

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6764945号
(P6764945)

(45) 発行日 令和2年10月7日(2020.10.7)

(24) 登録日 令和2年9月16日(2020.9.16)

(51) Int.Cl.

F 1

G 05 D 1/02 (2020.01)
G 08 G 1/16 (2006.01)
B 60 W 30/00 (2006.01)G 05 D 1/02
G 08 G 1/16
B 60 W 30/00

Z

C

請求項の数 9 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2018-559805 (P2018-559805)	(73) 特許権者	518337739 ヌートノミー インコーポレイテッド アメリカ合衆国 02210 マサチューセッツ州 ボストン ノーザン アベニュー — 100 スイート 200
(86) (22) 出願日	平成29年3月20日 (2017.3.20)	(74) 代理人	100102978 弁理士 清水 初志
(65) 公表番号	特表2019-512824 (P2019-512824A)	(74) 代理人	100102118 弁理士 春名 雅夫
(43) 公表日	令和1年5月16日 (2019.5.16)	(74) 代理人	100160923 弁理士 山口 裕幸
(86) 國際出願番号	PCT/US2017/023193	(74) 代理人	100119507 弁理士 刑部 俊
(87) 國際公開番号	W02017/165286	(74) 代理人	100142929 弁理士 井上 隆一
(87) 國際公開日	平成29年9月28日 (2017.9.28)		
審査請求日	平成30年11月9日 (2018.11.9)		
(31) 優先権主張番号	15/078, 143		
(32) 優先日	平成28年3月23日 (2016.3.23)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】車両の運転および自動運転を簡易化する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

以下を含む動作によって車両を環境内で目的地まで、1つまたは複数のプロセッサによって、自律的に走行させることを含む方法：

所与の時点での車両の位置を起点とし前記所与の時点から期間後の前記車両の位置を終点とする前記車両の候補軌道の有限集合を、1つまたは複数のプロセッサによって、生成すること、

前記車両の動作規則の違反を決定するための制御ポリシーに基づき、候補軌道の前記有限集合のそれぞれの候補軌道に関して、前記車両の応答を、1つまたは複数のプロセッサによって、シミュレートすること、

前記候補軌道および前記車両の動作規則の違反と関連付けられたコストを、1つまたは複数のプロセッサによって、決定することであって、所与の軌道と関連付けられた前記コストが前記所与の軌道の連続した状態間の遷移と関連付けられたコストに基づいて評価されること、

前記候補軌道と関連付けられた前記コストに基づいて、前記候補軌道の中から推定上の最適軌道を、1つまたは複数のプロセッサによって、選択すること、ならびに

前記選択された推定上の最適軌道に基づいて、前記車両のアクチュエータに、前記環境内で前記目的地に向かって前記車両を自律的に走行させる制御動作を行うよう、1つまたは複数のプロセッサによって、命令すること。

【請求項 2】

10

20

前記車両の制御に関する操作を簡易化することが、前記推定上の最適軌道と関連付けられたフィードバック制御ポリシーを、前記車両の制御要素に適用することを含み、前記フィードバック制御ポリシーの適用が、前記車両の状態および前記環境の状態に基づく、請求項1記載の方法。

【請求項3】

前記候補軌道の有限集合に1つまたは複数の制約を適用することを含み、前記制約が、前記連続した時点における前記世界状態のシーケンスに基づいて適用される、請求項1記載の方法。

【請求項4】

前記推定上の最適軌道が、前記車両の速度および方向の両方と関連付けられ、前記推定上の最適軌道を選択することが、有向グラフを通る最小コストパスを決定することを含み、前記候補軌道が前記有向グラフのエッジを含み、前記最小コストパスのコストが、制約の違反と関連付けられたペナルティを含む、請求項1記載の方法。 10

【請求項5】

車両の候補軌道の有限集合を生成することが、前記車両の前記位置および前記所与の時点での所与の制御ポリシーに対する前記車両の予期される応答を表すモデルを適用することを含み、前記モデルが、前記環境車両の要素の位置での前記所与の制御ポリシーおよび前記車両の予期される応答に対する前記環境の要素の応答を表す、請求項1記載の方法。

【請求項6】

所与の軌道と関連付けられた前記コストが、前記車両の状態と前記環境の状態との相互作用と関連付けられたコストに基づき、前記コストが、軌道の2つ以上の世界状態のシーケンスにわたって経時的に解釈されるコスト規則の表現を可能にする形式言語のコスト規則として表現されている、請求項1記載の方法。 20

【請求項7】

所与の軌道と関連付けられた前記コストが、前記車両の状態と前記環境の状態との相互作用と関連付けられたコストに基づく、請求項1記載の方法。

【請求項8】

前記選択された推定上の最適軌道が、前記車両の速度および方向の両方と関連付けられている、請求項1記載の方法。

【請求項9】

前記環境の状態が、前記対応する時点での別の車両、歩行者、および障害物の状態を含む、請求項1記載の方法。 30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本記述は、車両の運転および車両の自動運転を簡易化することに関する。

【背景技術】

【0002】

背景

人による車両の典型的な運転、および技術を用いた車両の自動運転は、機会とリスクを提示する。危険の多くは、車両の状態ならびに他の車両および障害物を含む環境の状態を考慮して車両がどのように運転されるかということと関連付けられる。 40

【0003】

通常、車両を運転している人間の運転者は、車両が、適用される交通規則を遵守しながら、例えば他の車両および歩行者と共有する道路網上を目的地まで安全かつ確実に進むように車両の動作を制御することができる。自動運転車両の場合には、車両が安全かつ確実に進むことができるよう、リアルタイムのセンサデータ、地理データ（地図など）、規制/規準データ（交通規則）、および履歴情報（交通パターンなど）に基づいて一連の制御動作を生成することができる。

【0004】

50

安全性などの理由から、車両の人間の運転者のパフォーマンスを監視することは有用でありうる。

【0005】

本発明者らは、自動運転車両という用語を、例えば、人間のオペレータによる直接の制御も管理も必要とせずに、例えば、人間のオペレータがいつでも制御責任を引き継ぐことを必要とせずに、乗客または物またはその両方を1つまたは複数の乗車場所から1つまたは複数の降車場所まで運ぶように設計された任意の移動装置を含む広い意味で使用する。自動運転車両のいくつかの例は、特に、自動運転路上走行車両、自動運転路上外走行車両、自動運転車、自動運転バス、自動運転バンもしくはトラック、ドローン、または航空機などである。

10

【0006】

本発明者らは、規制データという用語（場合によっては動作規則という用語）を、例えば、車両運転者を含む道路使用者などの装置のユーザの行動パターンを規定する規制、法律、および公式のまたは非公式の規則を含む広い意味で使用する。これらには、交通規則、ならびに同様の精度および深さで記述されたベストプラクティスおよび乗客またはオペレータの好みが含まれる。本発明者らは、履歴情報という用語を、例えば、いずれの場合もおそらくは場所、時刻、曜日、季節および天候のデータもしくは他の関連する特徴またはそれらの組み合わせの関数としての、歩行者および自転車通行者を含む道路使用者の行動パターンに関する統計データを含む広い意味で使用する。

20

【発明の概要】

【0007】

概要

一般に、一局面では、車両の制御に関連した操作は、以下を含む動作によって簡易化される。所与の時点での車両の位置を起点とする車両の候補軌道の有限集合が生成される。候補軌道は、車両の状態と、車両の位置および所与の時点での車両の可能な挙動および環境の可能な挙動に基づく。候補軌道と関連付けられたコストに基づいて候補軌道の中から推定上の最適軌道が選択される。コストは、車両の動作規則の違反と関連付けられるコストを含む。選択された推定上の最適軌道は、車両の制御に関連した操作を簡易化するために使用される。

【0008】

30

実施態様は、以下の特徴のうちの1つまたは2つもしくはそれ以上の任意の組み合わせを含みうる。車両の制御に関連した操作を簡易化することは、推定上の最適軌道と関連付けられたフィードバック制御ポリシーを、車両の制御要素に適用することを含む。各軌道は、所与の時点における車両の状態から後の時点における車両の状態への時間的遷移を表す。所与の時点の後の一連の時点の各々について、後続の時点での車両の位置を起点とした車両の候補軌道の後続の有限集合が生成される。後続の有限集合の候補軌道は、車両の状態と、後続の時点での車両の位置での車両の可能な挙動および環境の可能な挙動に基づく。

【0009】

40

候補軌道の有限集合には1つまたは複数の制約が適用される。1つまたは複数の制約を適用することは、有限集合の候補軌道の各々にラベルを帰属させることを含む。各ラベルは、候補軌道に基づく車両の特性を表す論理述語を含む。1つまたは複数の制約に基づいて、有限集合から何も除外されないか、または場合によっては少なくとも1つの候補軌道が除外される。除外することは、ハード制約を含み静的に（すなわち、時間に依存しないやり方で）解釈できる制約のうちの1つを適用することを含む。

【0010】

候補軌道は、有向グラフのエッジとして表される。推定上の最適軌道を選択することは、有向グラフを通る最小コストパスを決定することを含み、候補軌道は有向グラフのエッジを含む。

【0011】

50

環境は車両を含む。車両の候補軌道の有限集合を生成することは、車両の位置および所与の時点での所与の制御ポリシーに対する車両の予期される応答を表すモデルを適用することを含む。制御ポリシーは、車両を制御するコマンドを決定するフィードバック機能を含む。

【0012】

コストは、形式言語で表現されたコスト規則として表現される。コスト規則は、優先順位付けされ重み付けされた規則を含む。各コストは、(a)コスト規則の優先度およびその優先度を有するコスト規則の違反コストの集約、または(b)候補軌道の関数、のどちらかに各々対応する値の配列として表現される。

【0013】

車両の実際の軌道が、所与の期間にわたって監視される。所与の期間にわたって、車両の実際の軌道は、推定上の最適軌道と比較される。車両の制御に関連した操作を簡易化することは、運転者のパフォーマンスを監視することを含む。運転者のパフォーマンスを監視した結果が報告される。運転者のパフォーマンスは、1つまたは複数のパフォーマンスマトリックに基づいて評価される。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、安全性マトリックを含む。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、快適性マトリックを含む。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、環境マトリックを含む。事故発生の可能性が評価される。車両の動作規則の違反の可能性が評価される。運転者のパフォーマンスに関連した情報は、車載ディスプレイに表示される。運転者のパフォーマンスに関連した情報は、車両から離れた受信機に無線で送信される。

【0014】

車両の制御に関連した操作を簡易化することは、車両を自律的に走行させることを含む。車両の動作規則は、車両の運転者に適用される交通規則を含む。

【0015】

一般に、一局面では、車両の制御に関連した操作は、以下を含む動作によって簡易化される。所与の時点での車両の候補軌道の有限集合が生成される。車両のすべての可能な軌道の軌道空間に沿った候補軌道の有限集合。各候補軌道は制約に照らして評価される。候補軌道と関連付けられたコストに基づいて有限集合の候補軌道の中から推定上の最適軌道が選択される。車両のすべての可能な軌道の空間は、推定上の最適戦略が最適戦略に任意に近いように、生成された候補軌道の有限集合によって十分にカバーされる。選択された推定上の最適軌道は、車両の制御に関連した操作を簡易化するために使用される。

【0016】

実施態様は、以下の特徴のうちの1つまたは2つもしくはそれ以上の任意の組み合わせを含みうる。候補の有限集合を生成することは、非決定論的である可能性のあるプロセスを適用することを含む。車両の制御に関連した操作を簡易化することは、推定上の最適軌道と関連付けられたフィードバック制御ポリシーを、車両の制御要素に適用することを含む。各軌道は、所与の時点における車両の状態から後の時点における車両の状態への時間的遷移を表す。所与の時点の後の一連の時点の各々について、後続の時点での車両の位置を起点とした車両の候補軌道の後続の有限集合が生成される。後続の有限集合の候補軌道は、車両の状態と、後続の時点での車両の位置での車両の可能な挙動および環境の可能な挙動とに基づく。

【0017】

候補軌道の有限集合には制約のうちの1つまたは複数が適用される。1つまたは複数の制約を適用することは、有限集合の候補軌道の各々にラベルを帰属させることを含む。各ラベルは、候補軌道に基づく車両の特性を表す論理述語を含む。1つまたは複数の制約に基づいて、有限集合から何も除外されないか、または場合によっては少なくとも1つの候補軌道が除外される。候補軌道を除外することは、ハード制約を含み静的に解釈できる制約のうちの1つを適用することを含む。

【0018】

候補軌道は、有向グラフのエッジとして表される。推定上の最適軌道を選択することは

10

20

30

40

50

、有向グラフを通る最小コストパスを決定することを含み、候補軌道は有向グラフのエッジを含む。

【0019】

環境は車両を含む。車両の候補軌道の有限集合を生成することは、車両の位置および所与の時点での所与の制御ポリシーに対する車両の予期される応答を表すモデルを適用することを含む。制御ポリシーは、車両を制御するコマンドを決定するフィードバック機能を含む。

【0020】

コストは、形式言語で表現されたコスト規則として表現される。コスト規則は、優先順位付けされ重み付けされた規則を含む。各コストは、(a)コスト規則の優先度およびその優先度を有するコスト規則の違反コストの集約、または(b)候補軌道の関数、のどちらかに各々対応する値の配列として表現される。

10

【0021】

車両の実際の軌道が、所与の期間にわたって監視される。所与の期間にわたって、車両の実際の軌道は、推定上の最適軌道と比較される。車両の制御に関連した操作を簡易化することは、運転者のパフォーマンスを監視することを含む。運転者のパフォーマンスを監視した結果が報告される。運転者のパフォーマンスは、1つまたは複数のパフォーマンスマトリックに基づいて評価される。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、安全性マトリックを含む。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、快適性マトリックを含む。1つまたは複数のパフォーマンスマトリックは、環境マトリックを含む。事故発生の可能性が評価される。

20

【0022】

車両の制御に関連した操作を簡易化することは、運転者のパフォーマンスを監視することを含む。車両の制御に関連した操作を簡易化することは、車両を自律的に走行させることを含む。

【0023】

一般に、一局面では、自律走行車両は、制御ポリシーとの整合性、および世界軌道に沿った連続した世界状態間のそれぞれの遷移に適用されるコスト規則との整合性が取れるよう車両に最適軌道の少なくとも一部を通過させるように構成された制御可能な装置を含む。コントローラは、世界軌道に従って制御可能な装置にコマンドを提供する。ソースは、連続した時点における世界状態に関する情報を提供する。計算要素は、(a)各世界状態が、世界状態に関する情報に少なくとも部分的に基づいた車両の状態と車両の環境の状態と環境内の少なくとも1つの他の物体の状態との組み合わせを表す、世界状態の集合、および(b)各世界軌道が、世界状態のうちのある世界状態と世界状態のうちの別の世界状態との間の時間的遷移を表す、世界軌道の集合を、反復的に更新する。更新の各反復は、世界状態の1つまたは複数の各々について、および対応する車両制御ポリシーについて、その世界状態から次の世界状態までの候補軌道をシミュレートすることを含む。シミュレートされた候補軌道が制約に違反しない場合、その軌道は世界軌道の集合に追加されて、更新された世界軌道の集合が形成される。必要に応じて、新しい世界状態が、シミュレートされた候補軌道によって表される遷移に対応する世界状態の集合に追加されて、更新された世界状態の集合が形成される。更新された世界状態の集合および更新された世界軌道の集合を通る最小コストパスが決定される。この決定することは、世界軌道のそれぞれの遷移にコスト規則を適用することを含む。車両の自律制御のために、最小コストパスに沿った現在の世界状態から次の世界状態への次の遷移を表す情報がコントローラに送られる。

30

【0024】

[本発明1001]

以下を含む動作によって車両の制御に関連した操作を簡易化することを含む方法：

所与の時点での車両の位置を起点とする前記車両の候補軌道の有限集合を生成することであって、前記候補軌道が、前記車両の状態と、前記車両の前記位置および前記所与の時

40

50

点での前記車両の可能な挙動および環境の可能な挙動に基づく、こと、

前記車両の動作規則の違反と関連付けられたコストを含む、前記候補軌道と関連付けられたコストに基づいて、前記候補軌道の中から推定上の最適軌道を選択すること、ならびに

前記車両の制御に関連した操作を簡易化するために、前記選択された推定上の最適軌道を使用すること。

[本発明1002]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、前記推定上の最適軌道と関連付けられたフィードバック制御ポリシーを、前記車両の制御要素に適用することを含む、本発明1001の方法。

10

[本発明1003]

前記候補軌道の有限集合に1つまたは複数の制約を適用することを含む、本発明1001の方法。

[本発明1004]

1つまたは複数の制約を適用することが、前記有限集合の前記候補軌道の各々にラベルを帰属させることを含み、前記ラベルの各々が、前記候補軌道に基づく前記車両の特性を表す論理述語を含む、本発明1003の方法。

[本発明1005]

推定上の最適軌道を選択することが、有向グラフを通る最小コストパスを決定することを含み、前記候補軌道が前記有向グラフのエッジを含む、本発明1001の方法。

20

[本発明1006]

車両の候補軌道の有限集合を生成することが、前記車両の前記位置および前記所与の時点での所与の制御ポリシーに対する前記車両の予期される応答を表すモデルを適用することを含む、本発明1001の方法。

[本発明1007]

前記コストが、形式言語のコスト規則として表現されている、本発明1001の方法。

[本発明1008]

前記車両の実際の軌道を所与の期間にわたって監視することを含む、本発明1001の方法。

[本発明1009]

30

前記所与の期間にわたって、前記車両の前記実際の軌道を前記推定上の最適軌道と比較することを含む、本発明1008の方法。

[本発明1010]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、運転者のパフォーマンスを監視することを含む、本発明1001の方法。

[本発明1011]

1つまたは複数のパフォーマンスマトリックに基づいて前記運転者のパフォーマンスを評価することを含む、本発明1010の方法。

[本発明1012]

前記運転者のパフォーマンスに関連した情報を車載ディスプレイに表示することを含む、本発明1010の方法。

40

[本発明1013]

前記運転者のパフォーマンスに関連した情報を、前記車両から離れた受信機に無線で送信することを含む、本発明1010の方法。

[本発明1014]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、前記車両を自律的に走行させることを含む、本発明1001の方法。

[本発明1015]

前記車両の前記動作規則が、前記車両の運転者に適用される交通規則を含む、本発明1001の方法。

50

[本発明1016]

以下を含む動作によって車両の制御に関連した操作を簡易化することを含む方法:
所与の時点での車両の候補軌道の有限集合を生成することであって、前記候補軌道の有限集合が、前記車両のすべての可能な軌道の軌道空間に属する、こと、
前記候補軌道の各々を制約に照らして評価すること、
前記候補軌道と関連付けられたコストに基づいて、前記有限集合の前記候補軌道の中から推定上の最適軌道を選択することであって、推定上の最適戦略が最適戦略に任意に近いように、前記車両のすべての可能な軌道の前記空間が前記生成された候補軌道の有限集合によって十分にカバーされている、こと、および
前記車両の制御に関連した操作を簡易化するために、前記選択された推定上の最適軌道を使用すること。

10

[本発明1017]

前記候補軌道の有限集合に1つまたは複数の制約を適用することを含む、本発明1016の方法。

[本発明1018]

前記候補軌道を有向グラフのエッジとして表すことを含む、本発明1016の方法。

[本発明1019]

前記環境が車両を含む、本発明1016の方法。

[本発明1020]

車両の候補軌道の有限集合を生成することが、前記車両の前記位置および所与の時点での所与の制御ポリシーに対する前記車両の予期される応答を表すモデルを適用することを含む、本発明1016の方法。

20

[本発明1021]

前記制御ポリシーが、前記車両を制御するコマンドを決定するフィードバック機能を含む、本発明1020の方法。

[本発明1022]

前記車両の実際の軌道を所与の期間にわたって監視することを含む、本発明1016の方法。

[本発明1023]

前記所与の期間にわたって、前記車両の前記実際の軌道を前記推定上の最適軌道と比較することを含む、本発明1022の方法。

30

[本発明1024]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、運転者のパフォーマンスを監視することを含む、本発明1016の方法。

[本発明1025]

前記運転者のパフォーマンスの前記監視の結果を報告することを含む、本発明1024の方法。

[本発明1026]

1つまたは複数のパフォーマンスマトリックに基づいて前記運転者のパフォーマンスを評価することを含む、本発明1024の方法。

40

[本発明1027]

事故発生の可能性を評価することを含む、本発明1024の方法。

[本発明1028]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、運転者のパフォーマンスを監視することを含む、本発明1016の方法。

[本発明1029]

前記車両の制御に関連した操作を簡易化することが、前記車両を自律的に走行させることを含む、本発明1016の方法。

[本発明1030]

制御ポリシーとの整合性、および世界軌道に沿った連続した世界状態間のそれぞれの

50

遷移に適用されるコスト規則との整合性が取れるように自律走行車両に最適軌道の少なくとも一部を通過させるように構成された制御可能な装置と、

前記世界軌道に従って前記制御可能な装置にコマンドを提供するコントローラと、

連続した時点における世界状態に関する情報のソースと、

計算要素であって、

(a) 各世界状態が、前記世界状態に関する情報に少なくとも部分的に基づいた前記車両の状態と前記車両の環境の状態と前記環境内の少なくとも1つの他の物体の状態との組み合わせを表す、前記世界状態の集合、および

(b) 各世界軌道が、前記世界状態のうちのある世界状態と前記世界状態のうちの別の世界状態との間の時間的遷移を表す、前記世界軌道の集合

を反復的に更新することであって、

前記更新の前記反復の各々が、

前記世界状態のうちの1つまたは複数の各々について、および対応する車両制御ポリシーについて、前記世界状態から次の世界状態までの候補軌道をシミュレートすることと、

前記シミュレートされた候補軌道が制約に違反しない場合、前記軌道を前記世界軌道の集合に追加して、更新された世界軌道の集合を形成することと、

必要に応じて、前記シミュレートされた候補軌道によって表される前記遷移に対応する前記世界状態の集合に新しい世界状態を追加して、更新された世界状態の集合を形成することと、

前記更新された世界状態の集合および前記更新された世界軌道の集合を通る最小コストパスを決定することであって、世界軌道のそれぞれの遷移にコスト規則を適用することを含む、ことと

を含む、こと、ならびに

前記車両の自律制御のために、前記最小コストパスに沿った現在の世界状態から次の世界状態への次の遷移を表す情報を前記コントローラに送ること

を行うための前記計算要素と

を含む、自律走行車両

を含む、装置。

上記のおよびその他の局面、特徴、および実施態様は、方法、装置、システム、コンポーネント、プログラム製品、ビジネス方法、機能を果たすための手段または工程などとして表現することができる。

【0025】

上記のおよびその他の局面、特徴、および実施態様は、特許請求の範囲を含めて、以下の説明を読めば明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】自律走行車両の制御動作を生成するためのシステムのブロック図である。

【図2】車両のブロック図である。

【図3】制御動作を生成するプロセスの流れ図である。

【図4】世界モデルプロセスの概略図である。

【図5】シミュレータプロセスのブロック図である。

【図6】具体化プロセスのブロック図である。

【図7】概略図である。

【図8】車両の概略図である。

【図9】ブロック図である。

【図10】コンピュータシステムのブロック図である。

【図11】評価プロセスの流れ図である。

【図12】実行プロセスの流れ図である。

【図13】交通シナリオの概略図である。

10

20

30

40

50

【図14】候補軌道の概略図である。

【図15】運転者パフォーマンスシステムのブロック図である。

【図16】運転者パフォーマンスシステムにおける処理の概略図である。

【図17】最適軌道の生成を示す概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

本明細書において、本発明者らは、人間の運転者のパフォーマンスを監視するため、自動運転車両の操作を簡易化するため、およびその他の有用な機能を果たすために使用できるシステムおよび技法について説明する。

【0028】

図1に示すように、例えば自動運転路上走行車両10の操作を簡易化することを含む実施態様においては、障害物14（他の車両、歩行者、自転車通行者、および環境要素など）との衝突を回避し、動作規則（この場合は、例えば交通規則）16に従いながら、自動運転路上走行車両を、直接的な人間による制御または環境12を介した管理入力なしで走行させることができる。そのような自動運転を達成するために、自動運転路上走行車両（より具体的には、車両と関連付けられた、例えば車両に取り付けられたコンピュータシステムまたはデータ処理装置18）は、まず、世界モデル20を大まかに構築する。

【0029】

大まかに言うと、世界モデルは、例えばジオロケーション装置、地図、地理情報システムまたはそれらの組み合わせと、他の車両、自転車通行者、歩行者、または他の障害物を検出するセンサからのデータを使用して構築された、車両の環境の表現である。世界モデルを構築するために、例えば車両に搭載されたコンピュータシステムは、車両（本明細書では「自車」ともいう）に取り付けられた様々なセンサ22（例えば、LIDAR、単眼カメラまたは立体カメラ、RADAR）からのデータを収集し、次いで、このデータを解析して、環境内の関連物体（障害物）の位置および動き特性（本明細書では障害物情報24ともいう）を決定する。本発明者らは、関連物体という用語を、例えば、他の車両、自転車通行者、歩行者、および動物、ならびに電柱、縁石、セーフティコーン、および柵などを含む広い意味で使用する。（環境内には、小さな路側の破片や植物などの、関連性のない物体も存在しうる。）自動運転車両はまた、車両間通信26によって収集された障害物情報に依拠してもよい。

【0030】

世界モデルが与えられると、自動運転車両に搭載されたコンピュータシステムは、アルゴリズムプロセス28を用いて、指定された目標32に向かって環境を通る軌道30を自動的に生成して実行する。本発明者らは、軌道という用語を、例えば、ある場所から別の場所までの、例えば、乗車場所から降車場所までのバスまたは経路を含む広い意味で使用する。いくつかの実施態様では、軌道は、1つの世界状態から次の世界状態への各遷移のシーケンスを含むことができる。

【0031】

指定された目標は、一般に、例えば乗客の目的地に関する乗客提供情報35に依存する別のアルゴリズムプロセス34によって提供される。本発明者らは、目標という用語を、例えば、特に、一時的な降車場所、最終的な降車場所、または目的地などの、自動運転車両が到達すべき目標を含む広い意味で使用する。本発明者らは、乗客という用語を、例えば、特に、自動運転車両によって運ばれる1人もしくは複数の人間、または自動運転車両によって運ばれるべき物体の目的地を決定する関係者を含む広い意味で使用する。

【0032】

自動的に生成される軌道は、理想的には、少なくとも以下の特性を有するべきである：

（1）この軌道は実行可能であるべきである、すなわち、車両が該軌道を、車両の現在のまたは予期される運転速度において合理的な精度でたどることができる；

（2）この軌道は衝突がないものであるべきである、すなわち、車両が該軌道に沿って走行した場合、いかなる物体とも衝突しない；および

10

20

30

40

50

(3) この軌道は、地域の動作規則もしくは交通規則、一般的な運転慣行17、または一般的な乗客もしくは特定の乗客の運転の好み19、またはそれらの要素のうちの任意の2つ以上の組み合わせを含みうる既定の規則セットに従うべきである。これらの要素およびおそらくはその他の類似した要素を併せて、動作規則と一般に呼ぶこともある（また本発明者らは、動作規則を運転規則とも呼ぶ）。すべての既定の運転規則に従う軌道が存在しない場合、軌道は規則違反の厳しさおよび程度を最小限にするべきである。

【0033】

自動軌道生成は、環境（例えば、道路）が、自らの意志で独立して動く車両、歩行者、および自転車通行者を含む他の独立した作用因子21と共有される状況において、上述した3つの特性を満たすべきである。

10

【0034】

自動軌道生成はまた、いくつかの関連する運転規則もしくは多数の障害物の存在を伴う複雑なシナリオにおいて、またはすべての運転規則、もしくはそのような条件のうちの2つ以上の組み合わせを満たす軌道が存在しないシナリオにおいて、運転規則が自車に対して正しく実施されることを系統的に保証するべきである。

【0035】

本明細書において、本発明者らは、自動運転路上走行車両が、適用される運転規則を遵守しながら、例えば他の車両および歩行者と共有する道路網上を、目的地まで安全かつ確実に進むことを可能にする、リアルタイムのセンサデータおよび履歴情報に基づいて制御動作を生成するためのシステムおよび技法について説明する。

20

【0036】

図2に示すように、システム50は、以下の基本要素を含む。

【0037】

1.自車の状態54およびコンディション56の特性、例えば、車両の位置、線速度および線加速度および角速度および角加速度、ならびに進行方向を測定することまたは推測することまたはその両方を行うことができるセンサ52。そのようなセンサには、例えば、GPS、車両の線加速度と角速度の両方を測定する慣性測定ユニット、個々の車輪速度センサおよび導出された個々の車輪スリップ比の推定値、個々の車輪ブレーキ圧センサまたは制動トルクセンサ、エンジントルクセンサまたは個々の車輪トルクセンサ、ならびにハンドル角および角速度センサ、ならびにこれらの組み合わせが含まれるが、これに限定されない。

30

【0038】

2.車両の環境12の特性を測定できるセンサ58。そのようなセンサには、例えば、LIDAR、RADAR、可視光、赤外線、または熱線スペクトルの単眼カメラまたは立体ビデオカメラ、超音波センサ、飛行時間（TOF）深度センサ、ならびに温度センサおよび雨センサ、ならびにこれらの組み合わせが含まれるが、これに限定されない。そのようなセンサからのデータを処理して、他の車両、歩行者、自転車通行者、スクーター、ベビーカー、カート、および他の移動物体のタイプ、位置、速度、および推定される将来の動きに関する情報を得ることができる。そのようなセンサからのデータは、静的障害物（例えば、電柱、看板、縁石、交通標示コーンおよびバレル、道路分離帯、樹木）、道路標示、道路標識などの関連物体および特徴を識別し解釈するためにも使用することができる。このタイプのセンサは、一般に、運転者支援能力または高度に自動化された運転能力を有する車両（例えば、自動運転車両）で利用可能である。

40

【0039】

3.他の車両の位置、線速度および線加速度および角速度および角加速度、ならびに進行方向などの、他の車両の状態およびコンディションの測定された特性または推測された特性またはその両方の特性を伝達することができる装置60。これらの装置には、車両間（V2）通信装置および車両-インフラストラクチャ間（V2I）通信装置、ならびにポイントツーポイントネットワークまたはアドホックネットワークまたはその両方での無線通信のための装置が含まれる。装置は、（無線通信および光通信を含む）電磁スペクトルまたは他の媒体（例えば、音響通信）を介して動作することができる。

50

【0040】

4. 交通渋滞最新情報および気象条件を含む、環境についての履歴データ、リアルタイムデータ、または予測データ（またはそれらのうちの任意の2つ以上）を提供するデータソース62。そのようなデータは、車両上のメモリ記憶ユニット60に格納されてもよいし、またはリモートに位置するデータベース62から無線通信によって車両に送信されてもよい。

【0041】

5. 車道の幾何学的特性の高精度地図、道路網接続特性を記述する地図、車道物理特性（車両走行車線および自転車走行車線の数、車線幅、車線走行方向、車線標示タイプ、および位置など）を記述する地図、ならびに横断歩道、様々なタイプの交通標識（例えば、止まれ、譲れ）、様々なタイプの交通信号（例えば、赤-黄-青の指示器、点滅する黄色または赤色の指示器、右折または左折の矢印）などの道路特徴の空間位置を記述する地図を潜在的に含む、GISデータベースから引き出された道路地図を提供するデータソース64。そのようなデータは、車両上のメモリ記憶ユニット65に格納されてもよいし、またはリモートに位置するデータベース67から無線通信によって車両に送信されてもよい。

10

【0042】

6. 同様の時刻に所与の道路区間に沿って以前に走行した車両の運転特性（例えば、典型的な速度および加速度プロファイル）に関する履歴情報を提供するデータソース66。そのようなデータは、車両上のメモリ記憶ユニットに格納されてもよいし、またはリモートに位置するデータベースから無線通信を介して車両に送信されてもよい。

【0043】

20

7. 例えば本出願に記載されているように、アルゴリズム69を実行することができる車両上に位置するコンピュータシステム18（データプロセッサ）。アルゴリズムは、特に、上記のソースによって提供されたデータを処理し、（後述する他の結果に加えて）短い将来の期間（この期間は、例えば、場合によってはより短く（例えば、コンマ数秒）またはより長く（例えば、数十秒、数分、または長期間）なりうるが、例えば、約2~5秒であることができる）にわたって取りうる、現在のシナリオにおける安全運転動作を含む予測される最適軌道61を計算する。（後述するように、アルゴリズムはまた、（例えば、将来のあるときに）運転者パフォーマンスを評価する手段として、車両の実際の走行軌道動作を、この最適軌道と、または人間の運転者の比較できる格納された軌道のデータベースと比較することもできる。）

30

【0044】

8. 乗客に（または後述する、人間が運転する車両の場合には、運転者に）、例えば、車両の動作、状態、またはコンディション、車両の軌道、地図、センサのうちの1つまたは複数から導出された情報、障害物に関する情報、様々なタイプの警報、および他の情報、ならびにそれらの任意の2つ以上の組み合わせに関する多種多様な情報を提供するための、コンピュータシステムに接続され車両に搭載された表示装置70。（人間が運転する車両の場合、警報は、例えば、良好な運転パフォーマンス、悪い運転パフォーマンス、またはその両方に関連した警報を含むことができる。加えて、必要に応じてまたは有用な場合に、運転者の挙動および運転者の運転パフォーマンスの質に関して、運転者に、および許可され認証されたユーザに、レポートを提供することもできる。）9. リモートに位置するデータベースから車両にデータを送信し、リモートに位置するデータベースにデータを送信する無線通信装置72。送信されるデータは、例えば、車両の動作、状態、またはコンディション、車両の軌道、最適軌道、地図に関連した情報、センサのうちの1つまたは複数から導出された情報、障害物に関する情報、様々なタイプの警報、および他の情報、ならびにそれらの任意の2つ以上の組み合わせを含む多種多様な情報を運ぶことができる。無線通信装置はまた、運転者のパフォーマンスの運転データまたは記述を（例えば、電子メールまたはテキストメッセージで）信頼できる受信者に直接的または間接的に送信するに使用されてもよい。

40

【0045】

10. コンピュータシステムから、制御動作（例えば、操舵、加速、減速、ギア選択）に

50

対応する、および補助機能（例えば、方向指示器の作動）のためのコマンド76を受け取り、コマンド76に従って動作するように搭載された機構および機能（例えばアクチュエータ）を有する車両10。本発明者らは、コマンドという用語を、例えば、車両の操作機構および機能に送られる、任意の命令、指図、指令、要求、または呼び出し、またはそれらの組み合わせを含む広い意味で使用する。本発明者らは、制御動作という用語を、例えば、必要な、有用な、または車両に軌道の少なくとも一部に沿って進ませるか何らかの他の動作を行わせることと関連付けられる任意の動作、作動、または始動を含む広い意味で使用する。

【0046】

11. コンピュータシステムが、例えば上述したデータおよび情報を格納するために車両上でアクセスできるメモリ65。 10

【0047】

図7および図8に、感知、計算構成要素、および地図リソース、ならびにシステムにおけるそれらの論理的および物理的位置のうちのいくつかを示す。

【0048】

図3に示すように（また図9も参照して）、本発明者らは、次に、アクチュエータ87（例えば、制御動作に応答できる車両の機構および機能）によって使用される、リアルタイムのセンサデータ11と規制データの両方に基づく制御動作の集合またはシーケンス82を、実行時にオンライン生成するための方法80について説明する。いくつかの実施態様では、この方法は、少なくとも、車両12内のコンピュータシステム18上で実行される以下の主要プロセスを含む。 20

【0049】

A. 例えば、搭載されている車両センサ87およびデータソース89によって収集されたデータ86と、車両間通信装置または車両-インフラストラクチャ間通信装置を介して受け取られたデータとを解析して、自車および自車の環境を特徴付ける数量の推定値（および推定値と関連付けられた関連統計値）を生成する、世界モデルプロセス84。大まかに言うと、世界モデルは、入ってくるデータに基づいて、自車および環境の状態を推定することができる。所与の時点での世界モデルによって生成される推定値を、その時点での世界状態88と呼ぶ。

【0050】

世界状態の一部として表現される数量には、自車の現在の位置、速度、および加速度；他の付近の車両、歩行者、自転車通行者、スクータ、ベビーカ、カート、および他の移動物体または他の障害物のタイプ、位置、速度、および現在の意図の推定値；付近の静的障害物（例えば、電柱、看板、縁石、交通標示コーンおよびバレル、道路分離帯、樹木）の位置およびタイプ；ならびに道路標示、道路標識、および交通信号の位置、タイプ、および情報内容が含まれるが、これに限定されない。世界状態は、車両走行車線および自転車走行車線の数、車線幅、車線走行方向、車線標示タイプおよび位置などの車道の物理特性、ならびに横断歩道、交通標識、交通信号などの道路特徴の空間位置に関する情報も含むことができる。世界状態88は、最尤推定値、誤差共分散、および関心対象の変数についての十分な統計値を含む、自車の状態と付近の車両の状態の確率論的推定値を含む。 40

【0051】

図4にも示すように、世界モデルプロセス84が所与の時点に対して実行されると、すべての利用可能な車両センサおよびデータソースからデータが取り込まれ、その時点での以下の数量83の一部または全部を計算するように処理される。

【0052】

1. グローバル座標フレームにおける自車の位置および進行方向。これらの数量は、GPSシステムを使用して直接的に測定することもできるし、またはGPS、IMU（慣性測定ユニット）、車輪速度センサ、および場合によってはLIDARセンサなどの他のセンサからの情報を組み合わせる公知の技法（例えば、[Optimal Filtering, Brian D. O. Anderson, John B. Moore, Dover, 2005]に記載されているようなもの）によって計算することもでき 50

る。

【0053】

2.自車の線速度および線加速度および角速度および角加速度。これらの数量は、IMUシステムを使用して直接測定することができる。

【0054】

3.自車の操舵角。この数量は、標準の自動車用センサによって直接測定することができる。

【0055】

4.止まれの標識、譲れの標識、速度制限標識、および自車の現在の走行方向に関連する他の交通標識の位置。これらの数量は、市販の装置を使用して、または以下に記載されているような公知の技法によって測定することができる: [De La Escalera, Arturo, Luis E. Moreno, Miguel Angel Salichs, and Jose Maria Armingol. "Road traffic sign detection and classification." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 44, no.6 (1997) : 848-859.、Bahlmann, Claw, Ying Zhu, Visvanathan Ramesh, Martin Pelli kofer, and Thorstea Koehler. "A system for traffic sign detection, tracking, and recognition using color, shape, and motion information." In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (2005) : pp.255-260.、Maldonado-Bascon, S aturnino, Sergio Lafuente-Arroyo, Pedro Gil-Jimenez, Hilario Gomez-Moreno, and Francisco Lopez-Ferreras. "Road-sign detection and recognition based on support vector machines." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 8, no.2 (2007) : 264-278.、Mogelmose, Andreas, Mohan Manubhai Trivedi, and Thomas B. Moeslund. "Vision-based traffic sign detection and analysis for intelligent driver assistance systems: Perspectives and survey." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13, no.4 (2012) : 1484-1497.、Franke, Uwe, Dariu Gavrilă, Steffen Gorzig, Frank Lindner, Frank Paetzold, and Christian Wohler. "Autonomous driving goes downtown." IEEE Intelligent Systems and their Applications, 6 (1998) : 40-48.])。数量は、そのような情報を含む市販の地図データから(例えば、TomTom(登録商標)などの専門地図提供者から)、またはそのような情報を含むように手作業で注釈付けされた市販の地図から収集することもできる。そのような情報は、地図データから収集された場合、前述したように、車両上のメモリ記憶ユニット65に格納されてもよいし、またはリモートに位置するデータベースから無線通信によって車両に送信されてもよい。

【0056】

5.走行可能な路面の境界、個々の走行車線を画定する標示(そのような標示の位置とタイプの両方を含む)、および未舗装の走路の特定された縁。これらの数量は、市販のセンサを使用して、または以下に記載されているような公知の技法によって測定することができる: [He, Yinghua, Hong Wang, and Bo Zhang. "Color-based road detection in urban traffic scenes." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 5, no.4 (2004) : 309-318.、Wang, Yue, Earn Khwang Teoh, and Dinggang Shen. "Lane detection and tracking using B-Snake." Image and Vision Computing 22.4 (2004) : 269-280.、Kim, Zu Whan. "Robust lane detection and tracking in challenging scenarios." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9, no.1 (2008) : 16-26.])。これらの数量は、項目4に記載される市販の地図データから収集することもできる。

【0057】

6.自車の現在の走行方向に関連する交通信号の状態(例えば、赤/黄/青/矢印)。これらの数量は、市販の装置、または以下に記載されているような公知の技法によって測定することができる: [Lindner, Frank, Ulrich Kressel, and Stephan Kaelberer. "Robust recognition of traffic signals." In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004.、Fairfield, Nathaniel, and Chris Urmson. "Traffic light map

10

20

30

40

50

ping and detection.” In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011.、Shen, Yehu, Umit Ozguner, Keith Redmill, and Jilin Liu. “A robust video based traffic light detection algorithm for intelligent vehicles.” In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009, pp.521-526.])。

【0058】

7.歩行者横断歩道、停止線、およびその他の道路特徴の位置。これらの数量は、項目4に記載される市販の地図データから収集することができる。

【0059】

8.自車の現在の走行車線に関する他の車両、歩行者、自転車通行者、スクータ、ベビーカー、カート、およびその他の移動物体の位置および速度。これらの数量は、市販の装置(例えば、[Mobileye 560. <http://www.mobileye.com/products/>、Autoliv Stereo-vision camera. <https://www.autoliv.com/ProductsAndInnovations/ActiveSafetySystems/Pages/VisionSystems.aspx>、Delphi Electronically Scanning Radar <http://delphi.com/manufacturers/auto/safety/active/electronically-scanning-radar>、Ibeo LUX <http://www.autonomoustuff.com/ibeo-lux-standard.html>])、または以下に記載されているような公知の技法を使用して測定することができる:[Premebida, Cristiano, Goncalo Monteiro, Urbano Nunes, and Paulo Peixoto. “A lidar and vision-based approach for pedestrian and vehicle detection and tracking.” In Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2007, pp.1044-1049.、Wang, Chieh-Chih, Charles Thorpe, Sebastian Thrun, Martial Hebert, and Hugh Durrant-Whyte. “Simultaneous localization, mapping and moving object tracking.” The International Journal of Robotics Research 26, no.9 (2007) : 889-916.、Premebida, Cristiano, Oswaldo Ludwig, and Urbano Nunes. “LIDAR and vision-based pedestrian detection system.” Journal of Field Robotics 26, no.9 (2009) :696-711.、Yilmaz, Alper, Omar Javed, and Mubarak Shah. “Object tracking: A survey.” ACM Computing Surveys 38.4 (2006) :13.、Gavrila, Dariu M., and Vasanth Philomin. “Real-time object detection for “smart” vehicles.” In Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, vol.1, pp.87-93, 1999.])。

【0060】

9.走行可能な路面上の静的障害物(例えば、電柱、看板、縁石、交通標示コーンおよびバレル、道路分離帯、樹木)の位置。これらの数量は、市販の装置(例えば、[Mobileye 560. <http://www.mobileye.com/products/>、Autoliv Stereo-vision camera. <https://www.autoliv.com/ProductsAndInnovations/ActiveSafetySystems/Pages/VisionSystems.aspx>、Delphi Electronically Scanning Radar <http://delphi.com/manufacturers/auto/safety/active/electronically-scanning-radar>、Ibeo LUX <http://www.autonomoustuff.com/ibeo-lux-standard.html>])、または以下に記載されているような公知の技法を使用して測定することができる:[Premebida, Cristiano, Goncalo Monteiro, Urbano Nunes, and Paulo Peixoto. “A lidar and vision-based approach for pedestrian and vehicle detection and tracking.” In Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2007, pp.1044-1049.、Wang, Chieh-Chih, Charles Thorpe, Sebastian Thrun, Martial Hebert, and Hugh Durrant-Whyte. “Simultaneous localization, mapping and moving object tracking.” The International Journal of Robotics Research 26, no.9 (2007) :889-916.、Premebida, Cristiano, Oswaldo Ludwig, and Urbano Nunes. “LIDAR and vision-based pedestrian detection system.” Journal of Field Robotics 26, no.9 (2009) :696-711.、Yilmaz, Alper, Omar Javed, and Mubarak Shah. “Object tracking: A survey.” ACM Computing Surveys 38.4 (2006) :13.、Gavrila, Dariu M., and Vasanth Philomin. “Real-time object detection for “smart” vehicles.” In Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, vol.1, pp.87-93, 1999.、Golovinskiy, Aleksey, Vladimir G. Kim, and T

10

20

30

40

50

homas Funkhouser. "Shape-based recognition of 3D point clouds in urban environments." In Proceedings of the 12th International Conference on Computer Vision, pp.2154-2161, 2009.])。

【 0 0 6 1 】

10. 現在の大気の状態、例えば雪が降っているかそれとも雨が降っているか、および路面に氷が存在するほどに寒いかどうか。これらの数量は、標準の自動車用雨および温度センサを使用して直接測定するかまたは推測することができる。

【 0 0 6 2 】

11. 同様の時刻にその道路区間に沿って以前に走行した車両の運転特性（例えば、典型的な速度および加速度プロファイル）に関する履歴情報。そのようなデータは、車両上のメモリ記憶ユニットに格納されてもよいし、またはリモートに位置するデータベースから無線通信を使用して車両に送信されてもよい。

10

【 0 0 6 3 】

本明細書に記載するシステムは、上に列挙した数量の完全な集合が存在しない場合に有用に機能することができる。上記の1~11に記載されるすべての計算された数量を、車両のメモリユニットに格納することができる。

【 0 0 6 4 】

B. 物理的自車が、世界モデルから受け取った世界状態において所与の時点から始まり、所与の選択されたフィードバック制御ポリシーに従う場合にたどることになる軌道98（すなわち、時間でインデックス付けされた状態のシーケンス）を推定または予測するために、入力として世界状態88（例えば、世界モデルの出力の形式のデータ構造）を取り込み、所与の選択されたフィードバック制御ポリシー96（例えば、環境に関する情報に基づいて操舵コマンド、ブレーキコマンド、およびスロットルコマンドを計算する関数）に対する自車の応答の公知の数値シミュレーションモデルまたは解析シミュレーションモデルを用いるシミュレータプロセス90（図5にも示されている）。言い換えると、シミュレータプロセスは、操舵コマンド、制動コマンドおよびスロットリングコマンドを決定する所与の選択されたフィードバック制御ポリシーに対して自車がどのように応答するかの既存のモデルを使用して、世界状態が与えられた自車の世界軌道をシミュレートする。

20

【 0 0 6 5 】

所与の車両には、多数の広範囲に及ぶフィードバック制御ポリシーが存在する可能性があり、各フィードバック制御ポリシーは、時間および環境の状態に基づいて自車の機能装置に送られるコマンドを調整することができる。異なるフィードバック制御ポリシーは、所与の世界状態から始まる車両の異なる挙動を生成することができ、車両は異なるフィードバック制御ポリシーに対して異なる応答をすることになる。本発明者らは、「制御ポリシー」という用語を、例えば、センサ情報に基づいて計算される任意の制御法則を含む広い意味で使用する。例えば、自動車が所望のバスの左側にある場合、制御ポリシーは自動車を右に移動させるように構成されることができ、自動車が別の車両に接近しつつある場合、制御ポリシーは（アダブティブクルーズコントロールシステムにおいて行われるように）自動車を減速させる。ヤコビアン、フィードバック線形化、バックステッピング、スライディングモード、モデル予測制御など、幅広いフィードバック式およびそれらの組み合わせのいずれかを使用することができる。シミュレータプロセスは、他の車両、自転車通行者、および歩行者などの他の物体のモデルも含み、それらの軌道を同様の方法で予測することができる。

30

【 0 0 6 6 】

世界状態に含まれる情報は、シミュレータプロセスが、環境を通して自車および他の物体の予想される動きを十分に評価する（すなわち、例えば、自動車の動きを、（孤立状態の車両ではなく）独立した作用因子の集合体の一部として予測する）ことを可能にする。シミュレータプロセスの出力102は、推定された世界軌道98、すなわち、各々が後続の世界状態への遷移をもたらす、時間によってインデックス付けされた世界状態のシーケンスである。

40

50

【0067】

シミュレータプロセスは、所与の世界状態を含むかまたは指し示し、所与の世界状態に基づいて自車または何らかの他の物体の世界軌道の予測を求める他のプロセスからの要求に応答するサービスプロセスとして動作させることができる。

【0068】

C.論理述語の所与の集合112の中から、（世界モデルによって生成された）特定の世界状態または（シミュレータによって生成された）車両の予測される世界軌道の特定の遷移に適用される論理述語114を選択する、ラベラプロセス110。本発明者らは、論理述語という用語を、例えば、式の一部である未知の数量に実際の値が代入されると論理的な結果を生じるように評価することができる式を含む広い意味で使用する。述語の例には、「自車は右車線にある」、「自車は衝突している」、「自車は車両Xの後ろにある」、「自車の速度は標示された制限を超えている」、「自車は停止している」が含まれる。より具体的には、例えば、車両の位置および進行方向が $(x, y, \text{シータ}) = (13.5, -1.39, 0.34)$ である場合、車両は右車線にある。

10

【0069】

ラベラプロセスはまた、所与の（時空間）軌道、例えば時間によってインデックス付けされた状態のシーケンスに適用されるラベル116のシーケンス、すなわちシンボルのシーケンスを生成することもできる。そのようなラベルのシーケンスは、所与の軌道に沿った状態のサブシーケンスに関連付けられた非繰り返しラベルの最大の（例えば、有限シーケンスの最長の）順序付きリストであり、車両のアクティビティの状況における車両の物理的挙動を記述する論理軌道118（例えば、「自車は、車両Xを追い越した後左車線から右車線に移り、次いで交差点で停止する」）に対応する。論理軌道とは、例えば、自車などの動作または挙動を記述する論理型ステートメントとして表現された軌道を意味する。

20

【0070】

ラベラプロセスは、入力として、シミュレータプロセスによって生成された世界軌道の一部である世界状態または遷移と、他の車両および環境に対する自車の関心対象の特性を符号化した（遷移に関連する）潜在的ラベルまたは（状態に関連する）論理述語のリストとを取り込むサーバプロセスとして働くことができる。ラベラプロセスは、各入力世界状態に、その特定の世界状態で真と評価する述語集合??119を関連付ける。ラベラプロセスは、各入力世界軌道に、その世界軌道に沿って選択された世界状態の任意のサブシーケンスに関連付けられたラベルの最大の非繰り返しシーケンスを関連付ける。ラベルおよび述語は、公知の解析方法および数値方法を使用して割り当てることができる。

30

【0071】

D.図6も参照する、自車の挙動ならびに付近の車両および環境の挙動のそれぞれの有限集合をもたらす候補フィードバック制御ポリシーの有向グラフ114を増分的に構築する、具体化プロセス112。グラフ内の各エッジは、有限な時間スパンの世界軌道のセグメントに対応し、軌道の各エッジを生成するために実行される特定のフィードバック制御ポリシーによって定義される。グラフの各頂点またはノードは、世界状態に対応し、新しいフィードバック制御ポリシーが選択されることになる決定点を表す。よって、各世界軌道は、連続した時点における世界状態のシーケンスを含み、特定の一連のフィードバック制御ポリシーに対応する一連の挙動に対応する、軌道に沿った連続した世界状態間の遷移を表現する。

40

【0072】

実行時（自車が運転されているとき）に、またはシミュレーション中（車両の軌道を予測しているとき）に、フィードバック制御ポリシー96は、車載センサによって得られた測定値と、車両および環境の観測された以前の実際の軌道とに依存して、時空間軌道のエッジの特定のインスタンスをもたらす。

【0073】

有向グラフの根は、世界モデルプロセス84の出力として初期設定300された世界状態88である。各反復時に（すなわち、各連続した時間ステップにおいて）、具体化プロセスは

50

、現在の世界状態の推定値を受け取り、有向グラフを更新する。具体化プロセスはこれを、まず、現在の有向グラフの頂点のうちの1つまたは複数を選択すること310、および次の時間ステップでのその頂点から次の頂点への遷移に対応する、これらの頂点の各々にフィードバック制御ポリシーを選択すること320によって行う。

【0074】

次いで、具体化プロセスは、具体化プロセスが選択した対（世界状態、フィードバック制御ポリシー）ごとに、シミュレーションプロセス330を呼び出す。次いで、各対についてのシミュレーションプロセスの出力である予測される軌道の遷移がラベラプロセス340に送られ、ラベラプロセス340は遷移のラベルシーケンスを生成する。このようにして得られた（ラベル付き）遷移が、静的に解釈できるハード制約（例えば、固定された物体との衝突）に違反しない場合342、それらは、初期世界状態に対応する頂点を起点とする新しいエッジとして有向グラフに追加される350。遷移のいずれかの端点が、有向グラフ内にすでにある頂点の世界状態と一致しない場合、これらの状態は新しい頂点として有向グラフに追加される。そうでない場合、各エッジは一致する世界状態の頂点に接続される。

【0075】

有向グラフのグラフ拡張のための頂点およびフィードバック制御ポリシーを選択する公知の方法がいくつかある（例えば、PRM*、RRT、RRT*）。これらは、（1）確率論的に完全である（すなわち、存在するならば、有効な解を高い確率で見つけることができる）こと、（2）漸近的に最適である（すなわち、最終的に、（1）によって示唆されるような最適解に任意に十分に近似した解を生み出す）こと、および（3）計算上効率的である（すなわち、n個の頂点を有するグラフに頂点を追加するために $O(\log n)$ 回の演算を必要とする）ことが分かっているアルゴリズムである。これらの特性を有する他のアルゴリズムも使用することができる。

【0076】

いくつかの実施態様では、具体化プロセスには以下の特性がある。

完全性および漸近的最適性: x で世界状態を示し、 u で制御動作（操舵、スロットリング、制動など）を示し、 T で有限時間間隔を示す。

$$J = \int_T \gamma(x(t), u(t)) dt$$

（式中、 $(x, u) > 0$ ）という形式の任意の加法的目的関数（additive cost function）について、任意の閉曲線 S 上で、

$$\int_S \gamma(x(t(s)), u(t(s))) ds > 0$$

であるよう、

$$J[n]$$

を、 n 回反復後の有向グラフ上の最小コストパスのコストとする。すると、具体化方法は、 n が無限大になるとときの

$$J[n]$$

の極限が、同じ境界条件を満たす、 x および u のすべての実現可能な軌道にわたる J の大域的下限と同じである場合に、漸近的に最適である（よって完全である）。（大まかに言うと、具体化方法は、根底にあるランダムな幾何学的グラフが浸透し接続される場合に、この基準を満たす。さらなる情報は、S. Karaman and E. Frazzoli. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. Int. Journal of Robotics Research, 30 (7) : 846-894, June 2011に提供されている。

【0077】

効率性:計算効率を保持するために、木における n 個の頂点の存在下で、具体化プロセスの各反復を実行するコストは、 $O(\log n)$ 以下でなければならない。

【0078】

自律走行車両の制御動作を生成する一局面は、多くの制約を満たし、特定のコストを最小限に抑える軌道を計画することである。いくつかの公知のシステムでは、これは、大き

10

20

30

40

50

な最適化問題を定式化し、次いで、コストおよび制約に基づいて、初期の推測から始まる良好な軌道に収束しようと試みることによって行われる。これは結局、潜在的に何千もの制約を受ける無限次元空間（軌道の空間）において探索しようと試みることになるので、公知のシステムは、システムもしくは制約集合を簡素化するための戦略、または探索を簡素化する追加の制約を課すための戦略を有する。

【0079】

本発明者らが本明細書で説明している手法では、具体化プロセスは、多くの候補軌道を迅速に、例えば、毎秒数百個の候補軌道を生成する。毎秒200個が典型的な値でありうるが、速度は200より多い場合もあるしまたは少ない場合もありうる。アルゴリズムの実行速度が速いほど、解の質が向上する。具体化プロセスは、最適軌道に任意に近づく軌道を生成する能力を保証する方法で行われる。

10

【0080】

E.図11にも示すような、具体化プロセスによって作成された有向グラフ内の各エッジと関連付けられるコスト132を割り当てて更新し、各エッジに割り当てられたコストを使用して有向グラフを通る最小コストパスを計算する、評価プロセス130。コスト評価は、自車の論理軌道を記述するラベルのシーケンス121と組み合わされた、車両の将来の状態と、世界状態88内の付近の車両および障害物の将来の状態との予測される物理軌道および推定値を提供する、シミュレータプロセスおよびラベラプロセスの出力に基づく。

【0081】

次いで、評価プロセスは、様々なエッジの物理軌道と論理軌道の組み合わせを、線形時相論理（LTL）、計算木論理（CTL*）、 μ 計算などの形式言語で表現された、優先順位付けされ重み付けされた規則の集合（適用される運転規則または動作規則を含む）140に照らして評価する。本発明者らは便宜上LTLを使用している。

20

【0082】

優先順位付けのために、2つの規則、例えばAとBには、Bの任意の違反がAの任意の違反よりも好ましい場合（Aがより高い優先度を有する場合）、異なる優先順位があらかじめ割り当てられる。例えば、「他の車両と衝突しない」という形式の規則は、「右端の車線に留まる」という形式の規則よりも高い優先度を有する。規則Bの違反のレベルと「同等」の規則Aの違反のレベルが存在する場合、2つの規則には、同じ優先度、およびおそらくは異なる重みが割り当てられる。例えば、「右端の車線に留まる」と「設定走行速度を維持する」である（より遅い車両が前を走行しているときに走行速度を維持するために、車両は遅い車両に取って代わるように左車線に移動することを決定してもよい）。規則は、関連する規制機関で定められた動作規則に従って、およびユーザ/オペレータの好みによって、優先順位付けされ重み付けされる。

30

【0083】

LTLは、すべての運転規則を含む、（本明細書で記載されている有向グラフなどの）離散時間遷移系上のすべてのいわゆるオメガ正規表現を表すのに十分な表現力を有することが知られている。加えて、公知のコンピュータアルゴリズムは、任意のLTL式を同等の有限状態オートマトンに自動的に変換することができ、よって、ソフトウェア開発プロセスにおける一般的なエラーおよび複雑さの原因が取り除かれる。

40

【0084】

各反復時に（すなわち、各時間ステップにおいて）、評価プロセスは、その時間ステップの時点で具体化プロセスによって構築された有向グラフのすべてのエッジのコストを、その根から始めて、最新の世界状態と、シミュレーションプロセスおよびラベラプロセスに対する新しい呼び出し（サービスの要求）に応答して受け取った出力とに基づいて更新する。

【0085】

いくつかの実施態様では、評価プロセスは以下の工程を実行する。有向グラフの根は、世界モデルプロセス84によって返された最新の世界状態88として初期設定される。次いで、有向グラフ内のエッジが、エッジごとにシミュレータプロセスおよびラベラプロセスを

50

呼び出すことによって、例えば、最良優先順（または有向グラフの完全なカバレッジを保証する他の順序）に従って更新される。ラベラプロセスからの得られたラベルシーケンスは、エッジごとの関心対象の各式について（例えば各動作規則について）、対応する有限状態オートマトンの状態を更新するために使用される。更新された状態は、エッジの端にある有向グラフの頂点のために格納された情報に追加される。所与のパスに沿った式（LT L式として表現された動作規則）の違反コストは、その式の有限状態オートマトンが遷移を受け入れるためにパス内のラベル付けされた世界軌道から除去される必要があるラベルの数に比例する。各エッジのコストは、いくつかの数値エントリを含む配列であり、各数値エントリは、規則優先度レベルおよびその優先度の規則（複数可）が違反される程度の比率に、または車両の軌道の関数（例えば、バス長、回転角、燃料消費量など）に、またはこれら2つの組み合わせに対応する。評価プロセスの最終工程は、更新された世界軌道に基づいて各エッジのコストを更新することである。評価プロセスの結果は、すべてのエッジのコストが更新された有向グラフである。

【0086】

評価プロセスの工程の特徴として、各エッジのコストは、自車が他の車両または障害物と衝突すること、自車が運転規則に違反すること、または車両の動作に関連する他のイベントなどのイベントの統計的推定値、確率論的推定値、または最悪（worst-case）の推定値の影響を受ける可能性がある。

【0087】

いくつかの実施態様では、候補軌道の集合が与えられると、評価プロセスは、いくつかの成分で構成されるコストにおいて符号化された基準に従って、どの軌道が最良であるかを迅速に見つけることができる。コストは、（10.1, 2, 0）という形式の配列として表現することができ、ここで各成分は、特定の基準について課されるコストを与える。例えば、第1の成分はバス長であることができ、第2の成分は横断される車線境界の数であることができ、第3の成分は予期される衝突の回数であることができる。コストは、例えば、後のエントリが先のエントリよりも高い優先度を有する辞書式順序付けに従って比較される。例えば、コスト（25, 4, 0）を有する軌道は、コスト（10, 2, 1）を有する軌道よりも好ましいと考えられる。というのは、後者は、より短くても、衝突を引き起こすことになるからである。コスト（12, 0, 0）を有する軌道はどちらの軌道よりも好ましい。この概念は、（何らかの最小限の違反を許容して）車両が満たすことのできるすべての運転規則を満たす軌道を系統的に計算することを可能にし、よって、ある規則に違反する必要がある場合に、例えばアボートする代わりに、予測可能な適度なパフォーマンス低下が提供される。

【0088】

直感的には、本発明者らが記述していることは次のように考えることができる。この問題は、NP複雑性クラスの筆頭にある種類の問題である。これらは、ある候補解を生成するあるオラクル、すなわち非決定論的（N）プロセスが与えられた場合に、その候補が実際に解であるかどうかを容易に検査することができる問題である（容易 = 多項式（（P）olynomial）時間）。具体化プロセスは、上述した技法の「非決定論的」部分である。これは、毎秒多数（数百または数千）の候補解を生成し、すべての可能な解の空間を効率的にカバーするオラクルである。評価プロセスは、これらの候補を迅速に検査する。

【0089】

次いで、（後述する）実行プロセスが最良候補を選択し、その最良候補をコントローラプロセスに送ると共に、その実行を監視する。

【0090】

F. 図12にも示すような、評価プロセスで割り当てられた更新されたコストに従って、具体化プロセスによって作成されたグラフ上の更新されたエッジおよび頂点の最小コストパス152を選択する、実行プロセス150。最小コストパスの次の遷移に対応するフィードバック制御ポリシーは、実行のために（後述する）コントローラプロセス170に提供される。実行プロセスはまた、コントローラプロセスの、最小コストパスに対応するフィードバッ

10

20

30

40

50

ク制御ポリシーの正しい実行を監視する。コントローラプロセスがフィードバック制御ポリシーの実行を完了して新しいものを受け入れるときは常に、実行プロセスは、最小コストパスの第1のエッジの目的地頂点を有向グラフの新しい根として設定することによって有向グラフを更新し、その新しい根を起点とするパスに沿って到達することができないすべての頂点およびエッジを有向グラフから除去する。

【0091】

G. 実行プロセスによって提供される各フィードバック制御ポリシーを実施するコントローラプロセス170。前述したように、各フィードバック制御ポリシーは、世界モデルプロセス84によって提供される世界状態情報が与えられた場合に、車両の所望の挙動を実現するために、制御入力（例えば、操舵角コマンド、加速コマンド、および制動コマンド、ならびに方向指示器の作動などの補助コマンド）を提供する。コントローラプロセスは、世界モデルプロセス84からおよび実行プロセス150からメッセージを受ける。世界モデルプロセスのメッセージは、車両の状態および環境の状態（付近の車両など）に関する最新情報を含む。実行プロセスのメッセージは、コントローラによって実行されるフィードバック制御ポリシーの記述を含む。世界状態と、所与のフィードバック制御ポリシーで指定されたコマンドとに基づいて、コントローラプロセスは、車載アクチュエータに送信されるべき入力制御信号（例えば、操舵角、スロットル設定、ブレーキ設定など）を決定する。車両の動きを制御するフィードバック制御ポリシーを計算するための公知の方法の例には、以下が含まれる。

R. Wallace, A. Stentz, C. E. Thorpe, H. Maravec, W. Whittaker, and T. Kanade, "First results in robot road-following," in IJCAI, pp. 1089– 1095, 1985. O. Amidi and C. E. Thorpe, "Integrated mobile robot control," in Fibers' 91, Boston, MA, pp. 504–523, International Society for Optics and Photonics, 1991. B. d'Andréa Novel, G. Campion, and G. Bastin, "Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state feedback linearization," The International journal of robotics research, vol. 14, no. 6, pp. 543–559, 1995. Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in International Conference on Robotics and Automation, pp. 384–389, IEEE, 1990. Z.-P. Jiang and H. Nijmeijer, "Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping," Automatica, vol. 33, no. 7, pp. 1393– 1399, 1997. A. Ollero and O. Amidi, "Predictive path tracking of mobile robots. application to the CMU Navlab," in 5th International Conference on Advanced Robotics, vol. 91, pp. 1081–1086, 1991. P. Falcone, M. Tufo, F. Borrelli, J. Asgari, and H. E. Tseng, "A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems," in 46th Conference on Decision and Control, pp. 2980–2985, IEEE, 2007. J. P. Hespanha et al., "Trajectory-tracking and path-following of under-actuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty," Transactions on Automatic Control, vol. 52, no. 8, pp. 1362–1379, 2007. A. P. Aguiar, J. P. Hespanha, and P. V. Kokotovic, "Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 2, pp. 234–239, 2005. [SEP] H. K. Khalil and J. Grizzle, Nonlinear systems, vol. 3. Prentice hall New Jersey, 1996. A. L. Rankin, C. D. Crane III, D. G. Armstrong II, A. D. Nease, and H. E. Brown, "Autonomous path-planning navigation system for site characterization," in Aerospace/Defense Sensing and Controls, pp. 176– 186, International Society for Optics and Photonics, 1996. J. Wit, C. D. Crane, and D. Armstrong, "Autonomous ground vehicle path tracking," Journal of Robotic Systems, vol. 21, no. 8, pp. 439–449, 2004. [SEP] C. E. Garcia, D. M. Prett, and M. Morari, "Model predictive control: theory and practice-a survey," Automatica, vol. 25, no. 3, pp. 335–348, 1989. E. F. Camacho and C. B. Alba, Model predictive control. Springer Science & Business Media, 2013. [SEP] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. Scokaert, "Constrained model predictive control: Stability and optimality," Automatica, vol. 36, no. 6, pp. 789–814, 2000

【 0 0 9 2 】

実行プロセスは、コントローラプロセスの正しい実行を監視する。自車の実際の軌道が、計画された最適軌道から（例えば、制御不能、規則違反、または衝突の許容できないリスクを示すように設定された）閾値量を超えて逸脱した場合（または他の車両が予期しない挙動を示す場合）、緊急手順がトリガされ、有向グラフが再初期設定される。コントローラプロセスが次いでフィードバック制御ポリシーを実行していない場合、または新しいフィードバック制御ポリシーを受け入れる準備ができている場合、実行プロセスは有向グラフ上の最小コストパスを計算し、それをコントローラプロセスに送る。次いで実行プロ

10

20

30

40

50

セスは、まず、有向グラフの根を最小コストパス内の最初のエッジの端点に移動させ、新しい根から到達可能でない頂点およびエッジを有向グラフから削除する。次いで実行プロセスは反復される。

【0093】

いくつかの実施態様では、リアルタイムのセンサデータと履歴情報の両方に基づいて制御動作のシーケンスを生成するために、世界モデルプロセス、具体化プロセス、評価プロセス、実行プロセスおよび制御プロセスを同時にかつ非同期的に実行させることができる（すなわち、同じ「ロック」を用いずに。例えば評価プロセスの各反復について、具体化プロセスの複数回の反復が行われる）。シミュレータプロセスおよびラベラプロセスは、その他のプロセスからの要求に応じて実行させることができる。世界モデルプロセスおよび制御プロセスは、利用可能なセンサのサンプリング周波数によって、ならびに利用可能なアクチュエータの帯域幅および車両のダイナミクスの帯域幅によってそれぞれ決定される速度で実行させることができる（すなわち、それらは連続した時点で反復する）。世界モデルプロセスおよび制御プロセスは、推定、認知、および制御のための公知の方法を使用する。具体化プロセス、評価プロセス、および実行プロセスは、利用可能な計算リソースに応じて、（ベストエフォートベースで）可能な限り頻繁に、ただし世界モデルプロセスおよび制御プロセスよりもおそらくは低い速度で反復される。

10

【0094】

プロセス間の通信は、例えば共用メモリおよびパブリッシュ/サブスクライブプロトコルを含む、公知のプロセス間およびスレッド間メッセージ受け渡し機構によって実施することができる。

20

【0095】

図10に、車両10で使用できるコンピュータシステムの典型的な構成要素およびそれらの関係を示す。

【0096】

運転者パフォーマンス監視

上記の考察において、本発明者らは、一連の時間ステップの各時間ステップで最適軌道が決定され、最適軌道の現在の部分に対応するフィードバック制御が、車両に最適軌道を通過させるために車両の動作を制御するように実行されるシステムについて説明した。時間の経過とともに、自動運転車両は目的地に到達する最適軌道をたどる。

30

【0097】

上述したプロセスの少なくともいくつかは、異なる状況で、すなわち、車両が人によって運転され、一連の時間ステップの各時間ステップで、運転される車両の実際の軌道に適用されたメトリックとその期間の間に決定された最適軌道に適用されたメトリックとの比較によって表される、ある期間にわたる運転者のパフォーマンスの遡及的解析を行うことができる状況で使用することもできる。特に、この解析は、運転者のパフォーマンスを監視し、運転者およびその他の関係者に有用な情報を提供するために使用することができる。

【0098】

すなわち、図16に示すように、最適軌道情報220および実際の軌道情報222を、特に、車両の運転者のパフォーマンス226を観測し、決定し、解析し、報告するために使用することができる。

40

【0099】

本発明者らは、「運転者パフォーマンス」という用語を、例えば、人間が操作中に車両をどのように制御するかの任意の面、例えば、絶対的な観点でのまたは標準、モデル、もしくは例に対する、運転者パフォーマンスを特徴付けるのに使用される様々なメトリックおよび因子のうちの1つもしくは複数に関する、人間の制御の質、有効性、またはスタイル（またはそれらの組み合わせ）などを含む広い意味で使用する。

【0100】

いくつかの実施態様では、運転者パフォーマンスを評価するために、車両10（運転者の

50

制御下にある瞬間の自動運転車両、または非自動運転車両であることができる)に位置するコンピュータシステム18は、予測された「最適軌道」220と車両の実際の軌道222の両方を解析することによって、パフォーマンスマトリック224を計算する。本発明者らは、「最適軌道」という用語を、例えば、理想的であるか、または望ましいものであるか、または有用であり、場合によっては、様々な適切な要素のうちの1つまたは複数を考慮した最良の経路であると考えられる車両の任意のパスまたはコースまたは経路を含む広い意味で使用する。

【0101】

いくつかの例では、計算されたパフォーマンスマトリックを使用して、車両の安全を確保するためにコンピュータ制御で車両の動きを修正することを目的とする操舵制御動作または制動制御動作228またはその両方を作動させることができる。加えて、このメトリックは、特に、運転者の運転パフォーマンス、事故を引き起こす可能性、または交通法規に違反する可能性を評価するために使用することもできる。

【0102】

メトリックの解析に基づき、運転パフォーマンスの良し悪しまたはその両方に関連した運転者への警報230を車載ディスプレイ上で示すことができる。運転者の挙動に関するレポート232も、プッシュモードで、または許可され認証されたユーザによる要求に応じて、受信者(例えば、信頼できる受信者)に無線送信することができる。これらのユーザには、特に、運転者、家族(子供の運転技能の取得を監視する親)、ソーシャルネットワーク(例えば、安全レベルまたは「環境適合性」レベルを互いに「競い合う」若い運転者)、レンタカー事業者、または保険代理店のいずれかまたはこれらのうちの2つ以上の組み合わせが含まれうる。

【0103】

図4に関して先に説明し、図16に示すように、世界モデルプロセス84が実行されると、すべての利用可能な車両センサおよびデータソース242からデータ240が取り込まれ、以下の数量83の一部または全部を計算するように処理される。

【0104】

運転者パフォーマンスのために、各数量が、車両が動作している間の各時間ステップkにおいて計算される。数量が計算される連続した各瞬間を隔てる間隔は、0.2秒から2秒までの範囲であることができる。

【0105】

1. 世界モデルに関連したセクションにおいて上述した数量244。

【0106】

2. すべての移動物体(例えば、車両、自転車通行者、歩行者など)の将来の位置246は、以下の公知の技法を使用して、構成可能な期間T(例えば、現在の時間ステップkから将来の時間ステップk+Tまでの期間)にわたって予測される: [Aoude, Georges, Joshua Joseph, Nicholas Roy, and Jonathan How. "Mobile agent trajectory prediction using Bayesian nonparametric reachability trees." In Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace (2011) : 1587-1593.、Demiris, Yiannis. "Prediction of intent in robotics and multi-agent systems." Cognitive Processing, 8, no. 3 (2007) : 151-158.、Morris, Brendan Tran, and Mohan Manubhai Trivedi. "Learning, modeling, and classification of vehicle track patterns from live video." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9.3 (2008) : 425-437.]。すべての移動物体の将来の位置は、車両上のメモリユニット65に格納される。期間Tは、典型的な妥当な範囲である2~5秒以内の(または前述のようにそれより多いかまたは少ない)期間であることができる。

【0107】

3. 図14に示すように、コンピュータ18上で動作する(自動運転車両に関して先に説明した種類の)プロセス202が、自車が構成可能な期間Tの間に環境を通ってたどりうる候補軌道204(例えば、時間パラメータ化されたパス)を生成する。生成された候補軌道は車両

10

20

30

40

50

上のメモリユニットに格納される。

【0108】

そのような候補軌道の生成は、状態格子 (state lattice) に依拠した技法、グラフ探索技法、または確率論的道地図もしくは高速探索ランダムツリーなどのランダム化された計画法を利用した技法を含む、様々な公知の技法によって達成することができる [S. M. LaValle. Planning algorithms. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006. L. E. Kavraki, P. Svestka, J. C. Latombe, and M. H. Overmars. Probabilistic roadmap for path planning in high-dimensional configuration spaces. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12 (4) : 566-580, 1996. J. C. Latombe. Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1991. J. T. Betts. Survey of numerical methods for trajectory optimization. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 21 (2) : 193-207, March-April 1998. S. Karaman and E. Frazzoli. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. Int. Journal of Robotics Research, 30 (7) : 846-894, June 2011.]。そのような計画法では、典型的には、候補軌道を生成する際に車両に対する障害物の位置を考慮して、その結果、障害物（複数可）との衝突をもたらすであろう候補軌道が考慮から除去される。

【0109】

しかしながら、候補軌道生成プロセスの間には、道路標示、交通信号、交通標識、および関連する動作規則に起因する運転挙動制約を考慮して、生成された候補軌道が衝突しないだけでなく、動作規則の違反もない可能性が高いようにすることも望ましい。これらの特性を満たす軌道生成の方法については、上述した通りである。

【0110】

4. 候補自車軌道は、その質または望ましさに従って評価されランク付けされる。より正確には、各候補軌道は、以下のうちのいずれか1つまたは複数を含みうるが、これに限定されないパフォーマンスマトリックのセットに従って評価される。

a. 以下のうちの1つまたは2つもしくはそれ以上の任意の組み合わせの解析によって決定される、運転者の安全性：

i. 候補軌道により、自車が、停止信号または停止標識によって規定された領域内で完全に停止することができなくなるイベントの数として計算される安全性メトリック (a)。

ii. 候補軌道により、自車が、譲れの信号または譲れの標識によって規定された領域内に位置するときに他の車両、自転車通行者、歩行者、または他の動的障害物に道を譲ることができなくなるイベントの数として計算される安全性メトリック (b)。

iii. 候補軌道により、自車が、歩行者または自転車通行者が横断歩道に存在した場合に歩行者横断歩道で道を譲ることができなくなるイベントの数として計算される安全性メトリック (c)。

iv. 候補軌道により、自車が、1で特定された静的または動的障害物のいずれかの部分、または任意の他の物体もしくは道路特徴と衝突することになるイベントの数として計算される安全性メトリック (d)。

v. 候補軌道により、自車が、破線でない車線標示を横切るかまたは走行可能な路面を離れることになるイベントの数として計算される安全性メトリック (e)。

vi. 候補軌道により、自車が、交差点で優先順位に正しく従うことができなくなるイベントの数として計算される安全性メトリック (f)。

vii. 候補軌道により、自車が、i ~ vi に記載されていない動作規則に正しく従うことができなくなるイベントの数として計算される安全性メトリック (g)。

viii. 候補軌道に沿った所与の点における最高車両速度と候補軌道上の同じ点における最高速度制限とのパーセント差の最大値として計算される安全性メトリック (h)。

ix. 候補軌道に沿った先行車両との車間距離 (headway distance) と、所与の点における自車速度および候補軌道上の同じ点における先行車両の速度の差との比の最小値の逆数として計算される安全性メトリック (i)。このメトリックは「衝突余裕時間 (time to collision)」とも呼ばれる [LaValle2006]。

10

20

30

40

50

x. 候補軌道により、自車が、所定の回数を超えて隣接する走行車線を横切って移行し、したがって「蛇行」挙動を呈することになるイベントの数として計算される安全性メトリック(j)。

xi. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大横加速度(軌道上の所与の点における車両速度の二乗を、所与の軌道上の同じ点における曲率半径で割ったものとして計算される)と、現在の環境条件が与えられた場合の最大許容横加速度との比として計算される安全性メトリック(k)。

xii. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大縦加速度(軌道上の所与の点における縦速度の時間微分として計算される)と、現在の環境条件が与えられた場合の最大許容縦加速度との比として計算される安全性メトリック(l)。 10

【0111】

b. 以下のうちの1つまたは任意の2つ以上の解析によって決定される乗客の快適性:

i. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大縦加速度(軌道上の所与の点における縦速度の時間微分として計算される)と、選択された最大快適縦加速度値との比として計算される縦方向快適性メトリック(a)。

ii. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大縦方向ジャーケ(軌道上の所与の点における縦加速度の時間微分として計算される)と、選択された最大快適縦方向ジャーケ値との比として計算される縦方向快適性メトリック(b)。

iii. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大横加速度(軌道上の所与の点における車両速度の二乗を、所与の軌道上の同じ点における曲率半径で割ったものとして計算される)と、選択された最大快適横加速度値との比として計算される横方向快適性メトリック(a)。 20

iv. 候補軌道を正確にたどるために自車によって必要とされるであろう最大横方向ジャーケ(軌道上の所与の点における横加速度の時間微分として計算される)と、選択された最大快適横方向ジャーケ値との比として計算される横方向快適性メトリック(b)。

【0112】

c. 以下のうちの1つまたは複数の解析によって決定される環境影響:

i. 所与の候補軌道の長さをすべての候補軌道の最小長さで割ったものとして計算される燃料消費量メトリック(a)。

ii. 候補軌道を正確にたどるために必要とされる(車両データおよび既定のモデルに基づいて計算される)推定燃料消費量と、運転者データベースからのデータおよび既定のモデルに基づいて計算される、現在の走行時間における走行した経路のベースライン燃料消費レベルとの比として計算される燃料消費量メトリック(b)。 30

iii. (車両データおよび既定のモデルに基づいて計算される)候補軌道上で自車が受けれるであろう車両摩損と、運転者データベースからのデータおよび既定のモデルに基づいて計算される、走行した経路および時間のベースライン摩損レベルとの比として計算される、車両摩損メトリック。

(これらのメトリックは、場合によっては、自動運転車両の場合に最適軌道を特定するために使用されたコストとは異なることに留意されたい。)

【0113】

いくつかの実施態様では、a~cに記載された定量的メトリックのいくつかの組み合わせ(例えば、加重和)の解析によって決定される最適軌道250が、最も望ましいとみなされる軌道として特定される。典型的には、すべてのパフォーマンスマトリックの加重和の最小値を示す候補軌道が最適軌道とみなされる。最適軌道および最適軌道と関連付けられたパフォーマンスマトリック値は、車両上のメモリユニットに格納される。

【0114】

上述した特定のメトリック計算は代表的なものが意図されており、これらだけが特定の運転者パフォーマンス特性のための有用なメトリックというわけではない。最適軌道の他の定義を用いることもでき、最適軌道は他の計算によって決定することもできる。

【0115】

10

20

30

40

50

上記のセクション1～セクション4の計算は、定期的に短い間隔（「時間ステップ」）0.2～2秒で繰り返される。場合によっては、この繰り返しは、示された範囲よりも小さいかまたは大きい間隔であることもできる。各時間ステップkで行われる計算の結果は、時点kにおける車両の位置から時点k+Tにおける車両の位置までの最適軌道を含む。

【0116】

図13および図15の左側に関連して、各時間ステップkにおいて、システムはまた、自車の実際の位置および車両の環境内の他の車両、自転車通行者、歩行者および他の障害物の実際の動き特性を知り、記録する。これらの情報を併せると、特に、期間Tの間の自車の実際の軌道になる。

【0117】

図15の右側に示すように、各時点k+Tにおいて、自車の既知の実際の走行軌道と、環境内の他の車両、自転車通行者、歩行者、および他の障害物の実際の動き特性とを表す、時点kと時点k+Tとの間の各時間ステップについての上述したすべてのデータが、上述したパフォーマンスマトリックを使用して遡及的に解析される。この解析では、（最適候補軌道ではなく）実際の自車軌道が解析の主題である。これは、時間kと時間k+Tとの間の時間間隔にわたる運転者の実際のパフォーマンスの解析をもたらす。

【0118】

次いで、時間kと時間k+Tとの間の時間間隔にわたる運転者の実際のパフォーマンスについての上述したパフォーマンスマトリックを、時間kと時間k+Tとの間の最適軌道についての上述したパフォーマンスマトリックと個々に比較することができる。運転者のパフォーマンスを定量化するために、以下のうちの1つまたは2つもしくはそれ以上の任意の組み合わせを含むがこれに限定されない様々な方法を使用することができる。

1. 運転者の実際のパフォーマンスについての個々のメトリックを、最適軌道についての同じメトリックと比較することができる。

a. メトリックのパーセント差が構成可能なパーセンテージ（すなわち、閾値パフォーマンスレベル）を超える場合、その特定の基準における運転者の運転パフォーマンスは不良としてラベル付けされる。

b. メトリックのパーセント差が構成可能なパーセンテージ（すなわち、閾値パフォーマンスレベル）未満である場合、その特定の基準における運転者の運転パフォーマンスは良好としてラベル付けされる。

【0119】

2. 運転者の実際のパフォーマンスについてのすべてのメトリックの和を、最適軌道についてのすべてのメトリックの和と比較することができる。

a. メトリックの和のパーセント差が構成可能なパーセンテージ（すなわち、閾値パフォーマンスレベル）を超える場合、運転者の全般的な運転パフォーマンスは、時点kから時点k+Tまでの時間間隔にわたり不良とラベル付けされる。

b. メトリックの和のパーセント差が構成可能なパーセンテージ（すなわち、閾値パフォーマンスレベル）未満である場合、運転者の全般的な運転パフォーマンスは、時点kから時点k+Tまでの時間間隔にわたり良好とラベル付けされる。

【0120】

結果として、人間の運転者のパフォーマンスを、交通条件および環境条件に関する関連情報を考慮したやり方で評価することができる。

【0121】

多種多様な他の基準、計算、解析、およびこれらの組み合わせにより、人間の運転者のパフォーマンスに関する1つまたは複数の結論の基礎を形成することができる。

【0122】

いくつかの実施態様では、車載ディスプレイが、前述の方法によって特定された良好および不良な運転パフォーマンスに関連した運転者への警報を提供する。良好な（もしくは不良な）運転パフォーマンスまたはその両方についての警告（または賛辞）は、上述したメトリックに関連して、上述した個々のパフォーマンスマトリック解析から導出された特

10

20

30

40

50

定の識別された運転ミスについて、車載ディスプレイ上に表示することができる。

【0123】

ディスプレイのいくつかの実施態様では、特定の識別された運転ミスを犯したときに、理解しやすいアイコンまたは他のインジケータ、例えば赤色のインジケータが表示される。例えば、運転者が譲れの標識で道を譲らなかった場合、赤い譲れの標識が車載ディスプレイ上に表示されてもよい。

【0124】

また、上述したパフォーマンスマトリックの和の解析に関連した一般的な「私はどのように運転していますか？」というインジケータを車載ディスプレイ上に表示することもできる。ディスプレイの一態様では、運転パフォーマンスが良好な場合にはうれしそうな顔が表示され、運転パフォーマンスが不良な場合には悲しそうな顔が表示され、運転パフォーマンスが変化しうる場合には様々な表情が表示されてもよい。

10

【0125】

計算された運転者パフォーマンスマトリックを、中央データ記憶リポジトリに無線で送信することもできる。別のプロセスはこれらのメトリックを認証され許可されたユーザに配信する。

【0126】

本明細書に記載したシステムおよび技法を実施するために多種多様なコンピュータシステム、ハードウェア、ファームウェア、センサ、ネットワーク、ソフトウェア、および装置を使用することができる。

20

【0127】

例えば、本発明者らが言及したメモリは、プロセッサによって使用されるプログラム命令およびデータを格納することができる。メモリは、ランダム・アクセス・メモリと読み取り専用メモリとの適切な組み合わせであってもよく、適切なプログラム命令（例えば、ファームウェアまたはオペレーティングソフトウェア）と、構成データおよび動作データとをホストしてもよく、ファイルシステムとして、または他の方法で構造化されてもよい。格納されたプログラム命令は、1人または複数のユーザを認証するための1つまたは複数の認証プロセスを含んでもよい。パネルのメモリに格納されたプログラム命令は、ネットワーク通信およびデータネットワークへの接続の確立を可能にするソフトウェアコンポーネントを格納していてもよい。ソフトウェアコンポーネントは、例えば、インターネットプロトコル（IP）スタック、ならびに様々なインターフェースのためのドライバコンポーネントを含みうる。接続を確立し、ネットワークを介して通信するのに適した他のソフトウェアコンポーネントは、当業者には明らかであろう。

30

【0128】

構成データと共にメモリに格納されたプログラム命令は、システムの全般的な動作を制御しうる。サーバ・コンピュータ・システムは、1つまたは複数の処理装置（例えば、マイクロプロセッサ）、ネットワークインターフェース、およびメモリを含むことができる。

【0129】

本明細書に記載したプロセスの全部または一部および様々な変更は、少なくとも部分的に、コンピュータプログラム製品、すなわち、データ処理装置、例えば、プログラマブルプロセッサ、1つのコンピュータ、または複数のコンピュータが実行するための、またはそれらの動作を制御するための、コンピュータおよび/または機械可読記憶装置である1つまたは複数の有形の物理的なハードウェア記憶装置において有形に具現化されたコンピュータプログラムを使用して実施することができる。コンピュータプログラムは、コンパイル言語またはインタプリタ言語を含む任意の形式のプログラミング言語で書くことができ、スタンドアロンプログラム、またはモジュール、コンポーネント、サブルーチン、もしくはコンピューティング環境で使用するのに適したその他のユニットを含む、任意の形式で配置することができる。コンピュータプログラムは、1台のコンピュータ上で、または1つのサイトにある、もしくは複数のサイトに分散され、ネットワークによって相互接続さ

40

50

れた複数のコンピュータ上で実行されるように配置することができる。

【0130】

プロセスの実施と関連付けられる動作は、較正プロセスの機能を果たす1つまたは複数のコンピュータプログラムを実行する1つまたは複数のプログラム可能なプロセッサによって実行することができる。プロセスの全部または一部は、FPGA（フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ）および/またはASIC（特定用途向け集積回路）などの専用論理回路として実装することができる。

【0131】

コンピュータプログラムの実行に適するプロセッサには、例えば、汎用と専用の両方のマイクロプロセッサ、および任意の種類のデジタルコンピュータの任意の1つまたは複数のプロセッサが含まれる。一般に、プロセッサは、読み取り専用記憶領域またはランダムアクセス記憶領域またはその両方から命令およびデータを受け取る。コンピュータ（サーバを含む）の要素には、命令を実行するための1つまたは複数のプロセッサと、命令およびデータを格納するための1つまたは複数の記憶領域デバイスとが含まれる。一般に、コンピュータは、データを格納するための大容量記憶装置、例えば、磁気ディスク、光磁気ディスクもしくは光ディスクなどの1つもしくは複数の機械可読記憶媒体も含むか、または1つもしくは複数の機械可読記憶媒体からデータを受け取るか、もしくはそこにデータを転送するか、もしくはその両方を行うように動作可能に結合される。

10

【0132】

コンピュータプログラム命令およびデータを具体化するのに適した有形の物理的ハードウェア記憶装置には、あらゆる形態の不揮発性記憶装置、例えば、EPROM、EEPROMおよびフラッシュ記憶領域デバイスなどの半導体記憶領域デバイス；磁気ディスク、例えば内部ハードディスクまたはリムーバブルディスク；光磁気ディスク；およびCD-ROMディスクおよびDVD-ROMディスク、ならびに揮発性コンピュータメモリ、例えばスタティックRAMおよびダイナミックRAMなどのRAM、およびフラッシュメモリなどの消去可能メモリが含まれる。

20

【0133】

加えて、各図に示される処理は、所望の結果を達成するのに、図示された特定の順序、または順番を必ずしも必要としない。加えて、他の動作が提供されてもよく、または記載したプロセスから動作が除かれてもよく、記載したシステムに他の構成要素が加えられてもよく、または記載したシステムから除去されてもよい。同様に、各図に示される動作は、異なるエンティティによって実行されてもよいしまたは統合されてもよい。

30

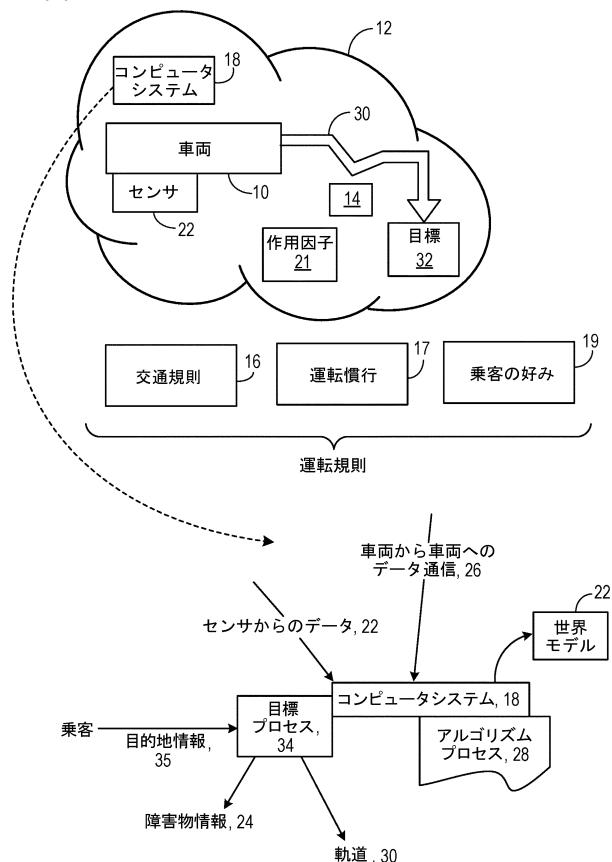
【0134】

本明細書に記載した態様の要素は、上記に具体的に記載されていない他の態様を形成するように組み合わされてもよい。要素は、プロセス、コンピュータプログラム、ウェブページなどから、それらの動作に悪影響を及ぼすことなく除外されうる。さらに、様々な別々の要素が、上述した機能を果たすように、1つまたは複数の個々の要素へと組み合わされてもよい。

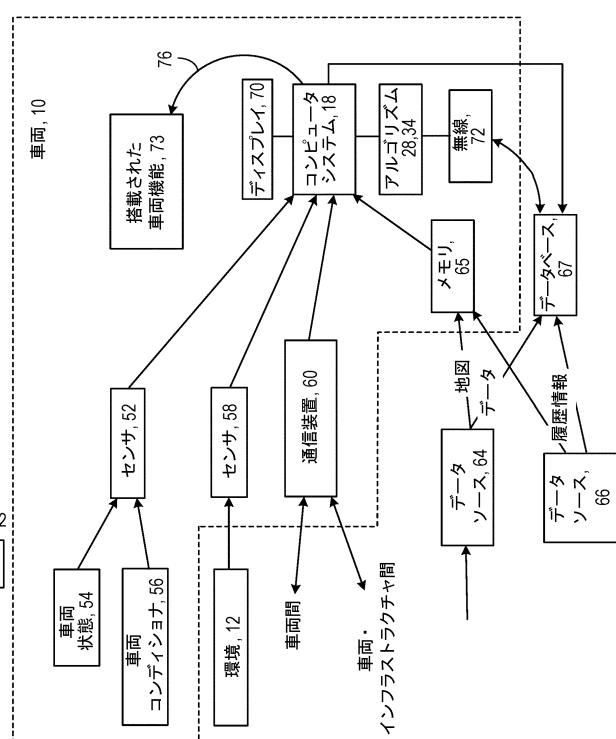
【0135】

添付の特許請求の範囲内には他の実施態様も含まれる。

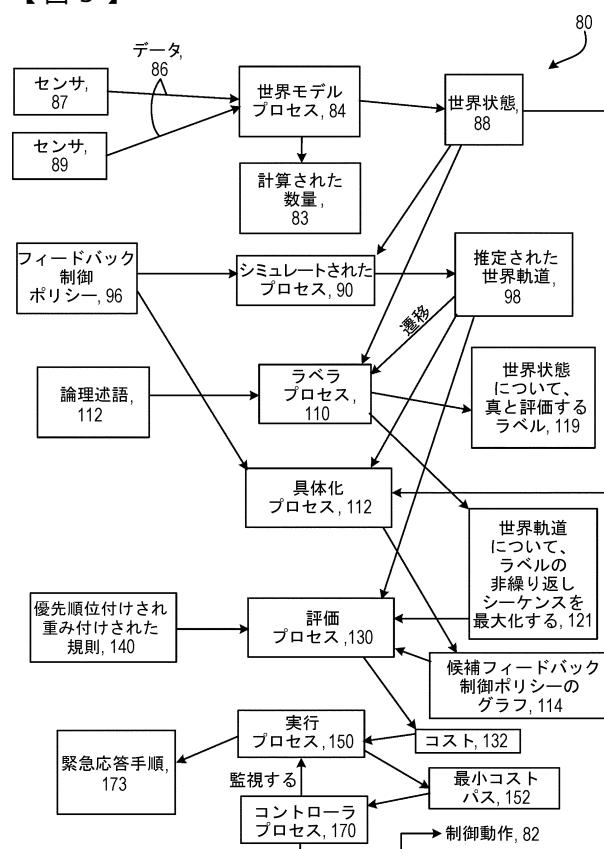
【 四 1 】



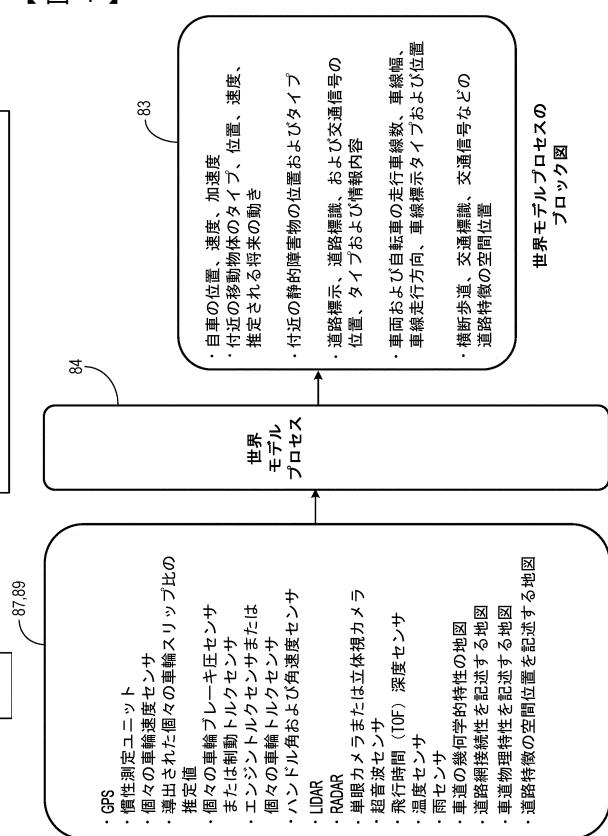
【図2】



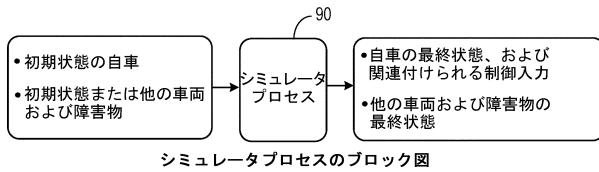
(3)



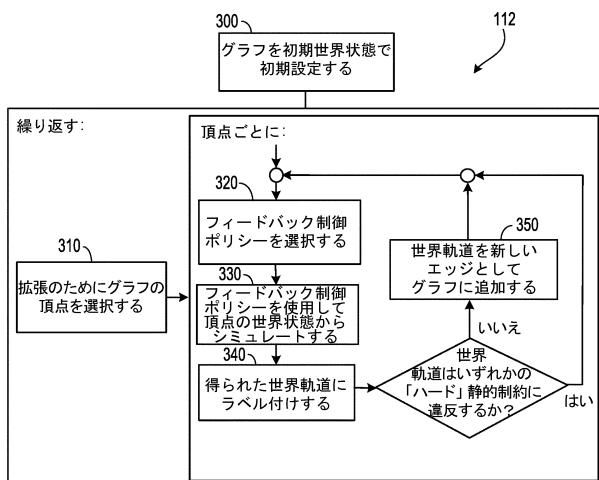
【 4 】



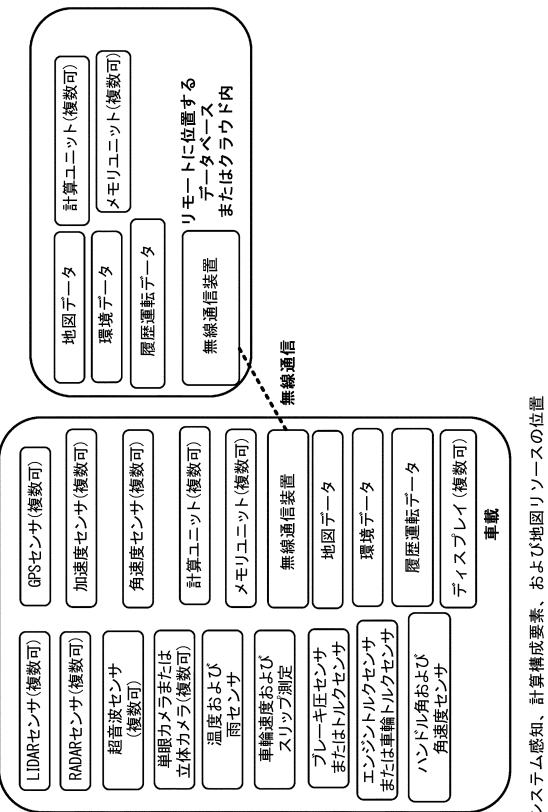
【図5】



【図6】

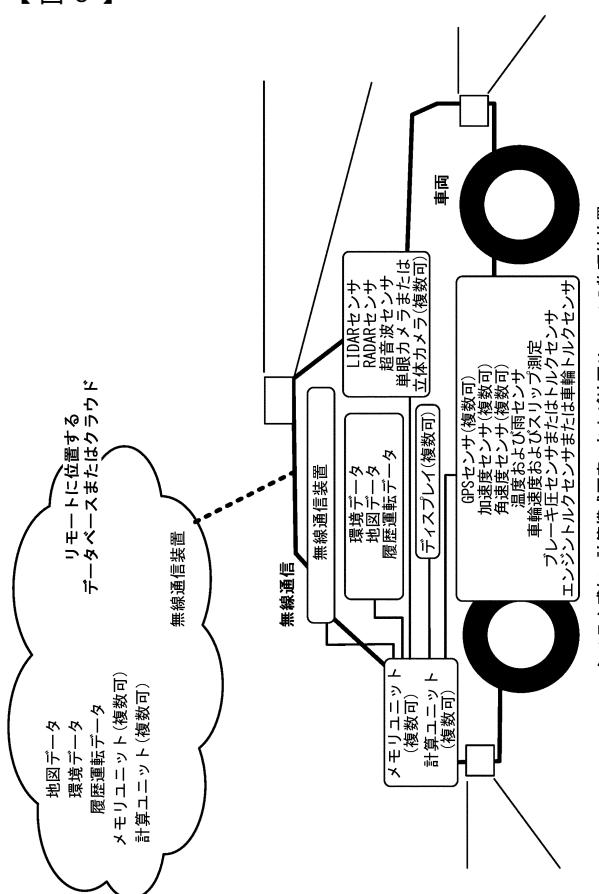


【図7】

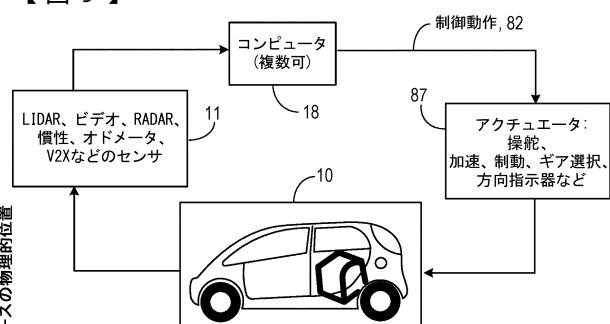


システム感知、計算構成要素、および地図リソースの位置

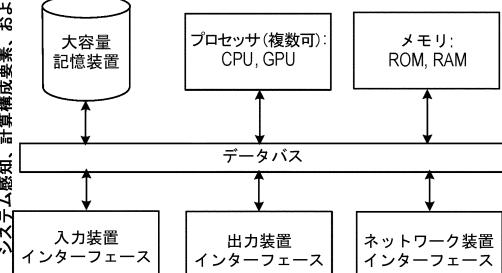
【図8】



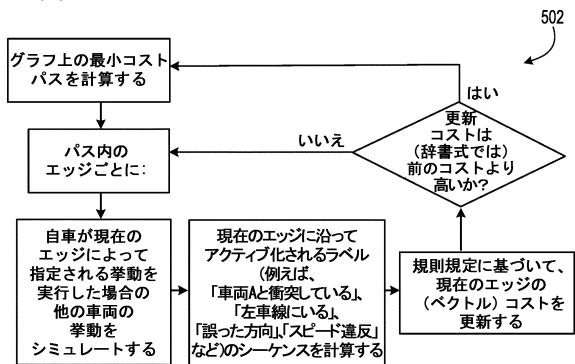
【図9】



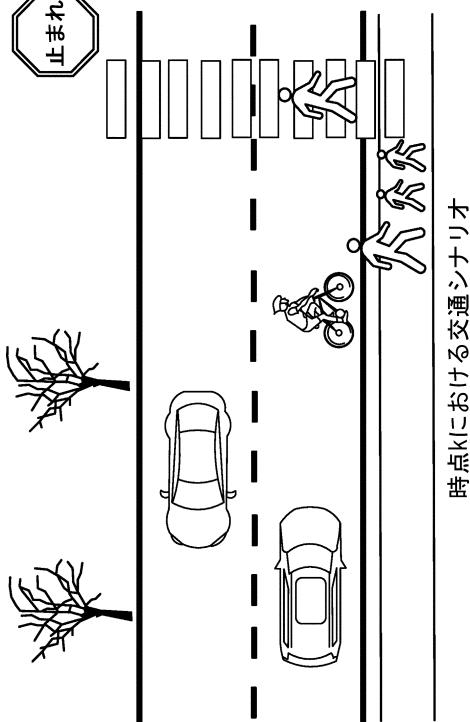
【図10】



【図 1 1】

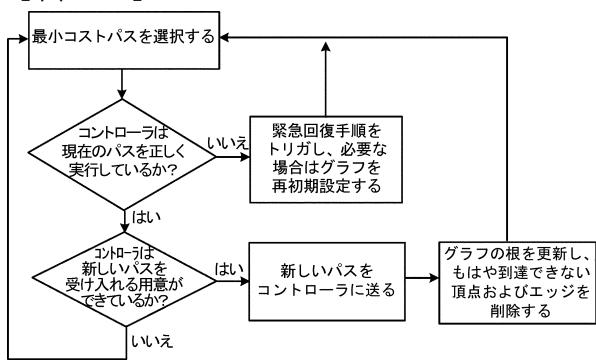


【図 1 3】

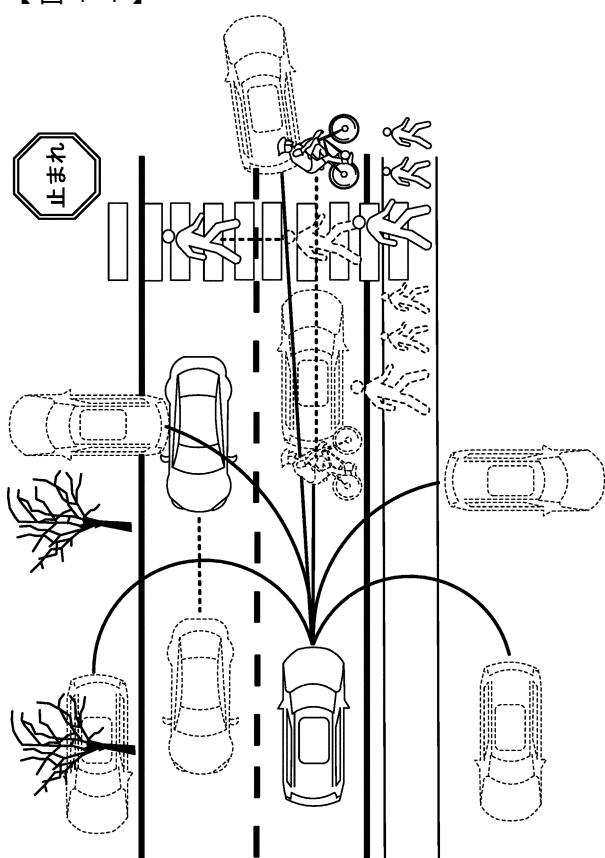


時点kにおける交通シナリオ

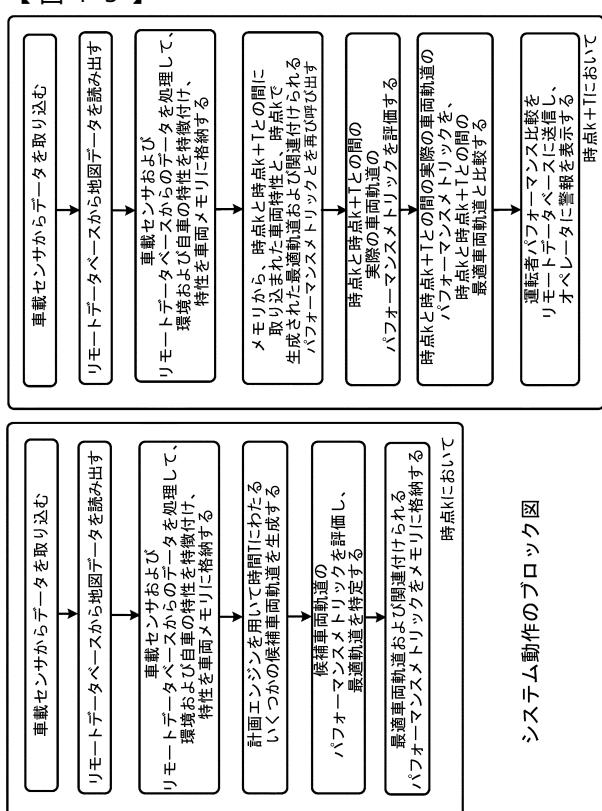
【図 1 2】



【図 1 4】

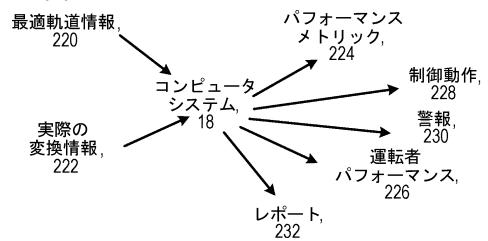


【図 1 5】

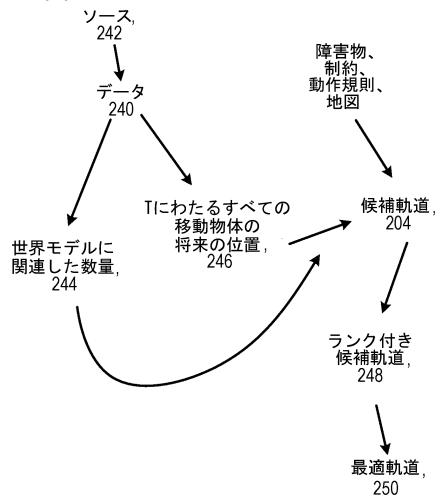


システム動作のプロック図

【図16】



【図17】



フロントページの続き

(74)代理人 100148699
弁理士 佐藤 利光
(74)代理人 100128048
弁理士 新見 浩一
(74)代理人 100129506
弁理士 小林 智彦
(74)代理人 100205707
弁理士 小寺 秀紀
(74)代理人 100114340
弁理士 大関 雅人
(74)代理人 100114889
弁理士 五十嵐 義弘
(74)代理人 100121072
弁理士 川本 和弥
(72)発明者 フラッソリ エミリオ
スイス連邦 8006 チューリッヒ ボレーシュトラーセ 35
(72)発明者 イアグネマ カール
アメリカ合衆国 02478 マサチューセッツ州 ベルモント ヒルサイド テラス 42

審査官 田村 耕作

(56)参考文献 特開2008-129804 (JP, A)
米国特許出願公開第2015/0345966 (US, A1)
特開2008-305014 (JP, A)
特開2010-228740 (JP, A)
再公表特許第2012/039280 (JP, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 08 G 1 / 16
B 60 W 30 / 00
G 05 D 1 / 02