

# 小型電気自動車の自律走行を目的とした研究開発

## Development of an autonomous small electric vehicle

菅野嘉彦\*, 長谷川貴志\*\*, 熊谷正朗\*\*\*

Yoshihiko Kanno\*, Takashi Hasegawa\*\*, Masaaki Kumagai\*\*\*

\*東北学院大学大学院, \*\*東京エレクトロン宮城(株), \*\*\*東北学院大学

\*Graduate school of Tohoku Gakuin University, \*\*Tokyo Electron Miyagi Ltd.,  
\*\*\*Tohoku Gakuin University

キーワード: 自律走行自動車 (Autonomus vehicle), ステレオビジョンカメラ (Stereo vision camera),  
自己位置推定 (Self localization)

連絡先: 〒 985-8537 多賀城市中央 1 - 13 - 1 東北学院大学工学部 機械知能工学科  
熊谷正朗, Tel.: 022-368-7358, Fax.: 022-368-7070,  
E-mail: kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

### 1. はじめに

我々にとって自動車は最も身近な移動体の一つであり, 自動運転化への取り組みは以前から研究されている. 有名な例として Google driverless car project がある<sup>1, 2)</sup>. この車両は一般的に市販されている, トヨタ自動車(株)プリウス(XW20型)を土台としており, 運転操作及びシステムを監視する2人以上の乗車を条件として公道で試運転できる免許が交付されている.

本学でも自律型の電気自動車の開発プロジェクトがあり<sup>3, 4)</sup>, 高齢者等を対象にした誰にでも簡単に安心して使えるような対話型のインタフェースを備えた自律型自動車の開発を目標としている.

また, 近年における, 自動車本体の電子制御の比率も高まり, センシング周りを基本として車輪移動型ロボットと共通した技術も多く見られるようになった<sup>5, 6)</sup>.

プリクラッシュセーフティ技術の例として富士重工業の EyeSight(ver.2)がある<sup>7, 8)</sup>. これは衝突の危険がある場合に自動ブレーキによって車両を安全に停止させ, 車両側で衝突回避を行うものである. EyeSight(ver.2)のシステム構成はステレオカメラ部と ECU(Engine Control Unit), TCU(Transmission Control Unit) 等が CAN(Controller Area Network) によって統合されている.

この例からも見れるように, 自律走行はセンシング技術のみで成り立つものではなく, 車両の動作そのものを操作するシステムと, これらを統合して制御を行う制御システムがあって実現ができるといえ, 車両に搭載された様々なシステムからセンシングを行い, しかるべき制御を実行することでこれらを成り立たせている.

本稿では Fig. 1 に示す電気自動車 COMS(コムスロング・パイプデッキ, トヨタ車体(株))を土台として, 車両本体に単独での移動機能を搭



Fig. 1 電気自動車 COMS

載し，これらをまとめる制御系の実装および外界認識機能を取り付け，自律走行を実現させることを目的とした開発について述べる．

## 2. 車両の概要と開発の指針

本研究では，人と車両の協調動作を目指すため，既存の車両に自律走行機能を取り付ける，移動ロボットとして開発する方針をとった．車両を自律動作可能とするためにいくつかの機能を追加する必要がある．主な機能要件を列挙する．

**コンピュータによる操作能力** 一般的に自動車は人の手により操舵，制動，スロットル制御を担っている．この操作系を人の手が扱うことと同等に操作できる必要がある．そのためには，ECU への指令の直接的な操作や，既存の操作系にモータを取り付けることでハンドルやペダルを動かす方法があり，本研究では後者の手法をとった．

**センシング** 自律制御には，現在の車両の状態，たとえば移動や走行経路，進行方向の障害物などの情報が不可欠である．本研究では，ステレオビジョンを用いた外界センシングと，前輪に取り付けたエンコーダによる内界センシングを現時点では使用している．

**車両の移動制御** 車両全体では，目標とする軌道

Table 1 車両の主な諸元.

項目	仕様
全長	2,365[mm]
全幅	995[mm]
全高	1,600[mm]
車両総重量	405[kg]
最小回転半径	3.3[m]
最高速度	前進：50[km/h] 後進：15[km/h]
駆動方式	後輪ホイールイン直接駆動 (モータ：290[W] × 2 個)
主バッテリー	密閉型鉛電池 72[V](12[V] × 6) - 52[Ah]

に対する追従や，障害物を検出しての回避行動などの動作を実現する必要がある．このためには，センサからの情報をもとに動作を決定すると共に，車両の状態を目標に合わせて操作する必要がある．

今回の開発に使用した車両は，法律上の車両区分ではミニカーとなる．そのため公道を走ることができ，車体の装備は一般の車両と変わらないものが取り付けられている．運転者が本車両を直接操作する際は通常の AT 車と同様にステアリング，アクセルペダル，ブレーキペダルを介して操作を行う．車両の諸元を Table. 1 に示す．

この車両は電気自動車であり，充電は家庭用コンセント (100[V]) から行える．電気自動車なので騒音もなく，ランニングコストも経済的で，CO<sub>2</sub> 排出量ゼロということで環境面にも配慮している自動車である．

特に実験車両として，排気ガス等や振動の問題がなく扱いやすいという面，車両に操作系を追加する分の余裕があり，電気自動車であるためこれらの制御システムとの親和性が高いという点で，この車両を土台として採用した．

### 3. 操作系の概要

車両を自律走行可能な車輪ロボットとして成立させるために、人が用いて車両を操作するものから、制御システムを介して操作を行う形に改修した。このためにそれぞれの操作系に対して、モータとそれを制御するコントローラで構成された、外付けの駆動ユニットを取り付け、サーボ機能を持たせ、これに操作量を指令することで車両の操作を行う。

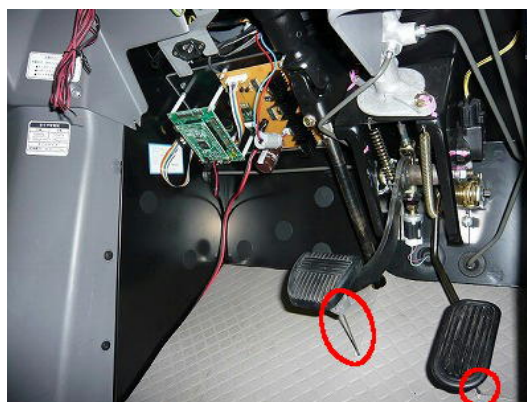
また、車両制御系と人間運転者側が交代で、もしくは協調して車両の操作できることを前提とし、これらの操作系に対してバックドライバビリティを重視した。これは運転者側が車両の操作を行う余地を残すとともに、その操作が車両の動きに結びつくことを目的とする。

また実験用車両という性質から、車両制御システムの操作下にて、運転者側が意図した車両の動作とならない、つまり車両制御システムの動作不良による異常運転が発生する可能性が高い。そのため、自動制御中であっても、搭乗している実験者の操作介入を優先させることが重要である。

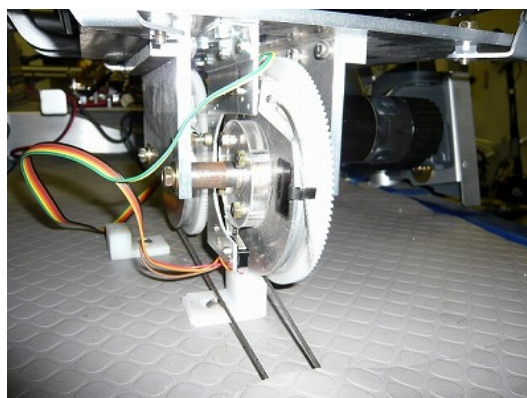
#### 3.1 アクセル，ブレーキペダル操作部

駆動ユニットを座席シート下部のスペースに配置し、ワイヤとプリーを用いて車両のアクセル，ブレーキペダルを操作する。実機の写真を Fig. 2 に示す。この駆動ユニットは、モータ駆動回路，リミット検出機構，ローカルコントローラである H8/3052F マイコンにて構成される。モータの動作は上位制御系のメインコントローラからの指令に基づいて行う。モータは指令角度になるように、モータに内蔵したロータリーエンコーダの読みをもとに速度制御されている。

これらはアクセル・ブレーキの各ペダルに一組ずつ取り付けられ、双方が独立して動作し、さらに運転者側がペダルの操作を行った場合は



(a) ペダル部 (ペダルを引くワイヤがペダル下に見える)



(b) ワイヤの駆動部 (運転席下)

Fig. 2 ペダルの操作部



Fig. 3 ステアリング駆動ユニット

ワイヤがたるむことで、運転者の操作を優先させる。

#### 3.2 ステアリング操作部

ステアリングは、ステアリング軸に歯車を取り付け、それをアクセル，ブレーキ操作部と同

様にモータ，駆動回路，ローカルコントローラで操作する．駆動部の写真を Fig. 3 に示す．ステアリング操作量はモータ内蔵のエンコーダにより計測できる．

ワイヤがたるむペダル操作系と異なり，ステアリングはモータで直接操作されているため，運転者の操作介入はコントローラの制御で実現した．具体的には，ステアリングの速度制御において，実回転速度と，目標角に達するために内部で指令する目標回転速度の偏差をモニタし，これが閾値を超えた場合には外力で強制的に回されたと判断して，能動的動作を停止するものとした．停止後はバックドライバビリティがあり，人間によって通常通りの操作できる．つまり，介入して運転者操作に切り替えたい場合は，ハンドルを無理に回せばよい．実験中のとっさの判断でハンドルを切る場合などに自然に切り替わるようにした．一方で，車両の通常走行の範囲では(据え切り時が最も重い)，モータによる操作は保たれるようにした．

## 4. 車両の制御系

この車両の操作は上述のように運転者の操作，もしくはコンピュータ制御によって行う．コンピュータ制御系は，3個の操作用モータを制御するローカルコントローラと，これらに指令を出すメインコントローラ(ノート型 Windows PC)からなる．

メインコントローラからの操作指令は，ローカルコントローラが実現すると想定して，ペダル操作等の実際の状態量はフィードバックせず，現状ではオープンループ的に操作しているのみである．

これらのコンピュータは RS232C 準拠のシリアル通信(115200bps，USB-シリアル変換回路経由)3系統で接続する．メイン-ローカル間は 20 [ms](50 [Hz]) の周期で指令を送信している．また，後述の走行計測用のエンコーダを担



Fig. 4 前輪に取り付けた磁気式エンコーダ．

当するマイコンとも接続し，50[ms](20[Hz])で測定値を得る．なお，モータの制御周期と通信周期の等間隔性の維持はローカルコントローラ側が担当している．そのため，PC側は環境としては使いやすいものの実時間制御性に劣る Windows xp を用いている．

## 5. エンコーダによる自己位置推定

### 5.1 自己位置推定の概要

移動ロボットにおいて自己姿勢の計測および自己位置の推定は，自律走行を行う際に特に必要となる．一般には内界センサを用いる手法と外界センサを用いる手法，両者を併用する手法がある．内界センサを用いる自己位置推定は移動ロボット自身を計測対象とするため，外界の環境に左右されにくく，安定して，かつ，比較的高頻度に計測が行えるメリットがあるが，絶対的計測が困難で誤差が蓄積しやすい．一方，外界センサを用いるものは，環境の影響を受けやすいほか，一般的に計測頻度が低い傾向にあるが，計測自体は誤差が蓄積しにくい．

この内界センサとしてよく用いられる手法として，車輪にエンコーダを設置し，移動量と車速の測定がある．本車両においても，左右前輪にエンコーダを取り付けた．

車輪による自己位置推定は多数の手法がある．前輪が操舵輪の4輪車両の場合は，後輪の2輪

の回転を計測すれば，対向2輪型のロボットと同様に自己位置が推定できる．しかし，本車両は後輪駆動であり，走行時の滑りの影響が懸念される．操舵輪に取り付ける場合は，一般には同時に操舵角を測定して演算に用いるが，前輪の支持部にセンサを付けることは難しく，ステアリングコラムに取り付けた場合はその先のガタの影響を受ける．そこで，左右の両前輪に回転角センサを取り付け，その回転から後述のように自己位置推定を行うこととした．

前輪の車軸には安全性の観点からも手を加えないで済むよう，エンコーダは独自開発した．Fig. 4 に示すように，前輪内側に，48 個の磁石を等間隔に，磁極が交互になるように取り付け(7.5[deg] 間隔, アクリル板のリングに埋め込み, リングごと吸着)，2 個の磁気センサによって読み取る．磁石は 1 回転当たり 24 周期の磁極変化をもたらし，2 相信号を得て，4 逡倍によって 96 分割 (3.75[deg]) の分解能を得た．これは車輪の移動に換算すると約 7[mm] に相当する．

## 5.2 移動量測定の精度

エンコーダを使用する上での問題となるのが，積算誤差である．そのため，走行の実測値との差を測定し，積算誤差を見積もった．ロボットの原点を後輪軸中心とし，その移動量をロボットに取り付けたエンコーダによって測定した値と，巻尺で直接測定した値を比較することで行った．

直線移動での評価は 5[m] から 30[m] まで 5[m] 刻みで行った．全体として誤差は  $\pm 1\%$  以内の範囲に収まっており，車輪の滑りなどの問題は見られず，直線での移動において十分な精度で移動距離の測定を行うことが可能であり，次に述べる自己位置推定にも耐えうるといえる．

## 5.3 旋回時におけるロボットのモデル

旋回時における左右の車輪の移動量の差から旋回中心を求めることで，旋回での車両の軌跡

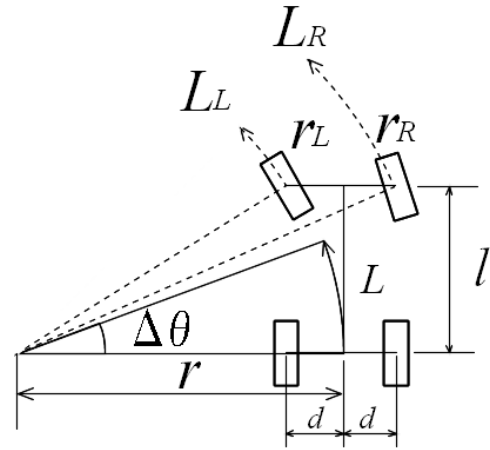


Fig. 5 車両の旋回運動のモデル

を推定した．前述のように，一般的な対向2輪型のロボットとは異なり，計測輪が操舵輪であることが特徴である．

車両のモデルを Fig. 5 に示す．車両の原点は後輪軸の中心とする．ここで， $l$  はホイールベース， $d$  は前輪後輪のトレッド幅であり，ある時間で  $\Delta\theta$  の円弧運動を行ったとする．左右前輪の移動量  $L_R, L_L$  (センサで計測される値) とそれぞれの旋回中心までの距離  $r_R, r_L$ ，ロボットの旋回半径  $r$  (求める値) は以下の関係をもつ．

$$r_R^2 = (r + d)^2 + l^2 \quad (1)$$

$$r_L^2 = (r - d)^2 + l^2 \quad (2)$$

$$L_R = r_R \Delta\theta, \quad L_L = r_L \Delta\theta \quad (3)$$

(3) より  $\Delta\theta \neq 0$  として  $\Delta\theta$  を消去し ( $L_R r_L = L_L r_R$ )，両辺を二乗して (1), (2) を代入する．

$$L_R^2 \{(r - d)^2 + l^2\} = L_L^2 \{(r + d)^2 + l^2\} \quad (4)$$

これを  $r$  について整理すると 2 次方程式を得る．

$$r^2(L_R^2 - L_L^2) - 2d(L_R^2 + L_L^2)r + (L_R^2 - L_L^2)(d^2 + l^2) = 0 \quad (5)$$

$r$  について解くと

$$r = d \frac{L_R^2 + L_L^2}{L_R^2 - L_L^2} \pm \sqrt{\left( d \frac{L_R^2 + L_L^2}{L_R^2 - L_L^2} \right)^2 - (d^2 + l^2)} \quad (6)$$

を得る．なお， $L_R^2 - L_L^2$  が 0 となる場合は直進時であり，本式を用いる必要がない．

この式は二つの解を持つが，実用上は一方（±のうち+）を選択できる．たとえば， $L_R^2 \approx L_L^2$  となる状況には，旋回半径が非常に大きい（ほぼ直進）の場合と，（一般的な 4 輪車では構造的に無理だが）前輪が八の字となって旋回中心が後輪の中心付近となる場合がある．そのため，同じ  $L_R, L_L$  の測定値に対して，二つの解が存在するが，車両の最小旋回半径を加味すると，実質的に有効なのは一方となる．

旋回半径  $r$  より，(1),(3) を用いて  $\Delta\theta$  を得る．これにより車両の移動量が分かるため，車両の位置姿勢  $(x_i, y_i, \theta_i)$  を次式により更新する．

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + L_m \cos(\theta_i + \Delta\theta/2) \\ y_{i+1} &= y_i + L_m \sin(\theta_i + \Delta\theta/2) \\ L_m &= 2r \sin(\Delta\theta/2) \\ \theta_{i+1} &= \theta_i + \Delta\theta \end{aligned} \quad (7)$$

以上により，操舵輪である前輪に取り付けた回転角度センサから，操舵角を用いずに自己位置推定を行うことができる．

#### 5.4 旋回運動時の自己位置推定実験

以上の自己位置推定手法の検証を行うため，車両による実験を行った．ほぼ平坦な舗装路面において，車両の後輪中心（車両規準点）が半径 5[m]（実測）の円上を走行するように，運転者が手動で操作を行った．その際のセンサの回転計測値をもとに，上記の演算で位置を求めた．

結果を Fig. 6 に示す．点列は 0.5[s] 間隔で上記演算を行って得た軌道を表し，実線は半径 5[m] の円である．推定値の半径が若干小さいほかは円状の軌道が得られている．この演算ではトレッド幅  $2d$  として実測値である 0.84[m] を用いたが， $2d = 0.85$  とするとほぼ半径 5[m] となる．そのため，この誤差はトレッド幅の誤差などに起因するものと考えられ，タイヤ変形や接地面の状

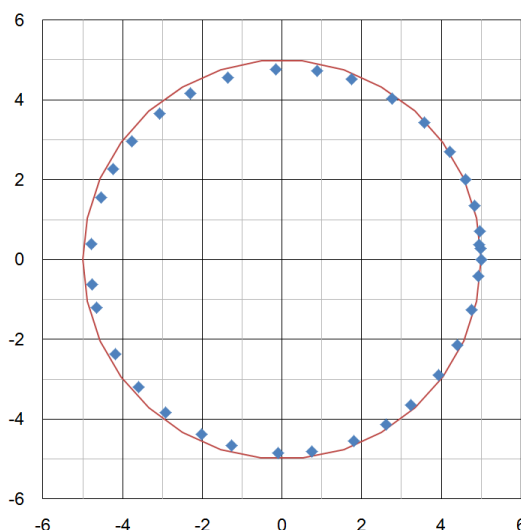


Fig. 6 旋回時の軌道の推定結果

態によるトレッド幅変化の影響感度が高いことがわかった．

なお，ほぼ一定の速度で走行させた車両に対して，点列の間隔が部分的に異なるのは，センサ部とメインコントローラ間の通信タイミングに起因するデータ抜けを補償したことによるもので，同問題が生じないように通信部には今後改良が必要である．

## 6. ステレオビジョンによる外界認識

### 6.1 ステレオビジョンの概要

障害物検出などのための外界センサとして，本研究ではステレオビジョンを用いた．カメラを複数個使用して構築するステレオビジョンは，カメラ群から取得した画像群から画面内の距離の分布を得られる手法である．カメラを 2 台用いる場合は，左右のカメラに映る同一物の位置のずれである視差から，三角測量を行うことで容易に対象までの距離を測ることができる．耐外乱性，精度，分解能という観点ではステレオビジョンセンサはレーザーレンジファインダ (LRF) やミリ波レーダに劣るが，ステレオビジョンセンサは画像の取り込みを行うために面での計測が

可能で、色を含む画像データの取得が可能という利点がある．今後は LRF の併用も計画しているが、本研究では画像データの応用性からステレオビジョンセンサの構築を先行して行った．

本研究では平行に設置した 2 台の USB カメラから同時に画像を撮影し、ステレオマッチングで距離画像を取得した．左カメラ (以後基準カメラとする) から得た画像を基準画像とし、この画面上に写る計測対象の座標  $(u_1, v_1)$  に対応する点  $(u_2, v_2)$  を、対となる右カメラ (以後対象カメラとする) から得た対象画像から探索する．この 2 点には幾何学的な条件であるエピポーラ拘束があり、対応点の探索速度向上に重要である．これを単純化するため、カメラは光軸が平衡となるように 2 台をユニット化したうえで車両に取り付けた (車両の振動などの影響は、2 カメラが平行のまま揺れるなど、カメラに同じように出るようにした) ．

基準画像と対象画像を比べ、両画像上でのずれである視差から、三角測量の原理で計測対象点の三次元座標  $(x, y, z)$  を求めることができる．視差  $d$  は  $u_1 - u_2$  であり、三次元座標  $(x, y, z)$  は以下の式から求める．

$$(x, y, z)^T = \left( \frac{u_1 B}{d}, \frac{v_1 B}{d}, \frac{f B}{d} \right)^T \quad (8)$$

ただし

$(u_i, v_i)$ :	対象の画像上での座標	[pixel]
$(x, y, z)$ :	対象の三次元座標	[mm]
$B$ :	カメラ間距離 (基線長)	[mm]
$f$ :	焦点距離	[pixel]
$d = u_1 - u_2$ :	視差	[pixel]

である．

ステレオカメラからの視差測定の様子と得たマッチング画像の例をそれぞれ Fig. 7(a),(b) に示す．ステレオマッチングは何らかの手がかりが無ければ検出できないため、正しく得られている箇所と不適切なところがある．



(a) 2 台のカメラによる画像間の視差



(b) 画像から作成した視差マップ

Fig. 7 ステレオマッチングの処理例

## 6.2 処理系の実装

車両に搭載した 2 台のカメラの画像処理は、OpenCV<sup>9)</sup> を用いて実装した．距離画像生成のための、OpenCV に標準のライブラリにステレオマッチング手法は 4 種類があったが、本研究では応答速度が最重要項目であるため、精度は低い処理速度が早い Dynamic Programming 法を用いた．基本的にはこの手法で視差画像を得て、さらに障害物検出のために以下の処理を加えた．

- 1) 道路外領域除去のためのマスク処理
- 2) 距離範囲を限定するための二値化処理
- 3) 不要情報除去のためのエッジ検出と領域の限定化

これにより、道路と推定される範囲にある、指定距離内の障害物を検出する．なお、得た視差

Table 2 障害物までの距離と視差の測定

障害物距離 [mm]	視差 [pixel]
2000	103
3000	81
4000	71
5000	64
6000	60
7000	57
8000	54
9000	52
10000	51

画像は、特徴量の不足などで正しく計測できなかった点が周囲の情報から補間されるようで、距離画像が横方向ににじんだようなものとなる (Fig. 7)。そこで、現画像に対してエッジ検出処理を行い、これで距離画像を区分することによって、障害物の検知精度の向上を図った。

### 6.3 距離測定性能

距離測定における分解能をみるために、2000[mm] から 1000[mm] 刻みでカメラ前に障害物を置き、得られる視差の検証を行った。結果を Table. 2 に示す。視差には想定された単調減少傾向が見られ、有用な情報が得られたことが確認できた。しかし、6[m] 以遠は視差の変化がほとんど生じず、同ような数値となったため、6[m] 以遠の障害物検出には使いがたい。ただし、本研究では低速運転の移動車の実験を想定しており、そのためには 6[m] 以内の障害物計測が可能であれば十分に停止、回避が行えるため、このステレオビジョンセンサを引き続き使用している。

### 6.4 回避実験

以上の処理系を用いて、車両前方にある物体を障害物と感知させ、さらに障害物回避を行う動作を実装した。上述の処理に加え、道路領域内に障害物が存在するかを検出するために一定の

視差を超える (近距離の) 領域に対して領域のピクセル数を算出し、一定以上の大きさの塊が存在する場合、障害物が存在すると認識するものとした。障害物回避実験は以下の条件で行った。

- 幅約 6[m]、平坦で直線の道路上。
- 対向車両無し。
- 晴れ、乾いた路面。
- 速度一定、回避中に加速は行わない。

また、障害物回避行動は以下のシナリオに沿って行った。

- 1) 障害物に向かって直進。
- 2) 障害物を検知した段階で一時停止。
- 3) 徐行しつつ旋回、反対車線側へ移動。
- 4) 元の車線へ移動。

これらの動作が可能であることを実験によって確認した。

## 7. おわりに

以上により、車両に対して自律走行機能を付加し、障害物回避まで行えることを確認した。

しかし、路面の傾きや、タイヤの滑り (路面状況、路肩近くの砂、落ち葉等) があると、自己位置推定の誤差になることは容易に想像できる。このため、短時間の制御には自己位置推定を用いる一方で、GPS やステレオビジョンの画像から解析した道路位置 (白線など) の情報、LRF による路面範囲の推定などを組み合わせて、長時間にわたって安定した自己位置の確保を実現することが、今後は必要である。これらの情報は自己位置だけではなく、運転者の操作による非自律移動時にも斜線の逸脱や蛇行などの検知に有用であり、それをもとにしたステアリング補助、車線逸脱防止などの機能を追加することで、より安全性を高めることにつながると考えられる。



## 謝 辞

本研究において，車両本体の運用や実験の実施には東北学院大学工学部 機械知能工学科 教授 鈴木利夫氏と，鈴木研究室の学生諸君に多くの協力を頂いている．また，車両の操作部分の多くは卒業生 新保和哉氏により，機械部品の製作には東北学院大学工学部 機械工場の協力を得てきた．ここに謝意を表する．

- 7) 柴田英司: 新開発ステレオカメラによる運転支援システム「EyeSight」の開発, 自動車技術 vol.63 93/98 (2009)
- 8) 真壁俊介: 先進運転支援システムアイサイト (ver.2) の紹介, 自動車技術 vol.66 88/93 (2012)
- 9) OpenCV, <http://opencv.jp/>

## 参考文献

- 1) Google: Google Official blog:  
what we're driving at,  
<http://googleblog.blogspot.jp/2010/10/what-were-driving-at.html> (2010)
- 2) PCWorld: Google's Self-Driving Car  
Licensed to Hit Nevada Streets,  
[http://www.pcworld.com/article/255204/googles\\_self\\_driving\\_car\\_licensed\\_to\\_hit\\_nevada\\_streets.html](http://www.pcworld.com/article/255204/googles_self_driving_car_licensed_to_hit_nevada_streets.html) (2012)
- 3) 新保和哉: 電気自動車の自律走行システムの開発, 東北学院大学工学部 機械創成工学科 学位論文・卒業論文概要集, Vol.21-M, ME-80 (2012)
- 4) 長谷川貴志: 一人乗り用電気自動車の自律走行制御, 東北学院大学工学部 機械知能工学科 学位論文・卒業論文概要集, Vol.24-ME, ME-67 (2012)
- 5) ラクシンチャラーンサクボンサトーン, 大前学: 超小型電気自動車を用いた自動運転システムの研究開発, 自動車技術 vol.66 81/87 (2012)
- 6) 菅原直樹, 坪内孝司: 移動ロボットと自動車のセンシング技術, 自動車技術 vol.66 65/71 (2012)