(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0094197
(43) 공개일자 2018년08월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05D 1/08 (2006.01) *B63C 11/48* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G05D 1/0825 (2013.01)
B63C 11/48 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0019935
(22) 출원일자 2017년02월14일
심사청구일자 2017년02월14일

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)
(72) 발명자
이호재
인천광역시 연수구 해돋이로84번길 29 (송도동, 송도풍림아이원3단지아파트) 303동 1804호
문지현
인천광역시 남구 경인남길118번길 21 103호 (용현동,한솔빌라)
(74) 대리인
이원희

전체 청구항 수 : 총 7 항

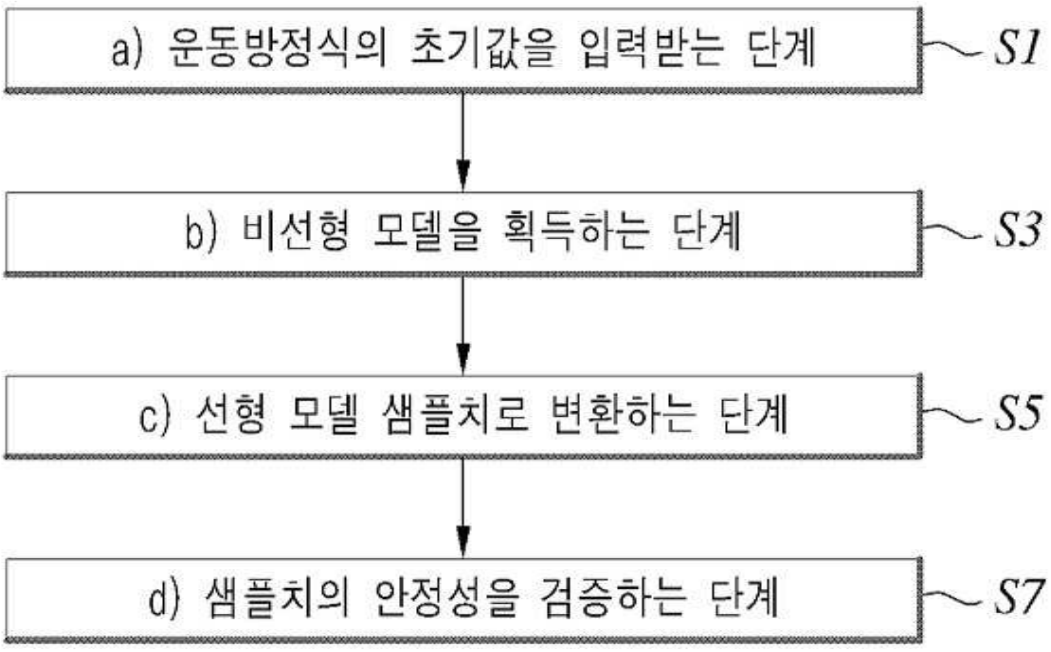
(54) 발명의 명칭 **수중글라이더 선형 모델의 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어방법 및 제어장치**

(57) 요 약

본 발명은 수중글라이더의 비선형 모델의 국부 거동 데이터를 이용하여 최적 선형화된 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어방법 있어서, 입력부가 수중환경에 세팅된 수중글라이더의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 입력받는 a)단계; 산출부가 a)단계에서 입력된 초기값을 기준으로 수중글라이더의 동적 구동이 수식화된 비선형

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



모델을 획득하는 b)단계; 옵저버가 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식을 이중선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환하는 c)단계; 및 컨트롤러가 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식과 c)단계에서 변환한 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 광대역 안정성을 검증하는 d)단계를 포함하고, 컨트롤러는 선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)되어, 수중글라이더의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형 모델의 샘플치를 획득하는 것을 특징으로 한다.

본 발명은, 비선형 시스템에 포함된 수중글라이더의 국부 거동을 바탕으로 선형화된 샘플치를 획득하는 과정에서 이중선형 및 선형 행렬 부등식의 관점으로 디지털 재설계 하는 방법을 제공하여 수중글라이더가 전대역 범위에서 라그랑지 안정성(Lagrange stability)을 확보하고 해당 샘플을 검증하여 불연속적인 데이터로부터 최적화된 선형 모델의 연속적인 데이터를 산출하는 이점이 있다.

(52) CPC특허분류
G05D 1/0875 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 53598-1
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 핵심연구지원
연구과제명 다개체 시스템의 효율적 분산 제어기 설계기법 개발과 수중 글라이더의 편대 유영에의 응용
기 여 율 1/1
주관기관 인하대학교
연구기간 2014.05.01 ~ 2017.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

수중글라이더의 비선형 모델의 국부 거동 데이터를 이용하여 최적 선형화된 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어방법 있어서,

a) 입력부가 수중환경에 세팅된 상기 수중글라이더의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 입력받는 단계;

b) 산출부가 상기 a)단계에서 입력된 상기 초기값을 기준으로 상기 수중글라이더의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득하는 단계;

c) 옵저버가 상기 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식을 이중선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환하는 단계; 및

d) 컨트롤러가 상기 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식과 상기 c)단계에서 변환한 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 광대역 안정성을 검증하는 단계를 포함하고,

상기 컨트롤러는 선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)되어,

상기 수중글라이더의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형 모델의 샘플치를 획득하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 a)단계는,

상기 수중글라이더의 운동 방정식의 기준이 되는 벡터를 초기값으로 설정하고,

상기 벡터는,

상기 수중글라이더의 기하학적 중심으로부터 상기 수중글라이더의 머리 방향의 벡터 e_1, 상기 e_1에 대한 직각방향 벡터 e_2 및 상기 e_1 벡터와 상기 e_2 벡터에 상호 수직한 벡터 e_3를 포함하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 b)단계는,

아날로그 제어를 통해 상기 수중글라이더의 연속적인(continuous) 비선형 모델을 획득하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 b)단계는,

상기 수중글라이더의 이산적(discrete-time)으로 분포된 비선형 모델을 획득하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 c)단계는,

상기 b)단계에서 획득한 이산적으로 분포된 비선형 모델에서 연속적인 선형 모델의 샘플치를 산출하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 6

제 3 항에 있어서,

상기 d)단계는,

상기 b)단계에서 획득한 연속적인(continuous) 비선형 모델과 상기 c)단계에서 산출된 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 라그랑지 안정성(Lagrange stability)을 검증하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어방법.

청구항 7

수중환경에 세팅된 수중글라이더의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 설정하는 입력부;

상기 입력부에서 설정된 초기값을 기준으로 상기 수중글라이더의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득하는 산출부;

이중선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 상기 산출부에서 획득한 비선형 모델의 수식을 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환하는 옵저버; 및

선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)되고, 상기 산출부에서 연속적으로 획득되는 비선형 모델과 상기 옵저버에서 변환된 샘플치를 비교하여, 샘플치의 광대역 안정성을 검증하는 컨트롤러를 포함하여,

상기 수중글라이더의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형화된 샘플치를 획득하는 것을 특징으로 하는 출력궤환 제어장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 수중글라이더의 비선형 모델로부터 선형 모델의 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어방법 및 제어장치에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 최근 육상 이동수단의 자원 고갈로 인하여, 대체 에너지를 이용하여 움직이는 해상 이동수단이 주목받고 있다. 다만, 수중 환경에서 조사가 육지환경의 조사보다 어려운 점이 있기 때문에 무인 수중 장치(UUV: unmanned underwater vehicle)의 운영이 요구되고 있다. UUV의 한 종류로 원격 탐사 로봇(ROV: remotely operated vehicle)이 해상 조사를 위해 전형적으로 사용되고 있는 모델이지만, 높은 비용 및 제한된 공간 접근성을 갖는 단점을 갖는다. 때문에 이를 보완하기 위하여 프로펠러 구동 자율 수중 로봇(AUV: autonomous underwater vehicle)이 개발되었다. 하지만, AUV는 프로펠러를 구동하기위한 베터리 소모가 크기 때문에 장기간 임무에는

적합하지 못한 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 프로펠러를 포함하지 않은 AUV의 일종인 수중글라이더에 대한 연구가 지속되고 있다.

[0004] 일반적으로 수중글라이더는 도 1에 도시된 바와 같이 깊은 수심의 수압을 견딜 수 있도록 제작된 바디(10)와 바디(10)의 양측에 구비된 고정날개(20)와 바디(10)의 후단에 구비된 방향타(30)가 외부에 구성되며 바디(10)내부에 부력탱크, 펌프, 제어부 및 베터리로 구성된다. 수중글라이더는 내부 펌핑 시스템으로 부력을 변경하여 위쪽 및 아래쪽으로 움직일 수 있다. 상세하게 수중글라이더는 잠수된 상태에서 부력탱크에 유체가 주입되거나 배출되면 수중글라이더의 비중이 달라지면서 발생되는 부력의 변화에 의해 수중에서 승강되게 되며, 이때 고정날개(20)에 작용되는 추진력에 의해 수중글라이더가 일정 각도로 전진하면서 승강하게 된다. 결과적으로, 수중글라이더는 부력 조절을 제외하고 추가 에너지 소비를 필요로 하지 않으므로 저렴한 비용으로 장기 임무를 수행할 수 있다. 다만, 수중글라이더는 수중 작동시 주변 유체의 영향을 받아 구동하게 되므로 수중글라이더의 움직임을 예측 및 안정화하기 위한 연구가 지속되고 있다.

[0005] 특히, 수중글라이더의 제어방법으로 글라이더의 무게중심을 움직이거나 높이조정을 통해 피칭 모멘트 제어를 유도하고 이를 통해 고도를 변경하는 방법이 있다. 해당 방법을 바탕으로 비행 데이터를 이용한 매개 변수 식별에 의해 획득된 수중글라이더의 플랜트 모델이 연구되었다. 또한, 수중글라이더의 동역학과 관련하여 full-orer 모델을 2차로 감소시킴으로써 단일 섭동(singular perturbation) 기법을 통해 분석되었고, Lyapunov 기반 제어설계가 연구되었다. 게다가, 안정성 문제에 대한 화두가 제시되면서 피드백 선형화 기법이 수중글라이더에 적용되었다. 그러나, 비선형 모델이 부분적으로 선형화되고 근사 오차가 무시되어, 안정성이 전역대에 걸쳐 보장되지 못한 문제점이 확인되었다. 이를 보충하기 위해 완전 선형화된 모델의 전역 안정성을 보장하는 제어기를 설계하는 연구가 진행되었지만, 피드백 선형화를 위한 출력 변수를 선택하는데 어려움이 확인되었다.

[0006] 수중글라이더의 글라이딩 안정화 방법에 관한 종래기술로서 대한민국 등록특허 제10-1658112호(이하 '선행기술'이라 약칭함)는 비선형움직임을 갖는 수중글라이더의 움직임을 선형화 하여 수중글라이더의 부력 및 모멘트 제어를 통해 안정적인 구동을 제공하기 위한 방법을 개시한다. 선행기술은 본원 발명자의 종래발명으로 비선형 시스템을 선형화함으로써 수중글라이더의 안정성을 획득하는 방법에 한정되어 있다. 이에, 본 발명자는 비선형 시스템의 국부 구동을 바탕으로 선형시스템의 안정적인 샘플치를 획득하기 위한 방법을 고안하였다.

[0007] 한편, 대다수 산업 분야의 제어 시스템은 연속적으로 작동한다. 그러나 연속적으로 작동된 컨트롤러는 실제로 사용하기가 어렵기 때문에, 이를 해결하기위한 방법으로 샘플 데이터 컨트롤러가 구현 및 설계된다. 샘플 데이터 컨트롤을 위한 연구가 다양하게 진행되었다. 그 중, 디지털 컨트롤러를 설계하는 방법은 샘플러와 홀드 장치를 아날로그 컨트롤러의 양 쪽에 배치하는 에뮬레이션 방법이 있다. 이 방식의 장점은 플랜트용 컨트롤러를 설계하기 위한 디자인 도구를 용이하게 사용할 수 있다는 점이며, 종래의 아날로그 폐루프 특성을 보존하기 위해 샘플링 속도를 요구하게 되는 단점이 있다.

[0008] 디지털 재설계(DR: digital redesign)는 미리 설계된 아날로그 제어 시스템의 플랜트 입력 매핑, 출력 매칭, 상태 일치 등의 특성을 유지하는 샘플링된 데이터로 전환하는 효율적인 방법이다. 일반적으로, DR에 대한 대부분의 결과는 선형시스템에 초점을 맞추고 있으며, 비선형 시스템에 대한 결과는 초기 설정문제의 분석적 해를 요구하는 이산화 과정의 어려움이 동반되는 단점이 있다. 때문에, 비선형 시스템을 선형화하는 다양한 방법이 적용되고 있다. 가장 일반적인 선형화 방법으로 평형점을 중심으로 Taylor 계열을 확장하는 방법이 있다. 해당 방법은 상태와 평형점 편차에 대해서만 비선형 시스템을 선형화 하는 방법이다. 즉, Taylor 선형화 바법을 통해 획득한 선형 모델을 기반으로 DR 기법을 적용하게 되면 편향이 무시될 수 있기 때문에 일치 성능이 저하될 수 있다.

[0009] 또한, chaotic 궤도 추적기에 최적선형 모델과 DR 기법이 활용될 수 있다. 그러나 해당 선형 모델은 제어 가능성(또는 안정화 가능성)이 포함되어 있다는 가정하에 연구가 진행되었다.

[0010] 한편, 펄스폭 변조 피드백 제어기를 이용한 DR 접근법과 최적 선형화에 기반한 출력 피드백 제어기 설계가 연구되었지만 최적의 선형화 프로세스에서는 추정된 상태가 사용되지 않았다.

[0011] 이에 본 발명자는 제시되지 않은 관점에서 안정도 및 검출 가능성이 보장되는 수중글라이더의 최적 선형화된 샘플치를 획득하기 위한 방법을 고안하였다.

선행기술문헌

특허문헌

[0013] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-1658112호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0014] 본 발명의 목적은 비선형적 특성을 나타내는 수중글라이더 시스템의 국부 거동을 바탕으로 최적화된 선형 모델의 샘플치를 획득하는 제어방법 및 제어장치를 제공하는데 있다.

과제의 해결 수단

[0016] 상기 목적을 달성하기 위하여 본 발명은 수중글라이더의 비선형 모델의 국부 거동 데이터를 이용하여 최적 선형화된 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어방법 있어서, 입력부가 수중환경에 세팅된 수중글라이더의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 입력받는 a)단계; 산출부가 a)단계에서 입력된 초기값을 기준으로 수중글라이더의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득하는 b)단계; 옵저버가 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식을 이중선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환하는 c)단계; 및 컨트롤러가 b)단계에서 획득한 비선형 모델의 수식과 c)단계에서 변환한 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 광대역 안정성을 검증하는 d)단계를 포함하고, 컨트롤러는 선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)되어, 수중글라이더의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형 모델의 샘플치를 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0017] 바람직하게, a)단계는 수중글라이더의 운동 방정식의 기준이 되는 벡터를 초기값으로 설정하고, 벡터는, 수중글라이더의 기하학적 중심으로부터 수중글라이더의 머리 방향의 벡터 e_1, e_1에 대한 직각방향 벡터 e_2 및 e_1 벡터와 e_2 벡터에 상호 수직한 벡터 e_3를 포함할 수 있다.

[0018] 바람직하게, b)단계는 아날로그 제어를 통해 수중글라이더의 연속적인(continuous) 비선형 모델을 획득할 수 있다.

[0019] 바람직하게, b)단계는 수중글라이더의 이산적(discrete-time)으로 분포된 비선형 모델을 획득할 수 있다.

[0020] 바람직하게, c)단계는 b)단계에서 획득한 이산적으로 분포된 비선형 모델에서 연속적인 선형 모델의 샘플치를 산출할 수 있다.

[0021] 바람직하게, d)단계는 b)단계에서 획득한 연속적인(continuous) 비선형 모델과 c)단계에서 산출된 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 라그랑지 안정성(Lagrange stability)을 검증할 수 있다.

[0022] 본 발명은 수중환경에 세팅된 수중글라이더의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 설정하는 입력부; 입력부에서 설정된 초기값을 기준으로 수중글라이더의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득하는 산출부; 이중선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 산출부에서 획득한 비선형 모델의 수식을 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환하는 옵저버; 및 선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)되고, 산출부에서 연속적으로 획득되는 비선형 모델과 옵저버에서 변환된 샘플치를 비교하여, 샘플치의 광대역 안정성을 검증하는 컨트롤러를 포함하여, 수중글라이더의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형화된 샘플치를 획득하는 것을 다른 특징으로 한다.

발명의 효과

[0024] 본 발명에 따르면, 비선형 시스템에 포함된 수중글라이더의 국부 거동을 바탕으로 선형화된 샘플치를 획득하는 과정에서 이중선형 및 선형 행렬 부등식의 관점으로 디지털 재설계 하는 방법을 제공하여 수중글라이더가 전대역 범위에서 라그랑지 안정성(Lagrange stability)을 확보하고 해당 샘플을 검증하여 불연속적인 데이터로부터 최적화된 선형 모델의 연속적인 데이터를 산출하는 이점이 있다.

[0025]

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 종래의 수중글라이더의 모식도이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 출력궤환 제어방법의 블록도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 출력궤환 제어장치의 모식도이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 수중글라이더의 초기 세팅조건을 나타낸 모식도이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 T=0.5s로 설정된 초기 설정값을 기준으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.5s 조건에서 입력된 제어값을 바탕으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.2s로 설정된 초기 설정값을 기준으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.2s 조건에서 입력된 제어값을 바탕으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 이하, 첨부된 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명을 상세히 설명한다. 다만, 본 발명이 예시적 실시 예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일 참조부호는 실질적으로 동일한 기능을 수행하는 부재를 나타낸다.

[0028] 본 발명의 목적 및 효과는 하기의 설명에 의해서 자연스럽게 이해되거나 보다 분명해 질 수 있으며, 하기의 기재만으로 본 발명의 목적 및 효과가 제한되는 것은 아니다. 또한, 본 발명을 설명함에 있어서 본 발명과 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략하기로 한다.

[0029] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 출력궤환 제어방법의 블록도이다. 출력궤환 제어방법은 수중글라이더(3)의 비선형 모델의 국부 거동 데이터를 이용하여 최적 선형화된 샘플치를 획득할 수 있다. 도 2를 참조하면 출력궤환 제어방법은 운동방정식의 초기값을 입력받는 a)단계(S1), 비선형 모델을 획득하는 b)단계(S3), 선형 모델 샘플치로 변환하는 c)단계(S5) 및 샘플치의 안정성을 검증하는 d)단계(S7)를 포함할 수 있다.

[0030] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 출력궤환 제어장치(1)의 모식도이다. 도 3을 참조하면 출력궤환 제어장치(1)는 입력부(11), 산출부(13), 옵저버(15) 및 컨트롤러(17)를 포함할 수 있다. 또한, 출력궤환 제어장치(1)는 비선형 모델을 제공하는 장치와 호환되어 사용될 수 있다. 본 실시예에서는 수중글라이더(3)가 동적 구동을 통하여 출력궤환 제어장치(1)에 비선형 모델을 제공하는 장치로 사용되었다. 수중글라이더(3)는 고정날개와 꼬리가 달린 타원형의 강체로 정의된다.

[0031] 본 실시예에 앞서, 수중글라이더(3)를 적절한 조건으로 세팅하여 운동방정식을 세우기 위한 조건이 성립될 수 있다. 수중글라이더(3)는 수중글라이더(3)의 질량을 균일하게 나누는 수직면에 대칭이 되도록 세팅될 수 있다. 특히, 전술된 세팅 과정은 수중글라이더(3)와 수면의 배치를 통해 하기의 출력궤환 제어방법을 실시하기 위한 필수적인 조건으로 이해될 수 있다. 즉, 이러한 세팅과정을 통해 수중글라이더(3)가 수직한 수면위에서만 움직이는 비선형 모델을 설정할 수 있다.

[0032] 한편, 수중글라이더(3)는 해류의 동력에 거의 영향을 미치지 않을 정도로 천천히 움직이고 내부질량은 부력의 중심에 고정될 수 있다. 수중글라이더(3)의 병진 또는 회전 운동은 부력을 제어하거나 수중글라이더(3)의 상대적인 상승 또는 하강을 유도하는 수면의 변화(elevator) 또는 내부질량을 사용함으로써 생성될 수 있다. 이를 통해, 수중글라이더(3)는 추가적인 추진없이 전진방향의 구동력을 얻을 수 있다.

[0033] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 수중글라이더(3)의 초기 세팅조건을 나타낸 모식도이다. 도 4를 참조하면 a)단계(S1)에서는 입력부(11)가 수중환경에 세팅된 수중글라이더(3)의 동적 구동을 표현하기 위해 운동방정식의 초기값을 입력받을 수 있다. 특히, a)단계(S1)는 수중글라이더(3)의 운동 방정식을 구하기 위해 기하학적 중심으

로부터 수중글라이더(3)의 머리 방향의 벡터 e_1, e_1에 대한 직각방향 벡터 e_2 및 e_1 벡터와 e_2 벡터에 상호 수직한 벡터 e_3를 설정하고, e_1, e_2 및 e_3 벡터방향으로 수중글라이더(3)에 작용하는 외력을 입력값으로 설정할 수 있다.

[0034] 벡터 e_1, e_2, e_3는 오른손 법칙을 따르며 벡터 e_1은 엄지손가락이 향하는 방향, 벡터 e_2는 검지손가락이 향하는 방향, 벡터 e_3는 중지손가락이 향하는 방향을 의미하는 벡터로 정의된다. 특히, 벡터 e_1은 수중글라이더(3) 몸통의 세로축을 따라 머리방향으로 향하는 벡터를 정의한다. 벡터 e_2는 벡터 e_1에 수직인 수평면에 있으며 도면으로 들어가는 방향의 벡터를 정의한다. 벡터 e_3는 벡터 e_1 및 벡터 e_2 수직하는 방향으로 정의한다.

[0035] 또한, a)단계(S1)는 수중글라이더(3)의 운동 방정식을 구하기 위해 고정된 기준 좌표계 $\{i, j, k\} \in R^3$ 를 설정할 수 있다.

[0036] 한편, i축과 벡터 e_1의 사이각으로 형성되는 피치각 θ이 정의된다. 또한, i축과 수중글라이더(3)의 경로방향의 속력을 정의하는 V 사이에 형성된 경로각 Φ 가 정의된다. 마지막으로, 공격각 α는 $\alpha = \theta - \Phi$로 정의된다.

[0037] 유체역학적 관점에서 L방향으로 작용되는 힘은 수중글라이더(3)에 가해지는 양력을 정의한다. 또한, D방향으로 작용되는 힘은 수중글라이더(3)의 운동을 통해 수면과 수중글라이더(3) 사이에 형성되는 마찰력을 정의한다. M_2는 피칭모멘트를 의미한다. 일반적으로, 피칭모멘트는 이동체의 피치 축에 작용하는 임의의 모멘트를 의미하나, 본 실시예에서는 벡터 e_2방향으로 적용되는 피칭모멘트로 정의된다.

[0038] a)단계(S1)에서는 입력부(11)가 입력값으로 u_1, u_2를 입력받을 수 있다. a)단계(S1) 에서 입력부(11)를 통해 입력되는 u_1은 수중글라이더(3)의 부력을 조절함으로써 $m_0 = m_g - m_w$를 제어할 수 있다. m_g는 수중글라이더(3)의 질량을 의미하고, m_w는 변위 유체(displaced fluid)의 질량을 의미한다. u_2는 수중글라이더(3)의 내부질량이 부력의 중심이 고정된 상태에서 운동을 제어하는 수면의 변화(elevator)를 의미한다. 이러한 변화에 의해 유도된 힘은 벡터 e_3 방향으로 작용하는 커플링 팩터 δ와 관계되어 $\delta V_2 u_2$로 기술된다.

[0039] 전술한 수중글라이더(3)의 세팅단계와 a)단계(S1)를 통해 수중글라이더(3)의 무게중심은 부력의 중심에 위치함을 알 수 있다. 그러므로 부력과 중력이 m_0에 대해 동일한 기원을 가짐을 확인할 수 있다. 수중글라이더(3)에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산될 수 있다.

[0040]
$$D = (\varkappa_{D_0} + \varkappa_D \alpha^2) V^2$$
$$L = (\varkappa_{L_0} + \varkappa_L \alpha) V^2$$
$$M_2 = (\varkappa_{M_0} + \varkappa_M \alpha + \varkappa_q \Omega) V^2$$

[0041] 수식에서 $\varkappa_{D_0}$, $\varkappa_D$는 항력 계수이고, $\varkappa_{L_0}$, $\varkappa_L$은 양력 계수, $\varkappa_{M_0}$, $\varkappa_M$은 피치 모멘트 계수, $\varkappa_q$는 피칭 감쇠계수, Ω는 벡터 e_2의 각속도를 의미한다. 또한, 해당 수식 및 후술되는 과정에서 벡터 e_1 및 벡터 e_3 방향의 추가 질량 및 벡터 e_2 방향의 축에 대한 관성 모멘트는 고려되지 않는다.

[0042] 또한, 뉴턴의 제2 법칙과 운동량 방정식을 적용하여 수중글라이더(3)의 구동을 다음과 같은 수학식(1) 로 표현할 수 있다.

[0043] 수학식 (1)

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

[0044]

[0045] 여기서, $x \in \mathbb{R}^5$는 상태(state), $u \in \mathbb{R}^2$는 제어 입력을 의미하고, x는 상세하게,

$$x_1 := V - V_e, \quad x_2 := \phi - \phi_e, \quad x_3 := m_0 - m_{0_e}$$
$$x_4 := \alpha - \alpha_e, \quad x_5 := \frac{\varkappa_q}{\varkappa_M}\Omega$$

[0046]

[0047] 로 표현된다. 여기서 첨자 "e"는 각 상태 또는 입력 변수의 평형점을 의미한다. 각 평형 점은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_e := \left(\frac{|m_0|g}{\sqrt{\varkappa_{D_e}^2 + \varkappa_{L_e}^2}}\right), \quad \phi_e := \arctan\left(-\frac{\varkappa_{D_e}}{\varkappa_{L_e}}\right)$$
$$m_{0_e} := \pm\frac{\sqrt{\varkappa_{D_e}^2 + \varkappa_{L_e}^2}V_e^2}{g}, \quad \alpha_e := -\frac{\varkappa_{M0}}{\varkappa_M}, \quad \Omega_e := 0$$

[0048]

[0049] 여기서 g는 중력가속도, $\varkappa_{D_a} := \varkappa_{D_n} + \varkappa_D\alpha_e^2$, $\varkappa_{L_a} := \varkappa_{L_n} + \varkappa_L\alpha_e$ 이고, m_{0_e}는 Φ_e와 항상 반대 부호를 갖는다. 입력값을 고려해보면,

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 - u_{2_e} \end{bmatrix}$$

[0050] 이고,

$$u_{2_e} := \frac{\varkappa_{M0}}{\varkappa_M} + \alpha_e$$

[0051] 여기서, 이고,

[0052] 벡터 값 함수 $f(x)$와 $g(x)$는 다음과 같이 표현된다.

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \\ g_{51} & g_{52} \end{bmatrix}$$

[0053]

[0054] 여기서,

$$
\begin{aligned}
f_1 &:= -\frac{1}{m}((x_3 + m_{0_e})g\sin(x_2 + \phi_e) + D \\
&\quad - \delta u_{2_e}(x_1 + V_e)^2 \sin(x_4 + \alpha_e)) \\
f_2 &:= \frac{1}{m(x_1 + V_e)}(-(x_3 + m_{0_e})g\cos(x_2 + \phi_e) + L \\
&\quad + \delta u_{2_e}(x_1 + V_e)^2 \cos(x_4 + \alpha_e)) \\
f_3 &:= 0 \\
f_4 &:= \frac{\varkappa_M}{\varkappa_q} x5 - f_2 \\
f_5 &:= \frac{\varkappa_q}{J}(x_4 + x_5)(x_1 + V_e)^2 \\
g_{11} &= g_{21} = g_{41} = g_{51} = g_{32} := 0 \\
g_{31} &:= 1 \\
g_{12} &:= \frac{1}{m}\delta(x_1 + V_e)^2 \sin(x_4 + \alpha_e) \\
g_{22} &:= \frac{1}{m}\delta(x_1 + V_e)\cos(x_4 + \alpha_e) \\
g_{42} &:= -g_{22} \\
g_{52} &:= -\frac{\varkappa_q}{J}(x_1 + V_e)^2
\end{aligned}
$$

[0055] 이고,

[0056] 상기 식에서 J는 벡터 e_2에 축에대한 관성 모멘트이다.

[0057] 비선형 모델을 획득하는 b)단계(S3)는 a)단계(S1)의 입력값을 기준으로 수중글라이더(3)의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득할 수 있다. 또한, b)단계(S3)는 아날로그 컨트롤러로 수중글라이더(3)의 연속적인(continuous) 비선형 모델을 획득할 수 있다. 이와는 반대로 b)단계(S3)는 수중글라이더(3)의 이산적(discrete-time)으로 분포된 비선형 모델을 획득할 수 있다.

[0058] 본 실시예에서는 산출부(13)를 통하여 다음과 같은 수학식(2)로 표현된 비선형 시스템을 고려할 수 있다.

[0059] 수학식(2)

[0060]
$$
\begin{aligned}
\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\
y &= h(x)
\end{aligned}
$$

[0061] 여기서 벡터 값 함수 $f: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$, $g_i: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ $g = [g_1, \cdots, g_m]$, $h: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^p$는 관심있는 영역에 대해 C^1 이라고 가정하고, $\sum\Delta = \{x \in \mathbb{R}^n : ||x|| \leqslant \Delta, \Delta \in \mathbb{R}_{>0}\}$ 및 $f(0) = 0$, 그리고 $x \in \sum\Delta \subset \mathbb{R}^n$은 상태(state), $u = u(x) \in \mathbb{R}^m$ 은 $u(0) = 0$이고, $y \in \mathbb{R}^n$는 출력이다.

[0062] 선형 모델의 샘플치로 변환하는 c)단계(S5)는 b)단계(S3)에서 획득한 비선형 모델의 수식을 옵저버(15)가 이중 선형 행렬 부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)을 기반으로 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환할 수 있다. c)단계(S5)는 b)단계(S3)에서 획득한 이산적으로 분포된 비선형 모델에서 연속적인 선형 모델의 샘플치를 산출할 수 있다.

[0063] 본 실시예에서, x가 아닌 y만이 피드백에 사용되는 가정을 사용할 수 있다. c)단계(S5)에서 획득한 비선형 모델을 x_{op} 부근에서 근사화 하는 정확한 선형모델을 구축하기 위해, 아래와 같은 $(A, B, C) \in \mathbb{R}^{n\times n} \times \mathbb{R}^{n\times m} \times \mathbb{R}^{p\times n}$ 를 찾아야 한다.

[0064] 수학식(3)

$$f(x) + g(x)u \approx Ax + Bu$$
$$h(x) \approx Cx$$

[0065]

[0066] 수학식(4)

$$f(x_{op}) + g(x_{op})u = Ax_{op} + Bu$$
$$h(x_{op}) = Cx_{op}$$

[0067]

[0068] 상기 수식은 x_{op} 의 부근에서 허용 가능한 $u \in \mathbb{R}^m$ 에 대한 가능한 정확한 표현을 만족할 수 있다. u는 임의이므로, $B = g(x_{op})$로 설정한다. 결과적으로, $\widetilde{\varepsilon_x} \in \mathbb{R}^n$와 $\widetilde{\varepsilon_y} \in \mathbb{R}^p$를 포함하는 모델링 오차(errors)를 최소화하기 위해 문제가 단순화 될 수 있다. 이와 관련된 수식으로,

[0069] 수학식(5)

$$f(x) = Ax + \tilde{\varepsilon}_x$$
$$h(x) = Cx + \tilde{\varepsilon}_y$$

[0070] 와

[0071] 수학식(6)

$$f(x_{op}) = Ax_{op}$$
$$h(x_{op}) = Cx_{op}$$

[0072] 가 있으며,

[0073] 전술한 수학식(5)는 x_{op} 의 부근에서 Taylor series에 의해 수학식(7)로 확장될 수 있다.

[0074] 수학식(7)

$$f(x) = f(x_{op}) + \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x_{op}} (x - x_{op}) + \mathcal{O}((x - x_{op})^2)$$
$$h(x) = h(x_{op}) + \frac{\partial h}{\partial x}\Big|_{x_{op}} (x - x_{op}) + \mathcal{O}((x - x_{op})^2).$$

[0075]

[0076] 이를 통해 전술한 식은

$$f(x_{op}) + \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x_{op}} (x - x_{op}) + \mathcal{O}((x - x_{op})^2) = Ax + \tilde{\varepsilon}_x$$
$$h(x_{op}) + \frac{\partial h}{\partial x}\Big|_{x_{op}} (x - x_{op}) + \mathcal{O}((x - x_{op})^2) = Cx + \tilde{\varepsilon}_y$$

[0077]

[0078] 와 같이 쓰일 수 있다. 식에서 $\mathcal{O}(\cdot)$ 는 고차 항을 나타낸다. 식을 재정렬하면,

[0079] $$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x_{op}} - A\right)(x - x_{op}) = \varepsilon_x$$
$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}\Big|_{x_{op}} - C\right)(x - x_{op}) = \varepsilon_y$$
가 되며,

[0080] 여기서, $\varepsilon_x = \tilde{\varepsilon}_x - \mathcal{O}((x - x_{op})^2),\ \varepsilon_y = \tilde{\varepsilon}_y - \mathcal{O}((x - x_{op})^2)$ 는 총 모델링 오차이다. 따라서, x_{op} 에서 이들을 최소화하기 위해, A, C에 대해 $\|\partial f/\partial x|_{x_{op}} - A\|_2$ 와 $\|\partial h/\partial x|_{x_{op}} - C\|_2$ 가 최소화 되어야 한다. 비병리적인(nonpathological) 샘플링 주기 $T \in \mathbb{R}_{>0}$ 을 갖는 $\Lambda_T := \{x(kT), k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 를 균일한 동작점으로 설정한다. 다음을 통해 안정되고 검출 가능한 최적의 선형 모델을 얻을 수 있다.

[0081] 정리 1. 만약 적절한 차원(dimension)의 행렬 $X_k = X_k^T \succ 0$, $W_k = W_k^T \succ 0$, $Z_k = Z_k^T \succ 0$, A_k, C_k, M_k, N_k 가 존재하면, 양의 스칼라 상수 $\{\varkappa_1, \varkappa_2, \varkappa_3, \varkappa_4, \varkappa_5, \bar{\varkappa}_6, \eta\}$ 와 스칼라 $\gamma_1, \gamma_2 \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ 는 다음의 최소화 문제(MP)는 해를 가질 수 있다.

[0082] $$\text{MP 1:} \underset{A_k, X_k, M_k, C_k, W_k, Z_k, N_k}{\text{Minimize}} \quad \gamma_1 + \gamma_2$$
는 하기의 수학식을 조건으로 한다.

[0083] 수학식(8)

[0084] $$\begin{bmatrix} -\gamma_1 I & (\bullet)^T \\ \frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{x_k} - A_k & -\gamma_1 I \end{bmatrix} \prec 0$$

[0085] 수학식(9)

[0086] $$f(x_k) = A_k x_k$$

[0087] 수학식(10)

[0088] $$\begin{bmatrix} -x_{k-1}^T (X_{k-1}^{-1} - \varkappa_3 T I) x_{k-1} & (\bullet)^T \\ x_k & -X_k \end{bmatrix} \preccurlyeq 0$$

[0089] 수학식(11)

[0090] $$X_k A_k^T + M_k^T B_k^T + A_k X_k + B_k M_k \prec 0$$

[0091] 수학식(12)

[0092] $$\varkappa_2^{-1} I \preccurlyeq X_k \preccurlyeq \varkappa_1^{-1} I$$

[0093] 수학식(13)

[0094] $$X_k \preccurlyeq \varkappa_3^{-1} T^{-1} I$$

[0095] 수학식(14)

$$\begin{bmatrix} -\gamma_2 I & (\bullet)^T \\ \frac{\partial h}{\partial x}\big|_{x_k} - C_k & -\gamma_2 I \end{bmatrix} \prec 0$$

[0096]

[0097] 수학식(15)

$$h(x_k) = C_k x_k$$

[0098]

[0099] 수학식(16)

$$\begin{bmatrix} -(y_{k-1} - C_{k-1}x_{k-1})^T (W_{k-1} - \bar{\varkappa}_6 T\, I)(y_{k-1} - C_{k-1}x_{k-1}) & * \\ W_k(y_k - C_k x_k) & -W_k \end{bmatrix} \preccurlyeq 0$$

[0100]

[0101] 수학식(17)

$$A_k^T Z_k + C_k^T N_k^T + Z_k A_k + N_k C_k \prec 0$$

[0102]

[0103] 수학식(18)

$$\varkappa_4 I \preccurlyeq Z_k \preccurlyeq \varkappa_5 I$$

[0104]

[0105] 수학식(19)

$$\bar{\varkappa}_6 T\, I \preccurlyeq W_k$$

[0106]

[0107] 수학식(20)

$$\begin{bmatrix} -Z_k - \eta I & * \\ W_k C_k & -W_k \end{bmatrix} \preccurlyeq 0$$

[0108]

[0109] 그리고 하기의 선형 시스템은,

$$\dot{x} = A_k x + B_k u$$
$$y = C_k x$$

[0110]

[0111] $B_k = g(x(kT))$ 이고, $(\bullet)^T$ 는 대칭 위치의 전치된 요소를 나타내는 x(kT)에 대한 비선형 시스템의 안정되고 검출 가능한 최적 선형모델일 수 있다. $k \in \mathbb{Z}_{\geq 1}$에 대하여, 대칭 파지티브 행렬 X_{k-1}, W_{k-1} 및 Z_{k-1}은 MP1을 $x(kT-T)$로 풀어냄으로써 결정된다. $k=0$인 MP1의 최적 선형화 조건에 한해서는 수학식(8), (9), (14), (15)만 사용된다.

[0112] 이를 증명하는 과정은 다음과 같다. $f(x_k) = A_k x_k$ 와 Schur complement를 통해 수학식(8)과 동일한 $(\partial f/\partial x|_{x_k} - A_k)^T (\partial f/\partial x|_{x_k} - A_k) \prec \gamma_1^2 I$ 에 관련하여 A_k에 대해, γ_1을 최소화 할 때마다 제약조건 $\|\partial f/\partial x|_{x_k} - A_k\|_2$ 는 최소화 된다. 구속 조건 $\|\partial h/\partial x|_{x_k} - C_k\|_2$ 와 γ_1에 대하여, 수학식(14), (15)도 유

사한 방식으로 유도될 수 있다. 동작 순간 세트(set) Λ_T에 대해, 최적 선형 모델의 안정화 가능성은 Lyapunov 함수 후보이며 $(V_1(x_k) - V_1(x_{k-1}))/T < -\varkappa_3 \|x_{k-1}\|^2$을 만족시키고 수학식(11), (12) 및 $x_k^T X_k^{-1} x_k - x_{k-1}^T X_{k-1}^{-1} x_{k-1} + \varkappa_3 T \|x_{k-1}\|^2 < 0 \Leftrightarrow (10)$와 동등한 $V_1(x) = x^T X_k^{-1} x$에 의해 보장될 수 있다.

[0113] LMI 수학식(13)은 수학식(10)의 타당성에 필요된다. $e = y - C_x$라 하면, y는 수학식(2)의 출력이고, x는 정리 1에 의해 유도된 최적 선형 모델의 상태를 의미한다. 이중성 개념(duality concept)을 사용하면 $(V_2(e_k) - V_2(e_{k-1}))/T < -\bar{\varkappa}_6 \|e_{k-1}\|^2$와 같은 Lyapunov 함수 후보(functional candidate) $V_2(e) = e^T Z_k e$와 수학식(16), (17), (18)은 최적 선형 모델의 검출 능력을 증명하기에 충분하다. 이를 위해, 수학식(19) 또한 안정화 가능성의 경우처럼 요구된다. 또한, e는 상태 오차(error)가 아닌 비선형 시스템과 최적화된 선형 시스템 사이의 출력 오차(error)이기 때문에, 수학식(17)의 Z_k과 수학식(16)의 W_k사이의 추가적인 관계를 다음과 같이 고려해야 한다.

[0114] $$-Z_k + C_k^T W_k C_k = 0 \Rightarrow -Z_k + C_k^T W_k C_k \prec \eta I$$

[0115] 여기서, η는 매우 작은 양의 값이다. Diag $\{I, W_k\}$로 Schur complement와 일치 변환(congruence transformation)을 수행하면 수학식(20)이 된다. 이와 같은 방식으로 이론을 증명할 수 있다.

[0117] 비고 1: $\varkappa_6 T I \preccurlyeq Z_k$에 대하여 양의 상수 $\varkappa_6$가 존재한다. 이는 수학식(19), (20) 및 $\varkappa_6 = (C_{k-1}^T C_{k-1})\bar{\varkappa}_6 I$에서 도출된다.

[0119] 비고 2: MP1은 이중선형이기 때문에, 일반적으로 해결하기 어려운 nonconvex 프로그래밍 문제를 구성한다. 그럼에도 불구하고, 하기의 서술에서 LMI와 함께 heuristic algorithms의 종류는 효율적으로 MP1을 해결할 수 있다. A_k와 C_k가 고정되어 있다면, X_k, W_k, Z_k, N_k 및 M_k를 찾는 것이 LMI 문제가 되며 반대의 경우도 동일하다. 이러한 관점에서, BMI를 이중 LMI로 처리함으로써 MP1을 반복적으로 해결할 수 있다.

[0121] 비고 3: 전술한 y만 피드백에 사용된다는 가정하에, 최적의 선형화는 추정된 상태 $\hat{x}(kT)$에 대해 수행되어야 한다. 즉, (A_k, B_k, C_k)가 아닌 정리 1에 의한 $\hat{x}(kT)$ 근방의 선형화 모델의 시스템 행렬인 $(\hat{A}_k, \hat{B}_k, \hat{C}_k) \in \mathbb{R}^{n\times n} \times \mathbb{R}^{n\times m} \times \mathbb{R}^{p\times n}$을 구할 수 있다.

[0122] 수학식(2)에서 $t \in [kT, kT+T), k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}$에 대하여 $\hat{x}(kT)$와 관련된 이상적인 최적화 선형 모델을 고려해보면 다음과 같다.

[0123] 수학식(21)

[0124] $$\dot{x}_c(t) = A_k x_c(t) + B_k u_c(t)$$
$$y_c(t) = C_k x_c(t)$$

[0125] 여기서, 수학식(21)은 가상이고 입력과 출력이 실제 플랜트와 동일하다고 가정할 수 있다. 첨자 "c"는 아날로그 제어를 나타내며, 첨자 "d"는 샘플링 된 데이터의 제어를 나타낸다. 또한, 아날로그 옵저버 기반의 출력궤환 제어기는 하기의 $\hat{x}_c(kT)$ 과 관련된 최적 선형 모델을 기하급수적으로(exponentially) 안정화 하기 위해 미리 설계되었다고 가정한다.

[0126] 수학식(22)

$$\dot{\hat{x}}_c(t) = \hat{A}_k\hat{x}_c(t) + \hat{B}_k u_c(t) - L_k(y_c(t) - \hat{C}_k\hat{x}_c(t))$$
$$\hat{y}_c(t) = \hat{C}_k\hat{x}_c(t)$$
$$u_c(t) = K_c^k\hat{x}_c(t).$$

[0127] 이고,

$$\dot{\hat{x}}_c(t) = A_k\hat{x}_c(t) + B_k u_c(t)$$
$$\hat{y}_c(t) = C_k\hat{x}_c(t)$$

[0128]

[0129] 상태 추정 오차를 $e_c := x_c - \hat{x}_c$라 할 때, 증강된(augmented) 아날로그 폐루프 모델은 하기와 같이 서술되며,

[0130] 수학식(23)

$$\dot{\chi}_c = \begin{bmatrix} \hat{A}_k + \hat{B}_k K_c^k & -\hat{B}_k K_c^k \\ 0 & \hat{A}_k + L_c^k\hat{C}_k \end{bmatrix}\chi_c(t) + p_c(t)$$

[0131]

[0132] 여기서, $\chi_c(t) := \mathrm{col}\{x_c(t), e_c(t)\}$ 이고,

$$p_c(t) = \begin{bmatrix} (A_k - \hat{A}_k + (B_k - \hat{B}_k)K_c^k) & -(B_k - \hat{B}_k)K_c^k \\ (A_k - \hat{A}_k + (B_k - \hat{B}_k)K_c^k + L_c^k(C_k - \hat{C}_k)) & -(B_k - \hat{B}_k)K_c^k \end{bmatrix}\chi_c(t)$$

[0133]

[0134] 이다.

[0136] 비고 4: $f(\cdot)$, $\partial f/\partial x(\cdot)$, $h(\cdot)$, $\partial h/\partial x(\cdot)$, $g(\cdot)$ 를 내포하는(implies) 수학식(2)에 대하여 가정된 연속적인 차별화성은 Λ_T에 대하여 균일하게 경계가 정해질(bounded) 수 있다. 그러므로, 수학식(23)의 $(\hat{A}_k, \hat{B}_k, \hat{C}_k)$는 MP1에서 얻어진 균일한 boundedness를 가질 수 있다.

[0137] 해당 이산화 모델은 다음 수식과 같다.

[0138] 수학식(24)

$$\chi_c(kT + T) = \Phi\chi_c(kT) + q_c$$

[0139]

[0140] 여기서,

[0141] $$\Phi = \mathrm{e}\left(\begin{bmatrix} \hat{A}_k + \hat{B}_k K_c^k & -\hat{B}_k K_c^k \\ 0 & \hat{A}_k + L_c^k \hat{C}_k \end{bmatrix} T\right) =: \begin{bmatrix} \phi_k^{11} & \phi_k^{12} \\ \phi_k^{21} & \phi_k^{22} \end{bmatrix}$$
$$q_c = \int_{kT}^{kT+T} \mathrm{e}^{\Phi(kT+T-\tau)} p_c(\tau)\mathrm{d}\tau.$$
이다.

[0142] 이제 수학식(21)이 표본 추출된 데이터 환경에 놓여있다고 가정한다. 그러한 시스템은 $t \in [kT, kT+T)$ 에 대한 수학식(25)에 의해 기술된다.

[0143] 수학식(25)

[0144] $$\dot{x}_d = A_k x_d + B_k u_d(kT)$$
$$y_d = C_k x_d$$

[0145] 수학식(25)의 동적 거동은 수학식(26)에 의해 효율적으로 근사화될 수 있다.

[0146] 수학식(26)

[0147] $$x_d(kT+T) = G_k x_d(kT) + H_k u_d(kT)$$
$$y_d(kT) = C_k x_d(kT)$$

[0148] 여기서, $G_k = \mathrm{e}^{A_k T}$, $H_k = \int_{kT}^{kT+T} \mathrm{e}^{A_k(kT+T-\tau)} B_k \mathrm{d}\tau$ 이다. 샘플링된 출력만을 사용하는 샘플 데이터 제어 수학식(26)을 위해, 샘플 데이터 옵저버 기반 출력궤환 제어기에 다음과 같은 수식을 취할 수 있다.

[0149] 수학식(27)

[0150] $$\hat{x}_d(kT+T) = \hat{G}_k \hat{x}_d(kT) + \hat{H}_k u(kT) - L_d^k(y_d(kT) - \hat{y}_d(kT))$$
$$\hat{y}_d(kT) = \hat{C}_k \hat{x}_d(kT)$$
$$u_d(t) = K_d^k \hat{x}_d(kT) + F_d^k y_d(kT)$$

[0151] $e_d := x_d - \hat{x}_d$, $\chi_d := \mathrm{col}\{x_d, e_d\}$ 라 하면, 증강된 이산 시간(discrete-time) 폐루프 모델은 수학식(28)과 같이 표현된다.

[0152] 수학식(28)

[0153] $$\chi_d(kT+T) = \begin{bmatrix} \hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k & -\hat{H}_k K_d^k \\ 0 & \hat{G}_k + L_d^k \hat{C}_k \end{bmatrix} \chi_d(kT) + q_d(kT)$$

[0154] 여기서,

$$q_d(kT) = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} (G_k - \hat{G}_k + (H_k - \hat{H}_k)K_d^k) \\ +(H_k - \hat{H}_k)F_d^k C_k + \hat{H}_k F_d^k (C_k - \hat{C}_k) \\ (G_k - \hat{G}_k + (H_k - \hat{H}_k)(K_d^k + F_d^k C_k) \\ +L_d^k (C_k - \hat{C}_k)) \end{pmatrix} & -(H_k - \hat{H}_k)K_d^k \\ & -(H_k - \hat{H}_k)K_d^k \end{bmatrix} \chi_d(kT)$$

[0155]

[0156] 이고, $\hat{G}_k = e^{\hat{A}_k T}$ 이며, $\hat{H}_k = \int_{kT}^{kT+T} e^{\hat{A}_k(kT+T-\tau)} \hat{B}_k d\tau$ 이다.

[0158] 보조정리(Lemma) 1: 섭동(perturbation) p_c 와 q_d 는 수학식(29)의 조건을 만족한다.

[0159] 수학식(29)

$$\lim_{e_c(t)\to 0} \sup_{t\in\mathbb{R}_{\geqslant 0}} \frac{\|p_c(t)\|}{\|e_c(t)\|} = 0 \quad \text{and} \quad \lim_{e_d(kT)\to 0} \sup_{k\in\mathbb{Z}_{\geqslant 0}} \frac{\|q_d(kT)\|}{\|e_d(kT)\|} = 0.$$

[0160]

[0162] 증명: $\|e_c\| \to 0$ 일 때마다, $\|x_c - \hat{x}_c\| \mapsto 0$ 이다. x_c 에서 획득한(obtained) (A_k, B_k, C_k) 와 $\hat{x}_c$ 에서 획득한(obtained) $(\hat{A}_k, \hat{B}_k, \hat{C}_k)$ 에 의해 $A_k - \hat{A}_k \to 0$, $B_k - \hat{B}_k \to 0$, $C_k - \hat{C}_k \to 0$ 임을 의미할(implies) 수 있다. 마찬가지로, e_d 와 q_d 를 구성할 수 있다. 결과적으로, 수학식(29)가 산출된다.

[0164] 비고 5: 보조정리 1로부터, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 \in \mathbb{R}_{\geqslant 0}$ 인 스칼라가 존재하고,

$$\|e_c\| \leqslant \rho_1 \Rightarrow \|p_c\| \leqslant \varepsilon_1 \|e_c\|$$
$$\Rightarrow \begin{cases} \|A_k - \hat{A}_k\| \leqslant \varepsilon_2 \rho_1 \\ \|B_k - \hat{B}_k\| \leqslant \varepsilon_3 \rho_1 \\ \|C_k - \hat{C}_k\| \leqslant \varepsilon_4 \rho_1 \end{cases}$$

[0165] ,

[0166] 여기서, $\rho_1 := \sup_{t\in\mathbb{R}_{\geqslant 0}} \|e_c\|.$ 이다.

[0167] 샘플치의 안정성을 검증하는 d)단계(S7)는 c)단계(S5)에서 산출된 샘플치의 안정성을 검증할 수 있다. 특히, d)단계(S7)는 선형 행렬 부등식(LMI)을 기반으로 디지털 재설계(DR)된 컨트롤러(17)를 사용하여 c)단계(S5)에서 산출된 샘플치의 안정성을 검출할 수 있다.

[0168] A: 최적 선형 모델을 위한 디지털 재설계(DR)

[0169] 최적 선형 모델을 위한 디지털 재설계(DR)는 하기의 문제에 초점을 맞추고 있다.

[0171] 문제 1: 수학식(21)의 점근 안전성을 보장하는 미리 설계된 컨트롤러(17) 획득값(gain) $\{K_c^k, L_c^k\}$이 주어지면, 하기의 조건이 만족되도록 수학식(27)에서 디지털 컨트롤러(17) 획득값(gain) $\{K_d^k, F_d^k, L_d^k\}$을 확인할 수 있다.

[0172] 1) 수학식(28)의 $\chi_d(kT)$은, 수학식(24)의 $\chi_c(kT)$와 가능한 유사하게 이치시킨다.

[0173] 2) 수학식(27)을 갖는 샘플 데이터 시스템의 수학식(25)는 점근적으로 안정적이다.

[0174] 문제 1의 두번째 조건은 하기의 정리에 의해 이산적(discrete) 방식으로 다루어질 수 있다.

[0176] 정리 2: 비병리학적(nonpathological) T를 갖는 표본 데이터 페루프 시스템의 수학식(28)이 점근적으로 안정하다면 수학식(27)을 갖는 표번 데이터 시스템의 수학식(25)도 점근적으로 안정적이다.

[0178] 증명: 수학식(25), (27)로부터 도출된(follows from) $t \in [kT, kT+T)$에 대하여,

$$
\begin{aligned}
\|x_d(t)\| \leqslant \|x_d(kT)\| + \Big\| & \int_{kT}^{t} (\hat{B}_k K_d^k + \hat{B}_k F_d^k \hat{C}_k) x_d(kT) \mathrm{d}\tau - \int_{kT}^{t} \hat{B}_k K_d^k e_d(kT) \mathrm{d}\tau \\
& + \int_{kT}^{t} ((B_k - \hat{B}_k) K_d^k + (B_k - \hat{B}_k) F_d^k (C_k - \hat{C}_k) + (B - \hat{B}_k) F_d^k \hat{C}_k \\
& + \hat{B}_k F_d^k (C_k - \hat{C}_k)) x_d(kT) \mathrm{d}\tau - \int_{kT}^{t} (B_k - \hat{B}_k) K_d^k e_d(kT) \mathrm{d}\tau \\
& + \int_{kT}^{t} \hat{A}_k x_d(\tau) \mathrm{d}\tau + \int_{kT}^{t} (A_k - \hat{A}_k) x_d(\tau) \mathrm{d}\tau \Big\| \\
\leqslant \big(1 + T\big(& \big\| \hat{B}_k K_d^k + \hat{B}_k F_d^k \hat{C}_k \big\| + \big\| (B_k - \hat{B}_k) K_d^k + (B_k - \hat{B}_k) F_d^k (C_k - \hat{C}_k) \\
& + (B - \hat{B}_k) F_d^k \hat{C}_k + \hat{B}_k F_d^k (C_k - \hat{C}_k) \big\| \big)\big) \|x_d(kT)\| \\
& + T\big(\big\| \hat{B}_k K_d^k \big\| + \big\| (B_k - \hat{B}_k) K_d^k \big\| \big) \|e_d(kT)\| \\
& + \big\| \hat{A}_k \big\| \int_{kT}^{t} \|x_d(\tau)\| \mathrm{d}\tau + \big\| A_k - \hat{A}_k \big\| \int_{kT}^{t} \|x_d(\tau)\| \mathrm{d}\tau
\end{aligned}
$$

[0179]

[0180] 이고, Gronwall-Bellman 부등식에 의해서 하기의 결론이 산출된다.

$$
\begin{aligned}
\|x_d(t)\| \leqslant & \mathrm{e}^{(\|\hat{A}_k\| + \varepsilon_2 \rho_1) T} \big((1 + T\big(\big\| \hat{B}_k K_d^k + \hat{B}_k F_d^k \hat{C}_k \big\| + (\varepsilon_3 \big\| K_d^k \big\| + \varepsilon_3 \varepsilon_4 \big\| F_d^k \big\| \\
& + \varepsilon_3 \big\| F_d^k \hat{C}_k \big\| + \varepsilon_4 \big\| \hat{B}_k F_d^k \big\|) \rho_1)) \|x_d(kT)\| + T(\big\| \hat{B}_k K_d^k \big\| + \varepsilon_2 \big\| K_d^k \big\|) \|e_d(kT)\| \big) \\
\leqslant & \delta_1 \|\chi_d(kT)\|
\end{aligned}
$$

[0181]

[0182] 여기서,

$$
\delta_1 := \mathrm{e}^{(\|\hat{A}_k\| + \varepsilon_2 \rho_1) T} \sqrt{\begin{aligned} & \big(1 + T(\big\| \hat{B}_k K_d^k + \hat{B}_k F_d^k \hat{C}_k \big\| + (\varepsilon_3 \big\| K_d^k \big\| + \varepsilon_3 \varepsilon_4 \big\| F_d^k \big\| + \varepsilon_3 \big\| F_d^k \hat{C}_k \big\| \\ & + \varepsilon_4 \big\| \hat{B}_k F_d^k \big\|) \rho_1)\big)^2 + T^2 \big(\big\| \hat{B}_k K_d^k \big\| + \varepsilon_3 \big\| K_d^k \big\| \big)^2 \end{aligned}}
$$

[0183]

[0184] 는 수학식(28)이 점근적으로 안정적이라는 가정과 비고 4로인해 제한된다. 그러므로, $x_d(t)$는 $\chi_d(kT)$와 동시에 근원(origin)으로 점근적으로 수렴하게 된다.

[0185] 문제 1의 첫번째 조건은 $\chi_c(kT) = \chi_d(kT)$ 가정 하에서 $\chi_c(kT+T) = \chi_d(kT+T)$의 조건에 의해 공식화될 수 있다; 즉,

[0186] 수학식(30)

[0187] $$\phi_k^{11} = \hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k$$

[0188] 수학식(31)

[0189] $$\phi_k^{12} = -\hat{H}_k K_d^k$$

[0190] 수학식(32)

[0191] $$\phi_k^{22} = \hat{G}_k + L_d^k \hat{C}_k$$

[0192] 상기의 수학식들은 정확하게 해결되기는 어렵다. 게다가, 수학식(28)의 점근적인 안정성을 정리 2에 의해 보장할 수 있어야 한다. 때문에, 수학식(30), (31), (32)를 relaxing하고, 계수적으로 부합하는 해답(solution)을 찾는 대안적인 방법을 제시한다.

[0194] 정리 3: 양의 상수 $\{\varkappa_1, \varkappa_2, \varkappa_3, \varkappa_4, \varkappa_5, \varkappa_6\}$와, 적절한 차원의(dimensions) 대칭 파지티브 한정(positive definite) 행렬 P_k, Z_k 와 행렬 K_d^k, F_d^k, L_d^k 과 스칼라

[0196] $\gamma_3, \gamma_4 \in \mathbb{R}_{\geqslant 0}$가 있다면, 하기의 MP는 해답(solution)갖는다.

[0197] $\underset{P_k, K_d^k, F_d^k}{\text{MP 2: Minimize}} \quad \gamma_3$ 는 하기의 수학식에 종속된다(subject to).

[0198] 수학식(33)

[0199] $$\begin{bmatrix} -\gamma_3 I & (\bullet)^T \\ \phi_k^{11} - \hat{G}_k - \hat{H}_k K_d^k - \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k & -\gamma_3 I \end{bmatrix} \prec 0$$

[0200] 수학식(34)

[0201] $$\begin{bmatrix} -\gamma_3 I & (\bullet)^T \\ \phi_k^{12} + \hat{H}_k K_d^k & -\gamma_3 I \end{bmatrix} \prec 0$$

[0202] 수학식(35)

$$\begin{bmatrix} -P_{k-1}+\varkappa_3 T I & (\bullet)^T \\ \hat{G}_k+\hat{H}_k K_d^k+\hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k & -P_k^{-1} \end{bmatrix} \preccurlyeq 0$$

[0203]

[0204] 수학식(36)

$$\varkappa_2^{-1} I \preccurlyeq P_k^{-1} \preccurlyeq \varkappa_1^{-1} I$$

[0205]

[0206] 수학식(37)

$$P_k^{-1} \preccurlyeq \varkappa_3^{-1} T^{-1} I$$

[0207]

[0209] $\underset{Z_k, L_d^k}{\text{MP 3: Minimize}} \quad \gamma_4$ 는 하기의 수학식에 종속된다(subject to).

[0210] 수학식(38)

$$\begin{bmatrix} -\gamma_4 I & (\bullet)^T \\ \phi_k^{22}-\hat{G}_k-L_d^k \hat{C}_k & -\gamma_4 I \end{bmatrix} \prec 0$$

[0211]

[0212] 수학식(39)

$$\begin{bmatrix} -Z_{k-1}+\varkappa_6 T I & (\bullet)^T \\ \hat{G}_k+L_d^k \hat{C}_k & -Z_k^{-1} \end{bmatrix} \preccurlyeq 0$$

[0213]

[0214] 수학식(40)

$$\varkappa_5^{-1} I \preccurlyeq Z_k^{-1} \preccurlyeq \varkappa_4^{-1} I$$

[0215]

[0216] 수학식(41)

$$Z_k^{-1} \preccurlyeq \varkappa_6^{-1} T^{-1} I$$

[0217]

[0218] 상기의 MP는 모든 $k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}$ 에 대하여 성립한다. 또한, 수학식(28)의 $\chi_d(kT)$ 는 수학식(24)의 $\chi_c(kT)$ 와 유사하게 대응되며(match), $k=0$ 인 경우 $P_{k-1} = P_{k-1}^T \succ 0$ 와 $Z_{k-1} = Z_{k-1}^T \succ 0$ 가 임의적으로 $P_{k-1}^{-1} \preccurlyeq \varkappa_3^{-1} T^{-1} I$ 와 $Z_{k-1}^{-1} \preccurlyeq \varkappa_6^{-1} T^{-1} I$ 에 종속될 때(subject to), 점진적으로 안정적이다. 다만, $k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 1}$ 인 경우에는 원스텝(one-step) 뒤의 샘플링 순간(instant)에 MP 2 와 MP 3을 해결함으로써 결정될 수 있다.

[0220] 증명: 하기의 부등식을 만족하는 수학식(30) 고려하면,

[0221] $$\left\|\phi_k^{11} - \hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k\right\| \leqslant \gamma_3$$

[0222] 유도된 2-norm 정의에 의해, 전술된 부등식은 수학식(33)을 Schur complement 수행하여

[0223] $$(\phi_k^{11} - \hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k)^T (\phi_k^{11} - \hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k) \prec \gamma_3^2 I$$ 을 취할 수 있다. 이와 유사하게, 수학식(31)과 수학식(32)에 관한 내용도 수학식(34), (38)을 각각 획득하기 위해 정립될(established) 수 있다.

[0224] 하기의 식

[0225] $$x_d(kT+T) = (\hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}) x_d(kT)$$ 의 지수적(exponential) 안정성은 Lyapunov function $V_1(x_d(kT)) := x_d(kT)^T P_{k-1} x_d(kT)$ 를 선택함으로써 보장될 수 있으며, Lyapunov function은 수학식(36)으로부터 방사상으로(radially) 제한되지 않으며, 수학식(36)은 일부 $P_k = P_k^T \prec 0, k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}$. 와 같은 조건에서

[0226] $$(\hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k)^T P_k (\hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k) - P_{k-1} \preccurlyeq -\varkappa_3 T I$$ 를 만족한다. Schur complement를 사용하면 수학식(35)를 획득할 수 있다. 유사하게, 수학식(28)의 안정성을 증명하기 위해 $V_2(e_d(kT)) := e_d(kT)^T Z_{k-1} e_d(kT)$ 와 수학식(39)는

[0227] $$e_d(kT+T) = (\hat{G}_k - L_d^k \hat{C}_k) e_d(kT)$$ 의 지수적(exponential) 안정성을 보증할 수 있으며, $\Delta V(\chi_d(kT)) < 0$ 처럼 $V(\chi_d(kT)) = \lambda_1 V_1(x_d(kT)) + \lambda_2 V_2(e_d(kT))$ 형태의 Lyapunov function을 위한 $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재함을 증명할(show) 수 있다. 수학식(42)에 따라 수학식(36), (37), (40) 및 (41)중 하나는 수학식(28)을 따라 $V(\chi_d(kT))$ 의 상승률을 계산할 수 있다.

[0228] 수학식(42)

[0229] $$\begin{aligned}&\Delta V(\chi_d(kT))|_{(28)}\\ &\quad = \lambda_1 \Delta V_1(x_d(kT)) + \lambda_2 \Delta V_2(e_d(kT))\\ &\quad \leqslant -\lambda_1 \varkappa_3 T \|x_d(kT)\|^2 + 2\lambda_1 \zeta_1 \|x_d(kT)\| \|e_d(kT)\| + (\lambda_1 \zeta_2 - \lambda_2 \varkappa_6) \|e_d(kT)\|^2\end{aligned}$$

[0230] 여기서,

[0231] $$\zeta_1 = \left\|(\hat{G}_k + \hat{H}_k K_d^k + \hat{H}_k F_d^k \hat{C}_k)^T X_k^{-1} (\hat{H}_k K_d^k)\right\|$$

[0232] $$\zeta_2 = \left\|(\hat{H}_k K_d^k)^T X_k^{-1} (\hat{H}_k K_d^k)\right\|$$ 이며, Sylvester criterion에 의해,

[0233] $\left(\frac{\zeta_1^2}{\varkappa_3 T}+\zeta_2\right)\lambda_1-\lambda_2\varkappa_6 T<0$ 이거나 오직 이 경우에만 수학식(42)의 우변은 $-\sigma_3 T\,\|\chi_d(kT)\|^2$ 보다 작게된다. 여기서 σ_3 는 수학식(42)의 우변에서 2차 형태 행렬의 절대 최소 고유치이다. 게다가, 수학식(42)를 위반하지 않고 충분히 작은 λ_1 과 충분히 큰 λ_2를 선택할 수 있기 때문에 전술한 내용은 항상 성립된다. 그러므로, 전술한 바를 통해 수학식(28)의 점근적 안정성을 보장할 수 있다.

[0234] d)단계(S7)는 컨트롤러(17)가 b)단계(S3)에서 획득한 비선형 모델의 수식과 c)단계(S5)에서 변환한 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 광대역 안정성을 검증할 수 있다. d)단계(S7) 사용되는 컨트롤러(17)는 선형 행렬 부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)을 기반으로 디지털 재설계(DR: digital redesign)될 수 있다. 특히, d)단계(S7)는 b)단계(S3)에서 획득한 연속적인(continuous) 비선형 모델과 c)단계(S5)에서 산출된 선형 모델의 샘플치를 비교하여 샘플치의 라그랑지 안정성(Lagrange stability)을 검증할 수 있다.

[0236] B: 디지털 재설계(DR)된 컨트롤러(17)를 갖는 샘플링된 데이터 비선형 시스템의 안정성

[0237] 수학식(43)

[0238]
$$\dot{x}_d(t)=f(x_d(t))+g(x_d(t))u_d(kT)$$
$$y=h(x_d(t))$$

[0239] $t\in[kT,kT+T),\,k\in\mathbb{Z}_{\geqslant 0}$ 와 수학식(43)에 대하여 디지털 재설계(DR)된 수학식(27)과 비선형 시스템을 나타내는 수학식(2)의 샘플 데이터는, 샘플링 간격을 통해 적분함으로써 정확하게 이산화될 수 있다. 특히, 수학식(27)은 수학식(44)를 생성할 수 있다.

[0240] 수학식(44)

[0241]
$$\begin{aligned}x_d(kT+T)&=x_d(kT)+T\left(f(x_d(kT))+g(x_d(kT))u_d(kT)\right)\\&\quad+\int_{kT}^{kT+T}f(x_d(\tau))-f(x_d(kT))+(g(x_d(\tau))-g(x_d(kT)))u_d(kT)\,\mathrm{d}\tau\\&=:\mathscr{G}_e\end{aligned}$$

[0242] 최적 선형 모델의 측정된 상태 데이터만을 보유하고 있기 때문에 수학식(26)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

[0243]
$$\begin{aligned}x_d(kT+T)&=G_k x_d(kT)+H_k u_d(kT)\\&=\hat{G}_k x_d(kT)+\hat{H}_k u_d(kT)+(G_k-\hat{G}_k)x_d(kT)+(H_k-\hat{H}_k)u_d(kT)\end{aligned}$$

[0244] $=:\mathscr{G}_a$

[0246] 보조정리(Lemma) 2: 하기에 서술되는 수학식(45)와 같은 수학식(26)과 (44) 사이의 관계에는 $T_1\in\mathbb{R}_{>0}$과 $\nu_1\in\mathbb{R}_{>0}$ 가 존재하며,

[0247] 수학식(45)

[0248] $$\|\mathcal{G}_a - \mathcal{G}_e\| \leqslant \nu_1 T$$

[0249] 수학식(45)는 모든 비병리성(nonpathological) $T \in \mathbb{R}_{(0,T_1]}$에 대하여 Σ_Δ 의 어떠한 부분 집합도 유지할(hold) 수 있다.

[0251] 증명: 수학식(9)와 수학식(26)의 G_k의 정의로부터 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_2]}$ 에 대해서 수학식(46)을 만족하는 $\nu_2 \in \mathbb{R}_{>0}$ 와 $T_2 \in \mathbb{R}_{>0}$ 를 선택할 수 있다.

[0252] 수학식(46)

[0253] $$\begin{aligned}\left\|\hat{G}_k x_d(kT) - (x_d(kT) + T f(x_d(kT)))\right\| &= \left\|\left(T(\hat{A}_k - A_k) + \mathcal{O}(T^2)\right) x_d(kT)\right\| \\ &\leqslant \nu_2 T\end{aligned}$$

[0254] 특히, 비고 4와 $x_d(kT) \in \Sigma_\Delta$ 에 대한 $\lim_{T\to 0} \|\mathcal{O}(T^2)\|/T = 0$ 의 결과로 인해 선택할 수 있다. 동일한 이유로, 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_3]}$ 에 대한 하기의 식

[0255] $$\begin{aligned}\left\|(G_k - \hat{G}_k)x_d(kT)\right\| &= \left\|((A_k - \hat{A}_k)T + \mathcal{O}_{A_k}(T^2) - \mathcal{O}_{\hat{A}_k}(T^2))x_d(kT)\right\| \\ &\leqslant \nu_3 T\end{aligned}$$ 를 만족하는 $\nu_3 \in \mathbb{R}_{>0}$ 와 $T_3 \in \mathbb{R}_{>0}$ 이 존재할 수 있으며, 정리 3에 의해 재설계된 디지털 컨트롤러 $u_d(kT)$는 경계가 있기 때문에 유사한 결과가 $\hat{H}_k$ 로 확장되어 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_4]}$ 에 대하여 수학식(47)을 만족하는 $\nu_4 \in \mathbb{R}_{>0}$와 $T_4 \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재할 수 있다.

[0256] 수학식(47)

[0257] $$\left\|(H_k - \hat{H}_k)u_d(kT) - T g(x_d(kT))u_d(kT)\right\| = \left\|\left(T(\hat{B}_k - B_k) + A_k^{-1}\hat{B}_k\mathcal{O}(T^2)\right) u_d(kT)\right\|$$

[0258] $$\leqslant \nu_4 T$$

[0259] 게다가, 유사한 방식으로 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_5]}$ 에 대하여, 하기의 식

[0260] $$\begin{aligned}\left\|(H_k - \hat{H}_k)u_d(kT)\right\| &= \left\|((B_k - \hat{B}_k)T + \mathcal{O}_{A_k}(T^2)A_k^{-1}B_k - \mathcal{O}_{\hat{A}_k}(T^2)\hat{A}_k^{-1}\hat{B}_k)u_d(kT)\right\| \\ &\leqslant \nu_5 T\end{aligned}$$ 를 만족하는 $\nu_5 \in \mathbb{R}_{>0}$ 와 $T_5 \in \mathbb{R}_{>0}$ 이 존재할 수 있다.

[0261] 반면에, Σ_Δ에 대하여 $f(\cdot) + g(\cdot)u$ 는 $l_1 \in \mathbb{R}_{>0}$ 과 함께 Lipschitz 라고 $f(\cdot), g_i(\cdot) \in C^1$

가 의미하기(implies) 때문에, 어떤 컴팩트한 집합(set) $\Sigma_\delta = \{x_d(kT) : \|x_d(kT)\| \leqslant \delta \in \mathbb{R}_{>0}, \delta < \Delta, k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}\} \subset \Sigma_\Delta$ 에 대하여 $\sup_{x_d(t)\in\Sigma_\delta, t\in[kT,kT+T), k\in\mathbb{Z}_{\geqslant 0}} \|f(x_d(t)) + g(x_d(t))u_d(kT)\| \leqslant M$ 을 만족시키는 $M \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재할 수 있다. $T_6 := \delta/M$ 이라 가정한다. 이때 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_6]}$ 에 대하여, $(k, x) \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0} \times \Sigma_\delta$ 는 모든 데이터에 대하여 타당하며(valid), $t \in [kT, kT+T)$ 에 대한 수학식(43)의 해답(solution) $x_d(t; kT, x)$ 은 $\|x_d(t; kT, x) - x\| \leqslant M(t - kT) \leqslant \delta$, so $x_d(t) \in \Sigma_\Delta$ 을 만족한다. 이는 하기의 수학식(48)로 표현된다.

[0262] 수학식(48)

$$\left\| \int_{kT}^{kT+T} f(x_d(\tau)) + g(x_d(\tau))u(kT) - (f(x_d(kT)) + g(x_d(kT))u(kT))\, d\tau \right\| \leqslant \int_{kT}^{kT+T} l_1 \|x_d(\tau) - x_d(kT)\|\, d\tau \leqslant \frac{1}{2} l_1 M T^2$$

[0263]

[0264] 그러므로, $T_1 := \min\{T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\}$ 과 $\nu_1 := \nu_2 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5 + \frac{1}{2} l_1 M T$ 는 참으로 증명된다.

[0266] 정리 4: 수학식(21)의 비병리학적인(nonpathological) 모든 $T \in \mathbb{R}_{(0,T_7]}$ 에 대하여, $T_7 \in \mathbb{R}_{>0}$ 은 다음과 같이 존재한다. 비선형 시스템의 수학식(43)의 샘플 데이터와 정리 3에 의해 재설계된 컨트롤러의 수학식(27)의 샘플데이터는 임의의 궁극적 경계에(ultimate bound) 균등하게 구속된다.(uniformly bounded)

[0268] 증명: 정리 3과 보조정리 2로부터, $V(\chi_d(kT))$ 의 상승률은 다음과 같다.

[0269] $$\sigma_1 \|\chi_d(kT)\|^2 \leqslant V(\chi_d(kT)) \leqslant \sigma_2 \|\chi_d(kT)\|^2$$

[0270] $\Sigma_{\bar{\delta}} = \{\chi_d(kT) \in \mathbb{R}^{2n} : \|\chi_d\| \leqslant \delta\}$ 에 포함되는 수학식(44)의 페루프 사선을 따라 상기의 식은 수학식(49)에 의해 계산되며,

[0271] 수학식(49)

[0272] $$V(\chi_d(kT+T))|_{(44)} - V(\chi_d(kT)) = V(\chi_d(kT+T))|_{(28)} - V(\chi_d(kT)) + V(\chi_d(kT+T))|_{(44)} - V(\chi_d(kT+T))|_{(28)}$$

[0273] $$\leqslant -\sigma_3 T \|\chi_d(kT)\|^2 + \left\| V(\chi_d(kT+T))|_{(44)} - V(\chi_d(kT+T))|_{(28)} \right\|$$

[0274] 여기서, 수학식(49)의 우변의 후술된 부분은 하기의 수학식(50)에 의해 계산될 수 있다.

[0275] 수학식(50)

$$\begin{aligned}&\left\|V(\chi_d(kT+T))|_{(44)}-V(\chi_d(kT+T))|_{(28)}\right\|\\&\quad\leqslant l_2\left\|\chi_d(kT+T)|_{(44)}-\chi_d(kT+T)|_{(28)}\right\|\\&\quad\leqslant l_2(\left\|x_d(kT+T)|_{(44)}-x_d(kT+T)|_{(28)}\right\|+\left\|e_d(kT+T)|_{(44)}-e_d(kT+T)|_{(28)}\right\|)\end{aligned}$$

[0276]

[0277] 여기서, $l_2 \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 $\Sigma_{\bar{\Delta}} := \chi_d(kT) \in \mathbb{R}^{2n} : \|\chi_d\| \leqslant \Delta\}$ 에 관한 $V(\cdot)$ 의 Lipschitz 상수이다. 수학식(44)와 수학식(28)에 동일한 평가 상태(estimation states)가 사용되었기 때문에, 수학식(50)은 다음과 같이 쓰일 수 있다.

$$\begin{aligned}\left\|V(\chi_d(kT+T))|_{(44)}-V(\chi_d(kT+T))|_{(28)}\right\| &\leqslant 2l_2\left\|x_d(kT+T)|_{(44)}-x_d(kT+T)|_{(28)}\right\|\\&\leqslant 2l_2\nu_1 T\end{aligned}$$

[0278]

[0279] 결과적으로, 하기의 식을 얻을 수 있다.

$$V(\chi_d(kT+T))|_{(44)}-V(\chi_d(kT)) \leqslant -\sigma_3 T\left\|\chi_d(kT)\right\|^2+2l_2\nu_1 T$$

[0280]

[0281] 임의의 $c_2 \in \mathbb{R}_{(0,\sigma_2\delta^2]}$ 에 대하여, $T < T_7 := \min\{T_1, T_8\}$ 라 하면, $T_8(c_2) := (c_2 - 2\sigma_2\sigma_3^{-1}\nu_1 l_2)/2\nu_1 l_2$. If $\sigma_3 T\left\|\chi_d(0)\right\|^2 \leqslant 2\nu_1 l_2 T$ 이고, 다음과 같이 확인된다.

[0282] 수학식(51)

$$\begin{aligned}V(\chi_d(T))|_{(44)} &\leqslant V(\chi_d(0))+2\nu_1 l_2 T\\&\leqslant 2\sigma_2\sigma_3^{-1}\nu_1 l_2+2\nu_1 l_2 T\\&\leqslant c_2.\end{aligned}$$

[0283]

[0284] 또한, $\sigma_3 T\left\|\chi_d(0)\right\|^2 > 2\nu_1 l_2 T$ 이면, $V(\chi_d(T)) < V(\chi_d(0)) \leqslant \sigma_2\left\|\chi_d(0)\right\|^2 =: c_1(\chi_d(0)) \in \mathbb{R}_{(0,\sigma_2\delta^2]}$ 이다. 어떠한 경우에도 $V(\chi_d(T)) \leqslant \max\{c_1, c_2\}$ 이다. 이제, 모든 $k \in \mathbb{R}_{[2,j]}, j \in \mathbb{Z}_{\geqslant 3}$ 에 대하여 부등식 $V(\chi_d(kT))|_{(44)} \leqslant \max\{c_1, c_2\}$ 가 항상 참이라고 가정한다. 이제 부등식에서 $k = j + 1$ 을 취한다(holds). $\sigma_3 T\left\|\chi_d(jT)\right\|^2 \leqslant 2\nu_1 l_2 T$ 일 때마다, 하기의 수학식(52)를 취한다(holds).

[0285] 수학식(52)

$$\begin{aligned}V(\chi_d(jT+T))|_{(44)} &\leqslant V(\chi_d(jT))+2\nu_1 l_2 T\\&\leqslant 2\sigma_2\sigma_3^{-1}\nu_1 l_2+2\nu_1 l_2 T\\&\leqslant c_2.\end{aligned}$$

[0286]

[0287] 만약 $\sigma_3 T \|\chi_d(jT)\|^2 > 2\nu_1 l_2 T$ 라면, 두가지 경우로 나뉘어 질 수 있다. $k \leqslant j$인 경우 $\sigma_3 T \|\chi_d(kT)\|^2 > 2\nu_1 l_2 T$ 일 수 있으며, 이와 보완적으로 $0 < i < k \leqslant j$ 의 경우 $\sigma_3 T \|\chi_d(kT)\|^2 > 2\nu_1 l_2 T$ 이거나 $\sigma_3 T \|\chi_d(iT)\|^2 \leqslant 2\nu_1 l_2 T$ 일 수 있다. 전 영역(yields)는 수학식(53)으로 표현되며,

[0288] 수학식(53)

$$V(\chi_d(jT+T))|_{(44)} \leqslant V(\chi_d(0)) - \sum_{h=0}^{j} (\sigma_3 T \|\chi_d(hT)\|^2 - 2\nu_1 l_2 T)$$

[0289] $$< c_1$$

[0290] 후자는 수학식(54)로 표현된다.

[0291] 수학식(54)

$$V(\chi_d(jT+T))|_{(44)} \leqslant V(\chi_d(iT)) - \sum_{h=i}^{j} (\sigma_3 T \|\chi_d(hT)\|^2 - 2\nu_1 l_2 T)$$

$$\leqslant V(\chi_d(iT))$$

$$\leqslant 2\sigma_2 \sigma_3^{-1} \nu_1 l_2$$

[0292] $$< c_2.$$

[0293] 어느 경우에나, $V(\chi_d(jT+T)) \leqslant \max\{c_1, c_2\}$ 은 유지될 수 있기 때문에, $\|\chi_d(kT)\|$ 균등하게 경계 지어 질 수 있다.(uniformly bounded)

[0294] 궤도(trajectories)가 $\sigma_3 T \|\chi_d(0)\|^2 > 2\nu_1 l_2 T$ 과 함께 시작되면, 수학식(49)는 $\sigma_3 T \|\chi_d(k_{\text{uub}} T)\|^2 \leqslant 2\nu_1 l_2 T$ 와 같은 유한한 $k_{\text{uub}} \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}$ 가 존재함을 의미한다. $\|\chi_d(kT)\|$ 의 궁극적인 경계(ultimate boundedness)를 증명하기 위해, $\chi_d(k_{\text{uub}} T)$ 을 시작점으로 재설정 할 수 있다. 이러한 경우, 모든 $k \in \mathbb{Z}_{\geqslant k_{\text{uub}}}$ 에 대하여 $V(\chi_d(kT)) \leqslant \max\{c_1(\chi_d(k_{\text{uub}} T)), c_2\} = c_2$ 가 성립한다. 그러므로, $\|\chi_d(kT)\| \leqslant \sqrt{c_2/\sigma_1}$ for all $k \geqslant k_{\text{uub}}$. 와 같은 유한한 k_{uub} 가 존재하게 된다. $\|x_d(t)\|$ 의 획일한 궁극적 경계(the uniform ultimate boundedness)를 증명하기 위해, 하기의 $t \in [kT, kT+T)$ 에 대한 주요화(majorization)를 획득할 수 있다.

[0295]
$$\begin{aligned}\|x_d(t)\| &\leqslant \|x_d(kT)\| + \left\| \int_{kT}^{t} f(x_d(\tau)) + g(x_d(\tau))(K_d^k \hat{x}_d(kT) + F_d h(x_d(kT)))\, \mathrm{d}\tau \right\| \\ &\leqslant \|x_d(kT)\| + T \left\| f(0) + g(0)(K_d^k x_d(kT) - K_d^k e_d(kT)) \right\| + T \left\| g(0) F_d^k h(x_d(kT)) \right\| \\ &\quad + \int_{kT}^{t} \| f(x_d(\tau)) + g(x_d(\tau))(K_d^k \hat{x}_d(kT) + F_d h(x_d(kT))) \\ &\quad - (f(0) + g(0)(K_d^k \hat{x}_d(kT) + F_d h(x_d(kT)))) \| \, \mathrm{d}\tau \\ &\leqslant \left((1 + T \left\| g(0) K_d^k \right\|) \|x_d(kT)\| + T \left\| g(0) K_d^k \right\| \|e_d(kT)\| \right) + T \left\| g(0) F_d^k \right\| l_3 \|x_d(kT)\| \\ &\quad + \int_{kT}^{t} l_1 \|x_d(\tau)\| \, \mathrm{d}\tau\end{aligned}$$

[0296] 여기서, $l_3 \in \mathbb{R}_{>0}$ 은 Σ^{Δ}에 관한 $h(\cdot)$ 의 Lipschitz 상수이다. Gronwall-Bellman의 부등식에 따르면 이는 다음의 수학식(55)와 같다.

[0297] 수학식(55)

[0298]
$$\|x_d(t)\| \leqslant \mathrm{e}^{l_1(t-kT)} \left((1 + T \left\| g(0) K_d^k \right\| + T l_3 \left\| g(0) F_d^k \right\|) \|x_d(kT)\| + T \left\| g(0) K_d^k \right\| \|e_d(kT)\| \right)$$

[0299]
$$\leqslant \mu_2 \|\chi_d(kT)\|$$

[0300] 여기서,

[0301]
$$\mu_2 = \sup_{k \in \mathbb{Z}_{\geqslant 0}} \mathrm{e}^{l_1 T} \sqrt{(1 + T \left\| g(0) K_d^k \right\| + T l_3 \left\| g(0) F_d^k \right\|)^2 + T^2 \left\| g(0) K_d^k \right\|^2} < \infty$$

[0302] 이다. 이는 $\|x_d(t)\|$ 가 동시에 균일하게(uniformly) $\|\chi_d(kT)\|$ 에 한정됨을 의미하고, 모든 $t > t_{uub}$에 대하여 $\|x_d(t)\| \leqslant \mu_2 \sqrt{c_2/\sigma_1}$ 과 같은 $t_{uub} \in \mathbb{R}_{>k_{uub}T}$ 가 존재함을 의미한다. 그러므로, 비선형 시스템의 수학식(2)는 수학식(27)에 의하여 디지털 재설계 되어 균일하게 궁극적으로 제한됨(ultimately bounded)을 확인할 수 있다.

[0303] 한편, 다시 도 3을 참조하면, 수중글라이더(3)의 이산적으로 분포된 비선형 모델의 국부 거동을 바탕으로 선형화된 샘플치를 획득하는 출력궤환 제어장치(1)는 입력부(11), 산출부(13), 옵저버(15) 및 컨트롤러(17)를 포함할 수 있다.

[0304] 입력부(11)는 수중환경에 세팅된 수중글라이더(3)의 동적 구동을 표현하는 운동방정식의 초기값을 설정할 수 있다.

[0305] 산출부(13)는 입력부(11)에서 설정된 초기값을 기준으로 수중글라이더(3)의 동적 구동이 수식화된 비선형 모델을 획득할 수 있다.

[0306] 옵저버(15)는 이중선형 행렬 부등식(BMI)을 기반으로 산출부(13)에서 획득한 비선형 모델의 수식을 선형 모델 샘플치의 수식으로 변환할 수 있다.

[0307] 컨트롤러(17)는 선형 행렬 부등식(LMI)을 기반으로 디지털 재설계(DR)되고, 산출부(13)에서 연속적으로 획득되는 비선형 모델과 옵저버(15)에서 변환된 샘플치를 비교하여, 샘플치의 광대역 안정성을 검증할 수 있다. 이와 같은 출력궤환 제어장치(1)는 전술한 출력궤환 제어방법에 구성요소로 포함되어 기능하며, 기능에 대한 동일한

설명이 중복됨으로 해당 설명을 생략하도록 한다.

[0309] **<실험예1>**

[0310] 수중글라이더(3)의 모델에 다음과 같은 초기 입력값으로 실험을 진행하였다.

[0311]
$$g = 9.8\ \text{m/s}^2,\quad m = 28\ \text{kg},\quad m_{0_e} = 1.46\ \text{kg}$$
$$J = 0.1\ \text{kg m}^2,\quad \varkappa_{L_0} = 0\ \text{kg/m},\quad \varkappa_L = 300\ \text{kg/m}$$
$$\varkappa_q = -5\ \text{Nms},\quad \varkappa_{D_0} = 10\ \text{kg/m},\quad \varkappa_D = 100\ \text{kg/m}$$
$$\varkappa_{M_0} = 1\ \text{Nm},\quad \varkappa_M = -40\ \text{Nm},\quad \delta = 0.3$$

[0312] 수학식(2)의 형태를 한 비선형 모델을 획득하기 위해, 하기의 함수와 같은 출력값을 선택하였다.

[0313]
$$h(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 + x_4 \end{bmatrix}$$

[0314] 이론 1을 이용한 최적화 선형 모델을 기반으로, 코스트 함수 $J_1 = \int_0^\infty (x^T Q_c x + u^T R_c u)\mathrm{d}t$ 과 디자인 파라미터 $Q_c = \mathrm{diag}\{0.1, 0.1, 1, 1, 1\}$ 와 $R_c = \mathrm{diag}\{0.01, 1\}$ 을 통해 선형 2차 조절 기법(linear quadratic regulation technique)에 적용되는 수학식(22)와 같은 아날로그 컨트롤러를 획득할 수 있다. 추가적으로, 관찰 획득값은 $J_2 = \int_0^\infty (x^T Q_o x + y^T R_o y)\mathrm{d}t$ 와 $Q_o = 10I_5$ 및 $R_o = 0.001I_2$ 을 토대로 획득하였다. 정리 3을 통해, 디지털 재설계(DR)된 아날로그 컨트롤러(17)를 획득할 수 있다.

[0315] 정상 상태(steady)의 수중글라이더(3)에 대한 하기의 평형을 고려하면 t=0인 경우 다음과 같으며,

[0316]
$$(V_e, \phi_e, m_{0_e}, \alpha_e, \Omega_e) = (1\ \text{m/s}, -0.5236\ \text{rad}, 2.1138\ \text{kg}, 0.0598\ \text{rad}, 0\ \text{rad/s})$$

[0317] t=20인 경우 다음과 같다.

[0318]
$$(V_e, \phi_e, m_{0_e}, \alpha_e, \Omega_e) = (1\ \text{m/s}, 0.5236\ \text{rad}, -2.1138\ \text{kg}, -0.0598\ \text{rad}, 0\ \text{rad/s})$$

[0319] 두 경우 모두, 하강 및 상승하는 글라이딩과 부합한다. 초기 상태는

[0320]
$$x_0 = \begin{bmatrix} 2 - V_e & -1.0472 - \phi_e & 1.55 - m_{0_e} & 0.0087 - \alpha_e & \frac{\varkappa_q}{\varkappa_M} 0.15 - \Omega_e \end{bmatrix}^T$$

[0321] 이며, $\hat{x}_0 = (0, 0, 0, 0, 0)^T$ 이다. 운영 순간 설정(operating instant set) Λ_T에 대하여, 실험예 1에서는 T=0.5s로 설정하였다.

[0323] **<실험예1>의 결과**

[0324] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 T=0.5s로 설정된 초기 설정값을 기준으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다. 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.5s 조건에서 입력된 제어값을 바탕으로 비선형 모델과 선형

모델을 비교한 그래프이다. 도 5 및 6을 참조하면, 디지털 재설계를 통해 샘플링된 결과는 아날로그 컨트롤러에서 측정하지 못한 궤도상태와 이상적으로 근접함을 확인할 수 있다.

[0326] **<실험예2>**

[0327] 실험예2는 실험예1의 조건에서 T=0.2s 로 변경하여 진행하였다.

[0329] **<실험예2>의 결과**

[0330] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.2s로 설정된 초기 설정값을 기준으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다. 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 T=0.2s 조건에서 입력된 제어값을 바탕으로 비선형 모델과 선형 모델을 비교한 그래프이다. 도 7및 8을 참조하면, 실험예1의 결과보다 실험예2의 결과가 아날로그 컨트롤러의 결과에 더욱 근접한 결과를 산출한 것을 확인할 수 있다.

[0331] 이상에서 대표적인 실시예를 통하여 본 발명을 상세하게 설명하였으나, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 상술한 실시예에 대하여 본 발명의 범주에서 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 변형이 가능함을 이해할 것이다. 그러므로 본 발명의 권리 범위는 설명한 실시예에 국한되어 정해져서는 안 되며, 후술하는 특허청구범위뿐만 아니라 특허청구범위와 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태에 의하여 정해져야 한다.

부호의 설명

[0333] S1: 운동방정식의 초기값을 입력받는 단계

S3: 비선형 모델을 획득하는 단계

S5: 선형 모델 샘플치로 변환하는 단계

S7: 샘플치의 안정성을 검증하는 단계

1: 출력궤환 제어장치

11: 입력부

13: 산출부

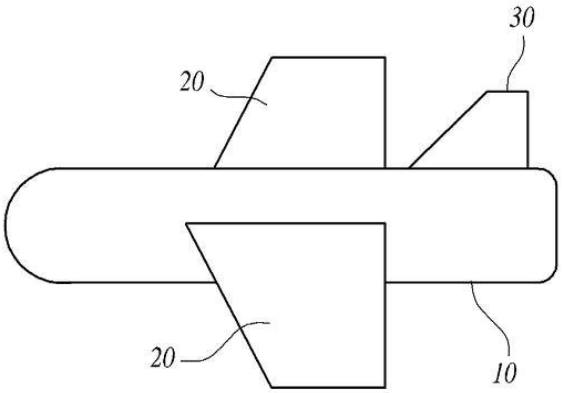
15: 옵저버

17: 컨트롤러

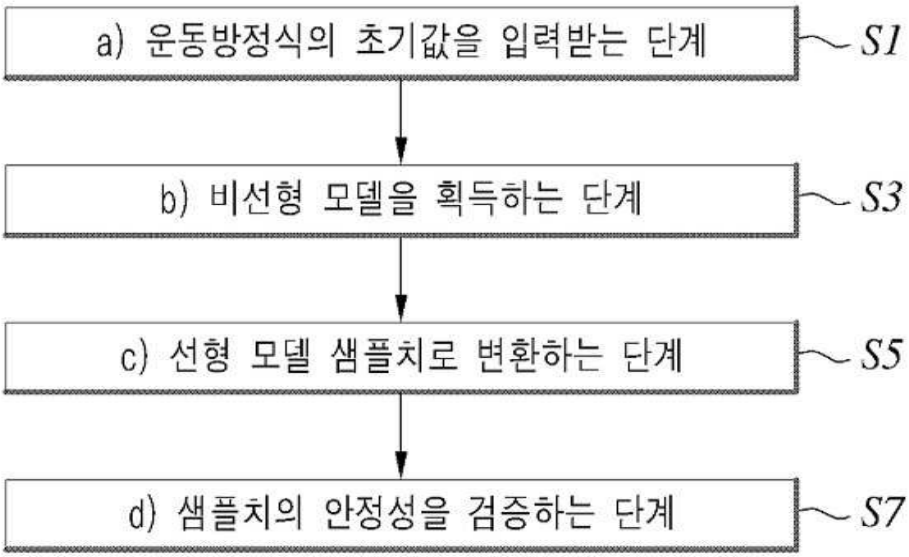
3: 수중글라이더

도면

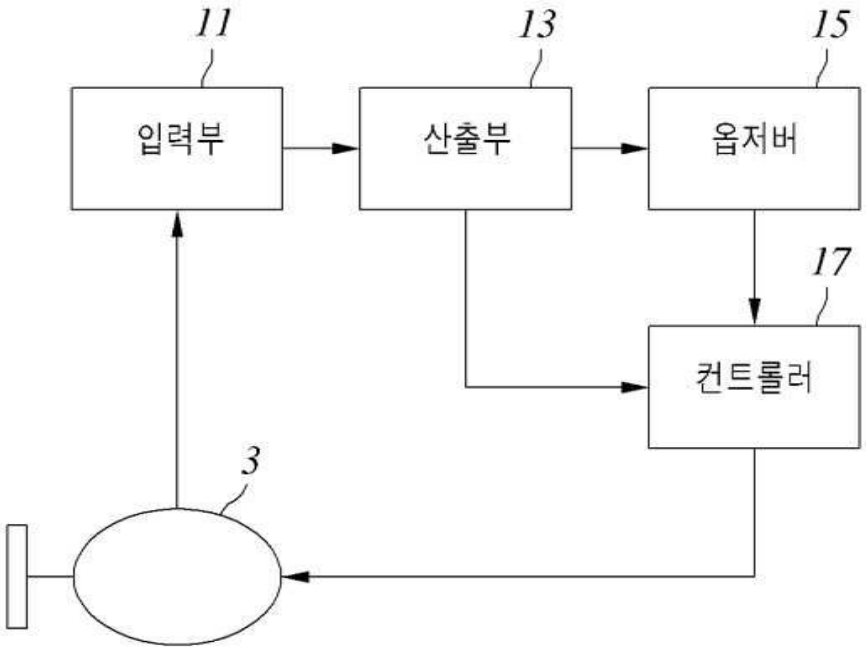
도면1


30
20
20
10

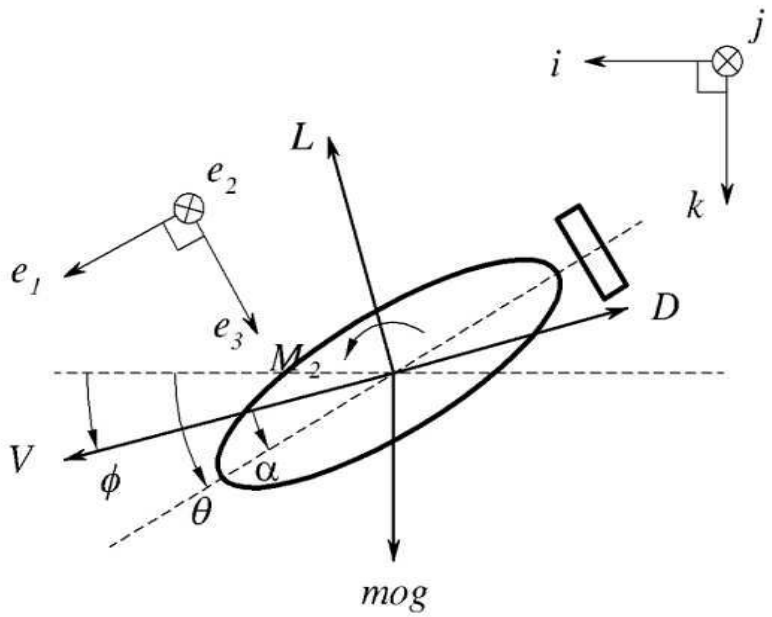
도면2


a) 운동방정식의 초기값을 입력받는 단계
S1
b) 비선형 모델을 획득하는 단계
S3
c) 선형 모델 샘플치로 변환하는 단계
S5
d) 샘플치의 안정성을 검증하는 단계
S7

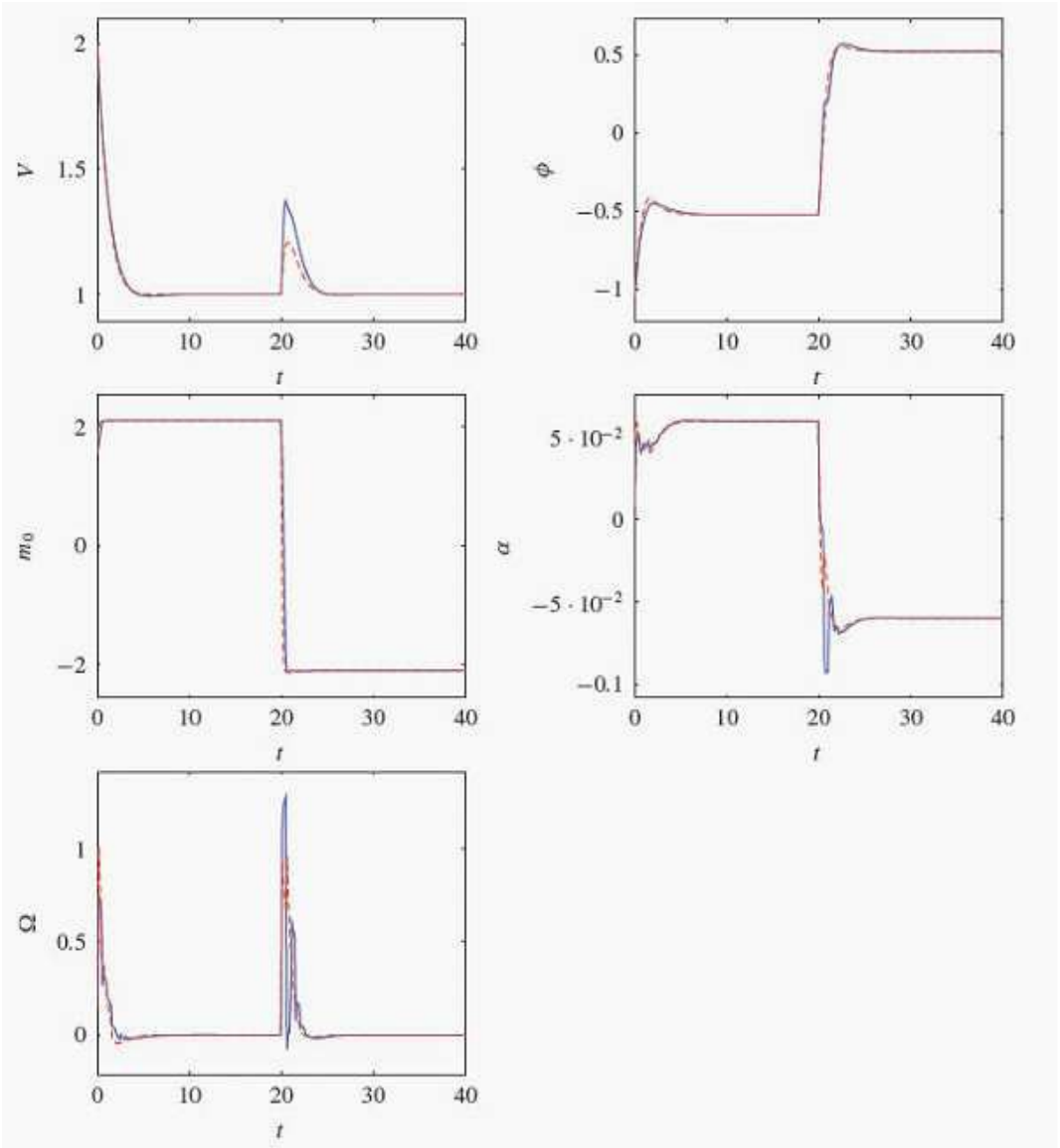
도면3



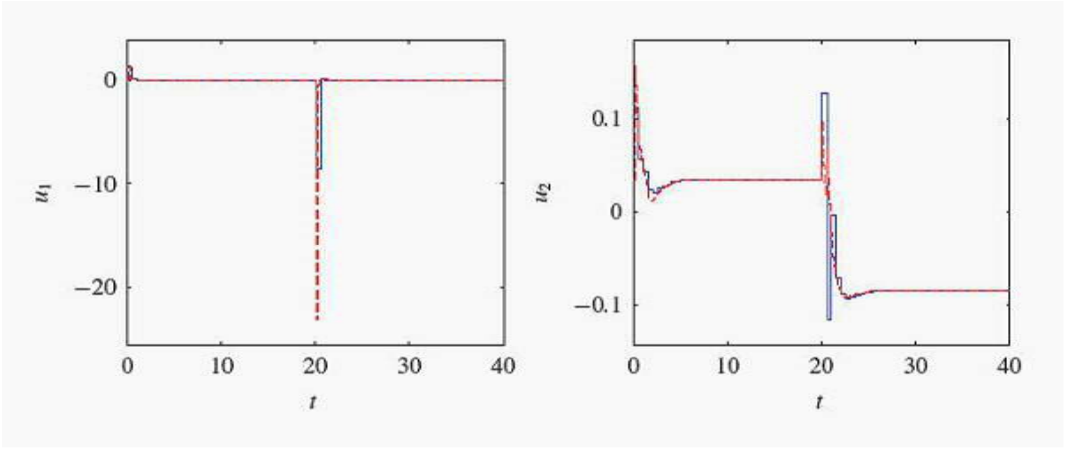
도면4



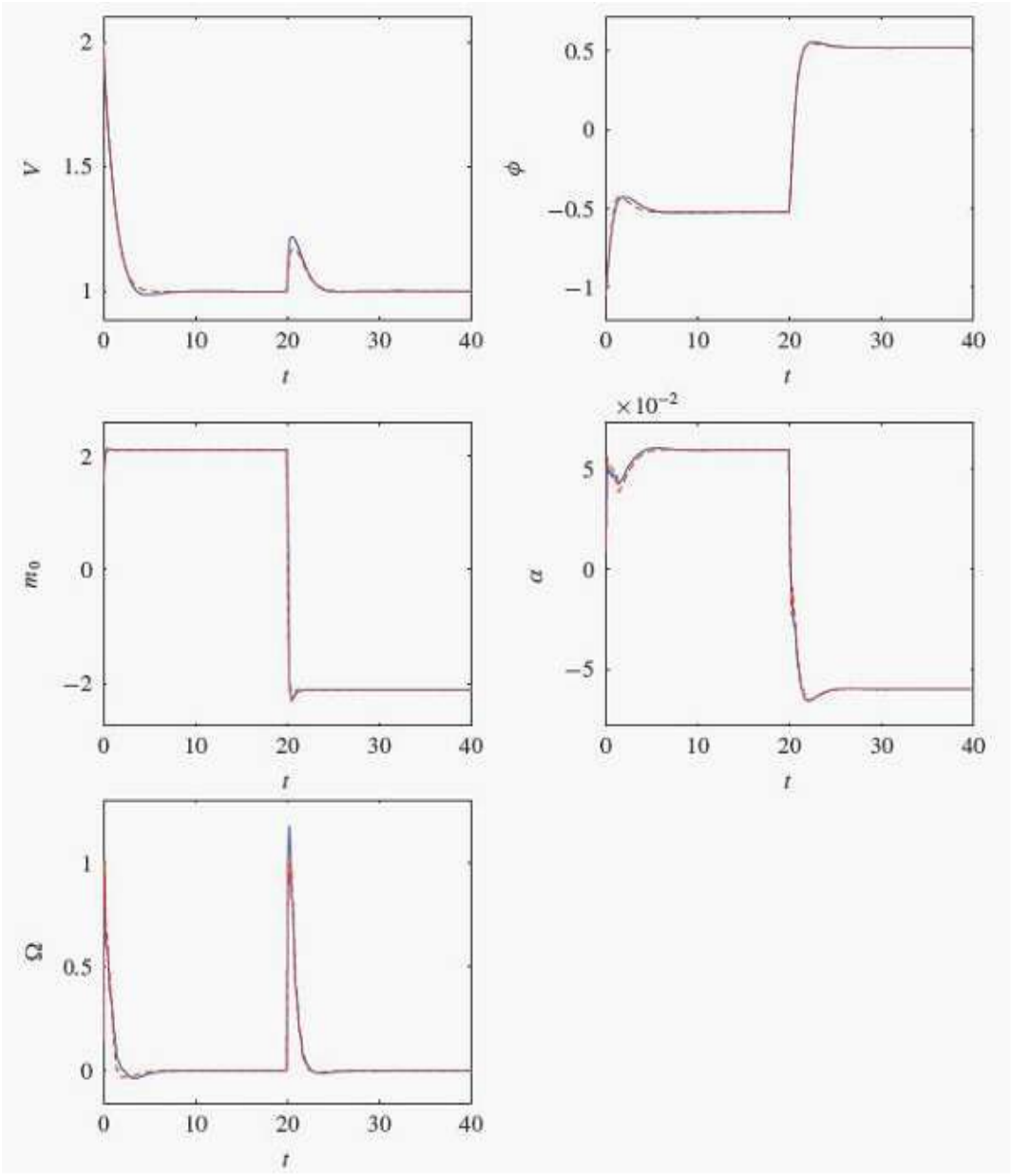
도면5



도면6



도면7



도면8

