

電磁誘導ゴルフカー向けステレオビジョン 「effi-vision」

"effi-vision" Stereo Vision for Electromagnetic Induction Golf Cars

山崎 章弘

Abstract

Yamaha Motor has been incorporating automatic driving into products for over 20 years (albeit in limited applications). Electromagnetic induction golf cars, which are capable of automatic driving following induction lines buried in the ground, are now in operation on golf courses throughout Japan since being launched in 1996.

When automatic driving vehicles are faced with impediments such as obstructions and bad weather, electromagnetic induction performs robustly compared to GPS, LiDAR, and cameras. Although initial investment of cost and time for installing induction lines etc. is involved, the electromagnetic induction method is capable of stable operation in locations such as tunnels, where there is no GPS signal, or in conditions such as snow, fog, or poor light, which LiDAR and cameras struggle with. On the other hand, the electromagnetic induction method is not capable of recognizing the surrounding environment. Thus, other methods are required to prevent collisions caused by automatic operation.

In this report, we will introduce the on-road obstacle detection and speed-varying functions of the "effi-vision" collision prevention system based on the stereo vision developed for electromagnetic induction golf cars. Electromagnetic induction golf cars have been equipped with this system since the end of 2018.

1 はじめに

ヤマハ発動機では、限定用途ながら20年以上前から自動走行を具現化している。埋設された誘導線に沿って自動走行可能な電磁誘導ゴルフカーは、1996年の発売以来全国のゴルフ場で運行されている。

電磁誘導方式は、GPS、LiDAR、カメラなどを使用した自動走行手法と比べ、遮蔽や悪天候に対して頑健である。誘導線の設置など導入初期に費用や手間がかかるものの、GPS電波が届かないトンネル内でも使用でき、LiDARやカメラが苦手とする降雪や霧、低照度といった条件下でも安定した走行ができる。一方で電磁誘導方式には、周囲環境を認識する機能がない。自動で衝突を防止するためには、別の手段を用意する必要がある。

本稿では、電磁誘導ゴルフカー向けに開発したステレオビジョンをベースとする衝突防止システム「effi-vision」の走路上障害物検出機能および増減速機能について述べる。このシステムは、2018年末から電磁誘導ゴルフカーに搭載されている(図1)。



図1 effi-vision搭載ゴルフカー

2 背景

ゴルフ場のカートパスは、アップダウンやカーブが多く、木々の間をすりぬけるように進むエリアがある。このような場所では、カートパス周辺の立木やその他の静止物が、カートパスに近接して存在することがあり、前方の立体物を検出するだけのシンプルな障害物センサを使用した衝突防止装置は、そのまま進むと衝突する対象であると判断することがある。この場合、静止物はカートパスの外にあるため衝突しないが、車両は停止する。

このような誤停止が多発すると、目的地への到着が遅くなるだけでなく、乗客にストレスがかかる。これを回避するためには、車両前方の立体物が衝突することのない周辺静止物か、衝突する可能性がある障害物かを正しく判断する必要がある。図2の例は、ゴルフカーを車両正面の立木で止まらないようにしたうえで、曲がった先にいる歩行者で止める必要がある状況を示している。

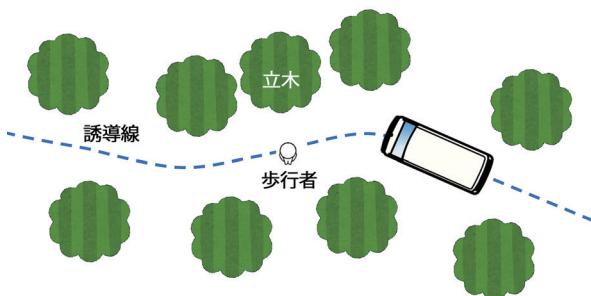


図2 ゴルフ場カートパス

前述の課題の対策案の一つとして、本誌No.48(2012年)で、機械学習(人識別技術)を用いた衝突防止システムの研究内容について紹介した^[1]。人の立ち入りや車両の乗り入れが制限されているゴルフ場では、カートパスに侵入する障害物の種類は限られている。本研究で試作したシステムでは、検出した立体物が人であれば障害物として停車し、人でなければ周辺静止物として通過するが、他の障害物(ゴルフ場をメンテナンスする作業車など)には対応していなかった。また、障害物を正しく検出できたとしても、衝突の可能性までは判断していなかった。

3 effi-vision

このような課題を解決するために開発したのがeffi-visionである。以下にその手法と構成について述べる。

3-1. 走路領域の特定

effi-visionでは障害物の種類に関係なく、車両前方の立体物が、カートパス上にあるかどうかで障害物と周辺静止物を判別している。カートパス上の障害物のみを検出するためには、車両前方の走路領域(この先車両が走行するエリア)を特定する必要がある。しかし、カートパスには明確な境界がなく、車線もない。路面もアスファルトと決まっているわけではないので、リアルタイムの画像処理による走路領域の特定は難しい。また、ゴルフ場には複雑な組み合わせのカーブが多いため、舵角による特定も難しい。

そこで、同じルートを毎回精度良くトレースできる電磁誘導ゴルフカーの特徴を利用して、過去の移動軌跡から、現在の走路領域を特定する手法を開発した。移動軌跡情報を走路マップとして用い、その走路マップと現在の車両位置から画像上の走路領域を特定する。これにより走路上の障害物のみを検出する“走路上障害物検出”が可能になる。外観による走路領域の特定が難しいカートパスにおいて、正しく特定できている例を図3に示す。

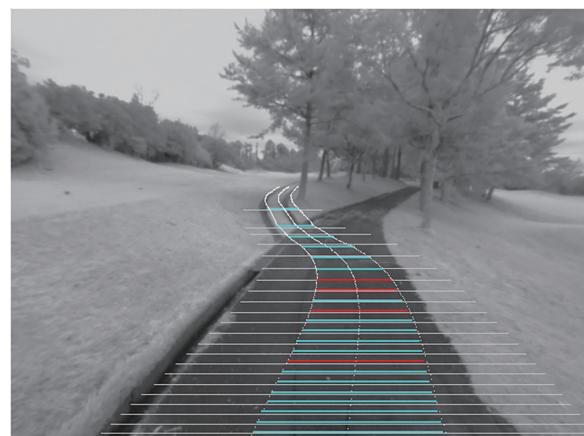


図3 画像上走路領域特定結果

3-2. システム構成

effi-vision(ステレオビジョン)を搭載した電磁誘導ゴルフカーの構成を以下に示す。

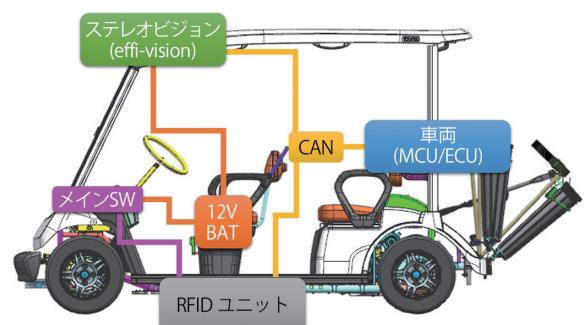


図4 システム構成

車両前方上部に取り付けられたステレオビジョン「effi-vision」は、車両前方を撮影するステレオカメラと画像処理を行う画像処理ボードで構成している。画像処理ボードはSoC FPGA(System On a Chip Field Programmable Gate Array)を搭載しており、ステレオマッチングのような並列化の効果が大きい処理をFPGAで、それ以外をCPUで処理している。

RFID(Radio Frequency Identification)ユニットは、カートパスに埋設したRFIDタグを読み取り、effi-visionは、CAN通信を介してその情報を受信する。タグの主な用途は、走路マップの切り替えである。

走路マップは、タグごとに分割しており(図5)、誘導走行中にタグ上を通過すると、そのタグに紐付けられた次の走路マップに切り替わる。運転者による手動走行から誘導走行に復帰した際にも、タグを通過することによって、走路上障害物検出を再開することができる。



図5 カートパスの走路マップイメージ

車両の位置推定には、車速パルスをもとに計算したオドメトリ(タグからの距離)を用いる。一般に自己位置推定では、精度確保のため高価なセンサやセンサフェュージョンを用いることが多いが、このシステムでは以下の理由から追加のセンサを必要としない。

電磁誘導方式は、誘導線に直交する横方向の誤差が少なく、車両は誘導線上にいることが確実で、その位置は距離方向の一次元(オドメトリ)だけで特定することができる。距離方向の誤差は、空気圧の違いなどによるタイヤ径の差やスリップなどによって生じるもの、その累積誤差は、タグ通過時にリセットでき、タグを短い間隔で設置するというシンプルな対策で、累積誤差の増大を予防することもできる。また、走路マップと走行時のタグ間距離の比から、次区間のオドメトリ誤差を予測して補正することも可能である。

3-3. 走路上障害物検出

走路上障害物検出では、車両前方の走路領域を特定して、カートパス上の障害物のみを検出する(図6)。



図6 走路上障害物検出結果

処理の流れを図7に示す。走路マップと現在の車両位置から画像上の走路領域を算出したあと、視差画像から走路領域以外の視差を除去し、立体物を検出する(図8)。

検出結果は、CAN通信を介してゴルフカーに送信し、ゴルフカーは、障害物までの距離に応じて減速・停止する。



図7 走路上障害物検出処理内容

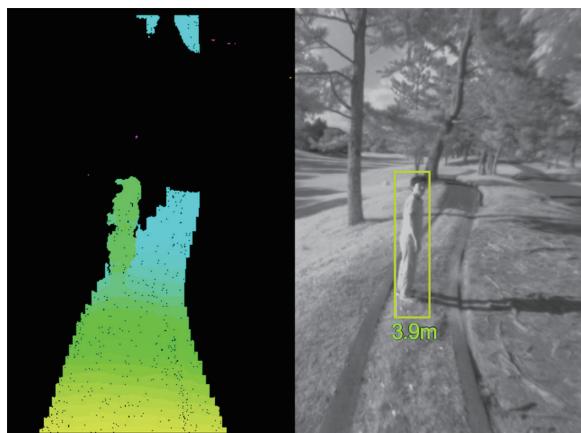


図8 走路領域の視差画像(左)と検出結果(右)

3-4. 走路マップ作成方法

走路マップはあらかじめ作成しておく必要があるが、その作業は、effi-vision導入の際に、一台の電磁誘導ゴルフカーで、画像を収集しながらカートパスを一周すれば完了する。

車種が同じであれば、走路マップを他のゴルフカーにコピーして使用できる(図9)。

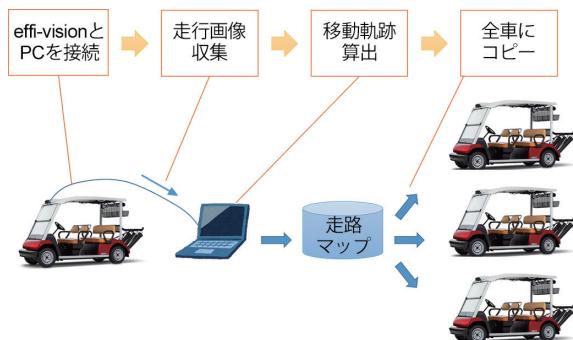


図9 走路マップ作成方法

収集した画像は、PC上でビジュアルオドメトリを用いて処理される。ビジュアルオドメトリは、連続した画像から3次元移動軌跡を推定する画像処理技術である(図10)。

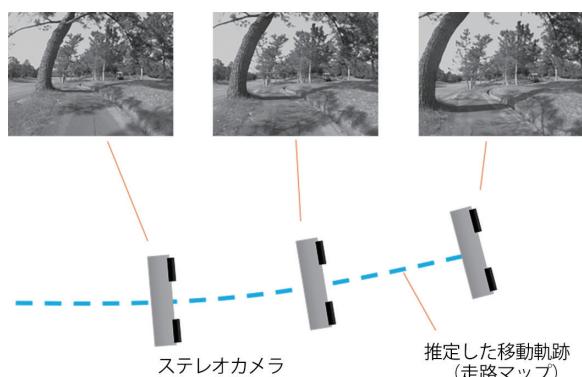


図10 走路マップ作成イメージ

実際の走路マップ作成作業では、画像収集とビジュアルオドメトリを並行して処理するので、画像収集のための走行が完了すれば、程なく走路マップも完成する。

注意点は、周辺環境が静止していることが前提の手法であることで、画角内には移動体がないことが望ましい。人や車両のような実体だけでなく、移動する自車両の影まで走路マップに影響する。なお、人や車両の移動をコントロールしやすいことに加え、撮影日時、天候を選ぶことで影の影響を低減できるゴルフ場は、ビジュアルオドメトリに適した環境といえる。

3-5. 増減速機能

effi-visionではあらかじめ走路マップを用意しているが、そこにはいくつかのメリットがある。走路マップの正否を運用前に確認できるほか、画像上の走路領域特定処理において移動体や悪天候の影響を受けないことや、計算負荷が少ないといったこと等が挙げられる。さらに走路マップは、走路上障害物検出の用途だけでなく、車両の増減速にも利用できる。

電磁誘導ゴルフカーで直線路の車速を上げるためにには、カーブ進入前に減速ができる機能を有していることが不可欠だが、従来は自動で減速する方法がなかった。操舵量による減速機能ではカーブ前に減速できず、定点(磁石またはRFIDタグ)で増減速を指示する場合は、別途定点を埋設しなければならない。

effi-visionを搭載した電磁誘導ゴルフカーでは、走路マップを用いて車両前方の走路形状から目標速度を算出することで、カーブおよび下り坂進入前の自動減速が可能になっており、あわせて直線路の高速化も可能である。その結果、従来の乗り心地を損なうことなく、目的地までの到着時間を短縮できた。

4 一般道への応用

effi-visionは、国交省の「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験」^[2]にも電磁誘導車両に搭載して参加している(図11)。



図11 自動運転サービス実証実験用7人乗りカート

この一般道での実証実験では、ゴルフ場とは違う新たな課題が浮上した。対向車などの除外困難な移動体の影響により、実際の走行経路と作成された走路マップとの間にズレが生じることである。この課題には対向車側の領域をマスクすることで対応し、大部分のズレを抑えることができた。一部残ったズレに対してはあらかじめ開発しておいた走路手動修正機能に対応した。

秋田県上小阿仁村では、雪の環境下で評価を実施した(図12)。積雪によるスリップ(オドメトリ誤差)の影響を懸念していたが、数cm程度の積雪では影響は認められなかった。また、今回の評価では、電磁誘導ゴルフカーの走行に積雪はまったく影響しなかったが、レンズカバーへの着雪(図13)によりeffi-visionが障害物を検出できない場面があった。これらは、今後の降雪地向けの課題となった。



図12 雪道の登坂



図13 レンズカバーへの着雪

今後の使用フィールドの広がりによる、新たな課題対策や機能開発などの取り組みを通して、effi-visionのさらなるブラッシュアップに努めていきたい。

■参考文献

- [1] 吉田 瞳, 山崎 章弘, 人を検出するステレオ画像認識システム, YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW 2012 No.48.
- [2] 国土交通省ホームページ (<https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/automated-driving-FOT/index.html>)

■著者



山崎 章弘

Akihiro Yamazaki

先進技術本部
研究開発統括部
先進技術研究部

■共同開発先

ヤマハモーター・パワープロダクツ株式会社

5 おわりに

電磁誘導ゴルフカー向けに開発した「effi-vision」の障害物検出および増減速機能について紹介した。あらかじめ走路マップを作成して、カートパス上の障害物だけを検出することで、カートパス周辺にある立木などの誤検出と、車両正面にない障害物の未検出を抑制することができた。走路マップは、ビジュアルオドメトリを用いて簡単に作成でき、走行時間短縮にも役立っている。

電磁誘導は古い方式ながら、確実性、環境ロバスト性においてアドバンテージを有している。用途が限定されているとはいえ、意外に柔軟性も高い。例えばカートパスは、一筆書きに限定されると思われるがちだが、分岐が可能であるほか、鉄道の線路とは違い誘導線からの離脱もできる。これらは、効率的なルート選択や移動が困難な障害物の回避に使える可能性がある。