

## 車載ミリ波レーダの車両感知器への適用の検討

弓場 竜<sup>†</sup> 北村 忠明<sup>†</sup>

<sup>†</sup> (株)日立製作所 日立研究所 〒319-1292 日立市大みか町7-1-1

E-mail: <sup>†</sup> {ryumiba, kitamura}@gm.hrl.hitachi.co.jp

あらまし 速度計測が可能であり照明条件や気象変換へ耐環境な車両感知器を実現するために、本稿はACC(車間距離制御システム)やCWS(車間距離警報システム)用に開発された車載ミリ波レーダの車両感知器への適用を提案する。最初に机上にて上記の車両感知器のシステム構成ならびに信号処理を検討した後、次に実道ならびに社内設備にて交通量ならびに速度の計測の評価実験を実施した。実験の結果、2車線個別の交通量ならびに車両の走行速度を95%以上の精度で計測する見通しを得た。

キーワード ミリ波レーダ, 感知器, 交通量, 速度

## A Study on Adapting an Automotive Millimetre -wave Radar into a Traffic Counter

Ryo YUMIBA<sup>†</sup> and Tadaaki KITAMURA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Hitachi Research Lab, Hitachi, LTD., 7-1-1 Omika-cho Hitachi-shi city, 319-1292

E-mail: <sup>†</sup> {ryumiba, kitamura}@gm.hrl.hitachi.co.jp

**Abstract** In order to realize a traffic counter that measures velocity directly and keeps accurate under tough weather and illuminative condition, we propose to adapt the automotive millimetre-wave radar into a traffic counter which has been developed for ACC (Adaptive Cruise Control) and CWS (Collision Warning System). We designed system composition and signal processing of the traffic counter theoretically, and executed evaluation experiment of measuring traffic quantity and vehicle velocity in real road and in laboratory yard. The evaluation results show good performance (more than 95% accuracy) on measuring traffic quantity in two lanes separately and measuring vehicle velocity.

**Keyword** Millimetre-wave Radar, Traffic Counter, Traffic Quantity, Velocity

### 1. はじめに

安全かつ円滑な道路交通の実現を目指して、渋滞回避の経路誘導等の交通情報を提供したり、交通流が円滑になるように信号機を最適制御する交通管制システムが各都道府県で運用されている。上記の経路誘導や信号制御には、交差点間の旅行時間が判定基準として重要である。AVI (Automatic Vehicle Identification) 装置は、同定した車両の通過時間から2装置間の旅行時間を直接計測できるが、コスト等の面から量的な拡大は難しい。よって、交通管制センタは多くの経路の旅行時間を道路の多数の地点に設置された車両感知器の計測データから推定している。この旅行時間の推定のために、超音波式や光学式等の数方式の車両感知器がこれまで多数導入されてきた[1]。また近年の規制緩和によって民間業者による交通情報の収集および提供が許可されたことを受けて[2]、海外先行例のように民間による車両感知器の配備が進むことも予測されている[3]。

車両感知器の計測データから旅行時間を推定する過程で交通流の速度が必要となるが、現在普及してい

る超音波方式、光方式の車両感知器は速度を直接的に計測できないので、センタは速度以外の計測データの統計量から間接的に速度を推定している。この間接的に得られた速度には、交通流が低速の時に速度変動が大きいう問題や、統計量から推定するため交通流の速度変化が時間遅れるという問題があり、旅行時間の予測精度を低下させる要因となっている[4]。また、一部方式の車両感知器では、気象変化や日照変化による検知率の低下が報告されている[1][5]。

一方、車間距離制御システムや車間距離警報システムのセンサに開発された車載76GHzミリ波レーダ[6][7][8]は下記に列挙する特長を持ち、速度の直接計測、耐環境等の特長をもつ車両感知器の実現が期待できる。

1. 車両の検知ならびに、車両の道路上の位置と速度の計測が可能。
2. ミリ波帯の電波特性上、気象変化や照明変化の影響を受けにくい
3. 扇状に電波を放射するので路側から検知可能で、道路上へのオーバーハングが不要。

4. 検知範囲が広く複数車線の検知に見込
5. 100mm 角程度のサイズで省スペース設置
6. 車両への普及が進めば量産効果で低コスト化に期待
7. 特定小電力に該当し、無線局免許が不要

本研究は、車間距離制御システムや車間距離警報システム用に開発された車載ミリ波レーダを路側設置型の車両感知器に応用することを検討し、実道実験による台数計測の精度評価、社内設備実験による速度計測の精度評価を実施した。評価の結果、2車線の車線別の台数ならびに速度を95%以上の精度で得たので以下報告する。

## 2. ミリ波レーダ方式の車両感知器の机上検討

### 2.1. 車両感知器の装置構成と信号処理

ミリ波レーダ応用の車両感知器は、ミリ波レーダが計測したレーダ基準の距離、速度、方向を2次加工して道路上における車両の位置、速度等に変換した後、交通量の集計等の信号処理を行う。以下、この信号処理の詳細を述べる。

ミリ波レーダ応用の車両感知器の装置構成を図1に示す。図1において、ミリ波レーダは路側の支柱上部から斜め下方の道路に向けて電波を放射するとともに、放射波のビーム幅に相当したスリット状の検知範囲内の路面や道路構造物からの反射波を受信している。検知範囲に車両が進入すると、ミリ波レーダは車両からの反射波を受信し、この受信波を入力とした内蔵 DSP (Digital Signal Processor) による一連の信号処理によって車両を検知・追跡して識別番号を付与するとともに、各車両の距離  $r$ 、相対速度  $v$ 、方向  $\theta$  を計測する。補足すると、距離  $r$  は図1に示すレーダ座標系の原点  $O'$  から車両上の反射中心  $P$  までの距離  $O'P$ 、相対速度  $v$  は距離  $r$  の時間変化率、方向  $\theta$  はレーダ座標系  $O'$

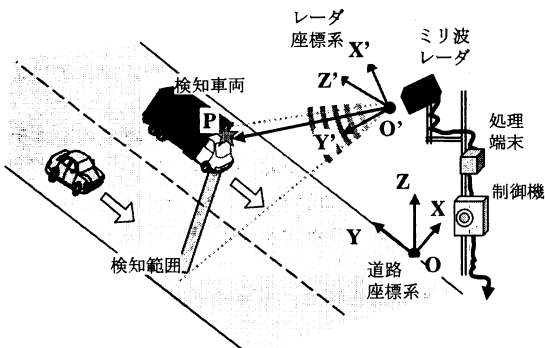
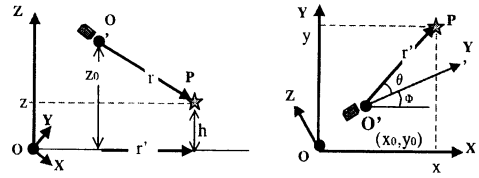
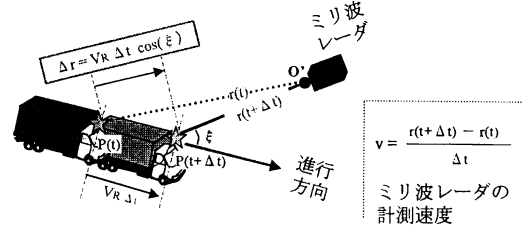


図1 ミリ波レーダ方式車両感知器の装置構成



(a) Z軸と点P, O'を含む断面 (b) X軸とY軸を含む断面



(c) ミリ波レーダの計測速度と道路座標系における車両速度

図2 ミリ波レーダが計測する距離、相対速度、方向と道路上の位置と速度の関係

$-X'$   $-Y'$   $-Z'$  の  $X'$   $-Y'$  平面上における  $Z'$  軸周りの回転角 ( $Y'$  軸方向が原点, 右方向が正) である。ミリ波レーダは毎周期この検知結果を処理端末に送信する。なお、ミリ波レーダは、距離  $r$ 、相対速度  $v$  などの連続性から追跡処理を行い、同一の車両が検知範囲に到達してから退出するまでの間、同一の識別番号を与え続ける。

図1において、処理端末は次の3ステップの処理を行う。

- Step1 各時刻における車両の道路上の位置、速度、車線の計算
- Step2 車両通過後の車種の識別
- Step3 所定周期ごとの車線別の交通量 (単位時間あたりの通過台数)、平均速度、車種割合の計算

Step1 において、処理端末は道路座標系 (図1中の  $O-X-Y-Z$ ) におけるミリ波レーダの設置位置  $(x_0, y_0, z_0)$  ならびに  $X, Y, Z$  の各座標軸周りの回転で定義した設置方向  $(\alpha, \beta, \gamma)$  を保持しており、ミリ波レーダから検知データを受信すると直ちに下記の手順で道路上の位置、速度、車線を計算する。まず、道路上の位置  $(x, y, z)$  はミリ波レーダ計測の距離  $r$ 、方向  $\theta$  から式(1)を用いて計算する (図2(a),(b)参考)。

$$\begin{aligned} x &= r' \cos(\theta + f) + x_0, & r' &= (r^2 - (z_0 - h)^2)^{1/2} \\ y &= r' \sin(\theta + f) + y_0 \\ z &= h \end{aligned} \quad (1)$$

表1 車両感知器の特性比較

	超音波	光学	画像*	ミリ波レーダ
複数車線	—	—	○可能	○可能
車載機通信	—	○可能	—	—
耐環境	△気温、雨	×雨、雪	×西日、霧	○
オーバーハング	要	要	要	不要
計測項目	交通量、占有率	交通量、占有率	交通量、占有率、速度、車種、渋滞長、映像他	交通量、速度、車種

\*画像処理により車両を検知し種別項目を計測する方式。AVI装置を含まない。

なお、式(1)において $\phi$ は放射波の中心軸 $Y'$ と $X$ 軸とが成す角であり設置方向 $(\alpha, \beta, \gamma)$ から計算できる。 $h$ は車両表面上で電波が反射する中心点の地上高である。 $h$ の値は実際には車両により異なるが、近似的に固定の所定値を用いる。次に車両の道路上の速度 $V_R$ は、図2(c)に示すようにレーダからみた車両の見かけの速度が車線の進行方向(図1において $Y$ 軸負)とレーダの中心軸 $Y'$ が成す角 $\xi$ の余弦分だけ目減りすることを考慮して式(2)で計算する。

$$V_R = \cos(\xi)^{-1} v \quad (2)$$

最後に、車線は処理端末が保持する車線のレイアウトと車両の位置を比較して計算する。図1の場面では、車両の位置 $x$ と各車線の $X$ 軸上の範囲を比較して車線を定める。以上計算した道路上の位置、速度、車線は、ミリ波レーダが割りふった識別番号ごとにバッファに蓄えておく。

Step2において、処理端末は各識別番号の車両が通過した直後、Step1で蓄えたバッファ中の検知時間と速度から車長を計算して、車長を基準に大型車、普通車等の車種を識別する。この車種の識別処理は、現行の13GHzマイクロ波方式の車両感知器に準じる[9]。

Step3において、処理端末は所定周期毎に、Step1で計算した検知台数、速度を集計して、車線別に交通量、平均速度をそれぞれ計算する。また、Step2の車種を集計することで、車線別の車種割合を計算する。

処理端末は以上Step3計算した車線別の通過台数、平均速度、車種割合を交通管制センタと接続された制御機に出力する。

## 2.2. 車両感知器の特性比較

ミリ波レーダ方式の車両感知器を実現したときの、現在普及している超音波(シングル方式)、光学ならびに画像の各方式の車両感知器との特性比較を表1に示す[1][5]。なお表1において、占有率とは単位時間あたり計測地点に車両が存在する時間割合である。表1よりミリ波レーダ方式は、光学式のような車載機との通信機能や、画像式のような豊富な計測項目はないものの、速度の計測、高い耐環境性、複数車線検出の特長をもつことがわかる。他、オーバーハングが不要なことより、設置が容易になることや、道路景観の向上が期待できる。

なお、ミリ波レーダ方式の車両感知器は直接的に占有率を計測できないが、以下に示す関係を用いれば間接的に計算できる。単位時間に計測地点を通過する交通流に着目したときの、交通量 $Q$ 、空間平均速度 $V_s$

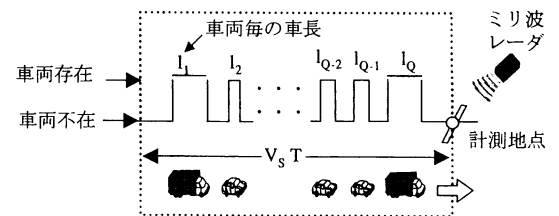
(単位時間における速度の調和平均)、平均車長 $l_{ave}$ 、占有率 $O_t$ の関係を図3、式(3)に示す。あらかじめ平均車長 $l_{ave}$ を処理端末に登録しておけば、式(3)を用いてミリ波レーダ方式の車両感知器は占有率を間接的に計測できる。

$$O_t = (\sum l_i T) / (V_s T) = Q l_{ave} / V_s \quad (3)$$

## 2.3. 既存設備との接続

ミリ波レーダ方式の車両感知器が計測した速度情報を交通管制センタに伝送するためには、現在普及している制御機に速度情報の受信機能・送信機能が無いので、制御機に機能追加が必要となる。

一方、超音波ならびに光学の車両感知器では、制御機はセンサヘッドから検知パルス(図3の車両の存在、不在に相当)を受信し、所定周期でパルスの数と幅の集計から交通量と占有率を計算して交通管制センタへ送信している。ミリ波レーダ方式の車両感知器でも2.1節のStep3を処理端末から制御機に移行して、車両を検知する毎に式(3)左辺の占有率に相当幅の検知パルスを処理端末から送信すれば、制御機は従来通り信号を受信、計算、送信することができる。この信号処理



単位時間 $T$ あたりに計測地点を通過する交通流  
図3 計測地点を通過する交通流の模式図

の構成では、ミリ波レーダ方式の車両感知器は、既存設備と互換性を保つことができる。

### 3. 実験評価

本節では、2.1.節で検討したミリ波レーダ方式の車両感知器の実現に向けて、文献[6]のミリ波レーダを用いて台数と速度の計測精度を実験評価した結果を述べる。以下、実験・評価の詳細、ならびに実験評価のために準備した評価装置について述べる。

#### 3.1. 検知状況映像を利用した評価装置の開発

ミリ波レーダの検知結果を詳細に評価するには、ミリ波レーダが車両を検知したタイミングならびに検知した車両の道路上の位置と、実際に車両が接近するタイミングならびに車両の道路上の位置を比較する必要がある。正解データとして100台以上といった多数の車両の出現タイミングならびに道路上の位置をリアルタイムに記録することは困難なので、以下の評価方法を有効と考えた。

**Step1** ミリ波レーダ傍にカメラを併設してレーダの信号とカメラの映像の同期をとって計算機内に取込む。

**Step2** ミリ波レーダが車両を検知すると、ミリ波レーダの設置位置と設置方向、ミリ波レーダが計測した車両の距離と方向から、車両の道路上の位置を計算する。

**Step3** ターゲットの道路上の位置ならびにカメラの透視投影パラメータを入力として、所定の幾何式により車両のカメラ映像中の位置を計算する。

**Step4** カメラの映像上に車両を示すマークを上記の映像中位置にオーバーレイした映像（以下、検知状況映像）を合成する。

**Step5** 検知状況映像中における上記マーカの出現タイミングならびに車線、実際の車両の出現タイミングと車線を比較する。両者が一致すれば検知成功、実際の車両が出現してもマーカが出現しなければ検知もれ、マーカが出現しても車両が出現しない、あるいは車両以外のものが出現している場合には誤検知と判定する。

以上の評価を実施するために、実験に先立ち図4に示す評価装置を準備した。

図4(a)は実験時にデータを収集する装置構成である。図4(a)において、ミリ波レーダならびにDVカメラ1は、左部に示すように併設された3脚上にそれぞれ固定されている。DVカメラ1の映像出力は、スタンドアロン型の画像処理装置の映像入力に接続されている。画像処理装置の映像出力はDVカメラ2の映像入力に接続されている。一方、ミリ波レーダは、シリアルケーブルでノートPCと接続されている。また、ノートPCと画像処理装置はLANケーブルで接続されており、実験開始前に計測開始前に時刻情報を交換してシステム時刻の同期をとっておく。

計測を開始すると、ノートPCはミリ波レーダの検知データをファイルに記録する。ノートPCは検知データとともに、検知データの各フレーム取得時のシステム時刻を別ファイルに記録しておく。一方、画像処理装置は入力されたDVカメラ1の撮影映像の上部に、図4(a)右部の用に装置のシステム時刻を描画してDVカメラ2に出力する。DVカメラ2は、画像処理装置が出力した映像をテープに記録する。上記の動作によってこの評価装置は、ノートPCのシステム時刻を基準に同期をとったミリ波レーダの検知データとカメラ映像を取得することができる。

図4(b)は計測実験後に持ち帰ったデータからオフラインで検知状況映像を合成する装置構成である。図4(b)のデスクトップPCは、DVカメラ2が記録した映像をキャプチャボードで複数のビットマップファイルに取り込む。同時にデスクトップPCは、ノートPCからミリ波レーダの検知データと各フレームの取得時刻のファイルを取得する。作業者が上記ビットマップファイルの先頭ファイルと、ミリ波レーダの検知データの同期を取った後、デスクトップPCは先述のStep2～Step5の手順でレーダの検知状況映像を合成する。

#### 3.2. 実道実験による計測台数の精度評価

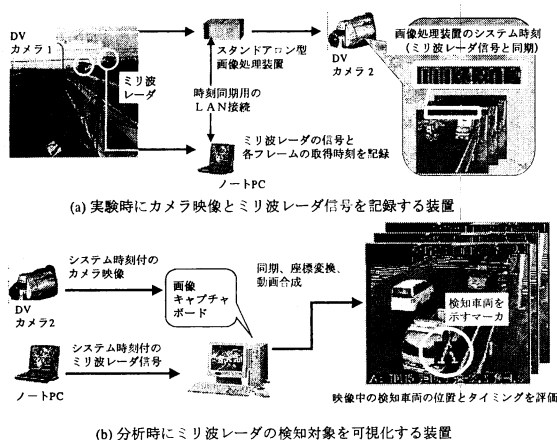


図4 検知状況映像によるミリ波レーダ車両検知の評価装置

3.1節の評価装置を用いて、実道実験を実施した後、台数精度を評価した。実験は使用許可を取得した歩道橋の上に装置一式を運搬し、表2の条件でミリ波レーダを設置して歩道橋の下を通過する車両を検知したデータを収集した。実験時の状況として、図5(a)に実験場所の模式図、図5(b)に検知車両の例を示す。図5(b)の上段の数値はレーダ内信号処理が検知対象に割り振った識別番号、下段の数値は車線を示す。

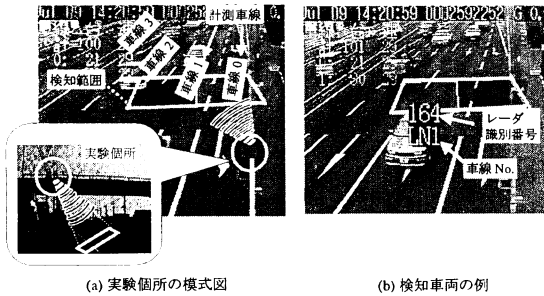


図5 実道実験の写真と模式図ならびに車両検知の例

表2において、車線番号は図5(a)の車線番号に応じる。車線0は図5(a)において最も右側(歩道側)の車線、車線1は車線0の左隣の車線である。図5において検知範囲は一部車線2にまたがるが、十分にカバーできず検知率が低く不安定であったので評価の対象外とした(車線2と識別した検知車両は棄却した)。表2において俯角の値は予備実験から車両が良好に検知できる角度を数通り試した結果から定めた。設置する際、俯角は傾斜計を用いて設定した。表2において、方向は実験時に検知範囲の中心が車線1と車線0の中央になるように目測で調整した後、分析時に検知状況映像において車両とマークが一致するように推定した。

台数計測の精度評価において、本論文の範囲では計測対象に円滑な交通流を想定して速度変動が大きな信号切替り前後を除外した。実験の結果得られた車線0と車線1のトータルの評価結果を表3に示す。表3より実際の通過台数186台に対して誤検知1%、検知もれ3%、合計の台数精度98%の結果を得た。なお、車

表2 台数計測の実験条件

場所	国道6号 市毛歩道橋
日時	2003年7月9日 14:00頃 (約20分間)
設置位置	高さ6.9m、車道・歩道境界
設置角度	俯角15°、方向角7°
計測方向	車両前面
計測車線	車線0,1

線識別は車線2を含めて検知車両237台のうち正解235台と99%精度の結果を得た。

表3 実道における台数計測の実験結果

通過台数	検知台数	誤検知	検知もれ
186	183	2	5
-	0.98	0.01	0.03

### 3.3. 社内設備実験による計測速度の精度評価

図5(a)の評価装置を社内試験場の高架設備に設置し、高架設備の下を通過する実験車両が映像中の長さL(8.2m)の評価区間を通過するのに要した時間Tから計算した平均速度 $V_{IMG} = (L/T)$ を真値として、ミリ波レーダの計測速度vと式(2)から計算した道路上の速度 $V_R$ の精度を評価した。速度評価時の実験条件を表4に、実験結果のグラフを図6に示す。表4中の設置位置、速度評価時の実験条件は、実験設備の制約の中で可能な限り台数計測の条件に近づけた。車両の速度は、試験場の制限速度の範囲内で変化させた。

図6のグラフより、7回の実験ケースすべてで計測速度の誤差が±3%の範囲に納まったことがわかる。誤差平均値は絶対値で1.2%であった。なお、本実験における式(2)中の補正係数 $\cos(\xi)^{-1}$ の範囲は1.10~1.14と速度絶対値を10~14%増加する効果をもっていたので、式(2)の速度補正は有効であったといえる。

今回使用したミリ波レーダは、全速度域で速度精度が安定しているため、式(2)を用いることでレーダの速度計測の全範囲に渡って、車両の道路上の速度計測が上述の誤差±3%内で可能と考えられる。

表4 速度計測の実験条件

設置位置	高さ5.5m
設置角度	俯角20°、方向角14°
計測方向	車両前面
車両速度範囲	10~20 km/h

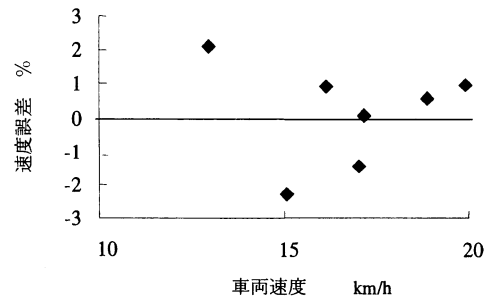


図6 計測速度の評価結果

#### 4. おわりに

車間距離制御システムや車間距離警報システムに開発された車載 76GHz ミリ波レーダを車両感知器に応用することで、交通流が円滑であれば2車線の車線別の台数と速度を95%以上の精度で計測する見込みを得た。今後、以下の課題を解決して実用に近づける計画である。

・速度変動を伴う交通流の計測 本論文では評価対象外とした、信号の切替り直前・直後や渋滞時といった速度変動の大きな交通流の台数計測を実現する。加速・減速や停止・発進を伴う車両を、検知もれや多重検知することなく安定に検知することが課題となる。

・方向角のリアルタイム調整 本論文でオフラインの分析時に合成映像から推定したミリ波レーダ設置の方向角をオンラインで調整する方法を確立することが課題である。具体的には、検知状況映像を現地で確認・調整する装置を開発する計画である。

・車種の識別 本論文では評価対象外としたが、2.1節で述べたように13GHz マイクロ波方式(9)と同様にミリ波レーダ方式車両感知器は検知時間から車種を識別できる見込みである。速度の直接計測に加えてこの車種計測を実現できれば、旅行時間の予測精度が向上することが報告されている[11]。

・試作機の開発 種類の天候条件下や交通条件下で長期に渡って評価するために、図1構成の試作機を開発することを課題とする。図1中の処理端末のハードとソフトが主要項目となるが、本論文の分析時における計算量の見積もりから、組込み型の小型計算機[12]で十分に実現できる見込みである。試作機の開発において、出力信号のフォーマットに2.1節で述べた既存の車両感知器との互換性も考慮したい。

#### 文 献

- [1] 小沢慎治：「道路交通とハイテクノロジー 感知・検知の技術からのアプローチ 最新の技術水準と可能性」, 第61, 62回交通工学講習会テキスト, pp135-138, (1998)
- [2] 警察庁交通局交通規則課：「交通情報の提供に関する指針について」, 交通工学, 37(4), pp98-104, (2002)
- [3] 中村秀樹：「ドイツにおける道路交通情報サービスの展開」, 交通工学, 37(3), pp35-39, (2002)
- [4] 川嶋弘尚：「車両感知器を用いた旅行時間算出について」, 第13回交通工学研究会発表論文集, pp17-20, (1993)

- [5] 安井和彦：「各種車両感知器の感知特性に関する研究」, 第23回交通工学研究発表会論文報告集, (2003)
- [6] 黒田浩司, 高野和明：「ミリ波レーダへのZoom FFT処理方式適用の検討」, 電学論D, 123(5), pp.634-639, (2003)
- [7] 本間信一：「自動車搭載用ミリ波レーダ技術」, 三菱電機技報, vol39, pp583, (2000)
- [8] 大橋洋二：「76GHzシングルチップMMIC高周波ユニットの開発」, 富士通テン技報, Vol.20, No.1, pp23-31, (2002)
- [9] 池田利秋：「マイクロ波式車両感知器」, 交通工学, 25(5), pp73-74, (1990)
- [10] 佐々木綱, 飯田恭敬：「交通工学通論」, オーム社, pp.94-95, (1989)
- [11] 森田武：「速度形車両感知器の活用による旅行時間予測」, 第11回交通工学研究発表会論文集, (1991)
- [12] 松本典剛他：「遠隔監視向け端末のためのブロック型アーキテクチャの提案と評価」, 情報処理学会論文誌, Vol45, No. SIG3(ACS 5), pp.91-99, (2004)