

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 1 5 号 平成 2 5 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

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）	1
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	9
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）	15
— 超音波フェーズドアレイ測位システム —	
生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発	21
— センシングシステムの設計と試験金型の試作 —	
生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発	25
— 樹脂流動解析シミュレーション技術に関する研究 —	
防災情報システムの高度化に関する研究（第2報）	30
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発（第5報）	32
水田魚道を遡上する魚の自動計数装置の開発（第2報）	35
人の動線推定に関する研究開発（第3報）	37
— フィルタアルゴリズムの改良とランドマークによる位置補正 —	
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）	41
音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価（第2報）	45
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2報）	49
断続切削における被削材の固有振動に関する検討	52

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)

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 (3rd 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する中で、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）が増加しつつあり、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するために、観光客の位置に基づいた AndroidTM 用情報提供アプリケーションを開発し、高山市を訪れた観光客の行動データを計測した。また、得られた行動データから高山市における観光客の回遊性について分析し、開発したアプリケーションについても評価した。

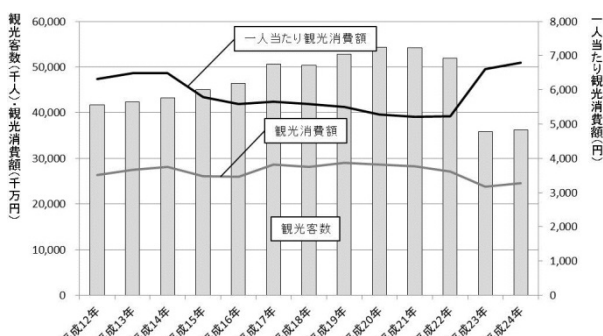
キーワード 観光, Android, 行動計測, 行動モデル, 主成分分析, アプリケーション評価

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、これまでにない旅行形態が注目を集めるようになることで、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]が急激に増加しつつあり、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。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



※平成22年までは「岐阜県観光レクリエーション動態調査」結果、平成23年からは「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

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、本研究開発では、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の構築を目指している。本年度は、これまでに開発したアプリケーション^[4]とは別に、新たな AndroidTM 用情報提供アプリケーションを開発し、高山市を訪れた観光客の行動データを収集する実験を行った。また、得られた行動データから高山市における観光客の回遊性について分析し、開発したアプリケーションについても評価した。本稿では、これらの内容について報告する。

2. 情報提供アプリケーションの開発

これまでに開発した Android 用情報提供アプリケーション（以下、旧アプリ）は、地図を表示するマップビュー、カメラ映像を表示するカメラビュー、コンテンツを表示するコンテンツビューから構成されていたが、新たに開発した Android 用情報提供アプリケーション（以下、新アプリ）は、図 2 に示すマップビューとコンテンツビューのみの構成とした。

マップビューは、Google 社が提供する Google Maps Android API v2 を利用し開発した。マップビューの左上隅にはコンパスアイコン、右上隅にはロケーションアイコン、中央には現在地を示す楕円状のマーカーが配置されている。また、マップビューにはコンテンツの位置を示すバルーン状のコンテンツマーカーが配置され、コンテンツマーカーをタップすることにより表示される吹き出し状のインフォウィンドウを再度タップすることでコンテンツビューを表示することができる。コンテンツは、タイトル、評価値、写真、コメントを 1 セットとしてコンテンツビューを構成しており、コンテンツが複数のビューから構成されている場合は、コンテンツビュー上部の表示切り替えタブをタップすることでビューを遷移することができる。

提供するコンテンツ数については、旧アプリが 380 件であったのに対して、新アプリでは 20 件とした。ただし、新アプリでは観光客が散策中にコンテンツを登録することが可能であり、マップビューで現在地から 50m 以内の任意の位置をロングタップすると登録ダイアログを表示するようインタフェースを実装した。また、コンテンツビューでは、コンテンツとの距離が現在地から 50m 以内の場合、表示切り替えタブ右側にプラス記号が記された追加タブを表示し、追加タブをタップすることにより既存コンテンツへの写真、コメントの追加を可能とするとともに、コメント欄のロングタップによるコメントのみの追加も可能となるようインタフェースを実装した。

また、新アプリにはコンテンツの評価が可能となるよ



(a) マップビュー (b) コンテンツビュー
図2 アプリケーションの画面

うコンテンツビュー下部の左側に評価ボタンを配置した。コンテンツの評価は、評価値の最大値を 5 とし、(評価ボタンのタップ数/コンテンツ画面の閲覧数) × 5 で算出しており、一度評価ボタンをタップすると 24 時間以内は再度タップできず、コンテンツから 50m 以上離れていてもタップできない仕様とした。評価結果は、マップビューではインフォウィンドウ内の星印の着色数で提示され、コンテンツビューでは数値として提示される。現在地から 50m 以上離れているコンテンツのコンテンツビューについては、評価ボタンではなく経路探索ボタンが表示され、タップするとマップビューに歩行、若しくは自動車での経路、距離を表示する。

さらに、観光客の移動、コンテンツ登録・評価、経路探索等のイベント発生に応じて、イベント情報をネットワークに接続されたデータベースに蓄積する技術を実装した。また、イベントの内容に応じてデータベースを検索する技術も実装し、観光客の行動に応じて観光情報をリアルタイムにフィードバックする機能を実現した。

なお、旧アプリについては、昨年度実施した行動データ収集実験ではアプリケーションが異常終了するケースが散見されたが、アルゴリズムを見直し、安定した動作が可能となるようプログラムを改良した。

3. 観光行動データの収集

昨年度は高山市において平成 24 年 10 月 11 日から平成 25 年 1 月 31 日まで旧アプリを使用した行動データ収集実験^[4]（以下、実験 1）を実施した。今年度についても昨年度と同様、観光客の行動データを収集するために、高山市において平成 25 年 7 月 13 日から平成 25 年 9 月 30 日まで旧アプリを使用した実験（以下、実験 2）と、平成 25 年 10 月 7 日から平成 26 年 1 月 15 日まで新アプリを使用した実験（以下、実験 3）について、参加者を募集することにより行った（委託先：山都印刷株式会社、岐阜県高山市西之一色町 2-90）。何れの実験についても、参加者は、①中学生以上であること、②飛騨地域（高山

表1 観光行動データの収集結果

項目	実験1	実験2	実験3
実験参加者数	79人	87人	70人
データ取得時間(総和)	181.8時間	203.7時間	153.8時間
データ取得時間(平均)	2.3時間	2.3時間	2.2時間

市、飛騨市、下呂市、大野郡白川村)以外に居住していること、③高山市内を2時間以上散策できること、④行動データの利用について承諾を得られることを条件に募集した。

実験を開始する前には、参加者に実験の目的、アプリケーションの操作方法等を説明し、高山市内を散策中は極力アプリケーションを使用するよう依頼した後、アプリケーションをインストールした Android 端末を貸し出すことにより実験を実施した。また、終了後には、観光客の動態調査等で実施される項目に加え、アプリケーションの操作性等の項目に関するアンケートを実施した。

行動データとしては、位置情報に加え、スマートフォンに内蔵されているセンサ等の情報を記録したデータを収集した。また、アプリケーションのタッチ操作等の使用状況を記録したデータ等についても収集した。その結果、表1に示す人数、時間について行動データを収集することができた。

4. 観光行動データの分析

4. 1 行動データによる高山市の特徴分析

表2にアンケート調査による参加者の特徴について示す。参加者像を素描すると、女性、愛知県を始めとした隣接県からの来訪者、宿泊客、4回目以上の来訪者、自家用車利用者が多く、秋・冬季(実験1、実験3)は夫婦・友人等の2人連れ、夏季(実験2)は家族連れ等の3人以上が多い。これらのことから、近県であっても宿泊旅行の目的地となり得るとともに、何度でも訪れたい観光地であることが推測できる。なお、高山市の平成24年観光統計では、男性/女性の比率が55%/45%、日帰り客/宿泊客の比率が48%/52%であったことなどから、実際の高山市の観光客像とは異なっている。また、本実験では50代以上の参加者が少ないことから、年齢を重ねるほど、観光地でのITの利活用に対する抵抗感が増加したのではないかと推測している。

次に、収集した行動データから実験参加者の移動経路、滞在時間、移動速度について分析した。分析にあたってはマイクロソフト社の Bing Maps Platform API を利用した Silverlight アプリケーションを開発し、結果を描画した。移動経路、滞在時間、移動速度の分析結果をそれぞれ図3、図4、図5に示す。

図3は、観光を目的として、徒歩で移動している参加者の位置情報を抽出し、参加者毎の移動履歴に基づいて描画したものである。なお、図中のバルーンマーカーは実験の開始・終了地点を示す。実験1(図3(a))では、

表2 実験参加者の特徴

項目	実験1	実験2	実験3
性別			
男性	38人 48.1%	32人 36.8%	24人 34.3%
女性	41人 51.9%	55人 63.2%	46人 65.7%
年齢			
10代・20代	32人 40.5%	40人 46.0%	33人 47.1%
30代・40代	34人 43.0%	43人 49.4%	32人 45.7%
50代以上	13人 16.5%	4人 4.6%	5人 7.1%
住所			
岐阜県	12人 15.2%	11人 12.6%	13人 18.6%
愛知県	26人 32.9%	34人 39.1%	19人 27.1%
隣接県※	8人 10.1%	13人 14.9%	21人 30.0%
東日本	21人 26.6%	11人 12.6%	13人 18.6%
西日本	12人 15.2%	15人 17.2%	3人 4.3%
海外	0人 0.0%	3人 3.4%	1人 1.4%
目的			
ビジネス	15人 19.0%	4人 4.6%	4人 5.7%
観光	60人 75.9%	76人 87.4%	61人 87.1%
その他	4人 5.1%	7人 8.0%	5人 7.1%
種別			
日帰り	15人 19.0%	18人 20.7%	23人 32.9%
宿泊	64人 81.0%	69人 79.3%	47人 67.1%
同伴者数			
0人	8人 10.1%	6人 6.9%	4人 5.7%
1人	39人 49.4%	36人 41.4%	41人 58.6%
2人以上	32人 40.5%	45人 51.7%	25人 35.7%
訪問回数			
1回目	25人 31.6%	19人 21.8%	23人 32.9%
2～3回目	27人 34.2%	32人 36.8%	20人 28.6%
4回目以上	27人 34.2%	36人 41.4%	27人 38.6%
交通手段			
電車	22人 27.8%	19人 21.8%	10人 14.3%
バス	24人 30.4%	0人 0.0%	5人 7.1%
車	33人 41.8%	68人 78.2%	55人 78.6%

※愛知を除いた三重、長野、富山、石川、福井、滋賀の6県。

国分寺通り(鍛冶橋を起点として、国道158号を西に進み、県道74号をそのまま直進し、高山駅北交差点を終点とする通りの通称)沿いにある店舗を実験開始・終了地点としたため、国分寺通りを移動する参加者が多いが、各実験とも古い町並(三町伝統的建造物群保存地区、及び下二之町大新町伝統的建造物群保存地区)、特に上三之町を中心として回遊していることが分かる。実験3(図3(c))では、実験開始2週間後から中橋が改修工事による全面通行止めとなったため、中橋の移動量が減少し、迂回路として、宮川沿いを北に移動し、筏橋を利用していることが推測できる。

図4は、図3と同一の参加者について、地図を矩形領域に分割することにより、各領域内に滞在した時間を参加者毎に抽出し、各領域内で最大の滞在時間を有する参加者の滞在時間に基づいて描画したものである。なお、図中の領域の1辺の長さは約10mであり、右上凡例中の t は時間、単位は秒である。図3においては上三之町以外の古い町並を回遊している様子が伺えるが、図4においては、上三之町での滞在時間は確認できるが、上三之町以外の古い町並での滞在時間がほとんどないことから、多くの参加者が古い町並でも上三之町以外は通過しているだけであることが明らかである。古い町並以外では、高山陣屋、飛騨高山まちの博物館、桜山八幡宮(高山祭屋台会館、桜山日光館を含む)、飛騨国分寺、宮川朝市(下三之町(宮川沿い)の路上にて、飛騨高山宮川朝市協同組合によりほぼ毎朝行われている朝市)等に滞在しているが、上三之町と比較すると短時間の滞在であることが



(a) 実験1



(b) 実験2



(c) 実験3

図3 実験参加者の移動経路



(a) 実験1



(b) 実験2



(c) 実験3

図4 実験参加者の滞在時間

分かる。

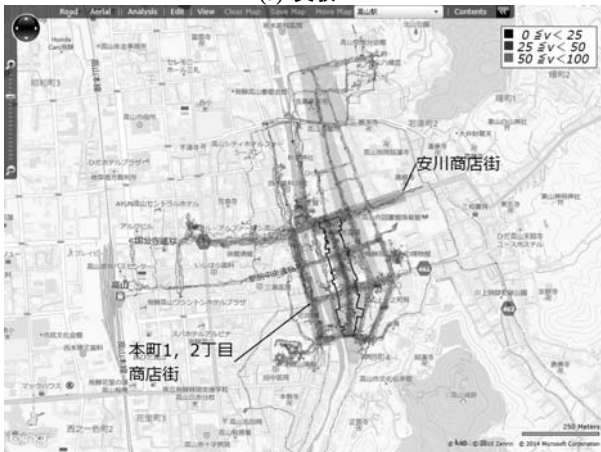
図5も、図3と同一の参加者について、各画素内における移動速度を算出し、画素毎に参加者の移動速度を平均した値に基づいて描画したものである。なお、図右上凡例中の v は速度、単位は $m/分$ である。図5からも、上三之町においては他と比較して速度が遅く、時間を掛けて観光していることが推測できる。上三之町以外では、実験2(図5(b))で本町1、2丁目商店街、安川商店街での移動速度が遅くなっているが、実験2の実施時期が夏季であったため、アーケードのある通りで、日差しを避

けて回遊していると予想される。

これらの結果とアンケートで集計した観光消費額との関係を表3に示す。表中の値は、各項目(相関係数を除く)とも観光を目的として、徒歩で移動している参加者の平均値である。なお、滞在時間については、図4中の5分以上滞在した矩形領域内の滞在時間を使用して算出しており、移動速度、滞在率については、それぞれ移動距離、滞在時間を計測時間で除した値である。表より、本実験においては、移動距離、滞在時間、移動速度、滞在率の各項目と観光消費額との相関係数が低いことが明



(a) 実験1



(b) 実験2



(c) 実験3

図5 実験参加者の移動速度

表3 行動データと観光消費額との関係

項目	実験1	実験2	実験3
計測時間	122.63分	124.18分	120.12分
移動距離(A)	3,909.46m	2,259.17m	2,429.40m
滞在時間(B)	49.25分	69.83分	46.13分
移動速度(C)	31.88m/分	18.19m/分	20.23m/分
滞在率(D)	40.16%	56.23%	38.41%
観光消費額(E)	38,187円	35,917円	22,102円
AとEの相関係数	-0.180	-0.177	-0.004
BとEの相関係数	0.015	0.143	-0.047
CとEの相関係数	-0.167	-0.002	-0.086
DとEの相関係数	0.112	0.091	-0.108



図6 対象領域

らかとなった。ただし、本実験においては、3で記述したとおり、「高山市内を2時間以上散策できること」という条件を実験参加者に与えている。また、同伴者数に違いはあるが、夏季（実験2）は秋・冬季（実験1, 3）に比べて移動が少なく、滞在時間が長くなる傾向がある。

4. 2 回遊行動モデルの生成

実験で得られた行動データから、観光を目的とした参加者のデータを使用し、回遊行動モデルを生成する。モデルは、高山市を任意の矩形領域に分割し、領域間の移動率を算出することにより生成した。

まず、モデルを構成する領域間の移動率を求めるため、候補領域を設定した。候補領域は、鍛冶橋を中心とする地図上で、一辺の長さが約100mとなる矩形領域で地図を分割し、図4と同様に、観光を目的とした実験参加者の行動データから、各領域内に滞在した時間を参加者毎に求め、各領域内の滞在時間の総和が1時間以上となる領域をJR高山本線以東の地域から設定した。

次に、位置情報と計測時間を用いて各参加者の候補領域間の移動数を求めた。候補領域間の移動数を求めるにあたっては、参加者毎の領域内の滞在履歴を求める必要があるが、滞在履歴は、同一領域内に滞在する時間が連続して5分以上ある場合、5分間を1回の滞在とみなし、時系列順に滞在領域と滞在数を求めた。例えば、ある領域で連続してT分滞在した場合、滞在数はT/5回とし、小数点以下は切り捨てることとした。その後、横軸が移動元、縦軸が移動先となるODマトリクスを作成し、滞在履歴から候補領域間の移動数を算出した。この時、領域Aで連続してN回滞在した場合、A-A間での移動数はN-1回となり、領域A、次に領域Bに滞在した場合、A-B間での移動数は1回となる。

最後に、各参加者の候補領域間の移動数を統合し、ODマトリクスの横軸毎に移動数の和を求め、和が12回以上ある領域を対象領域として選定し、前述の処理を繰り返すことにより対象領域間の移動数を求め、各横軸について移動率を求めた。図6に移動率を求めた対象領域を、表4に対象領域間の移動率を示す。図中の番号は、領域

表4 対象領域間の移動率

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
1	0.821	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.107	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.000	0.870	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	0.813	0.000	0.000	0.000	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	0.000	0.000	0.107	0.571	0.000	0.107	0.107	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.818	0.000	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.548	0.032	0.065	0.000	0.032	0.258	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.032	
7	0.007	0.007	0.000	0.014	0.000	0.029	0.643	0.000	0.000	0.007	0.107	0.014	0.014	0.007	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.079	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.056	0.000	0.000	0.278	0.111	0.056	0.000	0.111	0.000	0.111	0.056	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.904	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.000	0.027	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	0.000	0.000	0.000	0.105	0.000	0.053	0.158	0.000	0.000	0.263	0.158	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.100	0.005	0.000	0.000	0.053	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.016	0.041	0.010	0.000	0.021	0.648	0.005	0.005	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.041	0.130	0.016	0.010	0.000	0.010	0.000	0.005	0.016	0.000	0.000	0.000	
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.794	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088	0.000	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.000	0.000	
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.130	0.043	0.087	0.000	0.000	0.087	0.000	0.304	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.130	0.130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.681	0.085	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.286	0.000	0.000	0.000	0.190	0.238	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.143	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.095	
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.857	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.826	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.083	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.167	0.000	0.000	0.000	0.167	0.250	0.000	0.083	
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.033	0.767	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067	0.033	
20	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.078	0.013	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.032	0.740	0.071	0.000	0.013	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	0.000	
21	0.005	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.015	0.006	0.000	0.002	0.026	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.025	0.797	0.058	0.031	0.003	0.001	0.000	0.002	0.001	0.002	0.005	0.001	0.005	
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.017	0.009	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.109	0.620	0.135	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044	0.000	0.004	0.000	
23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.054	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.074	0.074	0.537	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.034	0.074	
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.029	0.029	0.486	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.086	0.229	
25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.263	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.526	0.105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.054	0.135	0.000	0.081	0.000	0.000	0.000	0.000	0.649	0.000	0.027	0.000	0.027	
28	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.073	0.036	0.055	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.836	0.000	0.000	0.000		
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.429	0.000	0.000	0.571	
30	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.011	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.091	0.102	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.023	0.625	0.000	0.000	0.011	
31	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.068	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.114	0.705	0.045	0.000	
32	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.000	0.073	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.109	0.073	0.618	
33	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.014	0.058	0.000	0.826		
Avg.	0.001	0.000	0.004	0.009	0.000	0.010	0.027	0.007	0.012	0.005	0.040	0.001	0.008	0.010	0.012	0.006	0.007	0.004	0.003	0.014	0.040	0.026	0.017	0.004	0.016	0.008	0.009	0.004	0.008	0.023	0.008	0.011	0.026	

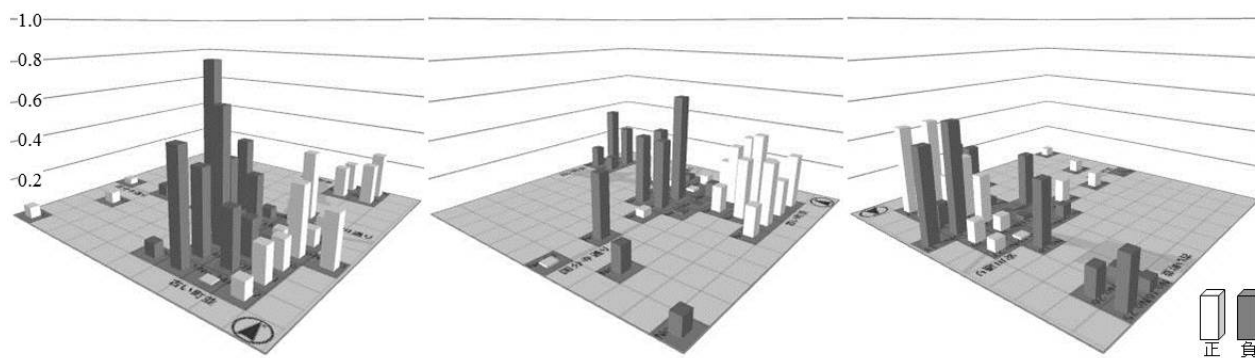


図7 因子負荷量

を区別するために付した番号であり、表中の番号と同一である。

実験開始・終了地点を含む領域を除けば

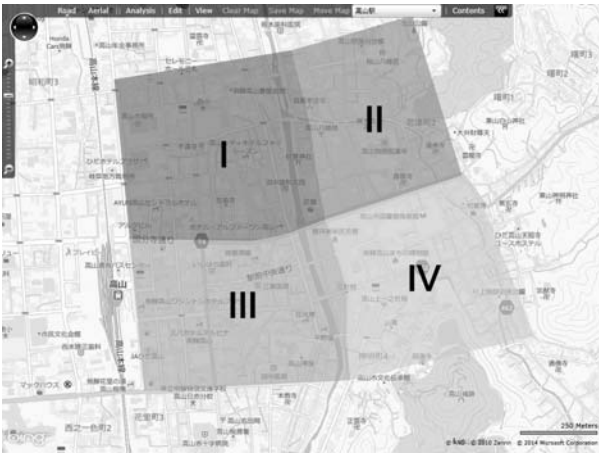


図8 分割した高山市の観光エリア

分割した4つのエリアから構成されると推測できる。さらに、第3主成分は各エリアにおける回遊性の高さを示す因子負荷量を有していると考えられる。つまり、回遊性は第IVエリアが最も高く、次いで第II・IIIエリア、最も低いのが第Iエリアと推測できる。

これらの特徴は、従来予想されていた高山市の観光における回遊性の特徴と一致しており、実験中の回遊行動と従来の回遊行動との間に差がないことに加え、領域間の移動率から生成した回遊行動モデルの有効性を示しているといえる。なお、図4(b)で示した宮川朝市を除く4つの施設について、領域間の移動があるかどうか移動率を求めたところ、飛騨国分寺から飛騨高山まちの博物館への移動が1回あるだけで、それぞれの施設は独立した滞在先となっていると予想される。従って、実験中の高山市における観光経路としては、上三之町を中心とした古い町並を散策するコース、あるいは古い町並と4つのエリアのうちの何れかの観光施設を回遊するコースが代表的であると考えられる。

4. 4 アプリケーションの評価

開発したアプリケーションを評価するために、収集した行動データからデータの収集率、及びコンテンツのアクセス状況等を分析する。

まず、各実験における行動データの収集率を算出する。収集率は、表1のデータ取得時間内に記録することができた行動データの内、GPSによる位置データの計測時間の総和をデータ取得時間の総和で除した値である。各実験における行動データの収集率は、実験1から3の順に69.5%、87.2%、89.5%であった。実験1の収集率が低い要因としては、使用したAndroid端末（シングルコア、動作周波数：1GHz）の処理性能が低く、複数の処理を同時に起動した時に発生する処理の遅延を原因としたアプリケーションの異常終了であった。そのため、実験2、3では使用するAndroid端末（デュアルコア、動作周波数：1.5GHz）を変更したことで大幅に収集率が向上した。また、Android端末がGPSを捕捉するまでに時間を要したり、GPSを捕捉できず位置データの計測に無線ネット

表5 コンテンツに対するアクセス状況

項目	実験1	実験2	実験3
実験参加者数	79	87	70
コンテンツ数※1		380	21
見る・知る		66	3
食べる・飲む		54	14
買う		158	4
泊まる		72	0
その他		30	0
閲覧数	663	571	87
見る・知る	64	64	18
食べる・飲む	175	123	56
買う	345	263	13
泊まる	42	55	0
その他	37	66	0
実訪問数※2	77	39	16
見る・知る	1	6	4
食べる・飲む	24	7	11
買う	52	26	1
泊まる	0	0	0
その他	0	0	0

※1 実験3は実験終了時におけるコンテンツの登録数

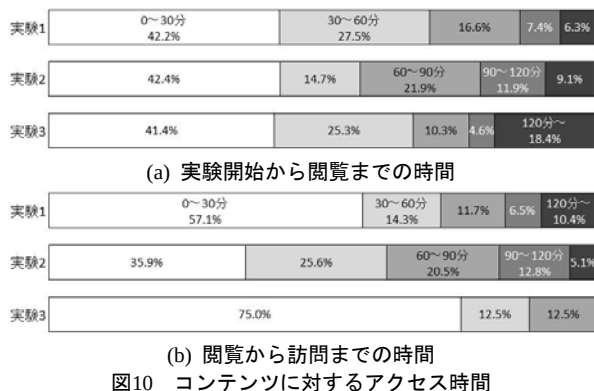
※2 コンテンツの位置から10mの範囲内に近づいた人数



図9 コンテンツの位置

ワークを使用したりした等の要因により、収集率が100%に達しなかったが、開発したアプリケーションの行動データの収集機能は有効であったと考えられる。

次に、コンテンツに対するアクセス状況を表5に、主なコンテンツの配置状況を図9に示す。実験1、2では、図5(b)で移動速度が遅くなっていた本町1、2丁目商店街、安川商店街を中心に、コンテンツを密集して配置したのに対して、実験3では、初期登録数を20としたため、結果としてコンテンツの配置が分散された。表より1人当たりの閲覧数は、実験1から3でそれぞれ8.4回、6.6回、1.2回となり、コンテンツ数が多いほど閲覧数が増加するが、1コンテンツ当たりの閲覧数は、それぞれ1.7回、1.5回、4.1回となり、コンテンツ数が少ないほど閲覧割合が高くなった。1コンテンツ当たりの閲覧数をカテゴリ別に見ると、実験1では「見る・知る」が1.0回、「食べる・飲む」が3.2回、「買う」が2.2回、「泊まる」が0.6回、「その他」が1.2回、実験2ではそれぞれ1.0回、2.3回、



1.7回, 0.8回, 2.2回, 実験3では「泊まる」, 「その他」を除いて, それぞれ6.0回, 4.0回, 3.3回であり, カテゴリ間での関心の高さの差が顕著であった. また, 閲覧後の実訪問数の割合は, 実験1から3でそれぞれ11.6%, 6.8%, 18.4%となり, 情報を絞り込むことで実訪問割合を高めることができる可能性が示唆された. つまり, 観光客の関心の高い情報を適切に提供することにより, 閲覧割合が増加するだけでなく, 実訪問割合も増加し, 回遊性を高めることができると考えられる. なお, カテゴリは, ㈱JTBパブリッシングの「るるぶ.com」^[6]における観光スポットの分類を参考に作成し, 各カテゴリの内訳は, 「見る・知る」が自然, 社寺・教会, 建物・史跡, 動植物園・公園, 美術館・博物館, 劇場, 案内所等の施設, 「食べる・飲む」が和食, 洋食, 伊仏料理, 中国料理, エスニック, 麺類, 喫茶・甘味, 居酒屋・バー, ライブハウス, テイクアウト等の施設, 「買う」がファッション・雑貨, 民芸品・土産品, 食料品・お酒等のショッピング施設, 「泊まる」が旅館, ホテル, 民宿・ペンション等の宿泊施設, 「その他」が前述に分類されない施設とした.

また, コンテンツに対するアクセス時間の検証結果を図10に示す. 実験開始直後は, アプリケーションに対する関心の高さから閲覧数が多くなりがちであるが, 実験開始後30分以降は, コンテンツに対する興味度の高さから閲覧すると考えられる. よって, どの実験においても6割程度が, 訪問予定先に関する情報収集を回遊中に行ったことが図10(a)から推測できる. また, 閲覧後1時間以内に訪問していればコンテンツが回遊に何らかの影響を与えたと考えられる. 図10(b)からは, 実験1では71.4%, 実験2では61.5%, 実験3では87.5%の訪問がコンテンツに何らかの影響を与えられたものであると推測できる.

新アプリに付加したコンテンツの登録機能, 評価機能, コンテンツまでの経路表示機能については, それぞれの利用回数が1回, 11回, 13回であり, あまり利用されなかった. この原因としては, アプリケーションの操作よりも行動データの収集を優先して実験を実施したためであると考えられる.

5. まとめ

観光客の位置情報や観光コンテンツへのアクセス情報を取得する実証実験を高山市で行い, 昨年度の実験と合わせて236名の参加者から行動データを取得した. また, これらの行動データから観光を目的とする参加者197名の移動経路や滞留時間分布等を抽出するとともに, それらの情報から回遊行動モデルを生成し, 主成分分析を用いることで高山市の回遊特性を分析した.

その結果, 殆どの参加者が上三之町を中心とした古い町並を散策するコース, あるいは古い町並と観光施設を回遊するコースで観光していることが見出された. また, 主成分分析により, 高山市は回遊性の特徴から4つのエリアに分割することができ, 各エリアの回遊性に差があることが明らかとなった.

開発したアプリケーションの検証結果については, 行動データの収集率が実験1から3の順に, 69.5%, 87.2%, 89.5%となり, 有効な計測技術を確認することができた. また, コンテンツの閲覧回数が十分とはいえないが, 閲覧されたコンテンツの約6割が回遊中のものであり, 閲覧されたコンテンツの最大で約2割が実際の訪問に結びつき, それらの少なくとも約6割が回遊に何らかの影響を与えた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. また, 観光客の関心の高い情報を適切に提供することにより回遊性を高めることができる可能性を示唆することができたことから, 観光客の回遊行動を支援するアプリケーション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2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.14, pp.6-10, 2013.
- [5] 吉岡茂, “マルコフ推移モデルによる都道府県間人口移動の特徴”, 地球環境研究, Vol.6, pp.97-106, 2004.
- [6] ㈱JTBパブリッシング, “るるぶ.com”, <http://www.rurubu.com/>.

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

曾賀野 健一 青木 隆明* 可児 純子 渡辺 博己 棚橋 英樹

A Study on Inexpensive Body Sway Analysis for Rehabilitation Support of Locomotorium

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI* Junko KANI Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし 加齢や生活習慣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いわゆるロコモティブシンドロームを発症する。特に股関節の機能が衰弱すると体幹の安定性が低下し更衣等の日常生活動作に制限を受け、転倒等の事故からリハビリを必要とする患者が急増している。臨床現場では股関節機能の健全性を定量的に評価することが求められるが計測装置が高価であること等から臨床の場での日常的な使用は困難である。本稿では安価な床反力情報取得装置を用い、臨床現場の所見等に基づいて姿勢と移動動作及び体幹の安定性評価に関わる特徴量を検討した上で床反力情報取得・解析プログラムを開発した。このプログラムを用いて健康者と股関節症患者の床反力情報取得実験を実施し、得られた特徴量を解析した結果、特に股関節症患者が属する患者群の歩行において患側の単脚支持期における特徴量に臨床現場等で観察される現象の影響と考えられる傾向がみられ、本稿で開発した床反力情報取得・解析手法の有効性を示した。

キーワード ロコモティブシンドローム、股関節機能評価、床反力、単脚支持期、体幹の安定性

1. はじめに

1. 1 社会的背景

人口の高齢化が急速に進み医療費や介護保険費の社会的負担が高騰する中、国は事態を深刻に受け止め“治療から予防へ”への取り組みを進めている。平成25年にスタートした国民健康づくり運動「健康日本21（第2次）」^[1]においては予備軍を含めて4,700万人といわれるロコモティブシンドローム（運動器症候群）^[2]の予防が新たに明記されるとともに、「健康長寿産業の振興」を成長戦略の重点領域として明確に位置づけている。また中部経済産業局ではリハビリやロコモティブシンドローム予防等にかかるR&Dを支援しており、岐阜県においては第2次ヘルスプランぎふ21^[3]（平成25年度～平成29年度）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。このように疾病リスクの低減を図るための健康維持・増進・疾病予防にかかるサービス（健康度評価、IT融合型健康サービス等）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^[4]。

1. 2 体幹の安定性

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体幹の安定性が低下し、更衣、階段の昇り降り、車の乗り降り等の幅広い日常生活動作が制限され、躓く、転倒等の事故を引き起こし骨折から要介護（寝たきり）を招く危険性が一段と高まる。平成23年の厚生労働省の調査^[5]では要介護原因の23%が転倒や関節疾患によるもので、その原因である大腿骨頸部骨折受傷の7割以上が立位からの転倒によるとされる。こうした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。

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^[6]、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。しかし臨床現場ではリハビリ経過観察や術前後等における関節機能等の能力をできるだけわかりやすく患者や関係者に説明することが重要であり、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いる。定量的な情報を取得するためには重心動揺計や足圧計測装置等を使用する方法がある。装置が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。そこで本研究では臨床検査で行われる姿勢や移動動作に基づいて体幹の安定性評

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

価に関わる特徴量を検討した上で安価な床反力情報取得装置を用いて床反力情報を取得し、その時間的な変化を解析することで特徴量を抽出、可視化するためのプログラムを開発した。さらに開発した床反力情報取得・解析手法の有効性を検証するため健康者と股関節機能に障害を有する症患者（以下、股関節症患者という）を対象とした実験を行い、得られた特徴量を解析し、その傾向を確認した。なお、床反力情報の解析等につい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得ている。

2. 計測・解析

2. 1 臨床検査

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いる^[7]。そこで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^[8]。

遂行度の判定は体幹の安定性や左右（脚）の対称性等、特に単脚支持期（片脚で体幹を支持する時期）の観察が重要であり、単脚支持期等の定量的な評価方法として重心動揺計や足圧計測装置等が用いられることがある。この場合は足圧中心（Center of foot Pressure ; COP）の位置を計測する方法が一般的であり、静止立位等の検査ではCOP総軌跡長や動揺面積等が使用される^[7]。

本稿においてもCOPの位置を参照し股関節機能を評価する方法を採用した。

2. 2 床反力情報取得装置

COPの位置は床平面座標系の左右前後に配置された4点の荷重比率を計算することにより求めることが可能である。今回、床反力情報の取得対象として、臨床検査で行われる立位姿勢の他に歩行等の移動動作も含まれることからサンプリング周波数を100Hz程度に設定すると十分な情報が得られると考えられる^[9]。さらに重心動揺計や足圧計測装置と比べて安価である点を考慮し、任天堂社製バランスWiiボード（以下、WBという）を採用した。

WBは計量法に定められた技術水準で製造され体重計として正式に認可されているが、臨床実験に先立ち念のためWBに内蔵されているフォースセンサの計測精度について確認を行った。WBは、装置の4箇所に配置されたフォースセンサを所定のサンプリングレートで連続的に計測することができ、Bluetoothを経由してPCに送信することができる（図1）。またセンサの特性上キャリブレーションが必要であるが、独自に開発したPC側のソフトウェアにより処理している。

以上の要件を満たすプログラムを用いて無荷重時のフォースセンサ4点の情報をサンプリングレート100Hzで10秒間取得した結果、標準誤差は0.030kgであった。また70kgの重量を有する静止物体がWB上に荷重した状態で



図1 WBとパソコンの接続・通信

フォースセンサ4点の情報を同じ条件で取得した結果、標準誤差は0.032kgであった。

また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ニッタ社製FootView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。この値はサンプリングレートごとにCOPの位置を計測し、各計測時に取得した左右方向と前後方向のCOP位置変化分から軌跡長を取得時間分加算した値である^[7]。被験者は健康な成人被験者2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。両脚立位と片脚立位の姿勢ごとに20件のデータを取得した結果、いずれの姿勢もWBとFootViewで抽出したCOP軌跡長に有意差はみられなかった（ $p \geq 0.05$ ）。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FootViewと同程度の計測精度を有することを示唆している。

2. 3 姿勢・移動動作と特徴量

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し、評価の対象とした姿勢・移動動作の種類とWBを用いた床反力情報取得方法を表1に示す。

表1 姿勢・移動動作とWBを用いた床反力情報取得方法

姿勢・移動動作	床反力情報取得方法
両脚立位姿勢	WBの中央で両下肢を接し両腕を体側に付け眼の高さで約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の中央に片脚で立位し両腕を体側に付け眼の高さで約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）
段昇降	WB（段差：約5cm）に昇段しWBから降段する移動を行う。（左右脚別） （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）

※すべての姿勢・移動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（靴下の着用は許可）で行った。

※歩行はWBの段差が平坦となる歩行路を整備した。

次に、WBを用いて取得した床反力情報から抽出する体幹の安定性評価に関わる特徴量を検討した。

歩行の床反力分析において、健常者の床反力パターンは垂直分力で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健側下肢の垂直分力に増加がみられ左右脚で等しい二峰性の床反力形状とならず、患側下肢の垂直分力には二峰性の減少（平坦化）が観察されるという報告がある^[10]。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を患側に側屈する現象がみられるという所見がある。

これらの報告等をふまえて今回、体幹の安定性を評価するために検討した特徴量を説明する。

MX, MYはCOP位置の左右(X), 前後(Y)方向の最大振幅である。TdX, TdYはサンプリングレートごとに計測したX, Y方向のCOP位置変化分を取得時間分加算した値である。SDX, SDYはサンプリングレートごとに計測したCOP位置のX, Y成分の標準偏差でありX, Y方向の動揺の集中した範囲(幅)をあらわしている。SdX, SdYはX, Y方向のCOP位置変化分の標準偏差でありCOP位置変化分のばらつきをあらわしている。MdZはサンプリングレートごとに計測した床反力変化分(絶対値)の最大値である。TdZは床反力変化分(絶対値)を取得時間分加算した値である。SDdZは床反力変化分(絶対値)の標準偏差であり床反力変化分のばらつきをあらわしている。なお床反力是对象者ごとに静止立位時の左右脚合成床反力で正規化し体重に依存しない。RX, RYはX, Y方向の荷重割合で両脚立位姿勢を10秒間保持した時のCOP位置(平均値)とWB中心位置との荷重割合の差(最大値)である。Vは段昇降や歩行の速さをあらわし単脚支持期のCOP総軌跡長を取得時間で除した値である。

2. 4 単脚支持期の抽出

単脚支持期とは片側の脚で全体重を支える時期のことを指し、右脚の単脚支持期の場合には左脚が床から離床し着床するまでの遊脚期と同時期になると定義される。従って、段昇降や歩行において単脚支持期の開始時点はWBに最初に着床する側の脚(軸脚)と反対側の脚(反対脚)が離床する時点、単脚支持期の終了時点は反対脚が着床した時点と考えることができる。2台のWBを用いることで単脚支持期を定義どおり計測することが可能であるが、計測した床反力情報を観察すると一方のWBにおける着床時の床反力波形の特徴と他方のWBにおける離床時の床反力波形の特徴に同時性がみられたことから、この点に関して実験により確認を行った。

段昇降では2台のWBを前後に配置し(図2左)、WB2上で静止立位姿勢を保持した状態から片脚を前方のWB1に着床する方法で開始し段昇降を繰り返した。WB1の下には高さ5cmの台を配置しWB1とWB2の段差が5cmとなるようにした。右脚から着床し段昇降を繰り返した場合

の床反力波形を図3に示す。ここでRoffは反対脚(左脚)の離床を示している。離着床判定レベルは一般的に用いられる30Nとした^[6]。床反力波形WB1にはRoffと近い時間帯にピーク P_0 がみられるが、これは反対脚の離床時に軸脚が反対脚の推進力を受けて最大の床反力を示すためと考えられる。また床反力波形WB1には最大ピーク P_M がみられる。これは反対脚(左脚)がWB1に着床した際の衝撃力があらわれていると考えられる。

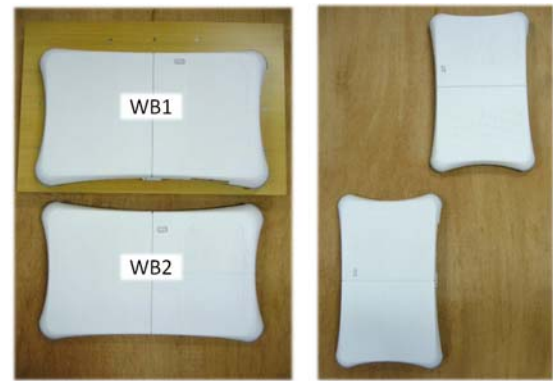


図2 単脚支持期抽出の検討におけるWBの配置
(左) 段昇降, (右) 歩行

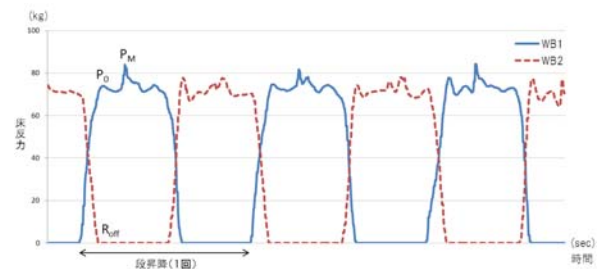


図3 段昇降時の床反力波形

Roffと P_0 の同時性を検証するため、健常歩行が可能な成人被験者2名が段昇降(左右脚別)をそれぞれ10回行いRoffと P_0 の時間差を求めた結果、段昇降1回に要した平均時間2.54秒に対しRoffと P_0 の時間差の平均値0.042秒、標準偏差0.025秒であった。以上の結果からRoffと P_0 には同時性があり、段昇降時の単脚支持期を P_0 から P_M までの区間とみなすことができ、1台のWBで単脚支持期を計測することが可能と考えられる。

歩行では2台のWBを図2右のように配置し(左脚からWBに着床する場合、右脚からWBに着床する場合はWBの配置を左右反転した。)、WBの段差と平坦になるように歩行路を整備した。左脚からWBに着床した場合の床反力波形を図4左に、右脚からWBに着床した場合の床反力波形を図4右に示す。

図4左でRoffは反対脚(左脚)の離床を示している。床反力波形(右脚)にはRoffと近い時間帯にピーク P_1 がみられるが、これは反対脚の離床時に軸脚が反対脚の推進力を受けて最大の床反力を示すためと考えられる。図4右でRonは反対脚(左脚)の着床を示している。床反力波形(右脚)にはRonと近い時間帯にピーク P_2 がみられ

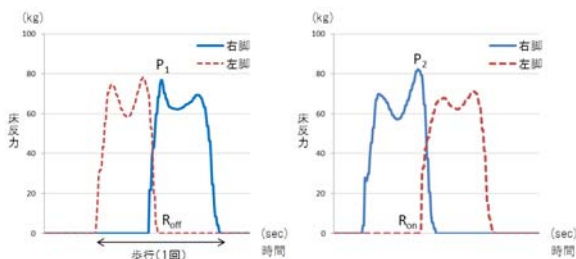


図4 歩行時の床反力波形
(左) 左脚から着床, (右) 右脚から着床

るが, これは反対脚 (左脚) の着床時に軸脚 (右脚) で推進力を働かせるために最大の床反力を示すと考えられる。

RoffとP₁, RonとP₂の同時性を検証するため, 健康歩行が可能な成人被験者2名が歩行 (左右脚別) をそれぞれ10回行いRoffとP₁, RonとP₂の時間差を求めた結果, 歩行1回に要した平均時間1.2秒に対しRoffとP₁の時間差は平均値0.032秒, 標準偏差0.037秒, RonとP₂の時間差は平均値0.037秒, 標準偏差0.037秒であった。以上の結果からRoffとP₁, RonとP₂には同時性があり, 歩行時の単脚支持期をP₁からP₂までの区間とみなすことができ, 1台のWBで単脚支持期を計測することが可能と考えられる。

2. 5 床反力情報取得・解析プログラムの開発

2. 3と2. 4の検討に基づき, WBを用いて床反力情報を取得し特徴量の抽出と解析結果の可視化を行うための床反力情報取得・解析プログラムを開発した。

このプログラムでは, はじめにWBとの接続と被験者情報の登録を行う。そしてまず両脚立位姿勢を表1の計測方法で行い, 床反力情報を取得後にCOP軌跡と特徴量の抽出結果を表示する。これらの解析結果はCSV形式と画像で指定フォルダに出力する。

次に片脚立位姿勢, 段昇降, 歩行をそれぞれ表1の計測方法で行い床反力情報を取得後, 左右脚別にCOP軌跡と特徴量の抽出結果を表示する。これらの解析結果はCSV形式と画像で指定フォルダに出力する。片脚立位姿勢の床反力情報解析結果を図5に示す。COP軌跡上に表示されている数値は左右前後の荷重割合を示している。

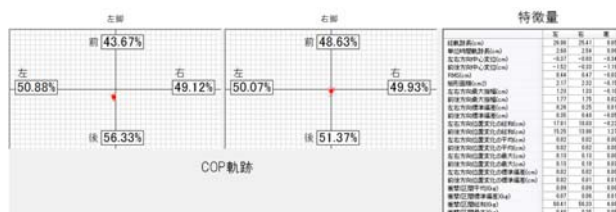


図5 床反力情報取得・解析例 (片脚立位姿勢)

段昇降と歩行については, 単脚支持期の床反力情報を2. 4の方法で抽出し左右脚別にCOP軌跡と特徴量の抽出結果を表示する。歩行の単脚支持期におけるCOP軌跡

(左右脚別) を図6に示す。COP軌跡上には床反力変化分 (体重比) を20段階のカラーパターンを用いて分類表示しておりCOPの移動情報に加えて床反力の変化情報を定量的に視認できる機能を加えた。

図6においてCOP軌跡の両端付近に体重比2%を超える床反力の変化が生じている様子がみられる。こうした床反力の変化は床反力形状の二峰性に影響し, 床反力変化が小さくなるほど床反力形状に二峰性の減少 (平坦化) が観察されると考えられる。

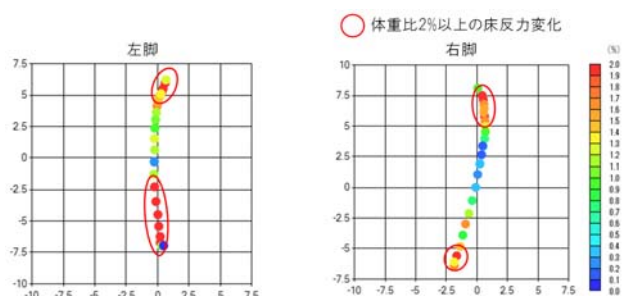


図6 COP軌跡と床反力変化の可視化 (歩行)

4種類の姿勢・移動動作の計測から解析結果の表示までに要する時間は被験者1人あたり約3分である。計測時は身体にセンサ等を装着する必要がなくWBに乗る動作のみであることから足圧測定装置等を用いる場合と比べて患者への負担軽減に配慮している。

3 実験

安価な床反力情報取得装置としてWBを用いた床反力情報取得・解析手法の有効性を検証するため実験を実施した。

3. 1 特徴量の日間変動

体幹の安定性に関する計測値の再現性は重要であるが, これに関する基礎的検討の報告は少ない。そこで, 日を変えて抽出した特徴量の変動性を検証した。

被験者は2名とし, 2. 5で開発した床反力情報取得・解析プログラムを用いて表1の計測方法で床反力情報を7日間にわたって同じ時間帯に取得し特徴量を抽出した。その結果, いずれの被験者もすべての特徴量に関して標準偏差 (平均値比) は約0.10であった。この結果は日を変えて抽出した特徴量に大きな変動が生じているとはいえないことを示唆している。

3. 2 健康者と股関節症患者の床反力情報取得実験

股関節症患者が表1の姿勢と移動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, 2. 5で開発した床反力情報取得・解析プログラムを用いて健康者と股関節症患者を対象とした床反力情報取得実験を実施した。

被験者は健康者11名, 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のうち, 実験参加への同意が得られた4名である。

実験への参加に対するインフォームドコンセントは、事前に実験参加の安全性や個人情報の秘密保持等に関して十分に説明した後、書面をもって行った。なお、本実験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。

4 実験結果と考察

3. 2の実験で取得した床反力情報から特徴量を抽出し、健常者が属する健常群と股関節症患者が属する患者群の傾向を確認するため判別分析を行った。判別分析には統計解析ソフトJUSE-StatWorks/V4.0を用いた。群の判別は説明変数が形成する多次元空間において2群の重心からマハラノビス距離を求めて導かれる説明変数の判別関数により行い、判別関数の値の正負により属する群を判別する方法である。

両脚立位姿勢の判別分析では健常群に健常者11名のデータ11件、患者群に股関節症患者4名のデータ4件を用いた。片脚立位姿勢、段昇降、歩行の判別分析では健常群に健常者11名の左右脚をあわせたデータ22件、患者群に股関節症患者4名の患側のデータ4件を用いた。

このデータを使用し、1つ抜き交差検定法により判別率を求めた。1つ抜き交差検定法は標本群から1つの事例を抜き出しテスト事例とし、残りの事例をトレーニング事例とすることで全事例が1回づつテスト事例となるよう検定を繰り返す方法で、統計学において仮説検定用に用いられる手法の一つである。本稿では、両脚立位姿勢の判別分析において14施行分をトレーニングデータ、1施行分をテストデータとしてサンプルの組み合わせを変え15通りの判別結果より判別率を求めた。片脚立位姿勢、段昇降、歩行の判別分析については25施行分をトレーニングデータ、1施行分をテストデータとしてサンプルの組み合わせを変え26通りの判別結果より判別率を求めた。判別率は、正しく判別されたサンプル数を全サンプル数で除した値を用いた。その結果、両脚立位姿勢、片脚立位姿勢、歩行の判別率はそれぞれ93.3%、80.7%、96.1%であった。両脚立位姿勢、片脚立位姿勢、歩行についてはいずれも判別率が80%を超える結果となった。段昇降については健常群と患者群の判別に有意な因子がみられない結果となったが、この一因としてWBに右脚から昇段し左脚をWBに着床する場合に、単脚支持期終了をあらわす左脚着床のタイミングや荷重のかけ方に個人差がみられ健常群の各特徴量にばらつきが生じたことが考えられる。段昇降における単脚支持期の抽出方法については、さらに検討が必要である。

また、判別分析により患者群に寄与する因子（特徴量）を調べた結果、両脚立位姿勢ではTdXとRX、片脚立位姿勢ではTdZ、歩行ではTdXとTdZ⁻¹が該当した。

今回の実験に参加した股関節症患者1名について、患者群に寄与する因子データを健常群比であらわした結果を図7に示す。健常群の因子データは今回の実験に参加した

健常者11名の平均値を用いた。各因子の標準偏差（平均値比）はTdX（両脚立位姿勢）：0.083、RX（両脚立位姿勢）：0.016、TdZ（片脚立位姿勢）：0.23、TdX（歩行）：0.37、TdZ⁻¹（歩行）：0.50である。

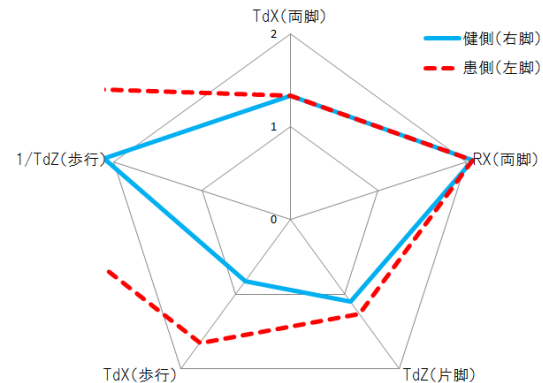


図7 股関節症患者の体幹安定性評価例

図7に示した股関節症患者は両脚立位姿勢において左右（X）方向のCOP位置変化分の総和（TdX）が健常者と比べて大きい傾向がみられる。また左右（X）方向の荷重割合（RX）が大きい傾向がみられ、荷重が健側（右脚）に偏っていた。これは患側（左脚）の荷重負担を軽減するため健側に荷重を移動させて両脚立位姿勢を保持しているためと考えられる。患側の歩行では左右（X）方向のCOP位置変化分の総和（TdX）が健側と比べて大きい傾向がみられ、これは患側の単脚支持期に体幹を患側に側屈する現象が影響していることが考えられる。また床反力変化分の総和（TdZ）が患側で小さい傾向がみられる。これは患側に荷重をかけることが困難であることから患側の単脚支持期開始時に健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ことによる影響と考えられ、患側の床反力波形において二峰性の減少（平坦化）が観察される一因と推察される。

5 まとめ

安価な床反力情報取得装置としてWBを採用し、先行研究や臨床現場の所見に基づいて計測対象とする姿勢と移動動作及び体幹の安定性評価に関わる特徴量を検討した上で、床反力情報の取得、特徴量の抽出、床反力情報解析結果の可視化・出力を行うための床反力情報取得・解析プログラムを開発した。

股関節症患者が臨床検査で行われる姿勢と移動動作を行った場合に床反力にあらわれる傾向を確認するため、開発した床反力情報取得・解析プログラムを用いて健常者と股関節症患者の床反力情報取得実験を実施した。この実験で得られた特徴量に関して解析を試みた結果、設定した健常群と比較して股関節症患者が属する患者群の

歩行において患側の単脚支持期における左右（X）方向のCOP位置変化分の総和（TdX）と床反力変化分の総和（TdZ）に先行研究や臨床現場で観察される現象の影響と考えられる傾向がみられたことにより本稿で開発した床反力情報取得・解析手法の有効性を示した。

以上より、WBを用いた床反力情報取得・解析手法は安価であるだけでなく、WBに乗るだけで4種類の姿勢と移動動作を行った場合の体幹の安定性評価に関わる情報を患者に負担をかけることなく計測できる。

またWBを用いた床反力情報取得・解析手法は、活動量計に近い感覚で体幹バランスの安定度を測る“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、早い段階でロコモティブシンドロームの兆候に気づき予防できるセルフケア（未病ケア）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には、研究指導と実験にあたり多大な協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

文 献

- [1]健康・体力づくり事業財団，“健康日本21（第2次）”，
<http://www.kenkounippon21.gr.jp/>(2014.3現在)
- [2]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/jp/public/locomo/>(2014.3現在)
- [3]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)
- [4]中部経済産業局，“新ヘルスケア・サービス産業について”，新ヘルスケア・サービス産業創出懇談会資料，2012.
- [5]厚生労働省，“国民生活基礎調査”，2011.
- [6]奈良勲，“運動療法学 各論”，医学書院，2010.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]臨床歩行研究会，“臨床歩行計測入門”，医歯薬出版，2012.
- [10]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.

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)

— 超音波フェーズドアレイ測位システム —

田畑 克彦 久富 茂樹 岩井 俊昭*

遠藤 善道 西田 佳史**

Development of a New Wireless Sensor System using Embedded Technology (3rd Report) - The Ultrasonic Phased-Array Positioning System -

Katsuhiko TABATA Shigeki KUDOMI Toshiaki IWAI*
Yoshimichi ENDO Yoshifumi NISHIDA**

あらまし 我々は、無人搬送車(AGV)の経路移動をナビゲーションするための超音波フェーズドアレイ測位システムを開発している。本システムは、無人搬送車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い、相対位置を計測しながら走行する。これまで無人搬送車とランドマーカ間の相対位置は、1つのランドマーカの位置情報を使用することを想定して測位実験と改良を繰り返してきた。しかし、ランドマーカまでの距離が遠く、方位角が大きい場合には、超音波通信のSN比が低下し、位置精度が低下する。本稿では、この問題を解決するために、2つのランドマーカの距離情報から測位する手法について検討し、精度の向上を図った。また、本測位システムを移動装置に実装し、1つのランドマーカの位置情報を使用した簡易な経路走行実験から、その可能性を確認した。

キーワード 超音波センサー、フェーズドアレイ、測位システム、無人搬送車(AGV)、組込技術

1. はじめに

現在、コストダウンや省力化のために製造現場内の搬送を目的とした無人搬送車(以下、AGV)が実用化され、商品化されている。従来のAGVの経路走行のためのナビゲーションとして、経路上に磁気テープを貼るタイプやレーザーレンジセンサーを使用するタイプなどがある。前者はコストパフォーマンスが高いが経路変更の自由度が低く、後者は経路変更の自由度は高いが高価であるという課題がある。そこで我々は、経路変更の自由度が高く、しかも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測位システムの研究開発^[1~3]を行っている。

本センサーシステムは、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。また、AGVに搭載する超音波センサーアレイシステム(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通信を行い順次識別しながら、マーカとの相対位置(距離と方位角)を計測し、これを基準として走行する。このため、無人搬送車は従来の磁気テープを用いたラインレースと同様に電子地図を持たない簡便な手法による走行が可能であるにもかかわらず、マーカの配置を変更するだけで柔軟に走行経路を変更できる利点がある。

したがって、従来システムのように超音波センサー素子単体を用いて超音波信号を送信し、壁などの建物構造物等からの反射信号を単数または複数の超音波センサー素子で受信し、電子地図を作成し、この電子地図をもとに移動する方法とは異なるシステムである。

本研究では、マイコンやFPGAを用いて実用機に近いソナーシステムとマーカからなる超音波フェーズドアレイ測位システムの原理モデルの研究開発を進めている。昨年度は、多重反射信号による計測精度の劣化や誤検知が観測され、前述の対策だけでは不十分であることが判

* 岐阜県情報技術研究所

** 国立大学法人 東京農工大学大学院 生物システム応用科学府

*** 独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルヒューマン工学研究センター

明したため、改良を加えて精度向上を図った^[3]。これらの改良の結果、マーカーまでの距離と方位角が、それぞれ5000mmと30°以内の測位において、±100mm、±5°の精度で測位が可能となった。

今年度はさらに改良を加えた測位システムを開発し、複数のマーカーに対して測位実験を行った。その結果、マーカーのID毎に測位可能であることを確認した。しかしながら、マーカーまでの距離が遠く、方位角も大きい場合は、受信センサー素子の指向性によって感度が低下するので、通信信号のSN比が低下し、測位精度が低下する。また、現状の測位方法上、SN比の低下による方位角の計測精度の低下が位置誤差に大きな影響を与えることが分かった。

本報告では、SN比が低下しても比較的安定した計測が可能な距離情報のみを使用して測位精度の向上を図った。具体的には、既知の位置に設置した2つのマーカーまでの距離計測値を用いて、GPSと同様の方法により位置を計算する。これにより、SN比が低下する位置関係においても、測位精度を維持できることを確認した。

さらに共同研究機関である株式会社ブイ・アール・テクノセンターが開発している移動ロボットと誘導ソフトウェアに本測位システムを実装し、1マーカーを測位する方法にて経路走行実験を行い、その可能性を確認したので報告する。

2. 超音波フェーズドアレイ測位システム

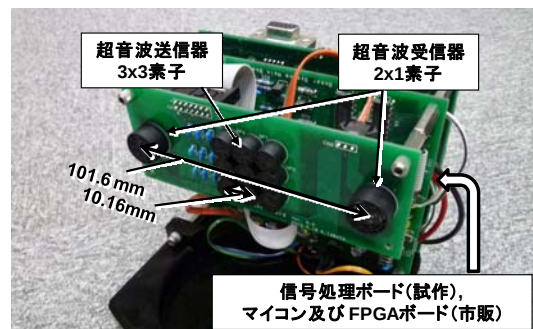
図1に、試作したソナーシステムとマーカーを示す。次節以降に記すマーカー位置の計測処理をマイコンボード(プロセッサ、STM32F103ZE)及びFPGAボード(FPGA, XC3S1200E)に実装した。表1に使用した超音波センサー素子の主な仕様を示す。ソナーシステムとマーカーとの相互通信の仕様は、ID信号長を7bit、通信速度を625bpsとした^[1]。また、送信する超音波信号の搬送周波数はソナーシステムに40kHz、マーカーに32.7kHzを割り当てた。この周波数は市販されている一般的な空中超音波センサー素子の共振周波数である。ソナーシステムとマーカーが送信する超音波受信信号の周波数が異なると、素子の共振点が異なるため、自分が送信した信号をそのまま受信してしまう信号レベルを抑制できる。これによって、自身が送信する超音波信号の多重反射成分などの自己雑音による誤検知を回避する。

2. 1 ランドマーカーの測位手法

マーカーの測位は、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となるFPGAでの処理を考慮して、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た。処理内容を以下に述べる。

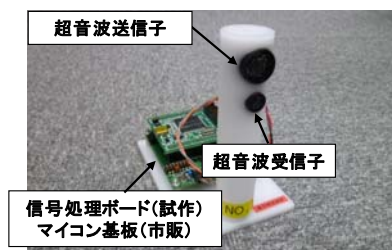
2. 1. 1 ランドマーカー方位角 θ_{MK}

マーカー方位角 θ_{MK} は、左右受信センサー素子の受信時間差を計測することにより、次式を用いて計算する。



寸法: 130(幅)×100(高さ)×90mm(奥行き)

(a) ソナーシステム (試作機)



Size: 80(幅)×20mm(高さ)×80(奥行き)
(ポールサイズ: Φ25×115mm)

(b) ランドマーカー (試作機)

図1 超音波フェーズドアレイ測位システム外観

表 1 超音波センサー素子の仕様

	ソナーシステム 送信器 ランドマーカー 受信器	ランドマーカー 送信器	ソナーシステム 受信器
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

$$\theta_{MK} = \sin^{-1} \left(\frac{d\ell}{\ell_{RL-RR}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{MK}=0^\circ$ の時にマーカーが正面に存在しているととして、 ℓ_{RL-RR} は受信センサー素子間の距離、 $d\ell$ はマーカーからの左右それぞれの受信センサー素子までの行路差であり、以下の式で表される。

$$d\ell = c \cdot dt \quad (2)$$

ここで、 c は音速[m/s]である。ゆえに、左右受信センサー素子の信号到達時間の差 dt を測定することで、マーカーの方位角を計測する。実際には、標本化周期 T_s でAD変換を繰り返し行うので、左右受信センサー素子に到達する時点での標本点の差を N_d とすると時間差 dt は次式で与えられる。

$$dt = N_d \cdot T_s \quad (3)$$

本稿の開発システムでは、(1)式の方位角を求めるパラメータとして標準化周期 T_s を $10\mu\text{s}$ に、左右受信素子間の距離 ℓ_{RL-RR} を 101.6mm としている。

2. 1. 2 ランドマーカーまでの距離 ℓ

左右受信センサー素子からマーカーまでの距離 ℓ_{Right} と ℓ_{Left} は、それぞれ次式より算出できる。

$$\ell_{Right} = \frac{c}{2} \cdot (t_{flight} - t_{process}) = \ell \pm \frac{d\ell}{2} \quad (4)$$

$$\ell_{Left} = \frac{c}{2} \cdot (t_{flight} - t_{process}) = \ell \mp \frac{d\ell}{2} \quad (5)$$

ここで、 t_{flight} と t_{flight} は、それぞれ左右受信センサー素子について超音波信号が往復するのに要する時間である。また、 $t_{process}$ はマーカーのID認識に要する時間であり、一定の応答遅延となるように設計する。ここで、 ℓ は左右受信センサー素子を結ぶ線分の中点からマーカーまでの距離で、 $d\ell/2$ は左右受信素子の中点を基準とした場合の行路長のずれ量である。

(4)式と(5)式の平均値を計算すると、 $d\ell/2$ が消去され、マーカーまでの ℓ を求めることができ、2つの受信素子で検出することにより、誤差の影響を小さくできる。方位と距離を計算するため、パルスが到来したと判定するタイミングは、送受信パルスの最大値の50%に設定した閾値を超えたタイミングで計算する。

なお、音速 c は気温 $T[^\circ\text{C}]$ との間に次の関係がある。

$$c = 331.45 + 0.61T \quad (6)$$

このため、方位角と距離を計算する際に、あらかじめ気温を計測し音速を求める。

2. 2 本測位システムの動作

本測位システムの動作について簡単に述べる。無人搬送車の走行システムに該当する測位データ取得用PCから、探索するマーカーIDをソナーシステムに通知する。ソナーシステムに搭載されているマイコンがそのIDを受信し、探索ビーム方向をFPGAに通知する。FPGAは、送信センサー素子アレイを並列駆動し、指定された方向へフェーズドアレイによって合成された探索信号を送信する。この合成信号は7bitのID情報を含んでおり、2値デジタル振幅変調方式(ASK)としている。さらに、FPGAはマイコンから左右受信センサー素子が受信する信号のAD値を $10\mu\text{s}$ の標準化周期で取得し、5m以上先のマーカーを計測可能な82msの間の超音波受信信号データを保存した後、マーカーからの応答信号のID識別と前述の測位計算のためのタイミングを計測する。マイコンはこれらの情報からマーカー検出の有無と、検出が成功した場合の距離 ℓ と方位角 θ_{MK} の測位計算を行い、PCに通知する。

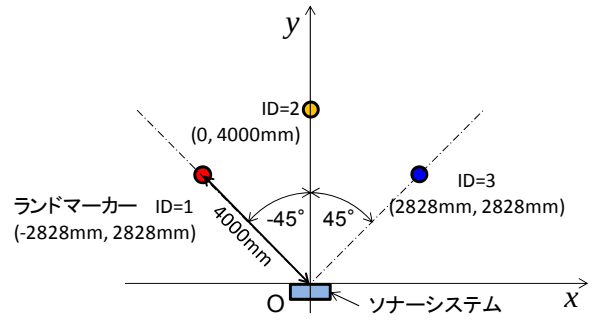
マーカーは超音波受信センサー素子が受信した超音波信号に対して逐次信号処理を行いながら、割当てられたIDが到来するのを待つ。そして、割当てられたIDが到来した場合、一定の応答遅延 $t_{process}$ 後にID毎に割り振られた固有の応答信号を送信する。

2. 3 ランドマーカーの測位実験と課題

本測位システムは1つのマーカーに対して位置計測し、相対位置を把握することを想定している。そこで、図2(a)に示すように室内の3箇所に異なるIDを持つマーカーを



(a) 実験の様子



(b) マーカー座標の定義

図2 ランドマーカー測位実験

表2 実験条件

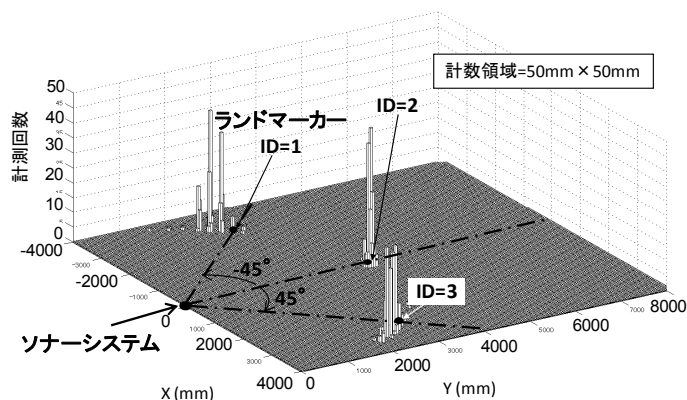
測定条件			
実験配置(図2のとおり)			
室温			25 $^\circ\text{C}$
室温25 $^\circ\text{C}$ における超音波伝搬速度			347 m/s
システム条件			
ランドマーカー計測回数			200回
通信信号パターン(7 bits)			
ランドマーカーID	探索信号	応答信号	
1	1100110	1011001	
2	1010010	1101101	
3	1011010	1100101	

設置し、運用時と同様にすべてのマーカーの電源を投入し、稼働させた状態で測位実験を行った。便宜上、マーカーの座標はソナーシステムを原点として、図2(b)のように定義する。そして、1個のマーカーに対して、ソナーシステムから200回の探索信号を送り、マーカーの測位を行った。測位実験の実験条件を表2に示す。

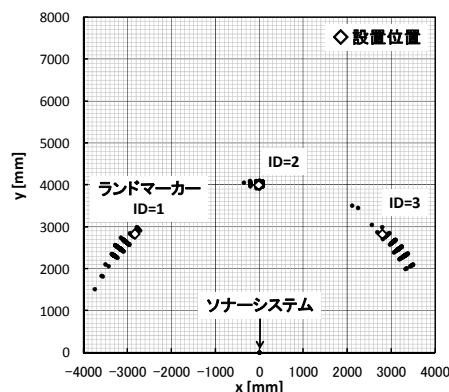
なお、ソナーシステムの方法は図2(a),(b)に示すようにID=2と正対するように設置している。

表3が測位結果である。また、図3(a)は、同じ実験データを用いて測位した頻度を2次元ヒストグラムで表したグラフである。同図のグラフ原点にソナーシステムが設置されている。1マスは50mm×50mmの領域であり、その領域内の位置を計測した回数を計数する。計測頻度の分布が集中して、より高い数値となる方が安定した精度で測位できていることを意味する。また、図3(b)は、2次元測位結果の点群データである。

表3および図3より、マーカーID毎に識別し、その位置が分離できていることが確認できる。しかしながら、±45 $^\circ$ と方位角が大きい位置に設置しているID=1およびID=3のマーカーの方位角については、平均値の誤差と標



(a) マーカー測位の2次元ヒストグラム



(b) 測位結果の分布

図3 ランドマーカーの測位結果グラフ

表3 ランドマーカーの測位結果一覧

ランドマーカー ID	設置距離 [mm]	設置 方位角 [deg]	測定距離 [mm]		測定方位角 [deg]		測定頻度 [Hz]
			平均値	SD*	平均値	SD*	
1	4000	-45	4040.5	48.7	-51.4	3.3	7.8
2	4000	0	4033.3	35.7	-0.7	1.0	7.7
3	4000	45	4033.7	48.8	52.0	4.0	7.4

* 標準偏差

標準偏差が大きい。これは表1より、ソナーシステム受信センサー素子の指向性は、 $\pm 35^\circ$ であるため、これ以上の方位角となる場合には、感度の低下によりSN比が低下した結果、精度も低下していると考えられる。図3(b)より、距離方向に対しては、円弧状に計測値が分布しており、どのIDに対しても、安定して計測できていることが確認できる。また、測位頻度は7.4Hz~7.8Hzであり、市販されているレーザーレンジセンサーによるナビゲーション手法によるものと同程度である。

ここで、精度低下の著しい方位角方向の計測結果に着目する。図3より櫛の歯状に周期的に計測値が並んでいることが確認できる。これは、(3)式の左右受信センサー素子に到達する時間差 dt を計測する際に、マイコンが受信信号を10 μ sの標準化周期でAD変換を行っているため、 dt が離散的になるためである。例えば、室温25 $^\circ$ Cの環境下でID=1が存在する $\ell=4000$ mm, $\theta_{MK}=-45^\circ$ 付近の角度分解能 $d\theta$ は、 2.9° であり、外乱などにより標本点の差 N_d が1ずれるだけで、真値からの方位角方向への測位誤差 Δr は202mmとなる。測位誤差 Δr は $d\theta$ を用いて以下の近似式から求めている。

$$\Delta r = 2 \ell \sin \left(\frac{d\theta}{2} \right) \quad (7)$$

一方、距離分解能については、標本点が1ずれたとしても測位誤差は1.7mmにしかない。以上のことから、距離 ℓ が遠くなり、SN比が低下した状態では、方位角誤差が測位精度の低下に大きく影響することが課題である。

3. 方位角計測精度の向上

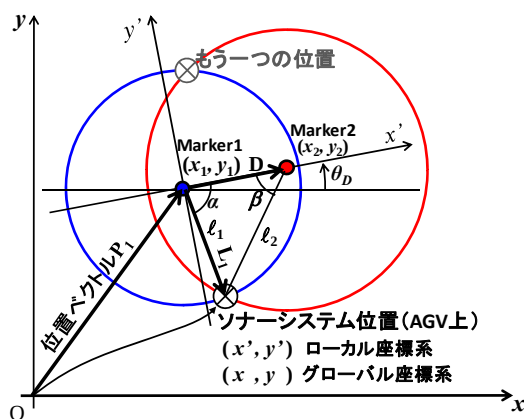


図4 2つのランドマーカー距離による測位

本章では、前章の検討結果をもとに、距離情報のみを用いた測位を行う。このために、マーカーの位置座標から、GPS^[4]と同様の方法で測位する。最初に本研究の測位方法について述べ、次に前章のマーカーの距離データを用いて測位計算した結果、方位角精度が飛躍的に改善されたことを示す。

3. 1 2つのランドマーカーによる測位方法

図4は本研究における測位方法の概要である。図中のMarker1とMarker2が、それぞれグローバル座標 (x_1, y_1) および (x_2, y_2) に設置されている。そして、AGVに搭載したソナーシステムが、2つのマーカーまでの距離を計測した値を、それぞれ ℓ_1 および ℓ_2 とする。この時、Marker1を中心とする半径 ℓ_1 の円とMarker2を中心とする半径 ℓ_2 の交点にソナーシステムが存在し、その位置 (x, y) は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{L}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_D & -\sin \theta_D \\ \sin \theta_D & \cos \theta_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{P}_1$ はグローバル座標系原点からローカル座標系原点への位置ベクトル、 $\mathbf{L}_1$ はMarker1の存在するローカル座標系原点からソナーシステムへの位置ベクトルである。また、 θ_D はグローバル座標系に対するローカル座標系の

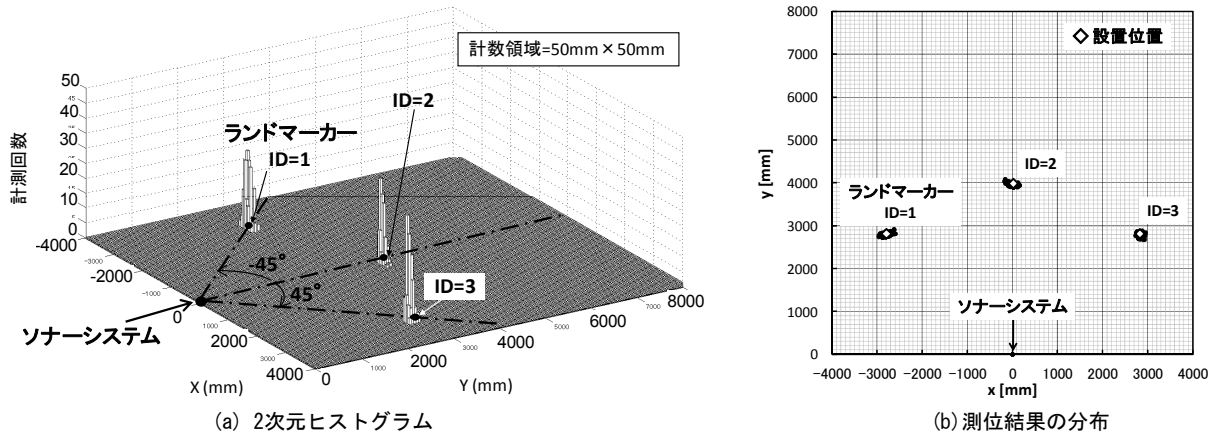


図5 2つのランドマーカーによる測位結果グラフ

表4 2つのランドマーカーによる測位結果一覧

ランドマーカー ID	設置距離 [mm]	設置方位角 [deg]	測定距離 [mm]		測定方位角 [deg]	
			平均値	SD*	平均値	SD*
1-(2) **	4000	-45	3965.3	48.7	-45.1	1.1
2-(3)	4000	0	3968.2	36.2	-0.2	1.1
3-(1)	4000	45	3971.7	48.8	45.5	0.7

*標準偏差, ** ()内は測位に使用したもう1つのマーカーID

回転角であり、次の式で表される。

$$\theta_D = \sin^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{|D|} \right) \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{D}$ はローカル座標系において x' 軸上に存在するMarker1からMarker2への位置ベクトルであり基線ベクトルと呼ぶ。また、その大きさ $|D|$ を基線長と呼ぶ。

そして、(8)式における (x', y') はローカル座標系におけるソナーシステムの位置であり、次の式で表される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell_1 \cos \alpha \\ -\ell_1 \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、 y' には符号が正の解も存在するが、常にソナーシステムはマーカーの手前にあるとして、解を選択する。また、 α は位置ベクトル $\mathbf{D}$ と $\mathbf{L}_1$ の成す角であり、余弦定理により、以下の式で求めることができる。

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{|\mathbf{D}|^2 + \ell_1^2 - \ell_2^2}{2|\mathbf{D}|\ell_1} \right) \quad (11)$$

上式の余弦定理が成り立つためにはソナーシステムと2つのマーカーにより三角形を形成する必要があるため、これらが直線上に存在すると解を求めることはできない。

3. 2 測位結果と考察

前章の実験データを用いて、前節に示した2つのランドマーカーの距離計測値を用いてソナーシステムの位置を算出した。ソナーシステムの位置は図2に示すように座標系の原点に存在するので、原点付近に測位値が分布する。前章の実験結果との比較を容易にするために、ソナーシステムの測位値と、計測対象としたマーカー座標と

の差をとった。このことは、AGVを基準にして、AGVからマーカーを観測した場合の相対的なマーカー測位値の分布として置き換えていることを意味する。

表4に測位結果を、図5に測位結果の分布をそれぞれ示す。なお、表4における () 内のマーカーIDは、計測対象のマーカー位置を求めるために使用したもう一つのマーカーである。表3の測位精度ではID=3の方位角の標準偏差 θ_σ は 4.0° である。ここで(7)式の $d\theta$ に θ_σ を代入すると方位角方向への測位値は真値から279mmにわたって分布していることになる。しかしながら、表4では方位角の標準偏差が 0.7° であり、真値からの測位値の分布は49mmに抑えられている。さらに、方位角の計測平均値の誤差も 7.0° から 0.5° に改善されている。ID=1の計測結果についても同様の結果が得られた。したがって、マーカーまでの距離が遠くなった状態で、さらに方位角が大きくなるなど、SN比が確保できないケースにおいて、有効な手法であると言える。このような代表的なケースとしては、経路の方向が大きく切り替わるコーナー部などが挙げられる。

距離結果については、距離情報を用いた位置計算のため、精度は変わらない。距離の計測精度を高めることで、両手法ともに計測精度が向上するため、今後も改良を重ねる予定である。

3. 3 2つのマーカーによる経路誘導方法

本測位システムにおいて、電子地図を用いずに経路走行する場合には(10)式と(11)式のローカル座標系において、2つのマーカーに対して相対的な自己位置を測位し、次のいずれかの方法により経路走行できる。いずれも基線長 $|D|$ は既知である必要がある。

- ・ 2つのマーカーをゲートとして、その中点を保つよう走行制御する
- ・ 基線ベクトル $\mathbf{D}$ を仮想的な壁とし、これに沿う形で走行制御する

また、2つのマーカーを測位する必要があるため、測位頻度が半分低下してしまう。これについては、交互にマーカーを測位し、一方のマーカーまでの距離を計測した際に、他方のマーカーまでの距離はオドメトリなどで補

正することで測位頻度を保持できると考える。現在のAGVは方向制御と速度制御を行っているので、オドメトリとの併用は現実的な手法である。AGVが最高速度1000mm/sで走行していると仮定すると、表3に示す7.4～7.8Hzの測位頻度結果では最大でも135mm程度の走行間の位置補正でよい。オドメトリとジャイロを併用したデッドレコニング^[5]では数mの走行で数cmの位置誤差であることから、累積誤差の影響はほとんど無視できる。

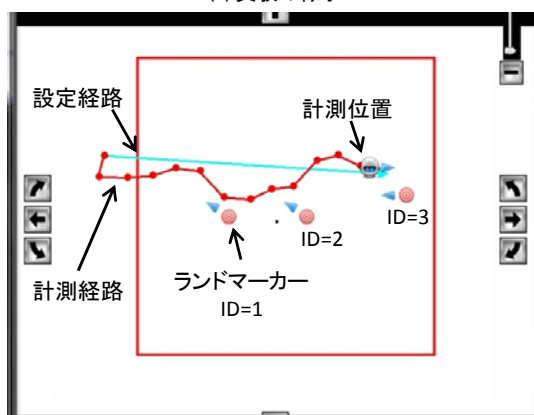
4. 本測位システムによる経路走行実験

本測位システムによるナビゲーションが可能であることを確認するため、移動装置による経路走行実験を行った。実験では、異なるIDのランドマーカを経路上に3個配置し、従来想定したように、マーカを1個ずつ測位しながら経路走行する。図6(a)は共同研究機関（株式会社ブイ・アール・テクノセンター）が介護施設等を巡回警備することを目的に開発した見守りロボットと誘導ソフトウェアにより、実験を行っている様子である。なお、このロボットと誘導ソフトウェアは、電子地図による経路走行を想定したシステムである。図6(b)は誘導ソフトウェアにて、設定経路と走行経路をモニタ表示した結果である。ロボット内蔵の方位センサーのトラブルによる蛇行がみられるが、本測位システムによる測位は安定しており、経路誘導の可能性を確認できた。



※株式会社ブイ・アール・テクノセンター開発

(a) 実験の様子



(b) 誘導ソフトウェアによる走行経路表示

図6 経路走行実験

5. まとめ

無人搬送車のナビゲーションのための測位システムとして、超音波フェーズドアレイ技術と双方向通信技術を使用する超音波フェーズドアレイ測位システムを開発し、超音波ランドマーカの測位実験を行った。この結果、マーカまでの距離が遠く、かつ方位角が大きい場合に、超音波通信のSN比が低下し、測位精度が低下することを示した。特に方位角精度の低下に伴い測位誤差が著しく増大することが計測方法においても、課題であることを示した。一方、方位角精度が低下した場合でも距離精度は保たれていることから、2つのマーカまでの距離情報を用いて、GPSと同様の方法により位置計算する方法を取り入れた。この結果、SN比が低下する状況においても、方位角の計測精度を維持できることを示した。この方法は、経路のコーナー部など、マーカの計測方位角が大きくなり測位精度の低下が懸念される個所で有効と考える。さらに、移動装置を用いた経路走行実験により、その可能性を示した。今後は、測位距離の拡張および精度向上のための改良を重ねつつ、実用化のための課題解決を行っていく予定である。

謝辞

経路走行実験については、株式会社ブイ・アール・テクノセンターが開発した移動ロボットと誘導ソフトウェアにより、同社主体のもと実施され、実験データをご提供頂きました。ここに感謝の意を表します。

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2報)-超音波位置計測システムの精度向上-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.14, pp.1-5, 2013.
- [4] B.W.Parkinson and J.J.Spilker, “Global Positioning System: Theory and Applications”, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [5] 橋本雅文, 富家孝宏, 大場史憲, “冗長オドメトリ系とジャイロ情報の融合によるモジュール型全方向移動ロボットのデッドレコニング”, 日本機械学会論文集(C編), vol.66-645, pp.1613-1620, 2000.

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発

— センシングシステムの設計と試験金型の試作 —

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

- The sensing system design of the injection mold and an experiment with a prototype -

Toshio Yamada, Naoyuki Bando, Hidekazu Hirayu, Hideki Tanahashi,
Atsunori 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, センサシステムの設計および試作した実験金型を用いたデータ取得実験について報告する。実験データの解析から, 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。

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業界では, 成形品の微細化や樹脂の多様化などにより, 成形条件は複雑なものとなっているが, 温度や圧力などの成形時の金型内部状態を客観的なデータとして得ることが難しく, 成形条件の決定は作業者の経験に大きく依存している。高機能・高精度の射出成形品を高い生産性で製造するためには, 従来経験に頼っている部分を論理的に解明するとともに, 金型内の状態を基に適切なショットが行われたかを常時監視する技術が求められている。

これまでも, 金型内に温度や圧力のセンサを取り付けて射出成形時のデータを取る試みが行われており, 国内工場の良品製造パターンと同じになるように海外工場の成形条件を設定するなど, 成形時の金型内データの活用が始まっている^[1]。しかしながら, これらデータの活用は立ち上げ時の一時的な利用に留まり, 継続的なデータの活用はほとんど行われていない。これは, データ取得にパソコン等の設備を要し, 日常的な生産では使いづらいシステムであるところが大きい。連続的にデータを取得し, データから異常を発見することで, 現在目視検査に頼っている不良発見を自動化できることが期待され

ている。また, 金型の経時変化も取得でき, 金型メンテナンスへの活用も期待される。

軽量で強い素材として注目されているカーボンファイバ等を混入した繊維強化樹脂の成形では, 繊維の方向(樹脂の流れ)が製品強度に関係しており, 単に形状ができているというだけでなく, 型内の樹脂流動状態が設計どおりであることが必要である。金型内の状態を定量化することでショットごとの流動状態を確認することができ, 製品の品質をデータで示すことが可能になる。また, これらのデータを保管することで製品のトレーサビリティにも利用が可能であり, 品質管理を強化する手段として期待できる。

このように, これまでブラックボックスであった金型内の状態を継続的に取得・蓄積する技術は, 生産の立ち上げ時間の短縮化や不良品発見に効果が期待できる技術である^[2]。本研究では,

- ・ 金型の各種データ(温度, 圧力, 振動など)をパソコンで取得し, 金型上で処理
- ・ 取得データのビッグデータ解析によって成形異常を自動判定

ができる知的な金型(スマート金型)の開発を目標とする。

本報では, スマート金型実現のための第1ステップとして試作した試験金型について報告するとともに, 試験金

* 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

型を用いた成形実験の結果について報告する。

2. センサ付き射出成形金型の設計

射出成形において、金型内の樹脂の状態に影響を与えると考えられるパラメータとしては、温度、圧力、流速、流れ方向などが考えられ、温度については、樹脂そのものの温度や金型表面の温度、内部温度など、複数の測定ポイントが考えられる。さらには、射出成形機側の各種条件や材料のコンディションなど、成形の成否に関わるパラメータは無数に存在する。これらの考えられるパラメータを可能な限り収集して成形条件にフィードバックすることが理想ではあるが、本研究では、量産現場での使いやすさを考慮して「金型上で完結するシステム」をコンセプトにシステムを設計した。

2.1 センサシステム

金型内の樹脂の挙動を知るには粘性流体である樹脂そのものを測定することが最も効果的であるが、樹脂内部の状態を成形品に傷をつけることなく測定することは不可能である。金型表面に取り付けたセンサのデータから間接的に樹脂の挙動を推定することになるが、型表面のセンサには溶融した樹脂が直接触れることになり、高温、高圧下にさらされる。このような条件の下では繊細なセンサの使用は困難であり、本研究では射出成型用に開発された型内圧力センサ、型表面温度センサを使用することとした。また、型の深部温度を測定する温度センサ、コア側の型振動を測定する加速度センサも使用することとした。使用したセンサを表1に示す（金型上のセンサ配置は次節で説明する）。

これらのセンサで測定されるデータを同一の時間軸で

表1 試験金型に取り付けたセンサ

種別	点数	レンジ	メーカー・型番
表面圧力	4	200MPa	KISTLER 6157BA
表面温度	8	450°C	KISTLER 6193B
深部温度	4	650°C	汎用シース熱電対
振動	3(軸)	400m/s ²	小野測器 NP-3574

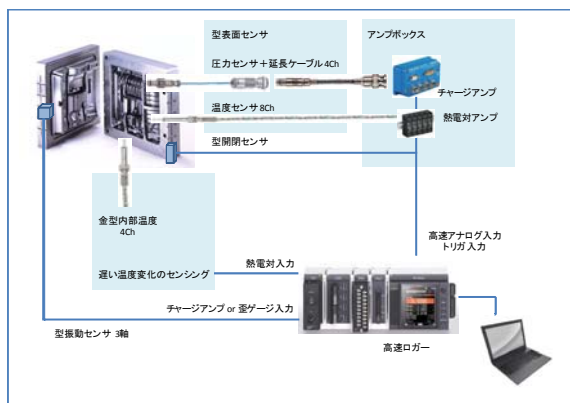


図1 データ記録システムの構成

同期して記録するため、図1で示す構成のシステムを構築した。KISTLER社製のセンサには専用のデータ処理装置が用意されているが、他社のセンサ（振動と深部温度）と時間同期して記録させることが困難である。すべてのセンサデータを汎用のデータロガー（キーエンス社NR-600シリーズ）で記録することで、特定メーカーによらない同期記録システムを構築した。

型表面の温度測定には、熱容量が小さい小型の熱電対センサを金型と熱的に絶縁された状態（H7公差のゆるみばめ）で設置している。これによって、充填される樹脂が温度センサに到達すると、10ミリ秒オーダーの短時間で温度変化が検出できる。このセンサを流路に複数設置して、温度変化の時間間隔を検出することで、樹脂の流速を推定することが可能になる。熱電対のデータ取得には熱電対用の入力モジュールが用意されているが、サンプリングが遅く急峻な温度変化を検出することができない。センサからアナログの熱電対アンプを介して高速アナログモジュールに接続することで、熱電対型センサの高速なデータ取得を実現した。開発システムでは、全データを1m秒のサンプリング間隔で取得できる。

2.2 金型設計

試作金型による成形品の形状は、引っ張り試験で用いられるJIS K7162試験片形状とした。これは、本研究と同時に進めている流動解析の研究での利用を想定したものである。キャビティは図2に示すような製品2個取りの形状であり、表面圧力センサを4箇所（○にP）、表面温度センサを8箇所（●にT）に設置した。深部温度センサは、可動側はパーティング面から20mm、固定側は32mm奥の上下に設置した。

図中の○に×の印は流量調整弁を示しており、成形品のキャビティ内での樹脂の流れ方を変化させ、表面温度センサの立ち上がりタイミングのパターンを変えて評価することを目的としている。また、ウェルドの有無や発生位置も変わることから、成形品の強度比較を行うことも想定している。

試作金型の写真を図3に示す。型表面センサはすべて可動側に設置しており、固定側には深部温度センサ（2箇所）のみ取り付けられている。流量調整はランナー幅の異なるブロックを入れ替えることで実現しており、流路断面積が

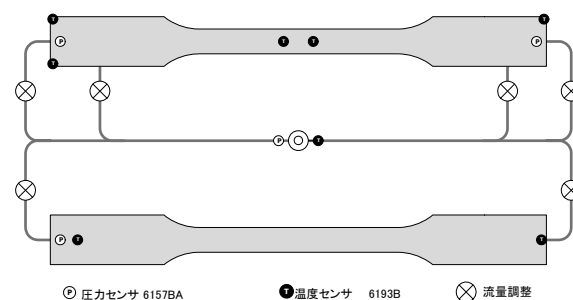


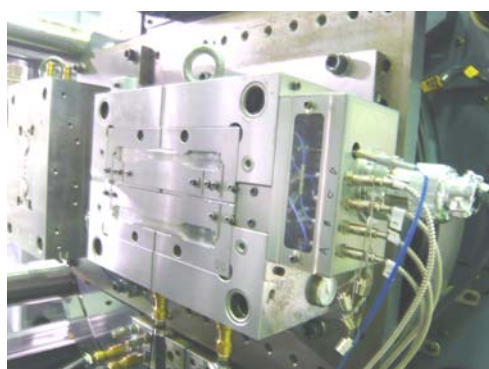
図2 試作金型の基本構造

1, 2/3, 1/2, 0の4段階で切り替えが可能である。また、中央部分にセンサを設置していない下側の製品は、引っ張り試験時の破断部分に傷がつかないように、ブロック押しのエジェクト機構を採用した。

3. 試作型による成形実験

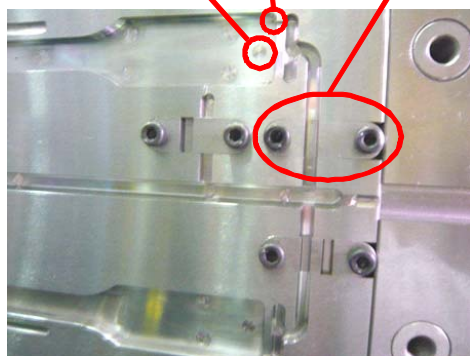
試作した金型を用いて、3種類の充填パターンにおいてデータ取得の実験を行った。使用した樹脂材料はポリカーボネイト(PC)およびPCにカーボンフィラー(CF)を10%, 20%, 30%入れたものの4種類である。成形機は住友重機(株)製SE280HS-CIを用い、合計で約300ショット分のデータを収集した。PC材の成形で得られたデータの一例を図4に示す。このときの充填パターンは、図5(a)に示すように左下の流量制御弁を全開、右上の流量制御弁を1/2開、他の流量制御弁は閉としたものであり、製品キャビティに対して1方向から樹脂が充填されるパターンである。成形品(ランナー付き)は図5(b)に示す形状である。

すべてのセンサデータは図4(a)に示すように時間同期して記録ができており、樹脂の充填・冷却に伴って型表面の圧力(図4(b))・温度(図4(c))が変化していることが確認できる。型深部の温度は、型の熱容量が大きく1回の成形サイクル中に大きな変動は見られなかったが、長時間の繰り返し運転では緩やかな時間的な変動が確認



(a) キャビティ側全体

型内圧力 センサ 表面温度 センサ ランナー切替 ブロック



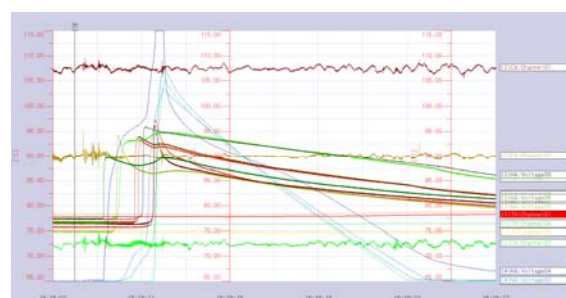
(b) ランナーおよびゲート部分

図3 試作金型

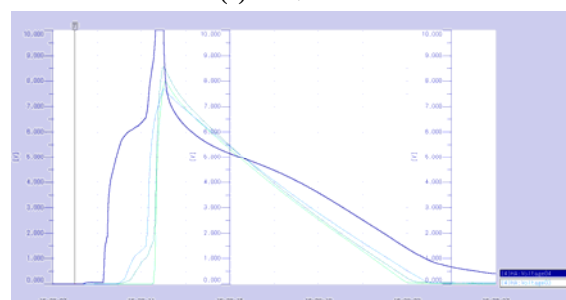
された。また、型振動(図4(d))については、型の移動や成形機の運転に伴って発生する振動が記録されているが、非常に小さな加速度であり同じ工場内にある他の機械の振動の影響も受けていると考えられる。

型表面温度の取得に用いたセンサには、前章で述べたように熱容量の小さなものを採用しているため、図7に示すように温度変化に対して素早い時間応答が得られることが確認できた。センサデータの立ち上がり時間をみることで、樹脂がセンサ間を通過する時間が分かり、充填状態を評価する指標となることが確認できた。

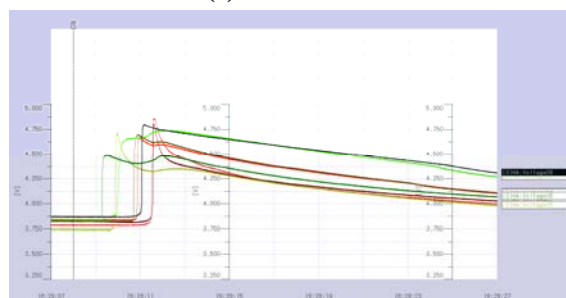
ショットごとで得られるデータの安定性を検証するた



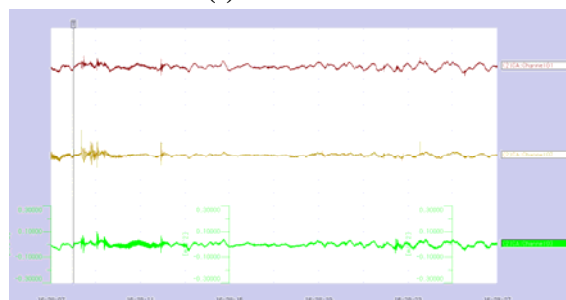
(a) 全データ



(b) 型表面圧力



(c) 型表面温度

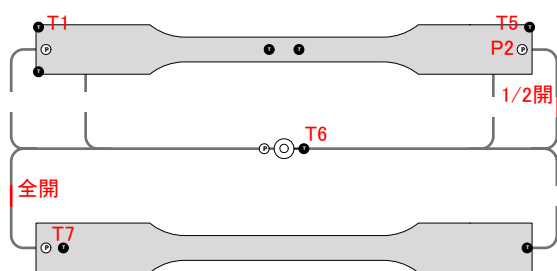


(d) 型振動

図4 測定データの波形

(深部温度はほとんど変化が無いので個別グラフを省略)

め、16ショット分のデータを重ね書きした、グラフを図7,8に示す。図中のAのラインは故意に不良を発生させた場合(重量充填率98%)のものである。図7は型表面圧力センサ(図5(a)におけるP2)のデータである。A以外はほぼ同じ波形、ピーク圧が得られていることが確認できる。また、図8は型表面温度センサ(図5(a)におけるT1, T8)の立ち上がり部分を時間拡大したものである。Aは大きく外れているが、その他の場合の立ち上がり時間は20m秒以内に収まっていることが確認できた。なお、B,Cのラインはしばらく型が開いた後の1回目、2回目のショットのデータであり、型表面の温度が定常状態に達していないことが確認できた。このように、同一の成形条件であればばらつきの少ないデータ取得が可能であること、成形条件が変われば測定データも変化することが確認でき、本システムで異常発見が可能であることが示唆された。



(a) ランナーパターンとセンサ番号



(b) 成型品

図5 データ比較評価のサンプル形状

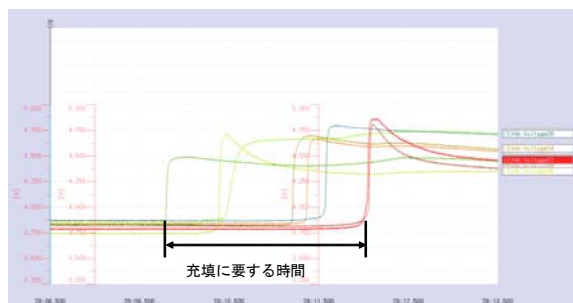


図6 温度センサによる流動時間評価

4. まとめ

プラスチック射出成型における立ち上げ時間の短縮、不良成形の発見を目的としたスマート金型システムを提案し、センサシステムの設計および実験金型を試作した。試作した金型を用いたデータ取得実験から、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、さらなる成形データの取得・解析を進めるとともに、金型上で完結するコンパクトなシステムの開発を進める。

文 献

- [1] “キスラー プラスチックブック”, 日本キスラー株式会社, 2012.
- [2] 北川和昭, 中野利一, “実践 射出成型不良対策事例集”, 日刊工業新聞社, 2010.

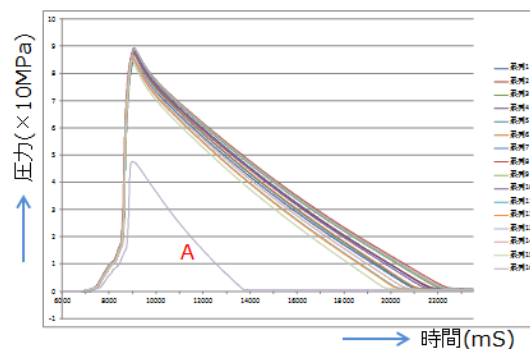


図7 圧力センサ(P2)の波形

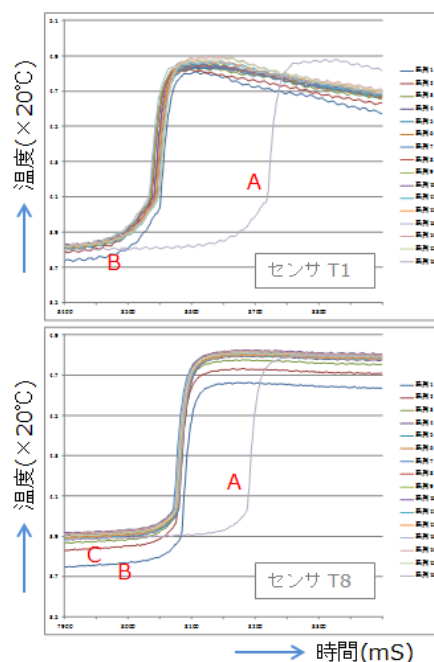


図8 型表面温度センサの立ち上がり

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

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*

A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Injection Molding -

Naoyuki BANDO Hidekazu HIRAYU Toshio YAMADA Shigeki KUDOMI
 Atsunori NIWA* Syuichi ASAKURA* Naoki KUBOTA*

あらまし 炭素繊維をフィラーに含む熱可塑性樹脂の流動解析シミュレーションの妥当性を評価する目的で、実際に射出成形機によって成形加工した際の観測結果とシミュレーションの対比を行った。

ウェルドライン発生箇所とフィラー配向、圧力・温度変化、樹脂到達時間を評価項目として比較した結果、金型キャビティが流動樹脂で充填される様子や充填・保圧プロセスの過程で樹脂が冷めていく様子は概ね妥当であるが、ウェルドライン近傍のフィラー配向には差異が認められた。

キーワード 樹脂流動解析, 射出成形, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

1. 緒言

近年、省エネルギー志向が高まり、金属材料で構成されていた機械部材を軽量のプラスチックに置き換える動きがある。

温めたシリンダ内で溶かした樹脂をピストンによって押し出し、金型に流し込んで固める射出成形は、得られる形状の自由度の高さからプラスチック成形加工で多用されている。部品を大量に製造するのに優れた加工技術であるが、強度特性を向上させるための強化材（フィラー）を含む材料を使う場合、安定した成形条件を見つけるのに手間がかかることが課題となっている。

この課題の解決には、流動解析技術の活用が有効と考えられる。流動解析とは、プラスチックを「溶かして、型に流し込み、固める」現象をコンピュータを用いて模擬（シミュレーション）する技術^[1]である。この技術を活用すれば、設計段階の金型形状データで樹脂の流れを確認できるため、結果を設計にフィードバックさせることで成形条件を見つけるのが容易な金型の製作に繋がるものと期待されている。

この期待に応えるべく、流動解析は既にいくつかの商用コードが販売されている。しかし、現場での活用は限

られているのが現状である。これは、シミュレーションが比較的単純な法則や仮定の組み合わせで構成されるシステムであり、実際に取り扱いたい現象がこれら法則や仮定の範囲に収まるものであるか、各個の課題ごとに実験結果と対比しながら判断する必要がある。そのため、流動解析の実施は商用コードを利用することで比較的容易に済んだとしても、解析結果の妥当性の判断に更に労力を必要とするためと思われる。

そこで、本研究では、フィラーを含む樹脂の流動解析の結果が、現実の樹脂流動と比較して、どれほど妥当性を持っているかを判断する一助とするため、実験およびシミュレーションの対比を行ったので、以下に報告する。

2. 検証モデル

本研究では、射出成形における実際の樹脂流動とシミュレーション結果の比較を以下の検証モデルで評価した。

2. 1 金型

本研究で用いる射出成形金型の形状を図1に示す。

この金型ではJIS K 7162で規定されているプラスチック引張試験片を2つ成形するものである。ランナー部には断面積を調整できる絞りを設けており流動パターンを変化させることができる。また、ランナーおよび試験片キャビティには温度センサおよび圧力センサを設置しており、実際の金型内部の樹脂流動を観測することができ

* 岐阜県産業技術センター

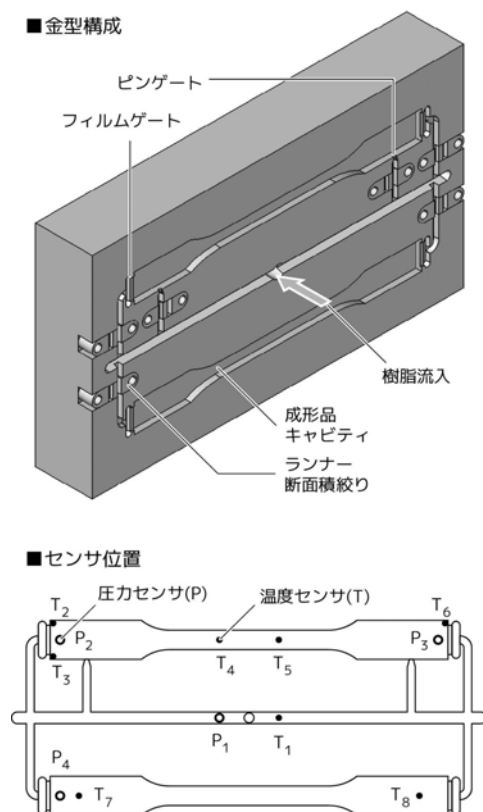


図1 射出成形金型

る。

2. 2 成形品形状

先の金型を用いて、本研究では図2に示す2つの形状を成形した。

パターン1はウェルドライン近傍での繊維配向を観察する目的の形状である。試験片の両端に設けられたフィルムゲートからそれぞれ樹脂が流入するパターンで、試験片中央部で流動先端が合流しウェルドラインが生じる。なお、2つの試験片のうち、一方の試験片の一端につながるランナーの途中に断面積を半分にする絞りを設けている。

パターン2は試験片キャビティおよびランナーに設けたセンサにより樹脂の到達時刻、圧力、温度を評価する目的の形状である。試験片の一方の端のみから樹脂が流入するパターンで、樹脂は試験片の長手方向に一様に流れる。

2. 3 成形機

射出成形機には、住友重機械工業社製SE280HS-CIを用いた。この成形機は充填プロセス中、スクリュ速度を切り替える多段階射出機能を有している。また、動作はNC制御されており、射出圧力、スクリュ速度およびスクリュ位置をモニタすることができる。

2. 4 材料

射出成形材料には、Iupilon CFH2010を採用した。これ

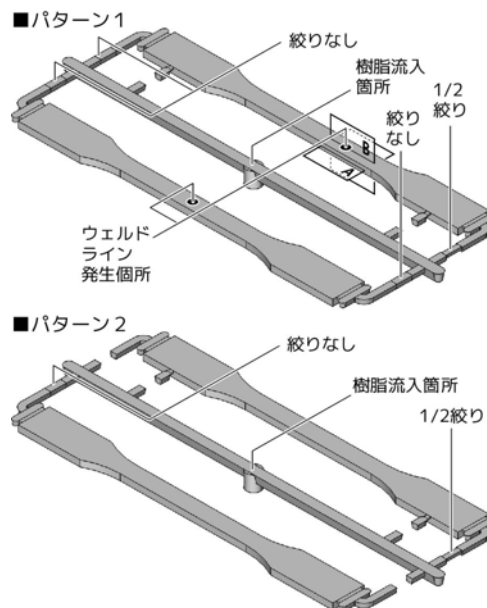


図2 成形品形状

は、ポリカーボネート樹脂にフィラーとして短炭素繊維を10%含んだ炭素繊維強化熱可塑性樹脂である。

3. 実験とシミュレーション

3. 1 実験条件

射出成形は主に充填、保圧および冷却プロセスからなる。このうち充填プロセスでは、スクリュを成形機限界まで前進させた位置を0mmとし、そこから85mm後進した位置を初期位置として、スクリュ位置64mmまでは速度70mm/sで前進、その後は速度20mm/sで前進する2段階速度切替方式を採用した。スクリュが前進して位置15mmに達すると保圧プロセスに切り替わる。本設定で充填プロセス時間は約2.75秒である。保圧プロセスでは10秒間50MPaの圧力で樹脂を押し続ける。保圧プロセスが終了すると圧力は解かれるが、そのままの状態を15秒維持して金型内で充填樹脂を冷却固化させる。その後金型が開き、成形品は取り出される。なお、本実験における射出樹脂温度は265℃、金型内部温度は90℃とした。

実験における射出成形設定および実際の成形機の応答を図3に示す。図において、横軸は時間を、縦軸はスクリュ速度および射出圧力を表し、実線は観測した値、破線は目標値を示す。なお、時間ゼロは樹脂の射出開始時刻である。また、充填プロセス中の射出圧力目標値は、装置を守るための限界設定値である。

図3から、設定したスクリュ速度に対し実際のスクリュ速度は正確に追従できていないことがわかる。これは、樹脂の流動抵抗など、移動を妨げる力がスクリュに働くためと考えられる。

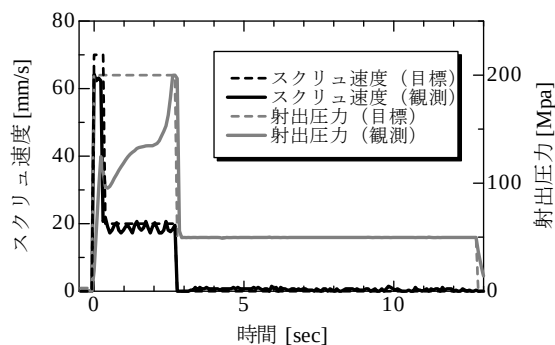


図3 射出成形設定および成形機の応答
(パターン2)

3. 2 シミュレーション条件

単位時間あたりに射出される樹脂量は、スクリュ速度にはほぼ比例する。図3で示したとおり実験時のスクリュ速度は目標値と実際の値が異なる。このため、スクリュ速度の目標値、つまり成形条件の値をシミュレーションでも採用すると、実際の流動挙動を正確に模擬できない。そこで、シミュレーションでは、実際のスクリュ速度を参照する方式で充填解析を行った。

シミュレーションはAutodesk社製Autodesk Simulation Moldflow Insight Premium 2014を用い、金型による冷却が非定常に行われることを考慮した充填および保圧プロセスを解析した。

4. 結果と考察

4. 1 樹脂流動現象の傾向評価

4. 1. 1 ウェルドライン

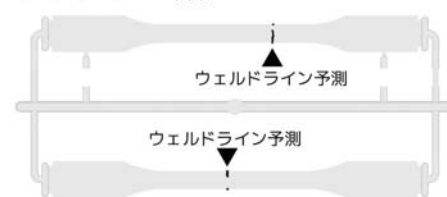
成形品形状パターン1を実際に成形した際とシミュレーションによって予測したウェルドラインの発生場所を図4に示す。実際とシミュレーションの結果がよく一致していることから、ウェルドラインの予測に流動解析は有効であるといえる。

4. 1. 2 フィラー配向

成形品形状パターン2を成形したときのウェルドライン近傍のフィラー配向について、実物の観察結果とシミュレーション結果を図5に示す。なお、実物写真はデジタルマイクロスコープによって撮影したもので、配向を確認しやすいように画像処理によって炭素繊維をハイライト表示している。またシミュレーション結果では、フィラーがそろっている割合をトーンで、フィラーが最も揃っている方向を線で示している。観察面は、図2に示す試料の厚みを等分した平面（観察断面A）および幅を等分した平面（観察断面B）である。これは厚みおよび幅方向の中央部となる。

実物写真を見ると、この試料の場合、写真右方向から

■シミュレーション結果



■成形品

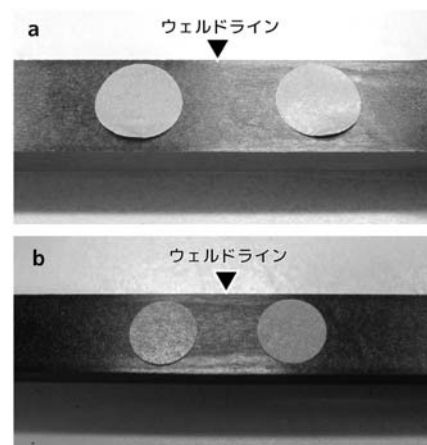
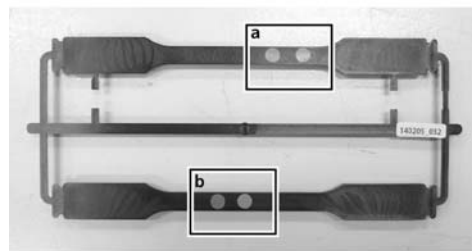


図4 ウェルドライン

流入した樹脂と左方向から流入した樹脂が合流したとき、右側樹脂は左側樹脂の中央部を進み、左側樹脂は右側樹脂の表面を伝うように進んだことが、フィラー配向からうかがえる。これは外気に触れて粘性を増した互いの流動先端が合流すると、圧力や粘度がわずかに高いほうが、一方の樹脂をかき分けるように進むためではないかと考えられる。

対してシミュレーションにおいても同様の傾向がみられるが、観察断面Bを比較すると、実際の配向ほどには顕著に一方の樹脂が他方の樹脂内部を進む様子は見られない。ここから、ウェルドラインにおけるフィラー配向の乱れは、概ねの傾向は一致するが、実際の複雑な合流の様子までは模擬することは難しいと推察される。

なお、試料の厚み方向を観察すると、合流する以前にあっても流動中心である厚み中央部において繊維が乱れている。これは既に知られている射出成形における繊維配向の知見^[2,3]と一致している。シミュレーションにおいても同様の結果を得られている。

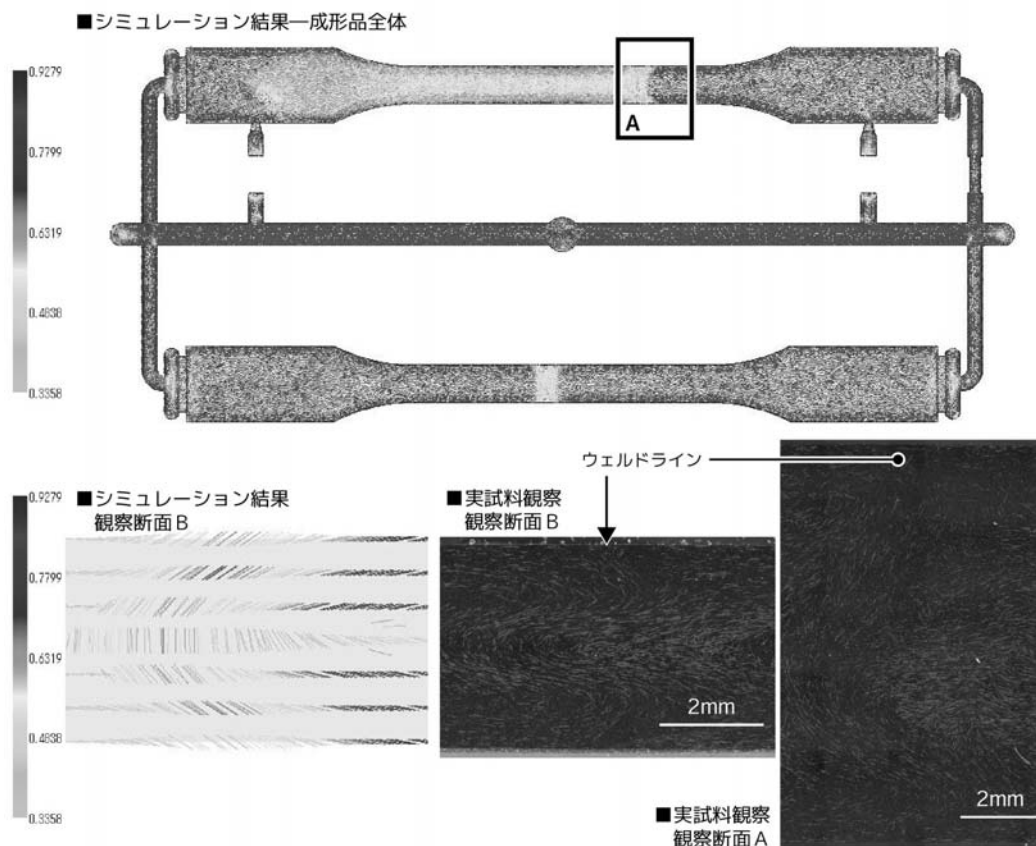


図5 ウェルドライン近傍のフィラー配向

4. 2 樹脂流動現象の計測評価

4. 2. 1 圧力・温度

射出成形時の実際の金型の圧力および温度の観測結果とシミュレーション結果を図6に示す。両図とも横軸は時間で、縦軸は圧力および温度を示している。なお、温度は図1に示す試験片を1つ成形する流路上にある T_1 から T_6 までを示している。また、実験における圧力は、金型内に設置した圧力センサの観測値であり、シミュレーションにおける圧力は、成形品が金型に対して垂直に作用した力を示している。

樹脂は、キャビティ内部を進み、空間を埋め尽くすと金型内の空間を押し広げようとする。その結果、金型内部のキャビティ表面の圧力は上昇する。よって、圧力センサの値がピークを示している時刻は、金型内部が樹脂で充填された時刻となる。本研究の成形実験では空間が充填されるとほぼ同時刻に保圧プロセスへ切り替わるので、ピーク値を示すのは一瞬で、その後金型内部では樹脂の冷却固化が進み、圧力は徐々に低下する。この様子をシミュレーションでもよく模擬できているが、圧力の絶対値には違いが見られる。

実際の流動樹脂は金型に触れた瞬間に固化するスキン層と呼ばれる膜内部を進む。金型に作用する圧力は樹脂の射出圧力を源とし、スキン層を介して金型に作用する。このとき、スキン層は、平面的に展開したシートに面に

鉛直に力を加えたときのシートの反力のような力で、流動樹脂が金型を押し広げようとする力を阻害するものと考えられる。対してシミュレーションでは冷却に伴う固化層の増大で体積が収縮することによる圧力の低下は模擬するが、スキン層の平面的な復元力を考慮しないために、流動性を十分に有している状態で完充填した際は射出圧力とほぼ等しいピーク値を示し、全体では実験よりも大きな値を示すと考えられる。

金型内部の温度センサは、流動樹脂先端に触れても直ちには流動樹脂温度を観測せず、樹脂からセンサに熱が移動する僅かな時間を要する。この間に樹脂表面の温度は金型に熱を奪われて急激に低下するので、結果として温度センサの観測結果は、樹脂の射出時の温度より低い値でピークを有する山なりのグラフ形状となる。

この温度結果は実験とシミュレーションがよく一致しており、ピーク時の温度はほぼ違いがない。若干、保圧プロセス中の温度の低下傾向に違いがみられるが、これは金型素材の特性および熱伝達係数の設定が厳密でなかったためと思われる。

4. 2. 2 樹脂到達時間

図6の温度グラフにおいて、グラフが急激に立ち上がっている時刻は、流動樹脂先端がセンサ位置に達した時刻である。そこで、各センサに流動樹脂先端が至った時刻を温度グラフから読み取り、実験およびシミュレーショ

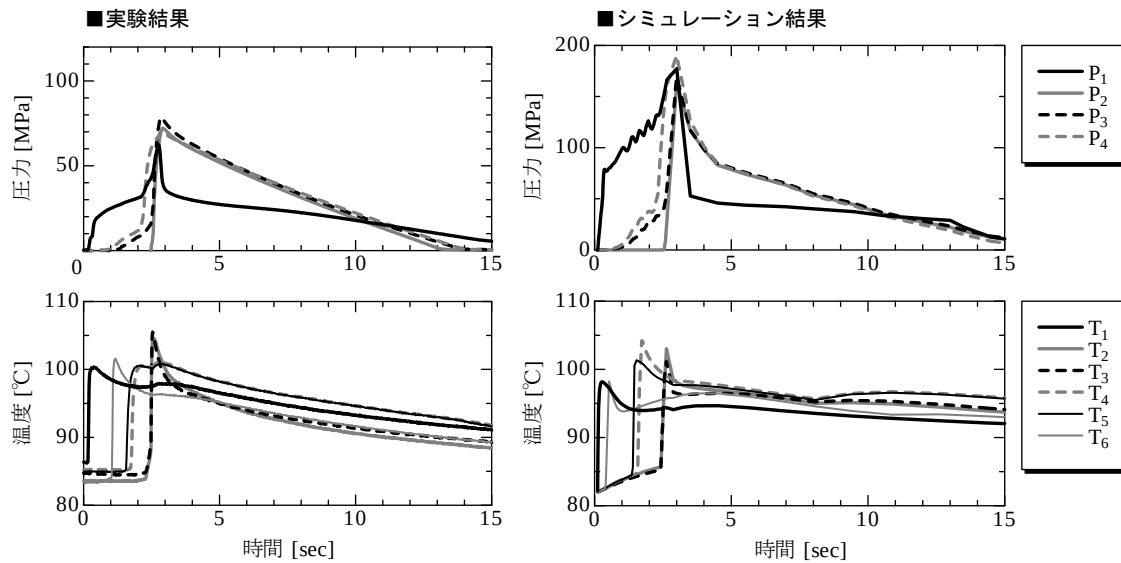


図6 圧力および温度の解析結果（パターン2）

ンで比較したのが図7である。横軸には、流動樹脂が到達した順に温度センサを示し、縦軸には到達した時刻を示している。なお、時刻ゼロは温度センサT₁に流動樹脂先端が至った時刻としている。

比較すると、各センサに至る順序が一致していることから、樹脂が充填されていくパターンが一致していることがわかる。また充填時間間隔も数量的にはほぼ一致することがわかる。このことから、金型内で進展していく樹脂の流動を評価するのに、シミュレーションは有効な手段であるといえる。

5. 結言

フィラーを含む樹脂の流動解析の結果が、現実の樹脂流動と比較して、どれほど妥当性を持っているかを評価する目的で実験およびシミュレーションの対比を行った。

実験結果とシミュレーション結果はウェルドラインの発生箇所において一致した。フィラー配向は概ねの傾向は一致したが、実際の複雑な配向までは模擬することは

難しいと推察された。

圧力においては、経時変化は概ね一致したが、ピーク値に違いが見られた。これは、実際の成形では、スキン層が樹脂内部の圧力を金型に伝えることを阻害するためと思われる。温度はよく一致した。

温度観測結果とシミュレーションを用いて、樹脂の充填パターンを比較したところ、実験結果とシミュレーション結果には一致が見られた。

以上のことから、フィラーを含む樹脂の流動解析の結果は、金型キャビティが流動樹脂で充填される様子や充填・保圧プロセスの過程で樹脂が冷めていく様子は概ね妥当であるが、ウェルドライン近傍のフィラー配向については、結果の利用に注意を要するといえる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、株式会社岐阜多田精機 多田憲生 様には多大のご支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 日本塑性加工学会, 流動解析 - プラスチック成形, 2004.
- [2] 竹田 啓, "射出成形における繊維配向", 繊維学会誌, Vol.47, No.2, pp.74-78, 1991.
- [3] 山下 勝久, 野々村 千里, 山田 敏郎, "射出成形品の繊維配向における層構造の解析(1)", 成形加工, Vol.13, No.6, pp.400-407, 2001.

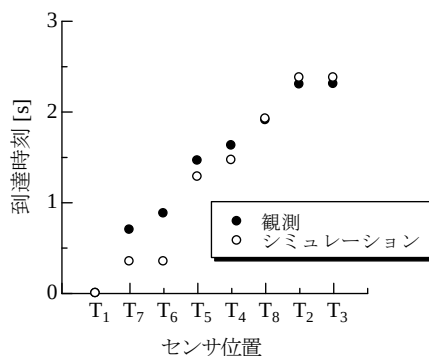


図7 センサへの樹脂到達時刻

防災情報システムの高度化に関する研究(第2報)

浅井 博次 藤井 勝敏

Study on a Disaster Reporting System (2st Report)

Hirotsugu ASAI Katsutoshi FUJII

あらまし 県が試験的に運用している「防災リポートch.」は、県内で災害が発生したときに現地の情報を迅速に収集するためのGISアプリケーションであるが、従来型携帯電話からスマートフォンへの移行が進むにつれ、スマートフォンに対応していないことが大きな課題となっていた。そこで、昨年度より、スマートフォンアプリの開発による課題解決を図っている。昨年度は、災害情報登録専用アプリを開発した。本稿では、新規に開発した登録情報閲覧機能について報告する。

キーワード 県域統合型GIS, 防災リポートCh., スマートフォン専用アプリ

1. はじめに

岐阜県では災害情報収集手段を複数確保するため、市町村から被害報告を受ける既存の「被害情報集約システム」に加え、県内で災害が発生した際に地域で活動する防災関係者等から迅速に情報を収集することを目的とする「防災リポートCh.」が試験的に運用されている。

防災リポートCh.とは、災害発生時に現場付近に居合わせた防災情報リポーター（岐阜県内の自治体職員、消防団員を対象に募集する情報提供ボランティア）に、災害の状況を携帯電話のカメラで撮影し、県の防災情報集約センターに報告してもらうための仕組み（図1）であるが、旧来のマウス操作を前提として設計された県域統合型GIS上に構築されていることから、タッチパネル操作などへの対応が不十分であり、スマートフォン（タブレット）に対応していないという大きな課題があった。

そこで、本研究では、県域統合型GIS利用者へ影響を与える可能性のあるGISの改修をすることなく、専用のスマートフォンアプリを開発することで課題の解決を図ってきた。昨年度は、スマートフォンから災害情報を防

災リポートCh.へ登録するためのandroid版アプリを開発し、防災情報リポーターの間口をスマートフォン所有者へ広げることができた。

災害情報登録アプリにより、災害情報の収集という点における課題の解決はできたが、スマートフォンで可能なことは、依然として限定されている。そこで、本年度は、スマートフォンでの活用の幅を更に広げるため、情報活用の基本となる閲覧機能を新たに開発したので、報告する。

2. 登録情報閲覧機能

防災リポートCh.は情報の収集に主眼を置いており、登録された情報を閲覧できるのは災害情報集約センターの担当者のみとなっている。しかしながら、登録情報利活用の基盤となる閲覧機能は、今後の防災リポートCh.の活用推進に必要な不可欠な機能といえる。

閲覧機能がないことによる問題点を、以下に挙げる。

- ・自分が登録した情報を確認できない
- ・同様の情報がすでに登録されていてわからない

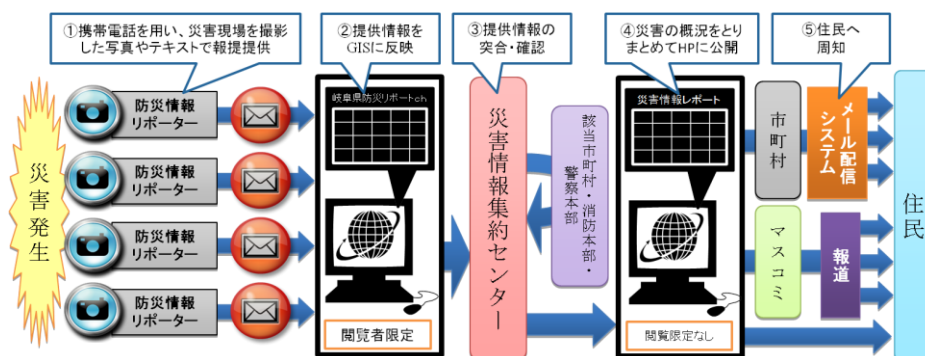


図1 防災リポートCh.の処理の流れ

- ・間違っで登録した情報を削除/修正できない

これらの問題は、類似した情報の登録増加や登録情報の信頼性低下につながる。結果として、後段の確認作業を増大させるため、本システムの効率を低下される大きな要因となる。

スマートフォン対応として開発した災害情報登録アプリは、災害情報の登録に特化したアプリであり、登録された情報を閲覧することはできない。そこで、これらの問題に対応するため、登録情報を閲覧する機能を開発した。情報登録時に登録済情報を確認できることで、重複など不必要な情報登録の抑制が期待できることから、災害情報登録アプリの機能拡張という形で閲覧機能を実装した。

情報登録と情報閲覧は、表示される地図上の位置を指定する、という同じ行為によって指示を行う。そのため、何らかの方法で、どちらの指示を行っているのかを判別する必要がある。オプションメニューなどによりモードを切り替える方法もあるが、本アプリでは、長押し時間によってモードを切り替えることとした。これは、情報閲覧と情報登録は一連の作業の中で行う指示であることから、できる限り自然な作業でモードの切り替えができるよう、意図したためである。

長押し時間により、

情報閲覧 → 情報登録

とモードが移行する。

長押し時間が約0.2sec～約0.5secの間で押下した指を離すと、情報閲覧モードとなる。押下した場所付近の登録情報をGISへ問い合わせ、最近傍に登録されている情報を取得し、表示する。また、内容を表示している登録情報マークを矩形で囲い、どの登録情報の内容を表示しているかを明示する(図2)。検索範囲内に情報が登録されていない場合は、何もせず処理を返す。

長押し時間が約0.5secを超えると、押下位置にサークル表示を開始し、情報登録モードに入ったことをユーザに提示する。そして、約1.5sec経過すると、情報登録画面を表示する。

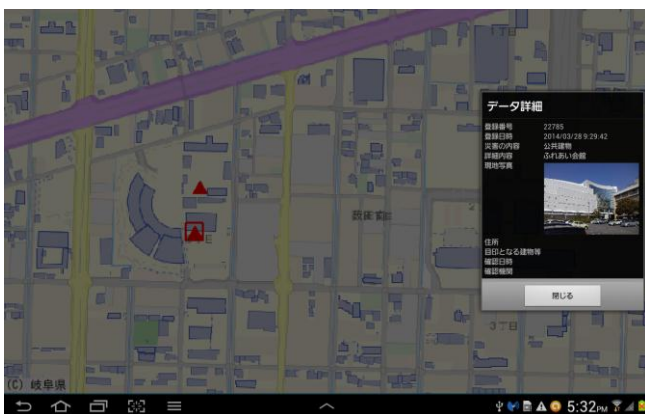


図2 登録情報の内容表示イメージ

3. タブレット利用検討

本研究では、スマートフォン非対応という防災リポートCh.の課題に対し、スマートフォンからの情報登録を実現し、情報収集における課題を解決した。一方、情報収集後の作業(情報の突合・確認など)についてはスマートフォン対応への検討をしてこなかった。しかしながら、タブレットの普及が急速に進み、近年では様々な業務で利用されるようになってきている。今後更に多くの業務でタブレットの利用が進んでいくことが予想されることから、本システムにおけるタブレット利用について検討した。

タブレットは、高い可搬性(軽さ、薄さ)、長い連続駆動時間、大きな画面、タッチパネルによる直観的な操作やインスタントオン(電源投入後すぐの動作開始)などの特徴がある。これらは、屋外や移動中での利用において、大きな利点となる。

防災リポートCh.運用の中で屋外・移動中での利用が必要となるシーンとしては、図1③提供情報の突合・確認のステップが挙げられる。現場付近の防災関係者が実際に現場に行って状況を確認するなど、屋外での作業が必要となるケースが多く、タブレットの高い可搬性と、キーボードを必要としない直観的なユーザインタフェースの有用性は高いと思われる。

また、災害対策本部は、災害の規模・程度によって被災地付近に設置されることもある。そのため、対策本部内に設置される災害情報集約センター担当者端末としても、高い可搬性のメリットは大きいと思われる。

防災リポートCh.は情報登録アプリの公式サイト公開を機に平成26年3月に本格運用に移行したばかりである。まずは現行システムの運用を通して課題抽出を図り、その上で、本章で検討したタブレット利用なども含め、システムの改善について判断していく予定である。

4. まとめ

本研究では、岐阜県の防災情報システムの利便性向上を目的に、昨年度より防災情報リポートCh.のスマートフォン対応を進めている。今年度は、昨年度開発した災害情報登録機能に加え、情報閲覧機能を新たに開発することで、スマートフォン利用者の利便性向上を図った。これにより、スマートフォン利用者が防災リポートCh.を利用するために必要な基本機能である情報登録と情報閲覧を実現した。今後、防災リポートCh.が広く活用されることを期待したい。

次年度は、運用により見えてくる防災リポートCh.の課題等へのフォローアップを行う予定である。また、防災リポートCh.に限定せず、防災情報を有効活用するための方法についても、検討していく予定である。

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発(第5報)

藤井 勝敏 田畑 克彦 横山 哲也 平湯 秀和 遠藤 善道

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

Katsutoshi FUJII Katsuhiko TABATA Tetsuya YOKOYAMA
Hidekazu HIRAYU 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)の実用化を目指し、これまでに開発した試作機を用いて県内外複数の水田で実証実験を行ったところ、特に中山間地での自律走行設定時に稲列追従制御が機能しない問題が発生した。本報では、次年度の実証実験に向けて、その問題の根本的な原因を突き止めるべくアイガモロボットに搭載した運転情報記録装置(ドライブレコーダー)について報告する。

キーワード アイガモロボット, 軟弱土壌, 稲列追従走行

1. はじめに

水田用小型除草ロボット(以下、アイガモロボット)は、当研究所が平成15年から開発してきた水稻の移植(田植え)直後の時期に使用する雑草抑制用除草機である^[1]。稲が十分に生育し雑草より優勢になるまでの期間、週2回程度、繰り返し走行させることで、除草剤を使わずに雑草を抑える効果がある。これまでにアイガモロボットの開発・改良と並行して、平野部の水田などでアイガモロボットを試用することにより、除草効果と収穫量や品質への影響等について調査研究を行ってきた^[2]。

本年度は、直近の3カ年間の研究開発事業^[3]で製作した試作機を使用し、農家や組合の協力の下、中山間地の水田で1シーズン通して実証実験を行うとともに、埼玉、岡山、島根、兵庫の試験圃場においても同様の実証実験を実施した。その際、将来の一般農家への販売を想定し試作機一式の管理、操作および手入は貸出先の協力農家や農業普及員もしくは研究機関等に任せ、商品化を見据えた運用データの収集を試みた。

しかし、実験では自律走行設定時に稲列追従制御が正常に機能しないなどの様々な問題が発生し、結果的にはオペレータが手動操作で運用することでシーズン中の作業を完了した結果となった。

問題発生の原因については、アイガモロボットの個体差、水田の地質、水深、営農方法、日照条件、運用管理者の操作技術習熟度の違いなどが複合したものであると疑われるが、いずれの要素についても再現性がないために、現時点では原因特定に至っていない。

そこで来シーズンの実証実験への備えや、その後の実用化を念頭に、現地でのアイガモロボットの運転状況を記録するための改良と、特に重要な不具合である稲列追

従動作の不具合に関する考察と改良に取り組んだので報告する。

2. 稲列追従制御の不具合

アイガモロボットは、本体上部のカメラで図1のような濃淡画像を撮影し、リアルタイム画像処理を経て、現在走行中の稲列に対しての機体のずれを認識し、左右の駆動モータへの出力を調節して進行方向を調整する仕組みで稲列追従を行う。

本年度の実証実験では、アイガモロボットを自律走行状態に切り替えたとき、この調整機構が発現せずに稲列を踏み潰してしまう不具合が複数個所で発生した。

これらの圃場では自律走行ではなくラジコンによる手動走行を使って予定の走行作業を完遂させたが、圃場全体をオペレータが手動操縦するのでは省力化にならず、また、オペレータからアイガモロボットを目視できない広大な圃場においては、自律走行なしに運用することは実用的でないため、ユーザからはこの問題解決が強く求められている。

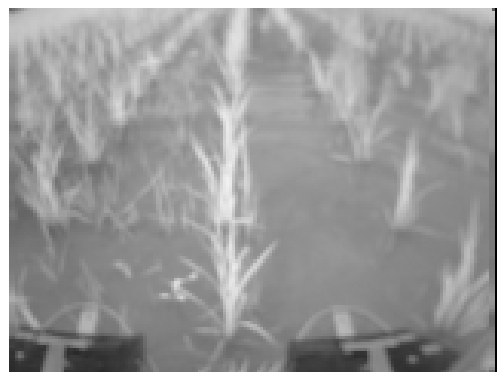


図1 稲列撮影画像

3. 不具合情報の収集

現地実証実験中に不具合報告が起きた機体は確認のためにすぐに回収し、平地の標準圃場を使って動作確認を行った。しかし、その際には稲列追従制御は試運転時と変わらず問題なく機能し、内部データにも異常は認められなかった。

そのため不具合発生状況については現地オペレータからのヒアリングに頼るしかなく、その場合に得られる情報は作業環境(圃場の広さ、方角、天気)と作業時のアイガモロボットの様子程度である。しかも各圃場にはアイガモロボットは1台ずつしか割り当てておらず、アイガモロボットの様子について正常機体との比較できないため、オペレータの主観的な印象でしか得られない。

このような状況は、アイガモロボットが将来一般向けに販売された場合にも当然想定すべきである。今年度や従来の研究中においては、現地実証実験に開発者が立ち会い、ロボットの挙動を確認してその場で修理、調整を行うことがあったが、同様な対応は一般農家向けに製品として販売した後では極めて困難になる。

アイガモロボットの製品化を目指す上で、この作業に関するノウハウをメーカーあるいはユーザに委譲することが、最大の壁とも言える。



図2 軟弱土壌での走行



図3 防草シートを敷設した枕地

4. 制御プログラムの改良

オペレータから聴取した不具合発生の傾向や現地調査から、追従動作に係る問題は、

- ・圃場の条件(土質、気象、周辺環境)
- ・運用方法(時間帯、操作ミス、苗の生育状況)
- ・機械的な性状(経年劣化、さび、故障、個体差)

のいずれか、もしくは複数の要因が、設計上想定している誤差範囲を超えたことが直接の原因と推察される。

例えば圃場の土質に関しては、従来から軟弱土壌でアイガモロボットが直進走行する際、転覆の恐れがあることがわかっており(図2)、一部の機体では転動輪に浮力を持たせ、走行中の機体姿勢を安定化する改良を行っている。また軟弱土壌における旋回動作では、クローラーベルトの縁が地面を掘り下げて荒らすため、昨年度は枕地に防草シート(図3)を敷設する対策を実施したが作業性とシートの維持に問題があったため、今年度は旋回半径を大きくとることで地面への影響を軽減する改良を行っている。

今回の稲列追従に関する不具合も、そのほとんどが中山間地の軟弱圃場で発生していることから、土質の軟らかさが一因の可能性が高い。今回は曲がっている稲列に沿わずに直進することが問題となっているため、走行制御プログラムの改良点として、稲列から外れたときの補正に使うモータ出力制御量を従来よりも大きく設定できるように改良した。なお、正常に追従走行できた平地圃場においては、次年度の実証の中で、従来の設定と軟弱地用設定との動作状況を比較する予定である。

5. ドライブレコーダの開発

前節の推察に基づいてアイガモロボットの制御プログラムに改良や調整を加えているが、根本的な原因が特定されていないため、来年度の実証実験においても今年度と同じ不具合が再発する可能性は十分考えられる。

そこで不具合の原因絞り込みのために、来年度実証実験に使用する予定のアイガモロボットすべてに、制御システムの内部状態変化を自動的に記録する装置(ドライブレコーダ)を開発し、搭載した。収集を予定する情報(ログ)の項目を表1に示す。なお、ログに含まれる時刻情報は、アイガモロボットに搭載されているバッテリーバッ

表1 ドライブレコーダの記録項目

内容	形式
カメラ画像	ビットマップ
オペレータ操作 (ラジコン、パネル)	時刻+内容
自律走行判断	時刻+内容 (状況により+画像)
センサ異常値	時刻+センサデータ +画像



図4 アイガモロボットドライブレコーダー

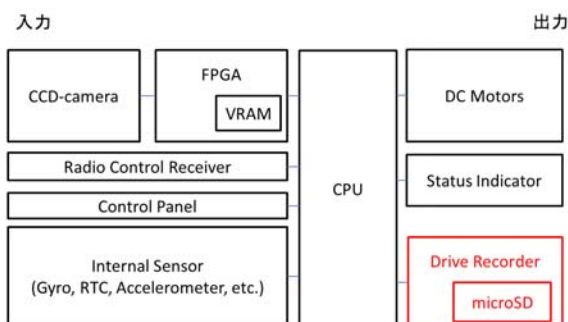


図5 アイガモロボット制御ブロック図

クアップされた時計ICを参照している。

ドライブレコーダ自体は図4のような組み込みモジュールとして本体内に収納され、従来通りにロボットの電源を投入しラジコン等を使って操縦していれば、自動的にSDカードにログが保存されるようにプログラムしてある(図5)。そのため、運用時に不具合が生じた後で、オペレータからの聞き取りと合わせてこのログを解析することによって、異常発生時刻周辺でどのような状況が発生していたかが明らかとなり、不具合発生原因の手がかりが得られるのではないかと期待している。

6. まとめと今後の予定

今年度は、開発したアイガモロボットを中山間地等の複数の実証試験圃場で使用し、開発者の立ち会いなしにシーズン運用を行ったところ、想定外の故障や不具合が発生し、設計通りの性能を発揮できない結果となり、実験の目的であった自律走行を主体とする作業性や使用感等の運用データが収集できなかった。また、オペレータ等の主観が入る不具合報告からは根本的な原因究明や対

策が得られないことも分かった。

そこで次年度の実証実験に備え、今年度と同様すべての現地試験に開発者が立ち会えない状況を補完し、不具合の発生状況を後日解析できるようにするため、ドライブレコーダを開発し、実証実験予定のアイガモロボット全機に搭載した。

この改良により、次年度5月から7月にかけて予定する現地実証実験での各地の運転状況がデータとして蓄積できることから、稲列追従に関する不具合を含め、アイガモロボットの実運用上の課題の特定や解決に資すると考えられ、実用化に向けて前進することが期待される。

謝 辞

本研究は、農林水産省平成25年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業「機械除草技術を中核とした水稲有機栽培システムの確立と実用化」の一分担として実施しました。

本研究に際し、農林水産省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稲生産者の皆様、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提供してくださいました岐阜大学応用生科学部太場先生ならびに岐阜フィールド科学教育研究センター古川様、みのる産業株式会社、中山間農業研究所に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 光井輝彰,他, “有機栽培技術の高度化に関する研究－水田除草ロボット(アイガモロボット)移動機構の開発－”, 第5号, pp.33-36, 2003.
- [2] 光井輝彰,他, “水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発－現地実証試験2012－”, 第14号, pp.13-14,2013.
- [3] 光井輝彰,他, “水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発－自律走行ロボットの開発(第4報)－”, 第14号, pp.11-12,2013.

水田魚道を遡上する魚の自動計数装置の開発(第2報)

横山 哲也 桑原 圭司* 米倉 竜次* 坂東 直行 浅井 博次

Development of Fish Counter for Water Ladder (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA Keiji KUWABARA* Ryuji YONEKURA* Naoyuki BANDO Hirotsugu ASAI

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。著者らは昨年度、水田魚道を通過した魚を自動計数できる装置を試作した。本年度は試作した装置を用いて、県内2箇所で開催された数カ月間の計測を行った。本稿ではその計測結果と課題について述べる。

キーワード 水田魚道、自動計数

1. はじめに

岐阜県では生物多様性に配慮した基盤づくりや水田・農業用水路を活用した環境教育など、環境との調和に配慮した取組みを推進している。その取組みの一つ「生きものにぎわう水田再生事業」において、水田魚道の設置を推進している。水田魚道は、排水路に生息する魚が水田を繁殖・成長の場として利用できるよう、水田と排水路をつなぎ魚の自由な移動を促進する。しかし、水田魚道の効果的な運用方法に関する情報は少なく、その方法を確立するためには、水田魚道を遡上する魚の種類、個体数、時間帯などを定量的に評価する調査が必要である。

調査の実施にあたっては計測期間が長くなることから、人が介在しない自動での計数方法が望まれる。著者らは昨年度、光電式遮断センサ（以下、光電センサ）とカメラを組み合わせた自動計数装置を試作した^[1]。本装置は水中に設置され、光電センサの投光部から受光部に対してスリット光を投光し、魚がスリット光を遮ると、水面の上から写真を撮影する。撮影画像から水田魚道を通過した魚の大きさや種類を確認することも可能である。

本年度は試作した計数装置を用いて、県内の2箇所で開催された計測を行った。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. 現地での計測

2. 1 現地計測の概要

表1と図1に、本年度計測を行った県内2箇所の計測期間と水田魚道を示す。何れの魚道もコルゲート角型U字管を用いた。

図2に計数装置の設置を示す。光電センサが水の流れの

変化により生じる泡の影響を受けないよう、水の流れが緩やかな畔の平坦部を計測箇所を選定した。また計数装置の太陽光の影響を軽減するため、装置の上にカバーを被せた。電源に関しては現地で商用電源を確保できないため、鉛蓄電池バッテリー(12V 115Ah)を用いた。

表1 県内2箇所の計測期間

計測箇所	計測期間
海津市馬目	5月30日～7月27日のうち計50日
可児市今	6月 5日～8月28日のうち計78日



図1 水田魚道（左：海津市馬目、右：可児市今）



図2 現地での自動計数装置の設置（可児市今）

* 岐阜県河川環境研究所

2. 2 計測結果^[2]

図3に自動計数装置のカメラで撮影した画像の一例を示す。撮影画像を基に目視による魚種と大きさの特定を行い、撮影時間より魚が通過した時間を特定した。また、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遡上・降下を判断した。

表2に自動計数装置で計測した魚種と遡上及び降下数を示す。可児市今においては農業排水路に生息する魚のうち、おもにタモロコとドジョウの遡上及び降下が確認



図3 計数装置のカメラによる撮影画像(タモロコ)

表2 県内2箇所の計測結果

計測箇所	魚種	遡上数	降下数
可児市今	タモロコ	2,735	2,970
	ドジョウ	145	32
	その他	30	12
	不明	417	313
海津市馬目	タモロコ	1	1
	メダカ	2	0

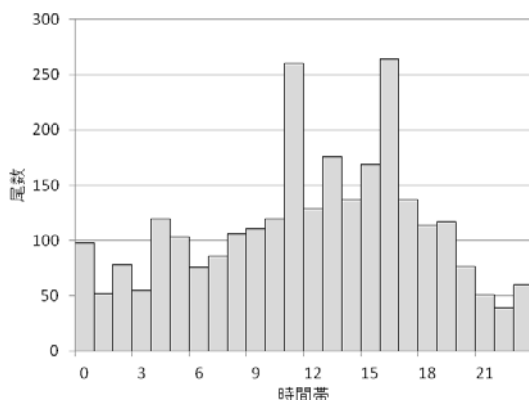


図4 タモロコの遡上数(全期間の合計, 可児市今)

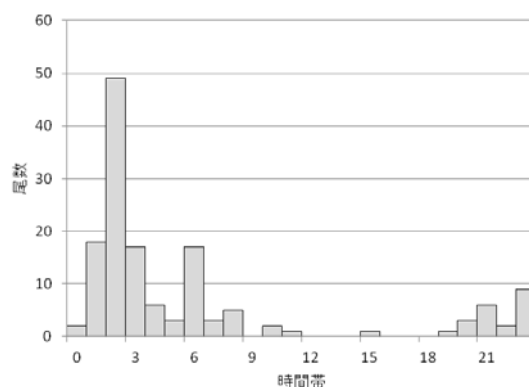


図5 ドジョウの遡上数(全期間の合計, 可児市今)

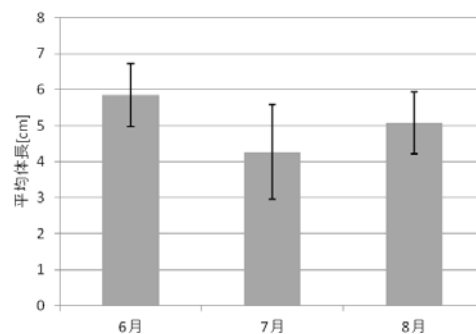


図6 タモロコの平均体長と標準偏差(遡上, 可児市今)

できた。海津市馬目については、天候等の都合により計測日数に対して水が流れた日数の割合が小さく遡上数と降下数が少ない結果となった。

図4, 5に、可児市今における全計測期間のタモロコとドジョウの時間帯毎の遡上数を示す。図よりドジョウは夜間に遡上するのに対し、タモロコは昼夜を問わず遡上することがわかった。

図6に、可児市今における遡上した魚の平均体長と標準偏差を示す。7月に平均体長が小さくばらつきが大きいのは、成魚に交じり稚魚が遡上を始めたためと思われる。

3. 現地計測での問題点とその対策

現地計測を行った結果、問題点として持続的な計測が挙げられる。具体的には、バッテリー交換で現地に赴いた際、計数装置の不調によりデータが計測されていないことがあった。集計データの品質を向上させるためには、遠隔地から計数装置のモニタリングができる仕組みが必要である。

遠隔モニタリングを行うにあたり、計測箇所が農地で有線インフラが整備されていないことを考慮し、携帯電話に組み込まれている3Gデータ通信モジュールの利用を検討している。自動計数装置にSMS(Short Message Service)等を組み込むことで、遠隔地に居ながら計数装置の状態を把握することが可能になると考える。

4. まとめ

本研究では水田魚道を遡上する魚の定量的評価を行うため、自動計数装置を用いて県内2箇所計測を数カ月行った。その結果、水田魚道を通過する魚の個体数、時間帯、魚種及び大きさを特定することができた。

来年度も引き続き県内で計測を行うことから、今後は装置の遠隔モニタリングが可能となるよう改良に努める。

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] 桑原 圭司, "県内に設置された水田魚道の効果調査", 平成25年度岐阜県河川環境研究所研究成果発表会資料, 2014.

人の動線推定に関する研究開発（第3報）

— フィルタアルゴリズムの改良とランドマークによる位置補正 —

山田 俊郎, 渡辺 博己, 棚橋 英樹

A study on a human tracking (3rd report)

- An advanced filtering algorithm and a position adjustment using landmarks -

Toshio Yamada, Hiroki Watanabe, Hideki Tanahashi

あらまし スーパーマーケット等の大型量販店を利用する買い物客の行動履歴を得るため、ショッピングカートを利用した位置計測システムを構築している。これまでに、光学マウスと方位センサ・ジャイロを用いた測定システムを試作し、測定データを確率フィルタとマップマッチングで補正して動線をプロットするアプリケーションを開発した。開発システムではおおむね良好な動線推定ができるものの、条件によっては動線推定ができなくなる場合や、推定された動線に誤差が残る問題が確認された。本報では、これらの問題を解決するために導入した、フィルタアルゴリズムの改良およびランドマークについて報告するとともに、店舗実験用に1ボックス化した測位モジュールおよび動線推定例についても報告する。

キーワード 動線推定, 測位技術, デッドレコニング, 確率フィルタ

1. はじめに

大型量販店における店舗設計や経営戦略の立案にあたって、店舗を利用する買い物客の回遊行動データは有用な情報であると考えられている。現時点では、動線追跡にかかるコストが高く、個別の動線情報(追跡調査)や従業員の感覚で得られる情報(〇〇売り場は人が少ない, など)しか利用できていないが、多くの買い物客の動線データを得てビッグデータ解析を行うことで、従来の経験的なデータからは得られない新たな知見が得られるのではないかと期待されている。

位置情報の取得技術については、屋外においてはGPSが標準技術として確立しているが、屋内の測位においては確立した技術が存在していない。現状では測位の目的に応じてさまざまな方式の測位技術が提案されているが、それぞれに一長一短がある^[1]。

このようなニーズや技術背景のもと、我々は測位対象を店舗内のショッピングカートに限定することで、「実用的な動線データ」を「低コスト」で取得する技術の開発をおこなっている^[2,3]。前年度までに開発した技術では、パソコン用の光学マウスを移動量測定センサとして用いてカートの移動量($\delta x, \delta y$)を測定し、ジャイロまたは電子コンパスからカートの回転角速度($\delta \theta$)を得ている。汎用的な部品の組み合わせで測定デバイスを構築することで、測定システム全体の低コスト化を実現した。また、センサで得られた値は、それぞれ誤差をもっているため、

確率フィルタとマップマッチングを用いて動線を推定することで誤差補正を行った。

これらの開発技術を用いて実際の大型量販店で動線推定実験を行ったところ、限られたエリアにおいてはおおむね正しい動線推定ができることを確認した。しかしながら、確率フィルタの候補点が生成できなくなる、売り場の通路が1本ずれる、といった問題も確認された。

本報では、これらの課題を解決するために行ったフィルタアルゴリズムの改良およびランドマークによる位置補正について報告する。さらに、図1に示すように計測装置を1ボックス化して現場での取り扱いを容易にした測位モジュールについても報告する。



図1 測位モジュールつきショッピングカート

2. フィルタアルゴリズムの改良

各センサから得られる値($\delta x, \delta y, \delta \theta$)はいずれも変化量であって、開発システムではセンサから0.5秒ごとに値を取得している。現在位置を得るには、($\delta x, \delta y, \delta \theta$)を0.5秒ごとに加算する必要があるが、誤差の蓄積が問題となる。前年度の報告で、誤差を補正するため確率フィルタとマップマッチングを併用する手法^[3,4,5]を提案したが、マップ制約によって確率フィルタで新たな候補点が生成できない場合が発生した。

確率フィルタでは、センサデータから得られた移動ベクトルに誤差を割り振ったベクトルを複数作成し、現在の候補点から複数の移動先候補点群および各点の存在確率を生成する(図2)。移動先候補点群の確率にマップの存在確率を積算してマップマッチングを行い、存在確率の高い点から規定数を次の候補点群として絞り込んでいく(図3)。この操作によって、移動が許された通路内に複数の候補点を生成しているが、確率の高い点が密集すると次の移動先候補点すべてが進入禁止エリア内となることがあり、動線の生成が不可能になる。確率フィルタのロバスト性を確保するためには、単に確率の高い点を選ぶだけでなく、空間的な広がりを考慮して候補点を選

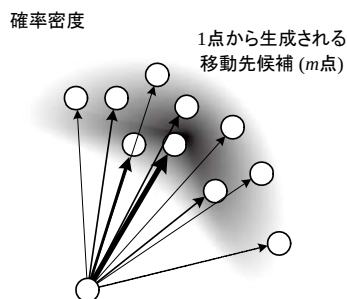


図2 移動候補点の生成

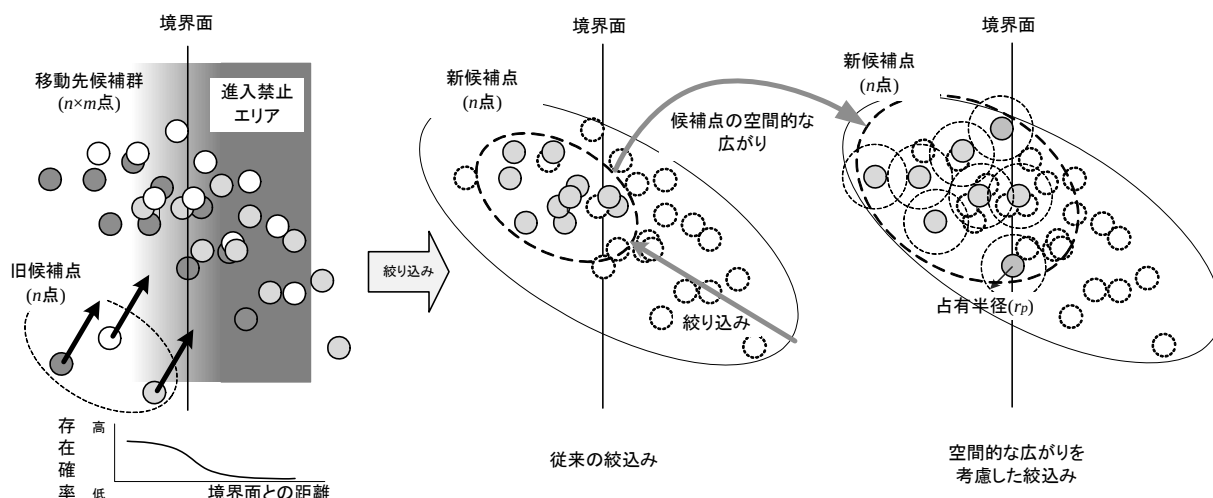


図3 候補絞り込みアルゴリズムの改良

ぶ必要があることがわかった。

改良したアルゴリズムでは、図3の右に示すように一定の範囲内に1つの候補点しか存在できないよう、候補点の占有半径(r_p)を定義した。候補点は先のアルゴリズムと同様にマップマッチング後の確率の高い点から順に抽出し、選ばれた候補点の占有半径内に存在する他の候補点の確率を0にする。この操作によって、次以降の候補点抽出で占有半径内の点が抽出されることがなく、空間的な広がりを持った候補点の生成が可能となった。

3. ランドマークによる位置補正

確率フィルタによってある程度の誤差補正はできるものの、長距離の直線移動では店舗の通路1本分程度の誤差が生じることがある。量販店の売り場は商品棚と通路が規則的に並んだ繰り返しパターンを生成しているため、通路が1本ずれても動線推定アルゴリズムは破綻なく計算が可能である。しかしながら、その後の推定は通路1本分ずれた情報を基に計算されるため、誤った動線を推定し続けることになる。光学マウスセンサの精度検証から、20mの移動で 1σ 誤差が約50cmであることがわかっており、広いエリアの動線推定では一定間隔で位置を補正するための機能が必要となる。

位置を補正するためには、環境側に何らかのランドマークが必要となる。本研究のランドマークに求められる機能は、ピンポイントで通路上の位置を特定する、移動方向を検出するであり、さらには本研究の開発コンセプトである「低コスト」を考慮する必要がある。複数手法で技術的な検討を行い、赤外線発光マーカでランドマークを実現することとした。指向性のある赤外線発光器の光軸が通路に垂直になるように設置し、カーットの受光部がランドマークのIDを検出する。この方法では、通路の幅方向の位置の特定はできないため、ランドマーク前

の一定の距離の位置を通ったものとして位置補正を行った。

ランドマークは図4に示す箱型（W=60mm, H=120mm, D=25mm）のものであり、商品棚下部のベースの高さに収まるサイズである。赤外線LEDからは0.5秒おきにランドマークIDが発信されており、バッテリー駆動で1週間以上の連続可動が可能である。赤外線IDは、誤り検出機能を持った1バイトデータを2400bpsの通信速度で、一般的なリモコンで用いられる38kHzのデジタル振幅変調をかけて送信している。このような符号化をかけることで、環境赤外線の影響等による誤認識を避けることができるとともに、カート側では汎用的なリモコン受光センサをマイコンのUARTに接続するだけでIDの検出が可能となった。また、赤外受光センサをカートの両側に付けることで、進行方向の検出も可能である。

動線推定アプリケーションでは、新たにランドマークの位置、IDを定義する機能を追加し、定義されたIDのランドマークを検出すると位置補正を行う処理を追加した。位置補正では、候補点の位置をランドマークによる補正点の1点に特定すると2章と同様な問題が発生してロバスト性が低下するため、図5に示すように候補点群全体を移動させている。候補点群内の最も確率の高い代表点を補正点に移動させ、ランドマークの光軸に垂直な方向に向きを補正する。他の点群は代表点の移動量と同じベクトルで全体を移動させ、向きについても代表点の補正量と同じ量の補正をおこなう。



図4 赤外線IDランドマーク

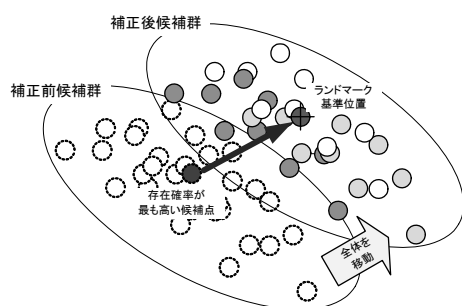


図5 ランドマークによる位置補正

4. 計測装置のモジュール化と計測実験

店舗での実験の利便性を高め、より実用的なシステムとするため、図6に示すようにマイコンやセンサ類、バッテリーをまとめて測位システムをモジュール化した。モジュール化に伴い、microSDカードへの記録機能、リアルタイムクロックによる測位時間の記録機能、赤外線ランドマークIDの検出機能を追加した。測位モジュールのブロック図を図7に示す。

測位モジュールを取り付けた改良型カート、および赤外線ランドマークを用いて、店舗で測位実験をおこなった。ランドマークの配置は、玄関自動ドアに1個と約20mの間隔をあけて通路に2個設置した。ランドマークによって推定された動線の位置の補正ができるだけでなく、玄関のランドマークによって初期位置の特定が容易になり、位置推定の再現性も上がっている。従来は手作業で入力した初期位置を基に動線を計算しており、初期位置のばらつきが動線推定の再現性に影響を及ぼしていた。

動線推定アプリの表示例を図8に示す。動線は平面図左下の玄関位置からスタートし、店内を巡回した後レジを通り、玄関まで戻っている。マップ上の△がランドマークの場所を示し、その上の数字がランドマークのIDを示している。この例では、ID=4のランドマークによって l_{adj} の距離（約通路1本分）の位置補正がなされている。なお、アプリケーションでは動線の色によって移動スピ

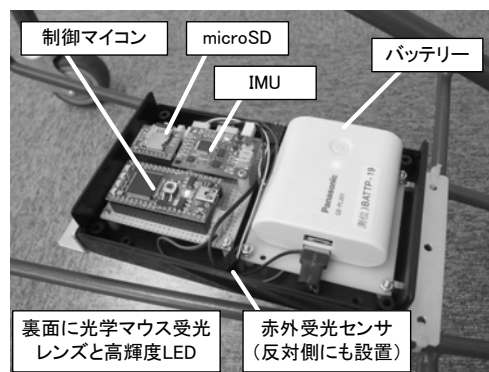


図6 測位モジュール

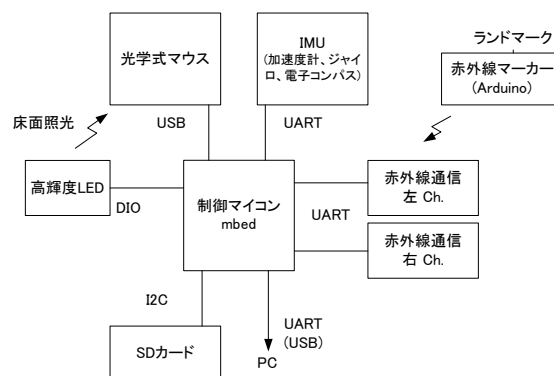


図7 測位モジュールの構成

ードを示しており、買い物客が立ち止まった場所もわかるようになっている。

5. まとめ

大型量販店を利用する買い物客の動線推定を目的とした屋内測位システムを実現するため、ショッピングカートを利用した測位システムを提案した。安価なハードウェアでシステムを構築し、確率フィルタとマップマッチングで誤差を補正することで、動線解析に実用的なレベルの結果が得られることが店舗実験で確認できた。

今後は、複数のカートを用いて長期的な実用実験を行うとともに、工場内など量販店以外の場所にも適用の範囲を広げる。

文 献

- [1] “活用始まる屋内測位 高精度化で広がる用途”，日経エレクトロニクス2-20 No.1076, pp.65-71, 2012.
- [2] 山田俊郎，“人の動線推定に関する研究開発”，岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.13, pp43-46, 2012.
- [3] 山田俊郎，渡辺博己，棚橋英樹，“人の動線推定に関する研究開発（第2報）”，岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.14, pp -, 2013.
- [4] 石川智也，興梠正克，蔵田武志，“サービス現場での従業員トラッキングシステムの評価と応用”，日本VR 学会論文誌, Vol.16, No.1, pp23-33, 2011.
- [5] 大瀧保明，胡丹，猪岡光，鈴木明宏，“携帯型装置による人間の移動行動の推定”，計測自動制御学会東北支部第222回研究集会, 2005.



図8 動線推定の例

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)

藤井 勝敏 棚橋 英樹

Development of Applications for Tablet PC in Welfare Field(II)

Katsutoshi FUJII Hideki TANAHASHI

あらまし 知的障害を持つ生徒のための接客サービス訓練の場において、タブレットPCを使った支援技術の可能性を実証することを目的に、喫茶サービス注文聞き取り業務支援用アプリを開発した。支援対象とする生徒に接客業務を経験するきっかけを与えることを目的として、支援機器を使う前から行われていた作業マニュアルに準拠しつつ指導教官らと連携を取りながらアプリの設計・改良を行った。

キーワード 作業学習、喫茶サービス、注文取り業務、Androidアプリ開発

1. はじめに

特別支援教育における作業学習とは、知的障害を持つ児童・生徒が作業活動を通じて将来の職業生活や社会自立を目指すことを意図して学校の授業の一部として実施されており、農耕園芸、縫製、手工芸、清掃作業等様々な内容のものが実施されている^[1]。県立岐阜本巣特別支援学校では、食品加工の一環として喫茶サービスによる作業学習を実施しており^[2]、月に2回程度の営業日には学内関係者のみならず地元の一般県民も利用している(図1)。その営業目的は、学習指導要領に基づく作業学習としての喫茶店内業務手順の訓練であるが、特に校外の一般人を相手に接客サービスを実践していることは大きな特徴である。

ところで、喫茶店における接客サービスでは、客の注文を正しく聞き取り確認することが必要であるため、担当者の技能には日常会話が可能であることと伝票への記入ができることが求められる。しかし特別支援学校高等部生徒の場合、何かの障害でその業務が困難なことがあ

表1 注文取り業務の手順

動作	接客用語
来店対応	いらっしゃいませ 好きなお席どうぞ
おしぼりを出す	-
客がメニューを決めるのを待つ	ご注文はお決まりですか？
注文を聞いて伝票に書き込む	-
注文の確認	ご注文を確認させていただきます。 〇〇を■個、△△を●個、 以上でよろしいですか？
客の承認を得る	少々、お待ちください。
礼をして戻る	-



図1 café和 (カフェなごみ)

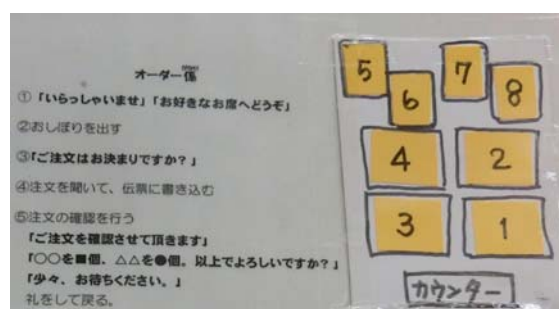


図2 ホール係の接客マニュアル

り、これまで同校の食品加工班で作業学習を行う生徒のうち、注文取り業務を行うのは障害が比較的軽度なごく一部の生徒に限られてきた。

本研究では、同校の取り組みの中で接客サービスの学習を希望する生徒のうち、より障害が重い生徒に対して情報技術を使った教育的支援の可能性を探索することを目的に、特にタブレットPCのアプリ開発による問題解決に取り組んだので報告する。

(テーブルナンバー)			
ドリンク200円		キッズ100円	
数量	品名	数量	品名
☐	コーヒー(ホット)	☐	ココア(ホット)
☐	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)
☐	紅茶(ホット)	☐	
☐	ココア(ホット)	☐	

ありがとうございます café和ーなごみー

図3 café和の紙伝票

2. 支援業務の内容

同校の喫茶サービス「café和」においては接客を行う生徒を「ホール係」と呼び、その業務内容は表1の通りマニュアル化されている。ホール係の生徒は客の来店をきっかけに一連の手順を実践することで接客サービスの経験を積むことを期待されているが、この通りにできない生徒もいる。そこで本研究ではその障壁を解消する技術について提案を行った。

2. 1 マニュアルが暗記できない場合

ホール係の業務は「いらっしゃいませ」の掛け声に始まり、いくつかの定型文を客に話しかける必要があるが、緊張により手順を抜かしたり、文章を忘れたりすることがある。また、間違えたときパニックになることもある。このような児童に対しては、失敗を繰り返しながら訓練を続け成長を期待するケースもあるが、今回対象とする生徒には、できるだけ失敗しない状況を整えて、まずは接客経験を積ませることが適当と考え、カウンターに掲示している図2のような接客マニュアルを適時手元で確認できる環境を整える提案をした。

具体的には、マニュアル上の手順の進行に応じて、その時にすべき作業手順および接客用語をタブレット端末画面上に表示することで、手順の抜けを防止する支援内容であり、客の顔を見て緊張したときも、画面を確認すれば話すべき内容が表示されているため、読み上げることでその場の対処が可能となる。

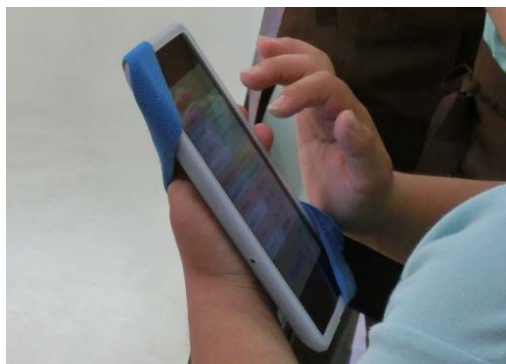


図4 タブレットPCの保持方法

2. 2 伝票の筆記、復唱が困難な場合

「café和」標準の手順では図3のような伝票で客の注文をとる。客の注文に応じて「正」の字の画数で注文数を表す方法で記入し、注文内容はドリンク名と総数を読み上げて確認する(café和においては1グループ6～8人程度の来客が多い特徴がある)。伝票は厨房向けと客向けに転記して渡す必要があり、文字が判読できないと業務に影響が生じるが、クリップボードに留めた紙伝票に筆記する場合、筆圧や握力の関係で困難なことがある。

このような入力にはタッチパネルが適していることから、開発する支援アプリには伝票の入力機能を実装することになった。また、注文内容を確認する際の伝票読み上げ方法についても、ホール係業務マニュアルに準拠した文章を生成し、読み上げることで確認が取れる方法を提案した。

3. 実証実験と改修

café和における課題について担当教官との打ち合わせや現地調査結果を踏まえ、ホール係専用支援アプリの基本形を試作してから後、接客サービスの練習中や、実際の喫茶店営業中に行った実証実験で明らかになった問題点や必要な機能について意見が出され、その都度改修、テストを繰り返す形でアプリの開発を現在も進めている。アプリの画面構成や使用方法については末頁表2の通りであるが、本節では本年度のホール係担当生徒の仕様状況を踏まえて特に配慮した点について述べる。

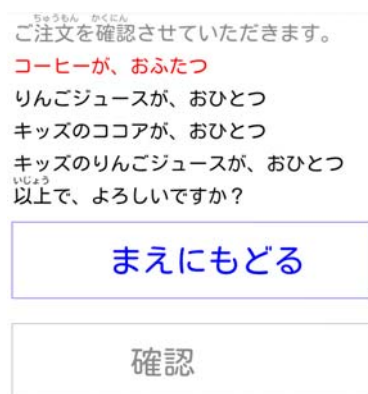


図5 注文確認時の読み上げ



図6 背景色の変更

3. 1 端末の大きさ、保持方法

実証実験に使用したタブレットPCは7インチAndroidタブレット(Nexus7-2012モデル,ASUS製)で、専用シリコンケース(エレコム製)に入れ、さらに面テープ式ゴムベルト(幅3cm長さ45cm,グリーンオーナメント製)を斜めにかけている(図4)。このタブレットPCは紙伝票用に使用しているクリップボードの大きさに近く、安価で入手性が良いことも選定理由に含まれる。握力が弱いことと持ち慣れないことに配慮してソフトケースやベルトを併用しているが、これまでのところ落下などの過失は起きていない。

3. 2 数量の数え方

注文確認の場面においては、マニュアルでは例えば「コーヒーが2個」のように、注文数を数値で読み上げ、単位は「個」としていたが、「おひとつ」「おふたつ」のように読み上げるのが自然であるとの要望により、注文確認テキストの生成方法を修正した(図5)。

3. 3 背景色の変更

当初のアプリの配色は、真っ白な背景に黒ではっきりとした文字で表示していたが、視覚的な刺激がストレスになる恐れがあるとの指摘を学校側から受け、背景色に白色の他、若草色、ベージュ色とその中間色などを切り替える機能を実装した(図6)。

これらの配慮に関する修正のほか、アプリの基本機能に係る入力手順(特に、一旦入力した注文を打ち間違っているいは客の希望で変更する手順)について生徒の理解状況を確認しながら改良を続けている。

4. アプリの支援効果と課題

このアプリを実際の営業中に利用したところ、接客が全くできなかった生徒が付き添いなしで注文を取りに行くことができるようになったなど、明らかな支援効果が表れたと教育関係者らから評されている。勿論、本人の努力による精神的な成長あつての結果であるが、支援機器を手にすることで、接客業務を経験するきっかけを与え、不安の軽減につながったのではないかと考えている。

本研究ではこのような効果を意図し、対象業務を限定して準備しているため、この結果は想定通りであった。しかし、支援の対象となる業務や対象生徒は他にも可能性があり、教育の機会均等化には、本研究で得られた知見を踏まえた支援技術の普及、拡大が必要である。特に、

利用者や教員、専門家の意見を取り入れて支援目的ごとに専用アプリを開発する本研究の手法には、アプリの開発・保守体制の維持が不可欠であり、その構築も含めて今後の課題であると考えている。

5. まとめ

特別支援学校の生徒が営業する喫茶サービスの注文取り業務について、その接客手順を誘導するタブレットPC用支援アプリを開発し、その効果を確認した。その結果、筆記や会話が困難で客と接することが難しかった生徒が、タブレットPCの支援を受けることで、一通りの接客業務を完遂できるようになる改善効果が認められた。

次年度には進級、卒業により今年度とは障害の状態が異なる生徒が本アプリの対象ユーザとなるため、目標設定を新たに支援方法などを再検討する。それに加え、接客サービス以外の業務についてもタブレットPC等情報技術による支援の可能性を検討し、研究開発を進める予定である。

謝 辞

本研究開発の実施に際し、実証実験にご協力下さった岐阜本巣特別支援学校食品加工班の生徒の皆様およびご指導いただきました出口先生、松原先生、鹿島先生に深く感謝いたします。

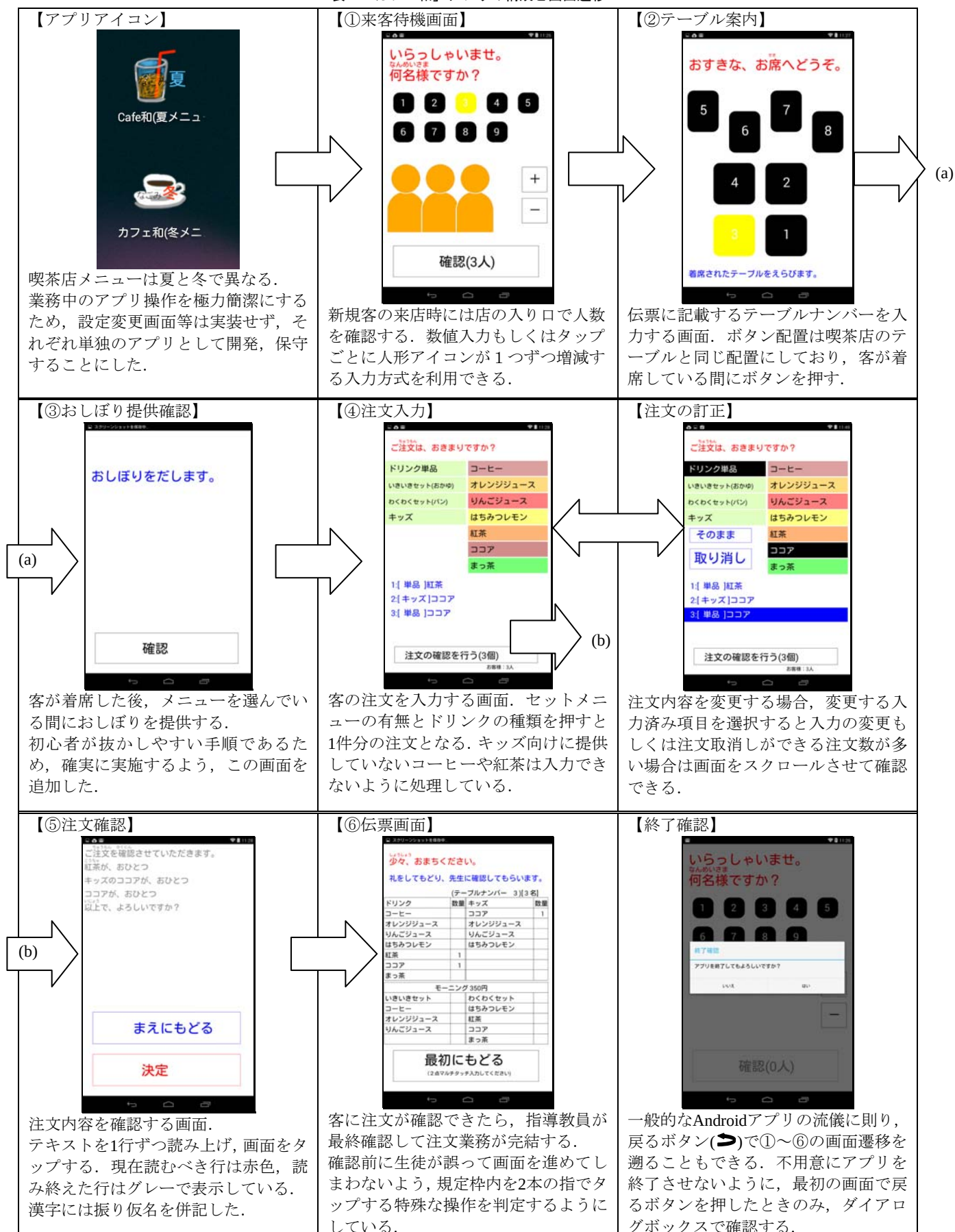
また、本研究の内容に関して立案から評価にわたり共に議論し、助言をいただきました、スマートフォン・タブレット端末の福祉分野での活用研究会メンバーの皆様に感謝いたします。

なお本研究成果に関して、文部科学省平成25年度「民間組織・支援技術を活用した特別支援教育研究事業」に採択された「特別支援学校におけるタブレット端末の就労支援への活用の可能性調査事業」の一環として、研究開発と並行して事業化、技術移転を進めている。

文 献

- [1] 文部科学省, “特別支援学校学習指導要領解説 総則等編(高)”, pp.418-419, 2009.
- [2] 岐阜県立岐阜本巣特別支援学校(喫茶café和-なごみ-), <http://school.gifu-net.ed.jp/gifumotosu-sns/>

表2 「カフェ和」アプリの構成と画面遷移



音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価(第2報)

久富 茂樹 田畑 克彦

Evaluation of Tool Wear using Cutting Sound
Obtained by Sound Source Separation (2nd Report)

Shigeki KUDOMI Katsuhiko TABATA

あらまし 工具が摩耗すると所望の加工精度を得ることができないため、工具の摩耗状態を把握し、適切な時期に工具交換を行う必要がある。切削音から工具摩耗を判断する方法は、非接触計測が可能で、比較的安価にシステムを構築できるが、環境音の影響を受けやすく実用化に課題がある。

昨年度より、環境音の影響を受けにくい工具摩耗評価を行うために、複数のマイクロホン（マイクロホンアレイ）によって測定した音のデータから、音源分離技術によって目的とする切削音のみを抽出することを試みている。本年度は、無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニットを構成し、音源分離手法の検討を行った。2つの単一周波数音源を使った音源分離実験では、SN比を 37 [dB]とすることができ、提案手法の効果を確認した。また、ホワイトノイズを加えた環境において切削音の分離を試みた。

キーワード 音源分離、遅延和法、マイクロホンアレイ、工具摩耗、切削音

1. はじめに

工具摩耗の検出、工具交換管理を目的として、切削音を利用した工具摩耗評価に関する研究を実施している^[1]。音情報を利用した方法は、計測装置が比較的安価で、非接触での計測が可能であることから、設置条件などの制約が少なく、既存の工作機械にも取り付けが可能であるため、中小企業にも導入しやすい方法である。その反面、環境音の影響を受けやすく、大きな機械音が発生している工場内では安定した計測が困難である。そこで、本研究では、複数のマイクロホン（マイクロホンアレイ）を用いて、測定した音のデータから、音源分離技術によって目的とする切削音のみを抽出することを試みている。

昨年度は、無指向性マイク4個を直線上に配置したマイクロホンアレイを試作し測定を行った。正弦波信号の分離については、一定の効果が認められたが、切削音の分離に関しては、十分な効果を得ることができなかった。分離性能を向上させるには、より多くのマイクロホンを使用し、目的方向の指向性を高めることが必要であると考え、今年度は、マイクロホン数を8個に増やしたマイクロホンアレイを試作し、さらに、指向性マイクロホン1本を加えたマイクロホンユニットを構成して、目的音の分離性能の向上を試みた。

2. マイクロホンアレイ

2. 1 マイクロホンの指向性

一般的に、マイクロホンアレイには無指向性マイクを使用することが多い。音源の方向が一定ではない場合には、どの方向からの音も同じ音圧で測定できたほうが都合がよいためである。しかし、今回の目的のように、音源の位置が既知であり、それほど移動しない場合には目的方向の音のみを捉えることができればよい。ショットガンマイクと呼ばれる指向性マイクロホンは、側面にスリットを開けた干渉管をマイクロホンの前に取り付けた構造になっており、側面方向からの音は、干渉管によって減衰するように設計されている。その結果、正面方向の感度が高い指向性となる。今回、このような特性を持つ指向性マイクロホン（オーディオテクニカ製AT8015）と、これまでに使用してきた無指向性マイクロホン

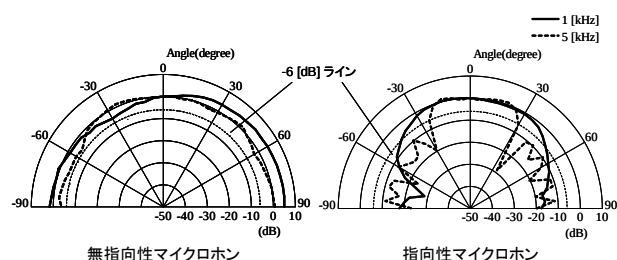


図1 マイクロホン単体の指向性

(DBProducts製C9767BB422LF-P)によるマイクロホンアレイを組み合わせて、マイクロホンユニットを構成し、狭指向性の実現を目指す。

まず、それぞれのマイクロホンの指向性を測定した。測定は、マイクロホンと正対している方向を0 [deg]として、スピーカの位置を-90 [deg]から+90 [deg]まで 5 [deg]ごとに半径 2 [m]の円弧上を移動させ、マイクロホンで音を計測した。0 [deg]の計測音の振幅を基準にしてデシベル表示した結果を図1に示す。指向性マイクロホンでは、±60 [deg]方向からの音に対しては約-10 [dB]の感度になっており、側面からの音の感度が低くなっている。しかし、工場のような騒音環境の中で、切削音の微妙な違いを検出するには、この特性では不十分である。工場内の音圧レベルは80～90 [dB]ほどあり^[2]、静かな事務所の50 [dB]程度の音圧レベルにするには、30～40 [dB]程度減衰させる必要がある。

2. 2 無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニット

正面方向の指向性を一層高くするためには、指向性マイクロホンを複数並べてマイクロホンアレイにすることも考えられるが、指向性マイクロホンは比較的高価であることを考慮して、今回は、指向性マイクロホン1本と安価な無指向性マイクロホンのアレイを組み合わせたマイクロホンユニットを構成した。図2に構成したマイクロホンユニットを示す。マイクロホンアレイは、8個の無指向性マイクロホンを70 [mm]間隔で直線状に配置したものを製作した。そして、その中心位置に指向性マイクロホンを設置した。

マイクロホンユニットの各マイクロホンで計測した信号から、以下の2種類の方法で正面方向の分離信号を求めた。

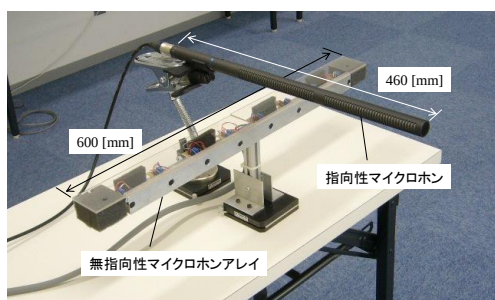


図2 マイクロホンユニット

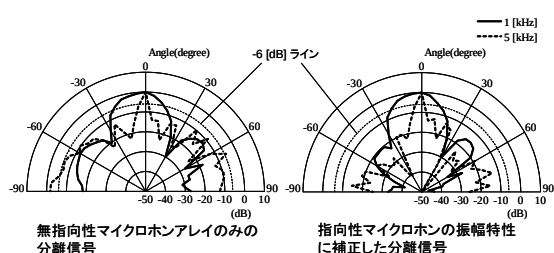


図3 マイクロホンユニットの指向性

<方法1>

マイクロホンアレイの各マイクロホンの出力信号を使用し、遅延和法^[3]によって正面方向の分離信号を求める。

詳細については、4個のマイクロホンを使用して実施した昨年度の方法と同様のため前報^[1]を参照されたい。

<方法2>

マイクロホンアレイの各マイクロホンの出力の周波数毎の振幅特性を指向性マイクロホンの特性に一致するように成形した後、遅延和法によって正面方向の分離信号を求める。

具体的な方法は、以下のとおりである。マイクロホンアレイの各計測信号と、指向性マイクロホンの計測信号をそれぞれ離散フーリエ変換した複素数列 $X_{n,k}$, $X_{d,k}$ ($k=0,1,\dots,N-1$) を(1)式で表す。ただし、 N は計測データ数、添え字の i はマイクロホンの番号である。

$$\begin{cases} X_{n,k} = A_{n,k} e^{-j\alpha_{n,k}} \\ X_{d,k} = A_{d,k} e^{-j\alpha_{d,k}} \end{cases} \quad \dots (1)$$

ここで、 j は虚数単位である。無指向性マイクロホンの計測信号の位相特性はそのまま維持し、振幅特性を指向性マイクロホンのものに置き換えた数列を $X_{a,k}$ ($k=0,1,\dots,N-1$)とすると、 $X_{a,k}$ は(2)式のようにになる。

$$X_{a,k} = A_{d,k} e^{-j\alpha_{n,k}} \quad \dots (2)$$

(2)式を逆離散フーリエ変換し、補正信号 $x_{a,n}$ を得る。

$$x_{a,n} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{a,k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (n=0,1,\dots,N-1) \quad \dots (3)$$

この補正信号を使って、遅延和法により分離信号を求める。

本マイクロホンユニットを使用して、前節と同様に指向性を求めた。図3に指向性パターンを示す。方法1により、マイクロホンアレイのみの信号を使って分離信号を求めた場合、1 [kHz]の特性では、指向性マイクロホン単体での特性に比べると、正面方向の指向性が高くなっているが、±60 [deg] 付近にサイドローブができており、その付近では-10 [dB]の減衰にとどまっている。5 [kHz]の特性は更に多くサイドローブが発生しており、複雑なパターンになっているが、正面方向以外からの音に対しては、-10～-20 [dB]程度の減衰にとどまっている。一方、方法2によって、指向性マイクロホンの振幅特性と一致するように、マイクロホンアレイの各信号を補正した場合、1 [kHz]の特性では、±45 [deg] 付近に発生しているサイドローブでも-15～-20 [dB]程度に減衰している。±60 [deg]以上の方向からの音に対しては、-30 [dB]以上の減衰を示しており、正面方向への指向性を高くすることができた。5 [kHz]の特性に関しても、指向性パターンは複雑であるが、方法1に比べて正面方向の指向性を高めることができた。

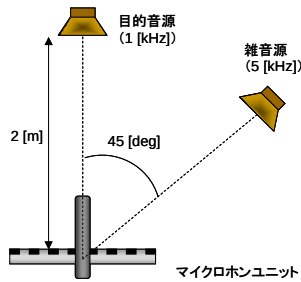


図4 2つの単一周波数音源を使用した音源分離

3. 単一周波数音源の分離

前章で述べたマイクロホンユニットを用いて、2つの単一周波数音源の分離を試みる。図4に実験の配置図を示す。マイクロホンユニットと 2 [m] 離して正対するように、目的音源のスピーカを設置し、1 [kHz] の単一周波数の音を出力した。また、45 [deg] の方向に雑音源のスピーカを設置し、5 [kHz] の単一周波数の音を出力した。マイクロホンユニットで計測した各信号はA/D変換器によって、44.1 [kHz] のサンプリングでP Cに取り込んだ。

図5に無指向性マイクロホン単体での計測信号、指向性マイクロホン単体での計測信号、前章の方法1で求めた分離信号、方法2で求めた分離信号の各時系列信号とそのパワースペクトルを示す。無指向性マイクロホン単体での計測信号は、目的信号である 1 [kHz] の音と雑音信号である 5 [kHz] の音がほぼ同程度の強さで混合された波形になっている。指向性マイクロホン単体での計測信号は、無指向性マイクロホンに比べると雑音信号が減衰しており、パワースペクトルからSN比（5 [kHz] の音を基準にしたときの1 [kHz] の音の強さ）を求めると、10.7 [dB] となった。しかし、まだ十分に雑音信号が減衰しておらず、波形も歪んだ形状となっている。方法1によってマイクロホンアレイの計測信号から求めた分離信号は、よりSN比が向上しており、18.3 [dB] であった。さらに今回提案した方法2によって求めた分離信号は、SN比が 37.0 [dB] となり、雑音信号が十分減衰する結果が得られた。波形を見てもほとんど歪みがない 1 [kHz] の正弦波となっていることがわかる。

4. 切削音と雑音との分離

汎用旋盤を用いて、被削材の外径を自動送りによって切削し、その時の音を構成したマイクロホンユニットで測定した。正常な工具を使用した場合と摩耗した工具を使用した場合の切削音をウェーブレット変換^[4]し、スカログラムを表示させることによって、切削音の比較を行った。切削に使用した正常工具と摩耗工具を図6に示す。また、切削条件は、表1に示すとおりである。

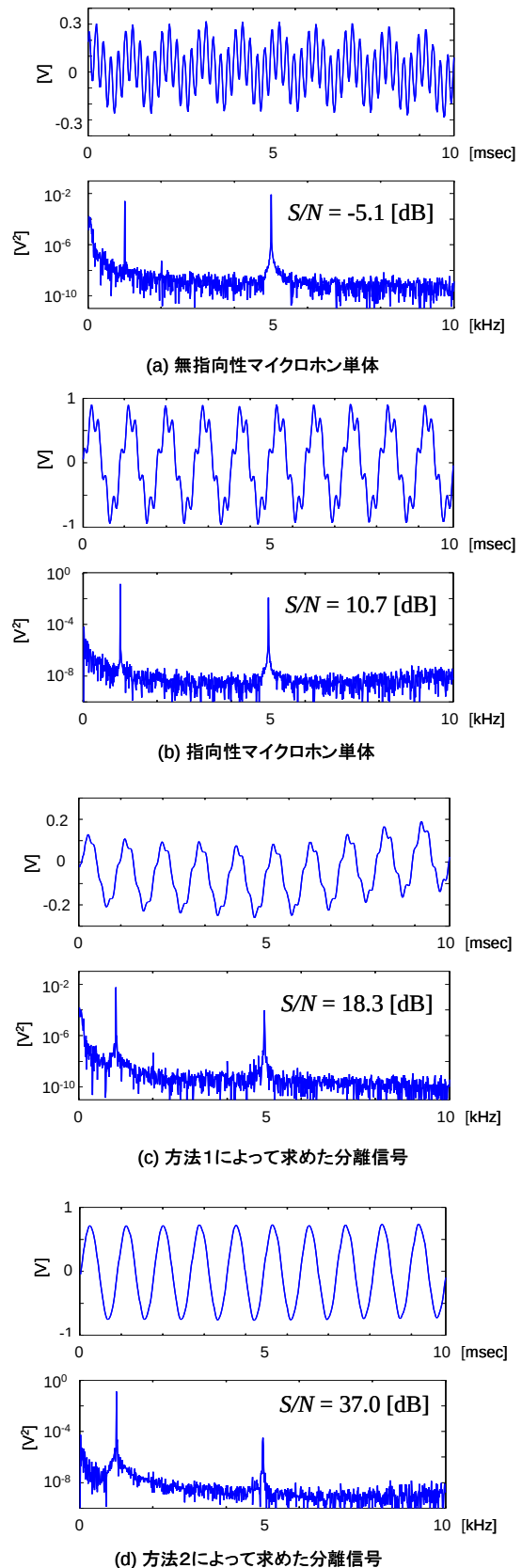


図5 時系列信号（上段）とパワースペクトル（下段）

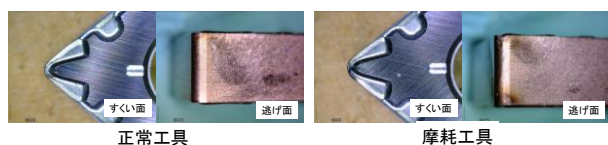
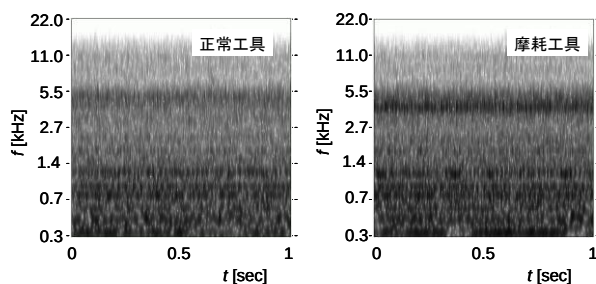
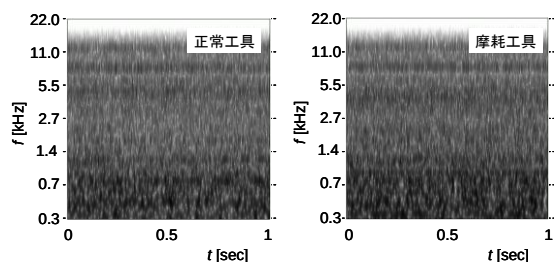
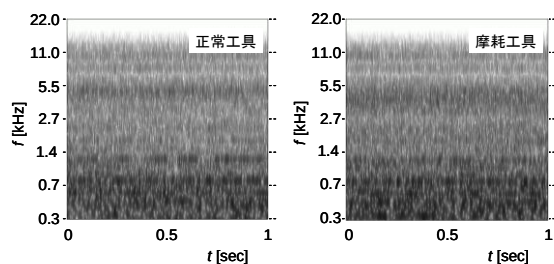


図6 切削工具

表1 切削条件

被削材	S45C丸棒材 (φ90)
主軸回転数	550 [rpm]
切り込み量	0.3 [mm]
送り	0.2 [mm/rev]

図7 測定音のウェーブレット変換
(ノイズなし, 指向性マイクロホンのみ)図8 測定音のウェーブレット変換
(ホワイトノイズあり, 指向性マイクロホンのみ)図9 分離音のウェーブレット変換
(ホワイトノイズあり, マイクロホンユニットを使用)

まず, ノイズのない実験室環境で切削を行い, 指向性マイクロホンにより切削音を計測した. マイクロホンは切削部に向けて, 1.5 [m]離して設置した. 図7に計測信号のウェーブレット変換結果を示す. 横軸は時間, 縦軸は周波数を示しており, 色が濃くなるほど信号強度が高い

ことを示している. 2つの図を比較すると, 最も特徴的な部分は, 4 [kHz]付近の周波数域であり, 摩耗した工具では, その部分の強度が高い. この結果から, 表1の切削条件では, 工具摩耗の判断指標として, 4 [kHz]付近のスペクトル値が使用できそうである.

次に, 工場内の雑音を模擬するために, ホワイトノイズをスピーカから出力した状態で同様の実験を行った. スピーカはマイクロホン正面に対して, 45 [deg]の方向に1.5 [m]離して設置した. 図8に指向性マイクロホンで計測した信号のウェーブレット変換結果を示す. 全周波数域にノイズが重畳して, 切削音がマスキングされた結果になっている. 正常工具の場合と摩耗工具の場合で, 4 [kHz]付近のスカログラムも違いが不明瞭になってしまっている. 図9に2章で述べた<方法2>によって求めた分離信号のウェーブレット変換結果を示す. 図7に比べると全体的に強度が低下しており色が薄くなっているが, 図8ではほとんど違いがわからなくなっていた 4 [kHz]付近のスカログラムも違いが認められた. 構成したマイクロホンユニットを用いて音源分離を行うことで, ノイズ環境であっても, 工具摩耗に起因した特徴量を抽出できそうであることがわかった.

5. まとめ

切削音から工具の摩耗状態を評価することを目的として, 雑音と切削音が混ざった環境において, 切削音のみを分離することを試みた. 無指向性マイクロホンのアレイと指向性マイクロホンを組み合わせたマイクロホンユニットを構成し, 遅延和法により音源分離を行った. 2つの異なる単一周波数音源を使った分離実験では十分な分離効果が確認できた. ノイズ環境中で切削音を測定した実験でも, 提案手法のノイズ低減効果を確認することができた. しかしながら, 今回の研究では, 切削音の分離が十分ではなく, 工具摩耗状態の定量的な考察を行うまで至らなかった. 今後, さらに優れた音源分離手法, 計測方法を検討していき, 工具摩耗を評価できる手法を確立したい.

文 献

- [1] 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.
- [2] 騒音の基礎知識,
<http://www.city.gifu.lg.jp/secure/6589/soukiso.pdf>
- [3] 浅野太, “音のアレイ信号処理 ―音源の定位・追跡と分離―”, pp.71-79, コロナ社, 2011.
- [4] 戸田浩, “最新ウェーブレット実践講座”, ソフトバンククリエイティブ, 2005.

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2報)

横山 哲也 坂東 直行

Development of Jig Design Verification Method using Simulation (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA Naoyuki BANDO

あらまし フライス加工などの切削加工では、被削材を固定するジグの設計が不適切で被削材がずれ動いたり、振動が生じることで加工精度が低下する。ジグ設計が不適切となる理由の一つに、設計指標がなく作業者の経験に依存していることが挙げられる。本研究では作業者の経験に左右されず加工精度を維持することを目的とした、ジグ設計を検証評価するシミュレーション技術の開発を目指している。著者らは昨年度、フライス加工を対象に実加工とシミュレーション結果の比較を行い、ジグに作用する力は概ね一致することを確認した。本年度は穴あけ加工において、実加工とシミュレーション結果の検証を行った。本報ではその検証結果について報告する。

キーワード ジグ設計, 切削シミュレーション, 有限要素法

1. はじめに

フライス加工などの切削加工では、被削材を固定するのにジグを使用している。多品種少量生産や大物の切削加工においては、専用ジグを設けるとコスト高となるため、クランプやブロックなどの汎用ジグを用いて被削材を固定している。この際、ジグの配置、位置、個数および締め付け力などが適切でないと、被削材のずれ動き、ビビリ振動や過大な締め付け力による変形等が生じて加工精度が低下する。

上記問題が発生する理由の一つに、ジグ設計に明確な指標がなく、作業者の経験に依存していることが挙げられる。ジグ設計では、加工中に発生する切削力を考慮してジグの配置位置、配置個数および締め付け力を決める必要があるが、経験の浅い作業者では、不適切なジグ設計を行ってしまうおそれがある。そのため、ジグ設計を支援するツールの構築は、非熟練者でも熟練者と同等のジグ設計を可能とし、加工品質の向上を図ることができる。

我々は過去、ジグ設計の支援ツールとして、ジグに働く力を算出できる切削加工シミュレーションを作成した^[1]。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、被削材およびジグにかかる歪みや応力等を計算できる。昨年度はジグを用いて被削材を固定したフライス加工において、実加工とシミュレーション結果の比較を行い、ジグに作用する力は概ね一致することを確認した^[2]。

本年度は切削加工シミュレーション上で穴あけ加工を模擬し、実加工とシミュレーション結果の比較を行った。本報告では検証の結果について述べる。

2. 穴あけ加工のシミュレーション

2. 1 切削加工シミュレーションの処理手順

以下に、穴あけ加工のシミュレーション手順を示す。
①NC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る。②被削材と工具の干渉判定を行い、その結果を受けて、被削材に働く切削力を計算する。③切削力を外力として有限要素法を用いた構造解析を行い、被削材およびジグにかかる力等を計算する。

2. 2 被削材と工具の干渉判定

切削工具と被削材の干渉判定を行うにあたり、図1に示すように、被削材内部に均等な間隔で点を配置する。切削工具の動きに応じて、配置した点が工具内部に存在するか内外判定を行うことで干渉を判定する。

2. 3 被削材に作用する切削力の計算

穴あけ加工において、切削工具から被削材が受ける切削力は工具軸方向に働くスラスト力 F_m と、工具径方向に働くトルク T_q がある。以下ではこれら切削力を、被削材の干渉点 i に作用する z 方向の力 $f_{i,z}$ と xy 方向の力ベクトル $\mathbf{f}_{i,xy}$ に変換する。なお、スラスト力 F_m とトルク T_q は切

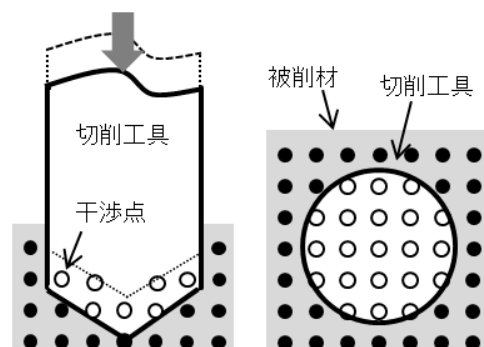
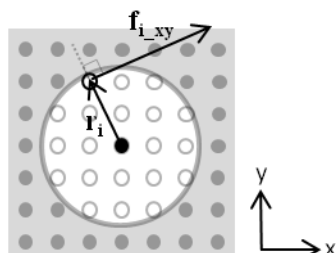


図1 切削工具と点の干渉 (左: 水平方向 右: 軸方向)

図2 干渉点に働くxy方向の力 $f_{i,xy}$

削条件、被削材のブリネル硬さ等によって実験式から算出可能である^[3]。

干渉点 i に作用する z 方向の力 $f_{i,z}$ を算出する。 $f_{i,z}$ の総和は工具からの受けるスラスト力であることから、干渉点の数を N とした場合、 $f_{i,z}$ は以下のとおりとする。

$$f_{i,z} = \frac{F_{th}}{N} \quad (1)$$

次に、干渉点 i に作用する xy 方向の力ベクトル $\mathbf{f}_{i,xy}$ (図2)を算出する。干渉点全体にトルクが作用するとし、そのトルクにより生じる力の大きさは干渉点毎にすべて同じと仮定すると、トルクは位置ベクトルと干渉点に作用する水平力ベクトルの外積の総和で表すことができる。

$$T_q = \left| \sum_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i,xy}) \right| \quad (2)$$

ここで $\mathbf{r}$ は切削工具中心を始点、干渉点を終点とする位置ベクトルである。

水平力 $\mathbf{f}_{i,xy}$ を単位ベクトル $\mathbf{t}_i$ と係数 k の積で表す。

$$\mathbf{f}_{i,xy} = k \mathbf{t}_i \quad (3)$$

トルク値は実験式より既知であるから、式(2)式(3)より係数 k を以下のとおり算出する。

$$k = \frac{T_q}{\left| \sum_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{t}_i) \right|} \quad (4)$$

これより干渉点 i に作用する $\mathbf{f}_{i,xy}$ が決まる。

2. 4 ジグに作用する力の計算

有限要素法を用いて以下の剛性方程式を解くことで、ジグに作用する力を計算する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{M}_g \quad (5)$$

ここで $\mathbf{F}$ は外力、 $\mathbf{u}$ は変位、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 $\mathbf{M}_g$ は重力である。式(1)式(3)で求めたで求めた切削力は、外力 $\mathbf{F}$ ベクトルの要素として含まれる。

干渉点に働く切削力を、有限要素法で使用するメッシュモデルのどのノードに作用させるか考える。本研究では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。干渉判定に用いる点はこの6面体内部に等間隔に配置されていることから、

切削力が作用するノードは干渉した点が属する6面体の構成ノードとする。また、各ノードに対する切削力の分配は、干渉した点の6面体内の位置に基づき分配する。

ジグに作用する力をジグと被削材の合わせ面に働く力 $\mathbf{f}_d$ とした場合、その力は合わせ面の構成ノードに作用する内力を基に計算することできる。式(6)にその計算式を示す。

$$\mathbf{f}_d = \sum_{j \in R} \mathbf{K}_j \mathbf{u}_j \quad (6)$$

ここで $\mathbf{K}_j$ は構成ノード j とその隣接ノードからなる剛性行列、 $\mathbf{u}_j$ は $\mathbf{K}_j$ に対応する変位であり、 R は被削材(またはジグ)の合わせ面の構成ノードの集合である。

3. 切削加工シミュレーションの検証

ジグを用いて被削材を固定した穴あけ加工において、ジグに作用する力をシミュレーションと実加工と比較した。

使用した部材の物性値を表1に、切削条件を表2に示す。被削材は図3のようにジグで固定され、ドリルを用いて被削材の中央を、3mm毎のステップで穴あけを行った。ジグに作用する力は、被削材と3分力計の合わせ面に働くxyz成分の力とし、3分力計を用いて計測する。3分力計の z 軸は切削工具の軸方向、 xy 平面は被削材と3分力計の合わせ面と平行とし、被削材の長手方向を x 方向とした。なお、今回の実験で使用した被削材のブリネル硬さが測定できなかったため、スラスト力とトルクの値は予備実験

表1 使用部材の物性値

部材	物性値
被削材 (ポリアセタール)	ヤング率 3.6[GPa]
	ポアソン比 0.35
	密度 1.41[g/cm ³]
ジグ (鉄)	ヤング率 210[GPa]
	ポアソン比 0.3
	密度 7.8[g/cm ³]

表2 切削条件

切削工具	ドリル
	φ 8[mm] 2枚刃
回転数	2000[rpm]
送り	1080[mm/min]



図3 ジグを用いた被削材の加工

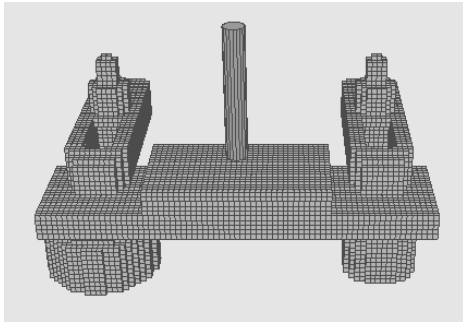


図4 有限要素法でのメッシュモデル

で計測した値を用いた。

図4にシミュレーションで使ったメッシュモデルを示す。被削材、ジグと3分力計をメッシュサイズ2.0mmのボクセル形状(6面体)で置き換えた。

図5(a)(b)に、3分力計の計測値とシミュレーションの結果を示す。被削材はクランプされているため、加工前から力が加わっているが、図5はその力は差し引いている。

図5(a)より、ジグに作用する z 方向の力は実加工とシミュレーション結果とでほぼ一致していることが確認できる。図5(b)では両者に差が生じているが、この理由は以下のとおりと考えられる。スラスト力が被削材中央に働くことで、被削材に曲げが生じる。被削材の固定状況が両端固定梁と見做せるため、被削材のドリルが当たらない側は引張り応力が支配的になり、被削材は両端方向に伸びようとする。シミュレーションでは3分力計を中身が詰まった中実モデルと見做したが、実物の3分力計はセン

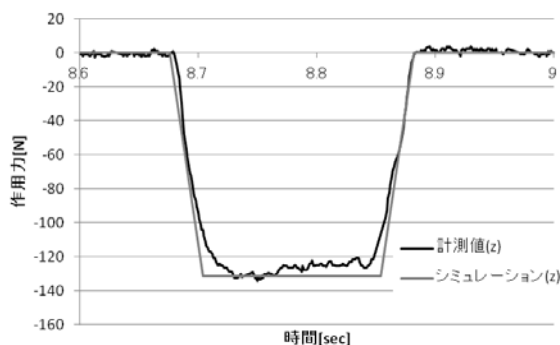
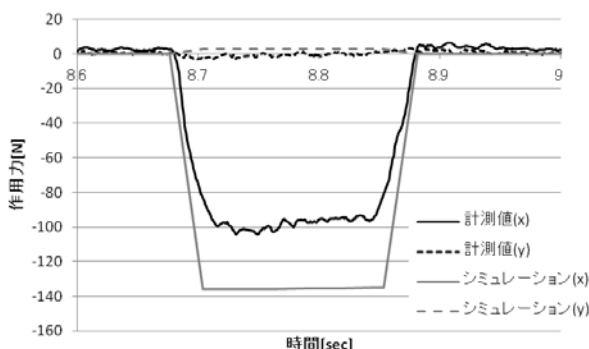
(a) z 方向のジグ作用力(b) x, y 方向のジグ作用力

図5 計測値とシミュレーション結果の比較

サが内蔵されていることから中空と推定され、実物に比べ剛性が高く設定されている。そのため、シミュレーションでは両端方向に伸びようとする被削材に対して、3分力計が変形せずに抵抗するため、計測値より大きい値になったと推測される。 y 方向に関しては x 方向ほどの力が作用せず、両者とも小さい値となっていることが確認できる。

4. まとめ

本研究ではジグ設計を評価するシミュレーション技術の開発を目指し、今年度は切削加工シミュレーションで穴あけ加工の模擬を行った。ジグを用いて被削材を固定した穴あけ加工において、実加工とシミュレーション結果の比較を行った。その結果、 z 方向のジグ作用力はほぼ一致することを確認した。今後更なる検証を行い、シミュレーションの精度向上を図りたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたりジグ設計のアドバイスを頂きました株式会社イマオコーポレーションに感謝致します。

文 献

- [1] 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.
- [2] 横山ら, “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”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第14号, pp.29-32, 2013.
- [3] 例えば, M.C.Shaw, and C.J.Oxford Jr, “On the Drilling of Metals 2-The Torque and Thrust in Drilling”, Trans. of ASME, Vol.79, pp.139-148, 1957.

断続切削における被削材の固有振動に関する検討

横山 哲也

Study on Characteristic Vibration of Work Material in Intermittent Cutting

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし フライス加工等において、切削工具と被削材の間で断続的な切削力が作用することで強制振動が生じる。特に固有振動が大きくなると加工精度を低下させることから、その対策が必要である。著者は過去、有限要素法を用いて切削加工時の被削材とジグに作用する力を計算できる切削加工シミュレーションを作成した。この有限要素法により計算で得られる固有振動数を基に断続切削周波数を選択することで、断続切削の固有振動を抑制できないかと考えている。そこで本報では、数値計算による固有振動数の算出方法と、断続切削周波数が固有振動に与える影響を調べるために行った基礎実験の内容について述べる。

キーワード 断続切削, 固有振動, びびり振動

1. はじめに

フライス加工等において、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の周波数（以下、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、振動が大きくなりびびり振動が生じる。びびり振動が生じると所望の加工寸法を実現することが難しくなることから、その発生を防ぐ必要がある。

断続切削による振動を抑制する手段^[1]として、①切削力を小さくする、②ジグを追加するなどして剛性を強化する、③断続切削周波数の整数倍を機械構造物の固有振動数からずらす方法がある。ただし、③に関しては予め固有振動数を把握する仕組みが必要となる。

著者は過去、ジグ設計の支援ツールとしてジグに働く力を算出できる切削加工シミュレーションを作成した^[2]。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、被削材およびジグにかかる歪みや応力等を計算できる。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計算で求め、この固有振動数と断続切削周波数の整数倍が一致しないよう断続切削周波数を選択することで、断続切削の固有振動の抑制ができないかと考えている。そこで本報では、数値計算による固有振動数の算出方法と、断続切削周波数が固有振動に与える影響を調べるために行った基礎実験の内容について述べる。

2. 数値計算による固有振動数の算出方法

切削加工シミュレーションで実装した有限要素法によ

り、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 $\mathbf{K}$ 、質量行列 $\mathbf{M}$ を得ることができる。以下では $\mathbf{K}$ と $\mathbf{M}$ を用いて数値計算で固有振動数の算出する方法を示す。

機械系の振動は式(1)に示す一般固有値問題となる。

$$\mathbf{K}\mathbf{x} = \omega^2 \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (1)$$

ここで ω は固有値、 $\mathbf{x}$ は固有ベクトルである。本研究では式(2)に示す標準固有値問題に変換し、Lanczos法を用いて反復計算で固有振動数を算出する。

$$(\mathbf{B}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{B}) \mathbf{B}^T \mathbf{x} = \frac{1}{\omega^2} \mathbf{B}^T \mathbf{x} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{B}$ は $\mathbf{M}$ をコレスキー分解した下三角行列である。

なお、実加工においてはジグの位置ずれ等によって固有振動数が若干変化する。そのため、計算で求めた固有振動数に幅を持たせ、その幅の中に断続切削周波数の整数倍が存在しないよう断続切削周波数を選択することで固有振動の抑制ができないかと考える。

3. 基礎実験

断続切削周波数が固有振動に与える影響を調べるため、系の固有振動数で振動する自由振動が生じる肩削り加工において、断続切削周波数を変えて固有振動を計測し、その大きさを比較する。

3. 1 周波数スペクトルの特定

固有振動の大きさを比較するにあたり、断続切削時の周波数スペクトルを以下のとおり計測する。

図1にポリアセタールの被削材を鉄のジグで固定した機械構造物を示す。切削工具は被削材中央をy軸正方向に



図1 被削材とジグからなる機械構造物

向かって削り進む。被削材裏に歪みゲージを貼り付け、被削材のx方向の歪みを計測する。計測した歪みの時系列データを抜き出し、FFTを用いて周波数スペクトルを算出する。

3. 2 固有振動の比較

断続切削周波数の整数倍を1次固有振動数に一致・不一致させた際の、固有振動の歪みの大きさを比較する。このときの切削条件は軸方向の切込みは1[mm]、1刃当たりの送り量は0.188[mm]、径方向切込みは切削工具直径の1/2である。なお、断続切削周波数の整数倍を1次固有振動数に確実に一致させるため、予め被削材に加振を与えて1次固有振動数を特定した。図2に、加工時の周波数スペクトルを示す。固有振動数と断続切削周波数の整数倍が一致すると固有振動が励起し、一致しないと固有振動が励起しないことがわかる。

次に、1次固有振動数を励起させる複数の断続切削周波数において、固有振動の歪みの大きさを比較する。図3に断続切削周波数205[Hz]、149[Hz]、102[Hz]時の周波数スペクトルを示す。各々の周波数では、同一時間長におけ

る刃の当たる回数が異なり、その結果、自由振動の発生回数も異なるため、図中の1次固有振動の振幅を単純比較することはできない。そこで断続切削周波数205[Hz]の1次固有振動の振幅を自由振動発生回数の割合で除し、その値を149[Hz]、102[Hz]のグラフに破線で示す。破線と1次固有振動の振幅を比較すると、断続切削周波数205[Hz]時での振動は149[Hz]、102[Hz]時に比べて大きいことわかる。これは、断続切削周波数が多いと被削材に刃が当たる時間間隔が短く、自由振動が減衰しきる前に次の刃が当たり固有振動が励起され易くなったためと推測される。

4. まとめ

本報では断続切削における固有振動の抑制を目的に、数値計算による固有振動数の算出方法と、断続切削周波数が固有振動に与える影響を調べた基礎実験の内容について述べた。基礎実験の結果、固有振動数と断続切削周波数の整数倍が一致すると、固有振動が励起されることを確認した。今後は数値計算で得られる固有振動数を基に、固有振動を抑制する断続切削周波数の選択を行いたい。

文 献

- [1] 社本英二，“切削加工におけるびびり振動の発生機構と抑制”，電気製鋼，82(2)，pp.143-155, 2011.
- [2] 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.

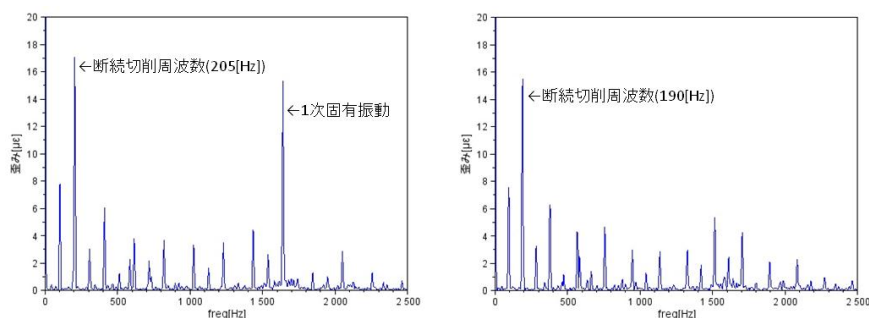


図2 断続切削周波数の整数倍と固有振動数の一致・不一致による固有振動の比較(左:一致, 右:不一致)

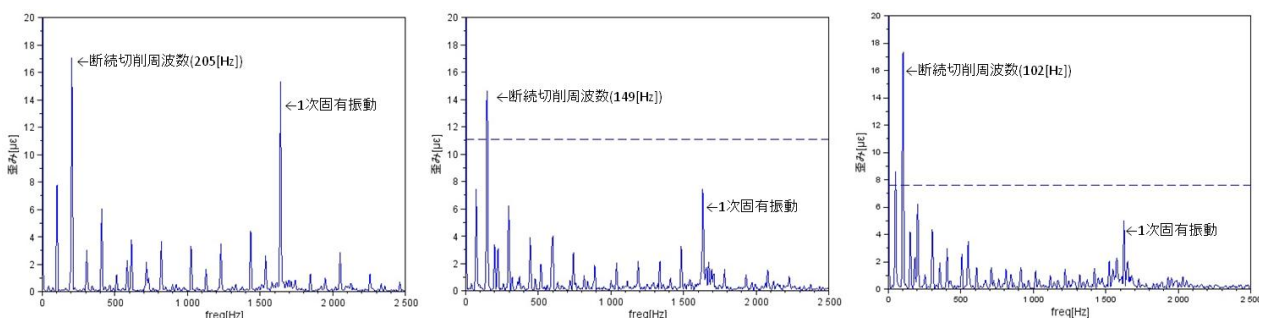


図3 断続切削周波数の違いによる1次固有振動の比較(左:205[Hz], 中:149[Hz], 右:102[Hz])

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 15 号 平成 25 年度

発行

平成 2 6 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>
