

쌍동선을 위한 제어기의 구성

박 찬 식
삼성 반도체 통신 (주)

이 장 규
서울공대 제어계측공학과

박 성 희
진해기계창

Controller Design for SWATHS

Chan-Sik Park : Samsung Semiconductor & Telecommunications CO.
Jang Gyu Lee : Dept. of Control and Inst., Seoul National University
Sung-Hee Park : Agency for Defense Development

1. 서론

주어진 제어대상 모델에 대하여 제어기를 구성하여 실제로 적용하는 경우 모델의 불일치, 모델링에서 고려하지 않은 외란 (disturbance), 측정잡음 등에 의하여 성능이 설계시와 달라진다. 실제적용에서도 성능을 계속 유지하기 위하여 제어기는 안정성, 계수변화 (parameter variation) 에 대한 강인성 (robustness), 외란상쇄 (disturbance rejection) 및 측정잡음에 둔감함 등의 특성을 가져야 한다. 귀환 (feedback) 을 사용하여 제어기를 구성하는 경우 위의 모든 조건을 만족시킬 수 없으므로 제어목적에 따라 적당한 조건을 선정하여 중요한 특성을 주로 갖게 한다.

본 논문에서는 쌍동선 (small waterplane area twin hull ship-SWATHS) 에 대하여 PID, LQ, LQG 제어기를 구성하여 안정성, 계수변화에 대한 강인성, 외란상쇄 및 측정잡음의 영향을 비교하였다. 쌍동선의 경우 다른 단동선 (mono hull ship) 에 비하여 접수면 (water-plane) 이 적으므로 무계중변을 흡수할 수 있는 복원력이 약하여 적은 외력에도 상하동요 (heave) 와 종동요 (pitch) 가 심하게 일어난다. 이러한 동요를 줄이는 것이 쌍동선의 제어목적이다.

본 연구에서는 먼저 선형화된 수직축 운동방정식을 이용하여 선체운동의 모델을 구했으며 중첩의 원리 (superposition theorem) 에 의하여 주파수 응답의 합으로 파도입력을 모델링 하였으며 제어를 위하여 필요한 측정치는 IMU (Inertial Measurement Unit) 에서 제공된다고 가정하였다. 쌍동선의 동요의 원인은 파도, 바람, 조류 등이 있으나 파도에 의한 영향이 가장 크므로 본 논문에서는 파도에 의한 영향만을 고려하였다. 파도는 쌍동선에 외란으로 작용하며 측정할 수 없는 양이므로 PID, LQ 제어에서는 제어모델에 포함되지 않지만 LQG 제어에서는 제어 모델에 포함된다. LQG 제어의 경우 제어모델에 파도를 백색잡음으로 가정하고 제어기를 구성한 것 (LQG1) 과 2차의 셰이핑필터 (shaping filter) 를 사용하여 구성한 것 (LQG2) 으로 나누었다.

2. 쌍동선 모델링 및 제어기의 구성

쌍동선의 수직운동방정식은 상하동요 (heave) 와 종동요 (pitch) 가 간섭 (coupling) 된 미분방정식으로 나타낸다. 식 (1)은 쌍동선의 수직운동방정식을 나타내며 계수 A_{ij} 는 무계중변을, B_{ij} 는 계동상수를, 그리고 C_{ij} 는 복원력을 나타낸다.

$$A_{33}\ddot{z} + B_{33}\dot{z} + C_{33}z + A_{35}\ddot{\theta} + B_{35}\dot{\theta} + C_{35}\theta = \delta_{31} \cdot \alpha_F + \delta_{32} \alpha_A + F_3 \quad (1,a)$$

$$A_{55}\ddot{\theta} + B_{55}\dot{\theta} + C_{55}\theta + A_{53}\ddot{z} + B_{53}\dot{z} + C_{53}z = \delta_{51} \cdot \alpha_F + \delta_{52} \alpha_A + F_5 \quad (1,b)$$

여기서 z 와 θ 는 각각 상하동요와 종동요를 나타내며 α_F , α_A 는 각각 전치편각과 후미편각을 나타낸다. F_i 는 파도입력을 나타내는 항으로 해상상태를 나타내는 파워스펙트럼과 선체의 주파수 응답특성을 이용하여 구한다. 파워스펙트럼은 선수각과 해상상태수에 의하여 달라지지만 고정된 선수각과 해상상태수에 대하여 우함수임을 고려하여 다음과 같이 모델링 된다.

$$F_i = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_k d\omega_k} e^{j\phi_{rk}} \quad (2)$$

여기서 N 은 데이터개수, $d\omega_k$ 는 주파수증분, S_k 는 크기를, ϕ_{rk} 는 불규칙 위상을 나타낸다. 식 (2)로 나타나는 해상상태에서 속도와 조우주파수에 의하여 선체가 받는 영향은 달라지며 주어진 속도와 조우주파수의 주파수 응답으로 주어진다. 주어진 주파수 응답에서 크기를 A_k , 위상을 ϕ_k 로 두면 파도입력은 다음과 같이 모델링된다.

$$F_i = \sum_{k=1}^N A_k \sqrt{2S_k d\omega_k} e^{j(\phi_k + \phi_{rk})} \quad (3)$$

식 (3)으로 나타나는 파도입력모델을 제어모델에서는 사용할 수 없으므로 2차의 셰이핑필터를 사용하여 크기가 1인 백색잡음을 입력으로 하는 선형시불변시스템으로 구성하여 제어 모델에 포함시킬 수 있다.

PID, LQ 제어의 경우에는 식 (1)을 이용하여 구성하며 이때 파도입력 F_i 는 무시된다. LQ 제어의 경우에는 F_i 를 백

색잡음으로 가정된 경우 (LQG1)와 F_i 를 2차의 웨이핑필터를 사용하여 증가된 제어모델에 대하여 제어기를 구성한 경우 (LQG2)로 나누었다. LQG2의 경우 전체제어모델은 상하동요와 종동요측에 각각 2차의 웨이핑필터가 증가되어 8차의 모델이된다. 각 제어기의 이득은 안정성, 강인성, 외란상쇄 및 측정잡음의 둔감함을 고려하여 결정되어야 한다.

3. 시뮬레이션 및 성능분석

시뮬레이션에 사용한 모델은 식(1)의 수직축 운동방정식과 식(3)의 파도 스펙트럼을 이용한 파도입력으로 구성하였다. 수직축 운동방정식의 계수는 선체의 속도에 의하여 달라지며 파도입력은 해상상태수에 의하여 변화하며 선수각은 고정되었다고 가정하였다. 제어모델은 조우주파수와 쌍동선의 고유주파수가 일치하는 부근에서 결정하였으며 이것은 제어기의 안정성을 높이기 위함이다. 제어기의 성능은 몬테카를로 (Monte Carlo) 방법을 사용하여 분석, 비교하였다. 표1에 측정기 변화에 의한 응답을 나타내었으며 이때 시뮬레이션 조건은 해상상태수 6, 선수각 180 deg, 속도 10 knots, 조우주파수 0.63773 rad/sec 이다. 측정치는 다음의 4가지 방법으로 얻는다고 가정하였다.

- i) 고급센서를 사용하여 모든 상태변수를 얻는 경우 (M1)
- ii) 저급센서를 사용하여 모든 상태변수를 얻는 경우 (M2)
- iii) 상하동요를 직접측정하지 않고 상하동요변화율을 적분하여 얻는 경우 (M3)
- iv) 상하동요를 측정하지 않는 경우 (M4)

표1에서 PID 제어기는 모든 상태변수를 측정할 수 있는 경우 측정잡음의 크기에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이것은 제어이득을 낮게 두었기 때문이며 이 경우 측정잡음에는 둔감하지만 외란에 민감할 수 있다. M3의 경우에는 M1, M2와 비슷한 성능을 나타내며 M4의 경우에는 성능이 떨어진다. LQ 제어기는 M1, M2의 경우 측정잡음에 민감하다. 이것은 제어이득이 비교적 높게 선정되었기 때문이며 외란에 둔감할 수 있다. M4의 경우에는 성능이 떨어진다. 이것은 PID 제어기나 LQ 제어기는 측정하지 않은 상태변수를 추정해내지 않기 때문이며 추정기법을 사용하면 나은 특성을 나타낼 수 있다. LQG 1 제어기와 LQG 2 제어기는 M4의 경우 칼만필터에 의하여 상태변수를 추정해낼 수 있으므로 M1 이나 M2에 비하여 성능이 뒤지지 않는다. LQG 1제어기와 LQG 2 제어기의 측정기 변화에 따른 성능의 차이는 나타나지 않음을 알 수 있다.

표2에 환경변화에 의한 응답을 나타내었으며 이때 조우주파수와 선수각은 0.63773 rad/sec, 180 deg로 고정되었고, 측정치는 고급센서를 이용하여 모두 측정할 수 있다고 가정하였다. 쌍동선의 경우 해상상태수의 변화는 외란의 변화로 나타나며 속도는 계수의 변화로 나타난다. 표2에서 PID 제어기는 속도의 변화에 의하여

표1. 측정기 변화에 따른 응답

제어기	측정기	heave rate (ft/sec)	heave (ft)	pitch rate (deg/sec)	pitch (deg)
PID	M1	1.31	1.80	0.42	0.54
	M2	1.32	1.82	0.41	0.59
	M3	1.31	1.80	0.42	0.61
	M4	1.45	2.12	0.36	0.64
LQ	M1	1.16	1.66	0.41	0.44
	M2	1.47	2.09	0.48	0.71
	M3	1.15	1.64	0.41	0.44
	M4	1.20	1.79	0.52	0.64
LQG 1	M1	0.95	1.31	0.42	0.47
	M2	1.35	1.92	0.49	0.59
	M3	0.96	1.32	0.43	0.47
	M4	0.98	1.36	0.39	0.44
LQG 2	M1	1.16	1.63	0.37	0.34
	M2	1.45	2.07	0.39	0.51
	M3	1.16	1.63	0.37	0.34
	M4	1.26	1.80	0.36	0.37

종동요가 심하게 나타난다. 이것은 속도변화에 의하여 유발된 계수변화에 대하여 PID 제어기가 불안정해졌기 때문이다. 해상상태수의 변화 즉 외란의 변화에 대하여서는 PID 제어기는 좋은 성능을 유지한다. LQ 제어기와 LQG 1 제어기는 속도의 변화와 해상상태수의 변화에 대하여 모두 좋은 성능을 유지한다. LQG 2 제어기의 경우 계수의 변화에 대하여 종동요와 종동요 변화율이 심하게 나타난다. 해상상태수의 변화는 계수변화와 외란의 변화를 동시에 나타낸다. 이것은 해상상태수의 변화에 의하여 웨이핑필터의 모델이 바뀌기 때문이다. 즉 LQG2 제어기는 속도와 해상상태수의 변화에 대하여 가장 민감하다.

표2. 환경변화에 의한 응답

제어기	해상상태수	속도	heave rate (ft/sec)	heave (ft)	pitch rate (deg/sec)	pitch (deg)
PID	5	10	0.64	0.76	0.30	0.44
	6	10	1.31	1.80	0.42	0.54
	6	20	0.61	0.67	0.40	0.63
LQ	5	10	0.52	0.62	0.34	0.33
	6	10	1.16	1.66	0.41	0.44
	6	20	0.52	0.60	0.48	0.33
LQG1	5	10	0.46	0.49	0.32	0.30
	6	10	0.95	1.31	0.42	0.47
	6	20	0.45	0.42	0.58	0.41
LQG2	5	10	0.55	0.64	0.33	0.31
	6	10	1.16	1.63	0.37	0.34
	6	20	0.64	0.67	0.62	0.40

4. 결론

본 논문에서는 쌍동선 (SWATHS - small water-plane area twin hull ship)에 대하여 PID, LQ 및 LQG 제어를 구성하여 계수변화, 외란 및 측정잡음에 대하여 그 특성을 비교, 분석하였다.

제어의 성능은 서울공대 VAX 11/750 컴퓨터를 사용한 시뮬레이션을 통하여 비교하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 모든 상태변수를 다 측정할 수 있는 경우 측정잡음에 PID, LQG1, LQG2, LQ 제어기의 순으로 둔감하다.
- 상하동요를 측정하지 못하는 경우 상하동요변화율을 적분하여 상하동요를 구해서 제어를 구성하여도 성능의 향상이 있다.
- 측정잡음이 존재하고 제어에 필요한 모든 상태변수를 측정할 수 없는 경우 추정기법을 사용한 제어를 구성하는 것이 유리하다.
- 계수변화에 대하여 LQ, LQG1, PID, LQG2 제어기의 순으로 둔감하다.
- 외란의 변화에 대하여 PID, LQ, LQG1제어기는 비슷한 정도로 둔감하며 LQG2 제어기는 민감하다.
- 파도입력을 백색잡음으로 가정하고 구성된 LQG1 제어기와 2차의 shaping 필터로 모델링하여 구성된 LQG2 제어기의 성능은 큰 차이가 없으며 LQG1 제어기가 측정잡음, 계수변화 및 외란의 변화에 둔감하다.
- LQG1 제어의 경우 속도변화에 따른 모델링오차를 완전히 극복하지 못하여 중동요가 빠른 주기로 나타난다.

이상의 결과를 종합하여 볼때 쌍동선의 효율적인 제어를 위하여 LQG1 제어방식을 채택하는 것이 합당하며 속도변화에 대한 이득예정 (gain scheduling) 방식이 요구된다.

앞으로 쌍동선제어를 위하여 계속연구되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 디지털 컴퓨터를 사용하여 실제로 적용하는 문제에 대한 연구.
- 좀더 나은 제어특성을 얻기위하여 이득예정 방식을 이용하여 제어를 구성하는 방법에 대한 연구

참 고 문 헌

- [1] Karl J. Åström and Björn Wittenmark, Computer-Controller Systems, Prentice-Hall Inc., 1984.
- [2] Arthur Gelb, Applied Optimal Estimation, THE M.I.T press, 1979.
- [3] D.T. Higdon, " Active Motion Reduction on SSP Kaimalino in a Seaway, " AIAA/SNAME

Advanced Marine Vehicles Conference, San Diego, California/Apr. 17-19, 1978.

- [4] 정학영, " 적응필터를 이용한 선체운동의 추정, " 석사학위논문, 제어계측공학과 대학원 서울대학교, 1985.
- [5] 권옥현, 이장규 외, " 함포를 위한 최적제어기 구성, " 최종보고서, 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소, 1984, 12.