

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 1 6 号 平成 2 6 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

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）	1
— 金型搭載小型ロギングシステムの設計と試作 —	
生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発（第 4 報）	5
— 構造解析シミュレーション技術に関する研究 —	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第 1 報）	9
— カメラセンサ —	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第 2 報）	15
— 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 3 報）	21
— 音センサ —	
観光客の行動計測技術と行動モデルに基づいた情報提供手法の研究開発（第 4 報）	25
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 1 報）	30
防災情報システムの高度化に関する研究（第 3 報）	34
運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術（第 2 報）	38
超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発（第 1 報）	44
シミュレーション技術を用いたジグ設計検証手法の開発（第 3 報）	49
— 固有振動数の算出 —	
固有振動数算出における計算時間の短縮に関する検討	52
水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発（第 6 報）	54
計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測	57
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	59
— 水文学タンクモデルの武儀川への適用 —	

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第3報)

— 金型搭載小型ロギングシステムの設計と試作 —

山田 俊郎, 坂東 直行, 平湯 秀和, 棚橋 英樹,
丹羽 厚至*, 窪田 直樹*, 多田 憲生**

A study on a smart injection mold (3rd Report)

- The design of a mold appendable small logging system and an experiment with a prototype -

Toshio Yamada, Naoyuki Bando, Hidekazu Hirayu, Hideki Tanahashi,
Atsushi Niwa, Naoki Kubota, Norio Tada

あらまし プラスチック射出成形における生産立ち上げ時間の短縮化, 不良成形品の発見を目的に, 複数のセンサを取り付けた金型システム(スマート金型)を開発している。成形時に変化する型内の圧力や温度など時系列データを取得し, ビッグデータ解析することで現在のショットが良品と異なるのかを判別することが可能となる。本報では, 金型に搭載できる小型のデータ収集システムの開発と測定データの妥当性について報告する。昨年度の測定に用いた汎用システムで得られたデータとの比較から, 提案システムで得られるデータも成形状態の同一性を確認するための指標となり得ることを確認した。

キーワード 射出成形, 金型, センシング, ビッグデータ

1. はじめに

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

昨年度は, センサシステムの有効性を検証することが目的であったため, 汎用のアンプやロガーを組み合わせ

てシステムを構築した。汎用システムの組み合わせであることから, 全体にシステムが大がかりであり, セットアップに時間を要する。生産現場において日常的にセンシングシステムを用いるには, システムの小型化や容易な取り扱いが求められるため, 本年度は金型に搭載できるサイズの小型ロギングシステム(図1)を開発した。

本報告では, スマート金型のデータ収集に特化した小型のデータロガーの開発とデータ検証について報告する。データロガーは, 必要な機能を絞り込み, 必要最小限の回路構成とすることで小型化を図った。また, 開発ロガーで取得したデータと汎用システムで取得したデータを比較し, 開発システムで得られるデータの妥当性について検証した。

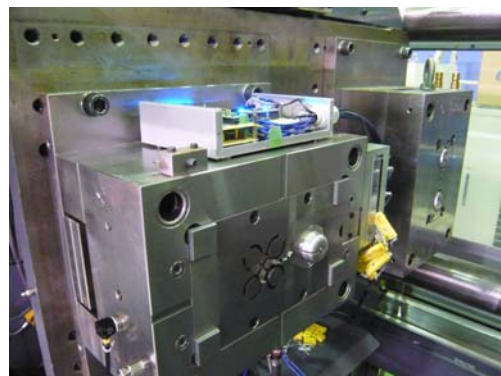


図1 金型搭載データロガー

* 岐阜県産業技術センター 環境・化学部

** 株式会社 岐阜多田精機

2. データロガーの設計

昨年度に構築した汎用のアンプやロガーを用いたシステムは図2に示す構成であり、圧力センサ4点、型表面温度センサ8点、型内部温度センサ4点、加速度センサ3軸の測定が可能であった。小型ロガーの開発にあたってなるべく多くの入力数を確保することが望ましいが、採用したマイコン(mbed: LPC1768)の制限から、圧力センサ2点、型表面温度センサ4点、型内部温度センサ4点の構成とし、図3に示すブロック構成とした。高い応答性が求められるセンサ（圧力、型表面温度）はアナログ信号での入力となることから、マイコンのA/Dコンバータの入力数（6ch）が上限となる。なお、加速度センサはデジタル信号で接続することが可能であるが、本システムでは搭載していない。

データのサンプリングレートは、データの詳細度とデータ量を考慮して500Hzとした。昨年度のシステムでは1kHzでサンプリングしていたが、測定する圧力・温度の変化スピードに対してオーバースペックのサンプリングであると見受けられた。昨年度の測定データを間引き、疑似的に500Hz、250Hz、125Hzのサンプリングデータを作

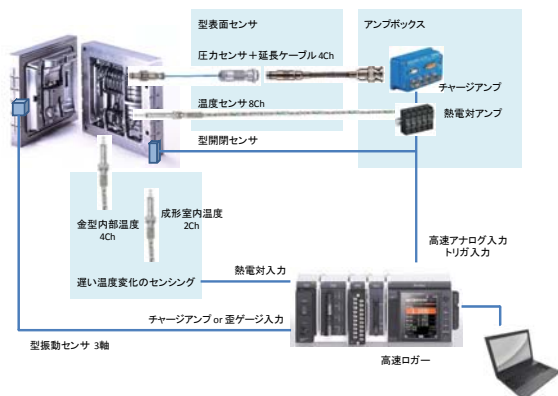


図2 汎用アンプ・ロガーを用いたシステム

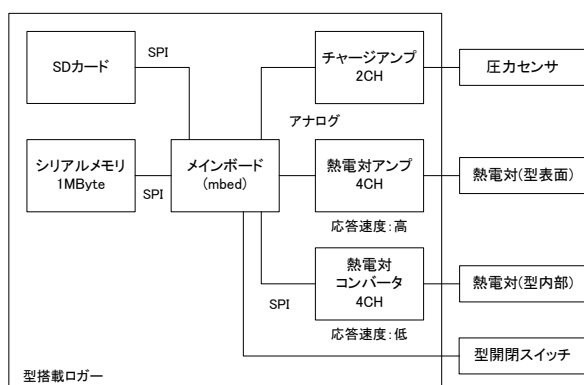


図3 金型搭載ロガーの構成

成し、変化の特徴が維持できているかを調べたところ、250Hz以上のサンプリングであれば1kHzサンプリングのデータと大差ないことを確認した。今回はチャンネル数が少ないことと、サンプリングの余裕をみて、500Hzサンプルとした。

2. 1 チャージアンプ（圧力センサアンプ）

型内圧力の測定に用いる圧力センサは、水晶の圧電効果を利用したものであり、今回用いたセンサ（KISTLER 6157BA）では圧力1(MPa)に対して -94.0×10^{-12} (C)の電荷が発生する^[2]。つまり、圧力の変化に応じて電荷量に変化し、センサの外部と電流の入出力が発生する。この電流の入出力を積分することでその時点の圧力を知ることができ、一般に図4に示すチャージアンプと呼ばれる回路を用いる。回路の原理は一般的な積分アンプであるが、積分誤差(C1の残留電荷)をリセットするためのスイッチSWが設けてある。射出成形の1サイクルごとにリセットをかけることで、誤差の蓄積を防ぐことができる。

この回路を作成する場合、微小な電荷量を扱うことから、入力インピーダンスが高くオフセットの少ないOPアンプを選定することはもちろんであるが、OPアンプの—入力の絶縁に配慮する必要がある。基盤に部品をはんだ付けする通常の実装では、基盤を通して電荷のリークが起こるため、OPアンプの—入力、RおよびC1のセンサ側のリードを空中配線として絶縁を確保した。

さらに、今回の回路では残留電荷によるドリフトをリセットするスイッチを設けたため、ここでの電荷漏れ対策も必要となった。SWはマイコンからの制御でON/OFFできる半導体のアナログスイッチである。汎用的に用いられているアナログスイッチ(C-MOSファミリーの4066)では、一定の圧力でセンサを保持しても出力電圧は一定とならず、徐々に下がる傾向があった。これは、電荷が漏れていることを示している。しかしながら、アナログスイッチのデータシートには、スイッチの2極間(IN-COM間)の漏れ電流の記載はあるものの、GNDへの回り込み等を含む漏れの総量の記載はされていない。複数のアナログスイッチで試した結果、Analog Devices ADG751が条件を満たすことがわかった。一般的なアナログスイッチは単一のスイッチ構造であるのに対して、ADG751はT型のスイッチ構造であり、この内部構造の違いが電荷漏れに効果があったと考えられる。

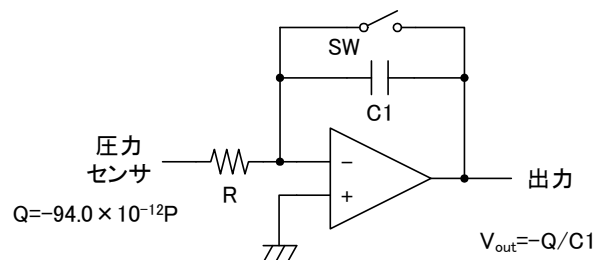


図4 チャージアンプの基本構成

2. 2 熱電対コンバータ・アンプ

型の表面および内部の温度測定には熱電対を用いている。熱電対は冷点と温点の温度差が電圧で出力されるセンサであり、電圧をA/D変換してマイコンに取り込む。熱電対の種類による特性の補正や冷点の温度測定機能を組み込み、デジタルデータとして温度を出力するコンバータICが市販されているが、変換速度が速いものでも100msであり、500Hzサンプリングの測定はできない。比較的变化が遅い型内部温度の測定にはコンバータIC(MAXIM MAX31855)を用い、型表面のセンサについては熱電対向けのアナログアンプ(Analog Devices AD8495)で増幅し、マイコンのA/Dコンバータでデジタルデータとして取得した。

熱電対は起電力が小さいため、その出力は入力インピーダンスの高いアンプで受けることとなり、ノイズの影響を受けやすくなる。後のデジタル処理でもノイズの処理は可能であるが、できるだけアナログ信号の段階でフィルタ処理を行うほうが望ましい。汎用測定器による測定では、樹脂注入ノズルに最も近いセンサの温度変化が最も急峻であり、その変化曲線を図5に示す。この変化が測定でき、かつ高周波ノイズをカットするフィルタをオシロスコープの測定帯域評価の方法^[3]を参考に設計した。

参考資料では、

- ・20%→80%の立ち上がり時間=0.4/信号帯域
- ・測定誤差が3%の周波数帯域=信号帯域×1.9

の指標が示されており、20%→80%の変化時間が0.012秒の立ち上がりを測定誤差3%で測定するには63.3Hz以上の周波数帯域が必要であることがわかった。つまり、

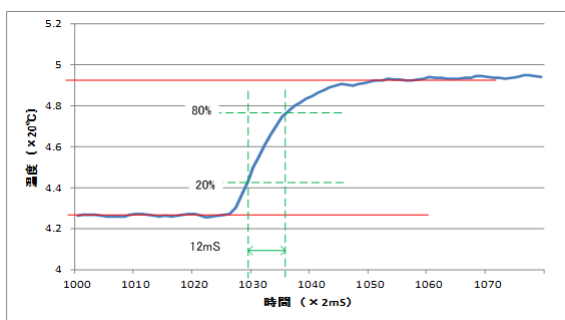


図5 型表面温度センサの立ち上がり波形

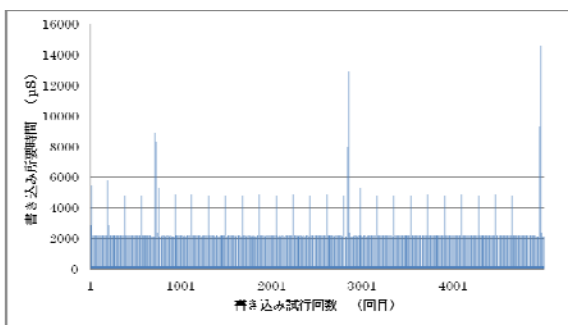


図6 SDカードへの書き込みにかかる時間

63.3Hz以上の信号はノイズとしてカットしても目的とする測定への影響は小さい。この結果を基に、入手性の良いE6系列の抵抗・コンデンサ値でフィルタを設計し、カットオフ周波数71.6Hzの2次のローパスフィルタを採用した。

2. 3 ロギングメモリ

センサから取得したデータはSDカードに記録することとしたが、SDカードを高速に読み書きするネイティブモードの技術仕様は公開されておらず、SDアソシエーションのメンバー以外は技術仕様が開示されているSPIモードの利用に限定される。

SPIモードでSDカードに16KByteサイズの連続書き込みを行い、書き込み試行ごとに要した時間を図6に示す。ほとんどの書き込みは0.2msで完了したものの、12回の書き込みごとに2.2msを要し、136回の書き込みごとに4.8msを要した。さらに10ms以上の時間を要する場合もあり、書き込み時間が一定でないことがわかった。このような現象はSDメモリを変えても発生し、CLASS10の高速モデルであっても不定期に10ms以上の時間を要する結果となった。さらに、書き込みのサイズを32Byteと小さくしても同様に10ms以上の時間を要することがあり、SDカードの内部処理が書き込み時間に影響していると考えられた。

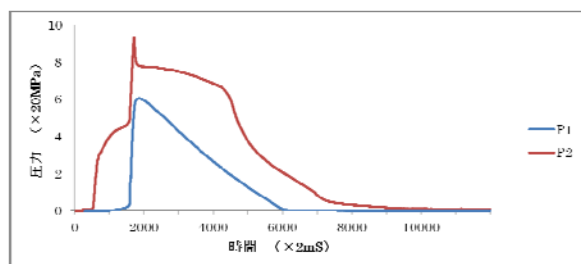
500Hzのサンプリングに合わせてデータをSDカードに書き込むには、遅くとも書き込みが1ms以下となる必要がある。ほとんどの書き込みが1ms以下で完了するとしても、サンプリング時間以上の書き込みが途中に入ることによってサンプリングの抜けが生じる。そのため、ロギングデータはマイコンのメモリ上に一旦保存し、ロギング完了後にSDカードへ書き出すこととした。しかし、採用したマイコンのRAMのサイズは64kByteであり、500Hz×30秒(成形にかかる時間)の測定データを保存することができない。そのため、SPI接続のSRAM(1Mbit×8個)をマイコンに接続し、一時記憶領域とした。

3. 試作データロガーによるデータ取得

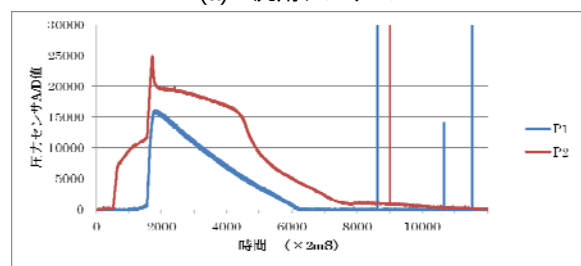
試作したデータロガーで得られるデータの妥当性を、汎用システムとの比較で評価した。同一の成形機パラメータにおいて、それぞれのシステムを用いて測定した型内の2点の圧力変化のグラフを図7に示す。試作ロガーにおいては、圧力値の校正ができなかったため、縦軸は無単位(A/Dコンバータの変換値)となっているが、システムの目的が値の測定ではなく、他のショットとの差異の発見であるため、無単位であっても異常検出等の目的は達成できる。図7(b)のグラフを見ると、試作ロガーでは測定期間の終盤にインパルス状のノイズが入っている。この例では測定の終盤に現れているが、圧力変化のある部分で発生することもある。これらのノイズはA/D変換で発生したと考えられるが、このような単発ノイズはデ

デジタル処理で除去することができるため、大きな問題とはならない。また、全体的に試作ロガーのグラフの線が太く見えるのもノイズの影響で測定値にふらつきがあるためである。このノイズはアナログ回路部分で発生していると考えられるが、測定レンジに対して小さな値であり、波形の概形が変わるほどのものではないため、差異判定への影響は小さいと考えられる。これらノイズに起因する測定値の劣化はあるものの、2つのシステムの測定グラフの比較から、試作ロガーの応答性、リニアリティは汎用ロガーと同等の性能であることが確認できた。

型表面温度センサについては、温度の立ち上がり状態の取得が重要であるため、立ち上がり部分に注目して比較を行った。型表面の4点を2つのシステムで測定した結

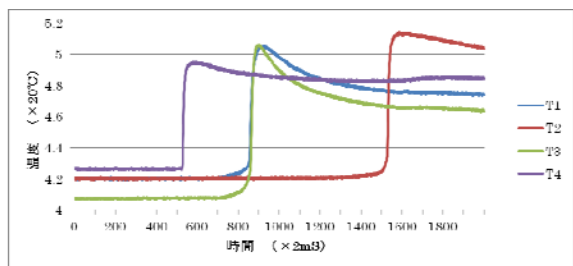


(a) 汎用システム

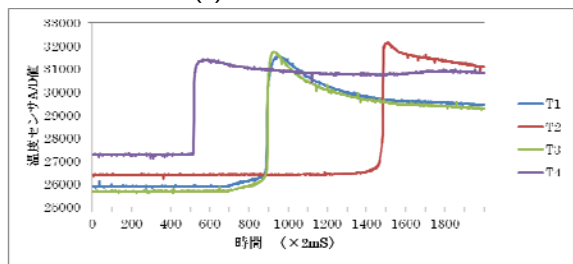


(b) 試作ロガー

図7 測定データ波形の比較（型内圧力）



(a) 汎用システム



(b) 試作ロガー

図8 測定データ波形の比較（型表面温度）

果を図8に示す。温度においても試作システムは校正ができなかったが、圧力と同様に縦軸が無単位であっても問題はない。波形を比較すると、試作ロガーでは多少ノイズがある波形となっているが、立ち上がりの応答特性は汎用システムと同等となっており、樹脂到達のタイミング測定に使えることが確認できた。

測定の再現性はショット間での差異が比較的小さい圧力センサの測定値で検証した。図9は10ショット分の測定データを重ね書きしたグラフである。このグラフでは、測定データを3近傍メジアンフィルタで平滑化し、インパルス状のノイズを除去している。すべての測定グラフが重なって描画されていることから、試作システムにおいても測定の再現性は十分な性能があることを確認した。

4. まとめ

プラスチック射出成形の製品製造現場で使用することを目的として、金型に搭載可能な小型のデータ収集装置を開発した。汎用システムの組み合わせで構築したデータ収集装置で取得したデータとの比較から、提案システムで得られるデータが成形状態の同一性を確認するための指標となり得ることが示唆された。

今後は、大量の成形データを収集し、データ解析によって不良品等の不具合を検出する手法について開発を進める。

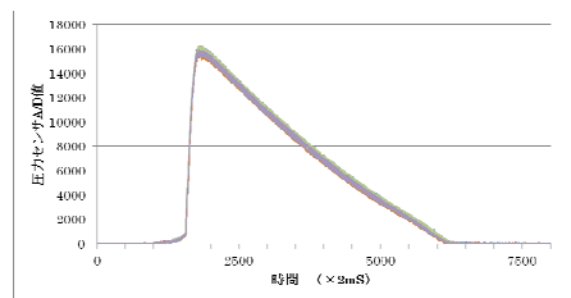


図9 圧力センサの波形（10ショット重ね書き）

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] “キスラー プラスチックブック”, 日本キスラー株式会社, 2012.
- [3] “オシロスコープの周波数応答とその立ち上がり時間確度への影響について”, Application Note 1420, Agilent Technology, 2003.

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第4報)

—構造解析シミュレーション技術に関する研究—

坂東 直行 山田 俊郎 平湯 秀和 久富 茂樹
窪田 直樹* 赤塚 久修* 丹羽 厚至*

A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Strength Test -

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA Hidekazu HIRAYU Shigeki KUDOMI
Naoki KUBOTA* Hisanobu AKATSUKA* Atsunori NIWA*

あらまし CFRP射出成形品の強度特性をシミュレーションで評価する方法について、実験や解析モデル間で比較しながら有効性を検討した。その結果、炭素繊維含有率の変化による剛性の変化や、ウェルドライン近傍での応力集中の様子をシミュレーションで確認できた。よって、シミュレーションによるCFRP射出成形品の強度評価は、製品設計において有効な手段といえる。

キーワード 構造解析, 均質化法, 引張試験, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

1. 緒言

省エネルギー志向の高まりをうけて、軽量で高強度を特徴とする炭素繊維強化樹脂(CFRP)が輸送機械における次世代の材料として期待されている。

CFRPには、熱を加えると硬化する熱硬化性樹脂を使うものと、熱を加えると柔らかくなる熱可塑性樹脂を使うものに大別される。前者はすでに航空機分野で活用されているが、加熱による硬化工程が必要であるため生産性が悪く、大量生産には不適である。そのため、生産性を重視する自動車分野では、熱可塑性CFRPが次世代材料として検討されている。

一般的な熱可塑性樹脂の成形加工では射出成形が用いられており、設備も普及している。そこで、熱可塑性CFRPの成形加工でも射出成形技術が使えるよう、炭素繊維入り樹脂の加工特性を考慮した成形技術が研究されている。

CFRPの持つ高い強度特性は、内部の炭素繊維によってもたらされたものであり、これは炭素繊維の配向方向に対して顕著に現れる。このため繊維配向が乱れている場合は揃っている場合と比較して強度は低下する。また、CFRP射出成形では繊維配向は、成形中の樹脂の流動方向に揃い、流動先端が合流するウェルドラインでは乱れる。これは成形品の部材強度が加工工程で決定することを意

味する。このため、射出成形で高品質な強度の部材を得るには、事前に部材内部の繊維配向が加工工程でどのように分布するか、またその結果部材の強度はどのようなかを検討する必要がある。

部材の強度特性の評価には、構造解析シミュレーションを用いる方法がある。しかし、一般的な構造解析シミュレーションでは、部材を形成する材料は、部材中の箇所に依らず、また力の方向に依らず均質なものであると仮定するため、CFRP射出成形品の強度評価には不十分である。この課題の解決策の一つとして、事前に樹脂流動解析シミュレーションを行って得た繊維配向データを構造解析シミュレーションに反映させて解析する方法が提案されている。

そこで、本研究では、樹脂流動解析の結果を継承した構造解析シミュレーションの実施を試み、その特徴を検討したので報告する。

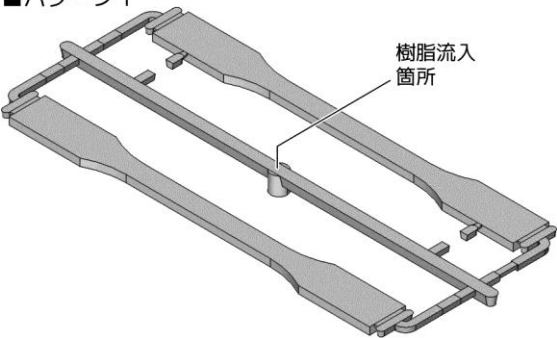
2. 目的

繊維配向により、部材中の箇所によって、また力の方向によって強度特性が異なるCFRP射出成形品は、程度や方向が不均質な強度異方性を持つ部材と見なせる。

このような部材の強度をシミュレーションで評価するための手法に均質化法がある。均質化法とは、材料の微視的な非均質性と巨視的材料特性とを関係づける理論であり、構造解析シミュレーションでは、要素にそれぞれ

* 岐阜県産業技術センター

■パターン1



■パターン2

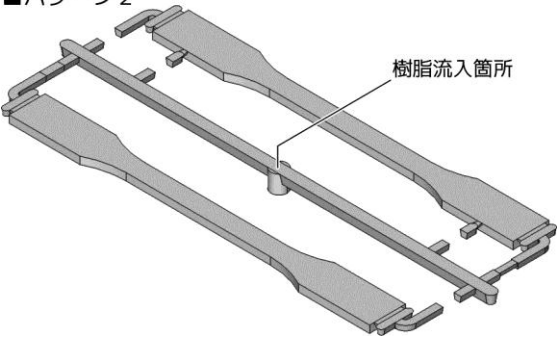


図1. 実験で用いた射出成形品



図2. CFRP射出成形品の引張試験

異なる異方性強度特性を割り当てることで、巨視的にみて実際の成形品の強度特性と同等の結果を導くことができる。この手法を取り入れることで、CFRPの射出成形品の強度特性も評価できる。しかし、均質化法がどれだけ有効なのかは、実際の部材強度との比較を行いながら探っていく必要がある。

また、シミュレーションは解析精度と必要時間がトレードオフの関係にある。そのため、ひとくちにシミュレーションによる強度特性評価といっても、目的と制約に応じたモデルで様々な解析されるのが実際である。

そこで、本研究では均質化法を用いたCFRPの射出成形品の強度評価において、実際の射出成形品の強度と比較して能力をはかるとともに、解析モデル間の比較を行い、それぞれの特徴を明らかにすることを目的とした。

表1. 実験で用いた材料

樹脂種	材料名
PC	lupilon S2000R*
PC+CF10%	lupilon CFH2010*
PC+CF20%	lupilon CFH2020*
PC+CF30%	lupilon CFH2030*

* 三菱エンジニアリングプラスチックス株式会社製

表2. シミュレーション環境

種別	ソフトウェア名
樹脂流動解析ソフトウェア	Autodesk Moldflow Insight Premium 2014
材料特性予測ツール	MSC Digimat 5.0.1
構造解析ソフトウェア	Altair HyperWorks Radioss v11

3. 方法

3. 1 強度特性評価実験

実際のCFRP射出成形品の強度を評価するため、図1に示す射出成形品から切り出した試験片を用いて引張試験を行った(図2)。この成形品は、昨年度の射出成形実験で取得した形状であり、JIS引張試験片を2つ得るものである。なお、CFRPの射出成形ではウェルドラインでの顕著な強度低下が知られている。そこで試験片中央のくびれ部にウェルドラインの有るものと無いものの2種類を用意した。

材料には、ポリカーボネート(PC)を母材とし、炭素繊維(CF)をそれぞれ10, 20, 30%含むCFRP、および比較のためにCFを含まないPCピュア材を用いた。用いた材料を表1に示す。

3. 2 シミュレーション

CFRP部材の強度特性を構造解析シミュレーションで評価するには、母材である熱可塑性樹脂と介在物である炭素繊維を区分できるレベルの微視的な要素の材料特性から、シミュレーションで用いるメッシュレベルの巨視的な要素の材料特性を導く機能と、それを構造解析用の要素に割り当てる機能が必要である。これらの機能は強度評価シミュレーションを行う構造解析システムにも射出成形加工をシミュレーションする樹脂流動解析システムにもなく、別途に用意する必要がある。

本研究で用いたシミュレーション環境を表2に示す。なおここで、均質化法の適用は材料特性予測ツールによってなされる。

表3. 解析で用いた炭素繊維の材料物性

特性	値
ヤング率	185 GPa
繊維直径	11 μm
アスペクト比*	30

* 繊維長／繊維直径

解析は以下の手順で行った。

まず、Moldflow上で、流動解析シミュレーションを実施する。ここから、射出成形品中の繊維配向が得られるので、繊維配向データを出力する。また、流動解析で用いたメッシュデータを出力する。次に、HyperWorks上で構造解析用モデルを作成し、メッシュデータを出力する。この3つのデータファイルをDigimatで読み込み、流動解析用メッシュ上の繊維配向データを構造解析用メッシュ上に割り当てる。また、母材であるPCおよび介在物であるCFそれぞれ単独の材料特性から炭素繊維複合材料の材料特性を予測するモデルを作成する。そして、Digimatから構造解析シミュレーション用に出力された解析コードを使いRadioss上で構造解析を実施する。解析中、DigimatはRadiossが要素の材料物性モデルを参照するたびに、その要素に応じた材料物性を提供する。

解析モデル間で比較するため、繊維配向を考慮する解析モデルと、考慮しない解析モデルを設定した。ここで、繊維配向を考慮しないとは、流動解析シミュレーションを行わずに、均質化法によって導出した材料物性モデルをそのまま構造解析で使うことを意味し、すなわち全体が均質な物性でシミュレーションすることを表す。なおこのとき、解析中のDigimatによる材料物性の提供は必要なく、解析の実行はRadiossのみで可能である。

均質化法を適用するには、実験で用いたCFRPの母材であるPC、およびCFの強度特性パラメータが必要になる。そこでシミュレーションでは、PCのパラメータはPCピュ

ア材の引張試験結果から導出し、CFのパラメータは表3の値を用いた。

4. 結果

引張試験結果を図3に示す。ここで、試験片のくびれ部にウェルドラインが無いものを(a)、有るものを(b)としている。図にはCFRPが破断するまでを示す。なお、ピュア材はひずみが3%を越えても変形を続ける。図3から、CFRPの場合、およそひずみが0～0.5%までの間は、応力・ひずみの関係が線形であるが、それ以降は非線形の傾向を示している。また、応力・ひずみの関係が線形区間の直線の傾きは、CF含有率の変化にともない増加している。なお、CFRPではウェルドラインの影響が強度の顕著な低下として現れている。

繊維配向を考慮した場合のシミュレーション結果を図4に示す。図4から、線形区間の直線の傾きは、実験とシミュレーションではほぼ一致した。

また、ウェルドラインがある場合のシミュレーション結果を応力の大きさによってコンター表示したものを図5に示す。このときの樹脂流動解析で得た繊維配向結果を配向の程度によってコンター表示したものを図6に示す。ここから、ウェルドラインにおいて、応力が集中している様子が見て取れる。

次に、CF20%の場合を取り上げ、解析モデル間で比較した結果を図7に示す。図7から、繊維配向を考慮しないモデルと比較して、繊維配向を考慮したモデルのほうが実際の強度特性に近い結果が得られた。

5. 考察

実験では、CF含有率の変化により剛性が変化することや、ウェルドラインがあると強度特性が著しく低下することが特徴として挙げられた。この様子をシミュレーシ

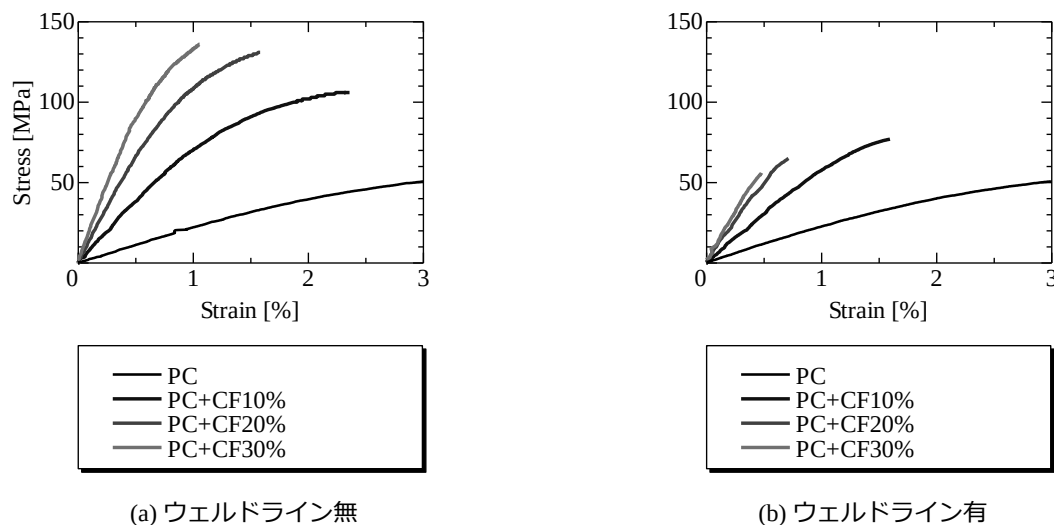


図3. 引張試験結果

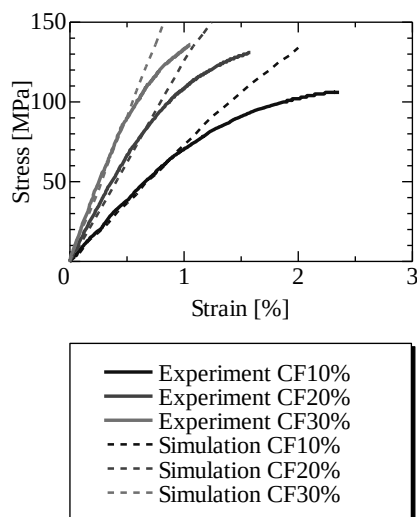


図4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

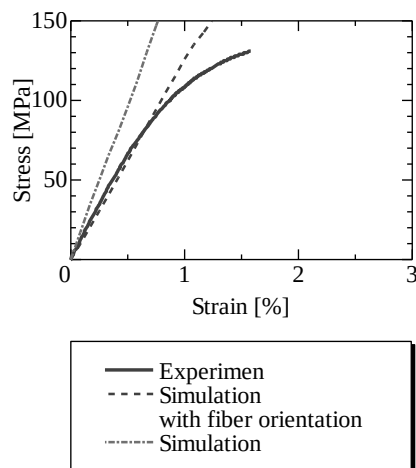


図7. 解析モデル間比較 (CF20%の場合)

ョンでも表現できている。このことから、均質化法を導入したシミュレーションによるCFRP射出成形品の強度特性評価は有効である。

特に、強度を求めてCFRPを材料として用いた射出成形品では、ウェルドラインによる強度低下をあらかじめ把握しておくことは重要である。部材の破壊起点となる応力集中の様子をシミュレーションで確認できることは有意義である。

繊維配向を考慮しない解析モデルは、現実にはありえないが、繊維方向があらゆる方向に完全にそろっている状態を仮定した場合の部材強度を評価することにあたる。これは、CFRP部材が取得する可能性のある最大強度を評価することであり、それ以上には成り得ないことを意味する。よって、この解析モデルは、部材の材料設計や形状設計で有意義な方法である。この解析モデルでは、構

造解析ソルバー単体で実施できるため、解析時間が短縮できることもメリットとしてあげられる。

なお、部材の変形がすすむとともに、応力・ひずみ間の関係が非線形になっていく様子は、シミュレーションで再現できなかった。これはCFの破断およびCFと母材の接触界面の特性の考慮が不十分だったからである。

6. まとめ

CFRP射出成形品の強度特性をシミュレーションで評価する方法について、実験や解析モデル間で比較しながら有効性を検討した。

その結果、CF含有率の変化による剛性の変化や、ウェルドライン近傍での応力集中の様子をシミュレーションで確認できた。

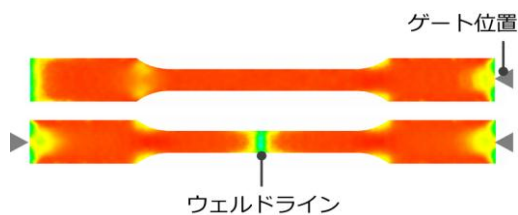
よって、シミュレーションによるCFRP射出成形品の強度評価は、製品設計において有効な手段といえる。

文 献

- [1] 山田俊郎, 坂東直行, 平湯秀和, 棚橋英樹, 丹羽厚至, 窪田直樹, 多田憲生, ”生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発ーセンシングシステムの設計と試験金型の試作ー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.21-24, 2014
- [2] 坂東直行, 平湯秀和, 山田俊郎, 久富茂樹, 丹羽厚至, 浅倉秀一, 窪田直樹, ”生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発ー樹脂流動解析シミュレーション技術に関する研究ー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.25-29, 2014



上: ウェルドライン無 下: ウェルドライン有
図5. 応力分布結果



上: ウェルドライン無 下: ウェルドライン有
図6. 繊維配向結果

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第1報)

ーカメラセンサー

平湯 秀和 田畑 克彦 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Wheelchair (1st Report) - Camera Sensors for Obstacle Detection -

Hidekazu HIRAYU Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI

あらまし 高齢者の生活を支えるツールとして電動カートの普及が進んでいるが、加齢に伴う認識力の低下による運転者の判断ミスや操作ミスが原因とする歩行者や車との接触事故および段差等での転倒事故等が問題となっている。本研究では、このような事故の危険を未然に検知するための安全装置のセンサとして、障害物の有無や段差等の危険箇所を検出するカメラセンサを開発する。カメラセンサとして、屋内外で安定して障害物を検出可能であること、実用化のための安価なセンサであること等を考慮し、単眼カメラを使用した。本年度は単眼カメラによるオプティカルフローを用いて、床面と障害物領域を分割する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性の検討を行った。

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

1. はじめに

到来する超高齢化社会において、高齢者のQOL（生活の質）を向上させることは、廃用症候群による寝たきりや閉じこもりを予防する上で、非常に重要な要素である。そして、QOLを向上するためにはADL（日常生活動作）やIADL（手段的日常生活動作）の維持が必須であり、活動的な日常を送ることが求められる。

高齢者が活動的な生活を送る上で、有用なツールの1つとして挙げられるのが電動カートである。もともとはゲートボールが流行していた時、高齢者が自宅からコートまでの移動手段として、電動車いすを製造していたスズキ株式会社が販売したのが始まりであるが、歩行が困難な高齢者に歓迎されて広く普及した。普及が広がったその他の理由として、道路交通法上、電動カートは電動車いすに分類されるため、歩行者と同じ扱いであり運転免許が必要ないことも挙げられる。

しかしながら、電動カートの普及に伴い、歩行者や車との接触事故が後をたたず、最近5年間では年間約200件の交通事故が発生している^[1]。この件数は、道路交通法上、歩行者と電動車いすの接触事故や電動車いすの単独事故は交通事故として計上されないことから、電動車いすに関連した実死傷者数は実際にはさらに多いといえる。事故の要因としては、運転者の不注意等に起因するもの（車道走行等）もあるが、ボンヤリしていて歩行者と衝突するなど、4割強が電動カートを運転する利用者の高齢

化による認識力の低下に伴う操作ミスによる事故である。

そこで、これらの問題を解決するため、本研究では、共同研究先である県内企業が開発する高齢者用電動ビークルに、障害物の接近や危険箇所を検知する安全装置を新たに開発することで、電動ビークルの操作ミスによる事故防止の実現を図る。なお、本稿では開発する安全装置付きの電動カートと従来の電動カートとを区別するため、特に電動ビークルと記載する。

本稿では安全装置のためのセンサとして、カメラを用いた障害物検出センサの研究開発について報告する。近年、自動車の安全運転の分野では『ぶつからない車』として、複数カメラによるステレオ視を行い前方の車との車間を自動で制御する技術や、ミリ波などを使用したレーダー装置が開発されている^[2~4]。しかし、これらのセンサ技術は前方の自動車や中央線などの検出を目的としているのに対して、本研究では人、段差等を検出対象としているため、これらの技術を使用することはできない。

開発中の電動ビークルの用途は、ショッピングモールや公共施設などの屋内から駅前や田園地帯などの屋外走行まで幅広く想定されている。これらの環境において、歩行者や電柱、側溝や車止めなどの電動車いすの衝突・転倒要素となる障害物を検出する安価で小型なセンサの開発が求められる。

そこで、本研究では周辺環境情報を高速に取得可能でコンパクト、かつ安価な単眼カメラを用いたセンサを開発する。

具体的には、前フレームと現フレームの画像情報を基にオプティカルフローを検出し、平面（床面）であれば得られる三次元的な動き情報を基に、平面と異なる高さを持つ領域（障害物）を検出する手法について検討を行った。また、実験により本手法の有効性の検討を行ったので報告する。

2. 高齢者用電動ビークルおよび安全装置について

本プロジェクトでは、歩道などの屋外走行から、ショッピングセンターなどの屋内走行までシームレスな走行を実現する電動ビークルを開発する。

一般的な電動カート利用者の声として現状の電動カートは屋外走行では支障ないが、ショッピングセンターなどの屋内の走行においては小回りが利かないため、商品棚間の移動や、人などの障害物を避けることが困難といった課題が挙げられている。

そのため、本プロジェクトで開発する電動ビークルは、電動カート同様に屋外環境で安定した走行を実現しつつ、屋内環境においては人等の障害物の回避や商品棚間の移動がスムーズに行えるように小回りの利く機能を有する。この電動ビークルは健常者に受け入れやすい操縦インタフェースを持ち、さらに、人や段差などの危険を事前に検知して、自動的に停止する機能を持つ。本プロジェクトで開発する電動ビークルのイメージ図を図1に示す。

車いす型電動ビークル本体は共同研究先である県内企業が開発する。この電動ビークルは、図1に示すとおり、ホイールベース可変機能により、屋外環境下ではホイールベースを長くすることで安定した走行を実現し、屋内環境下では逆にホイールベースを短くすることで小回りの利く走行を実現する。また、フレーム前面にヘッドライト等を取り付けたカバーを装着し、全体寸法は電動車いすのJIS規格 T9203に準拠した大きさとする。最高時速は車いすと同様の6kmである。

本機の安全装置として、前面に障害物を検出するための超音波フェーズドアレイソナーおよびカメラセンサを搭載し、後部には後方からの自動車の接近音を検知するための音センサを有している。

超音波フェーズドアレイソナーは電動ビークル前方にある複数の障害物を広域に探索することが可能なセンサである。更にカメラセンサでは検出困難な夜間等の環境やガラス戸などの透明物体の検知が可能である。一方、カメラセンサはセンサ周辺環境情報を高速に取得可能で、かつ人や段差などの対象物の大きさや高さ等の形状を識別することが可能である。また、超音波フェーズドアレイソナーでは検出が困難な段差等の検出が可能である。それぞれのセンサは長所・短所があるため、将来的には両方のセンサで得られた情報を組み合わせて、障害物検知率を向上させる。



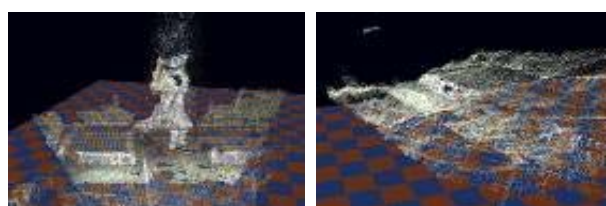
図1 電動ビークルのイメージ図

電動ビークル後部に搭載する音センサは、マイクロホンアレイを用いることで、環境雑音の影響を低減させながら、自動車のクラクション音、エンジン音、ロードノイズなどの音を検出することで、運転者に自動車の接近を知らせる機能を有する。

3. カメラセンサによる障害物検知

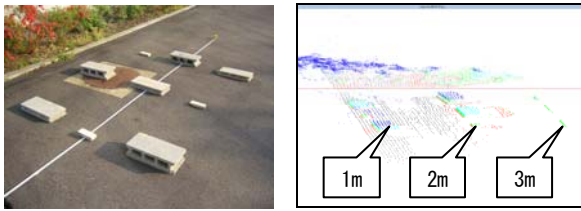
3. 1 カメラセンサの選定

最高速度6kmで走行する電動ビークルが、人や段差等の障害物を検出し安全に停止するには3m程度離れた距離で段差等を識別可能なセンサが求められている。そこで、本研究でははじめに「測域センサ」「ステレオカメラ」「単眼カメラ」の3種類のセンサを電動ビークルに搭載するカメラセンサの候補として検討した。実際に屋外環境下で障害物の計測をいくつかのセンサを用いて実施すると共に、センサの情報収集等を行った結果、屋内環境のみならず屋外環境下において安定して計測できること、安全装置として超音波フェーズドアレイソナーとの併用可能なコストとなること等を考慮し、単眼カメラを選定した。ステレオカメラや測域センサは複数カメラが必要であることやセンサ単体の価格が高価であるが、単眼カメラは1つのカメラモジュールとFPGAでシステムを組み上げることが可能である。なお、屋外環境下でステレオカメラ(ビュープラス製miniBEE)と測域センサ(北陽電機製URG-04LN)を用いて障害物検知を行った結果、70mmのベースラインを持つステレオカメラは2m離れた



ステレオカメラで撮影した 人や車止めの例 ステレオカメラで撮影した 車止めの例

図2 ステレオカメラの実験結果例



測域センサによる計測

測域センサによる凹凸検出結果
(数字は測域センサからの距離)

図3 測域センサの実験結果例

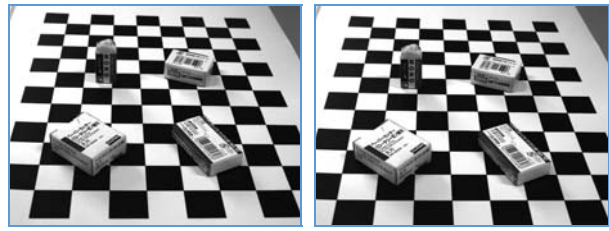
距離にある10cm程度の段差は識別可能であった。また、測域センサは半導体レーザが近赤外波長帯に関わらず、直射日光下でも3m離れた3cmの段差も障害物検出が可能なことを確認した。ステレオカメラおよび測域センサでの実験結果例を図2、図3に示す。

3. 2 障害物検出のためのアルゴリズム

単眼カメラは電動ビークルに固定されている。従って、平坦な道であっても坂道であってもカメラから得られる画像は見かけ上、同じ平面として観測される。そこで、本研究ではオプティカルフローを用いて、平面上の領域（電動ビークルが走行する床面領域）とそれ以外の領域（人や壁、側溝、段差などの障害物）に分割する手法の検討を行った。なお、オプティカルフローとは時間的に連続する画像間で物体の動きをベクトルで表現したものである^[5]。オプティカルフローの例を図4の赤線で示す。

オプティカルフローは物体の動きを画像座標上の長さや方向で表す。従って、カメラから物体までの距離が遠いと長さは短く、近いと長く表現されるため、見かけの長さのみで平面（床面）と障害物を識別することは困難である。そこで、本研究ではオプティカルフローの長さを二次元的な画像上の見かけの長さではなく、三次元的な長さに変換し評価することにした。本稿では、画像上の見かけの長さであるオプティカルフローを、三次元空間における床面上に射影したその長さをオプティカルフローの三次元長と定義する。

各フレームで得られるオプティカルフローの中で床面上にあるオプティカルフローは、全て同一平面（床面）上に存在する（一つのオプティカルフローは三次元特徴点となる二つの端点を結ぶ線分で構成され、二つの端点はどちらも床面上に存在する）。従って、カメラが移動することで表れる床面上の複数のオプティカルフローの三次元長は、三次元空間上におけるカメラの移動量と等しく、かつ全て同じ長さになる。一方、障害物領域で検出されるオプティカルフローは三次元空間上において、床面と同一平面上に特徴点は存在しないため、これらのオプティカルフローの三次元長は床面から得られるオプティカルフローの三次元長とは長さが異なる。例えば、床面よりも上にある段差や人等の凸状の障害物は長さが長く、床面よりも下にある側溝等の凹み状の障害物は長さが短くなる。したがって、もし、床面上のオプティカルフローの三次元長（＝カメラの移動量）がわかれば、異



フレーム(t-1)

フレームt

図4 オプティカルフローの例

なる三次元長のオプティカルフローを持った特徴点は障害物領域の特徴点となるはずである。また、カメラは電動ビークルに固定されているため、カメラの高さが既知である。従って、床面上のオプティカルフローとの三次元長の差から後述の式を用いて障害物の高さ情報を得ることが可能となる。

本研究では現フレームおよび前フレームの画像を用いて下記の手順で障害物検出を実施した。

Step1: 現フレームのオプティカルフローを求める。

Step2: 現フレームのオプティカルフローの中から、前フレームで床面と検出された特徴点と同一座標位置のオプティカルフローを全て求める。これが現フレームにおける床面上のオプティカルフローと仮定される。なお、カメラが移動する最初のフレームにおいては、カメラの近傍に障害物はないという仮定をもとに画面下部領域は床面とした。

Step3: Step2で求めた現フレームにおける床面上のオプティカルフローを全て三次元長に変換する。なお、ノイズ等の影響があるため、得られた全ての三次元長に対してメディアンをとった値を現フレームにおけるカメラの移動量とする。

Step4: 現フレームで検出された全てのオプティカルフローに対して、床面との高さ h を求める。高さ h は(1)式より求める。

$$h = \frac{l-L}{l}H \quad (1)$$

ここで、 H はカメラの床面からの高さ、 l は対象とするオプティカルフローの三次元長、 L はStep3で求めた床面上のオプティカルフローの三次元長である。

Step5: 高さ h が(2)式を満たす場合、そのオプティカルフローは現フレームにおける床面上のオプティカルフローとする。

$$-d \leq h \leq d \quad (2)$$

ここで、 d は床面の許容範囲を示す閾値である。

また、 h が(2)式の範囲外、かつ正の値を持つ場合は凸状の障害物、負の値を持つ場合は凹状の障害物となる。

3. 3 キャリブレーション

前節のとおり、オプティカルフローの画面上の見かけの長さを三次元空間上の長さに変換するためには、画像平面に投影された点をワールド座標系の三次元座標に射影する必要がある。そのため、キャリブレーションを行う。

1. 内部パラメータ A の推定

実験で使用するカメラやレンズを用いて、キャリブレーションパターンを複数枚撮影し、カメラの焦点距離、レンズ歪み係数、画像主点位置等の推定を行う。

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで f_x, f_y はそれぞれ画像面上の u 軸および v 軸における画素サイズと焦点距離 f との積からなるスケール係数であり、 (C_x, C_y) は画像平面とカメラ光軸の交点となる主点座標である。

2. 外部パラメータ $[R | T]$ の推定

実際に撮影する高さ・角度にカメラを配置し、キャリブレーションパターンを撮影し、外部パラメータ（カメラの回転 R および並進 T ）を推定する。

$$[R|T] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 画像平面の二次元点から三次元座標の射影

ワールド座標系の三次元座標点 (X,Y,Z) および座標平面に投影された二次元点 (u,v) は、式(5)の関係となる。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

s は任意のスケールを示す。本研究では、画像平面に投影された点をワールド座標系の三次元座標に変換するため、式(5)の逆行列を求め、 (u,v) から (X,Y,Z) を推定する。

また、ワールド座標系におけるカメラの位置 T_c ・姿勢 R_c は式(6)、式(7)より求める。

$$R_c = R^T \quad (6)$$

$$T_c = -R^T T \quad (7)$$

ここで、右肩の T は転置行列を意味する。

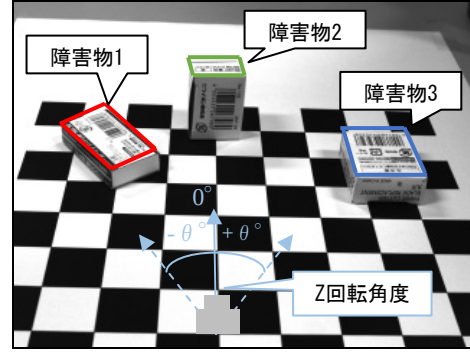


図5 実験で使した床面および3つの障害物



図6 実験の様子

3. 4 実験および考察

本手法の有効性を検証する実験を行った。

実験では障害物と床面の識別、また、障害物がある場合、その高さを求めることができるかを検証するため、屋内環境において、水平な机の上にマーカを置き、その上に寸法がわかっている3つの障害物を配置した(図5)。

カメラの位置・姿勢およびレンズ補正のためのキャリブレーションを実施後、カメラを雲台に固定し、三脚を床面と水平に進行方向で、かつ障害物に正対する方向に対して前後に手動で動かしながら動画像を撮影することで、床面と障害物の分割および障害物の高さが識別できるかについて実験を行った。実験の様子を図6に示す。

実験で使したカメラはセンサーテクノロジー社製 STC-TB202USB-AHでフレームレートは15fps、解像度は1628×1236である。レンズは12mmレンズを使用した。撮影対象となる3つの障害物の高さはそれぞれ11.5mm, 39.5mm, 16.5mmである。

今回、実験で撮影したフレームの中から、カメラを障害物に対して近づけたり遠ざけたりする動作を行った73フレームから148フレームの計76フレーム分のデータに対して床面と障害物の分割および障害物の高さについて検証を行った。

床面と障害物の分割実験の結果、画像中から障害物のみを検出することは可能であった。そこで、精度良く障害物や床面の高さを求めることができるかについて定量的な評価実験を行った。

図5に示すとおり、フレーム毎に画像中の障害物領域をあらかじめ求めておき、その領域内のそれぞれの画像点

におけるオプティカルフロー情報から個々の画像点での障害物の高さ h を求め、領域内の複数の高さ情報の中からメディアン値を取ることでその領域の障害物の高さとした。

1フレーム毎に計測した3つの障害物の高さ等の結果を図7に示す。横軸はフレーム番号、左縦軸は床面からの高さ(mm)、右縦軸はZ回転角度(度)を示す。Z回転角度は図5に示すとおり、床面に対して鉛直方向をZ軸とした時のカメラの回転角度を示す。カメラを床面に対して水平方向に回転することでZ方向の回転角度が検出される。Z方向の回転角度は R_c より求める。

図7(a)に床面領域(真値は0mm)の実測値を、図7(b)～(d)に障害物1, 2, 3のそれぞれの高さの真値および実測値を示す。また、図7(e)にカメラのフレーム毎の並進移動量を示す。

図7(a)～(d)のグラフにおいて、フレーム115～124付近で誤差は非常に大きい、それ以外のフレームにおいて、障害物の高さも床面も比較的真値に近い値となっている。また、カメラを回転させた(Z方向の回転角度が大きい)場合、回転角度が大きいと障害物の高さの誤差は大きい傾向となった。

図7(e)のグラフに示すとおり、フレーム115～124フレーム付近ではカメラを障害物に対して近づけてから遠ざける動作をしている瞬間のため、カメラの並進移動量はほとんど0であった。したがって、このフレーム間ではオプティカルフローの三次元長は短くなるため、障害物の高さの誤差も大きくなったと推測される。その結果が図7(a)～(d)のグラフに示される大きなピークで現れている。

1フレーム当たりのカメラの移動量が0～約2.5mmと非常に微細であったため、オプティカルフローの三次元長の長さも短く、そのため、障害物の高さも真値との誤差が2mm前後となった。

そこで、オプティカルフローの三次元長を長くするために、連続する前後フレームでの障害物検出を行うのではなく、6フレーム間隔のフレームを用いて障害物検出を行った。図8にその結果を示す。横軸はフレーム番号、左縦軸は高さ(mm)、右縦軸はZ回転角度(度)を示す。

図8(a)に示すとおり、平面の真値との誤差は1mm前後であった。また、図8(b)～(d)に示すとおり、障害物1, 2, 3のそれぞれの高さの真値および実測値は、カメラの並進移動量が少ない115～127フレーム前後、およびカメラの回転角度が大きい133フレーム付近を除くと、障害物の高さはほぼ真値に近いことが確認できた。

実験の結果、カメラが停止寸前のように並進移動量が非常に少ない場合を除けば、床面と障害物の領域分割が可能であり、かつ、障害物の高さの識別も可能であることがわかる。

したがって、オプティカルフローを用いて床面と障害物の領域分割および障害物の高さ検出を行う本手法は有効であることが示唆された。

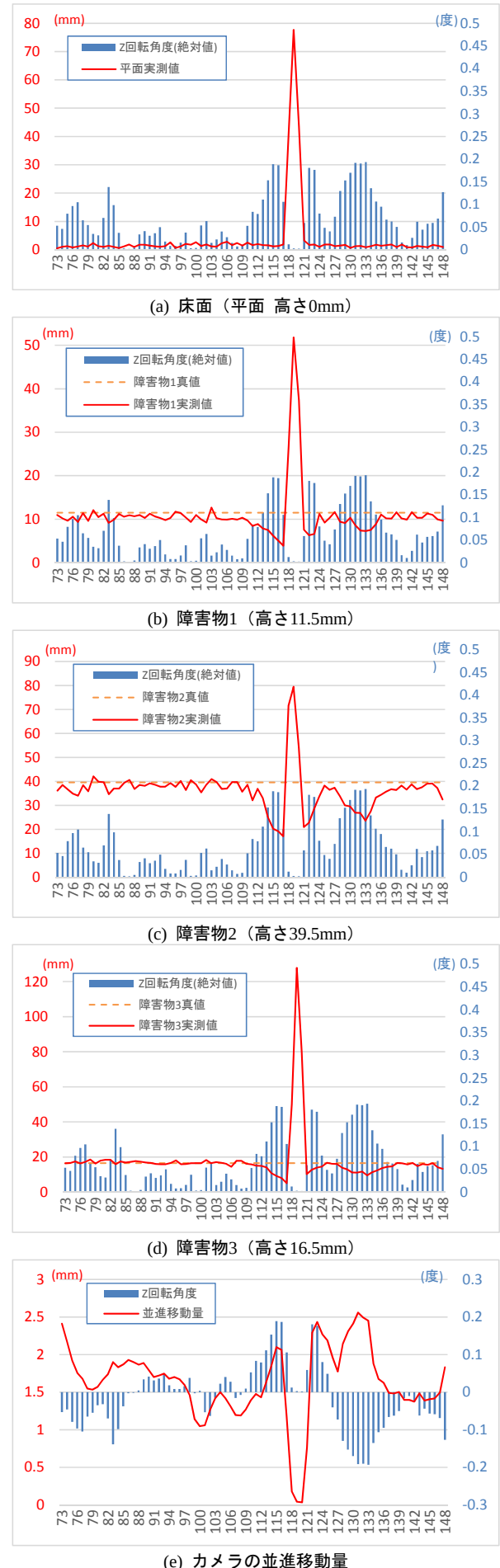
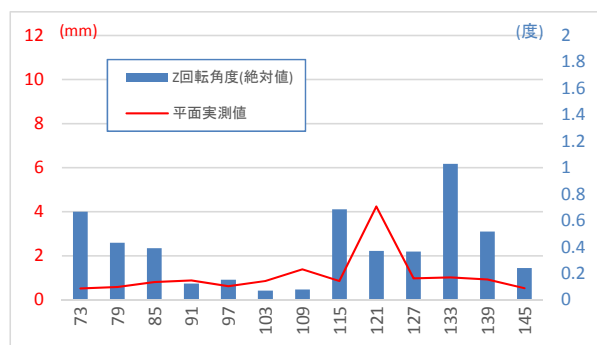
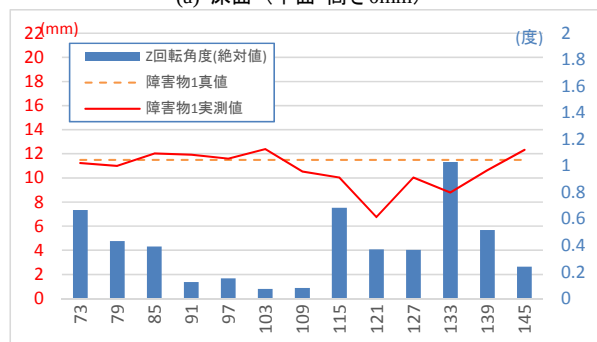


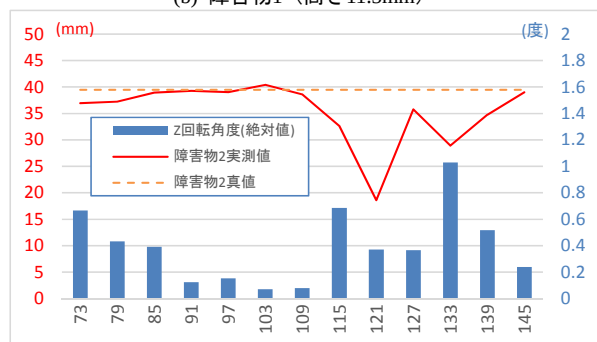
図7 フレーム毎の障害物の真値および実測値の結果
(1フレーム差分)



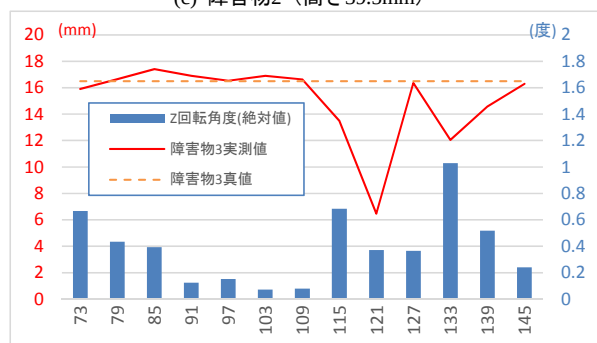
(a) 床面 (平面 高さ0mm)



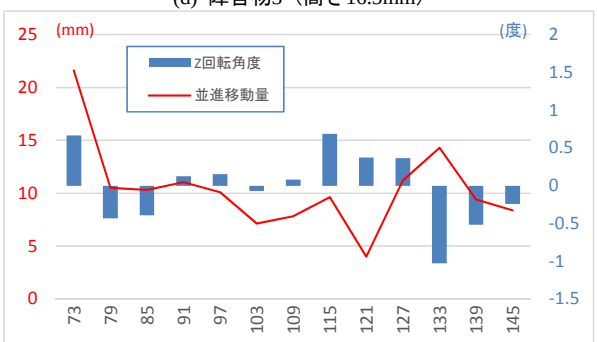
(b) 障害物1 (高さ11.5mm)



(c) 障害物2 (高さ39.5mm)



(d) 障害物3 (高さ16.5mm)



(e) カメラの並進移動量

図8 フレーム毎の障害物の真値および実測値の結果
(6フレーム差分)

3.1節で記述したとおり，電動ビークルの安全装置としては3m程度離れた距離で段差等を識別できるカメラセンサが求められる．本実験は机上実験であり，カメラの床面に対する高さは239mm，撮影距離は543mmであるが，これを実際の電動ビークルに置き換えた場合，カメラの床面に対する高さが1.3mで撮影距離は3mとなる．このとき，3m離れた距離の10cm程度の段差は今回の実験では18mm程度の段差と同等の高さとなる．本実験で11.5mmの障害物の識別および高さを求めることができたことから，画像の空間解像度等が同等程度のカメラ環境および周辺環境であれば電動ビークルの安全装置として障害物の検出・高さ情報を得ることは可能であることがわかった．また，実験ではデスクトップパソコン上で画像を読み込み，障害物検知および高さ情報の取得を実施したが，処理速度は30フレーム／秒であり，ほぼリアルタイムで処理することが可能であった．

4. まとめ

電動ビークル走行時に，障害物や段差等の危険個所を検出するカメラセンサの開発を行うため，本研究では単眼カメラによるオプティカルフローを用いて，床面と障害物領域を分割する手法の検討を行った．また，実験により本手法の有効性を示すことができた．

今後の課題として，実際に屋外環境下で撮影実験を行い，ノイズ等のある環境下で安定して人や段差等を検出できるかについて検討を行う．また，現在は市販のUSBカメラで取得した画像をオフラインによるパソコンの画像処理で障害物検出・高さ情報の取得を実施しているが，今後はFPGA等を用いてリアルタイム処理を行う予定である．

文 献

- [1] “警察庁ホームページ 電動車いすの安全利用に関するマニュアルについて”，
<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku12/tebiki.htm>.
- [2] 上野潤也，実吉敬二，“ステレオ法によるロバストな道路面の検出”，ロボティクスシンポジウム予稿集，Vol.14，pp.65-70，2009.
- [3] “富士重工業株式会社ホームページ アイサイト (ver.3)”，
<http://www.subaru.jp/levorg/levorg/safety/eyesight.html>.
- [4] “ぶつからないクルマ いざ普及へ”，「日経エレクトロニクス」2012年11月26日号，pp51-58，日経BP社.
- [5] Buauchemin,S.S. and Barron,J.L. ”The computation of optical flow”, ACM Computing Surveys, Vol.27, No.3, pp.433-467, 1995.

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発（第2報）

－ 超音波フェーズドアレイソナー －

田畑 克彦 平湯 秀和 久富 茂樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Wheelchair (2nd Report) - An Ultrasonic Phased-Array Sonar -

Katsuhiko TABATA Hidekazu HIRAYU Shigeki KUDOMI

あらまし 電動車いすは高齢者の生活を支えるツールとして広く利用されているが、加齢による認識力の低下による操作ミスの原因とする障害物、歩行者または車との接触などの事故が多発している。本研究では、事故の危険を検知するための安全装置のセンサとして、障害物の有無や接近を広域に検出するソナーを開発する。通常の障害物検知用のソナーよりも検知距離を拡大するため、フェーズドアレイ技術を用いて任意の方向へ強い超音波を送信し、検出対象である障害物からの反射信号の信号対雑音比を大きくする。本年度は、超音波ビームの強度と形状を変えて障害物からの反射波形を観測し、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。この設計指標に基づき、超音波導波管アレイを開発し、所望の超音波ビームが形成されていることを確認した。

キーワード 電動車いす、安全装置、障害物検出、超音波、フェーズドアレイ

1. はじめに

高齢者が活動的な生活を送る上で、有用なツールとして利用されている電動車いすであるが、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が後をたたない。我々は、電動車いすの運転中に、障害物の接近や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現するための安全装置を開発している。この安全装置は、将来的に共同研究先である県内企業の電動車いすへ搭載し、安全装置付きの電動車いすとしての普及を目指している^[1,2]。なお、開発する安全装置付きの電動車いすを電動ビークルと記述する。

本稿では安全装置のためのセンサとして、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）の研究開発について報告する。一般的な超音波ソナーは、送信素子と受信素子の組合せ、または1つの素子で送受信を兼ねた構成であり、送信素子から超音波を送信後、障害物からの反射を受信素子で検出することで、伝播領域内にある障害物の有無と距離を検出する。現在はFA用途や自動車の後方にある障害物を検出する製品が市販されており、その有用性は明らかである。

本電動ビークルでは、ショッピングモールや公共施設などの屋内走行も想定している^[1]。このため、超音波ソナーは、カメラなどの光センサでは検出困難なガラス製の自動扉やショーウィンドウなどの透明な障害物も検出でき、さらに屋外走行時も昼夜を問わず安定した検出が可能であるため、安全装置の一つとなりえる。本ビークルのような移動装置に搭載する超音波ソナーでは、障

害物の検出可能距離が長いほど好ましく、現状では3m程度に設定している。しかしながら、超音波は空気中での伝播減衰が大きいために、市販されている通常のソナーでは障害物を検出できる距離が1.5m程度と短い。また、電動ビークルが屋内を走行するシーンでは、比較的高い頻度で移動方向が大きく変化することが想定されるので、どの方向に障害物があるのかを広範囲に検出する必要がある。さらに、電動ビークルは自動車よりも小型なため、コンパクトにする必要がある。

これらの要求を解決するために、本研究ではフェーズドアレイ技術を用いた超音波フェーズドアレイソナーを開発する。フェーズドアレイ技術とは、複数の送受信素子の位相を制御することで、特定の方向に強い合成送受信波を形成できる技術である^[3]。これにより、高いSN比と方位方向の分解能を得ることができるので、上述の課題を解決できる見込みがある。なお、フェーズドアレイ技術は送受信時に適用されることが多いが、本研究ではシステムをできるだけ簡略化するため、送信時のみに本技術を適用し、強い信号送信から高いSN比の反射信号を得ることを課題解決のアプローチとする。本年度はこれまでに開発した超音波フェーズドアレイ測位システム^[3~6]のモジュールを用いて障害物検出実験を行った。この実験により、超音波ビーム強度と形状を変えて障害物からの反射信号を観測した結果、障害物を効率よく検出するための設計指標を得た。この設計指標を満たすために、超音波導波管アレイを開発し、所望の超音波ビームが得られていることを確認したので報告する。

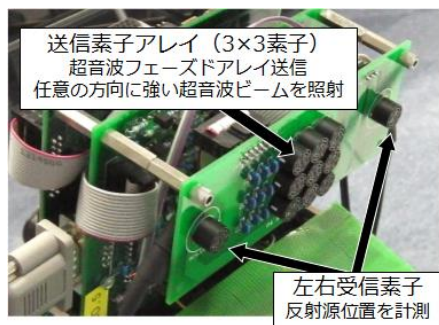


図1 超音波フェーズドアレイソナー実験機

表1 センサ素子と素子アレイの仕様

超音波センサ素子		素子アレイ部	
製造者	日本セラミック株式会社	素子寸法	Φ9.95×7.0mm
型番	AT40-10PB3	送信部	
中心周波数	40kHz±1.0kHz	素子数	9 (3行3列)
送信音圧レベル	116 dB* Min. at 40.0kHz**	素子間隔	10.2mm
受信感度	-66.5 dB**/** Min.	受信部	
指向性 (-6dB 全角)	±50°	素子数	2 (左右各1)
		素子間隔	101.6mm

*0dB = 10V/Pa, **入力電圧 = 10Vrms, ***実測値

2. 障害物検出実験

超音波フェーズドアレイ（以降、フェーズドアレイをPAと記す）ソナーの開発にあたり、効果的に障害物を検出するための傾向を障害物検出実験により把握し、そこから明らかとなる設計指標をもとに開発する。そこで、これまでに超音波PA測位システムで開発したソナーシステム^{[4]~[6]}を実験機として実験に用いて、障害物からの反射信号の傾向を把握した。

2.1 実験機の概要

図1は実験機の外観である。本実験機は、中央の送信素子アレイとその両側の受信素子から構成される。使用した送受信素子は日本セラミック株式会社の型式AT40-10PB3で、一般的な空中超音波素子である。表1は使用した素子と素子アレイ部の主な仕様である。

超音波PA送信を行う超音波素子アレイは、図1のように3行3列の送信素子で構成し、駆動する超音波素子数を1, 3, 9個に変更することによって、超音波信号の強度とビーム形状を変更することができる。表2は駆動素子数と信号強度ならびに3Dのビーム形状の関係である。また、ビームの照射方向は隣り合う素子間の駆動タイミングを制御することで変更できる^{[4][5]}。本実験では±60°以内の横方位方向の領域を検出するために、1回の障害物の検出につき、表3に示す7つのビーム形状による走査を行う。図2は表3におけるNumber0および2において実測により得られた横方位方向のビーム形状である。同図の駆動素子数Dは9であり、表3のメインビームとサイドビームが出現する横方位角の理論値とほぼ一致している。また、Number0の形状は、表2の数値シミュレーションによる3Dビーム形状を横方位の平面で切断した際の断面形状

表2 駆動素子数Dと超音波ビーム形状との関係

駆動素子数D	1	3	9	備考
駆動素子位置				○ 駆動する素子 ● 駆動しない素子
信号強度	弱(1.0倍)	中(2.8倍)	強(6.3倍)	() 内は開放素子1個に対する最大利得
ビーム形状	広い	縦長	狭い	
正面照射時の3Dビーム形状				縦方位 横方位 送信源 正面方向 信号強度 弱 強

表3 ビーム形状(D=3および9)

Number	メインビーム	サイドビーム
0	0°	-60°, 60°
1	10°	-40°
2	20°	-30°
3	30°	-20°
4	40°	-10°
5	50°	-5°, -68°
6	-50°	5°, 69°

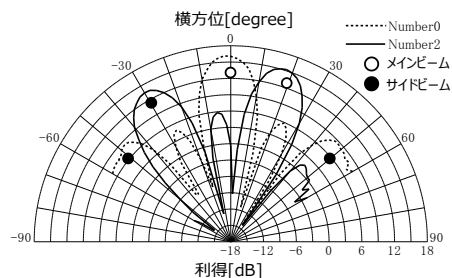


図2 Number0とNumber2の2Dビーム形状(D=9)

と類似している。ここで、サイドビームとは、メインビーム以外の方向に対しても素子間の位相が1周期ずれることによって、極大値を示すビームであり、波長よりもアレイ間隔が長い場合に発生する^[3]。気温20℃における周波数40kHzの超音波の波長は8.6mmであり、本実験機の素子間隔10.2mmが波長よりも長いことが起因して発生している。現状ではこのサイドビームがある状態で障害物検出を試みる。

障害物で反射した信号は、左右受信素子で受信した後、オペアンプで増幅され、包絡線検波などの信号処理が行われる。そして信号処理後の信号をデジタルオシロスコープで観測する。なお、送信する超音波信号は搬送周波数40kHzでパルス幅1.6msで振幅変調された単パルス信号を用いている。

2.2 障害物検出実験

図3(a)は実験機の設置図である。実験機は床面より高さ600mm、水平方向から35°下向きに設置した。下向きに設置した理由は、床面の段差を検出することを想定したためである。使用した障害物は、壁を想定した寸法1800×450mmの長机と、子供を想定したφ210×1200mmの円柱ポールを使用した。図3(b)および(c)はそれぞれの実験の

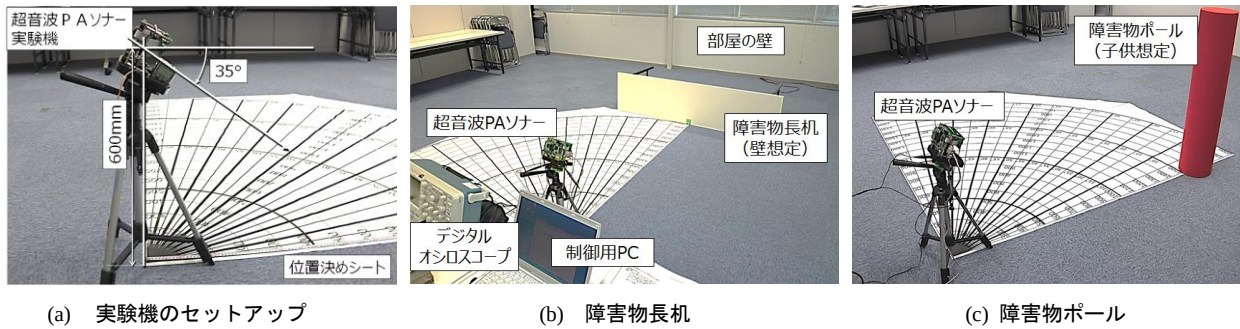


図3 障害物検出実験

ようすである。各障害物の位置は、共同研究者と協議した初期段階の目標条件である距離1500mm以内、方位角 $\pm 60^\circ$ 以内に存在する壁または子供を検出することを前提とし、距離を500mmから2000mmまで500mm刻み、方位を0deg, -30deg, -60degとした。

2. 3 実験結果

2. 3. 1 反射信号波形の観測と考察

図4は障害物の位置をソナーから1500mmの正面に設置した時に、表2における駆動素子数D=3で超音波ビームを照射した時の左右受信素子の受信信号である。デジタルオシロスコープを使用しているため、横軸は通常は経過時間となるが、計測時間内での短時間の音速は一定であることから、経過時間が障害物から反射される信号の往復時間と考え、以下の式によって距離 ℓ に変換できる。

$$\ell = c \cdot t_{osc} / 2 \quad (1)$$

ここで c は音速[m/s]、 t_{osc} は送信パルスの立ち上がりからの経過時間[s]である。本変換により、反射源までの距離の把握が容易となる。

図4の反射信号について考察する。最初に送信素子からの信号がそのまま回り込んで受信素子に到達する送信パルスが検出される。注目している障害物による反射信号は設置距離である1500mm付近に現れる。反射信号の形状は2つの極大値を示すが、最初の極大値が反射源からの直接反射成分であり、そのあとに続く極大値が床と障害物から構成されるコーナー部からの反射成分であると考えられる。図4(b)の障害物がボールである場合の直接反射成分が図4(a)の長机よりも強い理由は、表2のように超音波ビームが縦長であることに加え、ボールのような縦長形状であると反射面積が大きくなり反射効率が上がるためと考えられる。縦長形状の障害物は人や木などの自然物をはじめ、電柱や街灯などの人工物も環境に多く存在することから、縦長形状のビームが有効である。次の極大値は床と障害物のコーナー部による2回反射により、超音波信号の入射方向に反射成分が戻る再帰性反射に近い現象により発生していると考えている。この性質は光学機器においてコーナーキューブまたはレトロリフレクターなどに応用されている。この反射

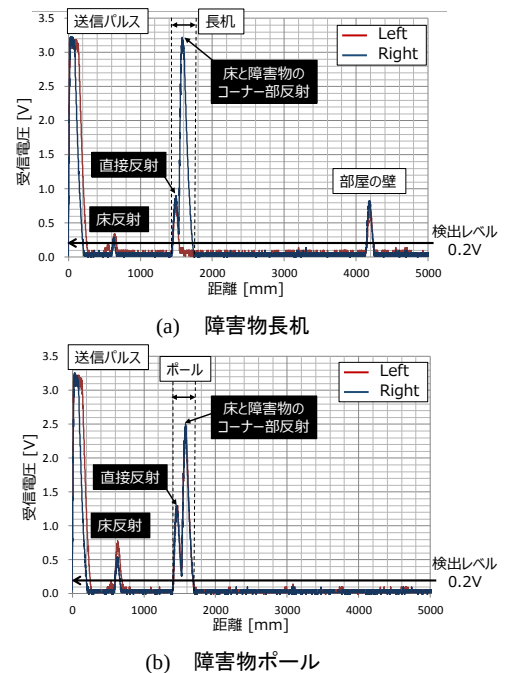


図4 観測波形(障害物位置1500mm正面)

成分が直接反射成分よりも安定してかつ強く、床面付近の近傍から遠方のどこかにある障害物のコーナー部からの反射成分を確実に捉えることから、縦長の形状のビームが有効である。

その他の反射源として、600mm程度の距離に検出されている。これは同図(a)(b)ともに観察され、障害物の位置を変えても出現している。この反射源はソナーの設置高さからも推測されるように、床面である。この事実は仮に600mm前方に障害物があったとしても同様の波形となるため、床(路)面からの反射と区別することは難しい。また、縦長形状のビームを使用することを考えると床面からの信号反射を抑えることは困難である。そこで、床反射成分は最初のパルス送信時間内に到達させることで、この問題を解消する。すなわち、ソナーの取付け高さをパルス幅内の床(路面)から300mm以内とし、300mm以上離れた距離にある障害物を検出することとする。

最後の反射源は図4(a)の長机の場合に検出され、4200mm程度の距離に存在する。この反射源は、図3(b)の実験部屋の壁である。したがって、建物の壁などの大きな構造物はかなり遠距離から検出可能である。図4(b)の

ようにポールのような縦長の障害物が部屋の壁の手前にあると、ポールに遮られて超音波が部屋の壁まで到達できないため、反射源として検出されていない。しかし、最も近い障害物が検出できれば良いので、これは問題にはならない。

2. 3. 2 障害物の検出結果

障害物を2.2項に述べた位置に配置し、表2のように駆動送信素子数Dを変更して、検出を判定した結果が表4である。判定方法は、障害物の各位置に対して表3に示した7つのビーム形状の超音波信号を送信(走査)し、図4の反射信号の観測データを取得し、0.2V以上の反射信号が得られた場合に障害物として検出しているとした。表中の”○”が左右受信素子ともに検出可,”△”がいずれかの一方向の受信素子が検出可,”×”が両素子とも検出不可である。

本結果より、駆動送信素子数 $D=9$ の信号強度であれば、壁およびボールともに当初の目標である距離1500mm、横方位 $\pm 60^\circ$ 以内の障害物を検知できることがわかった。なお、検出が最も厳しい1500mm、 -60° にある障害物を検出できたビーム形状は、表3のNumber0と6であり、この時の -60° 方向の最大信号強度は、実測値で開放素子の2.3倍程度であった。このため、今後の開発ではこの強度を目安にする。

2. 3. 3 方位角計測についての考察

前述の検出結果では反射信号の強度から存在の有無を判定したに過ぎない。実際には、超音波ビームは広がりを持つので、前述のように複数のビーム形状で反射信号が検出される場合がある。そこで、障害物の横方位角を計算するため、一般的に用いられる左右受信素子が受信する時間差 dt を計測して、方位角を求めた。図5のように受信素子 R と L が距離 r_{RL} だけ離れている場合において、十分遠方にある障害物からの反射波と仮定すると、図5のような平面波としてとらえることができる。この時の横方位角 θ は以下の式によって求めることができる。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta' = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{d\ell}{\ell_{RL}}\right) \quad (2)$$

ここで、 dl は受信素子LとRの行路差であり、両受信素子の受信時間差 dt とは以下の関係がある。

$$d\ell = c \cdot dt \quad (3)$$

図6は距離1500mm，横方位角-30°に設置したポール位置を，観測データをもとに(2)式の横方位角 θ と2.3.1項の距離から，プロットした結果の一例である．ポール位置は実際よりも右に存在し，正面に存在すべき部屋の壁は左よりに計測されている．他の観測データからも，かなり計測位置がばらついていった結果となった．これは，反射源の形状と素材により，左右受信素子に到達する反射信号の振幅が異なってしまい，(3)式の受信タイミング差のばらつきが位置計測のばらつきとなって現れているためである．このことは，表4において，一方の受信素子だけが検出されることから確認できる．よって，安

表4 障害物検出結果

駆動素子数D	距離[mm]	障害物 壁			障害物 ボール		
		横方位角 [degree]			横方位角 [degree]		
		0	-30	-60	0	-30	-60
9	500	○	○	○	○	○	○
	1000	○	○	○	○	○	○
	1500	○	○	○	○	○	○
	2000	○	○	△	○	○	△
3	500	○	○	○	○	○	○
	1000	○	○	○	○	○	○
	1500	○	○	○	○	○	×
	2000	○	○	×	○	○	×
1	500	○	○	○	○	○	○
	1000	△	○	△	○	○	×
	1500	△	○	×	○	×	×
	2000	×	×	×	○	×	×

○左右受信素子検出可、△片方受信素子検出可、×検出できず

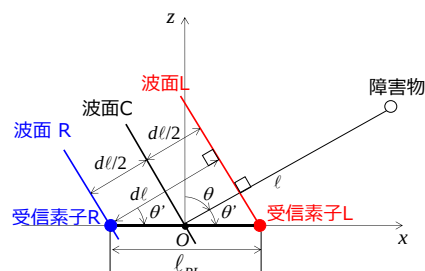


図5 横方位角の計算モデル

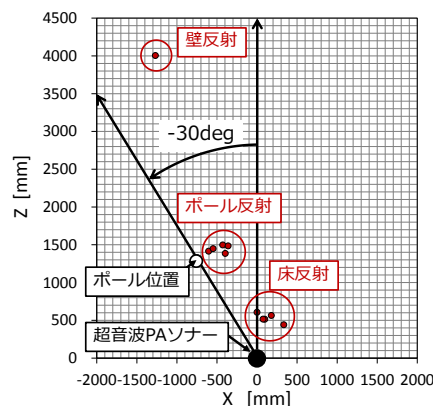
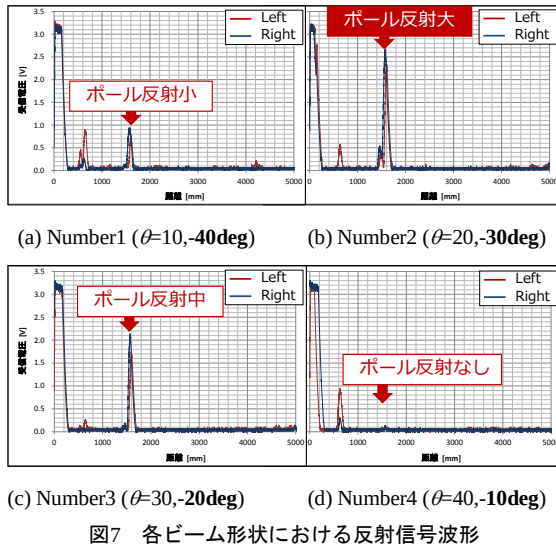


図6 反射源の位置計測結果(距離1500mm,横方位角-30°)

定した横方位角の計測のためには、他の手法を用いる必要がある。

図7は、図6と同じポール位置において、ビーム形状をNumber1からNumber4まで変更した場合の反射信号の観測波形である。同図のキャプションの括弧内の θ が表3中のメインビームまたはサイドビームの方向である。ポールが存在する -30° 方向に超音波ビームを照射しているNumber2において、ポールからの反射強度が最大となっていることが確認できる。よって、超音波ビームの照射方向と反射信号の強度から障害物の横方位角を判定する方法が、障害物の形状等によらず、より安定した計測ができると考える。しかしながら、例えばNumber2のビーム形状は図2からも確認できるように、 20° 方向にもビームが照射されており、実際にはポールが -30° 方向にあるのか、 20° 方向にあるのか判断できない。この判断のためには、サイドビームを抑制し、メインビームのみのビーム形状にする必要がある。



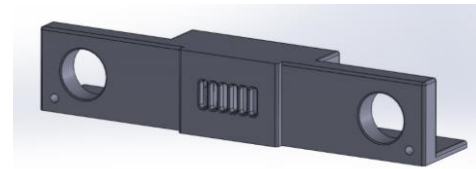
3. 超音波導波管アレイの開発

前章では、その結果からメインビームのみによるビーム形状とする必要について触れた。前述したようにサイドビームを抑制するためには、送信素子アレイの間隔を波長未満にする必要がある。しかし、素子寸法が約10mmであるために、波長の8.6mmを上回ってしまい、通常の方法ではサイドビームを抑制できない。そこで、導波管アレイにより、音源の間隔を波長以下にすることによって、サイドビームの抑制を図る。これまでも同様の目的で音響管チューブによる導波管アレイを適用し、良好な結果が得られた研究が報告^[7]されており、実現性は高い。また、導波管アレイを開発することにより、既存の素子が使用できるのでコストも低減でき、また導波管構造により防水機能を付加できる利点もある。

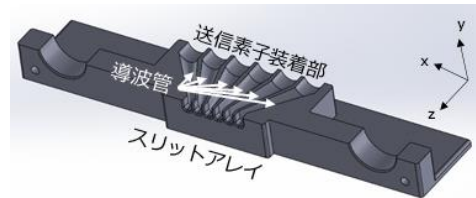
3. 1 設計と試作

本開発において、数値シミュレーターとしてMathworks社のMATLABおよびPhased Array System Tool Boxを使用して、図8に示す導波管アレイの設計を行った。これまでの研究開発により、送信開口の中心点に音源があると仮定した場合でも良好なビーム形状の予測結果が得られていることから、今回も導波管出口のスリット開口中央部に音源があるとして設計を行った。

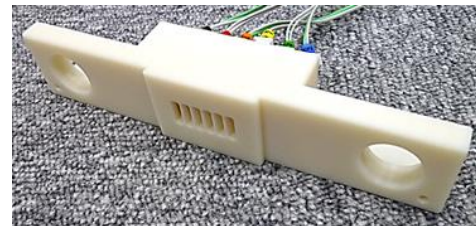
導波管アレイはABS樹脂を構造材とする三次元造形機(Stratasys社製 FORTUS 360mc-L)で作成した。造形可能な寸法となるよう、スリット間隔は波長の半分以下の4mmとした。また、送信素子は従来よりも小型のものを選定した。これは、大きな素子を使用すると音源の間隔が広い状態から急激に狭くなるので導波管が大きく屈曲し、この屈曲部で超音波が大きく減衰し、効率の低下を引き起こすことを防ぐためである。図8が最終的に試作した設計モデルと造形モデルである。また表5は設計した導波管アレイの基本仕様である。スリットを1列とした理由は、波長よりも素子アレイ長（開口長）が長い場合に



(a) 設計モデル（全体）



(b) 設計モデル（x-z 平面断面）



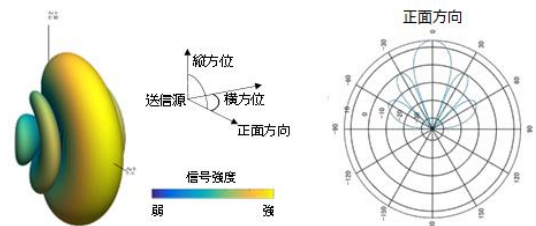
(c) 造形モデル

図8 導波管アレイ試作機

表5 導波管アレイ試作機の仕様

送信素子		導波管アレイ部	
製造者	日本セラミック株式会社	使用素子数	6
型番	T4008A1	スリット数	6
中心周波数	40kHz $\pm$ 1.0kHz	スリット間隔	4mm***
送信音圧レベル	117 dB* Min. at 40.0kHz**	スリット開口寸法	3(W) $\times$ 10(H)mm
素子寸法	Φ 7.95 $\times$ 6.0mm	アレイ部寸法	60(W) $\times$ 30(H) $\times$ 27(D)mm
指向性(-6dB 全角)	$\pm 50^\circ$		

*0dB = 10V/Pa, **入力電圧 = 10Vrms, *** Center to Center



(a) 3Dビーム形状

(b) 2Dビーム形状

図9 試作機の正面方向照射時のビーム形状
(数値シミュレーション)

はビーム幅が狭くなり、逆に短い場合には広くなる性質^[3]を利用し、縦長のビーム形状を形成させるためである。図9はこのモデルにおいて、正面に超音波ビームを送信制御した場合の数値シミュレーターによって得られたビーム形状である。表2におけるD=3の縦長ビーム形状と比較すると、同様の縦長ビーム形状が形成され、さらにサイドビームが抑制されていることがわかる。

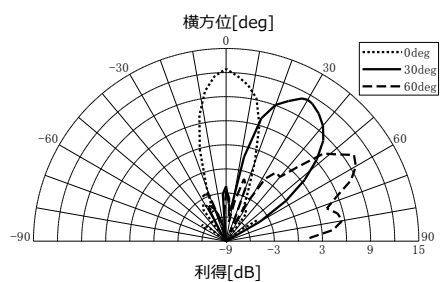
3. 2 導波管アレイのビーム形状

図8(c)の造形モデルに送信素子、ビーム制御用の組込

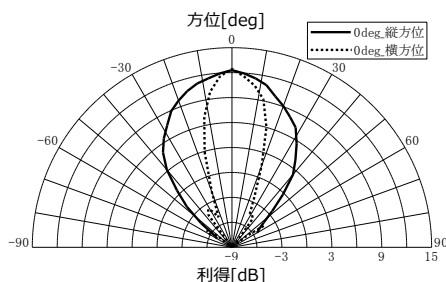
み基板およびドライバ基板を接続し、フェーズドアレイにより任意の方向に超音波合成ビームを生成し、ビーム形状を測定した。合成ビームの照射方向は各スリット出口における位相を制御することで変更できる。このため、スリット位置と送信素子からスリット出口までの行路長を考慮し、励振タイミングをFPGAで並列制御した。

図10(a)は、フェーズドアレイにより横方位角 0° 、 30° 、ならびに 60° に位相制御した場合の2Dビーム形状である。横軸はこれまでの利得と比較するため、図2で使用した開放素子の出力を基準とした利得としている。図9(b)の数値シミュレーション結果と同様にサイドビームが抑制されたビームが形成され、そのビーム幅は、半減全角で $\pm 15^{\circ}$ であった。なお、図9(b)のシミュレーション結果のサイドビームの強度が図10よりも大きい。この理由は、図9における利得は、アレイ素子の指向性が等方的であると仮定し、これを基準値として算出したdBiであり、基準対象が異なるためである。図10(a)のビーム制御角が 0° における最大利得は12.0dB(4.2倍)であり、図2のD=9時の16.1dB(6.3倍)よりも小さい。しかし、横方位角が 30° 以下の場合では、表4に示すようにD=3の最大2.8倍程度の利得でも2000mm先の障害物が検出可能であることから今回の目標値は達成している。さらに、 60° における最大利得は9.7dB(3.0倍)であり、2.3.2節において信号強度の目安とした2.3倍よりも大きく、広角での検出能力は向上している。

図10(b)は、横方位 0° にビーム制御した時の縦方位のビーム形状である。比較のため、その時の横方位のビーム形状も示している。縦方位方向のビーム幅は、半減全角で $\pm 30^{\circ}$ (60°)で、横方位の2倍に広がっており、所望の縦長ビームが形成されていることを確認した。



(a) 横方位 (0, 30, 60deg制御時)



(b) 縦方位と横方位の比較(0deg制御時)

図10 試作機の2Dビーム形状(実測)

以上により、障害物検出実験により設計指針を明らかにし、その指針に沿ったビーム形状が実現できた。

4. まとめ

本稿では、高齢者用電動ビークルの安全装置として、広域に障害物を検出でき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、初期目標である距離1500mm、横方位 $\pm 60^{\circ}$ 以内の障害物を検出しやすいソナーの検討を行い、設置高さ300mm以下の縦長ビーム形状が有効であること、方位方向の計測については左右受信素子の計測時間差よりも、ビーム照射方向とその時の反射強度から判定する方法が確実であることなどの設計指針を得ることができた。また、縦長ビーム形状と方位方向の計測指針を実現するために導波管アレイを開発し、サイドビームを抑制できることを確認した。

今後は、本導波管アレイによる障害物検出実験を行い、検出能力の検証と改良を行う予定である。

謝 辞

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

文 献

- [1] 平湯秀和, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第1報) —カメラセンサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.9-14, 2015.
- [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3報) —音センサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.21-24, 2015.
- [3] 吉田孝監修, “4.5 電子走査アンテナ”, 改訂 レーダ技術, 電子情報通信学会, pp.119-137, 1996.
- [4] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [5] 田畑克彦, 岩井俊昭, 久富茂樹, 遠藤善道, 西田佳史, “長遅延応答型超音波トランスポンダー”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1086-1091, 2013.
- [6] 田畑克彦, “空中超音波フェーズドアレイ測位システム=無人搬送車誘導用途としての開発=”, 超音波テクノ, 日本工業出版, Vol.26, No.6, pp.76-82, 2014.
- [7] 高橋亮介, 鄭聖熹, 高橋隆行, “超音波アレイセンサによる視覚障がい者のための障害物検出手法”, 計測自動制御学会東北支部 第226回研究集会, 資料版番号226/1, 2005.

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 —

久富 茂樹

平湯 秀和

田畑 克彦

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Wheelchair (3st Report)

- A Sound Sensor -

Shigeki KUDOMI

Hidekazu HIRAYU

Katsuhiko TABATA

あらまし 電動ビークルは、歩行の困難な高齢者が活動的な生活を送るための有用なツールの一つである。しかしながら、加齢による認識力の低下に起因した操作ミスによる障害物、歩行者または車との接触などの事故が多発している。そこで、本研究では、事故の危険を検知するための安全装置の一つとして、後方からの車の音を検出して運転者に注意喚起する音センサを開発する。本年度は、車の音の検出方法を検討し、低騒音下の屋外において、10m 後方の車のクラクション音の検出と、5m 後方の車の徐行音の検出が可能であった。また、マイクロホンアレイを用いた音源分離技術を適用することで、ノイズ低減効果があることを確認した。

キーワード 電動ビークル、安全装置、音、マイクロホンアレイ、遅延和法

1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動ビークルは広く利用されつつあるが、加齢による認識力低下による操作ミスが原因で、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が問題となっている。当所では本年度から、電動車ビークルを安全に運転するため、障害物の接近や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現する安全装置を開発している^[1,2]。

本稿では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。高齢になり聴覚が低下してくると、接近してくる車の音に気づかず、不用意な進路変更で車と接触事故を起こす危険がある。本研究では、特に問題となる後方からの車の接近を想定して、電動ビークル後方の車のクラクション音、エンジン音、ロードノイズなどをマイクロホンで検出し、運転者に注意喚起する装置を開発する。また、後方からの音を選択的に取得するために、マイクロホンアレイを使用した音源分離技術を適用してノイズ低減を図る。本年度は、車道と歩道が分離されていないような比較的狭い道路において、車が電動ビークルを追い越す状況を想定して、低騒音下の屋外で、(1) 10m 後方の車のクラクション音を検出する、(2) 5m 後方の車の徐行音を検出する、という目標を立て研究を実施した。

2. 車の音計測

2. 1 クラクション音

リニアPCMレコーダ（zoom製 H4n）を使用して、24bit 分解能、96kHzサンプリングの設定で、車のクラクション音を測定した。周囲の雑音が比較的少ない屋外で、車と測定器の距離は10mとした。また、予めクラクション音を測定し、録音レベルがオーバーしないように、レベル調整した状態で計測した。

図1にクラクション音の時系列波形の一例を示す。時系列波形から、瞬間的に大きな音圧が発生していることがわかる。環境音と比べても十分に音圧が大きく、低騒音の環境下では、音圧に適切な閾値を設定することでクラクション音の検出ができることを確認した。

2. 2 エンジン音

車のエンジン音を測定し、ウェーブレット変換による時間一周波数解析を行った。測定はクラクション音の測定と同様である。ただし、車と測定器の距離は5 mとした。図2にエンジン音の時系列波形とウェーブレット変換結果の一例を示す。測定開始後約4.5sの時点で

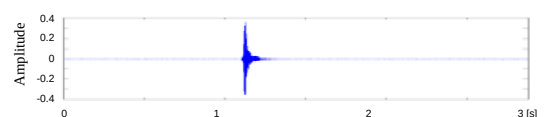


図1 クラクション音の時系列波形

エンジンを始動している。エンジン始動時は音圧も高く、高い周波数成分まで含んでいる。しかし、その後のアイドリング状態では、音圧はそれほど高くない。10sの時点から1秒間のデータを切り出して、アイドリング状態のパワースペクトルを求めた。図3にその結果を示す。この測定では、32Hz付近と97Hz付近の周波数成分が強く現れた。

2. 3 車の走行音

同様の方法で車の走行音を測定し、ウェーブレットによる解析を行った。測定場所は、1分間に4～5台程度の車が通行する交通量で、車の走行音の他に目立った騒音はなかった。ただし、測定日は風速7～8m/sの風の強い日であった。予備測定を行い、録音レベルがオーバーしないように、測定器のレベルを調整した。

図4に測定した走行音の解析結果を示す。車の図がある時間帯に車が走行したことを示している。時系列波形を見ると、車の走行とは関係なく振幅が大きくなっている。測定した音を聞くと、振幅が大きい時間帯には、強く吹く風の音が記録されていた。ウェーブレット変換結果から、全時間域において1 kHz以下の周波数成分が多く含まれていた。車の走行がなく風だけが吹いている時間帯では、1kHz以上の周波数成分は小さかったが、車が走行している時間帯では、1kHz以上の周波数成分も多く含まれることがわかった。風の強い日に車の走行音を測定した結果、車の走行音も1kHz以下の周波数成分のほうが多く含まれていた。しかし、風が強く吹くと、図4に示したように走行音の1kHz以下の周波数成分は風音に埋もれてしまい検出が困難であった。そのため、車の徐行音は1kHz以上の周波数域で評価し検出する必要があることがわかった。

2. 4 評価指標の検討

実際に電動ビークルに搭載する際には、逐次信号処理をしてクラクション音、徐行音を検出する必要がある。

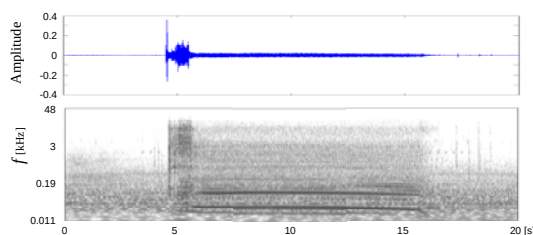


図2 エンジン音の時系列波形とウェーブレット変換

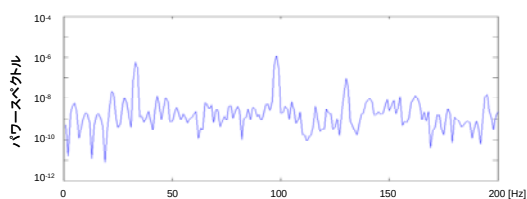


図3 アイドリング状態のパワースペクトル

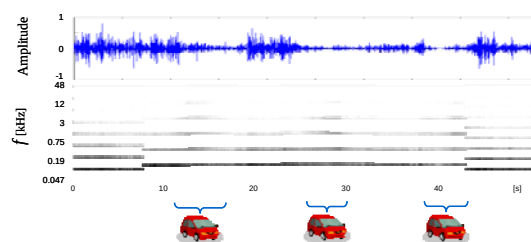


図4 走行音の時系列波形とウェーブレット変換

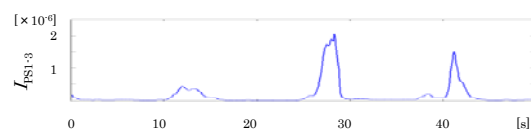


図5 評価指標値

る。特に検出が難しいと予想される車の徐行音について、2.3 節で測定したデータに対して、以下のような手順で処理を行い、評価指標値 (I_{ps1-3} と記述する) を求めた。

- (1) 9,600個 (0.1秒間) のデータの切り出し
- (2) 窓関数 (Hanning 窓)
- (3) パワースペクトルを求め、1～3kHzの合計を算出
- (4) 移動平均 (平均数: 5)

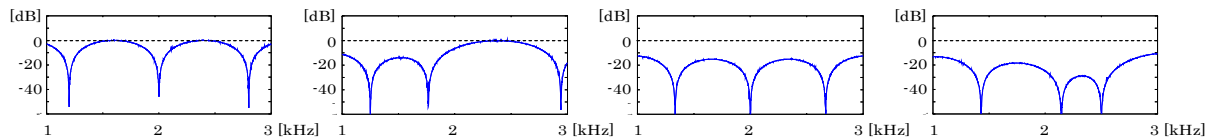
評価指標値の結果を図5に示す。車の種類や走行状態によって大きさは異なるが、車の通過時に評価指標の値が大きくなっており、車の走行音を検出できることがわかった。

3. マイクロホンアレイ

3. 1 マイクロホンアレイの設計

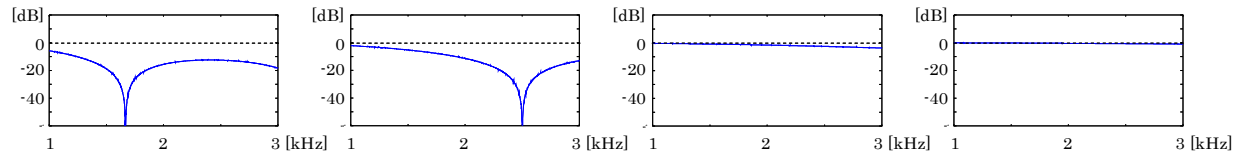
クラクション音は環境音に比べて音圧が十分に高く、その検出は比較的容易であるが、徐行音は音圧が小さく周囲の雑音によって検出が困難になることが予想される。複数のマイクロホン (マイクロホンアレイ) を使用し、所望の到来方向の音を選択的に取得する方法として音源分離技術がある^[3]。筆者らはこれまでに、この技術を利用して、切削加工時における加工音を選択的に取得し、工具摩耗評価を行う研究を行ってきた^[4]。今回は、前述の研究でも使用し、比較的計算負荷の少ない遅延和法 (DS法) を用いて、電動ビークル後方の音を選択的に取得して車の徐行音を検出することとする。そこで、今回の計測に適したマイクロホンアレイの設計を行うためにシミュレーションによる検討を行った。

はじめに、アレイ長 (両端のマイクロホンの距離) を0.6mに固定して、マイクロホン数を2, 4, 6, 8個と変えた。アレイの正面方向を0degとして、ホワイトノイズが 45deg方向から到来した時の各チャンネルの波形を計算し、DS法を適用した場合の信号についてパワ

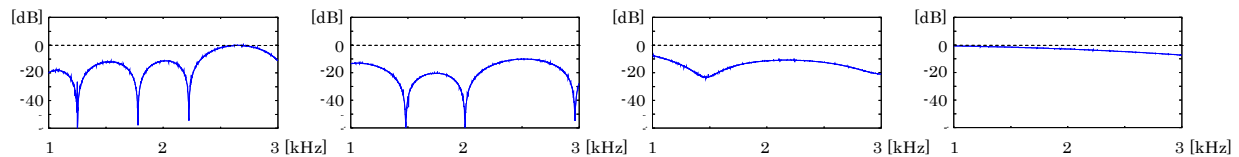


マイク数:2(マイク間隔:0.6 [m]) マイク数:4(マイク間隔:0.2 [m]) マイク数:6(マイク間隔:0.12 [m]) マイク数:8(マイク間隔:0.0857 [m])

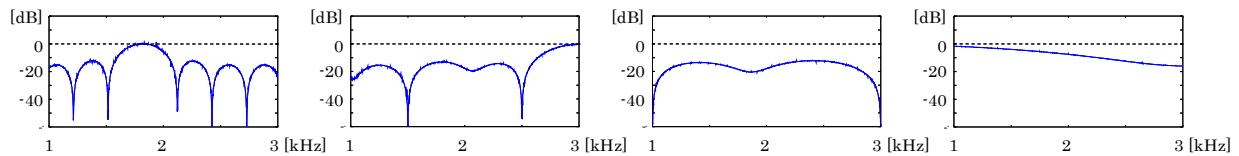
図6 DS法シミュレーション (マイク数の影響)



アレイ長:1 [m], 音源方向:10 [deg] アレイ長:0.6 [m], 音源方向:10 [deg] アレイ長:0.3 [m], 音源方向:10 [deg] アレイ長:0.1 [m], 音源方向:10 [deg]



アレイ長:1 [m], 音源方向:40 [deg] アレイ長:0.6 [m], 音源方向:40 [deg] アレイ長:0.3 [m], 音源方向:40 [deg] アレイ長:0.1 [m], 音源方向:40 [deg]



アレイ長:1 [m], 音源方向:70 [deg] アレイ長:0.6 [m], 音源方向:70 [deg] アレイ長:0.3 [m], 音源方向:70 [deg] アレイ長:0.1 [m], 音源方向:70 [deg]

図7 DS法シミュレーション (アレイ長と音源方向の影響)

ースペクトルを求めた。図6にシミュレーション結果を示す。横軸は周波数で、今回解析対象とする1～3kHzの範囲について表示した。縦軸はDS法を行った後の信号のパワースペクトルで、元の信号のパワースペクトルを基準にデシベルで表示した。マイクロホン数が2個および4個の時は、信号の減衰効果がほとんどない周波数帯が存在するのに対し、6個および8個の時は、1～3kHzのすべての周波数域において10dB以上信号が減衰した。コスト面でもできるだけマイクロホン数は少ない方がよいため、マイクロホン数は6個として設計することにした。

次に、マイクロホン数を6個に固定して、アレイ長、音源方向をパラメータとして変化させた。図7にシミュレーション結果を示す。音源方向が10degの時は、車の接近方向であり、できるだけ減衰しないことが好ましい。斜め方向(40deg)や横方向(70deg)からの音に関しては、ノイズと見なして、できるだけ減衰量を大きくするという方針で各結果を検証した。その結果、アレイ長が0.3mの時に、これらの条件を両方とも満足しているため、アレイ長は0.3mとした。なお、これは電動ビークルに実装可能なサイズである。

3. 2 マイクロホンアレイの試作

前節の設計に基づき、マイクロホンアレイを試作した。マイクロホンはエレクトレットコンデンサマイク

(DBProducts製 C9767BB422LF-P)を使用した。三次元造形機でカバーを製作し、6cm間隔で下向きに並べてアレイにした。試作したマイクロホンアレイとアンプを図8に示す。風によるレンジオーバーを防ぐために、マイクロホンの前面にスポンジのフードを取り付け、アンプ部には、Sallen-Key形3次ハイパスフィルタ(カットオフ周波数:1kHz)を実装して、解析に不必要な低周波数域をカットするようにした。なお、マイクロホンを下向きに取り付けると、前向きに比べて約3dB(at 2kHz)感度が低下したが、最終的に必要となる防雨構造を考慮してこのような構造にした。

4. 車の音検出

DS法による音源分離アルゴリズムと2章で検討した車のクラクション音、徐行音の検出アルゴリズムをコントローラ(National Instruments製 cRIO-9068)に組み込んだ。マイクロホンアレイの各信号はAD変換モジュールを介して、25.6kHzのサンプリング速度でコントローラに取り込み、2,560サンプリング(0.1s)ごとにデータ処理を行った。

4. 1 徐行音とクラクション音の検出

処理したデータに対して閾値を設定し、閾値以上になったとき、モニタ上に作成したLEDを2秒間点灯させ

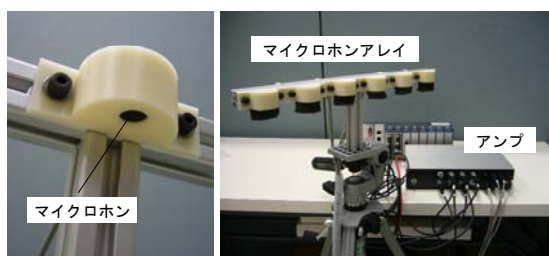


図8 試作したマイクロホンアレイとアンプ

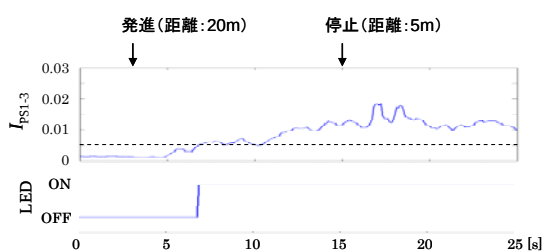


図9 徐行音の評価指標とLEDのON/OFF状態

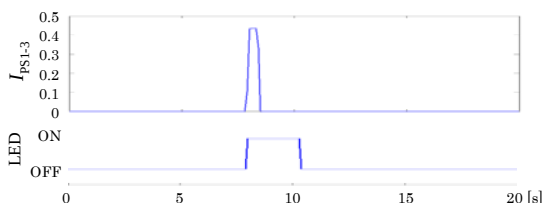


図10 クラクシヨンの評価指標とLEDのON/OFF状態



図11 横方向からのノイズの評価指標とLEDのON/OFF状態

るプログラムを作成した。マイクロホンアレイから20m離れた位置から、5mの位置まで徐行して接近した時の評価指標値とLEDのON-OFFの状態を図9に示す。車の接近を判定するための評価指標の閾値は0.005とした(図中の破線)。測定開始後、約3s後に車が発進すると徐々に評価値は高くなり設定した閾値を超えた時点でLEDが点灯した。15sの時点で5mまで接近したときに車を停止し、アイドリング状態を維持した。車の停止後に評価指標値が2度大きく上がっているが、これはセレクトレバー操作とパーキングブレーキ操作の音によるものである。別の車種での実験でも同様に5m以上離れた位置で徐行音を検出することができた。

マイクロホンアレイと車との距離を10mにして、車のクラクシヨンを鳴らした時の評価指標値とLEDのON-OFFの状態を図10に示す。判定に使用したプログ

ラム及びパラメータ値は、徐行音検出で使用したものと同一である。クラクシヨンを鳴らすとほぼ同時にLEDが点灯し、2秒間その状態を保っていた。同じプログラムで、車の徐行音とクラクシヨンの検出を行うことができた。

4. 2 マイクロホンアレイのノイズ低減効果

エンジンをかけて停車している車をノイズ源と見なし、マイクロホンアレイの真横から音が到来するようにして測定を行った。車とマイクロホンアレイの距離は5mとした。図11に結果を示す。評価指標値は閾値に達しておらずLEDは点灯しなかった。横方向からの音に関しては、マイクロホンアレイの設計どおり、DS法によって信号が減衰していることを確認した。

5. 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、低騒音下の屋外において、10m 後方の車のクラクシヨンの検出と、5m 後方の車の徐行音の検出を行うことができた。また、マイクロホンアレイを使用してDS法を適用することにより、横方向からのノイズ低減効果があることを確認した。

今後は、電動ビークルに組み込めるように装置の小型化を進めるとともに、電動ビークルから発生する音の影響を調べ、対策を考えていきたい。

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ました。

文 献

- [1] 平湯秀和, 田畑克彦, 久富茂樹 “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第1報) —カメラセンサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.9-14, 2015.
- [2] 田畑克彦, 平湯秀和, 久富茂樹 “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第2報) —超音波フェーズドアレイセンサー”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.15-20, 2015.
- [3] 浅野太, “音のアレイ信号処理 —音源の定位・追跡と分離—”, pp.69-102, コロナ社, 2011.
- [4] 久富茂樹, 坂東直行, “音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第14号, pp.33-36, 2013.

観光客の行動計測技術と行動モデルに基づいた 情報提供手法の研究開発(第4報)

渡辺 博己 曾賀野 健一 棚橋 英樹

Development of Technology for Measuring Tourist Behavior and Method for Providing Location-Based Tourist Information (4th report)

Hiroki WATANABE Kenichi SOGANO Hideki TANAHASHI

あらまし 観光を取り巻く環境が大きく変化の中で、観光地においては観光客のニーズを把握し、新たな観光サービスを提供する必要性が高まっている。一方、位置取得機能などを有するスマートフォンの普及に伴い、観光においても利用者の位置情報を用いたサービス（LBS：Location Based Services）が増加しており、観光需要の創出が期待されている。しかしながら、観光地の観光サービス提供者が、観光客の位置情報を把握していなければ、適切な場所やタイミングでサービスを提供できず、観光振興への寄与度などの効果を評価することも困難である。本研究では、観光客の位置情報等の観光行動に基づいた観光ニーズを取得するプラットフォームを構築しており、本報告では、高山市で取得した観光客の行動データを対象として、クラスター分析により回遊パターンを分類し、回遊行動の特徴を明らかにした。

キーワード 観光、行動計測、クラスター分析、回遊パターン分類

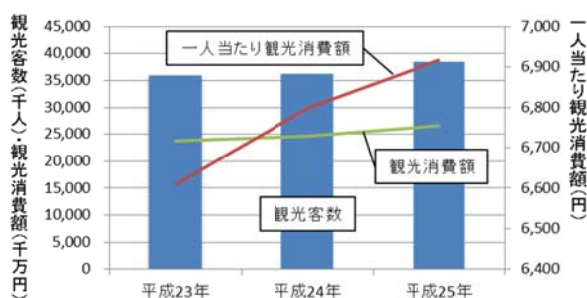
1. はじめに

旅行形態が「団体から個人・グループ」に変化し、観光ニーズが多様化している中、岐阜県では、高速道路網の充実等により、観光地へのアクセスが改善され、観光客数が増加している（図1）。しかし、その一方で、日程の短縮化（日帰り）、あるいは範囲の広域化（一度に多数の観光地への立寄り）が進み、「宿泊から日帰り・安近短への志向」へと観光を取り巻く環境が大きく変化している。そのため、人口減少、景気低迷などの要因により、今後大幅な観光客の増加が期待できない地域では、観光ニーズの把握が重要となっている。また、観光旅行の個

人化により、主要観光ルート上にないところでも観光客が訪れるようになり、エコツーリズムやグリーンツーリズム、産業観光など、これまででない旅行形態が注目を集めるようになり、観光業界だけでなく、様々な分野で観光客の購買や消費意欲の向上などに繋がるサービスの提供が必要とされている。

これまで観光ニーズを把握する方法としては、訪問施設に関する統計データの利用やアンケート調査、観光ルートや体験イベントに関するモニター調査などが行われてきた。しかし、近年、GPS や RFID などによる位置計測技術を利用した行動調査や研究^[1~3]が急激に増加している。また、これに関連して、利用者の位置情報を用いたサービス（LBS：Location Based Services）がスマートフォンの普及とともに提供され始めている。すなわち、現在地周辺の観光施設や店舗、宿泊施設情報等（以下、コンテンツ）の表示、これらの施設の経路案内などの web ベースのサービスに加え、スマートフォンに搭載されたカメラから得られる映像に仮想的な物体としてコンテンツを付加表示する拡張現実（AR：Augmented Reality）技術と融合した情報サービス、位置情報を利用したゲームや地域イベントなどが注目されており、観光需要の創出が期待されている。

こうした中、本研究では、観光関係者による観光ニーズの把握を支援するために、観光客の回遊情報やコンテ



※「岐阜県観光入込客統計調査」結果より作成。

※平成23年の調査より、観光庁が策定した「観光入込客統計に関する共通基準」を導入し、調査手法を変更。

図1 岐阜県における観光動態の推移

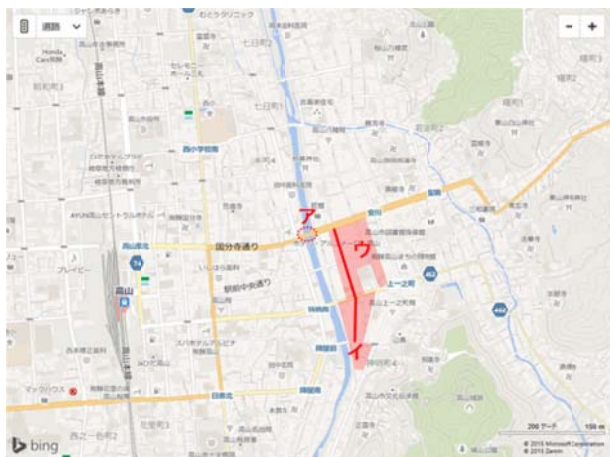


図2 分析対象とした地図範囲

ンツへのアクセス情報（以下、行動データ）を取得し、観光客の行動データを分析するためのプラットフォームを構築している。今年度は、本プラットフォームの普及を図るために、行動データの利活用について検討し、これまでに高山市で取得した行動データ^[4]を対象として、クラスター分析により回遊パターンを分類し、高山市における観光客の回遊行動の特徴を明らかにしたので報告する。

2. 行動データの概要

行動データは、高山市中心市街地を主対象区域として、一般の観光客を被験者として収集したものであり、観光情報の提供機能に加え、位置情報や操作情報等の計測機能を実装したアプリケーションを試作し、それをインストールしたスマートフォンを貸し出すことにより収集した。行動データの収集は、平成 24 年 10 月 11 日～平成 25 年 1 月 31 日、平成 25 年 7 月 13 日～平成 25 年 9 月 30 日、平成 25 年 10 月 7 日～平成 26 年 1 月 15 日の 3 回に分けて実施し、これらの期間に 236 名の被験者の協力により、1 人あたり約 2 時間の行動データを収集した。本報告では、これらの行動データのうち、図 2 の地図範囲内のみで回遊した 188 名の行動データを分析対象とし、回遊パターンの分類を試みた。なお、図 2 のアの円内は鍛冶橋、イの直線部分は上三之町通り、ウの赤色領域は

三町伝統的建造物群保存地区（以下、三町）を示す。

3. 回遊パターンの分類

行動データから回遊パターンを分類するために、本研究ではクラスター分析を用いた。クラスター分析は、与えられたデータに基づいて、類似性の高いものを集め、幾つかのグループ（クラスター）に分類する方法である。

3. 1 滞在領域に基づいたクラスター分析

分析用データの生成にあたり、まず、図 2 の範囲を、昨年度の研究報告^[4]と同様に、1 辺の長さが約 100m となる矩形領域で分割した。その結果、図 2 は東西方向に 20、南北方向に 15 の領域に分割され、300 の矩形領域が生成された。

次に、各領域における滞在の有無を移動履歴から求めた。滞在の有無については、各領域内に 10 分以上連続して存在する場合に滞在有りとし、それ以外を滞在無しとして、次式の被験者 n に対する滞在領域ベクトルを求めた。なお、領域内の滞在の有無を判定する時間については、領域の大きさ、歩行速度、信号等での待ち時間等を考慮して、決定した。

$$R_n = (r_{n1}, r_{n2}, r_{n3}, \dots, r_{n299}, r_{n300}) \dots\dots\dots (1)$$

$$r_{nk} = \begin{cases} 1, & (\text{滞在有り}) \\ 0, & (\text{滞在無し}) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

図 3 に式 1 の滞在領域ベクトルを用いたクラスター分析により得られた樹形図を示す。クラスター分析は、オープンソースの統計解析システムである R^[5]を使用した。

回遊パターンは、樹形図より 2 つのクラスターに大きく分類される。左側をクラスター A、右側をクラスター B とすると、各クラスに属する被験者数は A、B の順に 87 名、101 名である。図 4 に各領域における滞在の有無の総和を求めた滞在頻度をクラスター毎に示す。図の作成にあたっては、マイクロソフト社の Bing Maps SDK を利用した分析プログラムを開発し、結果を描画した。なお、滞在頻度が高くなるに連れて、青、緑、黄、赤色の順に変化する。

クラスター A は、鍛冶橋付近を中心に滞在領域が広く分布しているのに対し、クラスター B は、上三之町通り

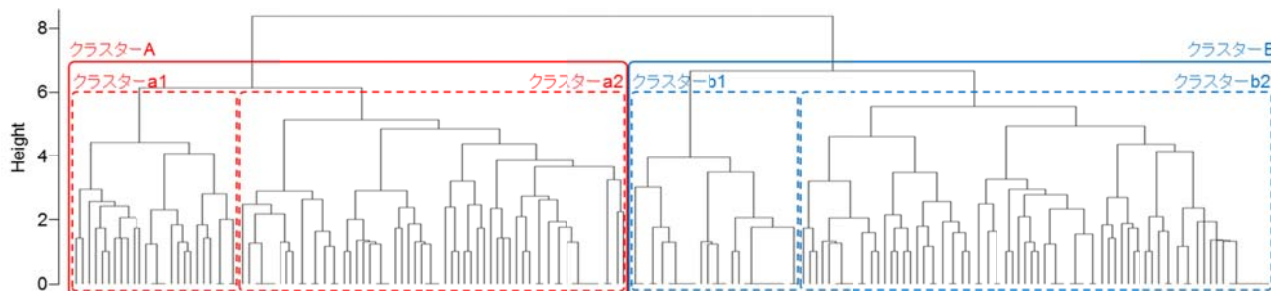
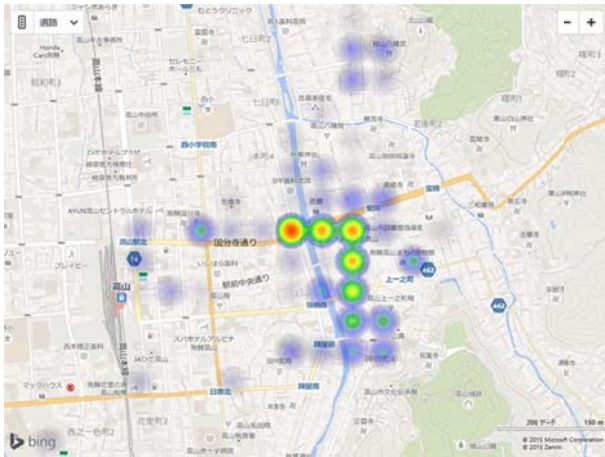
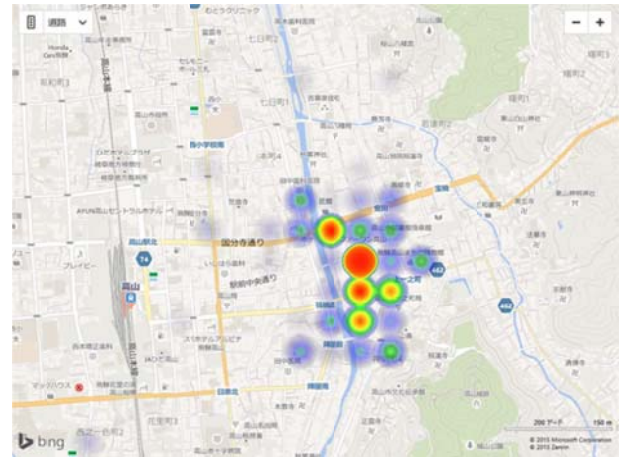


図3 滞在領域に基づいたクラスター分析結果

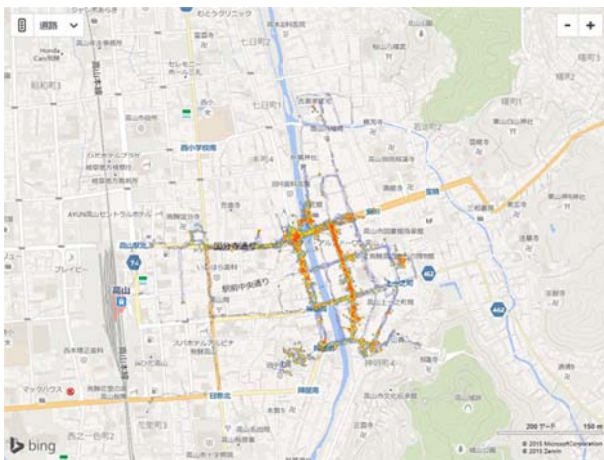


(a) クラスターA (被験者数: 87名)

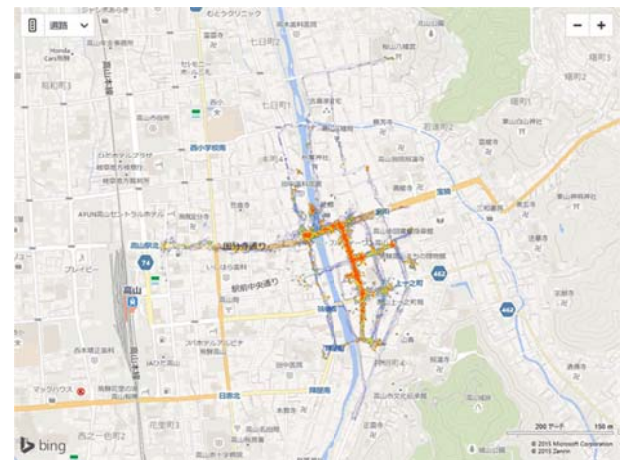


(b) クラスターB (被験者数: 101名)

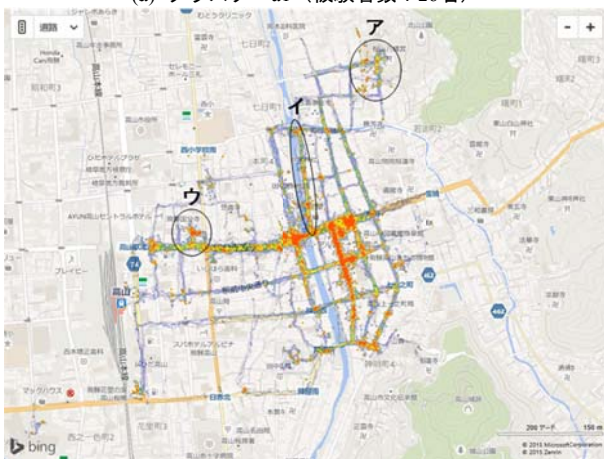
図4 各クラスターの領域毎の滞在頻度



(a) クラスターa1 (被験者数: 26名)

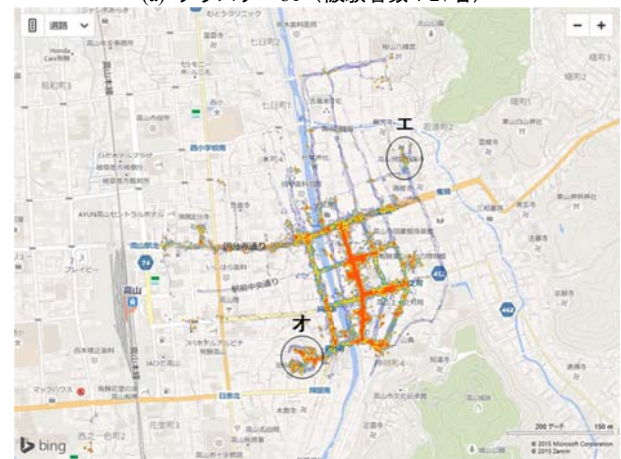


(a) クラスターb1 (被験者数: 27名)



(b) クラスターa2 (被験者数: 61名)

図5 クラスターAを細分化した場合の滞在分布



(b) クラスターb2 (被験者数: 74名)

図6 クラスターBを細分化した場合の滞在分布

を中心とした三町付近に滞在領域が集中しているという特徴を有している。

また、クラスターA内の左側のクラスターをクラスターa1、右側のクラスターをクラスターa2とし、各クラスターに属する被験者の1秒毎の位置情報をプロットした滞在分布を図5に示す。クラスターBについてもクラスターAと同様に、クラスターb1、b2と細分化し、それらのクラスターに対する滞在分布を図6に示す。各クラ

スターに属する被験者数は、a1、a2、b1、b2の順に26名、61名、27名、74名である。なお、滞在分布についても、分布数が多くなるに連れて、青、緑、黄、赤色の順に変化する。

クラスターa1では、鍛冶橋周辺に多くが分布しているが、クラスターa2では、鍛冶橋周辺に加え、桜山八幡宮(図5(b)ア)、宮川朝市(図5(b)イ)、飛騨国分寺(図5(b)ウ)などの観光スポットにも分布している。一方、クラ

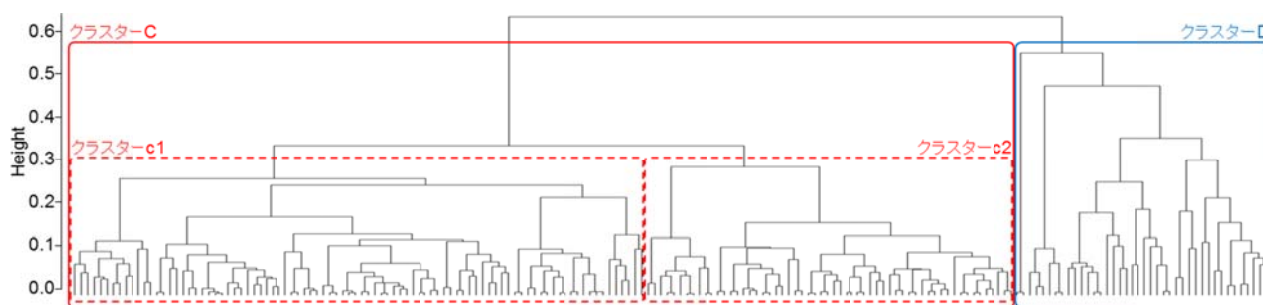
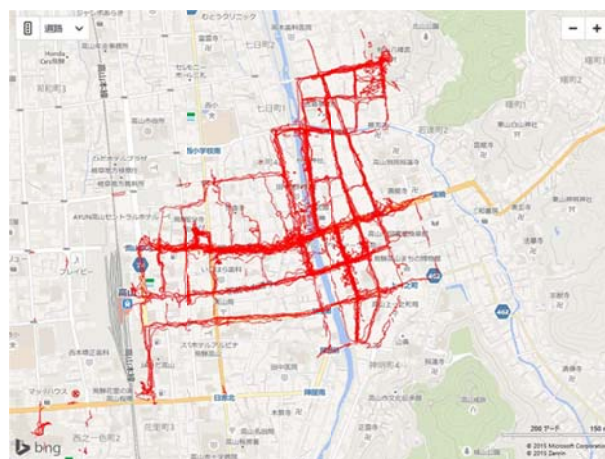


図7 移動経路に基づいたクラスター分析結果



(a) クラスター-C (被験者数 : 148名)



(b) クラスター-D (被験者数 : 40名)

図8 各クラスターの移動経路

スターb1 では、上三之町通りに分布が集中しており、被験者の回遊範囲が極端に狭いが、クラスターb2 では、高山別院(図 6(b)エ)や高山陣屋(図 6(b)オ)にも分布している。

3. 2 移動経路に基づいたクラスター分析

被験者の移動経路から、前節と同様に、クラスター分析により回遊パターン进行分类する。

移動経路は、被験者間で回遊に要する時間が異なることから、各被験者の回遊時間を正規化し、時間 T_i における位置 (x_i, y_i) から構成される次式の移動経路ベクトルを分析用データとした。

$$P_n = (x_{n1}, y_{n1}, x_{n2}, y_{n2}, \dots, x_{nt}, y_{nt}) \dots\dots\dots (3)$$

図 7 に式 3 の移動経路ベクトルを用いたクラスター分析により得られた樹形図を示す。

回遊パターンは、樹形図より 2 つのクラスターに大きく分類される。左側をクラスター-C、右側をクラスター-D とすると、各クラスに属する被験者数は C、D の順に 148 名、40 名である。図 8 に各クラスターに属する被験者の移動経路を示す。

前節と比較すると、クラスターを構成する人数に差はあるものの、移動経路で分類した場合も、クラスター-C に属する被験者は、三町を中心として、その周辺を移動しているのに対し、クラスター-D に属する被験者は、広範囲に移動している。

また、クラスター-C 内の左側のクラスターをクラスター-c1、右側のクラスターをクラスター-c2 と細分化し、

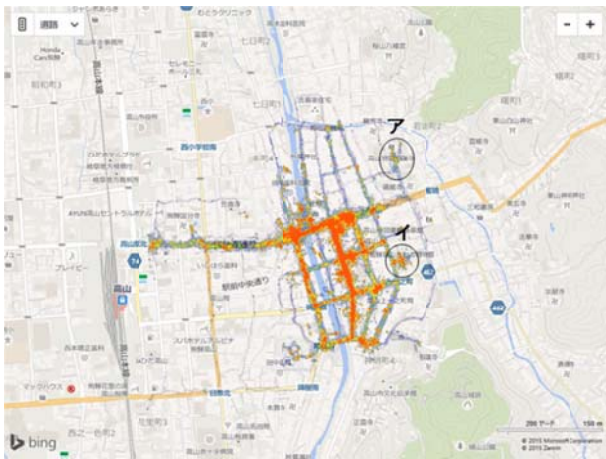
それぞれのクラスターについて、被験者の 1 秒毎の位置情報をプロットした滞在分布を図 9 に示す。各クラスターに属する被験者数は、c1、c2 の順に 90 名、58 名である。クラスター-D についても比較のため滞在分布を図 10 に示す。

クラスター-c1、c2 とともに上三之町通りに分布が集中し、飛騨高山まちの博物館(図 9(a)(b)イ)の訪問が目立っている。また、クラスター-c1 では、鍛冶橋周辺に加え、高山別院(図 9(a)ア)に分布しており、クラスター-c2 では、高山陣屋(図 9(b)ウ)に分布している。クラスター-D では、前節のクラスター-a2 と同様に、桜山八幡宮(図 10 エ)、宮川朝市(図 10 オ)、飛騨国分寺(図 10 カ)などの観光スポットに分布が見られる。

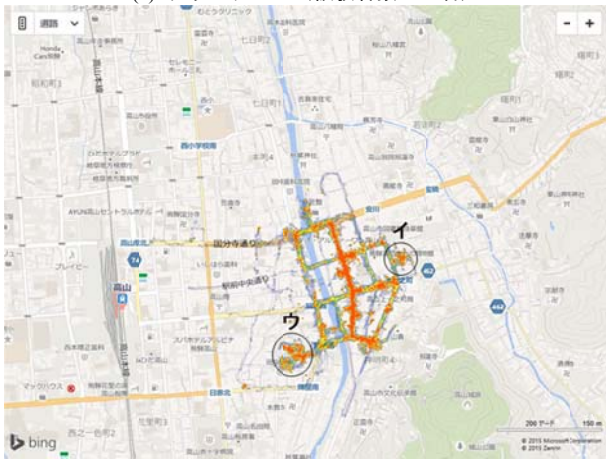
3. 3 高山市における回遊パターンの特徴

滞在領域に基づいたクラスター分析においては、鍛冶橋周辺を中心に広範囲に滞在領域が分布するクラスターと、上三之町通りを中心に三町周辺に滞在領域が分布するクラスターの 2 つのクラスターに分類され、さらには、回遊範囲(滞在領域数)の大小で細分化された。また、図には示していないが、より小さなクラスターに分類することで、各クラスターにおける滞在領域の組合せが異なっていた。これらのことから、領域間の関連性を把握できるため、ある施設を訪問した観光客に対して、関連性を踏まえた観光施設をおすすめの施設として紹介する等の情報提供が可能である。

移動経路に基づいたクラスター分析においても、三町



(a) クラスターc1 (被験者数 : 90名)



(b) クラスターc2 (被験者数 : 58名)

図9 クラスターCを細分化した場合の滞在分布

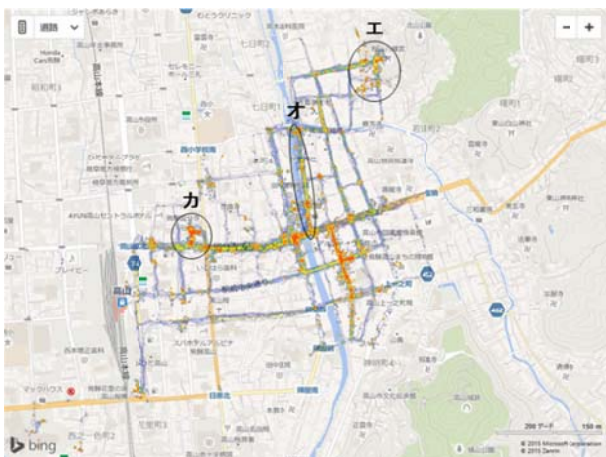


図10 クラスターDの滞在分布 (被験者数 : 40名)

以外に回遊はあるものの三町を中心に滞在するクラスターと、地図範囲内で広域に滞在するクラスターの2つのクラスターに分類され、さらには、上三之町通りを中心として、その北側に滞在分布がある被験者と、上三之町通りを中心として、その南側に滞在分布がある被験者とのクラスターに分類された。滞在領域に基づいたクラスター分析と比較して、滞在分布が重複するクラスターが少ないことから、移動経路に基づいたクラスター分析においては、地理的条件を踏まえたクラスターに分類さ

れていることが推測できる。

これらの分析により分類されたクラスターに基づいて、実験により得られた行動データを各クラスターにおける学習データとして利用すれば、判別分析等の分類手法により、新たに訪れた観光客の行動データがどのクラスターに属するかを分類することが可能である。さらに、分類されたクラスターにおける行動データに基づき、回遊中の観光客の行動を予測することで、予測結果を踏まえた情報提供が可能となる。

4. まとめ

高山市を訪れた観光客の行動データから、クラスター分析により回遊パターンを分類した。クラスター分析では、滞在領域に基づく方法と、移動経路に基づく方法により回遊パターンを分類した。その結果、高山市の観光は、上三之町通りを中心に、三町とその周辺を回遊する観光客と、上三之町通りに加え、三町から離れたエリアにある観光スポットを回遊する観光客の2つに大きく分類されることが明らかとなった。

今後は、これらの結果を観光関係者に開示し、観光戦略の立案を支援していくことを検討するとともに、県内市町村を対象に、本プラットフォームを利用した観光客の行動計測支援を実施し、観光振興に寄与することを目指す。また、本プラットフォームの普及を図るために、県内企業への技術移転を促進し、観光分野だけでなく、福祉分野等の他分野への応用も踏まえて、県内企業における事業化の支援についても検討する。

文 献

- [1] 長尾光悦, 川村秀憲, 山本雅人, 大内東, “GPS ログからの周遊型観光行動情報の抽出”, 電子情報通信学会技術研究報告 ICS78, pp.23-28, 2005.
- [2] 野村幸子, 岸本達也, “GPS・GISを用いた鎌倉市における観光客の歩行行動調査とアクティビティの分析”, 日本建築学会総合論文誌, Vol.121, No.1542, pp.70-77, 2006.
- [3] 矢部直人, 有馬貴之, 岡村祐, 角野貴信, “GPSを用いた観光行動調査の課題と分析手法の検討”, 観光科学研究, Vol.3, pp.17-30, 2010.
- [4] 渡辺博己, 曾賀野健一, 棚橋英樹, “観光客の行動計測技術と行動モデルに基づいた情報提供手法の研究開発 (第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.1-8, 2014.
- [5] R Development Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>.

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1報)

藤井 勝敏 遠藤 善道

Development of a Communication Aid for Intellectual Disabled Café Receptionists

Katsutoshi FUJII Yoshimichi ENDO

あらまし 特別支援学校で実施されている作業学習カリキュラムの内容のうち、喫茶サービスにおける接客業務をタブレットPC等の情報通信機器および専用アプリにより支援することで、学習対象者の拡大および学習意欲向上を促す効果について実証研究を行う。本年度は、レシートプリンタを導入することに伴うホール担当者の実働状況の情報収集技術の開発を行うとともに、より実営業店舗に近い環境での作業学習への対応(カスタマイズ)を実施した。

キーワード タブレットPC, 接客支援アプリ, コミュニケーション

1. はじめに

県内の特別支援学校のうち、岐阜本巣特別支援学校(岐阜市秋沢)では、軽度から中度の知的障害の生徒が校内で喫茶サービスを提供する作業学習「c a f é和」を実施している。業務としては、厨房で飲食物の準備をする係と、接客・注文業務や、配膳、下膳を行うホール係に分かれている。特に、接客・注文を担当する生徒については、接客用語を含む作業マニュアルを完全に理解し、明瞭な会話ができ、注文内容を正確に筆記できることが求められるため、喫茶サービス学習者の内でも特に障害が軽い生徒にしか担当できなかった。

当研究所では、同校の協力を得て平成24年度から喫茶サービスにおける接客業務の分析を踏まえ、タブレットPCとその専用アプリ開発技術によって、学習者を支援する技術開発に取り組んできた^[1]。その結果、昨年度は中度知的障害の生徒が画面上のガイダンスに沿って接客することで、教師の付添いなしで注文が取れるようになるなど、著しい学習効果が得られたとの関

係者から評価された。

本年度は、このアプリにレシートプリンタ印刷機能を拡張することで、従来、注文取りの後、教師が紙伝票に転記または確認してから厨房へ伝達していた作業を省略し、注文取りの後、担当者が自分で伝票を印刷し、厨房に伝えるまでを一貫して教師の支援なしに行うように改良した。

一方で、郡上特別支援学校(郡上市八幡町)においては、国道156号線沿線にある道の駅「古今伝授の里やまと」(郡上市大和町)内で、生徒が観光客等を相手に喫茶サービスを提供する作業学習「Good job喫茶」を行っている(図1)。この営業店舗において今年度から当研究所が開発したアプリおよびレシート印刷システムを試験導入し、業務内容および対象利用者である生徒から改善提案を出していただいた。

本報では、これらの作業学習で使用されている接客業務支援システムに関しての技術的な解説と、本年度の使用現場から寄せられた要望に対して行った改良事項について述べる。



図1 タブレットを使用した接客学習の様子

2. 接客学習支援システム

喫茶サービスにおける接客業務は、概ね以下の流れで行うようにマニュアル化されている。

- (1) 来店者グループの人数確認
- (2) 空席状況の確認とテーブルへの案内
- (3) おしぼり、水の提供
- (4) 注文の聞き取り



図2 喫茶サービス学習用印刷サービスシステム

S/N:1

テーブルナンバー (4)	
ドリンク200円	キッズ100円
コーヒー(ホット)	1 ココア(ホット)
コーヒー(アイス)	ココア(アイス)
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(ホット)	はちみつレモン(ホット)
はちみつレモン(アイス)	はちみつレモン(アイス)
紅茶(ホット)	1 かき氷いちご
紅茶(アイス)	かき氷メロン
ココア(ホット)	かき氷抹茶
ココア(アイス)	かき氷シロップ なし

ありがとうございました cafe和ーなごみー

「接客体験学習支援システム」 企画・開発／岐阜県情報技術研究所 2014年

図3 印刷出力例

- (5) 注文内容の確認
(6) 注文の厨房への伝達

当研究所が昨年度までに開発した業務支援アプリはAndroid端末(ASUS製Nexus7等)単体で動作し、(1)から(5)の手順を進行に合わせて画面上でガイダンスする内容であった。(6)については、従来の方法との整合をとるため紙伝票に書き写す方法としていたので、教師が注文伝票に転記ミスがないか確認する必要があった。

2. 1 レシート印刷機能

本年度は、市販のラベルプリンタ(ブラザー工業製RJ-4030)を導入し、喫茶店の中に図2に示すレシート印刷システムを構築した。接客サービスの学習者は、アプリを使って取ってきた注文内容を、手順の最終画面に現れる印刷ボタンを押すことでレシートに印刷できる(図3)。

なお、レシートプリンタへの印刷データはWindows PC用に開発した印刷サーバソフトでタブレットPCからの要求に応じてレイアウト出力しているため、Windows PC用に接続することができるレシートプリンタであれば種類は問わない。

2. 2 ヘルプボタン機能

本研究で使用しているアプリは、接客マニュアルに沿って適時所作を指示する内容であるが、実際の接客においては、通常メニューにない注文や問い合わせ(氷抜き指示やアレルギー物質の確認)など客側の要望によるイレギュラーな状況への対応が必要となる場合が少なからず発生する。こうした場合、接客見習い中の担当者自身で解決することは求めているが、できれば一言断って責任者を呼びに行くという機転が利くと良い。しかし、実際そのような状況が発生すると、どうしてよいかわからず、身動きが取れなくなるケースが見られる。

そこで、アプリ画面上に「こまった?」と表記したボタンを配置し、学習者がこのボタンを押したときは印刷サーバに無線通信が届き、警報音とともにタブレット端末に登録された該当者名(例では「なごみ」)をサーバ画面上に表示する仕組みを実装した(図4)。これ

しばらく
少々、おまちください。
礼をしてもどり、レシートに印刷します。



(a) 「こまった?」ボタン



(b) サーバ画面表示

図4 ヘルプ機能

[illegible]

図5 売り上げ集計表示

を察知した教師が現場に向かい、イレギュラーな事態に迅速に対応することができる。

2. 3 売り上げ集計機能

印刷サーバに要求された注文データには、注文案件ごとに、シリアル番号、メニューの注文数、テーブル番号、担当者名などの情報が含まれている。サーバ上では注文数を集計することで一日の売り上げを計算することができる。また印刷サーバの待機画面上に図5のように常時表示しているほか、同じ内容をレシートに印刷することもできる。

3. 使用状況と改善事項

前述のとおり，本研究で開発したアプリおよび印刷用システムは，特別支援学校の作業学習の時間および，道の駅の指定営業日に生徒に使用されている．いずれの現場においても，設計意図どおりの支援効果が得られており，生徒および教師らから好評を得ているが，それとともに現場での使用中に見つかった課題や改善要望が寄せられた．本節では今年度対応したいいくつかの事例を紹介する．

3. 1 レシートの切断不良

今回使用したレシートプリンタは、感熱ロール紙タイプのもので、印刷済み部分をつまんで刃に当てて引



図6 レシート切断の様子

さきぎる方式のものである。手首をひねりながら用紙をめくる要領をつかめば、さほど力を入れなくても切断できるが、現場ではうまくちぎれないことがあった。状況を観察したところ、切断時にプリンタが滑りやすく、手でプリンタを押さえつけないと、左手はタブレットを持っているために、右手だけでプリンタを押さえつつレシート切ろうとする無理な姿勢が見られた(図6)。そこで、レシートプリンタを家電転倒防止等に用いられるジェルパッドで机に固定する方法で対策し、改善が認められた。

なお、プリンタの上位機種にはオートカッターを搭載したものがあり、それに置き換えることも検討したが、生徒自身の反復練習によって克服できる見込みがある問題のため、最小限の支援で解決することが望ましいとの教育側の意向を汲み、今回は手切りのレシートプリンタを採用した。

3. 2 エキスパートモード設定

郡上特別支援学校のGood job喫茶では、タブレットPCのガイドランスが無くても接客できる生徒もいるが、売り上げ集計に反映させるため、全員がタブレットPCで注文を取る運用を試みている。その場合、支援アプリの機能のうち、注文の入力と印刷機能だけが必要で、接客の基礎的ガイドランス(図7)は不要であるとの学校、生徒側からの要望があり、アプリに「エキスパートモード」を追加し、人数とテーブル番号を単一画面で簡便に入力する機能を提供した(図8)。同校では、従前から紙伝票で接客を行ってきた生徒の手入力の置き換えとして活用されている。

また副次的な効果として、接客の経験が浅い学習者は初期段階には従来のモードを使うが、エキスパートモードに移ることが一つの到達目標として学習意欲の向上につながっているとの評価を得ている。



図7 標準モードでの入力画面遷移

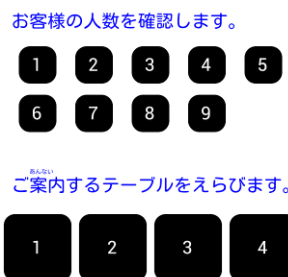


図8 エキスパートモード入力画面

4. まとめ

喫茶接客業務の作業学習を、タブレットPCとレシートプリンタおよび無線LANによって支援するシステムを開発し、岐阜本巣特別支援学校の「c a f é和」と郡上特別支援学校の「Good job喫茶」で使用したところ、期待された学習上の効果が見られ、生徒の学習意欲向上につながった等の高評価が得られた。

本研究では、既に普及期にあるタブレットPCなどの情報通信機器を、特別支援学校の接客業務学習用に求められるニーズに基づいて開発、改良を加えて実証実験を行ってきた。その結果、この支援方法は知的障がい者の作業学習において有効であると認められ、引き続き学習の現場で使用するだけでなく、興味を持つ他の学校や福祉就労施設への用途拡大を目指している。

一方で、この支援方法の普及には指導者、使用者との調整のもとで個別の案件に応じて要望されるきめ細かいカスタマイズが求められる。例えば、学校、事業者ごとに異なるメニュー項目の変更や、独自の接客マニュアルへの反映である。本研究事業の中では、こうしたカスタマイズ業務自体をNPO法人に所属する在宅就労者の業務として成立させ、永続的にサポートできる体制を整えることを考えており、そのために開発向けのアプリ保守技術講習会などの方法で技術移転を進める計画である。

謝 辞

本研究は、NPO法人バーチャルメディア工房ぎふ、岐阜県立情報科学芸術大学院大学、日本福祉大学、公益財団法人ソフトピアジャパン、県教育委員会特別支援教育課、岐阜本巣特別支援学校、郡上特別支援学校の相互協力の下で実施しています。関係者ならびに実証実験に参加いただいている生徒の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 藤井勝敏, 棚橋英樹, “タブレットPCを用いた福祉分野支援アプリの開発(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, pp.41-44, 2014.

防災情報システムの高度化に関する研究(第3報)

浅井 博次 棚橋 英樹

Study on a Disaster Reporting System

Hirotsugu ASAI Hideki TANAHASHI

あらまし 一般の方々の協力により情報を効率よく高精度に収集するため、スマートフォンなどの高機能携帯端末とGISの活用を推進している。本年度は、道路や橋りょうなどの社会基盤に関する危険情報収集、および、外来生物の生息情報収集について検討し、アプリを開発したので報告する。また、県が公開している防災関連情報の活用促進を目指し、雨量・河川水位情報へのイーजीアクセスを実現するアプリを開発したのであわせて報告する。

キーワード GIS, 外来生物リポートサイト, 道路メンテナンスサポーター, 雨量・河川水位情報

1. はじめに

災害時の被害を軽減するためには、どこで何が起きているか、どこに何があるか、といった情報をすばやく知ることが重要である。そのためには、できる限り正確かつ迅速に情報を収集すること【情報収集】と、それらの情報に容易にたどり着け、共有できること【情報活用】が必要となる。

しかしながら、防災情報の収集は自治体等公的機関だけで行うことが多く、情報収集が不十分であったり、情報が古いまま放置されるケースも少なくない。特に、災害発生時などの非常時に自治体等公的機関だけでは情報収集は容易ではない。また、防災情報は気象・河川水位・道路規制などの種類ごとに別々の場所に公開されているため、自分に関係のある防災情報の収集に関してさえも煩雑であることが多い。種類ごとに必要な情報を収集しなければならず、総合的な情報の把握や情報の共有も困難である。

本研究では、これらの課題に対応するための非常に強力なツールとしてスマートフォンなどの高機能携帯端末とGIS（地理情報システム）に着目し、携帯端末から県域統合型GIS^[1]を容易に活用できる機能の提供を進めている^[2,3]。

本稿では、昨年度までに開発した防災リポートch.の技術を活用し、情報収集の課題解決を目的に開発した、道路や橋りょうなどの社会基盤に関する危険情報を報告するアプリ、および、外来生物の生息情報を報告するアプリについて報告する。

また、情報活用の課題については、県下で最も発生頻度の高い水害をターゲットとし、雨量、及び、河川水位の情報へのイーजीアクセスを実現する雨量・河川水位

情報アプリを開発したので報告する。

2. GIS+スマートフォン

まず最初に、GISとスマートフォンに代表される高機能携帯端末が防災情報システムの高度化に対する強力なツールとなり得る理由について説明する。

防災情報の中で最も重要な項目の1つが「場所」に関する情報である。GISは地図上に情報を重ね合わせて表示できるため、場所を基準としたわかりやすい形での情報共有が可能である。GISを活用したシステムでは、今いる場所、自宅など、指定した場所付近の関連情報に容易にたどり着くことができる。一方、高機能携帯端末にはGPSなど高度なセンサやカメラが搭載されているため、正確な位置情報の取得、現場写真などの状況把握に有益な情報の取得が可能である。

高機能携帯端末からGISシステムへのアクセスを可能にすることで、いつでもどこでも利用可能で、簡単に情報の取得・共有が可能なシステムを構築することができる。また、地図を見ながら位置を指定することができるため、GPSの精度が悪い場所でも、位置精度の高い情報提供が期待できる。

情報収集の点からも、この2つのツールは非常に強力である。防災情報については、情報の収集、それも、精度良い情報の収集が重要であるが、先に述べたように自治体等公的機関だけでは十分対処しきれないケースが多い。しかし、この2つのツールを活用することで、一般の方々の協力により、広範かつ迅速な情報収集を実現できる。現在では、高機能携帯端末が広く普及している。また、コミュニティ運営へ市民が参加する動きが広がってきている^[4,5]。そのため、携帯端末からGIS上に情報を

登録できる機能を提供することで、大多数の市民の方々が情報提供者になり得る。

3. 社会基盤危険情報の収集

3. 1 社会基盤メンテナンスサポーター制度

岐阜県では、県民参加の無償のボランティア活動により地域の道路を地域で見守る制度として社会基盤メンテナンスサポーター制度^[7]（通称「MS」）（図1）を平成21年度から開始し、平成26年4月現在、893名が活動している。MSは危険箇所の早期発見や早期修繕が実施できるよう担当区域が決められ、簡単な点検の実施・報告や危険箇所や損傷状況などの情報提供を行う。担当区域を管理する土木事務所はMSからの情報提供をもとに道路損傷等に対応し、その結果を情報提供を行ったMSに報告する。

しかしながら、点検結果等の報告は紙ベースで行っているため、損傷箇所の住所や路線名などの別途確認を要する項目を記入する必要がある、報告の手間が問題となっていた。



図1 社会基盤メンテナンスサポーター制度概要

3. 2 MS用報告アプリ

上記の課題に対応するため、スマートフォンから統合型GIS上のマップに情報を報告するための専用アプリ（図2）を開発し、試験運用を開始した。本アプリにより、点検現地での即時報告が容易となり、大幅な作業負担軽減を図ることができる。また、プルダウンメニューからの選択で入力する形式の採用、GIS活用による損傷箇所の住所入力の廃止などの作業負担軽減対策を行っている。

県域統合型GISのマップへ登録される情報は次のとおりである。

- ・活動地区
- ・点検日時

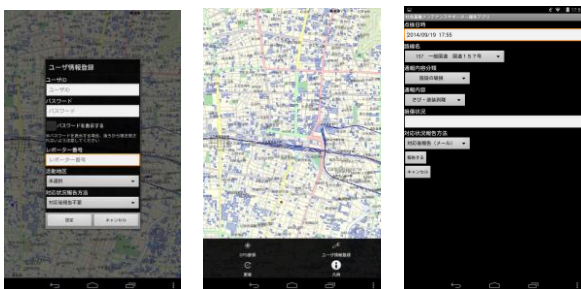


図2 MS用報告アプリ

- ・点検位置
- ・路線名
- ・通報内容分類
- ・通報内容
- ・損傷状況（自由記述）
- ・対応状況報告方法
- ・状況写真

アプリ化することにより、通報内容分類（大分類）、通報内容（中分類）で通報毎に分類情報が付加されるため、通報情報の把握・整理が容易となり、迅速な対応に繋げることが可能となる。

図4に情報が登録される統合型GISのマップイメージを示す。通報された情報は、通報された位置に、通報内容毎異なるマーカで表示される。マップ上のマーカを選択すると、詳細情報が左のパネルに表示される。また、データ検索機能により、マップに登録されている情報を表形式で一覧表示し、確認することが可能である。

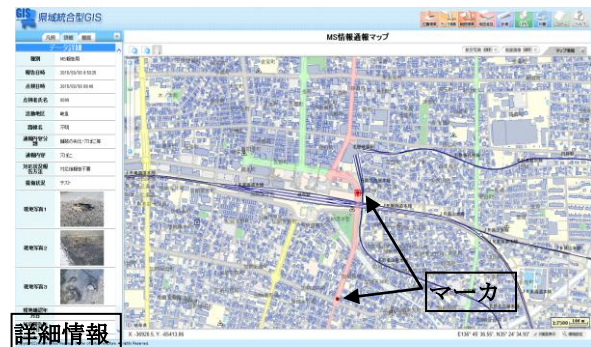


図4 統合型GIS上のマップイメージ

4. 外来生物生息情報等の収集

4. 1 特定外来生物生息分布調査

外来生物（海外起源の外来種）による生態系、人の生命・身体、農林水産業への被害の増加に対応するため、平成17年6月に「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律（外来生物法）」が施行され、問題を引き起こす海外起源の特定外来生物の指定、その飼養、栽培、保管、運搬、搬入といった取扱いに関する規制、及び、その防除などの実施について定められた。

同法への対応として、岐阜県では、これまで5年に一度、市町村、森林管理署、森林組合、農業協同組合などを対象にアンケート調査を行い、県内に定着している特定外来生物の生息分布状況の把握、効率的な防除対策のための基礎データの作成およびモニタリングの継続に努めてきた。また、調査結果を県統合型GIS上に整理・公開し、情報共有を図ってきた。

しかしながら、調査間隔が長く経時変化が把握できない、広い県土を限定された調査対象者だけでカバーしきれない、などの課題があった。

4. 2 外来生物リポートサイト用アプリ

上記の課題に対応するため、県民の方から特定外来生物の生息・捕獲等の情報を提供していただくための専用スマートフォンアプリ（図5）を開発し、情報提供に協力いただく「岐阜県外来生物リポーター」の募集を平成27年2月28日より開始した^[6]。本アプリにより、いつでも容易に情報提供が可能となったことで、提供情報の増加、提供される情報（確認場所・確認日など）の精度向上、画像情報による状況理解の改善等が期待される。また、従来困難であった経時変化等の把握が可能となることで、状況に応じた適切な対応を迅速に実行することが可能となる。

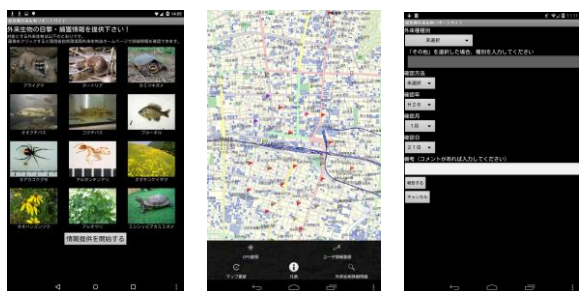


図5 外来生物リポートサイト用アプリ

本アプリにより、下記の情報が県域統合型GISのマップへ登録される。

- ・確認位置
- ・外来種の種別
- ・確認方法（目撃 or 捕獲）
- ・確認年月日
- ・補足コメント（自由記述）
- ・状況写真

プルダウンメニューからの選択で入力する形式を採用することで、入力の手間の軽減を図っている。また、専門知識の無い方でも適切な情報提供ができるよう、環境省自然環境局外来生物法のホームページに公開されている詳細情報ページへのリンク機能を実装している。

図6に情報が登録される統合型GISのマップイメージを示す。

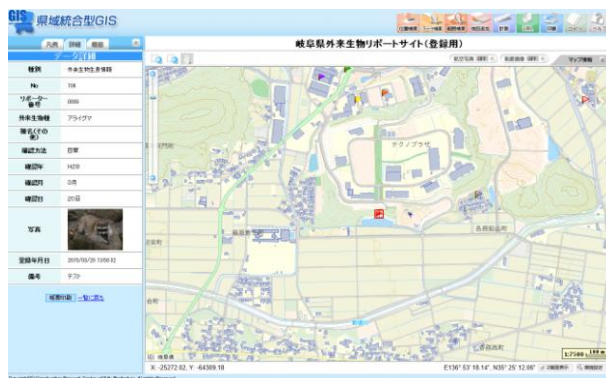


図6 統合型GIS上のマップイメージ

5. 雨量・河川水位情報アプリ

5. 1 災害・防災に関する公開情報

災害・防災に関する情報は多岐にわたり、いろんな場所に分散して公開されている。そのため、関連する情報へのアクセスを支援するため、災害・防災などの情報を取りまとめたポータルサイトの構築などが行われている。岐阜県でも総合防災ポータル^[8]を構築し、情報の周知・共有に努めている。これらのポータルサイトでは、種類毎に情報が独立してまとめられ、内部では階層構造を用いて整理されているケースが多い。そのため、特定の情報について調べたい場合には便利である。一方、自分に関係のある様々な災害・防災情報を広く収集・確認したい場合には、A川α地点の水位、B川β地点の水位、γ地区の雨量、などと1つずつ情報を収集する必要があり、非常に煩雑である。

個人が災害等に対処する場合には、自分に関係のある災害・防災情報（以下、MyDisasterInfoと呼ぶ）を広く収集し、自分を取りまく状況の全体像を迅速に把握することが重要である。これに対しては、主要携帯電話キャリアが緊急速報「エリアメール」や「緊急速報メール」などのサービスを提供している。これらは自治体等の発令情報などの周知を目的としたものであるため、『何かが起こった時』にのみ提供されるものである。本項では、『何かが起こりそうな時』『何かが起こっている最中』に発令情報以上の詳細な関連情報が収集可能となるよう、迅速なMyDisasterInfoの収集を支援する方法について、当県で頻度の高い水害に関連する情報を例にとり、検討した。

5. 2 横断的な情報収集方法について

岐阜県総合防災ポータルでは、水害に関連する情報として、岐阜県川の防災情報のページで、岐阜県下の雨量、河川水位、河川映像（ライブカメラ）の情報を公開している。これらの情報は種類毎にまとめられ、それぞれ独立したマップ上に観測地点がマーカーとしてマッピングされており（図7）、地図上のマーカーを選択することで選択した観測地点の詳細な情報にアクセスできる。

一見、イーザーアクセスが実現できているように見えるが、先述のとおり、MyDisasterInfoの収集には煩雑で手間のかかる作業が必要である。また、提示されているマップが縮尺固定であることも問題である。広域マップしか提示されていないため、詳細な観測地点の場所が分からず、MyDisasterInfoかどうかの判断が難しいのが実情である。

5. 3 雨量・河川水位情報アプリ

上記の課題に対応するため、スマートフォンアプリを開発した。アプリの機能は次のとおりである。

・すべての観測地点情報の一覧

google map上に雨量・水位・ライブカメラの観測地点を種類毎に異なるマーカで登録し、一目で確認可能とした（図8）。縮尺自在であるので、すべての種類

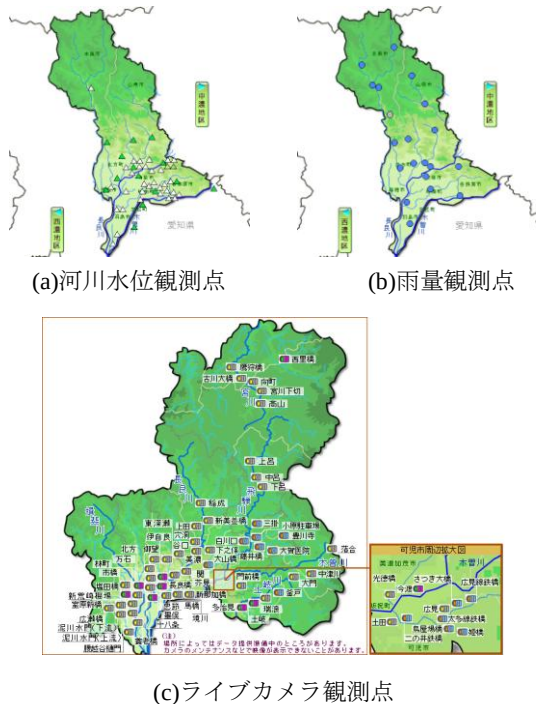


図7 【岐阜県川の防災情報】観測点情報一覧画面

の情報について、MyDisasterInfoに該当するのがどれなのかを容易に把握することができる。また、マーカーをタップすることで、各観測点の詳細情報を容易に確認することができる。

・MyDisasterInfoの一覧

確認したい観測地点をMyDisasterInfoとして登録することで、登録した地点の詳細情報を一覧で確認できる機能を実装した。地点の登録は、登録したい観測地点のマーカーをタップし、表示されるウィンドウ内の登録ボタンを押下することで行う。メニューボタン ⇒ 登録情報一覧 で登録した観測地点の詳細情報が一つの画面に一覧表示される。本機能により、迅速にMyDisasterInfoを確認することが可能となる。



図8 アプリイメージ

6. まとめ

災害情報システムの課題である情報収集と情報活用について、検討を進めた。情報収集については、蓄積した技術の横展開を図り、2つの新しい分野、社会基盤危険情報収集、及び、外来生物生息情報収集に適用した専用アプリをそれぞれ開発した。情報活用については、各人が必要とする情報を横断的に取得し、集約して閲覧できるアプリを開発し、公開されている災害・防災情報の有効活用を推進する方法を示した。

災害情報システムの効率的な運用には、有力な情報提供者である市民との協働と、利用目的に合わせた多様な情報提供方法が用意されることが極めて重要である。今後も、開発技術の横展開等、検討を進めていく。

文 献

- [1] 県域統合型GISぎふ, <http://www.gis.pref.gifu.jp/>
- [2] 藤井ら, “防災情報システムの高度化に関する研究 (第1報)”, 情報技術研究所研究報告第14号, pp.15-18, 2012.
- [3] 浅井ら, “防災情報システムの高度化に関する研究 (第2報)”, 情報技術研究所研究報告第15号, pp.30-31, 2013.
- [4] FixMyStreet Japan, <http://know.fixmystreet.jp/>
- [5] Code for Japan, <http://code4japan.org/>
- [6] 岐阜県外来生物リポーターの募集について, http://www.pref.gifu.lg.jp/kankyo/shizen/seibututayoi/gairai_report_site.html
- [7] 社会基盤メンテナンスサポーター, <http://www.pref.gifu.lg.jp/kendo/michi-kawa-sabo/doroiji/jumin-ono-kyodo/>
- [8] 岐阜県総合防災ポータル, <http://www.pref.gifu.lg.jp/bousai/>

運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術(第2報)

曾賀野 健一 青木 隆明* 李 鵬 渡辺 博己 棚橋 英樹

A Study on Inexpensive Body Sway Analysis for Rehabilitation Support of Locomotorium (2nd report)

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI* Peng LI Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし 身体の動揺を安価な計測器を用いて定量化し、リハビリテーションの経過観察等に資する情報としてPT（理学療法士）等に提供することを目的に、Wii Board（WB）を利用した床反力計測・解析システムの構築を進めている。これまでに、WBに配置された4箇所のフォースセンサ情報をBluetooth経由で取得し、足圧中心（Center of foot Pressure ; COP）の位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出する独自のプログラムを試作した。さらに、股関節機能に衰弱がみられる患者4名と非患者11名を被験者とした床反力情報取得実験を行い、特徴量の傾向を確認した。しかし、被験者数の問題から身体バランス評価手法の精度は高いとはいえなかった。そこで本報では、被験者数を確保し、股関節症患者群にみられる重要度の高い特徴量を導くための分析手法について報告する。さらに、リハビリテーションの経過観察等に応用可能な可視化手法について報告する。

キーワード 床反力, COP, 身体バランス, ロコモティブシンドローム, 股関節機能, リハビリテーション

1. はじめに

加齢や生活習慣（運動不足、肥満等）により筋肉や骨等の運動器機能が衰弱すると疼痛やよろめく等の症状、いわゆるロコモティブシンドローム^[1]を発症する。運動器の中でも特に股関節は骨盤と下肢をつなぐ要の荷重関節であり、立つ、歩く等の姿勢や動作を安定して行うために必要な筋肉や骨等で構成されているが、この関節機能が衰弱すると身体バランスを保持する機能が低下し、更衣や階段の昇り降り等の幅広い日常生活動作が制限される。股関節機能障害の発生率は人口の高齢化とともに増加傾向にあり、その回復措置として医学的リハビリテーションを必要とする患者数も急増している状況である。

股関節機能が日常生活に支障のない状態かを判定する基準には日本整形外科学会が定める股関節機能判定基準（JOA SCORE）があり^[2]、立位や歩行等の検査課題の遂行度を得点化し、その合計得点で股関節機能を評価する。臨床現場ではリハビリ経過観察や術前後等における股関節機能の定量的な計測と解析により評価の信頼性を確保することが求められており、重心動揺計や足圧計測装置等が使用されているが、これらの装置は高価であることや検査に手間がかかること等から臨床の場での日常的な使用は困難である。

前年度の研究開発では、安価に床反力情報を取得する

装置として任天堂社製のWii Board（以下、WBという）を採用し、床反力計測・解析システムを構築した^[3]。このシステムでは、WBに配置された4箇所のフォースセンサ情報をBluetooth経由で取得し、足圧中心（Center of foot Pressure ; COP）の位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出することが可能である。さらに、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機能に衰弱がみられる患者（以下、股関節症患者という）4名と非患者11名を被験者とした床反力情報取得実験を行い特徴量の傾向を確認した。しかし、被験者数の問題から身体バランス評価結果の精度は高いとはいえなかった。

本報では、被験者数を確保するとともに、取得した床反力情報からCOPの位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出し、統計的手法を用いて股関節症患者群において重要度が高いと考えられる特徴量を導き、股関節症患者群にみられる傾向を確認した。さらに、リハビリテーションの経過観察等への応用例として、重要度の高い特徴量に関して履歴観察やリハビリ前後の比較を行うための可視化手法について報告する。

2. 計測・解析

2. 1 床反力情報取得・解析方法

WBを利用した床反力情報取得・解析技術の構成を図1に示す。WBにはパソコンと通信する機能を有していない

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

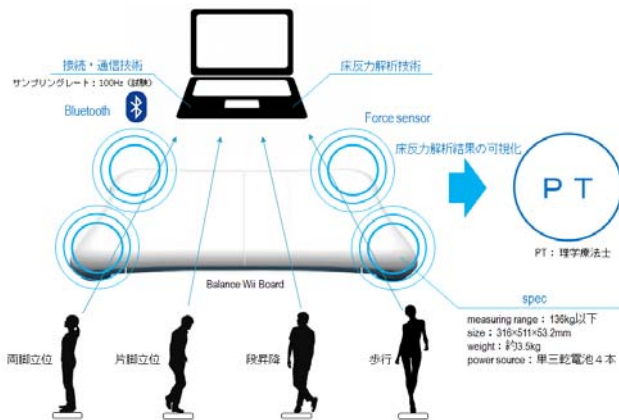


図1 WBを利用した床反力情報取得・解析技術の構成

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。プログラムの手順については後述の2. 3計測対象姿勢と動作の内容に基づいて構築した。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平面座標系における左右前後の荷重比率を計算することによりCOPの位置を求め、COP位置の時間変化等に基づいて諸種の特徴量を抽出する。なお、歩行等の動作では特徴量を抽出する際に、単脚支持期（片側の脚で全体重を支える時期）を抽出の対象区間とした。単脚支持期の抽出方法については、前年度の研究開発^[3]において検討した方法を用いた。

2. 2 WBの有用性

WBを用いて得られたCOPの位置精度を検証するため、医療現場等で重心動揺の計測に用いられているアニマ社製グラビコーダGP-5000との比較を行った。比較に用いた数値は身体における重心動揺を評価する指標として用いられるCOP総軌跡長とした^[4]。被験者は股関節機能に衰弱のみられない成人被験者10名とし、両脚立位と片脚立位の姿勢を10秒間保持したときのCOP総軌跡長を測定した。いずれの姿勢もWBとグラビコーダで抽出したCOP軌跡長に有意差はみられなかった（ $p \geq 0.05$ ）^[3]。このことはWBで抽出したCOPの位置情報が一般的な重心動揺計測で用いられるグラビコーダと同程度の数値であることを示唆している。

2. 3 計測対象姿勢と動作

股関節機能を評価する場合、対象者が日常生活の中で行う姿勢や移動動作の安定性を尺度としており^[4]、臨床現場では日本整形外科学会が定めるJOA SCOREの評価基準に沿って日常生活動作（立位、段昇降等）や歩行等の遂行度を判定する方法が最も普及している^[5]。

床反力の計測対象とする姿勢・動作の種類及びWBを用いた計測方法については、JOA SCOREに記載されている股関節機能評価基準及び岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部で行われている臨床検査に準拠する内容とし、以下のように定めた。

【姿勢】

・両脚立位姿勢

WBに両下肢を接し、両腕を体側につけ眼の高さで約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、両腕を体側につけ眼の高さで約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。（左右脚別に行う。）

【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。（左右脚別に行う。）

（例）右脚から昇段する場合

右昇段→左昇段→右降段→左降段

・歩行

3歩以上歩行後、WBに片脚で乗り前方へ移動する。（左右脚別に行う。）

WBの段差が平坦となる歩行路を整備した。

すべての姿勢・動作についてサンプリングレートを100Hzに設定し、計測時は開眼で靴を脱いだ状態でいき、靴下の着用は許可した。

2. 4 特徴量

歩行の床反力分析において、股関節機能等に衰弱がみられない場合の床反力パターン（垂直分力）は踵接床時とつま先離床時にピークを呈する二峰性の形状を示すことが知られているが、股関節症の片側罹患例では左右脚で等しい二峰性の床反力形状とならず、患側下肢の床反力（垂直分力）に二峰性の平坦化が観察されるという報告がある^[6]。また岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部では、股関節症患者の特徴的な跛行として患側下肢の単脚支持期に体幹が患側に側屈する現象がみられるという所見がある。

以上の臨床所見と先行研究の報告にみられる二峰性の平坦化及び側屈の影響は、床反力及びCOP位置の時間変化にあらわれると考えた。身体のパランス機能を評価するために検討した主な特徴量を表1に示す。

表1 主な特徴量の内容

特徴量	説明
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）
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）

※両脚／片脚立位姿勢は10秒間、段昇降と歩行は単脚支持期の床反力情報に基づいて算出

※側屈等はCOP位置の変化や荷重割合に作用すると想定

※二峰性の平坦化は床反力の変化に作用すると想定

3 実験

股関節症患者が2. 3の姿勢と動作を行った場合にCOP位置と床反力にあらわれる傾向を確認するため、股関節症患者と非患者を対象とした床反力情報取得実験を実施した。股関節症患者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、非患者は医療・福祉・介護関連の展示会、企業訪問、研修、見学等の場を活用して募集した。実験への参加に対するインフォームドコンセントについては、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後、書面をもって行った。特に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。床反力情報取得実験に用いた実験機材と実験風景を図1に示す。



図2 床反力情報取得実験に用いた機材と実験風景

非患者を対象とした床反力情報取得実験ではアンケート調査をあわせて実施し、下肢の疾患（現在の治療状況、既往歴の有無）や日常生活機能の支障に関するチェックを行い、すべての項目に該当がみられない場合は非患者に分類した。この結果、本稿で扱うサンプル数は股関節症患者13名、非患者147名の計160名となった。股関節症患者群（以下、患者群という）と非患者群のサンプルの構成を表2に示す。

表2 床反力情報取得実験で取得したサンプルの構成

	非患者群			患者群		
	全	男	女	全	男	女
被験者数（人）	147	102	45	13	6	7
平均値（歳）	39	41	35	48	29	64
標準偏差（歳）	14	13	15	22	9	16
最大値（歳）	84	81	84	83	39	83
最小値（歳）	19	20	19	15	15	42

4 実験結果と考察

4. 1 サンプルの傾向分析

3の実験で取得した各被験者の床反力情報からCOPの位置や床反力の時間変化等に関する特徴量を2. 3の姿

勢・動作別に抽出した。サンプルデータは、両脚立位姿勢では患者群に患者13名のデータ13件、非患者群に非患者147名のデータ147件を用い、片脚立位姿勢、段昇降、歩行では患者群に患者13名の患側のデータ13件、非患者群に非患者の左右脚をあわせたデータ294件を用いた。以上のデータを用いて個々のサンプル間の類似性を分析し、サンプルの分布傾向を確認するため、階層的クラスター分析を行った。階層的クラスター分析は、サンプルや変数の類似度（主に距離）に基づいてデンドログラム（樹形図）と呼ばれる階層構造を生成し、サンプルの分類を行う手法であり、分類されたサンプルの集団はクラスター（cluster）と呼ばれる。サンプルの類似度の指標に関しては、一般的に用いられるユークリッド距離による群平均法とした。分析では、統計解析ソフトJUSE-StatWorks/V4.0を用いた。

歩行のサンプルデータを用いて階層的クラスター分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図3に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②、③に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②、③の特徴をみるとTdZすなわち床反力の総変化量（体重比）が他のclusterと比較して小さい傾向を示している。これは、患側の単脚支持期初期において患側に荷重をかけることが困難であることから、非患側に働かせる推進力を低減し患側の荷重負担を軽減する影響と、患側の単脚支持期後期において患側に十分な推進力を働かせることができないことが考えられ、患側の床反力波形において二峰性の平坦化が観察される一因と推察される。また、cluster②、③に属する股関節症患者の症例には、伸筋群の衰弱が確認できることから患側の推進力の低下が床反力に作用していると考えられる。さらに、cluster③の特徴をみるとTdXすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster③のCOP軌跡（図3）は、患側（右脚）単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが右前方に移動した後に左

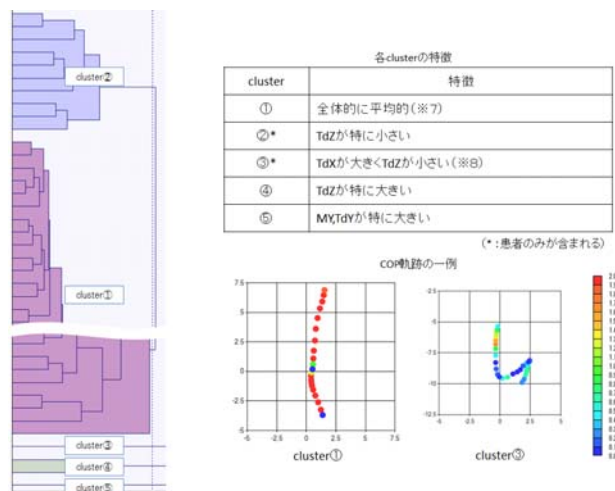


図3 階層的クラスター分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（歩行）

側方に屈曲している様相がみられる。これは、患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持していることが考えられ、患側の単脚支持期において側屈が観察される一因と推察される。また、cluster③に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから、患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

段昇降のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図4に示す。cluster①、②、③に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster④、⑤に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster④、⑤をみると、TdZすなわち床反力の総変化量（体重比）が他のclusterと比較して小さい傾向を示している。これは、歩行と同様に患側の単脚支持期初期及び後期において非患側及び患側に推進力を働かせることができないことが考えられる。また、cluster④、⑤に属する股関節症患者の症例には、伸筋群の衰弱が確認できることから、患側の推進力の低下が床反力に作用していると考えられる。さらに、cluster⑤の特徴をみるとTdXすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster⑤のCOP軌跡（図4）は、患側（右脚）単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが右前方に移動した後に左側方に屈曲している様相がみられる。これは歩行と同様に、患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持している影響が考えられ、患側の単脚支持期において側屈が観察される一因と推察される。また、cluster⑤に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

片脚立位姿勢保持のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図5に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②、③、④、⑤に属

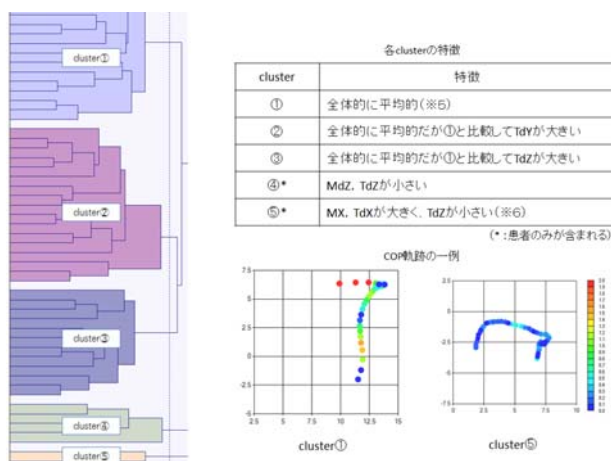


図4 階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（段昇降）

するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②、③の特徴をみるとTdXすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster②のCOP軌跡（図5）は、患側（左脚）単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが特に側方に往来している様相がみられる。これは、歩行や段昇降にもみられるように患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持していることが考えられる。また、cluster②、③に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

両脚立位姿勢保持のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図6に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②、③、④、⑤に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②の特徴をみるとRXすなわち側方の最大荷重割合が大きい傾向がみられた。これは、患側への荷重負担を軽減させるために非患側に荷重を移動させていることが考えられる。また、cluster②、③、④、⑤に属する患者の症例には患側に股関節部骨構造の変形ともなう疼痛が確認できることから、患側の荷重負担を軽減する働きが荷重移動に作用していると考えられる。ここで股関節症患者のみが含まれるcluster③、④、⑤の特徴をみるとTdXすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。ただし、これらのclusterに属するサンプルは、cluster④のCOP軌跡（図6）にみられるようにRXすなわち側方の最大荷重割合が小さい傾向がみられた。これは、患側への荷重負担を軽減させるために非患側に荷重を移動させることを行わず、

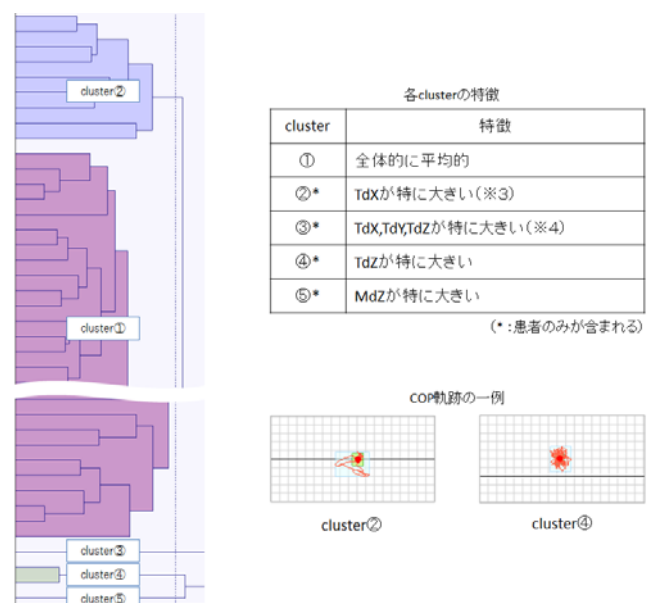


図5 階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（片脚立位姿勢保持）

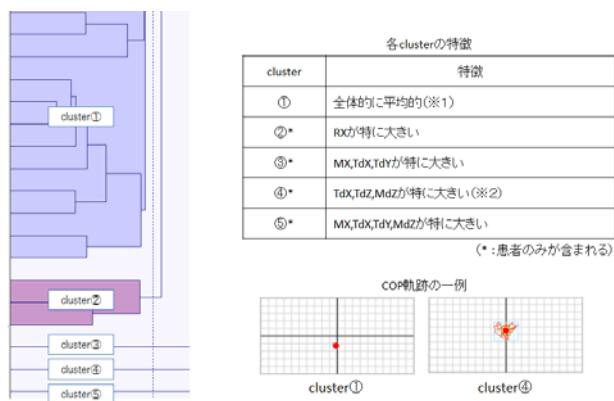


図6 階層的クラスター分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（両脚立位姿勢保持）

両脚立位姿勢を保持しようとする過剰な働きがCOPの軌跡に作用したと考えられる。なお、cluster②に属するサンプルにおいてはTdXが平均的な数値を示すことから、両脚立位姿勢保持において股関節症の傾向をみる場合には、RXとTdXをあわせて観察する必要がある。

以上の結果から、股関節症患者の特徴的な跛行にみられる二峰性の平坦化や側屈の現象等は、股関節症患者が属するclusterの特徴としてよくあらわれており、clusterの特徴に共通してみられる特徴量を股関節症に関わる重要度の高い特徴量と考えることができる。

4. 2 特徴量の妥当性

4. 1の階層的クラスター分析の結果、姿勢・動作別に患者が属するclusterの特徴をみると共通する特徴量が複数存在するが、これらの特徴量が股関節症に関わる実質的な意義を有しているかを検証するため、統計的手法を用いて特徴量の妥当性を検証した。例として、図4の段昇降において患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdZに注目し、患者群と非患者群の平均値と標準誤差をそれぞれ求め、その結果を図7に示す。患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。同様に、両脚立位姿勢を保持した場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdX, RX, 片脚立位姿勢を保持した場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdX, 歩行の場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdZに関して、それぞれ患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、いずれも患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。図7において患者群と非患者群の平均値の差を求めると約31%となる。このことは、体重70kgの人が高さ5cmの段を昇る際に、患者群は非患者群よりも体重を支える側の脚への荷重負担を平均で約21kg軽減していることを示している。この患者群と非患者群の平均値の差（約21kg）と標準誤差の意義、すなわち特徴量TdZが体重を支える側の脚における支持性の評価尺度の一つとして臨床的に意義を有するかについては医学的見地に基づいた検討が一層重要であると考えている。

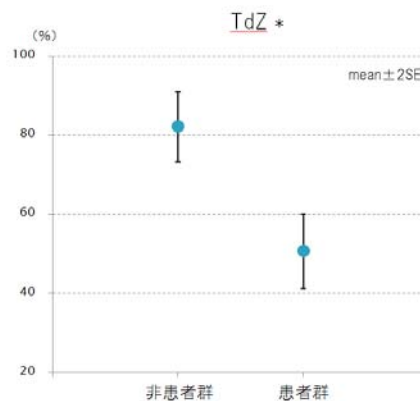


図7 段昇降運動における患者群と非患者群の傾向
(TdZ: 単脚支持期における床反力の総変化量(体重比) * : $p < 0.05$)

5 床反力解析結果の可視化

4. 2の検証の結果、患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる特徴量に注目し、これらの特徴量がリハビリテーションの経過や術前後において、どのような変化がみられるかを視覚的に確認し、日常生活への復帰の時期予測を検討するためのツールを試作した。

図8は、重要度の高い特徴量に関する履歴管理機能を示しており、管理対象者と特徴量を選択すると、管理対象者の計測回ごとの特徴量の数値を時系列にグラフ上に表示する。また、非患者群の特徴量の数値から算出した平均値ラインとの差を確認することにより自分自身の位置を把握することが可能であり、その後の運動療法を計画する際の検討材料として活用できる。

図9は、今回の実験結果において患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる5つの特徴量をレーダーチャート上に示したものである。自分自身の身体バランス機能を全体的に把握することが可能である。各特徴量の数値は、非患者群の特徴量の数値から算出した平均値に対する倍率を示しており、非患者群の平均値ラインを「1」として、これより外側に位置するほど身体バランス機能の低下が疑われることをあらわす。また、片脚立位姿

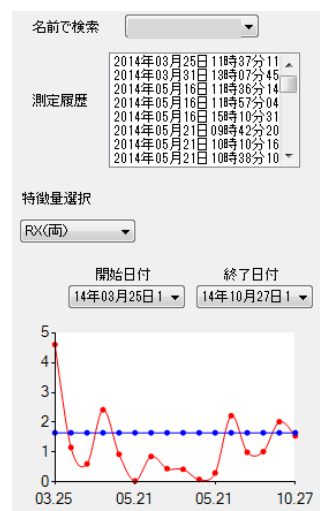


図8 重要度の高い特徴量の履歴管理

勢、段昇降、歩行に関しては左右脚別に5つの特徴量の数値を確認することが可能であり、体重を支える片側の脚の支持機能が低下していないか等、身体の左右のバランスを視覚的に確認できる。このような情報は、転倒等の危険性が高まるロコモティブシンドロームの予兆に気づき、股関節機能の回復措置を早期に適用する場合の検討材料として活用できる。さらに、今回の身体バランス機能評価結果を示すレーダーチャートの隣に別のレーダーチャートを用意し、計測履歴データを選択することにより、5つの特徴量を並べて比較することが可能である。このような情報は、リハビリテーションや術前後の比較を行う場合に、股関節機能等の改善効果を数値として視覚的に確認することが可能であり、その後の運動療法や治療計画を策定する際の検討材料として活用できる。

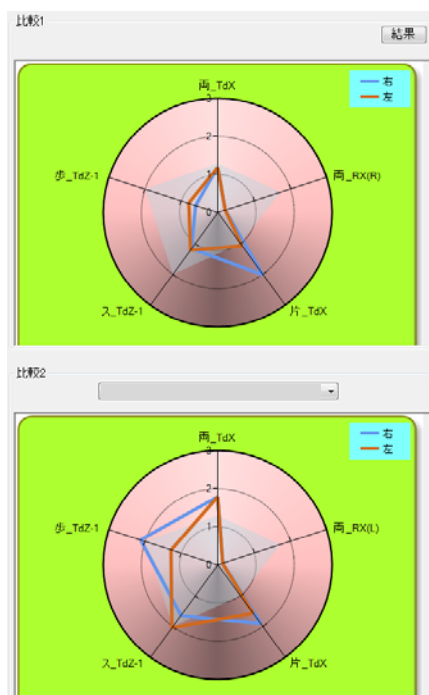


図9 身体バランス機能評価指標の比較

6 まとめ

安価で計測精度の良好な床反力情報取得装置としてWBを採用し、独自に開発した床反力情報取得・解析プログラムを用いて4種類の姿勢・動作を対象とした床反力情報取得実験を行った。実験で取得したサンプル160件の床反力情報から諸種の特徴量を抽出し、姿勢・動作別にサンプルの傾向を確認するため階層的クラスター分析を行った。分析の結果、股関節症患者の特徴的な跛行にみられる二峰性の平坦化や側屈の現象等は、股関節症患者が属するclusterの特徴としてよくあらわれており、clusterの特徴に共通してみられる特徴量を股関節症に関わる重要度の高い特徴量と考えることができる。これらの重要度の高い特徴量が股関節症に関わる実質的な意義を有しているかを検証するため、統計的手法を用いて特徴量の妥当性を検証した。重要度の高い各特徴量に対し、

患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる5つの特徴量に注目し、リハビリテーションの経過観察や術前後の比較において、これらの特徴量の変化を視覚的に確認し、日常生活への復帰の時期を検討するためのツールを試作した。今後、これらの特徴量の信頼性を高め身体バランス機能の評価指標として扱うためには、さらに多くの患者及び非患者のサンプルを取得しデータの傾向を観察する必要がある。

本県では第2次ヘルスプランぎふ21^[7]において日常生活に制限のない期間を延ばす「健康寿命の延伸」を目標に掲げ健康支援への取り組みを強力に推進している。疾病リスクの低減を図るための健康維持・増進・疾病予防にかかる健康度評価やIT融合型健康サービス等の需要が一層高まり、健康で暮らしやすい社会の形成が望まれている中で^[8]、本研究開発成果である床反力情報取得・解析技術は、身体バランス機能を測る「ものさし」と考えることができ、臨床の場でのリハビリ効果や術前後の評価に限らず、早期にロコモティブシンドロームの兆候に気づき予防を促すセルフケアツールとしての応用展開も考えられる。

謝 辞

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いたします。

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/\(2014.3現在\)](http://www.joa.or.jp/public/locomo/(2014.3現在))
- [2]奈良勲，“運動療法学 各論”，医学書院，2010。
- [3]曾賀野健一，青木隆明，可児純子，渡辺博己，棚橋英樹，“運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術”，岐阜県情報技術研究所研究報告第15号，pp.9-14，2013。
- [4]望月久，峯島孝雄，“重心動揺計を用いた姿勢安定度評価指標の信頼性および妥当性”，理学療法学 第27巻第6号，pp.199-203，2000。
- [5]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。
- [6]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。
- [7]岐阜県，“第2次ヘルスプラン岐阜21”，[http://www.pref.gifu.lg.jp/kenko-fukushi/kenko-iryo/kenko/seikatsu-shukambyo/2-herusupurann.html\(2014.3現在\)](http://www.pref.gifu.lg.jp/kenko-fukushi/kenko-iryo/kenko/seikatsu-shukambyo/2-herusupurann.html(2014.3現在))
- [8]中部経済産業局，“新ヘルスケア・サービス産業”，新ヘルスケア・サービス産業創出懇談会資料，2012。

超音波通信を用いたフェーズドアレイ測位システムの開発(第1報)

田畑 克彦 久富 茂樹 遠藤 善道

A Phased-Array Positioning System using Ultrasonic Communication (1st Report)

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 我々は無人搬送車または移動ロボットなど、自律移動装置の経路移動をナビゲーションするための超音波式測位システムを開発している。本測位システムは、自律移動装置上の超音波測位モジュールが、経路上にあるランドマーカの役割をする超音波トランスポンダーと超音波通信を行うことで、相対位置を計測することができる。測位距離を5mから10mまで拡張するために、測位モジュールに対するランドマーカまでの距離に応じた受信利得を制御する機能を付加し、ランドマーカに対する送信素子数の増加による送信信号の出力向上を行った。さらに、ランドマーカについては、床または天井などの強い反射信号による測位精度の劣化を防ぐための送信ビーム形状について検討した。

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

1. はじめに

無人搬送車や移動ロボットの経路誘導を行うことを目的として、経路変更の自由度が高く、低価格な新しいナビゲーションシステムの実現を目指し、それに供するための超音波フェーズドアレイ測位システム（以降“フェーズドアレイ”を“PA”と記す）を開発している^[1~5]。

超音波PA測位システムは、ルート設定用のランドマーカ（以降“マーカ”と記す）として、磁気テープなどの代わりに超音波センサーを使用する。想定している誘導方法は、AGVに搭載する超音波PA測位システム（以降“ソナーシステム”と記す）が、特定のマーカと超音波によるID通信を行って順次マーカを識別し、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測しながら走行する。位置が不明なマーカも確実に応答させることができるように、ソナーシステムには、SN比の高い先鋭化した超音波ビームを走査するPA技術を採用している^[1~5]。

これまでの研究により、2つのマーカを測位することにより距離4m、方位角 $\pm 45\text{deg}$ 以内の領域において、誤差50mm程度の測位が可能となった^[3~5]。

本システムの計測可能距離は0.5mから5mである。しかしながら、屋外での運用も考慮すると、計測距離を拡張することが望ましい。このため、本年度は企業ニーズなどをもとに目標計測距離を10mに拡張し、そのための改良を行った。

2. 超音波PA測位システムの改良

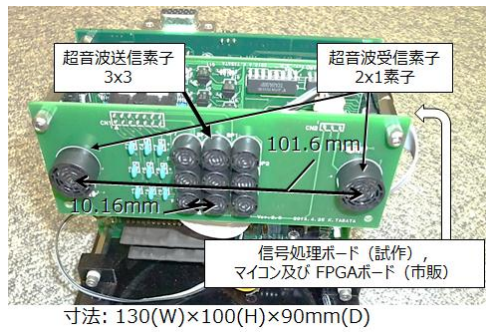
本章では、計測距離10mを達成するためのソナーシステムとマーカの改良内容について記述する。図1は今年度

改良試作したソナーシステムとマーカである。マーカ測位の計算処理はマイコンボード(プロセッサ, STM32F103ZE)及びFPGAボード(FPGA, XC3S1200E)に実装した。表1は使用した超音波センサー素子の主な仕様である。ソナーシステムとマーカとの相互通信の仕様は、ID信号長を7bit、通信速度を625bpsとした^[1]。マーカ測位は、マイコンの処理負荷を軽減し、高速なハードウェア処理が可能なFPGAで処理させるため、比較的単純な送受信パルスの到来タイミングから計測する方法としている^[1~5]。

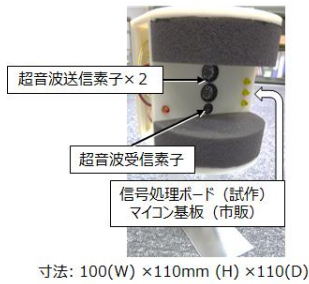
2. 1 ソナーシステム

これまでの研究により、5m程度まで計測できるように受信信号利得を設定すると、0.5m程度の近傍計測時には信号利得が高すぎるためにパルスが飽和し、ID信号の認識ができないことがわかっており、0.5mから10mまでの計測を可能するためには、ダイナミックレンジを拡張する工夫が必要となる。そこで、マーカまでの距離に応じ、信号利得を制御する機能を付加することとした。

図2は本年度試作したソナーシステムの機能ブロック図である。システム動作としては、送信強度が大きい場合には遠方のマーカを測位しているので、小さな信号を捕えるために初段のPGAの受信信号を5倍に増幅する。逆に、送信強度が小さい場合には近傍のマーカを測位しているので増幅率を1倍として、マーカからの応答信号を適切な強度で受信する。すでに送信系統については、マーカ距離に応じて、駆動する送信素子数を変更することで信号強度を制御する機能がある^[3]。よって、受信系統に対しても図2のように利得変更機能付きアンプであるPGA(Programmable Gain Amplifier, エヌエフ回路設計ブロック製 CA-206L2)を挿入し、受信信号の利得制御を行



(a)ソナーシステム



(b)ランドマーカー

図1 超音波フェーズドアレイ測位システム

表1 超音波センサー素子の仕様

	ソナーシステム 送信素子 ランドマーカー 受信素子	ランドマーカー 送信素子	ソナーシステム 受信素子
製造者	日本セラミック株式会社		
型番	AT40-10PB3	T3216A1	R3216A1
中心周波数	40kHz±1.0kHz	32.7kHz±1.0kHz	
送信音圧 レベル	116 dB* Min. at 40.0kHz**	113 dB* Min. at 32.7kHz**	—
受信感度	-66.5 dB**,*** Min.	—	-69 dB** Min.
指向性 (-6dB 全角)	±50°	±35°	

*0dB = 10V/Pa, **入力電圧 = 10Vrms, ***実測値

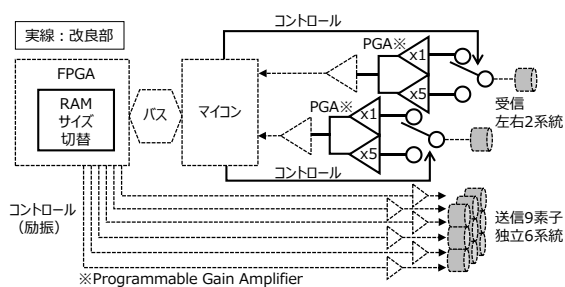


図2 ソナーシステムの機能ブロック図

った。信号利得の変更は、PGAの制御ピンに、マイコンからのデジタル制御信号を入力することで行える。さらに、受信信号はマイコンによってAD変換されて、FPGA内のメモリに一度格納されたのち、測位計算が行われる。遠距離測位と近距離測位時では計測距離が異なるため、計測に要する時間と格納データ数は異なる。このため、計測距離に応じてFPGAの内部メモリへの格納データ数を最小限にすることで、1秒間に測位可能な計測頻度を向上させた。

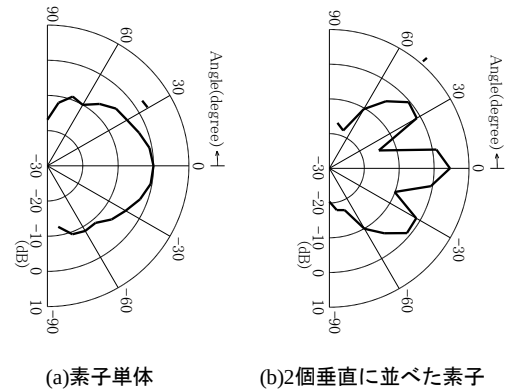


図3 送信素子数による指向性変化

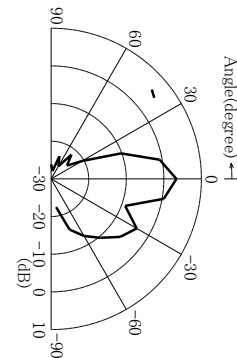


図4 改良マーカーの指向性

2. 2 ランドマーカー

ランドマーカーは、これまでは簡易なモジュールとするため、送受信素子1個の構成で開発を進めていた。しかしながら、計測可能距離を倍に拡大するには、送信素子1個ではマーカーからの応答信号が弱く、ソナーシステムまで十分な強度で到達できない可能性があり、強度を増大させる必要がある。また、マーカーからソナーシステムに伝答信号を送信する際、床面あるいは天井面で一度反射した超音波がゴースト信号となり、伝答信号をソナーシステムが正しく認識しない現象が現れた。これは、反射波は直接波に比べて経路長が長くなる分、遅れてソナーに到達するため、直接波と干渉すること、またはゴースト信号となって出現することに起因している。

以上の2つの課題に対し、マーカーの送信素子を2個垂直に並べることで、送信強度の増大と正面方向への指向性を高めることを検討した。

はじめに、マーカーに使用する送信素子単体の指向性を求めた。送受信素子を0.3m離して対向させ、送信素子に、±10V、32.7kHz、の矩形波を0.4ms間印加した時の受信波形を測定した。送信素子と受信素子が正対している時の受信波形の最大振幅 V_{0p-p} を基準として、送信素子を10degずつ回転させた時の受信波形の最大振幅の比をデシベル値で表し利得を求めた。図3(a)は指向性の測定結果である。角度は仰俯角方向である。水平方向(0 deg)に対して、±30degで-5dB、±60degで-10dB程度しか減

衰しておらず、床面、天井方向に対しても比較的強い超音波が放射されることを確認した。

次に、同じ送信素子2個を、中心間を16.4mm離して垂直に並べた場合の指向性を素子単体の場合と同様に求めた。2素子には同じ電圧波形を同位相で印加した。図3(b)に指向性の測定結果を示す。利得の算出は、素子単体の V_{0p-p} を基準にした。2素子の超音波が合成されることで水平方向(0deg)の利得が増し、素子単体の時に比べて、4.5dB増加した。しかし、同時に±30~40deg方向に強いサイドビームも形成されてしまい、その利得は素子単体の水平方向と同程度であった。

このサイドビームを消去するために、半径50mm、厚さ25mmの半円柱のスポンジを素子の上下に取り付け、サイドビームを吸収、拡散させる構造を考案し、図1(b)のスポンジガード付きマーカーを試作した。この試作マーカーの指向性測定結果を図4に示す。水平方向の利得は、3.4 dBで、スポンジガードがない場合と比較して若干弱くなっているが、+30~+40deg方向にできたサイドビームを抑えることが可能となり、仰俯角方向の指向性が高いビームを形成することができた。-30~40deg方向に対しては、若干サイドビームが残存している。これは、図1(b)のように受信素子も送信素子に対して垂直に実装したため、この受信素子の大きさの分だけ、サイドビームがスポンジガードから漏れ出たものと考えられる。今後は受信素子を送信素子の水平隣に配置し、送信素子の上下の空間を空けずにスポンジガードで埋めることで、さらにサイドビームを抑制する計画である。

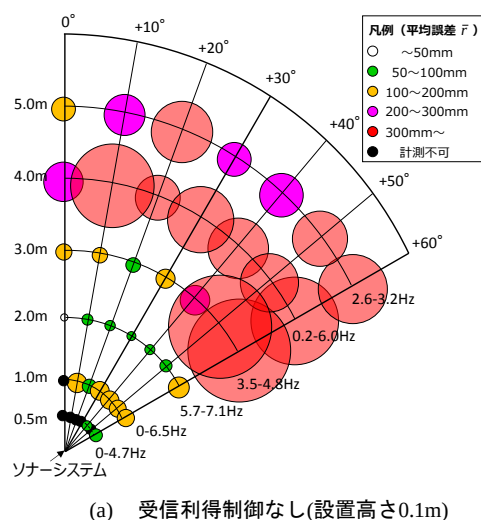
3. 測位実験

図1の改良したソナーシステムとマーカーの動作を検証するために、マーカーの相対位置を計測する測位実験を行った。最初に、ソナーシステムの受信利得制御の動作を確認するために屋内で行った測位実験の結果について述べる。次に10mまでの測位を確認するために屋外で行った測位実験の結果について述べる。

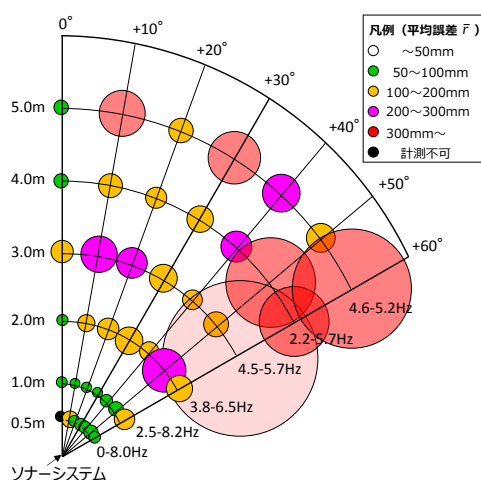
3. 1 屋内測位実験

受信利得制御の有効性を確認するため、屋内にてランドマーカーの設置位置を、距離0.5mと1m~5mまで1mステップで変更し、さらに方位角を0~60degまで10degステップで変更し、それぞれのマーカー位置に対して200回の測位を行った。

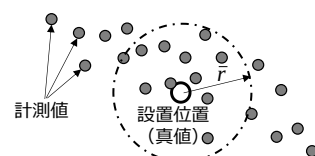
図6(a)と(b)は、それぞれ受信利得制御がない場合とある場合の測位結果である。扇の要の位置にソナーシステムが存在しており、マーカーの測位誤差は、円の大きさで表している。ここで測位誤差は、図6(c)のように計測値の平均位置を計算し、真値からのずれとして定義した。なお、実際の計測値の分布は真値を中心に均等に分布するのではなく、方位方向に広がりをもった円弧形状に分布する^[3,4]。また、図の横にある数値[Hz]は1秒間に測位



(a) 受信利得制御なし(設置高さ0.1m)



(b) 受信利得制御あり(設置高さ0.15m)



(c) 測位誤差の定義と計測値の分布形状

図6 屋内測位結果

する回数、すなわち計測頻度である。

図6(a)および(b)より距離3.0m以上で設置方位角が50deg以上になると、測位誤差は300mmを超える。これは表1における送受信機の指向性による感度の限界によるものと考えられる。送信素子の数量を増すなどして送信強度を向上させることで改善が見込まれる。図6(a)では0.5mの位置に存在するマーカーはほとんど計測できていないが、図6(b)ではおおむね計測できている。また、計測頻度についても、ほとんどの距離において受信利得制御がある場合の方が向上している。これらの結果は距離に応じて適した信号増幅率でIDパルスが認識されていることを示している。

次に、図6(a)と(b)の円の大きさで表した測位誤差に注



図7 屋外測位実験

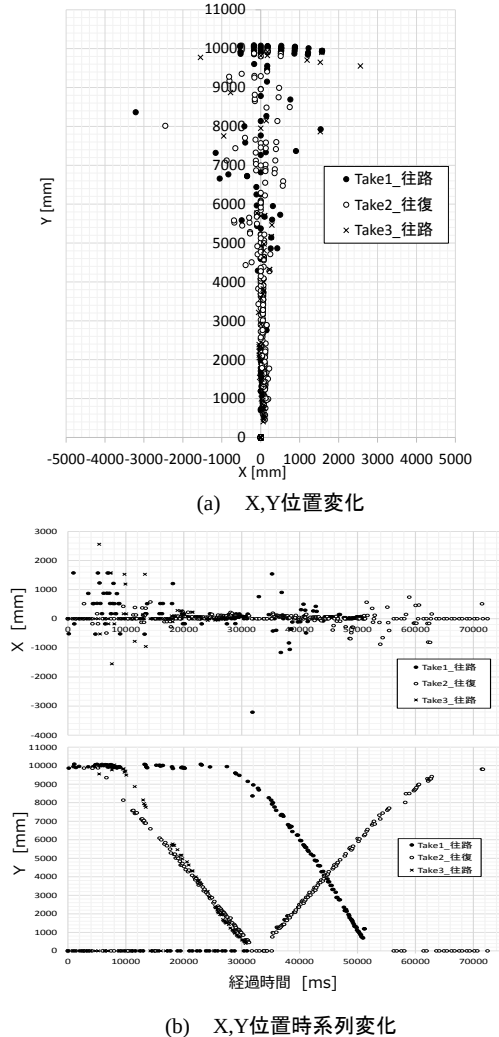
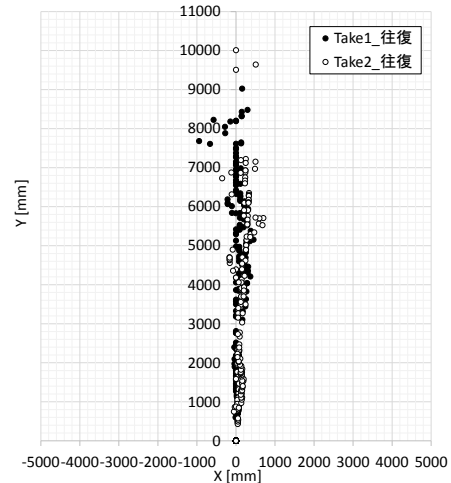


図8 受信素子間隔101.6mmの測位結果

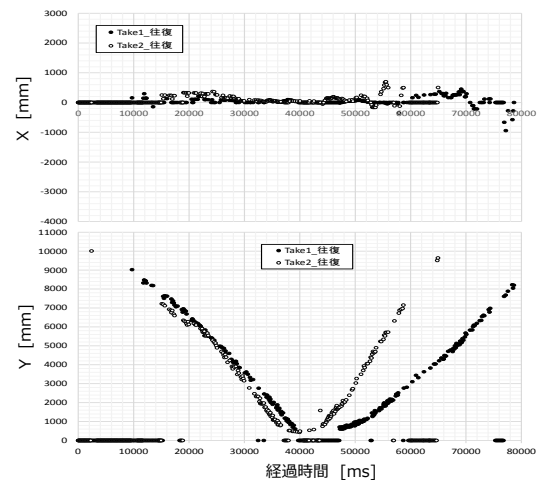
目し、利得制御がある場合とない場合を比較する。マーカー位置による優劣は判断しがたいが、これは設置高さが0.1mと0.15mと異なるため、床反射が影響する位置が異なってくることに起因しているものと考えられる。実際に設置高さを高くすると、床反射強度が低下し、測位誤差も低下する傾向があることを確認している。今後、どの程度の高さにすると誤差の影響が小さくなるかを把握する必要がある。

3. 2 屋外測位実験

改良システムの計測可能距離が0.5mから10.0mに拡張



(a)X,Y位置変化



(b)X,Y位置時系列変化

図9 受信素子間隔550mmの測位結果

できたことを確認するため、図7(a)に示すように、10m離れた場所にマーカーを設置し、手押し台車に搭載したソナーシステムが常にマーカーと正対するように直進移動させて、測位実験を行った。これまでの左右の受信素子の間隔は図7(b)における101.6mmの配置であった。これは移動ロボットへの実装を考慮し、できるだけコンパクトにするためである。しかし、素子間隔を広くできれば各受信素子に到達する時間差が拡大できるので、方位角分解能を向上させ、方位角の精度を高めることができる^[6]。無人搬送車への適用を想定した場合には、左右受信素子の間隔は拡張できるため、素子間隔を小型無人搬送車に設置可能な幅550mmに広げて測位を行った。

図8は従来の受信素子間隔が101.6mmの場合における測位結果である。台車をマーカーまで近づけて終了する往路走行を2回、マーカー手前0.5m付近まで近づけたのち10m地点まで戻って終了する往復走行を1回測位している。同図(a)は座標原点にマーカーが存在するとして、測位したX,Y座標の位置をプロットした結果である。また、同図(b)は時間経過に伴うX,Y値の変化である。なお、距離が0となっているデータは、測位を失敗したデータで

ある。本結果から、ソナーシステムの改良によって0.5mから10mまでの範囲で測位可能であることを確認した。距離情報が支配的なY値については、時間に伴って滑らかに増減している。しかしながら、方位角情報が支配的なX値については、Y値が7m以上の遠距離となると最大3mを超える誤差が生じ、測位値のバラつきが大きいことがわかる。これは、すでに明らかになっているSN比の劣化に伴う方位角誤差のバラつきによるものである。

図9は受信素子間隔を550mmに拡大した場合の図8と同様の測位結果である。測位条件は往復走行で2回測位している。図9(b)のX値の時間変化は安定しており、最大誤差も1.0m程度に改善されていることがわかる。したがって、実装対象の寸法に合わせて可能な限り受信素子間隔を拡張することが有効である。しかしながら、現状ではY値が8mを超えたあたりで著しく計測頻度が低下しており、処理プログラムなどに不具合がある可能性が高いため、この原因について調査する必要がある。

4. まとめ

超音波通信を用いた超音波フェーズドアレイ測位システムに対して、ソナーシステムならびにマーカーの改良を行った。ソナーシステムに対しては、2段階の受信利得制御機能を付加することで0.5mから10mまでの測位を実現した。また、マーカーに対しては送信素子を2個垂直に並べ位相合成による信号強度の向上を図ると同時に、スポンジガードにより上下方向へのサイドビームを抑制し、天井または床反射の影響を軽減できることを確認した。さらに、改良システムの全体動作を検証するために屋内外で測位実験を行って確認した。

今後は、マーカーに対しては送受信素子とスポンジガードの配置に改良を加え、ソナーシステムの修正を行い、再検証を行う。また、移動ロボットや無人搬送車への実装を考慮したシステムの検討を行う予定である。

文 献

- [1] 田畑克彦, 西田佳史, 飯田佳弘, 岩井俊昭, “超音波センサアレイを用いた新しいナビゲーションシステム”, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.1, pp.11-19, 2012.
- [2] 田畑克彦, 岩井俊昭, 久富茂樹, 遠藤善道, 西田佳史, “長遅延応答型超音波トランスポンダー”, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1086-1091, 2013.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 岩井俊昭, 遠藤善道, 西田佳史, 組込技術を用いた高機能ワイヤレスセンサシステムの研究開発(第3報)ー超音波フェーズドアレイ測位システムー, 岐阜県情報技術研究所研究報告書, No.15, pp.15-20, 2014.
- [4] Katsuhiko Tabata, Toshiaki Iwai, Shigeki Kudomi, Yoshimichi Endo and Yoshifumi Nishida, “Precision Improvement of Position Measurement Using Two Ultrasonic Land Markers”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp.245-252, 2014.
- [5] 田畑克彦, “空中超音波フェーズドアレイ測位システム=無人搬送車誘導用途としての開発=”, 超音波テクノ, 日本工業出版, Vol.26, No.6, pp.76-82, 2014.
- [6] 西谷哲史, 西田佳史, 溝口博, “全方位超音波位置センサ”, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1A22(1) - (2), 2004.

シミュレーション技術を用いたジグ設計検証手法の開発(第3報)

ー固有振動数の算出ー

横山 哲也 坂東 直行

Development of Jig Design Verification Method using Simulation (3rd Report)

- Calculation of Eigen Frequency -

Tetsuya YOKOYAMA Naoyuki BANDO

あらまし エンドミル加工等において、切削工具と被削材の間で断続的な切削力による強制振動によって固有振動が増幅し、その結果、加工精度を低下させることがある。それを防ぐためには、加工物等の固有振動数を予め把握することが重要である。著者は過去に、有限要素法を用いて切削加工時のジグに作用する力などを計算できる切削加工シミュレーションを作成した。本報ではこのシミュレーションで固有振動数を計算し、実物との固有振動数と比較を行った。

キーワード 切削加工シミュレーション、固有振動、有限要素法

1. はじめに

エンドミル加工等において、切削工具と被削材の間で断続的な切削力が働くことで強制振動が生じる。この際、工具回転数と刃先数の積から求まる断続切削周波数の整数倍が、被削材やジグを含む機械構造物がもつ固有振動数の値に近くなると共振を生じる。剛性不足している場合は振動が大きくなり、所望の加工精度を得ることが難しくなる。

断続切削による振動を抑制する手段として、インパルスハンマーを用いて機械構造物の固有振動数を求め、断続切削周波数の整数倍を機械構造物の固有振動数付近からずらす方法や、有限要素法を用いて固有振動数を求め、動解析により剛性不足箇所を特定し、ジグで補強する方法^{[1][2]}がある。したがって振動を抑制するには予め固有振動数を把握する必要がある。上記手法は加工前の被削材形状を対象としているが、加工による切削量が多い場合も想定すると、被削材の形状変化に伴う固有振動数の変化も考慮できればより有効と考える。

著者は過去、ジグ設計の支援ツールとしてジグに働く力等を算出できる切削加工シミュレーションを作成した^[3]。このシミュレーションは、有限要素法を用いて構造解析を行い、ジグにかかる力などが計算でき、かつ切削による形状変更にも対応している。この有限要素法より得られた剛性行列と質量行列から、機械構造物の固有振動数を算出できることから、断続切削による固有振動の抑制を補強できると考える。

本報告では、被削材とジグからなる機械構造物を対象に、切削加工シミュレーションを用いた固有振動数の算出方法と、算出した固有振動数を検証するため、加工により形状変化した実物の固有振動数を計測し両者の比較を行った内容について報告する。

2. 有限要素法による固有振動数の算出

2. 1 切削加工シミュレーションの概要

切削加工シミュレーションは、切削加工により被削材を固定するジグにかかる力や被削材の変形などを計算するシミュレーションである。その処理内容を図1に示す。

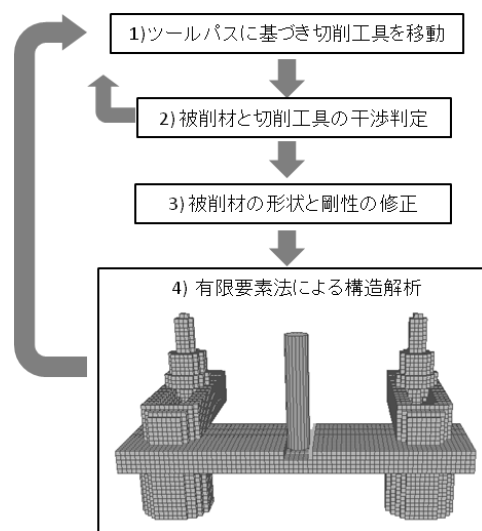


図1 切削加工シミュレーションの処理手順

1) NCデータに基づき切削工具を一定距離の刻み幅で移動させ、2) 被削材と工具の干渉判定を行う。干渉がなければ1)に戻り、干渉があれば、3) 被削材の形状と剛性を修正する。その後、4) 有限要素法を用いた構造解析を行い、ジグにかかる力などを計算で求める。式(1)に、4)の構造解析で用いる剛性方程式を示す。

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{M}\mathbf{g} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{F}$ は外力、 $\mathbf{u}$ は変位、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 $\mathbf{M}\mathbf{g}$ は重力である。ジグにかかる力は、有限要素を構成するノードに働く内力を基に計算で求める。なお、この行列 $\mathbf{K}$ と行列 $\mathbf{M}$ を用いて固有振動数を計算することになる。

有限要素法を用いて計算する際、メッシュ要素としてボクセル形状の6面体を採用している。切削工具と被削材の干渉判定には、この6面体内部に、等間隔に配置した質点を用いる。工具の移動により、質点が工具の幾何形状の内部に位置したら干渉と判断し、切削により形状が変化したとみなす。6面体内部に配置した質点の数が0になった際には、その6面体の剛性行列をゼロとすることで、形状変化により剛性行列の要素を変化させることができる。これにより、切削による固有振動数の変化に対応することが可能になる。

2. 2 固有振動数の算出方法

有限要素法により得られた被削材とジグからなる機械構造物の物性を反映した剛性行列 $\mathbf{K}$ 、慣性行列 $\mathbf{M}$ を用いて、数値計算で固有振動数を算出する方法を示す。

機械構造物の固有振動に関する式を以下に示す。

$$\mathbf{K}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{M}\mathbf{x} \quad (2)$$

ここで λ は固有値、 $\mathbf{x}$ は固有ベクトルである。このときの固有振動数 f は式(3)で求まる。

$$f = \sqrt{\lambda} / 2\pi \quad (3)$$

式(2)から固有振動数を解析的に求めることは難しいため、数値計算用に式を変形する。また断続切削周波数が機械構造物の固有振動数より低いことから、求める固有振動数は最小値からの固有振動数とする。行列 $\mathbf{M}$ の対角要素の平方根を対角要素とする行列 $\mathbf{B}$ を用いると、式(2)は式(4)に変換できる。

$$(\mathbf{B}^{-T}\mathbf{K}\mathbf{B}^{-1})^{-1}\mathbf{x} = \frac{1}{\lambda}\mathbf{x} \quad (4)$$

式(4)を数値計算で解くにあたり、剛性行列 $\mathbf{K}$ は大規模疎行列となることから、行列ベクトル積による計算が主となるランチョス法を用いる。

3. 固有振動数の比較

切削加工シミュレーションで求めた固有振動数を検証するため、加工により形状変化した実物の固有振動数を計測し、両者の比較を行う。



図2 被削材とジグからなる機械構造物

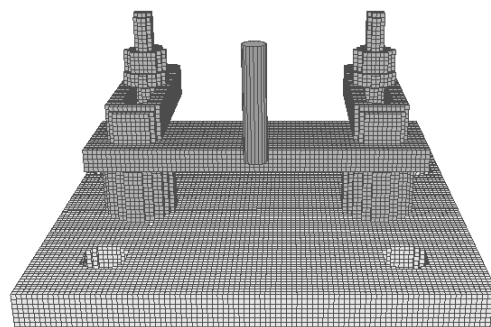


図3 切削加工シミュレーションのモデル

図2にポリアセタールの被削材を鉄のジグで固定した実物の機械構造物を示す。被削材には、x方向に歪みゲージが貼付されており、被削材にz方向の振動を与えた際の歪みを計測し、FFT解析することで固有振動数を特定することができる。なお、本研究ではセンサの取付けによる質量増加を防ぐため歪みゲージを用いている。

図3に切削加工シミュレーションのメッシュモデルを示す。メッシュサイズは2[mm]とし、被削材とジグおよびジグを固定するベース板を解析対象としてモデリングしている。

加工前と、溝加工による形状変化後（溝深さ2[mm]と4[mm]）に実物を計測した際の周波数スペクトルを図4に示す。図中の歪みの大きさは、各々の最大値で正規化した。計測している歪みは、歪みゲージがx方向に貼付されていることと被削材にz方向の振動を与えていることから、被削材のz方向の曲げ振動によるx方向の圧縮と引張りによる歪みと推測される。各々のスペクトルのピーク周波数は1640[Hz]、1562[Hz]、1484[Hz]である。

表1,2,3に切削加工シミュレーションで計算した2500[Hz]以下の固有振動数を記載する。表中の固有モードiは、最小固有振動数から数えてi番目の固有振動を指す。機械構造物の固有振動は固有ベクトルが表す方向に振動するため、図4と比較するには計算した固有振動数のうち、被削材がz方向に振動し歪みが大きくなる固有振動数を調べる必要がある。ここではz方向の曲げ振動を想定して、ベクトルの大きさで正規化した固有ベクトルを用いて、歪みゲージの貼付位置近傍の有限要素のx方向歪み

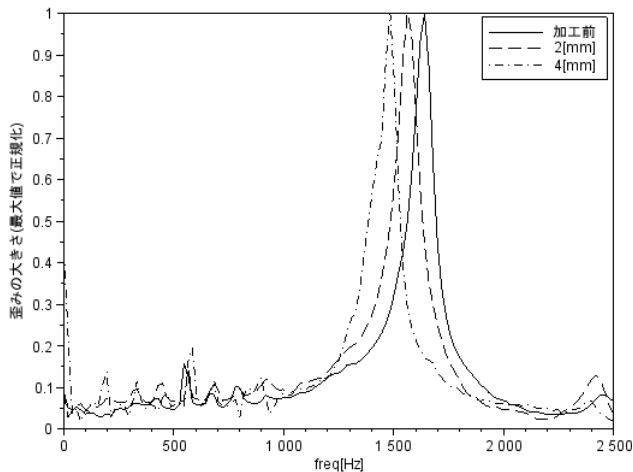


図4 実物の周波数スペクトル

表1 計算で求めた加工前の固有振動数

固有モード	固有振動数[Hz]	x方向歪み(絶対値)※
1	1327	2.84E-2
2	1342	1.24E-3
3	1570	1.33E-1
4	2245	2.42E-2

表2 計算で求めた形状変化後(2[mm])の固有振動数

固有モード	固有振動数[Hz]	x方向歪み(絶対値)※
1	1310	5.66E-2
2	1342	4.02E-4
3	1523	1.48E-1
4	2283	2.79E-2

表3 計算で求めた形状変化後(4[mm])の固有振動数

固有モード	固有振動数[Hz]	x方向歪み(絶対値)※
1	1265	8.69E-2
2	1342	2.11E-4
3	1475	1.31E-1
4	2313	2.99E-2

※ベクトルの大きさを正規化した固有ベクトルを使用して計算

を計算した。その結果、x方向の歪みが大きい固有振動数は何れもモード3の固有振動数であった。

図4と表1,2,3より、実物の固有振動数と数値計算で求めたモード3の固有振動数を比較すると、両者とも形状変化により固有振動数が小さくなることが確認できた。各形状において両者の固有振動数には差が生じるが、その理由はシミュレーションのモデル化誤差、計測誤差や組み付け誤差が影響を与えていると推測される。なお、形状変化後(4[mm])においては歪みの大きさを考慮すると固有モード1のピークも計測されておかしくないが、今回は計測できなかった。その要因がどこにあるか特定する必要がある。

4. まとめ

本報では、ジグ設計の支援ツールとしてジグに働く力などが算出できる切削加工シミュレーションを用いて、

ジグと被削材からなる機械構造物の固有振動数を計算した。計算で求めた固有振動数は加工による形状変化に伴い変化することを確認したが、計測した値と比較したところ、両者の間には差が生じており改良の必要がある。

計算で求めた固有振動数を用いて、工具回転数と刃先数の積から求まる断続切削周波数の変更で固有振動を抑制する場合は、以下の方法を考えている。切削加工シミュレーションでツールパス上に幾つかのサンプリング位置を設け、その位置で複数の固有振動数を計算し、固有ベクトルを参考に固有振動数を特定する。サンプリング間の固有振動数を、前後のサンプリング位置で求めた固有振動数で線形補間する。先に述べた理由よりシミュレーションで求めた固有振動数は実物と一致しないため、固有振動数の値に一定の幅を持たせる。幅を持たせた固有振動数の範囲内に断続切削周波数の整数倍(1,2,...,N倍)が存在しないように断続切削周波数を調整することで固有振動数を抑制する。なお、整数Nは有限値となり機械構造物の減衰に依存する。

本研究ではGPUを用いて固有振動数を計算しているが、計算に時間を要するため、計算時間の短縮が課題として挙げられる。

文 献

- [1] 坂本千秋, “治工具の構造解析システム”, 精密工学会誌, Vol.52 No.5, pp.808-810, 1986.
- [2] 名畑英二, 寺坂英二, “振動解析による治具剛性評価技術”, KOMATSU TECHNICAL REPORT, Vol.52 No.157, 2006.
- [3] 横山哲也, “ジグ設計評価の構造解析に関する研究(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第13号, pp.36-40, 2012.

固有振動数算出における計算時間の短縮に関する検討

横山 哲也

Study on Computation Time Reduction in Eigen Frequency Computation

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 機械構造物の振動解析を行うにあたり、固有振動数を知る必要がある。有限要素法を用いて機械構造物の固有振動数を求める際は、連立方程式を繰り返し解く必要があり、計算に時間を要する。本研究では、固有振動数の算出にかかる計算時間の短縮を目的に、近似的な逆行列を用いて固有振動数が計算可能であるか検討を行った。

キーワード 固有値解析、共役勾配法、逆べき乗法

1. はじめに

機械構造物の振動解析を行うにあたり、固有振動数を知る必要がある。有限要素法を用いて固有振動数を求める場合、行列が疎となるため、行列ベクトル積による計算が主となる逆べき乗法やランチョス法などが利用される。上記手法は収束条件や指定回数を満たすまで一連の計算を繰り返す手法で、解析対象モデルの行列サイズが大きい場合は繰り返し計算の中で連立方程式を反復計算で解くことになり、計算に時間を要する。

そこで本報告では、固有振動数を求める過程の連立方程式を反復計算ではなく近似的な逆行列を用いて直接解くことで計算時間が短縮するか、既存手法との比較検討を行った。

2. 数値計算による固有振動数計算

本報では、機械構造物の標準固有値問題を、既存手法と近似的な逆行列を用いた手法で解き、その比較を行う。本章では各計算手法について説明する。

2. 1 機械構造物の固有値問題

機械系の振動は式(1)に示す一般固有値問題となる。

$$\mathbf{K}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{M}\mathbf{x} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{K}$ は剛性行列、 $\mathbf{M}$ は慣性行列で対角行列、 λ は固有値、 $\mathbf{x}$ は固有ベクトルである。固有振動数 f は

$$f = \sqrt{\lambda} / 2\pi \quad (2)$$

である。振動で問題となるのは低い固有振動数であることから、式(1)を、最小値を算出する標準固有値問題に変換する。行列 $\mathbf{M}$ の対角要素の平方根を対角要素とする行列 $\mathbf{B}$ を用いて、式(3)に標準固有値問題を示す。

$$(\mathbf{B}^{-\mathrm{T}}\mathbf{K}\mathbf{B}^{-1})^{-1}\mathbf{x} = \frac{1}{\lambda}\mathbf{x} \quad (3)$$

2. 2 既存手法による固有値計算

行列 $\mathbf{K}$ が疎行列であることから、以下では行列ベクトル積で計算できる逆べき乗法を用いて標準固有値問題を解き、固有振動数を計算する。逆べき乗法の計算手順を以下に示す。

- 1) $\mathbf{x}_0$ を適当にとる。ただし $|\mathbf{x}_0| = 1$
- 2) $\mathbf{y}_i = \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}_i$
- 3) $\mathbf{K}\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i$
- 4) $\mathbf{x}'_{i+1} = \mathbf{B}\mathbf{y}'_{i+1}$
- 5) $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}'_{i+1} / |\mathbf{x}'_{i+1}|$
- 6) $\lambda_{i+1} = 1 / \sqrt{(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{x}_i)}$
- 7) $|\mathbf{f}_{i+1} - \mathbf{f}_i| / \mathbf{f}_{i+1} < \varepsilon$ であれば計算を打ち切る。そうでなければ2)に戻る。

上記計算手順の3)では連立方程式を解く。 $\mathbf{K}$ の逆行列を用いて連立方程式を解くことはできるが、逆行列は疎行列とならないため行列サイズが n 行 n 列のときは n^2 個の要素をメモリに格納する必要があり、 n が大きい場合にはメモリ上にデータを持つことが難しく、かつ逆行列自体の算出にも時間を要する。そのため、3)では連立方程式を共役勾配法による反復計算で解く。以下ではこの手法を既存手法と呼ぶ。

上記1)~7)の計算手順における計算時間の多くは3)の連立方程式の解法に要しており、計算時間短縮には共役勾配法における反復計算の計算量を減らす必要がある。

2. 3 近似的な逆行列を用いた固有値計算

固有振動数を計算するためには、上記計算手順に示すように固有振動数が収束するまで2)~7)を繰り返す必要がある。本研究では3)の連立方程式の解法において、前処理付き共役勾配法を用いて解く際の計算過程で求まるベクトルを基に作った近似的な逆行列^[1]（以下、近似逆行列と呼ぶ）を利用することで、計算時間の短縮を図る。

係数行列 $\mathbf{A}$ 、既知ベクトル $\mathbf{b}$ 、未知ベクトル $\mathbf{x}$ の連立方程式 $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ における連立方程式を反復回数 k 回で計算した

ときの近似逆行列を式(4)に示す.

$$\mathbf{A}^{-1} \approx \mathbf{P}_k [\boldsymbol{\omega}]_k^{-1} \mathbf{P}_k^T \quad (4)$$

式(4)中の各行列は以下のとおりである.

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{p}_0 \mid \cdots \mid \mathbf{p}_k]$$

$$[\boldsymbol{\omega}]_k = \begin{bmatrix} \omega_0 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_k \end{bmatrix}, \quad \omega_i = (\mathbf{p}_i, \mathbf{A} \mathbf{p}_i)$$

$\mathbf{p}_i$ は共役勾配法の計算過程で使用する修正方向ベクトルである. なお, 反復回数 k はベクトルサイズ以下である.

近似逆行列を用いた計算手順を以下に示す.

- 1) $\mathbf{x}_0$ を適当にとる. ただし $|\mathbf{x}_0|=1$
- 2) $\mathbf{y}_i = \mathbf{B}^T \mathbf{x}_i$
- 3)' 1回目: $\mathbf{K} \mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i$
2回目以降: $\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{P}_k [\boldsymbol{\omega}]_k^{-1} \mathbf{P}_k^T \mathbf{y}_i$
- 4) $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{B} \mathbf{y}_{i+1}$
- 5) $\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_{i+1} / |\mathbf{x}_{i+1}|$
- 6) $\lambda_{i+1} = 1 / \sqrt{(\mathbf{x}_{i+1}, \mathbf{x}_i)}$
- 7) $|f_{i+1} - f_i| / f_{i+1} < \varepsilon$ であれば計算を打ち切る. そうでなければ2)に戻る.

近似逆行列を算出するため, 3)'で1回目だけ共役勾配法を用いて連立方程式を解き, 2回目以降は近似逆行列を用いて連立方程式を解く. これにより, 2回目以降の繰り返し計算において, 計算時間の短縮が見込まれる. なお, 近似逆行列は逆行列と同じ行列サイズであるが, 3)'に示すように近似逆行列を直接求めて計算してないため, メモリの制約は受けない.

近似逆行列は逆行列を近似的に求めているため, 行列に誤差が含まれる. そのため, 固有振動数を正確に求めるには, 誤差の少ない近似逆行列を求める必要がある. そこで3)'の1回目の共役勾配法による解法の収束判定条

件を厳しく設定することで, 誤差の少ない近似逆行列を求める. また, 3)'の1回目の共役勾配法の反復回数が多いと, その結果 $\mathbf{P}_k$ の行列サイズが大きくなりメモリを圧迫する. そのため, 共役勾配法では前処理を施すことで反復回数を低減する.

3. 検証

逆べき乗法による固有振動数の算出において, 既存手法と近似逆行列を用いた手法とで計算時間の比較を行った. 解析のモデルは文献^[2]で使用しているシミュレーションのジグと被削材モデル(図1)を用いた. モデルの節点数は2万7千程度である. 計算手順7)の収束判定条件の固有振動数の相対誤差 ε は $1.0\text{E-}4$ とする.

逆べき乗法では最小固有値しか求めることはできないため, 本研究では以下に示す減次を行い, 最小値からの複数の固有値を求めた. 行列 $\mathbf{A}$ の固有値 λ^1 , 固有ベクトル $\mathbf{x}^1$ とした場合,

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - \lambda^1 \mathbf{x}^1 \mathbf{x}^{1T} \quad (6)$$

とすることで, 行列 $\mathbf{A}$ から固有値 λ^1 に対応する成分を省くことができ, 複数の固有値を計算することができる. ただし, 減次を行った行列は要素が変化しているため, 減次直後の1回目は連立方程式を共役勾配法で解く.

表1に計算時間と計算で求めた固有振動数の一例を示す. 表中のケース1, 2では, 計算手順1)で異なる初期ベクトル $\mathbf{x}_0$ を与えている. また, 計算手順3)'の1回目の共役勾配法の収束判定条件は実験的に求めた. 表より近似逆行列による計算結果は既存手法で求めた固有振動数とほぼ同じで, 計算時間は削減していることがわかる. 与える $\mathbf{x}_0$ によって計算時間の削減割合が変化するの, 計算手順2)~7)の繰り返し回数が $\mathbf{x}_0$ によって異なるためと推測される. なお, 繰り返し回数は7)の収束判定条件によっても変化する.

4. まとめ

本報告では, 固有振動数を求める過程の連立方程式を反復計算ではなく近似的な逆行列を用いて直接解くことで, 既存手法に比べ計算時間が短縮するか検討を行った. 逆べき乗において, 検証で使用したモデルでは計算時間が短縮することがわかった. ただし, 計算手順3)'の1回目の共役勾配法による解法の収束判定条件が緩いと正確な固有振動数が求まらず, 条件が厳しいと共役勾配法の反復回数が増えることでメモリ圧迫や計算時間の増加となるため, 適切な収束判定条件の選択が課題である.

文 献

- [1] 戸川隼人, “共役勾配法”, 教育出版, 1977.
- [2] 横山哲也, “シミュレーション技術を用いたジグ設計検証手法の開発(第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.49-51, 2015.

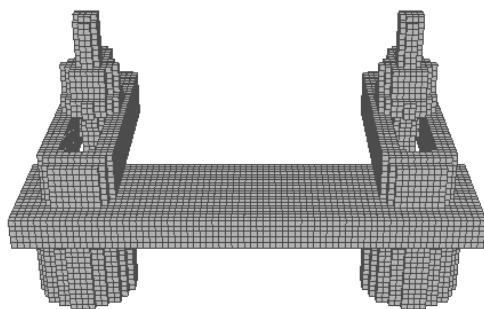


図1 解析モデル

表1 計算時間の比較

	ケース1		ケース2	
	既存手法	近似逆行列	既存手法	近似逆行列
計算時間※	1.0	0.15	1.0	0.22
固有振動数 [Hz]	1361	1361	1360	1363
	1382	1381	1384	1381
	1577	1577	1577	1578

※既存手法の時間で正規化した時間

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(第6報)

藤井 勝敏 田畑 克彦 横山 哲也 久富 茂樹 遠藤 善道

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

Katsutoshi FUJII Katsuhiko TABATA Tetsuya YOKOYAMA Shigeki KUDOMI Yoshimichi ENDO

あらまし 水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)を県内外の現地実証圃に貸し出し、貸出期間中の操作履歴を記録したドライブレコーダのデータ解析を行うことで、ロボット除草におけるオペレータの操縦時間の割合算出を行った。その結果、枕地での旋回をラジコン操作で行う運用で30%程度、自動運転を活用する運用で5~15%程度であることが判明した。また、アイガモロボットの補助装備であるチェーン除草において、苗の枯死原因となるアオミドロ等藻類の対策として新型チェーンを試作し使用したところ、苗を保全することに成功した。

キーワード アイガモロボット、運用ログ、チェーン除草

1. はじめに

アイガモロボット(図1)は、稲作を行う水田で、田植え直後から1か月間程度、水田内を定期的に走行させることにより、雑草の発生を抑制させることで、除草剤に代わる効果を得る自走式機械である。

これまでの研究開発の結果、アイガモロボットの機構および制御システムについてはほぼ完成しており^[1]、実証実験においても、一定の抑草効果が確認できている^[2]。実証実験の協力者の方々やメディア等を通じてアイガモロボットに興味を持った全国の稲作農家等からは、早期の商品化を望む声が多く寄せられているところである。

こうした声を受け、当研究所とみのる産業株式会社(岡山県赤磐市)は、平成25年度から農林水産省の農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業に参画し、岐阜県内外でアイガモロボットの実証実験を行いながら、初めてアイガモロボットを扱うユーザの反応や要望を聴取し、製品化に向けた改良を進めている。

また、県農業経営課および県内の農林事務所を中心に実施している農林水産省新技術導入広域推進事業により、平地および山間地の水田での実証実験を通じて、アイガ

モロボットを使用した無農薬水稻栽培技術確立のためのマニュアル整備を進めている。

本報では、今年度のアイガモロボットに関する研究開発の進捗を中心に述べる。

2. アイガモ運用ログの解析

アイガモロボットの実証実験は、現在は各地の実証圃の担当者(普及員または研究員)もしくは農家にアイガモロボットを貸し出し、5月から7月にかけてそれぞれで実施している。運用状況や使用感は、従来から作業日誌等の形で後日記録を回収するほか、現地で立ち会い直接聴取するなどして調査をしてきた。

その一方で、ロボットの運用実績について精密に分析するために、昨年度、マイクロSDカードにイベントログを保存するドライブレコーダを開発^[3]し、今年度の実証機すべての走行データを収集した。今年度はこの走行データを分析するための補助ツールを開発し、オペレータがロボットをラジコン操縦している時間、作業全体に占めるその割合を算出した。

アイガモロボットは、水田の端の条の前に設置し、スタートボタンを押せば全自動で苗列に沿って走行し、末端で旋回を繰り返しながら、自動運転する設計になっているが、そのためには枕地が十分に空けられ、できる限り浮遊物などがない環境を整えなければならない。実際のところ苗列終端での停止と旋回は、現場のオペレータが判断してラジコン操縦で行われるケースが多い。その場合ドライブレコーダの記録には、ロボットが自動運転している時間と、ラジコン操縦の時間が交互に現れる。一例として、図2にその様子を示す。なお、この図の左端は運用時刻を、1本の帯は1分間の操縦状態変化を示す。

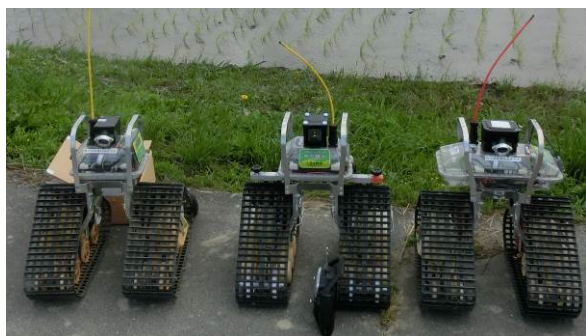


図1 アイガモロボット

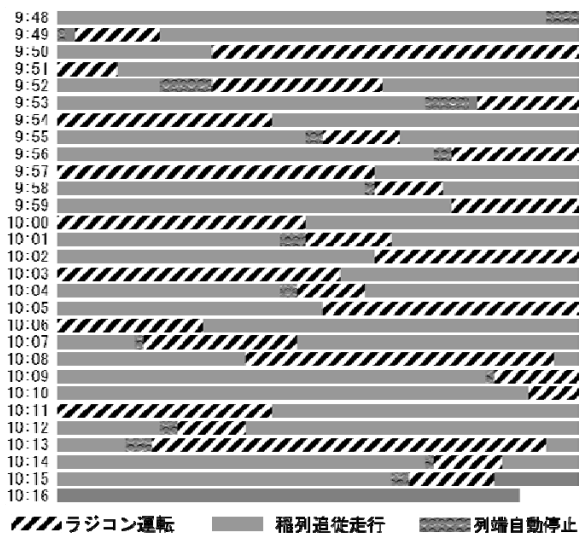


図2 ラジコン操縦主体の運用ログ例
(埼玉県鴻巣 7月4日 No. 41号機)

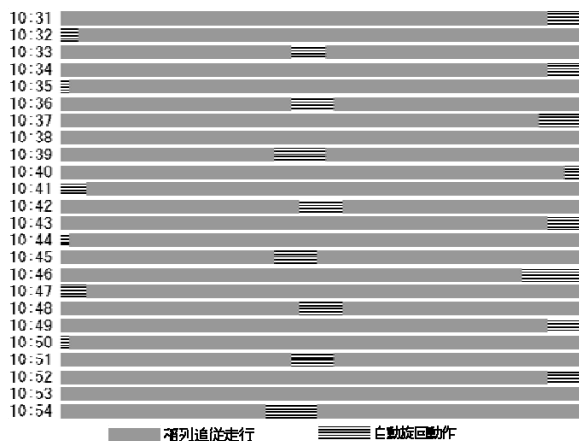


図3 全自動旋回を活用した運用ログ例
(羽島 7月2日 No. 32号機)

苗列に沿って走行する時間は当然苗列の長さに比例するが、ラジコン操縦を行う関係上、対岸を目視する必要があるため、長くても50メートル程度が限度であり、その到達時間は旧型機(H23年度以前製作)で概ね80～90秒、最新型機(H24年度製作)では60秒前後である。ラジコン操作での旋回操作時間は、ラジコンの巧拙により、手前側10秒、対岸は15～35秒程度であることがログデータの

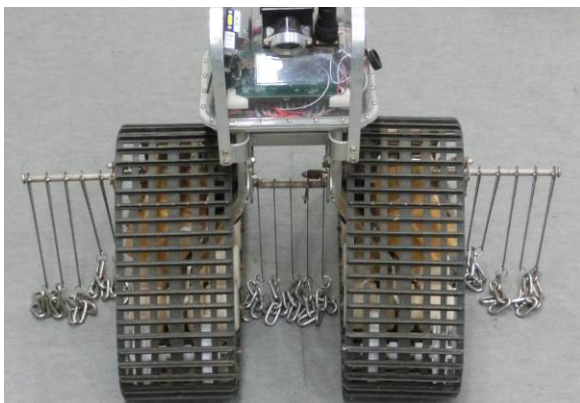


図4 株間チェーン

解析から読み取れる。図2の埼玉県鴻巣市の例では、総作業時間約30分のうちラジコン操作時間は9分で、同様な運用方法の圃場で概ね15～30%程度となった。

なお全自動旋回が可能な条件が揃うように特に枕地付近を十分に整備した水田ではオペレータの介入頻度は低くなり、基本的に監視しているだけで作業は進む(図3)。羽島の例では、45分のうち2分26秒の操縦(5.3%)であった。このような全自動運転がアイガモロボットの理想形であるが、もしも目を離れた際に斜行が発生すると、異常に気づくまでの遅れ時間によっては単純に旋回するより復帰に時間を要することになる。最悪のケースでは、作業全体に占めるラジコン操縦時間が15%程度になることもあった。

3. 株間チェーンの改良

これまでの実験でアイガモロボットが走行したとき、クローラベルトが踏みつけた条間部分の雑草の芽を掻き出すことで、直接的な除草効果が得られることがわかっている。クローラベルトが通らない苗列の株間の雑草に対しては、泥水の濁り効果による間接的な抑草作用だけで、満足な除草効果が得られない。そこで苗の根元の土に直接作用できるように、アイガモロボットの左右と中央部分に金属鎖を垂れ下げる付属品がある。この鎖およびその取り付け具を株間チェーンと呼ぶ(図4)。

株間チェーンは、苗が活着する田植え1週間後のころから、苗が大きくなり走行に支障が出始める4週間目頃までの間使用することで、苗の根元にも雑草抑制効果が得られたが、植えて間もない苗に対しての作用が強いため、株間チェーンが苗を抜いてしまうことや、なぎ倒していくことで欠株の原因にもなっていた。また、梅雨の時期にもかかわらず晴天が続いたときには水田にアオミドロなどの藻類が発生することがあり(図5)、この水田で株間チェーンを装着したアイガモロボットを走行させると、取り付け具に藻類が目詰まりし(図6)、走行のたびに苗をなぎ倒した上、藻類を被せ、枯死させる損害が生じた(図7)。



図5 アオミドロ発生田



図6 アオミドロ田走行直後の株間チェーン



図7 株間チェーンに倒された苗



図8 新型チェーン(試作品)

そこで今シーズンは、従来型の株間チェーンの代わりに、図8のような構造のチェーンを試作し、アイガモロボットに装着してアオミドロが発生しやすい水田で使用した。この試作チェーンは、軽量の樹脂チェーンとステンレスチェーンを結合した構造であり、アオミドロの上を通過しても従来の楕円部品のようにまわりつくことがなく、走行に伴い容易に洗い流され、苗を倒すこともない。

さらにこのチェーンは、苗が大きく育ってきた時期に苗列の上を走行しても受ける抵抗が小さいため、アイガ

モロボット運用終了の目安となる苗丈50cm程度(およそ5週目)まで使用し続けることが可能である。

ただし、この試作チェーンは構造上ロボットの駆動系に絡まる恐れがあることと、バネで楕円部品の先端を押しつけている従来型に比べ接地圧が低いため、抑草効果も落ちるのではとの懸念がある。これらの問題点については、次年度以降の課題と考えている。

4. まとめ

アイガモロボット試作機を岐阜県内7か所、県外2か所の現地実証圃に貸し出し、各オペレータの判断で自動運転、ラジコン操縦を併用しながら除草を目的として運用する実証実験を行い、その期間中の走行データを収集、解析した。その結果、ロボット1台にオペレータが集中しなければならない時間は間欠的かつ限定的(作業時短全体の5~30%)であり、ロボットを走行させながら別の作業、例えば枕地の整備や欠株の補植、あるいは2台目のロボット走行も可能であることを示唆するものである。

また平坦地で問題となっていた、アオミドロ発生時に走行した際の欠株についても、これまでよりも損害を抑える株間チェーンを試作した。

次年度には、これまでの実証圃の他に新規ユーザを加え、引き続き除草効果の試験を実施するとともに、初めてアイガモロボットを使う場合の課題抽出など、アイガモロボットが発売される状況を想定したサポート体制の在り方と、マニュアルづくりを進める予定である。

謝 辞

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

本研究に際し、農林水産業新技術導入広域推進事業に係る現地実証試験にご協力下さった水稻生産者、農業普及員の皆様に深く感謝いたします。

また、現地実証実験に先立ち、アイガモロボットの調整と試運転のために試験圃場を整備して下さいました岐阜大学応用生物科学部大場伸也教授、古川真一様、みのる産業株式会社、中山間農業研究所に深く感謝致します。

文 献

- [1] 光井ら，“水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(4)”，情報技術研究所研究報告，pp.11-12, 2013.
- [2] 広瀬ら，“水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の除草効果”，中山間農業研究所研究報告，pp.17-21, 2013.
- [3] 藤井ら，“水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(5)”，情報技術研究所研究報告，pp.32-34,

計数装置を用いた水田魚道を遡上する魚の計測

横山 哲也 米倉 竜次* 田畑 克彦

Counting Number of Migrating Fishes using Developed Equipment

Tetsuya YOKOYAMA Ryuji YONEKURA* Katsuhiko TABATA

あらまし 岐阜県では生物多様性に配慮した基盤づくりの一環として、水田と排水路をつなぎ魚の自由な移動を可能とする水田魚道の設置を推進している。設置の効果検証にあたっては、水田魚道を遡上する魚類等の種類、個体数などを定量評価する必要があるため、著者らは平成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3箇所では数カ月間の計測を行い魚の遡上を確認した。本報告ではその計測結果と課題について報告する。

キーワード 水田魚道、遠隔モニタリング

1. はじめに

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

昨年度は県内2箇所では計測を行い^[2]、魚の遡上を確認した。本年度は計測箇所を変え、県内3箇所では計測を行った。以下では現地での計測結果および課題について報告する。

2. 現地計測

2. 1 現地計測の概要

表1に本年度計測を行った県内3箇所の計測期間を、図1に計数装置を設置した水田魚道の風景を示す。何れの魚

表1 県内3箇所の計測期間

計測箇所	計測期間※
海津市馬目	5月 7日～ 8月 8日
郡上市白鳥	5月12日～ 8月29日
中津川市蛭川	5月27日～ 8月14日

※中干しや機器の不調等で計測していない期間も含む

道もコルゲート角型U字管で施工されている。計数装置は流れが緩やかな箇所に配置し、水の流れにより発生する泡の影響を受けないように配慮した。

2. 2 計数装置の改良

昨年度現地計測を行った際、継続した計測が困難であることが問題点として挙げた。計数装置は現地に設置されているため、装置の不調で計測不能に陥っても遠隔に居る人はそれを知る術がなく、バッテリー交換で現地に赴いた際に、データが計測されていないことがはじめてわかる。その結果、計測データに欠落期間が生じる。

その対策として本年度では3G通信モジュールを用いて、遠隔に居ながら計数装置の状態を把握できるモニタ



図1 現地計測を行った水田魚道（左：海津市馬目，中：郡上市白鳥，右：中津川市蛭川）

* 岐阜県水産研究所

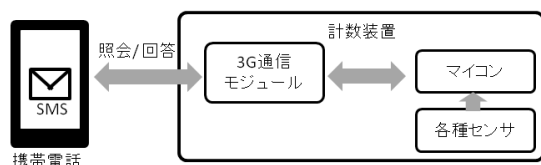


図2 SMSによる計数装置の遠隔モニタリング

表2 県内3箇所の計測結果

計測箇所	魚種	遡上数	降下数
海津市馬目	ドジョウ	190	110
	フナ類	20	3
	タモロコ	4	1
	不明	40	20
郡上市白鳥	ドジョウ	131	86
	カワムツ	12	17
	カワヨシノボリ	4	0
	不明	87	69
中津川市蛭川	ドジョウ	101	49
	カワムツ	346	286
	不明	10	7

リングの仕組みを追加した。図2にその概要を示す。遠隔に居る人が携帯電話等を用いて、計数装置に組み込まれた3G通信モジュール宛てにSMS(Short Message Service)を送ると、計数装置から現在のバッテリー電圧等の各種情報がSMSで返信される。これにより計数装置が不調で機能が停止している場合は、装置からの返信がないため不調に気付き、現地に出向いて対応することができる。

今年度の計測においても、計数装置からのSMSの返信がないことで装置の故障に気付き、現地に出向いて装置を復帰したことがあり、データ欠落期間を短くすることができた。

2. 3 計測結果

表2に今年度の計測結果を示す。魚の個体数は計数装置のカメラで撮影した画像からカウントした。魚種の特定は、予め排水路に生息している魚を調査で絞りこんでおり、カメラの撮影画像を基に目視で行った。遡上と降下は、撮影画像中の魚の頭が水田側・排水路側のどちらに向いているかで判断した。魚道内に留まっている魚に対して複数回カウントしている可能性はあるが、何れの魚道においても魚の遡上を確認することができた。

3. 現地計測における問題点とその対策

今年度計測を行った水田では常時排水が難しいことから、魚道の水かさ確保のため魚道内に堰板を設置した。そのため、図3に示すように魚道の底に設置した白板に泥が沈殿した。沈殿がひどくなった状態で夜間に撮影した画像は真っ暗となり魚の認識が難しくなる。そのため、白板に溜まった泥を定期的に取り除く必要が生じた。通常はバッテリー交換で現地に出向いた際に泥を取り除いていたが、バッテリー交換の間隔が長い場合は泥が溜ま



図3 計数装置のカメラによる撮影画像

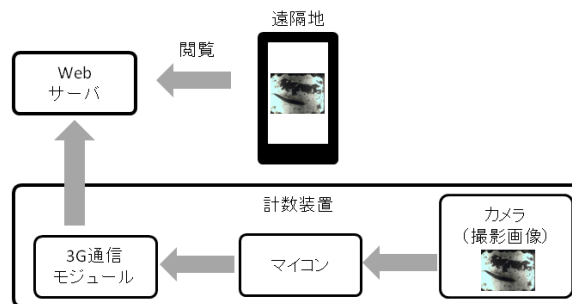


図4 Webサーバを用いた撮影画像の閲覧

った状態が長くなることになる。そのため、遠隔に居ながら泥を取り除きに行くタイミングを計れる仕組みが必要である。

対策として図4に示す仕組みを検討している。計数装置に付属しているカメラを用いて、定期的に白板を撮影し、その画像データを、3G通信モジュールを用いてネット上にあるWebサーバに転送する。遠隔に居る人はWebサーバに表示されている画像を閲覧することで白板の状況を把握し、泥を取り除く必要があれば現地に赴くことになる。なお、Webサーバへの画像の転送方法は、実装の観点からHTTP(Hypertext Transfer Protocol)メソッドのPOSTを用いる。

4. おわりに

本研究では水田魚道を遡上する魚の個体数、時間帯および魚種を特定する計数装置を用いて、県内3箇所で現地計測を数カ月行った。また、SMSを用いて計数装置の遠隔モニタリングを可能とする改良を行った。

来年度はWebサーバへの撮影画像の転送による閲覧が可能となるように計数装置の改良を行うとともに、現地計測を引き続き実施する。

文 献

- [1] 横山ら, "水田魚道を遡上する魚の自動計数装置の開発", 岐阜県情報技術研究所第14号, pp.19-20, 2013.
- [2] 横山ら, "水田魚道を遡上する魚の自動計数装置の開発(第2法)", 岐阜県情報技術研究所第15号, pp.19-20, 2014.

中小河川等における発電ポテンシャルの見積り方法について

－ 水文学タンクモデルの武儀川への適用 －

河村 隆雄

Estimation Method of Hydraulic Potential with Small Rivers

- Application of Hydrologic Tank Model to Mugi River -

Takao KAWAMURA

あらまし エネルギー資源の再生可能エネルギー化の重要性が叫ばれる中、岐阜県下で最も豊富といわれる水力エネルギーの利用を促進するために、中小河川の小水力発電ポテンシャルの簡便な評価方法の開発を目的として、洪水予測などに利用される直列タンクモデルを使用して河川の流況曲線を降水量から推定することを試みた。この手法に基づいて実際の武儀川の流況曲線との比較からタンクモデルの係数を調節したところ、本手法は小河川の発電ポテンシャルの推定に利用可能であると判断された。ただし短時間の流量変化の再現までは難しい。

キーワード 小水力発電、発電ポテンシャル、直列タンクモデル、流況曲線

1. はじめに

化石エネルギー資源の枯渇や地球温暖化に伴う環境破壊などのエネルギー問題への対応策として、エネルギー資源を化石燃料から太陽光や水力、風力、バイオマスなど再生可能エネルギーへの切替えの必要が叫ばれている。これらはエネルギー資源の国産化、地産地消に繋がり、国や地域経済の安定化に有効である。しかし現状では太陽光発電を除いて採算性の判断が難しく、普及ははかばかしくない。これに対処するにはこれら再生可能エネルギーのポテンシャル評価技術を開発する必要がある。

既に環境省では、平成20年度から23年度にかけて再生可能エネルギー導入ポテンシャルの調査を行い、結果をホームページ等に公開している^[1~3]。ただし100kW未満はひと括りにされるなど、一般市民に再生可能エネルギーによる電力ポテンシャル活用のインセンティブを引き起こすほどきめ細かいものにはなっていない。

岐阜県下に幅広く存在する主な再生可能エネルギーとして、太陽光、水力、バイオマス、そして地熱が挙げられる。中でも水力の賦存量は全国一位とされている。しかし中小の河川について、小水力発電のエネルギーポテンシャル算出に関わる具体的データは乏しい。

岐阜県では平成23年から24年にかけて、1kW以上の出力が見込まれる635箇所の農業用水について水力ポテンシャルの調査が行われ、その結果に基づき推定出力20kW以上の48箇所について地元の意向が調査された。しかし実

施に動き始めた所は大きな出力の見込める数カ所であった。これは、設置場所ごとに水車の仕様が異なることや、関連施設の建設、維持管理などの費用を含めるとコストがかさむと判断されたことが原因とされている。

県下の中小河川においても発電可能な地点は多数存在すると予想されるが、これについて年間の流量データもそろっておらず、発電ポテンシャルの判定に多大の労力と時間を要し、発電設備設置への決断を妨げる要因となっている。そこで、県内各地について季節ごとの需要に応じたきめ細かな発電ポテンシャルの評価を迅速に行う手法の開発が期待される。これは小水力発電施設の設置個所の増加にも繋がり、設備および設置費用や管理運営コストを低減させる方策の一つになると考えられる。

近年、洪水などの水災害予防の観点から、水文学に則り、その地域の雨量に基づいて河川等の流量を予測する手法が発達している。そこで本報告では、中小河川の持つ小水力発電ポテンシャルの分布を市町村レベルよりも小さな空間スケールで明らかにするために、中小河川の流量の予測にこの手法を適用することを試みた。

2. 小水力発電ポテンシャルの評価方法

2.1 水力の発電ポテンシャル

水力発電のポテンシャルは、水車設置個所における河川もしくは用水の有効落差 $H[m]$ と流量 $Q[m^3/s]$ から次式によって計算される。

$$P = \eta \rho g Q H \quad [\text{W}] \quad (1)$$

ただし、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 η は発電施設の総合効率である。このように水力発電ポテンシャルは主に流量と有効落差から求めることができる。有効落差は実落差(水源の水面と水車からの流出水面の高度差)から、損失水頭(水の流動に伴うエネルギー損失を水位に換算したもの)を差引いたものである。実落差は地形図から得られるが、損失水頭は導水路の長さや形状などによって決まるものであり、ここでは損失水頭は考慮せず、有効落差は実落差に等しいとする。

流量については、既に計測データがある事例は少なく、新たに計測が必要な場合が多い。しかし発電ポテンシャルを評価するには数年から10数年にわたる継続的測定が必要であり、また一般に計測に手間がかかるため実施は容易でない。そこで本報告では、比較的入手の容易な地区近隣の雨量から河川等の流量を推定する方法を提案する。

2.2 流況曲線と発電ポテンシャル

河川の流量は日々変化するが、水車の運転可能な最大流量を超える流量、同じく最小流量未満の流量では発電できない。また、水車が効率よく動作する流量の範囲は、水車の設計点流量の両側のあまり広くない範囲に限られる。そこで水源に適した水車を選定するために、また年間の水力発電ポテンシャルを評価するために、水源の年間の流量分布を調べておく必要がある。これを見積もる道具として河川の流況曲線がある。

流況曲線とは、図1に示すように、1年間の日流量の観測値を順位付けし、縦軸に日流量、横軸に順位をとって表示したものである。この流況曲線において、水車の許容最大流量以上の領域(右上り斜線部)および、運転可能な最小流量より右側の領域(右下り斜線部)を切捨てた面積 a-b-c-d-e が年間に利用可能な総流量となる。この総流量を式1に当てはめて発電量を計算したものが、その地点において年間に期待できる発電電力量になる。

この図を描くには、その地点の流量の時系列データ

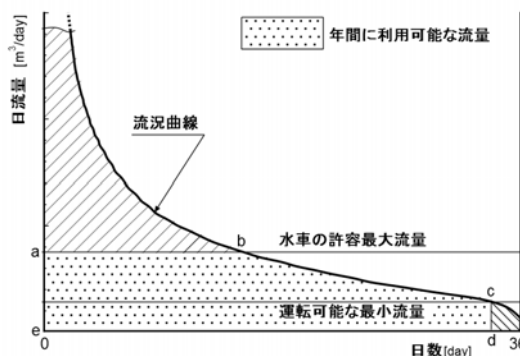


図1. 河川の流況曲線と年間の利用可能な流量

を長期間収集する必要があるが、これをその地域の降水量から推定できれば、短期間にその地点の発電ポテンシャルを推定できるとともに、何カ年にもわたる流量測定のコストが節減できる。

2.3 河川の流量と雨量の関係(タンクモデル)

水文学で河川の流量を予測するための最も簡便な方法として、直列タンクモデルと呼ばれる手法がある。このモデルは図2に示すように、一つもしくは複数の排出口を持つタンクを複数、縦に積み上げたものである。直列タンクモデルの各タンクは、その土地の地層に相当し、タンクの排出口からの流出量は地層内を流れる地下水の流量に相当する。タンクの下部には下方の地層へ浸透する地下水の流量を与える。雨や雪などの降水はいったん第1タンクに貯えられ、タンク内の水位に応じてその一部が側方パイプを通して地表面上へと流れ出す。

気象庁では、土砂災害警戒情報及び大雨警報・注意報の発表の基準となる土壌雨量指数^[4]を算定するにあたって、図2に示す Ishihara & Kobatake^[5]の直列3段タンクモデルを使用している。これは第1タンクに二つの側方パイプを設け、ある水位以上になると流出量が折線状に増加して出水状況を表現する。本報もこれを踏襲するが、平常時の流量への対応に重きを置く。

2.4 評価対象流域の選定とその面積の算出

流量の推定を行う河川流域の選定にあたって、次の事項を条件とした。(1)流量観測所が存在すること(必須)、(2)雨量観測所が存在すること(必須)、(3)河川流量を支配する大規模発電所や他河川からの大規模な流入(農業用水など)が存在しないこと、(4)流域面積が過大でないこと、(5)現地確認が容易なこと、などである。結果として当研究所に比較的近い武儀川が残った。

次に、対象河川の流量観測所の観測流量に関わる流域の面積を調べた。これには図3に示すように、国土交通省^[6]より入手した流域マップから谷口流量観測所への流入に関わる区域を切り出し、その区域のピクセル数を数えることで求めた。なお、流域面積算出の基準として、近隣の美濃市域のピクセル数を求め、これと比較することで流域面積137.2km²が求められた。また、後にこの流

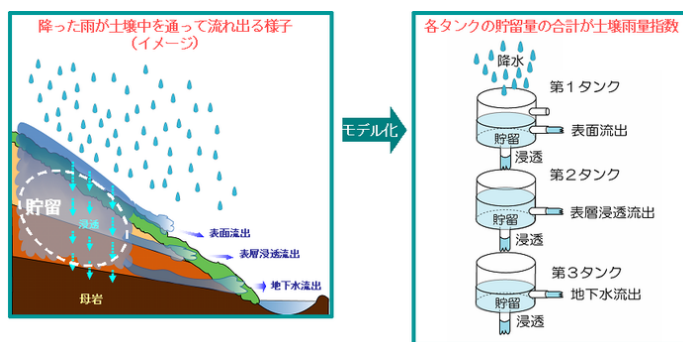


図2. 直列3段タンクモデル^[4]



図3. 武儀川流域図

域を細分した小流域毎の流量推定を行うために、各小流域の面積も求めた。

2. 5 流域流量の推定方法

直列タンクモデルにおける各タンクの側面孔からの流出量 q_i ($i=1, 2, 3$, 以下同様)は次のように記述される。

$$q_1(t) = \alpha_0 \{S_1(t) - L_0\} + \alpha_1 \{S_1(t) - L_1\}$$

$$q_2(t) = \alpha_2 \{S_2(t) - L_2\}$$

$$q_3(t) = \alpha_3 \{S_3(t) - L_3\}$$

ここで L_i は側面孔の高さ、 α_i は側面流出孔の流出係数、 β_i は底面浸透孔の浸透係数で、各係数のタンク部位との対応を図4に示す。河川への流出量は、各タンクの側面流出孔からの流出流量の総和によって与えられる。なおタンク内の水位 S_i は次式で与えられる。

$$S_1(t + \Delta t) = (1 - \beta_1 \Delta t) \cdot S_1(t) - q_1(t) \cdot \Delta t + R$$

$$S_2(t + \Delta t) = (1 - \beta_2 \Delta t) \cdot S_2(t) - q_2(t) \cdot \Delta t + \beta_1 \cdot S_1(t) \cdot \Delta t$$

$$S_3(t + \Delta t) = (1 - \beta_3 \Delta t) \cdot S_3(t) - q_3(t) \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot S_2(t) \cdot \Delta t$$

ここで R は降雨量である。係数 L_i , α_i , β_i の値は流域の地質、土地利用状況などによって様々に変化するが、当

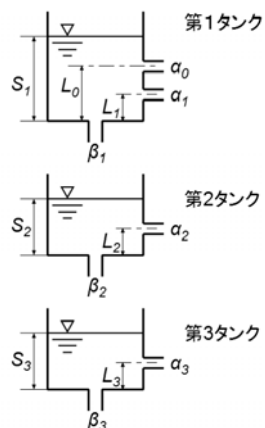


図4. 直列3段タンクモデルの各種係数

該流域については時期を選ばず普遍であるとみなす。すなわち、これらの係数が定まればどのような時期においてもこれらの係数を用いて流域の雨量から河川の流量を予測できる。しかし初めて予測を行う段階ではこれら係数の値を求めることが課題となる。一般的には各係数に仮の値を与えて流量を推定し、観測流量と推定流量の両者がフィットするよう係数を調整するが、この方法は多大な労力を要する。そこで本報告では、目的が流況曲線を得ることにあることから、直接、流況曲線をフィットさせることで係数を選定した。

求まった係数の普遍性を高めるには、長期間にわたる流量測定値との比較が必要である。今回選定した武儀川では谷口地区に流量観測所があり、2009年から2013年の5カ年にわたる流量観測データが貯えられている。また、流量推定に用いる降水量は、流域内の葛原の雨量観測所に1976年から2015年までの雨量データが蓄積されており、谷口の流量観測期間を全てカバーしており、これを用いることにした。後出の図6に2010年における武儀川谷口で観測された流量と葛原の降水量を示す。

なお、上記5カ年の観測期間の降水量及び流量観測値の総量を求めたところ、流量の総量は雨量の総量よりも約1割少なく現れた。これは、蒸発の効果というよりは、むしろ大出水時に流量観測データが多数「欠測」になっていることが影響していると考えられる。このため降水量は全て、いずれ河川に流入するとして扱う。

3. 各種係数の選定と流量の推定結果

降水量から推定した流況曲線が流量観測値に基づく流況曲線にフィットするよう係数を調整した。表1に、得られた係数を気象庁が土砂災害等の予測に使用している係数と比較して示す。着目する時間スケールの違いから両者は大きく異なる値になった。

図5に、2009年から2013年の5年間の武儀川の谷口流量観測所における観測値に基づく流況曲線を示す。図の縦軸は、単位流域面積あたりの流量[mm/day]であり、また小流量領域を見易くするために対数表示をした。上述の方法による推定流量から得た流況曲線を同じ図の中に一点鎖線で示す。出水域や渇水域以外では実際の流況曲線と良好な一致を示しており、今回、約140km²におよぶ広大な流域を一組の直列3段タンクモデルで近似したにも

表1. 流量の推定に使用した係数

No.	本報告			気象庁洪水予測		
	Tank	Pipe	L_i	α_i	β_i	L_i
1	0	60	0.1	0.006	60	0.15
	1	25	0.001		15	0.1
2	2	30	0.3	1.0	15	0.05
	3	7	0.75	0.0	15	0.01

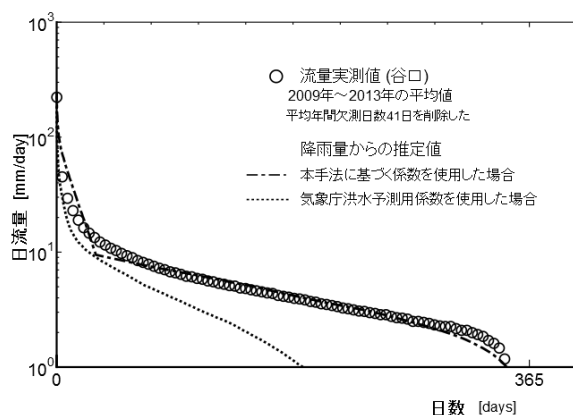


図5. 武儀川の流況曲線(実測値と推定値の比較)

関わらず、小水力発電に必要な流量域の流況曲線をほぼ再現できた。なお図中に気象庁の土砂災害等予想用係数による推定結果を点線で表示したが、出水域以外では流況曲線は再現されない。また図5の縦軸を図1のようにリニアに戻し、これに水車の許容最大流量、最小流量を設定すれば谷口流量観測所における年間発電能力を評価できる。

次に図6に、ここに得られた係数を用いて各時刻の流量を推定した結果を一点鎖線で、また谷口流量観測所における実測値を○印で示す。流量が平常なときの時間平均的な流量変化は、流量がごく少ない場合を除きほぼ再現されている。また大出水時の流量変化も表現されており、季節的な変動を含めた水力ポテンシャルの予測に役立つと考えられる。なお図中の点線は気象庁の土砂災害等予測用係数を用いた流量推定結果で、大出水時の流量変化は再現されるが、平常流量時は再現されない。

以上は、谷口流量観測所に関わる流域について推定したものである。実際に小水力発電所を設置する場合、これを当該発電所に関わる小流域に適用する必要がある。ここに求めた係数は土質や地層の厚さ、土地の利用状況などによって変化すると考えられるが、小流域のこれら

の性質が今回適用した広流域の平均値と類似であれば、ここで得られた係数はほぼ有効であり、ここで得られた面積当たりの推定流量を当該小流域の面積当たり流量とみなして発電ポテンシャルを推定することができる。

4. まとめ

中小河川の水力発電ポテンシャルの簡便な推定手法開発のために、3段直列タンクモデルを武儀川流域に適用し、実測の流況曲線との比較によってタンクの各種係数の調整を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 流況曲線を小水力発電のポテンシャルの見積もりに必要な程度に再現することができた。
- (2) これに基づく流量推定結果は、季節的な水力ポテンシャル変動がほぼ推定できることを示している。

この手法を小流域の発電ポテンシャル推定に使用していくには、流域の地質などいくつかの要因が各種係数に及ぼす影響について調査する必要がある。

文 献

- [1] 環境省. 平成21年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書(2010,3)
- [2] 環境省. 平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書(2011,4)
- [3] 環境省. 平成23年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書(H24,6)
- [4] 気象庁, 土壌雨量指数の解説,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>
- [5] Ishihara, Y. and S. Kobatake (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ.,29,27-43
- [6] 国土交通省, 主要水系調査成果一覧システム,
<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/risui/suikai/index.html>

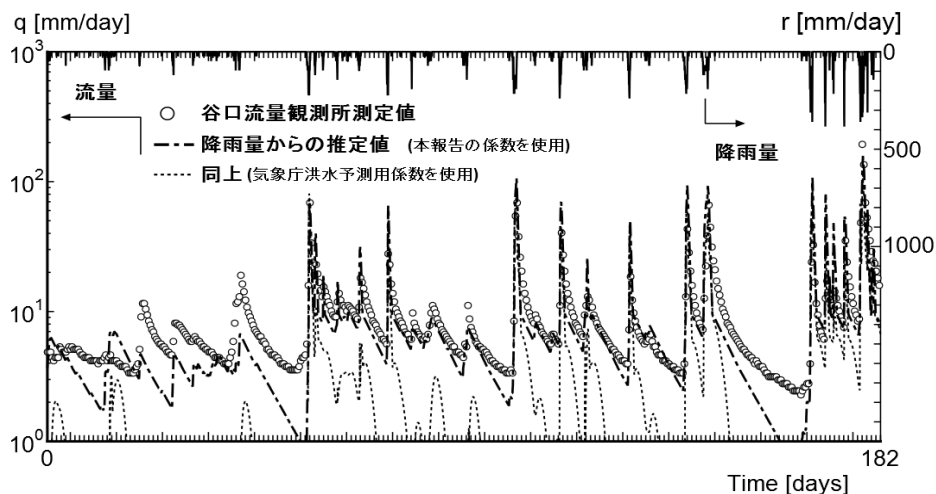


図6 得られた係数による推定流量と実測値との比較 (2010年1日～6日)

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 16 号 平成 26 年度

発行 平成 2 7 年 7 月 1 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>
