

# 画像照合を用いた農作業機向け車速計測センサの開発

大村 功, 三田村智行, 吉川 毅, 多田 達実  
清水 将志\*, 宮下 行雄\*, 高氏 秀則\*\*, 金子 俊一\*\*

## Development of Velocity Sensor for Agrimotors using Image Matching

Isao OHMURA, Tomoyuki MITAMURA, Takeshi KIKKAWA, Tatsumi TADA  
Masashi SHIMIZU\*, Yukio MIYASHITA\*, Hidenori TAKAUJI\*\*, Shun'ichi KANEKO\*\*

### 抄 録

画像照合を用いて対地画像から移動速度を高精度に計測する農作業機向け車速計測センサの開発を行った。実環境でロバスト性の高い画像照合法である方向符号照合法（OCM）を用い，FPGA（Field Programmable Gate Array）を用いた処理のハードウェア化により高速処理と小型化，消費電力の低減を図った。従来に比較し，農作業機における低速域での車速計測の精度と応答性を大幅に改善することができた。開発したセンサを農作業機へ搭載し，実際の圃場において，その有効性を検証した。

キーワード：方向符号照合，FPGA，ロバスト，画像照合，速度計測

### Abstract

We developed a high-precision velocity sensor for agrimotors by sensing ground motion with image registration. The sensor that has high-performance at working speed of agrimotors is realized by using of the robust image registration algorithm called Orientation Code Matching (OCM) and its hardware implementation with FPGA (Field Programmable Gate Array) to achieve requirements of real-time measurement, small sized sensor and fewer power consumption. The effectiveness of the sensor has been verified by agrimotors installed with the sensor in real agricultural fields.

KEY-WORDS : Orientation code matching, FPGA, robustness, image registration, velocity measurement

### 1. はじめに

食品の安全・安心を求める社会情勢から，農薬や化学肥料を減量するクリーン農業が推進されており，北海道では2000年より表示制度を設けた積極的な取り組みを図っている<sup>1)</sup>。さらに，農薬の適正化を進める目的で2006年に全国的に導入されたポジティブリスト制度（「食品衛生法の一部を改正する法律」平成15年法律第55号により規定）では，残留農薬の種類や量が細かく制限され，従来にも増して注意深い農薬散

布作業が求められるようになった。

このような散布作業では，従来から農作業車の速度を計測してその移動量に対応した散布量の制御を行っているが，上述した制度への対応や品質向上のためには，さらに高い精度での車速計測を行い，散布量の低減と均一性を向上させることが求められている。現在おもに利用されている車速計測手法は車輪の回転数から算出する方法であるが，圃場での比較的大きなスリップ率や積載物の重量によるタイヤ径の変化が問題となり精度を上げることが困難である<sup>2)</sup>。さらに，車輪

\* 東洋農機㈱

\* Toyo Agricultural Machinery M.F.G Co., Ltd.

\*\* 北海道大学大学院情報科学研究科

\*\* Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

事業名：民間等共同研究

課題名：車速計測のための組込向け小型画像センサの開発

の回転測定の分解能は近接センサを使用しているなどの検出原理の制約から 1/8 ~ 1/12 回転となっており、低速域での応答速度の低下、すなわち散布量制御における時間分解能が低下する。たとえば、速度 2 km/h における実質的な応答速度は約 1 秒となる。薬剤の散布作業は 2 km/h から 8 km/h 程度までの低速域での作業であることから、この速度領域での精度の改善が重要と言える。

現在検討されている他の計測手法としては、精密農業の分野で利用の研究が進んでいる GPS (Global Positioning System) が挙げられる<sup>3)</sup>。しかし、上述した低速域での移動速度を精度良く計測するためには、RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) などの高い分解能を有したシステムが必要となるため、実際の導入に関してはコスト面が大きな課題となっている。また、欧米ではマイクロ波ドップラ速度センサが利用されている。非接触で比較的精度は高いが、圃場では地面の状態によって誤差が発生しやすく、一般に低速域では精度が低下するなどの課題がある。

一方、東洋農機㈱と北海道大学は、画像を利用した農作業機の速度計測方法について検討を進めてきた。対地画像の移動量を安定して計測する手法の研究により、車速計測の精度向上が確認されている<sup>2)</sup>。

画像を用いた計測は、工業分野では位置合わせや検査方法としてすでに不可欠の技術となっており、農業分野においても選果などへの適用が試みられている<sup>4)</sup>。しかし、農業など屋外での利用については、遮蔽や明度の変動などを考慮した高いロバスト性が必要となるため<sup>5)</sup>、実用化事例は少ない。

また、移動量の計測、移動体の追跡等において使用される画像照合の処理は、多大な演算量を伴うため<sup>6)</sup>、処理能力の高いコンピュータを必要とする。農作業機への搭載を考えた場合、使用環境、消費電力等の点から検討が必要である。

これらの点から、本研究開発では、東洋農機㈱と北海道大学により進めてきた計測手法をベースに、高精度で実時間処理が可能な農作業機向け車速計測センサの開発を行った。画像の移動量の検出には、実環境でロバスト性の高い画像照合法である方向符号照合法 (OCM) を用い、FPGA を用いた処理のハードウェア化により高速処理と小型化、消費電力の低減を図った。OCM は北海道大学で開発され、実環境における画像照合技術として高いロバスト性を有することが示されている<sup>7,8)</sup>。また、試作した車速計測センサについて、圃場での実地試験により、有効性の検証を行った。

## 2. 方向符号照合に基づいた速度計測

### 2.1 方向符号照合法

OCM においては、2 つの画像の類似度を評価するために画像の明度そのものではなく、画素近傍における明度変化が最大となる勾配方向を量子化した値を符号として用いる。こ

の方向符号 (OC: Orientation Code) の分布は画像ごとに固有性が高く、照明不良などに起因する明度変動に影響されにくく、無相関画像間における類似度は定値性を有するという特性がある<sup>7)</sup>。

画素  $(x, y)$  での明度を  $I(x, y)$  とし、画像の  $x$  方向および  $y$  方向の勾配をそれぞれ、

$$\begin{aligned} \nabla I_x &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \\ \nabla I_y &= \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \quad (1)$$

と定義すると、対象とするすべての画素について、勾配角度  $\theta(x, y)$  は、

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{\nabla I_y}{\nabla I_x} \quad (2)$$

として算出することができる。勾配演算としては Sobel 演算などを用いる。適当な量子化幅  $\Delta\theta = 2\pi/N$  により量子化された勾配角度符号として、方向符号  $c_{xy}$  は次式で定義される。

$$c_{xy} = \begin{cases} \left[ \frac{\theta(x, y)}{\Delta\theta} \right] & \text{if } |\nabla I_x| + |\nabla I_y| \geq \Gamma \\ N & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\Gamma$  は安定な符号生成を行うためのしきい値として使用する値で、十分な勾配値が得られない場合、すなわち低コントラストな画素であった場合に無効符号  $N$  を割り当てる。有効な方向符号は  $0 \sim N-1$  として得られる。

さらに、参照画像を  $I_{ref}$ 、比較する対象画像を  $I_{search}$  (ともに画素サイズ  $S_x \times S_y$ ) とし、それぞれの方向符号を  $c_{ref}$ 、 $c_{search}$  とする時、それらの残差絶対値  $d$  の平均残差絶対値  $D$  を照合評価値として次式により定義する。

$$D = \frac{1}{S_x \times S_y} \sum_{S_x \times S_y} d(c_{ref}, c_{search}) \quad (4)$$

$$d(a, b) = \begin{cases} \min\{|a-b|, N-|a-b|\} & \text{if } a \neq N, b \neq N \\ N/4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、各画素間での残差絶対値  $d$  は、方向符号が巡回的であることを考慮した算出方法を採用している。

### 2.2 速度計測

計測は、撮像系を垂直下向きに取り付けて得られる対地画像を対象として、画像照合により移動量を検出することで、実速度を推定する。速度計測の概念図を図 1 に示す。

時間間隔  $\Delta t$  で得られた 2 枚の画像を用い、1 枚目の画像を参照画像を切り出すために、2 枚目の画像は対象画像とし

て探索領域を設定するために使用する。切り出した参照画像を用いて探索領域中の最も類似する領域をOCMにより探索することで、参照画像を取得した位置と探索した類似領域の位置の間の相対変位（画像上における移動量）が求められる。この相対変位を  $d_c$  とし、レンズの焦点距離を  $f$ 、撮像距離を  $H$  とすると、実速度推定値  $\hat{V}$  は次式で求められる。

$$\hat{V} = \frac{H}{f} \frac{dc}{\Delta t} \tag{6}$$

式(6)において、撮像距離  $H$  は設置の状態や圃場における地面の凹凸などの実際の計測環境に影響される。本研究においては変動を最小限に抑えるためにトラクタにより踏み固められたタイヤ跡を観測する方法を採った。これにより撮像距離  $H$  を一定として速度計測条件を考えることができる。

センサの設置条件として、撮像距離  $H$  を1000mm、レンズ焦点距離  $f$  を8mm、撮像デバイスの画素サイズ  $5.6\mu\text{m}$  とすると、他の誤差要因がないと仮定して、画素当たり約0.7mmの精度で移動量計測ができる。フレームレート（1/30 sec）の計測では、車速にすると0.076km/hの精度が得られることになる。

一般には、作業機のピッチング、ローリングによっても撮像距離  $H$  は影響を受けるが、農作業機を利用する規模の圃

場においては十分な整地が行われており、実地試験によりこれらの影響が微少であることを確認している。

また、圃場の地面画像に対するOCMの適用については、ソフトウェア処理による試作システムを用いて、天候や作物など異なった条件の圃場における実験を行い、精度およびロボスタ性の検証を行った。実際の圃場では農作業機の走行により明度変化や遮蔽が頻繁に起こりうる環境であり、上記検証ではこのような環境においても安定して精度の高い速度の推定が提案手法で可能であることを確認した<sup>2)</sup>。

### 3. 車速計測センサの開発

#### 3.1 ハードウェア構成

本研究では、農作業機において従来利用されている速度センサ（車輪の回転検出に基づいたもの）の精度、応答性について改善を図り、置き換えを可能とした小型で取り扱いの容易なセンサの実現を目指した。目標とした仕様を表1に示す。計測精度および計測周期は、今後開発を予定している薬剤散布機の噴霧量制御入力として、必要とされる性能を目標とした。

農作業機向けセンサとして特に求められるのは耐環境性である。定められている規格の中で最も高い防塵性能と同時に、雨天等を考慮した高い防水性能が求められる。これはほぼ密閉された環境で動作できる処理装置が必要であることを意味しており、放熱対策の点から消費電力のより少ない機器が望ましい。また、一般にトラクタでは作業機への動力供給を機械的に行っており、接続する機器の消費電力については自動車と同様に低消費電力であることが求められる。

図2に機能検証用として開発したセンサの外観を、また図3にデバイス構成とFPGA内部の処理回路の構成を表したブロック図を示す。本研究では、速度センサを実現するハードウェアとして、デジタル出力を備えた市販CCDカメラモジュールと、独自開発したFPGAボードを使用した。FPGAボードはFPGAデバイスの他にメモリデバイスと電源回路を搭載したシンプルな構成とし、必要な処理や制御機能はすべてハードウェア化してFPGA内部に搭載する方法を採った。これによりFPGAに搭載する機能の回路設計量は増すことになるが、部品点数の削減と必要な機能に限定した処理回路の搭載により、センサ全体として、小型化、低消費電力化を図ることができる。また、CCDカメラモジュールは、ADコンバータ等の周辺回路をモジュール化してデジタル出力を備えたものを採用し、FPGAと直結した回路構成とした。利用したカメラモジュールはカラー仕様であるが、Y信号（輝度成分）のみ抽出して処理している。表2に使用したCCDカメラモジュールの仕様を、表3にFPGAボードの仕様をそれぞれ示す。

FPGA内部の処理は、おもに6つの処理回路から構成される。前半の処理（画像入力回路、方向符号化回路、メモリア

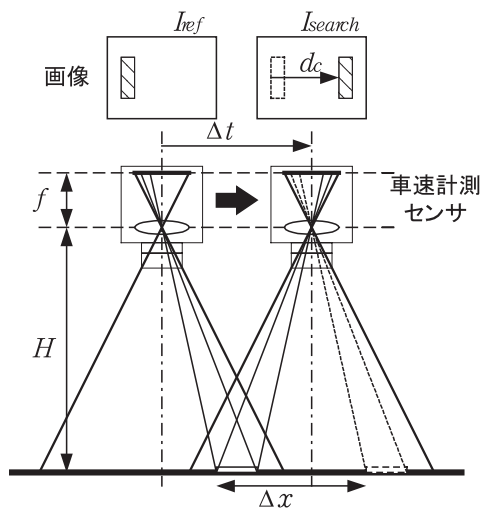


図1 速度計測の概念図

表1 目標とした仕様

計測速度範囲	0~15 km/h
計測精度	0.2 km/h 以下
計測周期	10 Hz 以上
消費電力	10 W 以下
耐環境性	IEC IP65に対応すること

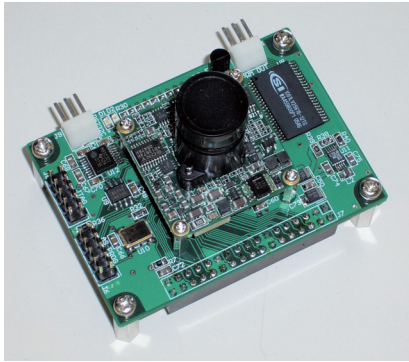


図2 機能検証用センサ

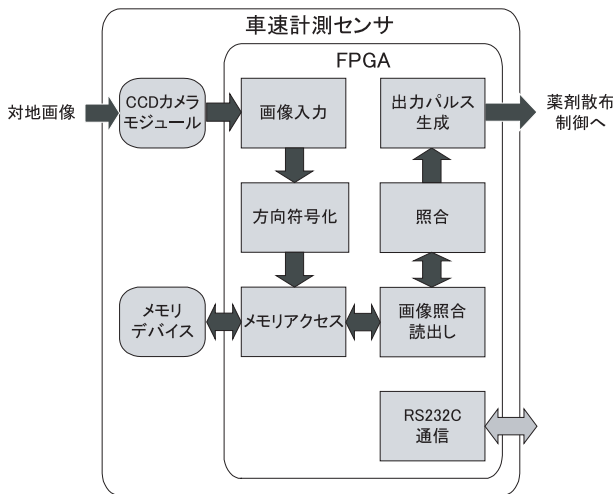


図3 デバイス構成およびFPGA内部の処理機能

アクセス回路)では、画素単位で入力されるデータを対象に、方向符号を算出する式(1)から(3)の処理を行い、結果を外部のメモリに書き込んでいる。後半の処理(照合画像読出し回路、照合回路、出力パルス生成回路)では、外部メモリ上の画像データを対象とした照合処理を行って結果を出力する処理となっており、結果は速度に応じた時間間隔のパルスとして薬剤散布のコントローラへ出力する。これら2つの処理系から、方向符号化された画素データの書き込みと照合のための読み出しが非同期に発生するため、メモリアクセス回路にはアクセス時間の管理とともに調停機能を搭載している。また、動

表2 使用したCCDカメラモジュールの仕様

メーカー・型番	(株)モスウェル MS-72
撮像素子	1/4インチ, 41万画素
画像サイズ	VGA (有効画素768×494)
画像出力形式	アナログ:NTSC, デジタル:YUV
画素サイズ	4.75 μm (H) × 5.55 μm (V)
基板サイズ	32×32 mm
レンズ仕様	M12マウント f=8mm

表3 検証用FPGAボードの仕様

FPGA	アルテラ社, EP2C5T144(100kgate相当)
メモリ	ISSI社, IC61LV25616 (256k×16bit)
入出力	RS232C(1ch), パルス出力(1ch) 拡張端子(22pin)
基板サイズ	70×50 mm

作確認や評価のために、RS232C向けのシリアル通信回路を付加して、計測結果や内部状態について読み出すことができるようにした。

なお、FPGA化においては、10万ゲート相当以下の低コストFPGAへの搭載を目標とした。

### 3.2 方向符号化回路

方向符号化モジュールでは、順に入力される画素データを対象に、式(1)から(3)に示される演算を各画素毎に実行し、方向符号を出力する。このような処理のハードウェア化においては、汎用の三角関数や浮動小数点演算の使用は回路規模の増大を招くため、本研究では、方向符号の量子化数を16、すなわち量子化幅を $\pi/8$ に固定し、整数演算のみにより方向符号を生成する回路とした。

処理のブロック図を図4に示す。Sobel演算では周囲8画素のデータを同時に参照するため、2ライン分のバッファを使用し、上下3画素分を同時に入力して連続的に処理する回路とした。各画素の方向符号は、 $x, y$ 方向それぞれのSobel演算の結果から以下の5つの判別信号を取り出し、最後段のルックアップテーブルにより5 bitの方向符号に変換している。

$C_x$ :  $x$ 方向の明度こう配の符号bit

$C_y$ :  $y$ 方向の明度こう配の符号bit

$C_8$ :  $x, y$ 方向の明度こう配の絶対値の比較結果

$C_{16}$ :  $\alpha \tan(\pi/8)$ と $\beta$ の比較結果

$C_f$ : 各明度こう配の絶対値の和と $\Gamma$ の比較結果

ここで、 $\alpha = \max(|\nabla I_x|, |\nabla I_y|)$ ,  $\beta = \min(|\nabla I_x|, |\nabla I_y|)$ とした。これらの信号のうち、 $C_f$ が式(5)の下段における無効符号の生成条件に、他の4つが上段における $\pi/8$ で量子化された明度の勾配方向を決定する信号となっている。

これらの処理は、各演算に最適なbit幅の信号を割り当て、回路の最適化を図るとともに、パイプライン回路を構成して、画素当たり1クロックで処理可能とした。

なお、CCDモジュールより出力される画素データは、インターレースとなっており、1画面分が2回に分けて出力される仕様であるため、本センサでは、偶数フィールドとして出力される画像データのみを対象として処理を行い、奇数フィールドのデータは廃棄した。また、メモリアクセスにおけるア

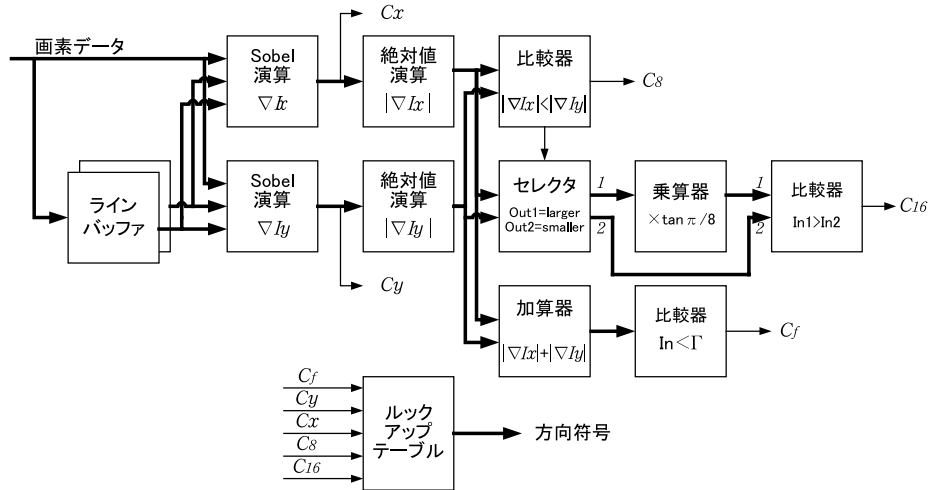


図4 方向符号化処理

ドレス計算の簡略化から、メモリに保持する画像は中心部の512×128画素とした。

### 3.3 照合処理回路

画像の照合処理は、図5に示すように、参照画像と現在のフレーム中の探索領域から順に読み出された対象画像との間で照合評価値を求め、探索領域中の対象画像で最も照合評価値の小さい画像位置を求める処理である。画像照合における演算量は、参照画像の画素数に依存した式(4)で示される平均残差絶対値  $D$  の演算と、この演算を探索領域全体に渡って適用する回数によって決定される。画素間の残差絶対値演算を基準にすると、1回の画像照合における演算回数  $N_{op}$  は式(7)で表される。

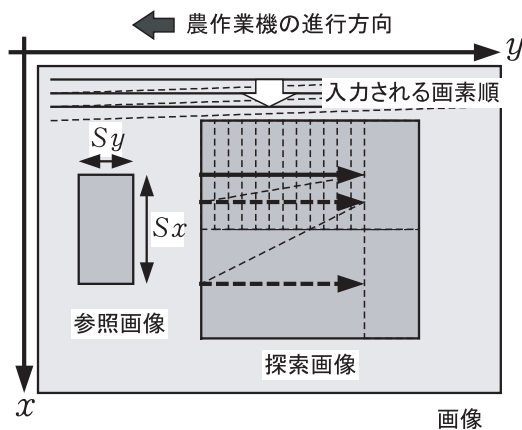


図5 画像照合処理

$$N_{op} = S_x \times S_y \times (T_x - S_x + 1) \times (T_y - S_y + 1) \quad (7)$$

本研究ではソフトウェア処理による検証から、十分な照合精度が得られる画像サイズとして、参照画像のサイズを50×25画素に、また探索範囲は100×100画素としている<sup>3)</sup>。この

条件で画像照合における演算回数を算出すると1回の計測で約485万回の演算処理が必要となる。フレームレート(30frame/s)での処理を考えた場合、一般のPCシステムではOSのオーバーヘッドや複数段のキャッシュシステムによるメモリアクセス時間のばらつき等が発生し、実時間処理には処理性能の高いプロセッサが必要となる。

一方、処理の内容は画素間の残差絶対値演算とその積算処理の繰り返しである。このことから、ハードウェアにおいては、最適な演算回路を設計し、必要な並列度を満たすように演算回路を多重化することで、比較的容易に処理の高速化を図ることができる。

必要な並列度  $p$  は、動作周波数  $f_{clk}$  [Hz]、画素間の残差演算にかかるクロック数  $m$ 、最大許容処理時間  $t_{max}$  [sec] および前述した演算回数  $N_{op}$  の関係から、式(8)で求めることができる。

$$p \geq \frac{N_{op} \times m}{f_{clk}} \frac{1}{t_{max}} \quad (8)$$

基本的に消費電力の低減という点からは、動作周波数、並列度ともにできるだけ低く設定すべきである。動作周波数については、画素データの入力周波数(29MHz)、メモリへのアクセス頻度(1画素当たり書込みと読出しの両方を伴う)とアクセス時間(1クロックと仮定)を考慮して、周波数の下限をカメラモジュールの周波数の2倍の58MHzと考えることができる。さらに画素間の残差演算をメモリの読み出し周期を含め2クロック、最大許容処理時間を33msecと仮定すると、式(8)から並列度は6以上となる。

一方、このような並列処理を実現するためには、参照画像もしくは探索画像どちらかの画素データを同時に並列度の数だけ読み出す必要がある。FPGAに内蔵されているメモリは複数組み合わせることで、多様なアクセス幅に設定できることから、本研究ではデータ幅に自由度の大きいFPGA内部の

メモリに参照画像を保持し、並列度分の参照画像データを読み出す方法を採用した。

また、並列度は参照画像の1辺の画素数と一致させた方が制御回路の設計が容易となる。実際の処理時間には照合処理以外に参照画像の読み出し処理が含まれており、今後の画像サイズの変更に対応するためには処理時間に余裕を持たせる必要がある。さらに、画素間の残差絶対値演算は4bitの小さな演算回路で実現できることから、この並列化による回路規模の増大は大きな影響を与えないと考え、本研究においては、並列度を参照画像の短辺である $S_y$ に相当する25とした。

式(5)の画素間の残差絶対値演算の結果 $d$ は、 $S_y$ 個の中間結果保持レジスタへ加算して保持し、 $S_x$ 回の読み出し毎(全参照画像の読み出し毎)に残差絶対値の総和を出力する。この方法では図5に示すように、まず探索領域を $x$ 方向に $S_x$ 画素の幅に制限した帯状の領域で照合処理を行い、この帯状の領域を $x$ 方向へ1画素分ずつ順次移動させることで、探索範囲全域に適用する。

なお、照合評価値として式(4)では、平均残差絶対値 $D$ を定義しているが、参照画像のサイズが同一である場合には平均値を求める必要がなく、画素間の残差絶対値の総和により比較することができる。したがって、もっとも類似度の高い照合位置は、順次出力される残差絶対値の総和について、最も小さな値とその座標を保持しておき、探索領域全域の処理が終了した時点で、この座標を出力パルス生成回路へ出力する。

### 3.4 FPGAへの搭載結果

これらの処理をAltera社のFPGA(Cyclone IIシリーズ)に搭載した結果、周辺機能も含めた全処理回路の規模はおおよそ2000LEs(Logic Elements)となり、低価格量産向けFPGAシリーズの最小規模クラスのデバイス(EP2C5)に搭載できる回路規模となった。FPGAにおける使用リソースを表4に示す。表中で( )内はデバイスEP2C5T144C8における使用可能リソースを示している<sup>9)</sup>。また、RAMブロックは1個あたり4Kbitの容量で、使用したLogic Elements数はGate数換算で40kGate相当(1LE=20Gate換算)となる。消費電力は使用したCCDカメラモジュールを含めて、実測で約2.5W(12V給電時、約0.21A)となった。処理回路の論理合成およびFPGAの配置配線にはAltera社Quartus II

表4 FPGAの仕様リソース

使用FPGA	アルテラ社 EP2C5T144
LE数	1979 (4608)
レジスタ数	1261 (4608)
メモリブロック	9 (26)
PLL	1 (2)

Web Edition Ver 7.2 sp3を使用した。

使用したFPGAの全LE数に対して、使用したLE数は43%程度と十分な余裕があることから、高解像度化や探索領域の拡張など、今後の機能拡張に十分対応可能であることがわかる。

## 4. 実地試験による計測精度の評価

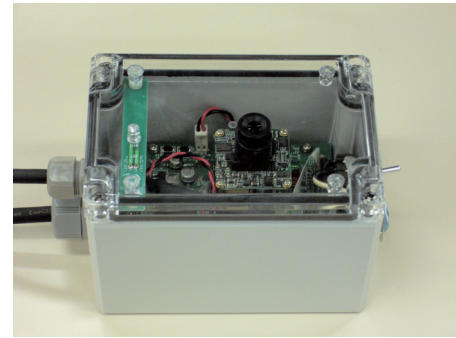


図6 試作した車速計測センサの外観

### 4.1 実験システム

試作した車速計測センサの外観を図6に示す。FPGA処理ボードはトラクタからの給電における電源変動への対応などの改善を加えたものを使用しており、防塵防水対応のケースに密閉した構造となっている。また、振動や温度変化等の基本的な耐久性についても試験を行い、確認を行った。

実地試験では、試作センサの計測結果をRS232C経由でPCへ取り込み、1/30秒毎の結果をハードディスクへ記録した。

表5 使用したDGPSの仕様

計測方式	Differential GPS
GPS受信	12チャンネル
ビーコン受信	2チャンネル
位置計測誤差	1m未満
データ更新	10Hz(最大)
出力遅延	100msec以内



図7 実験に使用した圃場と農作業機



図8 車速計測センサの入力画像

また、評価の基準値を得るために、同時に人手により区間の通過時間を計測するとともに、DGPS（ニコン・トリプル社Ag124）により計測した速度（DGPSの速度出力を採用）を同時に記録した。実験に使用した圃場の様子を図7に、比較に使用したDGPSの仕様を表5に示す。また、試作センサが捉えている対地画像の例を図8に示す。

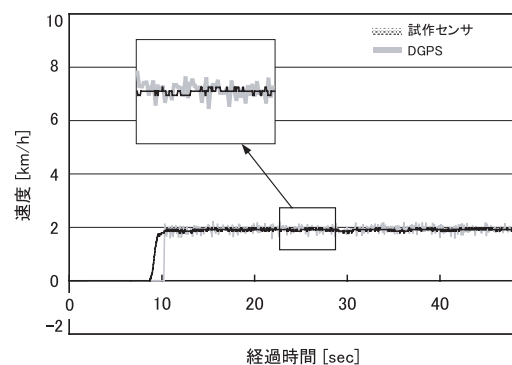
トラクタの走行は、熟練した運転者により、固定可能なアクセルレバーをあらかじめ決めたエンジン回転数に調整して圃場の整地済みの直線部分を走行することで、一定速度での走行とした。5 m区間毎で人手により通過時間を計測した結果により、区間毎の実速度のばらつきが、6 km/h以上で最大10%と大きくなるものの、2 km/hでの走行では6% (0.12km/h) 以下となり、高い精度での定速走行が可能であることを確認している<sup>10)</sup>。

## 4.2 実測値と実速度の比較

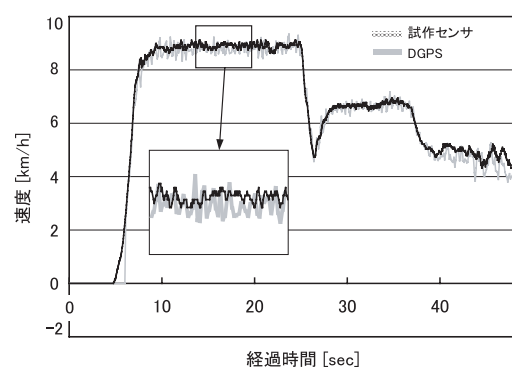
図9にDGPSと試作したセンサによる計測結果の一例を示す。薄い実線によりプロットしたものがDGPSの結果、濃い実線によるプロットは試作センサの結果である。横軸は計測開始からの経過時間を表しており、(a)は時速2 km/h一定で走行した結果、(b)は9 km/hでの走行の後、速度を変化させた場合を示した。計測周期は試作センサが1/30 sec、DGPSは1/10 secである。

グラフではDGPSの方がやや大きな変動を示していることが分かる。これは測位データ含まれる仕様の範囲内の誤差が速度値を求める差分処理により強調されて現れたものと考えられる。速度1 km/hの変化は、1/10 sec毎の計測において約3 cmの移動に相当し、これは使用したDGPSの仕様上の測位精度1 mと比較して十分に小さな値である。DGPSにより計測した速度は、前後の結果による平均値がほぼ真値を表していると考えられる。

実地試験の結果から、試作センサの結果はDGPSによる結果とほぼ一致しており、2 km/hでの定速走行区間における両者の平均値の差は0.1km/h以下となり、さらにセンサによる計測結果の変化の幅は0.2km/h以下と人手により計測した結果のばらつきとほぼ一致した。この値は画素数で、2から3画素となっており、非常に安定した計測結果と言える。



(a) 2 km/hでの定速走行の結果



(b) 9 km/hおよび速度変化のある場合の計測結果

図9 DGPSと試作センサによる比較評価

これらの結果から、精度、計測時間、さらに消費電力の点で、試作したセンサがほぼ目標とした仕様を満たしていると言える。

## 5. おわりに

本研究では車速計測に必要な機能をハードウェア化することで、農業機械において利用できるコンパクトな車速計測センサを開発した。対地画像の相対移動量の計測には、方向符号照合を用いた実環境にロバストな手法を使用し、ハードウェア化により実時間での処理を可能とした。また実際の圃場においてその性能を検証し、農業機械向け車速計測センサとしての有効性を確認した。

FPGAは、近年、集積度の向上と同時にデバイス単価の低下により利用が拡大しており、コストを意識した製品においても十分に利用可能なデバイスとなりつつある。また、処理の高速化や装置の小型化とともに、開発前後の柔軟な機能変更に対応できることから、本センサのように想定される出荷台数が数百から数千台の製品開発において、非常に有効なデバイスであると言える。

開発したセンサは低速での速度計測手法として高い精度を有しており、非接触での精密計測システムや自律走行ロボットにおける移動量センサなど幅広い応用が期待できる。また、撮

像素子として、CMOSタイプのイメージセンサを利用した場合でも同様に安定した計測が出来ることを確認しており<sup>10)</sup>、解像度やフレームレートの変更など、アプリケーションに対応したセンサ開発が可能である。

画像を利用したセンサは、フォーカスや露光量などの光学系の設定を伴うため設置時の調整や保守が必要となる。また農作業機においては屋外での使用となるため、耐久性や対環境性の点で十分に検証を行う必要がある。今後はこれらの点から、長期の使用試験など実用化を目指した研究を進める予定である。

## 引用文献

- 1) 北海道クリーン農業推進協議会：「北のクリーン農産物表示制度」の概要について。
- 2) 中原和哉・高氏秀則・金子俊一・田中孝之・清水将志・宮下行雄・大村功：電子情報通信学会論文誌D Vol.J91-D, No.3, pp.793-802, (2008)
- 3) 中西洋介・他9名：農作業車両自律走行作業支援システムの開発, 北海道立工業試験場報告, No.300, pp.43-51, (2001)
- 4) 石川 豊：ポストハーベストにおける画像計測の応用, 計測と制御, Vol.37, No.2, pp.91-94, (1998)
- 5) 金子俊一：画像処理におけるロバストなセンシング技術, 精密工学会誌, Vol.69, No.10, pp.1383-1386, (2003)
- 6) 奥田晴彦・橋本 学・鷲見和彦・佐々木和則：部分テンプレート組み合わせ最適化に基づくロバスト画像照合, 電学論(C), 124巻3号, pp.629-636, (2004)
- 7) F.Ullah・S.Kaneko・S.Igarashi：Orientarion code matching for robust object search, IEICE Trans on Inf. & Syst., Vol.E84-D, No.8, pp.999-1006, (2001)
- 8) F.Ullah・Kaneko：Using orientation code for rotation-invariant template matching, Pattern Recognition, Vol.37, No.2, pp.201-209, (2004)
- 9) Altera corp.：Cyclone II Device Hand Book, (2007)
- 10) 大村 功・三田村智行・中原和哉・高氏秀則・金子俊一・清水将志・宮下行雄：電子情報通信学会論文誌 Vol.J91-D, No.5, pp.1325-1335, (2008)