

論 文

地図上のコース指示による移動体の自動誘導*

津村 俊弘**・藤原 直史**・白川 友紀**・岡崎 譲***

Automatic Guidance of Vehicle Commanded by Route Course on Map*

by Toshihiro TSUMURA**, Naofumi FUJIWARA**,
Tomonori SHIRAKAWA** and Mamoru OKAZAKI***

This paper presents a system for automatic guidance of ground vehicle commanded by written course on map. Using self-contained on-line computing micro-processor which computes instantly the vehicle position, heading angle (azimuth) and predicted forecast position, steering command for guidance is decided. Our system shows good and favorable results. Principles of self-contained guidance system are as follows;

- 1) accurate digital position and heading informations of vehicle are computed by digital micro-computer using the digital data from left and right side wheels rotation of vehicle,
- 2) predicted forecast positions of vehicle are computed and are located on the map,
- 3) course is scanned by photo-sensor which is set on the above predicted position, and the scanned output is applied to the steering motor,
- 4) vehicle is guided automatically.

Detailed experiments of automatic guidance of battery powered small cart show good results, such as, straight line course; ± 17 cm deviation from the course at 10 meters point
rectangular course; ± 20 cm deviation from the course at 24 meters point

(The rectangular course commands the vehicle to turn 90° to the left at 12 meters point).

1. まえがき

道路上を走行する自動車などの自動誘導, 空港内を走行中の航空機などの無視界誘導, 工場内や危険箇所における各種運搬機器・移動機械の自動誘導, 無人消防車・救急車, 機械式盲導犬・移動ロボットの自動誘導など, 移動体の進行すべきコースをあらかじめ与えておいて, その指示にもとづいて自動誘導ができれば大変便利であろう。現在までのところ, 上記移動体などの自動誘導に関しては, いくつかの方法が提案されており, あるものは実用化されている。

自動誘導の手法を機能的な構成について分類してみると, 1)移動体が自らの位置・方位を把握する機能と, 2)進行方位などの誘導方策を決定する機能となる。さらに位置・方位を把握する機能を, その情報源によって分けると,

- A) 移動体が他の援助施設によらずに位置・方位を検出する方式
- B) 移動体が外部の援助施設からの情報を利用し, 位置・方位を検出する方式

に分かれる。

また, 誘導方策を決定する機能は,

- a) 移動体内部に目標コースを持つもの
- b) 移動体外部のコース情報を利用するもの

に分かれる。移動体の自動誘導の手法は, 1), 2)の組み合わせにより, 以下のようになる。

A) a) I.N.S. などとオートパイロットにより航行する航空機・船舶など

* 原稿受付 1980.12.11

** 大阪府立大学 工学部 Faculty of Engineering,
University of Osaka Prefecture: Umemachi, Mozu,
Sakai, Osaka 591 JAPAN

*** 大阪府立大学 大学院 Graduate School of University
of Osaka Prefecture: Umemachi, Mozu, Sakai,
Osaka 591 JAPAN

- A)・b) 宇宙開発などにおいて、将来発展が期待される分野
 B)・a) TACAN, LORAN, DECCAなどとオートパイロットにより航行する航空機・船舶など
 B)・b) 路面などに設置された目標コースにより誘導される車輛など^{1~5}

以上の四種類の組み合わせの中で、外部援助装置を必要としないものは、A)・a)の組み合わせだけであり、「自立的」な誘導方法と呼ばれている。

本論文では、外部援助装置を必要としない A)・a) の組み合わせに属する誘導方法を提案する。すなわち、位置・方位検出方法として、単位時間当たりの移動体左右の進行距離を独立に求め、それらの和の半分から移動距離を、差から進行方位の変化を求め、初期状態よりそれらを累算することにより、現在位置・方位を求める推測航法方式を採用し、誘導方策を決定する方法としては、紙面上に目標コースを描いた地図を移動体に与えると、それを読み取りながら操舵方向などを決め、自動誘導を行う方式を採用した。さらに、本方式の有効性を確かめるために、以上の手法を用いた実験車輛を作成し、誘導実験を行い、所期の結果を得たので報告する。

2. 誘導方法

2.1 誘導の原理

移動体を自動誘導する手法の特長は、位置・方位検出方法と、誘導方策を決定する方法の組み合わせによって決まる。外部情報を全く必要としない自立的な自動誘導を実現するには、位置・方位検出方法と誘導方策を決定する方法の両方が自立的であることが必要である。また、位置・方位検出が行われた後、誘導方策を決定するという手順をふまなければならない。そこで、まず位置・方位検出方法について述べる。

ある時刻における移動体の位置・方位が明らかなとき、その点から単位時間走行した時点での位置・方位は、その2点間の走行情報(走行距離・進行方位の変化)をもとに、幾何学的計算によって求めることができる。この計算を出発点から単位時間(τ秒)毎に移動体上の計算機で行うことで、時々刻々変化する移動体の位置・方位をτ秒毎に自立的に検出することができる。この位置・方位自立測定法についてはすでに報告した⁶ので、ここでは省略する。(付録参照)

次に、算出された移動体の位置・方位に基づいて誘導方策を決定する方法について述べる。

Fig. 1に示されるように、目標コースの左側を黒く塗った地図を作成し、地図読み取り装置に載せる。移動体

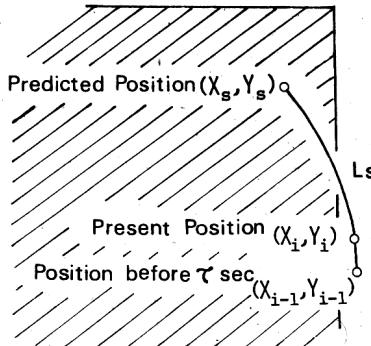


Fig. 1 Relation between present and predicted position of vehicle on route map

が現在位置(X_i, Y_i)から、適当な距離(L_s)進んだ時、到達すると予測される地図上の位置(X_s, Y_s)に明暗を判別(コース読み取り)するセンサを移動させる。センサの出力が暗ならば右へ、明ならば左へ操舵すれば、移動体は目標コースに沿って誘導されることになる。

2.2 誘導方法

上記誘導原理を実現するにあたって、到達予測位置(X_s, Y_s)の推定は非常に複雑であるので、本研究では次式により算出することとした。なお、地図上の到達予測位置をコース読み取り位置と呼ぶことにする。

$$\begin{aligned} X_s &= X_i + L_s \times \sin(\theta_i + n \times \Delta\theta_i / 2 \pm \Delta\theta_s) \\ Y_s &= Y_i + L_s \times \cos(\theta_i + n \times \Delta\theta_i / 2 \pm \Delta\theta_s) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 L_s は現在位置(X_i, Y_i)より到達予測位置(X_s, Y_s)までの距離であり、 $\Delta\theta_i / 2$ は点(X_{i-1}, Y_{i-1})より現在位置(X_i, Y_i)まで走行する τ 秒間に変化した方位変化の半分であり、点(X_{i-1}, Y_{i-1})と点(X_i, Y_i)とを結ぶ直線と点(X_{i-1}, Y_{i-1})での進行方位とがなす角度である。これに適切な整数 n をかけることにより、 $n \times \Delta\theta_i / 2$ は点(X_i, Y_i)以後、点(X_{i-1}, Y_{i-1})～点(X_i, Y_i)間の平均操舵角を保ちながら走行すると仮定した時の、点(X_i, Y_i)と到達予測位置(X_s, Y_s)を結ぶ直線と、点(X_i, Y_i)での進行方位とがなす角度となる。

$\Delta\theta_s$ は補正係数で、移動体が点(X_{i-1}, Y_{i-1})から点(X_i, Y_i)まで進行する間にも操舵を続けているために、点(X_i, Y_i)における瞬時の回転半径が点(X_{i-1}, Y_{i-1})～点(X_i, Y_i)間における平均の回転半径と異なることや、操舵方向切り換え時の無駄時間などを補償している。複号は点(X_{i-1}, Y_{i-1})～点(X_i, Y_i)間における操舵方向が右のとき、つまり点(X_{i-1}, Y_{i-1})における明暗判別の結果が暗であれば+、逆のとき-をとる。

コース読み取り位置にセンサを移動させる時、センサの出力が暗であれば右に、明であれば左に操舵するシス

テムを構成すれば、移動体は目標コースに沿って誘導されることになる。

次に、直線的な目標コースを例にとり、コース読み取り位置および明暗判別結果と操舵および車輪の軌跡の関係を詳しく述べる。移動体が直線的に誘導されている場合には、(1)式における進行方位 $\theta = \theta_0$ (一定) となり、その変化 $\Delta\theta_i$ は、

$$\Delta\theta_i \approx 0 \quad (2)$$

とみなすことができる。この時、到達予測位置 (X_s, Y_s) は、

$$\begin{aligned} X_s &= X_i + L_s \times \sin(\theta_0 \pm \Delta\theta_i) \\ Y_s &= Y_i + L_s \times \cos(\theta_0 \pm \Delta\theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

Fig. 2において、点 (X_i, Y_i) は出発点より $i\tau$ 秒間、走り続けた移動体の位置である。点 (X_i, Y_i) において、(3)式より求められたコース読み取り位置 (X_{s_i}, Y_{s_i}) が暗領域内にある時、移動体は点 $(X_i, Y_i) \sim$ 点 (X_{i+1}, Y_{i+1}) 間では右に操舵しながら進む。したがって、点 (X_{i+1}, Y_{i+1}) におけるコース読み取り位置 $(X_{s_{i+1}}, Y_{s_{i+1}})$ は、(3)式中の複号を + にとり、演算して求める。ついで、その点にセンサを移動させ明暗判別を行う。以後、点 $(X_{i+1}, Y_{i+1}) \sim$ 点 (X_{i+2}, Y_{i+2}) 間では、点 $(X_{s_{i+1}}, Y_{s_{i+1}})$ での明暗判別が明であるので操舵方向を左にとる。

このように、直進誘導時、コース読み取り位置 (X_s, Y_s)

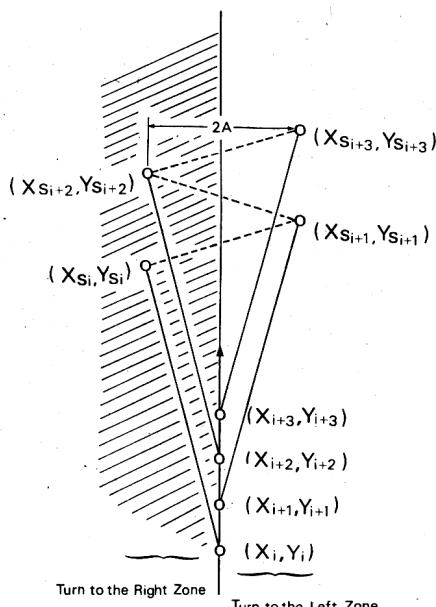


Fig. 2 Illustration of vehicle and sensor position when vehicle is on straight course

Y_s) は、 τ 秒毎に誘導コースの左右を振れながらジグザグに進み続ける。この振幅を A とおくと、(3)式から近似的に、

$$A = L_s \times \sin \Delta\theta, \quad (4)$$

となる。

この時、注意すべきことは、操舵方向を決定する(明暗を判別する)センサは、コース読み取り位置 (X_s, Y_s) でのみ明暗判別しているのではなく、センサが移動している途中でも判別を行っているということである。いま、センサが暗と判別している時間を T_R 、明と判別している時間を T_L とすれば、 T_R は右に操舵し続けている時間となり、 T_L は左に操舵し続けている時間になる。もし、

$$T_R = T_L \quad (5)$$

ならば、右に操舵している時間と左に操舵している時間は等しいので、Fig. 2 に示すように移動体は直進し続ける。

3. 実験車両とそのシステム

本論文で提案した自動誘導方式の有効性を確かめるために、実験システムを試作した。試作した実験車両の外観を Fig. 3 に示す。

3.1 ハードウェア構成

ハードウェア構成を Fig. 4 に示す。実験車両としては、市販の電動ゴルフカートを用いた。この車は、差動歯車を介して駆動される後輪 2 輪と、モータにより操舵される前輪 1 輪をもつ 3 輪車で、ホイールベース 65 cm,

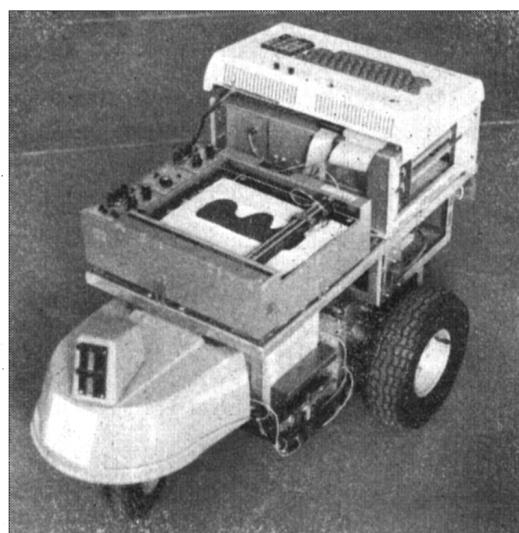


Fig. 3 View of our experimental vehicle

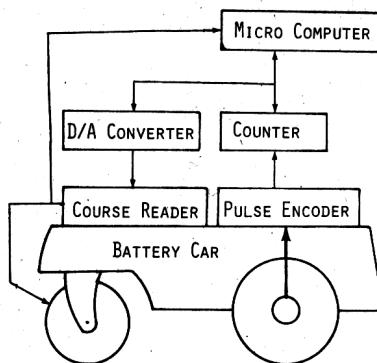


Fig. 4 Integrated guidance system configuration

トレッド 56 cm, 平地最大速度 1.43m/秒, 操舵角速度 1.26 rad/秒である。後輪には左右独立に、1 回転当たり 400 パルスを発生するパルスエンコーダを取り付けた。なお、このパルスエンコーダは、車輪の進行距離約 0.229 cm 当たり 1 パルスを発生する。この量子化による方位検出誤差は最大 $\pm 0.233^\circ$ であり、10m直進した場合、横方向に最大 ± 4.07 cm の位置検出誤差を生じる。前輪タイヤサイズは 2.50-4、後輪は 3.50-5（単位はすべてインチ）である。

車上計算機としては、マイクロコンピュータ（CPU は Z-80、主メモリ 32K バイト）を用い、オンラインで車輌の現在位置、方位、コース読み取り位置の算出を行う。コース読み取り装置としては、X-Y 記録計のペンのかわりに反射型フォトピックアップを取り付けて使用した。D/A 変換器は 8 ビットのものである。

Fig. 4において、左右のパルスエンコーダより発生したパルスは、それぞれカウンタにより計数され、 τ 秒毎に車上計算機に入力され、車輌の現在位置・方位が算出される。このデータに基づいて、(1)式により算出されたコース読み取り位置 (X_i, Y_i) は、D/A 変換器を経て地図読み取り装置上に出力され、コースの明暗が判別される。明暗判別信号は操舵モータに直接与えられるが、この信号は 2 値信号であるから、操舵輪は一定角速度で左または右に操舵される。また、明暗判別信号は、同時に車上計算機にもフィードバックされている。

3.2 ソフトウェアの作成

ここで提案した原理に基づいて試作した実験車を誘導するプログラムは、アセンブラーで作成し、以下のことに気をつけた。

- ①現在位置・方位は τ 秒毎に算出されるので、簡単のために到達予測位置の算出および出力も τ 秒毎に行うこととした。
- ②車輌現在位置 (X_i, Y_i) と到達予測位置 (X_s, Y_s) を

算出するのに必要な三角関数の計算は、メモリ中に表を作ることで時間の短縮をはかった。なお、表は 90° を 201 分割し、一つの数値は 1 バイトの大きさで格納している。

- ③データは主として、2 バイトの固定小数点として扱い、 θ など特に誤差の累積が問題となりそうな数値については 4 バイトとした。

以上のような考慮をはらって製作したプログラムは、現在位置・方位検出に約 780 ステップ、誘導方策決定に約 320 ステップを要した。左右車輪よりパルスデータを取り込んでから、コース読み取り位置を出力するまでの一巡の計算時間は、25 ミリ秒以内に収った。

4. 誘導実験および考察

車輌の自動誘導に影響する本質的なパラメータとしては、進行速度、操舵角速度、制御周期などがあるが、本研究においては、これらを次のように固定した。

進行速度 = 75.8 cm/秒、操舵角速度 = 1.26 rad/秒

現在位置・方位算出周期 (τ) = 0.1 秒

到達予測位置演算周期 (τ) = 0.1 秒

また、(1)式中のパラメータ n を 14 と固定した。コース読み取り位置の振れ幅 A 、および車輌位置から到達予測位置までの距離 L_s と誘導性能の関係を調べるために、直進コースおよび直角コースについて実験を行った。走行路面は平坦なコンクリート舗装路である。

4.1 直線コース指令による自動誘導

直線コースの左側を黒く塗った地図を実験車輌にセットし、10m直進走行実験を行った。発進時には、車輌の進行方位を正確に目標コースに合わせ、急加速で発進しないよう加速度制御を行った。走行中、車輌の中心から連続的に水を落として実際の走行軌跡を測定した。これ

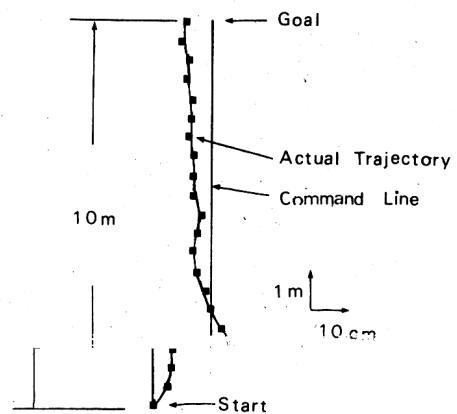


Fig. 5(a) Actual trajectory of vehicle by guidance command of straight line course

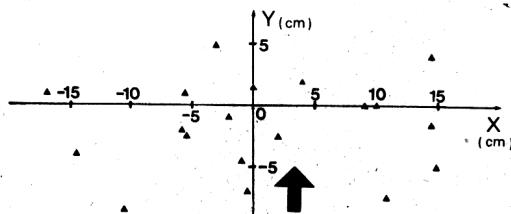


Fig. 5(b) Actual final position by guidance command of 10 meters straight line

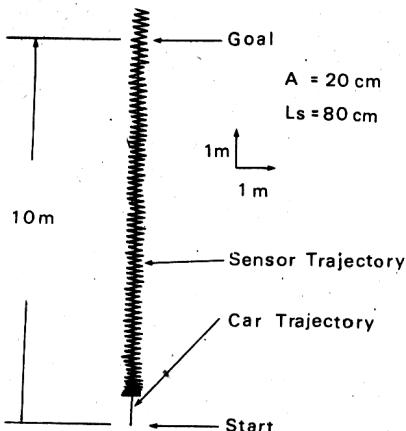


Fig. 6(a) Continuous reading of vehicle and sensor position from on-board computer

を Fig. 5-a に示す。出発時に右に蛇行しているのは、操舵方向切換リレーの特性が原因していると考えられる。出発後、約 4 m 走行すると、ほぼ定常状態に入ってしまい、車輌の蛇行はほとんどない。10m 地点では、10 cm ほど目標点からはずれている。以上の実験を何度もくり返し、目標点(10m 地点)における車輌停止位置を測定した。車輌停止位置のばらつきを、目標点を原点として Fig. 5-b に示す。位置検出およびそれに基づく自動誘導を含めた総合誤差が、10m 地点では進行方向に約 ± 7 cm、横方向に約 ± 17 cm 以内に収まった。

Fig. 6-a に、上記直線コース誘導走行中に車上計算機によって算出された車輌の軌跡と、コース読み取り位置の軌跡を示す。コース読み取り位置は、2.2 誘導方法で述べたように、明領域と暗領域を交互に振れながらコースにからみつつシグザグに進んでいる。車輌の軌跡は、コース読み取り位置の軌跡であるシグザグ線の中を通っているほぼまっすぐな線であり、直線コース誘導時の誘導誤差は、ほとんどないことがわかる。なお、Fig. 5-a に示される実際の車輌軌跡と、Fig. 5-b に示される計算機内の車輌軌跡とを比べると、誤差が存在するが、これは車輌の位置・方位検出精度に関係している誤差であ

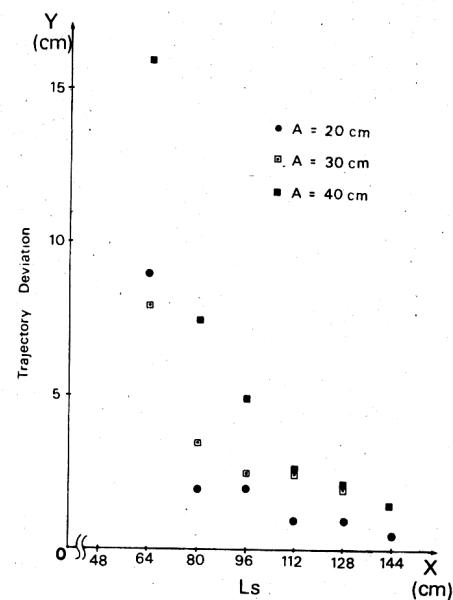


Fig. 6(b) Trajectory deviation of guided vehicle vs. L_s and A
 L_s : Net range from vehicle to sensor
 A : A half of peak to peak sensor deviation at steady state guided condition

る。Fig. 5-a の車輌軌跡には約 2 cm の蛇行が含まれている。この蛇行の大きさとコース読み取り位置の振幅 A 、および車輌位置から到達予測位置までの距離 L_s との関係を詳しく調べるために、種々実験し、まとめたものを Fig. 6-b に示す。

Fig. 6-b より L_s が大きいほど、また A が小さいほど誘導軌跡の蛇行が小さいこと、 L_s が 1 m 以上では、蛇行の振幅は A の値にかかわらず、ほぼ 2 cm 以内に収まっていることがわかる。これらの実験より、蛇行の振幅はコース読み取り位置の振幅 A に比べてはるかに小さいことがわかる。この原因について以下に考察する。

移動体が何らかの外的要因により、Fig. 7 に示されるように誘導コースから外れた状態を考える。この場合、コース読み取り位置は明領域と暗領域とを交互に往復しているが、明らかに明と判別している時間(T_L)の方が、暗と判別している時間(T_R)よりも長い。つまり、操舵信号は左右交互であるが、左へ操舵される期間の方が右へのそれよりも長いので、左に操舵される効果が大きくなり、移動体は目標コースにからみつくようになる。

このように操舵方向は、明暗によるパンパン制御によるものであるにもかかわらず、コース読み取りが時間的に連続して行われているため、目標コースと移動体との

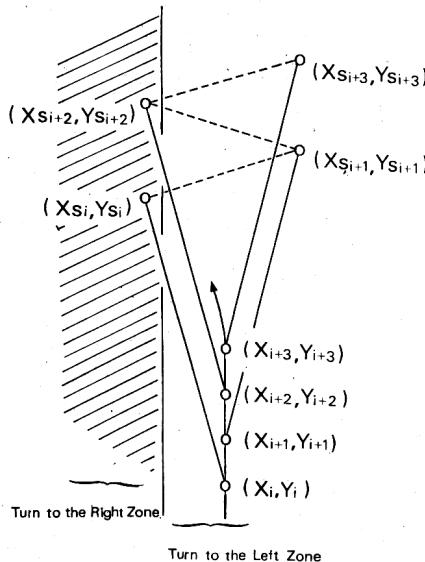


Fig. 7 Contribution to steady state error reduction of the longer duration time while sensor is in turn-to-the-left zone

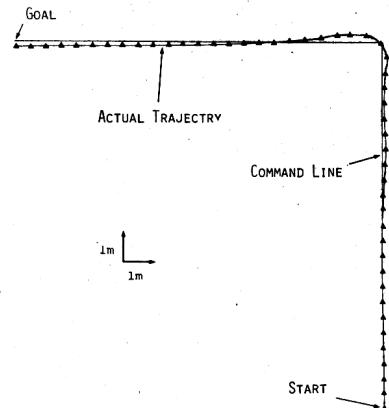


Fig. 9(a) Actual-trajectory of vehicle by guidance command of rectangular course

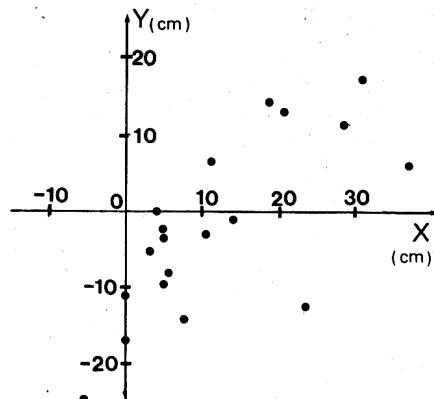


Fig. 9(b) Deviation of vehicle from commanded final position

それを把握し誘導する制御系となっている。このため、誘導車輌の蛇行は、コース読み取り位置の振幅に比べて非常に小さくなり、安定した誘導が実現されている。

4.2 直角コース指令による自動誘導

Fig. 8 に示される直角コースを実験車輌にセットし、このコースに沿って誘導した。この走行軌跡を Fig. 9-a に示す。実際の走行軌跡は与えられた誘導コースにからみついており、車輌の蛇行はほとんどないことがわかる。この直角コース走行実験を何度もくり返し、Fig. 8 に示される目標点における車輌停止位置のばらつきを、目標点を原点として Fig. 9-b に示す。図より、目標点

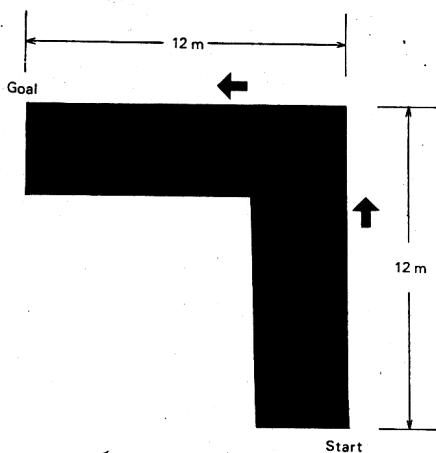


Fig. 8 Guidance command (Rectangular course)

に対し約±20 cm のコース偏差にとどまっていることがわかる。停止位置は、右上がりの帯状に分布している。これは、Fig. 5-b に示される車輌停止位置の分布と、それ自身を 90° 回転させた分布とを合成した分布であり、X 方向・Y 方向それぞれ直進する間に生じた 2 方向の位置検出誤差が合成されていることがわかる。

次に、上記直角コース走行実験の際に、車上計算機によって算出された車輌の軌跡と、コース読み取り位置の軌跡の 2 例を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の a と b とは、図中に示される異なるパラメータを設定して、別々に測定した実験データである。シグザグの線がコース読み取り位置の軌跡であり、その中を通っている線が車輌の軌跡である。直進部分においては、前記 4.1 で述べた直進コース走行実験の結果と同じ状態であることがわかる。また、コーナにおける車輌軌跡は、Fig. 10 の a, b ともオーバーシュートしていることがわかり、Fig. 10-a と Fig. 10-b とを比較すると、L_s の小さい Fig. 10-a の方

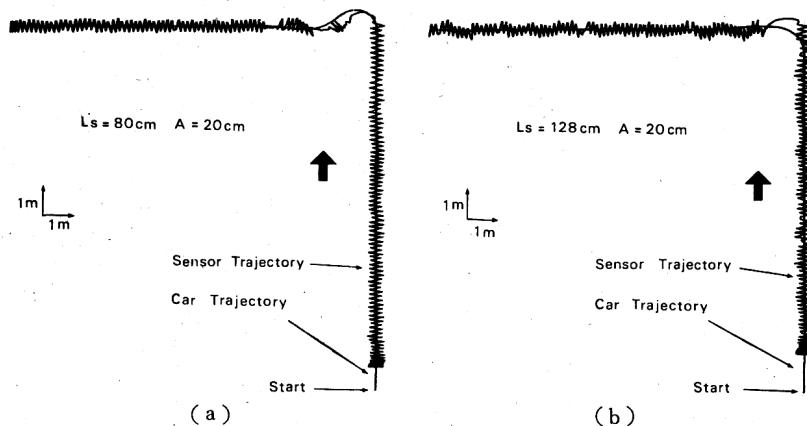


Fig. 10 Sensor (saw-toothed) and car (smoothed) trajectories along the rectangular course

Table 1 Overshoot of the vehicle trajectory (cm) vs. L_s and A when vehicle turns 90°

L_s (cm) : Net range from vehicle to sensor
 A (cm) : A half of peak to peak sensor deviation at steady state guided condition

$L_s \backslash A$	20	30	40
80	65.0	65.0	60.0
96	35.0	30.0	32.5
112	15.0	15.0	17.5
128	12.5	12.5	12.5

が大きくオーバーシュートしていることがわかる。

第1表は、コース読み取り位置の振れの振幅 A と、車輌位置から到達予測位置までの距離 L_s を種々変化させて実験を行い、測定したオーバーシュートの大きさをまとめたものである。 L_s が小さいほど直角コーナにおけるオーバーシュートは大きくなることがわかる。また、コース読み取り位置の振幅 A は、オーバーシュートには無関係であることもわかる。

5. 結 論

走行経路を紙に描くことで誘導コースが指定でき、情報収集・解析・判断機能を、自立・オンラインで行う自動誘導方式を提案した。この方式は、

- コースの設定、変更が容易である。
- 移動体外部の情報を必要とせず、自立で誘導できる。

という特長をもつ。この方式に基づいて実験車輌を試作し、実際に紙に描かれたコースどおりに自動誘導ができる事を確かめた。実際の車輌位置とコースとのずれを検出しながら操舵することで、車輌の蛇行をきわめて小

さくすることができ、安定した自動誘導を実現できることが明らかになった。また、誘導アルゴリズムに関する内部パラメータと、直角変向指令に対する追従性の関係も実験により明らかにした。総合的な誘導実験の結果、10m直線コース指令における目標点での実際の車輌位置は、進行方位に約 $\pm 7 \text{ cm}$ 、横方向に約 $\pm 17 \text{ cm}$ 以内に収まった。

本方式は、従来の方法に比べ、汎用性において非常に優れているので、各種無人誘導システムへの応用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 菊池：自動車の無人操縦；計測と制御，Vol. 11, No. 1, pp. 85~89 (昭.47)
- 2) 宮崎, ほか：工場内無人運搬車と制御；オートメーション, Vol. 21, No. 2, pp. 43~47 (昭.51)
- 3) 川村：農業機械の自動化の動向；ビーグルオートメーションシンポジウム, Vol. 1, pp. 9~14 (昭.53)
- 4) 富沢, ほか：移動式点検装置の制御方式；ビーグルオートメーションシンポジウム, Vol. 2, pp. 25~26 (昭.54)
- 5) 館, ほか：ランドマークを利用した移動ロボットの誘導；ビーグルオートメーションシンポジウム, Vol. 2, pp. 17~20 (昭.54)
- 6) 津村, ほか：移動体の現在位置・進行方位の計測の一方法；日本機械学会講演論文集, No. 807-3, pp. 123~130 (昭.55)

付録 移動体の位置・方位自立測定法

Fig. A-1において、移動体が $(X_{i-1}, Y_{i-1}) \sim (X_i, Y_i)$

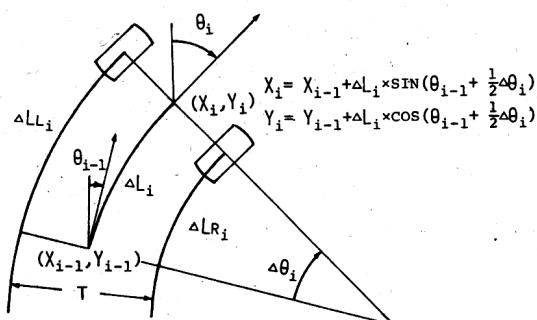


Fig. A-1 Illustration of incremental position computation algorithms

間を走行する時間(τ 秒)に、左右車輪がそれぞれ ΔL_{Li} , ΔL_{Ri} だけ進行したとすると、移動体の進行距離 ΔL_i 、進行方位の変化 $\Delta\theta_i$ は、

$$\Delta L_i = (\Delta L_{Li} + \Delta L_{Ri})/2 \quad (A.1)$$

$$\Delta\theta_i = (\Delta L_{Li} - \Delta L_{Ri})/T \quad (A.2)$$

で表わされる。ただし、 T はトレッドである。したがって、点 (X_i, Y_i) での進行方位 θ_i は、点 (X_{i-1}, Y_{i-1}) での進行方位を θ_{i-1} とすると、

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta_i \quad (A.3)$$

となる。ただし、方位 θ は右回りを正としている。 τ を十分小さくとると $\Delta\theta$ も十分小さく、点 (X_{i-1}, Y_{i-1}) と

点 (X_i, Y_i) は同一円周上の点とみなされ、その2点を結ぶ円周上の距離と2点間の直線距離はほぼ等しくなる。したがって、移動体の現在位置 (X_i, Y_i) は、近似的に

$$X_i = X_{i-1} + \Delta X_i \quad (A.4)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta Y_i \quad (A.5)$$

となる。ただし、 ΔX_i , ΔY_i は

$$\Delta X_i = \Delta L_i \times \sin(\theta_{i-1} + \frac{1}{2}\Delta\theta_i) \quad (A.6)$$

$$\Delta Y_i = \Delta L_i \times \cos(\theta_{i-1} + \frac{1}{2}\Delta\theta_i) \quad (A.7)$$

により算出される。移動体の初期位置 (X_0, Y_0) と初期方位 θ_0 がわかっていてれば、現在位置 (X_i, Y_i) および現在の進行方位 θ_i は、初期点より累算することにより、次のように表わされる。

$$X_i = X_0 + \sum_{n=1}^i \Delta X_n$$

$$Y_i = Y_0 + \sum_{n=1}^i \Delta Y_n$$

$$\theta_i = \theta_0 + \sum_{n=1}^i \Delta\theta_n$$

上記の演算を車上計算機で出発点より一定の周期(τ)でくり返し行うことにより、時々刻々変化する移動体の位置が算出される。以上の移動体の位置・方位自立測定法の詳細は、各種補正法も含めてすでに報告⁶した。