

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6749480号
(P6749480)

(45) 発行日 令和2年9月2日 (2020.9.2)

(24) 登録日 令和2年8月13日 (2020.8.13)

(51) Int. Cl.

F I

B60W 30/06 (2006.01)
B60W 30/095 (2012.01)
E04H 6/10 (2006.01)
G08G 1/16 (2006.01)
B60R 99/00 (2009.01)

B60W 30/06
 B60W 30/095
 E04H 6/10 A
 G08G 1/16 C
 B60R 99/00 340

請求項の数 17 (全 38 頁)

(21) 出願番号 特願2019-512321 (P2019-512321)
 (86) (22) 出願日 平成29年11月28日 (2017.11.28)
 (65) 公表番号 特表2019-529209 (P2019-529209A)
 (43) 公表日 令和1年10月17日 (2019.10.17)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2017/043380
 (87) 国際公開番号 W02018/131322
 (87) 国際公開日 平成30年7月19日 (2018.7.19)
 審査請求日 平成31年3月1日 (2019.3.1)
 (31) 優先権主張番号 15/402, 353
 (32) 優先日 平成29年1月10日 (2017.1.10)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 米国 (US)

(73) 特許権者 000006013
 三菱電機株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
 (74) 代理人 100110423
 弁理士 曾我 道治
 (74) 代理人 100111648
 弁理士 梶並 順
 (74) 代理人 100122437
 弁理士 大宅 一宏
 (74) 代理人 100147566
 弁理士 上田 俊一
 (74) 代理人 100161171
 弁理士 吉田 潤一郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 車両を駐車するシステム、方法及び非一時的コンピューター可読記憶媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

車両を駐車空間内に駐車する方法であって、前記方法は、前記車両のジオメトリ、前記駐車空間のマップ、前記車両の運動学的モデル、及び前記車両の動的モデルを記憶するメモリに結合されたプロセッサを使用し、前記プロセッサは、前記方法を実施する記憶命令に結合され、前記記憶命令は、前記プロセッサによって実行されると、前記方法の少なくともいくつかのステップを実行し、前記少なくともいくつかのステップは、

前記車両のジオメトリ及び前記駐車空間のマップを用いて、前記車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、前記車両の位置及び方位を規定することと、

前記車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、前記幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、前記車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、前記車両の運動学的特性に従って前記2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

前記運動学的グラフから、前記車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、前記車両の目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

前記車両の動的モデルを用いて、前記運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

10

20

前記基準軌道に従って前記車両の運動を制御することと、
を含み、

前記幾何学的経路を前記求めることは、

前記初期ノードを、衝突を伴わないノードのセットを通じて前記目標ノードと接続する幾何学的グラフを構築することであって、前記幾何学的グラフにおけるノードの各対は、前記車両及び前記駐車空間のジオメトリのみを用いて求められた衝突を伴わないエッジで接続されることと、

前記幾何学的経路の前記通過点のセットを形成する前記幾何学的グラフからノードのセットを選択することと、

を含み、

前記駐車空間の状態空間内の点をサンプリングして、サンプリングされた状態を生成することと、

前記幾何学的グラフのノードの全ての状態が前記サンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合、前記サンプリングされた状態を拒絶することと、

そうではない場合、

前記サンプリングされた状態に最も近い状態を有する前記幾何学的グラフの最近傍のノードを求めることと、

前記サンプリングされた状態のノードを前記幾何学的グラフに追加すること、及び前記追加されたノードを、エッジが衝突を伴わない場合に前記エッジを介して前記最近傍のノードと接続することと、

前記サンプリングすること、前記拒絶すること、前記求めること、及び前記追加することを、前記初期ノードが前記目標ノードに接続されるまで繰り返すことと、
を更に含む、方法。

【請求項 2】

前記運動学的グラフを、前記通過点のセットに対応するシードのセットから反復的に成長させること、
を更に含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記車両の少なくとも 1 つのセンサーを用いて、前記駐車空間の少なくとも一部のジオメトリを求めることと、

メモリから前記車両のジオメトリを選択することであって、前記センサー及び前記メモリは、前記プロセッサに動作的に接続されることと、
を更に含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記幾何学的グラフは、前記初期ノードから開始して前記目標ノードへ向かう初期ツリーと、前記目標ノードから開始して前記初期ノードへ向かう目標ツリーとを含み、前記最近傍のノードは、前記初期ツリーからの第 1 の最近傍のノードと、前記目標ツリーからの第 2 の最近傍のノードとのうちの一方又は組み合わせを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記幾何学的グラフの前記初期ノードと各非葉ノードとについて、前記目標ノードに到達する最小コストを求めることと、

前記初期ノードについて求められた前記最小コストを有する、前記初期ノードを前記目標ノードと接続するノードのセットを選択して、前記幾何学的経路の前記通過点のセットを形成することと、
を更に含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記初期ノード及び前記目標ノードを除く葉ノードを、前記幾何学的グラフから除去することと、

前記幾何学的グラフからの前記除去された前記葉ノードを接続する前記エッジを除去することと、

10

20

30

40

50

を更に含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

車両を駐車空間内に駐車する方法であって、前記方法は、前記車両のジオメトリ、前記駐車空間のマップ、前記車両の運動学的モデル、及び前記車両の動的モデルを記憶するメモリに結合されたプロセッサを使用し、前記プロセッサは、前記方法を実施する記憶命令に結合され、前記記憶命令は、前記プロセッサによって実行されると、前記方法の少なくともいくつかのステップを実行し、前記少なくともいくつかのステップは、

前記車両のジオメトリ及び前記駐車空間のマップを用いて、前記車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、前記車両の位置及び方位を規定することと、

前記車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、前記幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、前記車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、前記車両の運動学的特性に従って前記2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

前記運動学的グラフから、前記車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、前記車両の目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

前記車両の動的モデルを用いて、前記運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

前記基準軌道に従って前記車両の運動を制御することと、
を含み、

前記運動学的グラフを前記求めることは、

前記通過点のセットに近接する前記駐車空間をサンプリングして、サンプリングされた状態を生成することと、

前記サンプリングされた状態を、ツリーを更新するために、前記運動学的エッジが衝突を伴わないものである場合に前記運動学的エッジを用いて少なくとも1つの通過点から開始する少なくとも1つのツリーと接続することと、

終了条件が満たされるまで前記サンプリングすること及び前記接続することを繰り返すことと、

を含み、前記終了条件は、前記接続された幾何学的グラフの前記形成、前記運動学的グラフ上で前記初期ノードと前記目標ノードとを接続する経路の数が閾値を超えること、近傍の通過点のツリーに接続するノードの数、のうちの1つ又は組み合わせを含む、方法。

【請求項 8】

前記サンプリングすることは、前記通過点の状態の関数として平均及び共分散を有する前記駐車空間の状態の確率分布を用いてバイアスして実行される、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記通過点のセット $X_0, \dots, X_M$ から2つの隣接した通過点 X_i, X_{i+1} を選択することと、

サブグラフ SG_i を、衝突を伴わないノード及び運動学的エッジのセットを通じて前記通過点 X_{i+1} に接続するサブグラフ SG_{i+1} を形成することであって、 SG_i は、2つの隣接した通過点 X_{i-1}, X_i についての先行する反復中に求められた前記サブグラフであることと、

$0 \leq i \leq M-1$ について前記選択すること及び前記形成することを繰り返すことと、
を更に含む、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

初期ツリー及び目標ツリーを用いて前記サブグラフを初期化することであって、前記初期ツリーは、幾何学的通過点 $\{X_0, \dots, X_i\}$ に対応するノードを含む前記サブグラフ SG_i を含み、前記目標ツリーは、前記通過点 X_{i+1} に対応する前記ノードを含む

10

20

30

40

50

ことと、

通過点 X_i 、 X_{i+1} に近接する前記車両の運動学的モデルの状態空間から新たな状態 X をバイアスしてサンプリングすることと、

前記車両が前記新たな状態から前記初期ツリー及び前記目標ツリーにおける状態への衝突を伴わない運動学的経路を辿ることができる場合、前記初期ツリー及び前記目標ツリーのうちの少なくとも一方に前記新たな状態 X を追加することと、

前記新たな状態 X が前記初期ツリー及び前記目標ツリーの双方に追加されるまで、前記サンプリングすること及び前記追加することを繰り返すことと、
を更に含む、請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

前記通過点 X_i 、 X_{i+1} と、前記車両及び前記駐車空間のジオメトリとに従って、確率分布関数 $P(X | X_i, X_{i+1})$ を構築することと、

前記確率分布関数 $P(X | X_i, X_{i+1})$ に従って前記状態空間から前記新たな状態 X をサンプリングすることと、

前記サンプリングされた状態が衝突を伴わないものになるまで前記サンプリングすることを繰り返すことと、

を更に含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

車両を駐車空間内に駐車する方法であって、前記方法は、前記車両のジオメトリ、前記駐車空間のマップ、前記車両の運動学的モデル、及び前記車両の動的モデルを記憶するメモリに結合されたプロセッサを使用し、前記プロセッサは、前記方法を実施する記憶命令に結合され、前記記憶命令は、前記プロセッサによって実行されると、前記方法の少なくともいくつかのステップを実行し、前記少なくともいくつかのステップは、

前記車両のジオメトリ及び前記駐車空間のマップを用いて、前記車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、前記車両の位置及び方位を規定することと、

前記車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、前記幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、前記車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、前記車両の運動学的特性に従って前記2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

前記運動学的グラフから、前記車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、前記車両の目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

前記車両の動的モデルを用いて、前記運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

前記基準軌道に従って前記車両の運動を制御することと、

を含む、

前記運動学的グラフの各ノードの最適コストを求めることであって、ノードの前記最適コストは、前記車両を、前記ノードから前記運動学的グラフのエッジを通じて前記目標ノードに運動させる最良推定コストを表すことと、

方策反復によって、運動学的通過点と前記初期状態を前記目標状態と接続する関連付けられたエッジとのセットによって表される初期運動学的経路を求めることと、

を更に含む、方法。

【請求項 13】

現在状態 X_c を第1の運動学的通過点の初期状態 X_0 として含むように前記初期運動学的経路 P_0 を初期化することと、

次の状態と前記現在状態との間のエッジ $E(X_c, X_n)$ が前記現在状態から前記目標状態への最小コストを生成するように、前記現在状態の前記次の状態 X_n を求めることと、

、

10

20

30

40

50

前記次の状態 X_n 及び前記エッジ $E(X_c, X_n)$ を、前記初期運動学的経路 $P_0 = \{P_0, X_n, E(X_c, X_n)\}$ に追加することと、

前記次の状態が前記目標状態になるまで、前記求めること及び前記追加することを繰り返すことと、

を更に含む、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記運動学的経路において後続する通過点に到達するのに不必要な中間通過点を除去することによって前記運動学的経路を平滑化すること、

を更に含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 15】

車両を駐車空間内に駐車するシステムであって、

前記車両のジオメトリ、前記駐車空間のマップ、前記車両の運動学的モデル、及び前記車両の動的モデルを記憶するメモリと、

前記駐車空間の少なくとも一部のジオメトリを示す情報を検知するように動作するセンサーと、

前記メモリに結合されたプロセッサであって、

前記車両のジオメトリ及び前記駐車空間のマップを用いて、前記車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、前記車両の位置及び方位を規定することと、

前記車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する、前記通過点のセットに対応するシードのセットから成長した運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、前記幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、前記車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、前記車両の運動学的特性に従って前記2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

前記運動学的グラフから、前記車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、前記車両の前記目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

前記車両の動的モデルを用いて、前記運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

を行うように構成された、プロセッサと、

前記基準軌道に従って前記車両の運動を制御するコントローラーと、

を備え、

前記プロセッサは、

前記駐車空間の状態空間内の点をサンプリングして、サンプリングされた状態を生成することであって、前記サンプリングすることは、前記通過点の前記状態の関数として平均及び共分散を有する前記駐車空間の状態の確率分布を用いてバイアスして実行されることと、

幾何学的グラフのノードの全ての状態が前記サンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合、前記サンプリングされた状態を拒絶することと、

そうではない場合、

前記サンプリングされた状態に最も近い状態を有する前記幾何学的グラフの最近傍のノードを求めることと、

前記サンプリングされた状態のノードを前記幾何学的グラフに追加すること、及び前記追加されたノードを、エッジが衝突を伴わない場合に前記エッジを介して前記最近傍のノードと接続することと、

前記サンプリングすること、前記拒絶すること、前記求めること、及び前記追加することを、前記初期ノードが前記目標ノードに接続されるまで繰り返すことと、
を行うように構成される、システム。

【請求項 16】

10

20

30

40

50

前記プロセッサは、前記初期ノードを、衝突を伴わないノードのセットを通じて前記目標ノードと接続する幾何学的グラフを構築することであって、前記幾何学的グラフにおけるノードの各対は、前記車両及び前記駐車空間のジオメトリのみを用いて求められた衝突を伴わないエッジで接続されることと、前記幾何学的経路の前記通過点のセットを形成する前記幾何学的グラフからノードのセットを選択することによって前記幾何学的経路を求める、請求項 15 に記載のシステム。

【請求項 17】

請求項 1 から 14 のいずれか 1 項に記載の方法を前記プロセッサによって実行させるためのプログラムが格納された非一時的コンピューター可読記憶媒体。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、包括的には、車両の経路計画に関し、より詳細には、車両を目標空間に自動的に駐車する経路計画方法に関する。

【背景技術】

【0002】

自律車両又は自律走行モードを実行する車両のいずれかの車両によって利用されるいくつかの制御システムは、他の車両又は歩行者等の障害物を回避するためのみではなく、車両の操作に関連付けられたいくつかの基準を最適化するためも含む双方で、未来を予測し、車両の安全運動又は経路を予測する。目標状態は、固定ロケーション、移動ロケーション、速度ベクトル、領域、又はそれらの組み合わせのいずれかとすることができる。道路縁、歩行者、及び他の車両等の周囲環境は、車両のセンサーによって検知される、及び／又は、事前に与えられた情報によって少なくとも部分的に既知である。

20

【0003】

自律運転モードにおいて実行される自律車両又は半自律車両を制御するタスクのうちの 1 つは、車両を、本明細書において目標状態と称される駐車位置及び駐車方位に自動的に駐車することである。駐車タスクは、以下のように定式化することができる。車両動態、駐車空間のマップ、車両の開始位置及び開始方位を表す初期状態、並びに車両の目標駐車位置及び目標駐車方位を表す目標状態が与えられると、車両の初期状態から目標状態への所望の経路又は運動を求め、次いで、車両のアクチュエーター、例えば車両のガスペダル及びハンドルを制御して、車両が所望の経路又は運動を辿ることを確実にする。しかしながら、車両の運動についての非ホロノミック制約及び駐車施設又は駐車場等の駐車空間における一般的に狭小な自由空間に起因して、車両を自動的に駐車する経路計画は、困難を有する。

30

【0004】

大半の既存の経路計画解決法は、特定の駐車シナリオに対処するか、又は駐車空間の特定のジオメトリを想定するのみである。例えば、特許文献 1 に記載の方法は、縦列駐車及び後方駐車を経路を計算する。特許文献 2 に記載の方法は、駐車経路の特別の構造を想定し、障害物を無視し、駐車空間の特定のジオメトリに基づいて経路を計算する。また、特許文献 3 に記載の方法は、縦列駐車に対処し、車両の初期状態が、事前にコード化された縦列駐車操作が開始されるいわゆる実現可能開始領域内にあることを必要とする。上述の方法は、リアルタイム経路生成を達成するが、多かれ少なかれ、障害物のタイプ、駐車空間のジオメトリ、及び駐車タスクを制限しており、全般的な駐車シナリオを考慮することができない。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】 米国特許第 7 7 3 7 8 6 6 号

【特許文献 2】 米国特許第 8 4 9 7 7 8 2 号

【特許文献 3】 米国特許第 8 8 6 2 3 2 1 号

50

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

したがって、実生活における多様な駐車シナリオに適した、車両を目標空間に自動的に駐車するシステム及び方法が必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【0007】

いくつかの実施形態の目的は、車両の自動化駐車システム及び方法のためのリアルタイム経路生成を可能にする経路計画方法を開示することである。いくつかの実施形態の別の目的は、実生活の狭小な駐車空間における多様な駐車シナリオについての自動駐車の実例によって引き起こされる経路計画の計算コストを低減するような方法を提供することである。

10

【0008】

いくつかの実施形態は、任意のレイアウトを有する駐車空間を通じて所望の経路を発見するのに、サンプリングに基づく経路計画方法を用いることができるという理解に基づいている。一方で、いくつかの実施形態は、高速探索ランダムツリー（RRT: rapid-exploring random tree）方法及びその変形等のサンプリングに基づく経路計画方法を、自動化駐車問題に適用する結果として、このタスクを計算上非実用的にする複数の無駄な計算がもたらされる可能性があるという認識に基づいている。一般的な駐車シナリオにおいて、駐車スポットは、車両の初期位置、例えば現在位置から比較的離れて位置する。加えて、駐車施設又は駐車場の空間等の駐車空間の狭小な自由空間及び複雑なマップに起因して、駐車スポットへの経路は、異なる形式及び形状を有する可能性がある。そのために、そのような経路を発見する目的で、経路の実現可能性について、駐車空間全体をサンプリングしてテストする必要があると得る。結果として、サンプリングに基づく経路計画方法の単純な適用により、全ての未探索状態空間が不必要にサンプリングされ、リアルタイム駐車応用の非実用的な解がもたらされる可能性がある。

20

【0009】

いくつかの実施形態は、駐車問題を、少なくとも2つのステージを用いて解くことができるという認識に基づいている。第1のステージにおいて、車両の初期状態を目標状態と接続する運動学的経路（kinematic path）が構築される。第2のステージにおいて、この運動学的経路を辿る実際の軌道が求められる。運動学的経路は、車両の動的モデルよりも単純である運動学的モデルを用いて構築することができるので、このような手法は有利である。

30

【0010】

2ステージ問題分割により、当初の駐車問題を以下のものに再定式化することができる。車両のジオメトリ、駐車空間のマップ、及び車両の運動学的モデルが与えられると、本明細書において運動学的経路と称される、初期状態を目標状態に接続する、実現可能でありかつ衝突を伴わない（collision free）経路を発見する。運動学的な実現可能性は、運動学的経路が初期状態をその初期値とする車両運動学の解であり、したがって、この運動学的経路を、車両が初期状態から開始して辿ることができることを確実にする。衝突を伴わないという特性は、車両が、運動学的経路に沿って運動する間、駐車空間において障害物と衝突しないことを保証する。

40

【0011】

運動学的モデルが通常、車両の動的モデルよりも単純であるにもかかわらず、運動学的経路の運動学的実現可能性について駐車空間全体をサンプリングしてテストする必要がある場合、自動化駐車問題の解は、依然として計算上非実用的である可能性がある。高速道路を走行する車両についての経路計画と比較して、車両の自動化駐車システムの経路計画は、固有の特性を有する。すなわち、環境内の衝突を伴わない空間は、通常、非常に狭小であり、サンプリングに基づく方法が遥かに低速で駐車空間を探索することが必要とされる。結果として、衝突を伴わない空間を通じて2つの状態を接続する運動学的経路を構築

50

することは、より困難である。

【0012】

加えて、いくつかの実施形態は、駐車空間全体のサンプリング問題を、計画の部分問題のセットに分割することができるという全体的な理解に基づいている。例えば、初期状態及び目標状態の双方からの運動学的グラフの構築を開始すること、及び／又は、駐車空間を部分空間のセットに分割することが可能である。一方で、ランダム分割は、計算効率を高めない場合があり、断片的な及び／又は実現不可能な運動学的経路をもたらす場合がある。

【0013】

いくつかの実施形態は、各部分問題の解を接続して、初期状態と目標状態とを接続する実現可能な運動学的経路を求めることができるように、駐車空間問題のサンプリングを部分問題のセットに分割する必要があるという認識に基づいている。加えて、部分問題のセットへの分割は、駐車空間の分割状態をサンプリングする方法についての指針を提供すべきである。これは、一般的なサンプリング問題において、サンプリングされた状態は、初期状態と目標状態との間の比較的大きな距離に起因して、駐車空間において構築される運動学的ツリーの近くにあり、このツリーに追加される確率が低いためである。この低い確率は、運動学的ツリーへの近接性を求めるために行われる計算が無駄になる可能性の方が高いことを意味する。近接性の検出における計算の無駄を回避するために、サンプリングされた状態は、双方のツリーから離れているものの、運動学的ツリーの近傍として扱うことができる。一方で、そのように扱うことで、衝突検出ステージにおいて無駄な計算が増加する。これは、距離のあるサンプリングされた状態を、運動学的ツリーへの近傍として扱う場合、サンプリングされた状態と運動学的ツリーとの間の衝突を伴わない接続を有する確率が低いためである。低確率イベントを検出するのに適用されるいずれの計算も、無駄になる可能性が最も高く、したがって、低計算効率を招く。

【0014】

いくつかの実施形態は、車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路 (geometric path) を用いて、運動学的経路を構築するためにサンプリング問題を部分問題のセットに分割することができ、それにより、サンプリングの計算効率を高めるとともに実現可能な運動学的経路を提供することができるという理解に基づいている。

【0015】

幾何学的経路は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップのみを用いて、すなわち、車両の運動学的モデル又は動的モデルを考慮することなく構築することができる。このようにして、幾何学的経路の計算が単純化される。幾何学的経路の衝突を伴わないという特性は、衝突を伴わない運動学的経路を幾何学的経路から開始して構築することができる可能性を高める。加えて、各通過点が車両の位置及び方位を規定する通過点の対は、サンプリング問題の有利な分割を提供する。

【0016】

具体的には、車両の運動学的モデルを用いて、近傍の通過点の各対を接続する運動学的サブグラフのセットを求めて運動学的グラフを形成することができる。例えば、1つの実施形態において、2つの隣接した通過点が、例えば、一本の線の直線線分又は異なる幾何学的形状を用いて接続される。そのような場合、各部分問題は、「2つの隣接した通過点を接続する運動学的経路を発見する」こととして定式化することができる。全ての部分問題を解くことができる場合、初期状態は、運動学的経路を通じて目標状態に接続することができる。これは、当初の経路計画問題が解かれることを更に暗示する。

【0017】

とりわけ、近傍の通過点は、通常、互いの方が車両の初期状態及び目標状態よりも近くにあるので、駐車空間のバイアスサンプリングを用いて各運動学的サブグラフを構築することができる。そのために、状態の各新たなサンプルは、運動学的サブツリーのうちの1つに追加される可能性の方が高く、したがって、計算の無駄を低減する。

【0018】

1つの実施形態において、部分問題は、逐次的に解かれる。例えば、部分問題1は、「初期ノードと第2の通過点に対応するノードとを接続する運動学的サブグラフ SG_1 を発見する」こととして構築され、部分問題2は、「運動学的サブグラフ SG_1 を第3の通過点と接続する運動学的サブグラフ SG_2 を発見する」こととして構築され、最終的に、最後の部分問題は、「最後から1つ前の運動学的サブグラフを最後の通過点と接続する運動学的グラフを発見する」こととして構築される。別の実施形態において、部分問題は並列的に解かれ、したがって、計算速度を桁違いに高速化する。並列的に解かれる部分問題は、逐次的に解かれる部分問題と異なるものとして行うことができる。

【0019】

10

1つの実施形態は、バイアスされたサンプリングを用いて、運動学的グラフを構築するために状態サンプリングを導く。付加的又は代替的に、1つの実施形態は、近似的な到達可能セットをサンプリングステップに用いて、サンプリングされた状態の品質を改善する。近似的な到達可能セットを考慮に入れることによって、接続するのが困難であるか又はコストがかかるサンプリングされた状態は、拒絶される。この処理は、非効率なサンプルに起因した衝突検出における計算時間の無駄を低減することができ、また、運動学的グラフの高速な構築を可能にする通過点のセットを提供することができる。

【0020】

したがって、1つの実施形態は、車両を駐車空間内に駐車する方法であって、方法は、車両のジオメトリ、駐車空間のマップ、車両の運動学的モデル、及び車両の動的モデルを記憶するメモリに結合されたプロセッサを使用し、プロセッサは、方法を実施する記憶命令に結合され、記憶命令は、プロセッサによって実行されると、方法の少なくともいくつかのステップを実行し、少なくともいくつかのステップは、

20

車両のジオメトリ及び駐車空間のマップを用いて、車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、車両の位置及び方位を規定することと、

車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、車両の運動学的特性に従って2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

30

運動学的グラフから、車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、車両の目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

車両の動的モデルを用いて、運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

基準軌道に従って車両の運動を制御することと、
を含み、

幾何学的経路を求めることは、

初期ノードを、衝突を伴わないノードのセットを通じて目標ノードと接続する幾何学的グラフを構築することであって、幾何学的グラフにおけるノードの各対は、車両及び駐車空間のジオメトリのみを用いて求められた衝突を伴わないエッジで接続されることと、

40

幾何学的経路の通過点のセットを形成する幾何学的グラフからノードのセットを選択することと、

を含み、

駐車空間の状態空間内の点をサンプリングして、サンプリングされた状態を生成することと、

幾何学的グラフのノードの全ての状態がサンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合、サンプリングされた状態を拒絶することと、

そうではない場合、

50

サンプリングされた状態に最も近い状態を有する幾何学的グラフの最近傍のノードを求めることと、

サンプリングされた状態のノードを幾何学的グラフに追加すること、及び追加されたノードを、エッジが衝突を伴わない場合にエッジを介して最近傍のノードと接続することと

ン
サンプリングすること、拒絶すること、求めること、及び追加することを、初期ノードが目標ノードに接続されるまで繰り返すことと、

を更に含む、方法を開示する。

【0021】

別の実施形態は、車両を駐車空間内に駐車するシステムであって、

車両のジオメトリ、駐車空間のマップ、車両の運動学的モデル、及び車両の動的モデルを記憶するメモリと、

メモリに結合されたプロセッサであって、

車両のジオメトリ及び駐車空間のマップを用いて、車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を求めることであって、各通過点は、車両の位置及び方位を規定することと、

車両の運動学的モデルを用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求めることであって、各運動学的サブグラフは、幾何学的経路の近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、車両の運動学的特性に従って2つのノードを接続する衝突を伴わない運動学的経路を規定することと、

運動学的グラフから、車両の初期状態に対応する初期ノードを、中間ノードのセットを通じて、車両の目標状態に対応する目標ノードと接続する運動学的経路を選択することと、

車両の動的モデルを用いて、運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求めることと、

を行うように構成された、プロセッサと、

基準軌道に従って車両の運動を制御するコントローラーと、

を備え、

プロセッサは、

駐車空間の状態空間内の点をサンプリングして、サンプリングされた状態を生成することであって、サンプリングすることは、通過点の状態の関数として平均及び共分散を有する駐車空間の状態の確率分布を用いてバイアスして実行されることと、

幾何学的グラフのノードの全ての状態がサンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合、サンプリングされた状態を拒絶することと、

そうではない場合、

サンプリングされた状態に最も近い状態を有する幾何学的グラフの最近傍のノードを求めることと、

サンプリングされた状態のノードを幾何学的グラフに追加すること、及び追加されたノードを、エッジが衝突を伴わない場合にエッジを介して最近傍のノードと接続することと

ン
サンプリングすること、拒絶すること、求めること、及び追加することを、初期ノードが目標ノードに接続されるまで繰り返すことと、

を行うように構成される、システムを開示する。

【0022】

更に別の実施形態は、方法をプロセッサによって実行させるためのプログラムが格納された非一時的コンピューター可読記憶媒体を開示する。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1A】いくつかの実施形態によって対処される駐車シナリオの一例の図である。

- 【図 1 B】いくつかの実施形態による、車両の幾何学的表現の一例示的な概略図である。
- 【図 1 C】図 1 A の駐車シナリオに対応する駐車空間のマップの概略図である。
- 【図 2 A】1 つの実施形態による自動化駐車システムの機能図である。
- 【図 2 B】1 つの実施形態による運動計画システムの全体構造の図である。
- 【図 3 A】いくつかの実施形態による運動計画のステージのブロック図である。
- 【図 3 B】いくつかの実施形態による、運動的経路 (k i n e t i c p a t h) の計画部分問題のセットへの分割決定の概略図である。
- 【図 4 A】いくつかの実施形態による、運動学的経路計画問題を部分問題のセットに分割することのブロック図である。
- 【図 4 B】いくつかの実施形態による、運動学的経路計画問題を部分問題のセットに分割する通過点のセットを有する、図 1 A の駐車シナリオの概略図である。 10
- 【図 4 C】いくつかの実施形態による、車両を駐車空間内に駐車する方法のブロック図である。
- 【図 4 D】1 つの実施形態による、運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットの一例の図である。
- 【図 5 A】いくつかの実施形態による、幾何学的経路を求める方法のフローチャートである。
- 【図 5 B】1 つの実施形態による、幾何学的グラフを構築することの概略図である。
- 【図 5 C】いくつかの実施形態による、車両の到達不可能エリアの例の概略図である。
- 【図 5 D】1 つの実施形態による、幾何学的グラフを構築する方法のフローチャートである。 20
- 【図 5 E】1 つの実施形態による、運動学的経路を選択する方法のブロック図である。
- 【図 6 A】1 つの実施形態による、通過点のセットによって規定される運動学的経路を用いて、計画問題を部分問題のセットに分割することのブロック図である。
- 【図 6 B】図 6 A の部分問題に対処するように構築された運動学的サブグラフの概略図である。
- 【図 6 C】図 6 A の部分問題に対処するように構築された運動学的サブグラフの概略図である。
- 【図 6 D】図 6 A の部分問題に対処するように構築された運動学的サブグラフの概略図である。 30
- 【図 7 A】1 つの実施形態による、部分問題を逐次的に解く方法のブロック図である。
- 【図 7 B】通過点のセットを用いて部分問題を定式化する代替的な一実施形態の概略図である。
- 【図 8】1 つの実施形態による、運動学的グラフを求める方法のブロック図である。
- 【図 9 A】1 つの実施形態による、部分問題を解く一例示的な方法のブロック図である。
- 【図 9 B】1 つの実施形態による、バイアスされたサンプリングの一実施形態様のブロック図である。
- 【図 9 C】1 つの実施形態による、バイアスされたサンプリングの方法のブロック図である。
- 【図 1 0】1 つの実施形態による、運動学的グラフから運動学的経路を選択する方法のブロック図である。 40
- 【図 1 1 A】1 つの実施形態による、初期運動学的経路を平滑化するフローチャートである。
- 【図 1 1 B】1 つの実施形態による、図 1 1 A のフローチャートの一ブロックによって実行される方法のフローチャートである。
- 【図 1 1 C】図 1 A に示す駐車シナリオの運動学的経路のプロットである。
- 【図 1 1 D】運動学的経路に沿った車両 1 0 0 の運動を示すプロットである。
- 【図 1 2】1 つの実施形態による、運動学的経路を更に処理して基準軌道を生成する方法のブロック図である。
- 【図 1 3】本発明の 1 つの実施形態によるシステムの概略図である。 50

【図 1 4】いくつかの実施形態による自動化駐車システムのブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0024】

図 1 A は、いくつかの実施形態によって対処される駐車シナリオの一例を示している。この例において、駐車空間 150 の境界は、 $L \times H$ のサイズを有する矩形によって表されている。車両 100 は、初期状態 101、例えば、現在状態を有し、目標状態 102 によって規定された駐車スポットに駐車される必要がある。各状態、例えば、初期状態及び目標状態は、車両の位置及び方位を規定する。駐車空間 150 は、障害物を含む。障害物は、駐車空間のレイアウトの一部、すなわち、駐車空間の壁及び／又は柱等の常設の (permanent) 障害物 103 とすることができる。常設の障害物の寸法は、通常既知である。図 1 A は、そのような寸法の非限定的な例を示している。

10

【0025】

付加的又は代替的に、障害物は、他の駐車中であるか又は運動している車両 104 を含むことができる。車両 104 及び駐車することになる車両 100 の幾何学的寸法は、車両のタイプに基づいて求めることができる。明確にするために、本開示は、前輪駆動車両を検討するが、異なる実施形態は、後輪駆動車両及び全輪駆動 (full wheel drive: 四輪駆動) 車両を含む他の車両に適用される。

【0026】

いくつかの実施形態において、駐車空間のレイアウト及び障害物 103 の位置は、駐車空間のマップ上で指定される。そのようなマップは、所定のものとすることもできるし、駐車中又は駐車前にリアルタイムで構築することもできる。種々の実施形態は、初期状態と目標状態とを接続する運動学的経路 105 が実現可能でありかつ衝突を伴わないものであるように、この運動学的経路を求める。

20

【0027】

図 1 B は、いくつかの実施形態による、車両の幾何学的表現の一例示的な概略図を示している。この例において、車両は、矩形 115 として抽象化されている。車両状態は、この車両の後輪軸の中点を表す位置 (x, y) 110、及び、車体軸と水平軸との間の角度を示す方位 θ 120 を含む。

【0028】

車両が経路に沿って運動する速度を求める運動計画は、車両 100 の動的モデルを用いる。本明細書において用いられる場合、車両の動的モデルは、車両の状態における時間依存変化を説明する。動的モデルは、通常、微分方程式によって表される。1 つの実施形態において、車両の動的モデルは、5 次の微分方程式

30

【数 1】

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \cos(\theta)\cos(\zeta)v \\ \dot{y} &= \sin(\theta)\cos(\zeta)v \\ \dot{\theta} &= \sin(\zeta)\frac{v}{l} \\ \dot{v} &= a_1 \\ \dot{\zeta} &= a_2,\end{aligned}\tag{1}$$

40

であり、ここで、 v は、前輪の速度であり、 ζ は、前輪と車両方位との間の角度であり、 a_1 は、並進加速度であり、 a_2 は、操舵角速度であり、 l は、(x, y) と前輪同士の中点との間の距離である。

【0029】

経路計画のために、いくつかの実施形態は、車両の質量又は運動を引き起こす力を考慮しない車両の運動を記述する車両の運動学的モデルを用いる。

【0030】

1 つの実施形態において、以下の運動学的モデルが考慮される。

【数 2】

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \cos(\theta)u_1 \\ \dot{y} &= \sin(\theta)u_1 \\ \dot{\theta} &= u_2,\end{aligned}\tag{2}$$

ここで、 $u_1 = \cos(\zeta)v$ は、後輪軸の中点の速度であり、 $u_2 = \tan(\zeta)u_1 / l$ である。

【0031】

或る経路が運動学的モデル(2)の解である場合、その経路は運動学的に実現可能である。車両状態 $X = (x, y, \theta)$ は、位置 X に配置される車両がいかなる障害物とも衝突せず、かつ駐車空間の境界の内側に完全に収まる場合にのみ、衝突を伴わないものである。初期状態 101 は、 $X_0 = (x_0, y_0, \theta_0)$ として略式表現され (abbreviated)、目標状態 102 は、 $X_f = (x_f, y_f, \theta_f)$ によって示される。矩形 $L \times H$ によって表される駐車空間での特定の駐車タスクについて、車両状態は、状態空間

10

【数 3】

$$\mathcal{X}: [0, L) \times [0, H) \times [0, 2\pi)$$

に常に属する。

【0032】

いくつかの実施形態は、車両状態が衝突を伴わないものであるか否かを、駐車空間のマップとも称される、駐車空間の幾何学的表現に基づいて判断する。1つの実施形態において、駐車空間のマップは、全ての障害物及び駐車空間の境界を単純な幾何学的形状として近似することによって導出される。1つの実施形態において、環境(駐車空間と同等)内の障害物 103 は、障害物ごとに最小バウンディングボックスを構築することによって導出される矩形として近似することができる。障害物及び駐車空間の境界の幾何学的近似を用いて、駐車空間又は環境を、幾何学的オブジェクトのリストによって完全に記述することができる。

20

【0033】

図 1C は、図 1A の駐車シナリオに対応する駐車空間のマップ 130 を示している。双方のタイプの障害物が、矩形表現を用いて 1つのタイプの常設障害物 103 としてともに統合される。障害物は、経路計画のために、搭載プロセッサの計算能力 (computing power) に依拠して、複数の幾何学的形状によって近似することができる。例えば、別の実施形態において、計算能力が十分ではない場合、障害物は、障害物ごとにバウンディングサークルを構築することによって近似することができる。代替的に、障害物は、ポリトープによって近似することができるが、これにより、経路計画における計算負荷を高める場合がある。また、駐車空間内の障害物は、同一の幾何学的形状によって近似されない場合もある。

30

【0034】

図 2A は、1つの実施形態による自動化駐車システムの機能図を示している。環境マッピング及びローカライゼーションブロック 201 は、駐車空間のマップを構築又は更新し、環境及び車両動作状態 (vehicle operation condition) を検知することによって車両の現在ロケーションを求める。例えば、車両動作を検知するのに、3軸加速度計(複数の場合もある)、3軸ジャイロ스코プ(複数の場合もある)、及び/又は磁力計(複数の場合もある)を備えることができる慣性測定ユニットを用いることができる。車両の位置及び速度を提供するのに全地球測位システムセンサーを用いることができる。環境 200 を検知するセンサーは、他の車両、歩行者、及び建物を含む障害物を捕捉するビデオカメラ、車両と障害物との間の距離を検出する超音波/レーダーセンサー、等とすることができる。1つの実施形態において、環境マップは、図 1C に示す駐車空間の幾何学的表現を生成するために更に処理される。

40

【0035】

50

目標状態選択ブロック202は、車両を駐車する駐車スポットのための目標状態を、駐車場候補を識別することによって選択し、この目標状態を運動計画ブロック203に送信する。1つの実施形態において、利用可能な駐車スポットは、駐車施設の管理に関連付けられた別個のシステムによって追跡される。付加的又は代替的に、駐車スポットは、自動化駐車システムのセンサー230を用いて検出することができる。1つの実施形態において、運動計画ブロックは、チェックを行って、目標状態が、駐車可能 (parkable)、すなわち、駐車スポットまでの実現可能経路があるか否かを判断し、目標状態選択ブロック202にチェック結果を通知する。目標状態が駐車可能でない場合、目標状態選択ブロック202は、評価のために別の目標状態を選択する。別の実施形態において、目標状態選択ブロック202は、目標状態が駐車可能であるか否かを評価し、駐車可能な目標状態のみを運動計画ブロックに送信することもできる。

10

【0036】

目標状態が駐車可能である場合、運動計画203は、全運動計画手順を開始し、車両モデル210、車両の初期状態及び目標状態、並びに駐車空間のマップに基づいて基準軌道241を求める。1つの実施形態において、基準軌道は、車両速度及び操舵角の経時的なプロファイルを規定する。別の実施形態において、基準軌道は、車両状態 (x , y , θ) の経時的なプロファイルを規定する。

【0037】

基準軌道241が与えられると、車両コントローラー及びアクチュエーター204は、制御コマンドを求めるとともに実行して、基準軌道が状態プロファイルである場合、車両状態が基準軌道241を追跡することを強制し、又は、基準軌道が車両速度プロファイル及び操舵角プロファイルである場合、車両速度及び操舵角が基準軌道を追跡することを強制する。1つの実施形態において、制御コマンドは、ガスペダル圧力又は操舵トルクとすることができる。車両コントローラー／アクチュエーターは、制御コマンドを求めるために信号243も用いることができる。信号243は、測定操舵角、又はハンドル若しくはガスペダルを動かすモーターの測定電流とすることができる。

20

【0038】

図2Bは、1つの実施形態による運動計画システム203の全体図を示している。運動計画システム203は、この運動計画システム203のモジュールを実行する少なくとも1つのプロセッサ270を備える。プロセッサ270は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップ等の幾何学的情報281を記憶するメモリ280に接続される(271)。メモリ280は、車両の運動学的モデル及び車両の動的モデル等の車両のモデル282も記憶することができる。メモリ280は、限定されるものではないが、車両の初期状態、駐車車両の目標状態、コスト関数、それぞれの計算された状態の値、各状態に至る運動、幾何学的グラフ、運動学的グラフ、通過点、基準軌道を含む、運動計画器の内部情報283も記憶することができる。いくつかの実施形態において、メモリ280は、自動化駐車の方法を実施する記憶命令を含むことができ、ここで、命令は、プロセッサ270によって実行されると、方法の少なくともいくつかのステップを実行する。

30

【0039】

いくつかの実施形態は、駐車問題を、少なくとも2つのステージを用いて解くことができるという認識に基づいている。第1のステージにおいて、車両の初期状態を目標状態と接続する運動学的経路が構築される。第2のステージにおいて、この運動学的経路を辿る実際の軌道が求められる。運動学的経路は、車両の動的モデルよりも単純である運動学的モデルを用いて構築することができるので、このような手法は有利である。

40

【0040】

図3Aは、いくつかの実施形態による運動計画203のステージのブロック図を示している。ブロック301は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップ130、車両の初期状態101及び目標状態102、並びに車両の運動学的モデル303に基づいて運動学的経路を求める。運動学的経路は、ブロック302において更に処理されて、車両の動的モデル304の解である基準軌道が生成される。

50

【0041】

このような問題分割により、当初の駐車問題を以下の問題に再定式化することができる。車両のジオメトリ、駐車空間のマップ、及び車両の運動学的モデルが与えられると、本明細書において運動学的経路と称される、初期状態を目標状態に接続する、実現可能でありかつ衝突を伴わない経路を発見する。運動学的な実現可能性は、運動学的経路が初期状態をその初期値とする車両運動学の解であり、したがって、この運動学的経路を、車両が初期状態で開始して辿ることができることを確実にする。衝突を伴わないという特性は、車両が、運動学的経路に沿って運動する間、駐車空間において障害物と衝突しないことを保証する。

【0042】

10

運動学的モデルが通常、車両の動的モデルよりも単純であるにもかかわらず、運動学的経路の運動学的実現可能性について駐車空間全体をサンプリングしてテストする必要がある場合、自動化駐車問題の解は、依然として計算上非実用的である可能性がある。高速道路を走行する車両についての経路計画と比較して、車両の自動化駐車システムの経路計画は、固有の特性を有する。すなわち、環境内の衝突を伴わない空間は、通常、非常に狭小であり、サンプリングに基づくアルゴリズムが遥かに低速で駐車空間を探索することが必要とされる。結果として、衝突を伴わない空間において2つの状態を接続する運動学的経路をリアルタイムで構築することは、より困難である。

【0043】

図3Bは、駐車空間全体の状態のサンプリングを介した運動学的経路301の、計画部分問題312のセットへの分割(311)決定の概略図を示している。運動学的経路313は、部分問題312の解の和集合から選択される。

20

【0044】

いくつかの実施形態は、各部分問題の解を接続して、初期状態と目標状態とを接続する実現可能な運動学的経路を求めることができるように、駐車空間問題のサンプリングを部分問題のセットに分割する必要があるという認識に基づいている。加えて、部分問題のセットへの分割は、分割された駐車空間をサンプリングする方法についての指針を提供するべきである。これは、一般的なサンプリング問題において、サンプリングされた状態は、初期状態と目標状態とが比較的離れている場合、駐車空間において構築される運動学的ツリーの近くにあり、このツリーに追加される確率が低いためである。この低い確率は、運動学的ツリーへの近接性を求めるために行われる計算が無駄になる可能性の方が高いことを意味する。近接性の検出における計算の無駄を回避するために、サンプリングされた状態は、双方のツリーから離れているものの、運動学的ツリーの近傍として扱うことができる。一方で、そのように扱うことで、必然的に、衝突検出においてより多くの計算の無駄がもたらされる。これは、双方のツリーから比較的離れていても運動学的ツリーに対する近傍として扱われるサンプリングされた状態について、このサンプリングされた状態と双方のツリーとの間の衝突を伴わない接続を有する確率は低いためである。低確率イベントを検出するのに適用されるいずれの計算も、無駄になる可能性が最も高く、したがって、低計算効率を招く。

30

【0045】

40

いくつかの実施形態は、車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する衝突を伴わない幾何学的経路を用いて、運動学的経路を構築するために、サンプリング問題を部分問題のセットに分割することができ、それにより、サンプリングの計算効率を高めるとともに実現可能な運動学的経路を提供することができるという理解に基づいている。

【0046】

図4Aは、運動学的経路計画問題を部分問題のセットに分割することのブロック図を示している。この分割することは、車両の初期状態及び目標状態及びジオメトリ、並びに駐車空間に基づいて通過点のセットを生成するブロック411に依拠している。各通過点は、中間目標(milestone)車両状態を規定する。通常、最初の通過点は初期状態

50

X_0 に対応し、最後の通過点は目標状態 X_f に対応する。また、通過点のセットは、以下の接続特性、すなわち、全ての通過点が衝突を伴わないエッジと接続されることを満たすものとし、ここで、エッジは、2つのノード（又は状態）間の幾何学的接続又は運動学的接続を表すことができる。1つの実施形態において、2つの任意の状態 X_1 、 X_2 が与えられると、これらの状態の間の幾何学的エッジは、直線とすることができ、これらの状態の間の運動学的エッジは、車両運動学（2）と、 $0 \leq t_1 \leq t_2 < \infty$ で範囲付けされた任意のものについて、境界条件 $X(t_1) = X_1$ 、 $X(t_2) = X_2$ とを満たす任意の実現可能な解とすることができる。

【0047】

例えば、通過点を介した幾何学的経路は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップのみを用いて、すなわち、車両の運動学的モデル又は動的モデルを考慮することなく構築することができる。このようにして、幾何学的経路の計算が単純化される。幾何学的経路の衝突を伴わないという特性は、衝突を伴わない運動学的経路を幾何学的経路の上に構築することができる可能性を高める。加えて、各通過点が車両の位置及び方位を規定する通過点の対は、サンプリング問題の有利な分割を提供する。

【0048】

図4Bは、運動学的経路計画問題を部分問題のセットに分割するのに用いられる通過点のセットを有する、図1Aの駐車シナリオの概略図を示している。通過点のセットは、車両状態 X_0 、 $\dots$ 、 X_5 を規定し、ここで、各通過点は、車両の位置及び方位を含む車両状態を規定する。通過点 X_0 及び X_5 は、それぞれ初期状態及び目標状態に対応する。例えば、状態 X_1 に対応する通過点は、車両の位置 420 及び方位 425 を規定する。同様に、状態 X_2 に対応する通過点は、車両の位置 430 及び方位 435 を規定する。これらの通過点は、衝突を伴わないものであり、衝突を伴わない幾何学的エッジ、例えば、直線 427 及び 437 と接続される。

【0049】

いくつかの実施形態は、車両の運動学的モデルを用いて、近傍の通過点の各対を接続する運動学的サブグラフのセットを求めて運動学的グラフを形成する。例えば、各部分問題は、「2つの隣接した通過点を接続する運動学的経路を発見する」こととして定式化することができる。全ての部分問題を解くことができる場合、初期状態は、運動学的経路を通じて目標状態に接続することができる。これは、当初の経路計画問題が解かれることを更に暗示する。

【0050】

図4Cは、車両を駐車空間内に駐車する方法のブロック図を示している。この方法は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップ 440 を記憶するメモリに結合されたプロセッサを用いる。メモリは、車両の運動学的モデル 303 及び車両の動的モデル 304 も記憶することができる。プロセッサは、方法を実施する記憶命令に結合され、ここで、命令は、プロセッサによって実行されると、方法の少なくともいくつかのステップを実行する。

【0051】

方法は、車両のジオメトリ及び駐車空間のマップ 440 を用いて、車両の初期状態を、通過点のセットを通じて駐車車両の目標状態と接続する、衝突を伴わない幾何学的経路 455 を求める（450）。各通過点は、例えば、図4Bに示すような車両の位置及び方位を規定する。方法は、車両の運動学的モデル 303 を用いて、運動学的エッジと接続された複数のノードを有する運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットを求める（460）。各運動学的サブグラフは、近傍の通過点の対を接続し、各ノードは、車両の状態を規定し、2つのノードを接続する各運動学的エッジは、車両の運動学的特性に従って2つのノードを接続する、衝突を伴わない運動学的経路を規定する。

【0052】

図4Dは、1つの実施形態による、運動学的グラフを形成する運動学的サブグラフのセットの一例を示している。この例において、運動学的グラフ 445 は、4つの運動学的サブグラフ 446、447、448、及び449によって形成される。例えば、サブグラフ

10

20

30

40

50

の各々は、反復的に、例えば、通過点のセットに対応するシードのセットから反復的に、成長させることができる。

【0053】

とりわけ、近傍の通過点は、通常、互いの方が車両の初期状態及び目標状態よりも近くにあるので、駐車空間のバイアスサンプリングを用いて各運動学的サブグラフを構築することができる。そのために、状態の各新たなサンプルは、運動学的サブツリーのうちの1つに追加される可能性の方が高く、したがって、計算の無駄を低減する。

【0054】

1つの実施形態において、部分問題は、逐次的に解かれる。例えば、部分問題1は、第1の通過点 X_0 に対応する初期ノードと第2の通過点 X_1 に対応するノードとを接続する運動学的サブグラフ SG_1 を発見することとして構築され、部分問題2は、運動学的サブグラフ SG_1 を第3の通過点 X_2 と接続する運動学的サブグラフ SG_2 を発見することとして構築され、以下同様であり、最終的に、最後の部分問題は、最後から1つ前の運動学的サブグラフ SG_{M-1} を、最後の通過点 X_M と接続する運動学的グラフを発見することとして構築される。別の実施形態において、部分問題は並列的に解かれ、したがって、計算速度を桁違いに高速化する。並列的に解かれる部分問題は、逐次的に解かれる部分問題とは異なるものとすることができる。

【0055】

図5Aは、いくつかの実施形態による、幾何学的経路を求める方法のフローチャートを示している。方法は、初期ノードを、衝突を伴わないノードのセットを通じて目標ノードと接続する幾何学的グラフ GG を構築する(501)。幾何学的グラフ内のノードの各対は、車両及び駐車空間のジオメトリのみを用いて求められる、衝突を伴わないエッジと接続される。幾何学的グラフは、幾何学的グラフ内のノード間のエッジが運動学的ではなく幾何学的であることを除いて運動学的グラフに類似している。幾何学的エッジを利用することにより、幾何学的グラフは、運動学的グラフよりも遥かに高速に構築することができる。次に、方法は、幾何学的経路の通過点のセットを形成する幾何学的グラフから、ノードのセットを選択する(502)。

【0056】

例えば、1つの実施形態において、幾何学的グラフは、車両及び駐車空間のジオメトリに従った衝突を伴わない接続のために、例えば一様に又はランダムに駐車空間の状態空間をサンプリングして、サンプリングされた近傍の状態間の接続をテストすることによって構築される。単一の衝突を伴わない接続を有しないサンプリングされた状態は剪定され、サンプル状態の残りが幾何学的グラフのノードを形成する。

【0057】

図5Bは、1つの実施形態による、幾何学的グラフを構築することの概略図を示している。この例において、幾何学的グラフは、初期状態101に対応する初期ノード511を有する初期幾何学的ツリー GT_i 521と、目標状態102に対応する目標ノード512を有する目標幾何学的ツリー GT_t 522とを用いて双方の端点から構築される。初期幾何学的ツリーは、ノードセット V_{GT_i} 及びエッジセット E_{GT_i} を有する。目標幾何学的ツリーは、ノードセット V_{GT_t} 及びエッジセット E_{GT_t} を有する。

【0058】

現在の反復中、 $X = (x, y, \theta)$ で示す状態510は、或る特定のサンプリングスキームに従ってサンプリングされ、衝突を伴わないものであることが検証されている。次に行われるのは、最近傍のノード、例えば、初期幾何学的ツリー上に位置するノード530を求めることである。初期ツリー521からの最近傍のノード530とサンプリングされた状態510との間の幾何学的エッジ535が衝突を伴わないものである場合、サンプリングされた状態510に対応する新たなノードが作成されて初期幾何学的ツリーのノードセットに追加されるとともに、エッジ535が初期幾何学的ツリーのエッジセットに追加される。

【0059】

10

20

30

40

50

サンプリングされた状態 510 について、目標幾何学的ツリーに同様の手順が適用される。すなわち、目標幾何学的ツリー 522 上に位置する最近傍のノード 540 が特定される。ノード 540 とサンプリングされた状態との間の幾何学的エッジ 545 が衝突を伴わないものである場合、サンプリングされた状態に対応する新たなノードが作成されて目標幾何学的ツリーのノードセットに追加されるとともに、エッジ 545 が目標幾何学的ツリーのエッジセットに追加される。エッジ 535 及び 545 の双方が衝突を伴わないものである場合、初期幾何学的ツリーと目標幾何学的ツリーとが接続され、その場合、初期ノードと目標ノードとが接続される。そのために、幾何学的グラフは、初期幾何学的ツリーと目標幾何学的ツリーとの和集合である。

【0060】

10

付加的又は代替的に、いくつかの実施形態は、到達可能性基準を用いてサンプリングを実行する。到達可能性基準に従って、状態空間内のサンプルは、このサンプルが既に構築されているグラフから到達可能である場合にのみ保存される。1つの実施形態において、到達可能性をテストするのに車両の動態の使用を回避するために、到達可能性は、到達不可能性 (non-reachability: 到達不可能範囲) の欠如として定義され、到達不可能性は、車両の側部付近の所定のエリアである。

【0061】

図 5C は、車両の位置及び方位を規定する状態 510 における、車両 100 の到達不可能エリア 553 及び 557 の例の概略図を示している。この例において、到達不可能エリアは、車両の車輪を最大限左又は右に向けた状態で、状態 510 において開始して所定の速度で運動する車両運動の円によって表される。以前にサンプリングされた状態 530 が到達不可能エリア 553 及び 557 内にある場合、状態 510 は、状態 530 のノードに接続されない。幾何学的グラフの全てのノードがサンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合、そのサンプリングされた状態は、拒絶される。

20

【0062】

図 5D は、1つの実施形態による、幾何学的グラフを構築する方法のフローチャートを示している。この実施形態において、サンプリングされた状態 X は、衝突を伴わないことがテストされることに加えて、通過点の品質を改善するために或る特定の運転可能性基準によって評価される。運転可能性基準は、運動学的グラフの構築において計算効率を改善することができる。

30

【0063】

方法は、駐車場の状態空間内の点をサンプリングして (550)、サンプリングされた状態を生成する。幾何学的グラフのノードに対応する全ての状態がサンプリングされた状態の到達不可能エリア内にある場合 (560)、サンプリングされた状態は拒絶される (555)。そうではない場合、方法は、サンプリングされた状態に最も近い状態を有する幾何学的グラフの最近傍のノードを求め (570)、サンプリングされた状態のノードを幾何学的グラフに追加して、この追加されたノードを、エッジが衝突を伴わない場合にこのエッジを介して最近傍のノードに接続する (580)。

【0064】

方法は、サンプリングすること、拒絶すること、求めること、及び追加することを、初期ノードが目標ノードに接続されるまで繰り返す。例えば、1つの実施形態において、幾何学的グラフの構築は、初期幾何学的ツリーと目標幾何学的ツリーとが接続されている限り、停止される。別の実施形態において、幾何学的グラフの構築は、或る特定の数のサンプリングされた状態が初期幾何学的ツリーと目標幾何学的ツリーとの双方に追加されるまで、停止される。

40

【0065】

幾何学的グラフは、初期ノードが目標ノードと接続されるような、ノード間の幾何学的接続を表すノード及びエッジを含む。幾何学的グラフが与えられると、初期状態から目標状態への多くの幾何学的経路が存在し得る。或る特定のコスト関数を低減する幾何学的グラフからの幾何学的経路を選択することが有利である。例えば、1つの実施形態は、2つ

50

のステップ、すなわち、a) ノードごとにコストを求めるステップであって、ここで、ノードコストは、そのノードによって指定される状態から目標状態への最小コストを表す、ステップと、b) 初期ノードから開始し、ノードコストに従ってノードのセットを選択するステップであって、ここで、初期ノードのコストは、車両がノードのセットを通過する場合にのみ最小に達する、ステップとを実行することによって幾何学的経路を選択する。

【0066】

ノードコストは、エッジのコストによって求められる。それぞれ車両状態 X_i 、 X_j に対応する2つのノード N_i 、 N_j を所与とし、 N_i 及び N_j がエッジ $E_{i,j}$ によって接続されると仮定する。エッジ $E_{i,j}$ のコストは、ベクトルノルム：

【数4】

$$c(E_{i,j}) = \sqrt{(X_i - X_j)^T Q (X_i - X_j)}$$

と定義され、ここで、 Q は、正定値行列である。この場合、 Q は1であり、エッジコストは、ユークリッドベクトルノルムに還元される。幾何学的グラフの構築中に、上記のように全てのエッジのコストが計算される。任意のノード N_i について、そのコストは、 $V(N_i)$ によって示され、以下の価値反復を実行することによって得ることができる。

【数5】

$$V^k(N_i) = \min_{j \in I} \{V^{k-1}(N_j) + c(E_{i,j})\}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

ここで、 I は、ノード N_i に接続されるノードのインデックスセットであり、 $V^k(N_i)$ は、第 k の価値反復におけるノードコスト $V(N_i)$ の値である。幾何学的グラフの1度の価値反復は、固定の k についての全てのノードについて価値反復(3)を実行することを意味する。価値反復は、ノードコストの初期推測を要求し、これは、 $k=0$ におけるノードコストである。

【0067】

1つの実施形態において、全てのノードについて $V^0(N_i) = 0$ である。 $k \rightarrow \infty$ の場合、 $V^k(N_i)$ は、ノード N_i の最小コストに収束し、したがって、ノードの最小コストは、価値反復によって得ることができることが確立されている。価値反復は、反復的に行われ、この反復は、実用上、或る特定の基準に従って停止されなければならない。1つの実施形態において、反復は、 k が事前設定された大きな正の数に達すると停止する。別の実施形態において、反復は、全てのノードについて $|V^k(N_i) - V^{k-1}(N_i)|$ が或る閾値未満になると停止する。

【0068】

価値反復からもたらされるノード N_i の最小コストを $V(N_i)$ と表すものとする。最良の幾何学的経路を表すノードのセットは、方策反復を実行することによって求められる。すなわち、 N_i が最良の幾何学的経路のうちの1つのノードであると仮定すると、 N_i の次のノードは、

【数6】

$$N_{\text{next}} = \operatorname{argmin}_{N_j \in I} \{V(N_j) + c(E_{i,j})\}.$$

を解くことによって求められる。

【0069】

一例として、図5Eにおいて、初期状態に対応する初期ノードから開始するとともに目標ノードにおいて停止する方策反復を、幾何学的グラフに適用することにより、緑色の線によって表される最良の幾何学的経路、及び車両状態 X_0 、 X_1 、 $\dots$ 、 X_5 に対応するノードのセットが与えられる。

【0070】

別の実施形態において、最良の幾何学的経路は、3つのステップ、すなわち、a) 初期ノード及び目標ノードを除く全ての葉ノードを除去することによって幾何学的グラフをト

10

20

30

40

50

リミングするステップであって、ここで、葉ノードは1つのみの近傍のノードを有する、ステップと、b) トリミング後に幾何学的グラフにわたって価値反復を実行することによって各ノードの最小コストを求めるステップと、c) トリミング後に初期ノードから開始して、幾何学的グラフに従ってノードのセットを選択するステップとによって求められる。この実施形態は、最良の幾何学的経路がいずれの葉ノードも含まず、したがって、トリミング後に幾何学的グラフにわたって価値反復を実行することにより、全ての非葉ノードの同じ最小コストが与えられるという理解に基づいている。この実施形態は、ノードの最小コスト、及び最良の幾何学的経路を求める計算負荷を大幅に低減することができる。最良の幾何学的グラフを規定するノードのセットから通過点のセットを抽出することができる。

10

【0071】

図5Eは、1つの実施形態による、幾何学的経路455を選択する方法のブロック図を示している。方法は、幾何学的グラフの初期ノード及び各非葉ノードについて、目標ノードに到達する最小コストを求め(591)、初期ノードを、初期ノードについて求められた最小コストを有する目標ノードと接続するノードのセットを選択して(593)幾何学的経路の通過点のセットを形成する。例えば、ノードのコストを求める前に、方法は、初期ノード及び目標ノードを除く葉ノードを幾何学的グラフから除去するとともに、除去された葉ノードを接続するエッジを幾何学的グラフから除去することができる。

【0072】

図6Aは、1つの実施形態による、通過点のセットによって規定される幾何学的経路455を用いて、計画問題を部分問題のセットに分割することのブロック図を示している。図6B、図6C、及び図6Dは、図6Aの部分問題のセットに対処するように構築された運動学的サブグラフのセットを示している。例えば、第1の部分問題601は、 X_0 と X_1 とを接続する、すなわち、初期状態を、第2の通過点と接続する第1の運動学的サブグラフ SG_1 を構築することと定義される。図6Bは、運動学的サブグラフ SG_1 が X_0 と X_1 とを運動学的に接続するように構築されることを示している。

20

【0073】

第2の部分問題602は、第1の運動学的サブグラフ SG_1 と X_2 とを接続する、すなわち、第2の通過点を、第3の通過点と接続する第2の運動学的サブグラフ SG_2 を構築することと定義される。図6Cは、運動学的サブグラフ SG_2 が SG_1 と X_2 とを運動学的に接続するように構築されることを示している。最後の部分問題M609は、 SG_{M-1} と X_M とを接続する運動学的グラフKGを構築することと定義される。図6Dは、運動学的サブグラフ SG_{M-1} と、運動学的グラフKGが SG_{M-1} と X_M とを運動学的に接続するように構築されることを示している。上述の定義の部分問題は、プロセッサにおいて逐次的に実行することができる。

30

【0074】

図7Aは、1つの実施形態による、部分問題を逐次的に解く方法のブロック図を示している。方法は、セット475からの2つの隣接した通過点710ごとに運動学的グラフ740を逐次的に(730)構築する(720)。グラフ740が構築された後、方法は、成功770又は失敗760の終了条件が満たされるまで、次の対710に移る(750)。

40

【0075】

図7Bは、通過点のセットを用いて部分問題を定式化する代替的な一実施形態の概略図を示している。部分問題780及び790は、それぞれ $\{X_0, X_1\}, \dots, \{X_{M-1}, X_M\}$ を接続する運動学的サブグラフ $SG_1, \dots, SG_M$ を構築することと定義される。全てのサブグラフが接続されている限り、運動学的グラフはサブグラフの和集合と定義され、接続されている。この実施形態における部分問題は、並列的に解くことができる。

【0076】

とりわけ、近傍の通過点は、通常、互いの方が車両の初期状態及び目標状態よりも近く

50

にあるので、駐車空間のバイアスサンプリングを用いて各運動学的サブグラフを構築することができる。そのために、状態の各新たなサンプルは、運動学的サブツリーのうちの1つに追加される可能性の方が高く、したがって、計算の無駄を低減する。

【0077】

図8は、1つの実施形態による、運動学的グラフを求める方法のブロック図を示している。方法は、通過点のセットに近接する駐車空間をサンプリングして(810)、サンプリングされた状態815を生成する。そのようにして、サンプリングされた状態は、通過点のうちの少なくとも1つの状態にバイアスされる。例えば、サンプリングは、通過点の状態の関数として平均及び共分散を有する駐車空間の状態の確率分布を用いて実行することができる。

10

【0078】

方法は、サンプリングされた状態を、ツリーを更新するために、運動学的エッジが衝突を伴わないものである場合にこの運動学的エッジを用いて少なくとも1つの通過点から開始する少なくとも1つのツリーと接続し(820)、終了条件が満たされるまでサンプリングすること及び接続することを繰り返す(830)。例えば、終了条件は、接続された幾何学的グラフの形成、運動学的グラフ上で初期ノードと目標ノードとを接続する経路の数が或る閾値を超えること、近傍の通過点のツリーに接続するノードの数、のうちの1つ又は組み合わせを含むことができる。

【0079】

図9Aは、1つの実施形態による、部分問題 $i+1$ を解く一例示的な方法のブロック図を示している。部分問題 $i+1$ は、通過点 X_i 及び X_{i+1} 、駐車空間のジオメトリ、及び車両の運動学的モデルから運動学的サブグラフ SG_{i+1} を構築する(720)ことを強制する。サブグラフ SG_{i+1} は、サブグラフ SG_i と X_{i+1} とを接続するように構築される。例えば、サブグラフ SG_i は、根ノードが状態 X_0 に対応する初期運動学的ツリーとして見るることができる。目標運動学的ツリー KT_t は、部分問題 $i+1$ の目標状態として扱われ、状態 X_{i+1} を有する根ノードで初期化される。バイアスされたサンプリングブロック901は、確率密度関数 $P(X)$ に従って状態空間

20

【数7】

$\mathcal{X}$

をサンプリングし、衝突を伴わない状態

30

【数8】

$X \in \mathcal{X}$

を返す。接続ブロック902は、サンプリングされた状態と、サブグラフ SG_i 及び運動学的目標ツリー KT_t 上に位置する当該状態の最近傍のノードとの間の接続を行う。サンプリングされた状態は、衝突を伴わない運動学的エッジでサブグラフ SG_i の、当該状態の最近傍のノードに接続することができる場合にのみ、サブグラフ SG_i に追加される。同様に、サンプリングされた状態は、衝突を伴わない運動学的エッジで運動学的目標ツリーの、当該状態の最近傍のノードに接続することができる場合にのみ、このツリーに追加される。また、最近傍のノードとサンプリング状態を有するノードとを接続するエッジは、最近傍のノードが位置するツリーに追加される。

40

【0080】

バイアスされたサンプリング901及び接続902を含む上述のステップは、或る特定の停止基準が満たされるまで繰り返される。1つの実施形態において、基準は、サンプリングされた状態 X がサブグラフ SG_i 及び運動学的目標ツリーの双方に追加される場合である。別の実施形態において、基準は、サブグラフ SG_i 及び運動学的目標ツリー KT_t の双方に追加されるサンプリングされた状態の数が或る閾値を超える場合である。

【0081】

図9Bは、1つの実施形態による、バイアスされたサンプリング901の一実施態様のブロック図を与えている。確率密度関数 $P(X)$ は、まず、通過点 X_i 及び X_{i+1} の関数として構築される(911)。ブロック912において、サンプリングされた状態が、

50

その確率密度関数が $P(X)$ に一致するように生成される。サンプリング 912 は、サンプリングされた状態が衝突を伴わないもの (913) になるまで (914)、繰り返される。

【0082】

例えば、サンプリングは、通過点の状態の関数として平均及び共分散を有する駐車空間の状態の確率分布を用いて実行される。1つの実施形態において、確率分布は、ガウス分布である。

【0083】

図9Cは、平均 μ 及び共分散 σ が X_i 及び X_{i+1} の関数であるガウス確率密度関数 $P(X)$ 920 を用いる1つの実施形態による、バイアスされたサンプリングの方法のブロック図を示している。スカラー調整パラメーター $0 \leq \lambda_\mu \leq 1$ を定義すると、ガウス分布の平均値は以下によって与えられる。

【数9】

$$\mu = \lambda_\mu X_i + (1 - \lambda_\mu) X_{i+1}.$$

【0084】

ガウス分布の対角共分散行列は、 $\sigma = \text{diag}(\lambda_x \sigma_x, \lambda_y \sigma_y, \lambda_\theta \sigma_\theta)$ として計算され、ここで σ_x 、 σ_y 、 σ_θ は、式

【数10】

$$[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\theta] = \text{dot}(X_i - \mu, X_i - \mu) + \text{dot}(X_{i+1} - \mu, X_{i+1} - \mu).$$

によって求められる。ここで、 $\text{dot}(x_1, x_2)$ は、ベクトル x_1 及び x_2 のドット積を表し、 $\lambda_x = \lambda_y > \lambda_\theta > 0$ は、或る特定の基準を反映するように確率密度関数について調整されるスケーリングパラメーターである。1つの実施形態において、 $\lambda_x = \lambda_y > \lambda_\theta > 0$ は、人間のヒューリスティクスを反映するために用いることができる。

【0085】

別の実施形態において、確率密度関数 $P(X)$ は、平均 μ 及び共分散 σ が X_i 及び X_{i+1} を含む通過点のセットの関数であるガウス過程である。

【0086】

図10は、1つの実施形態による、運動学的グラフ KG465 から運動学的経路を選択する方法のブロック図を示している。方法は、初期ノード及び目標ノードを除く全ての葉ノードを除去することによって運動学的グラフをトリミングし (1001)、ここで、葉ノードは、運動学的エッジで1つの近傍のノードにのみ接続される。方法は、運動学的グラフにわたって、幾何学的グラフの場合と同じように、価値反復を実行することによって各ノードの最小コストを求める (1002)。初期ノードから開始して、ブロック1003は、ノードコスト及び運動学的グラフに従って初期運動学的経路を選択する。1つの実施形態において、ブロック1003は、幾何学的グラフからの最良の幾何学的経路 (通過点のセットと同等) の選択において採用される方策反復を用いて初期運動学的経路を選択する。例えば、初期運動学的経路は、初期ノード及び目標ノードを含むノードのセットを含む。ブロック1004は、初期運動学的経路を平滑化して、初期状態から開始して目標状態において終端する運動学的経路を生成する。

【0087】

図11Aは、1つの実施形態による、初期運動学的経路 1110 を平滑化する (1004) フローチャートを示している。いくつかの実施形態において、運動学的経路を平滑化することは、運動学的経路において後続する通過点に到達するのに不必要である中間通過点を除去することを含む。例えば、初期運動学的経路 $P_0 = \{X_0, \dots, X_M\}$ が与えられると、ブロック1004は、 $M \leq 1$ である場合 (1120)、何も行わず、すなわち、経路を返す (1125)。 $M = 2$ である場合、中間経路は、初期運動学的経路 P_0 と定義され、これは 1012 でラベル付けされている。 $M > 2$ である場合 (1130)、ブロック1004は、部分経路 $PS = \{X_1, \dots, X_M\}$ の平滑化を試みて (1140

)、平滑化された部分経路 S P S を生成し、中間経路 $\{X_0, S P S\}$ を返し、これは 1 0 1 3 でラベル付けされている。ブロック 1 0 1 1 は、 X_0 と残りのノードとの間の接続を試みることによって、 P_0 又は S P S のいずれかの中間経路を単純化して、より平滑な経路を生成する (1 1 5 0)。

【0 0 8 8】

図 1 1 B は、1 つの実施形態による、図 1 1 A のフローチャートのブロック 1 0 1 1 によって実行される方法のフローチャートを示している。M として初期化されるインデックス変数を j とする。ブロック 1 1 6 5 は、衝突を伴わない運動学的エッジで X_1 と X_j とを接続することを試みる。接続に成功した場合、ブロック 1 1 8 0 は、 $\{X_1, X_i, M - j \leq i \leq M\}$ からなる新たな経路を出力し、接続に失敗した場合、 j を 1 だけ増分する。 j が $M - 1$ に達した場合、ブロック 1 0 1 1 は停止して、中間経路 $\{X_i, 1 \leq i \leq M\}$ を出力し、 j が $M - 1$ に達していない場合、新たな接続をテストするために新たな X_j がブロック 1 1 6 5 に提供される。

10

【0 0 8 9】

ブロック 1 0 0 4 は、車両を初期状態 X_0 から目標状態 X_f に運動させるために運動学的経路が通過する必要があるノードのセットを出力する。運動学的経路は、初期値が初期状態であり、速度及び操舵角を外部入力とする車両の運動学的モデルをシミュレートすることによって生成することができる。運動学的経路の 2 つの隣接したノードである、 X_i から X_j まで車両を運動させるのに必要な速度及び操舵角は、運動学的グラフの構築中に得られる。具体的には、これらは、 X_i を、エッジ $E(X_i, X_j)$ を通じて X_j と接続するときに解かれ、エッジ $E(X_i, X_j)$ においてアクションコードとして記憶される。

20

【0 0 9 0】

図 1 1 C は、図 1 A に示す駐車シナリオの、平滑化ブロック 1 0 0 4 において計算される、運動学的経路 1 1 9 0 をプロットしている。図 1 1 D は、運動学的経路 1 1 9 0 に沿った車両 1 0 0 の運動を示す概略図 1 1 9 5 をプロットしている。

【0 0 9 1】

いくつかの実施形態は、車両の動的モデルを用いて、運動学的経路を時間の関数として追跡する基準軌道を求め、この基準軌道に従って車両の運動を制御する。一方で、ブロック 1 0 0 4 は、モデル (1) の車両動態を満たさない運動学的経路 $X_k(t)$, $t \in [0, t_n]$ を生成することができる。

30

【0 0 9 2】

図 1 2 は、1 つの実施形態による、リアルタイム制御のために、運動学的経路を更に処理して基準軌道を生成する方法のブロック図を示している。ブロック 1 2 0 1 において、運動学的経路及び加速度制約 1 2 1 0 から初期軌道 $X^0(t)$ が生成される。ブロック 1 2 0 2 は、以下の最適制御問題を解くことによって基準軌道 1 2 2 0 を生成する。

【0 0 9 3】

【数 1 1】

$$\min_{a_1(t), a_2(t), t \in [0, t_n]} \int_0^{t_n} (X(t) - X_k(t))^T W (X(t) - X_k(t)) dt$$

40

ただし

【数 1 2】
(1)

$$|a_1(t)| \leq a_{1\max}$$

$$|a_2(t)| \leq a_{2\max}$$

$$X(0) = X_0, \quad X(t_n) = X_f$$

$$|X(t) - X_k(t)| \leq \varepsilon,$$

10

ここで、 W は、正定値行列であり、 $a_{1\max}$ は、車両の最大並進加速度であり、 $a_{2\max}$ は、ハンドルの最大角速度であり、 ε は、小さい正のスカラー値である。上述の最適制御問題は、通常、時間において離散化され、解くのに初期推測を必要とする非線形最適化問題に変換される。

【0094】

1つの実施形態において、初期推測は、運動学的経路 $X_k(t)$ から生成し、車両動態(1)を変換することができる。別の実施形態において、境界条件 $X(t_n) = X_f$ 及び $X(0) = X_0$ は、満たすのが困難である場合がある。以下の最適化問題を考慮することが有利である。

【0095】

20

【数 1 3】

$$\min_{a_1(t), a_2(t), t \in [0, t_n]} \Phi + \int_0^{t_n} (X(t) - X_k(t))^T W (X(t) - X_k(t)) dt$$

ただし

【数 1 4】

(1)

$$|a_1(t)| \leq a_{1\max}$$

$$|a_2(t)| \leq a_{2\max}$$

$$|X(t) - X_k(t)| \leq \varepsilon,$$

30

ここで

【数 1 5】

$$\begin{aligned} \Phi(X(0), X_k(0), X(t_n), X_k(t_n)) = & (X(0) - X_k(0))^T S_0 (X(0) - X_k(0)) \\ & + (X(t_n) - X_k(t_n))^T S_n (X(t_n) - X_k(t_n)), \end{aligned}$$

ただし、 S_0 及び S_n は、正定値行列である。

40

【0096】

別の実施形態において、運動学的経路の計算中に得られる t_n 、すなわち、車両が X_0 から X_f まで運動する時間は、満たすには過度に厳格であり、したがって、上述の最適化問題の実現可能性を危うくする場合がある。 $t_n \sim (1 + \alpha) t_n$ を $0 < \alpha < \infty$ で緩和することによって、初期軌道と同等に運動学的経路を生成することができる。

【0097】

図13は、1つの実施形態によるシステムの概略図を示している。システムは、自動化駐車1350を実行するように構成されたプロセッサ1302を備える車両1301を備える。車両は、LIDAR1310及び／又はカメラ1320等の少なくとも1つのセンサーも備える。LIDARセンサー1310は、低分解能の第1のセンサーであり、カメ

50

ラ1320は、高分解能の第2のセンサーである。センサー1310及び／又は1320は、プロセッサ1302に動作的に接続されるとともに、駐車空間の少なくとも一部のジオメトリを示す情報を検知するように構成される。この情報を用いて、プロセッサ1302は、駐車空間のマップ130を求め、及び／又は更新する。そのために、プロセッサ1302は、マップ130を用いて自動化駐車1350を実行する。

【0098】

図14は、いくつかの実施形態による自動化駐車システム1400のブロック図を示している。システム1400は、車両1301の内部に実装することができる。付加的又は代替的に、システム1400は、車両1301に通信可能に接続することができる。

【0099】

システム1400は、カメラ1410、慣性測定ユニット(IMU)1430、プロセッサ1450、メモリ1460、送受信機1470、及びディスプレイ／スクリーン1480のうちの1つ又は組み合わせを備えることができる。これらは、接続1420を通じて他の構成要素に動作的に結合することができる。接続1420は、バス、ライン、ファイバー、リンク又はそれらの組み合わせを含むことができる。

【0100】

送受信機1470は、例えば、1つ以上のタイプの無線通信ネットワークを通じて1つ以上の信号を送信することを可能にする送信機と、1つ以上のタイプの無線通信ネットワークを通じて送信された1つ以上の信号を受信する受信機とを備えることができる。送受信機1470は、様々な技術に基づいて無線ネットワークとの通信を可能にすることができる。これらの技術は、標準規格のIEEE802.11ファミリーに基づくことができるフェムトセル、Wi-Fiネットワーク又は無線ローカルエリアネットワーク(WLAN)、標準規格のIEEE802.15xファミリーに基づくBluetooth(登録商標)、近距離場通信(NFC)、ネットワーク等の無線パーソナルエリアネットワーク(WPAN)、及び／又はLTE、WiMAX等の無線ワイドエリアネットワーク(WWAN)等であるが、これらに限定されるものではない。システム1400は、有線ネットワークを通じて通信する1つ以上のポートを備えることもできる。

【0101】

いくつかの実施形態では、システム1400は、CCDセンサー若しくはCMOSセンサー、レーザー及び／又はカメラ等の画像センサー1410を備えることができる。この画像センサーは、以下では「センサー1410」と呼ばれる。例えば、センサー1410は、光画像を電子画像又はデジタル画像に変換することができ、取得された画像をプロセッサ1450に送信することができる。付加的又は代替的に、センサー1410は、シーン内のターゲット物体から反射された光を検知し、捕捉された光の強度をプロセッサ1450にサブミットすることができる。

【0102】

例えば、センサー1410は、「カラー情報」を提供するカラーカメラ又はグレースケールカメラを含むことができる。「カラー情報」という用語は、本明細書において用いられるとき、カラー情報及び／又はグレースケール情報を指す。一般に、カラー画像又はカラー情報は、本明細書において用いられるとき、1～N個のチャンネルを含むものとみなすことができる。ここで、Nは、画像を記憶するのに用いられている色空間に依存する或る整数である。例えば、RGB画像は、3つのチャンネルを含み、赤情報、青情報及び緑情報についてそれぞれ1つのチャンネルを有する。

【0103】

例えば、センサー1410は、「深度情報」を提供する深度センサーを含むことができる。深度情報は、深度センサーを用いて様々な方法で取得することができる。「深度センサー」という用語は、深度情報を単独で及び／又は他のいくつかのカメラと併せて取得するのに用いることができる機能ユニットを指すのに用いられる。例えば、いくつかの実施形態では、深度センサー及び光カメラは、センサー1410の一部分とすることができる。例えば、いくつかの実施形態では、センサー1410はRGBDカメラを備える。この

10

20

30

40

50

R G B Dカメラは、カラー（R G B）画像に加えて、深度センサーが有効にされているときはピクセルごとの深度（D）情報を捕捉することができる。

【0104】

別の例として、いくつかの実施形態では、センサー1410は、3D飛行時間（3D T O F）カメラを備えることができる。3D T O Fカメラを用いた実施形態では、深度センサーは、3D T O Fカメラに結合されたストロボライトの形態を取ることができる。このストロボライトは、シーン内の物体を照明することができ、反射された光は、センサー1410内のC C D / C M O Sセンサーが捕捉することができる。深度情報は、光パルスが物体に進んでセンサーに戻って来るまでに要する時間を測定することによって取得することができる。

10

【0105】

更なる例として、深度センサーは、センサー1410に結合された光源の形態を取ることができる。1つの実施形態では、この光源は、1つ以上の狭い光の帯を含むことができる構造化された光パターン又はテクスチャー付けされた光パターンをシーン内の物体に投射する。深度情報は、物体の表面形状によって引き起こされる投射パターンの幾何学的歪みを利用することによって取得される。1つの実施形態は、赤外線構造化光プロジェクターと、R G Bカメラにレジスタリングされた赤外線カメラとの組み合わせ等のステレオセンサーから深度情報を求める。

【0106】

いくつかの実施形態では、センサー1410は立体カメラを備える。例えば、深度センサーは、2つ以上のカメラを用いてシーンの深度情報を取得することができる受動ステレオビジョンセンサーの一部分を成すことができる。捕捉されたシーンにおける双方のカメラに共通の点のピクセル座標を、カメラ姿勢情報及び／又は三角測量技法とともに用いて、ピクセルごとの深度情報を取得することができる。

20

【0107】

いくつかの実施形態では、システム1400は、デュアルフロントカメラ及び／又は前面カメラ及び背面カメラ等の複数のセンサー1410に動作的に接続することができ、これらの複数のセンサーは、様々なセンサーを組み込むこともできる。いくつかの実施形態では、センサー1410は、静止画像及びビデオ画像の双方を捕捉することができる。いくつかの実施形態では、センサー1410は、例えば、30フレーム毎秒（f p s）で画像を捕捉することが可能なR G B D又は立体ビデオカメラを備えることができる。1つの実施形態では、センサー1410によって捕捉された画像は、生の未圧縮フォーマットとすることができ、処理及び／又はメモリ1460への記憶の前に圧縮することができる。いくつかの実施形態では、画像圧縮は、プロセッサ1450によって可逆圧縮技法又は非可逆圧縮技法を用いて実行することができる。

30

【0108】

いくつかの実施形態では、プロセッサ1450は、I M U 1 4 3 0から入力を受信することもできる。他の実施形態では、I M U 1 4 3 0は、3軸加速度計（複数の場合もある）、3軸ジャイロ스코プ（複数の場合もある）、及び／又は磁気計（複数の場合もある）を備えることができる。I M U 1 4 3 0は、速度、方位、及び／又は他の位置関連情報をプロセッサ1450に提供することができる。いくつかの実施形態では、I M U 1 4 3 0は、測定された情報を、センサー1410による各画像フレームの捕捉と同期して出力することができる。いくつかの実施形態では、I M U 1 4 3 0の出力は、プロセッサ1450がセンサー測定値を融合し及び／又は融合された測定値を更に処理するのに部分的に用いられる。

40

【0109】

また、システム1400は、カラー画像及び／又は深度画像等の画像をレンダリングするスクリーン又はディスプレイ1480を備えることができる。いくつかの実施形態では、ディスプレイ1480は、センサー1410によって捕捉されたライブ画像、融合画像、拡張現実（A R）画像、グラフィカルユーザーインターフェース（G U I）、及び他の

50

番組 (program: プログラム) 出力を表示するのに用いることができる。いくつかの実施形態では、ディスプレイ 1480 は、ユーザーが、仮想キーボード、アイコン、メニュー、又は他の GUI、ユーザージェスチャー及び／又はスタイラス及び他の筆記用具等の入力デバイスの或る組み合わせを介してデータを入力することを可能にするタッチスクリーンを備えることができ及び／又はこのようなタッチスクリーンとともに収容することができる。いくつかの実施形態では、ディスプレイ 1480 は、液晶ディスプレイ (LCD) 又は有機 LED (OLED) ディスプレイ等の発光ダイオード (LED) ディスプレイを用いて実施することができる。他の実施形態では、ディスプレイ 1480 は、ウェアラブルディスプレイとすることができる。いくつかの実施形態では、融合の結果をディスプレイ 1480 にレンダリングすることもできるし、システム 1400 の内部又は外部に存在することができる異なるアプリケーションにサブミットすることもできる。

10

【0110】

例示的なシステム 1400 は、図示した機能ブロックのうちの 1 つ以上の追加、組み合わせ、又は省略等によって、本開示と整合性を有するように様々な方法で変更することもできる。例えば、いくつかの構成では、システム 1400 は、IMU 1430 又は送受信機 1470 を備えていない。さらに、いくつかの特定の例示の実施態様では、システム 1400 は、周辺光センサー、マイクロフォン、音響センサー、超音波センサー、レーザーレンジファインダー等の様々な他のセンサー (図示せず) を備える。いくつかの実施形態では、システム 1400 のいくつかの部分は、1 つ以上のチップセット等の形態を取る。

【0111】

20

プロセッサ 1450 は、ハードウェア、ファームウェア及びソフトウェアの組み合わせを用いて実現することができる。プロセッサ 1450 は、センサー融合及び／又は融合した測定値を更に処理するための方法に関連付けられる計算手順又はプロセスの少なくとも一部を実行するように構成可能な 1 つ以上の回路を表すことができる。プロセッサ 1450 は、メモリ 1460 から命令及び／又はデータを引き出す。プロセッサ 1450 は、1 つ以上の特定用途向け集積回路 (ASIC)、中央及び／又はグラフィカル処理ユニット (CPU 及び／又は GPU)、デジタルシグナルプロセッサ (DSP)、デジタル信号処理デバイス (DSPD)、プログラマブル論理デバイス (PLD)、フィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA)、コントローラー、マイクロコントローラー、マイクロプロセッサ、埋め込みプロセッサコア、電子デバイス、本明細書において記述される機能を実行するように設計された他の電子ユニット、又はその組み合わせを用いて実現することができる。

30

【0112】

メモリ 1460 は、プロセッサ 1450 の内部に、及び／又はプロセッサ 1450 の外部に実装することができる。本明細書において使用されるときに、「メモリ」という用語は、任意のタイプの長期、短期、揮発性、不揮発性又は他のメモリを指しており、任意の特定のタイプのメモリ若しくはメモリの数、又はメモリが記憶される物理媒体のタイプに制限されるべきではない。いくつかの実施形態では、メモリ 1460 は、自動化駐車を容易にするプログラムコードを保持する。

【0113】

40

例えば、メモリ 1460 は、静止画像、深度情報、ビデオフレーム、プログラム結果、並びに IMU 1430 及び他のセンサーによって提供されるデータ等のセンサーの測定値を記憶することができる。メモリ 1460 は、車両のジオメトリ、駐車空間のマップ、車両の運動学的モデル、及び車両の動的モデルを記憶するメモリを格納することができる。一般に、メモリ 1460 は、任意のデータ記憶機構を表すことができる。メモリ 1460 は、例えば、一次メモリ及び／又は二次メモリを含むことができる。一次メモリは、例えば、ランダムアクセスメモリ、リードオンリーメモリ等を含むことができる。図 14 においてプロセッサ 1450 とは別であるように示されるが、一次メモリの全て若しくは一部をプロセッサ 1450 内に設けることができるか、又はそうでなくても、プロセッサ 1450 と同一の場所に配置し、及び／又はプロセッサ 1450 に結合することができること

50

は理解されたい。

【0114】

二次メモリは、例えば、一次メモリと同じ、又は類似のタイプのメモリ、及び／又は例えば、フラッシュ／USBメモリドライブ、メモリカードドライブ、ディスクドライブ、光ディスクドライブ、テープドライブ、ソリッドステートドライブ、ハイブリッドドライブ等の1つ以上のデータ記憶デバイス又はシステムを含むことができる。或る特定の実施形態において、二次メモリは、取外し可能な媒体ドライブ（図示せず）内の非一時的コンピューター可読媒体に動作的に収容可能であるか、又は別の方法で、動作的に構成可能とすることができる。いくつかの実施形態において、非一時的コンピューター可読媒体は、メモリ1460及び／又はプロセッサ1450の一部を形成する。

10

【0115】

本発明の上記で説明した実施形態は、多数の方法のうちの任意のもので実施することができる。例えば、実施形態は、ハードウェア、ソフトウェア又はそれらの組み合わせを用いて実施することができる。ソフトウェアで実施される場合、ソフトウェアコードは、単一のコンピューターに設けられるのか又は複数のコンピューター間に分散されるのかにかかわらず、任意の適したプロセッサ又はプロセッサの集合体において実行することができる。そのようなプロセッサは、1つ以上のプロセッサを集積回路部品に有する集積回路として実装することができる。ただし、プロセッサは、任意の適したフォーマットの回路類を用いて実装することができる。

20

【0116】

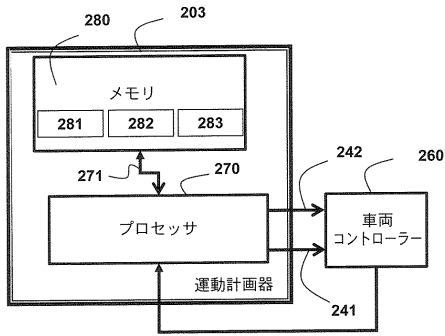
また、本発明の実施形態は、例が提供された方法として実施することができる。この方法の一部として実行される動作は、任意の適切な方法で順序付けすることができる。したがって、動作が示したものと異なる順序で実行される実施形態を構築することができ、これには、例示の実施形態では一連の動作として示されたにもかかわらず、いくつかの動作を同時に実行することを含めることもできる。

【0117】

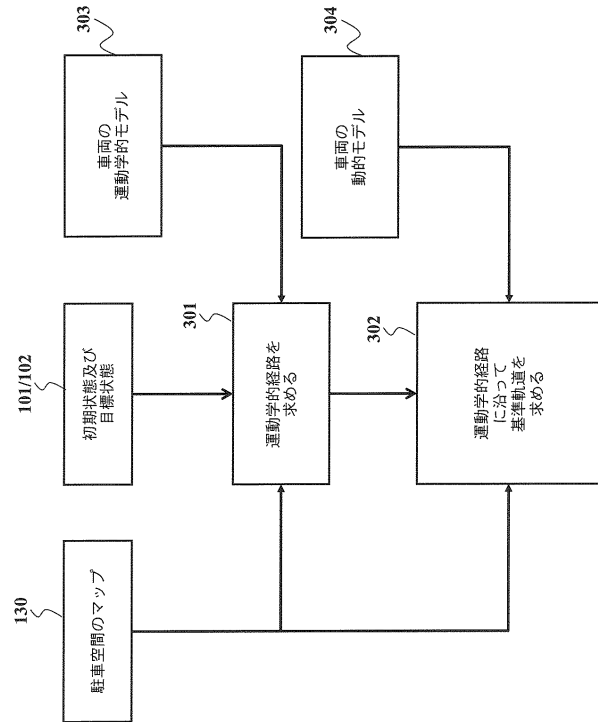
請求項の要素を修飾する、特許請求の範囲における「第1」、「第2」等の序数の使用は、それ自体で、1つの請求項の要素の別の請求項の要素に対する優先順位も、優位性も、順序も暗示するものでもなければ、方法の動作が実行される時間的な順序も暗示するものでもなく、請求項の要素を区別するために、単に、或る特定の名称を有する1つの請求項の要素を、同じ（序数の用語の使用を除く）名称を有する別の要素と区別するラベルとして用いられているにすぎない。

30

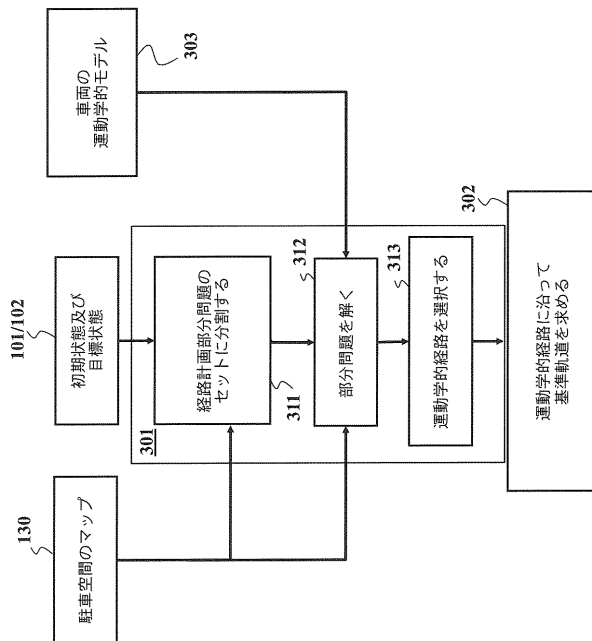
【図 2 B】



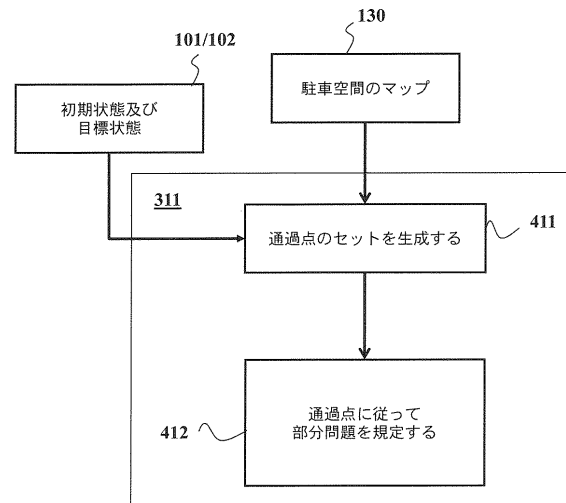
【図 3 A】



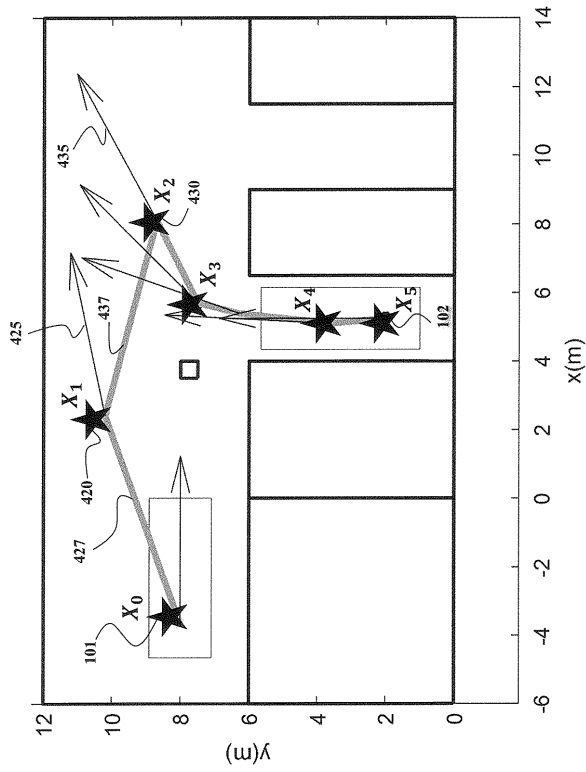
【図 3 B】



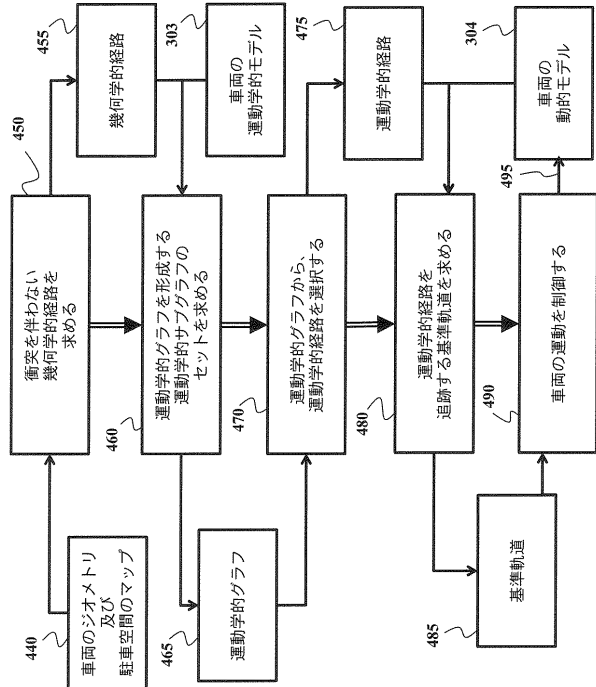
【図 4 A】



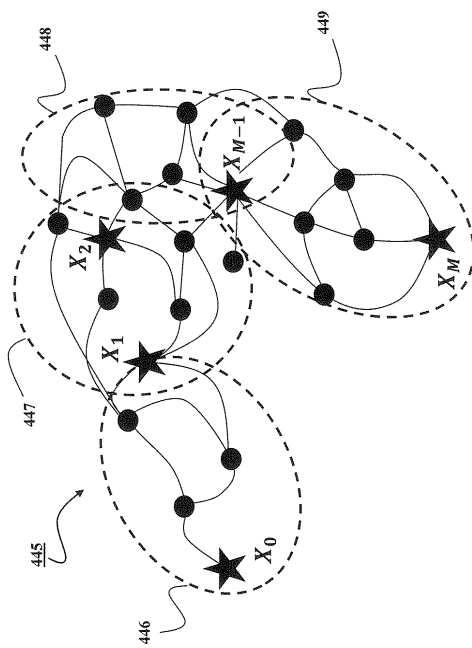
【図 4 B】



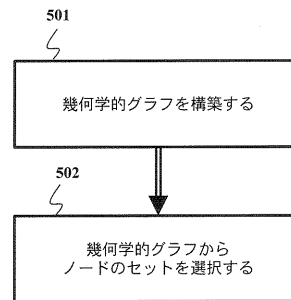
【図 4 C】



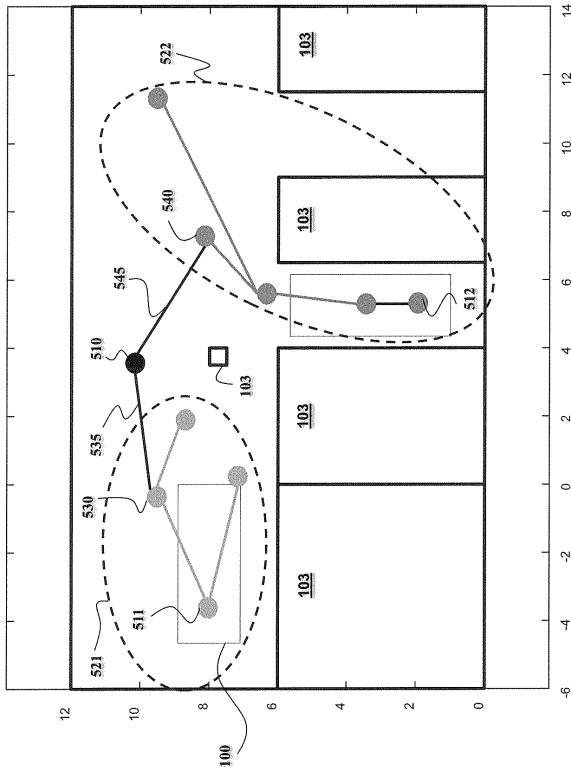
【図 4 D】



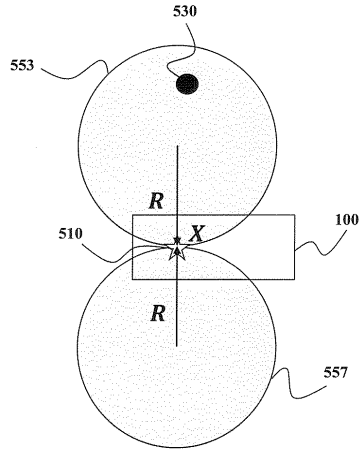
【図 5 A】



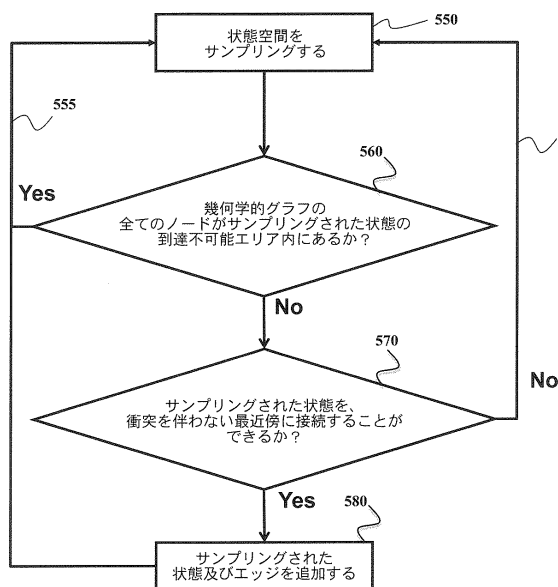
【図 5 B】



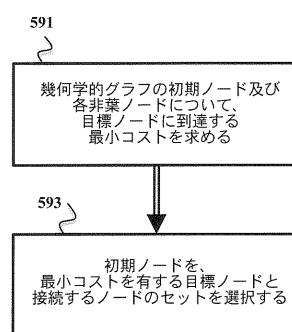
【図 5 C】



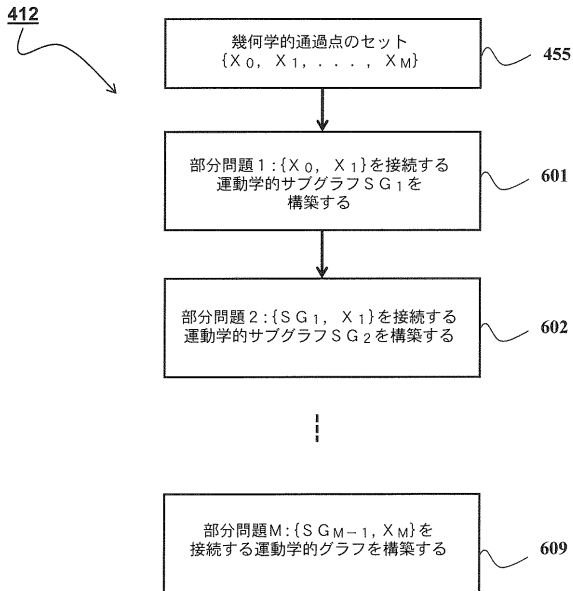
【図 5 D】



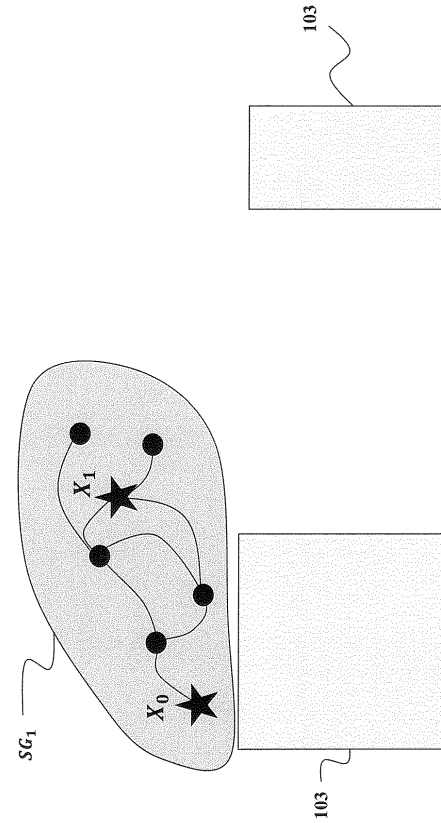
【図 5 E】



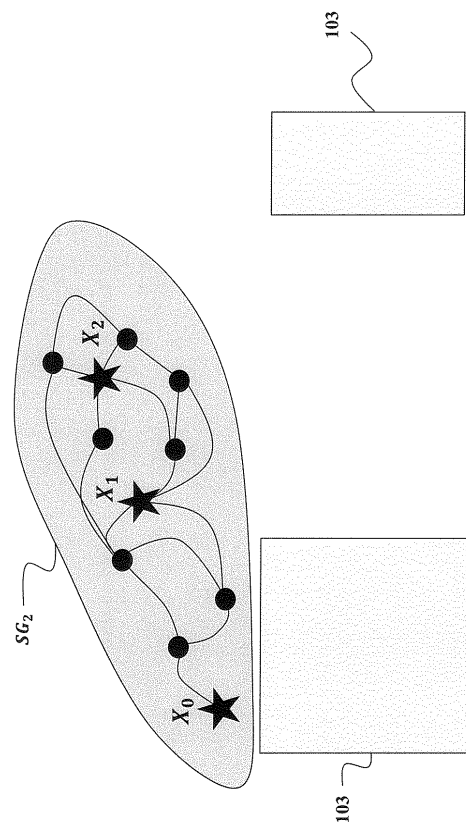
【図 6 A】



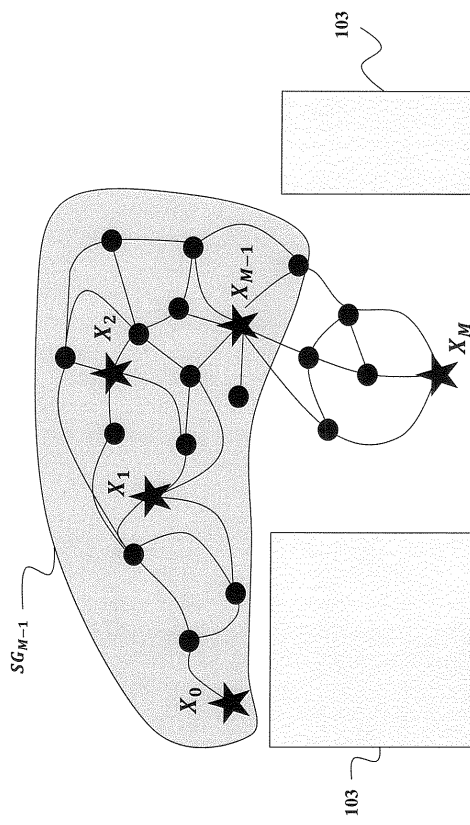
【図 6 B】



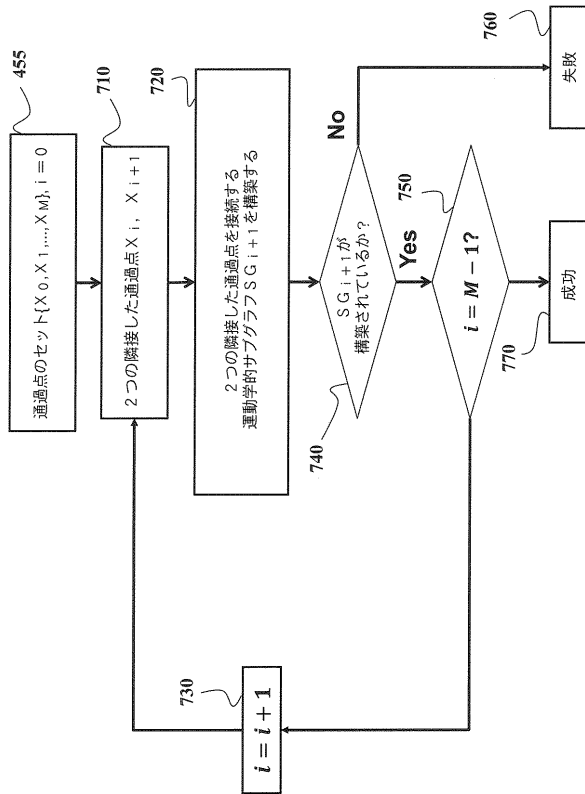
【図 6 C】



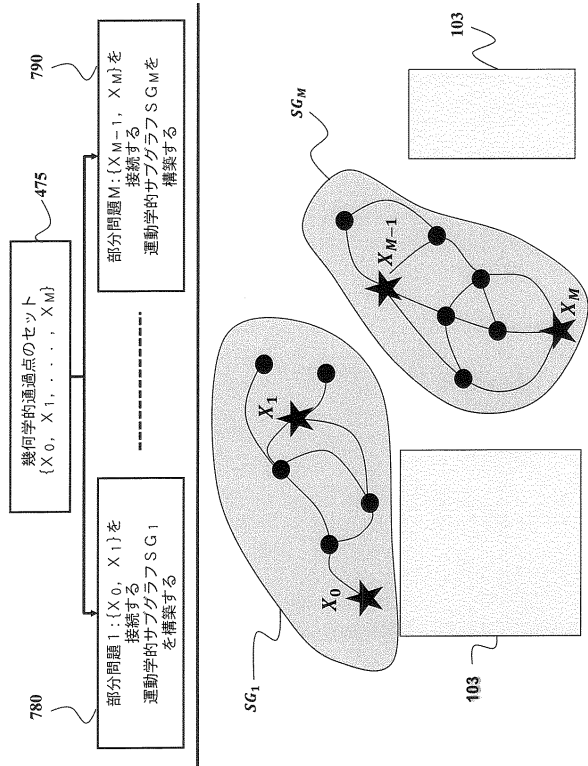
【図 6 D】



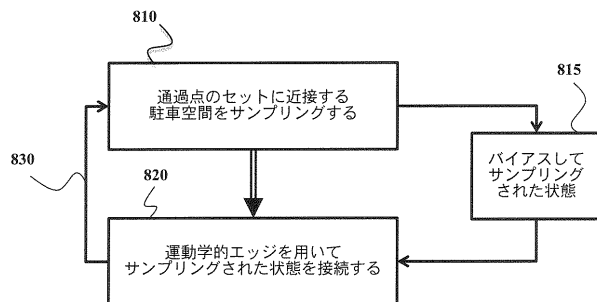
【図 7 A】



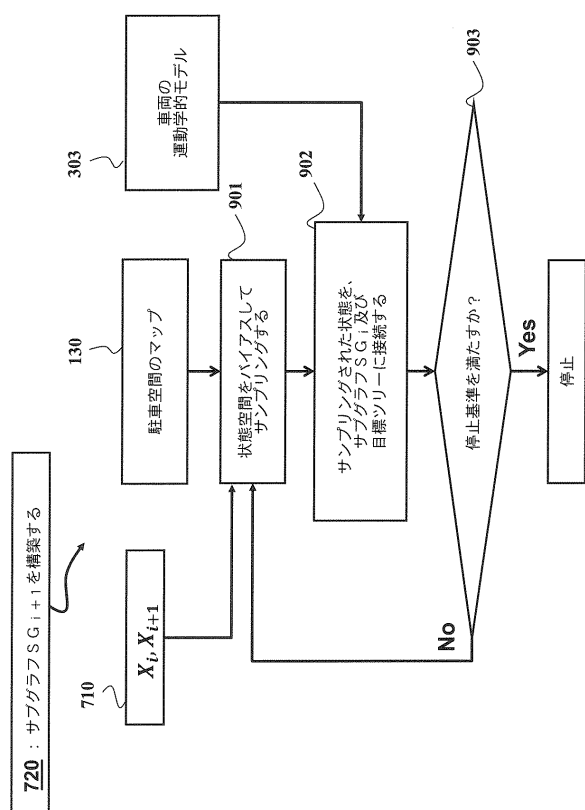
【図 7 B】



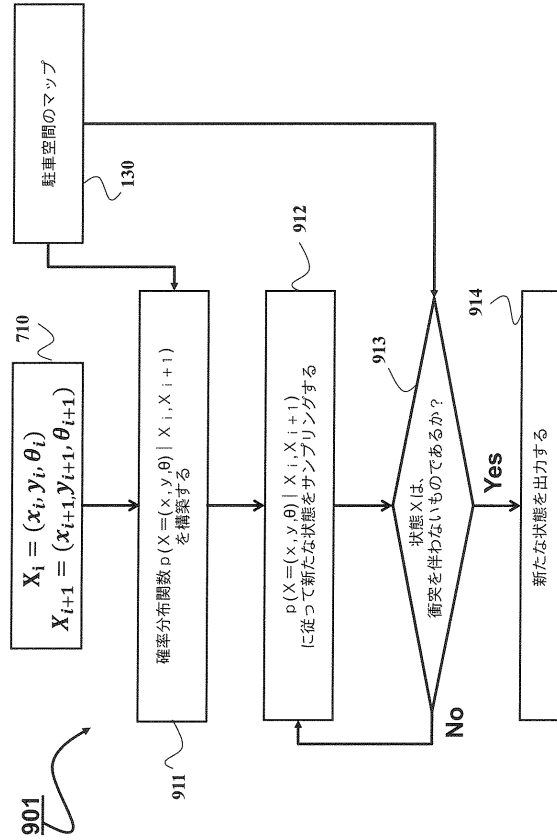
【図 8】



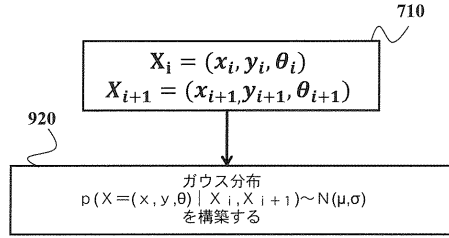
【図 9 A】



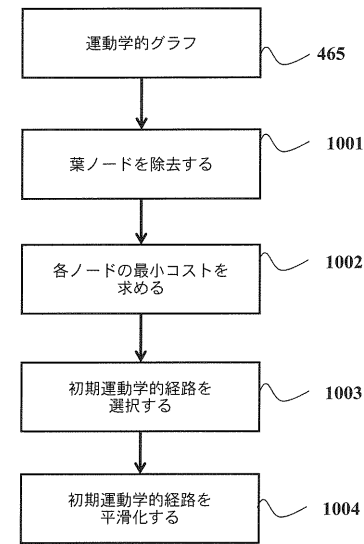
【図 9 B】



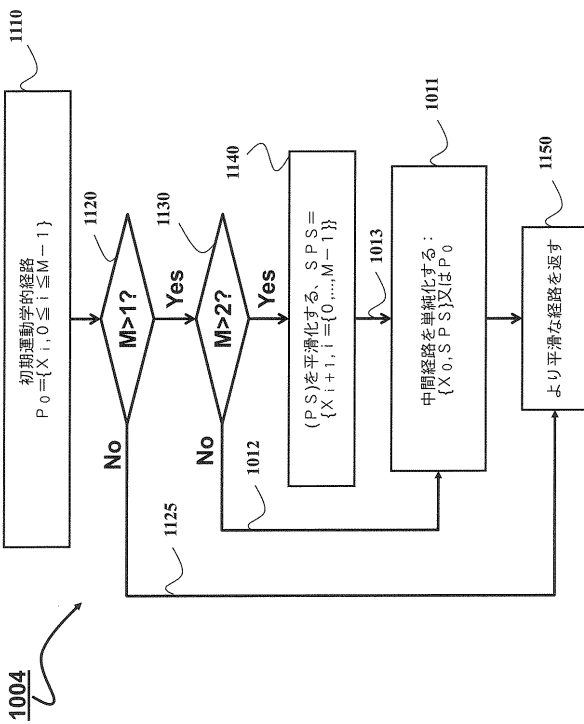
【図 9 C】



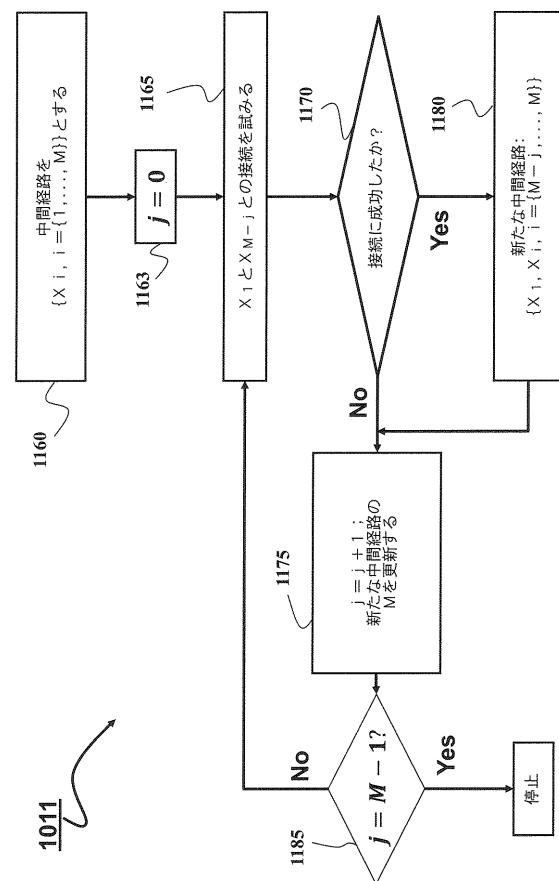
【図 10】



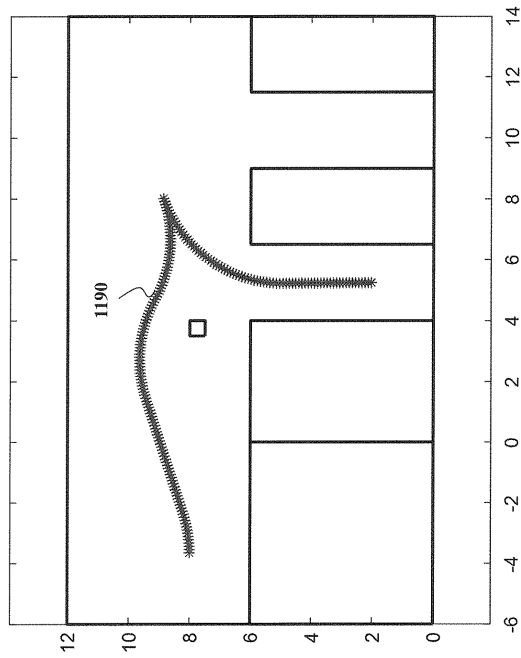
【図 11 A】



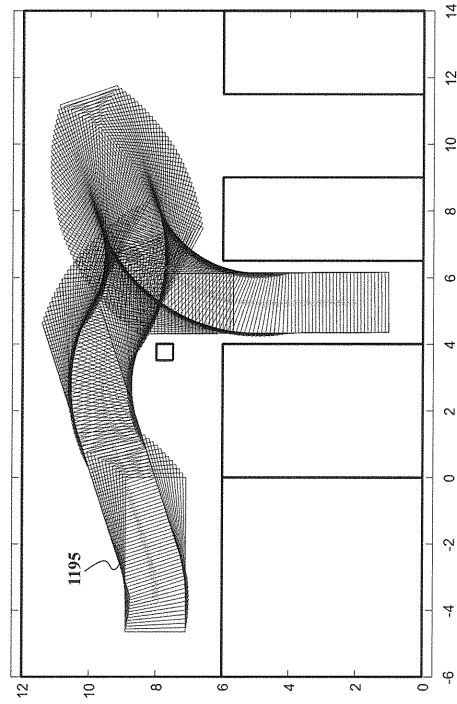
【図 11 B】



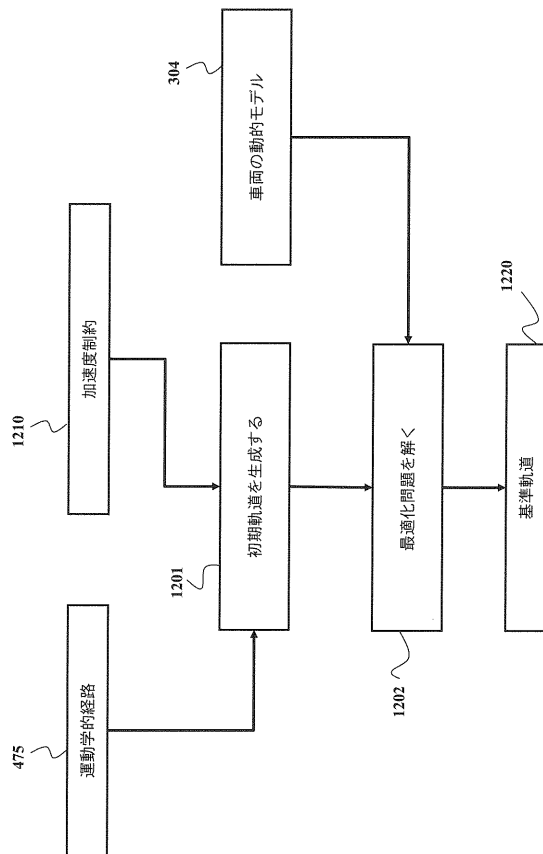
【図 1 1 C】



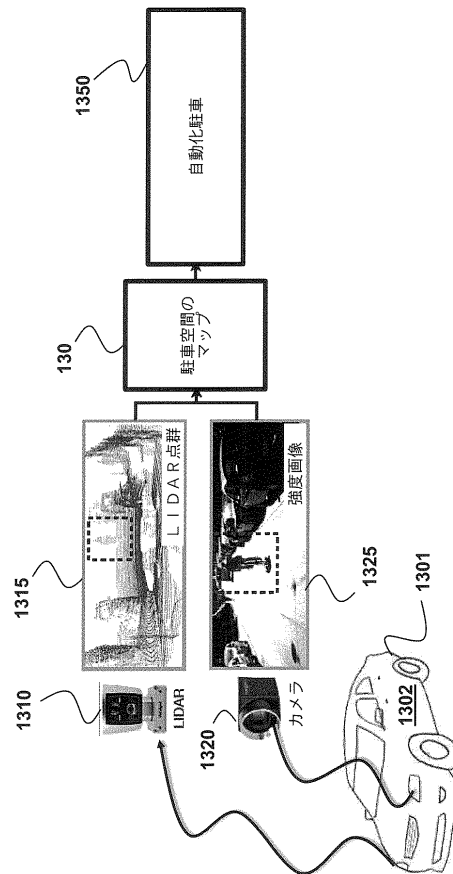
【図 1 1 D】



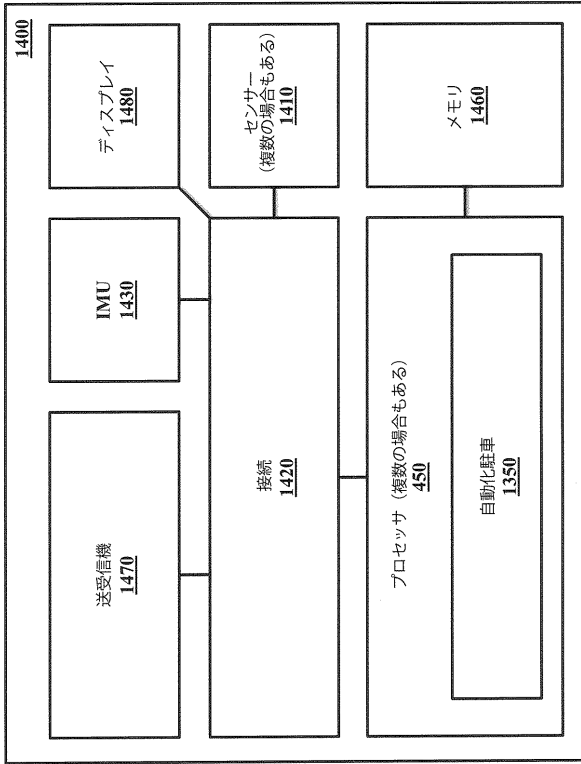
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 14】



フロントページの続き

(72)発明者 ワン、イエビン

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミツ
ビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

(72)発明者 ジャ、デヴェシュ

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミツ
ビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

審査官 増子 真

(56)参考文献 特開2014-026516 (JP, A)

特許第5981010 (JP, B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

IPC	B60W	10/00-10/30
		30/00-60/00
	G08G	1/00- 1/16
	B60R	21/00-21/13
		21/34-21/38
	E04H	6/00- 6/44
	B62D	6/00- 6/10