

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 11 号 平成 21 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用	1
家具産業におけるサービス工学応用プロジェクト —RFID を用いたアンケート端末の開発—	9
障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発（第 1 報） —頸髄損傷者用の新たな入力装置の試作と評価—	15
映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発 —汎用的な作業への拡張—	21
作業動作カイゼンのための作業負担定量化手法の検討	27
三次元計測器による鏡面を利用した形状測定	30
搬送車インターフェース（ナビゲーション）システムの基礎研究 —超音波フェーズドアレイによるビーム形成—	35
リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発 —個別ユニットエミュレータの機構計算の実装と並列化—	40
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—	45
水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発 —水稻とマコモ栽培ほ場での除草実験—	49
画像を用いた食品評価に関する研究（第 3 報）	53

人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用

渡辺 博己 山田 俊郎 浅井 博次 棚橋 英樹

Development of Measurement Technology for Human Behaviors and Application to Operations Analysis in Service Industry

Hiroki WATANABE Toshio YAMADA Hirotsugu ASAII Hideki TANAHASHI

あらまし 日本経済の7割近く（GDP・雇用ベース）を占めているサービス産業は、一層の市場拡大が期待されているが、製造業に比べ低い生産性が課題となっている。こうした中、「経験と勘」に頼るサービスに「科学的・工学的手法」を導入することにより、サービスやその提供プロセスにおいて、生産性を高めるための研究開発が活発に行われている。しかし、サービス産業は中小企業の比率が高いこと、地域に密着した事業を展開する企業が多いことなどから競争力・競争性の意識が低い傾向にあるため、「科学的・工学的手法」の必要性の動機づけを高めることが重要となっている。そこで、本研究では、「科学的・工学的手法」の導入を促進するために、容易に人物の行動をセンシングすることが可能な行動計測システムを開発するとともに、システムから得られるデータを視覚的に捉えやすくするための可視化技術について検討した。また、本研究の導入事例として、サービスの現場で本システムを活用した作業改善を実施した。その結果、改善効果が明瞭となり、本システムを用いた「科学的・工学的手法」の有益性が示された。

キーワード サービス、科学的・工学的手法、画像センサ、加速度センサ、行動計測、可視化、改善

1.はじめに

1.1 サービス産業を取り巻く状況

日本経済の7割近く（GDP・雇用ベース）を占めているサービス産業は、今後も、少子高齢化などの社会構造の変化に伴うサービス需要の増大、業務のモジュール化の進展によるアウトソーシングの拡大が期待されるなど、一層の市場拡大が見込まれている^[1]。しかし、生産性の伸び率が製造業と比べて低く、欧米諸国と比べても低いという課題があり、今後の経済成長を考えていく上で競争力の強化が不可欠な産業とされている。

こうした状況の中、2006年7月に政府より発表された「経済成長戦略大綱」^[2]では、生産性向上で出遅れているサービス産業の革新が欠かせないとされ、その生産性を向上させることにより、製造業と並ぶ「双発の成長エンジン」を創ると明言している。また、同大綱では、「サービス産業生産性協議会」の創設（財団法人社会経済生産性本部（現：日本生産性本部）に2007年5月設立）と「サービス研究センター」の設置（独立行政法人産業技術総合研究所にサービス工学研究センターとして2008年4月設立）が提言された。

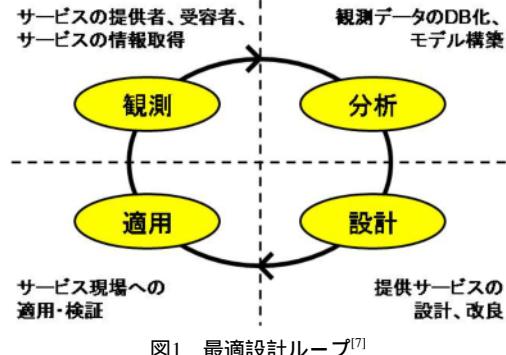
これを機に、「経験と勘」に頼るサービスから「科学的・工学的手法」によるサービスへ』の実現に関する重要性が注目されている。特に、サービス工学^[3,4]あるいは

サービスサイエンス^[5]と呼ばれる分野では、サービス提供の効率化や付加価値の向上、提供するサービスに最適なバックヤードの構築に関する研究開発が急速に拡大している。

1.2 「科学的・工学的手法」の導入方法

これまで、自動車や家電をはじめとする工業製品については、製造プロセスなども含め、様々な研究開発を繰り返すことにより技術革新を続け、生産性を高めてきた。一方で、サービスは、工業製品が有形物であるのに対して、見たり触れたりすることができない「無形性」、生産と消費が同時に起こり、同時に終了する「同時性」、終了と同時に消え、蓄積しておくことができない「消滅性」、サービスの受け手あるいは顧客（以下、受容者）や提供者、場面、状況等により品質が違ってくる「異質性」などの特性を持ち^[6]、これらの特性から来る背景が生産性の低さの要因の一つと考えられている^[1]。そのため、提供プロセスなどを含め、サービスの生産性を高めるためには、これらの特性を踏まえた上で、「科学的・工学的手法」を導入する必要があると考えられている。

こうした状況を開拓するために、経済産業省は、これまでに成功している企業の技術やビジネスモデルについて分析した上で、一つの共通的な傾向として、「サービスの受容者や提供者に関する情報を取得・分析し、サービスの内容や提供方法に反映させることで、サービスの付



加価値や効率性を高めている」という手法を確認し、これを踏まえた研究開発の方法論を「技術戦略マップ」^[7]に示した。

したがって、これまで「経験と勘」に頼ってきたサービスに、「科学的・工学的手法」を導入し、生産性を高めていくためには、サービスの現場で、受容者や提供者の行動などを「観測」し、それを「分析」して得られる客観的根拠に基づいてモデルを「設計」し、それを現場に再び「適用」するという「最適設計ループ」(図1)を繰り返すことが重要である^[8]と言える。

1.3 本研究の背景と目的

2009年3月に岐阜県が策定した「岐阜県長期構想」では、サービス産業の経営力の強化・革新を支援するために、「ITを活用した新サービスの展開や生産性向上を支援する」と、県が取り組むべき政策の方向性として掲げておる、本研究所では今年度より、県内サービス産業の生産性向上を目的として、従来の「経験と勘」によるサービスから、「科学的・工学的手法」に基づいたサービスの実現に取り組んでいる。

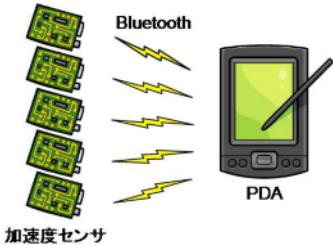
しかし、サービス産業は、研究開発を行わないと生き残ることができない製造業と比べ、少しの工夫で事業が成り立ってきたという背景があるため、「科学的・工学的手法」の導入への積極性が低い傾向がある。また、サービス産業は中小企業の比率が高いこと、地域に密着した事業を展開する企業が多いことなどから、競争力・競争性の意識が低い傾向にあるため、「科学的・工学的手法」の必要性の動機づけの高まりが鈍い側面がある。

そこで、本研究では、「最適設計ループ」において重要な「観測」技術、特にセンシング技術に着目し、簡易な構成となるシステムを開発することで、「科学的・工学的手法」の導入を促進する。具体的には、種類の異なる複数のセンサを用いた人物の行動計測システムを開発し、サービスの現場の状況やニーズに応じたシステム構成が可能であることを示唆するとともに、導入による効果を視覚的に捉えやすくするための可視化技術について検証する。

また、本稿では、「科学的・工学的手法」の導入効果について検討するために、実際のサービスの現場に「最適設計ループ」を適用した事例について紹介する。



(a) 画像計測部



(b) 動作計測部

図2 行動計測システムのプロトタイプ

2. 行動計測システムの構築

「最適設計ループ」において、「観測」するデータは非常に重要な意味を持つ「観測」データの量が少なければ、規則性や関係性などの「分析」が困難となり、適切なサービスモデルの「設計」・「適用」に支障が出るためである。

そこで、本研究では、画像センサ（フレームレート：30fps、画素数：30万画素）と加速度センサ（サンプリングレート：1000Hz、軸数：3軸）を使用することにより、大容量の「観測」データの取得が可能なシステム構成とする。図2に、構築した行動計測システムのプロトタイプを示す。プロトタイプシステムは、画像計測部と動作計測部から構成され、それぞれ独立して動作させることができる。そのため、サービス現場の状況に応じて、計測の継続・中断が可能なシステム構成となっている。画像計測部については、全体的な人物の動きや流れを計測し、サービスの受容者への配慮が必要な場合は計測を中断する。動作計測部については、サービスの提供者が装着することで、個々の動きや振る舞いを計測することが可能であり、受容者へのサービス提供中でも計測を継続することが可能である。また、動作計測部は、受容者の協力が得られる場合は、受容者へ装着することも想定している。

2.1 画像計測部

画像計測部は、安価かつ簡単な機器構成とするために、1台のPCと1台のカメラから構成されている（図2(a)）。しかし、サービスの現場では、様々なイベントが同時に発生することが考えられるため、広い空間の「観測」が可能な魚眼レンズ（水平画角110度、垂直画角81.57度）を使用した。カメラからの入力画像は、キャプチャボード（Ituner Network Corp製 Spectra8）を通じてPCに接続されており、非圧縮AVIファイルとして保存する。



(a) 原画像



(b) 補正画像

図3 取得した原画像と歪みを補正した補正画像

画像計測部では魚眼レンズを用いているため、取得する画像が歪曲しているが、情報量の多さから歪曲画像をそのまま保存している。そのため、取得画像を「分析」する場合は、目的に応じて画像を補正する必要がある。その際、歪曲率 D は実際の像高(画像中心からの距離) Y と理想像高 H から、

$$D = (Y - H)/H \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

で表すことができる^[9]。

高い精度で補正が必要な場合は、格子模様などを撮影した画像を用いて歪みを補正する必要があるが、本研究では、一般的な魚眼レンズモデル $y = f$ (y : 像高, f : 焦点距離, : 光線の入射角度) として、通常のレンズモデルである $y = f \tan \theta$ に対する歪曲率を算出した。この時、式(1)は、

$$D = (f\theta - f \tan \theta)/f \tan \theta \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

と表すことができ、原画像 F の光軸と画像中心座標 (u_0, v_0) が一致していると仮定すると、原画像の画素 $F(u, v)$ は補正画像 G に対して、

$$G\left(u_0 + \frac{u-u_0}{1.0+D \times 100}, v_0 + \frac{v-v_0}{1.0+D \times 100}\right) \quad (3)$$

と表すことができる^[10]。図3に、取得した原画像と歪みを補正した補正画像を示す。

2.2 動作計測部

加速度データは、人物の動きを「観測」する上で最も

表1 加速度センサ(WAA-004)の主な諸元

分類	項目	内容
機能	サンプリングレート	MAX1000Hz
	送信レート	MAX1000Hz
	加速度検出範囲	±2.5g, ±3.3g, ±6.7g, ±10g
	加速度分解能	0V ~ 3V 10ビット
	使用時間	約4時間
	通信レート	230kbps
Bluetooth	スレーブ	可能
	マスター	可能
	通信距離	約10m
	自動接続	可能
機構	サイズ (W × H × D)mm	38mm × 39mm × 10mm
	重量	17g

効果的なデータである 計測機器が小型軽量であるため、装着により日常動作を妨げることなく計測が可能であり、医学・工学分野などで数多くの研究が行われている。

本研究では、より携帯性を高めるために、小型3軸加速度センサ(ワイヤレステクノロジー(株)製 WAA-004)をPDA(OS: Microsoft Windows Mobile 6)に無線で接続する構成とする(図2(b))。また、PDAに実装するデータの取得及び記録プログラムを開発したことで、最大5台の加速度センサが接続可能である。表1に、加速度センサの主な諸元を示す。

動作計測部は、計測対象となる身体部位に加速度センサを装着し、PDAを携帯することにより使用する。加速度センサからは、各部位のmG単位(非SI単位)の3軸加速度データとミリ秒単位の測定時刻が近距離無線通信規格の1つであるBluetoothによりPDAに送信される。PDAでは、受信したデータを個々の加速度センサに対応させたファイルに保存することで、詳細な身体動作の測定が可能となっている。

2.3 「観測」実験

本研究で構築した行動計測システムは、製造業をはじめ、様々なシーンで使用することが可能であるが、サービス産業における生産性向上が主目的であることから、実験は、サービスの現場を対象に行うこととした。対象とする現場については、県内サービス産業の中で多くの従業員を抱える旅館・ホテル業とし、特に、サービス提供のバックヤードにあたる宴会・食事会場における下膳・配膳業務とした。なお、計測する作業は、畳上に設置された膳に対して、宴会・食事で使用する備品(箸、グラス、椀、料理など)の準備・片付け動作とした。

実験では、部屋の隅に画像計測部を配置し、部屋全体が撮影できるよう、カメラを約2mの高さから下方約40度を向くよう設置した。また、動作計測部は、着物姿の従業員1名の背部にある帯結びにPDAと加速度センサ、頭頂部、両前腕部及び右下腿部、それぞれに加速度センサを装着し、計5箇所の身体部位の加速度データを計測した。なお、計測にあたっては、画像計測部及び動作計測

部ともに50msでデータを保存するよう設定した。

約2時間程度、連続してシステムを稼働させたが、問題なくデータの収集が可能であった。また従業員からは、特に違和感なく、普段と変わらない作業が可能であるとの感想が得られた。これらの結果から、本システムの行動計測における有用性が示された。

3.「観測」データの可視化

「最適設計ループ」において、規則性や関係性などを「分析」するためには、「観測」により得られたデータの可視化（認識）が、データの取得と並んで重要な役割を担っている^[11]。例えば、画像データからは、動物体追跡や動作認識など^[12]、また加速度データからも、動作認識^[13]や身体活動量測定^[14]など、サービス工学を対象とした取り組みではないが、見方によっては可視化と称すべき様々な研究開発が行われている。

本稿では、画像データから人物の位置を特定し、連続して得られるデータから移動経路を可視化する方法について述べる。また、加速度データの効果的な可視化方法については、検討している段階であるが、頭頂部に装着した加速度センサのデータを簡易的に可視化したので、その結果を示す。

3.1 人物位置の特定

画像計測により物体の位置を特定する方法としては、複数のカメラを用いる方法が一般的であるが、システム構成が複雑となるというデメリットがある。そこで、本研究では、人物の足元の位置を特定することとし、対象とする人物は同一平面上を移動するという拘束条件により、単眼カメラで位置を特定する手法を用いる。

一般的に、画像上の点 $m(x, y)$ と空間上の点 $M(X, Y, Z)$ との間には、

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

が成り立つ^[15]。ここで、 s はスケールファクタ、 p_{ij} で表される行列はカメラパラメータと呼ばれており、このパラメータを求めることがキャリブレーションといふ。

本研究では、2.3節における畳面のみを人物が移動すると仮定するので、畳面を $Z=0$ とおけば、式(4)は、

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表すことができる。

また、全ての畳の大きさは同一で、サイズも既知（860mm × 1580mm）であるため、ある畳の角を原点とおけば、画像上の座標も特定できる。そこで、 $p_{34}=1$ とおくことにより、式(5)を展開すると、



図4 人物位置特定ツール

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -x_nY_n \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -x_nX_n & -y_nY_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{31} \\ p_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。

したがって、4個の基準となる点を用いれば、8個の p_{ij} を求めることが可能であることが分かる。しかし、キャリブレーションの精度を高めるためには4点以上の基準点を用い、最小2乗法によってパラメータを同定するのが通常である。

そこで、式(6)を

$$B \cdot P = b \quad (7)$$

と表し、最小2乗法により展開すると、

$$P = (B^t B)^{-1} B^t b \quad (8)$$

となる。

カメラパラメータがキャリブレーションできれば、式(5)から、平面上の点 $M'(X, Y)$ は、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{34} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

により求めることができる。

3.2 移動経路の可視化

人物の移動経路を求めるためには、「観測」した画像データから、連続して人物の足元位置を特定する必要がある。画像処理技術に関する研究開発では、これを自動的に行うことの目的で様々な研究が行われているが、確実に人物領域を抽出し、足元位置を特定する技術は確立されていない。そこで本研究では、手動で足元位置を指定し、移動する平面上の位置を算出するツールを作成することで、人物位置を特定する。図4に、作成した人物位置特定ツールを示す。

本ツールでは、歪曲画像を補正した画像から人物位置を特定する。人物位置を特定するにあたっては、前節で述べたキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーションにおける基準点は、まず、「位置情報登録」ボックスにチェックを入れ、画像中から確認可能な畳の隅を指定する。次に、指定した点の平面座標を入力し、「キャリブレーション」ボタンを押す。カメラパ

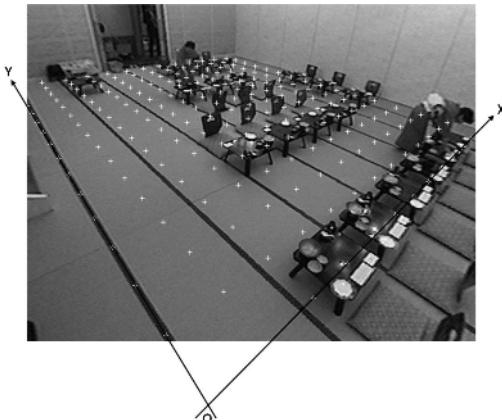


図5 キャリブレーションの結果

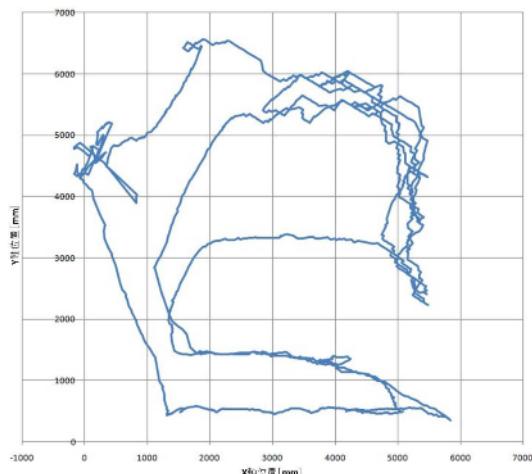


図6 画像データから得られる移動経路

ラメータは、からを4点以上繰り返した後、「位置情報登録」ボックスのチェックを外し、「キャリブレーション」ボタンを押すことにより求めることができる。図5に、からの操作により求めた座標系を示す。なお、基準点は6点与えた。白色の+点は500mm間隔で表示してあり、右奥に向かってX軸、左奥に向かってY軸となっている。

カメラパラメータが求まれば、映像を再生し、移動経路を求めたい人物の足元位置で、マウスの左ボタンを押下し続けることにより、連続した平面座標がファイルに書き込まれる。図6に、得られた座標データから作成したグラフを示す。2.3節で得られた画像データから、約5分間の移動経路を抽出した結果であるが、同じ経路を繰り返し移動しながら、長い距離を移動していることが分

かる。なお、この時間内に移動した距離は約77.7mであった。

3.3 加速度データの可視化

取得する加速度データはX軸、Y軸、Z軸における数値データであり、長時間データを取得し続けると、その量は膨大となる。そのため、如何に効率よく可視化するかが非常に重要になると考えられる。

2.3節で得られた加速度データの一例を図7に示す。横軸が時間方向で、縦軸は加速度の大きさ(単位:mG)を表す。なお、例として挙げた作業状態は、同時刻における画像データから確認したものである。約1分間の数値データをグラフ化したものであるが、様々な姿勢変化を読み取ることが可能である。

そこで、これらのデータから作業者の姿勢を推定し、どの様な作業を行っているかなどの作業工程を分類する技術の開発を、今後行う予定である。特に、サービス産業においては、「経験と勘」に頼り、製造業のような「科学的・工学的手法」に基づいた工程管理が行われていないため、作業分類による工程把握は、「最適設計ループ」を活用していく上で、重要な意味を持つと考えている。

4.「最適設計ループ」の適用

本章では、サービスの現場にセンシング技術を活用した「観測」技術を適用することにより、サービス工学の導入によるバックヤードの効率化を目的とした「最適設計ループ」の実践例を示す。対象とする作業は、2.3節と同様に宴会・食事の準備作業とし、実際の準備作業に模倣したシミュレーションとして実施した。

4.1 「経験と勘」による作業工程の「観測」

シミュレーションは、10客分の膳について、12種類の備品を配膳する作業として行った。図8にシミュレーションにおける作業完了後の1客の膳の状態を示す。図中、コンロ・板が2組あるが、通常でも、準備作業の開始前には既に準備されているため、同じ条件としている。

従来の「経験と勘」による作業工程を表2に示す。従来の工程では、作業者は1種類の備品が入ったトレーを片手に持ち、備品ごとに1客ずつ配膳しながら各膳を回っている(図9)。そのため、表2の工程に対しては、1客の膳に対して12回配膳することになる。なお、シミュレーションでは、10客分と数が少なかったため、トレーではなく、備品をそのまま片手に10客分持ち配膳した。これを「観

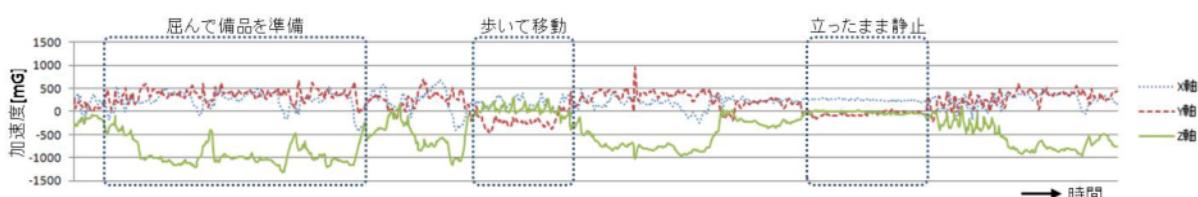


図7 取得した加速度データと作業状態の例



図8 シミュレーションにおける作業完了状態



図9 従来の配膳作業の様子

表2 従来の作業工程

工程
燃料(ロウ)を配る
お品書きを配る
箸置きを配る
箸を配る
グラスを配る
お猪口を配る
スプーンを配る
小皿1を配る
小皿2を配る
小皿3を配る
小皿4を配る
大皿を配る

表3 新たな作業工程

工程
燃料(ロウ), お品書き, 箸置き, 箸, スプーン, 小皿1~4, 大皿を配る

測りし得られた画像データから移動経路を可視化した。図10に、従来工程の移動経路を示す。移動距離は163.1mであった。

4.2 従来工程の「分析」と新たな工程の「設計」

移動経路の可視化により、「観測」データを視覚情報として理解しやすくなるため、「分析」工程が容易となる。つまり、図10から直感的に考えられるのは、非常に多くの同経路における配膳数である。そのため、最後の膳に備品を配膳してから、次の備品の入ったトレーを取りに行くまでの「カラ搬送」が、工程の数だけ発生している。これを効率化する場合、有効と考えられる方法の一つとして、製造業で行われている「ムダ取り」による改善がある。そこで、従来工程の「ムダ取り」を図るために、

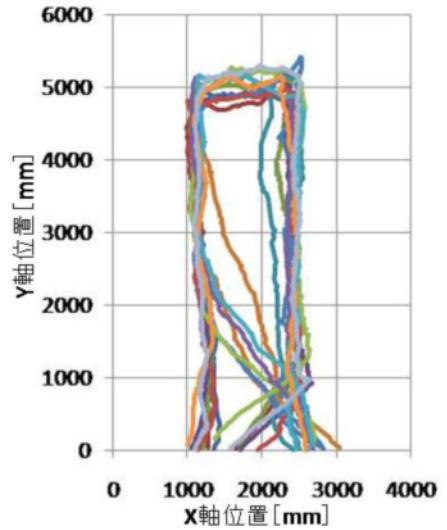


図10 従来の作業工程の移動経路



図11 セル生産方式に基づいたトレー中の備品の様子

セル生産方式の導入により新たな作業工程を「設計」し、移動経路・距離を削減した。

セル生産方式とは、1人、または少数の作業者チームで製品の組み立て工程を完成（または検査）まで行う製造における生産方式である。この考え方を配膳作業に適用した。本シミュレーションでは、5または10などの倍数管理が容易な客数からなる膳を1組のセルと見立て、1組のセルに配膳する備品をできる限り少ないトレーにまとめ、それを台車に乗せ1客ずつ配膳するという方法をとった。図11に、10客を1組のセルと見立てた場合のトレー中の備品と、図12にトレーを台車に乗せた配膳の様子を示す。また、表3に、セル生産方式に基づいた新たな作業工程を示す。なお、製造管理ノウハウをサービス産業へ導入することについては、「科学的・工学的手法」の一つとして重要視されており^[1]、本シミュレーションにおいては、サービスの現場にセンシング技術の導入とセル生産方式による提供プロセスの改善という二つの「科学的・工学的手法」の導入を図ったことになる。また、提供プロセスの改善において「観測」技術を適用することは、より視覚的に捉えやすい改善効果が得られるものと期待できる。



図12 台車を使った配膳作業の様子

4.3 「科学的・工学的手法」による作業工程の「適用」と「最適設計ループ」の繰返し

本シミュレーションでは、10客を1組のセルとし、一つのトレーに10種類の備品（グラス、お猪口を除く）を10客分入れ、1客ずつ配膳する方法を工程1とした。また、グラス、お猪口については、それぞれの専用ケースを同時に台車に乗せ、工程1と同様に配膳する方法を工程2とし「適用」した。

これを、再度「観測」した結果、図13に示す移動経路が得られた。当然の結果ながら、同経路の配膳数は激減し、移動距離も37.1mと77.3%減少した。

最終的に、セル生産方式に基づいた配膳を3回繰り返したが、1回ごとに効率性を「分析」し、トレー中の備品の並べ方を「設計」し直すという行為を、作業者が自発的に繰返した。図14、15に2、3回目のトレー中の備品の様子をそれぞれ示す。1回目は10客分の備品を入れただけであったが、2回、3回と繰り返すことにより、配膳する順番、向き、組み合わせなどを「分析」し、「設計」していくことが分かる。

表4に、本シミュレーションにおける従来の作業工程と新たに「設計」した作業工程との移動距離と作業時間の比較を示す。結果として、「最適設計ループ」を繰り返すことで、作業が最適化されていくことが分かる。

5.まとめ

サービス産業への「科学的・工学的手法」の導入を促進するために、「最適設計ループ」における「観測」技術の確立を目的として、サービスの現場の状況やニーズに応じて人物の行動をセンシングすることが可能な行動計測システムを開発した。これにより、画像データと加速度データを収集することで、大規模なデータ量の確保が可能な「観測」技術を確立することができた。その反面、それらのデータをどのように可視化するかといった課題が残るが、画像データからは、取得画像内で移動経路を視覚的に提示することにより、サービスの現場で内在する問題の把握が可能なことを示唆した。

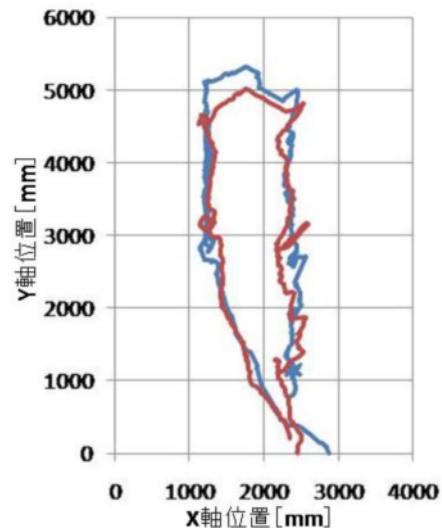


図13 新たな作業工程の移動経路



図14 2回目のトレー中の備品の様子



図15 3回目のトレー中の備品の様子

表4 「最適設計ループ」の繰り返しによる結果の推移

項目	従来の 作業工程	新たな作業工程		
		1回目	2回目	3回目
移動距離[m]	163.1	37.1	35.0	32.7
作業時間[秒]	382	360	338	321

また、サービスの現場に「最適設計ループ」を適用した事例を示すことで、その効果による有効性を示した。特に、「ムダ取り」などによるサービスの提供プロセスを

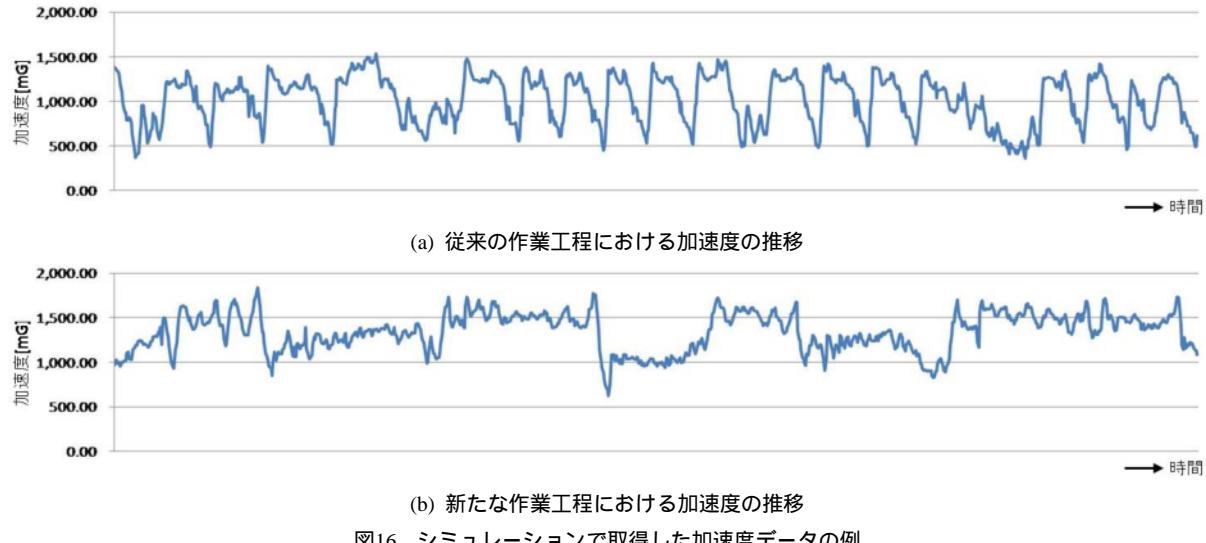


図16 シミュレーションで取得した加速度データの例

改善する場合において、その効果を可視化することは重要であり、サービスの現場の動機づけに有効であると考えられる。

今後の課題としては、加速度データの可視化手法について検討する必要がある。4章におけるシミュレーションで得られた加速度データのうち、頭頂部の加速度ベクトルの大きさをグラフ化したものを図16に示す。なお、グラフの横軸は時間、縦軸は加速度ベクトルの大きさである。グラフからは、頭部の動きが読み取れるが、従来の作業工程と新たな作業工程との間で頭部の動きが全く異なっており、興味深いデータが得られている。そのため、3章でも述べたが、当面は加速度データからの姿勢推定により、作業工程の分類に利用することを目指す予定である。また、様々な作業における身体活動量に関する知見を得ることができれば、作業負担や疲労などの保健医療分野への応用も可能であると思われ、幅広い応用が期待できる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、開発した行動計測システムの実験及び「最適設計ループ」の検証のために御協力を頂きました株式会社高山グリーンホテルの新谷尚樹代表取締役社長をはじめ、従業員の皆様に深く感謝いたします。また、「ムダ取り」など作業改善に御指導・御鞭撻を頂きました株式会社JPECの山田直志代表取締役、株式会社IICの松本正憲代表取締役社長に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 経済産業省、サービス産業におけるイノベーションと生産性向上に向けて（報告書）、2007、
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70411b03j.pdf> .

- [2] 経済産業省、経済成長戦略大綱、2006、
<http://www.meti.go.jp/topic/data/e60713aj.html> .
- [3] 下村芳樹、原辰徳、渡辺健太郎、坂尾知彦、新井民夫、富山哲男、『サービス工学の提案』、日本機械学会論文集（C編）、Vol.71、No.702、pp.315-322、2005 .
- [4] 吉川弘之、『サービス工学序説』、Synthesiology、Vol.1、No.2、pp.111-122、2008 .
- [5] 日高一義、『サービス・サイエンスにまつわる国内外の動向』、科学技術動向、No.57、文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター、2005、
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt057j/0512_03_feature_articles/200512_fa01/200512_fa01.html .
- [6] 上林憲行、『サービスサイエンス入門』、オーム社、2007 .
- [7] 経済産業省、技術戦略マップ2009、2009、
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2009.html .
- [8] 内藤耕、『サービス工学入門』、東京大学出版会、2009 .
- [9] 岸川利郎、『光学入門』、オプトロニクス社、1990 .
- [10] 富永将史、本郷仁志、輿水大和、丹羽義典、山本和彦、『人物行動把握のための複数人物追跡システムの構築』、動的画像処理実利用化ワークショップ2004（DIA2004）講演論文集、pp.79-84、2004 .
- [11] 三樹弘之、細野直恒、山本栄、『サービスサイエンスにおける視覚化の動向と展望』、計測と制御、Vol.48、No.5、pp.391-398、2009 .
- [12] 松山隆司、久野義徳、井宮淳、『コンピュータビジョン、新技術コミュニケーションズ』、1998 .
- [13] 澤田秀之、橋本周司、『加速度センサを用いたジェスチャー認識と音楽制御への応用』、電子情報通信学会論文誌（A）、Vol.J79-A、No.2、pp.452-459、1996 .
- [14] 杉本淳、『身体活動量の測定 - 最近の進歩 - 』、日本リハビリテーション医学会誌、Vol.37、No.1、pp.53-61、2000 .
- [15] 徐剛、辻三郎、『3次元ビジョン』、共立出版、1998 .

家具産業におけるサービス工学応用プロジェクト

RFIDを用いたアンケート端末の開発

山田 俊郎 成瀬 哲哉* 棚橋 英樹

Service Science Project for Furniture Industry

Development of Digital Questionnaire Terminal using RFID

Toshio YAMADA Tetsuya NARUSE* Hideki TANAHASHI

あらまし サービス産業において、消費者の嗜好をとらえることは新商品の開発や販売促進にとって重要な課題となっている。我々は、飛騨の家具産業の販売を支援するため、商品数の多い木製椅子をターゲットとした家具レコメンドシステムの構築を進めており、レコメンドの基礎データとなる顧客の嗜好を収集するアンケート端末を開発した。この端末は電子タグを用いて簡単な操作で嗜好だけでなく多くの情報を収集することができ、アンケート調査の使用シーンによって複数の運用形態で利用できる利点がある。展示会やショールームで実際に運用した結果、利用者や運用者の双方から操作の簡易さが確認でき、レコメンドシステムの基礎データを集めることができた。

キーワード サービス工学、アンケート、電子タグ

1.はじめに

サービス産業において、消費者の嗜好をとらえることは新商品の開発や販売促進にとって重要な課題となっている。従来、消費者の嗜好の調査には、モニター調査やアンケート調査、POSの売り上げ情報などを用いて分析を行っているが、調査や分析に多くのコストが必要になる。また調査結果を単なる数字として示すだけでなく、サービスの現場で使える情報に整理して示すことも求められている。

我々は、飛騨の家具産業の販売を支援するため、商品数の多い木製椅子をターゲットとした家具レコメンドシステムの構築を進めている。このシステムでは、複数の椅子の間の関連性を整理し、ある椅子を選ぶとそれと類似した椅子を提案するものである。ここで、「類似」とはメーカー側が考える商品シリーズの分類のみでなく、多くの顧客から家具のイメージに関するデータを集め、商品間の関連性を分析して得られた分類も含んでいる。

これらのデータを集めるためには、従来型の紙のアンケートによる調査が考えられるが、商品数や設問項目が多くなるとアンケート協力者の負荷が大きくなる。多くのアンケートデータを得るためにには、簡単な操作で必要な情報が収集できるアンケート手法が求められている。

デジタル機器を用いたアンケート調査は各種の方法でなされており、展示会等のイベントで一時的に用いられる

ことが多い。また、明示的なアンケート調査ではないものの、Suica等の交通系カードの利用実績から移動経路が把握できたり、お財布携帯やEdy等の決済系カードの利用実績から購入傾向が調査できたりするなど、デジタル機器の普及によって多くの情報を容易に得ることができるようになってきている。

これらの情報収集では、簡単な操作で多くの利用者を識別できる電子タグがキーテクノロジーとして利用されている。本研究では、消費者の家具に関する情報を収集することを目的として、電子タグを用いたアンケート端末を開発した。

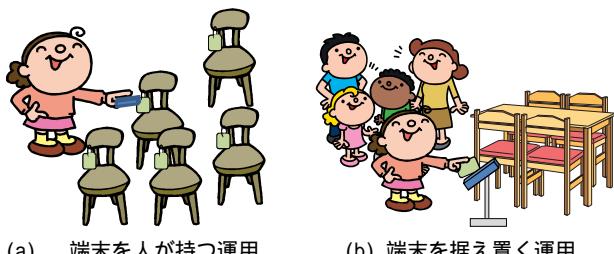
2.アンケート端末のコンセプト

電子タグを用いたアンケートシステムとしては、電子タグリーダを取り付けたPDA端末を用いることが考えられる（表1-1）。この方法では、PDAの画面に情報を表示することができ、情報収集とともに情報提供もできるメリットがある。その反面、端末の耐久性や提示するコンテンツの管理など、運用上の負荷が大きいデメリットがある。一時的なイベントでの調査であればこのようなシステムでも運用可能であるが、ショールーム等で長期間利用するには、運営上の負荷を極力減らし、スタッフの負担にならないシステムが求められる。

本研究では、情報収集のみに機能を絞った情報収集専用

* 岐阜県生活技術研究所

端末を開発した。ショールームなど商品数が多く同時刻の来客数が少ないシーンでは、商品に電子タグを取り付け人が端末を持つ運用(図1(a), 表1-)を想定し、展示会など商品数が限られて同時刻の来客数が多いシーンでは端末を据え置き、来客者が電子タグを持つ運用(図1(b), 表1-)を想定した。また、据え置き型の場合は単一読み取り(表1-)のみでなく複数の選択肢読み取り(表1-)ができるよう設計した。このように、さまざまな利用シーンに柔軟に対応する構成とすることで、販売現場のニーズに対応したアンケート調査を可能とした。そのため、開発する端末は部品レベルのものとし、利用シーンに合わせて装置を組み上げて運用することとした。据え置き型の運用の場合は、アンケート参加者が持っているSuica等の交通系のカードやEdy等の決済系のカード(FeriCa)を使ってアンケートに回答することもできるシステムとした。参加者が持っているICカードを用いることで専用ICカードの配布や回収の作業を省くことができ、アンケート調査の運用が容易なシステムとした。(FeriCaの場合、ID番号のみ読み取りが可能であり、書き込みや利用履歴等のカードに蓄積された情報の読み取りはできない機器としている。)



(a) 端末を人が持つ運用 (b) 端末を据え置く運用

図1 アンケート端末の利用シーン

また、アンケート参加者に対して情報提示が必要な場合を想定して、情報提示が可能なPDA端末を用いたアンケートシステムも試作した。PDA端末については、レコメンドシステムと連動しており、商品のタグにタッチすると商品情報、関連商品の紹介が可能なシステムとなっている。

3. 開発基板の機能

開発したアンケート端末の電子回路基板を図2に示す。この基板のサイズは88mm×60mm×8mmで、表2に示す機能が持たせてあり、図4のモジュール構成となっている。

RFIDリーダモジュールにはISO15693規格の電子タグの読み書きができ、Ferica規格のIDの読み取りができるモジュールを用いている。このモジュールをマスターとして、図3のように拡張電子タグリーダモジュールを接続することで、読み取り点数を32点まで拡張することができる。また、通信のデータ量が少ないとから、無線通信モジュールは通信速度よりも省電力性を優先して、Xigbeeプロトコルのサブセットを利用した通信モジュールを採用した。



図2 アンケート端末基板



図3 拡張モジュールの接続

表1 アンケート端末の利用形態

	人がタグリーダを持つ場合		人が電子タグ(Suica等のICカード)を持つ場合	
システムのイメージ				
お客様が持つもの	PDA (170mm×90mm×25mm程度)	小型専用端末 (95mm×65mm×15mm程度)	専用電子タグ、Suica、Pasmo等のICカード	
商品側に置くもの	専用電子タグ	専用電子タグ	専用端末(シングルリーダ)	専用端末(マルチリーダ)
利点	<ul style="list-style-type: none"> 商品にタグを張り付けるだけであり、多くの商品に対応可能 お客様に対して商品情報の表示が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 商品にタグを張り付けるだけであり、多くの商品に対応可能 PDAに比べて端末が小型、軽量で耐久性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> お客様が持っているICカードが利用可能 左記の小型端末がそのまま流用可能 	<ul style="list-style-type: none"> お客様が持っている電子タグが利用可能 複数の選択肢のある情報が収集可能
課題	<ul style="list-style-type: none"> 端末の耐久性(落下等による破損) 端末の管理が必要 PDAに表示するためのコンテンツが必要 	<ul style="list-style-type: none"> お客様に対する情報提示が無い 端末の管理が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 地域によってはICカードを持っていないお客様が多い 専用カードを用いる場合、カードの管理が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 地域によってはICカードを持っていないお客様が多い 選択肢の数に応じて端末が大型化
利用シーン	<ul style="list-style-type: none"> ショールームなど、商品数が多くてお客様の数が限られている場合 関心のある商品のカタログをお渡しする 		<ul style="list-style-type: none"> 東京での展示会など、ICカードを持っているお客様の数が多くて商品数が限られている場合 イベント感覚で参加していただける 	

表2 アンケート端末基板の機能

対応電子タグ	ISO15693 (I-CODE, Tag-IT) 読み書き FeliCa (Suica, Edy, おさいふ携帯等) IDm読み取りのみ
通信機能	USB接続、2.4GHz無線通信
メモリ機能	microSD対応
マルチリーダ接続	リーダモジュール32台まで接続可
その他諸機能	LED、電子音、リアルタイムクロック
動作電圧	3.2V~5V (乾電池3本またはリチウムイオン電池1セルで動作)
連続読み取り時間	単三アルカリ乾電池3本で16時間以上 (無線通信OFF時)
本体基板サイズ	88mm×60mm×8mm

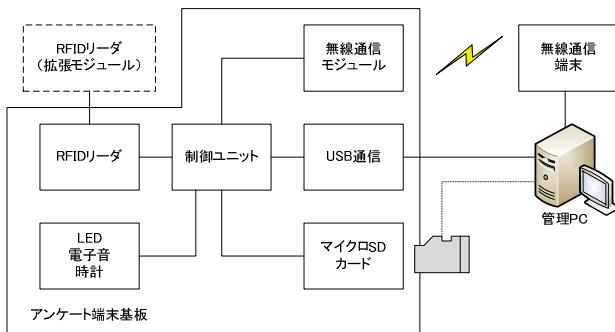


図4 アンケート端末基板の構成

アンケート端末では、電子タグを読み取るとタグID等の情報を、

- ・ 無線通信でホストコンピュータに送信
- ・ USB接続したコンピュータに送信
- ・ 内蔵マイクロSDカードに保存

のいずれか、または複数の処理を行うことが可能である。端末が電子タグを読み取ると、以下の情報がカンマで区切られたASCII文字形式で送信または内蔵マイクロSDカードに保存される。

- ・ シーケンス番号：電源が入れられたときから読み取った電子タグの通し番号。
- ・ 日付：電子タグを読み取った日付。
- ・ 時刻：電子タグを読み取った時刻。
- ・ 端末番号：アンケート端末の番号。（今回は8台試作したため、11~18番）
- ・ アドレス：読み取ったRFIDリーダモジュールの番号。1台のアンケート端末に複数のリーダモジュールを接続した場合、この番号の違いで読み取ったリーダモジュールを識別できる。
- ・ タイプ：ISO15693カードの場合は1, FeliCaの場合は2
- ・ UID：読み取った電子タグのID

表3 保存データの例

シーケンス	日付	時刻	端末番号	アドレス	タイプ	UID
0	2010/2/7	15:32:16	11	0	1	E004010001C52B37
1	2010/2/7	15:33:23	11	0	1	E004010001C52A5D
2	2010/2/7	15:33:45	11	0	1	E004010001C52E48
3	2010/2/7	15:34:59	11	0	1	E004010001C5325B
4	2010/2/7	15:35:29	11	0	1	E004010001C5325B

内蔵マイクロSDカードの保存データは一般的に用いられるCSV形式としたため、収集したデータは表3のようにExcel等の表集計ソフトで処理が可能である。

内蔵マイクロSDカードに保存されたCSVファイルは、

- ・ 無線通信で読み出し
- ・ USB接続で読み出し
- ・ マイクロSDカードを取り出してPCのカードリーダで読み出し

のいずれかの方法でアンケート端末からPCに読み取ることができる。

4. 専用端末の運用例

4.1 携帯型アンケート端末

開発した携帯型アンケート端末の外観を図5に示す。端末は、91mm×63mm×15mmの箱型であり、図6に示すように携帯電話程度のサイズである。動作電源はデジタルカメラ用のリチウムイオンバッテリーを用いており、連続で6時間の運用が可能である。

電子タグリーダモジュールは裏面の上方に内蔵されており、図7のように電子タグにタッチすると電子音とLEDで利用者に電子タグの読み取りを知らせる。

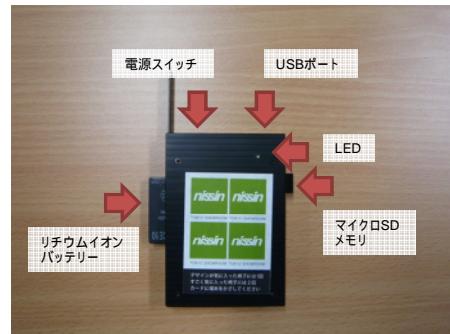


図5 端末の外観と機能



図6 携帯電話とのサイズ比較

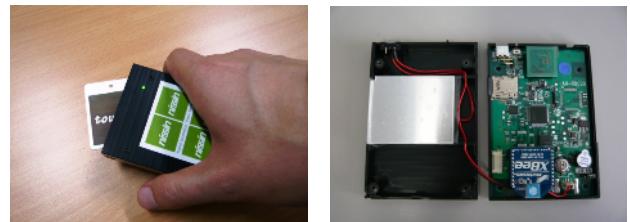


図7 端末の使用形態

図8 携帯型アンケート端末内部

4.2 据え置き型アンケート端末（マルチリーダ構成）

据え置き型アンケート端末のサイズは、設置する場所に応じて自由に決めることが可能であるが、複数の電子タグリーダモジュールを用いる場合、隣接するリーダ間で誤検出が起こらないように、モジュール間をタグのサイズ程度離す必要がある。

本研究では、Suica等の一般的なカード型電子タグ（タグサイズ：90mm×55mm）の利用を想定し、4つの選択肢から回答を選ぶ端末を製作した。280mm×200mmのパネルを上下左右の領域に分けて、本体基板と3台の拡張モジュールを配置し、4か所でタグの読み取りが可能である。端末上にタグをかざすと、電子音と選択肢上に設置したLEDによってタグを読み取ったことを利用者に通知できる。本アンケート端末は単三アルカリ乾電池3本で16時間以上の運用が可能である。

拡張モジュールは32台まで増設が可能であるが、選択肢の数を増やすとそれだけタグをタッチする場所の面積が増えることになるため、端末サイズが大きくなる。また、読み取りにかかる時間も長くなるため、読み取りにもたつき感が発生する。



(a) 正面パネル

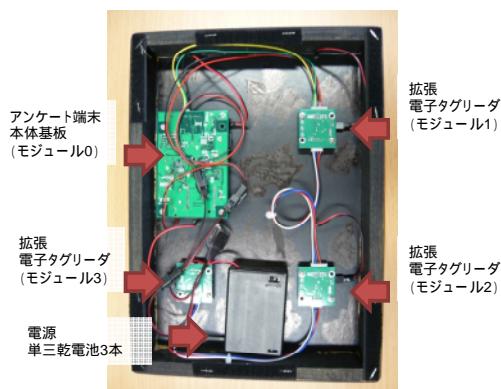


図9 据え置き型アンケート端末（4点読み取りの場合）

4.3 情報表示機能付きアンケート端末

液晶画面を持ったPDAに電子タグリーダを取り付けたアンケート端末は、販売現場での取り扱いに多少の困難が伴うが、アンケート参加者に対して情報提供が可能であるメリットがある。本研究では、レコメンドシステムと連動し

て、商品のタグにタッチすると商品情報とともに関連する商品を紹介するシステムを試作した。

レコメンドシステムはWebベースのシステムで開発されており、商品コードをファイル名とするURLを参照することで商品情報、関連商品を表示することが可能である。タグの情報から特定のURLを参照するには、タグIDとURLを関連付けるテーブルをPDAに持たせ、タグID 商品コード URLという変換を行うことが一般的である。しかし、商品の追加やタグの付け替えがあるごとに関連付けテーブルを修正する必要がある。今回対象とする家具の商品コードは、長いものでも英数字20文字程度であるため、関連テーブルを用いずとも、今回採用した電子タグが持つ48バイトの文字列記録領域に直接商品コードを記録することで煩雑なテーブルの管理作業を不要とした。PDA端末は電子タグのデータ領域に書かれた商品コードを読み取り、必要な接頭語（<http://www....>など）と接尾語（.htmlなど）を付けてWebブラウザからレコメンドシステムに表示情報を要求し、商品説明、関連商品を表示する。



図10 情報提示機能付き端末



図11 端末の使用例

5. アンケート端末の運用実験

開発したアンケート端末を用いて木製椅子のイメージ調査を行うとともに、アンケート端末の有効性を確認するため、展示会およびショールームで運用実験を行った。

5.1 展示会における運用実験

（株）日進木工の協力によって、以下の2回の展示会の日進木工ブースで運用実験を行った。

- ・ インテリアトレンドショー

第28回JAPANTEX 2009

- 会期：2009年11月11日(水)-13日(金)
- 会場：東京ビッグサイト 西展示ホール1~4

- ・ IFFT/インテリア ライフスタイル リビング

- 会期：2009年12月2日(水)-4日(金)
- 会場：東京ビッグサイト 東展示ホール2・3

展示品数に対して来場者数が多い展示会での運用であるため、アンケート端末は据え置き型のものとし、来場者が電子タグを持つ運用形態とした。木製椅子等の展示商品のイメージを選択式で回答するアンケート内容とし、来場者は対応する選択肢上に電子タグをかざして回答する。ま

た、来場者の属性によって来場者バッジの色分けがなされていることから、回答に用いるカードも色分けし、回答者の属性も取得した。

当初はSuica等の来場者が持っているFericaカードでも回答ができるよう準備を進めていたが、アンケート端末のFericaカードに対する読み取り能力が弱く、定期入れや財布に入れた状態では読み取りができなかった。そのため、今回の実験ではISO15693規格のカードを渡して回答していただいた。



図12 端末の設置状況



図13 アンケートで用いたカード

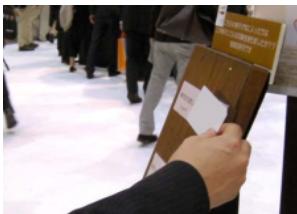


図14 端末の使用例

両展示会を通して、合計216名の方にアンケート参加を頂き、参加者にシステムについての意見を伺ったところ、「操作が簡単で分かりやすい」との意見が多く、おおむね好評であった。また、Suicaやお財布ケータイ等を利用したアンケート回答について意見を聞いたところ、一部の方から「個人情報の流出が心配で抵抗がある」との意見があった。開発したアンケート端末ではFericaのデータ領域にはアクセスできないため、ID番号以外の情報を取り出すことはできないが、利用者からみれば少額決済にも用いることができるカードをアンケートに利用することに心配があるものと考えられる。

5.2 ショールームにおける運用実験

飛騨の家具メーカーの協力によって、以下のショールームで運用実験を行った。

- ・ 柏木工株式会社 飛騨高山 暮しのギャラリー
 - 調査期間：平成22年1月30日(土)～2月7日(日)
 - 調査対象の木製椅子 25脚
- ・ 飛騨産業株式会社 飛騨の家具館 飛騨高山
 - 平調査期間：成22年2月6日～2月14日
 - 調査対象の木製椅子 65脚

- ・ 日進木工株式会社 東京ショールーム
 - 調査期間：平成22年2月13日(土)～2月14日(日)
 - 調査対象の木製椅子 45脚

来店者数に対して商品数が多いショールームでの運用であるため、商品に電子タグを取り付け、来店者がアンケート端末を持つ運用形態とした。来店者は気に入った商品に取り付けてある電子タグに端末をかざしてアンケートに回答する。また、気に入ったものは1回、とても気に入ったものには2回アンケート端末をかざす運用とし、商品に対する気に入りの度合いも取得できるようにした。



図15 椅子に取り付けた電子タグ



図16 端末の使用例

今回の運用実験では、3か所のショールームで合計76名の方にアンケート参加を頂いた。タッチするだけの操作であるため、簡単な説明でアンケート協力者に操作方法を理解していただくことができ、運用上の支障はなかった。また、調査の初日は我々研究スタッフが調査の対応を行ったが、2日目以降は、家具メーカーのショールームスタッフに対応を依頼し、特別な負担をかけることなくアンケート調査の運用が可能であった。

利用者に端末に対する意見を伺ったところ、幅が携帯電話よりも10mm程度大きいため女性の手にでは持ちづらい、何かの情報表示がほしい、との意見があった。また、アンケート協力者が端末を腰の高さ程度の位置から床に落とすトラブルがあったが、破損することなく動作していた。

5.3 アンケートデータの解析例

椅子の嗜好に関するアンケート調査の解析結果については生活技術研究所の研究報告書で報告するが、電子タグを用いたアンケートシステムによる特徴的なデータ解析例を以下に示す。

ショールームにおいて実施した端末を持つタイプのアンケート端末の運用実験では、気に入った商品の電子タグ番号とともに、電子タグにタッチした時間も記録される。そのため、事前に電子タグがつけられた商品の位置をマッピングしておき、タッチされたタグIDと対応付けることで、商品を見て回った順序や、その間の所要時間など、ショールーム内での行動軌跡を調査することが可能である。今回の実験において取得した行動軌跡の例を図17に示す。この事例では、2フロアあるショールームにおける2名分の行動軌跡を表示している。

ショールームの玄関は1階の左手にあり、ここでアンケート端末を手渡してアンケートを開始している。赤色（濃

い黒色)の実線で示した顧客(顧客A)は、気に入った椅子にタッチしながら1階の奥まで行き、そこから玄関方向に折り返している。行きよりも戻りの方が多い時間がかかるのであり、まずはずっと見て、戻りながらゆっくり見ているのではないかと考えられる。その後玄関横の階段から2階に上がって2階の商品を見て回っている。

緑色(グレー)の実線で示した顧客(顧客B)は、玄関から1階の奥まで行き、奥の階段から2階に上がって玄関方向に戻るように商品を見て回っている。全体を見回るには効率の良いルートであり、顧客Aよりも滞在時間が短い。

今回の実験では、商品の嗜好を調査することを目的としていたため、関心のある商品のログしか取得できておらず、行動解析とするには荒いデータとなっている。同様のシステム構成で、スタンプラリーやクイズラリーのような必ず電子タグにタッチする内容とすれば詳細な行動軌跡の構成も可能になる。

6.まとめ

本研究では、家具産業の販売現場をモデルケースとして、多くのデータを簡易に収集するアンケート端末を開発し、その有用性を確認した。開発した専用端末は、利用者、運用者とともに操作の簡易性が確認でき、通常の販売店業務に大きな負担をかけることなく導入することが可能である。

今回の実証実験では、無線通信を用いたリアルタイムのデータ収集は行わなかったが、提供できるコンテンツを整備することで関心のある商品を集めたカスタマイズカラゴの発行など、きめ細かな情報提示に活用できる。

今後は情報収集のみでなく、レコメンドシステムのコンテンツの充実に合わせて、情報提示機能も充実させるとともに、家具産業以外にも利用シーンの拡大を図る。

謝辞

本研究は(財)日本生産性本部、平成21年度サービスイノベーションを通じた生産性向上に関する支援事業(サービス工学適用事例開発分野)「家具産業におけるサービス工学応用プロジェクト」により実施した。



図17 ショールームでの行動軌跡の例(2名)

障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第1報)

— 頸髄損傷者用の新たな入力装置の試作と評価 —

千原 健司 上村 数洋* 足立 重平**

鳥井 勝彦*** 今枝 光宏**** 赤塚 久修

Research and Development of Assistive Technology (1st Report) Development and Evaluation of Novel Input Device for Spinal Cord Injury Person

Kenji CHIHARA Kazuhiro UEMURA* Juuhei ADACHI**
Katsuhiko TORII*** Mitsuhiro IMAEDA**** Hisanobu AKATSUKA

あらまし 今日、少子高齢社会の進展と共に、障がい者数も年々増加している。このため、健常者による人的支援には限界があり、障がい者の自立生活を支援する福祉機器が望まれている。この中で、重度の頸髄損傷者用の電動車いす入力装置は、顎で操作するタイプが主流であり、これは顎の前面に設置するため空間上邪魔となり、障がい者は操作する際に大きなストレスを感じており、心身共に負担の少ない入力装置の開発が強く求められている。このため、今回、心身共に負担の少ないという観点から新たに2種類の入力装置を考案・試作し、ユーザーを中心とした評価を通じて、実用化の可能性を調査した。結果、これらの各入力装置に、十分な実用化の可能性があることを確認した。

キーワード 福祉機器、電動車いす、入力装置、頸髄損傷者

1. はじめに

今日、少子高齢社会の進展と共に、障がい者数も年々増加しており、医療・福祉機器開発のニーズは高く、特に福祉分野では障がい者等にやさしい機器が望まれている。一方、岐阜県では県内を中心とした産学官連携による研究開発を通じて、地域の医療・福祉機器産業を振興している^[1]。

このような状況の中で、共同研究者の上村氏から、重度の頸髄損傷者用の電動車いす入力装置は、顎で操作するタイプが主流であり、これは顎の前面に設置するため空間上邪魔となり、操作する際に大きなストレスを感じている。このため、心身共に負担の少ない入力装置を開発したいとの要望があった。

これを受け今回、同氏が所属する障がい者支援団体の他、優れたモノづくり或いは福祉機器開発技術を有するメーカーと連携し、心身共に負担の少ないという観点から新たに2種類の入力装置を考案し、試作した。また、これらの試作を用いて、ユーザーを中心とした評価を実施し、実用化の可能性を調査した。

2. 入力装置の考案

2. 1 デザインコンセプト

重度の頸髄損傷者用の電動車いす入力装置としては、主に国内製の顎で操作する入力装置、あるいは海外製の後頭部で操作する入力装置が利用されている。今回、これらと比較して、心身共に負担が少ないという点を重視して、次の2つのタイプを設計する。

先ず、顎の前面にない入力装置として、既に海外では、後頭部で操作する入力装置^[2]が市販化されており、国内でも販売されている。しかしながら、本入力装置は、30～50万円と高価であり、また、個人に合わせた調整に手間と時間がかかる（或いは出来ない）という声があり、安価で尚且つ個人に合わせた調整のし易い国内製の入力装置が求められている。これらの点に配慮して、後頭部で操作する入力装置を新たに設計する。以降、このタイプを【タイプ1】と言う。

次に、究極に心身共に負担が少ないという観点から、障がい者より、頸部を使わずに、例えば体を傾けて操作が可能な入力装置という要望があった。これまで、同類の入力装置としては、頭部に取り付けた磁気センサにより頭部ジェスチャを検出して操作するもの^[3]、或いはステレオカメラにより頭部ジェスチャを検出して操作するもの^[4]、或いは脳波で操作するもの^[5]等が発表されている。しかしながら、磁気センサは近くに金属物や電磁モーターがある場合にはセンシングが不安定になること、

* 特定非営利活動法人バーチャルテクノロジーエンジニアリング

** 日本電気株式会社

*** 株式会社今仙技術研究所

**** 鍋屋バイテック株式会社

ステレオカメラは、識別のために大げさなジェスチャを登録する必要があり、また、段階的な速度制御が難しいという問題点がある。脳波による操作は、操作装置としては誤検出が比較的多く、また装置が大掛かりになると書いた要因で実用には程遠い。このため、今回、センサとしては安価で環境の影響を受けにくい加速度センサを用いて、体の傾きを検出し操作する入力装置を新たに設計する。以降、このタイプを【タイプ2】と言う。

2. 2 タイプ1の設計

後頭部を圧迫しないように配慮されている枕部と、位置と角度を自由に調整可能な支持部を備えた既存のヘッドレスト部品を改造して設計した。既存のヘッドレストの組立図を図1に示す。これに加えて、入力部位の自由度について、損傷レベルがC4である頸髄損傷者に協力してもらい、頸部に負担が掛からないように様々な方向に動いて頂いたところ、矢状方向とヨー軸の回転方向が、ピッチ軸の回転方向等と比べて、比較的楽に動かすことができることを確認した。このため、これらの方向に後頭部の移動を拘束し、剛性が高く、ユーザーに応じて機械的な調整を可能とすることを念頭に、図2のような可動部を設計した。可動部のリンク構成を図3に示す。

回転5軸、直動3軸のパラレルな閉リンクを形成することにより、矢状方向とヨー軸の回転方向に枕部の移動を拘束する。この他、主な特徴を以下に挙げる。

- ・パラレルな機構で構成しているので高い剛性を持つ。
- ・外側の直動2軸の周辺に直動バネをそれぞれ配置し、着脱可能なカラーで固定することにより、ユーザーに応じて臨機応変に機械的な調整が可能である。
- ・外側の直動2軸を、汎用的なショックアブソーバの外形寸法と同程度のサイズとしており、将来的には路面からの外乱を吸収するために、直動2軸をショックアブソーバと置き換えることが可能である。
- ・外側の直動2軸とそれぞれ平行に、直動型ポテンショメータを2機配置し、これらにより直動2軸の位置を検出し演算することにより、シンプルな構成で矢状方向の移動量とヨー軸の回転量を検出可能である。
- ・入力装置全体において、構成がシンプルであり、安価な製造が可能である。

なお、本機構について実用新案登録を出願中である。

2. 3 タイプ2の設計

損傷レベルがC4である頸髄損傷者等との意見交換により、対象となるユーザーは手足が不自由であるが、体幹および頭は比較的動かすことが可能であることを確認し、更に心理的な負担を軽減すべく、目立たないように装置を配置することにした。この結果、衣服の胸のポケットに入力装置を配置するタイプ（以降、このタイプを【タイプ2-1】という）と、眼鏡のフレームにセンサ部分を配置するタイプ（以降、このタイプを【タイプ2-2】という）を設計することにした。また、センサ数については、煩雑にならないという観点から、試作では1

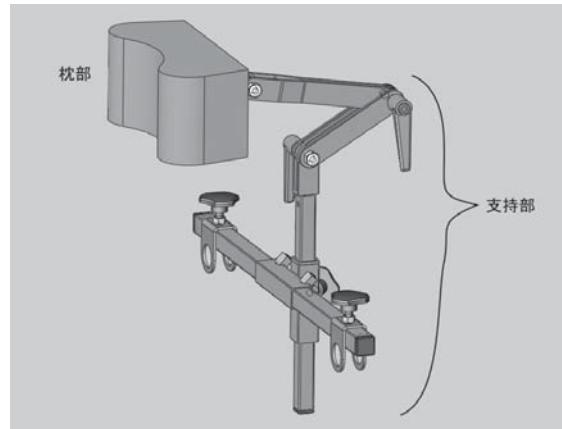


図1 ヘッドレストの組立図

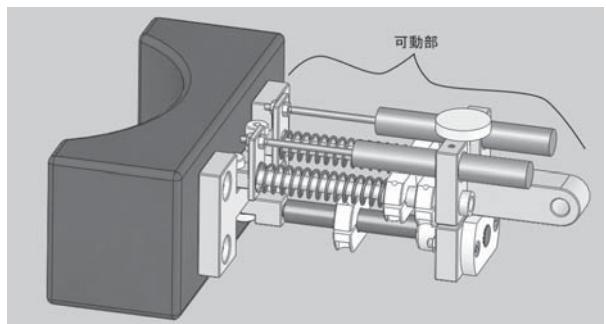


図2 入力装置の可動部

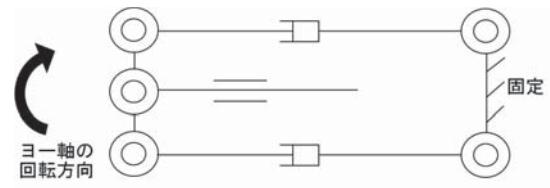


図3 可動部のリンク機構

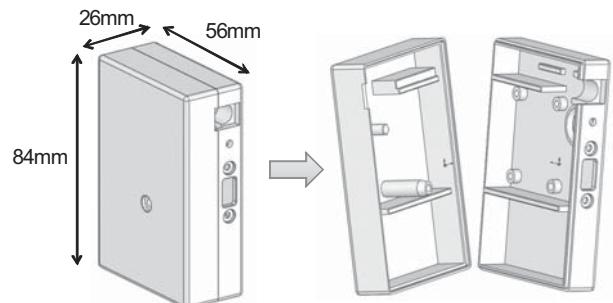


図4 タイプ2-1の収納ケース

箇所にのみ搭載することとした。複数のセンサの必要性については、プロトタイプによる試験結果により検討することにした。

タイプ2-1については、胸のポケットに収納できるようなサイズとし、尚且つバリ等で衣服に引っ掛かりがないように収納するケースの材質を樹脂とした。設計した収納ケースの組立図を図4に示す。外形の大きさは、概

ねタバコ箱大にすることができた。また、小型の構成部品として2軸加速度センサはRAS-2(近藤科学社製)を、制御基板はM16C/Tiny (ルネサステクノロジー社製)マイコンを搭載したKCB-1 (近藤科学社製)を採用した。

タイプ2-2については、タイプ2-1と同じ2軸加速度センサと制御基板を使用することにした。異なる点として、2軸加速度センサを、眼鏡フレームに取り付けられるようにするために、センサを収納する部位を、新たに設計した。設計したセンサ収納部を図5に示す。センサを収納し、尚且つセンサの基準面が顔側面と垂直となるように、眼鏡フレームを通す溝が切ってある面と、センサの基準面が垂直になるように設計した。

3. 入力装置の試作

3. 1 タイプ1の試作

タイプ1のプロトタイプを図6に示す。後頭部による入力部分A、前進モードと後退モードを切り換えるためのボタンB、そしてAとBからの入力信号から、電動車いすを操作するコマンドを生成するための制御回路を内蔵する制御ボックスCから成る。制御ボックスC内の写真を図7に示す。製作した制御ボックスは、各コネクタおよびスイッチの他、M16C/Tiny (ルネサステクノロジー社製)のマイコンを搭載した制御ボードKCB-1 (近藤科学社製)と、後退モード時に操作者に注意を喚起する圧電ブザーを内蔵している。また、2個の直動型ポテンショメータから取得したAD値と、保持している走行モードによって、図8に示すテーブルによりコマンドを生成する。これをシリアル通信により、100msec間隔で電動車いすのコントローラに送信されるように、組込プログラムを制作し、制御ボードに組み込んだ。送信するコマンドに対する電動車いすの動作を表1に示す。なお、表内の最大速度とは、電動車いすのジョイスティック下にあるトグルスイッチで、高速(6km/h)、中速(4.5km/h)、低速(2.5km/h)の3段階に設定可能な、電動車いすの最大走行速度のことである。

健常者により本プロトタイプを使用し、送信するコマンドに基づいて、電動車いすが想定どおりに動作することを確認した。

表1 コマンドに対する電動車いすの動作

S	ストップ
f	最大速度の50%で前進
F	最大速度の100%で前進
b	最大速度の30%で後進
B	最大速度の60%で後進
r	最大速度の50%で、その場右回転
R	最大速度の100%で、その場右回転
I	最大速度の50%で、その場左回転
L	最大速度の100%で、その場左回転
V	最大速度の100%で、右前進旋回
U	最大速度の100%で、左前進旋回
W	最大速度の30%で、右後進旋回
T	最大速度の30%で、左後進旋回

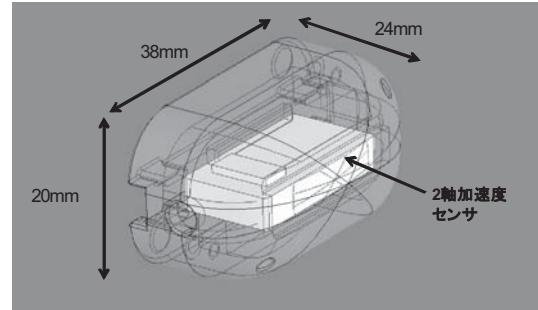


図5 タイプ2-2のセンサ収納部

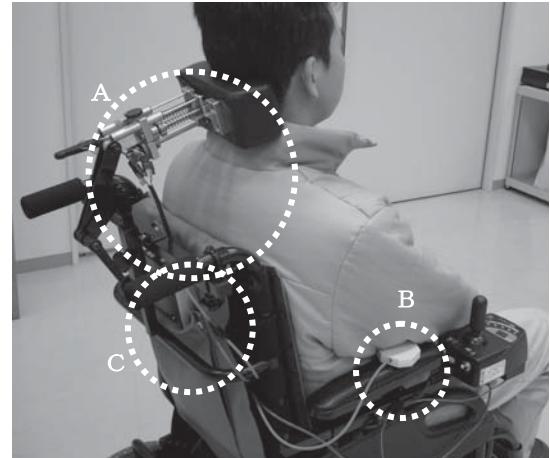


図6 タイプ1のプロトタイプ

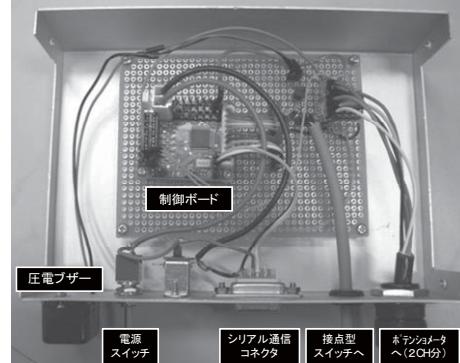


図7 タイプ1の制御ボックス

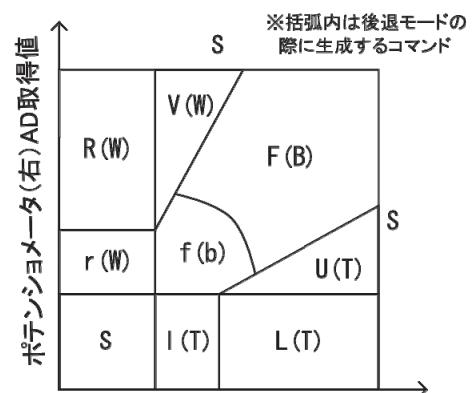


図8 タイプ1のコマンド生成テーブル

3. 2 タイプ2の試作

タイプ2-1のプロトタイプを図9に示す。この収納ケースを胸ポケットに入れ、体幹の傾きにより操作する。この他に、押しボタンスイッチと通信コネクタを備えており、押しボタンスイッチで起動し、通信コネクタを介して電動車いすにコマンドを送信する。

タイプ2-2のプロトタイプを図10に示す。2軸加速度センサを設計・製作したセンサ収納部に格納し、図10左のように眼鏡フレームに装着して頭の傾きにより操作する。この他に、制御基板を収納した制御ボックス、押しボタンスイッチ、通信コネクタを備えており、押しボタンスイッチで起動し、通信コネクタを介して電動車いすにコマンドを送信する。

タイプ2-1およびタイプ2-2の電動車いすに対する操作コマンド生成方法は共通で、ピッチ方向加速度センサとロール方向加速度センサの両センサから取得したAD値によって、図11のテーブルによりコマンドを生成し、シリアル通信により、100msec間隔で電動車いすのコントローラに送信されるように、組込プログラムを制作し、各制御ボードに組み込んだ。なお、押しボタンスイッチを押して約2秒後の姿勢を基準点とし、この時のAD値が図11の中央のSコマンド領域の中心にセットされる。また、このテーブルの他に、加速度センサの特性を生かし、急激な加速が生じた場合にSコマンド（ストップ）を送信するようにした。送信されるコマンドに対する電動車いすの動作はタイプ1と同様で表1の通りである。

健常者により各プロトタイプを使用し、送信するコマンドに基づいて、電動車いすが想定どおりに動作することを確認した。

4. 試作の評価

4. 1 評価方法

試作した各プロトタイプを使用して、本入力装置の使用対象者である損傷レベルがC4の頸髄損傷者3名により操作性の評価を行った。ここで、試作した各入力装置を電動車いすに搭載し、被験者にいきなり試乗していただくことは危険が伴う。このため、PC上で各入力装置からコマンドを受け、電動車いすの動作をシミュレートするソフトウェアが必要であり、制作した。制作したソフトウェアのGUIを図12に示す。電動車いすの動作をヘッドマウント方式により表示することが可能で、入力装置からの入力情報の表示、経過時間と衝突回数の表示、任意マップの読み込み、ログの記録、ログの再生、電動車いすの大きさおよび最大走行速度の変更が可能である。このシミュレーションソフトにより走行時間および衝突回数を測定し、安全に操作できると判断したタイプの入力装置のみ電動車いすに搭載し、被験者により試乗してもらいコメントを頂くことにした。

次に、福祉機器を開発する際の注意点として、同じ損傷レベルに分類されていても、細やかな症状は各々の障

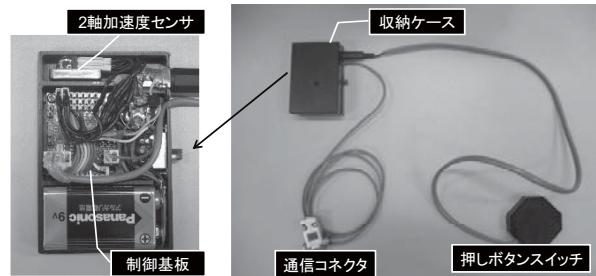


図9 タイプ2-1のプロトタイプ

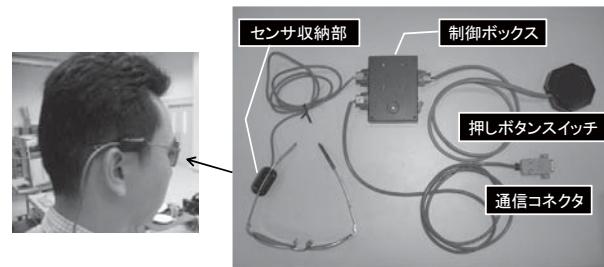


図10 タイプ2-2のプロトタイプ

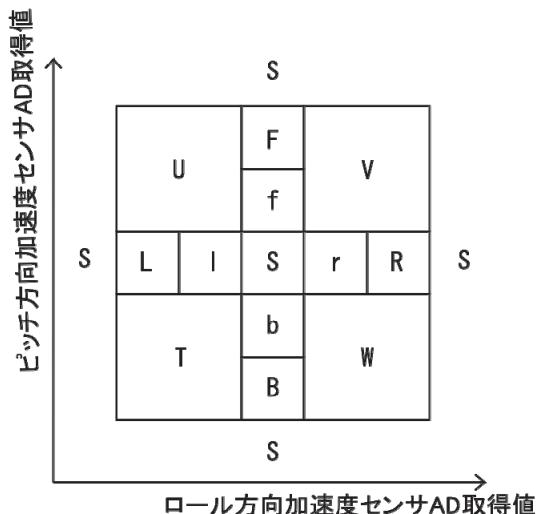


図11 タイプ2のコマンド生成テーブル

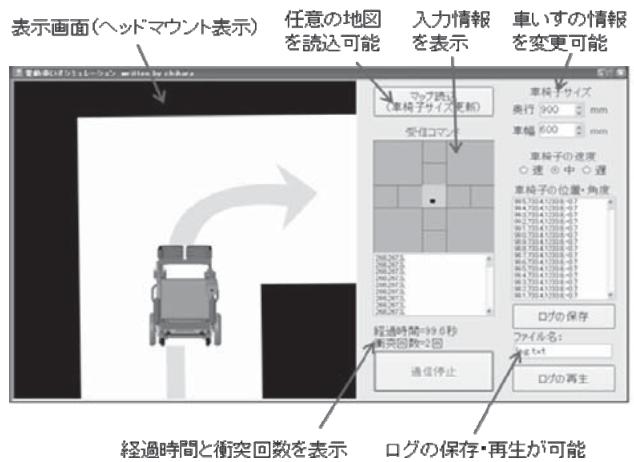


図12 シミュレーションソフトウェアのGUI

がい者によって異なり、また、生活様式あるいは価値観もそれぞれ違うため、できるだけ多くの対象ユーザーにより評価してもらうことが望ましい。このため、複数の対象ユーザーによる評価を目的にアンケートを実施した。また、アンケートの項目も、対象ユーザーが考えた方がより適切であるため、複数のユーザーが共同でアンケート素案を考え、後に技術開発サイドを含め協議し決定した。アンケートの実施については、ホームページに各製作の動画と質問項目を公開し、全国頸髄損傷者連絡会各支部および会員の協力を得て、障がい当事者に回答していただいた。有効回答者数は31であった。

4.2 ユーザーによる操作性の評価結果

試乗する場所を図13左に示す。ここはロの字型の通路で形成されており、電動車いすの操作には90°カーブの旋回が特に必要になるため、図13右に示すクランクコースによりシミュレーションを実施した。また、実機への試乗の可否は、ある程度被験者にシミュレーションに慣れてもらった後に、電動車いす速度を中速と高速の条件で、シミュレーションを各1回実施してもらい、主に衝突回数により判定した。

3名の被験者のシミュレーションによる走行試験の結果を表2～4に示す。この結果から、Aさんは、タイプ1とタイプ2-2で、Bさんはタイプ1で、Cさんは全てのタイプで搭乗ができると判断し、実機を操作して頂いた。実機の操作後、操作性等について改めてコメントを頂いた。評価結果をまとめると以下の通りである。

- ・タイプ1については、シミュレーションおよび実機にて3名全てが安全に走行可能であることを確認した。また、バネ力の調整具合など改良すべき点についてコメントを頂くことができた。
 - ・タイプ2-1については、体幹の可動範囲が十分確保できず1名は操作できず、1名は走行不安定で、1名はシミュレーションでは走行できたが実機に搭乗すると姿勢が変わり走行できなかった。加速度センサを胸の位置に配置することは難しいとの結論を得た。
 - ・タイプ2-2については、2名においてシミュレーションで安全に走行可能であったが、実機では速度を上げると、頭が揺れて走行が不安定となった。電動車いすに新たにセンサを設置してセンサ値の差分を取るなど、複数センサによる補償が必要であるとの認識を得た。
- 次に、一番走行が上手であったCさんのシミュレーションデータを図14～15に示す。各図共に、横軸は電動車いすの回転中心のX座標で、縦軸は電動車いすの回転中心のY座標で、時間毎に座標をプロットした図である。また、○が電動車いす最大速度を高速、×が電動車いす最大速度を中速の設定でシミュレーションした結果である。図14の結果から、タイプ1の走行軌跡は、その場回転と直進が多く、旋回が少ないことが分かる。つまり、図8の中のV或いはUコマンド（最大速度での左右旋回操作）をうまく使えていないことが分かる。一方、図15の結果

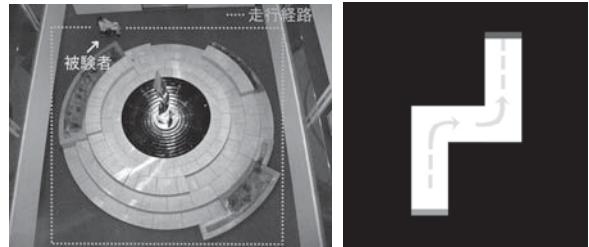


図13 試乗場所とシミュレーションに使用したコース

表2 Aさんのシミュレーションによる走行時間と衝突回数

入力装置	走行時間 [秒]	衝突回数 [回]
タイプ1(中速)	28.6	0
タイプ1(高速)	23.6	0
タイプ2-1(中速)	タイムオーバ	計測不能
タイプ2-2(中速)	34.2	0
タイプ2-2(高速)	32.5	1

表3 Bさんのシミュレーションによる走行時間と衝突回数

入力装置	走行時間 [秒]	衝突回数 [回]
タイプ1(中速)	46.5	0
タイプ1(高速)	51.2	0
タイプ2-1(中速)	77.9	9
タイプ2-1(高速)	25.6	0
タイプ2-2(中速)	65.0	3
タイプ2-2(高速)	83.5	5

表4 Cさんのシミュレーションによる走行時間と衝突回数

入力装置	走行時間 [秒]	衝突回数 [回]
タイプ1(中速)	28.3	0
タイプ1(高速)	21.6	2
タイプ2-1(中速)	34.1	0
タイプ2-1(高速)	30.4	0
タイプ2-2(中速)	31.4	1
タイプ2-2(高速)	27.4	0

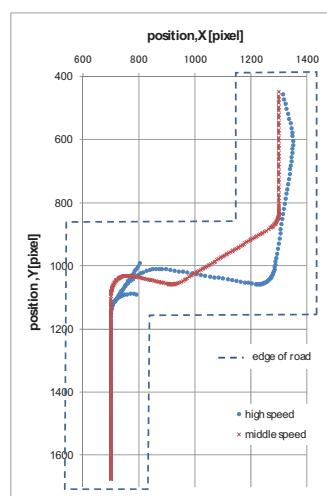


図14 Cさんのタイプ1のシミュレーションデータ

から、タイプ2の走行軌跡は直進、その場回転、旋回のコマンドがうまく使えていたことが分かった。他の2名に關しても類似の結果であり、この結果、タイプ1のコマンド生成テーブルには改善の余地があることが分かった。

4.3 複数ユーザーによるアンケート結果

ホームページに各試作の動画と次の質問項目を公開し、障がい当事者に回答していただいた。詳細な質問内容は割愛するが、内容を大きく分けると、タイプ1の試作による動画を視聴した後の感想11項目、タイプ2の試作による動画を視聴した後の感想11項目、個人属性2項目、生活の状態3項目、身体の状態10項目、現状の車いす9項目、その他6項目の、計52項目による質問内容である。

有効回答者数は31名であった。アンケート結果を、全て報告することは割愛するが、今回提案する2種類の入力装置を、使用してみたいかどうかをという点においてまとめた結果を表5に示す。総じてタイプ1、タイプ2とともに、使用してみたいとの声を多数頂いた。また、他の質問項目による回答から様々な改良すべき点を頂いた。アンケート実施の意義でも述べたが、障がいを持つ当事者の意見は様々である。全ての要求を満たす装置を開発することは不可能であるが、今回の調査により非常に多数の意見を抽出することができたので、今後は各回答を、丁寧に読み解き、より障がいに受け入れられる入力装置の開発に活かしていきたい。

5.まとめ

心身共に負担の少ないという観点から新たに2種類の頸髄損傷者用の入力装置を考案・試作し、ユーザーを中心とした評価を通じて、実用化の可能性を調査した。この結果、タイプ1、タイプ2ともにユーザーからのニーズは十分に高く、操作性の評価等から各試作の課題を明らかにすることが出来た。

今後は、アンケート結果等を活用し、心身共に負担の少ない頸髄損傷者用の入力装置を実用化するべく、開発を継続する。

表5 新たに開発している入力装置を使用してみたいかどうか

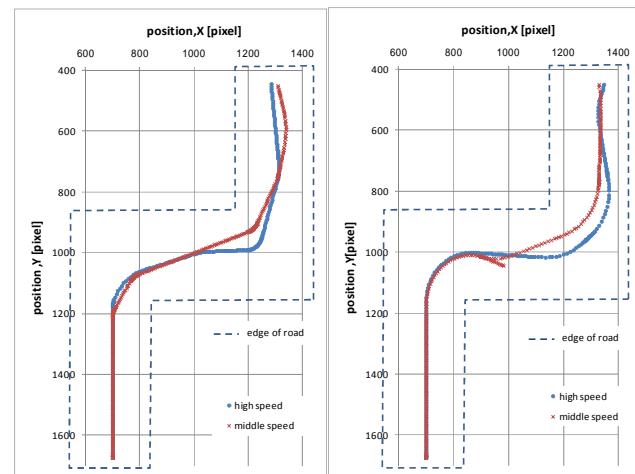
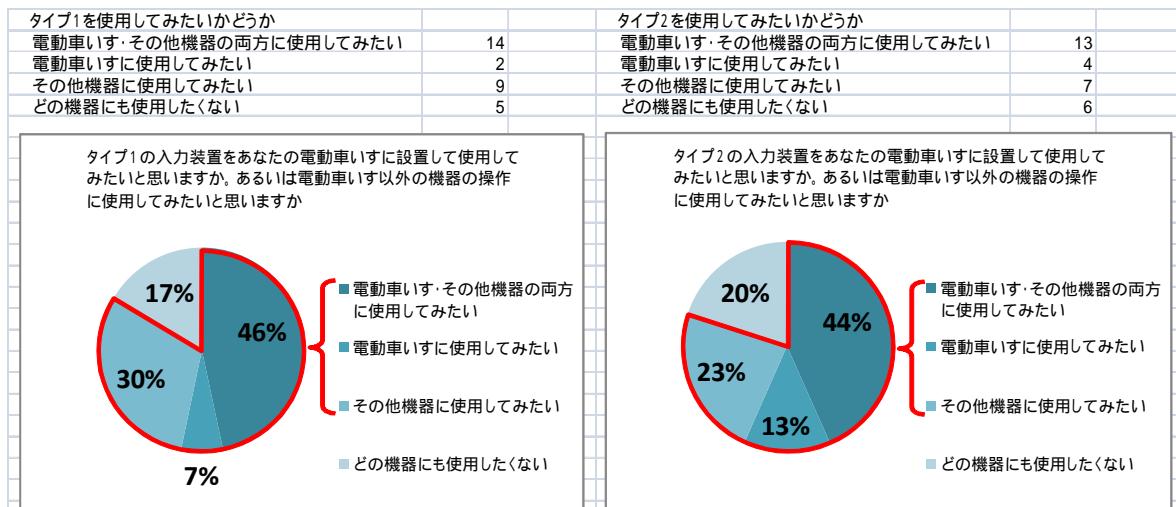


図15 Cさんのタイプ2のシミュレーションデータ

(左はタイプ2 - 1、右はタイプ2 - 2)

謝 辞

本研究開発は、都市エリア産学官連携促進事業（発展型）岐阜県南部エリア可能性試験の委託により実施されました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 都市エリア産学官連携促進事業（発展型）岐阜県南部エリア, <http://www.gikenzai.or.jp/ikou/>
- [2] ASLヘッド・アレイコントローラー, 米SUNRISE MEDICAL社（国内販売代理店, 株式会社アクセスインターナショナル）
- [3] 井上剛伸ほか, “重度脳性麻痺者を対象とした頭部操作式電動車いすの開発”, バイオメカニズム, vol.12, no.25, pp.303-313, 1994
- [4] 依田育士ほか, “頭部ジェスチャによる非接触・非拘束電動車いす操作インターフェース”, 電子情報通信学会誌 Vol. J91-D, No.9, pp.2247-2255, 2008
- [5] 独立行政法人理化学研究所ほか, “脳波で電動車いすをリアルタイム制御”, プレスリリース, 2009.6.29

映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発

汎用的な作業への拡張

松原 早苗 渡辺 博己 棚橋 英樹

Research of Failsafe Camera System using Motion Analysis - An Extension of Versatile Work -

Sanae MATSUBARA Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし 製造現場において、消費者ニーズの多様化による頻繁な製品種の切り換えに柔軟に対応するため、人手による作業が増加している。しかし、人の作業において「作業忘れ」や「作業間違い」といった作業ミスは不可避であり、このミスに起因する不良を早期に発見し、市場や後工程に流さないことが大きな課題とされている。このような課題を事前に予防する対策のことを、一般に「ポカよけ」と呼ぶが、本研究所では平成20年度より、カメラから取得した映像中の作業者の動作をリアルタイムに解析し、作業ミスを高い信頼性で検出する、新しい「ポカよけ」手法の研究開発に取り組んでいる。今年度は、提案「ポカよけ」手法を、昨年度対象とした「締め付け」作業等の単純な反復作業から、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるよう拡張し、検証実験を行った。その結果、従来手法と比較し信頼性の高い作業ミス検出が可能であることを確認した。また、作業者の変更に対しても個人差の影響を受けにくいことを確認した。

キーワード ポカよけ、動作解析、作業分析、異常検知、インダストリアルエンジニアリング(IE)

1.はじめに

自動車や家電などの製造現場では、製品の品質や生産性を向上するために、製造技術や製造機械の高度化が強く進められてきた。しかし近年は、大量生産から多品種少量生産への移行や製品サイクルの短期化等の激しい変化に対応する必要があるため、設備投資が追い付かず、十分な設備の確保が困難な状況になりつつある。そこで、このような需要の変化に対応した作業環境を確保するため、柔軟性の高い人手を多用する現場が増加している^[1]。しかしながら、人が行う作業には、「作業忘れ」や「作業間違い」といった人為的なミスによる不良の発生が避けられないといった課題がある。万が一、品質を満たさない不良品が市場へ流出した場合は、消費者に多大な迷惑がかかることはもちろん、企業も信頼を失い、企業の存続に関わる大きな問題となる^[1]。そのため、人為的な作業ミスによる不良品が消費者や後工程へ流れることを無くす、もしくは少なくするための対策は非常に重要性が高く、多くの取り組みが続けられており、さらなる向上が求められている。

そこで本研究所では、平成20年度より、岐阜県の主要産業である製造業を対象として、この人為的な作業ミスをさらに信頼性高く検出する「ポカよけ」手法の研究開

発に取り組んでいる。組立後の部品を検査する従来手法に対して、本手法は、組み立てる作業者の動きの過程をリアルタイムに評価することで、作業ミスの早期検出、検出の信頼性向上を可能とすることを特徴としている。

昨年度は、「締め付け」作業等の単純な反復作業を対象として、作業ミスを検出する手法の開発を行った。そして、実際の自動車の組立工程におけるネジの締め付け作業に適用し、有効性を確認した^[4]。今年度は、昨年度対象とした単純な反復作業から、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるよう手法を拡張し、実験によりその手法の有効性を検証した。

2. 作業ミス検出手法の概要

2.1 従来手法の課題

製造現場では作業ミスを検出することは重要性が高く、多くの取り組みがなされている。

これらの取り組みは、各作業工程の後に検査工程を設け、部品（製品）の機能や外観から作業ミスを検出する方法と、作業工程内で行われる個々の作業の過程で起きる事象（例えば、工具のトルク情報や部品数の因数管理等）から作業ミスを工程内で検出する方法の大まく2つに分かれれる。

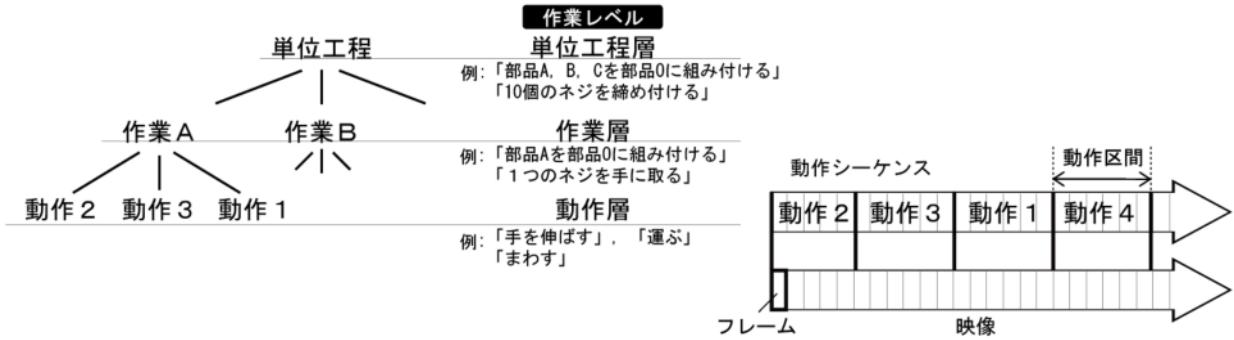


図1 作業と映像の階層構造

前者の方法では、検査工程による工数増が避けられないため多用すると生産性の低下が問題となり、一般的には、一連の製造工程の最終段階や中間で検査工程が設けられることが多い。そのため、不良が発見された場合、後もどり工数の増加や破棄される部品（製品）の増加による損害が大きくなる問題がある。

一方、後者的方法は、工数の増加が不要であり、作業工程内で作業ミスを検出することができる。その方法として、ポカよけがある。ポカよけとは、部品の取り付け忘れ等の「うっかりミス」や部品を間違えて付けてしまう等の「ポカミス」を避ける仕組みのことである。具体的な例としては、作業者が複数の部品箱から間違えず指定部品をピッキングできるように、指定の部品箱のみLEDを点灯させ作業の指示を行う装置や、その部品箱に手を入れたことを確認する光電スイッチを用いた動作確認センサ、また、作業の回数や部品の個数を工具やセンサで計測し、標準作業と異なる場合に作業ミスが発生したとして知らせる装置等がある。しかし、例えば、指定の部品箱に手を入れたことが確認できても、その部品を落したり、別の場所へ置き忘れたりすることにより、部品の取り付け忘れが発生する場合がある。このように、部品箱の挿入口の光電スイッチやトルクレンチの締め付け完了信号等、ある一時点での動作を検出するセンサ情報のみでは作業全体の品質を十分に保証できない問題がある。

2.2 提案手法の概要

本研究では、製造現場で既に使用されている前述のセンサ情報に加え、カメラを用いて作業者の動作を連続的に評価することで、作業ミス検出の信頼性を高めるポカよけ手法を提案する。製造現場では、作業者が変わっても、作業の品質を保つため、工程ごとに作業の内容とその順序を定めた作業手順書が作成されている。この作業手順が定められていることを利用し、予め正しい作業として登録した作業映像と、リアルタイムに取り込まれる作業映像とを比較する画像処理技術を開発することで作業ミスを検出する。

2.3 作業の構造と記述

従来から、作業改善や作業設計を目的とした作業分析は、インダストリアル・エンジニアリング（IE）と呼ばれる工

学的手法が用いられている^[2]。その中では、仕事のレベルが階層的に表現され分析される。本稿では、図1に示すように、仕事のレベルを3つの階層（単位工程層、作業層、動作層）に分けて説明を行う。単位工程層は、1つの作業場において「部品A、部品B、部品Cの順に部品Oに組み付ける」、「10個のボルトを締め付ける」等の1つの組み付け部品に対して行う一連の作業を意味する。作業層は、「部品Aを部品Oに組み付ける」、「部品Bを部品Oに組み付ける」等の意味ある目的行動の最小単位であり、最下層の動作層は、「手を伸ばす」、「運ぶ」、「まわす」等の基本的な動作である。

本研究では、1つの単位工程に対して撮影した映像を、画像処理により動作層の動作単位に分割することで、単位工程を動作層で記述する。

2.4 システム構成

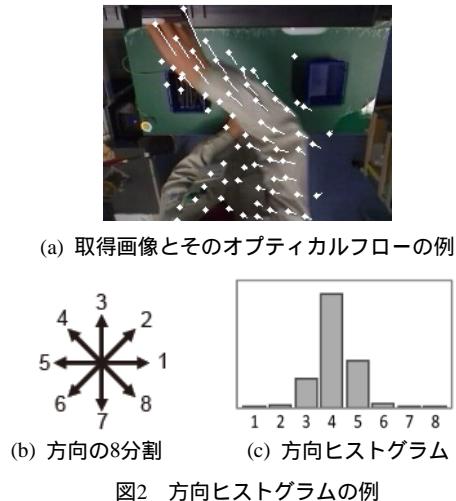
人の動き情報を取得する手法として、モーションキャプチャシステムを用いる手法があるが、マーカの装着が必要である等の作業者への拘束や、複数台のカメラを用いた高価で複雑な機器の導入が必要となる。そこで本研究では、作業者への拘束を必要とせず、現状の作業環境に簡単に追加構築ができるよう、作業を撮影する1台のカメラと、画像処理による作業ミス検出処理を行う1台のPCという安価かつ簡単な機器構成とした。

ここでは、作業者の手や腕が動く範囲を注目領域として撮影するため、カメラは作業者の前上方から作業台に向かって設置した。

3. 動作シーケンスの獲得と作業ミスの検出

作業台上において手と腕で行う作業を対象とし、作業映像を解析することで、作業ミスを検出する処理について述べる。

まず、作業映像を構成する各フレームから動きの大きさと方向分布を表わす動き特徴量を抽出し、その時系列データの変化から作業映像を動作単位に分割する。次に、1つの動作単位に対する開始フレームから終了フレームまでの区間を動作区間と定義し、この動作区間の動きの方向分布を表す動作特徴量を求める。そして、動作区間とその動作特徴量の時系列データである動作シーケンス



を獲得する。作業ミスは、予め登録した正しい作業の動作シーケンスとリアルタイムに獲得される動作シーケンスとを比較評価することで検出する。数式等詳細については、昨年度の報告^[4]を参考にされたい。

3.1 動き特徴量の抽出

本手法では、従来の顔や手などの注目部位を切り出す手法に対して、オクルージョンや作業者の服装の変化、照明変化等の影響を受けにくい局所特徴の統計量を用いるアプローチ^[3]をとる。具体的には、局所的な動きベクトルとしてオプティカルフローを用い、その統計量である動きの大きさと方向分布を表わす方向ヒストグラムを動き特徴量として用いる。方向ヒストグラムは、まず、図2に示すように、画像中の注目画素点の動きベクトル（大きさと方向）を求め、方向別に分類する。本稿では、画像を構成する画素が格子状に配列されていることから、図2(b)に示す

ように、方向分割数を8とした。各動きベクトルを8方向に分類し、方向ごとに動きベクトルの大きさの和をとる。得られる方向ヒストグラムの例を図2(c)に示す。図2(a)では、右下方向から左上方向への動きベクトルが多く、得られるヒストグラム（図2(c)）も方向4が大きい値となっている。

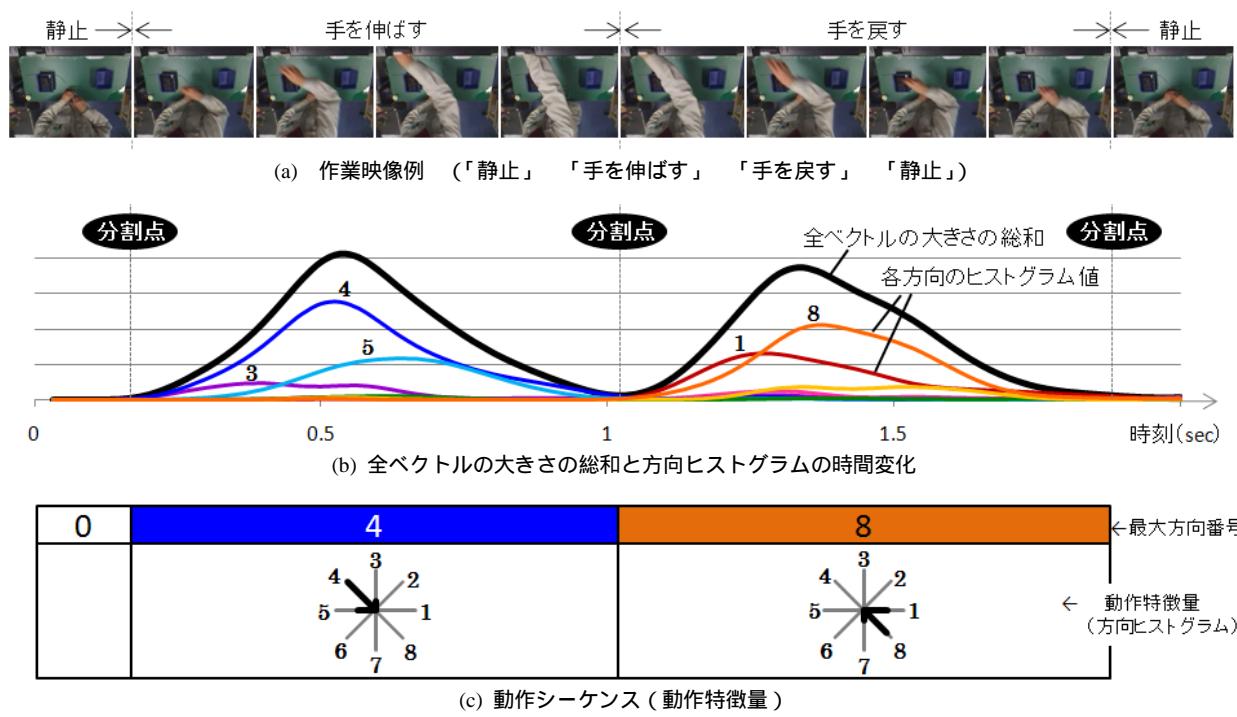
3.2 動作単位の分割

作業映像における動作単位と動作単位の切り替わりの点を分割点として検出することで、作業映像を動作単位に分割する。

本手法では、作業における動作単位を始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定することで、対象とする手の動作は、必ず「静止状態から速度を上げ、ある地点で速度が減少し静止する」という過程をもつことを利用する。そこで、図3(a)に「静止」「手を伸ばす」「手を戻す」「静止」という映像の例を示す。そして、この映像から抽出した全ベクトルの大きさの総和（太線）の時間変化を図3(b)に示す。大きさの総和は、動作の開始とともに動きが大きくなり、動作の切り替わり時点で小さくなることがわかる。そのため、ここでは、全ベクトルの大きさの総和が減少から増加する時点を分割点として検出する。

3.3 動作特徴量の抽出

2つの分割点間を1つの動作単位を構成する動作区間とする。また、この動作区間の動作特徴量は、区間全体の動きの方向分布を表わす方向ヒストグラムとし、区間を構成する各フレームの動き特徴量（方向ヒストグラム）から求める。動作特徴量は、動作区間内の各フレームの方向ヒストグラムを、方向ごとに積算し、全ベクトルの大きさの和で割ることで算出する。図3(c)に、図3(b)の分割結果と動き特徴量の時系列データから算出される動作特徴量とそ



の最大となる方向の番号を記号として示す。全ベクトルの大きさの総和が小さく、動きがないと判断された区間は、記号0とした。

3.4 作業ミスの検出

作業ミスを、予め正しい作業として登録した動作シーケンスと、リアルタイムに取り込まれる作業の動作シーケンスとを比較することにより検出する。

動作シーケンスAは、動作区間の時系列データ $\{A_1, A_2, \dots, A_i\}$ ($i=1, \dots, n$)であり、各動作区間 A_i は、8方向の方向ヒストグラムである動作特徴量 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ をもつ。ただし、 i は動作区間の順番を意味する。

比較する2つの動作シーケンスをそれぞれA、Bとしたとき、同じ番号の動作区間 A_i と B_i の動作特徴量の類似度を順に求める。動作特徴量の類似度は、方向ヒストグラムをベクトルとして扱い、2つのベクトル $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ と $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i8})$ の余弦とする。値が1に近づくほど類似度は高くなり、0に近づくほど類似度は低くなる。その類似度に対して閾値処理を行い、閾値以下の場合、動作が異なると判定し、作業ミスとして検出する。実験では、経験的に閾値を0.85とした。

4. 実験

本章では、昨年度行ったネジの締め付け作業等の反復動作からなる作業だけでなく、独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるように拡張した手法を実験により評価する。

本稿では、汎用的な作業の例として、1つのボルトにワッシャー（小）、ワッシャー（大）の2種類のワッシャーを順に入れ、1つのナットを手締めする作業に対して実験を行う。この作業は、実際の製造現場から、組立後に部品が重なり、ワッシャーの順序や欠如の確認が難しいという意見を受け、対象作業として採用した。

作業の流れは、「ボルトを治具にセットする」「ワッシャー（小）を手に取る」「ワッシャー（小）をボルトに入れる」「ワッシャー（大）を手に取る」「ワッシャー（大）をボルトに入れる」「ナットを手に取る」「ナットをボルトに手締めする」「ボルトを治具から外す」という流れである。複数の部品を部品箱から取り、治具にセットされたボルトに取り付ける作業であり、部品の「取り付け忘れ」や「取り付け順序の間違い」といったポカが発生する。現在、このような部品の組立現場では、各部品箱の前に光電スイッチ等のスイッチセンサを設置し、手が部品箱を通過することを確認するシステムが導入されていることが多い。このシステムでは、「ワッシャー（小）の部品箱通過」「ワッシャー（大）の部品箱通過」

「ナットの部品箱通過」がこの順序で確認されない場合をポカとして検出している。しかし、このシステムでは、部品箱通過後、部品を落としたり、どこかに置き忘れたりした後、次の作業へ移った場合、取り付け忘れのポカを検

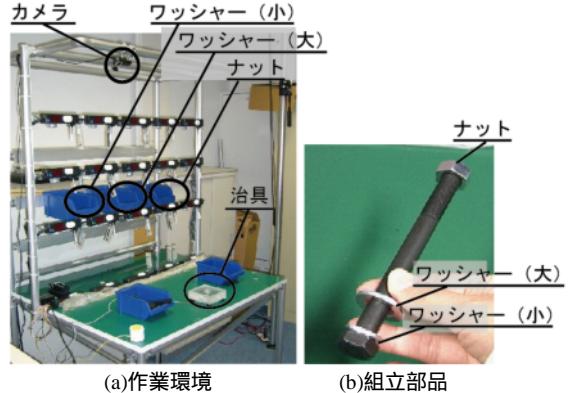


図4 作業環境における提案システムと取得画像例

出できない問題がある。また、ワッシャーの取り付け順序は、品質の重要な要素であり、一度に2種類の部品を手にすると、取り付け時に順序が入れ替わる危険性がある。そのため、順序を間違えないよう「ワッシャー（小）を手に取る」「ワッシャー（小）をボルトに入れる」「ワッシャー（大）を手に取る」「ワッシャー（大）をボルトに入れる」と1つずつ取り付ける作業を標準としているが、「ワッシャー（小）をボルトに入れる」動作を省いて作業される場合がある。しかし、このようなシステムでは検出できない問題がある。

本研究では、このような「部品箱Aを通過した」等のある一時点の動作を確認するセンサを用いた現状のシステムの問題に対して、「部品箱Aから治具まで部品を運ぶ」といった連続的な動作の評価を加えることで、信頼性の高いポカ検出を行う。

4.1 実験条件

一般的な製造現場を想定して、セル型の組立作業環境を構築した。図4(a)に作業環境を示す。左から順に「ワッシャー（小）」「ワッシャー（大）」「ナット」の部品箱を配置し、ここでの組立作業を撮影した映像を作業データとして評価した。組立後の部品を図4(b)に示す。システム構成は、図4(a)に示すように作業に支障がなく、手や腕が動く範囲を中心に撮影可能な位置に設置したカメラ1台と、ポカ検出の処理を行う1台のPCとした。1つの作業データは、ボルトを治具にセットしてから、ボルトを治具から外すまでの作業に対する映像である。作業データは、非圧縮のカラー情報をグレースケールに変換して利用した。フレームレートは30fps、画像サイズは160pixel×120pixelとした。

作業データは、ポカを含まない正しい作業（以降、OK作業と呼ぶ）のデータ80件、ポカを含む作業（以降、NG作業と呼ぶ）のデータ12件の合計92件を用い、評価を行った。これらのデータは、作業者の変化の影響を評価するため、作業者4名がそれぞれOK作業20件、NG作業3件を行ったデータである。

ポカを含むNG作業データは、以下の3種類のシナリオとした。NGシナリオ2、NGシナリオ3は、従来のスイッ

チセンサのみでは検出できず問題となっていた状況を再現しものである。

<NGシナリオ1>

「ワッシャー(小)」または「ワッシャー(大)」を取り付け忘れる。

<NGシナリオ2>

「ワッシャー(小)を手に取る」の後、「ワッシャー(小)ボルトに入れる」を省き、「ワッシャー(大)を手に取る」を行い、2種類のワッシャーを一度にボルトに入れれる。ワッシャーの順序が入れ替わる危険性があるNG作業。

<NGシナリオ3>

「ワッシャー(小)」または「ワッシャー(大)」を手に取り、落とすまたは人に話しかけられ、部品を別の場所に置き忘れ、次の作業へ移り、部品を取り付け忘れる。

4.2 作業データの解説

図5に、OK作業データの動作シーケンスの例を示した。映像が、「ワッシャー(小)に手を伸ばす」「ワッシャー(小)をボルトに運ぶ」「ワッシャー(大)に手を伸ばす」「ワッシャー(大)をボルトに運ぶ」「ナットに手を伸ばす」「ナットをボルトに運ぶ」の動作単位に分割されていることがわかる。

本来、動作シーケンスは、各動作区間にに対して方向ヒストグラムを動作特徴量としてもつが、図では、スペースの

都合により、方向ヒストグラムの最大となる方向の番号の記号列として示す。また、ワッシャーをWと省略する。

図6に、NGシナリオ1のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー(小)に手を伸ばす」「ワッシャー(小)を運ぶ」「ナットに手を伸ばす」

「ナットをボルトに運ぶ」となり、「ワッシャー(大)に手を伸ばす」「ワッシャー(大)をボルトに運ぶ」が抜け、「ワッシャー(大)」の取り付け忘れが発生したことがわかる。

図7に、NGシナリオ2のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー(小)に手を伸ばす」「ワッシャー(小)を運ぶ」「ナットに手を伸ばす」「ナットをボルトに運ぶ」

「ワッシャー(大)に手を伸ばす」「ワッシャー(大)を運ぶ」となり、「ワッシャー(小)をボルトに運ぶ」を飛ばし、ワッシャーの順序が入れ替わる危険がある作業であることがわかる。このNG作業は、従来のスイッチセンサのみのシステムでは検出ができず問題となっていたが、動作シーケンスを評価することで検出可能であることがわかる。

図8に、NGシナリオ3のNG作業データに対する動作シーケンスの例を示した。「ワッシャー(小)に手を伸ばす」「ワッシャー(小)をボルトに運ぶ」「ワッシャー(大)」

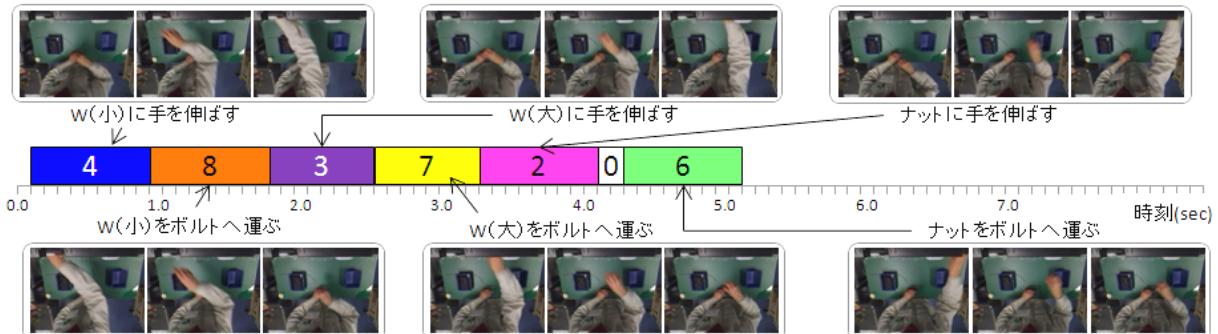


図5 OK作業データに対する動作シーケンス例

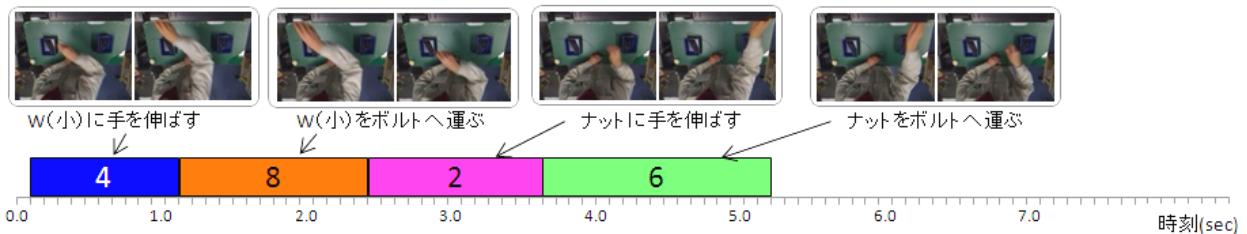


図6 NGシナリオ1のNG作業データに対する動作シーケンス例

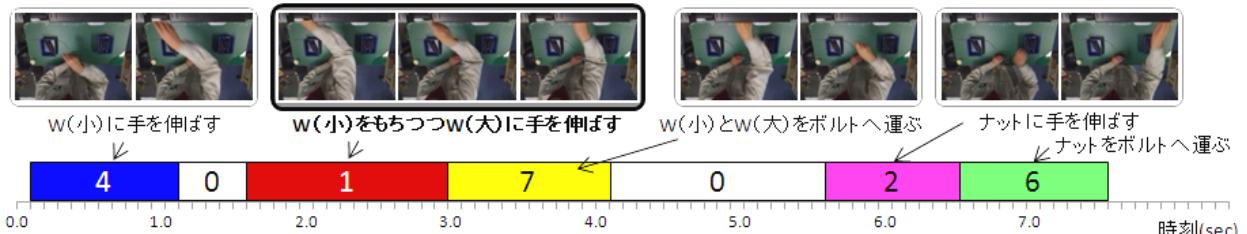


図7 NGシナリオ2のNG作業データに対する動作シーケンス例

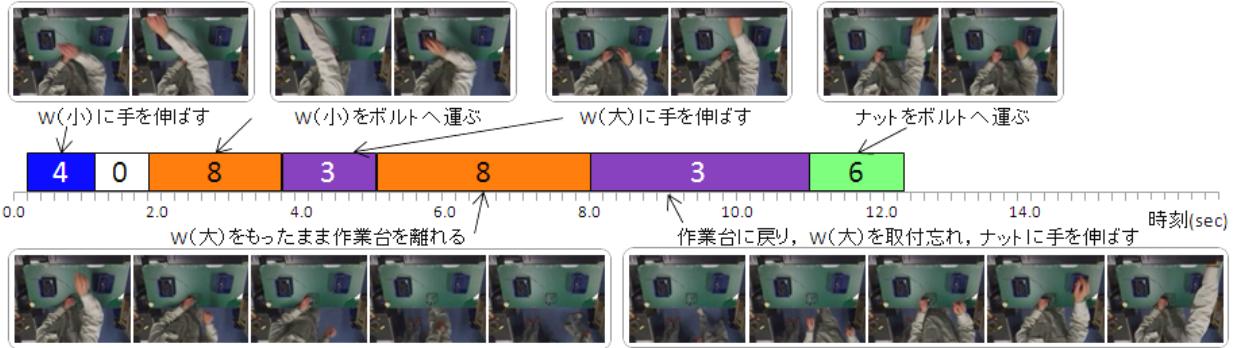


図8 映像の分割と動作シーケンスの獲得

に手を伸ばす」人に話しかけられ「ワッシャー（大）をもったまま作業台を離れる」「作業台に戻り、ワッシャー（大）を取り付け忘れ、ナットに手を伸ばす」「ナットをボルトに運ぶ」となり、正しい作業と異なる動きが入ったことがわかる。このNG作業も、従来のスイッチセンサのみのシステムでは検出ができず問題となっていたが、動作シーケンスの評価を加えることで検出可能であることがわかる。

4.3 ポカ検出の精度評価

正しい作業データの動作シーケンスを予め登録し、評価する作業データの動作シーケンスとの類似度に対して閾値判定することで、ポカ検出を行う。

ここでは、正しい作業として登録した動作シーケンスはある作業者の1つのOK作業データを用いた。そして、各作業者の予め正否がわかっている各作業データ（OK作業データ、NG作業データ）に対して、ポカ検出処理を行い、ポカを含まないOK作業かポカを含むNG作業かを判定し、評価する。ポカの未検出率、過検出率を評価する。判定した結果を表1に示す。作業映像が動作単位に正しく分割されたことは目視により確認した。

OK作業データ80件に対して、76件がOK作業と正しく判定され、正解率は95%であった。4名の作業者別の正解率は、それぞれ90%、95%、100%、95%であり、作業者の個人差による影響は見られなかった。登録した動作シーケンスの作業者と異なる作業者でもポカ検出可能であることがわかる。ここでは、動きに対する評価しており、各動作の時間が異なっても正しく評価できることが、作業者の変化や動作時間のばらつきを吸収したと考えられる。動作シーケンスは、動作の時間の情報を含んでいるため、時間の評価も可能である。

OK作業データがNG作業と過検出された原因是、部品を落したり、部品を取り損ね2度部品箱に入れたりといった例外的な動きが入ったためであった。これらは標準作業として定められた作業から外れ、NG作業として判定され

るものである。部品の落下や部品の取り損ねは、ポカにつながる動作である。部品を取りやすい位置に部品箱を移すことや部品箱を変えるなどなど改善の材料となる情報になると考えられる。

NG作業データ12件すべてにおいてNG作業と正しく判定され、未検出率は0%であった。ポカよけシステムでは、ポカを含むNG作業が誤ってOK作業と判定され、不良が流れることは許されない。つまり、NG作業データがOK作業と誤判定される未検出率が0%であることが重要である。ここでは、従来のスイッチセンサのみを用いたシステムでは検出が難しいポカの検出も可能であることを確認した。

5.まとめ

製造業の組立工程における人の作業に対する品質の向上を目的として、カメラ映像を用い、作業者の動作を評価することで人為的な作業ミスであるポカを検出するポカよけシステムを提案した。昨年度行った「締め付け」作業等の単純な反復作業を対象とする作業ミス検出手法を、複数の独立した動作の組合せからなる汎用的な作業に適用できるよう拡張した。また、実際の組立作業を想定した映像に対して実験を行い、従来のスイッチセンサのみを用いたシステムでは検出が難しいポカの検出が可能である結果を得た。今後は、実際の製造現場に適用し、提案手法の「ポカよけ」への有用性について検討を行う。

文 献

- [1] 平野裕之，“品質保証と自働化”，日刊工業新聞社，2001.
- [2] 藤田彰久，“IEの基礎”，建帛社，1997.
- [3] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation", Proc.ICPR, 2004.
- [4] 清水早苗, 平湯秀和, 浅井博次, “映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発 - 締め付け作業への適用 - ”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第10号, pp.1-6, 2007.

表1 実験結果

入力	OK作業データ	80	判定結果	
			OK作業	NG作業
OK	OK作業データ	80	76	4
NG	NG作業データ	12	0	12

作業動作カイゼンのための作業負担定量化手法の検討

浅井 博次 渡辺 博己 山田 俊郎

Study on Quantification of Physical Load for the Motion Improvement

Hirotsugu ASAI Hiroki WATANABE Toshio YAMADA

あらまし 多くの作業労働者を必要とする製造業では、急激な少子高齢化による労働力不足が懸念されており、労働力の確保と高齢労働者が健康に働くための対策は非常に重要な課題である。我々は、作業者の身体にとって負担の低い作業を実現することがこれらの課題に有効であると考え、作業における筋肉の筋張力（筋肉の発生力）のデータに基づいて身体への負担を定量化し、作業動作カイゼンの効率化に繋げることを提案している。提案手法では、作業動作の計測が不可欠であるが、制約の多い製造現場では多方向から隠れのない作業者の映像を撮影することが困難なため、計測ができない場合が多い。そこで、本年度は、作業映像の隠れに対応可能なモーションキャプチャソフトの導入によりこの課題を解決し、製造現場へ適用可能な作業動作計測を実現した。また、提案する負荷定量化手法を実際の組み立て作業に適用し、作業負荷定量化検討を行い、提案手法の可能性を示した。

キーワード 改善、作業負担定量化、筋張力

1. はじめに

1. 1 背景

急激な少子高齢化の進行に伴い、2005年頃から、日本は人口減少時代に突入した（図1）。労働力人口も減少の一途をたどっており、2009年統計データ^[2]によると、労働力人口比率は6割を切った。パート、派遣、フリーターなど近年の就業形態の多様化の進行に併せ鑑みると、実態は更に低くなると思われ、近い将来、深刻な労働力不足に陥ることが懸念されている。

少子高齢化の影響は労働者の年齢構成にも顕著に表れている。図2、表1に示すように、近年、高齢労働者の比率が急激に増加している。今後、更にこの傾向が強まっていくことが予想される。

多くの作業労働者を必要とする製造業にとって、労働力の確保は非常に重要な課題である。限られた労働力を確保し、有効に活用するために、作業者の身体にとって負担の低い作業の実現により、高齢労働者をはじめとした作業者が働きやすい製造現場を実現することが強く望まれている。

1. 2 作業負担の定量化

作業者の身体にとって負担の低い作業を実現するためには、作業による作業者の疲労（作業負担）の現状を把握する必要がある。直接疲労を測る方法はないため、一般的には、身体負荷を指標として利用している。身体負荷を計測する既存手法としては、観察により姿勢を分類して身体負荷を解析するOWAS法^[3]・RULA法、表面筋電図により筋活動をモニターする手法などがある。しかし、

観察による手法では作業姿勢を大まかな姿勢に分類して評価を行うため、細かな姿勢の違いに対応できない。

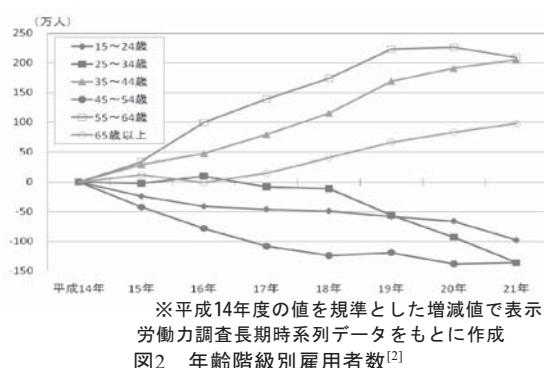
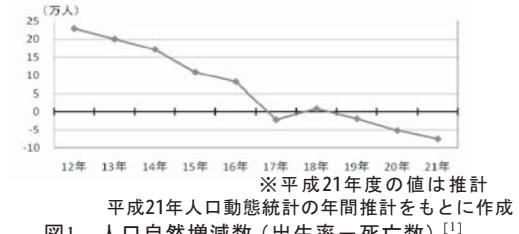


表1 年度毎の年齢階級別雇用者比率 (%)^[2]

	15~24歳	25~34歳	35~44歳	45~54歳	55~64歳	65歳以上
14年	11.3	25.2	21.0	23.9	14.5	4.1
15年	10.8	25.1	21.5	23.1	15.1	4.4
16年	10.5	25.2	21.7	22.3	16.3	4.1
17年	10.3	24.7	22.2	21.6	16.9	4.4
18年	10.1	24.3	22.5	21.0	17.3	4.8
19年	9.8	23.2	23.2	20.8	17.9	5.2
20年	9.7	22.6	23.7	20.5	18.1	5.5
21年	9.2	22.1	24.2	20.8	17.9	5.8

労働力調査長期間系列データをもとに作成

また、表面筋電図は定量的な評価が困難であり、解析にも高度な知識が要求される。

そこで、我々は、筋骨格モデルを用いて身体負荷を定量化・可視化することで作業負担を定量化することを提案している^[4]。筋骨格モデルとは、人の身体を筋肉、骨格レベルまでモデル化したものである。姿勢（動作）と人の属性（身長・体重・性別など）から各筋肉の筋張力（筋肉の発生力）や関節間力などを計算できる。筋張力は筋肉の負荷を表していると考えることができるところから、提案手法では、筋張力データに基づいて作業負担を定量化する。筋肉毎の筋張力データから疲労部位の特定・推定が可能であること、細かな姿勢の違いにも対応可能であること、保持姿勢の評価や動作速度を考慮した評価が可能であることなどから既存手法と比べて詳細な作業負担の解析を行うことができる。また、作業動作に同期して、人体モデル上に身体負荷状況を可視化できるため、専門的な知識がなくても作業負担を直感的に理解できる利点もある。図3に筋骨格モデルによる解析イメージを示す。

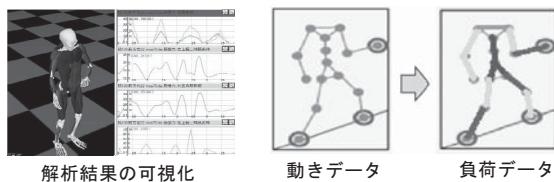


図3 筋骨格モデルによる解析イメージ

本年度は、作業映像の隠れに対応可能なモーションキャプチャソフトの導入により、製造現場へ適用可能な作業動作計測を実現したので報告する。また、提案する身体負荷定量化手法の適用例として、実際の組み立て作業に適用した事例について紹介する。

2. 製造現場への適用に向けた検討

図4に筋骨格モデルを用いて作業負担を定量化する手順を示す。

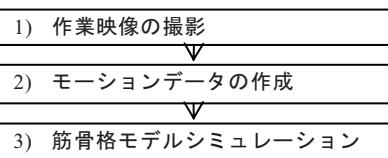


図4 筋骨格モデルによる身体負荷定量化手順

筋骨格モデルを用いた解析を行うためには、モーションキャプチャ装置を用いて対象となる作業者の動きを計測する必要がある。一般的なモーションキャプチャ装置では、全身に多数のマーカーを装着した計測対象者を多数のカメラを用いて多方向から撮影することで対象者の動きを計測する。装着されたすべてのマーカーが常に2つ以上のカメラに撮影されていないと正しく計測することができない。撮影対象を隠してしまうような障害物がない広い撮影スペースが必要となるため、撮影環境の整

備が容易な専用スタジオを利用した計測が一般的である。しかしながら、カイゼン等により作業環境に変更があるたびに製造現場と同様の環境を構築して作業動作計測をする必要があるなど、動作計測に大きなコストがかかりてしまう。一方、実際の製造現場では、広い撮影スペースの確保が困難であり、カメラを設置できる場所も限られているため、作業者の隠れがない映像の取得はほぼ不可能であり、作業者の隠れがある映像を前提とした作業動作計測手法が必要とされる。

そこで、我々は、内部に人体モデルを持ったモーションキャプチャソフトPV STUDIO 3Dを利用することでこれらの問題を解決し、制約の多い製造現場での作業動作計測を可能とした。本ソフトは、マーカーの一部が隠れにより正しく計測されない場合でも、内部の人体モデルを活用することで姿勢を推定することが可能である。また、2台のビデオカメラによる作業動作映像のみから動作生成が可能であるため、あまり大きな撮影スペースを必要としない。計測対象へのマーカー装着も必須ではないため、作業者への負担も小さい。

3. 適用事例

提案手法を製造業の組み立て現場における単純繰り返し軽作業に適用し、身体負荷の定量化を試みた。軽作業において最も主要な症状が腰痛であることから、腰痛と深い関係があると言われている3つの筋肉（脊柱起立筋、腸腰筋、腹斜筋）を解析対象とした。脊柱起立筋は脊柱を支える筋肉、腸腰筋は姿勢維持に重要な筋肉である。腹斜筋は体の捻りや曲げを担当する筋肉だが、現代社会では使用頻度が低く、機能不全になりやすい。腹斜筋が機能不全になると、体の安定性が低下し、捻った姿勢がもろくなることから、ちょっとしたことで腰を痛めるようになる。また、姿勢保持に関わる他の筋肉に大きな負担がかかることから、腰痛の原因になりやすい。

作業者属性による負担の違いの一例として作業者の体重の違いによる比較を、また、姿勢による負担の違いの一例として正しい姿勢と不良姿勢との比較を行った。長期間継続される軽作業では、継続的な負担を把握することが重要と考え、解析には定型作業1サイクル間の筋肉の緊張力の平均、および標準偏差を用いた。

3. 1 体重差による比較

組み立て現場で計測した同じ作業動作に対し、作業者の体重の違いがどのように負担に影響するかを比較するため、身長150cm、年齢30歳の男性作業者について、体重60Kgと80Kgの2設定でシミュレーションを行った。結

表2 体重の違いによる筋張力の比較

	平均(N)		標準偏差(N)	
	60Kg	80Kg	60Kg	80Kg
脊柱起立筋	69.03	91.42	120.77	162.96
腸腰筋	121.41	146.43	65.61	82.48
腹斜筋	332.25	450.62	444.36	601.79

果を表2に示す。

体重が重いほうが、すべての筋肉で平均、標準偏差とも筋負担が大きいという結果であった。これにより、体重が重い作業者ほど、腰痛関連筋肉への負担が増加するという傾向があることがわかる。

3. 2 姿勢による比較

長時間継続される作業では、姿勢の影響が大きいと考えられる。そこで、腰痛の主要な原因の一つとされている不良姿勢「反り腰」を例にとり、正しい姿勢との比較を行った。「反り腰」とは、背骨のS時カーブが過剰に曲がっている姿勢のことである。骨盤が前傾して腰に大きな負担がかかる。長時間の立ち作業やハイヒールの多用などでよく見られ、主な原因は背筋と腹筋とのアンバランスだと言われている。

組み立て現場で計測したモーションデータをもとに、正しい姿勢での作業データと不良姿勢である反り腰での作業データを作成し、姿勢の違いがどのように筋負担に影響するかを比較した。身長150cm、体重60Kg、年齢30歳の男性作業者について、シミュレーションを行った結果を表3に示す。

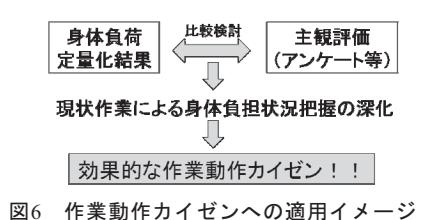
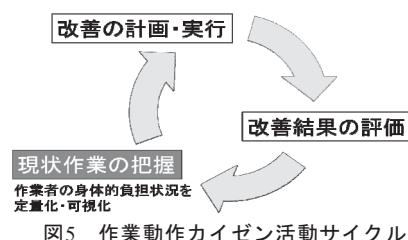
表3 姿勢の違いによる筋張力の比較

	平均(N)		標準偏差(N)	
	通常	反り腰	通常	反り腰
脊柱起立筋	69.03	27.57	120.77	64.45
腸腰筋	121.41	99.69	65.61	39.42
腹斜筋	332.25	200.94	444.36	233.65

反り腰のほうが、すべての筋肉で平均、標準偏差とも筋負担が大幅に小さくなっていることが分かる。特に、脊柱を支える脊柱起立筋が半減している。反り腰が癪になっていると、長時間にわたり姿勢保持に関わるこれらの筋肉への負担が減る、つまり、楽をさせていることになる。結果として、筋肉の機能が低下し、腰痛を誘発するものと考えられる。

4. 作業動作カイゼンへの適用

一般的なカイゼンサイクル同様、作業動作カイゼンにおいても図5のカイゼンサイクルを回し続けることが最も重要である。図6に示すように、提案手法により定量化



された身体負荷データとアンケート等による作業者の主観評価とを比較することで、作業による身体的負担状況の把握が深まり、より正しい現状把握に基づいてカイゼンサイクルを回すことで、効果的な作業動作カイゼンが実現できるものと考えている。

筋骨格モデルによる身体負荷定量化のメリットを活かした作業動作カイゼン項目の案を以下に挙げる。

- 身体負荷の可視化によるカイゼンモチベーションの向上
既知の不良姿勢などによる身体負荷を可視化し、作業者へ提示することで、カイゼンへのモチベーション向上に活用する
- 疲労部位特定による作業動作カイゼンの効率化
- 負荷の継続、繰り返しを考慮した作業動作カイゼン
筋肉単位で疲労と休息による回復を考慮し、作業環境のレイアウト改善、作業ローテーション改善、作業者ローテーション改善に活用する
- 作業者属性に応じた作業動作カイゼン
同一作業における作業者属性（性別、体重など）による作業負荷の違い（傾向）を作業動作カイゼンに活用する

4.まとめ

作業映像の隠れに対応可能なモーションキャプチャソフトの導入により、製造現場へ適用可能な作業動作計測を実現した。また、提案する負荷定量化手法を実際の組み立て作業に適用し、作業負荷定量化検討を行い、提案手法の可能性を示した。

労働力の確保や増加する高齢労働者対策として、「作業者に選ばれる職場づくり」、「健康に仕事をやり続けられる職場づくり」の必要性はますます増加していくものと考えられる。本研究では、身体負担に着目して疲労の定量化を行ったが、このような客観的指標で評価した疲労の度合いと、実際に感じる疲労感とは、かい離することが多い。そのため、今後は、精神的疲労も含め、総合的に疲労を定量化することが重要になる。

謝 辞

本システムへの助言や現場提供等、御支援・御協力を頂きました皆様に感謝致します。

文 献

- [1] 厚生労働省、平成21年人口動態統計の年間推計
- [2] 総務省、労働力調査、総務省ホームページ、2010.
- [3] <http://homepage2.nifty.com/aseo/owas.htm>、2010.3参照
- [4] 大野尚則，“身体への優しさを重視した作業動作カイゼン手法に関する研究開発”，岐阜県情報技術研究所研究報告第10号、pp.15-19、2009.

三次元計測器による鏡面を利用した形状測定

平湯 秀和

The Shape Measurement by Three-Dimensional Measuring Instrument Using Specular Plane

Hidekazu HIRAYU

あらまし 型設計や意匠デザイン等において、製品や意匠品のモデルから三次元形状データを作成するために、非接触三次元計測器が用いられる。しかしながら、計測物の表面の凹凸により隠れが存在する場合や対象物全周の三次元形状データが必要な場合は1回の計測すべての領域を網羅することは困難である。その解決方法として、現状では、専用ターンテーブルやマーカ等を用いる手法が現場では使われているが、計測物の大きさ制限やマーカを同時に計測する必要があるなど、効率的に計測する手法が未だに確立されていない。そこで、本研究では非接触三次元計測器と鏡面を使用することで専用ターンテーブルやマーカ等を使用することなく、1回の計測で効率良く計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行う。具体的には、計測物を非接触三次元計測器で直接測定すると同時に、直接測定できない領域に対して、鏡面を適切に配置することで間接的に計測を行う。その結果、計測物も三次元計測器も移動させることなく計測を行うことが可能となり、1回の計測で三次元形状データの取得が可能となった。

キーワード 三次元計測器、三次元モデリング、鏡面ミラー、デジタルエンジニアリング

1.はじめに

プレス成型品等の素形材製品の型設計や意匠デザイン、品質検査等において、デジタルデータを活用することは、効率化を図る上で非常に有効な手段である。そのため、製品や意匠品のモデルから型設計に必要な三次元形状データを効率的に作成することが重要であり、製造分野等の現場では、それらの三次元形状データの取得が可能な三次元計測器が用いられている。

一般的に三次元計測器には、プローブを計測物に接触させて計測する接触式とレーザ光等を計測物の表面に照射し反射した情報から三次元計測を行う非接触式がある。接触式は精度良く計測することが可能であるが一つ一つの三次元データの取得に非常に時間がかかる。一方、非接触式は計測精度が接触式には劣るが一回の計測で大量に三次元データが取得可能であるため、計測に要する時間が少ない。そのため、対象物全体の三次元形状データの取得には効率の良い非接触三次元計測器が多く用いられることが多い。しかしながら、非接触三次元計測器は、計測物の表面の凹凸により隠れが存在する場合や対象物全周の三次元形状データが必要な場合は1回の計測すべての領域を網羅することは困難である。

その対処方法として、専用のターンテーブルを使用し多方向から測定する手法と、マーカを計測物に貼り付け、マーカを対応点として多方向から測定する二つの手法が

ある。しかしながら、専用ターンテーブルを用いる手法は巨大もしくは荷重のある計測物や固定されて移動することが困難な計測物を測定することは困難である。また、マーカを用いる手法はマーカを貼った領域は計測できず、またマーカを同時に計測する必要がある。そのために、未だに非接触三次元計測器で効率的に計測する手法は確立されていない。

そこで、本研究では非接触三次元計測器と鏡面を使用することで専用ターンテーブルやマーカ等を使用することなく、1回の計測で計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行った。具体的には、計測物を非接触三次元計測器で直接測定すると同時に、直接測定できない領域に対して、鏡面を適切に配置することで間接的に計測を行った。また、実験により本手法の有効性の検討を図った。

2.システム構成

本研究におけるシステム構成を図1に示す。システムは計測器と計測物の直接計測できない領域を映すミラーから構成される。計測原理としては、通常、計測可能な領域については直接計測を行うが、直接計測できない領域についてはミラーを適切に配置することで間接的に計測する。つまり、三次元計測器により照射されたレーザ光がミラーにより鏡面反射し、計測物の直接計測のできな

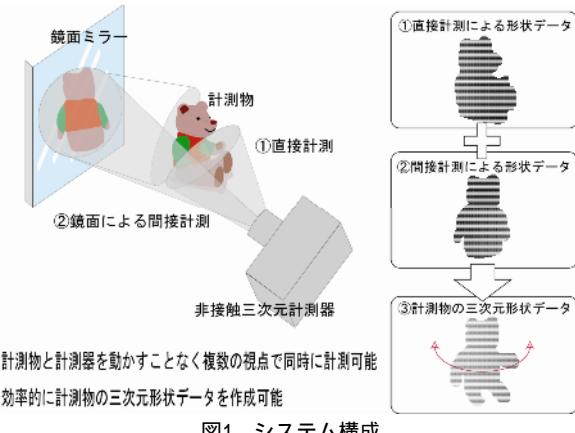


図1 システム構成

い領域に投影され、同じ光路を通り、三次元計測器に反射光として戻るという原理で間接計測する。

2.1 鏡面により間接計測された三次元点の変換

直接計測された三次元点も間接計測された三次元点も同じ三次元計測器の座標系で表現されているが、間接計測された三次元点は鏡面反射により得られた三次元データであるため、直接計測された三次元点とは本来の座標系は異なる。そこで、直接計測された三次元点と間接計測された三次元点を一つの三次元形状データとして作成するためには、同じ座標系に変換する必要がある。

図2に示すとおり、鏡面反射により間接計測された三次元点は鏡を通して反対側に観測される。図2は円錐体を図の右方向から三次元計測器で測定した例であるが、鏡面ミラーは三次元計測器で直接測定できない円錐体の裏領域が鏡を通して見ることができるように配置した。この場合、図3に示すとおり、円錐体の裏領域は鏡面ミラーを通して計測されるため、裏領域の三次元点は鏡面領域の平面を対称にして測定される。従って、実在点 $P(x_p, y_p, z_p)$ は間接計測された三次元点 $Q(x_q, y_q, z_q)$ と鏡面領域の平面方程式 $ax + by + cz + d = 0$ より、

$$\begin{cases} x_p = as + x_q \\ y_p = bs + y_q \\ z_p = cs + z_q \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{但し}, s = -2 \frac{ax_q + by_q + cz_q + d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

と表すことができるため、直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能となる。

2.2 2平面で構成される鏡面ミラー

前節のとおり、三次元計測器の座標系における鏡面領域の平面方程式を求めることができれば、間接計測された三次元点も直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能である。しかしながら、鏡面ミラーは

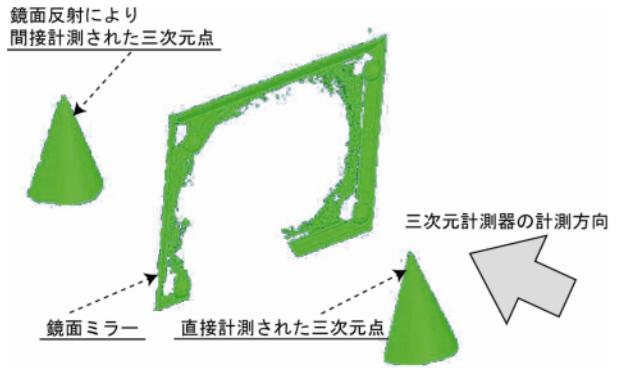


図2 円錐体を計測した結果例

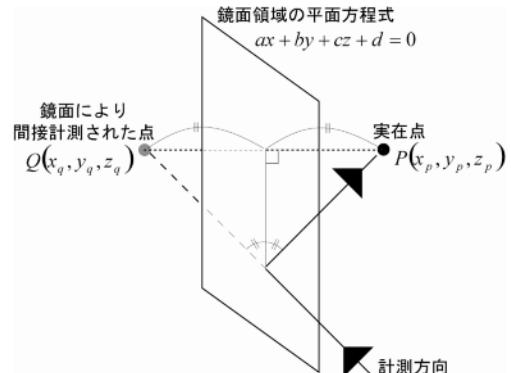


図3 間接計測された点と鏡面の関係

レーザ光を全反射するため、鏡面領域の平面方程式を直接求ることは非常に困難である。そこで、本研究では図4に示すとおり、鏡面部分と4つのターゲット球で構成された鏡面ミラーを使用することにより、4つのターゲット球で構成される平面を求める。その平面情報から鏡面領域の方程式の推定を行う。なお、4つのターゲット球は鏡面領域を遮ることがないようにミラーの四隅に配置した。また、ターゲット球は実際に三次元計測器のマーカとして使用される精度の良い球面で構成されたものを使用した。

まず、鏡面ミラーに対して、反射防止スプレーを塗布し、鏡面部分およびターゲット球を計測する。次に計測された4つのターゲット球に関して、それぞれの球に対してセグメンテーションを行い、得られた各領域に対して球面方程式

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (2)$$



図4 鏡面とターゲット球で構成された鏡面ミラー

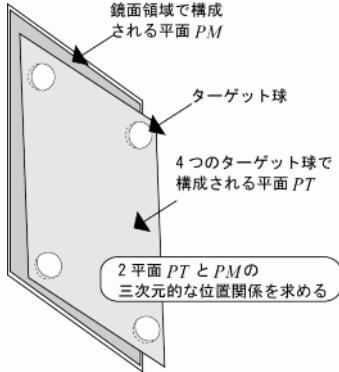


図5 2平面PTとPMで構成された鏡面ミラー

を当てはめ、各球の中心点を求める。ここで、 (x_c, y_c, z_c) はターゲット球の中心点、 r は球の半径を表す。そして、図5に示すとおり、得られた4点を基にターゲット球で構成される平面PTの平面方程式

$$a_t x + b_t y + c_t z + d_t = 0 \quad (3)$$

を求める^[1,2]。ここで、 a_t, b_t, c_t, d_t は平面PTの平面方程式のパラメータを表す。

次に鏡面部分に関して、平面であるという仮定を基に平面PMの平面方程式

$$a_m x + b_m y + c_m z + d_m = 0 \quad (4)$$

を求める。ここで、 a_m, b_m, c_m, d_m は平面PMの平面方程式のパラメータを表す。

2.3 鏡面の平面方程式の求め方

得られた2平面PT, PMの三次元的な位置関係を求めることができれば、間接計測時には、ターゲット球の三次元情報を用いて鏡面領域の平面方程式を推定することができ、結果として、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換することが可能となる。

そこで、2平面PT, PMの法線ベクトルをそれぞれT, Mとすると、2平面PT, PMの三次元座標軸上での傾き関係Rは、

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{M} \quad (5)$$

と表せる。ここで、Uは法線ベクトルTをワールド座標系のXYZ軸と一致させるように変換する回転行列を表す。

また、2平面間の並進関係は4つのターゲット球の重心 $G(x_g, y_g, z_g)$ と平面PM間のユークリッド距離で表される。ここでユークリッド距離lは、

$$l = \frac{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}}{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}} \quad (6)$$

となる。式(5)と式(6)が、鏡面ミラーにおいて、ターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係を示す。

次に間接計測時における鏡面領域の平面方程式は以下のように推定する。間接計測により計測された4つのターゲット球を通る平面方程式の法線ベクトルをT'とする。推定される鏡面領域の平面方程式 $a_m x + b_m y + c_m z + d_m = 0$ の法線ベクトル $\mathbf{M}' = (a_m, b_m, c_m)$ は

$$\mathbf{M}' = \mathbf{U}'^{-1} \mathbf{R} \quad (7)$$

となる。ここで、 \mathbf{U}'^{-1} は法線ベクトルT'をワールド座標系のXYZ軸と一致させるように変換する回転行列U'の逆行列を表す。

また、推定される鏡面領域の平面方程式のパラメータ d_m は、

$$d_m = -\left(a_m x_g + b_m y_g + c_m z_g\right) - l \sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2} \quad (8)$$

となる。ここで、 x_g, y_g, z_g は4つのターゲット球の重心 $G(x_g, y_g, z_g)$ を示す。

(7)式および(8)式を用いて鏡面領域の平面方程式を推定し、(1)式に適用することで、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換される。

3. 実験

本手法の有効性を検討するため、図4の鏡面ミラーにおいて、ターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係の推定を行った後、球体、円錐体、立方体の3種類の計測物に対して形状計測を行った。なお、鏡面ミラーは、図6のとおり、直接計測と間接計測が同時にできるように配置した。

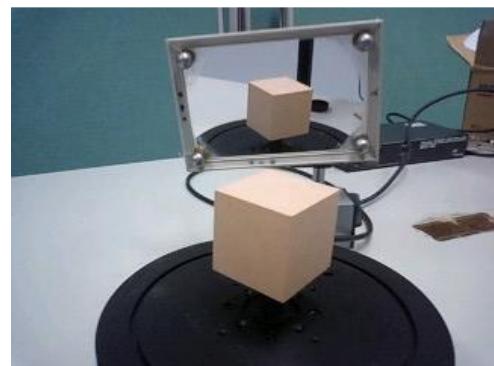


図6 実験の様子（三次元計測器側より撮影）

3.1 実験方法

本研究では非接触三次元計測器として、KONICA MINOLTA製RANGE7^[3]を使用した。RANGE7は計測物に660nmの半導体レーザ光を当て、反射した情報を基に表面形状を計測することが可能な計測器である。本機器の諸元を表1に示す。

実験では、それぞれの計測したデータにおいて、ターゲット球のみ手動で選択し、2.3節の方法で鏡面領域の平面方程式を推定した。これにより、間接計測された三次元点は直接計測された三次元点と同じ座標系に変換される。次に、統合された三次元点に関して、それぞれの形状（球体、円錐体、立方体）に当てはめ、実測値との比較を行った。本研究では、実測値は専用ターンテーブルを用いた三次元データ取得方法で得られた三次元形状とし、取得方法はRANGE7を用いて計測物を全周45°刻み（8方向）で測定し、それぞれの形状に当てはめた結果を用いた。比較する項目に関しては表2に示す。また、直接計測のみによる形状の当てはめと実測値との比較も行うことで本手法による誤差と形状の当てはめによる誤差との比較も行う。

3.2 実験結果

球体、円錐体、立方体のそれぞれの計測した三次元点の表示例を図7、図8、図9に示す。

図4の鏡面ミラーにおけるターゲット球で構成される平面と鏡面領域の平面間の三次元的な位置関係の推定結果（式(5)の R 、式(6)の l ）は $R = (0.2274, 0.3754, -0.8985)$, $l = 7.8901$ である。表2の比較項目に基づき、実測値との比較結果を表3に示す。表3において、間接計測補正とは間接計測された三次元点を直接計測された三次元点と同じ座標系に変換した三次元点群のことである。

表3のとおり、球体や円錐体の中心位置や半径において、間接計測補正や統合結果と実測値との差が1.5mm未満であり、円錐体や立方体における角度差も0.5°未満であることから、本手法の有効性を示すことができた。球体や円錐体の中心位置のユークリッド距離に関して、間接計測補正における誤差が大きい理由としては、式(4)の鏡面

表1 非接触三次元計測器の諸元

KONICA MINOLTA製 RANGE7	
測定方式	三角測量 レーザ光切断方式
撮像画素数	131万画素 (1280 × 1024)
測定距離	450mm ~ 800mm
測定範囲	267 × 334 × 194mm (WIDEレンズで測定距離800mm時)
確度 (球間距離)	± 40 μm
精度 (Z,)	4 μm

表2 比較項目

球体	中心(x,y,z)の位置、半径の長さ
円錐体	頂点(x,y,z)の位置、主軸(x,y,z)の傾き、角度
立方体	二つの側面の外積と上面との角度差

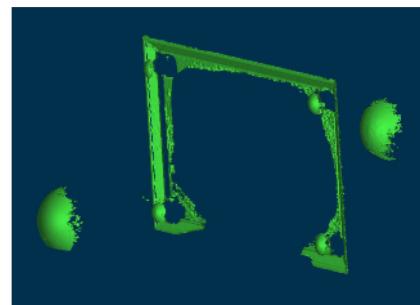


図7 球体の計測結果の例

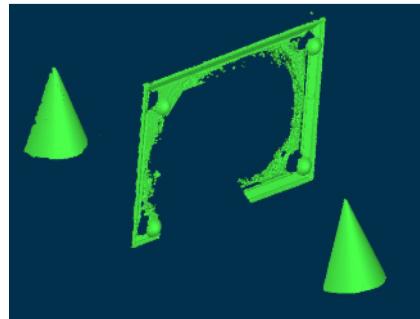


図8 円錐体の計測結果の例

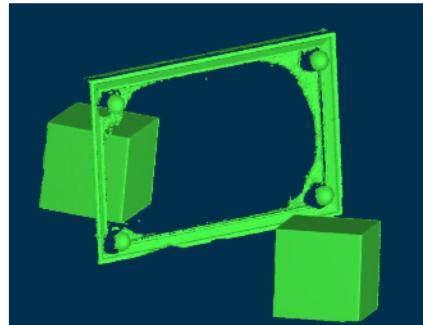


図9 立方体の計測結果の例

領域における平面方程式の推定精度が低いことが挙げられる。鏡面に対して反射防止スプレーを塗布した鏡面領域に対して平面当てはめをし、その誤差を可視化した結果を図10に示す。図10の白い領域は誤差が0.16 ~ 0.24mmを示しているが、平面に対して最大0.34mm程度の当てはめ誤差が存在する。これはスプレーを一様に塗布できなかったため平面に凹凸が生じ、平面当てはめに誤差が生じた結果である。

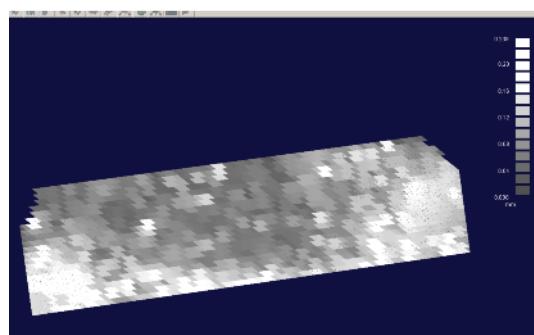


図10 鏡面領域の当てはめ誤差

4 .まとめ

非接触三次元計測器と鏡面を使用することでターンテーブルやマーカー等を使用することなく、効率良く計測物の三次元形状データを取得する手法の検討を行った。また、実験により本手法の有効性を示すことができた。

今後の課題としては、鏡面領域の平面推定誤差について検討が必要である。

謝 辞

本事業を遂行するにあたり、非接触三次元計測器購入のための補助金を頂いた財団法人JKAに深く感謝いたします。

文 献

- [1] S.Kaveti,E.K.Teo,H.Wang:"Second-order Implicit Polynomials For Segmentation of Range Images", Pattern Recognition, Vol.29,No.6,pp.937-949,1996.
- [2] D. Keren, C. Gotsman:"Fitting Curves and Surfaces With Constrained Implicit Polynomials", IEEE Trans. PAMI, Vol.21, No.1, PP.31-41, 1999.
- [3] "KONICA MINOLTA RANGE7" ,<http://konicaminolta.jp/instruments/products/3d/range7/index.html>

表3 実験結果

		中心(mm)				半径 (mm)
		X	Y	Z	ユークリッド距離	
球体	実測値	-0.4207	85.7837	-0.7381		18.9061
	直接計測	-0.4987	85.7444	-0.8937		19.0419
	残差	-0.078	-0.0393	-0.1556	0.1784372	0.1358
	間接計測補正	-0.2077	86.8209	-0.9045		18.985
	残差	0.213	1.0372	-0.1664	1.0718404	0.0789
	直接および間接計測の統合	-0.4105	85.98	-0.944		19.0634
	残差	0.0102	0.1963	-0.2059	0.2846622	0.1573

		中心(mm)				主軸			角度 (°)
		X	Y	Z	ユークリッド距離	X	Y	Z	
円錐体	実測値	-3.2128	103.6891	-0.2323		0.0099	0.9993	0.0357	26.7501
	直接計測	-3.3024	104.0386	-0.3778		0.0099	0.9993	0.0362	26.7491
	残差	-0.0896	0.3495	-0.1455	0.3890356	0	0	0.0005	-0.001
	間接計測補正	-3.0941	105.0534	-0.6726		0.0064	0.9997	0.0224	26.7734
	残差	0.1187	1.3643	-0.4403	1.4384951	-0.0035	0.0004	-0.0133	0.0233
	直接および間接計測の統合	-3.2413	104.8325	-0.7774		0.0098	0.9995	0.0296	26.3882
	残差	-0.0285	1.1434	-0.5451	1.2670082	-0.0001	0.0002	-0.0061	-0.3619

		角度差(°)
立方体	実測値	
	2つの側面1と2の外積と上面	0.154856
	2つの側面3と4の外積と上面	0.15295
	直接および間接計測の統合	
	2つの側面1と2の外積と上面	0.17138
	残差	0.016524
	2つの側面3と4の外積と上面	0.243862
	残差	0.090913

搬送車インターフェース(ナビゲーション)システムの基礎研究

超音波フェーズドアレイによるビーム形成

田畠 克彦 横山 哲也

Basic Research of Navigation System for Automatic Guided Vehicle

- Beam Forming by Ultrasonic Sensor Array -

Katsuhiko TABATA Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 少子高齢化が進む中で労働人口が減少し、人材の確保がますます困難になってきている。このような状況の中で、シルバー人材や子育てを終えた女性等の復帰により労働力を確保することが期待されており、これらの新たな人材が復帰しやすい環境を整える必要がある。このため、労働の基本でありながら、重労働である搬送作業に着目し、一種のパワーアシストを目的とした、人に追従しながら自由な走行ルートを移動する無人搬送車の研究開発が様々な研究組織で行われている。本研究では超音波センサのみを用いた安価で簡便な無人搬送システムの開発を目指し、現状の超音波センサシステムの課題とこれらを解決するための超音波フェーズドアレイ技術を適用することを提案し、その1次元センサアレイ送信機の試作および基礎評価実験を行なった。その結果、指向性についてはセンサ単体の半減角程度までは超音波ビームを任意の方向に照射可能であること、利得については $\pm 40^\circ$ 程度まではセンサ単体における最大音圧に対して1.8倍程度の利得が得られることを確認した。

キーワード 超音波センサ、フェーズドアレイ、無人搬送車(AGV)

1.はじめに

1.1 背景

少子高齢化が進む中で労働人口が減少し、人材の確保がますます困難になってきている。厚生労働省の報道資料^[1]によれば、2004年から2015年における労働力人口の減少は400万人を超える、2030年には1000万人減少し、深刻な労働力不足に陥ることが報告されている。このような状況から、シルバー人材や子育てを終えた女性等の復帰により労働力を確保することが期待されているが、そのためには、これらの人材が復帰しやすい労働環境を整える必要がある。このため、労働の基本でありながら、重労働である搬送作業に着目し、一種のパワーアシストを目的とした搬送車の研究が行われている。このような搬送車は、台車のように人が押すタイプと人に追従するタイプが考えられるが、追従するタイプは将来的に無人搬送車を連結できるメリットがあるため、こちらのタイプの無人搬送車の研究開発の事例^[例えば、2~5]が多い。

現状における追従するタイプの無人搬送車は、紐・鎖などによる牽引や、超音波、赤外線、カメラ画像およびレーザーレンジファインダ、あるいは、これらを複合したセンサの計測などで人の追従を行っている。しかしながら、紐や鎖による牽引はシンプルで確実ではあるが、機構部を備えることから長時間使用における耐久性等で

課題となる。また、赤外光、レーザや画像を使用するには光環境の変化（検出部の汚れ等も含む）への対応や普及を想定した場合にコスト的な課題がある。一方、超音波センサは、低価格でほぼメンテナンスフリーであるため、コスト面や保守性の面で課題はないが、騒音などの外乱に弱いとされている。この課題に対しては、信号に特徴を持たせることで検出精度を向上させる手法^[5~7]や、スペクトラム拡散を利用して特定信号の抽出を行う信号処理手法^[8]が考案されている。そこで本研究では、用途に応じて適切な手法を検討・開発することで克服可能であると考え、超音波センサシステムを用いた追従(ナビゲーション)を目指す。

1.2 空気中超音波センサの課題と解決手法

超音波センサは、海中ソナー、魚群探知機、臓器や胎児の診断、金属や新素材（CFRP）の非破壊探傷検査、ならびにキャピテーション等の性質を利用した超音波洗浄等の多くの分野^[9, 10]で活躍している。

また、これまでの空気中における超音波センサの活用については、ドップラ効果を利用した風速計、超音波の反射による障害物の検出や音波の到来時間遅れを利用した距離計（最近では測位機能も付加）などが挙げられるが、無人搬送車等のロボットへの適用例としては障害物検知程度の機能しかなかった（図1(a)参照）。

しかしながら、現在はMEMS技術の発展、マイコンや

FPGAなどの組込デバイスの高機能化・高性能化に伴い、超音波による3Dイメージングや特定の人物に近接追従するロボットなどの開発事例も多くなっており、空気中においても、小型で高度な超音波センサシステムの開発が可能になってきている。

ここで、人に追従する無人搬送車に超音波センサを適用することを想定した場合、以下の課題が挙げられる。

課題1：死角がないこと

従来は、図1(a)に示すように、円筒形のロボット筐体の円周方向に対して超音波センサを配置し、センサ単体で超音波を送信、その反射波を受信している。このため、センサ単体の指向性により、角度や距離によっては死角が生じる。

課題2：雑音に強いこと

課題1のように、センサ単体で発する音圧でSN比が決定されるため、根本的にはセンサ出力を大きくする必要がある。これを補完するため、送信する超音波信号に特徴を持たせることで、特定の信号を抽出する手法がある^[5~8]。

課題3：追従する対象を分別できること

従来のように反射波を検出する場合には、常に対象物を捕捉している必要があるが、音波の空气中における伝搬速度は遅く、十分な時間分解能が得られず現実的ではない。このため、近年では特定のIDを含む変調信号を送信することで、発信源（対象）を特定する手法^[5, 8]が取られている。

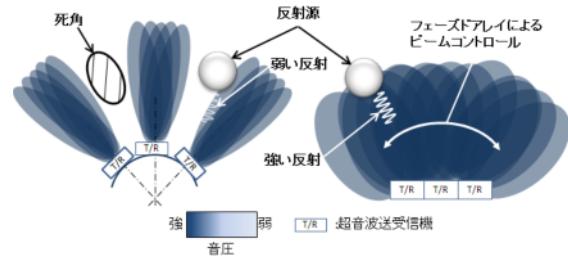
そこで、特に課題1および課題2を解決するために、図1(b)のように無人搬送車側に超音波センサを複数並べた超音波アレイを有する送信機を装備し、フェーズドアレイコントロールにより、瞬時に任意の方向に超音波ビームを形成し、照射する手法を提案する。

本稿では、実際に1次元の超音波センサアレイ送信機を試作し、本研究のキー技術となる空気中の超音波フェーズドアレイにおける送信信号を受信し、課題1を解決するためのビーム指向性測定と、課題2を解決するためのセンサ単体に対するビーム利得測定を行い、それらの測定試験結果について評価したので報告する。

2. 提案手法

フェーズドアレイ自体は、電波ではレーダ技術^[11]、超音波では金属配管の非破壊探傷検査等に使用されている波の性質を応用した一般に知られている技術であるが、空気を媒介とした超音波への適用例はほとんどない。

この技術は、図2のように各センサ素子から放出される超音波の位相をずらし、波の重ね合わせにより、ビーム照射方向を制御するので、ビームを任意の方向に照射できる。そのため、従来のセンサ単体の指向性による死角の出現を防ぐことができ、前述の課題1を解決できる。



(a) 従来手法 (b) 提案手法
図1 超音波検出方式の概念図

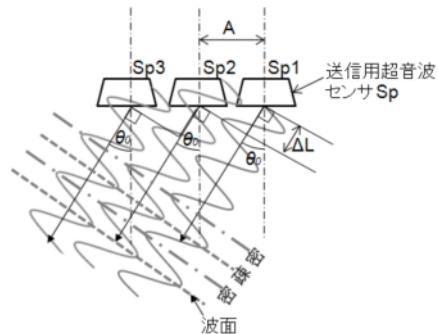


図2 フェーズドアレイの原理

また、生成される信号は、各センサ素子から送信される音波の重ね合わせとなるため、その利得によりSN比が向上し、課題2を改善することができる可能性がある。

課題3については、近年の手法と同様に、先導側に小型の超音波トランスポンダを装備し、これが無人搬送車側から送信される特定の超音波ID信号を感知した時のみ応答するようにし、追従すべきトランスポンダを見分けることを想定する^[5]。

3. フェーズドアレイによるビーム形成方法

本章では、超音波センサアレイによるビーム形成方法について説明した後、試作した超音波フェーズドアレイ送信機の構成等について述べる。

3.1 フェーズドアレイの原理

図2は、3つの1次元の超音波センサアレイの例である。超音波ビームを θ_0 方向に送信したい場合、この方向に対して超音波センサSp1～Sp3の波形の位相差をなくし、波面を形成することでビームの指向性をコントロールする。

このため、ある θ_0 におけるSp1とSp2、Sp2とSp3の行路差 ΔL は、次の式で表せる。

$$\Delta L = A \sin \theta_0 \quad (1)$$

ここで、Aはアレイの間隔[m]である。また、 ΔL だけ進む時間差を Δt とすると、次の式で表せる。

$$\Delta t = \Delta L/c \quad (2)$$

ここでc [m/s]はある気温T[]における音速で、

$$c = 331.45 + 0.61T \quad (3)$$

で表せる。

よって、(2)式の Δt だけ $Sp1(Sp2)$ と $Sp2(Sp3)$ の送信タイミングを遅らすことにより、任意の方向 θ_0 に超音波の波面(ビーム)を照射することができる。

3.2 フェーズドアレイ送信機の試作

図3に本研究で試作した超音波フェーズドアレイ送信機のブロック図を示す。図中の点線内が該当部で、5つの超音波センサを一次元に整列させており、その間隔Aは、外径16mmのセンサをユニバーサル基板に実装する都合上、17.78mmとした。また、FPGAボードでそれぞれのセンサ素子の励振タイミングを制御し、位相コントロールを行った。超音波センサへの励振信号は図のように3.3Vの矩形波とし、増幅器により12.0Vに増幅した。なお、FPGA内のクロックは50MHzで動作しているため、20nsecの分解能で位相コントロールが可能であり、その量子化位相誤差は、 $\pm 0.144^\circ$ ($= \pm 180/1250$ 分割(11bit))となる。

ここで、送信機の試作で使用した送信用超音波センサは、日本セラミック株式会社のT40-16で、共振周波数が40KHz、指向性が半減(-6dB)半角で $\pm 27.5^\circ$ であり、圧電素子を用いたユニモルフ構造のスピーカである。

また、FPGAボードは(株)イーエスピー企画のCQBB-IMG(FPGAはXilinx社のXC3S1200E)を用いた。このボードは各種マイコンを増設可能であるため、将来的に測位等を行う受信システムを組み込むことを想定している。

4. 超音波ビーム計測実験

本章では、第3章で試作した超音波フェーズドアレイ送信機の指向性および単体センサに対する利得を測定したので、実験構成とその結果を示す。

4.1 実験方法

実験の測定方法を図3に示す。センサアレイ中心に位置する超音波センサ $Sp3$ に正対させるように受信用超音波センサMic(日本セラミック(株)R40-16)も送信用超音波センサと同じ仕様である。

空間的な配置は図4および図5のように、回転ステージの回転中心上に超音波センサ $Sp3$ のスピーカ振動子の中心が位置するように製作し、送受信センサ間の距離は超音波センサメーカーの測定試験と同じ300mm一定とした。

これにより、ある方向 θ_0 に超音波ビームを形成し、回転ステージにより送受信センサ間の相対角度 θ_{TR} を変化させながら、受信センサの電圧を計測することで指向性を把握できる。

以降に、1章で述べた課題1を解決する死角がないビーム指向性の測定結果と、課題2を改善する単一センサに対する信号利得の結果を示す。

4.2 ビーム指向性の実験結果

ビーム指向角 θ_0 を $0\sim40^\circ$ まで、 $5^\circ\sim10^\circ$ 間隔で変化させ、送受信センサ相対角 θ_{TR} を最小-60°～最大60°まで変化させて得られたビーム指向性を図6に示す。

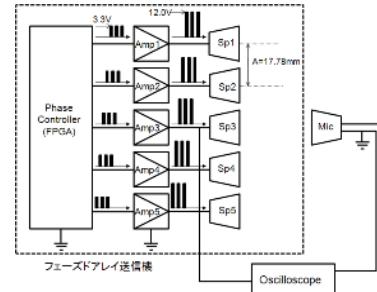


図3 超音波フェーズドアレイ送信機構成と測定方法

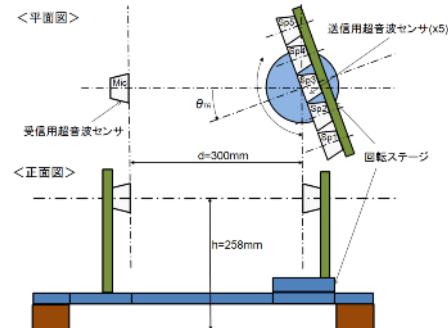


図4 実験構成(空間配置)

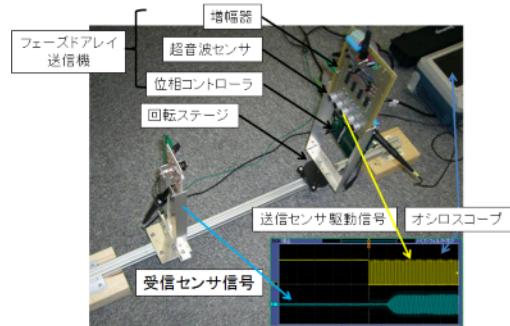


図5 実験系の写真

なお、本図の縦軸の利得 $G_{5sp}[\text{dB}]$ は、フェーズドアレイ送信機を用いた時のビーム指向角 $\theta_0=0^\circ$ および相対角 $\theta_{TR}=0^\circ$ における受信波最大電圧振幅 $V_{5sp}(\theta_0=0^\circ, \theta_{TR}=0^\circ)[\text{V}]$ に対する各測定時の θ_0 および θ_{TR} における受信波の最大電圧振幅 $V_{5sp}(\theta_0, \theta_{TR})[\text{V}]$ の利得であり、次の式で定義する。

$$G_{5sp} = 20 \log_{10} (V_{5sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{5sp}(\theta_0=0^\circ, \theta_{TR}=0^\circ)) [\text{dB}] \quad (4)$$

図6では、ビーム角 θ_0 以外の角度においても、利得の極大値が発生していることがわかる。これらは、グレーティングロープや量子化ロープと呼ばれるサイドロープである。

グレーティングロープは、一波長の位相ずれが発生すると位相が揃い、波面が形成されるために発生するもので、その発生角 θ_{gn} は、(1)式において波長ずれを考慮するとの式となる。

$$\Delta L \pm n\lambda = A \sin \theta_{gn}$$

$$\theta_{gn} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm n\lambda/A) \quad (n = 0, 1, \dots) \quad (5)$$

ここで、 $\lambda[\text{m}]$ は超音波の波長であり、 n は()内の計算式が

-1から1で取りうる整数であり、 $n=0$ がメインロープを示す。

また、量子化ロープは3.節で示した量子化位相誤差によって発生するサイドロープとして知られており^[11]、比較的大きな1次の量子化ロープが発生する角度 θ_q は次式で表される。

$$\theta_q = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm \lambda/(2A)) \quad (6)$$

上述の2つの1次サイドロープの発生角度を図6のグラフの上部および縦線を用いて図示する。

図よりビーム指向角 $\theta_0 = 20^\circ$ までは、ほぼ意図した方向にビームのメインロープが発生しているが、 $\theta_0 = 30^\circ$ を超えると、意図した方向にはメインロープが発生していないことがわかる。

また、サイドロープの発生角度についても、送受信機超音波センサの相対角 θ_{TR} が大きくなるにつれ、理論値からのずれが大きくなる傾向がある。さらに、その利得も、相対角 θ_{TR} が小さい位置に発生するサイドロープはメインロープより大きくなる傾向が見られた。

これらの現象が発生する要因の一つとして、超音波センサ単体の指向性が半減半角で $\pm 27.5^\circ$ であるが、指向角が大きくなると十分な音圧が出力されずに計算式通りの方向制御が困難になっていると考えられる。

したがって、このフェーズドアレイ送信機の実験結果では、 $\pm 20^\circ$ 程度までのビーム走査が限界であるが、指向性の低いセンサ素子を使用することで、走査角を広げることができると考える。

4.3 単体センサに対するビーム利得の実験結果

本実験で得られた5個の超音波センサアレイの受信波最大電圧振幅に対し、1個の超音波センサに対する利得 G_{1sp} を求めた。ここで、利得 G_{1sp} は次の式で表される。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{5sp(\theta_0, \theta_{TR})} / V_{1sp(\theta_{TR}=0)}) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

ここで、 $V_{1sp(\theta_{TR}=0)}$ は、図4においてセンサアレイの中心にある1個の超音波センサSp3のみを、 $\theta_{TR}=0$ の条件で励振させた場合における受信センサの最大電圧振幅である。

この結果を図7に示す。ここで、ビームの指向角は、4.2節の結果により制御可能と考えられる $\theta_0=0, 5, 10, 20^\circ$ の4方向に走査した場合の結果をプロットしている。本図より、メインロープに関しては概ね5[dB](1.8倍)以上の利得が得られていることがわかる。

また、グレーティングロープや量子化ロープなどのサイドロープによる走査も有効であるとすると、この4方向に対するビーム走査で送受信センサ間の相対角が $\theta_{TR}=40^\circ$ 程度までは0[dB]を超えていていることがわかる。このことは、単一センサの半減指向角が 27.5° であるが、フェーズドアレイで4方向にビームを振ることで、 40° までは単一の送受信センサが正対しているときと同等の音圧が得られていることを意味する。

これらのサイドロープは、通常の反射波を用いた計測においては、ゴーストとして雑音や誤差の原因となるので排除する必要があり、波長がアレイ間隔に対して長い

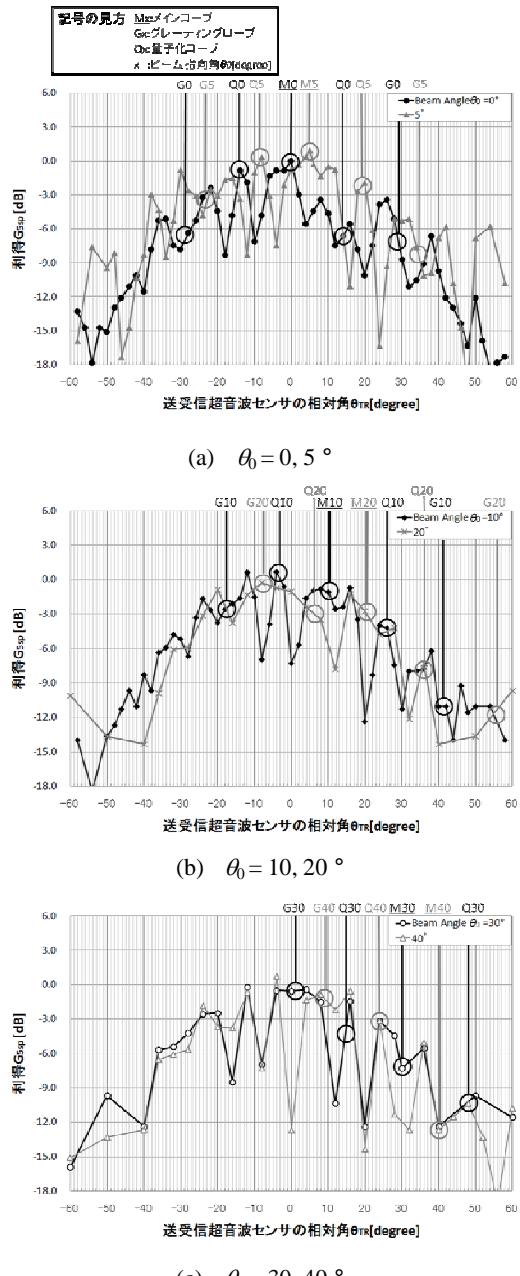


図6 フェーズドアレイのビーム指向性(実験結果)

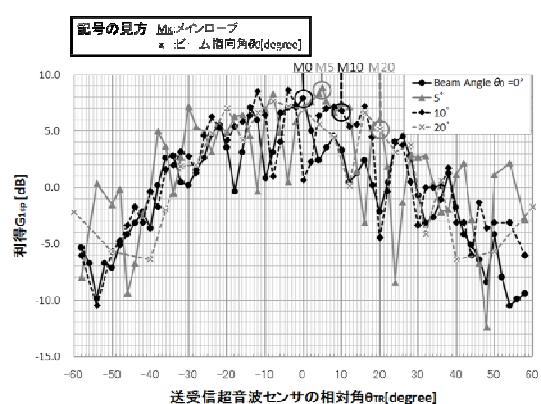


図7 超音波センサアレイの利得(実験結果)

(グレーティングロープが発生しない)金属や液体中の計測で使用してきた経緯がある。

しかしながら、トランスポンダ式の場合は、受信機まで十分な音圧で届くことが目的であるので、課題3の超音波ID信号が正常に生成できれば、これらのサイドロープを利用できる可能性がある。

5.まとめ

本報告では、人間に追従する搬送車の追従センサとして、安価でメンテナンスフリーな超音波センサシステムを提案し、このセンサシステムを使用する際に課題となる指向性による死角生成と外乱対策の問題を、フェーズドアレイによる任意方向へのビーム走査とSN比の向上で解決する提案を行った。

また、その第一段階として、実際に5個の1次元超音波アレイを実装したフェーズドアレイ送信機を試作し、実験によってビーム走査時の指向性と利得を測定した。この結果、センサ単体の半減角程度であればビームを任意の方向に制御できること、メインロープではセンサ単体の1.8倍程度の利得が得られることを確認し、死角の解消および信号レベルの向上により雑音に強いシステム構築が可能なことを示した。加えて、サイドロープを利用することで、より少ない走査で広い指向性を確保できる可能性があることを示した。

今後は、送信機の改良と受信センサ部の製作を行い、追従固体の認証のためのデータ送受信手法について研究を行う予定である。

文 献

- [1] 厚生労働省 雇用政策研究会，“人口減少下における雇用・労働政策の課題～すべての人が自律的に働くことができ、安心して生活できる社会を目指して～” 2005年7月。
- [2] 南雲陽介、大矢晃久，“発光器をガイドとした自律移動ロボットの人間追従”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集 2P1-H6, 2001.
- [3] 山田貴則、大矢晃久、油田信一，“人間の紐操作による移動ロボットの誘導”，日本ロボット学会 第21回学術講演会，3H23, 2003.
- [4] 越智友亮、岩野優樹、大須賀公一、天野久徳“FRIGOを用いた人間追従システムの開発”，第8回システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 2D2-4, 2007.
- [5] 高畠志生、大矢晃久，“超音波トランスポンダによる特定目標物の位置検出”，第7回ロボティクス・シンポジア予稿集，22A2, pp.275-278, 2002.
- [6] 丹沢勉、清弘智昭、森英雄，“屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ”，日本ロボット学会誌 Vol.15 No.4, pp.542-549, 1997.
- [7] 丹沢勉、塩澤獎、渡辺寛望、清弘智昭，“屋外移動ロボットのためのワイドレンジ超音波距離センサ”，日本ロボット学会誌 Vol.27 No.5, pp.583-589, 2009.
- [8] パナソニック株式会社，“超音波測定装置および超音波測定方法”，特許第4164539号, 2008.
- [9] 谷村康行著，“超音波技術 基礎のきそ”，日刊工業新聞, 2007.
- [10] 寺本顯武 他，“特集 先進超音波計測”，(社)計測自動制御学会 計測と制御 vol.41 No.1, pp.2-65, 2010.
- [11] 吉田孝監修，“改訂 レーダ技術”，電子情報通信学会, 1996.

リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発

- 個別ユニットエミュレータの機構計算の実装と並列化 -

横山 哲也 田畠 克彦 山田 俊郎 稲葉 昭夫

Development of Real-time Emulator for Industrial Machine

- Implementation and Parallel Calculation of Emulator for Arm Robot -

Tetsuya YOKOYAMA Katsuhiko TABATA Toshio YAMADA Akio INABA

あらまし 産業機械の組込みソフトウェアの開発には、実機の動作を模擬するエミュレータの活用が有効である。我々は平成20年度に、産業機械の個別ユニットを制御する組込みソフトウェアの検証用エミュレータとして、組込みソフトウェアと論理時間上で同期して実機の動作を模擬する「個別ユニットエミュレータ」の試作を行った。今年度はアームロボットのエミュレータを新たにパソコンで実現するため、機構の動きを算出する機構計算の実装を行い、モーションコントローラを用いてエミュレート出来ることを確認した。また機構計算の並列化を行い、シングルスレッドでの実行に比べて計算時間が短縮することがわかった。

キーワード 組込みソフトウェア、エミュレータ、数値計算

1.はじめに

近年、産業機械の開発期間は短縮傾向となっている。また、産業機械における組込みソフトウェアへの機能要求が高度化している。このため、組込みソフトウェアの検証時間が十分に確保できず、機能安全性の低下を招いている。実機を動かす組込みソフトウェアと実機との統合検証は、両者の完成を待って行われる多くの場合、組込みソフトウェアが先に完成することから、実機が完成するまでの間に手待ち状態が生じ、開発効率が低化する。また、複数の部署が開発を行う場合、実機が部署分ないと並行して検証を行うことができないため、手待ち状態が増加し更に開発効率が低下する。この解決策として、数値計算に基づき実機と同様に振舞うシステム(以下、エミュレータ)を用いて、実機の完成を待たずに検証を行う手法、HIL(Hardware In the Loop)^[1]があり、メカトロニクス製品メーカーを中心に活用されている。

HILは専用電子基板を用いて、機械の機構をエミュレートする。組込みソフトウェアが実装されたコントローラにHILを接続すれば、コントローラからは実機が接続されているようにみえる装置である。ただし、HILは専用基板で構成されていることから一般的に高価であり、開発担当者数確保するのは難しい。

上記課題に対して、我々は今年度、共同研究事業者と共同して安価に提供できるエミュレータとして、汎用

FPGAを用いた「個別ユニットエミュレータ」を開発した。ただし、汎用FPGAはリソースの制約で記述できるモデルに制限があり、また浮動小数計算の実装が難しい。一方、最近のパソコンはCPUの性能向上が著しく、エミュレータをパソコン内部で実現したい要望もある。パソコンであれば汎用FPGAが抱える上述の問題をクリアすることができる。

そこで本研究では、パソコンでの実装を目的とした個別ユニットエミュレータの機構計算を開発し、パソコンで実装を行った。さらに、機構計算の計算時間を短縮するための並列計算も行ったので、その内容について記述する。

2. 機構計算の実装

2.1 個別ユニットエミュレータ

個別ユニットエミュレータは、産業機械を構成する個別ユニットの実機動作を模擬するエミュレータで、エミュレータ部、デバッグインターフェースとデータコンバータで構成され、組込みコントローラで制御される(図1)。エミュレータ部は複数の部品で構成される機械の動きを、運動方程式に基づいて数値積分する機構計算で構成される。以下ではこの機構計算について記載する。デバッグインターフェースとデータコンバータに関しては、平成20年度の報告書^[2]を参照されたい。

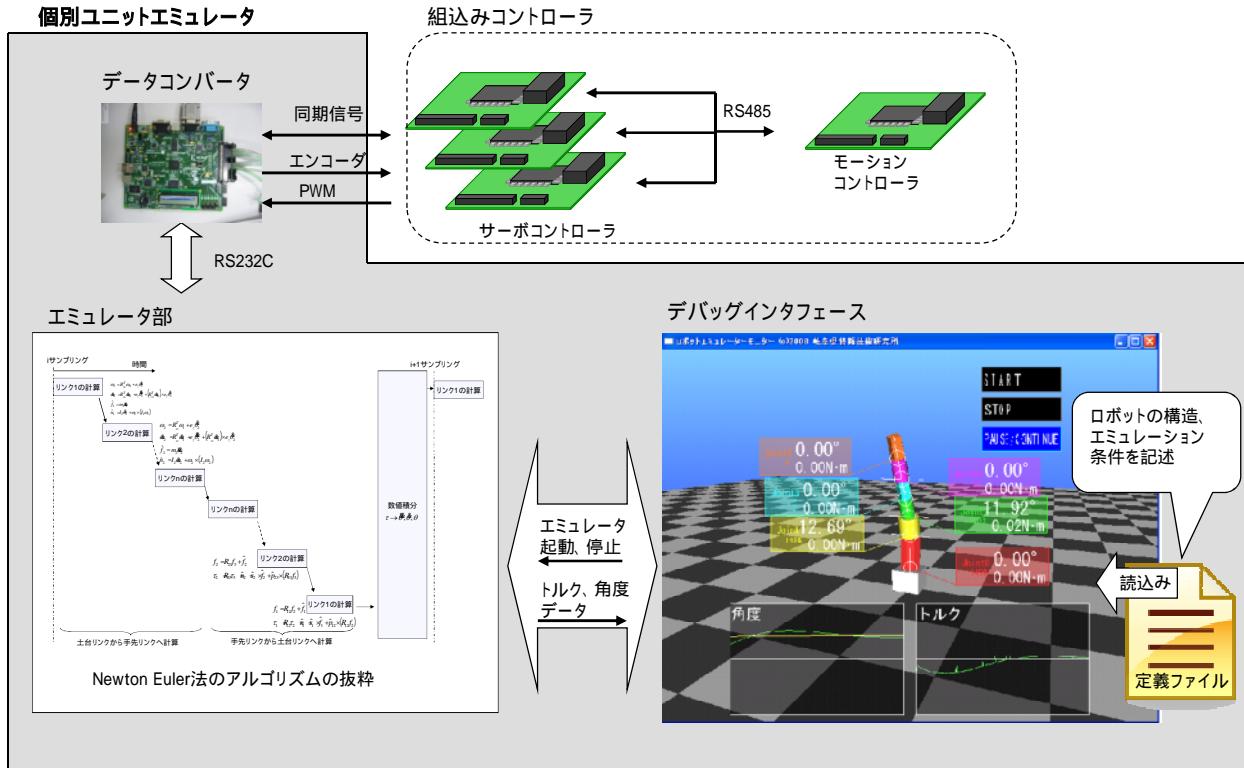


図1 個別ユニットエミュレータおよび組込みコントローラ

2.2 機構計算

本研究では対象とする個別ユニットは、産業機械として多用されているシリアルリンクのアームロボットとした。ロボットの機構は、複数のリンクがシリアルに繋がった多関節リンクとその関節に設けられたモータで構成されるため、エミュレータ部は図2に示すモータと多関節リンクのモデル構成とした。モータモデルは組込みコントローラからの制御電圧と多関節リンクモデルのエミュレーション結果に基づいて、電機子回路と回転軸の挙動をエミュレートする。多関節リンクモデルはモータモデルのエミュレーション結果に基づいて、関節角度の挙動をエミュレートする。以下、モータと多関節リンクの機構計算を記載する。

モータ電機子回路に関する運動方程式は、式(1)として記述できる。

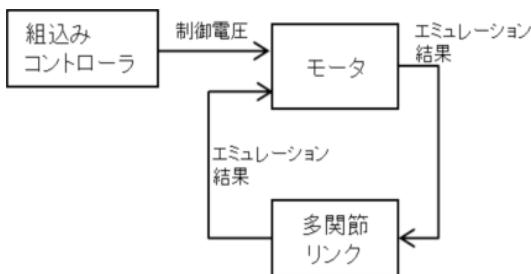


図2 エミュレータ部のモータと多関節リンクとの関係

$$V_{in} - K_b \dot{\theta}_m = Ri + L \ddot{\theta} \quad (1)$$

ここで V_{in} はモータの印加電圧、 K_b は逆起電力係数、 θ_m はモータ回転角度、 R は電機子抵抗、 L は電機子インダクタンス、 i は電機子に流れる電流を指す。

また、モータ回転軸に関する運動方程式は、式(2)として記述できる。

$$M_m \ddot{\theta}_m = K_T i - N_g \left\{ K_g \left(\frac{N_g}{4} \theta_m - \theta_l \right) + D_g \left(\frac{\theta_m}{4} - \theta_l \right) \right\} \quad (2)$$

ここで M_m はモータとギア 1 次側の慣性モーメント、 K_T はトルク定数、 $N_g (< 1)$ は減速比、 K_g はギアの剛性係数、 D_g はギアの減衰係数、 θ_l はギア 2 次側（アーム側）の回転角度である。 T はギア 2 次側に伝達するトルクであり、ギアのねじれを表現している^{[3] [4]}。

モータの運動方程式(1)(2)は、連立微分方程式として式(3)のとおり表現できる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{K_b}{L} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_t}{M_m} & -\frac{N_g K_g N_g}{M_m} & -\frac{D_g N_g K_g N_g}{M_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ \frac{N_g K_g}{M_g} (\theta_l + D_g \dot{\theta}_l) \end{bmatrix} \quad (3)$$

一方 N リンクで構成される多関節リンクの運動方程式は、式(4)で記述できる。

$$M_l(\theta_l)\ddot{\theta}_l + C(\dot{\theta}_l, \theta_l) + D_l\dot{\theta}_l = T \quad (4)$$

$M_l \in R^{N \times N}$ は多関節リンクの慣性モーメント係数行列、 $C \in R^N$ は遠心力とコリオリ力の非線形項および重力項をまとめたベクトル、 D_l はギア 2 次側の減衰係数行列である。ギア 2 次側の慣性モーメントは多関節リンクの慣性モーメントに比べて小さいことから無視した。

リンク数の増加に伴い、式(4)の係数行列とベクトルを直接算出すると計算量が大きいことが知られている^[5]。そのため、本研究ではNewton-Euler法^{[6] [7]}を用いて係数を算出する。Newton-Euler法はシリアルリンク構造において、各リンクの力とモーメントのつりあいから運動方程式を算出する計算法である。

運動方程式(3)と(4)を時間歴で数値積分をするにあたり、モータの時間刻み(サンプル時間)と多関節リンクの時間刻みを同一にするのが望ましい。ただし、モータの電流時定数は多関節リンクの時定数に比べて小さいため、多関節リンクの時間刻みをモータの時間刻みに合わせることは計算の効率が悪い。またモータの時間刻みを多関節リンクに合わせることは、数値計算の安定性上難しい。そこで本研究では、モータには計算コストは高いが安定性の優れた後退オイラー法を、アームロボットには計算コストが低い前進オイラー法の数値計算法を用いることで、両者の時間刻みをアームロボットの時間刻みに揃えた。

2.3 モーションコントロールを用いた機構計算の動作確認

モーションコントロールは、直交座標系におけるロボットの手先位置を目標位置に追従させる。図1ではモーションコントローラをマイコンで実装しているが、ここでは浮動小数計算を行うためパソコンに置き換えた。モーションコントローラで現在の手先位置から目標位置を実現するための目標関節角度を算出し、その値をサーボコントローラにRS485経由で送る。サーボコントローラからアームロボットの現在の関節角度をパソコンにRS485経由で送り、モーションコントローラで現在のアームロボットの手先位置を計算する。

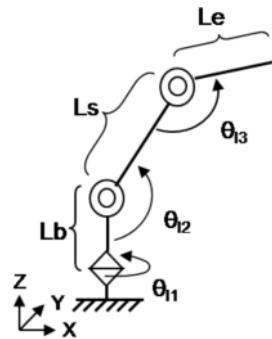


図3 3軸シリアルリンクのアームロボット

制御対象のアームロボットのモデルを図3に示す。3関節のシリアルリンク型で、関節にはギアを有したモータが備わっている。

モーションコントローラからサーボコントローラに送る目標関節角度は、Jacobi行列を用いて算出する。アームロボットの手先速度 $\dot{x}(\theta_l) \in R^3$ と関節角速度 $\dot{\theta}_l \in R^3$ の関係は、Jacobi行列 $J(\theta_l) = \frac{\partial X}{\partial \theta_l} \in R^{3 \times 3}$ を用いて式(5)で記述できる。

$$\dot{\theta}_l = J(\theta_l)^{-1} \dot{x}(\theta_l) \quad (5)$$

ここで $\dot{\theta}_l = (\theta_{ld} - \theta_l) / \Delta t$ 、 $\dot{x}(\theta_l) = (X_d - X(\theta_l)) / \Delta t$ とおくことで、アームロボットの手先の目標位置 $X_d \in R^3$ を実現するための目標関節角度 $\theta_{ld} \in R^3$ を、式(6)のとおり与えた。

$$\theta_{ld} = wJ(\theta_l)^{-1}\{X_d - X(\theta_l)\} + \theta_l \quad (6)$$

ここで w は重み係数である。式(6)の θ_{ld} はモーションコントローラの制御周期により随時更新し、サーボコントローラに送信される。サーボコントローラは受信した目標関節角度を追従することになる。なお、この動作確認では重力は作用しないとした。

図4にロボットの手先位置と目標位置の偏差を示す。横軸はモーションコントローラの指示回数、縦軸は目標値に対する偏差である。目標位置は、y軸のみに10mm、x

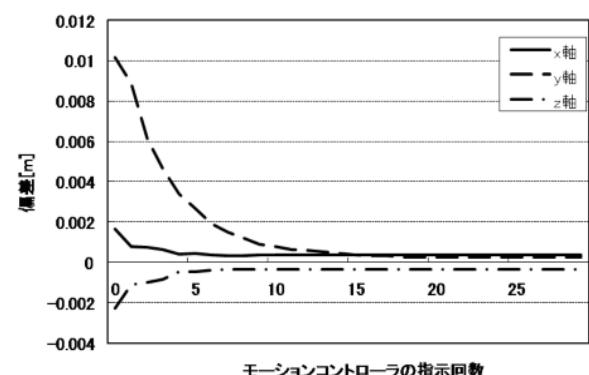


図4 ロボット手先位置の目標位置の偏差

軸, z軸に関しては0mmを与えた。図から指示回数の増加に伴い、偏差が小さくなっていることがわかる。偏差が0にならない理由としては、エンコーダの分解能等が考えられる。

3. 機構計算の並列化の検討

多関節リンクに係る数値計算はモータに比べて計算量が多い。そこで多関節リンクの数値計算で使用しているNewton-Euler法を並列化することで、計算にかかる時間を抑えることを試みた。

従来からあるNewton-Euler法を用いた並列化に関する研究として、Newton-Euler法がリンク単位での計算であることに着目して、関節毎にCPUを配置して計算時間を減らす試みがある^[8]。しかし、この手法は関節数のCPUを用意することから並列演算機の使用が前提となる。本研究では、一般的なスペックのパソコンでの実装を目標としているため、関節毎に処理を並列化するのではなく、Newton-Euler法の一連のシーケンス処理を分割して並列計算を行う。分割数は昨今のパソコンのCPUがデュアルコアを備えていることから、2つとした。

図5にNewton-Euler法の一連のシーケンスを示す。シーケンスは大別して 運動学計算と順動力学計算、 リンク両端間における力/トルクの変換、 数値積分の3つに分けられ、シングルスレッドで実行される。本研究での並列化では、～の処理を図6に示す2つのスレッドに

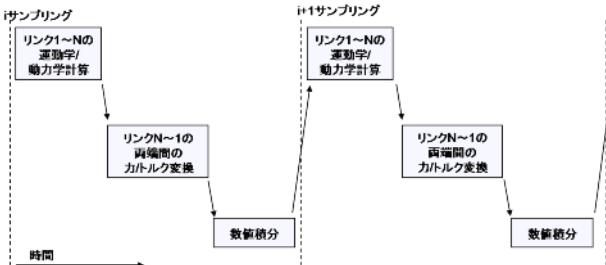


図5 Newton-Euler法のシーケンス

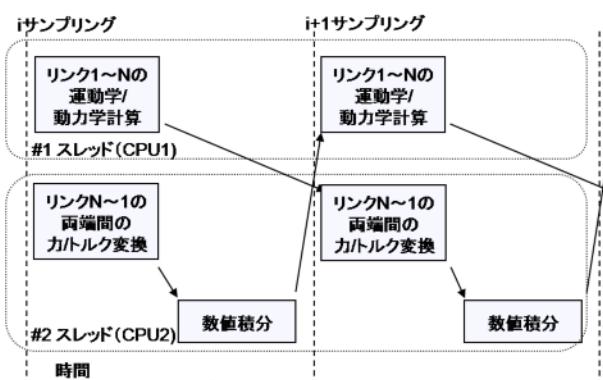


図6 Newton-Euler法の並列シーケンス

割り当てる。なお、スレッド間は同期を保つためにフラグを活用した。

図6に示す並列化においては、並列化に伴う計算誤差が生じる。図5のシングルスレッドでの実行は、数値積分で角度を更新してから 運動学計算を行うが、図6の並列計算では1サンプル前の角度情報を使用して運動学を計算することになる。これは関節角度 θ_l に誤差 $\Delta\theta$ 、関節角速度 $\dot{\theta}_l$ に誤差 $\Delta\dot{\theta}$ が含まれることに相当し、その影響は式(4)の係数 $M_l(\theta_l)$, $C(\dot{\theta}_l, \theta_l)$ 中の三角関数および係数 $C(\ddot{\theta}_l, \theta_l)$ 中の $\ddot{\theta}_l$ に表れる。

そこで、並列化に伴い生じる三角関数の誤差の影響を考える。 $|\Delta\theta| << 1$ の条件のもとでは、三角関数はテイラーフラグメントを用いて以下のように近似できる。

$$\sin(\theta_l + \Delta\theta) = \sin(\theta_l) \cos(\Delta\theta) + \cos(\theta_l) \sin(\Delta\theta)$$

$$= \sin(\theta_l) \left(1 - \frac{\Delta\theta^2}{2} + L_1\right) + \cos(\theta_l) \left(\Delta\theta - \frac{\Delta\theta^3}{2} + L_2\right)$$

$$\approx \sin(\theta_l)$$

$$\cos(\theta_l + \Delta\theta) = \cos(\theta_l) \cos(\Delta\theta) - \sin(\theta_l) \sin(\Delta\theta)$$

$$= \cos(\theta_l) \left(1 - \frac{\Delta\theta^2}{2} + L_3\right) - \sin(\theta_l) \left(\Delta\theta - \frac{\Delta\theta^3}{2} + L_4\right)$$

$$\approx \cos(\theta_l)$$

これにより、刻み時間を小さくすれば $|\Delta\theta| << 1$ が成立し、 $\Delta\theta$ を含む項がなくなることから、三角関数の誤差の影響は無視できる。

次に式(4)の $C(\dot{\theta}_l, \theta_l)$ の $\dot{\theta}_l$ の誤差の影響を考える。 C は遠心力やコリオリ力をまとめたベクトルであり、角速度の2乗の項を含むことから、 $|\Delta\dot{\theta}| << 1$ であれば誤差の影響は無視できると考える。こちらも刻み時間を小さくすることで $|\Delta\dot{\theta}| << 1$ は成立すると考えられる。

同一条件のもとで3関節リンクの機構計算を行い、1秒経過後のシングルスレッドと並列計算の計算結果の差を表1に示す。各軸とも刻み時間を小さくすれば、差は小さくなることがわかる。これより、刻み時間を小さくすれば誤差の影響は無視できることがわかる。

表1 計算結果の差の比較

刻み時間(sec)	$\Delta\theta_{l1}$ [rad]	$\Delta\theta_{l2}$ [rad]	$\Delta\theta_{l3}$ [rad]
1.0E-3	0.018696	0.083323	0.109300
1.0E-4	0.004967	0.006647	0.013919
1.0E-5	0.000523	0.000650	0.001419

次に3関節リンクの機構計算において、Newton-Euler法の1ループに係る平均計算時間を測定した。シングルスレッドの場合の計算時間を1とした場合、並列計算は0.61となった。今回、計算に使用したパソコンはHP社 xw6400(Dual CPU Xeon@3GHz)で4つのCPUコアを有している。計算に使用するCPUコアの組み合わせによつては、スレッド間の同期に時間が浪費され、計算時間が1

を超えるケースもあった。

4.まとめ

本研究では、産業機械を構成する個別ユニットのエミュレータ「個別ユニットエミュレータ」の機構計算をパソコンに実装し、モーションコントローラを用いてその動作を確認した。

機構計算の並列化については、Newton-Euler法を2スレッドで実行し、刻み時間を小さくとることで並列化に伴う計算誤差が小さくなることがわかった。計算時間に関しては、CPUコアの組み合わせによってはシングルスレッドに比べ計算時間が減少することを確認したが、引き続き検証する必要がある。

今後は共同研究事業者と共同して、個別ユニットエミュレータの事業化に向けた改良を行いたい。

謝 辞

本研究は、経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業の一環として実施しました。

文 献

- [1] dSPACE社，“Solutions for Control 日本語版”，2007.
- [2] 横山哲也 他，”リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発”，岐阜県情報技術研究所研究報告，第10号, pp.19-22, 2009.
- [3] 西田吉春 他, "柔軟関節を持つマニピュレータのロバスト制御", 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, pp.466-471, 1994.
- [4] 大明準治 他, "シリアル2慣性系の非干渉化同定", 電気学会論文誌D, Vol.129, No.12, pp.1169-1177, 2009.
- [5] 吉川恒夫, "ロボット制御基礎論", コロナ社, 1995.
- [6] J.Y.S.Luh 他, "On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 102, pp.69-76, 1980.
- [7] M.W.Walker 他 , "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robot Mechanisms", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 104, pp.205-211, 1982.
- [8] J.Y.S.Luh 他, "Scheduling of Parallel Computation for a Computer-Controlled Mechanical Manipulator", IEEE Trans, SMC-12, 2, pp.214-234, 1982.

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

光井 輝彰 田畠 克彦 平湯 秀和 田中 等幸 稲葉 昭夫

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

- Development of Autonomous Moving Robot -

Teruaki MITSUI Katsuhiko TABATA Hidekazu HIRAYU Tomoyuki TANAKA Akio INABA

あらまし 化学農薬の使用量を低減し、環境に優しい農作業を推進する現場では、雑草対策が最大の課題であり、除草剤に代わる有効な除草手段が求められている。これまでに、我々はロボット技術を応用した新たな除草手法を考案し、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の研究開発を進めてきた。本ロボットは小型軽量で様々なほ場へ適用可能であり、水田内を走行するだけのシンプルな機構であるが、高い除草効果が期待できる。平成20年度からは経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託を受け、実用化を目指したロボットの開発を開始した。ここでは、ロボットが自律して水田内を走行(除草作業)するために、一定の条件を設定した水田を対象に、画像処理を利用した自律走行機能の開発を行っている。ほ場実験の結果、開発したロボットが稲列に沿った走行と稲列終端での折り返しを繰り返し、水田全体を自律して除草作業できることを確認した。

キーワード ロボット、自律走行、画像処理、水田、除草

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、慣行農業において多用されている化学農薬の削減が望まれている。行政でも、環境保全型農業^[1]やぎふクリーン農業^[2]のように、それらの農業を推進する動きを進めており、水稻栽培では有機栽培や減農薬栽培などの安全で環境負荷の少ないクリーンな農業が行われつつある。ここでは、最も多用される農薬である除草剤の使用を控えるために様々な手法が試みられているが、有効な手段は無く、雑草対策が大きな課題となっている。

本研究では除草剤に代わる新たな除草手段として、水田用除草ロボットの開発を進めてきた^[3-5]。また、平成20年度からは経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託を受け、ロボットの実用化を目指した開発を開始した。ここでは作業の省力化を考慮して、ロボットの自律走行機能の開発も行っている。ただし、あらゆるほ場条件にロボットを対応させる事を考えると、ロボットに要求されるスペックが膨らむばかりで、現実的でない。そこで、実用化を考慮した時に機能的にも価格的にもバランスの良いロボットとなるように、農業者が許容可能な範囲で条件を設定したほ場を対象にして開発を行った。実験は実際の稲の栽培と時期がずれるため、ひこばえや移植直後の稚苗(冬季に田植えを敢行)を対象として行った。

2. アイガモロボットの開発コンセプト

除草剤に代わる雑草対策として有力な手段として機械による除草があり、この主流は乗用大型機械である。しかし、高価な大型機械を導入できるのは大規模農業を実施している一部地域に限られている。国内では、特に岐阜県のように中山間地の多い地域では、比較的小規模な農地が多く、ほ場の改良整備による農地の集約にも限界がある。そのため、機械の大型化とは別の方法により、除草作業の集約化や効率化を考える必要がある。さらに農業者の意見等を踏まえた上で、ロボットの基本仕様を次のように定めた。

- 1) 安価(目標価格: 30万円)
- 2) 除草作業に手間がかからない
- 3) 運搬が容易
- 4) 環境にやさしい

1)は、様々な農業者がロボットを導入できるようにするための必須条件として定める。1台のロボットでカバーできる作業面積としては1ha(1000m²)以上を目標とする。2)は、水田にロボットを持ち込んでスイッチさえ入れれば、ロボットが1枚の水田の除草作業を自律して行う機能であり、大規模に除草作業を行うときには必要となる。除草作業は、雑草を物理的に抜くのではなく、クローラ走行により雑草の生長を抑制する手法である。現状では除草効果の検証実験を週2回で7週間程度の作業

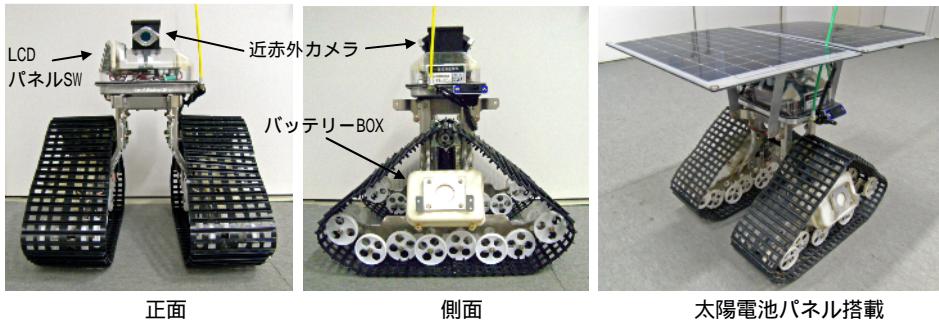


図1 開発したロボット (H21開発機)

表1 諸元

全長	500mm
全幅	450mm
高さ (クリアランス高)	500mm (300mm)
クローラ幅	150mm
全備重量	9200g
モーター	7.2Kgf·cm 18.5W x2
バッテリー	Li-ion 24V-7.0Ah
走行時間	3時間以上
作業効率	10a/h

(ラジコン操作による走行)で行っているが、作業頻度と作業期間を軽減させる方向で検討を進めている。

3)は、ロボットを中山間地の小規模な水田など、既存の農村環境に持ち込んで、そのまま利用するための仕様である。大型で重いロボットでは取り回しが悪く、田植え後の水田では水持ちを悪くする危険性もある。小型・軽量のロボットなら、水田へ導入する際の稲や水田内環境への影響を比較的軽微に抑えることが可能である。また、発生初期の雑草を対象として除草作業を行うので、大きな力は必要なく、小型ロボットでも十分に除草効果を上げることが可能である。4)は駆動源にバッテリーを使用することで、エンジン使用時の排オイルや排気ガスの排出を無くすとともに、太陽電池の併用も視野に入れている。

3. ロボットの開発

今年度開発したロボットを図1に、諸元を表1に示す。ロボットの基本的な性能として、水田内の走行速度が約0.5m/s、1回の充電で3時間以上作業(走行)することを目標とする。この場合、作業効率は1時間当たり約10a(1反:100m²)となり、1日1回充電する場合、週2回の除草作業ならば1台で1ha(10反:1000m²)以上のほ場を作業することができる。バッテリーを交換するか、1日の充電回数を増やすことにより、作業面積を増やすことも可能である。この基本性能を実現するために、小型のロボットで利用可能なモーターとバッテリーを選定した。クローラベルトについては、形状と表面パターンを検討し、除草効果と走行性能の両立できるものを独自に開発した。ロボットのボディ全般については、屋外で長期間(5年以上)使用可能な耐久性を備え、泥や夾雑物が堆積しにくく、容易にメンテナンスを行えることを考慮して開発を行った。

また、ロボットの自律走行には、稲の検出に有利な近赤外帯域の画像処理情報を利用することとし、そのために必要となる画像処理及びロボットの制御を行う基板を新たに開発した。カメラには安価で近赤外帯域にも感度を持つ小型カメラを選定し、ロボットの前後方向に2個搭載した。カメラの設置位置は視野角と耐環境性の面から検討し、ロボット最上部の中央寄りから斜め下向きに設置することにした。この位置は、泥の跳ね返りを受けにくく、稲が成長した時にも葉がレンズに干渉しにくいという利点がある。カメラの視野範囲はクローラベルト先端のロボットが跨ごうとする直近の稲から、約2.5m先までである。その他、旋回制御や異常検出のためにジャイロと加速度センサを搭載した。

4. 自律走行実験

ロボットの水田内走行アルゴリズムは、
 ・稲列に沿った走行制御
 ・稲列終端での折り返し走行制御
 の機能を備え、これらを組み合わせながら図2のように水田内全体の除草作業を行う。対象とするほ場には、農業者が許容可能な条件として、下記の2つを設定する。
 条件1：土壤表面は軽微な凹凸(田植機の轍等)のみで足跡などの大きな凹凸が無い。
 条件2：水田の外周部(あぜ際)への稲の植え込みを制限する(減反面積へ計上可能)。

4.1 自律走行アルゴリズム

稲列検出のための画像処理手法について、当初はロボット外部のPCを用いて動作検証を行った。それを基に、

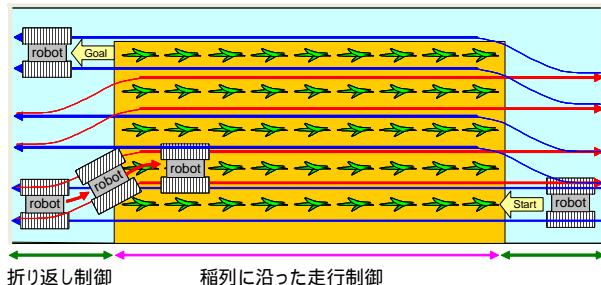


図2 水田内走行アルゴリズム

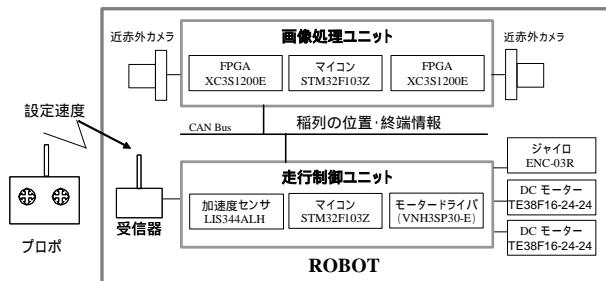


図3 システム構成

画像処理のプログラムを簡略化するとともに、処理自体をロボットに搭載した画像処理ユニットのハードウェアで行うことで、搭載カメラを利用した場合の最短時間(フレームレート、1/30秒)以下で稲列の位置情報を取得可能になった。ロボットのシステム構成を図3に示す。画像処理ユニットでは前後カメラの画像処理を行い、検出した稲列の位置情報を稲列の終端情報を制御ユニットへ送る。走行制御ユニットでは受信した画像処理ユニットからの情報と自身のセンサ情報(加速度、ジャイロ)を基に動作を決定し、左右モーターの制御を行う。

図4に稲列終端での制御手順を示す。稲列に沿った走行制御では、ロボットの中心線上に稲の位置を保つように進行方向を修正して走行する。この際、画像処理による稲列の終端情報が欠株等による誤判別でないか判定を行う。稲列終端に到達したと判定した時点で停止し、スイッチバック方式を用いた折り返し制御に切り換える。停止後は約60度旋回し、次に目標とする稲列付近まで直進し、さきほどとは逆に旋回して目標とする稲列に沿う

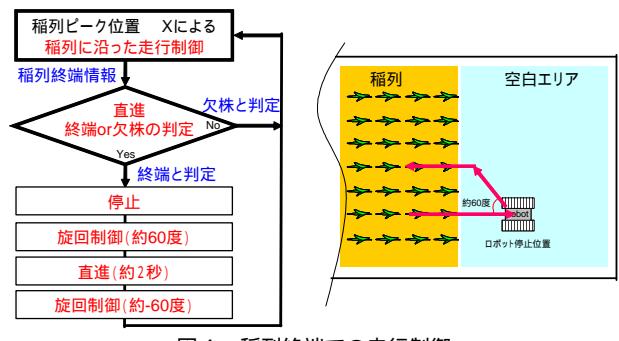


図4 稲列終端での走行制御

ように方向を変える。ここで制御はジャイロとタイマによるシーケンシャルな制御で行う。

4.2 自律走行実験

実用的な面積のほ場(30m×50m)において、自律走行実験を行ったところ、稲列に沿った走行制御と稲列終端での折り返し走行制御を繰り返し(図5)、自律して水田内を走行できることを確認した。さらに、同様な実験を、天候の異なる環境や移植直後のほ場など、条件の異

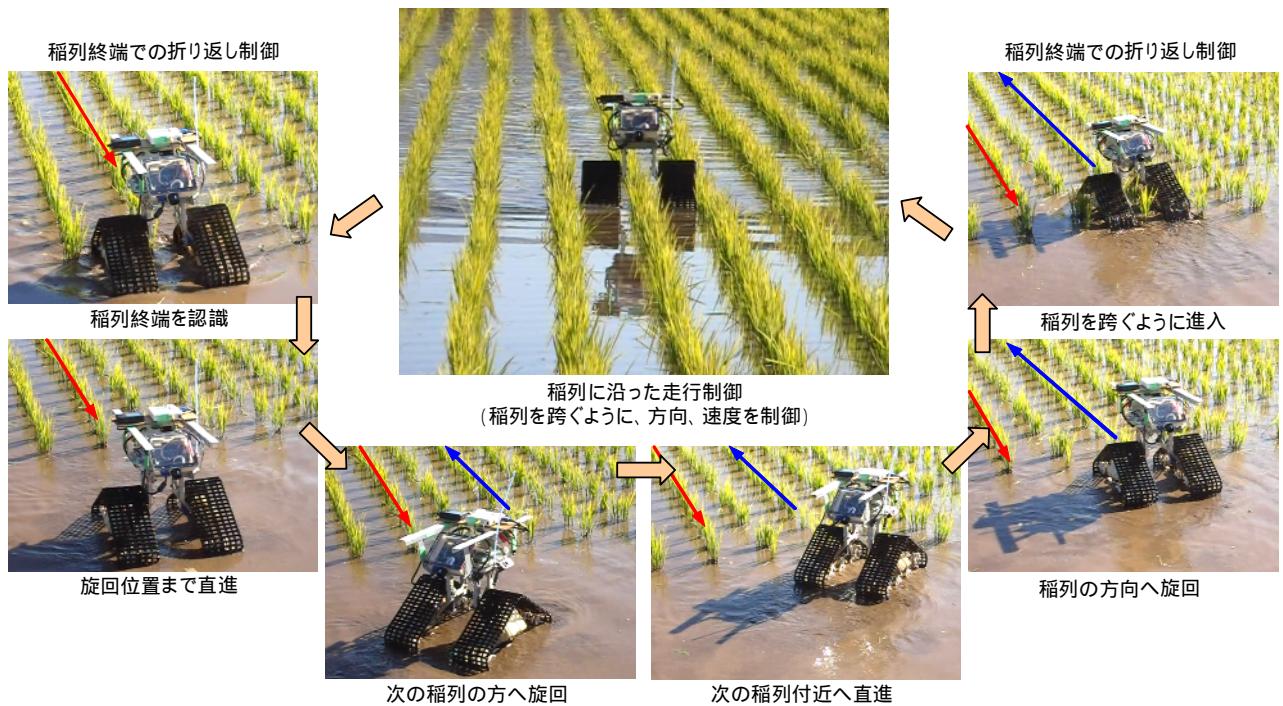


図5 自律走行制御 (H20開発機)

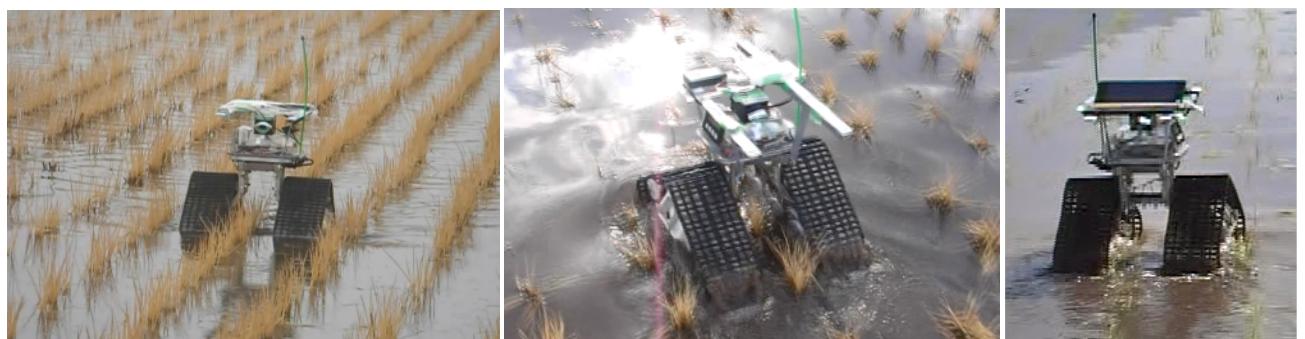


図6 様々な環境での自律走行実験 (H21開発機)

なる環境で行い(図6),自律走行の安定性を調べた.これらの実験を通し,これまでに下記の場面において誤動作を確認している.

- 1) 終端の空白エリアの土壤に,硬く固まった大きな凹凸がある場面
- 2) 目標とする稲列の終端が欠如している場面
- 3) 移植直後の稲があまりにも小さい場面
- 4) 移植直後の稲が活着せずに浮いてしまっている場面
1) 2) では,隣の稲列に進入するなど,終端での折り返し制御に失敗する可能性があり,3) 4) では稲列追従に失敗する可能性がある.今後はこれら想定外の場条件への対応を含め,様々な条件に適応できるよう自律走行のロバスト性を向上させる予定である.

5.まとめ

水田での自律走行機能を備えたロボットを開発し,実用規模のほ場での実験を通して,ロボットが自律走行を行えることを確認した.ただし実験はロボット開発後の冬季に行ったものであるため,今後は実際の稲の栽培時期にロボットを現場へ持ち込み,想定する作業期間を通して自律走行実験を行う必要がある.この際,自律走行のためにほ場に設定する条件の緩和も考慮しながら,自律走行機能のロバスト性の向上を進める予定である.同時に,実用的な除草効果が得られる効率的なロボットの運用方法について検討を進める予定である.

さらにロボットの実用化に向けては,ロボットの運用を支援するための機能が必要である.これについては,高齢の農業者でもロボットを使用できるような操作インターフェースや,ロボットの転倒や盗難など予期せぬ事態が発生した際に現場にいない農業者へ異常事態を知らせる機能などについて開発を進める予定である.

謝辞

本研究は,岐阜県中山間農業研究所,岐阜大学,みのる産業株式会社,株式会社常盤電機の協力の下,経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託を受けて実施しました.ここに感謝の意を表します.

文 献

- [1] 農林水産省 環境保全型農業関連情報
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozan_type/
- [2] “ぎふクリーン農業”
<http://www.pref.gifu.lg.jp/pref/s11435/clean/index.html>
- [3] 光井輝彰,小林孝浩,鍵谷俊樹,稻葉昭夫,大場伸也,“アイガモロボットの開発”,日本ロボット工業会機関誌,ロボット177号,pp.20-25,2007.
- [4] 平湯秀和,田中等幸“水田用小型除草ロボット(ア

イガモロボット)の開発 水田除草用自律走行ロボットのための稲列検出手法の開発”,岐阜県情報技術研究所研究報告,第10号,pp27-32,2009.

- [5] 田畠克彦,光井輝彰,稻葉昭夫,平湯秀和,田中等幸“水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発 - 自律走行のためのハードウェア検討 - ”,岐阜県情報技術研究所研究報告,第10号,pp35-39,2009.

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

水稻とマコモ栽培ほ場での除草実験

光井 輝彰 広瀬 貴士* 岩澤 賢治** 久田 浩志* 大場 伸也*** 稲葉 昭夫

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

- Weeding Experiments in Rice and Manchurian Wild Rice Fields -

Teruaki MITSUI Takashi HIROSE* Kenji IWASAWA **
Hiroshi HISADA* Shinya Ooba *** Akio INABA

あらまし これまでに、農業分野におけるロボット技術の応用として水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を行ってきた。また、平成20年度からは経済産業省の委託を受け、実用化を目指した開発も開始した。これらロボットの開発の中で、試作機を用いた実際のほ場での除草実験により、ロボットを利用した水田除草の有効性を検証してきた。本年度は、昨年度に引き続き県内の水稻栽培ほ場3箇所とマコモ(水田の転作作物、健康野菜として注目されつつあり、県内では瑞浪市が特産化を図っている)栽培ほ場における除草実験を行い、除草効果の有効性を確認した。

キーワード ロボット、除草、クリーン農業、水稻、マコモ

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、慣行農業において多用されている化学農薬の削減が望まれている。行政でも、環境保全型農業^[1]やぎふクリーン農業^[2]のように、それらの農業を推進する動きを進めており、水稻栽培では有機栽培や減農薬栽培などの安全で環境負荷の少ないクリーンな農業が行われつつある。ここでは、最も多用される農薬である除草剤の使用を控えるために様々な手法が試みられているが、有効な手段は無く、雑草対策が大きな課題となっている。

本研究では除草剤に代わる新たな除草手段として、水田用除草ロボットの開発を進めてきた^[3]。また、平成20年度からは経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託を受け、ロボットの実用化を目指した開発を開始した。これら一連のロボット開発の中で、平成18年度より試作機を用いて実際のほ場での検証実験を行ってきた。今年度は昨年度に引き続き^[4]、平野部(岐阜市)、中山間地(中津川市)、高冷地(飛騨市)の環境の異なる県内3箇所の水稻ほ場と昨年度より開始したマコモの栽培ほ場において除草実験を行い、その有効性について検討した。

2. ロボットによる水田内除草作業

ロボットによる除草作業は、ロボットが水田内を走行するだけであり、ロボットが走行する際の以下の要素により除草(抑草)効果を発揮する。

- ・クローラによる雑草の踏み潰し
- ・クローラによる表層土壤の攪拌、雑草の掻き出し
- ・土壤攪拌による水中照度の低下の他、濁水中に浮遊する粘土粒子の土壤表面と幼稚草への堆積^[5]

除草効果を高めるためには、雑草が成長する前に除草作業を開始し、水田の濁りを維持できる頻度で除草作業を繰り返す必要がある。よって、除草作業は代掻きの約1週間後から開始し、その後週2回程度の頻度で繰り返し行い、稻が生長して雑草害が問題にならなくなる移植後約7週間後まで行う。

また、今年度は新たに株間除草機構を導入した。水稻ほ場での除草作業は、図1のように稻を跨いで稻の条の中央をクローラで走行するが、株間(稻際)はクローラ

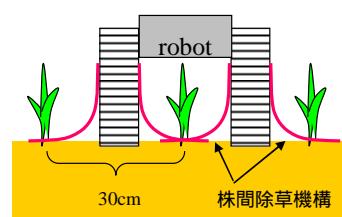


図1 ロボットによる除草作業イメージ

* 岐阜県中山間農業研究所

** 岐阜県東濃地域土岐農業改良普及センター

*** 岐阜大学

が直接作用できないため雑草が残りやすい。株間除草機構はロボットが走行する際に、稻を傷めずに株間の土壤表面に直接作用する機構で、これにより株間の除草効果を向上させることができることが期待できる。

3. 水稲ほ場での除草実験

昨年度に引き続き、標高、気候、土質や雑草種など各種条件の異なる県内3箇所のほ場において除草実験を行った。表1に各試験ほ場の特徴と実験のスケジュールを示す。

3.1 実験方法

今年度の実験では新たに開発した試作機を使用した。図2に実験で使用したロボットを、表2に緒元を示す。このロボットは昨年度の試作機と比較して走行性能と耐久性能を改良しているが、除草実験に関わる条件の違いとしては、クローラベルト幅（昨年度は90mm）と重量（昨年度は4500g）及び株間除草機構の装着が挙げられる。

株間除草機構は複数のタイン（土壤を掻く除草機構の先端部）を備え、ロボットの走行により株間の土壤表面を稻に損傷を与えないで軽く掻く機構である。これまでに数種類の機構を試作し模擬ほ場での予備実験を通して効果を確認してきた。これを基に今回新たにほ場実験用の機構を開発した（図3）。タインには棒状の樹脂の先端に棒状の樹脂をそのまま広げたタイプ（図3(a)）と、ねじりブラシを取り付けたタイプ（図3(b)）で、それぞれ柔軟性の異なる数種類を準備した。柔らかいタインは稻が損傷しにくいが除草効果が低く、硬いタインは稻が損傷しやすいが除草効果が高いと言える。株間除草機構はタインの部分が交換可能であり、状況に合わせてタインの種類や取り付け個数を変更することができる。今回の実験では、この株間除草機構をクローラベルトの左右に（合計4個）装着して、稻の移植直後は柔らかいタインを使用し、稻の成長と雑草の状態を見て強度の高い（硬い）タインに交換した。

除草作業はラジコン操作で行い、各ほ場に共通する試験条件として、週2回の片道走行による除草作業を設定した。また、ロボットも株間除草機構も初めての利用であったため、実験当初は移植直後の苗に損傷を与えないか、代掻き後間もない軟弱土壤で問題なく走行できるか等に注意しながら実験を行った。

3.2 実験結果と考察

ロボットの除草作業による苗の損傷については、クローラ幅が広くなても苗を踏まない限り何ら問題なく、踏んだとしても苗の上で旋回しない限り欠株になることは無かった。株間除草機構についてもタインが接触しても苗が揺れる程度で特に問題は無かった。図4に初期（移植7日後）のほ場における除草作業後の様子を示す。ロボットの走行による稻の損傷や欠株は無く、ほ場内で直進、旋回を行っても株間除草機構に異常は無かった。

昨年までの試作機では初期の軟弱な土壤で進行方向前

表1 試験圃場と実験スケジュール

場所	岐阜市	中津川市	飛騨市
圃場標高	10m	390m	493m
平均気温	16.2	13.9	11.3
土壤	灰色低地土	多湿黒ボク土	灰色低地土
供試品種	ハツシモ	コシヒカリ	コシヒカリ
施肥	無施用	慣行	無施用
日程	代かき 6/8 移植 6/10 除草作業期間 6/15 ~ 7/29 残草調査日 7/29	5/8 5/12 5/15 ~ 6/30 7/1	5/22 5/26 5/29 ~ 7/14 7/15

表2 緒元

全長	500mm
全幅	450mm
高さ (クリアランス高)	500mm (300mm)
クローラ幅	150mm
全備重量	8600g
モーター	7.2Kgf·cm 18.5W x2
バッテリー	Ni-MH 24V-4.3Ah

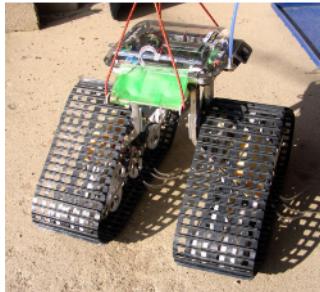
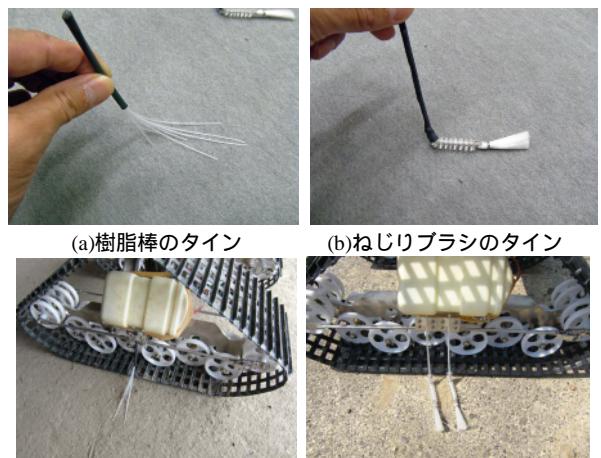


図2 水稲ほ場用の試作機



株間除草機構の装着状態（ワンタッチで着脱可能）

図3 株間除草機構の例



苗の損傷、欠株無し

機器に異常なし

図4 株間除草機構を装着した除草作業後の様子



図5 代掻き7日後（移植3日後）の除草作業

方が持ち上がり走行に苦労する場面が見られたが、新たな試作機ではそのようなことは無く安定して除草作業が行えることを確認した（図5）。

図6、7に中津川市試験区の除草作業終了時点でのほ場の様子を示す。無処理区は水面が見えないほど雑草が繁茂しており、ロボット除草区は、無処理区と比較して明らかに雑草が少ないことが分かる。図8に各試験ほ場の残草調査結果を示す。グラフは優先雑草（コナギ、イヌホタルイ、ノビエ）の風乾重の無処理区に対する割合を示す。ばらつきはあるものの3か所の試験ほ場ともに無処理区と比較して明らかに雑草が減少していることを確認できた。また、昨年度の除草作業と比較すると、今年度は除草作業の頻度を週3回から週2回に減らし、走行方法を往復走行から片道走行に簡略化したが、除草効果は昨年度と同程度であることから、これらの要素は除草効果にそれほど影響しないと考えられる（ただし、飛騨市の試験区は昨年度とほ場が異なる）。

株間除草機構に関しては、株間除草機機構を装着しないで除草作業を行う試験区を準備して比較したが、除草効果は同程度であった。さらに、残草のほとんどは株間に残っていることからも、今回利用した株間除草機構は



図6 無処理区（7月3日 中津川）



図7 ロボット除草区（7月3日 中津川）

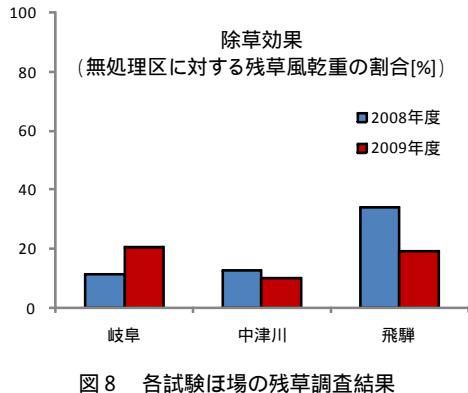


図8 各試験ほ場の残草調査結果



図9 実験後の土壤表面の状態

効果が無かったと考えられる。この事は、除草実験後のほ場の土壤表面の状態（図9）を見ても明らかである。株間の土壤に表面剥離や糸状の藻が存在しており、株間除草機構が株間の土壤に有効に作用していなかったことが伺える。その原因としては、欠株や稻の損傷が生じないことを最優先に考え、タインの交換（強度アップ）が遅れ、十分に土壤表面を掻き出すことが出来なかつたことと、一部が変形するなど株間除草機構の耐久性が不足していたことが考えられる。実際のほ場では長期間、広範囲の除草作業をこなす必要があることから、株間除草機構自体の耐久性を上げるとともに、当初から強度の高いタインで稻に損傷を与えずに株間に作用するような機構が必要と考えられる。

4. マコモほ場での除草実験

マコモはイネ科の大型多年草で、春に株分けした30cm程度の苗が秋には2メートル以上に育ち、肥大化した株元の新芽（マコモタケ）は食用や薬用として利用されている。ただし、マコモには登録農薬が無く除草剤が使用できないため、現状では手取り除草が基本であり、雑草対策はマコモ栽培における大きな課題となっている。

4.1 マコモほ場での実験方法

マコモは大型化するので疎に植えるが、今年度は条間1.5m、株間0.8m（昨年度は条間1.8m、株間1m）に設定した。水稻栽培のように苗を跨ぐ必要が無いため、ロボッ

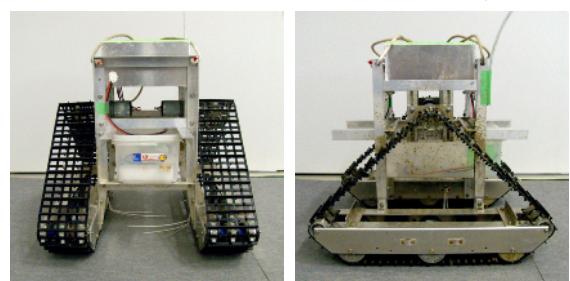


図10 マコモほ場用の試作機

表3 緒元	
全長	460mm
全幅	400mm
高さ	420mm
クローラ幅	90mm
全備重量	5500g
モーター	7.2Kgf·cm 18.5W x2
バッテリー	Li-ion 20V-3.0Ah



図11 除草作業の様子



図12 除草作業終了後のほ場用の状態(7月10日)

トのクローラ間には大型のバッテリーを搭載するとともに、土壤表面を搔く樹脂性のタインを装着して除草効果の向上を図った。図10にマコモほ場用に開発した試作機を、表2に緒元を示す。ロボットはマコモの条間と株間の両方向を自由に走行することができる(図11)ので、除草作業は条間だけを走行する区域と、条間と株間の両方向を走行する区域に分けて行った。両区域は仕切りを設けていないため、土壤攪拌の効果は拡散することになる。除草作業を行わない無処理区のみは波板で区切った。除草作業は5月22日から7月8日までの7週間行い、その間に周1回のペースで合計8回の除草作業を行い、残草サンプリングを7月10日に行った。

4.2 マコモほ場での実験結果

図12に除草作業終了時点のほ場の様子を示す。条間走行区の株間には雑草が茂っているが、条間と株間の両方向を走行した区域ではほとんど雑草が生えていない。ロボットの走行跡は明らかに雑草が減っており、雑草が非常に多い無処理区とは対照的である。残草調査結果からも非常に高い除草効果が得られたことが確認できる(図13)。今年度は除草作業の頻度を昨年度の週2回から週1回に減らしたが、十分な除草効果が得られた。その反面、実験中にモータドライバが焼損したり、ギアが破損したりするなど、トラブルも多かった。大きく強力なタインを取り付けたため、ロボットに大きな負荷が掛っていたことが予想される。今後はロボットの耐久性の向上と、より効率の良い作業手法の検討が課題となる。

5.まとめ

水稻栽培ほ場での実験では、開発したロボットがこれまでの試作機以上に水田内を安定して走行(除草作業)できることを確認した。除草効果についてはロボットの除草作業による雑草量の減少を確認したが、開発した株間除草機構の効果が出ていないため、機構の改良を進める必要がある。マコモ栽培ほ場においては、昨年度に引き続き非常に良好な除草効果が得られた。条間・株間走行区は見た目にも残草が少なく、作業の効率化を進めることで非常に有効な除草手段となり得ると考えられる。

今後は、水稻栽培圃場の実験で開発したロボットをベースとして研究を進め、除草効果の向上とロボットの効

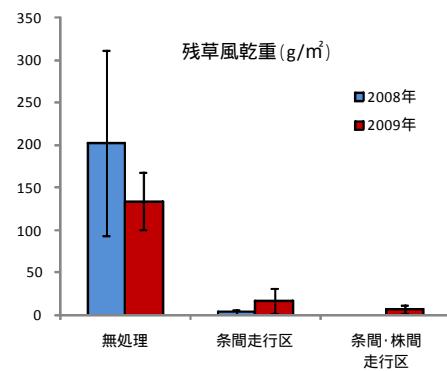


図13 まこもほ場の残草調査結果

率的な運用方法について検討を進める予定である。同時に実用規模のほ場において、ロボットの自律機能による除草作業について検証を進める予定である。

謝辞

本研究は、岐阜県中山間農業研究所、岐阜県東濃地域土岐農業改良普及センター、岐阜大学、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機の協力の下で実施しました。なお、水稻栽培に関する部分は、経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託を受け実施しました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 農林水産省 環境保全型農業関連情報
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/
- [2] “ぎふクリーン農業”
<http://www.pref.gifu.lg.jp/pref/s11435/clean/index.html>
- [3] 光井輝彰, 小林孝浩, 鍵谷俊樹, 稲葉昭夫, 大場伸也, “アイガモロボットの開発”, 日本ロボット工業会機関誌, ロボット177号, pp.20-25, 2007.
- [4] 光井輝彰, 広瀬貴士, 遠藤彰将, 鍵谷俊樹, 大場伸也, 稲葉昭夫, “クリーン農業を支援するロボット(アイガモロボット)の応用技術に関する研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, 第10号, pp.23-26, 2009.
- [5] 福島和敏, 保田謙太郎, 芝山秀次郎 “田面水の攪拌が雑草の発生に及ぼす影響”, 雜草研究, Vol.48(別), pp.224-225, 2003.

画像を用いた食品評価に関する研究(第3報)

田中 等幸 丸山 新* 赤塚 久修 松原 早苗 棚橋 英樹

Research of Food Valuation with Image Analysis (3rd report)

Tomoyuki TANAKA Shin MARUYAMA* Hisanobu AKATSUKA
Sanae MATSUBARA Hideki TANAHASHI

あらまし 近年、各地で食品の信頼性の向上や高付加価値化に対する取り組みが行われているが、岐阜県においても県産品のおいしさを客観的かつ定量的に評価することが求められている。牛肉の評価は、脂肪交雑など外観の良さが重視されているが、肉眼では判断が難しい脂質も評価することが注目されている。本研究では、画像を用いて、牛肉に含まれるオレイン酸割合を非破壊かつ迅速に測定する手法の開発を目的とする。近赤外カメラによって胸最長筋(ロース芯)の画像を取得し、理化学分析値との関係から検量モデルを作成した。次に、未知試料の画像からオレイン酸割合の分布画像を作成し、理化学分析値と提案手法による予測値がおおむね一致した。さらに、食味官能評価試験を実施し、提案手法と食味評価との傾向が一致することを確認した。

キーワード 食品評価、牛肉、オレイン酸、近赤外画像

1. はじめに

1.1 食品の品質評価の動向

食品工業の分野では、食品成分の定量分析や判別分析など品質管理技術に関する研究が多く行われているが、理化学的特性を測定するためには多くの時間や労力を必要としている。しかしながら、農業分野における非破壊測定技術は発展し、光学センサによる選果装置やカメラ画像を用いた着色や傷の選別技術が研究開発されている^[1-2]。特に、流通分野においては、ミカンやリンゴなど果実類の酸度や糖度を瞬時に測定し、測定結果を消費者に提供するサービスを提供している。これにより、見た目の良さに加えて、「おいしさ」をPRするとともに、商品の信頼性の確保や高付加価値化のための新たな取り組みが各地で行われている。

1.2 牛肉の品質評価と脂質測定の課題

近年、日本人の肉食文化は定着し、1960年以降、食肉の消費量の増加はめざましく、その増加幅は他の先進国の多くを上回っている^[3]。特に、牛肉は家計消費の割合が高く、日本人の肉食志向を牽引している食材であるが、その品質評価は牛枝肉取引規格によって決定されている。牛枝肉取引規格による評価項目は、歩留まり等級と肉質等級に大別される。歩留まり等級は枝肉から得られる部分肉の重量によって決定される。肉質評価は、ロース芯部分を評価対象として、脂肪交雫、肉の色沢、肉の締まり及びきめ、脂肪の光沢と質の項目に対して、格付職員

の目視評価によって等級が決定されている。牛枝肉取引規格によって品質評価が全国的に統一化されている中で、日本国内には200種以上もの銘柄牛があり、他銘柄牛との差別化や高付加価値化に向けた独自の取り組みが行われている。

最近の研究によって、脂質が牛肉独特の香り、軟らかさ及び多汁性に影響を及ぼしていることが知られている^[4]。このような背景から、従来の肉質評価に加えて、脂質を評価することで、ブランド化に向けた新たな試みが行われている。しかしながら、現在多く実施されている脂質の測定方法は、理化学的分析装置による破壊試験である。そのため、装置にかけるためにはミンチ状に粉碎するなどの段取りを必要とし、測定値を得るためにには多くの時間を要する課題がある。

そこで本研究では、牛肉を破壊することなく、また手間をかけず、迅速に牛肉表面に分布する脂質成分(以下、オレイン酸割合)を定量的に測定する手法を開発する。さらに、開発した測定手法を用いて、食味官能評価との関係について検討する。

2. 提案手法

農産物を破壊することなく、理化学的特性を測定する方法として実用化例が多いのは、近赤外光を用いた光学的測定法である。近赤外光の波長帯域はおよそ800nm~2500nmと定義される。近赤外光は、食品の主成分(水、脂肪、デンプンなど)の化学的帰属性を反映するとされ、成分に基づく吸収帯が多く観察されている^[5]。そこで、

* 岐阜県畜産研究所

近赤外分光法と画像解析手法を応用し、牛肉の成分分布を可視化する測定法を提案する。従来手法と提案手法との比較を図1に示す。従来手法は肉片の一部を破壊し、ミンチ状に粉碎した試料を理化学分析装置にかけ測定値を得る。これに対し、提案手法は、牛肉をカメラ撮影するのみで、手間と時間をかけず測定することができる。提案手法を枝肉市場へ適用する場合、3つの利点があげられる。1つめは、牛肉を破壊しないため、全頭評価が可能となる。2つめに、牛肉表面に分布する成分の広範な多点測定が可能であるため、脂肪交雑の評価と同様に枝肉横断面の評価が可能である。3つめは、肉眼では評価が難しい脂質を評価項目としてすることで、新たな評価指標の一つとして期待される。

本研究では、近赤外分光法と画像解析手法を応用し、近赤外画像を用いて、牛肉に含まれる成分を簡単かつ迅速に可視化する面分布測定法について提案する。

3. 検量モデルの作成と評価

3.1 供試牛

岐阜県の枝肉市場に上場された黒毛和種のリブロース8頭を実験材料とし、スライスした牛肉を冷蔵庫で1日以上冷蔵したものを供試する。

3.2 実験手順

試料は村澤らの分割手法^[6]を用いて、図2に示すように牛肉のロース芯を4領域に分割する。先ず、ロース芯の輪郭を抽出し、抽出した輪郭距離の最長となる2点間を長軸とし、長軸に直交しかつ、重心位置に最も近い2点間の距離を短軸とする。この2軸によって分割される右上を1象限、左上を2象限、左下を3象限および右下を4象限とする。

図3に実験手順を示す。実験は検量モデルの作成および検量モデルの評価で構成される。検量モデルの作成は、1試料に対し、次節で詳述する分光画像撮影および理化学的分析を行う。この操作を5試料分繰り返し、各象限の分光画像の反射率（領域内中間値）と理化学的分析値との相関が高い波長の組み合わせを同定し、モデル式（以下、検量モデル）を作成する。検量モデルは従属変数をオレイン酸割合の理化学的分析値、説明変数を領域内の反射率とする重回帰分析によって求め、オレイン酸割合と反射率との相関係数が高い2波長を選択する。選択波長を2波長としたのは、選択波長数を増やすことによる過剰適合や画像処理時の複雑さを簡素化するためである。モデル式を次に示す。

$$c = k_0 + k_1 R_1 + k_2 R_2 \quad (1)$$

ここで、 c はオレイン酸割合の予測値%， R_1, R_2 はそれぞれ第一選択波長 $R_1\text{nm}$ 、第二選択波長 $R_2\text{nm}$ における反射率、 k_0, k_1 および k_2 は理化学的分析値と予測値との残差を最小とする条件によって決定される定数である。

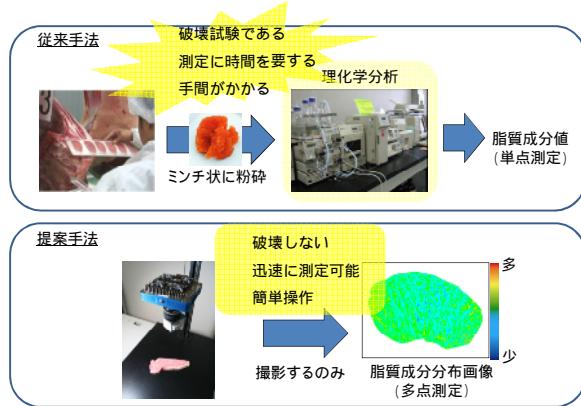


図1 従来手法と提案手法との比較

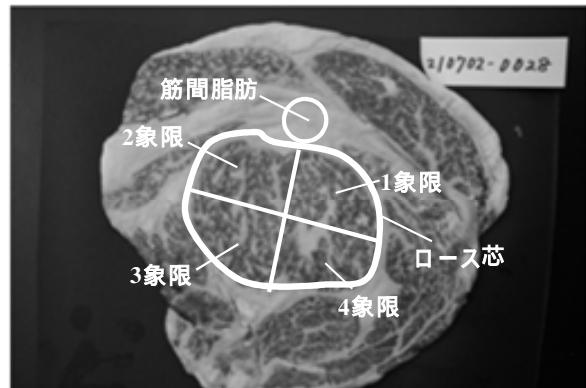


図2 ロース芯の領域分割図

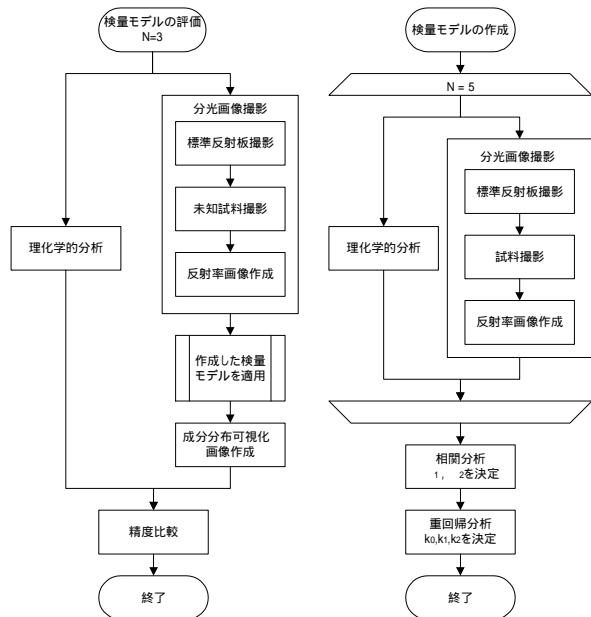


図3 実験手順

次に、作成した検量モデルの精度を評価するため、未知の3試料に対して検量モデル作成手順と同様に分光画像撮影と理化学的分析を行う。分光画像撮影後、反射率画像を作成し、これに作成した検量モデルを適用することで、オレイン酸分布可視化画像を作成する。試料の各

象限における理化学的分析値とオレイン酸分布可視化画像の領域内中間値とを比較し、検量モデルの精度を評価する。なお、精度は相関係数Rおよび予測値の標準誤差SEPによって評価する。

3.3 分光画像撮影及び反射率画像作成

図4に撮影装置の装置構成を示す。撮影装置の構成は冷却CCDカメラ（Apogee社製 Alta U モデル）、分光器（Cri 社製 VariSpec NIR）および光源（林時計工業社製 TKG-1051-1500）から構成される。冷却CCDカメラは近赤外帯域に感度をもち、各画素において65,535階調の高精細な輝度値を取得できる。分光器は液晶チューナブルフィルタを使用し、650nm～1100nmの範囲で任意の波長の光を1nm刻みで透過させることができる。

試料を定盤上に置き、鉛直下向きに冷却CCDカメラを設置する。電圧変動による照明変動を防ぐため、光源は安定化電源を介して接続し、試料の表面が均一に照射する位置に固定する。

波長間のカメラ感度やフィルタ透過特性の違いを均一とするため、標準反射板（ミロクロ社製 BN-R98-SQ12）を用いて露光時間の調整を行った後、700～1050nmまでのバンドパス透過帯域を10nm刻みで掃引し、標準反射板および試料を撮影する。試料の分光画像を標準反射板の分光画像で除算し、分光反射率画像を作成する。これにより、異なる透過波長帯域で撮影した分光画像間の反射の程度を比較することが可能となる。

3.4 理化学的分析

分割領域ごとに切断した肉片と主軸の端部に接する筋間脂肪をそれぞれミンチ状に粉碎する。粉碎した試料0.5gを15mlの試験管に秤量し、25%水酸化カリウム・エタノール溶液5mlを加え、90°で2時間加熱し鹹化する。試験管に水6mlを加えた後、n-ヘキサン15mlで脂質を除去する。水層を塩酸にて酸性にし、n-ヘキサン10mlを加え、1分間振とう抽出する。ヘキサン層を採取し、窒素ガス気流下40°で乾固後、0.05mol/Lフェナシルプロマイド100μl、トリエチルアミン100μl、エタノールを加えて2mlとする。60°で2時間加熱し、フェナシルエステル化によって高速液体クロマトグラフ（以下、HPLC）用試料とする。HPLC（島津製作所社 SPD-10AV）はカラム（島津製作所社 Shim-pack FC-ODS）、移動相にpH2.6の0.01mol/Lリン酸塩緩衝液/アセトニトリル（20:80, v/v）を用いて測定波長254nmで脂肪酸組成を分析する。同定する脂肪酸はミリスチン酸（C14:0）、ミリストレン酸（C14:1）、パルミチニ酸（C16:0）、パルミトレン酸（C16:1）、ステアリン酸（C18:0）、オレイン酸（C18:1）およびリノール酸（C18:2）である。なお、総脂肪酸に占めるオレイン酸をオレイン酸割合とする。

4. 提案手法による実験結果

4.1 牛肉ロース芯の分光画像と近赤外スペクトル

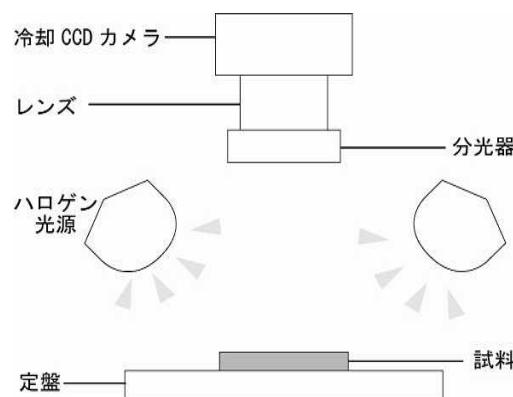


図4 撮影装置

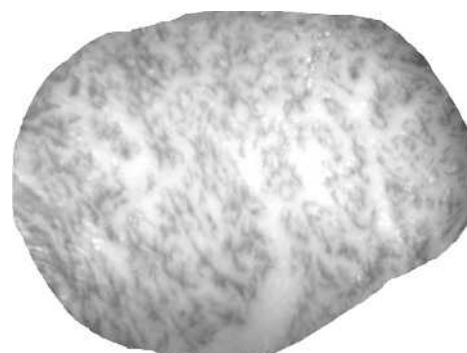


図5 ロース芯の反射率画像（透過中心波長930nm）

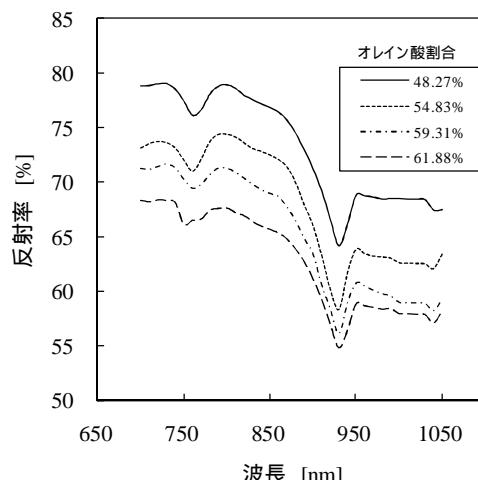


図6 筋間脂肪の近赤外スペクトル

図5は液晶チューナブルフィルタの透過中心波長を930nmにしたときのロース芯の反射率画像である。画像の濃淡は反射率の高い画素を白色、反射率の低い画素を黒色として描画した。

牛肉は、水分、タンパク質、脂質など複数の成分が含まれる^[4]。そのため、脂質成分以外の情報が含まれにくい筋間脂肪部位を対象として、オレイン酸割合の異なる試料の近赤外スペクトルを求めた。図6は筋間脂肪部位における700～1050nmまでの平均反射率を示しており、オレイン酸割合が高い試料ほど近赤外スペクトルは下にシ

フトする傾向にあった。これにより、近赤外波長帯域においてオレイン酸割合と近赤外画像による反射率との間に負の相関が示唆された。また、スペクトルの形状から760nm付近、930nm付近および1040nm付近に下向きのピークが確認された。これらの波長は、C-H結合に由来する吸収帯であることが知られている。なお、腎臓周囲脂肪を用いた実験結果と一致した^[7]。したがって、検量モデルを構成する選択波長として、相関係数が高い順に930nmおよび1040nmの2波長を選択した。

4.2 検量モデルの作成および評価

選択波長における反射率とオレイン酸割合による重回帰式(1)によって、検量モデルを作成した。検量モデルによって計算されたオレイン酸割合の予測値と理化学的分析値との散布図を図7に示す。検量モデルの相関係数Rは0.866、検量モデル作成時の予測標準誤差SEPは1.049となった。検量モデルの誤差の要因として、試料の表面状態や内部構造の違いによる拡散反射の影響が考えられる。また、選択波長とオレイン酸との帰属関係を調査することで検量モデルの安定性が増すと考えられる。今後、オレイン酸以外の脂肪酸に対する近赤外スペクトルへの影響や試料の温度変化による反射率画像や精度への影響な

どについて詳細に検討する必要がある。

4.3 オレイン酸分布画像の作成

検量モデルを未知試料の反射率画像に適用し、オレイン酸割合の分布画像を作成した。図8はオレイン酸割合の

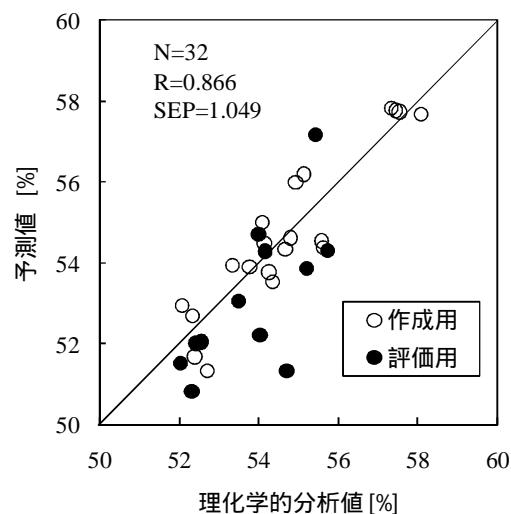


図7 ロース芯内オレイン酸割合の理化学的分析値と提案手法による予測値の散布図

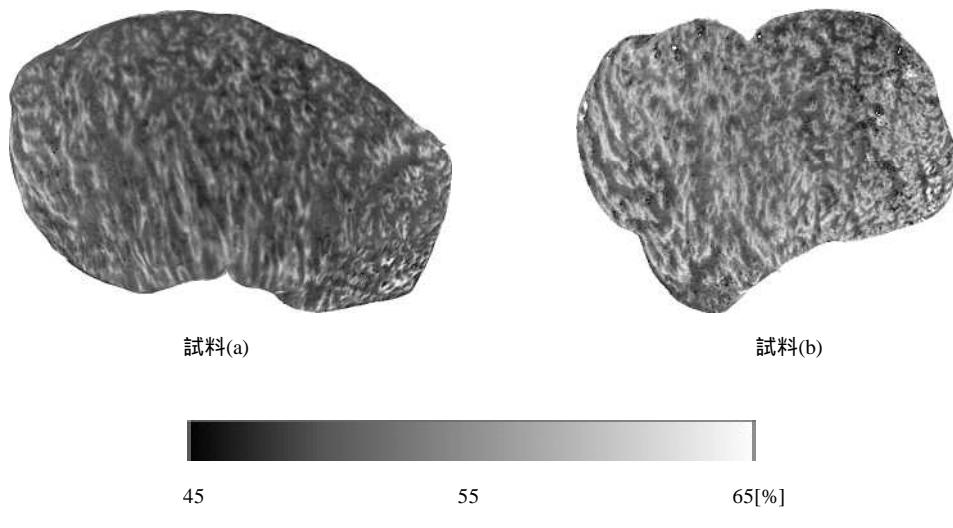


図8 ロース芯内のオレイン酸割合分布画像

表1 ロース芯の分割領域ごとの理化学分析値と予測値との比較 [%]

試料(a)	1象限	2象限	3象限	4象限
理化学的分析値	52.97	52.72	51.36	51.70
提案手法による予測値	51.77	52.20	52.47	51.91

表2 ロース芯の分割領域ごとの理化学分析値と予測値との比較 [%]

試料(b)	1象限	2象限	3象限	4象限
理化学分析値	54.31	57.19	54.34	53.88
提案手法による予測値	53.84	55.16	54.99	55.17

理化学的分析値が異なる2試料（試料(a), 試料(b)）において、オレイン酸割合45~65%の範囲をグレースケール描画した例である。画像内の色は、黒色から白色になるにしたがって、オレイン酸割合が高くなることを示す。また、2試料におけるロース芯の分割領域ごとの理化学的分析値と予測値(領域内中間値)との比較をそれぞれ表1, 表2に示す。図8から試料(a)は試料(b)と比べ、試料全体的にオレイン酸割合の低い様子が確認できる。また、理化学分析値と提案手法による予測値はほぼ一致した。可視画像や肉眼では牛肉表面に広がる脂質成分や分布を確認することは困難であるが、提案手法によってロース芯内におけるオレイン酸割合の分布が視覚的に確認できた。また、従来の理化学的分析は、肉の成分構造は測定対象としない単点測定（肉片の平均値）であるが、提案手法は、試料の構造を損失しないため、オレイン酸割合の成分値のみならず、試料全体の成分分布の解析が可能である。なお、分光画像からオレイン酸分布画像を作成に要した時間は18.5秒であった。

5. 食味官能評価試験

提案手法による解析結果と食味官能評価との関係を調査するため、食味官能評価試験を実施した。試験方法は食肉の官能評価ガイドラインを参考とした^[8]。試料は熟成期間を同一とする2種類（試料L, 試料O）の黒毛和種去勢牛のロース（いずれも格付A5）とした。調理方法はしゃぶしゃぶとし、薄くスライスされた牛肉約50gは、沸騰した熱湯中に9秒間ゆでて、直ちに官能パネルに供した。たれは評価の妨げにならない味付け用ポン酢を小皿で別添した。官能パネルは消費者など24名とし、香り、やわらかさなど10項目について8段階尺度で評価した。

官能パネルによって評価された2試料の項目別平均点のプロットを図9に示す。試料Lと試料Oは甲乙つけがたい評価であったが、試料Lは試料Oに比べて、オレイン酸との関係が深い「(1)香り」、「(4)やわらかさ」、「(5)脂の程度」についての評価点が高かった。特に、「(4)やわらかさ」と「(5)脂の程度」については有意差($p<0.05$)を確認した。図10に2試料のロース芯中心部位の画像解析結果（図10(a)）を示す。解析結果はグレースケール表示であるため、試料L, 試料Oの明暗の差を目視によって、判断することは困難であった。しかし、両者の理化学分析値と画像解析値を比較した結果、試料L, 試料Oの理化学分析値はそれぞれ、54.09%, 50.73%であったのに対し、画像解析によるロース芯内平均値は53.12%, 51.97%であり、オレイン酸割合の傾向は一致した。これにより、オレイン酸割合が高いほど食味性が良いとする従来の報告と一致するとともに、解析結果と食味官能評価試験結果はおおむね一致した。今後、ロース芯に分布するオレイン酸割合と食味との関係について検討したい。

6.まとめ

本研究では、牛肉のおいしさの一要因として知られるオレイン酸を非破壊かつ迅速に定量化する測定手法を開発した。食品成分の定量分析手法として利用されている近赤外分光法に着目し、近赤外帯域に感度を有する冷却CCDカメラと任意の波長の透過を可能とする分光器の組み合わせによって、牛肉に含まれる成分を可視化する面分布測定法を提案した。ロース芯の分光画像を取得し、反射率と理化学的分析値との相関が高い波長を同定し、検量モデルを作成した。次に、未知試料に対し、検量モデルを精度評価した結果、相関係数0.866、予測標準誤差1.046を得た。さらに、食味官能評価との比較試験を行い、提案手法による解析結果と食味官能評価がおおむね一致した。

謝 辞

本研究の一部は科学技術振興機構（JST）地域イノベーション創出総合支援事業、重点地域研究開発推進プログラム（シーズ発掘試験）「牛肉の脂質評価法の開発と応用」により実施した。

文 献

- [1] 中島輝子, 吉川公規, “イメージング分光によるウンシュウミカン果実の腐敗検出装置の開発”, 日本食品工学会誌, Vol.53, No.11, pp. 555-560, 2006.
- [2] 山田久也, 田中信明, 高田咲子, “イチゴ非破壊品質測定装置の実用化”, 照明学会誌, Vol.93, No.5, pp. 273-277, 2009.
- [3] 沖谷, “肉の科学”, 朝倉書店, pp.1-58, 2007.
- [4] J.D.Wood, R.I.Richardson, G.R.Nute, A.V.Fisher, M.M.Campo, E.Kasapidou, P.R.Sheard, M.Emser, “Effects of fatty acids on meat quality: a review”, Meat Science, Vol.66, pp.21-32, 2003.
- [5] 岩元, 河野, 魚住, “近赤外分光法入門”, 幸書房, pp.40-61, 2002.
- [6] 村澤七月, 口田圭吾, 大澤剛史, 堀武司, 加藤浩二. “黒毛和種去勢牛ロース芯を4分割に分割したときの各領域における脂肪交雑の特徴および遺伝的パラメータ”, 日本畜産学会報, Vol.79, No.3, pp.343-351, 2008.
- [7] 田中等幸, 平湯秀和, 丸山新, “画像を用いた食品評価に関する研究”, 岐阜県情報技術研究所報告(第2報), 第10号, pp.54-57, 2009.
- [8] 入江ら, “食肉の官能評価ガイドライン”, 日本食肉消費総合センター, pp.1-37, 2005.

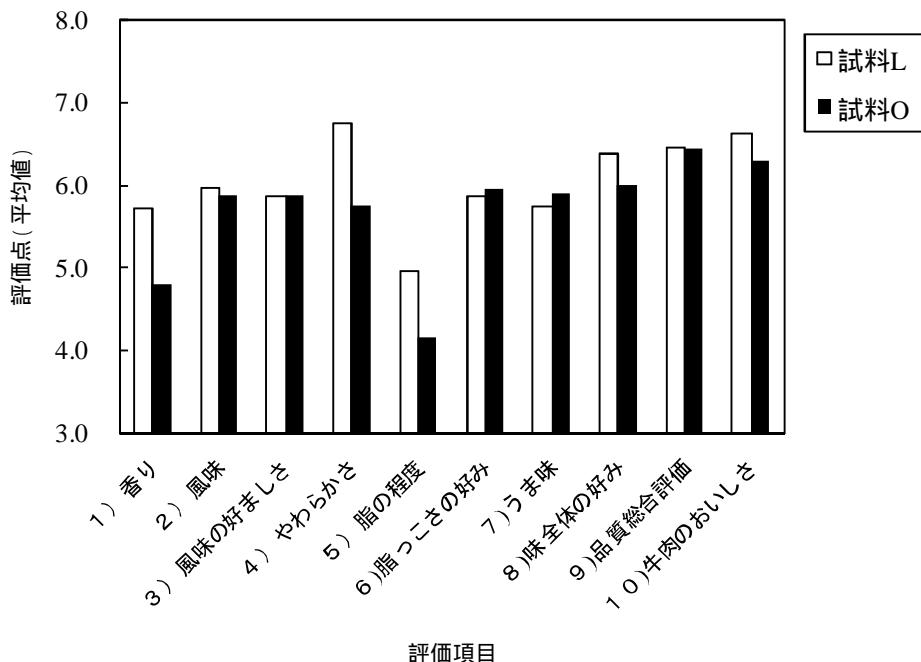


図9 官能パネルによる評価

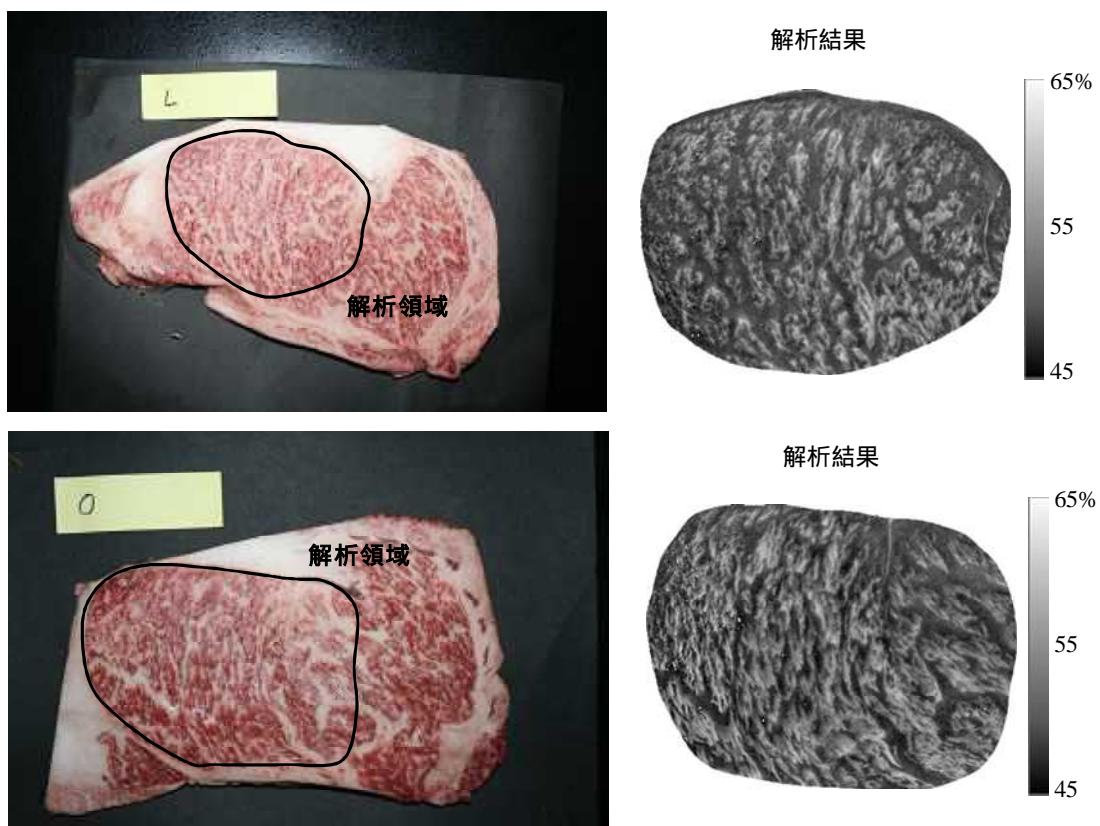


図10 ロース芯の解析領域と画像解析結果

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 11 号 平成 21 年度

発行 平成 22 年 7 月 2 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.gifu-irtc.go.jp>
