(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0141246
(43) 공개일자 2015년12월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B25J 9/16 (2006.01) *B25J 19/02* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0069386
(22) 출원일자 2014년06월09일
심사청구일자 2014년06월09일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
송재복
서울특별시 강남구 언주로30길 56 삼성타워팰리스 B동 2907호
이상덕
서울 성북구 안암로 145, 기계공학부 창의관 706호 (안암동5가, 고려대학교)
(74) 대리인
홍동우

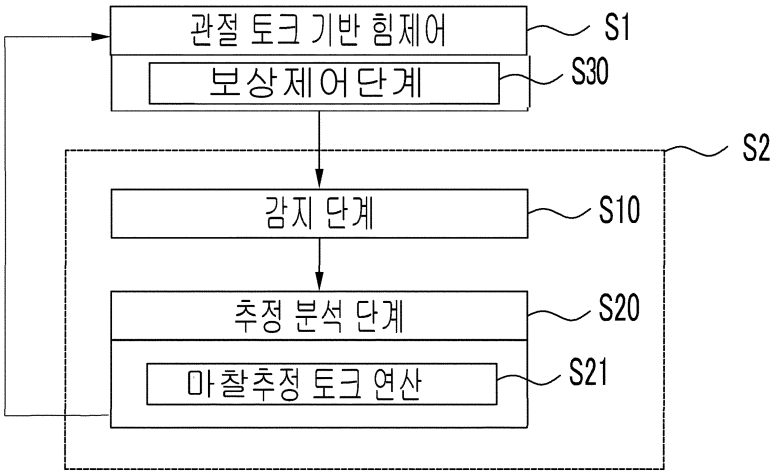
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 **로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법**

(57) 요 약

본 발명은, 구동 모터를 통하여 가동되는 관절부를 구비하는 로봇 머니퓰레이터의 제어부의 감지 제어 신호에 따라 감지부가 상기 관절부의 회전각을 포함하는 감지 관절 정보를 취득하고, 상기 구동 모터에 인가되는 모터 전류가 취득되어 상기 제어부로 전달되는 감지 단계와, 상기 감지 단계에서 취득된 상기 감지 관절 정보, 모터 전류 및 상기 제어부와 연결되는 저장부에 사전 설정 저장된 추정 데이터에 기초하여 상기 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정 산출하는 추정 분석 단계를 포함하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법 및 로봇 머니퓰레이터를 제공한다.

대 표 도 - 도4



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2007-0056094
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 이공학분야기초(신진연구센터지원사업)
연구과제명 인간-제품 햅틱 시뮬레이션 기술
기 여 율 1/1
주관기관 고려대학교
연구기간 2014.03.01 ~ 2015.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

구동 모터를 통하여 가동되는 관절부를 구비하는 로봇 머니퓰레이터의 제어부의 감지 제어 신호에 따라 감지부가 상기 관절부의 회전각을 포함하는 감지 관절 정보를 취득하고, 상기 구동 모터에 인가되는 모터 전류가 취득되어 상기 제어부로 전달되는 감지 단계와,

상기 감지 단계에서 취득된 상기 감지 관절 정보, 모터 전류 및 상기 제어부와 연결되는 저장부에 사전 설정 저장된 추정 데이터에 기초하여 상기 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정 산출하는 추정 분석 단계를 포함하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 추정 분석 단계는:

상기 감지 토크 정보와 상기 모터 전류와 상기 추정 데이터에 기초하여 상기 제어부의 추정 제어 신호에 따라 관측기에서 마찰 추정 토크가 연산되는 마찰 추정 토크 연산 단계를 포함하고,

상기 마찰 추정 토크 연산 단계는, 상기 관측기에 저역 통과 필터가 구비되고, 상기 저역 통과 필터를 통한 저역 통과 필터링되어 상가 마찰 추정 토크가 산출되는 것을 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 저역 통과 필터링 단계를 통하여 산출되는 상기 마찰 토크는,

$$\hat{\tau}_f(t)=K\left[\int_0^t (r\tau_m+C^T\dot{q}-g-\hat{\tau}_f)dt - M\dot{q}\right]$$

로 표현되고,

상기 구동 모터의 출력 토크는 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되고,

여기서, t는 시간을 나타내는 시간 변수이고, τ_m은 상기 구동 모터의 출력토크, r (>1)는 상기 감속기의 감속비, M은 상기 로봇 머니퓰레이터의 관성행렬, C^T는 상기 로봇 머니퓰레이터의 코리올리력 및 원심력를 포함하는 비선형 항을 나타내는 행렬(C)의 트랜스포즈, $\dot{q}$는 상기 로봇 머니퓰레이터의 상기 관절부에 대한 속도 벡터, 변위 벡터, g는 중력벡터인 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 제어부의 제어기가 상기 마찰 추정 토크를 이용하여 상기 관절부에 상기 출력 토크를 보상하도록 상기 구동 모터를 제어하는 보상 제어 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법.

청구항 5

관절부의 제어 동작을 이루는 로봇 머니퓰레이터로서,

상기 관절부를 가동시키기 위한 출력 토크를 형성하고 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되는 구동 모터와,

상기 구동 모터에 구동 제어 신호인 모터 전류 신호를 인가하는 제어기를 구비하는 제어부와,

상기 제어부의 감지 제어 신호에 따라 상기 관절부의 회전각을 감지하는 관절 위치 측정부를 포함하고 상기 제어부에 감지 관절 정보를 제공하는 감지부와,

상기 감지부에서 취득된 상기 감지 관절 정보, 상기 구동 모터에 인가되는 모터 전류 신호의 모터 전류 및 사전 설정 저장된 추정 데이터를 저장하는 저장부와,

상기 제어부의 연산 제어 신호에 따라 소정의 연산 과정을 실행하는 연산부를 구비하고,

상기 제어부는, 상기 감지 관절 정보, 모터 전류 및 상기 사전 설정 저장된 추정 데이터에 기초하여 상기 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정 산출하는 관측기를 구비하는 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터.

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 관측기가 산출하는 상기 마찰 토크는:

$$\widehat{\tau_f}(t)=K\left[\int_0^t (r\tau_m+C^T\dot{q}-g-\widehat{\tau_f})dt - M\dot{q}\right]$$

로 표현되고,

상기 구동 모터의 출력 토크는 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되고,

여기서, t는 시간을 나타내는 시간 변수이고, τ_m은 상기 구동 모터의 출력토크, r (>1)는 상기 감속기의 감속비, M은 상기 로봇 머니퓰레이터의 관성행렬, C^T는 상기 로봇 머니퓰레이터의 코리올리력 및 원심력를 포함하는 비선형 항을 나타내는 행렬(C)의 트랜스포즈, $\dot{q}$는 상기 로봇 머니퓰레이터의 상기 관절부에 대한 속도 벡터, 변위 벡터, g는 중력벡터인 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 제어기가 상기 마찰 추정 토크를 이용하여 상기 관절부에서의 상기 출력 토크를 보상하도록 상기 구동 모터를 제어하도록 상기 구동 모터에 보상 제어 신호를 인가하여 보상하는 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 로봇 머니퓰레이터의 각 관절에서 발생하는 마찰력을 추정하는 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 가속도 센서, 힘/토크 센서와 같은 추가적인 센서의 사용 없이 로봇에 기본적으로 내장되어 있는 모터와 엔코더만을 이용하여 로봇 관절에서 발생하는 마찰력에 의한 마찰 토크를 산출할 수 있는 로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 로봇 머니퓰레이터의 관절에서 발생하는 마찰력은 로봇의 위치 및 속도 오차, 응답성능 저하, stick-slip 운동 등과 같은 비선형 마찰현상을 야기하여 로봇의 정밀 제어 및 관절토크 기반 제어의 성능을 저하하는 주요 원인이다.

[0003] 마찰현상으로 인한 로봇의 제어성능 저하를 로봇의 관절 마찰력을 예측하여 적절히 보상함으로써 개선할 수 있으며, 이러한 기술을 로봇 머니퓰레이터의 마찰 보상 기술이라 한다.

[0004] 로봇의 관절에서 발생하는 마찰력을 예측하기 위해서는 마찰력의 수학적 모델을 구성해야 하며, 마찰력의 수학적 모델을 구성하기 위해서는 마찰력을 추정하는 과정이 반드시 필요하다.

[0005] 로봇 머니퓰레이터의 관절에 작용하는 마찰력을 산출하는 방법은 크게 두 가지 방법으로 구분할 수 있다.

[0006] 첫째는 힘/토크 센서를 이용하여 직접적으로 로봇의 관절 마찰력을 측정하는 방법이고, 둘째는 로봇의 동역학 수식과 관측기를 바탕으로 간접적으로 로봇의 관절 마찰력을 추정하는 방법이다.

[0007] 센서 기반의 마찰력 측정 방법은 힘/토크 센서 등을 이용하여 로봇 관절에 내장된 모터에서 출력되어 관절로 인가된 힘과 토크를 측정하고, 로봇 링크에 작용한 힘과 토크를 측정함으로써 모터에서 출력된 힘과 토크 중 관절 마찰로 손실되어 로봇의 링크로 전달되지 않은 힘과 토크를 산출하는 방법이다. 센서 기반의 마찰력 측정 방법은 비선형적인 특성이 강한 로봇의 관절 마찰력을 정확하게 산출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 방법은 힘/토크 센서와 같은 고가의 센서가 필요하므로 경제적이지 못하며, 산업현장에서 사용되는 대부분의 로봇에는 힘/토크 센서가 장착되어 있지 않아 센서의 설치를 위한 추가적인 기구부의 장착 또는 설계의 변경을 수반하므로 실용적이지 못하다.

[0008] 또한, 관측기 기반의 마찰력 추정 방법은 로봇 관절의 위치, 속도, 가속도 등과 같이 로봇의 상태를 나타낼 수 있는 지표들과 로봇의 동역학 수식을 활용하여 관절 마찰력의 관측기를 설계하고, 설계된 관측기를 이용하여 마찰 토크를 간접적으로 추정하는 방법이다.

[0009] 관측기 기반의 마찰력 추정 방법은 힘/토크 센서의 설치와 로봇의 설계 변경을 수행하지 않고 마찰력을 산출할 수 있으므로 매우 경제적이나 마찰력 추정을 위한 관측기의 설계 과정에서 비선형적인 마찰현상의 선형화 및 단순화가 필요하므로 매우 제한적인 조건에서만 가능하다는 한계가 수반된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 상기 문제점들을 해결하기 위한 것으로서, 추가적인 힘/토크 센서 및 로봇 관절의 가속도 정보를 사용하지 않고, 로봇 머니퓰레이터의 각 관절에서 발생하는 마찰력을 추정하는 방법 및 이를 수행하는 로봇 머니퓰레이터를 제공하는 것이다.

[0011] 따라서 로봇 머니퓰레이터의 동작의 구현을 위하여 기본적으로 로봇 머니퓰레이터에 내장되어 있는 모터와 엔코더만을 이용하여 로봇의 관절에서 발생하는 마찰력 및 마찰 토크를 추정할 수 있는 방법 및 이를 수행하는 로봇 머니퓰레이터를 제공한다.

[0012] 또한 마찰 현상의 선형화 및 단순화를 수행하지 않고, 마찰력을 추정할 수 있는 마찰력 관측기를 고안하여 로봇 머니퓰레이터의 급격한 상태 변화 및 비선형적인 마찰력의 발생 시에도 정확하게 마찰력에 의한 마찰 토크를 추정할 수 있도록 한다.

과제의 해결 수단

[0013] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명은, 구동 모터를 통하여 가동되는 관절부를 구비하는 로봇 머니퓰레이터의 제어부의 감지 제어 신호에 따라 감지부가 상기 관절부의 회전각을 포함하는 감지 관절 정보를 취득하고, 상기 구동 모터에 인가되는 모터 전류가 취득되어 상기 제어부로 전달되는 감지 단계와, 상기 감지 단계에서 취득된 상기 감지 관절 정보, 모터 전류 및 상기 제어부와 연결되는 저장부에 사전 설정 저장된 추정 데이터에 기초하여 상기 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정 산출하는 추정 분석 단계를 포함하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법을 제공한다.

[0014] 상기 로봇 머니퓰레이터 제어 방법에 있어서, 상기 추정 분석 단계는: 상기 감지 토크 정보와 상기 모터 전류와 상기 추정 데이터에 기초하여 상기 제어부의 추정 제어 신호에 따라 관측기에서 마찰 추정 토크가 연산되는 마찰 추정 토크 연산 단계를 포함하고, 상기 마찰 추정 토크 연산 단계는, 상기 관측기에 저역 통과 필터가 구비되고, 상기 저역 통과 필터를 통한 저역 통과 필터링되어 상가 마찰 추정 토크가 산출되는 것을 포함할 수도 있다.

[0015] 상기 로봇 머니퓰레이터 제어 방법에 있어서, 상기 저역 통과 필터링 단계를 통하여 산출되는 상기 마찰 토크는,

$$\hat{\tau}_f(t)=K\left[\int_0^t (r\tau_m+C^T\dot{q}-g-\hat{\tau}_f)dt-M\dot{q}\right]$$

[0016] 로 표현되고,

[0017] 상기 구동 모터의 출력 토크는 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되고, 여기서, t는 시간을 나타내는 시간 변수이고, τ_m은 상기 구동 모터의 출력토크, r (>1)는 상기 감속기의 감속비, M은 상기 로봇 머니퓰레이터의 관성행렬, C^T는 상기 로봇 머니퓰레이터의 코리올리력 및 원심력를 포함하는 비선형 항을 나타내는 행렬(C)의 트랜스포즈, $\dot{q}$는 상기 로봇 머니퓰레이터의 상기 관절부에 대한 속도 벡터, 변위 벡터, g는 중력벡터일 수도 있다.

[0018] 상기 로봇 머니퓰레이터 제어 방법에 있어서, 상기 제어부의 제어기가 상기 마찰 추정 토크를 이용하여 상기 관절부에 상기 출력 토크를 보상하도록 상기 구동 모터를 제어하는 보상 제어 단계를 포함할 수도 있다.

[0019] 본 발명의 다른 일면에 따르면, 관절부의 제어 동작을 이루는 로봇 머니퓰레이터로서, 상기 관절부를 가동시키기 위한 출력 토크를 형성하고 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되는 구동 모터와, 상기 구동 모터에 구동 제어 신호인 모터 전류 신호를 인가하는 제어기를 구비하는 제어부와, 상기 제어부의 감지 제어 신호에 따라 상기 관절부의 회전각을 감지하는 관절 위치 측정부를 포함하고 상기 제어부에 감지 관절 정보를 제공하는 감지부와, 상기 감지부에서 취득된 상기 감지 관절 정보, 상기 구동 모터에 인가되는 모터 전류 신호의 모터 전류 및 사전 설정 저장된 추정 데이터를 저장하는 저장부와, 상기 제어부의 연산 제어 신호에 따라 소정의 연산 과정을 실행하는 연산부를 구비하고, 상기 제어부는, 상기 감지 관절 정보, 모터 전류 및 상기 사전 설정 저장된 추정 데이터에 기초하여 상기 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정 산출하는 관측기를 구비하는 것을 특징으로 하는 로봇 머니퓰레이터를 제공한다.

[0020] 상기 로봇 머니퓰레이터에 있어서, 상기 관측기가 산출하는 상기 마찰 토크는:

$$\hat{\tau}_f(t)=K\left[\int_0^t (r\tau_m+C^T\dot{q}-g-\hat{\tau}_f)dt-M\dot{q}\right]$$

[0021] 로 표현되고,

[0022] 상기 구동 모터의 출력 토크는 감속기를 통하여 상기 관절부에 연결되고,

[0023] 여기서, t는 시간을 나타내는 시간 변수이고, τ_m은 상기 구동 모터의 출력토크, r (>1)는 상기 감속기의 감속비, M은 상기 로봇 머니퓰레이터의 관성행렬, C^T는 상기 로봇 머니퓰레이터의 코리올리력 및 원심력를 포함하는 비선형 항을 나타내는 행렬(C)의 트랜스포즈, $\dot{q}$는 상기 로봇 머니퓰레이터의 상기 관절부에 대한 속도 벡터, 변위 벡터, g는 중력벡터일 수도 있다.

[0024] 상기 로봇 머니퓰레이터에 있어서, 상기 제어기가 상기 마찰 추정 토크를 이용하여 상기 관절부에서의 상기 출력 토크를 보상하도록 상기 구동 모터를 제어하도록 상기 구동 모터에 보상 제어 신호를 인가하여 보상할 수도 있다.

발명의 효과

[0025] 상기한 바와 같은 구성을 갖는 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법은 다음과 같은 효과를 갖는다.

[0026] 첫째, 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법은, 추가적인 센서를 사용하지 않고, 기본적으로 로봇 머니퓰레이터에 내장되어 있는 구동 모터의 전류정보와 엔코더로 구현되는 감지부의 관절 위치 측정값만을 사용함으로써, 경제적으로 관절 마찰력을 추정할 수 있으며, 설계의 변경 및 추가적인 기구의 장착이 필요 없어 이미 산업현장에서 사용되고 있는 일반적인 로봇 머니퓰레이터에의 적용성이 상당히 수월하다.

[0027] 둘째, 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법은, 본 발명의 저역통과 필터 기반의 관측기를 사용하면 마찰 현상의 선형화 및 단순화를 수행하지 않고 로봇 머니퓰레이터의 관절에서 발생한 마찰력을 추정할 수 있어 복잡하고 비선형성이 강한 마찰력을 정확하게 추정 가능하여, 다양한 마찰력의 추정에 적용 가능하게 한다.

[0028] 셋째, 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법은, 로봇 머니퓰레이터 관절에서 발생하는 마찰을 추정하고, 추정된 마찰력의 마찰 추정 토크를 바탕으로 마찰을 보상함으로써 로봇의 정밀 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

[0029] 본 발명은 도면에 도시된 일실시예들을 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허 청구 범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1는 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법을 실행하는 로봇 머니퓰레이터의 개략적인 모식도이다.

도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 로봇 머니퓰레이터의 개략적인 블록 선도이다.

도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 로봇 머니퓰레이터의 개략적인 관절부의 구성도이다.

도 4는 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법의 개략적인 흐름도이다.

도 5 내지 도 7은 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법의 세부 단계에 대한 구성도 및 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 이하에서는 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법에 대하여 도면을 참조하여 설명하기로 한다.

[0032] 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법은 로봇 머니퓰레이터(10)의 관절부에서 형성되는 마찰토크(τ_f)를 관측기를 통한 추정 산출하는 것으로, 이를 통하여 추정 산출된 마찰토크(τ_f)를 이용하여 각 관절부에서의 힘 토크제어를 통한 입력된 작업 모드 수행 내지 충돌과 같은 비정상적인 외력에 의한 영향 발생 감지 및 대응 제어 등을 실행할 수 있다.

[0033] 본 발명의 로봇 머니퓰레이터(10)는 하나 이상의 관절부(100)를 구비하는데, 관절부(100)에는 가동을 위한 구동 모터(1)가 배치된다. 도 1에는 간략화된 로봇 머니퓰레이터(10)의 개략적인 상태도가 도시되고, 도 2에는 로봇 머니퓰레이터(10)의 관절부에서의 개략적인 구조도가 도시된다. 도 1에서 일축 로봇 머니퓰레이터를 도시하였으나, 본 발명은 이에 국한되지 않고 다축 로봇 머니퓰레이터에도 적용 가능하다.

[0034] 도 2에서 τ_m은 관절부에 대응하는 구동 모터에서 생성되는 모터 출력 토크를 나타내고, τ_j 는 각 관절부에서 구동 모터(1)에 연결되는 감속비(r)를 갖는 감속기(1b)를 거쳐 관절에서 출력되는 관절 출력 토크를 나타내고, τ_f는 각 관절부에서의 감속기(1b) 등의 기계적 요소에서 발생하는 관절부에 대한 마찰 토크를 나타낸다.

[0035] 본 발명의 로봇 머니퓰레이터 및 이의 제어 방법은 고가의 토크 센서 내지 가속도 센서를 배제하고 엔코더로서의 감지부의 관절 위치 측정부를 통하여 감지되는 회전각과 구동 모터에 인가되는 전류를 이용하여 각 관절부에서의 마찰 토크를 관측 추정 산출하는데, 이렇게 추정 산출된 마찰 토크(τ_f)는 로봇 머니퓰레이터(10)의 힘-토크 제어를 실행하는데 사용되거나, 로봇 머니퓰레이터(10)의 이상 작동 여부를 감지 대응하는데 사용되거나, 또는 관절에서의 로봇 머니퓰레이터(10)와 외부 환경, 예를 들어 작업자 내지 물체 등과의 충돌로 인하여 발생하여 로봇 머니퓰레이터(10)에 인가되는 비정상적인 외력에 의한 외력 토크를 감지하는데 사용될 수 있는 등 다양한 제어 용도로 사용될 수 있다.

[0036] 로봇 머니퓰레이터(10)는 제어부(20)와 저장부(30)를 구비하고, 제어부(20)와 연결되는 연산부(40)를 구비할 수 있다. 입력부(60)를 통하여 작업자에 의한 입력 정보 제공도 가능한데, 입력부(60)는 별도의 통신부(50)를 통하여 제어부(20)와 신호 전달을 이루는 구조를 취할 수도 있고 경우에 따라 입력부(60)가 직접 제어부(20)와 직

결되어 신호 전달을 이루는 구조를 취할 수도 있는 등 설계 사양에 따라 다양한 변형이 가능하다.

[0037] 또한, 여기서 구체적으로 명시되지는 않으나 로봇 머니퓰레이터(10)는 관절 토크 센서 기반으로 힘제어를 실행하여 로봇 머니퓰레이터(10)의 엔드이펙터, 즉 말단에서 작업 대상에 대한 소정의 힘을 가하여 설정된 소정의 작업을 실행하는데, 이는 관절 토크 센서 기반의 힘제어의 통상적인 과정을 이루는바 이에 대한 구체적 설명은 생략한다.

[0038] 로봇 머니퓰레이터(10)는 제어부(20)를 포함하는데, 제어부(20)는 감지부(5)에서 감지되는 관절부(100)의 관절 토크인 감지 관절 토크 정보를 포함하는 감지 정보를 취득하여 제어부(20)로 전달한다.

[0039] 감지부(5)는 관절 위치 측정부(2)와 관절 속도 측정부(3)를 포함할 수 있는데, 관절 위치 측정부(2)와 관절 속도 측정부(3)는 구동 모터(1)에 내장될 수 있고, 경우에 따라 관절 위치 측정과 관절 속도 측정은 구동 모터(1)에 인가되는 전류 신호를 사용하여 연산되어 추출 사용되는 구조를 취할 수도 있고, 또는 구동 모터 및/또는 감속기(1b)를 통하여 연결되는 별도의 외부 엔코더를 통하여 는 등 설계 사양에 따라 다양한 구성이 가능하다. 관절 위치 측정부(2)와 관절 속도 측정부(3)는 관절부(100)에 배치되는 엔코더로 구현될 수 있고 경우에 따라 회전 속도를 감지하기 위한 자이로 센서를 더 구비할 수도 있으나 본 실시예는 엔코더로 관절부에서의 관절 위치 측정 및 관절 속도 측정을 실행하는 것으로 구현하여 제조 원가를 절감하고 구성을 간단하게 형성하도록 한다.

[0040] 또한, 본 실시에에서는 각 관절에서의 각가속도를 감지하는 별도의 관절 가속도 측정부를 구비하지 않고, 가속도 항목을 배제하는 방식의 동역학적 모델을 통하여 각 관절에서의 회전각 및 각속도를 이용하여 각 관절부에서의 마찰토크를 추정하는 방식을 중심으로 설명한다.

[0041] 저장부(30)는 하기되는 제어부(20)와 연결되는데, 저장부(30)는 사전 설정 데이터를 포함하여 소정의 제어 신호인가 내지 관측 기능을 통한 예측치 연산 등의 기초가 되는 사전 설정 추정 데이터를 포함하는 정보 데이터를 제공할 수 있다.

[0042] 제어부(20)는 제어기(21)와 관측기(23)를 포함하는데, 제어기(21)는 감지부(5)로부터 감지된 감지 정보 내지 작업자에 의하여 입력부(6)를 통하여 입력되는 입력 정보에 기초하여 구동 모터(1)에 소정의 구동 제어 신호를 인가함으로써 로봇 머니퓰레이터(10)를 구성하는 가동부인 링크를 가동시키기 위한 구동력을 제공하거나 관측기(23)에서 관측되는 마찰 추정 토크를 이용하여 실제로 구동 모터 및/또는 감속기에서 발생하는 마찰 토크를 보상하여 목표로 설정된 구동력을 제공하도록 구동력 제어를 실행하는데 사용될 수 있다.

[0043] 또한, 본 발명에 따른 제어부(20)의 제어기(21)는 관절부에서의 오작동 여부 내지는 현재 접촉이 예상치 못한 충돌인지 예상된 충돌인지 여부를 판단하여 각각의 경우에 대한 소정의 사전 설정된 작동 모드를 실행하기 위한 제어 신호를 인가할 수도 있다.

[0044] 관측기(23)는 감지부(5)로부터 감지된 감지 관절 정보를 포함하는 감지 정보 및 저장부(30)에 저장되는 사전 설정 데이터에 기초하여 소정의 관절부를 통하여 연결되는 관절 링크(도 1 참조)의 가동을 예측하여 관절부에서 발생하는 기계적 요소로 인한 마찰 토크(τ_f) 가해지는 관절 토크를 추정 산출할 수 있다.

[0045] 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터 제어 방법(S1,S2)은 감지 단계(S10)와 추정 분석 단계(S20)를 포함한다. 이와 같은 본 발명의 마찰 토크를 추정 관측하는 로봇 머니퓰레이터 제어 방법은 로봇 머니퓰레이터(10)의 엔드이펙터 말단에 대한 힘제어를 실행하는 과정(S1) 상에서 진행될 수 있는데, 관절 토크 기반 힘제어를 실행하는 관절 토크 기반 힘제어 단계로서 추정된 마찰 추정 토크를 보상하여 목표 토크를 출력하도록 하는 보상 제어 단계(S30)를 포함할 수 있다.

[0046] 그런 후, 감지 단계(S10)에서 제어부(20)의 제어기(21)는 후속적인 추정 분석 단계(S20)를 실행하기 위한 관절부(100)의 감지 관절 정보를 취득하도록 하는 감지 제어 신호를 감지부(5)로 인가한다. 감지 제어 신호를 인가받은 감지부(5)의 관절 위치 측정부(3)는 관절부(100)의 위치 변동에 따른 각변화, 즉 관절부의 회전각을 감지하고 감지된 감지 관절 정보를 제어부(20)의 제어기(21) 및/또는 관측기(23)로 전달하는데, 감지부(5)의 관절 위치 측정부(3)가 감지한 감지 관절 정보는 관측기(23)로 직접 전달될 수도 있고, 제어부(20)의 제어기(21)를 통하여 관측기(23)로 전달될 수도 있는 등 설계 사양에 따라 다양한 변형이 가능하다.

[0047] 또한, 감지 단계(S10)에서 제어부(20)는 구동 모터(1)에 인가되는 모터 전류(i)를 취득하는데, 구동 모터(1)는 제어부(20)의 제어기(21)의 구동 제어 신호에 따라 입력되는 구동 제어 신호로서의 모터 전류(i) 신호에 따라 구동되어 소정의 토크를 생성 출력한다. 구동 모터(1)의 모터 전류(i)는 감지 관절 정보와 함께 제어부(20)로 전달되는데, 이는 앞선 감지 관절 정보와 마찬가지로 관측기(23)로 직간접적으로 전달될 수 있다.

[0048] 감지 단계(S10)가 실행된 후, 제어부(20)의 제어기(21)는 추정 분석 단계(S20)를 실행한다. 제어부(20)는 감지 단계(S10)에서 취득된 감지 관절 정보 및 제어부(20)와 연계되는 저장부(30)에 사전 설정되어 저장된 사전 설정 저장 추정 데이터에 기초하여 관절부(100)의 마찰 추정 토크를 산출하는 추정 분석 단계(S20)를 실행하는데, 추정 분석 단계(S20)는 감지 단계(S10)에서 취득된 감지 관절 정보, 모터 전류 및 사전 설정 저장 추정 데이터를 사용하여 관절부에서 발생하는 마찰 토크를 추정하여 마찰 추정 토크를 산출한다. 여기서, 사전 설정 저장 추정 데이터는 제어부(20)와 연결되는 저장부(30)에 저장되는 데이터로서, 소정의 제어 신호 인가 내지 관측 기능을 통한 마찰 추정 토크 산출에 사용될 수 있다.

[0049] 추정 분석 단계(S20)는 본 실시예에서 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)를 포함하는데, 경우에 따라 마차 토크 연산 단계 후 충돌 등의 비정상 상태 여부를 판단하기 위한 외력 토크 추정 단계를 더 구비할 수도 있는 등 설계 사양에 따른 다양한 변형이 가능하나, 본 실시예에서의 추정 분석 단계(S20)는 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)를 구비하는 경우를 중심으로 기술된다.

[0050] 마찰추정 토크 연산 단계(S21)는 감지 관절 정보와 모터 전류(i) 및 사전 설정 추정 데이터에 기초하여 제어부(20)의 추정 제어 신호에 따라 외력 추정 관측기(23)에서 마찰 추정 토크(τf)가 연산된다. 경우에 따라 마찰 추정 토크 연산과 더불어 별도로 구비되는 외력 변화 추정 관측기를 통하여 외력 변화 추정값을 산출하고, 이를 이용하여 마찰 추정 토크에 대한 고주파 성분 등을 더 연산하여 비정상 토크 발생 여부를 확인하는 방식을 구현할 수도 있으나, 본 실시예에서는 이에 대한 설명은 생략한다.

[0051] 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)에서 마찰 추정 토크가 연산되는 경우, 사전설정 추정 데이터의 일환으로, 로봇 머니퓰레이터(10)의 관성 및 길이 및 감속기의 감속비(γ) 등과 같은 모델 정보는 사전 설정되어 저장부(30)에 저장되는데, 로봇 머니퓰레이터(10)는 다음과 같이 모델링될 수 있다(도 1 및 도 2 참조).

[0052] 모터 전류(i)는 제어부(20)의 제어기(21)를 통하여 모터 드라이버(1a)에서 구동 모터(1)에 입력된 전류이고, 모터 출력 토크(τ_m)는 모터의 출력토크인 동시에 감속기의 입력토크이다. 앞서 기술된 바와 같이, 도면 부호 τ_f는 감속기 및 로봇 머니퓰레이터의 관절부 내부의 기계요소들에 의하여 손실된 마찰토크(τ_f)이고, τ_j는 로봇 머니퓰레이터의 관절부(100)의 출력 토크로 최종적으로 링크에 전달되는 토크인데, 로봇 머니퓰레이타(10)의 관절부(100)에 마찰력이 존재하지 않는다면 모터 출력 토크(τ_m)는 감속비 r (>1) 인 감속기(1b)에서 r배 증폭되어 감속기에서 출력되므로 감속기를 거쳐 링크에서 직접 출력되는 출력토크는 $r\tau_m$의 수치를 갖게되나, 감속기(1b)를 구성하는 기계요소들에 의해서 발생한 마찰 토크(τ_f)만큼 감속기의 출력토크는 손실되므로 실제 감속기의 출력 토크 는 $r\tau_m - \tau_f$이고, 이러한 크기의 토크가 로봇 머니퓰레이터(10)의 링크에 전달된다. 따라서 로봇 머니퓰레이터(10)의 링크에 작용하는 토크(τ_j)는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

[0053] $$\tau_j = r\tau_m - \tau_f$$

[0054] 위와 같이 표현되는 토크 관계를 마찰 토크(τ_f)에 대해서 다시 정리하면 아래와 같다.

[0055] $$\tau_f = r\tau_m - \tau_j$$

[0056] 위 식에서 알 수 있듯이, 로봇 머니퓰레이터(10)의 관절에서 발생하는 마찰토크(τ_f)는 구동 모터(1)의 모터출력토크(τ_m)와 구동 모터(1)와 연결되는 감속기(1b)의 감속비(r), 로봇 머니퓰레이터(10)의 링크에 작용하는 관절부(100)에서의 출력 토크(τ_j)로 표현 및 산출될 수 있다. 여기서, 모터출력토크(τ_m)는 모터에 인가된 모터전류(i)에 비례하고, 대부분의 상용 모터는 해당 모터의 제조사에서 모터전류(i)와 모터출력토크(τ_m) 사이의 비례 관계식을 제공하며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

[0057] $$\tau_m = \alpha i$$

[0058] 여기서 a는 i와 τ_m 사이의 관계를 정의하는 비례상수로서 구동 모터(1)의 특성에 따라 결정된다. 로봇 머니퓰레이터(10)의 구동 모터(1)에 연결되는 모터 드라이버(1a)에서 구동 모터(1)에 인가되는 모터 전류(i)를 측정하고 위 관계를 이용하여 모터출력토크(τ_m)를 계산할 수 있다. 관절부(100)에서의 출력 토크(τ_j)는 로봇 머니퓰레이터(10)의 관절부(100)에서 출력되어 관절부(100)에 연결되는 링크에 입력되는 토크이므로 로봇 머니퓰레이터(10)의 동역학 수식과 각 관절부의 위치, 속도, 가속도를 바탕으로 계산할 수 있으며, 로봇 머니퓰레이터(10)의 동역학 수식을 바탕으로 표현된 출력 토크(τ_j)는 아래와 같다.

[0059] $$\tau_j = M(q)\ \ddot{q} + C(q, \dot{q})\,\dot{q} + g(q)$$

[0060] 여기서, M(q)는 관절부(100)를 통하여 연결되는 관절 링크의 관성 행렬을, $C(q,\dot{q})$는 코리올리 및 구심력을 나타내는 비선형 항을 나타내는 행렬을, g(q)는 중력 벡터를, $\ddot{q}$, $\dot{q}$, q는 각각 관절부(100)의 가속도 벡터, 속도 벡터, 변위 벡터이다. 상기 관계식에서 M,C,g는 로봇 머니퓰레이터의 물성치에 해당하여 도출할 수 있으며, $\dot{q}$,q는 감지부(5)의 관절 위치 측정부(3)인 엔코더를 이용하여 감지 측정될 수 있다.

[0061] 종래의 로봇의 가속도 처리에 있어 각 관절부에서의 가속도를 엔코더를 이용하여 측정하면 신뢰성이 낮아지므로, $\ddot{q}$를 측정하기 위해서는 추가적인 가속도 센서가 필요하였으나, 본 발명은 가속도 센서와 같은 추가적인 센서를 사용하지 않는 방식을 취하여 마찰토크(τ_f)를 추정 산출하기 위해 $\ddot{q}$를 사용하지 않고 마찰토크(τ_f)를 기술하는 방식을 취한다. 이를 위하여 먼저 출력 토크(τ_j)의 동역학 수식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

[0062] $$\tau_j = \sum_{j=1}^{n} M_{ij}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} C_{ij}\dot{q}_j + g_i$$

[0063] 여기서, Mij와 Cij는 각각 M(q) 및 $C(q,\dot{q})$ 행렬의 i행j열의 요소이며, gi는 각각 g(q) 벡터의 i번째 요소이다. 이때 Cij는 일반적으로 유일해를 갖지 않으므로, Cij를 다음과 같이 정의한다.

[0064] $$C_{ij} = \frac{1}{2}\dot{M}_{ij} + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial M_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i}\right)\dot{q}_k$$

[0065] 이와 같이 설정된 Cij는 $N(q,\dot{q}) = \dot{M}(q) - 2C(q,\dot{q})$가 교대 대칭 행렬(skew-symmmetric matrix)가 되도록 구성하는데, M(q)는 대칭이므로 다음과 같이 기술될 수 있다.

[0066] $$N(q,\dot{q})^T = -N(q,\dot{q})$$

[0067] $$\dot{M}(q)^T - 2C^T(q,\dot{q}) = -\dot{M}(q) + 2C(q,\dot{q})$$

[0068] 이러한 관계에서, 본 발명의 로봇 머니퓰레이터(10)의 동역학 수식 관계에서,

[0069] $\dot{M}^T = \dot{M}$ 의 관계가 성립되므로, M과 C는 다음의 관계가 성립된다.

[0070] $$\dot{M}(q) = C^T(q,\dot{q}) + C(q,\dot{q})$$

[0071] 따라서, $C(q,\dot{q}) = C^T(q,\dot{q}) - \dot{M}(q)$ 의 관계가 형성되어, 관절부(100)에서의 출력 토크(τ_j)는 다음과 같은 관계로 표현된다.

[0072] $$\tau_j = M\ddot{q} + \dot{M}\dot{q} - C^T q + g$$

[0073] 한편, $\frac{d}{dt}(M\dot{q}) = M\ddot{q} + \dot{M}\dot{q}$ 이므로, $M\ddot{q} = \frac{d}{dt}(M\dot{q}) - \dot{M}\dot{q}$ 의 관계로 표현되고, 이러한 관계식을 상기 마찰토크(τ_f)에 대한 관계식에 입력 정리하면, 마찰토크(τ_f)는 다음과 같이 표현된다.

[0074] $$\tau_j = \frac{d}{dt}(M\dot{q}) - \dot{M}\dot{q} + \dot{M}\dot{q} - C^T\dot{q} + g$$
$$= \frac{d}{dt}(M\dot{q}) - C^T\dot{q} + g$$

[0075] 따라서, *C*가 특정한 조건을 만족하도록 표현함으로써 $\ddot{q}$ 를 사용하지 않고 이와 같은 마찰토크(τ_f)의 표현이 가능하다. 따라서, 마찰토크(τ_f)는 아래와 같이 정리될 수 있다.

[0076] $$\tau_f = r\tau_m - \frac{d}{dt}(M\dot{q}) + C^T\dot{q} - g$$

[0077] 즉, 로봇 매니퓰레이터(10)의 관절부(100)에서의 마찰토크(τ_f)가 모델링화되어 설정되는 사전 설정 추정 데이터 및 감지부의 엔코더를 이용하여 측정 또는 계산할 수 있는 값만으로 기술될 수 있다.

[0078] 한편, 본 발명의 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)는 추정값의 신뢰도 향상을 위하여 강인성을 증대시키도록 추정되는 마찰토크를 저역통과 필터링시키는 과정을 포함한다. 즉, 본 발명의 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)에서 추정하고자 하는 마찰토크(τ_f)에서 기술되는 $\frac{d}{dt}(M\dot{q})$ 는 $(M\dot{q})$ 을 차분하여 산출되는 값이므로, 관절 위치 측정기(3)인 엔코더의 출력값만을 이용하는 과정에서 $\dot{q}$ 에 존재하는 전기적 오차가 증폭되어 계산된 값의 신뢰성이 보장되기 어렵다는 문제점을 해결하고자, 본 발명은 상기 마찰토크(τ_f)의 표현 시 사용된 $(M\dot{q})$ 의 차분을 사용하지 않고, 마찰토크(τ_f)를 추정할 수 있는 방법으로 저역통과 필터링 과정을 수행하는 관측기(23)를 구성한다. 즉, 저역통과 필터링 과정을 수행하는 관측기(23)를 통하여, $(M\dot{q})$ 의 차분을 배제함으로써, $\dot{q}$ 에 존재하는 전기적 오차가의 증폭을 방지함으로써 출력값의 신뢰성을 확보할 수 있다.

[0079] 도 4에 도시된 바와 같이, 저역통과 필터는 특정 신호에 포함되어 있는 주파수 중 필터의 차단주파수보다 낮은 주파수 영역의 신호는 통과시키고, 차단주파수보다 높은 주파수 영역의 신호는 감쇄시키는 필터로서, 저역통과

필터의 입력신호를 구성하는 주파수가 대부분 해당 저역통과 필터의 차단주파수보다 아래의 주파수 영역에 존재하면, 입력신호가 거의 손실되지 않고, 저역통과 필터를 통과할 수 있는데, 본 발명의 저역통과 필터의 입력은 도면 부호 τ_f로 지시되는 추정하고자 하는 마찰 토크를 나타내고, 저역통과 필터의 출력은 도면 부호 $\hat{\tau_f}$로 지시되는 마찰 토크의 추정값, 즉 마찰 추정 토크를 나타낸다.

[0080]
$$\hat{\tau_f} = \frac{K}{s+K}\,\tau_f$$

[0081] 여기서, s는 라플라스 변수이고, K는 저역통과 필터의 차단주파수를 나타낸다. 즉, 본 발명은 K를 설정 조정하여 마찰토크(τ_f)가 저역통과 필터를 통과하며 손실되는 주파수 영역을 최소화되도록 하여, 출력되는 마찰 추정 토크($\hat{\tau_f}$)를 이용하여 마찰토크(τ_f)를 관측한다. 마찰토크(τ_f)를 추종하는 마찰 추정 토크($\hat{\tau_f}$)는 마찰토크(τ_f)와는 달리 로봇 머니퓰레이터(10)의 관절부(100)에서의 가속도나 차분없이 산출 가능한 값으로, 다음과 같은 과정을 통하여 산출될 수 있다.

[0082] 즉, 상기 저역통과 필터 차단 주파수를 이용하여 저역통과 필터 입출력의 관계는 다음 같이 표현된다.

[0083]
$$(s+K)\,\hat{\tau_f} = K\tau_f$$

[0084] 이를 다시 차단 주파수(K)를 중심으로 표현하면, 다음과 같이 정리된다.

[0085]
$$\hat{\tau_f} = K\frac{1}{s}(\tau_f - \hat{\tau_f})$$

[0086] 이는 라플라스 영역(laplace domain)에서 기술된 수식으로, 이를 라플라스 인버스 트랜스포메이션을 이용하여 시간 영역(time domain)에서 재기술할 경우 다음과 같이 표현된다.

[0087]
$$\hat{\tau_f}(t) = K\left[\int_0^t (\tau_f - \hat{\tau_f})dt\right] = K\left[\int_0^t \left(r\tau_m - \frac{d}{dt}(M\dot{q}) + C^T\dot{q} - g - \hat{\tau_f}\right)dt\right]$$
$$= K\left[\int_0^t \left(r\tau_m + C^T\dot{q} - g - \hat{\tau_f}\right)dt - M\dot{q}\right]$$

[0088] 여기서, t는 시간을 나타내는 변수이며, 관측을 시작한 시점으로부터 관측을 하고 있는 시점까지의 시간을 나타내는데, 이와 같이 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)에서 저역통과 필터를 이용한 관측기를 사용하면 $(M\dot{q})$의 차분을 수행하지 않고 마찰 추정 토크($\hat{\tau_f}$)를 산출할 수 있다.

[0089] 도 5 및 도 6에는 본 발명의 로봇 머니퓰레이터(10)의 구동 모터(1) 및 모터 드라이버(1a)와 제어부(20)의 연결관계 및 제어부(20) 관측기(23)의 구체적 구성도가 도시된다. 로봇 머니퓰레이터(10)의 작동 시, 관절부(100)에서 관절 마찰력에 의하여 마찰 토크(τ_f)가 발생하는 경우, 로봇 머니퓰레이터(10)의 제어부(20)와 연결되는 구동 모터(1)의 모터 드라이버(1a)에 감지 제어 신호를 인가하여, 현재 구동 모터(1)에 인가되는 구동 모터 전류(i)를 취득하고, 감지부(5)의 관절 위치 측정부(2)의 감지 신호를 취득하고 이를 이용하여 로봇 머니퓰레이터(10)의 각 관절부(100)의 감지 관절 정보인 위치 및 속도(q, $\dot{q}$)를 측정 산출함으로써, 모터 전류(i)와 관절부(100)의 감지 관절 정보가 제어부(20)의 관측기(23)로 입력됨으로써, 관절부(100)에서 발생하는 마찰 토크에 대한 추정값으로서의 마찰 추정 토크($\hat{\tau_f}$)가 산출된다. 이와 같이, 본 발명은 마찰 추정 토크 연산 단계(S21)에서 저역 통과 필터를 통한 필터링 과정을 실행하되, 종래 기술과 같은 로봇 머니퓰레이터의 관절부에서의 가속도 정보를 이용하지 않고 마찰력에 의한 마찰토크의 선형화 내지 단순화를 수행하지 않고, 물리계에서의 실제

마찰력에 의한 마찰 토크와 거의 유사한 형태의 마찰 추정 토크($\widehat{\tau_f}$)를 취득할 수 있다.

[0090] 본 발명의 제어 방법은 보상 제어 단계(S30)를 더 구비할 수도 있다. 즉, 단계 S21에서 마찰 추정 토크가 연산된 후, 제어부(20)의 제어기(21)는 마찰 토크를 로봇 머니퓰레이터(10)를 가동시킴에 있어 구동 모터(1) 및 감속기(1b)를 거쳐 출력되는 관절부(100)에서의 출력 토크는 $r\tau_m$의 수치를 갖게되나, 감속기(1b)를 구성하는 기계요소들에 의해서 발생한 마찰 토크(τ_f)만큼 감속기의 출력토크는 손실되므로 제어기(21)는 마찰 토크(τ_f)를 오차로 판단하여 오차를 줄이기 위한 소정의 보상 제어 과정을 실행할 수 있는데, 제어기(21)는 관측기(23)에서 산출된 마찰 추정 토크($\widehat{\tau_f}$)를 오차로 설정하고, 상응하는 게인값(미도시)을 조정하여 이를 피드백시킴으로써, 구동 모터(1)에 입력되는 모터 전류(i)를 조정하여 관절부(100)에서 최종적으로 출력되는 출력 토크를 마찰 토크만큼 보상하는 보상 제어 단계(S30)를 실행할 수도 있다.

[0091] 상기한 바와 같이, 본 발명에 따른 로봇 머니퓰레이터의 관절부에서의 마찰 토크를 관측 추정할 수 있고, 이를 이용하여 관절부에서의 출력 토크 제어를 실행하는 방식을 기술하였으나, 마찰 추정 토크를 이용하여 관절부의 이상 거동을 감지 대응하거나 또는 충돌 등의 비정상 상태 감지 대응을 이루는 등의 제어 과정을 실행할 수도 있는 등, 마찰 토크를 추정 관측하는 범위에서 는 방식을 하여 이에 기초하여 충돌 등의 비정상 외력의 발생 여부를 판단하는 범위에서 다양한 변화를 도출하는 다양한 구성이 가능하다.

부호의 설명

[0092] 1...구동 모터 2...관절 위치 측정부

3...관절 속도 측정부 4...관절 토크 측정부

5...감지부 10...로봇 머니퓰레이터

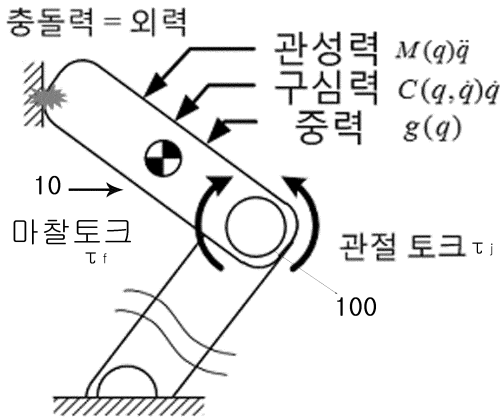
20...제어부 30...저장부

40...연산부 50...통신부

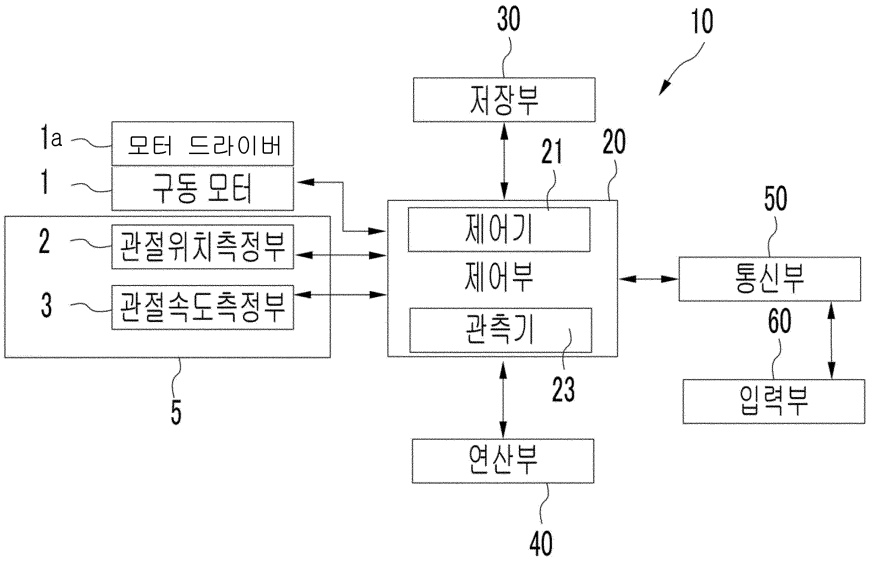
60...입력부

도면

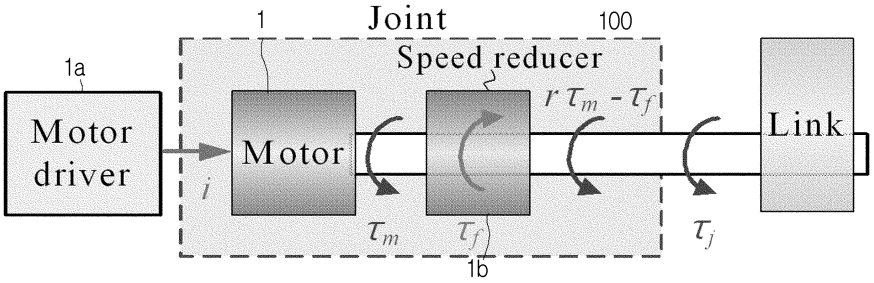
도면1



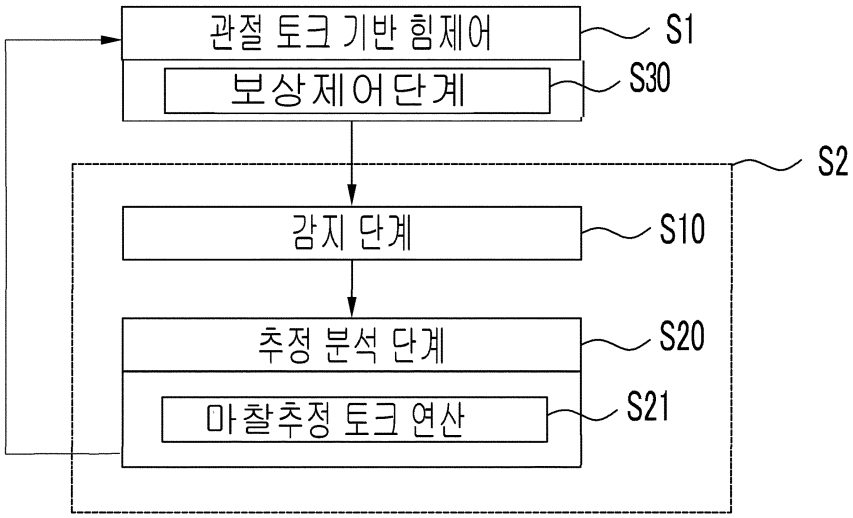
도면2


30
10
저장부
1a
모터 드라이버
1
구동 모터
21
20
2
관절위치측정부
제어기
50
제어부
3
관절속도측정부
통신부
관측기
60
23
입력부
5
연산부
40

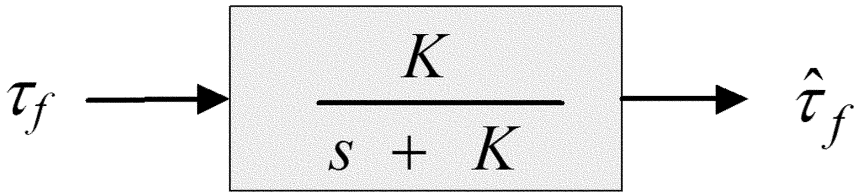
도면3


1
Joint
100
Speed reducer
1a
$r\tau_m - \tau_f$
Motor driver
Motor
Link
i
τ_m
τ_f
τ_j
1b

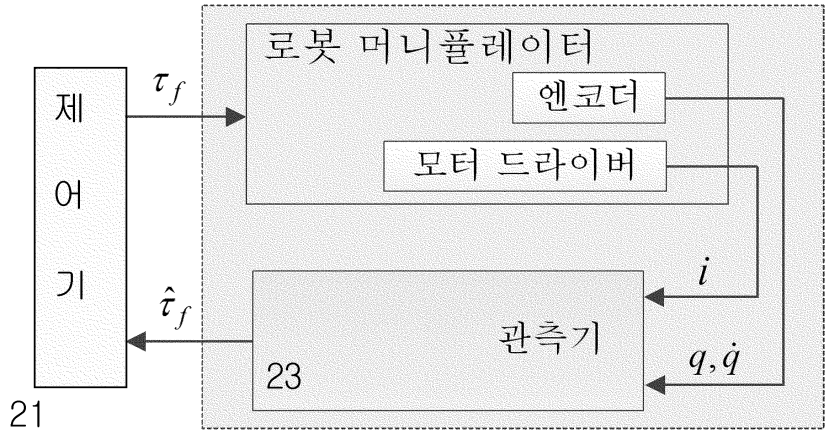
도면4


관절 토크 기반 힘제어
S1
보상제어단계
S30
S2
감지 단계
S10
추정 분석 단계
S20
마찰추정 토크 연산
S21

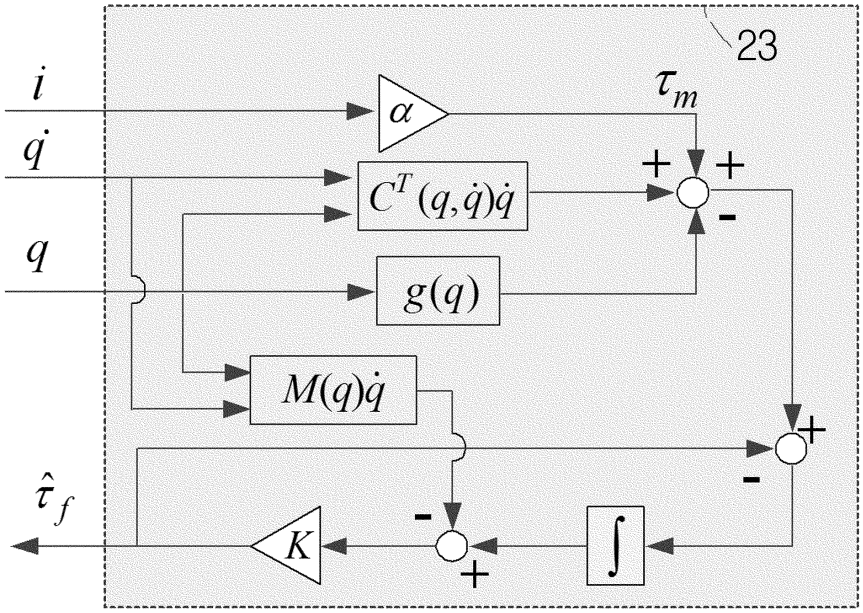
도면5


τ_f
$\frac{K}{s+K}$
$\hat{\tau}_f$

도면6


로봇 머니퓰레이터
엔코더
모터 드라이버
제
어
기
τ_f
$\hat{\tau}_f$
i
$q, \dot{q}$
관측기
23
21

도면7


23
i
$\dot{q}$
q
α
τ_m
$C^T(q,\dot{q})\dot{q}$
$g(q)$
$M(q)\dot{q}$
$\hat{\tau}_f$
K
$\int$
+
+
-
-
+
-
+