

## 軽自動車を用いた自律移動ロボットの試作

### Trial Production of Autonomous Vehicle Robot Using Car

江村 超\*, 鳥羽山 恭一\*\*, ○ 桧山 昌之\*, 香美 義幸\*

Takashi Emura\*, Kyouichi Tobayama\*\*, ○ Masayuki Hiyama\* and Yoshiyuki Kagami\*

\* 東北大学 工学部, \*\*株式会社 東芝

\* Faculty of Engineering, Tohoku Univ., \*\* Toshiba Ltd.

キーワード: 自動車制御 (Automobile Control), 自律移動ロボット (Autonomous Vehicle Robot), 推測航法 (Deadreckoning), エンジン回転速度制御 (Control of Engine's Rotary Speed)

連絡先: 〒 980 - 77 東北大学工学部 機械電子工学科 メカトロニクス設計学  
桧山昌之, Tel. : (022) 217-6969, Fax. : (022) 217-7027,  
E-mail : hiyama@emura.mech.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

日本における自動車保有台数は、一世帯に一台の割合に近づきつつある。この保有台数の増大に伴い交通渋滞が増加し、自動車が移動体として本来持つべき機動性が十二分に発揮されず、経済的な損失ならびに運転者の精神的な苦痛をも招いている。さらに、運転者の精神状態の悪化が運転者の不注意や運転操作ミスを誘発し、交通事故の原因ともなっている。

そこで、交通渋滞の軽減などを目的とし、運転者により多くの交通情報を伝達する高度情報化交通システムの開発が、各国において進められている<sup>1)</sup>。日本でいち早く、一部の地域において運用が始まった VICS (Vehicle Information and Communication System) に関する研究が現在も引き続き行われている。さらに、交通事故の対応策として、ASV (Advanced Safety Vehicle) の構想がたてられ、予防安全・事故回避・衝突時の被害軽減、そ

して衝突時の災害拡大防止などの安全技術が開発され、一部の技術はすでに実用化されている。

また、今日のカーエレクトロニクスの発展は著しく、従来運転者と機械的にしか接続されていなかったエンジンやブレーキが、例えば排気ガスやタイヤ・路面間の状態など、車自身ならびに車の置かれた周辺環境に応じて電子制御システムにより制御されるようになった。このシステムによって、より安全かつ快適な走行が確保され、自動車は最低限の車の知識さえあれば、誰にでも手軽に運転できる交通手段となってきた。

しかしながら、運転者の負担を精神面も含めてさらに軽減するために、運転がより容易なシステムが必要であり、車の自律化が望まれる。これまでも自律走行に関する研究が、各地の大学や研究機関そして企業で行われており<sup>2)</sup>、カーネギメロン大学の NabLab<sup>3)</sup> や機械技研の知能自動車 PVS (Personal Vehicle System)<sup>4)</sup> そして、明治大

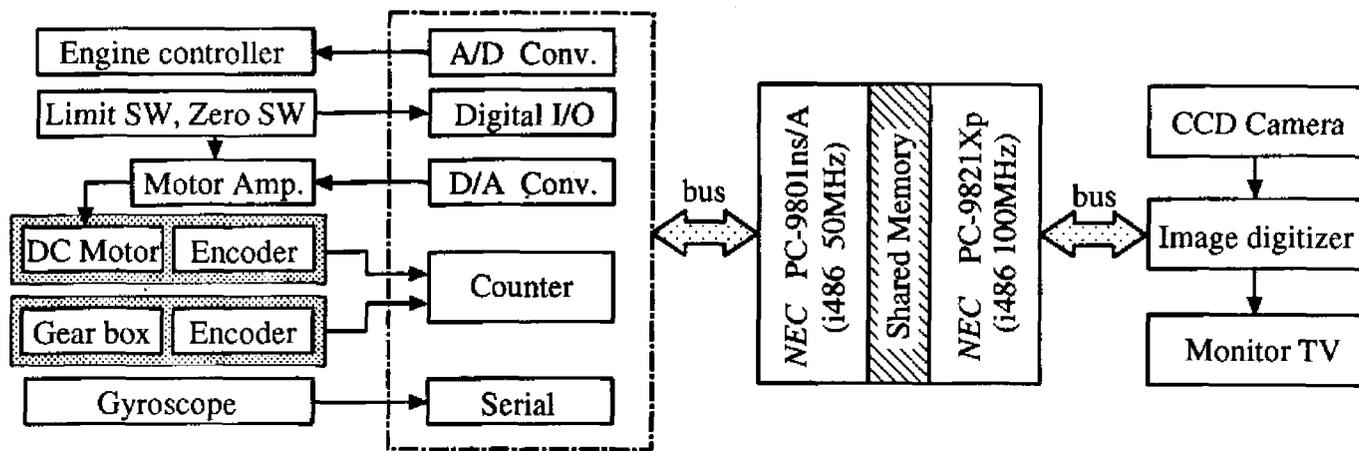


Fig. 1 Block diagram of ALV

学の AFV (Autonomous Field Vehicle)<sup>5)</sup> などが知られている。

当研究室においても、1988 年より自律移動ロボットの研究を行っており、操舵角の連続性を考慮に入れた移動ロボットの軌道生成法の提案<sup>6, 7)</sup>や、CCD カメラを搭載した実機により分岐の存在するランドマークの追従走行を実現している<sup>8)</sup>。

一般的な環境においてより自律性の高い走行を実現するため、移動環境を屋内から屋外へと移行した。しかしながら、この移行により耐環境性や走行時間の制限などの問題が生じた。そこで、今回これらの問題を解決し、さらに将来の自律自動車を念頭に入れ、軽自動車をベースとした自律移動車を試作した。本論ではそのシステム構成ならびに制御方法、そして基礎実験の結果を報告する。

## 2. システムの概要

今回試作した自律移動車は市販の軽自動車(鈴木株式会社製アルト: M-CA71V, 前輪駆動, マニュアル変速, ドラムブレーキ方式のガソリン車)を改造したものである。

これは高い耐環境性や、ガソリンエンジン動力を車の駆動力源だけでなく電力供給源としても用いることにより、移動ロボットの自立化を実現し、航続距離の飛躍的な延長を可能にするためである。

改造の基本方針として、安全性を考慮に入れ、キャブレターやブレーキ、クラッチなどの保安部品

Table 1 Dimensions of vehicle

Tread	1.215	m
Wheelbase	2.175	m
Width	1.395	m
Length	3.195	m
Weight	650	kg
Diameter of tire	480	mm

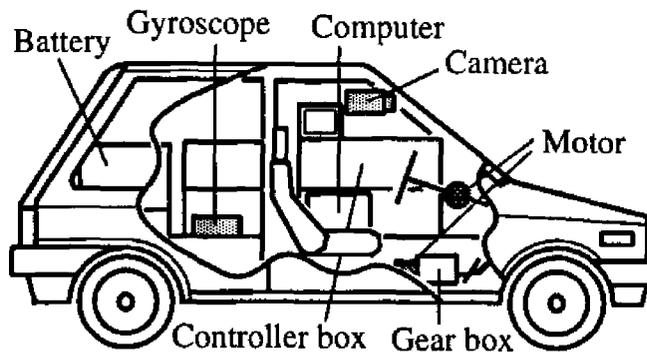


Fig. 2 Outline of ALV

の改造は行わず、また万一の場合実験者が移動ロボットを運転可能なように、各ペダルやハンドルなどは取り外さないこととした。この自動車の主な仕様を Table 1 に示す。

Fig. 1 にシステム構成を示す。この移動車には、画像処理と、駆動装置の制御ならびに内界センサからの情報を処理する 2 台のコンピュータが搭載されており、これらコンピュータ間のデータ授受は共有メモリを用いている。

Fig. 2 に ALV の概略図を示す。助手席, 後部座

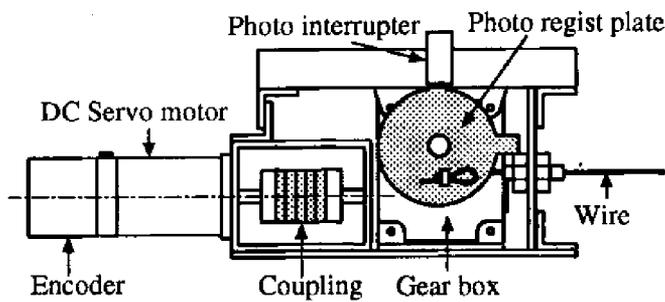


Fig. 3 Driving system for pedal

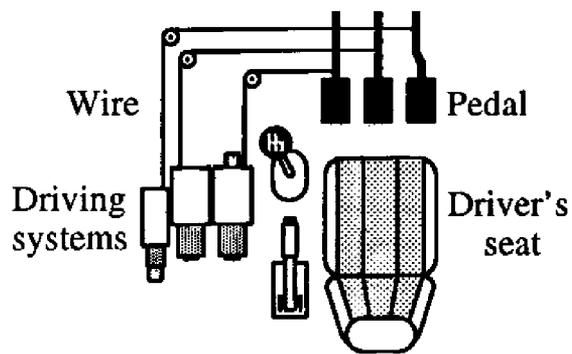


Fig. 4 Arrangement of driving systems

席を取り外し、ペダル駆動装置や制御回路、バッテリーなどが搭載されている。ここで、カメラは助手席側に取り付けられている。

## 2.1 ペダル駆動装置

ペダル駆動には、ペダルに固定されたワイヤをモータで巻き取る方法を用いた。ここで、ワイヤはペダルを踏み込む向きに巻き取られる。これにより、運転者はいつでもペダルを踏むことができる。

Fig. 3 にアクセルペダル用ワイヤ巻き取り装置の外観を示す。駆動モータの回転はカップリングを介して、ウォームギヤの入力軸の回転に伝達される。ここで、アクセルペダルの可動範囲はウォームギヤの出力軸において約 1 回転に相当するので、アクセルペダルの最小踏み込み量をフォトインタラプタを用いて検出している。

また、各ペダルを巻き取るのに必要な力は、アクセル、クラッチ、ブレーキの順に大きくなり、この力の大きさから駆動モータならびにウォームギヤの減速比を決定した。アクセルペダルには出力トルクの小さな DC モータ (エンコーダ付き) を減速比 60:1 で、クラッチ、ブレーキにはパワステ用

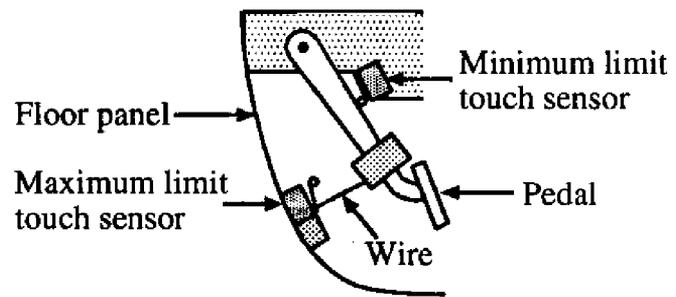


Fig. 5 Outline of pedal

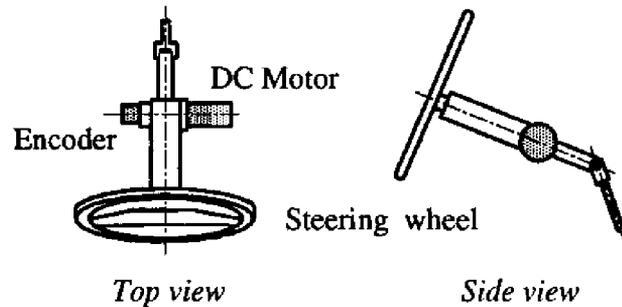


Fig. 6 Driving system for steering wheel

の出力トルクの大きな DC モータを減速比 10:1, 20:1 でそれぞれ用いている。

Fig. 4 に各ペダル巻き取り装置の配置を示す。ワイヤを巻き取る構造上、可能な限りペダルから巻き取り装置までのワイヤの長さを短くすることが望まれる。しかしながら、運転席側の足元に巻き取り装置を配置すると自律走行中に実験者が危険となるので、助手席側の座席のあった位置に巻き取り装置を配置した。さらに、ペダルに固定されたワイヤは床に取り付けられたアルミパイプのガイドを通じて、助手席側に配置された巻き取り装置へと接続されている。ここで、このアルミパイプは防塵の役目も兼ねている。

Fig. 5 にブレーキペダルの概略図を示す。基本的にはクラッチペダルも同様であり、ペダルの踏み込み量の上限ならびに下限を検出するためのタッチスイッチが取り付けられている。一方、アクセルペダルには最大踏み込み量を検出するためのタッチスイッチだけが取り付けられている。

## 2.2 ステアリング駆動装置

ステアリングの駆動を行うために、本来のステアリング装置を市販車用の電動パワーステアリン

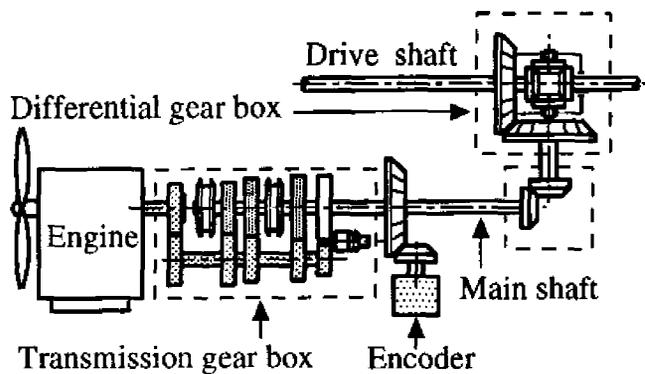


Fig. 7 Attachment of odometer to transmission

グ装置に付けかえた。しかし、この装置には駆動モータしか搭載されていないので、駆動モータと同軸上にエンコーダを取り付けハンドル角の検出を行う。Fig. 6 に駆動装置の概略図を示す。

### 2.3 センサ

センサはモノクロ CCD カメラ、走行距離計、光ファイバジャイロを搭載している。今後、障害物検出のために超音波トランスミッタを用いた測距センサや、グローバルな移動車の位置検出のために GPS レシーバを搭載する予定である。

車速あるいはタイヤの回転速度は直接測定することは容易ではない。そこで、本来スピードメータに接続されていたワイヤの回転から走行距離を求めることとした。この軸はメインシャフトと機械的に接続されており、この回転速度はメインシャフトの回転速度に比例する。しかしながら、このワイヤが長くなるほどワイヤとワイヤを保護するチューブとの間に働く摩擦の影響が大きくなり、正しい走行距離が得られない。そこで、この影響を極力押えるためこのワイヤをパネルまで引き延ばさず、エンジンルーム内からカップリングを介して耐環境性の高い磁気式エンコーダを直接取り付け、メインシャフトの回転速度を測定し走行距離を得ることとした。Fig. 7 に走行距離計の取り付け概略図を示す。現在移動車のデッドレコニングは、走行距離計と光ファイバジャイロを用いて行われている。

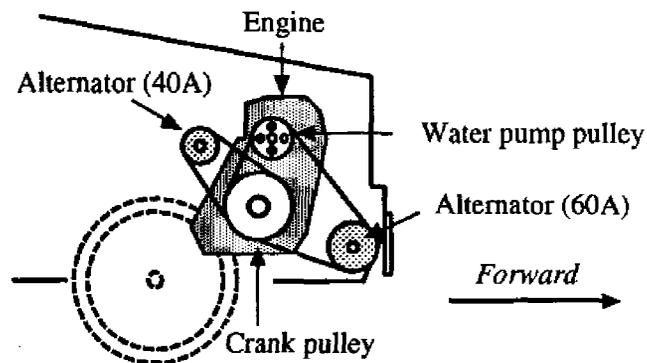


Fig. 8 Attachment of alternator

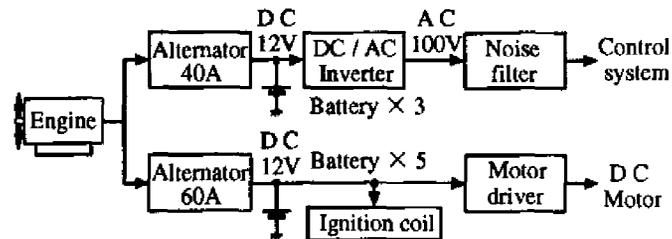


Fig. 9 Outline of power supply system

### 2.4 電力供給システム

自動車の電力はバッテリーから供給され、バッテリーはオルタネータにより発電された電力で充電されている。今回改造した軽自動車には公称容量 40A のオルタネータが搭載されていたが、このオルタネータのみで各種の駆動モータやコンピュータなどの電力をすべて供給することは不可能である。そこで、容量 60A のオルタネータを新たに搭載し、バッテリーを他に 7 個搭載することにより、すべての電力供給をエンジンの回転でまかなうことが可能なシステムを構築した。

Fig. 8 にオルタネータ取り付け概略図を示す。新たなオルタネータの大きさの関係により、容量 40A のオルタネータを本来エアコン用のコンプレッサを取り付ける場所に移動し、新たなオルタネータを本来のオルタネータが取り付けられていた場所に搭載した。これらオルタネータのプーリはそれぞれ、クランクプーリやウォーターポンププーリに V ベルトを介して接続されている。なお、バッテリーはエンジンルーム内に 1 個、残りはプラスチックケースに納められ、車内後部に配置した。

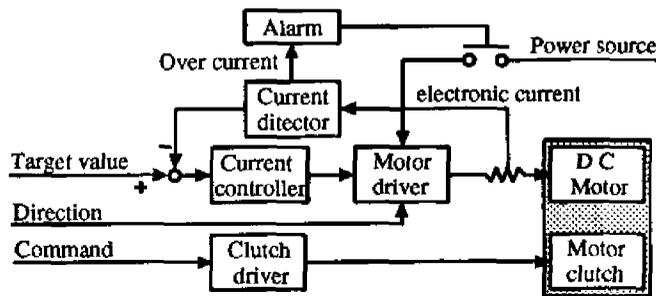


Fig. 10 Outline of motor driver

Fig. 9 に電力供給の概略図を示す。電力供給は直流電源・交流電源の2系統に分けられており、直流電源側は容量 60A のオルタネータを用いて5個のバッテリーを、交流電源側は容量 40A のオルタネータを用いて3個のバッテリーを介して電力を供給している。

### 3. 各駆動モータの制御

アクセルペダル駆動用以外のモータには電磁クラッチが取り付けられており、モータドライバはモータクラッチ駆動部、モータアンプ部、そして非常停止回路部から構成されている。Fig. 10 にモータドライバの概念図を示す。モータアンプはPWM 駆動方式の電流帰還型電流制御アンプである。非常停止回路部は、過電流を検出するとリレーを切り、駆動電源を遮断する構造である。

#### 3.1 エンジンの回転速度制御

エンジンは移動車の駆動力源だけではなく、電力供給源にも用いられる。また、負荷の変動に伴いエンジンの回転速度が変動すると、移動車の速度制御が困難になる。そのため、エンジンは一定回転速度を維持する必要がある。さらに、コンピュータプログラムが暴走した場合においても安全なように、アクセルペダルの制御はコンピュータを介さず回路のみで行うこととした。エンジンの目標回転速度はコントロールボックスのパネルに取り付けられたポテンショメータで設定する。

しかしながら、低いエンジン回転速度のままでは発進する時に負荷変動に耐えられず、エンジン

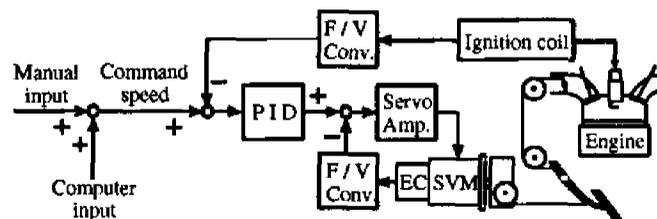


Fig. 11 Block diagram of engine control

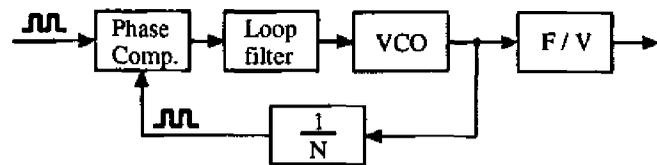


Fig. 12 Block diagram of F/V converter

が停止してしまうことがありうる。通常、運転者は発進時にはアクセルペダルを少々踏み込みエンジン回転速度を上昇させた状態でクラッチをつないでいる。そこで、発進時のみコンピュータから指令値の上乗せを行うこととした。

Fig. 11 にエンジン制御のブロック線図を示す。これは、アクセルペダル駆動用モータを速度制御するマイナーループと、エンジンの回転を速度制御するメインループから構成されている。

エンジンの回転速度の検出には、点火タイミングパルス信号の利用を考え、イグニッションコイルの1次側の信号を用いた。この移動車に搭載されているエンジンは3気筒のレシプロエンジンで、1行程でクランクシャフトが2回転する。これより、エンジンの回転速度を  $\omega_e$  r/min、コイルの1次側のパルスの周波数を  $f_{ig}$  Hz とすると、次式が成立する。

$$f_{ig} = \frac{1}{60} \times \frac{3\omega_e}{2} = 0.025\omega_e \quad (1)$$

上式より、エンジンの回転速度 800~4000 r/min に対応するコイルのパルスの周波数は 20~100 Hz であり、比較的低い周波数帯域で変化することになる。またノイズの影響を低減する効果を期待して、PLL(Phase-Locked Loop) を用いてパルス信号が整えられ F/V コンバータを介してエンジン回転速度に比例した電圧を得ることができる。Fig. 12

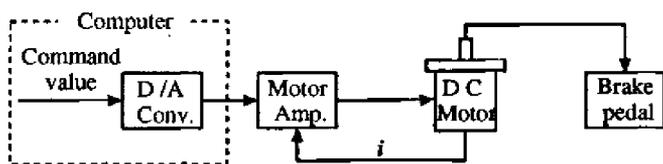


Fig. 13 Block diagram of brake pedal control

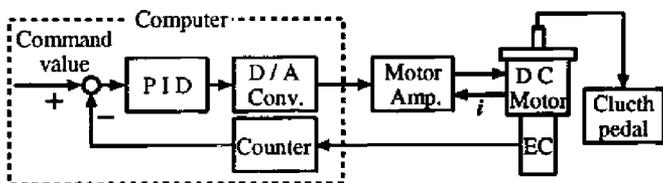


Fig. 14 Block diagram of clutch pedal control

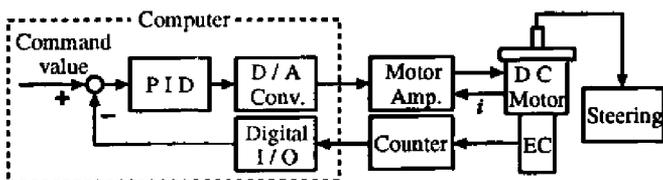


Fig. 15 Block diagram of steering control

にイグニッションのパルス信号に対する F/V コンバータのブロック線図を示す。

### 3.2 ブレーキ・クラッチペダルの制御

運転者はブレーキペダルの踏み加減により、自動車の制動力を制御していると考えられる。そこで、ブレーキペダルにはトルク制御を用いることとした。Fig. 13 にブレーキペダル制御のブロック線図を示す。

一方、クラッチペダルの操作は、特にクラッチをつなぐ操作の際、運転者は経験的に覚えた微妙な踏み込み操作を行っていると考えられる。そこで、クラッチペダルには位置制御を用いることにした。駆動モータの入力軸にエンコーダを取り付け、位置の検出を行う。Fig. 14 にクラッチペダル制御のブロック線図を示す。

### 3.3 ステアリングの制御

ステアリングの制御にはクラッチペダルと同様に位置制御を用いる。Fig. 15 にステアリング制御のブロック線図を示す。ここで、実験の度にハンドル角を零点調整することは大変であるので、ステ

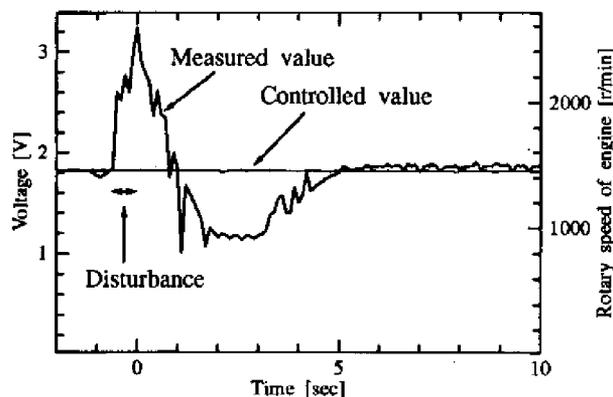


Fig. 16 Transient response of engine's rotary speed

アリングに取り付けられたエンコーダとそのエンコーダ値を読み込むカウンタ回路に常時電源を供給し、ハンドル角の値を保持している。

## 4. 基礎実験結果

### 4.1 エンジン回転速度の安定性実験

車速を制御するために必要なエンジン回転速度の安定性を測定した。エンジンに負荷変動を実際に与えることは困難かつ危険であるため、アクセルペダルを人間が奥まで一瞬押し込みこれを負荷外乱とみなした。Fig. 16 にエンジン回転速度の過渡応答を示す。外乱を与えてから約5秒程度で回転速度がほぼ一定値に落ち着いている。実際にはこのような大きな負荷変動は生じないと考えられ、実用上問題ないと思われる。

### 4.2 位置認識の確認実験

外界環境を画像処理システムを用いて理解するには、通常多くの処理時間が必要となる。画像処理サンプリングの間には、内界センサのみの情報を利用するデッドレコニングが不可欠となる。試作した移動ロボットでは現在走行距離計と光ファイバジャイロスコープを用いてデッドレコニングを行うが、その実用性を確認する実験を行った。ハンドルを限界まで回しその位置でハンドルを保持して定常円走行をした時のデッドレコニングの結

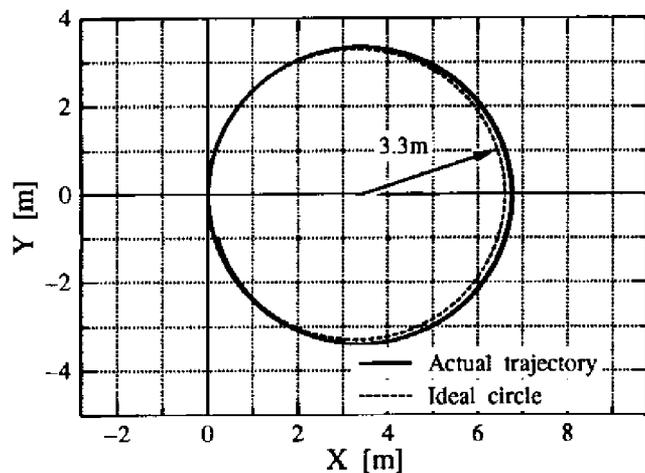


Fig. 17 Experimental result of circular motion

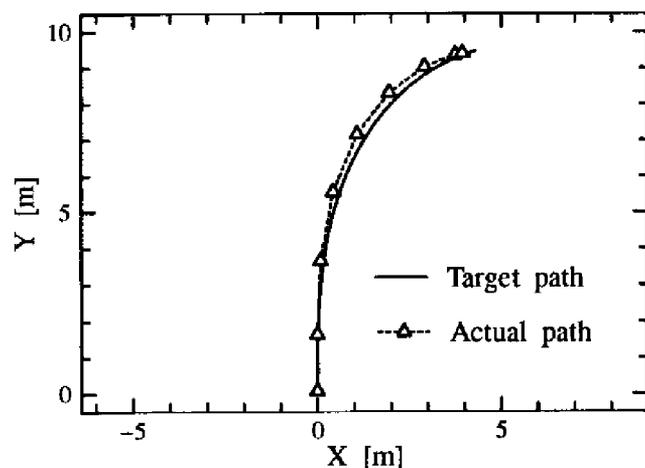


Fig. 18 Tracking of Clothoid curve

果を Fig. 17 に示す. 実際の軌道とデットレコニングによって得られた軌道との間の誤差は  $\pm 40$  mm 以内である. 実際の軌道の測定は, 右側後輪の中心に水を垂らしその軌跡を実測した結果から導いた. この結果は, 実測の方法や移動車の大きさ, また実際の制御においては移動車は絶えず画像システムにより誤差を補正することなどを考慮すれば, 十分な精度と思われる.

### 4.3 軌道追従実験

一般道路において緩和曲線として広く用いられているクロソイド曲線为目标軌道として軌道追従実験を行った. Fig. 18 に目標軌道とデットレコニングによる移動車の軌跡を示す. この図より多少の操舵の遅れが生じていることがわかる.

## 5. おわりに

より一般的な環境での自律走行を実現するために, 安全性を考慮した耐環境性が強い完全自立型の自律移動車を試作した.

いくつかの基礎実験の結果, エンジン回転速度が実用上問題なく安定に制御されること, ならびに, 試作したシステムのデッドレコニングの精度が実用上十分であることを確認した.

今後は, より滑らかな曲線走行を目指し, 遅れも考慮に入れた操舵角制御や車速の制御を, そして, 本来の目的である屋外環境における自律走行の実現を考えている. また, 現在のシステムに搭載されている外界センサは CCD カメラのみであり, 単純かつ制限された環境でない限り, カメラから得られる画像のみを利用して外環境を認識することは非常に困難である. それ故, 外環境認識のための他のセンサ, 例えば測距センサなどの搭載も考えている. 最後に, 本移動ロボットの設計および試作において東北大学工学部, 鈴木正俊技官の協力を得たことをここに記し, ここに謝意を表す.

## 参考文献

- 1) 山: GPS 情報, エレクトロニクスライフ 2月号, 18/21 (1996)
- 2) 津川: 自動車の自動運転システム, 日本ロボット学会誌, 13-7 946/949 (1995)
- 3) Charles E. Thorpe: Vision and Navigation the Carnegie Mellon Nablabs, Kluwer Academic Publishers (1990)
- 4) 服部, 植木, 中野: 自律走行車両の操舵制御, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 141/142 (1990)
- 5) 前田, 前田, 村上: 知能野外移動ロボット (AFV) の研究 - その 6. AFV の研究開発の進行状況 -, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1321/1324 (1993)
- 6) 荒川, 江村, 古屋: 曲率の連続性を考慮した自立移動車の走行軌道の生成法, 計測自動制御学会東北支部第 136 回研究集会資料, 136-6 (1992)
- 7) 桧山, 荒川, 江村, 香美: 自律移動車の Bezier 曲線に基づく軌道生成, 計測自動制御学会東北支部第 158 回研究集会資料, 158-5 (1995)
- 8) Arakawa, Hiyama, Emura, Kagami: Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robot Based on Landmarks, IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 1273/1278 (1995)