

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 1 2 号 平成 2 2 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(第2報)	1
— マルチカメラを用いたカイゼン効果の可視化 —	
人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用(第3報)	5
— 加速度・角速度データを用いた動作推定 —	
映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発	13
— 梱包作業への適用 —	
県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発	19
画像を用いた食品評価に関する研究(第4報)	23
ジャガードモケット織物の高感性化・省力化生産技術の開発	27
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発	33
— 自律走行ロボットの開発(第2報) —	
水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発	36
— 現場での実用性評価 —	
障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第2報)	38
— 後頭部で操作する入力装置によるロボットアームの制御 —	
障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第3報)	40
— 無線通信によるマウスポインタ操作インタフェースの開発 —	
障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第4報)	42
— 携帯型情報端末を用いた家電用赤外線リモコンモジュール —	
測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討(第2報)	44
搬送車ナビゲーションシステムの基礎研究(第2報)	47
— 超音波センサアレイの改良と通信速度の把握 —	
ジグ設計評価のための構造解析に関する研究(第1報)	51

人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用(第2報)

ー マルチカメラを用いたカイゼン効果の可視化 ー

渡辺 博己

山田 俊郎

田中 等幸

棚橋 英樹

Development of Measurement Technology for Human Behaviors and Application to Operations Analysis in Service Industry (2nd report)

- Visualization of Kaizen Effects using Multiple Cameras -

Hiroki WATANABE

Toshio YAMADA

Tomoyuki TANAKA

Hideki TANAHASHI

あらまし 近年、経験と勘に頼るサービス産業に科学的・工学的手法を導入することにより、サービスの品質や提供プロセスにおけるサービスの生産性を高めるためのサービス・イノベーションに関する取り組みが活発に行われている。こうした取り組みに有効と考えられているのが、従来、製造業で培われてきた製造管理ノウハウの活用であるが、サービスの現場での活用事例が少ないのが現状である。そこで、本稿では、サービスの現場におけるカイゼンの持続性・継続性の向上に寄与するために、カメラ映像を用いてカイゼン効果を可視化するための観測システムを試作した。また、実際にカイゼンを実施し、カイゼン前後の映像を分析することで、その効果を視覚的に提示する方法を検討した。その結果、カイゼン効果が明瞭となり、本システムを用いた可視化方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、マルチカメラ、可視化、カイゼン

1. はじめに

1. 1 サービス・イノベーション

近年、経験と勘に頼りがちなサービスの現場に、科学的・工学的手法を導入し、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取り組みが活発に行われている^[1]。こうした取り組みは、欧米諸国に比べて出遅れているサービス産業の生産性向上を目的とするものであるが、サービス産業における生産性とは、付加価値の向上・新規ビジネスの創出と効率性の向上の2つの要素から構成され、次式のように定義されている^[2]。

$$\text{生産性} = \frac{\text{付加価値の向上・新規ビジネスの創出}}{\text{効率性の向上}}$$

そのため、サービス産業における生産性向上では、分母にあたる効率化を図り、これにより余裕が生まれた労働力や資金を分子に充てることが重要と考えられている。また、分母と分子を両立させることにより、サービス産業の飛躍的な生産性の向上を図る取り組みはサービス・イノベーション^[1,2]と呼ばれており、日本経済の成長を支える上で不可欠な取り組みとされている。

1. 2 サービス現場の効率化

これまで、製造業においては、トヨタ生産方式に代表されるように、現場を起点とした効率化・品質管理のための製造管理ノウハウが研究され、数多くの事例が展開されてきた。しかし、サービス業においては、製造管理手法の活用事例が少なく、今後、これらの手法を活用することで生産性が向上すると期待されている^[2]。

こうした製造管理手法の1つにカイゼンがある。カイゼンは、製造業における工場の作業者が中心となって、作業効率の向上や安全性の確保など、ボトムアップ式で行われることに特徴がある活動である。しかし、サービスの現場では、経験と勘による業務形態が慣習化しているだけでなく、サービス業は典型的な労働集約型産業である。そのため、カイゼンもトップダウン式で行われることが多く、持続性・継続性を維持するのが困難な状況にある。

そこで、本稿では、サービスの現場におけるカイゼンのモチベーションの向上を支援するために、カイゼン前後の人の動きを可視化するための観測システムを試作し、カイゼンにより得られた効果を視覚的に表現する方法に取り組んだので、その内容について報告する。

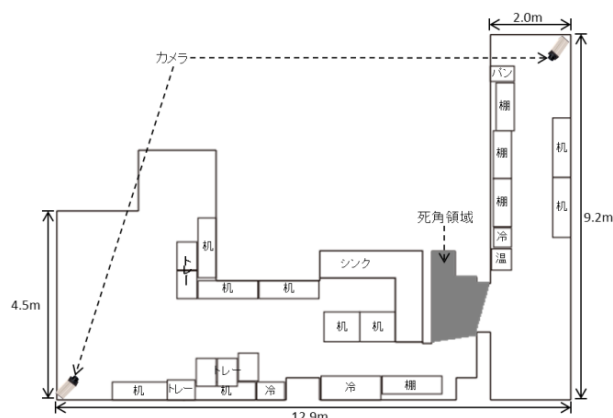


図1 対象領域とカメラ位置

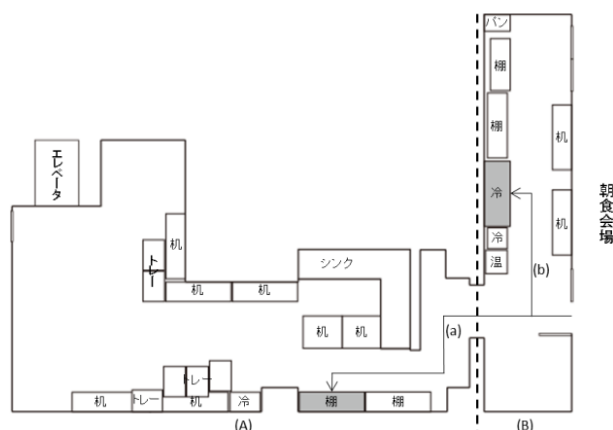


図3 「カイゼン」後の配置

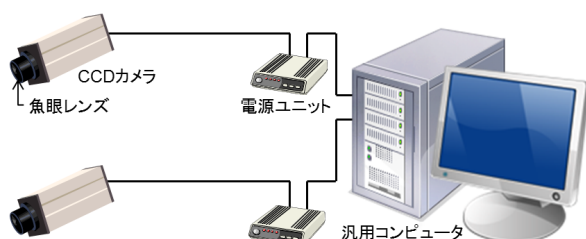


図2 システム構成

2. 観測システムの試作

本システムは、昨年度構築した行動計測システムの画像計測部^[3]をベースに試作した。しかしながら、図1に示すとおり、本稿においてカイゼンの対象とする観測領域（以下、対象領域）は、1台のカメラでは対象領域の全てを観測することが不可能であるため、2台以上のカメラを接続できるよう試作した。なお、本稿では2台のカメラを配置することにより、死角となる領域（図1のグレーの部分）を極力少なくした。この死角領域では、作業がなく、移動のみに使用されている。

図2に試作したシステム構成を示す。レンズは、昨年度と同様に魚眼レンズ（水平画角110度、垂直画角81.57度）を使用した。また、カメラは、配線を簡単にするために、カメラからの映像（Video）信号とカメラへの電源（Power）供給を一本の同軸ケーブルに重畳して伝送するVP多重方式のカラーCCDカメラ（エルモ社製 NSV-D673）を使用した。2つのカメラ映像は、VP多重電源ユニット（エルモ社製 NVC-10P）からそれぞれ出力され、1枚のキャプチャカード（Ituner Network Corp製 Spectra8）をインターフェースとしてPCに入力した。それぞれの入力画像は640×480ピクセルの解像度で処理され、非圧縮AVIファイルとして個々に保存される。この時、AVIファイルの各フレームを書き込んだシステム時間もタイムテーブルとして記録される。

3. カイゼン効果の可視化

3. 1 カイゼン概要

カイゼンは、株式会社十八楼の協力により、朝食提供サービスにおけるバックヤード業務を対象に行った。また、カイゼンでは、朝食会場で料理を提供する料理人1名を被験者として、被験者のバックヤードにおける移動距離を短くすることを目的として、経営者及び被験者と伴に改善案を検討した。これは、一度に多くを改善した場合、どこに効果が表れたのかを示すことが困難になると考えられるためである。その結果、被験者が会場の料理を補充する場合に、予備の材料を保管している1台の冷蔵庫を、被験者が頻繁に使用する作業機の近くに配置することで、移動距離を短縮することにした。図3にカイゼン後の配置を示す。なお、カイゼン前の配置は図1のとおりであり、図3における破線左側を領域A、破線右側から朝食会場までを領域Bとする。

朝食会場とBとを連結する入口を起点とした場合、カイゼン前後の冷蔵庫までの経路は図3中の(a)、(b)で表すことができるが、それぞれの距離は(a)が7.2mであるのに対して、(b)は4.1mである。仮に、1日当たり10回、冷蔵庫を使用する場合のカイゼン効果は、往復で考えると62m（3.1m×2×10）の削減となり、年間に置き換えると22km（62m×365）の移動距離の短縮が見込まれる。

3. 2 可視化方法

可視化の準備作業として、被験者の対象領域における平面座標と時間を求めた。平面座標は、A、Bそれぞれを撮影したAVIファイルから1フレームずつ画像を抽出し、歪曲を補正した上で、画像上の被験者の足元位置を手動で特定し、予め求めておいた各座標変換行列から同一座標系で算出した^[3]。時間は、タイムテーブルに記録したシステム時間をそのまま使用した。

可視化は、前述の座標と時間に基づいて、A、Bにおける滞在時間や歩行時間、歩行距離等を数値で表した表形式と、視覚的に認識しやすい図形式として、座標を連続的に直線で結んだ移動経路として表現する方法と、被験者が特定位置に留まっている状態を示した滞留分布として表現する方法により行った。

表1 カイゼン前後の観測結果

観測時間		滞在時間[秒]			歩行時間[秒]			歩行距離[m]			歩行速度[m/秒]			B→A 移動回数	冷蔵庫 移動回数
		A	B	その他	A	B	A+B	A	B	A+B	A	B	平均		
7:00~7:30	前	34	775	991	12	110	122	18.2	130.2	148.4	1.5	1.2	1.2	2	0
	後	0	636	1,164	0	117	117	0.0	126.4	126.4	-	1.1	1.1	0	1
7:30~8:00	前	106	621	1,073	27	102	129	41.0	135.7	176.7	1.5	1.3	1.4	3	3
	後	0	208	1,592	0	69	69	0.0	82.5	82.5	-	1.2	1.2	0	3
8:00~8:30	前	155	644	1,001	60	143	203	96.5	179.6	276.1	1.6	1.3	1.4	9	1
	後	127	298	1,375	25	52	77	37.8	61.8	99.6	1.5	1.2	1.3	3	1
8:30~9:00	前	275	390	1,135	86	123	209	125.2	153.1	278.3	1.5	1.2	1.3	10	1
	後	205	537	1,058	79	127	206	121.8	150.6	272.4	1.5	1.2	1.3	9	4
合計	前	570	2,430	4,200	185	478	663	280.9	598.6	879.5	1.5	1.3	1.3	24	5
	後	332	1,679	5,189	104	365	469	159.6	421.3	580.9	1.5	1.2	1.2	12	9
	差	Δ238	Δ751	989	Δ81	Δ113	Δ194	Δ121.3	Δ177.3	Δ298.6	0.0	Δ0.1	Δ0.1	Δ12	4

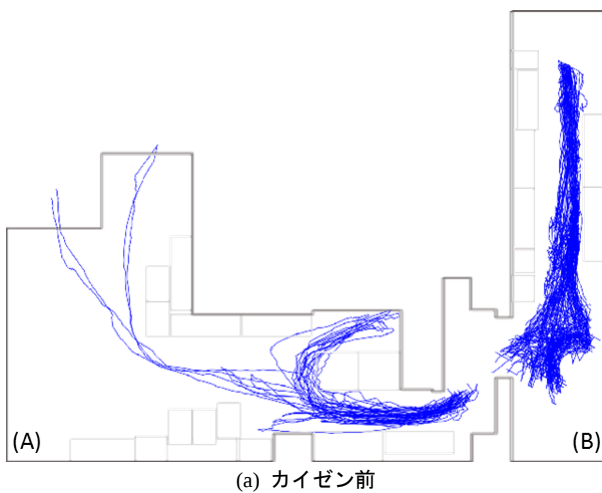


図4 カイゼン前後の移動経路

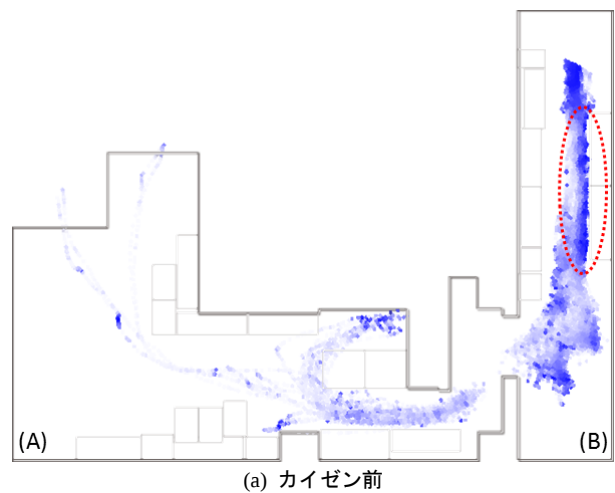


図5 カイゼン前後の滞留分布

3. 3 可視化結果と考察

カイゼン前後の観測結果について、数値データを表1、移動経路を図4、滞留分布を図5に示す。

まず、直接的な効果であるが、表1に示す冷蔵庫移動回数がカイゼン後は9回であったため、距離に換算して55.8m (3.1m×2×9) の移動のムダを削減することができた。そのため、Bを経由してAに移動した回数も12回削減



することができ、これは図4のAにおける軌跡の数が減少していることから容易に判別することができる。また、Aにおける滞在時間、歩行時間、歩行距離も減少した結果、朝食会場で顧客と接する時間が増加し、付加価値の向上に貢献していることが予想できる。

次に、二次的効果であるが、カイゼンで移動した冷蔵庫は、Aに配置されていた時は上部に物が積載され、棚

の代替として使われていた。しかし、冷蔵庫をBに移動したことにより、Aには代わりに棚を配置したため、Bに配置した冷蔵庫の上部は、棚として使用されるのではなく、作業台として使用されるようになった。そのため、カイゼン前は図5(a)の円（点線）内のような縦に長く分布する滞留状態が発生していたが、カイゼン後は図5(b)の円（点線）内の横に短く分布する滞留状態が発生するようになった。これらの分布により、Bにおける歩行時間、歩行距離が減少したと考えられ、図5はカイゼンの二次的効果を裏付ける可視化手段として有効であることが分かる。

4. まとめ

サービスの現場におけるカイゼンへのモチベーションの向上を図るために、カイゼン前後の作業者の動きを観測することにより、作業者の位置情報を視覚的に表現する可視化手法について検討した。作業者の観測においては、作業者が複数の領域を行き来するため、マルチカメラシステムを試作し、広範囲における観測を可能にした。また、カイゼン効果の可視化においては、移動経路、滞留分布として表現することで、数値データだけでは表れない情報の視覚的な表現が可能となった。

これらの結果を、協力者である株式会社十八楼に提示したところ、カイゼン効果に理解を得られただけでなく、移動経路や滞留分布から残存する課題を発見し、次のカ

イゼンへの意欲が見られた。そのため、本稿で提示した移動経路や滞留分布は、カイゼンの持続性・継続性の向上に有効な可視化手段となり得ると考えられる。

今後は、様々な観測手法について研究を進めながら、カイゼンに留まらず、人やモノの動きを効果的に可視化できる手法について検討を進める予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、試作した観測システムの実証及びカイゼン効果の検証のために御協力を頂きました株式会社十八楼の伊藤豊邦専務をはじめ、従業員の皆様に深く感謝いたします。また、カイゼンの御指導・御鞭撻を頂きました株式会社JPECの山田直志代表取締役様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 内藤耕，サービス工学入門，東京大学出版会，2009.
- [2] サービス産業生産性協議会，サービス・イノベーション（サービス産業生産性協議会平成20年度活動報告書），生産性出版，2009.
- [3] 渡辺博己，山田俊郎，浅井博次，棚橋英樹，“人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.1-8，2010.

人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用(第3報)

ー 加速度・角速度データを用いた動作推定 ー

渡辺 博己

山田 俊郎

田中 等幸

棚橋 英樹

Development of Measurement Technology for Human Behaviors and Application to Operations Analysis in Service Industry (3rd report)

- Motion Estimation from Acceleration and Gyroscopic Data -

Hiroki WATANABE

Toshio YAMADA

Tomoyuki TANAKA

Hideki TANAHASHI

あらまし 科学的・工学的手法をサービスに適用し、サービス提供の効率性と付加価値を高めることが重要とされている中で、我々は昨年度より、県内旅館・ホテル業を対象として、宴会・食事会場における配膳・下膳業務への最適設計ループの適用を目指し研究開発を行っている。ここで重要となるのが従業員の動作を分析する技術であり、統計的に十分な動作データの収集が必要となっている。そこで、我々は、人の動作計測手法の1つとして広く用いられている加速度／角速度センサを利用することにより、長時間の計測が可能なウェアラブルシステムを開発している。本稿では、従業員への負荷の少ないセンサの数、装着位置を検討するために、判別分析手法を用いた加速度／角速度データによる動作推定実験を行い、様々な条件の違いによる判別率への影響を明らかにした。

キーワード サービス、科学的・工学的手法、加速度／角速度センサ、判別分析、動作推定

1. はじめに

1. 1 科学的・工学的手法の導入

サービスはモノとして触ることができず（無形性）、サービスが存在するのは提供者からのサービスを受容者が受容した時だけであり（同時性）、サービスの授受が終わればサービスは存在しなくなり（消滅性）、サービスは受け取る相手によって価値が違ってくる（異質性）^[1]。つまり、サービスは、提供されるその場所にのみ存在し、提供されるときにのみ利用が可能であるため、その利用状況を別の場所で再現することができないという特徴を持っている。そのため、これまでサービス産業では経験と勘によるサービスの提供が行われてきており、これがサービス産業の生産性の低さの一因と考えられている。

こうした状況を克服するため、製造業において利用されてきた科学的・工学的手法をサービス産業に適用することにより、サービス提供の効率性と付加価値を高め、サービスの生産性の向上を図ろうとする研究開発^[2~4]が急速に拡大している。また、経済産業省は、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」という最適

設計ループ（図1）に基づいた研究開発^[5]を推進している。

1. 2 観測データの分析

我々は、昨年度より、県内サービス産業の中で多くの従業員を抱える旅館・ホテル業を対象として、特に、サービス提供のバックヤードにあたる宴会・食事会場における配膳・下膳業務への最適設計ループの適用を目指し、従業員の行動計測技術に関する研究開発を行っている^[6]。ここでは、業務の平準化・標準化のための業務改善やノウハウの共有、あるいは人材育成のための業務のマニュアル化などによる効率性の向上を目的とした「設計」を

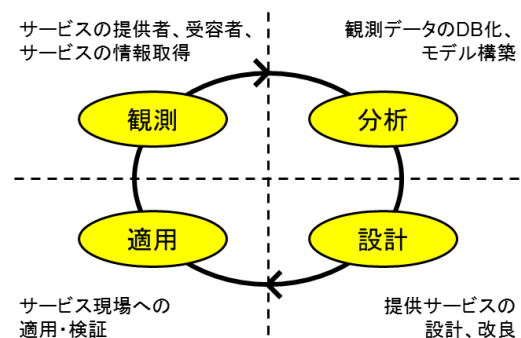


図1 最適設計ループ^[5]

可能にするために、「観測」技術を確立するとともに、計測データから動作を推定する「分析」手法を開発している。

サービスの現場における従業員の動作を分析する場合、業務内容によりその動作は多様であるとともに、複雑であるため、統計的に十分な動作データの収集が必要となる。そこで、我々は、人の動作計測手法の1つとして広く用いられている加速度／角速度センサを利用することにより、長時間の計測が可能なウェアラブルシステムを開発している。加速度／角速度センサは、カメラシステム等のように環境に設置する必要がなく、小型軽量であるため、顧客の目に留まらない位置に装着が可能であり、サービスの現場のような環境での計測に適した機器である。しかし、サービスの現場で長時間にわたり従業員の動作を計測するためには、できるだけ負荷の少ないセンサの数、装着位置を検討する必要がある。

本稿では、従業員の動作を高精度に推定するために、判別分析手法を用い、センサ数、装着位置を含め、様々な条件の違いによる判別率への影響を評価した。評価にあたっては、配膳業務を対象として、同じ従業員間、異なる従業員間で計測した動作データを用いて動作推定実験を行った。以下、その内容について報告する。

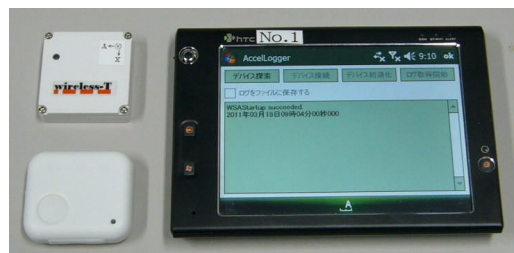
2. 動作の推定

2. 1 動作計測

動作データは、昨年度構築した行動計測システムの動作計測部^[6]をベースに改良したシステムにより計測した。計測には、加速度データのみが取得可能なセンサ（ワイヤレステクノロジー（株）製 WAA-004）と加速度及び角速度データの取得が可能なセンサ（同 WAA-006）を使用した。また、より携帯性を高めるために、近距離無線通信規格の1つであるBluetoothでセンサをPDA（HTC Nippon（株）製 HTC Advantage X7501）に接続する構成とした。システムの外観を図2、主な諸元を表1、2に示す。また、PDAに実装する動作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個のセンサを同時に接続することが可能である。

本システムは、計測対象となる身体部位にセンサを装着し、PDAを携帯することにより使用する。WAA-004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BluetoothのSPP（Serial Port Profile）を用いたシリアル通信によりPDAに送信される。WAA-006からは、3軸加速度データ、測定時刻に加えて、1秒当たりの3軸の変位角度データがBluetoothシリアル通信によりPDAに送信される。PDAでは、受信したデータを各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。

実験では、着物姿の従業員1名の背部にある帯結びにPDAを、複数の身体部位にセンサを装着し、身体部位毎



（左上：加速度センサ、左下：加速度／角速度センサ、右：PDA）
図2 システムの外観

表1 各センサの主な諸元

項目	WAA-004	WAA-006	
センサタイプ	加速度(3軸)	加速度(3軸)	角速度(3軸)
サンプリングレート	MAX1000Hz	MAX1000Hz	
送信レート	MAX1000Hz	(3軸)MAX500Hz (6軸)MAX333Hz	
検出範囲	±2.5g, ±3.3g, ±6.7g, ±10g コマンド切換え	±2.0g, ±4.0g コマンド切換え	X,Y軸:±500dps Z軸:±300dps
使用時間	約4時間	約6時間	
サイズ (W×H×D)	38mm×39mm ×10mm	39mm×44mm×12mm	
重量	17g	20g	

表2 PDAの主な諸元

項目	HTC Advantage X7501
CPU	Marvell® PXA270 624MHz ATI graphic chip W2284内蔵
搭載OS	Microsoft® Windows Mobile® 6 Professional
内蔵メモリ	256MB FLASH ROM, 128MB SDRAM, Microdrive 8GB HDD
連続通話時間	4.5時間(W-CDMA使用時) 5.5時間(GSM使用時)
サイズ (W×H×D)	133.1mm×97.7mm×16mm
重量	350g(電池、キーボード、スタイラス含む)

に加速度／角速度データを計測した。なお、PDA、センサの重量は500g以下であるため、装着による動作への影響は無視できる程度である。

2. 2 特徴量抽出

加速度データを用いた特徴量の抽出手法としては、サンプリング間隔が等しい時系列データを一定のウィンドウ幅 w で構成されたウィンドウで分割し、スライディング幅 $s = w/2$ 、つまり、 $w/2$ のウィンドウ幅がオーバーラップするようウィンドウをスライドさせることにより、ウィンドウ毎に特徴量を求めるという手法^[7,8]が一般的である。また、文献^[7,8]では、平均、標準偏差、エネルギー、周波数領域エントロピー、相関係数の5種類の特徴量としてウィンドウ毎に求めている。そこで、本稿においても文献^[7,8]と同様に、ウィンドウ毎に5種類の特徴量を求める方法を採用した。

平均、標準偏差は各軸の加速度／角速度データの平均

と標準偏差である。エネルギーは、各軸の加速度／角速度データにFFTを行い、その絶対値の合計として求める。ある軸の加速度／角速度データのFFT成分を $F_1, F_2, \dots, F_w$ とすると、エネルギーは式(1)により求められる。

$$Energy = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w |F_i|^2 \quad (1)$$

周波数領域エントロピーは、FFT成分 F_i を全成分の総和で正規化し、式(2)の確率分布 p を求め、式(3)により求められる。

$$p(i) = \frac{|F_i|^2}{\sum_{j=1}^w |F_j|^2} \quad (2)$$

$$Entropy = - \sum_{i=1}^w p(i) \log p(i) \quad (3)$$

相関係数は、対象とする軸とそのセンサ内の他軸、及びセンサ間の各軸の組み合わせにおける2軸間の加速度／角速度データに関する相関係数である。相関係数は、2軸間の共分散 $cov(x, y)$ と標準偏差 σ_x, σ_y から式(4)により求められる。

$$corr(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4)$$

2. 3 クラス判別

加速度／角速度データから動作を推定するため、上記で抽出した特徴量に対して、それぞれの特徴量にクラスを一意に特定できるラベル（以下、クラスラベル）を付した教師あり学習を適用した。クラス判別器としては、パターン認識の分野で様々な対象の推定に使用され、特徴の線形結合の値に基づいて分類を行う線形分類器のLDA (Linear Discriminant Analysis) とSVM (Support Vector Machine) の2つを採用した。LDAは、事前に与えられているデータが異なるグループに分かれることが明らかな場合、新しいデータが得られた際に、どちらのグループに入るのかを判別するための基準（判別関数）を得るための識別手法で、正規分布モデルを仮定したアルゴリズムの1つである。SVMは、トレーニングデータから、各データ点との距離が最大となる分離平面（超平面）を求めるマージン最大化という基準でパラメータを学習する識別手法で、現在知られている多くの手法の中で一番認識性能が優れた学習モデルの1つとされている。

実験では、オープンソースの統計解析システムであるR^[9]を使用し、動作を姿勢と作業の2つのカテゴリに分け、カテゴリ毎に2つのクラス判別器により判別率を求めた。また、姿勢については更に3分類し、カテゴリ毎の判別率を求めた。各カテゴリにおける判別クラスを表3に示す。それぞれの姿勢・作業は配膳業務における標準的な動作であるが、作業マニュアルは存在せず、経験と勘により行われている動作である。なお、特徴量のクラスラベルは、加速度／角速度データの計測時に撮影したカメラ映

表3 各カテゴリにおける判別クラス

カテゴリ	姿勢			作業
	全身	上半身	下半身	
個別 クラス	立位 座位	直立 前傾 前屈	前後移動 左右移動 重心移動 静止	配膳 下膳 集膳 整膳 膳清掃 床清掃 グラス確認 定点作業 爪先作業 搬送 空搬送 台車搬送 台車空搬送 移動 静止
共通 クラス	立上り 立下り			

像に基づき、各サンプルに全てのカテゴリのクラスラベルを手で付けた。また、特徴量の抽出時には、抽出対象となるウィンドウ内のサンプルに複数のクラスラベルが含まれているウィンドウは無視し、単一のクラスラベルが付されているウィンドウのみを対象に特徴量を求め、そのクラスラベルを特徴量のクラスラベルとした。

3. 実験

本稿では、動作推定手法の有効性の検証を目的として、同じ従業員により、同じ作業を複数回試行した時の動作データを用いて判別率を求めた動作推定実験（実験Ⅰ）と、異なる従業員ではあるが、同一時間、場所で作業した時の動作データを用いて判別率を求めた動作推定実験（実験Ⅱ）の2通りの実験を実施した。

各実験においては、ウィンドウ幅の違いによる判別への影響を比較するために、ウィンドウ幅の違いによるサンプル数、判別率を求めた。なお、両実験ともに、加速度／角速度データは、それぞれサンプリング周波数100Hzで計測したデータを5サンプル毎に平均し、50ミリ秒間隔で取得した。また、ウィンドウ幅は $w=16$ (0.8秒)、32 (1.6秒)、64 (3.2秒) の3種類とした。これは、約1秒毎に動作を推定することを想定した場合、文献^[7,8]のようにスライディング幅を $s=w/2$ として動作を判別すると、それぞれ0.4秒、0.8秒、1.6秒間隔で判別結果を出力することが可能となるからである。但し、本稿では、人の動作の多様性・複雑性に十分に対応した特徴量を確保するために、スライディング幅を $s=1$ として特徴量を求めた。なお、リアルタイムシステムなど、実時間で処理することが必要な場合は、適切なウィンドウ幅とスライディング幅を検討する必要がある。以下、各実験について述べる。

3. 1 実験Ⅰ ～同じ従業員による動作データを用いた動作推定実験～

実験Ⅰでは、昨年度実施した配膳業務のシミュレーション¹⁶⁾で取得した動作データから、台車を使った配膳作業の3試行分を使用した。これは、同一日に取得した動作データであるとともに、配膳手順が若干異なっているが、3試行分すべての動作データが同一の配膳業務を繰り返しているため、比較的に高い判別率が得られることを想定したことによるものである。なお、取得した動作データは、着物姿の従業員1名の頭頂部、腰部、両前腕部及び右下腿部の計5箇所に着したWAA-004から取得した加速度データである。

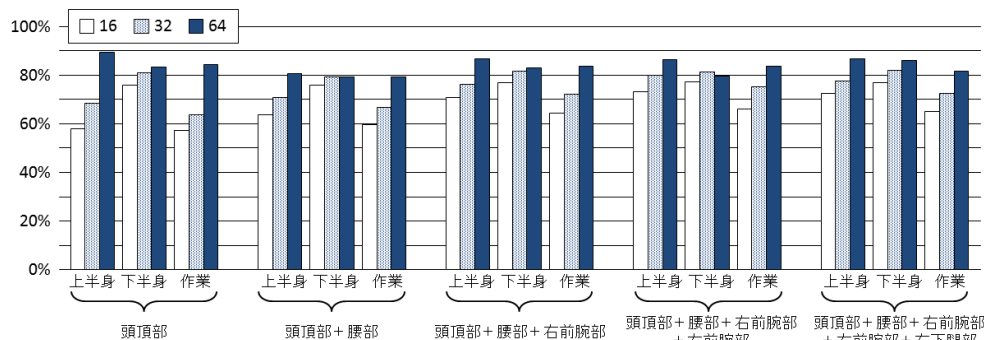
まず、ウィンドウ幅の違いによるサンプル数を、各カテゴリのクラス毎に比較した。表4に比較結果を示す。結果は3試行分のサンプル数の合算値である。なお、特徴量抽出後のサンプル数が0、または1試行のみに分類されたクラスは省略する。

次に、同データを使用し、1つ抜き交差検定法によりウィンドウ幅、装着位置、センサ数の違いによる判別率を求めた。1つ抜き交差検定法は、標本群から1つの事例だけを抜き出してテスト事例とし、残りをトレーニング事例とすることで、全事例が一回ずつテスト事例となるよう検定を繰り返す方法で、統計学において仮説検定に用いられる手法の1つである。本実験では、2試行分をトレーニングデータ、1試行分をテストデータとして組み合わせを変え、3通りの判別結果より判別率を求めた。全身の

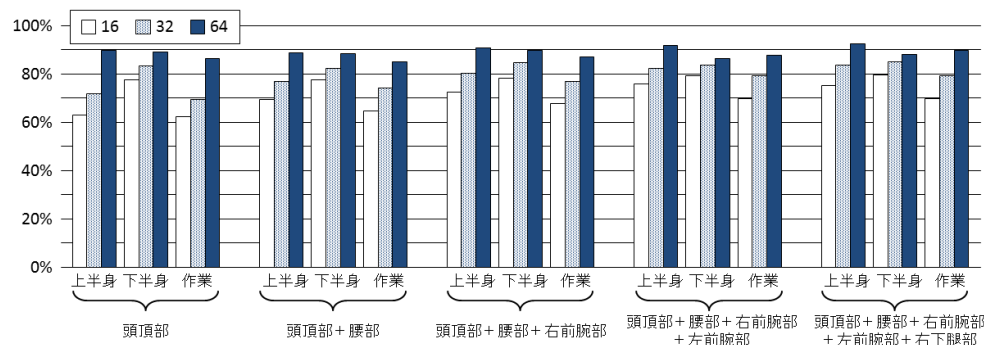
表4 実験Ⅰのカテゴリ・クラス別サンプル数の比較結果

カテゴリ／クラス	抽出前のサンプル数	特徴量抽出後のサンプル数		
		w=16	w=32	w=64
立位	20211	13504	9583	4672
直立	814	316	89	5
前傾	10390	5738	3470	1178
前屈	9007	7450	6024	3489
前後移動	3581	1759	696	67
左右移動	71	26	0	0
重心移動	14812	10502	8044	4262
静止	1747	1217	843	343
配膳	11201	7635	5968	3433
グラス確認	549	100	3	0
定点作業	5723	4182	2928	1172
搬送	299	131	47	0
空搬送	104	48	6	0
台車搬送	2058	1208	511	61
台車空搬送	277	200	120	6

カテゴリについては、座位のサンプル数が0であったため判別できなかった。図3にLDA、SVMによるカテゴリ毎の判別率の比較結果を示す。結果は、各カテゴリにおいて、正しく判別されたサンプル数を全サンプル数で除した判別率である。なお、特徴量抽出に使用する動作データの組み合わせは、装着位置、センサ数を変更することにより31通りあるため、1～5個のセンサ数のうち、主な



(a) LDAによる判別結果の例



(b) SVMによる判別結果の例

図3 実験Ⅰの判別率の比較結果

表5 実験Ⅱのカテゴリ・クラス別サンプル数の比較結果

カテゴリ ／クラス	抽出前の サンプル数	特徴量抽出後のサンプル数		
		w=16	w=32	w=64
立位	11445	6718	4768	3054
直立	2156	1843	1536	1003
前傾	7743	4397	3108	2019
前屈	1546	478	124	32
前後移動	6541	4197	3138	2222
左右移動	551	188	90	42
重心移動	4113	2141	1396	691
静止	240	192	144	99
配膳	4991	2132	1381	691
定点作業	148	76	28	0
搬送	5583	3911	2879	2048
空搬送	453	378	298	197
移動	270	221	182	118

装着位置の結果のみを示す。

3. 2 実験Ⅱ ～異なる従業員による動作データを用いた動作推定実験～

実験Ⅰでは、配膳業務のシミュレーションで取得した動作データを使用した。実験Ⅱでは、事前に役割分担や配膳物等について何も打ち合わせず、実際の配膳現場で同時に計測した2名の従業員の動作データを使用した。使用した動作データは、着物姿の各従業員の頸部、腰部の2箇所にてWAA-006を、両上腕部の2箇所にてWAA-004を装

着し、取得した加速度／角速度データである。

まず、カテゴリ・クラス別サンプル数を比較した結果を表5に示す。結果は、2名分の合算値である。なお、特徴量抽出後のサンプル数が0、または1名にのみ分類されたクラスは省略する。

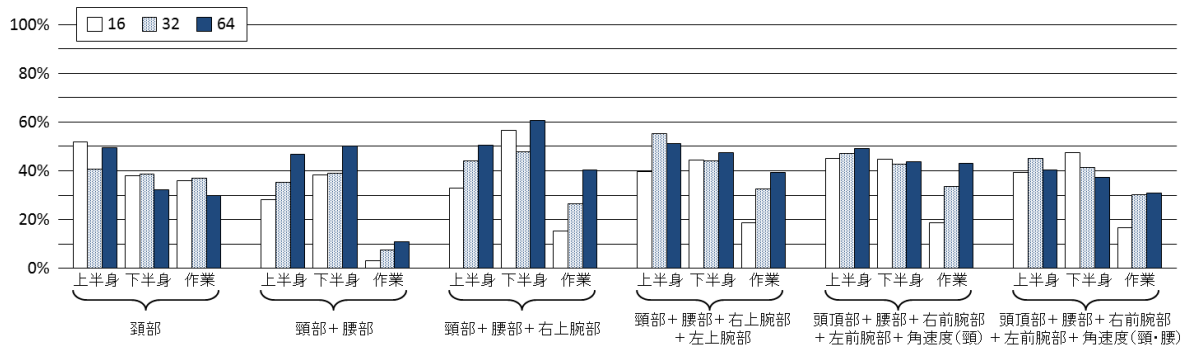
次に、2名分の動作データのうち、一方をトレーニングデータ、他方をテストデータとし、これらを入れ替える交差検定法により2通りの判別結果を取得し、判別率を求めた。前節と同様に求めた判別率の比較結果を図4に示す。ただし、動作データの組み合わせが、装着位置、センサ数、データ種別を変更することにより63通りあるため、1～4個のセンサ数のうち、主な装着位置、データ種別における結果のみを示す。

4. 結果と考察

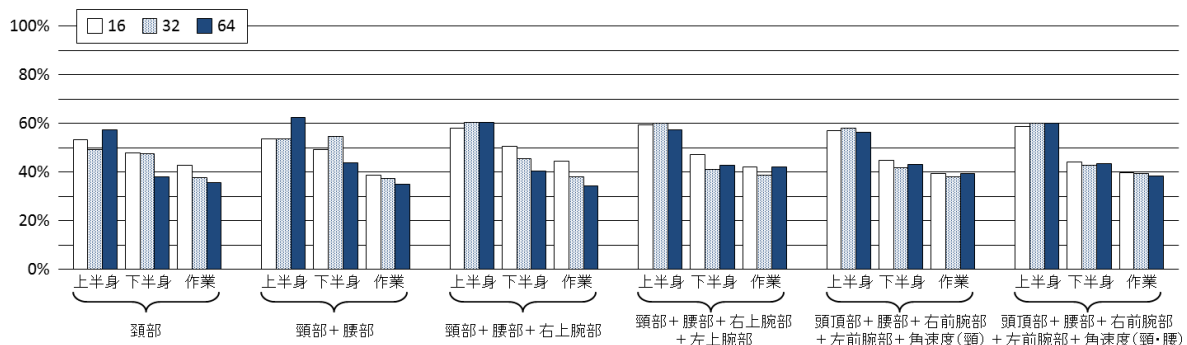
4. 1 ウィンドウ幅によるサンプル数への影響

表4、5より、両実験において、ウィンドウ幅を大きくすると、出現頻度の低い動作は十分なサンプル数が得られないだけでなく、欠落するクラスがあることが分かった。実験Ⅰでは、「下半身」カテゴリの「左右移動」クラスが $w = 32$ で、「作業」カテゴリの「グラス確認」、「搬送」、「空搬送」クラスが $w = 64$ で欠落し、実験Ⅱでは、 $w = 64$ で「作業」カテゴリの「定点作業」クラスが欠落した。

また、表4、5の結果が合算値であるため、直接把握す

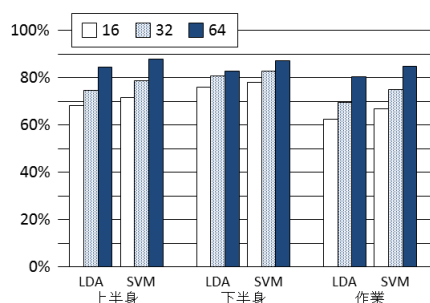


(a) LDAによる判別結果の例

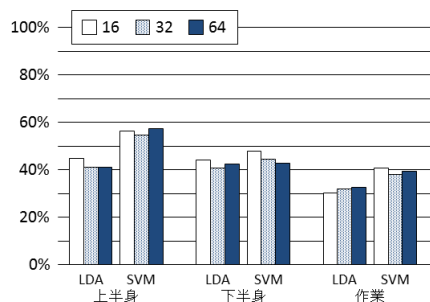


(b) SVMによる判別結果の例

図4 実験Ⅱの判別率の比較結果

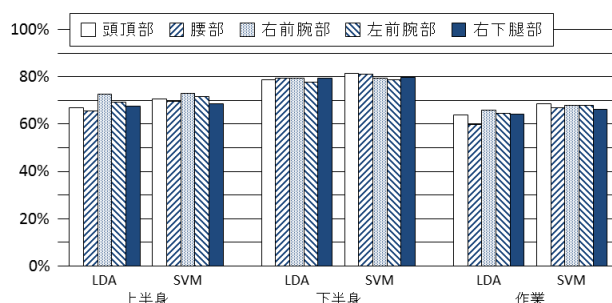


(a)実験 I における比較結果

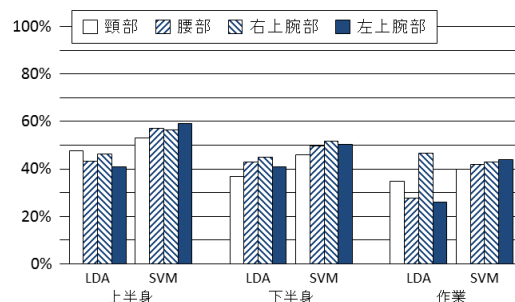


(b)実験 II における比較結果

図5 ウィンドウ幅による判別率への影響



(a)実験 I における比較結果



(b)実験 II における比較結果

図6 装着位置による判別率への影響

ることは困難であるが、実験 I では、 $w = 32$ で「作業」カテゴリの「グラス確認」、「空搬送」クラスが、 $w = 64$ で「上半身」カテゴリの「直立」クラスが1試行分にしか存在せず、判別結果を求めることができなかった。実験 II についても同様に、 $w = 64$ で「上半身」カテゴリの「前屈」クラス、「下半身」カテゴリの「左右移動」、「重心移動」、「静止」クラス、「作業」カテゴリの「配膳」クラスが1名分にしか存在せず、判別結果を求められなかった。

これらの動作を含め様々な動作が、その日の業務内容により出現頻度が変わることが予想されるが、分類結果として必要な姿勢・作業により、適切なウィンドウ幅の設定が必要である。

4. 2 ウィンドウ幅による判別率への影響

ウィンドウ幅 $w = 16, 32, 64$ について、各平均判別率は、実験 I ではLDAが68.9%, 74.9%, 82.6%で、SVMが72.1%, 78.8%, 86.7%であった。また、実験 II ではLDAが39.8%, 38.0%, 38.8%, SVMが48.3%, 45.7%, 46.4%であった。各カテゴリにおける平均判別率を図5に示す。

実験 I では、欠落するクラスがあるものの、ウィンドウ幅を大きくすることで、判別率が上昇した。しかし、実験 II では、必ずしも判別率が上昇するという傾向は見られなかった。これは、従業員間で各クラスを構成するサンプル数にばらつきがあり、トレーニングデータのサンプル数が減少することで、適切な判別空間を構築できなかったことが原因と考えられる。そのため、判別空間の構成に十分なサンプル数を確保することが、判別分析手法を用いた動作推定には重要である。

4. 3 装着位置による判別率への影響

装着位置の違いによる判別率への影響については、セ

ンサ数が1の場合の各装着位置における加速度データの判別結果から評価する。

実験 I において、各装着位置が頭頂部、腰部、右前腕部、左前腕部、右下腿部の時の平均判別率は、LDAが70.5%, 70.5%, 72.7%, 68.2%, 69.9%, SVMが71.6%, 72.8%, 73.5%, 72.5%, 73.6%であった。また、実験 II において各装着位置が、頸部、腰部、右上腕部、左上腕部の時の平均判別率は、LDAが35.9%, 46.0%, 37.9%, 39.8%, SVMが51.2%, 50.3%, 49.5%, 46.1%であった。各カテゴリにおける平均判別率を図6に示す。

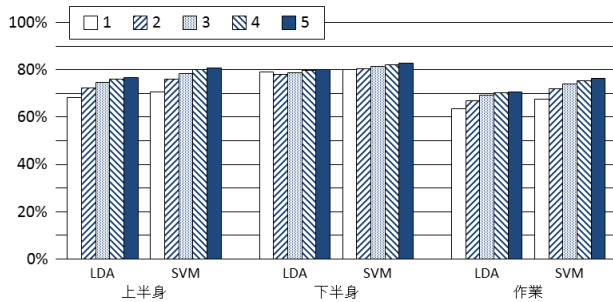
実験前は、「上半身」カテゴリが腰部より上位、「下半身」カテゴリが腰部より下位の装着位置において判別率が高くなると予想していたが、その傾向は見られなかった。これは、実際に行われる業務を対象とした動作には、単純な動作にはない複雑な姿勢・作業が含まれることが原因と考えられる。そのため、判別する姿勢に応じて装着位置を選定することも必要ではあるが、対象とする業務を考慮した装着位置の選定が重要である。

4. 4 センサ数による判別率への影響

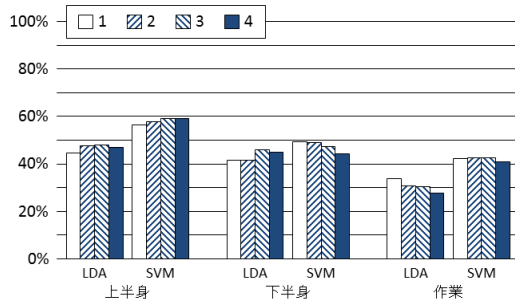
センサ数の影響については、実験 I では1~5、実験 II では1~4個の各センサから得られた加速度データの判別結果で評価する。

実験 I では、センサ数1~5の順に、LDAが70.4%, 72.4%, 74.3%, 75.4%, 75.8%, SVMが72.8%, 76.2%, 78.1%, 79.3%, 80.0%であった。また、実験 II では、センサ数1~4の順に、LDAが39.9%, 40.1%, 41.3%, 39.8%, SVMが49.3%, 49.7%, 49.7%, 48.2%であった。各カテゴリにおける平均判別率を図7に示す。

実験 I では全てのカテゴリで判別率の上昇傾向が得ら



(a)実験Ⅰにおける比較結果



(b)実験Ⅱにおける比較結果

図7 センサ数による判別率への影響

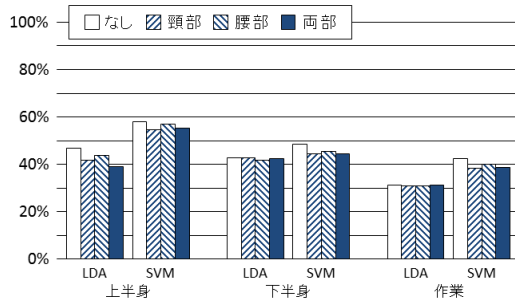


図8 角速度データによる判別率への影響

れたが、実験Ⅱでは類似する傾向は見られなかった。そのため、センサ数についても装着位置と同様、対象とする業務を考慮したセンサ数の選定が重要である。

4. 5 角速度データによる判別率への影響

実験Ⅱでは角速度センサを使用したため、角速度データが判別率に及ぼす影響について評価する。

角速度データについて、使用データなし、頸部データ、腰部データ、両部データを使用した場合の平均判別率を順に示すと、LDAが40.4%、38.4%、38.8%、37.5%、SVMが49.5%、45.7%、47.5%、46.1%であった。各カテゴリにおける平均判別率を図8に示す。

本実験では、角速度データを使用しない場合に、最も高い平均判別率が得られたことから、角速度データによる効果が十分に得られていないことが判断できる。そのため、角速度データの取得位置を含め、効果的な角速度データの利用方法について検討する必要がある。

4. 6 実験全体について

実験Ⅰ、Ⅱを比較すると、実験Ⅰでは高い判別率が得られたものの、実験Ⅱでは概ね良好な結果ではあるが、

表6 実験Ⅰにおけるカテゴリ・クラス別平均判別率

カテゴリ	クラス	平均判別率	
		LDA	SVM
上半身	直立	13.6%	3.9%
	前傾	63.5%	68.7%
	前屈	80.6%	83.5%
下半身	前後移動	26.5%	23.3%
	左右移動	0.0%	0.0%
	重心移動	90.4%	94.5%
	静止	24.3%	15.6%
作業	配膳	82.4%	87.5%
	グラス確認	6.2%	0.1%
	定点作業	52.6%	59.6%
	搬送	18.9%	3.1%
	空搬送	29.7%	4.4%
	台車搬送	20.6%	18.0%
	台車空搬送	4.4%	0.2%

表7 実験Ⅱにおけるカテゴリ・クラス別平均判別率

カテゴリ	クラス	平均判別率	
		LDA	SVM
上半身	直立	39.7%	25.1%
	前傾	46.5%	73.7%
	前屈	11.5%	1.9%
下半身	前後移動	58.8%	66.9%
	左右移動	8.7%	0.4%
	重心移動	11.7%	5.6%
	静止	12.1%	2.1%
作業	配膳	10.4%	6.3%
	定点作業	11.5%	0.0%
	搬送	45.3%	62.1%
	空搬送	11.1%	0.6%
	移動	2.7%	0.0%

十分な結果を得ることができなかった。これは、同一人物の動作データがトレーニングデータに入っているかどうかが大きく起因しているものと考えられる。

また、各カテゴリにおける個々のクラスにおいて判別率のバラつきが大きくなった。各クラスにおける平均判別率を表6、7に示す。バラつきが大きくなった要因の1つとして、判別空間を構成するサンプル数の違いが考えられる。これが、全体の判別率にも影響していると考えられ、各判別率のバラつきを抑えつつ、全体の判別率を向上させる必要がある。

2つのクラス判別器については、SVMはLDAに比べて各カテゴリにおける平均判別率が高くなった。しかしながら、サンプル数の多いクラスについてはSVMが優れていると言えるが、サンプル数の少ないクラスについてはLDAの平均判別率が高いことから、必ずしもSVMが優れているとは言い難い側面がある。

5. まとめ

サービス産業に科学的・工学的手法を導入し、業務の効率化を図るために、加速度／角速度センサによる「観測」技術を確立し、判別分析手法による動作推定に関する「分析」技術を検討した。実験では、同じ従業員、異なる従業員から取得した加速度／角速度データを使用し、特徴量を求めるためのウィンドウ幅、センサの装着位置、数量等を変化させた時の判別率への影響を2つのクラス判別器により比較した。

その結果、判別分析における特徴量抽出のためのウィンドウ幅を大きくすると、欠落する姿勢・作業がある反面、概ね判別精度は向上する傾向にあることが明確となった。また、装着位置、センサ数と判別率との間に明確な因果関係は表れなかったが、実際の業務を対象とする動作推定には、装着位置・センサ数を適切に判定する判別結果の選定手法が必要であると考えられる。そのため、動作推定においては、対象とする姿勢・作業が含まれるよう欠落を回避しつつ、判別精度を向上させる判別分析手法を検討する必要がある。

一方で、判別精度を向上させるためには、偏りの少ないトレーニングデータの取得も必要と考えられる。しかしながら、実際の作業動作を対象とする場合、どうしても動作の種別に偏りが生じることは避けられない課題である。そのため、トレーニングデータとする動作データの効果的な抽出手法を検討する必要がある。

今後は、判別精度を向上させるための判別分析手法に加えて、動作データの計測手法を検討する必要がある。判別分析手法としては、先ず姿勢推定で動作を分類し、その姿勢を取り得る作業を推定するという2段階の判別分析の適用を検討したい。また、動作データの計測手法としては、携帯情報端末の高度化に伴い、種々のデータの取得が可能な環境が整いつつあるため、加速度、角速度データだけでなく、他のデータの利用も検討したい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成金を頂きました財団法人越山科学技術振興財団に感謝の意を表します。また、実験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。

文 献

- [1] 内藤耕, サービス工学入門, 東京大学出版会, 2009.
- [2] 産業技術総合研究所サービス工学研究センター,
<http://unit.aist.go.jp/cfsr/>.
- [3] 東京大学人工物工学センター, サービス工学研究部門,
<http://www.race.u-tokyo.ac.jp/research/service.html>.
- [4] サービス工学研究会,
<http://www.service-eng.org/index.html>.
- [5] 経済産業省, 技術戦略マップ2010, サービス工学分野,
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkylu_kaihatu/str2010/a7_2.pdf.
- [6] 渡辺博己, 山田俊郎, 浅井博次, 棚橋英樹, “人物の行動計測技術の開発とサービス産業への応用”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第11号, pp.1-8, 2010.
- [7] L. Bao, S. S. Intille, “Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data”, In Proc. of PERVASIVE 2004, LNCS 3001, Springer, pp.1-17, 2004.
- [8] N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, M. L. Littman, “Activity Recognition from Accelerometer Data”, In Proc. of American Association for Artificial Intelligence, pp.1541-1546, 2005.
- [9] R Development Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0,
<http://www.R-project.org/>.

映像の動作解析技術を用いた「ボカよけ」手法の研究開発

— 梱包作業への適用 —

曾賀野 健一

渡辺 博己

松原 早苗

棚橋 英樹

Research of Failsafe Camera System using Motion Analysis

- Application to Packing Work -

Kenichi SOGANO

Hiroki WATANABE

Sanae MATSUBARA

Hideki TANAHASHI

あらまし 組立等の生産現場において、人的要因に基づく作業ミス（ヒューマンエラー）は、避けることのできない大きな問題である。作業ミスが起因となり、品質を満たさない不良品が流出した場合には、企業の信頼失墜や損失を招くだけでなく、人の生命に関わる重大な事故につながる危険性もある。製品等の品質や安心・安全を語る上で、作業ミスを未然に防ぐための対策（「ボカよけ」対策）は、企業にとって非常に重要度の高い課題であり、現場では様々な取り組みが行われているが、さらなる向上が望まれている。本研究では、カメラで取得した映像から作業者の動作をリアルタイムに解析し、人の作業を評価する新しい手法の研究開発に取り組んできた。これまでに、予め登録した作業手順どおりの作業映像とリアルタイムに取り込まれる作業映像を比較する画像処理技術を開発し、作業ミスの検出手法に関する研究を実施した。今年度は、この手法を実際の作業現場における梱包作業に適用し検証実験を行った。その結果、本手法は作業者の動作の過程を簡単な装置を用いて解析し、かつ他のセンサや画像処理を併用することで、実際の現場で発生する作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出可能であることを確認した。さらに、作業手順の途中に変則的な動作が存在する場合においても、評価の対象とする動作区間を設定することで作業の評価が可能であることを示した。

キーワード ボカよけ、映像、動作解析、作業評価、リアルタイム、異常検知

1. はじめに

大量生産が盛んな時代には、製品の欠陥を排除し、製品の品質や生産性を向上するために、機械設備の導入や製造技術・機械の高度化が進められていた。しかしその後は、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が進行しており、こうした需要の変化に対応した作業環境を早急に確保するために、(柔軟性の高い) 人の介入が求められる状況となってきた^[1]。

そのため、いまだに組立等の生産現場では、人的要因に基づく作業ミス（ヒューマンエラー）は避けることのできない大きな問題となっている。ひとたび、品質を満たさない不良品が市場へ流出した場合には、消費者に多大な迷惑をかけるばかりか、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。たとえ最終検査で市場流出を防ぐことができたとしても、工場内で不具合が発生した場合、ラインの停止、後戻り工数の増加、回収や廃棄等の大きな損失を被ることになる。また、人の生命に関わる重大な事故につながる恐れもある。平成22年1月に起きた東海道新幹線架線切断事故は、作業員のボルトの締め忘れが原因であり、結果として、約15万人の足

に影響が出た。部品が車両や乗客を直撃していた恐れもあり、現場の安全対策が問われる事態となった。

人が作業を行う以上、「長時間作業による注意力の低下」や「単純作業による慣れや油断」等が「作業忘れ」や「作業間違い」等の人的要因に基づく作業ミスを引き起こし、不良の発生につながることになる。製品等の品質や安心・安全を語る上で、作業ミスの発生状況や原因等を十分観察し、作業ミスを未然に防ぐための対策は非常に重要度が高い。

以上のような社会的背景をふまえて、本研究では、岐阜県の基幹産業である製造業を対象として、人的要因に基づく作業ミスを検出する「ボカよけ」手法の研究開発に取り組んできた。本手法は、作業中における作業者の動作の過程を簡単な装置を用いて解析し、リアルタイムに評価を行うことで、作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出する点を特徴としている。

これまでに、予め登録した作業手順どおりの作業映像と、リアルタイムに取り込まれる作業映像を比較する画像処理技術を開発し、作業ミスの検出手法に関する研究を実施した^[3,4]。今年度は、この手法を実際の生産現場における梱包作業に適用し、実験により、その有効性を

検証した。

2. 作業ミス検出手法の概要

2. 1 従来の作業ミス検出に対する取り組み

組立等の生産現場において人的要因に基づく作業ミスを検出することは重要度が高く、様々な取り組みがなされている。例えば、あるメーカーでは作業指示ランプや動作確認センサ等の機材を用いた作業ミス検知システムを導入している。こうした取り組みは、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、工具で締める際のトルク情報や部品数の員数管理等）から作業ミスを工程内で検出する方法の大きく2つに分けられる。

前者の方法では、検査工程が増加する程、工数増となるため、多用すると生産性が低下してしまう。そのため一般的には、一連の作業工程の中間や最終段階で検査工程が設けられることが多くあるが、検査回数が少なければそれだけ不良の発見が遅れることになり、後戻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、後者の方法では、工数を増加する必要がなく、作業工程内で作業ミスを検出することが可能となる。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クアップできるように、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、図1に示すように、部品箱に手を入れたことを検出する光電スイッチを用いた動作確認センサや、作業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用いられる。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、その部品を落としたり、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ります。作業ミスを検出できないことがある。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、ポイント型動作確認センサの情報のみでは作業全体の品質を十分に保証できないため、新たな作業ミスの検出手法が必要となる。

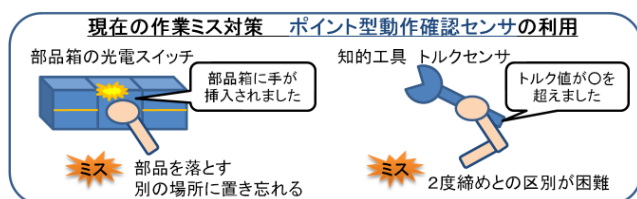


図1 現在の人的要因に基づく作業ミスに対する取り組み

2. 2 新たな作業ミス検出手法の概要

本研究では、組立等の生産現場において既に使用されている前述のセンサ情報に加え、カメラ映像を用いて作業

の動作を解析し、リアルタイムに評価を行うことで、作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出する手法を提案する。生産現場では、作業者が変わっても作業の品質を保つため、作業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。このように作業手順が定められていることを利用して、作業手順どおりの作業者の動作情報と実際の作業者の動作情報を比較することで作業ミスを検出する。まず、作業映像を構成する各フレームから動作の大きさと方向分布を表す動作特徴量を抽出し、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、この動作区間の動作の方向分布を表す動作特徴量を求める。そして、図2に示すように、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、予め登録した作業手順どおりの動作シーケンスとリアルタイムに獲得される実際の作業者の動作シーケンスを比較することで検出される。

対象作業 ・標準作業が定められている
・作業台上での定点作業

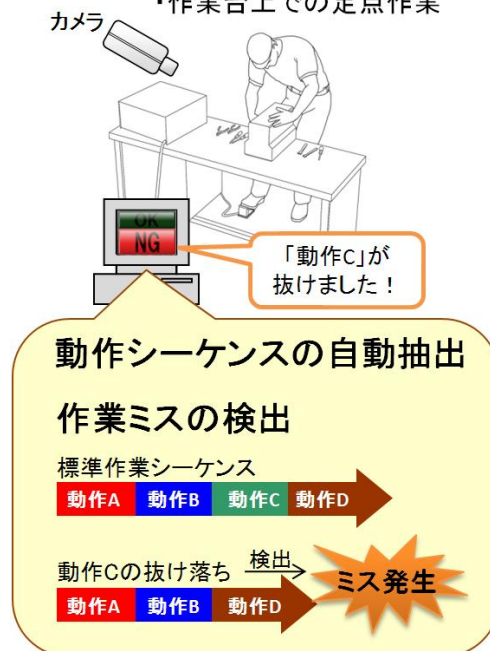


図2 新たな作業ミス検出手法のイメージ

なお、人の動作情報を取得する手法としては、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ため作業者が拘束され、また、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、標準作業が定められている作業台上での定点作業を対象として、作業への拘束を必要とせず、現状の作業環境に簡便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。

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け設置する。

3. 作業ミス検出手法のしくみ

3. 1 動作特徴量の抽出

本手法では、従来の顔や手等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^[2]をとる。具体的には、局所的な動作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作の大きさと方向分布を表す方向ヒストグラムを動作特徴量として用いる。方向ヒストグラムは、まず、図3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。本研究では、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3(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って得られる方向ヒストグラムを作成し、動作特徴量とした。図3(a)の例では、右下方向から左上方向への動作ベクトルが多いため、方向4が大きい値となる方向ヒストグラム（図3(c)）が生成される。

3. 2 動作単位分割

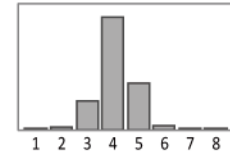
作業映像における動作単位と動作単位の切り替わりの点を分割点として検出することで、作業映像を動作単位に分割する。本手法では、作業における動作単位を始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定することで、対象とする手の動作は、必ず「静止状態から速度を上げ、ある地点で速度が減少し静止する」という過程をもつことを利用する。そこで、図4(a)に「静止」→「手を伸ばす」→「手を戻す」→「静止」という映像の例を示す。また図4(b)に、この映像から抽出した全ベクトルの大きさの総和（太線）の時間



(a) 取得画像とそのオプティカルフローの例



(b) 方向の8分割



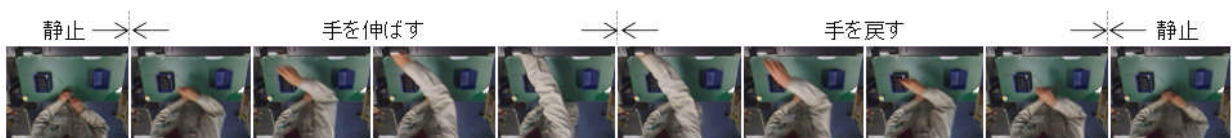
(c) 方向ヒストグラム

図3 方向ヒストグラムの例

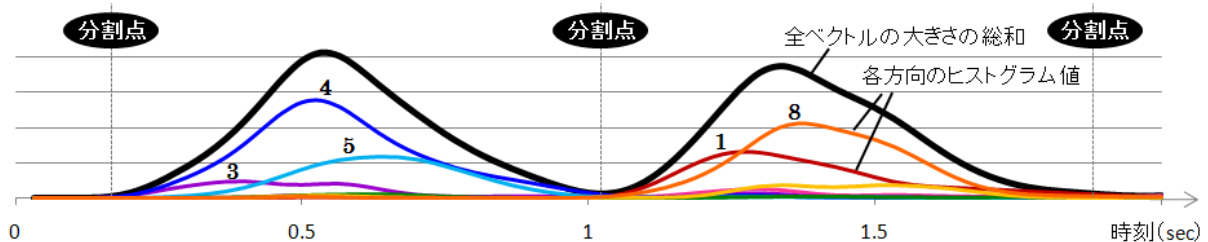
変化を示す。大きさの総和は、動作の開始とともに動きが大きくなり、動作の切り替わり時点で小さくなることからわかる。そのため、ここでは、全ベクトルの大きさの総和が減少から増加する時点を分割点として検出する。

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し、この動作区間の動作特徴量は、区間を構成する各フレームの動作特徴量（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4(c)に、図4(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、動きがないと判定された区間は記号0とした。



(a) 作業映像例（「静止」→「手を伸ばす」→「手を戻す」→「静止」）



(b) 全ベクトルの大きさの総和と方向ヒストグラムの時間変化

0	4	8	←最大方向番号
			←動作特徴量 (方向ヒストグラム)

(c) 動作シーケンス（動作特徴量）

図4 映像の分割と動作シーケンスの獲得

3. 4 作業ミスの検出

予め作業手順通りの動作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た作業者の動作シーケンスを比較することにより作業ミスを検出する。

動作シーケンス $\mathbf{A}$ は、動作区間の時系列データ $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_i\}$ ($i=1, \dots, n$)であり、各動作区間 $\mathbf{A}_i$ は、8方向の方向ヒストグラムである動作特徴量 $\mathbf{A}_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ 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 $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ としたとき、同じ番号の動作区間 $\mathbf{A}_i$ と $\mathbf{B}_i$ 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 $\mathbf{A}_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i8})$ と $\mathbf{B}_i=(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i8})$ 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、閾値以下の場合に動作が異なると判定し、作業ミスとして検出する。

4. 実験

本手法の有効性を検証するため、実際の生産現場における梱包作業に適用し、実験により評価を行った。

4. 1 梱包作業において発生する作業ミスと提案手法

評価の対象とした作業は、製品（2段）と製品を間に挟んで中敷き（3段）を段ボールに入れる作業である。以下、作業の流れと発生する作業ミスについて述べる。

まず、作業の流れは、「段ボールを机に置く」→「中敷き（1段目）を入れる」→「製品（1段目）を入れる」→「中敷き（2段目）」→「製品（2段目）を入れる」→「中敷き（3段目）を入れる」→「段ボールのふたを閉める」という流れである。

複数の中敷きを入れる作業であるため、作業の途中で中敷きを入れ忘れる作業ミスが発生することがある。この作業は、段ボールに中敷きと製品を順に重ねて入れる作業であるため、中敷き（1段目、2段目）の有無を作業後に確認することができない。現場の作業ミス対策としては、光電センサを設置し、中敷きを段ボールに入れる前にセンサを通過させることで中敷きの数を管理する方法がとられている。この作業では3段の中敷きを入れることから、作業終了時に中敷きのセンサ通過回数が3回未満のとき、中敷きの「入れ忘れ」が発生したとして検出している。しかしこの方法では、中敷きをセンサ通過後に落としたり、どこかに置き忘れたりした後、次の作業へ移った場合、中敷きの「入れ忘れ」の作業ミスを検出できないといった問題が現場で発生した。

本研究では、「センサを通過させた」等のポイント型動作確認センサでは作業ミスの発生を十分に防止できない現状の問題に対して、「センサ通過地点から段ボールまで中敷きを運ぶ」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作業ミス検出を行う。また、本実験では、動作を評価した後に、段ボール内の中敷きの有無を輝度

より判定することで、さらに信頼性を高める処理を加える。

4. 2 実験条件

作業環境は、図5(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台と作業ミス検出の処理を行う1台のPCとした。カメラで取得された画像例を図5(b)に示す。1つの作業データは、1段目の中敷きを通過センサに通した時点から、3段目の中敷きを入れ終える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。

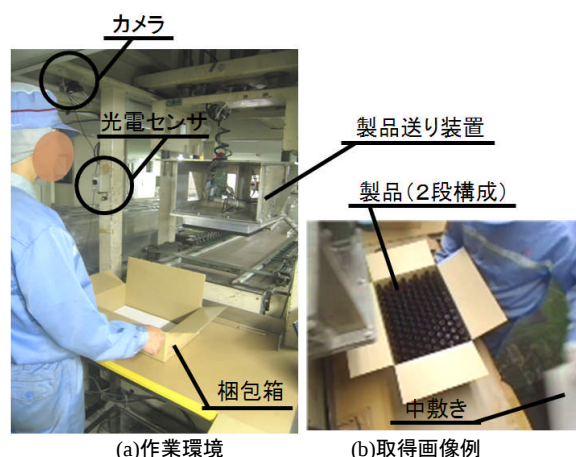


図5 作業環境と取得画像例

実験では、作業手順通りの作業（以降、OK作業と呼ぶ）のデータ316件、作業手順と異なった作業（以降、NG作業と呼ぶ）のデータ4件の合計320件を用い、評価を行った。これらのデータは、作業者の変更による個人差の影響を確認するため、作業者2名がそれぞれOK作業を165件と151件、NG作業を各2件行ったデータである。

NG作業データは、以下の2種類のシナリオとした。NGシナリオ2は、従来の通過センサのみを用いた作業ミス対策では検出できず問題となっていた状況を再現した。

<NGシナリオ1>

「中敷き（3段目）」を入れる動作を忘れる。

<NGシナリオ2>

「中敷き（1段目）」をセンサ通過後、人に話しかけられて中敷き（1段目）を別の場所に置き忘れ、次の作業へ移り、中敷き（1段目）を入れ忘れる。

4. 3 作業データの解説

作業の動作に関して評価を行うにあたり、作業手順通りの動作であれば、これまでに開発した評価手法により評価が可能である。ところが実際の作業現場では、「中敷き（1段目）を入れる」から「製品（1段目）を入れる」に移る間に、段ボールの位置調整等の変則的な動作が入ることがあるため、新たな工夫が必要となった。

本研究では、「中敷きの入れ忘れ」を未然に防止することが重要であることから、中敷きが光電センサを通過した

後の「中敷きを入れる」動作区間を評価の対象とした。動作区間の始点は中敷きが光電センサを通過した時点とし、終点は中敷きを段ボールに入れる動作が終了した時点とした。

図6に、標準作業データの動作シーケンスの例を示す。映像により動作が、「中敷き（1段目）を入れる」、「中敷き（2段目）を入れる」、「中敷き（3段目）を入れる」の動作区間に分割される。

本来、動作シーケンスは、各動作区間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6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のみを示す。

一方、「中敷きを入れる」動作が正しいと判定されたが中敷きが挿入されていない作業ミス（例えば、話しかけられることにより中敷きが段ボール上を通過等）が発生する可能性が考えられるため、「中敷きを入れる」動作の前後において段ボール内に輝度の差が検出された場合に中敷きが段ボール内に存在すると判定する方法も併用した。なお、段ボール内の輝度検出のみでは段ボールが明るく反射して、中敷きと誤判定される場合があること等から十分な

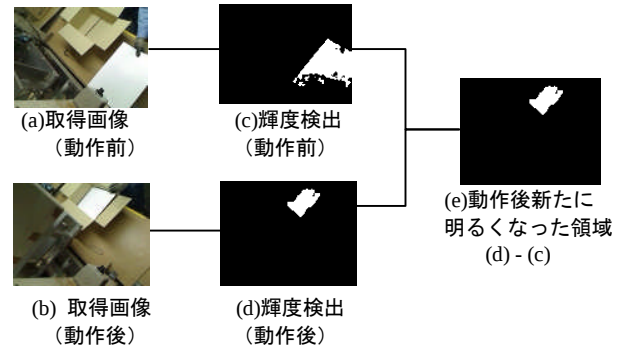


図7「中敷き（1段目）を入れる」動作前後での輝度検出の例

判定ができない。そのため、「中敷きを入れる」動作の判定を行った後に輝度の判定を加えることにより作業の評価を行った。いずれの判定も正しい場合のみ、正しい作業であると判定される。

図6の「中敷き（1段目）を入れる」動作の前後における輝度検出の例を図7に示す。動作の前後で取得された画像は(a), (b)であり、それぞれ輝度検出を行った画像が(c), (d)である。(c)と(d)の画像を比較して、動作後に新たに明るく変化した領域を検出した結果が(e)である。

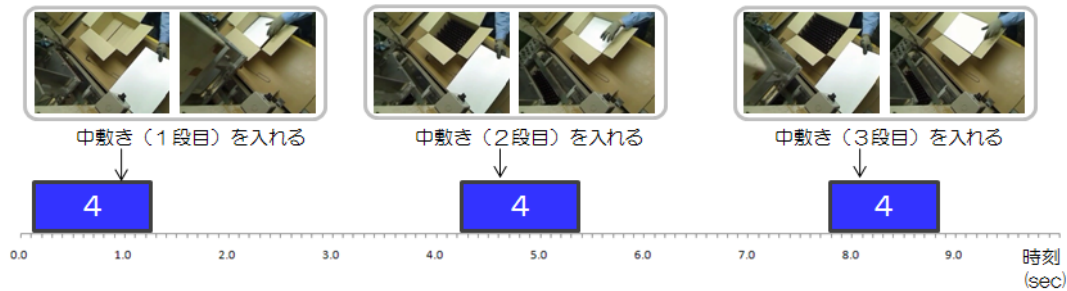


図6 標準作業データに対する動作シーケンス例

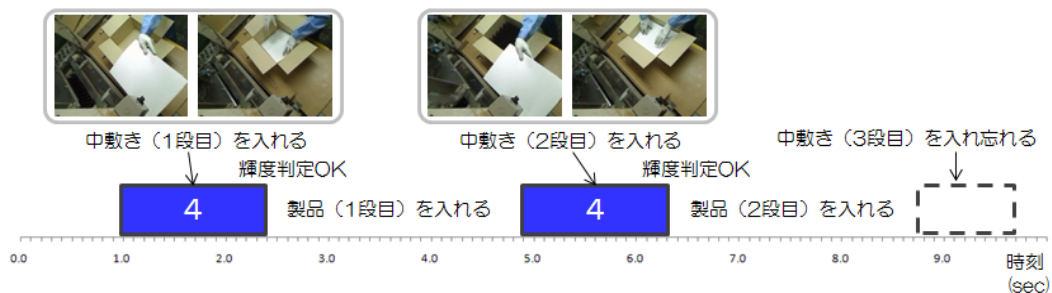


図8 NGシナリオ1の作業データに対する動作シーケンス例

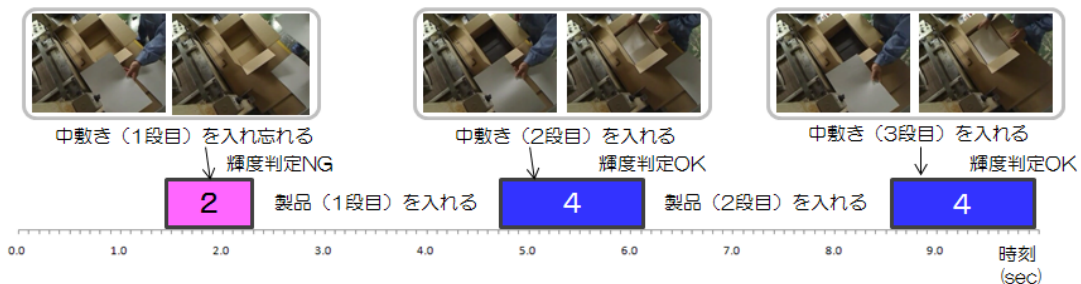


図9 NGシナリオ2の作業データに対する動作シーケンス例

図8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。「中敷き（1段目）を入れる」→（輝度判定）→「中敷き（2段目）を入れる」→（輝度判定）となり、「中敷き（3段目）を入れる」→（輝度判定）が抜け、「中敷き（3段目）」の入れ忘れが発生したことがわかる。正しく中敷きを入れたと判定されたのは2回であり、本来の3回と異なるため作業ミスとして検出された。

図9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。「中敷き（1段目）センサ通過」→人に話しかけられる「中敷き（1段目）を持ち作業台を離れる」→（輝度判定）→「作業台に戻る」→「中敷き（2段目）を入れる」→（輝度判定）→「中敷き（3段目）を入れる」となり、「中敷き（1段目）を入れる」動作と「作業台を離れる」の動作が異なることがわかる。正しく中敷きを入れたと判定されたのは2回であり、本来の3回と異なるため作業ミスとして検出された。このNG作業は、従来の通過センサのみを用いた作業ミス対策では検出が不可能で問題となっていたが、動作の評価を加えることで作業ミスの検出が可能となったことがわかる。

4. 4 作業ミス検出の精度評価

作業手順どおりの作業データを予め登録し、評価する作業データとの類似度を閾値により評価することで、作業ミス検出を行った。さらに、中敷きを入れる動作の類似度を評価した後に、段ボール内の輝度を評価することで、作業ミス検出の信頼性を高める処理を併用した。

ここでは、作業手順どおりの作業として登録した動作として、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、作業ミスの検出処理を行い、OK作業かNG作業かを判定し、作業ミスの未検出率、過検出率を評価した。評価結果を表1に示す。なお、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。また、動作の類似度を評価する際の閾値は、実験的に0.8とした。

表1 実験結果

			判定結果	
			OK作業	NG作業
入力	OK作業データ	316	304	12
	NG作業データ	4	0	4

OK作業データ316件に対して、304件がOK作業と正しく判定され、正解率は96.2%であった。2名の作業員別の正解率は、それぞれ95.7%、96.6%であり、作業員の個人差による影響は見られなかった。このことは、作業員の変更等により、各動作に要する時間が異なった場合においても、類似度の評価において高い正解率を得られたことで、本手法は、作業員の変更や動作時間のばらつきに対して、ロバスト性を有していることを示している。

一方、OK作業データがNG作業と過検出された原因は、作業手順の誤り等の中敷きの動作が異なることによるも

のであり、標準作業として予め登録した動作と異なるため、NG作業として判定されたものである。過検出の事例は、作業ミスにつながる危険性を有していることから、作業手順の見直しや中敷きが通過しやすい位置にセンサを移す等、作業改善に向けた情報としての活用も考えられる。

NG作業データ4件に関しては、NG作業と正しく判定され、未検出率は0%であった。評価の際に、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は0%であることが重要である。

5. まとめ

組立等の生産現場における人の作業品質の向上を目的として、映像の動作解析を行うことで人が行う作業を評価し、作業ミスを検出する手法を提案した。

本手法の有効性を検証するため、実際の生産現場である梱包作業に適用し、実験により評価を行った。その結果、本手法は、作業中における作業員の動きの過程を簡単な装置を用いて解析し、リアルタイムに複数の評価を併用することで、実際の生産現場で発生する作業ミスを早期かつ高い信頼性で検出することが可能となった。すなわち、従来の光電センサを用いた中敷きの員数管理に加えて、作業員が中敷きを運ぶ動きの評価と、中敷きが段ボールに入ったことを示す輝度の評価を併用することで、作業ミス検出の向上が図られた。さらに、作業手順の途中に変則的な動作が存在する場合においても、評価の対象とする動作区間を設定することで作業の評価が可能であることを示した。また、作業員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。

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] 平野裕之，“品質保証と自動化”，日刊工業新聞社，2001.
- [2] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation", Proc.ICPR, 2004.
- [3] 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.
- [4] 松原早苗，渡辺博己，棚橋英樹，“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－”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.21-26，2008.

県産ブランド牛肉付加価値向上のための 携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発

田中 等幸 山田 俊郎 丸山 新* 江崎 雅康** 棚橋 英樹

Development of a Portable Evaluation System for Making Value-added of Beef Quality

Tomoyuki TANAKA Toshio YAMADA Shin MARUYAMA*
Masayasu ESAKI** Hideki TANAHASHI

あらまし 牛肉の安心・安全だけでなくおいしさについて関心が高まっており、現行の目視による霜降り等の「格付値」の肉質評価のみではなく、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。そこで、牛肉のおいしさの一つの指標である脂質を市場で簡易に評価する手法を開発し、その情報を育種改良等へ活用することで、岐阜県産ブランド牛肉「飛騨牛」のブランド価値向上を図ることを目的とした。

今年度は、システムの機能的な側面から、①小型マルチバンドカメラの開発、②脂質解析ソフトウェアの開発、③枝肉情報管理データベースの開発の3テーマに分割し、それぞれの機能的評価とシステムとしての基本動作を確認した。

キーワード 牛肉、付加価値化、脂質評価、携帯型測定端末

1. はじめに

我々はこれまでの研究開発において、カメラで撮影するだけで、牛肉を破壊することなく、牛肉に含まれる脂質を定量的に評価する技術を確認した^[1-2]。しかし、これまでに使用してきた実験システムは大がかりな装置構成であり、そのシステムを生産・流通で利用するのは困難である。市場で取引される牛肉の脂質を評価し、おいしさの情報を生産面における育種改良などへの利用や、牛肉を購入する消費者に対して、おいしさなどの品質情報を提供するためには、携帯可能な小型かつ軽量の脂質測定装置が必要である。

そこで本研究開発では、牛枝肉市場において、おいしさの一つの指標である脂質評価情報を効率よく簡易に収集可能な携帯型マルチバンドカメラ端末を開発し、撮影した画像などを逐次データベースに格納することで、畜産業における効果的な利用の促進を目標とする。

今年度は、システムの機能的な側面から小型マルチバンドカメラの開発、脂質解析ソフトウェアの開発および枝肉情報管理の3つにテーマを分割し、それぞれの機能的評価と、小型マルチバンドカメラからデータベースへの

画像格納までの基本動作を確認したので報告する。

2. システムの概要

図1にシステムの概要を示す。牛枝肉市場における作業者は、携帯型マルチバンドカメラ端末によって枝肉断面を撮影する。撮影画像はカメラの情報通信機能によって脂質解析サーバへ送信される。脂質解析サーバは、受信した画像に対して脂質解析処理を行い、見た目での判断が困難な脂質を可視化する脂質分布画像を生成する。また、脂質解析サーバ上には育種改良や飼養管理に必要な

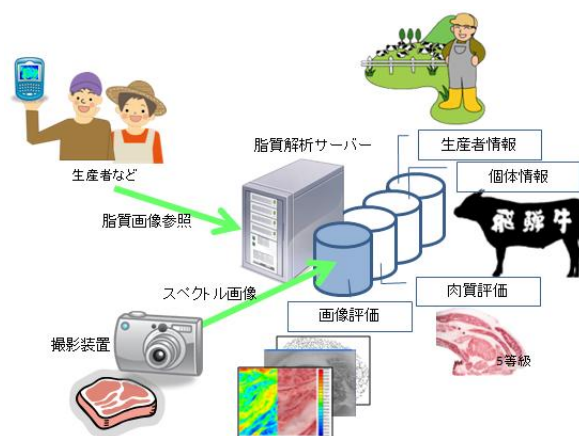


図1 システムの概要

* 岐阜県畜産研究所

** 株式会社イーエスピー企画

データベースが稼働しており、小型マルチバンドカメラによって撮影された画像と生成された脂質分布画像は逐次データベースに格納される。生産者や流通関係者は、携帯型のモバイル端末を使用して、市場で取引された牛肉に関する様々な情報を照会することが可能となる。

本システムが実現することによって、飛騨牛のブランド力向上に向けた研究開発が飛躍的に推進されるとともに、育種改良の指導ツールとしての利用や、流通・消費者に対しても安心・安全情報と品質の情報提供が期待される。

3. システム開発

本システムは機能的側面から、以下に示す3つのテーマに分割した。節ごとにそれぞれの開発内容について記述する。

- ① 小型マルチバンドカメラの開発
- ② 脂質評価ソフトウェアの開発
- ③ 枝肉情報管理データベースの開発

3. 1 小型マルチバンドカメラの開発

複数の分光画像が同時に取得可能なマルチバンドカメラの1次試作機を開発した(図2)。カメラはマルチバンドカメラモジュール、カメラ制御記録基板、マルチバンドLED制御基板から構成される。カメラのレンズ先端にそれぞれ異なる3つのバンドパスフィルタ(中心波長760nm, 810nmおよび930nm, いずれも半値幅10nm)とIRカットフィルタを装着することで、1度のシャッターで3枚の近赤外マルチバンド画像と1枚の可視画像(いずれも640×480pixel)が取得できる。これまでの実験成果を踏まえ^[1-3], マルチバンドカメラモジュールには、近赤外帯域である750~1050nmに高い感度を持つチップセットを採用した。カメラ制御記録基板はマルチバンドカメラモジュールから出力される画像データをフレームメモリに蓄積し、記録処理することが可能である。また、画像をTCP/IPネットワークを介して外部へ転送する組込みソフトウェアを実装した。マルチバンドLED制御基板は、複数の単波長光をカメラフレームの同期信号に同期させてストロボ発光することができる。

3. 2 脂質解析ソフトウェアの開発

マルチバンド画像から脂質分布画像を生成する脂質解析ソフトウェアの1次試作モデルを開発した。ソフトウェアは標準反射板と牛肉試料のマルチバンド画像から反射率画像を生成し、予めセットされた検量モデルによって脂質分布画像を出力する。図3はグレースケールの脂質分布画像を脂質割合に応じてカラーマッピング表示した例である。生成された脂質分布画像の画素には、脂質割合の推定値が数値化されており、推定値をカラーマッピングすることで、脂質割合の分布を視覚的に確認することができる。

また、小型マルチバンドカメラは4枚の画像が出力され

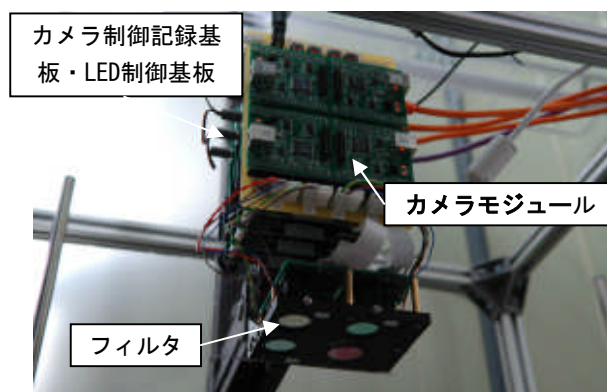


図2 小型マルチバンドカメラ

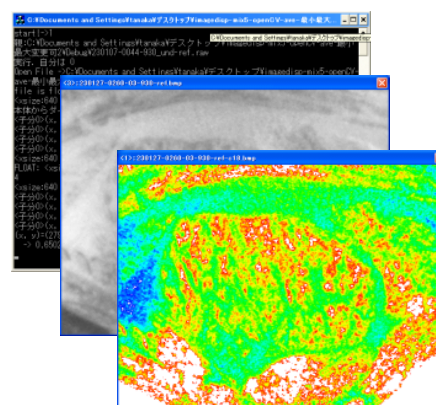


図3 脂質解析ソフトウェア

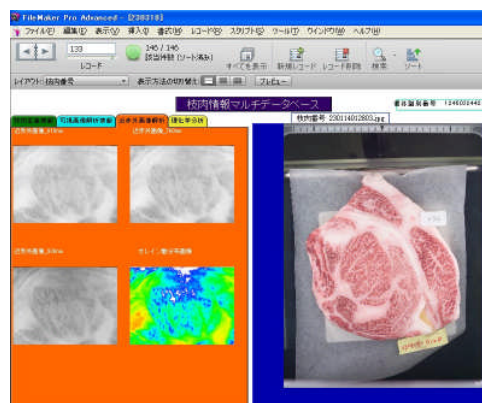


図4 枝肉情報管理データベースの画面例



図5 データベース開発に対する説明会の様子

るが、それぞれの画像は視点が異なるため、画像間で視差が生じる。そのため、同一視点の脂質分布画像を生成するためには画像間で対応する点を見つけだし、それぞれの画像に対して統合処理を行う必要がある。そこで、キャリブレーションパターン（チェスボード）を用いたカメラのキャリブレーションについて検討した。カメラの内部パラメータ、および歪み係数を推定し、画像を補正するアルゴリズムを考案しソフトウェアに実装した。

3. 3 枝肉情報管理データベースの開発

画像とテキスト情報が連携可能なマルチメディアデータベースの1次試作モデルを開発した。図4はデータベースの画面の例である。データベースのインターフェースは、テキスト情報と画像との一覧性を良くするように工夫した。データベースの利用者は、枝肉画像を見ながら格付値や脂質分布を参照することができる。また、従来の国産牛に関するデータベースは、生産履歴情報、生産者情報、枝肉格付け結果など多数のデータベースが散在し、これらの情報が一元的に集約されていない課題があった。そこで本研究開発では、外部データベースから必要なデータを抽出し、枝肉情報管理データベース固有の番号を新たに設定することで、情報の一元的な管理を実現した。データベースの開発に際し説明会等を実施し、市場関係者や生産者の意見を取り入れた（図5）。

4. システム評価

4. 1 小型カメラの脂質推定精度評価

小型マルチバンドカメラの脂質推定精度を評価した。撮影実験は冷暗室内にて行った（図6）。光源にはハロゲン光源を用いた。実験試料は岐阜県の枝肉市場に上場された黒毛和種11頭であり、厚さ10mm程度にスライスしたリブローズを用いた。まず、標準反射板を用いて、マルチバンド画像間の光量を調整した後、標準反射板と牛肉試料の撮影を繰り返した。なお、撮影時の牛肉試料の表面温度は0～4℃であった。脂質解析ソフトウェアに標準反射板の反射画像と牛肉試料の反射画像を入力することによって、標準反射板に対し牛肉試料の反射の程度を示す反射率画像が生成される。2値化処理によって牛肉の脂肪部位を抽出し、脂肪の平均反射率を求めた。ロース芯を4領域に分割裁断し、高速液体クロマトグラフによって領域ごとに理化学的測定を行った。目的変数をオレイン酸割合の理化学的測定値、説明変数を脂肪の平均比反射率とする推定式を求め、理化学的測定値と平均反射率との関係を示す相関係数 R と、平均二乗誤差 MSE から、小型マルチバンドカメラの脂質推定精度を評価した。図7は理化学測定値と推定値との散布図である。相関係数 $R=0.74$ 、平均二乗誤差 $MSE=4.53\%$ の結果が得られた。これは従来システムによる結果と同程度であったため、一次試作機としては良好であると言える。

図8は牛肉試料の反射率画像と脂質分布の推定画像である。同一試料でも画像間で反射率が異なることが分か

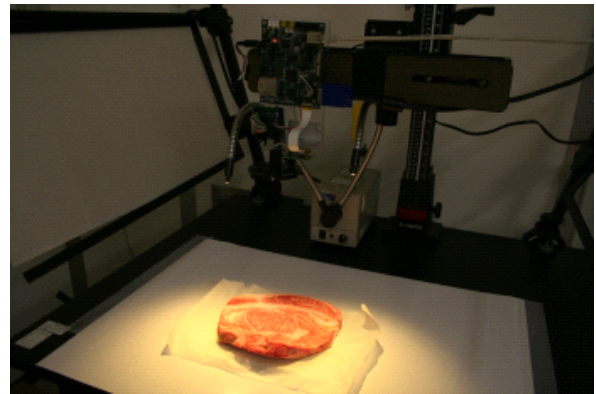


図6 撮影実験の様子

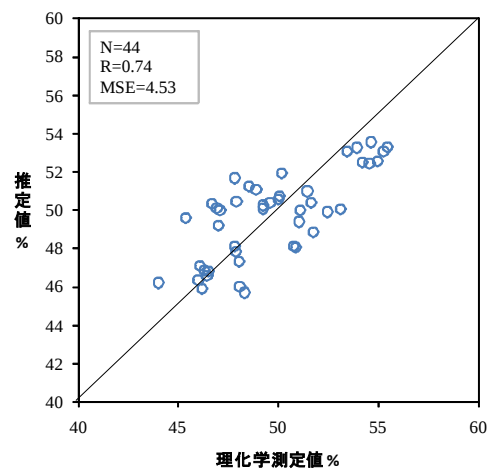


図7 理化学測定値と推定値との散布図

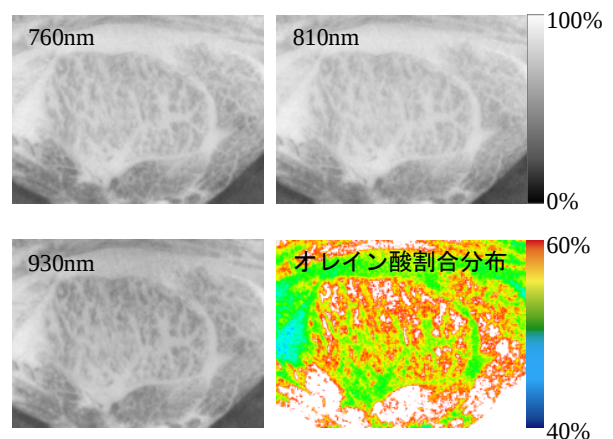


図8 反射率画像と脂質分布画像の一例

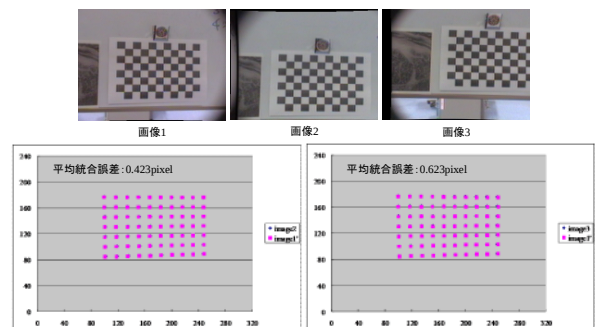


図9 画像統合手法の精度評価

る。反射率画像は反射率0~100%の範囲でグレースケール表示し、オレイン酸分布画像は40~60%の範囲でカラーマッピング表示している。なお、白画素は外れ値を意味している。

4. 2 画像統合手法の精度評価

キャリブレーションパターン（チェスボード）を用いて視差が異なる画像間の画像統合精度を評価した。図9は視点が異なる3つの画像と、画像1と画像2、画像1と画像3との統合関係を示している。コーナー70点の平均統合誤差は目標の1pixel未満を実現し、アルゴリズムの有効性を確認した。しかしながら、本アルゴリズムを小型マルチバンドカメラから取得される画像に適用したところ、画像間の特徴量を対応付けすることができなかった。原因として画質に起因するものと考えられた。今後の課題として、小型マルチバンドカメラから取得される画像の画質について更なる改良があげられる。

4. 3 システムの動作検証

小型マルチバンドカメラによる画像取得から、枝肉情報管理データベースへの格納・画像閲覧までの基本動作を検証した。具体的には、小型マルチバンドカメラで撮影した画像は、TCP/IPネットワークを介して脂質解析サーバに蓄積された。脂質解析ソフトウェアは蓄積されたマルチバンド画像に対して脂質解析処理を行い、脂質分布画像を生成した。モバイル端末を使用して枝肉情報管理データベースをwebブラウジングした結果、脂質分布画像とテキスト情報が連携して閲覧可能であることを確認した（図10）。

5. まとめ

本研究開発では、牛枝肉市場において、おいしさの一つの指標である脂質評価情報を効率よく簡易に収集可能な携帯型マルチバンドカメラ端末を開発し、画像を逐次データベースに格納することで、岐阜県産ブランド牛肉「飛騨牛」のブランド価値向上を図ることを目的とした。

今年度は、①小型マルチバンドカメラの開発、②脂質評価ソフトウェアの開発、③枝肉情報管理データベースの開発の3つに機能モデルを分割し、それぞれ1次試作機の開発と評価を行った。また、カメラによる画像取得から、データベースへの画像格納までのシステムとしての基本動作を確認した。

今後、実用化モデルの開発および、枝肉市場での実証実験を行う予定である。



図10 モバイル端末による動作検証の様子

謝 辞

本研究は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 地域ICT 振興型研究開発「県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発」で実施した。ここに感謝の意を示す。

文 献

- [1] 田中等幸, 丸山新, 赤塚久修, 松原早苗, 棚橋英樹, “画像を用いた食品評価に関する研究(第3報)”, 岐阜県情報技術研究所報告, 第11号, pp.53-57, 2009.
- [2] 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(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所報告, 第10号, pp.54-57, 2008.

画像を用いた食品評価に関する研究(第4報)

田中 等幸 丸山 新* 山田 俊郎 曾賀野 健一 棚橋 英樹

Research of Food Valuation with Image Analysis (4th report)

Tomoyuki TANAKA Shin MARUYAMA* Toshio YAMADA
Kenichi SOGANO Hideki TANAHASHI

あらまし 地域県産品のおいしさをPRするための一つの手段として、外観の良さや成分値を客観的かつ定量的に評価する取り組みが実施されている。牛肉においては、主に脂肪交雑など外観の良さが評価の対象として重視されているが、近年肉眼では判断が難しい脂質を評価することが注目されている。これまでに、カメラ画像から良質な脂を含む牛肉評価技術を確認するため、脂質と光学的な関係を実験的に検討してきた。今年度は、牛肉の脂質分布を可視的に表示する脂質評価装置の開発を目的とした。試作した装置は、外乱光を遮断する筐体内にカメラ、LED照明を内蔵し、光源コントローラおよびPCによって構成される。胸最長筋（ロース芯）に対し、2種類の単波長LED光を順に斜光照射することによって、マルチスペクトル画像が取得される。画像は脂質解析ソフトウェアによって解析され、脂質割合の分布画像を作成される。牛肉片60試料を用いて脂質推定精度を検証した結果、相関係数0.745、推定誤差2.24%の結果を得た。

キーワード 牛肉、画像、オレイン酸割合、脂質評価装置

1. はじめに

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、脂肪交雑、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各地で行われている。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と関係があることが知られている。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、理化学測定装置による破壊試験である。そのため、測定結果を得るためには、牛肉をミンチ状に粉碎するなど時間を必要とすること、また測定値は牛肉全体の評価と必ずしも一致しない等の課題があった。

我々は、上述した課題を解決するため、肉眼での判断が困難な脂質を非破壊かつ定量的に評価する技術開発を実施してきた^[1-2]。また、評価結果と食味官能評価試験結果との関連性や画像を用いた面分布測定法の有効性につ

いて検討した。今年度は小売・流通現場等での利用を想定した可搬型の脂質評価装置を試作し、精度評価を行ったので報告する。

2. 脂質評価装置の設計

2. 1 カメラと光源との偏角イメージング

画像処理の分野では、対象や目的に応じて照明環境を設定するが、光源の位置や光源とカメラとの相対関係を検討することは重要である。カメラは肉表面で反射する反射光と肉内部に入り込んだ散乱光の強さを取得することになる。そこで、カメラと光源との位置関係によって、画像の明るさや見え方にどの程度影響するかを明らかにするため、偏角イメージング実験を行った。

図1に偏角イメージング実験のモデル(側面図)を示す。実験は冷暗室環境の下で行った。被写体には、標準反射板と固化した牛抽出脂肪3試料(直径100mm、厚さ10mm)を使用した。カメラは鉛直下向き方向にセットし、試料は試料中心が光軸と一致するように置いた、なお、台座による反射の影響を軽減するために、吸光シートを敷いた。光源はC-H結合由来の940nmのLED照明を使用した。試料中心からの距離 $r=200\text{mm}$ 、 $\angle XOP$ の大きさを入射角度 θ とすると、光源の位置は $P(r, \theta)$ と表わされる。実験では、光源の入射角度(θ)を $0\sim 90^\circ$ 、 15° 間隔に移動させ撮影した。図2は光源の入射角度ごとの比平均反射率(実線)と標準偏差(破線)である。入射角

* 岐阜県畜産研究所

度が大きくなるにつれて比平均反射率も大きくなる傾向にあった。これは、入射角度が大きくなるに伴い、正反射成分が強く影響した結果であると考えられる。一方、標準偏差は $0\sim 30^\circ$ までは減少傾向にあり、 30° 過ぎから増加傾向にあった。図3は光源の入射角度 90° と 30° との画像比較である。黒色を0%、白色を100%として比平均反射率をグレースケールで表現した。光源の入射角度 90° の画像は 30° の画像に比べて明るさやコントラストが大きい一方で、試料表面の凹凸の状態を鮮明に映し出すことを確認した。したがって、コントラストが大きく、なお且つ表面の凸凹状態による影響を軽減することを考慮すると、光源の位置は斜光照明（入射角度 $45^\circ\sim 60^\circ$ ）が良好であるとする知見が得られた。

2. 2 装置構成

試作した脂質評価装置は、撮像系を含む筐体、PCおよび光源コントローラによって構成される（図4）。撮像系は冷却CCDカメラ（Apogee社AltaU260）とC-H結合由来の2種類のLED（760nm, 940nm）によって構成され、これらは外乱光を遮光するためにドーム型の筐体に内蔵した。筐体の内径はローズ断面を内包することを考慮し300mmとした。筐体の高さは、様々なレンズの画角に対応するため、242mmと360mmに高さ調整可能な2段階構造とした。また、LEDは100mmの高さに設置し、前節の知見を踏まえ、光軸からの角度 45° の斜光照明とした。ローズ芯面積（およそ直径100mm）がバランス良く均一に明るくなるように、LEDはローズ中心から $\pm 50\text{mm}$ の位置に照射する方向に傾けて取り付けた。2種類のLEDの配列パターンは1列全周とする高密度かつ交互配列とした（図5）。

2. 3 マルチスペクトル画像処理

処理手順は、まずマルチスペクトル画像間の明るさを均一とするため、標準反射板を用いて異なるLEDごとに光源コントローラによって光量調整する。予め調整した光量の下、標準反射板をセットし、LEDを順に点灯させ、2枚のマルチスペクトル画像を撮影しておく。次に、試料をセットし、同様に2枚のマルチスペクトル画像を撮影する。なお、マルチスペクトル画像は16bit階調、解像度 $512\times 512\text{pixel}$ である。

脂質解析処理や脂質分布画像作成等の画像処理は、開発した脂質解析ソフトウェアによって行う。試料の反射画像は、波長ごとに標準反射板の反射画像によって正規化され、比反射率画像が作成される。比反射率画像は1画素単位に脂質推定値が計算されると同時に、脂質割合分布画像が作成される。試料間の脂質割合分布状態を比較するため、比反射率をグレースケールまたはカラーマッピング表示する。

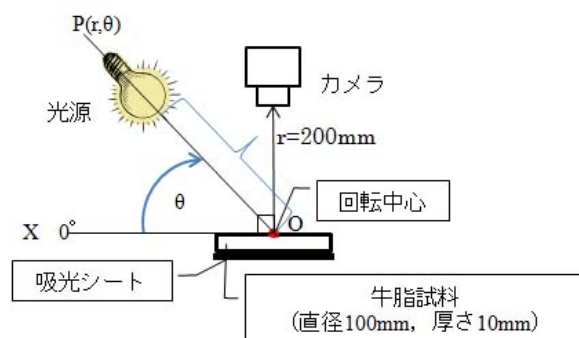


図1 実験モデル

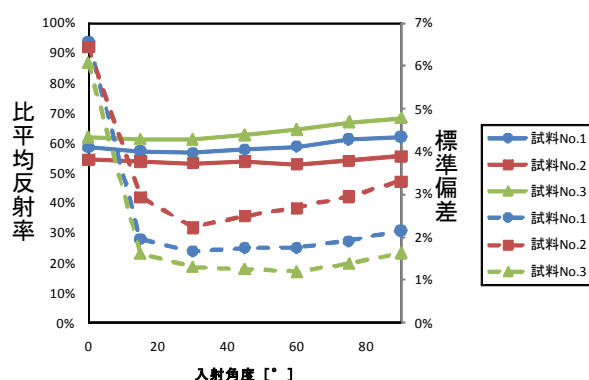


図2 入射角度と平均反射率・標準偏差との関係

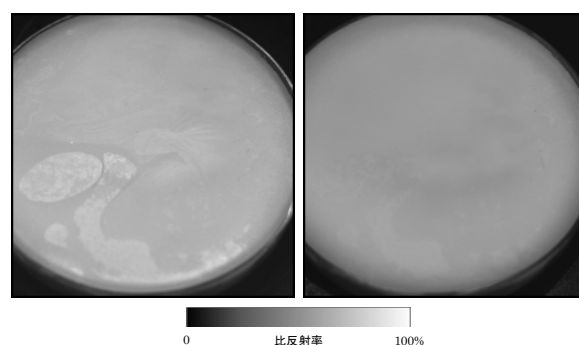


図3 入射角度 90° 画像（左）と入射角度 30° の画像（右）

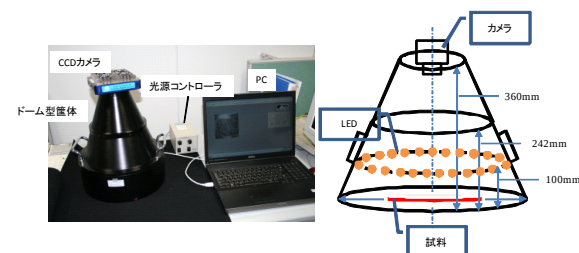


図4 脂質評価装置の外観（左）と筐体の概要（右）

3. 脂質評価装置の評価

3. 1 評価方法

岐阜県の枝肉市場に上場された和牛を実験材料とし、厚さ10mm程度にスライスしたリブローズを冷蔵庫で1日以上冷蔵したものを実験に使用した（図6）。

図7に評価方法の手順を示す。試料は筐体によって覆い被され、牛肉ロース芯のマルチスペクトル画像を取得後、比反射率画像を作成した。比反射率画像は2値化処理によって脂肪と筋肉を区分し、村澤らの分割手法^[3]を用いて、4領域ごとに脂肪の平均反射率を求めた（ $n=60$ ）。なお、撮影時の牛肉試料の表面温度は0～4℃であった。次に、ロース芯を4領域に分割裁断し、高速液体クロマトグラフによって、領域ごとに理化学測定値を測定した。理化学測定値と比反射率との関係から推定式（検量モデル（式1））を作成し、モデルの精度（相関係数 R 、推定誤差RMSE%）を評価した。なお、検量モデルは目的変数をオレイン酸割合の理化学測定値、説明変数を比吸光度とする重回帰分析によって求めた。

$$c = k_0 A(\lambda_0) + k_1 A(\lambda_1) + k_2 \quad (\text{式 1})$$

ここで、 c はオレイン酸割合の予測値、 $A(\lambda_0)$ 、 $A(\lambda_1)$ はそれぞれ第一選択波長、第二選択波長における比吸光度、 k_0 、 k_1 および k_2 は理化学測定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。

3. 2 評価結果

図8に理化学測定値と脂質解析ソフトウェアによる推定値との関係をプロットした。図中のひし形はモデル作成のための試料、丸形は未知試料を示している。モデルの精度は相関係数0.745、推定誤差2.24%であった。従来の光ファイバによる評価装置^[4]の推定精度が2.20%（ $n=60$ ）であったことから試作段階としては良好な結果と言える。

図9は霜降りの程度が同程度の牛肉試料に対し、オレイン酸割合分布をグレースケール表示比較した結果と脂質割合推定値のヒストグラムである。実験に使用した試料の理化学測定によるオレイン酸割合は、最小値43.1%、最大値57.6%であったため、40～60%の範囲をグレースケール表示した。黒または白画素は脂肪以外の部位を示しており、明度が黒色から白色へと明るくなるにつれてオレイン酸割合が高くなることを示している。図9(a)試料、図9(b)試料それぞれの4領域の理化学測定値と推定値の平均値はほぼ一致した。両者のオレイン酸分布を画像およびヒストグラムから比較しても図9(a)試料のオレイン酸割合が全体的に高いことがわかる。このことから、個体間でのオレイン酸割合の分布比較が確認できたと同時に、脂質評価装置の有効性を示した。

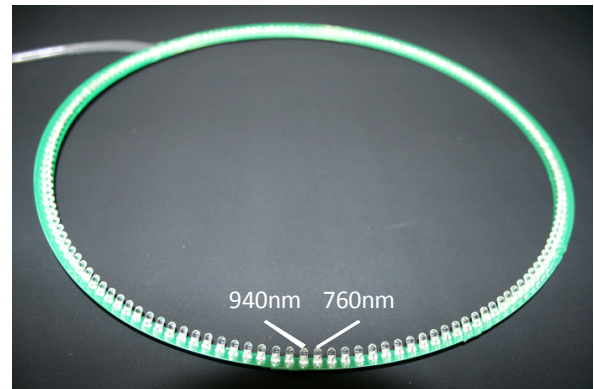


図5 LED照明



図6 実験材料

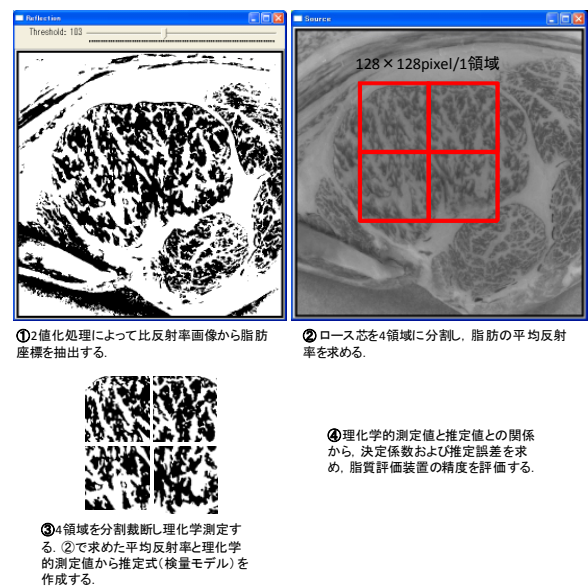


図7 評価方法

4. まとめ

本研究では、牛肉の食味の良さの一要因として知られる良質な脂、オレイン酸を対象とし、非破壊かつ可視的に定量化する可搬式の脂質評価装置を試作した。装置はカメラとLEDの撮像系、光源コントローラおよびPCによって構成される。撮像系の設計において、偏角イメージング実験を行った結果、LEDの配置は斜光照明とした。また、PCにはカメラ制御とマルチスペクトル画像からオレイン酸割合分布画像を作成するまでの脂質解析ソフトウェアを実装した。牛肉試料を用いて脂質評価装置の脂質推定精度を評価した結果、相関係数 0.745、推定誤差 2.24%の結果が得られた。

今後、装置の小型化、推定精度の向上を進めることで、現場での利用や、脂質成分を定量的かつ可視的に測定する研究開発ツールとして利用されることが期待される。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）研究成果最適展開支援事業（A-STEP）フィージビリティスタディ【FS】ステージ探索タイプ「牛肉の脂質評価装置の開発」と、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 地域ICT 振興型研究開発「県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発」の委託を受けて実施した。ここに感謝の意を示す。

文 献

- [1] 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（第2報）”, 岐阜県情報技術研究所報告, 第10号, pp.54-57, 2008.
- [2] 田中等幸, 丸山新, 赤塚久修, 松原早苗, 棚橋英樹, “画像を用いた食品評価に関する研究（第3報）”, 岐阜県情報技術研究所報告, 第11号, pp.53-57, 2009.
- [3] 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.
- [4] 大倉力, 朴善姫, 西岡輝美, 入江正和, “近赤外分光法による肉豚脂質評価装置の開発”, 照明学会誌, 第93巻, 第8A号, 2009.

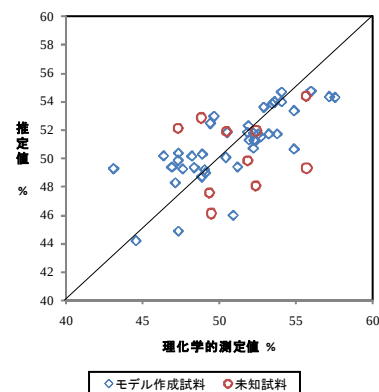


図8 理化学測定値と推定値との関係

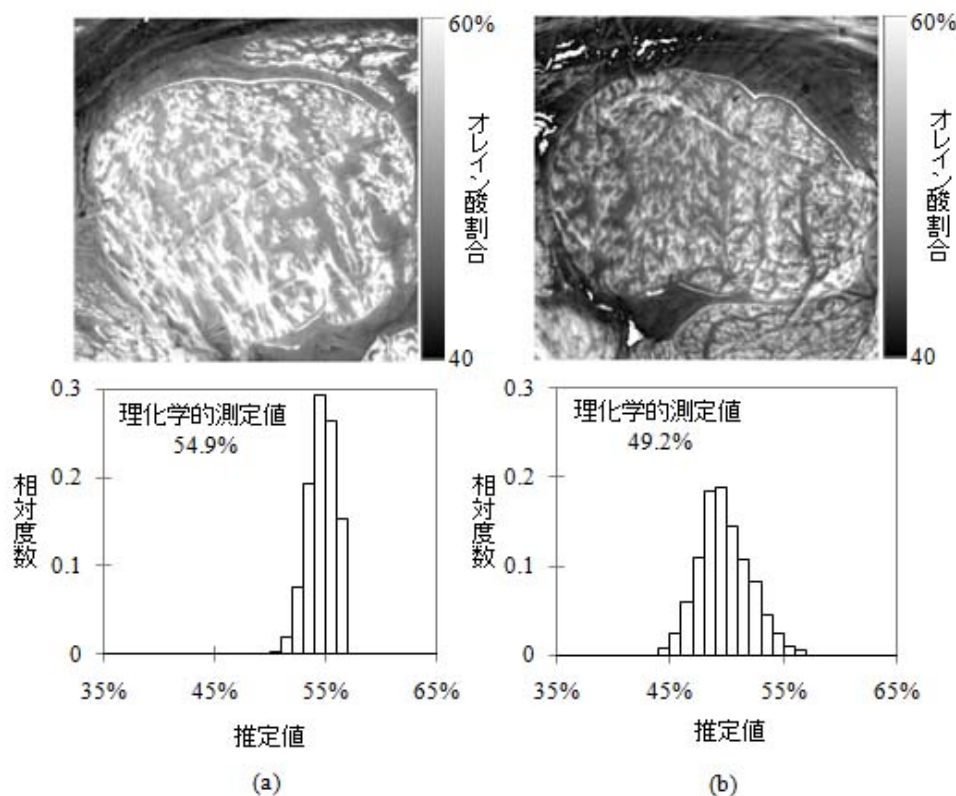


図9 脂質評価装置によるオレイン酸割合分布画像とヒストグラム

ジャガードモケット織物の高感性化・省力化生産技術の開発

山田 俊郎 棚橋 英樹

Development of High Sensitivity and Labor-saving Manufacturing System for Jacquard Moquette Textile

Toshio YAMADA Hideki TANAHASHI

あらまし 高級自動車やバス・電車の内装材には、肌触りが良くデザイン性に富み、耐摩耗性にも優れたモケット織物が多く採用されている。モケット織物の生産には、約3,200本ものモケット糸が使われているが、従来の生産技術ではこれら1本1本を管理することが困難であり、デザインの制限や残糸の大量発生という課題があった。本研究では、電子タグを用いてモケット糸のボビンの1本1本を管理する生産技術を開発することで、従来にないデザイン性の高いモケット織物を試作するとともに、残糸の大幅な削減を実現した。

キーワード 生産技術、高感性化、省力化、織物、電子タグ

1. はじめに

自動車のシートや内装材には、肌触りが良くデザイン性にも富んだ高感性的な素材が用いられており、特に高級自動車やバスにおいては、これらの感性的な条件を満たし、かつ、耐摩耗性にも優れたモケット織物が採用されている。さらに、自動車以外に電車、航空機、船舶等のシートや内装材にもモケット織物は広く用いられており、その肌触りやデザインは乗り物のイメージを印象付ける重要な要素の一つとなっている。このように、モケット織物は中高級自動車や公共交通機関に使用されるがゆえに、他社との差別化や更なる高付加価値化を図ることができるような高感性化が常に求められている。この高感

性化を実現する要素技術のうち、織物業界に対してはデザインの自由度の高いモケット織技術の開発が求められている。

モケット織物には通常の織物の経糸と横糸に加えてパイル糸があり、染め糸を用いたジャガード織では表面に現れるパイル糸の色を選択することで図柄を織り上げる。織機では約3,200本のボビンから布の幅方向に並んだパイル糸を供給しており、ボビンに巻かれた糸の色がデザインを決める要素となる。自動車業界をはじめとする川下企業からはデザイン性の高い織物が求められているが、従来の生産方式ではボビンを人が管理しているため、複雑なデザインになるとボビン管理の工数が増大し、工業製品として生産することは高コストとなり現実的ではな

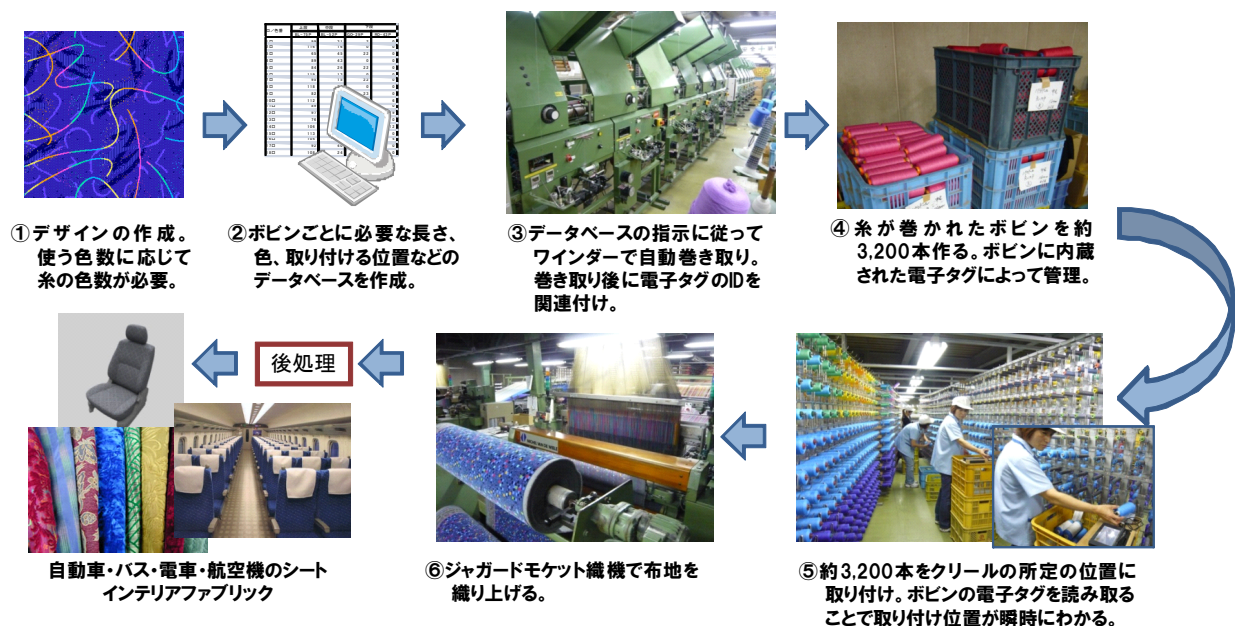


図1 開発した生産システムの作業フロー

かった。

また、ボビンに巻き取るパイル糸の長さは、本来はボビン1本1本で異なるが、1本ごとの管理ができないため、あらかじめ多めに巻き取っており、織上がり後に大量の残糸が生じている。

本研究では、

- デザイン性の高い多色モケット織物への対応
- 工数の削減による生産の効率化
- 残糸の削減

を目標に、電子タグを用いてパイル糸のボビン1本1本の管理を実現する生産システムを開発し、デザイン性の高いモケット織物を効率的に生産する技術を確認した。

2. 開発システムの概要

開発したジャガード織物の生産技術の作業フローを図1に示す。織物の生産は、まずデザインの作成から始まり、デザインによって必要な糸長をボビンごとに算出する。次に、ワインダー装置によってボビンに必要な長さの糸が自動的に巻き取られ、電子タグによってボビンと次工程のクリール取り付け位置の関連付けがなされる。従来の生産手法では、この関連付けの管理ができなかったため、個別ボビンの糸色や糸長の管理が困難であり、限られた糸色で多めに同量巻き取ったボビンによって生産を行っていた。

ワインダーでの巻き取り作業で作られた約3,200本のボビンは、織機の後方に設置されたクリールに取り付けられる。このとき、作業者はボビンを電子タグリーダ端末にかざすことで取り付け位置が分かり、個別のボビンを指定された位置に取り付けることが可能となった。

その後、織機による製織工程、毛足を切りそろえるシャーリングやバックパッキングなどの後処理工程を経てモケット織物が完成する。

本研究の技術開発は、

- 自動巻き取りワインダー装置の開発（主に機械装置）
- 生産管理システムの開発（主にソフトウェア）
- 電子タグリーダの配置検討
- 高感性モケット織物の試作

の4項目について実施したが、本稿では生産管理システムの開発および電子タグリーダの配置検討について報告する。併せて、モケット織物の試作についても結果を報告する。

3. 生産管理システム

本研究で開発する生産管理システムは、図2に示す構成であり、

- デザイン画から糸長を求める糸長計算システム
- ボビンの電子タグを読み取り12鍾のワインダー機械装置を制御するワインダー制御システム
- クリール取り付け作業用の作業指示端末

の3つのサブシステムで構成される。これらのシステムは1つのデータベース構造を基に連携して動作するため、一体の生産管理システムとしてソフトウェアを開発した。

生産管理アプリケーションは、当研究所と共同研究先の企業とで随時仕様を策定し、プログラム実装をソフトウェア開発会社に委託する「アジャイル開発方式」によって実施した。

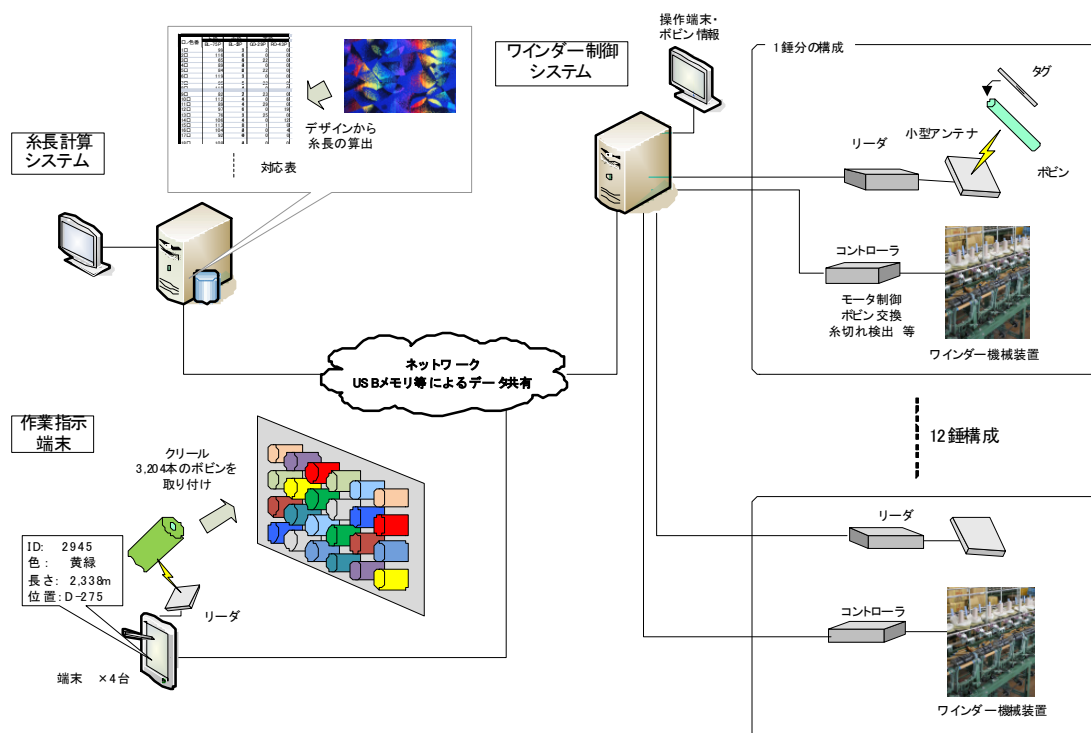


図2 開発した生産管理システムの構成図

3. 1 糸長計算システム

3. 1. 1 ボビン管理データベース構造

糸長計算システムでは、データの属性によって複数のデータベース(以下DBと記述)を管理し、DB中のデータを参照して新規の作業指示を作成している。織機の機械的な制約を記した織機DB、ワインダー装置の稼働状況記したワインダーDB、糸の種類によって異なる伸びや巻き取り速度などの条件を記した糸種DB、デザイン画を管理するデザインDBが参照元DBであり、「どのデザインの製品をどの号機の織機で何m製造する」という手順で作業指示データの作成ができるシステムとした。これによって、生産ごとに変わるパラメータ(織長、デザインNo., 使用する織機番号など)と固定のパラメータ(経糸の本数(羽数)など織機固有のパラメータ、使用する糸の特性など)を分離して管理することができ、新規作業指示の作成を簡易なものにすることができた。

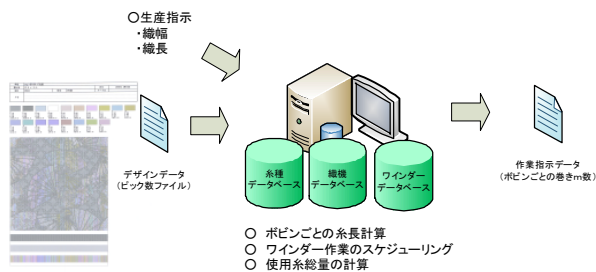


図3 データベースの構成

3. 1. 2 糸長計算アルゴリズム

各ボビンに巻き取るパイル糸の糸長は、デザインDBに登録される羽ごとの出現頻度 $a(n)$ (本)と紋丈 nm (本)、織機DBに登録される打ち込み数 np (本/単位)とパイル長 lp (mm)、織り上げる布地の長さ lt (m)から計算される。

パイル糸は横糸に掛けて織り上がるため、横糸の間隔を d (mm)として、その断面を図4に示すようにモデル化した。

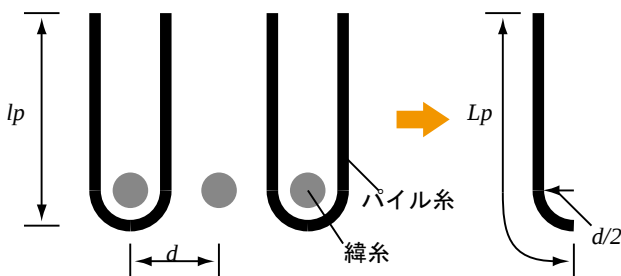


図4 パイル糸の出現がある場合の断面

横糸間隔 d は打ち込み数 np から求めることができるが、打ち込み数の単位は複数あり、mm単位に換算する必要がある。一般に多く使われる「本/インチ」単位の場合、

$$d=25.4/np \quad (1\text{インチ}=25.4\text{mm})$$

となる。このほか、「本/寸」, 「本/cm」も単位とし

て使われており、これらからmm単位の横糸間隔 d に変換する。

パイル1本当たりに必要な糸の長さ Lp は図4のモデルより、直線で示されるパイル部分と1/4円弧で示される裏側部分の和となり、以下の式で求められる。

$$Lp=(lp-d/2)+(2\times\pi\times d/2)/4$$

パイルが出現していない部分のパイル糸は図5に示すように布地の裏側に隠れているが、出現しない部分が長く続くと布地の裏側で糸が弛み、布地の品質が悪くなる。そのため、パイルが出現しない場合でも一定の間隔ごとに横糸に掛け、糸が弛まないようにしている。パイル糸として出現しない糸がどのタイミングで横糸に掛けられるかは織機のジャガードを制御する紋紙によって決まるが、本開発では紋紙の情報を用いていない。そのため、横糸1本ごとに掛けられると仮定して、図5のように1/4円弧2つでモデル化し、パイルが出現しない場合の糸長 Ld を計算した。

$$Ld=(2\times\pi\times d/2)/4\times 2$$

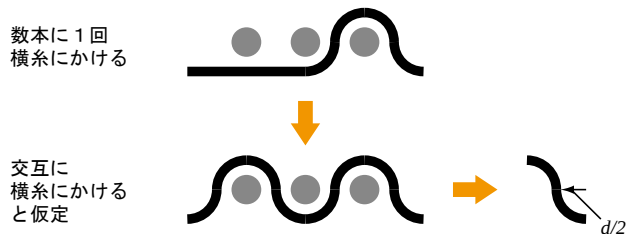


図5 パイル糸の出現が無い場合の断面

これにより、 n 羽目に必要な1柄あたりのパイル糸の長さ $Lg(n)$ は、

$$Lg(n)=a(n)\times Lp+(nm-a(n))\times Ld$$

織り長に対するパイル糸の総量は、

$$L(n)=Lg(n)\times lt/((nm/np)\times 25.4)/1000$$

(打ち込み単位が本/インチの場合)

となり、 n 番目のボビンの巻き量が決定される。

3. 2 ワインダー制御システム

3. 2. 1 ワインダー制御アルゴリズム

ワインダー装置は1錘につき1台のシーケンサ(PLC)で制御されており、作業管理PCからはこれらPLCに対して指示を行う。PC-PLC間はEthernetで接続し、PLCの機能として用意されているメモリ参照機能を用いて、PC側がネットワーク越しにPLCのメモリ領域を参照する方式をとった。

作業シーケンスは、起動やタグ読み取りなどの通常動作や、糸切れやタグの読み取り不良などの異常時など、作業単位ごとに想定される状況に対応できるよう手順を組み立てた。一般に装置間の通信フローは表1のようなフロー表で表示するが、共有メモリ型の通信であることを考慮して、表2に示すようなメモリ状態遷移表を作成し、プログラム実装事業者との認識の共有を図った。

表1 通信フロー表の例（自動運転起動時）

PLCIにて操作する信号	方向	PCIにて操作する信号	内容
運転停止リレー 巻指示要求リレー 巻取状態リレー (完了)	ON ON OFF	作業指示No 指示巻量 テンション管理P(max) テンション管理P(標準) 巻指示巻数 巻速度管理P(加速) 巻速度管理P(max) ストップ交換指示リレー 巻指示設定完了リレー	機器マスターデータ 機器マスターデータ 機器マスターデータ 機器マスターデータ 自動巻取時「固定」 機器マスター「速度制御PLCIに送信」 機器マスター「速度制御PLCIに送信」 ストップ交換指示(巻指示時はON)
巻指示要求リレー 巻指示設定完了リレー	OFF OFF		
タグ読取要求リレー	ON	μ-Chipリッド駆動 タグ読取結果リレー (正常) タグ読取エラーリレー	ICタグ読取駆動 (タグID:32byte) 作業指示D, B更新
タグ読取要求リレー タグ読取通知リレー タグ読取結果リレー (PLCIにてリレー-OFF)	OFF OFF OFF OFF		

表2 メモリ状態遷移表の例（自動運転起動時）

[illegible]

3. 2. 2 作業インタフェース

高感性モケット織物の試作においては、ワインダー装置を現場作業員が操作し、約3,200本の原料糸ボビンを作成することとなる。そのため、操作工数が少なくなるよう、極力簡易な操作インタフェースを設計した。ワインダー作業に用いる作業指示データベースに登録される情報のうち、現場作業に必要な情報を1行にまとめ、図6に示すように1画面に12台の状態を一覧表示した。エラー表示などの特別な作業指示は随時ポップアップウィンドウで表示され、各号機の詳細情報は行をクリックすることでポップアップウィンドウに表示される。



図6 ワインダー作業管理端末の操作画面

なお、図6は正常運転時や糸交換要求時、異常発生時など想定される場合の表示を列記したものであり、通常運転時は最上段の「糸巻き中」表示が並んだ表示となる。

3. 3 作業指示端末

ボビンを特定の位置に取り付けるクリール作業においては、作業の邪魔とならない小型の端末が求められる。腕時計のような感覚で体に装着できるものが理想的ではあるが、電子タグの読み取り機の制約（安定した読み取りには10mW出力のリーダが必要、リーダ装置のミドルウェアのプラットフォームがWindowsXP）により、図7(a)に示す小型のWindows PCと10mW出力のリーダモジュールの組み合わせを用いることとした。

Windows PCを用いることで、表示の自由度が高くなるが、必要な情報はクリール上の取り付け位置のみであることから、取り付け位置を大きく表示し、補助的情報は小さめの表示としている。図7(b)のように、作業者は前工程で巻き取られたポビンをリーダにかざすことで、瞬時に取り付け位置を知ることができる。

また、PC用のLバッテリーに外部補助バッテリーを併用することで1日の作業時間（約8時間）の動作が可能である。



(a) 端末の構成 (b) 取り付け作業

図7 作業指示端末

4. 電子タグリーダの配置検討

電波を用いて信号の送受信を行う電子タグは、周囲の環境によって外乱が生じることもあり、読み取り精度が大きく変化する。特に、金属製のワインダー機械装置の周囲では、電波の反射の影響が考えられ、また、隣接する巻き取り機構間の距離が短いことから、リーダ間の電波干渉が発生する恐れもある。このため、スペクトラムアナライザを用いてワインダー機械装置上の電波状況を測定し、電子タグのIDがクリアに読み取れる最適なアンテナ配置を決定した。

巻き取り機構で巻き取りが完了したボビンはボビン運搬機構のベルトコンベア上に排出され、保管ユニットに運搬される（図8）。このベルトコンベア上にある時点でボビンのタグIDの読み取りを行う。機械装置の配置から、タグリーダを設置できる場所は図9に示すようにベルトコンベアの裏側および上方の2か所に限定される。タグリーダをこの2か所に設置し、それぞれの場合における電波強度を測定した。

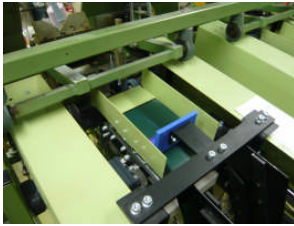


図8 ボビン運搬機構

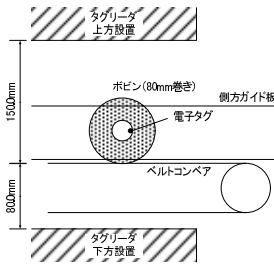


図9 ボビン運搬機構の断面

糸の巻き取りが最も多い場合のボビンの直径は約80mmであるため、タグの位置はベルトコンベア面から40mm程度の距離が最も離れた場合となる。そのため、図10に示す方法でコンベア面から40mmの位置で計測した。タグリーダは2.4545GHzを中心として、1MHz間隔で10種類の周波数で読み取りを行っているため、約10秒間計測を行った。

電波測定に用いた機器は以下のとおりである。

- ・スペクトラムアナライザ アジレントテクノロジー N9340B
- ・半波長ダイポールアンテナ アンリツ MA5612B4

図11は下面設置の場合の測定結果であり、黄色（明るい線）がsweep波形、緑色（暗い線）がMax Hold波形である。



(a) 上面設置



(b) 下面設置（濃い緑色部分の下に設置）

図10 リーダの配置の違いによる電波強度計測

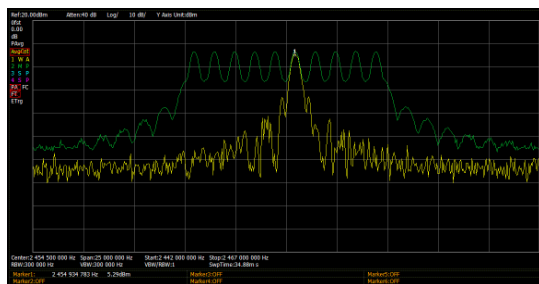


図11 下面設置の場合の電波強度

コンベア面から40mm上方の位置は、下面配置のアンテナ面から120mm、上面配置のアンテナ面から110mmであり、ほぼ同じ距離である。測定された電波強度は、上面設置の場合で7.8dbm、下面設置の場合で5.3dbmであり、どちらの場合も電子タグの読み取りは可能であった。下面配置の場合、間にベルトコンベア（樹脂製）が入り、周囲に金属部品が多く配置されているため、電波状態への影響が危惧されたが問題はなかった。作業性の面からタグリーダの設置は下面配置が望ましいため、以後の検討は下面配置でのみ行った。

下面配置とした場合にボビンのタグIDを読み取ることができる最大距離は、コンベア面から30cm程度であり、その場所での電波強度は約0dbmであった。このことから、0dbmが電子タグ読み取りの最低電波強度であると考えられる。よって、本来読み取るべき位置に無いボビンの誤読み取りを防ぐには電波強度が0dbm以下となっていればよいことが分かる。この結果をもとに、巻き取り機構上、ボビン供給箱、巻き取り後のボビンストッカー、隣接するワインダーの読み取り位置の各位置で電波強度を測定したところ、それぞれ、-10.5dbm、-16.2dbm、-13.9dbm、-19.6dbmであり、最低強度よりも10dbm以上低い強度であることがわかり、これらの位置では誤読み取りの恐れが無いことが確認できた。

5. 高感性モケット織物の試作

開発システムによって、多色糸のボビン管理が可能になったが、モケット織物は織機の構造上の制約によって、同一の経糸方向の色数が3色に限られる制約がある。この制約のもと緯糸方向の色数を増やした花柄のデザインと扇柄デザインを作成し、モケット織物の試作を行った。

花柄デザインでは、地となる葉の部分に緑系を4色、柄となる花卉の部分に赤・紫系を10色、めしべの黄色系および花卉の深みを出す青系のポイント色に5色の合計19色を配色している。試作のデザイン設計を図12に、試作に用いた糸の色見本を図13に、試作したモケット織物と従来の3色織の比較を図14に示す。

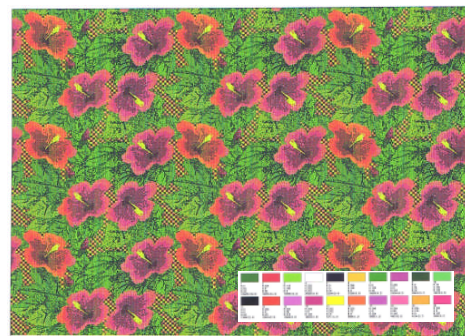


図12 試作デザイン（大花）19色

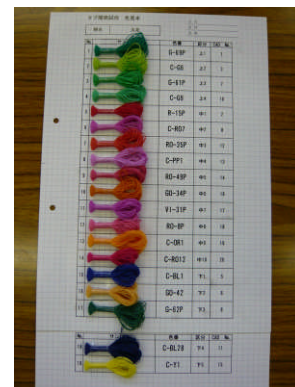
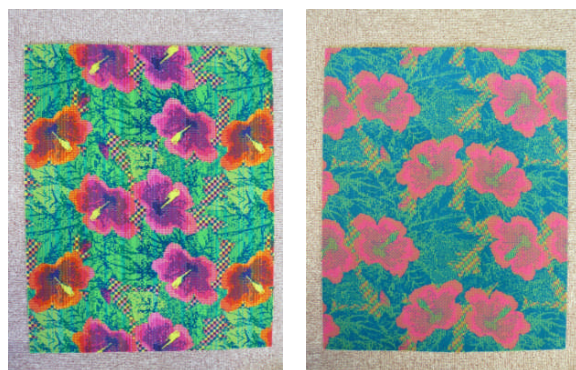
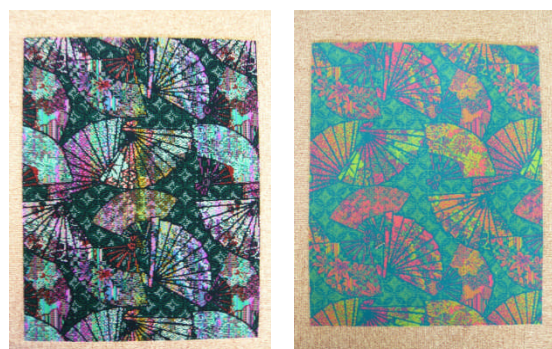


図13 糸色見本（19色）



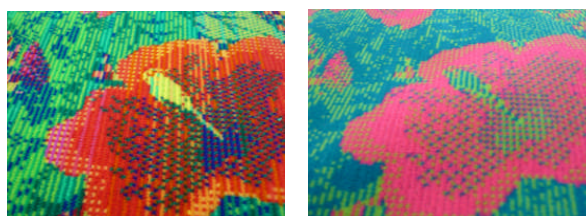
19色 3色
図14 試作モケット織物（大花）

扇柄デザインは濃緑をベースに、背景2色、輪郭となる部分に2色、柄の模様となるポイント色に13色の合計17色を割り当てた。試作したモケット織物と従来の3色織の比較を図15に示す。



17色 3色
図15 試作モケット織物（大花）

試作デザインを通して、扇柄デザインのような幾何学的な柄は多色化によりデザインの深みが増し、配色によって落ち着きや華やかさを表現できることが確認できた。また、花柄デザインのような写実的な柄では、図16に示す花部分の拡大写真のように、多色化によって表現力が増すことが確認できた。



(a) 19色デザイン (b) 3色デザイン
図16 花柄部分の拡大

試作したモケット織物（扇柄）の試作に使用した糸量を表3に示す。開発した生産管理システムによって、製造に必要な条件を与えれば必要な糸量が即座に計算でき、

従来よりも正確に必要な糸量を把握することが可能となった。これにより、従来よりも残糸の減少が期待できる。

表3 扇柄の使用糸量（5m試作時）

前提条件			使用糸量		
			色番	糸長(m)	重量(kg)
ハイル長	2.80	mm	1 C-BK2	11567.88	0.58
打込み	44.00	本	2 C-G11	8807.12	0.44
紋丈	528.00	本	3 RO-35P	1556.65	0.08
織長	5.00	m	4 C-RO7	1200.11	0.06
P長/本	2.96	mm	5 R-2P	894.02	0.05
DP長/本	0.45	mm	6 GO-7P	815.70	0.04
1釜本数	264.00	本	7 RO-2S	482.72	0.02
総PIC数	8661.40	回	8 C-PI2	305.43	0.02
引出ロス	10.00	m	9 C-PP10	540.06	0.03
			10 C-PP11	531.14	0.03
			11 C-BL18	1120.45	0.06
			12 BL-88P	543.77	0.03
			13 C-G7	523.91	0.03
			14 G-25P	651.61	0.03
			15 C-G9	1167.11	0.06
			16 C-VI2	3700.27	0.19
			17 G-69P	6289.08	0.32

6. まとめ

本研究では、高感性なモケット織物を少ない工数で生産することを目標に、原料糸のボビンを電子タグで管理する生産技術の開発を行った。試作した多色モケット織物は、従来織物と比較してデザイン性の高いものであり、従来織物と変わらない工数で実現できる本技術によって事業化が期待できる。

本年度の研究開発によって、高感性モケット織物の試作を行うための機械装置、生産管理装置開発は一通りの完成を見たが、モケット織物そのものの試作検討については最初の試作ができた段階である。多色を活かしたデザインや、多様な糸種を取り混ぜたデザインなど、モケット織物の高感性化には織物そのものの課題が残されている。今後は川下企業の意見を取り入れながらデザイン開発・試作を重ねて高感性モケット織物の開発を進める。また、試作を通して従来方式との生産性の比較を行い、開発方式による効率化を定量的に検証することも必要である。

謝 辞

本研究は経済産業省、平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業の採択を受けて、管理法人（財）岐阜県研究開発財団、実施機関（株）関織物株式会社、岐阜県情報技術研究所の体制で実施した。

追記：

岐阜県情報技術研究所のホームページから本研究報告のカラー版PDFがダウンロードできます。以下のURLのヘッダバナー「刊行物」から、「平成22年度研究報告」へお進みください。

<http://www.com.rd.pref.gifu.jp/~imit/>

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 自律走行ロボットの開発(第2報) —

光井 輝彰 平湯 秀和 田畑 克彦 飯田 佳弘 陶山 純* 葛谷 和己**

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

— Development of an Autonomous Moving Robot (2nd Report) —

Teruaki MITSUI Hidekazu HIRAYU Katsuhiko TABATA Yoshihiro IIDA
Jyun SUYAMA* Kazumi KUZUYA**

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。そこで、ロボット技術を応用した新たな除草手法として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、自律走行機能を備えたプロトタイプロボットを開発した。しかし、実際の現場では安定して自律走行が行えない場面が確認されており、改良開発を行った。

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、化学農薬の使用を減らした安全で環境負荷の小さい農業が望まれている。行政でもこれを推進する動きを進めている^[1]が、手間のかかることが普及の障害であり、特に除草剤を使用しない場合の除草作業が最大の課題となっている。そこで我々は、水田除草剤に代わる新たな除草手段として水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)を提案し^[2]、平成20～21年度には経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の委託研究において自律走行機能を備えたロボットを開発した。これをベースに、2010年度からは農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け、稲の栽培体系まで含めたロボットによる除草技術の実用化研究を開始した。本報では、開発中のロボットの概要と、自律走行実験について報告する。

2. 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機械除草は乗用大型機械が主流であるが、これ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。そこで、農業者の意見を取り入れながら、ロボットを新たな除草手段として開発するため、以下の基本開発方針を定めた。

* みのる産業株式会社

** 株式会社常盤電機

1) 環境にやさしい

除草剤を使用しないだけでなく、バッテリー駆動とし、エンジン使用時の排オイルや排気ガスの排出を無くす。

2) 手間がかからない

水田に設置したロボットが1枚の水田内の除草作業を自動で行う。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を用いる。検証実験では、週2回の除草作業を7週間程度行うことで除草効果を確認している^[3]。

3) 取り扱いが容易

水田に持ち込んで利用するため、小型軽量で運搬や取り回しを容易にする。大型で重いロボットでは取り回しが悪く、水田の水持ちを悪くする危険性もある。

4) 安価(目標価格: 30万円)

導入しやすい価格設定ができるように、ロボットに必要な機能と対象水田への要求条件について検討を進める。

3. ロボットの開発

開発したロボットを図1に、諸元を表1に示す。ロボットは稲を跨いで水田内を約0.5m/sの速度で走行し、1回の充電で3時間の作業(走行)が可能である。この場合、作業効率は1時間当たり約10a(1反: 1000m²)となり、1日1回の充電で、除草作業(2回/週)を毎日行うとすると1台で1ha(10反: 10000m²)以上の水田を除草することができる。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、作業面積を倍増することも可能である。

3. 1 基本機能の改良開発

ロボットの機構は水田で使用することを考慮して、防水性と耐久性を備えるとともに、泥や夾雑物が堆積しにくく、メンテナンスを容易に行うための改良を行った。具体的には、電装部品を格納するケースやフレーム機構、プーリーの形状などの改良を行った。

バッテリーは直列接続可能なリチウムイオンバッテリーを左右のクローラ内部の低い位置に防水ケースに収納して搭載しているが、充電はそれぞれ左右のパッケージ毎に独立して行う必要がある。従来は充電の度にこのケースからバッテリーを取り出して、個々のバッテリーをそれぞれ充電していたが、バッテリーを取り外さずに充電器のプラグを差し込むだけで充電できるように改良を行い（図2）、ロボットの取り扱い性を向上させた。

ロボットの操作インターフェースには、入力のための4つのボタン(LEDランプ付き)と16文字×2行のLCDキャラクタディスプレイを備え、自律走行に必要なパラメータの設定や作業の指示は、LCDに表示された情報を見ながらボタンを操作して行う。これまで、LEDランプはそれぞれのボタン操作に連動させて使用していたが、独立した表示装置として有効に活用することにした。そのため、専用のスイッチパネルシートを作成して、機構的には1体となっているボタンとLEDランプを独立した入力装置と表示装置（パイロットランプ）として使用できるよう改良した（図3）。

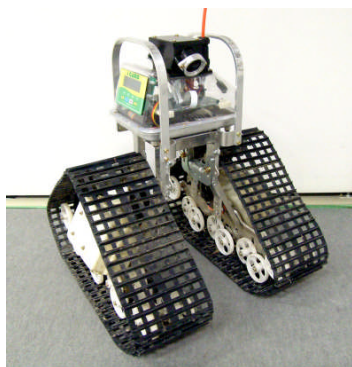


図1 開発したロボット

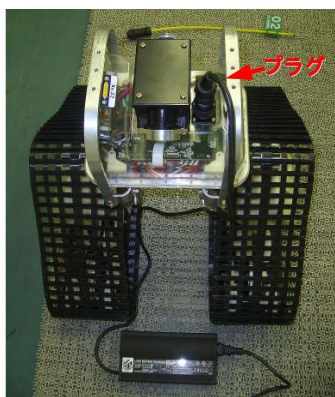


図2 プラグインで容易な充電（左）

表1 諸元

Length	500mm
Width	450mm
Hight (Clearance)	500mm (300mm)
Width of Crawler Belt	150mm
Weight	9.2Kg
Motor	7.2Kgf-cm 18.5W
Battery	Li-ion 25.6V-7.0Ah
Running Time	3 Hours
Working Capacity	1000㎡/h

3. 2 自律走行システムの開発

ロボットの制御には、画像処理用のFPGA、制御用のマイコン、姿勢検出のための加速度センサとジャイロ等を備えた基板を利用した。カメラには稲の検出に有利な近赤外帯域に感度を有するものに、光学フィルタを組み合わせ利用した。カメラの設置位置は、泥の跳ね返りや成長した稲の葉との干渉を避けるため、ロボット最上部の中央付近とした。この位置から前後方向それぞれ斜め下向きに合計2台のカメラ（画角：水平79°，垂直58°）を設置し、クローラベルト先端付近から約2.5m先までの視野範囲を確保した。システム構成を図4に示す。

4. 自律走行機能の開発

様々な水田のあらゆる条件に対応できるようにロボットのスペックを膨らますのではなく、実用時のロボットの機能と価格とのバランスを考慮した上で対象とする水田に条件を設定し、自律走行機能の開発を行った。

条件1：稲の列が交わらずに終端まで続いている。

条件2：稲列終端部（あぜ際）への稲の植え込みを制限し（減反面積へ計上可能）、波板を設置する。

4. 1 自律走行アルゴリズム

ロボットは(1)稲列追従走行、(2)稲列終端判別・停止、(3)次の稲列への進入の各動作を繰り返し行い、水田全体の除草作業を進める（図5）。

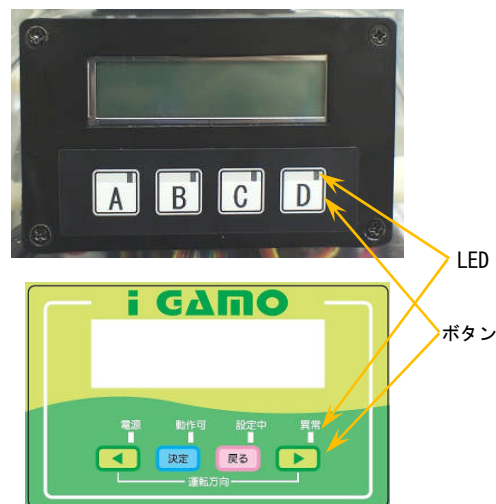


図3 操作パネルの改良（上：改良前，下：改良後）

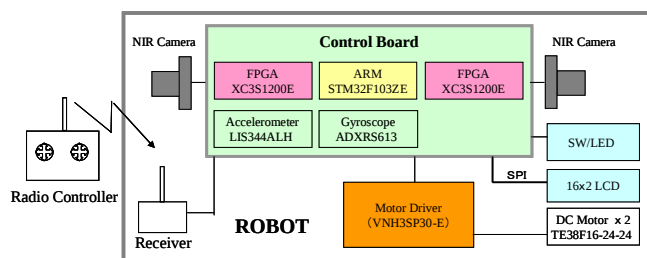


図4 システム構成

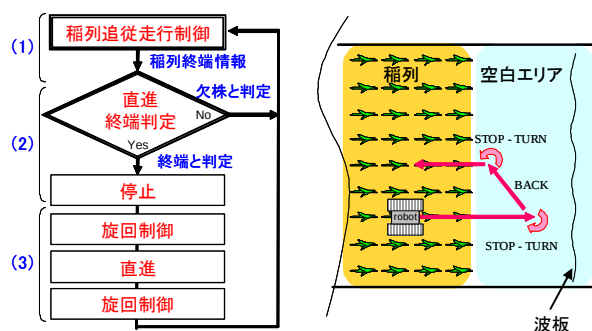


図5 自律走行アルゴリズム

稲列追従走行では、搭載カメラによる近赤外領域の映像を画像処理し、フレーム毎に目標とする稲列を認識してロボットの進行方向の制御を行う。ここでは太陽の写りこみや欠株（稲が無い部分）等の外乱に対して、画像処理上の対策を行うとともに、ロボットの姿勢に応じた速度制御を行うことで、追従性能の向上を図った。

稲列終端判別・停止は、終端部分に設置した波板を画像処理で認識し終端部分の走行速度を落とし、波板との相対位置で停止位置を決定することで停止位置の安定を図った。これにより、従来2m程必要であった稲列終端の空白エリアを1m程度に縮めることが可能となった。

停止後は、旋回 → 直進（後進） → 逆旋回とスイッチバック方式で、次に目標とする稲列の追従走行ができる位置まで移動する（図5）。ここでの制御はジャイロと加速度センサ、マイコンのタイマ機能を用いてシーケンシャルに行うが、今回、各動作の間に設定していた一定間

隔の停止状態を無くし、姿勢の安定判別後に直ちに次の動作に移ることで、各動作間の無駄時間を無くすとともに、各動作を確実に安定した状態から行う改良を行った。

4. 2 自律走行実験

冬季の実験となるため、屋外では刈跡水田のヒコバエを対象に、ビニルハウス内では田植え直後の擬似水田で実験を行った。刈跡水田では、ほ場の端にロボットを設置してスタートさせると、自動で指定範囲の作業を行い、終了位置に戻るという、通常の使用状況を想定した実験を行った。作業面積は稲列9条の範囲（約20m×3m）で、稲列の終端には1.6mの稲を植えない空白エリアを設けた。様々な天候状況で実験を行い、太陽光の反射が強い状況でも一連の除草作業を自動で行えることを確認した。ハウス内の模擬水田では、低温のため一部の苗が水面に寝てしまうなど、稲列の認識が非常に難しい状態であった。ここでは、ロボットの走行速度を一割ほど落とすことで自律走行が可能であった。また、稲列終端の空白エリアを1m程度に縮めてもスイッチバック出来ることを確認した。実験の様子を図6に示す。

5. まとめ

自律走行機能を備えたロボットについて、現場での実用性の向上を目指した改良開発を行った。実験では自動で除草作業を行えることを確認したが、ロボット開発後の冬季に行った実験であるため、実際の稲の栽培時期に様々な条件で検証を行う必要がある。ここでは、例外対策（想定外の状況の検出と対策）を含め自律走行機能のロバスト性を検証し、さらに改良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。

謝 辞

本研究は、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機、岐阜大学、岐阜県中山間農業研究所、農政部農業技術課、東濃農林事務所の協力の下、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」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] 例えば“ぎふクリーン農業研究センター”
<http://www.gifu-cal.or.jp/>
- [2] 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
- [3] 光井輝彰, 広瀬貴士, 岩澤賢治, 久田浩志, 大場伸也, 稲葉昭夫, “水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発—水稲とマコモ栽培ほ場での除草実験—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, 第11号, pp.49-52, 2010



図6 自律走行実験の様子（上：刈跡水田，下：ハウス内）

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

ー 現場での実用性評価 ー

光井 輝彰 平湯 秀和 田畑 克彦 飯田 佳弘
吉田 一昭* 岩澤 賢治** 広瀬 貴士***

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

ー On-the-Spot Practicality Evaluation ー

Teruaki MITSUI, Hidekazu HIRAYU, Katsuhiko TABATA, Yoshihiro IIDA
Kazuaki YOSHIDA*, Kenji IWASAWA**, Takashi HIROSE***

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)の開発を進め、試作機を用いたほ場での除草実験により除草効果の検証と、効率的なロボットの運用方法について検討を行ってきた。本年度は、より実用的なロボットの改良開発を進めるために、これまで試験場内で行っていた除草実験を農業者のほ場へ拡大し、農業者の視点から本除草技術全般に関する評価を行った。

キーワード ロボット, 除草, 水稻, 減農薬栽培

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、環境保全型農業やぎふクリーン農業のように、それらの農業を推進する動きを進めており^[1]、水稻栽培でも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。ここでは慣行的に用いられる農薬として、除草剤についてもその使用を控えるための様々な手法が試みられてきている。しかし、作業時間を飛躍的に短縮できる除草剤に対して有効な代替技術は無く、雑草対策が依然として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^[2]。また、今年度からは農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の委託を受け、水稻の栽培手法からロボットの運用方法までを含め、本除草技術を実用的な除草技術体系として確立するための研究開発を開始した。今年度は(有)甘原ええのお(多治見市)の協力を得て除草実験を行い、本除草技術について現場の農業者の視点から評価を行い、実用化に必要な課題の抽出を行ったので報告する。

2. 実験概要

除草実験は、一枚の水田を図1のように波板で仕切り、各試験区を設定した。走行区は移植3日後の5月27日からロボットの走行を開始し、7月1日までの間、週2回のペースで除草作業を行った(合計11回走行)。残草調査は7月5日に行った。実験概要を下記に示す。

①場所：多治見市甘原町 (有)甘原ええのお

②耕種概要

- a)品種 コシヒカリ
- b)移植 5月24日
- c)栽植密度 18株/m² (30cm×18cm), 3～5本/株
- d)施肥 全量基肥体系 (N-P-K : 8.1-5.4-5.4kg/10a)
- e)病虫害防除 フィプロニル・プロパナザール粒剤(移植時箱施用)
エトフェン・ロックス・カスカマイシ・フサライド水和剤(8月上旬)

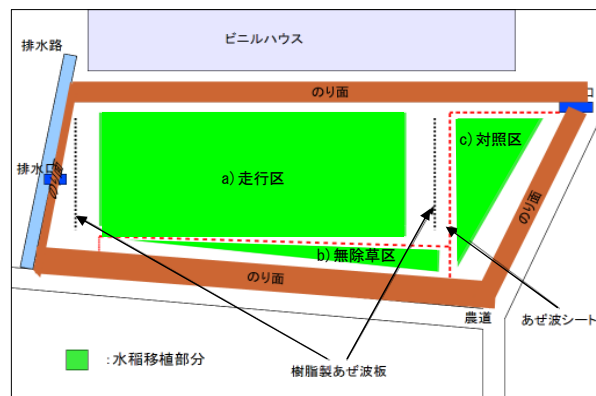


図1 試験区の設定

* 岐阜県農政部農業技術課

** 岐阜県農政部東濃農林事務所

*** 岐阜県中山間農業研究所



図2 実験の様子（左：初期の作業の様子，右：軟弱土壌で安定した走行が出来ない状態）

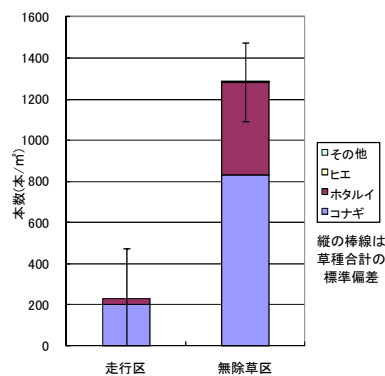


図3 残草調査結果

③試験区

- a) 走行区 (約1000m²) b) 無除草区 (約5m²)
c) 対照区 (約150m², 除草剤散布)

3. 実験結果

3. 1 ロボットによる除草作業について

ロボットによる除草作業については、自律走行が安定して行えず、作業の中断等により正確な作業時間を把握することは最終の走行作業まで不可能であった。特に、太陽光の水面反射が直接カメラに入る方向では、稲体認識が阻害されロボットが迷走する場面が見られた。また、湛水深が深いエリアでは（加えて移植された苗が貧弱な場合）、水面より上に現れる部分が小さく稲株の認識が難しくなり、踏みつぶしで苗が水没し、その後の土壌攪拌で欠株に至るケースが多かった。さらに、ほ場内で田面が露出しやすかった部分を基準に湛水深を設定したところ、元来深かったエリアの湛水深は更に深くなったことで、土壌硬化が遅れて軟弱化し、当初は問題の無かったエリアでもロボットが安定して走行できない場面が頻発した。実験の様子を図2に示す。

3. 2 除草効果について

残草調査を各試験区3か所ずつ行った結果、雑草はコナギ、ホタルイが中心であり、残草本数は図3の通りとなった（対照区は走行区の湛水維持が除草剤の薬効にも有利に働き、残草はなかった）。走行区は無除草区と比較すると抑草効果が認められるが、一部で雑草が多いところがあり、調査結果にも大きなばらつきが生じていた。特に、湛水深が浅くなりやすい（一時的に土壌の露出も観察された）部分に雑草が集中しており、地温の上昇や早い段階で水の濁りが収まるのが要因と考えられた。また、全ての調査を通じて残草は殆どが株間に発生したものであり、条間の抑草効果は十分得られていた。

4. まとめ

ロボットの自律走行については、稲の認識機能を改善するとともに土壌硬度などの必要なほ場条件を明確化する

ることに対応可能であると考えられる。除草効果については、より高い除草効果が求められるが、除草効果を安定して得やすいほ場の条件設定や管理が必要であると考えられる。これら実用化に必要な課題をまとめると、

- ・ロボットの自律走行の安定化(特に太陽光の反射対策)
 - ・株間の除草効果の向上
 - ・ほ場条件の最適化(土壌均平化、深水維持、大型苗移植)
- が挙げられ、実用化のためにはロボットの改良だけでなく、ほ場の整備や管理など農業者側からの歩み寄りが不可欠である事が示唆された。ただし、求める除草効果については、本技術が開発初期段階であること、減農薬栽培を進める個々の農業者が求める除草レベルが一般栽培者と異なることを加味すると、一足飛びに除草剤処理と同等レベルまで引き上げなくても普及が可能ではないかと考えられる。その他、農業者からの意見としては、ロボットの重さや大きさ、持ち運び等の運搬性や作業機の洗浄については特に問題を感じてはいなかったが、泥汚れを受けるほ場作業であるために、バッテリーを本体から脱着不要な、より簡易な充電機能が得られると良い等の意見があった。

今後も農業者の視点からの評価とそれを基にしたロボットの改良開発を進める予定である。

謝 辞

（有）甘原ええのおには、ほ場の提供と研究への多大な協力を頂きました。また、本研究は、みのる産業株式会社、株式会社常盤電機、岐阜大学、中山間農業研究所、農業技術課、東濃農林事務所の協力の下、農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」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] 例えば“ぎふ農業・農村振興ビジョン”
<http://www.pref.gifu.lg.jp/sangyo-koyo/nogyo/ippa/vision/>
- [2] 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

障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第2報)

ー 後頭部で操作する入力装置によるロボットアームの制御 ー

千原 健司 田畑 克彦 飯田 佳弘

Research and Development of Assistive Technology (2nd Report) Control of Robotic Arm with Input Device using Back of the Head

Kenji CHIHARA Katsuhiko TABATA Yoshihiro IIDA

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、障がい者自らが生活を豊かにすることができる福祉機器が望まれている。昨年度は、重度の頸髄損傷者用の電動車いす入力装置として、心身共に負担の少ないという観点から、後頭部を使用した入力装置を考案・試作し、十分に実用化の可能性があることを確認している。今回、実用化という観点からハードウェアを見直すと共に、新たな付加価値として、同じ入力装置を用いて電動車いすの他にロボットアームを操作することが可能かどうか検討した。

キーワード 福祉機器、電動車いす、ロボットアーム、入力装置

1. はじめに

今日、少子高齢社会の進展と共に、高齢者の増加・生活の多様化等に起因し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い。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、昨年、重度の頸髄損傷者用の電動車いす入力装置として、心身共に負担の少ないという観点から、後頭部で操作する入力装置を考案・試作し、十分に実用化の可能性があることを確認した^[2]。本入力装置の実用化開発をベースに、電動車いすの他に、パソコンおよびロボットアームのシームレスな操作を可能とする研究を、(株)今仙技術研究所が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から助成を受け、当研究所らと共同で平成22～23年度に実施中である。

今回、上記入力装置について実用化という観点からハードウェアを見直すと共に、ロボットアームが操作可能かどうか検討した結果について報告する。なお、パソコンの無線操作については別報^[3]を参照されたい。

2. 基本設計の見直しと技術移転

2. 1 基本設計の見直し

後頭部で操作する入力装置は、ヘッドレスト型の入力部により操作者の後頭部を、矢状方向(体を前後に貫く方向)及びヨー軸回転方向に拘束し、尚且つ内蔵センサにより拘束された後頭部の動きを検出し、機器の動作命令に変換する装置である。

今年度は、昨年実施した試作および評価結果^[2]を反映させ、以下の点に配慮して再設計をした。

- ・矢状方向およびヨー軸回転方向のバネ定数を独立して

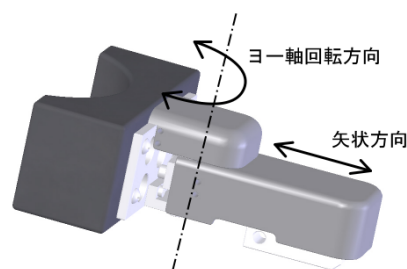


図1 入力装置の組立図

設定可能にする。

- ・各軸の摺動を滑らかにする。
- ・耐久性に配慮した部材を使用する。
- ・屋内外で使用可能にする

この結果、リンク機構を大幅に変更し、防水カバーも設計した。設計変更した入力装置の組立図を図1に示す。なお、内部構造については工業所有権を申請する予定であるため本報では公開しない。

以上の再設計に基づき試作をし、動作を確認したところ、矢状方向およびヨー軸回転方向のバネを任意に変更することが可能であり、また各軸の摺動が滑らかであることを確認した。なお耐久性については、共同企業による耐久試験により評価する予定である。

2. 2 技術移転とリスクアセスメント

基本設計を見直した結果を共同企業に技術移転するため、図面および試作品の他、ISO14121 (JIS B 9702:2000)をベースにリスクを洗い出し、ISO12100 (JIS B 9700:2004)をベースに、適切なリスクの低減手法を提案した結果を文書にして共同企業に引継ぎをした。

設計者にしか思いつかないリスクが新規開発品には存在すると考えられるため、リスクアセスメントは、共同研究における技術移転の際には必須と考えている。

なお、今回21項目の危険源を同定したが、5項目は、障がい者固有の特性によるものと想定しており、リスクの見積/評価結果を不明としている。今後、共同している医療関係者を中心とした臨床試験により、引続き評価する予定である。

3. 電動車いすとロボットアームの切替制御

3. 1 1つの入力装置による複数機器の操作

2階層の操作モードを遷移させることによって、1つの入力装置で電動車いすとロボットアームの切替操作を実現した。操作モードの階層構造を図2に、全体システム写真を図3に示す。操作者は、肘の下に配置した切替ボタンと、後頭部に配置した入力部により、各操作モードを切替えて各機器の操作を行う。なお今回、上位の階層は、電動車いすを操作するモードとロボットアームを操作するモードとし、同時には操作できないことにした。

3. 2 電動車いすの操作

電動車いす操作モードは、下位に前進モードと後退モードを持ち、後頭部入力部を押しこむと前進（後退）し、同入力部をヨー軸回りに回転させると同方向に電動車いすがその場回転し、同入力部を押し込みながらヨー軸回りに回転させると、同方向に電動車いすが旋回（後旋回）する。速度は、押し込み量（回転量）に応じて変化する。モードの切替えは、切替ボタンを長押しするとロボットアーム操作モードに移行し、短押しすると下位の前進・後退モードが切り替わる。

3. 3 ロボットアームの操作

ロボットアーム操作モードは下位に6つのモードを持つ。ロボットアームの動作イメージと、各下位モードの動作を図4に示す。各下位モードには、相反する動作を割り当て、位置決め等の調整操作をし易いようにした。また、操作者がどのモードで操作しているか把握できるように、状態表示器を図3のように設置した。後頭部入力部をヨー軸回りに左右に回転させることにより図4表に示す各動作をする。モードの切替えは、切替ボタンを長押しすると、ロボットアームが自動で折り畳み電動車いす操作モードに移行し、短押しするとロボットアームがそのまま、電動車いす操作モードに移行する。また、後頭部入力部を矢状方向に押し込むことにより、ロボットアーム操作モードの下位モード内に移行する。

3. 4 動作試験

前節の機能をコントローラに組み込み、健常者により動作試験を実施した。後頭部で操作する入力装置により、離れた床に置いてある紙を、電動車いすでその場所まで移動し、ロボットアームで拾い、テーブルに置くことができることを確認した。

4. まとめ

後頭部で操作する入力装置について実用化という観点からハードウェアを見直すと共に、ロボットアームを操

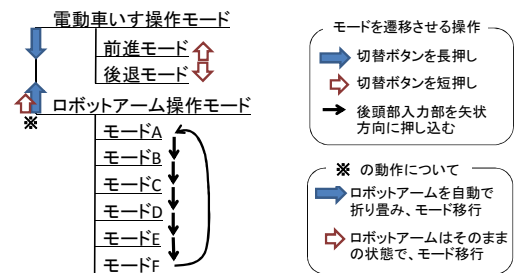


図2 操作モードの階層構造とモード遷移



図3 全体システム

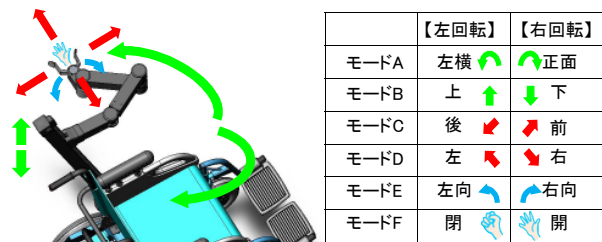


図4 ロボットアームの各下位モードにおける動作

作可能であることを確認した。今後は、ユーザーによる操作試験を実施し、提案したシステムの改良を実施する。

謝 辞

本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の平成22年度福祉用具実用化開発費助成金により実施しました。ここに感謝の意を表します。

また、各共同機関のメンバーに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 文部科学省地域イノベーションクラスタープログラム都市エリア型岐阜県南部エリア
<http://www.gikenzai.or.jp/ikou/>
- [2] 千原健司ほか，“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）一頸髄損傷者用の新たな入力装置の試作と評価一”，岐阜県情報技術研究所研究報告第11号，pp.15-20, 2010
- [3] 田畑克彦ほか，“障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発（第3報）一無線通信によるマウスカーソル操作インタフェースの開発一”，岐阜県情報技術研究所研究報告第12号，pp.40-41, 2011

障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第3報) ー無線通信によるマウスポインタ操作インタフェースの開発ー

田畑 克彦 千原 健司

Research and Development of Assistive Technology (3rd Report) Development of Wireless Interface Boards for Mouse Pointer Control

Katsuhiko TABATA Kenji CHIHARA

あらまし マルチメディアが社会に浸透し、障がいを持つ多くの人も、パソコンを使用してインターネット上の各種サービスを利用しており、もはやパソコンは生活を送る上で必要不可欠な機器になりつつある。上肢等に障がいを持つ人がパソコンを操作する場合、マウスまたはキーボードの代替となる市販の操作インタフェースを使用しているが、その障がいの部位や症例は様々であり、適用できないケースも多く、手製のマウススティックを使用することが多い。本報では、重度の頸髄損傷者用の電動車いすを後頭部で操作する入力装置で、パソコンも操作できることを目的として、マウスポインタを操作するための2つの入力デバイスを使用した無線式操作インタフェースを開発し、その動作を確認したので報告する。

キーワード 福祉機器, 無線通信, マウス操作, 組込みシステム

1. はじめに

少子高齢化社会がますます進行していく中で、障がい者への人的な支援には限界がある。このような状況の中で、障がいを持つ人が自立した生活を送るためには、自助努力とそれを支える福祉機器の提供が必要不可欠である。

現在、日常の生活や仕事を行っていく上で、使用用途や頻度が急速に拡大しているのが、パソコン利用である。パソコンにより、文書作成、表計算、または専用ソフトウェアを使用した在宅就業や、インターネットによる情報収集、食材や日用品の購入などが可能になり、自立生活のために重要な機器となりつつある。

上肢に障がいを持つ人がパソコンを操作する場合には、マウスまたはキーボードの役割を果たす様々な市販の操作インタフェースを使用している。しかし、障がいの部位、症例および程度も様々であり、市販品を使用できないケースも多いことから、本人が使い易いように製作されたマウススティックを用いることが多い。

現在、本研究所では重度の頸髄損傷者が電動車いすやロボットアームを後頭部で操作する入力装置を開発中^[2]である。本報では、この入力装置によりパソコンも操作可能とすることを目的として、マウスポインタを操作するための2つの入力デバイスを使用した無線式操作インタフェースを開発し、その動作を確認したので報告する。

2. システム構成

2. 1 無線方式の選択

マウスに代わる入力デバイスによって得られた操作情報(ポインタ移動やクリック動作等)は、マイコンなどの組込みシステムにてパソコン本体に送信される。この送信方式には有線式と無線式があるが、電動車いすへの実装を考慮すると、有線式はケーブルのコード長や周囲の家具などの配置によって、使用できるエリアや条件が制限されるため、現実的でない。そこで、これらの制限を受けない無線式を選択する。

無線通信方式は、無線LAN、Zigbeeモジュール、Bluetoothモジュールによる手法が候補として挙げられる。どの手法も、コスト的には優劣はないが、マイコンなどの組込み機器に接続し易いシリアル通信が可能であること、ペアリングなどの混信対策等が取られ、1対1通信が安定していることから、Bluetoothモジュール(エーディーシーテクノロジー株式会社 ZEAL-C01シリアルセット)を選択した。なお、今回はWindows XPをOSとしたパソコンをターゲットにしている。

2. 2 シリアルキーによるマウス操作

マイクロソフト社のWindows XPでは、標準のキーボードまたはマウスを使用することが困難な人のためのユーザー補助機能として、シリアルキー機能^[1]を提供している。これは、シリアルキー機能を有効にすれば、COMポ

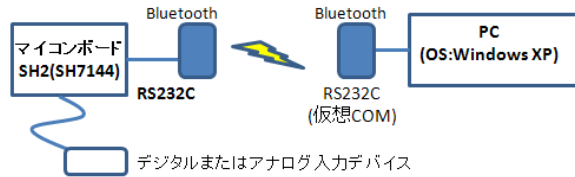


図1 無線式操作インタフェースシステム

ートにシリアル接続されたデバイスから、指定された命令コードを受信することによって、キー入力やマウスポインタを操作できる機能である。よって、マイコンが入力デバイスの入力情報を解読し、指定のマウス命令コードをパソコンに送信することで、マウス操作が可能となる。

2. 3 構築するシステム

図1は今回構築したシステムである。マウスの代わりとして製作した入力デバイスはマイコンボード（イーエスピー企画（株）CQ-7144）に接続される。マイコンは、読み取った入力デバイスの状態により、マウス命令コードを生成し、RS232C通信によりマイコンに接続されているBluetoothモジュールを介して、パソコン側のBluetoothモジュールに無線送信する。Bluetoothモジュールとパソコンは仮想COMポートによりRS232C通信を行い、パソコンがマウス命令コードを受信し、対応するマウス動作を行う。なお、今回のマイコンボード上のマイコンはルネサスエレクトロニクス社のSH2(SH7144)を使用している。また、RS232Cの通信仕様は表1のとおりである。

表1 RS232C通信仕様

通信速度	19200bps
データビット	8ビット
ストップビット	1ビット
パリティビット	なし
フロー制御	なし

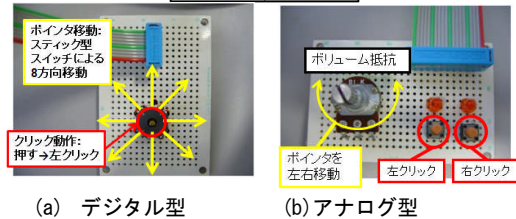


図2 マウス入力デバイス

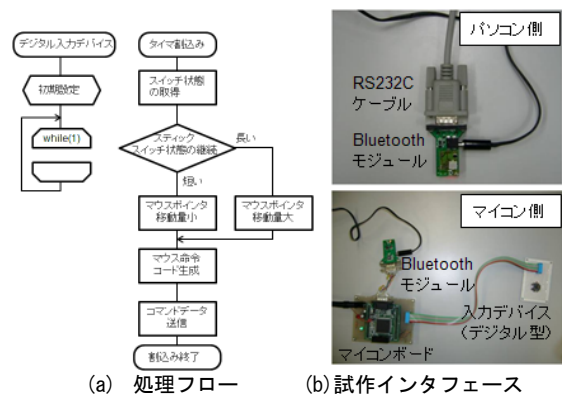


図3 開発した操作インタフェース（デジタル型）

3. 試作システムの動作確認

今回は図2に示すように、入力デバイスの入力信号がデジタル、アナログ双方に対する動作を確認するため、入力デバイスを2種類製作し、その動作を確認した。

製作した2種類の入力デバイスの概略を以下に述べる。

3. 1 デジタル型入力デバイス

図2(a)のように8方向のスティック型スイッチにより、マウスポインタを8方向に動かし、スティックの押し込みによって左クリック動作させる。また、同じ方向へスティックを倒している時間が長ければ、移動量を増やして操作性を上げることができるようにした。マイコンに実装したプログラムの処理フローと試作したインタフェースの写真を図3に示す。

3. 2 アナログ型入力デバイス

図2(b)のようにボリューム抵抗によるアナログ電圧値の変化により、マウスポインタを左右2方向に動かし、別ボタンスイッチによって左右クリックの動作をさせる。

アナログ電圧値の大きさにより、マウスポインタの動作量を変化させている。また、ポインタが画面左端まで移動すると、マウスポインタの高さを一行として、一行分上の画面右端に移動する。逆に右端まで移動すると一行分下の画面左端に移動する。

4. まとめ

パソコンのマウスポインタ操作を行う無線式操作インタフェースの開発事例について述べた。本報にて開発・検証した操作インタフェースは、後頭部で操作する入力装置^[2]に実装される予定である。今後は、より使い勝手を考慮し、他のWindowsバージョンやUSBタイプのBluetoothモジュールの適用について検討する。

謝辞

本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の平成22年度福祉用具実用化開発費助成金により実施しました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] マイクロソフト社，“シリアルキー”，<http://www.microsoft.com/japan/enable/training/windows/wi/serialkeys.mspx> (2011.3現在)
- [2] 千原健司ほか，“障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発（第2報）－後頭部で操作する入力装置によるロボットアームの制御－”，岐阜県情報技術研究所研究報告第12号，pp.38-39, 2011.

障がい者の自立生活を支援する福祉機器の研究開発(第4報)

ー 携帯型情報端末を用いた家電用赤外線リモコンモジュール ー

山田 俊郎 千原 健司 棚橋 英樹

Research and Development of Assistive Technology (4th Report) ー IR Remote Control Module for Home Appliance by Using PDA or Smartphone ー

Toshio YAMADA Kenji CHIHARA Hideki TANAHASHI

あらまし 遠隔操作ができるリモコンは高齢者や障がい者にとって有効なツールではあるが、家電製品の増加や機能の複雑化に伴って、操作が困難になってきている。近年利用が進んでいるスマートフォン等の携帯型情報端末を用いることで、複数のリモコンを統合すること、および使いやすいインタフェースの開発が可能であると考えられるため、携帯型情報端末からリモコン信号を送信するためのモジュールを開発した。本モジュールを情報端末に接続して用いることで、プログラム次第で複数の家電製品の操作が可能であることを確認した。

キーワード リモコン、スマートフォン、情報端末、家電製品、環境制御装置(ECS)

1. はじめに

テレビやエアコンなど、多くの電化製品はリモコンで操作することを前提とした設計がなされており、家庭では多数のリモコンが利用されている。これらのリモコンはそれぞれの家電製品ごとに専用のものが用意されており、家電製品の数だけリモコンも必要となっている。また、家電製品の高機能化に伴いリモコンのボタンが増え操作も複雑になっており、さらには、テレビのリモコンであってもメーカーによってボタン配置などのデザインが異なり、複数のリモコンを使い分けることが困難になっている。このようにリモコンの利用が進むにつれ、複数のリモコンの管理、操作の習得が困難になっており、1つの端末で複数のリモコン機能を持つものが求められている。

一方、リモコンの最大の特徴は、遠隔操作ができることであり、身体能力に障がいのある方や高齢者にとっては有効な道具である。そのため、一般的な家電製品のみでなく、部屋の照明やカーテンの開閉など、健常者の家庭では普及が進んでいない分野でもリモコンが用いられ、福祉機器の分野では環境制御装置(ECS)として普及している。



図1 開発リモコンのコンセプトと開発モジュール

一般向けの市場には、リモコンの機能を学習させ、複数のリモコンの機能を1台で実現する製品も存在するが、ボタン配置はAV機器向けの固定配置であり、エアコン等の他の機器の操作には適していない。また、操作性を良くするため、通常機能のリモコンに加えて簡易機能のリモコンが付属する家電製品も存在するが、かえってリモコンを増やすことになっている。

そこで我々は、小型で高機能な情報機器として近年注目されているスマートフォンなどの携帯型情報端末に着目し、これらを用いて家電製品のリモコンを実現することとした(図1)。情報端末はプログラミングによって様々なインタフェースデザイン(操作画面デザイン)が可能であり、多機能リモコンを1台で実現するために適切なプラットフォームである。複数のリモコンを1台にまとめるだけでなく、簡単に操作ができるよう機能を絞った表示や、白内障などの視覚障がいに対応した表示など、操作性の面でも様々な提案が考えられる。また、スマートフォンは利用者が常時携帯しており、可用性の面でも優れている。

本報では、携帯型情報端末を用いたリモコン機能実現のため、家電製品のリモコンで多く用いられている赤外線信号を情報端末から発信するモジュールの開発について報告する。開発モジュール(図1丸枠内)は、多くの情報端末が備える音声出力端子に接続して利用ができ、外部バッテリーを必要としない点が特徴である。

2. 赤外線送信モジュール

家電製品のリモコンは、図2(a)に示すように、送信するデータ波形に38~40kHzの変調をかけた波形パターンで赤

外線LEDを明滅させ、信号を送信している。信号波形はメーカーや機種によって異なるが、おおむねパルス幅は0.35ms以上となっている。一方、情報端末が扱うことのできる音声データは最大でも48kHz（約0.02ms間隔）サンプリングであり、再生周波数はその半分の24kHzが上限である。したがって、音声出力から信号波形を出力することはできるものの、変調がかけられた明滅パターンの波形を直接出力することはできない。そのため、情報端末によってリモコン信号を発信させるには、音声信号に変調をかける回路および変調信号によってLEDを明滅させる回路を接続する必要がある。

これらの回路は、少ない電力で駆動させることが可能であり、電池等の外部電力を用いずに、情報端末の音声出力の電力によって動作させることが可能である。今回用いた情報端末（Apple社iPod Touch 4th generation）で音量を

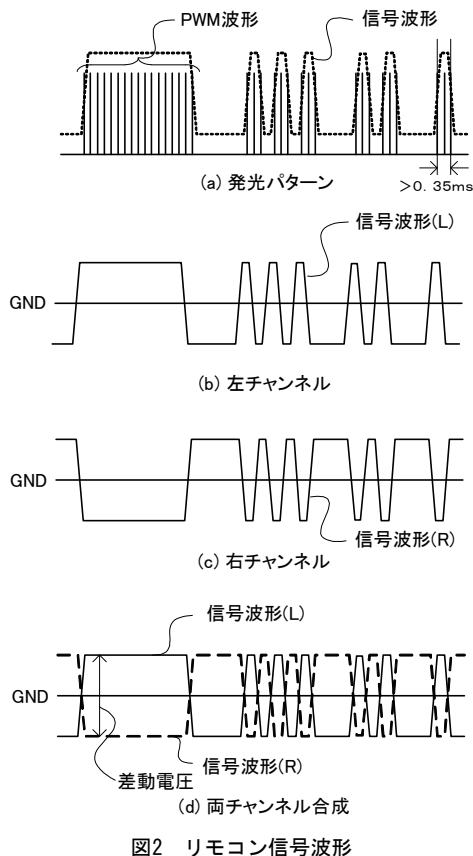


図2 リモコン信号波形

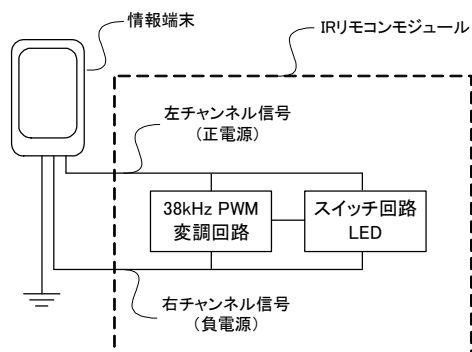


図3 IRリモコンモジュールの構成

最大にした場合の音声出力信号（矩形波1kHz、片チャンネル、16Ω負荷（定格））の正電位時の平均電圧は1.2V、負電位時の平均電圧は0.96Vであり、約70mWもの電力が利用できる。しかし、音声信号の対GND電圧は開放時でも1.5Vであり、電圧は十分ではない。赤外線LEDの明滅には、赤外線LEDの順方向電圧（1.35V typ.）とスイッチングトランジスタの順方向電圧（0.6V typ.）を加算した電圧（1.95V typ.）以上の電圧が必要である。

そこで、提案モジュールでは、基準電位をGNDではなくステレオ音声信号の一方のチャンネルとし、他方を信号電位とする回路構成（図3）によって、動作電圧の確保を図った。この回路の左チャンネルに信号波形（図2(b)）を、右チャンネルにその反転した波形（図2(c)）を入力すると、回路にかかる電圧はその差動電圧となり（図2(d)）片チャンネルで得られる約倍の電圧が得られる。なお、波形の極性が変わって逆方向に電圧がかかる場合は、ダイオードと抵抗を通して電流を還流させている。

3. 機能確認と操作インタフェースの提案

情報端末では、家電リモコンのビットパターンに合わせた音声信号を送信することでリモコンモジュールが動作する。本年度は開発モジュールの機能を確認するために、テレビ（三菱電機、Panasonic）用簡易リモコンおよびCATVチューナー（Panasonic）用リモコンをiPod Touch上に開発し、プログラミングによって複数の家電製品の操作が可能であることを確認した。今回開発したアプリケーションはそれぞれ独立で動作するものであるが、将来的には図4のように1つのメニューから操作する家電製品を選び、操作画面に切り替えることを予定している。また、特定の家電製品であっても、プログラミングによって様々なデザインの操作パネルの実現が可能であるため、利用者に合わせたボタン配置や配色などのユーザインタフェースの検討も予定している。

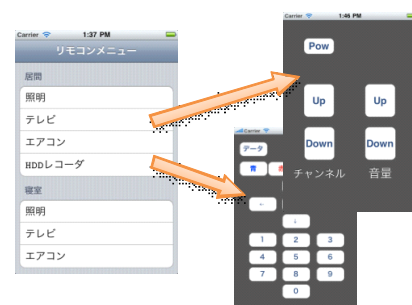


図4 スマートフォンリモコンの実現イメージ

4. まとめ

障がい者や高齢者が使いやすい家電リモコンを実現するため、情報端末で家電が操作できる赤外線信号を発信するモジュールを開発し、その機能を確認した。今後は情報端末上のインタフェースの検討を行い、使いやすいインタフェースの実現を目指す。

測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討(第2報)

平湯 秀和

Integration of multi-view scanning range data using RANSAC(2nd Report)

Hidekazu HIRAYU

あらまし 生産ライン設備等の設計において、手戻りのない設計を行うデジタルエンジニアリングを導入するためには、デジタルデータ化されていない既存の生産設備の三次元CADデータ化が重要な課題となっている。この問題を解決するための機器としてレーザレンジファインダがあるが、非常に高価で、持ち運びも困難であるため、導入は進んでいない。そこで、本研究では室内環境の三次元モデル化を行うために、安価かつ可搬が可能な測域センサを直交する直線上に複数台配置したシステムを用いて、複数視点で計測することで得られた膨大なデータから、複数視点間の変換（回転と並進）パラメータを効率良くロバストに推定する手法の検討を行った。

キーワード 測域センサ、三次元モデリング、RANSAC、デジタルエンジニアリング

1. はじめに

生産ライン設備等の設計において、コンピュータ上でその機能やレイアウト等を検討し、手戻りのない設計開発を行う手法であるデジタルエンジニアリングが注目を浴びている。しかし、実際の生産現場においては、デジタルデータ化されていない既存の生産設備が多く存在しており、これらの三次元モデル化が非常に課題となっている。

従来、既存設備を測量するには、巻き尺等を用いて1点1点手で計測する古典的方法を用いるか、レーザレンジファインダによる計測方法を用いるしかなかった。しかし、前者は非常に手間がかかり、後者は一つの測定位置では隠れが生じるため、対象物全体のモデルを作る場合には重量のあるレンジファインダを何度も移動・設置させて複数視点での測定が必要となる。また、購入・維持費が非常にかかるため、中小企業への導入は少ない。

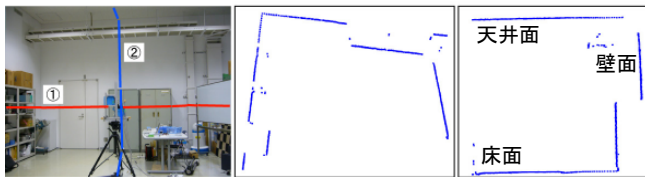
この問題を解決するため、本研究では対象物に対して垂直方向と水平方向を同時に計測可能な安価なシステムを開発した[1]。具体的には、2台の測域センサを直交する直線上に配置した構成となっている。本システムを用いて複数視点で計測した点群データを一つの座標系にまとめて一つの三次元モデルにするため、ワールド座標系に対する個々の視点の自己位置を推定する必要がある。一昨年度は、自己位置推定を行う手法として、複数視点の点群データ間において重複して計測された部分を用いて繰り返し計算で、誤差関数を最小化する変換パラメータを求める手法ICP(Iterative Closest Point)を用いた[2]。しかしながら、この手法は計算コストが高く、また、複数の視点のデータに適当な対応を持たない点が多数含まれ

ていると、これらの点の影響によって局所解に陥るといった問題があった。

そこで、今年度は個々の視点で得られた膨大な点群データから、グローバル特徴となる複数の三次元直線を推定し、複数視点で得られる三次元直線同士のマッチングを行うことで、複数視点間の変換（回転と並進）パラメータを効率良くロバストに推定する手法の検討を行った。具体的には、室内環境は壁や床、机等の水平面が多く存在するという仮定を基に、これらの面は測域センサでは直線成分として検出されるため、一つの視点で得られた点群データに対して、ロバスト推定で使用されるRANSAC(Random sample consensus)を適用することで、複数の三次元直線を推定する。測域センサは非常に広範囲の空間を計測することができるため、異なる視点で計測したとしても、同一水平面は他の視点でも観測されるため、個々の視点で得られた三次元直線同士をマッチングすることで、ワールド座標系に対するそれぞれの視点の変換パラメータを推定することが可能となる。本手法の有効性を室内環境の実測データを用いて示す。

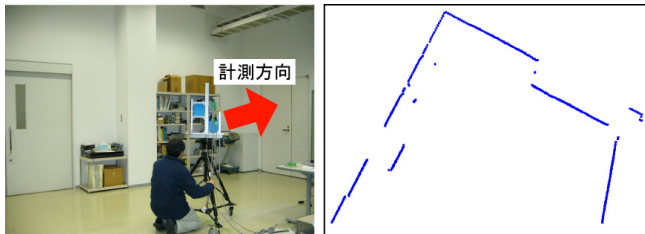
2. システム概要と取得される点群データ

本研究では、測域センサを直交する直線上に2台配置し、対象物に対して、三次元直線上に水平・垂直方向の三次元情報を同時に取得するシステムを用いた。本システムで使用した測域センサはSICK社のLMS200である。LMS200は視野角が180°で最大計測距離80m、応答時間が13~53ms、システム誤差が±15mmの測域センサである。本システムは、二つのLMS200を直交する直線上に配置し三脚に載せることで、移動しながら対象物を計測



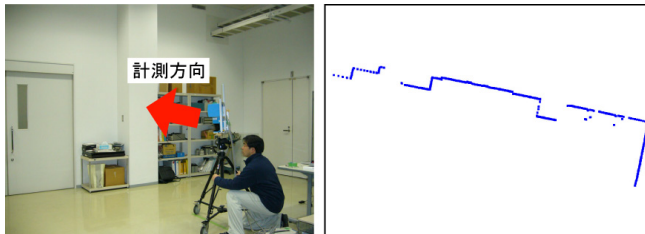
システム外観 水平方向①のデータ 垂直方向②のデータ
(上面から見た図) (側面から見た図)

図1 システム外観と得られる点群データ例



(a) 視点Aでの計測

(b) 視点Aでの水平方向データ



(c) 視点Bでの計測

(d) 視点Bでの水平方向データ

図2 水平方向の点群データ例

することが可能である。

本システムで得られる点群データ例を図1に示す。直交する2つの測域センサにより、室内環境に対して水平・垂直方向にそれぞれ三次元点が取得可能なことがわかる。

本研究では、システムを三脚に載せて、室内環境に対して水平にシステムを移動させながら計測を行う。そのため、水平方向の点群データは、床面に対して常に同じ高さの三次元情報を得ることが可能であり、かつ、垂直方向の点群データは常に異なる方向の三次元情報が取得できる。そのため、本研究では水平方向の点群データを用いて自己位置推定を行い、同時に得られる垂直方向の点群データは用いて室内環境の三次元モデルを生成する。

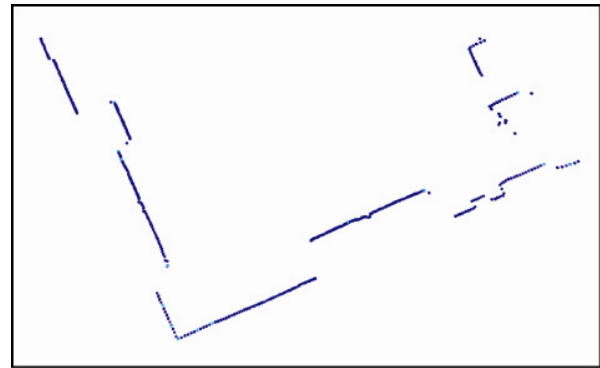
水平方向の点群データは床面に対して常に同じ高さの二次元情報が得られるが、計測する方向によっては図2に示すように得られる二次元情報が異なるため、従来から行ってきたICP手法では重なり合う領域が少なくなり、安定した自己位置推定を行うことは困難となる。

従って、本研究では点群データからグローバル特徴となる複数の二次元直線を検出し、そのマッチングで自己位置推定を行う。

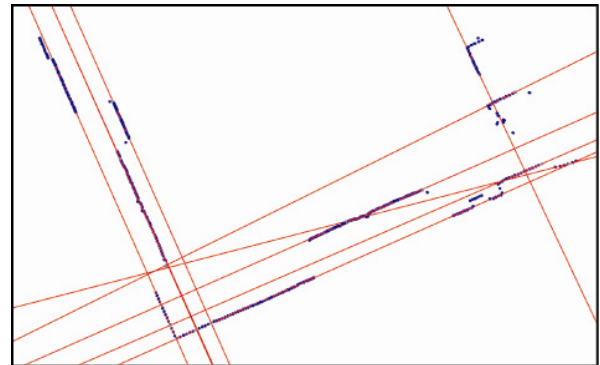
3. グローバル特徴抽出

点群データに対して、RANSACにより二次元直線を検出する。

RANSACは、観測された全てのデータからランダムに



(a) 点群データ



(b) RANSACで得られた直線

図3 点群データおよびRANSACで得られた直線例

いくつかのサンプルを抽出し、最小二乗法を当てはめることで、推定値が正しいと仮定した場合のInlier (誤差内の点) の数を数えるという処理を繰り返し、Inlierの数が最大となる推定値が最も正しい推定とみなす手法である[3]。抽出したサンプルにOutlier(外れ値)が含まれなければより確からしい推定が得られ、また、Outlierの数が全点数に比べて少なければ推定される誤差範囲内により多くの測定値が含まれる。

RANSACアルゴリズムを用いて以下のように一つの視点の水平方向の点群データから直線を検出する。

1. 水平方向の点群データから、ランダムにn個のデータを抽出する。
2. 抽出したn個のデータを基に直線方程式を推定する。
3. 全ての水平方向の点群データから処理2で抽出したn個のデータを除いた点を処理2で求めた直線方程式に当てはめ、得られたデータと直線方程式の誤差を計算する。ここで、誤差が閾値内の場合、直線方程式に対して投票する。
4. 1～3を繰り返し、投票数が最も多い直線方程式を仮の直線方程式とする。
5. 全ての点群データに対して処理4の直線方程式を適用し、誤差が閾値内のデータを抽出する。
6. 処理5で得られたデータを基に、再度、直線方程式を推定し直す。

本研究では点群データに対して、抽出された一本の直線上にある点群データを取り除き、上記の処理を繰り返

すことにより、一つの視点における点群データから10本の二次元直線を検出した。図3に点群データおよびRANSACで得られた直線例を示す。

4. グローバル特徴のマッチング

異なる視点で計測しても、床面や壁等の同一水平面は他の視点でも観測されるため、個々の視点で得られた三次元直線同士をマッチングすることで、ワールド座標系に対するそれぞれの視点の変換パラメータを推定することが可能となる。そこで、前章で得られた三次元直線情報を基に、自己位置推定を行う。なお、水平方向の点群データは高さ方向の座標系は常に一定であるため、直線は二次元直線と見なすことができる。そのため、本研究では直線の傾き、切片、線分の情報を基に同一直線であるかどうかの判定を行う。

二つの視点間において、対応する直線グループを決定するために、視点間の直線グループの組み合わせの中で、それぞれの視点間の直線グループ間の角度差がほぼ一致し、かつマッチングした直線グループの切片や交点等がある閾値内にあるグループの数が最も多い組み合わせを求める。本研究では、10本の直線同士の全ての組み合わせについて、マッチングを行い、最も閾値内にある直線数が多い組み合わせを推定する。

5. 実験

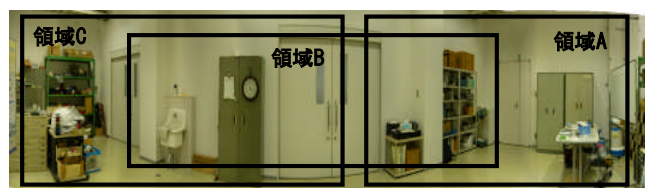
本手法を検証するため、幅7.8m×奥行き13.0m×高さ4.0mの室内環境（図4(a)）に対して、80視点（1視点あたり約2000点の点群数）で計測を行い、実験を行った。

図4(a)に実験環境の外観を、図4(b)～(d)に図4(a)内のそれぞれの領域を計測した点群データ例を示す。

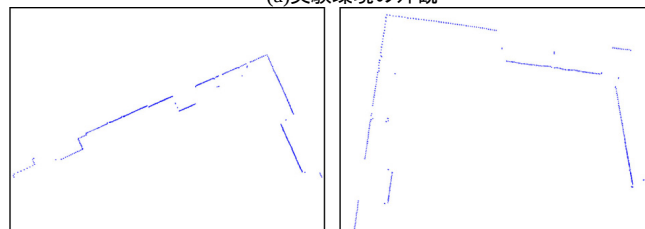
また、80視点の水平方向の点群データに対して、ワールド座標系に対する各視点での変換パラメータを適用した結果を図4(e)に示す。もし、正しく自己位置推定がされていなかった場合、壁面等が複数の線分として検出されてしまうが、壁に対して±40mm程度とほぼ同一線分上に載っているため、精度良く自己位置が推定されていることがわかる。

6. まとめ

安価な測域センサを直交する直線上に複数台配置したシステムを用いて、室内環境を複数の計測視点で測定を行った。また、本研究では個々の視点で得られた膨大な点群データから、グローバル特徴となる複数の三次元直線を推定し、複数視点で得られる直線同士のマッチングを行うことで、複数視点間の変換（回転と並進）パラメータを効率良くロバストに推定する手法を用いて、複数の点群データを一つの座標系に統合した。実際に室内環

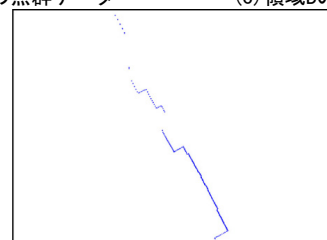


(a)実験環境の外観

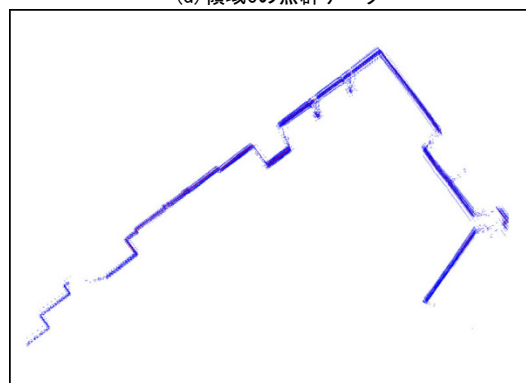


(b) 領域Aの点群データ

(c) 領域Bの点群データ



(d) 領域Cの点群データ



(e) 80視点の統合結果（水平方向の点群データ）

図4 実測データによる実験結果

境に適用した結果、ほぼ精度良く自己位置推定を行うことができた。今後の課題としては、自己位置推定の定量的な精度検証およびマッチングの高速化である。

文 献

- [1] 平湯秀和 “測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討”，岐阜県情報技術研究所研究報告，第10号，pp58-59，2009.
- [2] P.J.Besl and N.D.McKay, “A Method for Registration 3-D Shapes ”, IEEE Trans. PAMI, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [3] M. A. Fischer and R. C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, Commun. ACM, no.24, vol.6, pp.381-395, June 1981.

搬送車ナビゲーションシステムの基礎研究(第2報)

— 超音波センサレイの改良と通信速度の把握 —

田畑 克彦

西田 佳史*

飯田 佳弘

Basic Research of Navigation System for Automatic Guided Vehicle (2nd Report)

- Improvement of an Ultrasonic Sensor Array and Estimation of Baud Rate -

Katsuhiko TABATA

Yoshifumi NISHIDA*

Yoshihiro IIDA

あらまし 昨年度から無人搬送車(AGV)への適用を想定し、屋内外によらず、容易に経路変更が可能な超音波センサを用いた新しいナビゲーションシステムの構築を目指し、システム構築に必要な要素技術の研究を行っている。このシステムの特徴は、超音波で課題となる信号対雑音比を改善するために、空気中では適用事例の少ないフェーズドアレイ技術を採用し、走行ルートの基準となるランドマーカを探索する。ランドマーカには、混信を避けるために特定のIDが割り振られており、該当するIDを受信した時のみ応答することを想定している。本報では、昨年度の超音波センサレイ送信機を改良し、その評価を行った。また、ランドマーカのID認識の前段階として、どの程度の通信量が確保できるかを実験的に確認したので報告する。

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)、組込み技術

1. はじめに

現在、コストダウンや省力化のために製造現場内の搬送を目的とした無人搬送車(以下、AGV)が実用化され、商品化されている。現状のAGVは屋内の走行を目的としており、走行経路の設定は経路に沿って磁気テープや光反射テープを床面に貼るもの、あるいは床下に磁気誘導線を埋設し、それをAGV側のセンサがセンシングしながら走行する手法が代表的である。これらの方式は工場内の固定された経路を搬送する目的においては有用であるが、経路変更が頻繁に行われるケースへの適用は困難である。頻繁な経路変更に対応できる高精度なレーザレンジセンサを使用したシステムも開発されているが、価格は高く、経路設定も専用ソフトウェアを用いるためある程度の専門的知識が必要である。

我々は上述の課題を解決するため、昨年度より、屋内外によらず、経路の設定が簡単で、しかも低価格な新しいナビゲーションシステムの開発に着手している。このシステムの特徴は図1に示すようにルート設定用の磁気テープなどのマーカの代わりとして、超音波センサを使

用している点である。超音波センサの特徴は、低価格でほぼメンテナンスフリーであり、コスト面や保守性の面で課題はないことが挙げられる。また、騒音などの外乱に弱いとされる課題に対しては、信号対雑音比(SN比)を向上させるフェーズドアレイ技術を採用することにより、解決を試みることにした。昨年度の研究^[1]では、1個数百円程度の超音波センサ素子であってもフェーズドアレイによるビーム照射方向の制御が可能であるという結果を得た。

しかしながら、選定した超音波センサ素子単体の指向性が高いことによりビーム照射範囲が狭かった問題と、波長に対してセンサ素子の寸法が倍以上あり、サイドローブが発生しやすい問題があった。発生するサイドロー

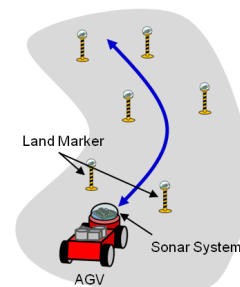


図1 超音波センサによるナビゲーションシステム

* 独立行政法人 産業技術総合研究所
デジタルヒューマン工学研究センター

ブが多いと、生成される超音波のエネルギーが各ローブに分散し、探知距離が短くなる等の問題がある。このため、本年度は使用するセンサ素子を見直しセンサアレイの改良を行った。また、本システムでは経路上のランドマーカを特定して相対位置を推定し、AGVの進路を制御する手法を想定しているため、マーカとAGVのセンサ間で通信する必要がある。このため、どの程度の通信速度を確保できるかについて実験的に確かめた。

補足であるが、昨年度はパワーアシストを目的とした人追従型台車のためのナビゲーションシステムの開発を目指していた。しかし、コストダウンの観点から人が介在しないシステムのニーズが強く、上述のAGV用ナビゲーションに変更した。研究開発としてはランドマーカの切り換えが必要となるため、よりチャレンジングな内容であるが、超音波通信による信号認識や位置推定などの基本的な技術的課題は同じである。

2. フェーズドアレイの概要

この技術は、電子制御により図2のような各センサ素子から放出される超音波の位相をずらすことで、各センサ素子の波の重ね合わせとなるビームの照射方向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ような指向性による死角の出現を防ぐことができ、各センサ素子の合成波であることからSN比も向上する。また、機械的な方向制御を必要としないこと、仮に一つのセンサ素子が故障しても他のセンサ素子である程度リカバーできることから、信頼性が高いことも特徴である。

同図は、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。

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

ここで c [m/s]はある気温 T [°C]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せることにより、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. 超音波センサアレイの改良

誤差のない理想化した1次元のセンサアレイについて考える。図2において、 N 個のセンサ素子からなる1次元アレイの指向性 $P(\theta)$ は以下の式で表すことができる。

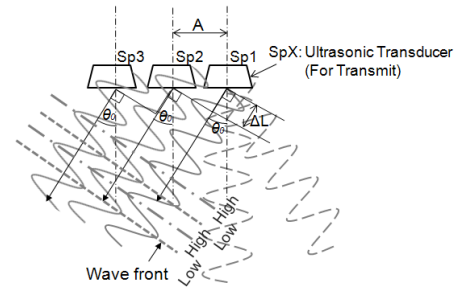


図2 フェーズドアレイ技術の原理

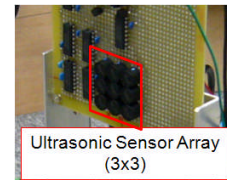
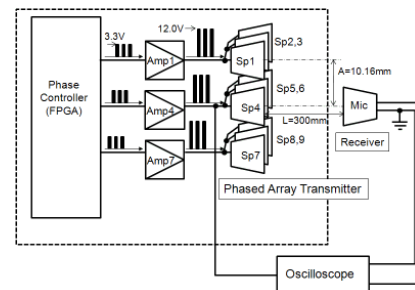
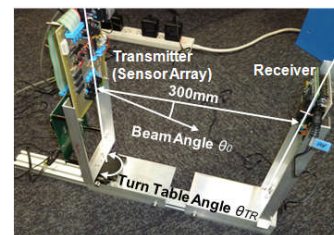


図3 作成した超音波センサアレイ



(a) ブロックによる実験構成



(b) 実際の実験構成

図4 指向性および通信速度把握実験

$$P(\theta) = p(\theta) \sum_{n=0}^{N-1} |e_n| \exp(jnkA(\sin \theta - \sin \theta_0)) \quad (4)$$

ここで、 $p(\theta)$ はセンサ素子の指向性、 $|e_n|$ は端子電圧振幅、 n はセンサ素子番号、 k は波数で $k=2\pi/\lambda$ で λ は波長である。

(4)式より、アレイ全体の指向性は、センサ素子単体の指向性により決まる。したがって、ビーム走査範囲(角)を広げるためには、できるだけ指向性のないものを選定することが望ましい。

また、1波長ずれることにより、生成されるグレーティングローブの出現角は以下の式で表すことができる。

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

ここで m は $\sin \theta_0 \pm m\lambda / A$ が-1～1の間を取る整数であり、 $m=0$ がメインローブである。よって、 $\lambda / A > 1$ であれば1波長ずれによるグレーティングローブは発生しないため、

センサ素子間隔は波長よりも短いことが理想であるが、安価な市販品を使用することを前提としているため、 λ/A が可能な限り大きい値をとるものを選定する。

結果として、最も指向性が低く（半値半減角 $\pm 50^\circ$ ）、外径が小さい10mmのセンサ素子（日本セラミック(株)製、AT40-10）を選定し、3x3素子の送信用センサアレイを製作した(図3)。

4. 指向性および通信速度把握実験

4. 1 フェーズドアレイ超音波ビームの指向性実験

図4は、実験の測定方法である。センサアレイの中心に位置する超音波センサSp5に正対させるように受信用超音波センサMicを配置する。受信用センサMicも、送信用の超音波センサ素子と同じ型番を使用する。

図4(b)は空間的な配置を示す。回転ステージの回転中心上に超音波センサSp5のスピーカ振動子の中心が一致するように製作し、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。 θ_0 方向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する。

図5は(1)式から(3)式により主ビーム指向角 θ_0 を 0° ～ 30° まで 10° 間隔で変化させ、受信センサの観測角 θ_{TR} を最小 -60° ～最大 60° まで変化させて得たビーム指向性である。送信信号は、励振信号とその停止を10msec間隔で切り替える信号を送った。なお今回は、1軸のビーム制御を行うため、図4(a)のように(Sp1,Sp2,Sp3),(Sp4,Sp5,Sp6)と(Sp7,Sp8,Sp9)の組は同相とし、Sp1, Sp4, Sp7の列の間の位相をコントロールした。

なお、本図の縦軸の利得 G_{1sp} [dB]は、1つの送信素子と受信器と正対させた場合（主ビーム角 $\theta_0=0^\circ$ および観測角 $\theta_{TR}=0^\circ$ ）における受信波の最大電圧振幅 $V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)$ [V]に対して、9つの送信素子からなるフェーズドアレイ送信器を用いた時の θ_0 および θ_{TR} における受信波の最大電圧振幅 $V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR})$ [V]の利得であり、次の式で定義する。

$$G_{1sp} = 20 \log_{10} (V_{9sp}(\theta_0, \theta_{TR}) / V_{1sp}(\theta_0=0, \theta_{TR}=0)) \text{ [dB]} \quad (6)$$

図より、ほぼ意図した方向にビームを照射できていることがわかり、得られる音圧は単一素子の16dB(6倍)以上で、ビーム幅は半値半減角で $\pm 10^\circ$ 程度であることがわかる。また、主ビーム角 θ_0 以外にもピークが生じているが、これは1波長ずれによる ± 1 次のグレーティングローブ出現角 θ_{g1} であり、以下の式で表される。

$$\theta_{g1} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm \lambda/A) \quad (7)$$

主ビーム角を $0^\circ \sim 30^\circ$ に設定した時のそれぞれのサイドローブの出現角の理論値を表1に示す。これらの数値と図5の指向性を比較すると、ほぼ期待通りの角度に出現していることが確認できる。なお、それ以外の角度においてもサイドローブが発生している。これは、(Sp1, Sp2,

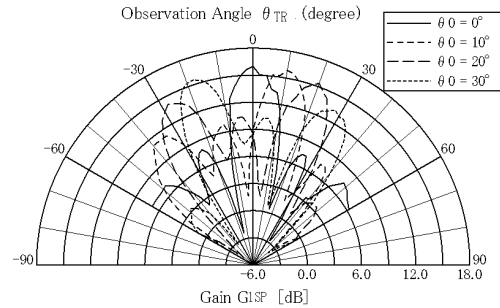
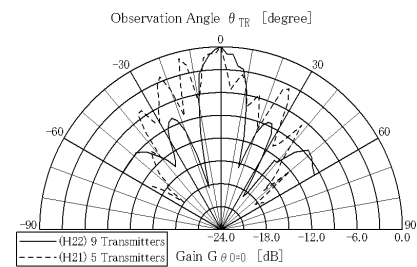


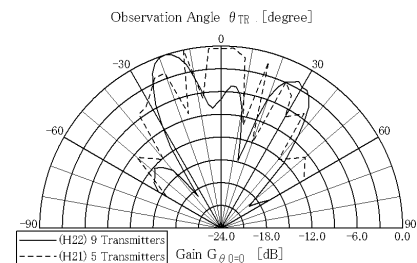
図5 フェーズドアレイ超音波ビームの指向性結果

表1 メインローブとサイドローブ出現角(理論値)

Main Lobe Angle [degree]	Side Lobes Angle [degree]			
	Grating Lobes θ_g		Grating Lobes θ_{sp1-7} & Quantization Lobes	
	$n = -1$	$n = 1$	$n = -1$	$n = 1$
0.0	-57.7	57.7	-25.0	25.0
5.0	-49.3	68.8	-19.6	30.7
10.0	-42.2	-	-14.4	36.6
20.0	-30.2	-	-4.6	49.9
30.0	-20.2	-	4.4	67.3



(a) 主ビーム角 $\theta_0=0^\circ$



(b) 主ビーム角 $\theta_0=30^\circ$

図6 昨年度との指向性の比較

Sp3)と(Sp7,Sp8,Sp9)の送信タイミングが1波長ずれることによって発生するサイドローブと、量子化ローブ^[2]であり、その出現角 θ_{sp1-7} は同じで、 ± 1 次の出現角は以下の式で表せる。

$$\theta_{sp1-7} = \sin^{-1} (\sin \theta_0 \pm \lambda/(2A)) \quad (8)$$

参考のため、上式の結果も合わせて表1に示す。

図6は、主ビーム角 $\theta_0=0^\circ, 30^\circ$ において、今年度と昨年度取得したビーム指向性を比較したグラフである。異なるセンサ素子の比較を行うことから、縦軸の利得 $G_{\theta_0=0}$ は、それぞれのセンサ素子における $\theta_0=0^\circ, \theta_{TR}=0^\circ$ の時の受信電圧を基準にした数値である。本図より、昨年度よりもサイドローブ数が減少し、意図した主ビーム角 θ_0

にメインローブが出現していることが確認できた。

4. 2 通信可能速度の把握

Duty比を50%一定とし、通信速度を変化させた時の、図4(a)におけるオシロスコープの波形の一例を図7に示す。横軸が時間で、左の縦軸が送信センサ素子の駆動電圧値、右の縦軸が受信センサ素子の受信電圧値である。また、色の薄い線が送信側センサ素子の駆動電圧、濃い線が受信センサ素子の受信電圧である。

本図より、通信速度が上昇するにしたがって、送信時の受信電圧の低下と送信停止時の受信電圧の増加により電圧比が低下し、ついには判別が付かなくなっている。これは、受信センサ素子の振動子が音圧の変化に追従できなくなっていると考えられ、この追従性能は受信する音圧の大きさに依存すると考えられる。

そこで、指向性実験時（図5）に得られたデータから、実際に信号が到達してから振動するまでの時間差 δt を求め、最大受信電圧 V_p との関係から、通信速度を設定した。

励振までの時間差 δt は以下の式で表される。

$$c(t - \delta t) = L \quad (9)$$

$$\delta t = t - L / c \quad (10)$$

ここで、 t はオシロスコープにより確認した送信から受信までの時間差、 L は送受信機間の距離(0.3m一定)である。なお、送受信の時間差は、最大受信電圧 V_p の半値を閾値として、算出している。

この結果を図8に示す。最大受信電圧 V_p が0.4V以上となる電圧(音圧)が高い状態においては、励振時間遅れ δt は0.23msec付近に集中しており安定しているが、受信電圧(音圧)の低下に伴い、 δt の値が様々な値となり、不安定になっていることが分かる。

このため、これらのバラツキを考慮した時間遅れから、およそ0.4msec未満であれば、ほぼ励振できると考え、パルス幅を0.4msecに設定する。

次にデューティー比の設定であるが、パルス幅0.4msecでDuty比50%とすると、図7(b)と(c)の中間の波形となる。したがって、デューティー比50%では後段の電子回路(増幅器の増幅率)によっては、パルス波形を分離できない可能性があるため、余裕を見て25%に設定する。

最終的に、通信速度 B_o は、625 bps ($=1/0.0004 \times 0.25$)であればパルスを分離できると判断する。図9が $B_o=625$ bps, Duty比25%において、パルス列”1100101”を送受信した波形である。図より十分にパルスが分離されていることを確認できた。

6. まとめ

本年度は超音波センサアレイの送信器のセンサ素子を見直すことで、サイドローブ数を減少させ、ビーム走査角が大きい場合においても、角度精度を向上させることが確認できた。また、受信音圧値とセンサ素子の反応遅れ時間の関係から、通信速度を検討し、通信速度

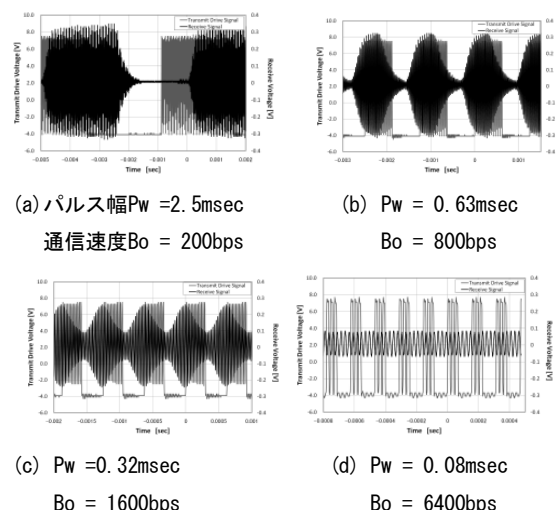


図7 通信速度に伴う波形の変化

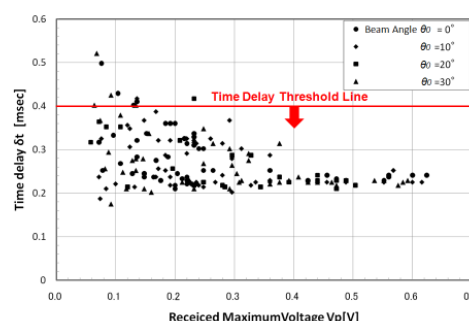


図8 受信電圧と励振時間遅れの関係

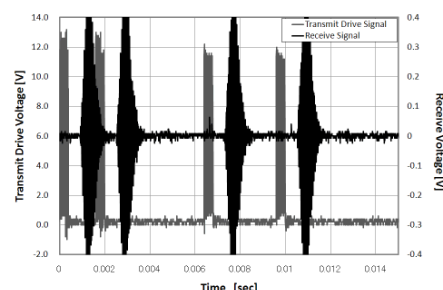


図9 パルス列”1100101” 送受信波形
($B_o=625$ bps, duty比25%)

$B_o=625$ bps, Duty比25%において十分に分離したパルス信号を受信できることを実験により確かめた。

今後は、超音波によるナビゲーションシステムの構築に必要な部分的な検討をさらに進める。具体的には、特定のランドマーカとのデータ通信手法と、データ通信時の位置推定手法について検討を行う予定である。

文 献

- [1] 田畑 克彦, 横山 哲也, “搬送車インタフェース (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-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.11, pp.35-39, 2010.
- [2] 吉田孝監修, “改訂 レーダ技術”, 電子情報通信学会, 1996.

ジグ設計評価のための構造解析に関する研究(第1報)

横山 哲也

Research on FEM for Jig Design Evaluation (1st Report)

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 切削加工においてジグ設計が適切でないと、切削中に材料がずれ動くことがあり加工精度が低下する。ジグ設計が不適切となる理由の1つに、設計指標がなく熟練者の経験に依存していることが挙げられる。本研究では作業者の経験に依存しない、ジグ設計の評価手法を構築することを目的とする。本年度はフライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象とし、有限要素法を用いた構造解析について検討を行い、ジグに働く切削抵抗反力と締付け力とを比較可能なシミュレーションを構築した。

キーワード ジグ設計, 有限要素法, 切削抵抗

1. はじめに

切削加工において、図1に示す材料の動きを固定するジグは加工精度に大きな影響を与える。このジグに関して、配置位置、配置個数および締付け力を決めることをジグ設計というが、ジグ設計が適切でないと材料のずれ動きが発生し加工精度を低下させる原因になる。ジグ設計が不適切となる理由の1つには、ジグ設計に明確な指標がなく、作業者の経験に依存していることが挙げられる。そのため、ジグ設計の評価手法の構築は、非熟練者のジグ設計を可能とし、加工品質の向上を図ることができると考える。

材料のずれ動きを抑えるためには、切削中に発生する切削抵抗を考慮した締付け力がジグに働ければよい。しかし、切削中は材料上を切削工具が移動するため、ジグが受ける切削抵抗の分力は変化し、材料が削られ剛性は劣化する。それらを考慮して締付け力を決定する必要がある。また、ジグ自体が切削工具の動きを阻害しないため、取り付け位置にも制約があり、適切なジグ設計を行うことは難しい。

そこで我々は上記課題の解決策として、NCプログラムに基づいた加工シミュレーションにおいて、有限要素法を用いた構造解析を行い、ジグに作用する切削抵抗の反力を算出し、その値を基にジグの締付け力を評価するジグ設計の評価手法を構築する。本年度は、フライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象とし、有限要素法を用いた構造解析について検討を行う。

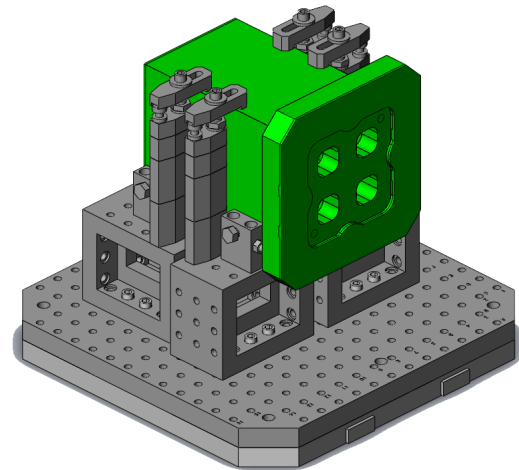


図1 ジグで固定された鋳物素形材料

2. ジグに働く切削抵抗反力の算出

2. 1 ジグに働く切削抵抗反力の算出

有限要素法は対象物体を有限要素で構成し、材料の特性値を組み込むことで、物体が外力を受けた際の変形と反力を正確に計算できる。本研究では線形の有限要素法を用いて材料に切削抵抗が働いた際の、ジグに作用する切削抵抗の反力を算出する。図2に、四面体を有限要素として構成した鋳物材料を示す。使用したメッシュャソフトはCIMNE社のGiDである。なお、本章では便宜上、切削加工時に材料と切削工具の間に発生する切削抵抗は既知とする。

線形の有限要素モデルによる剛性方程式は、外力 f 、変位 u 、剛性行列 K と物体力(重力) M_g を用いて式(1)で与えられる。

$$f = Ku + Mg \quad (1)$$

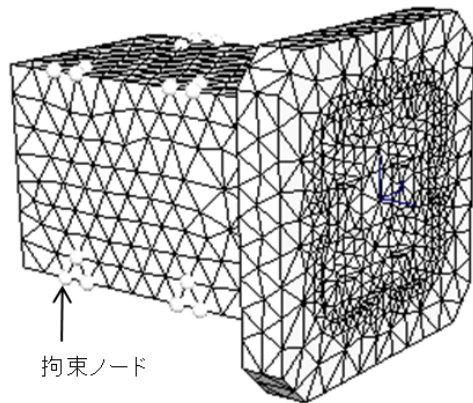


図2 有限要素で構成された鋳物素形材

剛性方程式(1)を以下のとおり書き直す.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_{cu} \\ f_{cl} \\ f_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & \\ & K & & \\ & & & \\ & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ u_s \end{pmatrix} + Mg \quad (2)$$

添字の f, cu, cl, s は拘束を受けないノード, 切削抵抗 (cutting force) が働くノード, 締付け力が働くクランプジグ (clamp jig) に接触するノードおよびストッパジグ (stopper jig) に接触するノードである. なお, 式(2)の左辺第1行は外から荷重を受けないため0である. 本研究では線形の有限要素法を使用することから, 締付け力と切削抵抗による変形は線形の重ね合わせの原理から別々に考えることが可能である.

切削抵抗 f_{cu} が働くもとで, ジグに働く反力 f_{cl}, f_s を求める. 拘束条件のない剛性行列 K の逆行列は存在しないため, 剛性方程式を解くにあたり剛性行列の一部に単位行列を設けるよう, 式(3)のとおりに変形した. なお, クランプジグおよびストッパジグは強制変位0の拘束が働くとした. 式中の*は未知であることを示す.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_{cu} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} & 0 \\ 0 & I \\ & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}}_{K'} \begin{pmatrix} * \\ * \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (3)$$

切削抵抗 f_{cu} が作用した際, 共役勾配法^[1]を用いて右辺の変位 u_f, u_{cu} を算出し, 式(2)を用いてジグに働く反力 f_{cl}, f_s を求める.

2. 2 締付け力と切削抵抗反力の関係

ジグの反力 f_{cl} によって, 材料がずれ動く可能性を以下の方法で判断する. 締付け力 $\overline{f_{cl}}$ とした場合, 図3のように f_{cl} と $\overline{f_{cl}}$ が直交する場合, 次の関係を満たす必要がある.

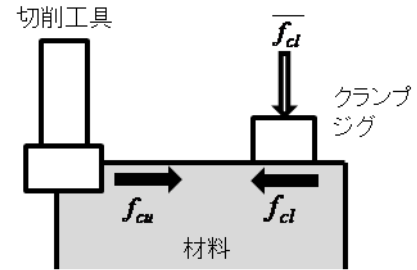


図3 締付け力と切削抵抗反力の関係(1)

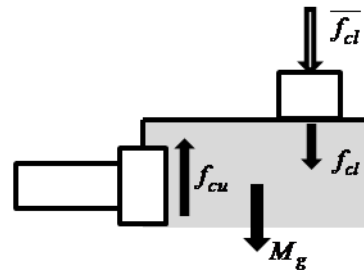


図4 締付け力と切削抵抗反力の関係(2)

$$|f_{cl}| \leq \mu |\overline{f_{cl}}| \quad (4)$$

ここで μ は摩擦係数である. 式(4)の関係が満たされない f_{cl} が作用する場合, ジグと材料間ですべりが発生し, 材料がずれ動く可能性が高いと判断できる.

図4のように f_{cl} と $\overline{f_{cl}}$ が平行に働く場合, 材料を押さえるために式(5)の関係を満たす必要がある.

$$|f_{cl}| \leq |\overline{f_{cl}}| \quad (5)$$

3. 切削抵抗の算出

3. 1 切削抵抗の算出

有限要素法による構造解析を行うにあたり, 入力値となる切削抵抗の算出が必須になる. 切削抵抗の算出には, 切削工具の回転角度に応じて変動する瞬間切削抵抗を計算する手法がある^[2]. 切削抵抗の変動は切りくず厚みが

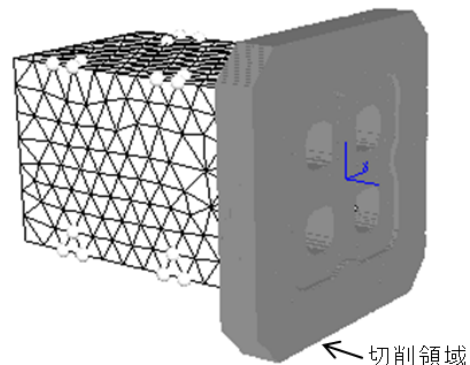


図5 材料上の切削領域

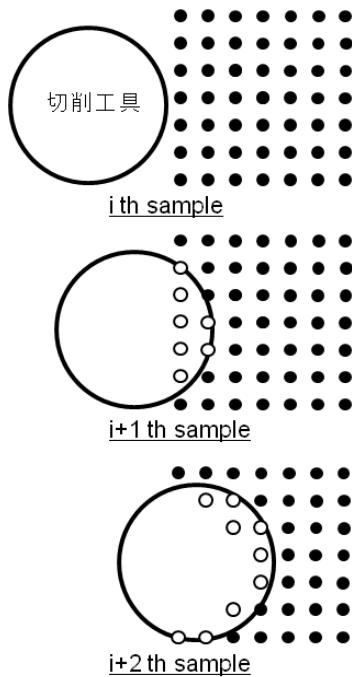


図6 材料と切削工具の干渉

一定でないことに起因するが、本研究では切削抵抗の最大値が求まればよいことから、切りくず厚み最大値の1刃当りの送り量を用いた計算とする。また、今年度に関しては切削抵抗の主応力のみを求めることとした。なお、本研究では切削部位特定にかかる計算量を削減するため、図5のとおり材料上に予め切削領域を定義しておく。図中のボックス表示（グレー箇所）が切削領域である。

切削抵抗を算出するにあたり、切削領域内に均等に質点を配置し、切削工具の動きに応じて、質点と切削工具の干渉を判定する。ここでの干渉は幾何学的な干渉であり、図6に示す切削工具の領域内で質点の内外判定を行う。干渉した質点について図中では白抜きで表示する。

サンプル間の材料全体にかかる切削抵抗 f_{cu} を以下のとおり算出する。

$$f_{cu} = NKsA = NKslf_z \quad (6)$$

ここで N は同時切れ刃数の最大値、 Ks [N/mm²] は比切削抵抗、 A [mm²] は切削面積とし、 l [mm] は切削工具軸方向の切り込み量である。 F_z [mm/tooth] は切削工具1刃当りの送り量で、以下の計算式で算出する。

$$F_z = \frac{F}{ZS} \quad (7)$$

ここで S [rpm] は切削工具の回転数、 F [mm/min] は送り速度と Z は切削工具の刃数である。各質点に働く切削抵抗は、式(6)で求めた f_{cu} を干渉した質点個数で割った値とした。

次に切削抵抗の向きを求める。切削抵抗は図7のように

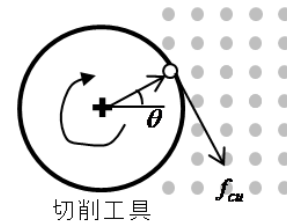


図7 切削抵抗の向き

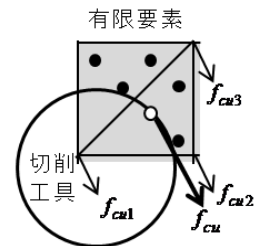


図8 ノードに働く切削抵抗等価力

切削工具外周の接線方向に働く。切削工具の回転中心と質点を結ぶベクトルに対して直角方向に切削抵抗が働くことから、角度 θ を用いて切削抵抗の向きを算出可能である。なおベクトルが働く平面は、切削工具軸に対して垂直平面である。

3. 2 有限要素に働く切削抵抗

切削抵抗を算出後、有限要素法へ計算の入力とするために、有限要素のノードに切削抵抗を分配させる必要がある。本研究では要素の重心座標を用いて、要素を構成するノードに切削抵抗を分配する。図8に切削抵抗の分配力(以下、等価力) $f_{cu1,2,3}$ を示す。この等価力が有限要素法の入力値となる。

3. 3 切削に伴う剛性劣化

切削に伴い材料の形状が変化し、剛体が劣化する。本研究では有限要素内に含まれる質点数を把握し、切削に伴い質点個数がゼロとなった場合に有限要素モデルから

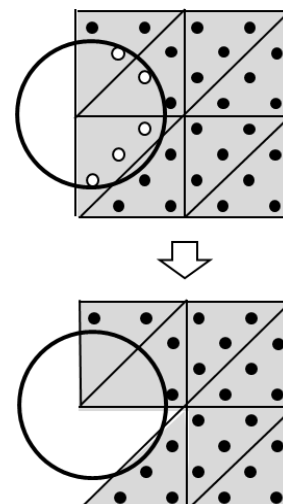


図9 要素削除イメージ

要素を削除することとした．図9に要素削除のイメージを示す．

有限要素削除に伴い剛性行列を修正する必要がある．

$$K' = K - \Delta K_e \quad (8)$$

ここで ΔK_e は要素剛性行列である．本研究では剛性方程式の解法において，共役勾配法を用いている．共役勾配法は反復計算で事前計算を必要としないことから，剛性行列の変化に伴う計算時間の影響はない．

3.4 切削抵抗を計算入力とした加工シミュレーション

図10に，横型フライスによる切削抵抗を計算入力とした加工シミュレーションを示す．パッチの色はミーゼス応力の大きさを示す．図より切削工具に近い部位に応力が集中していることがわかる．なお，図10は便宜上，物体力をゼロとして計算した結果である．

1 サンプルにおける式(3)の計算時間は，共役勾配法(対角スケール)とOpenMPを用いた並列計算を施した結果，0.05～0.1[sec]程度であった．なお，材料の有限要素を構成するノード数は1955，共役勾配法の収束判定条件の許容誤差は1.0E-12である．

4. まとめ

フライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象としたジグ設計評価手法を構築するため，有限要素法を用いた構造解析について検討を行い，ジグに働く切削抵抗反力と締付け力とを比較可能なシミュレーションを構築した．今後は加工シミュレーションの妥当性を検証するため，実加工との比較を行う予定である．

なお，ジグの締め付け力が過大な場合は，材料に塑性変形を与えることになる．これについては補足Aに記載する方法で，その影響を調べることができる．

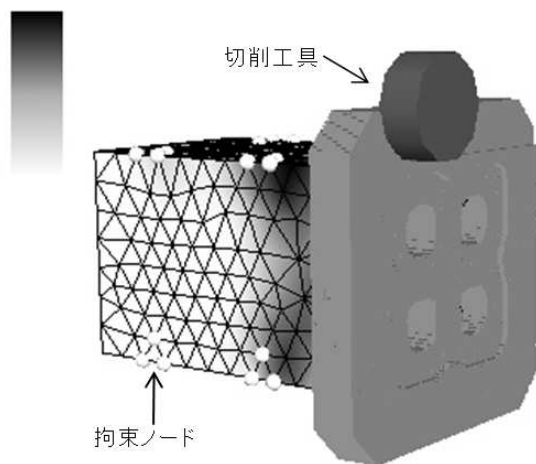


図10 加工シミュレーション

謝 辞

本研究を進めるにあたり，財団法人遠藤斉治郎記念科学技術振興財団から研究助成金を頂きました．ここに感謝の意を表します．また，CADデータの提供およびジグ設計の指導頂きました株式会社イマオコーポレーションにも感謝致します．

文 献

- [1] 戸川隼人，“共役勾配法”，教育出版，1990.
- [2] 例えば，高田祥三，山崎好幸，“切削状態予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム”，日本機械学会論文集(C編)，61巻581号，1995.
- [3] 三好敏郎，“有限要素法入門”，培風館，1978.

補 足

A. 締め付け力が材料に及ぼす影響について

過大な締め付け力が材料に加わると，材料は塑性変形を生じる．加工シミュレーションでは以下に記載する計算で締め付け力の大きさから応力を計算することで，材料が弾性変形から塑性変形に変わる応力（以下，降伏応力）との比較が可能である．

締め付け力 $\overline{f_{cl}}$ のみが材料に作用した際の剛性方程式を以下に示す．

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{f_{cl}} \\ 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} & & & \\ & & 0 & \\ & & & \\ 0 & & & I \end{pmatrix}}_{K'} \begin{pmatrix} * \\ * \\ * \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (9)$$

式(9)は剛性方程式を解くため，剛性行列の一部に単位行列を設けている．共役勾配法を用いて，式(9)の未知変位 $u(=u_f, u_{cu}, u_{cl})$ を算出したら，式(10)より各四面体に働く応力 σ を求める．

$$\sigma = DBu \quad (10)$$

ここで D はヤング率とポアソン比で構成される応力-歪み行列， B は形状関数の微分で表された歪み-変位行列である^[3]．算出した応力 σ を最大主応力もしくはミーゼス応力に変換することで，降伏応力との比較が可能となる．

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 12 号 平成 22 年度

発行 平成 23 年 7 月 5 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>
