

知能自動車の制御手法

機械技術研究所

広瀬武志 谷田部照男

津川定之 松本俊哲

1. まえがき

自動車に与えらるべきの意味での知能を付与せよという試みは、やはり自動車の自動操縦に関する研究に端を発している。1960年代、米国のRCA社、GM社は相前後して自動操縦車の開発に着手し、独自の手法で実験に成功している。我々でも、1963年から機械技術研究所で研究が開始され、1967年には時速100kmで安定した自動操縦を実現することができた。そのほか、英国の交通道路研究所、米国のオハイオ州立大学、西独のツェンクス社でも、それぞれ独自の自動操縦車を開発した。

これらの自動操縦車に共通した技術的特徴は、その誘導方式にあって、走行車線の中央に埋設された車心型の被覆ケーブルに交流電流を流し、路面下に形成される半円形の交流磁界を自動車の前バンパ両端に装着した2個の検出用コイルで受信する。この受信信号の強度差からコースずれを検出し、これによってハンドルを制御し、コースに沿って自動車を自動的に誘導する。

このように自動車の自動操縦は全く独立に1963年頃から米国のSRIで人工知能ロボットの研究が開始された。これは1個のテレビカメラで外部環境を認識し、3個の車輪を小型モータで駆動して室内の床面上を走行する一種の移動機械であった。この装置の特徴はテレビカメラからの映像情報を対象とした立体認識のための情報処理手法と、部屋全体の障害物分布を前提とした移動のための問題解決手法であった。人工知能に関する研究はこの頃から盛んとなり、各国で研究されたが、外部環境に対するパターン認識技術の困難性などのため、真の意味での知能を有する移動機械が実現するには至らなかった。

機械技術研究所における知能自動車の研究は、自動操縦車における研究業績と人工知能に対する研究者としての興味に基づいて開始された。そしてこの研究の目標は、障害物を回避しながら道路上を自由に走行できる、高度に知的な自動操縦車の実現であった。この研究開発をすすめるにあたっての最大の困難は、やはり外部環境の認識手法であったが、1968年にはその基本的な手法が確立され、以来改良を重ね、1976年には走行テスト結果に基づく新しい道路パターン認識手法を開発した。また、同年マイクロプロセッサによる問題解決手法も開発され、知能自動車の全体的システム構成が完成された。

ここでは、この道路パターン認識手法と問題解決手法について詳しく説明し、これらの手法に基づいて試作した知能自動車と、その走行実験の結果を紹介する。

2. 道路パターン認識手法

誘導ケーブル方式による自動操縦車の「目」が磁界だけを見る目であって、道路上の障害物については盲目であるのに対して、知能自動車の「目」は走行の障害となるものを認識できなければならない。しかし、戶外という複雑な環境のもとで、道路があるいは草原、水面のような道路以外の平面であるか、また障害物があるかないか、全てを認識することは困難である。そこで、この知能自動車の置かれる環境は、自動車の走行用に作られた道路上で、しかもその道路は他

の平面とはガードレールと縁石のようのもので仕切られているという前提をおく。よすれば、このように仕切られた道路との立体物が走行の障害となるので、知能自動車の「目」は、この立体物がどこにあるかを識別できなくてはならない。その位置を正確に認識するだけで良い。

このように方針で開発されたのが道路パターン認識装置で、図1に示すように上下に配置された2台のテレビカメラで前方道路空間を見下ろすとき、この空間的映像は一般に偏位しているが、テレビカメラの光軸が交差する位置にある物体の映像だけが重なり合うという、立体視の原理を応用している。この前方空間の映像はテレビカメラによって映像信号に変換されるので、この映像信号の一致する部分を抽出すれば、光軸が交差する位置にある物体を検出することができる。この方法として、この映像信号の相関をとるとか、映像信号をAD変換して電算機で処理する方法などが考えらるが、いずれの方法も処理に時間がかかり、連続的に走行する自動車の目には適さない。

よこで、一般に障害物の輪郭が背景との区別がく明暗の差を帯びていることに着目する。すなわち、テレビカメラを上下方向に走査すると、立体物と背景との境界では明暗の変化が大きく（これを明暗変化点と定義する）、しかもこの変化点が上下方向に小さくとも2個以上存在する。よこで、両映像信号の明暗変化点を抽出し、この時間的配列の一致するものを立体物として認識する。図2は障害物認識手法のブロック図である。映像信号は微分され、明暗の変化に比例した微分信号に変換される。次に、微分信号の中からあるレベル以上の信号のみを抽出し、一定幅のパルス信号として波形整形する。すなわち、明から暗、暗から明への変化点は、それぞれパルス信号として抽出される。これらのパルス信号を論理回路で導き、時間的配列の一致する部分を抽出し、立体物として認識する。さらに一致する個所の持続時間から立体物の高さを読み取り、自動車の特性を考慮して、高さ10cm以上の立体物を障害物として認識する。図1の認識領域内の道路面に何らかの標識がある場合、この像は重なり合うために立体物として誤認識されるが、高さの判定によって10cm以下の立体物として認識され、障害物とは見做さる。さらに、障害物は一般に横幅を持つことに注目し、車道方向の一回の走査の間の障害物の存在を前述の処理で求め、連続した数回の走査にわたって障害物が存在

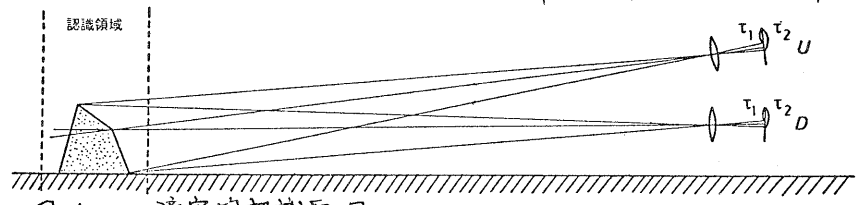


図1. 障害物認識原理

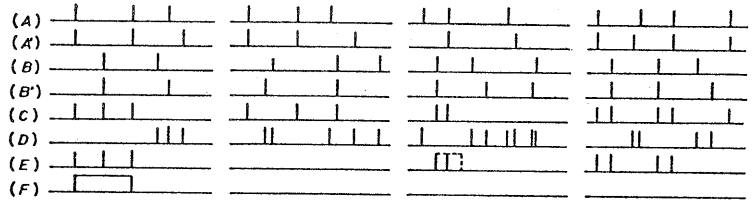
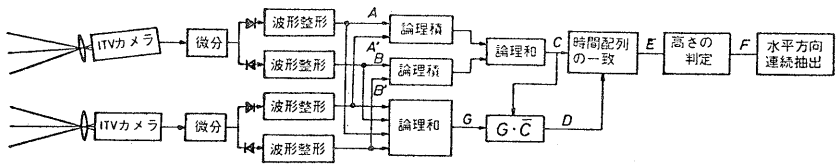
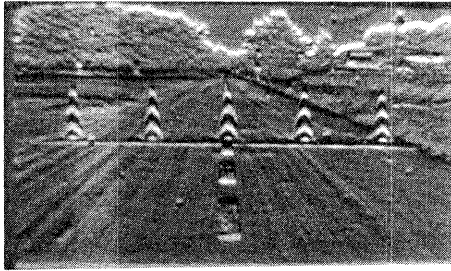


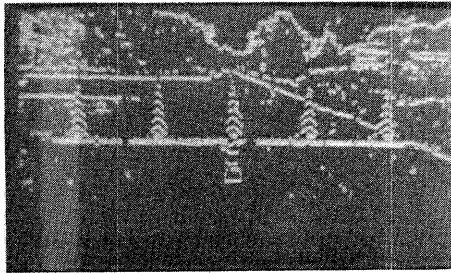
図2. 認識手法ブロック線図および処理波形例



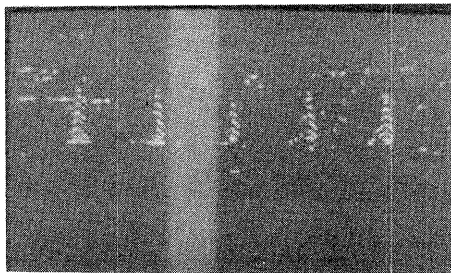
(a)



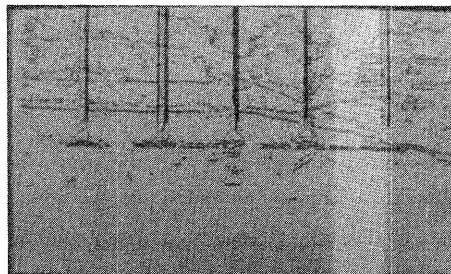
(b)



(c)



(d)



(e)

図3. 障害物認識の処理過程

すると共にだけこれを障害物として認識する。このために、テレビカメラは通常のインターレス走査ではなく順次走査を採用している。

図3は映像信号の処理過程をテレビモニタで見たものである。(a)は上のテレビカメラで見た映像で、自働車の前方9mの場所に5個のラバコーンを置いてある。(b)はこの映像を微分処理したもので、下から上の方向に見て、明暗の変化に対応した映像となる。(c)は明暗変化点を抽出し、パルス信号に変換したもので、パターン認識でいう線画である。(d)は上および下のテレビカメラのパルス信号の論理積を求めたもので、下のテレビカメラの光軸は、前方9mで交差しているの、認識領域内にあるラバコーンの橋の部分の重なりが見られる。(e)はこの映像を処理して障害物を認識したもので、ラバコーンを障害物として、黒線で表示している。

上記の処理方法によると、認識できる領域は光軸の交差する点を中心に前後に約1mの奥行きのあるものになり、知能自働車の通路パターン情報としては不十分であるので、認識領域を拡張することを図った。図々においてテレビカメラの光軸を $\Delta\alpha$ だけ傾ける。認識可能領域は $\Delta\alpha$ だけ遠方に移動する。このようにテレビカメラを機械的に傾けるかわりに、上のテレビカメラからの信号を $\Delta\alpha$ に対応する時間 ΔT だけ遅延させれば同じ効果を得られる。ここで、遅延素子を十数個直列に接続し、 $\Delta\alpha$ の出力を並列に処理して認識領域を拡張した。遅延素子としてはソフトレジスタを使用し、その転送クロックの周波数とソフトの段数によって遅延時間を求めた。1ビット当りの遅延量は0.22 μ sで、光軸の傾きに換算すると、0.12 $^\circ$ に相当する。テレビカメラは下から上へ走査するので、認識領域は上からの信号を遅延すると遠方へ、下からの信号を遅延すると近くへ移動する。図々に認識領域拡張方法のブロック図を示す。図中の走査誤差較正回路は、2台のテレビカメラの間の走査の誤差を較正するものである。表1は試作した通路パターン認識装置の仕様を示したものである。表から判るように、こ

の装置は5mから20mまでの間を約1m間隔に16の帯状の領域を、約40°の視角で認識する。

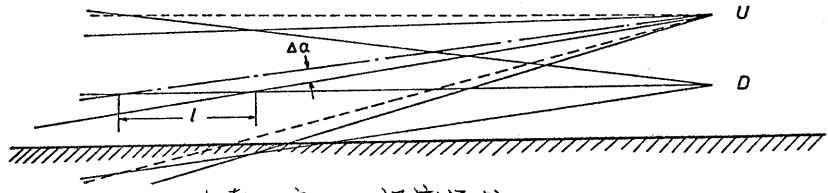


図4. 光軸の変化と認識領域

図6はこの装置を使用した実験例で、(a)は上のテレビカメラの映像、(b)は下の観画ヒ、5mから20mまでの認識領域(図の最下部が5m、最上部が20mに対応する)の障害物分布を合成したものである。これからわかるように、道路曲線部分のガードレールを障害物として認識しているが、この情報は1mの距離の領域の左からN番目の走査線部分に障害物が存在することを示しており、これは透視画法的な障害物分布となる。そこで、認識領域の位置情報と、その領域における通過可能領域の存在を平面的に求めるため、認識領域を図7に示すように、縦方向

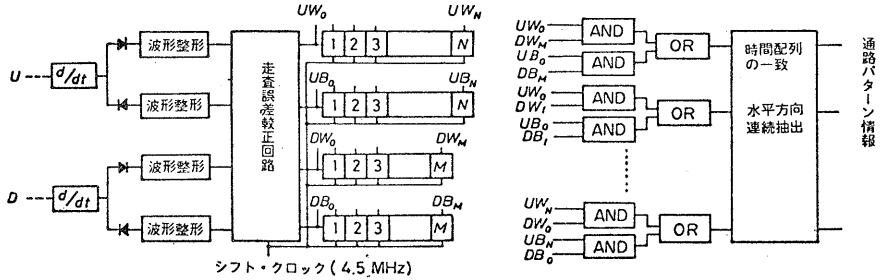


図5. 認識領域拡張のための処理回路ブロック図

第1表 認識範囲 (一)は下の信号を遅延

遅延量	認識距離	横方向視野	認識の奥行き	走査線1本分の幅
-19bit	5 m	3.7m	0.2m	0.7cm
-12	6	4.4	0.3	0.9
-7	7	5.1	0.5	1.0
-3	8	5.8	0.6	1.1
0	9	6.6	0.8	1.3
2	9.8	7.2	1.0	1.4
4	10.8	7.9	1.1	1.5
5	11.4	8.3	1.2	1.6
6	12.0	8.8	1.3	1.7
7	12.7	9.3	1.5	1.8
8	13.5	9.9	1.7	1.9
9	14.4	10.5	1.9	2.1
10	15.4	11.2	2.1	2.2
11	16.5	12.5	2.5	2.4
12	17.9	13.1	3.0	2.6
13	19.5	14.2	3.4	2.8

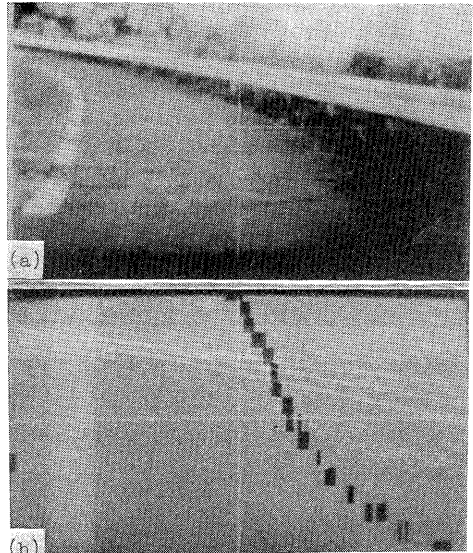


図6. 通路パターン認識例

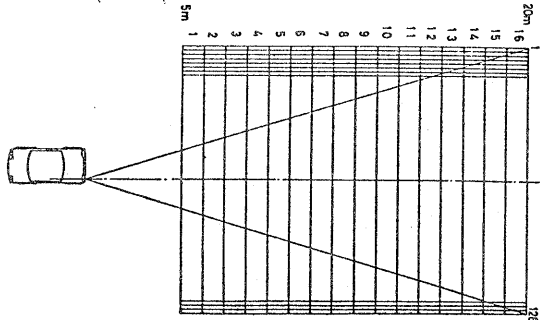


図7. 認識領域のメッシュ化

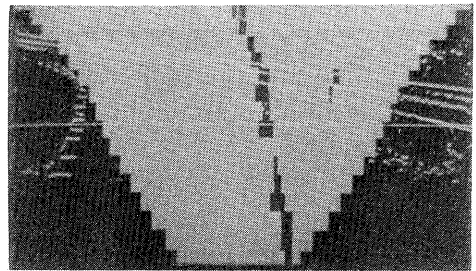


図8. 通路パターンのメッシュ化

(運行方向)を認識領域の位置に対応して16, 横方向を128(1の幅は約12cmに相当)に分割し, 各メッシュごとに障害物の有無を前述の障害物分布状態に対応させた。図8は図6の結果をメッシュに対応させた例で, 黒く表示された部分が障害物であり, ガードレールと自動車の位置関係がよくわかる。このとき, 光学系の視界外の障害物の有無が判定できないので, フェイルセーフの考えから, 障害物が存在するものとした。

この結果をRAM(16×128=2Kビット)に記憶し, 認識領域の午前から順にメッシュを左から右に読み出し, 1認識領域上=26個以上の連続したメッシュに障害物があるとき(26メッシュは約3m幅に相当する), これは自動車の通過可能領域と定義し, 問題解決装置への位置を出力する。図9はその出力情報のデータフォーマットで, 8ビットのデータの群で構成されている。すなわち, 最初に認識領域の位置データ, 次にその認識領域に通過可能領域があればその左端と右端の位置のデータが組になって出力される。同じ領域内に複数個所の通過可能領域があれば, 複数個の左端と右端の位置データが出力される。これを右認識領域において出力し, 最後にデータ終了コードが出力される。この通路パターン認識装置では, 1画面の情報を取り込みながら処理し, 後処理の時間も含めても約36mSecで障害物分布を出力できる。すなわち, テレビ画面1フレーム毎に通路パターン情報が出力される。

ビット位置	7 6 5 4 3 2 1 0
通過可能領域位置データ	1 0 0 0 X X X X
通過可能領域左端データ	0 X X X X X X X
通過可能領域右端データ	0 X X X X X X X
データ終了コード	1 1 0 0 0 0 0 0

X = 0 or 1

図9 通路パターン情報データフォーマット

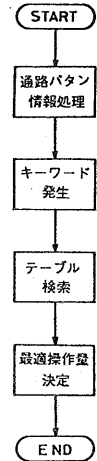
3. 問題解決手法

従来の自動操縦車は, 道路面と形成された参照コースからのずれを検出し, PSD制御方式によって自動車に対する操作量(舵角, 速度, 加速度など)を決定するものであって, 参照コース設定後に生じた障害物を回避する動作をとることではできなかった。ところが, 前節で述べた通路パターン認識装置によって, 新しい思想に基づく自動操縦車の可能性が示された。すなわち, この通路パターン認識装置は設定された参照コースからのずれを検出するだけでなく, むしろ自動車前方の通過可能領域を2次元的に検出する機能を持っている。したがって, 通路パターン認識装置からの情報を問題解決装置で処理して最適操作量を決定することにより, 自動車前方の障害物を回避し, あるいは道路の右左折に従って無人で走行する知能自動車と構成することができるといえる。

最適操作量を決定するには, 通路パターン認識装置の視野内の情報をもとにして, 自動車の動作を評価指標として安全性および迅速性を考えて最適制御問題として定式化し, この問題を解く方法がある。ところが, 一般に最適制御問題の数値解には, 大型計算機を用いてさえも長大な時間と記憶容量を要する。したがって, 移動と停止と交互に繰り返すある種の移動ロボットにはこの方法を適用することができず, 常に移動している知能自動車には適用することはできない。

知能自動車の制御には, 最適操作量決定のための演算時間が短かく, かつ複雑な動作の判断が可能な制御方法が必要である。こゝでの問題解決装置として, その機能と柔軟性の面からマイクロプロセッサを中心として構成している。そのため, 処理時間を考えて, コンピュータプログラムの算術演算ではなく, 論理演

算を主としたものでなければならぬ。このよりの最適操作量決定法として、テーブル検索手法がある。テーブル検索手法では、予め大型計算機であらゆる通路パターンについて最適制御問題を解いて編集した最適操作量を記憶させたテーブルを用意する。そして、通路パターン情報に基づいて発生したキーワードを用いてテーブルを検索し、最適操作量を決定する。図10のフローチャートを示す。キーワードは通路パターンを特徴づけるパラメータであり、その発生方法には通路パターンに応じて何通りかの方法がある。たとえば、直前に走行する場合と、右折、左折の場合とでは異なる方法でキーワードが発生される。こうして発生されたキーワードは、対応した最適操作量が記憶されている場所と論理的に関係づけられているので、論理推算を施すだけで容易に最適操作量を検索することができる。



知能自動車の制御方法としてテーブル検索手法を用いた背景には、図10 問題解決の実際の自動車の運転においても、道路環境と我々の運転操作には、実装置内の処理する種の対応が認められることがある。すなわち、道路環境をいくつかのカテゴリに分類したとき、我々の走る運転操作は各カテゴリに対してほとんど一意に定まるからである。

図11は問題解決装置を示すもので、通路パターン情報と自動車からの舵

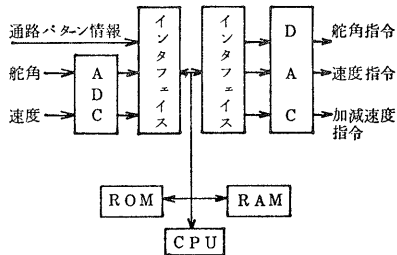


図11 問題解決装置

角、速度を入力し、それに基づいて最適の舵角、速度、加減速度を決定し、指令として出力する。この問題解決装置は図12に示すような構成であり、マイクロプロセッサはモトローラ製MC6800(クロック周波数1MHz)である。

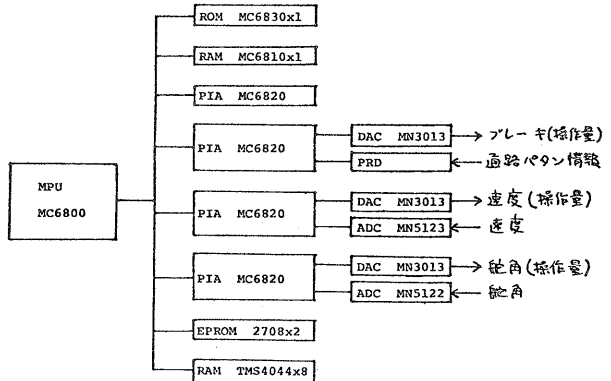


図12 マイクロコンピュータの構成

4. 知能自動車

前述した通路パターン認識装置および問題解決装置を用いて、知能自動車の試作を行い、テストコースでの走行実験に成功した。ここでは、知能自動車の構成、問題解決装置のソフトウェア、およびテストコースでの走行実験結果について紹介する。

4.1 知能自動車の構成

知能自動車の自動操縦される自動車、通路パターン認識装置および問題解決装置で構成される。

自動操縦される自動車は、トルクコンバータを備えた小型乗用車を用い、ステアリング、アクセル、ブレーキは問題解決装置からの電気信号により制御されるように改造を行った。ステアリングはパワーステアリング装置を改造した電気油

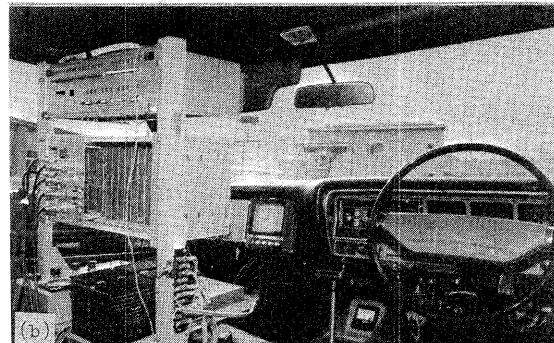


図13 知能自動車の外観(a), と内部(b)

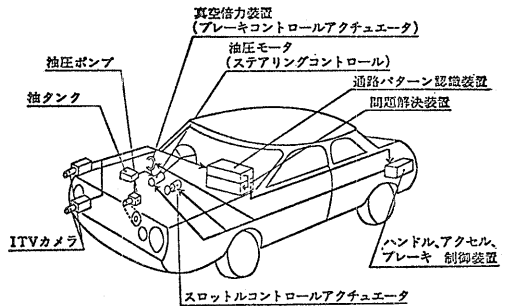


図14 知能自動車に装着された装置

自動車の右先端に装着された二台のテレビカメラと、車室内のリアICと論理ICを組合せた処理装置とからなる。問題解決装置はやはり車室内にあり、ナビゲーションのマイクロプロセッサを中心として構成されている。図13は知能自動車の外観および内部の写真を示す。図14は自動車に装備された各装置の模式図を示す。

2-2 問題解決装置のソフトウェア

概要を図15のフローチャートで示す。道路パターン認識装置における処理と問題解決装置におけるものは非同期で行われるため、道路パターン認識装置から問題解決装置へのデータ転送は、問題解決装置がデータヘッダ(280)を検出し、トビキに始まり、順次データを通過可能域位置データ、通過可能域左端データ、通過可能域右端データ(さらに同じ位置に通過可能域があれば左端データ、右端データが対になって続く)の順で入力し、データ終了コード(280)の検出で終了する。したがって、問題解決装置は最適操作量を出した後、道路パターン認識装置からのデータヘッダを待つ。

知能自動車の制御の基本は「安全」と「キープレート」と原則として道路上を走行する。したがって、問題解決装置はこの原則に基づいて、まず認識領域の各々に於いて自動車の通過が可能な区域が存在するかをチェックする。そして、通過可能域が全てについて存在するときは、各可能域の左端座標 (X_i, Y_i) , $(i=1 \sim 16)$ から Y_i/X_i の値を求め、次にこの値の最大値と与える (X_0, Y_0) の組 (X, Y) を求める。この (X, Y) の値をキーワードとして使用可能。図16にキーワード発生手段の例を示す。

通過可能域の有無および (X, Y) をもとにして道路の状況を次の5個のカテゴリに分類する。すなわち、

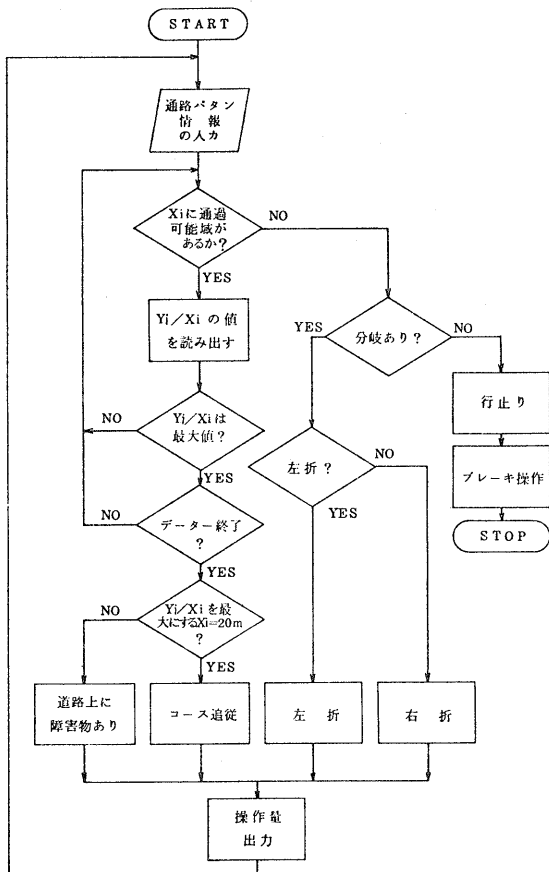


図5. ソフトウェアのフローチャート

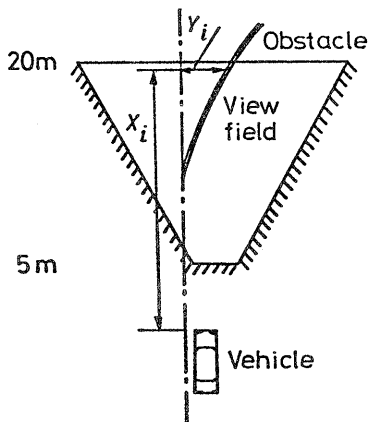


図16 キーワード発生手法

- 1). 直線道路または大きな曲率の曲線道路
- 2). 道路上に障害物がある。
- 3). 左折道路。
- 4). 右折道路。
- 5). 行止り。

である。もし、認識範囲の5mから20mにわたって自動車の通過可能領域があるときは、道路の状況は上記のカテゴリの1)または2)に分類される。そして(X, Y)のXが20mに等しいときは、道路状況は1)に分類され、その他の場合は2)に分類される。これらの場合において、操作量を求めるためのキーワードは、(X, Y)と自動車の速度である。また、認識範囲の20mまで通過可能領域が残っているときは、道路状況は3), 4), 5)に分類される。認識範囲の左側または右側に続く通過可能領域があるときは、曲り角の位置座標がキーワードとなる。左折と右折の両方が可能な場合は、キープレフトの原則から左折を優先して選択する。以上の場合がすべて選択不可能なときには、知能自動車は行止りの道路に入ったことになり、減速して停止しなければならない。

以上のよう、問題解決装置はキーワードをもとに、道路状況に対応した操作量をテーブルより検索して、指令信号をハンドル、アクセル、ブレーキ制御装置に送り、知能自動車の方向、速度を制御する。

4.3 走行実験 マイクロコンピュータで制御された知能自動車は、テストコースにおける種々の道路環境で、30km/hの速度による走行実験に成功した。

走行実験はテストコース内の6m幅の直線道路および50m x 50mの広さの巡回広場において行われた。直線道路での走行実験では、既設の二本の誘導用テーブルを基準として、自動車の走行軌跡

の記録を行った。

走行実験の結果の一部を7回から20回までを示す。図17, 18, 19は直線道路における走行実験であり、道路の左側にガードレールを設置し、図17はそれに沿って走行した例である。図18は、途中から道路幅が急に変化している場合の走行例。

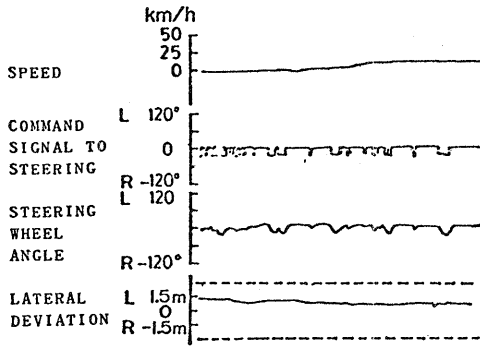


図 17 直線走行

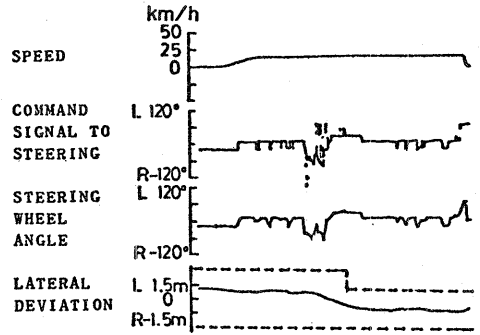


図 18 道路幅が変化した場合の走行

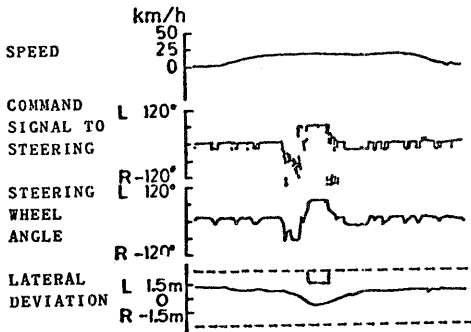


図 19 障害物回避走行

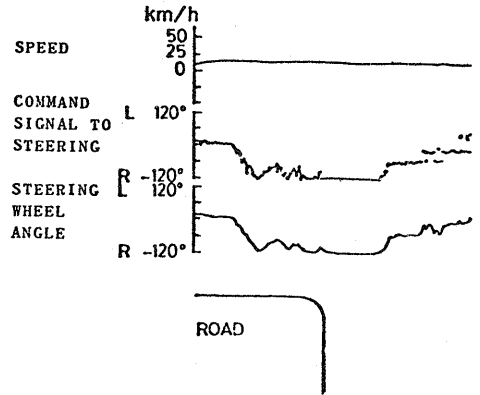


図 20 右折走行

図19の走行コースの途中に、概略自動車の大きさの障害物が道路の左側にある場合の障害物回避走行の例である。図20は、旋回広場に図の下側に示すような逆L型のコースをガードレールで設定し、それに沿って右折したときの走行結果である。

5. おわりに

これまで述べたように、知能自動車に関する研究はその初期的開発段階を終了し、いよいよ本格的な研究成果が問われる段階に立ち至っている。そのシステムの構成のほとんどが完成されたといえ、そのソフトウェアはまだまだテストルーチンのレベルを越えていない。また、道路パターン認識機能については、自動車の機能として不可欠な全天候型を満足するまでには、まだかなりの努力と時間を必要とするであろう。

しかしながら、テストコース内とはいえ、まかりなにも知能自動車が所定の挙動を実現できたことは、この種の技術分野に1つの突破口を開いたことにあるであろう。これまで全く手がつけられなかった野外走行中の車上からの実時間でのパターン認識技術とか、限定された環境内とはいえ所定の障害物分布に対する問題解決手法など、移動機械全般にわたる安全化、省力化の技術分野からひとつの可能性を提供することによってきたと考えられる。特に、この研究過程から生み出された知能を有する移動機械全般に対するアプローチの手法が、今後重要な技術分野に成長すると考えられる移動ロボット設計手法に、いくらかでも

貢献できるは幸いである。

(参考文献)

- 1) L.E. Flory et al : Electric Techniques in a System of Highway Vehicle Control, RCA Review 23 No 3 (1962)
- 2) H.M. Morrison et al : Highway and Driver Aid Developments SAE Trans (1961)
- 3) Y. Ohshima et al : Control System for Automatic Automobile Driving, IFAC Tokyo Symposium (1965)
- 4) R.E. Henton et al : One Approach to Highway Automation, IEEE Proc Vol 56, No 4 (1969)
- 5) P. Prebinger et al : Europas Erster Fahrerloser Pkw, Siemens-Zeitschrift Vol 43, No 3 (1969)
- 6) N.J. Nilsson et al : Preliminary Design of an Intelligent Robots, in J.T. Tou (ed) Computer and Information Science, Vol 2, Academic Press. (1967)
- 7) 松本 : 通路パターン認識方式. 特許 オ701608号 (1968)
- 8) 久瀬 昭か : 明暗変化点分布に着目した通路パターン認識手法, オ16回 SICE 学術講演会 (1977)
- 9) 津川 : 適応的評価関数を用いた知能自動車最適制御 オ16回 SICE 学術講演会 (1977)
- 10) 谷田部 昭か : マイクロプロセッサを用いた知能自動車との制御手法, オ16回 SICE 学術講演会 (1977)
- 11) 松本 昭か : 知能自動車の構成とその制御手法, システムと制御 Vol 22 No 8 (1978)