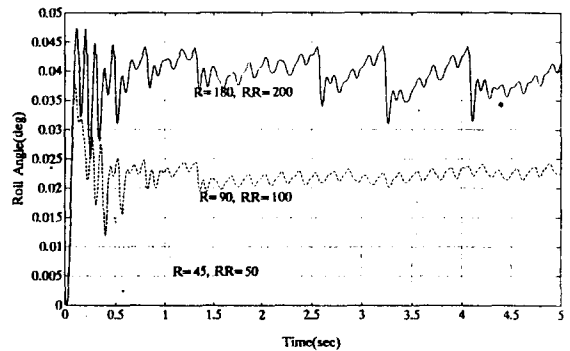
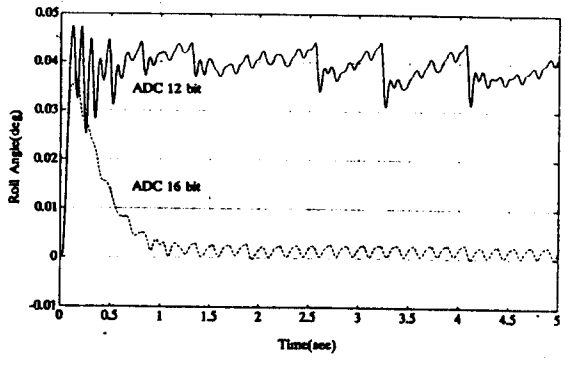
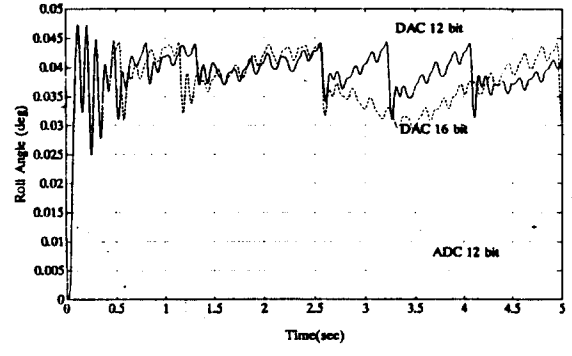


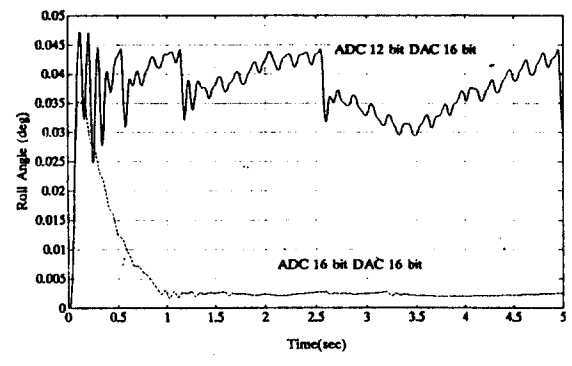
그림 4 ADCRANGE 변화에 대한 Roll Angle (요 명령 1° : ADC & DAC 12비트)



(a) ADC 비트 변화에 대한 Roll Angle
(요 명령 1° : DAC 12비트)



(b) DAC 비트 변화에 대한 Roll Angle
(요 명령 1° : ADC 12비트)



(c) DAC 비트 변화에 대한 Roll Angle
(요 명령 1° : ADC 16비트)

그림 5 ADC & DAC 비트 변화에 대한 Roll Angle