

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第17号 平成27年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第4報）	1
— カメラセンサ —	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第5報）	8
— 超音波フェーズドアレイソナー —	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第6報）	12
— 音センサ —	
生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発（第5報）	16
— 量産試験における効果検証 —	
生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発（第6報）	20
— 流動解析と構造解析の連携シミュレーション技術に関する研究 —	
画像認識技術を用いた検査工程の作業時間推定	24
超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発（第2報）	30
運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術（第3報）	34
— データ傾向の臨床的所見とデータの蓄積・活用 —	
情報通信機器による知的障がい者のための協働支援システムの開発研究（第2報）	40
豚肉色客観評価装置の開発	44
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発（第7報）	48
計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測（第2報）	52
降水量からの小水力発電のポテンシャルの推定	54
— 流域面積が小さい水源への適用 —	
設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発	58
交流電圧波形の非接触計測による電力算出の検討	60

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第4報)

—カメラセンサー—

平湯 秀和 田畑 克彦 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (4th Report) - Camera Sensors for Obstacle Detection -

Hidekazu HIRAYU Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者の生活を支えるツールとして電動カートの普及が進んでいる。しかし、加齢に伴う認識力の低下による運転者の判断ミスや操作ミスが原因で発生する、歩行者や車との接触事故および段差等での転倒事故等が問題となっている。本研究では、このような事故の危険を未然に検知するための安全装置として、単眼カメラを用いた歩行者や電柱、側溝などの衝突・転倒要素となる障害物を検出するセンサを開発する。本年度は、移動体に搭載した単眼カメラで取得したオプティカルフローを用いて、前フレームからのカメラの並進・回転量を推定し、床面と障害物領域を安定して抽出する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示す。

キーワード 電動車いす, 安全装置, 障害物検出, 画像処理, オプティカルフロー

1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動カートの普及が進んでいるが、電動カートの普及に伴い、歩行者や車との接触事故が毎年多く発生している。平成27年の電動車いすに係る交通事故の発生件数は179件であり、このうち7人の利用者が亡くなっている^[1]。この件数は、道路交通法上、歩行者と電動車いすの接触事故や電動車いすの単独事故は交通事故として計上されないことから、電動車いすに関連した実死傷者数はさらに多いといえる。事故の要因としては、運転者のマナーや法令違反等に起因するもの(車道走行等)もあるが、ボンヤリして歩行者と衝突するなど、電動カートを運転する利用者の高齢化による認識力の低下に伴う操作ミスによる事故も多数発生している。

これらの問題を解決するため、本研究では、共同研究先である県内企業が開発する高齢者用電動ビークル^[2]に、歩行者や電柱、側溝などの衝突・転倒要素となる障害物を検出する安全装置を新たに開発・搭載することで、電動ビークルの操作ミスによる事故防止の実現を図る。なお、本稿では開発する安全装置付きの電動カートと従来の電動カートとを区別するため、以下では電動ビークルと記載する。

本稿では安全装置のためのセンサとして、カメラを用いた障害物検出センサの研究開発について報告する。近年、自動車の安全運転の分野では『ぶつからない車』として、複数カメラによるステレオ視を行い前方の車との

車間を自動で制御する技術や、ミリ波などを使用したレーダー装置が開発されている^[3,4]。しかし、これらのセンサ技術は前方の自動車や中央線などの検出を目的としているため、人、段差等を検出対象とする本研究では、これらの技術を使用することはできない。

開発中の電動ビークルの用途は、ショッピングモールや公共施設などの屋内から駅前や田園地帯などの屋外走行まで幅広く想定されている。これらの環境において、歩行者や電柱、側溝や車止めなどの電動車いすの衝突・転倒要素となる障害物を検出する安価で小型なセンサの開発が求められる。そこで、本研究では電動ビークルの周辺環境情報を高速に取得可能で、コンパクトかつ安価な単眼カメラを用いたセンサを開発する。

昨年度は、前フレームと現フレームの画像情報を基にオプティカルフローを検出し、カメラの並進運動のみを考慮し、平面(床面)であれば得られる三次元的な動き情報を基に平面と異なる高さを持つ領域(障害物)を検出する手法に関して検討を行った^[2]。なお、オプティカルフローとは時間的に連続する画像間で物体の動きをベクトルで表現したものである^[5]。カメラが並進運動のみの場合、この手法で平面と障害物を区別することが可能であったがカメラの回転運動も加わると、平面と障害物の識別精度は低下する問題点があった。実際の電動ビークルは並進だけでなく回転運動も発生するため、本年度はカメラの並進運動と回転運動を考慮し、床面と障害物を識別する手法の検討を行った。

具体的には、前フレームで得られた床面領域情報とそ

の領域のオプティカルフロー情報を基に、カメラの並進・回転パラメータの推定を行う。次に推定された並進・回転パラメータを基に現フレームの特徴点の位置情報からオプティカルフローを推定する。ここで、もし床面領域であれば「カメラの並進・回転パラメータを基に推定したオプティカルフロー」と、「画像から得られたオプティカルフロー」の結果は一致し、障害物領域であれば結果にずれが生じる。本稿では、実際に屋外環境下で実験を行い、本手法の有効性の検討を行ったので報告する。

2. カメラセンサによる障害物検出手法

2.1 障害物検出のためのアルゴリズム

単眼カメラは電動ビークルに固定されている。従って、平坦な道であっても坂道であってもカメラから得られる画像は見かけ上、同じ平面として観測される。そこで、本研究ではオプティカルフローを用いて、平面上の領域（電動ビークルが走行する床面領域）とそれ以外の領域（人や壁、側溝、段差などの障害物）に分割する手法を検討した。

具体的には、前フレームで得られた床面領域情報とその領域に含まれるオプティカルフローの情報を基に、カメラの並進・回転パラメータを推定し、次に、現フレームの画像全体において、求めた並進・回転パラメータを用いて個々の特徴点に対して座標変換し、現フレームにおけるオプティカルフローを推定する。ここで、もし、床面領域であれば「カメラの並進・回転パラメータを基に推定したオプティカルフロー」と、「画像から得られたオプティカルフロー」の結果は一致し、障害物領域であれば結果にずれが生じる。

本研究では前フレームおよび現フレームの画像を用いて、下記のとおり、Step0を1回実施後、Step1からStep4の処理を繰り返し実施することで、障害物検出を行った。

Step0: 最初のフレーム（電動ビークルが動き出す直前）において、カメラの手前には障害物がないものと仮定し、画像における手前エリア（図1の黒い四角枠内）にある特徴点（図1の白い丸）は全て平面領域に存在すると仮定する。これを「前フレームで平面領域に存在する特徴点」とし、位置情報を保持する。

Step1: 現フレームにおいて、画像の手前エリア内で、かつ、前フレームで平面領域と推定された特徴点を持つオプティカルフローの情報を基にカメラの並進・回転パラメータを推定する。

Step2: 現フレームの画像全体における全ての特徴点に対して、Step1で求めた並進・回転パラメータを用いて座標変換し、現フレームにおけるオプティカルフローを推定する。

Step3: 推定したオプティカルフローの位置と、画像から得られたオプティカルフローの位置を照合す

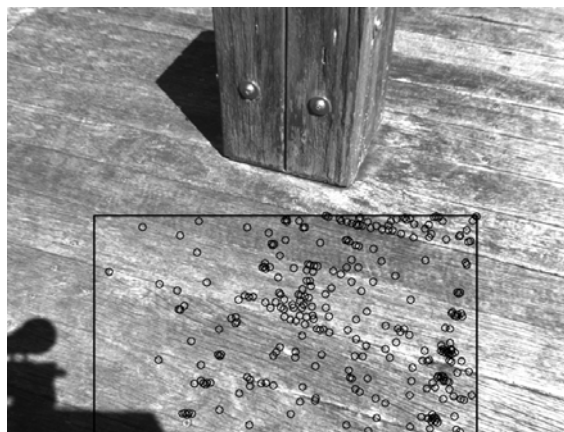


図1 画像における手前エリア（黒四角枠内）
（白い丸はエリア内で検出された特徴点を示す）

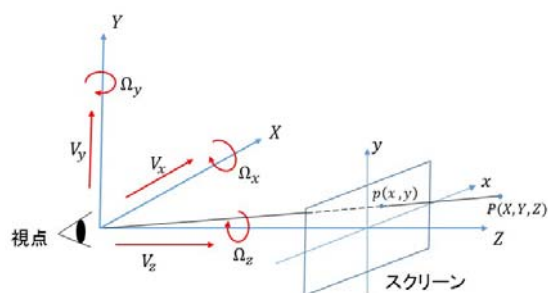


図2 オプティカルフローにおける座標系

る。ここで、一致していればその特徴点は平面領域であり、一致していなければ、凹凸のある障害物領域となる。

Step4: 現フレームにおいて、平面領域と抽出された特徴点を、「前フレームで平面領域に存在する特徴点」とし、位置情報を保持する。

2.2 カメラ並進・回転パラメータのロバスト推定

図2に示す座標系のとおり、並進量 $V=(V_x, V_y, V_z)$ と回転量 $\Omega=(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ の運動パラメータを持つカメラにおいて、三次元上の特徴点 $P=(X, Y, Z)$ は(1)式に示すオプティカルフロー $v=(v_x, v_y)$ を持つ^[6]。また、複数のオプティカルフローの延長線は拡張焦点（Focus Of Expansion : FOE点）と呼ばれる、ある一点に収束されるが（図3および(2)式の F ）、この拡張焦点を用いると、更に(3)式が得られる^[6]。

$$\begin{cases} v_x = x \frac{V_z}{Z} - f \frac{V_x}{Z} + v_x^r(\Omega) \\ v_y = y \frac{V_z}{Z} - f \frac{V_y}{Z} + v_y^r(\Omega) \end{cases} \quad (1)$$

ここで $v_x^r(\Omega)$, $v_y^r(\Omega)$ は

$$v_x^r(\Omega) = \frac{xy}{f} \Omega_x - \frac{x^2 + f^2}{f} \Omega_y + y \Omega_z,$$

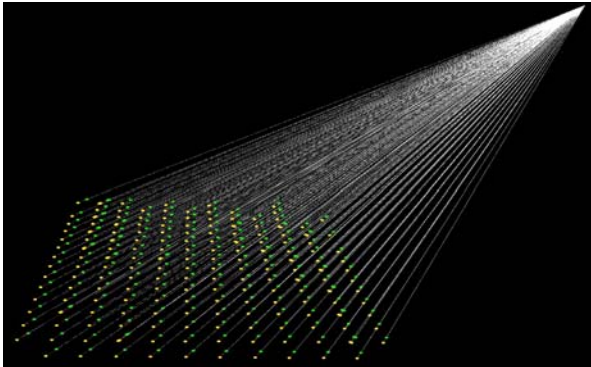


図3 オプティカルフローと拡張焦点 (FOE点)
 (画面左下の点集合：前後フレームの特徴点を示す。
 オプティカルフローの延長線上が拡張焦点となる)

$$v_y^r(\Omega) = \frac{y^2 + f^2}{f} \Omega_x - \frac{xy}{f} \Omega_y - x \Omega_z \text{ である.}$$

$$F = (FOE_x, FOE_y) = \left(f \frac{V_x}{V_z}, f \frac{V_y}{V_z} \right) \quad (2)$$

$$E(F, \Omega) = u_x(y - FOE_y) - u_y(x - FOE_x) \quad (3)$$

ただし、 $u_x = v_x - v_x^r, u_y = v_y - v_y^r$ である。

ここで、 f は焦点距離を示し、 $x=fX/Z, y=fY/Z$ である。また、 $E(F, \Omega)$ は誤差関数で、誤差が無ければ理論上0となる。

本稿では、文献[6]の佐藤らが行ったように、(3)式に対して、M推定として反復再重み付け最小二乗法を用いて、FOE点 F およびカメラの回転量 Ω を求め、更に得られたカメラの回転量を基に、(1)式を用いた最小二乗法により、カメラの並進量 V を求めた。

下記にカメラの並進・回転パラメータのロバスト推定の流れと床面領域および障害物領域の検出の流れを示す(図4)。

Step1: 前および現フレームの画像からオプティカルフローを求める。

Step2: そのオプティカルフローの中で、前フレームで平面領域と推定された特徴点を持ち、かつ、手前エリア内に現フレームの特徴点が存在するオプティカルフローのベクトル v および、それらのベクトルを構成する現フレームにおける画像座標上の特徴点 $p = (x, y)$ を取得する。

Step3: (3)式と、 v および p から反復再重み付け最小二乗法でFOE点 F とカメラの回転量 Ω を求める。

Step4: カメラの回転量 Ω を(1)式に代入し、特徴点 p を用いて最小二乗法でカメラの並進量 V を求める。

次に、得られたカメラの並進・回転パラメータを用いて床面領域と障害物領域検出処理を行う。現フレームの

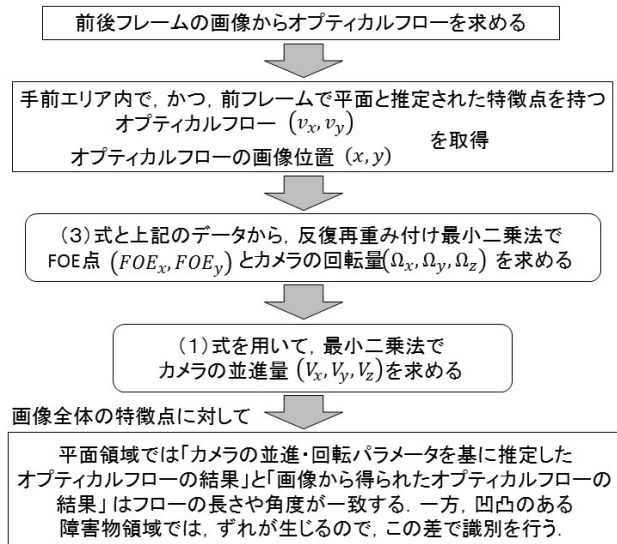


図4 ロバスト推定および床面領域と障害物領域検出の流れ

画像全体で抽出された全ての特徴点に対して、(1)式を当てはめることで、それぞれのオプティカルフローが推定される。前述で求めた並進・回転パラメータは平面領域のみを用いて得られたものであるため、現フレームにおいて平面領域に存在するオプティカルフローは、「カメラの並進・回転パラメータを基に(1)式に代入し求めたオプティカルフローの結果」と「画像から得られたオプティカルフローの結果」は一致する。しかし、凹凸のある障害物領域に存在するオプティカルフローの場合は、「カメラの並進・回転パラメータを基に(1)式に代入し求めたオプティカルフローの結果」と「画像から得られたオプティカルフローの結果」に、フローの長さや角度にずれが生じる。実験では、計算で求めたオプティカルフローと画像から得られたオプティカルフローに対して、ある閾値以上の長さもしくは角度がずれていた場合は障害物領域と判定した。

3. 実験および考察

3. 1 キャリブレーション

電動ビークルの周りにある障害物領域を、単眼カメラを用いて精度良く検出するため、できるだけ画角の広いレンズを用いる必要がある。その場合、画像周辺部で発生するレンズ歪み等を解決する必要がある。また、(1)式に示すように、カメラの並進・回転パラメータを推定する際には、カメラ中心から床面までの距離 Z を事前求めておく必要がある。そこで、レンズ歪みや画像主点位置調整等のみならず、各画素において距離 Z を正確に求めるため、本研究では幾何学的キャリブレーションを実施した。

実験では、できる限り画角を広くとるため、A0用紙にキャリブレーションパターンを印刷し、それをキャリブレーションボードとして使用した。また、下記のとおり、

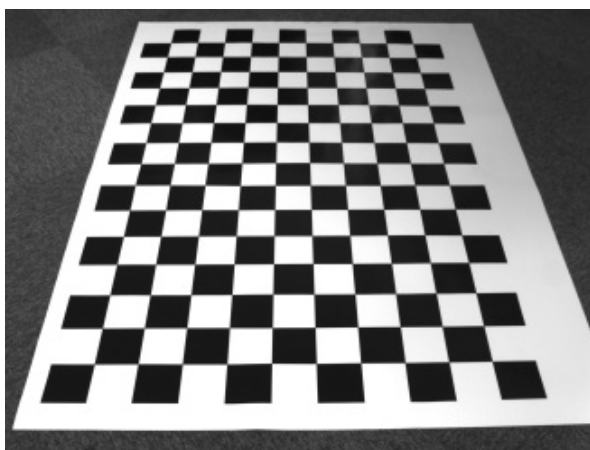


図5 A0用紙サイズのキャリブレーションボード

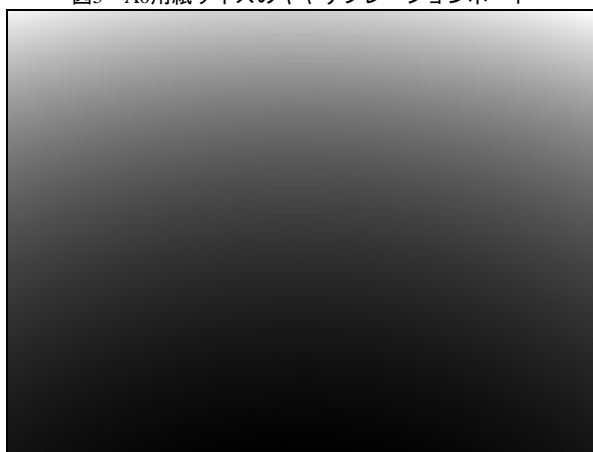


図6 キャリブレーションで求めたカメラからの距離 Z
(輝度値が明るくなるに従い、距離 Z の値は大きくなる)

内部・外部パラメータを求めた。

・内部パラメータの推定

実験で使用するカメラやレンズを用いて、キャリブレーションボード全体が写るように複数枚撮影し、カメラの焦点距離、レンズ歪み係数、画像主点位置等の推定を行った。実験では30枚の画像を基に内部パラメータを推定した。

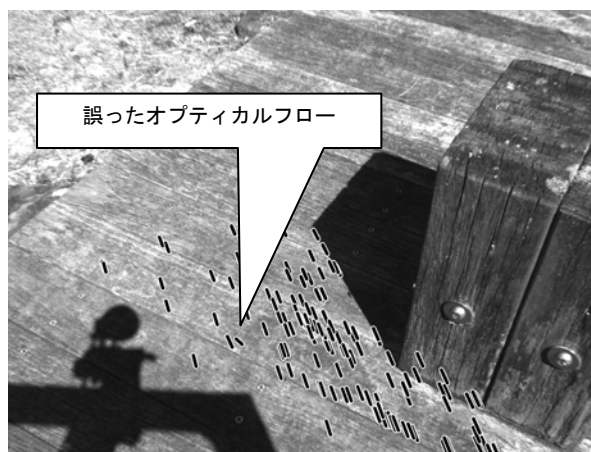
・外部パラメータの推定

屋外環境下で実際に撮影する高さ・角度にカメラを固定させ、キャリブレーションボードの撮影を行った。実際に撮影した画像を図5に示す。

キャリブレーションにより、実際の三次元空間と二次元画像平面との幾何学的な対応関係が求まるため、これによりカメラからの距離 Z を求めた。図6に距離 Z の値を輝度値に変えて表現した結果を示す。図5と合わせて見ればわかるとおり、カメラからの距離が遠くなれば輝度値が明るくなる。

3. 2 誤ったオプティカルフローの検出

本研究では、画像処理ライブラリであるOpenCVを用いてオプティカルフローの検出を行った。このライブラリは比較的精度良くオプティカルフローを求めることはできるが、画像によっては誤ったオプティカルフローが求まる場合がある。誤ったオプティカルフローをカメラ



(a) 誤ったオプティカルフロー削除前
(黒線がオプティカルフローの検出結果)



(b) 誤ったオプティカルフローを削除
図7 誤ったオプティカルフローの検出・削除

の並進・回転パラメータの推定に用いた場合、誤った並進・回転パラメータが推定され、障害物検出も誤判定されてしまう問題がある。それを回避するため、図4の「前後フレームの画像からオプティカルフローを求める」処理を行った直後に、誤ったオプティカルフローを検出、削除を行った。

カメラの回転運動の大きさにもよるが、カメラの並進・回転運動により得られるオプティカルフローの位置に関して、一般的に、画像座標の y 軸（水平方向）の値がほぼ同じ位置にあれば、そこに存在する複数のオプティカルフローの長さはほぼ等しくなる。一方、画像座標の x 軸（鉛直方向）の値がほぼ同じにあれば、そこに存在する複数のオプティカルフローの角度はやはりほぼ等しくなる。そこで、実験では画像を横方向、縦方向にそれぞれ10分割し、縦横方向のそれぞれ分割された10個の領域に対して、統計的手法を用いて、ほぼ同じ長さ（横方向）、同じ角度（縦方向）に存在するオプティカルフローのみをその後の処理に使用する手法を実施した。図7に誤ったオプティカルフローの検出、削除の例を示す。図7(a)の黒線がオプティカルフローを検出した結果であるが、その中の一本（吹き出し部分）の角度が他と比較するとずれており、誤ったフローとなっている。本手法

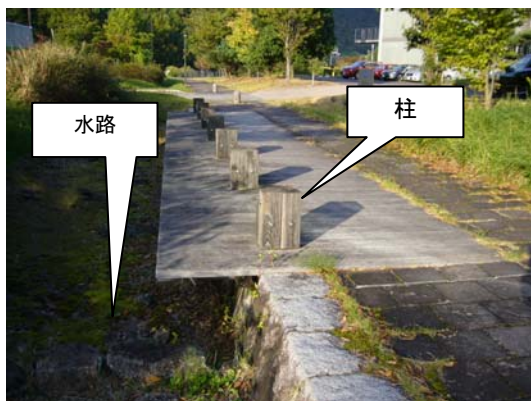


図8 実験環境（歩道）



図9 実験環境（駐車場）



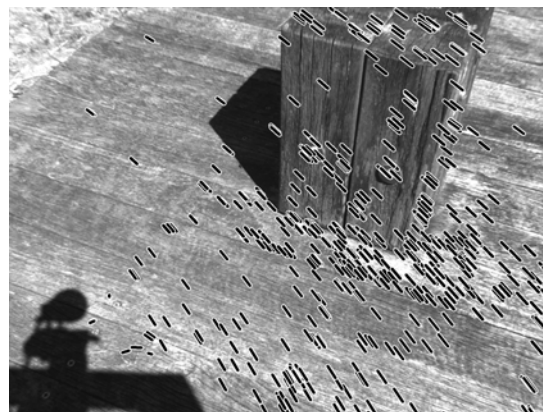
図10 撮影環境

により、図7(b)に示すとおり、削除された。

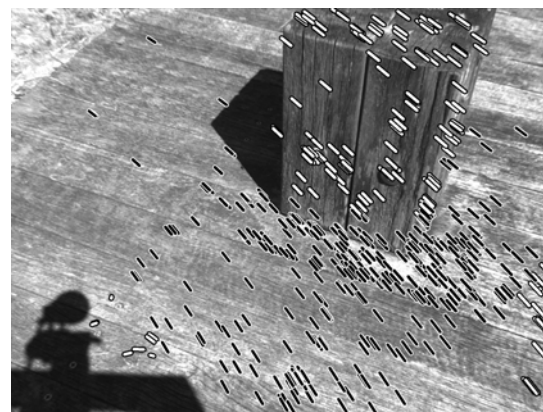
3. 3 実験環境

本研究の有効性を検証するため、屋外環境下で動画像を取得し、オフライン処理で平面領域と障害物領域の識別実験を行った。実験環境は、柱(280×280×400mm)や水路(深さ600mm)のある歩道シーン(図8)と、車止め(120×180×600mm)やU型側溝(寸法180mm)のある駐車場シーン(図9)である。また、撮影環境は図10に示すとおり、台車にカメラおよびパソコンを搭載し、キャリブレーションを行った後、台車を動かしながら動画像の撮影を行った。

実験で使用したカメラはBASLER製acA1600-20umでフレームレートは20fps、解像度は1624×1236である。レンズはミュートロン製8mmレンズHS0818Vを使用した。



(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図11 歩道シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その1）



(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図12 歩道シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その2）

3. 4 実験結果および考察

前述の二つの屋外環境下のシーンに関して実験を行った。図8の歩道シーンでは409個の画像、図9の駐車場シーンでは327個の画像に対して、それぞれ平面領域と障害物領域の識別を行った。歩道シーンに関する実験結果例を図11と図12に示す。図11には歩道内の柱が、図12はカメラが更に前方に進んで柱と水路が写っている画像である。図11(a)および図12(a)には画像から得られた全てのオプティカルフローの抽出結果を黒線で示す。また、カメラの並進・回転パラメータを推定後、平面領域と障害物領域の識別をした結果が図11(b)と図12(b)である。図11(b)と図12(b)の黒線は平面領域であり、白線は障害物領域と識別されたオプティカルフローである。柱の部分や水路の部分に関して障害物と識別され、良好な結果が得られていることがわかる。

本研究では、3.2節で記載した誤ったオプティカルフローの検出・削除はカメラの並進・回転パラメータを推定する際のみ使用し、平面領域と障害物領域の識別は全てのオプティカルフローに対して実施した。理由としては、本シーンにはないがカメラの前を人等の移動体が横切った場合、移動体のオプティカルフローはカメラの運動に伴うオプティカルフローとは異なる動きをするため、移動体検出のためには全てのオプティカルフローに関して平面領域と障害物領域の識別を行う必要があるためである。従って、図11(b)や図12(b)において、画像の左下側は明らかに誤ったオプティカルフローではあるが、障害物として識別されている。

駐車場のシーンに関する実験結果例を図13と図14に示す。図13には平坦なアスファルト上に車止めがあり、さらに遠方には側溝、そしてそのさらに先には背の高い雑草の茂みが写っている。図14は図13からカメラが更に前方に進み、側溝と雑草の茂みが写るシーンとなっている。図13(a)および図14(a)は画像から得られた全てのオプティカルフローの抽出結果を黒線で示す。また、平面領域と障害物領域の識別結果が図13(b)と図14(b)である。このシーンでも車止め、側溝、雑草等のアスファルト（平面領域）と異なる凹凸のある障害物が識別されていることがわかる。

以上のことから、オプティカルフローを用いて平面領域と障害物領域の識別を行う本手法は有効であることが示唆された。

一方、三つの課題も判明した。第1の課題はキャリブレーションにおける誤差である。図11(b)や図13(b)のように画像の右下部にあるいくつかのオプティカルフローは本来は平面領域であるが誤判定されており、障害物領域として識別されている。これはキャリブレーションにおいて距離 Z を推定する際に誤差が生じているためと推測される。キャリブレーションの仕方を再度検証し、精度を向上させる必要がある。

第2の課題は、除去しきれなかったオプティカルフロー



(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）



(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図13 駐車場シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その1）

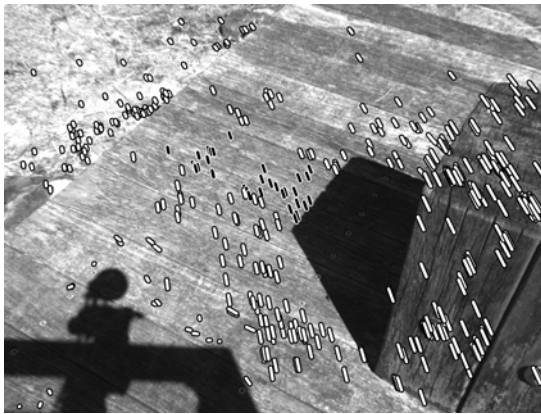


(a) 全てのオプティカルフロー（黒線）

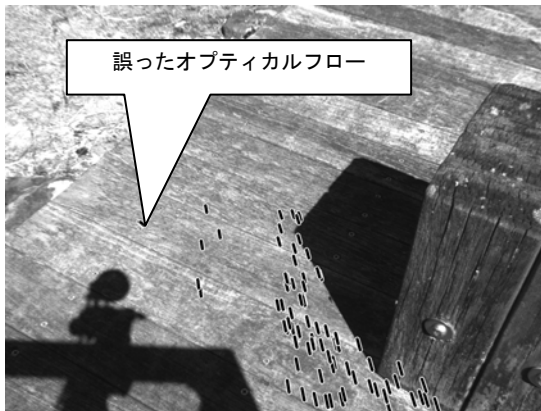


(b) 識別結果（黒線：平面、白線：障害物）

図14 駐車場シーンの平面・障害物領域の検出結果例（その2）



(a) 平面・障害物領域の識別結果



(b) 運動パラメータ推定に用いたオプティカルフロー

図15 誤判定した平面・障害物領域の識別結果例（その1）

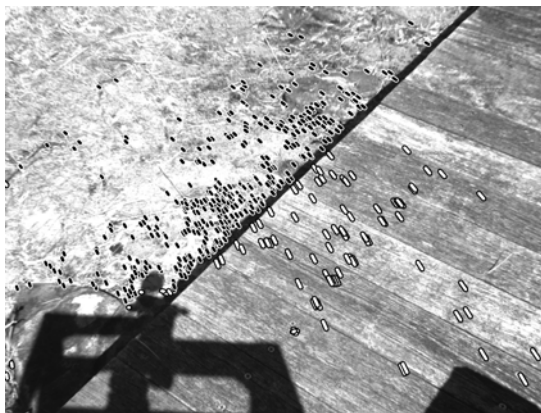


図16 誤判定した平面・障害物領域の識別結果例（その2）

の誤検出である。図15(a)に歩道シーンにおけるある画像の平面領域と障害物領域の検出結果を示す。この結果では平面領域と障害物領域が適切に識別されておらず誤った識別結果となった。この理由として、図15(b)に示すとおり、カメラの並進・回転パラメータを推定するために用いた複数のオプティカルフローの中に誤ったオプティカルフローが含まれていたため、正しくパラメータ推定ができなかったと考えられる。この解決手法として、前後フレームだけでなく、複数フレームを用いてオプティカルフローの信頼度を計算することなどがあげられる。

第3の課題は、手前エリアに存在する特徴点は全て平面領域と仮定したことに伴う誤判定である。本研究では、2.1節で記述したとおり、カメラが移動し始めて最初のフ

レームでは画像の手前エリアに存在する特徴点は全て平面領域と仮定している。一方、歩道シーンの実験で、水路に近づきすぎたため、カメラを後ろに戻す行動を実施した際、障害物領域を平面領域と誤判定してしまった。図16に示すとおり、本来は凹領域の障害物である水路が平面領域と識別され、これにより歩道の平面領域が凸領域の障害物と誤って識別されている。これはカメラを停止→後退させた際、画像の手前エリアは水路しか写っていなかったため、この領域を平面領域と誤判定したためである。電動ビークルがどこまで障害物に近づくのか電動ビークルを開発する共同研究企業と検討する必要があるが、手前が平面であるという仮定がなくなるまで近づくことを想定した場合は、カメラを停止から移動した際も前フレームの平面・障害物領域の情報を保持するなどの対策が必要である。

4. まとめ

電動ビークル走行時に、障害物や段差等の危険箇所を検出するカメラセンサの開発を行うため、本研究では移動体に搭載した単眼カメラで取得したオプティカルフローを用いて、前フレームからの移動体の並進・回転量を推定し、床面と障害物領域を安定して抽出する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示すことができた。

今後の課題としては、実験により明らかになった三つの課題に対して検討を行う。また、現在は市販のUSBカメラで取得した画像をオフラインによるパソコンの画像処理で障害物検出を実施しているが、今後はFPGA等を用いてリアルタイム処理を行う予定である。

文 献

- [1] “警察庁ホームページ 電動車いすの安全利用に関するマニュアルについて”，
<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku12/tebiki.htm>.
- [2] 平湯秀和, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第1報）—カメラセンサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.9-14, 2015.
- [3] “富士重工業株式会社ホームページ アイサイト (ver.3)”,
<http://www.subaru.jp/levorg/levorg/safety/eyesight.html>.
- [4] “ぶつからないクルマ いざ普及へ”, 「日経エレクトロニクス」2012年11月26日号, pp51-58, 日経BP社.
- [5] Buauchemin,S.S. and Barron,J.L. ”The computation of optical flow”, ACM Computing Surveys, Vol.27, No.3, pp.433-467, 1995.
- [6] 佐藤育郎, 山野千晴, 柳川博彦, “車載単眼カメラからの進路横断物体の検知”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010) 論文集, pp.75-82, 2010.

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第5報）

－ 超音波フェーズドアレイソナー －

田畑 克彦 平湯 秀和 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (5th Report) - An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA Hidekazu HIRAYU Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者の生活を支えるツールの一つである電動車いすに対して、事故の危険を検知するための安全装置を開発している。その中の一つのセンサとして、本研究では障害物の有無や接近を広域に検出する超音波フェーズドアレイソナーを開発している。昨年度は、超音波ビームの強度と形状を変えて障害物からの反射波形を観測し、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。さらに、この設計指標を達成するための超音波導波管アレイを開発した。本年度はこの導波管アレイを含む、超音波ビーム走査から障害物検知までを行う一連のシステムを構築し、障害物の検知能力を確認した。この結果、超音波ビームの送信出力の不足が判明したため、導波管アレイの改良を行い、目標とした従来の2倍の信号強度を得ることができた。

キーワード 電動車いす, 安全装置, 障害物検出, 超音波, フェーズドアレイ

1. はじめに

高齢者が活動的な生活を送る上で、有用なツールとして利用されている電動車いすであるが、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が後をたたない。そのため我々は、電動車いすの運転中に障害物の接近や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現する安全装置を開発している。この安全装置は、将来的に共同研究先である県内企業の電動車いすへ搭載し、安全装置付きの電動車いすとしての普及を目指している。なお、開発する安全装置付きの電動車いすを特に電動ビークルと記述する。

現在、安全装置に搭載する複数のセンサを開発しているが、この中の一つとして、超音波を使用した障害物検出センサ(以降、“超音波ソナー”と記す)の研究開発を行っている^[1]。一般的な超音波ソナーは、送信素子と受信素子の組合せ、または一つの素子で送受信を兼ねた構成であり、送信素子から超音波を送信後、障害物からの反射を受信素子で検出することで、伝播領域内にある障害物の有無と距離を検出する。現在はFA用途や自動車後方の障害物を検出する製品が市販されており、その有用性は明らかであるが、超音波は空気中での伝播減衰が大きいため、市販されている通常のソナーでは障害物を検出できる距離が1.5m程度と短い。本ビークルのような移動装置に搭載する超音波ソナーでは、障害物の検出可能距離が長いほど好ましいため、現状では3m程度に設定している。また、電動

ビークルが屋内を走行するシーンでは、比較的高い頻度で移動方向が大きく変化することが想定されるので、どの方向に障害物があるのかを広範囲に検出する必要がある。さらには、電動ビークルは自動車よりも小型なため、センサーサイズはコンパクトにする必要がある。

これらの要求を解決するために、本研究ではフェーズドアレイ技術を用いた超音波フェーズドアレイソナー(以降、“超音波PAソナー”と記す)を開発している^[1]。昨年度は、超音波ビーム強度と形状を変えて障害物からの反射信号を観測した結果、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。また、この設計指標を満たすために、超音波導波管アレイを開発し、所望の超音波ビームが得られていることを確認した。

本年度は、昨年度開発した導波管アレイを使用して、超音波ビームの走査から反射信号の受信を行い、障害物を検出するまでの一連の動作を実現する二次試作機を開発し、障害物検知実験を行った。しかしながら、子供のように、形状が小さく音波を吸収する服に包まれた対象の場合、反射信号が小さいため、目標の範囲内であっても検出できないことが判明した。このため、昨年度製作した導波管アレイを改良し、目標値に設定した昨年度比で2倍の信号強度を達成したので報告する。

2. 超音波PAソナーの試作

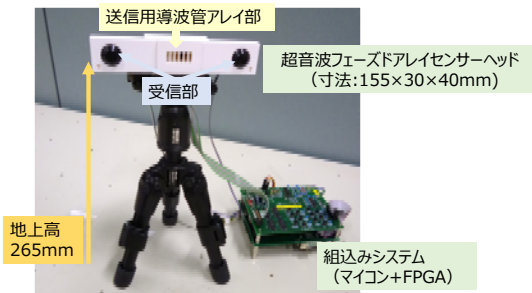


図1 超音波PAセンサー二次試作機

表1 送信部仕様

導波管アレイ:	
スリット開口サイズ	幅3mm×縦10mm
スリット間隔 (Center to Center)	4mm
スリット数	6
超音波素子数	6
超音波素子:	
中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
送信用素子 (開放型)	日本セラミックス株式会社 T4008A1(φ8×6mm)

表2 受信部仕様

実装仕様:	
素子サイズ	Φ18mm
素子間隔 (Center to Center)	120mm
素子数	2
超音波素子:	
超音波中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
送信用素子 (防滴型)	日本セラミックス株式会社 PR40-18(φ18×12mm)

昨年度開発した超音波導波管アレイ^[2]を使用して、フェーズドアレイによる超音波ビーム走査とその反射信号を受信し、障害物の位置を検出するまでの一連の動作を実現する二次試作機を開発した。図1に二次試作機の外観を示す。表1と表2は、それぞれ送信部と受信部の主な仕様である。

動作の概要を図2に示す。ノイズフロアを計測したのち、導波管アレイの奥に取り付けた超音波素子を0.4msの間、12Vの40kHzの矩形信号で励振する。この励振により発生したパルス幅0.4msの超音波パルスは導波管を通過してスリット開口部から送出される。各スリットに超音波素子が一個ずつ実装されているため、6個の超音波素子を使用しており、各素子の励振タイミングは送信方向に応じて制御する。そして、音波が5m往復する時間だけ受信素子にて反射信号の観測を行う。そして、ノイズフロアから0.1V以上大きい信号を障害物からの反射として、超音波ビームの送信方向と距離から位置を計測し、シリアル通信で障害物の位置と反射強度を通知する。その後、送信方向を変更して同様の処理を繰り返す。なお、送信方向は-60degから60degまでの10degステップで切り替えている。

図3はビーム送信方向を0deg, 30degおよび60degに制御した場合のビームパターンの実測値である。利得は単素子を同条件で励振した場合において、最も音圧が

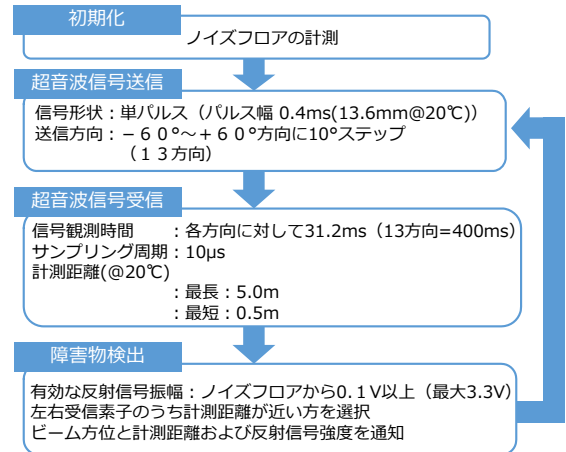


図2 二次試作機の動作フローチャート

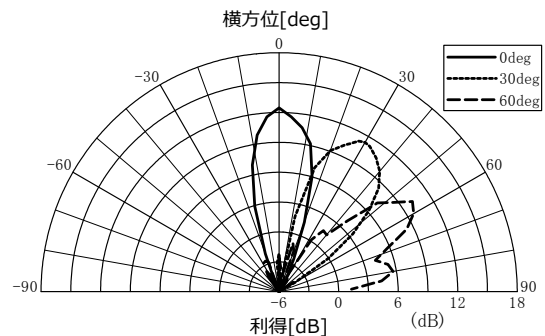


図3 超音波ビームパターン(実測)

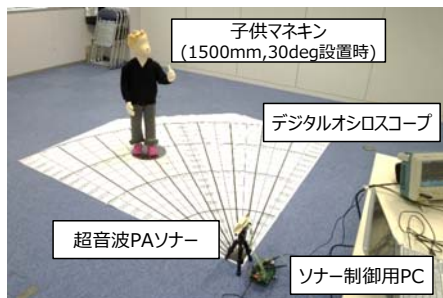
高い正面 (0deg) 方向の信号強度を基準としている。ここで、スリットから観測点までの距離は300mm一定としている。同図から、現状では所望の方向に超音波を送信できており、単素子の4倍(12dB, 0deg送信時)~3倍(9.7dB, 60deg送信時)の音圧が得られていることが確認できる。

3. 障害物検出実験

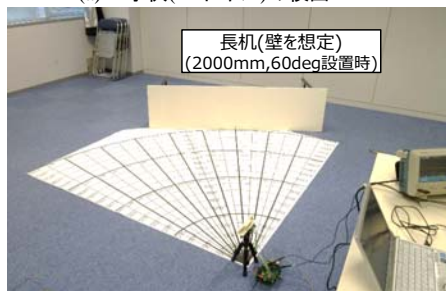
開発した二次試作機を用いて障害物検出実験を行った。障害物は図4に示すように3歳児の大きさの子供のマネキンと、壁などを想定した長机を横向きに置いたものの2種類を用いて、検出目標である距離3000mm以内、方位60deg以内の位置に設置し、検出可否を確認した。なお、超音波PAセンサーヘッドの地上高は、昨年度得られた知見である地上高300mm以下の265mmとした。

本実験では、受信波形を把握しなかったため、増幅後の受信信号をデジタルオシロスコープで取得した。なお、検出条件は図2の二次試作機と同じとした。

実験結果を表3に示す。長机はほぼ目標領域の検出ができていたが、子供マネキンは方位角が60degでは1000mmまで、0degでも2000mmまでしか検出できなかった。これは、マネキンが服を着ているために超音波を吸収してしまい、十分な反射強度が得られていないためである。この対策としては、送信する超音波信号



(a) 子供(マネキン)の検出



(b) 長机(壁を想定)の検出

図4 障害物検出実験のようす

表3 障害物検出実験の結果

距離[mm]	障害物 子供マネキン			障害物 長机(壁を想定)		
	横方位角 [deg]			横方位角 [deg]		
	0	30	60	0	30	60
500	○	○	○	○	○	○
1000	○	○	○	○	○	○
1500	○	○	○	○	○	○
2000	○	×	×	○	○	○
3000	×	×	×	○	○	×

○検出可能 ×検出できず

の強度を高めるか、信号処理を工夫することで低レベルの反射信号を強調することが考えられる。そこで、本年度はまず導波管アレイを改良し、信号強度を高めることを試みた。

4. 超音波導波管アレイの改良

先行研究の実験によれば^[2]、フェーズドアレイで生成された超音波信号強度はほぼ距離に反比例していた。よって、子供マネキンに対して目標を達成するためには表3より現状の約2倍の検出距離が必要なため、送信強度の目標値を二次試作機で用いた音響導波管アレイの2倍に設定する。超音波導波管アレイの送信強度を向上させるには、単純に送信素子数を増やし、適切に励振タイミングを制御することで達成される。このように超音波ビームのカスタマイズが容易な点は、フェーズドアレイ技術の利点でもある。なお、今回目標として設定した出力では横方位角60deg、距離3000mmの障害物を検出できない可能性もあるが、素子数があまりに多数になると複雑化してコストアップにつながるため、これ以上の改良は信号処理等に対応する予定である。

4. 1 モデルケースによる比較

表4 超音波導波管アレイのモデルケースの主な仕様

導波管タイプ	分離型	マージ型
スリット開口サイズ	幅3mm×縦4.5mm	幅3mm×縦10mm
スリット間隔 (Center to Center)	横4mm×縦5.5mm	横4mm
スリット数	12	6
超音波素子数	12	12

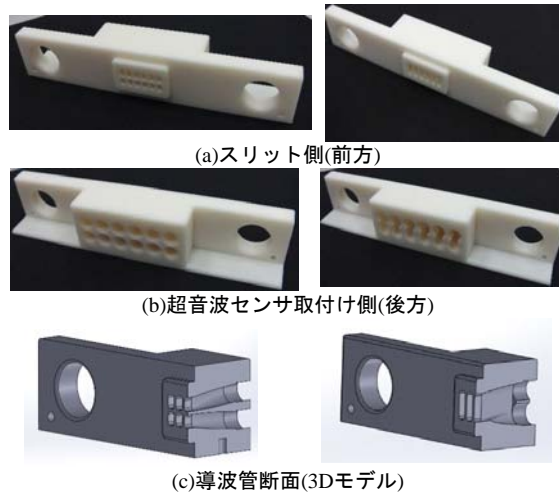
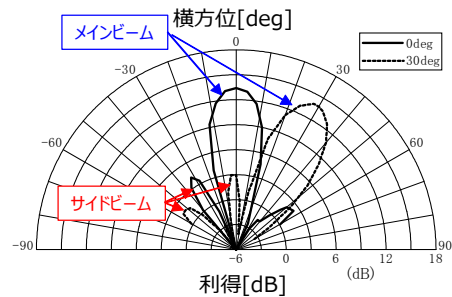
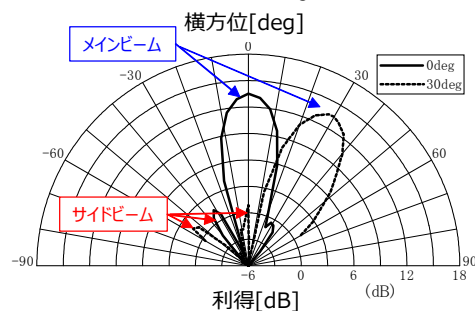


図5 試作した導波管アレイ(左:分離型、右:マージ型)



(a) 分離型(0, 30deg制御時)



(b) マージ型(0, 30deg制御時)

図6 モデルケースの2Dビームパターン(実測)

表4と図5に示す2つのモデルケースを考案し、ビームパターンの傾向を把握した。モデルケースでは、従来の送信強度を2倍にするために送信素子数を2倍にする。このため、上下に素子を実装し、この2個の素子は同相制御を行う。つまり励振するタイミングは同時であるので、励振信号線を並列接続する。また、スリット開口の寸法は二次試作機の導波管アレイと同程度とする。導波管は上下2つの素子で別々の導波管を使用する分離型と一つの導波管を共有するマージ型の2種類とした。マージ型をモデルケースにした理由は、導波管内の空間が広いために、超音波が導波管から抜け易く信

号強度が得られると推測されるが、導波管内における複数の音波の干渉が及ぼす影響を確認するためである。

図6は図3と同様の方法で、分離型とマージ型の超音波ビームパターンを実測した結果である。双方ともにメインビームが0degと30deg方向となるようにタイミングを制御している。図3の結果と比較すると図6ではメインビームの利得は12dBから13.5dB程度に改善されているに過ぎないことがわかる。このように素子数を2倍にしても出力が2倍とならない大きな原因として、図5(c)の音響管断面に示すように、スリット出口に向かうにしたがって音響管が細くなる、いわゆるホーンの逆の形状となっているため、音が抜けづらくなっていると考えられる。また、分離型とマージ型の結果を比較すると、メインビームの利得は同程度であり、マージ型の利得が大きくなるという予想とは異なっていた。しかしながら、誤検知の原因となるサイドビームを比較すると、分離型が最大4.2dB(1.6倍)であるのにマージ型は最大1.5dB(1.2倍)に抑制できていることが確認できる。サイドビームは波長(20℃時8.6mm)以上離れた音源の干渉によって発生するので^[1]、3つ以上離れたスリットから送出される超音波の干渉により発生する。分離型は上下に音源となるスリットがありその数が倍であるため、離れた音源の超音波が干渉しサイドビームレベルが上がってしまっていると考えられる。よって、サイドビームレベルの低いマージ型の方が望ましい結果が得られることがわかった。

4. 2 改良導波管アレイ

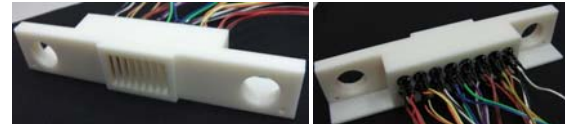
導波管は縦方向にはホーン形状となるようにして出力の増大を図ること、マージ型とすることでサイドローブを抑えること、などを知見として得ることができた。得られた知見に従い、スリット開口と素子数を変えてビームパターンを把握するシミュレーションと実験を繰り返した結果、表5と図7に示す改良型導波管アレイを開発した。図8は改良導波管アレイに超音波センサ素子を取付け、メインビームを0deg,30degおよび60degの方向に送信制御したときのビームパターンである。図3の従来の信号強度に対して、目標であった約2倍(6dB増)の信号強度が0degから60degにわたって得られていることが確認できた。

4. まとめ

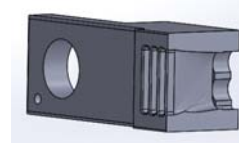
本稿では、高齢者用電動ビークルの安全装置として、広域に障害物を検出する超音波フェーズドアレイソナーの開発について述べた。本年度は、昨年度に開発した超音波導波管アレイを用いて、超音波ビーム走査から障害物検出までの一連の動作を行う二次試作機を開発した。また、本試作機による障害物の検出能力を把握する実験を行い、送信信号強度については現状の2倍以上必要であることを示した。そこで、素子数を増

表5 改良導波管アレイの仕様

導波管タイプ	マージ型
スリット開口サイズ	幅3mm×縦20mm
スリット間隔 (Center to Center)	横4mm
スリット数	8
超音波素子数	16



(a)スリット側(前方) (b)センサ取付け側(後方)



(c)導波管断面(3Dモデル)

図7 改良導波管アレイ

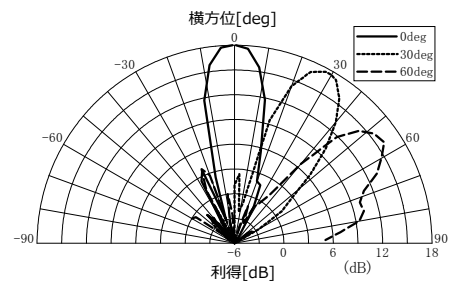


図8 改良導波管の2Dビームパターン(実測)

やすことを前提に、2つの導波管アレイのモデルケースを考案し、その傾向を実験的に把握した。さらに得られた結果をもとに改良を重ね、目標であった従来の約2倍の信号強度を得ることができた。

今後は、改良導波管アレイの検出能力を確認するとともに、雑音に強い受信信号処理についても検討し、検出能力とロバスト性向上のために、さらなる改良を加える予定である。

謝 辞

本研究で試作した部品の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機で製作しました。

文 献

- [1] 田畑克彦, 平湯秀和, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第2報)ー超音波フェーズドアレイソナー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.15-20, 2015.
- [2] 田畑克彦, 岩井俊昭, 久富茂樹, 遠藤善道, 西田佳史, “長遅延応答型超音波トランスポンダー”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1086-1091, 2013.

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第6報)

— 音センサ —

久富 茂樹 平湯 秀和 田畑 克彦

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (6th Report)

- A Sound Sensor -

Shigeki KUDOMI Hidekazu HIRAYU Katsuhiko TABATA

あらまし 歩行の困難な高齢者が活動的な生活を送るための有用なツールの一つである電動ビークルを対象として、当所では、事故の危険を検知するための安全装置を開発している。本稿では、後方からの車の音を検出して運転者に注意喚起する音センサの開発について報告する。本年度は、電動ビークルに音センサを搭載して走行する際に問題となる電動ビークル自体の走行音の影響を調べた。電動車いすに音センサを取り付け、走行音の影響を調べたところ、振動によるノイズ音が昨年度検討した車の接近を検出するための評価指標値に影響を及ぼし、車の接近と誤検知することがわかった。ノイズ音と車の接近音の特徴の違いを利用してノイズ音を除去する処理を導入したところ、電動車いすの走行音による誤検知を低減することができた。また、電動ビークルへの搭載に向けてセンサシステムの小型化について検討した。

キーワード 電動ビークル, 安全装置, 音, マイクロホンアレイ, ノイズ

1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動ビークルは広く利用されつつあるが、加齢による認識力低下による操作ミスが原因で、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が問題となっている。当所では昨年度から、電動ビークルを安全に運転するため、障害物の接近や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現する安全装置を開発している^[1~3]。

本稿ではその一つとして開発している音センサについて報告する。高齢になり聴覚が低下してくると、接近してくる車の音に気づかず、不用意な進路変更で車と接触事故を起こす危険がある。本研究では、特に問題となる後方からの車の接近を想定して、電動ビークル後方の車のクラクション音、エンジン音、走行音などをマイクロホンで検出し、運転者に注意喚起する装置を開発している。昨年度は、後方から接近する車の検出精度を高めるために、後方の指向性を高めたマイクロホンアレイの設計、車の接近を検出するための評価指標値の検討を行った。低騒音下の屋外において、三脚に固定したマイクロホンアレイを用い、10m 後方の車のクラクション音の検出が可能であることと、徐行して接近してくる車の走行音を5m 離れた地点で検出が可能であることを確認した。本年度は、音センサを電動ビークルに搭載した際に問題

となる電動ビークル自体の走行音の影響を検討するとともに、電動ビークルへの搭載に向けて、システムの小型化について検討したので報告する。

2. 電動ビークル走行音の影響

電動ビークルに音センサを搭載して走行すると、電動ビークル自身の走行音も音センサで検出して、接近する車の検出に影響を及ぼすことが懸念される。音センサを搭載する電動ビークルは開発中のため、今回は、当所にある電動車いすに音センサを取り付け、走行音の影響を評価した。

2. 1 測定方法

音センサは、昨年度試作したマイクロホンアレイと同様に、6個のエレクトレットコンデンサ型マイクロホンを水平方向に6cm間隔で直線上に配置した構造とし、電動車いすの座席背面に取り付けた。各マイクロホンの信号を、バンドパスフィルタ（通過周波数：1.5kHz～4kHz）に通過させた後、0～5Vの電圧レンジに収まるように、オペアンプで増幅した。その後、AD変換モジュールを介して、25.6kHzのサンプリングでコントローラ（National Instruments製 cRIO-9068）に取り込み、各信号を使用して、DS法^[4]によりビームフォーミングを形成した。図1にマイクロホンアレイの指向性を示す。電動車いす後方を0

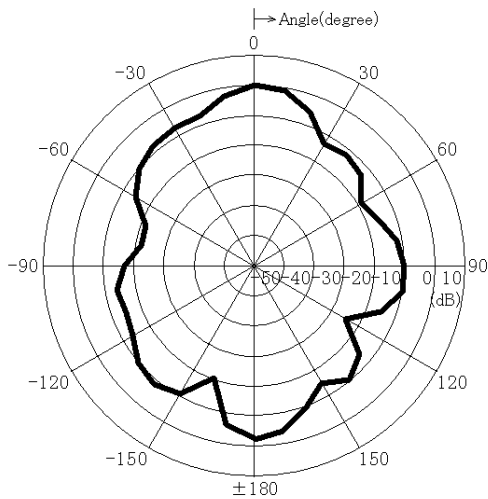


図1 マイクロホンアレイ指向性 (2kHz)



図2 電動車いす走行音の実験

度とし、10度間隔で角度を変えて、2kHzの正弦波の音をスピーカから出力した。そのときのマイクロホンアレイ出力を測定し、FFT解析を行い2kHzのパワースペクトル値を求めた。0度方向の値を基準としてそれぞれの方向の値をデシベルで示した。電動車いすの前後方向からの音に対して感度が高く、横方向からの音に対して感度が低くなっていることがわかる。これによって、後方からの車の接近に対する音の指向性を高めた。

2. 2 電動車いす走行音の解析

図2に示す石畳状になっている歩道での電動車いす走

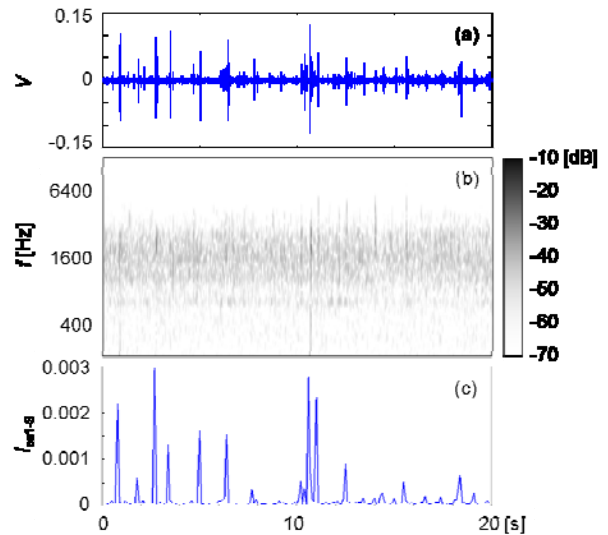


図3 電動車いす走行音

(a) 時系列波形, (b) ウェーブレット変換, (c) 評価指標値

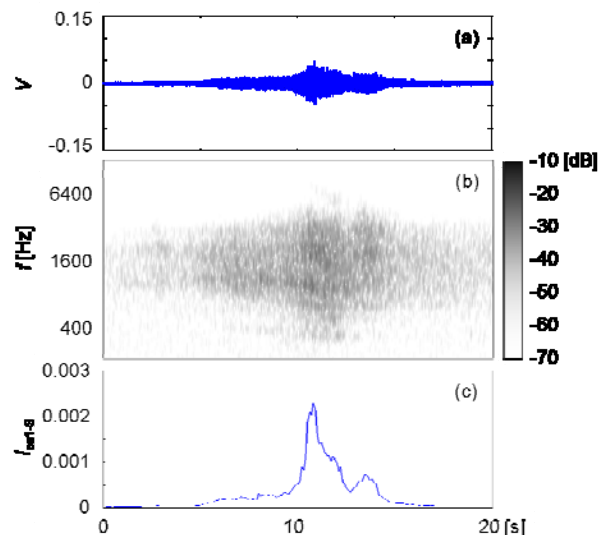
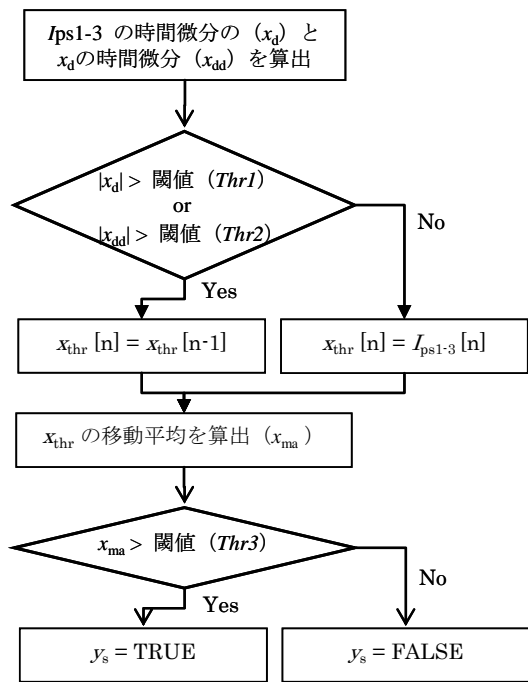


図4 車の通過音

(a) 時系列波形, (b) ウェーブレット変換, (c) 評価指標値

行音を取得した。図3に走行音の測定結果を示す。図3(a)はマイクロホンアレイの出力電圧波形を、電圧レンジを基準として正規化し、平均値が0になるようにオフセットした波形である。図3(b)はウェーブレット変換により時間一周波数解析を行った結果である。また、図3(c)には、昨年度と同様にして求めた車接近の評価指標値 (I_{ps1-3})^[3]を示す。

電動車いすが歩道の石畳の隙間を通過する際の振動により電動車いすの機構部から発生した音や、歩道の小枝や小石を踏んだときの音がマイクロホンで検出された。図3(a)で時折パルス状に音圧が高くなっている部分はその信号に該当する。図3(b)のウェーブレット変換結果



x_d : I_{psl-3} の時間微分
 x_{dd} : x_d の時間微分
 x_{thr} : の整形値 (ノイズ除去)
 x_{ma} : 改良した評価値
 y_s : 車接近の判定結果

図5 車接近判別のフローチャート

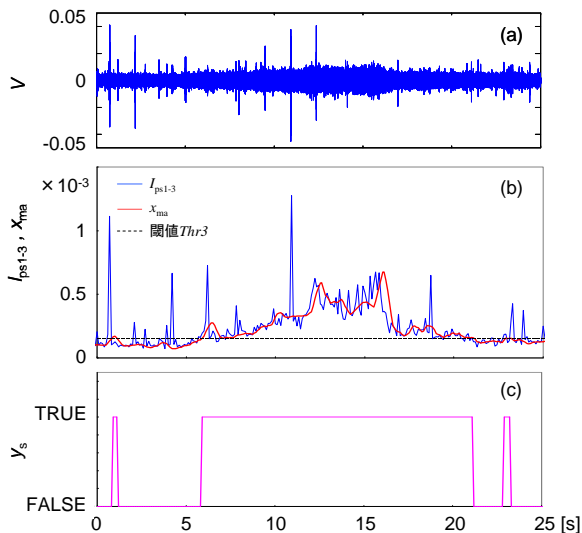


図6 車接近音検出結果

(a) 時系列波形, (b) 評価指標値, (c) 車接近の判定結果

から、その音の周波数特性は広い帯域に渡っており、車

の接近を判別する評価指標値で使用している1kHz～3kHz帯にも含まれることが確認できる。そのため、図3(c)に示すように、ノイズ音により評価指標値が大きくなり、車の接近と誤検出する。なお、電動車いすのモータなどの駆動音は音圧が小さく、評価指標値に大きな影響を与えるものではなかった。

2.3 車接近判別アルゴリズムの改良

前節で示したように、昨年度示した車接近判別の評価指標値では、電動車いす自体の走行時のノイズ音により、頻繁に誤検出することがわかった。開発する電動ビークルでも同様の問題が生じることは十分に予想されるため、その対策が必要である。

車の接近音と比較するために、電動車いすは停止状態とし、図2に示す道路で、電動車いすの後方から車道を走行して接近し追い越していく車の走行音を測定した。歩道と車道とは約2m離れている。図4に測定した結果を示す。結果の構成は図3の場合と同様である。図3(c)と図4(c)を比較すると、図4(c)では I_{psl-3} が徐々に変化する波形であるのに対して、図3(c)ではパルス状の波形になっていることがわかる。そこで、 I_{psl-3} の変化が急激な場合はその値を採用しないようにするアルゴリズムを検討した。図5にフローチャートを示す。

まず、 I_{psl-3} の変化量を知るために、 I_{psl-3} の時間微分(x_d)と、 x_d の時間微分(x_{dd})を求める。パルス状の波形の場合、速度成分に相当する x_d や加速度成分に相当する x_{dd} は大きくなるはずである。そこで、 x_d の大きさ、または、 x_{dd} の大きさが閾値以上になった場合にはその値は採用せず、1サンプリング前の値を採用することにした。次に、データ数を5とした移動平均を求めることでデータを平滑化した(x_{ma})。求めた値と閾値($Thr3$)を比較し、閾値を超えていれば、車接近の判定結果(y_s)をTRUEにした。予備実験の結果から、今回のシステムでは、閾値 $Thr1$ と閾値 $Thr2$ はともに0.001に、閾値 $Thr3$ は 1.5×10^{-4} に設定した。

2.4 車接近音検出

改良したアルゴリズムを使用して、車の接近音を検出する実験を行った。2.1節で述べた装置を用いて、2.2節と同様に、図2の石畳状の歩道を電動車いすで走行した。そのときに、隣の車道を後方から接近し追い越していく車の走行音を測定した。結果の一例を図6に示す。図6(a)は、マイクロホンアレイの出力電圧波形を、電圧レンジを基準として正規化し、平均値が0になるようにオフセットした波形、図6(b)は、評価指標値 I_{psl-3} と改良したアルゴリズムで求めた x_{ma} 、図6(c)は、閾値によって車の接近を判定した結果である。

図6(b)の I_{psl-3} を見ると、所々値がパルス状に急激に変化している。これは、2.2節で示したように、電動車いすの走行により発生したノイズ音の影響である。5s付近から、車道を走行する車の接近に伴い、 I_{psl-3} が徐々に増大している。12s付近で一度ピークになり14s付近にかけて

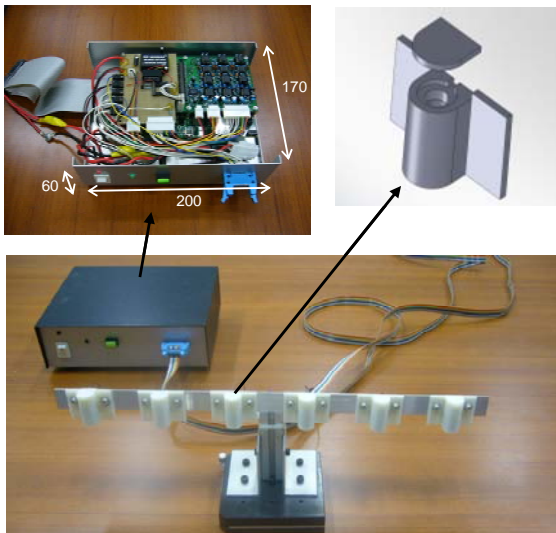


図7 小型化した計測システム

一時減少し、16s付近でもう一度ピークを迎えてその後徐々に減少している。この間も電動車いすの走行によるノイズ音が時々重畳している。なお、14s付近で一時的に減少傾向にあるのは、図1で示したようにマイクロホンアレイが電動車いす後方の音を強調して取得できるように設計されているため、車道を走行する車が電動車いすの横を通りすぎる時には、指向性が悪くなり、 I_{ps1-3} が減少する。車が電動車いすを追い越すと、前方からの音が回折してマイクロホンアレイに到達するため、再び指向性が高くなり、 I_{ps1-3} が増大していると考えられる。

今回改良した評価値である x_{ma} を見ると、電動車いす走行時のノイズ音の影響を受けることなく、車の接近に伴う緩やかな変化成分のみが抽出できていることがわかる。閾値で車の接近を判定した結果である y_s を見ると、若干誤判定しているところはあるが、電動車いす走行時に発生するノイズ音の影響による誤検出が低減できていることがわかる。

開発する電動ビークルと今回実験で使用した電動車いすとは、構造が異なることから、発生する走行音は異なる可能性がある。しかし、今回の実験と同様にパルス状のノイズ音の発生が十分に考えられるため、今回得られた知見を今後の開発に活用する。

3. 計測装置の小型化

前章で使用したシステムは、開発の容易性を優先させたことと、データ保存が必要であったため、ノートPCとコントローラを使用したセンサシステムであった。その状態では電動ビークルに搭載することが困難であることから、システムの小型化を検討した。

図7に小型化したシステムを示す。入出力と計測コントローラ部には、マイコンとFPGAが搭載されている基板

(National Instruments製 sbRIO-9623)を使用した。マイクロホンのアンプ・フィルタ回路部の小型化と安定化のため専用基板を設計した。これにより、計測コントローラとアンプ・フィルタ回路を $200 \times 170 \times 60\text{mm}$ のボックスに収まるサイズになった。マイクロホンアレイについては、より小型のマイクロホンを使用して小型化を図るとともに、マイクロホンが雨に濡れないよう円筒型のカバーを設計・試作した。円筒の下側から音が回折により入り込む構造になっており、風音の影響を低減するために円筒内部には防風用のスポンジを入れた。小型化により、電動ビークルへの実装に対して、寸法上の目処がついた。

今後、前章で検討したアルゴリズムを実装して、車の接近音検出を検証する。

4. まとめ

電動ビークルの安全装置の一つとして開発している音センサについて、電動ビークル自体の走行音の影響を調べた。走行時に発生するノイズ音が、車の接近を検出するための評価指標値に影響を及ぼし、車の接近と誤検知することがわかった。ノイズ音と車の接近音の特徴の違いを利用してノイズ音を除去する処理を導入したところ、走行音による誤検出を低減することができた。また、電動ビークルへの搭載に向けてセンサシステムの小型化を実施した。

今後は、いろいろな環境で走行実験を行い、ノイズ音の影響を評価しその対策を検討する。

謝辞

本研究で試作した部品の一部は、公益財団法人JKAの補助事業で導入した三次元造形機で製作しました。

文献

- [1] 平湯秀和, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第1報) -カメラセンサ”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.9-14, 2015.
- [2] 田畑克彦, 平湯秀和, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第2報) -超音波フェーズドアレイソナー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.15-20, 2015.
- [3] 久富茂樹, 平湯秀和, 田畑克彦, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第3報) -音センサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.21-24, 2015.
- [4] 浅野太, “音のアレイ信号処理 -音源の定位・追跡と分離-”, pp.71-79, コロナ社, 2011.

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第5報)

— 量産試験における効果検証 —

山田 俊郎, 坂東 直行, 浅井 博次, 久富 茂樹,
棚橋 英樹, 多田 憲生*

A study on a smart injection mold (5th Report)

- The verification of benefits on mass production trial -

Toshio Yamada, Naoyuki Bando, Hirotsugu Asai, Shigeki Kudomi
Hideki Tanahashi, Norio Tada

あらまし プラスチック射出成形における生産立ち上げ時間の短縮化, 不良成形品の発見を目的に, 複数のセンサを取り付けた金型システム(スマート金型)を開発している。成形時に変化する型内の圧力や温度など時系列データを取得し, ビッグデータ解析することで現在のショットが良品と異なるかを判別することが可能となる。本報では, 前年までに開発した測定システムを用いて大量の製品成形のデータを取得し, その分析について報告する。成形のショット間の測定データを比較解析することで, 樹脂の充填不足などの成形不良を検出できることが確認でき, 成形の良否判定に有効な技術であることを確認した。

キーワード 射出成形, 金型, センシング, ビッグデータ

1. はじめに

プラスチック射出成形の成形条件決定の迅速化や製品の不良発見, さらには流動解析シミュレーションとの比較検証を行うため, 金型内にセンサを取り付け, 成形状態の監視ができるスマート金型の開発を進めている。一昨年度の研究^[1]において, JISの引張り試験片が成形できる金型に各種のセンサを取り付けた金型を試作し, データ取得の検証を行った。この金型でデータ取得実験を行ったところ, 同一成形条件下でのデータ再現性, 不具合時の異常データ検知の可能性が確認でき, 生産現場で有効なシステムとなり得ることを確認した。また, 流動解析シミュレーションとの比較検証においても, モデルの詳細度を高くするとシミュレーション結果が測定データに近くなる傾向が確認でき, シミュレーションの精度向上にも有効であることがわかった。

昨年度の研究^[2]では, 射出成形金型の測定に特化した回路構成でシステムを構築することで測定装置の小型化を図り, 金型に搭載できるサイズの装置を開発するとともに, 新たな試験金型を試作した(図1)。開発システム(図2右A:型内圧力4Ch.,型表面温度8Ch.,型内部温度4Ch., B: 型内圧力8Ch.,型表面温度12Ch.,型内部温度4Ch.)の測定データを従来の汎用システム(図2左)で測定したデー

タと比較し, 小型簡略化されたシステムであっても従来装置と同等のデータが得られることが確認できた。

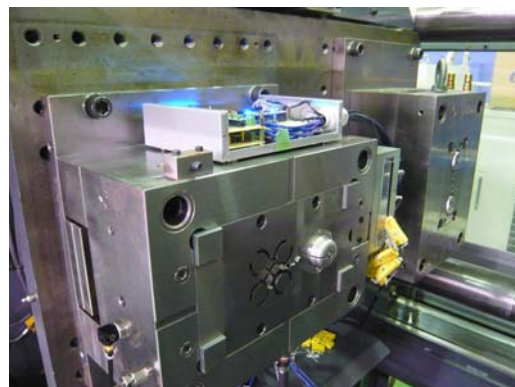


図1 測定装置を搭載した試験金型



図2 汎用システム(左)と開発システム(右)

* 株式会社 岐阜多田精機

本報告では、試作金型を用いて収集した約1,000ショットの測定データの分析について報告する。成形試験は同一の金型で材料条件を変えて実施し、不良検出の検証を行った。不良検出にあたっては、測定データからデータの特徴を抽出する特徴量を定義し、定常値から外れるものを不良とした。特徴量判別によって検出された不良品判定の事例を示し、システムの有効性について検証した。

2. 試験金型

試験金型には図3に示すように、成形品表面の圧力を測定する圧力センサが3点 (P1~P3) 表面温度を測定する温度センサが7点 (T1~T7) 取り付けられており、図4の形状の試験品が成形できる。成形機から射出される樹脂は、2つの成形品の間から型に注入され、ランナを通してそれぞれのキャビティに注入される。通常、複数個取りの金型は同形状のキャビティとするが、試験のため特徴の異なる異形の2個取りとした。1つはパイプを接合する

部品をイメージした形状であり、一部が欠けたC字型の円弧形を4つつないだものである。全体が肉厚の要素で構成されており、体積は27.3cm³である。以下ではこれをクリップ形状と呼ぶ。もう一方は小型機械のカバーをイメージした形状であり、潰した半球状のシェルの周囲にフランジがつき、内部にリブがある形状である。全体が薄肉で構成されており、体積は10.0cm³である。以下ではこれをドーム形状と呼ぶ。体積差が2.7倍あり肉厚にも差があるため、それぞれのキャビティ内の流動特性は異なるが、充填完了タイミングが同じになるようゲートサイズを調整している。

センサの配置は、それぞれのキャビティのゲート近くに圧力センサ (P1,P2) と温度センサ (T3,T4) を配置し、充填末端に温度センサ (T1,T2,T7) を配置した。また、薄肉部分の流動状況を測定するため、ドーム形状には圧力センサ (P3) と温度センサ2点 (T5,T6) が設置してある。

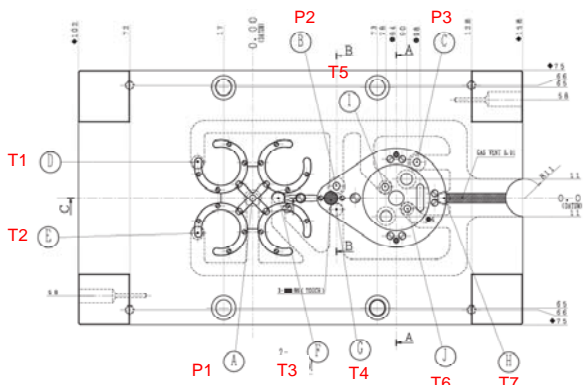
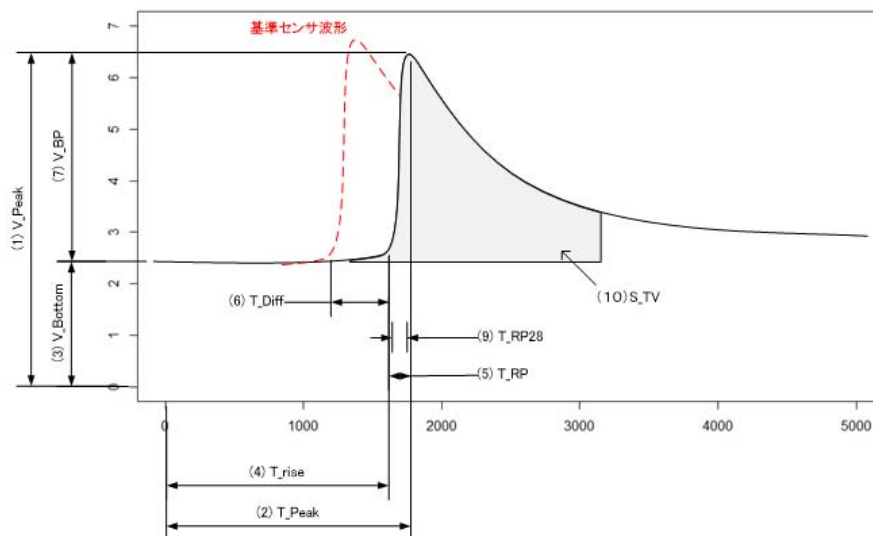


図3 試験金型のセンサ配置



図4 試作品の例

(左 : PC, 中央 : PC+CF10%, 右 : PC+GF10%)



1. V_Peak : センサの最高値
2. T_Peak : 最高値が出た時間
3. V_Bottom : センサの初期値(100サンプル平均)
4. T_Rise : センサ値が立ち上がった時間
5. T_RP : 立ち上がりからピークまでの時間
6. T_Diff : 基準センサの立ち上がりからの時間差
7. V_BP : センサ値の最大変化量
8. COR : 基準波形との相関係数
9. T_RP28 : 20%→80%変化時間
10. S_TV : 一定時間の積分値

図5 特徴量の定義

3. 特徴量の定義

昨年度までの成形実験において、複数のショットの時系列データをグラフ化し、それらを重ね書きして比較する(図7)ことで、他とは異なった成形状のショットを発見することができた。人がデータを見て判定を行う場合、グラフ形状の比較による判別は効果的であるが、金型に搭載するマイコンで判定を行うには時系列データは情報量が多く、パターン認識のような高負荷の処理は現実的ではない。時系列データから状態変化の特徴を表す特徴量を抽出することで、良否判定につながる情報を残したまま全体の情報量を削減し、軽い処理で良否判定が行えるようにした。

特徴量には様々なパラメータが考えられるが、射出成形の充填・保圧の状態を示す波形の立ち上がり注目して、図5に示す10項目の特徴量を定義した。なお、時間は型閉センサが反応した時点を基準(0)としている。

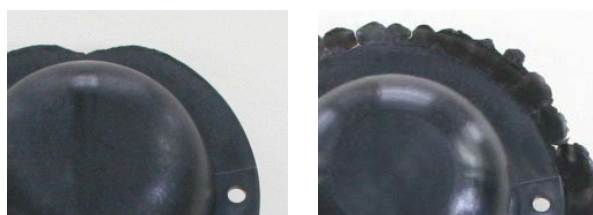
4. 量産試験における不良品検出

試験金型を用いて、各種の材料において約1,000ショットの成形試験を行った。試験に用いた材料は、ポリカーボネート(PC)、カーボンファイバーフィラー10%入りポリカーボネート(PC+CF10%)、グラスファイバーフィラー10%入りポリカーボネート(PC+GF10%)、再生ポリプロピレン(PP)、ナイロン6(PA6)の5種類である。1回目の成形実験はPC、2回目はPC+CF10%およびPC+GF10%、3回目(2日間)はPPおよびPA6で行った。射出成型の不良^[3]には様々なタイプのものがあるが、以下開発システムで検出できた不良の種類と特徴量の変化について事例を紹介する。

4.1 ショートショットおよびバリ

図6に示すようなショートショットおよびバリの不良は、射出成型の典型的な成形不良である。成形試験は良品を成形する成形条件で行っており、試験中にこれらの不良が発生しなかったため、PC+CF10%の材料において成形機の条件を調整して故意に不良を発生させて検証した。

ショートショットは、充填末端部分まで樹脂が到達しない不良であり、末端部分に設置した温度センサ(T7)のピーク値(V_{Peak})が良品と比較して極めて小さな値



(a) ショートショット (b) バリ

図6 典型的な成形不良

を示した。また、バリは樹脂の過充填によって発生する不良であり、すべての圧力センサ(P1~P3)が良品よりも大きなピーク値(V_{Peak})を示した。これらのことから、ショートショットやバリのような顕著な不良はセンサのピーク値の違いで検出できると考えられる。

4.2 微小ショートショット

PC材での成形において、リブ部分に図7に示すような窪みの発生が認められた。窪みのサイズは様々であるが、大きなものでも、幅1mm、深さ0.5mm程度の微小なショートショットであった。成形品と測定データを比較すると、ドーム形状のゲート近くの圧力センサ(P2)のピーク値(V_{Peak})によって成形状態に違いがみられた。図7のグラフは、P2の時系列データを32ショット分重ね書きしたもので、ピーク値の高いものほどショートが大きく、低いものは良品となっていた。このような微小な欠陥であっても、センサデータから検出ができることが確認できた。

ところが、この結果は経験則から得られているショートショットの感覚から外れている。一般的に「ショートショット=充填不足=圧力が足りない」と考えられており、圧力の高いものがショートショットというのは経験則に反している。そのため、シミュレーションによって充填状況を検証した。シミュレーションのタイムスパンを細かくして解析すると、このリブに対して中央の円筒のリブとシェルの両側から樹脂が流れ込んでいることが分かり、このリブの中央も充填末端となり得ることが分かった。そのため、キャビティ内の空気が抜けきれず、最後にリブの部分で圧縮されて残った空気が窪みを発生させることがあると考えられた。PC材での成形は初回の成形実験であったため、この結果をもとに金型を改修し、

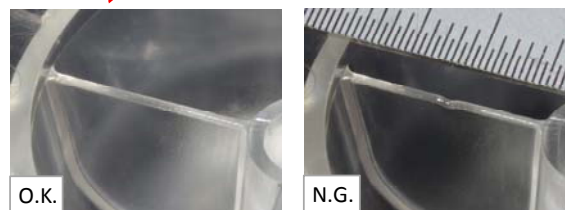
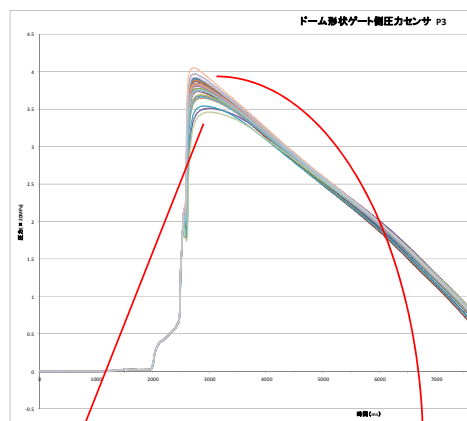


図7 微小ショートショットの検出

2回目以降の実験ではこの不具合は現れていない。このように、測定データを基にして不具合の原因究明を行うと、成形品のみを見て経験的に判断するよりも的確な判断が可能であることが示された。

4. 3 縞状痕

PC+CF10%材での成形における特徴量を検証したところ、圧力・温度センサの立ち上がり時間に関する特徴量 (T_Rise, T_Diff) に差異が認められるショットが発見できた。変化が認められた特徴量の一例として、横軸にショット番号、縦軸に温度センサの立ち上がり時間差 T_Riseをプロットしたグラフを図8(a)に示す。147ショット目および153ショット目に他とは異なる値が得られており、147ショット目の成形品に不良が認められた。なお、153ショット目は成形機停止に伴うものであり、不良検出とは関係がない。

147ショット目の成形品を前のショットと比較したものが図8(b),(c)である。147ショット目の成形品には、図の右下から左上にかけて薄い縞模様が現れている。縞状の模様および温度の立ち上がりが他とは遅れていることから考察すると、不良の原因としてフィラー材料の不均質状態による流動性の低下が考えられる。

4. 4 異物混入

PP材での成形において、成形試験中に前の材料が混入する不具合 (図9(b)) が現れた。材料供給装置中に残っていたPA6のペレットが混入したものと考えられ、PA6の融点が高いことから粒形状を保ったまま成形品に混入した。この成形試験の温度センサの立ち上がり時間 (T_Rise) をグラフ化したものが図9(a)であり、最初に異物混入が認められた743ショット目に変化が現れている。粒形状を保っているため、ゲートを通過する際の抵抗が大きく、それぞれのセンサ位置への樹脂の到達タイム

グがずれたものと考えられる。その後、760ショット目以降の成形にもPA6の混入が多発したため、実験を中止した。なお、711ショット目はノイズによる異常値である。

PPにPA6が混入した場合は、融点が異なるため流動タイミングに違いが現れたが、融点に近い材料の混入は検出できなかった。図9(c)はPPにABSが混入した例であり、異物が溶け込んでおり特徴量の差は認められなかった。

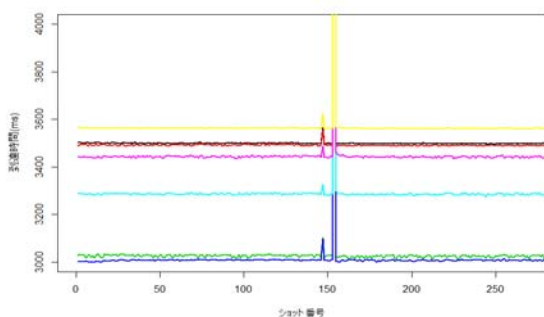
4. まとめ

プラスチック射出成形の製品製造現場で使用することを目的として、金型に搭載可能な小型のデータ収集装置を開発し、成形不良発見の効果を検証した。ショートショットや異物混入などが検出できることが確認でき、スマート金型の効果を示すことができた。

今後は成形の事例を重ねて、不良検出や金型保全の実績を増やしていく。

文 献

- [1] 山田, 坂東, 平湯, 棚橋, 丹羽, 窪田, 多田, “生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第15号, pp. 21-29, 2014
- [2] 山田, 坂東, 平湯, 棚橋, 丹羽, 窪田, 多田, “生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 (第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp. 1-4, 2015
- [3] 北川, 中野, “実践 射出成型不良対策事例集”, 日刊工業新聞社, 2010

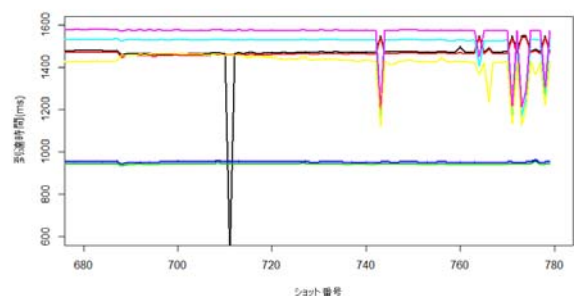


(a) 温度センサの立ち上がり時間 (T_Rise)



(b) 146ショット目 (良品) (c) 147ショット目 (不良品)

図8 縞状痕の不良成形例



(a) 温度センサの立ち上がり時間 (T_Rise)



(b) 検出例 (743ショット目) (c) 検出不可例

図9 異物混入の不良成形例

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第6報)

—金型設計から成形品の構造解析まで一貫通貫したシミュレーション技術の研究—

坂東 直行 山田 俊郎 久富 茂樹

A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Coupled Analysis -

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA Shigeki KUDOMI

あらまし これまでに筆者らは、炭素繊維強化プラスチックに対する現在の数値解析技術のポテンシャルを見極める一助とするため、流動解析技術と構造解析技術について実験とシミュレーション結果を比較しながら評価してきた。昨年度までは比較的単純な形状を検討対象として取り上げてきたため、本年度は実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における数値解析技術の能力を評価した。その結果、流動解析・構造解析ともに、複雑な形状であっても、定性的にはシミュレーション結果と実験結果は一致することがわかった。

キーワード 流動解析, 構造解析, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、強度と軽さを両立する材料として航空機に採用され、従来航空機と比較した機体の軽量化に寄与し、燃費を向上させた。現在、同様の意図をもって自動車をはじめとする他の輸送機械でも適用が模索されている。航空機と異なり量産が求められる自動車では、製造にかかる時間が重視される傾向にある。このため航空機で採用されている熱硬化性炭素繊維強化プラスチックは、成形に時間がかかるため適用が難しく、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) に期待が集まっている。

熱可塑性プラスチックは熱によって溶かした樹脂を金型のキャビティに注入し、冷え固まらせて形状を転写する射出成形技術プロセスを採用する場合は一般的である。CFRTPにおいても炭素繊維による機械的強度の向上を狙いつつ、射出成形によって短時間で大量に部材を生産できるよう検討が進められている。現在の主たる検討課題は、炭素繊維のような強化材(フィラー)を樹脂(マトリクス)に混ぜた材料で射出成形する際の流動性の低下による成形不良や、流動方向にフィラーが配向することによる強度特性の異方性などである。

この課題への有効なアプローチとして、数値解析技術に注目が集まっている。流動解析技術によって金型内部の樹脂流動を可視化することで成形不良の原因を特定でき、構造解析技術によって射出成形後の繊維配向が部材強度に及ぼす影響を評価することでランナーやゲートなど樹脂の流動性に影響を及ぼす金型の要因と部材形状の

組み合わせを排除できると考えられるからである。ここで得た知見をもとに、部材形状から金型設計、射出成形プロセスのパラメータ設計にわたる広範な設計諸元を適切に設定することができると期待されている。

しかし、数値解析技術はマクロな視点で成立する支配方程式を基礎としモデル化した現象を扱うものであるため、シミュレーションの結果が実際の現象をどの程度表現できているかは、比較してみなければわからないところがある。そこで筆者らは、現在の数値解析技術のポテンシャルを見極める一助とするため、炭素繊維強化プラスチックの流動解析技術と構造解析技術について、実験とシミュレーション結果を比較しながら評価してきた^{[1][2]}。その結果、実験結果とシミュレーション結果の間には定性的な一致が見られた。しかし、ここで取り上げた部材形状は、検討を容易にするために比較的単純なものであった。一般に、シミュレーションは形状が複雑になると精度が低下する傾向にある。そのため、実際の製品レベルの複雑さをもつ形状の場合についてはどうか、という疑問が残されていた。

そこで、実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における数値解析技術の能力を評価するため、成形実験とシミュレーションの比較を行ったので結果を報告する。

2. 方法

本報告では、図1に示す形状をとりあげて、流動解析および構造解析を行った。

図1(a)は4つのC字型クリップが平板の四隅にある

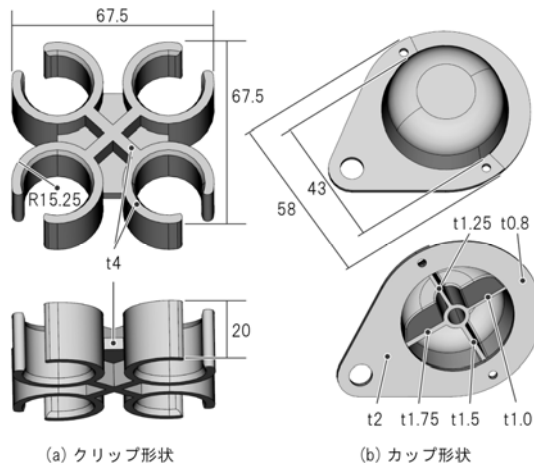


図1. 成形品形状

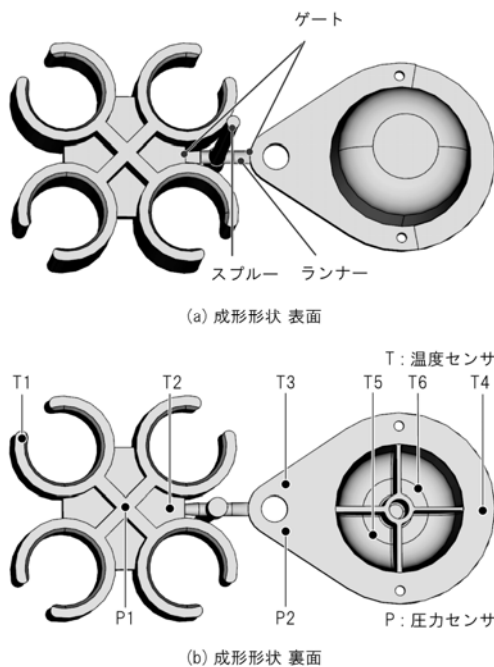


図2. 流動性評価におけるランナーパターン

形状で、対角のクリップはリブにより結合されており、前後と左右で対称な形状となっている。等方性材料を用いてクリップを成形した場合、各クリップの強度は同一とみなせるが、繊維強化樹脂によってクリップを成形した場合、繊維配向によって部材強度に差異が生じ、クリップ間の強度が異なると期待される。図1(b)は先端が平坦につぶれた半球カップの内側にボスを配置し、ボスからは半球の内面まで厚さの異なるリブが対向するように4つ配置された形状で、カップの縁には卵型のフランジが設けられ、卵の尻の部分の肉厚は先端部分よりも薄くなっている。流動性の悪い繊維強化樹脂と成形性の悪い薄肉のリブやフランジの組み合わせであるため成形環境が厳しく、実験とシミュレーションが比較しやすくなると期待される。

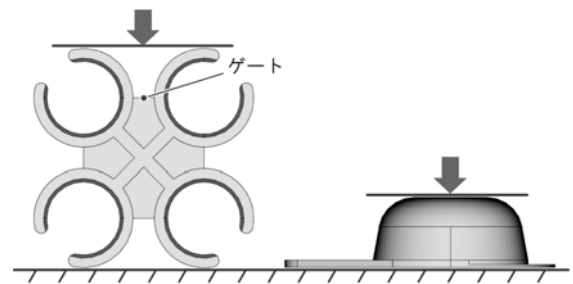


図3. 強度評価における荷重パターン

表1. シミュレーション環境

種別	ソフトウェア名
樹脂流動解析 ソフトウェア	Autodesk Moldflow Insight Premium 2016
材料特性予測 ツール	MSC Digimat 5.0.1
構造解析 ソフトウェア	Altair HyperWorks Radioss v11

流動解析では、この2つの異なる形状を一度の射出成形でそれぞれひとつずつ得る場合を想定し、図2(a)のようにランナーを配置した場合を取り上げてシミュレーションを行った。これは、同一形状の多数個取りと比較して異なる形状を一度に成形する場合、キャビティを満たす樹脂の流動が互いに及ぼす影響の程度が大きく、充填過程が複雑になり流動性の経時変化が表れやすく、実験とシミュレーションが比較しやすくなると期待されるためである。この結果と比較するため実際に射出成形を行い、スマート金型^{[3][4]}によって図2(b)の位置における金型内部のデータを取得した。

構造解析では、図3のように圧縮した場合を取り上げてシミュレーションを行った。この際、流動解析で得た繊維配向データから構造解析の各要素における強度特性を均質化法によって推定し、解析モデルに反映させている。なお、モデルの複雑化を防ぐため、材料は弾性変形を仮定し、塑性変形や内部破壊はモデル化の対象から外した。この結果と比較するため、万能試験機によって圧縮試験を行った。

材料には入手のしやすさから三菱エンジニアリングプラスチック株式会社製のIupilon CFH2010を用いた。これはPCをマトリクスとし、フィラーとして短炭素繊維を10%含有するCFRTPである。また、シミュレーションには、表1の商用ソフトウェアを利用した。

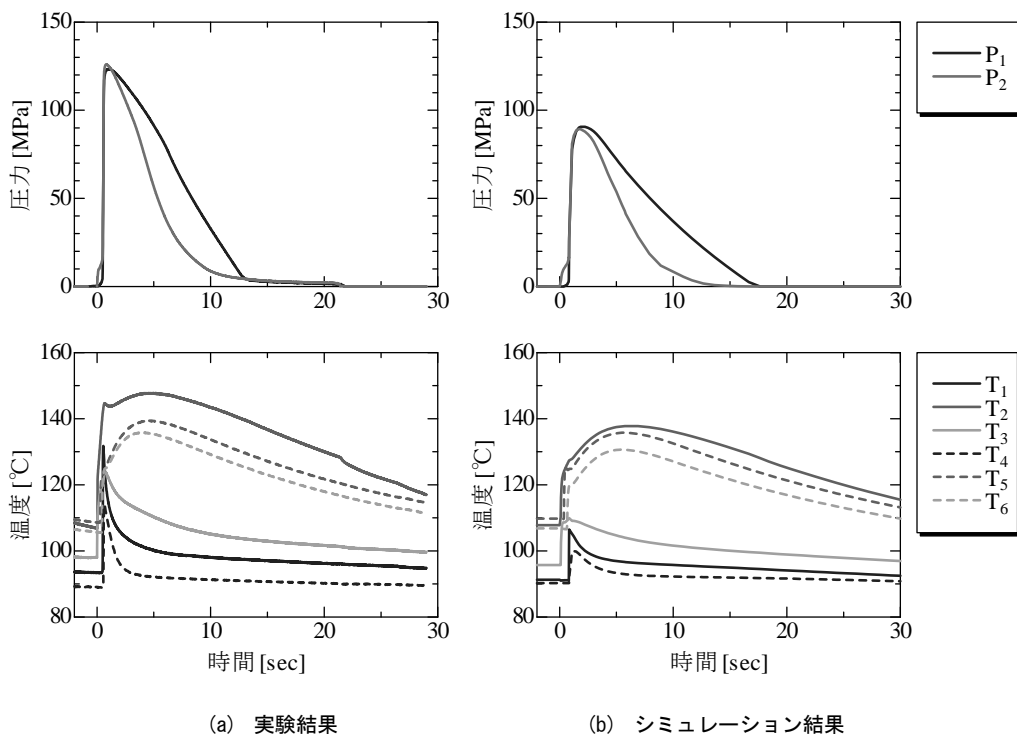


図4. 樹脂流動解析結果

3. 結果

流動解析結果と射出成形実験の結果を図4に示す。左のグラフは実験結果であり、右のグラフはシミュレーション結果である。横軸はすべて時間を表し、上段グラフの縦軸は圧力を、下段グラフの縦軸は温度を表す。ほぼグラフの形状が一致することから、本報告で取り上げた程度の複雑な形状であっても、炭素繊維を含有する樹脂の流動特性のシミュレーションの結果には妥当性があるといえる。しかし前報と同様に、定量的には実験結果とシミュレーション結果に差異が見られた。

図5は流動解析の結果得られたキャビティを満たす樹脂内部の繊維配向結果である。数値が高いほど繊維配向が揃っていることを意味し、その部分の材料の強度異方性が高くなることになる。

図6にクリップ形状の圧縮試験シミュレーション結果をミーゼス相当応力表示で示す。ここでは、全体が均質な材料であり、等方性の強度特性を持つと仮定した場合の構造解析の結果も示している。これは、繊維配向を考慮しない従来の解析手法の結果である。図中のA点とB点を比較すると、同一の応力分布となっているが、C点とD点を比較すると応力分布が異なっている。これは繊維配向に違いによって部材強度に差異が生じたためと考えられる。

次にカップ形状の圧縮試験の実験結果とシミュレーション結果を図7に示す。横軸は図3におけるカップ上面

の変位量であり、縦軸はそのときの圧縮荷重である。等方性材料を仮定した場合、シミュレーション結果と実験結果は顕著に傾向が異なるが、繊維配向を考慮した場合、定性的な傾向が一致した。ここから、樹脂の流動方向に揃いがちな繊維配向に起因する強度特性の不均質を考慮しなければ、CFRTP部材の強度特性シミュレーションの結果に妥当性がみられないことがわかる。しかし定量的には、差異が認められる結果となった。

4. 考察

一般に、実験結果とシミュレーション結果を比較すると、定性的な傾向は一致している。また、材料を均質材とした場合と比較して、繊維配向を考慮した場合の強度特性の傾向は実験とより一致している。このことから、繊維配向を考慮した数値解析技術が、CFRTPの部材設計に有効であるといえる。

一方、定量的には、流動解析、構造解析ともに差異が見られた。

流動解析における圧力値が実験との間で異なる理由としては成形実験における樹脂の過充填が考えられる。VP切り替えよりもわずかに早くキャビティ内が樹脂で満たされると、射出成形機のスクリーは押し込み動作を速度制御したままになり圧力値は高くなる。

構造解析における荷重・変位特性が実験との間で異なる理由としては、材料の内部破壊を考慮していないこと

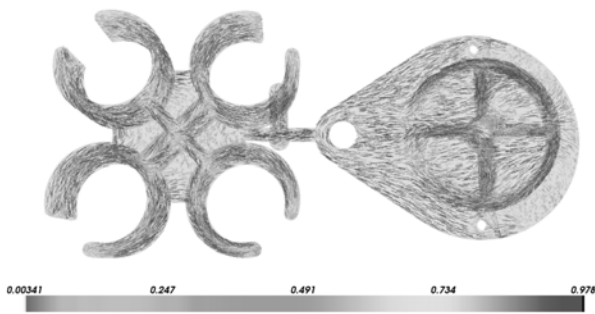


図5. 流動解析によって得られた繊維配向結果

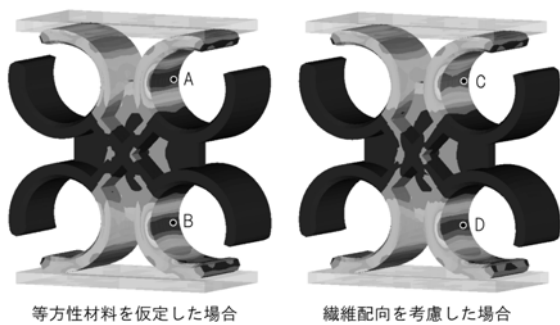


図6. クリップの強度解析結果

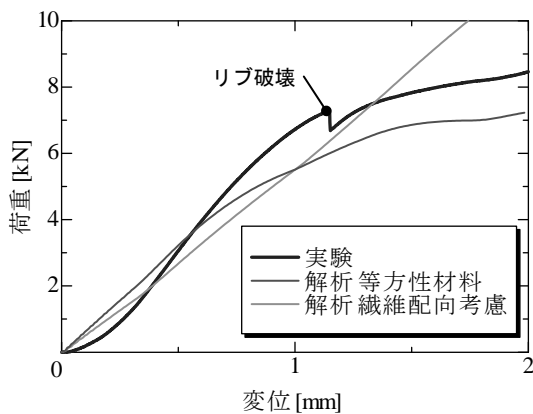


図7. カップ強度の比較

が挙げられる。CFRPは外力が加えられた際の部材の内部応力を炭素繊維が支持することで材料としての強度を得ているが、内部応力が大きくなると、炭素繊維と母材の界面が剥離したり、炭素繊維が折れたりして強度が低下する。このような現象を今回の解析モデルでは考慮していないため、変形が大きくなるほど強度特性に違いが目立つようになったと考えられる。材料の内部破壊も解析の対象に含めることは不可能ではないが、必要なパラメ

ータが多くなる、解析に時間がかかる、現象モデルの相互の影響が複雑になるなどの影響が表れ、シミュレーションによる現象理解を妨げることに伴い、結果として数値解析技術を実務としての設計に活用することが困難になる。

こうしたことを考慮すると、シミュレーションは実際の現象に対して定量的には差異が存在する、という前提で活用することが望ましい。よってシミュレーションの結果は、あらかじめ定めた物理的な評価指標の基準値を超えた・超えないで議論するのではなく、シミュレーション結果間で相対的に比較して優劣を見極める形式での活用が適しているといえる。

5. まとめ

実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における流動解析技術と構造解析技術の能力を、実験結果と比較して評価した。その結果、流動解析・構造解析ともに、複雑な形状であっても、定性的にはシミュレーション結果と実験結果は一致することがわかった。ここから、CFRTPの射出成形部材で意図する形状と特性を得るために数値解析技術は有効であるといえる。しかし、定量的には実験とシミュレーションの間に差異が見られた。ここから、シミュレーションの結果は相対的に比較して優劣を見極める形式での活用が適しているといえる。

文 献

- [1] 坂東直行, 平湯秀和, 山田俊郎, 久富茂樹, 丹羽厚至, 浅倉秀一, 窪田直樹, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 —樹脂流動解析シミュレーション技術に関する研究—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.25-29, 2014
- [2] 坂東直行, 山田俊郎, 平湯秀和, 久富茂樹, 窪田直樹, 赤塚久修, 丹羽厚至, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 (第4報) —構造解析シミュレーション技術に関する研究—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.5-8, 2015
- [3] 山田俊郎, 坂東直行, 平湯秀和, 棚橋英樹, 丹羽厚至, 窪田直樹, 多田憲生, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 —センシングシステムの設計と試験金型の試作—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.21-24, 2014
- [4] 山田俊郎, 坂東直行, 平湯秀和, 棚橋英樹, 丹羽厚至, 窪田直樹, 多田憲生, "生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 (第3報) —金型搭載小型ロギングシステムの設計と試作—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.1-4, 2015

画像認識技術を用いた検査工程の作業時間推定

渡辺 博己 曾賀野 健一 棚橋 英樹

Estimation of Inspection Working Time by Using Image Recognition

Hiroki WATANABE Kenichi SOGANO Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究では、カイゼン活動における作業時間計測を支援するために、ビデオカメラで撮影した動画ファイルについて、各フレームを作業内容に応じて分類することにより、作業時間を推定するシステムを構築した。作業画像の分類では、画像特徴表現手法の一つであるBag-of-featuresにより画像特徴量を抽出し、Support Vector Machineにより各フレームを分類した。また、作業時間の推定では、分類結果に基づいて単位時間当たりの代表となる作業を選定し、作業順序を示す作業チャートを作成することにより作業時間を算出した。実験では、検査工程の作業シーンを対象に、目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の三つのカテゴリに分類することにより作業チャートを作成し、各作業の作業時間を推定した。

キーワード カイゼン、作業時間計測、画像認識、Bag-of-features、Support Vector Machine

1. はじめに

若年労働者の減少、女性労働者の増加、外国人労働者の受け入れなど、企業の雇用形態が大きく変化している。また、少子高齢化、GDPの減退、消費者行動の変化など、消費者ニーズの多様化により、製品ライフサイクルが短縮化し、多くの企業で多品種少量生産への対応に迫られている。そのため、作業の標準化、作業者の能力向上や能率改善に向けた努力など、生産性向上のための生産管理支援に対する要望が高まっている。

こうした中、企業の作業現場では生産性向上のために、積極的に作業カイゼンに取り組み、生産工程の効率化を図っている。作業カイゼンの手法には、IE (Industrial Engineering) と呼ばれる工学的手法があるが、IEでは、作業時間を計測・分析することで、標準的な作業能力の算出、人件費等の原価管理、作業負担の軽減や作業の効率化等を図ることができる^[1]。

IEを活用した作業カイゼンにおいて、最初に取り組みなければならないのが現状分析である。これは、作業にどの程度の時間を要しているのかを調査することであり、カイゼン担当者は、ストップウォッチやビデオカメラを持って作業現場に張り付き、作業者が行う作業の様子を観察し、作業時間を計測する必要がある。しかし、この調査には、膨大な時間と手間を要し、計測ノウハウを有する人材の育成や人件費等の問題から、現状分析に至る前にカイゼン活動が停滞することも少なくない^[2]。また、人が時間を計測する場合には、長時間（長期間）にわたる作業時間の計測が困難であるため、時間帯や人による作業のムラ等を評価するまでに至っていないのが現状で

ある^[3]。

そこで、本研究では、カイゼン活動における作業時間の計測を支援するために、作業の様子を撮影した動画ファイルの各フレームを作業内容に応じて分類することにより、作業時間を推定するシステムを構築した。具体的には、各フレームの対象領域に対して、一般物体認識のアプローチとして数多く用いられているBag-of-featuresにより画像特徴量を抽出し、Support Vector Machine (SVM)により識別処理を行う方式^[4]を実装することで、各フレームを作業カテゴリに分類するとともに、分類結果に基づいて単位時間毎の作業順序を示す作業チャートを生成する技術を開発した。本報告では、検査工程における作業の様子を撮影した動画ファイルについて、各フレームを作業カテゴリに分類し、作業チャートを作成する実験を行ったので、その結果についても報告する。

2. 対象作業

本研究で対象とする作業内容については、アルミダイカスト部品の検査工程において、作業時間の把握を要望する県内企業の作業現場を対象に、部品の目視確認作業とバリ取り作業の作業時間を推定することにした。

正常な部品ばかりであれば、「全作業時間＝目視確認作業時間」となるはずであるが、実際にはバリ取り作業に時間を要し、その時間を無視することが困難な状況となっている。そのため、検査工程における作業時間の把握は生産性向上を図るうえで切実な課題となっている。検査工程の作業現場の様子を図1に示す。図には、守秘義務により画像の一部にフィルタ処理を加えている。



図1 作業現場の様子

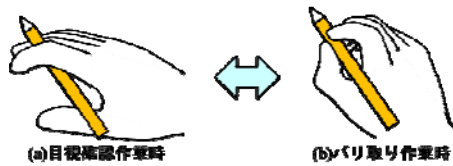


図2 バリ取り工具の把持状態

検査工程では、作業者は椅子に座り、机上に設置された拡大鏡を通して、5cm×2cm×1cm程度のアルミダイカスト部品を検査する。検査の手順は以下のとおりである。

- (ア) 左手外側にある未作業部品置き場から部品を1個掴む。
- (イ) 拡大鏡の下で両手を使って把持し、部品を回転させながら全体を目視し、良品かどうかを確認する。
- (ウ) バリがない場合は、右手外側にある既作業部品箱に部品を放出し、(ア)へ移行する。
- (エ) バリがある場合は、作業開始時から図2(a)の状態 で把持していたバリ取り工具を、(b)の状態に把持し直してバリを削り取り、(イ)または(ウ)に移行する。

本研究では、(イ)を目視確認作業、(エ)をバリ取り作業、(ア)、(ウ)、それ以外の状況をその他の作業として、三つのカテゴリに動画ファイルの各フレームを分類することとした。

3. 画像認識による識別処理

本研究では、画像を局所特徴量の集合とみなすことにより画像特徴量を抽出するBag-of-featuresと、教師あり学習を用いるパターン認識モデルの一つであるSVMにより、動画ファイルの各フレームをカテゴリに分類した。識別処理の流れを図3に示す。以下、詳細について述べる。

3.1 Bag-of-featuresによる画像分類

Bag-of-featuresでは、最初に、画像から局所特徴量を抽出し、ベクトル量子化する。ベクトル量子化においては、コードブックと呼ばれる辞書を用いてベクトル量子化ヒストグラムを生成する。このヒストグラムを特徴ベクトルとして識別器に入力することにより、識別器の構築や識別器による分類が可能となる。なお、本研究では、局所特徴量としてSURF (Speeded Up Robust Features) ^[5]を

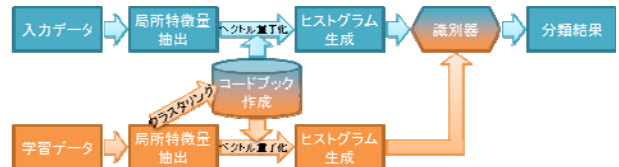


図3 識別処理の流れ

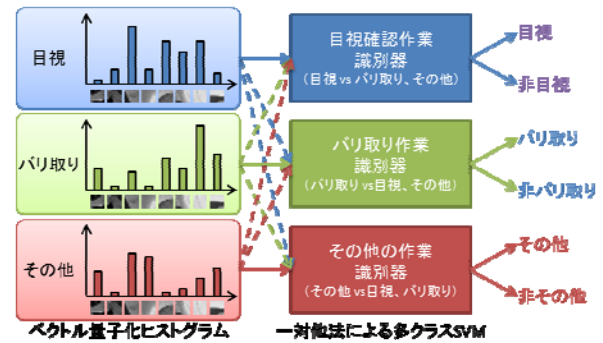


図4 多クラスSVMの概要

使用した。

3.2 コードブックの生成

コードブックとは、学習する全ての画像の局所特徴量を元に生成され、画像の特徴を一つの辞書として表したものである。コードブックの生成にあたっては、学習する全画像から抽出した局所特徴量をK-means法^[6]でクラスタリングし、各クラスターのセントロイド(重心)を要素として構成する。コードブックを構成する各要素はVisual Wordと呼ばれ、Visual Word数が多いほど認識性能が高くなることが知られている。しかし、計算コストも高くなるため、一般的には数千から数万にすることが望ましいとされている。

3.3 ベクトル量子化ヒストグラムの生成

ベクトル量子化ヒストグラムの生成にあたっては、まず、画像中の局所特徴量を抽出し、各局所特徴量について、最も近いVisual Wordをコードブックから求める。次に、対応するVisual Wordへの投票を繰り返し、コードブックに対するVisual Wordの出現頻度を表すヒストグラムを生成する。最後に、局所特徴量の数が画像により異なるため、ヒストグラムを局所特徴量の数で正規化し、特徴ベクトルとして生成する。

3.4 識別器の構成

識別器にはSVMを使用した。SVMは、基本的には2クラス識別器であるため、多クラスに対して識別するには、複数のSVMを組み合わせる必要がある^[7]。そこで、本研究では、一対他法で三つのSVMを構築し、識別器を構築した。各SVMからは、それぞれに結果が出力されるが、本研究では、超平面からの距離により、画像を三つの作業カテゴリの内の一つに分類した。図4に構築した多クラスSVMの概要を示す。なお、各SVMに用いるカーネルとしてガウシアンカーネルを使用した。

3.5 プログラムへの実装

プログラムは、短期間で開発が可能なMicrosoft社の

表1 動画ファイルの記録時間とフレーム数

ファイル	記録時間	フレーム数
Movie-1	35:09.073	63,210
Movie-2	35:09.073	63,210
Movie-3	5:54.821	10,635
Movie-4	35:09.073	63,210
Movie-5	35:09.073	63,210
Movie-6	22:44.830	40,905
計	2:49:15.943	304,380

Visual Studio Expressを使い、C#言語で開発した。また、画像処理技術の実装については、OpenCVをC#言語から使用するため、ラッパライブラリであるEmgu CV^[8]を利用した。

4. 実験

4. 1 実験データの取得

実験に使用する動画ファイルは、図1の作業の様子を、拡大鏡のアームに固定したビデオカメラで撮影することにより取得した。カメラは、SONY製 Action Cam (HDR-AS200V)を使用し、フレームサイズは1920×1080ピクセル、フレームレートは29fps、ファイルフォーマットはMP4形式で動画ファイルに記録した。

作業は、9時から12時10分まで行われ、90分の作業後、10分の休憩をはさみ、再度90分の作業が行われた。動画ファイルは、休憩時間を除く約170分の作業について、一人の熟練した作業員の作業シーンを連続して撮影した。なお、動画ファイルは、1ファイルあたりの最大記録時間が35分9秒であるため、6つの動画ファイルとして取得した。

表1に、取得した動画ファイルの記録時間とフレーム数の内訳を示す。Movie-1からMovie-3が休憩前の作業を撮影したもの、Movie-4からMovie-6が休憩後の作業を撮影したものであり、動画ファイルの数値の順に時間が経過している。

4. 2 学習データの作成

学習データの作成にあたっては、Movie-1の全フレームについて、①目視確認作業、②バリ取り作業、③その他の作業の作業のカテゴリに手作業で分類し、順に①28,011個、②21,601個、③13,598個の計63,210個の画像を学習データとして用意した。各カテゴリの画像例を図5に示す。なお、図には、図1と同様に、画像の一部にフィルタ処理を加えている。

4. 3 前処理と後処理

実験では、処理速度の高速化及び認識性能の高精度化を図るために、3章の識別処理の前後に以下の処理を追加した。

動画ファイルの各フレームは、サイズが1920×1080であるため、そのままプログラムで利用すると計算コストが高くなる。そのため、実験では、前処理として各フレ



図5 作業カテゴリの画像例

ームの解像度を640×360にサイズダウンした。また、目視確認作業、バリ取り作業は拡大鏡を通して行われることから、それらの作業を行う位置はほぼ固定されているため、サイズダウンした画像にROI (Region of Interest)を設定し、更に計算コストを軽減した。実験では、サイズダウンした画像の左上から(180, 180)の位置に幅240、高さ180でROIを設定した。なお、4.2節の学習データは、ROIを設定して取得したカラー画像をビットマップ形式で保存したものである。

また、全ての分類結果を時系列情報に基づき並び替え、誤分類をノイズとみなすことにより除去する平滑化処理を後処理として加えた。平滑化処理では、対象フレームの前後の分類結果が同一で、対象フレームの分類結果が前後と異なる時、対象フレームの分類結果を前後と同一にすることにより、誤分類を除去した。

4. 4 Visual Word数の選定

3.2節で述べたとおり、Visual Word数を多くすると認識性能は高まるが、計算コストも高くなる。そこで、動画ファイルの各フレームを作業カテゴリに分類するにあたり、Visual Word数を選定するための実験を行った。実験では、4.2節の全ての学習データを使用し、Visual Word数を変化させた時のMovie-1の全てのフレームに対する認識率と処理時間の推移を調査した。図6に結果を示す。実線は平滑化処理後の認識率であり、平滑化処理前(識別処理後)の認識率を点線で示す。

Visual Word数が増加するにつれて、上下に変動はあるものの、徐々に認識性能が高くなり、平滑化処理前の全作業のグラフでは、Visual Word数が3,000までは認識率が90%未満であったが、4,000からは90%以上となった。一方で、Visual Word数が増加するにつれて、処理時間が徐々に長くなった。そのため、本節以降の実験で用いるVisual Word数は4,000とした。

4. 5 学習サンプル数の選定

本システムを実際に作業現場で運用する場合、学習デ

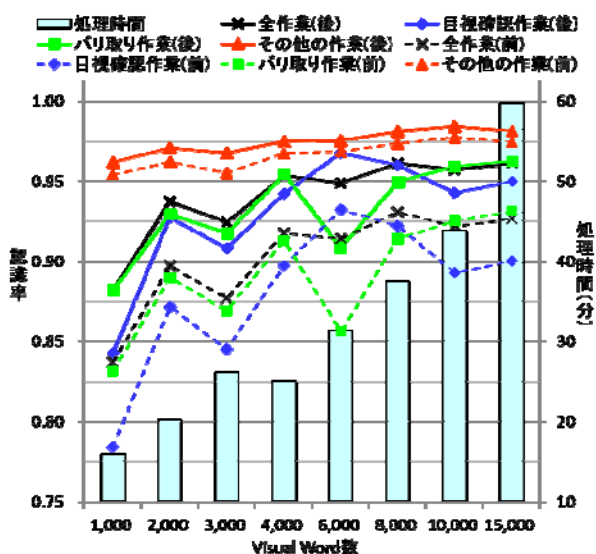


図6 Visual Word数の違いによる認識率と処理時間の推移 ※(後)は平滑化処理後、(前)は平滑化処理前の認識率

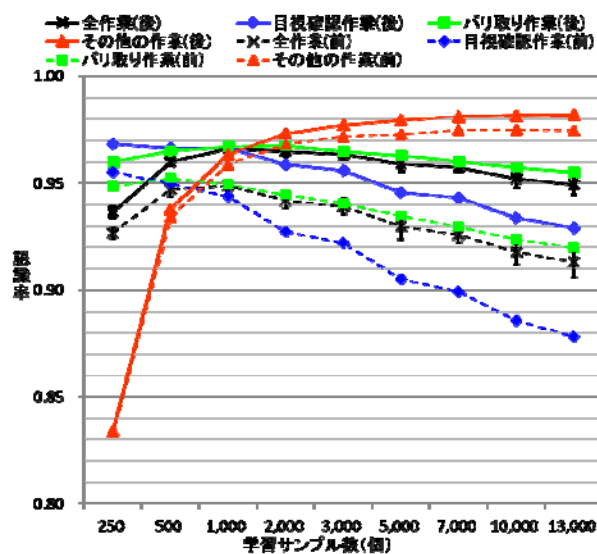


図7 学習サンプル数の違いによる平均認識率の推移 ※(平)は平滑化処理後の平均認識率

ータのサンプル数が多く、事前に学習データを準備（学習データとして使用する画像を手作業で作業毎に分類）する作業の負担が大きいたことが課題となる。そこで、学習データのサンプル数の違いによる認識率への影響について実験することにより、少ないサンプル数でも認識性能を維持することが可能であるかを検証した。

実験では、4.2節の学習データから各カテゴリについて同数のサンプルをランダムに抽出することとし、サンプル数を変更した時のMovie-1の全てのフレームに対する認識率の推移を調査した。なお、ランダムサンプリングによる偏りを評価するために、各サンプル数について10回ずつ実験を繰り返した。また、各実験において、ランダムに抽出したサンプルは全て異なり、同一のサンプルは含まれていない。各サンプル数における平均認識率の推移を図7に示す。実線は平滑化処理後の平均認識率であり、平滑化処理前の平均認識率を点線で示す。

検証の結果、サンプル数が1,000個の時、全作業の平均認識率が、平滑化処理の前後共に、最も高くなった。また、カテゴリ間の平均認識率の差も、平滑化処理の前後共に、最も小さくなった。グラフを概観すると、その他の作業については、サンプル数が増加するに伴い、認識性能が高くなる傾向があるが、目視確認作業、バリ取り作業、及び全作業の認識性能については、低くなる傾向が見られた。この原因としては、サンプル数が増加することにより、その他の作業に関するVisual Wordが増加し、その結果、目視確認作業、バリ取り作業の認識性能を低下させていると考えることができる。これらのことから、撮影した動画ファイルから各作業について1,000個の学習データを収集し、Visual Word数を4,000として学習すれば、十分な認識性能を得ることができると言える。なお、標準偏差の値が小さいことから、ランダムにサンプルを抽出しても、認識性能に大きな影響は与えないと考えら

れる。

4. 6 作業チャートの作成

作業チャートは、時間と作業内容から構成されるテーブルで、作業手順を表す。フレーム単位で出力すれば、時間分解能の高い作業チャートを作成することが可能であるが、識別処理の認識性能がそのまま作業チャートに反映されるため、高い認識性能が必要となる。作業時間の把握を依頼された企業からは、秒単位の作業時間が把握できれば十分であるとの回答が得られているため、本実験では、1秒間隔で分類結果の代表となる作業（代表作業）を選定し、その結果により作業チャートを作成することにした。なお、代表作業の選定にあたっては、1秒間の中で最も多く分類された作業カテゴリを選定した。

実験では、Movie-1から6までの全てのフレームを対象に、識別処理、平滑化処理を行うことにより各フレームを作業カテゴリに分類し、認識率を求めた。また、分類結果から作業チャートを作成することにより正誤を判定し、分類率を求めた。学習データは、4.2節で作成した学習データからカテゴリ毎に1,000個のサンプルをランダムに抽出した。正誤の判定においては、手作業で各カテゴリに分類した結果から作成した作業チャート（正解チャート）と本システムによる分類結果から作成した作業チャート（推定チャート）とを比較した。これらの実験を10回繰り返すことにより認識率、及び分類率の平均値を求めた。なお、各実験において、ランダムに抽出したサンプルは全て異なり、同一のサンプルは含まれていない。平滑化処理前後の平均認識率を表2に、平滑化処理の有無により作業チャートを作成した場合の分類率を表3に、本システムで作成した作業チャートから算出した各作業時間の総計を表4に示す。

表2に示すとおり、学習データのサンプル数を各カテゴリについて1,000個としても、高い認識性能を得ることが

表2 平滑化処理後の全フレームに対する平均認識率（試行回数：10回）※括弧内は平滑化処理前の結果

ファイル	Movie-1	Movie-2	Movie-3	前半	Movie-4	Movie-5	Movie-6	後半	全体
目視確認作業	0.963 (0.940)	0.952 (0.920)	0.936 (0.898)	0.956 (0.928)	0.891 (0.842)	0.905 (0.855)	0.825 (0.770)	0.879 (0.829)	0.915 (0.875)
バリ取り作業	0.969 (0.952)	0.934 (0.908)	0.927 (0.898)	0.950 (0.928)	0.881 (0.844)	0.897 (0.862)	0.902 (0.860)	0.892 (0.855)	0.921 (0.891)
その他の作業	0.965 (0.961)	0.956 (0.951)	0.950 (0.946)	0.960 (0.955)	0.953 (0.946)	0.959 (0.949)	0.948 (0.938)	0.955 (0.946)	0.957 (0.949)
全作業	0.965 (0.949)	0.947 (0.923)	0.936 (0.910)	0.955 (0.934)	0.906 (0.872)	0.923 (0.892)	0.881 (0.842)	0.906 (0.872)	0.928 (0.900)
標準偏差	0.001 (0.002)	0.004 (0.005)	0.005 (0.006)	0.003 (0.003)	0.008 (0.010)	0.008 (0.010)	0.012 (0.012)	0.008 (0.010)	0.005 (0.007)

表3 平滑化処理有りの作業チャートにおける平均分類率（試行回数：10回）※括弧内は平滑化処理無しの結果

ファイル	Movie-1	Movie-2	Movie-3	前半	Movie-4	Movie-5	Movie-6	後半	全体
目視確認作業	0.973 (0.969)	0.967 (0.963)	0.964 (0.963)	0.970 (0.966)	0.942 (0.937)	0.954 (0.946)	0.897 (0.891)	0.935 (0.929)	0.952 (0.946)
バリ取り作業	0.981 (0.979)	0.954 (0.952)	0.951 (0.954)	0.967 (0.965)	0.912 (0.911)	0.934 (0.931)	0.956 (0.957)	0.932 (0.931)	0.949 (0.948)
その他の作業	0.966 (0.970)	0.960 (0.965)	0.942 (0.948)	0.961 (0.966)	0.961 (0.968)	0.971 (0.974)	0.972 (0.975)	0.968 (0.972)	0.965 (0.970)
全作業	0.975 (0.973)	0.961 (0.960)	0.954 (0.956)	0.967 (0.966)	0.939 (0.938)	0.955 (0.953)	0.936 (0.934)	0.944 (0.943)	0.955 (0.953)
標準偏差	0.002 (0.003)	0.006 (0.006)	0.008 (0.006)	0.004 (0.004)	0.004 (0.004)	0.005 (0.006)	0.010 (0.010)	0.004 (0.005)	0.003 (0.003)

表4 作業チャートから算出した平均作業時間（試行回数：10回，単位：秒）※括弧内は正解との差

ファイル	Movie-1	Movie-2	Movie-3	前半	Movie-4	Movie-5	Movie-6	後半	全体
目視確認作業	930 (+4)	956 (+18)	143 (+6)	2,030 (+29)	921 (+22)	822 (+15)	531 (-30)	2,274 (+7)	4,303 (+35)
バリ取り作業	735 (+5)	685 (-8)	126 (-1)	1,546 (-4)	576 (-27)	508 (-15)	477 (+13)	1,561 (-29)	3,107 (-33)
その他の作業	444 (-10)	469 (-10)	86 (-5)	1,000 (-24)	613 (+5)	780 (0)	357 (+17)	1,750 (+22)	2,750 (-2)
計	2,110	2,110	355	4,575	2,110	2,110	1,365	5,585	10,160

できた。括弧内に平滑化処理前の平均認識率を示したが、平滑化処理前後で全作業に対する平均認識率が2.8%高くなったことから、平滑化処理を後処理として用いることは効果が高いと言える。しかし、休憩前後で認識率に差があること、時間の経過に従って認識率が低下するとともに標準偏差が大きくなる傾向があることから、均一な認識性能やより高い認識性能を必要とする場合には、これらのことを考慮した学習データの選定方法を検討しなければならない。

表3の作業チャートの平均分類率では、表2の平均認識率よりも高い結果となっていることから、1秒間隔で代表作業を選定することにより、識別処理における作業カテゴリへの誤分類を効果的に解消していると考えられる。特に、表2のMovie-4とMovie-6では、平滑化処理後の全作業の平均認識率の差が2.5%であったのに対し、表3の平滑化処理有りの平均分類率の差では0.3%に縮まっている。このことから、1秒間隔で代表作業を選定する作業チャートの分類率においては、僅かな認識率の差の影響は少ないと考えられる。一方、表2では平滑化処理の前後で全作業の平均認識率の差が2.8%であるのに対し、表3では平滑化処理の有無による平均分類率の差が0.2%であり、標準偏差よりも小さい結果となった。このことから、1秒間隔で代表作業を選定する場合、平滑化処理の効果は

無いものと判断できる。

表4では、平滑化処理後の作業チャートの作成結果に基づいて各作業の作業時間を集計したが、平均値ではあるものの35秒以下の誤差となり、作業間の時間割合を把握する上では、十分な結果が得られている。

4. 7 作業チャートの可視化

作業チャートを可視化する方法として、タイムチャート形式で図示した例を図8に示す。タイムチャートとして作業チャートを可視化することにより、作業の進捗状況の視認性が高まるだけでなく、バラツキ度合いも把握することができるようになり、生産管理に有用な情報を提供することが可能になると考えられる。

図9に正解チャートと推定チャートとの正誤の例をタイムチャートにより示す。推定チャートにおける誤分類の殆どは、アのような作業前後の時間のズレであるが、イのような作業の抜けやウのような誤認も見受けられるため、認識性能の向上や代表作業の選定方法を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、検査工程における作業時間を把握するために、画像認識技術による作業分類を行い、分類結果から作業手順を示す作業チャートを作成するシステムを構

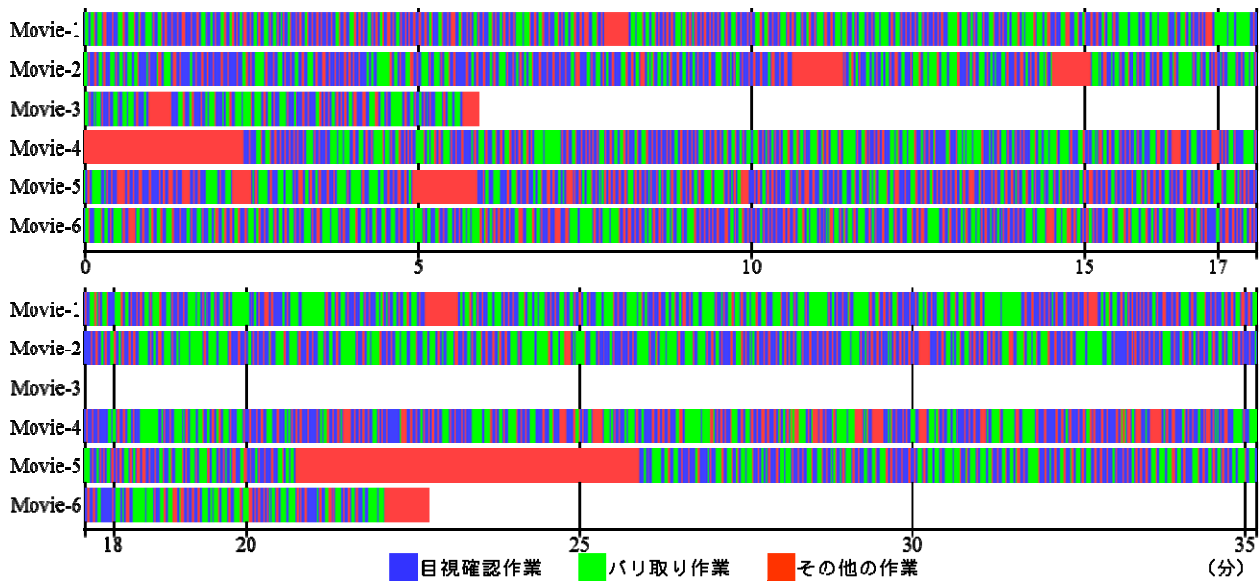


図8 作業チャートの可視化例



図9 作業チャート間の正誤例

築した。画像認識技術としては、Bag-of-featuresにより特徴ベクトルを抽出し、SVMを用いた一対他分類器により入力画像を分類する手法を用いた。実験では、特徴ベクトルの次元数（Visual Word数）や学習データのサンプル数の違いによる認識率への影響を評価し、作業シーンを撮影した動画ファイルの各フレームについて、作業カテゴリに分類するとともに、作成した作業チャートから各カテゴリにおける分類率や作業時間を推定した。

その結果、検査工程における作業内容を目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の三つのカテゴリに分類する識別処理については、Visual Word数が4,000の場合、各カテゴリについて1,000個の学習データを用意すれば、十分な認識性能が得られることが分かった。また、後処理として平滑化処理を行うことにより、認識性能が高められることが分かった。さらに、推定した作業時間の集計結果には誤差が含まれるものの、作業時間の割合を把握する上では、十分な結果が得られることも分かった。これらのことから、本システムは有用性が高いと判断できる。なお、本研究では、動画ファイルを入力データとしたが、約35分の動画ファイルの各フレームの分類にかかる処理時間は約27分（CPU：Core i7-4770K 3.50GHz）であり、動画ファイルの記録時間に比べて短時間で処理することが可能であることから、リアルタイムに取得するカメラ映像についても適用可能である。

今後は、他の作業者についても同様の動画ファイルを取得し、本システムの有効性を検証するとともに、他の作業についても作業分類の可能性を検証し、汎用性を高

めることを検討する。

文 献

- [1] 鈴木準, “IEを活用した現場改善のススメ”, ロジスティクス・ビジネス, Vol.9, pp.20-23, 2005.
- [2] 藤田彰久, “IE の基礎”, 建帛社, 1997.
- [3] 曾賀野健一, 渡辺博己, 棚橋英樹, “IEによる作業工程分析及び可視化手法の研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.13, pp.47-50, 2011.
- [4] G. Csurka, C. Dance, L. Fan, J. Willamowski and C. Bray, “Visual Categorization with Bags of Keypoints”, In Proc. of ECCV Workshop on Statistical Learning in Computer Vision, pp.59- 74, 2004.
- [5] H. Bay, T. Tuytelaars and L. V. Gool, “SURF : Speeded Up Robust Features”, In Proc. of ECCV, pp.404-417, 2006.
- [6] J. B. MacQueen, “Some Methods of Classification and Analysis of Multivariate Observations”, In Proc. of 5th Berkeley Symposium on Math. Stat. and Prob., pp.281-297, 1967.
- [7] 村山善透, 松川徹, 栗田多喜夫, “多クラス識別問題における2クラス識別器の選択”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2009-121, pp.195-200, 2009.
- [8] Emgu CV, <http://www.emgu.com/wiki/index.php>.

超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第2報)

田畑 克彦 久富 茂樹 遠藤 善道

A Phased-Array Positioning System using Ultrasonic Communication (2nd Report)

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 無人搬送車または移動ロボットなどの自律移動装置を誘導するための超音波測位システムを開発している。本測位システムは、自律移動装置上の測位モジュールが、経路上にあるランドマーカの役割をするトランスポンダーと超音波通信を行うことで、相対位置を計測することができる。これまでは走行時に問題となっていた床や天井反射による性能劣化の抑制について検討してきたが、本年度は廊下などの比較的狭い空間を走行することを想定し、壁による反射の影響とその抑制方法について走行経路に注目して検討した。この結果、ランドマーカのある壁とは反対側の壁に沿って走行することにより、壁反射の影響を抑制できることを確認した。

キーワード 測位システム, 超音波センサー, フェーズドアレイ, 移動ロボット

1. はじめに

無人搬送車や移動ロボットの経路誘導を行うことを目的として、経路変更の自由度が高く、低コストな超音波フェーズドアレイ測位システム(以降“フェーズドアレイ”を“PA”と記す)を開発している^[1~3]。

超音波PA測位システムは、ルート設定用のランドマーカ(以降“マーカ”と記す)として、磁気テープなどの代わりに超音波センサーを使用する。誘導方法としては、無人搬送車に搭載する超音波PA測位システム(以降“ソナーシステム”と記す)が、特定のマーカと超音波によるID通信を行って順次マーカを識別し、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測しながら走行することを想定している。位置が不明なマーカも確実に応答させることができるように、ソナーシステムにはSN比の高い先鋭化した超音波ビームを走査できるPA技術を採用している^[1~3]。

昨年度は信号利得を制御する機能を付加することにより、測位距離を10mまで拡張した。さらに床や天井などの反射による性能低下を防ぐためのスポンジガードをランドマーカに実装し、性能低下を低減した。

本年度は屋内環境に存在する廊下に代表される比較的狭い空間で走行実験を行った。この結果、IDが判別できないため、測位できない領域があることが判明した。そこで、廊下モデルを作成し、シミュレーションにより反射波の強度が比較的強いと予想される1回反射波の時間遅れからIDが判別できない領域を予測し、走行実験により確認したので報告する。

2. 超音波PAシステムと課題

本章では本測位システムの概略について説明する。また、移動台車に測位システムを搭載して、廊下の中央を走行した場合の実験結果を示し、廊下走行における測位の課題を明らかにする。

2. 1 超音波PA測位システム

図1は移動台車に取り付けたソナーシステムである。ソナーシステムによるマーカ測位のための信号処理および信号制御用のハードウェアとしてマイコン(STM32F103ZE)及びFPGA(XC3S1200E)を用いている。ソナーシステムとマーカのIDによる相互通信は、2値ASK(Amplitude Shift Keying)を用いてID信号長を7bit、通信速度を625bpsとしている。測位計算は、マイコンの処理負荷を軽減し、高速なハードウェア処理が可能なFPGAで処理させるため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから計測する方法を用いた^[1]。

図2は開発したマーカである。マーカは経路上に多数設置することが想定されるので、コストを意識し、マイコンのみの単純な構成としている。同図右にマーカの上下方向の超音波ビーム指向性を示す。スポンジガードによって上下方向の超音波の伝搬を制限するよう改良している^[3]。この改良は、マーカとソナーシステムの相対位置によっては、直接入射するID信号と床または天井から反射されたID信号の合成によりIDの情報が変化し、IDが認識できない問題を解決するために施している。

表1は使用した超音波センサー素子の主な仕様である。

2. 2 廊下走行測位実験と問題点

図3に示すように、壁際にマーカを設置し、そこから10m離れた地点から、ソナーシステムを搭載した移動台車を廊下の中央を速度約10mm/sで走行させてマーカを測位した。この時のソナーシステムの超音波センサー部の実装高さは50mmとした(図1)。実装高さを低くすると、床

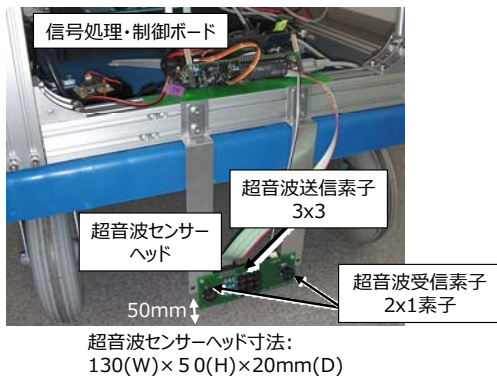


図1 移動台車に実装したソナーシステム

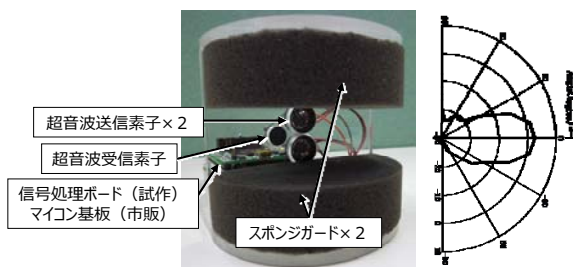


図2 ランドマーカー (左: 外観, 右: 上下方向の指向性)

表1 超音波センサー素子の仕様

	ソナーシステム		ランドマーカー	
	送信素子	受信素子	送信素子	受信素子
製造者	日本セラミック株式会社			
型番	T4010A1	R3216A1	T3216A1	R4010A1
中心周波数	40kHz	32.7kHz	32.7kHz	40kHz
送信音圧レベル	117 dB*	-	113 dB*	-
受信感度	-	-69 dB*	-	-67 dB*
指向性 (-6dB 全角)	±50°	±35°	±35°	±50°

*0dB = 10V/Pa

反射信号による前述のIDを認識できない問題をさらに抑制できる。

図4は廊下を2回走行させて、ソナーシステム(移動台車)の位置を2次元平面上にプロットした結果である。図中の原点をマーカーの設置位置とし、四角で囲った領域が廊下範囲である。本図によれば実際の走行経路より若干右にプロットされていることがわかる。この原因として、温度センサーを基板上に取り付けたため、基板上的ICなどの熱により実際の気温よりも高く計測されて、距離計算に用いるための音速が大きくなっていることが考えられる。また、6000mm以上ではx座標方向に広がりが発生している。これについては、SN比の低下による限界であるため、マーカーを6000mm以内の設置間隔とするか、2マーカー測位による精度向上^[2]が対策として考えられる。

この結果で重要な課題は、測位分布にバラツキがあることである。特に、y値が2000mm超～6000mm超では1000mm～2000mmと比較してプロット数が少なく、デー

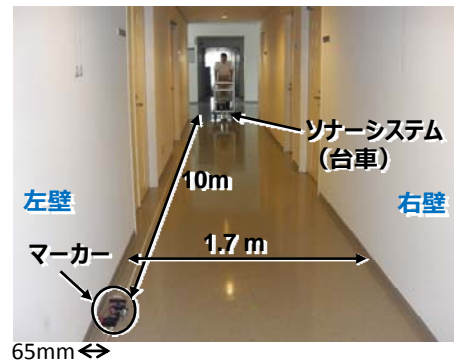


図3 廊下走行測位実験のようす

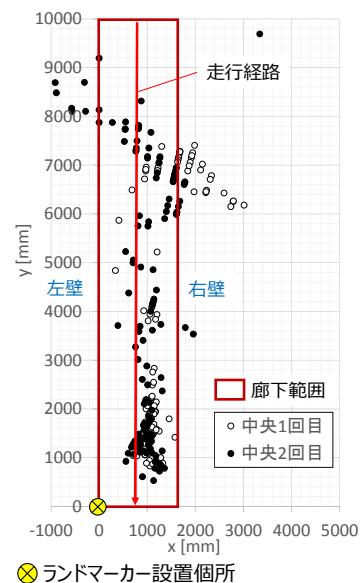


図4 測位結果

タ取得が困難になっていることが確認できる。これは、位置によってソナーシステムかマーカーのいずれかがIDを認識できず、測位が困難であることを示している。実際の運用を想定した場合、このように測位できない位置があると、無人搬送車が自己位置を見失うことになり、経路の逸脱などの重大な問題が発生するので、対策が必要である。

3. 廊下走行シミュレーション

超音波測位時にIDが認識できない現象の要因としては、前述したように直接信号波と床または天井からの反射信号波の合成によりIDが変化し、IDが認識できないという問題がある。今回の原因も、床や天井と同様、壁からの反射信号との合成によってIDが変化し、認識できなかったと予想される。したがって同様の対策が有効と考えられるが、スポンジガードにより左右方向に制限を加える方法は、検出すべき直接信号の範囲も制限してしまうため、有効な対策ではない。そこで、設置高さを低くすることに類似したアプローチを行う。本報では、正常にID信号を認識できる領域を推定するため、廊下モデル

を構築し、数値計算により有効な経路を推定した。

3. 1 シミュレーションモデル

通常、マーカーは通行の障害とならないように、廊下の端に設置する。図3の走行実験では左壁際に設置した。今回は、最も単純なケースを想定し、1回反射がゴーストを生成すると想定する。この場合、図5に示すように直接信号と右壁からの反射信号がランドマーカーに到達する。左壁で反射した信号は2回以上反射しないと到達できないため、今回は考慮していない。

具体的に図5の廊下モデルを構築し、数値計算を行った。数値計算にあたっての前提条件は以下のとおりである。

- 両側に垂直な壁がある幅W[mm]の廊下とし、マーカーは壁際の座標原点Oに設置する
- 移動装置は座標A(x_a, y_a)に存在し、常にy軸（壁）に平行で原点方向の向きで移動する
- 超音波通信が可能な指向性は±45[deg]以内とし、通信可能距離は10000mmとする
- IDが変化して検出できなくなる直接信号と反射信号の時間差dtは1.2msから11.2msである

IDが変化する時間差dtは図6の超音波IDの通信仕様において、第2bit以降に反射パルスが到来する時間差としている。

図5における主な数値計算式は以下のとおりである。直接信号の行路長ℓ_{dir}:

$$\ell_{dir} = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \tag{1}$$

右壁のy軸反射点y_R:

$$y_R = \frac{W \cdot y_a}{2W - x_a} \tag{2}$$

反射信号の行路長ℓ_{ref}:

$$\ell_{ref} = \overline{RM} + \overline{AR} = \sqrt{W^2 + y_R^2} + \sqrt{(W - x_a)^2 + (y_R - y_a)^2} \tag{3}$$

時間差dt:

$$dt = \frac{\ell_{ref} - \ell_{dir}}{c} \tag{4}$$

反射信号の伝搬方位角θ_M:

$$\theta_M = \theta_A = \sin^{-1} \left(\frac{W}{\sqrt{W^2 + y_R^2}} \right) \tag{5}$$

直接信号の伝搬方位角θ_d:

$$\theta_d = \sin^{-1} \left(\frac{x_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}} \right) \tag{6}$$

ここで、(4)式のcは音速[m/s]を表す。

3. 2 シミュレーション結果と考察

図7は前節の前提条件をもとに、数値計算した結果である。図において、黒色の領域は測位が困難な領域であり、領域AはゴーストによりIDが変化する領域、領域Bは指向性が±45deg以上となる領域、領域Cは伝搬距離(行路長)が10000mm以上となる領域である。逆に白色の領域は正常に通信できると予測される領域である。同図において第2章の実験のように中央を走行した場合は、2000mmを超えたあたりから、7000mmまでが黒色の領域にかかっている。これは廊下中央を走行した図4の実験結果とおおむね一致している。

この結果から、マーカーに対して反対側の壁沿い、つまり図の右側の経路を走行すると、白色の領域を走行す

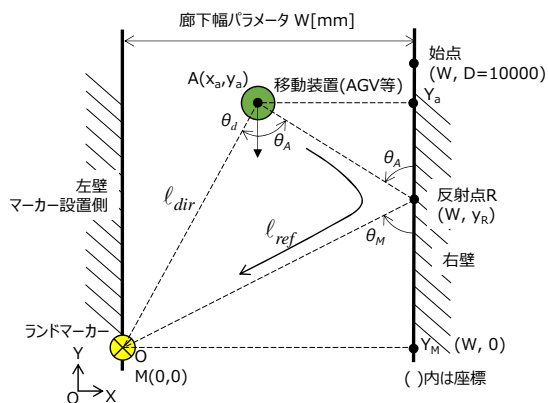


図5 廊下走行の計算モデル

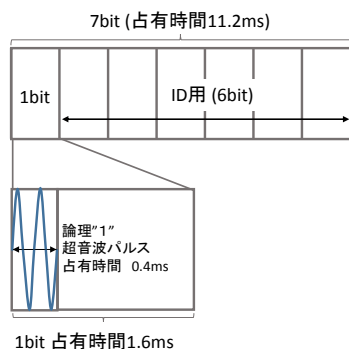


図6 超音波ID通信パッケージ

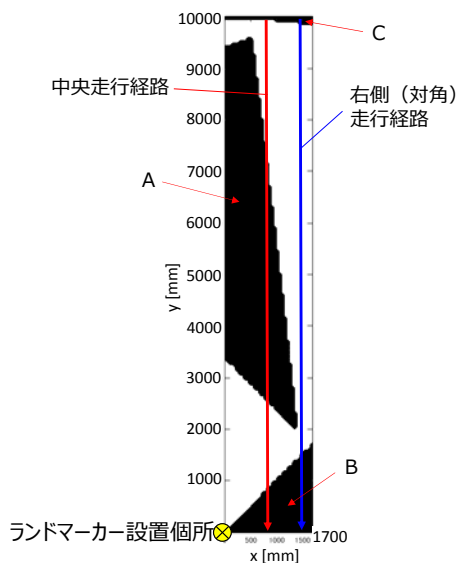


図7 廊下走行のシミュレーション結果

るため、安定した測位が維持できると予想される。

4. 検証実験

前章のシミュレーションによる予測が妥当であることを確認するための検証実験を行った。実験方法は2.2節と同様であるが、図8に示すように、ソナーシステムの実装位置を可能な限り壁際とするため、移動台車の左側に取付けた。壁とソナーシステムの測位基準位置（センサーヘッド中央）との距離は115mmである。

図9が測位結果である。2.2節と同様、右側に測位値が若干シフトしている。また、6000mmを超えるとSN比の低下によりx座標値のバラツキが大きくなる。

ソナーシステムの位置分布を比較すると、y座標値が



図8 廊下走行検証実験の様子

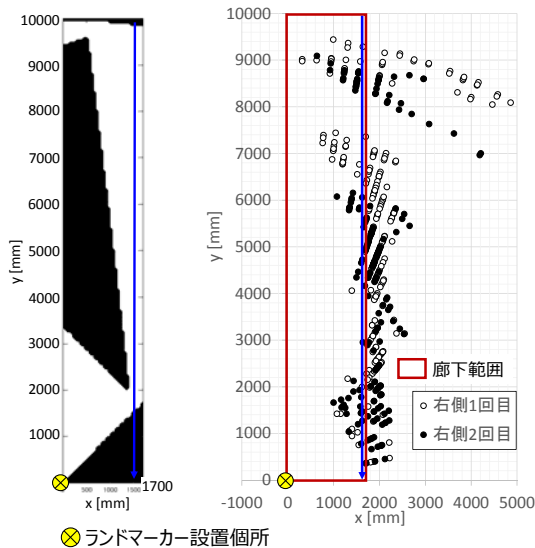


図9 右側(対角)走行時の測位結果

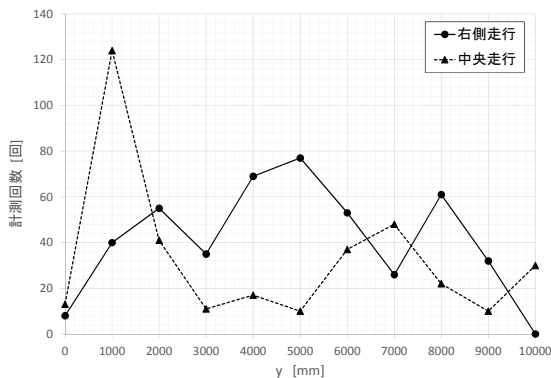


図10 y座標値と計測回数(頻度)の関係

8000mm手前を除けば、どの位置においても安定して測位できていることが確認できる。より結果を分かり易くするため、図10に両者のy座標値と計測回数(2回走行の総和)の関係を示した。横軸のプロットは1000mm間隔であるが、例えば3000mmの場合、移動台車のy座標値が3000mm以上4000mm未満にある場合の計測回数を示している。移動台車はほぼ定速で移動しているため、計測回数が多いほど測定が安定していることを示している。本図より、中央走行時は3000mmを超えると低下するが、右側走行時は2000mm以上では変動は見られるものの中央走行時より安定して計測できていることがわかる。逆に中央走行時は1000~2000mmの計測回数が非常に高い。これは、マーカーが計測視野内に収まっていることと、計測距離が2500mm以内では計測時間が短縮される機能³⁾によるものである。

5. まとめ

超音波通信を用いた超音波PA測位システムを用いて、両側に壁のある廊下において走行実験を行った。この結果、測位が困難な領域が存在することを示した。この原因として、これまでの床および天井反射による影響と同様に、壁反射によりIDが変化し、認識できなくなることを推測した。

そこで、廊下環境をモデル化し、1回反射信号がID認識に影響するとして数値シミュレーションを行った結果、マーカーと反対側の壁沿いルートが反射信号の影響を受けづらい領域であることを予測した。また検証実験の結果、シミュレーションと一致していることを確認できた。よって、両側が壁となる廊下においては、本シミュレーションの方法を用いるなどして走行経路を検討する必要がある。今後は企業への技術移転を進めながら、技術的課題については逐次対応する予定である。

文献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [2] 田畑克彦, 久富茂樹, 岩井俊昭, 遠藤善道, 西田佳史, 組込技術を用いた高性能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第3報)ー超音波フェーズドアレイ測位システムー, 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.15, pp.15-20, 2014.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 遠藤善道, 超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第1報), 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.16, pp.44-48, 2015.

運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術(第3報)

— データ傾向の臨床的所見とデータの蓄積・活用 —

曾賀野 健一 青木 隆明* 渡辺 博己

松原 早苗 棚橋 英樹

A Study on Inexpensive Body Sway Analysis for Rehabilitation Support of Locomotorium (3rd report)

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI* Hiroki WATANABE
Sanae MATSUBARA Hideki TANAHASHI

あらまし 身体の動揺を安価な計測器を用いて定量化し、リハビリテーションの経過観察等に資する情報をPT(理学療法士)等に提供することを目的に、Wii Board (WB) を利用した床反力計測・解析システムの構築を進めている。本年度は、WBに配置された4箇所フォースセンサ情報をBluetooth経由で取得し、足圧中心 (Center of foot Pressure ; COP) の位置や床反力の時間変化等を取捨する独自のプログラムを用いて床反力情報取得実験を行い、股関節症患者のデータ傾向の観察と臨床的所見との確認を行った。さらに、股関節症患者にみられる重要度の高い因子を導き、リハビリ支援に資するデータの蓄積と活用を図るための機能を構築したので報告する。

キーワード 床反力, COP, ロコモティブシンドローム, 股関節機能, リハビリテーション, データベース

1. はじめに

加齢や生活習慣(運動不足, 肥満等)により筋肉や骨等の運動器機能が衰弱するとよろめく等の症状, いわゆるロコモティブシンドローム^[1]を発症する。運動器の中でも特に股関節は骨盤と下肢をつなぐ要の荷重関節であり, 立つ, 歩く等の姿勢や動作を安定して行うために必要な筋肉や骨等で構成されているが, この関節機能が衰弱すると, 更衣, 階段の昇り降り, 車の乗り降り等の幅広い日常生活動作が制限され, 躓く, 転倒等の事故を引き起こし骨折から要介護(寝たきり等)を招く危険性が一段と高まる。

股関節症片側罹患例の特徴として, 患側下肢の片脚支持期において上体の動揺する現象が臨床的所見にみられる。また先行研究において, 股関節症片側罹患例では左右脚で等しい二峰性の床反力形状とならず二峰性の平坦化が観察されるという報告がある^[2]。このことから, 股関節症片側罹患例にみられる特徴は, 床反力の変化や床反力情報から得られる足圧中心 (Center of foot Pressure ; 以下COPという) 位置に現れると考え, 我々はこれまでに床反力情報取得装置にBalance Wii Board (任天堂社製: 以下WBという)を用いた床反力情報取得・解析技

術を開発した。WBの4箇所に配置されたフォースセンサを所定のサンプリングレートで連続的に計測し, Bluetoothを利用してパソコンで受信することが可能である。そして受信したフォースセンサ値からCOP位置や床反力の変化量を計算しCOP位置等の時間的変化を軌跡として確認することができる。

本年度は, これまでに開発した床反力情報取得・解析技術を実際の臨床現場に適用し, データ傾向の観察と臨床的所見との確認を行うことを目的とする。さらに, 股関節症患者群と非患者群のデータ分布を統計的に分析し, 股関節症患者群にみられる重要度の高い因子を統計的手法を用いて導き, この因子に注目してデータの活用(リハビリ支援)を図るための機能を構築したので報告する。

2. 計測対象姿勢と動作

股関節機能を評価する場合, 対象者が日常生活の中で行う姿勢や移動動作の安定性を尺度としており, 臨床現場では日本整形外科学会が定めるJOA SCOREの評価基準に沿って日常生活動作(立位, 段昇降等)や歩行等の遂行度を判定する方法が最も普及している^[3]。

床反力の計測対象とする姿勢・動作の種類及びWBを用いた計測方法については, JOA SCOREに記載されている股関節機能評価基準に準拠する内容とし, 以下のように定め

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

た。

[静的姿勢の保持]

- ・両脚立位姿勢
WBに両下肢を接し、眼の高さで約3m離れた正面の指標を注視し10秒間静止姿勢を保持する。
- ・片脚立位姿勢（左右脚別）
WBに片脚で立位し、眼の高さで約3m離れた正面の指標を注視し10秒間静止姿勢を保持する。

[移動動作]

- ・段昇降（左右脚別）
前方のWB（段差：約5cm）に昇段し、WBから後方に降段する移動を行う。
（例）右脚から昇段する場合
右昇段→左昇段→右降段→左降段
- ・歩行（左右脚別）
3歩以上歩行後、WBに片脚でのり前方へ移動する。
WBとの段差の小さい歩行路を整備した。

3 床反力情報取得実験

股関節症患者が2の姿勢と動作を行った場合に COP位置と床反力にあらわれるデータの傾向を観察し臨床的所見との確認を行うため、股関節症患者を対象とした床反力情報取得実験を実施した。股関節症患者のサンプルは岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部に通院する患者とし、事前に実験参加の安全性や個人情報の秘密保持等を十分に説明した。股関節症患者の実験にあたっては、岐阜大学大学院医学系研究科の医学研究等倫理審査委員会の承認を受けて実施した。

非患者のサンプルは、医療・福祉・介護関連の展示会等の場を活用して募集した。非患者を対象とした床反力情報取得実験ではアンケート調査をあわせて実施し、下肢の疾患（現在の治療状況、既往歴の有無）や日常生活機能の支障に関するチェックを行い、すべての項目に該当がみられない場合は非患者に分類した。

4 股関節症患者のデータ傾向

3の床反力情報取得実験で取得した床反力の時系列情報からCOP位置と床反力の変化に注目した床反力情報の解析例を図1に示す。

図1 (a) は、片脚立位姿勢の保持におけるCOPの軌跡を示している。股関節症患者のCOP軌跡は、非患者と比較して特に側方の動揺が大きい傾向がみられる。図1 (b) は、サンプリング時間ごとのCOP位置の変化からCOPの移動速度を求め、2次元平面上にプロットした分布である。2次元平面上の原点に対する位置をみることでCOPの移動方向を確認することができる。また、床反力の変化量（体

重比）を20段階のカラーパターンを用いて分類表示し、COPの移動方向と移動速度情報に加えて床反力の変化情報を定量的に確認することができる。非患者のCOP移動速度分布が概ね原点付近に集まり床反力の変化が小さく、COPの移動や床反力の変化が緩やかである傾向がみられるのに対し、股関節症患者のCOP移動速度分布では、COPが左側方に複数回、速く移動している傾向がみられる。また、床反力変化の大きい分布傾向がみられることから非患者と比較して震動の大きさを確認できる。このことは、臨床の所見において、患側下肢の片脚立位時に床反力の震動がみられる現象と一致している。

図2は、歩行における床反力の時間変化（以下、床反力波形という）をあらわしたものである。非患者の床反力波形には、着床時と離床時にピークを呈する二峰性の形状を示している様相を確認することができる。これは、軸脚の着床時に荷重をかけて踏み込み、軸脚の離床時に蹴り出しを行うことができていることを示している。しかし、股関節症患者の患側における床反力波形をみると、図2（右）のように床反力変化が小さい様相を示す。これは、患側の単脚支持期（片側の脚で上体を支える時期）初期において患側に荷重をかけることが困難であることから、非患側に働かせる推進力を低減し患側の荷重負担を軽減する影響と、患側の単脚支持期後期において患側に十分な推進力を働かせることができないことが考えられ、患側の床反力波形において二峰性の平坦化が観察される一因と推察される。

5 分析

5.1 特徴量

4の股関節症患者のデータ傾向から、股関節症患者の臨床所見にみられる患側片脚立位時の震動や歩行における二峰性の平坦化の影響は、床反力及びCOP位置の変化に作用すると考えられる。股関節症患者の特徴を定量的に把握するため、股関節症患者群と非患者群のデータ分布傾向を統計的に分析した。分析に用いた主な特徴量と内容を表1に示す。

表1 主な特徴量と内容

特徴量	内容
MX, MY	COP最大振幅（側方, 前後方）
TdX, TdY	COP総軌跡長（側方, 前後方）
SDX, SDY	COP位置の標準偏差（側方, 前後方）
RMS	Root Mean Square ; COP位置の二乗平均平方根
RX, RY	荷重割合（側方, 前後方 各最大値）
TdZ, MdZ	床反力の総変化量, 最大変化量（被験者の体重で標準化） （※）床反力の総変化量は単脚支持期に注目した解析値である。単脚支持期は片脚で体重を支える時期を指し、床反力波形の特徴から解析区間を定めた。

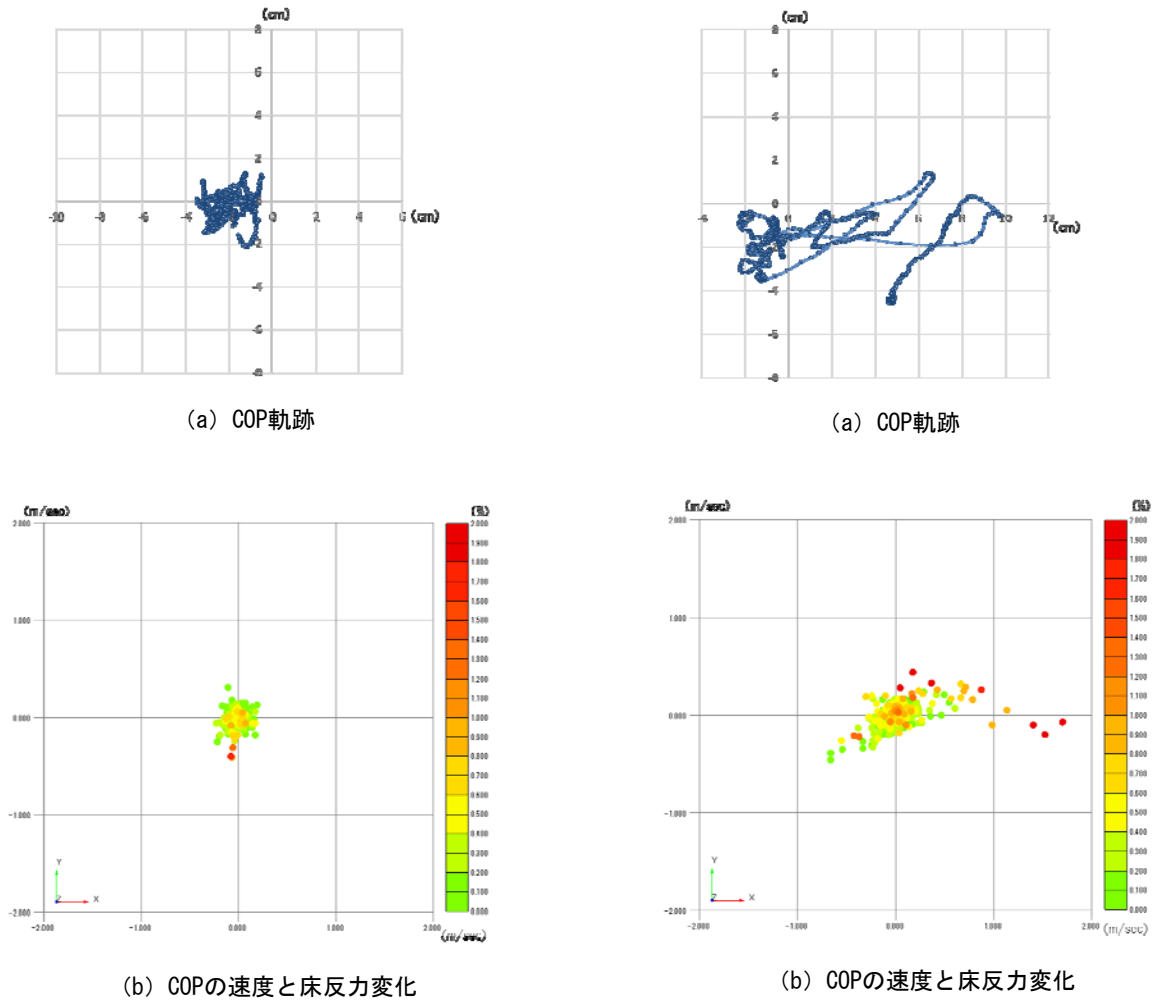


図1 片脚立位姿勢保持中（左脚）のCOP位置と床反力の変化
 (左) 非患者 (右) 股関節症患者（患側）

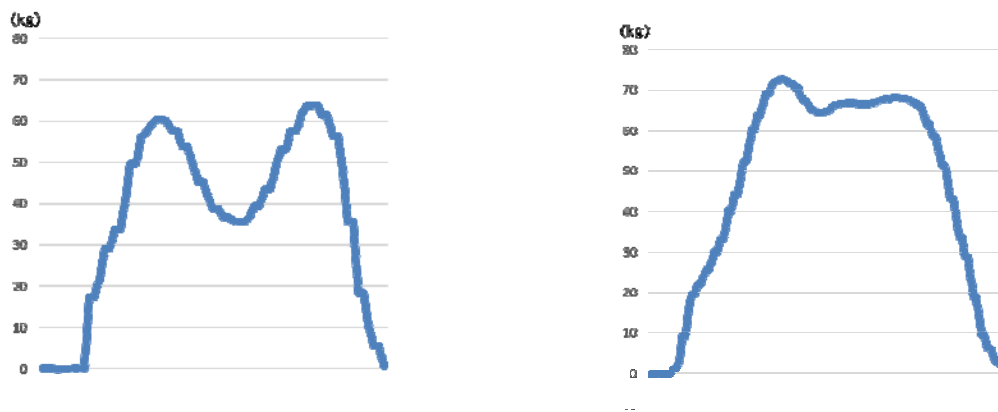


図2 歩行時（左脚）の床反力の変化
 (左) 非患者 (右) 股関節症患者（患側）

5. 2 因子分析

3の床反力情報取得実験により収集したサンプル数は股関節症患者28名、非患者347名の計375名である。股関節症患者群（以下、患者群という）と非患者群（以下、対照群という）のデータの分布傾向を分析し、患者群に寄与する重要度の高い特徴量（因子）を導くため因子分析を行った。因子分析は、観測された変数に対して共通に影響を与えている新しい変数（共通因子）を探索し、探索された共通因子の線形結合によって観測された変数を表す統計的手法で、式1に示すモデルを想定する。分析では、統計解析ソフトJUSE-StatWorks/V4.0を用いた。因子分析の結果、患者群にみられる重要度の高い因子として、TdX（両脚立位）、RX（両脚立位）、TdZ（片脚立位）、TdX（歩行）、TdZ（歩行）が該当した。これらの因子には、臨床所見において患側下肢の片脚立位時に床反力の震動がみられる現象と歩行時の二峰性の平坦化が関係する因子であるTdZ（片脚立位）とTdZ（歩行）が含まれている。

$$u_j = a_{kj}f_k + \dots + \varepsilon_j \quad (j = 1, \dots, p; k = 1, \dots, m) \quad (式1)$$

- u_j ; 観測された変数（特徴量）
- a ; 因子負荷量（固有ベクトル）
- f ; 共通因子スコア
- ε ; 独自因子
- j ; 観測された変数の数
- k ; 共通因子の数

5. 3 差の検定

5. 2の因子分析により導出した患者群にみられる重要度の高い因子の中で、TdZ（歩行）に関して患者群と対照群の分布傾向を示すと図3となる。対照群の立脚期における床反力変化量の平均値は体重比で200%を超えているのに対し、患者群の立脚期における床反力変化量の平均値は体重比で約50%以下であり、対照群の約4分

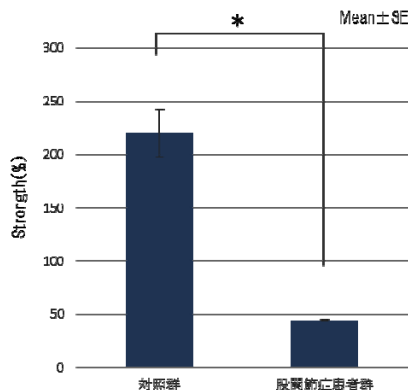


図3 歩行における股関節症患者群と非患者群の床反力総変化量分布傾向 (*:p<0.05)

の1と小さい値を示していることがわかる。

患者群にみられる重要度の高い5つの各因子に対し、患者群と対照群の2群について母平均の差の検定を行った結果、すべての因子について患者群と対照群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。このことは、因子分析により導出した5つの因子が股関節症患者の特徴を定量的に把握する場合に有効なパラメータであることを示唆している。

6 床反力解析情報の可視化

5の分析の結果、患者群にみられる重要度の高い因子に注目することにより、リハビリの分野において股関節機能の回復効果を定量的に確認し、日常生活復帰の目安として活用できる可能性を有する。本研究では、術後、リハビリの経過観察期において、重要度の高い因子を視覚的に確認しやすい機能として、図4に示すようなレーダーチャートを用いて床反力解析情報を可視化する機能を構築した。各特徴量の数値は、非患者群の特徴量の数値から算出した平均値に対する倍率を示しており、非患者群の平均値ラインを「1」として、これより外側に位置するほど股関節機能の低下が疑われることをあらわしている。また、片脚立位姿勢、歩行に関しては左右脚別の特徴量の数値を確認することが可能であり、体重を支える片側の脚の支持機能が低下していないか等、身体の左右の平衡性を視覚的に把握することができる。

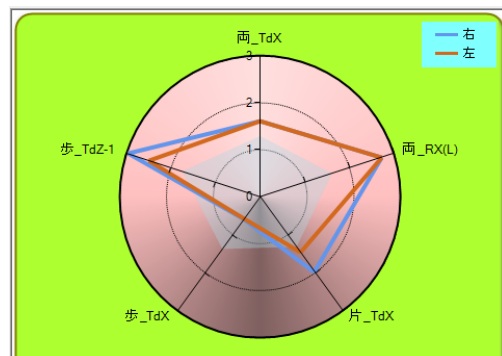


図4 レーダーチャートを用いた床反力解析情報の可視化例

7 床反力解析情報の蓄積と活用

このように、5の分析結果から導かれた股関節症例にみられる重要度の高い因子について、6の可視化手法を用いることにより対象者の股関節機能を定量的に確認することが可能である。この分析・可視化手法は、例えば術後のリハビリ経過観察において運動療法を実施し、股関節機能の回復効果を定量的に確認する際に活用できる。ここで、リハビリ経過観察での活用を図る場合には次のようなニーズがある。リハビリ施設等でのリハビリ期間

は一般的に短く、早い段階で自宅でのリハビリ期に移行する例は少なくないことから、リハビリ施設以外にも通所介護（デイサービス）や自分自身で床反力を測定し、測定履歴情報を参照できることが望まれる。しかしながら、前年度までに開発した床反力情報取得・解析プログラムでは、床反力情報取得・解析プログラムが導入されたパソコン（クライアント側の端末）内に床反力解析情報を格納しており、他のパソコン等から床反力解析情報を参照することはできないため、床反力解析情報（履歴）を自宅等から参照することは不可能である。そして、自宅のパソコン等で測定した新たな床反力解析情報は、リハビリ施設等のパソコン内に格納された情報と独立しているため、新規の測定結果とそれまでの測定履歴を比較するといった活用ができない。このような情報の活用を図るためには、情報の管理機能が必要となる。

そこで、床反力情報取得・解析プログラムを用いて取得・解析した床反力解析情報を格納するデータベース構造を設計・構築した。

RDBMS（Relational Database Management System；データベース管理システム）にはMySQLを用い、このデータベースは、人物属性情報、床反力試験情報（4種類の姿勢・動作試験情報）、床反力解析情報（4種類の姿勢・動作別）等のテーブルから構成され、人物属性情報と床反力解析情報は人物の固有識別情報により関連付けを行っている（図5）。

床反力情報取得・解析プログラムが導入されたパソコン（クライアント側の端末）において人物識別カード等を人物識別情報読取装置にかざすと、人物識別カードに記載されている固有識別情報（コード）を読み取り、ネットワークを経由して床反力解析情報データベースの人物属性情報テーブルに格納されている固有識別情報に該当する人物属性情報をクライアント側の端末で取得することが可能である。また、クライアント側の端末で4種類の姿勢・動作を行った後に得られた床反力解析情報は、ネットワークを経由して床反力解析情報データベースの床反力解析情報テーブルに自動的に登録することが可能である。

8 まとめ

床反力情報取得・解析技術を用いて股関節症患者のデータ傾向（COP位置と床反力の変化）を観察した結果、臨床的所見にみられる患側下肢の片脚立位時に床反力の震動が生じる現象と歩行時の二峰性の平坦化に関係すると考えられる傾向を確認した。

次に、股関節症患者群と非患者群のデータ分布傾向を統計的に分析し、股関節症患者群にみられる重要度の高い5つの因子を導出した。各因子について股関節症患者群と非患者群に対し母平均の差の検定を行った結果、すべての因子について平均値の95%信頼区間において有意

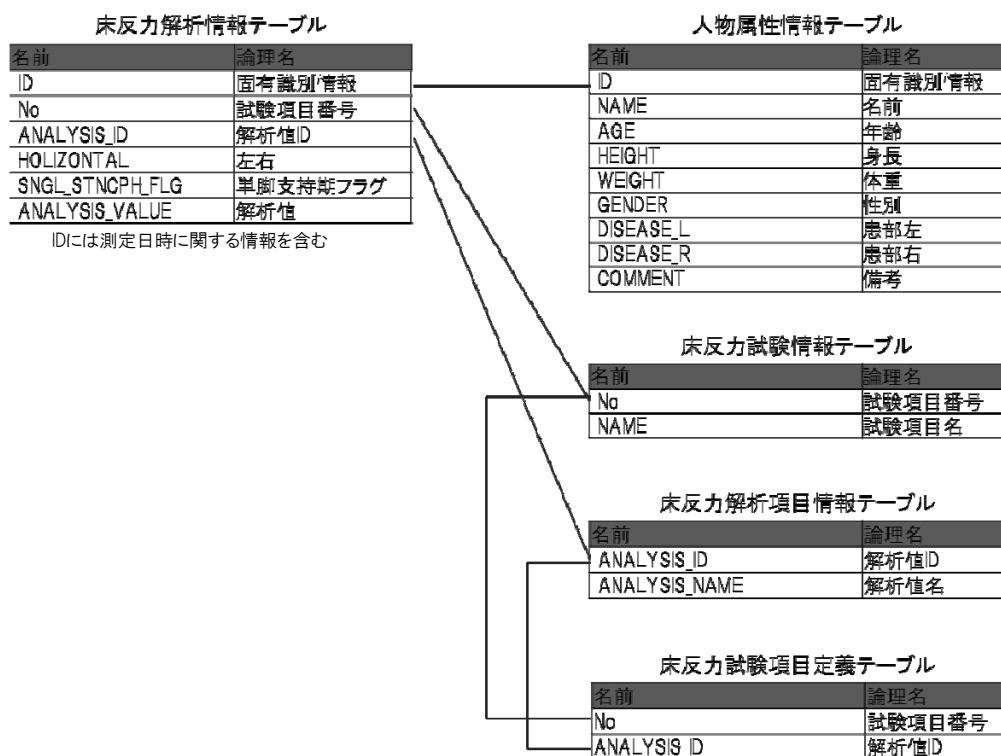


図5 床反力解析情報データベースのER図

水準5%で有意という結果となった。

この5つの重要度の高い因子に注目することにより、術後、リハビリの経過観察期において、股関節機能の回復効果を定量的かつ視覚的に確認することが可能である。さらに、データベースを活用した床反力解析情報を逐次蓄積することにより、リハビリ施設等でのリハビリ期を終え、自宅でのリハビリ期に移行した際にも過去の測定履歴情報を活用することが可能となり、その後の運動療法や健康増進施設等において股関節機能の維持・増進を図る際にも情報活用の幅が広がる。

なお、本稿で分析対象とした股関節症患者のサンプル数は28例であり多いとはいえない。身体動揺評価技術の精度を高めるためには、患者サンプルの確保と医学的知見に基づいたデータ傾向の観察が一層重要となる。

謝 辞

本研究の一部は、平成27年度戦略的情報通信研究開発推進事業（総務省）を受けて実施しました。

岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部の皆様、床反力情報取得実験にご協力いただいた皆様に深く感謝します。

文 献

- [1]日本整形外科学会，“ロコモティブシンドローム”，
<http://www.joa.or.jp/public/locomo/>(2016.3現在)
- [2]吉良秀秋，“股関節障害患者の歩行分析”，日整会誌55，
pp.735-745, 1981.
- [3]日本整形外科学会，“変形性股関節症診療ガイドライン”，南江堂，2008.

情報通信機器による知的障がい者のための 協働支援システムの開発研究(第2報)

藤井 勝敏 窪田 直樹

Development of a Communication Aid for Intellectual Disabled Café Receptionists

Katsutoshi FUJII Naoki KUBOTA

あらまし 特別支援学校における作業学習のひとつのコースである喫茶接客サービスの課題を、タブレットPCおよび無線LAN、プリンタ等の情報通信機器で支援する方法について研究、開発を行う。前報までに、テーブルへの客の誘導から注文確認までの手順を場面ごとに指導し、注文伝票をレシートプリンタで印刷するシステムと、学習者が判断に困った状況に陥った際、無線でヘルプを呼ぶ機能について開発し、岐阜本巣特別支援学校と郡上特別支援学校で実証実験を行った。今年度はこれらのシステムを使用する特別支援学校からの要望に応じていくつかの機能拡張を行ったので一括して報告する。

キーワード 特別支援学校, 接客, 作業学習, タブレットPC

1. はじめに

平成27年2月、岐阜県議会レストラン(岐阜市)を1日改装し、カフェ和(なごみ)として喫茶サービスを提供する学外実習が行われた。ホールでの接客および厨房での作業を担うのは岐阜本巣特別支援学校高等部食品加工班の生徒らで、これまで学内実習で磨いてきた接客技術を披露していた(図1)。

その中において、当研究所が開発したタブレットPC用接客支援アプリ^[1](図2)を使いながら接客対応し、レシートプリンタから出力される伝票を持って厨房伝達するまでを成し遂げる生徒がいた。この生徒は他の生徒が行っているようにクリップボードを片手に持ち、ペンで手

注文を伝票に書き取ることが困難であったが、タッチパネル入力とプリンタ出力による支援によって、スムーズに接客業務を全うできるようになった。

この例のように、支援に有効な情報通信機器を選定、導入し、必要があればシステム設計、開発を行って目的を達成することへのニーズは大きい。専門的な知識と技術が要求されるため、特別支援学校の中だけで実施するのは困難と言わざるを得ない。

そこで平成23年度以降、当研究所では、NPO法人パッチャルメディア工房ぎふ、IAMAS、ソフトピアジャパン、日本福祉大、県教育委員会および県内特別支援学校の関係者等から成る自主研究会に参加し、タブレット端末や無線通信等のICT技術を特別支援教育の現場に直接展開する取り組みを続けている。

今年度は、昨年度まで実証実験を行ってきた岐阜本巣



図1 カフェと学外実習(於県議会レストラン)

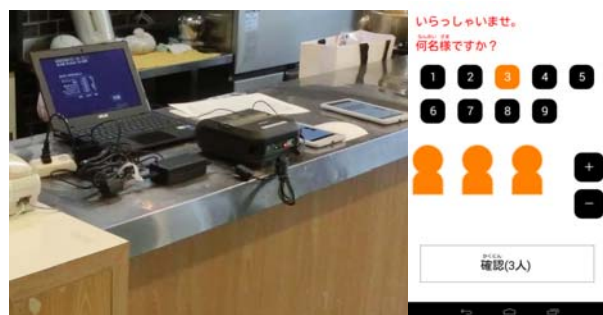


図2 接客学習支援システム装置および開始画面

特別支援学校および郡上特別支援学校からの要望への対応に加え、教員向けセミナー等で要望の多かったiPad版アプリの開発についても検討したので報告する。

2. 接客学習支援アプリ

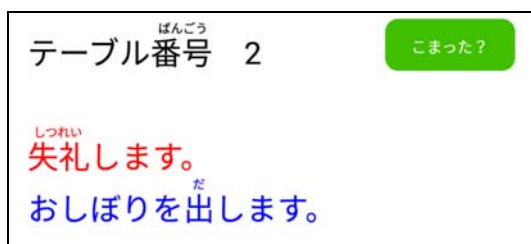
当研究所で開発した接客学習支援アプリは、喫茶店型店舗のホール係業務を対象に、来店時の声掛けから席への案内、水、おしぼりの提供、注文の聞き取り、注文内容の確認、伝票の印刷と厨房係への伝達までの所作を、タブレットの画面上にガイダンスすることで学習を支援するアプリである^[2]。当初は、接客学習の初心者による使用を想定していたが、教員による売上の集計作業を省略するため、紙伝票からの置き換えを図る要望があり、昨年度は接客支援を簡略化して迅速に入力できる「エキスパートモード」と呼ぶ動作モードを開発、提供した^[1]。

今年度は、アプリの機能やメニュー内容は据え置き、画面のレイアウトに関する教員、生徒からの要望への対応を実施している。

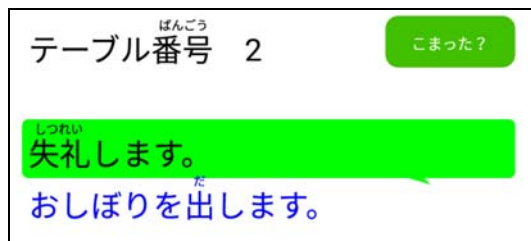
2. 1 吹き出し表現

接客の手順案内で、発話すべきセリフの部分を、色違い文字ではなく、「吹き出し」で表示してほしいとの要望に対応した(図3)。従来、「いらっしゃいませ」等の発話する内容を赤字、おしぼりを出す等の動作内容を青文字で表現する形で区別していたが、画面に書いてある文字をすべて読み上げてしまう生徒がいるために、指導教員からの要望で行った改良である。

吹き出し表現は、例えば漫画やコミュニケーションアプリ等の中で発言を表すシンボルとして使用されており、生徒らも日常で見慣れているのではないかと教員の発案である。実際にこの表現方式に切り替えたアプリは特に違和感なく生徒らに受け入れられた様子だったが、初

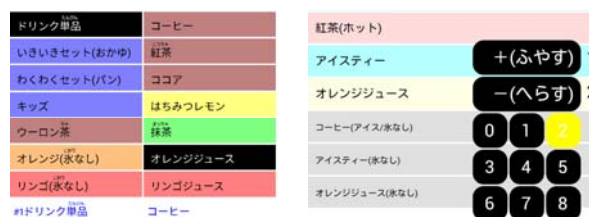


(a) 従来の表示：「失礼します」は赤字



(b) 吹き出し表現

図3 セリフ表現方法の改良



(a) 従来のメニュー入力ボタン(左岐阜本巣, 右郡上)



(b) 新しいメニュー入力ボタン(左岐阜本巣, 右郡上)

図4 画像付きボタン

心者の読み間違い抑止に効果があるかどうか今年度は比較できなかった。

2. 2 画像付きボタン

客の注文をシステムに入力するためには、客の言葉を耳で聞きとり、タブレット画面上のボタンをタップする操作を行う。従来、この画面構成は生徒が最終的に紙伝票へ移行できるように、図4(a)のようにオーダー伝票と同じレイアウトで並べたテキストで表現していた。今回、単に伝票記入の代替技術というよりも、より多くの生徒に、まずは接客業務を体験させたいとの学校からの要望に基づき、分かり易く親しみやすい入力インタフェースとして、商品のイメージに合わせたイラストや写真を使った入力ボタンを試験的に実装した(図4(b))。

岐阜本巣特別支援学校の冬メニューは、ドリンクとモーニングのセットメニューが選択可能で、ドリンクの種類が多い特徴がある。画像付きのボタンを配置するにあたり、個々のボタンをできるだけ大きく表示できるように、ボタンの個数を減らすため、例えば「キッズサイズのリンゴジュースを氷抜きで」と指定する方法を、「キッズ」ボタン、「リンゴジュース」ボタン、「氷抜き」ボタンの3つを選択してから「入力ボタン」を押す入力形式に変更した。

従来は「キッズ」ボタンと「リンゴ(氷無)」ボタンの2つを順不動で押せば1件分の登録ができたのが、今回の変更で1件の登録に最大4回画面を押さなければならなくなった。この仕様変更は、今年度から接客支援アプリを使用する生徒には特に問題にならなかったが、従来版で接客を練習した経験がある場合に混乱が生じたとの報告があった。そのため、文字ボタンを並べた旧型入力方式に、いつでも切り替えられるように配慮した。

郡上特別支援学校では商品写真を縮小したものを使用し、画像付きボタンを押した回数分、その商品が画面上の所謂「カート領域」に整列する入力方式としている。



図5 電子レジスタとレシート

注文を取り消す場合は、カート領域上の商品をタップすると1つずつ取消しの扱いになる。

3. レジアプリ

特別支援学校の作業学習では、喫茶サービス以外にも工芸品や縫製品等の制作販売も行われており、特に外部の一般客が来店する喫茶店に、物販コーナーを併設することがある。学習目的の仮設店舗であっても、金銭を扱う以上、レシート(領収書)の発行や個々の商品ごとの売上集計報告など経理処理が発生するが、郡上特別支援学校では、現金を扱うことも学習の一環として生徒に任せようと取り組んでいる。ちなみにこれまでは、既製のタブレットアプリを使って生徒が売上計算を行い、その脇で市販の教員が電子レジスタで領収書を打ち直して発行する方法で対応してきた(図5)。

同校では、昨年度から接客支援アプリを導入し、注文伝票印刷およびドリンクに限って売上集計をしてきたが、今年度はこのインフラを活用して、物販を含めて扱うことができるレジ担当専用の品代計算アプリ(レジアプリ)の開発が要望された。

レジアプリの画面構成および操作手順は、過去に当研究所が開発したもの^[3]と同じ、商品入力、合計金額提示と現金預かり、釣り銭表示の3画面構成(図6)であるが、伝票印刷システムのインフラを利用することで、下記の拡張を行っている。

- (1) 品名と単価をPCサーバで管理し容易に編集できる
- (2) 釣り銭表示と同時に領収書(図7)が印刷される
- (3) 緊急支援要請ボタン(こまったボタン)が機能する

なお、売上集計のタイミングについては、従来はドリンク注文伝票印刷時点で集計していたが、このアプリを開発したことにより、レジアプリから領収書を発行した時点に変更しており、喫茶サービス以外の商品売り上げもシステム上で統一集計できるように改善した。

このアプリを導入したことにより、閉店後の伝票集計作業が不要になり、作業学習本来の目的である、当日の接客業務について振り返り(反省)を行う時間に余裕ができたと教員、生徒らから好評である。



(a) 商品入力画面



(b) 合計金額提示と現金預かり画面



(c) 釣り銭定時画面

図6 レジアプリ



岐阜県情報技術研究所
レジスタアプリ・デモ
TEL 058-379-3300

印刷サンプル

またの御来場を
お待ちしております
ありがとうございました
2016年 3月14日 9:49 #1

ホットコーヒー	内¥320
ランチョンマット	内¥250
ミックスクッキー	内¥100
**小計	¥670
(内税)	¥49
個数	3個

現計	¥ 670
お預かり	¥1000
お釣り	¥ 330

「接客体験学習支援システム」 企画・開発・岐阜県情報技術研究所 2015年

図7 出力レシートの例



図8 iOS版の喫茶接客学習支援ツールの画面(一部)

4. iOS版接客学習支援アプリ

本研究では、アプリ開発、配布および更新の簡便さから、接客アプリ用にAndroid、印刷サービス用にWindowsを利用してシステムを構築している。接客アプリについてはスタンドアロンで動作する試供プログラムも開発し、昨年よりGoogle Playで公開中である。しかし、特別支援学校等の教育機関ではiOS搭載端末が多く採用されている実態があり、Android版接客学習支援アプリ(試用版)と同様なiPad版アプリを求める声が多かった。

そこで当研究所で「喫茶接客学習支援ツール」の名称でiOS搭載端末向けアプリケーションを開発し、今年3月からApp Storeで試験公開を始めた(図8)。このiOS版はAndroid版アプリと同様に、接客業務の手順を案内し、注文確認後は画面上で内容を一覧できるほか、Android版にはない以下の機能を拡充、改良している。

- ① 画像つきメニューボタンの搭載
- ② 接客手順ステップの表示バー(画面上部)および直前のステップ表示
- ③ テーブルレイアウト編集
- ④ 伝票イメージ確認

またユーザインタフェースデザインについても一般的なiOS用アプリの様式に合わせた実装に変更している。iOS版もAndroid版試供アプリと同様、誰でも無料でダウンロードして使用することができるが、伝票印刷や「困ったボタン」機能は公開していない。

5. その他の取り組みと次年度の予定

本書で報告した以外に、岐阜本巣特別支援学校にWi-Fi環境下で動作するネットワークカメラとスティック型PCを使った遠隔モニタ画面のセットを導入し、フロアの様子を厨房内で見られる環境を整えた。元々は郡上特別支援学校の喫茶で7インチタブレットの遠隔モニタ画面

を設置したところ厨房が活動しやすくなったという事例を参考に、電源等の配置の都合により、厨房の冷蔵庫の上に23インチモニタを置くことにした。

同校では厨房係とフロア係は兼任せず、厨房とフロアは区切られた構造であるため、厨房の中にいると店内の様子が分らない。しかしモニタを設置してからは手が空いたときにフロアの様子を気にする様子が見られた。今後、厨房係を担当していた生徒が接客業務にも興味を持ってくれるのではないかと関係者らは期待している。

また、新規協力校で立ち上げるため、他校で使用中のシステムと同じ機材を用意して持ち込んだが、期待した支援効果は得られなかった。その要因としては、学級の規模が小さく指導教員が少ないこと、生徒が必要とする支援の内容が他校と異なることなどが考えられる。28年度に新規開校する羽島特別支援学校でも導入検討する予定があり、導入をスムーズにするためのガイドラインやマニュアル作りが必要であると考えている。

このほか今年度は、接客支援アプリのカスタマイズ方法の講習会をバーチャルメディア工房ぎふの協力で実施しており、本システムのさらなる普及を目指していく。

文 献

- [1] 藤井勝敏, 遠藤善道, “情報通信機器による知的障害者のための協働支援システムの研究開発(第1報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第16号, pp.30-33, 2015.
- [2] 藤井勝敏, 棚橋英樹, “タブレットPCを用いた福祉分野支援アプリの開発(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第15号, pp.41-44, 2014.
- [3] 藤井勝敏, 棚橋英樹, “タブレットPCを用いた福祉分野支援アプリの開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第14号, pp.39-40, 2013.

豚肉色評価装置の開発

浅井 博次 松原 早苗 吉岡 豪*

Development of Pork-Color Digitization Device

Hirotsugu ASAI Sanae MATSUBARA Go YOSHIOKA

あらまし 養豚では、種豚の育種改良の効率化、豚肉品質の維持・向上のため、簡単・迅速に豚肉の肉質を客観的かつ定量的に評価することが求められている。肉色は食肉を評価する重要な要素であるが、現状、目視による主観評価によって行われており、個人差などによる評価のばらつきが懸念される。そこで、デジタルカメラを用いて対象の豚肉を撮影することで肉色を客観的に評価することが可能な携帯型装置の開発を目指す。本報では、装置開発に向けて行った基礎検討について報告する。

キーワード 豚肉, 肉色, 定量化, デジタルカメラ

1. はじめに

養豚業では、飼料の高騰などにより生産コストが上昇している中、景気低迷などを受け良質で安価な豚肉への需要が高まっている。良質な肉を安定供給するためには、おいしい赤肉(脂肪やスジが少なく赤く見える肉の部位)の効率的生産を可能とする種豚の育種改良が重要である。現状、肉質評価の多くは格付員の主観評価によって行われている。しかし、人による評価の場合、個人差や体調・気分・疲労などによる評価のばらつきが懸念されることから、客観的な方法による評価が望まれている。そこで本研究では、客観的データに基づいた効率的な育種改良推進に向け、デジタルカメラを用いて対象の豚肉を撮影し、撮影した画像を評価することで食肉の品質評価で重要な肉色を客観的に評価可能な装置の開発を目指す。

2. 肉色について

2. 1 『色』の計測

色の最も特殊な点は、「この色は〇〇色だ」と決定する要素の中に、人の感覚である『視覚』が含まれている点である。色は「人がその色をどんな色だと感じるか」に基づいて数値化されている。光源から物体に照射された光が、物体によって反射・透過される。その光を人が目を通して知覚することによって、人が物の色を認識する。つまり、物の色は、光源、物体、視覚によって決定され、「環境A下においてBという方法で観測した時の色」として認識される。そのため、「人が認識する」色は、光源、背景、見る方向、観察者、対象の大きさなど、実に様々

なものの影響を受け、見え方が大きく変化する。

色を数値化し、比較・評価に活用するためには、色を観測する条件を統一することが非常に重要となる。また、その色が「ある条件下での色」であることに留意する必要がある。

2. 2 食肉品質の評価指標：肉色

食肉の品質は、食肉を食べた時に視覚、嗅覚、触覚および味覚を通じて感じる総合的な感覚(=食味性)によって評価される。食味性は、(1)肉色、(2)保水性、(3)テクスチャ(肉の物性全般、主に硬さ)、(4)フレーバー(香りと味)の4成分に大別される^[1]。肉色は食味性を決定する重要な要素の一つなのである。実際、消費者が肉を購入する際に肉色を重視している^[2]。また、食肉流通で使用されている豚枝肉取引規格^[3]の中でも、肉色は豚肉の肉質を評価する項目の一つとして規定されている。後述するが、肉色はPSE肉、DFD肉などの異常肉との間に明確な相関があることが分かっている。つまり、食肉の品質評価と流通戦略の双方において、肉色は非常に重要な要素なのである。

2. 3 異常肉と肉色

赤肉の異常として代表的なのがPSEとDFDである。PSE肉はむれ肉、ふけ肉、ウォータリーポークとも言い、肉色が淡く(Pale)、柔らかくて締まりがなく(Soft)、水っぽい(Exudative)肉のことである。と殺前に強いストレスにさらした際に発生し易い。一方、DFD肉は肉色が暗く(Dark)、硬く(Firm)、水気がない(Dry)肉のことである。と殺前の長時間絶食、輸送、と殺前の取扱いなどによる疲労やストレスの影響で発生すると言われている。豚肉を肉色で評価すると、PSE肉とDFD肉は両端に位置しており、肉色による選別が容易である。肉色がPSEとDFDの間にある豚肉の中にも、RSE (Red-dish-pink, Soft, Exu-

* 岐阜県畜産研究所

dative), PFE(Pale, Firm, Exudative), PFD (Pale, Firm, Dry)などの異常肉が存在している。これらの異常肉は、肉色と表面状態から判別するのが一般的である。

このように、肉色は異常肉の判別に使用されている。しかし、豚肉は産地や品種によって肉色が大きく異なるため、肉色に対する1つの基準ですべての豚肉から異常肉を的確に判別することはできない。対象とする豚の産地・品種に応じて肉色の評価基準を設定する必要があり、そのためにも、わずかな色の違いを客観的に評価する方法が望まれている。

2. 4 肉の変色

肉は、時間の経過等により色が変わっていくことが知られている。と殺直後は紫がかった赤色であるが、その肉を切って空気に触れさせておくと、だんだんと鮮紅色に変化(ブルーミング現象)する。更に長時間放置し続けると、鮮紅色から茶褐色に変化(メト化)する。そのため、と殺後一定時間が経過し、ブルーミングによる色の変化が収まった時に評価するなど、肉色の変化が抑制された条件下で評価することが肝要である。

2. 5 肉色評価の現状

豚肉の肉色検査は、主に図1に示す畜試式豚肉標準肉食模型(ポークカラースタンド(PCS))を用いた視感評価により行われている。6段階の色模型と比較し、1(淡色)から6(濃色)の値で色が数値化される。育種改良等による肉質の向上に伴い、ほとんどの肉が3(理想色)と評価されるようになったこともあり、近年では小数点以下1桁までの数値で肉色を評価するようになってきている。

しかしながら、視感による評価では、検査者の主観や体調による感覚のずれによる影響を排除できず、評価結果の信頼性・客観性に問題がある。特に、小数点以下の値は見比べる色見本がないため、検査者によるバラつきが大きいものと思われる。また、人の目には色順応という自動調節機能があり、連続して色比較判定作業を行うと判定性能が低下する、という点にも考慮が必要である。

JIS Z 8723(表面色の視感比較方法)には、色比較手順の他、作業面の色や作業空間内面の色などの観察作業環境が詳細に規定されているが、屠畜場などの評価現場で規格を満たす環境を構築するのは容易ではない。また、豚は牛と比べて一日に処分される数が多いため、屠畜場では迅速に多量の検査をする必要がある。検査環境構築だけでなく、検査の作業量・作業時間の点からも、信頼



図1 ポークカラースタンド

出典：豚枝肉取引規格の概要^[3]

性の高い肉色検査の実施は非常に困難であり、迅速・簡単に行うことのできる客観的肉色評価方法が望まれている。

3. 肉色評価装置の検討

3. 1 開発方針

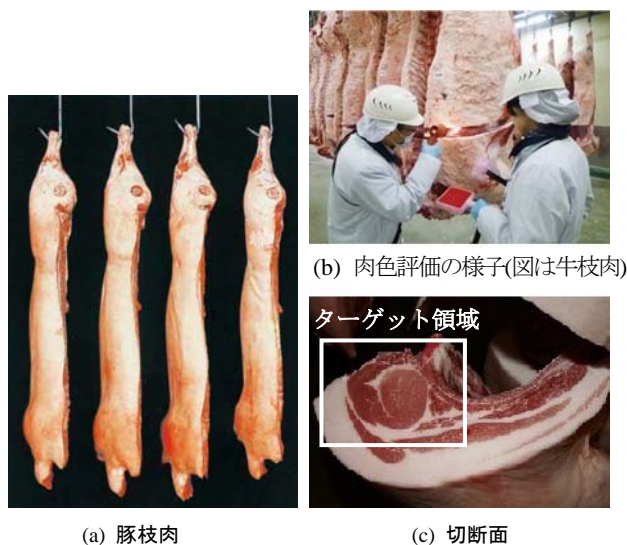
本研究では、効率的な育種改良を可能とするための肉質評価を指向していることから、屠畜場での利用を想定した肉色評価装置のシステム化の検討を進めている。屠畜場では色彩計測の専門家でない作業者が大量の検査を実施しないといけないことから、作業者の注意に頼ることなく、無意識に撮影条件の変動を抑制できる装置が望ましい。そこで、色を変化させる要因を極力排除し、検討すべき項目を限定することで、装置開発の効率化を図る。

3. 2 装置概要

開発する装置では、枝肉を切り開いた切断面(図2(b), (c))をデジタルカメラで撮影し、ロース芯領域の肉色を定量化する。また、上記方針に従い、以下の通りとする。

- ① ロース芯全体を大きく撮影できるように、撮影サイズを図中四角で囲った15cm×20cm程度とする。
- ② 光源変動を抑制するため、撮影環境を筐体で覆うことで疑似的な暗室を作り出し、その中で撮影が可能な携帯型システムとする。
- ③ 撮影対象までの距離や撮影方向を固定するため、装置を切断面に接触させて撮影する。
- ④ 切断面の凹凸の影響を抑制し解像度が均一な画像を取得するため、切断面と対向する方向から撮影する。

解体された枝肉は、図2(a)のように吊り下げられており、自重等による切れ目拡大懸念もあり、切断面はあまり



(a) 豚枝肉

(c) 切断面

図2 枝肉

出典：(a) 豚枝肉取引規格の概要^[3]

(b) 牛枝肉取引規格の概要^[4]



図3 装置イメージ

り広くない。この限られた空間に装置を差し込んで撮影する必要があるが、切断面鉛直方向に撮影に必要なカメラとの距離を確保できないため、④を実現できない。そこで、ミラー型の撮影機構を採用し、くさび形の外形とすることでカメラから切断面までの距離を確保しつつ、装置の高さ方向のサイズを抑える（図3）。

3. 3 使用光源

LEDは従来照明と比べ耐久性が高く、経時変化も小さいことから、画像認識用照明として広く利用されている。しかし、色認識用照明として考えると、素子間の特性にバラつきがあること、素子温度の変化によって明るさや色ずれが発生することなどの特徴について、配慮が必要である。前者は、素子選別により対応可能である。また、後者は、放熱設計を適切に行うことで対応する。

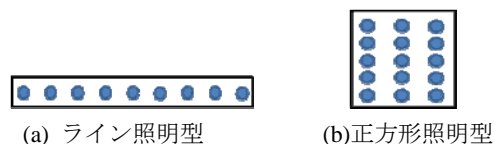
一般的な白色LEDの発光分布は青色成分が極端に強く、赤色成分が弱いという特徴があることから、上記特徴による微小な特性の変化が色認識に影響する可能性が考えられる。そこで、一般の白色LEDと比べ分光分布がなだらかに連続しており、一部の波長で突出した強度を有することが少ない高演色型白色LEDを採用する。演色性とは、基準光源（太陽光（CIE昼光）または黒体放射）下とくらべて対象光源下での色の見え方がどの程度変化するかを示す指標である。先述の通り、色の見え方は光源によって変わるため、必ずしも基準光源下での色の見え方にこだわる必要はない。しかし、高演色型白色LED光源の使用により人が認識している色に近い画像が記録できることで、肉色評価結果である数値と対象肉画像とを直感的に紐付け可能となるなどの効果も期待できる。

また、採用するLEDはCOB(Chip On Board)型とする。従来の砲弾型LEDは指向性が強く、直接照射による輝度ムラは大きな問題であった。しかし、COB型LEDは狭い場所にLEDがたくさん敷き詰められており、単体で面光源を構成できる。高輝度で影ができにくく、指向性も120°程度のもので発売されており、少ない光源数で輝度ムラを抑制した照明が可能になる。

3. 4 光源配置

本装置により色を評価したいのは、点ではなく領域（ロース芯）であるので、対象領域の輝度ムラを極力少なくすることが肝要である。そこで、簡易な試作装置を製作し、照明の当て方について簡単な検討を行った。

使用した照明は、約1.65cm間隔に9個のLEDを並べたライン照明と、LEDを5行3列で15個並べた正方向照明（縦1.0cm間隔、横1.65cm間隔）の2種類である（図4）。それぞ



● 図4 使用した照明

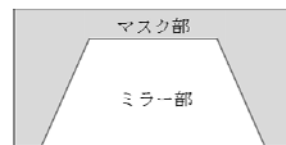


図5 反射ミラーのマスク例

れ、手で持って任意の場所から照射し、撮影面に設置した標準白色版を撮影した画像によって評価を行った。

反射用ミラーとカメラは、15cm×20cm程度の領域を撮影できるよう配置した。また、反射用ミラーは、ロース芯の撮影に必要な領域以外にマスクを施し（図5）、周辺環境に依存した不要な光の反射を抑制した。

検討した結果、留意すべき2つの知見が得られた。1つ目は、装置内部素材の反射特性による違いが撮影領域の輝度ムラに大きな影響を与えることである。図6(a)は照明を装置内部上面に設置した反射板に向け、撮影領域へ間接照射を行った時の画像である。左下から中央上部に向けて見られる線は反射ミラーのマスク部と非マスク部の境界によるものである。輝度ムラの大きさは照明を向ける向きにも依存するが、容易に知覚可能な輝度ムラが発生していることが分かる。

もう一つは、撮影対象からの反射により照明の映り込みが発生することである。図6(b)は標準白色版のかわりに、正反射が発生しやすいアクリル板を設置して撮影した画像であるが、照明がクッキリと映り込んでいるのがわかる。2種類の照明をさまざまな位置に配置して確認してみた結果、映り込みを排除するためには、装置中央から横方向に20cm以上照明を離す必要があることが確認できた。

得られた知見に基づき、ライティングは装置内部の素材・形状の影響を受けにくい直接照射とすることに決定する。照明の形状・個数については、次年度制作予定の一時試作装置を用いた検討で決定していく予定である。一時試作では、今回得られた知見に基づき、光源配置、装置内部の反射板配置等を柔軟に変更し評価・検討できるよう、あらかじめ内部の保持機構を用意しておく予定である。



(a) 反射特性差による影響 (b) 照明の映り込み

図6 輝度ムラ評価例

3. 5 肉色定量化手法

PCSは流通している豚枝肉を色差計で計測したデータに基づき、食肉および養豚関係者の意見を参考にして作製されている^[5]。設計当時からかなりの時間が経過し、先述のとおり流通している豚肉の肉色が当時から変化しているものの、実測に基づいて設計されていること、現在も活用されている基準であることなどから、豚肉の肉色を表現する基準として有効であると判断した。設計値のL*a*b*は文献^[5]に記載があるが、現状確認のため分光測色計（コニカミノルタ製CM-3600d）でPCS(2個)を計測した。結果を図7に示す。

計測したサンプルではa*, b*で均一に値が変化していない箇所が見られ、PCS2-3間、4-5間の色差が小さくなっていった。この傾向はSCI(正反射光込み)、SCE(正反射光除去)でも同様である。PCS表面には豚肉と質感を合わせるために細かな凹凸が入れられているが、これが計測サンプル間の計測値に差を生じさせている主要因であると思われる。設計値とは大きく異なっているものの、L*a*b*の各値がほぼ単調変化している傾向が確認できたことから、実際に流通しているPCSの色である本測定結果を参考に、肉色を定量化するための基準色を決定することとした。決定した基準色票の設定について、図8に示す。

L*a*b*色空間内でPCSカラーが分布する方向を基準軸とし、基準軸に直交する2軸を任意に設定、対象とする豚肉の肉色が分布すると思われる領域を囲うように合計7色を基準色として設定した。基準軸では、流通している豚肉の肉色がほとんどPCSカラーの中央に集中していることを考慮し、測定結果をもとに、PCSカラーの両端であるPCS1とPCS6、および中心の色を基準色として選定した。その結果、基準軸における色票間の色差は13.135

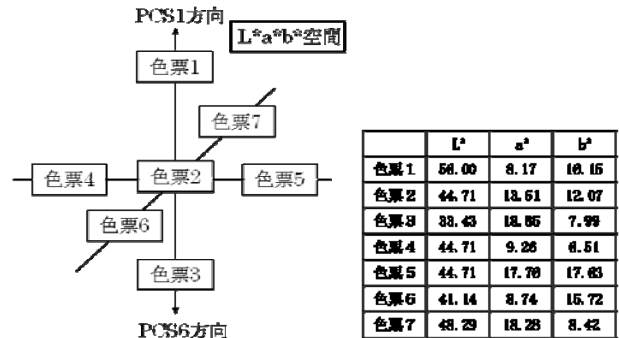


図8 基準色票の設定

となった。基準軸と直交する軸の色票については、基準軸より色のばらつきが小さいことを想定し、中央の色票2からの色差が7となるよう設定した。

基準色票7枚は評価ターゲットであるロース芯全体の領域をカバーできるサイズとして、無光沢A4サイズのもの財団法人日本色彩研究所より手配した。入手した色票を格子状に12点、分光測色計（コニカミノルタ製CM-3600d）で計測し、空間的な色のバラつきを評価した。その結果、すべての色票において色差が0.52以下（計測径4mm、および8mm）であった。この値は色の許容差を色差値で表した基準の一つ、AAA級許容誤差色差（色差の範囲0.4~0.8、厳格な許容差の規格を設定できる限界）の範囲内であることから、入手した色票のすべての領域を均一な色であるものとして扱うことが可能であると考え、基準色票7枚を制御された環境下で撮影した撮影データをもとに、線形補間により肉色を推定・数値化する方法を採用することとする。

4. まとめ

本稿では、豚肉の肉質評価における客観的な肉色定量化の必要性を整理し、肉色定量化のために行った基礎検討について報告した。次年度以降は、基礎検討結果に基づいた試作を行い、実際の肉を使って評価検討を進める予定である。

文献

- [1] 安井勉, “肉質に関する若干の問題”. 日本畜産学会北海道支部会報第28巻第2号, p23-32, 1986
- [2] “「食肉に関する意識調査」報告書”、公益財団法人日本食肉消費総合センター、平成26年度
- [3] “豚枝肉取引規格の概要”、公益社団法人日本食肉格付協会、平成26年7月
- [4] “牛枝肉取引規格の概要”、公益社団法人日本食肉格付協会、平成26年1月
- [5] 中井博康ほか, “豚標準肉色模型の作製”, 畜産研究所研究報告29号, p69-74, 1975

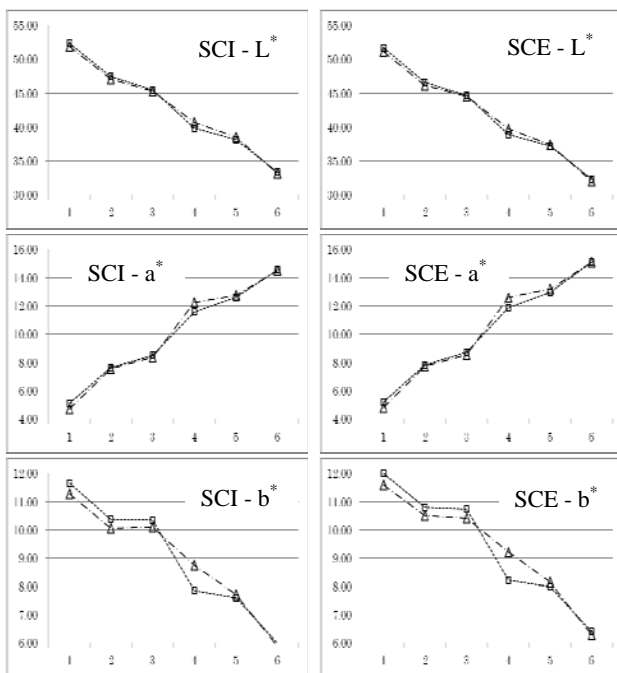


図7 PCS色計測結果 (横軸: PCS)

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(第7報)

藤井 勝敏 田畑 克彦 横山 哲也 久富 茂樹 遠藤 善道

Development of a Small Weeding Robot "AIGAMO ROBOT" for Paddy Fields

Katsutoshi FUJII Katsuhiko TABATA Tetsuya YOKOYAMA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)を有機水稲栽培の農家等へ一定期間貸し出し試用してもらい試みを行った。今年初めてアイガモロボットを使用する農家に対しては、移植シーズン前に機械の取り扱いおよび移植の留意事項について説明し、移植後の初回運転時にも操作実演を行ったが、日々の運用については技術者が立ち会わず農家に任せることとした。今年度、県内外の複数の圃場で同時に実証実験を行ったところ、機械の操作方法に関する問い合わせや故障の修理対応などでの課題が明らかになった。また、本除草機械の発売を望む農家が増えてきていることを踏まえ、アイガモロボット研究の完成状況について、本開発事業のまとめの意味を込めて整理する。

キーワード 水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)、実証実験、故障対応

1. はじめに

水田用小型除草ロボット(以下、ロボット:図1)は、平成15年から研究開発を進めてきた、土壌攪拌を主原理とする水田雑草の生育抑制を目的とした自律移動型ロボットである^[1]。平成20年度からは農業機械メーカーのみの産業株式会社(岡山県赤磐市)と共同で実用型試作機を開発し、現地実証圃での走行実験を重ねながら、機械系、制御系の技術開発を行ってきた。平成24年度には製品型に最も近い最終形を完成させ^[2]、平成25年度からは農業研究機関や農業法人を対象とした実証実験を行う一方で、メーカーでは量産化に向けた部品選択、設計変更、コストダウンを、当研究所では実証実験の実施と不具合および現地要望の洗い出し、制御ソフトウェアの改良を行ってきた^[3]。

特に最近3年間の実証実験は、ロボットを初めて使用する農業者が、設計意図どおりに扱うことができ、期待される除草効果が得られるかを評価するため、平成25年



図1 水田用小型除草ロボット『アイガモロボット』

度と26年度は郡上市、下呂市、恵那市の農業法人と埼玉県の研究機関を対象に、平成27年度は高山市および新潟県十日町市、福島県福島市、岡山県備前市、島根県大田市の農業法人、研究機関、大学校へ機械を貸し出して実施した。これらの新規実証圃に加え、平成22年度から実施している羽島市、岐阜市柳津町、中津川市での実証実験も継続している。

ロボットは、水稲の移植直後から1か月半程度の期間、具体的には5月下旬から7月中旬を中心に一斉に稼働する。このように全国複数個所で実証実験を行うことで、将来、ロボットが製品化されたとき、開発者が立ち会わない状況でユーザがロボットをどのように扱い、もし不具合が発生した場合、どのように対応するのかどうかを確認する意図があった。本報では、多くの実証実験を通じて現地で発生した不具合や問い合わせへの対応について報告する。

また、雑誌や新聞等、様々なメディアでロボットが取り上げられる機会が増えた結果、全国の農業者からロボットに関する問い合わせが増えてきている。こうした期待に応えるため、製品化に向けて取り組んでいる所であるが、ロボットの機能や使い方、除草効果について、誤った期待をされていないか懸念している。

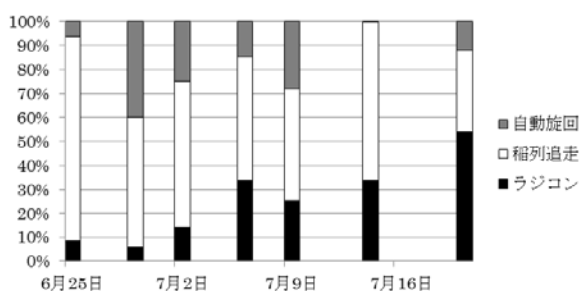
そこで、本年度を持ってロボットの開発は一旦、節目となることから、本書では改めてロボットの機能と技術開発状況についてまとめ、今後の予定について述べる。

2. 現地実証実験

本年度の実証実験の実施状況を表1に示す。いずれの圃場についても、今年度はロボットと十数ページの取り

実証圃所在地	新潟県	福島県	島根県	岡山県	岐阜羽島	岐阜柳津	岐阜高山	岐阜中津川
実施区分	新規	新規	新規	新規	継続	継続	新規	継続
取扱説明	5/20	5/28	6/8	6/23	-	-	5/8	-
使用開始	6/9	5/27	6/8	6/22	6/14	6/25	6/4	5/20
使用終了	7/13	7/21	7/9	7/22	7/20	7/20	6/30	7/23
延運転日数	24	13	9	8	12	8	11	22
総走行時間	54:00	5:08	10:09	14:39	15:34	7:19	19:56	16:58
うちラジコン時間	12:18	2:36	7:42	6:52	4:05	1:14	9:04	7:42

表1 本年度のロボット実証圃と実施スケジュール等



※ドライブレコーダの不調によりデータ欠落日がある

図2 継続実証圃のロボット運転状況推移

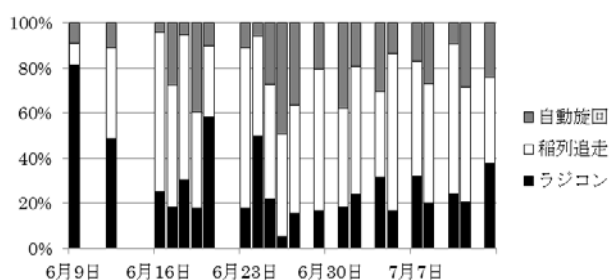


図3 新規実証圃のロボット運転状況推移

扱い説明書の引き渡しに合わせて操作説明を行っただけで、どのような広さでいつからいつまで作業を行うかについては、現地の農家の判断に委ねた。

その結果、従前から実証実験に参加している農家では全くトラブルなくロボットを使いこなしており、自動運転についても順調であったと報告を受けている。実際、この実証圃でのロボットの操作状況を解析したところ、図2のように初回はラジコン操作時間が極めて少なく、徐々に増え、自動運転が難しくなった頃にロボットの仕様を終了する傾向が見られた。運用ごとに自動運転が難しくなる原因には、活着しなかった苗による欠株の増加や成長した苗にロボットが引っかかり始めることなどが現地の観察により推定される。

これに対し、今年度初めてロボットを使うところでは、当初からマニュアル通りの自動運転が成功せず、ラジコン操作を行う時間比率が高くなる傾向が見られる。これは圃場に苗を移植するとき、枕地の開け方や稲列終端の揃え方などがロボット運転用に十分配慮されていなかったことが原因と推察され、初回使用後に補植等や枕の地均しによる改善を指導したところ、ラジコン運転比率が大幅に低下している(図3)。

2. 1 使用法の問合せと故障対応

新規実証圃に関しては、まだロボットの取り扱いに慣れていないこともあり、使用開始期には充電の仕方やプロポの操作方法など基本的事項の他、実証圃で運転したところ苗列に沿って走らない場合の対応策などの問い合わせに電話やメールで対応した。その後は徐々にロボットの運転に慣れたのか、使用方法に関する問合せは無くなったが、1, 2週間目ごろに、ギアの損壊1件とフレーム破断2件の故障連絡があった。ギア損壊については研究所に部品があったため、故障機を返送してもらい、交換後、即時送付で対応した。破断については、修理に時間がかかる見込みで、その時期はロボット除草が最も効果的な時期でもあり、修理のために除草作業を休むことを避けるため、故障連絡を受けた即日代替機を発送すると同時に、故障機を直接返送してもらう対応を取った。代替機は旧型で使い方や走行性能が実証機と異なり、除草作業への影響を抑えるために、故障機を修繕し現場に送り返すことを優先し、予備機の返却については繁忙期を過ぎてから依頼した(図4)。

この結果、実証実験は滞りなく継続できたが、今年度は8か所のうち2か所で同時に発生しており、仮にロボットが商品化され全国で販売された場合、この方法では十分な数の予備機を準備していなければ、すぐに対応不能になる恐れがある。現実的には故障の際にユーザもしくは販売店等で容易に部品交換できるような設計にするなどの対策を検討すべきであるが、従来の農業機械とは性質が異なる精密機械であることから、実用化へ向けての大きな課題の一つとして残している。

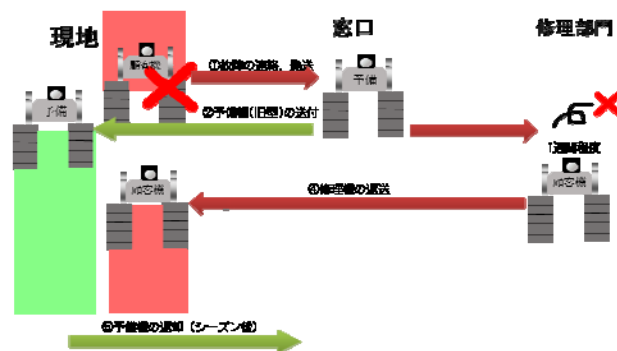


図4 故障時のロボットの移送

3. ロボットの使用方法

これまでの研究開発および実証実験を通じて、ロボットを使った水田除草方法については一定の目的が立った。本章では、この機械の想定ユーザである稲作農家の目線でのロボットの標準的な使用方法を示すとともに、実証圃での独自の工夫についても言及する。

3. 1 自動運転および調整

既報のとおり、ロボットは搭載するカメラで撮影した圃場内の画像を認識し、稲列に沿って走行し、枕地で自動的に旋回する機能を有している。操作者は、手持ちまたはラジコン誘導により除草作業を開始する最初の列にロボットを配置し、本体パネルボタン(図5)またはラジコンの特殊操作(ステアリングを回しながら電源スイッチON)で「最初に旋回する左右の方向」を指令するだけで、ロボットは自動運転を開始する。

枕地および稲列が適正に整備された圃場であれば、旋回後に苗が見えなくなるまで操作者の介入なしに自動運転が継続できることを実証実験で確認している。しかし、移植直後から無調整で終始全自動運転できることは稀で、大抵の場合、作業を期待する条から外れたロボットをラジコンで復帰する操作と、その間に潰してしまった苗の補植作業が発生する。

このとき、ロボットが自動運転を失敗するに至った原因が推定できれば、微調整により次回走行以降の成功する可能性があるが、微調整にはロボット本体の調整と圃場の調整の2つの方法がある。ロボットを調整するために、パソコンまたはタブレットPCと無線通信して操作するソフトやアプリ(図6)も開発したが、その性質上、機械技術者向けで、一般ユーザに使わせることは想定し難い。

一方で、圃場の調整とは苗の補植または移植のことを言い、長靴を履いた圃場作業者ならば日常的に行っている作業のバリエーションである。ロボットには、直近の運転中に行った判定結果をもとに、条の長さや条間移動量、終端の判定基準等を変動させて、走行中の圃場に適



図5 本体パネルボタン(最新型機)

応する機能がプログラミングされており、この性質を利用すると、枕地から1メートル程度の範囲内で条間隔を揃えるか、微増または微減するように苗を移動させて調整するとともに、この範囲を若干密植気味にすることで苗が小さい時期にも終端判定と再進入動作の成功可能性を向上させることができる(図7)。

このほかにも、植え替えによる調整には圃場条件に応じて様々な可能性が考えられる。ロボットを長く使い続けられれば利用者が独自ノウハウを開発できることも、このロボットを一度使うと繰り返し使いたくなる魅力の要因になっているのではないかと考えている。

3. 2 株間の除草効果

ロボットの走行痕はクローラベルトにより田面を削っていることにより除草効果は高く、その反面、濁水効果のみに頼る条列の株間については残草量が多いことが指摘されている。この点については、チェーン式の株間除草機構を取り付けて走行することで、一般的なチェーン除草法と同様な効果が得られる。

ただし、チェーンを付けて走行する場合、藻類や浮草が絡まるとモータに過負荷がかかるだけでなく、苗を倒伏させた上に藻類が載って枯死させることがある。広い圃場の一部で藻が発生し始めた初期には気づきにくいた



図6 ロボット調整用アプリ画面

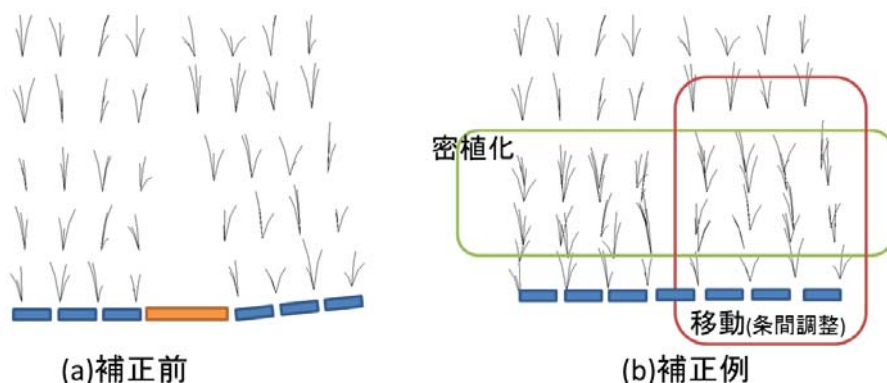


図7 移植と補植による圃場の調整例

め、運転中は、よく圃場を観察する必要がある。

藻類が発生した場合でも株間の除草効果を落とさたくない場合には、藻類を集めにくいチェーンを使うこともできる^[3]。このチェーンを使う場合、自動運転モードでの旋回動作では機構部と干渉しないように制御しているが、ラジコンで超信地旋回(その場旋回)を行うとクローラベルトに巻き込まれる恐れがあるため注意を要する。

なお、株間の除草効果については、有機水稲栽培では一般的な成苗移植、深水管理の条件で、定期的にロボットで濁水していれば、収穫時期の段階でほとんど雑草が残らないことが実証実験で確認されている。また、株間に活着し成長したヒエは、ロボットが列ごとに走行する様子を見ていれば遠方からも容易に見つけられるため、泥が軟らかく、ヒエの本数が少ないうちに圃場に立ち入って手取り除去するのが確実である。ロボットの開発初期には、圃場内に足跡や土塊があると転覆や斜行の原因となるため立ち入りを制限していたが、最新型のロボットでは足跡程度の穴ならば走行に支障ないように改良しているので、雑草が目立ってきたら翌年に種を残さないように圃場に立ち入って手で抜くことを推奨している。

4. ロボットの今後について

昨年度から今年度に掛けて、バッテリーの大容量化、ラジコンプロボのデジタル化、メンテナンス通信ポートの無線化等の改良を行い、実証実験を通じて寄せられた要望に対応する一方で、現在のシステム構成、制御方式で製品化に向けたコスト試算をメーカー内で進めている段階にある。現時点では、ある程度まとまった数を生産すると仮定しても、農家向けに行ったアンケート調査で購入を検討するとされる製品価格30万円前後での製造、販売は実現困難と試算される。今後はさらなるコストカットを検討する一方で、除草ロボットの新たな付加価値を発信していく必要性を感じている。

たとえば、一般的な田植え機や稲刈り機が毎年1度しか使われないのに対し、除草ロボットは1つの圃場で10回以上稼働させる機械である。小型で軽量である特徴から、軽トラックへの積み下ろしが容易で、乗用型機械の積み下ろしと比べて安全であり、圃場内走行中は勿論、圃場への進入、退出の際、転覆、転落などの重大事故の心配もない。乗用でないことに加え、低出力・低作用であることから、子供にも安心して作業を任せることができ、農作業体験を通じて、そこで稲作を続ける将来を想像す

るきっかけにもなる。

そして最も重要な意義は、食の安全、安心を得るとともに、圃場内外の魚や水生昆虫等の生物多様性を取り戻すことを目的に、除草剤を使わないという選択を取った場合に、雑草対策として前時代的な肉体労働に頼る方法ではなく、クリーンで作業的にも安全な方法を実現したことである。

除草ロボットの目指してきた方向性は「肉体的に辛くなく、精神的に快い雑草防除の実践」であり、将来的には革新的で現代的な除草方法を普及することによって、農業を魅力的な職業として次世代に伝えることが最終目標である。当研究所では12年間にわたる研究開発を通じて多くの技術課題を解決し、残る課題はメーカーによる事業化、製品化となったが、近い将来、全国の水田をロボットが走行し、そこに子供たちが集まり、そこに自然に世代間のコミュニケーションが生まれることを期待したい。

謝 辞

本研究は、農林水産省農林水産業・食品産業科学研究推進事業「機械除草技術を中核とした水稲有機栽培システムの確立と実用化」の一分担として実施しました。

本年度の実証実験にご協力下さった水稲生産者並びに研究員、普及指導員の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 光井輝彰,小林孝浩,鍵谷俊樹,浅野雄二,坂東直行, “有機栽培技術の高度化に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告第5号, pp.33-36, 2004.
- [2] 光井輝彰,田畑克彦,藤井勝敏,横山哲也,遠藤善道,陶山純,葛谷和己, “水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(第4報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第14号, pp.11-12, 2013.
- [3] 藤井勝敏,田畑克彦,横山哲也,久富茂樹,遠藤善道, “水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(第6報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第16号, pp.54-56, 2015.

計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測(第2報)

横山 哲也 米倉 竜次* 田畑 克彦

Count of Fish which Migrate Upward Fish Ladder using Counting Equipment (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA Ryuji YONEKURA* Katsuhiko TABATA

あらまし 岐阜県では生物多様性に配慮した基盤づくりの一環として、水田と排水路をつなぎ魚の自由な移動を可能とする水田魚道の設置を推進している。設置の効果検証にあたっては、水田魚道を遡上する魚類等の種類、個体数などを定量評価する必要があるため、平成25年度から、水田魚道を通過した魚を計数できる装置を用いて現地での計測を行っている。本年度も計数装置を用いて、県内2箇所です数カ月間の計測を行い魚の遡上を確認した。本報告ではその計測結果と遠隔モニタリングの内容について報告する。

キーワード 水田魚道、計数装置、遠隔モニタリング

1. はじめに

岐阜県では、排水路に生息するコイやフナ類などの魚が水田を繁殖・成長の場として利用できるよう、水田と排水路をつなぐことで魚の自由な移動を促進する水田魚道の設置を推進している。水田魚道の効果的な運用方法を確立するためには水田魚道を遡上する魚類等の種類、個体数、時間帯などを定量的に評価する調査が必要であり、これまでに光電式センサとカメラを組み合わせた自動計数装置^[1]を試作した。平成25年度からは、県内に設置された水田魚道において、本計数装置を用いて現地計測を行っている。

本年度も引き続き、県内2箇所です計測を行った。併せて、Webサーバによる遠隔モニタリングを実装した。以下では現地での計測結果および遠隔モニタリングの内容について報告する。

2. 現地計測の結果

表1に本年度計測した県内2箇所の計測期間を示す。なお、計測期間には中干し等で計測していない期間も含ま

表1 県内2箇所の計測期間

計測箇所	計測期間
養老郡養老町	5月15日～8月20日
本巣郡北方町※	6月25日～8月27日

※岐阜農林高等学校敷地内

れている。図1に計数装置を設置した水田魚道を示す。

表2に本年度の計測結果を記す。魚の個体数は計数装置のカメラで撮影した画像からカウントした。魚種の特定は、予め排水路にいる魚を調査で絞りこんでおき、カメラの撮影画像を基に目視で行った。撮影画像によっては魚種を特定できない場合もあり、その際は不明にカウントしている。遡上と降下の判別は、撮影画像中の魚の頭が水田側・排水路側のどちらに向いているかで判断した。本計測方法では、魚道内に留まっている魚に対して複数回カウントしている可能性はある。また、計数装置の構成上、連続の写真撮影ができないため、魚が列をなして通過すると取りこぼしが発生する。以上の理由より、表2に記載する数字は目安となるが、いずれの魚道においても魚の遡上を確認することができた。



図1 現地計測を行った水田魚道 (左：養老郡養老町, 右：本巣郡北方町)

* 岐阜県水産研究所

表2 県内2箇所の計測結果（計測期間の合計）

計測箇所	魚種	遡上数	降下数
養老郡養老町	ドジョウ	1948	1169
	メダカ	1960	799
	フナ類	541	282
	ヨシノボリ類	284	93
	モツゴ	4	0
	不明	207	104
本巣郡北方町	メダカ	1793	501
	モツゴ	158	73
	タモロコ	71	21
	ナマズ	44	30
	フナ類	42	10
	コイ	13	8
	ドジョウ	6	4
	不明	106	49

3. 遠隔モニタリングの実装

現地計測では人が常時現地にいないことから、計数装置の故障に気付くのが遅くなりデータの欠落期間が長くなることや、魚道内に泥が堆積されることで撮影画像から魚の認識が難しくなる恐れがある。そのため、遠隔から計数装置をモニタリングできる仕組みが必要である。

著者らは過去、SMS(Short Message Service)を用いてバッテリー電圧等のデータを人に知らせる仕組みを構築^[2]した。テキストデータの送信であればSMSで問題ないが、画像データの送信はSMSではできない。また、計測データ（バッテリー電圧や撮影枚数等）が時系列的にどのように変化しているかを把握するには、テキストデータではなくグラフ表示で確認できることが望ましい。

そこで本年度は本巣郡北方町での計測において、Webサーバを設置し、計数装置に組み込んだ3G通信モジュールを用いて、計数装置のデータをサーバに送信する仕組みを構築した(図2)。送信するデータの時間的変化は小さいため、データの送信間隔は数時間おきとした。図3,4にWebブラウザで閲覧できるバッテリー電圧の折れ線グラフと、撮影枚数の棒グラフを示す。図5に示す撮影画像は計数装置のカメラで魚道内を撮影した画像で、泥の堆積具合や魚道内の水かさを確認できる。これらのグラフや撮影画像により、遠隔から計数装置のモニタリングが可能になった。

4. おわりに

本研究では水田魚道を遡上する魚の個体数、時間帯および魚種を特定するための計数装置を用いて、県内2箇所で現地計測を数カ月行い、いずれの水田魚道においても魚の遡上を確認した。また、Webサーバを用いた計数装置の遠隔モニタリングを構築し、計数装置の稼働状況を把握することが可能となった。

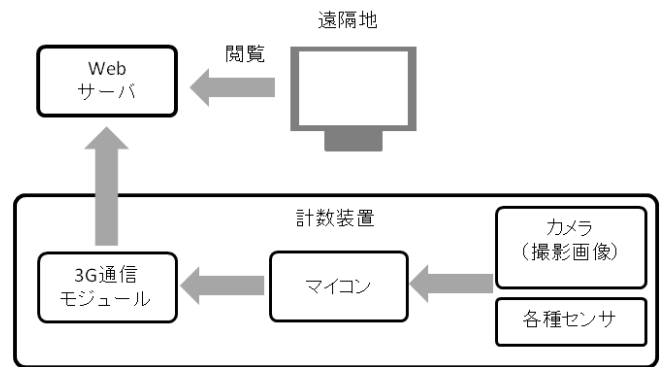


図2 Webサーバを用いた遠隔モニタリングの仕組み

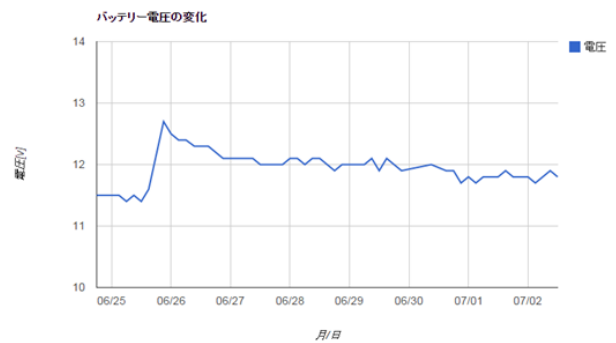


図3 バッテリー電圧の推移

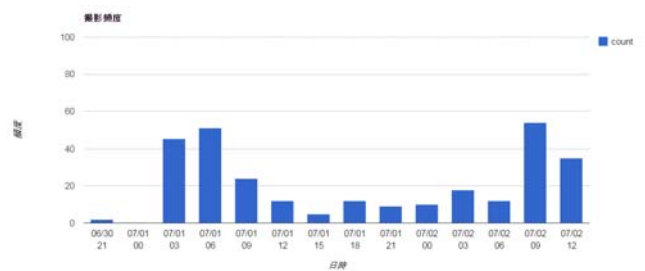


図4 撮影の頻度

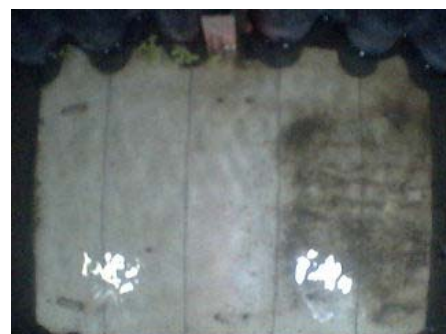


図5 魚道の状況を確認する撮影画像

文 献

- [1] 横山ら, "水田魚道を遡上する魚の自動計数装置の開発",岐阜県情報技術研究所第14号,pp.19-20,2013.
- [2] 横山ら, "計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測",岐阜県情報技術研究所第16号,pp.57-58,2015.

降水量からの小水力発電ポテンシャルの推定

－ 流域面積が小さい水源への適用 －

河村 隆雄

Hydraulic Potential Estimation from Rain Fall

- Application to Water Sources with Small Basin Area -

Takao KAWAMURA

あらまし 岐阜県下には全国有数の小水力発電ポテンシャルが存在するが、活用への動きははかばかしくない。その対策として、小流域における小水力発電ポテンシャルを簡便かつ短時間に評価する方法の開発を試みた。これは、水文学に基づく直列タンクモデルを用いて流域の降水量より水源の流況曲線を推定する方法に、3Dマップ標高データから流域面積を求める手法を組み合わせることで水源の発電能力を評価するもので、これを木曾川水系の小流域の水源に適用して発電電力量の推定を試みたところ、推定結果は実績発電量と良い整合性を示した。

キーワード 小水力発電、発電ポテンシャル、直列タンクモデル、3次元地図、流況曲線

1. はじめに

エネルギー資源の再生可能エネルギー化の重要性が叫ばれる中、岐阜県では県内の再生可能エネルギーの導入ポテンシャルやコストペイバックタイムなど次世代エネルギーインフラ活用の指針を作成し、導入の促進を図っている^[1]。県下には広大な森林に育まれる豊富な木質バイオマス資源と、その森林から湧き出す膨大な水力資源が存在し、その活用に大きな期待が寄せられている。環境省による再生可能エネルギー導入ポテンシャルの調査^[2]によれば、県下に全国二位の小水力発電ポテンシャルが存在するとされるが、その活用への意欲を生み出すためには、具体的な小水力発電の水源候補地について、その発電能力を簡便かつ短時間に評価して提供できることが望まれる。

前報^[3]では、洪水予測に利用される直列タンクモデルを使用して河川の流況曲線を降水量から推定する試みを武儀川について行い、実際の流況曲線と良好な一致が得られること、また、タンクモデルが中小河川の小水力発電ポテンシャルの推定に有効であることを明らかにした。

本報告では、岐阜県南部をほぼ網羅する木曾・長良・揖斐の三河川が形成する木曾川水系の流域について、一組の代表タンクモデルを用いて流況曲線の再現を図るとともに、これに三次元地図の標高データから流域面積を求める方法を組み合わせて、木曾川水系の小規模水源の発電能力を予測する手法を開発した。またこれを既に発電実績のある水源に適用することで、その効果を確かめた。

2. 木曾川水系のタンクパラメータ

2.1 木曾川水系の主要な中規模河川の流況曲線

前報で示したように、水源に設置した水車の発電能力を見積るには、その水源の流量 Q [m^3/s] を高さとし、また年間に発生する当該流量の出現率 Δx を幅とする矩形を流量の大きい順に並べたグラフ、すなわち縦軸に流量 Q 、横軸に流量の累積出現率 x をとった流況曲線(図 5 参照)を作成する必要がある。

本報告では、流域面積の異なる多数の河川の流況曲線を相互に比較するため、流量を、各河川の流量観測地点までの流域面積 A [km^2] で除して流域 1km^2 当たりの流量に換算した値 $q=Q/A$ [$(\text{m}^3/\text{s})/\text{km}^2$] (以下、流量流束と呼ぶ)を用いて表示することにする。この流量流束による流況曲線は、主として当該河川流域の降水量の時間分布(以下、降水特性という)に依存するものと考えられる。

はじめに木曾川水系内にある河川の流況曲線の状況を比較するために、国土交通省の水文・水質データベース^[4]上に流量観測データが存在する中規模 8 河川について、同データベースから取得した流量観測値に基づいて作成した流量流束の流況曲線(以下、実測流況曲線という)を図 1 に示す。図に見られるように、木曾川水系の代表的な中規模河川の実測流況曲線はかなりのばらつきを示している。これは、各河川の流域によって降水特性が異なることが反映されたものと考えられる。

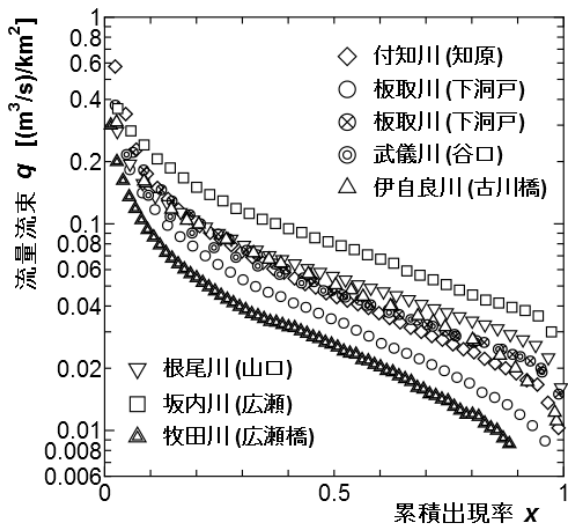


図1. 木曾川水系の中規模河川の実測流況曲線

2.2 木曾川水系の代表タンクパラメーター

前報では河川の降水特性と流況曲線の関係を、直列三段タンクモデルを用いて近似したが、このとき、降水特性と流況曲線との関係を表すものが各河川流域のタンクパラメーターである。もし、木曾川水系にある多数の河川流域の多くを同一のタンクパラメーター(以下、代表タンクパラメーターという)を用いて近似することができれば、降雨量から流況曲線を推定する作業は著しく容易になると期待される。ま

表1. 武儀川のタンクパラメーター
(流量流束に基づく値)

Tank	Pipe	L	α	β
1	0	16.7	0.1	0.006
	1	6.94	0.001	
2	2	8.33	0.3	1.0
3	3	1.94	0.75	0.01

L: 側管の高さ, α : 側管の流出係数

β : タンク底面ホールの流出係数

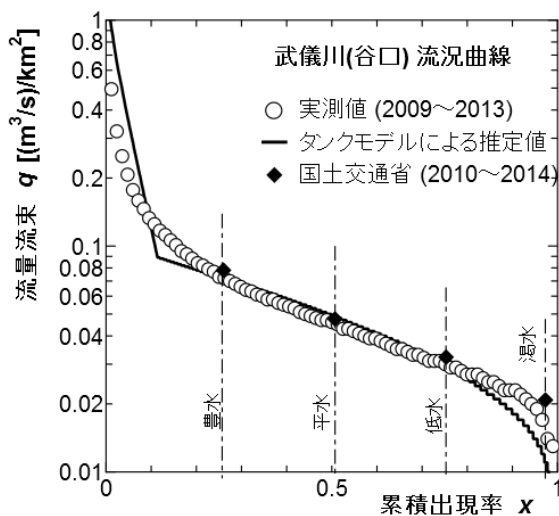


図2. 武儀川の実測流況曲線

た、図1の多数の流況曲線群の中ほどに位置する河川は、木曾川水系の平均的な性質を持つものと推測されることから、代表タンクパラメーターを持つ河川の候補として、武儀川を想定することができる。武儀川のタンクパラメーターについては既に前報で報告したが、これを流量流束に関わるものに換算したものを表1に示す。

図2は表1のタンクパラメーターを用いて武儀川の降水量データから推定流量流束を計算し、これに基づいて作成した推定流量流束の流況曲線(以下、推定流況曲線という)と、武儀川の実測流況曲線および国土交通省が同河川について提示している豊水点(累積出現率 $x=0.383$), 平水点(同0.630), 低水点(同0.863)における流量値を示す。二つの曲線および値は良好な一致を示している。なお、推定流況曲線を求めるプロセスについては4章で説明する。

図3は、木曾川水系の中規模8河川の実測流況曲線と、各河川流域の平均降雨量に武儀川のタンクパラメーターを適用して求めた推定流況曲線とを比較して示したものである。はじめに最下段の牧田川について考える。この河川においては、実測流況曲線が推定流況曲線を大きく下回っており、推定流況曲線を水車出力の評価ツールとして使用することの妥当性が問題になる。また、こうした傾向は津保川についても若干見られる。これら河川においては、関係各市の

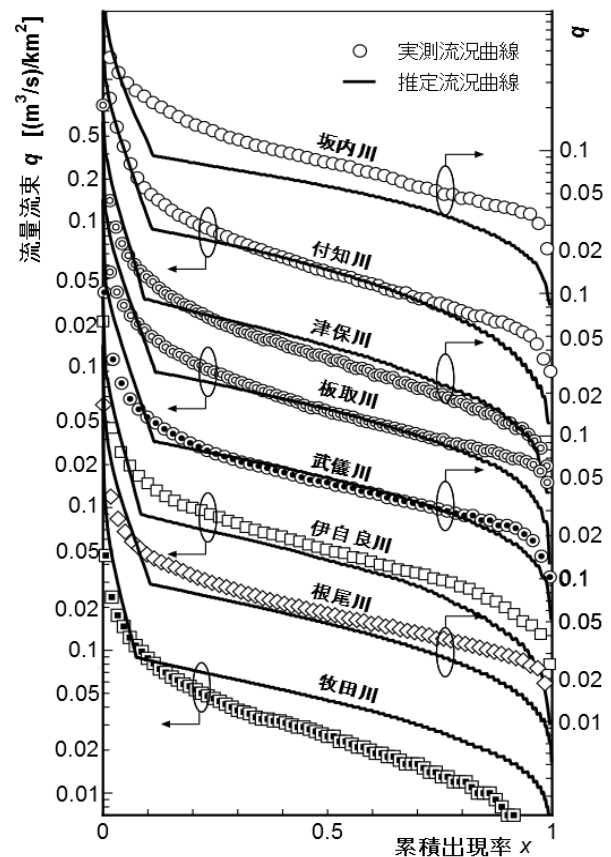


図3 木曾川水系の中規模8河川の実測流況曲線と推定流況曲線

広報資料および地形図などから農業用の水利用が盛んであると推測され、その場合、実測流量に利水流量を加えて推定の適否を検討する必要がある。

また最上段に示した坂内川については、実測流況曲線は推定流況曲線を5割程度上回っている。この河川流域の平均標高は高く、積雪による貯水効果、すなわち冬季の降雪が春以降に長期に亘って少しずつ流れ出すことによって大きな出水が緩和され、図のように豊水点から低水点の流量が増加するものと推測される。ただし本報告では、これら利水および積雪の効果については今後の課題とする。

上記の3河川を除く5河川については、武儀川のタンクパラメータを使用して求めた推定流況曲線は、実測流況曲線とかなり良い一致を示している。このことから本報告では、木曾川水系の代表タンクパラメータとして、武儀川のタンクパラメータを使用する。

3. 水源の流域面積の推定

発電機を設置する水源の流量は、原則として、その水源に集まる流域面積への降水量の総和として与えられる。このことから、本手法では、単位流域面積当たりの降水量 r [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$]は流域内で均一であると仮定し、これと水源の流域面積 A [km^2]を掛け合わせることで水源の流量とする。そこで、水源の流域面積を求める方法について考える。

これは、”降水は稜線を超えて流れることはない”を原理とし、これより水源地の周囲をとり囲む稜線と、稜線から水源に至る線で閉じた領域を当該水源の流域とし、その面積を流域面積 A とする。そこで、稜線を判定する作業が必要になる。詳細な等高線地図から直接稜線を描き面積を求める作業は炊雑であるため、今回、50 m メッシュで詳細な標高データが組み込まれた”国土地理院地図3D”を利用して稜線の判定を行った。

稜線判定の際の特徴量として、地図上の稜線に交わる直線上において、①高度の差分が正から負に変化すること、②高度の2階差分がその前後において常に負であることを

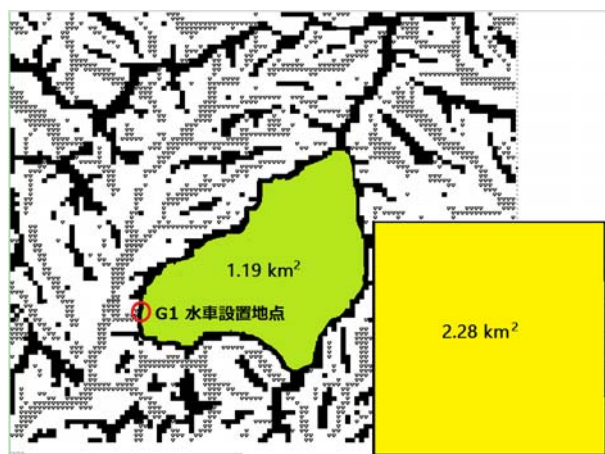


図4. G1地区流域面積判定図 -- 稜線, ~~~~~ 溪谷線

条件として、東西、南北両方向を含む8方向のいずれかにおいてこの条件を満たす点を稜線とした。また、稜線図を利用する際の便宜のために、稜線と逆の判定基準を用いて溪谷線を求めた。図4はその一例である。

4. 既設小水力発電地区の発電能力の推定

本報告に示した手法を既設の小水力発電用水源に適用するとともに、その発電実績と比較し、その妥当性について検討した。

4.1 水源の発電能力の推定方法

水源の発電可能電力量を推定するには、以下に示す①から⑥の作業が必要である。これを、図4に示す発電地区G1を例に説明する。

① 発電用水源の有効落差を求める。

まず、水源地の水面と、水車からの流出水面との高度差(実落差)を求める。実落差は測量によって求めることが望ましいが、地形図などから概略を判定することもできる。発電出力を評価するには本来、この実落差から、水源から排水路に至る導水路における流動損失を差引いた有効落差を求める必要があるが、本報告では簡便のために流動摩擦などによるエネルギー損失を総合効率に含めて考えることとし、実落差をそのまま用いる。G1地点の実落差 H は、測量により9.9mと求められている。

② 発電用水源の流域面積を求める。

これには3章に示した方法を使用する。図4にて示したG1地区の稜線図において、稜線で囲まれた流域のピクセル数を数えると同時に、同じ図中に面積の基準とする領域を描いてピクセル数を求め、それらピクセル数の比から流域面積を求める。G1地区の流域面積 A は1.19 km^2 であった。

③ 水源の降水量データを取得する。

はじめに、国土交通省の水文水質ベースから該当地区の時間雨量データ R [mm/h]を取得する。小流域の場合、雨量観測点が当該水源の流域中に存在しないことが多いが、その場合は水源を囲む近隣の雨量観測点のデータを複数取得し、それらを平均することでその地区の平均降水量とする。

なお、次に行う流量流束を推定する作業では、タンクパラメータに流量流束に関わるものを使用して流量流束を求めるので、時間雨量 R を単位面積当たりの降水量 $r (=R/3.6)$ [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$]に換算しておく必要がある。

④ 降水量 r から当該水源の流量 Q を推定する。

次に、この単位面積当たり降水量 r に対して表1に示す武儀川のタンクパラメータを適用して、時間毎の水源の流量流束 q [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$]を算出し、これを流量流束の推定値とする。さらに推定流量流束 q に②で求めた流域面積 A を掛けて、水源の推定流量 $Q (=qA)$ に戻しておく。

⑤ 推定した流量から流況曲線を描く。

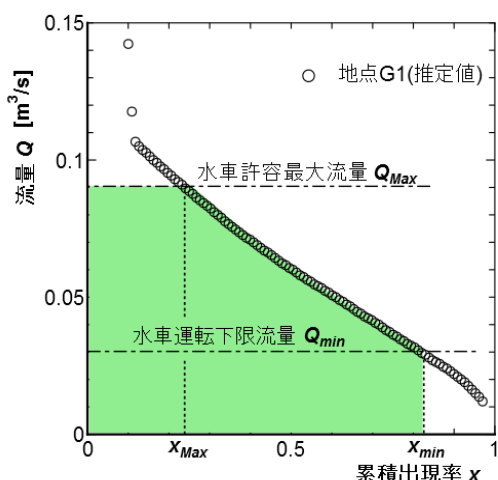


図5. 流況曲線から水車出力の推定

推定流量 Q を大数順にソートしたのち、各流量までの累積出現数を全データ数で割って各流量の累積出現率 x を求める。その後、図5に示すように縦軸に Q 、横軸に x を取って流況曲線を描く。なお図5では、雨量の長期欠測期間とその後の48時間は除外して計算している。

⑥流況曲線から水源の発電能力を推定する。

はじめに、流況曲線から水源の単位流域面積当たりの年間有効流量 Q_e を求める。これにはまず、得られた流況曲線に設置を予定している水車の最大流量(Q_{Max})と、下限流量(Q_{min})の線を引き、 Q_{Max} ならびに Q_{min} が流況曲線と交わる点の累積出現率 x_{Max} , x_{min} を求める。二つの座標軸と Q_{Max} 線、流況曲線、そして x_{min} 線で囲まれる面積(図5の灰色部分)を求めることで有効流量 Q_e が求まる。このとき水車による推定発電出力 P_p は次式で与えられる。

$$P_p = \eta \rho g Q_e H \text{ [W]} \quad (\rho: \text{水の密度}, g: \text{重力加速度})$$

ここで η は総合効率で、導水管路の流動損失特性、水車および発電機の効率、送電効率など、水源の立地条件や機器の性能に依存するため、経験値に基づいて予測する必要があるが、ここでは大まかに0.3とした。このようにして得

表2. 小水力発電実施地区における発電能力推定結果

地区		G1	G2
水源の流域面積	A [km ²]	1.19	2.25
水車最大流量	Q_{Max} [m ³ /s]	0.09	0.15
同 累積出現率	x_{Max}	0.24	0.25
水車下限流量	Q_{min} [m ³ /s]	0.03	0.05
同 累積出現率	x_{min}	0.83	0.66
水源の包蔵流量	Q_e [m ³ /s]	0.057	0.079
実落差	H [m]	9.9	9.0
水源の包蔵出力	P_e [kW]	5.5	6.9
総合効率	η	0.30	0.30
推定発電出力	P_p [kW]	1.7	2.1
推定年間発電電力量	W_p [kWh]	14533	18195
実績年間発電電力量	W_r [kWh]	11530	3387

られた推定発電出力 P_p に1年間の時間数を掛けあわせることで、水源の推定年間発電電力量 W_p [kWh] が得られる。

4.2 既設小水力施設の推定発電能力と実績発電量の比較

本報告に示した発電ポテンシャル推定方法の妥当性を調べるため、既に郡上市大和町および和良町に設置されている小水力発電施設2か所について、上記の手続きに従って見積もった水源の発電能力(出力 P_p 、年間発電電力量 W_p)と、年間発電電力量の実績値 W_r を表2に示す。地区G1の水車は推定される年間発電電力量 W_p を十分に活用しており、また、地区G2の発電設備は小規模で、実績電力量 W_r は推定値 W_p の2割以下と発電余力を大きく残していることがわかる。これら2地区は共に積雪が見られる地域であることを考慮すれば、年間の発電ポテンシャルはさらに増すものと予想される。しかしそれを考慮する前に推定値が実績値を上回っており、かつ、推定値と実績値が大きくかけ離れていないことは、本報告に示す方法で求めた年間発電電力量の推定値は同実績値と良い整合性を持つことを示している。

5. まとめ

木曾川水系における小水力発電について、降雨量から水源の発電ポテンシャルを簡便に推定する手法の開発を試み、また開発した手法を既設の小水力発電用水源に適用したところ、以下の事項が明らかになった。

- (1) 木曾川水系の主要な中規模河川については、大量の利水や積雪などの事情のある場合を除き、代表タンクパラメータに武儀川のタンクパラメータを用いることで、当該河川流域の平均降水量を基に、河川の流況を発電量推測に必要な程度に推定できる。
- (2) 国土地理院3Dマップの標高データから、稜線に関する比較的単純な特徴量を用いることによって稜線の判定が可能であり、これに基づいて流域面積が推定可能である。
- (3) 上の二つの手法に基づいて小水力発電実績のある水源について発電出力を推定し、これを発電実績と比較したところ、年間発電電力量について良い整合性を得ることができた。

文献

[1] 岐阜県, “岐阜県次世代エネルギービジョン”, H23.3
 [2] 環境省, “平成23年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書”, H24.6
 [3] 河村隆雄, “中小河川等における発電ポテンシャルの見積り方法について -水文学タンクモデルの武儀川への適用-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第16号, pp59-62, 2015.
 [4] 国土交通省, “水文学質データベース”, <http://www1.river.go.jp>
 [5] 国土地理院, “地理院地図3D”, <http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/site/index.html>

設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発

横山 哲也 窪田 直樹

Development of Equipment Data Collection and Storage System

Tetsuya YOKOYAMA Naoki KUBOTA

あらまし 設備機器の電流や電力等のデータの見える化は、機器異常の検出、ムダの発見によるコスト削減等につながる有益な手段と考えられる。本研究では、機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、簡易にデータを収集・蓄積し、データ解析が可能となるシステムの開発を行う。本年度は、センサノードやデータビューアなどを開発し、電流や温度を可視化できる基本システムを構築したので、その内容について報告する。

キーワード 見える化, IEEE1888, センサノード

1. はじめに

設備機器の電流や電力等のデータの見える化は、機器異常の検出、ムダの発見によるコスト削減等につながる有益な手段と考えられる。見える化を実現するには、機器設備のデータを収集・蓄積し、データ解析するシステム構築が必要であり、また既存設備の改修も必要となるため、導入費用が増すことになる。

本研究では機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、簡易にデータを収集・蓄積し、データ解析が可能となるシステムを開発し、電流等のデータの見える化の実現を目指している。本年度は、基本システムを構築したので、その内容について報告する。

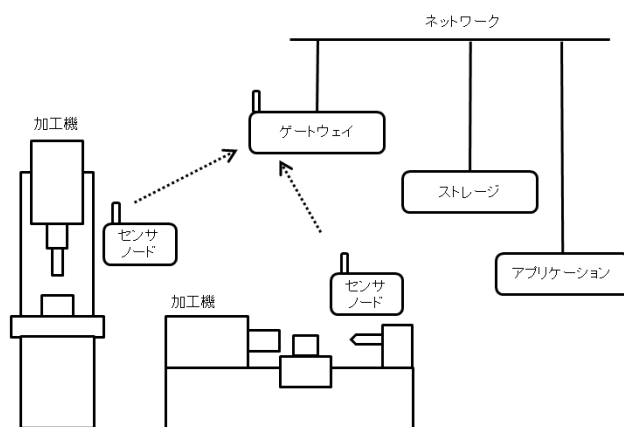


図1 基本システムの構築

2. データ集積・蓄積システムの構築

2.1 基本システムの構成

本研究ではシステムを構築するにあたり、導入が容易であることを踏まえ、IEEE1888^[1]をベースにシステムを構築した。図1に基本システムの構成を示す。システムはセンサノード、ゲートウェイ、ストレージ、アプリケーションで構成される。

センサノードはマイコン、センサと無線モジュールで構成され、加工機などの設備に取り付けたセンサから得られたデータをゲートウェイへ送信する。ゲートウェイはマイコン、無線モジュールとEthernetモジュールで構成され、センサノードから受信したデータを、有線LANを介してストレージに送信する。その際、センサデータに日時データを加え、時系列データに変換している。ストレージはゲートウェイから送られてくるセンサの時系列データを蓄積する。本研究では、東大グリーンICTプロジェクトが公開配布しているIEEE1888通信機能を実装

したFIAPStorage2^[2]を用いた。アプリケーションは、ユーザが検索したい情報をストレージからデータを抽出して可視化するソフトウェアである。

2.2 センサノードの構成

本研究では扱うセンサは、設備機器に容易に取り付けが出来るものを想定している。本年度製作したセンサノードは、電流と温度データを取得することを目的とし、クランプ型電流センサによるAC電流や、熱電対による温度などを得ることができる。図2にセンサノードの外観を、表1に仕様を示す。

使用するクランプ型電流センサは、クランプが分割可能なため、容易に電線に取り付けが可能である。電流の実効値を求めるため、マイコンのAD変換を用いて一定のサンプリング時間毎にセンサデータを取り込み、マイコンで実効値を計算する。また、3相3線の電流も計測できるよう、電流センサが2つ接続可能な回路構成とした。温度に関しては、熱電対の出力電圧は小さいため、アンプ



図2 センサノードの外観

表1 センサノードの仕様

基板寸法	95×72mm
電源	DC5V (ACアダプタを使用)
測定データ	・ AC電流 ・ 温度 ・ スイッチ入力
無線通信	・ 近距離無線通信 ・ 920MHz特定小電力

モジュールを介して、データをマイコンに取り込むこととした。また0/1の2値信号を取り扱えるようにスイッチ入力も用意した。

得られた電流、温度のデータは一定時刻毎に、無線モジュールを使用して、ゲートウェイに送信する。使用する無線通信は、近距離無線通信(ZigBee)や、920MHz特定小電力通信であり、マイコンとモジュール間はシリアル通信でデータのやり取りを行う。

2.3 データビューア

本研究ではデータの見える化を行うにあたり、図1のアプリケーションとして、Webブラウザでセンサデータを確認できるデータビューア(図3)を作成した。ビューアには、ストレージに蓄積されたセンサデータのリスト表示、選択したデータの時系列によるグラフ表示と日時検索機能がある。また表示したデータは、CSVファイルと

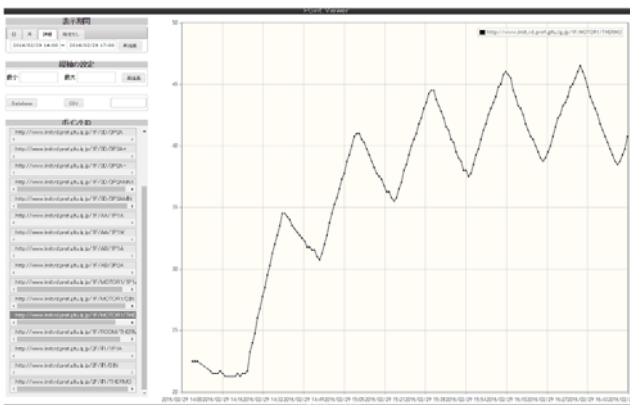


図3 データビューア

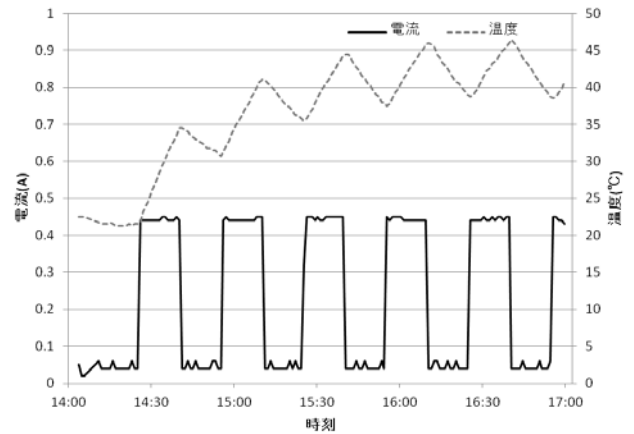


図4 計測例

して出力することも可能である。

3. 電気機器の計測事例

電気機器(電動機)にセンサノードを取り付け、機器を間欠動作させたときに流れる電流と、機器筐体の温度を測定した。時系列データを図4に示す。電気機器のON動作により、機器の筐体温度は常温から時間とともに上昇し、OFF動作により低下し始める。熱が逃げないうちに次のON動作が始まるため、温度が徐々に上昇し、その後、定常状態に落ち着くことが観測できた。

この事例のように、データ間の関係が明確で、温度の上がり方が適正であると判断できれば問題ないが、データ間の関係が不明確な場合は判断が難しい。そのため、ある閾値を超えた場合、または過去のデータと比較して挙動が異なることを判断できる仕組みを構築し、利用者に伝えるシステムを構築することが今後の課題である。

4. まとめ

本研究では機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、簡易にデータを収集・蓄積し、データ解析が可能となるシステムを開発することで、データの見える化などの実現を目指している。本年度は、センサノードやデータビューアを開発し、電流値や温度を見える化できる基本システムを構築した。

今後は蓄積してある時系列データを活用し、得られたデータを過去のデータを比較することで、異常検出ができるようにしたい。

文献

- [1] 江崎浩, 落合秀也, "スマートグリッド対応IEEE1888プロトコル教科書", インプレスジャパン, 2012.
- [2] "東大グリーンICTプロジェクト", <http://www.gutp.jp>.

交流電圧波形の非接触計測による電力算出の検討

横山 哲也

Study on AC Power Calculation by Non-Contact Measurement

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 設備機器の電力の見える化は、電気使用量を把握することができ、かつムダの発見によるコスト削減につながる有益な手段と考えられる。このため、機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、見える化を実現することは重要である。本研究では、非接触での交流電圧波形計測による電力算出について検討したので報告する。

キーワード 電力算出, 見える化, 非接触計測

1. はじめに

設備機器の電力の見える化は、電気使用量を把握することができ、かつムダの発見によるコスト削減につながる有益な手段と考えられる。そのため、本研究では機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、容易にデータを収集・蓄積できるシステムを開発している。

電力を計測するには電流と電圧の計測が必要となる。電流はクランプ計を用いて非接触で計測できるが、電圧は通常、端子金属部や電線の芯線に計測部位を直接接触させて計測する必要があるため、取り付け時に感電や、端子間の短絡による回路遮断等が発生する可能性がある。そのため、非接触の計測器が用意されているが、設備毎に設置するには費用がかかるといった問題がある。

そこで、本研究では非接触で電力を算出する方法を検討したので報告する。

2. 電力算出方法

2.1 基本コンセプト

非接触での交流電圧計測による電力算出方法として、電線の被覆に箔を巻き、芯線と箔間に生じる静電容量を利用して電圧波形を計測する方法^[1]がある。本研究ではこの方法を参考に電力を算出する。

図1に、箔に抵抗を接続し、抵抗にかかる電圧を計測す

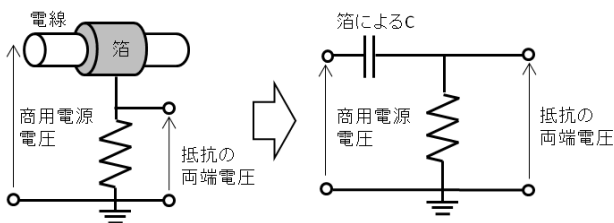


図1 電線被覆への箔の巻きつけとその計測回路

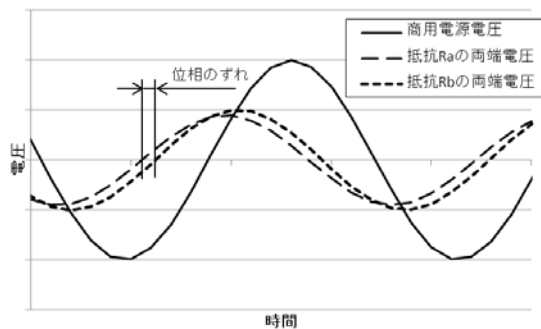


図2 電源電圧位相と異なる位相 (イメージ図)

る回路を示す。抵抗にかかる電圧は、電線に流れる交流電圧に対して位相の異なる電圧波形となる(図2)。このときの位相差は、箔に生じる静電容量 C と抵抗 R の値及び周波数で決まる。これより、値の異なる抵抗 R_a, R_b で電圧を計測すると、図2のようにずれた位相となる。本研究ではこの位相のずれを利用して、非接触で電線にかかる商用電源電圧の波形ピーク時の位相角(時間)を求める。電圧の実効値および周波数が既知とすれば、ピーク時の位相角をもとに角度をずらすことで瞬時電圧がわかり、電線に流れる電流を計測して電圧と掛け合わせることで、電力を算出することができる。

2.2 電力算出手順

本手法ではマイコンと電圧計測回路を用いて、商用電

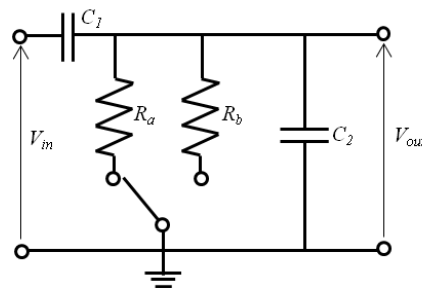


図3 電圧計測の回路

源電圧の波形ピーク時の位相角を求める。図3に電圧計測の回路を示す。\$V_{in}\$は商用電源電圧、\$V_{out}\$は抵抗の両端電圧でマイコンのAD入力となる。\$C_1\$は電線に箔を巻いたときの静電容量、\$R_a\$、\$R_b\$は箔に接続した抵抗である。抵抗にはマイコンからの指示で入り切りできるスイッチが接続されている。\$C_2\$は計測線の静電容量である。

図3の回路のゲインを式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| &= \frac{\omega C_1 R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_1 + C_2)^2}} \\ &= \frac{C_1}{(C_1 + C_2) \sqrt{\alpha^2 + 1}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中の\$\omega\$は角周波数で、\$\alpha\$は以下のとおりである。

$$\alpha = \frac{1}{\omega R (C_1 + C_2)}$$

位相角\$\theta\$は式(2)で求まる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\omega R (C_1 + C_2)} \right) = \tan^{-1}(\alpha) \quad (2)$$

スイッチを使い、抵抗\$R_a\$と\$R_b\$を切り替えた際のゲイン比は、式(1)より以下のとおりになる。

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_a \bigg/ \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_b = \sqrt{\frac{\alpha_b^2 + 1}{\alpha_a^2 + 1}} \quad (3)$$

マイコンのAD入力を用いて電圧波形のピーク値を求めることで、ゲイン比を計測から求めることができる。また、商用電源であることから周波数は既知であり、AD変換を一定サンプリングで行い、\$R_a\$接続時と\$R_b\$接続時の時系列の電圧波形データをマイコンのメモリに記録し、2つの波形データを比較することで、位相角のずれ量\$\theta_{ab}\$を計測値から求めることができる。これにより、本手法は以下に記載する手順を踏むことで、\$C_1, C_2\$の値を求めることなく、かつ電圧波形のピーク値をマイコンのAD入力範囲内になるように\$R_a\$、\$R_b\$を調整するだけで済む回路構成となる。

計測によりゲイン比および位相角のずれ量がわかることから、式(3)を用いて、以下の手順に基づいて電圧のピーク位相角を求める。

- 1) 初期値となる位相角\$\theta_a\$を決める。
- 2) 計測で求めた位相角のずれ量\$\theta_{ab}\$と位相角\$\theta_a\$より、位相角\$\theta_b\$が決まる。
- 3) 三角関数表(tan)より位相角\$\theta_a\$、\$\theta_b\$の\$\alpha_a\$と\$\alpha_b\$を求める。
- 4) 式(3)よりゲイン比を求める。
- 5) 計測で求めたゲイン比と、計算で求めたゲイン比の誤差を求め、その値がこれまでの誤差最小値と比べ小さければ更新し、そのときの角度を記録する。
- 6) 位相角\$\theta_a\$の値を増分して2)に戻る。位相角\$\theta_a\$がある値に達したら処理を終える。

上記手順により求まる最小誤差時の角度を、位相角と見做す。なお、\$\theta_a\$の初期値は、探索範囲の最小値とした。これより、箔を巻いた電線にかかる商用電圧のピーク位相角(時間)を知ることができ、商用電源の電圧実効値を既知とすれば、瞬時電圧が求まる。瞬時電圧とクランプ型電流センサで計測した電流値から、瞬時電力が計算でき、単位時間積分することで電力が算出できる。

3. 検証

本手法の検証を行うため、単相誘導電動機を無負荷で回転させた時の消費電力を算出した。本手法ではマイコンを用いて1秒あたり数サンプリングで1周期分の電力を計算しているため、過去1秒間で算出した値の平均をもとに、1秒間の電力を算出している。また、電流測定にクランプ型電流センサを使用しており、被測定電流とセンサ検出電流の間に位相差が存在するため、正弦波の電流が流れる想定のもとで、あらかじめ実測により位相差を特定し電力計算に反映している。なお、本手法での商用電源電圧の実効値は100[V]と仮定した。

表1 電力の算出結果

	平均値[W]	標準偏差[W]
本手法	35.1	1.54
電力計	33.4	0.22

表1に本手法で算出した電力の平均値および標準偏差を示す。比較として市販の電力計を用いて計測した結果も示す。電力計の値を真値とすると、本手法の平均値には誤差が含まれており、ばらつきも大きい。その理由は、抵抗\$R_a\$、\$R_b\$の値が330[KΩ]、1[MΩ]と大きいためノイズの影響を受けやすく、計測で求めるゲイン比と位相角のずれ量\$\theta_{ab}\$に誤差が含まれたためと考えられる。なお、電力計で計測した電圧実効値は100[V]を超えていることから、本手法と電力計の実質的な誤差は表1より大きくなる。

4. まとめ

本研究では機器設備の改修を必要とせず容易に取り付け可能なセンサを用いて、非接触での交流電圧波形計測による電力算出方法を検討した。電線に箔を巻き、値の異なる抵抗を用いて、電線に流れる交流電圧の波形を非接触で計測することで電力算出は可能であるが、その算出結果に誤差とばらつきがあることがわかった。電力算出の精度向上を図るには、ノイズの影響を受けない計測が課題となる。

文献

- [1] 佐藤光, "ワイヤレスセンサシステム", 東京電機大学出版局, 2012.

岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号 平成27年度

発行 平成28年7月11日
編集発行所 岐阜県情報技術研究所
岐阜県各務原市テクノプラザ 1-21
TEL: 058-379-3300
FAX: 058-379-3301
<http://www.imit.rd.pref.gifu.lg.jp>
