

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6343559号
(P6343559)

(45) 発行日 平成30年6月13日(2018.6.13)

(24) 登録日 平成30年5月25日(2018.5.25)

(51) Int.Cl. F1
B25J 13/00 (2006.01) B25J 13/00 Z

請求項の数 10 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2014-523337 (P2014-523337)	(73) 特許権者	311003754
(86) (22) 出願日	平成24年8月3日(2012.8.3)		ソフトバンク・ロボティクス・ヨーロッパ
(65) 公表番号	特表2014-522741 (P2014-522741A)		SOFTBANK ROBOTICS EUROPE
(43) 公表日	平成26年9月8日(2014.9.8)		フランス国、75015・パリ、リュ・デュ・コロネル・ピエール・アビア・43
(86) 国際出願番号	PCT/EP2012/065210	(74) 代理人	110001173
(87) 国際公開番号	W02013/017676		特許業務法人川口国際特許事務所
(87) 国際公開日	平成25年2月7日(2013.2.7)	(72) 発明者	グワイエ, ダビド
審査請求日	平成27年7月16日(2015.7.16)		フランス国、エフ-92120・モンルー
(31) 優先権主張番号	1157171	(72) 発明者	コレット, シリル
(32) 優先日	平成23年8月4日(2011.8.4)		フランス国、エフ-92350・ル・プレシ・ロバンソン、リュ・ドゥ・フォントネ、21
(33) 優先権主張国	フランス (FR)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 可変剛性の接合を有するロボットおよび最適化剛性の計算方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

少なくとも1つの関節鎖(110)上を移動する能力を有し、前記鎖の端部と移動面(120)との接触の少なくとも1つのセンサ(130)を含むロボット(100)であって、

前記鎖は少なくとも1つの接合(140)を含み、

前記接合は、位置および/または速度に基づき判断された命令により制御される電気モータ(210)により、および前記モータに印加される電流および/またはトルクを制限する手段により駆動され、

前記制限手段は前記少なくとも1つの接合(140)に印加されるトルクの関数として剛性係数により制御され、

前記トルクは、一方では前記接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方では前記トルクと、接触力、摩擦力および振動力との合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、

前記トルクと力は前記接合に印加され、

前記接合の角加速度による慣性力の効果、前記コリオリおよび遠心力の効果、前記摩擦力の効果の少なくとも一部はオフセットによりモデル化されて剛性係数を計算する、ロボット。

【請求項2】

10

20

前記オフセットは前記ロボットの姿勢に従って変化する、請求項 1 に記載のロボット。

【請求項 3】

前記重力加速度の前記効果は、前記ロボットの構成に依存する慣性係数であって関節角度に適用される慣性係数と、前記ロボットの慣性プラットフォームの測定結果を組み合わせることにより判断される重力ベクトルとの行列に基づき計算される、請求項 1 または 2 に記載のロボット。

【請求項 4】

前記重力ベクトルの計算については、前記鎖に固定されたエフェクタの位置の値をもとめることにより前記ロボットの中央鎖の空間内の配向を判断することにより曖昧性除去が行われる、請求項 3 に記載のロボット。

10

【請求項 5】

前記ロボットの前記動的平衡モデルにおいて考慮される前記接触力の印加点は、前記エフェクタ上に置かれた接触センサのオン/オフ状態のリスト、前記エフェクタの仮想接地面に対する最小距離の閾値のリスト、および前記リストの任意の組合せを含む一群の判定基準から選択される判定基準を満足するエフェクタの第 1 のリストを生成することにより判断され、

前記判定基準は前記ロボットの形態学により実質的に判断される、請求項 3 または 4 に記載のロボット。

【請求項 6】

前記第 1 のリストの前記エフェクタは、前記ロボットの現在の姿勢と前記ロボット構成データ内に格納された標準姿勢とを比較することにより、フィルタリングされ第 2 のリストとなり、

20

前記標準姿勢はエフェクタの標準リストを判断し、

前記第 2 のリストは、存在する場合、同様な判定基準に従って前記ロボットの現在の姿勢に最も近いものとして採用される前記標準姿勢に対応するリストのエフェクタだけをかつそれらのみを含む、請求項 5 に記載のロボット。

【請求項 7】

印加点における前記接触力は、前記接触力の合計と、前記ロボットの重量、および前記摂動力の垂直成分との間の前記平衡方程式のほぼ最適解を探すことにより判断される、請求項 3 ~ 6 のいずれか一項に記載のロボット。

30

【請求項 8】

前記摂動力は無視される、請求項 7 に記載のロボット。

【請求項 9】

少なくとも 1 つの関節鎖の端部と移動面との接触の少なくとも 1 つのセンサを含む前記鎖上を移動する能力を有するロボットの接合を駆動するための電気モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限する方法であって

前記鎖は少なくとも 1 つの接合を含み、

前記電気モータは位置および/または速度に基づく命令により制御され、

前記制限は前記接合に印加される計算トルク値の関数として剛性係数を判断することにより生じ、

40

前記トルクは、一方では前記接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方では前記トルクと、接触力、摩擦力および摂動力との合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、

前記トルクと力は前記接合に印加され、

前記接合の角加速度による慣性力の効果、前記コリオリおよび遠心力の効果、前記摩擦力の効果の一部はオフセットによりモデル化されて剛性係数を計算する、方法。

【請求項 10】

コンピュータプログラムがコンピュータ上で実行されると請求項 9 に記載の方法の実行を可能にするプログラムコード命令を含むコンピュータプログラムであって、

50

前記プログラムは、ロボットの接合を駆動するための電気モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限するように適合され、

前記ロボットは前記鎖の端部と移動面との接触の少なくとも1つのセンサを含む少なくとも1つの関節鎖上を移動することができ、

前記鎖は少なくとも1つの接合を含み、

前記電気モータは位置および/または速度に基づき判断された命令により制御され、

前記プログラムは、前記モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限するためのモジュールを含み、

前記制限モジュールは、前記少なくとも1つの接合に印加されるトルクの関数として剛性係数により前記制限を実行することができ、

10

前記トルクは、一方では前記接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方では前記トルクと、接触力、摩擦力および摂動力との合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、

前記トルクと力は前記接合に印加され、

前記接合の角加速度による慣性力の効果、前記コリオリおよび遠心力の効果、前記摩擦力の効果の一部はオフセットによりモデル化されて剛性係数を計算する、コンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、表面上を移動することができる関節ロボットの分野に属する。より正確には、本発明はロボットの接合(joint)の剛性の制御に適用される。剛性は、ロボットとの相互作用の人間工学における重要要因とその使用の期間および信頼性における制限要因に同時になる。

【背景技術】

【0002】

例示的関節ロボットは、ヒューマノイドロボットすなわち人の外観と機能のいくつか(頭、胴、2本の腕、2本の手、2本の脚、2本の足等)の属性を保有する関節ロボットである。外観以外では、ヒューマノイドロボットが達成できる機能は、運動を行い、話し、「推論する」その能力に依存する。ヒューマノイドロボットの中には四肢または頭を使って歩行し、身振りを行うことができるものもある。ヒューマノイドロボットが行うことができる身振りの複雑さは引き続き増している。本出願人により開発され市販されたNAO(商標)などのこのタイプのいくつかのロボットは、その動きが電気モータにより作動される数十の接合を有し得る。モータの指令制御論理は接合の剛性とロボットの電力消費(したがって温度の変遷)とを同時に判断する。したがって、モータの指令制御論理は、ロボットの安全性(安定性への影響)と、可能なその使用期間(限界温度到達時の強制的シャットダウン)と、ロボットとの相互作用においてユーザにより感じられる体験とに関する判断要素の1つである。関節鎖の剛性が大きすぎるとロボットは理想的ヒューマノイド型から離れる。同じタイプの問題領域はまた、他のタイプのロボット、動物ロボットまたはより一般的には関節鎖を含むロボットなどの非ヒューマノイドに関し存在する。

30

40

【0003】

指令制御論理は、接合の位置(一般的には角度に基づく)、接合の速度(角度の微分)、および/またはトルクの設定点を利用することができる。このような論理はセンサにより制御され、収束を設定点へ誘導できるようにする帰還ループを含んでも含まなくてもよい。トルク設定点または電流設定点を利用する指令制御は最も高価でありかつ最も広まっていない。実際、この場合、電流の値に対し正確なセンサを使用する必要があり、これは、特に接合の数が非常に多い場合に、高価となる。

【0004】

例えば工業用関節アームなどの関節鎖ロボットは特に組立作業を実行するための固定基

50

部を有し得る。これは、少数の接合でも、その単位原価が数万または数十万ユーロほどもかかる物を含む。この場合、トルクベース指令制御論理は、単位原価が主考慮点でない限り、好適となり得る。

【0005】

接合の数が多くかつ原価制約が非常に大きい、可動基部を有する（換言すると地面に固定されない）関節鎖ロボット（ヒューマノイドロボットが属するカテゴリ）の場合、使用は通常、所与の精度レベルに対しはるかに安上がりな位置および/または角速度に基づく接合に対する指令制御論理でなされる。しかし、この指令制御論理はいくつかの重大な欠点を有する。特に、障害が、モータが目標位置により規定される制約を達成するのを防げる場合、モータは、現実には達し得ない目標位置に達することを必要とし続け、したがって、その際、電力を消費し、ロボットへの損傷を避けるためにロボットを使用不能にさせるまで接合および全体の温度を上昇させる。この問題は、直立する際にロボットの足の水平性が単に失われるだけで過熱現象が引き起こされるためますます厄介である。

10

【0006】

この種の問題に対処するために、接合に印加されるトルクを、安全モードへの設定の発生数を低減するように、製造者により規定される物理的限界より十分に低いレベルに制限できるようにする各接合の剛性パラメータを定義することがN A O（商標）の旧バージョンから知られている。しかし、この解決策では、特にロボットの鎖の1つがその進行上の障害に遭遇するときのエネルギーの過剰消費を回避することができない。実際、過度に頻繁なシャットダウンを回避するために比較的高いレベルに必然的に固定されるといっような制限により、当該接合の消費電力が早期遮断されない。

20

【0007】

特に米国特許出願第2008/258670号明細書から、接合に印加されるトルクの値を計算しそれを角速度設定点に変換することも知られている。しかし、この実施形態では、ロボットとその環境との接点における反作用（これは過熱を発生する過度に高いトルクの印加の主要な起点である）について考慮されていない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】米国特許出願第2008/258670号明細書

30

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、ロボットの環境との接点においてロボットに印加される力の関数としてロボットの鎖同士の接合の剛性を変える手段を提供することによりこの問題を解決する。

【0010】

この目的のため、本発明は、鎖の端部と移動面との接触の少なくとも1つのセンサを含む少なくとも1つの関節鎖上を移動する能力を有するロボットを開示する。鎖は少なくとも1つの接合を含み、接合は、位置および/または速度に基づき判断された命令により制御される電気モータにより、およびモータに印加される電流および/またはトルクを制限する手段により駆動され、制限手段は少なくとも1つの接合に印加されるトルクの関数として制御され、トルクは、一方では接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方ではトルク、接触、摩擦および摂動力の合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、トルクと力は接合に印加され、接合の角加速度による慣性力の効果、コリオリおよび遠心力の効果、摩擦力の効果の少なくとも一部はオフセットによりモデル化される。

40

【0011】

有利には、オフセットはロボットの姿勢にしたがって変化する。

【0012】

有利には、重力加速度の効果は、ロボットの構成に依存する慣性係数であって関節角度

50

に適用される慣性係数と、ロボットの慣性プラットフォームの測定結果を組み合わせることにより判断される重力ベクトルとの行列に基づき計算される。

【 0 0 1 3 】

有利には、重力ベクトルの計算については、鎖に固定されたエフェクタの位置の値をもとめることによりロボットの中央鎖の空間内の配向を判断することにより曖昧性除去が行われる。

【 0 0 1 4 】

有利には、ロボットの動的平衡モデルにおいて考慮される接触力の印加点は、エフェクタ上に置かれた接触センサのオン/オフ状態のリスト、エフェクタの仮想接地面に対する最小距離の閾値のリスト、および上記リストの任意の組合せを含む一群の判定基準から選択される判定基準を満足するエフェクタの第1のリストを生成することにより判断され、判定基準はロボットの形態学により実質的に判断される。

10

【 0 0 1 5 】

有利には、第1のリストのエフェクタは、ロボットの現在の姿勢とロボット構成データ内に格納された標準姿勢とを比較することにより、フィルタリングされ第2のリストとなり、標準姿勢はエフェクタの標準リストを判断し、第2のリストは、存在する場合、同様な判定基準に従ってロボットの現在の姿勢に最も近いものとして採用される標準姿勢に対応するリストのエフェクタだけをかつそれらのみを含む。

【 0 0 1 6 】

有利には、印加点における接触力は、接触力の合計と、ロボットの重量、および摂動力の垂直成分との間の平衡方程式のほぼ最適解を探すことにより判断される。

20

【 0 0 1 7 】

有利には、摂動力は無視される。

【 0 0 1 8 】

本発明はまた、少なくとも1つの鎖の端部と移動面との接触の少なくとも1つのセンサを含む関節鎖上を移動する能力を有するロボットの接合を駆動するための電気モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限する方法を開示する。鎖は少なくとも1つの接合を含み、電気モータは位置および/または速度に基づき判断された命令により制御され、上記制限は接合に印加される計算トルク値を判断することにより生じ、上記トルクは、一方では接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方ではトルク、接触、摩擦および摂動力の合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、上記トルクと力は接合に印加され、接合の角加速度による慣性力の効果、コリオリおよび遠心力の効果、摩擦力の効果の少なくとも一部はオフセットによりモデル化される。

30

【 0 0 1 9 】

最後に、本発明は、コンピュータプログラムがコンピュータ上で実行されると請求項10に記載の方法の実行を可能にするプログラムコード命令を含むコンピュータプログラムを開示する。本プログラムは、ロボットの接合を駆動するための電気モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限するように適合され、ロボットは鎖の端部と移動面との接触の少なくとも1つのセンサを含む少なくとも1つの関節鎖上を移動することができ、鎖は少なくとも1つの接合を含み、電気モータは位置および/または速度に基づき判断された命令により制御され、プログラムは、モータに印加されるトルクおよび/または電流を制限するためのモジュールを含み、上記制限モジュールは、少なくとも1つの接合に印加されるトルクの関数として制限を実行することができ、上記トルクは、一方では接合の角加速度による慣性力、重力の加速度の慣性力、コリオリおよび遠心力の効果の慣性力との差の合計と、他方ではトルクと、接触、摩擦および摂動力との合計との間のロボットの動的平衡をモデル化する方程式の解として計算され、上記トルクと力は接合に印加され、接合の角加速度による慣性力の効果、コリオリおよび遠心力の効果、摩擦力の効果の少なくとも一部はオフセットによりモデル化される。

40

【 0 0 2 0 】

50

本発明の解により、エネルギーの過剰消費と過熱とを感知可能なほどに低減できるようになる。実施される実施形態は、あまりに高いトルクにおける接合モータの動作による温度上昇のほぼ半減化を達成する。足首などの大いに働く接合については、安全モードに設定する前の動作期間は4倍になり得る。

【0021】

したがって、ロボットの全エネルギー消費と全体寿命とが大きく改善される。

【0022】

さらに、使用されるアルゴリズムは、計算資源の点ではあまり貪欲ではない（AMD社のGeode（商標）タイプのプロセッサ（32ビット、500MHz）では3%未満）。

10

【0023】

最後に、接合（離脱可能なままである）の剛性のパラメータ化の導入により、ユーザの好みに対処しそしてロボットの姿勢のタイプに従って変形形態を導入できるようにし、これによりロボットとのユーザの相互作用の体験を豊かにすることができる。

【0024】

本発明は、いくつかの例示的实施形態の以下の説明とその添付図面からより良く理解され、その様々な特性と利点が浮かび上がることになる。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】関節鎖により象徴化されたロボットを示す。

20

【図2】従来技術によるロボットの接合モータの指令制御の一般的原理を示す。

【図3】本発明の一実施形態によるロボットの接合モータの指令制御処理の概要フローチャートを示す。

【図4a - b】従来技術と本発明の一実施形態それぞれによるロボットの右脚の接合の温度の時間的変遷を表す。

【図5a - b】従来技術と本発明の一実施形態それぞれによるロボットの左脚の接合の温度の時間的変遷を表す。

【図6】本発明の一実施形態によるロボットの接合モータの指令制御処理のいくつかの工程のフローチャートである。

【図7】図6のフローチャートの一工程の第1の詳細図である。

30

【図8a - f】本発明の一実施形態による接触点の判断を伴う3つの姿勢におけるロボットを表す。

【図9】図6のフローチャートの一工程の第2の詳細図である。

【図10】本発明の実施態様をその実施形態のうちの一つにおいて許容する物理的および機能的アーキテクチャの図である。

【発明を実施するための形態】

【0026】

図1に、関節鎖により象徴化されたロボットを示す。

【0027】

図示された例のロボット100はいくつかのセグメント（腿、脚、足）からなる5つの関節鎖を含み、鎖110が右脚に対応する。ロボットは表面120上を移動することができる。ロボットは少なくとも1つの接合140（この例では足首）を含む。既に引用されたNAO（商標）などのロボットは25の接合を含み、この例示的实施形態は決して限定するものではない。

40

【0028】

ロボットは、一般則として、足と表面120との接触のセンサ130を含むことになる。これらのセンサは例えばFSR（接地圧センサ）である可能性がある。これらのFSRは本発明の実施態様では特に有用である。これらのFSRは、このフレームワーク内では、足のそれぞれと地面またはロボットが進行する任意の他の表面との接触を検出することを目的とする。この目的により、例えば、柔軟なピエゾ抵抗材料の少なくとも2層を有す

50

るストリップからなる Tekscan (商標) 社の FlexiForce (商標) (商品名) センサを使用することが可能である。ストリップの電気抵抗は、ストリップが配置される表面に印加される垂直押圧力の関数として低下する。電流の測定により、校正後の押圧力を判断できるようにする。有利には、いくつか (例えば 4 個) のセンサが各足底に設けられる。

【0029】

図 2 に、従来技術によるロボットの接合モータの指令制御の一般的原理を図示する。

【0030】

NAO (商標) などのロボットは接合を制御するセンサとアクチュエータを駆動するための約 2 ダースの電子カードを含む。接合は通常、少なくとも 2 つの自由度、したがって 2 つのモータ 210 を有する。各モータは制御変数 q により角度の形式で制御される。接合はまた、いくつかの位置センサ 220、特に MRE (磁気ロータリエンコーダ: Magnetic Rotary Encoder) を含む。

10

【0031】

電子制御カード 230 は市販のマイクロコントローラを含む。これは、例えば Microchip 社の DSPIC (商標) であり得る。これは DSP に結合された 16 ビット MCU である。この MCU は 1 ms のループサーボ制御サイクルを有する。

【0032】

カード 240 は、ロボットがロボットに割り当てられた使命を達成できるようにするハイレベル機能を実行する。カードのプロセッサは市販のプロセッサ $\times 86$ である可能性がある。AMD 社の Geode (商標) (32 ビット、500 MHz) などの低消費電力プロセッサが好みにより選択されることになる。カードはまた、一組の RAM とフラッシュメモリを含む。このカードはまた、通常は WiFi、WiMax、トランスミッションレイヤ上で、任意選択的には VPN 内の任意選択的にカプセル化された標準プロトコルを有する移動データ通信用公衆ネットワーク上で、外部 (ビヘイビアのサーバ、他のロボットなど) とロボットとの通信を管理する。プロセッサは通常、標準 OS により制御され、これにより通常の高レベル言語 (C、C++、Python 等)、またはハイレベル機能をプログラムするための URB I (ロボット工学のための専用プログラミング言語) などの人工知能の特定言語を使用できるようにする。

20

【0033】

伝統的に、電気モータは、角度または位置 q 、角速度

30

【数 1】

$$\dot{q}$$

および/またはトルク τ に基づき設定点により駆動されることができ、トルクベース駆動は通常、電流ベース駆動で置換される。実際、我々はカノニカル関係 $\tau = k_c I$ を有する。ここで、 I はモータに供給される電流の強度であり、 k_c は少なくともいくつかの動作範囲では定数である。トルクを測定することより電流を測定することの方がはるかに容易である。トルクセンサはドリフトに非常に敏感である。しかし、電流に基づく制御も、多数のモータを有するロボットにおいては珍しい。実際、電流に基づく制御は非常に速いループサーボ制御サイクル (数十マイクロ秒程度) と電流の方向を判断することができる電流センサとを必要とし、これは低コスト電子制御カードと相容れない。

40

【0034】

この手法の欠点は、未検出障害の故に実行されないかもしれない位置設定点が、モータに印加される非常に大きなトルク、したがって高電流、したがってかなりの加熱と電気過剰消費、または実際にモータおよび/または接合の破損を生ずることである。これらの欠点はロボットの可能動作期間を著しく低減する。

【0035】

この欠点を克服するために、接合に印可されるトルクを制限するための測定を導入する

50

ことが可能である。これらの測定は、機械的（例えば係合解除可能ギアを有する車輪）である、またはクラッチ状係合の役割を果たし 0.0 ~ 1.0 の値を取ることができる剛性係数をモータ駆動回路内に導入することによりソフトウェア的である可能性がある。この剛性係数が 1 に等しいと、モータは最大許容トルクを出力することができる。後者は、有利には過熱を回避するために供給者により示される値より大幅に小さい値に固定されることができる。例えば、接合のモータが 5 ~ 6 Nm 程度の最大トルクを出力する NAO の場合、最大剛性における許容トルクは 3.2 Nm である。この係数が零に等しいと、モータは係合解除され、接合は自由にスイングすることができる。その結果、ロボットは転倒などする。安全モードに設定するための手順は、局所的または全体的温度が閾値を越えるとすべての剛性係数がまたはその一部だけが 1 から 0 になるということをもたらす。このときロボットはもはや使用可能ではない。

10

【0036】

図 3 に、本発明の一実施形態によるロボットの接合モータの指令制御処理の概要フローチャートを示す。

【0037】

本発明の原理によると、これは、ロボットの平衡を保証するようなやり方でその後各接合の剛性係数を変更するように、各接合に印加されるトルクの値を計算することを伴う。

【0038】

モジュール 310 は、図 6 と図 7 に関連する記載においてさらに詳述されるロボットの動力学の記述モデルに基づき関節トルクを計算する。モジュール 310 には、一方ではロボットの恒久的構成データ 330 が供給され、他方では慣性プラットフォーム 340 から、関節センサ 350 から、および接触センサまたは地面までの距離を測定する方法 360 から発生する瞬間データが供給される。トルク値はその後、関節剛性係数を計算するためのモジュール 320 に供給される。

20

【0039】

ロボットの構成データ 330 は実質的に、本発明を実施するために、それ自身の基準系内のロボットのすべての身体部の慣性行列 M からなる。ロボットの身体部はその様々な物理的構成要素、すなわち、頭、首、胴（中央鎖）、腕、前腕と手（上外側チェーン）、腿、脚、足（下外側チェーン）である。各身体部は、身体部の質量とその慣性モーメントとを与える次元（6, 6）の質量行列を有する。

30

【0040】

慣性モーメントが不変量である場合、ロボットの初期化時にロボットの構成の関数として行列 M を予め計算することができる。NAO の特定の特徴の 1 つは実際にロボットの物理的構成要素の変更を許容することであり、構成データは初期化毎に計算される。

【0041】

したがって、我々は一組の行列 M を有し、各行列はモジュール $ALMotion$ 内に格納される（後述の図 10 に関連する記載の注記を参照）。行列 M は以下の形式を有する。

【数 2】

$$M = \begin{bmatrix} M_{root} & 0_{6,6} & \dots & 0_{6,6} \\ 0_{6,6} & M_1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0_{6,6} \\ 0_{6,6} & 0_{6,6} & \dots & M_{ndof} \end{bmatrix} \quad \text{ここで } M_i = \begin{bmatrix} m_i I_3 & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & \mathcal{I}_i \end{bmatrix}$$

40

ここで、

- m_i = 身体部 i の質量

-

【数3】

$$S_i$$

= その質量の中心においてそして身体部自身の基準系において表された身体部 i の慣性行列

- $I_3 = 3 \times 3$ 単位行列

【数4】

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

10

【0042】

固定基部を有するロボットアームの場合、本体は通常、地面に固定される。走行する基部（地面に固定されない）を有するロボットの場合、本体は固定されない。本体が固定されるか否かは自由であり、システムにより判断される。

【0043】

慣性プラットフォーム340は通常、ジャイロメータと加速度計とから成る。慣性プラットフォーム340はその測定結果をモジュール310に提供する。

【0044】

関節センサ350は通常、上に示したようなMREである。関節センサ350は関節角度の値をモジュール310に供給する。

20

【0045】

接触センサ360は、所与のデータム、地上データム、または移動面（例えば地面）に対する特徴点（通常、エフェクタと呼ばれる）の位置の判断を可能にする。足の底の下に植め込まれるFSRは接触センサである。ロボットの関節鎖の他の部分（例えば臀部、肘、背中など）上にFSRまたは別のタイプの接触センサを植め込むことを想定することが可能である。但し、物理的接触センサは相対的信頼性のあるものである。空間内の関節角度のすべての値と本体の位置と配向とを確定することにより同じ結果を達成する（地面の表面との接触があるかどうかを判断する）ことが可能である。空間内の本体の位置と配向はFSRと慣性プラットフォームにより判断される。空間内のロボットの関節角度と本体の位置と配向の値に基づき、空間内のロボットのすべての身体部の位置を直接幾何学形状により計算することが可能である。

30

【0046】

モジュール320は各接合の剛性係数を計算するように構成される。各接合のトルクが入力としてモジュール320に供給される。モジュールは、各接合のトルクを最大トルクにより除して、その結果から、各接合に適用される剛性係数の値を推定する。モジュール310の出力を判断するロボットの動的記述モデルに反映される効果により、剛性係数にオフセットを加えるための手立てがモジュール320内でなされ得る。このオフセットは、定数、またはロボットの姿勢のタイプまたは採用のコンテキストに依存する一組の値（表にすることができる値）、または変遷法則が規定される変数であり得る。

40

【0047】

図4aと図4bは、従来技術と本発明の一実施形態それぞれによるロボットの右脚の接合の温度の時間的変遷を表す。

【0048】

実験は物理的に同一のロボットにより行われた。図4aと図4bによりそれぞれ詳述される実験間の唯一の差異は、第1番目の場合にはロボットの構成が本発明の実施態様を実施する手段を含まず、一方第2番目の場合にはそれを含むということである。

【0049】

いずれの場合も、ロボットは直立初期位置（Pose Init）に置かれた。

50

【 0 0 5 0 】

図 4 a と図 4 b のそれぞれでは、本発明の実施態様無しと有りの状態の右下関節鎖の関節モータのそれぞれの温度の変遷が表されている。

- 曲線 R H i p R o l l T e m p は、右臀部のロール接合の温度の変遷を表す。
- 曲線 R H i p P i t c h T e m p は、右臀部のピッチ接合の温度の変遷を表す。
- 曲線 R K n e e P i t c h T e m p は、右膝のピッチ接合の温度の変遷を表す。
- 曲線 R A n k l e R o l l T e m p は、右足首のロール接合の温度の変遷を表す。
- 曲線 R A n k l e P i t c h T e m p は、右足首のピッチ接合の温度の変遷を表す。

【 0 0 5 1 】

特記すべきは、右臀部のピッチ接合に対する実験の終了時（約 15 分）における温度のかなりの差異であり、第 1 の場合では 60、第 2 の場合では 42 に達する。右脚の温度の全上昇は、第 1 の場合では 50、第 2 の場合では 28 である。

10

【 0 0 5 2 】

図 5 a と図 5 b は、従来技術と本発明の一実施形態それぞれによるロボットの左脚の接合の温度の時間的変遷を表す。

【 0 0 5 3 】

実験の条件は図 4 a と図 4 b により詳述されたものと同一である。左脚に関する結果は、特に、足首のピッチ接合に関しさらに有利であり、その温度は、第 1 の場合では 80、第 2 の場合では 48 に達し、左脚の温度の全上昇は第 1 の場合では 109、第 2 の場合では 42 である。1 時間の 4 分の 1 未満の実験の条件下で 80 の温度に達することは通常、ロボットを安全モードに設定することを伴う。したがって、ロボットの動作期間は本発明の実施態様により非常に大幅に（約 4 倍だけ）延長される。

20

【 0 0 5 4 】

図 6 は、本発明の一実施形態によるロボットの接合モータの指令制御処理のいくつかの工程のフローチャートである。

【 0 0 5 5 】

関節トルクを計算するために、ロボットの動的変遷について記述する方程式が、センサと利用可能な計算能力との関数として、適用される（適切な場合いくつかの単純化前提が適用される）。

【 0 0 5 6 】

環境と相互作用する厳格に連結された身体部の力学の一般的原理を適用することにより、ロボット工学の当業者らは特に古典的研究：“A Mathematical Introduction to Robotics Manipulation”，MURRAY, Richard M., LI Zexiang and SASTRY, S. Shankar, CRC Press, 1994 を参照することによりロボットの動的モデルの完全な方程式を決定することができる。

30

【 0 0 5 7 】

例えば次のように方程式を書くものとする。

【 数 5 】

$$\tilde{M}(q)(\dot{T} - G) + N(q, \dot{q})T = L\tau + C^1(q)W$$

40

【 0 0 5 8 】

以下の説明では、q は関節角度からなるベクトルである。

【 数 6 】

$$\dot{q}$$

は関節速度（関節角度 q の時間微分）を示す。本体のデカルト速度は V r o o t で示され、6 次元である。最初の 3 つの成分は 3 軸（x, y, z）に関する本体の並進の速度であ

50

る。最後の3つの成分は3軸(x, y, z)に関する回転速度である。V r o o tと
【数7】

$$\dot{q}$$

からなるベクトルは一般化座標Tと呼ばれる。

【0059】

C(q)は、関節速度の空間とデカルト速度の空間とを行き来するための変換行列を示す。これは一般に運動力学ヤコビ行列式と呼ばれる。

【0060】

方程式の左側の第1項は、関節鎖を構成する身体部の慣性モーメントの効果を伝える。この項では、

-

【数8】

$$\tilde{M}$$

: 一般化座標の対称慣性行列。Mは、C(q)だけでなく行列にも基づき次のように計算される、

【数9】

$$\tilde{M} = C(q)^T M C(q)$$

。この行列は、ロボット(q)の関節構成に依存する。この行列は、1つまたは複数の接合が動くたびに更新されなければならない。

【数10】

$$\tilde{M}$$

は次元

【数11】

$$(\tilde{M}) = (6 + 6 \times n_{\text{dof}}, 6 + 6 \times n_{\text{dof}})$$

の正方行列である、ここでn_{dof}はロボットの自由度である。NAOの場合、23個のdofが存在し、行列

【数12】

$$\tilde{M}$$

の次元は(6 + 6 × 23)²、すなわち20,736個の値である。

- Gは一般化座標で表現される重力による加速度である。

【0061】

方程式の左側の第2項はシステムが受けるコリオリおよび遠心力を伝える。

【数13】

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

はこれらの効果に関連付けられた行列である。

【0062】

10

20

30

40

50

方程式の右側の第1項は関節トルクの効果伝える。

- は次元 $\dim(\tau) = (n_{dof}, 1)$ の関節トルクのベクトル、 は、作動トルクと関節摩擦トルクの合計である。

- L は を一般化座標で表現できるようにする行列である。

- W は、それ自身の基準系で表されるロボットを構成する各身体部に印加される負荷のねじれ (*wrench*) の行列である。 W は通常、外部環境と身体部との接触に関するねじれである $W_{contact}$ と外部摂動に関するねじれである $W_{perturbation}$ とに分解される。

【0063】

一実施形態では、モデルはこの際、関節摩擦と外部摂動 ($W_{perturbation}$) のトルクだけでなく固有加速

10

【数14】

$$(\dot{T})$$

とコリオリおよび遠心力

【数15】

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

20

も計算しないことにより単純化される。これらの効果は後で説明するようにオフセットにより考慮される。

【0064】

したがって単純化された動的モデルは次式のように書かれ得る。

【数16】

$$-\tilde{M}(q)G = L\tau + C^t(q)W_{contact}$$

【0065】

図6のフローチャートはこの方程式を解くために実施される計算工程について説明するが、この分割を限定として考える必要はなく、他の手順も全て可能である。

30

【0066】

これらの計算工程は20msのサイクルタイムで再生される。

【0067】

工程610では、仮想接地面が慣性プラットフォームの測定に基づき計算される。上記仮想面は重力ベクトルに垂直な面として判断される。プラットフォームの測定結果の信頼度に基づき、地面と接触したまたは接触しない下半身部をタグ付けすることにより、有利にはこれらの測定結果と胴の配向の判断とを相互参照することが可能である。

【0068】

工程620では、ベクトル q は、関節センサの角度が更新される *ALMemory* モジュールにより更新される。行列 M の助けにより、このように

40

【数17】

$$\tilde{M}(q)$$

を計算することが可能である。

【0069】

工程630では、仮想接地面に対して方向付けられた重力加速度が計算される。

【0070】

工程640では、項

【数 18】

$$-\tilde{M}(q)G$$

を計算するために工程 620 と 630 の出力が合成される。

【0071】

工程 650 では、力の計算のために考慮される接点のリストが計算され、工程 650 については図 7 に関連する記載において後で詳述され、図 8a ~ 8f の例により示される。

【0072】

工程 660 では、接触力 $W_{contact}$ が計算され、工程 660 については図 9 に関連する記載において後で詳述される。 10

【0073】

工程 670 では、関節速度の空間とデカルト速度の空間とを行き来するための変換行列の転置 $C^t(q)$ が計算される。

【0074】

工程 680 では、工程 670 により出力された行列と工程 660 により出力されたベクトルとの積が求められる。

【0075】

工程 640 と工程 680 の出力を合算することにより、求められた関節トルクのベクトルが工程 690 の出力として得られる。 20

【0076】

このベクトルはその後、剛性係数を計算するためのモジュール 320 に入力として供給されることができる。モジュール 320 は任意選択的に、特にロボットの動的モデルによりなされる単純化を考慮して、オフセットを加える。特に、固有加速、コリオリ力、遠心力、または関節摩擦トルクのいずれも考慮されない場合、0.25 のオフセットが、その環境との他の相互作用無しに、直立姿勢のロボットに良好な結果を与える、ということを実験的に判断することができた。ロボットの足が地面に付いていない場合、より小さいオフセット（例えば 0.1）を選択し、これによりロボットの接合を緩めてより柔軟な姿勢を与えることが可能である。

【0077】

図 7 は、図 6 のフローチャートの一工程の第 1 の詳細図である。 30

【0078】

図 7 は、接触点を判断する工程 650 の下位工程について詳述する。

【0079】

ロボットの構成ファイル内には、接触点となる候補である特徴点のリストが定義される。NAO などのヒューマノイドロボットの場合、例えば両足、両臀部、背中、頭、および手/前腕/肘アセンブリが選択されることになるが、このリストに限定することは無い、またはこれらの接触点をすべて採用する必要は無い。

【0080】

これらの構成データは、工程 610 の出力として判断された仮想接地面に対する鉛直距離が工程 710 の過程で計算されることになるエフェクタのリストを判断する。 40

【0081】

このとき、地面に最も近い接触点が工程 720 の過程で判断される。

【0082】

検知閾値はロボットの構成ファイル内に規定されており、検知閾値の限界値内の地面の近傍に位置する他のエフェクタが工程 730 の過程で判断される。

【0083】

図 8a ~ 8f は、本発明の一実施形態による接触点の判断を伴う 3 つの姿勢におけるロボットを表す。

【0084】

図 8 a、8 c、8 e は、ロボットの 3 つの異なる姿勢を表す。

- 図 8 a では、ロボットは可能な着座姿勢の 1 つにある。
- 図 8 c では、ロボットは可能な直立姿勢の 1 つにある。
- 図 8 e では、ロボットは所謂「ゴリラ」姿勢である。

【0085】

これらの姿勢に対応する候補接触点が図 8 b、8 d、8 f にそれぞれ表される。

【0086】

接触点の表記は以下の通りである。

- R E l b o w R o l l B o t h、右肘のロール接合
- L E l b o w R o l l B o t h、左肘のロール接合
- R F o o t F R、右足、表面右センサ
- R F o o t F L、右足、表面左センサ
- R F o o t R R、右足、裏面右センサ
- R F o o t R L、右足、裏面左センサ

10

【0087】

図 9 は、図 6 のフローチャートの一工程の第 2 の詳細図である。

【0088】

この工程の目的は N A O に印加される接触荷重を計算することである。

【0089】

この工程では、ロボットは、接触点によりその環境と相互作用する点状質量によりモデル化される。すべての接触は同一平面上にある。さらに、計算を簡単にするために、静的な場合を考える。

20

【0090】

これは以下の方程式を解くことを伴う。

- ロボットに印加される力の合計（ここでは、静的な場合の質量中心）は零になる、すなわち：

【数 19】

$$\sum_i f_i = m \cdot g$$

30

- 質量の中心におけるモーメントの合計は零になる。

【0091】

3 つの同一平面接触点に基づき、接触荷重の超静的構造が存在する。実際、特に接触力の接線荷重が両方程式に従う一方で相殺することができるという事実のために、上記問題の解である接触荷重の値の中には無限大が存在する。

【0092】

好ましい解を見つけるためには、計算された接触荷重を最小化することが求められ、接線接触力を零と考える。

【0093】

各接触について、面に垂直な力の成分だけを考える。

40

【0094】

【数 20】

$$f_c(\vec{i}) = f_c(i)\vec{z}$$

によりその環境上の N A O の接触 i の力ベクトルを示す。

ここで $f_c(i)$ は軸

【数 2 1】

\vec{z}

に沿った接触力のノルム。

【0095】

以下の解くべき系を考える。

【数 2 2】

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ (x_1 - x_G) & (x_2 - x_G) & \dots & (x_n - x_G) \\ (y_1 - x_G) & (y_1 - x_G) & \dots & (y_n - x_G) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

10

これは次のように単純化形式で書くことができる。

$A Y = B$

ここで、

- Bは、外部力（接触無し）の垂直成分のベクトル和である。
- Yは、工程650の出力として選択された接触点に印加される力の垂直成分の求められているベクトルである。
- Aは、その係数が質量の中心に対する接触点の座標である行列である。

20

【0096】

表記は以下の通りである：

- (x_i, y_i) は選択された接触点の座標である。
- (x_G, y_G) は質量の中心の座標である。
- f_i は、接触点 i に印加される垂直力のノルムであり、求めるものである。

【0097】

工程910の過程で、ロボットがバランスをとらなければならない外部力（接触無し）が判断される。

【0098】

工程920の過程で、行列Aの係数が計算される。

【0099】

したがって、ロボットの質量の中心は工程610中に判断された仮想接地面内に投影されるべきである。

【0100】

その後、方程式 $A Y = B$ の解 Y を工程930の過程で判断する必要がある。

【0101】

接触の数 n が3に等しい場合、行列Aを反転する必要がある。

【0102】

その行列式が非零であるという条件で、一意解が存在する。

40

【0103】

n が3より大きい場合、無限の解があり得る。したがって、式 $A Y = B$ が満足されるという制約下で最適解を判断するためのアルゴリズムを選択する必要がある。

【0104】

例えばその本質が Y (したがって f_i) の値を求めることである二次解法アルゴリズムを使用することが可能であり、関数

【数 2 3】

$$\min_y = \frac{1}{2} \|A.Y - B\|_Q + \frac{1}{2} \|Y\|_R$$

50

が $y > 0$ の条件で最小化される。

QとRは最適化重みを表す。この演算の目的は、重みQにより $AY - B$ のノルムを最小化することと、重みRによりノルムYを最小化することにその本質がある。

【0105】

図10は、本発明の実施態様をその実施形態のうちのいくつかにおいて許容する物理的および機能的アーキテクチャの図である。

【0106】

本発明の一実施形態におけるロボットの機能の制御を可能にするハイレベルソフトウェアがNAOなどのロボットに有利には付与される。NAOQIと呼ばれるこのタイプのソフトウェアアーキテクチャは、特に2009年10月15日発行の国際公開第2009/124955号パンフレットに開示されている。このアーキテクチャは、ロボットとPCまたは遠隔場所との間の通信を管理するための、そして本発明の実施のために必要なソフトウェアインフラストラクチャを提供するソフトウェアを交換するための基本機能を含む。

10

【0107】

NAOQIはロボット用途に最適化されたフレームワークである。これはいくつかの言語、特にC++、Python、Urbicを支援する。

【0108】

本発明のコンテキスト内では、NAOQIの以下のモジュールが特に役立つ。

- ALMemoryモジュール1010は、NAOQIの様々なモジュール間で共有されるメモリを管理し、特に、初期化時にロードされる構成要素を受信する。

20

- DCMモジュール1020は物理的ロボット（モータ、センサ）により通信を管理する。

- ALMotionモジュール1030はロボットの運動を管理する。本発明を実施するためのアルゴリズムの実行を可能にするコードがこのモジュール内に実質的にインストールされる。

【0109】

これらの3つのモジュールは有利にはC++でコード化される。同図はまた、モジュール間のデータフローを示す。

- ALMotionモジュール1030はALMemoryモジュール1010からセンサデータ（慣性プラットフォーム、FSR、関節角度など）を回収する。

30

- ALMotionモジュール1030は、接合の剛性係数を計算する工程を行い、その結果をDCMモジュール1020に伝達する。

- このモジュールは、これらの係数の適用に由来する関節角度の制約値を（同時に他のセンサの値として）ALMemoryモジュール1010へ渡す。

【0110】

上に述べた例は本発明の実施形態の例示として与えられたものである。これは決して本発明の分野を限定するものではなく、本発明の分野は以下の特許請求範囲により規定される。

【図1】

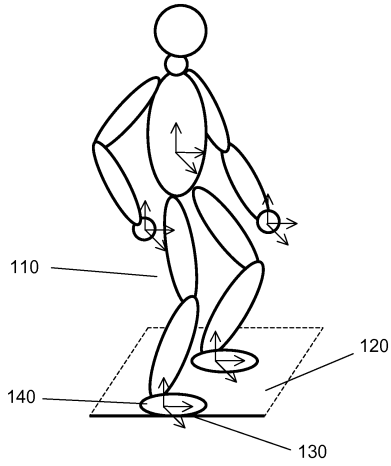


図1

【図2】

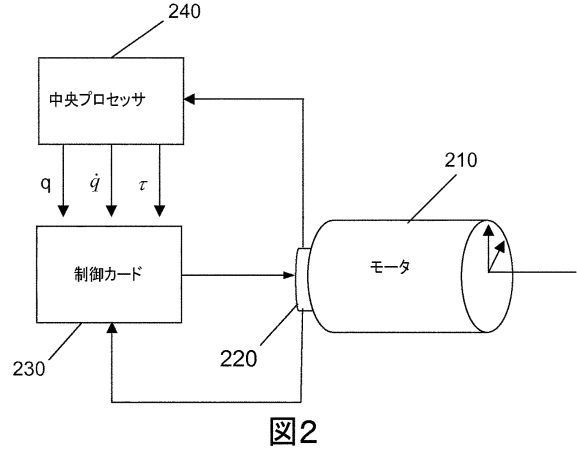


図2

【図3】

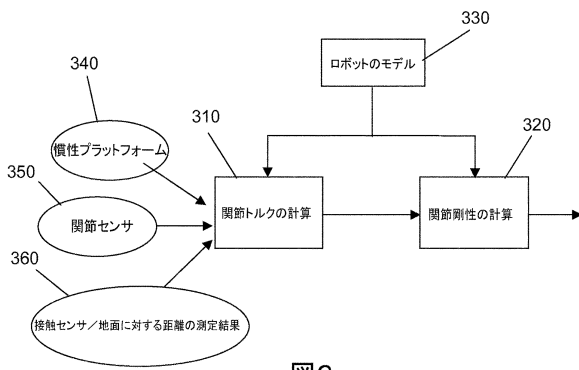
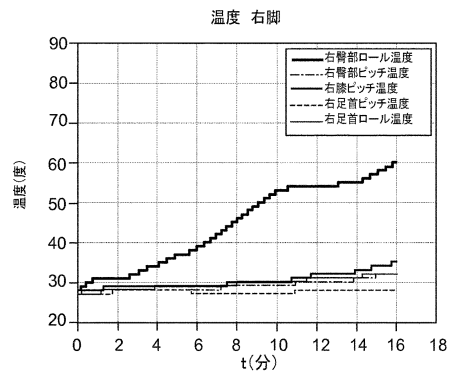


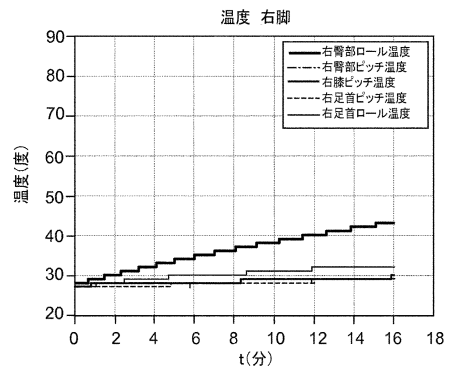
図3

【図4 a - b】



従来技術による温度の変遷

図4a



本発明の一実施形態による温度の変遷

図4b

【図5 a - b】

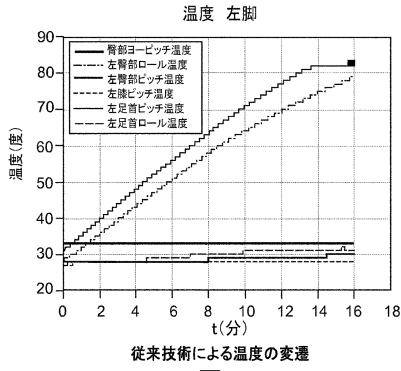


図5a

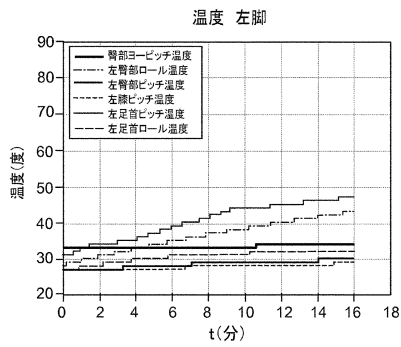


図5b

【図7】

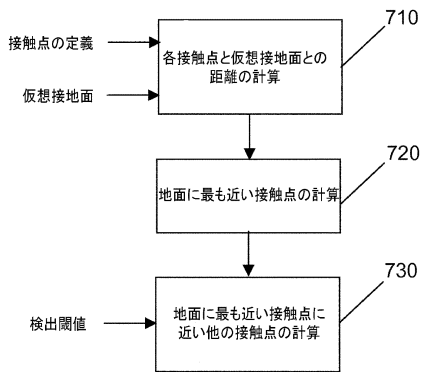


図7

【図6】

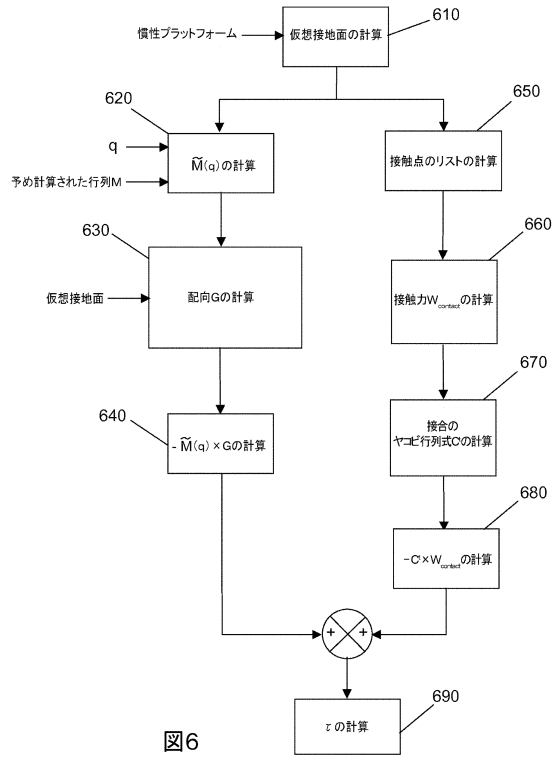
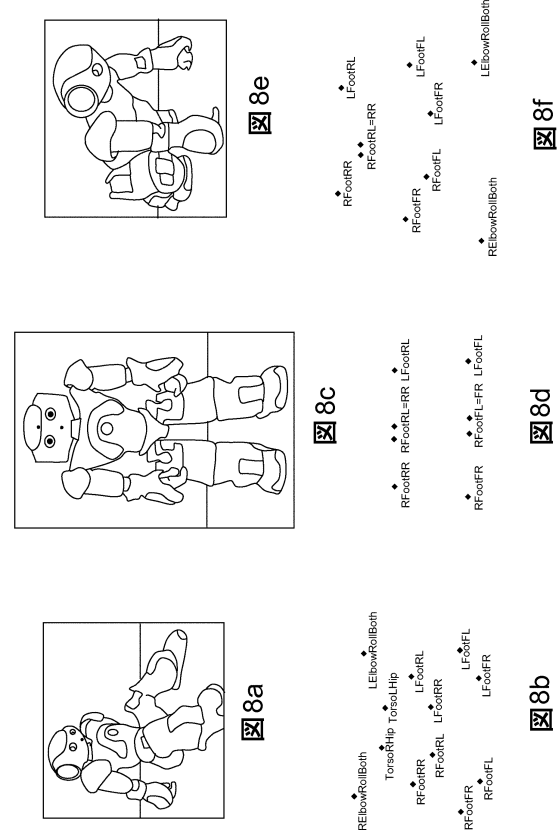
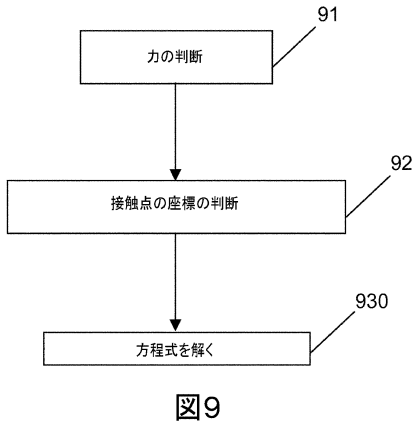


図6

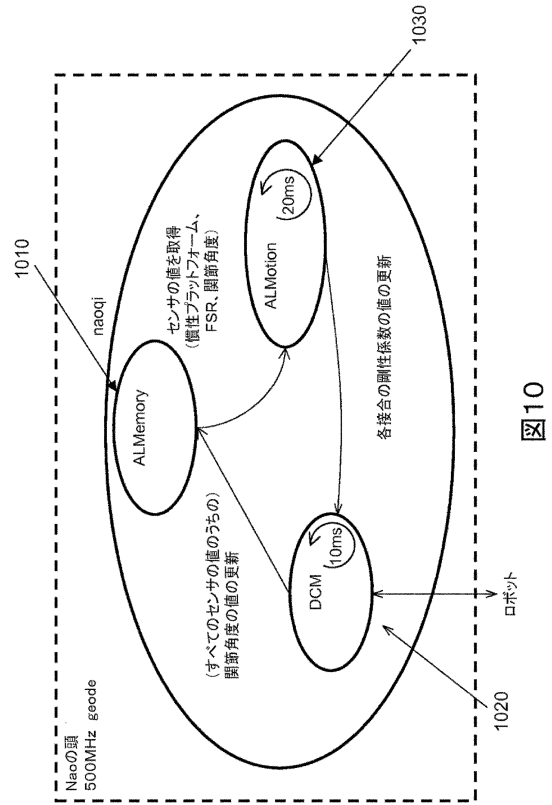
【図8 a - f】



【 図 9 】



【 図 10 】



フロントページの続き

審査官 稲垣 浩司

- (56)参考文献 国際公開第2007/139135(WO, A1)
特開2011-143536(JP, A)
特開平08-066893(JP, A)
特開2007-108955(JP, A)
国際公開第03/078110(WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
B25J 5/00 - 13/00