

수중 비행체를 위한 퍼지 논리 기반의 부상 제어기

Fuzzy Logic-Based Blowing Controller for Underwater Flight Vehicle

김현식

Hyun-Sik Kim

동명대학교 로봇시스템공학과

요 약

침수의 경우에, 수중 비행체(UFV : Underwater Flight Vehicle)는 발라스트 탱크들의 내부를 고압 공기로 비워 내어 부상을 수행한다. 그런데, 기존의 blow-off 방법은 가벼운 침수일지라도 부상 후에는 몸체를 수면에 드러나게 한다. 이는 불필요한 임무 실패 또는 몸체 노출의 결과를 가져온다. 따라서, 부상 제어에 의해 침수 및 부상에 의한 오버슈트 심도를 감소 시킴과 동시에 몸체를 수면 근처에 유지시키는 것이 필요하다. 이 문제를 해결하기 위해서 전문가 지식 및 FBFE(Fuzzy Basis Function Expansion)를 사용하는 부상 제어 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘의 성능 검증을 위한 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 UFV 부상 제어 시스템에 존재하는 문제점들을 효과적으로 해결하고 있음을 보여준다.

키워드 : 부상 제어, 전문가 지식, FBFE, 수중 비행체, 발라스트 탱크

1. 서 론

수중 비행체(Underwater Flight Vehicle: UFV)[1]는 하나의 추진기와 여러 개의 제어판(control plane), 여러 개의 탱크(tank)들을 가지고 있으므로 동적 및 정적 제어가 모두 가능하며, 유체 저항이 적으므로 추진에너지 소모 및 음향학적인 소음이 적은 장점을 가지고 있다. 이러한 UFV의 효과적인 적용을 위해서는 자율 제어(autonomous control) 기술을 필요로 하는데, 그 중에서 부력 자동조종(buoyancy autopilot) 분야는 심도 조절(depth regulating)[2]이나 긴급 부상(emergency blowing) 등의 연구에 그치고 있다.

UFV 침수(flooding)의 경우에, UFV는 음성(negative) 부력 상태가 되어 침몰할 가능성이 커진다. 이를 극복하기 위해 공기병(air bottle) 내의 고압 공기(HPA : High Pressure Air) 전체를 배출시켜서 발라스트 탱크(ballast tank) 내의 물을 몸체 밖으로 내보낸다. 동시에, 침수 및 부상 순차에 의해서 발생하는 오버슈트 심도(overshoot depth)를 감소시키기 위해서 제어판 및 추진기를 병행하여 사용한다. 그런데, 기존의 blow-off 방법은 매우 가벼운 침수일지라도 부상 후에는 몸체를 수면에 드러나게 한다. 이는 불필요한 임무 실패 또는 몸체 피탐의 결과를 가져온다. 따라서, 부상 제어를 통하여 오버슈트 심도의 감소와 몸체의 수면 근처 유지가 가능하도록 하여야 한다.

그런데, 요구된 UFV 부상 제어 시스템은 여러 개의 발라스트 탱크와 제어판을 갖는 MIMO 시스템이므로 침수 초기 조건에 의존하는 복잡한 부상 제어 절차를 가지고 있다. 또한, 무게와 같은 시스템 파라미터가 시간에 따라 변화하므로 불확실성을 가지며, 에너지 소모 및 음향학적 관점에서 제어판 명령의 연속성을 필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해서 전문가 지식[3] 및 FBFE(Fuzzy Basis Function Expansion)[3]를 사용하는 부상 제어 알고리즘이 제안되었다.

2. 부상 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 고려된 UFV는 심도 및 피치와 같은 수평면 제어를 위한 제어판으로서 선수 수평타 δ_b 와 선미 수평타 δ_s 를 각각 1개씩 가지고 있으며, 발라스트 탱크로서는 전방 탱크(forward tank) β_f 와 후방 탱크(after tank) β_a 를 각각 1개씩 가지고 있다. 일반적인 6 자유도(DOF : Degree Of Freedom) 운동과 관련된 힘과 모멘트 가운데에서 부상 제어 관점에서 지배적인 성분은 복원(restoring) 성분의 하나인 Z_R 인데, 이 힘은 부력 및 무게(weight)를 포함하므로 본 논문에서는 다음과 같이 모델링하였다.

$$Z_R = (B - W(Q_f, Q_b)) \cos \phi \cos \theta \quad (1)$$

여기서, B 는 부력을 의미하고 W 는 무게를 의미한다. 일반적인 침수 및 부상의 과정은 W 가 변화하는 과정으로 모델링될 수 있다. Q_f 는 침수량(flooding amount)이고, Q_b 는 부상량(blowing amount)이다.

요구된 UFV 부상 제어 시스템은 β_f , β_a , δ_b 및 δ_s 를 각각 1개씩 가지고 있는 MIMO 시스템이며, 침수 이후의 안정적인 부상 제어를 위해서는 CG(Center of Gravity)를 기준으로 한 침수 위치 및 심도 등의 침수 초기조건에 따라서 그 절차가 상이하게 이루어 질 수 있음을 알 수 있었다.

3. 부상 제어 알고리즘의 설계

설계의 첫 번째 단계로서, 심도 제어에 있어서의 전문가 지식을 확장하는 분해법(decomposition method)을 제안하였다. 제안된 UFV 부상 제어 절차는 그림 1과 같은데, δ_b 와 δ_s 는 기구학적으로는 동일하므로 단순화하여 δ 로 표현하였다.

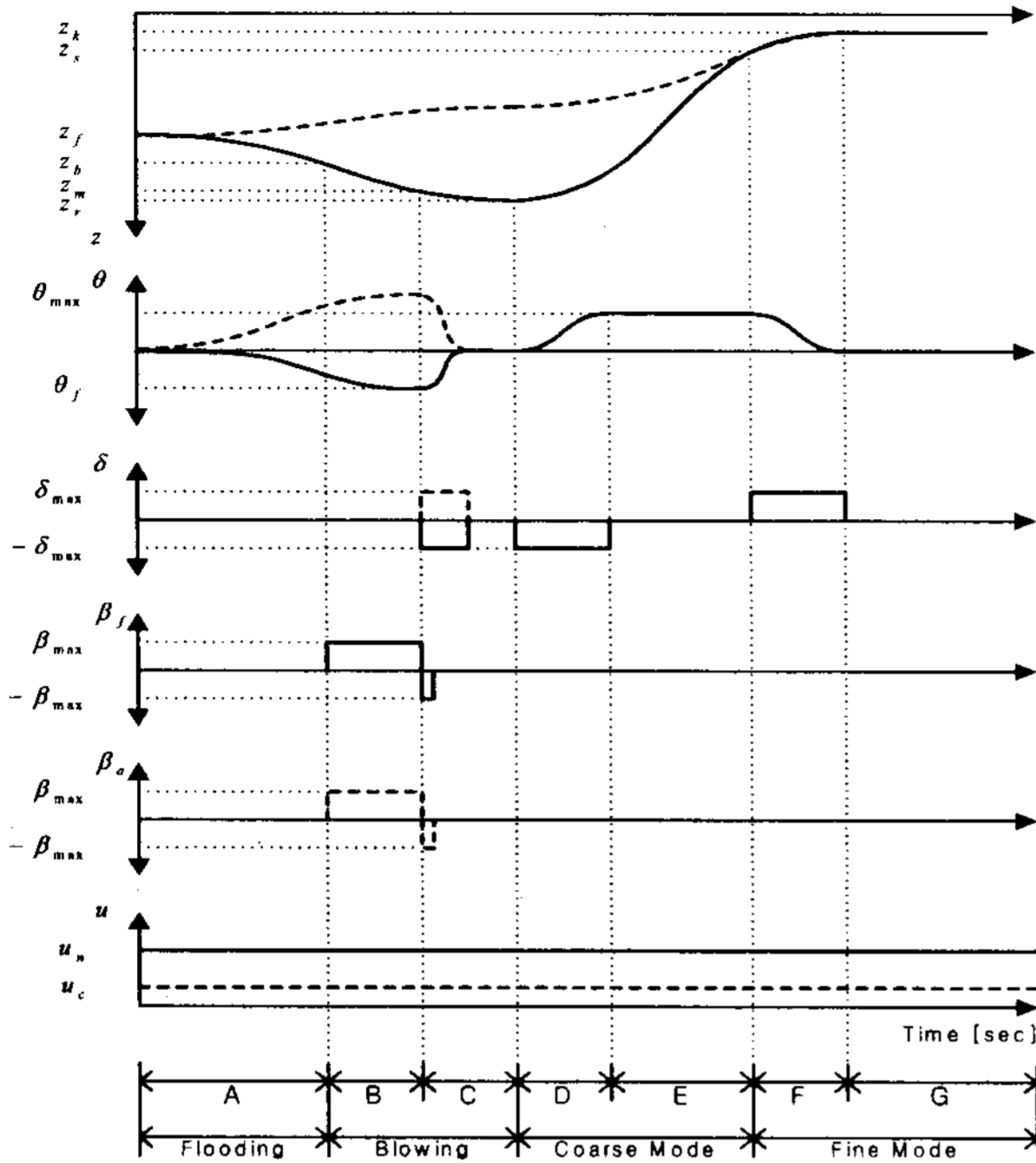


그림 1. UFV 부상 제어 절차.
Fig. 1. UFV blowing control procedure.

그림에서 실선 표시 부분은 전방 침수의 경우에 대한 부상 제어 절차를 나타내고, 점선 표시 부분은 후방 침수의 경우에 대한 부상 제어 절차를 나타낸다. 구간 A~C의 절차를 통해서서는 오버슈트 심도를 감소시킬 수 있으며, 구간 D~G의 피치 및 심도 제어 절차를 통해서서는 몸체를 수면 근처에 유지할 수 있다. 구간 A는 침수 구간이며, 구간 B는 무게 제어 구간, C, D 및 E는 피치 제어 구간, F는 피치 및 심도 제어 구간, G는 심도 제어 구간이다. 이를 통해 UFV 부상 제어 시스템을 무게, 피치, 심도 제어부로 비연성화하였다.

설계의 두 번째 단계로서, 앞의 분해법에 기반한 각각의 부 제어기(sub-controller)에 FBFE들을 부분적으로 사용하는 적응법(adaptive method)을 제안하였다.

우선, 부상 제어를 위한 부 제어기들 가운데 하나로서 무게 제어기는 다음과 같이 설계하였고, 피치 및 심도 제어기는 참고문헌[3]과 동일하다. 무게 제어기는 발라스트 탱크 내의 밸브(valve) 제어를 핵심 내용으로 하는데, 제안된 제어기는 P형 제어기를 사용하였다. 탱크별 기준값 W_r 을 가정할 때, 그 출력 β 는 $|e_w| > W_r$ 인 경우에 대해 다음과 같다.

$$\beta = \begin{cases} K_{out} \text{sat}(|e_w|) Q_b, & \text{if } e_w > 0 \\ K_{in} \text{sat}(|e_w|) Q_f, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $e_w = \Delta W$ 이고, $\text{sat}(\cdot)$ 는 포화함수이다. K_{out} 및 K_{in} 는 각각 물의 배출과 유입에 관련된 이득(gain)이다. 이를 기반으로 한 개별 탱크의 출력은 $\beta_f = \beta_a = \beta$ 이다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 부상 제어 알고리즘의 성능 검증은 UFV의 6 자유도 방정식을 적용하여, 수직면에서의 부상 제어 문제에 대해

서 이루어 졌다. 침수 시나리오는 전방 침수, 후방 침수, 전후방 침수의 순서로 주어졌다. 제안된 제어기의 성능을 비교하기 위해서, 침수 시간과 동일한 시간 동안에 시간당 일정한 비율로 무게 제어가 이루어지는 기존 방식을 고려하였다.

그림 2는 심도 제어 성능을 나타내는데, 기존 방식에 비해서 오버슈트 심도, 수면 유지, 시스템 강인성 등의 관점에서 주어진 부상 제어 문제를 효과적으로 해결하고 있다.

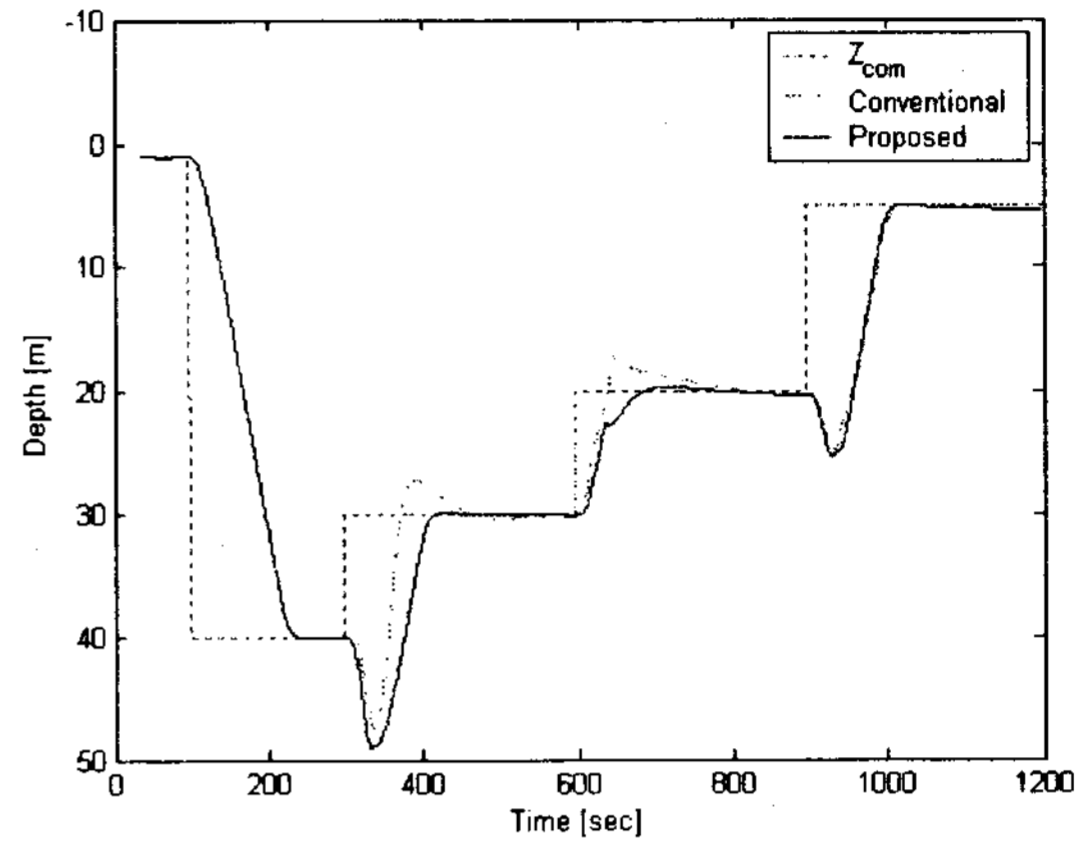


그림 2. 심도 제어 성능.
Fig. 2. Performance of depth control.

5. 결 론

본 논문에서는 전문가 지식을 확장하는 분해법 및 FBFE를 사용하는 부상 제어 알고리즘이 제안되었다.

제안된 알고리즘은 오버슈트 심도를 감소시키고 동시에 오버슈트 없이 몸체를 수면 근처에 유지할 수 있으며, 다양한 침수 초기조건에 비해 단순한 부상 제어 절차를 가지고 있다. 또한, 적응성으로 인해 침수 및 부상 결과에 의한 무게와 같은 시스템 파라미터 변화나 제어판 명령의 연속성 등의 문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 또한, 알고리즘의 구조와 파라미터 관점에서 용이한 설계가 가능하다.

시뮬레이션 결과를 통해서서는 제안된 알고리즘이 주어진 문제점들을 효과적으로 해결할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] R. K. Lea, R. Allen and S. L. Merry, "A Comparative study for control techniques for an underwater flight vehicle," International Journal of System Science, vol. 30, pp. 947-964, 1999.
- [2] Paul A. DeBitetto, "Fuzzy Logic for Depth Control of Unmanned Undersea Vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 20, no. 3, pp. 242-248, 1995.
- [3] H. S. Kim and Y. K. Shin, "Expanded adaptive fuzzy sliding mode controller using expert knowledge and fuzzy basis function expansion for UFV depth control," Ocean Engineering, vol. 34, pp. 1080-1088, 2007.