ヒューマンガイダンスを用いた駐車支援システム

非会員 ワダ マサキ* 非会員 尹 康燮**

正員 橋本 秀紀*

Parking Assistance Systems using Human Guidance

Massaki Wada*, Non-member, Kang Sup Yoon**, Non-member, Hideki Hashimoto*, Member

This paper discusses the problem of parking assistance system development. Firstly, we propose the driver assistance systems general architecture based on path planning and human interface modules. A path generation method based on parking possibility area is developed for the parking assistance systems. The human interface designed for the parking assistance systems is then described. A prototype of the parking assistance systems based on the proposed architecture and approaches have been constructed. Proposed algorithms and implementation solutions in the prototype construction are described. The lane and row parking experimental results obtained with the prototype systems are also shown.

キーワード：駐車支援システム，ヒューマンガイダンス，経路生成，ヒューマンインターフェース，ITS

Keywords: Parking Assistance System, Human Guidance, Path Planning, Human Machine Interface, ITS

1. まえがき

自動車，道路，人をシステム化するITS(Intelligent Transportation Systems)が我々の身近なものになってきている。また，社会的な要求として，ドライバの負担を減らし安全性を高める運転支援システムの必要性が指摘されている。

筆者らはレベルの異なる複数タスクを含んだ運転支援システムの研究を進めており，特に駐車支援システムのアーキテクチャ，設計等について検討を行っている。駐車は，回転半径が短く車両の方向変化が大きいことに加え，後進動作が含まれており，周辺車両との衝突の可能性も高い。そのため，周辺監視能力が未熟である初心者にとっては運転操作の中で最も困難な操作の一つである。また，ベーパードライバや高齢者ドライバの増加に伴い，駐車支援システムの必要性はますます高まってきている。本論文では運転支援システムの一環として，ヒューマンガイダンスを用いた駐車支援システムに関する研究成果を報告する。

最初に駐車支援システムを概観し，ヒューマンインターフェースと経路生成アルゴリズムによるヒューマンガイダンスシステムアーキテクチャを提案する。さらに，実際の駐車支援システムの設計，システム実現のためのハードウェア，アルゴリズムについて述べ，実験結果を示す。

2. 駐車支援システム (Parking Assistance Systems)

システムでどのような通信(車々間・路車間)，車両・駐車場でのどのようなセンサシステムが使用されているか(または使用されていないか)によって様々な駐車支援システムが考えられる。本駐車支援システムは駐車場管理システム(Parking Administration System)，車両センサシステム(Vehicle Sensing System)，ヒューマンガイダンスシステム(Human Guidance System)の三つの要素から構成される。図1に駐車支援システムにおける各システム間の情報の流れを示す。

この構成のシステムで駐車場の入口から駐車スペースまでガイドする時のイメージを図2に示す。駐車場の入口から駐車スペースまで車両をガイダンスする手順は次の通りである。

Step 1 駐車場の入口で駐車場管理システムが車両に駐車情報を提供

Step 2 駐車場の入口から駐車スペース前までのガイダンス

* 東京大学 生産技術研究所 第3部
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
The 3rd Department, Institute of Industrial Science, University of Tokyo
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

** 大邱大学 自動車産業機械工学部
〒712-714 慶尚北道慶山市珍良邑内里 15
The School of Automotive, Industrial, and Mechanical Engineering, Daegu University
15, Naeri, Jinryang, Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-714

図 1 駐車支援システムでの各システム間の情報の流れ図

Fig.1. Information flow between the systems of parking assistance system.

図 2 車両ガイダンスのイメージ図

Fig.2. Image of vehicle guidance.

Step 3 駐車スペース前から駐車スペースまでのガイダンス

駐車支援システムは、全てを自動で行なう自動駐車システム⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾と比較するとシステムの中にドライバを含むという大きな違いがある。ドライバを含むことにより、時間遅延、経路のずれ及びドライバ自身が感じるの不安感等の問題が予想される。時間遅延とはドライバが駐車支援システムから提供される情報を受け取ってから実際に運動動作を行うまでに要する時間の遅れである。経路のずれは、時間遅延、不正確なハンドル操作（ステアリング）、急激なアクセル及びブレーキ操作により発生する。また、ドライバは主としてモニタおよび音声によるガイダンスにのみ依存して運転することになるので、後進時に直接後方を見ないことによる不安感を持つ。そのため、駐車支援システムの設計時にはドライバの操作誤差および不安感を軽減できるヒューマンガイダンスシステムが要求される。

すでに製品化されている駐車支援システムは駐車プロセスの一部（Step 3 のなかのバック動作等）のみを支援する。これに対して、本研究では異なる複数タスクを含んだ運転支援システムの検討の一環として上述した全ての Step を支援するシステムの実現を試みた。

図 3 駐車場管理システムの画面表示

Fig.3. Display of parking administration system.

表 1 センサシステムの仕様

Table 1. Sensors spec.

センサ	サンプリング時間	仕様
DGPS	200 ms	精度：RMS 15 cm
INS	50 ms	3 軸ジャイロ（ドリフト 1σ ： $3^\circ/h$ ）と 3 軸 サーボ加速度計（ドリフト 1σ ：10 mg）
車輪 エンコーダ	50 ms	90 スリット/回転
ステアリングセンサ	50 ms	96 スリット/回転

3. 駐車場管理システム及びセンサシステム

〈3・1〉 駐車場管理システム 駐車場管理システムは駐車場を管理し、駐車場へ入る車両に空き駐車スペースを割り当てる。また、駐車支援に必要な駐車場の状態つまり駐車スペースの絶対位置と広さ、駐車スペース前方の道路幅を車両に提供する。

本システムでは車両が駐車場に進入したことを光電管で検知することにより、ヒューマンガイダンスシステムとの通信を開始する。また管理システムの画面から予約状況や入庫している車両データ等が確認可能である。図 3 は、駐車場管理システムが表示する画面の一例である。

〈3・2〉 センサシステム センサシステムは、複数のセンサと車両の状態を推定する推定アルゴリズムにより構成される。

本システムで使用するセンサは DGPS (Differential Global Positioning System), INS (Inertial Navigation System), ステアリング角度センサ, 車輪角速度センサである。DGPS アンテナと INS は後輪軸の中心の垂直線上に設置する。本システムで仕様したセンサの仕様を表 1 に示す。

複数のセンサデータから高精度かつロバストに車両状態推定値を得るためには、データ融合アルゴリズムが必要になる。融合アルゴリズムでは内界センサのキャリブレーション、車輪半径の推定、非同期データへの対応等を考慮する必要がある。以上の問題を考慮し、車両の状態（絶対位置、姿勢、ステアリング角）を実時間で推定するために Multi-rate Extended Kalman Filter^{(5) (11)} を用いてデータ融合を行った。

4. ヒューマンガイダンスシステム

ヒューマンガイダンスシステムでは、センサシステムと駐車管理システムから情報を取得し運転操作情報を生成し、この操作情報をドライバに提供する。

本論文では経路生成アルゴリズムとヒューマンインターフェースに基づくヒューマンガイダンスシステムアーキテクチャを提案する。このアーキテクチャを用いることで、制御ループにドライバを含むために発生する問題、センサの不確実性による問題を補償したシステムが構築可能になる。本章では駐車支援システムにおいてこのアーキテクチャによる設計とその実現を示す。

経路生成アルゴリズムは車両の状態、車両形状、及び駐車場管理システムから得られる駐車場情報を用いて駐車スペースまでの経路及び運転操作情報を生成する。この情報がヒューマンインターフェース部分を介してドライバに提供される。ドライバがヒューマンインターフェースの指示通りに車両を操作することにより、車両は駐車スペースまで安全にガイダンスされる。

一般的なヒューマンガイダンスシステムでは、経路生成と運転操作の判断に関する人間のスキルと機械知能の共同作業によってタスクが実現される。この作業ではどの程度人間の知能を使用するかによって以下のガイダンス方法が考えられる。

- 1) ドライバの知能を全く利用せず、ドライバをアクチュエータとして考える方法。
- 2) 駐車支援システムは駐車スペース位置と周辺状態を提供するだけで、経路生成と運転操作をドライバの知能と技術に依存する方法。
- 3) 1) と 2) の間で、ドライバの知能と技術のある程度用いる方法。

経路生成とヒューマンインターフェースによる構成を実現するための第一段階は各ステップで使用されるガイダンス方法の決定である。ドライバへの定量的・高精度なガイダンスの必要性、妥当性等がガイダンス方法選択の主な基準となる。ドライバの操作時に必要以上に定量的かつ高精度な指示が施されるとドライバの注目がヒューマンインターフェースに集中する。この場合ガイダンス以外の事象に対してドライバ認識能力の低下がおこる。従って定量的・高精度なガイダンスの導入は慎重に行う必要がある。

駐車場の入口から駐車スペース前までの Step 2 にお

る低速走行ではドライバに定量的・高精度なガイダンスを施す必要がない。またここでは周辺視野を疎かにせずドライバ自身が経路生成と運転操作を行うのが望ましいため 2) の方法でガイダンスする。

Step 3 では複雑かつ高精度な操作が必要であり、1) と 3) の両ガイダンス方法が適しているといえる。しかし、本システムでは高齢者や初心者ドライバの支援も目的としていることを考慮して、1) の方法を採用する。

第二段階は、各ステップで選択されたガイダンス方法を実現する経路生成アルゴリズムとヒューマンインターフェースの設計および構築である。以降駐車支援システムにおける経路生成とヒューマンインターフェースの設計と構築について述べる。

〈4・1〉 経路生成 経路生成アルゴリズムは各ステップごとに異なるものが必要である。Step 2 ではカーナビ等で使用されている経路生成アルゴリズムを直接用いた。この手法は一般的なアルゴリズムの応用であるため本論文では言及しない。

Step 3 における経路生成アルゴリズムは、駐車場管理システムから提供される駐車場情報とセンサシステムから提供される車両の情報を利用して、車両を駐車スペース前から駐車スペースまでガイドするため、経路および運転操作命令を生成する。

このステップの経路生成では、種々の物理的な制約条件を考慮する必要がある。一つは経路生成における車両の運動モデルの考慮である。駐車時は車両が低速走行であるため、幾何学的関係は Ackermann Steering Geometry⁽⁹⁾ で表現できる。すなわち、回転中心が後輪軸の延長線上にあると仮定して、後輪軸の中心位置を基準として経路及び運転操作命令（ステアリング角度、移動距離）を計算する。

また、駐車スペースの幾何学的な物理拘束も考慮する必要がある。駐車支援システムでは経路生成時に駐車スペース及び駐車スペース前の道路においてセンサシステムの精度を考慮した危険領域を設定する。このように危険領域を設定し駐車操作に使用可能なスペースを限定することで、生成される経路が周囲の駐車スペースに侵入しないようにする。

従来の多くの手法で生成される経路は、ドライバが追従するには困難が伴う。これは、従来の手法ではステアリング角度制御指令と速度制御指令に対し同時に追従する必要があるためである。そこで、本ガイダンスシステムではステアリング角度制御と前後進の距離制御を交互に行うような経路生成方法を採用する。つまり、ステアリング操作を走行中には行わず、静止中にのみ行うような経路を使用する。このような経路は直線と円弧だけで構成される。

以上の条件を考慮した経路生成方法を自動駐車システムや移動ロボット等で使用されている様々な方法（ポテンシャル場方法^{(6) (7) (10)}、ファジイ理論による方法⁽³⁾、ラプラス方程式による方法⁽⁸⁾）を用いて実現することが考えられる。

しかし、駐車支援システムの経路生成では従来の要求に

加えて、人間が介在するため発生する複数の要因を考慮する必要がある。まず人間がアクセルとブレーキ操作で速度制御を行うことは非常に難しく、従来の手法に必要な速度制御の実現は不可能である。また自動・自律システムでは実時間フィードバックを用いた経路追従のために経路が生成されている。本システムでは人間の遅延と人間のミスが存在するため、実時間フィードバックの実現が不可能である。そのため本システムでの経路生成の役割は、追従のための経路を生成することではなく、運転操作指示を生成するためのものとなる。

さらに人間が介在しているため、従来のアルゴリズムでは考慮されていない新たな要求も加わる。これはすなわち、ドライバの操作エラーが頻繁に発生しても、必要最小限の操作で駐車を実現する操作性（ドライバビリティ）向上に関する要求である。

以上駐車支援システム経路生成の要求について述べた。問題の物理的条件、経路生成の役割、運転性の実現全てを考慮したアルゴリズムを従来の方法の延長として実現するのは困難である。以上の問題を解決するために後述する Parking Possibility Region (PPR) を定義し、この PPR を介した新たな経路生成手法を提案する。本アルゴリズムは人間へのガイダンスを目的とし、かつ人間が介在するシステムの特徴を生かした独自の経路生成手法である。

本論文では駐車スペースの中心線を基準にした車体角度を使用する。ある車体角度から一回のステアリング角度制御指令と距離制御指令で、駐車スペースの中心線に到達可能な後輪軸中心位置の領域を **Parking Possibility Region-PPR** と定義する。定義から各 PPR に対応して一つの車体角度が存在する。以降この角度を PPR 角度とよぶ。

図 4 と図 5 に直角（横列）駐車と平行（縦列）駐車において、PPR 角度が 45° の場合の PPR を示す。車体角度と PPR 角度、後輪軸中心位置と PPR 重心点がそれぞれ一致した車両も示す。また駐車スペース中心線までの経路とこの経路による車両最終位置も示す。なお PPR 演算の詳細は付録 1 に直角駐車の場合の PPR 演算方法として示す。

車両の理想的な駐車完了位置は、駐車スペースの中心線上で駐車することである。そして、車両が PPR に到達すれば、以後の経路生成及びガイダンスは簡単に行うことができる。

しかしガイダンスのため車両が PPR 内の点へ到達可能であるか、または車両が PPR にあるかを判断するには PPR 角度を考慮する必要がある。ある PPR 内の点へ到達可能であるためには現在の位置・姿勢から車両位置が PPR 内の点、車体角度がこの PPR の PPR 角度という状態になるまでの経路が存在する必要がある（現在の車両位置から PPR 内の点までの経路が存在することは十分条件でなく、到達点での車体角度も考慮する必要があることに注意）。同様に車両がある PPR にあるためには車両位置がこの PPR 内であり、かつ車体角度がこの PPR に対応する PPR 角度でなければならない。

図 4 直角（横列）駐車の場合の PPR

Fig. 4. Parking possibility region in case of row parking.

図 5 平行（縦列）駐車の場合の PPR

Fig. 5. Parking possibility region in case of lane parking.

経路生成アルゴリズムは以下の通りである。

1) 直角（横列）駐車の場合

- ① 駐車スペース前の初期停止位置において 1° きざみで PPR 角度が 1° から 89° までの PPR の重心点を求める。
- ② 初期停止位置から直線と円弧からなる経路で到達できる重心点（PPR 1 重心点）を到達点として①から選択して経路を生成（複数の到達可能な重心点の中で最小 PPR 角度の重心点を選択）。
- ③ ②に基づき直進し停止した位置から新たに円弧だけで到達できる PPR（PPR 2）内の到達点を選択し、この到達点までの経路を生成する（複数 PPR 内の異なる到達可能な点の中から到達点を選択する。到達可能な点とこの点に対応する PPR 重心点の間の距離が最短である到達点を選択）。
- ④ ③に基づきハンドルを切り円弧によって到達した停止位置がいずれの PPR 内（PPR 3）にあれば駐車スペースの中心線までの円弧経路を生成する。停

図6 PPRによる経路生成の各ステップ (シミュレーション結果)

Fig. 6. Steps of path planning using PPR (Simulation Results).

止位置がPPR外にあれば、駐車スペースの中心線を行き過ぎずに駐車スペース内に最も深く入る経路を生成。その後③から反復。

⑤ 駐車完了位置までのガイダンス及び駐車完了判断。

2) 平行(縦列) 駐車

① 駐車スペース前の初期停止位置において 1° きざみでPPR角度が 1° から 89° までのPPRの重心点を求める。

② 初期停止位置から円弧(前進)と円弧(後進)で到達できる重心点(PPR1重心点)を到達点として①から選択して経路を生成(複数の到達可能な重心

点の中で最小PPR角度の重心点を選択)。

③ ②に基づきハンドルを切り円弧(前進)によって到達した停止位置から新たに円弧(後進)だけで到達できるPPR(PPR2)内の到達点を選択し、この到達点までの経路を生成する(複数のPPR内の異なる到達可能な点の中から到達点を選択する。到達可能な点とこの点に対応するPPR重心点の間の距離が最短である到達点を選択)。

④ ③に基づきハンドルを切り円弧(後進)によって到達した停止位置がいずれのPPR内(PPR3)にあれば駐車スペースの中心線までの円弧経路を生成

する。停止位置が PPR 外にあれば、駐車スペースの中心線を行き過ぎずに駐車スペース内に最も深く入る経路を生成。その後②から反復。

⑤ 駐車完了位置までのガイダンス及び駐車完了判断。

図 6 に上記アルゴリズムを実施したときの各ステップにそれぞれ対応した図を示す。ただし、コンセプトをわかりやすく表現するためにシミュレーション結果を用いている。

①では各 PPR 重心点が演算される。①の図には経路生成のために選択された PPR (PPR 1) の重心点、直線と円弧で到達できる PPR 重心の一部、直線と円弧で到達できない PPR 重心の一部を示した。PPR 重心点に到達可能であるためには停止した位置・姿勢から車両の位置が重心点・車体角度が PPR 角度の状態になるまでの経路が存在しなければならない。

②の図では選択された PPR 中心点を用いて生成された経路と実際に走行した直線経路を示した。

③の図では直線移動中に誤差が発生し、新たに円弧だけで到達できる PPR (PPR 2) 内の到達点を選択した場合を示している (この選択にも PPR 角度を考慮する必要がある)。またこの新たに選択された PPR 内の到達点を用いて生成された経路と実際に走行した円弧経路も示した。

④の図では円弧で移動している間に誤差が発生し、前ステップで選択された PPR (PPR 2) と異なった PPR 内 (PPR 3) に停止した場合を示している。このステップでは、現在車両が PPR にあるかを PPR 角度を考慮して判断することが必要になる。車両が到達した PPR (PPR 3) と、これを用いて生成された経路及び実際に走行した円弧経路も示した。

⑤の図では駐車完了位置まで生成された経路と実際に走行した経路を示している。

〈4・2〉 ヒューマンインターフェース 直観的なガイダンスを実現するため、モニタによる視覚情報提示スピーカによる音声情報提示を用いたマルチモーダルなヒューマンインターフェースを構成した。モニタを視覚インターフェース、スピーカを聴覚インターフェースとして用いたヒューマンインターフェースを構成した。これらのインターフェースを用いて、駐車場の入口から駐車スペース前までのガイダンス時 (Step 2) は駐車場管理システムから提供される駐車スペース情報とセンサシステムから提供される車両の現在位置・姿勢情報をドライバに伝達し、駐車スペース前から駐車スペースまでのガイダンス時 (Step 3) は経路生成アルゴリズムで生成された経路とより詳細な運転操作情報をドライバに伝達する。

ターゲットとするユーザに対して最適であり、かつ、提案するガイダンス方法に適したインターフェースを得るため、伝達すべき情報が直感的かつ正確に伝わるか、そして定量的な指示に対して精度のよい操作が得られるか等の観点に基づき、実験からのフィードバックを評価しながらインターフェースの開発を進めた。本章ではこの開発手法で構築されたヒューマンインターフェースについて述べる。

図 7 Navigation mode の画面

Fig. 7. Screen for navigation mode.

図 8 ギア変換時の画面

Fig. 8. Screen for gear change mode.

ヒューマンインターフェースには次の 4 つのモードがある。駐車場の入口から駐車スペース前までのガイダンス時 (Step 2) は Navigation Mode を使用し、駐車スペース前から駐車スペースまでのガイダンス時 (Step 3) は Gear Change Mode, Handle Operation Mode, Target Position Mode を使用する。

Navigation Mode 駐車場の入口から駐車スペース前の初期停止位置までのガイダンス時 (Step 2) に使用する。駐車場、割り当てられた駐車スペース、現在の車両位置、初期停止領域を表示し、ドライバを駐車スペース前までガイドする。この時のヒューマンインターフェースの画面を図 7 に示す。

Gear Change Mode 初期停止位置及び目標位置に到達していれば、次の経路で入れるギアを表示する。この時のヒューマンインターフェースの画面を図 8 に示す。ただし、次のギアが現在のギアと同じ場合は表示しない。同時に、「Reverse ギアを入れて下さい」というような音声による支援も行なう。初心者の場合、ギアの変換を忘れる

図 9 ハンドル操作時の画面

Fig. 9. Screen for handle operation mode.

図 10 目標点まで移動時画面

Fig. 10. Screen for moving to target position.

ことが多く、これを防止するため変換すべきギアを表示する。また駐車終了指令もパーキングギアを指示することによってこのモードで示される。

Handle Operation Mode ハンドル角度（ステアリング角度）は、アニメーションを利用してタイヤの現在の角度と目標角度を重ねて示し、上段に矢印で回転方向と回転量を示す。アニメーションで表示する際、ハンドルではなくタイヤを利用したのは、ハンドル角度が1回転以上の場合には表現に困難が生じるためである。タイヤの方向は車両の進行方向とはほぼ同じであるため、ドライバが次の動作を理解しやすい。この時のヒューマンインターフェースの画面を図9に示す。同時に音声支援で「ハンドルを右に回して下さい」という指示が行われる。

Target Position Mode ギアとハンドルの操作が終わり次第、車両の現在位置と目標位置を表示し、車両を目標位置までガイダンスする。この時のヒューマンインターフェースの画面を図10に示す。このモードでは車両が移動し、ドライバが画面に集中して周辺監視、速度把握等を疎

かにすることは非常に危険である。このため特にこのモードの音声インターフェースは重要である。音声によるインターフェースは「前進して下さい、目標まで3m、2m、1m」のような指示と同時にブザー音を利用して目標位置までの残りの距離を知らせる。残りの距離が短くなるにつれてブザー音の間隔を短くし、ドライバの距離感覚を補助する。

5. システム構成と実験

駐車支援システムを実現するため構成したシステムを図11に示す。車両側では経路生成及び位置推定用PCとヒューマンマシンインターフェース用のPC2台を用いる。車載PCはLANで接続されている。駐車管理PCと車載PCは、無線LANを介して接続され、ソフトウェアレベルでは高速なJava用分散オブジェクトHORB (Hirano Object Request Broker)⁽¹²⁾を用いて通信を行なっている。

実験に使用した車両Toyota-JZS147を図12に示す。車両の外形は全長4695mm、全幅1695mmでありまたホイールベースは2985mm、最小回転半径は(4200mm)であり一般の乗用車と比較して大きいため、駐車操作はより困難である。

想定した駐車場のスペースでシミュレーションを行なって位置姿勢精度がそれぞれ10cm、1°以上必要であることが確認された。この精度の実現のために複数センサと、Multirate Extended Kalman Filterによる車両位置姿勢推定アルゴリズムで構成したセンサシステムを用いた。

前述の駐車支援システムの妥当性を検討するために、直角（横列）駐車及び平行（縦列）駐車を対象として実験を行った。直角駐車実験は全長5500mm、全幅2500mmの駐車スペースでかつ前方の道路幅が6000mmの既存駐車場エリアで行った。並列駐車実験では全長8000mm、全幅3000mmの駐車スペースでかつ前方の道路幅が6000mmの駐車場エリアを設定して行った。

駐車最終目標位置・姿勢は駐車スペースの形状から予め定まる。本実験では目標 x 座標・ y 座標・姿勢(θ)に対してのずれが直角駐車の場合 ± 300 mm、 ± 300 mm、 $\pm 5^\circ$ 、並列駐車の場合 ± 300 mm、 ± 400 mm、 $\pm 5^\circ$ 以下の場合駐車終了指令を表示した。

20代～50代の、様々な運転レベルの被験者15人に対して複数回、本システムを使用してもらい、駐車実験を行なった。いずれの場合においても、駐車スペースまでの安全なガイダンスが行なわれ駐車終了指令提示を確認した。この実験結果からセンシングシステムで必要な精度が得られていることが確認された。

図13、図14に直角（横列）駐車の場合の実験結果を、図15、図16に平行（縦列）駐車の場合の実験結果を示す。これらの図において、塗りつぶされている車両位置は車両の停止位置であり、ここでギアおよびステアリング操作を行う。

提案された手法を用いることで経路からのずれが存在しても可能な限り一回の切り返しでガイダンスを行うことが

図 11 システム構成

Fig. 11. System Composition.

図 12 実験用車両

Fig. 12. Experimental Vehicle.

図 13 直角（横列）駐車の場合の実験結果
(1 回切り返し)

Fig. 13. Result of row parking case (single switch back).

できる。このため、実験ではほとんどのケースにおいて一回の切り返しで一回で図 13、図 15 に類似した経路の駐車が行われたことが確認された。図 13 の直角駐車ガイダンスの場合では二つの直線 ([a] 全長 5200 mm, [d] 全長 3400 mm) と二つの円弧 ([b] 半径 5500 mm と全長 2800 mm, [c] 半径 5200 mm と全長 4100 mm) で構成された経路によって駐車が行われた。図 15 の平行駐車ガイダンスの場合には三つの円弧 ([a] 半径 15700 mm と全長 5800 mm, [b] 半

径 5400 mm と全長 3300 mm, [c] 半径 5200 mm と全長 5100 mm) と一つの直線 ([d] 全長 1200 mm) で構成された経路によって駐車が行われた。

全駐車約 20% の場合では図 14、図 16 のように複数 (2 回から 3 回) の切り返し指示が必要となる場合を観測された。これはドライバーのハンドル操作エラーとセンサキャリブレーションの不十分性によるものである。

図 14 直角（横列）駐車の場合の実験結果
(複数切り返し)

Fig. 14. Result of row parking case (multiple switch back).

図 15 平行（縦列）駐車の場合の実験結果
(1 回切り返し)

Fig. 15. Result of lane parking case (single switch back).

図 16 平行（縦列）駐車の場合の実験結果
(複数切り返し)

Fig. 16. Result of lane parking case (multiple switch back).

これらの結果は経路からのずれが大きい場合でも PPR による経路生成手法を用いることで最少回数の操作によるガイダンスが実現されていることを示している。本ガイダンスシステムの有効性は特に運転レベルの低い被験者において顕著で、その場合駐車時間の短縮と操作回数の減少が確認された。

6. まとめ

本研究では、運転支援システムの一環として、ヒューマンガイダンスを用いた駐車支援システムを開発した。また、駐車支援システム実現のため、駐車場管理システム、センサシステム、ヒューマンガイダンスシステムを構築した。

ヒューマンガイダンスのために経路生成アルゴリズムとヒューマンインターフェースによるアーキテクチャを提案し、このアーキテクチャを用いた駐車支援システムの各システムの設計と構築について述べた。

新たに開発された経路生成アルゴリズムにより、ドライバーが追従しやすく、かつドライバーに指示しやすい経路を生成することが可能となった。具体的には、PPR を方向転換点または経由点として利用する手法を提案し、直線と円弧だけで構成される経路及び運転操作情報を生成した。ヒューマンインターフェースには、視覚および聴覚インターフェースを用い、経路生成アルゴリズムが生成した経路及び運転操作情報をドライバーの操作を妨げることなく分かりやすい形で提供した。

また、本駐車支援システムを利用した実際の駐車実験により、直角（横列）駐車及び平行（縦列）駐車において安全に駐車を行えることを実証した。

プロトタイプの開発と実験を行って判明した点、今後の研究について得られた知見について以下に述べる。

- 従来の駐車システムでは車両後方の情報のみを用いて駐車動作の一部（後進動作）の支援に限定されるため、ガイダンスを開始する際の初期停止位置は運転者が独自に選択しなければならない。この場合、最終的に駐車することが困難または不可能な初期位置に車両が停止する可能性がある。本システムでは駐車エリア周辺の幾何学条件（車両後方の情報のみでなく駐車エリア前の道幅等も含める）を使用して全プロセスのガイダンスを行っているためこの問題が発生しない。このように全プロセスを支援しているため、初心者等から従来のシステムと比較して本システムでの駐車が容易であるという評価が得られたと思われる。

また従来のシステムと異なって定量的な指令を含めたガイダンス方法 1) の応用もこの評価の要因と思われる。

- 本駐車ガイダンスシステムを利用して安全に駐車を行えることを実証したが、熟練したドライバー、また複数回システムを使用してシステムに慣れたドライバーには現在の駐車ガイダンスは冗長すぎて苛立つ感がある。今後異なる運転レベルに対応し、ドライバーの慣れに伴

い駐車ガイダンスシステム自体が進化することが望ましい。

- 現在のセンサ技術でガイダンスシステム（高精度操作を必要とするシステムも含めて）に必要な精度の実現が可能であることを確認した。

さらにガイダンスシステムでは複数の状態変数が必要となることも確認した。この要求を考慮して安全性を確保するためには、複数センサデータ融合を用いたセンシングシステムが適している。

- 提案されたヒューマンガイダンスシステムアーキテクチャは本駐車支援システム構築には十分であった。しかしながらガイダンスアーキテクチャを一般化するためには、提案されたアーキテクチャを改善する必要がある。特に様々な運転レベルのドライバ、複雑なアシスタンスモード間遷移等へ対応する必要がある、ドライバインザループシステムのために提案された手法⁽¹³⁾等の導入が考えられる。

- ガイダンスシステムは経路生成とヒューマンインターフェースの密接な結合により実現される。そのため経路生成アルゴリズムは従来手法で考慮されている要求に加えて新たな要因を考慮して設計する必要がある。

他システムへ応用するときシステムの要求によっては本稿で提案された経路生成方法の改善が必要となる。まず熟練したドライバに対して、または複雑な状況下でガイダンス方法²⁾が実施不可能な運転シナリオ（障害物回避等）で支援を実現するためガイダンス方法³⁾（pag.3）に対応するための改善の必要性が考えられる。また動的なシナリオ（複数車両が存在するなかの車線変更等）に対応出来るための改善の必要性も考えられる。

- インターフェースの設計はシステムパフォーマンスに対して影響を与えることが確認された。また、音声インターフェースを用いることでドライバの負担を軽減して、周辺監視を疎かにせずに駐車のための操作を行なうことが可能となることを確認した。このため、安全性が非常に重要な車両のヒューマンインターフェースでは、音声支援を含めたシステムが適していることが分かった。

（平成 14 年 4 月 3 日受付，平成 14 年 9 月 24 日再受付）

文 献

- (1) I.E. Paromtchik and C. Laugier: "Autonomous Parallel Parking of a Nonholonomic Vehicle", *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.13-18, Tokyo, Japan, Sep. (1996)
- (2) C.W. Cheng, S.J. Chang, and T.H.S. Li: "Parallel-Parking Control of Autonomous Mobile Robot", *Proc. International Conference on Industrial electronics, and Control, and Instrumentation*, pp.1299-1304 (1997)
- (3) S.J. Chang, C.W. Cheng, and T.H.S. Li: "Design and Implementation of Fuzzy Garage-Parking Control for A PC-based Model Car", *Proc. International Conference on Industrial electronics, and Control, and Instrumentation*, pp.1305-1310 (1997)

- (4) M. Ohkita, H. Miyata, M.P. Miura, and H. Kouno: "Traveling experiment of an autonomous mobile robot for a flush parking", *Proc. 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Syst.*, vol.1, pp.327-332 (1993)
- (5) M. Wada, K.S. Yoon, H. Hashimoto, and S. Matsuda: "Parking Assistance System based on High Accuracy Position Sensing", *Proc. IEEE International Vehicle Electronics Conf.*, pp.468-473 (1999)
- (6) 池上孝則・大園成夫:「距離値ポテンシャルに基づく経路探索」, 日本ロボット学会第 8 回学術講演会予稿集, pp.195-198 (1990)
- (7) J.C. Latombe: *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers (1996)
- (8) J.O. Kim and P. Khosla: "Real-Time Obstacle Avoidance Using Harmonic Potential Functions", *IEEE/RSJ international Conference on Robotics and Automation*, pp.790-796, Sacramento, CA, April, (1991)
- (9) 安部正人: 自動車の運動と制御, 山海堂 (1992)
- (10) J. Guldner, V.I. Utkin, and H. Hashimoto: "Robot Obstacle Avoidance in n-Dimensional Space Using Planar Harmonic Artificial Potential Fields", *Trans. ASME- Journal of Dynamic Syst., Measurement, and Control*, Vol.119, No.2, pp.160-166, June (1997)
- (11) M. Wada, K.S. Yoon, and H. Hashimoto: "High Accuracy Road Vehicle State Estimation Using Extended Kalman Filter", *Proc. 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems* (2000)
- (12) HORB: <http://www.horb.org/>
- (13) M.A. Goodrich, and E.R. Boer, "Designing human-centered automation: Tradeoffs in collision avoidance system design", *IEEE Trans. Intelligent Transportation Syst.*, Vol.1, No.1, pp.40-54, March (2000)

付 録

1. 直角駐車の PPR 演算方法

ここでは、直角駐車の PPR 演算方法を示す。

〈1・1〉経路生成座標系 駐車ガイダンスアルゴリズムでは後輪軸の中心位置 (x, y) を車両位置として使用した。また車体角として反時計方向で X 軸を基準にした θ 及び Y 軸を基準にした α を用いた。アルゴリズムで使用した座標系と駐車場パラメータを付図 1 に示す。

〈1・2〉パラメータ記号 アルゴリズムで用いられるパラメータの記号は以下の通りである。

付図 1 駐車エリア座標系

app. Fig. 1. Parking area coordinate system.

x : 駐車エリア座標系の X 軸方向車両位置
 y : 駐車エリア座標系の Y 軸方向車両位置
 θ : X 軸を基準とした車体角 ($\theta = \alpha + \pi/2$)
 α : Y 軸を基準とした車体角 ($\alpha = \theta - \pi/2$)
 D_a : 駐車エリア, 通路周辺の危険領域幅
 C_a : 車両の後トレッドから前バンパーまでの長さ
 C_c : 車体幅の半分の長さ
 R_w : 駐車エリア前の道幅
 P_d : 駐車エリアの長さ
 P_w : 駐車エリアの幅
 y_u : PPR の上境界
 x_r : PPR の右境界
 R_{min} : 最小回転半径

〈1・3〉 PPR 演算方法 車両が付図 1 のように後進しながら駐車を行うと仮定する。

各 PPR 角度と駐車エリア反対側の危険領域 (a) に突入しない条件で PPR 上限境界線が決まる。車体角が可能領域角度で (a) の境界線を接点とする車両の y 座標から PPR の上限境界線式

$$\begin{aligned}
 y &\leq y_u \\
 y_u &= R_w + P_d - D_a - \sqrt{C_a^2 + C_c^2} \\
 &\quad \sin\left(-\tan^{-1}\left(\frac{C_c}{C_a}\right) + \theta\right) \dots\dots\dots (付 1)
 \end{aligned}$$

が得られる。

また各可能領域角度と最小回転半径で駐車スペース中心線に到達可能である条件で PPR 右境界線が定まる。駐車スペース中心線から最小半径で移動したとき車体角が可能領域角度に等しい位置の x 座標から PPR の右境界線式

$$\begin{aligned}
 x &\leq x_r \\
 x_r &= -\text{sgn}(\alpha)R_{min}(1 - \cos(\alpha)) \dots\dots\dots (付 2)
 \end{aligned}$$

が得られる。

PPR の左傾斜境界線は各可能領域角度と駐車エリア左コーナー (b) に衝突せず駐車スペース中心線に到達可能であるという条件で定まる。可能領域角度 α を固定すると駐車スペース中心線に到達可能な半径が x 座標の関数として定

まる。左コーナー (b) に衝突しない条件を表す式に半径関数を導入し得られた y 座標から次の左傾斜境界線の式が得られる。

$$\begin{aligned}
 y &\geq P_d - \frac{x}{\sin\alpha} - \frac{x}{\tan\alpha} - \sqrt{2\left(\frac{P_w}{2} - C_c - D_a\right)} \\
 &\quad \left(\frac{-x}{\tan\frac{\alpha}{2}\sin\alpha} - \frac{\frac{P_w}{2} - C_c + D_a}{2} - C_c\right) \dots\dots\dots (付 3)
 \end{aligned}$$

以上の式付 1, 付 2, 付 3 を満足する点の集合が PPR を構成する。

ワ ダ マサキ

(非会員) 1971 年 3 月 31 日生。1994 年 12 月 Instituto Tecnológico de Aeronautica 大学工学部電子工学科卒業。1997 年 3 月同大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。1997 年 4 月東京大学大学院工学系研究科電子情報工学博士課程入学, 現在に至る。制御理論, 推定理論, ITS の研究に従事。

尹 康 燮

(非会員) 1963 年 9 月 15 日生。1986 年 2 月釜山大学工学部精密機械工学科卒業。1997 年 2 月同大学大学院精密機械工学専攻博士課程修了工学博士。同年 9 月東京大学生産技術研究所客員研究員。2000 年 3 月大邱大学自動車産業機械工学部講師, 現在に至る。制御工学, Robotics 及び ITS の研究に従事。

橋 本 秀 紀

(正員) 1957 年 8 月 15 日生。1981 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1987 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了工学博士。同年 4 月同大学講師。生産技術研究所勤務。1990 年同大学助教授, 現在に至る。1989-90 年 MIT 客員研究員 (LIDS, LEES)。知的制御システム, 制御工学, Robotics 及び ITS の研究に従事。