

論 文

CCD カメラ画像に基づいた自動車の車庫入れの自動化

小越 咲子[†] 小越 康宏^{††} 木村 春彦^{†††} 広瀬 貞樹^{††}

Automatic Traveling Vehicle System for the Parking Based on CCD Camera Image

Sakiko OGOSHI[†], Yasuhiro OGOSHI^{††}, Haruhiko KIMURA^{†††}, and Sadaki HIROSE^{††}

あらまし 近年、自動車の自動走行に関する研究が盛んに行われているが、その大半は一般道路を対象としたレーン追従に関する研究であり、駐車場を対象とした車庫入れの自動化に関する研究は少ない。本研究では、車庫入れの自動化に焦点を当て、運転者が指示した駐車スペースへの走行を自動化するシステムを提案し、シミュレーション実験により検証を行った。提案システムは、車載 CCD カメラにより撮影した前景画像を車載ディスプレイに出力し、ディスプレイ上で指示された画素点に対応する駐車位置を幾何学的な計算により測量し、駐車位置へ自動走行するものである。また、駐車位置までの走行においては、駐車位置付近までの幅寄せと、最終車庫入れ動作の二つに走行経路を分割し、前者は、提案手法である、アッカーマン・ジャント式旋回に基づく幅寄せモデルを用いた制御、及び、人間の幅寄せの知識を組み込んだファジー推論を用いた制御によって経路を決定し、後者は、代表的な最適車庫入れパターンをルール化し経路決定を行った。

キーワード 自動操縦、アッカーマン・ジャント式旋回、ファジー制御、カメラキャリブレーション

1. ま え が き

近年、人と道路と車両を最先端の情報通信技術を紹介してネットワークで結び、相互に情報をやり取りすることで、交通事故、渋滞などといった道路交通問題の解決を目指した新しい交通システムである ITS (高度道路交通システム) [1]~[3] が推進されている。例えば、運転者に道路情報を提供する AHS (走行支援道路システム) [4] や運転支援を行う ASV (先進安全自動車) と呼ばれる技術が考えられ、車載ミリ波レーダによる ACC (車間自動制御) や車載 CCD カメラによる自動レーンキープなどが実用化されている [5]。

国土交通省をはじめとする関連機関により考えられている ITS サービスのうち、安全運転の支援、自動運転のサブサービスに駐車場の自動駐車 [6] が定義され

ている。本研究ではこのサービスの実現を目的とする。

自動運転に関する研究としては、車載 CCD カメラで道路区分線を認識して自律走行を実現する研究 [7]~[10] や対向車などの動きも考慮して回避行動を行う研究 [11] が行われている。しかし、駐車場には一般道路のような走行の基準となるレーンが存在しないため、自動走行、駐車を行うのは困難である。自動駐車の研究として、駐車場内センサと車載センサを融合した自動駐車に関する研究 [12] が行われているが、外部における設備を必要とし、一般的な駐車場での利用には地域におけるインフラの整備が必要とされる。また、バックカメラを用いた駐車アシストシステム [13] のように後方の近距離において、駐車支援を行うシステムの開発も行われているが、前方カメラを用いた自動駐車システムの開発はまだ行われていない。しかしながら、運転技術の未熟な運転手において、運転手の前方視野に入る駐車場への自動駐車は有効であると考えられる。

そこで、本研究では自動車以外の場所にセンサを設置せず、車載 CCD カメラを用いて運転者の前方視野に入る画像を車載ディスプレイに映し出し、タッチペンで指示を行った駐車スペースに自動幅寄せ自動駐車を行うシステムの提案を行う。

[†] 金沢大学大学院自然科学研究科数理情報科学専攻, 金沢市
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University, 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa-shi,
920-8667 Japan

^{††} 富山大学工学部知能情報工学科, 富山市
Faculty of Engineering, Toyama University, 3190 Gofuku,
Toyama-shi, 930-8555 Japan

^{†††} 金沢大学工学部情報システム工学科, 金沢市
Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20
Kodatsuno, Kanazawa-shi, 920-8667 Japan

以下に、提案システムの手法の概略を示す。

(1) CCD カメラ画像からの測量

CCD カメラは安価で内部評定要素が安定しているため、画像からの測量に用いられることが多い[14], [15]. 測量を行うためのカメラキャリブレーションの方法としては、レンズ系を通る光線の方向を追跡して内部標定要素を求める直接的な方法と、対象空間点の座標とそれが投影された撮像面の画像座標の関係から求める間接的方法に分けられる。前者は測定カメラの検定に用いる厳密なもので特殊な機材が必要になり、手軽に実施できない。後者はセルフキャリブレーションと呼ばれ多くの方法が提案されているが、3次元基準点場を準備する方式が主流である。本システムにおいては、後者のセルフキャリブレーションを用いるが、周囲の他車、歩行者、車止め等の存在しない水平な平面駐車場を前提とするため、カメラキャリブレーションにおいても3次元座標の計測ではなく、2次元の平面座標として幾何学式を解法することにより計測を行う。

(2) 車庫入れ動作

本研究では、前進、切返しの二つの車庫入れパターンを想定しており、運転者にいずれか一つを選択させ、測量による位置関係に基づいて車庫入れ動作を行うものである。

車庫入れの一連の動作において、前半部分を幅寄せ、後半部分を最終車庫入れ動作といった二つの動作に分割する。車庫入れ動作においては無駄の少ない経路をとることが望ましいため、最終車庫入れ動作においては最小回転半径をとるように組込みルールを用いるものとし、この最終車庫入れ動作開始位置まで幅寄せにより走行する。したがって、幅寄せ動作を正確に行うことは非常に重要となる。

そこで、幅寄せ動作として、(i) 走行軌跡を厳密に計算して求める幅寄せ方法、(ii) 人間の操舵規則の知識を利用したファジー制御による幅寄せ方法といった二つの幅寄せ方法を提案する。(i) は走行軌跡を厳密に計算するため、計算時間が数秒程度要する場合があるが、走行可能な走路が短い場合においても正確な経路を求めることができる。一方、(ii) の幅寄せ方法は、走行可能な走路が短い場合は誤差を修正しきれない場合があるが、ファジールールの演算負荷は(i)と比較すると非常に小さいというメリットがある。

それぞれの特徴を生かすために、状況に応じて、幅寄せ手法(i), (ii)を選択するものとする。

2. 提案システム

本システムでは、駐車スペースの周りに他の車や障害物のない広い平面状の駐車場を対象とする。駐車場内には複数の駐車スペースがあり、運転者が指示した駐車スペースへ駐車を行うものとする。駐車動作については、車庫入れという用語を用いるものとする。

本システムの概要は、自動車の天板に設置された CCD カメラから得られる自動車の前景を車内のディスプレイに出力し、運転者がディスプレイ上にある駐車スペースの4隅、あるいは、駐車スペース入口の2隅をタッチペンで指示すると、駐車スペースまで自動走行するものである。

以降に、提案した駐車スペースの測量、走行軌跡の算出の手法について述べる。

2.1 CCD カメラを用いた駐車スペース位置測量

図1に示すように、自動車の後車軸を X 軸、車体中心線を Y 軸にとり、駐車場平面に自動車を基準とした X - Y 座標をとる。車載 CCD カメラによって X - Y 座標平面を撮影した撮像は、車載ディスプレイに図2のように表示される。この撮像は図1の灰色で塗られた台形状の範囲に対応しており、 X' - Y' 座標とおくことにする。

この X - Y 座標と X' - Y' 座標の関係を求める、提案したカメラキャリブレーションの手法を以降に示す。

2.1.1 CCD カメラを用いた測量方法

非線形レンズひずみのない理想カメラ (ピンホール

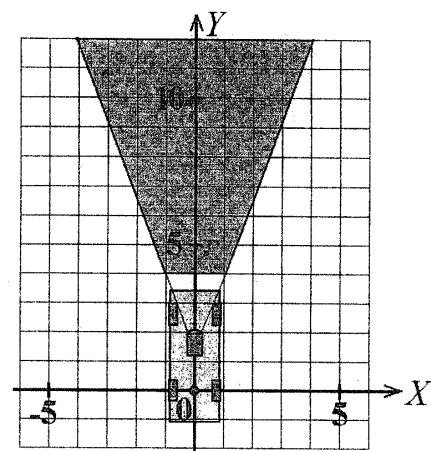


図1 「自動車を基準とした実際の位置: X - Y 座標」に対する「CCD カメラ画像: X' - Y' 座標」の関係
Fig.1 Relation with “the CCD camera image: the X' - Y' coordinate” to “the actual position on the basis of a vehicle: the X - Y coordinate”.

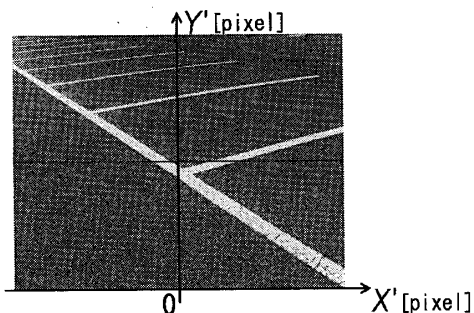


図 2 CCD カメラによる入力画像のイメージ
Fig. 2 The CCD camera image.

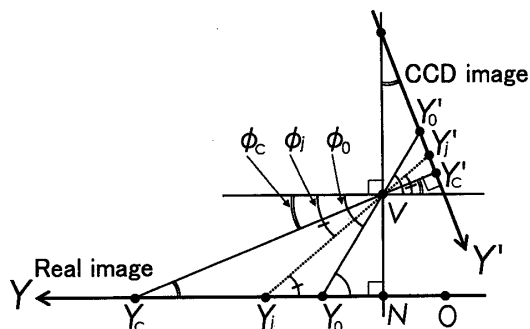


図 4 カメラのモデル (Y 軸成分)
Fig. 4 Camera model (Y-axis ingredient).

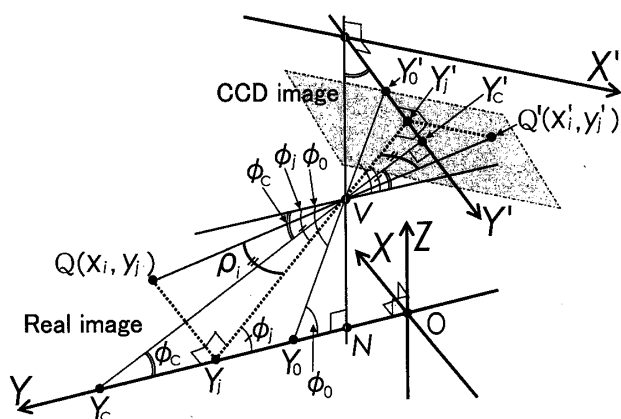


図 3 カメラのモデル
Fig. 3 Camera model.

カメラ) を想定し, 図 3 のようなカメラモデルを考える.

図 1 に従い自動車後車軸中心を原点 O として, 対象平面 (水平が保たれた地面) に X - Y 座標をとる. 投影中心点を V とおき, この点 V を通る CCD 面への撮像面を X' - Y' 座標とおく. X - Y 座標にある未知の点を $Q(x_i, y_j)$, V を通り X' - Y' 座標に投影される点を $Q'(x'_i, y'_i)$ とおく.

この点 Q' の画素点の座標から Q の座標を求める計算方法を以下に示す.

(1) Y 成分の計算方法

まず, 図 4 のように Y 成分のみ考える. 実際の路面上に, 自動車の後車軸中心点から車体中心線延長線上に直線を引き Y 軸とする.

点 V から垂直下の Y 軸上の点を N , レンズ光軸と Y 軸との交点を Y_c , Y_c が点 V を通り撮像面である Y' 軸上に投影される点を Y'_c とおく. 点 V から見た水平面に対するレンズ光軸の俯角を ϕ_c , 地面から点 V までの高さを \overline{VN} , 点 N から点 Y_c までの距離を $\overline{Y_cN}$ とおくと, 以下の関係式が成り立ち, \overline{VN} ,

及び, $\overline{Y_cN}$ をあらかじめ計測することにより, 俯角 ϕ_c が分かる.

$$\phi_c = \tan^{-1} \frac{\overline{VN}}{\overline{Y_cN}} \quad (1)$$

撮像面における Y' 軸上の最下点を Y'_0 とおき, この点に映る Y 軸上の点 Y_0 を考える. 点 V から見た水平面に対する点 Y_0 への俯角を ϕ_0 , 点 N から点 Y_0 までの距離を $\overline{Y_0N}$ とおき, この $\overline{Y_0N}$ を計測して以下の式に与え ϕ_0 を求める.

$$\phi_0 = \tan^{-1} \frac{\overline{VN}}{\overline{Y_0N}} \quad (2)$$

続いて, Y 軸上の任意の点 Y_j について, 撮像面の Y' 軸上の画素点 Y'_j から $\overline{Y'_jN}$ を求めることを考える. 点 V から点 Y'_c までの距離を $\overline{Y'_cV}$, 点 Y'_0 から Y'_c までの距離を $\overline{Y'_cY'_0}$ とおき, 以下の式に, 式 (1), 式 (2) の結果を代入し $\overline{Y'_cV}$ を求める.

$$\overline{Y'_cV} = \frac{\overline{Y'_cY'_0}}{\tan(\phi_0 - \phi_c)} \quad (3)$$

点 V から見た水平面に対する点 Y_j への俯角を ϕ_j , 画素点 Y'_c から Y'_j までの距離を $\overline{Y'_jY'_c}$ とおき, $\angle Y'_cVY'_j$ は $\phi_c - \phi_j$ となるので, 以下の式のような関係がある.

$$\phi_j = \phi_c - \tan^{-1} \frac{\overline{Y'_jY'_c}}{\overline{Y'_cV}} \quad (4)$$

以下の式に式 (4) の結果を代入して $\overline{Y'_jN}$ を求める.

$$\overline{Y'_jN} = \frac{\overline{VN}}{\tan \phi_j} \quad (5)$$

(2) X 成分の計算方法

X - Y 座標上の点 $Q(x_i, y_j)$ において、 Y 成分 y_j については、上記 (1) の計算方法に従い点 Q' の Y' 成分 y'_j の値から求めることができる。 X 成分 x_j については、 x'_j と y'_j の 2 変数を考慮する必要がある。

点 V から Y_j までの距離を $\overline{Y_jV}$ とおき、以下の式に式 (4) の結果を代入して求める。

$$\overline{Y_jV} = \frac{\overline{VN}}{\sin \phi_j} \quad (6)$$

また、点 V から Y'_j までの距離を $\overline{Y'_jV}$ とおき、以下の式に式 (1)、式 (4) の結果を代入して求める。

$$\overline{Y'_jV} = \frac{\overline{Y'_jV}}{\cos(\phi_C - \phi_j)} \quad (7)$$

点 Y'_j から Q' までの距離を $\overline{Q'Y'_j}$ 、 Y_j から Q までの距離を $\overline{QY_j}$ とおき、 X と X' は平行で $\triangle VY_jQ$ と $\triangle VY'_jQ'$ は相似であるから、相似の比から以下の式で $\overline{QY_j}$ を求める。

$$\overline{QY_j} = \overline{Q'Y'_j} \times \frac{\overline{Y_jV}}{\overline{Y'_jV}} \quad (8)$$

以上に示したように、あらかじめ、 \overline{VN} 、 $\overline{Y'_jN}$ 、 $\overline{Y_0N}$ を測定しておけば、撮像面上の点 Q' へ投影されている実際の点 Q を求めることが可能となる。

なお、 X - Y 座標は後車軸中心を原点 O としているので、原点 O から点 N までの距離を \overline{NO} とおき、この長さを計測し Y 成分 y_j に加算する。

2.1.2 CCD カメラを用いた測量

提案した測量システムは、ディスプレイに表示された CCD カメラ画像 (X' - Y' 座標) において、運転者が駐車スペースの 4 隅、あるいは、入口の 2 隅をタッチペンで指示すると、これに対応する駐車場位置 (X - Y 座標) を 2.1.1 の方法により求めるものである。

ここで、車内でタッチペンを使用する都合上、机上でマウスを操作する場合と違い、指示入力に誤差が生じやすい (誤差については 3.1.5 に示す)。

また、CCD カメラ画像の精度を上げるにはなるべく高い画素数が要求されるが、ディスプレイにおいて表示できるドット数には限度があるため、(タッチパネルのスペックを 3.1.3 に示す) CCD カメラ画像を圧縮して表示しなければならず表示精度が劣化する。

そこで、タッチペンによる入力誤差と、ディスプレイ表示サイズの制約による誤差を軽減するために、表示サイズを 2 種類考え、全景を表示するサイズにて指

示すべき点を仮選択し、仮選択された点を中心に拡大表示して仮選択された点の修正を行うように、ソフトウェアを工夫した。

この 2 種類の表示サイズについて以下に記す。

【標準表示】 CCD カメラ画像を液晶タッチパネル全景に表示するために、必要に応じてピクセルサイズを縮小して表示する (画面下側に【標準表示】と表示)。

【拡大表示】 液晶タッチパネルに仮選択された点の周辺を高解像度で表示するために、CCD カメラ画像のピクセルサイズに拡大して表示する (画面下側に【拡大表示】と表示)。拡大表示では、1 ドット当たり 0.25 ピクセルとなるように 400% とする (この拡大率は、ディスプレイに表示できるサイズに対し画像の見やすさと操作性を加味して経験的に決めた)。

駐車スペースの 4 隅 (右前、左前、右後、左後) について、以下のように操作する。

操作 1. (仮選択) 【標準表示】の液晶タッチパネル画面において、『駐車スペース右前の位置を選択してください』と表示されており、タッチペンで画面上の指定すべき位置を押すと、押された位置に十字ポインタが表示される。画面下側に表示されている【仮確定】ボタンを押すまで十字ポインタの位置を選択し直すことができる。

操作 2. (確定選択) タッチペンで【仮確定】ボタンを押すと、【拡大表示】に切り換わり、画面上の指定すべき点を押すことにより、十字ポインタの位置を選択しなおすことができる。選択できたら画面下側に表示されている【確定】ボタンを押す。

操作 1~2 を同様に繰り返して、4 隅すべてを選択するか、あるいは、右後、左後の選択においては、画面下側に【省略】ボタンが表示されているので省略して 2 隅のみ選択することもできる。

2.2 車庫入れ走行における走行軌跡の計算方法

自動車の走行軌跡の計算方法と、車庫入れ走行において必要とされる最小旋回半径について以降に述べる。

2.2.1 自動車の走行軌跡の計算方法

自動車の走行軌跡は以下に示すようなステアリング機構によって決定される。4WS 機構を除く 4 輪自動車の多くは図 5 に示すような、アッカーマン・ジャント式旋回 (Ackerman-Jeantaud steering mechanism) [16]~[18] と呼ばれる機構に従い、前内輪角を前外輪角よりも大きくとることにより、4 輪すべてが後車軸 (図 5 の Rear wheel Axis) 上にある点 O を中心点として旋回する。前外輪、前内輪、後外輪、後

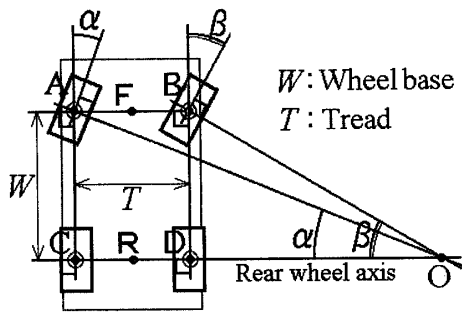


図5 アッカーマン・ジャント式旋回の機構
Fig.5 Ackerman steering mechanism.

内輪をそれぞれ A, B, C, D とおき, 輪距 (Tread) を T, 軸距 (Wheel base) を W とおく. 前外輪角を α , 前内輪角を β とおき, 図5より, α と β の関係は以下のように求める.

$$\tan \alpha = \frac{\overline{AC}}{\overline{CO}} = \frac{W}{\overline{CO}} = \frac{W}{T + \overline{DO}}$$

$$\tan \beta = \frac{\overline{BD}}{\overline{DO}} = \frac{W}{\overline{DO}}$$

上の2式より \overline{DO} を消去して,

$$\frac{1}{\tan \alpha} = \frac{1}{\tan \beta} + \frac{T}{W} \tag{9}$$

式(9)の関係をグラフで表すと図6のようになり, 前輪の切れ角を大きくとるにつれて, 前内輪角 β が前外輪角 α に比べより大きくなる特性が確認できる.

一般道路や高速道路において通常走行で旋回を行う場合, 車体重量を M [kg], 重力加速度を g [m/s²], 速度を V [m/s], 車体重心における旋回半径を K [m] とおくと, 重心位置に $M/g \cdot V^2/K$ [kg] で与えられる遠心力が作用し, 車体の旋回状態を保つため遠心力を打ち消そうとするコーナリングフォースと呼ばれる反力が働き, タイヤに横滑りが発生する. このため旋回中心が後車軸の延長線より前方に移動する. また, 通常速度による旋回運動での旋回半径は車両寸法に比べ著しく大きいので, 左右各輪はそれぞれ同一の運動をなすものとみなせ, 一般に二輪車として近似される. その他, 通常の道路での操行においては方向安定性を保つために, 突風, 路面の不整などの外乱といった複雑な要素を考慮する必要がある [16], [17].

一方, 本研究で対象としている車庫入れは, 極低速度で旋回するので遠心力の影響が無視できるため, 遠心力とつり合うコーナリングフォースも無視できる. したがって, 各車輪が横滑りなしに旋回すると考えら

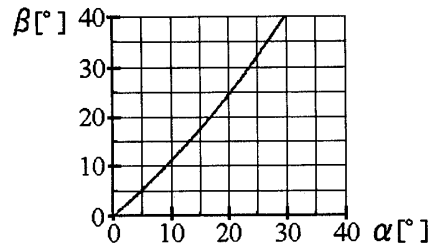


図6 アッカーマン理想曲線
Fig.6 Ackerman ideal curve.

れ, 理想的なアッカーマン・ジャント式旋回に基づき走行軌跡を計算することができる.

2.2.2 自動車の最小旋回半径

車庫入れを行う際には, 旋回半径が最小となるように, ステアリングの操舵を最大にとることが多い. この最小旋回半径は自動車の仕様により様々である.

図5において, 後車軸の中心 (CD の中点) を R, 前車軸の中心 (AB の中点) を F とおく. この R と F は, 自動車の自動走行を行う研究で基準点に用いられることが多い. 一般的に自動車の最小旋回半径は, 前外輪 A における旋回半径 \overline{AO} の最小値を指している. また, 点 R, F の旋回半径 \overline{RO} , \overline{FO} は以下のように求められる.

$$\overline{RO} = \overline{CO} - \frac{T}{2}, \quad \overline{CO} = \sqrt{\overline{AO}^2 - W^2}$$

$$\overline{FO} = \sqrt{\overline{RO}^2 + W^2}$$

1800 cc クラスの小型乗用車における標準値として, 最小旋回半径 $\overline{AO}_{min} = 5.4$ [m], 軸距 $W = 2.665$ [m], 輪距 $T = 1.48$ [m] を与えると, 上の式から, $\overline{CO}_{min} \cong 4.70$ [m], $\overline{RO}_{min} \cong 3.96$ [m], $\overline{FO}_{min} \cong 4.77$ [m] と求まる. また, このときの前外輪角 α は以下の式のようにになる.

$$\sin \alpha = \frac{\overline{AC}}{\overline{AO}} = \frac{W}{\overline{AO}} \tag{10}$$

式(9), (10)より, 前外輪最大角 $\alpha_{max} \cong 29.60$ [°], 前内輪最大角 $\beta_{max} \cong 39.69$ [°] と求まる.

2.3 走行経路決定

本研究では, 車庫入れの方法として, 図7(a)前進, (b)切返し の2パターンを想定する.

まず, 図7に実線で示すような車庫内へ進入する走行軌跡を最終車庫入れ動作と呼ぶことにし, この動作は組込みルールで実現するものとする.

また, 図7に破線で示すような走行軌跡は, 最終車

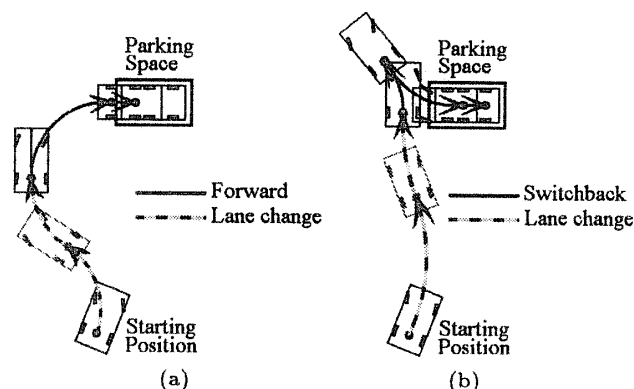


図 7 走行経路 (a) 前進, (b) 切返し
 Fig. 7 Method of the automatic control for the parking. (a) Forward, (b) Switchback.

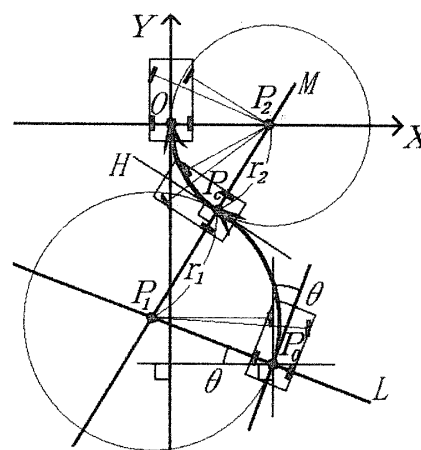


図 8 幅寄せモデル
 Fig. 8 Model of the lean change.

庫入れ動作を開始する位置まで位置合せを行うための走行であり、幅寄せにより実現するものとする。

このような、幅寄せと最終車庫入れ動作の一連の走行を、測量した位置関係に基づいて以下のステップにより実行する。

Step.1 運転者による車庫入れパターンを選択

前進、切返ししの二つの車庫入れパターンのうち、運転者にいずれか一つを選択させる。

Step.2 最終車庫入れ動作開始位置までの幅寄せ

選択された車庫入れパターンに対応した最終車庫入れ動作開始位置まで幅寄せにより走行する。この幅寄せの方法は 2.3.1~2.3.3 に示す。ただし、前進の場合は駐車スペースまでの距離が必要であるため、現在位置と駐車スペースの位置が近い場合は、自動的に切返しを選択する。

Step.3 最終車庫入れ動作

選択された走行パターンに基づき駐車位置 (Parking Space) まで走行を行う。この最終車庫入れ動作の詳細は 2.3.4 に示す。

2.3.1 幅寄せのモデルを用いた幅寄せ方法

2.3 Step.2 の幅寄せを実現するために提案した幅寄せモデルについて述べる。

前進走行における左側への幅寄せは図 8 のように模式化でき、この図をもとに幅寄せをモデル化する。自動車の初期位置として、後車軸中心点を $P_0(x_0, y_0)$ にとり、車体中心線を Y 軸に対し θ [°] 傾くように与える。幅寄せの完了位置 (最終車庫入れ動作の開始位置) は、後車軸中心点を原点 $O(0, 0)$ にとるものとし、車体中心線を Y 軸に一致させる。

このときの幅寄せの軌跡は、図 8 の矢印のように、

初期位置から左旋回と右旋回を伴い幅寄せの完了位置まで到達する。左旋回は、後車軸線 L 上にある旋回中心点 $P_1(x_1, y_1)$ を中心とする半径 r_1 の円となり、右旋回は、後車軸線 M と X 軸の交点 $P_2(x_2, 0)$ を中心とする半径 r_2 の円となる。二つの円はそれぞれの円の法線 H 上の点 $P_c(x_c, y_c)$ で交わるので、点 P_1 、点 P_c 、点 P_2 の 3 点は直線 M 上に並ぶ。この関係を満たす点 P_1 と点 P_2 が存在するとき、与えられた初期位置から目的の位置までの幅寄せが実現できる。

図 8 の r_1 と r_2 の関係から以下の等式を導く。

$$\begin{aligned} \|P_1 - P_2\| &= \|P_2 - O\| + \|P_1 - P_0\| \text{ より,} \\ \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - 0)^2} &= \sqrt{(x_2 - 0)^2 + (0 - 0)^2} \\ &+ \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

点 $P_0(x_0, y_0)$ と点 $P_1(x_1, y_1)$ から y_1 は以下のように表せる。

$$y_1 = y_0 + (x_0 - x_1) \times \tan \theta \quad (12)$$

式 (12), (11) より,

$$\begin{aligned} \text{左辺} &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_0 + (x_0 - x_1))^2} \\ \text{右辺} &= \sqrt{x_2^2} + \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - y_0^2} \end{aligned}$$

後車軸中心点の最小旋回半径を S [m] とおき、 $x_1 \leq x_0 - S \times \cos \theta$, $x_2 \geq S$ の範囲において、上記の式を満たす x_1 と x_2 の組を求める。

また、交点 $P_c(x_c, y_c)$ は以下の式で求まる。

$$(x_c, y_c) = \frac{(x_2 - x_1, y_2 - y_1)}{r_1 + r_2} \times r_1 + (x_1, y_1) \quad (13)$$

このときの、前外輪角 α は旋回半径を r とすると、図 5 より以下の式で求まる。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{W}{r + T/2}$$

なお、二つの円が接する組合せは多数存在するが、二つの円の半径の差が極端に大きくなると、乗車している人間にとって快適性が失われると考え、求まった組合せのうち二つの円の半径が最も近いものを採用することにす。

また、駐車スペースまでの距離が十分でないために幅寄せが不可能な場合は、組合せは見つからないので、その際には、後退走行するように運転者に指示するものとする。

2.3.2 ファジー理論を用いた幅寄せ方法

人間の直感的な知識を利用したファジー制御 [19], [20] による幅寄せ方法について述べる。

図 9 に示すように、幅寄せ完了位置における車体中心線を目標線 (Target line) とし、この目標線に追従するように自動車の幅寄せを行う。前輪軸中心から前輪軸線と目標線の交点までの距離を誤差 FD とおき、後輪軸中心から後輪軸線と目標線の交点までの距離を誤差 RD とおく。なお、目標線より右側に位置する場合を正にとるものとする。これらの誤差が 0 になるようにファジー制御器を用いて操舵量 θ を決定する。

ファジー制御器の概略は、図 10 のように 2 入力・1 出力のシステムを考え、各入力・出力の内容は以下のようになる。

- 入力 1 (前輪軸中心と目標線との誤差):
目標線から右方向のずれを正にとる。
 $Input\ 1 = FD$, 入力範囲は $-1.0 \sim 1.0$ [m]
- 入力 2 (車軸と目標線との平行度):
目標線から時計回りの車軸のずれを正にとる。
 $Input\ 2 = FD - RD$, 入力範囲は $-1.0 \sim 1.0$ [m]

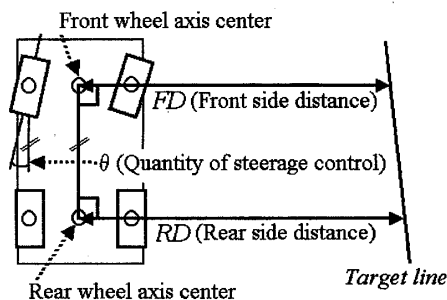


図 9 目標線 (Target line) との位置関係
Fig. 9 Information for the attitude control of the car.

- 出力 (前外輪操舵量 θ):

$Output$ の出力範囲は、0 のとき直進、 -1.0 (1.0) のとき左 (右) に最大に操舵する。

ファジーメンバシップ関数は、図 11 に示すように三角形の関数とし、 $-1.0 \sim 1.0$ の値に対応して七つのラベル {ML, MM, MS, ZR, PS, PM, PL} を用いる。ラベルは 2 文字からなり、1 文字目は符号 (負: Minus, 正: Plus), 2 文字目は絶対値の大きさ (大: Large, 中: Middle, 小: Small), ZR はゼロを表す。

人間のハンドル操作の知識をファジールールで記述すると、表 1 のルールマトリックスのようになる。例えば、表 1 右上の部分を用いて if-then ルールで表すと、

if $Input\ 1 = ML$ & $Input\ 2 = PL$ then $Output = MS$ となり、このルールは、「もし、前輪軸中心が左に大きくずれていて、かつ、車軸が右に大きくずれているならば、左に小さく操舵する」といった操舵の規則を表している。

車体の中心が左に大きくずれていても、既に進行方向がずれを修正する方向に向いているならば、オーバ

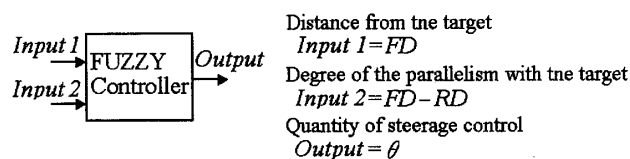


図 10 目標線 (Target line) からの誤差を修正するファジー制御器
Fig. 10 Fuzzy controller for the attitude control of the car.

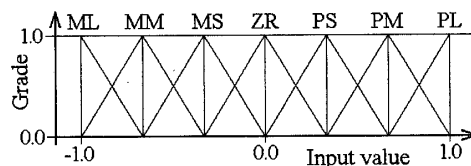


図 11 ファジーメンバシップ関数
Fig. 11 Fuzzy membership function.

表 1 操舵に用いるファジールール
Table 1 Fuzzy rules for steering.

Output		Input 2						
		ML	MM	MS	ZR	PS	PM	PL
Input 1	ML	PL	PL	PL	PM	PS	ZR	MS
	MM	PL	PL	PM	PS	ZR	MS	MM
	MS	PL	PM	PS	ZR	MS	MM	ML
	ZR	PM	PS	ZR	ZR	ZR	MS	MM
	PS	PL	PM	PS	ZR	MS	MM	ML
	PM	PM	PS	ZR	MS	MM	ML	ML
	PL	PS	ZR	MS	MM	ML	ML	ML

ハンクをなくすために、緩和する方向に修正する性質があり、表 1 のルール群は人間の運転者が幅寄せを行う際に行っている無駄な動きが少ない判断であり、複雑な非線形な動作となっている。

これらのルールは、自動車の幅寄せシミュレーションソフトを作成して、実験により獲得した。ソフトの概要は、目標線に対して自動車がある初期位置に配置し、初期位置には上記の表に基づいた全組合せを与えた。運転経験者がパソコンのゲームポートに接続されたゲーム用のハンドルを操作して、自動車を目標線に幅寄せし、このときの操作を記録してルール化した。

また、目標線への追従性を調整するためにシミュレーションを行いながら、入力 1 (前輪軸中心と目標線との誤差)、入力 2 (車軸と目標線との平行度) の二つの入力のゲイン調整、すなわち、入力 1 のゲインを大きくすると前輪軸中心位置を目標線に近づける作用が大きくなり、入力 2 のゲインを大きくすると車軸と目標線との並行性を保つ作用が大きくなり、これらのゲインのバランスをとる必要がある。

また、入力側の七つのラベル {ML, MM, MS, ZR, PS, PM, PL} について、各ラベルに対応する三角形関数の頂点位置の調整をすることにより、入力値のラベルへの適合度を調整することができる。つまり、七つのラベルの頂点位置が均等な場合は線形的な対応となり、不均等な場合は非線形な対応になる。ZR 付近に密になるようにとると、ZR 付近の誤差を敏感に反応するようになり、ZR 付近で疎になるようにとると、ある程度誤差が大きくなるまで反応を抑えることができる。これらの調整を行うために、様々な初期値による幅寄せの実験を行い、ゲイン調整とラベル位置の調整を行うものとする。

なお、走行中の位置は制御量に基づく移動量から把握できるものとする。

2.3.3 幅寄せ方法の選択

2.3.1 は幅寄せが辛うじて可能となる狭いスペースにおいても、正確な走行軌跡を求めることができる。解の組合せについては、半径を最小旋回半径から 1 [cm] 刻みで増大させて探索していくと、一般的な幅寄せを行う場合には、おおよその値で、解の数は数百個、**2.3.1** の計算繰返し数は数十万～数百万回となり、2 [GHz] の計算機で計算すると最小で 0.1 [秒]、最大で 9 [秒] 要する。

2.3.2 は、最小半径からなる組合せのように、限られたスペースで幅寄せを行う場合は誤差を生じてしま

うが、これよりも縦方向に 1 メートル程度のスペースに余裕があれば、正確な幅寄せを行うことができる。また、ファジールールの演算負荷は幅寄せモデルの計算と比較すると非常に小さい。

したがって、**2.3 Step.2** では二つの幅寄せ方法について以下の手順に従い選択し、実際の幅寄せ走行に適用するものとする。

(1) 駐車スペースの位置まで **2.3.2** の方法で走行シミュレーションを行い誤差を調べる。

(2) 誤差がなければ、**2.3.2** の方法を採用する。

(3) 誤差があれば、**2.3.1** の方法で採用する。

2.3.4 組込みルールによる最終車庫入れ動作

2.3 Step.3 について述べる。

駐車スペースに関する条件として、スーパーなどの一般的な駐車場を参考にして、1 台当りの駐車スペースのサイズを全長 5.0 [m]、全幅 2.2 [m] とし、駐車スペース前面の道幅は 5.0 [m] とした。この条件を前提に、最小の走行軌跡をとる最終車庫入れ動作を行うための、組込みルールを以降に示す。

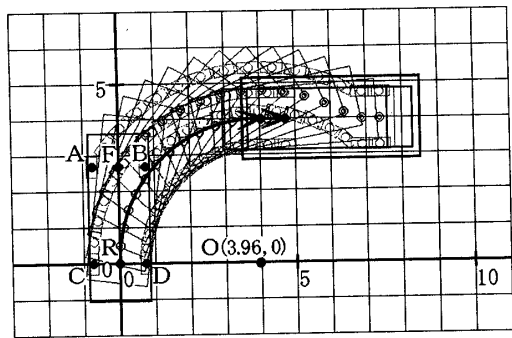
最終車庫入れ動作においては、軌跡の形状を可変にできることが望ましいが、車庫入れにおいては最小旋回半径で走行することが多く、以下の走行軌跡に該当しないものは車庫入れが不可能であるか、あるいは、より多くの切返しが必要になる場合が多い。今回は上記の条件よりも狭いスペースにおける走行は対象外とした。

(a) 前進による最終車庫入れ動作

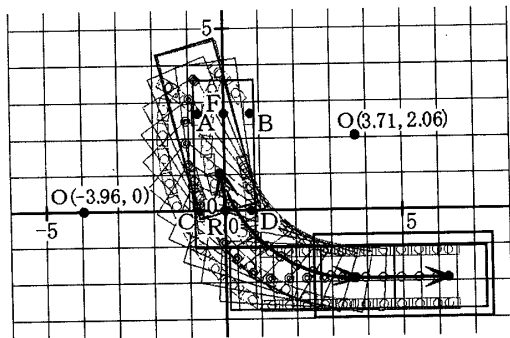
前進による車庫入れの走行軌跡は図 12 (a) のようになる。右方向に操舵を最大にとり右旋回で 6.252 [m] 前進し、車体中心線と駐車スペース長辺が平行に達した後、直進で 0.754 [m] 前進する。なお、移動距離は後車軸中心位置で計算するものとする。図では、最終車庫入れ動作の開始位置を原点にとる。参考までに旋回中心点 O を示す。

(b) 切返しによる最終車庫入れ動作

移動空間を小さくするために、自動車をわずかに駐車位置と反対に向けてから切返しする場合が多い。この点を考慮した切返しによる走行軌跡を図 12 (b) に示す。左方向に操舵を最大にとり左旋回で 1.042 [m] 前進し、車体中心線と駐車スペース長辺が 75 [°] に達した後、切返し動作に入り、右方向に操舵角を最大にとり、右旋回で 5.209 [m] 後進し、車体中心線と駐車スペース長辺が平行に達した後、直進で 2.556 [m] 後進する。



(a)



(b)

図 12 車庫入れの最短走行軌跡 (a) 前進, (b) 切返し
Fig. 12 Trace of the minimum move to the parking space. (a) Forward, (b) Switchback.

3. 実 験

CCD カメラによる駐車スペースの測量を実際に行い、得られた位置データをもとにして計算機シミュレーションによる車庫入れの実験を行った。

3.1 CCD カメラを用いた駐車スペース位置測量

自動車の天板に CCD カメラを設置して駐車スペースの測量を行った。

3.1.1 CCD カメラの自動車への設置

CCD カメラを自動車のルームミラー真上の天板（車体中心線上で後車軸から 2[m] 前方，地面から 1.4[m] の高さ）に設定，CCD カメラを正面に向けて水平線に対し俯角が $20[^\circ]$ となるように水準器付分度器を用い設置した。水準器を用いても正確に設置するのは難しいので，カメラ画像を用いて，2.1.2 の計算方法に基づいて正確な角度を求める。

3.1.2 CCD カメラのスペック

後方確認用に用いられる車載用の小型・軽量タイプではなく，計測を行うことを前提にして収差の少ないカメラを使用した。

- CCD 解像度：168 万 (1,488 × 1,128) ピクセル

- レンズ：LEICA DICOMAR
- レンズ構成：9 群 13 枚，F：1.6，
- 焦点距離 f ：2.85 mm (35 mm 換算 40 mm)
- 画角： $45^\circ 88' \times 35^\circ 58'$ (対角 $55^\circ 92'$)

3.1.3 タッチパネルのスペック

タッチパネルは 15 インチ液晶を用い，スペックは以下のとおりである。

- 表示面積：304 × 228 [mm]
- 解像度：1,024 × 768 [ドット]
- 画素ピッチ：0.297 × 0.297 [mm]
- 入力精度：1,024 × 768 [ドット]

カーナビゲーションシステムのタッチパネルを想定して，パネル面の 1/4 の部分，152 × 114 [mm] のサイズのみ使用した。

3.1.4 タッチパネルの精度

CCD カメラから得られる画素数は 3.1.2 に示したように 1,488 × 1,128 ピクセルである。カーナビゲーションシステムを想定したタッチパネルは，表示面積 152 × 114 [mm] (505 × 383 ドット) であり，CCD カメラで撮影される全景を表示するには 34% に縮小して表示する必要がある，このときの分解能は 1 ドット当り約 2.95 ピクセルとなり分解能が劣化している。

そこで，タッチパネルへの表示精度を向上させるために，2.1.2 に示したように，34% に縮小した全景画像にて座標の指示の仮選択を行った後，確定選択においては，仮選択された座標周辺を 400% に拡大表示することで，分解能は 1 ドット当り 0.25 ピクセルと高精度化し，選択された点を修正する方法をとった。

このタッチパネルの精度に伴うタッチペンによる入力誤差について以降に述べる。

3.1.5 タッチペンによる入力誤差

このタッチパネルにおいて，画面上にランダムに点を表示しタッチペンで入力させて誤差分布を調べた。100 点について正解からのずれを調べた結果，分布は表 2 のようになった。正確に入力できた率が 45%，1 グリッド距離の誤差率が 22%，2 グリッド距離の誤差

表 2 タッチペンによる入力誤差分布
Table 2 Input error distribution in touch pen.

frequency	error X' [dot]					
	-2	-1	0	1	2	
error Y' [dot]	2	0	3	3	1	0
	1	1	10	16	7	1
	0	1	5	45	0	2
	-1	0	3	1	0	0
	-2	1	0	0	0	0

が26%, 3グリッド距離の誤差が6%, 4グリッド距離の誤差が1%となった。5グリッド距離以上は0%となった。

ただし、同様の点を、表示分解能を高め入力誤差を防ぐために提案した、2.1.2で示した入力方法に従い400%に拡大表示し、100回タッチペンによる入力実験を行った結果、誤差率は0%となり、拡大表示による入力誤差の防止が確認できた。

3.1.6 CCDカメラを用いた測量

2.1.1に示した方法に基づき駐車場の座標を測量する。図2のように画面下端中央に原点をとり、pixel値で与えられる X' - Y' 座標をとる。画面上端では $Y' = 1,128$ [pixel]、画面左端、右端ではそれぞれ、 $X' = -744, 744$ [pixel]である。

あらかじめ、カメラ設置状態に関するパラメータとして、 $\overline{N_0} = 2$ [m]、 $\overline{VN} = 1.4$ [m]、 $\overline{Y'_C} = 564$ [pixel]、 $\overline{Y_C N} = 3.846$ [m]、 $\overline{Y'_0} = 0$ [pixel]、 $\overline{Y_0 N} = 1.957$ [m]のように測定し、カメラ光軸の正確な俯角は $\phi_C = 20.00$ [°]と求まる。パラメータが定まれば、CCDカメラ画像上の任意の点 Q' (705, 995) pixelから、実際の点 Q (3.439, 11.992) mが求まる。

図13(b)のように、ディスプレイ上に出力された駐車スペースである4隅をタッチペンで指示した結果、この4隅の X - Y 座標の値(単位m)は、右前隅(-2.5, 10.3)、左前隅(-1.4, 8.4)、右後隅(1.8, 12.9)、左後隅(3.0, 10.9)となり、誤差 ± 5 [cm]以内で測量できた。

通常、車庫入れを行う際には、駐車場入口に対し平行に近い状態で近づいてくることが多い。このとき、カメラの視野が狭いために入口の2隅しか測量できない場合も多いと考えられる。この場合でも、ディスプレイ上に表示された駐車スペース入口の2隅さえ分かれば、残り2隅を計算により求めることは可能であ

る。図13(a)のように2隅のみをタッチペンで指示した結果、右前隅(1.2, 10.6)、左前隅(1.6, 8.3)を誤差 ± 5 [cm]以内で測量でき、この2点の座標から、駐車場の短辺を2.2 [m]、長辺を5 [m]とする場合、右後隅(6.1, 11.5)、左後隅(6.5, 9.2)のように求めることができる。

3.1.7 CCDカメラを用いた測量の精度

3.1.6に示した実験環境において、CCD面に投影される像についての測量精度を2.1.1の計算式から求める。

例えば、CCDカメラの垂直下の点 N を基準に $Y = 2$ [m]となる位置の測量については、 X の位置にかかわらず、CCD画像上で Y' の値が1ピクセルずれると Y の値は約2 [mm]、 X' の値が1ピクセルずれると約1 [mm]変化する。また、 $Y = 12$ [m]となる位置の測量については、 Y' の値が1ピクセルずれると Y の値は約5 [cm]、 X' の値が1ピクセルずれると約6 [mm]変化する。

このように、画面上側部ほど精度が落ちるため、1ピクセル当り5 [cm]程度の精度が得られる $Y = 12$ [m]までを許容範囲とした。

ここで、実際の測量における精度を確認するために、3.1.6で示したように4隅を選択する方法で、50件について実験を検証した。巻尺などを用いて計測した結果と比較すると、いずれも1ドットずれた場合の理論値よりも誤差が約18%大きくなり、 $Y = 12$ [m]の付近において、最大で Y 方向に6 cmの誤差を生じた。これは、路面などの凹凸や水平度、タイヤとの設置状態が原因となっていると考えられる。

ただし、白線には15 [cm]ほどの幅があるため、多くの場合、白線の内側を選択することによって誤差を枠内に抑えられる場合が多い。

3.2 車庫入れシミュレーション

3.1.6で測量された駐車スペースの位置関係に基づいて、車庫入れのシミュレーション実験を行った。また、幅寄せ動作について検証を行った。

3.2.1 車庫入れシミュレーション

図13(a)の測量結果を用いた前進車庫入れのシミュレーション結果を図14(a)、図13(b)の測量結果を用いた切返し車庫入れのシミュレーション結果を図14(b)に示す。

図14(a)に示すように、前進のみの車庫入れパターンの場合、測量位置が駐車スペースまである程度の距離を必要とするが、図14(b)に示すように、切返し

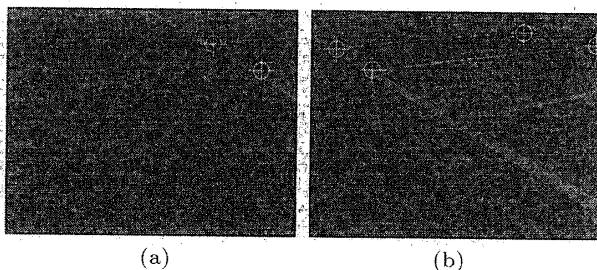


図13 駐車位置の指定 (a) 入口2隅, (b) 4隅
Fig. 13 Instructions of positions. (a) Two positions, (b) Four positions.

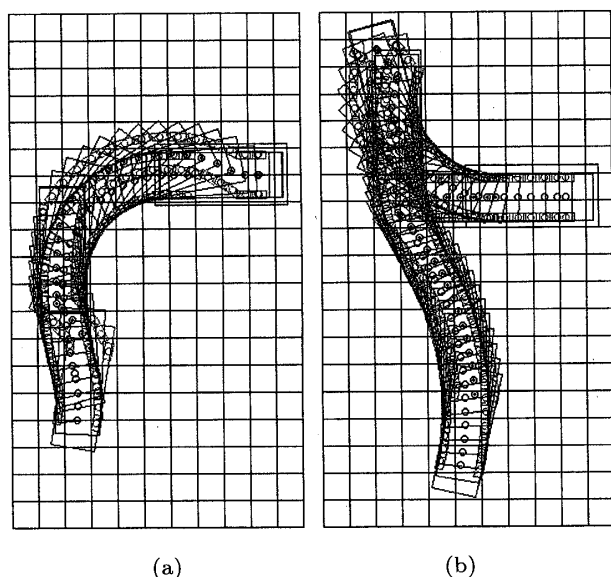


図 14 車庫入れシミュレーション (a) 前進, (b) 切返し
Fig. 14 Experimental result of the automatic control for the parking. (a) Forward, (b) Switch-back.

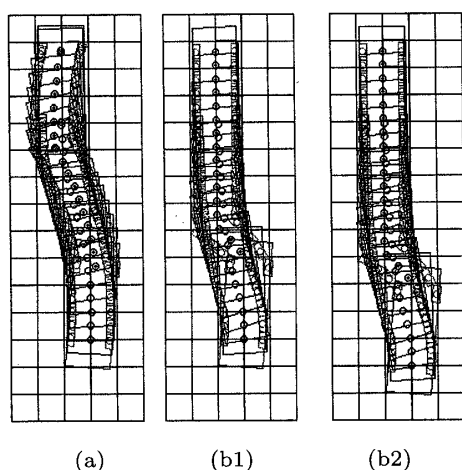


図 15 幅寄せシミュレーション (a) 幅寄せモデル, (b1) ファジー制御 1, (b2) ファジー制御 2
Fig. 15 Experimental result of the lane change. (a) Lane change model, (b1) Fuzzy control 1, (b2) Fuzzy control 2.

による車庫入れの場合は、一度切り返してから後進で戻ってくるので、測量位置が駐車スペースまでかなり接近しているケースに対しても実現可能と考えられる。どちらの場合においても、滑らかな走行経路で目標位置との誤差 0 で車庫入れを行うことができた。

3.2.2 幅寄せの検証

幅寄せモデルを用いた幅寄せとファジー制御を用いた幅寄せのシミュレーション比較結果を図 15 に示す。ここで、図 15 の (a) と (b1) は同一距離からの発進の

実験結果であるが、図 15 (a) の幅寄せモデルで幅寄せを行った場合は誤差 0 であるのに対し、図 15 (b1) のファジー制御の場合は誤差が $1.57 [^\circ]$ 生じた。

この理由は、今回用いたファジー理論による幅寄せにおいては、2.3.2 に記した、ゲイン調整やメンバーシップ関数の調整を行い、目標線への追従においてオーバーシュートを発生しない範囲内で調整を行った。このため、小さな誤差を直ちに修正するように作用はしない場合があり、わずかに誤差が生じたと考えられる。

ただし、図 15 (b2) のように幅寄せ位置までにある程度の距離がある場合は、ファジー制御においても十分に誤差を修正することができ誤差 0 で幅寄せが可能となった。

4. むすび

本システムでは、車載 CCD カメラから得られる画素点に対応する座標の測量を可能とすることができた。更に、測量された駐車スペースまでの走行経路を 2 分割し、幅寄せによる走行経路と前進・切返しの 2 パターンによる最終車庫入れの走行経路を算出し、シミュレーション実験により滑らかで誤差のない車庫入れが可能であることを確認できた。

ここで、幅寄せ走行において、幅寄せに要する距離が短い場合は、厳密な解を求めることが可能な幅寄せモデルを用いるのが有効であることが分かった。また、距離が長くなるにつれて幅寄せモデルでの経路候補の組合せが増大し計算時間がかかることを考慮すると、幅寄せ誤差を 0 にできる距離からはファジー制御を用いるのが有効であることが分かった。

今後、より現実的な車庫入れシステムを構築するために、駐車スペースの一部分が不可視であったり、予定した経路に障害物がある場合や、障害物が移動しながら接近してきた場合などを考慮する必要がある。

また、自宅の車庫など駐車スペースが限定されている場合は、運転者が駐車位置を指示する必要はないため、風景を手掛りに駐車スペースを自動判定して車庫入れすることを検討している。

謝辞 編集委員、査読委員の先生方から貴重な御教示を頂いた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 国土交通省道路局 ITS ホームページ,
<http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/index.html>
- [2] 小塚一宏, "ITS (高度道路交通システム) の国内外の動向," 豊田中央研究所 R&D レビュー, vol.33, no.3, pp.53-68,

Sept. 1998.

- [3] 織田利彦, “交通管制システムと ITS の活用による今後の展望,” 計測と制御, vol.40, no.3, pp.226-231, March 2001.
- [4] 国土交通省道路局 ITS ホームページ: AHS 実現へ向けて, <http://www.its.go.jp/ITS/j-html/index/indexAhs.html>
- [5] 金平 実, 定野 温, “運転操作補助に関する車両制御技術,” 計測と制御, vol.40, no.3, pp.214-219, March 2001.
- [6] 国土交通省道路局 ITS ホームページ: サブサービス 62. 駐車場の自動駐車, <http://www.its.go.jp/ITS/j-html/SAview/shousai/appendix/ssd/ss/ss062.htm>
- [7] D. Pomerleau and T. Jochem, “A rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering,” IEEE Expert, vol.11, no.2, pp.19-27, April 1996.
- [8] D.J. Kang, J.W. Choi, and I.S. Kweon, “Finding and tracking road lanes using line-snakes,” Proc. 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.189-194, Tokyo, Japan, Sept. 1996.
- [9] Y. Wang, D. Shen, and E.K. Teoh, “Lane detection using catmull-rom spline,” Proc. 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.51-57, Stuttgart, Germany, Oct. 1998.
- [10] 小森鉄平, 藤原幸広, 藤田政之, 内田健康, “ビジュアルサーボによる自動車の自動操舵,” 電学論 (C), vol.120-C, no.4, pp.501-506, April 2000.
- [11] 小平 実, 大友照彦, 田中 敦, 岩月正見, 大内隆夫, “ニューラルネットを用いた移動ロボット車の障害物回避走行制御,” 信学論 (D-II), vol.J79-D-II, no.1, pp.91-100, Jan. 1996.
- [12] 増田広司, 水谷麻美, 木村正博, “ITS 応用—自動運転の第一歩,” 東芝レビュー, vol.55, no.11, pp.23-26, Nov. 2000.
- [13] 畑中健一, 吉村明展, 熊本博文, 大見則親, 澤井孝典, “車載画像処理装置の開発,” SEI テクニカルレビュー, no.162, pp.90-93, March 2003.
- [14] 服部 進, 秋本圭一, 岡本 厚, 長谷川博幸, 井本治孝, “ターゲット場の多重撮影による基準点のない CCD カメラキャリブレーション,” 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.9, pp.1391-1400, Sept. 1999.
- [15] 秋本圭一, 服部 進, 井本治孝, “デジタル画像計測法を用いた精密工業計測,” 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1299-1309, July 2001.
- [16] 尾崎紀男, 自動車工学, 森北出版, 東京, 1972.
- [17] 下田 茂, 自動車工学, 共立出版, 東京, 1975.
- [18] 樋口健治, 自動車工学, 朝倉書店, 東京, 1980.
- [19] 廣田 薫 (編), ファジィ活用事例集, 工業調査会, 東京, 1991.
- [20] 日本ファジィ学会 (編), ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 東京, 1993.

(平成 15 年 4 月 30 日受付, 9 月 1 日再受付,
9 月 25 日最終原稿受付)



小越 咲子 (学生員)

平 8 金沢大・工・電気・情報卒. 同年 (株) アイ・オー・データ機器入社. 平 11 北陸先端大学院情報科学研究科博士前期課程了. 同年日立東北ソフトウェア (株) 入社. 平 13 金沢大大学院自然科学研究科博士後期課程入学. その間, 医療画像, 金融工学, データマイニングの研究に従事.



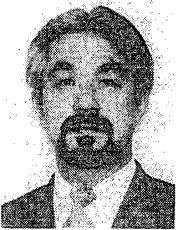
小越 康宏 (正員)

平 13 金沢大大学院自然科学研究科博士後期課程了. 博士 (工学). 同年富山大・工・知能情報工学科助手, 現在に至る. 平 3~6 (株) 新潟鐵工勤務, 平 8~9 (株) アイ・オー・データ機器勤務, 平 9~11 福島女子短大助手, 平 11~13 同短大講師. 強化学習, 福祉工学の研究に従事. 電気学会, 情報処理学会, 人工知能学会各会員.



木村 春彦 (正員)

昭 54 東北大大学院工学研究科博士課程了. 工博. 同年, 富士通 (株) 入社. 昭 55 金沢女子短大講師, 昭 56 同短大助教授, 昭 59 金沢大・経・助教授, 平 4 同大・工・電気・情報工助教授, 平 6 同学科教授, 現在に至る. その間, 最適コード変換, プロダクションシステムの高速化の研究に従事. 情報処理学会, 人工知能学会各会員.



広瀬 貞樹 (正員)

昭 49 富山大・工・電子卒. 昭 55 東北大大学院工学研究科博士課程了. 工博. 同年, 富士通研究所入社. 昭 59 神奈川大・工・助教授, 平成富山大・工・助教授, 平 10 同知能情報工学科教授, 現在に至る. その間, オートマトン・形式言語理論, アルゴリズム解析, 計算の複雑さの理論などの研究に従事. 情報処理学会会員.