

# カメラセンサと超音波センサの併用による自動車模型の自動追い越し

M2017SC014 吉田翔

指導教員：大石泰章

## 1 はじめに

近年、自動車の自動運転技術が大きな進歩を遂げており、ドライバーの運転を支援することで、事故防止、誤操作、負担削減などが期待される。中でも追い越し走行は複雑な手順を要するので、自動運転技術による貢献が大きいものと期待できる [1]。

本研究では、マイクロコンピュータ Arduino を用いた自動車模型を 2 台用いて、カメラセンサと超音波センサを搭載した自動車模型 (以下、後方車両) が、赤色のボールを搭載した自動車模型 (以下、前方車両) を自動で追い越す制御を行うことを目的とする。具体的には、まず後方車両はカメラセンサを用いて、前方車両に搭載した赤色のボールの距離と角度を測定し、その真後ろを追従する走行を行う。このときカメラの向きは正面を向いている。そして前方車両との距離が指定した距離まで縮まったとき、カメラの向きを左へ 45 度の方向に動かし、前方車両との左右方向の車間距離を一定に保ちながら追い越しを行う。その際、前方車両との距離が近づくにつれて、赤色のボールがカメラの視野に収まらなくなるため、後方車両の左右に搭載した超音波センサを代わりに使うことで自動追い越しの実現を目指す。今回は追い越すまでの動作を行い、元の車線に戻るといった動作は考慮しない。

## 2 使用する実験機

本研究で使用する実験機を図 1, 図 2 に示す。図 1 は Pololu 社製の自動車模型 Zumo Robot にマイクロコンピュータ Arduino Leonardo と赤色のボールを搭載した前方車両である。赤色のボールはカメラセンサの測定対象にするために搭載している。図 2 は自動車模型に Adafruit 社製のカメラセンサ PixyCMUcam5 と SparkFun 社製の超音波センサ HC-SR04 を搭載した後方車両である。



図 1 前方車両



図 2 後方車両

### 2.1 自動車模型 Zumo

Zumo は 100mm×100mm の大きさで、単 3 電池 4 本により電源供給される自動車模型である。モータにより左右のキャタピラを駆動することで、前進、後退、旋回が可能である。自動車模型には 3 軸加速度センサ、3 軸磁場センサ、3 軸デジタルジャイロセンサが内蔵されている。また

車体の裏には赤外線センサが搭載されているが、本研究では、赤外線センサを取り外し、代わりに超音波センサを取り付ける。

### 2.2 カメラセンサ Pixy

Pixy は水平方向 75 度、垂直方向 47 度の視野角を持ち、上下左右に視軸を動かすことができるカメラセンサである。また、最大 7 色の色を記憶させることが可能である。画像上の対象物体は PixyMon というソフトウェアを使用することで、図 3 のようにこれを覆う最小の面積の長方形として認識することができ、ピクセル数を単位として、その横幅  $w$ 、縦幅  $h$ 、重心座標  $(a, b)$  が得られる。ただし座標は、画像の左上を原点として、 $a$  軸は原点から右向きを正、 $b$  軸は原点から下向きを正とする。また  $a$  軸方向の最大ピクセル数は 320、 $b$  軸方向の最大ピクセル数は 200 であり、対象物体との距離や位置によってはカメラの視野に収まらないことがある。

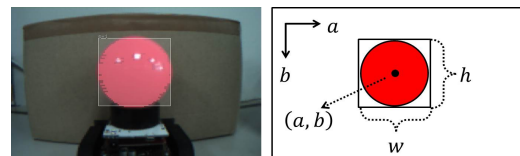


図 3 カメラの映像と得られるパラメータ

### 2.3 超音波センサ HC-SR04

HC-SR04 は測定距離 20mm~4500mm、測定角度 15 度以下の超音波センサである。ただし測定距離が大きくなるにつれてノイズの影響を受けやすくなるため、本研究では 80mm~300mm の範囲で使用する。距離を測定するためには、赤外線センサを使うこともできるが、超音波センサは赤外線センサよりも対象物体の形状や色の影響が少ないため、本研究では超音波センサを採用する。超音波センサを取り付けるためには Arduino の 4 つのピンを必要とするため、自動車模型にもともと搭載されていた赤外線センサの使用ピンを開放して、これに割り当てている。超音波センサは、超音波パルスが対象物体に反射して、戻ってくるまでの時間  $T[\mu\text{s}]$  を計測している。本研究では 2 つの超音波センサを使用し、図 2 に見るように自動車模型の左右にそれぞれ取り付けている。

## 3 自動追い越しの手順

本研究の目標は、カメラセンサと超音波センサを搭載した後方車両を用いて、赤色のボールを搭載した前方車両の自動追い越しを行うことである。カメラセンサは前方車両との距離が近づくにつれて、赤色のボールが視野に収まら

なくなるという欠点がある。超音波センサは対象物体との測定距離が大きくなるにつれて、ノイズの影響を受けやすくなるという欠点がある。そのため2つのセンサを併用することで自動追い越しが可能になると考える。図4は自動追い越しの手順とフローチャートである。前方車両と後方車両はともに図の下から上の方向に走ることにも注意する。

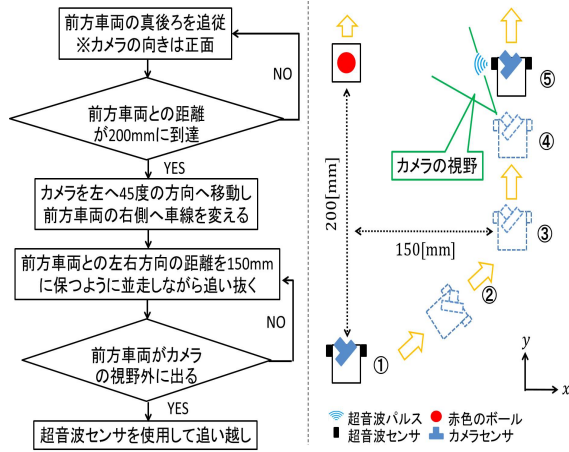


図4 自動追い越しの手順とフローチャート

まずはじめにカメラセンサを用いて前方車両の真後ろを追従する。ここではカメラから得られる赤色のボールの画像上での重心が常に画像の中心に位置するように方向制御をし、赤色のボールの画像上での横幅が目標とする値に収束するように車間距離制御をする。用いる制御則はP制御である。前方車両との距離が200mmに到達したとき、図4の①のようにカメラの向きを左へ45度に変化させる。続いて②、③のように前方車両との左右方向の車間距離が150mmを保つように制御し、右側へ車線を変えて追い越しを行う。すると④のように前方車両との距離が近づくにつれて、赤色のボールがカメラの視野に収まらなくなり、車間距離を測定できなくなる。そのため⑤のように超音波センサを使用することで車間距離を測定し、自動追い越しを行う。

## 4 センサの特性と使用法

この章ではカメラセンサと超音波センサについてそれぞれ実験を行って特性を調べ、3章で述べた追い越しの手順を実現するにはこれらをどのように使ったらよいか考える。

### 4.1 カメラセンサ

カメラセンサは図3で示したように対象物体の横幅  $w$ 、縦幅  $h$ 、重心座標  $(a, b)$  を読み取ることができる。よって対象物体の大きさと形が既知であれば対象物体との距離や角度を求めることが可能である。

#### 4.1.1 前方車両までの距離の測定

図5は図4の①の段階で後方車両からボールまでの距離  $d$  を表したものである。ただし前方車両は  $y$  軸に沿って

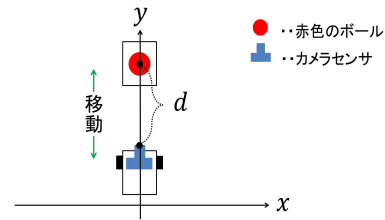


図5 後方車両と赤色のボールまでの距離

その正方向に走るものとし、これと垂直に  $x$  軸をとる。前方車両を固定し、後方車両のみを  $y$  軸に対して平行に動かす。このときの画像上での赤色のボールの横幅  $w$  とボールまでの距離  $d$  を測定したところ反比例の関係であった。これを近似的に以下の関係式で表す：

$$d = \frac{15000}{w}. \quad (1)$$

#### 4.1.2 後方車両を基準とした角度の測定

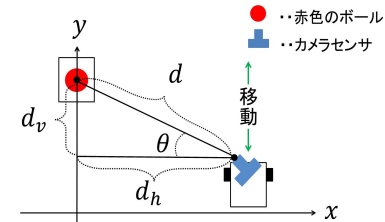


図6 後方車両の左右方向を基準としたボールとの角度（カメラの角度45度）

図6は図4の③の段階で後方車両の左右方向を基準とした赤色のボールの角度  $\theta$  を表したものである。前節と同様に  $x$  軸と  $y$  軸をとっている。カメラの向きを正面方向から左へ45度移動させた後方車両を前方車両と平行になるように置き、カメラから赤色のボールまでの距離  $d$  の左右方向の距離  $d_h$  を150mmに固定して、 $y$  軸に対して平行に後方車両のみを動かす。後方車両を前に動かすほど画像上でボールは左に動き、ボールの重心位置  $a$  は小さくなる。また、ボールの角度  $\theta$  も小さくなる。この関係を調べるため、画像上での赤色のボールの重心位置  $a$  と角度  $\theta$  を測定し、最小二乗法を用いたところ、 $a$  と  $\theta$  の関係は次のようになった：

$$\theta = 0.3235 a - 6.8557. \quad (2)$$

この関係を使うことにより、画像上でのボールの位置  $a$  に基づいて後方車両の左右方向を基準としたボールの角度  $\theta$  を得ることができる。また式(1)、式(2)より、距離  $d$  と角度  $\theta$  が得られれば、ボールまでの距離  $d$  の左右方向の成分  $d_h$ 、前後方向の成分  $d_v$  は次のように得られる：

$$d_h = d \cos \theta, \quad (3)$$

$$d_v = d \sin \theta. \quad (4)$$

図4の③の段階では、式(3), (4)で得られる $d_h, d_v$ に基づいて後方車両の $x$ 軸座標を求め、これが150mmになるように方向制御をする。その方法については5章で述べる。

## 4.2 超音波センサ

超音波センサはカメラセンサが赤色のボールを視野内に取めることができなくなった図4の⑤の段階で使用する。これは、式(2)から得られた角度 $\theta$ が11度以下になることに相当する。超音波センサは測定距離が大きくなるにつれてノイズの影響を受けやすくなるため、本研究では距離が300mm以下の場合しか使用しない。

### 4.2.1 前方車両までの距離の測定

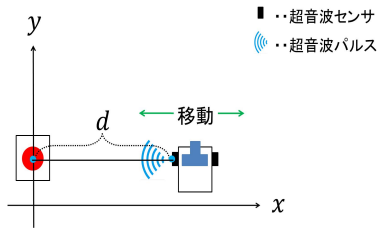


図7 超音波センサと前方車両までの距離

図7は超音波センサと赤色のボールまでの距離 $d$ を表したものである。超音波センサで前方車両までの距離が測れるようなとき、前方車両と後方車両はほぼ左右に並んでいるので $d \approx x$ と考えてよい。ただし、前節と同様に前方車両は $y$ 軸に沿って走るものとし、 $x$ 軸はこれと垂直にとって、後方車両の $x$ 軸座標を $x$ としている。 $x$ 軸に対して平行に後方車両のみを動かして、超音波パルスが戻ってくるまでの時間 $T$ と赤色のボールまでの距離 $x$ のデータを測定し、最小二乗法を用いたところ、 $T$ と $x$ の関係は次のようになった：

$$x = 0.1622T + 42.131. \quad (5)$$

この式(5)で得られた後方車両の $x$ 軸座標も同じく150mmになるように方向制御をする。

## 5 後方車両の制御手法

後方車両が前方車両と並走する図4の③～⑤の段階では、前方車両との左右方向の車間距離を150mmに保ち、後方車両の姿勢角が前方車両と並行になるように制御を行う。制御方法は後方車両の数学モデルを状態空間表現で表し、状態フィードバックを用いる。

### 5.1 状態空間表現と微分信号を用いた状態の復元

図8は後方車両と座標系を示したものであり、今までと同様に、前方車両は $y$ 軸に沿って走り、これと垂直に $x$ 軸をとるものとする。すると、後方車両の位置は座標 $x, y$ で、姿勢角は $y$ 軸正方向に対する角度 $\psi$ で表現できる。前章で考えたボールとの角度を $\theta$ 、ボールまでの距離を $d$ 、そ

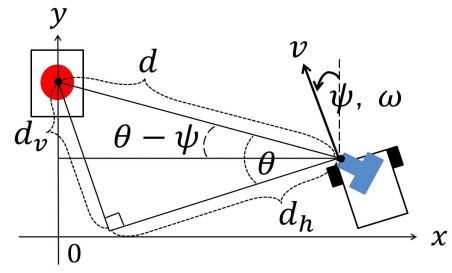


図8 座標系

の後方車両の左右方向の成分を $d_h$ 、前後方向の成分を $d_v$ 、姿勢角を $\psi$ とすると、 $x$ は次のように得られる：

$$\begin{aligned} x &= d \cos(\theta - \psi) \\ &= d \cos \theta \cos \psi + d \sin \theta \sin \psi \\ &= d_h \cos \psi + d_v \sin \psi. \end{aligned} \quad (6)$$

$\psi$ が十分小さいと仮定すると、 $\sin \psi \approx \psi$ 、 $\cos \psi \approx 1$ と近似でき、式(6)は以下のように書ける：

$$x \approx d_h + d_v \psi. \quad (7)$$

これだけでは $x$ の値は分からないので、次に $\psi$ を求めるために状態空間表現を考える。図8より、後方車両の進行速度を $v$ 、回転角速度を $\omega$ とすると、 $x, y, \psi$ は以下の方程式に従う[2]：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \psi & 0 \\ \cos \psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (8)$$

後方車両が並走する際は、 $x = 150, \psi = 0$ への安定化が制御目標となる。先と同様に $\psi$ が十分小さいと仮定すると、次の状態空間表現を得る：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \\ z = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \psi \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (9)$$

ただし $v$ は定数で進行速度を、 $u$ は制御入力で回転角速度を、 $z$ はカメラセンサまたは超音波センサで測定できる出力を意味している。センサでは後方車両の姿勢角 $\psi$ は測定できないため、 $x$ の微分信号を用いて $\psi$ を求める。式(7)と式(9)の状態方程式より $\dot{x}$ は

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -v\psi = \dot{d}_h + \dot{d}_v \psi + d_v \dot{\psi} \\ &= \dot{d}_h + \dot{d}_v \psi + d_v u \end{aligned}$$

となり、 $\psi$ について解くと

$$\psi = -\frac{\dot{d}_h + d_v u}{v + \dot{d}_v} \quad (10)$$

となる。 $\dot{d}_h, \dot{d}_v$ は差分近似を用いて求める。差分近似はノイズの影響を受けやすいため、ローパスフィルタを用いてノイズを除去する。この得られた式(10)を式(7)の $\psi$ に代入することで $x$ を得る。



## 5.2 後方車両の制御

状態空間表現 (9) に対し、以下のような状態フィードバック制御を考える：

$$u(t) = k_1(x(t) - 150) + k_2\psi(t). \quad (11)$$

ゲイン  $k_1, k_2$  は  $(x, \psi) = (150, 0)$  が安定平衡点になるように選ぶ。式 (9) の状態方程式の  $\mathbf{A}$  行列と  $\mathbf{B}$  行列、式 (11) の  $\mathbf{K} = (k_1, k_2)$  を用いて構成される閉ループ系の  $\mathbf{A}$  行列は、

$$\begin{aligned} \mathbf{A} + \mathbf{BK} &= \begin{bmatrix} 0 & -v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -v \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

となるが、その特性方程式は、

$$\begin{aligned} |\lambda \mathbf{I} - (\mathbf{A} + \mathbf{BK})| &= \begin{vmatrix} \lambda & v \\ -k_1 & \lambda - k_2 \end{vmatrix} \\ &= \lambda^2 - k_2\lambda + k_1v = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

である。 $\mathbf{A} + \mathbf{BK}$  の固有値を指定した値  $p_1, p_2$  とするには、ゲイン  $k_1, k_2$  を、

$$\begin{cases} -k_2 = -(p_1 + p_2) \\ k_1v = p_1p_2, \end{cases} \iff \begin{cases} k_2 = p_1 + p_2 \\ k_1 = \frac{p_1p_2}{v} \end{cases} \quad (14)$$

と選べばよい。この式 (14) より制御ゲイン  $k_1$  は進行速度  $v$  に反比例させるとよいことが分かる。

## 6 自動追い越しの実験結果

前方車両の速度を  $V = 100[\text{mm/s}]$  とし、後方車両の速度を  $v = V + 75[\text{mm/s}]$  とし、追い越しを行う。5章の考え方に従って、まず閉ループ系の極を  $(p_1, p_2) = (-0.45 + 0.38i, -0.45 - 0.38i)$  と決定し、制御ゲイン  $k_1, k_2$  は式 (14) に基づいて  $(k_1, k_2) = (0.002, -0.9)$  と設定する。式 (11) で得られた  $u$  を回転角速度とすることで、 $x$  軸方向の車間距離を  $150\text{mm}$  に保ち、姿勢角を  $0$  度とする制御を行う。そのときに得られた角度  $\theta$ 、カメラセンサ、超音波センサで得た後方車両の座標  $x$ 、後方車両の姿勢角  $\psi$  を図 9 に示す。いずれも角度  $\theta$  が  $11$  度以下になってカメラの測定限界を超えた約  $2.3\text{s}$  の時刻に縦線を入れている。時間がたつにつれて、前方車両を追い越すために角度  $\theta$  が小さくなっていることが確認できる。後方車両の姿勢角  $\psi$  が約  $0.5\text{s}$  以降の時刻で目標値  $0$  度に制御されていることから、前方車両に対して平行に走っていることが分かる。カメラセンサで得た  $x$  は目標値  $150\text{mm}$  に制御されていることがわかる。また角度  $\theta$  が  $11$  度以下になる  $2.3\text{s}$  以降の時刻では、カメラセンサによる測定値が大きくなっているのが確認できるが、これはカメラセンサの視野内に赤色のボールを取めることができなくなったためである。一方  $2.3\text{s}$  以降の時刻では超音波センサによって後方車両の座

標  $x$  が測定され、目標値  $150\text{mm}$  に制御されていることがわかる。約  $3.6\text{s}$  以降の時刻で超音波センサによる測定値が  $300\text{mm}$  になっているのは、前方車両を追い越して超音波センサで距離を測定できなくなったからである。このことから前方車両の速度  $V = 100[\text{mm/s}]$ 、後方車両の速度  $v = 175[\text{mm/s}]$  における、カメラセンサと超音波センサを併用した自動追い越しに成功したといえる。

同じように前方車両の速度を  $V=175[\text{mm/s}]$  とし、後方車両の速度を  $v = V + 75[\text{mm/s}]$  としたときの自動追い越し、前方車両の速度を  $V=250[\text{mm/s}]$  とし、後方車両の速度を  $v = V + 75[\text{mm/s}]$  としたときの自動追い越しを行った。

式 (14) に従って、制御ゲインを  $(k_1, k_2) = (\frac{0.35}{v}, -0.9)$  と定めることにより、速度に応じた追い越しにも成功することができた。

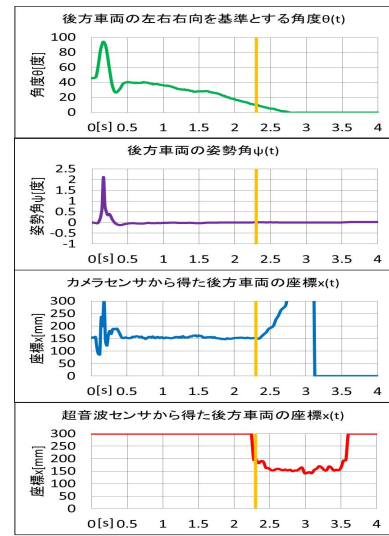


図 9 後方車両の速度を  $v = 175[\text{mm/s}]$  としたときの諸量の変化

## 7 おわりに

本研究では、カメラセンサを用いて後方車両を基準とした前方車両までの距離、角度を測定した。また、超音波センサを用いた距離の測定も行った。それぞれのセンサから得られた測定値から後方車両の座標と姿勢角を求めた。これらを用いてフィードバック制御することで速度に応じた自動追い越しを成功することができた。今後の課題としては、もう片方の超音波センサを用いることで、追い越し動作の前に後方車両の右側に障害物がないか確認を行い、より現実的な設定で追い越しを行うことが考えられる。

## 参考文献

- [1] 西羅光・川邊武俊：「自動車の最適経路生成」．計測と制御，第 45 巻，第 3 号，pp. 209–215，2006.
- [2] 福井善朗：「マウス競技における探索走行の計測・制御技術」．計測と制御，第 52 巻，第 3 号，pp. 522–527，2013.