

自動車の右左折時における内輪差発生による  
巻き込み事故防止システムに関する研究指導 小林 邦夫 教授 山崎 大生 准教授  
0781115 首藤 康秀A Study on An Avoidance System of the Accident Caused by the Inner Radius  
Differential of Vehicle when Turning Right or Left at the Intersectionby  
Yasuhide SUDO

## ABSTRACT

The objective of this study is to construct the system which prevents the inner radius differential accident of vehicle which occurs at the intersection using active safety technology. This system always monitors the vehicles circumference by measuring the coordinates of the obstacle with monocular Charge-Coupled Device camera (CCD camera).

Concretely, the image of the vehicle circumference situation can be obtained constantly with monocular CCD camera installed in the left front side of a vehicle. At the same time, the speed of the vehicle and the angle of front wheels also can be obtained continually with each sensor. On the other hand, the predictable course of the vehicle is displayed on the screen by calculating the data. The three-dimensional coordinates of the obstruction are deduced by acquiring the images from two different points when the vehicle moves. The possibility of the accident is detected from the prediction course of vehicles and the position of the obstacle, and a preventive step is performed based on this information. The verification system consists of model vehicle body, the sensor on the angle of front wheels, the sensor on the speed of the vehicle, charge-coupled device camera, alarm unit, braking mechanism, and personal computer. The performances of this accident avoidance system are checked by using the model vehicle for verification.

**Key words** : Inner radius differential, Image processing, CCD camera, Distance measurement , Course calculation

## 1. 緒言

人身事故による死者数は平成 20 年は 5,155 人となり、第 8 次交通安全基本計画の目標を 2 年前倒しで達成するに至っている。しかしながら事故発生件数は 70 万件を超え、負傷者数は 90 万人を超えるなど高い水準にあり、交通事故の現状が極めて深刻な事態であることに変わりはない<sup>(1)</sup>。

近年の事故の形態については『交差点内および交差点付近の事故が全体の約 5 割に達する』『左折時衝突、横断中を巻き込み事故とみなした場合の件数が全事故に対して約 1 割程度発生している』『死者・重傷者は軽傷者に比べ、特に自動二輪車乗車中と歩行中の構成率が高くなっている』といった特徴がある<sup>(2)</sup>。これらより巻き込み事故は非常に高い割合で発生していることがわかる。

自動車メーカーのこれらの事故に対する対応としては車両周辺監視システムが近年盛んに研究されている。カメラを複数台用いて周辺にある障害物の座標を測定することで事故回避を行うもの<sup>(3)</sup>や、単眼カメラでドライバーの死角を映し出すことで安全性を向上している<sup>(4)</sup>。

カメラを用いての障害物の位置座標の計測は、異なる 2 点から画像を取得し三角測量の原理を用いて計測することが一般的であるが、車載カメラとして用いることを前提とすれば、車両が移動することにより 1 台のカメラ

でも異なる 2 点からの画像を取得することが可能である。1 台のカメラ、つまり単眼カメラで異なる 2 点での障害物座標を計測できれば、障害物の座標を知ることができ、さらなる安全性の向上が期待できる。また複眼カメラと比較し、低コストおよび省スペースに寄与できる。

これらのことから、本研究では単眼カメラによる巻き込み事故防止システムを構築してきた<sup>(5)</sup>が、距離計測においては画像面上での二次元計測によるもので、システムの精度や誤動作等の問題が生じる恐れがあった。この問題を解決するために、単眼カメラにより三次元計測を行なうことは有意義であると考えられる。そこで、本年度は昨年度の課題でもあった<sup>(5)</sup>、単眼カメラを用いた基礎的な三次元距離計測の精度向上および誤差原因の検討を行なった。

## 2. システムの概要

## 2.1. システムについて

自動車事故を防止するためのシステムであれば、実車を用いて実験することが望ましいが、コストを減少させる為から本研究では模型車を製作し実験を行う。ここでは模型車に搭載する巻き込み事故防止システムを、単にシステムと呼ぶことにする。模型車車体は市街地を走ることが多く、乗用車よりも内輪差の発生量が大きいとい

う理由から路線バスを模擬している。

この模型車は次のように危険を回避する（図1では障害物として一般的な塀を想定）。

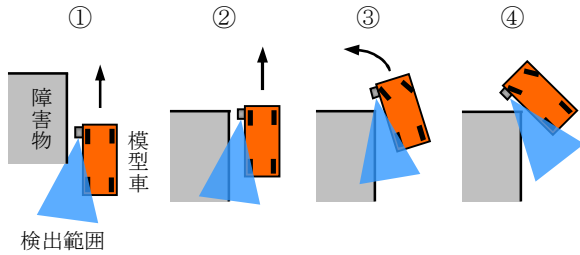


図1 システムのはたらき

- ① 車体左前方に後ろ向きで取り付けられた CCD カメラにより、車体側面周辺の障害物を常時監視する。
- ② 障害物の監視と同時に、前輪舵角センサと車速センサで模型車の舵角と走行速度を取得し、内輪差の発生量を考慮した車両の予測進路を常時計算する。
- ③ 障害物の画像情報と計算した予測進路の情報を照合し、予測進路内に障害物を発見した場合は、まずアラームや表示によってドライバーに危険を認知させる。
- ④ それでも進路や車速に変化が見られない場合は、自動ブレーキにて障害物との接触を予防する。

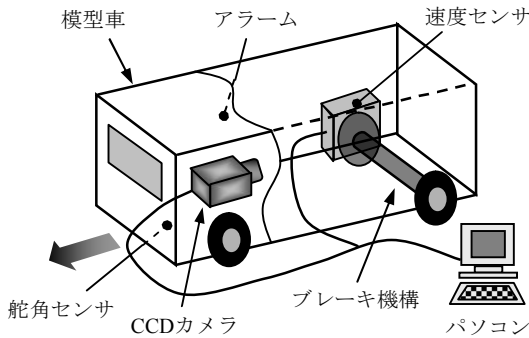


図2 模型車構成図

図2は模型車の構成図である。システムは実物の路線バスの寸法を1/13に縮小した模型車車体、車両の進路を予測するための前輪舵角センサと車速センサ、車両周辺の障害物を検知する CCD カメラ、危険回避のためのアラームとブレーキ機構、システム全体の管理や画像計測、進路予測をするパーソナルコンピュータで構成される。

## 2.2. 内輪差の発生

本研究では内輪差の発生に伴う障害物との接触を防ぐことが目的なので、最も旋回半径が小さくなる点、つまり左折の場合は車両左側面と後軸の延長線との交点  $P$  の軌道を求める。図3は  $P$  点の座標  $P(X,Y)$  を示したものである。ただし  $V$  は重心点の速度、 $\beta$  は横すべり角、 $\theta$  は  $X$  軸と車両中心線とのなす角（ヨー角）、 $r$  は重心点の角速度、 $l_r$  は重心～後軸間距離、 $D$  は車両の全幅を表す。

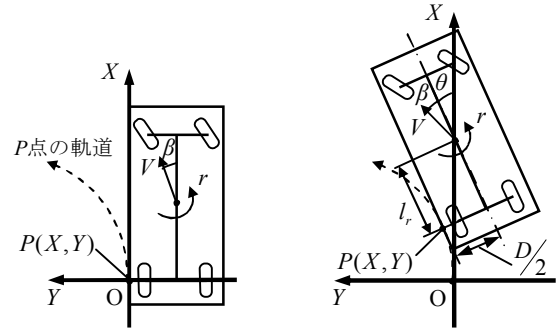


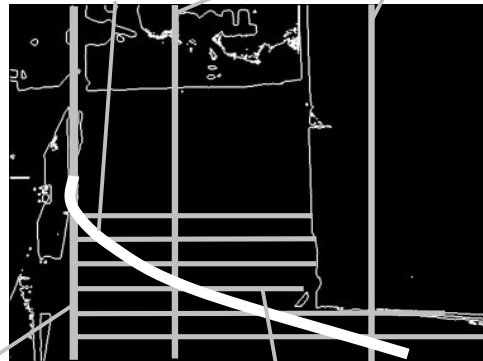
図3 旋回半径が最小となる  $P$  点の座標

$t$  秒後の  $P$  点の  $X, Y$  座標とヨー角は以下のように表すことができる。求めた  $P$  点の予測進路は座標変換の式(9)適用の後、取得画像に表示される（図4）。

$$\begin{cases} X = l_r + V \int_0^t \cos(\beta + \theta) dt - \left( l_r \cos \theta + \frac{D}{2} \sin \theta \right) \\ Y = -\frac{D}{2} + V \int_0^t \sin(\beta + \theta) dt - \left( l_r \sin \theta - \frac{D}{2} \cos \theta \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta = \int_0^t r dt \quad (2)$$

$P$  点の予測進路 0.5 秒後到達線 1.0 秒後到達線



$P$  点を通る垂線 最も短い距離測定線＝模型車～障害物間距離

図4  $P$  点の予測進路と二次元計測

## 2.3. 距離計測<sup>(5)</sup>

・二次元計測について

巻き込みによる事故の場合は車両側面が障害物に向かって接近する格好になるため、車両横方向の距離計測に重点を置いている。具体的には画像上での模型車側面～障害物間の画素数より、二次元的に障害物までの距離を計測している（図4もしくは図5画像Aや画像Bの矢印）。障害物までの距離が1.0秒後到達線以内ではアラーム、0.5秒後到達線以内ではアラームとブレーキが作動する。

・二次元計測での問題点

奥行き方向の距離が失われているため、図5において実際にはAは接触せず、Bは接触の恐れがあるが、二次元計測によるシステムでは同一のものとして対処する。以上の問題を解決するため三次元計測（5章）を行う。

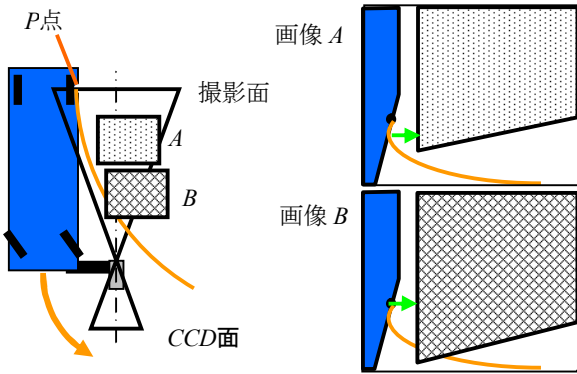


図5 二次元計測とその問題点

### 3. 車両の運動<sup>(6)</sup>

#### 3.1. 車両の運動方程式

P 点の予測進路を求める際や後述する移動前のカメラ座標・姿勢を推定するために、重心の横すべり角  $\beta$  やヨー角速度  $r$  を求めることは重要である。本研究においては車両が急激に加減速した場合の過渡的な現象や、急激なハンドル操作をする場合を考慮しないものとし、ローリング運動は無視する。 $\beta$  を微小量と見なし、前後トレッドが等しい車両が水平面内を一定速度で走行する場合、左右のタイヤのすべり角が等しく、車両のトレッドを無視した図6に示すような二輪モデルとして扱うことができる。本研究の車両はこのモデルとして扱う。

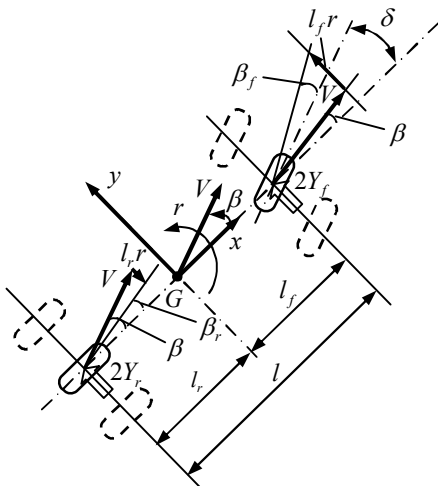


図6 四輪車の等価的な二輪モデル（車両固定座標）

よって、車両に座標系を固定した場合の運動方程式は次のようになる。

・横方向並進の運動方程式

$$mV \frac{d\beta}{dt} + 2(K_f + K_r)\beta + \left\{ mV + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \right\} r = 2K_f \delta \quad (3)$$

・ヨーイング運動方程式

$$2(l_f K_f - l_r K_r)\beta + I \frac{dr}{dt} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} r = 2l_f K_f \delta \quad (4)$$

ただし、 $m$ : 車両の慣性質量（車両重量）、 $I$ : ホイールベース、 $l_f$ : 重心～前車軸間距離、 $l_r$ : 重心～後車軸間距

離、 $r$ : 重心のヨー角速度、 $t$ : 時間、 $K_f$ 、 $K_r$ : 前後輪のコーナリングパワー（二輪分）、 $V$ : 走行速度、 $Y$ : 重心の横変位量、 $\beta$ : 重心の横すべり角、 $\theta$ : X 軸と前後輪の中心線とのなす角、 $\delta$ : 前輪舵角である。

システムでは、これらの式にルンゲ・クッタ (Runge-Kutta) 法を適用することで  $\beta$ ,  $r$  の値を求めている。

#### 3.2. 車両の定常旋回

車両の運動の対象を円運動に限定し、車両が定常旋回（一定の操舵角、一定の速度で走行）している時、 $d\beta/dt = 0$ ,  $dr/dt = 0$  となる。この定常状態の条件式を運動方程式、式(3), (4)に代入すると以下ようになる。

$$\beta = \left( 1 - \frac{m}{2l} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} V^2 \right) \frac{l_r}{l} \delta \quad (5)$$

$$r = \left( 1 / \left( 1 - \frac{m}{2l^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} V^2 \right) \right) \frac{V}{l} \delta \quad (6)$$

ここで  $\beta$ ,  $r$  は  $t$  の関数でない。 $r$  は  $t$  の関数ではないが、 $\theta$  は  $t$  の関数である。したがって P 点の X, Y 座標とヨー角を示した式(1), (2)を展開すると以下ようになる。

$$\begin{cases} X = l_r + \frac{V}{r} (\sin(\beta + rt) - \sin \beta) - \left( l_r \cos rt + \frac{D}{2} \sin rt \right) \\ Y = -\frac{D}{2} - \frac{V}{r} (\cos(\beta + rt) - \cos \beta) - \left( l_r \sin rt - \frac{D}{2} \cos rt \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X = l_r + \frac{V}{r} (\sin(\beta + rt) - \sin \beta) - \left( l_r \cos rt + \frac{D}{2} \sin rt \right) \\ Y = -\frac{D}{2} - \frac{V}{r} (\cos(\beta + rt) - \cos \beta) - \left( l_r \sin rt - \frac{D}{2} \cos rt \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = rt \quad (8)$$

これらの式に式(5), (6)を代入することで、 $t$  秒後の P 点の座標とヨー角を求めることができ、予測進路を求めることができる。

### 4. 障害物検出を目的とした画像処理

本研究では CCD カメラを用いて障害物の距離計測を行うが、計測のためにいくつかの画像処理を施す。

#### 4.1. 物体の形状検出

画像から特定の物体だけを認識したいとき、その物体と背景の濃度値の違いを利用して「二値化（閾値化）」を行う。この処理を施した静止画を図7に示す。



(a) 元画像 (b) 閾値 80 (c) 閾値 160

図7 閾値の違いによる二値画像の違い

#### 4.2. 物体の輪郭抽出

輪郭は濃度値が急激に変化する部分なので、関数の変化分を取り出す微分演算により輪郭抽出を行う。図7の「元画像」に二次微分の処理をした画像を図8に示す。画像が三種類あるのはオペレータ（表1）の違いによるものである。



(a) ラプラシアン1 (b) ラプラシアン2 (c)二値化後に(a)

図8 二次微分画像とそれを二値化した画像

表1 二次微分のオペレータ (一部)

オペレータ名	ラプラシアン1	ラプラシアン2
オペレータ	0 1 0 1 -4 1 0 1 0	1 1 1 1 -8 1 1 1 1

### 4.3. 地上固定座標系とカメラ座標系

カメラの座標が空間のどの座標に対応するかを求めることは、後述する三次元計測において非常に重要である。この両者の関係を表すためには、 $P$ 点を原点とした地上固定座標系をレンズの中心を原点とした座標系に変換すればよい。両座標系を図9に示す。

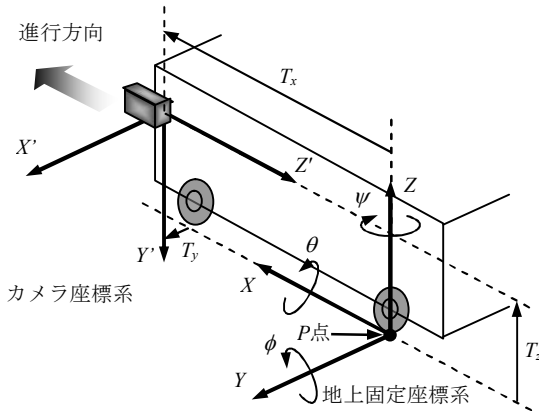


図9 地上固定座標系とカメラ座標系

地上固定座標系を $(X, Y, Z)$ 、回転角を $(\theta, \phi, \psi)$ 、カメラ座標系を $(X', Y', Z')$ とおき、地上固定座標系で表したカメラの座標(レンズの中心位置)を $X, Y, Z$ 軸方向にそれぞれ $T_x, T_y, T_z$ 、とすると、地上固定座標系からカメラ座標系への変換式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\phi c\psi - s\theta c\psi s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & -c\theta s\psi \\ -s\phi s\psi - s\theta c\phi c\psi & -c\phi s\psi + s\theta s\phi c\psi & -c\theta c\psi \\ -c\theta c\phi & c\theta s\phi & s\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - T_x \\ Y - T_y \\ Z - T_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、 $c\theta = \cos \theta$ ,  $c\phi = \cos \phi$ ,  $c\psi = \cos \psi$ ,  $s\theta = \sin \theta$ ,  $s\phi = \sin \phi$ ,  $s\psi = \sin \psi$ である。

## 5. 三次元計測

### 5.1. 車載単眼カメラにおける三次元計測

本システムはカメラを車載することを前提として新たに三次元計測システムを構築している。よって車両が移

動することにより、異なる視点からの画像が得られるため、車載単眼カメラでの三次元計測が可能となる。

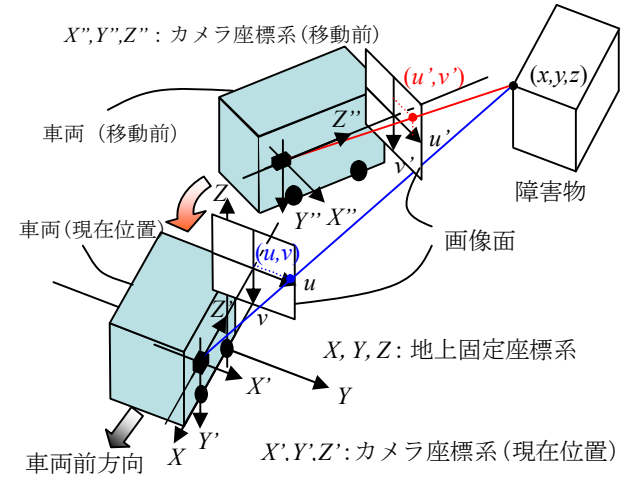


図10 車載単眼カメラによる三次元計測モデル図

図10は現在の車両の位置と走行してきたある一点の位置(以後、移動前とする)と障害物の位置関係を示したものである。これらの幾何関係を式(9)をふまえると次の2式ようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \sim A(I|\theta) \begin{pmatrix} x - T_x \\ y - T_y \\ z - T_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} \sim A(I|\theta) \begin{pmatrix} x - T_x \\ y - T_y \\ z - T_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

ただし、 $u, v, u', v'$ :カメラ画像面に投影される障害物の点(カメラ座標系)、 $A$ :カメラ内部パラメータ行列、 $x, y, z$ :障害物座標(地上固定座標系)、 $M_x, M_y$ :移動前のカメラの座標(地上固定座標系)、 $\psi_m$ :車両の運動によるヨー角の変化、である。

未知数である $u, v, u', v', A, M_x, M_y, \psi_m$ を求めることでカメラの座標と障害物の座標の関係が明らかになる。

### 5.2. カメラキャリブレーション

カメラ内部パラメータ行列 $A$ はカメラキャリブレーションによって求める。キャリブレーション手法には様々なものがあるが、ここでは簡便かつ安定した結果が得られるZhangのキャリブレーション手法<sup>(7)</sup>を用いて推定している。本研究で使用したカメラ「SONY XC-ST30」の内部パラメータは以下のようになった。

$$A = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & c_u \\ 0 & f_v & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1082.6 & 0 & 19 \\ 0 & 1084.2 & 13 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$





め次では、カメラのみを用いて距離計測を行ない、これらの要因が計測に与える影響を実験により確認した。

## 6.2. 車載カメラを模擬した単眼カメラによる距離計測

システムを車載した際のカメラの運動を直進運動、回転運動に分解して、カメラによる距離算出結果への影響を調べた。ここでは特に特徴の現れた、カメラの前後移動に回転運動を考慮した場合について取り上げる(図12)。検出物体は箱のA点に着目した。取得画像(図13)から算出される奥行き方向の座標  $Z_c$  と実測値  $Z_m$  を比較し、カメラの移動距離  $b_z$  との関係を示す(図14)。なお、 $Z_c$  は式(17)で算出される。 $(Z_m=3000[\text{mm}], 100 \leq b_z[\text{mm}] \leq 700, -5 \leq \theta[^\circ] \leq -1)$

$$Z_c = \frac{fu \left[ \{ fu \sin \theta - (Cu - u') \cos \theta \} b_z \right]}{\{ fu^2 + (Cu - u)(Cu - u') \} \sin \theta - fu(u - u') \cos \theta} \quad (17)$$

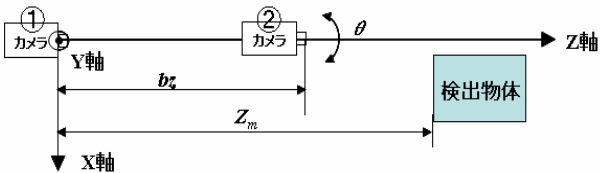
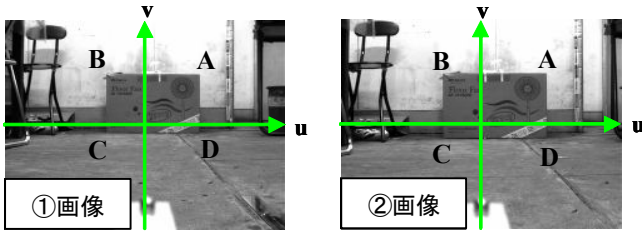


図12 カメラ実験モデル図



(a) 基準カメラ( $Z_m=3000[\text{mm}]$ ) (b) 検査カメラ( $Z_m=2700[\text{mm}]$ )

図13 取得画像と着目点

また地上固定座標系から障害物までの距離の5%まで許容した、検査カメラのX軸方向の並進と回転(特にヨー方向の回転)の許容範囲を式(18)に示す。

$$-0.08 \leq \theta[^\circ] \leq 0.07, -3.7 \leq r_x[\text{mm}] \leq 3.3 \quad (18)$$

(ただし  $\theta$ : ヨー角,  $r_x$ : X軸方向の並進量とする)

どちらの許容範囲も肉眼で確認できないほど微小であるが、さらなる性能向上のために、補正(5.5., 5.6.)を行い補正なしの結果と比較した(図14)。

図14は、走行による影響、回転角度の推定を行なう補正による計測では、高い精度で距離の算出ができて示している。しかし、移動距離が短い場合、十分な視差が確保できず、誤検出を起している。これは式(17)より微小回転の場合、算出値  $Z_c$  と視差  $u-u'$  は反比例の関係にあること、また視差は移動距離  $b_z$  に比例の関係にあることより、カメラの移動距離が短い場合、視差の変化量が小さくなり、算出値にばらつきが発生していると考えられる。

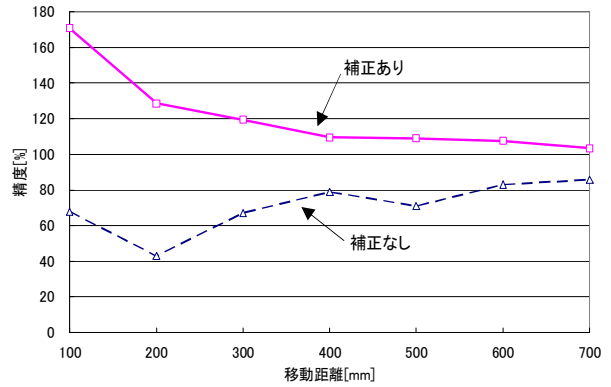


図14 回転角-3[°]における算出精度の比較

## 7. 結言

単眼カメラを用いた基礎的な三次元距離計測の精度の向上および誤差原因の検討を行ない以下の結果を得た。

- (1) 車載単眼カメラによる三次元計測(三次元位置決め)が可能であることを確認した。
- (2) 車載単眼カメラによる三次元位置決めシステムでの誤差の要因を明らかにした。
  - ・ 走行中に発生する揺れによる影響
  - ・ カメラ間の位置計測誤差による影響
- (3) カメラを用いた距離計測にて、計測誤差に与える影響が大きい因子を明らかにした。またこの因子の影響を受けにくい新たな計測システムを作成し、この有効性を確認した。

## 参考文献

- (1)警察庁交通局交通企画課 「平成20年中の交通事故死者数について」
- (2)警察庁交通局 「平成19年中の交通事故の発生状況」
- (3)埜圭二 十川能之 「自動車前方監視用のステレオ画像認識装置の開発」 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.101, No.302(PRMU2001 85-93),Page37-42 2001.09.13
- (4)広田民郎 「日産の先進安全&環境技術」 自動車工学 Vol.56, No.12, Page46-57 2007.11.01
- (5)吉田潤 「自動車の右左折時における内輪差発生による巻き込み事故防止システムに関する研究 ～CCDカメラでの映像取得における奥行き方向距離測定～」 武蔵工業大学大学院 修士論文概要集 平成19年
- (6)安部正人 著 「自動車の運動と制御 第二版」山海堂
- (7)Zhengyou Zhang 「A Flexible New Technique for Camera Calibration」 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.

尚、本論文の一部は自動車技術会春季学術講演会(2008)で発表した。