

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5060619号  
(P5060619)

(45) 発行日 平成24年10月31日(2012.10.31)

(24) 登録日 平成24年8月10日(2012.8.10)

(51) Int.Cl. F I  
B 2 5 J 13/00 (2006.01) B 2 5 J 13/00 Z

請求項の数 21 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2010-511285 (P2010-511285)	(73) 特許権者	000005326
(86) (22) 出願日	平成20年6月3日(2008.6.3)		本田技研工業株式会社
(65) 公表番号	特表2010-528886 (P2010-528886A)		東京都港区南青山二丁目1番1号
(43) 公表日	平成22年8月26日(2010.8.26)	(74) 代理人	100064414
(86) 国際出願番号	PCT/US2008/065677		弁理士 磯野 道造
(87) 国際公開番号	W02008/154228	(74) 代理人	100111545
(87) 国際公開日	平成20年12月18日(2008.12.18)		弁理士 多田 悦夫
審査請求日	平成23年5月18日(2011.5.18)	(72) 発明者	ング-ソウ-ビン、ビクター
(31) 優先権主張番号	60/933, 909		アメリカ合衆国、オハイオ州 93067
(32) 優先日	平成19年6月8日(2007.6.8)		-9705、レイモンド、ステート ルー
(33) 優先権主張国	米国 (US)		ト 739 21001、ホンダ アール
早期審査対象出願			アンド ディ アメリカズ、インク、
			リーガル デパートメント気付
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 モーション計画方法、モーション計画システム及び記録媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

2以上のモードで動作可能な主体装置のモーションを計画するコンピュータを用いた方法であって、

各モードは、前記主体装置の設定についての制約のセットを有し、

前記コンピュータは、

前記主体装置の目標設定を受け付け、

前記目標設定を含むモードと初期設定を含むモードの間に直列的に位置するモードのうち、モード内で効率的な連続する複数の設定を入手するために最も多くの演算処理及びリソースを必要とする最も制約されたモード、及び、

前記最も制約されたモードに隣接し、前記最も制約されたモードと前記初期設定を含むモードとの間に位置する第1のモード、

の両者のモードに共有される複数の遷移設定候補から前記主体装置の第1の遷移設定を選択し、

前記第1の遷移設定から前記初期設定へ、第1の連続する複数の設定を探索する第1の探索を実行し、

前記第1の遷移設定から前記目標設定へ、第2の連続する複数の設定を探索する第2の探索を実行し、

前記第1の連続する複数の設定及び前記第2の連続する複数の設定を出力すること、を特徴とする方法。

10

20

**【請求項 2】**

前記第 1 の探索を実行することは、

前記第 1 のモード、及び、前記第 1 のモードに隣接し、前記第 1 のモードと前記初期設定のモードとの間に位置する第 2 のモードに共有される第 2 の遷移設定をサンプリングし、

前記第 1 の遷移設定と前記第 2 の遷移設定との間の前記第 1 のモード内で、前記主体装置の第 3 の連続する複数の設定を、単一モード計画を使用して探索することを含むこと、を特徴とする請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 3】**

前記コンピュータは、

ノードを含むツリーを生成し拡大し、

前記ノードのそれぞれは、

前記初期設定から前記目標設定に達するために前記主体装置によって取られ得る設定を表すこと、

を特徴とする請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 4】**

前記コンピュータは、

前記第 1 のモードから、前記第 1 の遷移設定についての遷移設定に到達する実現可能性を決定し、

前記第 1 の遷移設定についての前記遷移設定候補の有用性を計算し、

前記有用性は、

前記第 1 の遷移設定から、前記最も制約されたモード内の前記目標設定に達するのに有効である設定の変化を表し、

前記第 1 の遷移設定を選択することは、

前記遷移設定候補の前記実現可能性及び前記遷移設定候補の前記有用性によってバイアスをかけられたうえで、遷移設定候補をサンプリングすることを含むこと、

を特徴とする請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 5】**

前記コンピュータは、

前記決定された実現可能性を前記遷移設定候補ごとに実現可能性テーブルに記憶し、

前記計算された有用性を前記遷移設定候補ごとに有用性テーブルに記憶すること、

を特徴とする請求項 4 に記載の方法。

**【請求項 6】**

前記目標設定は、

前記最も制約されたモード内にあり、

前記第 2 の探索は、

単一モード計画を使用して実行されること、

を特徴とする請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 7】**

前記最も制約されたモードは、

対象物を推進するためのモードを含むこと、

を特徴とする請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 8】**

2 以上のモードで動作可能な主体装置のモーションを計画するコンピュータ読取可能な記録媒体であって、

前記 2 以上のモードのそれぞれにおいて、前記主体装置が取り得る設定に対する所定の制約が存在し、

前記コンピュータ読取可能な記録媒体に記憶された命令は、プロセッサに対して、

前記主体装置の目標設定を受け付け、

前記目標設定を含むモードと初期設定を含むモードの間に直列的に位置するモードのう

10

20

30

40

50

ち、モード内で効率的な連続する複数の設定を入手するために最も多くの演算処理及びリソースを必要とする最も制約されたモード、及び、

前記最も制約されたモードに隣接し、前記最も制約されたモードと前記初期設定を含むモードとの間に位置する第 1 のモード、

の両者のモードに共有される複数の遷移設定候補から前記主体装置の第 1 の遷移設定を選択し、

前記主体装置の前記第 1 の遷移設定から前記主体装置の前記初期設定へ、第 1 の連続する複数の設定を探索する第 1 の探索を実行し、

前記主体装置の前記第 1 の遷移設定から前記主体装置の前記目標設定へ、第 2 の連続する複数の設定を探索する第 2 の探索を実行し、

前記主体装置の前記第 1 の連続する複数の設定及び前記主体装置の前記第 2 の連続する複数の設定を出力する処理を実行させること、

を特徴とするコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 9】

前記命令は、前記プロセッサに対して、

前記第 1 のモード、及び、前記第 1 のモードに隣接し、前記第 1 のモードと前記初期設定のモードとの間に位置する第 2 のモードに共有される第 2 の遷移設定をサンプリングし、

前記第 1 の遷移設定と前記第 2 の遷移設定との間の前記第 1 のモード内で、前記主体装置の第 3 の連続する複数の設定を、単一モード計画を使用して探索する処理を実行させること、

を特徴とする請求項 8 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 10】

前記命令は、前記プロセッサに対して、

ノードを含むツリーを生成し拡大する処理を実行させ、

前記ノードのそれぞれは、

前記初期設定から前記目標設定に達するために前記主体装置によって取られ得る設定を表すこと、

を特徴とする請求項 8 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 11】

前記命令は、前記プロセッサに対して、

前記第 1 のモードから、前記第 1 の遷移設定についての遷移設定に到達する実現可能性を決定し、

前記第 1 の遷移設定についての前記遷移設定候補の有用性を計算する処理を実行させ、

前記有用性は、

前記第 1 の遷移設定から、前記最も制約されたモード内の前記目標設定に達するのに有効である設定の変化を表し、

前記第 1 の遷移設定を選択する命令は、

前記遷移設定候補の前記実現可能性及び前記遷移設定候補の前記有用性によってバイアスをかけられたうえで、遷移設定候補をサンプリングする命令を含むこと、

を特徴とする請求項 8 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 12】

前記命令は、前記プロセッサに対して、

前記決定された実現可能性を前記遷移設定候補ごとに実現可能性テーブルに記憶し、

前記計算された有用性を前記遷移設定候補ごとに有用性テーブルに記憶する処理を実行させること、

を特徴とする請求項 11 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 13】

前記目標設定は、

前記最も制約されたモード内にあり、

10

20

30

40

50

前記第 2 の探索は、  
単一モード計画を使用して実行されること、  
を特徴とする請求項 8 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 14】

前記最も制約されたモードは、  
対象物を推進するためのモードを含むこと、  
を特徴とする請求項 8 に記載のコンピュータ読取可能な記録媒体。

【請求項 15】

2 以上のモードで動作可能な主体装置のモーションを計画するシステムであって、  
各モードは、前記主体装置によって取られ得る設定についての制約のセットを有し、  
前記システムは、  
目標設定を含むモードと初期設定を含むモードの間に直列的に位置するモードのうち、  
モード内で効率的な連続する複数の設定を入手するために最も多くの演算処理及びリソースを必要とする最も制約されたモード、及び、  
前記最も制約されたモードに隣接し、前記最も制約されたモードと前記初期設定を含むモードとの間に位置する第 1 のモード、  
の両者のモードに共有される複数の遷移設定候補から前記主体装置の第 1 の遷移設定を選択する決定的モード計画部と、  
前記第 1 の遷移設定から前記初期設定へ、第 1 の連続する複数の設定を探索する第 1 の探索を実行する探索ツリー拡大部と、  
前記第 1 の遷移設定から前記目標設定へ、第 2 の連続する複数の設定を探索する第 2 の探索を実行する単一モード計画部と、  
前記第 1 の連続する複数の設定及び前記第 2 の連続する複数の設定を出力する計画経路抽出部と、  
を有すること、  
を特徴とするシステム。

【請求項 16】

前記探索ツリー拡大部は、  
前記第 1 のモード、及び、前記第 1 のモードに隣接し、前記第 1 のモードと前記初期設定のモードとの間に位置する第 2 のモードに共有される第 2 の遷移設定をサンプリングし  
、  
前記第 1 の遷移設定と前記第 2 の遷移設定との間の前記第 1 のモード内で、前記主体装置の第 3 の連続する複数の設定を、単一モード計画を使用して探索すること、  
を特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

【請求項 17】

前記探索ツリー拡大部は、  
ノードを含むツリーを生成し拡大し、  
前記ノードのそれぞれは、  
前記初期設定から前記目標設定に達するために前記主体装置によって取られ得る設定を表すこと、  
を特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

【請求項 18】

前記決定的モード計画部は、  
前記第 1 のモードから、前記第 1 の遷移設定についての遷移設定に到達する実現可能性を決定し、  
前記第 1 の遷移設定についての前記遷移設定候補の有用性を計算し、  
前記有用性は、  
前記第 1 の遷移設定から、前記最も制約されたモード内の前記目標設定に達するのに有効である設定の変化を表し、  
前記遷移設定候補の前記実現可能性及び前記遷移設定候補の前記有用性によってパイア

スをかけられたうえで、遷移設定候補をサンプリングすること、  
を特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

【請求項 19】

前記システムは、  
前記決定された実現可能性を前記遷移設定候補ごとに記憶する実現可能性テーブルと、  
前記計算された有用性を前記遷移設定候補ごとに記憶する有用性テーブルと、  
を有すること、  
を特徴とする請求項 18 に記載のシステム。

【請求項 20】

前記目標設定は、  
前記最も制約されたモード内にあり、  
前記探索ツリー拡大部は、  
単一モード計画を使用して前記第 2 の探索を実行すること、  
を特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

10

【請求項 21】

前記最も制約されたモードは、  
対象物を推進するためのモードを含むこと、  
を特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

(関連出願の参照)

本出願は、2007年6月8日付けの、“Multi-Modal Motion Planning For A Humanoid Robot Manipulation Task”と題する米国特許仮出願第60/933,909号を基礎とする優先権を米国特許法119条(e)に基づき主張し、当該仮出願はその全体がここに引用される。

【0002】

本発明は、ロボットのモーションを計画する方法及びシステムに関する。より具体的には、各モードが別々の制約に従う多重モードを前提とする、モーションを計画する方法及びシステムに関する。

30

【背景技術】

【0003】

あるタスクを遂行するために、ロボット又は他の装置は、複数モードでの作業を実行する必要がある場合がある。あるモード(例えば、歩行)は、ロボットの設定に対し制約のセットを課すかもしれないし、別のモード(例えば、押し動かす)は、ロボットの設定に対し別の制約のセットを課すかもしれない。

【0004】

単一モードモーション計画用のアルゴリズムは、複数モード作業計画に適しているとは限らない。単一モード計画方法は、ロボット又は装置のすべてのモーションが同じ制約のセットに従うという前提に立っている。確率的ロードマップ(PRM)方法のような効果的な単一モードモーション計画方法は、ロボットが目標設定に辿り着く効果的な経路を手に入れるために現在利用可能である。しかしながら、複数モード計画においては、各モード内のモーションだけでなく、隣接する2モード間の遷移設定も決定されなければならない。遷移設定とは、あるモードから他のモードに遷移する前にロボットが取る設定のことである。複数モード作業においては、あるモードから他のモードへ遷移する場合、遷移設定を経由しなければならない。遷移設定の選択はまた、目標設定に至る経路全体の有効性に有意な影響を及ぼす。しかしながら、従来の単一モード計画方法は、有効な遷移設定を作成することができない。

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

50

## 【 0 0 0 5 】

複数モード作業においては、複数遷移設定又は、あるモードから他のモードに遷移するための遷移設定の連続セットがあり得る。遷移設定の連続セットの取り扱い方法の1つは、遷移設定の連続セットを離散化し、離散化された遷移設定からの経路探索を拡大することである。遷移設定の離散化が疎であり過ぎると、目標設定に至る遷移設定は取得されない。このような場合、遷移設定の離散化された点から、目標設定に至る経路を得ることはできない。逆に、離散化が密であり過ぎると、設定の経路を探索するのに過大なリソースが必要になる。

## 【 0 0 0 6 】

押し動かす作業は、複数モードモーション計画を前提とする操作の有益な型式である。人間形ロボットは、例えば、まずテーブルまで歩行し（第1のモード）、対象物に向かって腕を伸ばし（第2のモード）、その次に対象物のある位置へ押し動かす（第3のモード）。1つの押し動かすタスクのためにさえ、ロボットは、いくつもの押し動かす動作を実行する必要がある。これらの押し動かす動作の間に、ロボットは、腕を伸ばし又は引っ込め、左右の手を交換し、又は新たな位置へ歩行し、制約の様々なセットを満足させる。さらに、操作部位の届く範囲が制限されておりロボット又は装置の設定上の制約があることに起因して、いくつかの押し動かす動作は、不可逆的であり得る。このような理由により、ある目標を達するためには、押し動かすモーションは慎重に計画されなければならない。

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 0 7 】

## (発明の要約)

本発明の実施形態は、主体装置（例えば、人間形ロボット）のためにモーションを計画する装置、システム及びコンピュータ読取可能な記録媒体を提供する。各モードは、制約のセットを有しており、その制約は、主体装置によって遵守されなければならない。最も制約されているモード（例えば、押し動かすモード）と、最も制約されているモードに隣接し主体装置の初期設定により近いモード（例えば、腕を伸ばす／引っ込めるモード）によって共有される遷移設定候補のなかから、主体装置の第1の遷移設定が選択される。探索が実行され、第1の遷移設定と初期設定との間の、第1の連続する複数の設定を取得する。別の探索が実行され、第1の遷移設定から目標設定への経路を識別する。

## 【 0 0 0 8 】

ある実施形態においては、複数のノードを含むツリーが生成される。各ノードは、主体装置が初期設定から目標設定に至るために取り得る設定を表している。サンプリングされた遷移設定でツリーを拡大するためには、ツリーのノードとサンプリングされた遷移設定との間の距離が算出される。距離メトリックが最も短いノードに対して、サンプリングされた遷移設定が接続される。

## 【 0 0 0 9 】

ある実施形態においては、実現可能性テーブルと有用性テーブルが生成され記憶される。実現可能性テーブルは、第1のモードから遷移設定に達する、第1の遷移設定ごとの実現可能性についての情報を記憶する。有用性テーブルは、第1の遷移設定ごとの遷移設定候補の有用性を記憶する。有用性は、目標設定に達するのに有効である設定の変化を示す。遷移設定の有用性及び実現可能性に基づいて、遷移設定がサンプリングされる。

## 【 0 0 1 0 】

本明細書に記述されている特徴及び利点は、限定的なものではなく、図面、明細書及び特許請求の範囲を見れば、当業者には、追加的な特徴及び利点が明らかになる。さらに、本明細書中で使用される用語は、主として意味の取りやすさ及び教示目的から選択されており、本発明の主旨を限定するために選択されているものではないことは当然である。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 1 1 】

添付図面を参照しつつ以降に詳述される説明を読めば、本発明の教示は容易に理解され

10

20

30

40

50

る。

【図 1】本発明の一実施形態に係る、押し動かす対象物を含む環境内のロボットを示す図である。

【図 2 A】本発明の一実施形態に係る、モード間の遷移候補を示すモード遷移図である。

【図 2 B】主体装置及び主体装置によって操作されつつある対象物を含むシステムによって取られ得る設定を表す多様体の概念図である。

【図 3 A】本発明の一実施形態に係る、最も制約されたモードが最終モードとして現れる例を示す図である。

【図 3 B】本発明の一実施形態に係る、最も制約されたモードが第 1 のモードと最終モードとの間に現れる他の例を示す図である。

【図 4】本発明の一実施形態に係る、ロボットの構成要素を示すブロック図である。

【図 5】本発明の一実施形態に係る、モーション計画部の構成要素を示すブロック図である。

【図 6 A】本発明の一実施形態に係る、押し動かすモードでの作業を記述する座標系を示す図である。

【図 6 B】本発明の一実施形態に係る、押し動かすモードでの作業を記述する座標系を示す図である。

【図 7】本発明の一実施形態に係る、有用性テーブルを示す図である。

【図 8】本発明の一実施形態に係る、複数モードモーション計画方法のフローチャートである。

【図 9】本発明の一実施形態に係る、拡大戦略を使用するツリー拡大方法のフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明の一実施形態を、図を参照しつつ説明する。複数の図にまたがって同様の参照番号が記される場合、それらは同一の又は機能的に類似した構成要素を意味する。

【0013】

本明細書において、“一実施形態”又は“ある実施形態”と言う場合は、本発明の少なくとも 1 つの実施形態に、その実施形態に関連して記述される 1 つの特徴又は構造が含まれていることを意味する。本明細書のあちこちに“一実施形態では”という語が出現しても、必ずしも同一の実施形態を指しているわけではない。

【0014】

後記する詳細説明のいくつかの部分は、アルゴリズム用語や、コンピュータメモリ内のデータビット作業を示す象徴的な表現による。これらのアルゴリズム的な説明や表現は、情報処理分野の当業者が、自らの業績の要旨を、同分野の他の当業者に最も効率的に伝えるために用いる手段である。アルゴリズムとは、ここでは、そして一般的にも、ある所望の結果に至る複数のステップ（命令）の首尾一貫したシーケンスのことを言う。ステップとは、物理量に対する物理的操作を要求するステップのことである。通常、必ずしも必要条件ではないが、それらの数値は、記憶され、転送され、合成され、比較されかつ操作され得る、電子的、磁氣的又は光学的信号の形を取る。これらの信号のことを、ビット、値、要素、シンボル、文字、語又は番号等と呼ぶことが主として用語の共通化の理由から便宜である。さらに、物理量に対する物理的操作を要求するステップの配列のうちいくつかのものは、一般性を失うことなく、モジュール又はコードデバイスと呼ぶことが便宜である。

【0015】

しかし、このような用語の全ては適当な物理量と関連付けられており、これらの物理量に付された単なる便宜的なラベルに過ぎない。後記において特段の説明がない限り、明細書本文全体を通じて、“処理”、“計算”、“算出”、“決定”又は“表示”等の用語を用いた説明は、（電子的な）物理量としてのデータを、コンピュータシステムのメモリ、レジスタ又は他の情報ストレージのなかで操作しかつ変形するコンピュータシステムや同

10

20

30

40

50

様の電子的コンピューティングデバイスの動作や処理のことを言う。

【 0 0 1 6 】

本発明のいくつかの側面は、アルゴリズムの形になったプロセスステップや命令を含む。本発明のプロセスステップや命令は、ソフトウェア、ファームウェア又はハードウェアによって実施され、ソフトウェアで実施される場合は、ダウンロードされることが可能であり、多様なオペレーティングシステムが用いる別のプラットフォームから操作されることも可能である。

【 0 0 1 7 】

本発明は、操作を実行する装置にも関する。この装置は、所与の目的を達成する専用装置であってもよいし、コンピュータに記憶されたコンピュータプログラムによって動作する汎用コンピュータであってもよい。このようなコンピュータプログラムは、コンピュータが読取り可能な媒体に記憶され得る。その媒体とは、コンピュータシステムバスに接続可能な、フロッピー（登録商標）ディスク、光ディスク、CD-ROM、電磁光学的ディスク、ROM、RAM、EPROM、EEPROM、電磁的又は光学的カード、ASIC又は電子的命令を記憶し得るあらゆる媒体を含むが、これらに限定されない。さらに、本明細書で言うコンピュータは、単体のプロセッサを含んでもよいし、コンピュータ能力を増加させるために複数のプロセッサを用いた装置であってもよい。

【 0 0 1 8 】

ここでいうアルゴリズムやディスプレイは、もともと特定のコンピュータや他の装置に關係している訳ではない。ここで教示される内容に従って、プログラムとともに多様な一般目的システムが使用され得る。又は、必要とされる方法ステップを実行するためにさらに特化した装置を作成することも便宜である。これらのシステムのそれぞれについてどのような構成が必要となるかは、後記する明細書本文から明らかになる。さらには、本発明は特定のプログラム言語を参照して記載されるものではない。本発明の教示を実装するために、多様なプログラム言語が使用され得る。後記において特定の言語に言及した場合、それは本発明の実施可能性及びベストモードを開示するためである。

【 0 0 1 9 】

さらに、本明細書で使用される言語は、主として意味の取りやすさ及び教示目的から選択されているのであって、本発明の主旨を限定するために選択されているのではない。従って、本発明の開示は、特許請求の範囲にて記述されている本発明の範囲を例示するものであるが限定するものではない。

【 0 0 2 0 】

主体装置の設定とは、固定座標系における、主体装置の剛性ある各構成要素の位置及び向きについての仕様である。例えば、主体装置の設定は、パラメータ  $q = (q_0, q_1, \dots, q_{d-1})$  によって特定され得る。 $d$  は、主体装置の自由度の数である。すべての設定のセットは、主体装置の設定空間を形成する。他のロボット、障害物、運動学的制約、自己衝突及び主体装置の力学系のうちのいずれかによって課された様々な制約に起因して、各モードにおいて、主体装置は、設定空間内に設定のサブセットを取り得る。

【 0 0 2 1 】

対象物設定とは、主体装置によって操作されている対象物の設定である。ここでは、主体装置の設定及び対象物設定をまとめて“設定”と呼ぶ。対象物設定は、パラメータ  $q_{b_j} = (q_0, q_1, \dots, q_{d'-1})$  によって表され得る。 $d'$  は、操作されている対象物の自由度の数である。例えば、平面上を押し動かされる対象物の対象物設定は3自由度（2つの水平座標及び対象物の向き）を有する。

【 0 0 2 2 】

1又は複数の自由度を有し、かつ、それぞれが主体装置の設定に対し別々の制約のセットを課する2以上のモードにおいて作業可能であれば、主体装置は、どのような装置であってもよい。主体装置は、他の装置、ロボット、産業設備、車両、仮想装置及びコンピュータアニメ化されたキャラクタを含む。

【 0 0 2 3 】

10

20

30

40

50



2つのモード間の遷移が許容される場合、それらの2つのモードは隣接していると言われる。あるモードから他のモードに遷移するためには、両者のモードが、両者のモード内で主体装置が取り得る少なくとも1つの共通の設定（以降“遷移設定”という）を共有しなければならない。

#### 【0024】

まず、最も制約された作業モードについて探索を実行し、その次に、他のモードに探索を拡大することによって、複数モードモーションは計画される。最も制約されたモードについてモーションを探索することは、最も制約されたモードと最も制約されたモードに隣接するモードとの間を遷移するための遷移設定をサンプリングすることである。実現可能な設定が排除されるように、遷移設定はサンプリングされる。さらに、有用性が高い遷移設定が、高い確率でサンプリングされるような方法で、遷移設定はサンプリングされる。遷移設定をサンプリングした後で、従来の単一モードモーション計画方法を使用して、開始遷移設定と終了遷移設定との間の連続する複数の設定が、単一モード内で探索される。

#### 【0025】

（複数モード計画の概観）

図1は、本発明の一実施形態に係る、押し動かす対象物112を含む環境内のロボット130を示している。ロボット130は、人間のモーションに類似する様々な作業を実行することができる人間形ロボットである。このようなロボットの一例として、日本、東京の本田技研工業株式会社の進化人間形ロボットASIMOがある。以降では人間形ロボット130に言及しつつ実施形態を説明するが、本発明は、人間形ロボットに限定されず、複数モードで作業可能な他タイプのロボット及び機械的装置にも使用され得る。

#### 【0026】

ロボット130は、あるタスクを遂行するために、複数のモードで作業可能である。例えば、図1のロボット130は、テーブル110まで歩行し（第1のモード）、腕を伸ばし/引っ込め（第2のモード）、目標位置114まで対象物112を押し動かす（第3のモード）。このようなタスクを遂行するために、ロボット130は、連続する複数の設定を取らなければならない。異なる複数のモードで作業することによって、単一モードのみで作業することに比してより効果的に、様々なタイプのタスクを実行し得る。

#### 【0027】

ロボット130の設定は、ロボット130の平面座標（ $x_{robot}$ ,  $y_{robot}$ ,  $\theta_{robot}$ ）、各腕の関節角度、各手の開/閉パラメータ及び脚の関節角度を含み得る。押し動かされている対象物の対象物設定は、3つのパラメータを有する。そのうちの2つのパラメータは平面座標（ $x$ 及び $y$ ）を表し、1つのパラメータは、対象物の向きを表す。システム全体の設定は、ロボット130の設定と対象物設定を含む。

#### 【0028】

1又は複数の実施形態において、ロボット130は、少なくとも以下の5つの異なるモードで操作される。すなわち、（i）歩行モード、（ii）左腕を伸ばす/引っ込めるモード、（iii）右腕を伸ばす/引っ込めるモード、（iv）左腕で対象物を押し動かすモード及び（v）右腕で対象物を押し動かすモードである。これらのモードのそれぞれは、ロボット130の設定に対して異なる制約のセットを課する。歩行モードにおいて、例えば、ロボット130の左右の脚は、予め定義された連続する複数の設定内で操作されるので、ロボット130は、転倒することなく、体の部分同士を衝突（すなわち、自己衝突）させることなく、目的地まで歩行できる。同様に、伸ばす/引っ込めるモードにおいても、自己衝突又は他の障害物（例えば、テーブル110）との衝突が発生しないように、両腕は調和が保たなければならない。押し動かすモードにおいては、手の先端が対象物との接触を維持し、正しい方向に対象物を押し動かすように、ロボットの腕及び手は経路に沿って移動しなければならない。

#### 【0029】

図2Aは、本発明の一実施形態に係る、ロボット130のモード間の遷移候補を示すモ

ード遷移図である。ロボット130は、伸ばす/引っ込めるモードを経由して、歩行モードから押し動かすモードに遷移することができるが、歩行モードから押し動かすモードに直接遷移することはできない。ロボット130は、腕を引っ込めた後、歩行モードに戻り、別の位置へ歩行してもよい。ロボット130が対象物を押し動かす手を変更することができるように、右手を伸ばす/引っ込めるモードと、左腕を伸ばす/引っ込めるモードとの間を直接遷移することも可能である。図2Aの遷移図は、単なる例示に過ぎない。主体装置の設定に応じて、操作されている対象物に応じて又は主体装置が達成するように設計されているタスクに応じて、モードは、追加、置換又は省略され得る。

#### 【0030】

図2Bは、ロボット130及び操作されつつある対象物112を含む主体装置を含むシステムによって取られ得る設定を表す、多様体210、220、230、240、250の概念図である。ロボット130及び対象物112は、モードによって制約を課されることのない、設定空間200内のあらゆる設定を取り得る。一実施形態においては、設定空間200は、ロボットのぎこちない又は非効果的な動き（例えば、対象物の方を向かずに対象物を押し動かす）を防止するように定義される。

#### 【0031】

設定空間200内に、多様体210、220、230、240、250が存在する。ロボット130があるモードで操作されているときに取られ得る、ロボット130及び対象物112の設定のセットを、各多様体は表している。そのうちの多様体210、220、230、240は、例えば、ロボット130の4つの異なる平面座標（ $x_{robot}$ ,  $y_{robot}$ ,  $z_{robot}$ ,  $\theta_{robot}$ ）での、伸ばす/引っ込めるモードにあるロボット130及び対象物112の設定を示していてもよい。そのうちの多様体250は、ロボット130及び対象物112が押し動かすモードにおいて取り得る設定を表している。

#### 【0032】

多様体210、220、230、240、250が、腕を伸ばし/引っ込め、ロボットの手の先端部を使用して対象物112を目標位置まで押し動かすための複数のモードを表していると仮定する。腕を伸ばす前のロボット130の設定は、多様体240上の点Aによって表される。ロボット130は、システムが設定Bを取るよう腕を伸ばす。設定Aから設定Bへ遷移する間に、ロボット130は、多様体240内で連続する複数の設定を取る。対象物112の設定は、このように遷移している間に変化することはない。なぜならば、対象物112は、何ら操作されることなくテーブル110上に留まっているからである。設定Bを取った後、ロボット130は、多様体250内の連続する複数の設定を取ることによって、対象物112を押し動かす。ロボットの手の先端部は、設定Bにおいて対象物112に接触し始める。設定Bと設定Cとの間では、ロボット130は、2つの制約に従う。すなわち、(i)ロボットの手は対象物112と接触し続けていること、(ii)対象物112をひっくり返さずに対象物112を押し動かすために、ロボットの手と対象物112とが接触する点における法線ベクトルは、水平方向を維持していること、である。対象物112の設定は、ロボット130の設定とともに、設定Bと設定Cとの間で変化する。なぜならば、ロボット130は対象物112を押し動かしているからである。多様体250内の連続する複数の設定を取った後、システムは、設定Cを取る。設定Cを取った後、システムが設定Dを取るよう、ロボット130は腕を引っ込める。腕が完全に引っ込められる設定Dに達するまでの間は、システムは、線C-Dによって表される連続する複数の設定を取る。

#### 【0033】

図2Bにおいては、設定B及びCは、伸ばす/引っ込めるモード及び押し動かすモードの両方に共有される遷移設定である。複数モードを有するモーションを計画する場合の主な困難は、目標設定に効果的に達するこのような遷移設定を決定することにある。あるモードからあるモードへの遷移設定が決定された後、例えば、Oussama Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1, 1986, pp.90-98に記述されている従来の単一モード計画

10

20

30

40

50

を使用することによって、あるモード内の連続する複数の設定が入手され得る。当該文献は、その全体がここに引用される。

【 0 0 3 4 】

本発明の 1 又は複数の実施形態においては、設定の経路の探索は、最も制約されたモードから始まり、拡大する。最も制約されたモードとは、最も制限的な制約を条件とするモードであって、当該モード内で効率的な連続する複数の設定を入手するために最も多くの演算処理及びリソースを必要とするモードを言う。当該制約は、障害物の存在、ロボットの運動学的限界、モーションの予測不可能な又は不安定な制御特性、及び、操作されている対象物とある関係を維持するエフェクタの必要性等の理由に起因する。

【 0 0 3 5 】

図 3 A は、最も制約されたモードが最終モード N として現れる例を示す図である。ロボット 1 3 0 は、連続的に、モード A ~ N 内を動作する。具体的には、ロボット 1 3 0 は、モード A 内の初期設定 3 1 2 を出発し、次にモード B 及び他の後続モードに進み、最後にモード N に至る。目標設定 3 2 4 は、モード N 内にある。1 つのモードについての複数の設定を表すハッシュされた楕円形領域として示された遷移設定候補 3 1 6、3 1 8、3 2 0 及び 3 2 2 からサンプリングされた遷移設定を経由して、ロボット 1 3 0 はモード間を遷移しなければならない。遷移設定 3 1 6、3 1 8、3 2 0 及び 3 2 2 内のドットは、初期設定 3 1 2 と目標設定 3 2 4 との間の設定の経路（すなわち、ロボット 1 3 0 によって取られるべき連続する複数の設定）を探索するためにサンプリングされた遷移設定を示す。図 1 ~ 2 B を参照した前記の押し動かす例では、最も制約されたモードは、押し動かすモードである。

【 0 0 3 6 】

設定の経路を入手するためには、遷移設定候補 3 2 2 から、1 つの遷移設定がサンプリングされる。遷移設定がサンプリングされた後、モード N 内で単一モード計画が実行され、モード N 内に目標設定 3 2 4 へ至る設定の経路があるか否かを決定する。経路がある場合、様々なモードについての遷移設定を表すノードのツリーを拡大することによって、初期設定 3 1 2 へ至る設定の経路が探索される。サンプリングされた遷移設定と目標設定 3 2 4 との間に経路がない場合は、遷移設定候補から他の遷移設定がサンプリングされる。最も制約されたモードから出発し拡大することによって、さらに探索が進む前に、最も制約されたモード内で実現可能な遷移設定をもたらず可能性が低い設定の経路は放棄される。最も制約されたモードは、リソースを最も多く必要とするので、最も制約されたモードの効率的な遷移設定から出発し拡大すると、最も制約されたモード内で効率的な経路を生まない経路を計画してしまうために浪費されるリソースを節約できる。

【 0 0 3 7 】

図 3 B は、最も制約されたモード F が第 1 のモード A と最終モード N との間に現れる他の例を示す図である。遷移設定候補 3 4 2、3 4 6 を有するモード F が最も制約されたモードであることを除いて、図 3 B の例は、図 3 A の例と同じである。第 1 の遷移設定が遷移設定候補 3 4 2 からサンプリングされる。第 2 の遷移設定が、遷移設定候補 3 4 6 からサンプリングされる。モード F のハッシュされた領域 3 4 2 のドットは、サンプリングされた、第 1 の遷移設定を示している。モード F のハッシュされた領域 3 4 6 のドットは、サンプリングされた、第 2 の遷移設定を示している。遷移設定候補 3 4 2 及び遷移設定候補 3 4 6 から、第 1 の遷移設定及び第 2 の遷移設定をサンプリングした後、単一モード計画が実行され、第 1 の遷移設定及び第 2 の遷移設定間の何らかの設定の経路を発見する。

【 0 0 3 8 】

第 1 の遷移設定及び第 2 の遷移設定は、それらがそれらの間で実現可能な設定の経路を生まない場合、その後の探索から排除される。逆に、設定の経路を生む第 1 の遷移設定及び第 2 の遷移設定の組合せは、初期設定 3 1 2 又は目標設定 3 2 4 の方へ拡大するためのツリーのノードとなる。

【 0 0 3 9 】

最も制約されたモードが最終モードとして現れる（図 3 A の例）か、又は第 1 のモード

10

20

30

40

50

と最終モードとの間のいずれかの場所に現れる（図３Ｂの例）かにかかわらず、まず最も制約されたモードについての遷移設定をサンプリングし、次に他のモード内の連続する複数の設定に探索を拡大していくことにより、初期設定３１２及び目標設定３２４の間の設定の経路は、より効率的に探索される。まず最も制約されたモード内で有用性の高い経路を探索することによって、制約度は低くても、最も制約されたモード内の実現不可能な経路又は有用性の低い経路にしか至らない他のモードについての経路を探索する場合に浪費されるリソースを節約できる。

#### 【００４０】

（主体装置の例）

図４は、本発明の一実施形態に係る、ロボット１３０の構成要素を示すブロック図である。ロボット１３０は、センサ４４０、計算モジュール４１０、エフェクタ４９０等の構成要素を含む。計算モジュール４１０は、センサ４４０からセンサ信号を受け取り、ロボットの現在の設定を決定すると同様に、ロボットを包囲する環境内の様々な対象物との関係におけるロボットの位置及び向きを決定する。センサは、他の身体セグメント（例えば、上腕）との関係におけるある身体セグメント（例えば、腕）の位置及び向きを決定する、画像センサ、線形センサ、回転式センサ等の構成要素を含む。１又は複数の実施形態においては、センサ信号４４２は、ロボット１３０のモーションを制御するフィードバック信号として機能してもよい。

#### 【００４１】

エフェクタ４９０は、モータ、水圧式アクチュエータ、ソレノイド等の、ロボット１３０の形状に物理的变化を生じさせる構成要素を含む。

#### 【００４２】

計算モジュール４１０は、ロボット１３０の現在の設定を識別し、あるタスクを達成するためにモーションを計画し、生成されたエフェクタ信号４８２をエフェクタ４９０に送ることによって、計画されたモーションを実行する。一実施形態によれば、計算モジュール４１０は、対象物検出部４５０、環境マッピング部４６０、モーション計画部４７０及びコントローラ４８０等の構成要素を含む。

#### 【００４３】

対象物検出部４５０は、環境内の対象物の同一性及び／又は位置を決定する。１又は複数の実施形態においては、対象物検出部４５０は、例えば、"Rectangular Table Detection Using Hybrid RGB and Depth Camera Sensors"と題する、２００８年５月８日付けの同時係属している米国特許出願１２／１２４，０１６号（代理人ドケット番号２３０８５－１２７５６）に開示されているような技術を使用して実装される。

#### 【００４４】

環境マッピング部４６０は、ロボット１３０の周囲にある対象物についての情報を維持し、追跡する。具体的には、環境マッピング部４６０は、対象物情報４５２を受け取り、対象物１１０、１１２を３次元座標系にマッピングする。環境マッピング部４６０は、対象物の形状又は幾何学的情報（例えば、対象物の幅、高さ及び長さ）、及び、対象物の位置に関する情報を、ロボット１３０によって検知されたように記憶する。一実施形態においては、環境マッピング部４６０は、ユーザ又他のソースによって供給された対象物の位置又は属性（例えば、長さ、幅、高さ）についての情報を記憶する。環境マッピング部４６０は、環境情報４６２をモーション計画部４７０に供給する。環境情報４６２は、ロボット１３０の周囲にある対象物の位置及び輪郭に関する情報を含む。

#### 【００４５】

モーション計画部４７０は、環境情報４６２を受け取り、ロボット１３０によって実行されるべきモーション計画（例えば、ある経路を経由してある位置まで歩行する）を生成する。当該計画に基づいて、モーション計画部４７０は、コントローラ４８０に命令（例えば、脚関節を３０度だけ曲げる）４７２を送る。コントローラ４８０は、エフェクタ４９０に対してあるモーションを実行することを指示する制御信号４８２を様々なエフェクタ４９０に送る。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 4 6 】

( モーション計画部の構成要素 )

図 5 は、本発明の一実施形態に係る、モーション計画部 4 7 0 を示すブロック図である。モーション計画部 4 7 0 は、探索戦略選択部 5 1 0、決定的モード計画部 5 2 0、探索ツリー拡大部 5 4 0、計画経路抽出部 5 6 0 等の構成要素を含む。探索戦略選択部 5 1 0 は、設定の経路を探索し計画する複数の探索戦略のなかから、当該状況下でウエイトを与えられた優先度に応じて、1つの探索戦略を選択する。例えば、最も高い優先度として演算時間を最小化することが与えられている場合、最短の時間内で経路を生成する、1つの既知の探索戦略が選択され得る。例えば、最も高い優先度として、ロボット 1 3 0 の計画されたモーションを実行した後のタスク達成速度が与えられている場合、最も効率的に経路を生成する、1つの既知の探索戦略が選択され得る。探索戦略選択部 5 1 0 は、目標設定に達するためにロボット 1 3 0 によって取られるべきモードも決定する。探索戦略は、例えば、別のモードにおいて作業に課される条件に基づいて、モードのシーケンスを決定してもよい。

10

## 【 0 0 4 7 】

決定的モード計画部 5 2 0 は、最も制約されたモード内で遷移設定を探索する。図 3 A の例においては、決定的モード計画部 5 2 0 は、遷移設定 3 2 2 と目標設定 3 2 4 との間の設定経路を探索する。図 3 B の例においては、決定的モード計画部 5 2 0 は、遷移設定 3 4 2 からサンプリングされた1つの設定と遷移設定 3 4 6 からサンプリングされた1つの設定との間の設定経路を探索する。一実施形態においては、決定的モード計画部 5 2 0 は、ある作業モード(例えば、押し動かすモード)専用の経路を生成するように特化されている。一実施形態においては、決定的モード計画部 5 2 0 は、多くの作業向けの経路を生成するために使用され得る。

20

## 【 0 0 4 8 】

決定的モード計画部 5 2 0 は、有用性テーブル生成部 5 2 2、実現可能性テーブル生成部 5 2 6 及び遷移設定サンプリング部 5 3 0 等の構成要素を含む。有用性テーブルは、最も制約されたモードのすべての遷移設定の有用性を生成し記憶する。有用性は、最も制約されたモード内の目標設定に効率的に達する設定の変化を表す。一実施形態においては、有用性は、遷移設定 3 2 2 からサンプリングされた出発遷移設定からの平均距離を計算することによって決定される。

30

## 【 0 0 4 9 】

実現可能性テーブル生成部 5 2 6 は、実現可能性テーブル 5 2 8 を生成する。当該テーブルは、最も制約されたモード内の出発遷移設定が、実現可能であり、かつ、様々な制約に合致させながら実際に取り得るか否かを示す。主体装置の異なる部分間の衝突、障害物、特定の位置へのエンドエフェクタの到達可能性のような運動学的制約等の理由で、ロボット 1 3 0 によって取り得ない遷移設定もある。実現可能性テーブル 5 2 8 は、ある出発遷移設定が、このような制約に違反するか否かについての情報を記憶する。例えば、実現可能性テーブル 5 2 8 は、なんら制約に違反しない遷移設定に値「1」を関連付け、このような制約に違反する遷移設定に値「0」を関連付けてもよい。一実施形態においては、実現可能性テーブル 5 2 8 は、例えば図 7 を参照しつつ後記するように、有用性テーブル 5 2 4 と組み合わせられている。一実施形態においては、有用性テーブル 5 2 4 及び実現可能性テーブル 5 2 8 は、遷移設定サンプリング部 5 3 0 の参照用に予め計算され記憶されている。

40

## 【 0 0 5 0 】

有用性テーブル 5 2 4 及び実現可能性テーブル 5 2 8 を生成する処理は、ロボット 1 3 0 の手を使用してテーブル 1 1 0 上に置かれた対象物 1 1 2 を押し動かすこと参照して、ここに記述される。図 6 A 及び図 6 B に示されるように、 $x$ 、 $y$  及び  $z$  を含む、設定の 3 次元空間が押し動かす作業用に定義される。 $x$ 、 $y$  及び  $z$  は、ロボット用の座標系を定義し、当該座標系では、 $x$  軸はロボット 1 3 0 の顔が向いている方向と平行であり。 $y$  軸は  $x$  軸に垂直な水平移動を示し、 $z$  は、対象物 1 1 2 が接触している手の先端部における法

50

線ベクトルの向きを示す。

【 0 0 5 1 】

手を使用して対象物 1 1 2 を押し動かすとき、対象物 1 1 2 に接触している手の先端部（例えば、指、掌、又は指関節）における法線ベクトルは、水平でなければならない。そうでなければ、対象物 1 1 2 はひっくり返り、安定して押し動かすことはできなくなる。手の先端部の高さは固定されていなければならない。なぜならば、押し動かしている間に手の先端部を持ち上げると対象物 1 1 2 がひっくり返るかも知れないし、手の先端部を下げると手がテーブル 1 1 0 の表面に衝突するかもしれないからである。

【 0 0 5 2 】

実現可能性テーブル生成部 5 2 6 は、まず、すべての遷移設定 3 2 2 について、すべてのエントリをゼロ「0」（制約に違反する）に初期化してもよい。一実施形態においては、ロボットの腕の自由度からサンプル設定が創出され、サンプリングされた設定について逆運動学が実行され、（i）対象物に接触し得る高さまで手を上げ得るか否か、及び（i i）押し動かされている対象物 1 1 2 と手の先端部との接触点における法線ベクトルが水平に向けられ得るか否か、を決定する。所与の高さに手の高さが届き、かつ、法線ベクトルが水平に向けられ得る場合、他の制約も満たされるか否かを確認するチェックが実行される。他の制約は、自己衝突がないこと、対象物と接触している手の先端部がロボットの視野内にあること、他の障害物との衝突がないこと、等であり得る。すべての制約が満たされた場合、サンプリングされた遷移設定のエントリは、この遷移設定は実現可能であることを示す「1」に変更される。

【 0 0 5 3 】

有用性テーブル生成部 5 2 2 は、押し動かす作業の有用性を計算する。一実施形態においては、遷移設定の有用性は、障害物がない場合にその遷移設定から期待される、対象物を押し動かす距離として計算される。例えば、そこから押し動かすことが実行可能である全設定に亘って、モンテカルロ積分を実行することによって、有用性は推定され得る。モンテカルロ積分は、特定の位置から対象物が押し動かされ得る平均経路長を計算することを可能にする。ある設定から押し動かすことが実行され得るか否かについての情報は、実現可能性テーブル 5 2 8 に記憶される。有用性の推定値は、有用性テーブル 5 2 4 に、計算された出発位置ごとに記憶される。

【 0 0 5 4 】

対象物が押し動かされているとき、対象物は、回転中心（C O R）の周りを回転する螺旋を描く。対象物の質量、エフェクタ表面と対象物表面との間の摩擦及び対象物の密度分布のような対象物 1 1 2 の物理的パラメータの合理的範囲においての、不変の C O R 周りの事前確率 から、ある仮定がなされる。確率 は、ある場所から押し動かされる場合に対象物が取り得る方向の範囲を示す。これらの物理的パラメータは、分析を容易にするために、一様分布に単純化されてもよい。

【 0 0 5 5 】

$w_0 = (x, y, \quad)$  から出発して、ある 1 つの経路  $w_0, w_1, \dots, w_k$  が生成される。ここで、経路  $w_0, w_1, \dots, w_k$  内の  $k + 1$  個の点のそれぞれは、経路内の直前の接触点から対象物を押し動かすことによって到達し得る手の接触点の設定を示す。例えば、 $w_1$  は、 $w_0$  から到達でき、 $w_2$  は  $w_1$  から到達できる。 $w_{k+1}$  での実現可能性（到達可能性）がゼロ（0）になった時点で、シーケンスは終了する。多くの経路を生成した後、平均長が算出され、有用性テーブル 4 2 4 に記憶される。

【 0 0 5 6 】

図 7 は、本発明の一実施形態に係る、物を保持していない右手の先端部を使用する押し動かす作業についての、3 次元グラフ形状の有用性テーブル 5 2 4 のエントリを示す図である。ドットの雲 7 1 0 は、ロボット 1 3 0 の物を保持していない右手によって入手され得る遷移設定の有用性及び実現可能性を表す（すなわち、実現可能性のエントリは「1」である）。雲 7 1 0 のより暗い部分は、有用性がより高い遷移設定を示す。一方、雲 7 1 0 のより明るい部分は、有用性がより低い遷移設定を示す。雲 7 1 0 の外側の何も無い領

10

20

30

40

50

域は、制約があるために実現可能ではない遷移設定を表す。同様の有用性テーブル 5 2 4 が、ロボット 1 3 0 の左手についても生成され得るし、ロボットの他の手設定（例えば、物を保持している手、又は掌による押し動かし）についても生成され得る。

#### 【 0 0 5 7 】

有用性テーブル 5 2 4 及び実現可能性テーブル 5 2 8 を生成した後、遷移設定サンプリング部 5 3 0 は、予め計算された遷移設定の有用性及び実現可能性に基づいて、最も制約されたモード内の設定の経路を入手するための遷移設定をサンプリングする。具体的には、遷移設定サンプリング部 5 3 0 は、実現可能性テーブル 5 2 8 での対応するエントリが「1」に等しい実現可能な設定のセットから、有用性テーブル 5 2 4 での対応するエントリが定義するその設定の有用性に比例する確率で、遷移設定をサンプリングする。図 7 を参照して、より暗い色でマークされている遷移設定は、より明るい色でマークされている遷移設定に比べ、よりサンプリングされる確率が高い。一様離散格子に基づくというよりはむしろ、実現可能な設定についての有用性分布に基づいて、遷移設定が無作為的にサンプリングされるので、良好な押し動かす作業となる成功遷移設定を発見する機会が増加する。

10

#### 【 0 0 5 8 】

遷移設定がサンプリングされた後、決定的モード計画部 5 2 0 は、単一モード計画部 5 5 0 を後記にて詳述するように使用し、最も制約されたモード 5 2 0 内で取られるべき連続する複数の設定を計画する。

#### 【 0 0 5 9 】

20

探索ツリー拡大部 5 4 0 は、初期設定 3 1 2 と目標の設定 3 2 4 との間の複数の遷移設定を表すツリーのノードを拡大する。ツリーの 1 つのノードは、モード間の 1 つの遷移設定を表す。まず、探索ツリー拡大部 5 4 0 は、設定空間内で 1 つの設定  $q_{rand}$  をサンプリングする。設定  $q_{rand}$  は、無作為的にサンプリングされてもよいし、主体装置によって操作されている対象物の目標設定に一致するように選択されてもよい。サンプリングされた設定  $q_{rand}$  と、ツリーのノードとの間の距離を計算して、サンプリングされた設定  $q_{rand}$  との距離が最も短い 1 つのノードを選択する。

#### 【 0 0 6 0 】

サンプリングされた設定  $q_{rand}$  に最も近いノードをツリー内で選択した後、当該ノードから、サンプリングされた設定  $q_{rand}$  の方へ、場合によっては当該経路内に新たなノードを追加して、ツリーが拡大される。

30

#### 【 0 0 6 1 】

探索ツリー拡大部 5 4 0 は、距離メトリック算出部 5 4 2、ノード選択部 5 4 4 等の構成要素を含む。距離メトリック算出部 5 4 2 は、サンプリングされた設定とツリー内のノードとの間の距離を計算する。サンプリングされた設定とノードとの間の距離は、タスクの目標を反映するメトリックの選択を使用して定義されてもよい。例えば、ここで記述される押し動かす例では、距離メトリックは、ツリー内のノードの対象物設定（すなわち、対象物 1 1 2 の設定）とサンプリングされた設定との間の距離として定義されてもよい。タスクの目標は対象物 1 1 2 を移動することであるから、ロボット 1 3 0 の設定は無視される。距離が計算された後、ノード選択部 5 4 4 は、サンプリングされた設定に最も近いノードを決定する。次に、探索ツリー拡大部 5 4 0 は、選択されたノードのモードと当該モードに隣接するモードとの間の遷移設定を選択する。

40

#### 【 0 0 6 2 】

選択されたノード及び選択されたノードに隣接するノードのモードから遷移するための遷移設定は、様々な方法を使用して選択され得る。探索ツリー拡大部 5 4 0 の一実施形態においては、遷移設定は、バイアスなしで無作為的に選択される。他の実施形態においては、中間モード遷移がサンプリングされて、決定的モード計画部 5 2 0 の遷移設定サンプリング部 5 3 0 によって選択されたモード遷移に向かう経路を発見する。

#### 【 0 0 6 3 】

決定的モード計画部 5 2 0 の単一モード計画部 5 5 0 は、ノードとサンプリングされた

50

遷移設定との間の決定的モード内で単一モード経路を探索する。ノードによって表される設定とサンプリングされた遷移設定との間に経路が存在することを確認した後、サンプリングされた遷移設定に最も近い1つの既存ノードに繋がるノードとして、サンプリングされた遷移設定を追加することによって、ツリーが拡大される。一実施形態においては、2以上のノードへの距離が等しい場合、1つのノードが無作為的に選択され、サンプリングされた遷移設定へ繋がる。

#### 【0064】

探索ツリー拡大部540によって遷移設定がサンプリングされた後、単一モード計画部550は、サンプリングされた遷移設定とツリーのノードとの間の単一モードモーションを計画する。単一モード計画部550は、例えば、Oussama Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1, 1986, pp.90-98に記述されている確率ロードマップ(PRM)法及びポテンシャル場法のような様々な単一モード計画アルゴリズムを実行する。当該文献は、その全体がここに引用される。

#### 【0065】

計画経路抽出部560は、初期設定312と目標設定324との間の経路がツリーを拡大することによって識別された後、設定の経路を生成する。計画経路抽出部560は、経路を発生させないノードを排除し、ロボット130が目標設定324に達する際に取りべき連続する複数の設定を出力する。図4を参照して前記したように、連続する複数の設定に基づいて、モーション計画部470は、コントローラ480に入力される命令472を生成してもよい。

#### 【0066】

(複数モード作業計画方法)

図8は、本発明の一実施形態に係る、複数モードモーション計画方法のフローチャートである。最初に、モーション計画部470は目標設定を受け取る(ステップ806)。ある位置まで対象物を押し動かす例では、目標設定は、操作されている対象物の対象物設定の観点から定義される。詳細に前記した押し動かす例では、対象物設定は、水平座標及び対象物の向きを含む。モーション計画部470は、例えば図2Aに示されるように、ロボット130のモード間の遷移候補を決定する(ステップ808)。次に、モーション計画部470は、初期設定312と目標設定324との間の経路内で、最も制約されたモードを決定する(ステップ810)。モーション計画部470は、遷移設定の実現可能性及び遷移設定の有用性を計算し記憶する(ステップ814)。

#### 【0067】

次に、設定空間においてある設定 $q_{rand}$ がサンプリングされる(ステップ818)。設定 $q_{rand}$ は、無作為的にサンプリングされてもよいし、主体装置によって操作されている対象物の目標設定に一致するように選択されてもよい。サンプリングされた設定 $q_{rand}$ との距離が最も短い、探索ツリー内の1つのノードが選択される(ステップ822)。次に、拡大戦略を使用して、ツリーが選択されたノードから拡大される(ステップ826)。拡大されたツリーの末端に新たに追加された1つのノードは、末端設定として定義される。

#### 【0068】

ツリーが拡大された後、ツリー内の目標設定とツリー内の末端設定との間の距離がある閾値未満であるか否かを決定する(ステップ830)。目標設定と末端設定との間の距離が閾値未満である場合、初期設定から目標設定への設定の経路が抽出され出力される(ステップ834)。ツリー内の目標設定とツリー内の末端設定との間の距離がある閾値未満ではない場合、処理はステップ818に戻る。

#### 【0069】

図9は、本発明の一実施形態に係る、拡大戦略を使用する探索ツリー拡大方法のフローチャートである。最初に、対象物設定 $q_{obj}$ が目標設定から抽出される(ステップ904)。次に、最も制約されたモード(例えば、押し動かすモード)及び隣接するモード(

10

20

30

40

50



例えば、伸ばす／引っ込めるモード）によって共有される遷移設定がサンプリングされる（ステップ 908）。有用性が高い遷移設定であるほど高い確率でサンプリングされるようにバイアスをかけて遷移設定をサンプリングしてもよい。実現可能ではない遷移設定はサンプリングからは排除されてもよい。

#### 【0070】

サンプリングされた遷移設定から初期設定への逆方向探索が実行される（ステップ 910）。初期設定と最も制約されたモードに隣接するモードとの間のモード内で遷移設定が入手される。逆方向の経路探索が成功した場合（ステップ 912）、処理はステップ 916に進み、ステップ 908においてサンプリングされた遷移設定と目標設定との間の最も制約されたモード内で、単一モード計画を実行する。単一モード計画が成功した場合（ステップ 920）、ステップ 908においてサンプリングされた遷移設定及びステップ 910において入手に成功した遷移設定が探索ツリーに追加される（ステップ 924）。 10

#### 【0071】

ステップ 910、ステップ 916 又はその両者が、経路を発生することができない場合は、遷移設定がツリーに追加されることなく、処理はステップ 908に戻り、他の遷移設定をサンプリングし、ステップ 910から920までを繰り返す。

#### 【0072】

図9のステップは、別の順序で実行されてもよい。例えば、サンプリングされた遷移設定から初期設定への逆方向探索を行うステップ 910、及び、最も制約されたモード内で単一モード計画を実行するステップ 916は、並列的に実行されてもよいし、互いに実行される順序が入れ替わってもよい（すなわち、ステップ 908及びステップ 910がステップ 916及びステップ 920の後に来てもよい）。 20

#### 【0073】

（代替的な実施形態）

一実施形態においては、モーション計画部 470は、バイアスなしの均等な確率で遷移設定がサンプリングされるブラインド（blind）モーション探索戦略も実行する。ブラインドモーション探索戦略は、遷移設定をサンプリングする前に、実現可能性又は有用性を計算することを必要としない。しかしながら、ブラインドモーション探索戦略は、有用性がより高い遷移設定がサンプリングされるようにバイアスをかけることはない。したがって、ブラインドモーション探索戦略を使用すると、遷移設定のサンプリングをより高い有用性の方にバイアスする場合と比較して、探索結果であるモーションの数がより増加する結果となり得る。 30

#### 【0074】

一実施形態においては、遷移設定の実現可能性情報のみが予め計算され、実現可能性テーブル 528に記憶される。遷移設定の有用性は有用性テーブル 524に記憶されない。実現可能性情報は、実現不可能な遷移設定がサンプリングされないようにするために使用される。

#### 【0075】

前記では、いくつかの実施形態に関して本発明を記述してきたが、本発明の範囲内で様々な修正が可能である。したがって、本発明の開示は、例示的なものであって、特許請求の範囲に記載された本発明の範囲を限定するものではない。 40

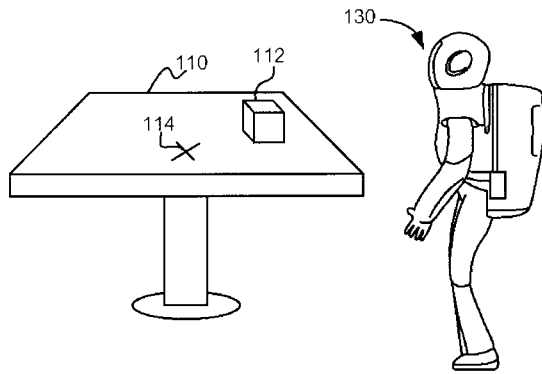
#### 【符号の説明】

#### 【0076】

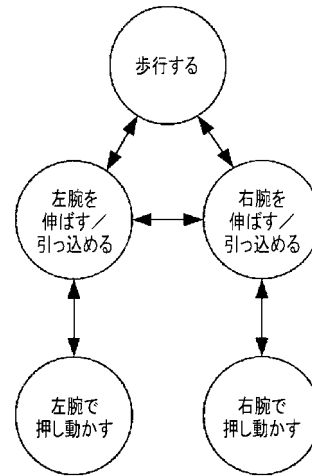
- 110 テーブル
- 112 対象物
- 114 目標位置
- 130 ロボット
- 200 設定空間
- 210、220、230、240、250 多様体
- 312 初期設定

3 1 6、3 1 8、3 2 0、3 2 2	遷移設定	
3 2 4	目標設定	
4 1 0	計算モジュール	
4 4 0	センサ	
4 5 0	対象物検出部	
4 5 2	対象物情報	
4 6 0	環境マッピング部	
4 6 2	環境情報	
4 7 0	モーション計画部	
4 7 2	命令	10
4 8 0	コントローラ	
4 8 2	エフェクタ信号	
4 9 0	エフェクタ	
5 1 0	探索戦略選択部	
5 2 0	決定的モード計画部	
5 2 2	有用性テーブル生成部	
5 2 4	有用性テーブル	
5 2 6	実現可能性テーブル生成部	
5 2 8	実現可能性テーブル	
5 3 0	遷移設定サンプリング部	20
5 4 0	探索ツリー拡大部 5 4 0	
5 4 2	距離メトリック算出部	
5 4 4	ノード選択部	
5 5 0	単一モード計画部	
5 6 0	計画経路抽出部	
7 1 0	雲	

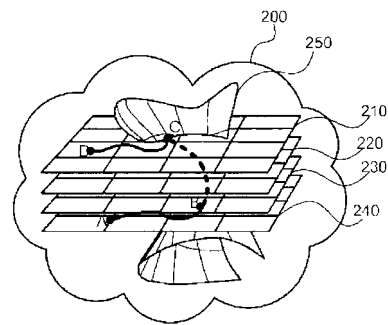
【図 1】



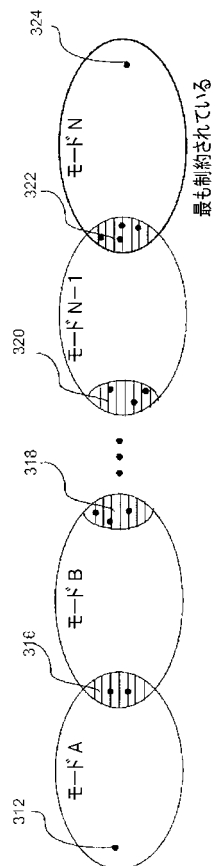
【図 2 A】



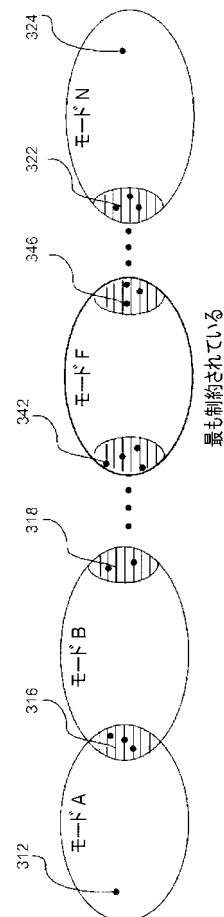
【図 2 B】



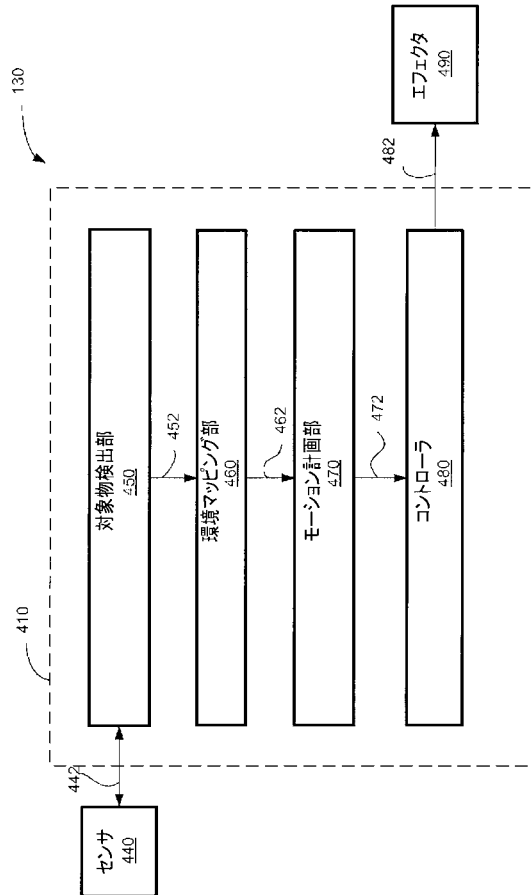
【図 3 A】



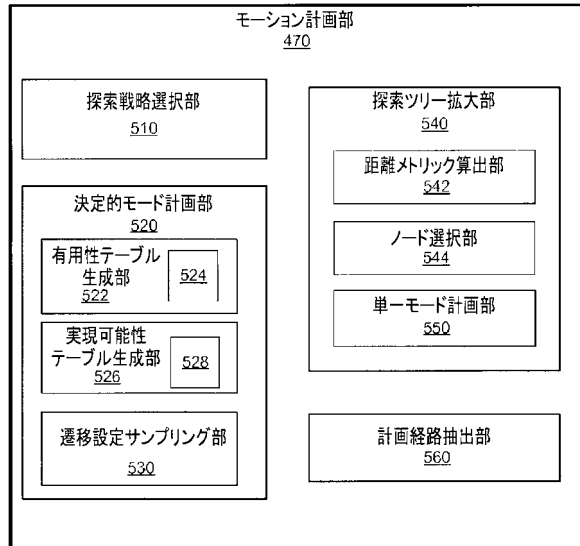
【図 3 B】



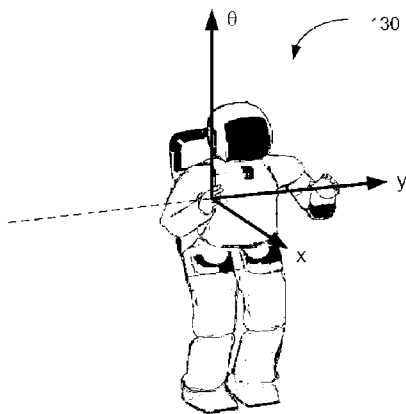
【図 4】



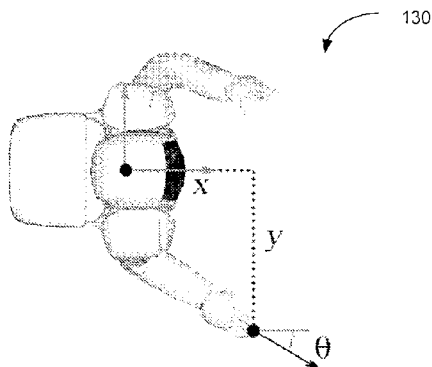
【図 5】



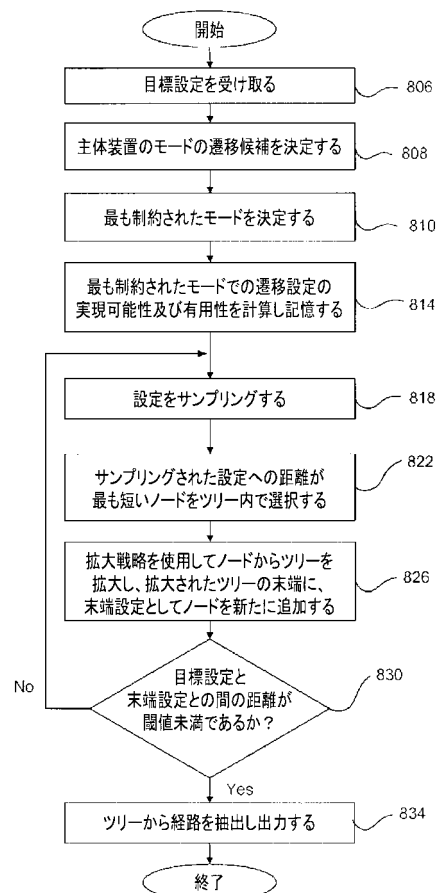
【図 6 A】



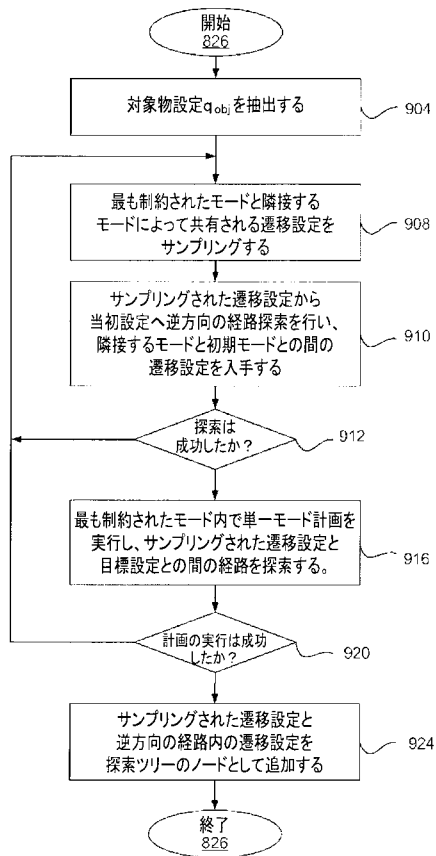
【図 6 B】



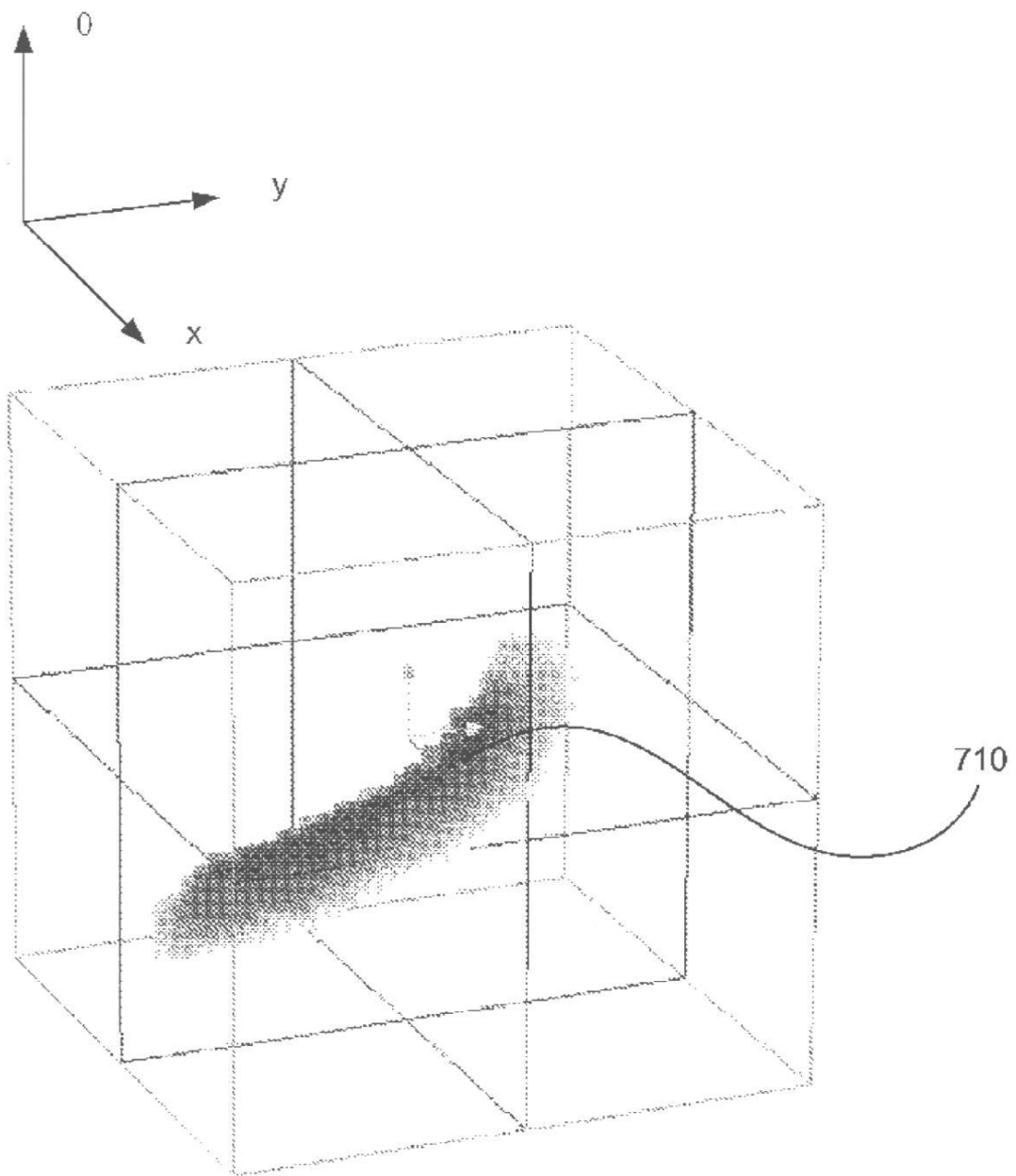
【図 8】



【図 9】



【図 7】



---

フロントページの続き

(72)発明者 ハウザー、クリス

アメリカ合衆国、オハイオ州 93067-9705、レイモンド、ステート ルート 739  
21001、ホンダ アール アンド ディ アメリカズ、インク、 リーガル デパートメント  
気付

(72)発明者 ゴンザレス パノス、ヘクター

アメリカ合衆国、オハイオ州 93067-9705、レイモンド、ステート ルート 739  
21001、ホンダ アール アンド ディ アメリカズ、インク、 リーガル デパートメント  
気付

審査官 金丸 治之

(56)参考文献 特開2004-255529(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 13/00