

野外走行可能なレーザ位置計測式無人走行車両

An Autonomous Vehicle Using Laser Scanners for the spacious rolling field

望月 博文*

Hirohumi Mochizuki

村井 孝之*

Takayuki Murai

溝川 隆司*

Takashi Mizokawa

要旨

本論文では、野外の起伏のある路面にて自動走行可能な無人走行車の研究内容について述べる。

この車両は、あらかじめ作成された地図に従って自動走行が可能である。自動走行のための、車両の位置計測は、デッドレコニング方式とレーザ位置計測方式を用いている。これは、地上に設置した反射体と、車両に搭載したレーザ投受光器を使用して、受光方位から位置計算を行うものである。また、このレーザ投受光器は、丘陵地などに於ける車体の傾斜に対応可能である。

また、リアルタイムで位置計測を可能とするための位置計算アルゴリズムと、広範囲な領域の走行を可能とするため、複数の反射体の利用方法も同時に開発し、走行実験により目標性能（位置計測精度： $\pm 0.1[m]$ ）を達成した。

これらの研究で得た無人車制御技術は、電磁誘導ゴルフカート「ターフエース」開発に応用展開された。

Abstract

This paper describes an autonomous vehicle for spacious rolling field. For vehicle navigation, the vehicle has a dead reckoning and a laser scanning system that determines its current position with maps that are set previously. The laser scanning system scans reflecters of known points and detects the angles of reflected laser beams. Vertical laser scanning enables it to detect them when the vehicle is on the slope. New algorithms for this system provide real-time vehicle positioning and proper selections of reflecters for the spacious field navigation. Experimental results show that the lateral accuracy of 0.1 m can be achieved, that is generally sufficient for vehicle navigation.

The resulting software of this autonomous vehicle control system has been introduced to commercial products, including "Turface", a driverless golf cart using magnetic field sensors.

1 はじめに

ゴルフ場等の野外の広範囲かつ起伏のある未舗装路面を、レールや誘導線等のガイドを用いずに自動走行可能な車両の実現を目的として、研究を進めてきた。

無人走行車両を自動走行させる方法として、従来、デッドレコニング方式がよく用いられてきた^[1]。しかし、この方式は、

- (1)路面の傾斜などによるタイヤの変形。
- (2)タイヤのスリップ。

等の問題により、計測される位置の累積誤差が大きく、この方式だけでは、起伏のある未舗装路面での無人走行の実現は難しい。また、デッドレコニング方式の問題点を解決する方法として、地上

に設置した反射体と車両に搭載したレーザ投受光装置を使用して、受光方位から三角測量の原理により位置を計測する。レーザ位置計測システムが研究されてきたが、ゴルフ場のような野外の広い丘陵地に適用するには、以下に示す問題点があった。

- (1) 車体が傾斜すると投受光が不可能となる場合が発生する。
- (2) 外来光等によるレーザ投受光装置の誤動作の発生。
- (3) 走行が可能な領域が一組の基準となる反射体の範囲内に限定される。

そこで、これらの問題点を解決する新しいレーザ位置計測システムを考案し、未舗装で起伏のある路面でも使用可能な無人走行車両を実現すべくテスト・改良を繰り返し、所定の目標性能(表1)を達成した。

* 技術本部制御技術部

本稿では、このレーザ位置計測式無人走行車両に関し、車両システムの概要と位置計測システム、及び、実験結果について報告する。

表1 レーザ位置計測システムの目標性能

項 目	目 標
対応走行速度	6 km/h
位置計測精度	$\pm 0.1\text{ m}$, $\pm 1^\circ$
車体傾斜	$\pm 20^\circ$ まで計測可
受光光線の識別	反射体からの反射光と外来光・所定反射体以外からの反射光を識別可.
投受光距離	最大50 m

2 車両システムの概要

位置計測装置としては、車輪速センサとレーザ投受光装置が搭載されている。
走行コースのデータは、予めコース編集装置にて作成し、車載の記憶装置に入力される。前輪は、操舵機構を介してモータにて操舵される。車速制御は、モータにて行われ、差動機構を介して左右後輪が駆動される。また、障害物センサを備えて

おり、障害物回避走行も可能となっている。
車両の制御系の構成を図に示す。(図1)

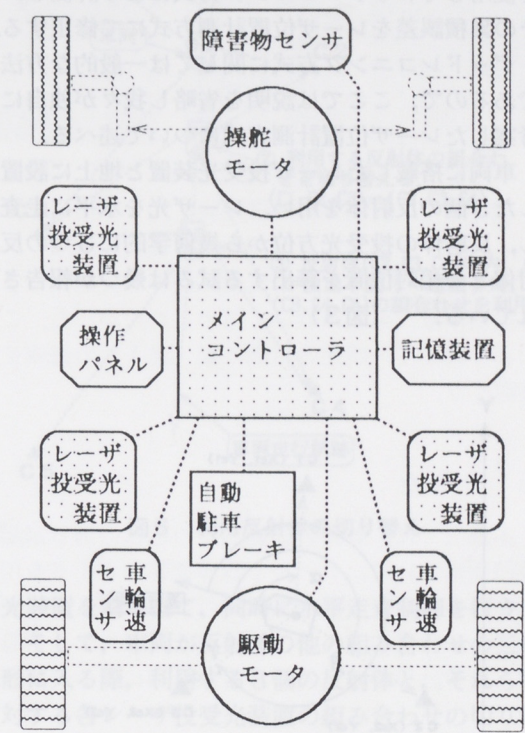


図1 車両の制御系構成図

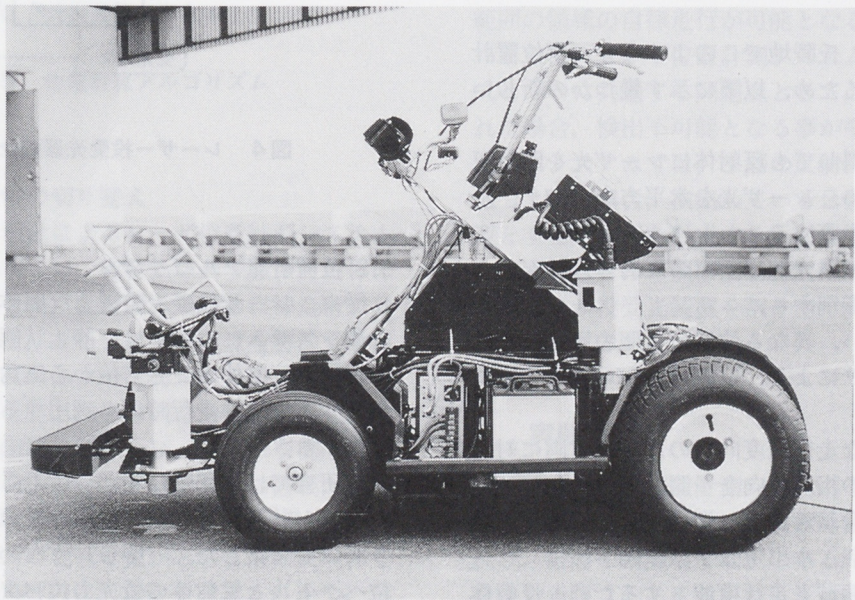


図2 テスト車両

3 レーザ位置計測方式

車両の位置は、基本的には左右の車輪速センサを使用してデッドレコニング方式により計測し、その累積誤差をレーザ位置計測方式にて修正する。

デッドレコニング方式に関しては一般的な方法であるので、ここでは説明を省略し我々が独自に考案したレーザ位置計測方式について述べる。

車両に搭載したレーザ投受光装置と地上に設置した3個の反射体を用い、レーザ光を水平に走査し、反射体の投受光方位から幾何学的に3つの反射体との相対位置を算出する試みは幾つか報告されている。^{[2],[3]} (図3)

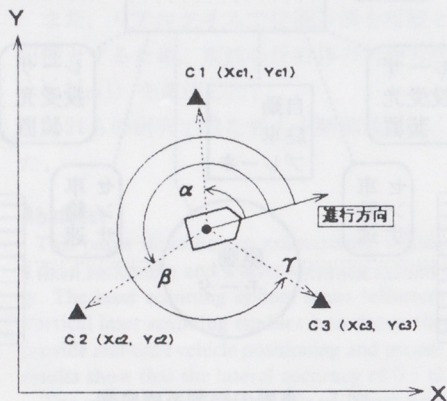


図3 従来の位置計算原理 (静止状態)

本研究では、丘陵地でこのようなレーザ位置計測を可能とするため、以下に示す幾つかの新しい試みを行った。

- (1) 車体が傾斜しても反射体にレーザ光を照射可能とするため、レーザ光を水平方向に加え、垂直方向にも走査する。
- (2) 外来光(太陽光線や所定の反射体以外からの反射光)を識別する。
- (3) 走行に伴い、異なる位置で3個の反射体の受光方位データにより、位置計算が可能なアルゴリズム。
- (4) 計測可能な走行速度向上のため、車両に対する各反射体の相対方向を予測計算し、レーザ投受光装置3台がそれぞれ担当する反射体(3個)を同時に狙い、水平走査する制御手法。
- (5) 広範囲な領域を走行可能とするため、反射体の組み合わせを、順次切り替えられる。

3.1 レーザ投受光装置の仕組み

レーザ投受光装置の構成(図4)について述べる。投受光装置は、モータにより水平方向に走査され、かつ、装置内部のポリゴンミラーによりレーザ光は上下にも走査される。反射体からの光を受光するとコントローラに受光信号が送られ、コントローラは投受光装置の水平回転軸に取り付けられたロータリーエンコーダの値から受光方位を計測する。

外来光による誤動作を防止するため、反射体(コーナキューブ)表面の偏光板と投受光装置内部の受光光線の偏光状態を検出する仕組みにより、所定の反射体からの受光の場合のみコントローラに受光信号を送る。

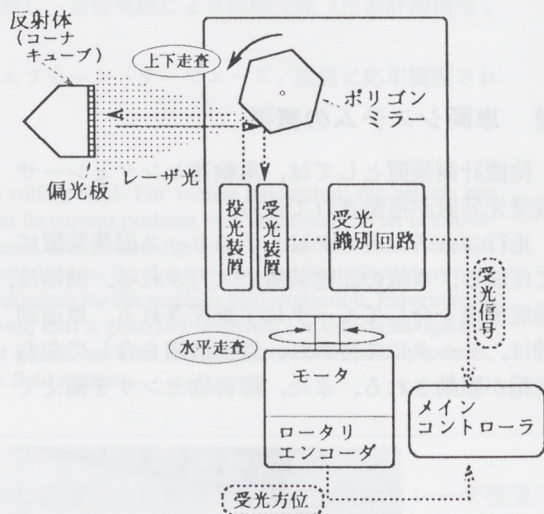


図4 レーザ投受光器の仕組み

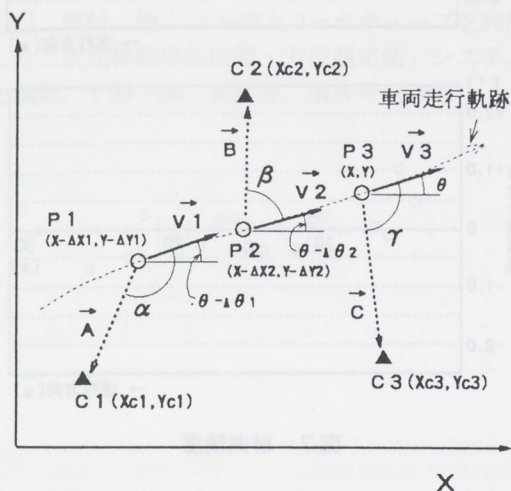
3.2 位置計算アルゴリズム

従来、レーザ投受光装置と反射体を用いた位置計測システムにおいては、静止状態での1地点での3個の反射体の受光方位から三角測量の原理で計算する方法を走行時にも適用する事例が報告されている。^[3]

本研究では、移動しながらでも3ヶ所の反射体の方位が計測できれば、位置が計算できるアルゴリズムを考案した。(図5)すなわち、車両の方位ベクトルと反射体の受光方位ベクトルの内積から、以下に示す3元2次連立方程式を立て、数値

計算により最終受光時点での位置を計算するものである。

$$\begin{aligned}\vec{A} \cdot \vec{V1} &= |\vec{A}| \cdot |\vec{V1}| \cos \alpha \\ \vec{B} \cdot \vec{V2} &= |\vec{B}| \cdot |\vec{V2}| \cos \beta \\ \vec{C} \cdot \vec{V3} &= |\vec{C}| \cdot |\vec{V3}| \cos \gamma\end{aligned}$$



P1, P2, P3: 受光位置
C1, C2, C3: 反射体位置
 $\theta - \Delta\theta_1, \theta - \Delta\theta_2, \theta$: 車両進行方位
 α, β, γ : 受光方位(車両との相対角度)
 $\vec{V1}, \vec{V2}, \vec{V3}$: 車両進行方位ベクトル
 $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$: 受光方位ベクトル

図5 位置計算アルゴリズム

3.3 利用反射体の切り替え

従来の三角測量によるレーザ位置計測システムを用いた無人車では、走行領域が一組の反射体の範囲内に限定され、広範囲の領域の自律走行には不向きであった。そこで、本問題点を解決するため、利用する反射体を順次切り替えて、広範囲の走行の実現を可能とする方式を考案した。(図6)

各反射体の設置位置、及び、三角形を構成する3個の反射体の組み合わせは、無人に搭載の記憶装置に入力されている。

走行時、車両の現在位置がどの3個の反射体で形成される三角形内に入るかを計算し、かつ、3ヶ所の反射体に対して3台の内最適なレーザ投受

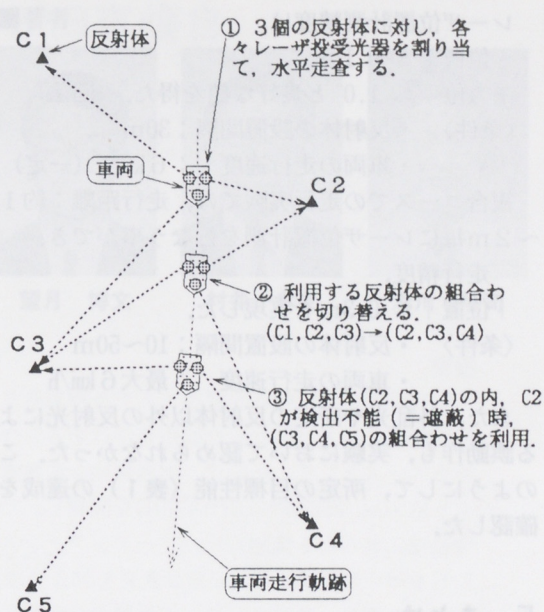


図6 利用反射体の切り替え

光装置を割り当て、同時に水平走査制御を行う。

そして、車両が反射体の他の組み合わせの三角形に入る際、利用する3個の反射体と、それらに対する各レーザ投受光装置の組み合わせの切り替えを実施する。

この様にして、走行に伴い利用する反射体の組み合わせを順次切り替えていく事により、反射体—レーザ投受光装置間の許容距離に関わらず、広範囲の領域の自律走行が可能となる。

さらに、レーザ位置計測システム、及び、光学式センサに共通する問題点として、光路を遮蔽された場合、検出不可能となる事が挙げられる。そこで本システムでは、1個の反射体が一定時間検出できない場合、検出している2個の反射体を一辺とする三角形を形成する反射体の内、最適な物を選定し、この3個の反射体に対して新たに担当するレーザ投受光装置を割り当て、位置計測を行う手法を試みた。

4 実験結果

前述のレーザ位置計測システムを搭載した無人走行車両を製作し、レーザ位置計測精度の検証、及び、野外の未舗装で起伏のある路面と舗装路面を含む走行コースを設定し、走行実験を実施した。結果は、以下の通りである。

レーザ位置計測精度は、

$$|\text{位置}| \leq 0.1\text{m},$$

| 方位 | $\leq 1.0^\circ$ と良好な値を得た。(図7)

〈条件〉 ・ 反射体の設置間隔：30m

・車両の走行速度 : 6 km/h (一定)

複合コースでの走行実験では、走行距離：約1～2 m毎にレーザ位置計測を行なう事ができ、

走行精度,

| 位置 | $\leq 0.3\text{m}$ を実現した.

〈条件〉 ・ 反射体の設置間隔：10～50m

・車両の走行速度 : 最大 6 km/h

また、外乱光や所定の反射体以外の反射光による誤動作も、実験において認められなかった。このようにして、所定の目標性能(表1)の達成を確認した。

5 まとめ

本論文では、野外の広範囲かつ起伏のある未舗装路面において、レーザ位置計測システムの原理・位置計算手法、及び、実験結果について述べた。

以上，レーザ位置計測システムを中心に述べた

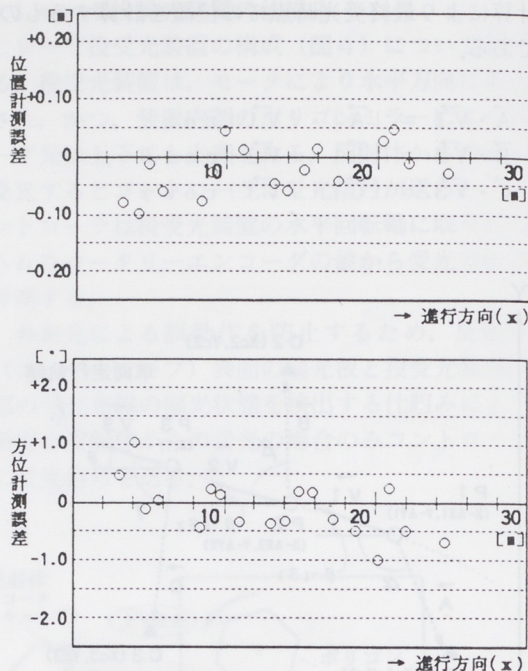


図7 計測精度

が、本研究を通じて得た無人走行技術は、電磁誘導ゴルフカート「ターフエース」開発に応用展開され(図8)、『93年10月に発売となった。

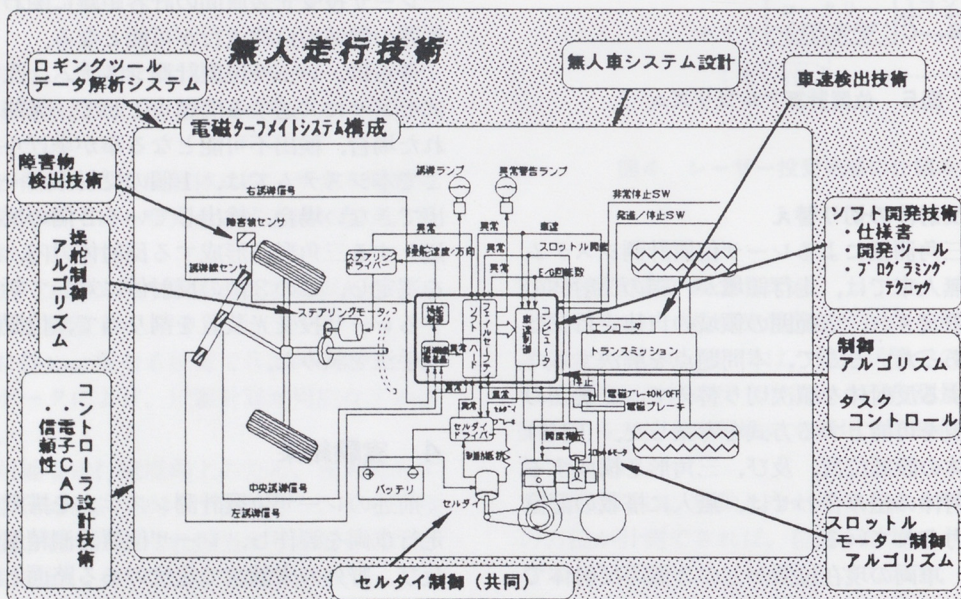
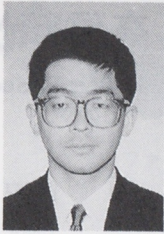


図8 電磁誘導ゴルフカート“ターフエース”への応用展開

■参考文献

- [1] 津村, 他: 「移動体の現在位置・進行方位計測の一方法」日本機械学会論文集, VOL. 47, No421, PP. 1153-1160 (1981)
- [2] 西出, 津村, 他: 「2次元移動体姿勢測定装置(レーザ・ナビゲータ)」第3回アドバンティ・シンポジウム, P31-34 (1990)
- [3] 津村, 他: 「レーザとコーナキューブを利用した二次元移動体の位置・方位測定法」システムと制御, P59-66, 第29巻, 第8号 (1985)

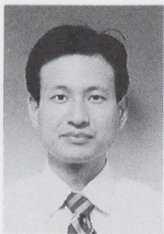
■著者



望月 博文



村井 孝之



溝川 隆司