

# 全方位カメラを利用した ラウンドアバウト車両挙動解析

加納 政宏<sup>1</sup>・阿部 義典<sup>2</sup>・松林 豊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 国際航業株式会社 社会基盤事業部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町二丁目二十四番一号)  
E-mail:masahiro\_kano@kkc.co.jp

<sup>2</sup>正会員 国際航業株式会社 社会基盤事業部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町二丁目二十四番一号)  
E-mail:yoshinori\_abe@kkc.co.jp

<sup>3</sup>正会員 国際航業株式会社 社会基盤事業部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町二丁目二十四番一号)  
E-mail:yutaka\_matsubayashi@kkc.co.jp

本研究では、全方位カメラを利用して車両挙動を多角的に捉え、ラウンドアバウトにおける車両挙動の俯瞰的・網羅的な把握が行えるシステムを試作し、長野県飯田市のラウンドアバウトをフィールドに、観測データに基づく車両挙動の解析を実施した。車両挙動に関しては、定点カメラを用いた取り組みがあるが、全方位カメラの活用により、ラウンドアバウト内を俯瞰的かつ網羅的な状況把握に期待した。今後、安全でエコな導入・運用を進めるためには、ラウンドアバウトにおける車両挙動を網羅的に捉え、道路構造上の問題箇所等を把握することが重要である。本稿では、検証結果に基づき、ラウンドアバウト内での走行実態の一元的定量化について報告する。

**Key Words** :Roundabout,All Azimuth Camera, Vehicle Behalysis, A Bird's eye viewt,Comprehensive

## 1. はじめに

わが国のラウンドアバウトは、諸外国と比べて導入件数が少なく、ドライバーの認知度も未だ低い。今後、安全で効率的なラウンドアバウトの導入・運用を進める上では、ラウンドアバウト内の車両挙動を網羅的に捉え、道路構造上の問題箇所等を的確に把握していくことが重要である。

車両挙動の把握に関しては、これまでも単路部や交差点で定点カメラを用いた取り組みが数多く行われているが、状況把握できる範囲がカメラの設置位置やアングルに依存する点に課題があった。一方、近年では複数の広角レンズにより構成される全方位カメラが登場し、カメラ単体による広範囲の状況把握が可能となった。これを活用する事により、ラウンドアバウト内の流入や流出等の交通流が錯綜する箇所においても、俯瞰的かつ網羅的な状況把握が期待できる。

本研究では、全方位カメラを利用して車両挙動を多角的に捉え、ラウンドアバウトにおける車両挙動の俯瞰的・網羅的な把握が行えるシステムを試作し、長野県飯田市のラウンドアバウトをフィールドに、実地観測データに基づく車両挙動、走行速度の解析を実施した。本稿では、実フィールド検証で得た結果に基づき、ラウンドアバウト内での走行実態の一元的定量化について報告する。

## 2. 全方位カメラを利用した車両挙動解析の概要

### (1) 全方位カメラの概要

全方位カメラは、周囲360度の画像を一度に撮影できる機器であり、近年、Googleのストリートビューをはじめ不動産の室内間取り撮影など、多方面で活用が進んでいる。図-1は、本研究で用いたPoint Grey Research社製の全方位カメラ“LadyBug2”である。水平方向に5個、天頂方向に1個の広角CCDカメラを備えており、6個のCCDカメラで撮影された画像は、1つのパノラマ画像に合成できる。471万画素(78.6万画素×6)の画像を、毎秒30フレームで撮影できる。



図-1 全方位カメラ (LadyBug2)

本研究で用いた全方位カメラ“LadyBug2”の仕様を、表-1に示す。

表-1 全方位カメラ (LadyBug2) の仕様

シャッタースピード	30フレーム/秒
CCD解像度	78.6万画素 (1024×768)
パノラマ画像 ピクセル数	4.7メガピクセル (78.6×6台)
視野カバー率	75% (真下方向を除く範囲)

## (2) 本研究の技術的特長

本研究では、30コマ/秒のシャッタースピードで取得した全方位カメラのパノラマ画像を利用し、画像に写る対象車両の走行軌跡、走行速度の算出を試みた(図-2参照)。走行軌跡の算出は、撮影したパノラマ画像にGCP (Ground Control Point) 3点を利用して測地座標を付与し、画像上で車両のタイヤと路面が接する位置の測地座標を求める。走行速度は、走行軌跡の測地座標から各コマ間の移動ベクトル量を求め、シャッタースピードと対象車両の移動コマ数から算出する。



図-2 車両挙動解析システムの全体イメージ

従来の定点カメラを用いた車両挙動解析では、状況把握できる範囲がカメラ設置位置やアングルに依存する点に課題があった。また、複数の定点カメラを用いた車両挙動の解析では、車両軌跡、走行速度を求める際に、重複範囲での解析データの同期処理、接合処理の煩雑が課題であった。

本システムでは、単体の全方位カメラで俯瞰的かつ網羅的な状況把握が可能である。また単体のカメラでの解析であるため、同期処理や接合処理が必要なく、ラウンドアバウト内の車両挙動を効率的・効果的に算出することができる(図-3参照)。

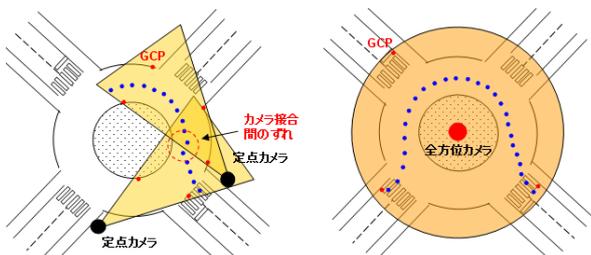


図-3 従来の定点カメラによる解析との違い

## 3. 車両挙動の解析方法

本研究で実施した車両挙動解析の流れを、図-4に示す。

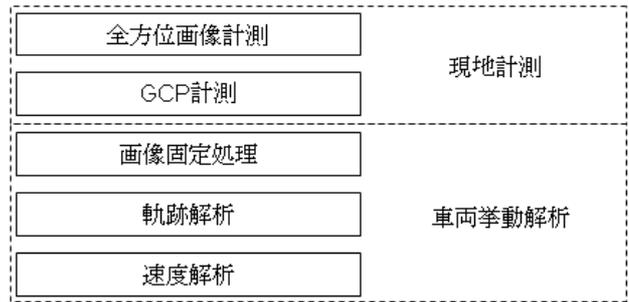


図-4 車両挙動の解析フロー

### (1) 現地計測

現地計測では、ラウンドアバウトの島中央部に設置した高さ3.5mの測量用長脚上に全方位カメラを固定し、対象交差点の車両の走行状況を撮影した。全方位カメラによる撮影風景を、図-5に示す。



図-5 全方位カメラおよび現地計測風景

GCP計測は、全方位カメラで取得したパノラマ画像に測地座標を付与するために、取得した画像上で横断歩道の隅等の明確に識別できる地物の測地座標を計測する作業である。今回は、ニコントリンプル社製のGPS受信機(Trimble5700GPS)を用いてネットワーク型RTK-GPS測量(VRS方式)の単点法により、測地座標を標準偏差で水平精度10cm、標高精度20cmで取得した。

### (2) 車両挙動解析

車両挙動の解析では、従来の定点カメラによる走行軌跡計測システムの技術を参考に、全方位カメラ画像による車両挙動解析システムを新たに開発した。本システムは、パノラマ写真上に取得した軌跡の点情報を表示するパノラマビュー、三次元画像を表示して車両軌跡の取得を行う3Dビュー、カメラ、GCP、軌跡情報の位置関係を表示するモデルビューの三つで構成される(図-6参照)。

本システムでは、取得した画像およびシャッタースピードをもとに、ラウンドアバウト交差点内を走行する車両の走行軌跡および走行速度を算出する。

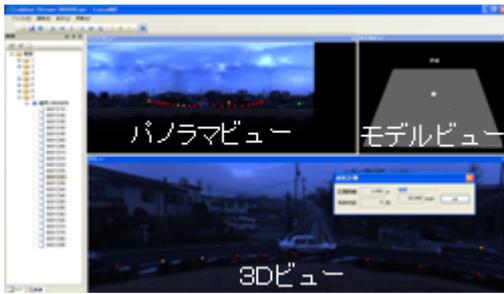


図-6 車両挙動解析システムの画面

本システムにおける軌跡解析および速度解析の方法を、以下に示す。

a) 軌跡解析

3D ビュー上の座標は球面座標で表現し、経度を  $\theta$ 、緯度を  $\phi$  とする。カメラから軌跡への方向を横方向および縦方向への傾きで表わす。カメラの座標からこの方向へ伸ばした直線と路面との交点が測地座標系における軌跡の座標となる。路面は3点のGCPを通る平面として定義する(図-7参照)。

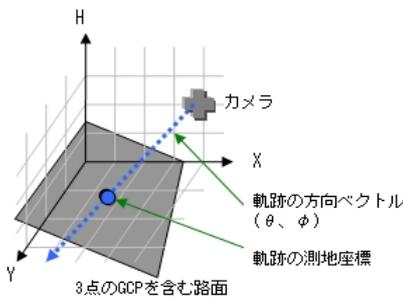


図-7 走行軌跡座標算出イメージ

本システムでは、GCP計測で取得した3点の測地座標から路面の法線ベクトルおよび道路面の方程式を作成し、車両軌跡取得のフィールドを構築する。走行軌跡解析の対象となるフィールドは、フラットな面で構成する必要がある。路面と直線との交点を求める際には、平面の方程式を用いる。平面の方程式では、ある点が特定の平面上にあるか検査する。3点のGCP座標をG1( $g1x, g1y, g1h$ ), G2( $g2x, g2y, g2h$ ), G3( $g3x, g3y, g3h$ )とし、路面の法線ベクトルN( $nx, ny, nh$ )を求め、さらに平面の方程式を作成する(図-8参照)。

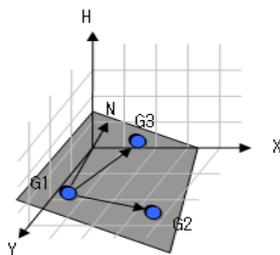


図-8 GCP・法線・平面の関係

GCP間のベクトル量は、次式(1a) (2a)で算出する。

$$G1 \rightarrow G2 = (g2x - g1x, g2y - g1y, g2h - g1h) \quad (1a)$$

$$G1 \rightarrow G3 = (g3x - g1x, g3y - g1y, g3h - g1h) \quad (1b)$$

$G1 \rightarrow G2, G1 \rightarrow G3$ は、どちらも路面上にあるベクトルである。この2つの外積をとることで、2つのベクトルを直行する法線N( $nx, ny, nz$ )を、次式(2a) ~ (2c)で求める。

$$nx = (g2y - g1y) * (g3h - g1h) - (g2h - g1h) * (g3y - g1y) \quad (2a)$$

$$ny = (g2h - g1h) * (g3x - g1x) - (g3h - g1h) * (g2x - g1x) \quad (2b)$$

$$nz = (g2x - g1x) * (g3y - g1y) - (g3x - g1x) * (g2y - g1y) \quad (2c)$$

法線Nから平面Sの方程式を作成すると、次式(3a)となる。

$$S(x,y,h) = nx(x - g1x) + ny(y - g1y) + nh(h - g1h) \quad (3a)$$

式(3a)の結果では以下の関係が成り立ち、軌跡座標が路面上にあるかを確認することができる。

$S=0$ のとき：軌跡は路面上にある

$S>0$ のとき：軌跡は路面よりも上にある

$S<0$ のとき：軌跡は路面よりも下にある

次に、カメラから軌跡への方向ベクトルを球面座標系( $\theta, \phi$ )から測地座標系( $x, y, h$ )に変換する。ここで求めた $x,y,h$ は、カメラから軌跡に向かう方向を表わす。

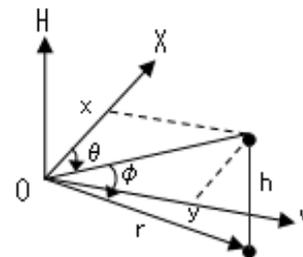


図-9 球面座標から平面座標への変換

球面座標から平面座標への変換式を、(4a) ~ (4c)に示す。

$$x = r * \cos(\phi) * \sin(\theta) \quad (4a)$$

$$y = r * \cos(\phi) * \cos(\theta) \quad (4b)$$

$$h = r * \sin(\phi) \quad (4c)$$

$x,y,h$ の比率がベクトルであり、 $r$ は適当値とする。カメラの座標に対して軌跡の方向ベクトルを徐々に加算していき、得られた座標を平面の方程式に当てはめ、有効性を確認する。 $S=0$ の場合、その座標は平面上にあることになり、処理は完了となる。 $S \neq 0$ の場合、その座標にさらに方向ベクトルを加算して処理を繰り返す。なお、検査座標を作成する際に加算する軌跡への方向ベクトルの値は、 $d$ 倍( $0 < d < 1$ )したものである。平面の方程式が返す値から、検査した座標が平面上にあるか下にあるか

を判別することができる。方程式の返した値の符号が前回の検査と異なれば、前回の座標と今回の座標との間に路面が挟まれていることがわかる。この場合、dの値を減少させた上で符号を反転して処理を繰り返すことで、座標を路面に収束させることができる。

#### b) 速度解析

速度解析は、走行軌跡で算出した2点間の測地座標から軌跡間の距離を求め、軌跡間の速度を算出する。距離Lの算出式を(5a)、速度Vの算出式を(5b)に示す。

$$L(m) = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2 + (h1 - h2)^2} \quad (5a)$$

$$V(km/h) = (L * 0.001) / \{s / 3600\} \quad (5b)$$

s: シャッター間隔(秒)

### 4. 実フィールドにおける検証結果

#### (1) 対象フィールド

開発したシステムは、長野県飯田市吾妻町のラウンドアバウトで実地観測による検証を行った。当該箇所は、7又路を束ねるラウンドアバウト交差点である。直径約24mの中央島は芝生で覆われており、器材設置が可能である。地形的な特徴として、北北東から南南西方向に約1.4m下がる粗フラットな面で構成されている。

#### (2) 車両挙動の算定結果

図-10は、本システムで算出した車両走行軌跡と現地オルソ画像を重ねた結果である。中央島に設置した全方位カメラにより、ラウンドアバウトに流入、流出する車両挙動を、全方向で網羅的に捉えることができた。



図-10 走行軌跡の展開図

車両挙動の把握は、定点カメラによる観測でも可能であるが、全方位カメラを用いることで、流入や流出等の交通流が錯綜する箇所でもカメラアングルに依存せず、危険事象等を網羅的に観測することができる。また、ラウンドアバウトを通過する車両の走行速度を連続して観測できるため、走行ルート別に速度超過車両の有無を見ることができる。本手法は、ラウンドアバウトにおける危険事象の網羅的な把握や、速度抑制対策等の対策前後

での比較による効果計測への活用が期待できる。

なお、算定した走行軌跡および走行速度の正確度については、現地では交通規制を伴うことから実施困難であったため、別途検証フィールドを構築して検証を実施した。検証結果を、以下に示す。

#### a) 走行軌跡の正確度の検証

走行軌跡の正確度の検証は、長脚に固定した全方位カメラの直下を原点とし、直線上に5m間隔で検証点を設置した環境を構築して行った(図-11参照)。

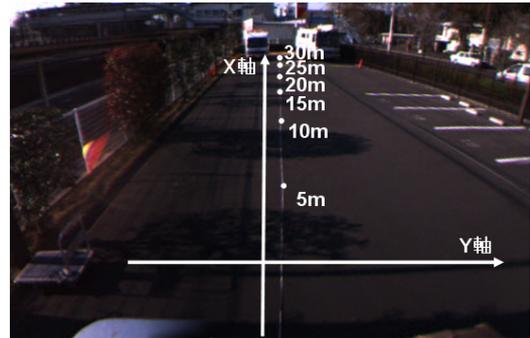


図-11 位置精度の検証環境

検証点では、ネットワーク型 RTK-GPS 測量 (VRS 方式) により5回計測した結果の平均値を求め、これを真値として用いた。また、この検証点での計測状況を全方位カメラで撮影し、今回開発したシステムで座標値を求め、先に求めた真値との比較により位置精度を検証した(図-12参照)。

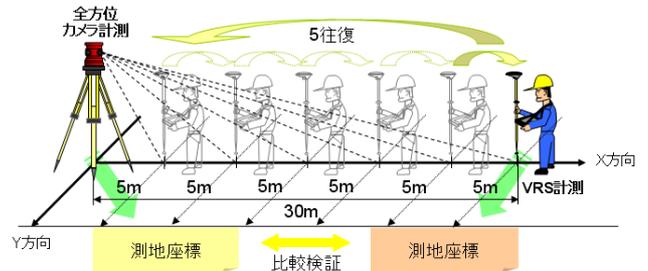


図-12 位置精度の検証方法

検証の結果、水平方向の位置精度については、カメラからの距離が大きくなると劣化する結果となった。一方、標高の位置精度は、距離に依存することなく高精度を保っていた(図-13参照)。水平方向の位置精度の劣化は、奥行きX方向の値のばらつきによる影響が大きい。これは奥行きX方向に対する精度劣化を意味する。また、カメラからの距離が30mの地点では、著しく精度の劣化が見られた。全方位カメラ画像の78万画素では、測量用ポールと道路面が接する箇所の判断が困難であり、奥行きX方向と横軸Y方向の両方でばらつきが生じた。この結果から、本システムの適用範囲は、カメラ設置箇所から半径25m以内が望ましい。

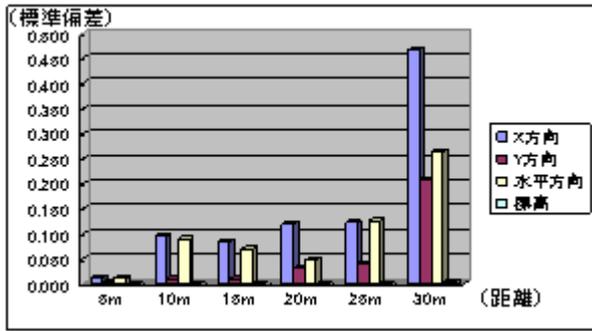


図-13 全方位カメラからの距離と位置精度の関係

b) 走行速度の正確度の検証

走行速度の正確度の検証は、自動追尾型トータルステーション（ソキア社製 SRX1X）を用いて高精度な車両の走行軌跡を計測し、これをもとに真値とする走行速度の算出した上で、本システムによる車両走行速度の算出結果との比較により行った（図-14 参照）。

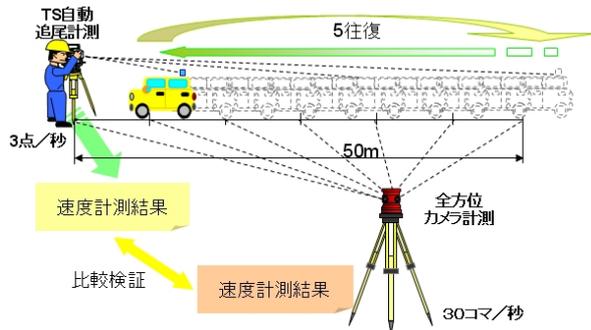


図-14 走行車両速度の正確度の検証方法

直線距離 50mの区間を 5 往復する車両の走行軌跡を計測し、自動追尾型トータルステーションで求めた走行速度の真値と、本システムで求めた走行速度と比較結果を、図-15 に示す。

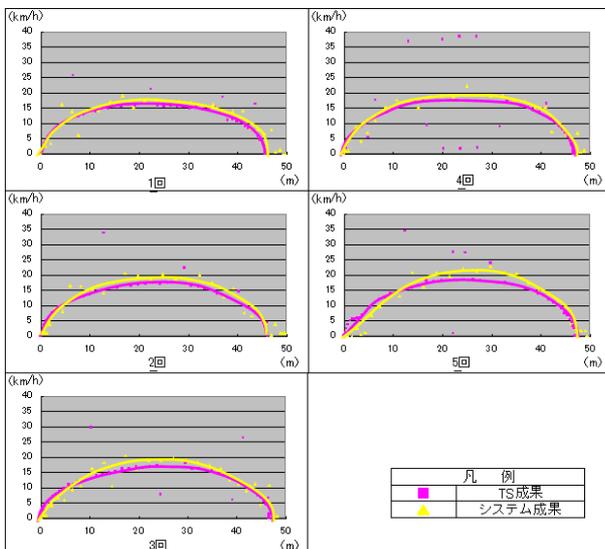


図-15 走行速度の算定結果の比較

自動追尾型トータルステーションは、1秒間に3点の位置座標を計測することが可能である。測角精度は1度であり、これは100mで約0.5mmの誤差に相当する。測距精度は、 $(1.5 + 2\text{ppm} \times D)$  mm である。検証の結果、本システムで算出した走行速度は、真値から $\pm 3\text{km/h}$ 程度の較差に収まった。ラウンドアバウトを通過する車両の走行速度の把握には、本システムが十分に活用できると言える。

5. 今後の展望

(1) ラウンドアバウトへの適用の可能性

今回の検証結果から、本システムによる車両挙動の把握は、カメラ設置位置から25m以内の範囲で有効と考えられる（図-16参照）。国内外の文献では、小規模な交差点に適用されるラウンドアバウトは、環道外側半径が6.5~12.5m、中央島半径2.0m程度で設計するものとされている。今後、特に生活道路などの小規模な交差点でラウンドアバウトを導入する際、本システムによる車両挙動の把握が有効である。

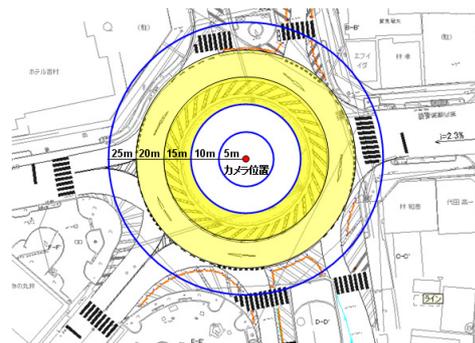


図-16 本システムの適用が有効な範囲

一方、ラウンドアバウトにおける交通挙動の把握では、流入部や流出部についても車両挙動を把握し、安全性を評価する必要がある。今回の検証フィールドは、比較的大規模なラウンドアバウトであったため、流入部や流出部の車両挙動については検証できていない。走行軌跡の正確度の検証結果では、カメラ位置から見て奥行き方向で位置精度の劣化が見られた。今後、流入部や流出部の車両挙動についても、小規模なラウンドアバウトで検証する必要がある。

(2) 技術的課題

今回の検証では、カメラ画像の解像度が車両の位置特定精度に大きく影響した。より広範囲に車両挙動を観測するためには、今回用いた全方位カメラよりも高解像度のものを採用する必要がある。なお、最新の全方位カメラ（LadyBug3）では、解像度1152万画素（192万画素×

6) の画像を毎秒15フレームで撮影可能である。これを本システムに組み込むことで、車両の位置特定の精度向上が期待できる。

また、奥行き方向の精度向上を図るためには、GCP計測点による画像標定の精度を向上させる必要がある。今回のシステムでは、GCP3点のみを利用したが、今後は複数のGCP測点による画像調整を可能とし、画像標定の精度向上を図る必要がある。

その他、今回の検証の中では、全方位カメラの画像データをパソコンに書き込む際、画像データの欠落が発生した。これは、画像データの転送スピードと、PCへの書き込みスピードの間でのタイミングのズレが生じたことが要因と考えられる。画像データの欠落は、走行速度算出時には移動ベクトルが大きい値となり、誤差要因となる。正確な分析に用いるためには、画像データの欠落を検知、タイムスタンプの記録等のシステム改良が必要である。

## 6. おわりに

本研究では、車両挙動の把握・解析に全方位カメラを取り入れ、ラウンドアバウトにおける網羅的な車両挙動の把握を可能とした。今後、算出した走行軌跡のデータをもとに車両近接等を自動判定できるシステムとすることで、事前に想定できなかった新たな危険事象の発見等が期待できる。わが国のラウンドアバウトは、安全性に関する実証データの取得がこれからの状況にある。今後、ラウンドアバウト導入にあわせて様々な実データを取得・収集し、ラウンドアバウトの幾何構造や性能評価に

反映していくことが望ましい。

また本研究で開発したシステムは、カメラ設置箇所の制約はあるが、ラウンドアバウト以外の交差点にも適用可能と考えられる。例えば、平面交差点では対角の隅切り箇所2点に全方位カメラを設置することで、通常の定点カメラよりも広角で車両挙動を捉え、巻き込み箇所の走行速度の計測にも活用できる。今後、様々なタイプの交差点で検証を重ね、多角的な視点から交通シミュレーションに活用できるシステムとしていきたい。

**謝辞：**本研究の現地検証においては、名古屋大学大学院工学研究科の中村英樹教授をはじめとする研究室の皆様、飯田市建設部都市・地域計画課調査計画係の職員の皆様、(財)国際交通安全学会の今泉浩子氏に多大なご協力をいただいた。厚く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 小宮粹史, 鼻中聡志: 複数のビデオカメラによる車両走行軌跡の連続観測 第2回ITSシンポジウム2003 (2003.12)
- 2) 葛西誠, 野中康弘: 都市間高速道路短路部を対象とした長区間車両挙動データ取得システム開発の試み 土木学会第59回年次学術講演会 (2004.9)
- 3) 富田林市RTK-GPS単点観測による基準点(星測点)測量作業マニュアル (2006.3)

(2011.5.6 受付)

## VEHICLE BEHAVIOR ANALYSIS OF ROUNDABOUT USING ALL AZIMUTH CAMERA

Masahiro KANO, Yoshinori ABE and Yutaka MATSUBAYASHI

In Japan, we have installed fewer roundabouts compared to other countries and awareness on roundabout is low among drivers. In this study, we made a prototype system which can grasp car behavior panoramically and comprehensively. Using this system, we made analysis on car behavior based on the observational data with an all azimuth camera, which is enable to capture car behavior from many directions. The observational data was taken at roundabouts at Iida-City, Nagano Pref. Concerning car behavior, there is approach using a monitoring camera. But, with an all azimuth camera, we expect to be able to grasp aspects in roundabouts comprehensively. In this report, based on validation result, it shows monogenetic quantification of actual run conditions at roundabouts.