



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년12월28일
 (11) 등록번호 10-1690154
 (24) 등록일자 2016년12월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 G05D 1/02 (2006.01) B63G 8/00 (2006.01)
 (52) CPC특허분류
 G05D 1/0206 (2013.01)
 B63G 8/001 (2013.01)
 (21) 출원번호 10-2015-0138755
 (22) 출원일자 2015년10월01일
 심사청구일자 2015년10월01일
 (56) 선행기술조사문헌
 KR101370649 B1*
 *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
 한밭대학교 산학협력단
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
 (72) 발명자
 김도완
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
 (74) 대리인
 특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 7 항

심사관 : 김동성

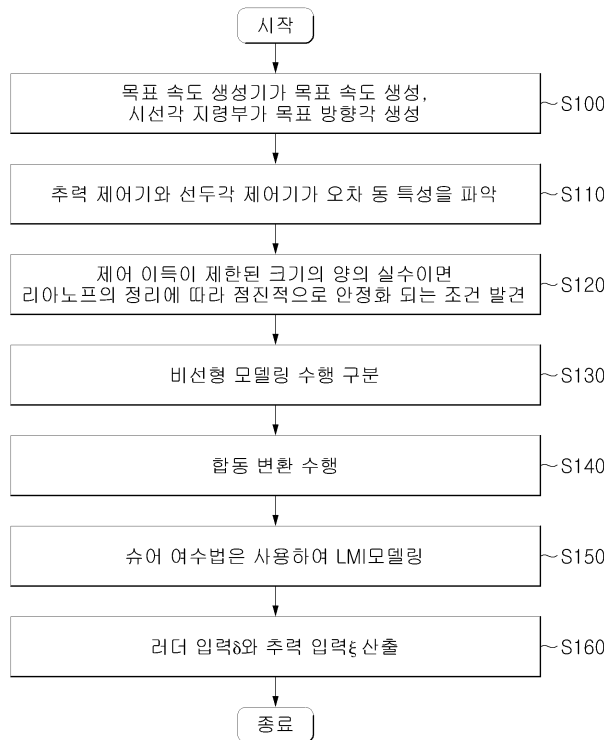
(54) 발명의 명칭 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법

(57) 요약

본 발명은 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법에 관한 것으로, 특히 무인 잠수정에 있어서 비선형 피드백 제어기에 의해 전후 속도(surge speed)가 일정하게 유지될 때에 선형행렬부등식을 사용하여 경로를 제어할 수 있도록 한 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법을 제공하는 데 있다.

(뒷면에 계속)

대표도 - 도9



또한, 본 발명에 따르면, 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 목표 속도 생성기; 현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 추력 제어기; 입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 시선각 지령부; 현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 선수각 제어기를 포함하는 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법이 제공된다.

(52) CPC특허분류

B63B 2702/10 (2013.01)

B63G 2008/002 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711022985

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 신진연구자지원

연구과제명 입력 포화 및 지연을 가지는 비선형 시스템을 위한 최적 디지털 퍼지 제어 기법 연구를 통한 자율 수중글라이더의 최적 운항에 적용.

기여율 1/1

주관기관 한밭대학교

연구기간 2015.05.01 ~ 2016.04.30

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

삭제

청구항 2

입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 목표 속도 생성기;

현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 추력 제어기;

입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 시선각 지령부; 및

현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 선수각 제어기를 포함하며,

상기 추력 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수인 흡입 영역에 있으면 비선형행렬부등식을 구한후에 이를 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하고,

상기 선수각 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수인 흡입 영역에 있으면 비선형행렬부등식을 구한후에 이를 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 러더 입력을 생성하는 무인 잠수정의 경로 추적 장치.

청구항 3

청구항 2항에 있어서,

상기 흡입 영역은 리아푸노프 양한정 행렬의 크기를 줄여 확장하는 무인 잠수정의 경로 추적 장치.

청구항 4

입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 목표 속도 생성기;

현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 추력 제어기;

입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 시선각 지령부; 및

현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 선수각 제어기를 포함하며,

상기 추력 제어기와 선수각 제어기는 비선형행렬부등식을 구한후에 구분 비선형 모델링을 수행하고, 합동 변환을 수행한 후에, 슈어 여수법을 적용하여 선형행렬부등식을 형성하는 무인 잠수정의 경로 추적 장치.

청구항 5

삭제

청구항 6

(A) 목표 속도 생성기가 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 단계;

(B) 추력 제어기가 현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 단계;

(C) 시선각 지령부가 입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 단계; 및

(D) 선수각 제어기가 현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 단계를 포함하며,

상기 (B) 단계는

(B-1) 추력 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수이면 비선형행렬부등식을 구하는 단계; 및

(B-2) 상기 비선형행렬부등식을 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 단계를 포함하는 무인 잠수정의 경로 추적 방법.

청구항 7

청구항 6항에 있어서,

상기 (B-2) 단계는

구분 비선형 모델링을 수행하는 과정과,

합동 변환을 수행하는 과정과,

슈어 여수법을 사용하여 선형행렬부등식을 형성하는 과정을 포함하는 무인 잠수정의 경로 추적 방법.

청구항 8

(A) 목표 속도 생성기가 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 단계;

(B) 추력 제어기가 현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 단계;

(C) 시선각 지령부가 입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 단계; 및

(D) 선수각 제어기가 현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 단계를 포함하며,

상기 (D) 단계는

(D-1) 상기 선수각 제어기가 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수이면 비선형행렬부등식을 구하는 단계; 및

(D-2) 상기 선수각 제어기가 비선형행렬부등식을 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 러더 입력을 생성하는 단계를 포함하는 무인 잠수정의 경로 추적 방법.

청구항 9

청구항 8항에 있어서,

상기 (D-2) 단계는

구분 비선형 모델링을 수행하는 과정과,

합동 변환을 수행하는 과정과,

슈어 여수법을 사용하여 선형행렬부등식을 형성하는 과정을 포함하는 무인 잠수정의 경로 추적 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법에 관한 것으로, 특히 무인 잠수정에 있어서 비선형 피드백 제어기에 의해 전후 속도(surge speed)가 일정하게 유지될 때에 선형행렬부등식을 사용하여 경로를 제어할 수 있도록 한 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법을 제공하는 데 있다.

[0002]

배경 기술

[0003] 무인잠수정은 사용자가 미리 정의한 경로점(Waypoint)을 따라 이동하면서, 측면 주사 소나 등의 초음파 센서를 이용하여 해저면을 탐색한다. 정확한 해저면 탐색을 위해서는 사용자가 정의한 경로를 벗어나지 않고 유지하는 것이 필요하다. 이를 위한 무인 잠수정의 유도 제어가 많이 연구되고 있다.

- [0004] 이러한 연구는 시선각(Line Of Sight)을 이용한 경로점 추적과, 유도 비전(The Vision Based Guidance) 등을 이용해서 수행되고 있으며, 이 중에서 시선각을 이용한 경로점 추적이 단순성과 용이한 장작성 때문에 가장 널리 연구되고 있다.
- [0005] 상기 시선각을 이용한 경로점 추적의 원리는 무인 잠수정의 현재 위치와 도달해야 할 경로점 사이의 시선각을 사용하고 있다.
- [0006] 이와 같은 경로 유도는 슬라이딩 모델 제어(Sliding model control), 백스테핑 기술(Backstepping technique), 모델 예측 제어(Model predictive control) 등을 포함하여 여러 가지 설계 기법이 제안되고 있다.
- [0007] 최근에는 가장 유력한 현대 제어 방법인 선형행렬부등식(LMIs:Linear Matrix Inequalities)에 기반한 설계 기법이 무인 잠수정의 유도 제어에 사용되고 있다.
- [0008] 상기 설계 기법은 선형행렬부등식의 제약 조건안에서 최적화하는 것으로 주어진 유도 제어를 해결하는 것이다.
- [0009] 선행문헌 Ghaoui and Niculescu(2000)에서 언급 하였듯이 선형행렬부등식 접근법은 서로 다른, 심지어 모순되는 여러 조건을 설계에 적용할 수 있게 하며, 성능 제약과 실행 가능성 사이에 트레이드 오프(trade-offs)를 가능하게 한다.
- [0010] 대부분의 선형행렬부등식을 이용한 설계의 선행문헌은 H_{∞} 제어의 차수의 감소, 이득 계획 제어, 강인성 제어, 선형 모델 등을 포함한다. 그러나, 무인 잠수정의 동특성은 본질적으로 비선형이고, 커플링되어 있어서, 대부분의 선형 제어는 중요한 비선형 효과가 존재하는 상황에서 안정성과 성능을 만족시키는 어렵다. 더욱이, 선형행렬부등식을 이용한 경로점 제어 연구는 다른 접근들과 달리 많은 연구들이 수행되지 않았다.
- [0011]

선행기술문헌

비특허문헌

- [0012] (비특허문헌 0001) (1) Aguiar, A. P., & Antonio, M. P. (2007). Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents. International Journal of Control, 80(7), 1092.1108.
- (비특허문헌 0002) (2) Alamo, T., Cepeda, A., & Limon, D. (2005). Improved computation of ellipsoidal invariant sets for saturated control systems. In Proc. 44th IEEE conf. decision and control, and europ. control conf. 2005 (pp. 6216.6221). Seville, Spain.
- (비특허문헌 0003) (3) Borhaug, E., & Pettersen, K.Y. (2005). Adaptive way-point tracking control for underactuated autonomous vehicles. In Decision and control, 2005 and 2005 european control conference. CDC-ECC ' 05 (pp. 4028.4034).
- (비특허문헌 0004) (4) Cao, Y. Y., & Lin, Z. (2003). Robust stability analysis and fuzzy-scheduling control for nonlinear systems subject to actuator saturation. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 11(1), 57.67.
- (비특허문헌 0005) (5) Feng, Z.,&Allen, R. (2004). Reduced order H_{∞} control of an autonomous underwater vehicle. Control Engineering Practice, 12(12), 1511.1520.
- (비특허문헌 0006) (6) Figueiredo, K., Vellasco, M., Pacheco, M., & Souza, F. J. D. (2014). Hierarchical neuro-fuzzy models based on reinforcement learning for autonomous agents. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 10(4), 1471.1494.
- (비특허문헌 0007) (7) Fossen, T. I. (2002). Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics.
- (비특허문헌 0008) (8) Fossen, T.I., Breivik, M., & Skjetne, R. (2003). Line-of-sight path following of underactuated marine craft. In Proceedings of the 6th IFAC MCMC (pp. 244.249).
- (비특허문헌 0009) (9) Fossen, T. I., & Pettersen, K. Y. (2014). On uniform semiglobal exponential

- stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws. *Automatica*, 50(11), 2912.2917.
- (비특허문헌 0010) (10) Fridman, E., & Shaked, U. (2002). An improved stabilization method for linear timedelay systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(11), 1931.1937.
- (비특허문헌 0011) (11) Fridman, E., & Shaked, U. (2003). On reachable sets for linear systems with delay and bounded peak inputs. *Automatica*, 39(11), 2005.2010.
- (비특허문헌 0012) (12) Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A. J., & Chilali, M. (1995). LMI control toolbox for use with matlab. Natick, MA: MathWorks.
- (비특허문헌 0013) (13) Gaskett, C., Wettergreen, D., & Zelinsky, A. (1999). Autonomous guidance and control for an underwater robotic vehicle. In *International conference on field and service robotics* (pp. 29.31).
- (비특허문헌 0014) (14) Ghaoui, L. E., & Niculescu, S. (2000). *Advances in linear matrix inequality methods in control*. Siam.
- (비특허문헌 0015) (15) Guo, J., Chiu, F. C., & Huang, C. C. (2003). Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 30(16), 2137.2155.
- (비특허문헌 0016) (16) Healey, A. J., & Lienard, D. (1999). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(3), 327.339.
- (비특허문헌 0017) (17) Hu, T., & Lin, Z. (2001). *Control systems with actuator saturation: analysis and design*. Boston, MA: Birkhauser.
- (비특허문헌 0018) (18) Innocenti, M., & Campa, G. (1999). Robust control of underwater vehicles: sliding mode vs. LMI synthesis. In *Proc. 1999 American control conference*, 5(pp. 3422.3426).
- (비특허문헌 0019) (19) Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall.
- (비특허문헌 0020) (20) Kim, D. W., Park, J. B., & Joo, Y. H. (2007). Effective digital implementation of fuzzy control systems based on approximate discrete-time models. *Automatica*, 43(10), 1671-1683.
- (비특허문헌 0021) (21) Kim, D. W., Lee, H. J., & Tomizuka, M. (2010). Fuzzy stabilization of nonlinear systems under sampled-data feedback: an exact discrete-time model approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(2), 251.260.
- (비특허문헌 0022) (22) Naeem, W., Sutton, R., Ahmad, S. M., & Burns, R. S. (2003). A review of guidance laws applicable to unmanned underwater vehicles. *The Journal of Navigation*, 56(1), 15.29.
- (비특허문헌 0023) (23) Naeem, W., Sutton, R., & Ahmad, S. M. (2004). Pure pursuit guidance and model predictive control of an autonomous underwater vehicle for cable/pipeline tracking. *IMarEST Journal of Marine Science and Environment, PartC*, 1, 15.25.
- (비특허문헌 0024) (24) Prestero, T. (2001). *Verification of the six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle* (M.S. thesis), MA: MIT.
- (비특허문헌 0025) (25) Refsnes, J. E. (2007). *Nonlinear model-based control of slender body AUVs* (Ph.D. thesis), Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology.
- (비특허문헌 0026) (26) Refsnes, J. E., Sorensen, A. J., & Pettersen, K. Y. (2008). Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: theory and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(5), 930.946.
- (비특허문헌 0027) (27) Roche, E., Senéme, O., & Simon, D. (2010). LFT/ H^∞ varying sampling control for autonomous underwater vehicles. In *Proc. 4th IFAC symposium on system, structure and control* (pp.

17.24).

(비특허문헌 0028) (28) Silvestre, C., & Pascoal, A. (2004). Control of the INFANTE AUV using gain scheduled static output feedback. Control Engineering Practice, 12(12), 1501.1509.

(비특허문헌 0029) (29) Tanaka, K., & Wang, H. O. (2001). Fuzzy control systems design and analysis: an linear matrix inequality approach. New York: Wiley.

(비특허문헌 0030) (30) Yakubovich, V. A. (1971). S-procedure in nonlinear control theory. Vestnik Leningrad University, 1, 62.77.

(비특허문헌 0031) (31) Shi, P., Luan, X., & Liu, C. L. (2012). Filtering for discrete-time systems with stochastic incomplete measurement and mixed delays. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(6), 2732.2739.

(비특허문헌 0032) (32) Su, X., Wu, L., Shi, P., & Song, Y. D. (2014). A novel approach to output feedback control of fuzzy stochastic systems. Automatica, 50(12), 3268.3275.

(비특허문헌 0033) (33) Wang, B., Zhu, Z., Ge, H., & Dai, Y. (2014). Multi-target localization in underwater acoustic sensor networks based on compressive sampling matching pursuit. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 10(6), 2167-2177.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 본 발명은 무인 잠수정에 있어서 비선형 피드백 제어기에 의해 전후 속도가 일정하게 유지되는 동안에 선형행렬 부등식을 사용하여 경로점을 제어할 수 있도록 한 무인 잠수정의 경로 추적 장치 및 그 방법을 제공하는 데 있다.

[0014]

과제의 해결 수단

[0015] 본 발명의 일측면은 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 목표 속도 생성기; 현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 추력 제어기; 입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 시선각 지령부; 및 현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 선수각 제어기를 포함한다.

[0016] 또한, 본 발명의 일측면의 상기 추력 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수인 흡입 영역에 있으면 비선형행렬부등식을 구한후에 이를 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하고, 상기 선수각 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수인 흡입 영역에 있으면 비선형행렬부등식을 구한후에 이를 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 러더 입력을 생성한다.

[0017] 또한, 본 발명의 일측면의 상기 흡입 영역은 리아푸노프 양한정 행렬의 크기를 줄여 확장한다.

[0018] 또한, 본 발명의 일측면의 상기 추력 제어기와 선수각 제어기는 비선형행렬부등식을 구한후에 구분 비선형 모델링을 수행하고, 합동 변환을 수행한 후에, 슈어 여수법을 적용하여 선형행렬부등식을 형성한다.

[0019] 한편, 본 발명의 다른 측면은 (A) 목표 속도 생성기가 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 산출하는 단계; (B) 추력 제어기가 현재 속도와 목표 속도의 차이인 명령 속도를 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 단계;

[0020] (C) 시선각 지령부가 입력된 정보에 의하여 목표 방향각을 산출하는 단계; 및 (D) 선수각 제어기가 현재 방향각과 목표 방향각의 차이인 명령 방향각을 사용하고, 점진적으로 안정화되는 조건의 선형행렬부등식(LM1)의 해를 산출하여 선수각 구동부의 러더 입력을 생성하는 단계를 포함한다.

[0021] 또한, 본 발명의 다른 측면의 상기 (B) 단계는 (B-1) 추력 제어기는 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수이면

비선형행렬부등식을 구하는 단계; 및 (B-2) 상기 비선형행렬부등식을 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 추진기의 추력 입력을 생성하는 단계를 포함한다.

[0022] 또한, 본 발명이 다른 측면의 상기 (B-2) 단계는 구분 비선형 모델링을 수행하는 과정과, 합동 변환을 수행하는 과정과, 슈어 여수법을 사용하여 선형행렬부등식을 형성하는 과정을 포함한다.

[0023] 또한, 본 발명의 다른 측면의 상기 (D) 단계는 (D-1) 상기 선수각 제어기가 제어이득이 제한된 크기의 양의 실수이면 비선형행렬부등식을 구하는 단계; 및 (D-2) 상기 선수각 제어기가 비선형행렬부등식을 선형행렬부등식으로 변환하여 그 해를 산출하여 러더 입력을 생성하는 단계를 포함한다.

[0024] 또한, 본 발명의 다른 측면의 상기 (D-2) 단계는 구분 비선형 모델링을 수행하는 과정과, 합동 변환을 수행하는 과정과, 슈어 여수법을 사용하여 선형행렬부등식을 형성하는 과정을 포함한다.

[0025]

발명의 효과

[0026] 본 발명은 비선형 피드백 제어를 통해 일정한 전후 속도를 유지하는 동안에 비선형 무인 잠수정과 관련된 수평 경로점 추적의 새로운 선형행렬부등식(LMI) 공식화를 제공한다.

[0027] 또한, 본 발명은 무인 잠수정의 선형화가 아닌 비선형에 기반하고 있으며, 추진기가 포화되어 있는 경우에도 국부적으로 점진적으로 안정화되는 것을 보장한다.

[0028] 또한, 본 발명은 잡음이나 외란을 고려하지 않은 비선형 무인 잠수정에 근거한 제어기 설계를 제공한다.

[0029] 이와 같이 본 발명에 따르면, 잡음 또는 외란에 영향을 받지 않는 강인한(Robust) 제어기 설계가 가능하다.

[0030] 또한 본 발명에 따르면 더 나은 강인성 성능을 유지하면서 더 적은 보존성의 선형행렬부등식을 발견할 수 있게 해준다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 본 발명이 적용되는 무인 잠수정의 좌표계를 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 무인 잠수정의 경로 추적 장치의 구성도이다.

도 3과 4는 Ω_c 와 (ϵ_{psi}, v, r) 의 궤적을 본 발명과 입력 제한 접근을 각각 보여준다.

도 5 내지 8은 경로점 추적과 전후 속도의 규칙성에 대한 본 발명의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 무인 잠수정의 경로 추적 방법의 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 이하에서는 특정 실시예들을 첨부된 도면을 기초로 상세히 설명하고자 한다.

[0033] 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0034] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되는 것은 아니며, 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.

[0035] 본 발명은 무인 잠수정에 있어서 비선형 피드백 제어기에 의해 전후 속도가 일정하게 유지되는 동안에 선형행렬부등식을 사용하여 경로점을 제어할 수 있도록 한다.

[0036] 이와 같은 본 발명은 목표 전후 속도와 시선각(목표 방향각)으로부터 결정되는 요각에 대한 오차 동특성의 점진적 안정화가 감소되도록 하는 것이다.

[0037] 앞선 선형행렬부등식의 연구와 반대로, 본 발명은 구분 비선형 기술에 의한 주어진 무인 잠수정의 선형이 아니고 비선형 기구학과 동역학에 근거해 있다.

[0038] 상기 구분 비선형 기술은 비선형으로 인해 부분적으로 동등한 폴리토픽(polytopic) 선형 파라미터 변형 모델(LPV: Linear Parameter-Varying)을 기반으로 해석이 가능하게 한다.

[0039] 더욱이, 선행문헌 Alamo, Cepeda, and Limon(2005)에 의해 모터브가 제공된 바와 같이, 구동기 포화의 비선형성이 설계에 반영되었다. 그러나, 선행문헌 Alamo et al., (2005)에서 부등식의 절대값 특성 대신에 δ 절차를 사용하고 있어, 제안된 방식은 더 적은 직접 제안을 포함하는 방법으로 제공된다.

[0040] 본 발명은 피드백 선형화를 사용하여 2개의 사용가능한 제어 입력, 러더각 그리고 추진기의 추진력을 독립적으로 설계할 수 있다. 이와 같은 분리된 특성을 이용하기 때문에 충분한 선형행렬부등식 조건을 리아푸노브(Lapunove) 안정 기준에서 오차 동특성의 국부적인 지수적 안정화로 생각할 수 있다.

[0041] 마지막으로, 비선형 무인 잠수정의 수평 경로점 추적이 제안된 설계 기법의 유효성을 검증하기 위해 주어진다.

[0042] 여기에서, $P>Q(P<Q)$ 는 행렬 $P-Q$ 가 양(음) 한정임을 의미한다. $\lambda_{\max}(A)(\lambda_{\min}(A))$ 는 행렬 A 의 최대 고유치(최소 고유치)를 의미한다. 그리고, $\text{col}\{\cdot\}$ 는 $\{\cdot\}$ 의 행렬로 주어진 블록을 갖는 행렬 컬럼을 의미한다. co 는 컨벡스 헐(convex hull)이다. B_n 은 $\Delta_n \in \mathbb{R}_{>0}$ 에서 $\{n: \|n\| \leq \Delta_n\}$ 의 볼(ball)을 가르킨다. $\text{sat}_{\bar{\mu}} \mu$ 는 $\bar{\mu} \in \mathbb{R}$ 에 속하고 포화 레벨 μ 가 $\mu \in \mathbb{R}$ 일때 다음의 포화 함수를 나타낸다. 생략 부호는 긴 대칭 행렬 표현을 간략하기 위해 사용되며, 일례로 $\text{Sym}\{S\} := S+S^T$ 로 적용된다.

$$\text{sat}_{\bar{\mu}} \mu := \begin{cases} \bar{\mu}, & \text{if } \mu > \bar{\mu} \\ \mu, & \text{if } |\mu| \leq \bar{\mu} \\ -\bar{\mu}, & \text{if } \mu < -\bar{\mu} \end{cases}$$

[0043]

[0044] 도 1은 본 발명이 적용되는 무인 잠수정의 좌표계를 나타내는 도면이다.

[0045] 도 1을 참조하면, 본 발명이 적용되는 무인 잠수정은 6자유도(Six degree-of-freedom) 운동을 하는 비선형 무인 잠수정으로 지구 지표에 고정된 지표 고정 좌표계(Earth-fixed frame)와 지표 고정 좌표계에 대해 움직이고 그 중심이 무인 잠수정의 부력의 중심과 일치하는 선체 고정 좌표계(Body-fixed frame)로 표현할 수 있다.

[0046] 상기 지표 고정 좌표계는 (x, y, ψ) 로 표현되며, (x, y) 는 관성 좌표계의 수직축과 수평축을 의미하며, ψ 는 요각(yaw angle)을 의미한다.

[0047] 그리고, 선체 고정 좌표계는 (u, v, r) 로 표현되며, u 는 전후 속도(Surging Velocity)를 의미하며, v 는 좌우 속도(Swying Velocity)를 의미하며, r 는 각속도(angular velocity)를 의미한다.

[0048] 이와 같은 구성에서 i) 무인 잠수정의 무게중심은 선체 고정 좌표계의 중심과 일치하며, ii) 무인 잠수정의 무게 중심은 부력 중심과 일치하고, iii) 상하면(xy면)과 좌우면(xz면)은 대칭이며(Symmetry), iv) 무인 잠수정에는 진행 방향의 조정을 위한 러더와 추진력을 위한 추진기가 설치되어 있으며, v) 구동기는 포화되어 있고, vi) 감쇠항에 있어서 2차 이상은 무시할만하며, vii)상하동요(heaving), 횡동요(rolling), 종동요(pitching)는 무시하고, viii)무게 중심의 y 위치는 무시한다.

[0049] 도 2는 본 발명의 제1 실시예의 무인 잠수정의 경로 제어 장치의 구성도이다.

[0050] 도 2 에 도시된 바와 같이, 무인잠수정의 제어부(1)는 추력 제어기(2), 선수각 제어기(3), 심도 제어기(4)로 구성된다.

[0051] 또한, 무인잠수정의 센서부(10)는 3축 가속도 및 각속도를 측정하는 관성측정기(IMU, 11), 3축 속도를 측정하는 속도계(DVL, 12), 심도를 측정하는 심도계(Depthmeter, 13), 방향각을 측정하는 방위계(Magnetometer, 14)로 구성된다.

[0052] 또한, 무인 잠수정의 상기 센서부(10)에서 입력된 정보들, 예를 들어 3축 가속도, 각속도, 3축 속도, 심도 및 방향각은 수중 복합항법부(20)에 전달된다.

[0053] 한편, 수중 복합항법부(20)는 상기 입력된 정보를 기초로 하여, 현재 속도 및 자세(방향각) 정보를 생성하여 목표 속도 생성기(30)에 입력한다. 이와 같은 수중 복합항법부(20)가 센서부(10)로부터 입력된 정보로부터 현재 속도 및 자세(방향각) 정보를 생성하는 것은 해당 분야에서 일반적으로 사용되는 다양한 방법으로 행해질 수 있

는 바, 이에 대한 구체적인 설명은 생략한다.

[0054] 목표 속도 생성기(30)는 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 계산한다. 이후, 목표 속도 생성기(30)에서 계산된 목표 속도와 수중 복합항법부(20)에서 계산된 현재 속도는 제어부(1)의 추력 제어기(2)에 입력되고, 추력 제어기(2)는 수중 복합항법부(20)에서 계산된 현재 속도와 목표 속도 생성기(30)에서 계산된 목표 속도의 차이가 줄어들도록, 그 차이를 명령 속도(명령 전후 속도, 또는 명령 좌우 속도 등)로 추진기의 RPM을 설정하도록 하는 추력 입력 정보를 생성한다. 이렇게 생성된 추력 입력은 추진기(100)에 입력된다.

[0055] 또한, 수중 복합항법부(20)는 상기 입력된 정보를 기초로 하여, 현재 위치 및 자세(방향각) 정보를 시선각(LOS) 지령부(40)에 입력한다. 이와 같은 수중 복합항법부(20)가 센서부(10)에서 입력된 정보로부터 현재 속도 및 자세(방향각) 정보를 생성하는 것은 해당 분야에서 일반적으로 사용되는 다양한 방법으로 행해질 수 있는 바, 이에 대한 구체적인 설명은 생략한다.

[0056] 이러한 시선각 지령부(40)는 입력된 정보를 기초로 목표 방향각을 생성하여, 이를 선수각 제어기(3)에 입력한다. 목표 방향각은 시선각 지령부(40)에서 계산되는 현재 무인잠수정의 위치에서 수중 복합항법부(20)에서 계산되는 무인잠수정의 선수 방향각의 차이이다. 선수각 제어기(3)는 목표 방향각의 크기가 줄어들도록 명령 방향각을 입력값으로 하여, 명령 방향각의 값이 줄어들도록 제어를 하여 러더(rudder) 입력 정보를 만들어, 이를 선수각 구동부(200)에 입력한다.

[0057] 한편, 수중 복합항법부(20)는 상기 입력된 정보를 기초로 하여, 현재 심도 정보를 생성하여 이를 심도 제어기(4)에 입력하고, 경로 정보부(50)는 기준 심도 정보를 심도 제어기(4)에 입력한다. 이후, 심도 제어기(4)는 수중 복합항법부(20)에서 입력 받은 현재 심도 정보와 경로 정보부(50)에서 입력 받은 기준 심도 정보를 제어기 입력값으로 하여, 이러한 차이값이 줄어들도록 피드백 제어를 하여, 무인잠수정의 선미(stern) 입력 정보를 출력하여, 이를 선미부(300)에 입력한다.

[0058] 이와 같은 상황에서 무인 잠수정의 기구적 그리고 동특성은 다음과 같이 주어진다.

[0059] (수학식 1)

$$\dot{\eta} = J(\psi)\phi$$

[0060]

[0061] (수학식 2)

$$M\dot{\phi} + C(\phi)\phi + D(\phi)\phi = \tau$$

[0062]

[0063] 여기에서, $\eta := [x, y, \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ 이며, $\phi := [u, v, r]^T \in \mathbb{R}^3$ 이고, $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 변환 행렬이며, $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 관성 행렬이며, $C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 각각에 가산된 질량(mass)를 포함하는 코리올리 구심력 행렬이며, $D \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 댐핑 행렬이며, $\tau = [\text{sat}_{\xi}(\xi) \quad Y_{uu\delta}u^2 \text{sat}_{\delta}(\delta) \quad N_{uu\delta}u^2 \text{sat}_{\delta}(\delta)]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 포화 제어 구동력(the saturated control actuator forces)이며, ξ 는 추진기의 추진력이며, δ 는 러더각이다. J, M, C 및 D 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$J = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_1(v, r) \\ 0 & 0 & c_2(u) \\ -c_1(v, r) & -c_2(u) & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1(u) & 0 & 0 \\ 0 & d_2(u, v) & d_3(u, r) \\ 0 & d_4(u, v) & d_5(u, r) \end{bmatrix}$$

[0064]

[0065] 여기에서, $m_1 = m - X_{\dot{u}}$, $m_2 = m - Y_{\dot{v}}$, $m_3 = mx_g - Y_{\dot{r}}$, $m_4 = mx_g - N_{\dot{v}}$,
 $m_5 = I_{zz} - N_{\dot{r}}$, $c_1 = -mv - mx_g r + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{r}}r$, $c_2 = mu - X_{\dot{u}}u$, $d_1 = X_{\dot{u}} - X_{\dot{u}|u}|u|$,
 $d_2 = Y_{\dot{v}} - Y_{\dot{u}v}u - Y_{\dot{v}|v}|v|$, $d_3 = Y_{\dot{r}} - Y_{\dot{u}r}u - Y_{\dot{r}r}|r|$, $d_4 = N_{\dot{v}} - N_{\dot{u}v}u - N_{\dot{v}|v}|v|$,
 $d_5 = N_{\dot{r}} - N_{\dot{u}r}u - N_{\dot{r}r}|r|$ 이고, m 은 무인 잠수정의 질량이며, x_g 는 중력의 x 위치이며, I_{zz} 은 관성텐서의 질
 량 모멘트이고, 관련된 계수는 선행문헌 Fossen(2002), Prestero(2001) 그리고 Refsnes(2007)에 개시되어
 있다.

[0066] 이하에서는, 목표 속도 생성기(30)가 목표 전후 속도를 생성하고 이에 따라 추력 제어기(1)가 이를 이용하여 추
 진기의 추진력을 형성하는 과정과, 시선각 지령부(40)가 목표 방향각을 생성하고, 이에 따라 선수각 제어기(3)
 가 러더각을 형성하는 방법에 대하여 설명하도록 한다.

[0067] 경로 제어는 간단하게 말하면, 도달해야 할 경로점과 현재 위치 사이의 시선각을 근접하게 위치하도록 만드는
 것이다. 시선각 지령부(40)은 수평면에 대한 시선각(목표 방향각)은 다음과 같이 산출한다.

[0068] (수학식 3)

$$\psi_d := \tan^{-1} \frac{e_y}{e_x}$$

[0069] 여기에서, x 축 위치 차이 $e_x = x - x_{dk}$ 이고, y 축 위치 차이 $e_y = y - y_{dk}$ 이며, (x_{dk}, y_{dk}) , $k \in \{1, 2, \dots, n_w\}$ 는 k 번째 경로
 점이다. $k+1$ 번째 경로점 $(x_{d(k+1)}, y_{d(k+1)})$ 은 만약(IF), $\rho \in_{>0}$ 에서 $\| \text{col} \{e_x, e_y\} \| \leq \rho$ 일때, 그러면(then) $(x_{dk}, y_{d$
 $k})$ 로부터 $(x_{d(k+1)}, y_{d(k+1)})$ 로 다음 경로점이 도달한다.

[0071] 본 발명은 수학식1과 2를 고려할 때, 수학식 2의 러더각(러더 입력 정보) δ 과 추진기의 추진력(추력 입력
 정보) ξ 을 설계하여 점진적으로 $\|e_\psi\|$ 와 $\|e_u\|$ 가 0으로 접근하도록 하는 것이다. 여기에서, 명령 방향각 e
 $\psi := \psi - \psi_d$ 이고, 명령 전후 속도 $e_u := u - u_d$ 이며, 목표 전후 속도 $u_d \in \mathbb{R}_{>0}$ 이다. 여기에서, ψ 는 현재 위치에서 요각이
 며, ψ_d 는 목표 방향각(시선각)이고, u 는 현재 위치에서 전후 속도이고, u_d 는 목표 전후 속도이다.

[0072] 제안(Proposition) 1: 이와 같은 본 발명의 목적을 달성하기 위해서는 추력 제어기(2)와 선수각 제어기(3)는 수
 학식 1과 2를 고려할 때에 변수 $\text{col}\{X, e_u\}$ 로 전환하면 $X := \text{col}\{e_\psi, v, r\}$ 일때 오차 시스템은 다음과 같이 파악
 한다.

[0073] (수학식 4)

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{e}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(e_\psi, e_x, e_y, v, r) & F_2(e_\psi, e_x, e_y, v, r) \\ F_3(r) & F_4(u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ e_u \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ F_5(u) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Bu^2 \text{sat}_{\delta}(\delta) \\ b \text{sat}_{\xi}(\xi) \end{bmatrix}$$

[0074] 여기에서, $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, B$ 및 b 는 다음과 같이 유도된다.

[0076] 먼저, $f_1(r) := (m - Y_{\dot{v}})r$, $f_2(r) := (-Y_{\dot{r}} + mx_g)r$, $f_3(u, r)$
 $+ (X_{\dot{u}} + Y_{\dot{u}r} - m)u$, $f_4(u, v) := -N_{\dot{v}} + N_{\dot{v}|v}|v| + (-X_{\dot{u}} + Y_{\dot{v}} + N_{\dot{u}v})u$,
 $f_5(u, r) := -N_{\dot{r}} + N_{\dot{r}r}|r| + (Y_{\dot{r}} + N_{\dot{u}r} - mx_g)u$ 로 정의한다.

[0077] 그리고, $-c_1(v, r)r := f_1(r)v + f_2(r)r$, $-c_2(u)r - d_3(u, r)r := f_3(u, r)r$

$c_1(v, r)u + c_2(u)v - d_4(u, v)v - d_5(\tilde{u}, \tilde{r})r$ 를 이용하면, 수학식 2는 다음과 같이 재작성된다.

[0078] (수학식 A1)

$$M\dot{\phi} = E(\phi)\phi + \tau$$

[0079] 여기서, E는 $E = \begin{bmatrix} -d_1 & f_1 & f_2 \\ 0 & -d_2 & f_3 \\ 0 & f_4 & f_5 \end{bmatrix}$ 이다. 수학식 3을 미분하고, 수학식1을 수학식 3에 대입하면,

$$\dot{\psi}_d = \frac{1}{\|\text{col}\{e_x, e_y\}\|} [\sin \psi_d \quad -\cos \psi_d] \times \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{\|\text{col}\{e_x, e_y\}\|} [\sin \psi_d \quad -\cos \psi_d] \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

[0082] 가 된다.

[0083] 이로부터 3각형 정리에 의해 다음을 얻는다.

[0084] (수학식 A2)

$$\dot{\psi}_d = - [f_7(e_\psi) \quad f_8(e_\psi)] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

[0085] 여기서, $f_7 = \frac{\sin e_\psi}{\|\text{col}\{e_x, e_y\}\|}$ 이고, $f_8 = \frac{\cos e_\psi}{\|\text{col}\{e_x, e_y\}\|}$ 이다. 변수 $\text{col}\{X, e_u\}$, 수학식 1, 수학식 A1, 수학식 A2, $f_9(v, r) := Y_{uv}v + (X_{\dot{u}} + Y_{ur} - m)r$,

$f_{10}(v, r) := (-X_{\dot{u}} + Y_{\dot{v}} + N_{uv})v + (Y_{\dot{r}} + N_{ur} - mX_g)r$ 등을 전환하면, 다음을 얻게 된다.

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{u_d}{e_\psi} f_7(e_\psi) & f_8(e_\psi) & 1 \\ 0 & -d_2(u_d, v) & f_3(u_d, r) \\ 0 & f_4(u_d, v) & f_5(u_d, r) \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_7(e_\psi) \\ f_9(v, r) \\ f_{10}(v, r) \end{bmatrix},$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{f_1(r)}{m - X_{\dot{u}}} & \frac{f_2(r)}{m - X_{\dot{u}}} \end{bmatrix}$$

$$F_4 = \frac{-d_1(u)}{m - X_{\dot{u}}}, \quad F_5 = \frac{X_{u|u}|u|u_d}{m - X_{\dot{u}}}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{uu\delta} \\ N_{uu\delta} \end{bmatrix}, \quad b = \frac{1}{m - X_{\dot{u}}}.$$

[0088]

[0089]

[0090] 보조 정리 1: $B_v * B_r$ 에서 $\zeta \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재하면 $\|F_2\| \leq \zeta$ 이다.

[0091] 먼저, 경로점을 업데이트하기 위해 $B_v \times B_r$ 에서 $\|\text{col}\{e_x, e_y\}\| \leq \rho$ 를 사용하면, $\|F_2\|$ 는 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned} & \|F_2\| \\ & \leq \left\| \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uv} & \begin{pmatrix} X_{\dot{u}} + Y_{ur} \\ -m \end{pmatrix} \\ 0 & \begin{pmatrix} -X_{\dot{u}} + Y_{\dot{v}} \\ +N_{uv} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} Y_{\dot{r}} + N_{ur} \\ -m\chi_g \end{pmatrix} \end{bmatrix} \right\| \\ & \quad \times \left\| \begin{bmatrix} f_7 \\ v \\ r \end{bmatrix} \right\| \\ & \leq \left\| \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uv} & \begin{pmatrix} X_{\dot{u}} + Y_{ur} \\ -m \end{pmatrix} \\ 0 & \begin{pmatrix} -X_{\dot{u}} + Y_{\dot{v}} \\ +N_{uv} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} Y_{\dot{r}} + N_{ur} \\ -m\chi_g \end{pmatrix} \end{bmatrix} \right\| \\ & \quad \times \sqrt{\frac{1}{\rho^2} + \Delta_v^2 + \Delta_r^2} =: \zeta \end{aligned}$$

[0092]

[0093] 보조정리2: 주어진 $a, b \in \mathbb{R}$ 이면 $\text{asat}_{\bar{b}}(b) \leq \max\{ab, -\bar{b}|a|\}$ 이다.

[0094] 보조정리3: $\Sigma_0(z)$ 와 $\Sigma_1(z)$ 가 \mathbb{R}^s 에 걸쳐 임의의 2차 형식이고, $\Sigma_1(z) \leq 0$ 을 만족하는 모든 $z \in \mathbb{R}^s - \{0\}$ 에 대하여 $\Sigma_0(z) < 0$ 인 것은 스칼라 $\tau \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ 일 때 모든 $z \in \mathbb{R}^s - \{0\}$ 에 대하여 $\Sigma_0(z) - \tau \Sigma_1(z) < 0$ 인 것과 필요충분조건이다.

[0095] 이어지는 정리는 수학적 4의 안정도와 관련이 있으며, 수학적 5를 사용하여 추력 제어기(2)는 추진기 추력 ξ 를 산출하고, 선수각 제어기(3)은 수학적 6을 사용하여 러더각 δ 를 산출한다.

[0096] (수학적 5)

$$\xi = -\frac{1}{b} (F_3 \chi + F_4 e_u + F_5 + \gamma e_u)$$

[0097]

[0098] (수학적 6)

$$\delta = \frac{1}{u^2} \Gamma(e_\psi, e_x, e_y, v, r) \chi$$

[0099]

[0100] Γ 는 설계 함수이다.

[0101] 이하에서는 추력 제어기(2)가 제어이득 γ 가 제한된 크기의 양의 실수이면 리아푸노프 정리에 따라 점진적으로 안정화되는 조건을 찾아 비선형행렬부등식을 구성하는 과정을 설명한다.

[0102] 정리 1: $P = P^T > 0$ 과 $c, d \in \mathbb{R}_{>0}$ 일때, $\Omega_c := \{\text{col}\{\chi, e_u\} \in \mathbb{R}^4 : \chi^T P \chi + p e_u^2 < c\}$ 으로 정의하고, $v :=$

$|m - Y_{\delta}| \Delta_v \Delta_r + | - Y_{\dot{r}} + mx_{\dot{g}} | \Delta_r^2 + |X_u| |e_u(t_0)| + |X_u| u | \bar{u}^2$ 로 정의되면, $\text{col} \{ \chi, e_u \}$ 는 Ω_c 에서 시작하여 페루프 시스템에 의해 해결된다.

$\bar{u} = \max\{u(t_0), u_d\}$, $\underline{u} = \min\{u(t_0), u_d\}$ 이고, $\bar{\xi} \in \mathbb{R}_{>v}$ 이면, 다음 수학적 7이 성립된다.

(수학적 7)

$$\begin{cases} \gamma \in \mathbb{R} \left(0, \frac{|b|}{|e_u(t_0)|} (\bar{\xi} - v) \right], & \text{if } e_u(t_0) \neq 0 \\ \gamma \in \mathbb{R}_{>0}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$P=P^T > 0$, $Q=Q^T > 0$ 이고, Γ 와, τ 그리고 $c \in \mathbb{R}_{>0}$ 이면, 다음을 만족한다.

(수학적 8)

$$\text{sym} \{ PF_1 + PB\Gamma \} + Q < 0$$

(수학적 9)

$$\text{sym} \{ PF_1 \} - 2\bar{\delta} \underline{u}^2 P B B^T P + Q < 0$$

(수학적 10)

$$\text{sym} \{ PF_1 \} - \tau P + Q < 0$$

(수학적 11)

$$-2\bar{\delta} \underline{u}^2 + \tau c < 0$$

(수학적 12)

$$\Omega_c \subset \mathcal{B}_v \times \mathcal{B}_r$$

$\mathbb{R}_{> \frac{\xi^2 \|P\|^2}{2\gamma \lambda_{\min}(Q)}}$ 에 대한 $\text{col} \{ \chi(t_0), e_u(t_0) \}$ 에 대하여 수학적 4 내지 6의 페루프 시스템은 흡입 영역에 제한된 변수 세트 Ω_c 는 점진적으로 안정하다.

이러한 점은 수학적 4에서 아래 $\text{sat}_{\bar{\xi}}(\xi) = \xi$ 의 가정하에 수학적 5의 ξ 를 선택하고, $F_3 \chi + F_4 e_u + F_5$ 를 삭제하면 다음을 얻는다.

(수학적 13)

$$\begin{bmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{e}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \\ 0 & -\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi \\ e_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Bu^2 \text{sat}_{\bar{\delta}}(\delta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\forall \gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에서 $|e_u| = e^{-\gamma(t-t_0)} |e_u(t_0)| \Rightarrow |e_u| \leq |e_u(t_0)|$ 이다.

여기에서, $\underline{u} := \min\{u(t_0), u_d\} \leq u \leq \max\{u(t_0), u_d\} =: \bar{u}$ 가 된다. γ 을 설계함으로

$|\xi| \leq \bar{\xi} \Rightarrow \text{sat}_{\bar{\xi}}(\xi) = \xi$ 가 된다.

[0123] 수학식 5의 양측의 놈(norm)을 선택함으로 $|\xi| \leq \frac{1}{|b|} (|F_3\chi| + |F_4e_u + F_5| + \gamma|e_u|) \leq |m - Y_b||v||r| + | - Y_r + mx_g||r|^2 + |X_u||e_u| + |X_{u|u}||u|^2 + \frac{|e_u|}{|b|}\gamma \leq v + \frac{|e_u(t_0)|}{|b|}\gamma$ 가 된다.

[0124] 따라서, 만약 수학식 7이 유지되면, $|\xi| \leq \bar{\xi}$ 이다.

[0125] 수학식 13의 리아푸노프(Lyapunov) 함수가 $\Omega_c/0$ 에서 $P=P^T>0$ 및 $p \in \mathbb{R}_{>0}$ 일때, $V = \chi^T P \chi + pe_u^2$ 이면 다음을 만족한다.

[0126] (수학식 14)

[0127] $k_1 \|\text{col}\{\chi, e_u\}\|^2 \leq V \leq k_2 \|\text{col}\{\chi, e_u\}\|^2$

[0128] 여기에서, $k_1 = \lambda_{\min}(\text{diag}\{P, p\})$ 및 $k_2 = \lambda_{\max}(\text{diag}\{P, p\})$ 이다. 수학식 13의 궤도에 따른 V 유도는

[0129] $\dot{V} = \chi^T \text{sym}\{PF_1\} \chi + 2\chi^T P B u^2 \text{sat}_{\bar{\delta}}(\delta) + 2\chi^T P F_2 e_u - 2p\gamma e_u^2$ 같이 된다.

[0130] 보조 정리 2와 수학식 6을 사용하면, $\dot{V} \leq \chi^T \text{sym}\{PF_1\} \chi + 2u^2 \max\{\chi^T P B \delta - \bar{\delta}|\chi^T P B|\} + 2\chi^T P F_2 e_u - 2p\gamma e_u^2 \leq \chi^T \text{sym}\{PF_1\} \chi + 2 \max\{\chi^T P B \Gamma \chi, -\bar{\delta}u^2|\chi^T P B|\} + 2\chi^T P F_2 e_u - 2p\gamma e_u^2$ 를 얻을 수 있다.

만약 $|\chi^T P B| \leq 1$, 그러면 $-\bar{\delta}u^2|\chi^T P B| \leq -\bar{\delta}u^2 \chi^T P B B^T P \chi$, 그렇지 않으면 $-\bar{\delta}u^2|\chi^T P B| < -\bar{\delta}u^2$ 이다.

[0131] 이때, 보조정리 3과 $Q>0$ 에서 $\chi^T Q \chi$ 의 가산과 감산을 사용하면 Ω_c 에서 $\dot{V} \leq \chi^T \text{sym}\{PF_1\} \chi + \max\{2\chi^T P B \Gamma \chi, -2\bar{\delta}u^2 \chi^T P B B^T P \chi, -2\delta u^2 - \chi^T P \chi + \tau c\} + \chi^T Q \chi - \chi^T Q \chi + 2\chi^T P F_2 e_u - 2p\gamma e_u^2$ 이다.

[0132] 따라서, 만약 수학식 8 내지 11을 유지되면, $\dot{V} \leq -\chi^T Q \chi + 2\chi^T P F_2 e_u - 2p\gamma e_u^2$ 이다.

[0133] 계속해서, 만약 수학식 12가 확증되면, 보조 정리 1을 적용하면 $\dot{V} \leq -\chi^T Q \chi + 2\xi \|P\| \|\chi\| |e_u| - 2p\gamma e_u^2 = \begin{bmatrix} \|\chi\| \\ |e_u| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\lambda_{\min}(Q) & * \\ \xi \|P\| & -2p\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\chi\| \\ |e_u| \end{bmatrix}$ 가 유도되고, 슈어 여수법(Schur complement)에 의하면 다음이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} -\lambda_{\min}(Q) & \xi \|P\| \\ \xi \|P\| & -2p\gamma \end{bmatrix} < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{\xi^2 \|P\|^2}{2p\gamma} - \lambda_{\min}(Q) < 0 \\ 2p\gamma > 0. \end{cases}$$

[0134]

[0135] 따라서, $k_3 \in \mathbb{R}_{>0}$ 가 존재하여 $p \in \mathbb{R}_{> \frac{\xi^2 \|P\|^2}{2\gamma \lambda_{\min}(Q)}}$ 에서 $\dot{V} < -k_3 \|\text{col}\{\chi, e_u\}\|^2$ 이다. 여기에서, 부등식 14와 비교 보조 정리를

$$\begin{aligned} \dot{V} < -\frac{k_3}{k_2} V &\Rightarrow V < e^{-\frac{k_3(t-t_0)}{k_2}} V(\text{col}\{\chi(t_0), e_u(t_0)\}) \Rightarrow \|\text{col}\{\chi, e_u\}\| \\ &< \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} e^{-\frac{k_3(t-t_0)}{2k_2}} \|\text{col}\{\chi(t_0), e_u(t_0)\}\| \text{임을 보여준다.} \end{aligned}$$

결국 수학적 식 13의 페루프 시스템은 $p \in \mathbb{R}_{> \frac{\xi^2 \|P\|^2}{2\gamma \lambda_{\min}(Q)}}$ 에 대한 $\text{col}\{\chi(t_0), e_u(t_0)\}$ 에 대하여 수학적 식 4 내지 6의 페루프 시스템은 흡입 영역에 제한된 변수 세트 Ω_c 는 점진적으로 안정하다.

[0136] 제언(Remark) 1: (1) 추정 오차 시스템인 수학적 식 4는 상호접속 시스템이다. 전통적인 접근에 의하면 수학적 식 4를 분해하여 2개의 서브 시스템 $\dot{\chi} = F_1\chi + Bu_d^2 \text{sat}_{\delta}(\delta)$ 과 $\dot{e}_u = F_5 + F_4e_u + Bu^2 + b \text{sat}_{\xi}(\xi)$ 으로 이루어져 있으며 얼마의 가정하에 분리하여 ξ 와 δ 를 산출하고 있다. 하지만, 선행 문헌은 상호접속하의 안정도를 제공하고 있지 않다. 이와 달리 본 발명에서는 정리 1이 피드백 선형화 아래에서 상호 접속 시스템의 전체에 걸쳐 점진적인 안정화가 이루어지는 동안에 δ 이 ξ 부터 분리되어 설계된다. 이와 같은 분리 원리가 확증되지 않으면, 수학적 식 4에서 F_2e_u 가 수학적 식 6보다 좀더 복잡한 선두 제어를 유인해야 한다.

[0137] (2) 선행문헌은 e_ψ 와 e_u 가 (v, r)가 제한된 상태에서 원점으로 수렴하나, 본원발명은 모든 (e_ψ, e_u, v, r)가 점진적으로 원점에 수렴한다.

[0138] 이제, 이하에서는 추력 제어기(2)와 선주각 제어기(3)가 비선형행렬 부등식에서 선형행렬부등식을 구분 비선형 모델링 과정과,

[0139] 정리 2: 수학적 식 4 내지 6의 페루프 시스템을 고려하면, 수학적 식 6에서 다음 수학적 식 15를 얻는다.

[0140] (수학적 식 15)

$$\begin{aligned} \Gamma := & \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_3=1}^2 \sum_{i_4=1}^2 \theta_{1i_1}(e_\psi, e_x, e_y) \theta_{2i_2}(e_\psi, e_x, e_y) \\ & \times \theta_{3i_3}(v) \theta_{4i_4}(r) K_{i_1 i_2 i_3 i_4} \end{aligned}$$

[0141]

[0142] 여기에서, $\theta_{11} = \left(\frac{f_7(e_\psi)}{e_\psi} - a_{11} \right) / (a_{11} - a_{12})$, $\theta_{12} = 1 - \theta_{11}$,

$$\theta_{21} = (f_8(e_\psi) - a_{22}) / (a_{21} - a_{22}) , \theta_{22} = 1 - \theta_{21} , \theta_{31} = \frac{|v| - a_{32}}{a_{31} - a_{32}} , \theta_{32} = 1 - \theta_{31}$$

$$\theta_{41} = \frac{|r| - a_{42}}{a_{41} - a_{42}} , \theta_{42} = 1 - \theta_{41} , a_{11} = 1/\rho , a_{12} = -0.25/\rho$$

$$a_{21} = 1/\rho , a_{22} = -1/\rho , a_{31} = \sup_{v \in \mathcal{B}_v} |v| , a_{32} = \inf_{v \in \mathcal{B}_v} |v|$$

$a_{41} = \sup_{r \in \mathcal{R}_r} |r|$, $a_{42} = \inf_{r \in \mathcal{R}_r} |r|$ 이다.

$$A_{i_1 i_2 i_3 i_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & m_3 \\ 0 & m_4 & m_5 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_d a_{1i_1} & a_{2i_2} & 1 \\ 0 & \begin{pmatrix} Y_{v|v} a_{3i_3} \\ -Y_v + Y_{uv} u_d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} Y_{rr} a_{4i_4} \\ -Y_r + (X_{i\dot{u}} \\ + Y_{ur} - m) u_d \end{pmatrix} \\ 0 & \begin{pmatrix} N_{v|v} a_{3i_3} \\ -N_v + (-X_{i\dot{u}} \\ + Y_v + N_{uv}) u_d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} N_{rr} a_{4i_4} \\ -N_r + (Y_r \\ + N_{ur} - m x_g) u_d \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$

[0143] 그리고, 이다.

[0144] 주어진 $\bar{u}, \underline{u}, \xi, \tau \in \mathbb{R}_{>0}$ 이라고 가정하면, 수학식 7은 유지되며, $\tilde{P} = \tilde{P}^T \succ 0$ 이고, $\tilde{Q} = \tilde{Q}^T \succ 0$ 이며,

$\tilde{K}_{i_1 i_2 i_3 i_4}, \tilde{c} \in \mathbb{R}_{>0}$ 이다.

[0145] (수학식 16)

$$\text{sym} \left\{ A_{i_1 i_2 i_3 i_4} \tilde{P} + B \tilde{K}_{i_1 i_2 i_3 i_4} \right\} + \tilde{Q} \prec 0$$

[0146]

[0147] (수학식 17)

$$\text{sym} \left\{ A_{i_1 i_2 i_3 i_4} \tilde{P} \right\} - 2\bar{\delta} \underline{u}^2 B B^T + \tilde{Q} \prec 0$$

[0148]

[0149] (수학식 18)

$$\text{sym} \left\{ A_{i_1 i_2 i_3 i_4} \tilde{P} \right\} - \tau \tilde{P} + \tilde{Q} \prec 0$$

[0150]

[0151] (수학식 19)

$$-2\bar{\delta} \underline{u}^2 \tilde{c} + \tau \prec 0$$

[0152]

[0153] (수학식 20)

$$E_v \tilde{P} E_v^T - \tilde{c} \Delta_v^2 I \prec 0$$

[0154]

[0155] (수학식 21)

$$E_r \tilde{P} E_r^T - \tilde{c} \Delta_r^2 I \prec 0$$

[0156]

[0157] 모든 $(i_1, i_2, i_3, i_4) \in (I_2 * I_2 * I_2 * I_2)$ 이며, $A_{i_1 i_2 i_3 i_4}$ 가 위에서 처럼 주어지고, $E_v = [0 \ 1 \ 0]$ 및 $E_r = [0 \ 1 \ 0]$ 이다 .

[0158] $p \in \mathbb{R}$ $\frac{\xi^2 \|P\|^2}{2\gamma \lambda_{\min}(Q)}$ 에 대하여, 수학적식 4 내지 6의 페루프 시스템은 흡입 영역에 제한된 변수 세트 Ω_c 는 점진적으로 안정하다. 이 경우에, $P = \tilde{P}^{-1}$, $Q = \tilde{P}^{-1} \tilde{Q} \tilde{P}^{-1}$, $K_{i_1 i_2 i_3 i_4} = \tilde{K}_{i_1 i_2 i_3 i_4} \tilde{P}^{-1}$, $c = 1/\tilde{c}$ 이다.

[0159] 위의 결과는 구분 비선형에 $\{e_\psi : |e_\psi| \leq \pi\} \times \mathcal{B}_v \times \mathcal{B}_r$ 의 할 때, F_1 은 다음으로 제작성할 수 있다.

[0160] (수학적식 22)

[0161]
$$F_1 = \sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_3=1}^2 \sum_{i_4=1}^2 \theta_{1i_1} \theta_{2i_2} \theta_{3i_3} \theta_{4i_4} A_{i_1 i_2 i_3 i_4}$$

[0162] 여기에서,

[0163] $\sum_{i_1=1}^2 \theta_{1i_1} = 1$, $\theta_{1i_1} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$, $i_1 \in \mathcal{I}_2$, $\sum_{i_2=1}^2 \theta_{2i_2} = 1$, $\theta_{2i_2} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$, $i_2 \in \mathcal{I}_2$, $\sum_{i_3=1}^2 \theta_{3i_3} = 1$, $\theta_{3i_3} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$, $i_3 \in \mathcal{I}_2$, $\sum_{i_4=1}^2 \theta_{4i_4} = 1$, $\theta_{4i_4} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$, $i_4 \in \mathcal{I}_2$ 로부터 F_1 의 범위는 행렬 폴리토프(polytope) $F_1 \in \{A_{1111}, A_{1112}, A_{1121}, A_{1122}, A_{1211}, A_{1212}, A_{1112}, A_{1221}, A_{1222}, A_{2111}, A_{2112}, A_{2121}, A_{2122}, A_{2211}, A_{2212}, A_{2221}, A_{2222}\}$ 이다.

[0164] 수학적식 15와 22에 대하여 P^{-1} 를 사용한 합동 변환과 $\tilde{P} := P^{-1}$, $\tilde{Q} := P^{-1} Q P^{-1}$, $\tilde{K}_{i_1 i_2 i_3 i_4} := K_{i_1 i_2 i_3 i_4} P^{-1}$ 정의에 의하면, 수학적식 8은 $\sum_{i_1=1}^2 \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_3=1}^2 \sum_{i_4=1}^2 \theta_{1i_1} \theta_{2i_2} \theta_{3i_3} \theta_{4i_4} \text{sym} \{ P A_{i_1 i_2 i_3 i_4} + P B K_{i_1 i_2 i_3 i_4} \} + Q$ 와 동치이다.

[0165] 이는 또한 수학적식 16에 대한 선형행렬부등식이 된다. 유사하게, 수학적식 17에 대하여 선형행렬부등식은 수학적식 9가 되면, 수학적식 18에 대한 선형행렬부등식은 수학적식 10이 된다. 또한 $\tilde{c} = 1/c$ 하면, 수학적식 18에 대한 선형행렬부등식은 수학적식 19가 된다.

[0166] 마지막으로, 슈어 여수법을 사용하고, 전후 곱셈연산을 사용하면 $\text{col}\{E_v, 0\}^T$ 와 $\text{col}\{X, e_u\} \in \Omega_c$ 는 다음을 만족한다.

[0167]
$$\text{col}\{X, e_u\} \in \Omega_c \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X \\ e_u \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ e_u \end{bmatrix} < c \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X \\ e_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ e_u \end{bmatrix}^T < c \begin{bmatrix} \tilde{P} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix} \Rightarrow v v^T < c E_v \tilde{P} E_v^T$$

[0168] 이때, $E_v \tilde{P} E_v^T < \tilde{c} \Delta_v^2 I \Leftrightarrow \text{LMI (20)} \Rightarrow \Omega_c \subset \mathcal{B}_v$ 가 된다.

[0169] 유사하게, 수학적식 21에 대한 선형행렬부등식은 $\Omega_c \subset \mathcal{B}_u$ 가 된다. 수학적식 20과 21에 대한 선형행렬부등식은 수학적식 12가 된다. 그 결과, 만약 수학적식 16 내지 21에 대한 선형행렬부등식은 유지되면, 정리 1의 모든 요구조건은 확증된다.

[0170] 제언 2: 정리 2의 설계 문제는 Ω_c 도메인의 최대화를 최적화하는 것으로 다음과 같이 해결된다. 즉, 흡입 영역을 크게 하기 위해서는 리아푸노프의 양한정 행렬 P의 크기를 줄여주는 것이 유용하다.

Minimize $\alpha \in \mathbb{R}_{(0,1]}$
 subject to LMIs (16)–(21), and

[0171]

$$\begin{bmatrix} -\alpha I & * \\ I & -\alpha \tilde{P} \end{bmatrix} \prec 0 \quad \text{or} \quad \bar{X}_i \bar{X}_i^T - \alpha \tilde{P} \prec 0$$

[0172]

여기에서, $\bar{X}_i \in \{\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_l\}$ 는 주어진 경로점이다.

[0173]

제언 3: 정리 2에 대하여 Matlab의 최적화 툴박스에서 fminsearch 함수와 같은 수치 최적화 알고리즘을 사용하면 τ 는 실현가능한 문제의 국부 최소화 연산자로 보여진다.

[0174]

제언 4: (1) 포화 함수를 방지하는 가장 쉬운 방법은 $(i_1, i_2, i_3, i_4) \in (I_2 * I_2 * I_2 * I_2)$ 에서 충분한 선형행렬부등식으로 아래와 같이 잘 알려진 입력 제한 $\Omega_c \subset \{\delta \in \mathbb{R} : |\delta| < \bar{\delta}\}$ 에 $\text{sat}_{\bar{\delta}}(\delta)$ 를 가산하는 것이다.

[0175]

(수학식 23)

[0176]

$$\begin{bmatrix} -\underline{u}^4 \bar{\delta}^2 & F_{i_1 i_2 i_3 i_4} \\ F_{i_1 i_2 i_3 i_4}^T & -P \end{bmatrix} \prec 0$$

[0177]

[0178]

그러나, 이러한 제한은 설계에 있어서 유지를 가져온다. 즉, 가능한 한 큰 Ω_c 를 얻는 것은 어렵다. 그 결과, 경로점 추적 제어는 제한된 영역에 국한된다. 이러한 접근과 달리 제안된 설계 조건은 $|\delta| < \bar{\delta}$ 와 같은 제한 없이 유도된다. 그 결과, 이러한 점은 예제에서 보여주듯 더 적은 유지 성능을 가져온다.

[0179]

(2) 정리 2에서 제시된 선형행렬부등식은 용이하게 다른 제어 설계 문제에 적용될 수 있으며, 강진 제어는 선형행렬부등식 분야에서 유리하다.

[0180]

(3) 다른 비선형 제어 문제와 비교하면 수학식 5와 6에 의해 제안된 상태 유도에 의존하지 않은 간단한 구조이다.

[0181]

(4) 정리 1과 2는 경로점 추적에 있어 여러 유형의 어뢰 잠수정에도 폭넓게 실제적으로 사용가능하다. 더욱이, 실제 장비에 있어 입력 포화가 실제적인 제품의 실장에 있어서 분석과 제어 설계를 복잡하게 만든다는 것이다.

[0182]

실시에

[0183]

수학식 1과 2에서 $\bar{\delta} = 13.6 \times \pi / 180 \text{ rad}$ 이고, $\bar{\xi} = 86 \text{ N}$ 이며, 계수는 $m = 3.048 \times 10 \text{ kg}$, $x_g = 0$, $I_{zz} = 3.45 \text{ kg m}^2$, $X_u = 0$, $X_{u|u} = -1.62 \text{ kg/m}$, $X_{\dot{u}} = -9.30 \times 10^{-1} \text{ kg}$, $Y_v = 0$, $Y_r = 0$, $Y_{v|v} = -1.31 \times 10^3 \text{ kg/m}$, $Y_{rr} = 6.32 \times 10^{-1} \text{ kg m/rad}^2$, $Y_{uv} = -2.86 \times 10 \text{ kg/m}$, $Y_{\dot{v}} = -3.55 \times 10 \text{ kg}$, $Y_{\dot{r}} = 1.93 \text{ kg m/rad}$, $Y_{ur} = 6.15 \text{ kg/rad}$, $Y_{uu\delta} = 9.64 \text{ kg/(m rad)}$, $N_v = 0$, $N_r = 0$, $N_{v|v} = -3.18 \text{ kg}$, $N_{rr} = -9.40 \times 10 \text{ kg m}^2/\text{rad}^2$, $N_{uv} = 10.62 \text{ kg}$, $N_{\dot{v}} = 1.93 \text{ kg m}$, $N_{\dot{r}} = -4.88 \text{ kg m}^2/\text{rad}$, $N_{ur} = -3.93 \text{ kg m/rad}$, 및 $N_{uu\delta} = -6.15 \text{ kg/rad}$ 이다.

[0184] $k \in I_{21}$ 에서 $(x_{dk}, y_{dk}) = (10^2 \sin((\pi/10)(k-1)) + 10^2, 10^2 \cos((\pi/10)(k-1)) + 10^2)$ 이며, $(x_{d(k+1)}, y_{d(k+1)})$ 의 업데이트를 위해 $\rho = 2.66$ 이며, $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ 에서 $u_d = 1.5 \text{m/s}$ 이고, $\Delta_v = 1.46$, $\Delta_r = 0.84$, $(x(0), y(0), \psi(0), v(0), r(0), u(0)) = (0.200, 0, 0, 0, 1.5)$.

[0185] 여기에서, 본 발명은 수학적 식 5와 6을 설계하여 모든 (e_ψ, e_u, v, r) 가 흡입 영역에 제한된 변수 세트 Ω_c 를 가지고 점진적으로 원점에 수렴하도록 하는 것이다. 여기에서 정리 1에 의해 $|e_u| \leq |e_u(t_0)| = 0$ 이기 때문에, $\Omega_c = \{X \in \mathbb{R}^3 : X^T X < c\}$ 이다. 또한, 시뮬레이션은 수학적 식 23에 선형행렬부등식을 적용하여 $\Omega_c \subset \{\delta \in \mathbb{R} : |\delta| < 8 (> \bar{\delta})\}$ 의 제한을 부가한다.

[0186] $\tau = 40$, $\bar{X}_1 = [\pi/9, 0, 0]^T$ 에서 Ω_c 와 이득은 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} 0.1935 & 0.0215 & 0.0823 \\ 0.0215 & 0.0188 & 0.0231 \\ 0.0823 & 0.0231 & 0.0840 \end{bmatrix}, \quad c = 0.0262$$

$$K_{1111} = [32.308 \quad 1.410 \quad 18.491],$$

$$K_{1112} = [25.676 \quad 1.133 \quad 24.910]$$

$$K_{1121} = [27.329 \quad 0.834 \quad 13.499],$$

$$K_{1122} = [18.438 \quad -0.992 \quad 17.225]$$

$$K_{1211} = [34.372 \quad 1.074 \quad 18.417],$$

$$K_{1212} = [28.212 \quad 0.827 \quad 25.133]$$

$$K_{1221} = [27.922 \quad -1.373 \quad 11.943],$$

$$K_{1222} = [21.620 \quad -1.871 \quad 16.668]$$

$$K_{2111} = [30.644 \quad 1.286 \quad 18.589],$$

$$K_{2112} = [24.914 \quad 1.048 \quad 24.812]$$

$$K_{2121} = [25.189 \quad 0.787 \quad 13.918],$$

$$K_{2122} = [17.490 \quad -1.027 \quad 17.185]$$

$$K_{2211} = [32.526 \quad 0.992 \quad 18.623],$$

$$K_{2212} = [27.267 \quad 0.783 \quad 25.086]$$

$$K_{2221} = [25.765 \quad -1.187 \quad 12.645],$$

$$K_{2222} = [19.909 \quad -2.093 \quad 16.475].$$

[0187]

[0188] 입력 제한 접근에 의하면 선형행렬부등식 16, 20, 21과 정리 2와 수학적 식 23을 제언2에 근거하여 Ω_c 와 비교해보면 이점이 명확하다. 그러나, $\bar{X}_1 = [\pi/9, 0, 0]^T$ 에서는 실현가능하지 않으며, $\bar{X}_1 = [\pi/120, 0, 0]^T$ 에서는 실현가능하다. 이 경우에 실현가능한 해법이 다음과 같이 주어진다.

$$P = \begin{bmatrix} 3.6774 & -0.0223 & 0.8031 \\ -0.0223 & 0.3178 & -0.0032 \\ 0.8031 & -0.0032 & 0.4029 \end{bmatrix}, \quad c = 2.7903 \times 10^{-3}$$

$$K_{1111} = [15.325 \quad -0.346 \quad 2.260],$$

$$K_{1112} = [12.022 \quad -0.911 \quad 5.090]$$

$$K_{1121} = [14.920 \quad -0.687 \quad 2.245],$$

$$K_{1122} = [9.015 \quad -3.194 \quad 4.313]$$

$$K_{1211} = [15.998 \quad -0.548 \quad 2.359],$$

$$K_{1212} = [13.017 \quad -1.081 \quad 5.261]$$

$$K_{1221} = [15.548 \quad -3.140 \quad 2.319],$$

$$K_{1222} = [11.480 \quad -4.150 \quad 4.268]$$

$$K_{2111} = [12.407 \quad -0.410 \quad 2.317],$$

$$K_{2112} = [10.804 \quad -0.920 \quad 5.096]$$

$$K_{2121} = [10.997 \quad -1.939 \quad 2.271],$$

$$K_{2122} = [8.002 \quad -3.262 \quad 4.254]$$

$$K_{2211} = [13.120 \quad -0.581 \quad 2.426],$$

$$K_{2212} = [11.708 \quad -1.078 \quad 5.276]$$

$$K_{2221} = [12.464 \quad -3.442 \quad 2.282],$$

$$K_{2222} = [10.248 \quad -4.149 \quad 4.290].$$

[0189]

[0190] 도 3과 4는 Ω_c 와 (e_{psi}, v, r) 의 궤적을 본 발명과 입력 제한 접근을 각각 보여준다.

[0191] 도 3에 도시된 바와 같이 본 발명에서 상태 궤적은 입력이 포화되어도 Ω_c 에 속하며, 원점에 수렴한다. 이와 달리 입력 제한 접근은 Ω_c 에 속하지 않으며 원점에 수렴하는 동안 시간 간격이 존재한다. 또한, 도 5 내지 8은 경로점 추적과 전후 속도의 규칙성에 대한 본 발명의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이러한 도면을 통하여 포화 제어 입력 $\text{sat}_{\delta}(\delta)$ 와 $\text{sat}_{\xi}(\xi)$ 아래에서 원하는 전후 속도 u_d 를 유지하는 동안에 무인 잠수정이 경로는 원하는 경로점 (x_{dk}, y_{dk}) 에 매우 근접한다.

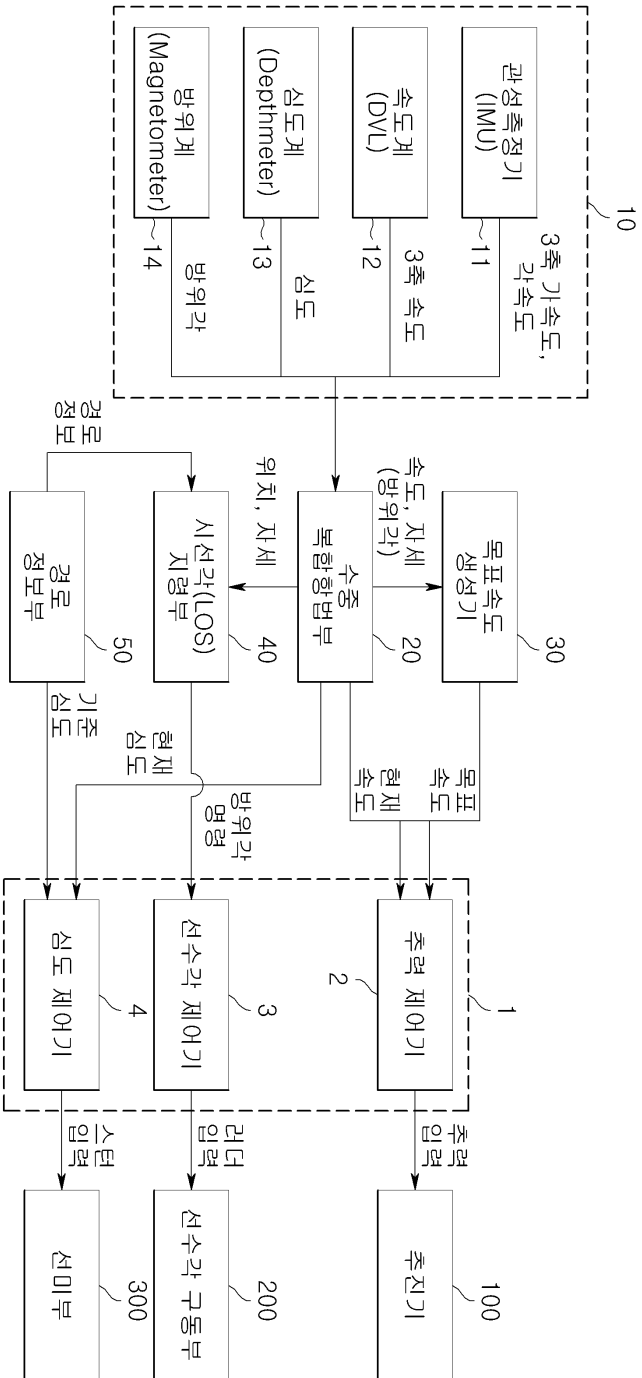
[0192] 도 9는 본 발명의 일 실시 예에 따른 무인 잠수정의 경로 추적 방법의 흐름도이다.

[0193] 먼저, 목표 속도 생성기는 입력된 정보에 의하여, 목표 속도를 계산한다(S100). 이때, 목표 속도 생성기는 수학적 식 1과 2를 사용한다.

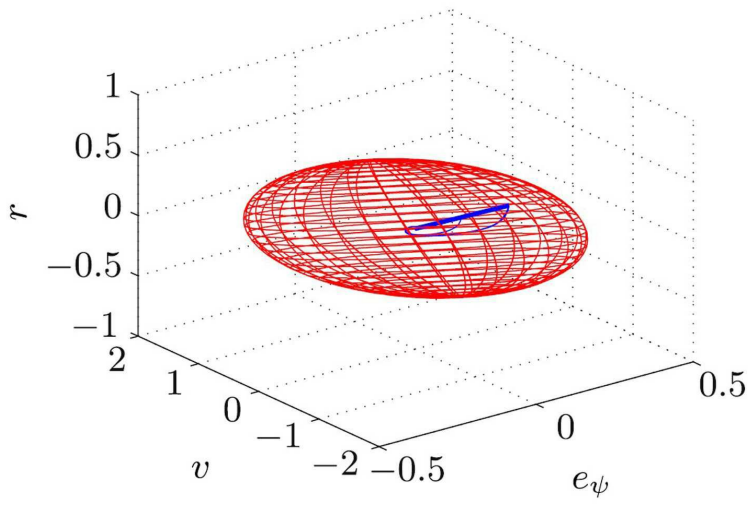
[0194] 이후, 목표 속도 생성기에서 계산된 목표 속도와 수중 복합항법부에서 계산된 현재 속도는 제어부의 추력 제어기에 입력되고, 추력 제어기는 수중 복합항법부에서 계산된 현재 속도와 목표 속도 생성기에서 계산된 목표 속도의 차이가 줄어들도록, 추진기의 RPM을 설정하도록 하는 추력 입력 정보를 생성한다.

[0195] 한편, 시선각 지령부는 입력된 정보를 기초로 목표 방향각을 생성하여(S100), 이를 선수각 제어기에 입력한다. 이때 시선각 지령부는 수학적 식 1 내지 3을 사용한다. 목표 방향각은 시선각 지령부에서 계산되는 현재 무인잠수정의 위치에서 수중 복합항법부에서 계산되는 무인잠수정의 선수 방향각의 차이이다. 선수각 제어기는 목표 방향각의 크기가 줄어들도록 러더(rudder) 입력 정보를 만들어, 이를 선수각 구동부에 입력한다.

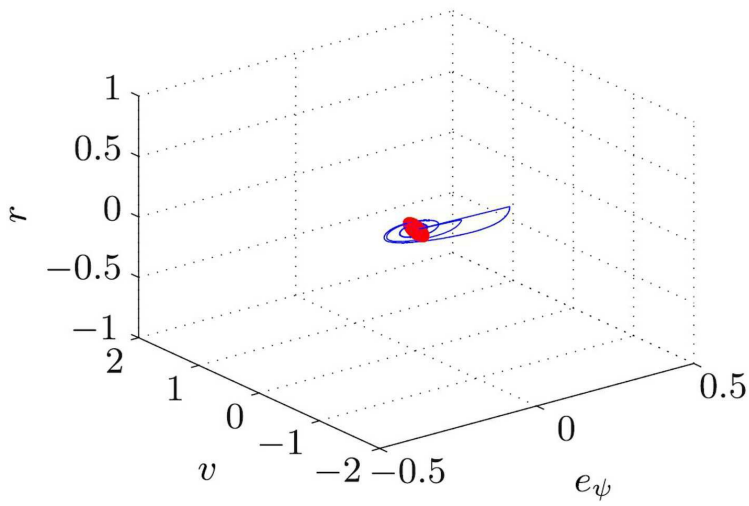
도면2



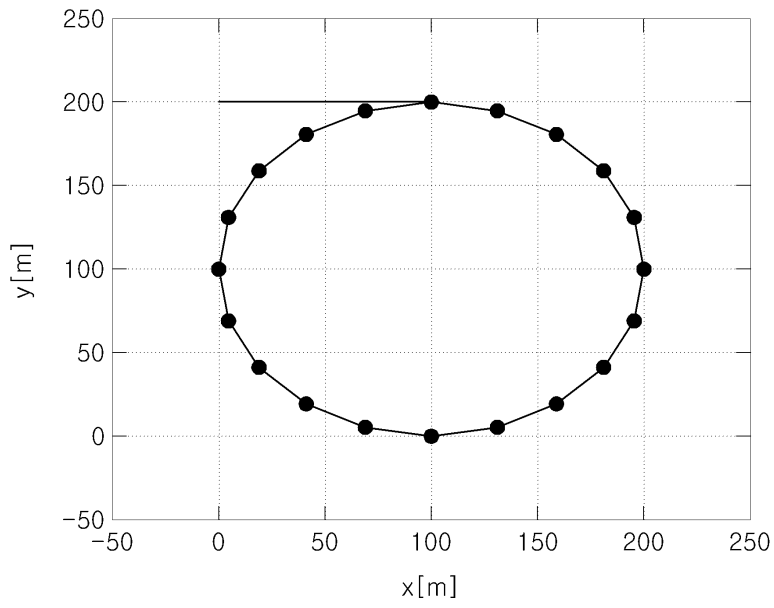
도면3



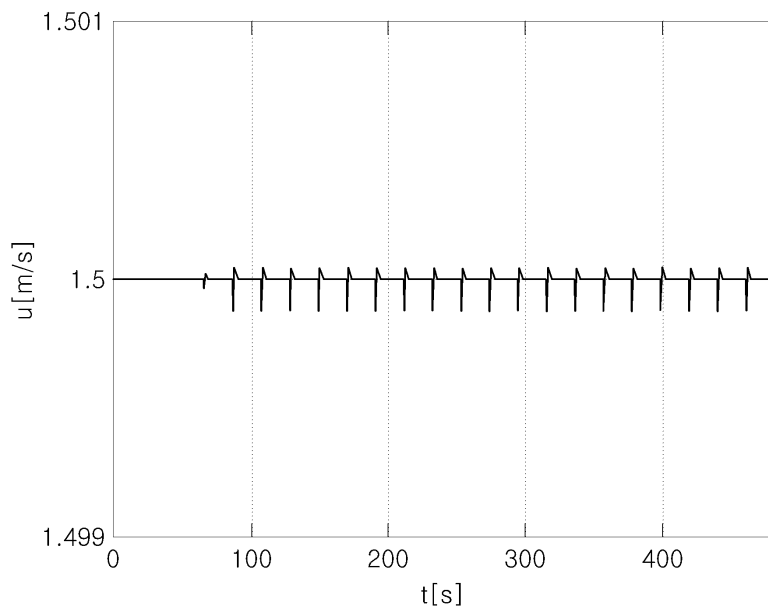
도면4



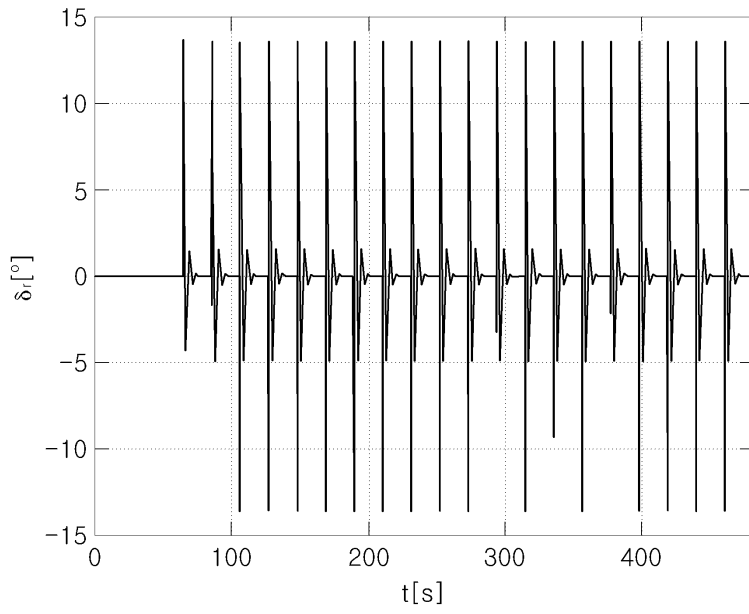
도면5



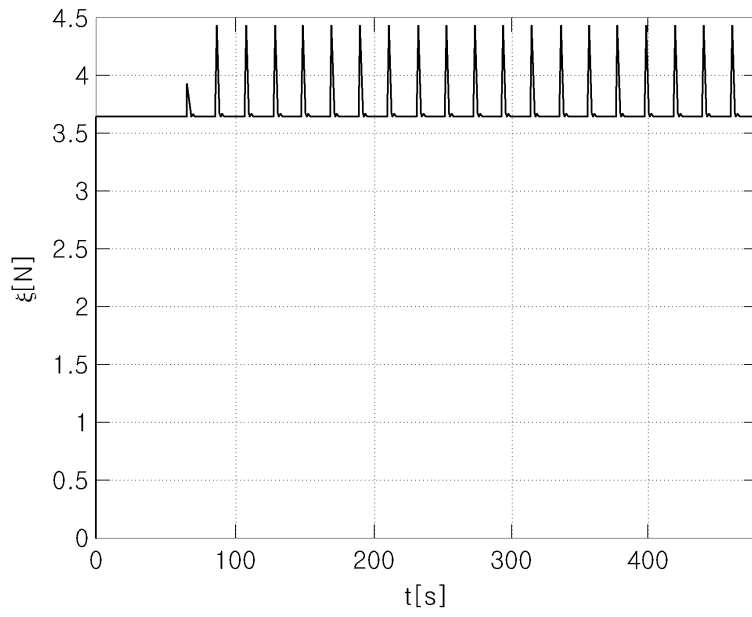
도면6



도면7



도면8



도면9

