



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0162261
(43) 공개일자 2024년11월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H02P 6/08 (2016.01) H02K 11/22 (2016.01)
H02K 49/10 (2006.01) H02P 23/12 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H02P 6/08 (2021.08)
B25J 9/102 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2023-0059085

(22) 출원일자 2023년05월08일

심사청구일자 2023년05월08일

(71) 출원인

서강대학교산학협력단

서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)

(72) 발명자

정석환

경기도 광명시 시청로 50, 107동 205호

송한결

서울특별시 관악구 봉천로 507-34, 305호

이에드가

서울특별시 영등포구 문래로20길 46

(74) 대리인

특허법인 피씨알

전체 청구항 수 : 총 10 항

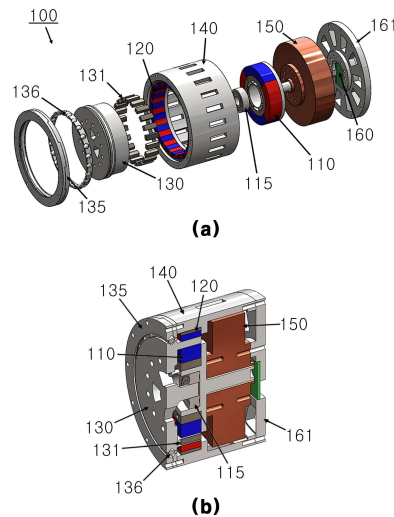
(54) 발명의 명칭 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템 및 그 제어 방법

(57) 요약

본 발명은 동축 자석기어 기반 구동모듈에 관한 것으로, 특히 기계적 마모가 없이 비접촉식 동력으로 전달할 수 있는 동축 자석기어 기반 구동모듈 및 이의 최적화를 위한 제어 방법에 관한 것이다.

본 발명의 실시예에 따르면, 기계 시스템 간에 비접촉식으로 동력을 전달함으로써, 기계적 마모가 없어 유지, 보수가 빈번하게 발생하는 시스템에 대한 유지비, 보수비를 낮출 수 있고, 소형 로봇 등 다양한 시스템에서 입력과 출력단의 파트를 밀폐할 수 있는 구조로 구현함으로써, 사막·수중·우주 등과 같은 환경에서 구동부를 먼지 및 물로부터 보호할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

B25J 9/126 (2013.01)
B25J 9/1694 (2013.01)
F16H 49/005 (2013.01)
H02K 11/22 (2016.01)
H02K 49/106 (2013.01)
H02P 23/12 (2013.01)
Y10S 74/04 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711187064
과제번호	2021R1F1A1046838
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	이상적인 로봇 구동을 위한 비접촉식 능동 소형 연속 변속 메커니즘 모듈의 설계 및
제어 연구	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	서강대학교
연구기간	2021.06.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

모터 및 상기 모터와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자를 갖는 구조체를 포함하는 구동모듈; 및
상기 복수의 회전자의 회전각에 대한 현재 전기적 차이각을 계산하고, 목표 전기적 차이각에 수렴하도록 상기 복수의 회전자 중, 어느 하나의 회전각을 조정함으로써 상기 모터를 목표 토크로 제어하는 제어 모듈
을 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서,
상기 구동모듈은,
축과 결합하는 내측 베어링;
상기 내측 베어링을 둘러싸고, 제1 마그넷을 포함하는 내측 회전자;
상기 내측 회전자와 일정 거리 이격되어 둘러싸는 형태로 결합되고, 제2 마그넷을 포함하는 외측 회전자;
상기 제1 마그넷 및 제2 마그넷 사이에 개재되는 복수의 폴 피스를 포함하는 폴 피스 홀더;
상기 폴 피스 홀더의 외주면을 둘러싸며 결합되는 베어링 케이지를 포함하는 외측 베어링;
내부로 상기 외측 회전자가 고정 결합되고, 전면으로 외측 베어링이 결합되는 하우징;
상기 하우징의 배면방향에서 내부로 삽입 결합되고, 구동력을 발생시키는 모터; 및
상기 외측 회전자 및 내측 회전자와 각각 인접하여 설치되어 상기 복수의 회전각을 측정하는 한 쌍의 엔코더 센서
를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈.

청구항 3

제 2 항에 있어서,
상기 제어 모듈은,
동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하고, 상기 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전각에 따라 현재 전기적 차이각을 계산하고, 현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정하는 것인, 동축 자석기어 기반 구동모듈.

청구항 4

제 3 항에 있어서,
상기 목표 또는 현재 전기적 차이각은, 동축 자석기어의 자기 커플링에 따른 토크(τ)와의 관계를 나타내는 이하의 수학적식,

$$\tau = \tau_g \sin \theta_g$$

으로 계산되는 것인, 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템(단, τ_g 는 측정되는 토크 사인파의 최대값, θ_g 는 전기적 차이각).

청구항 5

제 3 항에 있어서,

상기 목표 또는 현재 전기적 차이각(θ_e)은, 이하의 수학적식,

$$\theta_e = p_i \theta_m - N \theta_i$$

으로 계산되는 것인, 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템(단, p_i 는 내측 회전자의 폴 페어 수, N 은 내측 회전자의 폴 피스 수, θ_m 는 제1 회전각, θ_i 는 제2 회전각).

청구항 6

제 3 항에 있어서,

상기 제어 모듈은,

동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하고, 상기 오차값을 이용하여 상기 구동모듈의 제어신호를 보상하여 상기 모터의 출력을 선형화하는 외란 관측기

를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 외란 관측기는,

상기 구동모듈의 출력에 대한 명목모델의 역함수를 곱하여 외란을 추정하는 인버스 명목 플랜트 모델; 및

인버스 명목 플랜트 모델의 역함수를 실제 전달함수로 변환하여 상기 오차값을 예측하고, 상기 오차값을 피드백하여 보상하는 Q필터

를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템.

청구항 8

제 3 항에 있어서,

상기 제어 모듈은,

기준 전기적 차이각(θ_{e_ref})을 -80° 내지 80° 로 제어하고, 상기 전기적 차이각(θ_e)을 -180° 내지 180° 범위 내로 제어하여 폴 슬립 후 토크를 제어하는 것인, 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템.

청구항 9

모터 및 상기 모터와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자를 갖는 구조체를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈을 제어하는 방법으로서,

동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하는 단계;

상기 구동모듈에 탑재된 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전각을 입력받아 현재 전기적 차이각을 계산하는 단계; 및

현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정하는 단계

를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정하는 단계 이후,

동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형화된 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하는 단계; 및

상기 오차값을 이용하여 상기 구동모듈의 제어신호를 보상하여 상기 모터의 출력을 선형화하는 단계

를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 동축 자석기어 기반 구동모듈에 관한 것으로, 특히 중소형 기계 및 로봇 어플리케이션에 적합하며 기계적 마모가 없이 비접촉식 동력으로 전달할 수 있는 동축 자석기어 기반 구동모듈의 최적화를 위한 설계 프레임워크와 새로운 제어 전략이 적용된 제어 시스템 및 그 제어 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 기계, 로봇 시스템에서 가장 핵심적인 역할을 하는 부분 중 하나가 구동기이다. 구동기는 전기 모터, 공압 구동기, 유압 구동기 등 다양한 에너지원을 사용하여 구현될 수 있으나, 중, 소형 기계 로봇 시스템에서는 높은 제어 성능과 구동기 소형화의 용이성을 위해 전기 모터가 가장 보편적으로 쓰인다. 하지만, 전기 모터는 제한된 입력 전압 범위로 인해 최대 허용 속도가 제한되며 권선의 발열 문제로 인한 최대 허용 전류의 제한으로 인해 최대 토크가 제한된다. 이런 물리적 한계로 인해 전기 모터는 좁은 속도-토크 출력 범위를 가지며, 이러한 구동 범위의 한계로 인해 전기 모터를 구동기로 사용하는 중·소형 기계 로봇 시스템의 성능 또한 좁은 범위로 제한된다.

[0003] 내연기관 역시 제한된 속도-토크 출력 범위를 가지며, 이러한 구동기의 제한된 속도-토크 출력 범위를 로봇의 작업 요구 조건에 맞춰 바꾸기 위해 입, 출력 감속 메커니즘을 구동기와 로봇의 출력단 사이에 설치하여 로봇 출력단에 필요한 속도-토크 범위를 구현하게 된다. 가장 대표적인 예시가 그림1에 나타난 기계식 접촉기반 감속 메커니즘이다.

[0004] 일반적으로, 전기 모터와 같은 구동기의 속도-토크(speed-torque) 구동 범위를 로봇에 요구되는 적절한 속도-토크 영역으로 바꾸기 위해 사용되는 전통적인 감속 메커니즘은 대부분 도 1에 나타난 바와 같이 물리적인 기어의 접촉을 통해 동력을 전달하는 구조를 가지고 있다.

[0005] 도 1은 종래 기계식 접촉기반 감속 메커니즘이 적용된 구동기를 예시한 것으로, 도 1을 참조하면 대표적인 접촉기반 감속기로서 하모닉 드라이브(a)는 유연한 스플라인과 웨이브 발생기를 사용하여 매우 높은 기어비(감속비)와 제로 백래시(backlash)를 구현한다는 특징이 있다. 또한, 유성기어(b)는 쥘기어, 링기어, 플레닛기어 및 캐리어로 구성되어 저렴하고 쉽게 높은 기어비 구현이 가능하며, 사이클로이드 드라이브(c)는 사이클로이드 곡선으로 이루어진 디스크를 회전함으로써 감속 기능을 구현하고 낮은 백래시를 얻을 수 있다..

[0006] 이러한 다양한 기계식 접촉기반 감속 메커니즘은 다양한 산업분야에서 활발히 사용 중이다.

[0007] 그러나, 기존의 감속 메커니즘은 기계식 회전 커플링 기반의 메커니즘이 주로 사용되고 있으며, 이는 기계적인 접촉으로 인해 발생하는 소음, 마찰, 백래쉬는 부품의 수명과 입, 출력의 투명성(transparent), 역구동성을 감소 시키게 된다. 이러한 특징은 기어비가 높아짐에 따라 더 뚜렷하게 나타난다. 또한, 외부에서 구동기에 큰 충격이 가해졌을 때, 역구동성이 낮은 기계식 메커니즘은 쉽게 파손될 우려가 있다.

[0008] 이에, 기계식 커플링 대신 자석의 자기 커플링을 이용한 비접촉식 감속 메커니즘이 제안되었다.

[0009] 비접촉식 자기 커플링은 물리적인 접촉이 없으므로 기존 문제로 제기되어 왔던 소음, 마찰의 문제를 해결하고 유지보수 측면에서 이점을 가진다. 또한, 입출력의 물리적인 커플링이 없으므로 역구동성이 보장되며, 이는 외부 하중에 의한 파손에 강인함을 가질 수 있다.

[0010] 비접촉 기반 마그네틱 감속 메커니즘에 관한 선행문헌으로서, 미국등록특허 US7973441은 기존 비접촉으로 동력을 전달할 수 있는 자석기어의 토크 밀도의 한계를 상당히 증가시킨 동축 자석기어에 관한 디자인을 제시하고 있다.

- [0011] 하지만, 기존 비접촉 감소 메커니즘을 기반으로 한 설계들은 대부분 중대형 시스템인 풍력발전기 및 요트 등에 최적화된 자기 커플링 메커니즘에 집중되어 있었으며, 상대적으로 이족, 사족 보행 로봇 및 매니플레이터 등과 같은 작은 로봇 시스템에 맞게 개발된 설계된 사례는 부족하다고 할 수 있다.
- [0012] 또한, 로봇 시스템에 자석 기어를 적용한 연구들도 대부분 변속기의 감속 기능에 집중한 속도 제어, 1:1 기어 비 시스템 또는, 마그네틱 기어의 위치제어에 초점에 맞춰져 있는 등, 로봇의 정밀 토크 제어에 직접적으로 활용하기에는 한계가 있었다.
- [0013] 즉, 현재까지 중소형 로봇에 적합한 크기로 제작되면서 높은 토크 전달력 구현 및 안정적인 토크 제어가 동시에 가능한 동축 자석기어 기반 구동 시스템에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있지 않다는 문제점이 있었다.
- [0014] 또한, 자석기어의 여러 설계 및 제어와 관련하여, 지난 수십 년 동안 자석기어에 관한 연구가 진행되었으나, 적절한 전송 비율, 최적 설계를 고려한 중소 규모의 일반 기계 또는 로봇 애플리케이션을 위한 일반 설계 및 제어 프레임워크에 대한 연구는 거의 보고되지 않고 있다.
- [0015] 이에, 본 발명은 중소형 기계 또는 로봇 애플리케이션에 적합한 소형 모터의 동축 자석기어 구동 모듈에 대한 프레임워크를 구현하고자 한다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0016] (특허문헌 0001) 미국등록특허 US797344(2011.07.05.)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0017] 본 발명은 전술한 한계를 극복하기 위해 안출된 것으로, 본 발명은 입력축과 출력축이 물리적 접촉 없이 자기적으로 연결되어 마찰이 최소화되는 비 접촉식 변속 메커니즘을 적용하여 지속성 및 내구성이 극대화된 동축 자석기어 기반 구동모듈을 제공하는 데 과제가 있다.
- [0018] 또한, 본 발명은 현재 상태의 전기적 차이각을 제어하여 토크 센서 없이 토크 제어가 가능한 제어 알고리즘 및 외란 관측기를 통한 동축 자석기어 비선형성의 선형화를 구현한 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법을 제공하는 데 다른 과제가 있다.
- [0019] 또한, 본 발명은 직접 마그네틱 스프링의 차이각을 제어하여 높은 대역폭으로 더 정확하고 간단하게 힘 제어가 가능하도록 함으로써, DOB루프가 자석기어의 비선형성을 선형화하도록 하는데 다른 과제가 있다.

과제의 해결 수단

- [0020] 전술한 과제를 해결하기 위해, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템은, 모터 및 상기 모터와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자를 갖는 구조체를 포함하는 구동모듈 및, 상기 복수의 회전자의 회전각에 대한 현재 전기적 차이각을 계산하고, 목표 전기적 차이각에 수렴하도록 상기 복수의 회전자 중, 어느 하나의 회전각을 조정함으로써 상기 모터를 목표 토크로 제어하는 제어 모듈을 포함할 수 있다.
- [0021] 상기 구동모듈은, 축과 결합하는 내측 베어링, 상기 내측 베어링을 둘러싸고, 제1 마그넷을 포함하는 내측 회전자, 상기 내측 회전자와 일정 거리 이격되어 둘러싸는 형태로 결합되고, 제2 마그넷을 포함하는 외측 회전자, 상기 제1 마그넷 및 제2 마그넷 사이에 개재되는 복수의 폴 피스를 포함하는 폴 피스 홀더, 상기 폴 피스 홀더의 외주면을 둘러싸며 결합되는 베어링 케이지를 포함하는 외측 베어링, 내부로 상기 외측 회전자가 고정 결합되고, 전면으로 외측 베어링이 결합되는 하우징, 상기 하우징의 배면방향에서 내부로 삽입 결합되고, 구동력을 발생시키는 모터 및, 상기 외측 회전자 및 내측 회전자와 각각 인접하여 설치되어 상기 복수의 회전각을 측정하는 한 쌍의 엔코더 센서를 포함할 수 있다.
- [0022] 상기 제어 모듈은, 동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하고, 상기 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전각에 따라 현재 전기적 차이각을 계산하고, 현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정할 수 있

다.

[0023] 상기 목표 또는 현재 전기적 차이각은, 동축 자석기어의 자기 커플링에 따른 토크(τ)와의 관계를 나타내는 이하의 수학적식,

$$\tau = \tau_g \sin \theta_e$$

[0025] 으로 계산될 수 있다.

[0026] 상기 목표 또는 현재 전기적 차이각(θ_e)은, 이하의 수학적식,

$$\theta_e = p_i \theta_m - N \theta_l$$

[0028] 으로 계산될 수 있다. 단, p_i 는 내측 회전자의 폴 페어 수, N 은 내측 회전자의 폴 피스 수, θ_m 는 제1 회전각, θ_l 는 제2 회전각을 가리킨다.

[0029] 상기 제어 모듈은, 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하고, 상기 오차값을 이용하여 상기 구동모듈의 제어신호를 보상하여 상기 모터의 출력을 선형화하는 외란 관측기를 포함할 수 있다.

[0030] 상기 외란 관측기는, 상기 구동모듈의 출력에 대한 명목모델의 역함수를 곱하여 외란을 추정하는 인버스 명목 플랜트 모델 및, 인버스 명목 플랜트 모델의 역함수를 실제 전달함수로 변환하여 상기 오차값을 예측하고, 상기 오차값을 피드백하여 보상하는 Q필터를 포함할 수 있다.

[0031] 상기 제어 모듈은, 기준 전기적 차이각($\dot{\theta}_{e,ref}$)을 -80° 내지 80° 로 제어하고, 상기 전기적 차이각(θ_e)을 -180° 내지 180° 범위 내로 제어하여 폴 슬립 후 토크를 제어하는 것일 수 있다.

[0032] 또한, 전술한 과제를 해결하기 위해, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법은, 모터 및 상기 모터와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자를 갖는 구조체를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈을 제어하는 방법으로서, 동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하는 단계, 상기 구동모듈에 탑재된 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전각을 입력받아 현재 전기적 차이각을 계산하는 단계 및, 현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0033] 현재 전기적 차이각이 상기 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전각을 조정하는 단계 이후, 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형화된 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하는 단계 및 상기 오차값을 이용하여 상기 구동모듈의 제어신호를 보상하여 상기 모터의 출력을 선형화하는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0034] 본 발명의 실시예에 따르면, 기계 시스템 간에 비접촉식으로 동력을 전달함으로써, 기계적 마모가 없어 유지 및 보수가 빈번하게 발생하는 시스템에 대한 유지비 및 보수비를 낮출 수 있고, 소형 로봇 등 다양한 시스템에서 입력과 출력단의 파트를 밀폐할 수 있는 구조로 구현함으로써, 사막, 수중, 우주 등과 같은 환경에서 구동부를 먼지 및 물로부터 보호할 수 있는 효과가 있다.

[0035] 또한, 본 발명은 출력축의 토크를 증폭할 뿐만 아니라 추가적인 힘 센서 없이 토크 제어가 가능함에 따라, 로봇 시스템에 적용시 구동기와 힘 센서 및 이를 이용한 힘 제어를 단일 모듈로 구현할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0036] 도 1은 종래 기계식 접촉기반 감속 메커니즘이 적용된 구동기를 예시한 도면이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템에 대한 구조를 블록도로 나타낸 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 분해 사시도 및 단면 사시도를 나타낸 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 자기 커플링에 의해 전달되는 토크 변화에 대한 그래프를 나타낸 도면이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 모터 모델을 나타낸 도면이다.

도 6은 도 5의 구동모듈을 포함하는 제어 시스템의 구조를 나타낸 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법을 순서도로 나타낸 도면이다.

도 8 및 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법의 테스트에 따른 신호 파형을 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0037] 상기한 바와 같은 본 발명을 첨부된 도면들과 실시예들을 통해 상세히 설명하도록 한다.
- [0038] 본 발명에서 사용되는 기술적 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아님을 유의해야 한다. 또한, 본 발명에서 사용되는 기술적 용어는 본 발명에서 특별히 다른 의미로 정의되지 않는 한, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 의미로 해석되어야 하며, 과도하게 포괄적인 의미로 해석되거나, 과도하게 축소된 의미로 해석되지 않아야 한다. 또한, 본 발명에서 사용되는 기술적인 용어가 본 발명의 사상을 정확하게 표현하지 못하는 잘못된 기술적 용어일 때에는, 당업자가 올바르게 이해할 수 있는 기술적 용어로 대체되어 이해되어야 할 것이다. 또한, 본 발명에서 사용되는 일반적인 용어는 사전에 정의되어 있는 바에 따라, 또는 전후 문맥상에 따라 해석되어야 하며, 과도하게 축소된 의미로 해석되지 않아야 한다.
- [0039] 또한, 본 발명에서 사용되는 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다. 본 발명에서, "구성된다" 또는 "포함한다" 등의 용어는 발명에 기재된 여러 구성 요소들, 또는 여러 단계를 반드시 모두 포함하는 것으로 해석되지 않아야 하며, 그 중 일부 구성 요소들 또는 일부 단계들은 포함되지 않을 수도 있고, 또는 추가적인 구성 요소 또는 단계들을 더 포함할 수 있는 것으로 해석되어야 한다.
- [0040] 또한, 본 발명에서 사용되는 제1, 제2 등과 같이 서수를 포함하는 용어는 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 구성 요소들은 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성 요소도 제1 구성 요소로 명명될 수 있다.
- [0041] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하되, 도면 부호에 관계없이 동일하거나 유사한 구성 요소는 동일한 참조 번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.
- [0042] 또한, 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다. 또한, 첨부된 도면은 본 발명의 사상을 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위한 것일 뿐, 첨부된 도면에 의해 본 발명의 사상이 제한되는 것으로 해석되어서는 아니 됨을 유의해야 한다.
- [0043] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈 및 이의 제어 방법을 설명한다.
- [0044] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템에 대한 구조를 블록도로 나타낸 도면이고, 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 분해 사시도 및 단면 사시도를 나타낸 도면이고, 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 자기 커플링에 의해 전달되는 토크 변화에 대한 그래프를 나타낸 도면이다.
- [0045] 도 2 및 도 3을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈을 포함하는 제어 시스템은, 모터(150) 및 모터(150)와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자(110, 130)를 갖는 구조체를 포함하는 구동모듈(100) 및, 복수의 회전자(110, 130)의 회전각에 대한 현재 전기적 차이각을 계산하고, 목표 전기적 차이각에 수렴하도록 복수의 회전자(110, 130) 중, 어느 하나의 회전각을 조정함으로써 모터(150)를 목표 토크로 제어하는 제어모듈(200)을 포함할 수 있다.
- [0046] 본 발명의 실시예에 따른 구동모듈(100)은 동축 자석기어 구조로서, 도 2에 도시된 바와 같이 입력과 출력축이 물리적 접촉 없이 기계적으로 이격되어 있으며, 자기적으로 연결되는 구조이다. 따라서, 마찰이 최소화되어 접촉식 변속 메커니즘의 내재적인 단점을 극복할 수 있다.
- [0047] 특히, 이러한 구조는 구조체간 마찰이 매우 적어 윤활유의 사용이 필요 없으며, 부품의 교체나 수리 빈도도 현

저히 낮기 때문에 지속성 및 내구성 측면에서 강점이 있다. 이에 더하여, 자석기어는 기계적으로 이격되기 때문에 출력축이 입력축에 대해 역구동성(backdrivability)을 가지며, 이로 인해 과부하 및 외부 충격에 대한 기계적 파손을 피할 수 있어 부하가 급변하는 다양한 형태의 시스템에도 적용할 수 있다는 강점이 있다.

[0048] 특히, 로봇 시스템에서 변속기는 모터의 속도-토크 범위를 로봇에 요구되는 속도-토크 영역으로 이동시켜 로봇에게 요구되는 작업을 수행할 수 있도록 하는 역할을 한다. 이를 위해, 변속기는 최소한 모터의 정격 토크 이상의 토크를 견디고 전달할 수 있어야 한다. 일반적으로 사족 보행 로봇 등의 중소형 로봇 시스템에서는 10 대 1 정도의 낮은 감속비의 변속기를 BLDC모터, PMSM 등의 모터에 결합한 QDD(Quasi Direct Drive) 형태의 구동기를 주로 사용하게 된다. 이에, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석 기반의 구동모듈 또한 이러한 중소형 로봇 시스템에 맞추어 10.5 대 1의 기어비를 갖는 변속기가 BLDC모터와 결합한 QDD 형태로 설계되었으며, 최대한 큰 토크를 변속기가 전달받을 수 있도록 최적화된 것을 특징으로 한다.

[0049] 구체적으로, 본 발명의 동축 자석기반의 구동모듈(100)은 전체적인 구조로 볼 때, 종래의 동축 자석기어와 다소 유사하나, 모터(150) 및 엔코더가 하나의 구조체를 이루는 하나의 모듈 형태로 제작될 수 있고, 이에 따라 다양한 로봇 시스템에 손쉽게 적용이 가능하다는 특징이 있다.

[0050] 또한, 구동모듈(100)의 구조체를 이루는 대부분의 파츠, 특히 베어링, 하우징(135, 140) 등은 플라스틱 기반 재료로 3D 프린팅 등을 통해 구현되어 자석에 반응하는 철과 같은 강자성체의 재료가 최소한으로 사용함에 따라, 동력 전달 이외에 손실되는 자기장이 최소화되는 특징이 있다.

[0051] 이러한 본 발명의 구동모듈(100)은, 축과 결합하는 내측 베어링(inner bearing; 115), 내측 베어링(115)을 둘러싸고, 제1 마그넷(inner magnet)을 포함하는 내측 회전자(outer rotor; 110), 내측 회전자(110)와 일정 거리 이격되어 둘러싸는 형태로 결합되고, 제2 마그넷(outer magnet)을 포함하는 외측 회전자(120), 제1 마그넷 및 제2 마그넷 사이에 개재되는 복수의 폴 피스(pole-piece; 131)를 포함하는 폴 피스 홀더(pole-piece holder; 130), 폴 피스 홀더(130)의 외주면을 둘러싸며 결합되는 베어링 케이징(bearing cage; 136)를 포함하는 외측 베어링(outer bearing; 135), 내부로 외측 회전자(120)가 고정 결합되고, 전면으로 외측 베어링(135)이 결합되는 하우징(housing; 140), 하우징(140)의 배면방향에서 내부로 삽입 결합되고, 구동력을 발생시키는 모터(BLDC motor; 150) 및, 외측 회전자(120) 및 내측 회전자(110)와 각각 인접하여 설치되어 복수의 회전각을 측정하는 한 쌍의 엔코더 센서(encoder sensor; 160)을 포함할 수 있다. 여기서, 하나의 엔코더 센서(160)는 하우징(140)의 배면으로 결합하는 후면판(161)에 설치될 수 있고, 이와 쌍을 이루는 나머지 하나의 엔코더 센서는 적용되는 로봇 시스템과 연결부에 설치될 수 있다.

[0052] 전술한 구조의 구동모듈(100)을 로봇 시스템에 적용하면, 모터(150)는 내측 회전자(110)와 물리적으로 결합되어 외부 전기에너지를 통해 내측 회전자(110)를 회전시킬 수 있다. 또한, 외측 회전자(120)는 하우징(140)에 결합되어 고정되고, 외측 베어링(135)과 엔코더 센서(160)도 하우징(140)과 결합된다.

[0053] 그리고, 하우징(140)은 그라운드(ground)로 볼 수 있는 로봇 몸체와 물리적으로 결합되어 고정된다. 따라서, 하우징(140)과 결합된 외측 회전자(120) 또한 회전이 고정된다.

[0054] 폴 피스(131)는 폴 피스 홀더(130)에 삽입되고, 폴 피스 홀더(130)는 하우징(140)과 물리적으로 체결된 외측 베어링(135)과 결합되어 하우징(140)과 상대적 회전운동을 할 수 있다. 또한, 폴 피스 홀더(130)는 내측 회전자(110)와 내측 베어링(115)으로 연결되어 역시 상대적 회전 운동을 할 수 있다.

[0055] 본 발명의 동축 자석기어 기반 구동모듈(100)은 중소형 로봇 시스템에 적용할 수 있도록 부피를 최소화하는 형태로 설계될 수 있다.

[0056] 또한, 엔코더 센서(160)는 한 쌍이 입력축인 내측 회전자(110)와 출력축인 폴 피스 홀더(130)의 회전각을 각각 측정할 수 있다. 이렇게 측정한 회전각은 본 발명의 제어 모듈에 적용된 직렬탄성 원리를 이용한 토크제어 알고리즘에 사용될 수 있다.

[0057] 즉, 본 발명의 제어 시스템은 외측 회전자(120)가 고정되어 있고 내측 회전자(110)가 동력을 입력받아 폴 피스 홀더(130)가 동력을 출력하는 형태로 이루어질 수 있다. 이때, 동축 자석기어의 기어비(G)는 기존의 동축 자석기어의 원리에 따라, 이하의 수학식 1을 만족할 수 있다.

수학식 1

$$G = \frac{N}{p_i}$$

[0058]

[0060] 여기서, p_i 는 자석 폴 페어의 수, N 은 폴 피스 홀더에 삽입된 폴 피스의 수이다.

[0061] 전술한 구조에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 구동모듈은, 자석 기어를 구성하는 세 구성요소인 외측 회전자, 내측 회전자 및 폴 피스 홀더가 일정한 공극(air-gap)을 유지하며 물리적으로 베어링을 통해 이격됨에 따라, 이론적으로 마찰이 존재하지 않아 마찰로 인한 에너지 손실을 줄일 수 있게 된다.

[0062] 또한, 전술한 구조의 구동모듈(100)에 대하여, 이를 제어하기 위한 제어모듈(200)은 전달토크 최대화를 위한 최적화 알고리즘이 적용될 수 있다.

[0063] 이를 위한 구성으로서, 제어모듈(200)은 동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하고, 한 쌍의 엔코더 센서(160)로부터 측정된 내측 회전자(110) 및 외측 회전자(120) 각각에 대한 제1 및 제2 회전각에 따라 현재 전기적 차이각을 계산하고, 현재 전기적 차이각이 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 제1 회전각을 조정하는 제어기(210) 및, 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하고, 오차값을 이용하여 구동모듈의 제어신호를 보상하여 모터의 출력을 선형화하는 외란 관측기(220)를 포함할 수 있다.

[0064] 동축 자석기어의 동력전달에 핵심이 되는 자기 커플링은 설계 단계에서 내, 외측의 자석 수, 자석의 두께 및 폴 피스의 두께 등 다양한 요인에 의해 그 특징이 변화할 수 있다. 본 발명의 실시예에 따른 제어모듈(200)은 자기 커플링의 전달 토크를 최대화하기 위해, 설계시 6가지 설계 변수의 설정을 통해 시뮬레이션 상에서 변수들을 유전 진화 알고리즘에 따라 바뀌가며 토크 시뮬레이션 값이 최대가 되도록 설정되었다.

[0065] 도 4를 참조하면, 자기 커플링에 의해 전달되는 토크 변화에 대하여 2D 유한요소를 이용한 자기 해석방법(2D finite element method(FEM) magnetics)에 따른 신호 파형(a) 및, 2D FEM과 테스트 결과를 비교한 신호 파형(b)을 예시하고 있다.

[0066] 도 4에 나타난 바와 같이, 동축 자석기어의 자기 커플링에 따른 출력 토크(τ)는 입, 출력의 전기적 차이각(electrical deflection angle; θ_e)의 변화에 따라 사인과 형태를 띄는 것을 알 수 있으며, 이때 전기적 차이각(θ_e)과 이에 따른 구동모듈의 출력단에서 측정되는 토크는 이하의 수학식 2로 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$\tau = \tau_g \sin \theta_e$$

[0067]

$$\theta_e = p_i \theta_m - N \theta_l$$

[0068]

[0070] 이때, τ_g 는 측정되는 토크 사인파의 최대값, p_i , N 은 자석 기어 내측 로터를 이루는 자석의 폴 페어(pole pair)의 개수 및, 폴 피스 홀더에 삽입된 폴 피스(pole piece)의 개수를 가리킨다.

[0071] 그리고, 내측 및 외측 회전각(θ_m , θ_l)은 각각 입력축과 출력축의 물리적 회전각도이며, 전술한 2개의 회전 엔코더 센서(160)로 각각 측정될 수 있다. 이때, 전기적 차이각(θ_e)과 토크(τ)사이의 관계는 비선형 스프링의 스프링 힘과 변위 사이의 관계와 유사한 특성을 가진다. 이 특성을 이용하면 추가적인 센서를 사용하지 않고서

도, 전기적 차이각(θ_e) 정보만을 이용하여 구동 모델의 출력 토크를 예측할 수 있다.

[0072] 본 발명은 전기적 차이각(θ_e)을 제어하여 구동모듈(100)의 출력단 토크(τ)를 별도의 토크 센서 없이 (sensorless) 간접적으로 제어할 수 있는 것을 특징으로 한다.

[0073] 도 4에 나타난 바와 같이, 출력 토크(τ)는 자기 커플링에 의해 전기적 차이각(θ_e)과 사인함수의 관계를 가지므로, 전기적 차이각(θ_e)이 작은 범위에서는 τ 와 θ_e 의 관계를 이하의 수학적 식 3과 같이 선형으로 근사할 수 있다.

수학적 식 3

[0074]
$$\tau = \tau_g \sin(\theta_e) \approx \tau_g \theta_e$$

[0076] 이를 이용하면 시스템의 토크 제어 문제를 토크값에 선형적으로 대응하는 전기적 차이각을 제어하는 위치 제어 문제로 바꿀 수 있다.

[0077] 즉, 본 발명의 제어기(210)는, 매시간 원하는 토크(τ)를 얻기 위해 이에 대응하는 차이각(θ_e)을 계산하고, 계산된 목표 차이각(θ_e)을 만족시키도록 θ_m 과 θ_1 를 제어한다. 본 발명의 실시예에 따르면, 주어진 θ_1 에 따라 계산된 θ_m 를 만족하도록 모터를 회전시켜 θ_m 를 제어하는 방법을 사용할 수 있다.

[0078] 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB; 220))는 모터와 같은 물리적 시스템에 대한 명목모델을 활용하여 시스템 출력에 포함되는 외란 성분을 추정할 수 있으며, 이를 위한 구성으로서 인버스 명목 플랜트 모델($P_n^{-1}(s)$) 및 Q필터($Q(s)$)를 포함할 수 있다.

[0079] 본 발명의 실시예에서는 일반적인 선형 제어기에 동축 자석기어를 선형 모델로 근사한 명목 플랜트 모델(nominal plant model)을 사용하는 외란 관측기(disturbance observer; DOB)를 추가하여, 동축 자석기어의 이러한 비선형 특징을 제어적으로 선형화하여 토크 제어 성능을 높일 수 있는 제어 알고리즘을 구현할 수 있으며, 인버스 명목 플랜트 모델($P_n^{-1}(s)$)은 구동모듈의 출력에 대한 명목모델의 역함수를 곱하여 외란을 추정하고, Q필터($Q(s)$)는 인버스 명목 플랜트 모델의 역함수를 실제 전달함수로 변환하여 오차값을 예측하고, 오차값을 피드백하여 모터의 제어신호를 보상할 수 있다. 이러한 외란 관측기에 대한 상세한 설명은 후술한다.

[0080] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈은 폴 슬립에 대한 대응 방법을 더 포함할 수 있다.

[0081] 폴 슬립(Pole-Slip)은 전기적 차이각(θ_e)이 주기를 벗어나는 현상을 가리킨다. 이러한 현상은 하드웨어의 안정성을 보장하는 한편, 자석기어의 제어를 어렵게 만드는 요인 중 하나이다.

[0082] 이에, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈에서는 외부 충격에 의한 폴 슬립은 허용하되, 폴 슬립 이후에도 안정적인 제어가 가능하도록 (θ_{e_ref})는 선형 구간 안에 있도록 포화 함수를 통해 제한하고, ' θ_e '가 주기를 벗어날 때마다 이를 보상하는 알고리즘을 적용되는 것을 특징으로 한다.

[0083] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템을 상세히 설명한다.

[0084] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 모터 모델을 나타낸 도면이고, 도 6은 도 5의 구동모듈을 포함하는 제어 시스템의 구조를 나타낸 도면이다.

[0085] 도 5 및 도 6을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈은 자기 스프링의 비선형성과 3D 프린팅된 베어링의 마찰에 대응하는 다수의 비선형 요소를 갖는 모터모델로 표현될 수 있다.

[0086] 이러한 비선형 요소를 제거하기 위해, 본 발명의 제어 시스템은 명목 플랜트를 기준으로 이득을 얻는 비례 PID 제어기($C(s)$)를 포함할 수 있다.

- [0087] PID 제어는 비례 동작(Proportional Action; P), 적분 동작(Integral Action; I), 미분 동작(Derivative Action; D) 등 3가지 동작을 사용할 수 있으며, 비례 동작은 기준 입력과 출력 결과의 오차에 비례해서 제어하는 방법이다.
- [0088] P 제어를 유연하게 사용자가 원하는 목표값, 즉 각 모터의 목표 회전각 또는 회전 위치에 접근시킬 수 있다. 이 경우 미세한 오차를 없애기 위해 적분 동작인 I 제어가 적용될 수 있으며, 적분 동작은 미세한 오차들을 누적하다 일정한 값을 넘어서게 되면 제어를 시작하게 된다.
- [0089] 이 과정에서 비례 동작과 적분 동작의 조합으로 이루어진 PI 제어를 수행하게 되는데, 응답속도를 제어할 수 없는 점을 감안하여 오차 시간을 미분한 값에 비례하여 이루어지는 미분 동작을 추가하여 D 제어가 이루어질 수 있다. 따라서, PID 제어기{C(s)}를 통해서 시스템의 안정성을 높이고 응답 속도를 빠르게 구현할 수 있다.
- [0090] 또한, 동축 자석기어는 큰 비선형성이라는 내제적인 문제를 가지고 있으므로, 토크 제어의 성능이 낮아질 수 있다. 이는 리플(ripple)과 같은 동축 자석기어의 내제적인 물리적인 특징과 외부로부터 시스템에 가해지는 마찰 등의 외란에 기인한다고 할 수 있다.
- [0091] 본 발명에서는 일반적인 선형 제어기에 동축 자석기어를 선형 모델로 근사한 명목 플랜트 모델을 사용하는 외란 관측기(DOB)를 포함할 수 있다. 자기 커플링을 선형 관계로 가정하면, 제어 시스템은 동축 자석기어의 입력축과 동축 자석기어의 출력축이 이상적인 기어와 스프링을 통해 연결된 동역학적 모델로 나타낼 수 있으며, 이를 외란 관측기에서 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델로 사용할 수 있다.
- [0092] 외란 관측기는 전술한 선형 명목 플랜트 모델을 이용하여 실제 동축 자석기어의 비선형 모델과 선형화된 모델 간의 오차값을 예측하며, 이 값을 제어 입력의 형태로 보상함으로써 시스템이 이상적인 명목 플랜트 모델처럼 만들어준다. 최종적으로, 외란관측기를 이용해 동축 자석기어의 거동을 선형화 할 수 있으므로 기존 선형 제어기 기반의 토크 제어 성능을 향상할 수 있다.
- [0093] 도 5를 참조하면, 본 발명의 시스템을 토크 제어 알고리즘의 블록 다이어그램으로 나타낸 것으로, 부하 축의 관성은 무한대, 즉, ' $J_l = \Delta$ ', ' $\theta_l = \dot{\theta}_l = 0$ '으로 가정하여 토크를 단순화하고, 컨트롤러 설계 및 부하 축이 지면에 접촉하는 상황을 재현할 수 있다. 여기서, 지면과 접촉하여 명목 플랜트(Pn)은 이하의 수학적 식 4와 같이 나타낼 수 있다.

수학적 식 4

[0094]
$$P_n = \frac{\theta_s}{\tau_m} = \frac{p_i}{J_m s^2 + B_m s + K_{fpi}/G}$$

- [0096] 여기서, τ_m 은 토크이고, J_m 및 B_m 은 각각 모터 축 회전 관성 및 감쇠계수이고, K_f 는 선형화된 자석 스프링 강성이고, G 는 입력 및 출력 사이에 특정 전송 비율이다. 그러나, 자석기어는 자기 스프링의 비선형 특성 및 커스터마이징된 3D 프린팅 베어링 마찰 등과 같은 여러 비선형 성분을 포함하고 있어, 명목 모델과 실제 플랜트 사이에 불일치가 발생할 수 있다.
- [0097] 또한, 센서 측정시 신호 노이즈가 발생하며, 이러한 비선형 요소와 측정 노이즈는 각각 ' d ', ' n_1 ' ' n_2 ', ' n_3 '으로 표현할 수 있다. 아울러, 실제 플랜트를 명목화하고 교란 및 노이즈를 감쇠하기 위해, Q필터{Q(s)} 접근 방식을 사용하는 외란 관측기(DOB) 루프가 적용될 수 있고, 그 추정치는 ' $\hat{d}$ '로 표현할 수 있다.
- [0098] 이러한 루프의 출력은 이하의 수학적 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

수학적 식 5

[0099]
$$\theta_s = \frac{PP_n}{P_n(1-Q) + PQ}u + \frac{PP_n(1-Q)}{P_n(1-Q) + PQ}d + \frac{-PQ}{P_n(1-Q) + PQ}n_3$$

[0101] 여기서, P 는 실제 플랜트이고, P_n 은 시스템의 명목 플랜트이고, u 는 컨트롤러 출력으로서, ' $C_{ff} \Theta_{e_ref} + C(C_{e_ref} - \Theta_e)$ '를 가리킨다.

[0102] 전술한 바와 같이, 인버스 명목 플랜트 모델은, 평균값을 입력받고 모터에 대한 명목 모델의 역함수로 정의되어 외란 성분을 제거할 수 있다.

[0103] 외란은 모터에 존재하는 외부 부하, 마찰력 등으로 정의할 수 있고, 외란이 작용한 모터로부터 출력에 대하여 그 역의 명목 모델의 역함수를 곱하면 모터에 대한 입력 성분 및 외란 성분을 산출할 수 있다. 여기서, 모터에 대한 입력성분을 제거하면 외란을 관측할 수 있고 제거가 가능하게 된다.

[0104] Q 필터($Q(s)$)는 인버스 명목 플랜트 모델의 역함수를 실제 전달함수로 변환할 수 있다. 전술한 명목 모델의 역함수는 분자의 차수가 분모의 차수보다 크기하기 때문에 미래 값이 요구된다. 이에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 제어모듈은 명목 모델의 역함수를 전달함수로 바꾸기 위한 수단으로서, Q 필터($Q(s)$)를 포함할 수 있다. 이러한 Q 필터($Q(s)$)는 외란성분(d)을 추정하여 피드백하는 LPF(Low Pass Filter)로 구현할 수 있으며, 이를 통해 제어 시스템은 자석기어의 비선형성이 제거되어 명목 선형 플랜트로 동작하게 된다.

[0105] 이러한, Q 필터에 의해 상기 수학식 5의 변수는 아래의 수학식 6을 만족한다.

수학식 6

[0106] $\theta_s = P_n u - n_3 \quad \text{where } Q(s) \approx 1$

[0107] $\theta_s = Pu + Pd \quad \text{where } Q(s) \approx 0$

[0109] 상기의 수학식 6에 따르면, 외란 관측기(DOB)는 자석기어에 내재된 비선형성을 제거하고($Q \approx 1$), 신호 잡음을 감소시켜($Q \approx 0$), 시스템이 획득된 명목 선형 플랜트와 같이 작동하도록 한다.

[0110] 이러한 외란 관측기(DOB)의 성능은 주로 안정적인 저역 통과 필터인 Q 필터에 의해 결정되며, Q 필터 설계에는 시스템 대역폭, 안정성, 및 명목 플랜트 등의 많은 요소가 고려될 수 있고, 본 발명에서는 3차 저역 통과 버터워스 필터가 컷오프가 있는 Q 필터로 사용될 수 있다.

[0111] 그리고, 시스템이 DOB에 의해 명목화되면 피드백 컨트롤러를 구현할 수 있다.

[0112] 피드백을 위해 비례 미분(PD) 컨트롤러(C)가 채택될 수 있고, 컨트롤러 이득은 명목 플랜트에 대해 주어질 수 있다. 그러나, 시스템이 0형일 때, 즉 스텝 입력이 적용될 때 정상 상태 오류가 발생할 수 있으며, 이에 따른 추가 컨트롤러가 요구될 수 있다.

[0113] 이에, 본 발명의 실시예에서는, 적분 이득을 추가하는 대신 피드포워드 조건인 ' C_{ff} '를 도입하여 정상 상태 오류를 제거하고 폐쇄 루프의 대역폭을 증가시킬 수 있으며, 이는 레퍼런스를 더 빠르고 안정적으로 추적하는 효과가 있다.

[0114] 여기서, 정상 상태 상황($s \rightarrow 0$)을 고려하면 피드포워드 컨트롤러는 이하의 수학식 7과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 7

[0115] $\lim_{s \rightarrow 0} C_{ff}(s)P_n(s) = 1$

$$C_{ff} = K_f/G$$

[0116]

[0118] 여기서, ' C_{ff} '는 ' $P_n^{-1}Q$ '로 도출할 수 있다($s \neq 0$). 그러나, 이는 ' C_{ff} '의 복잡성이 증가함에 따라, 결과적으로 ' C_{ff} '로부터 제어 입력을 초과할 수 있어 시스템의 한계에 도달함에 따라 바람직하지 않은 응답을 만들 수 있다.

[0119] 이에 따라, 본 발명의 실시예에서는 컨트롤러를 더욱 단순하게 하고 의도하지 않은 응답을 피하기 위해 상수인 ' $C_{ff} = K_f/G$ '가 선택될 수 있다.

[0120] 그리고, 단위 스텝 입력으로 인한 정상 상태에서 발생하는 오차(ess)는 이하의 수학적 식 8로 계산될 수 있다.

수학적 식 8

[0121]

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 - C_{ff}(s)P_n(s)}{1 + C(s)P_n(s)} = 0$$

[0123] 또한, 폴 슬립(Pole-Slip)은 자석기어를 제어하기 어렵게 만드는 것으로, 기어를 제어하기 어렵게 하나, 하드웨어 안전도 보장하게 된다. 이러한 폴 슬립은 제어 입력과 외부 충격의 합이 시스템의 최대 전달 가능한 토크를 초과할 때 발생할 수 있다.

[0124] 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 발명의 실시예에서는 두 가지 솔루션이 적용될 수 있다. 첫번째, 기준 전기적 차이각, 즉 ' θ_{e_ref} '을 -80° 내지 80° 범위 내로 제어하고, 두번째, 전기적 차이각 즉, ' θ_e '을 폴 슬립 후 토크를 제어하도록 ' -180° 내지 180° ' 범위 내에서 수정할 수 있다.

[0125] 수정된 전기적 차이각은 이하의 수학적 식 9에 따라 계산될 수 있다.

수학적 식 9

[0126]

$$\theta_{e_mod} = \begin{cases} \theta_e & \text{no pole - slip} \\ \theta_e - 2n\pi & \text{n times positive pole - slip} \\ \theta_e + 2n\pi & \text{n times negative pole - slip} \end{cases}$$

[0128] 예를 들어, 폴 슬립이 발생하면, 도 4에서 점 A가 점 B로 이동하게 되며, 이는 한번의 포지티브 폴 슬립으로 볼 수 있다. 이 경우, ' θ_{e_mod} '는 ' $\theta_e - 2\pi$ '로 계산 및 보정될 수 있다.

[0129] 그리고, θ_{e_mod} 는 특수한 경우임에 따라 오직 실제 컨트롤러 구현에만 사용될 수 있다. 본 발명의 실시예에서는 일반성을 위해 ' θ_e '가 사용되는 경우를 예시하고 있다.

[0130] 전술한 구조에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 제어모듈(200), 제어기(210)를 통해 모터 시스템의 현재 상태의 전기적 차이각(θ_e)을 제어하여 토크 센서 없이 토크 제어가 가능한 제어 알고리즘을 제공함과 아울러, 외란 관측기(220)를 통한 동축 자석기어 비선형성의 선형화를 통해 출력 토크를 최적화할 수 있다.

[0131] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법을 설명한다.

[0132] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법을 순서도로 나타낸 도면이다. 이하의 설명에서 각 단계별 실행주체는 별도의 기재가 없더라도 전술한 본 발명의 제어모듈 및 그 구성부가 된다.

- [0133] 도 7를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법은, 모터 및 그 모터와 기계적으로 결합되는 복수의 회전자를 갖는 구조체를 포함하는 동축 자석기어 기반 구동모듈을 제어하는 방법으로서, 동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하는 단계(S100), 구동모듈에 탑재된 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전자각을 입력받아 현재 전기적 차이각을 계산하는 단계(S110), 현재 전기적 차이각이 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 상기 제1 회전자각을 조정하는 단계(S120), 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형화된 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하는 단계(S200) 및, 오차값을 이용하여 구동모듈의 제어신호를 보상하여 모터의 출력을 선형화하는 단계(S210)를 포함할 수 있다.
- [0134] 먼저, 동축 자석기어의 목표 토크 값에 대응하는 목표 전기적 차이각을 계산하는 단계(S100)는, 전술한 바와 같이 구동모듈의 출력 토크(τ)가 자기 커플링에 의해 전기적 차이각(θ_e)과 사인함수의 관계를 가짐에 따라, 토크 제어 문제를 위치 제어 문제로 전환하여 출력 토크(τ)를 토크 센서없이 간접적으로 제어하기 위한 알고리즘으로서, 매시간 원하는 목표 토크(τ)를 얻기 위한 목표 전기적 차이각(θ_e)을 산출하는 단계이다.
- [0135] 다음으로, 구동모듈에 탑재된 한 쌍의 엔코더 센서로부터 측정된 내측 회전자 및 외측 회전자 각각에 대한 제1 및 제2 회전자각을 입력받아 현재 전기적 차이각을 계산하는 단계(S110)에서는, 구동모듈에 설치된 내측 회전자 및 내측 회전자 각각에 대응하여 설치되는 한 쌍의 엔코더 센서를 통해 현재 제1 및 제2 회전자각을 검출하고, 검출 결과를 이용하여 전기적 차이각(θ_e')을 산출하게 된다.
- [0136] 그리고, 현재 전기적 차이각이 목표 전기적 차이각을 수렴하도록 제1 회전자각을 조정하는 단계(S120)에서는, S110 단계에서 산출한 전기적 차이각(θ_e')이 목표 전기적 차이각(θ_e)이 되도록 주어지는 회전자각(θ_1)을 고정하고, 모터를 제어하여 내측 회전자의 회전자각(θ_m)을 조절함으로써 토크(τ)를 조절하게 된다.
- [0137] 또한, S120 단계 이후, 본 발명의 제어 모듈은 외관 관측기를 이용하여 토크 성능을 향상시키는 과정을 수행할 수 있다.
- [0138] 이러한 보상 단계로서, 동축 자석기어의 선형화된 명목 플랜트 모델과 실제 동축 자석기어의 비선형화된 플랜트 모델을 비교하여 오차값을 예측하는 단계(S200)에서는, 외관 관측기를 이용하여 모터로부터 검출되는 신호에 대한 선형 명목 플랜트 모델을 이용하여 실제 동축 자석기어의 비선형 모델과 선형화된 모델 간의 오차값을 예측하게 된다.
- [0139] 다음으로, 오차값을 이용하여 구동모듈의 제어신호를 보상하여 모터의 출력을 선형화하는 단계(S210)에서는, 입력되는 모터 제어신호에 대하여 Q필터를 통해 비선형 모델과 선형화된 모델 간의 예측된 오차값을 보상함으로써, 모터의 구동을 선형화하게 된다.
- [0140] 이하, 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 시스템에 대한 테스트 결과의 일례를 통해 본 발명의 기술적 사상을 상세히 설명한다.
- [0141] 도 8 및 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 동축 자석기어 기반 구동모듈의 제어 방법의 테스트에 따른 신호 파형도를 나타낸 도면이다.
- [0142] 도 8을 참조하면, 본 발명에서 제안하는 토크 제어 알고리즘을 구동 모듈에 적용하여 검증한 것으로, 사각파 형태의 목표 전기적 차이각을 인가하여 시스템의 거동을 비교하였으며, 도 8에 나타낸 바와 같이, 제안한 알고리즘이 기존 PID 제어기에 비해 더 빠른 응답속도와 원하는 과도 응답을 보임을 확인할 수 있다(a, b). 또한, 측정된 토크와 전기적 차이각에 의해 예측된 차이가 매우 유사함을 확인할 수 있다(b).
- [0143] 또한, 도 9에 나타난 바와 같이, 사인파 형태의 출력축의 물리적 각도를 추종하여 제어한다고 할 때, 외부 충격에 의한 거동을 분석하면, 'D' 지점에서 외부 물체와의 충돌로 인하여 폴 슬립이 발생하며(a), 물체가 없어진 이후에는 안정적으로 제어됨을 확인할 수 있다(b, c).
- [0144] 특히, 도 9에 따르면, 전기적 차이각은 ' 2π ' 만큼 벌어짐을 확인할 수 있으며(d), 이는 폴 슬립에 의한 하드웨어 안정성이 보장됨을 나타내고 있다.
- [0145] 따라서, 본 발명의 실시예에 따른 제어 시스템은, 동축 자석기어의 자기 커플링을 이용해 추가적인 힘, 토크 센서 없이도 출력단의 토크를 제어할 수 있다. 특히, 본 발명에서 비접촉 동력전달은 기존 기계 접촉식 동력전달 메커니즘에 비해 안정성과 효율성을 높일 수 있는 것이 장점이며, 기존 동축 자석기어를 모듈화함에 따라, 중,

소형 로봇에 쉽게 적용, 설치할 수 있다.

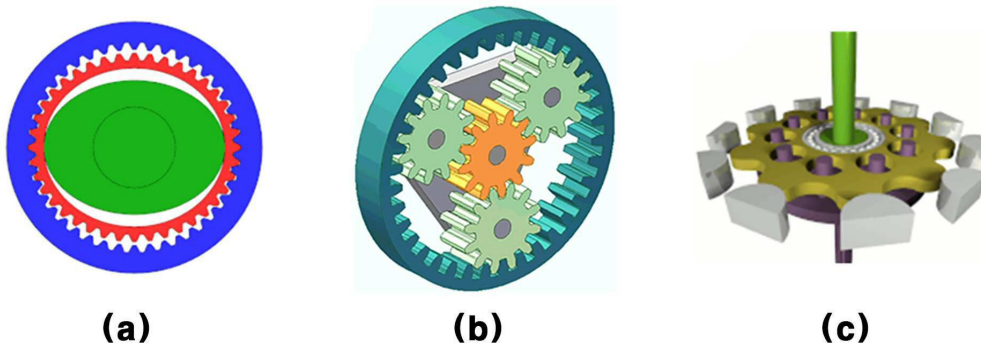
[0146] 상기한 설명에 많은 사항이 구체적으로 기재되어 있으나 이것은 발명의 범위를 한정하는 것이라기보다 바람직한 실시예의 예시로서 해석되어야 한다. 따라서, 발명은 설명된 실시예에 의하여 정할 것이 아니고 특허청구범위와 특허청구범위에 균등한 것에 의하여 정하여져야 한다.

부호의 설명

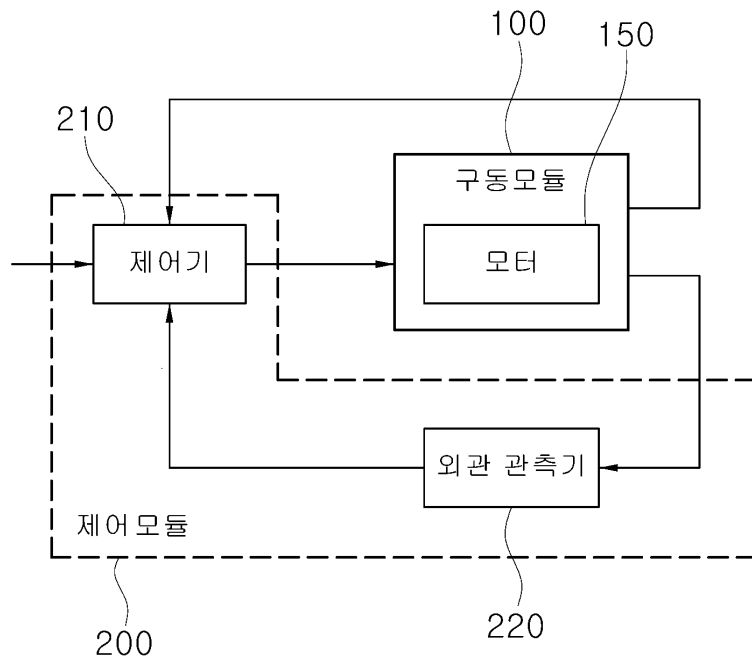
[0147] 100 : 동측 자석기어 기반 구동모듈 110 : 내측 회전자
115 : 내측 베어링 120 : 외측 회전자
131 : 폴 피스 136 : 외측 베어링
136 : 베어링 케이지 140 : 하우징
150 : 모터 160 : 엔코더 센서
161 : 후면판 200 : 제어 시스템
210 : 제어기 220 : 외관 관측기

도면

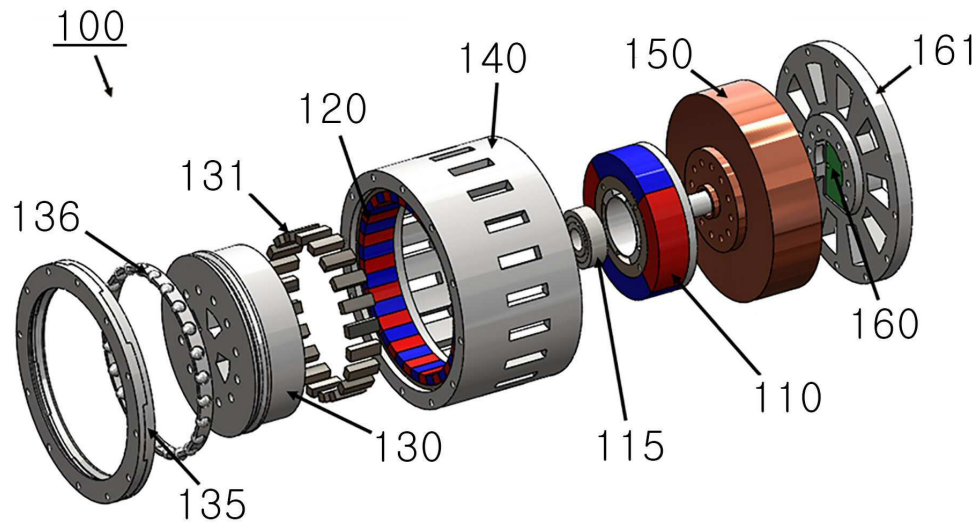
도면1



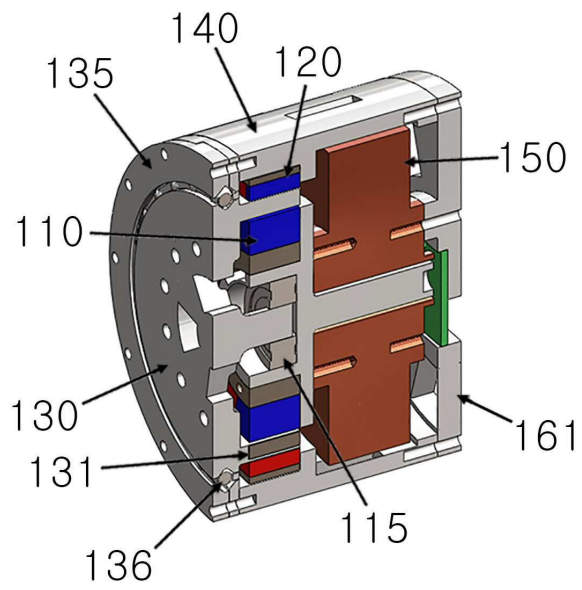
도면2



도면3

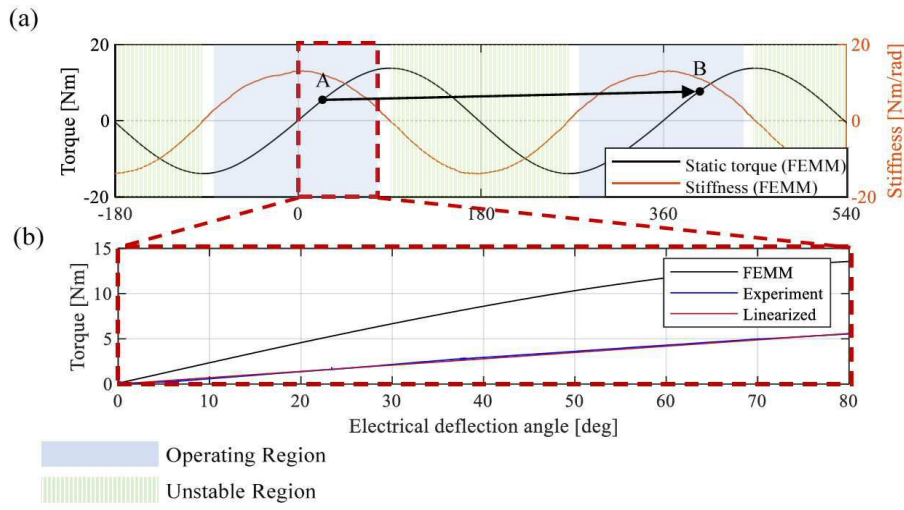


(a)

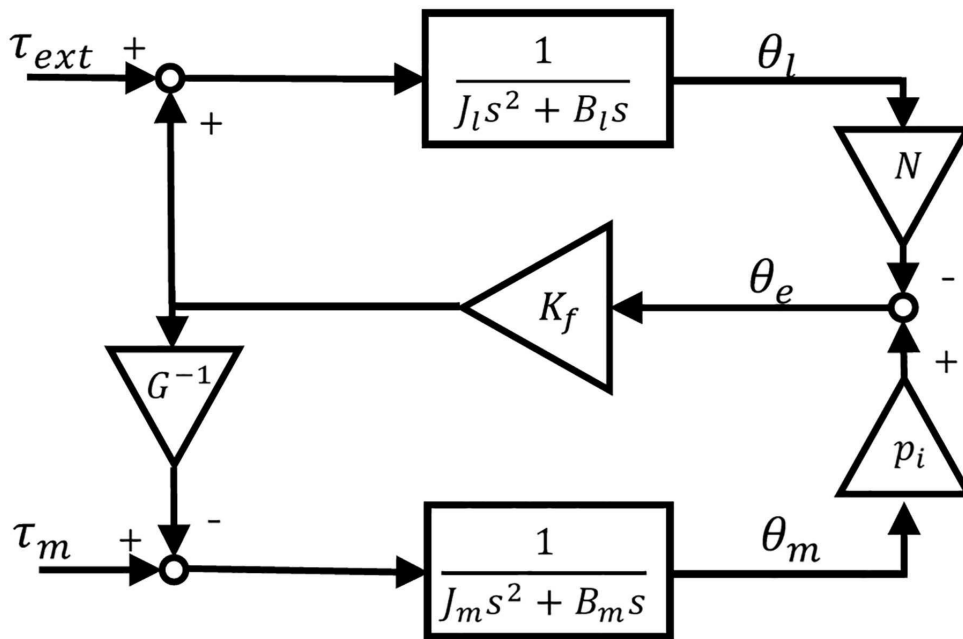


(b)

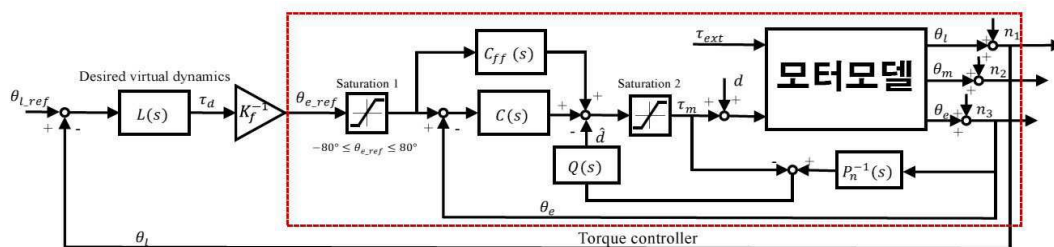
도면4



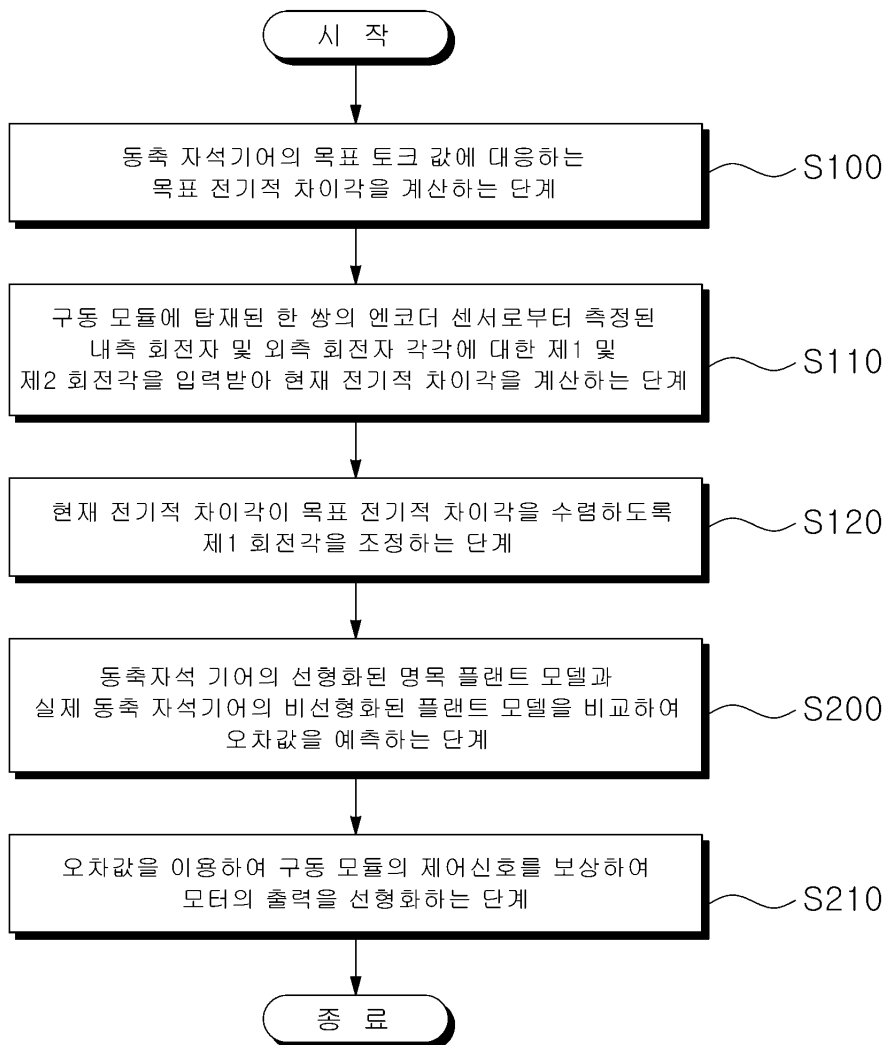
도면5



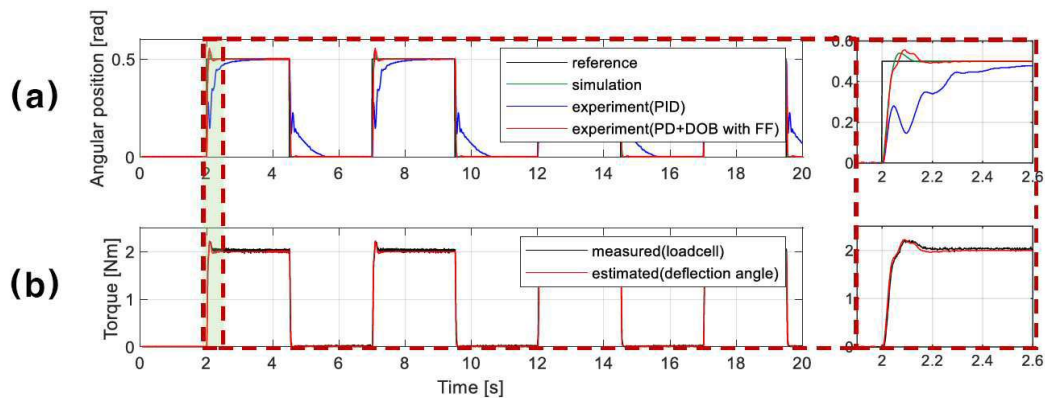
도면6



도면7



도면8



도면9

