(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)特許出願公表番号
特表2012-507088
(P2012-507088A)
(43)公表日　平成24年3月22日(2012.3.22)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
G08G 1/16	(2006.01)	G08G	1/16	C	2F129
G01C 21/26	(2006.01)	G01C	21/00	A	3D241
B60W 40/02	(2006.01)	B60W	40/02		5H181
B60R 21/00	(2006.01)	B60R	21/00	628B	

審査請求 未請求　予備審査請求 未請求　（全 56 頁）

(21)出願番号　特願2011-533404 (P2011-533404)
(86)(22)出願日　平成21年10月26日 (2009.10.26)
(85)翻訳文提出日　平成23年6月8日 (2011.6.8)
(86)国際出願番号　PCT/US2009/062059
(87)国際公開番号　WO2010/048611
(87)国際公開日　平成22年4月29日 (2010.4.29)
(31)優先権主張番号　12/289,325
(32)優先日　平成20年10月24日 (2008.10.24)
(33)優先権主張国　米国 (US)

(71)出願人　511099629
グレイ・アンド・カンパニー・インコーポレーテッド
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０００２・メテリー・ウエスト・ノース・アイ－１０・サーヴィス・ロード・３６０１
(74)代理人　100108453
弁理士　村山　靖彦
(74)代理人　100064908
弁理士　志賀　正武
(74)代理人　100089037
弁理士　渡邊　隆
(74)代理人　100110364
弁理士　実広　信哉

最終頁に続く

(54)【発明の名称】自律運転乗物用の制御及びシステム

(57)【要約】
ナビゲーション及び制御システムは、乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を生成するように構成される１つ以上のポジションセンサを含む。このシステムは、入力を有し、乗物の動作を制御する出力を生成する１つ以上の動作制御機構を含み、動作制御機構から離れた内蔵式自律型制御器を含む。自律型制御器は、ポジションセンサからポジション信号を受信し、乗物の更新された移動経路を定める動作制御信号を生成するように構成されるプロセッサと、ポジションセンサ、動作制御機構、及びプロセッサの間で通信を行うプログラマブルインタフェースとを含む。プログラマブルインタフェースは、ポジションセンサからのプロセッサへの入力を正規化し、動作制御機構への入力として加えられる適合する動作制御信号を生成するように構成され、それによって内蔵式自律型制御器は、様々な異なるセンサ及び異なる動作制御機構と共に動作するように構成可能である。

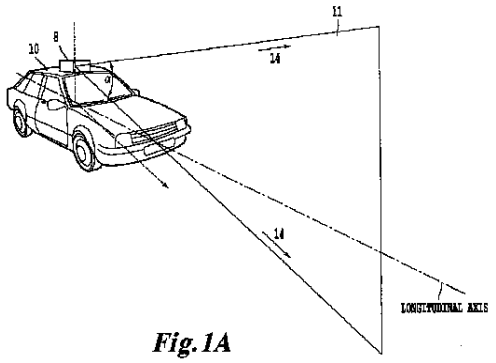


Fig.1A

【特許請求の範囲】
【請求項１】
ナビゲーション及び制御システムであって、
乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を生成するように構成される１つまたは複数のポジションセンサと、
入力を有し、前記乗物の動作を制御する出力を生成する１つまたは複数の動作制御機構と、
前記動作制御機構から遠隔配置される内蔵式自律型制御器とを備え、
前記内蔵式自律型制御器が、
前記ポジションセンサから前記ポジション信号を受信し、前記乗物の更新された移動経路を定める動作制御信号を生成するように構成されるプロセッサ、ならびに
前記ポジションセンサ、前記動作制御機構、及び前記プロセッサの間で通信を行い、前記ポジションセンサからの前記プロセッサへの入力を正規化し、前記動作制御機構への前記入力として加えられる適合する動作制御信号を生成するように構成されるプログラマブルインタフェースを備え、
それによって前記内蔵式自律型制御器が、様々な異なるセンサ及び異なる動作制御機構と共に動作するように構成可能である
ことを特徴とするシステム。
【請求項２】
前記乗物の移動経路に関して物体を示す物体信号を生成するように構成される１つまたは複数の物体センサをさらに備え、
前記プロセッサが、前記物体センサから前記物体信号を受信し、前記乗物の前記移動経路に関して静止している物体及び移動している物体を、前記物体信号から識別し、識別された前記静止物体及び前記移動物体ならびに前記ポジション信号を考慮して前記更新された移動経路を定める動作制御信号を生成するように構成される
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項３】
前記プログラマブルインタフェースが、前記ポジションセンサ、前記物体センサ、前記動作制御機構、及び前記プロセッサの間で通信を行うように構成され、前記物体センサからの前記プロセッサへの入力を正規化するように構成される
ことを特徴とする請求項２に記載のシステム。
【請求項４】
前記物体センサが、前記ビームを生成し、前記物体からの前記ビームの反射を検出するように構成される光検出測距装置を備える
ことを特徴とする請求項２に記載のシステム。
【請求項５】
前記物体センサが、前記ビームを生成し、前記物体からの放出ビームの波長における反射を検出するように構成されるレーザレーダ装置を備える
ことを特徴とする請求項２に記載のシステム。
【請求項６】
前記物体センサが、物体が識別される前記移動経路の画像を提供するように構成されるカメラを備える
ことを特徴とする請求項２に記載のシステム。
【請求項７】
プログラミング命令を前記プログラマブルインタフェースに入れるように構成されるプログラムインタフェースをさらに備える
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項８】
前記プロセッサが、方向制御命令及び速度制御命令のうちの少なくとも１つをドライブバイワイヤ形式で前記動作制御機構に供給し、それによって前記プロセッサが、エンジン

のスロットリング、乗物のステアリング、及び乗物のブレーキングのうちの少なくとも１つを電気的に制御するように構成される
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項９】
前記移動経路に沿ったウェイポイントの論理マップを記憶するように構成されるマップ記憶エリアをさらに備え、
前記論理マップが、あるウェイポイントから別のウェイポイントへの方向、前記ウェイポイントの地理空間座標、前記乗物の移動経路に沿った道路の交差点、及び異なるウェイポイントの間の移動に関連した時間のうちの少なくとも１つを含む
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１０】
前記プロセッサが、物体ポジションと前記ウェイポイントの前記地理空間座標との比較によって前記乗物付近の物体が前記ウェイポイントであるかどうかを判定するための障害物識別アルゴリズムによってプログラムされる
ことを特徴とする請求項９に記載のシステム。
【請求項１１】
前記ポジションセンサが、全地球測位システム装置、または慣性航行システムのうちの少なくとも１つを備える
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１２】
前記プロセッサが、
前記乗物付近の物体のポジション、速度、及び幾何学的形状を識別し、時間内に前記識別された物体の前記ポジション及び前記速度を予測し、前記識別された物体の将来のポジションを推定するように構成される可変構造オブザーバを備える
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１３】
前記プロセッサが、
前記移動経路に関して、２つのウェイポイントの間の交通パターンの記録に基づいて、前記２つのウェイポイントの間の前記乗物のルートを決定するように構成されるルート発見アルゴリズムを含む
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１４】
前記ルート発見アルゴリズムが、前記２つのウェイポイントの間の移動時間の記録、前記２つのウェイポイントの間の渋滞エリアの履歴、及び渋滞のリアルタイム報告のうちの少なくとも１つに基づいて前記ルートを決定するように構成される
ことを特徴とする請求項１３に記載のシステム。
【請求項１５】
前記ルート発見アルゴリズムが、前記２つのウェイポイントの間のいくつかの特定の移動ルートについての各重み付き平均に基づいて前記ルートを決定するように構成され、
各重み付き平均が、前記２つのウェイポイントの間の前記移動時間の記録、前記２つのウェイポイントの間の前記渋滞エリアの履歴、及び前記渋滞のリアルタイム報告のうちの前記少なくとも１つを含む
ことを特徴とする請求項１４に記載のシステム。
【請求項１６】
前記移動経路の画像を提供するように構成されるカメラをさらに備え、
前記画像に基づいて、前記プロセッサが、自律乗物の前記移動経路のための車線を識別する
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１７】
前記プロセッサが、前記識別された車線に障害物があるかどうかを判定するように構成

される
ことを特徴とする請求項１６に記載のシステム。
【請求項１８】
前記プロセッサが、静止物体または移動物体のうちの少なくとも１つの周りに回避経路を決定するように構成される
ことを特徴とする請求項１に記載のシステム。
【請求項１９】
前記プロセッサが、前記静止物体または前記移動物体との衝突の見込みを予測することによって、前記回避経路を決定するように構成され、
第１の行動として、前記回避経路について第１の解決策が存在するかどうかを判定するために、乗物の速度が、前記移動経路に沿って修正され、
第２の行動として、前記第１の解決策が存在しなければ、前記回避経路について第２の解決策が存在するかどうかを判定するために、前記スライディングモードアルゴリズムにおける進路変更操縦が、前記移動経路に沿って実施され、
第３の行動として、前記第１の解決策または前記第２の解決策が存在しなければ、前記乗物が停止させられる
ことを特徴とする請求項１８に記載のシステム。
【請求項２０】
前記プロセッサが、前記静止物体及び前記移動物体を回避するために最適軌跡を予測するためのスライディングモードプログラムを利用する仮想経路解析に基づいて前記回避経路を決定するように構成され、
前記スライディングモード解析が、１）前記移動経路からの前記乗物の移動点（ｘ＊（ｓ），ｙ＊（ｓ））、２）前記移動経路からの前記乗物の距離ｓ（ｔ）、及び３）前記移動点（ｘ＊（ｓ（ｔ）），ｙ＊（ｓ（ｔ））からの実際の乗物ポジション（ｘ（ｔ），ｙ（ｔ））の誤差ベクトルＥ（ｔ）に基づいてステアリングコマンドを生成するようにプログラムされ、
前記誤差ベクトルＥ（ｔ）が、前記乗物を、前記移動経路から逸脱させるか、または前記移動経路への進入路から逸脱させることができる時間に依存する非線形の要因に対応する
ことを特徴とする請求項１８に記載のシステム。
【請求項２１】
乗物をナビゲーション及び制御する方法であって、
乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を生成する段階と、
プログラマブルインタフェースによって前記ポジション信号を正規化して、正規化されたポジション信号を生成する段階と、
前記正規化されたポジション信号から動作制御信号を生成する段階と、
前記プログラマブルインタフェースによって前記動作制御信号を正規化して、前記乗物の更新された移動経路に沿って前記乗物の動作を制御する正規化された動作制御信号を生成する段階と
を含むことを特徴とする方法。
【請求項２２】
乗物を含む運転可能な装置であって、
前記乗物が、
乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を生成するように構成される１つまたは複数のポジションセンサと、
入力を有し、前記乗物の動作を制御する出力を生成する１つまたは複数の動作制御機構と、
少なくとも１つの前記動作制御機構から遠隔配置される内蔵式自律型制御器とを備え、
前記内蔵式自律型制御器が、
前記ポジションセンサから前記ポジション信号を受信し、前記乗物の更新された移動経

路を定める動作制御信号を生成するように構成されるプロセッサ、ならびに
前記ポジションセンサ、前記動作制御機構、及び前記プロセッサの間で通信を行い、前記ポジションセンサからの前記プロセッサへの入力を正規化し、前記動作制御機構への前記入力として加えられる適合する動作制御信号を生成するように構成されるプログラマブルインタフェースを備え、
それによって前記内蔵式自律型制御器が、様々な異なるセンサ及び異なる動作制御機構と共に動作するように構成可能である
ことを特徴とする装置。
【請求項２３】
前記乗物が、陸上乗物を含む
ことを特徴とする請求項２２に記載の装置。
【請求項２４】
前記陸上乗物が、自動車、トラック、スポーツ汎用車、レスキュー乗物、農業乗物、採鉱乗物、伴走乗物、玩具乗物、偵察乗物、テストトラック乗物、及び装甲乗物のうちの少なくとも１つ含む
ことを特徴とする請求項２３に記載の装置。
【請求項２５】
前記乗物が、船艇を含む
ことを特徴とする請求項２２に記載の装置。
【請求項２６】
前記船艇が、ボート、船、バージ船、タンカ、水陸両用車、ホバークラフト、及び装甲船のうちの少なくとも１つを含む
ことを特徴とする請求項２５に記載の装置。
【請求項２７】
前記乗物が、運転手に支援された制御のない自律乗物を含む
ことを特徴とする請求項２２に記載の装置。
【請求項２８】
前記乗物が、コンピュータ支援制御を用いて運転手により制御された乗物を含む
ことを特徴とする請求項２２に記載の装置。
【請求項２９】
前記プロセッサが、運転手の機能障害を認識するように構成される
ことを特徴とする請求項２８に記載の装置。
【請求項３０】
前記プロセッサが、生体計測センサから、または前記乗物の運転手制御の解析から、運転手の機能障害を認識するように構成される
ことを特徴とする請求項２９に記載の装置。
【請求項３１】
前記プロセッサが、入力コマンドがある場合に、前記乗物を制御するように構成される
ことを特徴とする請求項２８に記載の装置。
【請求項３２】
乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含むコンピュータ可読媒体であって、前記プログラム命令が、前記プロセッサによって実行されると、前記プロセッサに、
乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を受信し、プログラマブルインタフェースによって前記ポジション信号を正規化して、正規化されたポジション信号を生成し、
前記正規化されたポジション信号から動作制御信号を生成し、
前記動作制御信号を前記プログラマブルインタフェースに出力して、前記乗物の更新された移動経路に沿って前記乗物の動作を制御する正規化された動作制御信号を生成する
という機能を実行させることを特徴とするコンピュータ可読媒体。
【請求項３３】

ナビゲーション及び制御システムであって、
入力を有し、乗物の動作を制御する出力を生成する１つまたは複数の動作制御機構と、
１）移動経路からの前記乗物の移動点（ｘ＊（ｓ），ｙ＊（ｓ））、２）前記移動経路からの前記乗物の距離ｓ（ｔ）、及び３）前記移動点（ｘ＊（ｓ（ｔ）），ｙ＊（ｓ（ｔ））からの実際の乗物ポジション（ｘ（ｔ），ｙ（ｔ））の誤差ベクトルＥ（ｔ）に基づいてステアリングコマンドを生成するように構成されるプロセッサと
を備え、
前記誤差ベクトルＥ（ｔ）が、前記乗物を、前記移動経路から逸脱させるか、または前記移動経路への進入路から逸脱させることができる時間に依存する非線形の要因に対応する
ことを特徴とするシステム。
【請求項３４】
前記プロセッサが、形式“ｄ／ｄｔＥ（ｔ）＝－ｋＥ（ｔ）”の微分方程式を満たし、最適移動方向についてゼロに収束する前記誤差ベクトルＥ（ｔ）に基づいて、前記乗物の移動方向を決定するように構成される
ことを特徴とする請求項３３に記載のシステム。
【請求項３５】
前記移動経路に沿った前記移動点（ｘ＊（ｓ），ｙ＊（ｓ））の決定における前記プロセッサが、前記決定において、前輪速度、後輪速度、中間の滑り度、及び乗物のスリップのうちの少なくとも１つを含む前記非線形の要因を含む
ことを特徴とする請求項３３に記載のシステム。
【請求項３６】
前記移動経路に沿った前記移動点（ｘ＊（ｓ），ｙ＊（ｓ））の決定における前記プロセッサが、前記決定において、前記非線形の要因を説明するための前記移動経路に対するｓ（ｔ）の時間微分を含む
ことを特徴とする請求項３３に記載のシステム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
関連出願の相互参照
本出願は、代理人整理番号２８４３６１ＵＳの下で２００６年３月１６日に出願した「NAVIGATION AND CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS VEHICLES」と題した米国特許出願第１１／３７６，１６０号に関連している。本出願の内容全体は、参照により本明細書に組み込まれる。
【０００２】
本発明は、統合化センサ、そして自律運転乗物を制御及び指図するコンピュータベースのアルゴリズムシステムに関する。
【背景技術】
【０００３】
現代の乗物においては、運転手が、速度、操舵、障害物及び危険の認識、そして障害物及び危険の回避など乗物の安全動作に関して多数の決定を行うので、運転手は、乗物の制御システムの不可欠な構成要素のままである。しかし、これら機能の全てを行うための運転手の能力は、運転手の疲労などの肉体的要因、運転手の機能障害、運転手の不注意、または上手く危険を回避するために運転手によって必要とされる反応時間を減少させる視界などの他の要因により損なわれる場合がある。
【０００４】
さらに、例えば、戦争状況の中、または中毒の危険もしくは核放射線の危険が存在する状況の中など、環境的に危険な周囲状況の中では、運転手は、危険に曝されている。実際、イラクの道路脇の爆弾は、人命が失われるまさに現代の一例であるが、このことは、多くの場合、軍隊に物資を届ける補給トラックが無人であれば避けられ得る。

【０００５】
他のより普通の環境においては、運転手が医療緊急事態に見舞われた場合、または例えば運転手が運転状態中に見当識を失うことになった場合に生じることになるものであるが、運転手が見当識を失うことになったり、または乗物を身体的に操ることができないことになったりする場合がある。そのような方向感覚を失わせる環境または身体機能を奪う環境の一例は、運転手（もしくは船の船長）が、近づきつつある危険（または船が近づきつつある危険）に気付き、危険に反応する能力にハンディがある場合に、雪、霧、雨、及び／または夜間の灯りが無い状況下で車または船を運転または操舵することであろう。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００６】
【特許文献１】Jenkinsらの米国特許第5,644,386号
【特許文献２】Andressenの米国特許第5,870,181号
【特許文献３】Krasutskyらの米国特許第5,200,606号
【特許文献４】Ruffらの米国特許第6,844,924号
【非特許文献】
【０００７】
【非特許文献１】H. Wang、J. Kearney、J. Cremer、及びP. Willemsen、「Steering Autonomous Driving Agents Through Intersections in Virtual Urban Environments」、2004 International Conference on Modeling, Simulation, and Visualization Methods, (2004)
【非特許文献２】R. Frezza、G. Picci、及びS. Soatto、「A Lagrangian Formulation of Nonholonomic Path Following」、The Confluence of Vision and Control、(A. S. Morseら(編)、Springer Verlag、1998)
【非特許文献３】J. Shirazi、Java（登録商標） Performance Tuning、(OReilly & Associates、2000)
【非特許文献４】J. Witt、C. Crane III、及びD. Armstrong、「Autonomous Ground Vehicle Path Tracking」、Journal of Robotic Systems、(21(8), 2004)
【非特許文献５】C. Crane III、D. Armstrong Jr.、M. Torrie、及びS. Gray、「Autonomous Ground Vehicle Technologies Applied to the DARPA Grand Challenge」、International Conference on Control, Automation, and Systems、(2004)
【非特許文献６】T. Berglund、H. Jonsson、及びI. Soderkvist、「An Obstacle-Avoiding Minimum Variation B-spline Problem」、International Conference on Geometric Modeling and Graphics、(2003年7月)
【非特許文献７】D. Coombs、B. Yoshimi、T. Tsai、及びE. Kent、「Visualizing Terrain and Navigation Data」、NISTIR 6720、(2001年3月1日)
【非特許文献８】A. Kelly、「A 3d State Space Formulation of a Navigation Kalman Filter for Autonomous Vehicles」、CMU Robotics Institute, Tech. Rep.、1994
【非特許文献９】Drakunov, S.V.、「Sliding-Mode Observers Based on Equivalent Control Method」、Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)、Tucson、Arizona、1992年12月16日～18日、2368-2370頁
【非特許文献１０】Riekert及びSchunck「Zur fahrmechanik des gummibereiften kraftfahrzeugs」、in Ingenieur Archiv、vol. 11、1940、210-224頁
【非特許文献１１】D. Bernstein、A students guide to classical control、IEEE Control Systems Magazine、vol. 17、96-100頁(1997)
【非特許文献１２】DeCarlo R、及びS. Zak、S.V. Drakunov、「Variable Structure and Sliding Mode Control」、chapter in The Control Handbook a Volume in the Electrical Engineering Handbook Series、CRC Press, Inc.、1996
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】

【０００８】
したがって、乗物の操縦中の人間の欠如（deficiencies）に対処するにせよ、人間による操縦が好ましくない環境的に危険な状況にあるにせよ、乗物の経路中の静止物体及び移動物体、または経路に入ってくる移動物体を乗物が識別するシステム及び方法を有する必要性がある。
【０００９】
自律運転乗物、及びレーザ検出、及び視覚化システムの開発に関する、以下の参照論文などの多数の論文が報告されており、それら全ては、参照により本明細書に組み込まれる。
１）H. Wang、J. Kearney、J. Cremer、及びP. Willemsen、「Steering Autonomous Driving Agents Through Intersections in Virtual Urban Environments」、2004 International Conference on Modeling, Simulation, and Visualization Methods, (2004)
２）R. Frezza、G. Picci、及びS. Soatto、「A Lagrangian Formulation of Nonholonomic Path Following」、The Confluence of Vision and Control、(A. S. Morseら(編)、Springer Verlag、1998)
３）J. Shirazi、Java（登録商標） Performance Tuning、(OReilly & Associates、2000)
４）J. Witt、C. Crane III、及びD. Armstrong、「Autonomous Ground Vehicle Path Tracking」、Journal of Robotic Systems、(21(8), 2004)
５）C. Crane III、D. Armstrong Jr.、M. Torrie、及びS. Gray、「Autonomous Ground Vehicle Technologies Applied to the DARPA Grand Challenge」、International Conference on Control, Automation, and Systems、(2004)
６）T. Berglund、H. Jonsson、及びI. Soderkvist、「An Obstacle-Avoiding Minimum Variation B-spline Problem」、International Conference on Geometric Modeling and Graphics、(July, 2003)
７）D. Coombs、B. Yoshimi、T. Tsai、及びE. Kent、「Visualizing Terrain and Navigation Data」、NISTIR 6720、(2001年3月1日)
８）Jenkinsらの米国特許第5,644,386号
９）Andressenの米国特許第5,870,181号
１０）Krasutskyらの米国特許第5,200,606号
１１）Ruffらの米国特許第6,844,924号
【００１０】
こうした研究にも関わらず、適当な視覚化、障害物識別、そして障害物回避のシステム及び方法は、特に都市部での自律的な方向調整（autonomous direction）に関して、乗物の動作を制限する問題なしに実現されていない。
【課題を解決するための手段】
【００１１】
本発明の一実施例では、ナビゲーション及び制御システムは、乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を生成するように構成される１つまたは複数のポジションセンサを含む。このシステムは、入力を有し、乗物の動作を制御する出力を生成する１つまたは複数の動作制御機構を含むと共に、動作制御機構から遠隔配置される内蔵式自律型制御器を含む。自律型制御器は、ポジションセンサからポジション信号を受信し、乗物の更新された移動経路を定める動作制御信号を生成するように構成されるプロセッサと、ポジションセンサ、動作制御機構、及びプロセッサの間で通信を行うプログラマブルインタフェースとを含む。プログラマブルインタフェースは、ポジションセンサからのプロセッサへの入力を正規化し、動作制御機構への入力として加えられる適合する動作制御信号を生成するように構成され、それによって内蔵式自律型制御器は、様々な異なるセンサ及び異なる動作制御機構と共に動作するように構成可能である。
【００１２】
本発明の一実施例では、乗物をナビゲーション及び制御する方法は、乗物の位置及び進

行方向を示すポジション信号を生成する段階と、プログラマブルインタフェースによってポジション信号を正規化して、正規化されたポジション信号を生成する段階と、正規化されたポジション信号から動作制御信号を生成する段階と、プログラマブルインタフェースによって動作制御信号を正規化して、乗物の更新された移動経路に沿って乗物の動作を制御する正規化された動作制御信号を生成する段階とを含む。

【００１３】

前述の全般的な本発明の説明と以下の詳細な説明は共に、例示的なものであり、本発明を限定するものではないことを理解されたい。

【００１４】

本発明のより完全な理解、及び本発明の多くの付随的な利点は、そのことが、添付図面と併せて検討する場合に以下の詳細な説明を参照することによってより良く理解されるときに、容易に得られよう。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１Ａ】二次元（２Ｄ）のスキャンが、乗物の所定の軸に直交する平面のセクタ内で行われる、本発明の一実施例による自律乗物の概略説明図である。

【図１Ｂ】三次元（３Ｄ）のスキャンが、スキャンを乗物の所定の軸に直交する平面から外へ移動させることによって行われる、本発明の一実施例による自律乗物の概略説明図である。

【図２】本発明の一実施例によるエミッタ及び検出器システムの概略説明図である。

【図３Ａ】（１）本発明の一実施例における一方のレーザスキャナシステムによってスキャンされる一方のエリアの概略図である。（２）本発明の一実施例における別のレーザスキャナシステムによってスキャンされる相補的なエリアの概略図である。

【図３Ｂ】スキャニングシステム及び光学画像化システムを含む本発明の一実施例による自律乗物の概略説明図である。

【図４Ａ】本発明の統合自律乗物システムプラットフォームを示すハードウェア概略図である。

【図４Ｂ】本発明の自律乗物を制御する複数のプロセッサの相互接続を示す機能概略図である。

【図４Ｃ】自律乗物システムプラットフォームの構成に関してユーザに与えられるグラフィカルディスプレイのスクリーンショットである。

【図５Ａ】その中ではＧＰＳ信号が完全に失われているトンネルを通って移動するときに、本発明の自律乗物の動作中にステアリング制御器から集められたデータのグラフである。

【図５Ｂ】その中ではＧＰＳ信号が完全に失われているトンネルを通って移動するときに、本発明の自律乗物の動作中にステアリング制御器から集められたデータのグラフである。

【図５Ｃ】その中ではＧＰＳ信号が完全に失われているトンネルを通って移動するときに、本発明の自律乗物の動作中にステアリング制御器から集められたデータのグラフである。

【図６Ａ】本発明の一実施例による可変構造オブザーバアルゴリズムの利用の説明図である。

【図６Ｂ】元の速度計画、及び観測した障害物を考慮に入れる補正経路を示す例示的なＳ－Ｔ線図である。

【図６Ｃ】一実施例のＶＰＰ計算プロセスを示すフローチャートである。

【図７】都市環境における本発明の乗物のステアリング制御器についての標準偏差を示すグラフである。

【図８】ヘアピンターンを含むスラロームコースを一定速度３０ｋｍ／時で通り抜ける間でも、計画経路から２５ｃｍ未満の標準偏差が本発明の自律乗物によって維持されることを示すグラフである。

【図９】本発明のレーザスキャニングシステムからの速度値のフィルタリングの図である。
【図１０】自律乗物の軌跡の予測についての完全に非ホロノミックなモデルの概略図である。
【図１１】自律乗物の軌跡の予測についての一部非ホロノミックなモデルの概略図である。
【図１２】ＡＶＳコンソールの概略図である。
【図１３】本発明に適しているコンピュータシステムの概略図である。
【発明を実施するための形態】
【００１６】
ここで、いろいろな図の全体を通じて同じ参照数字が同一または対応する部分を示している図面、より詳細には図１Ａを参照すると、図１Ａは、一実施例における、乗物１０の上部に取り付けられた画像化センサ８を示しており、二次元（２Ｄ）のスキャンが、ここでは説明のために「垂直」スキャン平面と呼ばれる乗物１０の所定の軸に直交する平面１１のセクタ内で行われる。この画像化センサ及びその動作は、米国特許出願第１１／３７６，１６０号により詳細に説明されている。この画像化センサは、本発明に使用できる画像化センサの一例に過ぎない。
【００１７】
それでも、ここでの説明は、本発明の応用例についてのあるコンテクストを与えるために画像化センサ８の動作を簡単に概説する。一実施例では、画像化センサ８は、画像化センサ８から乗物１０の周りの環境の中にレーザパルス（または光）１４を送出する（図２に示すような）エミッタ１２を含む。図１Ａに示すように、レーザ（または光）パルス１４は、垂直スキャン平面１１の中に放出される。三次元（３Ｄ）画像を作成するために、平面１１の内外で画像化センサ８をパン（首振り）させて、図１Ｂに示すように３Ｄスキャニング体積１６を作成する。画像化センサ８は、物体２２から反射した光を検出することによって乗物１０近くの環境中の（図１Ｂに示すような）物体２２を検出する。
【００１８】
本発明の一実施例では、自律乗物１０は、以下で詳細に説明する２つのレーザスキャナシステム４０を使用する。
【００１９】
図２に示すように、画像化センサ８は、エコー信号２０の戻りを検出する検出器１８を含む。画像化センサ８は、レーザパルス１４のタイミング及び放出を制御し、レーザパルス１４の放出をエコー信号２０の受信と関連付けるためにプロセッサ２４を利用する。プロセッサ２４は、乗物に搭載されていてもよく、または画像化センサ８の一部であってもよい。例示的なプロセッサ及びその機能の詳細は後で提供される。
【００２０】
例示的な例では、エミッタ１２からのレーザパルス１４は、ビーム拡大器１３ａ及びコリメータ１３ｂを通過する。レーザパルス１４は、固定ミラー１５ａで回転ミラー２６に反射され、次いでレンズ２７ａ及び望遠鏡２７ｂを通じて送られて、直径１～１０ｍｍを有するレーザパルス１４のビームを形成し、合成三次元視野について対応する分解能を与える。望遠鏡２７ｂは、物体２２から反射した光を集める働きをする。
【００２１】
本発明の一実施例では、検出器１８は、物体から反射されて検出器に戻るレーザ光を背景光から区別するために、放出光の波長の光だけを検出するように構成される。したがって、本発明の一実施例では、画像化センサ８は、レーザパルス１４を送出し、物体が検出器１８の感度の範囲内であれば、このレーザパルス１４が物体２２によって反射され、検出器１８によって測定されることによって動作する。レーザパルスの放出と受信との間の経過時間により、プロセッサ２４を使用して物体２２と検出器１８との間の距離を計算することが可能になる。本発明の一実施例では、光学系（すなわち、１３ａ、１３ｂ、１５ａ、２６、２７ａ、及び２７ｂ）は、ビームを図１Ａに示すセクタの中に瞬間的に向ける

ように構成され、検出器１８は、図１Ａに示すそれぞれの角度方向α_1に対応する所定の角度位置で受信信号を受信するためのフィールドプログラマブルゲートアレイである。

【００２２】

回転ミラー２６によって、レーザパルス１４は、図１Ａに例示するように平面１１内で放射状セクタαをくまなく掃引される。本発明の一実施例では、画像化センサ８の前の視野内で物体のマッピングを達成するために、回転ミラー２６は、３０～９０度の角変位にわたって、毎秒１００～１００００度の角速度で回転させられる。

【００２３】

三次元（３Ｄ）画像を作成するために、本発明の一実施例では、平面１１の内外で画像化センサ８をパン（または首振り）させて、図１Ｂに示すように３Ｄスキャニング体積１６を作成する。説明のために、図１Ｂは、（垂直スキャン方向に）角度α及び（水平スキャン方向に）角度βによってスキャニング体積１６を定める。前述の通り、角度αは、毎秒１００～１０００度の角速度で３０～７０度である。角度β（すなわち、パン角度）は、毎秒１～１５０度のパン速度で１～２７０度である。典型的には、組み合わせた画像化センサ８は、毎秒３回以上３Ｄスキャニング体積１６を完全にスキャンすることができる。

【００２４】

本発明の一実施例では、乗物からの物体の距離及び乗物からの物体の方向に基づいて視野内の物体の地理空間位置を計算するために、瞬間的な乗物ポジションの地理空間ポジションデータが、プロセッサ２４によって利用される。図２に示すように、プロセッサ２４は、毎秒何回も乗物の位置、進行方向、高度、及び速度をプロセッサ２４に伝送する、例えば全地球測位システム（ＧＰＳ）及び／または慣性航行システム（ＩＮＳ：inertial navigational system）などのリアルタイム測位装置２５と通信する。典型的には、リアルタイム測位装置２５は、乗物１０に取り付けられ、（乗物の位置、進行方向、高度、及び速度などの）データを乗物１０にある全ての画像化センサ８（及び全てのプロセッサ２４）に伝送する。

【００２５】

市販のＧＰＳユニット及びＩＮＳユニットの場合、プロセッサ２４は、１０ｃｍより良い精度まで視野内の物体のポジションを決定することができる。本発明の一実施例では、乗物の経路内の障害物のマップを作成するために、プロセッサ２４は、ＧＰＳポジション、ＬＡＤＡＲ測定値、及び偏向角データを関連付ける。マップの精度は、測位装置２５からのデータの精度に依存する。以下は、そのようなデータの精度についての説明のための例であり、すなわち、ポジション１０ｃｍ、前進速度０．０７ｋｍ／時、加速度０．０１％、ロール／ピッチ０．０３度、進行方向０．１度、横方向速度０．２％である。

【００２６】

本発明の一実施例では、（市販の統合された）カルマンフィルタは、全てのデータを通じてプロセッサ２４への入力をソートする。カルマンフィルタは、ノイズデータの反復測定に基づいてシステムの状態を推定する既知の方法である。この場合には、カルマンフィルタは、各タイプのセンサに固有のノイズのタイプを考慮に入れ、次いで実際のポジションの最適推定値を構築することによって、よりさらに精確に乗物ポジションを推定することができる。そのようなフィルタリングは、A. Kelly、「A 3d State Space Formulation of a Navigation Kalman Filter for Autonomous Vehicles」、CMU Robotics Institute, Tech. Rep.、1994によって記載されており、その内容全体は、参照により本明細書に組み込まれる。

【００２７】

測距測定を行うために、市販のコンポーネントが、エミッタ１２及び検出器１８に用いられてもよい。一実施例では、エミッタ１２、検出器１８、及び関連した光学系が、レーザレーダ（ＬＡＤＡＲ：laser radar）システムを構成するが、例えば、光検出測距（ＬＩＤＡＲ：light detection and ranging）センサ、レーダ、またはカメラなどの正確な距離測定を行うことができる他のシステムが、本発明に使用されてもよい。ＬＩＤＡＲ（

光検出測距、またはレーザ画像化検出測距）は、レーザパルスを用いて物体または表面までの距離を決定する技術である。

【００２８】

図３Ａ（１）は、本発明の一実施例における一方のレーザスキャナシステムによってスキャンされる一方のエリアの概略図である。図３Ａ（２）は、本発明の一実施例における別のレーザスキャナシステムによってスキャンされる相補的なエリアの概略図である。各レーザスキャナシステム４０は、センサの前で例えば２７０°の弧を掃引するようにレーザパルス１４を放出するために、回転ミラーと併せて４つのレーザを使用する。本発明は、厳密に２７０°の弧を掃引することに限定されるものではなく、１８０°～２７０°～３６０°の他の弧の範囲が使用されてもよい。この例では、ビームは、ミラーが、真正面に向けられる（directly ahead）とき、及び両側にちょうど０°に向けられるときに、０．８°だけずらされる４つの異なるスキャン平面上のユニットから発する。このように複数のレーザを使用することによって、スキャナシステム４０は、乗物が操縦中にピッチ及びロールするときでも十分な視野を維持することができる。

【００２９】

スキャナシステム４０は、地面から異なる高さに取り付けられてもよい。例えば、センサを０．５メートルという比較的低い高さに取り付けることによって、センサは、乗物上でセンサがより高く上に取り付ける場合よりも効果的により小さい障害物を検出することができる。一方、いくつかの水平に取り付けたセンサは、それらのスキャン平面がしばしば、乗物がピッチしているときに地面によって遮られるので、低く取り付けられるときはそれほど効果的でない。

【００３０】

従来、完全な３６０°のスキャナ範囲を必要とした乗物は、乗物の前部で１つのスキャナシステム、及び乗物の後部で１つのスタンドアロン型のスキャナを使用した。２つのＥＣＵ（前部センサ用に１つ、及び後部センサ用に１つ）を用いるこの手法は、システムが単一障害点に対して弱いままである。本発明は、完全な３６０°の視野をそれぞれが有する２つのスキャナを使用することによって単一障害点の問題に対処し、それによって周囲環境の冗長ビュー（redundant view）を提供する。各スキャナシステムは、図３Ａ（１）及び図３Ａ（２）に示すように、それ自体のＥＣＵと共に、乗物の前隅の一方にあるセンサと、乗物の反対の後隅にあるセンサとを有する。実際には、図３Ｂは、スキャニングシステム（例えば、２つのレーザスキャナシステム４０など）及び光学画像化システム４２を含む本発明の一実施例による自律乗物の概略説明図である。

【００３１】

いくつかの重大な技術的な課題が、都市部で動作する自律乗物に提示されている。これら課題は、本発明の革新的なハードウェア及びソフトウェアの設計によって対処される。１）ＧＰＳデータは、都市環境に存在するビルディング及び他の障害物によりしばしば利用できないことになる。自律乗物のミッションの要素の多くは、ＧＰＳ座標によって特定されるので、本発明ではＧＰＳデータを補完するために、追加の位置推定情報が使用され得る。２）都市環境では、静止した障害物と共に多くの移動中の乗物が存在している。本発明の一実施例では、乗物のソフトウェアは、他の乗物を追跡し、他の乗物と交信し、他の乗物の移動を時々予測する。３）自律乗物は、当てはまる交通法全てに常に従わなければならない。４）都市環境における自律乗物は時々、他の乗物の追い越し、駐車、Ｕターンの実行、対向車線の車の流れを通り抜ける左折の実行（右側通行の場合）、及び交通渋滞の通り抜けなどの高度な操縦を行う。５）都市環境の一部のエリアでは、道路は、まばらな一連のウェイポイント（waypoint）だけで特定されることになり、本発明の自律乗物は、センサを利用して、辿る適切な経路を検出する。

【００３２】

これら課題は、特に交差点において、この環境中の自律乗物と他の乗物の両方の状態を追跡するソフトウェアシステムによって本発明において対処される。

【００３３】

システムコンポーネント

【００３４】

作業乗物：２００５年の“Ｆｏｒｄ　Ｅｓｃａｐｅ　Ｈｙｂｒｉｄ（フォードエスケープハイブリッド）”（商標）（以下、作業乗物（working vehicle）と呼ばれる）が、本発明の画像化センサ８を備えるように改良された。この作業乗物は、電気エンジンがほぼ常に動作し、ガスエンジンが、余分な馬力の供給または電気エンジンのバッテリの再充電を、自動的に開始及び停止する、ハイブリッド駆動システムを使用した。３３０ボルトのバッテリによって電力が供給される作業乗物の電気系統は、１３００ワットを超える電力を作業乗物に取り付けた装置に供給する。

【００３５】

この作業乗物は、車を物理的に制御するために、“Ｅｌｅｃｔｒｏｎｉｃ　Ｍｏｂｉｌｉｔｙ　Ｃｏｎｔｒｏｌｓ（ＥＭＣ）”社から市販されているアドバンスド電気自動車インタフェース技術（ＡＥＶＩＴ：Advanced Electronic Vehicle Interface Technology）の「ドライブバイワイヤ」システムを利用した。このＡＥＶＩＴシステムは、ステアリングホイールを回し、ギアを切り換え、スロットルを働かせ、ブレーキを働かせるのに冗長なサーボ及びモータを使用する。ＥＭＣ社（EMC Corporation）から市販されているこの解決策は、ステアリングコラム、ブレーキペダル、スロットルワイヤ、緊急ブレーキ、及びオートマチックトランスミッションに取り付けたアクチュエータ及びサーボを含む。ＡＥＶＩＴシステムは、乗物のターンシグナル及び点火を制御することもできる。電子式運転支援制御システムを用いることによって、乗物の全ての面が、１つの完全に統合したシステムによって制御され、全般的な複雑さを減少させ、障害点をなくす。電子式運転支援制御システムは、起動されると、乗物の主ブレーキシステムを働かせ、次いで乗物の点火をオフにする自律乗物用の緊急停止（Ｅストップ）機構も設けていた。最後に、わずかに遅れた後、乗物の緊急ブレーキが働かされ、この緊急ブレーキが保持される。これにより、Ｅストップコマンドを受信すると乗物が効果的に停止でき、乗物が坂にある場合でも停止したままにすることができることが、確かなものとなる。これら能力は、本発明において任意とみなされる。

【００３６】

ハードウェアプラットフォーム：本発明の自律乗物システム（ＡＶＳ：Autonomous Vehicle System）プラットフォームは、様々な自律運転応用例のために設計されたものである。ＡＶＳプラットフォームは、ハードウェア層及びソフトウェア層を含む。ハードウェア層は、プリント配線板または他の内蔵式の配線及び装置の構造体（self-contained wiring and device construct）を含み、このプリント配線板または他の内蔵式の配線及び装置構造体は、ＧＰＳ受信機または障害物センサなどの外界センサへの電力供給、及び、ＧＰＳ受信機または障害物センサなどの外界センサとの通信の両方を行うための配線と、入力を有し、乗物の動作を制御する出力を生成する動作制御機構とを含む。一実施例では、この目的のために、特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ）が使用され得る。

【００３７】

図４Ａは、本発明の統合自律乗物システムプラットフォームを示すハードウェア概略図である。図４Ａは、ユーザまたはプログラムインタフェース５２、コンピュータ５３、５４、フィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６、安全無線５８、ハードウェアウォッチドッグ６０、イーサネット（登録商標）リンク装置６２、配電コンポーネント６４、緊急停止（Ｅストップ）論理デバイス６６、内部及び外部のコントローラエリアネットワーク（ＣＡＮ：controller area networks）６８、デジタル及びアナログの入出力装置７０、ならびにＲＳ－２３２ポート及びＲＳ－４２２ポート８０を備えるＡＶＳプリント配線板５０を特に示す。プリント配線板上へこれらコンポーネントを統合することによって、自律乗物システム（ＡＶＳ）プラットフォームは、幅広い様々なセンサと、センサデータを処理し自律乗物を指示する計算能力とを統合するためのハードウェアを提供する。また、物理配線の大部分を、手による配線ではなくプリント配線板上に実装することによって、本発明のＡＶＳプラットフォーム中のハードウェア層は、信頼性の向上を示した

。

【００３８】

さらに、本発明以前は、自律乗物は、特定のセンサならびに駆動制御及びステアリング制御のために特別に設計または改造されていた。大抵がプロトタイプであるこれらの乗物は、自動車の技術者が気付いていた既知の課題への特定の解決を何度も目標として、産業がこれら乗物を開発したときに、自律乗物の開発における特定の問題に対処するために使用された。したがって、そのときには、より普遍的な自律乗物制御プラットフォームを生み出す現実的なはずみとなるものはなかった。さらに、どの種類のセンサ及びどの種類の駆動制御システムを組み込むかという未解決の問題によって、自律乗物を感知及び制御するための無数の選択肢に性能が適合可能であるシステムの設計がそうした普遍的な解決策を検討するには、フィールドがあまりにも未熟である状態に取り残された。

【００３９】

したがって、本発明の一実施例では、ユーザまたはプログラムインタフェース５２によって、ユーザは、特定のセンサ及び特定のドライブステアリング制御のための構成可能なインタフェース装置をプログラムすることができる。例えば、ＡＶＳプリント配線板５０を自律乗物に装着する技術者は、自律乗物上の特定のセンサ一式のためのフィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６（すなわち、構成可能なインタフェース装置）をプログラムし、特定の駆動制御及びステアリング制御、例えば、ＡＥＶＩＴドライブバイワイヤシステム（すなわち、動作制御機構）に必要とされる制御などのためにプログラムすることになる。別の例では、現場技師または整備技師が、自律乗物に新しいセンサを装着し、そのときに新たに装着したセンサに適合するようにフィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６を再プログラムしてもよい。

【００４０】

一実施例におけるプリント配線板５０は、安全無線５８用のＥストップ無線と、（図４Ａに示すコンピュータのうちの１つを構成する）ＡＥＶＩＴドライブバイワイヤシステムとに接続されていた。一実施例におけるハードウェア層は、ハードウェアの動作を監視するプログラマブル論理デバイス（すなわち、ハードウェアウォッチドッグ６０）を含み、故障したコンポーネントの（例えば、配電コンポーネント６４を介して）電源を切って電源を再投入することができ、またはもし致命的なエラーが検出されたら（例えば、Ｅストップ論理デバイス６０介して）乗物を停止することさえもできる。一実施例では、ＡＶＳハードウェア層は、コンピュータ５３、５４用に、ＱＮＸハードリアルタイムオペレーティングシステム（QNX hard real-time operating system）を実行する“Ｉｎｔｅｌ（登録商標）　Ｃｏｒｅ　Ｄｕｏ”コンピュータを備える。これらコンピュータが、ＡＶＳソフトウェアプラットフォームを実行するために使用された。

【００４１】

イントラシステム通信：図４Ｂは、コントローラエリアネットワーク（ＣＡＮ）とＡＶＳソフトウェア／ハードウェアとセンサとの間のプロセスの関係を示す機能概略図である。ＡＶＳプラットフォームの個々のコンポーネント内の通信は、含まれるメッセージの致命度（criticality）及び時間の正確さ（punctuality）に基づいてセグメント化されてもよい。一実施例では、ＡＶＳソフトウェアとドライブバイワイヤシステムとの間の乗物制御メッセージは、独立したコントローラエリアネットワーク（ＣＡＮ）を介して伝送され得る。一実施例におけるＣＡＮ６８は、統合された優先システムを有し、この統合された優先システムは、予測可能なリアルタイム通信（例えば、駆動信号及び制御信号）を実現するとともに、電磁干渉に対するロバスト性を提供する。本発明のある優先制御システムでは、緊急制御、及び必要ならば乗物の停止は、最高の優先度を得ると共に、ＣＡＮバス上の任意の他の通信に取って代わる。数少ない緊急メッセージの存在がなければ、計画ソフトウェアとドライブバイワイヤシステムとの間の制御通信が、所定の時間の間、第２の優先度として妨げられずに生じ得る。

【００４２】

一実施例では、プリント配線板５０上で、分離したＣＡＮバスが、車載用に特別に設計

されたセンサ（例えば、センサ信号）との通信に用いられ、これは、他の形態の通信が可能であってもなくてもよい。制御ネットワークをセンサに専念させることによって、制御パケットは、入力センサパケットを先取することが防止される。加えて、この分離は、センサネットワーク上の不調の装置が制御ＣＡＮバスを混乱させることにより自律乗物の安全動作が損なわれる可能性がある場合、そのような混乱を防止するのに役立つ。

【００４３】

一実施例では、プリント配線板５０上で、センサと計画コンピュータ５３、５４との間のより高帯域の通信が、イーサネット（登録商標）リンク装置６２を介して行われる。ＡＶＳプラットフォームに結合された高精度のセンサは、イーサネット（登録商標）リンク装置６２によってもたらされる高帯域、少ない待ち時間、及び耐故障性によく適している大量のデータを生成することができる。一実施例では、位置推定センサからのポジションデータと障害物スキャナからの物体データの両方が、それらのデータの確定的伝送（deterministic transmission）の必要性を否定するタイムスタンプを含む。センサから見た周囲の状況（センサの世界観：sensors’ view of the world）のいずれか１つを復元するために、ポジションデータ及び障害物データは、トリップ計画コンピュータ（trip planning computer）５３、５４内で再構築及び再配列され得る。

【００４４】

一実施例では、プリント配線板５０上で、フィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６は、データがコンピュータ５３、５４に伝送される前に、ポジション及び移動の情報を集め、慣性系におけるドリフト及びＧＰＳシステムの機能停止を補償することができる。次いで、補正データは、イーサネット（登録商標）及びＣＡＮを介してコンピュータ５３、５４に送信される。この補正データは、専用ＣＡＮバスを介して障害物スキャナにも伝送される。乗物のポジション、速度及び向きが、スキャナの障害物データを補正するのを場合によっては助けるために使用できるように、このデータは、障害物スキャナに送信される。次いで、コンピュータ５３、５４は、障害物、ロボットの位置、及びミッションのウェイポイントを同じ座標のセットに関連付けることができる。フィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６は、ポジションセンサ、動作制御機構、及びプロセッサの間で通信を行うことができ、１）ポジションセンサまたは物体センサからのプロセッサへの入力を正規化し、２）動作制御機構（例えば、上述のアドバンスド電気自動車インタフェース技術（ＡＥＶＩＴ：Advanced Electronic Vehicle Interface Technology）など）への入力として加えられる適合する動作制御信号を生成することができる。このように、プリント配線板５０（すなわち、内蔵式自律型制御器）は、様々な異なるセンサ及び異なる動作制御機構と共に動作するように構成可能である。

【００４５】

したがって、統合プリント回路プラットフォームの実施例は、新規な構成を通じて本発明の自律乗物に独特の能力をもたらし、この新規な構成は、自律乗物に搭載されているセンサから入力を受信し、ある到着地から別の到着地までの移動経路を識別し、静止障害物及び移動障害物、ならびに移動経路に沿ったウェイポイントを識別し、静止障害物と移動障害物の両方を避けるように移動経路を補正するように構成されるプロセッサを備える。この統合プリント回路プラットフォームは、機能的に中心の位置にプログラマブル装置を含み、このプログラマブル装置は、自律乗物センサからの入力、ならびに駆動制御及びステアリング制御への出力の両方を受け付けると共に正規化する能力を提供する。このようにして、プラットフォームは、１）プリント配線板上に様々な入出力装置を備え、２）ユーザが、プラットフォームを、センサ及びステアリング制御の特定のセット用に「カスタマイズする」ことを可能にする、インタフェースを与えることによって、幅広い様々な自律乗物センサに対応する能力を提供する。

【００４６】

上記の通り、ユーザまたはプログラムインタフェース５２は、ＦＰＧＡ５６が自律乗物に備えられている様々なセンサならびに駆動制御及びステアリング制御に対応するようにプログラムされることを可能にする機構を、ユーザに提供する。図４Ｃは、ユーザインタ

フェースにアクセスするとユーザに与えられるグラフィカルディスプレイ７０のスクリーンショットである。グラフィカルディスプレイ７０は、例えば、電圧（Ｖ）、乗物ＣＡＮフィードバック、ＥＭＣ　ＣＡＮフィードバック、及び比例ゲイン制御などの欄をユーザが選択することを可能にする調整部を含む。図４Ｂに示すように、ユーザまたはプログラムインタフェース５２は、コンピュータ５３または５４の一方（または両方）との交信、あるいはフィールドプログラマブルゲートアレイデバイス５６との直接交信によって、自律乗物システムプラットフォームをユーザが設定することを可能にする。

【００４７】

センサ：自律乗物は、いかなる環境でも安全にナビゲートするために、周囲環境の精確な描写（picture）及び自律乗物自体のグローバルポジションを必要とする。都市環境で動作する場合は、課題が追加される。以下は、本発明の様々な実施例において本発明の自律乗物に装着される様々なタイプのセンサを説明する。

【００４８】

位置センサまたはポジションセンサ：都市部に入る自律乗物またはロボットの課題の１つは、自律乗物またはロボット周囲の世界のマップを構築し、マップ内で自律乗物またはロボット自体の位置を突き止めることにある。障害物及び車線検出センサから集められるデータについては、世界内のどこかの絶対位置または乗物に対するどこかの位置が参照される。乗物の位置、進行方向、及び速度についての精確な情報がなければ、他のデータは、無益になり得る。世界内でルートを計画すること、及び車の流れと併せてルートを計画することは、乗物について集められた全情報を一組のグローバル座標に変換することによって、単純化される。この変換を行うためには、データが集められたときの乗物の位置を正確に知ることが必要である。この情報から、自律乗物の周囲のエリアのマップを作成することができ、このマップから自律乗物の経路を計画することができる。

【００４９】

基本的には、自律乗物の経路の計画、及びセンサから集められるデータの合成には、正確な位置推定情報が必要である。上記の作業乗物は、乗物位置推定を行うために（すなわち、ポジショニングデータを与えるために）、“Ｏｘｆｏｒｄ　Ｔｅｃｈｎｉｃａｌ　Ｓｏｌｕｔｉｏｎｓ”社製のＲＴ３０００（商標）測位装置を利用した。ＲＴ３０００（商標）は、１０センチメートル以下の位置決め精度、及び０．１度以内までの進行方向測定値精度を与えるために、Ｏｍｎｉｓｔａｒ（商標）ＨＰディファレンシャルＧＰＳ信号を使用する。ＲＴ３０００（商標）の統合慣性航行システム（ＩＮＳ）は、ＲＴ３０００（商標）が実質的に性能劣化なしで３０秒までのＧＰＳの機能停止を耐え抜くことを可能にする。ＩＮＳは、加速度及びロールの情報を与える。慣性系内の加速度計及びジャイロスコープに加えて、フォードエスケープハイブリッドのリアのＡＢＳ車輪速度センサのうちの１つからアンチブレーキシステム（ＡＢＳ：anti-braking system）のインタフェースボードを介して入力される車輪速度が、ＲＴ３０００センサに与えられる。ＡＶＳインタフェースボードは、“Ｆｏｒｄ　Ｅｓｃａｐｅ”のＡＢＳセンサから“Ｆｏｒｄ　Ｅｓｃａｐｅ”のＥＣＵへの通信信号を読み、通信信号をＧＰＳが使用できる信号に変換する。ＲＴ３０００センサは、カルマンフィルタリングとＲＴ３０００センサに内部で与えられるアルゴリズムとの組み合わせを用いて各ソースからのデータを内部的に統合する。

【００５０】

ＲＴ３０００センサは、本発明において、効果的な位置推定センサの一例として使用されている。ＧＰＳ信号が一部または完全に失われることになる場合でも、ＲＴ３０００センサは、失った信号を適切に補償することができる。図５Ａ～図５Ｃは、自律乗物が、その中では１０～１５秒の間ＧＰＳ信号が完全に失われているトンネルを通って移動する間に、ステアリング制御器から集められたデータを示す。ＧＰＳ信号の再取得時に乗物がたった５０センチメートルだけ所望の経路から外れていたことは、ＲＴ３０００センサの信頼性と、制御システムの能力がＲＴ３０００センサから発するデータに関連してよく働いていることの両方を語っている。これらの図では、Ｙ誤差は、制御システムアルゴリズムへの入力信号であり、経路誤差は、乗物の中心線が所望の経路から外れている実際の量で

あり、ステアリング角は、乗物のフロントタイヤの角度である。Ｙ誤差信号が増大すると、ステアリング角は、実際の経路誤差を最小にしようとするように調整される。

【００５１】

障害物または物体センサ：概して上述したような一実施例では、本発明の自律乗物は、自律乗物の主要な障害物回避センサとして、２つのＩｂｅｏ　ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴフュージョンシステムセンサ（Ibeo Automobile Sensor GmbH、Merkurring 20, 22143 Hamburg, Deutschland）を使用する。各ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴフュージョンシステムセンサは、２つのＩｂｅｏ　ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナと、１つのＩｂｅｏ電子制御装置（ＥＣＵ）を含む。作業乗物中の各ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナは、センサの前の２７０°の弧を掃引するための回転ミラーと併せて４つのアイセーフレーザ（eye-safe laser）を使用した。ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナの４つのビームは全て、ミラーが、ちょうど真正面に向けられているときに、そして両側にちょうど０°に向けられているときに、０．８°だけずらされる４つの異なるスキャン平面上のユニットから発する。

【００５２】

この実例におけるＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナは、その視野の柔軟性のため、地面から約０．５メートルという高さで乗物に強固に取り付けられた。他の高さも本発明に適している。０．５メートルという比較的低い高さにセンサを取り付けることによって、センサは、乗物上でセンサがより高く上に取り付ける場合よりも効果的により小さい障害物を検出することができる。一部の水平に取り付けたセンサは、それらのスキャン平面がしばしば、乗物がピッチしているときに地面によって遮られるので、この低さに取り付けられるときはそれほど効果的でない。

【００５３】

ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナは、単一のレーザビームから複数のエコーを検出するその能力により、幅広い天候条件で動作することができる。ビームが、１枚のガラスまたは雨滴などの透明な物体に到達する場合、ビームは、部分エコーを生成し、この部分エコーは、レーザスキャナによってそのようなものとして認識され、そのようなものとしてみなされる。この複数ターゲット能力（Multi-Target Capability）により、ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナは、暴風雨など多くの異なるタイプの悪天候で動作することが可能になる。

【００５４】

ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナの別な利点は、乗物の周囲の物体のマップを作成するために、２つのＡＬＡＳＣＡ　ＸＴセンサからレーザの角度及び測距情報を取り入れる電子制御装置（ＥＣＵ：Electronic Control Unit）の能力である。フィルタリングして雨滴や地面などの関心のないレーザのエコーを取り除いた後、ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナ制御システムは、両レーザスキャナからのデータを組み合わせ、次いでエコーの群の周りでポリゴンを適合させる。次に、ＥＣＵのソフトウェアアルゴリズムは、各障害物の速度ベクトルを計算し、それ自体の固有の識別番号で各障害物を識別する。通信オーバーヘッドを減少させるために、ＥＣＵは、特定の優先度分類アルゴリズムを満たす障害物を伝えるだけである。本発明の一実施例では、自律乗物は、この分類のための主要な基準として物体速度と乗物からの距離の両方に基づくアルゴリズムを使用する。得られるポリゴンは、ＣＡＮを介してコンピュータ５３、５４に伝送される。本実施例では、この処理の全ては、ＡＬＡＳＣＡ　ＸＴレーザスキャナのＥＣＵ上でローカルに行われるので、コンピュータ５３、５４は、この追加の処理オーバーヘッドを免れる。

【００５５】

両方の障害物検出システム４０から返される障害物について集めたものは、乗物の障害物データベース（obstacle repository）の中に取り入れられる。一方のスキャナシステムが、障害物のリストを返すことができない場合には、乗物は、その視野のいずれも失うことなく他方のスキャナシステムが切れ目なく動作し続ける。一方のスキャナシステムの障害が検出されると、ＡＶＳプラットフォームのハードウェア層は、リカバリが再起動で行われるかどうか確かめるためにシステムをリブートすることができる。

【００５６】
本発明の別の実施例では、“Ｖｅｌｏｄｙｎｅ”社のＬＩＤＡＲ（例えば、モデルＨＤＬ－６４Ｅ、３６０度の水平視野及び２６．８度の垂直視野を提供する６４個の要素のＬＩＤＡＲセンサ）が、障害物検出器４０として使用される。このＬＩＤＡＲシステムは、５～１５Ｈｚのフレームレートで、毎秒１３０万個のデータ点にわたっていることを特色とする。ＬＩＤＡＲシステムが生成する点群は、地形情報及び環境情報をもたらす。距離データと強度データの両方は、イーサネット（登録商標）出力パケットペイロードに与えられる。ＨＤＬ－６４Ｅは、環境についての情報に関して実に独占的に信頼され得るものであり、したがって、上記の他方のセンサに冗長性を与える。ＨＤＬ－６４Ｅセンサは、６４個の等間隔の角度の細分（約０．４°）で２６．８度の垂直視野（仰角）、及び＋２°～－２４．８°で３６０度の視野（方位角）、及び０．０９度の角度分解能（方位角）を与える６４個のレーザを利用する。ＨＤＬ－６４Ｅの精度は、２ｃｍ未満である。ＨＤＬ－６４Ｅは、５～１５Ｈｚ（ユーザ選択可能）のレートで視野を更新し、舗装道路について５０メートルのレンジ（約０．１０の反射率）、そして車及び葉について１２０メートルのレンジ（約０．８０の反射率）を有する。

【００５７】
車線／道路検出センサ：まばらに集まっているウェイポイントだけで車線／道路を識別する場合、場合によっては、自律乗物は、適切な車線／道路を見つけ、これに従わなければならない。この問題に対処するために、ビデオによる車線検出システム、例えば、“Ｉｔｅｒｉｓ”社（Iteris, Inc.、Santa Ana、California）製のモデルＬＤＷは、本発明の自律乗物の一実施例において画像化デバイス４２として用いられた。“Ｉｔｅｒｉｓ”社のＬＤＷシステムは、光学センサ及び画像処理システムを使用して、車線マーキングを検出及び追跡する。ＬＤＷシステム中の画像化センサは、ＬＤＷシステムが車線マーキングを探す乗物の前方のエリアの二次元のデジタル化画像を作成する。作業乗物では、画像化センサは、フロントガラスの上部に装着されたが、前方を向く他のポジションも適当である。このビデオによる車線検出システムは、左右の車線マーキングの位置、左右の車線マーキングのタイプ（実線、破線など）、車線内の乗物の角度、及び車線の曲率を自律乗物に提供する。この情報は、ＣＡＮ６８ｂを介して毎秒２５回のレートでＡＶＳプラットフォームソフトウェアに与えられる。ビデオによる車線検出システムからのこの情報を使用して、現在の車線のモデルを構築し、この現在の車線のモデルは、車線モデルにより良く従うように乗物の計画経路を調整するために、乗物のソフトウェアシステムによって使用され得る。

【００５８】
ソフトウェアプラットフォーム：自律乗物が都市環境で上手く動作するために必要なソフトウェアの容量及び複雑さは、ソフトウェアのアーキテクチャを容易に圧倒し得る。

【００５９】
ＡＶＳソフトウェアプラットフォームは、多くの異なるタイプの自律乗物応用例に用いることができる汎用自律型応用例のフレームワークとして設計された。ＡＶＳソフトウェアプラットフォームは、（多くの他の基本的な自律乗物に必要なものと共に）センサ統合機能、障害物回避機能、ナビゲーション機能、安全システム、イベントロギングシステム、位置推定機能、リアルタイム乗物監視機能、及びネットワーク統合機能を提供する。

【００６０】
作業乗物におけるＡＶＳソフトウェアプラットフォームは、Ｊａｖａ（登録商標）プログラミング言語を使用したが、本発明は、このプログラミング言語に限定されない。Ｊａｖａ（登録商標）のプラットフォーム非依存性のため、同じコードベースが、信頼できると共に繰り返し可能な結果を伴って様々なハードウェアシステム上で実行することができる。下記のようなＡＶＳソフトウェアフレームワークは、自律乗物応用例の設計の複雑さを低減するために、いくつかの異なるソフトウェア設計パターンまたは設計原理を使用する。これら設計パターンのそれぞれは、エンタープライズアプリケーション開発におけるソフトウェア開発の複雑さを低減し、そのソフトウェア開発の信頼性を改善することに成

功していることが証明されている。

【００６１】

本発明のＡＶＳソフトウェアフレームワークに使用される主要なソフトウェア設計原理の１つは、「関心の分離」のパラダイムであり、この「関心の分離」のパラダイムは、大きな問題を、解決がより容易になるように設計される一組のゆるく結びついた下位の問題に分割することによって開発の複雑さを低減する。したがって、ソフトウェアシステムは、重複する量を最小にしてできる限り多くの別々のコンポーネントに分けられる。ソフトウェアを機能的に分離したコンポーネントに分けることによって、あるコンポーネントにおける軽い障害は、他のコンポーネントに悪影響を及ぼさないはずである。

【００６２】

ＡＶＳソフトウェアフレームワークは、制御の反転（ＩｏＣ：Inversion of Control）コンテナを中心としたアーキテクチャを用いて実現されている。制御の反転は、フレームワークが、個々のアプリケーションコンポーネントの実行を調整及び制御するコンテナとして動作する設計パターンである。アプリケーションではなくフレームワークが、コンポーネント同士をつなぎ、アプリケーション内の適切なコンポーネントへのルーティングイベントに関与するので、ＩｏＣフレームワークは、プリケーション設計を単純化する。ＡＶＳフレームワークではＩｏＣコンテナが、スレッドスケジューリング、ログサービス、コンピューティングクラスタにわたってのアプリケーション資産の分散、耐故障性、及びネットワーク通信などの適切なリアルタイム自律乗物アプリケーションに必要なサービス全てを提供する。

【００６３】

ＡＶＳソフトウェアフレームワークのスレッドスケジューリング能力は、自律乗物アプリケーションの開発を大きく向上させた。最も効果的である関心の分散のパラダイムのために、コンポーネントは、できる限り切り離されるべきである。理想的には、コンポーネントは、あるコンポーネント中の障害が、後のコンポーネントが打ち切られることになる実行を引き起こさないように、逐次的ではなく並列に実行しているべきである。ＡＶＳソフトウェアフレームワークは、複数のコンピュータにわたってでもそれ自体の実行スレッドとして各コンポーネントを自動実行し、分離したコンポーネント同士の間のデータの共用を透過的に調整する。ＡＶＳソフトウェアフレームワークは、これら制御システムのそれぞれが、精確な乗物制御のために正確なタイミングを必要とするので、自律乗物の動作に必要とされる多くの制御システムにとって有益である多くの異なるレベルのプロセッサの負荷の下で、設定した頻度でこれらコンポーネントを実行することもできる。

【００６４】

一実施例におけるＡＶＳソフトウェアフレームワークは、（図４Ａに示すわずか２つのコンピュータ５３、５４の代わりに）１つまたは複数のコア埋込み型コンピュータ上で実行できる。実際には、３つのコア埋込み型コンピュータが、分散クラスタとして動作していた。クラスタ中の各コンピュータは、予め設定した時間的制約の内で自律型応用例の決定論的実行をサポートするために、ＡＶＳソフトウェアフレームワークのリアルタイム機能と結合されたハードリアルタイムオペレーティングシステムを実行する。リアルタイムサポートがイネーブルされると、プロセスの動作周波数は、大幅に安定する。ＡＶＳソフトウェアフレームワークのリアルタイム能力により、自律型応用例が、より首尾一貫して挙動し、ソフトウェアの問題の場合でも、安全監視装置及び低レベルドライブアルゴリズムなどのより高い優先度のコンポーネントが、適切に実行することが可能になることを確かにすることができる。

【００６５】

ソフトウェア実装：ソフトウェアロジックが、ＡＶＳソフトウェアフレームワークのためのモジュールとして実装された。ＡＶＳソフトウェアフレームワークは、それ自体が独立した実行スレッドで、これらモジュールをそれぞれ実行することができ、ＡＶＳソフトウェアフレームワークは、複数のコンポーネント間の依存性を自動管理する。以下のサブセクションは、本発明において利用されるソフトウェアモジュールを説明する。

【００６６】
ルート計画：環境のマッピング及び長距離のルート計画は、自律乗物の設計における重要事項である。利用した設計モデルは、論理マッピング及びルート計画からビジュアルマッピングを分離する。車載コンピュータによって実行される論理マッピング機能は、交差点コンポーネントの識別、センサにより見える陸標のマッピング、及び未定義マップエリアの補正を含む。未定義マップエリアエリアは、ロボット（すなわち、自律乗物）に与えられるマップが、現実世界の環境に十分に関係付けられていない領域からなる。この場合には、ロボットは、ロボットの移動経路に沿ってエリアを調査及び識別しなければならない。

【００６７】
本発明の一実施例では、既存のマップを座標データに変換することは、測量などの他の方法よりも、ステアリング方向を得るのにより効率的なやり方であることが示された。場合によっては、既存のマップは、利用できない可能性がある。自律乗物が、「クローズした」コース（すなわち、物理的な境界またはソフトウェアが指示した境界によって設定したコース）上を動作するように設計されている場合、人間による乗物の制御が、自律乗物が、クローズしたコースをマップ出力しながら、自律乗物を普通に制御するために使用されてもよい。自律乗物は、自律乗物のＧＰＳ、障害物スキャナ、及び車線検出センサからの情報を関係付けることによって指定したコースをマップ出力することができる。

【００６８】
コース、及びこのコースに沿ったウェイポイントを示す論理マップが得られると、この論理マップは、例えばルートネットワーク定義ファイル（ＲＮＤＦ：Route Network Definition File）形式で車載コンピュータ５３、５４に与えられるが、他の形式が使用されてもよい。２パスパーサ（two-pass parser）は、ウェイポイントの参照の全てが有効であることを検証する前に、ウェイポイントの全てを識別する。マップは、ＲＮＤＦ形式のオブジェクト指向適合物に記憶され、ＲＮＤＦファイルから導かれるマップの特徴についての拡張を含む。

【００６９】
ＲＮＤＦのデータから得られる第１の導かれた特徴は、ストップウェイポイント、及び出口ウェイポイント／入口ウェイポイントを交差点にグループ化することである。以下は、例示的なマッピング／ウェイポイントアルゴリズムである。まず、アルゴリズムは、いずれかのストップウェイポイントを選び、次いでこの点から離れる出口と、この点に至る入口との全てを見つける。次に、交差点の出口ごとに、この出口に続くウェイポイントが入口である場合、入口／出口のペアが、交差点に加えられる。同様に、交差点の入口ごとに、入口に先立つウェイポイントが出口ウェイポイントである場合、出口／入口のペアが、交差点に加えられる。最後に、任意のストップまたは出口が、交差点の境界から一定の距離の範囲内である場合、これらストップまたは出口も、交差点に加えられる。各ストップまたは出口が、１つの交差点に単に属することを確かなものとする準備が行われる。

【００７０】
ＲＮＤＦ内のデータから得られる第２の導かれた特徴は、ウェイポイント間の移動に関連したコストの記憶である。あるウェイポイントから次のウェイポイントまで運転するのに要する時間は、最適ルートを選ぶのに使用される基準値（metrics）の主要な候補である。時間基準値（Time metrics）は、ウェイポイント、出口、及びゾーンの対象に記憶される。ウェイポイントごとの初期コストは、区間の最大制限速度をウェイポイントとその前のウェイポイントとの間の距離で除する（割る）ことによって楽観的に計算される。ウェイポイントが、車線の始めにある場合、ウェイポイントは、ゼロのコストを有する。出口のコストは、入口の区間の速度に、一定のペナルティを加えたものに基づいて計算される。

【００７１】
本発明のあるルート発見アルゴリズムは、ロボット（すなわち、自律乗物）がその環境に関してより多くのものを調査するとき、ロボット（すなわち、自律乗物）が、ルートの

計画においてより効率的になることを可能にする学習のコンポーネントを含んでもよい。ウェイポイント間を、交差点を通って、及びゾーンを横切って移動するのに要する時間を記録することによって、移動時間を最適化するルートを計算することができる。移動時間の記録は、複数のルートにわたって使用される所与のＲＮＤＦのために維持される。交通パターン（traffic pattern）が時間とともに変化すると、新しい渋滞エリアが指し示され、古い観測記録は、信憑性が失われる。幾何学的に重みが減少する式１に示す重み付き平均の数式が、特定の移動ユニットのコストを計算するために使用される。最新の観測記録は、０．５の重みを有し、前の各観測記録の重みは、半分に減少する。

【００７２】

S_n=サンプル

N=サンプル数

N=1:合計S_0

N>1:合計=$S_0*1/(2^1)+S_1*1/(2^2)+...+S_{N-2}*1/(2^{N-1})+S_{N-1}*1(2^N)$・・・（１）

【００７３】

本発明の一実施例において、チェックポイント間の最適ルートは、Ａ＊ヒューリスティックガイド探索として知られている探索アルゴリズムを適用することによって求められる。他のアルゴリズムが、同じように使用されてもよい。Ａ＊探索アルゴリズムは、調査経路の優先度つきキューを維持する。優先度は、経路の現在のコスト（ｇ（ｘ））及びゴールまでの推定コスト（ｈ（ｘ））によって求められる。ルート計画のためのＡ＊の実施においては、ｇ（ｘ）は、すでに調査した移動ユニットについての観測した平均移動時間の合計である。ヒューリスティックｈ（ｘ）は、ゴールチェックポイントまでの直線距離をコースの最大制限速度によって除したものである。このヒューリスティックは、最短ルートがまず調査される挙動に影響を及ぼす。Ａ＊アルゴリズムは、シミュレーションと実際の試験の両方で精確なルートを生成することが証明されている。

【００７４】

可変構造オブザーバ（ＶＳＯ：Variable Structure Observer）：ＶＳＯのメイン機能は、自律乗物の近くの環境内（約１５０メートル内）の静止障害物及び移動障害物の全てについての座標及び軌跡の情報統合、及び予測を行うことである。可変構造オブザーバアルゴリズムは、複数の静止物体及び移動物体を追跡する。可変構造オブザーバアルゴリズムは、センサデータが一時的に失われる場合、またはセンサデータが一時的に信頼できなくなる場合でも、乗物の状況認識を改善し、乗物の知的運転及びナビゲーションを維持する能力を提供する。これは、別の乗物が自律乗物の前の交差点を走り抜けているときなど、一方の障害物が別の障害物によって一時的に隠される場合に非常に役立つ。

【００７５】

図６Ａは、本発明の一実施例によるＶＳＯアルゴリズムの利用の説明図である。具体的には、図６Ｂが、自律乗物の計画経路（すなわち、ＰＰと名付けられた曲線）が、一連の移動中の小さい長方形８２として示されるレーダが追跡した乗物（移動障害物）の経路と交差するときのシナリオにある、開発した可変構造オブザーバの実例である。この例では、レーダビーム（すなわち、左下隅から延びる角度変位する線）は、２台のトレーラ８４（すなわち、より大きい長方形）によって妨げられている。トレーラ８４によって妨げられることにより、追跡した移動障害物８２がレーダ画面から消えるとき、可変構造オブザーバは、移動中の乗物の予測されるポジションを生成するため、そのモデルを実行することによってメモリ中に移動障害物８２を維持する。自律乗物の経路に沿った速度計画は、移動障害物が経路に交差するときの時間を考慮する。破線の円形領域内で重なった長方形は、不確かさによる予測されるポジションの誤差を表す。したがって、可変構造オブザーバは、データの流れが遮られるときでも衝突を防ぐ。開発した可変構造オブザーバにより、無制限の個数の移動障害物を追跡することが可能であり、その個数は、システムの計算能力によってのみ制限される。

【００７６】

ＶＳＯの原理は、（Drakunov, S.V.、「Sliding-Mode Observers Based on Equivalent

Control Method」、Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)、Tucson、Arizona、1992年12月16日～18日、2368-2370頁）に示唆されたスライディングモードオブザーバのアイデアに基づいており、その内容全体は、参照により本明細書に組み込まれ、可変構造システムの一般理論に基づいている。その原理は、下記通り説明することができ、すなわち、障害物がセンサシステムによって検出されると、予備的データ処理を使用して障害物のポジション、幾何学的形状、及び速度ベクトルを識別する。ＶＳＯアルゴリズムは、障害物の「識別名」、及び障害物の動きの数学モデルを自動的に作成することになる。

【００７７】

そのため、識別された障害物についての状態ベクトル［ポジション、幾何学的形状、形状、速度など］が生成される。状態ベクトル（すなわち、障害物のパラメータ）は、入ってくるセンサデータのストリームに基づいて絶えず更新される。センサデータが一時的に失われる場合、ＶＳＯアルゴリズムは、一時的に見えなくなった乗物が、安全に停止するか、または障害物を回避することを可能にするために、センサデータが再取得されるまで、障害物のポジション及び速度の予測を（シミュレーションによって）与え続けることになる。

【００７８】

未来の時間に進めるようＶＳＯアルゴリズムを実行することによって、ＶＳＯは、経路計画及び速度計画のために、現在のポジションだけでなく、この障害物の将来のポジションも予測することができる。ある種のルールに従う。例えば、識別された物体が、自律乗物と同じ道路に沿って移動する移動物体である場合、ＶＳＯは、識別された物体がこの道路上に留まると仮定する。例えば、識別された物体が、自律乗物と同じ道路に沿って移動しており、ほぼ一定の速度で移動している移動物体である場合、ＶＳＯは、識別された物体が、この道路上に留まり、（そこで他の物体が邪魔をしない限り）同じ速度で持続すると仮定する。ＶＳＯは、近くの環境中の全ての障害物の状態ベクトルを、環境とともに動的に変化する乗物の動作環境についての１つの可変構造モデルにまとめる。ＶＳＯが、このエリアに入る障害物の新しいモデルを加え、障害物がこのエリアから離れたときに障害物を取り除くので、オブザーバの状態ベクトルの次元は、絶えず変化する。

【００７９】

本発明の一実施例における可変構造オブザーバは、スライディングモードを用いたシステムの理論に基づいている。スライディングモードの使用は、非線形の数学により理解されるものであり、システムの時間挙動を解析するために他の「システム」に使用されてきた。本発明の可変構造オブザーバでは、スライディングモードが、不確かさの存在下で強く非線形のシステムについての観測データから状態ベクトルを再構築するのに用いられる。ルート計画の文脈の中でのＶＳＯの利用に関するより詳細な説明は、以下に含まれている。

【００８０】

実際の実施では、ＶＳＯは、別の利点をもたらす。乗物の動きの数学モデルを、その計算に含むことによって、ＶＳＯは、センサデータに生じ得る変動を自動的にフィルタにより除去する。このことは、レーザスキャナセンサにとって特に重要であるが、このことは（これらセンサが計算する）速度ベクトルが、かなりのジッタを含み得るからである。

【００８１】

経路計画：本発明の経路計画アルゴリズムは、障害物を回避し、計画した回廊内で乗物をルーチン的に操舵する。一実施例では、これらアルゴリズムは、理由もなく、計画した回廊から乗物を逸脱させることはない。しかし、何らかの理由で乗物がルートの回廊を離れるのであれば、ナビゲーションシステムは、これを検出し、回廊に戻るように安全なルートを与える。ウェイポイントが見失われる場合、ナビゲーションシステムは、経路上の次の可能性のあるウェイポイントに単に進むことになる。経路が障害物によって遮られている場合、経路計画システムは、障害物の周りに経路を決定することになる。

【００８２】

本発明の一実施例における経路計画は、計画ルートの中心に追従すると共に、経路が乗物の航行に無理がないものであることをさらに確保するように設計される３次ｂスプラインを使用することによって達成される。この保証は、経路に沿った任意の点での曲率が、乗物がうまく追従できる最大曲率未満であることを意味する。加えて、新しいポジションにステアリングホイールを切るために乗物を停止してから続行する必要がないように、この曲率は継続が維持される。Ｂスプラインは、その経路の得られる曲線形状が容易に調整できることを主たる理由として、経路計画アルゴリズムに用いるために選ばれた。回廊の中心に追従する初期経路が作成された後に、この経路を障害物データベース（obstacle repository）と照合して、この経路が安全な経路であるかどうかを判定する。この経路が安全でない場合には、簡易アルゴリズムは、このスプラインが、有効な最大曲率を引き続き保ちつつ、分かっている全ての障害物を回避するまで、曲線の問題箇所で制御点を生成及び調整する。この時点で、経路は、安全でもあり、運転可能でもある。

【００８３】

本発明の経路計画は、詳細度（ＬＯＤ：Level of Detail）ベースの障害物回避アルゴリズムを、障害物の周りに経路を計画するためのいくつかの計画アルゴリズムと共に使用することもできる。本発明の一実施例におけるＬＯＤ解析により、異なる詳細度で同じアルゴリズムを実行することが可能になる。（例えば、大きい安全なマージンに対応するために）例えば、あまり詳細にせずに実行し、一方で、（例えば、より小さい安全なマージンに対応するために）有効な経路を見つけるまで詳細を反復的に増大させる。経路計画アルゴリズムは、有効な経路が求まるまでいくつかの異なるパラメータを用いて実行する。初期パラメータは、安全なマージン（例えば、障害物からの乗物のクリアランス、または障害物同士の間のクリアランス）を使用し、一方、最終パラメータは、障害物の周りに安全なマージンを使用しない。このことは、大きい誤差マージン（例えば、乗物横のクリアランス）で障害物を回避する経路が利用できる場合、経路計画ソフトウェアは、その経路を選択することを確かなものにする。さもなければ、計画アルゴリズムは、有効な経路が求まるまで障害物の周りの安全なマージンを減少させ続けることになる。

【００８４】

本発明は、乗物の推力、及び乗物に対する外力などの要因に対応する。システム同定は、本発明によって使用される方法であり、この方法によれば、システムを同定するパラメータは、システムへの入力信号をシステムの応答に関連付けて、実際の乗物のシステムと同じように（または似たように）挙動する伝達関数を明らかにすることによって、決定されることができる。例えば、乗物の速度を制御しようとするときは、入力はブレーキ及びアクセルのポジションであり、出力は乗物の速度である。システムのモデルは、伝達関数Ｈ（ｓ）によって以下のように記述することができる。

【００８５】

$$y(s)=H(s)u(s),\cdots(8)$$

【００８６】

ただし、ｕ（ｓ）は、システム入力（ブレーキ及びアクセルのポジション）であり、ｙ（ｓ）は、システム出力（速度）である。システム同定は、乗物システムの伝達関数Ｈ（ｓ）にたどり着くために乗物推進システムからの現実世界のデータに適用され、例えば、伝達関数が正確である確信が得られるまで作業乗物の実験的試験を受けた。

【００８７】

したがって、本発明による乗物の速度制御は、アクセル及びブレーキの関数に対応しただけでなく、物理的なエンジンシステム中の多くの他の要因にも対応した。例えば、作業乗物がガス電気ハイブリッドエンジンを備えていたので、工場で装着済みで触れることができない、燃料効率について調整済の車載コンピュータによって、２つの推進システムの結合を制御した。それゆえに、要求されるペダルのポジション、及び実現した実際のポジションのマッピングは、線形ではなく、ソフトウェア中で経験的な決定（empirical determination）によってマッピングし直さなければならなかった。本発明の一実施例では、乗物の速度は、集積型比例微分（ＰＤ）制御器によって制御される。この制御器は、以前

の出力、ならびに現在の誤差、及び誤差の微分係数に基づいて制御器の出力を決める。時間領域において、制御器は、以下のように記述することができる。

【００８８】

$u(t2)=(t2-t1)(K_p e(t_2)+K_d e'(t_2))+u(t_1)$・・・（９）

【００８９】

ただし、K_p及びK_dは、調整可能な係数（tunable coefficient）であり、ｕ（ｔ）は時間ｔでの制御器の出力であり、ｅ（ｔ）は時間ｔでの誤差である。この誤差は、目標出力から実際の出力を差し引いたものとして定義された。実際の出力は、ＲＴ３０００（商標）によって伝えられ、目標速度は、経路計画アルゴリズムから導かれた。

【００９０】

集積型ＰＤ制御器は、上記の導出した伝達関数に対して設計及び調整された。例えば、最適性能に必要とされる（ＰＤ制御器の比例制御（proportionate control）のための）重みは、初めに、導出した伝達関数の計算モデルに対して導出され、次いで乗物上での動作時に調整される。

【００９１】

アクセル及びステアリングホイールの制御は、経路計画システムから共に独立した２つの別々のプロセスを用いて作業乗物において実現された。経路が経路計画アルゴリズムによって決定されたら、加速度及びステアリングを排他的に使用して選ばれた経路に留まる。経路は、生成時に実行可能性についてチェックされるので、与えられる全ての経路は、乗物により実現可能であると制御システムによって仮定された。このように（ただし、本発明は、他の開始時の仮定を用いてもよい）、選択された経路に従うために最良の進み方を決めることは、制御システムの負担になる。

【００９２】

一実施例における作業乗物用のステアリング制御器は、“Riekert及びSchunck、「Zur fahrmechanik des gummibereiften kraftfahrzeugs」、in Ingenieur Archiv、vol. 11、1940、210-224頁”によって記載された古典的なシングルトラックモデル（single-track model）またはバイシクルモデル（bicycle model）に基づいた進み遅れ制御器であったが、その内容全体は、参照により本明細書に組み込まれる。進み補償器は、システムの応答性を増加させ、遅れ補償器は、定常誤差を（無くすことはないが）減少させる。進み遅れ補償器は、システムの周波数応答に基づいていた。進み遅れ補償器は、“D. Bernstein、A students guide to classical control、IEEE Control Systems Magazine、vol. 17、96-100頁(1997)”によって記載されたものに類似するものであったが、その内容全体は、参照により本明細書に組み込まれる。作業乗物において得られた制御器は、２つの進み及び遅れ関数に０．０４５である低周波ゲインを乗じる畳み込みであった。適応推定パラメータが使用された。適用推定は、まず理論関数を適用することによって得られる値（パラメータ）のセットを使用し、次いでパラメータが完成されるまで現実世界のシナリオ（例えば、深い砂、起伏の多い地形、及び他の地形タイプ）の中でこのパラメータを繰り返して試験及び修正する。

【００９３】

【数１】

$$F_{lead}(s)=\frac{850s+1}{900s+1} \quad \cdots（１０）$$

【００９４】

【数２】

$$F_{lag}(s)=\frac{2s+4}{0.2s+1} \quad \cdots (11)$$

【００９５】
離散化された制御器は、（１２）及び（１３）に示すように実装されたものであり、ただし、ｘは、状態ベクトルであり、
【００９６】
【数３】

$$\dot{x}$$

【００９７】
は、時間についての状態ベクトルの微分であり、ｕは入力ベクトルであり、δ_fは、中心線に対してタイヤで測定したときの出力ステアリング角である。状態ベクトルｘは、［y_s　Ψ］として定義され、ただしy_sは、仮想センサから参照経路までの距離を示し、Ψは、乗物のヨーレートである。仮想センサは、乗物の中心線に沿った乗物の前方に所与の距離だけ突出した点である。この点は、ルックアヘッド点（look-ahead point）と一般に呼ばれ、ルックアヘッド点からＲＴ３０００までの距離は、ルックアヘッド距離（look-ahead distance）と呼ばれる。
【００９８】
【数４】

$$\dot{x}=\begin{bmatrix}0.90475 & -0.00054\\ 0.00054 & 0.99998\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}-1.07538\\ 0.00277\end{bmatrix}u \quad \cdots (12)$$

$$\delta_f=\begin{bmatrix}0.02150 & 0.00005\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}0.00005\end{bmatrix}u \quad \cdots (13)$$

【００９９】
制御器への入力ベクトルｕは、［y_s］として定義される。制御器の出力は、中心線に対してタイヤで測定したステアリング角である。
【０１００】
作業乗物のステアリング及び制御システムは、ステアリングホイール角と得られたタイヤの角度との間の関係が線形であり、乗物の重心の位置がフロント軸とリア軸との間の中点にあると仮定した。乗物が不安定になるのを防ぐために、安全の尺度としてy_s信号の大きさが監視された。乗物がひどく経路から外れていることを意味する所与のしきい値をy_sが超えたら、乗物の速度は、２マイル毎時に落とされた。これにより乗物が、所望の経路上へ戻ることを可能にし、可能性がある転覆を防いだ。
【０１０１】
このようにして、ルート計画モジュールを使用して自律乗物が一般に従うべきグローバルルートを作成するが、速度及び経路プランナ（ＶＰＰ：Velocity and Path Planner）という名のローカル経路計画モジュールを使用して、グローバルルートを現在の局所経路に変換する。この局所経路は、乗物の計画ポジションと乗物の計画目標速度の両方を含む

。局所経路は、乗物の状態と周囲環境の両方が変化するとき、毎秒何回も再生成することができる。

【０１０２】

ＶＰＰは、可変構造オブザーバ（ＶＳＯ：Variable Structure Observer）からの情報を使用して、自律乗物の時間空間軌跡及び速度プロファイルを、計画及び更新する。このＶＰＰは、適切なルート計画（すなわち、静止した障害物から離れるよう操舵すること）によって静止した障害物を回避することを目的とすると共に、（必要ならば障害物を回避するために完全に停止することになることを含めて）自律乗物の速度を調整して自律乗物の計画経路を横切ろうとする移動障害物を回避することを目的とする。最適経路計算は、障害物の時間空間特性及び障害物の将来のポジションを含む拡張領域内で行われる。軌跡の計算は、この議論を簡単化するために、ここではこの形式で示される３つの論理ステップにおいて行われる。

【０１０３】

第１のステップ中、ＶＰＰは、グローバルルートから与えられたＧＰＳ点に基づいて（ｘ，ｙ）空間の軌跡を計算する。次いでこれらの点は、３次以上のスプライン補間を使用して計算される滑らかな曲線によって結ばれる。

【０１０４】

第２のステップでは、ＶＰＰは、拡張時間空間領域｛ｘ＊（ｔ），ｙ＊（ｔ），ｔ＊（ｔ）｝内で時間最適軌跡を計算し、これは速度の制約（最大制限速度及び最小制限速度）を満たし、任意の既知の障害物または検出した障害物を回避するものである。最適軌跡、または前述の制約のある準最適軌跡は、変分法、ベルマンの動的計画法、及びポントリャーギンの最小原理の組み合わせを用いて計算される。ポントリャーギンの最小原理は、制御変数及び状態変数の制約がある場合に時間最適制御に必要な条件を与える。この計算は、上記のようなスライディングモードアルゴリズムを用いて行われる。図６Ｂは、（斜め線の）元の速度計画、及び観測した障害物（すなわち、楕円形）を考慮に入れる（右に逸れて元の速度経路と平行に斜めに進む線の）補正経路を示す例示的な距離対時間のＳ－Ｔ線図である。このグラフでは、ｓは、経路に沿った距離を表し、時間は、経路に沿ってその点にあることになる予想時間である。

【０１０５】

第３のステップでは、ＶＰＰは、速度及び乗物の安全を保ちつつ、加速度／減速度の制約を満たすステップ２において計算された軌跡に最も近い軌跡のオンラインの準最適計算を使用する。この時点で、乗り心地が安全動作を妨げない場合、乗り心地が考慮に入れられてもよい。この軌跡の計算は、一実施例におけるスライディングモードのアルゴリズムを使用して、速度及び経路プランナによって実行される。

【０１０６】

この速度及び経路プランナは、乗物の速度を変えることによって空間時間領域（Ｓ－Ｔ領域）内のあらゆるタイプの障害物の回避を可能にする。数学的な解がなく、乗物が減速によって障害物を回避することができない場合、障害物が回避可能であるならば、次に進路変更操縦を実施して障害物を回避する。このタイプの進路変更操縦は、例えば別の乗物が不規則に挙動していない場合に容認可能である。

【０１０７】

ＶＰＰの結果は、車線変更または他の経路を変える操縦を試みるべきかどうかを判定するために繰り返して評価される。ＶＰＰのゴールの１つは、最適速度を実現することであり得ると共に、そのため計画アルゴリズムは、他の乗物がとても長い間停止している場合、または自律乗物が自律乗物の前の他の乗物によってもう十分に減速させられている場合にも、別の乗物を通過しようと試みることになる。

【０１０８】

より一般的には、本発明のＶＰＰアルゴリズムは、図６Ｃに示されることができる。具体的には、図６Ｃは、一実施例のＶＰＰ計算プロセスを示すフローチャートである。このプロセスは、（例えば、数値的なスプライン（numerical spline）として表される）目的

とする移動経路計画を受け取り、次いで経路パラメータ（例えば、距離、接線ベクトル、ヨー角など）を計算することによって開始するものとして概念化することができる。次に、このプロセスは、計算された経路パラメータに基づいて実行される曲率の計算を考慮に入れると共に、フォワードスライディングモードリミッタ計算とバックワードスライディングモードリミッタ計算（forward and backward sliding mode limiter calculations）の両方の実行において加速度／減速度の制約を考慮に入れる。速度計画が作成される。

【０１０９】

ここで、目的とする移動経路計画、及び計算された速度計画を有するプロセスは、移動経路に沿った時間分布の計算に進む。続いて、このプロセスは、目的とする移動経路を横切る移動障害物を回避するために移動障害物データを検討して空間時間領域速度計画を再計算すると共に、それによって修正した速度計画を作成する。修正した速度計画が、所定のまたは予め設定した加速度／減速度の制約を満たす場合、本実施例における移動障害物を回避する修正した速度計画が容認される。そうでなければ、このプロセスは、フォワードスライディングモードリミッタ計算により新しい速度計画を再び計算し始めることによって反復する。

【０１１０】

ステアリング制御システム：経路が、曲率及び速度に関連したいくらかの制約を満たす限り、ソフトウェア計画モジュールは、何らかの経路を生成させることができる。乗物は、高レベルの精度で経路に精確に従うことができる。この高レベルの運転精度により、計画モジュールは、障害物が密集した場をうまく縫って通り抜ける経路を生成することができる。複数の計画モジュールは、冗長性のために使用され得ると共に、一度に複数の候補経路を生成するためにも使用され得る。複数の経路が生成される場合、ベストスコアの経路が使用される（スコアは、最短時間、最短距離、障害物の最小の散らかり（least cluttered with obstacles）など多くの異なるやり方で計算できる）。

【０１１１】

また、経路計画コンポーネントは、乗物が生成された経路を精確に運転できるときに最も効果的に動作するので、本発明の自律乗物の開発中、ステアリング制御器に特に重点が置かれた。以下、本発明の高性能ステアリングアルゴリズムをより詳細に説明する。図７～図９に、高性能ステアリングアルゴリズムに関して実現された結果が示される。

【０１１２】

図７は、都市環境における本発明の乗物のステアリング制御器についての標準偏差を示すグラフである。図７は、乗物のステアリング制御器が、都市環境でも、非常に高い精度、そして高い速度で運転することができ、自律乗物が、都市のコースを曲がりくねって進む間、より高い安定した速度を実現することが可能になることを示す。都市で運転中、ＧＰＳからの信号は、高いビル及び木がＧＰＳ信号に与え得る影響によりかなりノイズを伴い得る。このノイズは、高速での自律運転を、都市環境ではよりずっと困難にさせ得る。

【０１１３】

図８は、ヘアピンターンを含む難しいスラロームコースを一定速度３０ｋｍ／時で運転する間でも、本発明のステアリング制御器が、経路からの標準偏差を２５ｃｍ未満に維持できることを示す。乗物のタイヤが、地面に対してスライド／スリップしているので、このタイプの精度は、ヘアピンターンの間に高速で実現するのが困難であり、このことは、これらの操縦中、ステアリング制御アルゴリズムによって説明されなければならない追加の変数になる。

【０１１４】

精度の高い運転性能に加えて、統計的な平均化及びフィルタリング法を用いるデータフィルタリングアルゴリズムは、本発明の自律乗物にある障害物センサのノイズを低減することが示されている。図９は、レーザスキャニングシステムからの速度値のフィルタリングの結果を示す。図９は、レーザスキャナによって与えられた速度値が、かなりのノイズを含んでおり、このノイズが上手く取り除かれたことを示す。

【０１１５】

高性能ステアリングアルゴリズム：本発明の一実施例では、新規な自律乗物ステアリング方法が提供される。この方法は、ステアリングコマンドを生成するために、次のような、地面上の経路に沿った移動点（ｘ＊（ｓ），ｙ＊（ｓ））を含む。ステアリングを実行する方法は、経路に沿った移動点の原点からの距離についての制御された時間の関数ｓ（ｔ）に基づいている。関数ｓ（ｔ）及びステアリング角

【０１１６】

【数５】

$$\varphi$$

【０１１７】

の制御は、地面上の移動点（ｘ＊（ｓ（ｔ）），ｙ＊（ｓ（ｔ））からの実際の乗物ポジション（ｘ（ｔ），ｙ（ｔ））のベクトル誤差

【０１１８】

【数６】

$$\bar{E}(t)$$

【０１１９】

【数７】

$$\bar{E}(t)=\begin{bmatrix}x(t)\\y(t)\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}x^*(s(t))\\y^*(s(t))\end{bmatrix}$$

【０１２０】

が、例えば、形式

【０１２１】

【数８】

$$d/dt\bar{E}(t) = - k\ \bar{E}(t)$$

【０１２２】

、ただし、ゲインｋ＞０、またはより一般的な

【０１２３】

【数９】

$$d/dt\ \bar{E}(t) = F(\bar{E}(t))$$

【０１２４】

である、所望の漸近的に安定な微分方程式を満たすように選ばれる。結果として、この誤差は、ゼロに収束し、したがって、経路に沿った乗物のロバストなステアリングを与える。この方法の実現可能な実施の１つを以下に与えるが、ただし、制御器のゲインｋの選択は、最適な収束条件に基づいている。

【０１２５】

完全に非ホロノミックなモデル（図１０参照）の場合、フロントタイヤとリアタイヤの

両方の横滑りがないと考えられる。リアディファレンシャルからの距離ｘ$_0$で乗物の長手方向軸上に位置する点のＸ－Ｙ座標を記述する非ホロノミックなモデルの運動学的部分は、

【０１２６】
【数１０】

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\end{bmatrix} = v_f\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\ \sin(\theta)\end{bmatrix}\cos(\varphi) + x_0\dot{\theta}\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\ -\cos(\theta)\end{bmatrix}$$
$$\dot{\theta} = v_f\frac{1}{l}\sin(\varphi) \quad \cdots (1)$$

【０１２７】
であり、ただしｘ、ｙはグローバルフレーム中の読み出し点の座標であり、θはヨー角であり、
【０１２８】
【数１１】

$$\varphi$$

【０１２９】
はフロント進行方向角度であり、ｖ$_f$はフロント速度である。後輪速度は、
【０１３０】
【数１２】

$$v_r = v_f\cos(\varphi)$$

【０１３１】
である。
【０１３２】
ここで、前輪が滑らないまま後輪が横滑りする可能性を考えることにする。図１１を参照されたい。
【０１３３】
経路に沿った距離ｓの関数としての所望の経路は、
【０１３４】
【数１３】

$$\begin{bmatrix}x^*(s)\\ y^*(s)\end{bmatrix}$$

【０１３５】
である。経路の始めからの仮想点の距離は、ｓ（ｔ）である。時間ｔでの仮想点のＸＹポジションは、

【０１３６】
【数１４】

$$\begin{bmatrix} x^*(s(t)) \\ y^*(s(t)) \end{bmatrix}$$

【０１３７】
である。仮想点からの現在の乗物ポジションのベクトル誤差は、
【０１３８】
【数１５】

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ \bar{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^*(s(t)) \\ y^*(s(t)) \end{bmatrix} = \vec{E}(t)$$

【０１３９】
である。誤差に関する体系（System for the error）は、
【０１４０】
【数１６】

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ \dot{\bar{y}}(t) \end{bmatrix} = v_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \cos(\varphi) + v_f \frac{x_0}{l} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} \sin(\varphi) - \begin{bmatrix} x^{*\prime}(s(t)) \\ y^{*\prime}(s(t)) \end{bmatrix} w$$

$$\dot{s}(t) = w$$

$$\dot{\theta} = v_f \frac{1}{l} \sin(\varphi)$$

・・・（２）

【０１４１】
であり、ただし、ｗは、経路に沿った仮想点の速度であり（これは仮想制御である）、
【０１４２】
【数１７】

$$\vec{H}(t) = \begin{bmatrix} x^{*\prime}(s(t)) \\ y^{*\prime}(s(t)) \end{bmatrix}$$

【０１４３】
は、仮想点の進行方向（単位）ベクトルであり、
【０１４４】
【数１８】

$$\left\| \vec{H}(t) \right\| = \left\| \begin{bmatrix} x^{*\prime}(s(t)) \\ y^{*\prime}(s(t)) \end{bmatrix} \right\| = 1$$

【０１４５】
である。速度が与えられたときの誤差の最大の収束速度（maximum rate of convergence）の条件から仮想制御を選ぶと、（２）の中の第１の式の右辺は、
【０１４６】
【数１９】

$$v_f\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\ \sin(\theta)\end{bmatrix}\cos(\varphi)+v_f\frac{x_0}{l}\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\ -\cos(\theta)\end{bmatrix}\sin(\varphi)-\begin{bmatrix}x^{*\prime}(s(t))\\ y^{*\prime}(s(t))\end{bmatrix}w=-k\begin{bmatrix}\bar{x}(t)\\ \bar{y}(t)\end{bmatrix}$$

・・・（３）

【０１４７】
であり、そして、
【０１４８】
【数２０】

$$\begin{bmatrix}\dot{\bar{x}}(t)\\ \dot{\bar{y}}(t)\end{bmatrix}=-k\begin{bmatrix}\bar{x}(t)\\ \bar{y}(t)\end{bmatrix}$$

【０１４９】
である。これは、指数の比率（exponential rate）ｋによるゼロへの誤差の収束を保証し、すなわち、
【０１５０】
【数２１】

$$\bar{x}(t)=\bar{x}_0e^{-kt}\to 0,\bar{y}(t)=\bar{y}_0e^{-kt}\to 0 \quad \text{に従って} \quad t\to\infty$$

【０１５１】
である。（３）から、タイヤの角度
【０１５２】
【数２２】

$$\varphi$$

【０１５３】
が、
【０１５４】
【数２３】

$$v_f\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\ \sin(\theta)\end{bmatrix}\cos(\varphi)-v_f\frac{x_0}{l}\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\ -\cos(\theta)\end{bmatrix}\sin(\varphi)=\begin{bmatrix}x^{*\prime}(s(t))\\ y^{*\prime}(s(t))\end{bmatrix}w-k\begin{bmatrix}\bar{x}(t)\\ \bar{y}(t)\end{bmatrix}=\vec{H}(t)w-k\bar{E}(t)$$

・・・（４）

【０１５５】
を満たすべきことを得る。（４）の両辺の２乗したノルムをとると、
【０１５６】
【数２４】

$$v_f^2\left[\cos^2(\varphi)+\left(\frac{x_0}{l}\right)^2\sin^2(\varphi)\right]=w^2-2kw<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>+k^2\left\|\vec{E}(t)\right\|^2$$

・・・（５）

【０１５７】
が得られる。ｋが与えられると、この式から、ｗが、
【０１５８】
【数２５】

$$w=k\left[<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>+\sqrt{<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>^2-\left\|\vec{E}(t)\right\|^2+v^2/k^2}\right]$$ ・・・（６）

【０１５９】
と分かり、ただし、
【０１６０】
【数２６】

$$v=v_f\sqrt{\cos^2(\varphi)+\left(\frac{x_0}{l}\right)^2\sin^2(\varphi)}$$

【０１６１】
は点x_0の速度であることに留意されたい。一方、ｗについて（５）を微分し、ゼロに対するｋの微分をとることによって、（５）からｋの最適値が分かり、
【０１６２】
【数２７】

$$0=2w-2k'w<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>-2k<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>+2kk'\left\|\vec{E}(t)\right\|^2$$ ・・・（７）

【０１６３】
である。最適点（w_{opt}）で、ｋ’（w_{opt}）＝０である。簡単に分かり得るように、この最適条件は、エリアｗ≧０、ｋ≧０において最大である。実際には、式（５）は、ｗｋ平面上の二次曲線$Aw^2+2Bwk+Ck^2=D$を表す。
【０１６４】

【数２８】

$$\left|<\vec{H}(t),\vec{E}(t)>\right| \le \left\|\vec{E}(t)\right\|$$

【０１６５】
なので、それよりＢ^{2}＜ＡＣであり、したがって、これは楕円であることになる。よって、ｋ$_{ｏｐｔ}$（ｋの最適値）＞０が最大である。
【０１６６】
（７）から、
【０１６７】
【数２９】

$$0 = 2w - 2k < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >$$

【０１６８】
したがって、
【０１６９】
【数３０】

$$w_{opt} = k_{opt} < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >$$

【０１７０】
であり、または（５）から、
【０１７１】
【数３１】

$$v^2 = k_{opt}^2 < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >^2 - 2k_{opt}^2 < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >^2 + k_{opt}^2 \left\|\vec{E}(t)\right\|^2$$

$$k_{opt}^2 = \frac{v^2}{\left\|\vec{E}(t)\right\|^2 - < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >^2}$$

【０１７２】
であり、これは、
【０１７３】
【数３２】

$$k_{opt} = \frac{v}{\sqrt{\left\|\vec{E}(t)\right\|^2 - < \vec{H}(t),\vec{E}(t) >^2}}$$

【０１７４】

を与える。誤差Ｅ（ｔ）は、ゼロに収束するので、ｋ$_{opt}$の値は、とても大きくなり得る。ｋを制限するために、近似最適値を使用することができる。

【０１７５】

【数３３】

$$k^* = \frac{1}{\sqrt{\left\|\vec{E}(t)\right\|^2 - <\vec{H}(t), \vec{E}(t)>^2 + \varepsilon^2}} \quad \cdots (8)$$

【０１７６】

を導入する、ただし、

【０１７７】

【数３４】

$$\varepsilon > 0$$

【０１７８】

は、小さい定数であり（これによりｋ＊が境界付けられることを保証する）、ｋ$_{opt}$ ｖｋ＊となる。（８）を（６）に代入すると、ｗの近似最適値：ｗ$_{opt}$ ｖｗ＊を得ることになり、ただし、

【０１７９】

【数３５】

$$w^* = \frac{<\vec{H}(t), \vec{E}(t)> + \varepsilon}{\sqrt{\left\|\vec{E}(t)\right\|^2 - <\vec{H}(t), \vec{E}(t)>^2 + \varepsilon^2}} = k^* \left[<\vec{H}(t), \vec{E}(t)> + \varepsilon \right]$$

【０１８０】

である。したがって、

【０１８１】

【数３６】

$$w_{opt} \approx k^* v_f \left[<\vec{H}(t), \vec{E}(t)> + \varepsilon \right] \sqrt{\cos^2(\varphi) + \left(\frac{x_0}{l}\right)^2 \sin^2(\varphi)}$$

【０１８２】

である。（４）から、

【０１８３】

【数３７】

$$v_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \cos(\varphi) + v_f \frac{x_0}{l} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} \sin(\varphi) = \vec{H}(t) v w^* - v k^* \vec{E}(t)$$

【０１８４】
を得る。この式から、
【０１８５】
【数３８】

$$\cos(\varphi)=\left\langle\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\ \sin(\theta)\end{bmatrix},\vec{H}(t)w^{*}-k^{*}\vec{E}(t)\right\rangle\frac{v}{v_f}$$

$$\sin(\varphi)=\left\langle\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\ -\cos(\theta)\end{bmatrix},\vec{H}(t)w^{*}-k^{*}\vec{E}(t)\right\rangle\frac{v}{v_f}\frac{l}{x_0}$$

【０１８６】
を得る。これらの式の右辺側で、
【０１８７】
【数３９】

$$v=v_f\sqrt{\cos^2(\varphi)+\left(\frac{x_0}{l}\right)^2\sin^2(\varphi)}$$

【０１８８】
であり、これは、進行方向角度
【０１８９】
【数４０】

$$\varphi$$

【０１９０】
にも依存する。そこで、
【０１９１】
【数４１】

$$\varphi$$

【０１９２】
を表現する１つの方法は、２つの式を除算して
【０１９３】
【数４２】

$$\tan(\varphi)$$

【０１９４】
を得ることである。
【０１９５】

その結果、

【０１９６】

【数４３】

$$\varphi = \arctan\left\{\frac{\left\langle\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\-\cos(\theta)\end{bmatrix}, \vec{H}(t)w^* - k^*\vec{E}(t)\right\rangle \frac{l}{x_0}}{\left\langle\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\\sin(\theta)\end{bmatrix}, \vec{H}(t)w^* - k^*\vec{E}(t)\right\rangle}\right\} \quad \cdots (9)$$

【０１９７】

となる。

【０１９８】

ここで、前輪が滑らないまま後輪が横滑りする可能性を考える。図１１を参照されたい。

【０１９９】

この場合には、リア点の速度ｖ$_r$は、車の長手方向軸に必ずしも真っ直ぐに並ばない。重心は、乗物の標準的な基準点の１つであるが、実際には、任意の点が、回転の基点（base for rotation）とみなされ得る。この例では、システムが非ホロノミックであるので、重心ではなく、前輪の間の点を考えることが、より便利である。それに応じて、基準点としての重心は、スリップを伴う制御されたコーナーリングに使用されることができる。

【０２００】

次いで、

【０２０１】

【数４４】

$$v_f\cos(\varphi) = \left\langle \vec{\mathrm{v}}, \begin{bmatrix}\cos(\theta)\\\sin(\theta)\end{bmatrix}\right\rangle$$

$$v_f\sin(\varphi) = \left\langle \vec{\mathrm{v}}, \begin{bmatrix}\sin(\theta)\\-\cos(\theta)\end{bmatrix}\right\rangle + \dot{\theta}(l - x_0)$$

【０２０２】

を得る。したがって、

【０２０３】

【数４５】

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\\dot{y}\end{bmatrix} = v_f\begin{bmatrix}\cos(\theta)\\\sin(\theta)\end{bmatrix}\cos(\varphi) + [v_f\sin(\varphi) - (l - x_0)\dot{\theta}]\begin{bmatrix}\sin(\theta)\\-\cos(\theta)\end{bmatrix}$$

$$J\ddot{\theta} = l[-F_{rlateral} + mv_f^2\tan(\varphi)/l] \quad \cdots (10)$$

【０２０４】

であり、ただし、最後の式の第２項は、遠心力の近似式を表す。この数式では、

【０２０５】

【数４６】

$$r_{cg} \approx l / \tan(\varphi)$$

【０２０６】
は、おおよそ、瞬間旋回半径である。
【０２０７】
【数４７】

$$F_{rlateral} = F_{rlateral_\max} sign(\sigma) \quad \cdots (11)$$

【０２０８】
と仮定することができ、ただし、
【０２０９】
【数４８】

$$\sigma = \dot{\theta} - \frac{v_f}{l}\sin(\varphi) \quad \cdots (12)$$

【０２１０】
である。
【０２１１】
見て分かるように、Ｆｌａｔｅｒａｌ（ｌａｔｅｒａｌ：横方向）は、変数σの不連続関数である。そのようなシステムでは、スライディングモードの現象が、生じ得る（例えば、“DeCarlo R、及びS. Zak、S.V. Drakunov、「Variable Structure and Sliding Mode Control」、chapter in The Control Handbook a Volume in the Electrical Engineering Handbook Series、CRC Press, Inc.、1996”を参照されたい。その内容全体は、参照により本明細書に組み込まれる）。このシステムでは、スライディングモードは、横方向摩擦力の十分なマージンがある場合に生じる。すなわち、
【０２１２】
【数４９】

$$F_{rlateral} > mv_f^2 \tan(\varphi)/l \quad \cdots (13)$$

【０２１３】
である。スライディングモードでは、
【０２１４】
【数５０】

$$\sigma = \dot{\theta} - \frac{v_f}{l}\sin(\varphi) = 0$$

【０２１５】
であり、システムの第１の式（１０）は、（１）になる。スライディングモードでは、横

方向の力は、等価制御法（例えば、上記参考文献参照）を用いて見つけることができ、このことは、スライディングモードにおける不連続関数は、等式

【０２１６】

【数５１】

$$\dot{\sigma} = 0$$

【０２１７】

から得られる等価な値によって置き換えられ得ることを示す。

【０２１８】

式を微分することにより、

【０２１９】

【数５２】

$$\dot{\sigma} = \frac{l}{J}[-F_{rlateral} + mv_f^2 \tan(\varphi)/l] - \frac{1}{l}[\dot{v}_f \sin(\varphi) - v_f \cos(\varphi)\dot{\varphi}]$$

【０２２０】

を得る。ここから、

【０２２１】

【数５３】

$$F_{rlateral_equivalent} = mv_f^2 \tan(\varphi)/l - \frac{J}{l^2}[\dot{v}_f \sin(\varphi) + v_f \cos(\varphi)\dot{\varphi}]$$

【０２２２】

である。この数式及び不等式（１３）は、速度及び／またはステアリング角を操作することによってスリップを制御する（所望のモーメントで開始及び阻止する）ために用いられる。

【０２２３】

（自然状態の低い横方向摩擦力または人工的に作り出した摩擦力により）スリップが生じる場合、後述のステアリングアルゴリズムが使用される。仮想点速度は、（１）の代わりに修正したモデル（１０）を考慮に入れる先のケースと同じように計算される。結果として、

【０２２４】

【数５４】

$$w_{opt} \approx k^* \left[< \vec{H}(t), \vec{E}(t) > + \varepsilon \right] \sqrt{v_f^2 \cos^2(\varphi) + \left[v_f \sin(\varphi) - (l - x_0)\dot{\theta} \right]^2}$$

【０２２５】

を得ることになり、ただし、

【０２２６】

【数５５】

$$k^* = \frac{1}{\sqrt{\left\|\vec{E}(t)\right\|^2 - <\vec{H}(t), \vec{E}(t)>^2 + \varepsilon^2}}$$

【０２２７】
は、以前と同じである。
【０２２８】
【数５６】

$$v = \sqrt{v_f^2 \cos^2(\varphi) + \left[v_f \sin(\varphi) - (l - x_0)\dot{\theta}\right]^2}$$

$$v_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \cos(\varphi) + \left[v_f \sin(\varphi) - (l - x_0)\dot{\theta}\right] \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} = \vec{H}(t) v w^* - v k^* \vec{E}(t)$$

【０２２９】
したがって、
【０２３０】
【数５７】

$$\cos(\varphi) = \left\langle \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}, \vec{H}(t) w^* - k^* \vec{E}(t) \right\rangle \frac{v}{v_f}$$

$$\sin(\varphi) = \left[\left\langle \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix}, \vec{H}(t) w^* - k^* \vec{E}(t) \right\rangle \frac{v}{v_f} + (l - x_0)\dot{\theta} \frac{1}{v_f} \right]$$

$$\sin(\varphi) = \left[A \cos(\varphi) + (l - x_0)\dot{\theta} \frac{1}{v_f} \right]$$

$$A = \frac{\left\langle \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix}, \vec{H}(t) w^* - k^* \vec{E}(t) \right\rangle}{\left\langle \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}, \vec{H}(t) w^* - k^* \vec{E}(t) \right\rangle}$$

$$\sin(\varphi - \psi) = \frac{1}{\sqrt{1 + A^2}} (l - x_0)\dot{\theta} \frac{1}{v_f}$$

$$\psi = \arctan(A)$$

$$\varphi = \arcsin\left[\frac{(l - x_0)\dot{\theta}}{v_f \sqrt{1 + A^2}} \right] + \arctan(A)$$

【０２３１】
である。
【０２３２】
ミッションマネージャ：本発明の自律乗物内での、かなりの量のより高レベルの処理及び意思決定は、ミッションマネージャモジュールによって扱われる。ミッションマネージャモジュールは、適切な動作のために各コンポーネントを監視するのに加えて、ＡＶＳアーキテクチャ内の全ての他のコンポーネント間で調整を行う。ミッションマネージャモジュール自体は、コンポーネントの実装から独立して動作するように設計されており、それにより、あるタイプのセンサを異なる設計のセンサに置き換えることは、乗物の適切な動作に影響を及ぼすことにならない。このソフトウェアの能力は、ユーザまたはプログラムインタフェース５２及びＦＰＧＡ５６によって提供される構成可能なハードウェアの能力を補完する。
【０２３３】
本発明の一実施例では、有限状態機械（ＦＳＭ：Finite State Machine）が利用され、この有限状態機械（ＦＳＭ）が、指示された経路をうまく完走するために必要な一連のイベントを通じて自律乗物の指示を担っている。ＦＳＭは、乗物が占め得る状態のセット及び状態間の移り変わりによって定められる。これら状態は、運転、通過、交差点での停車等などのイベントを含む。これら状態のそれぞれから、ＦＳＭは、「出口（exit）」の明確なセットを含み、この出口は、乗物が、一方の状態から他方の状態へ進むために実行し得る移り変わりである。そのような出口は、乗物が所望の経路を妨げるときに生じる可能性があり、これにより乗物は、「運転」状態から「通過」状態へ変化させられ得る。
【０２３４】
ＦＳＭは、交通法を含むことができ、そのようなものとして、規則は一般に、規則が適用されることがとても特別な状況を含む。乗物の行動は、一度に１つの状態によってしか制御することができないので、一実施例におけるＦＳＭは、時系列的な一連の挙動及びこれら挙動の開始の理由を生成し、それらはバグ及び論理エラーについて後で解析できる。
【０２３５】
加えてＡＶＳミッションマネージャは、与えられたミッションデータファイル（ＭＤＦ：Mission Data File）及びルートネットワーク定義ファイル（ＲＮＤＦ：Route Network Definition File）に基づいて高レベルの計画を実行するミッションプランナのコンポーネントを監視してもよい。ＭＤＦの所定のチェックポイントに沿ってウェイポイントからウェイポイントまで乗物をナビゲートするグローバル計画が作成されると、この計画への修正が、ミッションプランナによって追跡及び検証される。一実施例では、主要道路または他のルートに沿った道路脇の装置が、装置の地理空間座標を配信していてもよく、自律乗物は、自律乗物がそのポジションを確認するために、道路脇の装置から受信信号を受信し処理する。したがって、乗物の物体センサは、乗物から離れたコンポーネント装置を含むことができる。
【０２３６】
ミッションマネージャのさらに別の機能は、あるコンポーネントから別のコンポーネントへの要求が、乗物の安全動作に悪影響を及ぼさないことを確かのものとすることである。例えば、ステアリング制御モジュールから送られるステアリングコマンドは、まず、乗物のアクチュエータに渡される前に、ミッションマネージャによって乗物の状況（速度、ロールなど）に適切なものとして検証される。ミッションマネージャは、更に、一時停止コマンドを検出し、ミッションマネージャは、乗物の滑らかな停止を調整する。
【０２３７】
ミッションマネージャのさらに別の機能は、ミッションマネージャの自律乗物のすぐ近くで動作している他の自律乗物を監視することである。他の自律乗物を監視するやり方の１つは、各自律乗物に、それ自体の位置を同じネットワーク上の任意の他の自律乗物に伝えさせることである。この能力は、各自律乗物（またはポジション情報を配信する他の非自律乗物でさえも）が、互いに通信するところまでよく及び得る。そのような応用例の１

つは、有限コース経路及び追跡すべき有限個の乗物が存在する鉱山採掘の応用例にあろう。

【０２３８】

経路の視覚化：ＡＶＳコンソールは、自律乗物及びその環境のリアルタイム表示と、前の自律乗物の走行の再生とを共に可能にするＡＶＳプラットフォームのコンポーネントである。図１２は、リアルタイム表示８０を示すＡＶＳコンソールの概略図である。

【０２３９】

ＡＶＳソフトウェアプラットフォーム内の各内部モジュールは、ロギングモジュールによって一定の間隔で問い合わせされる。この間隔は、個々のモジュールごとにデータが時間に敏感な程度に応じて、特定の応用例に適切と考えられる任意の要因に応じて、１Ｈｚ未満～２５０Ｈｚで変わり得る。

【０２４０】

ＡＶＳプラットフォームは、モジュールがどのようにそのデータのログをとるべきかについて標準バイナリフォーマットを与える。まず、モジュールは、その内部状態が変化した最終時間を表す８バイトのタイムスタンプを書き込む。次に、このジュールは、モジュールを識別するために使用される２バイトの数字の識別名を書き込む。次に、このモジュールは、モジュールのデータの長さを含む４バイトの整数を書き込むべきである。最後に、このモジュールは、そのデータをメモリに書き込むことができる。

【０２４１】

ロギングモジュールは、モジュールごとにデータを取り、データをプロセッサのディスクドライブに逐次書き込む。ＡＶＳコンソールは、後で、自律乗物の再生を助けるためにＴＣＰ接続を介してこのデータを取り出す。加えて、ＡＶＳコンソールは、ＡＶＳからリアルタイムにこのデータを取り出すために、ＵＤＰ通信とＴＣＰ通信の組み合わせを使用する。ＡＶＳコンソールは、自律的に動作するように存在することは必要とされていないが、それが存在すれば、ＡＶＳコンソールは、自律乗物及びその環境のリアルタイムビューを表示することになる。

【０２４２】

ロギングモジュールは、ＡＶＳコンソールからのＴＣＰ接続を待機し、そして任意の要求されたモジュールのデータをこの同じＴＣＰ接続によってＡＶＳコンソールに送信する。加えて、一部のモジュールについてのデータは、特定の応用例に適切と考えられる任意の要因に応じて、連続的なＵＤＰ放送として自律乗物と同じイーサネット（登録商標）ネットワーク上の任意のコンピュータに送信される。

【０２４３】

ＡＶＳコンソールは、ＯｐｅｎＧＬフレームワークで構築された３Ｄディスプレイを含む。モジュールごとのデータは、ＡＶＳコンソールによって処理され、次いで３Ｄディスプレイに表示される。表示されるデータのタイプは、特定のモジュールに依存する。常に表示される標準データは、乗物、及び自律乗物によって現在感知されている任意の障害物と共に、自律乗物のポジション、姿勢、及び速度を含む。前の走行を再生するために、ＡＶＳコンソールは、以前記憶したデータを読むことができ、このデータを３Ｄディスプレイにロードすることができる。

【０２４４】

コンピュータ実装：図１３は、本発明のプロセッサ２４（または後述の特定のプロセッサのいずれか）を実装できるコンピュータシステム１２０１の一実施例を示す。コンピュータシステム１２０１は、上記の任意または全ての機能を実行するようにプログラム及び／または構成される。さらに、各機能は、乗物に搭載されている異なるコンピュータの間で分割されてもよい。これらコンピュータは、通信ネットワーク１２１６（後述）を介して互いに通信することができる。コンピュータシステム１２０１は、情報を伝達するためのバス１２０２または他の通信機構、及び情報を処理するためにバス１２０２と結合された内部プロセッサ１２０３を備える。コンピュータシステム１２０１は、内部プロセッサ１２０３によって実行される情報及び命令を記憶するためにバス１２０２に結合されたラ

ンダムアクセスメモリ（ＲＡＭ）または他の動的記憶装置（例えば、ダイナミックＲＡＭ（ＤＲＡＭ）、スタティックＲＡＭ（ＳＲＡＭ）、及びシンクロナスＤＲＡＭ（ＳＤＲＡＭ））などのメモリ１２０４を備える。加えて、メモリ１２０４は、内部プロセッサ１２０３による命令の実行中に、一時的変数または他の中間情報を記憶するために使用されることもできる。好ましくは、コンピュータシステム１２０１は、内部プロセッサ１２０３のための静的な情報及び命令を記憶するためにバス１２０２に結合された、例えば、リードオンリメモリ（ＲＯＭ）１２０５または他の静的記憶装置（例えば、プログラマブルＲＯＭ（ＰＲＯＭ）、消去可能ＰＲＯＭ（ＥＰＲＯＭ）、及び電気的消去可能ＰＲＯＭ（ＥＥＰＲＯＭ））などの不揮発性メモリを備える。

【０２４５】

コンピュータシステム１２０１は、特定用途向け論理デバイス（例えば、特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ））または構成可能論理デバイス（例えば、単純プログラマブル論理デバイス（ＳＰＬＤ）、複合プログラマブル論理デバイス（ＣＰＬＤ）、及びフィールドプログラマブルゲートアレイ（ＦＰＧＡ））を備えてもよい。コンピュータシステムは、“Ｔｅｘａｓ　Ｉｎｓｔｒｕｍｅｎｔｓ”社製のＴＭＳ３２０シリーズのチップ、“Ｍｏｔｏｒｏｌａ”社製のＤＳＰ５６０００、ＤＳＰ５６１００、ＤＳＰ５６３００、ＤＳＰ５６６００、及びＤＳＰ９６０００シリーズのチップ、“Ｌｕｃｅｎｔ　Ｔｅｃｈｎｏｌｏｇｉｅｓ”社製のＤＳＰ１６００、及びＤＳＰ３２００シリーズ、または“Ａｎａｌｏｇ　Ｄｅｖｉｃｅｓ”社製のＡＤＳＰ２１００、及びＡＤＳＰ２１０００シリーズなどの１つまたは複数のデジタルシグナルプロセッサ（ＤＳＰ）を備えてもよい。デジタル領域に変換されたアナログ信号を処理するように特に設計された他のプロセッサが、（以下の実施例に詳述するように）同様に使用されてもよい。

【０２４６】

コンピュータシステム１２０１は、メインメモリ１２０４などのメモリに収容された１つまたは複数の命令の１つまたは複数のシーケンスを実行する内部プロセッサ１２０３に応じて本発明の処理ステップの一部または全部を実行する。そのような命令は、ハードディスク１２０７またはリムーバブルメディアドライブ１２０８などの別のコンピュータ可読媒体からメインメモリ１２０４に読み込まれてもよい。そのような命令は、ＵＳＢフラッシュドライブまたはジャンプドライブ（jump drive）などの別のコンピュータ可読媒体からメインメモリ１２０４に読み込まれてもよい。そのようなドライブは、大部分のコンピュータオペレーティングシステムの下でフロッピー（登録商標）ディスクまたはハードドライブとして働くことができる固体メモリ装置である。マルチプロセッシング装置中の１つまたは複数のプロセッサを用いてメインメモリ１２０４に収容された命令のシーケンスを実行することもできる。代替実施例では、ハードワイヤード回路が、ソフトウェア命令の代わりに、またはソフトウェア命令と組み合わせて使用され得る。したがって、実施例は、ハードウェア回路とソフトウェアの任意の特定の組み合わせに限定されない。

【０２４７】

上述の通り、コンピュータシステム１２０１は、本発明の教示によりプログラムされる命令を保持し、データ構造、テーブル、レコード、または他の本明細書に記載のデータを収容するための少なくとも１つのコンピュータ可読媒体またはメモリを含む。本発明に適しているコンピュータ可読媒体の例は、コンパクトディスク、ハードディスク、フロッピー（登録商標）ディスク、テープ、光磁気ディスク、ＰＲＯＭ（ＥＰＲＯＭ、ＥＥＰＲＯＭ、フラッシュＥＰＲＯＭ）、ＤＲＡＭ、ＳＲＡＭ、ＳＤＲＡＭ、もしくは任意の他の磁気媒体、コンパクトディスク（例えば、ＣＤ－ＲＯＭ）、もしくは任意の他の光媒体、パンチカード、紙テープ、もしくは穴のパターンを有する他の物理的な媒体、搬送波（後述）、またはコンピュータにより読み出し可能な任意の他の媒体である。

【０２４８】

コンピュータ可読媒体のいずれか１つ、またはコンピュータ可読媒体の組み合わせに記憶されるとき、本発明は、コンピュータシステム１２０１を制御し、本発明を実施する１つまたは複数の装置を駆動し、コンピュータシステム１２０１が、人間のユーザ（例えば

、運転手）と対話することを可能にするソフトウェアを含む。そのようなソフトウェアは、デバイスドライバ、オペレーティングシステム、開発ツール、及びアプリケーションソフトウェアを含み得るが、それらに限定されない。そのようなコンピュータ可読媒体は、本発明の実施において実行される処理の全部または一部（処理が分散している場合）を実行するための本発明のコンピュータプログラム製品をさらに含む。本発明のコンピュータコードデバイスは、任意の解釈可能または実行可能なコード機構であってもよく、スクリプト、解釈可能なプログラム、ダイナミックリンクライブラリ（ＤＬＬ）、Ｊａｖａ（登録商標）クラス、及び完全実行可能プログラムを含むが、それらに限定されない。また、本発明の処理の一部は、性能、信頼性及び／または費用をより良くするために分散されてもよい。

【０２４９】

用語「コンピュータ可読媒体」は、本明細書で用いられる場合、実行するために内部プロセッサ１２０３に命令を与えることに関与する任意の媒体を指す。コンピュータ可読媒体は、不揮発性媒体、揮発性媒体、及び伝送媒体を含めて多くの形態をとり得るが、それらに限定されない。不揮発性媒体は、ハードディスク１２０７またはリムーバブルメディアドライブ１２０８などの例えば、光ディスク、磁気ディスク、及び光磁気ディスクを含む。揮発性媒体は、メインメモリ１２０４などの動的メモリを含む。伝送媒体は、バス１２０２を構成する電線を含めて、同軸ケーブル、銅線、及び光ファイバを含む。伝送媒体は、電波及び赤外線データ通信の間に生成されるもののような音波及び光波の形態をとることもできる。

【０２５０】

様々な形態のコンピュータ可読媒体が、実行するために内部プロセッサ１２０３への１つまたは複数の命令の１つまたは複数のシーケンスを実行することに関与してもよい。例えば、命令は、当初ディスク上で遠隔コンピュータに運ばれてもよい。バス１２０２に結合された赤外線検出器は、赤外線信号で運ばれるデータを受信し、このデータをバス１２０２上に置くことができる。バス１２０２は、このデータをメインメモリ１２０４まで運び、内部プロセッサ１２０３は、メインメモリ１２０４から命令を取り出し、この命令を実行する。適宜、メインメモリ１２０４によって受信された命令は、内部プロセッサ１２０３による実行前または実行後に記憶装置１２０７または１２０８に記憶されてもよい。

【０２５１】

例えば、本発明の一実施例では、コンピュータ可読媒体は、乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含み、このプログラム命令は、プロセッサによって実行されると、プロセッサに、乗物の位置及び進行方向を示すポジション信号を受信させる。受信されたポジション信号は、プログラマブルインタフェースによって正規化されて、正規化されたポジション信号を生成する。プロセッサは、正規化されたポジション信号から動作制御信号を生成し、動作制御信号をプログラマブルインタフェースに出力して、乗物の更新された移動経路に沿って乗物の動作を制御する正規化された動作制御信号を生成する。

【０２５２】

本発明の一実施例では、コンピュータ可読媒体は、乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含み、このプログラム命令は、プロセッサによって実行されると、プロセッサに、方向制御命令及び速度制御命令のうちの少なくとも１つをドライブバイワイヤ形式で乗物に供給させるか、またはウェイポイントの位置のプロセッサ内の記憶に基づいて物体の存在及び位置を決定させるか、または移動経路に沿って回避するために、静止物体または移動物体を識別することによって、ウェイポイント同士の間に乗物を向けさせる。

【０２５３】

自動車業界内のドライブバイワイヤ技術では、電気機械アクチュエータ、そしてペダル及びステアリング感覚のエミュレータなどのヒューマンマシンインタフェースを用いて、伝統的な機械制御システム及び油圧制御システムを電子制御システムに置き換える。した

がって、ステアリングコラム、中間シャフト、ポンプ、ホース、流体、ベルト、冷却器、ならびにブレーキブースタ及びマスタシリンダなどの伝統的なコンポーネントは、乗物からなくなっている。一実施例における本発明は、自律乗物システムプラットフォーム、ＦＰＧＡ、及び入出力モジュールが、自律乗物のステアリング、ブレーキング、及び推力に影響を及ぼす電子制御システムとの接続をもたらすので、ドライブバイワイヤ能力を助ける。

【０２５４】

本発明の一実施例では、コンピュータ可読媒体は、乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含み、このプログラム命令は、プロセッサによって実行されると、物体までの各距離、物体への各方向、乗物の進行方向、及び乗物の地理空間ポジションに基づいて、プロセッサに、乗物に対する物体の位置を地理空間座標に変換させる。物体位置のこの変換を達成するために、上記のＧＰＳシステム及びＩＮＳシステムからの入力は、プロセッサ２４によって使用され得る。

【０２５５】

本発明の一実施例では、コンピュータ可読媒体は、乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含み、このプログラム命令は、プロセッサによって実行されると、プロセッサに、複数の障害物のうちの１つの障害物のポジション、速度、及び幾何学的形状を識別させ、時間内に識別された障害物のポジション及び速度を予測させ、識別された障害物の将来のポジションを推定させる。ルート発見アルゴリズムは、２つのウェイポイントの間の記録された交通パターン（traffic pattern）に基づいて、２つのウェイポイントの間の乗物のルートを決定することができる。一実施例では、ルート発見アルゴリズムは、２つのウェイポイントの間の移動時間の記録、２つのウェイポイントの間の渋滞エリアの履歴、及び渋滞のリアルタイム報告のうちの少なくとも１つに基づいてルートを決定することができる。一実施例では、ルート発見アルゴリズムは、２つのウェイポイントの間のいくつかの特定の移動ルートについての各重み付き平均に基づいてルートを決定することができ、各重み付き平均は、２つのウェイポイントの間の移動時間の記録、２つのウェイポイントの間の渋滞エリアの履歴、渋滞のリアルタイム報告のうちの少なくとも１つを含む。

【０２５６】

本発明の一実施例では、コンピュータ可読媒体は、乗物内のプロセッサ上で実行するためのプログラム命令を含み、このプログラム命令は、プロセッサによって実行されると、プロセッサ２４に、あるウェイポイントから別のウェイポイントへの方向を与える１つまたは複数のウェイポイントの論理マップに（マップ記憶エリア内において）アクセスさせる。論理マップは、ウェイポイントの地理空間座標、乗物の移動経路に沿った道路の交差点についての交差点ウェイポイント、及び異なるウェイポイントの間の移動に関連した（記録または計算された）時間を含むことができる。プロセッサ２４は、物体ポジションとウェイポイントの地理空間座標との比較によって、物体のうちの１つが、障害物、または前記ウェイポイントのうちの１つであるかどうかを判定するための障害物識別アルゴリズムがプログラムされてもよい。

【０２５７】

さらに、本発明のコンピュータ可読媒体は、特定の場所に関連した地理情報を詳述するプログラム命令、経路計画アルゴリズム（下記の通り）、ナビゲーション命令、乗物に装着した画像センサに対する特定の命令、コマンドの命令、ならびに／または立体カメラもしくは乗物車輪速度センサなどの追加のセンサからのデータの受信、または運転手入力制御装置もしくは他の車載装置（後述のものなど）からのデータの受信、経路計画アルゴリズム、乗物の推力及び使用中の自律乗物に対する外力の応答、そして使用中の自律乗物についてのステアリング制御の応答に関してのデータを含む特定化された乗物の伝達関数を含むことができる。

【０２５８】

例えば、本発明の様々な実施例におけるプログラム命令は、セクタのうちの１つから画

像を供給するカメラからの入力を、プロセッサに処理させるように構成される。画像に基づいてプロセッサは、自律乗物の移動経路のための車線を認識する。プロセッサは、識別された車線に障害物があるかどうかを判定することができると共に、障害物の周りに回避経路を決定することができる。

【０２５９】

コンピュータシステム１２０１は、更に、バス１２０２に結合された通信インタフェース１２１３を含む。通信インタフェース１２１３は、例えば、ローカルエリアネットワーク（ＬＡＮ）１２１５、またはプロセッサ２４にソフトウェアをダウンロード中のインターネット、もしくは乗物に搭載されている複数のコンピュータの間の内部ネットワークなど別の通信ネットワーク１２１６に少なくとも一時的に接続されるネットワークリンク１２１４に結合している双方向データ通信を行う。例えば、通信インタフェース１２１３は、任意のパケット交換ＬＡＮに取り付けるためのネットワークインタフェースカードであってもよい。別の例として、通信インタフェース１２１３は、非対称デジタル加入者線（ＡＤＳＬ）カード、サービス総合デジタル網（ＩＳＤＮ）カード、または対応するタイプの通信回線へのデータ通信接続を行うためのモデムであってもよい。無線リンクが、車載コンピュータ、画像センサ、車輪速度センサ、生体計測センサ、及び／または運転手コマンド入力装置のいずれかとデータ交換を行うための通信インタフェース１２１３の一部として実装されることもできる。任意のそのような実装では、通信インタフェース１２１３は、様々なタイプの情報を表すデジタルデータストリームを運ぶ電気信号、電磁信号、または光信号を送受信する。

【０２６０】

典型的には、ネットワークリンク１２１４は、車載コンピュータ、画像センサ、車輪速度センサ、生体計測センサ、及び／または運転手コマンド入力装置のいずれかとデータ交換を行うために、他のデータ装置へのデータ通信を１つまたは複数のネットワークを介して行う。例えば、ネットワークリンク１２１４は、ローカルエリアネットワーク１２１５（例えば、ＬＡＮ）を介して、または通信ネットワーク１２１６を介して通信サービスを提供するサービスプロバイダによって運営される設備を介して、別のコンピュータへの一時的な接続を行うことができる。図１３に示すように、計算システム１２０１は、ローカルネットワーク１２１５及び通信ネットワーク１２１６を介して入力装置１２１７と通信することができ、ローカルネットワーク１２１５及び通信ネットワーク１２１６は、例えば、デジタルデータストリームを運ぶ電気信号、電磁信号、または光信号、及び関連した物理層（例えば、ＣＡＴ５ケーブル、同軸ケーブル、光ファイバなど）を使用する。コンピュータシステム１２０１に、及びコンピュータシステム１２０１から、デジタルデータを運ぶ、様々なネットワークを通じての信号、ならびにネットワークリンク１２１４上及び通信インタフェース１２１３を通じての信号は、ベースバンド信号または搬送波ベースの信号に実装され得る。ベースバンド信号は、デジタルデータビットのストリームを記述する非変調電気パルスとしてデジタルデータを運び、ただし、用語「ビット」は、シンボルを意味し、各シンボルが少なくとも１つまたは複数の情報ビットを運ぶと広く解釈されるべきである。デジタルデータを使用して、導電媒体を通じて伝搬されるか、または伝搬媒質を通じて電磁波として伝送される、振幅偏移変調信号、位相偏移変調信号、及び／または周波数偏移変調信号などで搬送波を変調することもできる。したがって、デジタルデータは、「有線」通信チャンネルを通じて非変調のベースバンドデータとして送信されるか、及び／または搬送波を変調することによってベースバンドとは異なる所定の周波数バンド中で送信されてもよい。コンピュータシステム１２０１は、ネットワーク１２１５及び１２１６、ネットワークリンク１２１４、ならびに通信インタフェース１２１３を介して、プログラムコードを含めたデータを送受信することができる。また、ネットワークリンク１２１４は、乗物に搭載されている様々なＧＰＳシステム及びＩＮＳシステムに、ＬＡＮ１２１５を介して接続を行うことができる。本発明の様々な実施例における入力装置１２１７は、入力をプロセッサ２４に与えると共に、本発明において述べられた画像センサ、車輪速度センサ、生体計測センサ、及び／または運転手コマンド入力装置を概略的に

表す。

【０２６１】

応用分野

本発明は、本発明が一次モードまたは二次モードでそれぞれ働く、自律運転乗物と人が運転する乗物との両方に広範囲にわたる応用を有する。

【０２６２】

一般に、上記の様々な特質を有する本発明は、様々な運転可能機器（driveable unit）に備えることができる。本発明の一実施例におけるそうした機器は、動力付きの陸上乗物（陸上車）または船舶であり、これには、例えば、自動車、トラック、スポーツ汎用車、装甲乗物、ボート、船、バージ船、タンカ、及び装甲艦が含まれる。船艇については、視界が限られていて他の船艇を回避することが望まれる天候条件または夜間条件においてナビゲートしているときだけでなく、ドック（dock）構造及びロック（lock）構造の船艇への損傷を最小にするためにドック構造（dock structure）とロック構造（lock structure）との間の船艇の制御が重要である場合、ドッキング動作（docking operation）時及びロック動作（lock operation）時にも、本発明は使用されることができる。

【０２６３】

本発明は、航空機への応用もある。特に高速航空機への応用は、飛行機が修正行動をとることができる飛行機から十分な距離で物体の存在を決定するための検出器の感度及び精度に依存することになる。しかし、速度が高くない空港の進入（approach：アプローチ）及び離陸において、本発明は有益である。例えば、離陸及び着陸においては、ランウェイエリアの終わりにしばしばいる鳥の群れが、エンジンに危険をもたらすかに懸念がもたれてきた。鳥は、少し離れていると肉眼では見ることが困難であると共に、航空機のレーダによって検出することが困難である。また、本発明は、操縦士の視界からたびたび隠される障害物が存在する応急の（間に合わせの）エリアにしばしば着陸するヘリコプタ、特に救援ヘリコプタへの応用例がある。

【０２６４】

他の応用分野には、軽飛行体（lighter-than-air vehicle）（例えば、自律気象観測気球、例えば遠隔制御小型航空機を含む自律国境パトロールシステム）、他の小型偵察機、及び水陸両用車（例えばホバークラフトなどを含めた水陸強襲乗物など）が含まれる。

【０２６５】

本発明の一実施例では、運転可能機器は、運転手に支援された制御のない自律乗物、またはコンピュータ支援制御を用いて運転手により制御された乗物であり得る。自律乗物は、本発明の一実施例によれば、運転手が危険に曝されることになる上記の環境的に危険な状況において応用を見出している。本発明の運転手により制御された乗物は、運転手が医療緊急事態に見舞われた場合、または例えば運転手が悪運転条件下で見当識を失うことになる場合に生じることになるような、運転手が、見当識を失うことになったり、または乗物を身体的に操ることができないことになったりする場合がある、上記のより普通な環境において応用を見出している。したがって、本発明の一実施例では、プロセッサ２４は、運転手の機能障害の場合、または経路障害物が差し迫っている場合、または運転手が要求する場合に乗物を制御するように構成される。

【０２６６】

本発明の本実施例の説明のための例として、自律乗物は、運転手が運転しているところの観察を通じて、所定の経路と比較して、運転手の機能障害を認識することができる。乗物の現在の経路と所定の経路とが類似していない場合、自律乗物は、例えば、最近、運転手がステアリングホイールを切ったか、及び／またはブレーキもしくはスロットルを踏んだか確かめるためにチェックを行うことができる。運転手が、クルーズコントロールをオンにして長い直線道路上を運転している場合には、運転手は、積極的にステアリングホイールを切るまたはブレーキもしくはスロットルを働かせることができないかもしれないので、比較とステアリング及びブレーキのチェックの両方が、意思決定プロセスに含まれてもよい。同じ理屈によって、運転手は、運転手が積極的に車を操舵している限り、自律乗

物の経路と一致しない経路を運転している可能性がある。自律乗物が引き継ぎを行う必要がある場合、本発明の一実施例における自律乗物は、まず、自律乗物が引き継ぎを行うことを運転手に可聴的及び可視的に警報し、次いで次に、引き継ぎを行い、可能な限り滑らかに及び安全に乗物を安全な停止ポジションに導く。運転手が、制御権を取り戻すことを望む場合、本発明の自律乗物は、一実施例では、運転手が制御を再開するための押しボタンまたは他の入力装置を提供している。本発明の別の実施例では、運転手は、自律乗物に制御権を明け渡すためにやはりボタンを押す（またはコマンド入力する）ことができる。したがって、本発明は、様々な実施例において協働的な自律運転モードを提供する。

【０２６７】

本発明の別の実施例では、生体計測センサが、別の入力装置を示し得る。本実施例では、生体計測センサは、運転手が積極的に運転しているかを、例えば、乗物のステアリングホイールに構築された心拍モニタからのプロセッサ２４への入力を通じて判定する。本発明に適している心拍モニタの一例は、運動器具に使用されるハートレートであり、一実施例においてこれは、ステアリングホイールに統合されることになり、または代替として運転手によって着用されてもよく、そしてプロセッサ２４と無線通信を行ってもよい。プロセッサ２４が、長時間の間（例えば５秒）、心拍の完全な喪失または非常に低い心拍を検出する場合、プロセッサ２４は、乗物の制御権をとるように構成される。車が適切な制御下にあるときに運転手の通常の心拍を監視することによって、プロセッサは、例えば、居眠り運転をしている、脳卒中を起こした、または心臓発作を起こしたことにより、運転手が機能を損なっているかを判定するための根拠を有する。本実施例は、（上述の）協働的な動作モードでやはり実施されてもよい。前述の通り、本発明の一実施例では、乗物の引き継ぎを行う前に可聴警報が発せられ、乗物を安全停止に導く。運転手が、実際には機能を損なっていない場合、運転手は、プロセッサ２４から制御権を取り返すためには、ボタン（または他の入力装置）を押すだけでよい。

【０２６８】

本発明の別の実施例では、自律乗物は、所定のコース上を繰り返して運転されてもよい。例えば、人間の運転手が、自律乗物を記録モードに変えるボタンを押す。人間は、その人が、自律乗物にそのコースを走行させたいように正確に乗物を運転する。次いで、人間の運転手が再びボタンを押すと、自律乗物は、とても高いレベルの信頼性及び繰り返し精度で記録したコースを何度も運転する。（繰り返し精度は、自動車試験装置の課題である）。この能力は、更に、現在多くの人間の運転手がこの仕事を行っている、乗物がオフロードを危険な状況の中で何日間も続けて運転される乗物の耐久試験において、人間の身体は比較的弱いという理由から、役立つものである。この能力は、長距離にわたって一貫した速度で乗物を運転するのにも役立つ。例えば、この能力は、燃費性能についてレーストラック上で、主要道路速度で乗物を試験するのに役立つであろう。

【０２６９】

本発明の別の実施例では、運転可能機器は、（例えば、ラップトップで実行する）マッピングプログラムと併せて使用されてもよく、ユーザは、到着地を選択することができる。この時点で、自律ナビゲーションソフトウェアは、マッピングソフトウェアにアクセスし、ＧＰＳウェイポイントではなく、「メインストリートで左に曲がれ」のような人間の指図において、（ソフトウェアが通常するように）ルートを生成することになる。この時点で、自律乗物は、通常動作で進んでそのルートに従う。一実施例では、マッピングソフトウェアは、道幅及び制限速度など追加の情報を自律ナビゲーションプログラムに提供するようにカスタマイズされる。

【０２７０】

本発明のナビゲーション及び制御システムについての他の応用分野には、１）例えば畑からの作物の収穫、耕起、草刈り等などの繰り返し作業または予測した経路上の作業を実行する農業機器（例えば、ガーデニング機器）、２）通常は脱出を妨げる灯りが無い通路または煙が充満した通路を通じて、例えば、貨物または人を輸送できる例えば動力付き荷車を含む採掘機器、３）洞窟探査機器、４）視程阻害によって緊急車両が前方に進む（後

述の通り）ことを妨げる必要はない例えば消防車、救急車、及びレスキュー隊車両などの緊急車両または警察車両、あるいは乗物の有人化により運転手を危険に曝す危険な環境状況中で動作する乗物、５）パレット、箱などを格納する／取り出すために使用される倉庫管理機器、ならびに６）玩具が含まれるが、これらに限定されるものではない。

【０２７１】

本発明の自律乗物を警察乗物に適用する例示のための例としては、ニューオリンズのコーズウェイ橋（２４マイルの長さで世界で最も長い橋）上では、かなりの霧シーズンがあることが挙げられる。濃い霧の朝には、通行車は、３５マイル毎時で運転する警察の車によって橋全体にわたって付き添われる。低い速度は、非常に短い視界のために必要とされる。極度の霧の朝には、付き添いさえも不可能なので、この橋は閉鎖される。付き添いにおいて先導する警察の車が、上記の協働的なモードで動作する本発明の自律乗物であれば、警察の車は、特にＲＩＥＧＬ（商標）画像化センサが使用される場合に、いずれのタイプの霧でも、安全に付き添うことができる。同じことが、夜間の運転に当てはまる。本発明の自律乗物は、暗闇によって影響を受けない。

【０２７２】

本発明に関する多数の修正形態及び変更形態が、上記教示に鑑みて実現可能である。したがって、添付の特許請求の範囲内で、本明細書に特に記載したもの以外の別のやり方で本発明を実施することができることを理解されたい。

【符号の説明】

【０２７３】

８　画像化センサ
１０　乗物、自律乗物
１１　平面、垂直スキャン平面
１２　エミッタ
１３ａ　ビーム拡大器
１３ｂ　コリメータ
１４　レーザパルス（または光）
１５ａ　固定ミラー１５ａ
１６　３Ｄスキャニング体積
１８　検出器
２０　エコー信号
２２　物体
２４　プロセッサ
２５　リアルタイム測位装置
２６　回転ミラー
２７ａ　レンズ
２７ｂ　望遠鏡
４０　レーザスキャナシステム、スキャナシステム
４２　光学画像化システム、画像化デバイス
５０　ＡＶＳプリント配線板
５２　ユーザまたはプログラムインタフェース
５３　コンピュータ、車載コンピュータ
５４　コンピュータ、車載コンピュータ
５６　フィールドプログラマブルゲートアレイデバイス、ＦＰＧＡ
５８　安全無線
６０　ハードウェアウォッチドッグ
６２　イーサネット（登録商標）リンク装置
６４　配電コンポーネント
６６　緊急停止（Ｅストップ）論理デバイス
６８　内部及び外部のコントローラエリアネットワーク（ＣＡＮ）

７０　デジタル及びアナログの入出力装置
８０　ＲＳ－２３２ポート及びＲＳ－４２２ポート
８２　一連の移動中の小さい長方形
８２　移動障害物
８４　トレーラ
１２０１　コンピュータシステム
１２０２　バス
１２０３　内部プロセッサ
１２０４　メモリ、メインメモリ
１２０５　リードオンリメモリ（ＲＯＭ）
１２０７　ハードディスク、記憶装置
１２０８　リムーバブルメディアドライブ、記憶装置
１２１３　通信インタフェース
１２１４　ネットワークリンク
１２１５　ローカルエリアネットワーク（ＬＡＮ）、ネットワーク
１２１６　通信ネットワーク、ネットワーク
１２１７　入力装置

【図１Ａ】

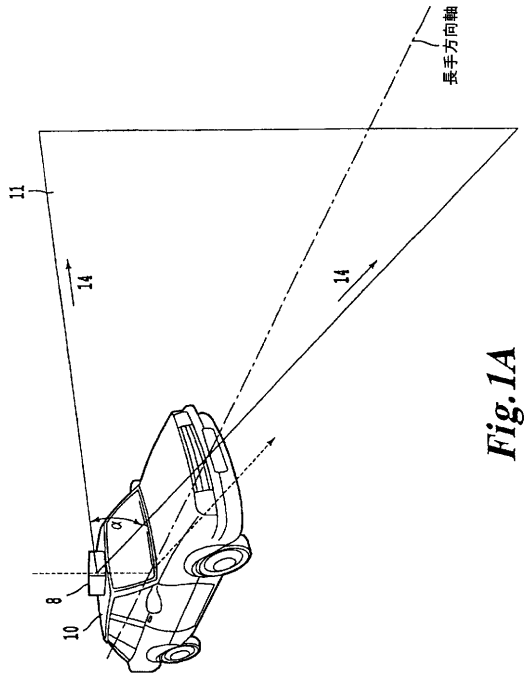


Fig.1A

【図１Ｂ】

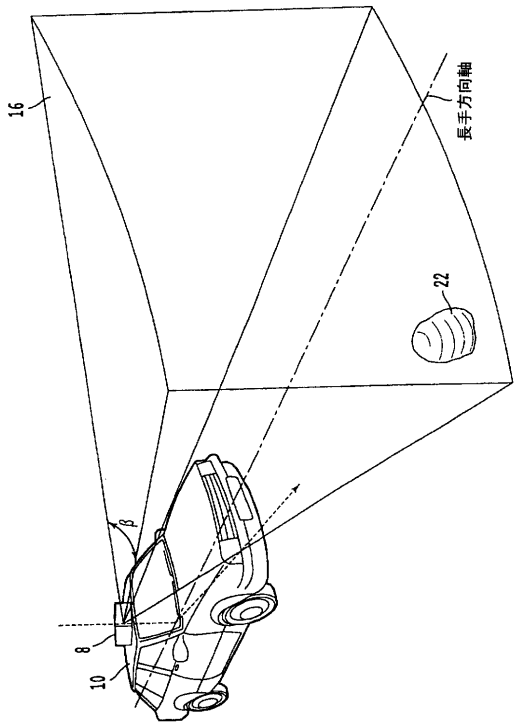


Fig.1B

【図２】

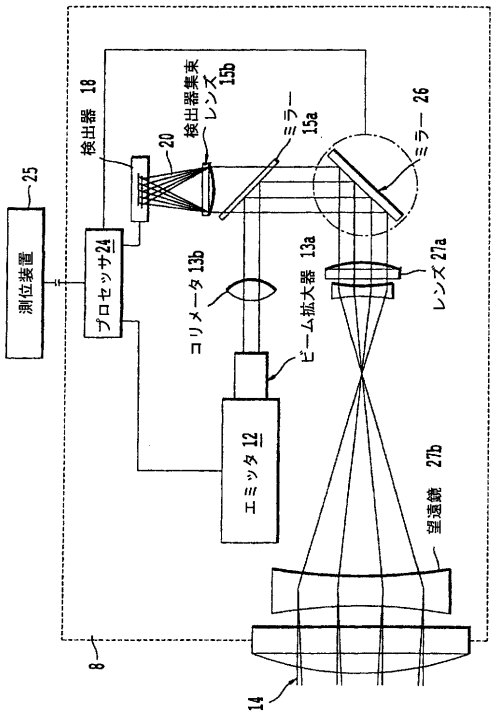


Fig.2

【図３Ａ（１）】

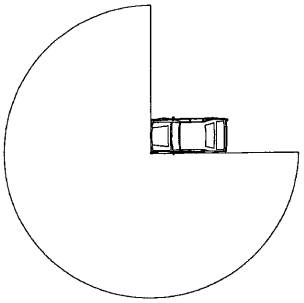


Fig.3A(1)

【図３Ａ（２）】

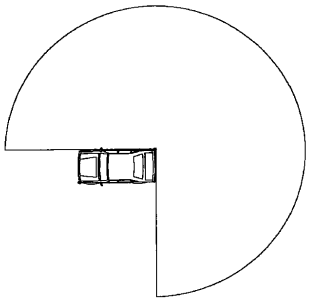


Fig.3A(2)

【図３Ｂ】

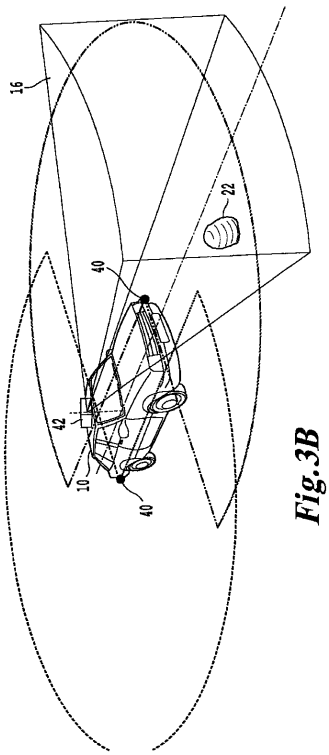


Fig.3B

【図４Ａ】

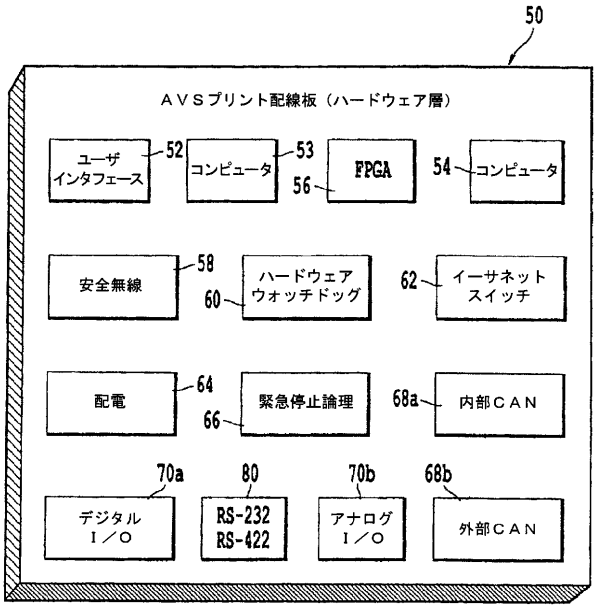


Fig.4A

【図４Ｂ】

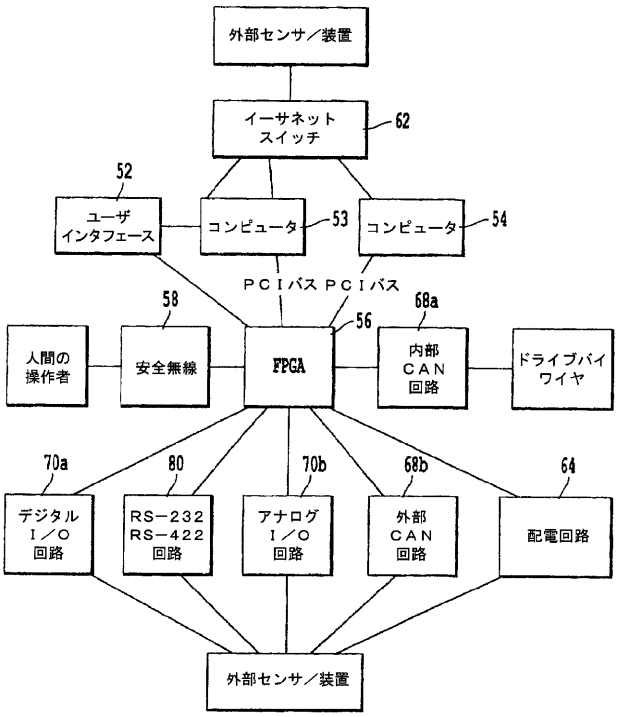


Fig.4B

【図４Ｃ】

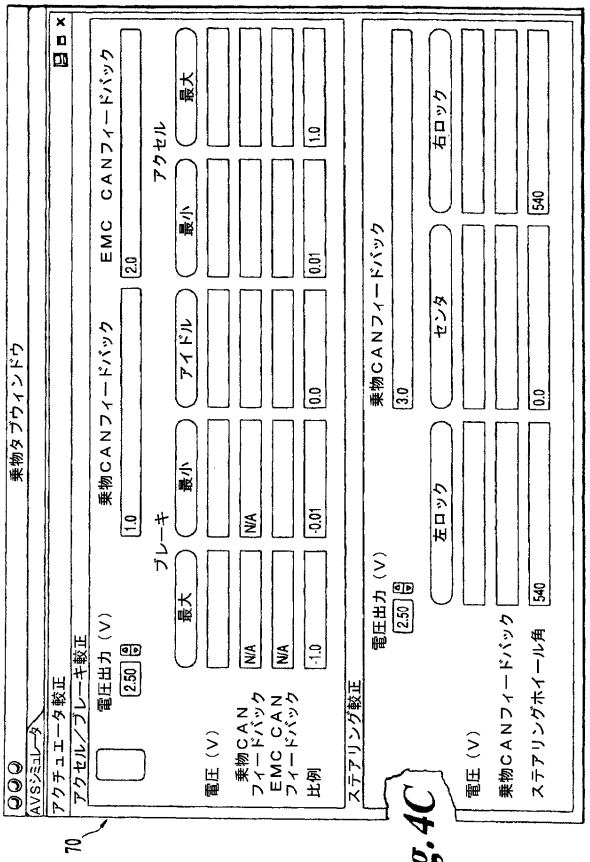


Fig.4C

【図５Ａ】

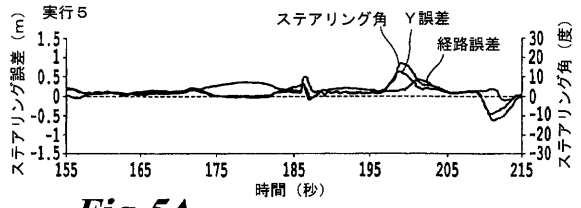


Fig.5A

【図５Ｂ】

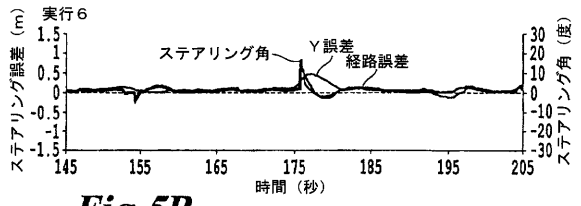


Fig.5B

【図５Ｃ】

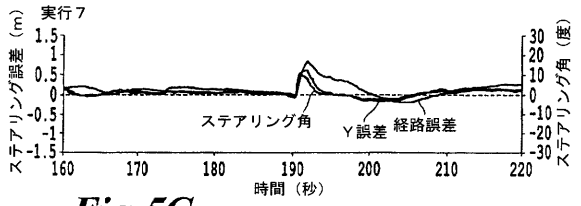


Fig.5C

【図６Ａ】

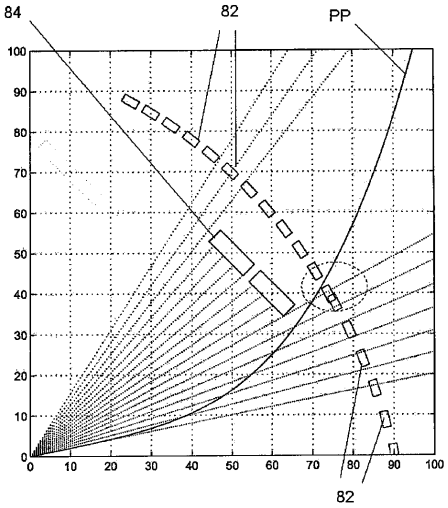


Figure 6A

【図６Ｂ】

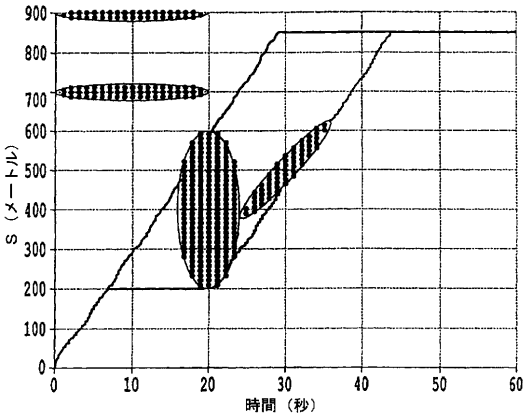


Fig.6B

【図６Ｃ】

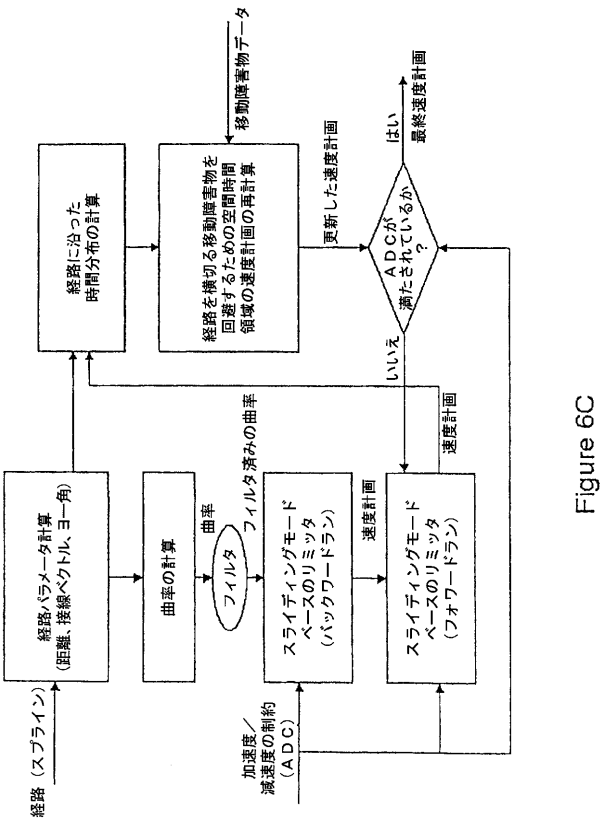


Figure 6C

【図７】

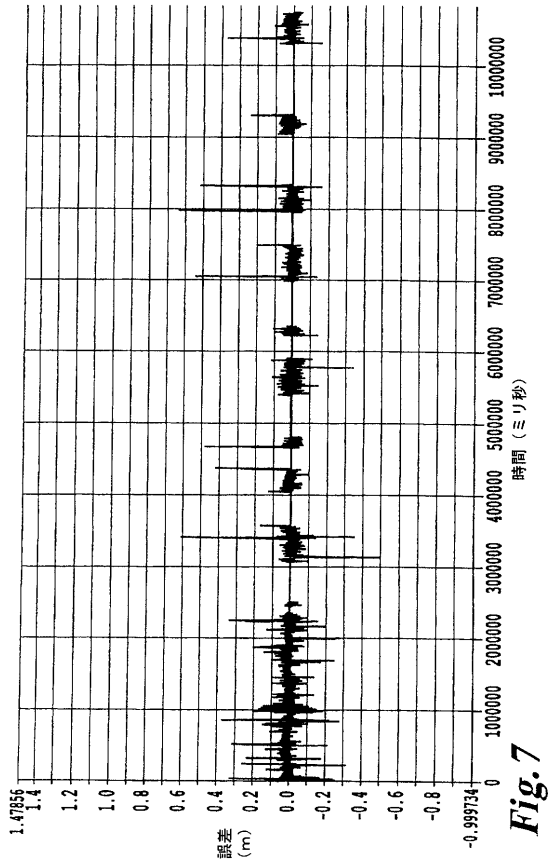


Fig.7

【図８】

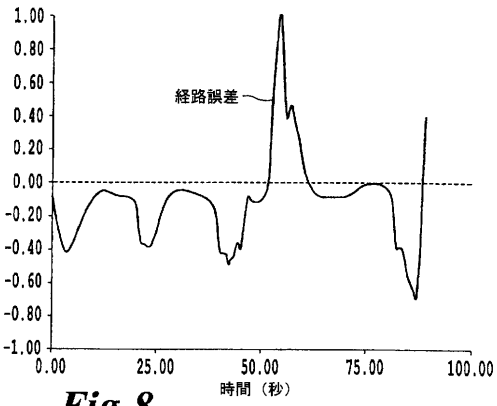


Fig.8

【図９】

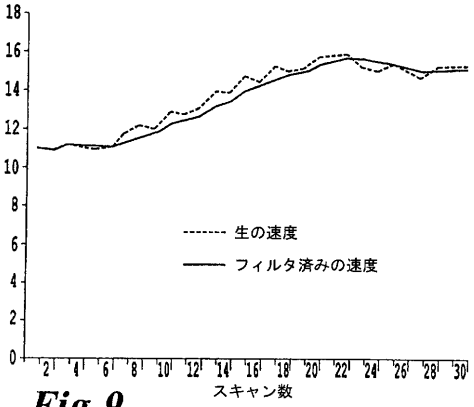


Fig.9

【図１０】

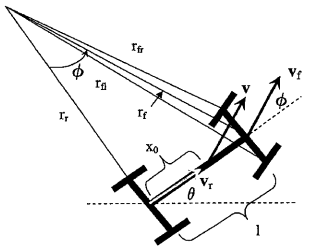


FIGURE 10

【図１１】

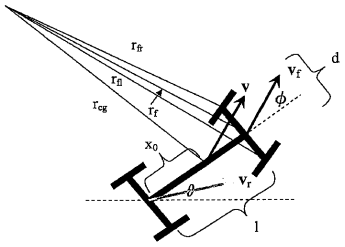


FIGURE 11

【図１２－１】

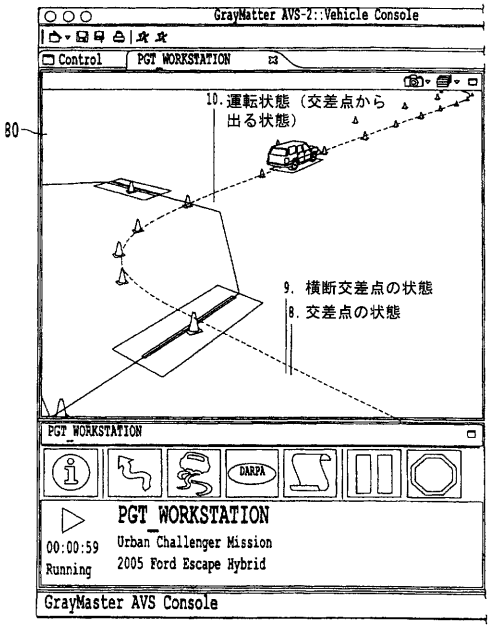


Fig.12-1

【図１２－２】

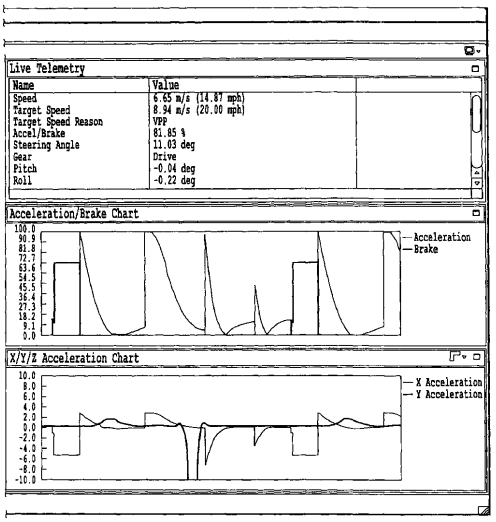
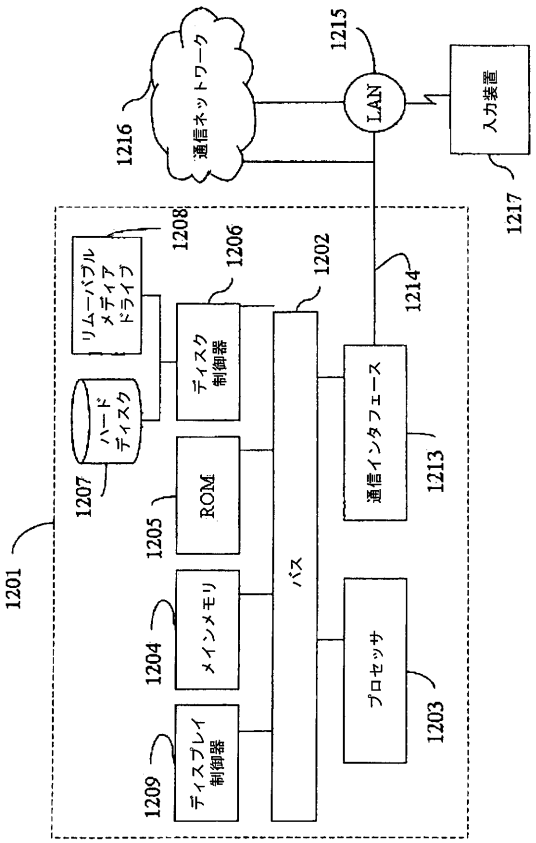


Fig.12-2

【図１３】

FIG. 13


1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1213
1214
1215
1216
1217
ディスプレイ制御器
メインメモリ
ROM
ハードディスク
リムーバブルメディアドライブ
ディスク制御器
バス
プロセッサ
通信インタフェース
LAN
通信ネットワーク
入力装置

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US 09/62059

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC(8) - G01C 22/00 (2009.01)
USPC - 701/23
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
USPC: 701/23

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
USPC: 701/1, 25, 28, 38, 48, 207, 213; 318/587; 382/103-104, 106-107; 340/440 (view search terms below)

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
USPTO WEST (PGPB, USPT, EPAB, JPAB); GOOGLE
Search Terms Used: route, path, algorithm, calculate, avoidance, travel, normalize, autonomous, vehicle, navigation, control, gps, beam, error, correct, water, boat, position, sensor, lane, optimum, deviate

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X --- Y	US 2008/0161986 A1 (BREED) 03 July 2008 (03.07.2008), entire document, especially para [0023]-[0024], [0126]-[0127], [0134], [0157]-[0167], [0201], [204], [0341]-[0342] and abstract	1-19, 21-32 ---------- 20
X --- Y	US 2007/0219720 A1 (TREPANGNIER et al.) 20 September 2007 (20.09.2007), entire document, especially para [0067]-[0071], [0101]-[0103], [0140]	33-36 ---------- 20
A	US 2007/0291130 A1 (BROGGI et al.) 20 December 2007 (20.12.2007)	1-36

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
24 November 2009 (24.11.2009)

Date of mailing of the international search report
07 DEC 2009

Name and mailing address of the ISA/US
Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents
P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450
Facsimile No. 571-273-3201

Authorized officer:
Lee W. Young
PCT Helpdesk: 571-272-4300
PCT OSP: 571-272-7774

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2009)

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW,GH,GM,KE,LS,MW,MZ,NA,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KM,KN,KP,KR,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PE,PG,PH,PL,PT,RO,RS,RU,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 ポール・ジェラード・トレパニアー
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０００２・メテリー・ワンダ・リン・ドライヴ・３５２０
(72)発明者 ホルヘ・エミリオ・ナゲル
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０１３０・ニュー・オリンズ・キャロンデレート・ストリート・８５６・アパートメント・＃５
(72)発明者 マシュー・テイラー・ドーナー
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０１２１・ジェファソン・リヴァー・ロード・１０８
(72)発明者 マイケル・トーマス・デュウェンター
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０１１５・ニュー・オリンズ・マガジン・ストリート・５３２２
(72)発明者 ニール・マイケル・トラフト
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０１１５・ニュー・オリンズ・プレザント・ストリート・７１２
(72)発明者 セルゲイ・ドラクノフ
アメリカ合衆国・フロリダ・３２１２９・ポート・オレンジ・フローラル・スプリングス・ブールヴァード・１２００・アパートメント・１９－２０３
(72)発明者 パウエル・キニー
アメリカ合衆国・ルイジアナ・７０４６１・スライデル・ウエスト・ブルージェイ・コート・４９５
(72)発明者 アーロン・リー
アメリカ合衆国・マサチューセッツ・０２１３０・ジャマイカ・プレイン・グリーンリー・プレイス・５・ユニット・ワン

Ｆターム(参考) 2F129 AA03 AA13 BB03 BB20 BB21 BB33 BB48 BB50 BB62 BB63
CC15 CC16 CC17 DD04 DD21 DD62 EE02 EE52 GG04 GG05
GG06 GG11 GG12 GG17 GG18 GG28 HH12
3D241 BB27 BB31 CA17 CA18 CA20 CE04 CE06 DB01Z DB02Z DB11Z
DC41Z DC44Z
5H181 AA01 AA25 AA27 CC03 CC04 CC14 FF04 FF05 FF07 FF11
FF22 FF27 FF33 LL01 LL04 LL09 LL20