(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7661370号
(P7661370)

(45)発行日　令和7年4月14日(2025.4.14)

(24)登録日　令和7年4月4日(2025.4.4)

(51)国際特許分類
Ｂ２５Ｊ　9/10 (2006.01)

ＦＩ
Ｂ２５Ｊ　9/10　Ａ

請求項の数　15　（全40頁）

(21)出願番号　特願2022-576402(P2022-576402)
(86)(22)出願日　令和3年6月10日(2021.6.10)
(65)公表番号　特表2023-547974(P2023-547974A)
(43)公表日　令和5年11月15日(2023.11.15)
(86)国際出願番号　PCT/EP2021/065699
(87)国際公開番号　WO2021/250201
(87)国際公開日　令和3年12月16日(2021.12.16)
審査請求日　令和6年5月8日(2024.5.8)
(31)優先権主張番号　102020115517.4
(32)優先日　令和2年6月10日(2020.6.10)
(33)優先権主張国・地域又は機関
ドイツ(DE)
早期審査対象出願

(73)特許権者　522480012
ドイッチェス ゼントラム ヒュル ルフトー ウント ラウムファールト エー．フェー．
ドイツ ５３２２７ ボン ケーニウスヴィンテラー シュトラッセ ５２２－５２４
(74)代理人　110004381
弁理士法人ＩＴＯＨ
(74)代理人　100107766
弁理士　伊東 忠重
(74)代理人　100070150
弁理士　伊東 忠彦
(74)代理人　100135079
弁理士　宮崎 修
(72)発明者　エングルスベルゲール，ヨハネス

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　ロボットを制御するための方法及びコンピュータプログラム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

複数のタスクを実行させるために運動学的に冗長なロボットをコントロールする方法であって、

パッシブベースの少なくとも１つの第１コントローラモジュールを使用し、

前記ロボットを制御する全体コントローラが少なくともほぼ受動的な挙動を示すように、

前記少なくとも１つの第１コントローラモジュールに対して少なくとも１つのタスクターゲット記述及び少なくとも１つの付属のタスクマッピングを計算し、

前記タスクに対して、タスク固有の対称行列$W_k = \Psi_k M_k^{-1}$の形態の少なくとも１つのタスク重み付け行列を計算し、ここで、行列W_kはタスク慣性行列M_kの逆行列から求められ、$M_k = (J_k M^{-1} J_k^T)^{-1}$は、$J_k$がタスクヤコビアンであり、Ｍが前記ロボットの動的モデルの慣性行列であり、異なるタスクを相互に独立して重み付けするために重み付けスカラΨ_kと組み合わされ、

前記少なくとも１つのタスク重み付け行列W_kを使用して、前記少なくとも１つの第１コントローラモジュールを前記全体コントローラに統合し、前記少なくとも１つのタスク重み付け行列W_kは、サブ行列の形態で、対称でありブロック対角の全体重み付け行列Ｗに組込まれ、前記タスク重み付け行列として$W_k = \Psi_k M_k^{-1}$を使用することにより、前記全体コントローラが受動性であり、したがってロバストに安定していることが保証される、

方法。

【請求項２】
前記少なくとも１つのタスクターゲット記述及び前記少なくとも１つの付属のタスクマッピングを、前記少なくとも１つの第１コントローラモジュールの名目上の挙動がばね質量ダンパシステムの挙動に対応するように計算する、
請求項１記載の方法。
【請求項３】
前記少なくとも１つのタスクターゲット記述及び前記少なくとも１つの付属のタスクマッピングを、ロボットの自然慣性に基づいて計算する、
請求項１又は２記載の方法。
【請求項４】
前記少なくとも１つのタスクターゲット記述及び前記少なくとも１つの付属のタスクマッピングを、タスク固有のコリオリ効果及び遠心効果が変更されないままであると同時に他のすべてのコリオリ効果及び遠心効果を補償するように、計算する、
請求項１乃至３いずれか１項記載の方法。
【請求項５】
前記少なくとも１つのタスクターゲット記述をタスクベクトルとして計算し、及び／又は、前記少なくとも１つの付属のタスクマッピングをタスクマッピング行列として計算する、
請求項１乃至４いずれか１項記載の方法。
【請求項６】
少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは前記全体コントローラに統合される、
請求項１乃至５いずれか１項記載の方法。
【請求項７】
制約条件として定式化された少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは前記全体コントローラに統合される、
請求項１乃至６いずれか１項記載の方法。
【請求項８】
前記少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは重み付けされる、
請求項６又は７記載の方法。
【請求項９】
前記全体コントローラが、優決定系制御問題の場合でも、少なくとも略受動的な挙動を示すように、前記少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは重み付けされる、
請求項１乃至８いずれか１項記載の方法。
【請求項１０】
前記少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、少なくとも１つの擬似逆行列及び／又は少なくとも１つの逆行列を用いて最適化される、
請求項１乃至９いずれか１項記載の方法。
【請求項１１】
前記少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、二次最適化される、
請求項１乃至１０いずれか１項記載の方法。
【請求項１２】
前記第１コントローラモジュールのうちの少なくとも１つは、トラッキングコントローラとして設計されている、
請求項１乃至１１いずれか１項記載の方法。
【請求項１３】
前記第１コントローラモジュールのうちの少なくとも１つは、レギュレーションコント

ローラとして設計されている、
請求項１乃至１２いずれか１項記載の方法。
【請求項１４】
制御可能な自由度のそれぞれに個別のコントローラモジュールが割り当てられる、
請求項１乃至１３いずれか１項記載の方法。
【請求項１５】
プログラムが少なくとも１つのプロセッサによって実行されるとき、プロセッサに請求項１乃至１４いずれか１項記載の方法を実行させる命令を含むコンピュータプログラム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、運動学的に冗長なロボットに複数の作業を行わせる制御方法に関するものである。また、本発明は、このような方法を実行するためのコンピュータプログラムに関する。
【背景技術】
【０００２】
ロボット制御の分野では、複数の、所謂「タスク」と呼ばれる、作業を同時に制御することが重要な研究課題となっている。以前の研究では、運動学的に冗長なロボットに対して、単一のタスクとそれに対応するヌル空間、すなわち残るロボット自由度を制御するという単純なケースが考えられてていたが、今日では、優先順位の有無にかかわらず複数のタスクを扱うことができる確立した方法がいくつか存在している。文献では、最初に運動学的レベルでタスクコーディネート問題を解決するものと、制御問題を直接動力学レベルで扱うものとを区別している。もう一つの重要な分類可能性は、階層的なコントローラによって厳密なタスクの優先順位を強制する方法と、タスクの重み付けによってソフトな又は緩やかな優先順位を生成する方法とに分けられることである。
【０００３】
運動学的レベルでは、
刊行物Ｙ．Ｎａｋａｍｕｒａ，Ｈ．Ｈａｎａｆｕｓａ，ａｎｄ Ｔ．Ｙｏｓｈｉｋａｗａ．Ｔａｓｋｐｒｉｏｒｉｔｙ ｂａｓｅｄ ｒｅｄｕｎｄａｎｃｙ ｃｏｎｔｒｏｌ ｏｆ ｒｏｂｏｔ ｍａｎｉｐｕｌａｔｏｒｓ．Ｔｈｅ Ｉｎｔｅｒｎａｔｉｏｎａｌ Ｊｏｕｒｎａｌ ｏｆ Ｒｏｂｏｔｉｃｓ Ｒｅｓｅａｒｃｈ，６（２）：３－１５，１９８７．ｄｏｉ：１０．１１７７／０２７８３６４９８７００６００２０１、及び、Ｇ．Ａｎｔｏｎｅｌｌｉ．Ｓｔａｂｉｌｉｔｙ Ａｎａｌｙｓｉｓ ｆｏｒ Ｐｒｉｏｒｉｔｉｚｅｄ ｃｌｏｓｅｄｌｏｏｐ ｉｎｖｅｒｓｅ ｋｉｎｅｍａｔｉｃ ａｌｇｏｒｉｔｈｍｓ ｆｏｒ ｒｅｄｕｎｄａｎｔ ｒｏｂｏｔｉｃ ｓｙｓｔｅｍｓ．ＩＥＥＥ Ｔｒａｎｓａｃｔｉｏｎｓ ｏｎ Ｒｏｂｏｔｉｃｓ，２５（５）：９８５－９９４，２００９．によって、ヌル空間プロジェクションに基づいて厳密なタスク階層を保証する階層型コントローラが提案されている。可能性のあるタスクの特異点問題に対処するために、
刊行物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．は、特異点にロバストな逆運動学法が提案されている。いずれにせよ、この特異点にロバストな逆運動学の結果として、厳密なタスク階層が失われる。これは、個々のタスク間の重み付けを効果的に作成するためである。
【０００４】
他の方法では、複数のタスクを動的レベルで同時に処理する。ヒューマノイドロボットの制御を可能にするために、「操作空間（Ｏｐｅｒａｔｉｏｎａｌ Ｓｐａｃｅ）」方法

がさらに開発された。これについては、刊行物
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.、及び、
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. verwiesen.を参照されたい。他の逆動力学（ＩＤ）ベースの方法では、階層型二次計画法（ＱＰ）が使用される。これについては、刊行物
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.、
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.、及び、
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.を参照されたい。言及されている方法のほとんどは、厳密なタスクの分離を目的としている。これにより、例えば、少なくとも理論的には、異なるタスクが互いに影響を与えず、同様に、障害後の（nach Stoerungen）個々のタスクのそれぞれの過渡的な挙動（Einschwingverhalten）は、他のタスク座標から完全に独立していることが保証される。

【０００５】

ここで紹介する方法は、逆動力学に基づくトラッキングコントローラのファミリに着想を得ており、単一の重み付き二次計画法（ＱＰ：einzigen gewichteten Quadratischen Programmes）の使用により、一連のタスク間のマイルドな妥協を目指す。これについては、刊行物
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, 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. d

oi： １０．１１４２／Ｓ０２１９８４３６１６５０００７９．、及び、
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．、を参照されたい。このようなコントローラは実装が非常に簡単で、柔軟性が高いという特徴がある。ただし、刊行物
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．、
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－Ｓｃｈ？ｆｆｅｒ．Ｄｙｎａｍｉｃ ｗａｌｋｉｎｇ ｏｎ ｃｏｍｐｌｉａｎｔ ａｎｄ ｕｎｅｖｅｎ ｔｅｒｒａｉｎ ｕｓｉｎｇ ｄｃｍ ａｎｄ ｐａｓｓｉｖｉｔｙ－ｂａｓｅｄ ｗｈｏｌｅｂｏｄｙ ｃｏｎｔｒｏｌ．Ｉｎ ＩＥＥＥ－ＲＡＳ １９ｔｈ Ｉｎｔ．Ｃｏｎｆ．ｏｎ Ｈｕｍａｎｏｉｄ Ｒｏｂｏｔｓ（Ｈｕｍａｎｏｉｄｓ），ｐａｇｅｓ ２５－３２，２０１９．、及び、
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．、に基づく受動性に基づく方法と比較すると、逆動力学に基づくコントローラは、いずれにせよ、モデルエラー及び接触の不確実性又は非安全性（Ｋｏｎｔａｋｔｕｎｓｉｃｈｅｒｈｅｉｔｅｎ）に関してロバスト性が低くなり、そのため、実際の使用では振動などの問題が発生し、発見的方法（ｈｅｕｒｉｓｔｉｓｃｈｅｒ Ｍｅｔｈｏｄｅｎ）を用いて対処する必要がある。

【０００６】

さらに、提示された方法は、刊行物
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．の重み付けに基づくマルチタスクコントローラと、刊行物
Ｋ．Ｂｏｕｙａｒｍａｎｅ ａｎｄ Ａ．Ｋｈｅｄｄａｒ．Ｏｎ Ｗｅｉｇｈｔ－Ｐｒｉｏｒｉｔｉｚｅｄ ｍｕｌｔｉｔａｓｋ ｃｏｎｔｒｏｌ ｏｆ ｈｕｍａｎｏｉｄ ｒ

ｏｂｏｔｓ．ＩＥＥＥ Ｔｒａｎｓａｃｔｉｏｎｓ ｏｎ Ａｕｔｏｍａｔｉｃ Ｃｏｎｔｒｏｌ，６３（６）：１６３２－１６４７，Ｊｕｎｅ ２０１８．ＩＳＳＮ ２３３４－３３０３．ｄｏｉ：１０．１１０９／ＴＡＣ．２０１７．２７５２０８５．と同様の刊行物
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．の厳密に階層的な受動性に基づくコントローラとの両方に着想を得ており、提示された方法は二次計画法（ＱＰ）を使用して、個々のタスクの制御ターゲットを組み合わせ、又は、それらを相互に比較検討する。ただし、刊行物
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．では、個々のタスクに属する各コントローラが逆動力学に基づいて計算され、ここで、単位行列（Ｅｉｎｈｅｉｔｓｍａｔｒｉｘ）は、フィードバック線形化に対応する所望の慣性（Ｔｒａｅｇｈｅｉｔ）として使用される。これに対し、本方法では、受動性の概念に基づいて個々のタスクに属するコントローラを計算し、ロボットの自然慣性を使用するため、ＰＤ＋コントローラと同様の方法が実現される。刊行物
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．から知られている、制御アプローチのための自然慣性の使用にも基づく方法とは対照的に、提示された方法は、重み付けされたＱＰ形式、つまりソフトな優先順位付けを使用し、これにより、任意の数の異なるタスクを組み合わせることが可能になり、また、この方法では、タスクの特異点が発生した場合など、特定の状況で攻撃的な（ａｇｇｒｅｓｓｉｖｅｎ）挙動が少なくなる。

【発明の概要】

【０００７】

本発明は、冒頭で述べた方法を改良するという課題に基づいている。さらに、本発明は、冒頭に述べたコンピュータプログラムを提供することを課題としている。

【０００８】

この課題は、請求項１の特徴を備える方法で解決される。さらに、課題は、請求項１５の特徴を有するコンピュータプログラムによって解決される。有利な設計及び／又は発展形態は従属請求項の対象である。

【０００９】

本方法は、ロボットを制御技術的にコントロールする（ｒｅｇｅｌｕｎｇｓｔｅｃｈｎｉｓｃｈｅｎ Ｋｏｎｔｒｏｌｌｉｅｒｅｎ）ために用いることができる。本方法は、例えば、サービスロボット、医療ロボット、インダストリー４．０、宇宙飛行士のロボット支援分野などで利用することができる。原則として、本方法は、運動学的冗長性を有する力／トルク制御ロボットを使用できる場合であって、高精度で柔軟な（ｎａｃｈｇｉｅｂｉｇｅ）ヒト・ロボット相互作用又は環境・ロボット相互作用の両方が所望される場合に使用できる。

【００１０】

運動学的に冗長なロボットは、複数の課題又はタスクを同時に実行することができるよ

うに複数の自由度を有する。タスクは互いに独立したものであってもよい。タスクは、少なくとも部分的に同時に実行することができる。ロボットは力制御及び／又はトルク制御であることができる。パッシブベースのコントローラモジュール（Ｄａｓ ｐａｓｓｉｖｉｔａｅｔｓ－ｂａｓｉｅｒｔｅ Ｒｅｇｌｅｒｍｏｄｕｌ）は、インピーダンスベースコントローラモジュールであってもよい。特に「受動性又はパッシブ（Ｐａｓｓｉｖｉｔａｅｔ）」という用語は、システム内で不所望なエネルギ増加が起こる「活性又はアクティブ（Ａｋｔｉｖｉｔａｅｔ）」を区別するために使用される。

【００１１】

「タスクターゲット記述（Ｔａｓｋ－Ｚｉｅｌｂｅｓｃｈｒｅｉｂｕｎｇ）」という用語は、特に、それぞれのタスクの実際のターゲットに対応する項と、対応するフィードフォワード制御又は補償項（Ｖｏｒｓｔｅｕｅｒｕｎｇｓ－ ｂｚｗ． Ｋｏｍｐｅｎｓａｔｉｏｎｓ－Ｔｅｒｍｅｎ）との結合（Ｋｏｍｂｉｎａｔｉｏｎ）から生じる量（Ｇｒｏｅｓｓｅ）を記述するものである。タスクの対応するターゲット設定は、参照軌道の名目上の追跡（ｅｉｎｅｍ ｎｏｍｉｎｅｌｌｅｎ Ｔｒａｃｋｉｎｇ ｅｉｎｅｒ Ｒｅｆｅｒｅｎｚｔｒａｊｅｋｔｏｒｉｅ）及び／又は、有利には同時に、柔軟なインピーダンス挙動（ｄｅｍ ｎａｃｈｇｉｅｂｉｇｅｎ Ｉｍｐｅｄａｎｚｖｅｒｈａｌｔｅｎ）からなることができる。例えば、環境、物体又は人間との相互作用の場合である。フィードフォワード制御又は補償項は、例えば、実際の所望の挙動及び／又は実際の所望の動力学を生成するために、重力効果、及び、コリオリ効果及び／又は遠心効果を完全に又は部分的に補償することができる。

【００１２】

「タスクマッピング（Ｔａｓｋ－Ｍａｐｐｉｎｇ）」という用語は、特に、所与の操作変数（Ｓｔｅｌｌｇｒｏｅｓｓｅｎ）及び／又は制御入力（Ｒｅｇｅｌｕｎｇｓｉｎｐｕｔｓ）と、それぞれの前述のタスクターゲット記述との間の関係を確立する変数又は量を記述するものである。設定量（Ｓｔｅｌｌｇｒｏｅｓｓｅｎ）及び／又は制御入力（Ｒｅｇｅｌｕｎｇｓｉｎｐｕｔｓ）は、例えば、ロボット関節の設定可能なトルク、及び人型ロボットなどの自由浮動ロボットの場合には、特定の条件下で関節トルクと所与のエンドエフェクタ加速度、例えばロボット足の加速度、との間の制約条件（Ｚｗａｎｇｓｂｅｄｉｎｇｕｎｇ）から生じる接触力でも構成することが可能である。

【００１３】

少なくとも１つのタスクターゲット記述及び少なくとも１つの付属のタスクマッピングは、少なくとも１つの第１コントローラモジュールの名目上の挙動がばね質量ダンパシステムの挙動に対応するように計算されることができる。

【００１４】

少なくとも１つのタスクターゲット記述と少なくとも１つの付属のタスクは、ロボットの自然慣性（ｅｉｎｅｒ ｎａｔｕｅｒｌｉｃｈｅｎ Ｒｏｂｏｔｅｒ－Ｔｒａｅｇｈｅｉｔ）に基づいて計算することができる。

【００１５】

少なくとも１つのタスクターゲット記述と少なくとも１つの付属のタスクマッピングは、タスク固有のコリオリ効果及び遠心効果が変更されないままである一方で、他のすべてのコリオリ効果及び遠心効果を補償するように計算することができる。

【００１６】

少なくとも１つのタスクターゲット記述はタスクベクトルとして計算することができる。タスクベクトルは、力、力の方向、モーメント及び／又はモーメントの方向を示すことができる。式（１７）の所望のタスク力$f_{k,des}$は、かかるタスクベクトルを表す。さらに、個々のタスクベクトルは、有利には、結合されたタスクベクトルにまとめることができる。式（２１）において記述される「全ての所望のタスク力の結合」f_{des}は、かかる結合タスクベクトルの一例を示す。

【００１７】

少なくとも１つの付属のタスクマッピングは、タスクマッピング行列として計算するこ

とができる。タスクマッピング行列は、マッピング行列（Ｔ）又はマッピング行列（Ｕ）とも称されることができる。タスクヤコビアン行列J_kの置換の「動力学的に一貫した擬似逆行列」とも称されることができる、式（１２）において記述される行列T_kは、かかるタスクマッピング行列の一例を表す。個々のタスクマッピング行列は、有利には、式（２２）で記述されるように、統一されたタスクマッピング行列Ｔに結合することもできる。

【００１８】

少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールを全体コントローラに統合することができる。制約条件として定式化された少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールを全体コントローラに統合することができる。

【００１９】

少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは重み付けされることができる。重み付けには、重み付け行列を用いることができる。重み付け行列は、重み付け行列（Ｗ）とも表すことができる。

【００２０】

少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、優決定系制御問題（Ｕｂｅｒｂｅｓｔｉｍｍｔｅｎ　Ｒｅｇｅｌｕｎｇｓｐｒｏｂｌｅｍ）の場合であっても、全体コントローラが少なくともほぼ受動的な挙動を示すように、重み付けすることができる。

【００２１】

少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、少なくとも１つの擬似逆行列（ｅｉｎｅｒ　Ｐｓｅｕｄｏ－Ｉｎｖｅｒｓｅｎ）及び／又は少なくとも１つの逆行列（ｅｉｎｅｒ　Ｉｎｖｅｒｓｅｎ）を用いて最適化することができる。

【００２２】

少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、少なくとも１つの最適化変数を用いて最適化することができる。少なくとも１つの第１コントローラモジュール及び／又は少なくとも１つのさらなるコントローラモジュールは、二次最適化又は二次関数的に最適化する（ｑｕａｄｒａｔｉｓｃｈ　ｏｐｔｉｍｉｅｒｔ）ことができる。二次最適化は、単一のインスタンスで実行することも、複数のインスタンスで実行することもできる。

【００２３】

コントローラモジュールのうちの少なくとも１つは、トラッキングコントローラとして設計することができる。コントローラモジュールのうちの少なくとも１つは、レギュレーションコントローラ又は閉ループ制御コントローラ（Ｒｅｇｕｌａｔｉｏｎ－Ｒｅｇｌｅｒ）として設計することができる。制御可能な各自由度に個別のコントローラモジュールを割り当てることができる。

【００２４】

コンピュータプログラム製品又はコンピュータプログラムは、コンピュータ読み取り可能な記憶媒体上に、コンピュータ読み取り可能なデータキャリア上に、又はデータキャリア信号として存在することができる。

【００２５】

本方法は以下のステップを含むことができる：

ａ）すべての受動トラッキングコントローラモジュールについて所望のタスク力及び付属のタスクマッピング行列を計算するステップであって、受動トラッキングコントローラモジュールの名目上の挙動がばね質量ダンパシステムの挙動に対応し、ロボットの自然慣性が依然として維持され、タスク固有のコリオリ効果及び遠心効果（ｄｉｅ　ｔａｓｋ－ｓｐｅｚｉｆｉｓｃｈｅｎ　Ｃｏｒｉｏｌｉｓ－ ｕｎｄ　Ｚｅｎｔｒｉｆｕｇａｌ－Ｅｆｆｅｋｔｅ）が依然として影響を受けないままである一方で、他の全てのコリオリ効果及び遠心効果は補償される、ステップと；

ｂ）全てのタスクに対する、受動性を保証又は受動性を促進する特別な重み付け行列（ｄ

ｅｒ ｓｐｅｚｉｅｌｌｅｎ ｐａｓｓｉｖｉｔａｅｔｓ－ｇａｒａｎｔｉｅｒｅｎｄｅｎ ｂｚｗ． ｐａｓｓｉｖｉｔａｅｔｓ－ｆｏｅｒｄｅｒｎｄｅｎ Ｇｅｗｉｃｈｔｕｎｇｓｍａｔｒｉｚｅｎ）を計算するステップと；
ｃ）受動性を保証又は受動性を促進する特別な重み付け行列を使用して、最適化よって、全体コントローラに個別パッシブトラッキングコントローラモジュールを統合し、結合するステップ。
【００２６】
方法ステップ ｃ）では、パッシブトラッキングコントローラモジュールに加えて、他のコントローラ又はコントローラモジュールを統合することができる。ステップｃ）では、重み付けされたタスクに加え、１つ以上のタスクが、制約条件として定式化され、相応に最適化によって全体コントローラに統合することもできる。方法ステップｃ）では、最適化のために擬似逆行列を使用することができる。ステップ ｃ）では、二次最適化又は二次プログラミング（ＱＰ）の概念に基づく最適化を行うことができる。
【００２７】
本発明は、トルクに基づくロボットをコントロールするためのコントローラモジュールに関するものであり得る。コントローラモジュールは、タスクマッピング行列と所望のタスクベクトルを有することができ、コントローラモジュールの名目上の挙動は、ばね質量ダンパシステムに対応することができる。
【００２８】
場合によっては相応のタスク空間に投影される、ロボットの自然な質量又は慣性の相応の質量又は慣性は、コンプライアンス挙動として表される、すなわちロボットの自然質量又は慣性に基づくインピーダンス挙動に対応でき、したがって、いわゆる慣性成形（Ｔｒａｅｇｈｅｉｔｓ－Ｓｈａｐｉｎｇ）が不要になる。
【００２９】
タスク固有のコリオリ効果及び遠心効果が影響を受けないままである一方で、他の全てのコリオリ効果及び遠心効果を補償することで、コントローラモジュールの受動性を実現することができる。
【００３０】
コントローラモジュールは、トラッキングコントローラとして設計することができる。コントローラモジュールはレギュレーションコントローラ又は閉ループ制御コントローラとして設計することができるため、フィードフォワード制御又は事開ループ制御（Ｖｏｒｓｔｅｕｅｒｕｎｇ）を行わずに済む。
【００３１】
かかるコントローラモジュールを任意の数を全体コントローラに結合することができる。かかるコントローラモジュールを任意の数、さらに、他のコントローラ又はコントローラモジュールを任意の数、全体コントローラに結合することができる。
【００３２】
本発明は、コントローラモジュールに対応するタスクの重み付けによって、マイルドな（ｓａｎｆｔｅ）又はソフトな（ｓｏｆｔｅ）優先順位付けを行うことができる、そのような全体的なコントローラに関するものであり得る。
【００３３】
コントローラモジュールに対応するタスクの重み付けは、全体コントローラの受動性が保証されるように、又は、全体コントローラの挙動が生成されるように、設計でき、これは、個々のタスクのターゲット設定が互いに矛盾していて、優決定系制御問題がある場合でも、可能な限り受動的な挙動に近づくものである。
【００３４】
さらに、１つ以上のタスクをハードな制約条件として定式化すると同時に、他のすべてのタスクをコントローラモジュールに基づき、マイルドな重み付けで考慮するか、又は全体コントローラに統合することができる。
【００３５】

制御問題を解くためには二次最適化を用いることができ、これは単一の二次最適化インスタンスによって実行することも、複数の二次最適化インスタンスによって実行することもできる。

【００３６】

制御問題を解くために、１つ以上の擬似逆行列又は逆行列を使用することができる。

【００３７】

制御可能な各自由度に、固有のコントローラモジュールを割り当てることで、個々のタスクコントローラの最大限の分離若しくはデカップリング（Ｅｎｔｋｏｐｐｌｕｎｇ）又は最大粒度（ｅｉｎｅ ｍａｘｉｍａｌｅＧｒａｎｕｌａｒｉａｅｔ）を実現することができる。

【００３８】

要するに又は換言すると、本発明は、特に、力／トルク制御ロボットのためのモジュール型パッシブトラッキングコントローラを提供する。

【００３９】

本発明によるコントローラは、冗長なロボットシステムを正確に、同時に柔軟（ｎａｃｈｇｉｅｂｉｇｅ）かつロバストに制御することを可能にする。これは、パッシブベースのコントローラモジュールを使用することで実現され、これらのモジュールは、（目下の問題（ｄｅｒ ｖｏｒｌｉｅｇｅｎｄｅｎ Ｐｒｏｂｌｅｍｓｔｅｌｌｕｎｇ）に依存する）さまざまな最適化方法により、全体コントローラに結合される。異なるタスクに特別な重み付け（ｅｉｎｅｒ ｓｐｅｚｉｅｌｌｅｎ Ｇｅｗｉｃｈｔｕｎｇ）を使用することで、目下の問題に依存するコントローラ全体の受動性が保証されるか、又は少なくとも促進される。この特別な重み付けは、それぞれの逆タスク慣性行列（ｄｉｅ ｊｅｗｅｉｌｉｇｅ ｉｎｖｅｒｔｉｅｒｔｅ Ｔａｓｋ－Ｔｒａｅｇｈｅｉｔｓｍａｔｒｉｘ）にスカラのタスク重み付け数を乗じたものを、個々のタスクの重み付けとして使用することに基づいている。制御設計及び分析は、受動性の概念又はリアプノフ理論に基づいており、制御の高いロバスト性を実現する。

【００４０】

本方法は、特異点に対してロバストであり、モデリングエラーや測定ノイズに対してロバストであり、柔軟に使用でき（オンラインで容易にコントローラ構造を変更できる、他のコントローラ方式との組み合わせが簡単にできる）、環境との接触に対してロバストであることが証明されている。実際の実験又は適用中のチューニングの手間は非常に少なくて済む。タスクはいくつでも結合することができ、各タスクはその重み付けに従って全体の結果に貢献する。

【００４１】

このように、本方法は、冗長なトルク制御ロボットシステムの制御のための先行技術に記載されたすべての方法の最も重要な利点を組み合わせると同時に、すべての欠点を回避している。

【００４２】

本方法は、逆動力学ベースの制御と、いわゆるＰＤ＋ベースの非常にロバストな制御との間のほぼ全領域をカバーしている。所望の分離又はデカップリングの粒度又は個々のサブコントローラのモジュール化は自由に選択可能である。

【００４３】

本発明が特に目的とする技術分野は、冗長な、トルク制御型ロボットシステムの制御である。マルチタスク課題の解決は、特に、全体コントローラの安定性と受動性、所望の参照軌道の正確なトラッキング、モデルの不正確さやセンサノイズに対するロバスト性、特異点に対するロバスト性、実装の柔軟性、及び、異なる部分コントローラの組み合わせ、並びにコンタクト安定性に関して、難しい問題を呈する。

【００４４】

この問題を部分的に解決する方法として、一つは逆動力学ベースの方法と、もう一つはパッシブベース又はインピーダンスベースの方法と、の２つがある。いずれの先行技術に

よるアプローチも、まだ克服されていない欠点がある。
【００４５】
逆動力学は受動的ではないので、実際の使用シナリオでは深刻な安定性の問題が生じ得る。また、逆動力学はモデルの不正確さ及びセンサノイズに対してロバストでなく、特異点の影響も受けやすい。逆動力学ベースの制御方法でも、常にコンタクト安定性を保証することはできない。
【００４６】
従来から知られている受動性又はインピーダンスに基づく方法は、通常、所望の参照軌道のトラッキングが悪いか、特異点の影響を受けやすい。さらに、対応するコントローラの実装は柔軟性に欠けることがほとんどで、異なる部分コントローラやコントローラタイプの結合は提供されていない。
【００４７】
本発明は、冗長性のあるトルク制御ロボットシステムの制御方法に基づいており、パッシブベース又はインピーダンスベースのトラッキングコントローラモジュールが最適化によって互いに結合されている。特別な重み付けにより、個々のコントローラモジュールの結合／合成によって、システム全体の受動性が失われたり、対応する結合／合成によって活性、つまりシステム内のエネルギの、対応する不所望な増加が発生したりしないことが確実にされる。これにより、前述のすべての利点が達成され、対応する欠点が回避される。特に、本発明の基礎となる方法は、システム全体の安定性及び受動性を保証するか、又は、システム全体の安定化若しくは受動化が技術的に不可能な場合には受動性を促進し、所望の参照軌道の正確な追跡を達成し、これらが非一貫的でなく（ｎｉｃｈｔ　ｉｎｋｏｎｓｉｓｔｅｎｔ）、したがって技術的に実行可能である限り、特異点、モデルの不正確さ及びセンサノイズに対してロバストであり、優れた接触安定性を特徴とし、特に、異なるコントローラタイプでも互いに結合させることが可能な柔軟な実施を可能にするものである。このように、本発明が基礎とする方法は、ここで取り上げたすべての問題を完全に解決するものである。
【００４８】
以下では、本発明の実施形態について、模式的に示すとともに、例を挙げて、図を参照しながら、より詳細に説明する。
【図面の簡単な説明】
【００４９】
【図１】ＭＰＴＣが逆動力学（ＩＤ）からＰＤ＋制御までの全領域をカバーすることを示す図である。
【図２】完全に決定され矛盾のないタスク設定に対するステップ応答又はジャンプ応答を示す図である。左：関節角度と基準。右：全体及びタスク固有のリアプノフ関数値。
【図３】優決定系（したがって矛盾する）タスク設定に対するステップ応答を示す図である。
【図４】ＯｐｅｎＨＲＰシミュレーションにおけるヒューマノイドロボットＴＯＲＯの歩行を示す図である（シングル及びダブルサポート時間：ＴＳＳ＝０．８ｓ、ＴＤＳ＝０．１２ｓ）。２．５秒後に左足にｘ方向に－６０Ｎの外力を０．３秒間加える。
【図５】実験でのＴＯＲＯの歩行を示す図である（シングル及びダブルサポート時間：ＴＳＳ＝０．９ｓ、ＴＤＳ＝０．３ｓ、ステップ長０．１５ｍ）。
【図６】本発明による方法の可能な適用例を示す図である。タスクのスタックに基づくコントローラフレームワークのためのモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）の実施形態を説明する。
【発明を実施するための形態】
【００５０】
概要
本研究は、異なる下位課題（サブタスク）のターゲットを互いに独立して達成することを目的とした汎用的なパッシブベースのコントローラである、いわゆるモジュラパッシブ

トラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ：Ｍｏｄｕｌａｒｅｎ Ｐａｓｓｉｖｅｎ Ｔｒａｃｋｉｎｇ Ｃｏｎｔｒｏｌｌｅｒ）を提案する。これらはタスクのスタック（ＳｏＴ：Ｓｔａｃｋ ｏｆ Ｔａｓｋｓ）として結合され（ｋｏｍｂｉｎｉｅｒｔ）、全体システムコントローラを合成する際のベースとなる。対応する解析とコントローラ設計はリアプノフ理論に基づいている。この研究の重要な貢献は、優決定された（ｕｅｂｅｒｂｅｓｔｉｍｍｔｅｎ）かつ、したがって矛盾する、タスク設定の受動性を保証する、特別な最適化重み付け行列（ｓｐｅｚｉｆｉｓｃｈｅｎ Ｏｐｔｉｍｉｅｒｕｎｇｓ－Ｇｅｗｉｃｈｔｕｎｇｓ－Ｍａｔｒｉｘ）の設計である。提案するフレームワークは、固定型（ｆｅｓｔｍｏｎｔｉｅｒｔｅ）ロボットと自由浮動型（ｆｒｅｅ－ｆｌｏａｔｉｎｇ）ロボットの両方について、シミュレーションと実験により検証されています。

【００５１】

Ⅰ．序論

ロボット制御の分野では、異なるタスクの同時制御が重要な研究課題となっている。初期の研究では、運動学的に冗長なロボットのための単一のタスクとそのヌル空間という単純なケースを検討していたが、今日では、優先度の有無にかかわらず、複数のタスクを扱うフレームワークがより確立されてきている。文献では、まず運動レベルでタスクコーディネート問題を解決する研究と、動力学に対する直接制御を定式化する研究とに区別される。もう一つの重要な分類は、階層型コントローラを用いた厳密なタスクの優先順位付けの使用に基づくものと、タスクの重み付けによるソフトな優先順位付けを用いたコントローラによる分類である。

【００５２】

運動制御の分野では，厳密なタスク階層を確実にするために，逐次的あるいは拡張的な（ｓｕｋｚｅｓｓｉｖｅｎ ｏｄｅｒ ａｕｇｍｅｎｔｉｅｒｔｅｎ）ヌル空間投影に基づく階層型コントローラが提案されている［１８，２］。タスクの特異点を処理するために、特異点ロバストな逆運動学が提案されている［１４］。しかし、この特異点ロバストな逆行列は、厳密なタスク階層を破壊し、異なるタスク間の重み付けを効果的に行う。

【００５３】

また、動力学レベルで複数のタスクを扱うフレームワークもある。操作空間アプローチは、ヒューマノイドロボットへの応用により、この方向に拡張された［２２，２３］。他の逆動力学（ＩＤ）ベースのコントローラでは，階層的な二次プログラム（ＱＰ）を用いる［２０，１１，３］。これらの研究の多くは、厳密なタスク分離又はデカップリング（Ａｕｆｇａｂｅｎｅｎｔｋｏｐｐｌｕｎｇ）を目的とする。

【００５４】

本研究は、単一の重み付けされたＱＰ’ｓ［１３，１５，１０］ を用いて、（タスクスタック（ＳｏＴ）として結合された）複数のタスクのバランスをソフトに互いに調整する逆動力学に基づくトラッキングコントローラのファミリに着想を得ている。このようなコントローラは、書き込みが容易で、高い柔軟性を有することが特徴である。しかしながら、これらのコントローラは，例えば［１９，５，１２，１６，６］などのパッシブベースのアプローチに比べ，モデリングエラーや接触の不確実性（Ｋｏｎｔａｋｔｕｎｓｉｃｈｅｒｈｅｉｔｅｎ）に対するロバスト性が劣る［１０，６］。これは、実システムへの実装では、振動などの問題を引き起こすことがあるが、しばしば発見的なアプローチで対応される［１３，１０］。

【００５５】

さらに、［３］の重み付けベースの多目的コントローラと、［６］の厳密に階層化されたパッシブベースのコントローラは、この研究のインスピレーションとなった。［３］と同様に、ここでは、異なるタスク空間コントローラからの個々の制御ターゲットを結合するために、ＱＰを用いた。［３］では，個々の制御ターゲットが、所望の慣性として単位行列を有する逆動力学に基づいて（フィードバック線形化）、計算される。これに対して、ここで提案する個別のタスクコントローラでは、受動性の概念を用い、慣性の変更を回避している、即ち、各個別のタスクについてＰＤ＋のような閉ループ挙動を目的としてい

る［１９］。自然な慣性を維持するもの［６］と比較して、重み付きＱＰ定式化（柔らかな優先順位付け）が用いられ、これは、任意の数の様々なタスクを相互に結合することを可能にし、さらに、特定の状況（例えば、単一のタスクが特異になったとき）において、比較的アグレッシブではない挙動へとつながる。

【００５６】

本研究では、いわゆるモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ：Ｍｏｄｕｌａｒｅｎ Ｐａｓｓｉｖｅｎ Ｔｒａｃｋｉｎｇ Ｃｏｎｔｒｏｌｌｅｒｎ）と称される、名目上パッシブなサブタスクコントローラに基づく制御アーキテクチャを導出する。これらは、タスクスタックを用いて相互に結合され、互いに釣り合わされ、タスクスタックは、単一の重み付き擬似逆行列又は対応するＱＰによって解かれる。この制御フレームワークは、逆動力学制御の長所と、パッシブベースの制御の長所とを組み合わせたものである、詳しくは：実装と適用の容易さ、タスク空間トラッキングのサポート、受動性及び接触ロバスト性、及び、特異点の自然な処理である。対応する安定性解析はリアプノフ理論に基づく。タスクが互いに矛盾しない場合、全体コントローラは漸近的に安定で受動的であることが示された。本研究の重要な貢献は、特別な最適化重み付けの導出（Ｈｅｒｌｅｉｔｕｎｇ）であり、加えて、優決定の（即ち、矛盾する）場合であっても受動性を維持することである。競合するタスク（ｋｏｎｋｕｒｒｉｅｒｅｎｄｅ Ｔａｓｋｓ）及び対応する一貫的でないタスク参照（ｉｎｋｏｎｓｉｓｔｅｎｔｅ Ｔａｓｋ－Ｒｅｆｅｒｅｎｚｅｎ）について、正式な安定性の証明がまだないものの、いくつかのシミュレーションは、トラッキングの場合でもＭＰＴＣの安定性とロバスト性を示した。

【００５７】

本稿の構成は以下の通りである：ＩＩ章では、タスクレベルのモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）を導出し、ＩＩＩ章では、コントローラ導出及び全体閉ループの相応の分析を紹介する。ＩＶ章ではＭＰＴＣと、逆動力学（ＩＤ）及びＰＤ＋ベースのコントローラとを比較し、デカップリングの可能な表現の幅広い選択肢を紹介する。Ｖ章では、固定ベース型ロボット又は定置型ロボット（ｆｉｘｅｄ－ｂａｓｅ Ｒｏｏｔｅｒ）と自由浮動型ロボット（ｆｒｅｅ－ｆｌｏａｔｉｎｇ Ｒｏｂｏｔｅｒ）とのシミュレーション結果を示し、ＶＩ章では、本稿の結論を述べる。

【００５８】

ＩＩ．　モジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）の導出

本研究は、それぞれが個別のターゲット又は目的（Ｚｉｅｌ）を有するn_T個の課題（タスク）について考える。各タスクの目標を達成するために、本章ではモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）を導出し、ＩＩ章ではそれらは異なる全体コントローラに結合される。

【００５９】

Ａ．　一般的なロボットモデル

ロボットの一般的な運動方程式は次のように表される。

【００６０】

【数１】

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

ここで、

【００６１】

（外１）

$$q \in \mathbb{R}^n$$

は、一般化された座標を表し、Ｍ（ｑ）、

【００６２】

（外２）

$C(q,\dot{q})$

及びτｇ（ｑ）は、慣性行列、コリオリ及び遠心行列及び重力トルクモーメントを表し[2]、さらに、

【００６３】

【数２】

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

は、一般化された力を表す。これらは、一方では、関節モータトルクτｊ及び内部障害トルクτｉｎｔで構成され、ロボットの関節（例えば関節摩擦）にともに作用し、両方とも関節選択行列Ｓ[3]を介してτに作用し、他方では、外部トルクτｅｘｔから作用される。後者は、全てのねじり（力とトルクの結合）の全体ω$_{all}$＝［ω$_1{}^T$・・・ω$_{n_L}{}^T$］^{T}で構成され、ｎ$_L$ロボット肢（左）に作用し、スタックされたリンクヤコビアンＬ$_{all}$＝［Ｌ$_1{}^T$・・・Ｌ$_{n_L}{}^T$］^{T}を介してτに作用する。ＩＩＩ－Ｅ章では式（２）の個々の要素が使用されるが、以下では単純にτを使用して任意の一般化された力を表す。

【００６４】

一般化された加速度

【００６５】

（外３）

$\ddot{q}$

について式（１）を解くことにより、式（３）が得られる。

【００６６】

【数３】

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

【００６７】

Ｂ．　タスク空間の大きさ

１）　タスク空間の速度及び加速度：

タスク速度ベクトルは、ロボット制御における典型的なタスク空間[4]に対して

【００６８】

【数４】

$$\dot{x}_k = J_k\dot{q} \qquad (4)$$

のように定式化できる。添え字ｋは、すべてのｎ$_\tau$タスクに対してかかるマッピングが存在すること、すなわちｋ∈｛１，．．．，ｎ$_T$｝であることを示す。ここで、

【００６９】

（外４）

$J_k \in \mathbb{R}^{n_{T,k}\times n}$

は、ｋ番目のタスクの次元ｎ＿Ｔ，ｋで、相応のタスクヤコビアンを示す。時間に関して式（４）を導出し、式（３）を使用することにより、タスク空間加速度

【００７０】

【数５】

$$\ddot{x}_k = \dot{J}_k \dot{q} + J_k \ddot{q} = J_k M^{-1}\left(\tau - \tau_g\right) - Q_k \dot{q} \ , \qquad (5)$$

が得られ、ここで、

【００７１】

【数６】

$$Q_k = J_k M^{-1} C - \dot{J}_k \ . \qquad (6)$$

である。

【００７２】

[1] 固定型ベースロボットの場合、これらは単純に関節座標ｑｊ（つまり、ｑ＝ｑｊ）で構成されるが、自由浮動型ロボット（例えばヒューマノイド）の場合、ロボットベース座標ｘｂ（つまり、ｑ＝［ｘｂ^{T}，ｑｊ^{T}］^{T}）も含む。

【００７３】

[2] 注：以下では、ｑと

【００７４】

（外５）

$$\dot{q}$$

の依存関係は無視される。

【００７５】

[3]注：固定型ベースロボットの場合、Ｓは単位行列であり、自由浮動型ロボットの場合、Ｓ＝［０$_{nacl\times 6}$，Ｉ$_{nacl\times nacl}$］が成立し、ここで、ｎａｃｌは作動又は駆動される（ａｋｔｕｉｅｒｔｅｎ）ロボット関節の数を示す。

【００７６】

[4] 典型的なタスク（課題）は、例えば、関節コントローラ及びデカルトエンドエフェクタコントローラである。

【００７７】

トラッキングコントローラの設計（ＩＩ－Ｃ章参照）では、対応するタスク速度誤差

【００７８】

【数７】

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

及びタスク加速度誤差

【００７９】

【数８】

$$\ddot{\tilde{x}}_k = \ddot{x}_{k,ref} - \underbrace{\left(J_k M^{-1}\left(\tau - \tau_g\right) - Q_k \dot{q}\right)}_{\ddot{x}_k} \qquad (8)$$

が特に重要である。ここで

【００８０】

（外６）

$$\dot{x}_{k,ref}$$

及び

【００８１】

（外７）

$$\ddot{x}_{k,ref}$$

はタスク参照速度及びタスク参照加速度を表す。

【００８２】

２）　タスク空間慣性及びその導出

J_kを使用すると、慣性行列Mをタスク空間に投影できる［１７］。

【００８３】

【数９】

$$M_k = (J_k\, M^{-1}\, J_k^T)^{-1} \quad . \tag{9}$$

式（９）から導出すると、

【００８４】

【数１０】

$$\begin{aligned}\dot{M}_k &= -M_k \left(\dot{J}_k M^{-1} J_k^T - J_k M^{-1} \overbrace{\dot{M}}^{C+C^T} M^{-1} J_k^T \right. \\ &\qquad \left. + J_k M^{-1} \dot{J}_k^T \right) M_k \\ &= C_k + C_k^T \ , \end{aligned} \tag{10}$$

が、タスク空間コリオリ及び遠心行列

【００８５】

【数１１】

$$C_k = M_k Q_k T_k^T \quad . \tag{11}$$

とともに得られる。行列

【００８６】

【数１２】

$$T_k = M_k J_k M^{-1} \tag{12}$$

は動的に一貫性のあるJ_k^Tの疑似逆行列を表す。

【００８７】

Ｃ．　モジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）

本章では、提案されているモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）を導出する。これは一般的な形式で記述されているため、任意の特別なコントローラ（例えば、デカルトコントローラ又は関節コントローラなど）のためのテンプレートとして役立つ。

ｎＴ個のタスクのそれぞれについて、タスク関連の相対運動エネルギ$E_{kin,k}$と相対位置エネルギ$E_{pot,k}$に基づいて、別個のリアプノフ関数を使用する。

【００８８】

【数１３】

$$V_k = \underbrace{\frac{1}{2}\, \dot{\tilde{x}}_k^T\, M_k\, \dot{\tilde{x}}_k}_{E_{kin,k}} + \underbrace{\frac{1}{2}\, \tilde{x}_k^T\, K_k\, \tilde{x}_k}_{E_{pot,k}} \ , \tag{13}$$

ここで、正定対称行列（ｄｉｅ　ｐｏｓｉｔｉｖ　ｄｅｆｉｎｉｔｅ，　ｓｙｍｍｅｔｒｉｓｃｈｅ　Ｍａｔｒｉｘ）K_kはタスクの剛性を表す。このリアプノフ関数は、タスクの位置誤差

【００８９】
（外８）

$$\tilde{x}_k$$

（以下、「ｘ ｋ～」と表すこともある）及びタスク速度誤差
【００９０】
（外９）

$$\dot{\tilde{x}}_k$$

（以下、「ｘ ｋ～・」と表すこともある）に関して正定である。
【００９１】
式（１３）を導出し、式（８）代入することによって
【００９２】
【数１４】

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

が得られる。ここで、以下の式が使われる。
【００９３】
【数１５】

$$\frac{\dot{M}_k}{2} = \frac{C_k^T + C_k}{2} = \underbrace{\frac{C_k^T - C_k}{2}}_{\text{skew-symmetric}} + C_k\ , \tag{15}$$

ここで、
【００９４】
（外１０）

$$\dot{\tilde{x}}_k^T\frac{\dot{M}_k}{2}\dot{\tilde{x}}_k$$

を
【００９５】
（外１１）

$$\dot{\tilde{x}}_k^T C_k\dot{\tilde{x}}_k$$

として書き換えることができるようになる。スキュー対称項（ｓｋｅｗ－ｓｙｍｍｅｔｒｉｃ）が削除されるからである。
【００９６】
ここで、（実際の）タスク力[5] ｆ ｋを次のように定義する：
【００９７】
【数１６】

$$f_k = T_k\tau\quad . \tag{16}$$

【００９８】
【数１７】

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

として、所望のタスク力^{6}ｆｋ，ｄｅｓを選択することによって、及び

【００９９】

【数１８】

$$T_k \tau = f_k = f_{k,des} - \underbrace{(f_{k,des} - f_k)}_{\tilde{f}_k} \quad , \qquad (18)$$

として、Ｔｋτを書き換えることによって、単一タスクリアプノフレートは式（１４）から

【０１００】

【数１９】

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

になる。

【０１０１】

制御されたシステム（タスクレベルで）は、入力

【０１０２】

（外１２）

$$\tilde{f}_k,$$

、出力

【０１０３】

（外１３）

$$\dot{\tilde{x}}_k$$

及び、式（１３）からのメモリ関数Ｖｋに関して受動的であることに留意されたい。所望のリアプノフレートＶｋ，ｄｅｓは、正定減衰行列（ｅｉｎｅ　ｐｏｓｉｔｉｖ　ｄｅｆｉｎｉｔｅ　Ｄａｅｍｐｆｕｎｇｓ－Ｍａｔｒｉｘ）Ｄｋに対して純粋に受動的又は散逸的（ｒｅｉｎ　ｐａｓｓｉｖ：ｐｕｒｅｌｙ　ｄｉｓｓｉｐａｔｉｖｅ）であり、項

【０１０４】

（外１４）

$$\dot{V}_k$$

は、未知の障害、過少作動（Ｕｎｔｅｒａｋｔｕｉｅｒｕｎｇ）、その他の作動制限（Ａｋｔｕａｔｏｒｌｉｍｉｔｓ）、タスクの非一貫性及び優先順位付けなどの要因に依存して非ゼロになり得る。最後に、式（８）にＭｋをかけ、式（１８）と式（１７）を代入し、単純化し、並べ替えると、タスク動力学は以下の式（２０）で表される。

【０１０５】

【数２０】

$$M_k \ddot{\tilde{x}}_k + \left(C_k + D_k\right)\dot{\tilde{x}}_k + K_k \tilde{x}_k = \tilde{f}_k \ . \qquad (20)$$

【０１０６】

なお、タスク関連のコリオリ項（つまり、Ｃｋｘｋ～・）が切り捨てられず、これは、受

動性の要件であることに留意されたい。所望のタスク力が達成された場合（つまり
【０１０７】
（外１５）

$$\tilde{f}_k = 0$$

）は、タスクｋに対するバネ質量減衰動力学の式（２０）に対応する。互換性のあるタスクの場合、全ての軌道の漸近安定性を示すことができる。これは、例えば、ε－方法［１７］を用いて、［６］と同様の負定時間導関数で（ｍｉｔ ｎｅｇａｔｉｖ ｄｅｆｉｎｉｔｅｒ Ｚｅｉｔａｂｌｅｉｔｕｎｇ）強いリアプノフ関数を保持することで達成できる。
【０１０８】
それ以外の場合、例えば、過少作動又は他の作動制限、不所望な外部障害（ｕｎｅｒｗａｒｔｅｔｅｎ ｅｘｔｅｒｎｅｎ Ｓｔｏｅｒｕｎｇｅｎ）、又は矛盾するタスクの場合、式（２０）はコンプライアンス[7]の挙動［７］に対応する。かかる場合には、さらなる分析が必要になり得る。本研究では、タスク非一貫性の問題に焦点を当てており、これについては、次の章で述べる。
【０１０９】
ＩＩＩ． 全体システム及び全体コントローラの閉ループ挙動の分析
本章では、サブタスクコントローラで構成される全体システムのコントローラを、即ちｋ∈｛１，．．．，n_τ｝について式（１７）から所望のタスク力$f_{k,des}$の完全なセットについて導出し、その閉ループ挙動を、リアプノフ理論を適応することによって分析する。
【０１１０】
Ａ． 種々のタスク力誤差の定義
ｋ∈｛１，．．．，n_τ｝に対して式（１７）から所望のタスクフォース$f_{k,des}$を結合することによって、
【０１１１】
【数２１】

$$f_{des} = \begin{bmatrix} f_{1,des} \\ \vdots \\ f_{n_\tau,des} \end{bmatrix} . \tag{21}$$

が得られる。同様に、全てのｋ∈｛１，．．．，n_τ｝に対して式（１６）を結合し、
【０１１２】
【数２２】

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{n_r} \end{bmatrix}}_{f} = \underbrace{\begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{n_r} \end{bmatrix}}_{T} \tau \ . \tag{22}$$

が得られる。
【０１１３】
[5]注：タスクに依存して、タスク力は、線形力、トルク、ねじれ等を含む。
【０１１４】
[6]注：この所望のタスク力$f_{k,des}$は、ＩＩＩ章でタスク固有のコントロールターゲットとして使用される。同様に、注：ＩＶ－Ｂ章で、ＰＤ＋定式化へのコントローラの類似性を容易に認識できるようにする、代替的（同様に等価の）コントローラ定式化（５５）を提示する。
【０１１５】
[7]覚：コンプライアンスとは、自然慣性（慣性の変更無し）を有するインピーダンス挙動を意味する。

【０１１６】
これは、対応する統合タスクマッピング行列
【０１１７】
（外１６）

$$T \in \mathbb{R}^{n_{\tau,all} \times n}$$

を介して、実際の一般化された力τを実際のタスク力のスタック（積層）にマッピングすることを表し、全てのサブタスク次元の合計は
【０１１８】
（外１７）

$$n_{\tau,all} = \sum_{k=1}^{n_\tau} n_{\tau,k}$$

によって定義される。そして、実際のタスク力誤差のスタックを定義する。
【０１１９】
【数２３】

$$\tilde{f} = f_{des} - f = f_{des} - T\tau \quad . \tag{23}$$

【０１２０】
結合したタスク力と対応する誤差についての検討を簡単にするために、コントローラ[8]によって生成された、命令された一般化された力τ_{cmd}について、式（２２）を評価し、
【０１２１】
【数２４】

$$f_{cmd} = \begin{bmatrix} f_{1,cmd} \\ \vdots \\ f_{n_\tau,cmd} \end{bmatrix} = T\ \tau_{cmd} = \underbrace{TU}_{T_u} u_{cmd} \quad , \tag{24}$$

を取得し、ここで、f_{cmd}は、指令（ｋｏｍｍａｎｄｉｅｒｔｅｎ）タスク力のスタックを表す。特定の制御問題（例えば過少作動、ＩＩＩ－Ｅ章参照）では、τ_{cmd}は所与の最適化変数u_{cmd}から、作動マッピング行列Ｕを介して得られ、即ち、$\tau_{cmd} = U_{cmd}$によって、対応する一般化された力にマッピングされることができる。
【０１２２】
式（２１）から式（２４）を引くと、対応する指令タスクフォース誤差のスタックが得られる。
【０１２３】
【数２５】

$$\tilde{f}_{cmd} = f_{des} - f_{cmd} = f_{des} - T\,\tau_{cmd} = f_{des} - T_u u_{cmd} \quad . \tag{25}$$

【０１２４】
Ｂ．　全体システムに対するリアプノフ関数とその実指令導関数の定義
本章では、モジュラタスク空間コントローラの完全なセットの安定性と受動性（したがって、全てのロボット自由度が、結合されたタスク座標によってカバーされる場合のロボット全体システムの安定性）を分析する。ここで、全ての個別タスクのリアプノフ関数（１３）を結合し、以下の全体リアプノフ関数を構成し、
【０１２５】
【数２６】

$$V = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k V_k \right) \quad , \tag{26}$$

これは、正スカラ重み付け$^{9}\psi_k > 0$に対して、正に定義される（正に入力要素V_kと同様に）。同様にして、全体リアプノフ関数導関数（ｄｉｅ　Ｇｅｓａｍｔ－Ｌｙａｐｕｎｏｖ－Ｆｕｎｋｔｉｏｎｓ－Ａｂｌｅｉｔｕｎｇ）

【０１２６】

（外１８）

$$\dot{V}$$

は、個別タスクのリアプノフ関数導関数

【０１２７】

（外１９）

$$\dot{V}_k$$

（V_k˙とも表すことがある）によって、

【０１２８】

【数２７】

$$\dot{V} = \sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_k \right) = \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{V}_{k,des} \right)}_{\dot{V}_{des}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_T} \left(\psi_k \dot{\hat{V}}_k \right)}_{\dot{\hat{V}}} \quad . \tag{27}$$

から得ることができる。

【０１２９】

全ての$\psi_k > 0$の場合、項V_{des}˙は、負の半定値（ｎｅｇａｔｉｖ　ｓｅｒｎｉ－ｄｅｆｉｎｉｔ）である。全ての所望のタスクリアプノフ関数導関数

【０１３０】

（外２０）

$$\dot{V}_{k,des}$$

は負の半定値であるからである。全体リアプノフ関数導関数の実誤差（Ｄｅｒ　ｔａｔｓａｅｃｈｌｉｃｈｅ　Ｆｅｈｌｅｒ）

【０１３１】

（外２１）

$$\dot{\hat{V}}$$

は以下のように表すことができる。

【０１３２】

【数２８】

$$\dot{\hat{V}} = \dot{\hat{x}}^T \underbrace{\begin{bmatrix} \psi_1 I & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \psi_{n_T} I \end{bmatrix}}_{\Psi} \tilde{f} \quad , \tag{28}$$

ここで

【０１３３】

（外２２）

$$\dot{\tilde{x}}^T = \left[\dot{\tilde{x}}_1^T, \ldots, \dot{\tilde{x}}_{n_T}^T\right],$$

である。

【０１３４】

（外２３）

$$\dot{\hat{V}}$$

は

【０１３５】

（外２４）

$$\tilde{f},$$

の関数であり、実際の一般化された力はτであることは留意すべきである。

【０１３６】

ここで、指令タスク力誤差

【０１３７】

（外２５）

$$\tilde{f}_{cmd}$$

のスタックの影響をさらに調査する。

式（２８）の相応の調整によって、全体リアプノフ関数導関数の指令誤差

【０１３８】

【数２９】

$$\dot{\hat{V}}_{cmd} = \dot{\tilde{x}}^T \Psi \tilde{f}_{cmd} \quad , \tag{29}$$

が見出され、これは以下の指令全体リアプノフ関数導関数に相当する

【０１３９】

【数３０】

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

ここで

【０１４０】

（外２６）

$$\dot{\hat{V}}_{k,cmd} = \dot{\tilde{x}}_k^T \tilde{f}_{k,cmd},$$

である。

最終的に式（２８）は以下のように変換でき、

【０１４１】

【数３１】

$$\dot{V} = \dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{\tilde{f}_{des} - \tilde{f}}^{\tilde{f}} \right) \tag{31}$$
$$= \underbrace{\dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{\tilde{f}_{des} - \tilde{f}_{cmd}}^{\tilde{f}_{cmd}} \right)}_{\dot{V}_{cmd}} + \underbrace{\dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{\tilde{f}_{cmd} - \tilde{f}}^{\tilde{f}_{real}} \right)}_{\dot{V}_{real}} ,$$

これは、実際全体リアプノフ関数導関数

【０１４２】

【数３２】

$$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{cmd} + \dot{\tilde{V}}_{real} \tag{32}$$

に相当し、これは実システム挙動を指す。

ここで

【０１４３】

【数３３】

$$\dot{\tilde{V}}_{real} = \dot{\tilde{x}}^T \Psi \left(\overbrace{\tilde{f}_{cmd} - \tilde{f}}^{\tilde{f}_{real}} \right) \tag{33}$$

は、リアプノフ関数導関数の誤差の要素を指し、

これは、実際のタスク力ｆからの指令タスク力ｆ$_{cmd}$の偏差

【０１４４】

（外２７）

$$\tilde{f}_{real}$$

に相当する。

【０１４５】

[8] 可能なコントローラは、例えば、式（３６）にあるように、制約のない制御問題に対して疑似逆ベースの最適化を使用し、又は、二次計画法（ＱＰ）ベースの最適化（ＩＩＩ－Ｅ章を参照）を使用して、不等式ベースの副条件（Ｎｅｂｅｎｂｅｄｉｎｇｕｎｇｅｎ）を処理することができる。

【０１４６】

[9] 注：この正スカラ重み付けψ$_k$は、式（３４）又は（４１）で使用される最適化重み付けと等価である。

【０１４７】

Ｃ．　全体システムのコスト関数

【０１４８】

（外２８）

$$\tilde{f}_{cmd}$$

に基づいて、式（２５）から全体システムに対する以下のコスト関数を定式化する。

【０１４９】

【数３４】

$$G = \frac{1}{2} \tilde{f}_{cmd}^T W \tilde{f}_{cmd} \tag{34}$$
$$= \frac{1}{2} \tau_{cmd}^T T^T W T \tau_{cmd} - f_{des}^T W T \tau_{cmd} + \frac{1}{2} f_{des}^T W f_{des}$$
$$= \frac{1}{2} u_{cmd}^T T_v^T W T_v u_{cmd} - f_{des}^T W T_v u_{cmd} + \frac{1}{2} f_{des}^T W f_{des} .$$

ここで、Ｗは任意の対称正定重み付け行列（ｅｍｅ　ｂｅｌｉｅｂｉｇｅ　ｓｙｍｍｅｔｒ

ｉｓｃｈｅ ｕｎｄ ｐｏｓｉｔｉｖ－ｄｅｆｉｎｉｔｅ Ｇｅｗｉｃｈｔｕｎｇｓｍａｔｒｉｘ）を表す。このコスト関数Ｇは、ＩＩＩ－Ｄ章及びＩＩＩ－Ｅ章に示される種々のコントローラによって最小化される。

【０１５０】

Ｄ． 無制約の完全作動のケース

１） 擬似逆行列に基づく一般的分析最適化：

この章では、完全に作動し、制約がなく、潜在的に矛盾するケース（ｄｅｎ ｖｏｌｌａｋｔｕｉｅｒｔｅｎ， ｕｎｂｅｓｃｈｒａｅｎｋｔｅｎ ｕｎｄ ｐｏｔｅｎｔｉｅｌｌ ｗｉｄｅｒｓｐｒｕｅｃｈｌｉｃｈｅｎ Ｆａｌｌ）を検討する。不等式に基づく副条件がないため、重み付けされた疑似逆行列による分析解が可能になり、ここで、完全な作動は制御可能性を保証し、指令され一般化された力τｃｍｄを最適化変数として直接使用できるようにする。この場合、コスト関数を最適化するためにＧをτｃｍｄで微分する（ｎａｃｈ τｃｍｄ ａｂ ｌｅｉｔｅｎ）（式３４の２行目）。

【０１５１】

【数３５】

$$\frac{dG}{d\tau_{cmd}} = \tau_{cmd}^{T} T^{T} W T - f_{des}^{T} W T \quad . \tag{35}$$

コスト関数（３４）は、式（３５）をゼロに設定し、コントローラ力τｃｍｄを解くことによって最小化される。

【０１５２】

【数３６】

$$\tau_{cmd} = \left(T^{T} W T\right)^{-1} T^{T} W f_{des} \quad , \tag{36}$$

これらは、所与の問題に対する最適一般化力指令である。式（３６）を式（２５）に代入すると、

【０１５３】

【数３７】

$$\tilde{f}_{cmd} = \underbrace{\left(I - T\left(T^{T} W T\right)^{-1} T^{T} W\right)}_{E_T} f_{des} \quad , \tag{37}$$

になり、ここでＥτはタスク力平衡行列を表す。

２）

矛盾しないケース：Ｔが２次で可逆の（全てのサブタスクが互いに独立で矛盾しない）場合、式（３７）の平衡行列はＥτ＝０となり、指令タスク力誤差は

【０１５４】

（外２９）

$$\tilde{f}_{cmd} = 0$$

となる。この場合、式（２９）からの

【０１５５】

（外３０）

$$\dot{\hat{p}}_{cmd}$$

もゼロになり、したがって、式（３２）からの

【０１５６】

（外３１）

$$\dot{V}$$

は、
【０１５７】
【数３８】

$$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \dot{\tilde{V}}_{real} \ , \qquad (38)$$

になる。
【０１５８】
３）　矛盾するケース：
一方、Ｔが反転できない場合（例えば、コントローラの設定が予め決まっている場合）、平衡行列Ｅ$_{\tau}$は０に等しくならない。式（３７）を式（２９）に代入することによって、全体リアプノフ関数導関数の指令誤差が
【０１５９】
【数３９】

$$\dot{V}_{cmd} = (\dot{x}_{ref}^T - \dot{q}^T J^T)\,\Psi\, E_\tau\, f_{des} \ . \qquad (39)$$

として見出される。
ここで、Ｊ＝［Ｊ$_1$^{T}，．．．，Ｊ$_{nr}$^{T}］^{T}は個別タスクヤコビアンのスタックを表す。
【０１６０】
先ず、矛盾する規制の場合（つまり、
【０１６１】
（外３２）

$$\dot{x}_{ref} = 0$$

）を検討し、式（３９）に現れる行列Ｊ^{T}ψＥ$_{\tau}$を調査する。
【０１６２】
【数４０】

$$\begin{aligned} J^T\Psi E_\tau &= J^T\Psi\left(I - T\left(T^T W T\right)^{-1} T^T W\right) \qquad (40)\\ &= J^T\Psi\left(I - \Lambda J\left(J^T \Lambda W \Lambda J\right)^{-1} J^T \Lambda W\right). \end{aligned}$$

ここでＴ＝ΛＪＭ$^{-1}$を代入し、Λはブロック対角行列であり、対角サブ行列としてタスク空間慣性行列｛Ｍ$_1$，．．．，Ｍ$_n$｝が得られる。Ｗ^{10}の任意の選択に対して、式（４０）は０ではなく、したがって、レギュレーションのケース又は開ループ制御のケース（Ｒｅｇｕｌａｔｉｏｎｓ－Ｆａｌｌ）であっても、式（３９）からの
【０１６３】
（外３３）

$$\dot{V}_{cmd}$$

は０ではない。いずれにせよ
【０１６４】
【数４１】

$$W = \Lambda^{-1}\Psi \qquad (41)$$

が選択される場合、式（４０）は
【０１６５】
【数４２】

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

になる。これは、（現在の一般化された速度ｑ・と所望のタスク力ｆｄｅｓに依存せず）式（４１）を選択する場合に、レギュレーションのケース

【０１６６】

（外３４）

$$(\dot{x}_{ref} = 0)$$

の場合の式（３９）からの指令リアプノフ関数導関数は

【０１６７】

【数４３】

$$\dot{\hat{V}}_{cmd} = 0 \quad (43)$$

になることを意味し、式（３２）からの

【０１６８】

（外３５）

$$\dot{V}$$

は

【０１６９】

【数４４】

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

になる。

式（４４）の要素を分析すると、制御された全体システムは、式（２６）からの入力

【０１７０】

（外３６）

$$\Psi\hat{f}_{real},$$

、出力ｘ～・（これら２つは

【０１７１】

（外３７）

$$\dot{\hat{V}}_{real}$$

の要素を表す）、及び正定保存関数Ｖに関して受動性である。相応に、ここで検討した矛盾するレギュレーションのケースでは、全体システムが受動的であると結論付けることができる。優決定／矛盾するタスク設定（レギュレーションのケース）の全体システム閉ループ動力学の場合、式（４１）は受動性保証最適化重み付け（ＰＷＯＷ）として機能する。式（４３）は、個々のタスクのリアプノフ関数導出誤差

【０１７２】

（外３８）

$$\dot{\hat{V}}_{k,cmd}$$

が０になることを意味しない（それらの合計のみ）ことに留意されたい。

【０１７３】
式（４１）より全体重み付け行列Ｗ＝Λ^{-1}ψは対称でありブロック対角線である。その対称性は、その対角部分行列の対称性
【０１７４】
【数４５】

$$W_k = \psi_k M_k^{-1} \quad , \tag{45}$$

に起因し、これはψ$_k$の関数及び（対称）タスク慣性行列Ｍ$_k$である。式（４５）を見ると、対応する重み付けスカラψ$_k$によって、各タスクを（他のタスクに関して）独立して重み付けできることが明らかになる。
【０１７５】
次に、矛盾するトラッキングのケースを検討する。
【０１７６】
（外３９）

$$\dot{x}_{ref} \neq 0$$

の場合に、まだ式（４１）を使用している場合、式（３９）は
【０１７７】
【数４６】

$$\dot{\hat{V}}_{cmd} = \dot{x}_{ref}^T \Psi E_T f_{des} \quad , \tag{46}$$

になり、式（３２）は
【０１７８】
【数４７】

$$\dot{V} = \dot{V}_{des} + \underbrace{\dot{x}_{ref}^T \Psi E_T f_{des}}_{\dot{\hat{V}}_{cmd}} + \dot{\hat{V}}_{real} \tag{47}$$

になる。矛盾のないタスク参照速度の場合、
【０１７９】
（外４０）

$$\dot{\hat{V}}_{cmd}$$

は通常ゼロにならず、トラッキングケースに対する正式な受動性証明になる（この文書の内容ではない）。
【０１８０】
１０　Ｗが対角行列として選択されている場合でも、逆動力学（ＩＤ）関連の文献でよく見られる。
【０１８１】
Ｅ．　過少作動及び他の作動制限の処理
前章で紹介した解析解は、作動制約（あるいは他の制約）が関係ない完全作動型ロボットから出発するコントロール問題を対象としている。本章では、ＭＰＴＣの文脈の中で、過少作動と作動制限のケースを取り上げ、その解決策を提案する。
【０１８２】
１）　過少作動：固定型ベースロボットとは対照的に、いわゆる自由浮動型ロボット（例えばヒューマノイド）のロボットベースは作動しない。ある程度の制御性を得るために、自由浮動型ロボットはエンドエフェクタを使用して、直接的ベース作動（ｅｉｎｅｒ　ｄｉｒｅｋｔｅｎ　Ｂａｓｉｓ－Ａｋｔｕｉｅｎｍｇ）の欠如を補う接触力を生成する必

要がある。ＩＩＩ－Ｄ章の対応する作動マッピング行列　Ｕ　は、次の形式を有する。
【０１８３】
【数４８】

$$U = [S^T, L_{EE}^T] \ . \tag{48}$$

対応する作動自由度／最適化変数は
【０１８４】
【数４９】

$$u_{cmd} = \begin{bmatrix} \tau_{j,cmd} \\ w_{EE,cmd} \end{bmatrix} \ , \tag{49}$$

であり、ここで、τｊ，ｃｍｄは指令関節トルクを表し、ωεε，ｃｍｄは指令エンドエフェクタ力である。式（４８）、式（４９）は、式（２）の要素に基づくものである。ただし、ここでは、結合されたリンクヤコビアンＬａｌｌ及びリンク力ωａｌｌが、相応の選択、即ち接触している可能性のあるエンドエフェクタ（”ＥＥ”）に相応する、つまり、ＬＥＥ及びωＥＥ，ｃｍｄ、よって置き換えられていることに留意されたい。
【０１８５】
　２）　接触制約条件と作動制限：先ほど紹介した指令エンドエフェクタ力ωεε，ｃｍｄは、多くの場合、不等式に基づく制限（いわゆる接触制約条件）の影響を受ける。例えば、ロボットの歩行に関連するアプリケーション（Ｖ－Ｂ章参照）では、これらの接触制約条件は通常、片側性と摩擦円錐の制約条件の観点から表現される。このような接触制約条件を無視すると、ロボットが故障する可能性がある。ロボットの物理的な制限により、多くの場合、指令関節トルクτｊ，ｃｍｄも同様に制限することが理にかなっている。このようにして、アクチュエータの飽和を回避することができる。
【０１８６】
　３）　二次計画法（ＱＰ）による解法：過少作動、アクチュエータ制限、及び接触制約に関連する上記の問題を処理できるようにする一般的な方法は、次の形式の二次計画法（ＱＰ）を設定することである。
接触関節トルク制約を考慮して、
【０１８７】
【数５０】

$$\underset{u_{cmd}}{\text{minimiere}} \ \ G_{QP} = \frac{1}{2} u_{cmd}^T T_v^T W T_u u_{cmd} - f_{des}^T W T_t u_{cmd} \ , \tag{50}$$

ここで、式（３４）の３行目は、ＱＰコスト関数ＧＱｒの定式化のために相応に適応される。制約がアクティブでない限り、ＱＰが重み付け疑似逆行列ベースの最適化と同じ解を達成することはよく知られている。ＩＩＩ－Ｄ章で解析的最適化に用いた受動性保証最適化重み付け（ＰＷＯＷ）と全く同じ、すなわちＷ＝Λ^{-1}ψを使うことが勧められる。ただし、制限がアクティブになると、受動性が保証されないことに留意されたい；レギュレーションケースであっても、である。
【０１８８】
　ＩＶ．　関連するコントローラのタイプに関する分類及び目的のデカップリングの粒度
　Ａ．　逆動力学（ＩＤ）及びＭＰＴＣの比較
　本章では、逆動力学（ＩＤ）ベースのコントローラとＭＰＴＣベースのコントローラのターゲット設定を比較し、顕著な類似性を示す。
【０１８９】
　逆動力学（ＩＤ）：逆動力学（ＩＤ）ベースのコントローラは通常、次の形式の２次安定動力学を実装する
【０１９０】
【数５１】

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

ここで、正定比例及び導出ゲイン行列

【０１９１】

（外４１）

$$\hat{P}_{ID,k}$$

及び

【０１９２】

（外４２）

$$\hat{D}_{ID,k}$$

の場合、参照軌道のトラッキング

【０１９３】

（外４３）

$$x_{k,ref},\ \dot{x}_{k,ref},\ \ddot{x}_{k,ref}$$

が可能になる。両ゲイン行列は通常、完全に分離された線形動力学を得るために、対角行列として選択される。

【０１９４】

１１　より明示的なＱＰ定式化は、例えば［２１，１５，１０］にある。

【０１９５】

　ここでは、臨界的に減衰した過渡応答を実現するために、いわゆる極配置［１］がしばしば使用される。式（５１）に式（５）からタスク空間加速度

【０１９６】

（外４４）

$$\ddot{x}_k$$

を挿入し、一般化された力τに関連する項を解くと、

【０１９７】

【数５２】

$$\begin{aligned} J_k M^{-1}\tau = {} & J_k M^{-1}\tau_g + Q_k\dot{q} \\ & + \ddot{x}_{k,ref} + \hat{D}_{ID,k}\,\dot{\tilde{x}}_k + \hat{P}_{ID,k}\,\tilde{x}_k\ . \end{aligned} \tag{52}$$

が得られる。ここではτを直接解かないことに留意されたい。これは、選択したコントローラの設定によっては、行列Ｊｋが可逆でない場合があるためである。

【０１９８】

モジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）：式（１７）のｆｋ，ｄｅｓを（式（１６）から）ｆｋ＝Ｔｋτに置き換え、その結果にＭｋ－１を事前に乗算して解くと、次の所望のタスクコントローラの式が得られる。

【０１９９】

【数５３】

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

式（５３）と式（５２）を比較すると、本発明のモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）と逆動力学（ＩＤ）ベースのコントローラの基本構造は同じである。それらは、選択された比例ゲイン行列及び導関数ゲイン行列によってのみ異なる。ＩＤベースのコントローラの場合、

【０２００】

（外４５）

$$\hat{P}_{ID,k}$$

及び

【０２０１】

（外４６）

$$\hat{D}_{ID,k}$$

は定数として選択され、ＭＰＴＣの場合は

【０２０２】

（外４７）

$$\hat{P}_{MPTC,k}$$

及び

【０２０３】

（外４８）

$$\hat{D}_{MPTC,k}$$

はそれぞれ、現在のタスク慣性M_Kの関数である。

また、

【０２０４】

（外４９）

$$\hat{D}_{MPTC,k}$$

は、タスクコリオリ行列C_kを含んでおり、したがって、さらに、タスク関連のコリオリ項が切り捨てられず、これは受動性の要件であり、ロバスト性を高める。[12]

【０２０５】

ここでの重要な態様は、式（５２）及び式（５３）がタスク加速空間内に記載されているものであり、一定のシステム又はタスクの固有値に対応するＩＤの一定のゲイン行列が得られ、ＭＰＴＣのローカル固有値は構成に依存する。一方、式（５２）と式（５３）が事前にM_kを乗算することによってタスク力空間に転送される場合、ＭＰＴＣの場合、知覚される減衰と剛性は一定であることがわかるが、それらはＩＤ構成に依存する。

【０２０６】

注：式（５２）と式（５３）の強い類似性は、既存のＩＤベースのコントローラフレームワークをＭＰＴＣ方法に移植する可能性に関して有益な効果をもたらすことができる。

【０２０７】

Ｂ．　ＰＤ＋コントロール／受動性ベースの全身制御の比較

コリオリ効果と遠心効果（以下、「ＣＣ」と略す）に関連するサブタスクコントローラのターゲット設定である式（１７）の項を並べ替えると、次の方程式が得られる。

【０２０８】

【数５４】

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

ここで、Ｎ$_k$は、タスク空間速度

【０２０９】

（外５１）

$$\dot{x}_k$$

に影響を与え得る

【０２１０】

（外５０）

$$\dot{q}$$

の全てのコンポーネントを分離するヌル空間プロジェクタを示し、行列Ｂ$_k$は、対応するＣＣ関連のフィードバック項を組み合わせる。式（５４）を式（１７）に代入すると、代替的（しかし同等の）サブタスクコントローラ定式化が見出される：

【０２１１】

【数５５】

$$f_{k,des} = T_k \tau_g + B_k \dot{q} + M_k \ddot{x}_{k,ref} + C_k \dot{x}_{k,ref} + D_k \dot{\tilde{x}}_k + K_k \tilde{x}_k. \tag{55}$$

式（１７）の元のサブタスクコントローラの定式化と比較して、この定式化により、ＭＰＴＣコントローラのＣＣ項切り捨てストラテジをより直接的に把握できる：ＭＰＴＣは、全ての、タスクに関連しないＣＣフィードバック項を切り捨て（［7］の非対角要素と比較可能）、タスクに関連するフィードフォワード項

【０２１２】

（外５２）

$$C_k \dot{x}_{k,ref},$$

を生成するとともに、タスクに関連するＣＣフィードバック項は切り捨てられず又は使用されない。後者は、タスクに関連するＣＣ項が変更されないままである公称サブタスク閉ループ挙動の式（２０）を考慮することで、再び検証できる。タスク関連のＣＣ項を保持することは受動性の前提条件であり、逆動力学ベースのコントローラと比較して、モデル誤差に対するロバスト性が高くなる。後者はすべてのＣＣ効果を完全に切り捨てるが（ロボットモデルが不正確になる可能性があることに基づいて）、ＭＰＴＣベースのコントローラは関連しないＣＣ項のみを切り捨てる。

【０２１３】

１２　フィードバックチャネルの数が減るため、センサノイズやモデルエラーに関連する問題が発生する可能性がある。

【０２１４】

興味深い特殊なケースは、単一のタスクのみが考慮され（対応するサブタスクのヤコビアンを積み重ねることによってすべてのサブタスクを１つの全体タスクに結合する）、タスクのヤコビアンＪ$_k$が２次で可逆である場合に発生する。この前提条件は、サブタスクが互いに矛盾しないことである。この特定のケースでは、Ｂ$_k$＝０であるため、式（５５）は古典的なＰＤ＋コントローラ［１９］（図１を参照）又は（不等式制約の場合）後に導入される受動性ベースの全身コントローラ（ＷＢＣ）と等価である［１２，１６］。

【０２１５】

Ｃ．　目的のデカップリングの粒度

ＭＰＴＣは、サブコントローラタイプ（例えばデカルト又は関節コントローラ）の選択と、目的デカップリングの「粒度（Ｇｒａｎｕｌａｒｉｔａｅｔ）」の両方において、汎用コントローラ設計ツールです[13]。本稿では、サブタスクの次元数、つまり各タスクに割り当てられる自由度の数を指定することはなかった。つまり、コントローラの構成は多種多様に考えられることを意味する。異なる制御ターゲット（例えば、デカルトエンドエフェクタトラッキングターゲット及び関節制御ターゲット）を単一のタスクスタック（ＳｏＴ：課題のスタック）において組み合わせる場合、ＳｏＴのどの部分をどのＭＰＴＣ関連サブタスクに割り当てるかという問題が残る。例えば、６次元のデカルトタスクは、２つの分離した（線形及び角度の）制御サブタスクとして、又は、代替的に単一の６次元のタスクとして定義することができる。第１のケースでは、線形及び角度誤差の動力学は分離されているが、第２のケースでは、それらは結合されている。

【０２１６】

すべてのコントローラのターゲット設定を唯一のタスクに結合することもでき（その結果、完全結合パッシブトラッキングコントローラ（ＦＣ－ＰＴＣ）になる）、これは特定の状況下ではＰＤ＋コントローラと等価である（第ＩＶ－Ｂ章及び図１参照）。あるいは、標準ＭＰＴＣフレームワークで処理できる一連の複数のタスク（例えば左足用のタスク、右足用のタスク）を定義することもできる。最後に、ＳｏＴの各行が個別のタスクを表す、最大粒度（ｍａｘｉｍａｌ　ｇｒａｎｕｌａｒｅｓ）のコントローラ設定を選択することもできる。この特別なタイプのコントローラ設定を、完全分離型パッシブトラッキングコントローラ（ＦＤ－ＰＴＣ）と称する。可能なすべてのＭＰＴＣ設定の中で、ＦＤ－ＰＴＣは逆動的コントローラに最も類似する設定である。両方とも、自由度が分離されたタスク動力学に基づく（図１参照）。ただし、慣性が変更されず、短縮されるＣＣ項が少ないため、ＦＤ－ＰＴＣの方がロバストであると想定される。

【０２１７】

前述のように、各タスクは唯一の重み付けスカラψ_kのみを有し、これによってタスク相互の（ソフトな）優先順位付けが可能となる。このようにして、チューニングの手間を軽減することができる。ただし、特定のタスク成分の優先順位を上げるためには（例えば、デカルトタスクのｘ、ｙ成分よりもｚ方向を優先する場合）、それ自身のタスクと適切な重み付け（例えば、ψ_z）を割り当てる必要があることに留意されたい。

【０２１８】

Ｖ．　シミュレーション及び実験

提案したＭＰＴＣフレームワークのパフォーマンスを検証するために、複数のシミュレーションを実行した：一つは、計算されたコントローラトルクを入力として使用する式（３）の前方積分に基づく単純なシミュレーションであり、もう一つは、シミュレーション環境としてＯｐｅｎＨＲＰ［１４］を使用した人型ロボットＴＯＲＯ［８］のシミュレーションである。

【０２１９】

Ａ．　固定ベースのロボットシミュレーション

ここで紹介する第１のシミュレーションは、完全に作動し、完全に決定され、したがってコンフリクトのないタスク設定のレギュレーションのケースを検証するものである。この目的のために、固定ベースのロボットアーム（その運動学と慣性特性はＴＯＲＯの脚の１つに対応する）の６つの関節が、２つの異なる関節タスクＡ及びＢに割り当てられた（それぞれ３つの関節をカバーする。図２参照）。対応する関節タスクの剛性と減衰ゲイン[14]は、$K=300I_{3\times3}$、Ｄ＝ｄｉａｇ（［４０，２０，１０］）、$K_B=40I_{3\times3}$及び$D=2I_{3\times3}$として選択された。スカラタスクの重み付け（ここではすべて１に設定）は、コンフリクトがないことに基づいて全てのタスクが完全に完了したため、効果がないことに留意されたい。コントローラは追加の調整（Ｔｕｎｉｎｇ）を必要としなかったことに留意されたい。提示されたパラメーターは、図２の教訓的な値（ｄｉｄａｋｔｉｓｃｈｅｎ　Ｗｅｒｔ）を改善するために選択された。シミュレーションの開始時に、全て

の関節が急速に初期目標値（ａｎｆａｅｎｇｌｉｃｈｅｎ　Ｓｏｌｌｗｅｒｔｅｎ）に収束する。１秒後、グループＡの関節は速度変化を経験し、その結果、対応するタスクエラー導関数が急上昇した。グループＡが再収束している間、グループＢはタスク分離に基づいてまったく影響を受けないことに留意されたい。２秒後、グループＢの目標値が変更される。ここでも、対応する関節座標が収束するが、グループＡは完全に影響を受けない。

【０２２０】

注：ここで観察された完全なタスク分離は、両方の関節タスクの一貫性によってのみ達成可能であった。最終的に、３秒後、τ_{ext}＝［２０，２０，２０，５，５，５］Ｎｍのトルクオフセットが最初に適用され、４秒後に取り除かれる。ここでも、観測されたコントローラ挙動は柔和で（ｇｕｔｍｕｅｔｉｇ）、我々の期待に応えるものであった。このシミュレーションでは、リアプノフ関数Ｖの合計値が、障害と目標値の変更の場合を除いて、常に減少することを確認できる（図２（右）を参照）。

【０２２１】

[13]注：ここでは「目的の分離又はデカップリング」について述べている。一貫性のあるタスクの場合、ＭＰＴＣ　は厳密に分離された誤差動力学を引き起こす。これに対して、一貫性が無い場合、（少なくともソフトなタスクの優先順位付けでは）対応するタスク誤差動力学の結合は避けられない。

【０２２２】

[14]注：簡潔にするために、ここでは剛性（線形：Ｎ／ｍ、角度：Ｎｍ／ｒａｄ）と減衰容量（線形：Ｎｓ／ｍ、角度：Ｎｍｓ／ｒａｄ）の単位は省略されている。

【０２２３】

提示された第２のシミュレーションは、矛盾するタスク設定について、コントローラのパフォーマンスを評価し、レギュレーションのケースについても評価する。

今回は、剛性K_{cart}＝ｄｉａｇ（［２０００，２０００，２０００，１００，１００，１００］）及び減衰D_{cart}＝ｄｉａｇ（［５００，５００，５００，２０，２０，２０］）を有するデカルト６自由度エンドエフェクタタスクが追加される。スカラタスクの重みψ_kは１に設定される。コントローラを起動した後、ロボットは平衡位置に（ｉｎ　ｅｉｎｅ　Ｇｌｅｉｃｈｇｅｗｉｃｈｔｓｐｏｓｉｔｉｏｎ）収束する。リアプノフ関数Ｖの合計値は単調に減少し、同時にサブタスクの重み付けされたリアプノフ関数値も増加し得ることに留意されたい（例えば図３の$\psi_{j_B} V_{j_B}$）。

【０２２４】

Ｂ．　ヒューマノイドロボットシミュレーションと実験

最終的に、ハイブリッドＷＢＣ設定に基づき、ヒューマノイドロボットＴＯＲＯ（図４参照）の歩行シミュレーションを実施した：逆動力学ベースの胴体の向きと全身ポーズタスク、発散運動コンポーネント（ＤＣＭ）［９］及びコントロールと角運動量の正則化のタスク、並びに、足トラッキングのためのデカルト（６自由度）ＭＰＴＣベースのコントローラが混合される[15]。足の参照トラジェクトリは正確に追跡される。２．５秒後、左足はｘ方向に－６０Ｎの力で０．３秒間、障害をうけ（ｇｅｓｔｏｅｒｔ）、最大足位置誤差５１ｍｍ及び最大ＤＣＭ誤差４５ｍｍになる。干渉が取り除かれた後、足は正常に続行するのに十分な速さで収束する。

【０２２５】

実際の条件下でのＭＰＴＣのパフォーマンスを評価するために、ＴＯＲＯを使用して、プッシュリカバリ（立った状態）、人間とロボットの相互作用、歩行など、複数の実験を行った（対応する動画はここに：ｈｔｔｐｓ：／／ｌｙｏｕｔｕ．ｂｅ／ＷｄＦ９ＵＱＫ８ａｉｏ）。ここでは、ＴＯＲＯが６歩前方に歩く歩行実験を提供する（詳細は図５参照）。別個のＭＰＴＣベースのコントローラは、足（６自由度のデカルトトラッキング）、胴体（３自由度の回転トラッキング）、脚関節、腰関節、及び、胴体の関節のコントロールのために使用された（最後の３つは、全身ポーズの制御と正則化タスクとして機能した）。シミュレーションと同様に、ＤＣＭベースのコントローラ及び角運動量正則化コントローラも使用された。全体的な歩行パフォーマンスはロバストであった。ただし、トラッ

キング誤差が観察される場合があり、これは、トルクのオフセットと関節摩擦が原因であると考えられる。ＩＤベースのコントローラと比較して［１０］、チューニングの手間は少なく、実際の条件下で使用した場合のＭＰＴＣのロバスト性を証明している。

【０２２６】

ＶＩ．　まとめ及び展望

本研究では、いわゆるモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ：Ｍｏｄｕｌａｒ　Ｐａｓｓｉｖｅ　Ｔｒａｃｋｉｎｇ　Ｃｏｎｔｒｏｌｌｅｒ）が導入されている。この汎用コントローラは、第１段階として、いくつかのサブタスクのターゲット設定を互いに独立に達成することを意図している。そして、これらの一次的な独立したサブタスクコントローラは、１つの全体コントローラに統合される。コントローラの設計と解析は、安定性と受動性に関する記述を容易にするリアプノフ理論に基づく。本稿では、完全作動型ロボットの矛盾するサブタスクの完全な集合の受動性を保証する最適化重み行列を設計することを主な目的の一つとしている。提案した制御フレームワークは、固定型ベースロボットと自由浮動型ロボットに対するいくつかのシミュレーションと実験で検証された。

【０２２７】

今後の研究では、逆動力学（ＩＤ）、提案されているモジュラパッシブトラッキングコントローラ（ＭＰＴＣ）、及びＰＤ＋コントローラなどの他のパッシブベースのコントローラの制御概念を広範囲に比較することを目指す。この包括的な比較は、理論的分析、シミュレーション、及びハードウェア実験に基づいて行われる。

【０２２８】

[15]注：ＭＰＴＣのモジュール性により、ＩＤベースのタスクとＭＰＴＣベースのタスクを同じ全身コントロールセットアップで組み合わせることができる。

【０２２９】

参考文献

［1］Ｊ．Ａｃｋｅｒｍａｎｎ．Ｐａｒａｍｅｔｅｒ　ｓｐａｃｅ　ｄｅｓｉｇｎ　ｏｆ　ｒｏｂｕｓｔ　ｃｏｎｔｒｏｌ　ｓｙｓｔｅｍｓ．ＩＥＥＥ　Ｔｒａｎｓａｃｔｉｏｎｓ　ａｎ　Ａｕｔｏｍａｔｉｃ　Ｃｏｎｔｒｏｌ，２５（６）：１０５８－１０７２，Ｄｅｃｅｍｂｅｒ　１９８０．ＩＳＳＮ　２３３４－３３０３．ｄｏｉ：１０．１１１０９／ＴＡＣ．１９８０．１１０２５０５．

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

［3］Ｋ．Ｂｏｕｙａｒｍａｎｅ，Ａ．Ｋｈｅｄｄａｒ．Ｏｎ　Ｗｅｉｇｈｔ－Ｐｒｉｏｒｉｔｉｚｅｄ　ｍｕｌｔｉｔａｓｋ　ｃｏｎｔｒｏｌ　ｏｆ　ｈｕｍａｎｏｉｄ　ｒｏｂｏｔｓ．ＪＥＥＥ　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　ｆｕｒ　ｒｅａｌ－ｔｉｍｅ　ｋｉｎｅｍａｔｉｃ　ｃｏｎｔｒｏｌ　ｏｆ　ｒｏｂｏｔ　ｍａｎｉｐｕｌａｔｏｒｓ．ＩＥＥＥ　Ｔｒａｎｓａｃｔｉｏｎｓ　ａｎ　Ｒｏｂｏｔｉｃｓ　ａｎｄ　Ａｕｔｏｍａｔｉｏｎ，１３（３）：３９８－４１０，Ｊｕｎｅ　１９９７．ｌＳＳＮ　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，Ｃ．Ｏｔｔ．Ｈｉｅｒａｒｃｈｉｃａｌ　Ｉｍｐｅ

dance-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.
[7] A. Dietrich, C. Ott, A. Albu-Schaeffer. 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, A. Albu-Schaeffer. 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, A. Albu-Schaffer. Three-Dimensional Bipedal Walking Control Based on divergent component of motion. IEEE Transactions on Robotics, 31(2):355368, April 2015. ISSN 1941-0468. doi: 10.1109/TRO.2015. 2405592.
[10] J. Englsberger, G. Mesesan, A. Werner, C. Ott. Torque-Based Dynamic Walking - a long way from simulation to experiment. In IEEE Int. Conf 011 Robotics and Automation (ICRA), pages 440-447, 2018.
[11] Adrien Escande, Nicolas Mansard, 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, 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, A. Leonessa. Compliant locomotion using whole-body control and divergent component of motion tracking. In IEEE lnt. Conf on Robotics and Automation (ICRA), pages 5726-5733, May 2015. doi: 10.1109/ ICRA.2015.7140001.
[14] F. Kanehiro, H. Hirukawa, S. Kajita. Openhrp: Open Architecture Humanoid Roboti

cs 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, J. Pratt. Design of a Momentum-Based Control Framework and application to the humanoid robot atlas. International Journal of Humanoid Robotics, 13(01):16500007, 2016. doi:101142/S0219843616500079.
[16] G. Mesesan, J. Englsberger, G. Garofalo, C. Ort, A. Albu-Schaffer. Dynamic walking on compliant aml uneven terrain using dem and passivity-based whole-body control. In IEEE-RAS 19th Int. Conf' on Humanoid Robots {Humanoids), pages 25-32, 2019.
[17] R. M. Murrny. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC press, 2017.
[18] Y. Nakamura, H. Hanafusa, 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, B. Riedle. A Positive-Real Modification of a class of nonlinear controllers for robot manipulators. In 1988 A.rnerican Control Conference, pages 1782-1785, June 1988. doi:10.23919/ACC.1988.4790015.
[20] J. Peters, M. Mistry, F. Udwadia, J. Nakanishi, and S. Sehaal. 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, S. Sehaal. Inverse dynam1ics control of floating-base rbots with external constraints: A unified view._IEEE Int. Cnof. on Robotics and Automation, pages 1085-1090, May 2011 doi:10.1109/ICRA.2011.5980156.
[22] L. Sentis, O. Khatib. Synthesis of Whole-Body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives. International Journal of Humanoid Robotics, 2(4):505-518, 2005.
[23] J L. Sentis, J. Park, Cl. Khatib. Compliant Control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. IEEE Transactions on Robotics, 26(3):483-501,

２０１０．
【０２３０】
図６は、本発明による方法の可能な適用例である。ここで、複数のインピーダンスベースコントローラモジュール１０２（モジュール型受動トラッキングコントローラ）が、本発明による方法によって、全体コントローラ１０４に統合される。図示の例では、コントローラモジュール１０２の表示は、それぞれ基準軌道及び質量を備え、これらは、ばねダンパシステムを介して互いに接続されており、Ａ及びＣの符号を有するコントローラモジュール１０２はそれぞれ直交制御タスクを表現し、Ｂ及びＤの符号を有するコントローラモジュール１０２は多関節コントローラとして形式化されている。図６に示すように、それぞれがタスクマッピング行列及びタスクベクトルを有する、様々なコントローラモジュール１０２は、統一されたタスクマッピング行列１０６並びに組み合わされたタスクベクトル１１０を有するタスクのスタックにまとめることができる。適切な最適化方法によって、例えば最適化変数１０８を用いると、タスクのスタックによって表されるコントローラモジュールは、全体的なコントローラ１０４に融合することができる。このようにして、様々なサブコントローラターゲットの最適な妥協が達成され、
特に、結果として得られる全体コントローラ１０４の受動性が可能な限り最良の方法で実装される。
【０２３１】
「できる（ｋａｎｎ）」は、特に、本発明の任意の特徴を指す。したがって、それぞれの１つ以上の特徴を追加的又は代替的に有する、本発明のさらなる発展形態及び／又は実施態様も存在する。
【０２３２】
必要に応じて、本明細書に開示された特徴の組み合わせから孤立した特徴を選び出し、特徴間に場合によっては存在し得る構造上及び／又は機能上のつながりを解きながら、他の特徴と組合せて、請求項の主題を画定するために使用することができる。
【符号の説明】
【０２３３】
１００　ロボット（Ｒｏｂｏｔｅｒ）
１０２　コントローラモジュール（Ｒｅｇｌｅｒｍｏｄｕｌ）
１０４　全体コントローラ（Ｇｅｓａｍｔｒｅｇｌｅｒ）
１０６　タスクマッピング行列（Ｔａｓｋ－Ｍａｐｐｉｎｇ－Ｍａｔｒｉｘ）
１０８　最適化変数（Ｏｐｔｉｍｉｅｒｕｎｇｓｖａｒｉａｂｌｅｎ）
１１０　タスクベクトル（Ｔａｓｋ－Ｖｅｋｔｏｒ）

【図面】

【図１】

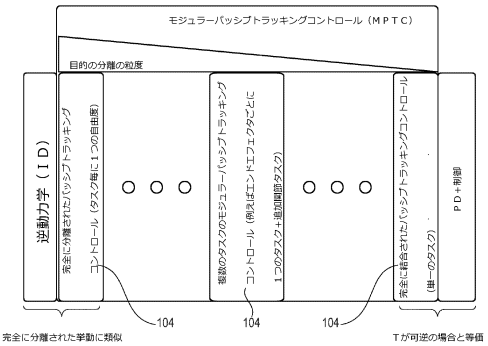


Fig. 1

【図２】

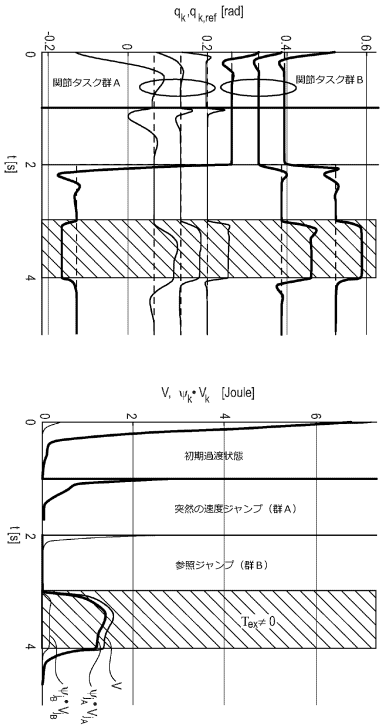


Fig. 2

【図３】

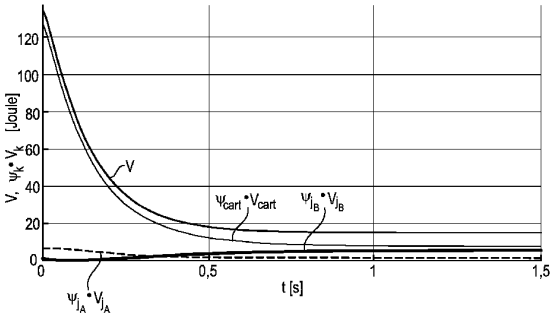


Fig. 3

【図４】

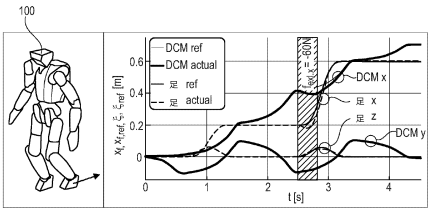


Fig. 4

【図５】

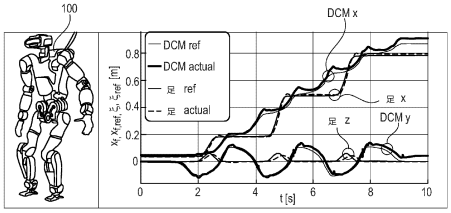


Fig. 5

【図６】

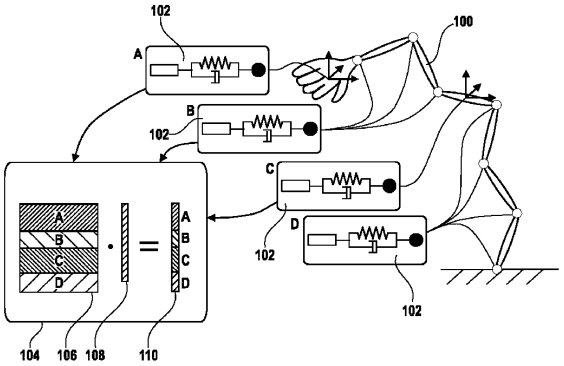


Fig. 6

フロントページの続き

ドイツ ８２２３４ ヴェスリング，ミュンヘナー シュトラッセ ２０ ドイッチェス ゼントラム ヒュル ルフト－ ウント ラウムファールト エー．フェー．（デーエルエル）内
(72)発明者 ガロファロ，ジャンルカ
ドイツ ８２２３４ ヴェスリング，ミュンヘナー シュトラッセ ２０ ドイッチェス ゼントラム ヒュル ルフト－ ウント ラウムファールト エー．フェー．（デーエルエル）内
(72)発明者 メゼサン，ジョージ，エイドリアン
ドイツ ８２２３４ ヴェスリング，ミュンヘナー シュトラッセ ２０ ドイッチェス ゼントラム ヒュル ルフト－ ウント ラウムファールト エー．フェー．（デーエルエル）内

審査官 稲垣 浩司

(56)参考文献 特開平１０－３２９０６７（ＪＰ，Ａ）
特表２０１３－５２０３２７（ＪＰ，Ａ）
特開２０１６－１５５２０３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｂ２５Ｊ １／００ － ２１／０２