



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년01월03일
(11) 등록번호 10-1813610
(24) 등록일자 2017년12월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05D 1/10 (2006.01) B64C 13/18 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0142510
(22) 출원일자 2014년10월21일
심사청구일자 2014년10월21일
(65) 공개번호 10-2016-0047026
(43) 공개일자 2016년05월02일
(56) 선행기술조사문헌
JP2000330632 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
(72) 발명자
김유단
서울특별시 서초구 남부순환로 2311-12 107동 30
1호 (방배동, 방배아트힐아파트)
조남훈
서울특별시 은평구 수색로 217 102동 1203호 (수
색동, 수색자이아파트)
(74) 대리인
도진봉

전체 청구항 수 : 총 16 항

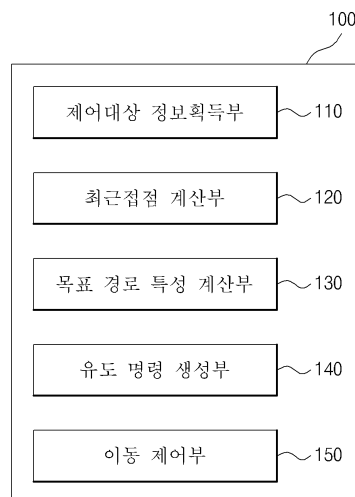
심사관 : 김동성

(54) 발명의 명칭 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법

(57) 요약

곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법이 개시된다. 본 발명의 일 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템은, 이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템으로서, 제어대상이 되는 상기 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득하는 제어대상 정보획득부; 상기 목표 경로에 대해 상기 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산하는 최근접점 계산부; 상기 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산하는 목표 경로 특성 계산부; 상기 제어대상 정보, 상기 최근접점 정보, 상기 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및 방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구하고, 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성하는 유도 명령 생성부; 및 상기 유도 명령에 따라 상기 이동체의 움직임을 제어하는 이동 제어부를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 F13SN02D1310

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 BK21 PLUS 과학기술분야 사업

연구과제명 BK21 PLUS 과학기술분야 사업

기 여 율 1/1

주관기관 한국연구재단

연구기간 2013.09.01 ~ 2020.08.31

명세서

청구범위

청구항 1

이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템으로서,

제어대상이 되는 상기 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득하는 제어대상 정보획득부;

매개화된 곡선으로 주어지는 상기 목표 경로에 대해 상기 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산하는 최근접점 계산부;

상기 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산하는 목표 경로 특성 계산부;

상기 제어대상 정보, 상기 최근접점 정보, 상기 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및 방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구하고, 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성하는 유도 명령 생성부; 및

상기 유도 명령에 따라 상기 이동체의 움직임을 제어하는 이동 제어부를 포함하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 목표 경로 특성 계산부는 상기 최근접점에서 상기 목표 경로의 단위 접벡터(unit tangent vector), 단위 법벡터(unit normal vector), 곡률(curvature)을 계산하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 유도 명령의 생성 이전에 설계 변수인 유도 이득 및 경계층 두께의 값이 선택되는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 유도 명령은 상기 이동체가 상기 목표 경로 위에 있도록 하고, 상기 이동체의 속도 방향이 상기 목표 경로의 접선 방향과 일치하도록 하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서,

정속 대기속도(constant airspeed) 경로 추종을 하고자 하는 경우,

상기 유도 명령 생성부는 바람 속도가 반영된 상기 이동체의 상대속도 벡터에 직교(orthogonal)하는 측면 유도 명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템.

청구항 6

이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템에서 수행되는 경로 추종 유도 방법으로서,
제어대상이 되는 상기 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득하는 단계;

매개화된 곡선으로 주어지는 상기 목표 경로에 대해 상기 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산하는 단계;

상기 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산하는 단계;

상기 제어대상 정보, 상기 최근접점 정보, 상기 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및
방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구하는 단계;

상기 전방주시 벡터를 이용하여 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성하는 단계; 및

상기 유도 명령에 따라 상기 이동체의 움직임을 제어하는 단계를 포함하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 목표 경로 특성 계산 단계는 상기 최근접점에서 상기 목표 경로의 단위 접벡터(unit tangent vector), 단위
법벡터(unit normal vector), 곡률(curvature)을 계산하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도
방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 유도 명령의 생성 이전에 설계 변수인 유도 이득 및 경계층 두께의 값이 선택되는 단계를 더 포함하는 3차
원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 유도 명령은 상기 이동체가 상기 목표 경로 위에 있도록 하고, 상기 이동체의 속도 방향이 상기 목표 경로
의 접선 방향과 일치하도록 하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 10

제6항에 있어서,

정속 대기속도(constant airspeed) 경로 추종을 하고자 하는 경우,

상기 유도 명령 생성 단계는 바람 속도가 반영된 상기 이동체의 상대속도 벡터에 직교(orthogonal)하는 측면 유
도 명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 11

이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템에서 수행되는 경로 추종 유도 방법으로서,

상기 목표 경로가 매개화된 곡선으로 주어지는 단계;

상기 이동체의 위치 및 속도 정보($\mathbf{r}_M$, $\mathbf{v}_{M_I}$, $\mathbf{v}_{M_a}$)를 획득하는 단계;

설계 변수인 유도이득k 및 경계층 두께 δ_{BL} 의 값을 선택하는 단계;

상기 이동체의 위치에 해당하는 상기 목표 경로 상의 최근접점P를 계산하는 단계;

오차 벡터 $\mathbf{e} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_M$ 를 계산하는 단계;

상기 최근접점에서의 단위 접벡터 $\hat{\mathbf{T}}_P$, 단위 법벡터 $\hat{\mathbf{N}}_P$, 곡률 κ_P 을 계산하는 단계;

상기 유도이득, 상기 경계층 두께, 상기 곡률을 이용하여 방사상 이격거리 d_{shift} 를 계산하는 단계;

이동된 오차 벡터 $\mathbf{d} \triangleq \mathbf{r}_W - \mathbf{r}_M = \mathbf{e} + d_{\text{shift}} \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P$ 를 계산하는 단계;

상기 경계층 두께에 대한 상기 이동된 오차 벡터의 크기의 비의 함수로 주어지는 전방주시각 θ_L 을 계산하는 단계;

$$\hat{\mathbf{L}} = \cos \theta_L \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|} + \sin \theta_L \hat{\mathbf{T}}_P$$

상기 방사상 이격거리 및 상기 전방주시각을 이용하여 전방주시 벡터를 계산하는 단계;

상기 전방주시 벡터를 이용하여 수직 가속도 명령 $\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N = k(\mathbf{v}_{M_i} \times \hat{\mathbf{L}}) \times \mathbf{v}_{M_i}$ 을 생성하는 단계를 포함하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

$$\theta_L(\|\mathbf{d}\|) = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \frac{\|\mathbf{d}\|}{\delta_{BL}}}$$

상기 방사상 이격거리는 전방주시각 함수가 인 경우

$$d_{\text{shift}} = \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{|\kappa_P|}{k} \right) \right)^2 \right] \delta_{BL}$$

로 계산되는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 13

제11항에 있어서,

$$\theta_L(\|\mathbf{d}\|) = \cos^{-1} \left(\frac{\|\mathbf{d}\|}{\delta_{BL}} \right)$$

상기 방사상 이격거리는 전방주시각 함수가

$$d_{\text{shift}} = \frac{|\kappa_P|}{k} \delta_{BL}$$

로 계산되는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 14

제11항에 있어서,

정속 대기속도(constant airspeed) 경로 추종을 하고자 하는 경우,

바람 속도 $\mathbf{v}_w$ 가 반영된 상대속도 $\mathbf{v}_{M_a} = \mathbf{v}_{M_I} - \mathbf{v}_w$ 를 계산하는 단계;

상기 수직 가속도 명령 및 상기 상대속도를 이용하여 상기 상대속도 벡터에 직교(orthogonal)하는 측면 유도 명령을 생성하는 단계를 더 포함하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 측면 유도 명령은 다음 수식과 같이 주어지는 것을 특징으로 하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법.

$$\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S = \begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{M_a}^T \\ \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N \\ (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N)^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|^2 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} \neq 0 \text{ and } \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N \neq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} = 0 \text{ or } \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N = 0 \end{cases}$$

청구항 16

제6항 내지 제15항 중 어느 한 항에 기재된 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법을 수행하기 위해 디지털 처리 장치에 의해 관독될 수 있는 프로그램을 기록한 기록매체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 경로 추종 문제는 기계 및/또는 차체와 같은 이동체(vehicle)가 목표 경로를 따르도록 하는 유도 명령을 설계하는 것으로 정의될 수 있다. 이러한 경로 추종은 무인기의 자율 운행을 위한 중요한 문제 중의 하나이다. 최근 무인기의 자율 비행에 관련된 임무들이 점점 복잡해지고 있어, 정확하고 효과적인 3차원 경로 추종 유도 기술이 요구된다.

[0003] 경로 추종을 위해 다양한 유도 기법이 개발되었지만, 대부분의 방법들은 2차원 경로 추종에 관한 것으로서, 크게 오차 운동학/역학 기반 방식(error kinematics/dynamics based approach), 벡터 필드 기반 방식(vector field based approach), 가상 목표 추적방식(virtual target following approach)와 같은 3가지 방식으로 분류될 수 있다.

[0004] 오차 운동학/역학 기반 방식에서는 경로 추종 문제를 고려하는데 있어 오차 변수가 정의되어 적용되었다. 오차 변수의 운동학/역학 모델이 유도되고, 선형 혹은 비선형 제어 모델이 오차 조절을 위해 적용된다. 이 방식은 직접적인 오차 피드백으로부터 안정성 및 신뢰성 있는 추종 성능이 보장되는 장점이 있다. 하지만, 유도 명령이 다소 복잡하고 모델 종속적이게 된다. 또한, 특이점 문제(singularity problem)가 실행 가능한 초기 조건 집합(set of feasible initial conditions)을 제한할 수 있다.

[0005] 벡터 필드 기반 방식에서는 각 지점에서 희망 코스 각 혹은 속도를 지정하는 벡터 필드가 수립되면 이동체가 벡터 필드를 따라 목표 경로로 수렴하게 한다. 이 방식의 장점은 직선 및 원형 경로의 추종에서는 전역 수렴이 된다는 것이다. 하지만, 일반적인 공간 곡선에서는 적용할 수 없다는 단점이 있다.

[0006] 가상 목표 추적 방식 혹은 전방주시점 기반 방식(look-ahead point based approach)에서는 유도 명령이 목표 경

로 상의 가상 목표점을 추적하도록 설계된다. 이 방식은 전통적인 시선 유도 기법에서 유래된 것으로서, 유도 명령의 단순성, 모델 독립성, 그리고 우수한 추적 및 바람 효과 보상을 가능하게 하는 전방주시 효과를 가진다. 또한, 외란에 대해서도 견고성을 제공해주기도 한다. 하지만, 이동체의 초기 위치가 목표 경로로부터 특정 전방주시 거리 이내에 있어야 하고, 목표 경로가 3차원의 일반 곡선과 같이 이형의 복잡한 곡선들이 결합되어 이루어진 경우에는 전방주시점을 결정하기 어려운 문제점이 있다.

[0007] 전술한 배경기술은 발명자가 본 발명의 도출을 위해 보유하고 있었거나, 본 발명의 도출 과정에서 습득한 기술 정보로서, 반드시 본 발명의 출원 전에 일반 공중에게 공개된 공지기술이라 할 수는 없다.

[0008] 경로 추종과 관련된 선행문헌으로는, 한국공개특허 10-2011-0138090호에 목표 주차 경로를 추종하기 위한 차량의 조향 제어 방법 및 장치가 개시되어 있다. 이에 의하면, 차량 내부 정보를 이용하여 차량의 현재 운동 자세를 연산하고, 목표 주차 경로를 이용하여 현재 운동 자세로부터 차량의 목표 운동 자세를 도출하며, 현재 운동 자세 및 목표 운동 자세를 이용하여 제어 조향각을 연산하게 되는데, 이는 차량의 평행주차 상황에만 국한되어 개발된 것으로서 조향각이 명령으로 주어지고 한 축 방향의 추종 오차만이 피드백되는 한계가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 한국공개특허 10-2011-0138090호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명은 무인기와 같은 이동체가 3차원 일반 경로 추종 시에 기존 전방주시점 기반 경로 추종 유도기법에서 발생하는 경로 추종 오차를 제거하고, 경로 추종 자동 비행을 시작할 수 있는 초기 위치 및 속도에 대한 제약을 완화시키는 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법을 제공하기 위한 것이다.

[0011] 본 발명은 목표 경로 위에 상정한 가상의 목표물을 추적하는 기존 기법과 달리 목표 경로의 미분 기하적 특성을 직접 활용하여 계산한 전방주시 벡터를 이용함으로써 수치 계산 측면에서 더 용이하고 실시간성이 더욱 향상된 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법을 제공하기 위한 것이다.

[0012] 본 발명은 경로 추종을 기반으로 하는 무인기의 다양한 임무에 활용 가능하며, 특히 장애물 등으로 인해 복잡한 경로를 비행해야 하는 경우 혹은 무인기의 3차원 고기동이 요구되는 경우 해당 무인기가 보다 안전하고 정밀하게 임무를 수행할 수 있도록 하는 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템 및 방법을 제공하기 위한 것이다.

[0013] 본 발명의 이외의 목적들은 하기의 설명을 통해 쉽게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0014] 본 발명의 일 측면에 따르면, 이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템으로서, 제어대상이 되는 상기 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득하는 제어대상 정보획득부; 상기 목표 경로에 대해 상기 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산하는 최근접점 계산부; 상기 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산하는 목표 경로 특성 계산부; 상기 제어대상 정보, 상기 최근접점 정보, 상기 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및 방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구하고, 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성하는 유도 명령 생성부; 및 상기 유도 명령에 따라 상기 이동체의 움직임을 제어하는 이동 제어부를 포함하는 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템이 제공된다.

[0015] 상기 목표 경로는 매개화된 곡선이며, 상기 목표 경로 특성 계산부는 상기 최근접점에서 상기 목표 경로의 단위 접벡터, 단위 법벡터, 곡률을 계산할 수 있다.

- [0016] 상기 유도 명령의 생성 이전에 설계 변수인 유도 이득 및 경계층 두께의 값이 선택될 수 있다.
- [0017] 상기 유도 명령은 상기 이동체가 상기 목표 경로 위에 있도록 하고, 상기 이동체의 속도 방향이 상기 목표 경로의 접선 방향과 일치하도록 할 수 있다.
- [0018] 정속 대기속도 경로 추종을 하고자 하는 경우, 상기 유도 명령 생성부는 바람 속도가 반영된 상기 이동체의 상대속도 벡터에 직교하는 측면 유도 명령을 생성할 수 있다.
- [0019] 한편 본 발명의 다른 측면에 따르면, 이동체가 목표 경로를 추종하도록 유도하는 경로 추종 유도 시스템에서 수행되는 경로 추종 유도 방법 및 이를 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체가 제공된다.
- [0020] 일 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법은, 제어대상이 되는 상기 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득하는 단계; 상기 목표 경로에 대해 상기 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산하는 단계; 상기 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산하는 단계; 상기 제어대상 정보, 상기 최근접점 정보, 상기 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및 방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구하는 단계; 상기 전방주시 벡터를 이용하여 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성하는 단계; 및 상기 유도 명령에 따라 상기 이동체의 움직임을 제어하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0021] 상기 목표 경로는 매개화된 곡선이며, 상기 목표 경로 특성 계산 단계는 상기 최근접점에서 상기 목표 경로의 단위 접벡터, 단위 법벡터, 곡률을 계산할 수 있다.
- [0022] 상기 유도 명령의 생성 이전에 설계 변수인 유도 이득 및 경계층 두께의 값이 선택되는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0023] 상기 유도 명령은 상기 이동체가 상기 목표 경로 위에 있도록 하고, 상기 이동체의 속도 방향이 상기 목표 경로의 접선 방향과 일치하도록 할 수 있다.
- [0024] 정속 대기속도 경로 추종을 하고자 하는 경우, 상기 유도 명령 생성 단계는 바람 속도가 반영된 상기 이동체의 상대속도 벡터에 직교하는 측면 유도 명령을 생성할 수 있다.
- [0025] 다른 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법은, 매개화된 곡선으로 상기 목표 경로가 주어지는 단계; 상기 이동체의 위치 및 속도 정보($\mathbf{r}_M$, $\mathbf{v}_{M_I}$, $\mathbf{v}_{M_a}$)를 획득하는 단계; 설계 변수인 유도이득 k 및 경계층 두께 δ_{BL} 의 값을 선택하는 단계; 상기 이동체의 위치에 해당하는 상기 목표 경로 상의 최근접점 P 을 계산하는 단계; 오차 벡터 $\mathbf{e} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_M$ 를 계산하는 단계; 상기 최근접점에서의 단위 접벡터 $\hat{\mathbf{T}}_P$, 단위 법벡터 $\hat{\mathbf{N}}_P$, 곡률 κ_P 을 계산하는 단계; 상기 유도이득, 상기 경계층 두께, 상기 곡률을 이용하여 방사상 이격거리 d_{shift} 를 계산하는 단계; 이동된 오차 벡터 $\mathbf{d} \triangleq \mathbf{r}_W - \mathbf{r}_M = \mathbf{e} + d_{\text{shift}} \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P$ 를 계산하는 단계; 상기 경계층 두께에 대한 상기 이동된 오차 벡터의 크기의 비의 함수로 주어지는 전방주시각 θ_L 을 계산하는 단계; 상기 방사상 이격거리 및 상기 전방주시각을 이용하여 전방주시 벡터 $\hat{\mathbf{L}} = \cos \theta_L \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|} + \sin \theta_L \hat{\mathbf{T}}_P$ 를 계산하는 단계; 상기 전방주시 벡터를 이용하여 수직 가속도 명령 $\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N = k(\mathbf{v}_{M_I} \times \hat{\mathbf{L}}) \times \mathbf{v}_{M_I}$ 을 생성하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0026] 상기 방사상 이격거리는 전방주시각 함수가 $\theta_L(\|\mathbf{d}\|) = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \frac{\|\mathbf{d}\|}{\delta_{BL}}}$ 인 경우

$$d_{\text{shift}} = \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{|\kappa_P|}{k} \right) \right)^2 \right] \delta_{BL}$$

로 계산될 수 있다.

[0027] 또는 상기 방사상 이격거리는 전방주시각 함수가

$$\theta_L(\|d\|) = \cos^{-1}\left(\frac{\|d\|}{\delta_{BL}}\right)$$

인 경우

$$d_{\text{shift}} = \frac{|\kappa_P|}{k} \delta_{BL}$$

로 계산될 수 있다.

[0028] 정속 대기속도 경로 추종을 하고자 하는 경우, 바람 속도 $\mathbf{v}_w$ 가 반영된 상대속도 $\mathbf{v}_{M_a} = \mathbf{v}_{M_I} - \mathbf{v}_w$ 를 계산하는 단계; 상기 수치 가속도 명령 및 상기 상대속도를 이용하여 상기 상대속도 벡터에 직교하는 측면 유도 명령을 생성하는 단계를 더 포함할 수 있다. 상기 측면 유도 명령은 다음 수학적식과 같이 주어질 수 있다.

$$\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^S = \begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{M_a}^T \\ \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^{N^T} \\ (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N)^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N\|^2 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} \neq 0 \text{ and } \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N \neq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} = 0 \text{ or } \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N = 0 \end{cases}$$

[0029]

[0030] 전술한 것 외의 다른 측면, 특징, 이점이 이하의 도면, 특허청구범위 및 발명의 상세한 설명으로부터 명확해질 것이다.

발명의 효과

[0031] 본 발명의 실시예에 따르면, 무인기와 같은 이동체가 3차원 일반 경로 추종 시에 기존 전방주시점 기반 경로 추종 유도기법에서 발생하는 경로 추종 오차를 제거하고, 경로 추종 자동 비행을 시작할 수 있는 초기 위치 및 속도에 대한 제약을 완화시키는 효과가 있다.

[0032] 또한, 목표 경로 위에 상정한 가상의 목표물을 추적하는 기존 기법과 달리 목표 경로의 미분 기하적 특성을 직접 활용하여 계산한 전방주시 벡터를 이용함으로써 수치 계산 측면에서 더 용이하고 실시간성이 더욱 향상된 효과가 있다.

[0033] 또한, 경로 추종을 기반으로 하는 무인기의 다양한 임무에 활용 가능하며, 특히 장애물 등으로 인해 복잡한 경로를 비행해야 하는 경우 혹은 무인기의 3차원 고기동이 요구되는 경우 해당 무인기가 보다 안전하고 정밀하게 임무를 수행할 수 있도록 하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0034] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템의 구성 블록도,

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 순서도,

도 3은 3차원 경로 추종 문제의 기하적 개념 및 목표 경로의 프레넷-세렛 프레임(Frenet-Serret frame)을 나타낸 도면,

도 4는 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 기하 개념을 나타낸 도면,

도 5는 유도 명령의 방향을 나타낸 도면,

도 6은 유도 명령 설계 과정에서 사용되는 전방주시각 함수를 나타낸 도면,

도 7은 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 순서도,

도 8은 3차원 나선형 경로를 목표 경로로 하는 경우의 3차원 궤적을 나타낸 도면,

도 9는 기존 유도 기법 대비 각 축마다의 가속도 성분을 도시한 도면,

도 10은 기존 유도 기법 대비 오차 벡터의 크기에 대한 시간 궤적을 나타낸 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0035] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0036] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.
- [0037] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0038] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.
- [0039] 또한, 명세서에 기재된 "...부", "...모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.
- [0040] 또한, 각 도면을 참조하여 설명하는 실시예의 구성 요소가 해당 실시예에만 제한적으로 적용되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상이 유지되는 범위 내에서 다른 실시예에 포함되도록 구현될 수 있으며, 또한 별도의 설명이 생략될지라도 복수의 실시예가 통합된 하나의 실시예로 다시 구현될 수도 있음은 당연하다.
- [0041] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일하거나 관련된 참조 부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [0042] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템의 구성 블록도이고, 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 순서도이다.
- [0043] 본 발명의 일 실시예에 따른 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템(100)은 곡선의 미분 기하적 특성인 단위 접벡터, 단위 법벡터, 곡률, 곡률 중심 등을 이용하여 전방주시 벡터를 설계하고, 이 전방주시 벡터를 추적 방향벡터로 삼는 수직 가속도 명령을 생성하는 것을 특징으로 한다.
- [0044] 도 1을 참조하면, 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템(100)은 제어대상 정보획득부(110), 최근접점 계산부(120), 목표 경로 특성 계산부(130), 유도 명령 생성부(140), 이동 제어부(150)를 포함한다.
- [0045] 제어대상 정보획득부(110)는 제어대상이 되는 이동체의 위치와 속도를 제어대상 정보로 획득한다(단계 S210).
- [0046] 이동체의 위치, 속도, 가속도 등은 이동체에 설치된 센서를 통해 측정되거나 이동체를 원격 제어하는 관제센터(미도시)를 통해 획득될 수 있다.
- [0047] 최근접점 계산부(120)는 매개화된 곡선으로 주어지는 목표 경로에 대해 매 순간 이동체의 위치에 해당하는 최근접점을 계산한다(단계 S220). 여기서, 최근접점은 제어대상 이동체로부터 가장 가까이에 있는 목표 경로 상의 한 점을 의미한다.
- [0048] 목표 경로 특성 계산부(130)는 목표 경로에 대해 미분 기하적 특성을 계산한다(단계 S230).
- [0049] 목표 경로는 매개화된 곡선인 바, 곡선의 미분 기하적 특성인 최근접점에서의 단위 접벡터, 단위 법벡터, 곡률

을 계산한다.

- [0050] 유도 명령 생성부(140)는 제어대상 정보, 최근접점 정보, 목표 경로의 미분 기하적 특성을 기반으로 하여 전방주시각 및 방사상 이격거리로 계산되는 전방주시 벡터를 구한다(단계 S240). 그리고 최종적으로 가속도로 주어지는 유도 명령을 생성한다(단계 S250).
- [0051] 여기서, 유도 명령의 생성에 앞서 설계 변수인 유도 이득 및 경계층 두께의 값이 선택될 수 있다.
- [0052] 전방주시 벡터의 산출 및 유도 명령의 생성에 대해서는 추후 관련 도면을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.
- [0053] 이동 제어부(150)는 유도 명령 생성부(140)에서 생성된 유도 명령에 따라 제어대상인 이동체의 가속도를 제어하여 이동체의 움직임을 제어한다(단계 S260).
- [0054] 이하에서는 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템에서 수행되는 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법에 대하여 상세히 설명하기로 한다.
- [0055] 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법을 적용함에 있어, 다음과 같이 가정하기로 한다.
- [0056] 가정 1. 목표 경로의 평활도 조건(smoothness condition of desired path)
- [0057] 목표 경로는 매개화될 수 있으며(parameterized), 2차 미분 가능한 공간 곡선(twice differentiable space curve)이다.
- [0058] 가정 2. 참조점의 유일성(uniqueness of reference path)
- [0059] 목표 경로 상의 최근접점(closest projection point)은 참조점으로서 유일하게 결정될 수 있다.
- [0060] 가정 3. 단위 접벡터의 방향(direction of unit tangent vector)
- [0061] 목표 경로의 단위 접벡터의 방향은 목표 경로 추종 방향에 의해 결정된다.
- [0062] 도 3은 3차원 경로 추종 문제의 기하적 개념을 보여주며, 목표 경로의 프레넷-세렛 프레임(Frenet-Serret frame)이 도시되어 있다.
- [0063] 도 3에서 P는 목표 경로(desired path)의 최근접점, M은 제어대상 이동체, r은 관성계(inertial frame)에서 정의된 위치 벡터, v는 속도 벡터, $(\hat{T}, \hat{N}, \hat{B})$ 는 각각 프레넷-세렛 프레임을 구성하는 단위 접벡터(unit tangent vector), 단위 법벡터(unit normal vector) 및 단위 종법벡터(unit binormal vector), $\mathbf{p}(l)$ 은 l 로 매개화된 목표 경로, s 및 σ 는 각각 목표 경로 및 이동체 경로(vehicle path)에 따른 거리를 나타낸다.
- [0064] 설정된 목표 경로 $\mathbf{p}(l)$ 에서, 최근접점 P는 다음과 같이 정의된다.
- [0065] (1)
$$\mathbf{r}_P(s(\sigma)) = \arg \min_{\mathbf{r} \in \mathbf{p}} \|\mathbf{r}_M(\sigma) - \mathbf{r}\|$$
- [0066] 여기서, 오차 벡터 $\mathbf{e} \triangleq \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_M$ 이다.
- [0067] 수학적 (1)에 의해 정의된 최근접점에서는 다음과 같이 오차 벡터와 단위 접벡터가 직교한다는 조건이 만족된다.
- [0068] (2)
$$\mathbf{e} \perp \hat{T}_P$$
- [0069] 이동체는 $\mathbf{a}_M = \mathbf{a}_{M_{cmd}}$ 이라는 유도기법에 따라 명령되어지는 것에 똑같은 가속도를 만들어내는 내부 루프 컨트롤러(inner-loop controller)를 구비하고 있는 것으로 가정한다. 여기서, 내부 루프 컨트롤러는 앞서 설명한 이동 제어부(150)에 해당한다.

[0070] 도 3에 도시된 개념도에서 추론 가능하듯이 정밀 경로 추종이란 다음의 두가지를 만족시키는 것이 목적이다.

[0071] 첫째는 이동체가 목표 경로 위에 있도록 하는 것(on-track)으로, 이것은 M과 P 사이의 거리가 0에 수렴한다는 위치 오차의 수렴성에 대한 것이다.

[0072] 둘째는 이동체의 속도 방향이 목표 경로의 접선 방향과 일치하도록 하는 것으로, 이것은 $\mathbf{v}_{MI}$ 로 표기되는 이동체의 속도 벡터와 $\hat{\mathbf{T}}_P$ 사이의 각도가 0에 수렴한다는 속도 방향 오차의 수렴성에 대한 것이다.

[0073] 즉, 경로 추종 문제는 수학적으로 이동체가 $\sigma \rightarrow \infty$ 되면 다음 조건을 만족하도록 유도 명령 $\mathbf{a}_{Mcmd}$ 설계됨으로써 해결 가능하게 된다.

[0074] (3) $\|\mathbf{r}_M(\sigma) - \mathbf{r}_P(s(\sigma))\| \rightarrow 0$

[0075] (4) $\hat{\mathbf{T}}_M(\sigma) \rightarrow \hat{\mathbf{T}}_P(s(\sigma))$

[0076] 수학적식 (3)이 만족된다면, 이동체는 목표 경로 상에 있게 될 것이며, 이는 위치 수렴(position convergence)을 의미한다.

[0077] 수학적식 (4)가 만족된다면, 이동체는 목표 경로의 방향을 따르게 될 것이며, 이는 속도 방향 수렴(velocity direction convergence)을 의미한다.

[0078] 또한, $\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_P$ 인 경우 이동체는 온-트랙(on-track) 상태에 있고, $\hat{\mathbf{T}}_M = \hat{\mathbf{T}}_P$ 인 경우 이동체는 정렬(aligned) 상태에 있는 것으로 정의할 수 있다.

[0079] 본 실시예에서는 목표 경로 곡선에 따른 움직임을 설명하기 위해 수정된 프레넬-세렛 프레임을 사용한다.

[0080] 미분 기하 관점에서 질점의 속도 및 가속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0081] (5) $\mathbf{v} = \|\mathbf{v}\| \hat{\mathbf{T}} = v \hat{\mathbf{T}}$

[0082] (6) $\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = \dot{v} \hat{\mathbf{T}} + \kappa v^2 \hat{\mathbf{N}}$

[0083] 여기서, κ 는 곡률(curvature)이다.

[0084] 공간 곡선의 형상(shape)은 곡률에만 종속된다. 곡선을 따르는 속력(speed)은 곡선의 형상에 영향을 미치지 않는다. 그러므로, 수학적식 (6)에서 수직 가속도 성분인 $\kappa v^2 \hat{\mathbf{N}}$ 가 곡선의 형상을 결정한다.

[0085] 그리고 수학적식 (6)으로 인해, 공간 곡선을 따른 가속도는 종법선 성분을 가지지 않는다.

[0086] 본 실시예에 따른 경로 추종 유도 방법에 의해 생성된 이동체의 가속도 명령은 다음 조건을 만족하게 된다.

[0087] 정밀 경로 추종을 위해 이동체가 온-트랙 상태 및 정렬 상태를 유지하기 위해서는 다음 명령 조건을 만족할 필요가 있다.

[0088] (7) $\mathbf{a}_{Mcmd}^N \cdot \hat{\mathbf{N}}_P \Big|_{\substack{\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_P \\ \hat{\mathbf{T}}_M = \hat{\mathbf{T}}_P}} = \kappa_P \|\mathbf{v}_{MI}\|^2$

[0089] (8) $\mathbf{a}_{Mcmd}^N \cdot \hat{\mathbf{B}}_P \Big|_{\substack{\mathbf{r}_M = \mathbf{r}_P \\ \hat{\mathbf{T}}_M = \hat{\mathbf{T}}_P}} = 0$

[0090] 여기서, $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 는 수직 가속도에 대한 명령이다.

[0091] 수학적식 (7)은 이동체 경로의 곡률이 목표 경로의 곡률과 동일해야 함을 나타내고, 수학적식 (8)은 비행체의 가속도가 목표 경로에 대해 중법선 성분을 가지지 않아야 함을 의미한다.

[0092] 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법을 적용함에 있어 도 4에 도시된 것과 같은 유도 기하 개념이 고려될 수 있다.

[0093] 도 4는 곡선의 미분 기하에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 기하 개념을 나타낸 도면이고, 도 5는 유도 명령의 방향을 나타낸 도면이며, 도 6은 유도 명령 설계 과정에서 사용되는 전방주시각 함수를 나타낸 도면이다.

[0094] 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법에서의 유도 명령은 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0095] (9)
$$\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N = k \left(\mathbf{v}_{M_I} \times \hat{\mathbf{L}} \right) \times \mathbf{v}_{M_I}$$

[0096] 여기서, $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 는 수직 유도 명령, $k > 0$ 는 유도 이득, $\mathbf{v}_{M_I}$ 는 이동체의 관성 속도, $\hat{\mathbf{L}}$ 은 전방주시 벡터 (look-ahead vector)이다.

[0097] 수직 유도 명령은 관성 속도에 수직한 가속도 성분인 수직 가속도에 대한 유도 명령이다. 도 4에 도시된 것과 같이 전방 주시 벡터 $\hat{\mathbf{L}}$ 은 d의 방향에서 $\hat{\mathbf{T}}_P$ 의 방향으로 θ_L 의 각도만큼 회전한 단위 벡터이다.

[0098] 수직 가속도 $\mathbf{a}_M^N \triangleq \mathbf{a}_M - \left(\mathbf{a}_M \cdot \frac{\mathbf{v}_{M_I}}{v_{M_I}} \right) \frac{\mathbf{v}_{M_I}}{v_{M_I}}$ 은 벡터 삼중적(vector triple product)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0099] (10)
$$\begin{aligned} \mathbf{a}_M^N &= \kappa_M v_{M_I}^2 \hat{\mathbf{N}}_M \\ &= \left(\mathbf{v}_{M_I} \times \left(\kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M + T \hat{\mathbf{T}}_M \right) \right) \times \mathbf{v}_{M_I} \end{aligned}$$

[0100] 여기서, $T \in \mathbb{R}$ 은 임의의 값이다.

[0101] 수학적식 (5)에서 $\mathbf{v}_{M_I} = v_{M_I} \hat{\mathbf{T}}_M$ 이고, 수학적식 (6)에서 $\mathbf{a}_M = \dot{v}_{M_I} \hat{\mathbf{T}}_M + \kappa_M v_{M_I}^2 \hat{\mathbf{N}}_M$ 이므로, 다음과 같은 수학적식을 얻을 수 있다.

[0102] (11)
$$\mathbf{a}_M^N = \mathbf{a}_M - \left(\mathbf{a}_M \cdot \hat{\mathbf{T}}_M \right) \hat{\mathbf{T}}_M = \kappa_M v_{M_I}^2 \hat{\mathbf{N}}_M$$

[0103] 수학적식 (11)을 다시 쓰면 다음과 같다.

[0104] (12)
$$\mathbf{a}_M^N = \kappa_M (\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I}) \hat{\mathbf{N}}_M$$

[0105] $T \in \mathbb{R}$ 을 만족하는 몇몇 T에 대해서 $\mathbf{v}_{M_I} \cdot \hat{\mathbf{N}}_M = 0$ and $(\mathbf{v}_{M_I} \cdot T \hat{\mathbf{T}}_M) \mathbf{v}_{M_I} = (\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I}) T \hat{\mathbf{T}}_M$ 라는 사실을 이용하면, 수학적식 (12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_M^N &= - \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M \right) \mathbf{v}_{M_I} + \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I} \right) \kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M \\
 &\quad - \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot T \hat{\mathbf{T}}_M \right) \mathbf{v}_{M_I} + \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I} \right) T \hat{\mathbf{T}}_M \\
 &= - \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \left(\kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M + T \hat{\mathbf{T}}_M \right) \right) \mathbf{v}_{M_I} \\
 &\quad + \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I} \right) \left(\kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M + T \hat{\mathbf{T}}_M \right) \\
 &= \left(\mathbf{v}_{M_I} \times \left(\kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M + T \hat{\mathbf{T}}_M \right) \right) \times \mathbf{v}_{M_I}
 \end{aligned}$$

(13)

수학식 (10)에서 수직 가속도 명령은 $\mathbf{v}_{M_I}$ 과 $\kappa_M \hat{\mathbf{N}}_M + T \hat{\mathbf{T}}_M$ 에 상응하는 벡터 $\mathbf{q}$ 의 삼중적으로 생성될 수 있다. 그러므로, 유도 기법은 적절한 $\mathbf{q}$ 의 선택에 의해 구성될 수 있다. 본 실시예에서 $\mathbf{q}$ 가 후술할 전방주시 효과(look-ahead effect)를 실현하도록 $k\hat{\mathbf{L}}$ 이 제시된다.

$\mathbf{a}_M^N = \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 이라면, 유도 명령의 방향은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N}{\|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|} = \text{sign}(\kappa_M) \hat{\mathbf{N}}_M = \frac{k}{|\kappa_M|} \text{rej}(\hat{\mathbf{L}}, \mathbf{v}_{M_I})$$

여기서, $\text{rej}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{a} - \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{b}\|^2} \mathbf{b}$ 이고, $\mathbf{b}$ 에 수직한 벡터 성분이다(도 5 참조).

수학식 (9) 및 (10)에 의하면, $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 의 방향 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N}{\|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|} &= \frac{k \left(\mathbf{v}_{M_I} \times \hat{\mathbf{L}} \right) \times \mathbf{v}_{M_I}}{\left\| \kappa_M v_{M_I}^2 \hat{\mathbf{N}}_M \right\|} \\
 &= \frac{k \left(- \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \hat{\mathbf{L}} \right) \mathbf{v}_{M_I} + \left(\mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_I} \right) \hat{\mathbf{L}} \right)}{\left\| \kappa_M v_{M_I}^2 \hat{\mathbf{N}}_M \right\|} \\
 &= \frac{k}{|\kappa_M|} \left(\hat{\mathbf{L}} - \frac{\left(\hat{\mathbf{L}} \cdot \mathbf{v}_{M_I} \right) \mathbf{v}_{M_I}}{v_{M_I}} \right) \\
 &= \frac{k}{|\kappa_M|} \text{rej}(\hat{\mathbf{L}}, \mathbf{v}_{M_I})
 \end{aligned}$$

(15)

수학식 (9)와 같은 유도 명령에 따른 이동체는 관성속도 $\mathbf{v}_{M_I}$ 을 전방주시 벡터 $\hat{\mathbf{L}}$ 에 정렬되도록 한다. 전방주시 효과라 칭해지는 이러한 특징은 추적 유도의 속성에서 기인한다.

도 4를 참조하면, 전방주시 벡터 $\hat{\mathbf{L}}$ 는 전방주시각(look-ahead angle) θ_L 과 방사상 이격거리(radially shifted distance) d_{shift} 에 의해 만들어진다. 도 4에서 C는 최근접점 P에서 곡률 중심이고, W는 P에서 C로의 직선 상에 정의되는 지점이다.

[0115] $\mathbf{r}_W$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[0116] \quad (16) \quad \mathbf{r}_W \triangleq \mathbf{r}_P + d_{\text{shift}} \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P$$

[0117] 오차 벡터 $\mathbf{e} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_M$ 이므로, $\mathbb{M}$ 에서 $\mathbb{W}$ 로의 거리 벡터는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[0118] \quad (17) \quad \mathbf{d} \triangleq \mathbf{r}_W - \mathbf{r}_M = \mathbf{e} + d_{\text{shift}} \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P$$

[0119] $\hat{\mathbf{d}} \triangleq \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|}$ 라 하면, 전방주시 벡터 $\hat{\mathbf{L}}$ 는 다음과 같이 만들어질 수 있다.

$$[0120] \quad (18) \quad \hat{\mathbf{L}} \triangleq \cos \theta_L \hat{\mathbf{d}} + \sin \theta_L \hat{\mathbf{T}}_P$$

[0121] 방사상 이격거리 d_{shift} 의 값은 수학적 (7) 및 (8)을 이용하여 설명한 바 있는 정밀 경로 추종 조건을 만족시키도록 결정될 수 있다.

[0122] 이동체가 온-트랙 상태에 있다면, $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ 이고, $\mathbf{d}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}} = d_{\text{shift}} \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P$ 이다. 따라서, 다음과 같은 수학적식을 얻을 수 있다.

$$[0123] \quad (19) \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{L}}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}} &= \cos(\theta_L(\|\mathbf{d}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}}\|)) \hat{\mathbf{d}}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}} + \sin(\theta_L(\|\mathbf{d}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}}\|)) \hat{\mathbf{T}}_P \\ &= \cos(\theta_L(d_{\text{shift}})) \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P + \sin(\theta_L(d_{\text{shift}})) \hat{\mathbf{T}}_P \end{aligned}$$

[0124] 여기서, θ_L 은 $\|\mathbf{d}\|$ 의 함수로서 지정된다.

[0125] 온-트랙 상태에 더하여, 이동체가 정렬 상태에 있다면, $\hat{\mathbf{T}}_M = \hat{\mathbf{T}}_P$ 이고, 따라서 다음과 같은 수학적식을 얻을 수 있다.

$$[0126] \quad (20) \quad \mathbf{v}_{M_I}|_{\hat{\mathbf{T}}_M=\hat{\mathbf{T}}_P} = \|\mathbf{v}_{M_I}\| \hat{\mathbf{T}}_P$$

[0127] 수학적식 (19)와 (20)을 수학적식 (9)에 대체하면, 온-트랙 상태 및 정렬 상태에서 생성되는 명령은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[0128] \quad (21) \quad \begin{aligned} \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N|_{\substack{\mathbf{e}=\mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{T}}_M=\hat{\mathbf{T}}_P}} &= k \left(\mathbf{v}_{M_I}|_{\hat{\mathbf{T}}_M=\hat{\mathbf{T}}_P} \times \hat{\mathbf{L}}|_{\mathbf{e}=\mathbf{0}} \right) \times \mathbf{v}_{M_I}|_{\hat{\mathbf{T}}_M=\hat{\mathbf{T}}_P} \\ &= k \|\mathbf{v}_{M_I}\|^2 \cos(\theta_L(d_{\text{shift}})) \text{sign}(\kappa_P) \hat{\mathbf{N}}_P \end{aligned}$$

[0129] 수학적식 (8)이 수학적식 (21)에 의해 만족됨을 알 수 있다.

[0130] 또한, 수학적식 (21)의 유도 명령은 다음과 같이 수학적식 (7)을 만족해야 한다.

$$[0131] \quad (22) \quad \begin{aligned} \mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N \cdot \hat{\mathbf{N}}_P|_{\substack{\mathbf{e}=\mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{T}}_M=\hat{\mathbf{T}}_P}} &= k \|\mathbf{v}_{M_I}\|^2 \cos(\theta_L(d_{\text{shift}})) \text{sign}(\kappa_P) \\ &= \kappa_P \|\mathbf{v}_{M_I}\|^2 \end{aligned}$$

[0132] 따라서, 방사상 이격거리 d_{shift} 는 정밀 경로 추종을 위해 다음 조건을 만족해야 한다.

[0133]

(23)

$$d_{\text{shift}} = \left\{ x \geq 0 : \theta_L(x) = \cos^{-1} \left(\frac{|\kappa_P|}{k} \right) \right\}$$

[0134]

경로 추종에서 전방주시 효과를 실현하기 위해 전방주시각 θ_L 은 몇가지 조건을 만족시킬 필요가 있다.

[0135]

도 4에 도시된 것과 같이 $\mathbb{W}$ 를 관통하고 $\hat{\mathbf{T}}_P$ 에 평행한 축 주위에서 반경 δ_{BL} 을 가지는 가상의 실린더를 가정한다. 이 실린더는 경계층(boundary layer)이라 칭하고, δ_{BL} 은 경계층 두께라 한다.

[0136]

유도 명령 설계 과정에서 전방주시각 θ_L 은 경계층 두께 δ_{BL} 에 대한 d 벡터(이동된 오차 벡터)의 크기의 비의 함수로 주어지며, 전방주시각 함수로 다음의 두 가지 중 한 가지를 선택하여 사용하면 된다.

[0137]

(24)

$$\theta_L(\|\mathbf{d}\|) = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - \frac{\|\mathbf{d}\|}{\delta_{BL}}}$$

[0138]

(25)

$$\theta_L(\|\mathbf{d}\|) = \cos^{-1} \left(\frac{\|\mathbf{d}\|}{\delta_{BL}} \right)$$

[0139]

도 6에는 유도 명령 설계 과정에서 사용되는 전방주시각 함수가 도시되어 있으며, 각각 BL 함수(수학식 (24))와 acos 함수(수학식 (25))를 나타낸다.

[0140]

방사상 이격거리는 전방주시각을 어느 것으로 택하느냐에 달려 있다. 만약 전방주시각 함수로 첫번째의 BL 함수(수학식 (24))를 선택할 경우에는 다음과 같이 계산된다.

[0141]

(26)

$$d_{\text{shift}} = \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{|\kappa_P|}{k} \right) \right)^2 \right] \delta_{BL}$$

[0142]

그리고 전방주시각 함수로 두번째의 acos 함수(수학식 (25))를 선택할 경우에는 다음과 같이 계산된다.

[0143]

(27)

$$d_{\text{shift}} = \frac{|\kappa_P|}{k} \delta_{BL}$$

[0144]

유도 명령의 크기는 $\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N \leq k \|\mathbf{v}_{M_I}\|^2$ 에 의해 한계를 가진다(bounded).

[0145]

본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법에서는 2개의 설계 변수가 존재하며, 이는 유도 이득 k와 경계층 두께 δ_{BL} 이다.

[0146]

유도 이득 k는 명령의 양에 영향을 미친다. 이동체의 초기 위치가 경계층 외부에 있다면, 경계층 두께는 이동체가 속도 벡터를 목표 경로의 방향으로 조종하기 시작하는 위치를 결정한다. 따라서, 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법은 이동체의 초기 위치에 관계없이 자율 비행 모드를 적용할 수 있다.

[0147]

또한, 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법은 특이점 문제가 발생하지 않는다.

[0148]

본 실시예에 따른 유도 방법과 기존의 전방주시점 기반 유도 방법의 주요 차이점은 본 실시예에 따른 유도 방법이 전방주시점이 아니라 전방주시각에 의한 전방주시 효과를 실체화하고 있다는 것이다.

[0149]

전방주시점에 기반한 경로 추종 유도 방법은 다음과 같이 주어진다.

[0150]

(28)

$$\mathbf{a}_{M_{\text{cmd}}}^N = \frac{2}{\|\mathbf{L}\|^2} (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{L}) \times \mathbf{v}_{M_I}$$

[0151] $\mathbf{L}$ 은 이동체에 대해 특정 거리 L 만큼 전방에 위치하고 있는, 목표 경로 상의 전방주시점의 상대적인 위치 벡터에 의해 정의되는 전방주시 벡터이다. 이 유도 방법은 목표 경로가 일정한 곡률을 가지는 2차원 곡선이 아닌 경우에는 정밀 경로 추종 조건을 만족할 수 없게 된다.

[0152] 이는 이동체가 온-트랙 상태 및 정렬 상태에 있을지라도 다음과 같은 결과를 보이기 때문이다.

[0153] 1) $\kappa_M = \frac{1}{\|\mathbf{L}\|} \neq \kappa_P$, therefore $\mathbf{a}_{M_{cmd}} \cdot \hat{\mathbf{N}}_P \neq \kappa_P \|\mathbf{v}_{M_I}\|^2$,
2) $\mathbf{L} \cdot \hat{\mathbf{B}}_P \neq 0$, therefore $\mathbf{a}_{M_{cmd}} \cdot \hat{\mathbf{B}}_P \neq 0$.

[0154] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 정속 대기속도(constant airspeed) 경로 추종을 위해 유도 명령 생성 과정에서 일부 수정이 이루어질 수 있다.

[0155] 바람 속도 $\mathbf{v}_w$ 가 0(zero)이 아닐 때, 관성 속도 $\mathbf{v}_{M_I}$ 는 바람의 영향으로 상대속도 $\mathbf{v}_{M_a} = \mathbf{v}_{M_I} - \mathbf{v}_w$ 와 동일하지 않게 된다. 그러므로, 수직 유도 명령 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 은 $\mathbf{v}_{M_a}$ 에 접하는 성분을 가지며, 실제 대기속도(airspeed)를 변경하는 것은 쉽지 않기 때문에 이상적이지 않게 된다. 따라서 실제 비행 상황에서 정속 대기속도를 유지하는 것이 정속 대지속도(constant ground speed)를 유지하는 것보다 우수한 성능을 나타낸다.

[0156] 수직 유도 명령 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 에서 다음의 명령 수정 로직에 따라 수정된 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S$ 를 측면 유도 명령(side guidance command)이라 하기로 한다.

[0157] 정속 대기속도를 유지하기 위해서는 이동체의 가속도가 다음의 조건을 만족해야 하므로 상대속도 $\mathbf{v}_{M_a}$ 에 직교(orthogonal)해야 한다.

[0158] (29) $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S \cdot \mathbf{v}_{M_a} = 0$

[0159] 앞서 설명한 것과 같이 곡선의 형상은 곡선을 따른 관성 속력이 아니라 수직 가속도에만 종속적이다. 그러므로 접선 가속도가 무엇이던지 간에 경로 추종 능력을 보존하기 위해 수직 가속도는 수학적 (9)와 동일해야 하므로, 다음 조건이 만족되어야 한다.

[0160] (30) $\left(\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S \cdot \frac{\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N}{\|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|} \right) \frac{\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N}{\|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|} = \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$

[0161] 수학적 (30)을 다시 쓰면 다음과 같다.

[0162] (31) $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S \cdot \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N = \|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|^2$

[0163] 측면 유도 명령은 종법선 성분의 생성을 피하기 위해 $\mathbf{v}_{M_I}$ 및 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N$ 에 의해 정의된 평면에 놓여져야 하므로, 다음과 같다.

[0164] (32) $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S \cdot (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N) = 0$

[0165] 수학적 (29), (31), (32)를 행렬 방정식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

[0166] (33) $\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{M_a}^T \\ \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N{}^T \\ (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N)^T \end{bmatrix} \mathbf{a}_{M_{cmd}}^S = \begin{bmatrix} 0 \\ \|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|^2 \\ 0 \end{bmatrix}$

[0167] 결과적으로 수정된 측면 유도 명령은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S = \begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{M_a}^T \\ \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N \\ (\mathbf{v}_{M_I} \times \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N)^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \|\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N\|^2 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} \neq 0 \text{ and } \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N \neq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } \mathbf{v}_{M_I} \cdot \mathbf{v}_{M_a} = 0 \text{ or } \mathbf{a}_{M_{cmd}}^N = 0 \end{cases}$$

[0168] (34)

[0169] 지금까지 설명한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 순서도가 도 7에 도시되어 있다. 도 7의 각 단계들은 도 1에 도시된 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템(100)의 각 구성요소에 의해 수행될 수 있다.

[0170] 제어대상 정보획득부(110)에는 매개화된 곡선으로 목표 경로 $\mathbf{p}(l)$ 가 주어진다. 그리고 제어대상 정보획득부(110)는 이동체의 위치 및 속도 정보($\mathbf{r}_M$, $\mathbf{v}_{M_I}$, $\mathbf{v}_{M_a}$)를 획득하고, 설계변수인 유도이득 k , 경계층 두께 δ_{BL} 의 값을 선택한다(단계 S310).

[0171] 최근접점 계산부(120)는 매 순간 이동체의 위치에 해당하는 최근접점 P 를 수학식 (1)에 의해 결정한다(단계 S320). 오차 벡터(error vector) $\mathbf{e} = \mathbf{r}_P - \mathbf{r}_M$ 도 계산할 수 있다.

[0172] 목표 경로 특성 계산부(130)는 최근접점에서 단위 접벡터 $\hat{\mathbf{T}}_P$, 단위 법벡터 $\hat{\mathbf{N}}_P$, 곡률 κ_P 를 계산한다(단계 S330).

[0173] 유도 명령 생성부(140)는 수학식 (27)(혹은 수학식 (26))에 의해 방사상 이격거리 d_{shift} 를 계산한다(단계 S340).

[0174] 그리고 수학식 (16)에 의해 경계층 중심점(W)의 거리벡터 $\mathbf{r}_W$, 수학식 (17)에 의해 이동체(M)에서 W로의 거리 벡터, 즉 이동된 오차 벡터(shifted error vector) $\mathbf{d}$, 수학식 (25)(혹은 수학식 (24))에 의해 전방주시각 θ_L 을 계산한다(단계 S350).

$$\hat{\mathbf{L}} = \cos \theta_L \frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|} + \sin \theta_L \hat{\mathbf{T}}_P$$

[0175] 그리고 수학식 (18)에 의해 전방주시 벡터 을 계산한다(단계 S360).

[0176] 이후 수학식 (19)에 의해 수직 유도 명령 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^N = k(\mathbf{v}_{M_I} \times \hat{\mathbf{L}}) \times \mathbf{v}_{M_I}$ 을 계산하고(단계 S370), 이를 출력한다(단계 S380).

[0177] 도면에서는 도시되지 않았지만, 단계 S380 이전에 정속 대기속도 경로 추종이 요구되는 경우에는 수학식 (34)에 따라 측면 유도 명령 $\mathbf{a}_{M_{cmd}}^S$ 를 계산하고, 이를 출력할 수도 있다.

[0178] 도 2 및/또는 도 7에 도시된 곡선 미분에 기반한 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법은 디지털 처리 장치(3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템(100))에 내장되거나 설치된 프로그램 등에 의해 시계열적 순서에 따른 자동화된 절차로 수행될 수도 있음은 당연하다. 상기 프로그램을 구성하는 코드들 및 코드 세그먼트들은 당해 분야의 컴퓨터 프로그래머에 의하여 용이하게 추론될 수 있다. 또한, 상기 프로그램은 디지털 처리 장치가 읽을 수 있는 정보저장매체(computer readable media)에 저장되고, 디지털 처리 장치에 의하여 읽혀지고 실행됨으로써 상기 방법을 구현한다. 상기 정보저장매체는 자기 기록매체, 광 기록매체를 포함한다.

[0179] 본 실시예에 따른 3차원 비선형 경로 추종 유도 방법의 성능을 보여주는 수치 시뮬레이션 수행 결과에 대해 관련 도면을 참조하여 설명하기로 한다. 경로 추종 성능의 비교를 위해 기존의 유도 기법에 대한 수치 시뮬레이션

도 같이 수행되었다.

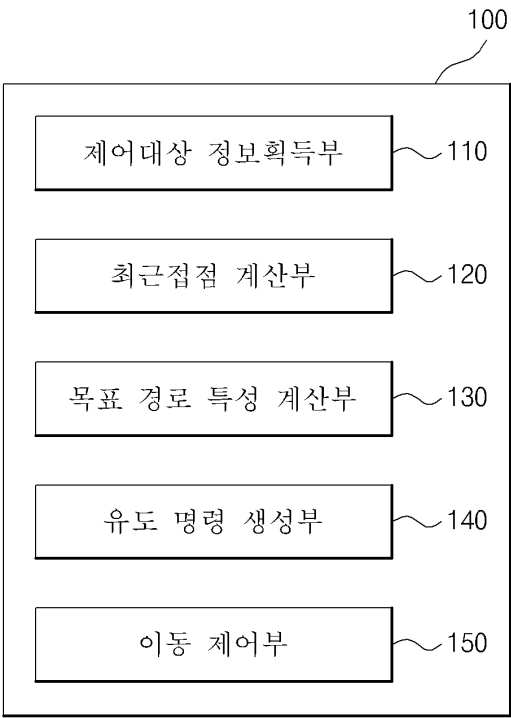
- [0180] 도 8은 3차원 나선형 경로를 목표 경로로 하는 경우의 3차원 궤적을 나타낸 도면이고, 도 9는 기존 유도 기법 대비 각 축마다의 가속도 성분을 도시한 도면이며, 도 10은 기존 유도 기법 대비 오차 벡터의 크기에 대한 시간 궤적을 나타낸 도면이다.
- [0181] 도 8을 참조하면, 3차원 궤적이 나타나 있으며, 빨간 선(410)은 주어진 목표 경로, 파란 선(420)은 본 실시예에 따른 유도 기법의 결과, 검정 선(430)은 기존 유도 기법의 결과를 나타낸다.
- [0182] 도면에서 확인할 수 있듯이 본 실시예에 따른 유도 기법의 결과는 목표 경로와 거의 일치하는 모습을 보인다. 이를 통해 기존 유도 기법에 비해 경로 추종 오차가 더 작음을 알 수 있다.
- [0183] 도 9를 참조하면, 각 축마다의 가속도 성분이 도시되어 있다. 본 실시예에 따른 유도 기법과 기존 유도 기법 모두 입력의 양에 해당하는 유도 명령의 크기는 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 보통 입력/명령의 크기가 클수록 오차가 작음을 고려할 때, 본 실시예에 따른 유도 기법은 기존 유도 기법과 명령의 크기를 비슷한 정도이면서도 더 작은 경로 추종 오차를 보인다는 장점이 있다.
- [0184] 도 10을 참조하면, 오차 벡터의 크기에 대한 시간 궤적이 나타나 있다. 앞서 3차원 궤적에서 예측하였던 것과 같이 기존 유도 기법에 비해 본 실시예에 따른 유도 기법이 더 작은 경로 추종 오차를 나타냄을 알 수 있고, 기존 유도 기법의 경우 어느 시간 이후로는 더 이상 경로 추종 오차가 감소하지 않음을 알 수 있다.
- [0185] 도 8 내지 도 10을 종합적으로 살펴볼 때 기존 유도 기법에 비해 본 실시예에 따른 유도 기법이 우수한 경로 추종 성능을 보임을 알 수 있다.
- [0186] 본 실시예에 따른 경로 추종 유도 기법은 지정된 경로를 추종하도록 하는 명령을 생성하므로, 고정익 또는 회전익 항공기는 물론 차량과 선박 및 잠수정 등의 이동체가 정해진 경로를 따라 가면서 수행해야 하는 다양한 임무에 활용이 가능하다. 따라서, 다양한 시스템의 정밀한 자동 운용에 적용될 수 있으며, 일례로 적절한 경로 생성 방법과 연계될 경우 유무인 항공기 또는 자동차의 충돌 회피 및 사고 방지에 활용이 가능할 것이다.
- [0187] 상기에서는 본 발명의 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 하기의 특허 청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

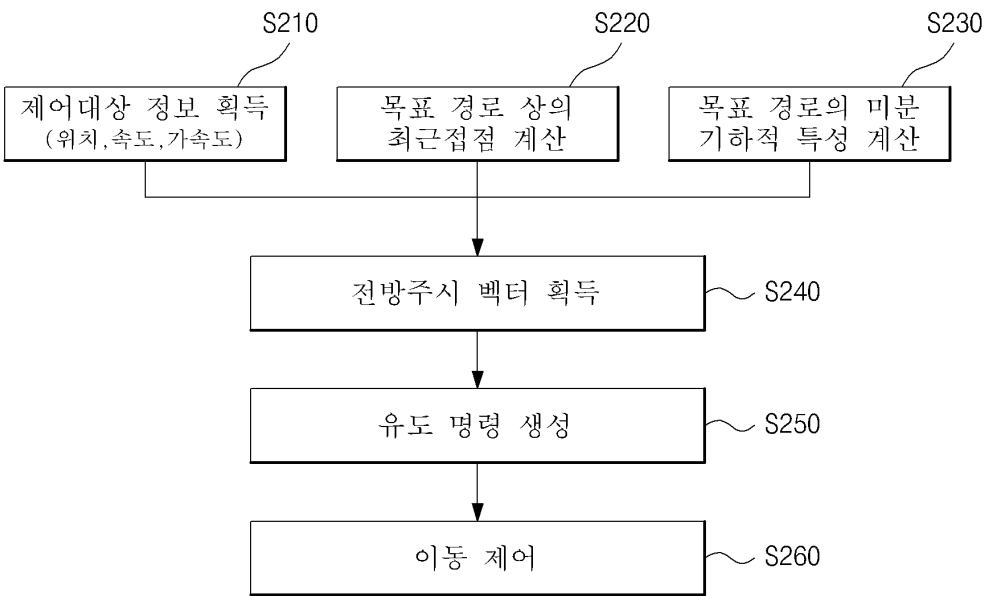
- [0188] 100: 3차원 비선형 경로 추종 유도 시스템
- | | |
|-------------------|----------------|
| 110: 제어대상 정보획득부 | 120: 최근점점 계산부 |
| 130: 목표 경로 특성 계산부 | 140: 유도 명령 생성부 |
| 150: 이동 제어부 | |

도면

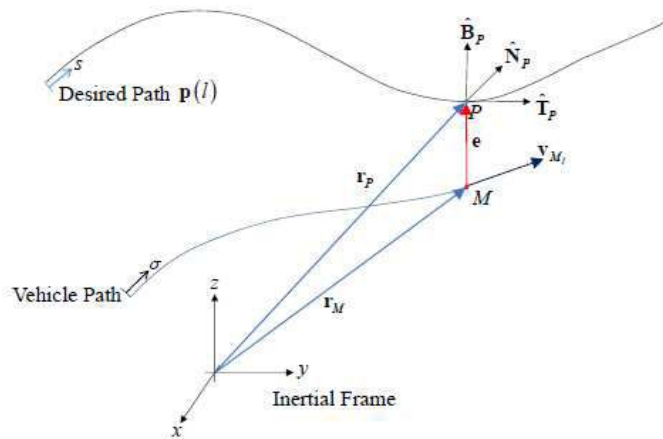
도면1



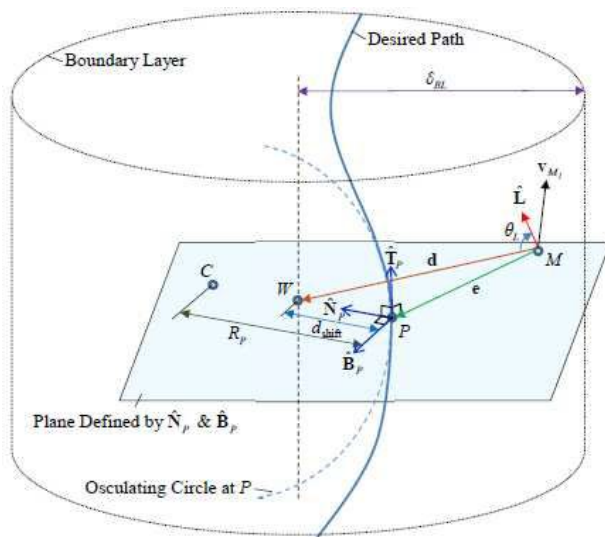
도면2



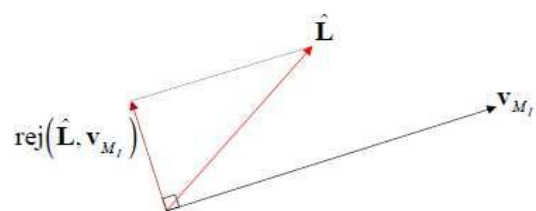
도면3



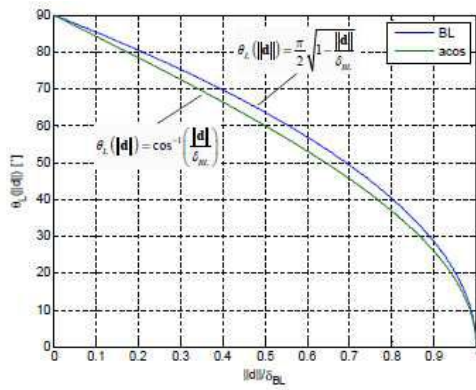
도면4



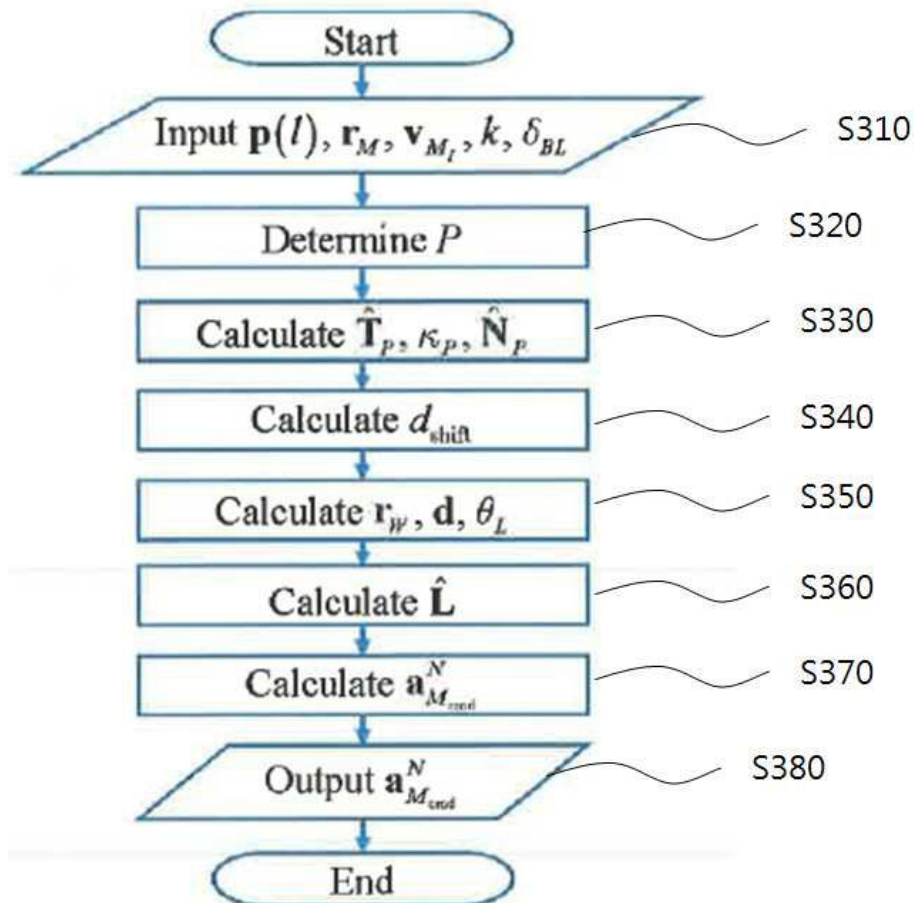
도면5



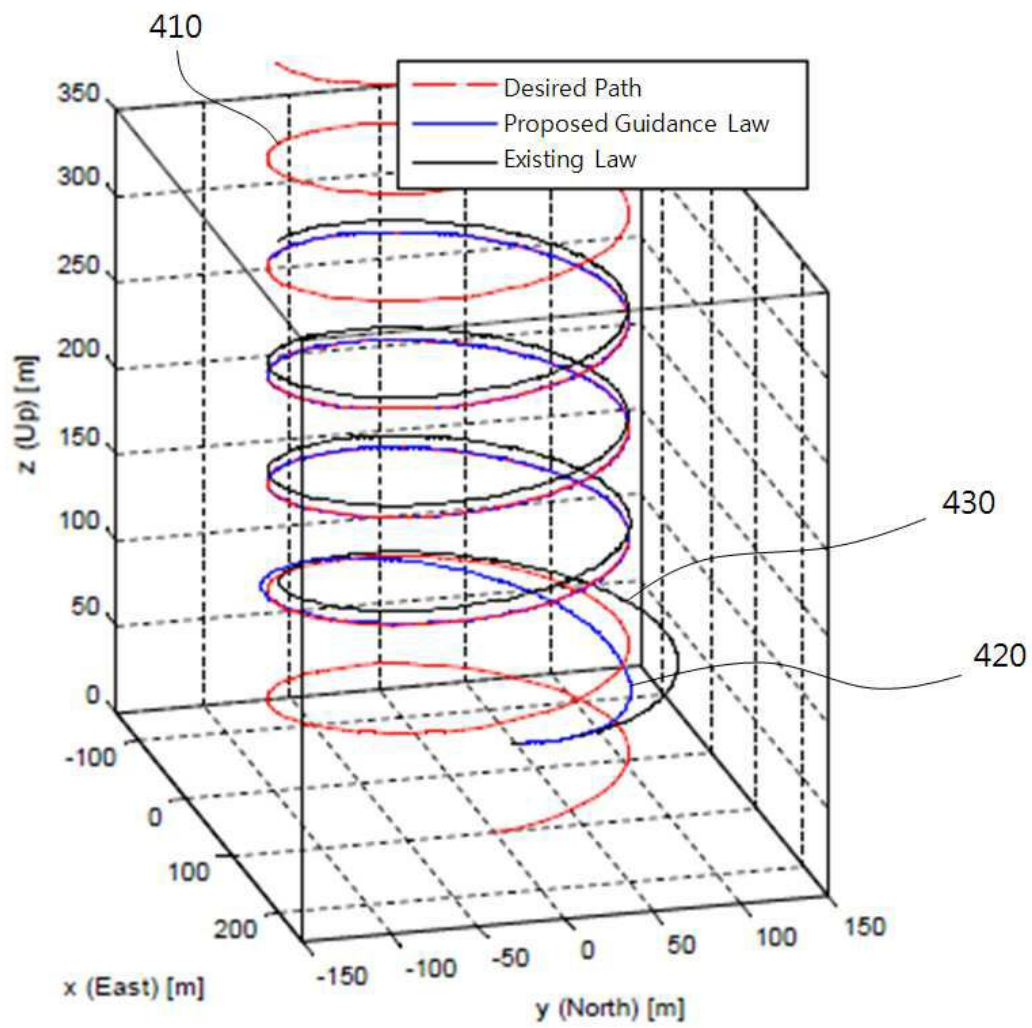
도면6



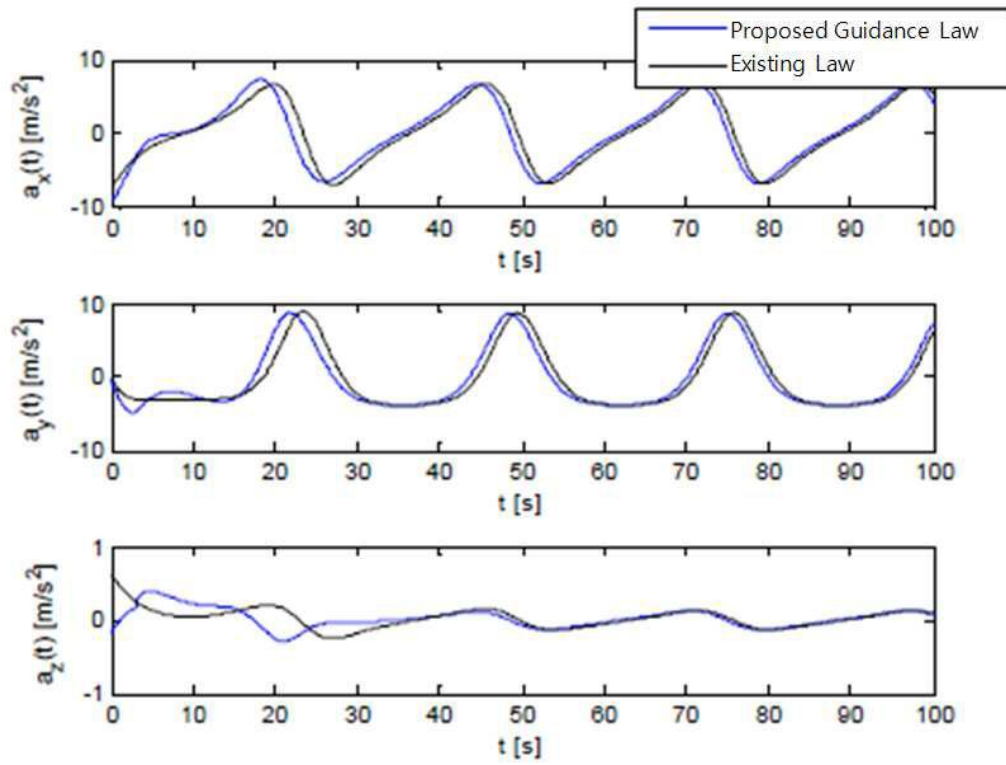
도면7



도면8



도면9



도면10

