(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월31일
(11) 등록번호 10-2747737
(24) 등록일자 2024년12월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B25J 9/16 (2006.01)
(52) CPC특허분류
B25J 9/1643 (2013.01)
B25J 9/1633 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-7000885
(22) 출원일자(국제) 2021년06월10일
심사청구일자 2024년05월09일
(85) 번역문제출일자 2023년01월09일
(65) 공개번호 10-2023-0045006
(43) 공개일자 2023년04월04일
(86) 국제출원번호 PCT/EP2021/065699
(87) 국제공개번호 WO 2021/250201
국제공개일자 2021년12월16일
(30) 우선권주장
10 2020 115 517.4 2020년06월10일 독일(DE)
(56) 선행기술조사문헌
US20230028405 A1

(73) 특허권자
도이췌스 첸트룸 퓌어 루프트-운트 라움파르트 에.파우.
독일, 본 53227, 쾨니히스빈터러 스트라쎄 522-524
(72) 발명자
엥글스베르거 요하네스
독일 82234 웨슬링 뮌헨스트라쎄 20 도이췌스 첸트룸 퓌어 루프트-운트 라움파르트 에.파우. (디엘알) 내
가로팔로 기안루카
독일 82234 웨슬링 뮌헨스트라쎄 20 도이췌스 첸트룸 퓌어 루프트-운트 라움파르트 에.파우. (디엘알) 내
메제잔 게오르게 안드리안
독일 82234 웨슬링 뮌헨스트라쎄 20 도이췌스 첸트룸 퓌어 루프트-운트 라움파르트 에.파우. (디엘알) 내
(74) 대리인
장훈

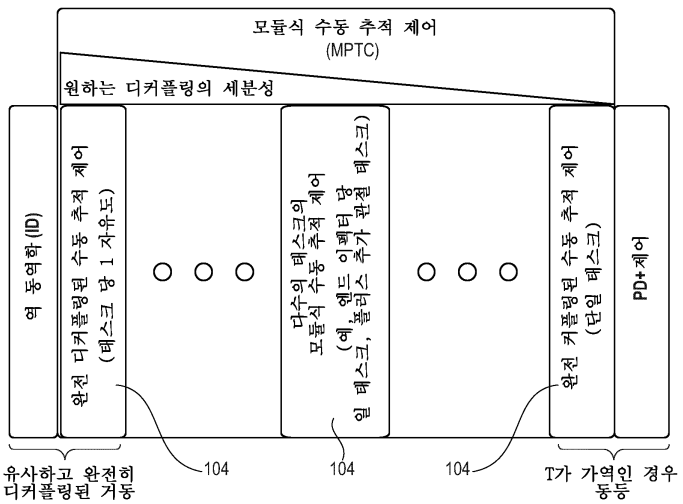
전체 청구항 수 : 총 15 항 심사관 : 박성용

(54) 발명의 명칭 **로봇을 제어하는 방법 및 컴퓨터 프로그램 제품**

(57) 요 약

본 발명은 다수의 태스크를 수행하기 위해 운동학적 중복 로봇(100)을 제어하는 방법에 관한 것이며, 적어도 하나의 수동성 기반 제 1 컨트롤러 모듈(102)이 사용되고, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈을 위해 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 적어도 하나의 해당 태스크 매핑이 계산되며, 상기 태스크에 대해 적어도 하나의 가중치가 계산되고, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102)은 상기 적어도 하나의 가중치를 사용하여 전체 컨트롤러(104)에 통합된다. 본 발명은 또한 적어도 하나의 프로세서에 의해 프로그램을 실행할 때 상기 프로세서로 하여금 그러한 방법을 수행하게 하는 명령을 포함하는 컴퓨터 프로그램 제품에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G05B 2219/39187 (2013.01)
G05B 2219/39197 (2013.01)
G05B 2219/39338 (2013.01)
G05B 2219/40336 (2013.01)
G05B 2219/40338 (2013.01)
G05B 2219/40358 (2013.01)
G05B 2219/40367 (2013.01)
G05B 2219/40372 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

다수의 태스크를 수행하기 위해 운동학적 중복 로봇(100)을 제어하는 방법에 있어서,

적어도 하나의 수동성 기반 제 1 컨트롤러 모듈(102)이 사용되며, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102)에 대해 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 적어도 하나의 해당 태스크 매핑이 계산되고, 상기 태스크에 대해 적어도 하나의 가중치가 태스크 특정 대칭 매트릭스 $W_k = \Psi_k M_k^{-1}$의 형태로 계산되고, 상기 매트릭스 W_k는 태스크 관성 매트릭스 M_k의 역수 및 서로 다른 태스크에 독립적으로 가중치를 부여하기 위한 가중치 스칼라 Ψ_k로 구성되고, $M_k = (J_k M^{-1} J_k T)^{-1}$이고, J_k는 태스크 Jacobian이고, M은 로봇의 동적 모델의 관성 매트릭스이며, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102)은 대칭적이고 블록 대각선인 전체 가중 매트릭스 W에 부분 매트릭스의 형태로 결합되는 적어도 하나의 태스크 가중 매트릭스 W_k를 사용하여 전체 컨트롤러(104)에 통합되는 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 상기 적어도 하나의 해당 태스크 매핑은 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102)의 공칭 거동이 스프링 질량 댐퍼 시스템의 거동에 대응하도록 계산되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 3

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 상기 적어도 하나의 해당 태스크 매핑은 자연 로봇 관성에 기초하여 계산되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 4

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 상기 적어도 하나의 해당 태스크 매핑은 태스크 특정 코리올리 및 원심 효과가 변경되지 않고 나머지 모든 코리올리 및 원심 효과가 보상되도록 계산되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 5

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 태스크 타깃 설명은 태스크 벡터로서 계산되고 및/또는 상기 적어도 하나의 해당 태스크 매핑은 태스크 매핑 매트릭스로서 계산되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 6

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈이 상기 전체 컨트롤러(104)에 통합되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 7

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 제약 조건으로서 공식화된 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈이 상기 전체 컨트롤러(104)에 통합되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 8

제 6 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈이 가중되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

제 6 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102) 및/또는 상기 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모

듈은 전체 컨트롤러(104)가 과도하게 결정된 제어 문제의 경우에도 적어도 수동적인 거동을 갖도록 가중되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 10

제 6 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102) 및/또는 상기 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 적어도 하나의 의사 역 및/또는 적어도 하나의 역의 도움으로 최적화되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 11

제 6 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈(102) 및/또는 상기 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 2차적으로 최적화되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 12

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 제 1 컨트롤러 모듈들(102) 중 적어도 하나는 추적 컨트롤러로서 구현되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 13

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 상기 제 1 컨트롤러 모듈들(102) 중 적어도 하나는 규제 컨트롤러로서 구현되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 14

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 별도의 컨트롤러 모듈(102)이 각각의 제어 가능한 자유도에 할당되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 15

컴퓨터 프로그램이 적어도 하나의 프로세서에 의해 실행될 때 상기 프로세서로 하여금 제 1 항 또는 제 2 항에 따른 방법을 수행하게 하는 명령을 포함하는 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 다수의 태스크들을 수행하기 위해 운동학적으로 중복되는 로봇을 제어하는 방법에 관한 것이다. 본 발명은 또한 그러한 방법을 실행하기 위한 컴퓨터 프로그램 제품에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 소위 "태스크"라고 하는 다수의 작업들을 동시에 제어하는 것은 로봇 제어 분야에서 중요한 연구 주제이다. 이전 작업들은 운동학적으로 중복되는 로봇에 대한 단일 태스크 및 해당 제로 공간, 즉 나머지 로봇 자유도를 제어하는 더 간단한 경우를 고려했지만, 오늘날에는 우선 순위가 있거나 없는 다수의 태스크들을 처리할 수 있는 다수의 확립된 방법들이 있다. 문헌은 운동학적 수준에서 태스크 조정 문제를 먼저 해결하는 작업들과 동적 수준에서 직접 제어 문제를 처리하는 작업들을 구분한다. 또 다른 중요한 분류 옵션은 계층적 컨트롤러를 통해 엄격한 태스크 우선 순위를 적용하는 방법과 태스크 가중치를 통해 소프트하게 우선 순위를 생성하는 기타 방법으로 분류하는 것이다.

[0003] 운동학적 수준에서 출판물 Y. Nakamura, H. Hanafusa 및 T. Yoshi Kawa. Taskpriority based redundancy control of robot manipulators, The International Journal of Robotics Research, 6(2): 3-15, 1987. doi: 10.1177/027836498700600201, 및 G. Antonelli. Stability Analysis for Prioritized closedloop inverse kinematic algorithms for redundant robotic Systems. IEEE Transactions on Robotics, 25(5):985-994, 2009에 의해 제로 공간 투영을 기반으로 하고 엄격한 태스크 계층을 보장하는 계층적 컨트롤러들이 제안되었다. 가능한 태스크 특이점 문제를 해결하기 위해, 출판물 F. Kanehiro, H. Hirukawa, 및 S. Kajita. Openhrp: Open Architecture Humanoid Robotics Platform, 및 The International Journal of Robotics Research, 23(2):155-165, 2004. doi: 10.1177/0278364904041324에서 특이점에 강한 역운동학법이 제안되었다. 그러나 이러한 특이

점에 강한 역운동학에 의해 엄격한 태스크 계층이 사라지는데, 이는 결국 개별 태스크들 간에 가중치를 생성하기 때문이다.

[0004] 다른 방법들은 동적 수준에서 다수의 태스크들을 동시에 처리한다. 휴머노이드 로봇의 제어가 가능하도록 하기 위해 "작동 공간" 방법이 더욱 개발되었다. 이에 대해 출판물 L. Sentis 및 O. Khatib. Synthesis of Whole-Body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives, International Journal of Humanoid Robotics, 2(4): 505-518, 2005, 및 L. Sentis, J. Park, and O. Khatib. Compliant Control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. IEEE Transactions on Robotics, 26(3):483-501, 2010이 참조된다. "Inverse Dynamics"(ID)에 기반한 다른 방법들은 계층적 2차 계획법(QP)을 사용한다. 이에 대해 출판물 J. Peters, M. Mistry, F. Udwadia, J. Nakanishi, 및 S. Schaal. A unifying framework for robot control with redundant dofs. Autonomous Robots, 24:1-12, 2008. doi: 10.1007/s10514-007-9051 -x., Adrien Escande, Nicolas Mansard, 및 Pierre-Brice Wieber. Hierarchical quadratic programming: fast online humanoid- robot motion generation, The International Journal of Robotics Research, 33(7): 1006- 1028, 2014. doi: 10.1177/0278364914521306, 및 K. Bouyarmane 및 A. Kheddar. On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots. IEEE Transactions on Automatic Control, 63(6): 1632-1647, June 2018. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.2017.2752085이 참조된다. 언급된 대부분의 방법은 엄격한 태스크 디커플링을 목표로 한다. 따라서 예를 들어, 적어도 이론적으로는, 서로 다른 태스크들이 서로 영향을 미치지 않고 간섭 후 개별 태스크의 각각의 과도적 거동이 다른 태스크 좌표와 완전히 독립적임이 보장된다.

[0005] 여기에 제시된 방법은 단일 가중된 2차 계획법(QP)을 사용하여 일련의 태스크들 간의 원활한 절충을 위해 노력하는 역 동역학 기반 추적 컨트롤러들의 패밀리에 의해 영감을 받았다. 이에 대해, 출판물 M. A. Hopkins, D. W. Hong, and A. Leonessa. Compliant locomotion using whole-body control and divergent component of motion tracking, In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pages 5726-5733, May 2015. doi: 10.1109/ICRA.2015.7140001., T. Koolen, S. Bertrand, G. Thomas, T. de Boer, T. Wu, J. Smith, J. Englsberger, 및 J. Pratt. Design of a Momentum-Based Control Framework and application to the humanoid robot atlas. International Journal of Humanoid Robotics, 13(01): 1650007, 2016. doi: 10.1142/S0219843616500079., 및 J. Englsberger, G. Mesesan, A. Werner, and C. Ott. Torque-Based Dynamic Walking - a long way from Simulation to experiment. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pages 440-447, 2018이 참조된다. 이러한 컨트롤러들은 구현이 매우 쉽고 높은 유연성이 특징이다. 출판물 B. Paden and B. Riedle. A Positive-Real Modification of a dass of nonlinear Controllers for robot manipulators. In 1988 American Control Conference, pages 1782-1785, June 1988. doi: 10.23919/ACC.1988.4790015., A. Dietrich. Whole-Body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots, volume 116. Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-40557-5., B. Henze, M. A. Roa, and Ch. Ott. Passivity-based whole- body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios. The International Journal of Robotics Research, 35(12): 1522-1543, 2016. doi: 10.1177/0278364916653815., G. Mesesan, J. Englsberger, G. Garofalo, C. Ott, and15:47 10.06.2020 A. Albu-Schaffer. Dynamic walking on compliant and uneven terrain using dem and passivity-based wholebody control. In IEEE-RAS 19th Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids), pages 25-32, 2019., 및 A. Dietrich and C. Ott. Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots. IEEE Transactions on Robotics, 36(1):204-221 , 2020. ISSN 1941-0468. doi:10.1109/TRO.2019.2945876에 따른 수동성 기반 방법과 비교하여, 역 동역학 기반 컨트롤러들은 모델 에러 및 접촉 불확실성에 대한 강성이 낮아 실제 사용에서 진동 등의 문제들이 발생하고, 이 문제들은 휴리스틱한(heuristic) 방법에 의해 해결되어야 한다.

[0006] 또한, 제시된 방법은 출판물 K. Bouyarmane 및 A. Kheddar. On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots. IEEE Transactions on Automatic Control, 63(6): 1632-1647, June 2018. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.2017.2752085의 가중 기반 멀티태스킹 컨트롤러에 의해 영감을 받았고, 출판물 A. Dietrich and C. Ott. Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots. IEEE Transactions on Robotics, 36(1):204-221 , 2020. ISSN 1941-0468. doi: 10.1109/TRO.2019.2945876의 엄격한 계층적 수동성 기반 컨트롤러에 의해 영감을 받았다. 출판물 K. Bouyarmane 및 A. Kheddar. On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots. IEEE Transactions on Automatic Control, 63(6): 1632-1647, June 2018. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.2017.2752085에서와 유사하게, 제시된 방법들은 개별 태

스크의 제어 타깃을 결합하거나 서로 비교하기 위해 2차 계획법(QP)을 사용한다. 그러나 이 경우 출판물 K. Bouyarmane 및 A. Kheddar. On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots. IEEE Transactions on Automatic Control, 63(6): 1632-1647, June 2018. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.2017.2752085에서, 개별 태스크에 속하는 각 컨트롤러는 피드백 선형화에 해당하는 원하는 관성으로서 항등 매트릭스를 사용하여 역 동역학을 기반으로 계산된다. 이에 비해 제시된 방법은 수동성 개념을 기반으로 개별 태스크에 속하는 컨트롤러를 계산하고 로봇의 자연 관성을 사용하여 PD+ 컨트롤러와 유사한 거동을 달성한다. 마찬가지로 제어 접근 방식에 자연 관성 사용을 기반으로 하는, 출판물 A. Dietrich 및 C. Ott. Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots. IEEE Transactions on Robotics, 36(1):204-221, 2020. ISSN 1941-0468. doi: 10.11097TRO.2019.2945876에 알려진 방법과는 달리, 제시된 방법은 가중된 QP 공식, 즉 소프트한 우선 순위 지정을 사용하여 임의의 수의 여러 태스크들을 결합할 수 있게 하고, 상기 방법은 또한 태스크 특이점이 발생하는 경우와 같은 특정 상황에서 덜 공격적인 거동으로 이어진다.

본 발명의 배경 기술은 출판물 "CISNEROS RAFAEL 등의 'QP-based task-space hybrid/parallel control for multi-contact motion in a torque-controlled humanoid robot', 2019 IEEE-RAS 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS (HUMANOIDS), IEEE, 15. October 2019 (2019-10-15), pages 663-670, XP033740754, DOI: 10.1109/HUMANOIDS43949.2019.9035038", 출판물 "CISNEROS RAFAEL 등의 'Robust Humanoid Control Using a QP Solver with Integral Gains', 2018 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), IEEE, 1. October 2018 (2018-10-01), pages 7472-7479, XP033490715, DOI: 10.1109/IROS.2018.8593417" 및 WO 2021/123057 A1 (2021-06-24)에 개시되어 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 과제는 처음에 언급된 방법을 개선하는 것이다. 또한, 본 발명의 과제는 처음에 언급된 컴퓨터 프로그램 제품을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 과제는 청구항 제 1 항의 특징들을 갖는 방법에 의해 해결된다. 상기 과제는 또한 청구항 제 15 항의 특징들을 갖는 컴퓨터 프로그램 제품에 의해 해결된다. 바람직한 실시예들 및/또는 개선예들은 종속 청구항들의 대상이다.

[0009] 상기 방법은 페루프 제어 측면에서 로봇을 제어하는데 사용될 수 있다. 이 방법은 예를 들어 서비스 로봇, 의료 로봇, Industry 4.0, 우주 비행사를 위한 로봇 지원 분야에서 사용될 수 있다. 이 방법은 원칙적으로 운동학적 중복이 있는 힘/토크 제어 로봇이 사용될 수 있고 고정밀 및 유연한 인간-로봇 상호 작용 또는 환경-로봇 상호 작용이 필요한 곳이면 어디에서나 사용될 수 있다.

[0010] 운동학적으로 중복된 로봇은 다수의 태스크를 동시에 구현할 수 있을 정도로 많은 자유도를 가질 수 있다. 태스크들은 서로 독립적일 수 있다. 태스크들은 적어도 부분적으로 동시에 실행될 수 있다. 로봇은 힘 제어 및/또는 토크 제어가 가능하다. 수동성 기반 컨트롤러 모듈은 임피던스 기반 컨트롤러 모듈일 수 있다. 여기서 "수동성"이라는 용어는 특히 시스템에서 원하지 않는 에너지 증가가 발생하는 "액티비티"를 정의하는데 사용된다.

[0011] 여기서, "태스크 타깃 설명"이라는 용어는 특히 각각의 태스크의 실제 타깃에 해당하는 항과 해당 사전 제어 또는 보상 항의 조합으로부터 발생하는 변수를 나타낸다. 태스크의 해당 타깃은 예를 들어 참조 궤적의 공칭 추적 및/또는, 바람직하게는 동시에, 예를 들어 환경, 물체 또는 사람과의 상호 작용의 경우 유연한 임피던스 거동으로 구성될 수 있다. 사전 제어 및/또는 보상 항은 예를 들어 실제 원하는 거동 및/또는 실제 원하는 역학을 생성하기 위해 중력 효과 및 코리올리 및/또는 원심 효과를 완전히 또는 부분적으로 보상할 수 있다.

[0012] 여기서, "태스크 매핑"이라는 용어는 특히 주어진 조작 변수 및/또는 제어 입력과 전술한 각각의 태스크 타깃 설명 사이의 관계를 설정하는 변수들을 나타낸다. 조작 변수 및/또는 제어 입력은 예를 들어 로봇 관절의 조정 가능한 토크와 휴머노이드 로봇과 같은 자유 부동 로봇의 경우 접촉력으로 구성될 수 있고, 상기 접촉력은 특정 전제 조건 하에서 관절 토크와 주어진 엔드 이펙터 가속도, 예를 들어 로봇 발 가속도 사이의 제약 조건으로부터 주어진다.

[0013] 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 적어도 하나의 관련 태스크 매핑은 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈의 공칭 거동이 스프링 질량 댐퍼 시스템의 거동에 대응하는 방식으로 계산될 수 있다.

[0014] 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 적어도 하나의 관련 태스크는 자연 로봇 관성에 기초하여 계산될 수 있다.

[0015] 적어도 하나의 태스크 타깃 설명 및 적어도 하나의 관련 태스크 매핑은 태스크별 코리올리 및 원심 효과가 변경되지 않고 다른 모든 코리올리 및 원심 효과가 보상되는 방식으로 계산될 수 있다.

[0016] 적어도 하나의 태스크 타깃 설명은 태스크 벡터로 계산될 수 있다. 태스크 벡터는 힘, 힘 방향, 모멘트 및/또는 모멘트 방향을 나타낼 수 있다. 식 (17)에서 원하는 태스크 포스 $f_{k,des}$는 이러한 태스크 벡터를 나타낸다. 또한, 개별 태스크 벡터는 바람직하게 결합되어, 결합된 태스크 벡터를 형성할 수 있다. 식 (21)에 나타난 "모든 원하는 태스크 포스의 결합" f_{des}은 그러한 결합된 태스크 벡터의 예를 나타낸다.

[0017] 적어도 하나의 관련 태스크 매핑은 태스크 매핑 매트릭스로서 계산될 수 있다. 태스크 매핑 매트릭스는 매핑 매트릭스(T) 또는 매핑 매트릭스(U)라고도 한다. 태스크 Jacobian 매트릭스 J_k의 전치의 "동적으로 일관된 의사 역(Pseuddo-Inverse)"이라고 할 수 있는, 식 (12)에 나타난 매트릭스 T_k는 이러한 태스크 매핑 매트릭스의 예를 나타낸다. 개별 태스크 매핑 매트릭스들은 바람직하게는 식(22)에 표시된 바와 같이 조합된 태스크 매핑 매트릭스 T로 결합될 수도 있다.

[0018] 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 전체 컨트롤러에 통합될 수 있다. 제약 조건으로 공식화된 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 전체 컨트롤러에 통합될 수 있다.

[0019] 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈 및/또는 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 가중될 수 있다. 가중 매트릭스가 가중에 사용될 수 있다. 가중 매트릭스는 가중 매트릭스(weighting matrix; W)라고도 한다.

[0020] 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈 및/또는 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 제어 문제가 과도하게 결정된 경우에도 전체 컨트롤러가 적어도 대략 수동적인 거동을 갖도록 가중될 수 있다.

[0021] 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈 및/또는 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 적어도 하나의 의사 역 및/또는 적어도 하나의 역을 사용하여 최적화될 수 있다.

[0022] 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈 및/또는 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 적어도 하나의 최적화 변수를 사용하여 최적화될 수 있다. 적어도 하나의 제 1 컨트롤러 모듈 및/또는 적어도 하나의 추가 컨트롤러 모듈은 2차적으로 최적화될 수 있다. 2차 최적화는 단일 인스턴스 또는 다수의 인스턴스에 의해 수행될 수 있다.

[0023] 컨트롤러 모듈들 중 적어도 하나는 추적 컨트롤러로 설계될 수 있다. 컨트롤러 모듈들 중 적어도 하나는 규제 컨트롤러로 설계될 수 있다. 제어 가능한 각각의 자유도에 별도의 컨트롤러 모듈이 할당될 수 있다.

[0024] 컴퓨터 프로그램 제품은 컴퓨터 판독 가능한 저장 매체에, 컴퓨터 판독 가능한 데이터 캐리어에 또는 데이터 캐리어 신호로서 존재할 수 있다.

[0025] 이 방법은 다음 단계들을 포함 수 있다: a) 모든 수동 추적 컨트롤러 모듈에 대한 원하는 태스크 포스 및 관련 태스크 매핑 매트릭스를 계산하는 단계로서, 수동 추척 컨트롤러 모듈의 공칭 거동은 스프링 질량 댐퍼 시스템에 해당하고, 또한 로봇의 자연 관성이 얻어지며, 태스크별 코리올리 및 원심 효과는 그대로 유지되면서 나머지 모든 코리올리 및 원심 효과가 보상되는, 상기 계산하는 단계, b) 모든 태스크에 대한 특수 수동성 보장 또는 수동성 촉진 가중 매트릭스를 계산하는 단계, c) 특수 수동성 보장 또는 수동성 촉진 가중 매트릭스를 사용하여 전체 컨트롤러를 형성하기 위한 최적화를 통해 개별 수동 추적 컨트롤러 모듈들을 통합 및 결합하는 단계.

[0026] 방법 단계 c)에서 수동 추적 컨트롤러 모듈들에 더하여, 다른 컨트롤러들 또는 컨트롤러 모듈들도 통합될 수 있다. 방법 단계 c)에서, 가중 태스크에 더하여, 하나 이상의 태스크가 제약 조건으로서 공식화될 수 있고 그에 따라 최적화에 의해 전체 컨트롤러에 통합될 수 있다. 방법 단계 c)에서 의사 역이 최적화에 사용될 수 있다. 방법 단계 c)에서 최적화는 2차 최적화 또는 "2차 계획법"(QP)의 개념을 기반으로 할 수 있다.

[0027] 본 발명은 토크 기반 로봇을 제어하기 위한 컨트롤러 모듈에 관한 것일 수 있다. 컨트롤러 모듈은 태스크 매핑 매트릭스와 원하는 태스크 벡터를 가질 수 있으며, 컨트롤러 모듈의 공칭 거동은 스프링-질량-댐퍼 시스템에 해당할 수 있다.

[0028] 해당 태스크 공간으로 투영될 수 있는 로봇의 자연 질량 또는 관성의 해당 질량 또는 관성은 커플라이언스 거동

이라 하며, 자연 로봇 질량 또는 자연 로봇 관성을 기반으로 하므로 소위 관성 셰이핑이 필요하지 않은 임피던스 거동에 상응한다.

[0029] 태스크별 코리올리 및 원심 효과는 영향을 받지 않고 나머지 모든 코리올리 및 원심 효과는 보상되므로 컨트롤러 모듈의 수동성이 달성될 수 있다.

[0030] 컨트롤러 모듈은 추적 컨트롤러로 설계될 수 있다. 컨트롤러 모듈은 규제 컨트롤러로 설계될 수 있으므로 사전 제어가 필요 없다.

[0031] 임의의 수의 그러한 컨트롤러 모듈들을 결합하여 전체 컨트롤러를 형성할 수 있다. 임의의 수의 이러한 컨트롤러 모듈들과 임의의 수의 다른 컨트롤러들 또는 컨트롤러 모듈들을 결합하여 전체 컨트롤러를 형성할 수 있다.

[0032] 본 발명은 컨트롤러 모듈에 따라 태스크를 가중함으로써 소프트한 우선순위 지정이 이루어질 수 있는 전체 컨트롤러에 관한 것일 수 있다.

[0033] 컨트롤러 모듈에 해당하는 태스크의 가중치는, 개별 태스크들의 타깃들이 서로 모순되므로 과도하게 결정된 제어 문제가 있더라도, 전체 컨트롤러의 수동성이 보장되거나 가능한 한 수동적 거동에 가까운 전체 컨트롤러의 거동이 생성되도록 설계될 수 있다.

[0034] 또한 하나 이상의 태스크가 엄격한 제약 조건으로 공식화될 수 있는 반면 나머지 모든 태스크들은 그러한 컨트롤러 모듈을 기반으로 하며 부드러운 가중에 의해 고려되거나 전체 컨트롤러에 통합된다.

[0035] 제어 문제를 해결하기 위해 2차 최적화가 사용될 수 있고, 이는 2차 최적화를 위한 단일 인스턴스와 2차 최적화를 위한 다수의 인스턴스에 의해 구현될 수 있다.

[0036] 제어 문제를 해결하기 위해 하나 이상의 의사 역 또는 역이 사용될 수 있다.

[0037] 제어 가능한 각각의 자유도에 별도의 컨트롤러 모듈이 할당될 수 있으며, 그 결과 개별 태스크 컨트롤러의 최대 세분성 또는 가능한 최대 디커플링이 달성된다.

[0038] 요약하면 그리고 달리 표현하면, 본 발명은 특히 힘/토크 제어 로봇을 위한 모듈식 수동 추적 컨트롤러를 제공한다.

[0039] 본 발명에 따른 컨트롤러는 중복 로봇 시스템의 정확하고 동시에 유연하고 견고한 제어를 가능하게 한다. 이것은 다양한 최적화 방법(당면한 문제에 따라 다름)을 사용하여 전체 컨트롤러에 결합되는 수동성 기반 컨트롤러 모듈들을 사용하여 달성된다. 다양한 태스크의 특별한 가중치를 사용함으로써 당면한 문제에 따라 전체 컨트롤러의 수동성이 보장되거나 적어도 촉진된다. 이 특수 가중치는 스칼라 태스크 가중치 수를 곱한 각각의 역 태스크 관성 매트릭스가 개별 태스크에 대한 가중치로 사용된다는 사실을 기반으로 한다. 컨트롤러 설계 및 분석은 수동성의 개념 또는 Lyapunov 이론을 기반으로 하며, 이는 제어의 높은 수준의 견고성을 가져온다.

[0040] 본 방법은 특이점, 모델링 에러 및 측정 노이즈에 강하고 사용이 매우 유연하며(컨트롤러 구조는 온라인에서 쉽게 변경 가능, 다른 컨트롤러 방법과 쉽게 결합 가능) 환경과 접촉할 때 매우 강인한 것으로 입증되었다. 실제 실험 중에 또는 실제 애플리케이션에 대한 조정 노력은 매우 적다. 여러 태스크가 서로 결합될 수 있다; 각각의 태스크는 가중치에 따라 전체 결과에 기여한다.

[0041] 따라서, 본 방법은 중복 토크 제어 로봇 시스템의 제어를 위해 선행 기술에 기술된 모든 방법의 가장 중요한 장점들을 결합하는 반면 모든 단점들을 피한다.

[0042] 본 방법은 역 동역학 기반 컨트롤러와 매우 강한, 소위 PD+ 기반 컨트롤러 사이의 거의 전체 스펙트럼을 커버한다. 원하는 디커플링의 세분성 또는 개별 하위 컨트롤러의 모듈성은 자유롭게 선택될 수 있다.

[0043] 본 발명에서 특히 다루는 기술 분야는 중복, 토크 제어 로봇 시스템의 제어이다. 여기에서, 멀티태스킹 태스크의 솔루션은 특히 전체 컨트롤러의 안정성 및 수동성, 원하는 참조 궤적의 정확한 추적, 모델 부정확성 및 센서 노이즈에 대한 견고성, 특이점에 대한 견고성, 구현의 유연성 및 다양한 부분 컨트롤러들의 조합 가능성, 및 접촉 안정성과 관련하여 어려운 문제이다.

[0044] 선행 기술은 이 태스크를 부분적으로 해결하는 실질적으로 두 가지 다른 방법, 즉 한편으로는 역 동역학 기반 방법, 및 다른 한편으로는 수동성 또는 임피던스 기반 방법을 포함한다. 선행 기술에 포함된 두 접근 방식은 아직 극복되지 않은 특정 단점들을 갖는다:

[0045] 역 동역학은 수동적이지 않으므로 실제 사용 시나리오에서 심각한 안정성 문제가 발생할 수 있다. 역 동역학은

여전히 모델 부정확성과 센서 노이즈에 강하지 않으며 특이점에도 취약하다. 역 동역학 기반 제어 방법에 의해서는 접촉 안정성이 항상 보장될 수 없다.

[0046] 선행 기술로부터 알려진 수동성 기반 또는 임피던스 기반 방법은 일반적으로 원하는 참조 궤적의 불량한 추적 또는 특이점에 대한 민감성을 갖는다. 또한 해당 컨트롤러 구현은 대부분 융통성이 없으며 서로 다른 부분 컨트롤러 또는 컨트롤러 유형의 조합이 제공되지 않는다.

[0047] 본 발명은 수동 또는 임피던스 기반의 추적 컨트롤러 모듈들을 최적화에 의해 서로 결합한 중복, 토크 제어 로봇 시스템의 제어 방법을 기반으로 한다. 특수 유형의 가중치는 개별 컨트롤러 모듈의 조합/합성을 통해 전체 시스템의 수동성이 사라지지 않도록 하거나 해당 조합/합성으로 인해 시스템에서 원치 않는 에너지 증가와 같은 액티비티가 발생하지 않도록 한다. 이러한 방식으로 앞서 언급한 모든 이점이 달성되고 해당 단점이 방지된다. 특히, 본 발명이 기반으로 하는 방법은 전체 시스템의 안정성과 수동성을 보장하거나 전체 시스템의 안정화 또는 패시베이션이 기술적으로 불가능한 경우 후자를 촉진하여 원하는 참조 궤적의 정확한 추적을 달성하고, 일관성이 없어서 기술적으로 실현될 수 없는 경우 특이점, 모델 부정확성 및 센서 노이즈에 강하고 우수한 접촉 안정성이 특징이며 무엇보다도 다양한 유형의 컨트롤러들이 서로 결합될 수 있는 유연한 구현이 가능하다. 따라서 본 발명이 기반으로 하는 방법은 여기에서 언급된 모든 문제를 완전히 해결한다.

[0048] 본 발명의 실시예들은 도면을 참조하여 아래에서 더 자세히 설명되며, 도면은 개략적으로 그리고 예시적으로 보여준다.

도면의 간단한 설명

[0049] 도 1은 역 동역학(ID; Inverse Dynamics)과 PD+ 제어 사이의 전체 범위를 커버하는 MPTC를 도시한다.

도 2는 완전히 결정되고 모순되지 않는 태스크 설정에 대한 단계 응답, 왼쪽: 관절 각도 및 참조, 오른쪽: 전체 및 태스크별 Lyapunov 함수 값을 도시한다.

도 3은 과도하게 결정된(따라서 모순되는) 태스크 설정에 대한 단계 응답을 도시한다.

도 4는 휴머노이드 로봇 TORO가 OpenHRP 시뮬레이션에서 걷고(단일 및 이중 지원 시간: TSS= 0.8s, TDS= 0.12s), 2.5초 후, 왼발은 x 방향으로 -60N의 외력에 의해 0.3초 동안 방해받는 것을 도시한다.

도 5는 TORO가 실험에서 걷는(단일 및 이중 지원 시간: TSS= 0.9s, TDS= 0.3s, 스텝 길이 0.15m) 것을 도시한다.

도 6은 본 발명에 따른 방법의 가능한 적용을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0050] "태스크 스택" 기반 컨트롤러 프레임워크를 위한 모듈식 수동 추적 컨트롤러(MPTC)의 구현이 설명된다.

[0051] 요약

[0052] 본 논문은 소위 MPTC(Modular Passive Tracking Controller)를 소개하는데, 이는 서로 다른 하위 태스크의 타깃을 서로 독립적으로 달성하는 것을 목표로 하는 일반적인 수동성 기반 컨트롤러이다. 이들은 전체 시스템 컨트롤러의 합성을 위한 기초 역할을 하는 태스크 스택(SoT)에서 서로 결합된다. 해당 분석 및 컨트롤러 설계는 Lyapunov 이론을 기반으로 한다. 이 논문의 중요한 기여는 과도하게 결정되어 모순되는 태스크 설정의 수동성을 보장하는 특정 최적화-가중 매트릭스의 설계이다. 제안된 프레임워크는 고정 및 자유 부동 로봇에 대한 시뮬레이션 및 실험에 의해 검증된다.

[0053] Ⅰ. 소개

[0054] 서로 다른 태스크들의 동시 제어는 로봇 제어 분야에서 중요한 연구 주제가 되었다. 이전 작업들은 운동학적으로 중복된 로봇을 위한 단일 태스크와 그 제로 공간의 더 단순한 경우를 고려했지만, 현재는 우선 순위가 있거나 없는 여러 태스크를 처리하기 위한 몇 가지 확립된 프레임워크가 있다. 문헌에서는 먼저 운동학적 수준에서 태스크 조정 문제를 해결하는 태스크들과 역학에 대한 제어를 직접 공식화하는 태스크들이 구분된다. 또 다른 중요한 분류는 태스크 가중치에 의한 소프트한 우선 순위 지정을 사용하는 컨트롤러들에 비해 계층적 컨트롤러에 의한 엄격한 태스크 우선 순위를 사용하는 것에 기반하여 수행될 수 있다.

[0055] 운동학적 제어 분야에서 엄격한 태스크 계층[18.2]를 보장하기 위해 연속적이거나 증가된 제로 공간 투영을 기

반으로 하는 계층적 컨트롤러가 제안되었다. 태스크 특이점을 처리하기 위해 특이점에 강한 역운동학이 제안되었다[4]. 그러나 이 특이점에 강한 역은 엄격한 태스크 계층을 파괴하고 결국 서로 다른 태스크들 간에 가중치를 생성한다.

[0056] 다른 프레임워크들은 동적 수준에서 여러 태스크들을 처리한다. 조작 공간 접근 방식은 휴머노이드 로봇 공학[22, 23]에 적용을 통해 이 방향으로 확장되었다. 다른 역 동역학(ID) 기반 컨트롤러들은 계층적 2차 계획법(QP)[20, 11, 3]을 사용한다. 이 태스크들의 대부분은 엄격한 태스크 디커플링을 목표로 한다.

[0057] 본 논문은 단일 가중 QP[13, 15, 10]를 사용하여 여러 태스크들(태스크 스택(SoT)에 결합된)을 서로 비교하는 역 동역학 기반 추적 컨트롤러들의 패밀리에 의해 영감을 받았다. 이러한 컨트롤러들은 구현하기 쉽고 높은 유연성이 특징이다. 그러나 이러한 컨트롤러들은 [19, 5, 12, 16, 6]과 같은 수동성 기반 접근 방식과 비교하여 모델링 에러 및 접촉 불확실성에 대해 덜 강하다[10, 6]. 이는 실제 시스템에 구현될 때 진동과 같은 문제들을 야기하고, 이 문제들은 종종 휴리스틱 접근 방식에 의해 해결된다[13, 10].

[0058] 또한 [3]의 가중치 기반 다목적 컨트롤러와 [6]의 엄격한 계층적 수동성 기반 컨트롤러가 이 논문에 영감을 주었다. [3]과 유사하게 여기에서 QP를 사용하여 서로 다른 태스크 공간 컨트롤러의 개별 제어 타깃을 결합한다. 그러나 [3]에서 각각의 개별 제어 타깃은 원하는 관성(피드백 선형화)으로서 항등 매트릭스를 사용하여 역 동역학을 기반으로 계산된다. 대조적으로 여기에 제시된 개별 태스크 컨트롤러들은 수동성 개념을 사용하고 관성 수정을 피한다. 즉, 각각의 개별 태스크[19]에 대해 PD+유형의 폐루프 거동을 목표로 한다. 자연 관성도 유지되는 [6]과 비교하여, 가중된 QP 공식(소프트한 우선 순위 지정)을 사용하여 임의의 수의 다양한 태스크를 서로 결합할 수 있으며 특정 상황(예: 단일 태스크가 특이하게 되는 경우)에서 덜 공격적인 거동으로 이어진다.

[0059] 이 논문에서 우리는 소위 MPTC(Modular Passive Tracking Controllers)라고 하는 통상 수동 하위 태스크 컨트롤러를 기반으로 하는 제어 아키텍처를 도출한다. 이것들은 태스크 스택에 의해 서로 결합되고 서로 비교된다. 여기서 태스크 스택은 단일 가중 의사 역 또는 해당 QP에 의해 해결된다. 제어 프레임워크는 역 동역학 컨트롤러와 수동성 기반 컨트롤러의 장점들, 즉 구현 및 사용의 단순성, 태스크 공간 추적 지원, 수동성 및 접촉 견고성, 특이점의 자연스러운 처리를 결합한다. 해당 안정성 분석은 Lyapunov 이론을 기반으로 한다. 태스크가 서로 모순되지 않는 경우 전체 컨트롤러가 점근적으로 안정적이고 수동적이라는 것이 밝혀졌다. 제시된 논문의 중요한 기여는 특정 최적화 가중치의 도출이며, 이는 과도하게 결정된(즉, 모순되는) 경우에도 수동성을 추가로 유지한다. 경쟁 태스크 및 일관성 없는 해당 태스크 참조의 경우, 여러 시뮬레이션에서 공식적인 안정성 증명이 아직 없지만 추적 경우에서도 MPTC의 안정성과 견고성이 나타난다.

[0060] 이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다: Ⅱ 장은 태스크 수준에서 모듈식 수동 추적 컨트롤러(MPTC)를 도출하고 Ⅲ 장은 전체 폐루프 및 컨트롤러 도출에 대한 해당 분석을 제시한다. Ⅳ 장은 MPTC를 역 동역학(ID) 및 PD+ 기반 컨트롤러와 비교하고 가능한 다양한 형태의 디커플링을 제시한다. Ⅴ장은 고정 기반 로봇과 자유 부동 로봇 모두에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 Ⅵ 장은 논문을 마무리한다.

[0061] Ⅱ. 모듈식 수동 추적 컨트롤러(MPTC)의 도출

[0062] 이 논문은 각각 고유한 개별 타깃이 있는 n_T 태스크를 고려한다. 개별 태스크의 타깃을 만족시키기 위해 이 장은 모듈식 수동 추적 컨트롤러들(MPTC)을 도출하고 이들은 Ⅲ 장에서 다양한 전체 컨트롤러로 결합된다.

[0063] A. 일반적인 로봇 모델

[0064] 로봇의 일반 운동 방정식은 다음과 같이 표시될 수 있다.

[0065] $$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) = \tau \quad (1)$$

[0066] 여기서 $q \in \mathbb{R}^n$는 일반화된 좌표[1]를 나타내고, M(q), $C(q,\dot{q})$ 및 τ_g(q)는 관성 매트릭스, 코리올리 및 원심 매트릭스, 및 중력 토크[2]를 나타낸다.

[0067] $$\tau = S^T(\tau_j + \tau_{int}) + \underbrace{L_{all}^T w_{all}}_{\tau_{ext}} \quad (2)$$

[0068] 는 일반화된 힘을 나타낸다. 이것은 한편으로는 관절 모터 토크 τ_j, 및 로봇 관절에 작용하는 내부 간섭 토크 τ_{int}(예: 관절 마찰) 그리고 다른 한편으로는 외부 토크 τ_{ext}로 구성되고, 상기 관절 모터 토크 및 내부 간섭 토크

는 관절 선택 매트릭스 S^3을 통해 τ에 작용한다. 후자는 n_L 로봇 사지(왼쪽)에 작용하는 모든 렌치(힘과 토크의 조합) $w_{all}=[w_1^T,...,w_{n_L}^T]^T$의 전체로 구성되고, 스택된 링크-Jacobians $L_{all}=[L_1^T,...,L_{n_L}^T]^T$을 통해 τ에 작용한다. Ⅲ-E 장은 (2)의 개별 요소를 사용하지만 다음에서는 단순히 τ를 사용하여 임의의 일반화된 힘을 나타낸다.

[0069] 일반화된 가속도 $\ddot{q}$에 따라 (1)을 풀면

[0070] $$\ddot{q}=M^{-1}\left(\tau-C\dot{q}-\tau_g\right). \quad (3)$$

[0071] B. 태스크 공간 변수

[0072] 1) 태스크 공간 속도 및 가속도: 로봇 제어에서, 일반적인 태스크 공간[4]에 대해 태스크 속도 벡터

[0073] $$\dot{x}_k=J_k\dot{q} \quad (4)$$

[0074] 가 공식화될 수 있다. 인덱스 k는 모든 n_T 태스크에 대해 이러한 매핑이 존재함을 나타낸다. 즉, $k\in\{1,..,n_T\}$. 여기에서 $J_k\in\mathbb{R}^{n_{r,k}\times n}$은 k-번째 태스크의 차원 $n_{r,k}$을 갖는 해당 태스크-Jacobian을 나타낸다. 시간과 관련해서 (4)를 도출하고 (3)을 대입하여 태스크 공간 가속

[0075] $$\ddot{x}_k=\dot{J}_k\dot{q}+J_k\ddot{q}=J_kM^{-1}\left(\tau-\tau_g\right)-Q_k\dot{q}, \quad (5)$$

[0076] 을 찾는다. 여기서,

[0077] $$Q_k=J_kM^{-1}C-\dot{J}_k. \quad (6)$$

[0078] 주석[1] 고정 기반 로봇의 경우 이들은 단순히 관절 좌표 q_j로 구성되고(즉, $q=q_j$), 자유 부동 로봇(예: 휴머노이드)의 경우 추가로 로봇 기본 좌표 x_b를 포함한다(즉, $q=[x_b^T,q_j^T]^T$)

[0079] 주석[2] 참고: q와 $\dot{q}$의 종속성은 다음에서 무시된다.

[0080] 주석[3] 참고: 고정 기반 로봇의 경우 S는 항등 매트릭스이고 자유 부동 로봇의 경우 $S=[0_{n_{act}\times 6},I_{n_{act}\times n_{act}}]$이고, 여기서 n_{act}는 작동 로봇 관절의 수를 나타낸다.

[0081] 주석[4] 일반적인 태스크들은 예를 들어 관절 컨트롤러 및 데카르트 엔드 이펙터 컨트롤러이다.

[0082] 추적 컨트롤러 설계의 경우(Ⅱ-C 장 참조) 해당 태스크 속도 에러

[0083] $$\dot{\tilde{x}}_k=\dot{x}_{k,ref}-\underbrace{J_k\dot{q}}_{\dot{x}_k} \quad (7)$$

[0084] 및 태스크 가속 에러

[0085] $$\ddot{\tilde{x}}_k=\ddot{x}_{k,ref}-\underbrace{\left(J_kM^{-1}\left(\tau-\tau_g\right)-Q_k\dot{q}\right)}_{\ddot{x}_k} \quad (8)$$

[0086] 가 특히 중요하다. 여기서, $\dot{x}_{k,ref}$ 및 $\ddot{x}_{k,ref}$은 태스크 참조 속도 및 태스크 참조 가속을 나타낸다.

[0087] 2) 태스크 공간 관성 및 그 도출: J_k를 사용하여 관성 매트릭스 M을 태스크 공간[17]에 투영할 수 있다:

[0088] $$M_k=(J_k\ M^{-1}\ J_k^T)^{-1} \quad (9)$$

[0089] (9)로부터 태스크 공간 코리올리 및 원심 매트릭스

[0090] $$C_k=M_kQ_kT_k^T \quad (11)$$

[0091] 를 사용하여

$$\dot{M}_k = -M_k\left(\dot{J}_k M^{-1} J_k^T - J_k M^{-1}\overbrace{\dot{M}}^{C+C^T} M^{-1} J_k^T + J_k M^{-1}\dot{J}_k^T\right) M_k$$

[0092] $$= C_k + C_k^T \,, \qquad (10)$$

[0093] 을 도출한다.

[0094] 매트릭스

[0095] $$T_k = M_k J_k M^{-1} \qquad (12)$$

[0096] 는 J_k^T의 동적으로 일관된 의사 역을 나타낸다.

[0097] C. MPTC(Modular Passive Tracking Controller)

[0098] 이 장은 제안된 MPTC(Modular Passive Tracking Controller)를 도출한다. 이것은 일반 형식으로 작성되어 특정 컨트롤러(예: 데카르트 또는 관절 컨트롤러)에 대한 템플릿 역할을 한다. 각 n_T 태스크에 대해 태스크 관련 상대 운동 에너지 $E_{kin,k}$ 및 상대 포텐셜 에너지 $E_{pot,k}$를 기반으로 별도의 Lyapunov 함수를 사용한다:

[0099] $$V_k = \underbrace{\frac{1}{2}\dot{\tilde{x}}_k^T M_k \dot{\tilde{x}}_k}_{E_{kin,k}} + \underbrace{\frac{1}{2}\tilde{x}_k^T K_k \tilde{x}_k}_{E_{pot,k}} \,, \qquad (13)$$

[0100] 여기서, 양의 정부호 대칭 매트릭스 K_k는 태스크 강성을 나타낸다. 이 Lyapunov 함수는 태스크 위치 에러 $\tilde{x}_k$ 및 태스크 속도 에러 $\dot{\tilde{x}}_k$와 관련하여 양의 정부호이다.

[0101] (13)의 도출과 (8)의 대입에 의해

[0102] $$\begin{aligned}\dot{V}_k &= \dot{\tilde{x}}_k^T\left(M_k\ddot{\tilde{x}}_k + \frac{\dot{M}_k}{2}\dot{\tilde{x}}_k + K_k\tilde{x}_k\right)\\ &= \dot{\tilde{x}}_k^T\Big(\underbrace{M_k J_k M^{-1}}_{T_k}(\tau_g - \tau) + M_k Q_k \dot{q}\\ &\quad + M_k\ddot{x}_{k,ref} + C_k\dot{\tilde{x}}_k + K_k\tilde{x}_k\Big)\end{aligned} \qquad (14)$$

[0103] 를 얻는다.

[0104] 여기서 다음 방정식이 사용되었다:

[0105] $$\frac{\dot{M}_k}{2} = \frac{C_k^T + C_k}{2} = \underbrace{\frac{C_k^T - C_k}{2}}_{\text{skew-symmetric}} + C_k \qquad (15)$$

[0106] 비대칭 항이 삭제되기 때문에 $\dot{\tilde{x}}_k^T\frac{\dot{M}_k}{2}\dot{\tilde{x}}_k$을 $\dot{\tilde{x}}_k^T C_k\dot{\tilde{x}}_k$로 다시 쓸 수 있다.

[0107] 이제, (실제) 태스크 포스[5] f_k를 다음과 같이 정의한다:

[0108] $$f_k = T_k^T\tau \,. \qquad (16)$$

[0109] 원하는 태스크 포스[6] $f_{k,des}$를

[0110] $$f_{k,des} = T_k\tau_g + M_k Q_k\dot{q} + M_k\ddot{x}_{k,ref} + (C_k + D_k)\dot{\tilde{x}}_k + K_k\tilde{x}_k \qquad (17)$$

[0111] 로 선택하고 $T_k^T\tau$를

[0112] $$T_k^T\tau = f_k = f_{k,des} - \underbrace{(f_{k,des} - f_k)}_{\tilde{f}_k} \,. \qquad (18)$$

[0113] 로 다시 써서, (14)로부터 다음의 단일 태스크 Lyapunov 비율을 구한다.

[0114] $$\dot{V}_k = \underbrace{-\dot{\tilde{x}}_k^T D_k \dot{\tilde{x}}_k}_{\dot{V}_{k,des}:\ \text{purely dissipative}} + \underbrace{\dot{\tilde{x}}_k^T \tilde{f}_k}_{\dot{V}_k} \quad (19)$$

[0115] 제어 시스템(태스크 수준에서)은 (13)의 입력 $\tilde{f}_k$, 출력 $\dot{\tilde{x}}_k$ 및 메모리 기능 V_k에 대해 수동적이다. 원하는 Lyapunov 속도 $\dot{V}_{k,des}$는 양의 정부호 감쇠 매트릭스 D_k에 대해 순수하게 수동적이지만, 항 $\tilde{f}_k$는 알려지지 않은 간섭, 작동 부족 및 기타 액추에이터 한계, 태스크 불일치(task inconsistency) 및 우선 순위 지정과 같은 요인에 따라 0이 아닐 수 있다. 끝으로, (8)을 M_k와 곱하고, (18)과 (17)을 대체하며, 단순화하고 조정하여 태스크 역학을 다음 형식으로 표시한다.

[0116] $$M_k \ddot{\tilde{x}}_k + \left(C_k + D_k\right) \dot{\tilde{x}}_k + K_k \tilde{x}_k = \tilde{f}_k \quad (20)$$

[0117] 태스크 관련 코리올리 항(즉, $C_k \dot{\tilde{x}}_k$)이 단축되지 않았으며, 이는 수동성에 대한 전제 조건이다. 원하는 태스크 포스에 도달하면(즉, $\tilde{f}_k = 0$), 식 (20)은 태스크 k에 대한 스프링-질량-댐퍼 역학에 해당한다. 호환 가능한 태스크의 경우, 모든 궤적의 점근적 안정성이 나타날 수 있다. 이것은 예를 들어 [6]과 유사하게 음의 정부호 시간 도함수를 갖는 강력한 Lyapunov 함수를 얻기 위해 ε-방법 [17]을 사용함으로써 달성될 수 있다.

[0118] 그렇지 않은 경우, 예를 들어 작동 부족 또는 기타 액추에이터 한계, 예기치 않은 외부 간섭 또는 모순되는 태스크의 경우, (20)은 컴플라이언스[7] 거동[7]에 해당한다. 이러한 경우 추가 분석이 필요할 수 있다. 이 논문에서, 다음 장에서 다루게 될 태스크 불일치(task inconsistency) 문제에 초점을 맞춘다.

[0119] III. 전체 시스템 및 전체 컨트롤러의 폐루프 거동의 분석

[0120] 이 장에서, 하위 태스크 컨트롤러들로 구성된 전체 시스템에 대한 컨트롤러, 즉 $k \in \{1,..,n_T\}$에 대한 (17)의 원하는 태스크 포스 $f_{k,des}$의 전체 세트에 대한 컨트롤러를 도출하고 Lyapunov 이론의 적용에 의해 폐루프 거동을 분석한다.

[0121] A. 다양한 태스크 포스 에러의 정의

[0122] $k \in \{1,..,n_T\}$에 대한 (17)의 모든 원하는 태스크 포스 $f_{k,des}$의 결합에 의해 다음을 얻는다.

[0123] $$f_{des} = \begin{bmatrix} f_{1,des} \\ \vdots \\ f_{n_T,des} \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0124] 유사하게, 모든 $k \in \{1,..,n_T\}$에 대한 (16)을 결합하고 다음을 얻는다.

[0125] $$\underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{n_T} \end{bmatrix}}_{f} = \underbrace{\begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{n_T} \end{bmatrix}}_{T} \tau \quad (22)$$

[0126] 주석[5] 참고: 태스크에 따라 태스크 포스에는 선형 힘, 토크, 렌치 등이 포함될 수 있다.

[0127] 주석[6] 참고: 상기 원하는 태스크 포스 $f_{k,des}$는 III 장에서 태스크별 컨트롤러 타깃으로 사용된다. IV-B 장에서 PD+ 공식에 대한 컨트롤러의 유사성을 쉽게 확인할 수 있게 하는 대체(동등한) 컨트롤러 공식(55)을 제시한다.

[0128] 주석[7] 컴플라이언스는 자연 관성이 있는 임피던스 거동(관성 수정 없음)을 의미한다.

[0129] 이는 해당 통합 태스크 매핑 매트릭스 $T \in \mathbb{R}^{n_{T,all} \times n}$를 통해 실제 일반화된 포스 τ를 실제 태스크 포스의 스택에 매핑하는 것을 나타낸다. 여기서 모든 하위 태스크 차원에 대한 합계는 $n_{T,all} = \sum_{k=1}^{n_T} n_{T,k}$로 표시된다. 이제 실제 태스크 포스 에러의 스택을 다음과 같이 정의한다.

[0130] $$\tilde{f} = f_{des} - f = f_{des} - T\tau \quad (23)$$

[0131] 명령된 태스크 포스 및 해당 에러에 대한 논의를 단순화하기 위해, 이제 컨트롤러[8]에 의해 생성된 명령된 일반화된 포스 τ_{cmd}에 대해 (22)를 평가하고 다음을 얻는다.

[0132] $$f_{cmd} = \begin{bmatrix} f_{1,cmd} \\ \vdots \\ f_{n_T,cmd} \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}\ \tau_{cmd} = \underbrace{\boldsymbol{T}\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{T}_u} u_{cmd} \quad (24)$$

[0133] 여기서, f_{cmd}는 명령된 태스크 포스의 스택을 나타낸다. 특정 제어 문제(예를 들어, 작동 부족, Ⅲ-E 장 참조)의 경우, 주어진 최적화 변수 u_{cmd}는 τ_{cmd}를 초래할 수 있으며, 이는 작동 매핑 매트릭스 U를 통해, 즉 $\tau_{cmd} = U\, u_{cmd}$를 통해 해당하는 일반화된 포스에 매핑된다.

[0134] 끝으로, (21)에서 (24)를 빼서 해당하는 명령된 태스크 포스 에러의 스택을 얻는다.

[0135] $$\tilde{f}_{cmd} = f_{des} - f_{cmd} = f_{des} - \boldsymbol{T}\,\tau_{cmd} = f_{des} - \boldsymbol{T}_u\, u_{cmd} \quad (25)$$

[0136] B. 전체 시스템과 실제 및 명령된 도함수에 대한 Lyapunov 함수의 정의

[0137] 이 장에서는 전체 모듈식 태스크 공간 컨트롤러 세트의 안정성과 수동성(및 그에 따라 모든 로봇 자유도가 결합된 태스크 좌표에 의해 커버되는 경우 로봇 전체 시스템의 안정성)을 분석할 것이다. 이를 위해 모든 단일 태스크 Lyapunov 함수(13)를 결합하여 다음과 같은 전체 Lyapunov 함수를 구성한다.

[0138] $$V = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k V_k \right) \quad (26)$$

[0139] 이는 양의 스칼라 가중치[9] $\psi_k > 0$에 대해 양의 정부호이다(입력 요소 V_k와 마찬가지로). 유사한 방식으로, (19)의 개별 태스크의 Lyapunov 함수 도함수 $\dot{V}_k$를 결합하여 전체 Lyapunov 함수 도함수 $\dot{V}$를 얻는다:

[0140] $$\dot{V} = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_k \right) = \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_{k,des} \right)}_{\dot{V}_{des}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \tilde{\dot{V}}_k \right)}_{\tilde{\dot{V}}} \quad (27)$$

[0141] 항 $\dot{V}_{des}$은 모든 원하는 태스크 Lyapunov 함수 도함수 $\dot{V}_{k,des}$가 음의 준정부호이기 때문에 모든 $\psi_k > 0$경우 음의 준정부호이다. 전체 Lyapunov 함수 도함수의 실제 에러 $\tilde{\dot{V}}$는 다음과 같이 표시될 수 있다.

[0142] $$\tilde{\dot{V}} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \underbrace{\begin{bmatrix} \psi_1 \boldsymbol{I} & \cdots & \boldsymbol{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{0} & \cdots & \psi_{n_T} \boldsymbol{I} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\Psi}} \tilde{f} \quad (28)$$

[0143] 여기서, $\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T = \left[\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_1^T, \ldots, \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_{n_T}^T \right]$. $\tilde{\dot{V}}$는 $\tilde{f}$의 함수이므로 실제 일반화된 포스 τ이다.

[0144] 이제 명령된 태스크 포스 에러 $\tilde{f}_{cmd}$의 스택의 영향을 추가로 조사한다. 그에 따라 (28)을 조정하면 전체 Lyapunov 함수 도함수의 명령된 에러를 찾고

[0145] $$\tilde{\dot{V}}_{cmd} = \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}^T \boldsymbol{\Psi}\ \tilde{f}_{cmd} \quad (29)$$

[0146] 이는 다음 명령된 전체 Lyapunov 함수 도함수에 해당한다.

[0147] $$\dot{V}_{cmd} = \dot{V}_{des} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \tilde{\dot{V}}_{k,cmd} \right)}_{\tilde{\dot{V}}_{cmd}} \quad (30)$$

[0148] 주석[8] 가능한 컨트롤러들은 부등식 기반 제약을 처리하기 위해, 예를 들어 제한되지 않은 제어 문제를 위한 (36)에서와 같이 의사 역 기반 최적화 또는 2차 계획법(QP) 기반 최적화(Ⅲ-E 장 참조)를 사용할 수 있다.

[0149] 주석[9] 참고: 상기 양의 스칼라 가중치 ψ_k는 (34) 및 (41)에서 사용된 최적화 가중치와 동일하다.

[0150] 여기서, $\dot{\tilde{V}}_{k,cmd} = \dot{\tilde{x}}_k^T \tilde{f}_{k,cmd}$. 끝으로 (28)을 다음과 같이 다시 표시한다.

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{V}} &= \dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{f_{des} - f}^{\tilde{f}}\right) \\ &= \underbrace{\dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{f_{des} - f_{cmd}}^{\tilde{f}_{cmd}}\right)}_{\dot{\tilde{V}}_{cmd}} + \underbrace{\dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{f_{cmd} - f}^{\tilde{f}_{real}}\right)}_{\dot{\tilde{V}}_{real}},\end{aligned}$$

[0151] (31)

[0152] 이는 실제 시스템 거동에 관련된 실제 전체 Lyapunov 함수 도함수이다.

[0153] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{cmd} + \dot{\tilde{V}}_{real} \quad (32)$$

[0154] 여기서,

[0155] $$\dot{\tilde{V}}_{real} = \dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{f_{cmd} - f}^{\tilde{f}_{real}}\right) \quad (33)$$

[0156] 는 실제 태스크 포스 f 중 명령된 태스크 포스 $\tilde{f}_{cmd}$의 편차 $\tilde{f}_{real}$에 해당하는 Lyapunov 함수 도함수의 에러의 구성 요소를 나타낸다.

[0157] C. 전체 시스템의 비용 함수

[0158] (25)의 $\tilde{f}_{cmd}$에 따라 전체 시스템에 대해 다음과 같은 비용 함수를 공식화한다.

$$\begin{aligned}G &= \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd}^T \boldsymbol{W}\, \tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} \\ &= \frac{1}{2}\boldsymbol{\tau}_{cmd}^T \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} \boldsymbol{\tau}_{cmd} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T} \boldsymbol{\tau}_{cmd} + \frac{1}{2}\boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{f}_{des} \\ &= \frac{1}{2}\boldsymbol{u}_{cmd}^T \boldsymbol{T}_u^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T}_u \boldsymbol{u}_{cmd} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{T}_u \boldsymbol{u}_{cmd} + \frac{1}{2}\boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{f}_{des}\end{aligned}$$

[0159] (34)

[0160] 여기서, W는 대칭 및 양의 정부호 가중 매트릭스를 나타낸다. 이 비용 함수 G는 Ⅲ-D 및 Ⅲ-E장에 제시된 다양한 컨트롤러에 의해 최소화된다.

[0161] D. 제한되지 않고 완전히 작동되는 경우

[0162] 1) 의사 역 기반 일반 분석 최적화: 이 장에서는 완전히 작동되는, 제한되지 않는 그리고 잠재적으로 모순되는 경우를 고려한다. 부등식 기반 제약이 없기 때문에 전체 작동이 제어 가능성을 보장하고 명령된 일반화된 포스 τ_{cmd}를 최적화 변수로 직접 사용할 수 있는 가중된 의사 역에 의한 분석 솔루션이 가능하다. 이 경우 비용 함수 (34, 제 2 라인)를 최적화하기 위해 τ_{cmd}에 따라 G를 미분한다:

[0163] $$\frac{dG}{d\boldsymbol{\tau}_{cmd}} = \boldsymbol{\tau}_{cmd}^T \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T} - \boldsymbol{f}_{des}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T} \quad (35)$$

[0164] 비용 함수(34)는 (35)를 0으로 설정하고 컨트롤러 포스 τ_{cmd}에 따라 풀면 최소화된다:

[0165] $$\boldsymbol{\tau}_{cmd} = \left(\boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T}\right)^{-1} \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{f}_{des} \quad (36)$$

[0166] 이들은 주어진 문제에 대한 최적의 일반화된 포스 명령이다. (36)을 (25)에 대입하면

[0167] $$\tilde{\boldsymbol{f}}_{cmd} = \underbrace{\left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{T}\left(\boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\, \boldsymbol{T}\right)^{-1} \boldsymbol{T}^T \boldsymbol{W}\right)}_{\boldsymbol{E}_T} \boldsymbol{f}_{des} \quad (37)$$

[0168] 여기서, E_T는 태스크 포스 균형 매트릭스를 나타낸다.

[0169] 2) 모순되지 않는 경우: T가 2차이고 가역적이면(즉, 모든 하위 태스크가 서로 독립적이고 서로 모순되지 않음), (37)의 균형 매트릭스는 E_T = 0이 되고 명령된 태스크 포스 에러는 $\tilde{f}_{cmd} = 0$이 된다. 이 경우 (29)의 $\dot{\tilde{V}}_{cmd}$도 0이 되므로 (32)의 $\dot{V}$는

[0170] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{real} \quad (38)$$

[0171] 이 된다.

[0172] 3) 모순되는 경우: T가 가역적이지 않으면(예: 컨트롤러 설정이 과도하게 결정된 경우), 균형 매트릭스 E_T는 0이 아니다. (37)을 (29)에 대입하면 전체 Lyapunov 함수 도함수의 해당 명령된 에러는 다음과 같다.

[0173] $$\dot{V}_{cmd} = (\dot{x}_{ref}^T - \dot{q}^T J^T)\,\Psi\, E_T\, f_{des} \quad (39)$$

[0174] 여기서, $J = [J^T, \ldots, J_n^T]^T$는 단일 태스크 Jacobians의 스택을 나타낸다.

[0175] 먼저, 모순되는 규제의 경우$(\dot{x}_{ref} = 0)$를 고려하고 (39)에 나타나는 매트릭스 $J^T \Psi E_T$를 조사한다.

[0176] $$\begin{aligned} J^T\Psi E_T &= J^T\Psi\left(I - T\left(T^T W T\right)^{-1} T^T W\right) \\ &= J^T\Psi\left(I - \Lambda J\left(J^T \Lambda W \Lambda J\right)^{-1} J^T \Lambda W\right) \end{aligned} \quad (40)$$

[0177] 여기서, $T = \Lambda J M^{-1}$을 삽입한다. 여기서, Λ는 대각선 부분 매트릭스로서 태스크 공간 관성 매트릭스 $\{M_1, \ldots, M_n\}$를 포함하는 블록 대각선 매트릭스이다. W^{10}을 선택하면 (40)은 0이 아니므로 (39)의 $\dot{V}_{cmd}$은 규제의 경우에도 0이 아니다. 그러나 만약

[0178] $$W = \Lambda^{-1}\Psi \quad (41)$$

[0179] 이 선택되면 (40)은 다음과 같이 된다.

[0180] $$J^T\Psi E_T = J^T\Psi - \underbrace{J^T\Psi\Lambda J\left(J^T\Psi\Lambda J\right)^{-1}}_{I} J^T\Psi = 0. \quad (42)$$

[0181] 이는 (현재 일반화된 속도 $\dot{q}$ 및 원하는 태스크 포스 f_{des}에 관계없이) 선택(41)에 있어 규제의 경우 $(\dot{x}_{ref} = 0)$에 (39)의 명령된 Lyapunov 함수 도함수 $\dot{V}_{cmd}$가 다음과 같이 되고,

[0182] $$\dot{V}_{cmd} = 0 \quad (43)$$

[0183] (32)의 $\dot{V}$는 다음과 같이 된다.

[0184] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{V}_{real}. \quad (44)$$

[0185] (44)의 요소에 대한 분석은 제어된 전체 시스템이 입력 $\Psi\tilde{f}_{real}$, 출력 $\dot{\tilde{x}}$(이 두 요소는 $\dot{V}_{real}$의 요소들을 나타냄), 및 (26)의 양의 정부호 저장 함수 V에 대해 수동적이라는 것을 나타낸다. 따라서 여기서 조사된 모순된 규제의 경우에 전체 시스템의 수동성이 추론될 수 있다. 과도하게 결정된/모순되는 태스크 설정(규제의 경우)의 전체 시스템 폐루프 역학에 대해, (41)은 수동성 보장 최적화 가중치(PWOW)로 작용한다. (43)은 개별 태스크의 Lyapunov 함수 도함수 에러 $\dot{V}_{k,cmd}$가 0이 된다는 것을 의미하지 않는다(그 합만).

[0186] (41)의 전체 가중 매트릭스 $W = \Lambda^{-1}\Psi$는 대칭적이고 블록 대각선이다. 대칭 특성은 대각선 하위 매트릭스의 대칭으로 인해 발생한다.

[0187] $$W_k = \psi_k M_k^{-1} \quad (45)$$

[0188] 이는 ψ_k의 함수이고 (대칭) 태스크 관성 매트릭스 M_k의 역수이다. (45)를 살펴보면 각 태스크가 해당 가중치 스칼라 ψ_k에 의해 여전히 독립적으로(다른 태스크와 관련해서) 가중될 수 있음이 분명해진다.

[0189] 이제 모순되는 추적 경우를 살펴볼 것이다. $\dot{x}_{ref} \neq 0$이고 (41)이 여전히 사용된다면, (39)는 다음과 같이 된다.

[0190] $$\dot{V}_{cmd} = \dot{x}_{ref}^T\,\Psi\, E_T\, f_{des} \quad (46)$$

[0191] 이를 위해 식 (32)는 다음과 같이 된다.

[0192] $$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \underbrace{\dot{\boldsymbol{x}}_{ref}^{T}\,\boldsymbol{\Psi}\,\boldsymbol{E}_{T}\,\boldsymbol{f}_{des}}_{\hat{V}_{cmd}} + \hat{V}_{real} \quad (47)$$

[0193] 일관되지 않은 태스크 참조 속도에 대해, $\hat{V}_{cmd}$는 일반적으로 0이 되지 않으므로 추적 경우에 대한 형식적인 수동성 증명이 어려워진다(이 문서의 내용 아님).

[0194] 주석[10] 역 동역학(ID) 관련 문헌에서 흔히 볼 수 있는 것처럼 W가 대각 매트릭스로 선택되더라도

[0195] E. 작동 부족 및 기타 작동 제한의 처리

[0196] 이전 장에 제시된 분석 솔루션은 작동 제한(또는 기타 제한)이 관련되지 않은 완전히 작동된 로봇에서 시작하는 제어 문제를 위한 것이다. 본 장에서는 작동 부족 및 작동 제한의 경우를 다루고 MPTC의 맥락에서 이러한 문제에 대한 솔루션을 제안할 것이다.

[0197] 1) 작동 부족: 고정 기반 로봇과는 달리 소위 자유 부동 로봇(예: 휴머노이드)의 로봇 베이스는 작동되지 않는다. 일정 수준의 제어 가능성을 얻기 위해 자유 부동 로봇은 엔드 이펙터를 사용하여 직접 베이스 작동의 부족을 보완하는 접촉력을 생성해야 한다. Ⅲ-D 장의 해당 작동 매핑 매트릭스 U는 다음과 같은 형식을 갖는다:

[0198] $$\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{S}^{T}, \boldsymbol{L}_{EE}^{T}] \quad (48)$$

[0199] 해당 작동 자유도/최적화 변수는 다음과 같다.

[0200] $$\boldsymbol{u}_{cmd} = \begin{bmatrix} \tau_{j,cmd} \\ \boldsymbol{w}_{EE,cmd} \end{bmatrix} \quad (49)$$

[0201] 여기서, $\tau_{j,cmd}$는 명령된 관절 토크를 나타내고 $w_{EE,cmd}$는 명령된 엔드 이펙터 포스이다. 식 (48) 및 (49)는 식 (2)의 요소를 기반으로 한다. 그러나 여기서 결합된 Link-Jabobians L_{all} 및 Link 포스 w_{all}을 접촉할 수 있는 엔드 이펙터("EE")에 해당하는 적절한 선택으로, 즉 L_{EE} 및 $w_{EE,cmd}$로 대체했다.

[0202] 2) 접촉 제약 및 작동 제한: 방금 도입된 명령된 엔드 이펙터 포스 $w_{EE,cmd}$는 종종 부등식 기반 제한(소위 접촉 제약)의 대상이 된다. 예를 들어, 로봇 보행과 관련된 애플리케이션(V-B 장 참조)에서 이러한 접촉 제약 조건은 일반적으로 일방성 및 마찰 원뿔 제약 조건으로 표현된다. 이러한 접촉 제약을 고려하지 않으면 로봇 고장이 발생할 수 있다. 로봇의 물리적 제한으로 인해 명령된 관절 토크 $\tau_{j,cmd}$도 제한하는 것이 이치에 맞는 경우가 많다. 이러한 방식으로 액추에이터 포화가 피해질 수 있다.

[0203] 3) 2차 계획법(QP)에 의한 솔루션: 작동 부족, 액추에이터 제한 및 접촉 제약 조건과 관련하여 언급된 문제를 처리할 수 있는 널리 사용되는 방법은 다음 형식[11]으로 2차 계획법(QP)을 설정하는 것이다.

[0204] $$\underset{\boldsymbol{u}_{cmd}}{\text{최소화}} \quad G_{QP} = \frac{1}{2}\boldsymbol{u}_{cmd}^{T}\boldsymbol{T}_{v}^{T}\boldsymbol{W}\boldsymbol{T}_{u}\boldsymbol{u}_{cmd} - \boldsymbol{f}_{des}^{T}\boldsymbol{W}\boldsymbol{T}_{u}\boldsymbol{u}_{cmd}$$
$$\text{접촉 및 조인트 토크 제한을 고려해서} \quad (50)$$

[0205] 여기서, QP 비용 함수 G_{QP}의 공식화를 위해 (34)의 세 번째 줄이 그에 따라 조정되었다. 제약 조건이 활성화되지 않는 한, QP가 가중된 의사 역 기반 최적화와 동일한 솔루션을 달성한다는 것은 잘 알려져 있다. 분석 최적화를 위해 Ⅲ-D 장에서 사용된 것과 정확히 동일한 수동성 보장 최적화 가중치(PWOW)를 사용하는 것이 바람직하다. 즉, $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\Psi}$. 그러나 일단 제한이 활성화되면 수동성은 더 이상 보장될 수 없다; 규제의 경우에도 보장될 수 없다.

[0206] IV. 관련 컨트롤러 유형에 따른 분류 및 원하는 디커플링의 세분성

[0207] A. 역 동역학(ID)과 MPTC의 비교

[0208] 이 장에서는 ID(Inverse Dynamics) 기반 컨트롤러와 MPTC 기반 컨트롤러의 타깃을 비교하고 중요한 유사성을 지적한다.

[0209] **역 동역학(ID):**

[0210] 역 동역학(ID) 기반 컨트롤러는 일반적으로 다음 형식의 안정적인 2차 역학을 구현한다.

[0211] $$\ddot{x}_k = \ddot{x}_{k,ref} + \hat{D}_{ID,k}\underbrace{(\dot{x}_{k,ref} - \dot{x}_k)}_{\tilde{\dot{x}}_k} + \hat{P}_{ID,k}\underbrace{(x_{k,ref} - x_k)}_{\tilde{x}_k} \quad (51)$$

[0212] 이는 양의 정부호 비례 및 미분 이득 매트릭스 $\hat{P}_{ID,k}$ 및 $\hat{D}_{ID,k}$의 경우 기준 궤적 $x_{k,ref}, \dot{x}_{k,ref}, \ddot{x}_{k,ref}$의 추적을 허용한다. 두 이득 매트릭스는 완전히 분리된 선형 역학을 얻기 위해 일반적으로 대각 매트릭스로 선택된다. 소위 극 배치[1]는 여기에서 임계적으로 감쇠된 과도 응답을 달성하기 위해 자주 사용된다. (5)의 태스크 공간 가속 $\ddot{x}_k$을 (51)에 대입하고 일반화된 포스 τ와 관련된 항에 따라 풀면, 다음을 얻는다:

[0213] $$J_k M^{-1}\tau = J_k M^{-1}\tau_g + Q_k\dot{q} + \ddot{x}_{k,ref} + \hat{D}_{ID,k}\tilde{\dot{x}}_k + \hat{P}_{ID,k}\tilde{x}_k \quad (52)$$

[0214] 주석[11] 더 명시적인 QP 공식은 예를 들어 [21, 15, 10]에 나타난다.

[0215] 선택한 컨트롤러 설정에 따라 매트릭스 J_k가 경우에 따라 반전되지 않기 때문에 여기서 τ에 따라 직접 풀지 않는다.

[0216] **MPTC(모듈식 수동 추적 컨트롤러):**

[0217] (17)의 $f_{k,des}$를 ((16)의) $f_k = T_k\tau$로 대체하여 결과를 M_k^{-1}과 미리 곱하고 풀면 다음과 같은 원하는 태스크 컨트롤러 공식을 얻는다:

[0218] $$J_k M^{-1}\tau = J_k M^{-1}\tau_g + Q_k\dot{q} + \ddot{x}_{k,ref} + \underbrace{M_k^{-1}(C_k + D_k)}_{\hat{D}_{MPTC,k}}\tilde{\dot{x}}_k + \underbrace{M_k^{-1}K_k}_{\hat{P}_{MPTC,k}}\tilde{x}_k. \quad (53)$$

[0219] (53)과 (52)를 비교하면, 제시된 모듈식 수동 추적 컨트롤러(MPTC)의 기본 구조와 역 동역학(ID) 기반 컨트롤러의 기본 구조가 동일함을 알 수 있다. 이들은 선택된 비례 및 미분-이득-매트릭스만 다르다. ID 기반 컨트롤러의 경우 $\hat{P}_{ID,k}$ 및 $\hat{D}_{ID,k}$는 상수로 선택되고, MPTC의 경우 $\hat{P}_{MPTC,k}$ 및 $\hat{D}_{MPTC,k}$는 각각 현재 태스크 관성 M_k의 함수이다. 또한, $\hat{D}_{MPTC,k}$에는 태스크 코리올리 매트릭스 C_k가 포함되어 있으므로 태스크 관련 코리올리 항이 단축되지 않으며 이는 수동성에 대한 전제 조건이며 견고성을 높인다[12].

[0220] 여기에서 중요한 측면은 (52)와 (53)이 일정한 시스템 또는 태스크 고유값에 해당하는 일정한 이득 매트릭스가 ID에 대해 주어지는 태스크 가속 공간에서 표시되는 한편, MPTC의 로컬 고유값은 구성에 따라 다르다는 것이다. 한편, (52)와 (53)을 M_k와 미리 곱하여 태스크 포스 공간으로 옮기면 MPTC의 경우 인지 감쇠와 강성이 일정한 반면, ID의 경우 구성에 따라 달라진다.

[0221] **참고:** (52)와 (53)의 심한 유사성은 기존 ID 기반 컨트롤러 프레임워크를 MPTC 방법론으로 포팅할 수 있다는 점에서 유리한 영향을 미칠 수 있다.

[0222] B. PD+ 제어/수동성 기반 전신 제어와의 비교

[0223] 코리올리 및 원심 효과(이하 "CC"로 약칭)와 관련된 하위 태스크 컨트롤러 타깃(17)에서 항들을 재정리하면 다음 식을 얻는다:

[0224] $$C_k\tilde{\dot{x}}_k + M_k Q_k\dot{q} = C_k\dot{x}_{k,ref} + \underbrace{M_k Q_k\left(\underbrace{I - T_k^T J_k}_{N_k}\right)}_{B_k}\dot{q} \quad (54)$$

[0225] 여기서, N_k는 태스크 공간 속도 $\dot{x}_k$에 영향을 미치는 $\dot{q}$의 모든 구성 요소를 제거하는 제로 공간 프로젝터를 나타내고, 매트릭스 B_k는 해당 CC 관련 피드백 항들을 결합한다. (54)를 (17)에 대입하면 대안적(동등한) 하위 태스크 컨트롤러 공식을 얻는다.

[0226] $$f_{k,des} = T_k\tau_g + B_k\dot{q} + M_k\ddot{x}_{k,ref} + C_k\dot{x}_{k,ref} + D_k\tilde{\dot{x}}_k + K_k\tilde{x}_k, \quad (55)$$

[0227] (17)의 원래 하위 태스크 컨트롤러 공식과 비교하여 이 공식은 MPTC 컨트롤러의 CC 항 단축 전략에 대한 보다

직접적인 통찰력을 허용한다: MPTC는 모든 비-태스크 관련 CC 피드백 항들([7]의 비-대각선 요소들과 비교 가능)을 단축하고 태스크 관련 피드포워드(feedforward) 항 $C_k\dot{x}_{k,ref}$을 생성하는 한편, 태스크 관련 CC 피드백 항은 단축되거나 사용되지 않는다. 후자는 태스크 관련 CC 항들이 그대로 유지되는 공칭 하위 태스크 폐루프 거동(20)을 고려하여 다시 한 번 확인될 수 있다. 태스크 관련 CC 항을 유지하는 것은 수동성을 위한 전제 조건이며 역 동역학 기반 컨트롤러와 비교하여 모델 에러에 대한 더 높은 견고성으로 이어진다. 후자는 모든 CC 효과를 완전히 단축하는 (잠재적으로 부정확한 로봇 모델을 기반으로) 한편, MPTC 기반 컨트롤러들은 비-태스크 관련 CC 항만 단축한다.

[0228] 흥미로운 특수한 경우는, (해당 하위 태스크 jacobians를 스택하여 모든 하위 태스크를 하나의 전체 태스크로 결합하는) 단일 태스크만 고려되고 태스크 Jacobian J_k가 2차이고 가역적인 경우이다.

[0229] 주석[12] 센서 노이즈 및 모델 에러 관련 문제를 일으킬 수 있는 피드백 채널 수의 감소로 인해.

[0230] 이를 위한 전제 조건은 하위 태스크가 서로 모순되지 않는 것이다. 이 특수한 경우 B_k = 0이므로 (55)는 종래의 PD+ 컨트롤러[19](도 1 참조)에 해당하거나 (부등 제약의 경우) 나중에 도입된 수동성 기반 전신 컨트롤러(WBC)[12, 16]에 해당한다.

[0231] C. 원하는 디커플링의 세분성

[0232] MPTC는 하위 컨트롤러 유형(예: 데카르트 또는 관절 컨트롤러)의 선택과 관련해서 그리고 원하는 디커플링[13]의 "세분성"과 관련해서 일반적인 컨트롤러 설계 도구를 나타낸다. 이 문서에서 하위 태스크에 대해 이야기할 때 차원, 즉 각 태스크에 할당된 자유도의 수가 더 자세히 지정된 하위 태스크는 없었다. 이는 상상할 수 있는 많은 수의 컨트롤러 구성이 있음을 의미한다. 제어 타깃이 서로 다른 경우(예: 데카르트 엔드 이펙터 추적 타깃 및 관절 제어 타깃) 단일 태스크 스택(SoT, 태스크 스택)에 결합되므로 당분간 SoT의 어떤 부분이 어떤 MPTC 관련 하위 태스크에 할당되는지에 대한 질문이 미해결 상태이다. 예를 들어, 6차원 데카르트 태스크는 2개의 디커플링된(선형 및 각도) 제어 하위 태스크로 정의될 수 있거나 단일 6차원 태스크로 정의될 수 있다. 첫 번째 경우에는 선형 및 각도 에러 역학이 서로 디커플링되는 반면, 두 번째 경우에는 커플링된다.

[0233] 또한 모든 컨트롤러 타깃을 단일 태스크로 결합하도록 결정할 수 있고(결과적으로 FC-PTC(Fully Coupled Passive Tracking Controller)가 됨), 이는 특정 상황에서 PD+ 컨트롤러에 해당한다(IV-B 장 및 도 1 참조). 또는 표준 MPTC 프레임워크에 의해 처리될 수 있는 여러 태스크 집합(예: 왼발 태스크 하나, 오른발 태스크 하나)을 정의할 수 있다. 끝으로 SoT의 각 라인이 별도의 태스크를 나타내는 매우 세분화된 컨트롤러 설정을 결정할 수도 있다. 이러한 특수 유형의 컨트롤러 설정을 FD-PTC(Fully Decoupled Passive Tracking Controller)라고 한다. 가능한 모든 MPTC 설정 중에서 FD-PTC는 역 동역학 컨트롤러와 가장 유사한 것이다; 둘 다 자유도 분리된 태스크 역학을 기반으로 한다(도 1 참조). 그러나 FD-PTC는 관성이 수정되지 않고 더 적은 CC 항들이 단축되기 때문에 더 높은 견고성을 갖는다고 가정할 수 있다.

[0234] 위에서 이미 언급한 바와 같이, 각 태스크에는 단일 가중 스칼라 Ψ_k만 있으므로 태스크가 서로에 대해 (부드럽게) 우선 순위 지정될 수 있다. 이렇게 하면 필요한 튜닝 노력이 줄어든다. 그러나 특정 태스크 구성 요소의 우선 순위를 높이려면(예: 데카르트 태스크의 x 및 y 구성 요소보다 z 방향이 선호되는 경우) 자체 태스크와 적절한 가중치(예: Ψ_z)가 이것에 할당되어야 한다.

[0235] V. 시뮬레이션 및 실험

[0236] 제안된 MPTC 프레임워크의 성능을 검증하기 위해 몇 가지 시뮬레이션을 수행했다: 한편으로는 계산된 컨트롤러 토크를 입력으로 사용하는 (3)의 순방향 통합을 기반으로 하는 간단한 시뮬레이션, 다른 한편으로는 시뮬레이션 환경으로서 OpenHRP [14]를 사용하는 휴머노이드 로봇 TORO[8]의 시뮬레이션.

[0237] A. 고정 기반 로봇 시뮬레이션

[0238] 제시된 첫 번째 시뮬레이션은 완전히 작동되고 완전히 결정되어 충돌 없는 태스크 설정에 대한 규제의 경우를 검사하기 위한 것이다. 이를 위해 고정 기반 로봇 팔의 6개 관절(이의 운동학 및 관성 특성은 TORO의 다리들 중 하나에 해당)이 두 개의 서로 다른 관절 태스크 A와 B(각각 3개의 관절을 커버함, 도 2 참조)에 할당되었다. 상응하는 관절 태스크 강성 및 감쇠 이득[14]은 $K_A = 300I_{3x3}$, D_A=diag[40,20,10], $K_B = 40I_{3x3}$ 및 $D_B = 2I_{3x3}$로 선택되

었다. 스칼라 태스크 가중치 ψ_k(여기서는 모두 1로 설정)는 아무런 효과가 없는데, 그 이유는 충돌이 없기 때문에 모든 태스크가 완벽하게 수행되었기 때문이다. 컨트롤러에 추가 튜닝이 필요하지 않았다는 점에 유의해야 한다. 제시된 파라미터들은 도 2의 교육적 가치를 개선하기 위해 선택되었다. 시뮬레이션 시작 시 모든 관절이 초기 설정값으로 빠르게 수렴한다. 1초 후 그룹 A의 관절들에 속도 변화가 발생하여 해당 태스크 에러 도함수에서 점프가 발생했다. 그룹 A가 재수렴하는 동안 그룹 B는 태스크 디커플링으로 인해 전혀 영향을 받지 않는다. 2초 후 그룹 B의 설정값이 변경된다. 여기에서도 해당 관절 좌표가 수렴하는 한편 그룹 A는 이제 완전히 영향을 받지 않는다. 참고: 여기에서 관찰된 완벽한 태스크 디커플링은 두 관절 태스크의 일관성으로 인해 달성될 수 있었다. 끝으로, 3초 후 $\tau_{imt} = [20, 20, 20, 5, 5, 5]$ Nm의 토크 오프셋이 먼저 적용된 다음 4초 후에 제거된다. 여기서도 관찰된 컨트롤러 거동이 좋고 우리의 기대를 충족시킨다. 이 시뮬레이션을 통해 Lyapunov 함수 V의 총 값이 간섭 및 설정값 변경의 경우 외에도 항상 감소한다는 것을 확인할 수 있었다(도 2(오른쪽) 참조).

[0239] 주석[13] 참고: 여기서는 "원하는 디커플링"에 대해 이야기하고 있다. 일관된 태스크의 경우 MPTC는 엄격하게 디커플링된 에러 역학을 야기한다. 반면에 불일치(inconsistency)의 경우 해당 태스크 에러 동역학의 결합을 피할 수 없다(적어도 소프트 태스크 우선순위 지정의 경우).

[0240] 주석[14] 참고: 간결함을 위해 여기서는 강성(선형: $\frac{N}{m}$, 각도: $\frac{Nm}{rad}$) 및 감쇠(선형: $\frac{Ns}{m}$, 각도: $\frac{Nms}{rad}$)에 대한 단위가 생략된다.

[0241] 제시된 두 번째 시뮬레이션은 모순된 태스크 설정에 대한, 재차 규제의 경우에 대한 컨트롤러의 성능을 평가한다. 이번에는 K_{cart} = diag([2000, 2000, 2000, 100, 100, 100])의 강성과 D_{cart} = diag([500, 500, 500, 20, 20, 20])의 감쇠를 갖는 데카르트 6 자유도 엔드이펙터 태스크가 이전에 설명한 관절 태스크 A와 B에 추가된다. 스칼라 태스크 가중치 ψ_k는 1로 설정된다. 컨트롤러를 시작한 후 로봇은 평형 위치로 수렴한다. Lyapunov 함수 V의 총 값은 단조롭게 감소하는 반면 하위 태스크의 가중된 Lyapunov 함수값은 증가할 수 있다(예: 도 3의 $\psi_{J_3} \cdot V_{J_3}$).

[0242] B. 휴머노이드 로봇 시뮬레이션 및 실험

[0243] 끝으로 하이브리드 WBC 설정을 기반으로 휴머노이드 로봇 TORO(도 4 참조)의 보행 시뮬레이션을 수행했다: 역동역학 기반 몸통 방향 및 전진 포즈 태스크, 운동의 발산 성분(DCM)[9]의 제어 및 각 운동량 정규화를 위한 태스크, 및 발 추적을 위한 데카르트 (6 자유도) MPTC 기반 컨트롤러가 혼합되었다[15]. 발 참조 궤적들이 정확하게 추적된다. 2.5초 후 왼쪽 발은 0.3초 동안 x 방향으로 -60N의 힘에 의해 간섭되어 51 ㎜의 최대 발 위치 에러 및 45 ㎜의 최대 DCM 에러가 발생한다. 간섭이 제거된 후 성공적으로 계속 갈 수 있을 만큼 빠르게 발이 수렴한다.

[0244] 실제 조건에서 MPTC의 성능을 평가하기 위해, 푸시 복구(서 있기), 인간-로봇 상호 작용 및 걷기(관련 비디오: https://youtu.be/WdF9UQK8aIo)를 포함하여 여러 실험을 TORO로 수행했다. 여기에 우리는 TORO가 6보 앞으로 걷는 보행 실험을 제시한다(자세한 내용은 도 5 참조). 별도의 MPTC 기반 컨트롤러를 사용하여 발(데카르트 6 자유도 추적), 몸통(3 자유도 회전 추적), 다리 관절, 허리 관절 및 상체 관절을 제어했다(마지막 3개는 전신 포즈를 제어하고 정규화 태스크로 사용됨). 시뮬레이션과 마찬가지로 DCM 기반 컨트롤러 및 각 운동량 정규화 컨트롤러를 추가 적용했다. 전반적인 보행 성능은 견고했다. 그러나 추적 에러가 관찰될 수 있으며 이는 토크 오프셋과 관절 마찰로 인해 발생한다고 생각한다. ID 기반 컨트롤러[10]에 비해 튜닝 노력이 적고 실제 조건에서 사용할 때 MPTC의 견고성을 입증한다.

[0245] VI. 요약 및 전망

[0246] 이 논문에는 소위 MPTC(Modular Passive Tracking Controller)가 도입되었다. 이 일반 컨트롤러는 제 1 단계에서 서로 독립적으로 여러 하위 태스크 타깃을 수행하려고 한다. 이러한 주로 독립적인 하위 태스크 컨트롤러들은 전체 컨트롤러로 병합된다. 컨트롤러의 설계 및 분석은 안정성과 수동성에 대한 표현을 용이하게 하는 Lyapunov 이론을 기반으로 한다. 이 문서의 주요 기여 중 하나는 완전 작동 로봇에 대한 전체 모순 하위 태스크 세트의 수동성을 보장하는 최적화 가중치 매트릭스의 설계이다. 제안된 제어 프레임워크는 고정 기반 로봇 및 자유 부동 로봇에 대한 여러 시뮬레이션 및 실험에서 검증되었다.

[0247] 향후 연구에서는 제안된 Modular Passive Tracking Controller(MPTC), 및 PD+ 컨트롤러와 같은 기타 수동성 기

반 컨트롤러의 역 동역학(ID)의 제어 개념을 광범위하게 비교하려고 한다. 이 포괄적인 비교는 이론적 분석, 시뮬레이션 및 하드웨어 실험을 기반으로 한다.

[0248] 주석[15] MPTC의 모듈성으로 인해 ID 기반 및 MPTC 기반 태스크는 동일한 전신 제어 설정에서 결합될 수 있다.

[0249] 참고 문헌

[1] J. Ackermann. Parameter space design of robust control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25(6):1058–1072, December 1980. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.1980.1102505.

[2] G. Antonelli. Stability Analysis for Prioritized closed-loop inverse kinematic algorithms for redundant robotic systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5):985–994, 2009.

[3] K. Bouyarmane and A. Kheddar. On Weight-Prioritized multitask control of humanoid robots. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(6):1632–1647, June 2018. ISSN 2334-3303. doi: 10.1109/TAC.2017.2752085.

[4] S. Chiaverini. Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(3):398–410, June 1997. ISSN 2374-958X. doi: 10.1109/70.585902.

[5] A. Dietrich. *Whole-Body Impedance Control of Wheeled Humanoid Robots*, volume 116. Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-40557-5.

[6] A. Dietrich and C. Ott. Hierarchical Impedance-Based tracking control of kinematically redundant robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(1):204–221, 2020. ISSN 1941-0468. doi: 10.1109/TRO.2019.2945876.

[0250]

[7] A. Dietrich, C. Ott, and A. Albu-Schäffer. Multi-objective compliance control of redundant manipulators: hierarchy, control, and stability. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 3043–3050, Nov 2013. doi: 10.1109/IROS.2013.6696787.

[8] J. Englsberger, A. Werner, C. Ott, B. Henze, M. A. Roa, G. Garofalo, R. Burger, A. Beyer, O. Eiberger, K. Schmid, and A. Albu-Schäffer. Overview of the torque-controlled humanoid robot TORO. In *IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pages 916–923, Nov 2014. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2014.7041473.

[9] J. Englsberger, C. Ott, and A. Albu-Schäffer. Three-Dimensional Bipedal Walking Control Based on divergent component of motion. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2):355–368, April 2015. ISSN 1941-0468. doi: 10.1109/TRO.2015.2405592.

[10] J. Englsberger, G. Mesesan, A. Werner, and C. Ott. Torque-Based Dynamic Walking - a long way from simulation to experiment. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 440–447, 2018.

[11] Adrien Escande, Nicolas Mansard, and Pierre-Brice Wieber. Hierarchical quadratic programming: fast online humanoid-robot motion generation. *The International Journal of Robotics Research*, 33(7):1006–1028, 2014. doi: 10.1177/0278364914521306.

[12] B. Henze, M. A. Roa, and Ch. Ott. Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios. *The International Journal of Robotics Research*, 35(12):1522–1543, 2016. doi: 10.1177/0278364916653815.

[13] M. A. Hopkins, D. W. Hong, and A. Leonessa. Compliant locomotion using whole-body control and divergent component of motion tracking. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5726–5733, May 2015. doi: 10.1109/ICRA.2015.7140001.

[14] F. Kanehiro, H. Hirukawa, and S. Kajita. Openhrp: Open Architecture Humanoid Robotics Platform. *The International Journal of Robotics Research*, 23(2):155–165, 2004. doi: 10.1177/0278364904041324.

[15] T . Koolen, S. Bertrand, G. Thomas, T. de Boer, T. Wu, J. Smith, J. Englsberger, and J. Pratt. Design of a Momentum-Based Control Framework and application to the humanoid robot atlas. *International Journal of Humanoid Robotics*, 13(01):1650007, 2016. doi: 10.1142/S0219843616500079.

[16] G. Mesesan, J. Englsberger, G. Garofalo, C. Ott, and A. Albu-Schäffer. Dynamic walking on compliant and uneven terrain using dcm and passivity-based whole-body control. In *IEEE-RAS 19th Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 25–32, 2019.

[17] R. M. Murray. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 2017.

[18] Y. Nakamura, H. Hanafusa, and T. Yoshikawa. Task- priority based redundancy control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6(2):3–15, 1987. doi: 10.1177/027836498700600201.

[19] B. Paden and B. Riedle. A Positive-Real Modification of a class of nonlinear controllers for robot manipulators. In *1988 American Control Conference*, pages 1782–1785, June 1988. doi: 10.23919/ACC.1988.4790015.

[20] J. Peters, M. Mistry, F. Udwadia, J. Nakanishi, and S. Schaal. A unifying framework for robot control with redundant dofs. *Autonomous Robots*, 24:1–12, 2008. doi: 10.1007/s10514-007-9051-x.

[21] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, and S. Schaal. Inverse dynamics control of floating-base robots with external constraints: A unified view. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1085–1090, May 2011. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980156.

[22] L. Sentis and O. Khatib. Synthesis of Whole-Body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2(4):505–518, 2005.

[23] L. Sentis, J. Park, and O. Khatib. Compliant Control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3):483–501, 2010.

[0251]

[0252] 도 6은 본 발명에 따른 방법의 가능한 적용을 도시한다. 이 경우에, 다수의 임피던스 기반 컨트롤러 모듈(102)(모듈식 수동 추적 컨트롤러)은 본 발명에 따른 방법에 의해 전체 컨트롤러(104)에 통합된다. 도시된 예에서, 컨트롤러 모듈(102)의 표시는 각각 참조 궤적 및 질량을 포함하고, 이들은 스프링 댐퍼 시스템을 통해 서로 연결되며, 컨트롤러 모듈(102)의 명칭 A 및 C는 데카르트 제어 태스크를 각각 나타내는 한편, 컨트롤러 모듈(102)의 명칭 B 및 D는 관절 컨트롤러로 공식화된다. 도 6에 도시된 바와 같이, 태스크 매핑 매트릭스 및 태스크 벡터로 각각 구성된 다양한 컨트롤러 모듈(102)은 결합된 태스크 매핑 매트릭스(106) 및 결합된 태스크 벡터(110)로 구성된 태스크 스택을 형성할 수 있다. 태스크 스택으로 표현되는 컨트롤러 모듈은 적절한 최적화 방법에 의해, 예를 들어 최적화 변수(108)의 도움으로 전체 컨트롤러(104)에 병합될 수 있다. 이러한 방식으로, 결과적인 전체 컨트롤러(104)의 수동성이 특히 최선의 가능한 방식으로 구현되면서, 다양한 서브-컨트롤러 타깃에서 최적의 절충안이 달성된다.

[0253] 특히, 본 발명의 선택적 특징은 "할 수 있다"로 표현된다. 따라서, 추가적으로 또는 대안적으로 각각의 특징 또는 특징들을 갖는 본 발명의 개선예들 및/또는 실시예들이 존재한다.

[0254] 필요한 경우, 여기에 개시된 특징 조합들로부터 독립된 특징들이 선택될 수 있고, 특징 사이에 존재할 수 있는 구조적 및/또는 기능적 관계를 풀어 청구범위 대상을 한정하기 위해 다른 특징과 조합하여 사용될 수 있다.

부호의 설명

[0255] 100: 로봇

102: 컨트롤러 모듈

104: 전체 컨트롤러

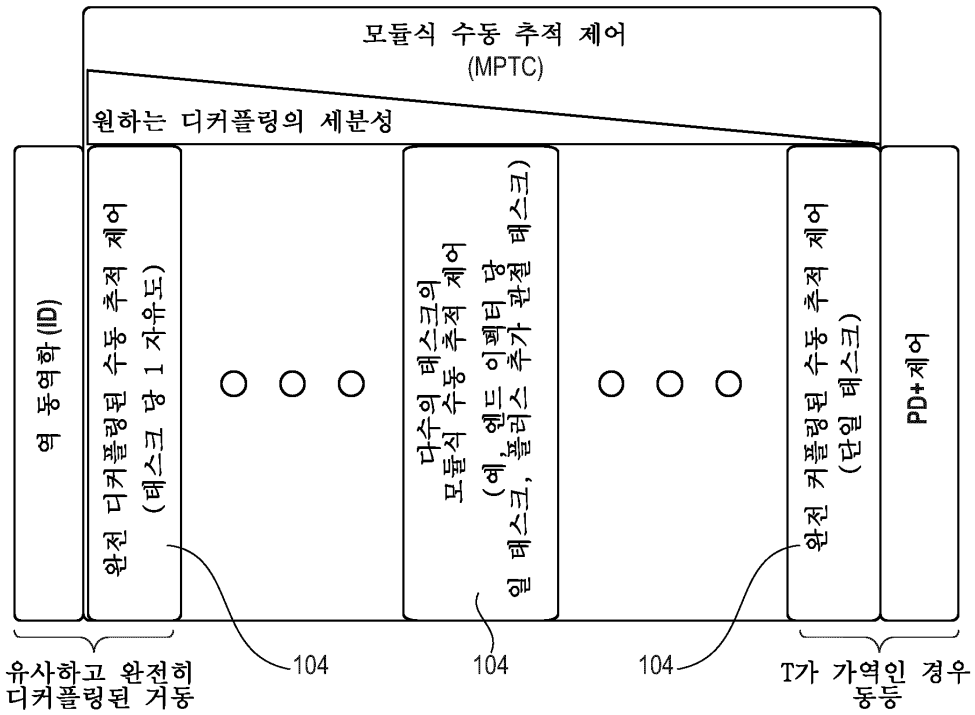
106: 태스크 매핑 매트릭스

108: 최적화 변수

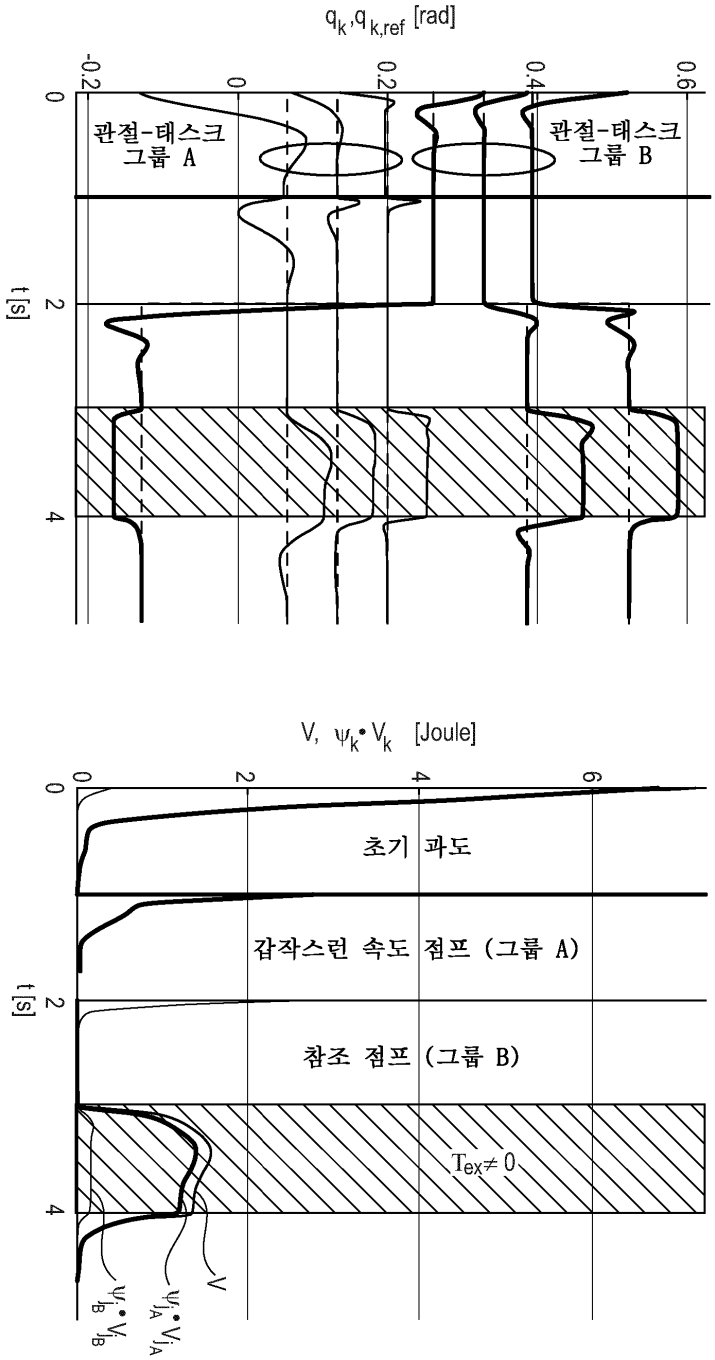
110: 태스크 벡터

도면

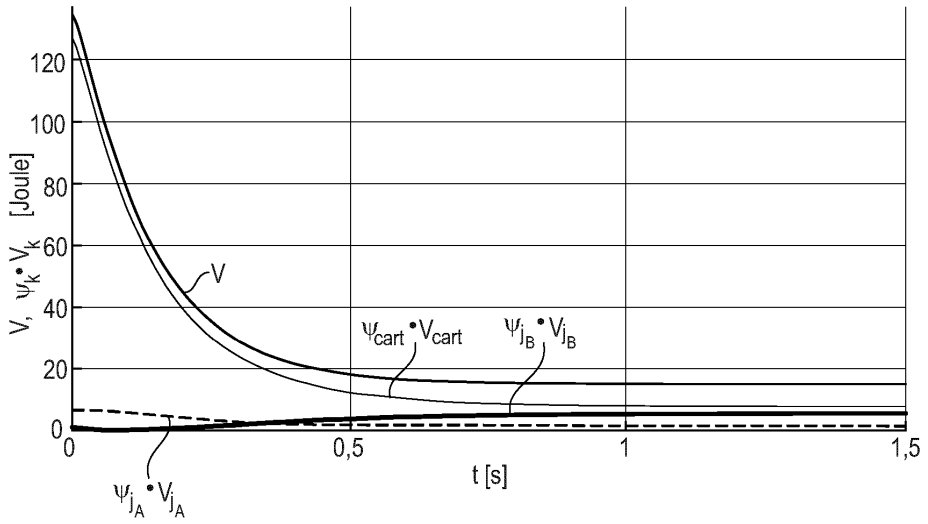
도면1



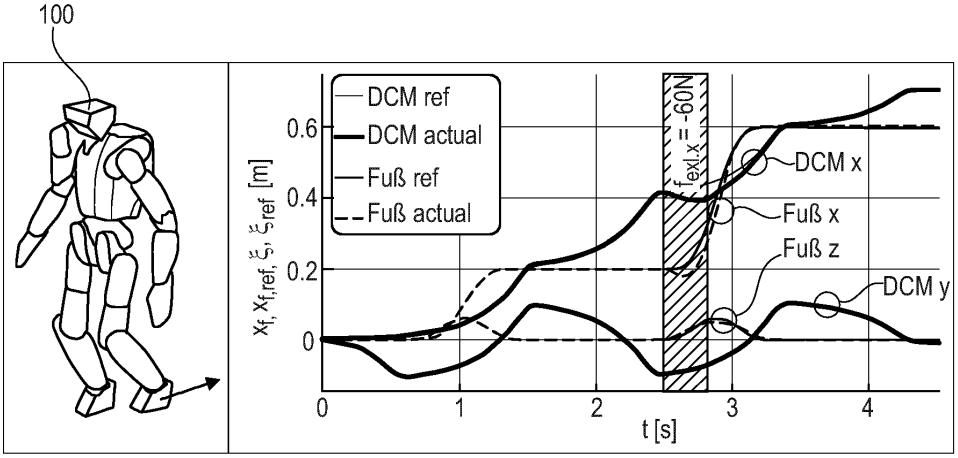
도면2


$q_k, q_{k,ref}$ [rad]
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
관절-태스크 그룹 A
관절-태스크 그룹 B
t [s]
0
2
4
V, $\psi_k \cdot V_k$ [Joule]
0
2
4
6
초기 과도
감작스런 속도 점프 (그룹 A)
참조 점프 (그룹 B)
$T_{ex} \neq 0$
$\psi_{j_B} \cdot V_{j_B}$
$\psi_{j_A} \cdot V_{j_A}$
V

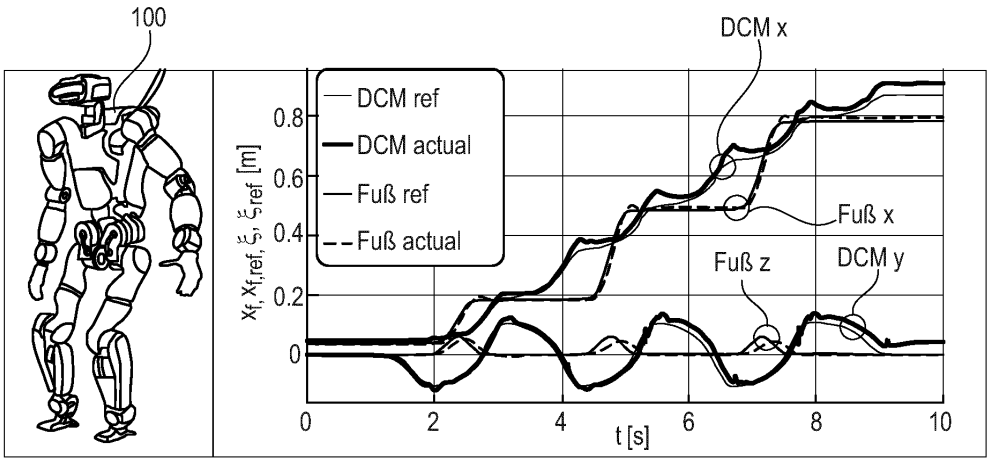
도면3


120
100
80
60
40
20
0
V, ψk•Vk [Joule]
V
ψcart•Vcart
ψjB•VjB
ψjA•VjA
0
0,5
1
1,5
t [s]

도면4


100
DCM ref
DCM actual
Fuß ref
Fuß actual
fext,x = -60N
DCM x
Fuß x
Fuß z
DCM y
0.6
0.4
0.2
0
xf, xf,ref, ξ, ξref [m]
0
1
2
3
4
t [s]

도면5


100
DCM x
DCM ref
DCM actual
Fuß ref
Fuß actual
Fuß x
Fuß z
DCM y
0.8
0.6
0.4
0.2
0
xf, xf,ref, ξ, ξref [m]
0
2
4
6
8
10
t [s]

도면6

