

쌍동형 무인선의 동적위치제어에 관한 연구

Dynamic Positioning Control of a Twin-hull Unmanned Surface Ship

강민주¹, 김태윤¹, 김진환⁺

Minju Kang¹, Taeyun Kim¹, Jinwhan Kim⁺

Abstract Dynamic Positioning (DP) is used to automatically maintain the position and heading of a floating structure subjected to environmental disturbances. A DP control system is composed of a motion controller to compute the desired force and moment and a thrust allocator to distribute the computed force and moment to multiple thrusters considering mechanical and operational constraints. Among various thruster configurations, azimuth thrusters or propeller/rudder pairs tend to make the allocation problem difficult to solve, because these types of propulsion systems include nonlinear constraints. In this paper, a dynamic positioning strategy for a twin-thruster ship that is propelled by two azimuthing thrusters is addressed, and a thrust allocation method which does not require a numerical optimization solver is proposed. The applicability of the proposed method is demonstrated with an experiment using an autonomous boat.

Keywords Unmanned Surface Vehicle, Dynamic positioning, Thrust allocation

1. 서 론

동적위치제어시스템이란 해양운동체가 바람, 조류 등의 환경외란 하에서 정해진 위치와 선수각을 유지하도록 하는 제어시스템이다^[1]. 동적위치제어시스템은 해양운동체의 추진기들을 이용하여 위치와 자세를 제어한다는 점에서 계류 시스템 등의 전통적인 위치유지방법과 차별성을 보인다. 1960년대 유정사업이 점차 심해역으로 확대돼나감에 따라 그 사용이 본격화된 동적위치제어시스템은 많은 기술 발전을 이루었고 현재는 다양한 수중·수상 무인운동체에도 적용이 되고 있다.

선박의 위치유지시스템 설계는 일반적으로 제어입력을 산출하고, 해당 제어입력에 상응하는 힘과 모멘트를 발생시

키기 위해 추진기의 추력을 조정하는 추력분배(Thrust Allocation)라는 두 절차로 구성된다. 동적위치제어시스템에 추력분배가 이용되는 이유는 두 가지 관점에서 해석할 수 있다. 첫째로 선박의 추진기들은 제어하고자 하는 운동의 방향(전후방향, 좌우방향, 선수각 등)으로 직접 추력을 발생시키는 것이 불가능하다. 적절한 전후·좌우방향 힘과 모멘트를 만들어내기 위해서 각 추진기들을 어떻게 구동할 것인지를 정하는 절차가 필요하며, 이것이 동적위치제어시스템이 추력분배를 필요로 하는 첫 번째 이유가 된다. 둘째로 동적위치제어를 목적으로 하는 해양운동체의 추진시스템은 대다수가 여유자유도를 가지도록 설계된다. 즉 추력분배를 할 때 주어진 힘과 모멘트를 만들어내는 방법이 무수히 많다는 것인데, 이는 동적위치제어시스템을 운용하는데 있어 여러 이점을 확보할 수 있도록 해준다. 먼저 추진기들이 소모하는 에너지의 양을 가격함수로 하는 최적화를 통하여 연료 효율성을 높일 수 있으며 구동기의 여유 자유도가 충분할 경우에는 추진기의 마모, 노화 등을 방지하는 구속

Received : May. 16. 2016; Revised : Jul. 12. 2016; Accepted : Jul. 14. 2016

⁺Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea (jinwhan@kaist.ac.kr)

¹Department of Mechanical Engineering, KAIST (ashashasha@kaist.ac.kr, xellosscor@kaist.ac.kr)

조건을 고려하는 것도 가능하다.

이와 같이 추력분배 문제는 일종의 최적화 문제로서 기술이 된다. 간단한 추진기 모델을 사용할 경우 추력분배 문제의 해를 간단한 행렬 연산만으로도 구할 수 있지만^[2-8], 에너지 소모량이나 추진제약조건 등을 동시에 고려할 경우에는 대부분 수치최적화 기법을 사용하여 문제를 풀이한다. 그 방법으로는 선형계획법^[9-11], 이차계획법^[12-14]이 대표적이며 이에 대한 여러 풀이 기법들이 개발되었다^[15-18].

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 타각제한이 있는 두 개의 이지무스 추진기로 구동되는 무인선에 적용할 수 있는 동적위치제어 기법을 제안한다. 타각제한이 있는 이지무스 추진기에 의해 구동되는 쌍동형 무인선은 동적위치제어를 수행하는데 두 가지 어려움을 겪는다. 첫 번째는 타각제한이 있는 이지무스 추진기는 그 추진제약조건이 비선형이면서 동시에 non-convex한 특성을 가지기 때문에 추력분배문제를 풀이하는 것이 까다롭다는 것이다^[9]. 두 번째는 타각제한이 있는 이지무스 추진기 두 개를 이용하여 낼 수 있는 전후방향, 좌우방향, 선수각방향의 힘과 모멘트의 집합이 특정 방향에 대해 제한되어 있어 선박이 부족구동(underactuated) 시스템이 된다는 것이다. 본 논문에서는 이 문제들을 소개하고 이를 극복하는 동적위치제어 기법을 제안한다. 제시하는 해석 방법을 적용함으로써, 추력 포화상태 및 타각 제한 조건을 유기적으로 고려하며 추력분배를 가능케 하고, 더불어 부족구동특성을 극복하고 동적위치제어를 수행하는 과정을 보인다.

2. 문제 정의

2.1 쌍동형 무인선의 추력분배 문제 정의

본 논문에서 다루는 쌍추진기 선박의 형태는 Fig. 2와 같다. 선미에 장착된 두 개의 추진기는 독립적으로 구동되어 서로 다른 각도를 취할 수 있는 것으로 가정한다. 타각 θ_1, θ_2 과 추력 u_1, u_2 로 표현되는 구동기 출력들은 선박의 전후방향과 좌우방향으로 각각 나누어 $u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}$ 로 생각할 수 있다. Fig. 2에 나타나는 선박의 형상을 참고하면 다음과 같이 추력분배문제의 첫 번째 제약조건을 작성할 수 있다.



Fig. 1. The twin-hull USV system

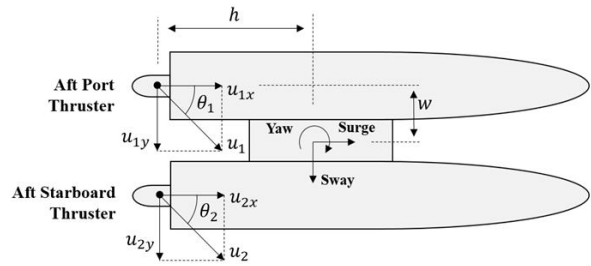


Fig. 2. Illustration of azimuth thrusters and notation

$$\begin{aligned} X_{con} &= u_{1x} + u_{2x} \\ Y_{con} &= u_{1y} + u_{2y} \\ N_{con} &= wu_{1x} - hu_{1y} - wu_{2x} - hu_{2y} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $X_{con}, Y_{con}, N_{con}$ 은 제어입력을 의미한다. 선박이 제어입력에 해당하는 기동을 실시하기 위해서는 추진기들이 위 식을 만족하는 $u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}$ 를 생성할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 추진제약조건으로서 양 추진기의 최대 추력 제한과 최대 타각 제한을 고려해두기로 한다. 두 추진기는 정해진 최대 추력 u_{max} 이상의 힘을 발생시킬 수 없으며, 각 추진기의 이지무스 각도는 θ_{max} 이상이 될 수 없다. 이는 각각 식 (2)와 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{ix}^2 + u_{iy}^2 \leq u_{max}^2 \quad (2)$$

$$\theta_{min} \leq atan(u_{iy}/u_{ix}) \leq \theta_{max} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에 나타난 추진제약조건들을 가시적으로 표현하면 Fig. 3와 같다. Fig 3와 같이 전후·좌우방향으로 추진기가 낼 수 있는 추력을 도시한 것을 추력가용범위 (Attainable thrust region)라고 부른다. 이 그림을 참조하면 각 추진기는 타각제한 조건으로 인해 전후방향으로 각각 부채꼴 모양의 힘을 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

위 내용을 바탕으로 쌍동형 무인선의 추력분배를 위한 최적화 문제를 정의할 수 있다. 본 논문에서는 추력분배 문제의 가격함수를 추진기 추력의 제곱의 합으로 가정한다. 이는 식 (4)와 같으며, 동시에 전후·좌우 방향의 추진기 힘 성분으로도 나타낼 수가 있다. 충분한 여유자유도가 확보될 경우 추진기 타각의 각속도 등을 가격함수에 포함시키는 경우도 있지만, 본 문제의 경우 구동기 수가 충분히 많지 않은 점을 고려하여 가격함수를 추력에 대한 것으로만 고려하기로 한다.

$$J = u_1^2 + u_2^2 = u_{1x}^2 + u_{1y}^2 + u_{2x}^2 + u_{2y}^2 \quad (4)$$

위의 가격함수를 최적화하는 과정에서 고려해주는 제약조건은 앞서 정의한 식 (1), (2), (3)과 같다. 타각의 각속도나 추력의 변화율은 최적화 문제의 해 존재 가능성(feasibility)을 심각하게 제한할 수 있으므로 고려하지 않기로 한다.

이렇게 기술된 최적화 문제는 추력분배 문제를 일반적인 이차계획 문제로 모델링한 것이다. 상당수의 동적위치제어 선박들이 이와 유사한 수준에서 가격함수와 추진제약조건을 설정하며, 이렇게 기술된 최적화문제는 수치해석 기법을 이용하여 빠르고 정확하게 풀이될 수 있다. 그러나 본 논문에서 다루는 쌍동형 무인선의 경우 일반적인 수치해석 기법을 바로 적용할 수가 없다. 식 (2), (3)과 같이 non-convex

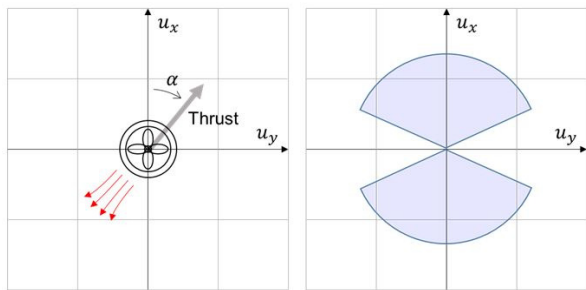


Fig. 3. Attainable thrust region

형태의 추진제약조건이 존재하기 때문이다. 이는 추력가용범위그래프(Fig. 3)에서도 확인 가능하다. 이지무스 추진기의 타각 제한이 만들어내는 비볼록 제약조건으로 인해 쌍동형 무인선은 상용화된 추력분배 기법을 적용하기에는 연산이 비효율적이게 된다.

2.2 쌍동형 무인선의 부족구동 특성

이지무스 추진기로 구동되는 쌍추진기 선박이 동적위치제어를 수행하는데 있어 겪는 어려움은 추력분배 과정에만 있는 것이 아니다. 본 논문에서 다루는 추진형태를 가지는 쌍동형 무인선은 때때로 부족구동 특성을 보인다. Fig. 4는 타각제한이 있는 두 이지무스 추진기로 만들어낼 수 있는 힘과 모멘트를 3차원 공간 상에 도시한 것이다. 특정 힘과 모멘트 영역에 공백이 있음을 확인할 수 있는데, 이는 해당 선박으로 만들어낼 수 없는 제어입력이 된다. 즉 쌍동형 무인선은 특정 방향의 힘과 모멘트를 필요로 하는 상황에 대해 underactuated system이 되는 것이다. 본 논문에서는 어떤 경우에 부족구동 현상이 나타나며 어떻게 이를 극복하는지 다루도록 한다.

3. 쌍동형 무인선의 동적위치제어 기법

3.1 추력분배 문제의 단순화

식 (1)부터 (4)까지 쌍동형 무인선의 추력분배 문제 풀이를 위한 최적화 문제가 정의되었다. 이는 두 개의 추력 (u_1, u_2)과 두 개의 타각(θ_1, θ_2)을 각각 어떻게 작동시킬지 정하는 것이기도 하며, 동시에 전후·좌우방향 추력 성분 ($u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}$)을 정하는 문제이기도 하다. 즉, 네 개

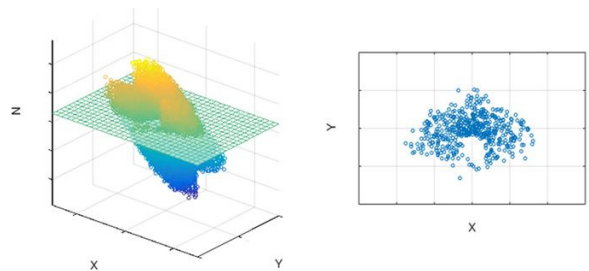


Fig. 4. Attainable forces and moment in the direction of surge, sway and yaw($\theta_{max} = 60^\circ$)

변수에 대한 nonlinear non-convex optimization 문제인 셈인데, 이는 다음의 절차를 적용하면 수치해석 방법을 적용하지 않고도 해석해를 구할 수 있다.

먼저 식 (1)의 항들을 각 추진기의 전후방향 힘들에 대해 정리하면 식 (5)와 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned}
 u_{1x} &= \frac{1}{2} \left[X_{con} + \frac{N_{con} + h Y_{con}}{w} \right] \\
 &= \frac{1}{2} X_{con} + \frac{h}{2w} Y_{con} + \frac{1}{2w} N_{con} \\
 u_{2x} &= \frac{1}{2} \left[X_{con} - \frac{N_{con} + h Y_{con}}{w} \right] \\
 &= \frac{1}{2} X_{con} - \frac{h}{2w} Y_{con} - \frac{1}{2w} N_{con}
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)의 결과는 중요한 의미를 가진다. 좌현과 우현 각각의 추진기가 내야하는 전후방향 추력이 제어입력 (X_{con} , Y_{con} , N_{con})가 주어지지만 하면 무조건적으로 정해진다는 것이다. 이는 기존의 추력분배 문제가 네 개의 변수를 최적화해야 했던 것에서 두 개의 변수를 최적화하는 것으로 바뀌었음을 의미한다. 그리고 이러한 특성을 이용하면 식 (2)와 (3)의 추진제약조건들에서 u_{1x} , u_{2x} 에 관한 항들을 제거하고 u_{1y} , u_{2y} 에 대해서만 정리하는 것이 가능해진다. 최대 추력에 대한 추진제약조건은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\sqrt{u_{i,max}^2 - u_{ix}^2} \leq u_{iy} \leq \sqrt{u_{i,max}^2 - u_{ix}^2} \tag{6}$$

최대 타각에 대한 추진제약조건은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 -\text{sign}(u_{ix})u_{ix}\tan(\theta_{\max}) &\leq u_{iy} \\
 &\leq \text{sign}(u_{ix})u_{ix}\tan(\theta_{\max})
 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (6), (7)에서의 u_{ix} 는 제어입력에 의해 무조건적으로 정해지는 값이기 때문에 결과적으로 u_{iy} 가 가질 수 있는 값은 상수 값 이내로 특정된다는 것을 볼 수 있다.

3.2 추력분배 문제의 도식적 풀이

단순화된 형태의 최적화 문제는 도식적인 해석을 가능케

한다. 식 (6)과 (7)의 단순화된 추진제약조건을 u_{1y} 와 u_{2y} 를 두 축으로 가지는 평면에 도시할 수가 있으며 이는 Fig. 5와 같다. 그림에서 붉은 실선은 최대 추력에 의한 추진제약조건, 푸른 실선은 최대 타각으로 인한 추진제약조건이 된다. u_{1y} 와 u_{2y} 모두에 대해 추진제약조건을 만족하는 내부 사각형이 (u_{1y} , u_{2y})의 추력가용범위가 된다. 음영처리된 이 영역은 본 논문에서 다루는 쌍추진기 선택이 물리적으로 실현할 수 있는 추력 (u_{1y} , u_{2y})의 집합을 나타낸다.

여기에서 식 (1)을 적용하면 추력분배를 마칠 수 있다. 식 (1)의 $Y_{con} = u_{1y} + u_{2y}$ 을 좌표평면상에 도시하면 Fig. 6와 같은 결과를 얻을 수 있다. 굵은 실선으로 나타나는 영역은 추진제약조건 $Y_{con} = u_{1y} + u_{2y}$ 을 만족하면서 동시에 실현 가능한 힘의 집합을 의미한다. 이 중에서 추진기의 소모

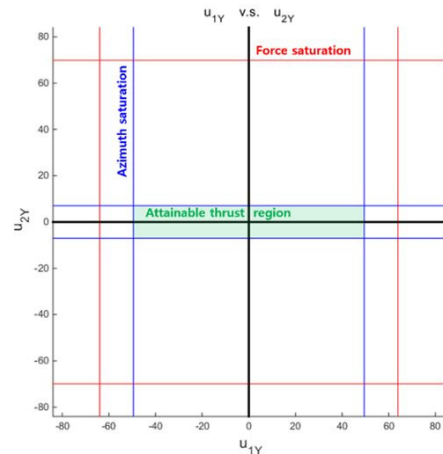


Fig. 5. Inequality constraints which are represented in space(u_{1y} , u_{2y})

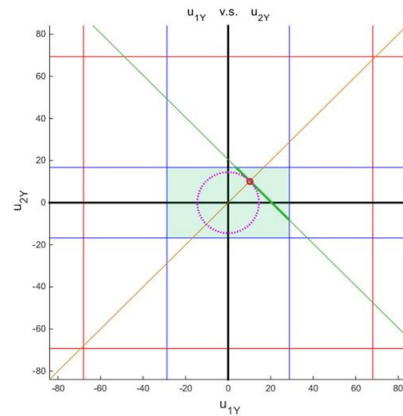


Fig. 6. Case study 1 : When the solution is on the boundary

에너지를 최소화하는 (u_{1y}, u_{2y}) 가 있다면 그것이 이 추력분배 문제의 해가 된다. Fig. 6에서는 $u_{1y} = u_{2y}$ 를 만족하는 상태에서 해가 구해지는 것을 확인할 수 있다.

앞에서 다룬 바와 같이 식 (1)을 적용하여 해를 구하는 과정은 Fig. 6, 7, 8과 같이 세 가지 경우로 분류할 수가 있다. Fig. 6는 $u_{1y} = u_{2y}$ 을 만족하며 추력이 분배되는 상황을 나타낸다. Fig. 7는 $u_{1y} = u_{2y}$ 을 만족하지 못하는 경우로, (u_{1y}, u_{2y}) 추력가용범위의 경계값에서 해가 발생하는 경우이다. 마지막으로 Fig. 8은 추력분배 문제의 해가 존재하지 않

는 경우를 나타내며, 이 경우가 바로 쌍동형 무인선이 부족구동되는 순간을 나타낸다.

3.3 추력분배 문제의 일반해 도출

Fig. 6, 7, 8에서 다룬 추력분배 문제의 풀이 과정들은 모두 수학적으로 일반화하는 것이 가능하다. Fig. 9를 보면 (u_{1y}, u_{2y}) 의 추력가용범위를 나타내는 사각형의 형상과 관련된 변수 a, b 는 모두 추력 제한과 타각 제한에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 즉 a, b 의 값만 적절히 정할 수 있으면 추력분배 문제의 해는 대수적으로 해를 찾을 수 있게 되는 것이다. a 와 b 의 값은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$\begin{aligned} a &= \min(a_1, a_2) \\ b &= \min(b_1, b_2) \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)의 a_1, a_2, b_1, b_2 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \text{abs}(u_{1x}) \tan(\theta_{\max}) \\ a_2 &= \sqrt{u_{\max}^2 - u_{1x}^2} \\ b_1 &= \text{abs}(u_{2x}) \tan(\theta_{\max}) \\ b_2 &= \sqrt{u_{\max}^2 - u_{2x}^2} \end{aligned} \tag{9}$$

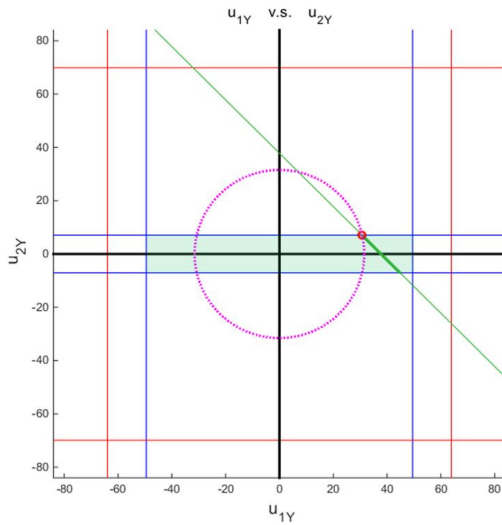


Fig. 7. Case study 2 : When the solution is inside the inequality constraints

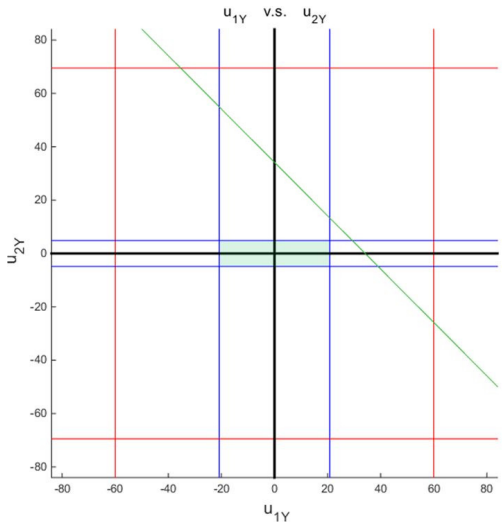


Fig. 8. Case study 3 : When the feasible solution does not exist

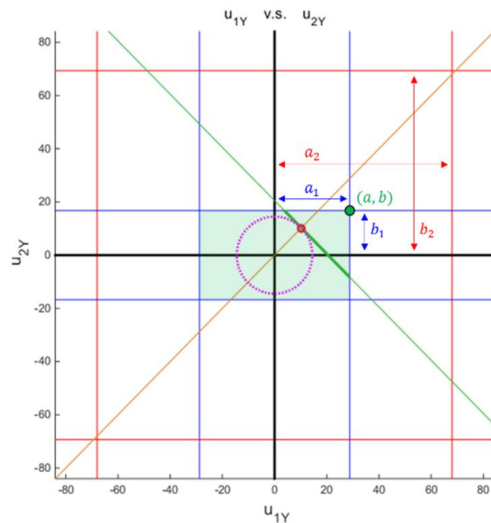


Fig. 9. Constraints formulation

Fig. 9와 식 (8), (9)를 이용하면 추력분배 문제의 풀이 과정이 Algorithm 1과 같이 정리된다. 추진기가 낼 수 있는 최대 추력과 추진기의 최대 타각, 추진기가 배치된 위치 등의 정보만 사전에 알고 있으면 별도의 수치해석 기법을 적용하지 않고 추력분배 결과를 얻을 수 있다.

3.4 쌍동형 무인선의 부족구동 특성 극복 방법

앞 장에서 쌍동형 무인선의 추력분배 문제가 해석적으로 풀이될 수 있음을 보였지만 쌍동형 무인선으로 동적위치제어를 수행하기 위해서는 추가적인 문제를 해결해야만 한다. 이는 쌍동형 무인선이 부족구동되는 문제에 관한 것으로, 앞에서 밝힌 바와 같이 쌍동형 무인선이 충분히 다양한 조

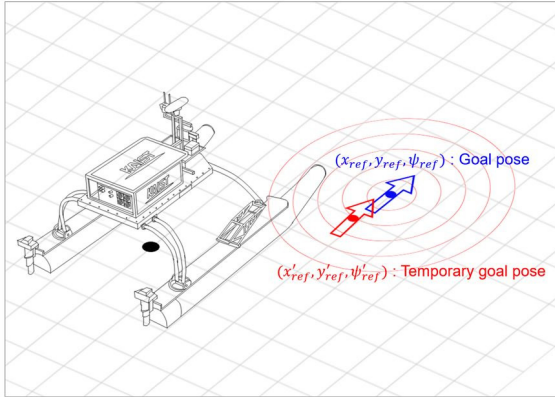


Fig. 10. Conceptual illustration of singularity resolution method

Algorithm 1 : Proposed thrust allocation method

Input : Virtual control input $\tau = [X_{con}, Y_{con}, N_{con}]^T$

Output : Actuator control input $\mathbf{u} = [u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}]^T$

- 1: calculate u_{1x} , u_{2x} , a , and b
- 2: **if** $|Y_{con}| \leq 2\min(|a|, |b|)$ **then**
- 3: $u_{1y} = u_{2y} = \frac{1}{2} Y_{con}$
- 4: **else if** $2\min(|a|, |b|) < |Y_{con}| \leq |a| + |b|$ **then**
- 5: **if** $|a| \geq |b|$
- 6: $u_{2y} = \text{sign}(Y_{con})|b|$
- 7: $u_{1y} = \text{sign}(Y_{con}) \cdot (|Y_{con}| - b)$
- 8: **if** $|a| < |b|$
- 9: $u_{1y} = \text{sign}(Y_{con})|a|$
- 10: $u_{2y} = \text{sign}(Y_{con}) \cdot (|Y_{con}| - a)$
- 11: **else if** $|a| + |b| < |Y_{con}|$
- 12: No feasible solution exists
- 13: **return** $\mathbf{u} = [0000]^T$
- 14: **end**

합의 힘과 모멘트를 발생시킬 수 없다는 점을 극복해야 한다. 쌍동형 무인선의 부족구동 현상을 피하고 동적위치제어를 수행하기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 제안한다.

먼저 Fig. 10은 무인선이 동적위치제어를 수행하는 장면의 예시를 보여준다. 그림 상에서 무인선은 위치와 선수가이 $\mathbf{x} = [x_{ref}, y_{ref}, \psi_{ref}]^T$ 이 되도록 유지하는 것을 목표로 한다. 이 때 무인선의 제어기에서는 힘과 모멘트 $\tau = [X_{con}, Y_{con}, N_{con}]^T$ 를 만들고자 할 것이다. 본 예시에서 $\tau = [X_{con}, Y_{con}, N_{con}]^T$ 는 무인선이 해당 포즈를 유지하기 위한 제어입력 에 상응하는 힘과 모멘트를 발생시키지 못하는 상황에 처한 것으로 가정한다.

이와 같은 예시 상황에서 무인선이 부족구동되는 상황을 피하기 위해 새로운 목표 포즈 $\mathbf{X}'_{ref} = [x'_{ref}, y'_{ref}, \psi'_{ref}]^T$ 를 생각해볼 수 있다. 그리고 이 포즈를 목표로 할 때 산출되는 제어입력 $\tau' = [X'_{con}, Y'_{con}, N'_{con}]^T$ 은 추력분배 문제의 해가 존재한다고 가정한다. 만일 이러한 \mathbf{X}'_{ref} 를 \mathbf{X}_{ref} 근처에서 지속적으로 찾을 수 있다면, 무인선을 \mathbf{X}_{ref} 에 근접하게 위치시키는 것이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 \mathbf{X}'_{ref} 를 찾아 임시 목표 포즈로서 사용하는 개념을 제안한다. 앞 장에서 고안한 추력분배 기법을 이용하면, 제어입력 $\tau = [X_{con}, Y_{con}, N_{con}]^T$ 가 정해질 때마다 τ 에 대한 추력분배가 가능한지 불가능한지를 판별식 $|a| + |b| < |Y_{con}|$ 으로부터 파악할 수 있다. 이를 이용하여 \mathbf{X}_{ref} 근처에서의 여러 지점들에 대해 추력분배가 가능한지를 조사하는 것이다. \mathbf{X}_{ref} 근처의 다양한 지점들이 이 판별식으로 조사하면 근처에서 임시 목표 포즈로 사용할 \mathbf{X}'_{ref} 를 찾을 수 있다. 근처를 탐색하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 목표 포즈를 탐색하기 위해 x , y , ψ 중 어느 값을 조절할지, 조절하는 데에 있어 가중치를 적용할 것인지, 목표 포즈를 얼마나 조밀하게 탐색할 것인지는 모두 튜닝 파라미터가 된다. 본 논문에서는 목표 포즈에서 좌표를 다양하게 변경해가며 \mathbf{X}'_{ref} 후보들을 탐색하고, 그 중 \mathbf{X}_{ref} 와의 거리 오차가 가장 작은 것을 찾음으로써 진행되었다. 더 자세히는, Fig 10에서와 같이 \mathbf{X}_{ref} 을 중심으로 하여 일정 반경에서 수십여 개의 좌표들을 조사하고, 그 조사 반경을 점차 넓혀가는 식으로 진행되었다.

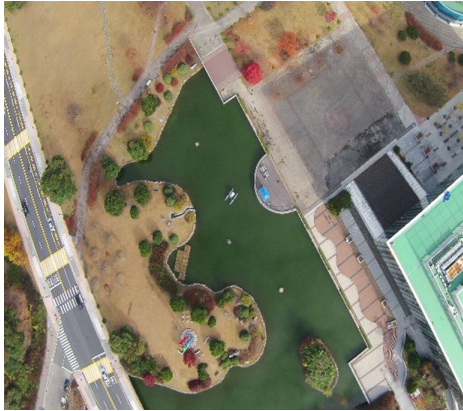


Fig. 11. The experiment site : KAIST Duck pond

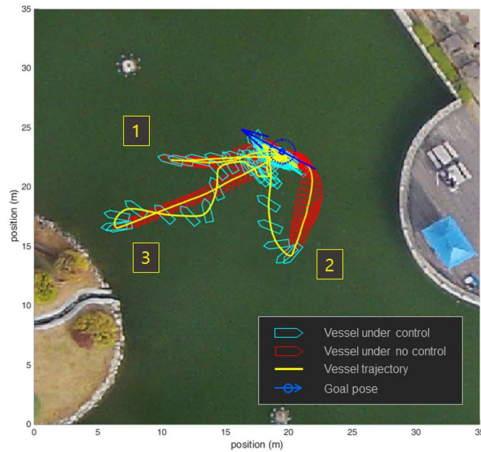


Fig. 12. Vessel time trajectory

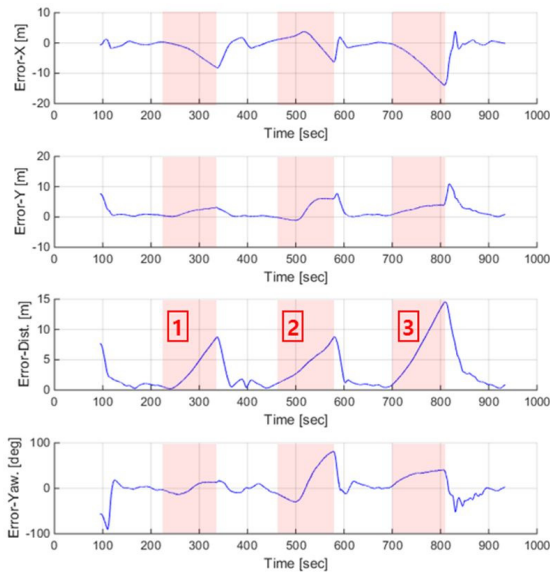


Fig. 13. Error information

4. 쌍동형 무인선의 동적위치제어 실험

제안된 추력분배 기법의 유용성 및 사용가능성을 검증하기 위해 실제 수상 환경에서 쌍추진기 무인선박의 위치제어 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 11과 같이 한국과학기술원 내에 위치한 연못에서 진행되었으며, 동적위치제어 제어기를 사용할 때와 사용하지 않을 때에 대해 각각 선박이 어떻게 거동하는지를 비교하는 것으로 진행되었다.

실험에 사용된 플랫폼은 선장 4.5 m, 선폭 3 m의 크기에 GPS, AHRS를 장착하는 무인선 플랫폼으로, Fig. 1에서 나타나는 바와 같이 두 개의 타각조절이 가능한 이지무스 추진기를 가지고 있다. 이 두 추진기는 $\pm 60^\circ$ 범위에서 타각 조절이 가능하며 각각 최대 220 N만큼의 전진 추력을, 160 N만큼의 후진 추력을 발생시킬 수 있다. 선박의 제어 기로는 PD제어를 사용하였으며, 본 논문에서 제안하는 방법을 이용하여 추력분배를 실시하고, 추력분배가 불가능한 상황에서는 제안된 방법을 통해 임시 목표 포즈를 설정하였다.

Fig. 12은 무인선의 GPS 이동 궤적을 나타내며 Fig. 13은 동적위치제어 실시 여부에 따라 선박의 거리오차와 방위각 오차가 어떻게 변화하는가를 도시한 것이다. Fig. 14는 양 이지무스 추진기의 추력과 타각 상태를 나타낸다. Fig. 13과 14에서의 붉은 영역은 무인선이 제어가 이루어지지 않는 상태에서 바람에 표류하는 상태를 나타내고, 그 외의 영역은 무인선이 동적위치제어를 실시하고 있는 상태를 나타낸다. Fig. 13의 붉은 영역에 표기된 번호는 Fig. 12에서 선박이 표류한 자취와 대응되므로 함께 비교하며 참고할 수 있다.

무인선은 동적위치제어를 수행하고 중단하기를 각각 2분씩 7회에 걸쳐 반복하였다. 제어를 꺼놓은 동안 선박이 표류한다는 사실로부터 환경외란이 작용하고 있음을 볼 수 있으며, 제어를 켜놓은 동안은 선박이 목표 위치를 사수한다는 점으로부터 동적위치제어가 적절히 수행되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 동적위치제어 시나리오가 진행되는 동안 추력분배가 불가능한 상황이 발생했을 때 어떤 지점으로 X'_{ref} 가 설정되었는지를 누적하여 보여주는 자료이다. 다양한 거리, 다양한 선수각 상황에서 무인선이 여러 번에 걸쳐 추력

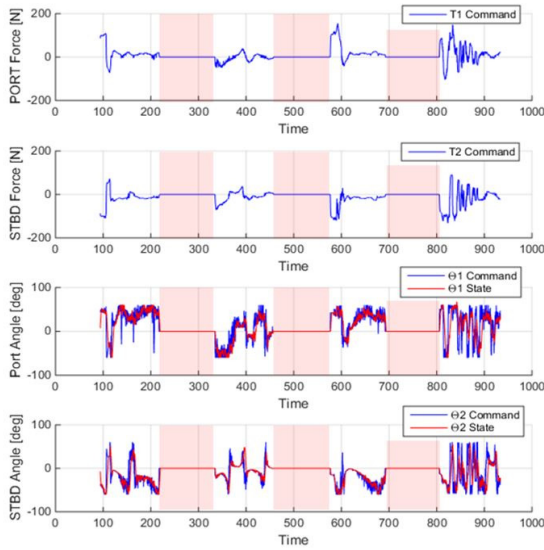


Fig. 14. Actuator inputs

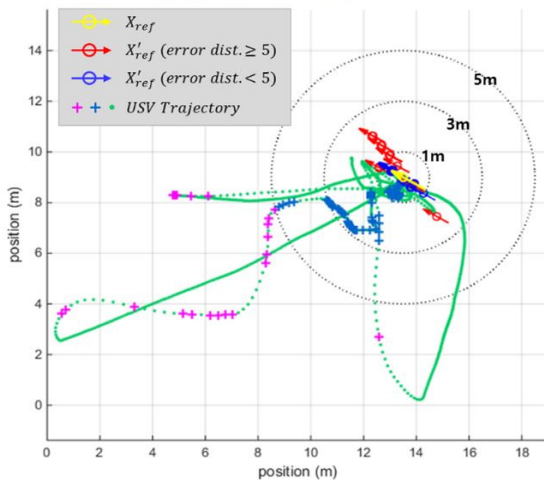


Fig 15. Location of compared to USV time trajectory

분배가 불가능한 상황에 처했음을 볼 수 있다. 이 그림에서는 X'_{ref} 들의 위치를 무인선의 거리오차 상태에 따라 적색과 청색으로 구분하여 나타냈다. 적색 화살표는 무인선이 목표 포즈 X_{ref} 로부터 5 m 이상 떨어진 상황에서 어느 지점을 X'_{ref} 으로 선정했는지 그 분포를 보여준다. 청색 화살표는 무인선이 목표 포즈 X_{ref} 로부터 5 m 이내에 위치한 상황에서 어느 지점을 X'_{ref} 으로 잡았는지 분포를 보여준다. 무인선이 목표지점으로부터 크게 떨어진 상황이 아니면 항상 X_{ref} 와 1 m 이내의 거리에서 X'_{ref} 을 찾음을 확인할 수 있다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 방법을 이용하면

쌍동형 무인선의 동적위치제어에 있어 추력분배를 효과적으로 수행할 수 있고, 추력분배가 불가능한 상황에서도 어느정도 동적위치제어 성능을 기대할 수 있는 휴리스틱 기법을 적용할 수 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 쌍동형 무인선박의 추력분배 문제 풀이 기법과 이를 응용한 동적위치제어 기법을 보였다. 타각 제한이 있는 이지무스 추진기를 사용하는 쌍동형 무인선은 추력분배 문제는 nonlinear non-convex optimization 문제로 기술되기 때문에 추력분배를 실시하기에 어려움이 있다. 그러나 본 논문에서 제안하는 일련의 과정들을 적용하면 non-convex 최적화 문제를 convex 문제로 단순화하고, 도식적 해석을 통해 추력분배문제의 해석해를 도출해내는 것이 가능하다. 더 나아가 이 추력분배 기법을 응용하여 쌍추진기 선박의 부족구동(underactuation)을 극복하고 동적위치제어를 수행하는 것이 가능함을 실험적으로 검증하였다.

휴리스틱 기법을 사용하지 않고 쌍추진기 선박이 가지는 부족구동특성을 극복하면서 3자유도 포즈 제어를 수행하기 위해서는 경로 계획 알고리즘을 사용하거나 본 시스템에 부합하는 비선형 제어기를 개발하는 것이 가장 이상적일 것이다. 그러나 아직 타각제한을 유기적으로 고려하면서 쌍축쌍타 선박에 적용할 수 있는 3자유도 포즈 제어 기법이 개발되어있지 않은 현 시점에서는 본 논문에서 제안하는 방법을 통해 동적위치제어를 수행하는 것도 고려해볼 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant [MPSS-CG-2015-01] through the Disaster and Safety Management Institute funded by Ministry of Public Safety and Security of Korean government. In addition, this research was a part of the project titled “Development of autonomous unmanned surface vehicle for ocean observation and sea surveillance (PMS3220)” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.

References

- [1] T.I. Fossen, Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons, 1994.
- [2] K.A. Bordignon, and W.C. Durham, "Closed-form solutions to constrained control allocation problem," Journal of Guidance, Control, and Dynamics vol.18, no.5, pp.1000-1007, 1995.
- [3] W.C. Durham, "Constrained control allocation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics vol.16, no.4, pp.717-725, 1993.
- [4] D. Enns, "Control allocation approaches," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Boston, MA, August. vol.5, 1998.
- [5] J. Shi, W. Zhang, G. Li, and X. Liu, "Research on allocation efficiency of the redistributed pseudo inverse algorithm," Science China Information Sciences vol.53, no.2, pp.271-277, 2010.
- [6] J.C. Vimig and D.S. Bodden, "Multivariable control allocation and control law conditioning when control effectors limit(STOVL aircraft)," In AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Scottsdale, AZ, pp.572-582, 1994.
- [7] M. Oppenheimer, D. Doman, and M. Bolender, "Control allocation," In W. S. Levine (Ed.), The control handbook, control system applications, 2nd ed., Chapter 8, 2010.
- [8] J.M. Buffington and D.F. Enns, "Lyapunov stability analysis of daisy chain control allocation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol.19, no.6, pp.1226-1230, 1996.
- [9] M. Bodson and S.A. Frost, "Control allocation with load balancing," In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference & Exhibit, 2009.
- [10] M. Bodson, "Evaluation of optimization methods for control allocation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol.25, no.4, pp.703-711, 2002.
- [11] S.A. Frost, and M. Bodson, "Resource balancing control allocation," In American Control Conference (ACC), 2010, pp.1326-1331, 2010.
- [12] O. Härkegård, "Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation," In Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on, vol.2, pp.1295-1300, 2002.
- [13] J.A. Petersen and M. Bodson, "Constrained quadratic programming techniques for control allocation," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol.14, no.1, pp.91-98, 2006.
- [14] J.A.M. Petersen and M. Bodson, "Interior-point algorithms for control allocation," Journal of guidance, control, and dynamics, vol.28, no.3, pp.471-480. 2005.
- [15] T.A. Johansen and T.I. Fossen, "Control allocation-a survey," Automatica, vol.49, no.5, pp.1087-1103, 2013.
- [16] T.A. Johansen, T.I. Fossen, and P. Tøndel, "Efficient optimal constrained control allocation via multiparametric programming," Journal of guidance, control, and dynamics, vol.28, no.3, pp.506-515, 2005.
- [17] T. Johansen, T. Fossen, S.P. Berge, et al., "Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol.12, no.1, pp.211-216, 2004.
- [18] T. Johansen et al., "Optimizing nonlinear control allocation," Decision and control, 2004, CDC. 43rd IEEE Conference on, vol.4, pp.3435-3440, IEEE, 2004.
- [19] T.A. Johansen, T.P. Fuglseth, P.Tøndel, and T.I. Fossen, "Optimal constrained control allocation in marine surface vessels with rudders," Control Engineering Practice, vol.16, no.4, pp.457-464, 2008.



강민주

2014 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
 2016 한국과학기술원 해양시스템대학원(공학석사)

관심분야: 해양로봇, 선박제어, 동적위치제어



김태윤

2010 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
 2012 한국과학기술원 해양시스템공학전공(공학석사)
 2012~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

관심분야: 수중항법, 비선형 필터 알고리즘, SLAM



김진환

1993 서울대학교 조선해양공학 학사
 1995 서울대학교 조선해양공학 석사
 2007 Stanford University 항공우주공학 박사
 1995~2000 한국기계연구원/한국해양연구원 선박해양공학연구센터(KRISO) 연구원/선임연구원
 2007~2010 Optimal Synthesis Inc. Research Scientist
 2010~현재 KAIST 기계공학과 부교수

관심분야: 해양로봇 및 항법제어