

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5774361号
(P5774361)

(45) 発行日 平成27年9月9日(2015.9.9)

(24) 登録日 平成27年7月10日(2015.7.10)

(51) Int.Cl. F I
G O 5 B 13/02 (2006.01) G O 5 B 13/02 J

請求項の数 5 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2011-100919 (P2011-100919)	(73) 特許権者	000005326 本田技研工業株式会社 東京都港区南青山二丁目1番1号
(22) 出願日	平成23年4月28日(2011.4.28)	(73) 特許権者	899000068 学校法人早稲田大学 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地
(65) 公開番号	特開2012-234262 (P2012-234262A)	(74) 代理人	110000246 特許業務法人O F H特許事務所
(43) 公開日	平成24年11月29日(2012.11.29)	(72) 発明者	金 天海 埼玉県和光市本町8-1 株式会社ホンダ ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン内
審査請求日	平成26年4月22日(2014.4.22)	(72) 発明者	菅野 重樹 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学 校法人早稲田大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 軌道計画方法、軌道計画システム及び軌道計画・制御システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

軌道計画システムによって、制御対象の状態を初期状態から目標状態へ向けて制御するための軌道を求める軌道計画方法であって、

セル作成部が、前記制御対象の状態空間をセルに分割するステップと、

探索木作成部が、前記状態空間において、前記制御対象の一の状態を表すノードと当該制御対象に入力が付与されることにより当該制御対象が状態遷移した後の状態を表すノードとをそれぞれ有する一つ以上の枝を備えた探索木を、いずれの前記セルにも2つ以上のノードが含まれないように、前記初期状態に対応する前記状態空間の位置から前記目標状態を含むセルまで作成するステップと、

軌道作成部が、運動コストが最小となるように、前記初期状態から前記目標状態までをつなぐ前記探索木の前記枝の一のセットを決定することにより、前記制御対象の前記初期状態から前記目標状態までの経路を定めるステップと、

を含み、

前記分割するステップでは、前記各セルについて、当該セル内の空間により規定された状態群に対して適用可能な入力群を付与して状態遷移させた後の状態群の、前記状態空間における広がり当該セルの近似誤差として求め、当該近似誤差を全ての前記セルについて加算した値が最小となるように、前記状態空間を予め定められた所定の数の前記セルに分割する、

軌道計画方法。

【請求項 2】

前記各セルについて求められる前記広がりである前記近似誤差は、前記入力群の各入力について、当該セルの中心位置が示す状態の当該入力による状態遷移後の状態の前記状態空間における位置を基準点として、当該セル内の空間により規定された状態群の当該入力による状態遷移後の位置の当該基準点からの距離の平均値を、前記入力群に含まれる全ての入力について平均化した値として定義される、

請求項 1 に記載の軌道計画方法。

【請求項 3】

前記分割するステップが、前記状態空間を均一な基本セルに分割するステップと、前記所定のセルの数に達するまで、全ての基本セルを、セルの近似誤差を最も小さくする軸の方向に分割するステップと、セルの近似誤差の和を小さくするようにセルの分割と結合を繰り返すステップとを含む請求項 1 または 2 に記載の軌道計画方法。

【請求項 4】

制御対象の状態を初期状態から目標状態へ向けて制御するための軌道を求める軌道計画システムであって、

前記制御対象の状態空間をセルに分割するセル作成部と、

前記状態空間において、前記制御対象の一の状態を表すノードと当該制御対象に入力が付与されることにより当該制御対象が状態遷移した後の状態を表すノードとをそれぞれ有する一つ以上の枝を備えた探索木を、いずれの前記セルにも 2 つ以上のノードが含まれないように、前記初期状態に対応する前記状態空間の位置から前記目標状態を含むセルまで作成する探索木作成部と、

運動コストが最小となるように、前記初期状態から前記目標状態までをつなぐ前記探索木の前記枝の一のセットを決定することにより、前記制御対象の前記初期状態から前記目標状態までの軌道を定める軌道作成部と、

を備え、

前記セル作成部は、前記各セルについて、当該セル内の空間により規定された状態群に対して適用可能な入力群を付与して状態遷移させた後の状態群の、前記状態空間における広がりを当該セルの近似誤差として求め、当該近似誤差を全ての前記セルについて加算した値が最小となるように、前記状態空間を予め定められた所定の数の前記セルに分割する、

軌道計画システム。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の軌道計画システムと、前記制御対象の状態が前記軌道計画システムの定めた軌道に沿って変化するように前記制御対象を制御する軌道制御装置と、を備えた軌道計画・制御システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、物体の、目標状態に至る状態遷移系列を作成する、軌道計画方法、軌道計画システム及び上記軌道計画システムを備えた軌道計画・制御システムに関する。

【背景技術】

【0002】

たとえば、ロボットのアームの制御において、軌道計画に基づいてアームのジョイント部のトルクを制御し、アームを目標の状態とする場合に、アームの位置及び角度のみの軌道計画では、ジョイント部のトルクを制御することはできない。ジョイント部のトルクを制御するには、アームの角度及び角速度を含む状態空間（位相空間）の軌道計画を作成する必要がある。

【0003】

位相空間上での状態遷移を取り扱うための手法として、Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) を用いた手法(非特許文献 1)がある。しかし、RRTは確率的手法であるため必ず

10

20

30

40

50

しもコスト最小に近い運動を計画できるとは限らない。また、状態空間の量子化を利用したTazaki の手法(非特許文献2)があるが、この手法は遷移を連続的に扱っておらず、強い線形性の仮定が要求されるため、適用できる機械の種類が限定される。

【0004】

そこで発明者らによって、連続的な探索により準コスト最小運動を計画できる手法として、位相空間の分割と探索木の枝の集約を用いた運動計画手法が提案されている(非特許文献3)。この手法によれば、連続的な探索により、動力学的な拘束条件のもとで与えられた初期状態から目標状態の集合までの準コスト最小運動を短時間で計画できる。しかし、この手法においては、位相空間の分割の際に、各軸に均一な分割を設定し、設計者が粒度を個別に決定していた。また、運動コストを最小化するための効果的な分割の構成方法は実現されていなかった。

10

【0005】

このように、運動コストを最小化するように状態空間を分割し、より精度よく準コスト最小軌道を計画することのできる軌道計画方法、軌道計画システム及び軌道計画・制御システムは開発されていなかった。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】S. M. LaValle and J. J. Kuffner.: "Randomized Kinodynamic Planning," Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 5, pp.378-400,(2001).

20

【非特許文献2】Y. Tazaki and J. Imura: "Approximately Bisimilar Discrete Abstractions of Nonlinear Systems Using Variable-resolution Quantizers," American Control Conference, pp.1015-1020, (2010).

【非特許文献3】C. H. Kim, H. Tsujino and S. Sugano: "Rapid Short-Time Path Planning for Phase Space," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23, No. 2, (2011).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

したがって、運動コストを最小化するように状態空間を分割し、より精度よく準コスト最小軌道を計画することのできる軌道計画方法、軌道計画システム及び軌道計画・制御システムに対するニーズがある。

30

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明による軌道計画方法は、軌道計画システムによって、物体の状態を目標状態へ制御するための軌道を求める軌道計画方法であって、該物体の状態空間をセルに分割するセル作成部が、所定のセルの数に対して、離散化による近似誤差を最小化するように該状態空間をセルに分割するステップと、探索木作成部が、該状態空間において、該物体の状態遷移に対応する探索木を、該物体の状態に対応する、該探索木の枝のノードがセルに一つずつ含まれるように作成するステップと、軌道作成部が、該探索木を使用して、該物体の現在の状態から目標状態までの経路を定めるステップと、を含む。

40

【0009】

本発明による軌道計画方法においては、所定のセルの数に対して、離散化による近似誤差を最小化するように状態空間をセルに分割するので、運動コストが最小化され、より精度よく準コスト最小軌道を計画することができる。

【0010】

本発明の一実施形態による軌道計画方法においては、前記分割するステップにおいて、セルの近似誤差を、セル内に含まれる任意の点とセルの中心点に入力を与えた場合の状態遷移先の点の距離の平均として表し、前記状態空間のセルの近似誤差の和が最小となるようにすることによって前記離散化による近似誤差を最小とする。

50

【 0 0 1 1 】

本実施形態によれば、簡単な手順によって離散化による近似誤差を最小とすることができる。

【 0 0 1 2 】

本発明の一実施形態による軌道計画方法においては、前記分割するステップが、前記状態空間を均一な基本セルに分割するステップと、前記所定のセルの数に達するまで、基本セルを、セルの近似誤差を最も小さくする軸の方向に分割するステップと、セルの近似誤差の和を小さくするようにセルの分割と結合を繰り返すステップとを含む。

【 0 0 1 3 】

本実施形態によれば、基本セルの中で近似誤差が最小となるように分割を実施し、その後、基本セルの間にまたがり、さらに大域的に平均的な近似誤差を小さくするように、分割と結合を繰り返すので、離散化による近似誤差を効率的に最小化することができる。

10

【 0 0 1 4 】

本発明による軌道計画システムは、物体の状態を目標状態へ制御するための軌道を求める軌道計画システムであって、離散化による近似誤差を最小化するように、該物体の状態空間をセルに分割するセル作成部と、該状態空間において、該物体の状態遷移に対応する探索木を、該物体の状態に対応する、該探索木の枝のノードがセルに一つずつ含まれるように作成する探索木作成部と、該探索木を使用して、該物体の現在の状態から目標状態までの軌道を定める軌道作成部と、を備える。

【 0 0 1 5 】

本発明による軌道計画システムは、所定のセルの数に対して、離散化による近似誤差を最小化するように状態空間をセルに分割するので、運動コストが最小化され、より精度よく準コスト最小軌道を計画することができる。

20

【 0 0 1 6 】

本発明による軌道計画・制御システムは、本発明による軌道計画システムと、該軌道計画システムが定めた軌道を実現する軌道制御部とを備えている。

【 0 0 1 7 】

本発明による軌道計画・制御システムは、本発明による軌道計画システムによってより精度よく計画された準コスト最小軌道を実現することができる。

【 図面の簡単な説明 】

30

【 0 0 1 8 】

【 図 1 】 本発明の一実施形態による軌道計画システムの構成を示す図である。

【 図 2 】 二重倒立振子の構成を示す図である。

【 図 3 】 本実施形態による軌道計画法を説明するための流れ図である。

【 図 4 】 分割された位相空間の例を示す図である。

【 図 5 】 図 3 のステップ S 0 2 0 及びステップ S 0 3 0 の動作を説明するための図である。

【 図 6 】 図 3 のステップ S 0 5 0 及びステップ S 0 6 0 の動作を説明するための図である。

【 図 7 】 セルの近似誤差の計算方法を説明するための図である。

40

【 図 8 】 セル作成部によって、位相空間を分割してセルを作成する方法を示す流れ図である。

【 図 9 】 図 8 のステップ S 1 0 2 0 の詳細を説明するための流れ図である。

【 図 1 0 】 図 8 のステップ S 1 0 3 0 の詳細を説明するための流れ図である。

【 図 1 1 】 二重倒立振子の第 1 の初期状態を示す図である。

【 図 1 2 】 二重倒立振子の第 2 の初期状態を示す図である。

【 図 1 3 】 状態数（最終的なセルの数）を 20^4 と設定した場合に、均一分割及び不均一分割の、位置姿勢セル内

【数 1】

$$-\frac{\pi}{10} \leq q_1 \leq 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{9\pi}{10} \leq q_2 \leq \pi$$

における速度空間の断面を示す図である。

【図 1 4】セルの数とシミュレーションによって得られた平均運動時間との関係を示す図である。

【図 1 5】状態数が、 16^4 、 20^4 、 24^4 及び 28^4 のそれぞれの場合について、3種類の均一分割を使用した場合と図 8 乃至図 10 にしたがって分割を行った場合の結果を示す図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0019】

図 1 は、本発明の一実施形態による軌道計画システム 100 の構成を示す図である。軌道計画システム 100 は、ロボットのアームなどの物体の状態を目標状態とするための、状態空間における軌道を求めるシステムである。軌道計画システム 100 は、状態空間上の物体の位置、すなわち状態に対応する枝を備えた探索木を作成する探索木作成部 101 と、状態空間を分割して複数のセルを作成するセル作成部 103 と、セル及び探索木を記憶するセル・探索木記憶部 105 と、探索木から、物体の状態空間における軌道を作成する軌道作成部 107 と、を備える。さらに、作成された軌道にしたがって物体の動きを制御する軌道制御部 120 を追加すれば、軌道計画・制御システムが得られる。各構成部の機能の詳細については、後で説明する。

20

【0020】

図 2 は、二重倒立振子 200 の構成を示す図である。以下の実施形態においては、物体を 2 次元平面内で運動する二重倒立振子 200 として説明を行なう。二重倒立振子 200 は、重心 203 を有する第 1 リンク 205 と、重心 209 を有する第 2 リンク 211 と、第 1 リンク 205 を回転可能に固定点に接続する第 1 関節（ジョイント）201 と、第 1 リンク 205 及び第 2 リンク 211 を回転可能に接続する第 2 関節 207 と、から構成される。

【0021】

二重倒立振子 200 の運動は、第 1 関節 201 及び第 2 関節 207 に与えるトルクによって定まり、第 1 リンク 205 の X 軸に対する角度

30

【数 2】

$$\theta_1,$$

第 2 リンク 211 の第 1 リンク 205 に対する角度

【数 3】

$$\theta_2$$

及びこれらの角速度

40

【数 4】

$$\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$$

によって表現される。そこで、本実施形態において、状態空間として以下の位相空間を採用する。

【数 5】

$$(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$$

50

【 0 0 2 2 】

図 3 は、本実施形態による軌道計画方法を説明するための流れ図である。

【 0 0 2 3 】

図 3 のステップ S 0 0 5 において、セル作成部 1 0 3 が、位相空間を分割し複数のセルを作成しておく。セル作成部の動作については後で詳細に説明する。

【 0 0 2 4 】

図 4 は、分割された位相空間の例を示す図である。図 4 は、簡単のために位相空間を 2 次元空間として表している。また、図 4 においては、図を簡略にするため、想定される角度及び角速度の範囲を等分割したセルが示されている。位相空間の分割方法については後で詳細に説明する。

10

【 0 0 2 5 】

図 3 のステップ S 0 1 0 において、探索木作成部 1 0 1 が、二重倒立振り子 2 0 0 の現在の状態及び目標状態を得る。ここで、状態は、位相空間上の位置に対応する。

【 0 0 2 6 】

図 3 のステップ S 0 2 0 において、探索木作成部 1 0 1 が、位相空間において、現在の状態の位置を探索木の根として定める。

【 0 0 2 7 】

図 3 のステップ S 0 3 0 において、探索木作成部 1 0 1 が、位相空間において、所定の時間間隔後の次の状態の位置を、探索木の枝のノードとして定める。所定の時間間隔後の次の状態の位置は、運動方程式や動力学シミュレータによって定める。上述のように、二重倒立振り子 2 0 0 の運動は、第 1 関節 2 0 1 及び第 2 関節 2 0 7 に与えるトルクによって定まるので、所定の時間間隔に第 1 関節 2 0 1 及び第 2 関節 2 0 7 に与えるトルクを定めれば、二重倒立振り子 2 0 0 の、所定の時間間隔後の次の状態が定まる。そこで、所定の時間間隔に第 1 関節 2 0 1 及び第 2 関節 2 0 7 に与えるトルクを最大値と最小値との間で、所定の増分で変化させながら、それぞれの場合に対応する次の状態を求めてもよい。この場合に、トルクを最大値と最小値との間で、所定の増分で変化させながら、幅優先探索により網羅的に探索を行なってもよい。

20

【 0 0 2 8 】

図 5 は、図 3 のステップ S 0 2 0 及びステップ S 0 3 0 の動作を説明するための図である。なお、図 5 は、簡単のために位相空間を 2 次元空間として表している。現在の状態にある、二重倒立振り子 2 0 0 に所定の時間間隔に 3 個の異なるトルク

30

【 数 6 】

$$\tau_a, \tau_b, \tau_c$$

を与えることにより、3 個の異なる次の状態が定まる。探索木作成部 1 0 1 は、これらの状態を探索木の枝のノードとする。さらに、生成された枝のノードが示すそれぞれの状態に対して、3 個の異なるトルク

【 数 7 】

$$\tau_a, \tau_b, \tau_c$$

40

を与えることにより、3 個の異なる、さらに次の状態が定まる。

【 0 0 2 9 】

図 3 のステップ S 0 4 0 において、探索木作成部 1 0 1 は、探索木の枝の集約を行う。探索木作成部 1 0 1 が、探索木を作成する場合に、上述のように、根または枝から派生させる枝の数を N とし、木の深さを M とすると、木の深さ M のレベルで探索の対象となる枝の数は N^M となる。そこで、探索木作成部 1 0 1 は、上述のセルを利用して、派生させた枝を集約する。具体的に探索木作成部 1 0 1 は、図 3 のステップ S 0 4 0 において、以下の処理を行う。

【 0 0 3 0 】

50

探索木作成部 101 は、派生させた次の状態が位相空間のどのセルに属するか定める。つぎに、探索木作成部 101 は、そのセルに属する状態が、枝のノードとしてすでに登録されているかどうか判断する。登録されていないならば、ステップ S045 に進む。登録されていれば、ステップ S060 に進む。

【0031】

図3のステップ S045 において、探索木作成部 101 は、派生させた状態が身体制約及び環境制約を満たすかどうか判断する。身体制約とは、一例として、ロボットの身体の部材に相当する第1及び第2のリンクが、たとえばお互いに衝突しないために設けられる角度の制約である。また、環境制約とは、身体の部材に相当する第1及び第2のリンクが、たとえば外部の障害物に衝突しないように設けられる角度の制約である。次の状態が身体制約及び環境制約を満たせば、ステップ S050 に進む。身体制約及び環境制約のいずれかを満たさなければ、ステップ S060 に進む。

10

【0032】

図3のステップ S050 において、探索木作成部 101 は、派生させた状態を枝のノードとして登録する。

【0033】

図3のステップ S060 において、探索木作成部 101 は、探索木作成部 101 が派生させた枝のノードに対応する次の状態を破棄する。

【0034】

図6は、図3のステップ S050 及びステップ S060 の動作を説明するための図である。枝のノードは、原則として1個のセル内には1個しか存在しない。探索木作成部 101 は、枝のノード(図6の実線で示した円)がすでに存在するセルにノードが位置する新たな枝を破棄する。すなわち、位相空間上の位置に近い状態は集約される。このように、従来の探索木の枝を、セルを使用して集約することによって、計算コストを大幅に低減することができる。

20

【0035】

図3のステップ S070 において、探索木作成部 101 は、探索が終了したかどうか判断する。探索木作成部 101 は、探索木の所定の深さまでの探索を終えた場合、あるいは所定時間の推移まで探索を終えた場合に探索が終了したと判断してもよい。探索が終了したと判断された場合には、ステップ S080 に進む。探索が終了していないと判断された場合には、ステップ S030 に戻り、探索が継続される。

30

【0036】

図3のステップ S080 において、軌道作成部 107 は、枝のノードが表す状態の中から、目標状態との位相空間上の距離が最も近い状態を選択し、この状態を最良状態とする(最終状態最適化の場合)。あるいは、軌道作成部 107 は、枝のノードが表す状態の中から、目標状態との位相空間上の距離が所定値以下であり、探索木の深さが最も浅い枝に対応する状態を選択し、この状態を最良状態とする(到達時間最適化の場合)。軌道作成部 107 は、最良状態から現在の状態(初期状態)まで、探索木の枝の経路を求めることにより現在の状態から最良状態に至る軌道を求める。このようにして軌道計画が求まる。たとえば、ロボットは、このようにして求めた軌道計画にしたがってアームを制御することにより、アームの最終状態を最適化し、あるいは、目標状態への到達時間を最適化することができる。

40

【0037】

上記の実施形態において、探索木作成部 101 は、現在の状態の位置を探索木の根として探索木を作成した。別の実施形態において、探索木作成部 101 が、目標状態を探索木の根として探索木を作成するように構成してもよい。

【0038】

本発明による軌道計画方法について、本明細書では、説明を簡単にするために、物体を二重倒立振り子としている。しかし、本発明の、既知状態登録木を使用する考え方は、任意の物体の状態空間における軌道計画方法に適用することができる。

50

【 0 0 3 9 】

ここで、セル作成部 1 0 3 の動作について説明する。セル作成部 1 0 3 は、所定のセルの数に対して、離散化による近似誤差を最小とするように状態空間（位相空間）を分割してセルを作成する。ここで、離散化とはセルによる状態の集約を意味する。

【 0 0 4 0 】

最初に近似誤差について説明する。図 3 のステップ S 0 4 0 における状態の集約は、位相空間上の点

【 数 8 】

$$x_a \text{ 及び } x_b$$

のユークリッド距離

【 数 9 】

$$\rho(x_a, x_b)$$

が十分に小さい場合、これらの状態に入力 u を与えて t 後に遷移する先の位相空間上の点

【 数 1 0 】

$$x_a' \text{ 及び } x_b'$$

の距離

【 数 1 1 】

$$\rho(x_a', x_b')$$

はやはり近いので、近い状態

【 数 1 2 】

$$x_a \text{ 及び } x_b$$

からの探索では、ほぼ同じ状態遷移系列が得られるという仮定に基づいている。ここで、 t 後の状態は以下の式で表せる。

【 数 1 3 】

$$x' = x(t + \Delta t) = F(x(t), u(t)) \quad (1)$$

である。

【 0 0 4 1 】

同一セル内の状態（位相空間上の点） x から探索して得られる系列が、セルの中心点 x_μ から探索して得られる系列に近似される場合、セルの近似誤差の尺度として同じ入力 $u(t)$ に対する t 後の遷移状態

【 数 1 4 】

$$x(t + \Delta t) \text{ 及び } x_\mu(t + \Delta t)$$

の距離が利用できる。したがって、入力 $u(t)$ に対するセルの近似誤差の尺度は、セル内に含まれる任意の状態とセルの中心点

【 数 1 5 】

$$x_\mu$$

の状態遷移先の距離をセル内領域全体

10

20

30

40

【数 1 6】

 χ_{cell}

で平均することにより表すことができる。こうして求めた入力 $u(t)$ に対する近似誤差の尺度について、とりうる入力の集合 U について平均をとると、セルの近似誤差は以下の式で表すことができる。

【数 1 7】

$$Error_{cell} = \frac{\int_U \int_{\chi_{cell}} \rho(F(x,u), F(x_u, u)) dx du}{\int_U \int_{\chi_{cell}} dx du} \quad (2) \quad 10$$

【0 0 4 2】

図 7 は、セルの近似誤差の計算方法を説明するための図である。

【0 0 4 3】

式 (2) のセルの近似誤差を計算するために、本実施形態においては、セルの代表点について

【数 1 8】

 $F(x, u)$

を計算し、平均をとる方法を採用する。図 7 に示すように、各軸方向の最大座標の点と最小座標の点をそれぞれ代表点とし、以下の式によりセルの近似誤差を計算する。ここで、 N は機械モデルの自由度であり、本実施形態においては、 $N = 2$ である。 20

【数 1 9】

$$Error_{cell} \approx \frac{\sum_{u \in U} E_{cell}(u)}{|U|} \quad (3)$$

$$E_{cell}(u) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} \frac{\rho'_{\min i}(u) + \rho'_{\max i}(u)}{2} \quad (4) \quad 30$$

【0 0 4 4】

つぎに、上記の手順によって求めたセルの近似誤差を使用して、セル作成部 1 0 3 によって、位相空間を分割してセルを作成する方法について説明する。

【0 0 4 5】

図 8 は、セル作成部 1 0 3 によって、位相空間を分割してセルを作成する方法を示す流れ図である。

【0 0 4 6】

図 8 のステップ S 1 0 1 0 において、セル作成部 1 0 3 は、状態空間を均一な基本セルに分割する。基本セルの数は、最終的なセルの数よりも小さくする。基本セルの分割粒度は、全ての軸方向で同じ値としてもよい。

【0 0 4 7】

図 8 のステップ S 1 0 2 0 において、セル作成部 1 0 3 は、全ての基本セルをセルの近似誤差を最小とする方向に分割する。 40

【0 0 4 8】

図 9 は、図 8 のステップ S 1 0 2 0 の詳細を説明するための流れ図である。

【0 0 4 9】

図 9 のステップ S 1 2 1 0 において、セル作成部 1 0 3 は、総分割数、すなわち、最終的なセルの数を取得する。

【0 0 5 0】

図 9 のステップ S 1 2 2 0 において、セル作成部 1 0 3 は、全ての基本セルのリストを作成する。 50

【 0 0 5 1 】

図9のステップS 1 2 3 0において、セル作成部1 0 3は、リストの先頭のセルを各軸方向に仮想的に分割した後のセルの近似誤差を求める。

【 0 0 5 2 】

図9のステップS 1 2 4 0において、セル作成部1 0 3は、分割後の近似誤差が最小となる軸方向にセルを分割する。ここで、分割には、文献(Y. Tazaki and J. Imura: "Approximately Bisimilar Discrete Abstractions of Nonlinear Systems Using Variable-resolution Quantizers," American Control Conference, pp.1015-1020, (2010).)などでも使用されている二分木を基にした分割構造を使用する。この構造は、指定したセルを二つの子セルに分割する細分化の機能を備えている。

10

【 0 0 5 3 】

図9のステップS 1 2 5 0において、セル作成部1 0 3は、分割されたセルをリストの末尾に追加し、先頭のセルをリストから削除する。

【 0 0 5 4 】

図9のステップS 1 2 6 0において、セル作成部1 0 3は、セルの数が最終的なセルの数に達したかどうか判断する。セルの数が最終的なセルの数に達していれば処理を終了する。セルの数が最終的なセルの数に達していなければ、ステップS 1 2 3 0に戻る。

【 0 0 5 5 】

このように、図8のステップS 1 0 2 0において、基本セルの中で近似誤差が最小となるように分割が行われる。

20

【 0 0 5 6 】

図8のステップS 1 0 3 0において、セル作成部1 0 3はセルの分割と結合を繰り返す。

【 0 0 5 7 】

図10は、図8のステップS 1 0 3 0の詳細を説明するための流れ図である。

【 0 0 5 8 】

図10のステップS 1 4 1 0において、セル作成部1 0 3は、分割構造の末端のすべての子セルのリスト(以下において、リストAと呼称する)及びその一階層上のすべての親セルのリスト(以下において、リストBと呼称する)を作成する。

【 0 0 5 9 】

図10のステップS 1 4 2 0において、セル作成部1 0 3は、リストA及びリストBの対応するセルについて近似誤差減少量を計算する。近似誤差減少量は以下の式で表せる。

30

【 数 2 0 】

$$\overline{\Delta Error}_{cell_i} = \overline{Error}_{cell} - (\overline{Error}_{sub1_i} + \overline{Error}_{sub2_i}) \quad (5)$$

ここで、右辺の第1項は親セルの近似誤差であり、右辺の第2項及び第3項は子セルの近似誤差である。iは、i軸方向の分割であることを示す。

【 0 0 6 0 】

図10のステップS 1 4 3 0において、セル作成部1 0 3は、リストAを近似誤差減少量の降順にソートする。

40

【 0 0 6 1 】

図10のステップS 1 4 4 0において、セル作成部1 0 3は、リストBを近似誤差減少量の昇順にソートする。

【 0 0 6 2 】

図10のステップS 1 4 5 0において、セル作成部1 0 3は、リストAの先頭に位置するセルの近似誤差減少量が、リストBの先頭に位置するセルの近似誤差減少量よりも大きいかどうか判断する。リストAの先頭に位置するセルの近似誤差減少量が、リストBの先頭に位置するセルの近似誤差減少量よりも大きければ、ステップS 1 4 6 0に進む。そうでなければ処理を終了する。

50

【 0 0 6 3 】

図 10 のステップ S 1 4 6 0 において、セル作成部 1 0 3 は、リスト A の先頭に位置するセルを、分割後のセルの近似誤差が最小となる軸方向に分割し、リスト B の先頭に位置するセルの子セルを結合する。

【 0 0 6 4 】

図 10 のステップ S 1 4 7 0 において、セル作成部 1 0 3 は、新たなセルの近似誤差減少量を計算し、リスト A に追加し、リスト A 及びリスト B を更新する。

【 0 0 6 5 】

このように、図 8 のステップ S 1 0 3 0 において、位相空間（状態空間）全体での近似誤差の平均が小さくなるように分割と結合が繰り返される。ステップ S 1 0 3 0 において、セルの総数は変化しない。

10

【 0 0 6 6 】

図 8 のステップ S 1 0 2 0 においては、基本セルの中で近似誤差が最小となるように分割が行われる。しかし、全基本セルについて、個々の分割数はほぼ一定となっているため、この段階では局所的な不均一分割が生成される。そこで、基本セルの間にまたがり、さらに大域的に平均的な近似誤差を小さくする処理として、分割と結合を繰り返す図 8 のステップ S 1 0 3 0 の処理を行う。ステップ S 1 0 3 0 では、セルの重要度を空間全体の体積

【 数 2 1 】

$$V_{space}$$

20

に占めるセルの体積

【 数 2 2 】

$$V_{cell}$$

で表し、この重要度で重みづけられた空間全体での近似誤差の総和を最小化するように分割を再構成する。正確には、この処理では近似誤差の総和は局所解へと収束する。

【 数 2 3 】

$$\text{minimize} \sum_{cell \in \chi} \frac{V_{cell}}{V_{space}} Error_{cell} \quad (6)$$

30

【 0 0 6 7 】

つぎに、本実施形態の軌道計画システムの効果を確認するための、二重倒立振子 2 0 0 のシミュレーション実験について説明する。二重倒立振子 2 0 0 の第 1 リンク 2 0 5 のリンク長は、 l_1 であり、質量は、 m_1 であり、重心位置 2 0 3 はリンクの中央である。二重倒立振子 2 0 0 の第 2 リンク 2 1 1 のリンク長は、 l_2 であり、質量は、 m_2 であり、重心位置 2 0 9 はリンクの中央である。また、重力加速度を g とする。

40

【 0 0 6 8 】

表 1 は、使用した二重倒立振子 2 0 0 のパラメータを示す。

【 表 1 】

	長さ[m]	質量[k g]
第 1 リンク	0. 5	0. 5
第 2 リンク	0. 5	0. 5

50

【 0 0 6 9 】

二重倒立振子 2 0 0 の運動方程式は、以下のとおりである。

【 数 2 4 】

$$\begin{aligned} (\alpha + \gamma + 2\beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + (\gamma + \beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 - \beta(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + k_1 \cos \theta_1 + k_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= \tau_1 \\ (\gamma + \beta \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + \gamma \ddot{\theta}_2 + \beta \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + k_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) &= \tau_2 \end{aligned}$$

$$\alpha = I_1 + \frac{1}{4} m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 \quad k_1 = \left(\frac{1}{2} m_1 l_1 + m_2 l_1\right) g$$

$$\beta = \frac{1}{2} l_1 m_2 l_2$$

$$k_2 = \frac{1}{2} m_2 l_2 g$$

10

$$\gamma = I_2 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2$$

関節角度と重力の関係に対する理解を容易にするために、以下のように座標を変更した。

【 数 2 5 】

$$q_1 = \theta_1 - \frac{\pi}{2}$$

$$q_2 = \theta_2$$

20

【 0 0 7 0 】

表 2 は、本実施形態の軌道計画システムのパラメータを示す表である。

【 表 2 】

関節	位置の制限 [rad]	速度の制限 [rad/s]	最大トルク [Nm]	トルク分解能
1	制限なし	2π	2.0	30
2	制限なし	4π	2.0	30

30

【 0 0 7 1 】

シミュレータの刻み時間幅 t は 50 ミリ秒とし、最大計画運動時間は 10 秒とした。運動のコストは運動時間として、各種境界条件のもとで準最短時間運動を求めた。また、距離の関数として以下の式を設定した。

【 数 2 6 】

$$\rho(x_a, x_b) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w_{p_i}^2 (q_{a_i} - q_{b_i})^2 + w_{v_i}^2 (\dot{q}_{a_i} - \dot{q}_{b_i})^2)} \quad (7)$$

w_{p_i} 及び w_{v_i} は各軸 i の重み定数であり、本シミュレーションでは、各関節とも w_{p_i} 及び w_{v_i} にはそれぞれ 1.0 及び 0.2 を使用した。

40

【 0 0 7 2 】

本シミュレーションでは、第 1 リンク 2 0 5 及び第 2 リンク 2 1 1 がともに下がって静止した第 1 の初期状態及びともに倒立して静止した第 2 の初期状態を設定した。

【 0 0 7 3 】

図 1 1 は、二重倒立振子 2 0 0 の第 1 の初期状態を示す図である。二重倒立振子 2 0 0 の第 1 の初期状態の座標は以下のとおりである。

【数 2 7】

$$(q_1, \dot{q}_1) = (-\pi, 0)$$

$$(q_2, \dot{q}_2) = (0, 0)$$

【0 0 7 4】

図 1 2 は、二重倒立振子 2 0 0 の第 2 の初期状態を示す図である。二重倒立振子 2 0 0 の第 2 の初期状態の座標は以下のとおりである。

【数 2 8】

$$(q_1, \dot{q}_1) = (0, 0)$$

$$(q_2, \dot{q}_2) = (0, 0)$$

10

【0 0 7 5】

本シミュレーションにおいては、第 1 及び第 2 の初期状態から、ランダムサンプリングした目標状態への運動を計画し、計画された運動のコスト、すなわち運動時間を調べた。1 0 0 0 0 0 個の目標状態からなるサンプルデータを作成し、これらの目標状態までの運動時間の平均を様々な分割条件について比較した。

【0 0 7 6】

また、姿勢空間の分割粒度を均一に固定し、速度方向にのみ上述の方法によって不均一に分割を行った。その理由は、障害物が姿勢空間上の拘束条件として表されるためであり、また、距離のパラメータの設定の影響を小さく抑えるためである。基本セルの分割粒度は、すべての軸方向に同じ値を設定した。

20

【0 0 7 7】

図 1 3 は、状態数（最終的なセルの数）を 20^4 と設定した場合の、一姿勢セル内

【数 2 9】

$$-\frac{\pi}{10} \leq q_1 \leq 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{9\pi}{10} \leq q_2 \leq \pi$$

における速度空間の断面を示す図である。図 1 3 (a) は、各姿勢方向及び速度方向に対して同じ分割粒度を設定して分割を行った場合を示し、図 1 3 (b) は、姿勢空間の分割粒度を均一に固定し、速度方向にのみ上述の方法によって不均一に分割を行った場合を示す。

30

【0 0 7 8】

図 1 4 は、セルの数とシミュレーションによって得られた平均運動時間との関係を示す図である。図 1 4 において、横軸はセルの数（総分割数）を表し、縦軸は平均時間を表す。図 1 4 において、「均一セル」は、各姿勢方向及び速度方向に対して同じ分割粒度を設定して分割を行った場合を示し、「本発明のセル」は、姿勢空間の分割粒度を均一に固定し、速度方向にのみ上述の方法によって不均一に分割を行った場合を示す。状態数（最終的なセルの数）が増えれば近似誤差は小さくなり、より短時間で遷移する運動を発見できることが確認できる。状態数が増えるにつれた、真の最短運動時間の平均値である、ある値に収束していくことが予想される。また、全ての分割条件について、「本発明のセル」の場合は、「均一セル」を使用した場合に比較してより短時間で遷移する運動を発見できることが確認できる。

40

【0 0 7 9】

図 1 5 は、状態数（セルの数）が、 16^4 、 20^4 、 24^4 及び 28^4 のそれぞれの場合について、3 種類の軸方向に均一な分割粒度を設定して分割を行った場合と姿勢空間の分割粒度を均一に固定し、速度方向にのみ上述の方法によって不均一に分割を行った場合の結果を示す図である。図 1 5 において、「均一 1」、「均一 2」及び「均一 3」は、同じ状態数となるように、

50

【数 3 0】

\dot{q}_1 及び \dot{q}_2

方向の分割粒度を均一とし、その比を、それぞれ 1 : 4、1 : 1 及び 4 : 1 に設定した場合を示す。また、「本発明」は、姿勢空間の分割粒度を均一に固定し、速度方向にのみ上述の方法によって不均一に分割を行った場合を示す。図 15 の縦軸は、平均時間の割合（コスト）を表す。ここで、平均時間の割合（コスト）は、状態数 3×10^4 の場合の平均時間の値を最適値として、それぞれの場合の平均時間とこの最適値との差によって表した。縦軸の値が小さいほど平均時間の割合（コスト）が小さい。割合（コスト）は、状態数によって変化する。「均一 1」、「均一 2」及び「均一 3」の割合（コスト）を比較すると、
 全ての状態数の場合に他よりも割合（コスト）が小さいものは存在しない。これに対して、「本発明」の割合（コスト）は、全ての状態数の場合に、「均一 1」、「均一 2」及び「均一 3」の割合（コスト）よりも小さい。

10

【0080】

このように、本発明の軌道計画システム及び軌道計画方法によれば、同じ状態数で、よりコストの小さい運動を精度良く発見することができる。また、本発明の軌道計画システムを含む本発明の軌道計画・制御システムは、本発明の軌道計画システムが作成した軌道をフィードバック制御などによって実現することにより、よりコストの小さい運動を実現することができる。本発明の枠組みは、機械状態を位相空間で扱う汎用的なものであるので、ロボット、自動車、航空機、ロケットの運動計画など様々な分野に広く応用することができる。

20

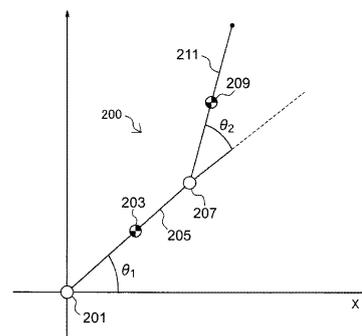
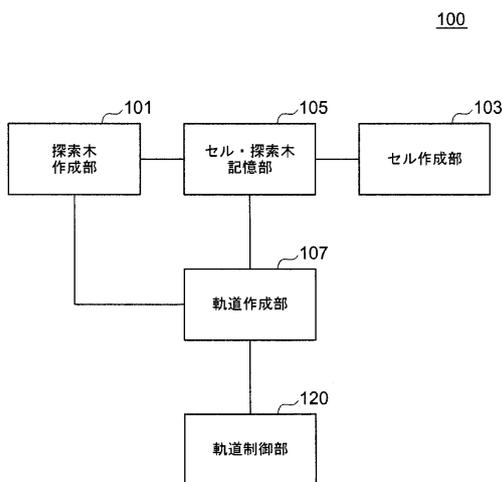
【符号の説明】

【0081】

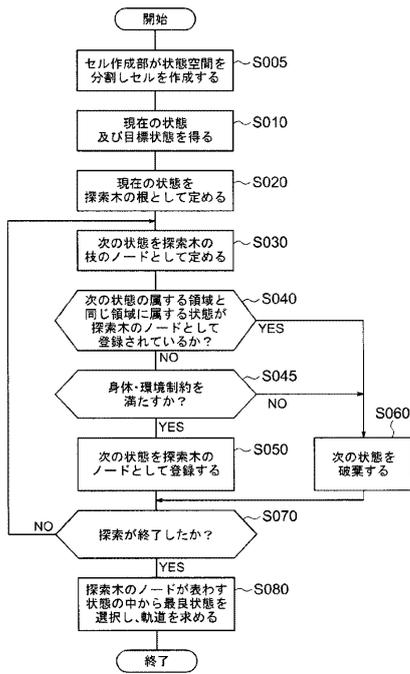
101...探索木作成部、103...セル作成部、105...セル・探索木記憶部、107...軌道作成部、120...軌道制御部。

【図 1】

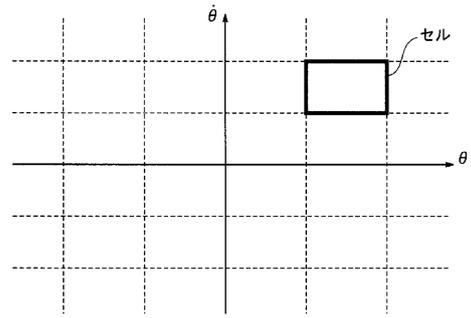
【図 2】



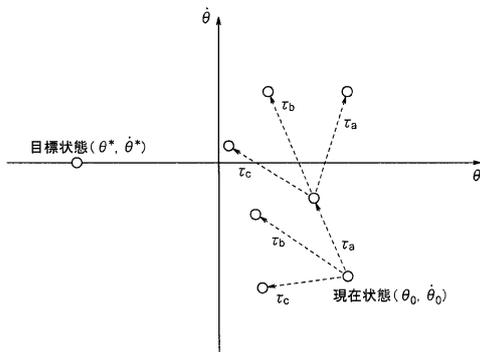
【図3】



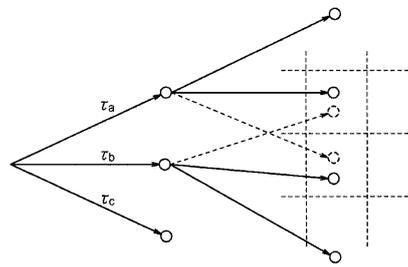
【図4】



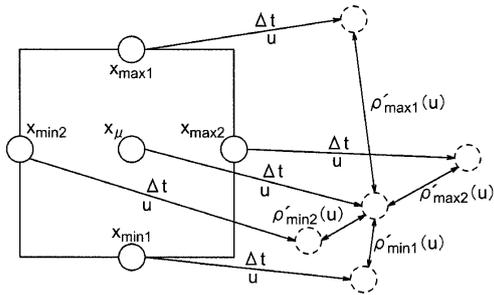
【図5】



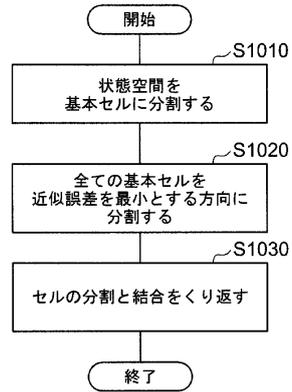
【図6】



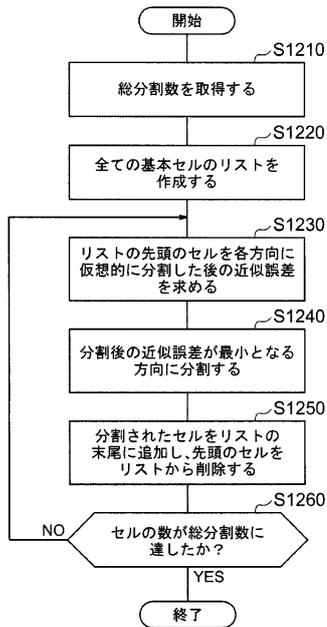
【図7】



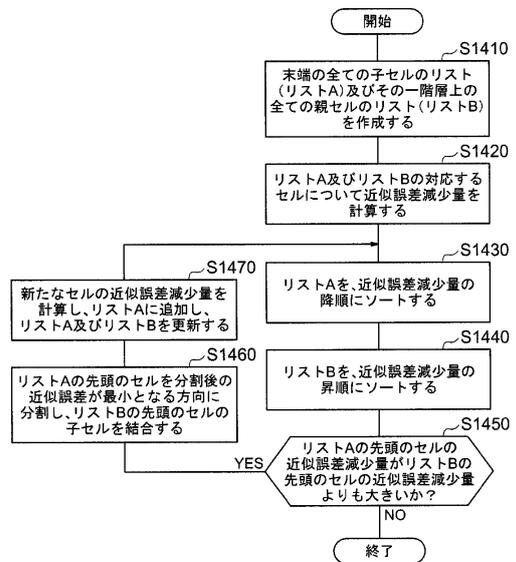
【図8】



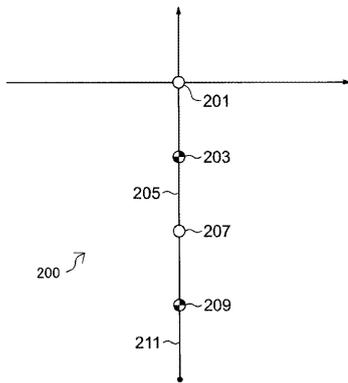
【図9】



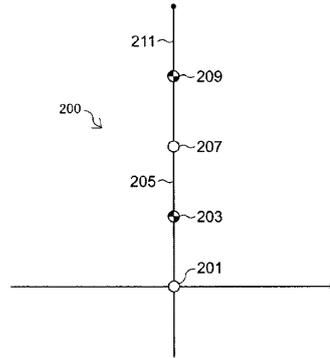
【図10】



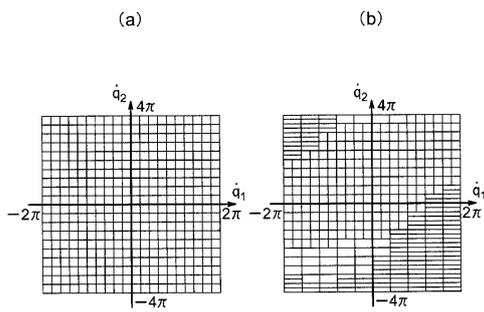
【図 1 1】



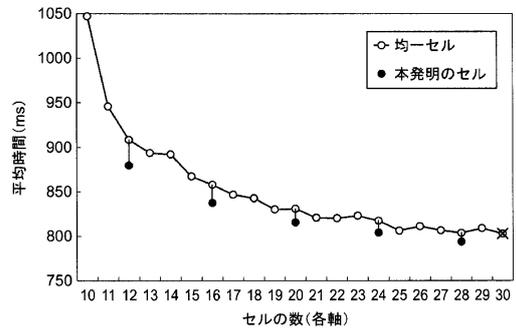
【図 1 2】



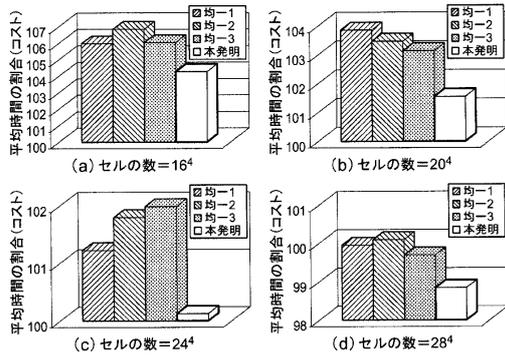
【図 1 3】



【図 1 4】



【 図 15 】



フロントページの続き

(72)発明者 山崎 翔太

東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学校法人早稲田大学内

審査官 稲垣 浩司

- (56)参考文献 金天海, 辻野広司, 位相空間分割による高速枝刈り・軌道計画アルゴリズム, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2010年 6月13日, p. "2P1-C13(1)"-"2P1-C13(4)"
金天海, 辻野広司, RPPPSとノイズキャンセルを用いた動作計画システム, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2010年 9月24日, p. 1525 - 1528
金天海, 辻野広司, 菅原志門, 菅野重樹, 準最短時間機械運動探索のための低計算オーダによる位相空間上探索木枝刈り手法, 第73回(平成23年)全国大会講演論文集(1) アーキテクチャ ソフトウェア科学・工学 データベースとメディア, 2011年 3月 2日, p. 405 - 406

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G05B 13/02

CiNii