

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 18 号 平成 28 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究（第1報）	1
— 金型内インサート金物の移動検出に関する基礎的考察 —	
インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究（第2報）	5
— 射出成形インサートの接合強度シミュレーション —	
設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発（第2報）	7
— フライス加工機への適用 —	
金属部品の外観検査システムの研究開発	9
— 照度差ステレオ法による検査システムの構築 —	
機械学習を用いた作業時間推定システムの開発	15
技術ノート：複数のウェアラブルカメラのリアルタイムモニタリング	22
距離画像を用いた両手作業の動作解析システムの開発	24
豚肉色評価装置の開発（第2報）	30
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第7報）	34
— イメージセンサ —	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第8報）	37
— 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9報）	41
— 音センサ —	
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3報）	45
予防・健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究	49
重負荷作業を解消する直感操作型運搬補助システムの開発（第1報）	54
計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測（第3報）	56
技術ノート：3D3プロジェクトへの取り組み	58
岐阜県南部における小水力発電ポテンシャルの推定	62
— タンクモデルパラメタの改善 —	

インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第1報)

ー 金型内インサート金物の移動検出に関する基礎的考察 ー

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 mold for insert injection molding (1st Report)

- Feasibility study on insert metal sensing -

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型の高品質化・効率化を達成する技術として、スマート金型の開発を進めている。スマート金型は、金型にセンサを組み込み、成形時の型内状態を監視・記録するとともに、成形の良否を判断する機能を搭載した金型である。本年度の研究では、スマート金型をインサート成形に対応させるべく、インサート金物の状態検出のための基礎的な検証をおこなった。周囲が金属に囲まれた金型内においても、渦電流式のセンサが利用可能であることを検証し、適切にセンサを配置すればインサート金物の微小な移動(0.05mm)や微小なコネクタピンの欠落の検出が可能であることが確認できた。

キーワード スマート金型, インサート成形, 渦電流式センサ

1. はじめに

自動車産業をはじめとする機械産業では、製品の軽量化・低コスト化を目的に、金属部品をプラスチックに置き換える流れが進んでいる。従来のプラスチックは金属に比べて強度や耐熱性が低く、用途が限られていたが、樹脂材料や成形方法の革新が進み、従来プラスチック化が困難であった部品にまで置き換えの範囲が広がっている。樹脂材料の用途拡大に伴って、生産技術の高度化が進む射出成形分野では、生産の効率化や高品質化を実現する技術が求められている。

このような背景のもと、プラスチック射出成型の生産立ち上げの効率化や成形不良の発見を目的に、成形中の金型内の圧力や温度を監視するスマート金型の開発を進めている^{[1][3]}。昨年までの研究において、金型に搭載して圧力・温度・振動を記録する小型測定モジュールを開発した。また、測定データから成形不良や金型のキャビティ間のアンバランスなどの状態が検出できることが確認でき、スマート金型の有用性を示すことができた。

本年度からの研究では、これまで樹脂のみの成形を対象としていたスマート金型をインサート成形に拡張する。一般的にインサート成形は、プレス成形した金属の薄板や埋め込みナットなどの小型の金属部品を金型内に配置

して、そこに樹脂を流し込み、金属と樹脂が一体となった成形品を製造する。さらに、近年では大型の金属部品の周囲に樹脂を巻き付けるように成形することで、金型内で金属と樹脂が一体となった製品を製造する、型内異種材料接合技術も開発されている。金属部品の溶接や組み立てで製造していたような複雑な形状の部品を1回の射出成形で製造できれば、工数と重量が大きく削減できるため、実用化の期待の大きい技術である。

このような型内異種材料接合の実用化を念頭に置いて、本年度は従来型のインサート成形において課題となっているインサート金物のずれを検出する技術の基礎的な考察をおこなった。

2. インサート金物検出方法の検討

金型内のインサート部品は、樹脂が充填される空隙に面して配置されるため、強固な固定が困難である。そのため、注入される樹脂の圧力によって微小な変位が生じ不良が発生することがある。特に薄板プレス金物の場合、スプリングバックの量などプレスに起因する予測不可能な変形によって、インサート金物が想定以上の樹脂圧を受けて変形が拡大することがある。これら金型内のインサート金物の変位や変形を検出する手段を検討した。

金属部品の微小変位を検出するセンサには、接触変位

* 株式会社 岐阜多田精機

計やレーザー変位計、渦電流式変位計などが考えられる。金型内に組み込んで使用することや成形品の寸法精度から必要となる計測制度等の条件を勘案すると、1. 小型であること、2. 0.05mm程度の分解能があること、3. 高温環境下（100℃程度）で使用できること、が必要である。しかし、既存のセンサは高温環境下での使用が想定されていないため、最も小型で安価であり、原理的に高温対応の可能性が高い、渦電流式の変位センサを検討することとした。

渦電流式の変位センサは、高周波磁界を発生するコイル（センサヘッド）に金属が近づくと金属内に発生する渦電流によってコイルのインダクタンスが変わることを利用して、センサと金属間の距離を測定する仕組みである。その測定原理から、市販の変位計では、検出対象の金属はセンサ径より十分大きく、センサ近傍には検出対象以外の金属が存在しない環境を条件としている。しかし、今回対象とするインサート金物の変位検出では、センサ周囲が大きな金属の塊でありかつ検出対象であるイ

ンサート金物は小さな部品であることが多い。インダクタンス変化の測定にあたっては条件の悪い環境であるため、センサ回路設計のデータが公開されている変換デバイスを用いて、基本的な条件変化の検出から検証をおこなった。

検証用に作成した実験装置の写真を図1に、模擬金型ブロックの構成を図2に示す。センサヘッドは金型表面と同一面に設置することとし、金型を模した鉄ブロックに埋め込む形で配置した。金型を模した2つの鉄製のブロック（上型、下型）の間に樹脂プレートやステンレスの薄板を挟み、センサとインサートの相対位置を移動させて変位の検出を検証する。

上型はセンサヘッドが埋め込まれた厚さ15mmの金型材ブロックで、直径の異なる2つのセンサヘッドが互いの測定に影響しないよう25mmの間隔をあけて配置してある。また、昇降ユニットによって、下型との平行を保ったまま上下に移動ができ、移動量は光電式変位計によって測定ができる。下型は樹脂プレートおよびインサート金物を配置するため中央部分が3mm削り込んであり、上型が下りると削り込み部分に隙間なくはまり込む構造となっている。また、XYテーブルによって前後左右に移動が可能であり、移動量はマイクロメーターで設定ができる。

センサヘッドにはomron社製のFA向け近接センサを用いた。センササイズによる検出量の違いを検証するため、 $\Phi 5.4$ のセンサ1（E2C-C1A 3M）と $\Phi 3.5$ のセンサ2（E2C-CR8A 3M）を上型に取り付けた。センサヘッドはTexas Instruments社製のインダクタンスデジタルコンバータ（LDC1614）に接続し、PCでデータを取得した。

このように、3軸の精密移動機構によって金型を模した環境下でセンサとインサートの位置関係を変化させ、インダクタンス変化によるインサートの変位検出の可能性を検証した。

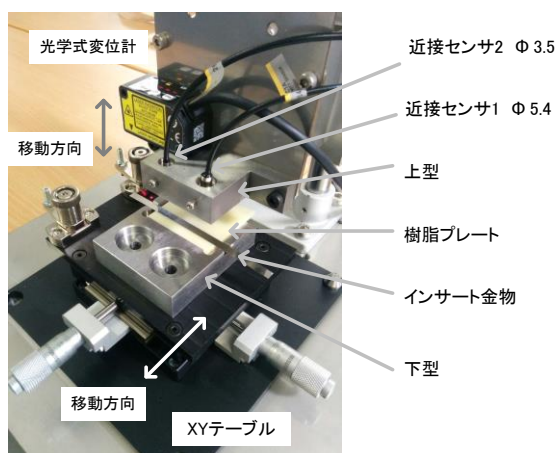


図1 金型内変位検出の実験装置

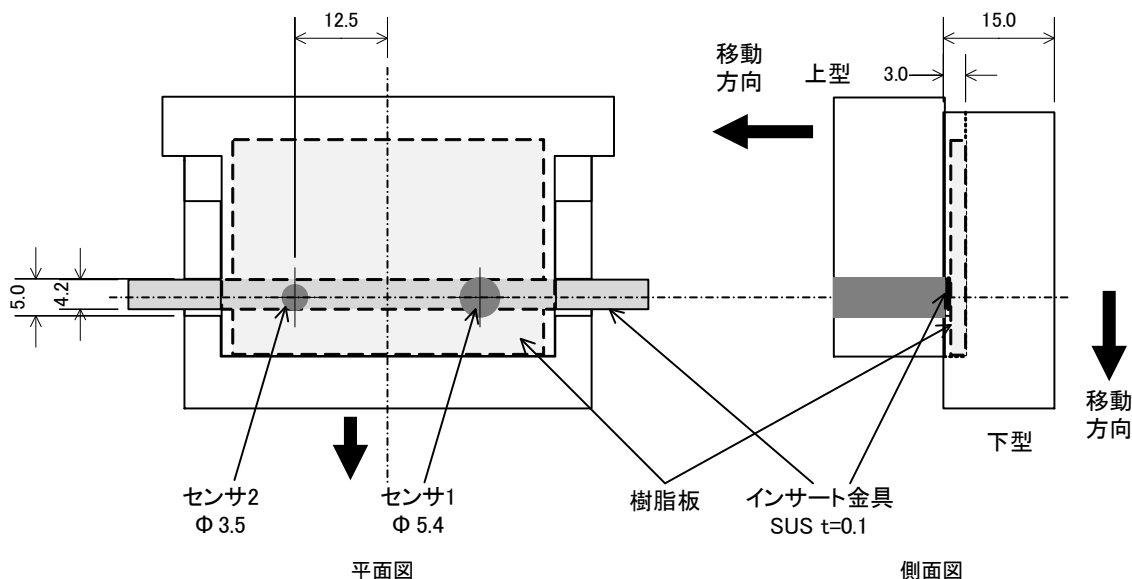


図2 模擬金型ブロック

3. 検出実験

3. 1 インサート金物の検出可能性の検証

インダクタンスの測定は、オープン以外各条件において上下型の開閉を5回おこない、それぞれで20サンプル分（合計100サンプル）をその条件の測定値とした。その平均と標準偏差を図3グラフに示す。各グラフ（図3～6）の縦軸はインダクタンス(μH)である。

まず基本的な条件として、上型と下型の距離が十分に開いている場合（オープン）と接している場合（クローズ）の比較をおこなった（図3 オープン、クローズ）。センサ1($\Phi 5.4$)、センサ2($\Phi 3.5$)とも、2つの条件下での測定の平均値に差異が確認できている。クローズ時には測定値のばらつきが大きくなることが標準偏差から見て取れるが、平均値の差に比べて十分小さなばらつきであり、金属に埋め込まれたセンサであっても、金型の接触・開放の検出が可能であることが確認できた。

次に、上下型間の充填条件（空隙、樹脂プレート：ABS、PA、PP）と間隔（1mm、2mm）とを変えて同様に測定したところ（図3 Air 1mm～PP 2mm）、どの条件においてもオープンと差異の無い結果となった。このことから、肉厚が1mm以上の成形であれば樹脂材料や対向する金型の状態によらずオープン状態と同等（一定の測定結果となる）とみなしてよいことがわかった。

さらに、インサート成形の状況を模して、図2に示す配

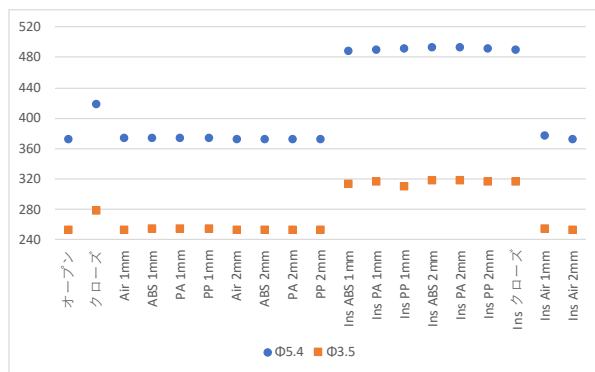
置で上下型の間に樹脂プレートと帯板（SUS304 $t=0.1\text{mm}$ $w=4.2\text{mm}$ ）を挟み込んで測定したところ（図3 Ins ABS 1mm～Ins PP 2mm）、どの条件においてもインサート金物が無い状態との差異が確認できた。クローズ時のインダクタンスとも大きな差が現れているが、これはセンサが対向する金属の材質の違い（模擬金型：鉄系、インサート：SUS304）によるものと考えられる。

これらの検証の結果、インサート金物の検出に渦電流方式が有効であることが確認できた。

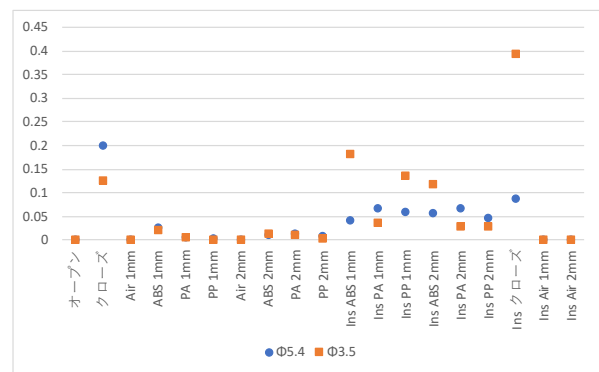
3. 2 インサート金物の変位による計測値の変化

前節において、インサート金物の有無の検出が可能であることが検証できたため、次にインサート金物の変位が検出できるか検証をおこなった。樹脂材料の違いによる測定値の差異は認められなかったため、この検証ではインサート成形で多く使われるABS材（プレート厚2mm）のみを対象とし、インサート金物は前節と同じSUSの帯板を同じ位置に配置した。

インサート成形中の金物の浮きを想定した条件として、模擬金型が密着した状態から型が開く方向（z方向：図1の上下方向）に0.05mmずつ移動させてインダクタンスを測定した。移動させるたびに20サンプル測定したインダクタンスの平均値と分散を図4に示す。測定結果から、移動距離に応じてインダクタンスが減少することが確認でき、0～0.5mmの範囲では0.05mmの分解能が得られている。インサート金具が近い位置にあるときは測定値のばらつ

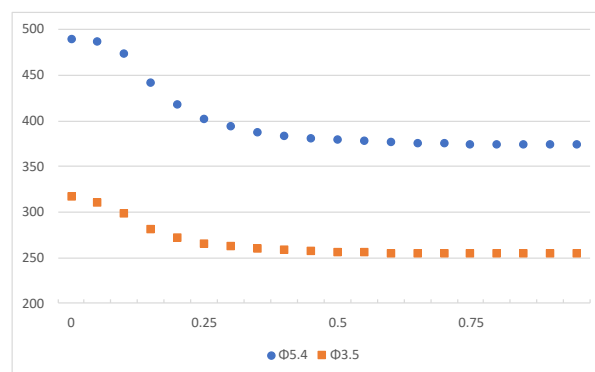


(a)平均値

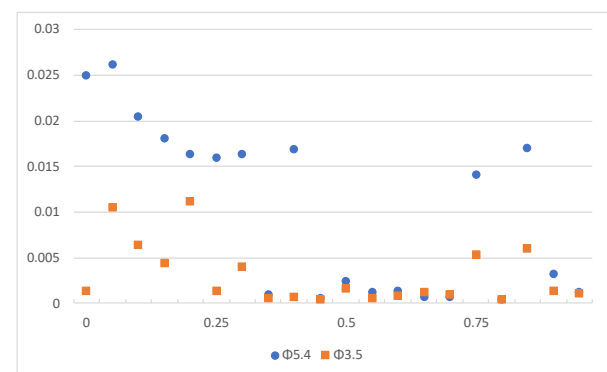


(b)標準偏差

図3 条件によるインダクタンスの変化



(a)平均値



(b)標準偏差

図4 z方向の変位によるインダクタンスの変化

きが比較的大きいが、十分小さな値であり、分解能への影響はない。

次にインサート金物の横ずれを想定した条件として、インサート金型をY方向（図1の前後方向）に移動させてインダクタンスを測定した。インサート金物のみを正確に微小移動させることが困難であったため、下型ごと手前に引き抜くように移動させた。本来、z方向は密着であるべきであるが、型および試験体を移動させるために0.05mm上げた状態で下型を移動させ、測定を行った。移動させるたびに20サンプル測定したインダクタンスの平均値と分散を図5に示す。

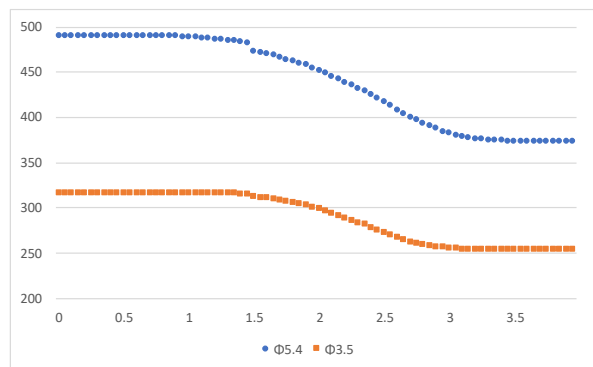
Φ5.4のセンサでは、変位量が0.0~1.0mmの範囲では、インサート金物が移動してもセンサ面に接する金属面の面積の変化が無いまたは小さいため、インダクタンスの変化は見受けられない。1.0~3.2mmの間では、センサ面に正対する金属面の面積が変化することから、変位によってインダクタンスの変化が現れており、0.05mmの分解能で変位検出が可能となっている。Φ3.5のセンサはセンサ径が小さい分変化が現れる範囲が短い、同様の傾向は得られている。

これらの検証の結果、インサート金物の端面がセンサ面を横切るようにセンサ配置を計すれば、渦電流方式のセンサで0.05mm分解能の変位検出が可能であることが確認できた。

3. 3 コネクタを事例とした検証

具体的な製品を想定した事例として、図6 (a) に示す0.5mmピッチのFFCコネクタの不良検出について実験をおこなった。コネクタはΦ3.5のセンサの直下に配置し、コネクタと同じ厚さ（2mm）の鉄板に穴をあけた治具で位置合わせをおこなった。良品コネクタ4個を各2回、1回につき20サンプル（計160サンプル）の測定を行い、次に1つのコネクタのピンを1本引き抜いて不良品コネクタを作り、同一のものであるが取り出しと配置を4回繰り返して各20サンプル（計80サンプル）の測定を行い、差異が検出できるか検証した。

良品・不良品の測定値の平均と誤差範囲（3σ）を図6(b)に示す。不良コネクタが1点のみであったため、誤差範囲が非常に小さいが、仮に正常品と同等の誤差範囲であつ



(a)平均値

たとしても分別は可能であるとみられる。この結果から、幅0.2mm程度の微小なピンの欠落も検出可能であることが示唆されたが、インダクタンスの差が測定値の1/25,000程度であり、安定した検出が可能であるかはさらなる検証が必要であると考えられる。

4. まとめ

インサート成形の金物の変位を検出するため、渦電流式センサによる金型内の変位検出について検証をおこなった。金属で囲まれた金型内では、周囲の影響を受けて変位検出が困難であると考えられていたが、条件によって0.05mm程度の分解能で検出できることが確認できた。

今後はセンサを実際の金型内に取り付け、成形品での検証をおこない、本技術の有用性を示す予定である。

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] 山田, 坂東, 浅井, 久富, 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5報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp. 16-19, 2016

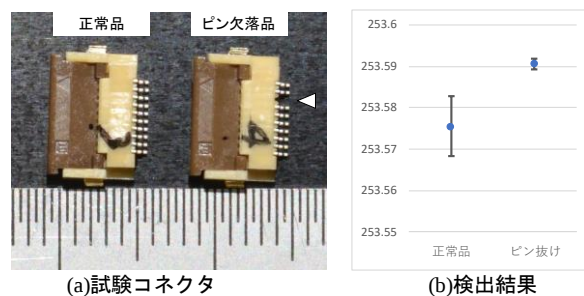
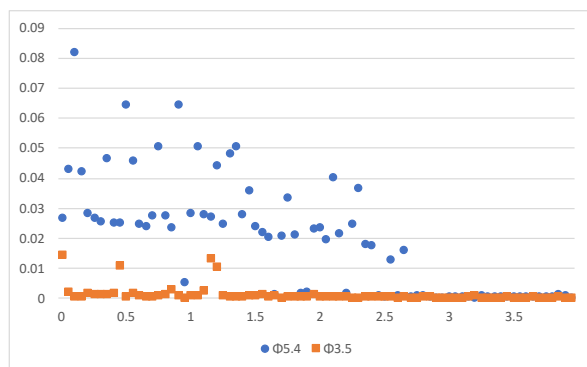


図6 FFCコネクタの不良検出



(b)標準偏差

図5 Y方向の変位によるインダクタンスの変化

インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第2報)

－ 射出成形インサートの接合強度シミュレーション －

坂東 直行

山田 俊郎

久富 茂樹

浅井 博次

A study on a smart mold for insert injection molding (2nd Report)

- Simulation of joint strength of injection molded insert -

Naoyuki BANDO

Toshio YAMADA

Shigeki KUDOMI

Hirotsugu ASAI

あらまし 本研究では、異種材料接合強度の評価をシミュレーションで実施した。本報ではネジインサートを題材に、螺旋形状と楔形状を有する形状で特徴を比較した。その結果、変位量を小さくするには、インサートの体積を大きくすることが有効であり、インサート固定が壊れにくくするためには、突起部の稜線長が長くなるよう、形状を工夫することが有効であるとわかった。

キーワード 数値解析, シミュレーション, 射出成形, インサート

1. はじめに

省エネルギー志向の高まりから、輸送機械を中心に、従来の金属材料からプラスチック材料への転換が進められている。プラスチックは金属と比較して軽量ではあるが強度が弱いため、全体的にはプラスチックを使うが強度が必要となる部分には金属を使うなど、あるひとつの部品の中で適用箇所ごとに材料を使い分けることで部品の機能維持が図られている。また、部品は組み立て作業を省くため、一体物であることが望ましく、こうした傾向から金属・プラスチック間の接合技術には高い関心が寄せられている。プラスチックと金属の接合強度は接合界面の性状や接合部の形状によって決まる。この内、接合部の形状は容易にコントロールできることから、強度向上には有効な手段である。また、こうした接合部の形状による接合強度向上のアプローチでは、トライ&エラーがローコストで実施できるシミュレーションが有効であると考えられる。

そこで本研究では、異種材料接合強度の評価をシミュレーションで実施した。本報では、インサート射出成形を題材にケーススタディを行ったので報告する。

2. 解析モデル

本報では、図1に示すネジインサートを取り上げる。

図1(a)は、プラスチックの成形とインサートの固定を射出成形プロセスで一度にできるよう、ネジ穴底面が閉じたものである。インサートの外周には螺旋状の突起があり、ねじれ方向の異なる帯を3つ形成している。以下で

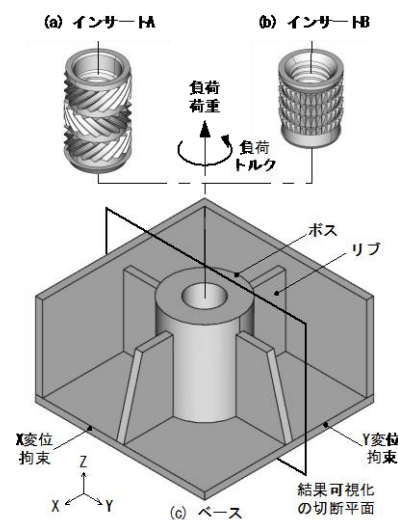


図1 解析モデル

は、これをインサートA^[1]と呼ぶ。図1(b)は、ネジ穴が貫通しており、温めたインサートをプラスチックに押し当てて固定する圧入プロセスに対応したものである。インサートの外周には楔形状の突起があり、帯を4つ形成している。以下では、これをインサートB^[2]と呼ぶ。図1(c)は、インサートを保持するボスと、ボスの直立を支えるリブがあるプラスチックケースの角を想定したフレームである。プラスチックケースの角を直交する2つの垂直平面で切断した形状であり、切断面は図中のXZ平面とYZ平面になる。以下では、これをベースと呼ぶ。

インサートの形状が、インサート固定の強度にどのように寄与しているかは不明である。そこで、ベースにインサートAが固定されたモデルとベースにインサートBが固定されたモデルで、形状と強度の特徴を比較評価す

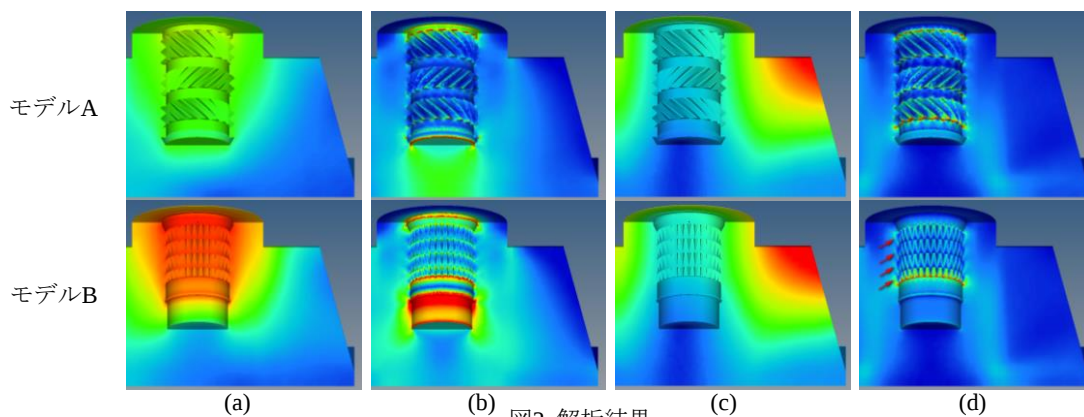


図2 解析結果

ることとした。以下では、前者をモデルA、後者をモデルBと呼ぶ。なお、モデルAではインサートの底面とボス穴底面は接触しているが、モデルBではインサート底面とボス穴底面の間に隙間がある構造となる。

シミュレーションモデルの構築にあたって、モデルを簡単にするため、次のような仮定を設けた。まず、インサートとベースは接着しておらず、接触による保持のみが作用していると仮定した。また、接触面には摩擦力はないと仮定した。加えて、射出成形や圧入で生じる残留応力は考慮しないこととした。以上の仮定から、ベースにはインサートの形状に応じた窪みがあるものとし、ベースにインサートがはめられたモデルを解析した。

シミュレーションの境界条件としては、ベースの切断面と底面に対して、変位を拘束した。荷重条件としては、インサートの上面円周縁に、鉛直上向きに引き抜く荷重が作用した場合と、インサートの中心軸まわりに回転トルクが作用した場合の2パターンを設定した。なお、荷重値は30N、トルクは1N/mを与えた。材料特性としては、インサートには真鍮、ベースにはPCの物性を与えた。

3. 解析結果

結果を図2に示す。なおここでは、リブの中立面を切断平面とし、ベースのみを描画対象とした可視化結果を示している。また、比較を容易にするためモデルAとモデルBで色分布のフルスケールを同一にしている。図2(a)は、引き抜き荷重を与えた場合の変位量を、図2(b)は相当応力を表す。変位はボス穴上端で最大となり、モデルBのほうがモデルAよりも48%大きかった。相当応力はインサートの底面と上面の円周縁で高くなり、最大値はモデルAとモデルBでほぼ等しかった。図2(c)は、回転トルクを与えた場合の変位量を、図2(d)は相当応力を表す。変位は、図中右側のリブ先端で最大で、モデルBのほうがモデルAよりも10%大きかった。相当応力はインサート外周の突起部先端で高く、最大値は最も深い位置にある突起帯の縁であった。最大値はモデルAがモデルBの4.4倍だった。

4. 考察

同じ荷重とトルクを与えたモデルAとBで変位が異なった理由としては、ボス部に占めるインサートの体積の違いと考えられる。真鍮はPCより変形しにくいいため、ボス部に占めるインサートの量が多いモデルAが有利で、さらにモデルBはインサートとボス穴底面間に空間があることも不利に働いたと思われる。ここから、外力による変形を小さくするには、インサートを大きくすることが有効といえる。なお、インサート固定の壊れやすさに関しては、回転トルクを与えた場合の相当応力が大きいことから、モデルAが不利といえる。図2(d)をみると、モデルBでは高い応力が集中している突起帯の縁以外に、インサート外周の突起先端部にも応力が分布していることがわかる(図中矢印)。螺旋形状よりも楔形状のほうが突起先端部の稜線長が長いことから、楔形状では荷重を稜線状に分布させたときの局所的な荷重が小さくなり、比較有利であったと考えられる。

5. まとめ

ネジインサートを題材に、螺旋形状と楔形状を有する形状で特徴を比較した。その結果、変位量を小さくするには、インサートの体積を大きくすることが有効であり、インサート固定が壊れにくくするためには、突起部の稜線長が長くなるよう、形状を工夫することが有効であるとわかった。また、プラスチックと金属の接合であるインサート接合において、接合強度に寄与する形状パラメータが明らかになったことから、異種材料の接合強度の向上にシミュレーションが有効であることを示すことができた。

文 献

- [1] Fitsco Industries Ltd, "Mouldfit Range", GrabCAD, <https://grabcad.com>.
- [2] Fitsco Industries Ltd, "Multifit Range", GrabCAD, <https://grabcad.com>.

設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発(第2報)

－フライス加工機への適用－

横山 哲也 久富 茂樹

Development of Equipment Data Collection and Storage System (2nd Report)

－Application to Milling Machine－

Tetsuya YOKOYAMA Shigeki KUDOMI

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、昨年度に構築した基本システムを用いて、フライス加工機の電流データを収集・蓄積し、データの利用方法について検討した。本報ではその内容について報告する。

キーワード データ収集, IEEE1888, 切削抵抗

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、設備機器のデータを収集・蓄積し、解析するシステムの構築が必要であり、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。

本研究では設備機器の改修を必要とせず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っている。昨年度は基本システムを構築し、時系列データの収集・蓄積が可能であることを確認した^[1]。本年度はNCプログラムで動くフライス加工機での電流データの収集・蓄積を行い、データの利用方法について検討したので報告する。

2. 時系列データの収集・蓄積

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^[2]をベースにシステムを構築した。システム構成要素は、図1に示すセンサノード、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。センサはセンサノードに接続され、センサ出力は計算処理を経て、無線通信でゲートウェイに送信される。ゲートウェイで受信したデータはEthernet通信でストレージへ送信され、ストレージに蓄積される。アプリケーションではストレージに蓄積されたデータを取得し、時系列データのグラフ表示や、CSVファイル出力を行う。

取扱うセンサは、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。本研究では電流を測定するため、

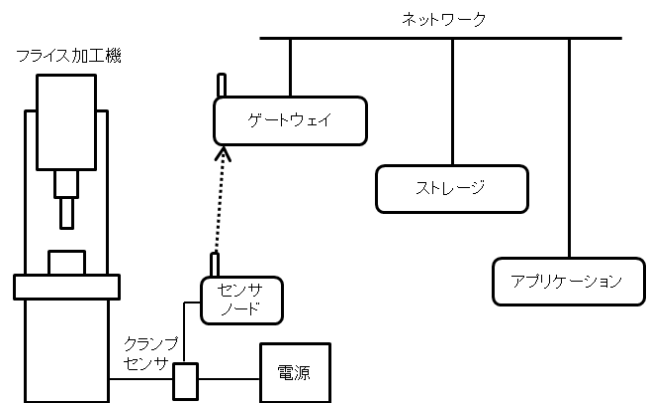


図1 データ収集・蓄積の構成

表1 センサノードのサンプリング間隔

AD変換	100μsec
実効値計算	100msec
データ送信	1sec

容易に取り付けが可能である分割型のクランプセンサを、フライス加工機の商用電源ケーブルにクランプした。

フライス加工機の電流を計測する際のセンサノードのサンプリング間隔（処理時間間隔）を表1に示す。マイコンのAD変換を用いて電流の瞬時値を計測し、6周期分（60Hz）のデータから電流実効値を計算する。計算したデータは1秒ごとにまとめてゲートウェイに送信することで、送信にかかるオーバーヘッドを少なくする。これにより、ストレージ上には100msec間隔のデータが蓄積される。フライス加工は切削が断続となることがあるため、短いサンプリング間隔は、加工機の細かい動きを検出することができる。

3. フライス加工機への適用

3. 1 切削時の電流検出

フライス加工機は、主軸に取り付けられた切削工具を回転させながらXYZ方向に動かすことで、被削材を削り所望の形状を作り出す。切削工具が被削材を削る際、工具は被削材から反力(切削抵抗)を受ける。その大きさは切削条件、被削材の種類などに応じて変わる。

切削加工では切削抵抗を把握することで、工具の寿命管理、負荷状況の把握や異常検出を行うことが可能となる。切削抵抗を正確に知るには、動力計などを加工機に取り付けデータ計測する必要がある。しかし、費用がかかることから、その重要性は認識されていてもデータ取得までに至らない状況が見受けられる。そこで以下に示す方法で、電流の時系列データから切削抵抗により生じる、切削時の電流の検出を試みる。

NCプログラムでフライス加工機を動かす際、加工基準点をずらすなどを行い、切削なしの電流を計測する。計測した時系列データには、主軸モータの回転や、主軸と加工テーブルのXYZ方向の移動に応じた電流が含まれるだけで、切削抵抗により生じる電流は含まれてない。この時系列データに対して、同一のNCプログラムで被削材を切削した際の時系列データを重ね、時間軸を合わせる(図2)。このときの2つの時系列データの差は、切削抵抗により生じる電流と考えられる。図2は次節で行った面出し加工時の時系列データで、破線枠内で2つの時系列データに差が生じており、切削抵抗が発生していると考えられる。

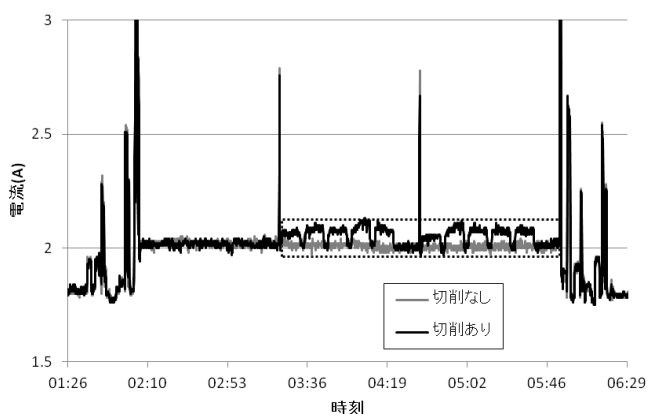


図2 時系列データの比較

表2 切削条件

工具	フラットエンドミル φ 10mm, 2枚刃
回転数	3000rpm
切削送り量	600mm/min
被削材	Al2017

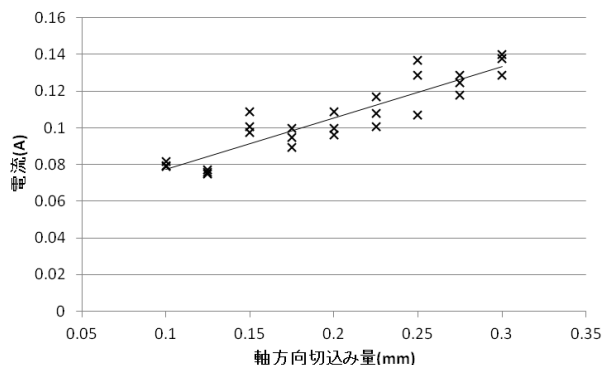


図3 切削抵抗と電流の関係

3. 2 切削抵抗と電流の関係

フライス加工機で面出しを行い、その際の電流の時系列データから、切削抵抗と切削抵抗により生じる電流の関係を求める。

表2に、面出し加工の切削条件を示す。面出しを行う被削材の面の大きさは100×30mmである。異なる軸方向切込み量で加工することで切削除去量を変え、切削抵抗を変化させる。時系列データから抽出する電流値は、水平方向切込み量6mmの切削時の電流とした。

図3に軸方向切込み量と切削時電流(平均値)の散布図を示す。図中の線は回帰直線である。ここでの軸方向切込み量は切削抵抗に相当することから、同一のNCプログラムで動作する切削なしの時系列データと、切削ありの時系列データの差の電流値は、切削抵抗の大きさに応じた値をとることが示唆された。

本手法では、切削抵抗の値を求めることは出来ないが、同一の切削条件下での電流を比較することで、切削抵抗の評価ができると考える。これより、工具寿命管理や異常検出への適用が期待できる。

4. まとめ

本研究では設備機器の改修を必要とせず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、解析が可能となるシステムの開発に取り組んだ。開発したシステムを用いて、フライス加工機の電流データの収集・蓄積を行い、データの利用方法を検討した。その結果、同一のNCプログラムで動作する切削なしと切削ありの電流の時系列データの差は、切削抵抗の大きさに応じた値をとることが示唆された。

文 献

- [1] 横山ら, "設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発", 岐阜県情報技術研究所第17号, pp.58-59, 2016.
- [2] 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.

金属部品の外観検査システムの研究開発

— 照度差ステレオ法による検査システムの構築 —

窪田 直樹 渡辺 博己 棚橋 英樹
加藤 邦人* 長谷部 瑛久*

Research of visual inspection system for metal parts - Construction of Inspection System by Photometric Stereo -

Naoki KUBOTA Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI
Kunihito KATO* Akihisa HASEBE*

あらまし 岐阜県の製造業のうち、金属製品製造業は大きなウェイトを占めている。これらの部品を製造・輸送する上で、部品の表面に細かい傷・打痕等が発生すると、意匠を損ねたり、塗装の劣化が生じたりするなど問題が発生することがある。そのため、次の工程に進む前の検査でこれらを見出すことは非常に重要である。一方で、これらの傷・打痕は光の当たり方によっては発見がしづらく、検査に熟練を要することがある。本研究では、熟練検査者の作業軽減を図るため、照度差ステレオ法によって傷や打痕を検出する技術を開発する。今年度は、照度差ステレオ法による画像取得のためのシステムを構築したので報告する。

キーワード 照度差ステレオ法, 外観検査, 金属

1. はじめに

岐阜県の製造業のうち、自動車、航空機をはじめとする機械部品製造業は非常に大きなウェイトを占めている。各種部品は、ある程度まとまった数(ロット)ごとに製造・出荷されるが、一部の部品に欠陥があれば、その部品を含むロット全てが欠陥扱いになることがあり、大きな損害になる。そのため、出荷前の検査は非常に重要である。このような欠陥検査項目の一つに、傷などの有無を調べる外観検査がある。傷のある部品は、意匠を損ねたり、塗装の劣化を招いたりすることがある。

現在、部品の外観検査には、カメラとコンピューターを用いた画像処理による方法と、検査者の目視による方法とがある。画像処理による外観検査は、電子部品をはじめとする小型部品の製造分野においては主流になっており、配置ズレや欠損、傷などの検出に威力を発揮している。一方、自動車関連部品のように大きな曲面を持った部品の検査は、電子部品用の画像処理をそのまま適用させることができない。そのため、ある程度大きな部品の検査は目視で行うことが主流となっている。しかし、目視による検査は、熟練を要することが多く、長時間の

集中力が必要であり、疲労に伴う見落としが発生するという問題がある。このような問題の改善のためには、画像処理による外観検査の適用範囲を広くし、検査者の負荷を減少させる必要がある。

本研究では、検査対象物に向けて異なる位置から順に照明を当て、それぞれの照明下での画像をカメラで撮影、画像処理することで、対象物表面の法線ベクトルを算出する照度差ステレオ法を利用することで、検査対象物表面の法線ベクトルの変化から傷や打痕を検出する技術を開発する。

今年度は、照度差ステレオ法による外観検査システムの構築を行ったので報告する。

2. 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法は、複数の光源から物体に光を照射し、その画像を画像処理することで物体表面がカメラに対してどの方向を向いているかを推定する方法である。

一般に、物体の表面での反射光は、入射角と同じ角度で反射する(鏡面反射)光と、周囲に様に拡散する光に分けられる。後者の光の拡散はランバート反射と呼ばれ、式(1)で表すことができる。

* 岐阜大学工学部

$$I_D = \hat{N}^T \cdot \hat{L} C I_L \cdot \cdot \cdot (1)$$

- I_D : 物体表面の微小領域の輝度
 $\hat{N}^T$: 物体表面の微小領域の単位法線ベクトル(Tは転置を表す)
 $\hat{L}$: 物体表面の微小領域から光源Lへ向かう単位ベクトル(以降光源ベクトル)
 C : 物体表面の微小領域の反射率
 I_L : 物体表面の微小領域への照度

この式から、光源ベクトルおよび照度と反射率の積が既知であれば、観測した物体表面の輝度をもとに、微小領域の法線ベクトルと光源ベクトルの内積すなわち両ベクトルがなす角度を求めることができる。

ここで、各ベクトルは3次元ベクトルであるので、図1

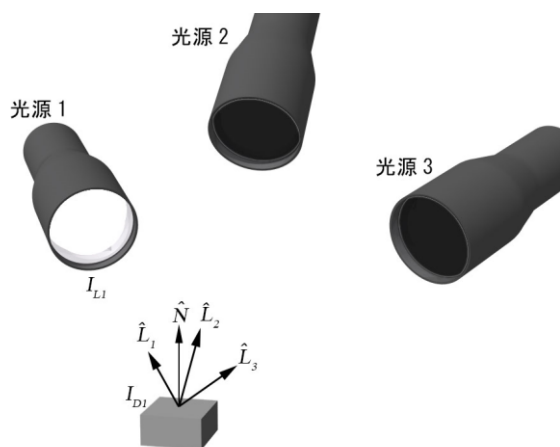


図1 照度差ステレオ法(光源1を点灯した状態)

で示すように3光源の情報があれば、式(2)のとおりの法線ベクトルを一意に推定することができる。

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{L}_1^T \\ \hat{L}_2^T \\ \hat{L}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{D2} \\ I_{D3} \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot (2)$$

カメラで撮影した画像はマス目状の画素の集合であり、それぞれの画素に写る領域を上記の微小領域とみなすことで、撮影された領域の法線ベクトルを連続的に取得することができる。この法線ベクトルの変化などを調べることで傷・打痕等を見つけることができると考えられる。

照度差ステレオ法は、比較的短時間(照明の切り替え時間程度)で撮影が終わる、1台のカメラで撮影するのでカメラ間キャリブレーションが必要ない、ランバート反射がみられる全ての画素に対して法線を求めることができる、といった特徴がある。

3. 照度差ステレオシステムの構築

3. 1 システムに用いる光源

前章で述べたとおり、微小領域の光源ベクトル、照度

および輝度が観測できれば、その領域の法線ベクトルを求めることができる。

一般的な光は、点光源から発せられる光のように、光源から球状に広がり、その照度は光源からの距離の二乗に反比例する。そのため、光源の微小領域との位置関係によって、光源ベクトルの向きや照度が変化する。一方、平行光は、光が拡散することなく直進するため、光源の微小領域との位置関係に関わらず、光源ベクトルの向きや照度が一定である(図2)。検査対象の微小領域ごとに光源との位置関係を明確にすることは困難であるため、照度差ステレオ法では平行光源を用いる。平行光を得るには、点光源と対象物との距離を十分に離す方法と、特殊なレンズ(テレセントリックレンズ)を用いて作り出す方法がある。本研究では、装置全体の小型化を見据え、テ

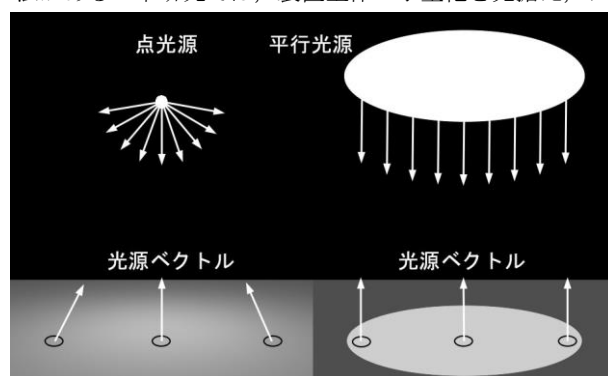


図2 点光源と平行光源

レセントリックレンズを用いることで平行光を得ることとした。

3. 2 構築したシステム

図3に、構築したシステムの撮影部分を示す。

カメラはEO-5012 LE(エドモンド・オプティクス・ジャパン製)、レンズはM1214-MP2(computar製)で、以下の仕様・設定で使用している。

撮像素子サイズ	5.6mm × 4.2mm
有効画素数	2560×1920
階調	12ビット

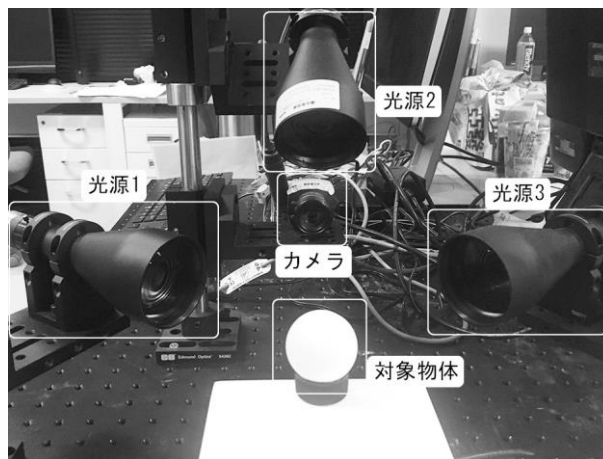


図3 システムの撮影部分

フレームレート	10.01fps
映像出力	USB 3.0
焦点距離	12mm
開放絞り	F1.4

光源は、LED照明ICS2(ADVANCED ILLUMINATION 製)にTSテレセントリックバックライトイルミネーター (エドモンド・オブティクス・ジャパン製、レンズ径約 60mm)を接続したものを、カメラの上および左右に設置した。それぞれの光軸は、カメラの焦点から約26cmの位置で交差するように調整した。

カメラは、USBケーブルを介してコンピューター EliteDesk 800G2(ヒューレットパッカード製)に接続している。また、各LED照明の信号線をDAコンバーター DAI16-4(CONTEC製)に接続し、コンピューターから照明の点灯/消灯ができるようになっている。

図4に、撮影アプリケーションの画面を示す。このアプリケーションは、最大4台の照明を任意の組み合わせで点灯/消灯させる制御機能と、各組み合わせの下で画像を連続的に撮影・保存する機能を有する。画像を保存する際には、照明の組み合わせパターンごとにフォルダを作成

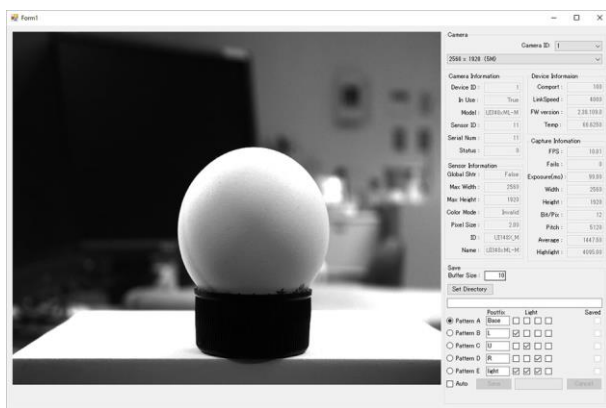


図4 撮影アプリケーションの画面

し、撮影時刻をファイル名とすることで、後処理でのミスを低減させるようにした。

本研究では、画像を撮影する際に、全照明を消灯した状態と、3台の照明を1台ごと点灯させた状態(計3種類)の画像を、それぞれ連続で10枚ずつ撮影した。さらに、画像処理の前処理として、次の処理を行った。

1. 時間方向のノイズ(画素値の揺らぎ)の影響を低減させるために、連続撮影した10枚の画像の平均画像を作成した。
2. ホットスポット(常時点灯している画素)の影響を低減させるため、各照明下で撮影した画像の平均画像から、無照明で撮影した画像の平均画像を減算した画像を作成した。

これ以降の画像処理は、全てこの前処理を行なった画像を使用した。

3. 3 光源ムラの低減

図1中の光源1を点灯させた状態で、カメラの光軸に対しほぼ垂直に設置した石膏製平面を撮影した画像(以下

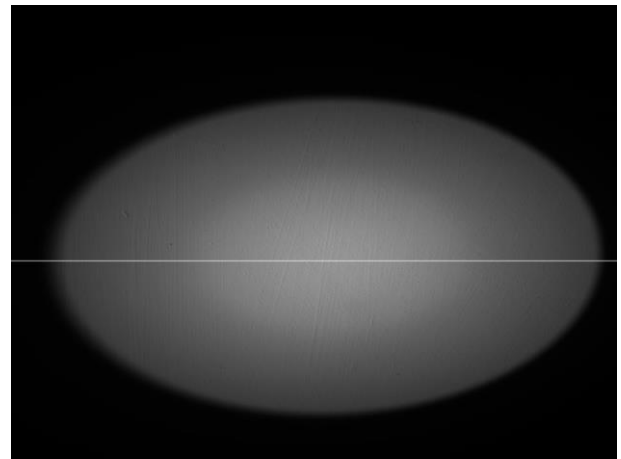


図5 光源1画像

光源1画像)を、図5に示す。

光源1は、図5に向かって右手前方向から照射しているため、平面の照射部分は横長の楕円形状になっている。この楕円部分は、中心が明るく、周囲に向かうにつれて暗くなっている。理想的な平行光を得るには、テレセントリックレンズの焦点に点光源を置く必要があるが、本研究で使用したLED照明が点光源になっていないためにこのグラデーション状のムラが発生したと考えられる。

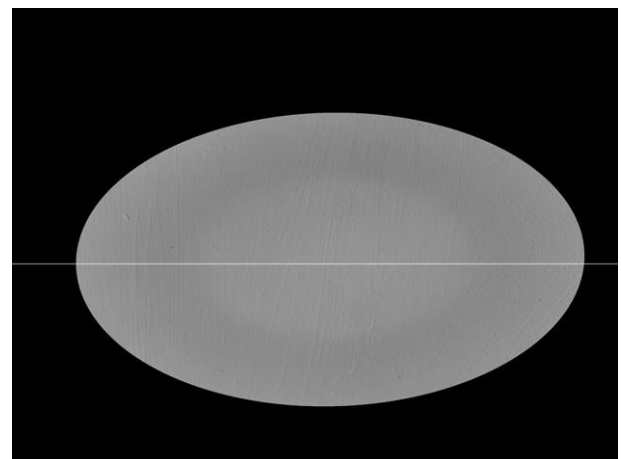


図6 補正後の光源1画像

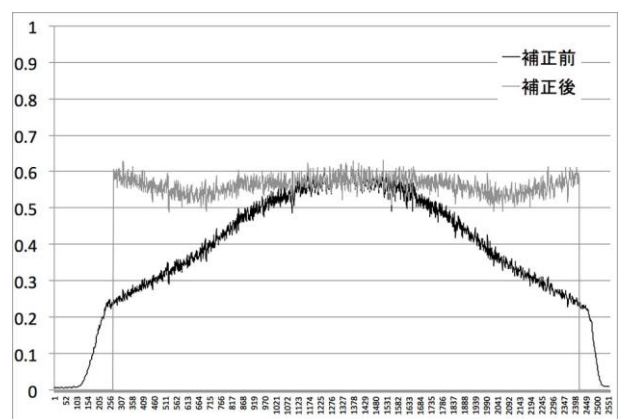


図7 補正前後の輝度

ここでは、このグラデーション状のムラが、光源の光軸を中心とした円対称象になっており、かつ、ガウス分布に従っていると仮定して、画像処理で補正した。補正後の照明1画像を図6に、図5および図6の中央部水平線上の画素の輝度(黒が0, 白が1)のグラフを図7に示す。

3. 4 光源ベクトルの推定

照度差ステレオ法では、光源ベクトルの推定が必要となる。一般には、カメラの前に金属球などを設置した状態で光を照射し、その鏡面反射の位置から光源ベクトルを推定する方法が多く用いられる^[12]。しかし、金属球はランバート反射成分が少ないため、光源やカメラの絞りの調整および照度の測定を別途行う必要がある。そこで本研究では、これらの調整・測定の簡略化のため、以下の手法を用いた。

まず、鏡面反射のない球体Sをカメラの前に設置して光源1画像を撮影する。この時、一番明るい点においても輝度が飽和しないよう十分注意する。続いて、この画像から球体が写っている円の領域Aを抽出する。ここで、撮影した画像の水平方向をX軸(右が正)、縦方向をY軸(下が正)とし、円の中心を (x_0, y_0) 、半径を r とする。この円は、中心 $(x_0, y_0, 0)$ 半径 r の球体Sを、XY平面上に投影したものに見做すことができる。すると、球体Sの表面は、以下の式で表すことができる

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2 = r^2 \cdots (3)$$

続いて、円の領域A内の任意の3点 (x_n, y_n) ($n = 1 \dots 3$)を選び、各点の輝度 I_{Dn} を取得する。ここで、球体S上の点 $(x_n, y_n, \sqrt{r^2 - (x_n - x_0)^2 - (y_n - y_0)^2})$ の法線ベクトルは、
$$\vec{N}_n = \left(\frac{x_n - x_0}{r}, \frac{y_n - y_0}{r}, \frac{\sqrt{r^2 - (x_n - x_0)^2 - (y_n - y_0)^2}}{r} \right)^T$$
で表すことができる。光源ベクトル $\hat{L}$ と、法線ベクトル $\vec{N}_n$ 、輝度 I_{Dn} はランバート反射の式(1)を満たすので、

$$\begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{D2} \\ I_{D3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{N}_1^T \\ \hat{N}_2^T \\ \hat{N}_3^T \end{bmatrix} \cdot \hat{L} C I_L \cdots (4)$$

が成り立つ。したがって、 $\hat{L}$ は次の式から求めることができる。

$$\hat{L} = \frac{1}{C I_L} \begin{bmatrix} \hat{N}_1^T \\ \hat{N}_2^T \\ \hat{N}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{D2} \\ I_{D3} \end{bmatrix} \cdots (5)$$

ここで、式(1)より、 $\hat{N} = \hat{L}$ となる点においては $I_D = C I_L$ が成り立つことから、球体S上、光源ベクトルと法線ベクトルが一致する点とその周辺の画素値の平均を取り、それを照度と反射率の積 $C I_L$ とする。

同様の手法で、光源2、光源3についても光源ベクトルおよび照度と反射率の積を求める。

上記の手法を用いて、図8に示す直径40mmの球体を各光源下で撮影した画像から光源ベクトルおよび照度と反射率の積を求めた。実際の球体Sの表面には微小な凹凸

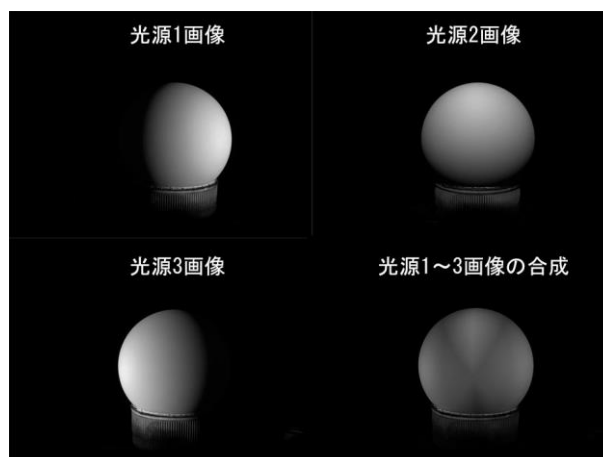


図8 球体を撮影した画像

などがあり、正確な光源ベクトルを求めることができない。そこで、任意の3点の組み合わせをできるだけ多くとり、その平均を求める処理を行なった。また、3. 3節で述べたとおり、光源にはムラがあり、非平面ではムラの低減が困難である。そこで、直径40mmの球に対し、60mm径の光束の中央付近を照射し、できるだけ明るい部分のみを使うようにした。さらに、任意の3点の組み合わせも、あまり遠い点の組み合わせを選ばないようにした。表1に、推定した光源ベクトルおよび照度と反射率の積を示す。

表1 光源ベクトルおよび照度と反射率の積

画像	光源ベクトル	照度と反射率の積
光源1画像	(-0.888, -0.005, -0.460)	0.823
光源2画像	(-0.001, -0.716, -0.698)	0.644
光源3画像	(-0.917, 0.0779, -0.392)	0.894

す。

求めた光源ベクトルを元に、図8で示した光源1~3画像に対して照度差ステレオ法を適用した画像を図9に示す。図中の黒色の部分は、いずれかの照明が当たっていないため法線を算出できなかった部分である。また、法線を算出できたところについては白色で示し、さらに黒い直線で算出した法線を示している。参考までに、理想的な球体に、表1で示す光源からの光が当たった時の照度差ステレオ画像をコンピュータ上で再現したものを理論値

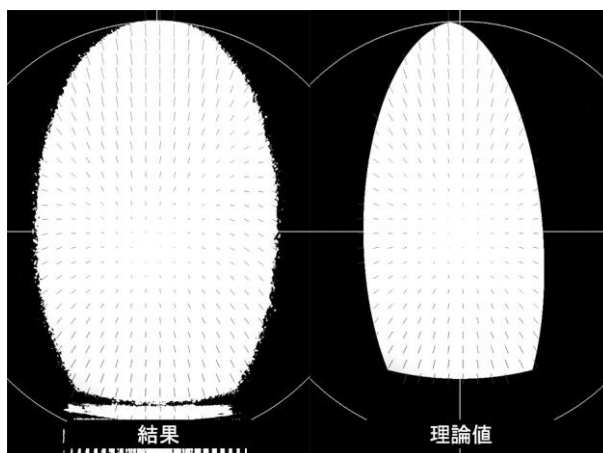


図9 照度差ステレオ結果と理論値

として併記した。

撮影時の環境光の影響などで光の当たっている領域が理論値よりも広く、その部分の法線の方法は正確に算出できていないが、理論値と重なる部分においては、法線の方法は概ね正確に算出されており、光源方向が推定できていることを示している。

4. 実験

前章で構築したシステムを用いて、平面の表面の凹凸を調べるため、その法線を求める実験を行なった。さらに、表面の凹凸を視覚的にわかりやすくするため、表面の凹凸の復元を行なった。

4. 1 平板の照度差ステレオ画像

石膏製平面を、カメラの焦点から約26cmのところに、カメラの光軸に対しほぼ垂直に設置した。その平面を、各光源を点灯した状態で撮影した画像を図10に、その画像から算出した照度差ステレオ画像を図11に示す。照度差ステレオ画像の右上部分にはほぼ正面向きの法線ベクトルが得られたが、左下部分に近づくにつれ、法線ベクトルが下を向くようになっている。これは、撮影した画像の光源ムラが十分低減できていないためと思われる、今後

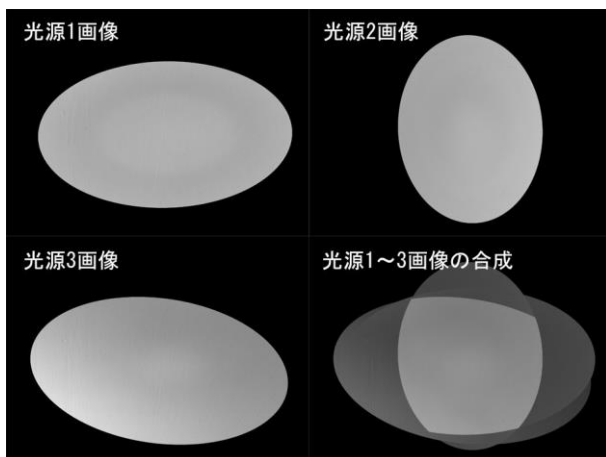


図10 石膏製平板を撮影した画像

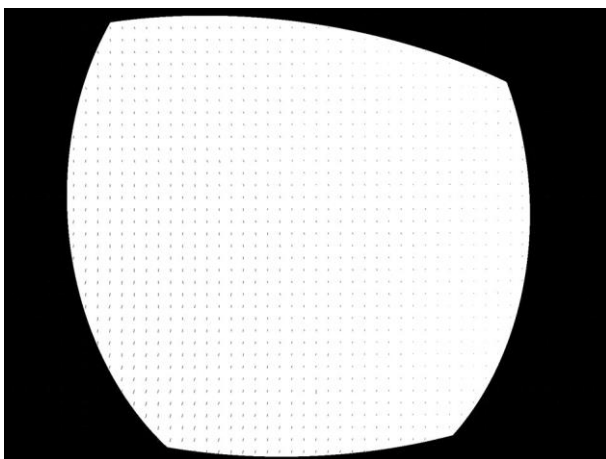


図11 照度差ステレオ画像

このムラをさらに低減していく必要がある。

図12に、光源画像と照度差ステレオ画像の一部を拡大したものを示す。図中の「灰色部」は、本来白色である石膏の表面の一部が灰色になっている部分である。石膏表面の凹部(傷)については照度差ステレオ画像に現れているが、灰色部については現れていない。これは、灰色部は色が異なるだけで表面に凹凸がなく、法線の変化がないためであり、このことから、将来部品の検査を行っ

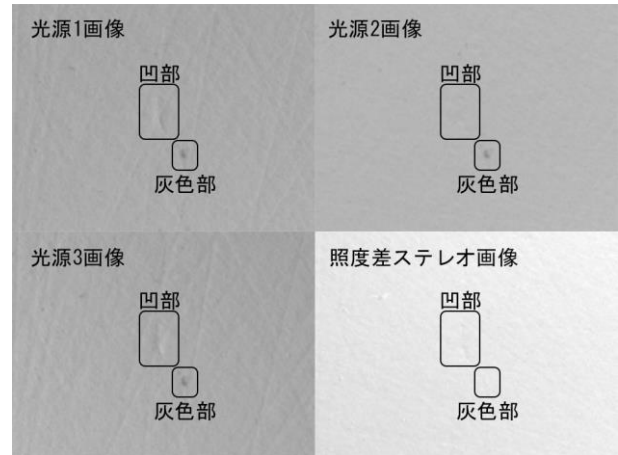


図12 照度差ステレオ画像の拡大図

た時に、塗装など部分的な色の変化を傷等と誤検出することがないことを期待できる。

4. 2 表面の凹凸

照度差ステレオ法は、3光源の光が当たった全ての画素に対して法線を求めることができる。そのため、その画素に対応する物体上の微小領域が滑らかに連続しており、かつ連続してカメラに写っていれば、元の物体の形状を復元することができる^[3]。ここでは、前節で撮影した画像上で発見した凹部を復元する。

まず、凹部を横断する直線(横200ピクセル、縦1ピクセル)において、法線ベクトルを元に奥行方向の情報を復元した。図13に、復元した直線部分のグラフ(横軸が左右、縦軸が奥行)と、対応する光源画像および照度差ステレオ画像を示す。

グラフは、前述した光源ムラや設置誤差のため水平にはなっていない(横200ピクセルの間に右端が7.5ピクセルほど手前になっている)が、ほぼ直線状になっている。横軸1285ピクセル付近と、横軸1330ピクセル付近に変化が見られる。この変化のある場所が、実際の平面上の凹部と対応しており、正しく復元できていることが確認できた。

続いて、図13に示した領域の周辺(横200ピクセル、縦100ピクセル)の範囲の復元を行なった。復元を行なった領域の簡易3次元表示を図14に示す。中央付近の凹部や、引っかき傷のようなものが再現できている。

なお、今回の実験では、画像上の200ピクセルは石膏平面上の8.3mmに相当した。

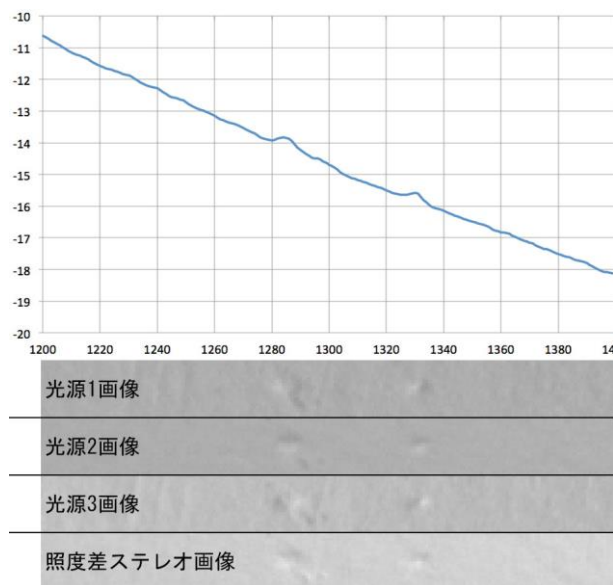


図13 照度差ステレオ法で復元した平面の一部

5. まとめ

照度差ステレオ法を用いて物体表面の傷・打痕等の検出を行うために、3つの平行光源を利用したシステムを構築し、撮影画像の保存まで自動で行うことができる環境を整えた。このシステムを用いて撮影した画像から、画像処理によって光源ベクトルおよび照度と反射率の積の推定を行うことができた。また、その情報を元に平面物体に存在する傷等を発見することができることを確認した。

今後は、光源のムラをハード的あるいは画像処理によって低減するとともに、平面上の傷・打痕の検出を自動的に行うアルゴリズムを考察・実装する。また、今回は

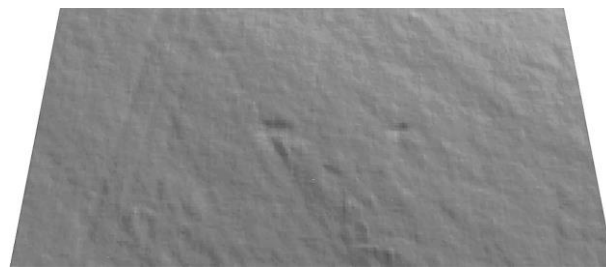


図14 簡易3次元表示

精度についての検証を行わなかったが、どの程度の精度で傷等の検出ができるかも調査する。

さらに、鏡面反射が見られる金属部品を対象として照度差ステレオ法が利用できるよう、平行光源の数を増やすなど対策を行って検証を行う。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団の研究助成によって実施しました。

文献

- [1] 松下康之, "照度差ステレオ", 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2011-CVIM-177, No.29, pp1-12
- [2] 井本治孝他, "反復照度差ステレオ法を用いた微細形状計測装置の開発", 日本機械学会論文集 Vol.82(2016), No.835, p.15-00512
- [3] 水永雄介他, "フォトメトリックステレオ法による物体形状の再構築", Reports of the Faculty of Science and Engineering, Saga University, Vol.33, No.1, 2004

機械学習を用いた作業時間推定システムの開発

渡辺 博己

曾賀野 健一

松原 早苗

棚橋 英樹

Development of Work Time Estimation System using Machine Learning

Hiroki WATANABE

Kenichi SOGANO

Sanae MATSUBARA

Hideki TANAHASHI

あらまし カイゼン活動における作業時間計測を支援するために、機械学習を用いた作業時間推定システムの構築を目指している。本研究では、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処理の精度を高めることを目的として、画像特徴表現手法の一つであるBag-of-Featuresにおける局所特徴量抽出手法、及びパターン認識モデルの一つであるSupport Vector Machineによる多クラス識別器構成手法について、幾つかの手法を検討し、画像分類実験を行った。また、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、時系列順に代表作業を並べることにより、作業チャートを生成するとともに、作業時間を算出し、本システムの有効性を確認した。

キーワード カイゼン, 機械学習, 作業時間推定, Bag-of-Features, Support Vector Machine

1. はじめに

製造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) ^[1]と呼ばれる工学的手法があるが、IEを活用した作業カイゼンにおいて、最初に取り組まなければならないのが現状分析である。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、作業者の作業状況を観察し、各作業にどの程度の時間を要しているのかを調査する。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]。

そこで本研究では、作業カイゼンにおける作業時間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、各作業の所要時間を推定するシステムの構築を目指している^[3]。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 (BoF) 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ている。

これまでに、アルミダイカスト部品の検査工程における作業画像について、SURF^[5]により局所特徴量を抽出し、一対他法による多クラスSVMを用いて識別することにより、目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の3つのクラスに分類するシステムを試作した^[6]。本年度は、試作システ

ムの認識精度を高めるために、BoFにおける局所特徴量の抽出手法、及びSVMによる多クラス識別器の構成手法について検討した。実験では、幾つかの局所特徴量抽出手法を比較するとともに、多クラス識別器の構成手法について比較した。また、分類結果に基づいた作業チャート生成処理を実装し、作業時間を推定した。以下、これらの内容について報告する。

2. 作業画像分類システムの試作

2. 1 対象作業の概要

本研究では、アルミダイカスト部品の検査工程を対象として作業画像进行分类する。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、約5×2×1[cm]の部品のバリの有無等を検査する(図1)。作業手順は、以下のとおりである。

- ①部品置き場から左手で部品を1個掴む。



図1 検査工程における作業の様子

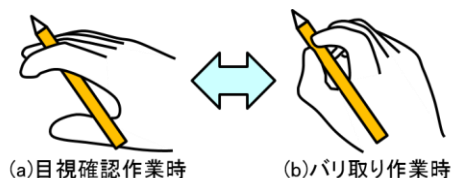


図2 バリ取り工具の把持状態

表1 作業映像の記録時間とフレーム数

ファイル名	記録時間	フレーム数
Movie1	35:09.073	63,210
Movie2	35:09.073	63,210
Movie3	5:54.821	10,635
Movie4	35:09.073	63,210
Movie5	35:09.073	63,210
Movie6	22:44.830	40,905
Total	2:49:15.943	304,380

- ②作業台上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する。
- ③バリがなければ、既作業部品箱に右手で部品を放出し、①へ戻る。
- ④バリがあれば、図2 (a) から (b) の状態に工具を持ち替え、バ리를削り取り、②または③に戻る。
- これらを踏まえ、本研究で分類するクラスは、目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の3つとし、それぞれの作業を以下のとおり定義した。

目視確認作業：両手で部品を把持している状態（作業手順②）。

バリ取り作業：右手で把持しているバリ取り工具を持ち替え始めてから、バ리를削り、再度両手で部品を把持するまでの状態（作業手順④）。

その他の作業：左手で部品を掴み、両手で把持するまでの状態（作業手順①）、左手から離れた部品が右手で放出され、作業台上に右手を戻すまでの状態（作業手順③）、及び部品の補充時や作業者の離席時など、目視確認作業、バリ取り作業以外の状態。

2. 2 作業画像の取得

作業画像は、1人の熟練作業員の手作業の様子を、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、動画ファイルとして取得した。カメラは、SONY製Action Cam (HDR-AS200V) を使用し、フレームサイズは1,920×1,080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。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表1に示す。なお、動画ファイルは、カメラの制約により、63,210フレーム目まで記録したところで自動的に分割され、新たなファイルに記録される。

2. 3 学習データの作成

学習データは、Movie1の全フレームについて、目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の3クラスに手作業で分



(a)目視確認作業

(b)バリ取り作業



(c)その他の作業

図3 各クラスの画像例

類し、順に28,011枚、21,601枚、13,598枚の計63,210枚の画像を学習データとして用意した。各クラスの画像例を図3に示す。

2. 4 試作システムの概要

試作システムは、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BoF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該当クラスに分類する。

BoFは、画像から局所特徴量を抽出し、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とにより特徴ベクトルを生成する画像特徴表現手法である。コードブックは、学習する全画像から抽出した局所特徴量をクラスタリングし、各クラスタの重心を要素（Visual Word）として生成する。ベクトル量子化ヒストグラムは、画像中の各局所特徴量について、最も近いVisual Wordを求め、対応するVisual Wordへの投票を繰り返すことにより生成する。特徴ベクトルは、ベクトル量子化ヒストグラムを局所特徴量の数で正規化することにより生成する。

識別器は、生成した特徴ベクトルを入力することにより構築する。識別器として用いるSVMは、様々なパターン認識問題に適用され、その有効性が確認されているが、SVMは、基本的には2クラス識別器である。そのため、多クラスに対して識別するには、複数のSVMを組み合わせた識別器を構成する必要がある。

試作システムにおける処理の流れを図4に示す。BoFおよびSVMの試作システムへの実装は、OpenCVをC#言語から使用するためのラッパライブラリであるEmgu CV^[7]を用いた。なお、試作システムについては、処理速度の高速化を図るために、1,920×1,080のサイズで入力される各フレームを640×360にサイズダウンするとともに、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（注目領域、Region Of Interest）を設定し、グレース

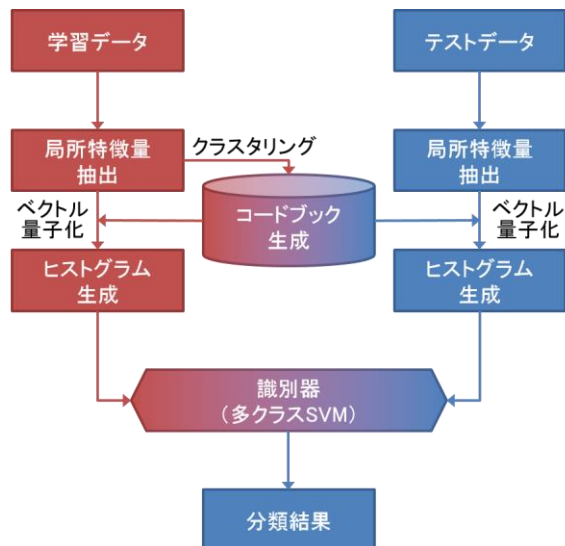


図4 画像分類処理の流れ

ケール画像に変換する前処理を実装している。

3. 局所特微量抽出手法の評価

3. 1 局所特微量抽出手法の概要

画像のスケール変化や回転に不変な特微量を抽出する SIFT^[8]や、SIFTの約10倍の高速化を実現したSURFは、BoFでよく用いられる局所特微量抽出手法である。

局所特微量抽出手法としては、SIFTやSURF以外にも様々な手法が提案されている。例えば、バイナリコードで特微量を生成することにより高速かつ省メモリ化を実現したBRIEF^[9]や、BRIEFにスケール不変性と回転不変性を導入したBRISK^[10]、ORB^[11]が提案されている。また、SIFTやSURFで使われているスケール空間の等方性に着目し、非線形・非等方性のスケール空間を利用したKAZE^[12]や、KAZEを高速化したAKAZE^[13]が提案されている。

他にも提案されている手法はあるが、本研究では、Emgu CVで利用可能な手法の中から、SIFT、SURF、BRISK、ORB、AKAZEの5種類について、BoFによる特徴抽出器を構築し、試作システムにおける認識率を評価する。

3. 2 局所特微量抽出手法の比較

実験では、SIFT、SURF、BRISK、ORB、AKAZEの5つの手法を用いて局所特微量を抽出し、Visual Word数を4,000として各コードブックを生成した。また、学習データは、目視確認作業、バリ取り作業、その他の作業の各クラスについて、1,000枚を2. 3節の学習データからランダムに選択し、各手法における多クラス識別器を構成した。評価にあたっては、Movie1からMovie6の全フレーム304,380枚をテストデータとして、学習、及びテストを10回繰り返し、試作システムにおける平均認識率を求めた。各手法について、局所特微量の抽出例を図5に、各クラスに対する平均認識

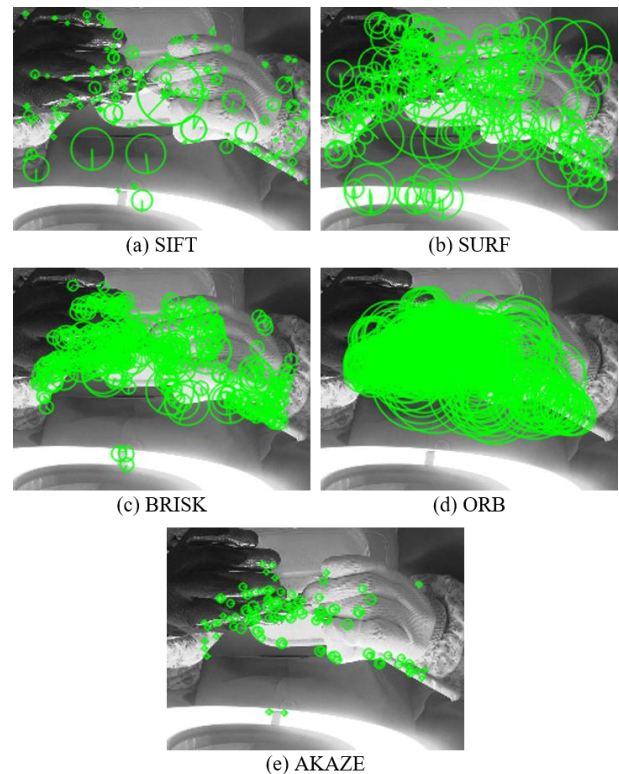


図5 各局所特微量の抽出例

表2 各局所特微量抽出手法における平均認識率[%]

クラス	SIFT	SURF	BRISK	ORB	AKAZE
目視確認	83.7	87.6	88.7	88.6	92.3
バリ取り	89.4	87.9	87.1	84.8	89.9
その他	95.8	94.8	92.6	91.9	94.9
全作業	88.7	89.6	89.3	88.3	92.3

率を表2に示す。なお、多クラス識別器については、後述する一対他法を用いて構成した。

表より、全体の平均認識率は、ORB、SIFT、BRISK、SURF、AKAZEの順に高くなった。また、AKAZEを利用した場合は、昨年度利用したSURFと比べて、平均認識率が2.7ポイント向上した。

4. 多クラス識別器構成手法の評価

2クラス識別器から多クラス識別器を構成する手法としてよく用いられているのが一対一法や一対他法^[14]である。しかしながら、両手法ともに、識別結果が不定となる場合があり、不定となる割合が試作システムの認識性能に少なからず影響すると考えられる。そこで、不定となる割合を評価する予備実験を行い、不定となる割合を極力小さくする多クラス識別器の構成手法について検討した。

4. 1 一対一法

一対一法は、 k 個のクラスから2個のクラスを選択して kC_2 個の全ての組合せについて2クラス識別器を構築し、各識

表3 比較実験の結果

識別器	項目	確定	不定	全体
一対一識別器	平均出現率[%]	98.9	1.1	89.6
	平均認識率[%]	90.1	40.5	
一対他識別器	平均出現率[%]	81.1	18.9	89.6
	平均認識率[%]	94.6	68.3	

別器の出力結果を該当クラスへ投票することにより、最も投票数の多いクラスを識別結果とする方法である。最多投票数となるクラスが複数ある場合、識別結果は不定となるが、どのクラスに識別するかをランダムに選択したり、クラス番号が若いクラスに決定したりする方法が行われている。

4. 2 一対他法

一対他法は、 k 個の各クラスに対して、対象クラスかそれ以外かを出力する2クラス識別器を構築し、1個の識別器で正の値を、 $k-1$ 個の識別器で負の値を出力する時に、正の値を出力する識別器のクラスを識別結果とする方法である。複数のクラスで正の値となる場合や、全てのクラスで負の値となる場合、識別結果は不定となるが、超平面からの距離が最も大きくなるクラスを識別結果とする方法が一般的となっている。

4. 3 一対一法と一対他法との比較

比較実験では、BoFの局所特徴量にはSURFを利用し、Visual Word数を4,000としてコードブックを生成した。また、学習データは、3. 2節の実験と同様に、各クラスについて1,000枚をランダムに選択し、一対一法、及び一対他法による多クラス識別器（一対一識別器、及び一対他識別器）をそれぞれ構築した。テストデータは、Movie1からMovie6の全フレーム304,380枚を対象とした。なお、実験では、学習、及びテストを10回繰り返し、テストデータに対して全クラスの識別結果が確定／不定となるデータ数の割合（平均出現率）と、正しく識別されたデータ数の割合（平均認識率）を求めた。また、不定時の識別結果は、各識別器における超平面からの距離を求め、距離が最大となるクラスとした。

実験結果を表3に示す。一対一識別器については、不定となる割合が低いため、不定時の識別結果が全体の認識率に及ぼす影響が小さい。しかしながら、一対他識別器については、不定となる割合が高く、不定時の識別結果が全体の認識率に大きく影響していることが分かる。

4. 4 一対他法と一対一法の組合せ

予備実験の結果を踏まえ、本研究では、識別器の認識性能を向上させるために、確定時の認識率が高い一対他識別器に、不定の割合が低い一対一識別器を組み合わせた多クラス識別器（組合せ識別器）を構成する。本研究で対象とする3クラス分類における組合せ識別器のクラス判定基準（図6）を以下に述べる。

(ア) 一対他識別器において、1つのクラスで正、2つのクラスで負となる場合（1P&2N、図5中の領域(1)）に

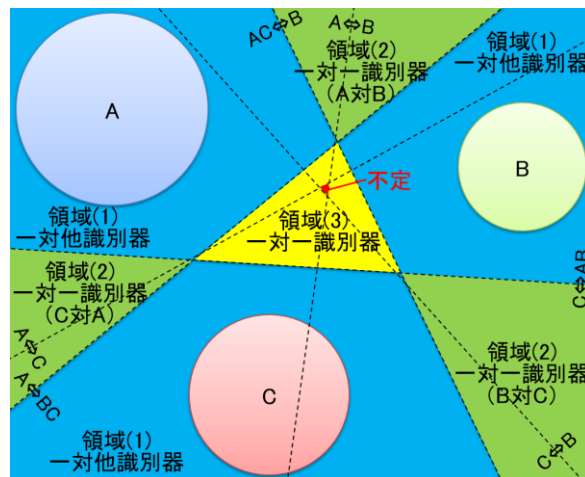


図6 組合せ識別器における判定基準

表4 組合せ識別器における各状態の平均出現率と平均認識率

項目	1P&2N	2P&1N	3P/3N	不定	全体
平均出現率[%]	81.1	4.3	14.0	0.6	90.7
平均認識率[%]	94.6	76.6	74.6	48.4	

は、正となるクラスを分類結果とする。

(イ) 一対他識別器において、2つのクラスで正、1つのクラスで負となる場合（2P&1N、図5中の領域(2)）には、正となる2クラス間の一対一識別器を用いてクラスを再判定し、正／負となるクラスを分類結果とする。

(ウ) 一対他識別器において、3クラスともに正／負となる場合（3P/3N、図5中の領域(3)）には、全ての一対一識別器を用いてクラスを再判定し、最多投票数となるクラスを分類結果とする。

(エ) (ウ)の一対一識別器において、最多投票数となるクラスが複数ある場合（不定）には、一対他識別器における個々の識別器の超平面からの距離を求め、距離が最大となるクラスを分類結果とする。

4. 5 組合せ識別器の評価

実験では、まず、3クラス識別に対する一対他識別器、一対一識別器を構成し、次に、前節の基準で分類結果を出力する組合せ識別器を構成することにより、全クラスに対する不定の出現率と認識率を評価した。なお、4. 3節の実験と同様に、SURFを用いて局所特徴量を抽出し、Visual Word数を4,000としてコードブックを生成した。また、学習データ、及びテストデータについても同様とし、学習、及びテストを10回繰り返した。表4に、組合せ識別器における1P&2N、2P&1N、3P/3N、不定の各状態の平均出現率と平均認識率を示す。

表より、組合せ識別器は、表3の一対他識別器と比較して、不定となる割合が0.6%に低下したため、不定時の認識率が48.4%に低下しても、全体の認識率に及ぼす影響が小さくなった。また、一対他識別器のみで構成した識別器と比べて、組合せ識別器は、認識率が1.1ポイント向上した。

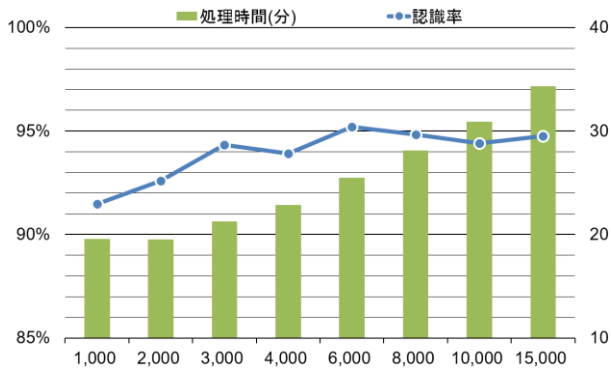


図7 Visual Word数の違い（横軸）による認識率と処理時間[分]（右側縦軸）の推移

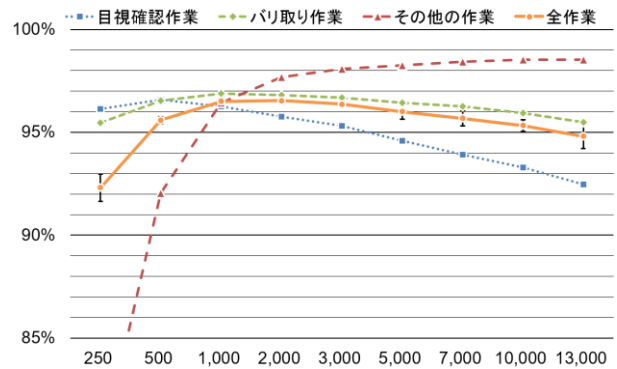


図8 学習サンプル数の違い（横軸）による各クラスの平均認識率の推移

5. 試作システムの評価

3, 4章の結果を踏まえ、試作システムを改良するとともに、昨年度^[6]と同様に、Visual Word数、学習サンプル数を実験により選定し、試作システムによる画像分類性能を評価した。

5. 1 Visual Word数の選定

BoFでは、Visual Word数が多いほど認識精度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。そこで、システムの試作にあたり、Visual Word数を選定するための実験を行った。

実験では、2. 3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Movie1の全フレームに対する認識率と処理時間[分]の推移を調査した。図7に結果を示す。なお、局所特徴量にはAKAZEを、多クラスSVMには組合せ識別器を使用した。

図より、Visual Word数が6,000までは、Visual Word数が増加するにつれて、認識率が高くなる傾向が見られたが、6,000以降は、ほぼ横ばいとなった。一方で、処理時間については、Visual Word数の増加とともに、長くなる傾向が見られたが、Movie1の再生時間よりは短くなった。そのため、本システムにおけるVisual Word数は6,000とした。

5. 2 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、2. 3節の学習データから各クラスについて同数のサンプルをランダムに選択し、サンプル数を変更した時のMovie1の全フレームに対する認識率の推移を調査した。なお、実験では、学習、及びテストを10回繰り返し、平均認識率を求めた。各サンプル数における平均認識率の

表5 改良前の試作システムにおける各クラスの平均認識率[%]

クラス	Movie1	Movie2	Movie3	Movie4	Movie5	Movie6	Total
目視確認	93.9	91.2	89.4	85.2	85.2	77.9	87.6
バリ取り	95.1	90.5	89.2	82.1	84.7	83.9	87.9
その他	96.1	95.2	94.4	94.7	94.3	93.8	94.8
全作業	94.8	91.9	90.6	87.1	88.5	83.8	89.6

表6 改良後の試作システムにおける各クラスの平均認識率[%]

クラス	Movie1	Movie2	Movie3	Movie4	Movie5	Movie6	Total
目視確認	96.4	95.4	94.4	92.9	94.6	88.6	94.0
バリ取り	96.9	93.3	91.1	89.3	90.2	87.6	91.9
その他	96.2	95.3	94.4	93.6	94.3	93.0	94.5
全作業	96.5	94.7	93.2	92.1	93.4	89.3	93.5

推移を図8に示す。

図より、サンプル数が1,000の時、全作業の平均認識率は96.5%となり、クラス間の平均認識率の差が最も小さくなった。また、その他の作業については、サンプル数が増加するに伴い、認識率が高くなる傾向があるが、目視確認作業、及びバリ取り作業については、低くなる傾向が見られた。これらの原因としては、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率を低下させていると考えることができる。さらに、全作業の平均認識率については、標準偏差を示しているが、値が小さいことから、ランダムにサンプルを選択しても、認識性能に大きな影響は与えないと考えられる。これらのことから、本システムにおける各クラスの学習サンプル数は1,000とした。

5. 3 画像分類手法の評価

これまでの実験結果より、局所特徴量をSURFからAKAZEに、多クラスSVMを一対他識別器から組合せ識別器に変更し、Visual Word数を6,000、学習サンプル数を1,000として試作システムを改良し、画像分類実験を行った。

実験では、これまでの実験と同様に、学習、及びテストを10回繰り返し、平均認識率を求めた。改良前のシステムによる各クラスの平均認識率を表5に、改良後の平均認識率を表6に示す。

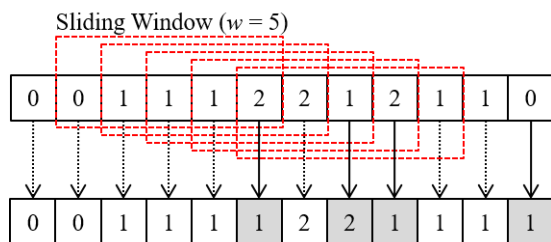


図9 フィルタリング処理例（ウィンドウ幅w=5の場合）

両表より、その他の作業の平均認識率は若干低くなったものの、目視確認作業、バリ取り作業については高くなり、全作業としては認識率が3.9ポイント向上した。

6. 作業チャートの生成

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、作業の時間的分布を表す。フレーム単位で処理すれば、29分の1秒単位で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、高い認識精度が必要となる。

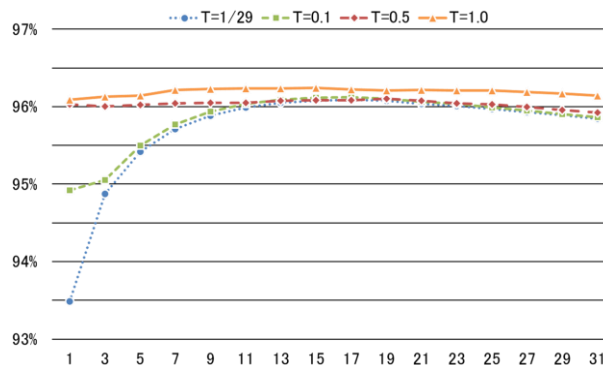
本研究では、フレーム単位での作業チャートを生成するために、画像分類処理後にフィルタリング処理を加えることにより、認識性能の向上を試みた。なお、作業チャートの生成にあたっては、フィルタリング処理後の分類結果について、単位時間 T 内で最も多く分類されたクラスの作業を、単位時間あたりの代表作業として選定した。代表作業が複数となる場合は、単位時間内の中央値とした。

6. 1 フィルタリング処理

フィルタリング処理では、フレーム F_i を中心に幅 w のウィンドウを設定し、ウィンドウを1フレームずつスライドさせながら、各フレームにおける分類結果を選定するスライディングウィンドウ法を用いた。選定にあたっては、ウィンドウ内の各フレームの分類結果に基づいて各クラスに投票し、投票数が最大となるクラスをフレーム F_i の分類結果として選定した。最大投票数となるクラスが複数ある場合は、投票結果に対象フレームの元の分類結果が含まれていれば、元の結果を選定し、対象フレームの元の分類結果が含まれていなければ、対象フレームの1フレーム前の分類結果を選定した。図9にフィルタリング処理における分類結果の選定例を示す。

6. 2 生成実験

作業チャートの生成実験では、フィルタリング処理におけるウィンドウ幅を $w=1\sim 31$ の間で変更し、5.3節の実験結果について正しく分類された平均分類率を求めた。また、単位時間については、 $T=1/29$ （フレームレート）、0.1、0.5、1.0[秒]の4種類について変更し、平均分類率を比較した。単位時間毎にウィンドウ幅を変更した場合の全作業に対する平均分類率を図10に示す。なお、 $w=1$ の時は、フィルタリング処理を行わずに、代表作業を選定した時の平均

図10 各単位時間 T のウィンドウ幅 w の違い（横軸）による全作業に対する平均分類率の推移表7 $T=1.0$, $w=15$ の場合の作業時間[秒]の推定結果（括弧内の

数値は誤差）

クラス	Movie1	Movie2	Movie3	Movie4	Movie5	Movie6	Total
目視確認	923.3 (17.3)	949.4 (25.4)	145.1 (11.1)	937.9 (50.9)	834.4 (43.4)	564.8 (9.8)	4354.9 (157.9)
バリ取り	736.7 (-0.3)	691.9 (-6.1)	124.2 (-5.8)	587.9 (-19.1)	515.6 (-13.4)	463.1 (-1.9)	3119.4 (-46.6)
その他	450.0 (-17.0)	468.7 (-19.3)	85.7 (-5.3)	584.2 (-31.8)	760.0 (-30.0)	337.1 (-7.9)	2685.7 (-111.3)
全作業	2110.0	2110.0	355.0	2110.0	2110.0	1365.0	10160.0

分類率を表し、 $T=1/29$ の時は、フィルタリング処理のみの平均分類率を表す。

図より、 $T=1/29$, 0.1の時は、フィルタリング処理により平均分類率が向上していることが分かるが、0.5, 1.0の時は、フィルタリング処理の効果はあまりないことが分かる。これらのことから、代表作業の選定処理は、単位時間が大きい場合、フィルタリング処理の効果を持っていると判断できる。そのため、作業チャートの用途に応じて、フィルタリング処理の有無を切り替える等の運用方法が考えられる。

6. 3 作業時間の推定

前節で最も分類率が高かった $T=1.0$, $w=15$ の時の作業チャートから、各作業の作業時間[秒]を推定した。表7に推定結果を示す。なお、値は平均値であり、括弧内の数値は、認識率を求める際の正解結果から算出した作業時間との誤差を表す。誤差の絶対値の合計を作業時間の合計で除した平均絶対誤差率は3.1%であり、概ね作業時間の推定が可能であることが分かる。

6. 4 作業チャートの可視化

作業チャートを可視化するために、単位時間を1ピクセルとして時系列順で水平方向に描画し、タイムチャート形式で画像ファイルを生成した。生成した作業チャートの一部を図11に示す。

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

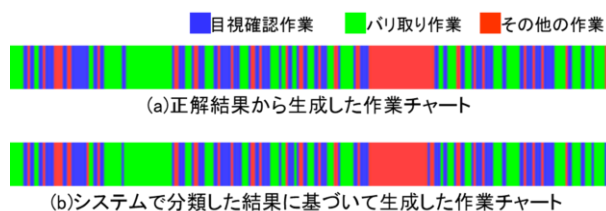


図11 作業チャートの可視化例（一部抜粋）

ることが可能である。

また、図11 (a) は正解結果から生成した作業チャート、(b) はシステムで分類した結果から生成した作業チャートの一部を示している。図より、誤分類はあるものの、概ね正確に再現できていることが分かる。

7. まとめ

本研究では、作業時間計測の支援を目指して構築している作業時間推定システムの認識精度を高めるために、BoFにおける局所特徴量の抽出手法、及びSVMによる多クラス識別器の構成手法について、他手法との比較実験を行い、最適なフレームワークについて検討した。その結果、局所特徴量抽出手法にはAKAZEを、多クラスSVM構成手法には一対他識別器と一対一識別器を組合せた識別器を使用する場合に、認識精度が最も高くなることが分かった。また、これらの手法をシステムに実装し、Visual Word数、学習サンプル数について最適なパラメータを得るための分類実験を行った結果、Visual Word数を6,000にした場合、各クラスについて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。これらの結果から、最適なフレームワークによるシステムを構築し、全動画ファイルに対する評価実験を行った結果、93.5%の認識率が得られた。

また、分類結果に基づいて作業チャートを生成する方法を検討し、フィルタリング処理におけるスライディングウィンドウ法のウィンドウ幅と、代表作業の選定処理における単位時間について、パラメータの変更による分類率への影響を調査した。その結果、単位時間を0.1秒以下とする場合には、フィルタリング処理を加えることにより、作業チャートの分類精度が高くなり、0.5秒以上では、フィルタリング処理の効果は低いことが分かった。推定した作業時間については、平均絶対誤差率が3.1%となり、本システムによる作業時間推定が有効であることが示唆された。また、作業チャートを可視化することにより、作業手順の確認が容易に行えることを確認した。

今後は、他の作業について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物体認識手法による作業分類の可能性を検証し、汎用性を高めていくことを検討する。

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] 渡辺博己, 曾賀野健一, 棚橋英樹, “Bag-of-featuresによる検査工程の作業画像分類”, 動的画像処理実用化ワークショップ2016, OS1-3, 2016.
- [4] G. Csurka, C. Dance, L. Fan, J. Willamowski and C. Bray, “Visual Categorization with Bags of Keypoints”, 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”, Proc. of European Conference on Computer Vision, pp.404-417, 2006.
- [6] 渡辺博己, 曾賀野健一, 棚橋英樹, “画像認識技術を用いた検査工程の作業時間推定”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.17, pp.24-29, 2016.
- [7] Emgu CV, <http://www.emgu.com/wiki/index.php>
- [8] D.G. Lowe, “Object Recognition from Local Scale-Invariant Features”, Proc. of International Conference on Computer Vision, pp.1150-1157, 1999.
- [9] M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha and P. Fua, “BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features”, Proc. of European Conference on Computer Vision, pp.778-792, 2010.
- [10] S. Leutenegger, M. Chli and R.Y. Siegwart, “BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints”, Proc. of International Conference on Computer Vision, pp.2548-2555, 2011.
- [11] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige and G. Bradski, “ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF”, Proc. of International Conference on Computer Vision, pp.2564-2571, 2011.
- [12] P.F. Alcantarilla, A. Bartoli and A.J. Davison, “KAZE Features”, Proc. of European Conference on Computer Vision, pp.214-227, 2012.
- [13] P.F. Alcantarilla, J. Nuevo and A. Bartoli, “Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces”, Proc. of British Machine Vision Conference, pp.13.1-13.11, 2013.
- [14] 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”, 信学技報, PRMU2009-121, pp.195-200, 2009.

複数のウェアラブルカメラのリアルタイムモニタリング

渡辺 博己 曾賀野 健一 松原 早苗 棚橋 英樹

Real-Time Monitoring for Multiple Wearable Cameras

Hiroki WATANABE Kenichi SOGANO Sanae MATSUBARA Hideki TANAHASHI

あらまし ウェアラブルカメラは、一人称視点で映像を撮影することが可能であるため、作業現場での活用が期待されている。しかし、市販されているウェアラブルカメラは、スマートフォン用アプリケーションを利用することで、撮像状況の確認やカメラの制御が可能であるが、映像はカメラ本体の記録媒体に保存されるとともに、カメラとスマートフォンとは1対1で接続される。そこで、現場作業員が見ている対象について、離れた場所の管理者・技術者等との視覚情報の共有を可能とするために、複数のウェアラブルカメラ映像を同時、且つリアルタイムにモニタリング可能なシステム構成について検討した。

キーワード ウェアラブルカメラ、マルチカメラシステム、リアルタイム、モニタリング

1. はじめに

多くの企業が積極的に取り組み始めているIoT（Internet of Things：モノのインターネット）は、製造業をはじめ、農業、サービス業等、様々な産業の生産活動に大きな変革をもたらしつつある。インターネットに接続される端末は、年々種類が増え、ウェアラブルカメラもその一部であると捉えられている。様々な機種が販売されているウェアラブルカメラは、撮影者の頭部に顔方向と一致するよう取り付けることで、撮影者と周囲の環境とのインタラクションを、一人称視点で撮影することが可能である。そのため、スポーツシーンやアウトドアでの臨場感のある映像が再現できる利点があり、今後は作業現場での利用を含め、多様なシーンでの活用が期待されている。

しかし、市販されているウェアラブルカメラ（以下「カメラ」）は、基本的にはパーソナルユースを目的として開発されているため、撮影した映像は、カメラに取り付けた記録媒体に保存され、撮影後に映像を再生するという使い方が一般的である。無線LAN機能を持つカメラについては、スマートフォン用アプリケーションを利用することで、リアルタイムに撮像状況を確認したり、カメラを制御したりすることができるが、映像の記録については、カメラ本体の記録媒体に保存される。また、カメラとスマートフォンとは1対1で接続されるため、複数のカメラの映像を同時に観察することは困難である。

本稿では、複数の現場作業員が見ている対象を、離れた場所にいる管理者・技術者等が確認するシーンでのカメラの利用を想定し、複数のカメラ映像を同時、且つリアルタイムにモニタリング可能なシステム構成について検討したので、その内容について報告する。

2. システム構成

カメラとPCを無線LANにより接続する場合、カメラ側のSSID（Service Set Identifier：無線LANにおけるアクセスポイントの識別名）をPCに設定する必要がある。この場合、カメラとPCとは、1対1で直接接続されているため、他のカメラを同時に接続することは困難である。

そこで、無線LANによる複数のカメラの同時接続を実現するために、USBデバイスサーバ（ネットワークを介してUSB機器に接続可能とする製品）を利用することにより、図1に示すようなマルチカメラシステムを構成した。カメラは、Webカメラ機能を有するPanasonic製カメラ（HX-A1H）を使用した。また、USBデバイスサーバは、無線LAN機能を有するサイレックス・テクノロジー製USBデバイスサーバ（SX-DS-3000WAN）を使用し、無線LANアクセスポイントに接続した。この時、無線LANを介して接続されるカメラは、USBデバイスサーバに付属するソフトウェアにより接続設定を行うことで、PCからはUSBカメラとして認識される。

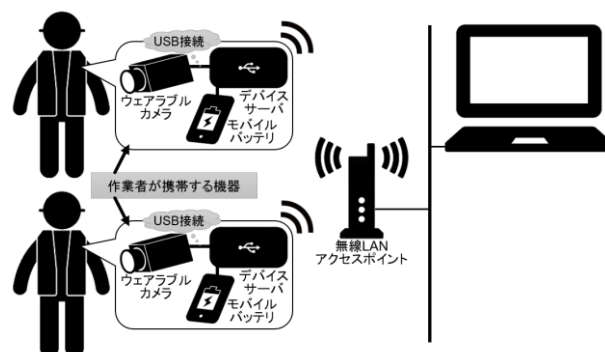


図1 マルチカメラシステムの構成

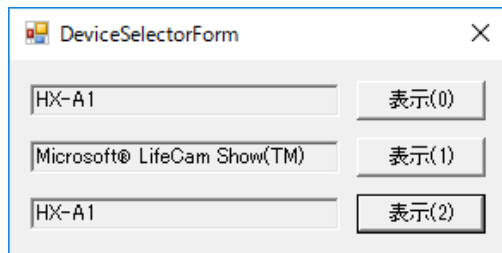


図2 カメラ選択フォーム

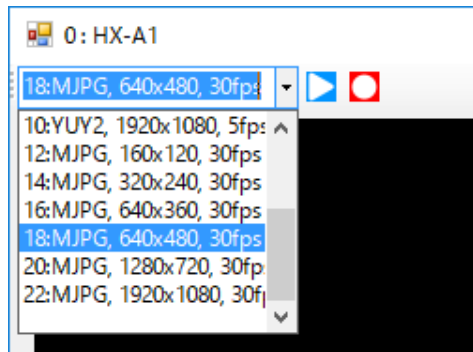


図3 映像出力フォーム

3. モニタリングソフトウェア

開発したモニタリングソフトウェアは、PCに接続されている全てのカメラを検出した後、図2に示すカメラ選択フォームを表示する。カメラ選択フォームには、各カメラについて表示ボタンを配置し、ボタンをクリックすることにより、対応するカメラの映像出力フォームを表示する。また、1つの映像を閲覧中に他の表示ボタンもクリックすることが可能であるため、複数のカメラ映像を同時に閲覧することができる。

映像出力フォームには、図3に示すとおり、圧縮形式や出力サイズを設定することが可能なコンボボックス、モニタリングの開始ボタン（三角形）、及びモニタリングと同時にAVI形式でのファイル出力が可能な記録ボタン（円形）を配置し、状況に応じて映像の出力サイズやモニタリング形式を選択できるようにしている。

図4に、2台のHX-A1Hから取得した映像の表示例を示す。映像の圧縮形式はMJPGで、フレームレートの設定値は30fpsである。映像は、MJPG形式で圧縮されているため、ブロックノイズが発生しているが、概ね良好な映像がリアルタイムで取得できている。

4. まとめ

ビッグデータ、人工知能等のデータ処理技術の進歩により、画像・映像からのデータ分析に対する期待が高まっている。このような技術潮流の中、作業現場におけるウェアラブルカメラ映像の活用に対応するために、複数のウェアラブルカメラ映像を同時、且つリアルタイムにモニタリングする技術を開発した。通信状況により、接続可能なカメラ台数、表示可能な映像サイズが異なるため、状況に合わせて適切に選択する必要があるが、当初の開発目標は達成することができた。なお、本稿ではウェアラブルカメラを用いているが、通常のUSBカメラの使用も可能である。

現状では、カメラ映像の表示、及び保存機能を有するだけであるため、今後、利用者のニーズに合わせて、モニタリングソフトウェアを改良する必要がある。また、取得した映像の分析技術について検討し、IoTにおける画像データの利活用を推進する。

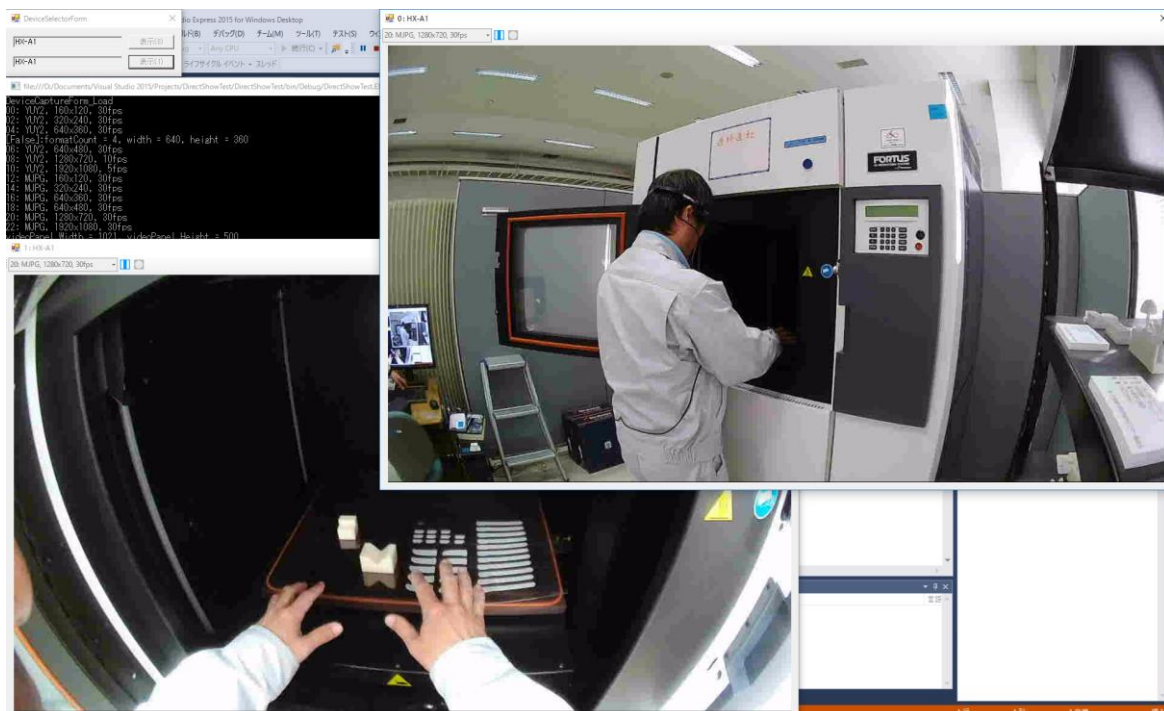


図4 2台のウェアラブルカメラ映像の表示例（表示サイズは1280×720）

距離画像を用いた両手作業の動作解析システムの開発

松原 早苗

渡辺 博己

曾賀野 健一

棚橋 英樹

Motion Analysis System for Both Hands Work using Depth Image

Sanae MATSUBARA

Hiroki WATANABE

Kenichi SOGANO

Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、距離画像カメラにより取得される距離画像を用いて両手の位置を検出することで、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。まず、距離画像から形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出する。そして、取得された手の位置が、指定したエリアを通過することを判定することにより、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間を計測した。実験では、実際の組立作業の距離動画像に対して、作業を構成する右手、左手のそれぞれの動作の時間を計測した。

キーワード カイゼン、作業動作解析、両手検出、距離画像、形状特徴

1. はじめに

製造現場においては、製造設備と材料・部品および作業からなる総合的なシステムの効率化が求められるが、労働者の高齢化や定着率の低下、多品種少量生産の増加に伴い、製造設備や部品の性能向上に比べ、人による作業の品質、生産性向上は十分でなく常に課題となっている。

この課題の解決には、インダストリアル・エンジニアリング（IE）と呼ばれる作業者の動作を分析する工学的手法が用いられている^[1]。しかし、最も基礎的で重要なデータである作業者の動作時間の計測は、ストップウォッチやビデオ映像を用いた手作業となっており、この動作時間データの取得に膨大な時間と手間を要することが、カイゼン活動の普及の妨げとなっている^[2,3]。

人が動作時間を計測する場合、限られた期間の計測となるため、「部品を落とす」、「部品を取り付け忘れる」など標準作業から外れるイベント発生の検知が限られる。標準作業以外のイベントの発生が、生産効率を下げる、品質を落とす原因となることが多く、このイベントを限界まで減らすことが、大きな改善につながる。しかし、このイベントを検知するためには、長時間にわたり、常時、計測する必要があるが、人手による計測では困難である。また、リアルタイムに動作時間を計測することができれば、生産計画への反映や、その場で作業ミスを検出するポカヨケなど、生産効率や品質を向上させるための適用場面が広がる。そのため、動作時間を自動的に計測できるシステムが求められている。

そこで、本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、距離画像カメラ

を用いて作業を撮影し、得られる距離画像から両手の位置を検出することで、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。具体的には、まず1枚の距離画像に対して、手部の形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出する。そして、右手、左手それぞれに対して、通過を判定するエリア設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間として計測する技術を開発した。本報告では、実際の組立作業の距離動画像に対して両手の位置を検出し、作業を構成する右手、左手のそれぞれの動作時間を計測する実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 対象作業

本研究では、製造現場の組立セルにおいて、標準作業が決められ、繰り返し行う両手作業を対象に、動作時間を計測する。想定する組立セルの作業環境を図1(a)に示す。

本報告において計測する作業の動作の単位は、動作研究におけるサブリック（動作の最小分解要素）^[2]にあたる単位とする。18種類からなるサブリックの中でも、手の位置情報を用いて計測するため、手が大きく移動する「空手で延ばす」、「運ぶ」を主な計測の対象動作とする。「空手で延ばす」は、ものを持たずに移動し始めるとき、「運ぶ」は、部品を持って動き始めるときの動作である。これらの作業の動作は、手の移動量が大きく、動作時間が長いので、カイゼンによる効果が大きい対象である。

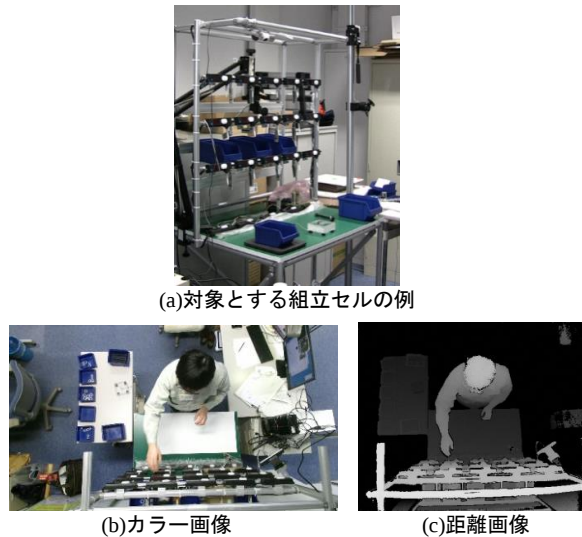


図1 対象とする作業環境と取得画像

3. 両手の位置検出

組立セルにおける作業の動作には、図1(a)のように複数の段がある部品棚に手を伸ばす動作が多くあり、どの部品箱に手を伸ばしたか、高さを識別する必要がある。また、照明変動や作業者の服装に影響を受けにくいことが求められる。

そこで、本手法では、高さ情報が得られ、照明変動に強く、作業者の服装の変化の影響を受けにくい距離画像から手部の形状特徴を抽出し、両手の位置を検出する。以下に、提案手法における各処理の詳細について述べる。

3. 1 距離画像

本研究では、距離画像の取得にはKinect v2を用いる。Kinect v2は、TOF(Time of Flight)方式で、距離情報を得ている。TOF方式は、カメラの周囲についてLEDより照射される赤外光が対象物に反射し、カメラで観測されるまでの時間を計測することにより、物体までの距離を計測する。Kinect v2のスペックを表1に示す。距離値はmmの単位で取得できる。本報告では、Kinect v2を用いたが、提案手法は、Light Coding方式やステレオ方式など、他の方式により距離情報を取得する距離画像でも用いることができる。

距離画像カメラを、部品箱と作業のための両手の移動範囲が入るよう、部品棚の上部から作業台に向け組立セルに設置した。得られるカラー画像と距離画像を、それぞれ図1(b), (c)に示す。ここでは、距離画像は、各画素に対してカメラからの距離500mmから1780mmまでの範

表1 Kinect v2のスペック

カラー画像	解像度	1920×1080
	フレームレート	30fps
距離画像	解像度	512×424
	フレームレート	30fps
距離取得範囲		0.5m～8.0m
距離画像の画角		70°(水平) × 60°(垂直)

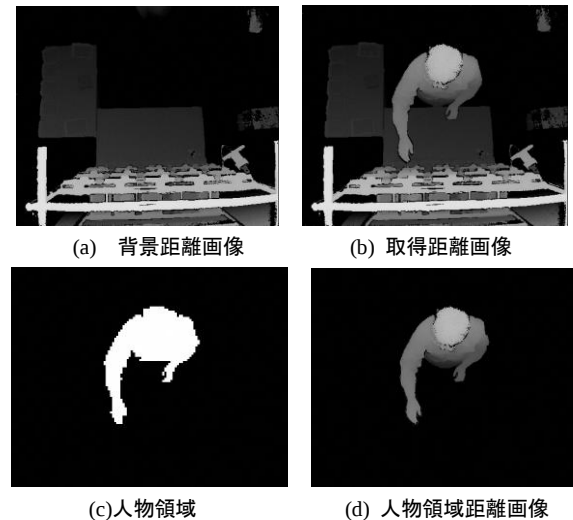


図2 距離背景差分により抽出した人物領域

囲を5mm間隔で、255から0の256段階の濃淡値に対応させ、濃淡画像として生成した。以降、この濃淡画像を距離画像として扱う。

3. 2 人物領域の検出

提案手法では、人物領域を、距離画像の背景差分により抽出する。まず、作業者がいない状況で、背景距離画像(図2(a))を取得する。次に、現時刻で取得される距離画像(図2(b))と、背景距離画像の画素値に対する差分をとり、その差が閾値 Th_m より大きい画素を抽出する。ここでは、閾値 Th_m を10(50mmにあたる)とした。抽出した領域に対して、膨張収縮処理を行い、最も大きい面積をもつ領域を人物領域として抽出する(図2(c))。現時刻の距離画像(図2(b))に、人物領域(図2(c))のマスクをかけ、得られる距離画像を人物領域距離画像として抽出する(図2(d))。

3. 3 身体部位の形状特徴の抽出

頭部は丸く、胴体部は領域が大きい、腕部は細い、手部は端点で閉じているという形状の特徴に着目し、3.2にて抽出された人物領域距離画像に対して形状特徴を抽出することで、頭部、胴体部、腕部、手部の領域を検出する。

本研究では、形状特徴として、RRC(Radial Reach Correlation)特徴量のリーチ長を用いる。RRCは、明度変動の影響に頑健で、画素単位で局所的なテクスチャを評価可能な特徴量であり、主に、濃淡画像を対象に、明度変動に頑健な背景差分や物体検出を行う目的で用いられている。RRC特徴量の抽出方法は、まず、注目画素から放射状の延長腕(リーチ)を伸ばし、閾値以上の濃淡値の差をもつ画素を探索し、ペアを構成する(図3)。特性に等方性を持たせるため、放射状の8方向について8組のペアをもつ。そして、ペアの画素(以降ペア画素と呼ぶ)の濃淡値が、注目画素の濃淡値より大きい場合は1を、小さい場合は0を割り当て、それをあらかじめ定義し

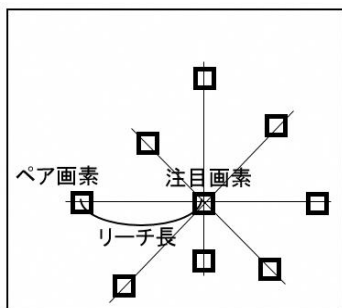


図3 リーチの形成

た順序で並べた二値符号列がRRC特徴量である。

本研究では、3. 2にて抽出した人物領域距離画像に対して、RRC特徴量の8方向のリーチ長を形状特徴として抽出する。距離画像は、各画素に距離情報をもつが、3. 1において述べたように、距離情報を濃淡値に対応させた濃淡画像として扱う。図2(d)の入力画像における各部位ごとの注目画素に対して、ペア探索処理を行い得られる8組のペアの取得例を図4に示す。注目画素を白の丸、リーチ長が閾値以上のペア画素を黄の四角、閾値以下のペア画素を水色の十字で示す。ここでは、ペアを決定する明度差の閾値 Th_{rd} を15とし、リーチ長の長短を判定する閾値 Th_{rl} は9とした。

頭部は丸く、胴体部は領域が大きい、腕部は細い、手は端点で閉じているという各部位の形状特徴を、リーチ長を用いて表す。図4(a)は、注目画素が頭部領域にある場合で、上方向から撮影した場合、頭部は円形となるため、8ペアのリーチ長の差が小さい。図4(b)は胴体部にある場合で、リーチ長の和が大きい。図4(c)は腕部にある場合で、リーチ長が長いペアと短いペアが交差する。図4(d), (e)は手部にある場合で、リーチ長の多くが短く、腕の方向のリーチ長は長い。各部位の形状特徴とリーチ長にこのような傾向がみられることから、本報告では、リーチ長(8個の値)に対して、以下の条件により各部位領域を抽出する。

- ・頭部 : リーチ長の最大と最小の差が閾値 Th_h 以下
 - ・胴体部 : リーチ長の和が閾値 Th_t 以上
 - ・腕部 : リーチ長が長いペアと、短いペアが交差する
 - ・手部 : 短いリーチ長が6個以上連続する
- 以上の条件により、図2(d)の人物領域に対して走査し、

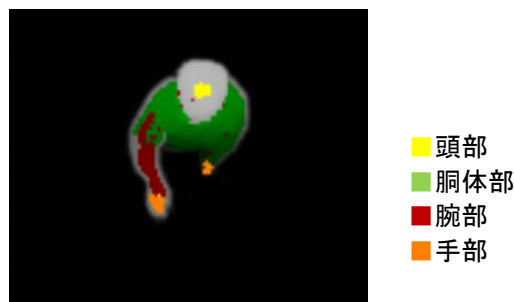


図5 抽出した各身体部位の領域

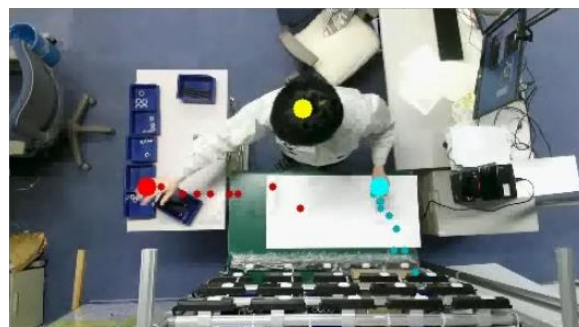


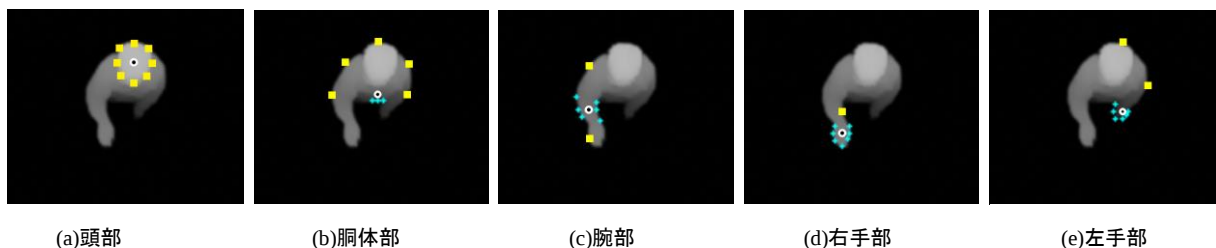
図6 両手の位置、頭部位置の検出結果
(右手 : 赤, 左手 : 水色, 頭部 : 黄)

抽出した各部位の領域を図5に示す。頭部、胴体部、腕部、手部をそれぞれ黄、緑、赤、オレンジで表示した。概ね各部位の領域が抽出されていることがわかる。ここで用いた閾値 Th_h 、 Th_t は、経験的にそれぞれ、10、90とした。距離画像の解像度は 512×424 で取得されるが、リアルタイムに処理するため、 128×106 にダウンサイジングを行い、処理を行った。

3. 4 両手位置の検出

3. 3にて抽出された各部位の領域の内、2つの手部領域、頭部領域に対して、それぞれの領域の中心を手の位置、頭部の位置として検出する。そして、2つの手の位置に対して、右手か左手かを判定する。手の2点のX座標値を比較し、X座標値が小さい方を右、大きい方を左と判定することができる。しかし、両手が交差した際は、反対の判定となる。

そこで、手の左右の判定は、まず、腕部領域で最大の領域を抽出し、その領域の胴体部側の端点が頭部位置に対して、左右のどちらに位置するかで判定する。次に、腕部の最大領域と連続する手にその判定結果を与える。



(a)頭部

(b)胴体部

(c)腕部

(d)右手部

(e)左手部

図4 各部位におけるペアの形成

(注目画素 : 白の丸, リーチ長が閾値以上のペア画素 : 黄の四角, 閾値より小さいペア画素 : 水色の十字)

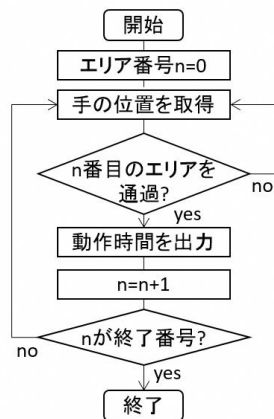


図7 動作時間計測処理の流れ

図5の場合、腕部領域が一つであり、胴体部側の端点が右であることから、この腕部領域と連続する手が右と判定され、もう一方の手が左と判定される。両手が交差する動作が入る作業の場合は、このような処理により、左右の判定を行う。

ある動作の一連の動きに対して、提案手法により検出した距離画像座標系における両手の位置座標を、カラー画像の座標系に変換し、カラー画像上にプロットしたものを図6に示す。右手を赤、左手を水色、頭部を黄で示した。各部位の位置が検出できていることがわかる。大きい丸が現時刻における各部位の位置であり、小さい丸が過去10フレームの各部位の位置である。

4. 動作時間の計測

製造現場においては、作業の動作の内容と順序は、作業手順書により定められている。治具から部品箱へ「空手で延ばす」動作の場合、手は、始点である治具の位置から終点となる部品箱の位置までを移動する。治具や部品箱が固定されている組立セルにおいては、作業手順書により手の移動するルートが決まる。そこで、本報告で

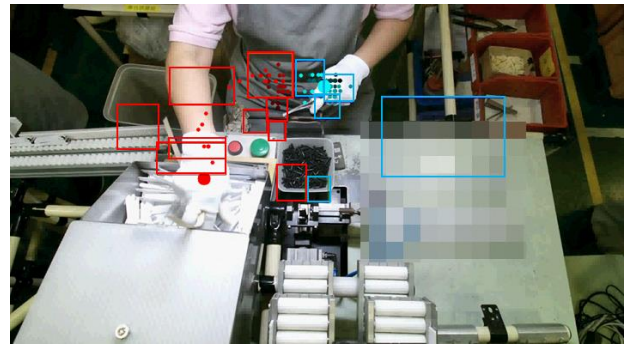


図8 通過エリアの設定

は、作業手順書に従い、あらかじめ計測したい動作の始点と終点の位置とその通過順序を設定し、3章により得られる手の位置がその設定位置を通過した時刻から、次の設定位置を通過するまでの時間を動作時間として計測する。

具体的には、まず、手が通過すべき点、つまり、作業を構成する動作の始点と終点の位置を、作業の開始から終了までに対して設定する。次に通過する順序、そして、各点に対して通過の判定を行う通過判定エリアを設定する。この通過判定エリアは、部品箱の大きさや組立品の大きさにより異なるため、通過判定エリアサイズや形は個々に設定する。両手の左右それぞれに対して、通過判定エリアを設定する。

取得される手の位置が1番の通過判定エリアを通過した時点をも、作業の開始とし時刻の計測を開始する。次に、手の位置が、2番目の通過判定エリアを通過するまで通過の判定を行い、通過時に時刻を取得し、前エリアの通過時刻からの時間を動作時間として出力する。最後n番目の通過判定エリアまで通過の判定を繰り返す。この処理を右手、左手に対して行う。処理の流れを図7に示す。

5. 実験

刃物製品の組立工程における、実際の作業に対して距離動画像を取得し、両手の位置検出を行うことで、作業の動作時間の計測を行った実験結果を示す。

5. 1 実験の設定

実験を行う作業の動作内容を示す作業指示書を表2に示す。距離画像カメラは、組立セルの作業員から見て前方上部に、作業台上面と作業員の両手の動作範囲が入る位置、角度で設置した。この作業は座り作業であり、頭部の移動はほとんどなく、右手、左手が交差する動作がない。そこで、この実験では、頭部の検出は行わず、両手の位置のみを検出することとした。右手、左手の判定は、両手が交差することがないことから、得られた手部の2点のX座標を比較し、X座標が大きい方を左、X座標が小さい方を右と判定した。

実験で用いる距離画像カメラにより取得した作業映像は3分28秒であり、13回の作業を含んでいる。サンプリング

表2 実験作業の作業指示書

No	左手	右手	No
L0	機械から部品Dを取る	部品Aを取る	R0
L1	部品Dを治具にセット	部品Aを機械にセット	R1
		スイッチを押す	R2
L2	部品Eを取る	部品Bを取る	R3
L3	部品Eを治具にセット	部品Bを治具にセット	R4
L4	治具で、部品B,D,Eを組み合わせてWにする		R5
L5	調整、確認		R6
	調整、確認	部品Cをとる	R7
		部品CをWにはめる	R8
		Wを完成品箱へ流す	R9

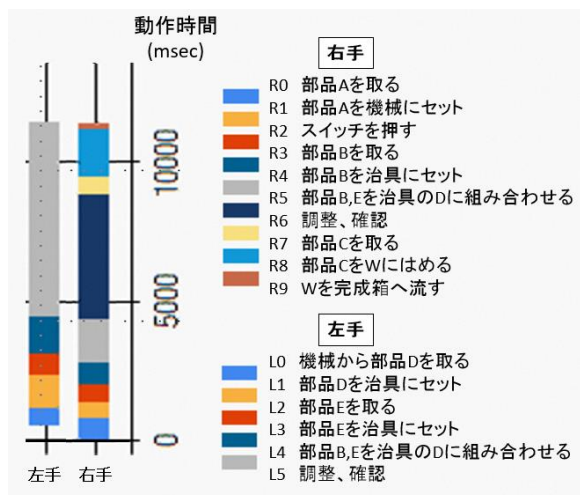


図9 計測した動作時間と動作内容の対応

グレートは30fpsで、距離画像、カラー画像が取得される。距離画像の解像度は、 100×75 にダウンサイジングし、用いた。この実験において用いる各閾値は、 Th_m は10、 th_rd は15、 Th_rl は7とした。

計測したい動作に区切る通過判定エリアを、表2の作業指示書と対応させ、図8に示すように、右は10個（R0～R9）、左は6個（L0～L5）と、左右それぞれに対して設定した。また、この図8には、カラー画像に右手、左手の現時刻の位置（大きい丸）と、過去20フレームの手の位置（小さい丸）をプロットした。作業映像全体を通して、両手の位置は、目視にて確認したところ、誤検出することはない。図8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9は、ある一つの作業において計測した動作時間である。左右それぞれに対して、動作の内容と対応付けられた動作時間が計測できることがわかる。

図10に、13回の作業を含む作業映像全体に対して動作時間を計測した結果を示す。図10のグラフにおいて、動作の内容を表す項目は、図9の項目と対応している。提案

手法では、手の位置が通過判定エリアを通過し、次の通過判定エリアを通過するまでの時間を動作時間として計測している。作業映像全体に対して、正しく動作時間の計測処理が動作していることを目視にて確認した。

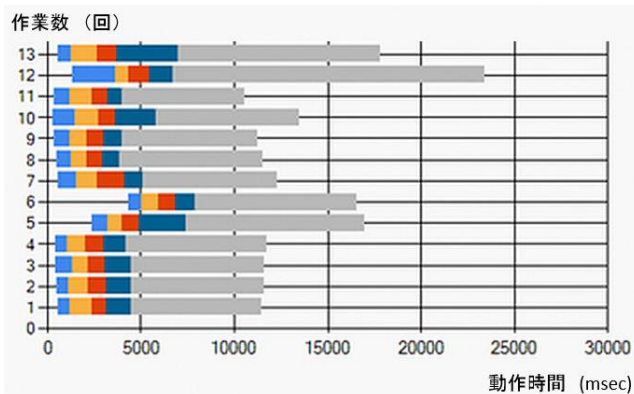
この作業の生産計画を行うために設定された標準作業時間は、約14秒である。概ね標準作業時間以内で作業が行われていることがわかる。一方、5回目、6回目、12回目、13回目の作業は、標準作業時間を超えている。

これらの作業の映像を確認したところ、5回目の作業では、右手が作業の開始を判定する通過判定エリアR0を通過後、「作業着を整える」動作が入り、5回目の右手1番目（R0→R1）の動作時間が長く計測された。また、5回目の作業の右手8番目（R7→R8）「部品Cを取る」動作において、部品Cを落とした。このようなイレギュラーなイベントの発生により、標準作業にはない「落とした部品の位置を確認する」動作、再度部品箱から「部品Cを取る」動作が入った。その右手の動作が、以降の通過判定エリアR8、R9、そして次の6回目の作業のR0を通過した。そのため、次の作業の計測が始まり、6回目の作業の右手1番目（R0→R1）の動作時間が長く計測された。

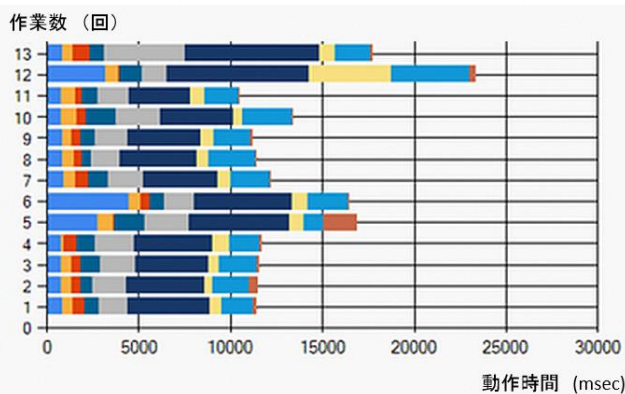
12回目の作業では、その前の11回目の作業で、右手8番目（R7→R8）「部品Cを取る」動作の際、もう一つ部品Cが飛び出し、隣の部品箱に入った。そのため、12回目の作業の「部品Cを取る」動作の際、部品Cの部品箱でなく、「隣の部品箱から取り出す」動作となった。そのため、部品Cの部品箱の通過判定エリアR7を通過せず、12回目の作業の右手7番目（R6→R7）の動作の時間が長くなった。

13回目の作業では、右手5番目（R4→R5）、左手4番目（L3→L4）の「右手の部品Bと、左手の部品Eを治具の部品Dに組み合わせる」動作において、組み合わせに時間がかかっていた。

5回目の作業において部品Cを取り付ける際に落とし、再度部品Cを部品箱から取り出す動作が、次の通過判定エリアや、次の作業の開始を判定するエリアまでを通過し、次の作業の動作時間にまで影響を与えた。この点に



(a)左手の動作時間



(b)右手の動作時間

図10 距離背景差分により抽出した人物領域

関しては、手の位置情報だけでなく、機械のスイッチ信号等、他のセンサ情報と組み合わせることで、異常が発生した際にも、次の作業の計測に影響を与えないような仕組みを検討する必要がある。

作業映像の提供者へこの結果を示したところ、5回目の作業にて発生した作業着を整える動作が頻繁に入る場合は、作業着の材質やサイズを調整する。また、12回目の作業の際発生した、部品Cを取出す時、もう一つ部品Cが飛び出したことについては、部品箱での部品Cの配置を検討するなどの改善案が出された。

このように、動作時間を計測し、可視化することで、部品を落とししたり、決められた部品箱から取り出されていなかったり、服装を整えたりするなどの標準作業と異なる動作の発生を検知できることを確認した。そして、標準作業と異なる動作が入った映像を確認し、問題の原因を分析することで、効果的な改善案を出せることが期待できる。人手による計測では難しい長時間、常時の計測を可能とすることで、カイゼンの速度の向上が期待できる。

6. まとめ

本研究では、製造現場の組立セルにおける両手作業のカイゼン活動を支援するため、作業を距離画像カメラで撮影し得られる距離画像から両手の位置を検出し、作業の動作時間を計測するシステムを構築した。まず、距離画像に対して、手部の形状特徴を抽出することで、両手の位置を検出した。そして、右手、左手それぞれに対して、通過を判定するエリア設定し、前エリアの通過時刻から現エリアを通過するまでの時間を、作業の動作時間を計測する技術を開発した。実際の作業現場における作

業映像に対して実験を行い、計測した動作時間から標準作業と異なる動作の発生を検知できることを示した。

今後は、長時間の評価実験、また、他の作業に対しても実験を行い、提案手法の汎用性を高める。また、長時間の動作データの分析と、リアルタイムに動作データを分析することでポカヨケへの展開を検討する。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人遠藤斉治朗記念科学技術振興財団の助成を受けたものである。また、本研究を進めるにあたり、実証実験において、御支援・御協力を頂きましたカイ インダストリーズ株式会社の皆様に深く感謝致します。

文 献

- [1] 藤田彰久，“IEの基礎”，建帛社，1997.
- [2] 平野裕之，“新作業研究”，日刊工業新聞社，2001.
- [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] 佐藤雄隆，金子俊一，丹羽義典，山本和彦，“Radial Reach Filter (RRF) によるロバストな物体検出”，信学論(D-II)，vol.J86-D-II，no.5，pp.616-624，2003.

豚肉色評価装置の開発(第2報)

浅井 博次

吉岡 豪*

Development of Pork-Color Digitization Device (2nd Report)

Hirotsugu ASAI Go YOSHIOKA

あらまし 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できる携帯型肉色評価装置の開発を進めている。今年度は、前年度までの基礎検討に基づいて試作機を製作し、試作機の色評価能力を検討した。また、ハイパースペクトルカメラで豚肉の分光画像計測を行い、現に流通している豚肉の肉色分布状況を確認した。

キーワード 豚肉, 肉色, 定量化, デジタルカメラ

1. はじめに

肉色は食肉の品質推定に活用される重要な指標の1つであり、一般的に格付員による感性評価に基づいて評価されている。人には色の見え方を一定に保とうとする色順応や見えていない部分を脳が補間してしまう機能などが備わっているため、色の評価に人は元来適していない。また、感性評価は個人差を排除できないことから、客観的な肉色の評価が強く求められている。

この課題に対応すべく、本研究では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進めている。本報では、製作した試作機の概要、及び、試作機を用いて行った色評価の検討について報告する。また、ハイパースペクトルカメラで豚肉の分光画像計測を行い、豚肉の肉色の分布状況を調査したので報告する。

2. 携帯型肉色評価装置

2. 1 装置概要

製作した携帯型肉色評価装置を図1に示す。外形寸法は横32cm、奥行き40.6cm、高さ18.5cm(ハンドル、ノブ部を除く)である。本装置は、豚枝肉の肉色評価を主目的としており、ハンガーに吊り下げられた枝肉の切断部に本装置を差し込んで切開面のロース芯部分の画像を撮影し、肉色の評価を行う。装置底面にある撮影用の窓部分を枝肉の切断面に密着させて撮影することで、被写体との距離・角度の変動を抑えた安定した撮影を可能としている。撮影用窓サイズは200mm×140mmであり、一回り小さい領域が肉色評価可能領域である。装置前方をくさび型とし、

そこに反射鏡を設置することで、反射鏡に向けて設置したデジタルカメラにより、装置の高さを抑えつつ、対向して撮影したような試料画像を取得することが可能となっている。また、装置上面に設置したタブレットにより、カメラのリモートシャッター、及び、撮影する画像のモニタリングが可能である。

装置には、ソニー製ミラーレス一眼レフカメラα6000に単焦点レンズSEL20F28を装着したデジタルカメラを搭載した。また、光源には平均演色評価数Ra90以上の高い演色性を有するCOB型LEDを採用した。豚肉はドリップの発生が多い傾向にあることから、撮影する画像中の正反射領域抑制のため、撮影領域の左右下方に1つずつCOB型LEDを配置した。

デジタルカメラとタブレットは内部バッテリー駆動、LED照明は外部接続のモバイルバッテリーから電源を供

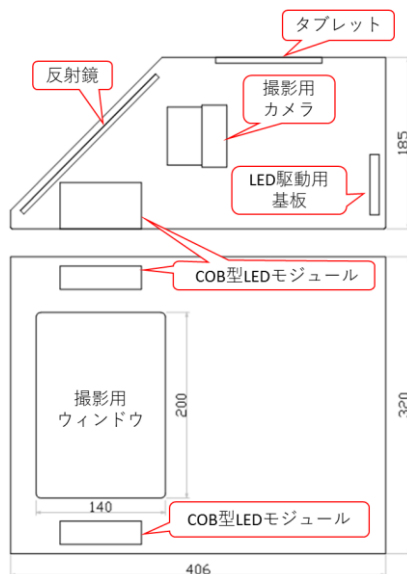


図1 携帯型肉色評価装置

* 岐阜県畜産研究所

給し、駆動する。モバイルバッテリーには小型・軽量・大容量(23000mAh)かつ高速な蓄電(約5時間)が可能なサンワサプライ製700-BTL017BKを採用し、コードレスで長時間の使用が可能である。

2. 2 色推定能力の評価

本研究では、白色板補正後の画像に対し、更に、豚肉赤身の肉色が分布する色領域を囲むように設定した色の色票(基準色票)を撮影した画像を用いて補正し、色を推定する手法を用いる。昨年度、豚肉標準肉色模型(PCS)を分光測色計で計測し、その計測結果に基づいて作成した基準色票を図2に示す。

本装置の色推定機能を確認するため、基準色票を試料とし、標準白色板による補正のみで、どの程度の色推定能力があるのかを確認した。なお、実験では、本装置の肉色評価可能領域である約17.0cm×13.5cmの矩形領域(領域L:180×120ピクセル)とロース芯を写す領域である中心部分の約13.0cm×10.0cmの矩形領域(領域S:165×105ピクセル)について、 $L^*a^*b^*$ (D65)の値を推定し、評価した。表1に、結果を示す。

L^* , a^* , b^* は対象領域の全ピクセルの推定値の平均、「平均値との色差」欄には、各ピクセルの推定値と平均値(L^* , a^* , b^*)との間で計算した色差の平均値、及び標準偏差である。平均的なバラつきだけを考慮しても、領域Lで色差4弱、領域Sで色差3弱のばらつきがあることが分かる。色の許容差の基準について、米国標準局が規定し

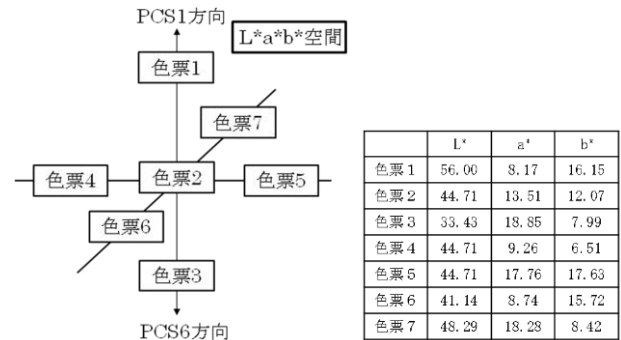


図2 基準色票の設定

ているNBS単位や日本電飾工業(株)ホームページ内^[1]を参照すると、色差3を超えてくると一般的に違う色と感ずるようである。つまり、標準白色板による補正のみでは、色の違いを正しく識別することができないことが分かる。

次に、本研究で提案する手法(白色板補正+基準色票補正)を適用し、色票2を囲む色票2以外の6枚の基準色票画像を用いて色票2の色推定を行った結果を表2に示す。 L^* , a^* , b^* は対象領域の全ピクセルの推定値の平均、「真値との色差」欄には、各ピクセルの推定値と真値(L^* , a^* , b^*)との間で計算した色差の平均値、及び標準偏差である。領域L、領域S共に、真値と推定値との色差が2シグマで1.7程度とAA級許容誤差^[1]を少し超える程度に収まっており、提案手法により色推定の高精度化が図れることが確認できた。

表1 基準色票の色推定結果

(a) 領域Lの色推定結果

	L^*	a^*	b^*	平均との色差		真値と平均との色差
				色差	標準偏差	
色票1	44.20	6.39	15.56	1.04	0.55	12.02
色票2	34.48	10.70	12.14	1.34	0.75	10.58
色票3	25.36	15.70	8.42	1.84	1.11	8.89
色票4	34.17	6.97	7.05	1.34	0.78	10.79
色票5	34.60	14.75	16.60	1.36	0.75	10.52
色票6	30.86	7.04	14.91	1.40	0.79	10.50
色票7	37.86	14.56	9.46	1.36	0.79	11.29

(b) 領域Sの色推定結果

	L^*	a^*	b^*	平均との色差		真値と平均との色差
				色差	標準偏差	
色票1	44.09	6.45	15.60	0.78	0.38	12.12
色票2	34.30	10.77	12.20	0.99	0.52	10.73
色票3	25.18	15.76	8.43	1.39	0.81	9.04
色票4	33.97	7.02	7.09	0.98	0.52	10.97
色票5	34.42	14.84	16.66	1.01	0.53	10.67
色票6	30.62	7.12	14.98	0.99	0.53	10.71
色票7	37.69	14.64	9.50	1.01	0.54	11.43

表2 提案手法による色票2の色推定結果

	L^*	a^*	b^*	真値との色差	
				色差	標準偏差
領域L	44.79	13.73	12.04	0.47	0.19
領域S	44.81	13.67	12.00	0.53	0.32

2. 3 装置使用上のシチュエーション別評価

2. 3. 1 代替白色板の利用

被写体にあたる光強度のむらなどを補正するため、一般的に拡散反射率が既知の標準白色板が用いられるが、取扱いに注意を要する物が多く、かつ、高価である場合が多い。本装置では、被写体に密着して撮影するため、補正に使用する白色板は傷や汚れ・ほこりに強いものが望ましい。そこで、標準白色板の代替として取扱いが容易で安価な高白色印刷用紙の使用可能性を検討した。結果を表3に示す。

標準白色板を用いて校正を行った表2の結果とほとんど変わらない色推定結果が得られており、校正用白色板として使用可能であることが確認できた。

表3 印刷用紙(高白色)校正による色票2の色推定結果

	L^*	a^*	b^*	真値との色差	
				色差	標準偏差
領域L	44.79	13.72	12.02	0.52	0.31
領域S	44.81	13.70	12.03	0.52	0.28

2. 3. 2 ポジション不全時の色推定能力評価

本装置は試料切断面に装置を密着させて計測することを前提としているが、実際の計測においては、しっかりと密着できない状態で計測してしまうことも考えられる。例えば、図3は肉厚2cm程度の切り身の豚肉を本装置で撮影したものであるが、装置を切り身の切断面に密着させることができないため、装置下面と切断面が一致するように気を付けながら、装置を宙に浮かせて計測している。



図3 撮影例（豚肉切り身）

この例のように、試料切断面と十分に密着することができない場合、被写体である切断面との距離・角度が白色板補正で想定している条件から外れてしまい、色の推定結果に悪影響を与える可能性が考えられる。そこで、色票2との距離・角度を変えて計測を行った場合の色票2の色推定結果への影響を確認した。

実験では補正に高白色印刷用紙を使用し、領域Lについて色推定を行った。結果を表4に示す。

表4 試料までの距離・傾きと色推定結果

装置下面と被写体間の距離 (cm)		指定領域全画素の平均			各画素と真値との色差	
装置 右側	装置 左側	L*	a*	b*	平均	標準 偏差
0	0	44.83	13.71	12.04	0.52	0.27
0	5	44.76	13.71	12.03	0.52	0.29
0	10	44.77	13.72	12.03	0.50	0.22
0	15	44.79	13.70	12.03	0.54	0.40
5	5	44.79	13.69	12.01	0.55	0.34
5	10	44.85	13.68	12.12	0.63	0.30
5	15	44.79	13.72	12.05	0.52	0.29
10	10	44.77	13.74	12.02	0.48	0.23
10	15	44.85	13.72	12.02	0.53	0.34
15	15	44.78	13.72	12.03	0.49	0.22

表2、表3の結果と比べて、真値と推定値との色差が平均、標準偏差とも多少増加しているものの、2シグマで1.9以下に収まっており、実際の撮影においても、十分許容可能な範囲であると思われる。

3. 豚肉の肉色分布調査

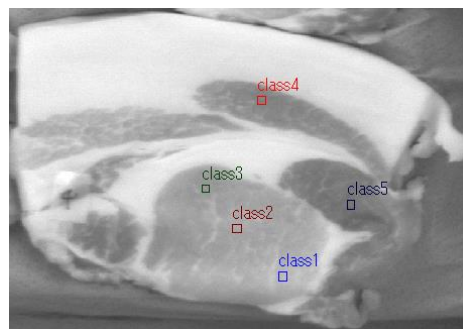
エバ・ジャパン(株)のハイパースペクトルカメラNH-7を用いて豚肉の分光画像計測を行い、現在流通している

豚肉の肉色の分布状況を調査した。

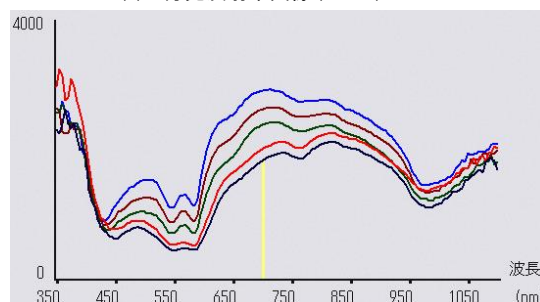
図4は取得した分光画像データ例を示したものである。同一試料の中でも、場所によって分光特性に大きな違いが見られることがわかる。



(a) カラー画像



(b) 分光反射率画像(700nm)



(c) 分光反射率グラフ(図中矩形選択領域の平均)

図4 分光画像データ例

そこで、撮影した12枚の試料に対し、同一試料内で分光特性に違いがみられる赤身領域を数か所選定し、当該領域の色を導出して色の分布状況を調査した。色分布の結果を図5に、色分布データについて主成分分析を行った結果を表5に示す。

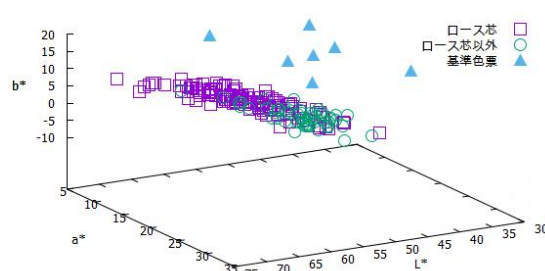


図5 豚肉赤身と基準色票の色分布

表5 豚肉赤身色分布の主成分負荷量と寄与率

	第1主成分	第2主成分	第3主成分
固有値	2.27	0.64	0.08
標準偏差	1.51	0.80	0.29
寄与率	0.76	0.21	0.03
累積寄与率	0.76	0.97	1
主成分 負荷量	L*	0.64	0.16
	a*	-0.49	0.84
	b*	0.59	0.52

第2主成分までの累積寄与率が0.97となっており、豚肉の肉色がL*a*b*色空間において、ほぼ平面上に分布していることが分かった。

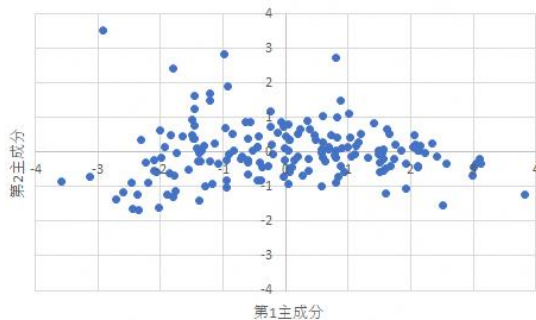


図6 赤身肉色の分布状況

図6は第1主成分と第2主成分について主成分スコアをプロットしたものである。今後、図6の分布状況を参考に、関係者と協議しながら新たな豚肉肉色指標を決めていく予定である。

豚肉は色ムラが出やすい傾向にあることが知られており、図4(b)に示すように、同じ一つの肉であっても、部位によって分光特性に大きな違いがある。この結果からも、一切れの肉を1つの色指標で表現することは実情に合っていないことが理解できる。新たな肉色指標の設定においては、色ムラなども含め、分かり易く、実情に合った評価指標となるよう、十分に留意して決める必要がある。

図2に示した基準色票の妥当性を確認するため、図5上に基準色票の色分布を合わせて表示した。基準色票の色が豚肉赤身の色分布領域と大きくずれており、豚肉の肉色分布領域をカバーできていないことが分かる。そのため、図5および図6の分布状況を参考に、豚肉の肉色分布をカバーできるよう色票を再設定する予定である。本報で述べた色評価検討では良好な結果が出ているが、すべて昨年度設定した基準色票を用いたものであるため、色票を再設定した折には、製作した装置で、新しい基準色票による豚肉肉色推定の評価検討を実施し、その性能について確認する予定である。

4. まとめ

製作した携帯型肉色評価装置の概要、及び、豚肉赤身

の色分布調査結果について報告した。

当該装置による色評価検討により、基準色票を用いた手法により高精度な色推定が可能であることを確認できた。また、計測において、試料と装置の密着状態が多少不十分であっても、色推定の精度がほとんど低下しないことを確認した。

今後は、豚肉肉色分布領域をカバーできていない現行の基準色票を更新し、製作した装置による豚肉計測を通し、関係者と連携しながら新たな色指標を決めていく予定である。

文 献

- [1] https://www.nippondenshoku.co.jp/web/japanese/colorstory/08_allowance_by_color.htm

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第7報)

ーイメージセンサー

藤井 勝敏

田畑 克彦

久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (7th Report) - Camera Sensors for Obstacle Detection -

Katsutoshi FUJII

Katsuhiko TABATA

Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者が運転し歩道などを走行することを想定した電動乗用車両(以下ビークル)について、不注意や操作ミスによる事故を未然に防ぐための安全支援装置を開発する。本報では特に、ビークルの前方に取り付けたイメージセンサから得られる映像を時系列で蓄積、処理することにより、その変化の特徴から車線逸脱による衝突あるいは転落の兆候を予知する方法を検討する。

キーワード 安全支援装置, 時系列断面画像処理

1. はじめに

足腰が弱くなり自転車の運転や歩行が困難になった高齢者が、日々の買い物や通院など、近所に出かける際の身体的負担を軽減する目的で、シニアカー等の電動車両が普及している。本研究は、そのような用途に加えて屋内用電動車いすとしても利用できる、新しい電動乗用車両(ビークル)の開発を目指し、特に走行中の安全性を高めるためのセンサシステムについての技術を研究開発している。

このセンサシステムは、一般的な歩道や生活道路の端を走行する車両に搭載することを想定しており、運動機能のみならず認知機能の衰えに不安を感じる高齢者ユーザを安全面で支援することが目標で、既報のとおり、カメラセンサ、超音波センサ、マイクロフォンセンサのハイブリッドシステムにより実現する計画である。

本報では、特に組み込み用イメージセンサ(カメラ)によって取得される路面のビデオ画像から、いかにして危険を検知し、回避行動につなぐかについて検討した。



図1 車載カメラによる撮影画像例

2. カメラを使った危険回避装置

本研究で扱うカメラは、CMOSイメージセンサおよびプラスチックレンズにより構成される組み込み用ビデオカメラを指す。昨今の携帯電話やPC、スマートフォンに内蔵されている小型で高性能な多種多様な製品・部品が入手可能であるため、この種のカメラで撮影した画像を処理する技術を研究対象としている。

2. 1 カメラの搭載方法

一例として、既製品の車載カメラで撮影した歩道の画像を図1に示す。車載カメラで路面を撮影する際、カメラの取り付け位置と角度は重要な検討事項である。路面上の段差や障害物をできるだけ多く画角内に納めるためには、可能な限り高い位置から地面に向けて撮影することが望ましい。そこで、ビークルの前方で運転者自身の視界を妨害しない高さとして、運転ハンドルの高さでもある地上80cmの位置に設定し、俯角を調整したところ、使用したカメラでは地面の手元50cmから300cm程度までの領域が撮影できた。

この領域には、ビークルの安定走行に直接影響がある段差や障害物が捉えられると予想できる一方で、背もたれ付きの座席から前方を眺めている運転者からは死角になりやすい場所でもある。この画像から危険予知することができれば、運転者の効果的な補助、支援につながると期待できる。

2. 2 画像処理方法の検討

路面を撮影した1枚の画像のみから危険因子を認識、判別することは、現在の技術では非常に困難である。特に、タイル等で装飾された歩道や、建物内を走行する可能性があるビークルにとって、撮影する路面状況の特徴を限

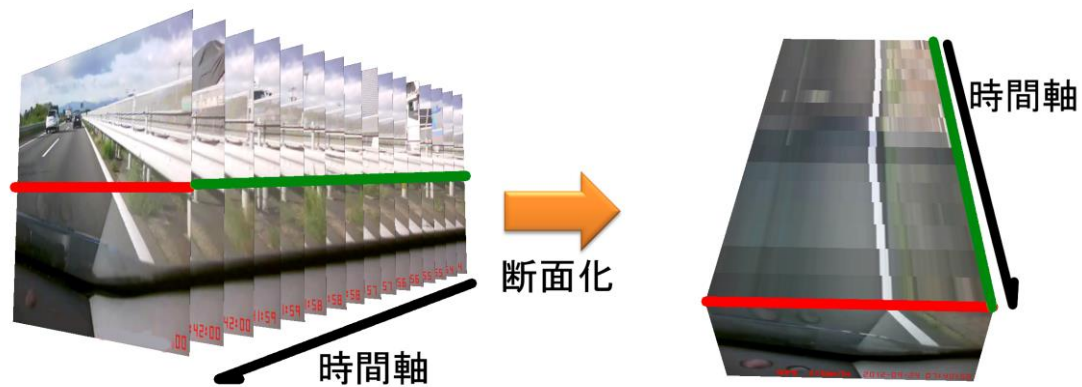


図2 時系列断面画像の生成原理

定することは不可能で、画像内に写っているものを理解し、ビークルにどのような影響が見込まれるか予想の上、危険回避のためのアクションを促す、という技術の実現は困難である。

そこで、より早期の実現を目指す本研究においては、そのような静止画像処理・認識技術ではなく、撮影画像の時間的な変化を捉えて判断する試みを行ってきた。既報においてはオプティカルフローを検討してきたが、本報では時系列断面画像^[1]（時空間断面画像とも言う）に着目した。

時系列断面画像は、2次元の動画を1コマずつ積み重ねた3次元空間を、画像上の任意の直線を横軸に、時間軸を縦軸にして輪切りにしたイメージの2次元画像である(図2)。静止したカメラで動きのない場面を撮影した場合には単なる縦縞模様になるが、カメラを取り付けた手押し車を交差点手前で前進させているときの映像で、例えば画像中心を通る水平線を横軸として再構成すると、図3のような画像が得られる。



図3 交差点付近で撮影した映像の時系列断面画像

2. 3 危険運転防止装置への応用

ビークルを使用する歩道や車道の端には、一般的に、歩車分離のための縁石ブロックや白線、排水目的の側溝、アスファルト舗装と地面の境目など、道沿いに何らかの連続的な人工物が存在すると想定する。そのような場所で撮影した時系列断面画像に、この人工物は時間軸方向に折れ線になるが、道沿いに安定走行している時には横の動きが少ない縦線で、斜行している間は斜線として現れる性質がある(図4)。

運転者が無意識のうちにこのように斜行した場合、短時間の後に、縁石乗り上げか、側溝への転落などの危険事故が起これると予想される。そのため、安全装置が画像処理によってこの予兆を捕捉し、警報音などで運転者に注意喚起することができれば、重大事故防止に非常に有効であると考えられる。



図4 安定走行時(左)と側溝転落直前(右)の比較画像

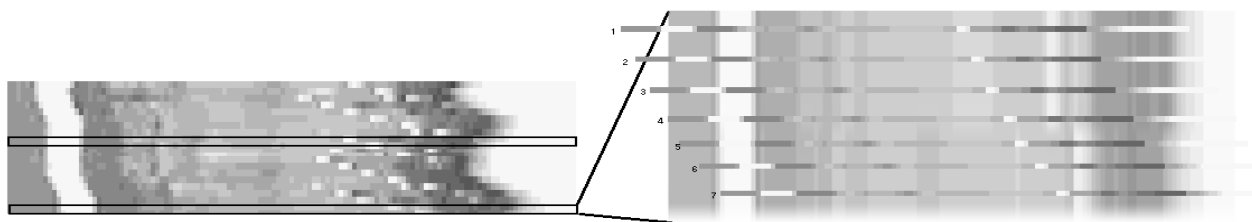


図5 時系列断面画像の最類似点計算

3. 画像処理の方法と課題

画像中に現れた斜線は、ハフ変換や最小二乗法などのよく知られた画像処理技術によって抽出、検知できるが、特に時系列断面画像に関しては、水平ライン間の類似性を最大化することにより変動量を推定する方法が有効である。図5では、最新時刻の画像(最下側枠内)を基準に、過去のラインの一つを取り出し(上側の枠線内)、左右に位置を変えて比較を行う様子を示す。ピクセル値の差(絶対値)の合計が最も少なくなる変位が、その時刻における車両自身の変動量を表していると推定する。これを、過去数秒間蓄積した画像に対して実施することで、変動量のグラフを得ることができる(図6)。図7は参考のため、推定変動量を打ち消して再構築した時系列断面画像で、注目した白線付近が時系列上で揃うことを示している。

この方法では、画像処理に必要なメモリ量や転送データ量、演算能力が、オブティカルフローのような全画面に対して行う処理よりも少なく抑えられるため、車載機用に予定している小規模のハードウェアでの実装に適している。

実際にビークルに見立てた手押し車に小型カメラを搭載したところ、日中に車両や電柱や建物の影が撮影されることがある。このコントラストが路面の模様よりも強

いと、類似度計算で影が基準になり意図しない判定結果になる恐れがある。

このような場面では、画像の輝度ではなく色差チャンネルおよびその時系列断面画像を使うと、比較的、影よりも路面の模様を強調できることがある(図8)。自然条件に依存する方法である以上、万能な方法とは言えないが、色空間変換やフィルタ処理との併用は、今後引き続き検討する価値があると考えている。

4. まとめ

高齢者用電動ビークルに車載することを想定したカメラで撮影したビデオ画像を処理することによって、運転者の不注意による重大事故を未然に防ぐ安全装置の実現のため、時系列断面画像を利用した事故予兆の判断手法について検討を行った。この方法は、道路沿いの走行であれば一般的につながって存在すると見込まれる構造物、標識の連続性に着目したレーン逸脱判定手法についての一提案である。

本手法については、振動する車体の影響や、雨天、夕方など画像処理が苦手とする場面での評価を中心に、さらなる研究が必要で、今後は専用ハードウェアによるシステム化と合わせて、ビークル試作機上での実証実験を行う予定である。

文 献

- [1] 伊藤敏夫, “車載カメラにおける画像処理とレーザレーダとのセンサフュージョンへの応用”, 日本テクノセミナー, pp.53-66, 2016.

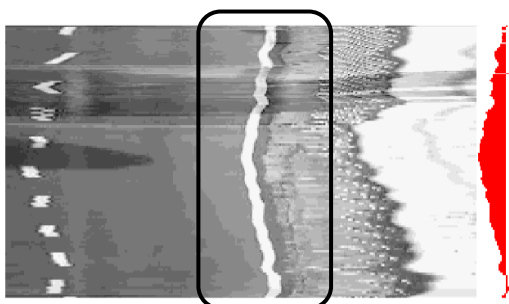
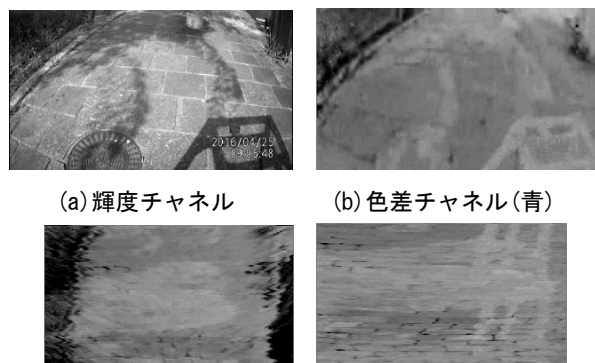


図6 変動量の推定(枠内を注目領域とする)



図7 変動量から再構築した時系列断面画像



(a) 輝度チャンネル

(b) 色差チャンネル(青)

(c) 時系列断面画像(左図は上側、右図は下側を抽出)

図8 影のある場面

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第8報）

ー 超音波フェーズドアレイソナー ー

田畑 克彦 久富 茂樹 藤井 勝敏

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (8th Report)

- An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Katsutoshi FUJII

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安全装置を開発している。この安全装置の一つとして、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、フェーズドアレイ送信を実現する音響管アレイの改良を行い、十分な送信信号強度を得ることができたが、まだ十分な検出能力を得られていないことが判明した。そこで、二値振幅偏移変調されたBarker符号を送信し、送信符号と受信信号との相関処理を行うことにより検出能力を高め、目標であった距離3000mm、方位60degにいたる三歳児程度の大きさの子供を検出できる目途がついた。さらに、来年度以降に電動車いすで検証するためのシステムを開発したので報告する。

キーワード 超音波フェーズドアレイソナー、超音波音響管アレイ、Barker符号、相関処理

1. はじめに

高齢者が活動的な生活を送る支援機器の一つとして、電動車いすが有用であるが、障害物との衝突、歩行者や自動車等との接触事故が後を絶たない。そこで我々は、電動車いすの運転中に障害物や危険箇所の接近をセンサで検知することによって、安全な走行を支援する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で開発されている新しい電動車いすへ搭載し、普及させることを目指している。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、電動ビークルの安全装置に搭載する複数のセンサを開発しているが、そのうちの一つとして、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][2]}。電動ビークルは直線走行が続く屋外だけでなく、高い頻度で移動方向が大きく変化する屋内での使用も想定しているため、正面だけでなく左右の広範囲にわたって存在する障害物を検出する必要がある。その上、車体が小型であることから、センサ自体もコンパクトにする必要がある。

これらの要求を同時に満たすため、本研究では多数の送信用超音波振動子を制御し任意の方向に強い超音波を送信するフェーズドアレイ技術を利用し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][2]}。昨年度は、フェーズドアレイ送信を

実現する音響管アレイを改良したところ、これまでの2倍の信号強度にすることができた^[2]。

本年度は、この音響管アレイを使用して障害物の検出能力を確認する実験を行ったが、目標である距離3000mm、方位60degに設置した服を着せた3歳児大の人体ダミー(以降、“子供マネキン”と記す)を検出できなかった。そこで、障害物検知に使う超音波信号を変調し、反射信号を強調する信号処理を加え、検出能力の向上を図った。具体的には、自己相関値が高く符号長が比較的短いBarker符号で二値振幅偏移変調(以降、“二値ASK変調”と記す)された超音波信号を送信し、送信符号と受信信号との相関計算によって符号化パルス圧縮を行った。これにより障害物からの反射を明確にとらえることができ、実験により目標達成の目途を得た。さらには、将来的な車載システム化に向けて、コンパクト化を一段と進めた検証用システムを開発し、実験用台車に搭載して動作確認を行った。本稿ではこれらの改良内容と評価実験結果について報告し、実証実験に向けた課題を整理する。

2. 障害物検出実験

昨年度開発した超音波音響管アレイ^[2]を使用して超音波PAソナーを構築し、障害物の位置と種類を変えて検出能力を把握した。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。本検出実験では搬送周波数40kHz、長

表1 送信部仕様

音響管アレイ:	
スリット開口サイズ	縦20mm×幅3mm
スリット間隔 (Center to Center)	4mm
スリット数	8
超音波素子数	16
超音波素子:	
中心周波数	40kHz
波長 (at 20℃)	8.6mm
素子型番	日本セラミックス株式会社
(開放型)	T4008A1(φ 8×6mm)

表2 受信部仕様

超音波素子:	
超音波中心周波数	40kHz
素子型番	日本セラミックス株式会社
(防滴型)	PR40-18(φ 18×12mm)

表3 障害物検出結果

距離[mm]	障害物 子供マネキン			障害物 低い壁		
	方位角 [deg]			方位角 [deg]		
	0	30	60	0	30	60
500	○	○	○	○	○	○
1000	—	—	—	—	—	—
1500	○	○	×	○	○	○
2000	○	○	×	—	—	—
3000	×	×	×	○	○	○

○検出可能

×検出できず

— 計測せず

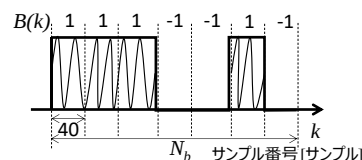
さ0.4msの単パルスを送信し、受信電圧がノイズフロアと分離可能な0.1V以上である場合に障害物の検出が可能と判定した。

表3は実験結果である。高さ450mmの低い壁に対しては目標の距離3000mm、方位角60degの検出を達成している。しかしながら、子供マネキンに対しては目標を達成できなかった。特に方位角が大きい60degでは距離1500mmでも検出困難であった。これは、衣服が超音波を吸収し反射信号の強度を弱めることに加え、送受信部の指向性により感度が低下していることが原因である。

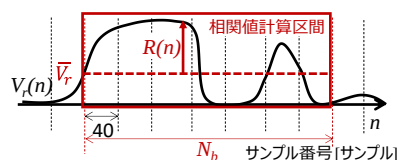
これまでのように音響管アレイを改良し送信強度を高めて検出領域を拡張することを継続するためには、さらに送信素子数と音響管数を増やす必要がある。このことは音響管が歪曲しすぎて超音波が減衰し易くなる、構造が複雑になるなど、効率、強度およびコストの面で問題となる。このため、Barker符号による相関処理により、反射信号を強調し検出領域の拡張を図ることとした。

3. Barker符号と相関処理による能力向上

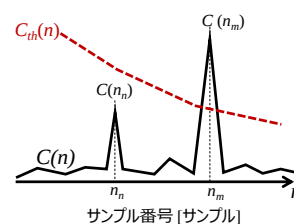
Barker符号は符号化パルスレーダにおいて位相符号化によるパルス圧縮などに用いられる符号列である。パルス圧縮とは、送信パルスとしてパルス内に特殊な変調を施したパルス幅の広い送信信号を用いて検出距離を拡張し、受信後の処理においてその復調を行って狭いパルス幅に変換することで距離分解能を向上させる技術である。本技術は、検出距離を拡張するには送信パルス幅を広くし、距離分解能を向上させるにはパルス幅を狭くするという相反する性質を解決する技術として用いられている^[3]。同様の目的で特徴的な信号を用いた方法が



(a) 送信信号 (Barker符号長7)



(b) 受信信号の振幅値 (検波後の拡大図)



(c) 相関値 (障害物判定)

図1 Barker符号による相関処理

幾つか報告されているが、本研究では近距離も検出したいために符号長の短いBarker符号を用いる。Barker符号は+1または-1から成り、(1)式で表されるように、符号列が一致した時($d=0$)に高い自己相関値 N となるが、不一致の場合は理論的最小値である0または ± 1 となる符号列である。

$$C(d) = \sum_{i=1}^{N-d} X_i \cdot X_{i+d} = \begin{cases} N & (d=0) \\ 0, \pm 1 & (d=1, 2, \dots, N-1) \\ 0 & (d \geq N) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、符号長 N が6084までのうち、上式を満たすBarker符号はわずか9個である^[3]。

3. 1 Barker符号による相関値計算

Barker符号によるパルス圧縮は、符号+1を位相0とし、-1を位相 π とする二値位相変調信号を用いることが一般的である。しかしながら、本システムは振動板の機械共振を利用した超音波素子を使用しているため、極小時間内に位相を反転することは困難である。このため本システムでは二値ASK変調信号を用いた相関処理を行うことで、パルス圧縮を行った。

図1を用いて本システムにおける相関処理の計算方法について説明する。図1(a)は40kHzの搬送波に対して二値ASK変調した符号長7bitのBarker符号関数 $B(k)$ である。励振時を符号1、非励振時を符号-1とし、1bit符号の時間幅は十分な励振時間である0.4msとしている。サンプリング周期 T_s を10 μ sに設定したため、1bit符号は40サンプルから成り、符号長7のBarker符号を構成するサンプル長 N_b は280である。一方、受信信号の拡大図は図1(b)であり、目標距離3000mmの1.5倍の4500mmまでの受信信号の振幅

値（以降，“受信振幅値”と記す） $V_r(n)$ をADコンバータで取得する．この時，観測データの n 番目のサンプルにおける相関値 $C(n)$ を次の式で表す．

$$C(n) = \sum_{k=0}^{N_b-1} B(k) \cdot R(k+n) \quad (2)$$

ここで， $R(k)$ は受信信号評価値であり，図1(b)に示すように受信振幅値 $V_r(n)$ と相関値計算区間 N_b における $V_r(n)$ の平均値との差であり，次の式で表される．

$$R(k+n) = V_r(k+n) - \bar{V}_r(n) \quad (3)$$

$$\bar{V}_r(n) = \frac{1}{N_b} \sum_{k=0}^{N_b-1} V_r(k+n) \quad (4)$$

最初は，評価値 $R(k)$ を二値化したのが，ノイズフロア程度に受信振幅値が低下すると誤検知が急増した．この対策として，(3)式のように平均値からの振れ量を符号の重みとすることで，振幅値も加味した評価値とした．

以上の式から図1(c)に示す相関値 $C(n)$ を得ることができるため，閾値 $C_{th}(n)$ を適切に設定することで，障害物からの反射信号 $C(n_m)$ を抽出する．障害物までの距離 ℓ はサンプル番号 n から次の関係式で求めることができる．

$$\ell = \frac{c \cdot T_s \cdot n}{2} \quad (5)$$

ここで c は音速[m/s]である．

3. 2 相関処理による検出結果

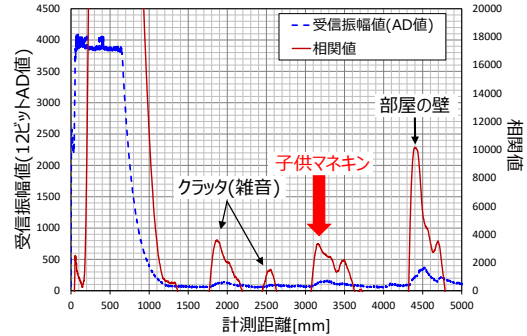
前述のようにBarker符号は9種類存在する．符号長 N は2～13の間に存在しており，どの符号を使用するか選定する必要がある．予備実験を行って検討した結果，符号長 N が11以上では符号列が長すぎるため，送信中に要求仕様である500mmの障害物からの反射信号と重なり，検出できない．また，(1)式において，符号がずれている場合に相関値が+1となる符号も極大値が別の位置に出現し，距離誤差が大きくなる傾向があった．以上の条件に合致しないBarker符号は，符号長 N が2，3，7の符号である．その中で符号長が最も長いために，符号一致時の相関値が最も大きくなる符号長7のBarker符号を選定した．

図2は第2章の障害物検出実験で最も検出が困難であった子供マネキン（距離3000mm，方位角60degに設置した場合）における検出結果である．図2(b)から受信振幅値（12ビットAD値）は0～4095の値で比較的緩やかに変化することに対して，相関値の階調は50万を超えるため値の変動も大きく，子供マネキンからの反射をより明確に検出できていることがわかる．本結果より，目標値である距離3000mm，方位角60degに存在する検出困難な障害物も検出できる目途がついた．

しかしながら，距離2000mmおよび2500mmにおいて，位置決めシートの皺からの反射と思われるクラッタ（雑音）も検出している．子供マネキンがこの位置に存在する場合にはクラッタよりも相関値は大きくなる．よって，



(a) 実験のようす



(b) 相関値計算結果 (Barker符号長7)

図2 障害物検出実験の一例

今後はクラッタと障害物を判別するため，図1(c)における閾値 $C_{th}(n)$ を適切に設定して，誤検知を回避する必要がある．

4. 検証用システムの開発

これまで，屋内において超音波信号の送受信処理について検討し，処理内容が固まってきた．今後は，実験用移動台車や電動ビークルに搭載し，屋内外にある実際の障害物の検出条件を検討することが必要である．このため，よりコンパクトなセンサーヘッド(図3(a))と電子回路基板を試作し，マイコンとFPGAに送受信処理を実装した超音波PAソナーの検証用システムを開発した．本システムには，制御用PCにマイコンから送られる障害物反射信号の位置と大きさ情報をロギングしCG表示する機能を追加した．さらに制御用PCに接続したUSBカメラから得られた画像を表示し，検出した障害物を確認できるようにした．図3(b)は検証用システムを実験台車に実装した写真である．

図4は動作確認のため，図3(b)の実験台車を高さ48cmの壁沿いに走行させているときの制御用PC画面のスナップショットである．図4(a)は符号長7のBarker符号信号を使用して，前述の相関処理によって右側の壁を検出した結果であり，同図(b)は受信振幅値（AD値）によって同じ壁を検出した結果である．表4は動作確認時の主な仕様である．また，(2)式におけるサンプル番号 n の最大値は，最大検出距離4500mm，サンプリング周期10μsに設定しているため，3100としている．



(a) 超音波PAソナーのセンサーヘッド

(b) 実験用台車への実装
図3 開発した検証用システム

図4において実験用台車は石畳の上を走行しているため、路面に多少の凹凸がある。このため図4(b)では、路面反射によるクラッタを検出してしまっているが、図4(a)の相関値による検出では、クラッタの検出を抑制できている。しかし、相関値による検出においても時々クラッタを検出していることを確認している。よってクラッタの抑制効果は、表4中の障害物検出条件において、単に相関値の閾値がより適切に設定されていたと考えられるが、図2(b)に示すように検出値が相関値となることで階調が広がり、クラッタと障害物の分離が容易になったとも考えられる。前述したように、今後は障害物の距離と方位角に対応して閾値 $C_{th}(n)$ を的確に定めることでクラッタによる誤検出をさらに抑制する。もう一つの課題は、最小検出距離を500mmに短縮することである。現状では表4のとおり相関値の場合、最小検出距離が600mmである。これは、低利得系の信号利得がまだ大きく、送信時の回り込み信号が膨張して、検出範囲に出現していることが原因であることから、利得調整を行う。

5. まとめ

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、送信信号に自己相関値の高いBarker符号を二値ASK信号として用いて、受信信号との相関処理を行うことで、障害物からの反射信号を強調した。これにより、検出目標であった距離3000mm、方位角60degにいる三歳児程度大きさの子供を検出できる目処が立った。また、来年度以降の電動ビークルへの実装に



(a) 相関値による壁検出



(b) 受信振幅値(AD値)による壁検出

図4 検証用システムの動作例(スナップショット)

表4 動作確認時の主な仕様

障害物検出方法	相関値	受信振幅値(AD値)
使用符号	Barker符号 (符号長7)	単パルス
検出距離	600~4500mm	500~4500mm
検出方位角	120deg (-60~+60deg)	同左
照射方向	13方向	
検出時間(1方向)	55ms	40ms
障害物検出条件 (動作確認のため暫定)		
高利得系	距離1000mm以上 相関値5000以上	距離1000mm以上 AD値155以上
低利得系 (近距離検出用)	距離600mm以上 相関値10000以上	距離500mm以上 AD値465以上

備え、検証用システムを開発し、動作確認を行った。この結果、相関処理による検出値の階調が広がるために、路面からの反射雑音(クラッタ)の抑制が容易になることを確認した。今後は、障害物の的確な検出条件を設定することと、近距離における検出能力を向上させる。

謝 辞

本研究で試作したセンサーヘッドは、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た。

文 献

- [1] 田畑克彦, 久富茂樹, 藤井勝敏, “フェーズドアレイ送信を用いた超音波障害物センサの開発—音響管アレイによる送信ビームの改良—”, 第33回センシングフォーラム講演予稿集, pp.244-249, 2016.
- [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5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, No.17, pp.8-11, 2016.
- [3] 吉田孝, “改訂 レーダ技術 第11章 特殊なレーダ技術”, 社団法人 電子情報通信学会, pp.275-280, 1996.

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第9報)

— 音センサ —

久富 茂樹

田畑 克彦

藤井 勝敏

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (9th Report)

- A Sound Sensor -

Shigeki KUDOMI

Katsuhiko TABATA

Katsutoshi FUJII

あらまし 高齢者が活動的な生活を送るための有用なツールである電動ビークルの安全性向上を目的として、後方からの車の音を検出し運転者に注意喚起する音センサを開発している。本年度は、風雑音とパルス状ノイズに対する検討を行った。風雑音に関しては、信号のアンプ部に急峻な特性をもつハイパスフィルタを導入することで、強い風が吹いた時のオーバーレンジ発生の低減を行った。また、形状の異なるマイクロホンカバーを試作してSN比を測定したところ、風速が小さいときはカバー形状により差が生じるが、風速が大きくなるとカバー形状による差はわずかであった。パルス状ノイズに関しては、評価指標値の極小値を利用する手法について検討した。

キーワード 電動車いす, 安全装置, マイクロホンアレイ, マイクロホンカバー, パルス状ノイズ

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。当研究所では、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。本稿ではこ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報告する。

高齢になり聴力が低下してくると、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。そこで、特に認識が困難な後方からの車の接近を想定して、車のエンジン音、ロードノイズなどを検出し、運転者に車の接近を知らせる装置を開発している^{[1]~[3]}。これまでに、検出周波数帯の検討や後方からの音を感度よく取得するためのマイクロホンアレイを使用したビームフォーマ、パルス状ノイズの除去方法などについて検討してきた。しかしながら、屋外で測定を行っているとき、強い風の日には、風音を車の接近として誤検出することが度々あった。本稿では、この風雑音の対策について検討したので報告する。また、パルス状ノイズの対策について、接近する車の走行状態によっては、パルス状ノイズと誤検出して車の接近を検出できないことがあったため、別の手法を検討したので報告する。

2. 風雑音に対する検討

これまでに、車の接近を判定する評価指標値として、風の影響を受けづらい1kHz~3kHzの音を用いるなど、風雑音に対する対策は行ってきたが、屋外で測定をしていると、風音の影響を受けて車の接近と判定してしまう誤検出が度々生じた。測定データを確認すると、強い風が吹いたときに、オーバーレンジが発生していることもあった。そこであらためて風雑音に対する検討を行う。

2. 1 扇風機の風の測定

自然の風は条件が一定でなく比較評価が困難なため、扇風機の風を利用することにした。ボタンの切り替えて風量が変わる家庭用扇風機を使用した。事前に風杯型風速計を使用して扇風機の風速を測定した。扇風機と風速計の距離が長くなると風速が安定しなかったため、距離を0.5mとして測定したところ風速が比較的安定し、扇風機の風量切替が「弱」で3.0m/s、「中」で4.2m/s、「強」で5.2m/sであった。

扇風機の正面の位置に0.5m離してマイクロホンを設置し風音を測定した。図1に測定の様子を示す。マイクロホンはエレクトレットコンデンサ型のものを使用し、受音面が下向きになるように固定した。マイクロホン出力をオペアンプで増幅したのち、バターワース型ローパスフィルタ（カットオフ周波数：4kHz）に通過させて、25.6kHzのサンプリングでコントローラに記録した。



図1 扇風機の風測定

図2に風速5.2m/sの風の測定値のウェーブレット変換結果を示す。色の濃い部分ほどその周波数成分が多く含まれることを示している。この結果から1kHz以下の周波数成分が強く表れていることがわかる。これらの成分の影響で風が吹いた時にオーバーレンジが発生していると推測できる。車接近の評価指標値には1kHz～3kHzの周波数帯を使用しているため、1kHz以下の信号は取得する必要がない。そこで、4次チェビシェフ特性を持つハイパスフィルタを測定回路に追加した。カットオフ周波数は2kHzに設定した。評価指標値に重なる周波数ではあるが、風の周波数成分が1kHz以上になることもあり、風の影響をできるだけ避けるためこのような設定にした。

図3に風速5.2m/sの風の測定波形を示す。(a)はハイパスフィルタ導入前、(b)はハイパスフィルタ導入後である。ハイパスフィルタを導入したことにより風雑音が抑制されており、強い風が吹いた時に発生するオーバーレンジの低減が期待できる。

2. 2 マイクロホンカバーの検討

これまでに雨対策として円筒状のマイクロホンカバーを試作した^[2]。しかしながら、風雑音に対するカバーの円筒長の検討は行っていなかったため、今回その検討を行った。開口部での風切り音の発生を抑制する目的で、球状のカバーも試作し評価を行った。図4(a)に試作したマイクロホンカバー形状、同図(b)に三次元造形機で試作したマイクロホンカバーの外観を示す。(A)～(E)は円筒状カバーで、音が入りこむ開口部が下側になっており、各カバーで開口部の位置が同じになるように三脚に固定した。開口部の直径は6mmで、開口部からマイクロホンまでの距離は(A)～(E)でそれぞれ、0mm、10mm、20mm、30mm、40mmである。(F)、(G)は球状カバーであり、球の直径は35mmである。球内部にマイクロホンが埋め込んでいる。(F)は開口部が後ろ(取り付け部側)になるように設計し、(G)は開口部が下向きになるように設計した。(F)、(G)ともに開口部の直径は6mmで開口部とマイクロホンの距離は20mmである。

これらのマイクロホンを使用して以下のようにSN比(x_{SN})を求めた。はじめに、前章と同様に扇風機の正面の0.5m離れた位置にマイクロホンを設置して扇風機の風音を測定した。0.1秒ごとに評価指標値(1kHz～3kHzのパワースペクトルの累積値)を求め、3秒間分を積算し

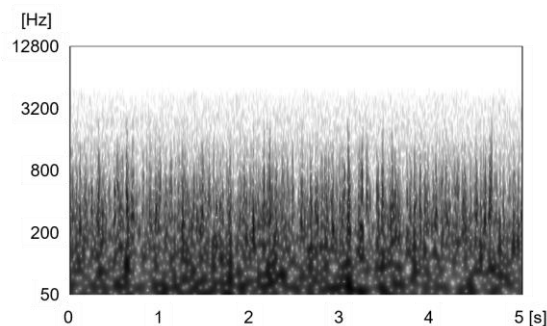
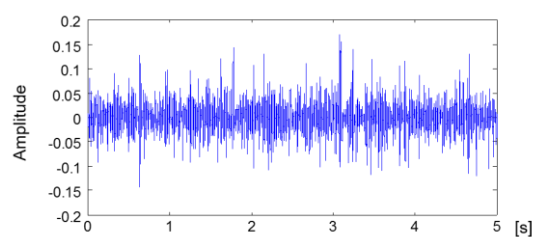
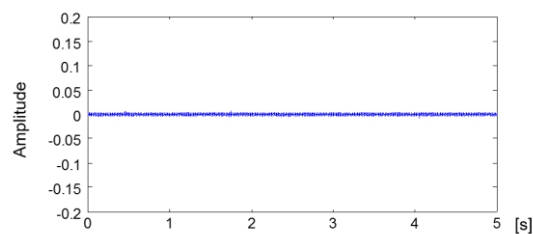


図2 風速5.2m/sの風のウェーブレット変換



(a) ハイパスフィルタ導入前



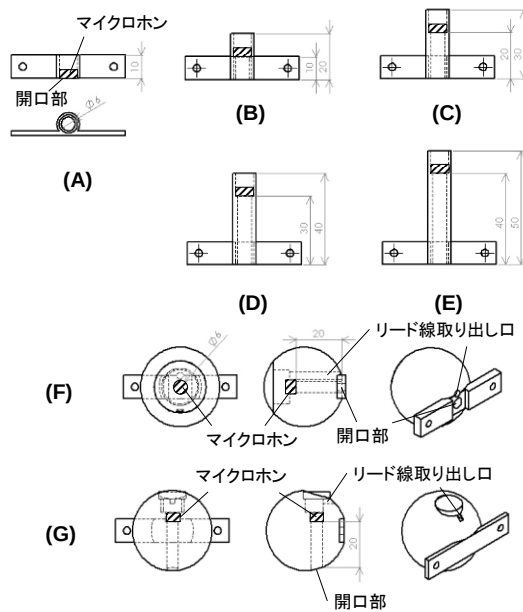
(b) ハイパスフィルタ導入後

図3 風速5.2m/sの風の測定波形

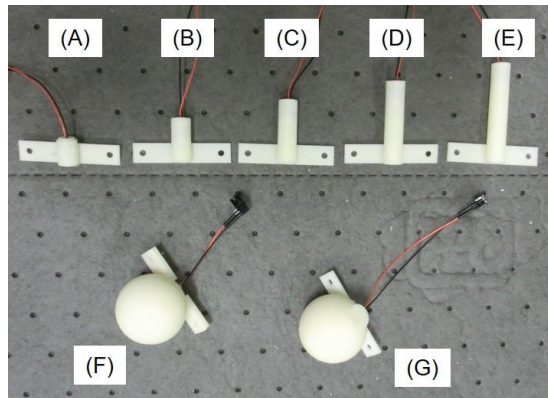
I_N とした。次にマイクロホンから1.5m離れた位置にスピーカを設置し1kHz～3kHzの周波数成分を含んだ音を再生した。同様に測定データから0.1秒ごとに評価指標値を求め、3秒間分を積算し I_S とした。はじめに測定した扇風機の風音にはモータの駆動音等も含まれるため、扇風機の側面方向に0.5m離してマイクロホンを設置することでマイクロホンに風が当たらないようにし、送風時のモータ駆動音、ファンの風切り音のみを測定した。同様に評価指標値の積算値を求め I_F とした。これらの値から(1)式のようにSN比を定義し算出した。

$$x_{SN} = 10 \log \left\{ \frac{I_S}{(I_N - I_F)} \right\} \quad \dots (1)$$

図5に測定値から算出したSN比を示す。風速3.0m/sの弱い風の場合は、カバー形状の違いが顕著であった。特に球状カバーである(F)や(G)のSN比が高くなった。球状にすることで風の流れがスムーズになり、風音が抑えられたためではないかと考えている。筒状カバーでは長さを30mmにした(D)のカバーのSN比が高くなった。カバーの筒部分が共鳴管の役割を果たし、長さが30mmの場合に2.7kHz付近の音が共鳴しやすくなったのではないかと考



(a) マイクロホンカバー形状



(b) 試作したマイクロホンカバーの外観

図4 マイクロホンカバー

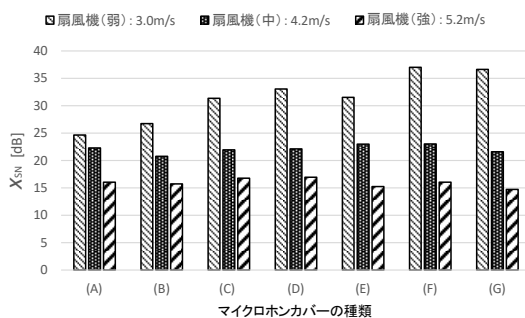


図5 マイクロホンカバーによるSN比

えられる。風速を4.2m/s, 5.2m/sにしたときは、カバー形状の差が小さくなった。風速が大きくなると空気の流れが大きく乱れ、カバー形状による差が生じなくなったためではないかと考えている。

3. パルス状ノイズ対策

昨年度の研究で、電動車いすの走行時にパルス状のノイズが発生することを確認し、その波形の特徴からパルス状ノイズを除去するアルゴリズムを検討した^[2]。パルス状ノイズの場合には、評価指標値の変化量が大きいいため、閾値以上の変化量の場合には評価指標値を前の時間に求めた値に据え置くという手法であった。しかし、接近する車の走行状態によっては、パルス状ノイズと誤検出して車の接近を検出できないことがあった。そこで今回は別の観点からパルス状ノイズを低減する手法について検討した。

図6に電動車いすで石畳を走行した時の時系列波形(a)と評価指標値(b)を示す。この間に車の走行はない。この評価指標値の極大値を○印で、極小値を×印で同図中にプロットした。極大値と極小値の差が大きく、極大値は大きな値を示しているが、極小値は小さい値に収まっていることがわかる。電動車いすは停止した状態で、車の走行音を測定した時の時系列波形(a)と評価指標値(b)を図7に示す。先ほどと同様に、極大値を○印で、極小値を×印で同図中にプロットした。石畳走行時とは異なり、極大値と極小値の差が小さく、評価指標値は小刻みに変動しながら、車の接近とともに、極大値、極小値とも徐々に増大し、車が遠ざかるとともに徐々に減少していることがわかる。図8に石畳走行時と車走行音が重なった時の時系列波形(a)と評価指標値(b)を示す。同様に極大値と極小値を図中にプロットした。時系列波形、評価指標値ともに図6の石畳走行時の結果と類似しているが、極小値をみると、車が最接近したと思われる6s付近の値が大きくなっている。車の接近に伴って評価指標値が全体的に大きくなったため、極小値も大きくなったと思われる。ただし、図6の結果と比較して極小値の増大幅はそれほど大きくなく、値も安定していない。そのためパルス状ノイズが発生しやすい状況下で、本手法のみで車の接近を検出することは困難である。従来実施してきた波形の特徴からパルス状ノイズを除去する手法と併用する手法を考えることが、パルス状ノイズ対策に重要である。

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、風雑音とパルス状ノイズに対する検討を行った。風雑音に関しては、信号のアンプ部に急峻な特性をもつハイパスフィルタを導入することで、強い風が吹いた時に発生するオーバーレンジの低減を行った。また、形状の異なるマイクロホンカバーを試作してSN比を測定したところ、風速が小さいときはカバー形状により差が生じるが、風速が大きくなるとカバー形状による差はわずかであった。今後、マイクロホンをアレイ化した時の特性も調べカバー形状を選定していきたい。パル

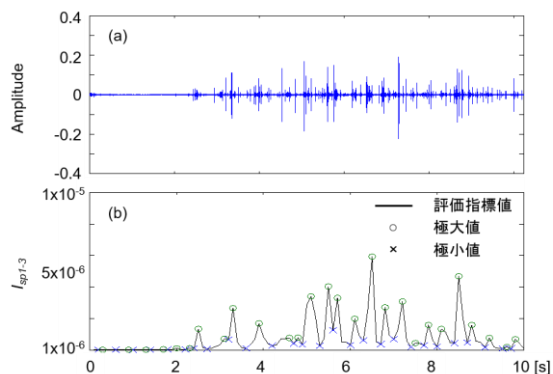


図6 石畳走行時の時系列波形(a) と評価指標値(b)

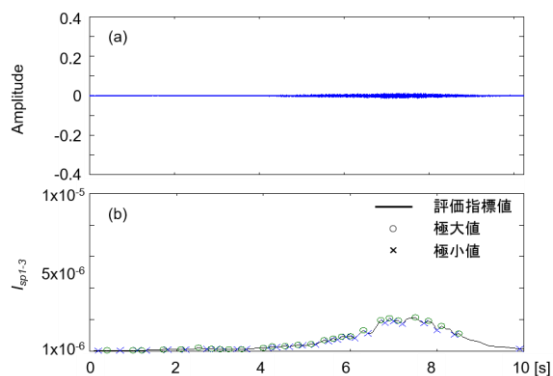


図7 車走行音の評価指標値

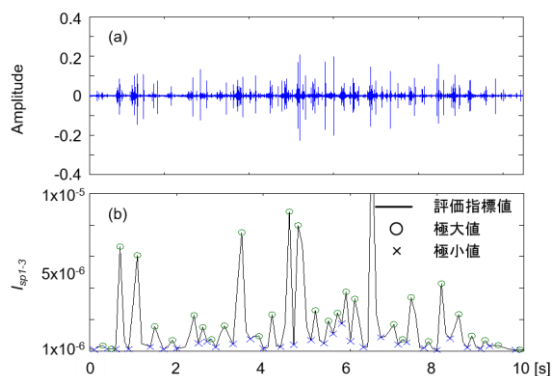


図8 石畳走行時と車走行音が重なった時の評価指標値

ス状ノイズに関しては，評価指標値の極小値を利用する手法について検討した．今後は，従来進めてきた波形の特徴からパルス状ノイズを除去する手法と併用する手法を考え，パルス状ノイズ対策の向上を図りたい．

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た．

文 献

- [1] 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.
- [2] 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6報）－音センサー”，岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号，pp.12-15，2016.
- [3] 久富茂樹，田畑克彦，藤井勝敏，“高齢者用電動ビークルのための自動車接近音検出”計測自動制御学会計測部門第33回センシングフォーラム，pp250-253，2016.

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3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 特別支援学校高等部が行う作業学習で、コミュニケーション能力の向上を目的とした喫茶接客サービスの実習を、情報通信技術を応用した機器やシステムによって支援する活動を継続している。今年度は、現金を扱うレジ業務を生徒に担わせることを目標とした支援アプリについて、バーコードリーダによる入力操作への対応と、キャッシュドロアの開錠制御、さらに、売り上げ集計作業を支援するためのレポート生成機能の拡充などの改良を行った。また、従来から注文取りと伝票印刷のために利用されている接客学習支援アプリについても、ホール係が行う一連の業務を一貫してアプリ画面でガイドするための機能拡張を行った。

キーワード 接客学習支援, Android, バーコードリーダ, DKD

1. はじめに

岐阜県内の多くの特別支援学校の高等部では、卒業後に就職した際に重要なコミュニケーション能力を向上させることを目的に、喫茶サービスの場面での接客業務の実習を取り入れている^[1]。その実施内容は、学校の設備や立地条件により差異はあるが、岐阜本巣特別支援学校(岐阜市)では学内のセミナーハウスを改装した喫茶室「Café和～なごみ～」を構えており、郡上特別支援学校(郡上市大和)の場合は、道の駅「古今伝授の里やまと」内のギャラリーを借りて月1回程度「goodjob喫茶」をイベントの一つとして実施している。また、今年度新規開校した羽島特別支援学校には当初から実習用の喫茶室を備え、7月から「ロータスカフェ」を開始した。この他の県内特別支援学校においても、学内模擬喫茶と校外実習を組み合わせる等により、一般客に接客する接客業務実習を行う学習環境づくりが進んでいる。

当研究所では教育現場からのニーズに基づいて、平成24年度から県立特別支援学校での喫茶サービスの学習をタブレットPC等の情報通信機器を応用し支援する研究を行っている。これまでに接客マニュアルの一部をタブレット画面上に表示し、ガイドするアプリや、注文伝票をレシートプリンタで出力するソフトウェア等、情報技術シーズを活かした支援システムの提案、開発を行ってきた^[2]。特に、昨年度、郡上特別支援学校からの要望により開発したレジ接客支援アプリ^[3]は、現金と紙幣およ

び硬貨の画像をマッチングすることで正確な現金受領と釣銭の返却を支援し、かつ会計処理に必要な領収書等の帳票を出力できるようにしたシステムである。

本年度は、このレジ接客支援アプリを更に発展させ、一般的なレジ業務に使用されているバーコード入力への対応と、現金を収納している金庫を適切なタイミングで自動開錠するシステム化を行った。また、その他、学校での実習の状況を観察しながら、レジアプリおよび接客学習支援アプリについてマイナーチェンジを行ったので、本報で報告する。

2. レジ接客支援システムの改良

既報^[3]のとおり、レジ業務の支援とは、商品代金の合計を計算することと、受領した現金に対する釣銭を計算することが主要な目的で、これらの計算機能に加え、接客マニュアルのガイドおよびヘルプ要請ボタンを実装したAndroidアプリを開発した。この操作に付随して、ネットワーク経由で接続したレシートプリンタから領収書が印刷されるとともに、サーバで保存された売上集計と取引履歴についても、実習に関連する経理処理で活用されている。

このアプリを使用しているgoodjob喫茶のレジでは、喫茶伝票を見て5種類のドリンクをボタン入力することが大半であるが、時々、テイクアウト食品や縫製品、木工品等を同じレジで扱うことがあり、その品目数は最大で

約40種類に上る。これらをレジアプリで入力する場合、部門ボタンを押して表示カテゴリーを切り替えてから、該当する商品名ボタンを押す操作方式を使用しているが、喫茶以外の商品の入力は煩雑で教員のサポートが欠かせなかった。

また、レジ接客とともに担当者の重要な仕事である現金の出納についても、手提げ金庫を教員が開け閉めする対応がとられていた。

本年度はこれらの課題について、新たな機能拡張による改良を行った。

2. 1 バーコード対応

バーコードとは、縞模様で数字や文字情報を含めたもので、スーパーマーケット等の多品種の商品を扱うレジでは、包装紙等に印刷されたバーコードに専用読み取り機を当てて入力するシステムが導入されており、レジ担当者の負担軽減を図っている(図1(a))。

喫茶のレジ支援アプリにおいてもこの入力方式を取り入れるため、接客システムサーバ側に、喫茶で取り扱う商品コード(英数字4文字)をCODE39形式のバーコードに一覧印刷する機能を実装した。一方、レジ担当者が取り扱うAndroid端末にはUSB接続のバーコードリーダー(BC-BR900L:ビジコム製)を接続し、読み取った商品コードの文字列を解析して該当する商品をアプリ内の買い物かごに登録する機能を実装した。



(a) 利用時の様子



(b) 商品登録画面



(c) 現金受領画面

図1 レジ接客支援システム



図2 キャッシュドロア

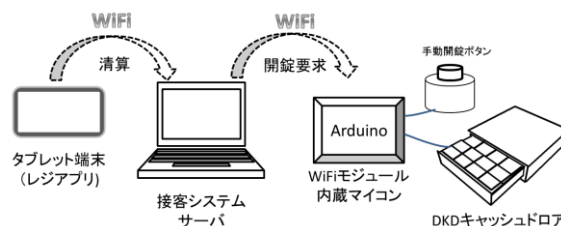


図3 キャッシュドロアのWi-Fi制御

2. 2 キャッシュドロアのマイコン制御

一般的な電子レジスタには、現金を収納する金庫を備え、清算・レシート印刷と同時に現金の引き出しが飛び出す仕組みが備わっている。この金庫部分をキャッシュドロア(図2)と言い、これを電気的に開錠する仕組みをDKD(Drawer Kick Driver)と呼ぶ。

本研究のように独自のレジアプリから開錠するためには、ユーザ操作による開錠要求信号を受けて、DKDインタフェースの電流を制御する付加装置が必要になる。そこで、キャッシュドロアを喫茶内プライベートWi-Fiネットワークと接続し、レジアプリが印刷サーバに清算・領収書印刷要求を送ると同時に、キャッシュドロア内のソレノイドを制御する装置を製作した(図3)。Wi-Fi接続にはArduinoマイコンESP-WROOM-02(秋月電子通商製)を使用し、ソレノイド電流はFETで制御している。

なお、不正なアクセスや操作によってレジが開かれることがないように、特定のプロトコルでの開錠要求のみを受け入れることとともに、担当者が手動でレジを開錠したときにも、サーバに時刻を記録している。

2. 3 その他の変更点

レジアプリによる操作は、取引履歴としてサーバ側にすべて記録しているが、誤った領収書を発行した場合には、発行番号と額面金額を使って取引の取り消しを登録できるようにした。また、レジ操作の練習時に誤って領収書を発行しないように、「練習モード」の切り替えボタンを追加した(図1(b))。

その他、会計時にあまり使用されない高額紙幣や1円、5円玉は標準で非表示にして、現金受領確認画面のボタン数を削減するなど、使いやすさを改善した(図1(c))。

3. 接客学習支援アプリの改良

喫茶サービスにおける接客学習支援アプリは、本研究の最初に研究開発、実用化したAndroidアプリである。来店者の出迎えから始まり、テーブルへの案内、注文取り、注文内容確認、伝票印刷までを画面上でガイドすることで、初心者の学習を心理的に支援する^[2]。

ガイドする接客手順および受け付けるメニュー内容については喫茶ごとに異なるため、各学校向けにカスタマイズしたアプリを提供しており、メニューの変更等に応じ、定期的にバージョンアップを行っている。

3. 1 セット型メニューの注文処理

Café和では昨年度の冬メニューからモーニングセット2種類、今年度の夏メニューからはケーキセット(図4)、そして今年度の冬メニューにはモーニング2種とケーキの3種類のセットメニューが開始され、それに伴い注文伝票の書式が変更された(図5)。

セットメニューがなかった従来の構成では、基本的に来客人数と同数のドリンクを順不同で聞き取り、確認の際はドリンクごとの注文数を読み上げる形式で行われてきた。これは、紙伝票を使う場合に「正」の字の書き順で引いた線の数で記録する方法と互換性があった。

セットメニュー開始後は、ドリンクメニューとセット(または単品)の組み合わせで一人分の注文として受け付け、確認の際にはテーブル内でのドリンクごとの注文数ではなく、各人の注文内容を順番に復唱する方が合理的である。アプリ側ではオーダー順序を保持し、この仕様を実現している。

ただし、注文を厨房に伝える際には、各ドリンク担当者に注文数を伝える必要があるため、伝票上の表示は表形式でドリンク別注文数を表記し、手書きで注文をとる生徒との互換性に配慮した。ただし、複数の客が異なるセットメニューを注文した場合に、順序情報が保存されないと配膳時に支障があるため、アプリ版からの厨房伝票には欄外にこの情報を記載している(図6)。

3. 2 ホール業務の一貫ガイド

郡上特別支援学校のgoodjob喫茶では、喫茶サービス班以外の作業班に所属する生徒も毎回若干名ずつ店舗で実習する。これらの生徒は接客の経験がなく、事前に作喫茶業務を練習する時間が限られることから、アプリによるガイダンスが期待されていた。

従来のアプリでは、ドリンク類を運ぶときに画面に注意を払うと、姿勢が不安定になる恐れがあったことから、アプリの利用範囲は来店から伝票作成までの支援に留めていたが、現場からの要望により、付け合わせの紹介、ドリンクの提供、伝票の説明までの、ホール担当者の一連の業務内容を同一アプリ内でガイドするように画面転換数を拡張した(図7)。なお、goodjob喫茶では、ドリンクを運ぶときにはタブレット端末をトレイと一緒に載せるという作業マニュアルを実践している(図8)。



図4 Café和のケーキセット

(テーブルナンバー)			
ドリンク 200円	数量	キッズ 100円	数量
コーヒー		ココア	
オレンジジュース		オレンジジュース	
りんごジュース		りんごジュース	
はちみつレモン		はちみつレモン	
紅茶			
ウーロン茶			
ココア			
抹茶			
ケーキセット 300円・モーニング 350円			
いきいきセット (おかゆ)		わくわくセット (パン)	
ケーキセット			
コーヒー		紅茶	
オレンジジュース		ココア	
りんごジュース		抹茶	

図5 新しい紙伝票様式(冬メニュー)

テーブル: EX 担当 なごみ S/N: 8 受付 2016/10/ 5 13:41			
ドリンク200円		キッズ100円	
コーヒー		ココア	1
オレンジジュース		オレンジジュース	
りんごジュース		りんごジュース	1
はちみつレモン		はちみつレモン	
紅茶			
ウーロン茶			
ココア			
まっ茶			
ケーキセット300円・モーニング350円			
いきいきセット (おかゆ)		わくわくセット (パン)	2
ケーキセット	1		
コーヒー		紅茶	
オレンジジュース		ココア	
りんごジュース	2	抹茶	
はちみつレモン	1	ウーロン茶	

- ☐ キッズ ホットココア
- ☐ キッズ りんご
- ☐ わくわく ホット蜂蜜レモン
- ☐ わくわく りんご
- ☐ ケーキ りんご

図6 アプリからの印刷伝票

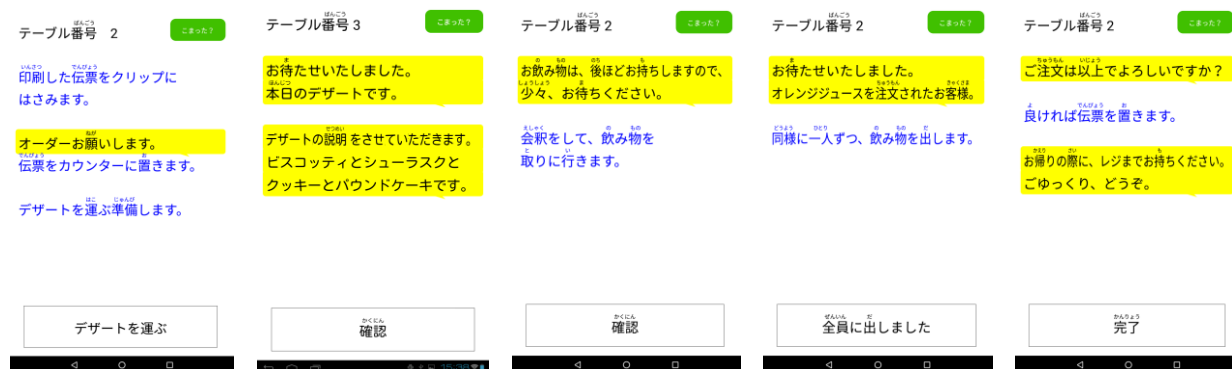


図7 goodjob喫茶のホール係手順ガイド(注文確認後)

謝 辞

4. 今後の課題

特別支援学校高等部が実施する、コミュニケーション能力向上を目的とした作業学習を円滑に進めるために、情報通信技術を幅広く導入する技術支援および研究開発を今後も継続していく予定である。

特に今年度は組み込みマイコンを応用した制御装置の開発も手掛け、従来から利用しているWindows, Android, iOSなどのパソコンやタブレット端末機器と連携することで、生徒、教員、来店客にとって、より良い学習環境の構築を推し進める。

またその一方で、新規に喫茶サービスを始める学校や作業所へのシステム導入支援を行う予定である。新規の学校の場合には、喫茶用の設備が整っていても、店舗運営の仕方は試行錯誤が必要とされる。一律のマニュアル通りに立ち上がるものではなく、数回の試験営業を重ね、学校独自の様式が定まってから、情報技術を入れるべき部分を見極めることが重要であると考えている。この立場を踏まえて、今年度開校した羽島のロータスカフェやH29年度新規開校予定の特別支援学校およびその他の県内、県外の特別支援学校と協力して本研究の成果普及に取り組む考えである。

本研究は、文部科学省「特別支援教育に関する実践研究充実事業(特別支援教育に関するNPO法人等の活動・連携の支援に関する実践研究)」「特別支援学校の喫茶サービスにおけるタブレット端末を利用したシステムの開発に関する調査事業」と、公益財団法人パナソニック教育財団『卒業後の自立まで見据えたキャリア発達を促すICTツール～作業学習におけるタブレットPCを用いた支援アプリの開発と授業実践による効果の検証～』の両事業に関わり、情報科学芸術大学院大学(IAMAS), 日本福祉大学, ソフトピアジャパンの有識者らとで構成する「福祉分野でのタブレットスマートフォン・PCの利活用研究会」における議論に基づいて実施した。関係者に深謝する。

文 献

- [1] 岐阜県教育委員会特別支援教育課“特別支援学校作業マニュアル 喫茶サービス基礎”, 2014.
- [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”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第14号, pp.39-40, 2013.
- [3] 藤井勝敏, 窪田直樹, “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研究開発(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第17号, pp.40-43, 2016.



図8 ドリンク提供時のトレイ

予防・健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究

曾賀野 健一 青木 隆明* 渡辺 博己

松原 早苗 竹原 正矩 棚橋 英樹

A Study on Personal balance care technology for Prevention and Health promotion

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI* Hiroki WATANABE
Sanae MATSUBARA Masanori TAKEHARA Hideki TANAHASHI

あらまし 要介護・要支援の要因として大きな割合を占める股関節症例を対象とし、移動動作等にみられる臨床的所見に基づいて、これまでに開発を進めてきた床反力情報取得・解析システムの改良を行った。また、自身で床反力情報の取得・評価が可能な自立式床反力情報取得・解析・蓄積システムを試作した。このシステムを用いて床反力情報取得実験を行い、収集したサンプルのデータ分布傾向から、股関節機能の安定性に関わると考えられる重要度の高い因子に関して基礎検討を行ったので報告する。

キーワード 予防, 健康増進, 股関節機能, 床反力, COP

1. はじめに

ロコモティブシンドローム (locomotive syndrome ; 以下, ロコモという。)^[1]は、筋肉や骨等の運動器機能が衰え、よろめくなどの症状が現れることをいう。ロコモの症状が進行すると、更衣、階段の昇り降り等の日常生活動作が制限され、つまづく、転倒等の事故を引き起こし、骨折から要介護・要支援（寝たきり等）を招く危険性が一段と高まる。

運動器機能の低下という言葉を目にすると、高齢者や老化の進行を想像しやすいが、必ずしも高齢者に限られることはなく、近年は若い世代も含めてロコモ予備軍が増えているといわれている。日本整形外科学会の調査によれば、ロコモの人口は予備軍を含めると4,700万人と試算されている^[1]。

ロコモの症状が出てからケアするのではなく、若い頃から意識し、発症前にその兆候を捉えて早期に介入すること、転倒等の事故に至る前に未然に防止する「予防」の必要性が社会的にも高まっている。ところが、ロコモの兆候は如何なる方法で説明できるのか、これまでに明確な指標は存在しなかった。そこで当研究所では、要介護・要支援に至る要因の一つである股関節症例を対象に、症例の発症につながると考えられる情報支援を目的として、股関節機能の安定性に関わる情報を自分自身で手軽

に計測・蓄積し、股関節機能の安定性を定量的に説明可能な技術に関して研究を進めている。

2. 股関節症例の臨床的所見

股関節機能の安定性を定量的に説明可能な技術に関する検討を行うにあたり、股関節症例にみられる特徴を把握する必要があるため、臨床的所見を確認した。臨床的所見の対象は、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股関節症患者とした。

2. 1 静的姿勢の保持

臨床的所見では、両脚立位や片脚立位等の静的姿勢を保持した際に、身体に生じる動揺の観察が行われる。例えば、片脚立位姿勢の保持における股関節症例の臨床的所見では、墜落的な動揺が観察される。墜落的な動揺は、患側（股関節症例を有する側）の脚で全体重を支持することが困難である場合に、転倒を回避するために、床平面に対して鉛直方向に荷重の変化が大きく現れる現象のことをいう。

2. 2 移動動作

移動動作における臨床的所見では、特に二峰性の観察が行われる。二峰性は、移動動作において足底の着床時から離床時まで生じる床反力の時間変化（床反力波形）を観察した場合に、足底の着床時期と離床時期の2つの時期に床反力の峰（ピーク）を呈する様相を説明する際に用いられる。股関節症例のみられない床反力波形は、図1(a)に示すように足底の着床時期と離床時期に明確なピークを

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

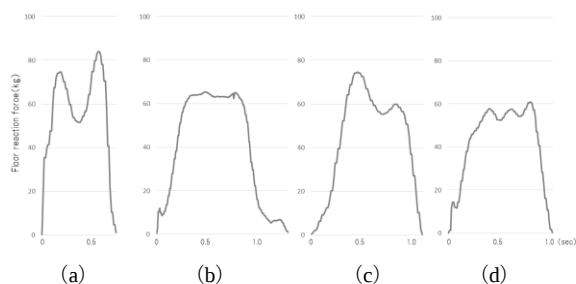


図1 移動動作における床反力波形
(横軸：時刻，縦軸：床反力)

- (a) 非患者
(b) 股関節症患者（患側 平坦症例）
(c) 股関節症患者（健側 平坦症例）
(d) 股関節症患者（患側 多峰症例）

呈する二峰性の形状を示す様相を確認することができる。これは、足底の着床時期に荷重をかけて踏み込み、離床時期に蹴り出しを行うことができていていることを示している。

一方、股関節症患者の患側における床反力波形をみると図1 (b)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、図1 (c)のように非患側（健側）の単脚支持期後期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。

なお、股関節症例には、前述の二峰性の平坦化の他に、床平面に対し鉛直方向の墜落的な動揺が現れる場合がある。この場合、着床時期にあらわれる第一峰と離床時期に現れる第二峰の間に一峰以上の峰が存在する多峰性を示す（図1 (d)）。この多峰性がみられる場合には、転倒のリスクを高める要因として臨床的所見において重要視されるランドマークとされる。

3. 計測・解析

3.1 計測対象姿勢と動作

股関節機能を評価する場合に、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）や移動動作等の遂行度を判定する方法が最も普及している^[2]。そして、この評価基準に準拠して行われる股関節症例の臨床的所見では、第2章に示したような特徴が観察されている。

このような股関節症例の特徴から股関節機能の安定性を定量的に説明することを目的として、計測対象とする姿勢と動作、計測方法を定めた。本稿では、股関節症例の特徴である静的姿勢時に生じる墜落的な動揺、移動動作時の

二峰性の平坦化や多峰性の影響は、床反力の時間変化に作用すると考え、床反力情報を取得するための装置として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・解析技術をこれまでに試作した。この技術は、当研究所が独自に開発したプログラムを用いることでWBに配置されたフォースセンサの情報をBluetoothを利用しパソコンに受信することが可能である。そして、取得した各フォースセンサの情報からサンプリング時間ごとに床反力情報の変化等を参照し諸種の特徴量を抽出することができる。

床反力の計測対象とする姿勢・動作の種類及びWBを用いた計測方法を表1に示す。

表1 静的姿勢・移動動作とWBを用いた床反力情報取得方法

静的姿勢 移動動作		床反力情報取得方法
静的姿勢	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	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	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）右昇段→左昇段→右降段→左降段
	歩行	3歩程度歩いた後、WBに片脚でのり前方へ移動する。WBとの段差の小さい歩路を整備した。

※すべての姿勢・移動動作について、計測時は開眼で靴を脱いだ状態（靴下の着用は許可）で行った。

※移動動作はWBの段差が平坦となる歩行路を整備した。

3.2 床反力情報取得・解析技術の改良

股関節機能に衰弱がみられる場合の特徴的な傾向（片脚立位姿勢の保持に観察される墜落的な動揺、移動動作に観察される二峰性の平坦化や多峰性）には、機能低下の兆候を知る上で重要な情報が含まれると考えられる。そこで、これらの臨床的所見に観察される特徴をふまえて、特に、移動動作における二峰性に関する特徴量の抽出方法について改良を加えた。これまでの床反力情報取得・解析技術では、軸脚の足底着床時期にあらわれる第一峰から離床時期にあらわれる第二峰までの床反力時間変化の積分値を用いていたが、股関節症例には、患側の床反力波形にあらわれる二峰性の平坦化の他に多峰性を示す場合がある。二峰間にあらわれる各峰の振幅（床反力の変化量）は峰の数に応じて大きな数値を示すため、二峰性の評価が適正でない問題が生じていた。そこで、軸脚の足底着床時期にあらわれる第一峰と離床時期にあらわれる第二峰について、それぞれの峰が示す振幅の加算値を算出する機能を構築した。

移動動作の床反力波形 $M(t)$ は、股関節症例がみられない場合、図2 (a)のように明確な二峰性が観察される^[3,4]。時

刻 t_1 , t_4 における2つの峰は、それぞれ足底の着床時と離床時の瞬間的な荷重を表している。一方、股関節症例の床反力波形 $M(t)$ は図2(b)のように二峰間に峰が複数存在し、多峰性を示す墜落的動揺区間 $\{t_2, t_3\}$ が確認できる。これは、足底の着床時と離床時に十分な荷重をかけられず、単脚支持期に荷重を分散させている現象と考えられる。すなわち、歩幅や移動速度よりも身体のバランス維持に力を集中させる傾向にあり、健全な移動能力に支障が生じていることが推察される。

本稿では、移動動作の二峰性の強さをあらわす特徴量として、足底の着床時期（図2(b)時刻 t_1 ）にあられる峰のピークから、その直後（図2(b)時刻 t_2 ）にあられる谷までのサンプリング時間ごとに示す床反力の変化値（絶対値）の積分値を求め、次に、足底の離床時期（図2(b)時刻 t_4 ）にあられる峰のピーク値から、その直前（図2(b)時刻 t_3 ）にあられる谷までのサンプリング時間ごとに示す床反力の変化値（絶対値）の積分値を求め、各積分値の和を特徴量に用いることとした。これを衝撃値 TdZ とし、(式1) で定義する。この特徴量が低値を示す場合には、二峰性の平坦化が疑われる。

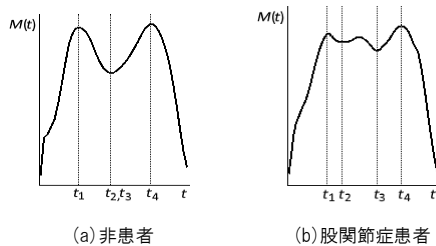


図2 移動動作の床反力波形
(横軸：時刻，縦軸：床反力)

$$TdZ = \int_{t_1}^{t_2} |M'(t)|dt + \int_{t_3}^{t_4} |M'(t)|dt \quad (\text{式1})$$

3. 3 自立式床反力情報取得・解析システム

股関節機能の安定性に関わる情報を日常的に自分自身で手軽に取得し、継続的に蓄積・観察することを目的として、自立式床反力情報取得・解析システムを構築した(図3)。

このシステムは、人物識別カードに記載されている被計測者の固有識別情報(UserID)を人物識別情報読取装置にかざすと、データベースに登録されている人物情報を取得し、3.1の計測に自動的に移行する。計測中、WBに乗る、WBから降りる等の案内は、床反力情報を参照することにより、被計測者の前に設置されたモニタに自動的に表示する。なお、データベースに関しては第4章に記述する。両脚立位姿勢の計測後は、自動的に片脚立位姿勢の計測に移行する。以前の床反力取得・解析システムでは、片脚立位姿勢を10秒間保持できずに途中で非支持足(遊脚側の脚)を着床した場合も評価の対象としていたため、例えば非支

持足が着床している時間が長いと良い評価となる問題が生じていた。そこで、床反力情報を参照し、サンプリング間の床反力変化量と足圧中心(Center of foot Pressure; 以下COPという)位置の側方変位量を用いて評価することで非支持足の着床を検出する機能を加えた。また、片脚立位姿勢を10秒間保持できずに非支持足を着床した場合に保持できた時間を取得する処理と再度同じ側の脚で計測を行うか、次のステップに移行するかを選択する機能を加えた。片脚立位姿勢の計測後は、自動的に段昇降の計測に移行する。左右脚別に計測を行い、段昇降の順序に誤りが発生した場合はリアルタイムに検出する。以前の床反力取得・解析技術では、例えば、右脚から昇降を開始する場合は、右脚(昇段)→左脚(昇段)→右脚(降段)→左脚(降段)の順序で動作を行うことになるが、被計測者の中には順序を誤るケースがあり、誤った床反力情報を取得する問題があった。そこで、床反力情報を参照し、WB上の左右の荷重割合と総床反力値を判定することにより、WB上の左右の昇降の様子を案内する機能を加えた。段昇降の計測後は、自動的に移動動作の計測に移行する。左右脚別に計測を行い、移動動作の計測後は、結果の閲覧画面に移行する。



図3 自立式床反力情報取得・解析システム

4 床反力情報の蓄積と活用

股関節機能の安定性に関わる情報を日々蓄積し、時間や場所の制約を受けず、自分自身の分析結果・履歴情報を参照することを目的として、床反力解析情報システムを用いて取得・解析した床反力解析情報を格納するデータベース構造の設計及び試作を行った。RDBMS(Relational Database Management System; データベース管理システム)にはMySQLを用いた。このデータベースは、人物属性情報、4種類の姿勢・動作に関する情報、床反力解析情報(4種類の姿勢・動作別)のテーブルから構成される。データベースの構造については、これまで被計測者のIDとして計測日時を参照した数値を設定していたが、複数箇所(施設)での計測ではIDの重複が懸念されるため、被計測者固有の固

有識別情報にUserIDを発行する機能を加えた。また、計測時に取得したアンケートの情報（運動習慣の有無・内容、日常生活の支障度に関する7項目のチェック、症状等）を考慮し、データベースの構造を設計した。

なお、現行の床反力情報取得・解析システムは、計測時に床反力情報の取得と解析処理を同一の計測用パソコン上でを行い、床反力解析情報をローカルのデータベースに格納している。そして、解析情報を閲覧する際には、データベースに格納された床反力解析情報を参照する方法としている。今後は、システムの効率化を図るため、床反力情報をサーバー側に蓄積しておき、端末側の要求に応じて解析結果を取得するしくみに移行する予定である。

5 実験

第4章で試作したデータベースを対象とし、自立式床反力情報取得・解析システム及び床反力解析情報データベース登録・管理システムを用い、ローカルネットワーク経由での接続・通信に関するシステムの有用性を検証した。この検証では2台のパソコンを用いて行った。1台目の端末上で、被計測者の入力、両脚立位姿勢等の計測を行うと、2台目の端末に構築したデータベースに対し、ローカルネットワーク経由で接続・通信を行う構成とした。

検証場所は、健康増進施設である岐阜市の健康ステーション、岐南町の地域包括支援センター等での床反力情報取得実験の場を利用して行った（図4）。検証の結果、人物識別カード等に記載されている被計測者の固有識別情報（UserID）を人物識別情報読取装置にかざすことにより、ローカル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UserIDに該当する人物属性情報（氏名、年齢等）をパソコン上で取得できていることを確認した。また、パソコン上で4種類の計測（両脚立位姿勢、片脚立位姿勢、段昇降、移動動作）を行った後に得られた床反力解析情報が、各計測の計測後にローカル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される機能が正常に動作することを確認した。

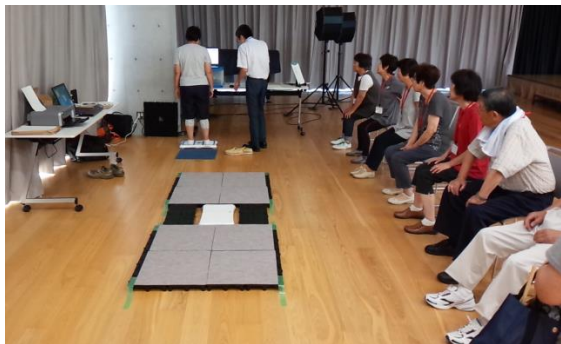


図4 床反力情報取得実験の様子
（岐南町地域包括支援センター）

6 データの分布傾向

股関節症の臨床的所見にみられる、片脚立位姿勢時に生じる墜落的な動揺、移動動作時の二峰性の平坦化や多峰性の影響は、床反力及びCOP位置の時間変化に作用すると考えられる。そこで、股関節機能の安定性を定量的に説明することを目的とし、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2に示す。

表2 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） （※）移動動作における床反力の総変化量は（式1）参照。静的姿勢時における床反力の総変化量は立位保持中のサンプリング時間ごとに示す床反力の変化値（絶対値）の積分値である。最大変化量は床反力の最大値と最小値の差分値である。

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21名、非患者147名の計168名である。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。

股関節症患者群と非患者群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。因子分析に用いた非患者群のサンプルは、運動習慣を有し、かつ股関節等に症状がない良群に属するサンプルを用いた。分析の結果、患者群にみられる重要度の高い因子として、片脚立位と移動動作におけるTdZ（床反力の変化に関わる特徴量）等が導出された。これらの因子は、臨床的所見において患側下肢の片脚立位時に墜落的な動揺がみられる現象と移動動作時における二峰性の平坦化がみられる現象を説明可能な重要度の高い因子と考えられる。

図5は、因子分析の結果、重要度の高い因子として導出された2つの因子に基づいて、サンプルの分布を2次元平面上にプロットしたものである。非患者群はTdZ（移動動作）が高値を、TdZ（片脚立位）が低値を示すのに対し、患者群は逆の様相がみられる。

図6は、因子分析の結果、重要度の高い因子として導出された2つの因子に対して、非患者群に属するサンプルの中で運動習慣のないサンプルを対象に、年代別分布傾向を示したものである。移動動作と片脚立位ともに40代以降に

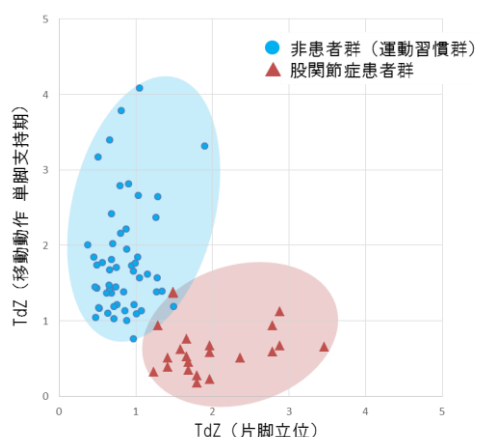


図5 非患者群と股関節症患者群のデータ分布

床反力総変化量の悪化がみられる。このことは、運動習慣のない生活スタイルが続くことにより、股関節機能の低下因子が増長することを示している。

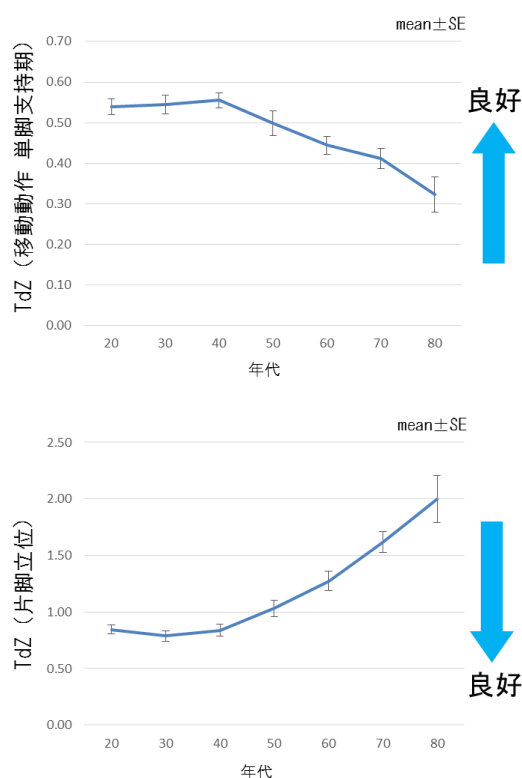


図6 床反力総変化量の年代別分布
(非患者群 運動習慣なし)
(上) 移動動作
(下) 片脚立位

7 まとめ

股関節機能に衰弱がみられる場合の特徴的な傾向（移動動作に観察される二峰性の平坦化や多峰性）に基づき、

二峰性の評価に関する特徴量として、移動動作時における着床時の第一峰と離床時の第二峰に注目した峰の振幅変化量を参照する方法に改良した。また、自立式床反力情報取得・解析システムの構築においては、以前のシステムで問題となっていた片脚立位姿勢の保持における非支持足（遊脚）の着床や段昇降における昇降順序の誤りをリアルタイムに検出し、片脚立位姿勢の保持時間を取得する機能や再計測を案内する機能等を加えた。この結果、計測操作を行う補助者を必要とすることなく、股関節機能の安定性に関わる情報を自分自身で計測することが容易となり、信頼性を有する床反力情報を取得することが可能となった。

次に、自分自身の分析結果及び履歴情報を参照することを目的とした床反力解析情報データベースを構築し、床反力情報取得・解析システムとの接続及び通信に関するシステムの有用性を検証した。検証の結果、被計測者の人物属性情報の参照と床反力解析情報のデータベース自動登録機能に関して、ローカルネットワーク経由で正常に動作することを確認した。

床反力情報取得・解析システムを用いて収集したサンプルのデータの傾向を統計的に分析した結果、股関節症例にみられる重要度の高い因子として、片脚立位姿勢の保持と移動動作におけるTdZ（床反力の変化に関わる特徴量）が導かれた。このことは、臨床的所見にみられる現象（片脚立位時の墜落的動揺、移動動作時における二峰性の平坦化）を説明可能な情報と考えられる。

このような股関節機能の安定性に関わる重要度が高いとみられる情報を日常的に手軽に取得し、継続的に蓄積・観察することにより、自分自身の股関節機能の状態を把握し、機能低下の兆候を早期に捉えることが可能になると考えている。

謝 辞

本研究の一部は、平成28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/\(2017.3現在\)](http://www.joa.or.jp/public/locomo/(2017.3現在))
- [2]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.
- [3]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.
- [4]臨床歩行研究会，“臨床歩行計測入門”，医歯薬出版，
2012.

重負荷作業を解消する直感操作型運搬補助システムの開発(第1報)

坂東 直行 久富 茂樹

Development of an intuitive operation type transport assist system for eliminating heavy load work

Naoyuki BANDO Shigeki KUDOMI

あらまし 日常的に頻出する荷揚げ作業に適合する作業補助装置を開発するため、電動ホイストを基軸に、汎用性、可搬性、操作性を高める方法を検討し、仕様にまとめた。また、原理モデルとして巻上機と制御部を試作し、能力を評価した。その結果、要求仕様を満たしていることが分かった。今後は、フレーム構造を検討するとともに、きめ細やかな動作を可能とする制御アルゴリズムを作成する予定である。

キーワード ホイスト, 作業補助, メカトロニクス, 制御システム

1. はじめに

少子高齢化が進んだ現代において、労働人口の減少は、早急に対応すべき問題となっている。この一つの解決策として、女性や高齢者がより活躍できる社会づくりが挙げられる。このためには、身体負担が大きい作業の環境改善が必要になる。特に重量物を持ち上げる作業は、多くの業種で頻出する作業であり、改善が求められる。

既存の荷揚げ装置としては、バランサやホイストがある。バランサはリンクアームとカウンターバランスで構成され、シーソーのようにバランスを取りながら荷物を移動させる装置である。ホイストは天井等に固定され、垂らしたワイヤーをモータで巻き上げることで荷物を持ち上げる装置である。これらは一部の例外はあるものの、床や天井に固定するものや、建屋の設備となっているものが多い。そうした点から、適用可能な範囲は絞られる。

我々の日常の活動を見渡してみると、定められた場所や形にない荷物を移動させる作業が見受けられる。こうした荷物の移動は、人力に頼っているのが現状である。

そこで本研究では、日常みかける突発的な荷揚げ作業に適合する作業補助装置の開発を目的とした。本年度は、装置の仕様を定めるとともに、原理モデルを試作したので報告する。

2. 要求する機能と仕様

本研究では、既存の装置では適合しない作業シーンを想定し、作業者を補助する装置を開発する。ここで本装置が補助する作業は、狭い作業スペース・屋外等において突発的に生じる荷揚げ作業とした。

開発する装置をこれらの作業に適合させるには、汎用性と可搬性、操作性を確保する必要がある。ここで汎用性とは作業内容を限定しないという意味であり、バランサとホイストを比較すると、後者のほうが汎用性に長けている。これは対象物にリンクアームがアプローチするバランサよりも、ワイヤーでアプローチするホイストのほうが柔軟性に優れ、自由度が高いためである。そこで、本研究においてはホイストをベースにポテンシャルを拡張させる改良を行うこととした。

一般にホイストは、ワイヤーの巻上機、巻上機を固定するフレーム、ユーザの操作を動作に変換する制御部で構成される。本研究では装置に可搬性を持たせるため、フレームは折りたたみ式とし、キャスターによる移動が可能な構造を採用した。これにより狭い作業スペースにも装置を持ち込め、また、屋外に持ち出すこともできる。巻上機は、動力として電動モータを採用し、動力源には確保が容易な100V電源を採用することにした。一般に、電動ホイストの巻上機には電磁ブレーキが組み込まれている。また、ワイヤーを巻き上げるドラムと電動モータの間には、減速機が組み込まれ、適切な速度と力で巻き上げられるようになっている。しかし本装置の場合、突発的な作業場での利用を想定するため、作業環境によっては不意の電源喪失が懸念されることから、電磁ブレーキ式は採用できない。そこで、減速機にセルフロック機能がある歯車を用いることで解決を図った。ここでは、不思議遊星歯車機構を採用した。

電動ホイストの操作は、押しボタン型操作コントローラを用いるのが一般的である。このため、ユーザは、ボタン操作による荷揚げ・荷下げの動作を視覚情報でしか得ることができず、きめ細やかな動作がしにくかった。

本装置では、装置とユーザの距離が従来のホイスよりも近くなることから、ユーザはこれまでよりも操作感覚を重視するようになると考えられる。そこで、コントローラはワイヤーに取り付けて、操作者が自身の操作の効果を直接感じられる構造を採用した。この際、荷揚げ用ワイヤーとは別にコントローラからケーブルが出ていると操作の邪魔になると考えられることから、コントローラの操作信号を制御部本体に送る伝達方式には無線を採用した。

可搬重量は、人力のみで荷揚げされることがありうる重量として50kgと設定した。本装置はこのような作業を支援する目的で開発する。全体重量は、可搬重量の半分を目安として25kgに設定した。巻き上げ速度は、人の自然な腕の上げ下げ速度とほぼ同じになるように30mm/sと設定した。

3. 構成と試作、評価

本年度は巻上機と制御部が期待どおりの働きをするか評価する目的で原理モデルを試作した。

図1に模式図、図2に原理モデルの外観を示す。

荷揚げワイヤーに取り付けたコントローラは、マイクロコンピュータと送信用無線モジュールで構成される。制御部本体は、受信用無線モジュールとマイクロコンピュータ、およびモータドライバで構成される。巻上機は、モータと減速機、巻き上げドラムで構成され、モータ主軸延長線上に配置した。

試作した原理モデルを用いて、無線による制御の可否、ブレーキ機能、可搬重量、本体重量、巻上速度を評価した。その結果、無線による伝達方式であっても問題なく動作することを確認した。電源を与えなくても垂れ下がりがなかったことから、ブレーキ機能が働いていることを確認した。可搬重量は50kg以上であることを確認した。巻上機重量は8kgであり、制御部は1kgにも満たないことから、軽量に構成することができたといえる。最大巻上速度は36mm/sであった。

4. 考察

本研究で試作した装置は、設定した仕様を満たしていた。これにより、今後試作する装置は本装置の構造をベースに改良していけばよいと分かった。

なお、今回は、市販の標準部品を組み合わせで巻上機を試作した。このため、部品に余剰な部分が含まれている。この点を改良すれば、さらなる軽量化が可能であると考えられる。

一方、本試作で減速機に採用した遊星歯車は騒音が大きく、対策が必要であることも分かった。

今後は潤滑方法、歯車の形状精度、材料などを検討す

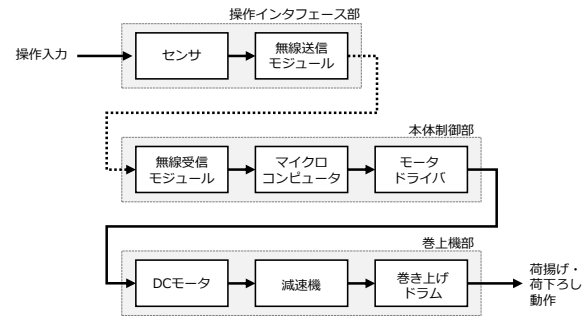


図1 システム構成

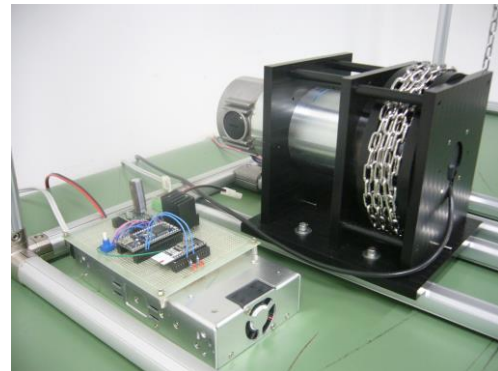


図2 原理モデル外観

る必要がある。

5. 結論

日常的に頻出する荷揚げ作業に適合する作業補助装置を開発するため、電動ホイスを基軸に、汎用性、可搬性、操作性を高める方法を検討し、仕様にとめた。

また、原理モデルとして巻上機と制御部を試作し、能力を評価した。

その結果、要求仕様を満たしていることが分かった。

なお、本装置は最終的に、フレームを含めた一体物となる構想である。今後は、フレーム構造を検討するとともに、きめ細やかな制御を可能とする制御アルゴリズムを作成する予定である。

文 献

- [1] 日本機械学会編、機械工学便覧β4 機械要素・トライボロジー、日本機械学会、2005。

計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測(第3報)

横山 哲也 米倉 竜次* 小松 史弥* 田畑 克彦

Count of Fish which Migrate Upward Fish Ladder using Counting Equipment (3rd Report)

Tetsuya YOKOYAMA Ryuji YONEKURA* Fumiya KOMATSU* 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、県内の水田魚道において数カ月間の計測を行った。本報告ではその計測結果について報告する。

キーワード 水田魚道, 計数装置

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。設置の効果検証および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必要がある。これまでに光電式センサとカメラを組み合わせて魚の通過を計測する計数装置^[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、本計数装置を用いた現地計測を行っている。

本年度も引き続き現地で計測を行ったので、その計測結果について報告する。

2. 現地計測の結果

2. 1 計測結果

表1に本年度計測した県内水田魚道のうち、海津市南濃

表1 計測期間

計測箇所	計測期間
海津市南濃町1	5月18日～ 8月18日
海津市南濃町2	6月8日～ 9月8日

町の計測期間を示す。計測期間には中干しや装置の不調で計測していない期間も含まれている。図1は計数装置を設置した水田魚道である。南濃町1と2の水田魚道は、水田は異なるが同じ排水路に接続されている。

表2に海津市南濃町1と2の計測結果を記す。魚の個体数はカメラで撮影した画像からカウントした。魚種の特定制は、予め排水路にいる魚を調査で絞りこみ、撮影画像から目視で行った。撮影画像から魚種を特定できない場合は不明にカウントした。遡上と降下の判別は、撮影画像中の魚の頭が水田か排水路のどちら側に向いているかで判断した。なお、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。また、魚道内に留まっている魚は撮影画像からは留まっていることが認識できないため、複数回カウ



図1 現地計測を行った水田魚道 (左: 海津市南濃町1, 右: 海津市南濃町2)

* 岐阜県水産研究所

表2 計測結果（計測期間の合計）

計測箇所	魚種	遡上数	降下数
海津市南濃町1	フナ類	3082	1874
	オオクチバス	1057	828
	コイ	491	302
	タモロコ	85	49
	カムルチー	72	48
	ドジョウ	61	33
	モツゴ	32	15
	メダカ	6	0
	不明、その他	321	240
海津市南濃町2	フナ類	6435	3544
	オオクチバス	1557	1110
	コイ	1439	677
	タモロコ	34	28
	ドジョウ	134	112
	モツゴ	1	5
	メダカ	1	0
	不明	282	213

ントしている可能性がある。このため、表2に記載されている数字は目安となる。

表より、海津市南濃町の魚道では魚の遡上を確認することができた。南濃町の水田魚道1と2は同じ排水路に接続されていることから、魚道を利用する魚種がほぼ同じであった。

2. 2 時系列データによる魚の通過推移

海津市南濃町1の計測結果を、横軸に日付、縦軸に遡上と降下の合計の個体数、水田水深としたグラフを示す(図2)。水深は計数装置とは別に用意した2つの圧力センサを用いて、水田内の水圧と大気圧を測定し、計算を施して取得した値であり、1日の平均値である。なお、図中の不調期間はログデータからセンサ不調または水の濁りで計測できなかったと推定される期間である。また、計測中断期間は中干しやセンサ交換の理由で計測を中断してい

た期間である。

図より、水深が約10cmに達すると、多くの魚が通過することが見受けられる。魚道には堰板が設けられており、一定水位に達しないと水は堰板を溢れださない。魚道に水が流れ始めないと魚の移動を促すことができないため、水田の適切な水深管理が必要と考える。なお、7月上旬から中旬にかけては中干しを実施しており、水深が浅いの1日だけ個体数が出現しているのは、雨の影響で水田水深が増加し、一時的に魚道に水が流れ落ちたためと推測される。

3. おわりに

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、県内の水田魚道において数カ月間計測を行った。その結果、海津市南濃町の水田魚道では魚の遡上を確認できた。本年度は海津市南濃町以外の水田魚道でも計測を実施したが、こちらは遡上が難しい状況であった。その理由として、水田魚道が設置された排水路とその排水路が接続している水路間で高低差が生じ、魚が自由に移動できなかったことが考えられる。

本研究では、水田魚道の効果的な運用方法を確立するのに必要となるデータを、人が介在せずに取得することを目的に、計数装置の開発に取り組んだ。平成25年から4年間、県内の水田魚道に開発した計数装置を設置し、データの計測を継続的に行うことができた。

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.

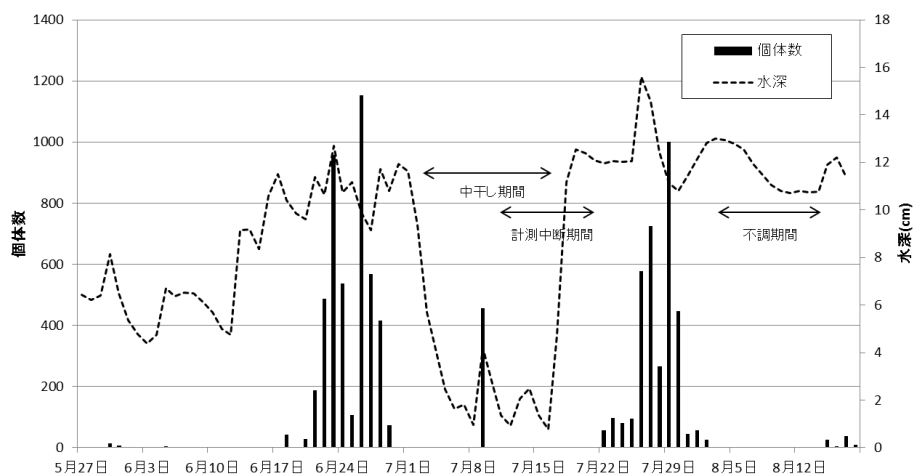


図2 時系列データ（南濃町1）

3D3プロジェクトへの取り組み

久富 茂樹

3D3 Project

Shigeki KUDOMI

あらまし 製品の開発から製造、検査にいたる工程の効率化が求められており、デジタルデータを活用したもののづくりが進められている。国立研究開発法人産業技術総合研究所では3D2プロジェクト、3D3プロジェクトを立ち上げ、公設試験研究機関が参画して研究会活動に取り組んでいる。当所も、3Dプリンタと3Dスキャナに関する技術向上を図るため、これらのプロジェクトに参加し研究課題に取り組んだ。

ガイドラインの手順に従って器物の造形、測定を行った結果、当所の3Dプリンタでは、X軸、Y軸方向について、設計値より0.05mm～0.15mmほど小さく造形されるのに対して、Z軸方向については設計値より0.1mm～0.15mmほど大きく造形された。この影響を受けて、同じ形状であっても、造形時の姿勢を変えると寸法誤差の傾向が変わることが確認された。同じ器物を約10か月後に再度測定し経時変化を調べたところ、器物内部をスパー条件で造形した器物の球直径は、ソリッド条件器物の球直径と比較して経時変化が小さいという結果になった。また、四面体器物と、その各辺に平行して配置したダンベル型1次元器物を同時に造形し、ダンベル型1次元器物から求めた6つの球間距離を用いて四面体を構築した結果、四面体器物と1次元器物から構築した四面体の倍率誤差はほぼ同じ結果となった。

キーワード 3Dスキャナ、3Dプリンタ

1. はじめに

近年、県内企業においてもデジタルデータを活用したもののづくりが進められており、製品の開発から製造、検査にいたる工程の効率化が求められている。このような要望に応えるため、当所においても、平成21年度に3Dスキャナを、平成25年度に3Dプリンタを導入し、多くの県内企業に利用していただいている。このような動向は全国的なもので、他県の多くの公設試験研究機関でも、方式は様々であるが、3Dスキャナや3Dプリンタが導入されている。このような状況の中、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）が、平成27年度に産総研地域連携戦略予算「3Dスキャナと3Dプリンタの連携によるクローズドループエンジニアリングの実証」（3D2プロジェクト）を立ち上げた。さらに本年度は「3D計測エボリューション」（3D3プロジェクト）として継続、発展し、これらのプロジェクトに公設試験研究機関が参画して研究会活動に取り組んでいる。当所も、3Dプリンタと3Dスキャナに関する技術向上を図るため、これらのプロジェクトに参加している。3D2プロジェクトでは、球、円柱、直方体で構成される器物を造形し、3Dスキャナで測定することで、造形精度を確認した。3D3プロジェクトでは、3D2プロジェクトで造形した器物の経時変化を確認する全体課題と、各地域で選

択する地域課題の二つの研究課題を実施した。本報では当所におけるこれらの課題の実施結果について報告する。

2. 課題の概要

本プロジェクトの実施にあたり運営協議会が組織され、全体課題、地域課題ともに、運営協議会で実施ガイドラインが作成された^[1~3]。造形および計測はこの実施ガイドラインに基づいて行った。

2. 1 全体課題

全体課題は、3Dプリンタで造形した器物を3Dスキャナで計測し、器物の誤差評価と、その経時評価を行うものである。図1に全体課題の器物形状を示す。コーナーに球が配置され、球と球の間に円柱と直方体が配置された形状になっている。各部の詳細寸法は割愛するが、外形寸法が100mm x 100mm x 100mm程度の大きさである。図中の記号は球番号を示す。レイアウト①は、S111を原点、辺S111-S211をX軸、辺S111-S121をY軸とした配置であり、レイアウト②は、レイアウト①の状態からX、Y、Zの軸周りにそれぞれ45度回転させた配置である。この形状を3Dプリンタで造形し、造形した器物を3Dスキャナで形状測定を行い、以下の項目について求める。

・各球の中心座標、直径、各球の中心間距離

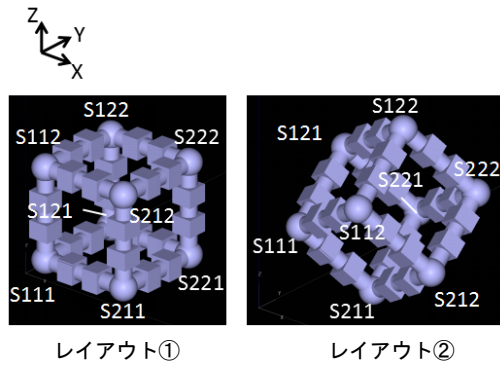


図1 全体課題の器物形状

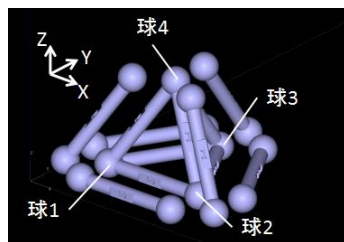


図2 地域課題の器物形状

・直方体上の8面でなす平面を求めたときの各平面の直角度

・円柱部の中心座標，直径および各円柱の軸の角度

また，1年間ほど経過した時点で同様の測定を行い，経時変化を調べる。

2. 2 地域課題

当所が所属する北陸・東海・近畿地域（中分科会）は，地域課題として，「低次の幾何誤差の簡易な評価」を実施した．本課題は，複雑な手順や器物形状を使わずに実施可能な評価方法の確立を目的に設定された課題である．図2に地域課題の器物の形状を示す．中央部に球と円柱で構成された四面体が配置されており，各球間距離は80mm，球直径は20mmの大きさである．その四面体器物の各辺と平行にダンベル型1次元器物が配置されている．この状態で3Dプリンタによって造形し，四面体器物，ダンベル型1次元器物をそれぞれ3Dスキャナでそれぞれ測定する．評価項目として，各球の直径，真球度および各球間距離を求める．また，各軸の倍率誤差および直角度誤差を求める．

3. 造形方法

3. 1 造形に使用した装置

造形には材料押出方式（FDM）の3DプリンタであるFORTUS360mc-L（Stratasys製）を使用した．造形材料（モデル材）はABS樹脂（ABS-M30）で，色は乳白色のものを使用した．

3. 2 全体課題の器物の造形

器物は平成27年9月下旬から11月中旬にかけて，表1に示す4条件で造形した．充填方法のソリッドとは，モデル内部に材料を密に充填する造形モードで，スパースとは，モデル内部が格子状になり空間ができる造形モードである．

表1 全体課題器物の造形条件

	器物A	器物B	器物C	器物D
造形レイアウト	レイアウト①	レイアウト②	レイアウト①	レイアウト①
造形ピッチ [mm]	0.127	0.127	0.254	0.127
充填方法	ソリッド	ソリッド	ソリッド	スパース

3. 3 地域課題の器物の造形

器物は平成28年11月下旬から12月下旬にかけて，表2に示す3条件で造形した．

表2 地域課題器物の造形条件

	器物E	器物F	器物G
造形ピッチ [mm]	0.127	0.127	0.254
充填方法	ソリッド	スパース	ソリッド

4. 測定方法

4. 1 測定に使用した装置

非接触3D測定には，RANGE7（KONICA MINOLTA製）を使用した．本装置は，三角測量・レーザ光切断方式の3Dスキャナである．造形器物を無処理で測定したところ正しく測定ができず，データの合成時にノイズや段差が目立ったことから，全体課題，地域課題とも器物に白色（つや消し）の水性塗料をスプレーした．測定後のデータ処理，検査ソフトウェアには，Geomagic Verify（3D SYSTEMS製）を使用した．

4. 2 全体課題の器物の測定

測定は23℃の環境で，回転テーブルを使用し，1姿勢につき，30度ステップで回転させて360度分のデータ（12データ）を取得した．しかし，それだけでは下になった面のデータが取得できないため，器物の設置面を変えて3姿勢で同様のデータを取得した．取得した計36データ（12データ×3姿勢）をソフトウェアで位置合わせ，合成処理を行った後，ノイズ除去（小さいクラスタの削除，重なったデータの削除など）を実施した．その後，ソフトウェアで課題の測定項目について数値を求めた．

1回目の測定は平成28年1月に実施し，2回目の測定は約10か月後の平成28年11月に実施した．その間，器物は直射日光が当たらない場所で保管していた．保管時の空調管理は行っていない．

4. 3 地域課題の器物の測定

地域課題の器物の測定も全体課題の場合と同様にして行ったが，四面体器物については，ガイドラインに記載されたマルチステップ法によって値を求めた．具体的に

は、四面体器物は頂上になる球を代えることによって4つの姿勢をとることができるため、それぞれの姿勢で測定、位置合わせ、合成、数値算出までを行い、最後に4姿勢の結果を平均する手法で求めた。

ダンベル型1次元器物の6つの球間距離を用いた四面体の構築は以下のように行った。ダンベル型1次元器物の球 m と球 n の球間距離測定値を l_{mn} とし、求める四面体の頂点座標について、球 m に対応する座標を $P_m(x_m, y_m, z_m)$ とする。ガイドラインの座標系設定に従い、 P_m を下記のように求めた。

$$P_1(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$$

$$P_2(x_2, y_2, z_2) = (l_{12}, 0, 0)$$

$$P_3(x_3, y_3, z_3) = \left(\frac{x_2^2 + l_{31}^2 - l_{23}^2}{2x_2}, \sqrt{l_{31}^2 - x_3^2}, 0 \right)$$

$$P_4(x_4, y_4, z_4) = \left(\frac{l_{14}^2 - l_{24}^2 + x_2^2}{2x_2}, \frac{l_{14}^2 - l_{34}^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2x_3x_4}{2y_3}, \sqrt{l_{14}^2 - x_4^2 - y_4^2} \right)$$

倍率誤差と直角度誤差は、設計値と実測値の差異を示す指標値であるが、これらは、運営協議会から提供されたエクセルシートを利用して求めた。

5. 結果と考察

5. 1 全体課題

図3に造形した器物の外観を示す。レイアウト①の器物は問題なく造形できたが、レイアウト②で造形した器物Bは、直方体の角部が下向きに配置された形状であるため、サポート形成パラメータをデフォルト値で造形したところ正常に造形できなかった角部があった。これまでデフォルト設定で造形を失敗した事例が無かったため、新たな知見となった。

結果の一例として、図4に第1回目測定時の球間距離の結果を示す。レイアウト①で造形した器物は、X軸、Y軸方向について、設計値より0.05mm～0.15mmほど小さく造形されるのに対して、Z軸方向については設計値より0.1mm～0.15mm大きく造形された。これは、本機の造形精度上の傾向と思われる。Z軸方向は造形ピッチ分の分解能しかないことがX軸、Y軸方向と異なる傾向を示す結果になった一因と思われる。レイアウト②で造形した器物はレイアウト①で造形した器物とは異なる傾向を示しており、造形の向きが変わると造形物の寸法精度が異なることがわかった。

図5に昨年度と今年度の球直径測定結果の差分を示す。器物Aと器物Cについては、上部の球の直径が増加する結果となった。器物内部をスパース条件で造形した器物Dは、他の器物と比較して経時変化が小さいという結果になった。器物内部の空間によって、器物外形の変形が抑制されたのではないかと考えている。

また、図6から図8に昨年度と今年度の球間距離測定結

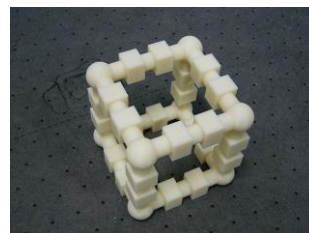


図3 器物Aの外観

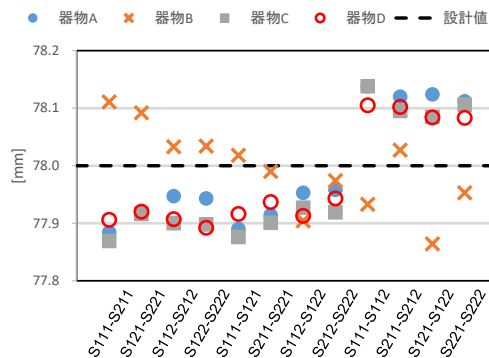


図4 第1回目測定時の球間距離測定結果

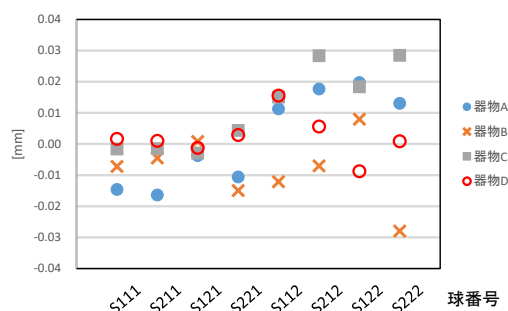


図5 球直径の差分

果の差分を示す。器物Aと器物Cについては、X軸方向、Y軸方向ともに、下部に配置した球の球間距離が増加する結果となった。スパース条件で造形した器物Dは、どの方向、場所でも0.02mm程度増加する結果になった。

5. 2 地域課題

図9に造形した器物の外観を示す。左側が四面体器物で、右側がその四面体器物の各辺と平行に配置して造形したダンベル型1次元器物である。

測定結果の一例として、四面体器物から求めた各軸の倍率誤差の結果とダンベル型1次元器物から求めた各軸の倍率誤差の結果を図10、図11にそれぞれ示す。四面体器物から求めた結果とダンベル型1次元器物から求めた結果ではほぼ同じ結果となった。また、内部充填方法をスパースにした器物が他の器物より各軸とも倍率誤差が小さい値となった。スパースの器物は、X軸、Y軸に比べてZ軸の倍率誤差が小

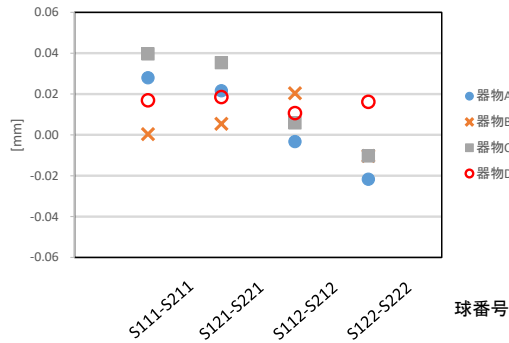


図6 球間距離（X軸方向）の差分

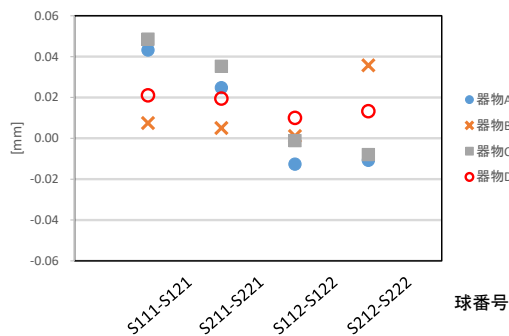


図7 球間距離（Y軸方向）の差分

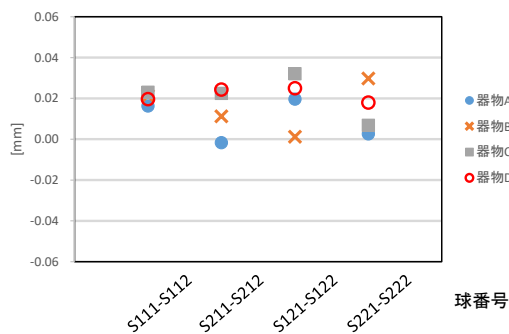


図8 球間距離（Z軸方向）の差分

さい値となった。今回の結果をどのように捉えるかについては、他機関の結果も見て、次年度以降も継続して考えていきたい。

6. おわりに

3D2プロジェクト, 3D3プロジェクトに参加することで、造形方法や計測方法について考え直す良い機会になった。内部充填方法による経時変化の違いなど、新たな知見もいくつか得られた。また、本プロジェクトに参加している他の公設試験研究機関やオブサーバ参加している企業との交流で様々な情報を得ることができた。ここで得られた知見や情報を技術支援に活かしていきたい。

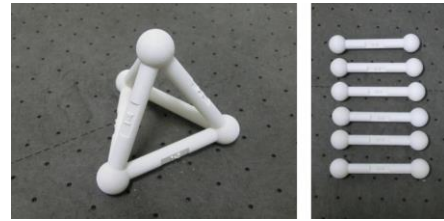


図9 器物Eの外観（塗装後）

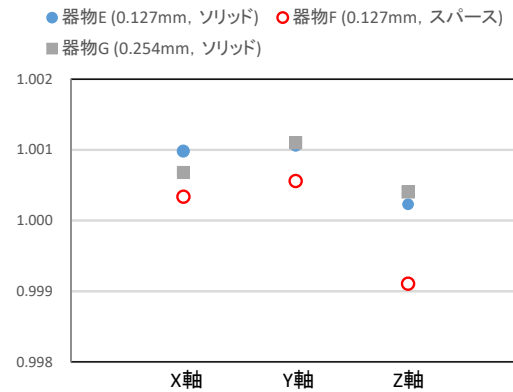


図10 四面体器物から求めた倍率誤差

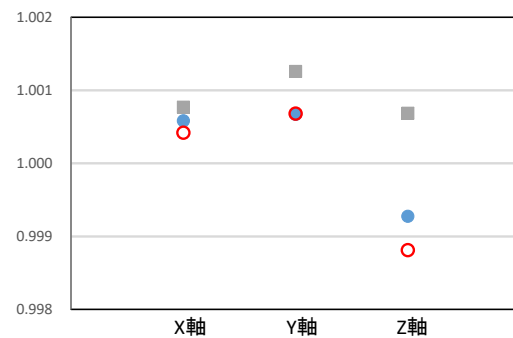


図11 ダンベル型器物から求めた倍率誤差

謝 辞

今回使用した3Dプリンタおよび3Dスキャナは、公益財団法人JKAの補助を受けて導入した。

文 献

- [1] 3D2プロジェクト運営協議会, "3D2プロジェクト実施ガイドライン", 2015.
- [2] 3D3プロジェクト運営協議会, "3D3プロジェクト実施ガイドライン 全体課題", 2016.
- [3] 3D3プロジェクト運営協議会, "3D3プロジェクト実施ガイドライン 地域課題1", 2016.

岐阜県南部における小水力発電ポテンシャルの推定

－ タンクモデルパラメタの改善 －

河村 隆雄, 棚橋 英樹

Estimation of Small Hydropower Potential in South Area of Gifu Prefecture

－ Improvement of Tank Model Parameters －

Takao KAWAMURA, Hideki TANAHASHI

あらまし 小水力発電ポテンシャルを平均降水量から簡便に予測する手法を開発する中、今回、予測精度の向上を目指してタンクモデルパラメタの改善を図った。これには、パラメタ相互の制約関係を求めることでパラメタの探索範囲を限定し、かつ、タンクモデルによって予測された流量を、短期間の実測ハイドログラフに適合させる手法と、長期の実測流況曲線に適合させる手法とを組み合わせることで、流況曲線とハイドログラフ双方に良好な近似を与えるパラメタを取得し、これを木曽川水系に適用した。

キーワード 小水力、発電ポテンシャル、タンクモデル、パラメタ制約関係、流況曲線

1. はじめに

岐阜県の特徴的な再生可能エネルギーである小水力発電について、手軽に発電ポテンシャルを取得するための実用的評価手法の開発を試みてきた。これまでに岐阜県南部をカバーする木曽川水系について、標準となる一組の直列3段タンクモデルを適用することで、地域の平均降水量から発電ポテンシャルをおよそ推定できることを示す^[1,2]とともに、これを実際の小水力発電の水源に当てはめて推定量の妥当性の確認を行ってきた^[3]。しかしポテンシャル推定の信頼度を高めるには、タンクモデルのパラメタをさらに改善する必要がある。

元来タンクモデルは、河川流量の変動を予測するためのツールとして開発され^[4]発展してきた。このためタンクモデルの各種パラメタの探索は、従来、実測降水量をモデルにあてはめて得られる予測流量のハイドログラフを実測流量によるハイドログラフに適合させることで、行う方法が採られてきた(図3(a)参照)。これには各種計算手法が駆使されるものの、有効なパラメタを得るには相応の経験が必要とされている^[5]。

一方、河川流量の時系列データから作成される流況曲線も、同じタンクモデルによって予測できることから、著者らは、予測された流況曲線を実測流況曲線に適合させることを通してタンクパラメタを見出す方法を提案し、実施してきた。しかし両手法ともに、適切なパラメタを

得る作業(以下、同定という)は試行錯誤的な要素を含んでいるため多大な手間を要するものであり、また、選定されたパラメタの有効性を評価するには多様な条件の実測データとの比較が必要であった。

そこでタンクモデルのパラメタ相互の制約関係を明らかにしてパラメタの探索範囲を絞り込むとともに、最適パラメタの同定手法として、上記のハイドログラフ適合法および流況曲線適合法を組み合わせることによって、長期・短期の双方にわたって信頼度の高いパラメタを得る手法を開発した。また、その手法を岐阜県南部の木曽川水系に適用してその有効性を調べた。

2 直列タンクモデルの特性

2.1 直列タンクモデル

図1に示す直列3段タンクモデルについて考える。各タンクの底面に下部タンクへの浸透流出孔、そして、側面には河川への流出を表す流出パイプが各1本(ただし最上位タンクのみ2本)設置されている。タンク番号(i)および流出孔番号(j)(側面パイプおよび浸透孔)を図1のように振る。タンク i の水位を s_i 、各流出孔 j の高さを $h_{i,j}$ 、流出係数を $\alpha_{i,j}$ とすると、各流出孔からの流出量 $q_{i,j}$ は、

$$q_{i,j}(t) = \alpha_{i,j} \{s_i(t) - h_{i,j}\} \quad (1)$$

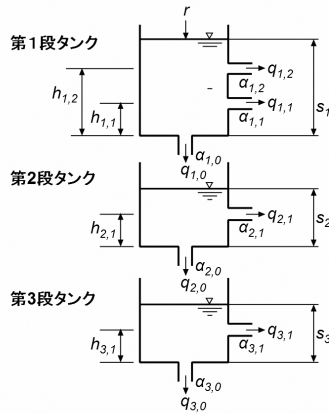


図 1. 直列 3 段タンクモデル

で表される。なお、下部タンクへの浸透流出比流量 $q_{i,0}$ 、そして、上位タンクからの浸透流入比流量 $q_{i-1,0}$ についても同様である。ただし最上位タンク ($i = 1$) については、浸透流入量 $q_{0,0}$ を降水量 r に置き換える。なお、本報告においては、他の研究者との比較を容易にするため、比流量の単位に [mm/hr] を使用する。

2.2 各タンク内の水位の変化

初めにタンクモデルの特性について調べる。各タンク内の水位の低下速度 ds_i/dt は、上位タンクからの流入量 $q_{i-1,0}$ から当該タンクの流出量の総和 $\sum_{j=0}^n q_{i,j}$ を差し引くことで求まり、これに式 (1) を代入すると次式になる。(以下簡便ため、 $\sum_{j=0}^n$ を Σ_j と記す。)

$$\frac{ds_i}{dt} = -s_i \Sigma_j \alpha_{i,j} + \Sigma_j (\alpha_{i,j} h_{i,j}) + q_{i-1,0} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_i = 1/\Sigma_j \alpha_{i,j}$ (タンクの時定数)、および、 $D_i = \tau_i \Sigma_j (\alpha_{i,j} h_{i,j})$ 、(無降水時の水位収束値) と置く。そして現象の解析を容易にするため、上部のタンクからの浸透流入量 $q_{i-1,0}(\tau)$ を一定の時間幅 Δt 、高さ $\pi_i = \tau_i q_{i-1,0}$ のパルス状降水 (図 2) の配列とみなすことにする。このときタンクの水位は、各パルスに対する応答の重ね合わせで表されると考える。すると、式 (2) は次のように表現される。

$$\frac{ds_i}{d\tau} = -\frac{1}{\tau_i} \{s_i - D_i - \pi_i\} \quad (3)$$

これを $[t_s = 0, s_{is} = s_{i0}]$ から $[t, s_i] (t < \Delta t)$ まで、あるいは $[t_s = \Delta t, s_{is} = s_{i1}]$ から $[t, s_i]$ (この間 $\pi_i = 0$) ま

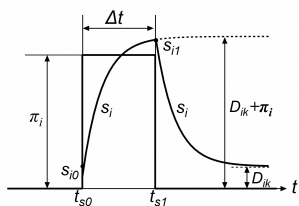


図 2. パルス状降水と水位の応答

で積分する。 π_i は各区内で定数であるので、

$$\int_{s_{is}}^{s_i} \frac{d(s_i - D_i - \pi_i)}{s_i - D_i - \pi_i} = - \int_{t_s}^t \frac{1}{\tau_i} dt$$

となり、これより、

$$s_i - D_i - \pi_i = \{s_{is} - D_i - \pi_i\} e^{-(t-t_s)/\tau_i} \quad (4)$$

が得られる。これはタンクの水位は、 $0 < t < \Delta t$ において、 $s_{i,0}$ から $D_i + \pi_i$ に向けて時定数 τ_i で上昇し、 $t > \Delta t$ ($\pi_i = 0$) では、 $s_{i,1}$ から D_i に向けて同じ時定数で低下することを表している。このように、タンクモデルにおいては、時定数 τ_i および D_i の二つのパラメタが重要な役割を担っている。

ここで、タンク内水位 s_i と $h_{i,j}$ との相対位置を、表 1 に示すように番号 k ($h_{i,j} < s_i < h_{i,j+1}$ のとき $k = j$) を用いて表すと、 τ_i 、および D_i は k によって変化する。これがタンクモデルの非線形性の原因であるが、同一水位番号 k の区間内では一定である。以下、これを表すためにこれらを $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ と記す。表 1 に $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ を示す。

表 1. 時定数 $\tau_{i,k}$ および水位の収束値 $D_{i,k}$ の定義

水位範囲 同番号 k	$s_i < h_{i,1}$ 0	$h_{i,1} < s_i < h_{i,2}$ 1	$h_{i,2} < s_i$ 2
時定数 $\tau_{i,k}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0}}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}}$	$\frac{1}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}}$
収束水位 $D_{i,k}$	0	$\frac{\alpha_{i,1} h_{i,1}}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}}$	$\frac{\alpha_{i,1} h_{i,1} + \alpha_{i,2} h_{i,2}}{\alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}}$

2.3 タンクからの流出流量

タンク i の側面の番号 j のパイプから流出する流量 $q_{i,j}$ は式 (1) で与えられ、これを式 (4) に代入すると、

$$q_{i,j,k} = \alpha_{i,j} \{s_{i,0} - (D_{i,k} + \pi_{i,k})\} e^{-(t/\tau_{i,k})} + \alpha_{i,j} (D_{i,k} + \pi_{i,k} - h_{i,j}) \quad (5)$$

が得られる。式中の $\tau_{i,k}$ 、 $D_{i,k}$ 、 $\pi_{i,k}$ は水位番号 k の影響を受けるので、 $q_{i,j}$ にも添え字 k を追加した。なお、各タンクから河川へ流出する流量は、側面流出孔からの流出量 $q_{i,j,k}$ の総和 $\Sigma_{j=1}^n q_{i,j,k}$ で与えられる。

$$q_{r(i,k)} = (\Sigma_{j=1}^n \alpha_{i,j}) (s_{is} - D_{i,k} - \pi_{i,k}) e^{-(t-t_s)/\tau_{i,k}} + (\Sigma_{j=1}^n \alpha_{i,j}) \pi_{i,k} - \alpha_{i,0} D_{i,k} \quad (6)$$

2.4 各種パラメタ相互の制約関係

ここで、各タンクからの流出流量を支配する、時定数 $\tau_{i,k}$ 、および収束水位 $D_{i,k}$ の相互関係について調べる。初めに、全ての流出係数 $\alpha_{i,j}$ は正であるから、時定数の定義より次の関係が得られる。

$$\tau_{i,0} > \tau_{i,1} > \tau_{i,2} > 0 \quad (\text{条件 1})$$

また $\alpha_{i,j}$ を、 $\tau_{i,k}$ の定義に基づいて $\tau_{i,j}$ によって表し、これに条件 1 を課すと、

$$0 < \alpha_{i,0} < \alpha_{i,1} < \alpha_{i,2} \quad (\text{条件 2})$$

が得られる。そしてこれより、 $2\alpha_{i,0} < \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1}$ および、 $\alpha_{i,0} + 2\alpha_{i,1} < \alpha_{i,0} + \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}$ となるから、

$$0 < \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}} < \frac{1}{2}, \quad \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}} < \frac{1}{2 - \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}}} \quad (\text{条件 3})$$

が導かれる。

次に、 $D_{i,j}$ については、その定義を $\tau_{i,0}, \tau_{i,1}, \tau_{i,2}$ を用いて書き直すと、 $\frac{D_{i,1}}{h_{i,1}} = 1 - \frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,0}}$ 、および $\frac{h_{i,2} - D_{i,2}}{h_{i,2} - D_{i,1}} = \frac{\tau_{i,2}}{\tau_{i,1}}$ が得られ、これに条件 3 を課し、また現象の性質から、水位の収束値 D_i は h_i よりも低くなることを用いると、次の制約条件が得られる。

$$\frac{1}{2} < \frac{D_{i,1}}{h_{i,1}} < 1, \quad \frac{h_{i,2} - D_{i,2}}{h_{i,2} - D_{i,1}} < \frac{2}{3} \quad (\text{条件 4})$$

さらに、直列タンクモデルにおいては、より少ない流出量を扱う下部のタンクほど時定数が大きくなる傾向にあり、いま各タンクの $\tau_{i,1}$ を代表に選ぶと、

$$0 < \tau_{1,1} < \tau_{2,1} < \tau_{3,1} \quad (\text{条件 5})$$

と表されることも制約条件に加えられる。

このようにタンクモデルの各種パラメタの間には、相互に多数の制約関係が存在し、中でも条件 (3) は厳しい制約を与える。タンクパラメタの同定にあたって、これらを枠組みとして利用することができる。

3 タンクパラメタの探索方法

3.1 ハイドログラフのみとの適合

従来、タンクパラメタの同定は、タンクモデルによる予測流量のハイドログラフを、実測流量のハイドログラフに適合させることによって行われてきた。図 3(a) に、本報告で、木曽川水系の標準モデルとした武儀川のハイドログラフを示す。なお、本報告に示す図では、パルス状降水の時間刻み Δt を 5 分とした。

ハイドログラフを用いて適合を行う場合、目的とする流量範囲が現れる時期を選んで適合作業を行う必要がある。本報告は小水力発電用水源の流量を予測することを目的としており、流況曲線の低水から豊水の範囲がとりわけ重要である。そこで、小流量に係わる低位タンクについてのパラメタ探索が容易になるよう、無降水期間が長く続いて小流量の状態が明瞭に出現する事例として、2011 年 5 月の約 800 時間を図 3(a) に示す。

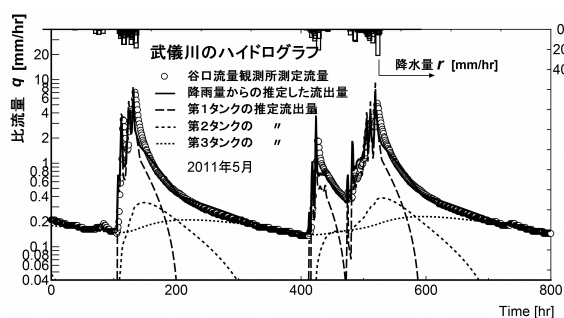
本手法ではパラメタの調整を、主としてタンクの時定数を用いて行う。このため、グラフの縦軸に対数をとる。すると、図にみられるように、実測流量のハイドログラフは、勾配の異なるいくつかの直線によって近似でき、かつ、流量が少ないほど勾配が緩やかになることから、下位のタンクほど時定数が大きいことが確認できる。この図より、各タンクが扱う流量範囲について時定数 $\tau_{i,1}$ の概略値を求め、前述の制約条件を満足するよう $\tau_{i,0}$ および $\tau_{i,2}$ を調節する。これを基に、表 1 の関係に従って各孔の流出係数 $\alpha_{i,j}$ を算出し、それを用いて河川流量を予測する。

これによって得られた予測ハイドログラフを実測ハイドログラフと比較し、より良い適合が得られるよう、制約条件を満足しつつ時定数および流出係数を調節する。以後これを繰り返すことで、良好な適合へと近づけていく。ただし、時定数はハイドログラフの勾配を与えるものであり、流出流量の絶対値を適合させるために、側面流出孔の高さや浸透孔の流出係数を調節する必要がある。その際、タンク毎の予測流出量も参考にした。

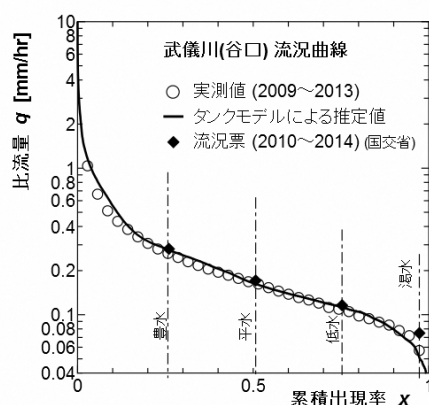
しかし、予測ハイドログラフは時定数の変化にあまり敏感ではなく、また、ハイドログラフとの適合に適した季節は限られること、そして、この手法は主として短期の流量変化への適合を目指しており、長期の流量変化にも適用可能な流出係数を正確に求めることは難しい。なお、図 3(a) 中の実線は、次節で示す流況曲線との適合とを組み合わせ得たタンクパラメタを用いた結果である。

3.2 流況曲線とハイドログラフの同時適合

発電用水源の流量予測を目的とする本研究では、長期間の実測降水量に基づいて作成された流況曲線をどの程度予測できるかが重要である。この目的に適したパラメタ取得の方法として、タンクモデルによって予測される流況曲線を、実測の流況曲線に適合させるようタンクパラメタを調整する方法^[1,2]が考えられる。しかし上述の手法と同様、この手法だけでハイドログラフと良好に



(a) ハイドログラフとの適合



(b) 流況曲線との適合

図 3. ハイドログラフと流況曲線との交互適合

適合させることは困難である。

そこで本報告では、長期の流量データに基づく流況曲線への適合と、短期の流量変化を表現するハイドログラフとの適合とを交互に行い、二つの曲線を同時にフィッティングさせるタンクパラメタ探索手法を用いることにした。この手法を、流況曲線については2009年から2013年の5年間にわたる武儀川の実測流量を用いて試みた結果が図3(a),(b)である。この手法によって、流況曲線については低水から豊水の範囲だけでなく、豊水の数倍の流量に至るまで良く近似できており、また、ハイドログラフとの適合も良好である。表2に、本手法で得られたタンクパラメタを示す。

表2 本手法で得られた武儀川のタンクパラメタ

i	j	$h_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$	$\tau_{i,j}$	$\frac{\tau_{i,j}}{\tau_{i,j}-1}$	$\frac{D_{i,k}}{h_{i,j}}$
1	2	108.0	0.0300	18	0.464	0.75
1	1	47.0	0.0180	38	0.308	0.69
1	0	0.0	0.0080	125		
2	1	11.2	0.0190	29	0.441	0.56
2	0	0.0	0.0150	67		
3	1	4.5	0.0055	133	0.267	0.73
3	0	0.0	0.0020	500		

4 木曽川水系の8河川の予測流況曲線

既報^[2,3]にて、武儀川について選定したタンクパラメタが岐阜県南部の木曽川水系にほぼ有効であることを示した。そこで、改善されたタンクパラメタについても同様な性質が存在するか否かについて検討した。

図4に木曽川水系内の中規模8河川の実測流況曲線(記号)と、上で求めたタンクパラメタを用いて予測した流況曲線(実線)とを比較して示す。前報と同様に、牧田川では農業利水の影響によって実測流況曲線は大きく低下し、また坂内川では積雪による貯留効果で実測値は予測値より大きく現れている。しかしこれらを除けば、予測流況曲線は豊水量を上回る流量域まで実測流況曲線に近接している。とりわけ武儀川より東側の地区については、平水量で予測誤差が10%以内にあるなど、水源の流出量を予測する用途には十分な精度を示している。

5 まとめ

小水力発電ポテンシャルの簡便な予測手法であるタンクモデルについて、同モデルの原理に基づくタンクパラメタ相互の制約関係を用いることでパラメタの探索範囲を縮減し、また、モデルの予測流量を、ハイドログラフに適合させる作業と、流況曲線に適合させる作業を交互に行うパラメタ同定手法を用いることでタンクパラメタの改善を図り、これによって次の結果を得た。

(1) 流況曲線およびハイドログラフ双方に、幅広い流量範囲で良好な近似を与えるタンクパラメタを取得できた。

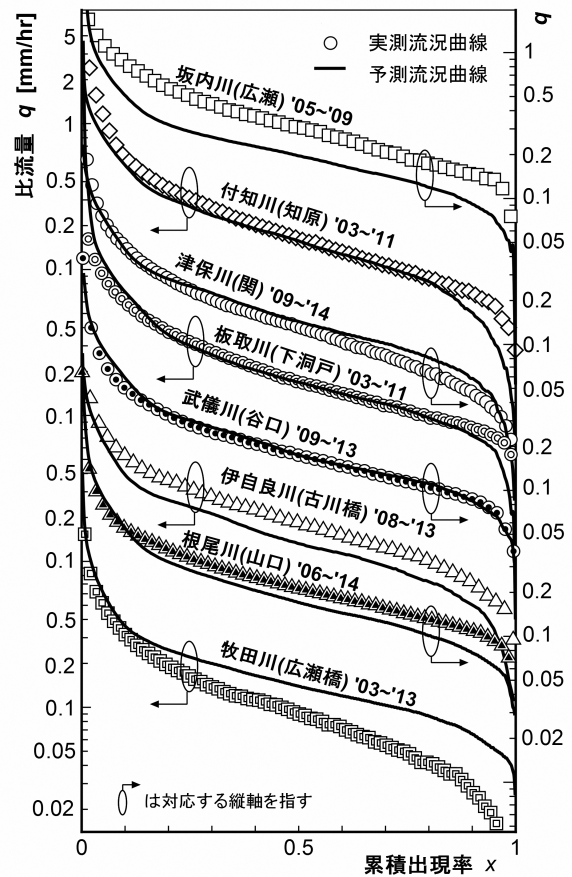


図4 木曽川水系8河川の実測および予測流況曲線

(2) 上記パラメタを木曽川水系の中規模河川に適用したところ、不適合の原因が明瞭な場合を除けば予測流況曲線は実測曲線を良く近似しており、とりわけ岐阜県東部では優れた予測値を与えた。

文 献

- [1] 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", 岐阜県情報技術研究所報告第16号, pp.59-62, 2015
- [2] 河村隆雄, "降水量からの小水力発電ポテンシャルの見積り方法-流域面積が小さい水源への適用-", 岐阜県情報技術研究所報告第17号, pp.54-57, 2016
- [3] 河村隆雄, 棚橋英樹, 和田清, "平均降水量データによる小水力発電ポテンシャルの予測-岐阜県における小流域水源への適用-", 土木学会第44回環境システム研究発表論文発表会講演集, pp.285-290, 2016
- [4] 菅原正巳, "流出解析法", 共立出版, 1972
- [5] 藤原洋一ほか4名, "流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究", 農業土木学会論文集, No.225, pp.137-149, 2003

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 18 号 平成 28 年度

発行 平成 29 年 月 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>
