

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6494872号
(P6494872)

(45) 発行日 平成31年4月3日 (2019.4.3)

(24) 登録日 平成31年3月15日 (2019.3.15)

(51) Int. Cl.	F I
B 6 O W 30/09 (2012.01)	B 6 O W 30/09
B 6 2 D 6/00 (2006.01)	B 6 2 D 6/00
B 6 2 D 101/00 (2006.01)	B 6 2 D 101:00

請求項の数 13 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願2018-521331 (P2018-521331)	(73) 特許権者	000006013
(86) (22) 出願日	平成29年2月6日 (2017.2.6)		三菱電機株式会社
(65) 公表番号	特表2018-534205 (P2018-534205A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公表日	平成30年11月22日 (2018.11.22)	(74) 代理人	100110423
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/005026		弁理士 曾我 道治
(87) 国際公開番号	W02017/138664	(74) 代理人	100111648
(87) 国際公開日	平成29年8月17日 (2017.8.17)		弁理士 梶並 順
審査請求日	平成30年4月24日 (2018.4.24)	(74) 代理人	100122437
(31) 優先権主張番号	15/041,639		弁理士 大宅 一宏
(32) 優先日	平成28年2月11日 (2016.2.11)	(74) 代理人	100147566
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 上田 俊一
早期審査対象出願		(74) 代理人	100161171
			弁理士 吉田 潤一郎
		(74) 代理人	100194939
			弁理士 別所 公博

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 車両の運動を制御する方法、及び車両の制御システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

車両の運動を制御する方法であって、

前記車両の前記運動のモデルに対する可能な制御入力 of 制御空間をサンプリングして、サンプリングされた制御入力のセットを導入することであって、前記車両の前記運動の前記モデルは、不確定要素を含むことと、

前記車両の前記運動の前記モデルを用いて、前記車両の前記運動についての制約を満たす状態へ前記車両を移動させる、各サンプリングされた制御入力の確率を決定することであって、該決定することは、

前記車両の初期状態を決定することと、

前記初期状態及び前記サンプリングされた制御入力を、前記車両の前記運動の前記モデルに提出して、前記車両の前記初期状態から次の状態までの変移を推定することと、

前記次の状態に対応する点における前記車両の状態にわたって確率分布関数 (PDF) の値を、前記サンプリングされた制御入力の前記確率として選択することと、

障害物の不確定要素領域と交差する前記次の状態の確率を決定することと、

前記障害物の前記不確定要素領域と交差する前記次の状態の前記確率と、衝突閾値とを比較し、当該比較の結果、前記次の状態の前記確率が前記衝突閾値を超える場合、前記次の状態が前記障害物と衝突を起こすと判断し、前記サンプリングされた制御入力にゼロの確率を割り当てることと、

を含む、決定することと、

10

20

前記サンプリングされた制御入力の前記確率を用いて、閾値を超える前記状態に前記車両を移動させる前記確率を有する制御入力を決定することと、

前記制御入力を、前記車両の少なくとも1つのアクチュエーターに対する制御コマンドにマッピングすることと、

前記制御コマンドに従って前記車両の前記運動を制御することと、

を含み、

前記方法のステップは、前記車両のプロセッサを用いて実行される、

方法。

【請求項2】

前記車両の前記運動の前記モデルは、前記車両の状態の変移を記述する関数であり、

10

該関数は、前記状態に作用するノイズを含み、

前記状態は、前記車両のロケーション、前記車両の速度及び前記車両の進行方向を含み、

前記状態に作用する前記ノイズは、前記関数によって記述される前記車両の動的特性の正確性についての不確定要素、及び前記関数によって用いられる前記車両のパラメーターの正確性についての不確定要素の一方又は組み合わせによって形成される前記不確定要素を含む、

請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記制御入力を前記決定することは、

20

前記閾値を超える前記サンプリングされた制御入力の前記確率のうちの最高確率を有するサンプリングされた制御入力を、前記制御入力として選択すること、

を含む、請求項1に記載の方法。

【請求項4】

前記車両の前記運動についての前記制約は、道路の中央からの前記車両のロケーションの偏差についての範囲、前記車両の現在の加速度及び進行方向角度からの変化についての範囲、前記車両の望ましい速度プロファイルからの偏差についての範囲、及び前記道路上の障害物に対する最小距離についての範囲のうちの1つ又は組み合わせを含む、

請求項1に記載の方法。

【請求項5】

30

前記車両の前記運動についての前記制約は、道路の中央からの前記車両のロケーションの偏差の確率、前記車両の現在の加速度及び進行方向角度からの偏差の確率、前記車両の望ましい速度プロファイルからの偏差についての確率、及び前記道路上の障害物に対する最小距離に違反する確率のうちの1つ又は組み合わせを含む、

請求項1に記載の方法。

【請求項6】

前記車両の前記運動についての前記制約及び前記車両の前記運動の前記モデルの前記不確定要素についての制約を用いて、前記PDFを決定すること、

を更に含む、請求項1に記載の方法。

【請求項7】

40

前記初期状態は、前記車両の現在の状態である、

請求項1に記載の方法。

【請求項8】

前記車両の前記初期状態から前記車両の目標状態までの前記車両の前記運動を指定する制御入力のシーケンスを反復的に決定することを更に含む、

前記初期状態は、前記方法の以前の反復中に決定された前記制御入力に対応する前記状態である、

請求項1に記載の方法。

【請求項9】

前記運動の目的及び前記プロセッサの計算電力に基づいて前記目標状態を決定すること

50

、
を更に含む、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

車両の制御システムであって、

プロセッサと、運動の不確定要素及び前記車両の前記運動についての制約を含む前記車両の前記運動のモデルを記憶するメモリと備える運動計画システムであって、

該運動計画システムは、

前記車両の前記運動の前記モデルに対する可能な制御入力 of 制御空間をサンプリングして、サンプリングされた制御入力のセットを生成し、

前記車両の前記運動の前記モデルを用いて、前記車両を、該車両の前記運動についての制約を満たす状態に移動させる、各サンプリングされた制御入力の確率を決定し、

前記サンプリングされた制御入力の前記確率を用いて、閾値を超える前記確率を有する制御入力を決定し、

該運動計画システムは、前記車両の状態にわたって確率分布関数 (PDF) の値を選択することによって、前記サンプリングされた制御入力の前記確率を、前記サンプリングされた制御入力に従う初期状態から変移した次の状態に対応する点における前記サンプリングされた制御入力の前記確率として決定する、

運動計画システムと、

障害物の位置を時間の関数として特定するセンサーであって、前記運動計画システムは、前記障害物の不確定要素領域と交差する前記次の状態の確率を決定し、前記障害物の前記不確定要素領域と交差する前記次の状態の前記確率と、衝突閾値とを比較し、当該比較の結果、前記次の状態の前記確率が前記衝突閾値を超える場合、前記次の状態が前記障害物と衝突を起こすと判断し、前記サンプリングされた制御入力にゼロの確率を割り当てる、センサーと、

前記制御入力を、前記車両の少なくとも 1 つのアクチュエーターに対する制御コマンドにマッピングし、前記車両の前記アクチュエーターに対する前記制御コマンドを用いて前記車両の前記運動を制御する車両コントローラーと、

を備える、制御システム。

【請求項 11】

前記車両の前記運動の前記モデルは、前記車両の状態の変移を記述する関数であり、

前記関数は、前記状態に作用するノイズを含み、

前記状態は、前記車両のロケーション、前記車両の速度及び前記車両の進行方向を含み、

前記状態に作用する前記ノイズは、前記関数によって記述される前記車両の動的特性の正確性についての不確定要素及び前記関数によって用いられる前記車両のパラメータの正確性についての不確定要素のうち的一方又は組み合わせによって形成される前記不確定要素を含む、

請求項 10 に記載の制御システム。

【請求項 12】

前記車両の前記運動についての前記制約は、道路の中央からの前記車両のロケーションの偏差の確率、前記車両の現在の加速度及び進行方向角度からの偏差の確率、前記車両の望ましい速度プロファイルからの偏差についての確率、前記道路上の障害物への最小距離を違反する確率のうち 1 つ又は組み合わせを含む、

請求項 10 に記載の制御システム。

【請求項 13】

前記車両の現在の状態及び前記車両の目標状態を決定するナビゲーションシステムを更に備え、

前記運動計画システムは、前記車両の前記現在の状態から前記車両の前記目標状態までの前記車両の前記運動を指定する制御入力のシーケンスを反復的に決定し、

前記初期状態は、前記現在の状態である、

請求項10に記載の制御システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、包括的には車両を制御することに関し、より詳細には、自律車両又は半自律車両を制御することに関する。

【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、何らかの目標状態に向けた車両の安全運動を予測する。目標状態は、固定ロケーション、移動ロケーション、車両ベクトル、領域、又はそれらの組み合わせのいずれかとしてすることができる。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。しかしながら、センサー情報はノイズを含みかつ不確定的であり、車両の正確なパラメータは未知であり、環境は部分的にのみ既知である。したがって、車両の制御は、そのような不確定要素を考慮に入れるべきである。

10

【0003】

例えば、自律道路車両が或る道路区間に沿って移動する場合、自律車両の制御システムは、車線の中央からの偏差及び速度変動のうち的一方又は組み合わせを最小限にする運動を生成して、乗員にとっての快適な乗車体験 (smooth ride) を提供するとともにスムーズな交通流を提供することができる。車両のセンサーは、道路上の潜在的な障害物を検出する。障害物のロケーション及び速度は、検知ノイズ及び他の不確定要素の発生源に起因して、不確定的である。車両制御システムは、車両の好適な加速及び操舵入力、並びに対応する結果として得られる運動を計算するとき、この不確定要素を考慮に入れて、制御入力における不必要なジャンプ、又は車両の他の望ましくない挙動を回避するべきである。

20

【0004】

自律車両のいくつかの制御システムによって用いられる車両のモデル及び環境のモデルは、実世界の単に簡略化された数学的記述であり、予測される未来の運動は、必要なときは常にリアルタイムに更新することができるように、高速で計算されなければならない。したがって、運動は、固定の更新レートにおいて又は新たなセンサー情報が到来するときは常に、再帰的に計算する必要がある。

30

【0005】

いくつかのシステムは、経路 (特許文献1)、又はランダム構成を生成することによる車両の運動又は制御入力 (特許文献2、特許文献3) のいずれかを決定し、それぞれ異なるランダムサンプルを互いに接続して、可能な運動のツリーを展開させる。未来の経路の予測のみを検討する場合、この方法の計算複雑度は低減されるが、この結果、運動不可能な経路がもたらされる可能性がある。その一方で、車両の運動が予測される場合、運動の品質は、運動全体を評価することによって決定される。この結果、運動の品質は、リアルタイム操作において保証することができないか、又は自律車両が従うべき運動は、十分に高速に決定されないか、又はそれら双方の組み合わせがもたらされる。

40

【0006】

計算／メモリ負荷との組み合わせにおける運動の品質の欠乏の原因は、運動の品質が、初期状態から目標状態までの運動全体を調査することによって決定されることにある。したがって、可能な運動のツリーは、不必要に大きくなる。そのような場合、計算／メモリ負荷は、過大になる可能性がある。

【0007】

高速計算及び高信頼度の性能は、いくつかの用途において普遍的なものである。例えば、路上の自律車両が高速道路を移動し、未来の運動を見出すことができない状況を検討す

50

る。予測される運動は安全であるべきだけでなく、種々の状況を検討することによって計算されるべきでもある。例えば、車両が、2つの車線を有する道路上で操作され、かつ2つの他の車両が存在し、一方は自動車の正面にあり、他方は他方の車線において後方から接近しつつあるシナリオを検討する。そのようなシナリオにおいて、運動は、減速するか、後続状態を維持するか、又は追い越しを開始するかを判断することによって決定されなくてはならない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】米国特許第8666548号

10

【特許文献2】米国特許第7447593号

【特許文献3】米国特許第88825207号

【発明の概要】

【0009】

本発明のいくつかの実施形態は、車両の決定される運動の品質は、運動全体を評価する代わりに、或る状態から別の状態に車両を導く制御入力の評価することによって達成することができるという認識に基づいており、ここで、車両の状態は、車両のロケーション、速度及び進行方向等の、車両の動的特性(dynamics)を含む。例えば、自律車両が速度を維持したまま車線変更を開始することが望まれる場合、本発明のいくつかの実施形態は、車線変更及び速度維持の双方の状態をもたらす制御入力を決定する。望ましい状態の特徴は、事前に定義することもできるし、挙動及び環境の特徴に依拠して調節することもできる。

20

【0010】

本発明のいくつかの実施形態は、或る状態及びこの状態に導く対応する制御入力は、車両の運動のモデル及び車両が操作される環境内の障害物を用いて特定することができることに依拠する。例えば、未来において障害物との衝突をもたらす高い危険性を課す制御入力には、低、又はゼロの確率が割り当てられる。

【0011】

したがって、1つの実施形態は、車両の運動を制御する方法を開示する。本方法は、車両の運動のモデルに対する可能な制御入力の制御空間をサンプリングして、サンプリングされた制御入力のセットを生成することであって、車両の運動のモデルは、不確定要素を含むことと、車両の運動のモデルを用いて、車両の運動についての制約を満たす状態に車両を移動させる、各サンプリングされた制御入力の確率を特定することと、サンプリングされた制御入力の確率を用いて、閾値を超える状態に車両を移動させる確率を有する制御入力を決定することと、制御入力を、車両の少なくとも1つのアクチュエーターに対する制御コマンドにマッピングすることと、制御コマンドに従って車両の運動を制御することを含む。本方法のステップは、車両のプロセッサを用いて実行される。

30

【0012】

別の実施形態は、車両コントローラーと、プロセッサ、及び運動の不確定要素及び車両の運動についての制約を含む、車両の運動のモデルを記憶するメモリを備える、運動計画システムとを備える車両の制御システムを開示する。運動計画システムは、車両の運動のモデルに対する可能な制御入力の制御空間をサンプリングして、サンプリングされた制御入力のセットを生成し、車両の運動のモデルを用いて、車両の運動についての制約を満たす状態に車両を移動させる、各サンプリングされた制御入力の確率を特定し、サンプリングされた制御入力の確率を用いて、或る閾値を超える確率を有する制御入力を決定する。車両コントローラーは、制御入力を、車両の少なくとも1つのアクチュエーターに対する制御コマンドにマッピングし、車両のアクチュエーターに対する制御コマンドを用いて車両の運動を制御する。

40

【図面の簡単な説明】

【0013】

50

【図 1 A】本発明のいくつかの実施形態による、好適な制御入力を示す概略図である。

【図 1 B】本発明のいくつかの実施形態による、好適であるいくつかの確率を有する制御入力を示す概略図である。

【図 1 C】本発明のいくつかの実施形態による、不適な制御入力を示す概略図である。

【図 1 D】本発明のいくつかの実施形態による、種々の制御入力に対する確率を示す概略図である。

【図 1 E】本発明の 1 つの実施形態による、車両の運動を制御する方法のブロック図である。

【図 2 A】本発明のいくつかの実施形態による、車両を制御する制御システムのブロック図である。

【図 2 B】本発明の 1 つの実施形態による、運動計画システムの全体的な構造の図である。

【図 3】本発明のいくつかの実施形態による、車両の運動を定義する状態変移のグラフの概略図である。

【図 4】本発明のいくつかの実施形態による、運動についての可能な指定事項を示す表である。

【図 5 A】本発明のいくつかの実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って決定される異なる運動の概略図である。

【図 5 B】本発明のいくつかの実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って決定される異なる運動の概略図である。

【図 5 C】本発明のいくつかの実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って決定される異なる速度の概略図である。

【図 5 D】本発明の 1 つの実施形態による、サンプリングされた制御入力の確率の選択を示すグラフである。

【図 6 A】本発明のいくつかの実施形態による、車両を制御する方法のフローチャートである。

【図 6 B】本発明の 1 つの実施形態による、図 6 A の方法のための、制御入力のサンプルセットを決定する例示的な実施態様のフローチャートである。

【図 6 C】本発明の 1 つの実施形態による、図 6 A の方法のための、各制御入力の確率を特定する例示的な実施態様のフローチャートである。

【図 6 D】本発明のいくつかの実施形態による、衝突の確率を特定する概略図である。

【図 6 E】本発明のいくつかの実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って、次の状態、制御入力及び対応する合計値 (aggregates) を特定することの概略図である。

【図 6 F】本発明のいくつかの実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って、状態、及び対応する制御入力、及び対応する合計値の確率を特定することの概略図である。

【図 6 G】本発明のいくつかの実施形態による、状態の別個のセットに導く指定事項が存在する場合の合計された状態を特定することの概略図である。

【図 6 H】本発明のいくつかの実施形態による、図 6 G の状況のための方法の反復の簡略化された概略図である。

【図 6 I】本発明の 1 つの実施形態による、車両について運動の選択を決定する例示的な実施態様のフローチャートである。

【図 7】本発明のいくつかの実施形態による、運動計画システムと車両コントローラーとの間のインタラクションの概略図である。

【図 8】本発明の 1 つの実施形態による、中間目標位置の挿入の概略図である。

【図 9】本発明の 1 つの実施形態による、車両を移動させる車両コントローラーに提出される運動の概略図である。

【図 10】本発明の 1 つの実施形態による、運動を更新する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】

【0014】

10

20

30

40

50

本発明のいくつかの実施形態は、車両の運動の品質は、現在の状態から目標状態までの運動全体を評価する代わりに、或る状態から別の状態に車両を導く制御入力の評価することによって達成することができるという認識に基づいている。本明細書において用いられるとき、車両の状態は、車両のロケーション、速度及び進行方向等の、車両の動的特性を含む。

【0015】

図1Aは、自律車両の初期状態110及び次の状態120の一例を示している。次の状態120は、デカルト座標位置、速度、又は車両に関連付けられた別のエンティティ(entity:単位体)とすることができる。次の状態120は、特定の状態、又は状態の領域とすることができる。例えば、次の状態120は、許容速度の間隔又はデカルト空間における可能なロケーションの領域とすることができる。好適な制御入力は、車両110をその初期状態から次の状態120に導く入力である。入力から結果として得られる状態130aは、1つの時間ステップで制御入力を適用することでもたらされる状態変移に対応することができる、又は結果として得られる状態130aは、軌跡111a、すなわち状態変移のシーケンスを有して初期状態110に接続することができる。

10

【0016】

初期状態から次の状態への変移は、車両の運動のモデルを用いて実行することができる。運動のモデルは、モデルに提出された制御入力に従って車両の状態を変移させる。種々の実施形態において、車両の運動のモデルは、不確定要素を含む。そのために、車両の運動のモデルは、確率論的運動モデルであり、これは、モデルが車両の実際の運動の簡略化された記述であることを考慮に入れるだけでなく、車両の真の状態の検知における不確定要素、障害物の状態の検知における不確定要素、及び環境の検知における不確定要素も考慮に入れるためである。

20

【0017】

図1Aは、制御入力の特定の選択から結果として得られる次の状態130aと、モデルの不確定要素に起因した、次の状態への移動の不確定要素に関連付けられた不確定要素領域131aとを示している。確率論的モデルは不確定要素を含むため、領域131aは、次の状態130aよりも広く、すなわち、領域131aは、次の状態130aを包含するので、制御入力は、良好な制御入力である。本明細書において用いられるとき、各制御入力の「良好度」又は品質は、車両の運動についての制約を満たす状態に車両を移動させる制御入力の確率に依拠する。確率が高い程、制御入力は良好になる。

30

【0018】

図1Bは、制御入力の別の選択についての、次の状態130bと対応する不確定要素領域131bとを示している。車両の次の状態は、運動についての制約に違反することはできない。しかしながら、不確定要素領域131b内に、制約を満たすことができる130bのようないくつかの状態が存在するので、初期状態130から車両の状態を変移させる図1Bの例の制御入力が良好な制御入力である確率が幾分か存在する。

【0019】

図1Cは、制御入力が、不確定要素領域が望ましい状態120と交差しない次の状態130cに導く状況を示している。図1Cの例の制御入力が、初期状態130から車両の運動についての制約を満たす状態に車両の状態を変移させる確率は、ゼロに近い。

40

【0020】

図1Dは、各制御入力に対する可能な割り当てられた確率と、対応する状態130a、130b、及び130cとを示している。見て取ることができるように、制約を満たす状態に車両を移動させる図1Aの制御入力の確率は、図1A、図1B及び図1Cの制御入力のうちで最も高い。同様に、制約を満たす状態に車両を移動させる図1Bの制御入力の確率は、図1Cの制御入力の確率よりも高い。いくつかの実施形態は、サンプリングされた制御入力の確率を用いて、閾値140を超える状態に車両を移動させる確率を有する制御入力を決定する。

50

【0021】

例えば、本発明の1つの実施形態は、閾値を超える最も高い確率を有する制御入力に対応する制御入力、すなわち、状態130aに対応する制御入力を用いる。別の実施形態は、図1A、図1B及び図1Cの制御入力等の制御入力の加重平均関数として制御入力を決定する。例えば、加重平均関数における各制御入力の重みは、その対応する確率である。いくつかの実施形態において、実施形態は、閾値を超える確率を有するサンプリングされた制御入力、すなわち、図1A及び図1Bの制御入力を合計する。

【0022】

図1Eは、本発明の1つの実施形態による、車両の運動を制御する方法のブロック図を示している。この方法は、車両のプロセッサを用いて実施することができる。方法は、車両の運動のモデルに対する可能な制御入力の制御空間をサンプリングして(150)、サンプリングされた制御入力155のセットを生成する。車両の運動のモデル145は、車両の運動についての不確定要素を含む。方法は、車両の運動のモデル145を用いて、車両の運動についての制約147を満たす状態に車両を移動させる、各サンプリングされた制御入力の確率165を決定する(160)。

10

【0023】

次に、方法は、サンプリングされた制御入力の確率165を用いて、閾値140を超える状態に車両を移動させる確率を有する制御入力175を決定する(170)。方法は、制御入力175を、車両の少なくとも1つのアクチュエーターに対する制御コマンド185にマッピングして(180)、制御コマンドに従って車両の運動を制御する(190)。

20

【0024】

図2Aは、本発明のいくつかの実施形態による、車両200を制御する制御システム199のブロック図を示している。車両は、四輪乗用車又はモバイルロボット等の、自律システムを装備した任意のタイプの移動車両とすることができる。また、車両は、制御システム199のコマンドに優先して外部入力210を受信することもできる。そのような場合、車両は、半自律車両である。

【0025】

制御システム199は、車両の現在の状態及び目標状態及び／又は領域を特定するナビゲーションシステム220を含む。例えば、ナビゲーションシステム220は、全地球測位システム(GPS)及び／又は慣性測定ユニット(IMU)を含むことができる。例えば、IMUは、3軸加速度計(複数の場合もある)、3軸ジャイロスコープ(複数の場合もある)、及び／又は磁気計(複数の場合もある)を含むことができる。IMUは、速度、方位、及び／又は他の位置関連情報を制御システム199の他のコンポーネントに提供することができる。

30

【0026】

また、制御システム199は、車両の未来の運動に対応する制御入力及び／又は制御入力のシーケンスを決定する運動計画システム240も備える。本発明のいくつかの実施形態において、運動計画システムは、以前の反復中に決定された車両の状態から、制御入力と車両の状態とを反復的に特定する。

40

【0027】

例えば、初期状態は、GPSによって特定された現在のロケーションとすることもできるし、GPS及びIMUの組み合わせによって特定された現在のロケーション及び現在の速度の組み合わせとすることもできる。目標状態は、障害物のロケーション及び速度を検出する少なくとも1つのセンサーを備える検知システム230からの検知情報231から取得される、障害物の運動を予測する(243)運動計画システム240からの情報244に応じて決定することができる。例えば、目標ロケーションは、障害物との衝突を回避するロケーションとすることもできる。

【0028】

1つの実施形態において、運動計画システムは、車両の確率論的運動モデルを用いて、

50

道路の中央からの車両のロケーションの偏差についての範囲、車両の現在の加速度及び進行方向角度からの変化についての範囲、車両の望ましい速度プロファイルからの偏差についての範囲、並びに道路上の障害物に対する最短距離等の、車両の運動についての種々の制約を満たす最高確率を有する、車両の未来の運動を決定する。

【0029】

初期状態及び目標状態に加えて、運動計画システム240は、障害物、車両の運転可能エリア、運転不可能エリア、又は違法エリア等の周囲環境250に関する情報231を受信する。情報231は、センサー230から、又は外部情報290として、例えば、車両対車両通信又は車両対インフラストラクチャ通信を用いて受信することができる。環境に関する情報は、マップとして表すことができる。また、運動計画システム240は、車両制御ユニット260から、車両運動に関する情報261も受信することができる。この情報は、位置、進行方向、速度等の車両の状態を含むことができ、マシンに直接又は遠隔に接続されたハードウェア又はソフトウェアのいずれかから受信される。

10

【0030】

運動計画システム240は、車両の運動についての制約を満たしつつ、目標状態を達成しかつ衝突及び運転不可能エリアを回避する、車両の運動241を決定する。この運動は、経路、速度、及び方位／進行方向を少なくとも含むが、また、更なるエンティティ、例えば、回転速度、加速度、操舵、制動、及びエンジントルクを含むこともできる。加えて、運動計画システム240は、運動241に対応する制御入力242を決定し、この制御入力は、当該制御入力を車両のアクチュエーターに対する制御コマンドにマッピングする車両制御システムに対するフィードフォワード制御入力として用いることができる。

20

【0031】

本発明の1つの実施形態において、運動計画システムは、検知システム230によって検出され、運動計画器によって受信される(231)、障害物の運動の予測243を含む。高確率を有する車両の未来の予測された運動について障害物を予測するのに応じて、本発明のいくつかの実施形態は、車両の変更された未来の運動を計算する。障害物は、別の車両若しくは歩行者、又は違法な運転挙動を表す仮想的な障害物、例えば、許容走行車線の境界を確定する線、停止線、「譲れ」の道路標識(yield sign)、又は運転者若しくは乗員からの入力からのものとすることができる。

【0032】

例えば、衝突が起こり得るような障害物との交差について、計算された運動が探索され、1つの実施形態は、障害物と衝突すると予測される計算された運動に低い確率を割り当てるか、又は更にはこれらの計算された運動を破棄する。変更された未来の運動は、以前の反復から計算された、可能な運動の残りの記憶されたセットから開始して決定される。本発明の実施形態のうちのいくつかは、検知システム230から取得されたセンサー情報231は、不確定的であるとともに誤差を有する可能性があり、障害物予測243が不確定要素を考慮に入れる場合でさえも、障害物の運動の予測は不確定的であるということに基づいている。そのような場合、補正された情報がセンサーシステム230から受信され、運動計画システム240によって計算された運動は、経路上の障害物を検出する際に変更される。

30

40

【0033】

運動241は、車両コマンド、例えば、操舵、制動、及びスロットルを計算するために、車両コントローラー260に対する入力、又は基準軌跡として用いられる。これらのコマンドを車両のアクチュエーターに提出して、車両を予測された運動241に従って移動させる。別の実施形態は、運動241に対応する制御入力242を提供する。運動計画器240に含まれる車両の運動モデルが実際の車両と同じ制御入力を用いる場合、車両は、計算された入力を用いて直接制御することができる。例えば、車両200が操舵及びエンジントルクを加えることによって制御される場合、かつ、運動計画器において用いられる運動モデルもまた制御入力として操舵及びエンジントルクを用いる場合、これらの制御入力は、車両に直接加えることができ、それにより、車両制御システム260をオーバーラ

50

イドすることができる。しかしながら、運動計画器 240 において用いられる車両 200 の数学的記述は、車両の真の運動の簡略化されたものであり得るため、車両制御システム 260 に対する入力として、代わりに、制御入力 242 を、フィードフォワード、又は公称の制御信号として運動基準 241 とともに用いることができる。例えば、エンジントルクに比例するように加速度をモデル化することができる。したがって、加速度は、運動計画システム 240 において利用される車両の運動モデルにおける入力として用いられる場合、車両制御システム 260 に対するスケーリングされたフィードフォワード入力として用いることができる。

【0034】

例えば、車両制御システム 260 は、操舵コントローラー、制動コントローラー及びスロットルコントローラーを備えることができ、操舵コントローラーは、操舵角度を入力として取り、制動コントローラーは、基準減速又は車輪空転 (wheel slip) を入力として取り、エンジンコントローラーは、公称速度又は加速度を入力として取り、全てのコントローラーは、トルクを出力し、運動計画システム 240 は、これらのエンティティの全てを含む。次に、運動計画器 240 によって計算されたトルクは、車両制御システム 260 を迂回することができ、又は、トルク 242 は、車両制御システム 260 のゼロレベル値として用いることができ、操舵角、基準減速又は車輪空転、及び公称速度又は加速度は、車両制御システム 260 に対する基準 241 として用いることができる。

【0035】

図 2B は、本発明の 1 つの実施形態による、運動計画システム 240 の全体的な構造を示している。運動計画システム 240 は、この運動計画システム 240 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、環境のマップ 281 及び車両情報 282 を記憶するメモリ 280 に接続される (271)。また、メモリ 280 は、現在時刻に至るまで計算された未来の運動、それぞれの確率及び不確定要素、並びに運動計画器の内部情報を記憶する (283)。この内部情報は、コスト関数、各計算された状態の値、各状態に導く運動、車両の望ましいロケーションからの偏差に関する情報、及び障害物の未来の予測された運動を含むが、これらに限定されない。いくつかの実施形態において、車両及び環境についての情報は、車両 261 及び検知情報 231 から受信された情報に基づいて更新される (271)。

【0036】

1 つの実施形態は、望ましい制御入力は、初期状態から目標状態までの運動全体の制御入力を評価する代わりに、一度に 1 つの制御入力を評価することによってだけで決定することができるという認識に依拠する。すなわち、計算された軌跡の品質は、軌跡を初期状態から目標状態まで計算して、その後運動の品質を評価するのではなく、特定の制御入力を評価するときに決定することができる。

【0037】

例えば、いくつかの実施形態は、車両の確率論的運動モデルを用いて、車両の運動のコスト関数を最適化する制御入力を計算し、ここで、コスト関数は、車両の運動についての確率論的制約として表現され、制御入力のセットの選択は、他のいくつかの確率論的コスト関数を最適化することによって選択することができる。コスト関数は、本発明の他の実施形態に従って選択される。

【0038】

図 3 は、本発明のいくつかの実施形態による、車両の運動を定義する状態変移のツリーの概略図を示している。運転可能空間 330 内の現在のツリーが、車両の現在の状態を示す根ノード 300 とともに示されており、このツリーは、状態をノードとして含み、状態は、本発明の他の実施形態に従って選択された制御入力から生じる、状態空間内のエッジとして変移する。例えば、エッジ 321 は、根ノード 300 から状態 320 までの所定の時間に制御入力を加えることによって生成された運動である。ツリーは、車両の目標状態 310 及び目標領域 340 を含むことができる。本発明の 1 つの実施形態において、いくつかの目標状態 310 及び領域 340 が存在することができる。エッジ 321 を生成する

10

20

30

40

50

制御入力、したがって同様に状態 3 2 0 に、或る確率を関連付けることができ、この確率は、車両、障害物及び環境のモデルにおける不確定要素を考慮する。

【0039】

本発明のいくつかの実施形態において、エッジ 3 2 1 は、いくつかの時点にわたって制御入力を評価することによって作成され、その一方で、他の実施形態は、各時点に新たな制御入力を決定し、ここで、制御入力の決定は、本発明の他の実施形態に従って記載されている。他の実施形態において、エッジ 3 2 1 は、1 つ又はいくつかの時点にわたっていくつかの制御入力を合計することによって作成される。目標領域 3 4 0 に向けてツリーを伸張する際に、初期状態が選択され、制御入力決定され、対応する状態シーケンス及び最終状態が決定される。例えば、3 8 0 を選択された状態とすることができ、3 8 1 をエッジとしてツリーに加えられる軌跡とすることができ、3 6 0 は、ノードとしてツリーに加えられる最終状態である。ツリーの更新は、本発明の他の実施形態によって記載されている。

10

【0040】

いくつかの実施形態において、車両状態は、いくつかの非線形関数 $x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k)$ に従って経時的に動的に進展し、ここで、 $f \in \mathbb{R}^n$ は、システム状態の進展を記述する非線形関数であり、 k は、離散時間インデックスであり、 $x \in X \in \mathbb{R}^n$ であり、 X は、状態空間であり、 u_k は、システムに対する入力を含み、 w_k は、システムの状態に作用するノイズであり、これは、例えば、車両の数学的記述における不確定要素、重量等の車両のパラメーターにおける不確定要素、又は不確定要素の他の発生源に起因するものである。例えば、状態に作用するノイズは、関数によって記述される車両の動的特性の正確性についての不確定要素、及び、関数によって用いられる車両のパラメーターの正確性についての不確定要素のうち的一方又は組み合わせを含む。いくつかの実施形態において、状態は、車両のロケーションベクトル、速度ベクトル、及び進行方向、例えば、方位を含む。確率密度関数 (PDF: probability density function) に関して、動的システムは、 $x_{k+1} \sim p(x_{k+1} | x_k, u_k)$ と記述することができる。いくつかの実施形態は、望ましい運動についての以前の指定事項を特定することができるという認識に依拠している。

20

【0041】

図 4 は、道路上を走行する自律車両の運動についての可能な指定事項の一例示的なリストを示している。運動についての指定事項は、車両の運動についての制約にマッピングすることができる。例えば、車両の運動についての指定事項により、車両が道路上に留まる (4 0 0) ことを指令することができる。可能な付加的な指定事項により、車両が公称速度 4 2 0 で車線の中央を走行する (4 1 0) ことを指令することができる。公称速度は、マップから取得されるか又は検知システム 2 3 0 によって検知される道路速度制限によって与えることもできるし、車両 2 0 0 の運転者又は乗員 2 1 0 によって与えることもできる。また、例えば、指定事項により、車両が周囲の障害物に対して安全マージンを維持するように指令することもできる。周囲の障害物は、検知システム 2 3 0 によって検出することができる。障害物の未来の挙動は、予測システム 2 4 3 によって予測することができる。加えて、別の可能な指定事項は、同じ車線における車両に対して安全距離を維持する (4 4 0) ことであり、これは 4 3 0 と同じであり得るが、通常はそうではない。乗員の快適さ、燃料消費、摩損、又は他の理由で、指定事項により、車両のスムーズな運転 4 5 0 を指令することができる。図 4 において表にまとめられた指定事項は、互いに反作用的なものであり得る。例えば、一定速度を維持しながら (4 2 0)、周囲の障害物に対して安全マージンを保つ (4 3 0) ことは不可能である可能性があり、又は指定事項 4 1 0 は、車両がいくつかの車線のうちの 1 つの車線の中央を維持すべきであることのみを宣言する。

30

40

【0042】

本発明のいくつかの実施形態において、指定事項は、動的システムが満たすべきである望ましい出力又は運動についての制約 $y_k = h(x_k)$ と記述される。例えば、或る指定

50

事項が公称速度 v_{nom} であり、或る状態が車両の速度 v である場合、 $v_{nom} = v$ が理想的であり、すなわち、車両の速度は、公称速度と同じであるべきである。

【0043】

1つの実施形態において、ランダムノイズソース e_k が望ましい出力に加えられ、すなわち、 $y_k = h(x_k, e_k)$ である。ノイズソース e_k は、指定事項を厳密に満たすことが可能でない場合があり、おそらくは可能でないことを考慮する。ノイズソースは、いくつかの方法において選択することができる。例えば、ノイズソースは、ゼロ平均及び共分散行列 R_k を有する加法的ガウス PDF、すなわち、 $e_k \sim N(0, R_k)$ であり、この結果 $y_k = h(x_k) + e_k$ がもたらされるものとして、又は最小値及び最大値を有する一様分布として、又は乗算的ノイズとして、選択することができる。付加的に又は代替的に、ノイズソースは、用途に特定の方法で選択することができる。PDF に関して、指定事項は、 $y_k \sim p(y_k | x_k)$ と記述することができる。

10

【0044】

そのために、本発明の1つの実施形態において、車両の運動についての制約は、道路の中央からの車両のロケーションの偏差についての範囲、車両の現在の加速度及び進行方向角度からの変化についての範囲、車両の望ましい速度プロファイルからの偏差についての範囲、及び道路上の障害物に対する最小距離についての範囲のうちの1つ又は組み合わせを含む。付加的に又は代替的に、車両の運動についての制約は、確率論的なものとして、道路の中央からの車両のロケーションの偏差の確率、車両の現在の加速度及び進行方向角度からの偏差の確率、車両の望ましい速度プロファイルからの偏差の確率、道路上の障害物に対する最小距離を違反する確率のうちの1つ又は組み合わせを含むことができる。

20

【0045】

図5Aは、本発明の種々の実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って決定される異なる運動の概略図を示している。運転可能領域500は、障害物が存在するエリア520を除く道路510を含む。車線情報、車両の運転者又は乗員の意図から特定することができる望ましい運動530は、車両の現在の状態550から目標状態540に到達するが、障害物520の運転不可能エリアを通過する、基準運動として解釈することができる。望ましい運動530は、車両の状態にわたって確率密度関数(PDF)531の形態の確率論的制約としてモデル化することができ、ここで、望ましい運動530は、PDFの平均であり、この平均からの許容偏差が標準偏差532としてモデル化される。そのような場合、運動は、これらの運動がPDF531とどの程度交差するかに依拠して、異なる確率を与えられる。運動計画器は、障害物520を回避するが、望ましい運動530と同じ位置において開始及び終了する、運動560及び570等の運動を生成する。

30

【0046】

本発明の実施形態のいくつかにおいて、運動は、第1に、良好な運動である確率に従っていくつかの運動を初期状態から目標状態まで特定することと、第2に、公称運動及び性能の他の測定値からの偏差、例えば、公称速度、周囲の障害物に対する距離、又は操舵入力の大きさからの偏差を組み合わせる決定論的なコスト関数を最適化することとによって計算される。例示のために、運動560は、望ましい運動の近くに留まるが、その一方で、運動570は、小さい操舵入力を維持することに重点を置いている。運動計画システム240において、目標状態540に導くいくつかの異なる運動が計算され、コスト関数により、いずれの運動を選択するかが決定される。

40

【0047】

図5Bは、本発明の様々な実施形態によって利用されるいくつかの原理に従って決定される異なる運動の概略図を示している。自律車両が、車線分離部(lane divider: 中央線)510bを有する2車線道路上で、第1の車線内に移動障害物520bを有する現在の状態550にある。運動についての指定事項は、車両が、指定事項からのそれぞれの許容確率論的偏差561b及び571bで、2つの車線560b及び570bのいずれかを維持することとすることができ、それにより、運動計画器は、第1の車線に留まるか又は第

50

2の車線に移動するかのいずれかを決定することができる。黒線580b及び590bは、運動計画器240による、2つの可能な計算された運動を示している。運動590bは、経路のおおよそ半分を過ぎるまで指定事項560bを満たしていない。

【0048】

図5Cは、公称速度、この場合、一定速度を維持するという指定事項560cとともに、580b及び590bにそれぞれ対応する速度プロファイル580c及び590cを示している。図5Cにおいて、運動580bに対応する速度580cは、制約を満たしていない。本発明のいくつかの実施形態は、最良の運動を決定するとき、これら2つ及び付加的な指定事項を重み付けする。

【0049】

図5Dは、本発明の1つの実施形態による、車両の状態にわたってPDF531を用いてサンプリングされた制御入力の変率の選択を示すグラフを示している。例えば、実施形態は、初期状態及びサンプリングされた制御入力を車両の運動のモデルに提出して、初期状態から次の状態521までの車両の変移を推定し、次の状態521に対応する点523における車両の状態にわたるPDFの値522を、サンプリングされた制御入力の変率として選択する。

【0050】

図6Aは、本発明のいくつかの実施形態による、車両を制御する方法699のフローチャートを示している。この方法は、車両の初期状態から車両の目標状態までの車両の運動を指定する制御入力のシーケンスを反復的に決定する。異なる実施形態において、初期状態は、車両の現在の状態であり、及び／又は、初期状態は、この方法の以前の反復中に決定された制御入力に対応する状態である。車両の現在の状態及び目標状態は、ナビゲーションシステム220によって決定することができる。

【0051】

運動は、例えば、図3に示すように、車両の状態を接続する状態変移によって規定される。各状態は、車両のロケーション、速度、及び進行方向を含む。方法のステップは、運動計画システム240のプロセッサ270及び／又は車両のプロセッサ270によって実行される。運動は、終了条件が満たされるまで、例えば、或る期間にわたって又は所定の反復回数にわたって、反復して決定される。図6Aの方法の反復は、以下のステップを含む。

【0052】

方法は、初期状態、サンプリングされた制御入力のセット及び対応する状態変移のセットを、状態及び変移が車両の状態についての静的制約及び動的制約を満たすように、特定する(600)。例えば、方法は、図3における状態380、状態変移381及び状態360を特定する。

【0053】

図6Bは、本発明の1つの実施形態による、サンプリングされた制御入力のセットを特定すること600の例示的な実施形態様のフローチャートを示している。特定すること600は、環境と以前の反復を用いて特定された状態とに関する情報を用いる。以前の状態の例として、図3におけるノード320、380、370、及び390が挙げられる。

【0054】

例示的な実施形態は、状態の初期探索601を実行する。これが方法の最初の反復である場合、初期状態は、車両の現在の状態である。最初の反復でない場合、初期状態は、多くの方法で特定することができる。例えば、初期状態は、目標状態の位置に対する最小ユークリッド距離を有する状態として特定することができ、初期状態は、[1, M]の間の、整数の一樣乱数(uniform integer random number)を生成することによって特定することができ、ここで、初期状態の数は1であり、以前の反復において特定された最後の状態の数はMであり、又は、初期状態は、以前の反復中に特定された制御入力に対応する状態として特定することができる。

【0055】

方法は、N個の制御入力セットをサンプリングし（602）、ここで、Nは、所定の数とするか又は適応的な数とすることができ、制御入力セットを用いて状態

【数1】

$$\{x_k^i\}_{i=1}^N$$

を予測する（603）。本発明のいくつかの実施形態において、制御入力は、動的システムのノイズソースから、すなわち、 w_k から、入力の平均値として公称入力 u_k を用いて、生成される。例えば、 w_k は、ガウス分布 $w_k \sim N(u_k, Q_k)$ から与えられるものとして選択することができ、又は、特定の用途に調整されるPDFとして選択することができる。

10

【0056】

本発明の他の実施形態において、サンプリングされた制御入力602は、運動についての指定事項を用いることによって生成される。運動についての指定事項は、事前に既知であり、動的システムのノイズソースから生成された入力は、指定事項をより良好に満たすように補正される。例えば、確率関数 $q(x_{k+1} | x_k, y_{k+1})$ を、入力を生成するのに用いることができ、ここで、 q は、時間インデックス k における状態及び時間インデックス $k+1$ における指定事項を所与とした、時間インデックス $k+1$ における状態の関数である。

【0057】

特定の例として、 w_k 及び e_k の双方が加法的ガウスPDFである場合、 q は、

20

【数2】

$$q(x_{k+1} | x_k^i, y_{k+1}) = p(x_{k+1} | x_k^i, y_{k+1}) = \mathcal{N}(x_{k+1} | x_{k+1}^i, (\Sigma)_{k+1}^{-1})$$

として選択することができ、ここで、

【数3】

$$x_{k+1}^i = f(x_k^i) + w_k^i + L_k^i (y_{k+1} - H_k^i f(x_k^i)), \Sigma_{k+1}^i = ((H_k^i)^T R_{k+1}^{-1} (H_k^i) + Q_k^{-1})^{-1},$$

$$\text{及び } L_k^i = (Q_k (H_k^i)^T (H_k^i Q_k (H_k^i)^T + R_{k+1}^{-1})^{-1}, H_k^i = \frac{\partial h}{\partial x},$$

30

であり、すなわち、制御入力は、指定事項からの偏差を考慮に入れる決定論的項で変更された、動的システムのノイズソースからのランダムサンプルとして生成することができ、対応する状態は、この変更された制御入力を用いて予測される（603）。

【0058】

本発明の1つの実施形態において、サンプリングされた制御入力602の生成及び対応する状態の予測603は、ループにおいて実行され、ここで、反復の数は、事前に決定される。別の実施形態において、制御入力602の生成は、指定事項に基づいて、T個の時間ステップの時間に先立って行われる。例えば、反復の数Tは、固定数のステップとして求めることができ、又は、反復は、検知システム230のセンサーの分解能の関数として決定することができる。602がT個の時間ステップで実行されると、入力が、時間インデックス $k+1$ から時間インデックス $k+T$ までの全ての指定事項に従って生成され、すなわち、 $q(x_{k+1} | x_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+T})$ である。

40

【0059】

図6Cは、車両の運動についての制約を満たす状態への移動を導入する各入力の確率を決定する方法610のフローチャートを示している。各入力の確率を決定するとき、まず、次の状態603が衝突611についてチェックされる。次の状態603及びこの状態603に導く状態変移が衝突を伴わない場合、指定事項との状態の一貫性が決定され（612）、各入力の確率が計算される（613）。

【0060】

1つの実施形態において、衝突チェック611が、次の状態

50

【数 4】

$$x_{k+1}^i$$

が障害物と衝突を起こすと判断した場合、車両の運動についての制約を満たす状態に導く入力確率は、ゼロに設定することができる。衝突チェックは、決定論的なものとするこ
ともできるし、確率論的なものとすることもでき、ここで、衝突は、衝突の確率が何らか
の閾値を超える場合に発生すると想定することができ、障害物の予測は、障害物の確率論
的な運動モデルに従って行われる。

【0061】

図6Dは、自律車両のロケーション610dの予測が障害物620dの不確定要素領域
621dと交差し、障害物620dがロケーション610dにある確率が衝突閾値630
dよりも高い一例を示している。例えば、車両のセンサーは、時間の関数として障害物の
位置を決定することができる。運動計画システムは、障害物の不確定要素領域と交差する
次の状態の確率を決定し、障害物の不確定要素領域と交差する次の状態の確率が衝突閾値
を超える場合、サンプリングされた制御入力にゼロの確率を割り当てる。

10

【0062】

方法610の別の実施形態において、合計確率が閾値614未満であり、ここで閾値は
予め決定することができる場合、入力は、車両の運動についての制約を満たす状態に導く
高い確率を有しないので、本方法が実行され（615）、再スタートする（599）。

【0063】

本発明のいくつかの実施形態において、決定すること612は、指定事項／制約のPDF
Fである、

20

【数 5】

$$p(y_{k+1}|x_{k+1}^i)$$

、次の状態、及び以前のサイクル660中に決定された入力の確率

【数 6】

$$\omega_k^i$$

の組み合わせとして行われる。例えば、入力が車両の動的モデルに従って生成される場合
、確率は、指定事項のPDFに比例し、すなわち、

30

【数 7】

$$\omega_{k+1}^i \propto p(y_{k+1}|x_{k+1}^i) \omega_k^i$$

である。別の例として、入力のサンプリングが上記で説明されたように、

【数 8】

$$p(x_{k+1}|x_k^i, y_{k+1})$$

に従って行われる場合、確率は、指定事項のPDFの予測に比例し、すなわち、

【数 9】

$$\omega_{k+1}^i \propto p(y_{k+1}|x_k^i) \omega_k^i$$

である。1つの実施形態において、確率は、これらの確率がPDFを表すように正規化さ
れる。

40

【0064】

本発明の1つの実施形態において、非ゼロであるものの低い確率を有する入力及び対応
する状態は、いくつかの時間ステップにおいて、より高い確率を有する入力及び状態と置
き換えられる。例えば、1つの実施形態は、生成することの確率

【数 1 0】

$$x_k^i$$

が

【数 1 1】

$$\omega_k^i$$

になるように入力及び対応する状態の新たなセットを生成する。別の実施形態において、この置き換えは、確率の逆二乗和が何らかの所定の閾値未満であるときは常に実行される。そのように行われることにより、蓋然的に良好な制御入力のみが用いられることが確実にされる。

10

【0 0 6 5】

入力及び対応する状態を決定すること 6 2 0 は、いくつかの方法において行うことができる。例えば、1つの実施形態は、加重平均関数を用いることによって制御入力を決定して、状態を

【数 1 2】

$$x_{k+1} = \sum_{i=1}^N \omega_{k+1}^i x_{k+1}^i$$

20

として生成し、制御入力についても同様である。別の実施形態は、制御入力を、最高確率を有する状態及び入力として決定し、すなわち、

【数 1 3】

$$i = \operatorname{argmax} \omega_{k+1}^i$$

である。付加的に又は代替的に、1つの実施形態は、サンプリングされた制御入力の固定数 $m < N$ にわたって平均することによって、制御入力を決定する。

【0 0 6 6】

図 6 E は、ステップ 6 0 0、6 1 0 及び 6 2 0 の 3 回の反復の結果の簡略化された概略図であり、各反復について 5 つのサンプリングされた制御入力生成される場合を示している。初期状態 6 1 0 e は、運動のモデル及び 5 つのサンプリングされた制御入力を用いて未来の時点 6 1 1 e を予測され、5 つの次の状態 6 2 1 e、6 2 2 e、6 2 3 e、6 2 4 e 及び 5 2 5 e が生成される。確率は、指定事項 6 2 6 e 及びこの指定事項 6 2 6 e の確率論的に許容される偏差 6 2 7 e の関数として決定される。各時間ステップにおいて、すなわち、各反復において、確率の合計を用いて、合計された制御入力及び対応する状態 6 2 0 e が生成される。

30

【0 0 6 7】

図 6 F は、図 6 E における第 1 の反復における 5 つの状態の可能な割り当てられた確率を示している。これらの確率 6 2 1 f、6 2 2 f、6 2 3 f、6 2 4 f 及び 5 2 5 f は、状態 6 2 1 e、6 2 2 e、6 2 3 e、6 2 4 e、及び 5 2 5 e を示すドットのサイズを選択することにおいて反映される。

40

【0 0 6 8】

図 6 E に戻ってこれを参照すると、状態 6 2 0 e は、次の反復についての初期状態となり、この状態 6 2 0 e は、初期状態 6 2 0 e から次の状態 6 3 1 e、6 3 2 e、6 3 3 e、6 3 4 e、及び 6 3 5 e まで変移する車両の状態の 5 つのサンプリングされた制御入力をここでも生成する。状態 6 3 0 e に対応する制御入力は、この反復のサンプリングされた制御入力の確率に従って選択される。状態 6 3 0 e は、次の反復についての初期状態である。

【0 0 6 9】

本発明のいくつかの実施形態において、図 4 における制約等の制約は、互いに反作用的

50

なものとすることができる。例えば、2車線道路上を走行する車両が車線のうちの一方の中央を維持すべきであるという制約を検討する。これは、指定事項 $y = d^2$ として表現することができ、ここで、 d は、車両の道路の中央からの変位の絶対値とすることができ、すなわち、 y の値は、車両が第1のレーンにあるか又は第2のレーンにあるかにかかわらず、同じ値となる。

【0070】

図6Gは、本発明の1つの実施形態による、両立しない制約 (conflicting constraints) の可能なシナリオの概略図を示している。実施形態は、まず、いずれの状態がいずれの車線に属するのかを特定し、次に、2つの合計された制御入力及び対応する合計された状態を計算する。これは、いくつかの方法で行うことができる。例えば、1つの実施形態は、まず、例えばカーネルスモザーを用いて、離散した確率の連続表現 630g を決定し、次に、図5Bにおいて560b及び570bによって例示化された、610g及び620gを決定する。別の実施形態において、最大確率640gに対応する、制御入力及び対応する状態が決定される。別の実施形態において、何らかの閾値未満の確率を有する2つの接近して存在する状態は、車線分離部を決定する。この例は、他の詳細及びより大きな範囲に一般化することができることが理解される。一代替形態として、両立しない制約は、まず、他の両立する制約を含む第1の制約のための運動を決定し、次に他方の制約のための運動を決定することによって、別個に取り扱うことができる。

【0071】

いくつかの実施形態は、以下のようにノード及びエッジのツリー $G = (V, E)$ を更新する。これが方法600の最初の反復である場合、ツリーは、現在の状態から開始され、エッジは空である。最初の反復でない場合、600～620において決定される合計された状態のシーケンス及び制御入力のシーケンスがノードとして追加され、状態を接続する軌跡がエッジとして追加される。例えば、図3における360は、追加のノードであり、対応するエッジは、381である。代替的に、1つの実施形態において、全ての生成された制御入力及び対応する状態がツリーに追加され、この場合において、決定すること620は、迂回することができる。

【0072】

図6Hは、PDFの各別個のセクションについての1つの制御を生成する方法の反復の簡略化された概略図を示している。この例において、状態623e及び624eに対応する2つの制御入力が、単一の反復について選択される。少なくとも1つの反復についての複数の制御入力の選択により、車両の現在の状態を車両の目標状態と接続する運動のセットが結果として得られる。そのために、1つの実施形態は、運動のセットから、コスト関数を最適化する運動を選択する。

【0073】

図6Iは、1つの実施形態による、車両の運動640を選択することのブロック図を示している。目標領域340に到達した全ての運動が、それらのコスト関数に従ってチェックされ、最良のコストをもたらす運動が求められ(642)、対応する制御入力を有する運動が車両制御システムに適用される(643)。

【0074】

いくつかの実施形態は、運動計画システム240によって計算される運動に従って車両を制御する(650)。運動計画システムによって計算される運動は、車両の制御システムに対する基準軌跡として用いられる。1つの実施形態において、制御入力は、車両制御システムに対するフィードフォワード成分として用いられる。例えば、本発明の1つの実施形態は、デカルト平面ロケーションの形態の基準軌跡を用いるとともに、車両の操舵角及び加速度をフィードフォワード成分として用いる。1つの実施形態において、基準軌跡は、車両の位置、速度ベクトル、及び進行方向を含む。

【0075】

図7は、本発明のいくつかの実施形態による、運動計画システムと車両コントローラーとの間のインタラクションの概略図を示している。例えば、本発明のいくつかの実施形態

において、車両 700 のコントローラーは、車両 700 の転回及び加速度を制御するステアリング 710 及び制動／スロットルコントローラー 720 である。しかしながら、1つの実施形態において、運動計画システム 740 は、運動計画器 740 における制御入力操舵及び速度であるように、よりシンプルなモデルを用いる。そのために、車両コントローラー 700 は、制御入力を、車両の少なくとも 1 つのアクチュエーター、車両のハンドル及び／又は制動に対する制御コマンドにマッピングし、車両のアクチュエーターに対する制御コマンドを用いて車両の運動を制御する。

【0076】

例えば、運動計画器の制御入力は、車両制御システム 720 の基準軌跡に追加することができる。1つの実施形態において、運動計画器において計算される、車両を移動させる制御入力は、真の車両制御システムに対するフィードフォワード制御入力として、例えば、運動計画システム 740 の制御入力が 710 及び 720 と部分的に同じ場合、用いられる。そのような方法を行うことで、真の車両制御システムは、運動計画器におけるモデル化誤差に起因した偏差のみを制御する。

【0077】

運動計画システム 240 は、コスト関数

【数 14】

$$J(x, u, \sigma_y) = j(x(T), u(T), \sigma_y(t)) + \int_0^T g(x(t), u(t), \sigma_y(t)) dt$$

を最小化し、車両の運動における制約を満たし、障害物との衝突を回避することを条件に、運動を選択する。1つの実施形態は、コスト関数を

【数 15】

$$J = \int_0^T k_1 \|p - p_{ref}\| + k_2 \|v - v_{ref}\| dt$$

として選択し、ここで、 k_1 及び k_2 は、ユークリッド距離上の正の重みであり、 p_{ref} 及び v_{ref} は、それぞれ、例えば運転者入力若しくは乗員入力から計算されるナビゲーションシステムから到来するか、又はカメラから推定される、望ましい経路及び速度であり、 p 及び v は、車両の位置及び速度である。他の実施形態において、コスト関数は、 $J = T$ として選択され、ここで、 T は、初期状態から目標領域に到達する運動の時間である。更に別の実施形態は、 $g = k_1 \Delta \delta + k_2 \Delta v$ を使用し、ここで、 $\Delta \delta$ 及び Δv は、それぞれ、2つの連続時間ステップの間の操舵及び速度における差であり、逆もまた同様である。例えば、1つの実施形態は、現在のロケーションと目標状態との間の中間目標出力を挿入する。

【0078】

図 8 は、自律車両 800 が、道路縁 810 及び 2 つの車線間の分離部 820 を有する 2 車線道路上を移動し、目標ロケーション 830 を受信したものの、運動計画システムが、割り当てられた時間スロット内で目標 830 に対する安全運動を計算することができない状況を示している。本発明の 1 つの実施形態において、運動計画器は、到達することが容易である中間目標点 840 及び／又は 841 を挿入する。1つの実施形態において、各車線に 1 つの目標点が挿入される。例えば、道路上に障害物 850 が存在する場合、用いられるコスト関数に依拠して、運動計画器は、車両 850 の追い越しが開始されるか否かを決定することができる。別の実施形態において、ナビゲーションシステムは、そのような中間目標を提供することができる。

【0079】

例えば、1つの実施形態は、中間目標ロケーション、例えば、初期ロケーションと目標ロケーションとの間のロケーション 840 を決定し、初期ロケーションと中間目標ロケー

10

20

30

40

50

ションとの間の第1の運動を決定し、第1の運動を用いて中間目標ロケーションに到達するように車両を制御する。次に、実施形態は、中間目標ロケーションと目標ロケーションとの間の第2の運動を決定し、第2の運動を用いて目標ロケーションに到達するように車両を制御する。代替的に、図5Bにおけるようないくつかの運動560b及び570bを計算することができる。

【0080】

いくつかの実施形態において、計算のための時間スロットが失効すると、中間目標への計算された運動が、基準として車両制御システムに送信され、その一方で、運動計画システムは、目標状態830への改善された運動を、継続して計算する。いくつかの実施形態において、中間目標は、新たな予測された運動が車両制御システムに送信されると更新される。他の実施形態において、実行されないツリーの一部が、運動を改善する前に、効率性を高めるように除去される。

10

【0081】

いくつかの実施形態は、目標ロケーションを、運動計画システムが処理することができる最も遠いロケーションとして決定する。例えば、1つの実施形態は、運動を決定することを許容される期間を決定し、その期間内に運動を計算することを許容される最大距離を決定し、初期ロケーションから最終目的地に向かう最大距離にあるロケーションを目標ロケーションとして、最大加速度、最大速度、及び最大操舵等のいくつかのファクターに依拠して決定する。

20

【0082】

図9は、車両900を移動させる車両コントローラーに提出される運動902の概略図を示している。次の計画サイクルにおいて、車両は、910に移動している。本発明の1つの実施形態において、運動計画器は、これを予測し、冗長部分901に対応するグラフ内のノード及びエッジを除去する。

【0083】

以前に計算された運動が利用可能である場合、運動計画システムは、その運動を用いて計算数を低減することができる。しかしながら、例えば、不確定要素予測が243に含まれる場合でさえ、予測システム243によって予測されたものと異なるように移動した1つ以上の障害物に起因した運転不可能エリアにおける変化と、制御された車両位置が運動計画システム240によって計算されたものと厳密に同じというわけではないことを考慮して、経路を調節する必要がある可能性がある。

30

【0084】

図10は、本発明の1つの実施形態による、運動を更新する方法のフローチャートを示している。まず、検知システムは、予期しない環境における変化、又は車両状態の推定における変化を検出する(1010)。非安全運動に導くノードに対応する枝が除去される(1020)。以前に取り扱われていなかった潜在的なエリアが、時間が許す限り付加的なサンプリング及びロケーションの接続とともにサンプリングされ(1030)、運動が更新される(1040)。

【0085】

いくつかの実施形態において、新たな障害物が現れるか又は障害物が運動計画器において予測された位置に対して位置を変更した場合、まず、新たな予測された障害物運動と衝突するツリー内のエッジが決定される。障害物と交差する各エッジについて、対応する子エンドポイントノードが、無効としてマーキングされる。次に、ツリーは、トリミング及び再延伸される。

40

【0086】

本発明の上記の実施形態は、数多くの方法のいずれにおいても実現することができる。例えば、それらの実施形態は、ハードウェア、ソフトウェア又はその組み合わせを用いて実現することができる。ソフトウェアにおいて実現されるとき、そのソフトウェアコードは、単一のコンピューター内に設けられるにしても、複数のコンピューター間に分散されるにしても、任意の適切なプロセッサ、又はプロセッサの集合体において実行することが

50

できる。そのようなプロセッサは集積回路として実現することができ、集積回路構成要素内に1つ以上のプロセッサが含まれる。一方、プロセッサは、任意の適切な構成の回路を用いて実現することができる。

【0087】

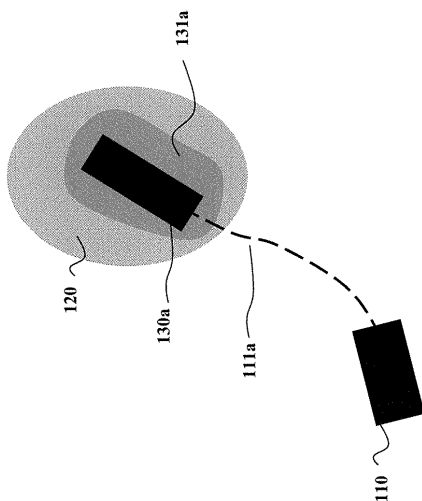
また、本明細書において概説される種々の方法又はプロセスは、種々のオペレーティングシステム又はプラットフォームのいずれか1つを利用する1つ以上のプロセッサ上で実行可能であるソフトウェアとしてコード化することができる。さらに、そのようなソフトウェアは、幾つかの適切なプログラミング言語及び／又はプログラミングツール若しくはスクリプト記述ツールのいずれかを用いて書くことができ、フレームワーク又は仮想機械上で実行される実行可能機械語コード又は中間コードとしてコンパイルすることもできる。通常、プログラムモジュールの機能は、種々の実施形態において望ましいように、組み合わせることもできるし、分散させることもできる。

【0088】

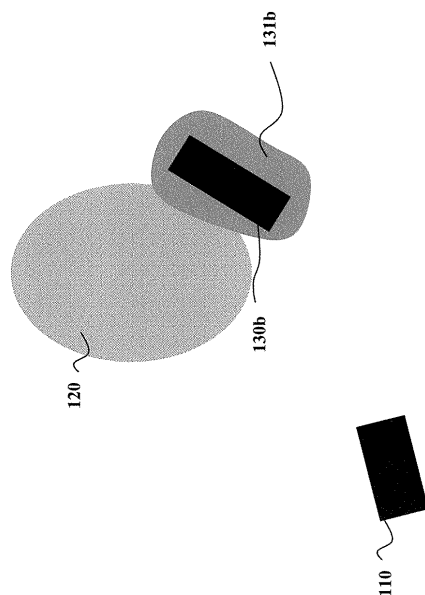
また、本発明の実施形態は方法として具現することができ、その一例が提供されてきた。その方法の一部として実行される動作は、任意の適切な方法において順序化することができる。したがって、例示的な実施形態において順次の動作として示される場合であっても、例示されるのとは異なる順序において動作が実行される実施形態を構成することもでき、異なる順序は、幾つかの動作を同時に実行することを含むことができる。

10

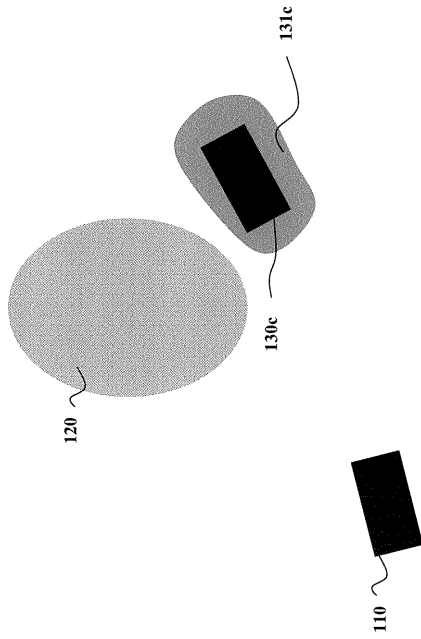
【図1A】



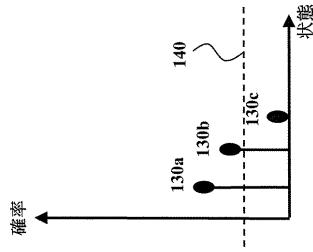
【図1B】



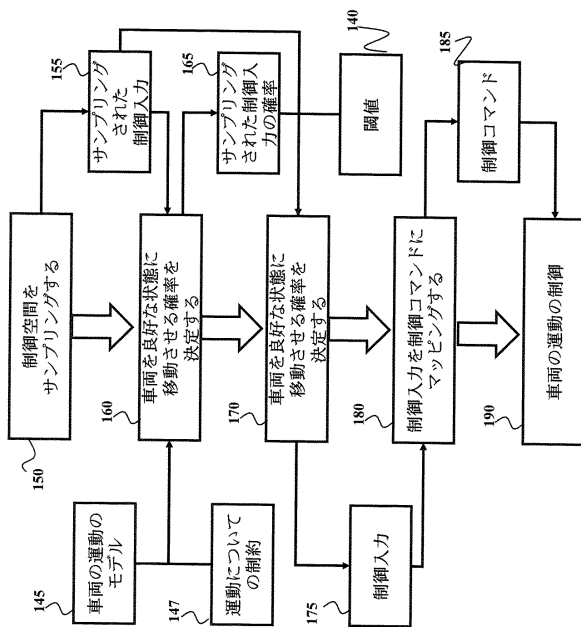
【図 1 C】



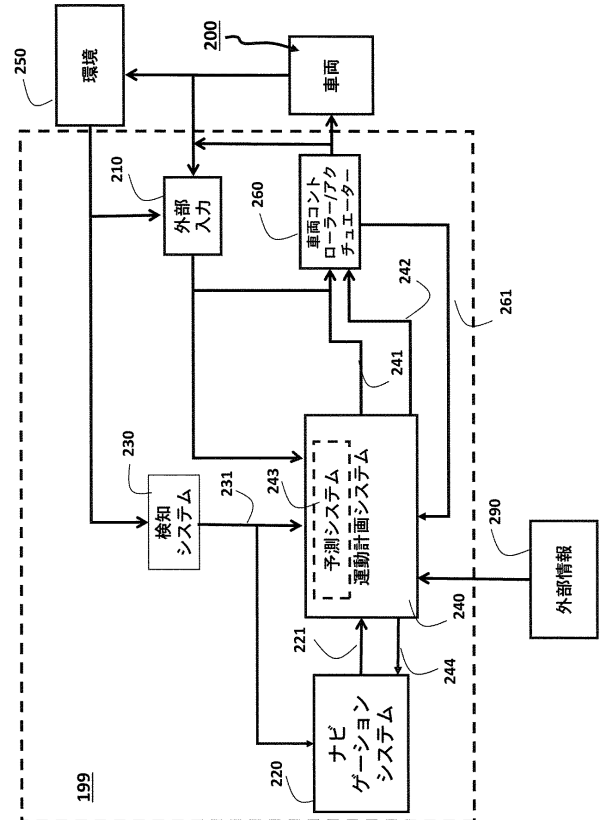
【図 1 D】



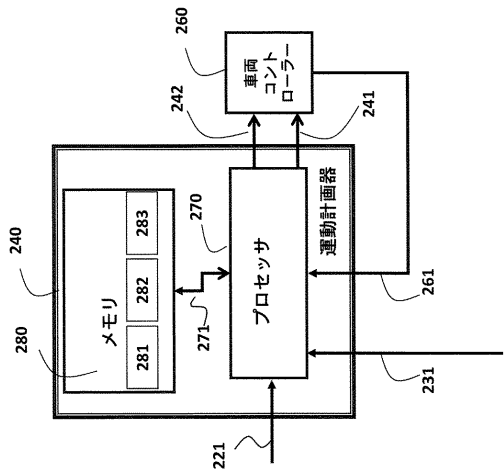
【図 1 E】



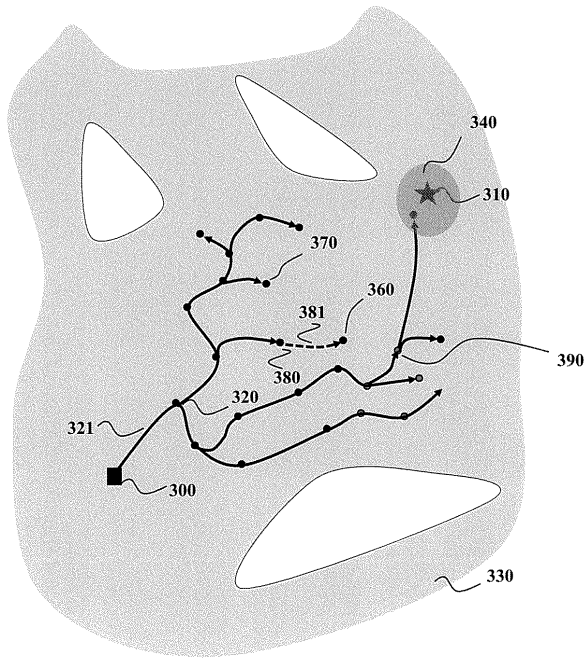
【図 2 A】



【図 2 B】



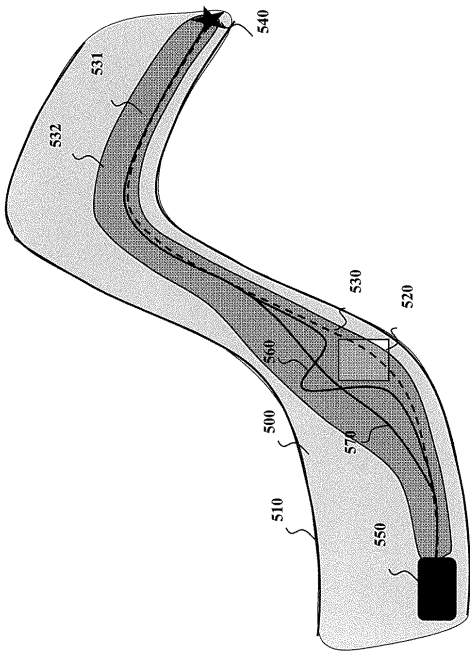
【図 3】



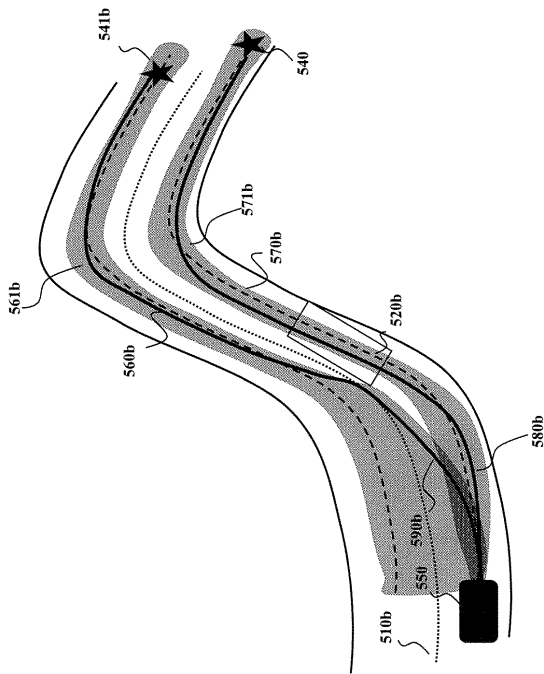
【図 4】

計算される運動についての指定事項	
400	道路上に留まる
410	車線の中央に留まる
420	公称前後方向速度を維持する
430	周囲の障害物に対する安全マージンを維持する
440	同じ車線内の車両に対する最小距離を維持する
450	スムーズに運転する

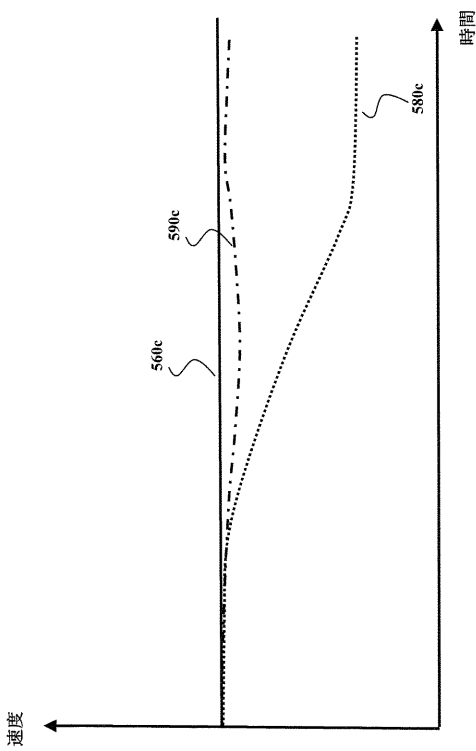
【図 5 A】



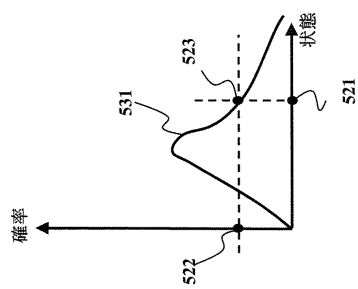
【図 5 B】



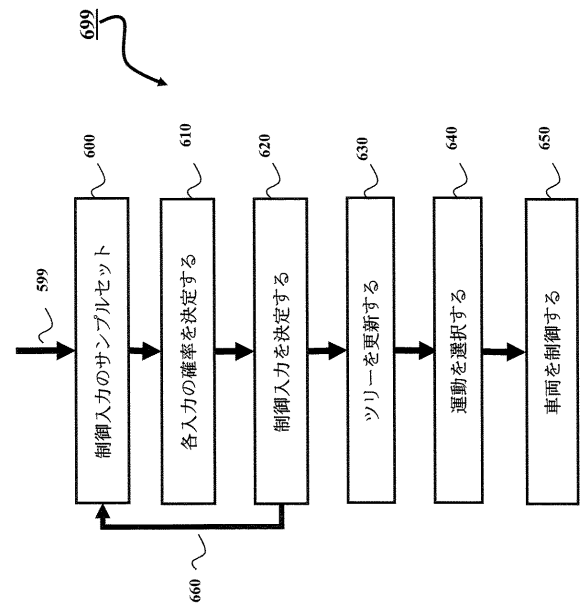
【図 5 C】



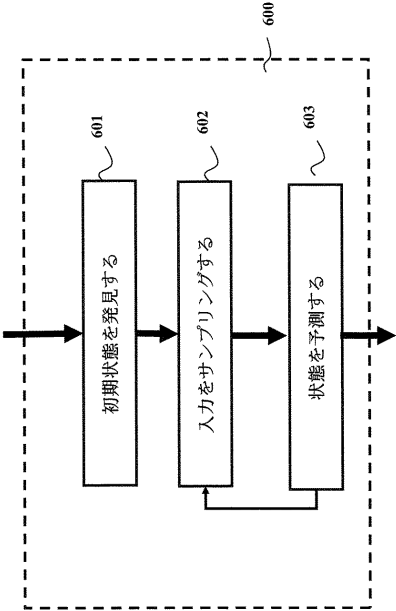
【図 5 D】



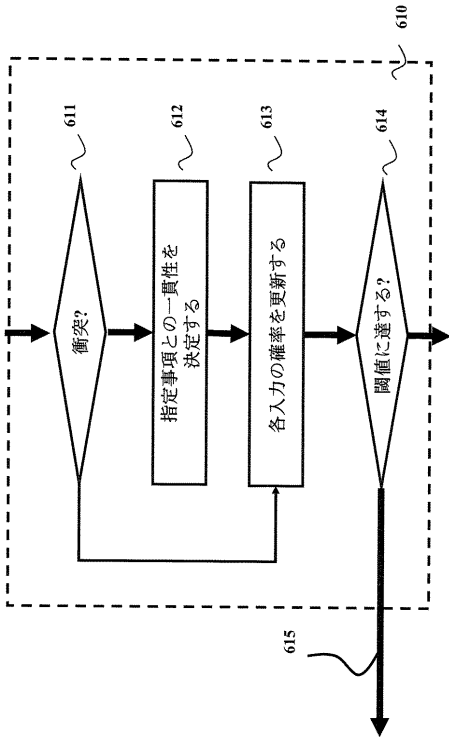
【図 6 A】



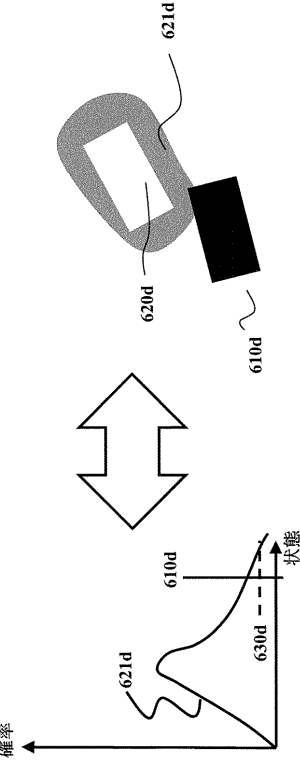
【図 6 B】



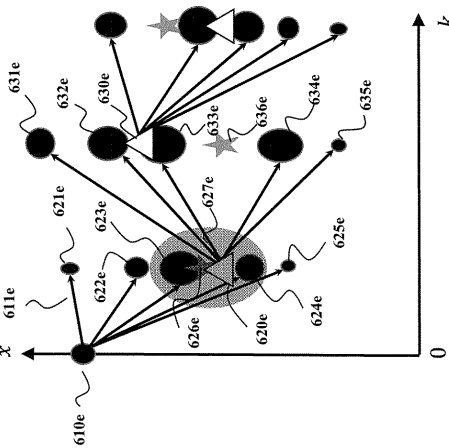
【図 6 C】



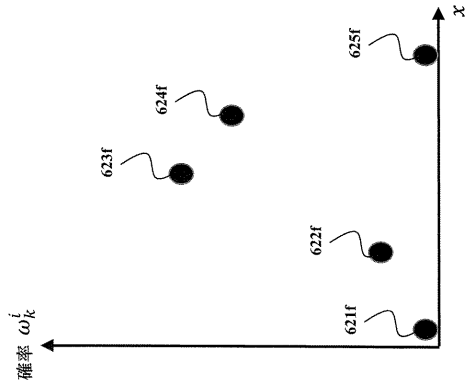
【図 6 D】



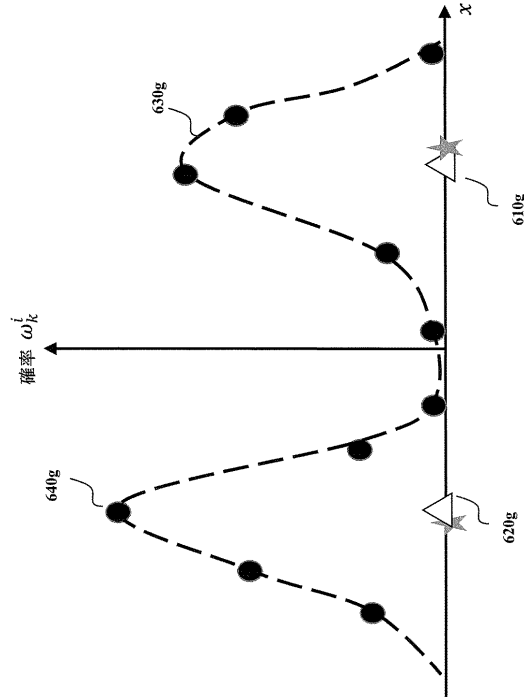
【図 6 E】



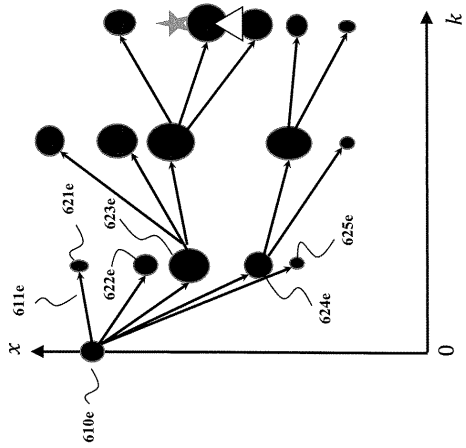
【図 6 F】



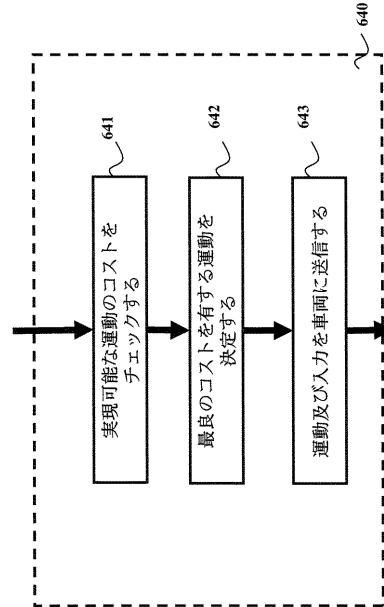
【図 6 G】



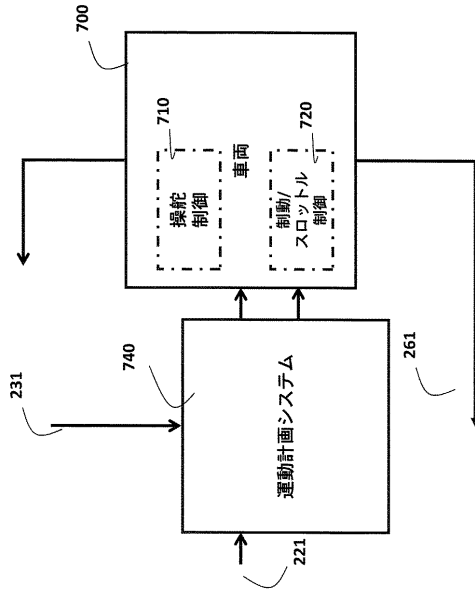
【図 6 H】



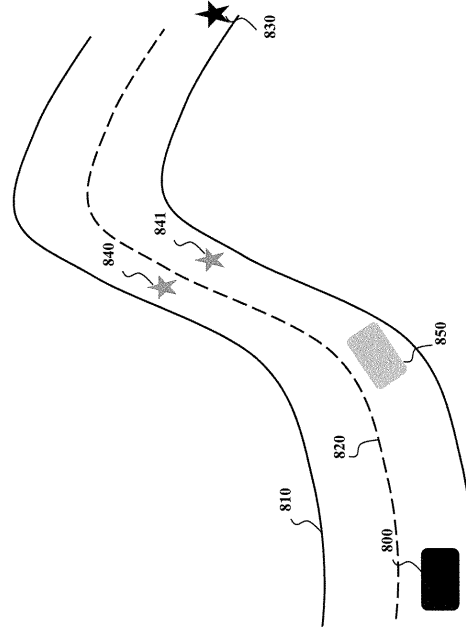
【図 6 I】



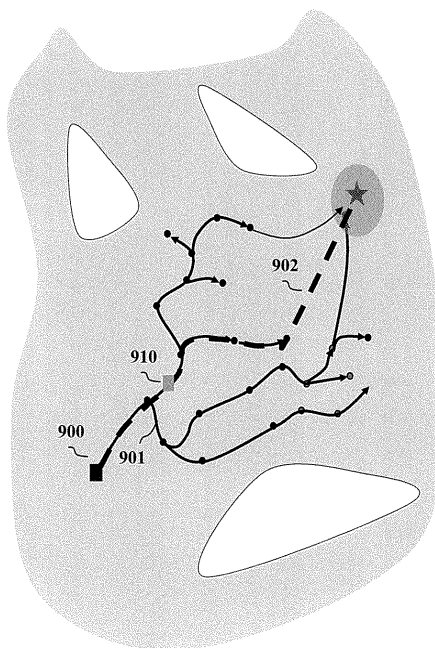
【図 7】



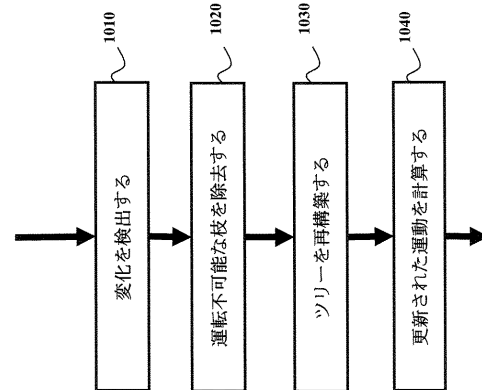
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(72)発明者 バーントープ、カール

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 ディ・カイラノ、ステファノ

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 田合 弘幸

(56)参考文献 特開2007-230454 (JP, A)

国際公開第2017/002590 (WO, A1)

特開2015-230547 (JP, A)

米国特許出願公開第2010/0017115 (US, A1)

米国特許出願公開第2014/0372073 (US, A1)

特開2009-098877 (JP, A)

米国特許出願公開第2010/0057361 (US, A1)

特開2010-076504 (JP, A)

国際公開第2006/070865 (WO, A1)

特開2007-099166 (JP, A)

欧州特許出願公開第01881346 (EP, A1)

特開2008-158969 (JP, A)

特開2009-037561 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B60W 30/00-30/20

G08G 1/00-99/00