



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0111582
(43) 공개일자 2017년10월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01S 1/74 (2006.01) G01S 5/20 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01S 1/74 (2013.01)
G01S 5/20 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0037357
(22) 출원일자 2016년03월29일
심사청구일자 2016년03월29일

(71) 출원인
조선대학교산학협력단
광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)
(72) 발명자
고낙용
광주광역시 남구 봉선중앙로47번길 5, 2동 101호
(봉선동)
(74) 대리인
특허법인명인

전체 청구항 수 : 총 37 항

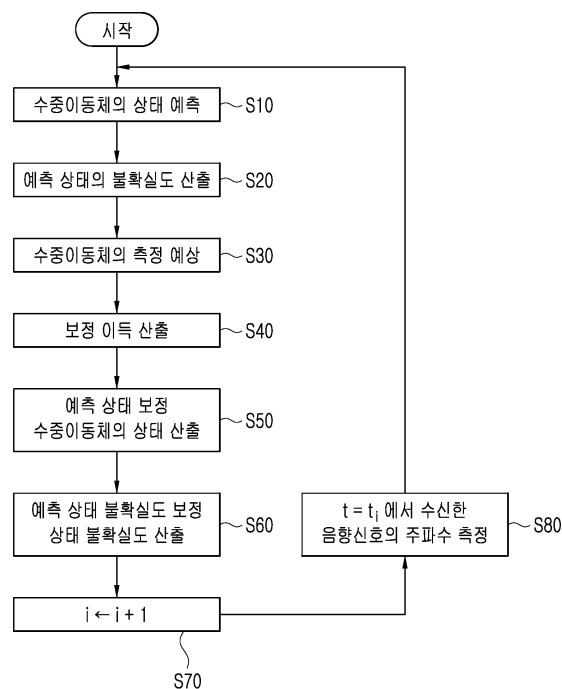
(54) 발명의 명칭 도플러 비컨을 이용한 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 수중 이동체의 위치 및 속도를 추정하기 위한 방법 및 시스템에 관한 것으로서, 상세하게는 복수의 도플러 비컨 위치 및 각 도플러 비컨의 발신 주파수를 아는 조건에서 수중 이동체의 수신 주파수를 이용하여 수중 이동체의 위치 및 속도를 계산할 수 있는 도플러 비컨을 이용한 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법 및 시스템

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



템에 관한 것이다. 이를 위해, 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법은, 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성된 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법으로서, 상기 복수의 비컨 위치 및 음향신호의 발신 주파수를 제공하는 단계와, 상기 수중 이동체가 상기 복수의 비컨으로부터 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 단계와, 상기 복수의 비컨 위치 정보, 상기 복수의 음향신호의 발신 주파수 정보 및 상기 수중 이동체의 수신 주파수 정보를 이용하여 상기 수중 이동체의 상태를 추정하는 단계를 포함한다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1345232330

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 이공학개인지초연구지원

연구과제명 해저 지형과 해수면 높이를 고려한 융합형 수중 로봇 위치 추정

기 여 율 1/1

주관기관 조선대학교 산학협력단

연구기간 2015.06.01 ~ 2016.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성되는 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

이전 시점의 수중 이동체의 상태에서부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측 상태를 산출하는 단계와,

이전 시점의 상태 불확실도로부터 현재 시점의 예측 상태 불확실도를 산출하는 단계와,

상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하는 단계와,

상기 예측 상태 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 측정 불확실도를 산출하는 단계와,

상기 예측 상태와 상기 예상 측정의 상호 오차 의존도를 산출하는 단계와,

상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 단계와,

상기 예측 상태와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하는 단계와,

상기 예측 상태 불확실도와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 예측 상태를 산출하는 단계는 상기 이전 시점의 상태와 상태 변환 행렬을 곱하여 상기 예측 상태를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 예측 상태 불확실도를 산출하는 단계는 상기 이전 시점의 상태 불확실도, 상태 변환 행렬 및 상태 변환 모델의 오차 공분산 행렬을 이용하여 상기 예측 상태 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 예상 측정을 산출하는 단계는 측정 모델 함수에 상기 예측 상태를 대입하여 상기 예상 측정을 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 예상 측정 불확실도를 산출하는 단계는 상기 예측 상태 불확실도, 측정 모델 행렬 및 측정 모델의 오차 공분산 행렬을 이용하여 상기 예상 측정 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 상호 오차 의존도를 산출하는 단계는 상기 예측 상태 불확실도 및 측정 모델 행렬을 이용하여 상기 상호 오차 의존도를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 보정 이득을 산출하는 단계는 상기 상호 오차 의존도를 상기 예상 측정 불확실도로 나누어 상기 보정 이득을 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 현재 시점의 상태를 산출하는 단계는 상기 보정 이득에 실제 측정과 상기 예상 측정의 차이값을 곱하여 보정값을 구하고 이 보정값에 상기 예측 상태를 더하여 상기 현재 시점의 상태를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 단계는 상기 보정 이득에 측정모델 행렬과 예측 상태 불확실도를 곱하여 보정값을 구하고 예측 상태 불확실도에서 보정값을 빼서 상기 현재 시점의 상태 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 10

서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성된 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

상기 복수의 비컨 위치 및 음향신호의 발신 주파수를 제공하는 단계와,

상기 수중 이동체가 상기 복수의 비컨으로부터 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 단계와,

상기 복수의 비컨 위치 정보, 상기 복수의 음향신호의 발신 주파수 정보 및 상기 수중 이동체의 수신 주파수 정보를 이용하여 상기 수중 이동체의 상태를 추정하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 수중 이동체의 상태를 추정하는 단계는 이전 시점의 상태에서부터 현재 시점의 상태를 예측하는 과정과,

상기 예측 상태를 이용하여 상기 수중 이동체가 수신한 음향신호의 주파수를 예상하는 과정과,

상기 예측 상태의 불확실도 및 상기 예상 주파수의 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 과정과,

상기 실제 측정 주파수, 상기 예상 주파수 및 상기 보정이득을 이용하여 예측 상태를 보정함으로써 현재 시점의 상태를 산출하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 현재 시점의 상태를 예측하는 과정은 이전 시점의 상태와 현재 시점의 상태가 급격하게 변하지 않는다는 가정에 따른 모델링에 근거하여 예측하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 음향신호의 주파수를 예상하는 과정은 주파수가 상태에 의하여 어떻게 결정되는지 나타낼 수 있는 수학적 모델링에 근거하여 상기 예측 상태에 대응하는 주파수를 예상하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 14

제11항에 있어서,

상기 예측 상태의 불확실도 및 상기 예상 주파수의 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 과정은 상기 예측 상태의 불확실도가 클수록 상기 실제 측정 주파수에 의한 보정이 커지고 상기 예상 주파수의 불확실도가 작을수록 상기 실제 측정 주파수에 의한 보정이 커지는 원리에 따라 상기 예측 상태의 불확실도에 비례하고 상기 예상 주파수의 불확실도에 반비례하도록 상기 보정 이득을 설계하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 15

제11항에 있어서,

상기 현재 시점의 상태를 산출하는 과정은 상기 보정 이득에 실제 측정 주파수와 상기 예상 주파수의 차이값을 곱하여 보정값을 구하고 이 보정값에 상기 예측 상태를 더하여 구하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 16

서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성되는 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 단계와,

이전 시점의 수중 이동체의 상태로부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측 상태를 산출하는 단계와,

상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하는 단계와,

상기 예측 상태를 보정하기 위한 보정 이득을 산출하는 단계와,

상기 예측 상태, 상기 측정 주파수 및 상기 예상 측정 그리고 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 보정 이득을 산출하는 단계는

이전 시점의 상태 불확실도로부터 현재 시점의 예측 상태 불확실도를 산출하는 과정과,

상기 예측 상태 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 측정 불확실도를 산출하는 과정과,

상기 예측 상태와 상기 예상 측정의 상호 오차 의존도를 산출하는 과정과,

상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 예측 상태 불확실도 및 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 19

복수의 비컨으로부터 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 수신하여 수중 이동체의 상태로서 위치 및 속도를 추정하는 수중 이동체에 있어서,

상기 수중 이동체는 이전 시점의 수중 이동체의 상태로부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측 상태를 산출하고,

이전 시점의 상태 불확실도로부터 현재 시점의 예측 상태 불확실도를 산출하고,

상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하고,

상기 예측 상태 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 측정 불확실도를 산출하고,

상기 예측 상태와 상기 예상 측정의 상호 오차 의존도를 산출하고,

상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하고,

상기 예측 상태와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하고,

상기 예측 상태 불확실도와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 이전 시점의 상태와 상태 변환 행렬을 곱하여 상기 예측 상태를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 21

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 이전 시점의 상태 불확실도, 상태 변환 행렬 및 상태 변환 모델의 오차 공분산 행렬을 이용하여 상기 예측 상태 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 22

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 측정 모델 함수에 상기 예측 상태를 대입하여 상기 예상 측정을 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 23

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 예측 상태 불확실도, 측정 모델 행렬 및 측정 모델의 오차 공분산 행렬을 이용하여 상기 예상 측정 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 24

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 예측 상태 불확실도 및 측정 모델 행렬을 이용하여 상기 상호 오차 의존도를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 25

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 상호 오차 의존도를 상기 예상 측정 불확실도로 나누어 상기 보정 이득을 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 26

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 보정 이득에 실제 측정과 상기 예상 측정의 차이값을 곱하여 보정값을 구하고 이 보정값에 상기 예측 상태를 더하여 상기 현재 시점의 상태를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 27

제19항에 있어서,

상기 수중 이동체는 상기 보정 이득에 측정모델 행렬과 예측 상태 불확실도를 곱하여 보정값을 구하고 예측 상태 불확실도에서 보정값을 빼서 상기 현재 시점의 상태 불확실도를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체.

청구항 28

서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과,

상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하면 수신한 음향신호의 주파수를 측정하고 상기 복수의 비컨 위치, 상기 복수의 음향신호의 발신 주파수 및 상기 측정한 수신 주파수를 이용하여 수중 이동체의 상태로서 위치 및 속도를 추정하는 추정 장치를 포함하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 29

제28항에 있어서,

상기 추정 장치는 이전 시점의 상태에서부터 현재 시점의 상태를 예측하고,

상기 예측 상태를 이용하여 상기 수중 이동체가 수신한 음향신호의 주파수를 예상하고,

상기 예측 상태의 불확실도 및 상기 예상 주파수의 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하고,

상기 측정한 수신 주파수, 상기 예상 주파수 및 상기 보정이득을 이용하여 예측 상태를 보정함으로써 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 산출하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 30

제29항에 있어서,

상기 추정 장치는 이전 시점의 상태와 현재 시점의 상태가 급격하게 변하지 않는다는 가정에 따른 모델링에 근거하여 현재 시점의 상태를 예측하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 31

제29항에 있어서,

상기 추정 장치는 주파수가 상태에 의하여 어떻게 결정되는지 나타낼 수 있는 수학적 모델링에 근거하여 상기 예측 상태에 대응하는 주파수를 예상하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 32

제29항에 있어서,

상기 추정 장치는 상기 예측 상태의 불확실도가 클수록 상기 측정한 수신 주파수에 의한 보정이 커지고 상기 예상 주파수의 불확실도가 작을수록 상기 측정한 수신 측정 주파수에 의한 보정이 커지는 원리에 따라 상기 예측 상태의 불확실도에 비례하고 상기 예상 주파수의 불확실도에 반비례하도록 상기 보정 이득을 설계하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 33

제29항에 있어서,

상기 추정 장치는 상기 보정 이득에 상기 측정한 수신 주파수와 상기 예상 주파수의 차이값을 곱하여 보정값을 구하고 이 보정값에 상기 예측 상태를 더하여 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 구하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템.

청구항 34

복수의 비컨으로부터 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 수신하는 음향 신호 수신부와,

상기 음향 수신부에서 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 주파수 측정부와,

이전 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도로부터 현재 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도를 예측하여 예측 위치

및 속도를 산출하고, 상기 예측 위치 및 속도를 이용하여 상기 음향신호 수신부가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수를 예상하여 예상 주파수를 산출하고, 상기 예측 위치 및 속도를 보정하기 위한 보정 이득을 산출하여, 상기 예측 위치 및 속도, 상기 측정 주파수 및 상기 예상 주파수 그리고 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도를 산출하는 제어부를 포함하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치.

청구항 35

제34항에 있어서,

상기 제어부는

이전 시점의 위치 및 속도 불확실도로부터 현재 시점의 예측 위치 및 속도 불확실도를 산출하고,

상기 예측 위치 및 속도 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 주파수 불확실도를 산출하고,

상기 예측 위치 및 속도와 상기 예상 주파수의 상호 오차 의존도를 산출하여,

상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 주파수 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치.

청구항 36

제35항에 있어서,

상기 제어부는 상기 예측 위치 및 속도 불확실도 및 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 위치 및 속도 불확실도를 산출하는 것을 특징으로 하는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치.

청구항 37

제1항 내지 제9항에 의한 방법을 실행하기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 수중 이동체의 위치 및 속도를 추정하기 위한 방법 및 시스템에 관한 것으로서, 상세하게는 복수의 도플러 비컨 위치 및 각 도플러 비컨의 발신 주파수를 아는 조건에서 수중 이동체의 수신 주파수를 이용하여 수중 이동체의 위치 및 속도를 계산할 수 있는 도플러 비컨을 이용한 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 수중 이동체의 위치를 알아내는 종래 방법에는 추측 항법(dead reckoning) 과 거리 기반 위치 추정 방법이 있다.

[0003] 추측 항법은 DVL(Doppler Velocity Log) 또는 IMU(Inertia Measurement Unit)을 사용하여 수중 이동체의 선속도 및 각속도를 구한다. 이 경우 속도가 센서 좌표계에서 구해지므로 절대 좌표계에서의 속도로 변환하기 위한 캘리브레이션(calibration)이 필요하다.

[0004] 그런데 추측 항법은 근본적으로 수중 이동체의 이동 및 시간 흐름에 따라 오차가 누적되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 완화하기 위해 수면에 부상하여 GPS 위치 정보를 사용하여 누적된 오차를 보상하거나, 거리나 방향 각을 측정하는 센서를 부가하여 오차 누적을 줄일 수 있으나, 시스템이 복잡해지는 단점이 있으며 누적 오차를 정확히 없앨 수는 없다.

[0005] 거리 기반 위치 추정 방법은 음향 비컨과 수중 이동체 사이의 거리를 측정하여 수중 이동체의 위치를 구하는 방법이다. 거리 측정을 위해 음향신호를 수신하고 발신하는 트랜스폰더(transponder)가 필요하다.

[0006] 그런데 거리 측정에 필요한 TOA(Time of Arrival) 방법에서 정확한 음향신호의 발신 시각과 수신 시각을 알아야 하므로 발신기와 수신기 사이의 동기화를 할 수 있을 경우에만 본 방법을 사용할 수 있다. 그러나 시간 동기화를 위해 비컨과 수신기 사이를 수중에서 유선으로 연결해야 하므로 현실적으로 그 사용이 제한된다는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) (선행문헌 1) 등록특허 10-0953921

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 창안된 것으로서, 본 발명의 목적은 다른 센서를 사용하지 않고도 위치 오차가 발생하지 않는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법을 제공하는 것이다.

[0009] 또한, 본 발명의 목적은 발신기와 수신기 간에 시간 동기화가 필요 없이 수중 이동체의 위치 및 속도를 추정할 수 있는 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법을 제공하는 것이다.

[0010] 또한, 본 발명의 목적은 장치 구조가 간단하고 고장 및 오동작의 위험이 적은 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 이를 위하여 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법은, 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성되는 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

[0012] 이전 시점의 수중 이동체의 상태로부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측 상태를 산출하는 단계와, 이전 시점의 상태 불확실도로부터 현재 시점의 예측 상태 불확실도를 산출하는 단계와, 상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하는 단계와, 상기 예측 상태 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 측정 불확실도를 산출하는 단계와, 상기 예측 상태와 상기 예상 측정의 상호 오차 의존도를 산출하는 단계와, 상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하는 단계와, 상기 예측 상태와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하는 단계와, 상기 예측 상태 불확실도와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 단계를 포함한다.

[0013] 또한, 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법은, 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성된 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

[0014] 상기 복수의 비컨 위치 및 음향신호의 발신 주파수를 제공하는 단계와, 상기 수중 이동체가 상기 복수의 비컨으로부터 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 단계와, 상기 복수의 비컨 위치 정보, 상기 복수의 음향신호의 발신 주파수 정보 및 상기 수중 이동체의 수신 주파수 정보를 이용하여 상기 수중 이동체의 상태를 추정하는 단계를 포함한다.

[0015] 또한, 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법은, 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하는 수중 이동체로 구성되는 시스템에서 수중 이동체의 상태(state)로서 위치 및 속도를 추정하는 방법에 있어서,

[0016] 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 단계와, 이전 시점의 수중 이동체의 상태로부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측 상태를 산출하는 단계와, 상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하는 단계와, 상기 예측 상태를 보정하기 위한 보정 이득을 산출하는 단계와, 상기 예측 상태, 상기 측정 주파수 및 상기 예상 측정 그리고 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하는 단계를 포함한다.

[0017] 또한, 본 발명에 따른 수중 이동체는, 복수의 비컨으로부터 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 수신하여 수중 이동체의 상태로서 위치 및 속도를 추정하는 수중 이동체에 있어서,

[0018] 상기 수중 이동체는 이전 시점의 수중 이동체의 상태로부터 현재 시점의 수중 이동체의 상태를 예측하여 예측

상태를 산출하고, 이전 시점의 상태 불확실도로부터 현재 시점의 예측 상태 불확실도를 산출하고, 상기 예측 상태를 이용하여 수중 이동체가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수로서 측정(measurement)을 예상하여 예상 측정을 산출하고, 상기 예측 상태 불확실도를 이용하여 현재 시점의 예상 측정 불확실도를 산출하고, 상기 예측 상태와 상기 예상 측정의 상호 오차 의존도를 산출하고, 상기 상호 오차 의존도 및 상기 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정 이득을 산출하고, 상기 예측 상태와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태를 산출하고, 상기 예측 상태 불확실도와 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 상태 불확실도를 산출하는 것을 특징으로 한다.

[0019] 또한, 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템은, 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 출력하는 복수의 비컨과, 상기 복수의 비컨으로부터 음향신호를 수신하면 수신한 음향신호의 주파수를 측정하고 상기 복수의 비컨 위치, 상기 복수의 음향신호의 발신 주파수 및 상기 측정한 수신 주파수를 이용하여 수중 이동체의 상태로서 위치 및 속도를 추정하는 추정 장치를 포함한다.

[0020] 또한, 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치는, 복수의 비컨으로부터 서로 다른 주파수를 가진 음향신호를 수신하는 음향 신호 수신부와, 상기 음향 수신부에서 수신한 음향신호의 주파수를 측정하는 주파수 측정부와, 이전 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도로부터 현재 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도를 예측하여 예측 위치 및 속도를 산출하고, 상기 예측 위치 및 속도를 이용하여 상기 음향신호 수신부가 현재 시점에서 수신한 음향신호의 주파수를 예상하여 예상 주파수를 산출하고, 상기 예측 위치 및 속도를 보정하기 위한 보정 이득을 산출하여, 상기 예측 위치 및 속도, 상기 측정 주파수 및 상기 예상 주파수 그리고 상기 보정 이득을 이용하여 현재 시점의 수중 이동체의 위치 및 속도를 산출하는 제어부를 포함한다.

발명의 효과

[0021] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 방법은 비컨의 위치 및 발신 주파수를 아는 조건에서 수중 이동체가 수신한 음향신호의 주파수만을 측정하면 수중 이동체의 위치 및 속도를 추정할 수 있다. 이에 따라 음향 수신기만 필요하므로 추정 장치의 구조가 간단해지고 구조가 간단하여 장치 고장 및 오동작의 가능성이 작다.

[0022] 또한, 본 발명은 속도 센서를 사용하는 주측 항법과 달리 수중 이동체의 이동 및 시간 흐름에 따른 누적 오차가 발생하지 않는 효과가 있다.

[0023] 또한, 본 발명은 음향 발신기와 수신기 간에 시간 동기화나 음향신호 도착 시각 감지가 필요 없기 때문에 시간 동기화나 도착 시각 감지가 어려운 환경에서도 사용할 수 있다.

[0024] 본 발명에 따른 방법은 작업 구역이 한정된 경우가 많은 ROV(Remotely Operated Vehicle) 위치 추정에 사용할 수 있으며, 또한 정해진 구역에서 작업하는 USV(Unmanned Surface Vehicle)나 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 위치 추정에 사용할 수 있다.

[0025] 특히, 본 발명에 따른 방법은 GPS 재밍(jamming) 시의 대체 항법으로 사용할 수 있다. 즉, USV의 위치 추정을 위해 GPS 또는 GPS/INS 복합 항법이 사용되고 있으나, GPS 재밍(jamming) 시 항법 기능을 상실하게 되므로 본 발명에 따른 방법이 대체 항법으로 널리 사용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0026] 도 1은 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템의 개략적인 구성도.
 도 2는 본 발명에 따른 상태 추정 과정을 수학적식으로 나타낸 도면.
 도 3은 본 발명에 따른 상태 추정 과정을 나타낸 순서도.
 도 4는 보정이득 계산 과정을 나타낸 순서도.
 도 5는 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치의 개략적인 내부 구성도.
 도 6은 시뮬레이션에 사용한 조건을 나타낸 도면.
 도 7은 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면.
 도 8은 xy 평면의 위치 추정 결과를 나타낸 그래프.
 도 9는 xz 평면의 위치 추정 결과를 나타낸 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0027] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시 예를 상세하게 설명한다. 본 발명의 구성 및 그에 따른 작용 효과는 이하의 상세한 설명을 통해 명확하게 이해될 것이다.
- [0028] 발명의 상세한 설명에 앞서, 동일한 구성요소에 대해서는 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 동일한 부호로 표시하며, 공지된 구성에 대해서는 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 구체적인 설명은 생략하기로 함에 유의한다.
- [0029] 도 1은 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템을 개략적으로 나타낸 것이다.
- [0030] 도 1에 도시된 바와 같이, 수면 또는 수중에 복수 개의 도플러 비컨(100)이 설치되어 있으며, 수중 이동체(200)가 수중을 운항하면서 수중 이동체(200)의 위치 및 속도를 실시간으로 추정한다. 수중 이동체(200)의 위치 및 속도 추정은 수중 이동체(200)가 직접 수행하거나 별도의 외부 장치(미도시)가 수행할 수 있다.
- [0031] 도플러 비컨(100)은 일정한 위치에 설치되어 특정 주파수의 음향신호를 출력하며, 수중 이동체(200)는 비컨(100)에서 출력한 음향신호를 수신한다. 도플러 비컨은 도플러 효과를 이용하는 비컨으로서 이하에서는 설명의 편의상 비컨으로 통칭하기로 한다.
- [0032] 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템은 비컨(100)의 위치, 비컨(100)에서 출력하는 음향신호의 주파수 및 수중 이동체(200)가 수신하는 음향신호의 주파수를 사용하여 절대 좌표계에서 수중 이동체(200)의 위치 및 속도를 구할 수 있다.
- [0033] 비컨(100)에서 출력된 음향신호가 빠르게 이동하는 수중 이동체(200)에 수신될 때 도플러 효과에 의해 주파수가 변경되므로, 비컨(100)의 출력 주파수는 서로 충분한 간격을 가져야 한다. 즉, 수중 이동체(200)가 최고 속도로 이동하더라도 수신된 주파수로부터 발신된 주파수를 알 수 있게 하기 위해 각 비컨(100)에서 발신되는 주파수들의 차이를 크게 한다.
- [0034] 예를 들어, 수중 이동체(200)가 $v(t)$ m/s로 이동하는 경우, $\Delta f(t)$ Hz의 주파수 편이(shift)가 발생한다면 주파수의 간격을 $2\Delta f(t)$ Hz 이상으로 하면 된다.
- [0035] 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 시스템은 이전 주파수 수신 시점의 수중 이동체(200)의 최적 위치 및 속도로부터 현재 수신 시점의 수중 이동체(200)의 위치 및 속도를 예측하고, 예측한 수중 이동체(200)의 위치 및 속도를 수중 이동체(200)가 현재 수신한 음향 신호의 주파수를 사용하여 보정함으로써 현재 수신 시점의 수중 이동체(200)의 최적 위치 및 속도를 산출한다. 이러한 과정은 수신 주파수가 측정될 때마다 반복된다.
- [0036] 이하에서는 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정을 위해 필요한 파라미터와 그에 따른 수학적식에 대하여 상세히 설명한다.
- [0037] 수면 또는 수중에 설치되는 비컨(100)의 위치는 수학적 식 1과 같이 표기한다.

수학적 식 1

$$\mathbf{b}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix}$$

- [0038]
- [0039] $\mathbf{b}_k$ 는 k번째 비컨의 위치를 의미한다. $\mathbf{b}_k$ 는 이미 알고 있는 벡터값이다.
- [0040] x_k 는 k번째 비컨의 x 방향 값, y_k 는 k번째 비컨의 y 방향 값, z_k 는 k번째 비컨의 z 방향 값을 나타낸다.
- [0041] 비컨은 총 M개(본 발명의 실시예에서는 M=8) 존재한다. k번째 비컨에서 발생하여 출력되는 음향신호의 주파수는 고정된 값으로 $f_{t,k}$ 로 표기한다. 수중 이동체가 k번째 비컨의 음향신호를 시각 $t=t_i$ 에서 수신할 때 측정된 음향신호의 주파수는 $f_{r,k}(t_i)$ 로 표기한다.

[0042] 수중 이동체(200)의 위치는 수학식 2와 같이 표기한다.

수학식 2

$$\mathbf{v}(t_i) = \begin{pmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \\ z(t_i) \end{pmatrix}$$

[0043]

[0044] $\mathbf{v}(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 위치를 의미한다.

[0045] $x(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체 위치의 x 방향 값, $y(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체 위치의 y 방향 값, $z(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체 위치의 z 방향 값을 나타낸다.

[0046] 수중 이동체의 상태

[0047] 수중 이동체의 위치 및 속도를 합쳐서 상태(state)라고 한다.

[0048] 본 발명은 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 상태를 구하는 것을 목표로 한다.

[0049] 수중 이동체의 상태는 수학식 3과 같이 표기한다.

수학식 3

$$\mathbf{x}(t_i) = \begin{pmatrix} \mathbf{v}(t_i) \\ \dot{\mathbf{v}}(t_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \\ z(t_i) \\ \dot{x}(t_i) \\ \dot{y}(t_i) \\ \dot{z}(t_i) \end{pmatrix}$$

[0050]

[0051] $\mathbf{x}(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 상태를 의미하며 시각 $t=t_i$ 에서의 상태 또는 상태 벡터라고 칭한다.

[0052] $\mathbf{v}(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 위치, $\mathbf{v}'(t_i)$ 는 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 속도를 나타낸다.

[0053] $x'(t_i)$ 는 $x(t_i)$ 의 미분값으로 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 x 방향 속도, $y'(t_i)$ 는 $y(t_i)$ 의 미분값으로 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 y 방향 속도, $z'(t_i)$ 는 $z(t_i)$ 의 미분값으로 시각 $t=t_i$ 에서 수중 이동체의 z 방향 속도를 나타낸다.

[0054] 즉, $\mathbf{x}(t_i)$ 는 x, y, z의 방향의 위치 및 속도 변수를 6개의 열로 모아 만든 벡터이다.

[0055] 수중 이동체의 상태 변환 모델

[0056] 상태 변환은 t_{i-1} 에서의 상태가 t_i 에서 어떤 값으로 변화되는지를 나타낸다. 즉, 수중 이동체의 이동 특성을 수학적으로 표현한 것이 상태 변환 모델(state transition model)이다.

[0057] 일반적으로 상태 변환 모델은 비선형 식 $\mathbf{g}(\cdot)$ 으로 표현되지만 알고리즘에 적용하기 쉽도록 선형화하여 사용한다. 선형화된 결과가 상태 변환 행렬 $\mathbf{G}(t_i)$ 로 표현된다.

[0058] 수중 이동체는 매우 급격하게 속도나 방향이 변하지 않으므로 t_{i-1} 에서의 속도가 t_i 에서의 속도와 같다고 모델링

한다. t_{i-1} 와 t_i 사이는 수십 또는 수백 밀리 초(milliseconnd) 정도의 짧은 시간이므로 속도 변화가 없다고 가정한다.

[0059] 이러한 가정하에 t_i 에서의 수중 이동체의 상태를 수학적 4와 같이 구할 수 있다.

수학적 4

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_i) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_{i-1}), \mathbf{u}(t_{i-1})) + \boldsymbol{\nu}(t_i) \\ x(t_i) &= x(t_{i-1}) + \dot{x}(t_{i-1})\delta t_i + \nu_x(t_i) \\ y(t_i) &= y(t_{i-1}) + \dot{y}(t_{i-1})\delta t_i + \nu_y(t_i) \\ z(t_i) &= z(t_{i-1}) + \dot{z}(t_{i-1})\delta t_i + \nu_z(t_i) \\ \dot{x}(t_i) &= \dot{x}(t_{i-1}) + \nu_{\dot{x}}(t_i) \\ \dot{y}(t_i) &= \dot{y}(t_{i-1}) + \nu_{\dot{y}}(t_i) \\ \dot{z}(t_i) &= \dot{z}(t_{i-1}) + \nu_{\dot{z}}(t_i) \end{aligned}$$

where, $\delta t_i = t_i - t_{i-1}$, and

$$\boldsymbol{\nu}(t_i) = (\nu_x(t_i), \nu_y(t_i), \nu_z(t_i), \nu_{\dot{x}}(t_i), \nu_{\dot{y}}(t_i), \nu_{\dot{z}}(t_i))^T \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(t_i))$$

[0060]

[0061] 수중 이동체의 상태는 다양한 주변 환경의 변화 및 불확실성, 수중 이동체 자체의 이동 제어 성능, 잡음 및 불확실성 등의 영향으로 오차 없이는 수학적으로 표현할 수 없다. 따라서 이러한 불확실성과 잡음 요소를 고려한 항을 상태 변환 모델에 추가해야 한다.

[0062]

이를 위해 위치 및 속도 항에 각각 $v_x(t_i)$, $v_y(t_i)$, $v_z(t_i)$, $v_{x'}(t_i)$, $v_{y'}(t_i)$, $v_{z'}(t_i)$ 로 표시한 항을 추가하였다.

[0063]

$\mathbf{v}(t_i)$ 는 상태 변환의 불확실성과 잡음을 나타내며, $\mathbf{Q}(t_i)$ 를 오차 공분산으로 갖는다. $\mathbf{Q}(t_i)$ 는 상태 변환 모델이 실제의 상태 변환으로부터 어느 정도의 오차가 있는지를 표현하는 행렬로서 그 값이 클수록 상태 오차가 큰 것을 나타낸다. $\mathbf{Q}(t_i)$ 는 가우시안 분포를 가지는 것으로 모델링한다.

[0064]

수학적 4를 행렬로 나타내면 수학적 5와 같다.

수학식 5

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x(t_i) \\ y(t_i) \\ z(t_i) \\ \dot{x}(t_i) \\ \dot{y}(t_i) \\ \dot{z}(t_i) \end{pmatrix}}_{\mathbf{x}(t_i)} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta t_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{g}(\mathbf{x}(t_{i-1}), \mathbf{u}(t_{i-1}))} \begin{pmatrix} x(t_{i-1}) \\ y(t_{i-1}) \\ z(t_{i-1}) \\ \dot{x}(t_{i-1}) \\ \dot{y}(t_{i-1}) \\ \dot{z}(t_{i-1}) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \nu_x(t_i) \\ \nu_y(t_i) \\ \nu_z(t_i) \\ \nu_{\dot{x}}(t_i) \\ \nu_{\dot{y}}(t_i) \\ \nu_{\dot{z}}(t_i) \end{pmatrix}}_{\nu(t_i)}$$

where, $\delta t_i = t_i - t_{i-1}$, and $\nu(t_i) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(t_i))$

[0065]

[0066]

결과적으로 상태 변환 모델은 수학식 6과 같이 결정되며, 수학식 7과 같이 상태 변환 행렬 $\mathbf{G}(t_i)$ 를 구할 수 있다.

수학식 6

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_i) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_{i-1}), \mathbf{u}(t_{i-1})) + \nu(t_i) \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \delta t_i \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} \mathbf{x}(t_{i-1}) + \nu(t_i) \\ &= \mathbf{G}(t_i) \mathbf{x}(t_{i-1}) + \nu(t_i) \end{aligned}$$

where, $\delta t_i = t_i - t_{i-1}$, and $\nu(t_i) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(t_i))$

[0067]

수학식 7

$$\mathbf{G}(t_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta t_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta t_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \delta t_i \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

[0068]

[0069] 상태 변환 행렬 $\mathbf{G}(t_i)$ 는 t_{i-1} 에서의 상태가 t_i 에서의 상태와 선형적 관계가 있음을 보여준다.

[0070] 측정

[0071] 측정(measurement)은 t_i 에서의 상태를 구하기 위해 필요한 정보로서 측정 정보 또는 측정 벡터를 말한다. 측정은 수중 이동체에서 수신하여 측정된 음향신호의 주파수들로 이루어진다. 측정은 M개의 비컨으로부터 발생하여 출력된 음향신호로부터 구하므로 M개의 변수를 가진다. 따라서 측정은 수학식 8과 같이 표기된다.

수학식 8

$$\mathbf{z}(t_i) = \begin{pmatrix} f_{r,1}(t_i) \\ f_{r,2}(t_i) \\ \vdots \\ f_{r,M}(t_i) \end{pmatrix}$$

[0072]

[0073] $\mathbf{z}(t_i)$ 는 M개의 비컨에서 발신되어 수중 이동체에서 시각 t_i 에 측정된 음향신호의 주파수 벡터이다. $f_{r,k}(t_i)$ 는 k번째 비컨이 발생시킨 음향신호가 수중 이동체에서 시각 t_i 에 수신되었을 때의 주파수를 나타낸다.

[0074] 측정 모델

[0075] 측정 모델(measurement model)은 측정 벡터 $\mathbf{z}(t_i)$ 가 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 에 의해 어떻게 결정되는지를 나타내는 수학적 모델이다. $\mathbf{x}(t_i)$ 가 주어지면 측정 모델 함수 $\mathbf{h}(\cdot)$ 에 의해 측정값 $\mathbf{z}(t_i)$ 를 구할 수 있다. 측정값은 측정 센서의 부정확성, 측정 대상 물리량의 불안정성, 측정 과정의 오류 등으로 인하여 실제 값을 그대로 나타내지 못한다. 따라서 이러한 측정의 불확실성과 잡음이 반영되도록 측정 모델을 구해야 한다.

[0076] 측정 모델은 수학식 9 와 같이 표현된다.

수학식 9

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(t_i) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}(t_i)) + \boldsymbol{\omega}(t_i) \\ &= \begin{pmatrix} f_{r,1}(t_i) \\ f_{r,2}(t_i) \\ \vdots \\ f_{r,M}(t_i) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_1(t_i) \\ \omega_2(t_i) \\ \vdots \\ \omega_M(t_i) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

where, $\boldsymbol{\omega}(t_i) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}(t_i))$

여기서 $\omega_k(t_i)$ 는 k번째 비컨에서 발생하여 출력되는 음향신호 측정 모델의 불확실성과 잡음을 나타낸다. M 개의 비컨에 대한 불확실성과 잡음 요소를 모두 모아 열 벡터 $\boldsymbol{\omega}(t_i)$ 로 표기한다.

$\mathbf{R}(t_i)$ 는 측정의 오차 정도를 나타내는 오차 공분산 행렬로서 가우시안 분포를 가지는 것으로 모델링하여 수학식 10과 같이 표현한다.

수학식 10

$$\mathbf{R}(t_i) = \begin{pmatrix} R_{11}(t_i) & \cdots & R_{1j}(t_i) & \cdots & R_{1k}(t_i) & \cdots & R_{1M}(t_i) \\ & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & & R_{jj}(t_i) & & R_{jk}(t_i) & & R_{jM}(t_i) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ & & R_{kj}(t_i) & & R_{kk}(t_i) & & \vdots \\ & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1}(t_i) & & R_{Mj}(t_i) & & R_{Mk}(t_i) & & R_{MM}(t_i) \end{pmatrix}$$

수학식 10에서, $\mathbf{R}(t_i)$ 의 대각선 요소 값들 $\omega_{jj}(t_i)$ 이 크면 측정 오차 $\omega_j(t_i)$ 가 크다는 것을 의미한다. 그리고 $\mathbf{R}(t_i)$ 의 비대각선 요소 값들 $\omega_{jk}(t_i)$ 이 크면 측정 오차 $\omega_j(t_i)$ 와 $\omega_k(t_i)$ 사이의 연관성이 높다는 것을 의미한다.

수학식 9에서, $f_{r,k}(t_i)$ 는 k번째 비컨이 발생시킨 음향신호가 수중 이동체에서 시각 t_i 에 수신되었을 때의 주파수를 나타낸다. $f_{r,k}(t_i)$ 는 수중 이동체의 위치를 나타내는 좌표값 (x, y, z)와 각 방향에서의 속도 (x', y', z')에 관한 함수이다. 따라서 $f_{r,k}(t_i)$ 를 측정하여 (x, y, z)와 (x', y', z')를 구할 수 있다.

$f_{r,k}(t_i)$ 는 다음과 같이 유도된다.

우선 $v_k(t_i)$ 는 수중 이동체의 k번째 비컨 방향으로의 속도 성분을 의미하며 수학식 11와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 11

$$v_k(t_i) = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})^T \cdot \frac{((x_k - x) \ (y_k - y) \ (z_k - z))^T}{\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}}$$

그러면 $f_{r,k}(t_i)$ 는 수학식 11로부터 수학식 12와 같이 구할 수 있다.

수학식 12

$$\begin{aligned} f_{r,k}(t_i) &= f_{t,k} \left(1 + \frac{v_k}{v}\right) + \omega_k(t_i) \\ &= f_{t,k} + \frac{f_{t,k}}{v} \frac{\dot{x}(x_k - x) + \dot{y}(y_k - y) + \dot{z}(z_k - z)}{\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}} + \omega_k(t_i) \end{aligned}$$

[0087]

[0088]

여기서, v 는 수중에서 음향 속도이며 모든 상태 변수는 시각 t_i 에서 얻을 수 있다. 수중 이동체의 k 번째 비컨 방향으로의 속도 성분 $v_k(t_i)$ 이 클수록 수중 이동체가 수신한 음향신호의 주파수와 비컨에서 출력된 음향신호의 주파수의 차이가 커지게 된다.

[0089]

수학식 9에 나타난 측정 모델 함수 $\mathbf{h}(\cdot)$ 는 비선형 함수이므로 이를 선형화하여 행렬 $\mathbf{H}(t_i)$ 로 만든다.

[0090]

$\mathbf{H}(t_i)$ 는 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로서, 1, 2, 3열은 $\mathbf{h}(\cdot)$ 를 수중 이동체의 위치 좌표 변수 (x, y, z)에 대해 편미분한 성분이고, 4, 5, 6열은 $\mathbf{h}(\cdot)$ 를 수중 이동체의 속도 변수 (x', y', z')에 대해 편미분한 성분이다.

[0091]

이에 따라 행렬 $\mathbf{H}(t_i)$ 는 수학식 13과 같이 구해진다.

수학식 13

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(t_i) &= \frac{\partial \mathbf{h}(x(t_i))}{\partial \mathbf{x}(t_i)} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{r,1}(t_i)}{\partial x(t_i)} & \frac{\partial f_{r,1}(t_i)}{\partial y(t_i)} & \dots & \frac{\partial f_{r,1}(t_i)}{\partial \dot{z}(t_i)} \\ \frac{\partial f_{r,2}(t_i)}{\partial x(t_i)} & \frac{\partial f_{r,2}(t_i)}{\partial y(t_i)} & \dots & \frac{\partial f_{r,2}(t_i)}{\partial \dot{z}(t_i)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{r,M}(t_i)}{\partial x(t_i)} & \frac{\partial f_{r,M}(t_i)}{\partial y(t_i)} & \dots & \frac{\partial f_{r,M}(t_i)}{\partial \dot{z}(t_i)} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

[0092]

[0093]

행렬 $\mathbf{H}(t_i)$ 의 1, 2, 3열은 수학식 14, 15, 16을 통해 각각 유도된다.

수학식 14

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial x(t_i)} &= \frac{f_{t,k}}{v} \left[-\frac{\dot{x}}{d_k} + \right. \\ &\quad \left. \{ \dot{x}(x_k - x) + \dot{y}(y_k - y) + \dot{z}(z_k - z) \} \frac{x_k - x}{d_k^3} \right] \end{aligned}$$

[0094]

수학식 15

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial y(t_i)} &= \frac{f_{t,k}}{v} \left[-\frac{\dot{y}}{d_k} + \right. \\ &\quad \left. \{ \dot{x}(x_k - x) + \dot{y}(y_k - y) + \dot{z}(z_k - z) \} \frac{y_k - y}{d_k^3} \right] \end{aligned}$$

[0095]

수학식 16

$$\frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial z(t_i)} = \frac{f_{t,k}}{v} \left[-\frac{\dot{z}}{d_k} + \left\{ \dot{x}(x_k - x) + \dot{y}(y_k - y) + \dot{z}(z_k - z) \right\} \frac{z_k - z}{d_k^3} \right]$$

[0096]

[0097] 또한, 행렬 $\mathbf{H}(t_i)$ 의 4, 5, 6열은 수학식 17, 18, 19를 통해 각각 유도된다.

수학식 17

$$\frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial \dot{x}(t_i)} = \frac{f_{t,k}}{v} \frac{(x_k - x)}{d_k}$$

[0098]

수학식 18

$$\frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial \dot{y}(t_i)} = \frac{f_{t,k}}{v} \frac{(y_k - y)}{d_k}$$

[0099]

수학식 19

$$\frac{\partial f_{r,k}(t_i)}{\partial \dot{z}(t_i)} = \frac{f_{t,k}}{v} \frac{(z_k - z)}{d_k}$$

[0100]

[0101] 수학식 14 내지 19에서, $d_k = \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}$ 이고, 모든 상태 변수는 시각 t_i 에서 추정된 값들이다.

[0102] 이상 유도된 결과를 이용하여 수중 이동체의 상태인 위치 및 속도를 구하는 과정을 구체적으로 설명한다.

[0103] 상태 추정 과정

[0104] 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 방법은 시각 t_i 에서 수중 이동체의 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 를 구하는 것이다. 또한, 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 에 대한 불확실도(오차 공분산) $\Sigma(t_i)$ 도 동시에 구한다. 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 와 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 는 다음 시각 t_{i+1} 에서 입력 값으로 사용된다.

[0105] 도 2는 본 발명에 따른 상태 추정 과정을 수학식으로 나타낸 것이다. 도 2는 상태 추정 과정을 단계별로 나누고 각 단계에서 처리 내용을 수학식으로 표현하였다.

[0106] 상태 추정 과정은 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 및 상태의 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 를 구하는 과정으로, 시각 t_{i-1} 에서 구한 수중 이동체의 상태 $\mathbf{x}(t_{i-1})$, 상태 불확실도 $\Sigma(t_{i-1})$, 시각 t_i 에서의 측정 $\mathbf{z}(t_i)$ 를 사용한다.

[0107] 도 3은 본 발명에 따른 상태 추정 과정을 순서도로 나타낸 것이다.

[0108] 도 2 및 도 3을 참조하여, 상태 추정 과정을 상세히 설명한다.

[0109] 먼저, 단계 S10에서, 상태 변환 모델을 이용하여 수중 이동체의 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 를 예측한다. 즉, 수중 이동체의 상태 $\mathbf{x}(t_{i-1})$ 와 상태 변환 행렬 $\mathbf{G}(t_i)$ 를 이용하여 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 를 예측한다(도 2의 라인 1 참조). 단계 S10에서 산출

된 값은 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 이다.

- [0110] 단계 S20에서, 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 에 대한 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 를 구한다. 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 는 상태 변환 행렬 $\mathbf{G}(t_i)$, 상태 변환 모델의 오차 공분산 $\mathbf{Q}(t_i)$, 상태 불확실도 $\Sigma(t_{i-1})$ 를 이용하여 예측한다(도 2의 라인 2 참조). 상태 변환 모델의 오차 공분산 $\mathbf{Q}(t_i)$ 가 클수록 예측 상태에 대한 불확실도가 커진다. 또한, 상태 불확실도 $\Sigma(t_{i-1})$ 가 클수록 예측 상태에 대한 불확실도가 커진다. 단계 2에서 산출된 값은 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 이다.
- [0111] 단계 S30에서, 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 를 구한다. $\mathbf{z}^-(t_i)$ 는 수중 이동체가 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 에 있다고 가정하여 측정 모델 함수 $\mathbf{h}(\cdot)$ 를 적용하여 구한다(도 2의 라인 3 참조).
- [0112] 단계 S40에서, 보정을 위한 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 를 구한다. 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 는 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$, 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 를 보정하기 위해 사용된다.
- [0113] 도 4는 보정이득 계산 과정을 나타낸 순서도이다.
- [0114] 도 4를 참조하면, 먼저 단계 S42에서, 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 에 대한 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 를 구한다. 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 는 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$, 측정모델 행렬 $\mathbf{H}(t_i)$, 측정모델의 오차 공분산 $\mathbf{R}(t_i)$ 를 이용하여 예측한다(도 2의 라인 4 참조). 측정 모델의 오차 공분산 $\mathbf{R}(t_i)$ 가 클수록 예측 측정에 대한 불확실도가 커진다. 또한, 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 가 클수록 예측 상태에 대한 불확실도가 커진다. 단계 S42에서 산출된 값은 예상 측정 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 이다.
- [0115] 다음 단계 S44에서, 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 와 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 의 상호 오차 의존도(교차 공분산) $\Sigma_{xz}^-(t_i)$ 을 구한다. 상호 오차 의존도는 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 와 측정 모델 행렬 $\mathbf{H}(t_i)$ 를 이용하여 구한다(도 2의 라인 5 참조). 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 의 오차가 커질 때 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 의 오차가 커진다면 상호 오차 의존도 $\Sigma_{xz}^-(t_i)$ 의 값이 커진다.
- [0116] 마지막으로 단계 S46에서, 상호 오차 의존도와 예상 측정 불확실도를 이용하여 보정이득을 산출한다.
- [0117] 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 가 클수록 측정 정보 $\mathbf{z}(t_i)$ 에 의한 보정이 커져야 한다. 또한, 예상 측정 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 가 작을수록 측정 정보 $\mathbf{z}(t_i)$ 에 의한 보정이 커져야 한다. 따라서 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 는 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 에 비례하고 예상 측정 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 에 반비례하도록 설계된다.
- [0118] 이러한 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 을 단계 S44의 상호 오차 의존도를 이용하여 설명하면, 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 는 상호 오차 의존도 $\Sigma_{xz}^-(t_i)$ 에 비례하고 예상 측정 불확실도 $\mathbf{S}(t_i)$ 에 반비례하게 된다(도 2의 라인 6 참조).
- [0119] 이어서 단계 S50에서, 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 를 보정하여 최적의 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 를 구한다. 최적의 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 는 보정이득 $\mathbf{K}(t_i)$ 에 실제 측정과 예상 측정의 차이값을 곱하여 보정값을 구하고 이 보정값에 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 를 더하여 구한다(도 2의 라인 7 참조).
- [0120] 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 은 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 로부터 구하고, 실제 측정 $\mathbf{z}(t_i)$ 은 실제 음향신호의 주파수를 측정하여 구하는 것이므로 실제 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 에 의해서 결정된다. 따라서 예측 상태 $\mathbf{x}^-(t_i)$ 와 실제 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 의 차이가 클수록 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 과 실제 측정 $\mathbf{z}(t_i)$ 의 차이가 커진다. 예상 측정 $\mathbf{z}^-(t_i)$ 과 실제 측정 $\mathbf{z}(t_i)$ 의 차이가 클수록 또

한 보정이득 $K(t_i)$ 이 클수록 큰 보정이 이루어진다.

[0121] 단계 S60에서, 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 를 보정하여 최적의 상태 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 를 구한다. 단계 S50의 상태 보정과 마찬가지로 보정이득 $K(t_i)$ 이 클수록 큰 보정이 이루어진다.

[0122] 최적의 상태 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 는 보정이득 $K(t_i)$ 에 측정모델 행렬 $H(t_i)$ 와 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 를 곱하여 보정값을 구하고 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 에서 보정값을 빼서 구한다(도 2의 라인 8 참조). 최적의 상태 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 는 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 에서 보정값을 빼므로 예측 상태 불확실도 $\Sigma^-(t_i)$ 보다 작게 된다.

[0123] 이렇게 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 와 상태 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 가 산출된 이후, 단계 S70을 거쳐 다음 시각으로 넘어가면, 단계 S80에서 시각 t_{i+1} 에서 수신한 주파수가 측정되고, 상태 $\mathbf{x}(t_i)$ 및 상태 불확실도 $\Sigma(t_i)$ 와 함께(도 2의 라인 9 참조) 측정 $\mathbf{z}(t_{i+1})$ 이 시각 t_{i+1} 의 추정 과정에서 사용된다.

[0124] 도 5는 본 발명에 따른 수중 이동체의 위치 및 속도 추정 장치의 개략적인 내부 구성을 나타낸 것이다. 도 5에 따른 구성은 수중 이동체(200)의 내부에 구비되어 있으나, 다른 실시예로서 제어부(30)가 별도의 외부 장치(미도시)에 설치될 수 있다. 이 경우 수중 이동체(200)와 외부 장치 간의 통신을 위한 장비가 더 필요할 수 있다.

[0125] 도 5를 참조하면, 음향신호 수신부(10)는 복수의 비컨(100)에서 출력된 음향신호를 수신한다.

[0126] 주파수 측정부(20)는 음향신호 수신부(10)에서 수신한 음향신호의 주파수를 측정한다. 수중 이동체(200)가 이동하면 도플러 효과에 의해 비컨(100)의 발신 주파수와 수중 이동체(200)의 수신 주파수가 서로 달라진다.

[0127] 제어부(30)는 추정 장치의 전반적인 동작을 제어하는 부분으로 수중 이동체의 위치 및 속도를 계산하기 위한 연산모듈을 구비한다. 연산모듈은 소프트웨어 또는 하드웨어적으로 구현될 수 있다.

[0128] 메모리(40)는 복수 비컨의 위치정보 및 발신 주파수, 수중 이동체의 초기 위치정보를 저장하고 있으며, 제어부(30)의 연산 처리에 의해 발생된 각종 데이터를 저장한다. 또한 메모리(40)는 수중 이동체의 상태 추정을 위한 프로그램을 저장하고 있다.

[0129] 제어부(30)는 프로그램을 실행하여 기저장된 복수 비컨의 위치 및 발신 주파수, 각 시각에 수신되어 측정된 음향신호의 주파수를 이용하여 수중 이동체의 초기 상태로부터 시각별 상태를 계산하게 된다.

[0130] 시뮬레이션

[0131] 도 6은 시뮬레이션에 사용한 조건을 나타낸 것이다.

[0132] 8개의 비컨을 사용하며 각 비컨의 설치 위치 및 주파수를 지정하였다. 또한, 수중 이동체의 초기 위치 및 이동 속도를 설정하였다. 시뮬레이션 조건에서 수중 이동체는 총 500초(8분 20초) 동안 운항하였다.

[0133] 도 7은 시뮬레이션 결과를 나타내고, 도 8은 xy 평면의 위치 추정 결과를 나타내고, 도 9는 xz 평면의 위치 추정 결과를 나타낸다.

[0134] 시뮬레이션 결과는 비컨의 위치 및 발신 주파수, 수중 이동체의 초기 위치와 이동속도 및 총 이동시간에 따라 달라질 수 있다.

[0135] 추정된 수중 이동체의 위치 및 속도의 정확성은 실제 위치 및 속도와 추정된 위치 및 속도의 차이를 통하여 알 수 있다. 위치 및 속도의 오차는 x, y, z 방향에서의 차이로 구하였다.

[0136] x, y, z 방향 위치의 오차 평균은 각각 0.2905m, 0.2321m, 0.2803m로서, 전체적으로 0.3m 이내이다.

[0137] x, y, z 방향 위치의 오차 최대값은 각각 2.0561m, 1.8437m, 1.6715m로서, 전체적으로 2.1m 이내이다.

[0138] x, y, z 방향 속도의 오차 평균은 각각 0.0046m/s, 0.0050m/s, 0.0051m/s로서, 전체적으로 0.0051m/s 이내이다.

[0139] x, y, z 방향 속도의 오차 최대값은 각각 0.0212m/s, 0.0284m/s, 0.0207m/s 로서, 전체적으로 0.03m/s 이내이다.

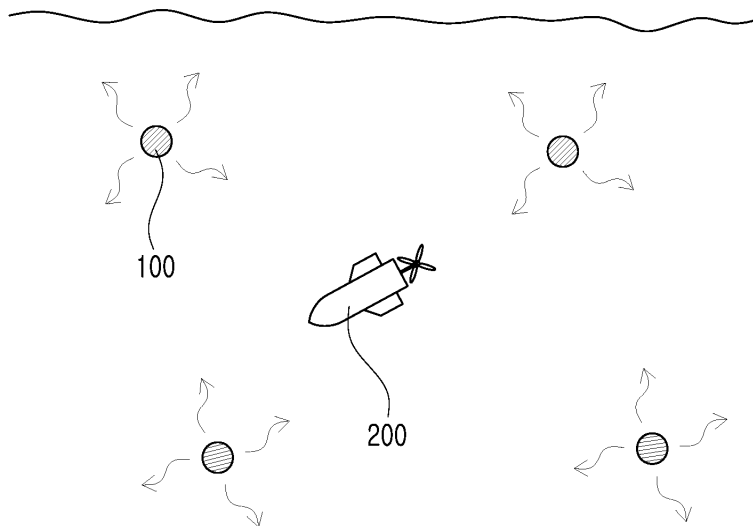
- [0140] x, y, z 방향 위치의 평균 제곱근 오차(root mean square)는 각각 0.4049m, 0.3328m, 0.3645m로서, 전체적으로 0.41m 이내이다.
- [0141] x, y, z 방향 속도의 평균 제곱근 오차(root mean square)는 각각 0.0057m/s, 0.0063m/s, 0.0064m/s로서, 전체적으로 0.0065m/s 이내이다.
- [0142] 모든 방향(3차원)의 위치 오차를 고려한 거리 오차는 평균, 최대, 평균 제곱근이 각각 0.5252m, 3.2732m, 0.0638m이다.
- [0143] 상기 위치 및 속도 오차는 수중 이동체의 운항 영역이 x, y, z 방향으로 각각 60m, 150m, 50m이고 최대 속도가 x, y, z 방향으로 각각 3m/s, 3m/s, 2m/s 임을 고려할 때, 실제 사용시 허용 가능한 범위 내에 있음을 알 수 있다.
- [0144] 이상의 설명은 본 발명을 예시적으로 설명한 것에 불과하며, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 본 발명의 기술적 사상에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 변형이 가능할 것이다.
- [0145] 따라서 본 발명의 명세서에 개시된 실시 예들은 본 발명을 한정하는 것이 아니다. 본 발명의 범위는 아래의 특허청구범위에 의해 해석되어야 하며, 그와 균등한 범위 내에 있는 모든 기술도 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석해야 할 것이다.

부호의 설명

- [0146] 10: 음향신호 수신부 20: 주파수 측정부
30: 제어부 40: 메모리
100: 비컨 200: 수중 이동체

도면

도면1

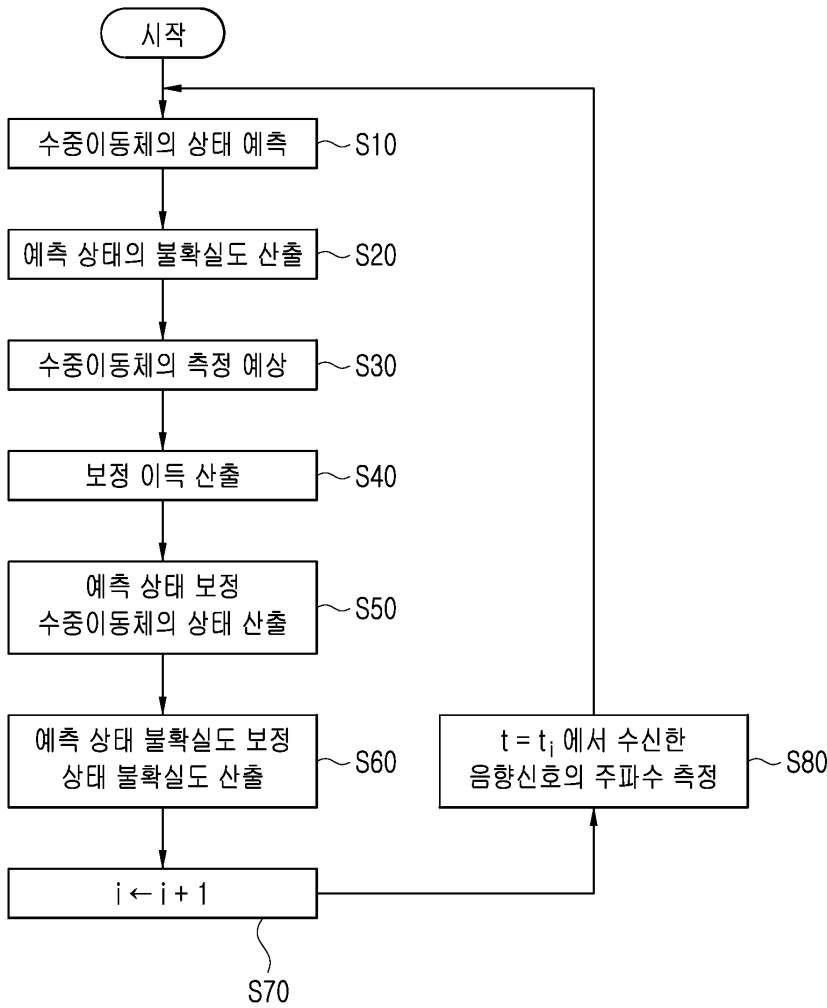


도면2

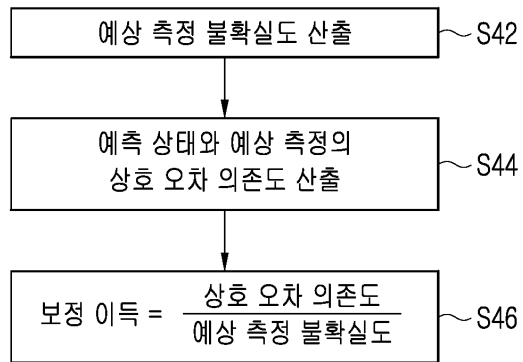
Estimate $(\mathbf{x}(t_{i-1}), \mathbf{\Sigma}(t_{i-1}), \mathbf{z}(t_i))$

1. $\bar{\mathbf{x}}(t_i) = \mathbf{G}(t_i)\mathbf{x}(t_{i-1})$
2. $\bar{\mathbf{\Sigma}}(t_i) = \mathbf{G}(t_i)\mathbf{\Sigma}(t_{i-1})\mathbf{G}(t_i)^T + \mathbf{Q}(t_i)$
3. $\bar{\mathbf{z}}(t_i) = \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}(t_i))$
4. $\mathbf{S}(t_i) = \mathbf{H}(t_i)\bar{\mathbf{\Sigma}}(t_i)\mathbf{H}(t_i)^T + \mathbf{R}(t_i)$
5. $\bar{\mathbf{\Sigma}}_{xz}(t_i) = \bar{\mathbf{\Sigma}}(t_i)\mathbf{H}(t_i)^T$
6. $\mathbf{K}(t_i) = \bar{\mathbf{\Sigma}}_{xz}(t_i)\mathbf{S}(t_i)^{-1}$
7. $\mathbf{x}(t_i) = \bar{\mathbf{x}}(t_i) + \mathbf{K}(t_i)(\mathbf{z}(t_i) - \bar{\mathbf{z}}(t_i))$
8. $\mathbf{\Sigma}(t_i) = \bar{\mathbf{\Sigma}}(t_i) - \mathbf{K}(t_i)\mathbf{H}(t_i)\bar{\mathbf{\Sigma}}(t_i)$
9. Return $(\mathbf{x}(t_i), \mathbf{\Sigma}(t_i))$

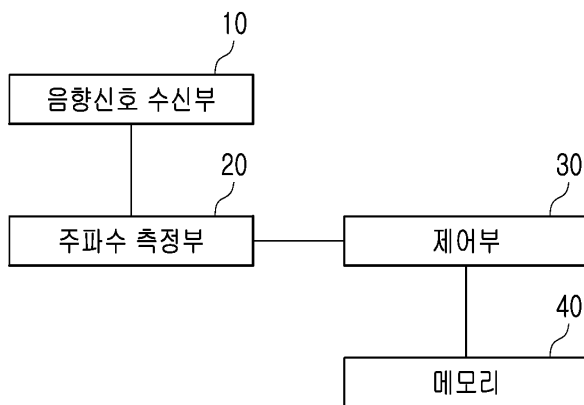
도면3



도면4



도면5



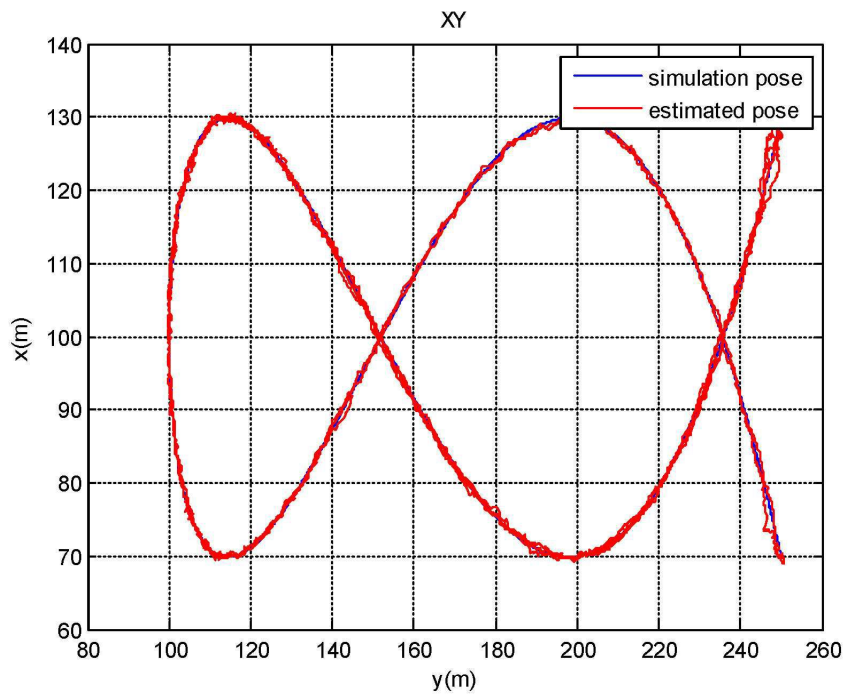
도면6

Beacon 1	$(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)m, f_{t,1} = 600KHz$
Beacon 2	$(x_2, y_2, z_2) = (200, 0, 0)m, f_{t,2} = 650KHz$
Beacon 3	$(x_3, y_3, z_3) = (200, 200, 0)m, f_{t,3} = 700KHz$
Beacon 4	$(x_4, y_4, z_4) = (0, 200, 0)m, f_{t,3} = 750KHz$
Beacon 5	$(x_5, y_5, z_5) = (0, 0, 200)m, f_{t,3} = 800KHz$
Beacon 6	$(x_6, y_6, z_6) = (200, 0, 200)m, f_{t,3} = 850KHz$
Beacon 7	$(x_7, y_7, z_7) = (200, 200, 200)m, f_{t,3} = 900KHz$
Beacon 8	$(x_8, y_8, z_8) = (0, 200, 200)m, f_{t,3} = 950KHz$
vehicle motion	$(x(0), y(0), z(0)) = (100, 100, 100)m$ $\begin{pmatrix} \dot{x}(t) = 3\cos(0.1 + 0.1t)m/s \\ \dot{y}(t) = 3\sin(0.5 + 0.008t)m/s \\ \dot{z}(t) = 2\sin(0.008t)m/s \end{pmatrix}, t \in [0, 500]s$

도면7

x 방향 위치 오차 평균	x error avg	0.2905
y 방향 위치 오차 평균	y error avg	0.2321
z 방향 위치 오차 평균	z error avg	0.2803
x 방향 속도 오차 평균	$\dot{x}$ error avg	0.0046
y 방향 속도 오차 평균	$\dot{y}$ error avg	0.0050
z 방향 속도 오차 평균	$\dot{z}$ error avg	0.0051
x 방향 위치 오차 최대값	x error max	2.0561
y 방향 위치 오차 최대값	y error max	1.8437
z 방향 위치 오차 최대값	z error max	1.6715
x 방향 속도 오차 최대값	$\dot{x}$ error max	0.0212
y 방향 속도 오차 최대값	$\dot{y}$ error max	0.0284
z 방향 속도 오차 최대값	$\dot{z}$ error max	0.0207
x 방향 위치 평균 제곱근 오차	x error rms	0.4049
y 방향 위치 평균 제곱근 오차	y error rms	0.3328
z 방향 위치 평균 제곱근 오차	z error rms	0.3645
x 방향 속도 평균 제곱근 오차	$\dot{x}$ error rms	0.0057
y 방향 속도 평균 제곱근 오차	$\dot{y}$ error rms	0.0063
z 방향 속도 평균 제곱근 오차	$\dot{z}$ error rms	0.0064
3차원 수중 거리 오차 평균	range error avg	0.5252
3차원 수중 거리 오차 최대값	range error max	3.2732
3차원 수중 거리 평균 제곱근 오차	range error rms	0.6385

도면8



도면9

