

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第20号 平成30年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

クラウド技術を活用したリモート監視に関する研究開発	1
ーCNNを用いた工業部品の欠陥画像分類ー	
交流電圧波形の非接触計測による電力算出の検討(第2報)	7
(技術ノート)	
オープンソースソフトウェアを活用した工作機械の状態可視化について(第2報)	9
インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第5報)	11
ー試作金型による連続試験ー	
インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第6報)	15
ー射出成形品の変形シミュレーションー	
安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第11報)	23
ーセンサシステムの改良と溝検出システムの提案ー	
情報通信機器による知的障がい者のための協働支援システムの開発研究(第5報)	29
灰色かび病警報装置の開発(第2報)	33
ー乾湿計型灰色かび病警報装置の試作ー	
照度差ステレオ法による外観検査システムの研究開発(第3報)	37
予防・健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究	42
ー股関節機能回復の目標設定支援を目的とした床反力波形解析とWebアプリケーションの開発ー	
距離画像センサを用いた作業動作解析技術の研究	46
ー再帰性反射マーカによる組立作業の分析ー	
壁面撮影装置を用いた画像統合技術と点検支援システムの研究開発	52
重負荷作業を解消する直感操作型運搬補助システムの開発(第3報)	58

クラウド技術を活用したリモート監視に関する研究開発

—CNNを用いた工業部品の欠陥画像分類—

渡辺 博己 浅井 博次 生駒 晃大 棚橋 英樹

A Study on Remote Monitoring by Using Cloud-Based Technologies - Defect Classification of Industrial Parts Using Convolutional Neural Networks -

Hiroki WATANABE Hirotsugu ASAI Akihiro IKOMA Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究では、既存の外観検査装置の欠陥分類機能を高度化するため、検査装置で取得した欠陥画像を、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）により欠陥種別に分類するシステムを試作した。システムに実装する学習モデルについては、既存モデルをベースに改良し、学習方法を検討することにより、新たな学習モデルを構築した。また、検査装置で取得した欠陥画像について、学習済みモデルの分類精度を検証する実験を行い、欠陥画像の分類が可能であることを確認した。

キーワード 深層学習、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）、工業部品、欠陥画像、画像分類

1. はじめに

検査工程においては、目視検査の負担を軽減するために画像検査装置（以下、検査装置）の導入が進められている。検査作業において、人は検査対象物を目で見て、脳で検査するため、欠陥の認識能力が高く、汎化能力も高い。しかし、人は長時間同じ作業を繰り返すことが困難であるとともに、個人により検査能力にバラツキがある。これに対し従来の検査装置は、カメラで画像を取得し、コンピュータで画像処理により設定されたパラメータに基づいて欠陥を検出・分析する。そのため、ただ単調に指示された作業をひたすら繰り返すことが得意であり、同一性能の別の装置があれば、同一の検査能力を実現することが容易である。しかし、事前に人から与えられた設定以外の作業は困難であるため、人に比べて認識能力や汎化能力が劣り、未だに目視作業に頼らざるを得ない検査対象物が数多く存在する。

一方、深層学習に代表されるAI技術は、これまでの検査業務を劇的に革新することが期待されている。特に、畳み込みニューラルネットワーク^[1]（以下、CNN）に代表される機械学習手法は年々進展し、今や人を超える認識性能を持つとまで言われている^[2,3]。しかし、工業部品の不良率は一般的に低く、欠陥画像を収集することは容易ではない。そのため、深層学習を用いた検査技術においては、欠陥画像データを学習し、欠陥種別を予測するCNNではなく、良品画像データを学習し、良品データとの乖離を検出するAutoEncoder^[4]を利用するケースが多い。

こうした中、自動車部品の検査を請け負う岐阜県内の中小企業から、ある検査対象物について、従来使用している検査装置では検出・分析機能に問題があり、人による目視検査作業の負担が大きいため、AI技術により装置を改善したいとの要望があった。そこで、本研究では、企業には比較的多くの欠陥品が集まり、検査装置により欠陥画像の収集が容易であることから、AI技術では一般的に行われていない欠陥種別の特定について取り組むこととし、検査装置の認識性能向上を目的として、CNNを用いた欠陥画像分類技術を開発することにした。本稿では、開発する画像分類技術について試作システムの構成を述べるとともに、CNNによる欠陥画像分類について実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 欠陥画像分類システムの試作

2. 1 既存画像検査装置の概要

検査装置における検査対象は円筒部品であり、検査では、部品を回転させた状態で、回転機構と同期の取れたラインスキャンカメラにより部品全周の画像を取得する。この時、1つの対象物を4回転させ、各回転において異なる方向から照明光を照射し、欠陥画像を取得する。

取得した画像については、欠陥の有無を分析し、欠陥があれば、欠陥部分が画像中心となるよう256×256の解像度で、特定のフォルダにビットマップ形式の画像ファイルとして保存する。欠陥の種別によっては、全ての照明光により検出される欠陥もあれば、そうでない欠陥もある。また、

欠陥の分布・大きさによっては、複数の画像で同一の欠陥が記録されることもある。そのため、欠陥の状態により取得される画像数が異なり、1つの検査対象物について複数の欠陥画像ファイルがフォルダに蓄積される。

図1に検査装置で取得した欠陥12種類、正常3種類の画像例を示す。なお、検査装置においては、欠陥画像のみが保存され、異物や汚れの付着した画像以外の正常画像については保存されない仕様となっている。そのため、正常画像を取得する際には、検査装置の欠陥判定しきい値を調整することにより取得した。

2. 2 試作システムの構成

欠陥画像分類技術の導入における企業側の条件としては、検査装置の機能はそのまま残し、試作システムを後付けすることであった。そのため、欠陥画像ファイルが保存されるフォルダを共有化し、検査装置と試作システムをネットワーク接続する構成とすることで、CNNによる欠陥画像分類が可能なシステムを試作した。

図2に構築した試作システムの概要を示す。システムは、対象フォルダを絶えず監視し、検査装置により画像ファイルが保存され、フォルダのファイル数が増加した時に、直ちに増加分のファイル名を取得する。次に、取得したファイル名の画像ファイルからデータを取得し、CNNにより構築した学習モデルに基づいて、欠陥画像の種別を推定する。推定結果については、ディスプレイ上に画像データ、ファイル名とともに欠陥種別を表示する。なお、対象フォルダについては、クラウドストレージ上のフォルダであっても監視可能であり、クラウドサービスとして画像分類機能を提供することも可能である。現状では、画像毎に欠陥種別を出力しているが、最終的には、各対象物から取得した複数枚の画像を用いて予測結果を統合し、対象物毎に欠陥種別に分類する機能を、今後、システムに実装する予定である。

3. 欠陥画像分類モデルの構築

3. 1 分類モデルの検討

CNNの代表的なモデルにはAlexNet^[5]やVGG^[6]、GoogLeNet^[7,8]、ResNet^[9]等があるが、本研究では、単純な構造であるため、改良が容易なVGGの16層モデルをベースとして、分類モデルを検討した。

中小企業がCNNを利用するにあたっては、PCの導入コストを低減するために、学習や分類に係る処理において、認識性能を確保しつつ、計算コストを抑えたモデル構成であることが望ましい。そのため、分類モデルの構成では、まず、VGGの全結合層へのベクトル生成時に使われるFlattenをGlobal Average Pooling^[10]（以下、GAP）に変更したモデルを構成し、モデルの軽量化を図った。また、本研究で分類する欠陥種別は15であり、大規模なデータを取り扱うことはないことから、全結合層を出力層の1層とするモデルを構成した。さらに、畳み込み層が3回連続するブロックに

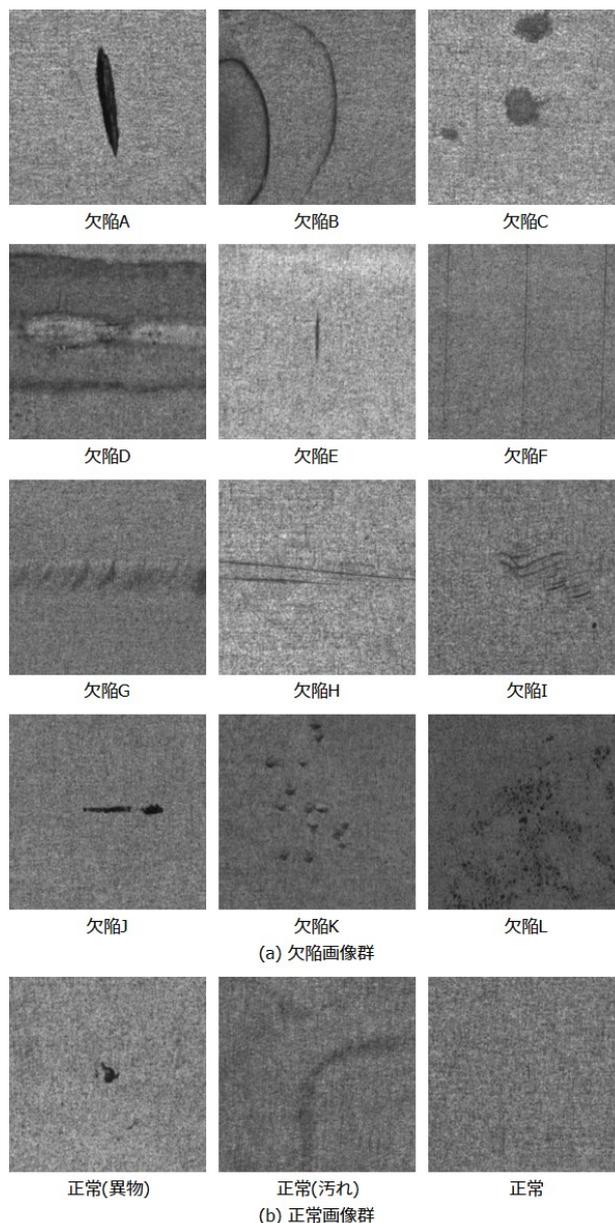


図1 欠陥種別毎の画像例

については、1層目のフィルタサイズを1×1にし、2層目と3層目の出力を重ねる形で統合するモデル（以下、基本モデル）を構成した。表1に、VGGをベースとした各モデルの構成を示す。なお、GAPについては、全結合層でのパラメータ数や過学習を解消するとされており、全結合層をGAPに置き換えた場合においても認識性能が高まることが報告されている^[10]。

次に、基本モデルのGAPの直前のPooling層までを並列に配置し、得られた2つのベクトルを統合した後、1×1の畳み込み層を経てGAPに入力するモデル（以下、双入力モデル）を構成した。2.1節で述べたとおり、欠陥部分は概ね画像中心となるよう取得され、その大きさは種別により異なる。そのため、画像全体と中心付近との2つの画像データを入力データとすることで、大域的な特徴と局所的な特徴が得

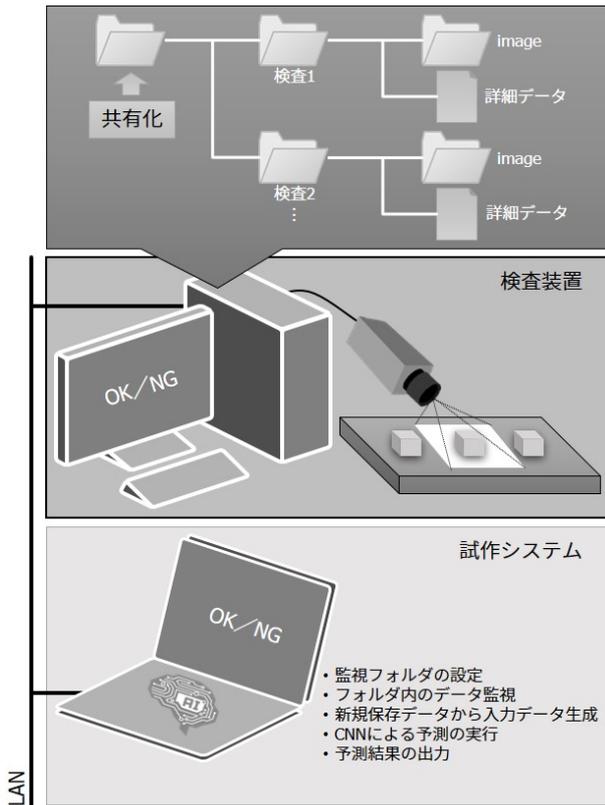


図2 試作システムの概要図

表1 VGGをベースとした各モデルの構成

VGG16	Multi-Conv +GAP+FC	Multi-Conv +GAP	基本モデル
Input128-1	Input128-1	Input128-1	Input128-1
Conv3-64	Conv3-64	Conv3-64	Conv3-64
Conv3-64	Conv3-64	Conv3-64	Conv3-64
Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling
Conv3-128	Conv3-128	Conv3-128	Conv3-128
Conv3-128	Conv3-128	Conv3-128	Conv3-128
Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling
Conv3-256	Conv3-256	Conv3-256	Conv1-256
Conv3-256	Conv3-256	Conv3-256	Conv3-256
Conv3-256	Conv3-256	Conv3-256	Conv3-256
Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling	Concatenate
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Max Pooling
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Conv1-512
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512
Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling	Conv3-512
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Concatenate
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Max Pooling
Conv3-512	Conv3-512	Conv3-512	Conv1-512
Max Pooling	Max Pooling	Max Pooling	Conv3-512
Flatten	Global Average Pooling	Global Average Pooling	Conv3-512
FC-4096	FC-4096	FC-15	Concatenate
FC-4096	FC-4096	Soft-max	Max Pooling
FC-15	FC-15		Conv1-512
Soft-max	Soft-max		Conv3-512

られることを想定している。表2に双入力モデルの構成を示す。なお、入力データには、元の画像サイズを128×128にリサイズしたグレースケール画像を使用するとともに、中心付近の画像については、元の画像から128×128のサイズで中心部分を切り取った画像を使用する。また、2つの入

表2 双入力モデルの構成

双入力モデル	
(画像全体)	(中心付近)
Input128-1	Input128-1
Conv3-32	Conv3-32
Conv3-32	Conv3-32
Max Pooling	Max Pooling
Conv3-64	Conv3-64
Conv3-64	Conv3-64
Max Pooling	Max Pooling
Conv1-128	Conv1-128
Conv3-128	Conv3-128
Conv3-128	Conv3-128
Concatenate	Concatenate
Max Pooling	Max Pooling
Conv1-256	Conv1-256
Conv3-256	Conv3-256
Conv3-256	Conv3-256
Conv3-256	Conv3-256
Concatenate	Concatenate
Max Pooling	Max Pooling
Conv1-256	Conv1-256
Conv3-256	Conv3-256
Conv3-256	Conv3-256
Concatenate	Concatenate
Max Pooling	Max Pooling
Concatenate	Concatenate
Conv1-256	Conv1-256
Global Average Pooling	Global Average Pooling
FC-15	FC-15
Soft-max	Soft-max

力データを使用することによりパラメータ数が増加することから、各畳み込み層のチャンネル数を半数とすることで、処理コストを軽減することにした。

3. 2 実験と結果

実験で使用する欠陥種別毎の画像データ数を表3に示す。学習フェーズでは、学習データとして各種別240枚、学習時の評価データとして60枚を、これらの画像データからランダムにサンプリングし、学習を繰り返すエポック数を500に設定してモデルの学習を行った。なお、評価データの正解率が200エポックの間に更新されない場合は、学習フェーズを終了するよう設定し、バッチサイズは60とした。予測フェーズでは、モデルの性能を評価するために、表3に示す全ての画像データを用いて、欠陥12クラス、正常3クラスの計15クラスに分類した。

まず、基本モデルの認識性能を評価する実験では、表1に示す各モデルについて、学習・予測フェーズを繰り返す実験を10回試行し、各クラスの適合率、及び再現率の平均値を算出した。実験に使用したモデルのパラメータ数、学習が収束した平均エポック数、学習に要した1エポックあたりの平均処理時間、及び分類結果から算出した平均適合率、再現率を表4に示す。なお、各試行における各モデルへの入力データは全て同一であり、実験で使用したPCの主な仕様は、CPUがCore i7 6700K、メモリが64GB、GPUがGeForce GTX 1080 Ti×2である。結果より、パラメータ数が少ないにも関わらず、基本モデルが最も高い認識性能を持つことが示された。また、パラメータ数を削減することにより、学習に要する処理時間も短縮することができた。

次に、双入力モデルの認識性能を評価するために、基本モデルの各畳み込み層のチャンネル数を半減したモデルを単入力モデルとし、画像全体を入力データとするモデルを

表3 欠陥種別毎のデータ数

種別	データ数	種別	データ数	種別	データ数
欠陥A	677	欠陥B	449	欠陥C	470
欠陥D	789	欠陥E	561	欠陥F	2,256
欠陥G	1,240	欠陥H	319	欠陥I	695
欠陥J	468	欠陥K	654	欠陥L	404
正常(異物)	752	正常(汚れ)	361	正常	503

表4 基本モデルの評価実験の結果

モデル	VGG16	Multi-Conv +GAP+FC	Multi-Conv +GAP	基本モデル
パラメータ数	65.1M	33.7M	14.7M	11.7M
平均エポック数	308.2	426.7	349.3	109.1
平均学習時間	10.8秒/epoch	9.2秒/epoch	8.4秒/epoch	7.9秒/epoch
平均適合率	0.8214	0.8627	0.8901	0.8928
平均再現率	0.8463	0.8832	0.9076	0.9086

単入力（大域）モデル，中心付近を入力データとするモデルを単入力（局所）モデルとして，各モデルの認識性能を評価する実験を行った．実験結果を表5に示す．なお，実験に関する諸条件については，先に述べた実験と同一である．

結果より，単入力（大域）モデルにおける平均適合率，再現率が，基本モデルを上回っていることから，チャンネル数の半減は，認識性能の向上に効果があったと判断できる．しかし，双入力モデルの平均適合率，再現率は単入力（大域）モデルを下回る結果となった．この原因としては，各単入力モデルの特徴が相殺され，調和的に学習が行われていることが予想される．表6に各単入力モデルにおける欠陥種別毎の平均再現率を示すが，欠陥種別により値の大小が交差していることから，大域的，及び局所的な画像データから欠陥種別を推定する方法は有効であると考えられる．そこで，学習方法を見直すことで，再度，双入力モデルの認識性能を評価することにした．

4. モデルの学習方法の検討

4. 1 学習方法の検討

双入力モデルについては，学習フェーズにおいて，効果的な学習が行われていないことが考えられる．そのため，2つの異なる方法で学習することにより，モデルの認識性能を比較する実験を行った．

1つ目の学習方法としては，先に学習した2つの単入力モデルの学習済みパラメータを利用する方法で，転移学習と呼ばれる方法を用いる．手順としては，まず，単入力（大域）モデル，単入力（局所）モデルを順に学習する．次に，各単入力モデルのGAPまでのパラメータを双入力モデルに転移する．最後に，各単入力モデルから転移したパラメータは更新せず，2つのネットワークを結合した層以降のみを学習する．

2つ目の方法は，GoogLeNetのように複数の出力を評価す

表5 双入力モデルの評価実験の結果

モデル	基本モデル	単入力(大域)モデル	単入力(局所)モデル	双入力モデル
パラメータ数	11.7M	2.9M	2.9M	6.1M
平均エポック数	110.3	99.2	72.0	90.9
平均学習時間	7.8秒/epoch	3.7秒/epoch	3.7秒/epoch	7.2秒/epoch
平均適合率	0.8921	0.8985	0.8766	0.8915
平均再現率	0.9092	0.9138	0.8967	0.9099

表6 単入力モデルにおける平均再現率

種別	単入力(大域)モデル	単入力(局所)モデル
欠陥A	0.8245	0.8338
欠陥B	0.9555	0.9316
欠陥C	0.9640	0.9540
欠陥D	0.9403	0.8777
欠陥E	0.9668	0.9681
欠陥F	0.9923	0.9881
欠陥G	0.8984	0.8619
欠陥H	0.9461	0.9524
欠陥I	0.7830	0.7291
欠陥J	0.9534	0.9380
欠陥K	0.8628	0.8722
欠陥L	0.8443	0.8383
正常(異物)	0.8774	0.8369
正常(汚れ)	0.9304	0.9067
正常	0.9671	0.9625

る方法で，双入力モデルについて，画像全体，及び中心付近を処理する各ネットワークに単入力モデルと同様に，GAP，出力層を加え，3つの出力誤差を同時に最小化する．つまり，1つの出力については，双入力モデルによる出力誤差を最小化し，残りの2つの出力については，各単入力モデルの出力誤差をそれぞれ最小化するよう学習する．なお，3つの出力からそれぞれ分類結果が得られるが，各単入力モデルの分類結果については評価しない．

4. 2 実験と結果

実験においては，3.2節の実験と同様に，前節の学習方法により双入力モデルの学習を行った．また，本実験においても，学習・予測フェーズを10回繰り返す，各クラスにおける適合率，及び再現率の平均値を算出した．実験結果を表7に示す．なお，表中，従来の学習方法を通常学習，パラメータを転移する方法を転移学習，複数の出力誤差を同時に最小化する方法をマルチ学習として記述する．

結果より，通常学習よりも転移学習，マルチ学習による方法が平均適合率，再現率が高くなり，マルチ学習による方法が最も高くなった．マルチ学習については，既にGoogLeNetにより実証されている方法であるが，マルチ学習は転移学習と同様に，各単入力モデルの特徴を踏まえた状態で学習していると考えられる．そのため，複数の入力データを用いる場合は，個々のネットワークの出力誤差を評価可能なモデルを構成することが有効であると考えられる．なお，転移学習については，パラメータ数が少ない

表7 学習方法の評価実験の結果

学習方法	通常学習	転移学習	マルチ学習
パラメータ数	6.1M	0.3M	6.1M
平均エポック数	73.2	106.0	67.9
平均学習時間	7.2秒/epoch	3.4秒/epoch	7.5秒/epoch
平均適合率	0.8923	0.9050	0.9071
平均再現率	0.9105	0.9203	0.9222

ため平均学習時間は短いですが、事前に2つの単入力モデルを学習する必要があることから、全体の学習時間は他の学習方法と比較すると倍以上となる。

5. 欠陥画像分類モデルの検証

最も認識性能が高くなったマルチ学習による双入力モデルについて、画像サイズ、バッチサイズを変更した場合の認識性能を検証した。画像サイズ、バッチサイズは、GPUが実装するメモリ容量の影響を大きく受けるため、これらの値を変更した場合の認識性能への影響を把握することは、深層学習に関する技術をシステムに実装する上で重要である。

画像サイズについては、大域画像のリサイズ後の画像サイズと局所画像の切り出しサイズを同一とし、64~192ピクセルまで32ピクセルずつ変更して、3.2節の実験と同一条件のもと、学習・予測フェーズを10回繰り返し、平均認識率を求める実験を行った。結果を図3に示す。なお、2つの入力データを用いる効果を検証するために、単入力(大域)モデルについても平均認識率を求め、これらの推移を比較した。その結果、160×160までは徐々に認識精度が高くなっていくが、それ以降は横ばいとなる傾向にあることが分かった。また、画像サイズが小さくなるほど2つの入力データを用いる効果が高くなることも確認できた。

次に、大域・局所画像のサイズを128×128、及び160×160として、バッチサイズを30~300まで30ずつ変更し、3.2節の実験と同一条件のもと、学習・予測フェーズを各画像サイズについて10回繰り返し、平均認識率の推移を比較した。結果を図4に示す。バッチサイズの違いによる認識性能への影響は、画像サイズを変更することよりも小さいが、学習データ数に対して剰余が発生するバッチサイズを設定した時は、認識性能が低下する傾向にあることが明らかとなった。

これらの実験より得られた結果から、表8に、画像サイズを160×160、バッチサイズを300とした時の、欠陥種別に対する平均適合率、再現率を示す。また、欠陥種別を欠陥と正常の2クラスとした場合の平均適合率、再現率も示す。種別間で認識精度にバラ付きはあるものの、全体の平均適合率、再現率は、91.62%、93.05%であった。正常・欠陥クラスの場合は、正常クラスの適合率が若干低いですが、全体の平均適合率、再現率は、96.13%、97.84%と高い認識性能が得

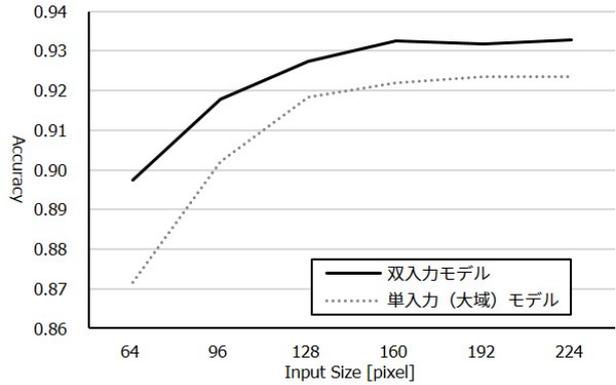


図3 画像サイズによる認識性能の評価

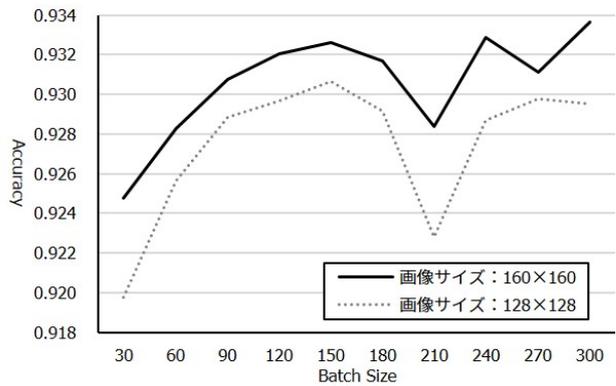


図4 バッチサイズによる認識性能の評価

表8 欠陥種別毎の分類結果

種別	平均適合率	平均再現率	種別	平均適合率	平均再現率
欠陥A	0.8634	0.8579	欠陥	0.9946	0.9861
欠陥B	0.9379	0.9728			
欠陥C	0.9331	0.9768			
欠陥D	0.9703	0.9455			
欠陥E	0.9270	0.9615			
欠陥F	0.9980	0.9941			
欠陥G	0.9885	0.9185			
欠陥H	0.7819	0.9574			
欠陥I	0.9112	0.8145			
欠陥J	0.9268	0.9553			
欠陥K	0.8959	0.8884			
欠陥L	0.8968	0.8682			
正常(異物)	0.9074	0.9105	正常	0.9280	0.9708
正常(汚れ)	0.9208	0.9608			
正常	0.8838	0.9749			
全体	0.9162	0.9305	全体	0.9613	0.9784

られた。得られた結果については、試作システムで学習済みモデルを利用する際には、1つの対象物に対して複数の画像から分類結果を判定するよう実装することから、多数決等による誤分類キャンセル処理等が行えるため、十分な結果であると考えている。なお、分類モデルについては、試作システムでの検証を進めながら、ネットワーク構成も

含めて検討することになっているため、今後も認識性能が高くなるよう改良を図る予定である。

6. まとめ

本研究では、従来の検査装置の認識性能の向上を図るために、CNNを用いた画像分類システムを試作した。また、システムに実装する学習済みモデルを構築するために、VGGをベースとした双入力モデルを構成するとともに、学習方法の違いによるモデルの認識性能について検証実験を行った。

試作したシステムでは、検査装置とネットワーク経由で接続することにより、検査装置の欠陥抽出画像が保存されるフォルダをリアルタイムに監視し、CNNによる画像分類処理を行うことで、検査対象物の欠陥種別を推定することが可能となった。また、構築した学習モデルについては、正常・欠陥の2クラスに分類する検証実験において、平均適合率として正常・欠陥の順に92.80%、99.46%、平均再現率として97.08%、98.61%の認識性能が得られた。

今後は、更に認識性能を向上させるとともに、汎化能力を高めるために、欠陥画像の収集を継続し、画像分類技術の検討を進める。また、既存の検査装置と同時に、試作システムを稼働させた検査業務を実施し、システムの検証実験を行なうとともに、システムの運用上の課題を抽出し、システムの改良を図る予定である。

文 献

- [1] Y. LeCun et al. : “Gradient-based learning applied to document recognition”, In Proc. of the IEEE, vol.86, no.11, pp.2278-2324 (1998)
- [2] S. F. Dodge and L. J. Karam : “A Study and Comparison of Human and Deep Learning Recognition Performance Under Visual Distortions”, In CoRR, abs/1705.02498 (2017)
- [3] R. Geirhos et al. : “Comparing deep neural networks against humans: object recognition when the signal gets weaker”, In CoRR, abs/1706.06969 (2017)
- [4] G. E. Hinton and R. Salakhutdinov : “Reducing the dimensionality of data with neural networks”, Science, vol.313, no.5786, pp.504-507 (2006)
- [5] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton : “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks”, In Proc. of NIPS, pp.1097-1105 (2012)
- [6] K. Simonyan and A. Zisserman : “Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition”, In CoRR, abs/1409.1556 (2014)
- [7] C. Szegedy et al. : “Going deeper with convolutions”, In CoRR, abs/1409.4842 (2014)
- [8] C. Szegedy et al. : “Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision”, In CoRR, abs/1512.00567 (2015)

[9] K. He et al. : “Deep Residual Learning for Image Recognition”, In CoRR, abs/1512.03385 (2015)

[10] M. Lin, Q. Chen and S. Yan : “Network in network”, In CoRR, abs/1312.4400 (2014)

交流電圧波形の非接触計測による電力算出の検討(第2報)

横山 哲也

Study on AC Power Calculation by Non-Contact Measurement (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 加工機の電力の見える化は、加工機の動力を把握できることから、負荷変化などの異常を検出することができる。そのため、センサを内蔵していない加工機においては、設備の改修を必要とせず容易に取り付けが可能なセンサを用いて、見える化を実現することは重要である。本研究では容易に電力を算出するにあたり、非接触で交流電圧波形の位相の推定を試みた。

キーワード 電力算出, 見える化, 非接触計測

1. はじめに

加工機の電力を測定することで、加工機の動力を推定することができる。動力の変化は加工負荷の変化と関係するため、加工機の異常検出や予防保全を行うには電力の監視は重要である。

古い加工機には、センサが内蔵されてないため、後付けでセンサを取り付けることになる。電力を計測する際は、電圧と電流を計測する必要がある。電流はクランプセンサを用いれば非接触で計測でき、かつ取り付けが容易である。しかし電圧は計測部位を端子や電線の芯線に接触させて計測しなければならず、場合によっては感電や短絡による回路破壊が発生するおそれがある。そのため、非接触で電圧を計測する計測装置が用意されているが、加工機毎に備え付けて使用するには費用が問題となる。

上記問題を解決するため、前報告では電線の被覆に箔を巻き、非接触で電圧波形を計測し、電力の算出を試みた^[1]。しかし計測回路の入力抵抗が大きくなり、ノイズの影響で電力値に誤差が含まれていた。本報では入力抵抗を小さくし推定方法を見直すことで、商用電源の交流電圧波形の位相を推定できるか検討した。

2. 交流電圧波形の位相の推定方法

非接触での計測方法として、電線の被覆に箔を巻き、芯線と箔間に生じる静電容量(コンデンサ)を利用して電圧波形を計測する方法^[2]がある。その手法を参考に、以下の方法で交流電圧波形の位相を推測する。

図1に示すように電線の電圧線、中性線の被覆に箔を巻き、その間を抵抗で接続する。この配線の等価回路は、図2に示すコンデンサ C_1 、 C_2 と抵抗 R のハイパスフィルタの構成となる。このときの抵抗の両端電圧の位相は、商用電源電圧に対して進み位相となり(図3)、位相差 θ_d は式(1)で表

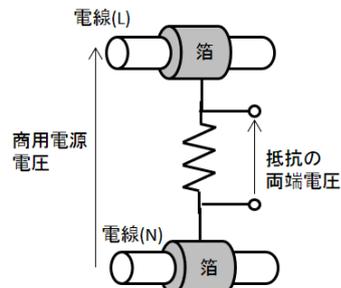


図1 電線被覆への箔の巻き付けと抵抗の配線

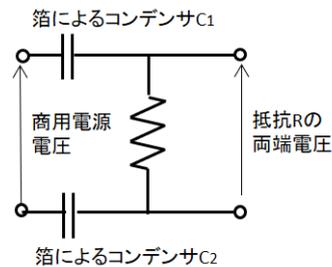


図2 等価回路

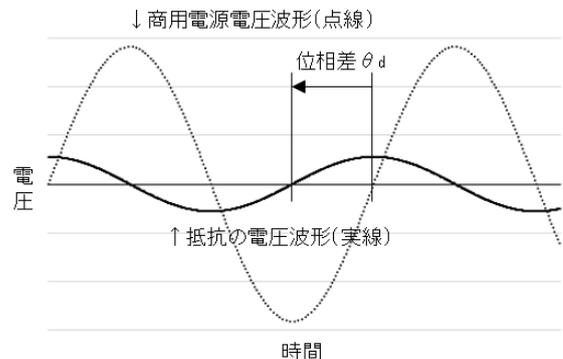


図3 商用電源波形と抵抗の電圧波形

することができる。

$$\theta_d = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega CR}\right) \quad (1)$$

式中の ω は角周波数で、 C は以下のとおりである。

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

本研究では式(1)の抵抗 R を小さくすることで、抵抗電圧の位相は90度進んでいると仮定する。計測した波形に対して90度の遅れ位相の波形を生成すれば、商用電源電圧の位相に近似できる。これより交流電圧波形を模擬することができ、クランプセンサによる電流波形との積により、有効電力を算出することができる。ただし、本手法は位相を推定するだけで電圧の大きさは求めることはできないため、模擬した波形の実効値は商用電源電圧の実効値と仮定することとする。

以上のことから、商用電源の交流電圧波形を推測するには、抵抗電圧の計測波形に対して位相が90度遅れた波形を生成する必要がある。ただし、抵抗電圧の振幅は小さくノイズが混入しているため、ここでは三角関数の直交性を利用して、以下の手順で波形を生成する。

- 計測した抵抗電圧波形の時系列データAと、正弦波(商用電源周波数)の1周期の時系列データBとで内積をとる。このとき、図4のようにデータBの位相をずらしながら内積を求め、内積値0となるデータBを求めることで、データAと直交する位相差90度の正弦波を特定する。
- 上記操作で求まる正弦波の候補として、位相差180度の波形2つが該当する。このため、2つの波形をともに90度ずらして時系列データAと内積をとり、内積値の正負で位相遅れ90度の正弦波を特定する。
- 特定した正弦波の値が0で、傾きが正のときの位相角を θ_0 とし、 θ_0 を基準に正弦波を生成する。

上記手順により、商用電源に対応した波形を生成することができる。

3. 推定結果

本手法の検証を行うため、推定した交流電圧波形と商用

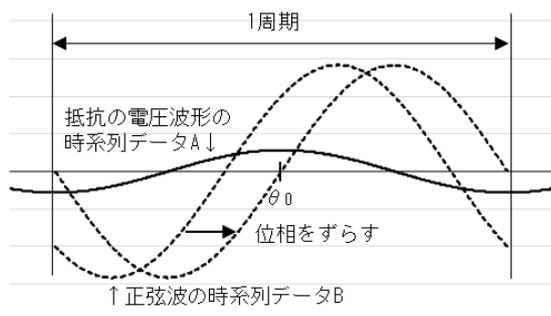


図4 抵抗の電圧波形と正弦波の時系列データ

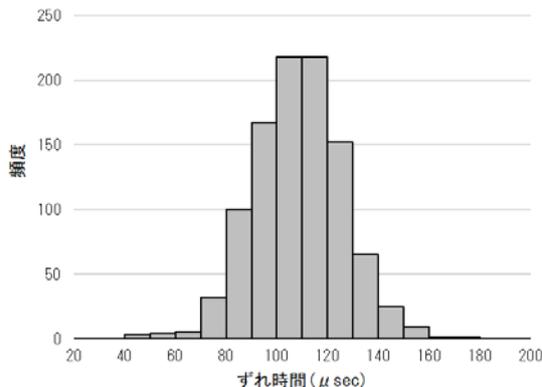


図5 本手法と商用電源電圧波形とのずれ時間

電源の電圧波形のずれ時間を計測した。

2章で記述した処理内容をマイコンで実装し、箔間の抵抗値は3.3K Ω とした。ただし、抵抗の両端電圧が小さいため、計装アンプを設けて波形を増幅し、マイコンのAD入力に与えた。位相角 θ_0 はマイコンのタイマー機能を用いて、一定時間間隔で推定した。また、位相角 θ_0 の推定精度をあげるため、過去に求めた位相角 θ_0 の時系列データから回帰式を計算し、位相角 θ_0 を求め直した。

推定した波形と商用電源の波形とのゼロクロス(交流電圧波形が0Vと交差するタイミング)のずれ時間の分布を図5に示す。このときのずれ時間の平均値は109 μ secで、角度にすると2.35度であった。また、ずれ時間の分布はひと山型となっており、標準偏差は17.5 μ secであった。ずれ時間が生じる理由は、商用電源電圧の高調波による波形のひずみが抵抗電圧の波形にも計測され、その結果、内積計算から求まる位相角 θ_0 に誤差が生じたと考えられる。

4. まとめ

本報では、センサを内蔵してない加工機において容易に電力を算出できる手法を構築するため、非接触で交流電圧波形の位相を推定する方法を検討した。本手法では電線に箔を巻き、抵抗を接続したシンプルな構成で、抵抗の両端電圧を計測することで交流電圧波形の位相を推定できることがわかった。また、推定結果を検証したところ、推定した波形と商用電源電圧の波形には、2.35度の位相角のずれがあった。

今後の課題として、推定結果の精度向上や安定性の評価が挙げられる。

文献

[1] 横山哲也, “交流電圧波形の非接触計測による電力算出の検討”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp.60-61, 2015.
 [2] 佐藤光, “ワイヤレスセンサシステム”, 東京電機大学出版局, 2012.

(技術ノート)

オープンソースソフトウェアを活用した工作機械の状態可視化について (第2報)

成瀬 哲哉 横山 哲也

Data Visualization of Machine State with Open Source Software(2nd Report)

Tetsuya NARUSE Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 工作機械の稼働状態の可視化は、工場内における機器異常の検出や稼働状態の見直しによるコスト削減等、有益な手段と考えられている。当研究所では、機器設備の改修が不要で簡易にデータを収集・蓄積する計測システムの開発を実施している^{[1][2]}。また、昨年度より、工作機械の稼働状態の可視化システムをオープンソースソフトウェアで構築し、製造現場への導入を試みている^[3]。本報では、OSSを活用し、開発済みの計測システムのデータベースに収集したデータを可視化し、製造現場への導入を試みたので報告する。

キーワード IoT, データ可視化, オープンソースソフトウェア(OSS)

1. はじめに

工作機械の稼働状態収集システム・可視化システムの導入は、工場内における機器異常の検出や稼働状態の見直しによるコスト削減等、有益な手段と考えられている。

しかし、これらのシステムの導入には、既存機器の改修や新規導入を伴うことから初期コストが大きく、県内中小企業への導入が進んでいないのが現状である。

当研究所では、これら県内中小企業の課題を克服するため、機器設備の改修が不要な稼働状態計測システムの開発を実施してきた。しかし、これらのシステムの運用においては、利用者に高度なプログラミング知識を必要としており、技術移転において課題となっている。

そこで、これらの課題を解決すべく、昨年度よりオープンソースソフトウェア(以下OSS)を活用した工作機械の稼働状態データの可視化を試みている。昨年度は計測システムから出力されたCSVファイルを読み込み、稼働状態を可視化することはできたが、リアルタイムでの可視化を実現できなかった。

本研究では、計測システムのデータベースにアクセスすることで、工作機械の稼働状態をリアルタイムで可視化することと製造現場への導入を試みたので報告する。

2. 計測システムの概要

本研究で用いた計測システムの概要を図1に示す。

計測システムは、センサノード、ゲートウェイ、ストレージ、アプリケーションで構成される。電流センサには工作機械の商用電源への取り付けが容易となるようクランプセンサを用いている。計測システムのアプリケー

ションではストレージに蓄積されたデータを取得し、データ表示・分析、CSVファイル出力を行っている。

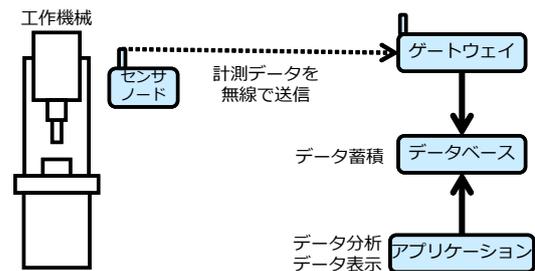


図1 計測システム

3. 稼働状態データの可視化

3. 1 オープンソースソフトウェア(OSS)の活用

本研究では、データの可視化にOSSを活用した。

データストア及び検索エンジンとしてElasticsearch, Elasticsearchにデータを集約するパイプラインとしてLogstash, Elasticsearch内のデータを可視化するツールとしてKibanaを用いている^[4]。

3. 2 工作機械の状態データの可視化

昨年度報告では、図2に示すように、計測システムのアプリケーションが出力した稼働状態データ(CSV形式)を、LogstashからElasticsearchに転送することで、データの可視化を実現していた。しかし、この手法では、稼働状態を可視化するためには開発したアプリケーションが必須であること、また、計測データをリアルタイムで表示できないなど、製造現場での運用の難しさといった課題を解決できなかった。

そこで、図3に示すように、データベースから直接デー

タを取得できるようシステム構成を変更した。この変更により、既存の計測システムに変更を加えることなく、データを取得することが出来、また、計測データのリアルタイムでの可視化を実現することが可能となった。

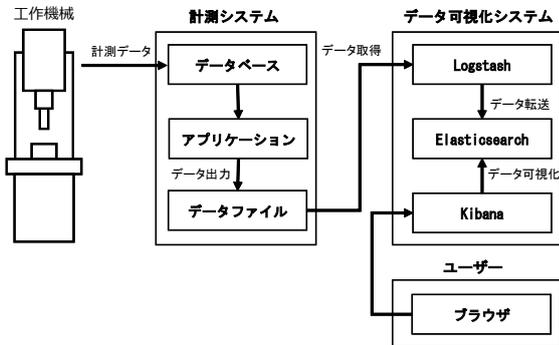


図2 データ可視化の構成図(変更前)

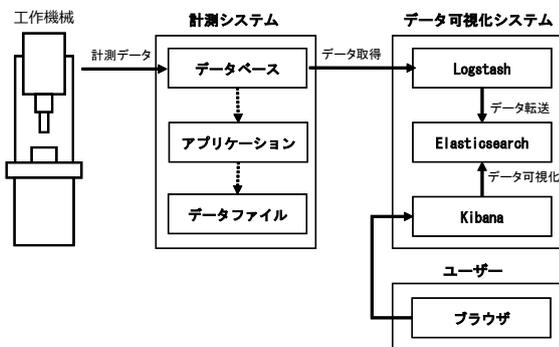


図3 データ可視化の構成図(変更後)

3.3 製造現場への導入

本研究で用いた計測システムは、県内企業の製造現場において、10数台の工作機械にセンサノードを取り付け、稼働状態を監視する実証実験が行われている。センサノードで計測された電流データはゲートウェイを介してデータベース(PostgreSQL)に蓄積されている。このデータベースにネットワークを介してLogstashで接続し、Elasticsearchにデータ転送を行い、kibanaにより10数台の工作機械の電流データ・稼働状況等をリアルタイムで可視化した。図4に計測データの可視化例を示す。



図4 計測データの可視化例

3.4 今後の展開

県内中小企業においては、生産現場の高度化の過程において、工程管理や稼働状況管理など多種多様な異なったシステムが導入されているのが現状である。それら複数のシステムを更新・統合するためには、多額の費用が掛かることから、システム全体の更新・統合に踏み切れない企業も多いと考える。

今回使用したOSSを活用した可視化システムであれば、データベースが複数存在する場合でも、図5に示すようにLogstash経由でElasticsearchにデータを統合することが出来、工程や稼働状況の一元的な管理が可能となると考えられる。

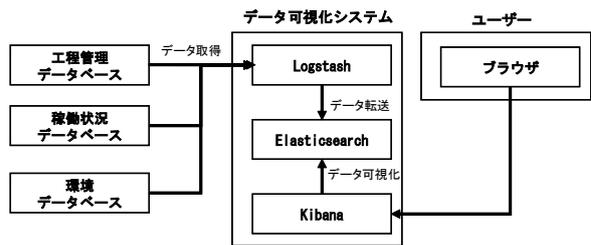


図5 各種データベースの統合例

4. まとめ

本研究では、計測システムを用いて収集した工作機械の稼働データを、オープンソースソフトウェア(OSS)を活用し可視化を試みた。

本研究で構成した可視化システムは、計測システムのデータベースに直接接続することで、現在運用されているシステムに変更を加えることなく製造現場に導入し、可視化を実現することが出来た。

また、工程管理や稼働状況管理などのデータベースが複数存在する場合でも、Logstash経由でElasticsearchにデータを統合することが出来ることから、工程や稼働状況の一元的な管理に有用であると考えられる。

今後は、計測システム・可視化システムの製造現場への導入に加え、生産現場のデータ統合など、技術移転・技術支援を進めていく。

文献

- [1]横山ら, "設備機器のデータ収集・蓄積システムの開発",岐阜県情報技術研究所第18号, pp.7-8, 2017.
- [2]横山ら, "IoT技術を活用した予防保全に関する研究開発(第1報)",岐阜県情報技術研究所第19号, pp.1-3, 2018.
- [3]成瀬ら, "オープンソースソフトウェアを活用した工作機械の状態可視化手法について",岐阜県情報技術研究所第19号, pp.4-5, 2018.
- [4] Elastic社 <https://www.elastic.co/jp/>

インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第5報)

一 試作金型による連続試験一

山田 俊郎 坂東 直行 浅井 博次
成瀬 哲哉 生駒 晃大 多田 憲生*

A study on a smart mold for insert injection molding (5th Report)

- Continuous Test of Smart Mold System -

Toshio YAMADA Naoyuki BANDO Hirotugu ASAI
Tetsuya NARUSE Akihiro IKOMA Norio TADA*

あらまし プラスチック射出成形の高品質化・効率化を達成する技術として、スマート金型の開発を進めている。スマート金型は、金型にセンサを組み込み、成形時の型内状態を監視・記録するとともに、成形の良否を判断する機能を搭載した金型である。本年度の研究開発では、スマート金型の機能を拡張する型開きセンサとガスベントセンサを試験型に取付け、成形試験をとおして提案センサの有効性を検証した。さらに、量産を想定した連続成形試験をおこない、3,000ショットを超える成形のデータ収集・分析を実施した。

キーワード スマート金型、インサート成形、渦電流式センサ

1. はじめに

製造業の現場では、製造過程で得られる各種データを分析して、生産の効率化や製品の設計に活かす取り組みが注目されている。NC加工機等の制御装置が組み込まれた工作機械では、すでに機械制御で使われているデータを取り出すだけであるため、データ収集や分析にコストはかかるものの、技術的には容易に実現が可能である。しかし、金型や手動の加工機など、制御装置を持たない生産設備のデータ収集は困難であり、特に金型では収集する物理量の多様さや使用環境の過酷さから、技術的な困難を伴う。

一方で、金型による部品加工は年々高度化しており、特にプラスチック射出成型の分野では、自動車産業における金属部品の置き換えや、電子産業における部品の微細化など、製品製造に求められる技術が高まっている。高度な樹脂部品の製造には、安定した射出成形が必要であるが、成形機の条件は制御できても、樹脂材料の不均一性や環境温度などの外的要因によって、成形の状態を一定させることは困難である。そのため、成形中の金型内の状態を監視し、突発的な不良品の発見および、適切な成形条件へのフィードバックが求められている。

このような背景のもと、プラスチック射出成形の生産立ち上げの効率化や成形不良の発見を目的に、成形中の

金型内の圧力や温度を監視するスマート金型の開発を進めている^{[1][5]}。昨年までの研究において、金型に搭載して圧力・温度・振動を記録する小型測定モジュールを開発し、そのデータ解析からスマート金型の有用性を示すことができた。さらに、検出する物理量の項目を増やすため、渦電流式センサを利用した型開きセンサ、および微細熱電対を利用したガスベントセンサを提案し、基礎的な検証をおこなった。

本年度は、提案したセンサを試験型に実装してスマート金型の機能を拡張し、提案技術の有効性を検証した。さらに、量産を想定した連続成形試験を行い、3,000ショットを超える成形のデータを収集し、その分析をおこなった。

2. 試験型の製作と新規センサの検証

2.1 量産試験型

射出成型機を連続運転して大量の実稼働データを収集するため、実製品に近い形状の試験用の金型を製作した。成形品の形状は図1(a)に示す結束バンド形状とし、左側のロック部分と右側のベルト部分の中間にゲートを配置した。センサ類は可動側の金型に取り付けられており、型内圧力センサ2点(ゲート直近およびベルト部分の流動途中)、型表面温度センサ3点(スプルー近傍のランナーおよびロック部分・ベルト部分の流動末端)を設置した。ゲート直近に設置した圧力センサは、キャビティへの樹

* 株式会社 岐阜多田精機

脂の充填開始直後から充填完了までの圧力変化を連続的に測定することを目的としている。温度センサは、温度変化によって樹脂の到達を検出することができるため、充填開始を検出するためにスプルー近傍と、充填完了を検出するために充填末端に取り付けた。

さらに、ガスベント溝に極細熱電対を利用したガスベントセンサを設置し、キャビティ横には渦電流式変位センサを利用した型開きセンサを設置した。ガスベントセンサと型開きセンサは前年度の研究で構造を提案し、基本性能を確認したものである。

また、圧力センサBより末端寄りのベルト部分に、キャビティの体積を変化させるための可動ピン(Φ3.0, 突き出し量0.3mm, 体積2.1mm³)を配置して、キャビティ状態を故意に変化させることができるようにした。このピンは固定側の金型に取り付けられており、ピンの出し入れによって、ベルト部分の製品の厚さ(1.25mm)に対して24%厚さが増加し、全体積(1266 mm³)に対して0.017%体積が増加する。

2. 2 型開きセンサの検証

従来のスマート金型システムで取得できる、圧力、温度と時間同期して型開き量を取得するため、スマート金型システムに型開きセンサ用が接続できるよう拡張をおこなった。渦電流式変位センサは、金属の接近によるセンサのインピーダンス変化を利用しているため、インピーダンスを計測してデジタル値に変換するデバイス(Texas Instruments LDC1614)を用いた入力回路を設計し、スマート金型システムに組み込んだ。ただし、このデバイスを用いたインピーダンス測定は条件によって数msの時間がかかるため、型開きセンサのサンプリング間隔は、温度・圧力センサのサンプリング間隔(通常1ms)に対して10倍のサンプリング間隔(通常10ms)に設定し

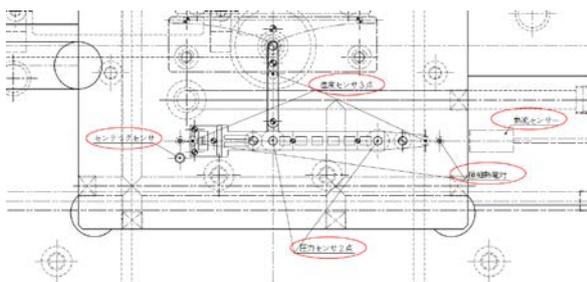
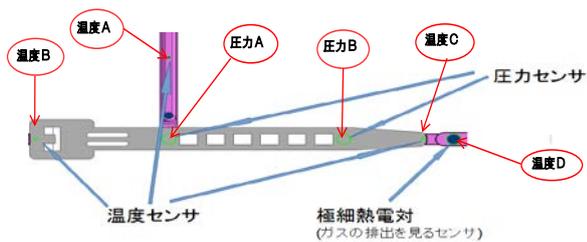


図1 量産試験金型

た。なお、型開きセンサは、製品のロック部分のキャビティの外側に配置した(図1(b)ではセンテックセンサと表記)。

ポリプロピレン(PP)を材料とした成形を行った際の型内圧力(圧力センサA)および型開きセンサの出力を図2(c)に示す。型開きセンサは設置状態によってインピーダンスが変わるため、型開き量を長さの単位(μm)で求めるためにはキャリブレーションが必要となる。しかし、今回センサを設置した金型内では、実寸を測ることができないため、デバイスの出力値をそのまま使い、グラフでは無単位としている。

PPの一般的な成形条件で成形したサンプルの部分拡大写真を図2(a)に示す。通常の成形条件では、成形品の状態が良く、図2(c)のグラフから金型内の圧力が増加しても型開きセンサの出力に変化が現れていないことがわかる。

通常の成形の条件では型開きセンサに変化がなかったため、型締力のみ1,500kNから500kNに落として成形をお

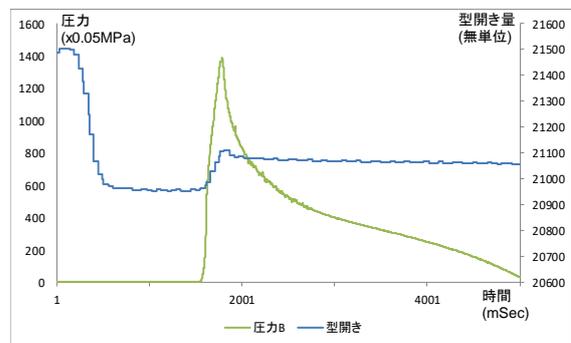
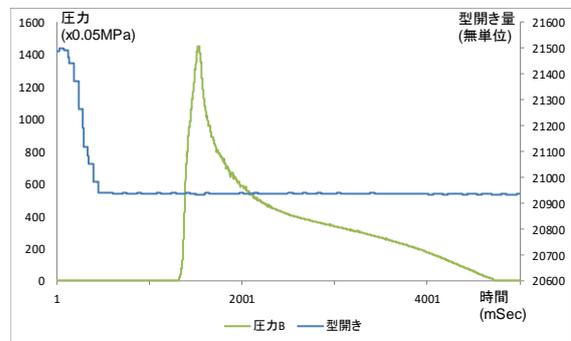
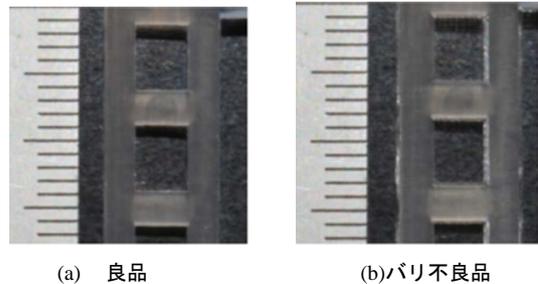


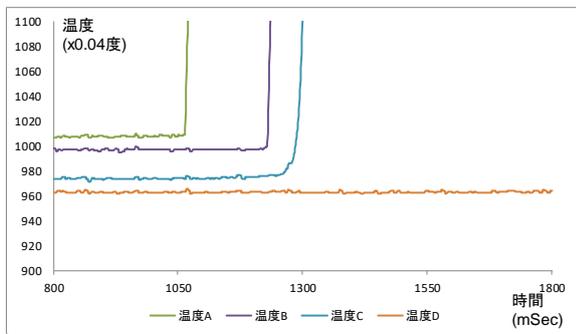
図2 型開きセンサの比較検証

こなった. この条件では図2(b)に示すように製品にバリが発生し, 図2(d)に示すように, 型内の圧力増加に対して開きセンサが変化を示している. 製品のバリは射出圧によって金型が開くことで発生するため, 提案の型開きセンサで金型の型開きが検出できていることが検証できた.

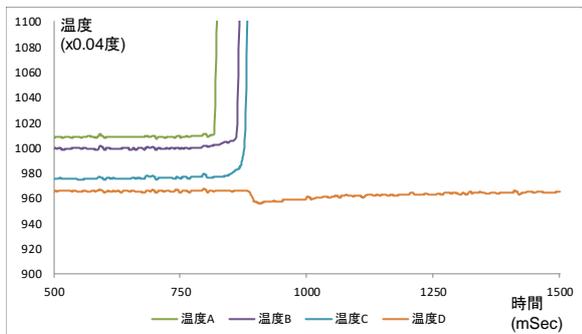
2. 3 ガスベントセンサの検証

ガスベントセンサは, 空気の流れによる温度変化を極細熱電対で検出するものであり, 前年度の研究報告書で仕組みを提案し, その構造を報告した. 電気的な構造がスマート金型システムの温度センサと同じであるため, システムの温度センサのポートに接続して使用できる. 試験金型では, ベルト部分の先にガス抜けを良くするための浅い溝(ベント溝)が設けられており, ベント溝のキャビティ寄り中央にセンサ表面がベント溝の底と同一面となるようにガスベントセンサを設置した.

ポリプロピレン(PP)を材料とした成形実験において, 成形機の射出速度(シリンダの移動速度)を変えて成形を行い, 樹脂の充填工程(温度センサの立ち上がり付近)に注目してガスベントセンサの変化の有無を確認した. 図3(a)は射出速度が20mm/sと比較的遅成形であり, ガスベントセンサに変化は現れていないが, 高速な80mm/sの際には小さいながら変化が現れている(図3(b)). このことから, キャビティ内の空気がベント溝をある程度の速度で流れるとガスベントセンサが反応することが確認できた. しかし, ベント溝を流れる空気の流速は射出速のみでなく, キャビティ形状やベント溝以外からのガス



(a) 射出速 20mm/s



(b) 射出速 80mm/s

図3 ガスベントセンサの反応

の抜け状況, 型や樹脂の温度などが複雑に関係するため, センサが反応する流速を一概に示すことは困難である.

また, センサの端面に極細の熱電対が露出する構造であることから, 金型面をクリーニングする際に, 熱電対を切断することがあり, 実運用上では破損しやすいことが問題となった. ガスベント検出の方法としては有効であると考えられることから, 今後センサ構造の改良が必要である.

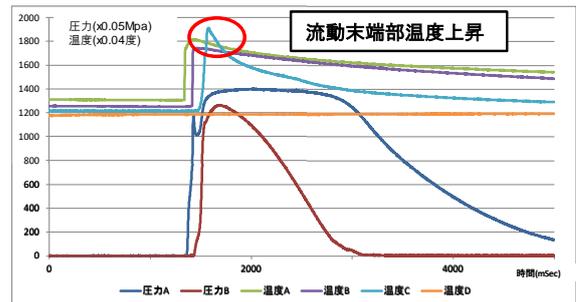
3. 量産試験によるデータ収集

3. 1 量産試験

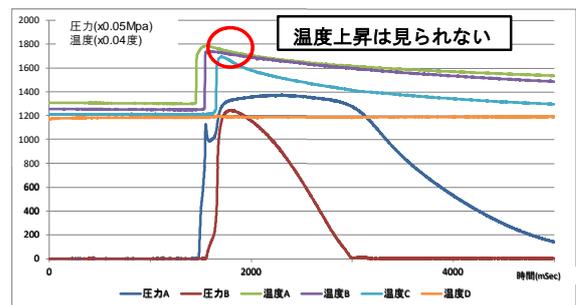
試験型による量産試験では, 材料にグラスファイバー30%入りのナイロン樹脂 (PA66-GF30) を使用し, 2日間に



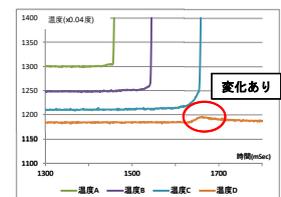
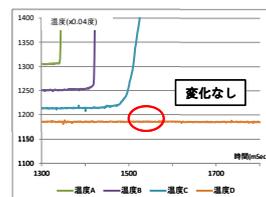
(a) ベルト部分末端の外観



(b) ガス焼け不良発生時の測定波形例



(c) 正常成型時の測定波形例



(d)不良時のガスベント波形 (e)正常時のガスベント波形

図4 成形不良の検出例

わたって約3,200本の成形をおこなった。成形品には番号シールを張り付け、測定データと現品の対応付けを行った。なお、成形は昼間のみとし、2日間の連続稼働ではない。

3. 2 成形不良の検出

2日にかけて行った成形実験では、1日目の成形においてベルト部分末端に多くのガス焼け不良が発生した(図4(a))。正常成型の測定波形(図4(c))と不良時の測定波形(図4(b))を比較すると、ほとんどのセンサが同じ変化傾向を示すものの、ベルト部分の充填末端に取り付けた温度センサCのピーク値に差異が見られた。不良発生時は温度の上昇が見られ、そのピーク値は樹脂の供給口であるランナー部分のピーク値よりも高い値を示している。このことから、供給される樹脂の温度よりも末端部分の樹脂温度が高くなり、樹脂が熱分解していることが示唆される。また、ガスベントセンサの反応は、正常成型時には変化があり(図4(e))、不良成形時には変化が現れていない(図4(d))。このことから、不良成形時はキャブティ内のガスの抜けが悪いことがわかる。

温度センサCおよびガスベントセンサの変化から、不良成形時はガスベント溝に詰まりが発生してガス抜けが悪くなり、樹脂の射出によってキャブティ内の空気が圧縮されて高温になり、樹脂を加熱分解して焼けが発生したことが推定された。

3. 2 特徴量の時系列変化の検証

先に報告した研究において、ショットごとの射出成型データの比較に利用できる特徴量を提案しており、今回もショットごとの特徴量の変化を検証した。成形が安定していたことから、各特徴量に大きな変化は見られなかったが、唯一1日目の成形の温度センサCのピーク値に大きなばらつきが見られた。図5にショットごとの各センサ

(圧力A,B, 温度A,B,C)のピーク値の変化を示す。2日目の成形では温度センサCのピーク値も安定している(途中2か所の落ち込みはチョコ停による)が、1日目は大きくばらついている。この時の成形は前節で示したガス焼けが頻発している。

ガス焼けの原因としては、材料の乾燥不足が考えられた。実験に先立って材料を1晩乾燥させたが、古い材料であったため乾燥が不十分でガスの発生が多くなり、ベント溝を詰まらせ、ひいてはガス焼けになったものと考えられる。2日目の成形試験では、さらに1晩乾燥させたため、ガスの発生が抑えられたものと考えられる。

なお、ピンによるキャビティの体積変化では、測定データに変化が認められなかった。

4. まとめ

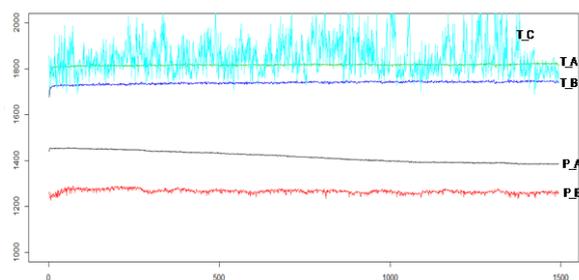
スマート金型に型開きセンサ、ガスベントセンサの計測機能を追加し、試験型による有効性の検証をおこなった。型開きセンサでは製品のバリが検出でき、ガスベントセンサではガス抜けの状態が検出できることが確認できた。しかし、ガスベントセンサには耐久性の面で課題があることが判明した。

また、連続成形試験からは、開発システムの連続稼働が確認できたとともに、材料状態の不良が原因と考えられる成形の不良が検出できた。

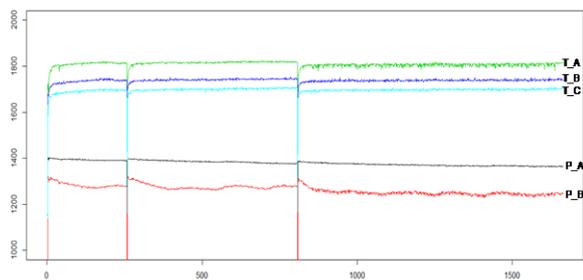
今年度は小型の試験金型による検証ができたが、今後はスマート金型の効果がより顕著に表れると考えられる大型の金型による検証をおこなう予定である。また、計測データの分析に関しても、特徴量比較のみでなく、AIの活用を進めていく予定である。

文 献

- [1] 山田, 坂東, 平湯, 棚橋, 丹羽, 窪田, 多田, “生産性向上に資する射出成型スマート金型の開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第15号, pp. 21-29, 2014
- [2] 山田, 坂東, 平湯, 棚橋, 丹羽, 窪田, 多田, “生産性向上に資する射出成型スマート金型の開発(第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp. 1-4, 2015
- [3] 山田, 坂東, 浅井, 久富, 多田, “生産性向上に資する射出成型スマート金型の開発(第5報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp. 16-19, 2016
- [4] 山田, 坂東, 浅井, 久富, 棚橋, 多田, “インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第1報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp. 1-4, 2017
- [5] 山田, 坂東, 浅井, 成瀬, 生駒, 多田, “インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp. 10-13, 2018



(a) 1日目の成形



(b) 2日目の成形

図5 各センサピーク値

インサート成形の生産性向上のための高機能金型に関する研究(第6報) ー射出成形品の変形シミュレーションー

坂東 直行 山田 俊郎 生駒 晃大

A study on a smart mold for insert injection molding (6th Report) -Deformation Simulation of Injection Molded Articles-

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA Akihiro IKOMA

あらまし プラスチックで成形されることの多いシェル形状を想定し、単純形状を取り上げて反りの現れ方を分析した。その中で、ピュア材と複合材では、異なる反り変形モードになる場合があり、金型を共用しがたい場合があることが分かった。ここで採り上げた形状は単純なものであるが、それゆえに何が要因となり、どのような変形が生じるのかの対応付けが容易である。よって、本報は反り問題の解を効率的に見つける際に役立つと期待される。

キーワード 射出成形, 反り, 複合材

1. はじめに

プラスチック部品の射出成形における課題のひとつに成形品の反りがある。樹脂を型に流し入れるときの温度と、型内冷却して固める時の温度の差によって生じる材料収縮が原因であるため、根本的に避けがたく、対処としては予め収縮を見越した形で金型をつくる方法が採られている。金型メーカーは経験に基づいた設計ガイドラインを有しているが、成形品の複雑化、精緻化、高機能化要求が高まるなか、公差要求も厳しくなっており金型の改修を繰り返しているのが現状である。

反り問題の有効な解決策を講じるためには、従来の画一的なガイドラインに従うのみでなく、形状に応じた個別具体的な解決策も盛り込んでいく必要がある。そうしたニーズにはシミュレーションが有効である。シミュレーションのメリットの一つに、トライ&エラーを繰り返すことで要求仕様を満たす解を探索できることが挙げられるが、シミュレーションを行うには相応のモデル作成の手間と計算時間が必要であるため、シミュレーションにかかるコストに上限を設けたうえでケースを限って行うことが多い。そうした場合、よりよい解にたどり着くには反りの軽減に効果のある要因に対する目利きが必要であるが、それを複雑になりがちな実成形品のシミュレーション結果から養うのは難しい。

そうした理由から本報は、反り軽減のための有効な解決策を見つける手がかりになることを期待し、反りがどのように生じるのかを単純な形状を採り上げシミュレーションによって分析し、状況ごとに整理するものである。

2. 解析モデル

以下では、プラスチックで成形されることの多いシェル形状を題材に、単純な形状をいくつか取り上げて反りの特徴を見ていく。なお、射出位置は成形品の表裏を無視し、流動距離を短くするうえで合理的と思われる個所に1か所配置し、見えるところにある場合、円錐であらわしている。また、わかりやすくするため、変形形状は10倍に誇張して表現している。図において基準形状は半透明で、反り形状は各形状の特徴を表す面もしくは角の中央で基準形状と一致させたときの成形品の変位量を色分布と共に表している。その他の解析条件を表1に示す。

表1 解析条件

項目	内容
ソフトウェア	Autodesk Moldflow Insight Premium
要素タイプ	MidPlane
板厚プロパティ ^{※1}	4mm
メッシュサイズ	2mm
金型表面温度	成形品表面で一定 ^{※2}
充填設定	流量一定を目安にソフトが自動設定
保圧設定	充填圧力の80%で10秒
型内冷却	20秒

※1 リブを含む

※2 冷却解析を含む場合を除く

3. ピュア材

ここでは、強化材を含まないピュア材として、PPを例に反りの現れ方を見ていく。

3.1 平面形状

図1に、100mm×100mmの正方形の板材中心から射出したときの反りを示す。単純板形状の場合、収縮は面内方向に限られており、射出位置を中心とする同心円で変位している。成形品が使用される際、作用する外力に抗するため、板材の面外方向の強度補強のための高さ10mmのリブを対向する縁2辺に設けたときの反りを図2に示す。このときの変形は面内のみならず面外方向にも起こり、面中心では凹み、リブ設置線上ではうねりが起こり、リブは内側に倒れる。中心の凹みを軽減するため、図3のように中心を通るようにリブを設けても、変形抑制の効果は見られない。板の縁すべてにリブを設けた場合（図4）、リブの内倒れはある程度抑制できるが、中心は凹み、リブは弓なりに変形する。さらに、中心で交差するようにリブを設けた場合（図5）、縁のリブがうねる。面の両側にリブを設けた場合（図6）、片面時にみられた面外変形は抑制される。

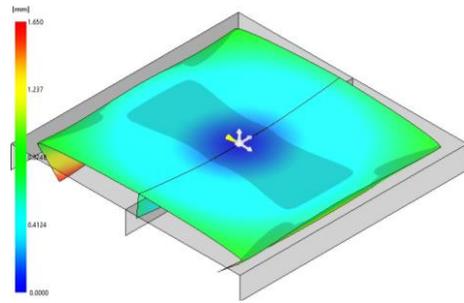


図3

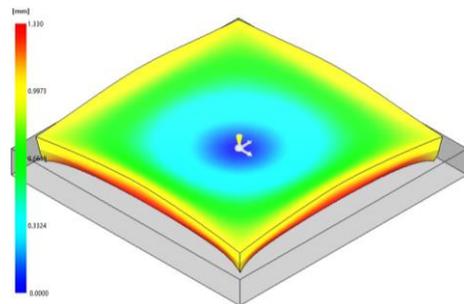


図4

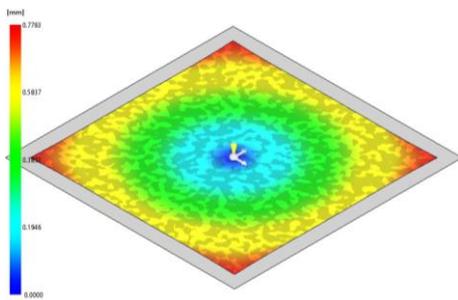


図1

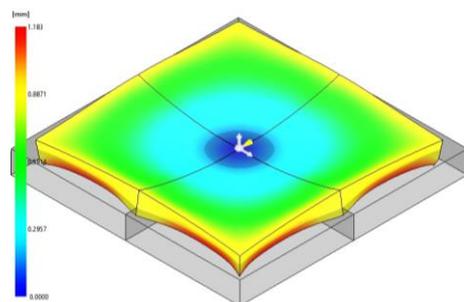


図5

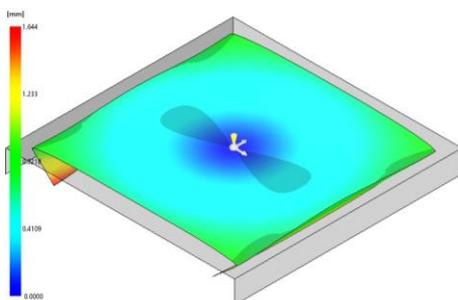


図2

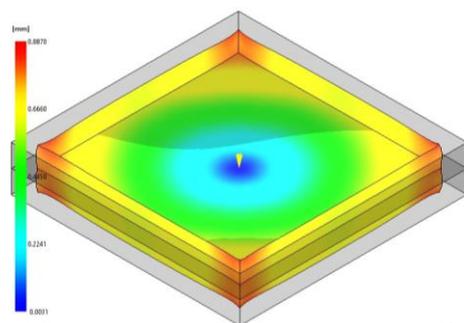


図6

3. 2 湾曲形状

板を、中心を通る直線周りに曲げた形状における反りを図7に示す。このとき、リブがないにも拘わらず面外変形し、角が反り上がる。補強のためリブを曲線に沿って設けても、片面の場合は反り抑制の効果が乏しく、逆に助長する(図8, 図9)。両面の場合(図10)は、反りがわずかながらも抑制される。面中心で交差するようにリブを設けた場合(図11)も、反りはわずかに抑制される。なお、曲面の内側で同様のリブを設けることは、金型からの成形品の取り出しを阻害するためできない。

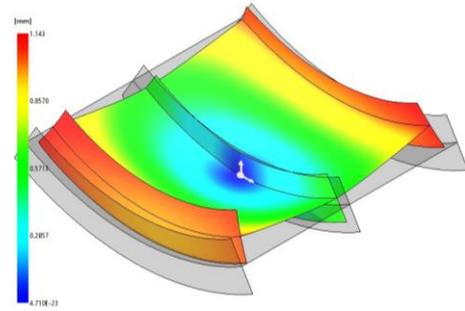


図10

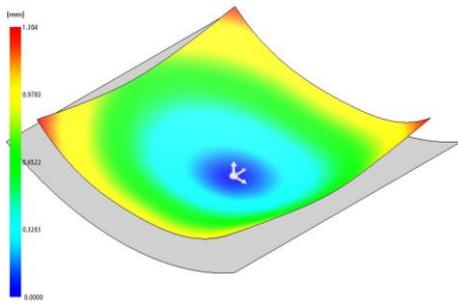


図7

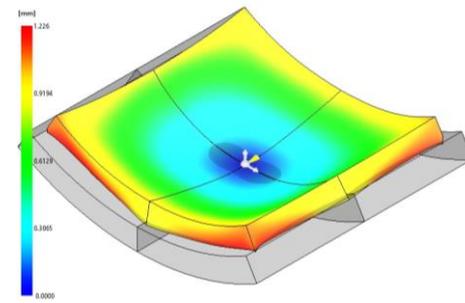


図11

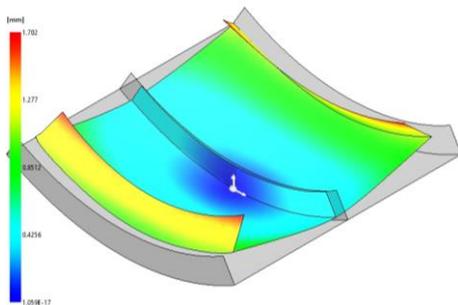


図8

3. 3 屈曲形状

板を直角に曲げた形状の場合(図12)、曲げ方向への内倒れがみられる。対して、角にリブを設けた場合(図13)、平面部の内倒れは抑制されるが、リブが内側に倒れ、平面をわずかにうねらせる。リブを平面全体に設けると変形は大きくなり、リブ設置面によってうねり形状が変わる(図14, 図15)。平面が平行に配置された形状の場合を図16に示す。ここでは変形量を等倍で表している。このとき端の平面は内倒れを起こす。対して、平行平面に直交するように平面を追加した場合(図17)、リブとは異なり平面のうねりは抑制され、内倒れも軽減する。

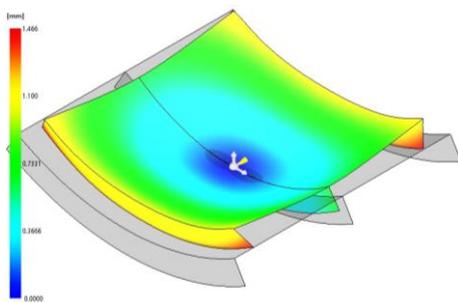


図9

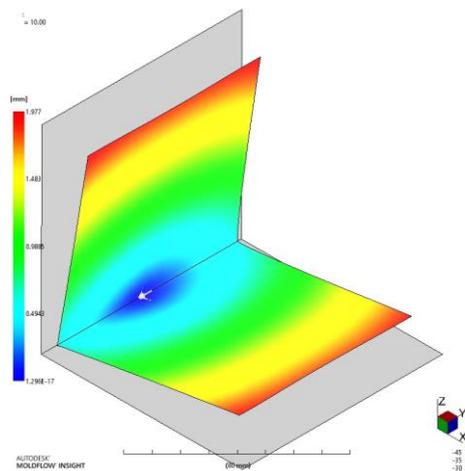


図12

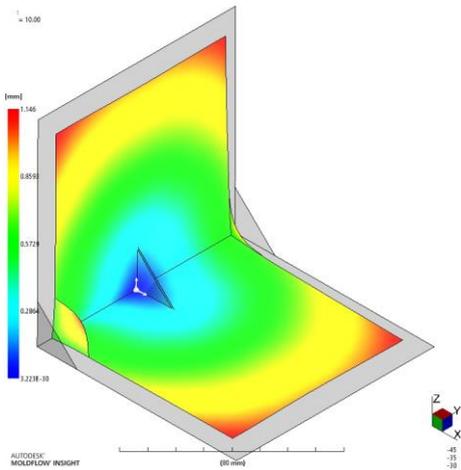


図13

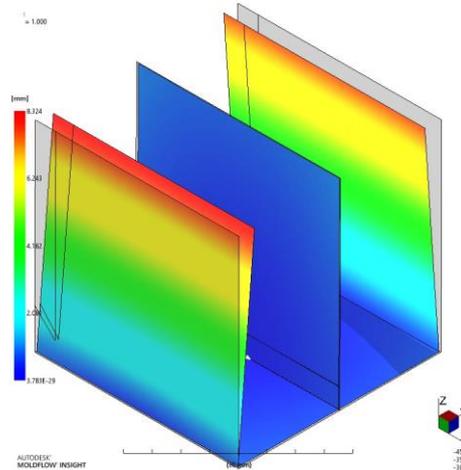


図16

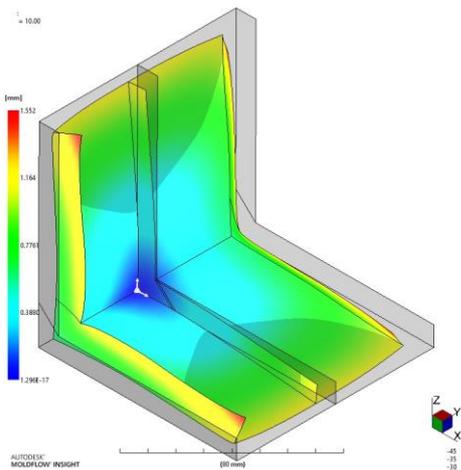


図14

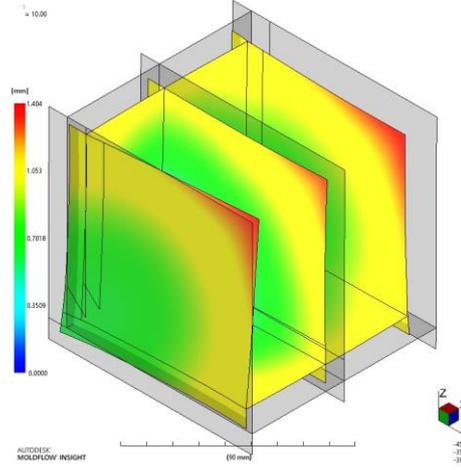


図17

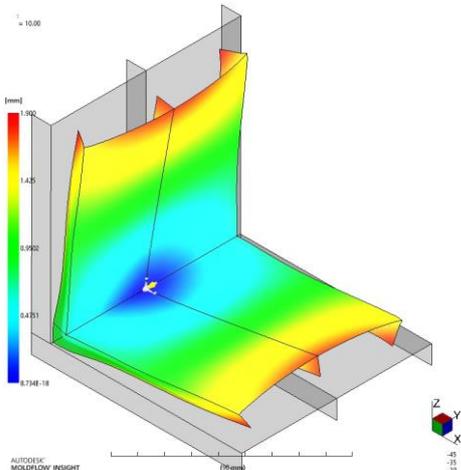


図15

3. 4 箱形状

箱形状の場合、開口端で内倒れがみられる(図18)。これは射出成形時においては金型のコアを締め付ける力となって表れるので、成形品の取り出しを困難にする。よって、箱形状を成形する場合、抜き勾配の調整が不可欠となる。なお、箱の底面は内側に向かう凸形状となる。底面の凸変形を軽減するため、内部にリブを設けることは効果が大きい(図19)が、角のみに設ける場合(図20)と、平面部全体に設ける場合で差はあまり見られない。箱の外側にリブを設けた場合(図21)、底面の凸変形の抑制効果は薄れる。内外両面にリブを設けても(図22)、内側のみの場合と比較して違いに乏しい。箱内部に、中心で交差するように平面を付加した場合(図23)、底面は外側に凸変形し、全体的な変形量は減少する。箱を形成する平面ではなく、隅にリブを設けた場合(図24)、変形抑制の効果は薄れる。

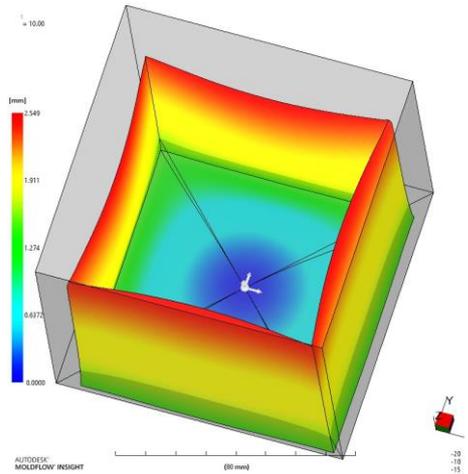


図18

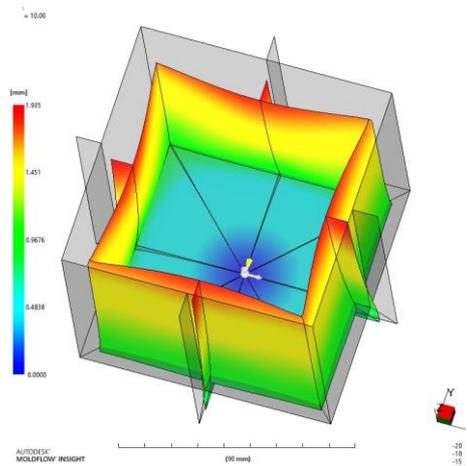


図21

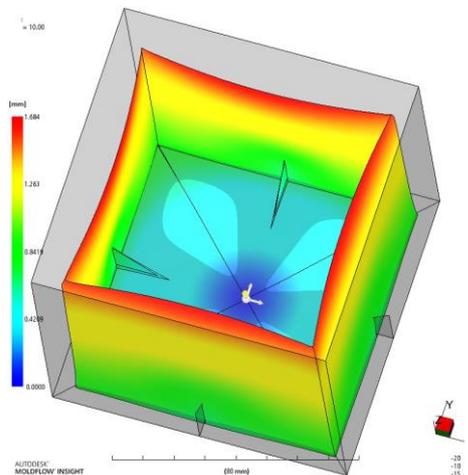


図19

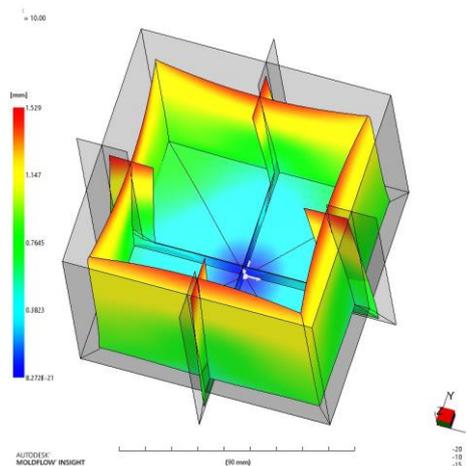


図22

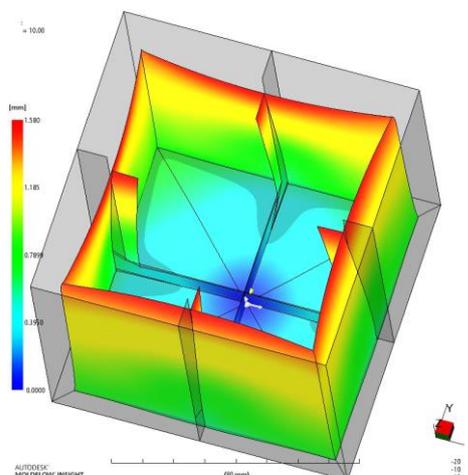


図20

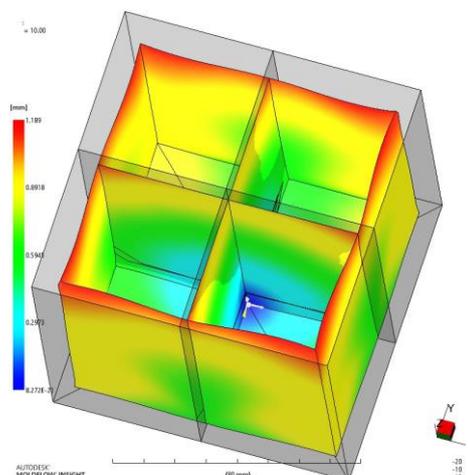


図23

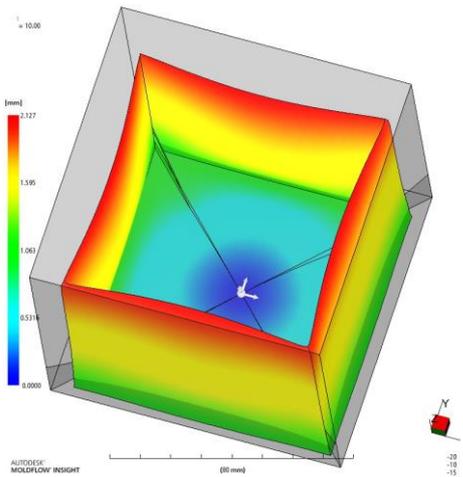


図24

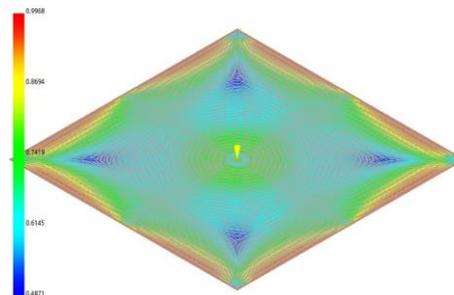


図26

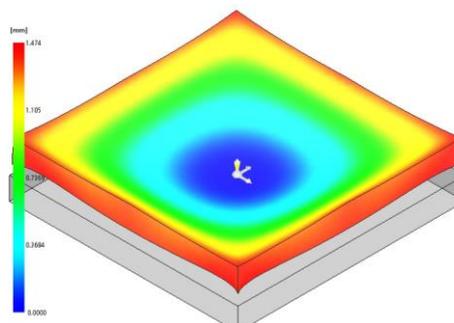


図27

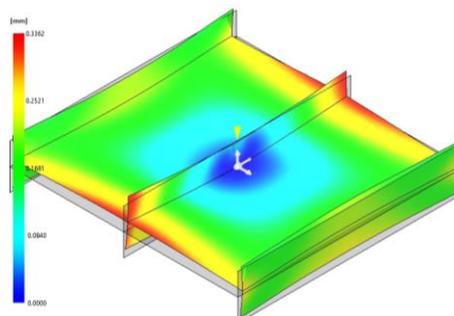


図28

4. 複合材

材料強度を向上させる強化材入り樹脂を材料に用いる場合、ピュア材とは異なる反り特性が現れると考えられる。これは、強化材には配向方向の変形を抑制する効果があるためである。そこで、炭素繊維を30%含むPPを例に反りの現れ方を見ていく。

4. 1 平面形状

ピュア材では、射出位置を中心に同心円状に分布していた変位が、角を頂点とする星形に分布を変える(図25)。また、変位量も少なくなる。平面の中心から射出したとき、同心円状に広がる流動先端は最初に板の縁の中央に到達し、そこから角へと流れを変える。隣り合う縁でも同様に流れるため、一つの角では縁にそって二方向から樹脂が充填され、結果図26に示す繊維配向となる。強化材は反りを抑制するばかりではなく、反りを増長することもある。板の縁すべてにリブを設けた場合(図27)、変形はピュア材のときよりも大きくなる。また、リブ上に射出位置を設けた場合(図28)、射出位置近傍の配向が他のリブ内の配向と一致せず、射出位置近傍はくびれ、ピュア材のときには見られなかった面外変形を誘発する。

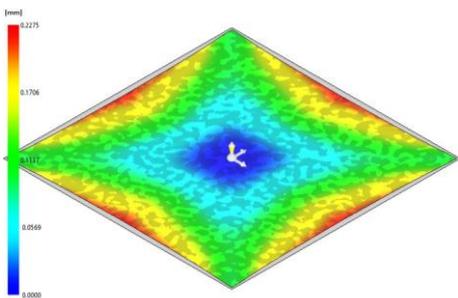


図25

4. 2 湾曲形状

湾曲形状の場合は、変形のモードが変わり、中心がもり上がり曲線の縁が下がり、直線の縁が内側へまがる双曲放物面となる(図29)。これは、射出位置を縁に設け、面内の繊維配向を変化させても(図30,31,32,33,34)、同様である。変形モードの変化は、リブを設けた場合(図35, 図36)も起こる。なお、変形量は総じて、ピュア材と比較して、少なく抑えられている。ここから、成形品に湾曲形状が含まれる場合反り変形のモードが変わるため、ピュア材と複合材では異なる金型設計が求められる。

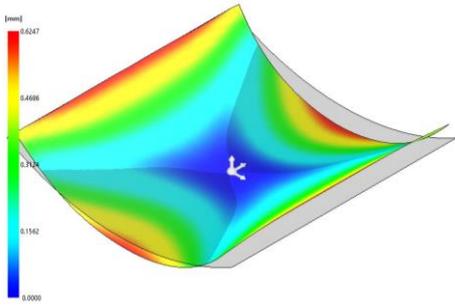


図29

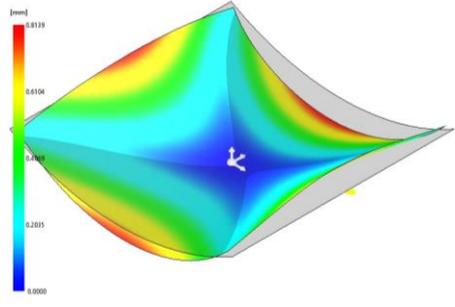


図33

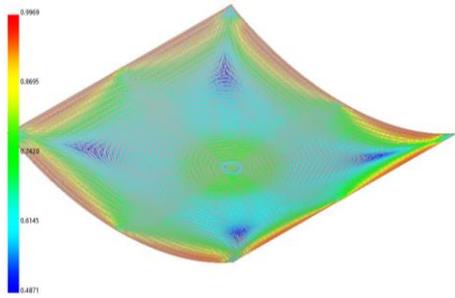


図30

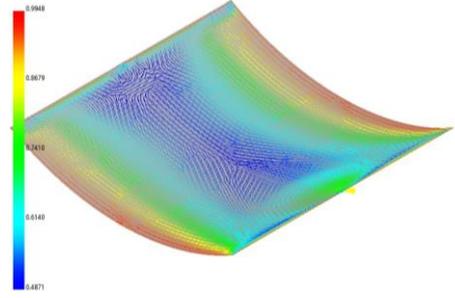


図34

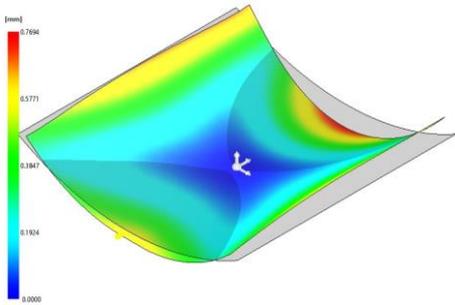


図31

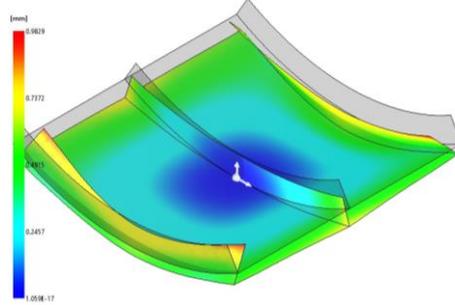


図35

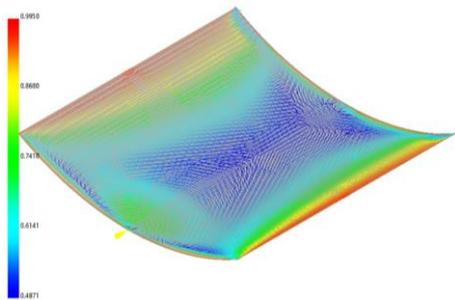


図32

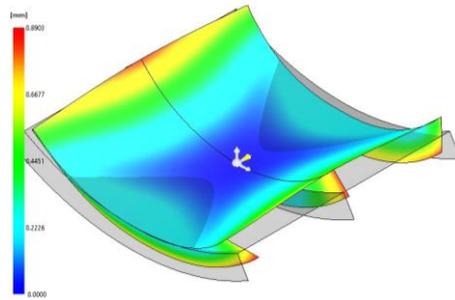


図36

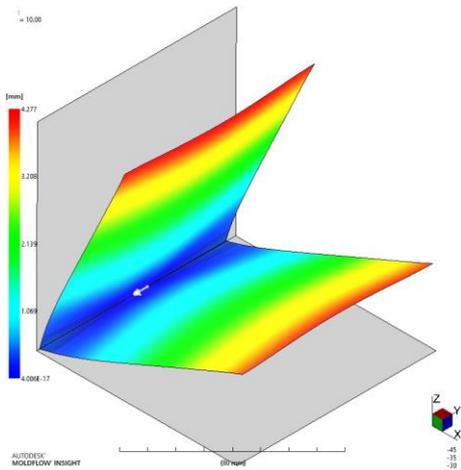


図37

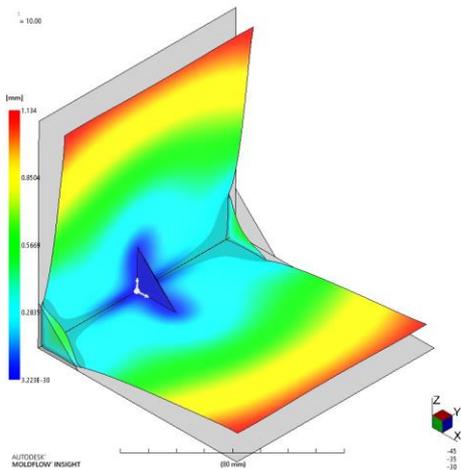


図38

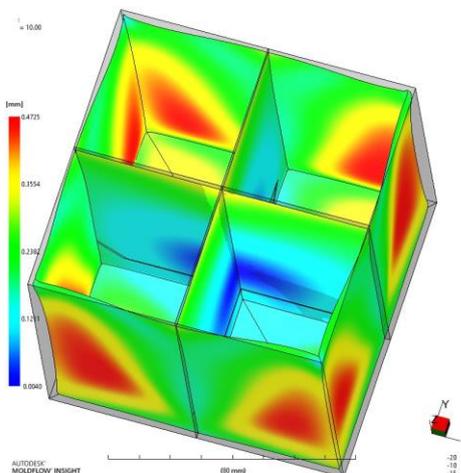


図39

4. 3 屈曲形状

屈曲形状においては、変形を大きく増長させてしまうことがある（図37）。リブを設けた場合（図38）、屈曲線の内反りが外反りになるなど、変形モードが変わることがある。

4. 4 箱形状

底面が外に凸変形するモードがなくなるほか（図39）、変形モードの目立った違いはない。なお、変形量は抑制される。

5. まとめ

本報では、シェル形状を想定し、反りの現れ方を見てきた。その中で、ピュア材と複合材では、異なる反り変形モードになる場合があり、金型を共用しがたい場合があることが分かった。

ここで採り上げた形状は単純なものであるが、それゆえに何が要因となり、どのような変形が生じるのかの対応付けが容易である。本報が、反り問題の解を効率的に見つける際に役立てば幸いである。

安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発(第11報)

ーセンサシステムの改良と溝検出システムの提案ー

久富 茂樹 藤井 勝敏 窪田 直樹

Development of Sensors for a Safety Driving System of Electric Senior Vehicles (11th Report)

- Improvement of Sensor Systems and Proposal of Groove Detection System -

Shigeki KUDOMI Katsutoshi FUJII Naoki KUBOTA

あらまし 高齢者の生活を支えるツールの一つである電動車いすに対して、事故の危険を検知する安全装置を開発している。これまでに、障害物を検出する超音波フェーズドアレイソナー、車線逸脱を検出するイメージセンサ、車の接近を検出する音センサをそれぞれ開発してきた。本年度は、これら3つのセンサシステムの改良と、新たに、距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出する手法を検討した。超音波フェーズドアレイソナーでは、送受信分離型の構造とすることで、障害物に対して斜め方向から接近するときの角度が、従来よりも広い範囲で障害物検出が可能になった。イメージセンサでは、時系列断面画像から得られる特徴点の位置を追跡し、その変化から危険度を判定する方法を試みた。電動ビークルに実装し動作確認を行ったところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることを確認した。音センサでは、速度の切り替え状態によって、車検出の閾値が変更するように改良した。交通量が少なく、静かな環境であれば、後方からの車の接近を約90%の率で検出できることを確認した。また、溝のように凹んだ段差を検出する手法を提案し、電動ビークル後進時の脱輪防止制御を行い基本動作の確認をした。

キーワード 超音波フェーズドアレイソナー、イメージセンサ、音センサ、距離センサ、溝検出

1. はじめに

高齢者の生活を支えるツールとして電動車いすは広く利用されつつあるが、認知機能低下による操作ミスが原因で、障害物との衝突、歩行者や車との接触などの事故が問題となっている。当研究所では、電動車いすを安全に運転するため、障害物や危険箇所をセンサで検知し、安全な走行を実現する安全装置を開発している。この安全装置は、将来的に、共同研究先である県内企業で開発された電動車いすへ、オプション装備として搭載することを目指している。なお、本研究では、開発する安全装置付きの電動車いすを“電動ビークル”と記述する。

電動ビークルの安全装置としては、既報のとおり、超音波フェーズドアレイソナー（以降、超音波PAソナーと記述）、イメージセンサ、音センサの3種類のセンサシステムを開発している^{[1][4]}。本年度は、3つのセンサシステムの改良と、新たに距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出して電動ビークルを制御するシステムを検討したので報告する。

2. 超音波PAソナー

2.1 素子の取り付け位置、角度の検討

障害物検出の実験において、障害物の面に対して垂直に電動ビークルが接近したときは障害物を検出できても、障害物の面に対して斜め方向から接近したときは障害物を検出できない課題があることがわかってきた。従来のソナーは図1に示すように送信素子のすぐ下側に受信素子を取り付けた送受信一体型であった。今回は、送信素子と受信素子とを分離することも含めて取り付け位置の検討を行った。

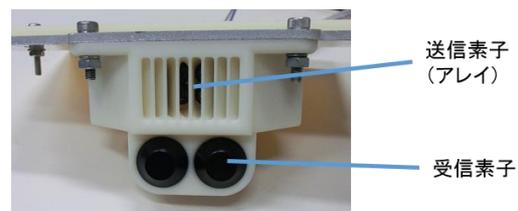


図1 従来の超音波PAソナー

台車の支柱に送信素子と受信素子を取り付け、210mm×130mm×60mmの段ボール箱を検出できるかの確認を行った。既報で述べたように、二値振幅偏移変調されたBarker符号を送信し、送信信号と受信信号との相関処理を行い、その大きさに障害物の有無を判定した^[3]。

はじめに、段ボール箱は台車の正面に正対するように床に配置し、台車との距離は2mとした。送信素子は台車の左右の支柱の中央になるように取り付け、送信素子の向き、高さ、受信素子の位置、高さを表1に示すように、16通りに変えて実験を行った。本実験では、実験系を簡略化するため受信素子を1個のみ使用した。また、台車は静止した状態で実験を行った。実験の結果、障害物の有無を判定できた条件は、No.2, No.4, No.9, No.10, No.13, No.15 の6条件であった。

表1 素子の取り付け位置、角度

No.	送信素子向き	送信素子高さ	受信素子位置	受信素子高さ
1	水平	30cm	中央	70cm
2	水平	30cm	中央	30cm
3	水平	30cm	左端	70cm
4	水平	30cm	左端	30cm
5	水平	70cm	中央	70cm
6	水平	70cm	中央	30cm
7	水平	70cm	左端	70cm
8	水平	70cm	左端	30cm
9	下向き20度	30cm	中央	70cm
10	下向き20度	30cm	中央	30cm
11	下向き20度	30cm	左端	70cm
12	下向き20度	30cm	左端	30cm
13	下向き20度	70cm	中央	70cm
14	下向き20度	70cm	中央	30cm
15	下向き20度	70cm	左端	70cm
16	下向き20度	70cm	左端	30cm

(左端：中央より25cm左にある支柱に取り付け)

次に、障害物の有無を判定できた6条件について、検出可能な障害物の角度を調べた。図2に示すように、障害物が台車の正面に正対している状態から障害物を置く向きを徐々に変えていき、検出できなくなる角度を求めた。

表2に実験結果を示す。受信素子を左右の中央に配置した条件の場合は、障害物が台車に正対している0度を中心として正の方向と負の方向にそれぞれ約3度までしか検出できなかった。一方、受信素子を左端に配置した条件では、 θ が負の方向、すなわち障害物の面が受信素子とは反対の方向に向いている時は全く検出できなかったが、 θ が正の方向、すなわち障害物の面が受信素子の方向に向いている時は11度まで検出可能で、受信素子を中央部に配置した場合に比べ、約2倍の検出可能角度範囲を得られた。本実験では受信素子を左側に1個配置しての実験であったが、右側にも同様に配置して、合計2個の受信素子を使用すれば、障害物の面の傾き θ が負の場合であって

も検出可能となり、検出可能角度範囲もさらに広がると推測できる。

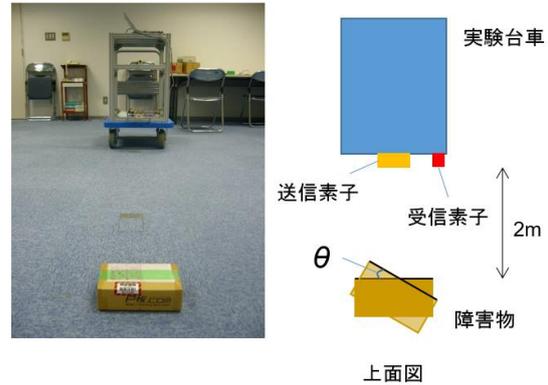


図2 実験台車と障害物の位置関係

表2 検出可能な障害物角度

No.	検出可能な障害物角度 [deg]
2	-3 ~ +3
4	0 ~ 11
9	-3 ~ 3
10	-3 ~ 2
13	-4 ~ 2
15	0 ~ 11

2. 2 送受信分離型超音波PAソナー

前節での実験で検出可能な障害物角度範囲が大きかったNo.4とNo.15の違いは、送信素子、受信素子を設置する高さの違いとそれに起因している送信素子の向きの違いである。電動車いすへの設置のしやすさを考慮して、No.15に近い条件でのセンサの搭載を行った。図3に送受信分離型超音波PAソナーを搭載した電動ビークルを示す。テーブルを利用して、左右の中央部に送信素子を、床面から70cmの高さに、水平から20度下向きの角度で設置した。受信素子は、床面から70cmの高さに、送信素子の中心から左右にそれぞれ20cm離れた位置に1個ずつ設置した。



図3 送受信分離型超音波PAソナーの搭載

2. 3 障害物検出による電動ビークル制御

今回使用した電動ビークルは、CAN (Controller Area Network) 通信によって、センサシステム側から電動ビークルを制御できる仕様になっている。超音波PAソナーで障害物を検出したときに、電動ビークルを緊急停止する「停止モード」と、電動ビークルを減速する「減速モード」の2種類のプログラムを作成した。試作した電動ビークルを6人の評価者に屋内外で運転してもらい評価してもらった。停止モード、減速モードともに、障害物がある場所では、十分に停止あるいは減速の制御ができていたとの評価結果であったが、同時に、評価者は障害物ではないと認識している場所や障害物までまだ距離があると感じている状態で停止、減速の制御が働くことがあるとの評価であった。また、停止モードであると、道路横断中などのように逆に危険な場面も考えられるため、減速モードをベースにするべきであるといった意見があった。本システムの実用化にあたり、これらの評価結果を反映した、障害物の検出距離、検出感度の調整機能や、走行スピード、操作レバーの状態と連動した電動車いす制御が必要となってくる。

3. イメージセンサ

既報^{[1],[2]}の通り、車体前方に配置したカメラで撮影した画像の時間的変化から、脱線、脱輪などにつながる漫然運転状態を検知し、事故が起こる前に運転者に警報音で知らせることを目標としている。この状態検知アルゴリズムは、画像中で路面を捉える特定水平ラインに着目、時系列で並べると、歩道等に沿って安全に走行している状況ならば路肩や白線などの境界が一定の水平位置に留まる性質に基づき、それが運転者の意図によらずに動き続けていれば、脱輪の恐れがあると判定する。そこで本章では、この境界などの路面特徴を時間的に追跡する方法と、その追跡状況から運転状況を推察する方法について検討した。

3. 1 路面特徴の追跡方法

電動ビークル前方に設置したカメラで走行中の路面を撮影した。撮影した画像の1フレームを図4(a)に、撮影した画像から求めた時系列断面画像を図4(b)にそれぞれ示す。当初、路面の時系列断面画像を解析し、路肩の境界を追跡する方法を試みた。1ライン分の画像を輝度と2つの色差に分解し、小領域ごとに最新時刻と直前の画像との間で擦り合わせながら画素値を比較し、差が最小となる位置を蓄積する方法である。この方法は、道路の白線やアスファルト舗装と畦道の境目の追跡には有効であったが、特徴的なエッジを含まない路面が続く場合や、模様複雑なタイル舗装面では発散してしまい、望ましい結果が得られなかった。

そこで、本年度は画素値同士の比較ではなく、画素の水平系列から得られる折れ線グラフの特徴点(山と谷)

位置を追跡する方法を試みた。この方法ではまず、カメラから得られた水平ライン上の画素の輝度 (Y)、色差 (Cb,Cr) について、それぞれグラフにし(図5(a))、それを山と谷が数点程度になるまで平滑化する(図5(b))。こうして得られた特徴点の位置と画素値を記録し、次の時刻から得られる特徴点との間で、位置が最も近い山同士または谷同士をグループ化する計算を繰り返す。対応する点がない場合、新しい特徴点として追加するか、しばらく対応しない状態が続いた場合は比較先から抹消する。

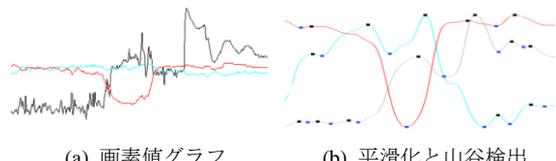
この手順の特徴は、路面の些細な変化や模様に対応して発散することを防ぐために十分な平滑化を行うことで、山谷の数が一定数に保たれるように平滑化パラメータを適応的に微調整している点である。また、後述の危険度判定の際には、各特徴点に隣接する山谷との落差を、その特徴点の有効性として参照する。

グループ化した特徴点を時間軸方向に並べると、図6(a)に示すように、水平位置変化のグラフが得られる。この水平位置は路肩や白線など道路の境界の位置に由来するため、この動き方から車線に沿った安定走行なのか、路肩に近づきつつあるのかを判定する。カメラから得られる特徴点の水平位置には、車体が走行する際のピッチ方向の振動に由来する小刻みな振動が含まれるが、時間方向の平滑化処理で取り除くことで、車体と車路の相対



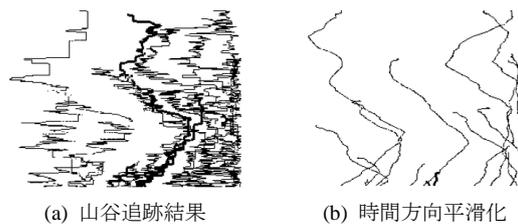
(a) カメラ画像例 (b) 時系列断面画像

図4 路面画像例とその時系列断面画像



(a) 画素値グラフ (b) 平滑化と山谷検出

図5 時系列断面画像における特徴点検出



(a) 山谷追跡結果 (b) 時間方向平滑化

図6 特徴点追跡

的な位置情報を残すことができる(図6(b)).

3. 2 危険度判定

直近の水平位置の変化から、現状の運転が続くと仮定したときの未来予測ができる。つまり図7に示すように、

- (1) 動きが少ない場合、歩道に沿って安定した走行中または停止中。安全上支障なし。
- (2) 周辺部へ発散する場合、境目から離れつつある。安全上支障なし。
- (3) 中心付近に近寄る場合、車両が境界を超える可能性あり。要注意。

特に(3)の場合、直近の変化量から越境予定時間を見積もることも可能で、その猶予時間と、特徴点ごとの有効性の高さを加味して危険度を判定する。

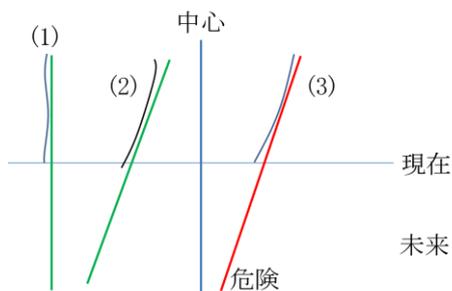


図7 特徴点の動き方と危険度

3. 3 イメージセンサ試作機

以上の画像処理を、ボード型コンピュータRaspberry Piと専用カメラモジュールから成るシステムに実装し、動作確認を行った。判定した総合的な危険度の高さに応じ、3段階で間欠を変えたブザー音により報知する。図8に試作したイメージセンサを示す。危険度判定のしきい値や予測時間等のパラメータ調整のためのスイッチ類を備えているが、運転者が日常的に操作するものではない。

電動車いすの前方テーブルに本試作機を搭載した電動ビークルを運転したところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることが確認できた。しかし、停止中に前方を人が横切ったときや、意図的な旋回を行う際にも同様に反応するため、警報に非常性が感じられなくなる



図8 イメージセンサ試作機

という課題を残す結果となった。この問題は、カメラの被写体に条件を付けず、信号処理に帰結させたことに起因すると考えている。対策としては運転者の入力内容や他センサとの連携を視野に入れているが、本プロジェクトでは具体化できなかったため、今後の課題としたい。

4. 音センサ

センサを搭載するために使用した電動車いすは、スイッチにより、最高速度が2.5km/h、4.5km/h、6.0km/hの3段階に切り替えができるようになっている。これまでに開発した音センサを取り付けた電動ビークルを運転し、車の接近を検出できるか評価した。その結果、6.0km/hの速度で運転した場合には、電動ビークル自体のモータ駆動音、走行音が大きくなり、常に車の接近と間違っ検出してしまいう課題が明らかになった。

その対策として、最高速度の切り替えスイッチの状態により、車の接近判定の閾値を変更することを検討した。電動車いす側からスイッチの状態が常時出力されているため、CAN通信によりその状態を取得し、閾値を変更するようにした。そして、再度、車の接近の評価実験を行った。評価実験の様子を図9に示す。実験した道路は、片側1車線の道路で、脇にある歩道を電動ビークルで走行した。実験した時は、1時間に100台程度の車が行き交う少ない交通量で、車の通行がない時の騒音は40~50dB(A)程度の静かな環境であった。電動ビークルを30分間走行している間に、後方から接近してきた車を、検出できた数と検出できなかった数、車の接近がないにもかかわらずセンサが反応してしまった誤検出の数をそれぞれ調べた。前方から車が接近する場合も音センサが反応する場合もあるが、この場合は、センサの反応の有無にかかわらず集計から除外した。車の接近検出結果を表3に示す。検出件数を総走行数で除した検出率は、電動ビークルの走行速度が4.5km/h時で92.6%、6.0km/h時で90.5%となった。30分間の電動ビークル走行での誤検出件数は、電動ビークルの走行速度が4.5km/h時で1件、6.0km/h時で3件という結果であった。6.0km/h走行時であっても、モータの駆



図9 音センサ評価実験の様子

動音，走行音によって常に誤検出してしまう不具合が改善できた．検出率も4.5km/h走行時と大差ない結果となった．今回，車種ごとのデータは取得していないが，トラックなどの大型車両で，エンジン音，ロードノイズが大きい場合には，距離が離れていても車の接近を検出できた．逆に低速度で走行してくる普通自動車は，かなり接近しないと検出できなかった．未検出であった計4件のうち，3件が普通自動車，1件が軽自動車であり，実験者の主観的な評価ではあるが，4件とも静かな走行音であった．検出できた車の中にはハイブリッド車も何台か含まれていた．ただし，エンジン音も聞こえていたので，電気モータのみの走行モードではなかったようである．

表3 車の接近検出結果

電動ビークル走行速度 [km/h]	検出件数 [件]	未検出件数 [件]	誤検出数 [件]
4.5	25	2	1
6.0	19	2	3

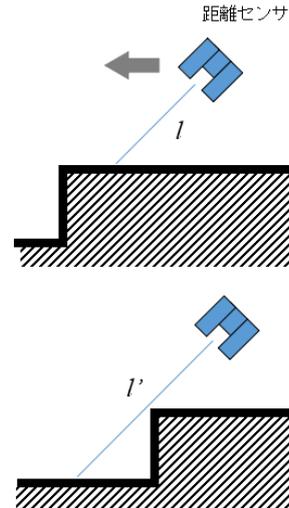


図10 距離センサを用いた溝検出の原理

5. 距離センサを用いた溝検出システム

独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) によると，2009年度から2018年11月末までの約10年間にNITEに通知された踏切で発生した電動車いすの事故は16件あり，その事故事例としては，タイヤが線路の溝にはまったことによる事故，踏切での脱輪による事故などが報告されている^[5]．踏切以外の事故事例でも路肩での脱輪が報告されており^[6]，電動ビークルの安全装置として，凸形状の障害物だけでなく，溝や下り階段などの凹んだ段差の検出も重要である．一方，近年，レーザやLEDを用いた距離センサモジュールが比較的安価で提供されている．そこで，この距離センサを用いて，溝などの凹形状の段差を検出する手法について検討した．

5. 1 距離センサを用いた溝検出の原理

図10に距離センサを用いた溝検出の原理を示す．距離センサを斜め下向きになるように電動ビークルに設置し，路面との距離を測定する．平坦な道路を走行しているときは常に路面との距離は l で一定である．溝のように凹んだ段差部にさしかかると，凹んだ部分との距離が計測されるため，計測値は $l' (l' > l)$ となるため溝が検出できる．今回は溝のように凹形状の場合を考えたが，凸形状の障害物の場合も検出可能で，その場合，計測値 l'' は $l'' < l$ となる．

実際に溝が検出可能か確認するために，台車に，路面より40cmの高さで，左右2か所にセンサを設置し，60cm先の路面との距離を測定するように，水平より約34度下に傾けた．今回使用した距離センサは，TFMini (Benewake製) で，光源に赤外LEDを使用し，ToF (Time of Flight) によって対象物との距離を測定する．測定範囲は0.3m～

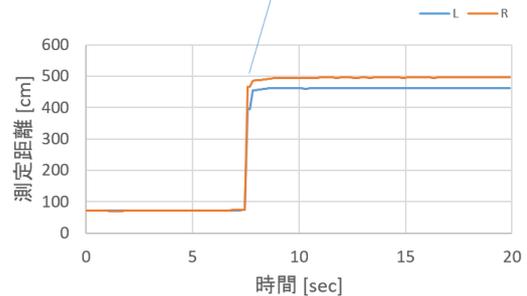


図11 下り階段での測定距離

12mで，測定精度は，6m未満で±4cm，6m～12mで±6cmである．

センサを取り付けた台車を廊下から下り階段に向かって移動させた時の測定距離を図11に示す．平坦な廊下を移動している時は，センサと床面との距離が変わらないため，測定距離は左右のセンサとも約72cmでほぼ一定であった．下りの階段にさしかかると測定距離は急激に増大した．この実験から，測定距離を常時監視することで，溝などの凹形状の段差にさしかかったことを検出できそうであることがわかった．

5. 2 後進時の脱輪防止制御

前節で述べた距離センサを電動車いすの後輪付近の左右2か所に取り付け，後進時の脱輪防止制御を試みた (図12)．距離センサは，路面から40cmの高さに設置し，60cm

先の路面との距離を測定するように、水平より約34度下に傾けた。マイコンにはmbed LPC1768 (NXPセミコンダクターズ)を使用し、センサ信号をシリアル通信によってマイコンに取り込んだ。後進時にセンサで溝を検出すると、電動ビークルが非常停止するようにマイコンのプログラムを作成した。非常停止後、電動ビークルが動けなくなってしまう状態を回避するために、運転者が操作レバーを前進側に操作しているときは、停止状態を解除して操作を有効にした。

電動ビークルを運転してシステムの評価試験を実施した。溝に向かって後進していくと、溝を検出して電動ビークルが非常停止することを確認した。停止した際の溝から電動ビークルの後輪までの距離は10回の試行の平均で40cmであった。しかしながら、操作の状況によっては、非常停止しないことがあった。原因の究明と対策を行い、システムの完成度を高めたい。

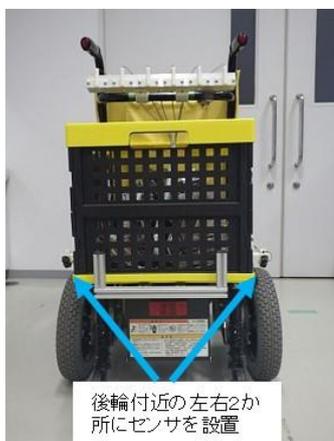


図12 後進時の脱輪防止システム

6. まとめ

これまで開発してきた安全装置のセンサシステムの改良と、距離センサを使用して溝のように凹んだ段差を検出する手法を検討した。超音波PAソナーでは、素子の取り付け位置、角度を検討し、送受信分離型の構造とした。障害物に対して斜め方向から接近するときの角度が、従来よりも広い範囲で障害物検出が可能になった。イメージセンサでは、時系列断面画像から得られる特徴点の位置を追跡し、その変化から危険度を判定する方法を試みた。電動ビークルに実装し動作確認を行ったところ、路肩等との距離の変化に反応して警報が鳴ることを確認した。音センサでは、速度の切り替え状態によって、車検出の閾値が変更するように改良した。交通量が少なく、静かな環境であれば、後方からの車の接近を約90%の率で検出できることを確認した。また、新たに、距離センサを使用して、溝のように凹んだ段差を検出する手法を提案した。電動ビークル後進時の脱輪防止制御を行い基本動作の確認をした。

これまでに開発した安全装置のセンサシステムを実用化につなげ、高齢者の生活を支える安全な電動ビークルを提供できるように取り組みを継続したい。

謝 辞

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

文 献

- [1] 久富茂樹, 藤井勝敏, 窪田直樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第10報) —センサシステムの電動車いすへの搭載—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp.18-22, 2018.
- [2] 藤井勝敏, 田畑克彦, 久富茂樹, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第7報) —イメージセンサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp.34-36, 2017.
- [3] 田畑克彦, 久富茂樹, 藤井勝敏, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第8報) —超音波フェーズドアレイソナー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp.37-40, 2017.
- [4] 久富茂樹, 平湯秀和, 田畑克彦, “安全性を考慮した高齢者用電動ビークルの開発 (第6報) —音センサー—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp.12-15, 2016.
- [5] 独立行政法人製品評価技術基盤機構
<https://www.nite.go.jp/data/000096188.pdf>
- [6] 独立行政法人製品評価技術基盤機構
<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/poster/sonota/1152.html>

情報通信機器による知的障がい者のための 協働支援システムの開発研究(第5報)

藤井 勝敏 窪田 直樹

Development of Education Apps for Special Support Schools (5th Report)

Katsutoshi FUJII Naoki KUBOTA

あらまし 特別支援学校の作業学習や、障がい者の就労支援事業の場面に、情報通信技術を取り入れることで、作業を的確に行えるようになり、自主性の向上と自立促進に寄与できると期待されている。本研究は、教員や支援者からの要望をもとに、その教育目標達成のために有用な技術を開発し実証している。本年度は、縫製作業班が使う材料と製品の在庫管理システムの改良と、iPad版レジアプリの現場実証を中心に実施した。

キーワード 障がい者支援アプリ、在庫管理システム、レジアプリ

1. はじめに

本研究は、パソコンやタブレット端末およびその周辺機器と、情報通信技術を応用することで、特に知的障がい者の方と共同で働く場面でコミュニケーション上の課題解決を図ることを目的に、5年間のプロジェクト研究として取り組んできた^[1-4]。当初は、県内特別支援学校が実施する喫茶サービスの作業学習場面で、注文を取り伝票に記入するまでの接客を支援する専用アプリを開発し、岐阜本巣特別支援学校、郡上特別支援学校、恵那特別支援学校、岐阜清流高等特別支援学校の協力を得て改良し、現在も授業で活用されている。

その一環として、作業製品の制作実習に使われる材料在庫の管理、発注業務を生徒が主体的に取り組めるように情報機器で支援してほしいとの要望があった。また、喫茶での会計や作業製品の販売を担当する生徒を支援するために開発したレジ支援システムについては、障がい者就労を支援する団体からも導入希望があり、昨年度はNPO法人レストランme,too(池田町)でのレジ導入を支援した^[5]。また、郡上市社会福祉協議会「ぼぶらの家」(郡上市高鷲)でも、レジ支援システムの評価、検討を行い、今年度はiPad版レジアプリをカスタマイズの上で、導入を支援した。本報では、これらに関して今年度行った研究開発および技術支援の内容について示す。

2. 在庫管理システム

特別支援学校が行う作業学習グループの一つに「縫製班」がある。布と糸から手工芸的に製品を作る技術の習得が主目的であるが、郡上特別支援学校では、これからの製品を作るべきか、また材料は不足していないかの

判断を、生徒の自主性に任せようとして取り組んでいる。

この判断を行うためには、前提条件としてストック内にある布や糸および完成品の現在数量を正確に把握している必要があり、これまでは、色違いを含めて20種類以上の品目の状況確認を担当教員が行っていた。昨年度までに筆者らが開発した在庫管理システムは、この作業にタブレット端末とバーコードリーダーを使い、材料や完成品の払い出し、収納の数量を入力し、PCで集計するシステムである。

2. 1 在庫管理の学習支援

本システムを利用することで在庫管理の手間を削減する当初の目的は達成されたが、手順が容易になったことで、この管理業務を生徒に任せることで、自主性を伸ばしたいとの要望を得た。そこで、在庫数を集計している管理用PCの画面を生徒が確認するときに、数量の過不足が直感的にわかるように、グラフ表現を併記するように改良した(図1)。

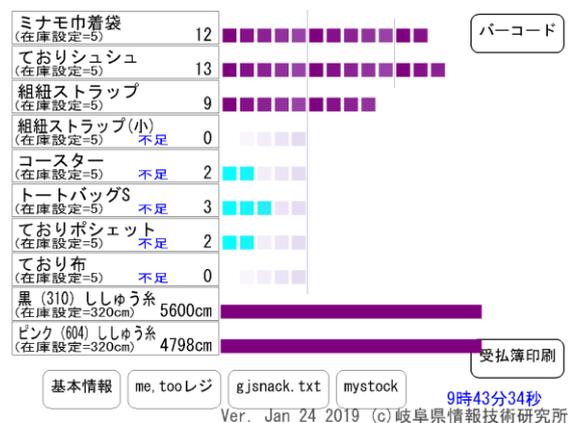


図1 在庫管理システムのグラフ表示



図2 在庫管理タブレット画面の改良

また、在庫数の変動を入力するタブレット端末側のアプリについても、従来はバーコード選択した品名を文字で表示していたところに、商品画像を表示して入力間違いを減らすように改良した(図2)。

この他に、画面の表示配色変更や操作方法の改良なども実施している。いずれも学習時にシステムを扱っている生徒らの感想や提案に基づく要望であり、改良したプログラムを現場へ還元することも、生徒らの学習への関心を高めることにつながったと教員から評価されている。

2.2 導入の効果

開発した在庫管理システムを使い授業を实践する郡上特別支援学校の報告書⁶⁾によると、「以前は(中略)、生徒は教師に確認しなければ在庫数を知り得なかった。だが、アプリの利活用により(中略)客から注文が入ったとき、在庫数を確認し、即座に販売できることを生徒自ら教師に伝える姿が見えるようになるなど、生徒による主体的な在庫管理が働く喜びや意欲を高めている」と評価されている。

この事例が示すのは、在庫数や注文数などの実績に関する情報にアクセスする適切な手段を与えることで、作業に取り組む生徒のモチベーションが高まり、生産性が向上したことである。勿論、このような教育的効果を期待して機能拡張を行った結果であるが、単純な受払管理記録を紙帳簿ではなく、取替えてパソコンで行ったことで、この拡張が実現したことも特筆すべき点である。

3. レジ支援アプリ

レジ支援アプリは、喫茶や物販の場面での釣銭や売り上げ計算を支援するタブレット用アプリである。本研究で開発したアプリは、特別支援学校の作業学習用に、授受する現金の種類と個数を画像で示す等、誰が扱っても間違いが少なくなるように工夫している。その内容が評価され、学校以外でも導入されている。

3.1 iPad版レジアプリ

本研究では当初、レジ支援アプリはAndroid版のみを開発していた。その主な理由は、既存システム¹⁾で導入したレシートプリンタや予備のタブレットを流用するためである。また、学校で利用する上で、複数の生徒が同時並行して実習できることと、操作記録を振り返り学習に活用したい等の要望に基づき、Androidタブレットを端末にして、Windows PCに情報を集約する仕組みの構成になっている。

しかし、接客支援システムを使わずレジ支援のみの利用において、この構成は冗長である。また、多くの教育機関では既にiPad導入を決めている等の状況を鑑み、



図3 iPad版レジアプリ



図4 レジアプリの実証実験

表1 Android版レジアプリとiPad版レジアプリの機能比較

	Android版	iPad版
構成機器	Androidタブレット端末(機種不問) Windows PC(ノート型等、機種不問) 各社レシートプリンタ(Windows対応なら機種不問)	iPadシリーズ端末 MFi [※] 対応レシートプリンタ (現在はEpson製 TMシリーズ一部機種に限定)
通信方式	Wi-Fi(インターネット接続は不問) PC/プリンタ間はUSBやBluetooth等任意	Bluetooth(プリンタも対応すること)
レジ端末数	タブレット端末を複数同時使用可能	1台
商品情報	Windows PCで編集、Androidにダウンロード	iPadアプリ内で設定、保管
商品画像	未対応	使用可能(iPadカメラで撮影)
売上情報	Windows PCに保存	iPad内部に保存

※MFi (Made For iPhone/iPad/iPod)



図5 商品画像ボタン

Android版と同様な支援機能に加え、売上集計や商品登録、レシート書式編集など、一般的なレジアプリと同様な機能をすべて含んだレジ支援アプリをiPad用に開発、平成30年2月からApp Storeで公開している(図3)。Android版とiPad版レジアプリの比較を、表1に示す。

3. 2 レジアプリの改善点

ぼぶらの家にレジアプリを導入するにあたり、iPad版を採用されたことを受け、最初に4月のバザーで一般公開版を試用した。しかし、直後のヒアリングにおいて、この版で想定していなかった不具合や、ぼぶらの家独自の利用方法による要望が挙がった。そこで、これらの課題を改善したカスタマイズ版を開発し、10月に開催された「たかすふるさと祭り」の出張販売レジ(図4)で改善効果を確認した。改善した項目は以下の通りである。

(1) 商品ボタンの幅を可変

一画面に表示しきれない品種数になるため、当初から実装していたスクロール表示とページ切り替えに加え、一行に並べるボタン数を3個から7個の間で設定できるようにした。数を増やせば一覧性は高くなり、配置を暗記してしまえば素早く入力できるようになるが、相対的にボタンのサイズが小さくなるため、指先でタップしにくくなる。使用者の理解しやすさと熟練によって、適度に調節する。

(2) 商品ボタンに、iPadのカメラ撮影画像を使用(図5)

個包装された商品は貼り付けられたシールで区別するため、商品入力ボタンにシールの写真を表示してほしいとの要望による。

(3) ひらがな表記に切り替え

レシートの記載は漢字と片仮名を用いるが、利用者の希望により、アプリ画面上ではすべて平仮名に表示切り替えできるようにした。

4. まとめ

特別支援学校が実施する作業学習の場面で、生徒が自主的に作業計画を立て、実行することを促すことを目的とした在庫管理システムの開発、改良と、障がい者就労

支援を目的とする支援機関において、レジ接客支援アプリの実証実験を実施し、いずれも期待された導入効果が得られたことを確認した。

また、本研究プロジェクト全体を通しての最大の成果は、知的障がい者が作業や就労する場面で当事者や介護者が抱く不安の一部は、情報通信技術を適所に導入することで解消できることを具体的に示した点である。

既報のとおり、クリップボードへの筆記の不安をタッチパネルとレシートプリンタで代替したことから始まり、手順を暗記する代わりに画面上に表示したセリフを読むことや、ヘルプボタンを準備することで安心感をもって学習に参加できる環境を構築し、実証した。

また、特別支援学校の生徒がタブレット端末を難なく使えることがわかり、レジ接客や在庫管理など、より多くの作業場面にも情報通信技術の支援が有効であることと、こうした支援技術は、学校以外の障がい者福祉の分野にも普及する可能性があることも示した。

ただし、支援技術が真に知的障がい者の支援になり得るためには、彼らが信頼する教師や支援者らに支援技術の設計意図を伝えるべく、時間をかけて現場に浸透させていくことが最も重要であったと振り返る。

本研究で試作した技術は「スマートフォン・タブレットPCの福祉分野での活用研究会」を通じ、大学、特別支援学校の障がい者福祉に関わる専門家と技術者、研究者との意見交換を経て福祉の現場への導入や、情報発信を行ってきた。今後も本研究推進の枠組みを展開し、新しい情報通信機器やサービス、新素材などの技術動向に注目しつつ、障がい者の支援に役立つ技術を開発、普及に努めていきたいと考えている。

謝 辞

本研究事業の推進に関わり、障がい者福祉の視点から多くの助言をいただいたバーチャルメディア工房篠田様、情報科学芸術大学院大学(IAMAS)山田様、郡上特別支援学校伊藤様に深く感謝します。

文 献

- [1] 藤井勝敏, 遠藤善道, “情報通信機器による知的障がい者のための協働支援システムの開発研究(第1報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第16号, pp.30-33, 2015.
- [2] 藤井勝敏, 窪田直樹, “情報通信機器による知的障がい者のための協働支援システムの開発研究(第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第17号, pp.40-43, 2016.
- [3] 藤井勝敏, 窪田直樹, “情報通信機器による知的障がい者のための協働支援システムの開発研究(第3報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp.45-48, 2018.
- [4] 藤井勝敏, 窪田直樹, “情報通信機器による知的障がい

い者のための協働支援システムの開発研究(第4報)”,
岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp.23-24,
2018.

- [5] 藤井勝敏, 窪田直樹, “福祉事業所へのレジ支援アプリ導入支援”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第19号, pp.25-28, 2018.
- [6] 岐阜県立郡上特別支援学校, “卒業後の自立までを見据えたキャリア発達を促すICTツールの開発”, (公財)パナソニック教育財団実践研究助成研究報告書, pp. 130-136, 2018.

灰色かび病警報装置の開発(第2報)

— 乾湿計型灰色かび病警報装置の試作 —

久富 茂樹 藤井 勝敏 渡辺 秀樹*

Development of Alarm Device for Gray Mold (2nd Report)

- Prototype of Psychrometric type Gray Mold Alarm System -

Shigeki KUDOMI Katsutoshi FUJII Hideki WATANABE*

あらまし トマトの生産において、深刻な問題を引き起こす地上部病害の一つである「灰色かび病」について、ハウス施設内の環境をセンシングすることにより、灰色かび病発生の警報レベルを把握できる装置を開発する。本年度は、熱電対を用いた乾湿計型灰色かび病警報装置を試作し、トマトハウス内に設置し測定を行った。また、灰色かび病の発生警報レベルと実際の発病との関係について試験を実施した。今回の判定式および閾値では、やや早い時期から警報レベルが高くなる結果となった。

キーワード 清流の国ぎふ・農畜産物ナンバーワンプロジェクト、トマト、灰色かび病

1. はじめに

岐阜県のトマト生産は生産額も多く、岐阜県の重要な園芸品目であるが、病害の発生による生産の不安定化が問題となっている。地上部病害の一つである灰色かび病は、咲き終わってしぼんだ花弁や枯れた葉に灰色のかびが付きはじめ、病斑が拡大すると、図1に示すように、茎や果実もかびで覆われて枯れてしまう。この病害の対策としては、栽培環境の改善とあわせて殺菌剤による予防防除が行われるが、この病原菌は薬剤の耐性菌が発達しやすいため、同一系統の薬剤の多用は防除効果が低下するという課題がある。本病は、施設内に蔓延すると薬剤の防除効果が著しく低下するため、早期に防除することが重要である。

灰色かび病の発生には、施設内の温度、湿度環境が大きく影響することがわかっているため、本研究では、ハウス施設内の環境をセンシングし、温度や湿度等が一定の条件を満たした場合に灰色かび病発生の警報を出力することで、本病の危険度を把握できる装置を開発する。昨年度は、使用した温湿度センサのいくつかが故障するトラブルが発生した。今年度は、耐環境性を考慮して、熱電対を用いた乾湿計型灰色かび病警報装置を試作し、トマトハウス内に設置し測定を行った。灰色かび病の発生警報レベルと実際の発病との関係について試験を実施したので報告する。



図1 トマト灰色かび病

2. 温湿度記録装置の試作

昨年度使用した温湿度センサのいくつかは、環境が高湿度状態になり、相対湿度が100%近くに達したのち故障する不具合が発生した。センサに結露が発生し故障したものと推測される。そこで、今年度は、高湿度環境でも安定した測定ができるように、シース型熱電対を用いて乾湿計型の原理で温湿度測定を行った。

試作した装置の外観を図2に示す。シース型熱電対として、ステンレス管タイプのK型熱電対と熱電対アンプモジュール (MAX31855; 分解能:0.25°C) を使用した。熱電対とアンプモジュールは二組使用し、一組は乾球温度計として使用し、もう一組は感温部にガーゼを巻き、常時蒸留水で湿らした状態にして、湿球温度計として使用した。シース型熱電対には、シースと熱電対が導通している接地形とシースと熱電対が絶縁されている非接地形が

* 岐阜県農業技術センター



図2 試作装置の外観

ある。両者を用いて環境温度を測定したが、測定値にはほとんど差がなかったため、今回の測定では、ノイズの影響を受けにくい非接地形の熱電対を使用することにした。マイコンには、mbed LPC1768 ((NXPセミコンダクターズ)を使用し、サンプリング時間を10分として測定した。測定値は、マイコンに接続したSDカードに記録するとともに、LCDに表示するようにした。また、後述する灰色かび病発生危険度を知らせるための表示灯 (LED) を取り付けた。

測定した乾球温度 t_d [°C]と湿球温度 t_w [°C]から以下のようにして相対湿度を求めた。温度 t [°C]における飽和水蒸気圧 e_s [hPa]は式(1)となる。

$$e_s = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad (1)$$

湿球温度での飽和水蒸気圧を e_{sw} [hPa]、乾湿計係数を A [K⁻¹]、気圧を P [hPa]とすると、水蒸気圧 e [hPa]は式(2)で表される。

$$e = e_{sw} - A \cdot P \cdot (t_d - t_w) \quad (2)$$

相対湿度 h [%RH]は式(3)で求めることができる。

$$h = e / e_{sd} \times 100 \quad (3)$$

今回は、 $A=0.000662$ 、 $P=1013$ の値を使用して計算を行った。

3. 灰色かび病発生警報レベル判定

これまでに岐阜県農業技術センターで実施した灰色かび病発病条件の研究結果に基づき、測定した温度、湿度から、以下のように灰色かび病発生警報レベル判定を行った。

その時の気温 (乾球温度) における飽和水蒸気圧 e_{sd} [hPa]は、式(1)より、

$$e_{sd} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_d}{t_d+237.3}} \quad (4)$$

この時の水蒸気圧 e は、式(3)より次式で求めることができる。

$$e = \frac{h \times e_{sd}}{100} = \frac{h \times 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_d}{t_d+237.3}}}{100} \quad (5)$$

この水蒸気圧が飽和水蒸気圧となる温度が露点温度 t_f [°C]であるので、式(1)より、

$$e = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_f}{t_f+237.3}} \quad (6)$$

これを t_f について解くと式(7)になり、式(5)で求めた水蒸気圧の値を使って、露点温度を求めることができる。

$$t_f = \frac{237.3 \times \log_{10}(\frac{6.1078e}{e})}{\log_{10}(\frac{e}{6.1078}) - 7.5} \quad (7)$$

乾球温度と露点温度の差を t_{diff} [°C]とし、次式のように結露危険度 R_{cnd} を定義する。 t_{diff} が閾値 α_c 未満の場合は結露危険状態、閾値以上の場合は安全状態とする。

$$R_{cnd} = \begin{cases} 1 (t_{diff} < \alpha_c) & : \text{危険} \\ 0 (t_{diff} \geq \alpha_c) & : \text{安全} \end{cases} \quad (8)$$

次式のように感染有効換算時間 T_{vi} を定義する。

$$T_{vi} = k_t \cdot R_{cnd} \cdot T_s \quad (9)$$

ここで、 k_t は各温度における菌糸伸長量を調べた実験結果から求めた温度調整係数、 T_s はサンプリング時間である。直近2日分の T_{vi} を積算し、感染有効積算時間 T_{sh_2days} を定義する。

$$T_{sh_2days} = \sum T_{vi} \quad (10)$$

感染有効積算時間の値によって、灰色かび病発生警報レベル S_{alm} を3段階で判定することにした。

$$S_{alm} = \begin{cases} 2 (T_{sh_2days} \geq \alpha_{a2}) & : \text{危険} \\ 1 (T_{sh_2days} \geq \alpha_{a1}) & : \text{注意} \\ 0 (T_{sh_2days} < \alpha_{a1}) & : \text{安全} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 α_{a1} 、 α_{a2} はそれぞれ、注意レベル閾値、危険レベル閾値である。この警報レベルに応じて、装置に取り付けたLEDを点滅させるようにした。

4. ハウス施設内での試験運転

図3に示すように、試作した警報装置をハウス施設内の2か所に設置し試験運転を実施した。センサは図4に示す風洞内に設置した。2章で述べたように、湿球温度計とする熱電対の感温部にガーゼを巻き、蒸留水が入った容器に浸かる状態にした。容器の蒸留水は測定期間中なくなることがないように適宜補充を行った。熱電対の乾湿計の他に、比較のため、温湿度センサ (HYT221: IST製) と湿度-電圧変換モジュール (TAM-H1: トウプラスエンジニアリング製) も同じ風洞内に設置し測定を行った。このセンサ、モジュールは、高湿度環境でも対応できる仕様の製品ではあるが、やや高価である。風洞は、150mm×150mm×300mmの筒状で、材質は発泡スチロールである。表面にはアルミ箔を巻いて日光を反射している。筒の端にはファン (定格入力: 6.24W, 風量: 2.9m³/min) を取り付け、風洞内部に空気が滞留しないように常時送風した。

平成30年6月4日から7月11日までのハウス内の温度を図5に、湿度を図6にそれぞれ示す。湿度-電圧変換モジュール (TAM-H1) は温度測定の機能を備えていなかったため、湿度結果のみ示している。日中気温が上昇するにつれ湿度は低下していき、夜になり気温が低下すると湿度が上昇す



図3 ハウス施設への設置

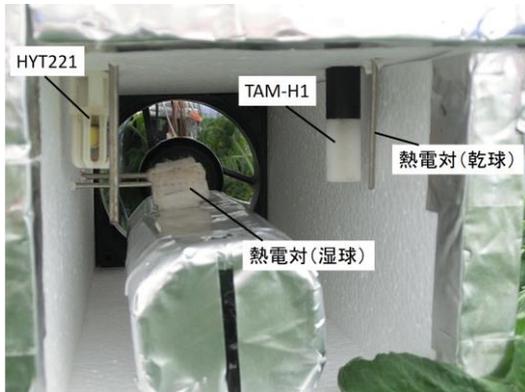


図4 風洞内に設置したセンサ

る傾向にある。7月4日から8日ころにかけて、気温が低く、100%近い湿度が続いているが、この時期に当地域では記録的な大雨が降っており、その影響が現れている。

また、警報レベルと実際の発病の対応を検討するために、数日おきに灰色かびの胞子をトマトに接種し、発病状況を観察した。測定した温度、湿度から求めた警報レベルと実際の発病との対応を図7に示す。星印は灰色かび病の発病が観察された日を示す。HYT221の測定結果から求めた警報レベルが高めになりやすく、警報レベルが早く上がり、長く継続する傾向になった。これは、高湿度状態において、HYT221が熱電対乾湿計に比べて、湿度が5%程度高く測定されたためであると考えられる。今回の実験では、実際に発病が観察されるまでも何回か警報レベルが危険を示す2になった。実際の発病を精度よく捉えることができるように、判定式や閾値の改善を図りたい。

その後、10月まで測定を続けたが、今回使用した2組のセンサ、試作機はどれも故障することなく測定を継続できた。

5. まとめ

灰色かび病発生の危険度を把握できる装置開発において、高湿度環境でも安定した測定ができるように、シース

型熱電対を用いて乾湿計を用いた温度測定を行った。得られた温度、湿度から灰色かび病発生警報レベル判定を行い、トマトハウス施設内で試験運転を実施した。6月から10月までのトマトの栽培期間中、試作した装置およびセンサは故障することなく計測を行うことができた。また、今回組み込んだ警報レベル判定結果と実際の発病との対応について試験を行った。今回の判定式および閾値では、やや早い時期から警報レベルが高くなっており、今後、判定精度が向上するように改善を図りたい。

謝 辞

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

文 献

- [1] 立正大学地球環境科学部環境システム学科
http://es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/vapor_press.html
- [2] 株式会社第一科学
<https://www.daiichi-kagaku.co.jp/situdo/notes/note105.html>

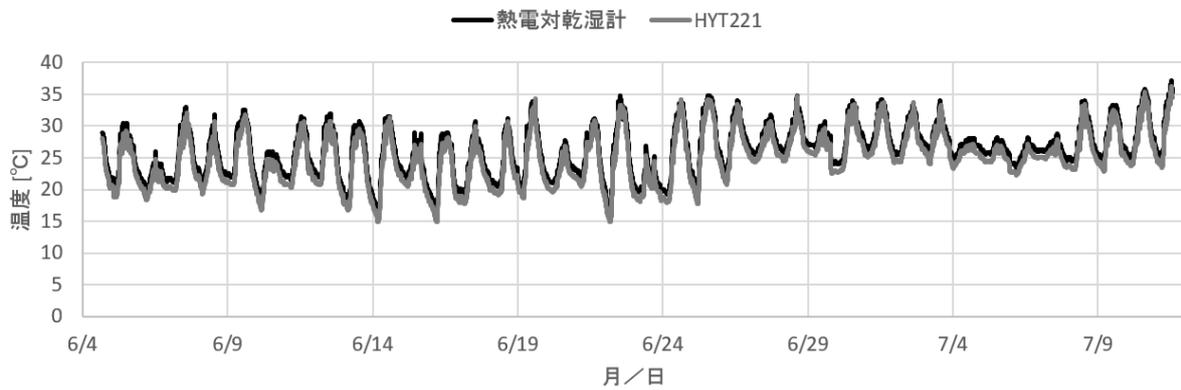


図5 トマトハウス内の温度変化（平成30年6月4日～7月11日）

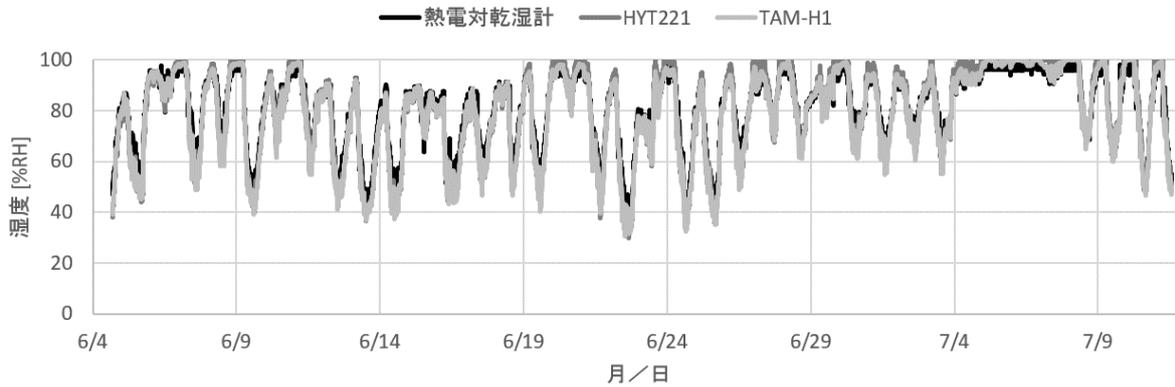


図6 トマトハウス内の湿度変化（平成30年6月4日～7月11日）

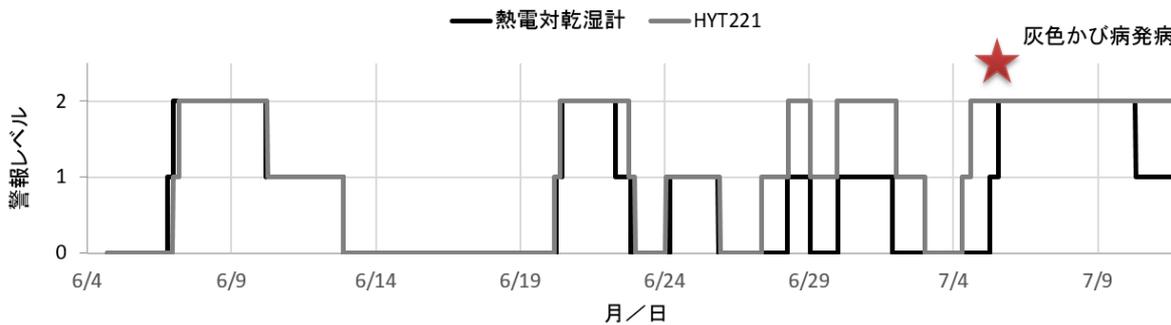


図7 警報レベルと実際の発病との対応

照度差ステレオ法による外観検査システムの研究開発(第3報)

窪田 直樹 渡辺 博己

Research of Visual Inspection System by Photometric Stereo(3rd Report)

Naoki KUBOTA Hiroki WATANABE

あらまし 岐阜県は古くから製造業が盛んであり、大小様々な製品や、それら最終製品に至る途中の各種部品が生産されている。これらの製品・部品を製造・輸送する上で、部品の表面に細かい傷・打痕等が発生すると、意匠を損ねたり、塗装の劣化が生じたりするなど、後工程で問題となる。そのため、次の工程に進む前の検査でこれらを発見することは非常に重要である。一方、これらの傷・打痕は光の当たり方によっては発見しづらく、検査に熟練を要することがある。本研究では、熟練検査者の作業軽減を図るため、照度差ステレオ法によって検査対象の表面の法線の方向を調べる手法を開発する。

キーワード 照度差ステレオ, 外観検査, 画像処理

1. はじめに

岐阜県における輸送機械器具製造業および金属製造業を合わせると、製品出荷額・従業員数とも製造業全体の1/4を超えており、重要な位置を占めている^[1]。このような製造業においては、各種製品・部品は、ある程度まとまった数(ロット)ごとに製造・出荷されるが、一部の部品に欠陥があれば、その部品を含むロット全てが欠陥扱いになることがあり、大きな損失になる。そのため、出荷前の検査は非常に重要である。このような欠陥検査項目の一つに、傷などの有無を調べる外観検査がある。傷のある部品は、意匠を損ねたり、塗装の劣化を招いたりすることがある。

現在、部品の外観検査には、カメラとコンピューターを用いた画像処理による方法と、検査者の目視による方法とがある。画像処理による外観検査は、電子部品をはじめとする小型部品の製造分野においては主流になっており、配置ズレや欠損、傷などの検出に威力を発揮している。一方、自動車関連部品のように大きな曲面を持った部品の検査は、電子部品用の画像処理をそのまま適用させることができない。そのため、ある程度大きな部品の検査は目視で行うことが主流となっている。しかし、目視による検査は、熟練を要することが多く、長時間の集中力が必要であり、疲労に伴う見落としが発生するという問題がある。このような問題の改善のためには、画像処理による外観検査の適用範囲を広くし、検査者の負荷を減少させる必要がある。

本研究では、外観検査手法の一つとして、照度差ステレオ法^[2]を採用した。照度差ステレオ法とは、照明の位置を変えながら撮影した複数の画像から、対象物表面の法線ベクトルを算出する手法である。法線ベクトルは3次元情報

を持つため、単純な輝度情報と比べ多くの情報を持っている。本研究では、この照度差ステレオ法を用いた撮影システムの開発について紹介する。

2. 照度差ステレオ法

一般に、物体の表面での反射光は、入射角と同じ角度で反射する光(鏡面反射、正反射)と、周囲に一樣に拡散する光に分けられる。後者の光の拡散はランバート反射と呼ばれ、式(1)で表すことができる。

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

ここで、

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

である。

式(1)から、光源ベクトル \hat{L} と、物体表面の反射率と照度との積 $C I_L$ が既知であれば、観測した物体表面の輝度 I_D をもとに、微小領域の法線ベクトルと光源ベクトルの内積すなわち両ベクトルがなす角度を求めることができる。

ここで、各ベクトルは3次元ベクトルであるので、図1で示すように3光源の情報があれば、式(2)のとおり法線ベク

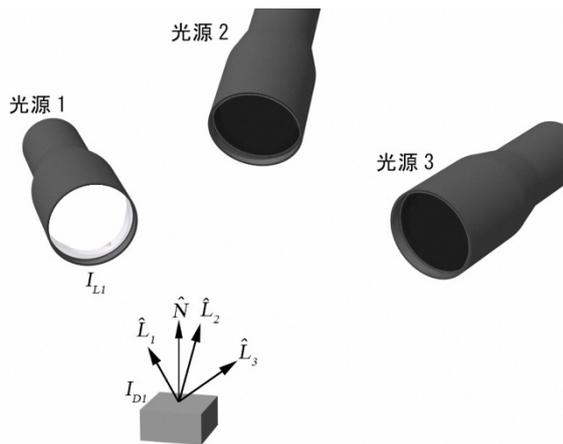


図1 照度差ステレオ法(光源1を点灯した状態)

トルを一意に推定することができる。

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{L}_1^T \\ \hat{L}_2^T \\ \hat{L}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{I_{D1}}{Cl_{L1}} \\ \frac{I_{D2}}{Cl_{L2}} \\ \frac{I_{D3}}{Cl_{L3}} \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (2)$$

ここで、

A^T : Aの転置行列

A^{-1} : Aの逆行列

である。

カメラで撮影した画像はマス目状の画素の集合であり、それぞれの画素に写る領域を上記の微小領域とみなすことで、撮影した画像のすべての画素の法線ベクトルを取得することができる。以降、撮影した画像の各画素の法線ベクトル(x, y, z)を色(r, g, b)に置き換えた画像を、照度差ステレオ画像と呼ぶ。

3. 照度差ステレオ画像の取得

3.1 撮影装置

図2に、照度差ステレオ画像撮影システムの外観を示す。中央にZ軸ステージがあり、検査対象物はこの上に静置する。Z軸ステージの直上にはカメラを、Z軸ステージの周囲にはテレセントリックレンズを装着した照明を4台設置した。テレセントリックレンズは、光源の光を平行に投影するために用いるレンズである。照度差ステレオ法では、事前に光源ベクトルを求める必要があるが、一般の照明では、光が光源から拡散するため、検査対象物の部位によって光源ベクトルの方向が異なり、法線ベクトルの算出が困難になる。そのため、照度差ステレオ法では、平行光を用いることが多い。平行光を得るためには、光源の位置を検査対象物から十分離れたところに設置する方法と、平行光源を用いる方法が考えられる。本研究では、装置全体の小型化のため、平行光源を採用した。

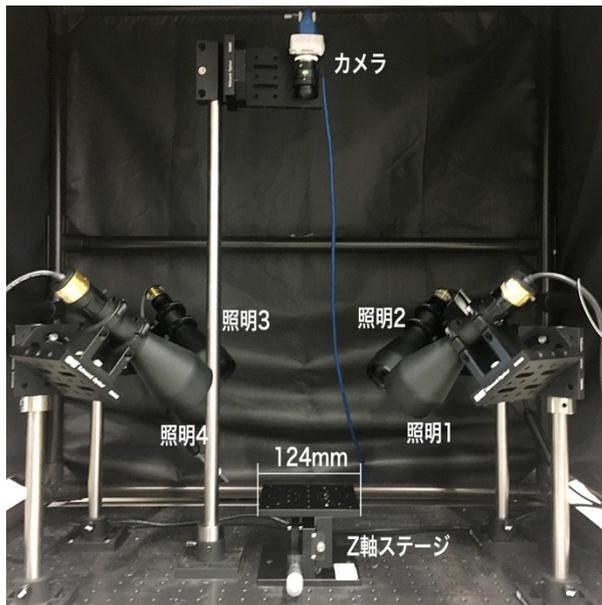


図2 照度差ステレオ画像撮影システム

撮影装置の仕様は以下のとおりである。

カメラ : EO-5012 LE(エドモンド・オプティクス・ジャパン)	
撮像素子サイズ	5.6mm × 4.2mm
有効画素数	2560×1920
階調	12ビット
フレームレート	10.01fps
映像出力	USB 3.0
レンズ : M5018-MP2(computar)	
焦点距離	80mm
開放絞り値	F1.8
照明 : ICS2(ADVANCED ILLUMINATION)	
照明用レンズ : TSテレセントリックバックライトイルミネーター(エドモンド・オプティクス・ジャパン)	

3.2 光源ベクトル推定

照度差ステレオ法では、カメラに対する光源の方向を推定することが重要である。一般的には、球体を撮影し、球体の中心座標と最も明るい点の座標から光源方向を計算する。しかし、明るい部分には広がりがあるため正確に光源方向を捉えることができない。Hayakawa^[3]は、入力画像中の相対的なランバート拡散反射率が既知の画素6点を使用することで、光源ベクトル推定を行う手法を提案している。しかし、本研究で用いる平行光源は、照明がもつ明るさのムラがそのまま平行投影されるため、均一な照度が必要なこれらの方法をとることができない(図3)。そこで、次のような手法で光源ベクトルを推定した。

図4(a)に示すような球体を撮影した入力画像から、球体の中心座標と半径を求める。ここで、入力画像に写っている球体の陽の部分と陰の部分が分離できるような2値化の閾値を求める。続いて、任意の光源ベクトルを想定し、その方向から球体に光が当たったと想定した想定球体画像(図4(b))を作る。そして、入力画像と想定球体画像を、あら



図3 標準反射板(石膏板)を撮影した画像



図6 不連続が発生した照度差ステレオ画像

素値から照度差ステレオ画像を作成することとした．このとき，式(2)は，下記のように書き換えられる．

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{L}_1^T & \hat{L}_2^T & \hat{L}_3^T & \hat{L}_4^T \\ \frac{I_{D1}}{CI_{L1}} & \frac{I_{D2}}{CI_{L2}} & \frac{I_{D3}}{CI_{L3}} & \frac{I_{D4}}{CI_{L4}} \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (3)$$

ここで，

A^+ : Aの疑似逆行列

である．

3. 4 照度差ステレオ画像から疑似3次元画像の作成

照度差ステレオ画像は，対象物表面の法線ベクトルを表しており，そこから傷や凹みを検出することができる．しかし，対象物の形状を表しているわけではないので視認性に乏しい．そこで，照度差ステレオ画像から疑似3次元画像を作成するプログラムを作成した．アルゴリズムを以下に示す．

まず，点(x, y)における法線ベクトルの各成分を $n_x(x, y)$ ， $n_y(x, y)$ ， $n_z(x, y)$ ，面の高さを $z(x, y)$ と表し，原点の面の高さ $z(x, y) = 0$ と定義する．

続いて，X軸およびY軸上の点について，次のように高さを計算する．

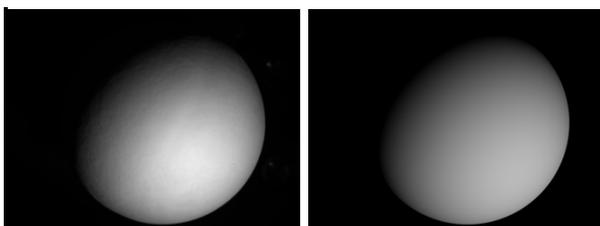
$$z(x + 1, 0) = z(x, 0) + \frac{n_x(x + 1, 0)}{n_z(x + 1, 0)}$$

$$z(0, y + 1) = z(0, y) + \frac{n_y(0, y + 1)}{n_z(0, y + 1)}$$

それ以外の点については，次のように高さを求める．

$$z(x + 1, y + 1) = \frac{z(x, y + 1) + z(x + 1, y)}{2} + \frac{n_x(x + 1, y + 1) + n_y(x + 1, y + 1)}{2n_z(x + 1, y + 1)}$$

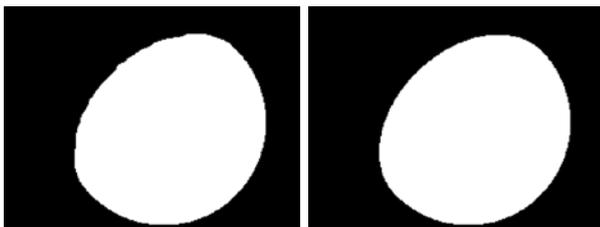
これを画面全体に繰り返すことで，対象物の3次元画像を作成した．この手法は，原点から離れるにつれ誤差が蓄積し，不正確な3次元画像になってしまう．そこで，原点を画像の中央にとることで，画像の中央付近の誤差を小さくするようにした．



(a) 入力画像

(b) 推定球体画像

図4 球体画像



(a) 入力画像

(b) 推定球体画像

図5 2値化画像

はじめ求めておいた閾値で2値化し(図5)，その差分をとる．この作業を，差分が小さくなるよう想定光源ベクトルの向きを徐々に変えながら行う．差分がほぼ変化しなくなった時点で，そのときの想定光源ベクトルを，その光源の光源ベクトルとした．

3. 3 照度差ステレオ画像の作成

照度差ステレオ法は，3枚の入力画像から対象物表面の法線ベクトルを算出することができる．しかし，照明が3台だけでは，影や鏡面反射の影響で，ランバート反射による輝度値を得られない場合がある．そこで，本研究では，4台の照明を使用している．昨年度は，撮影画像の各画素に対し，4枚の撮影画像の画素のうち最大輝度の画素を鏡面反射成分と判断して棄却し，残る3枚の撮影画像の画素から法線ベクトルを求めた．この手法は，鏡面反射の影響を抑えられる反面，光源ベクトル推定の誤差や光源ムラの影響で，照度差ステレオ画像に不連続が生じることがあった．図6に，不連続が発生した照度差ステレオ画像を示す．球体を撮影したときの照度差ステレオ画像であるが，球体の途中で不連続が発生している．今年度は，4枚の撮影画像の画

4. 結果と考察

4. 1 光源ベクトルの推定

光源からの光を当てた球体を撮影した画像から、光源ベクトルを推定した。図7に、入力画像と、各アルゴリズムで推定した光源ベクトル上の光源から照射された推定球体画像を示す。図7(a)は入力画像で、右下から光が当たっている。図7(b)は、入力画像に含まれる球体から、最も明るい点を探し、その方向に光源があると推定したときの推定球体画像である。撮影した球体は、表面につや消し剤を塗布してあったが、完全には鏡面反射を消すことができず、その影響で入力画像に比べ正面寄りから光が当たっているように見える。図7(c)は、文献[3]で紹介されている手法で推定した推定球体画像である。この手法も、鏡面反射の影響や光源が持つムラの影響で、入力画像に比べ右寄りから光が当たっているように見える。図7(d)は、本研究での手法であり、陰の入り方など入力画像に近いことが判る。ただし、本手法は計算に時間がかかるため、ムラのない平行光源や、鏡面反射がほとんど無い球体が用意できる環境であれば、文献[3]の方法が適していると考えられる。

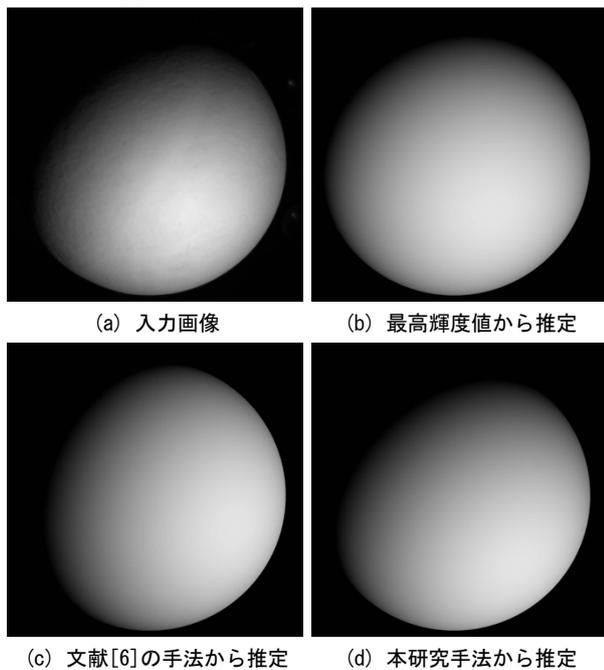


図7 入力画像と推定球体画像

4. 2 金属部品の照度差ステレオ画像

図8に、カッターの刃を各照明下で撮影した入力画像を示す。図中の矢印は、光源からの光の向きを表す。カッターの刃は金属製のため、刻印部分に鏡面反射が見られる。この4枚の入力画像のうち、照明1,2,3の3枚から作成した照度差ステレオ画像を図9に示す。照度差ステレオ画像は、画素ごとに法線ベクトル値を持っているが、ここでは、ベクトルのX成分の値を示す画像(明るいほど法線ベクトルが右向き)を図9(a)に、Y成分の値を示す画像(明るいほど法線ベクトルが上向き)を図9(b)に示す。また、3章4節で述べた

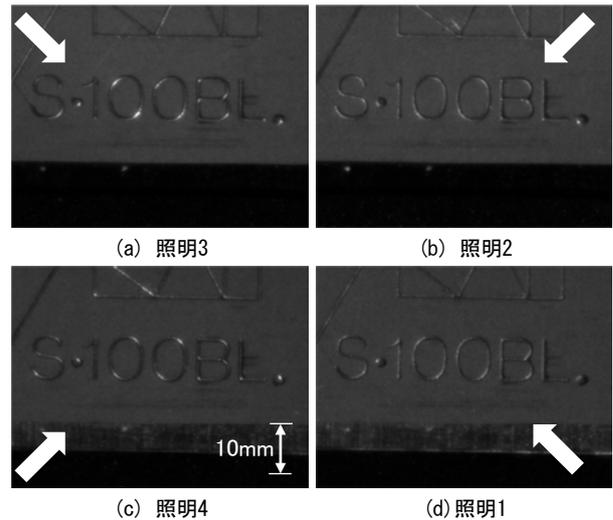


図8 カッターの刃の入力画像

方法で作成した疑似3次元画像を、図9(c)に示す。

カッターの刃の刻印は刃の表面に対して凹んでいるため、刻印を構成する線は、X成分画像では線の左側で明るく、右側で暗くならなければならない。同様に、Y成分画像では線の上側が暗く、下が明るくなるならなければならない。しかし、図9(a)の「0」の文字を見ると、文字の左上部分、右下部分は暗くなっており、明るい部分がない。また、左下部分、右上部分についてはその逆である。これらは、鏡面反射の影響で正しく法線ベクトルを推定することができなかつたためと考えられる。また、図9(c)を見ても、誤差が累積しているため、カッターの刃の形状が再現できていない。

図10は、昨年度のアルゴリズム(4枚の画像上の各画素において、最大輝度を持つ画素を除く3画素から法線を求める)で作成した照度差ステレオ画像である。図9と比べると、刻印を構成する線の上下・左右に明暗の領域が正しく出て

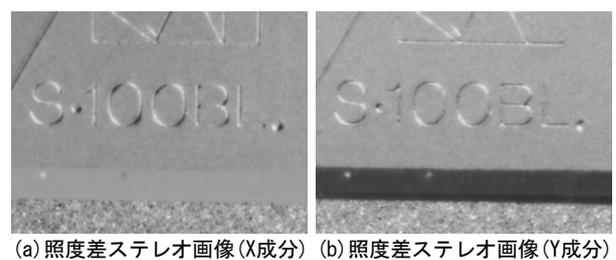
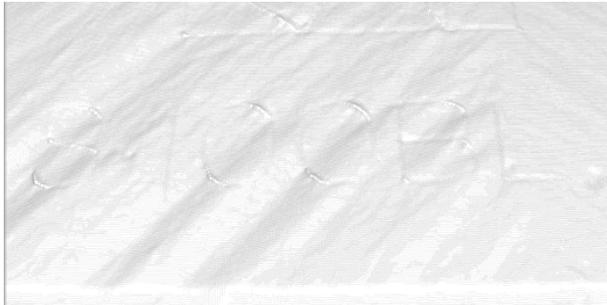


図9 入力画像3枚で作成した照度差ステレオ画像



(a) 照度差ステレオ画像 (X成分) (b) 照度差ステレオ画像 (Y成分)



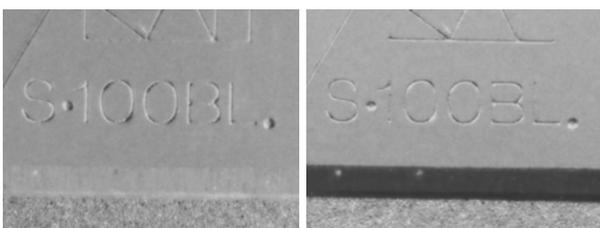
(c) 照度差ステレオ画像から作成した3次元画像

図10 昨年度のアルゴリズムで作成した照度差ステレオ画像

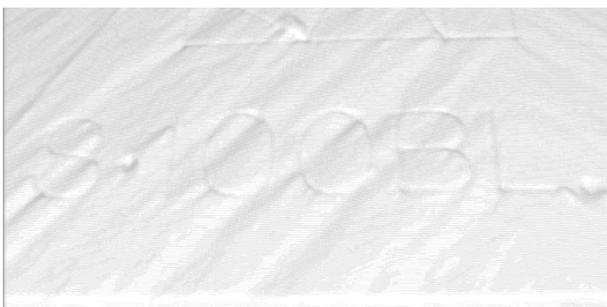
いるが、その一方で明暗が不連続になっている。図10(c)の疑似3次元画像を見ると、図9に比べるとカッターの刃の平坦さが出ているが、照度差ステレオ画像の不連続部分が目立っている。

図11に、本年度のアルゴリズム(4光源ベクトルの疑似逆行行列から法線を求める)で作成した照度差ステレオ画像を示す。鏡面反射の影響はまだ残っているが、刻印を構成する線の上・左右の明暗は正しくできている。また、疑似3次元画像についても、刻印が読み取れるまで再現されている。

疑似逆行列を利用する方法は照明の数が増えても対応ができるので、照明の数を増やすことでより精度の高い照度差ステレオ画像が得られるのではないかと予想される。

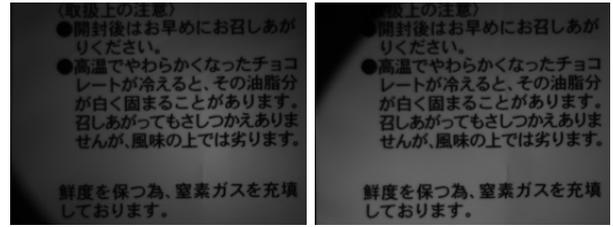


(a) 照度差ステレオ画像 (X成分) (b) 照度差ステレオ画像 (Y成分)



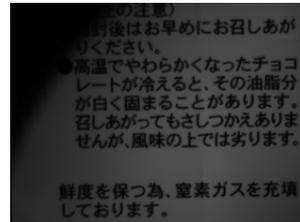
(c) 照度差ステレオ画像から作成した3次元画像

図11 本年度のアルゴリズムで作成した照度差ステレオ画像

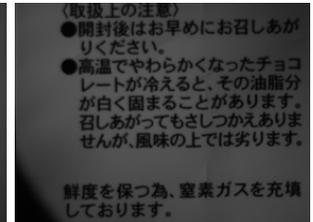


(a) 入力画像(照明3)

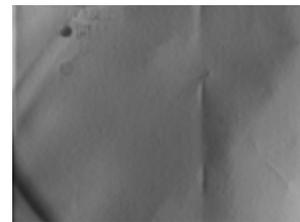
(b) 入力画像(照明2)



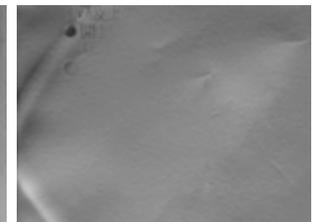
(c) 入力画像(照明4)



(d) 入力画像(照明1)



(e) 照度差ステレオ画像 (X成分)



(f) 照度差ステレオ画像 (Y成分)

図12 フィルムの照度差ステレオ画像

4. 3 フィルムの照度差ステレオ画像

図12に、食品包装フィルムを切り取った物の照度差ステレオ画像を示す。フィルムには文字が印刷されているが、印刷には凹凸がほとんど無いため、照度差ステレオ画像では文字が消えている。そのため、文字に隠れて見えづかったフィルムの折り目や凹凸を容易に発見することができる。

5. まとめ

1台のカメラと4台の平行光源を照射する照明を利用し、照度差ステレオ画像を取得するシステムを構築した。

このシステムを用いて、各照明の光源ベクトルを算出するアルゴリズムを開発した。また、多少の鏡面反射がある対象物でも照度差ステレオ画像を得ることができた。これにより、平面に近い金属部品、プラスチック部品や、印刷のある部品の表面の凹凸などを調べることができるとがわかった。

文 献

- [1] 平成26年工業統計調査, 岐阜県環境生活統計課.
- [2] Robert J. Woodham, Photometric method for determining surface orientation from multiple images. Optical Engineering 19(1980)139-144.
- [3] Hideki Hayakawa, Photometric stereo under a light source with arbitrary motion, Vol. 11, No. 11, J. Opt. Soc. Am A

予防・健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究 — 股関節機能回復の目標設定支援を目的とした床反力波形解析と Webアプリケーションの開発 —

曾賀野 健一 青木 隆明*

藤井 勝敏 成瀬 哲哉 棚橋 英樹

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

- Floor reaction force waveform analysis and development of Web
application for the purpose setting support of hip joint function recovery -

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI*
Katsutoshi FUJII Tetsuya NARUSE Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究は、運動器機能疾患の中でも近年急増している股関節症例を対象とし、股関節症例にみられる現象から股関節機能の安定性を定量的に説明することを目的としている。今年度は、股関節機能の評価パラメータの解釈を深め、機能回復の目標設定に資する情報を提供するための床反力波形解析を行った。また、自身の股関節機能の安定性評価に関わる情報を手軽に確認可能な技術を確立するため、Web機能を用いてデータベースサーバーに格納されている股関節機能の安定性評価に関わる情報を取得・可視化する機能を試作した。

キーワード 予防, 健康増進, 股関節機能, 床反力波形, Webアプリケーション

1. はじめに

加齢や生活習慣（運動不足、肥満等）により、関節や筋肉等の運動器機能が低下すると、日常生活の様々な動作が制限され、躓く、転倒等の事故に至るリスクが高まる。運動器機能の低下はロコモティブシンドローム（以下、ロコモという）と呼ばれ、要介護の主たる原因となっている。運動器機能の低下は、高齢者に限られることはなく、近年は若い世代も含めてロコモ予備軍が増えているといわれている。日本整形外科学会の調査では、ロコモの人口は予備軍を含めると4,700万人と試算されている^[1]。ロコモの症状が出てからケアするのではなく、若い頃からも意識し、発症前にその兆候を捉えて早期に介入する「予防」の必要性が社会的にも高まっているが、ロコモの兆候は如何なる方法で説明できるのか、これまでに明確な指標は存在しなかった。そこで当研究所では、これまでに、運動器機能疾患の中でも近年急増している股関節症例を対象とし、症例の発症につながると考えられる情報支援を目的として、股関節機能の安定性に関わる情報を自分自身で手軽に計測・

蓄積し、股関節機能の安定性を定量的に説明可能な技術に関して研究を進めてきた。今年度は、股関節機能の評価パラメータの解釈を深め、機能回復の目標設定に資する情報を提供するため、段昇降時の床反力波形解析を行った。また、自身の股関節機能の安定性評価に関わる情報を手軽に確認可能な技術を確立するため、Web機能を用いてデータベースサーバーに格納されている股関節機能の安定性評価に関わる情報を取得・可視化する機能を試作したので報告する。

2. 股関節機能の安定性評価における課題

股関節機能の安定性評価に関しては、股関節機能の安定性を定量的に説明することを目的に、これまでに、簡易な床反力計測装置（バランスWiiボード：任天堂社製）を用いて、静的姿勢保持（両脚立位、片脚立位）と動的動作（段昇降、歩行）の全4種類の姿勢保持と動作を行った場合の床反力時系列情報を取得・解析し、データベースサーバーに蓄積する床反力取得・解析システム（図1）を開発した。このシステムの内容については、過去の研究報告書を参考にされたい^[2,3]。

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

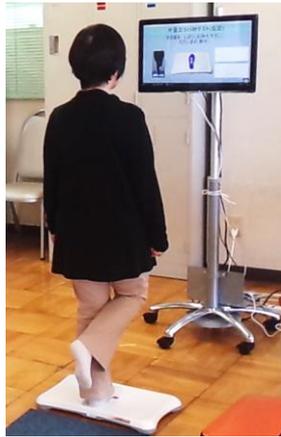


図1 床反力取得・解析システム

この床反力取得・解析システムを用いて、前年度までに股関節症例と非症例のサンプルを収集し、股関節症例群と非症例群のデータ分布傾向を統計的に分析した。この分析結果に基づいて、股関節症例群に対し重要度の高いパラメータとして導かれた情報を採用し股関節機能の安定性を評価することが可能である。

股関節症例群に対し重要度の高いパラメータと内容は表1のとおりである。

表1 股関節症例群にみられる重要度の高い情報

項目	内容
TdX (両脚立位) : ふらつき	COP (※) 総軌跡長 (側方)
RX (両脚立位) : 偏り	荷重割合 (側方)
TdZ (片脚立位) : がくつき	床反力の総変化量
TdX (段昇降) : 昇段時の動揺	COP 総軌跡長 (側方)
TdZ (段昇降) : 昇段の力強さ	床反力の総変化量
TdX (歩行) : 歩行時の動揺	COP 総軌跡長 (側方)
TdZ (歩行) : 歩行の力強さ	床反力の総変化量

(※) COP : 足圧中心 (Center of foot Pressure)

(注) 片脚立位における床反力の総変化量は、サンプリング時間ごとに示す床反力変化値 (絶対値) の積分値である。段昇降と歩行における床反力の総変化量は、単脚支持期 (片側の脚で上体を支える時期) の峰-谷間を対象としサンプリング時間ごとに示す床反力変化値 (絶対値) の積分値である^[3]。

ただし、動的動作に関しては、段昇降もしくは歩行のパラメータを用いることにより、全5種類のパラメータを採用し股関節機能の安定性を評価することとした。これらのパラメータを視覚的に確認しやすい方法としてレーダーチャートを用いた可視化機能を構築した (図2)。この評価手法により、同年代の平均値に対して、自身の状態がどの位置にあるのかを把握することが可能である。平均値より外側に位置する程、良好であることを示している。また、右脚と左脚の評価を色分け表示しており、左右のバランスも視覚的に確認可能である。

段昇降の力強さに関するパラメータは、昇段時の床反力の変化に注目し評価を行っている。このとき、軸脚の昇段時から反対脚が交差するまでの時期において、床反力の変

化を評価することも臨床的に重要視される。しかし、これまでの評価機能では、このような床反力の変化を評価することができない課題が残されていた。

また、図2の可視化機能は、Microsoft Visual Studioを用いて開発しており、開発したプログラムを実行可能なパソコンの環境と実行プログラムが存在しなければ動作しない。すなわち、時間や場所に制約されず、必要な情報を手軽に取得することができなかった。



図2 股関節機能の安定性評価

3. 床反力波形解析

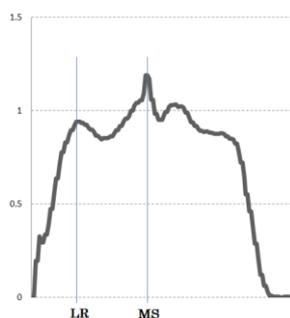
2に記述したように、段昇降の力強さに関するパラメータの解釈を深める必要がある。そのため、段昇降における軸脚の昇段時から反対脚が交差するまでの時期を対象とした床反力の変化を評価可能な機能を加えることを目的として、段昇降の床反力波形解析を行った。

臨床的所見では、段昇降における軸脚の昇段時から反対脚が交差するまでの時期を対象に、床反力の変化を評価する場合、床反力波形の平坦性と多峰性に注目する。そこで本研究では、床反力の変化を評価するため、歩行動作に準じてローディングレスポンス後期 (反対脚の離床、以下LRという) からミッドスタンス前期 (反対脚の交差、以下MSという) までの単脚支持期 (片側の脚で上体を支える時期) に注目し、床反力波形に平坦性がみられる場合には「平坦型」、床反力波形に多峰性がみられる場合には「動揺型」に分類する方法とした。

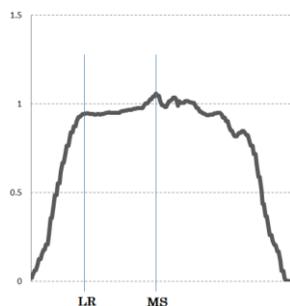
段昇降の床反力波形は、通常 非症例の場合、図3 (a) のようにLR時とMS時に峰を呈する歩行時の二峰性に準じた形状を形成するが、床反力波形に平坦性がみられる場合には、図3 (b) のようにLR時とMS時の峰の高さが減少している。これは、軸脚の接床時に荷重をかけて踏み込むことが困難であり、反対脚に働かせる推進力を低減し軸脚の荷重負担を軽減する作用が考えられる。床反力波形に多峰性がみられる場合には、図3 (c) のようにLRからMSまでの区間に1箇所以上の峰が観察される。これは、軸脚で上体を支持することが困難である場合に、転倒を回避するために床平面に対して鉛直方向に荷重の変化が大きく現れる墜落的な動揺が生じる作用が考えられる。図3 (b) や図3 (c) のような現象がみられる場合には、股関節機能の低下が疑われ、転倒のリスクが高まる要因とされる。

図3 (b) のような床反力波形における平坦性の判定では、サンプリング時間ごとに床反力変化量（絶対値）を求め、単脚支持期におけるすべてのサンプリング時間について所定の閾値を超過しない場合に「平坦型」に分類した。図3 (c) のような床反力波形における多峰性の判定では、サンプリング時間ごとに床反力変化量（絶対値）と床反力変化量（符号付）を求め、床反力変化量（絶対値）が所定の閾値を超過し、かつ床反力変化量（符号付）が正から負に変化するポイントを検出し、単脚支持期において1箇所以上のポイントを有する場合に「動揺型」に分類した。

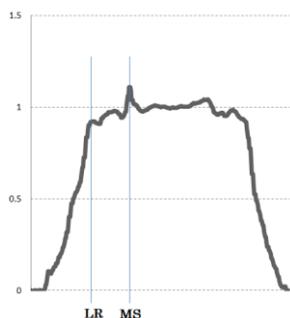
このような力強さ（段昇降）の評価における型の情報を提供することにより、リハビリ等における股関節機能の回復目標を設定するための検討材料になるのではないかと



(a) 通常（非症例）



(b) 平坦型



(c) 動揺型

図3 段昇降時の床反力波形と「型」の分類
(横軸：時間 縦軸：床反力)

縦軸の数値は、被験者の体重値を用いて標準化した値を用いた

考えている。たとえば、「平坦型」と判定された場合には、LRからMSまでの時期を対象として、膝立ち位や片脚支持での前方重心移動に関する運動介入等を検討できる。「動揺型」と判定された場合には、LRからMSまでの時期を対象として、膝立ち位や片脚支持でのリーチ動作等、上体を支持する機能を増強するための運動介入等を検討できる。

4. Web機能開発の構成

2に記述したように、これまでの床反力取得・解析システムでは、自身の股関節機能の安定性評価情報を手軽に取得することができなかった。そこで、Webブラウザの機能を用いて、3の床反力波形解析に基づく評価機能を加えた自身の股関節機能の安定性評価情報を手軽に参照する仕組みを確立することとし、必要な環境を整備した(図4)。



図4 Web機能開発の構成

Webブラウザを利用するためにWeb Serverを設置、Web Server SoftwareにはApache Tomcatを導入し、開発環境にはMZ Platform^[4]を利用した。このMZ Platformの機能として用意されているMZ Platform Servletを用い、Apache Tomcatに所定のファイル (MZ.war) を配備することにより、Webアプリケーションを構築、利用することが可能である。また、Webアプリケーションから床反力取得・解析システムで取得・解析した情報を蓄積するためにデータベースサーバーを用意し、データベースサーバーのDBMS (DataBase Management System) にはMySQLを利用した。MZ Platformを用いて開発したWebアプリケーション上で、MySQLのサーバー、ドライバ、ユーザー、パスワードの情報を設定することでMySQLに接続し、データベース内の所定のテーブルに格納されている情報を取得することが可能である。

5. Webアプリケーションの試作

4で整備した開発環境により、MZ Platformを利用し、2に記述した股関節機能の安定性評価を可能とするWebアプリケーションを試作した。Webアプリケーションの試作にあたっては、以下の要求仕様に基づいて必要となる機能を設計・構築した。

【要求仕様】

- ・被測定者IDの指定
- ・指定した被測定者IDに対する測定履歴情報の取得
- ・測定履歴情報はMySQLの所定のテーブルから取得
- ・取得した測定履歴情報をWebアプリケーション上にリスト形式で表示
- ・測定ID（レコード）の指定
- ・指定した測定IDに対する床反力解析情報の取得
- ・床反力解析情報はMySQLの所定のテーブルから取得
- ・取得した床反力解析情報を用いて5軸のパラメータ値（得点）を算出
- ・パラメータ値（得点）は、年代別のデータ分布傾向に基づいて算出
- ・算出したパラメータ値（得点）をレーダーチャートに反映
- ・力強さ（段昇降）の評価に関しては、床反力の波形形状に基づいて型を分類・表示することにより、評価の内容を補完（機能回復の目標設定のための情報提供）

以上の要求仕様に基づいて試作したWebアプリケーションを図5に示す。

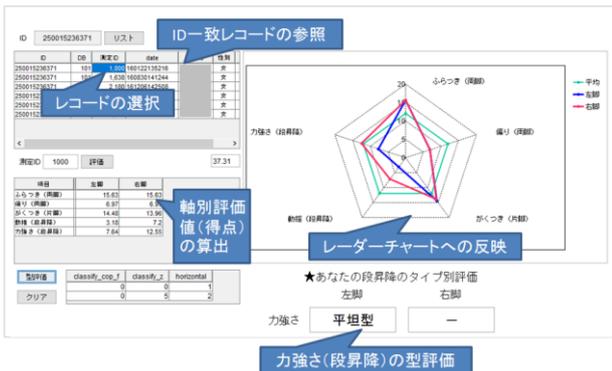


図5 Webアプリケーションの画面構成

6. まとめ

股関節症例にみられる現象から股関節機能の安定性を定量的に説明する段昇降の力強さに関するパラメータの解釈を深めるため、臨床的所見に基づいて床反力の波形解析を行い、軸脚の昇段時から反対脚が交差するまでの時期を対象に床反力の変化を「型」を用いて評価する手法を考案した。この評価手法を用いることにより、昇段能力の低下に気づきを与え、能力の回復を図るための目標設定に資する検討材料として活用できるのではないかと考えている。

自身の股関節機能の安定性評価に関わる情報を手軽に確認可能な技術を確立するため、前年度までに開発した床反力取得・解析システムを用いた股関節機能の安定性を評価するしくみをベースに、段昇降の力強さに関する評価手法を加えたWebアプリケーションを試作した。このWebア

プリケーションを利用することにより、データベースから取得した情報をレーダーチャートを用いて得点化表示することで、自身の評価が同年代の平均値と比較し、どの程度の位置にあるのか等を視覚的に把握することができる。今回試作したWebアプリケーションを活用することにより、自身の股関節機能の状態を手軽にチェックすることが可能となる。

本研究は、本年度を以て満了となる。これまでの研究開発期間において、近年急増している股関節機能の低下につながると思われる情報を導き、股関節機能の安定性に関わる評価情報を自身で手軽に確認可能な機能を実現することができた。この機能を実装した床反力取得・解析システムが、県内の医療機関が実施する運動器検診に導入されるに至り、本研究成果は、股関節機能の低下に気づきを与えることができる手軽なツールとして有用であると考えている。

股関節機能の低下から転倒骨折・要介護という大事に至る前に、日頃から自身の股関節機能の状態を知り、股関節機能の低下が疑われる場合には、機能低下の要因に適応した早期介入を行うことが重要である。このような予防・健康増進の視点に立ち、本研究成果が一層活用され情報支援の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、臨床的知見に基づいた研究指導ならびに床反力取得・解析システムの試用にご理解とご協力をいただきました岐阜大学医学部附属病院 リハビリテーション部の皆様、社団医療法人 かなめ会 山内ホスピタル リハビリテーション部の皆様に深く感謝の意を表します。

文献

- [1] 公益社団法人 日本整形外科学会, “新概念「ロコモティブシンドローム (運動器症候群)」”, <http://www.joa.or.jp/jp/public/locomo/>
- [2] 曾賀野健一, 青木隆明, 渡辺博己, 松原早苗, 竹原正矩, 棚橋英樹, “予防, 健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第18号, pp. 49-53, 2016.
- [3] 曾賀野健一, 青木隆明, 竹原正矩, 渡辺博己, 成瀬哲哉, 棚橋英樹, “予防, 健康増進に資するパーソナル・バランスケア技術に関する研究 一昇段動作を対象とした床反力時系列情報の解析と股関節機能低下因子に関する考察—”, 岐阜県情報技術研究所 研究報告第19号, pp.47-50, 2017.
- [4] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 製造技術研究部門, “MZ プラットフォーム ユーザー会”, <https://ssl.monozukuri.org/mzplatform/>

距離画像センサを用いた作業動作解析技術の研究

—再帰性反射マーカによる組立作業の分析—

渡辺 博己 浅井 博次 生駒 晃大 棚橋 英樹

A Study on Working Motion Analysis Technology Using Depth Sensor - Operations Analysis System for an Assembly Work by Both Hands with Retroreflective Markers -

Hiroki WATANABE Hirotugu ASAI Akihiro IKOMA Hideki TANAHASHI

あらまし カイゼン活動における作業時間計測を支援するために、距離画像センサを用いた作業動作解析技術の開発を目指している。本研究では、両手首に装着した再帰性反射マーカを検出することにより作業時間の計測が可能な作業分析システムを開発した。実験室環境において組立作業を模した実験を行い、システムの動作を検証した結果、計測した作業時間から複数のグラフを作成し、作業時間の推移が容易に把握できることを確認した。また、時間分解能を検証した結果、約47.6ミリ秒間隔で時間計測が可能であることを確認した。

キーワード カイゼン、作業分析、距離画像センサ、再帰性反射マーカ、作業時間計測

1. はじめに

製造業の作業現場では、生産性向上のために積極的に作業カイゼンに取り組み、生産工程の効率化を図っている。作業カイゼンの手法には、IE (Industrial Engineering) [1]と呼ばれる工学的手法があるが、IEを用いた作業カイゼンにおいて、最初に取り組みなければならないのが現状分析である。カイゼン担当者は、ストップウォッチやビデオカメラを持って作業現場に張り付き、作業者の作業状況を観察し、作業を構成する各動作にどの程度の時間を要しているのかを調査する。しかし、この調査には、膨大な時間と手間を要するだけでなく、計測ノウハウを有する人材の育成が必要であり、これらに係る人件費等の問題から、現状分析に至る前にカイゼン活動が停滞することも少なくない[2]。また、カイゼン活動を支援するシステム[3,4]が市販されているが、撮影した動画を再生しながら動作を登録する必要があるため、多数の工程から構成され、完了するまでに時間を要する作業に対しては、効率的なカイゼン活動を行うことが困難である。

カイゼン活動支援を目的として、画像処理技術を用いたシステムも提案されている。板倉らは、家電製品の組立作業に従事する作業者の頭と両手にカラーマーカを装着し、マーカ軌跡データのパターンマッチングにより、定型作業と異なる作業の発見を行っている[5]。高橋らは、基板検査装置の組立作業において、距離画像センサにより取得した人物領域特徴量から5つの姿勢に分類することを試みている[6]。しかし、これらのシステムは、ムダな作業やムリな

姿勢の発見を目的としているため、動作単位の作業時間計測には適用することができない。

一方、作業時間計測が可能な作業分析システムも提案されている。熊谷は、安価な距離画像センサである Microsoft社の Kinect を用いて、内蔵 API を利用することにより作業者の関節位置を計測し、動作単位の作業時間分析手法を提案している[7]。しかし、Kinectの内蔵 API は、人物の正面から撮影した映像を対象として関節位置を推定するため、作業環境によっては、作業者の前方にセンサの設置場所を確保できない場合がある。また、我々は、俯瞰可能な位置に Kinect を設置することにより、距離画像による背景差分から人物領域を検出し、身体部位の形状特徴を抽出することにより、作業環境における両手位置を求め、動作の始点から終点までの移動時間を計測することにより、作業時間を計測するシステムを試作した[8]。しかし、背景が変化する作業環境においては、人物領域の検出が困難となり、両手位置を正確に求められない等の課題があった。

そこで、本研究では、再帰性反射マーカを利用した作業環境の変動にロバストな作業分析システムを開発した。システムでは、マーカに再帰性反射材を使用することにより、Kinectの赤外線カメラ映像における高輝度領域として、容易に抽出することが可能である。また、抽出したマーカの位置情報から、動作の開始・終了を検出することにより、容易に作業時間を計測することが可能である。以下、開発したシステムの詳細について記述するとともに、実験室環境において、組立作業を模した実験を行ったので、その結果について報告する。

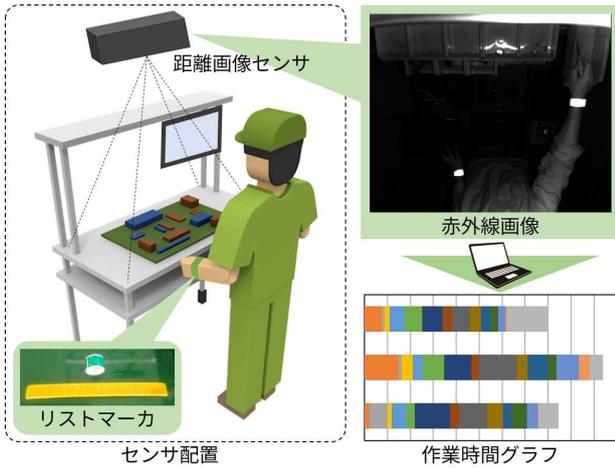


図1 提案システムの構成

2. 作業分析システム

2.1 システムの概要

図1に開発したシステムの構成を示す.本システムでは,作業台の作業面を俯瞰するように設置した Kinect を用いて,作業者の両手首に装着した再帰性反射マーカの位置と時刻を測定する.また,測定対象となる動作の始点,または終点を含むように,取得画像上でマーカを検出するための測定エリアを配置し,エリアの大きさ,及び通過順序等を予め設定しておく.

システムは,マーカの各測定エリアにおける通過時刻を分析し,通過時間差を動作時間として作業時間を計測する.分析処理は,マーカ候補領域抽出,マーカ領域左右判定,測定エリア通過判定から構成される.以下に,各処理についての詳細を述べる.

2.2 マーカ候補領域の抽出

マーカには,金属の薄板が中に入った巻き付け型のものを使用し,両手首用として色の異なる再帰性反射テープを貼付する.再帰性反射材からなるマーカに赤外光を照射し,その反射を赤外線カメラで撮影した場合,マーカ領域は,高輝度領域として取得することが可能である. Kinect には,距離画像を取得するための赤外線 LED と赤外線カメラが装備されており,本稿では,赤外線画像から高輝度領域を取得することにより,マーカ抽出処理のロバスト性を高めている.また,巻き付け型のマーカを手首に装着し,俯瞰撮影した場合,手首が回転してもほぼ同一の形状としてマーカを抽出することが可能である.

マーカ候補領域の抽出処理では,まず,取得した赤外線画像における高輝度領域が抽出されるよう2値化し,領域外周の輪郭を抽出する.次に,抽出した輪郭を直線近似して輪郭線を求め,輪郭線数が4となる凸四角形領域をマーカ候補領域として抽出する.図2に,本システムで取得したカラー画像,距離画像,赤外線画像,及びマーカ候補領域の抽出例を示す.

2.3 マーカ領域の左右判定

マーカ領域の左右判定では,マーカ候補領域の中心位置に対応するカラー画像の画素位置を求め,対応画素を中心とした領域色と,予め設定した各マーカの基準色を比較することにより判定する.



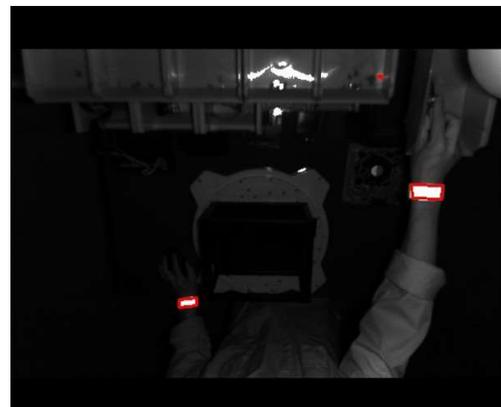
(a) カラー画像



(b) 距離画像



(c) 赤外線画像



(d) マーカ候補領域(赤枠)

図2 取得画像と抽出したマーカ候補領域の例

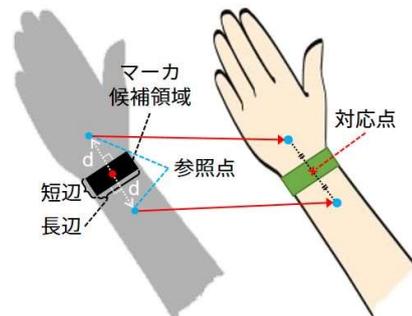
Kinectの赤外線画像における画素とカラー画像における画素の対応関係については、距離画像のDepth値に基づいて算出することができる。しかし、図2(b)に示すとおり、同図(c)の輝度値の高い画素については、Depth値を取得できないため、マーカ候補領域内の画素位置をカラー画像上に再現することができない。そこで、以下のとおり、カラー画像における画素位置を求める。まず、図3(a)に示すように、マーカ候補領域において長辺と短辺を求め、同領域の中心点から長辺に対して垂直となる2つの方向に、短辺の定数倍の長さ d となる位置に参照点を求める。次に、各参照点について、カラー画像における対応画素位置を取得し、これらの中心をマーカ候補領域のカラー画像における対応点として算出する。同図(b)に赤外線画像における参照点の抽出例を示す。

マーカ候補領域色の判定処理については、カラー画像における対応点を中心とした 7×7 の領域内の画素値をHSV表色系に変換し、色相値(Hue)のみを用いて基準色と比較する。比較処理では、領域内の画素の8割以上が基準色のしきい値以内であれば、該当マーカの領域色であると判定する。図4に、図2(a)のマーカ装着時のマーカ領域の判定結果を示す。判定処理では、図3(b)上部の小領域についても基準色と比較し、マーカ領域かどうかを判定する。結果として、マーカ領域色と同色系の円領域をマーカ領域の対応点として示しているが、マーカ以外の領域は除外され、マーカ領域の位置が正確に表示されていることが分かる。なお、図4のカラー画像は、距離画像におけるDepth値から再構成したカラー画像であり、各画素については、カラー情報だけでなくDepth情報も保持している。また、マーカの基準色については、設定を容易に変更できるようにマウス操作のみで色相値分布の取得が可能なインターフェース(図5)を開発し、予め上限値、及び下限値をしきい値として設定している。

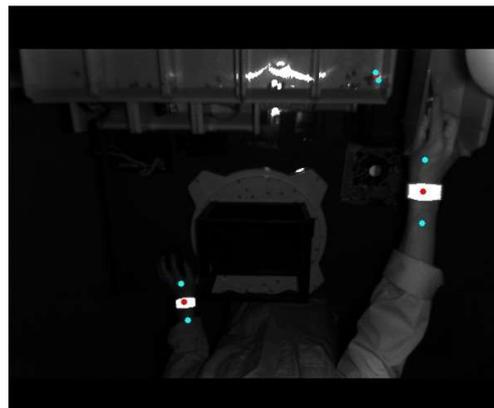
2.4 マーカの位置検出

本システムにおいては、マーカを検出する測定エリアを取得画像上に複数配置し、前節で左右判定されたマーカ領域の対応点を測定エリア内で検出した際に、その位置と時刻を各測定エリアに対して取得することにより、エリア間の検出時間差を動作時間として計測する構成とする。また、任意の部品に対して「取る」、「運ぶ」等の動作の始点、終点位置を各測定エリアに内包するよう設定することで、作業全体を構成する各作業工程の単位動作(作業動作)として作業時間を計測することが可能である。なお、本稿では、図6に示すように、作業の構成を3つの階層に分け、作業時間を計測している。

図7に、本システムにおける作業時間計測時の画面を示す。画面は、マーカの検出状況と測定エリアを表示する映像表示領域と、作業の進捗状況を示すツリービューから構成される。また、ツリービューは、作業全体を管理するトップノード、作業指示書等の各作業工程を管理するミドルノード、及び作業工程において指定する部品や工具等を用いて正しい位置で作業を行っているかを単位動作として管理するボトムノードから構成される。映像表示領域の矩形枠が測定エリアであり、計測を開始すると、マーカの測定エリアへの侵入を検知することにより、ツリービューにおけるボトムノードの選択状態が次ノードに遷移する。また、それと同時に、映像表示領域には次の測定エリアを表示し、次エリアへのマーカの侵入を待機する。



(a) 参照点・対応点の抽出方法



(b) 参照点の抽出例

図3 抽出した参照点・対応点の例



図4 マーカ領域の判定結果

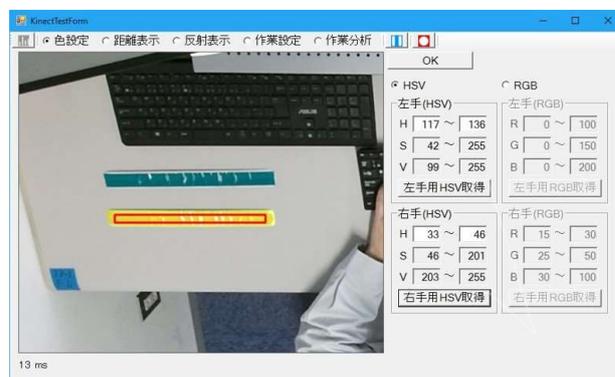


図5 マーカ基準色設定インターフェース

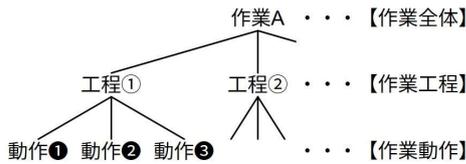


図6 作業の階層構造

測定エリアの設定については、図8に示す作業設定画面においてツリービューのボトムノードを選択すると、映像表示領域内の該当する検出エリアが強調表示され、エリア右下をドラッグすることでエリアの大きさを、エリア内をドラッグすることでエリアの位置を設定することができる。また、ボトムノードを右クリックしてコンテキストメニューを開き、「編集」を選択すると測定エリアに対するマーカの左右の区分等の各項目を変更することができる。新規に追加する場合は、「上に挿入」、または「下に挿入」を選択することで、測定エリアの位置と大きさ、及び各項目を設定することができる。さらに、各ノードにおいて設定内容のコピー機能を付加することで、繰り返し行われる動作等の設定を容易にし、操作性を高めている。なお、作業設定画面においては、検出可能領域を設定することにより、マーカの検出範囲を制限することができる。

3. 実験と考察

3.1 実験の概要

本システムの動作を検証するために、図9に示す作業台を実験室に設置し、Kinectを作業台の作業面から1050mmの高さに取り付け、表1に示す作業工程の順に、PCの組立作業を模した実験を行った。なお、本研究では、組立作業を対象に実験を行っているが、本システムの対象作業については、Kinectを俯瞰可能な位置に設置でき、且つマーカを装着することが可能な作業であれば、様々な作業に応用することが可能である。

実験では、1人の被験者が組立作業を10回試行し、各試行について作業映像を分析することにより、作業時間を計測した。各試行間のインターバルは約1時間以内であるが、1～3回目と4～10回目については試行日が異なり、7回目と8回目の間には約2時間のインターバルがある。

作業時間の計測にあたっては、各工程の作業開始時刻を明確にするために、マーカの初期測定エリアを設定し、各工程を開始する際には、マーカが初期測定エリア内に入るよう手を移動させる初期動作を追加した。そのため、各工程の作業時間は、初期測定エリアにおける検出時刻から、次工程の初期測定エリアにおける検出時刻までとした。また、各工程における個々の動作についても、測定エリア間のマーカ検出時刻の差とし、得られた結果を各動作の作業時間とした。

3.2 作業時間の計測

各測定エリアにおける検出時刻差から求めた作業時間について、作業全体、作業工程、作業動作の各階層に分けて集計した。集計結果の可視化例を図10に示す。

同図(a)は、各試行における作業全体の作業時間の推移である。図より、インターバルを挟んだ最初の試行では作業時間を要しているが、試行を繰り返すに連れて時間が短縮していく様子が確認できる。



図7 作業計測画面



図8 作業設定画面

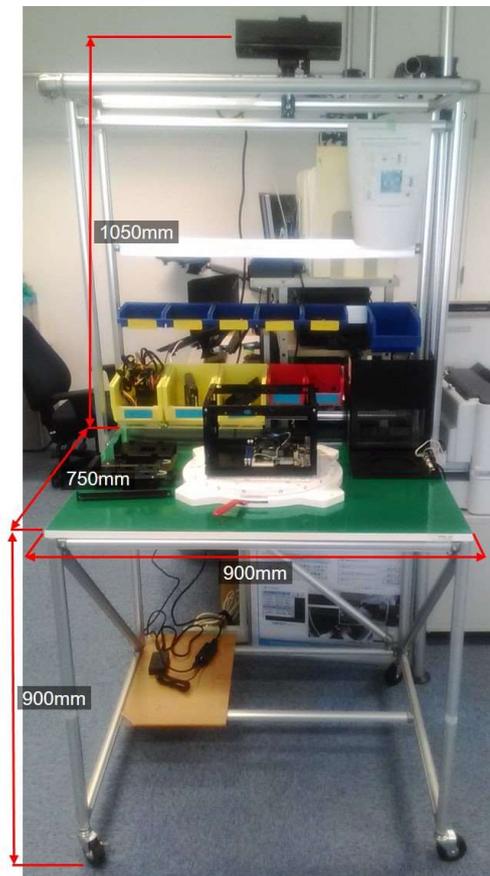


図9 実験における作業環境

表1 実験における作業工程表

No.	作業工程	使用する部品、工具等	動作数
1	マザーボード 取り付け	マザーボード 固定ネジ 4本 ドライバー	13
2	メモリ取り付け	メモリ 2枚	5
3	ファン取り付け	ファン 1個 固定ネジ 4本 ドライバー	18
4	フロントパネル 取り付け	フロントパネル	10
5	電源取り付け	電源 電源用ブラケット 1個 電源固定ネジ 4本 ブラケット固定ネジ 2本 ドライバー	27
6	ブラケット 取り付け	ブラケット 1個 固定ネジ 4本 ドライバー	13
7	HDD取り付け	HDD 1個 HDD用ブラケット 1個 HDD固定ネジ 4本 ブラケット固定ネジ 2本 ドライバー	21
8	HDDケーブル 取り付け	SATAケーブル 1本	11
9	ケースカバー 取り付け	ケースカバー 固定ネジ 4本	14
10	PC確認		4

同図(b)は、作業時間が最大・最小の試行（試行1，試行7）について、作業時間を工程毎に集計した時の比較結果である。図は、各試行について、左から順に工程1～10の作業時間を表しており、工程4，及び工程5で作業時間が大きく短縮していることが確認できる。

同図(c)は、試行7の工程4における各動作の進捗状況を示すガントチャートである。各動作に要する作業時間と、その推移が明確となり、負担の大きい動作等の把握が容易となる。

動作単位で作業時間を計測することにより、目的に応じた作業状況の可視化が容易となる。作業時間を様々な方法で可視化することにより、現状の作業に戸惑いやすい手順が含まれていないか、作業台や部品箱は作業者に対してムリのない配置となっているか等、作業動作や製品設計を見直す手掛かりとして重要な情報となり、作業カイゼンの糸口となる可能性がある。また、作業の負荷量やバラツキに関する情報は、作業のムラや作業の習熟度を評価するための指標として利用できるため、作業トレーニングに本システムを用いることも可能であると考えられる。そのため、本システムによる作業時間計測は、作業カイゼンを支援していく上で、有用性が高いと判断できる。

3.3 作業動作の検出

IEにおける動作要素の時間分析手法であるPTS法の一つにMTM法があるが、MTM法で使用される時間単位は36ミリ秒である¹⁴。実験では、10回の試行に要した作業時間は8,481秒であり、全取得フレーム数は253,762フレームであった。そのため、作業時間計測に要した処理時間は1フレームあたり33.4ミリ秒であり、この値が作業動作の最大時間分解能に該当する。このことから、本システムについては、十分な処理速度で作業時間を計測することが可能であると言える。なお、実験で使用したPCの主な仕様は、

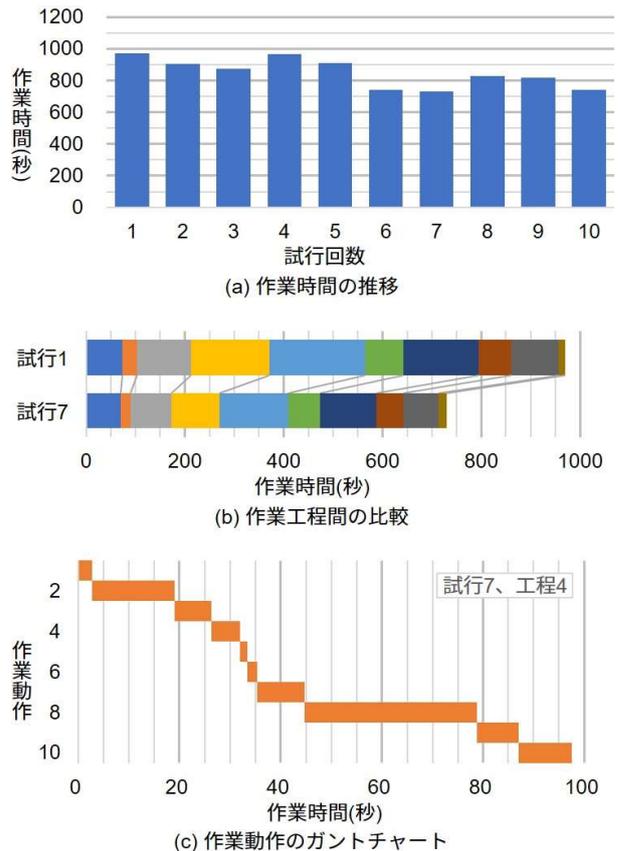


図10 作業時間計測結果の可視化例

CPUがCore i7-7700HQ (2.8GHz)，メモリが32GBのラップトップ型パソコンである。

次に、マーカの検出率を求めた。マーカの検出率については、マーカにオクルージョンが発生したり、マーカが検出範囲から逸脱したりして検出できない状況も含まれているが、全取得フレームに対して、左右のマーカが検出されているフレームをそれぞれカウントし、各マーカの検出率を試算した。結果を表2に示す。表より、左のマーカ(黄色)の検出率は83.2%、右のマーカ(緑色)は70.2%であった。右のマーカの検出率が左に比べて低いものの、右のマーカについて検出結果をフレームレートに換算すると、21.0フレーム/秒で検出できていると考えられ、時間分解能としては約47.6ミリ秒に相当する。そのため、作業時間を計測する上では、良好な結果であると考えられる。なお、左右の差の原因として考えられるのが実験環境における照明の位置である。天井に設置された蛍光灯が左手の作業域の真上にあり、右手の作業域と比較して、照明条件が安定していたと推測している。

最後に、左右のマーカの平均検出率が最も高かった試行8について、検出したマーカ位置を追跡処理した描画結果を図11に示す。検出ミスが若干あるものの、左右の手の作業域を容易に把握できるため、作業時間計測結果と合わせて評価することにより、作業カイゼンを図る上で有益な情報であると判断できる。なお、図中の検出ミスについては、測定エリアにおける検出ミスではないため、作業時間計測上は特に問題がない。

表2 マーカの検出率

試行	作業時間(秒)	フレーム数	検出数(左)	検出数(右)	検出率(左)	検出率(右)	平均検出率
1	971	28,701	22,733	21,154	79.2%	73.7%	76.5%
2	906	27,505	22,749	20,352	82.7%	74.0%	78.4%
3	875	25,128	19,750	18,387	78.6%	73.2%	75.9%
4	964	28,746	24,766	19,092	86.2%	66.4%	76.3%
5	910	26,750	22,383	16,607	83.7%	62.1%	72.9%
6	741	22,477	18,598	15,339	82.7%	68.2%	75.5%
7	730	21,810	17,495	14,806	80.2%	67.9%	74.1%
8	826	25,172	21,894	18,247	87.0%	72.5%	79.7%
9	819	24,807	21,076	17,928	85.0%	72.3%	78.6%
10	740	22,666	19,671	16,116	86.8%	71.1%	78.9%
計	8,481	253,762	211,115	178,028	83.2%	70.2%	76.7%

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、システム開発にご協力をいただきましたレシップエスエルピー株式会社の皆様に深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] 藤田彰久, “IEの基礎”, 建帛社, 1997.
- [2] 鈴木準, “IEを活用した現場改善のススメ”, ロジステイクス・ビジネス, Vol.9, pp.20-23, 2005.
- [3] 株式会社ブロードリーフ, “OTRS”, <https://www.otrs.jp/>.
- [4] 株式会社日本生工技研, “TimePrism”, <https://www.jiet.co.jp/>.
- [5] 板倉豊和, 服部可奈子, 折原良平, “工場作業者の作業軌跡データからのムダ作業発見”, 信学技法, PRMU2006-116, pp.71-76, 2006.
- [6] 高橋典宏, 山澤一誠, 生雲公啓, 野田賢, 横矢直和, “人物大装置の組み立て作業改善活動支援のための俯瞰距離画像からの人物姿勢分類”, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.7, No.14, pp.93-104, 2008.
- [7] 熊谷卓也, “ジェスチャー認識装置を用いた人体位置検出と工程作業動作分析への応用”, コニカミノルタテクノロジーレポート, Vol.11, pp.42-47, 2014.
- [8] 松原早苗, 渡辺博己, 曾賀野健一, 棚橋英樹, “距離画像を用いた両手作業の動作解析システムの開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.18, pp.24-29, 2017.

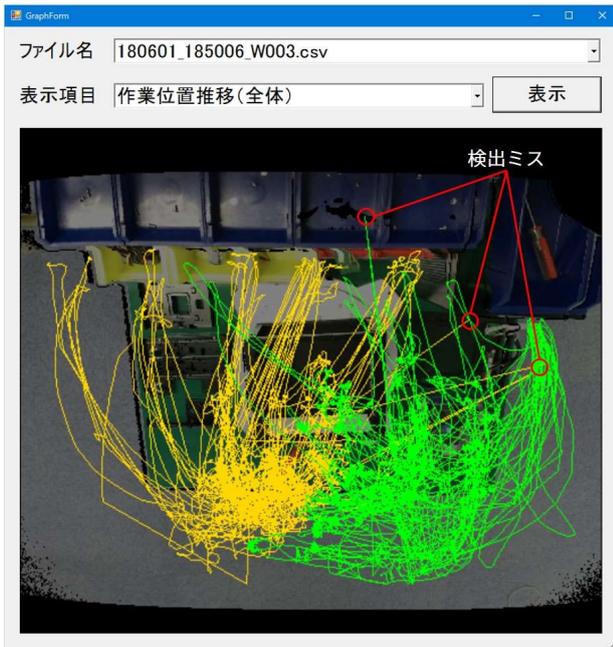


図11 マーカ位置の追跡結果例

4. まとめ

本研究では、作業台の作業面を俯瞰するように設置した距離画像センサを用いて、作業者の手首に装着した再帰性反射型マーカを精度良く検出し、特定の領域を通過する際の時刻を取得することにより、作業時間を動作単位で計測するシステムを開発した。

組立作業を模した実験では、計測結果から複数のグラフを作成し、作業時間の推移が容易に把握できることを確認した。また、時間分解能を検証し、約 47.6 ミリ秒間隔で時間計測が可能であることを確認した。

今後は、作業現場の要望に応じて、リアルタイムに作業状況を可視化する作業管理技術を開発する予定である。また、実際の作業現場における実作業でのシステムの検証を行うとともに、より安定した作業時間計測のために、マーカの検出精度の向上を検討する予定である。さらに、組立作業以外の作業についても検証を行い、汎化性能の向上を目指す予定である。

壁面撮影装置を用いた画像統合技術と点検支援システムの研究開発

生駒 晃大 渡辺 博己 浅井 博次 棚橋 英樹

鈴木 真宏* 林 忍* 加藤 光章* 江口 真澄* 原田 宣男*

Development of Image Stitching Techniques and Inspection Support System using Wall Surface Image Capturing Device

Akihiro IKOMA Hiroki WATANABE Hirotsugu ASAI Hideki TANAHASHI
Masahiro SUZUMURA* Shinobu HAYASHI* Mitsuaki KATO* Masumi EGUCHI* Nobuo HARATA*

あらまし 老朽化が進行する社会インフラ構造物の維持管理手法が様々検討される中、我々は橋梁等のコンクリート構造物の点検業務を支援するため、カメラを用いた点検支援システムの開発に取り組んでいる。

本研究では、昨年度開発したカメラとレーザーポインタを組み合わせた撮影装置により得られた画像を処理することで、壁面広域の統合画像を生成する技術の開発を行った。また、生成された統合画像を用いた点検業務を支援するためのソフトウェアの開発も行った。本稿では、統合画像生成までの流れについて述べるとともに、製作したソフトウェアについて報告する。

キーワード 社会インフラ、点検支援システム、画像統合

1. はじめに

道路や橋梁、トンネル等の社会インフラ構造物において、構造物の老朽化に伴う維持管理への対応が社会的な問題となっている。特に構造物の点検業務においては、平成26年の道路法施行規則の改正により、近接目視での損傷箇所の定期的な点検が義務化された^[1]。これら損傷箇所の目視確認やマーキング、記録作業は全て点検作業員による現場での作業となるため、作業への負担も大きく、高所等の点検の場合には、安全性の確保にも注意が必要となる。さらに、現場での記録作業は手書きでのスケッチが基本となるため、作業者ごとの判断基準のバラツキも問題となっている。

そこで我々は昨年度より、県内土木建築業の企業と共同で、橋梁をはじめとするコンクリート構造物の点検業務を支援するためのシステムの開発に向けた研究に取り組んでいる^[2]。本研究では、一般的なカメラとレーザーポインタを用いた比較的安価で高度な技量を必要としない簡易な構成での壁面撮影装置を開発する。そして、本装置により得られた画像を処理することで、現場や事務所での点検作業の効率化や、画像からの定量的な点検が可能なシステムの開発を目標としている。

今年度は、昨年度開発した撮影装置の改良を進めるとともに、撮影した画像から点検に使用可能な壁面広域の統合画像を生成する画像処理技術の開発を行ったので報告する。また、生成された統合画像を用いた点検業務を支援するためのソフトウェアの開発についても合わせて報告する。

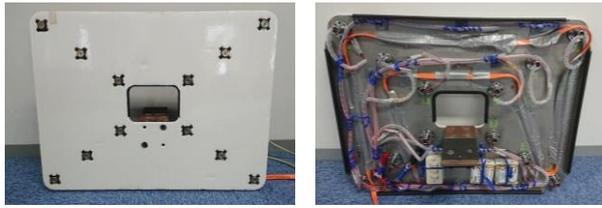
2. 壁面撮影装置

2.1 装置概要

本研究における点検支援システムでは、比較的小規模な橋梁等のコンクリート構造物の壁面を点検対象としている。そのため、特殊な計測装置や点検車両を用いない装置として、カメラと複数のレーザーポインタ、それらを一体的に固定するための固定装置から構成される壁面撮影装置を開発した。

装置で使用するカメラは一般的なデジタルカメラ等で問題ないが、カメラの総画素数や最大ズーム倍率が大きいほど、撮影の際の壁面との距離や一度に撮影可能な範囲をより大きく確保できる。またレーザーポインタは、撮影された画像中の壁面を捉えるために3個以上取り付けが必要であり、本研究では4個のレーザーポインタをカメラを取り囲むような四隅にそれぞれ配置した。

* 株式会社 市川工務店



(a) 昨年度製作した装置



(b) (a)の改良版



(c) (b)の改良版

図1 固定装置の外観(正面と背面)

2. 2 装置構成の改良

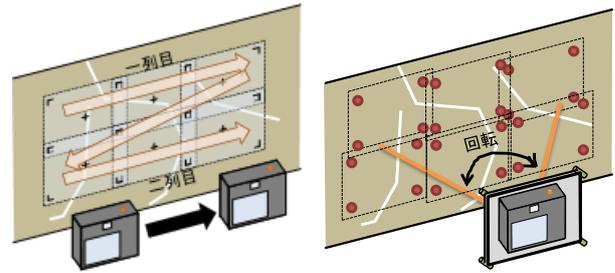
本撮影装置は、点検現場において人手での持ち運びや撮影が容易に行えることを特徴の一つとしている。しかし、昨年度製作した装置(図1(a))は、スチール製の固定具によりカメラやレーザーを固定した際の剛性を重視した作りであったため、人手での使用には適さない重さやサイズであった。そこで、装置構成の見直しや固定具の改良を行った。

図1(b)が改良後の撮影装置の外観である。剛性を保ちつつ、固定具の素材をアルミ製へと変更することで軽量化を実現した。さらに、昨年度は実験的に3枠合計で12個設置していたレーザーポインタは、精度上必要のない枠を取り除いた2枠の8個とすることで小型化した。また、使用するレーザーの色は昨年緑色から赤色へと変更し、取付けには専用のアダプタを使用することで、固定後にレーザーの微細な傾きを手動で調整可能な構成とした。レーザーの色を変更することで、現場での使用の際に問題となっていたレーザーの動作温度範囲を、15~35℃から-10~50℃へと拡張した。

図1(c)の装置は、図1(b)の装置による現場での検証実験の結果をもとにさらに改良を加えたものである。固定具部分の形状は撮影の際に扱いやすいように改良され、レーザーポインタも最終的に使用する枠のみの4個とした。

2. 3 撮影方法

実際の現場でカメラを用いて壁面を撮影する際には、壁面全体を複数の領域に分割し、分割した領域ごとに撮影を行うのが一般的である。そのため、分割して撮影された画



(a) 従来の撮影

(b) 提案装置での撮影

図2 撮影方法の比較



図3 大域画像(左側)と局所画像(右側)

像を点検作業で利用できるようにするためには、統合処理等の画像処理を適用することで、壁面全体の統合画像に変換する必要がある。

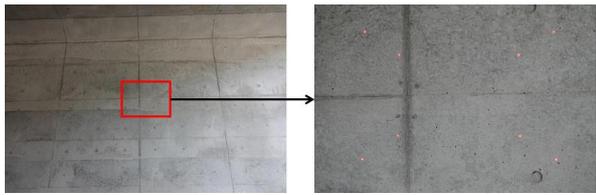
統合処理を容易に行うための撮影方法として、図2(a)に示すような、壁面に対して正対した状態を保ちつつ、上下左右に平行移動して撮影する手法が有効である。一方、本装置を用いた場合には、レーザーポインタがあることにより、撮影した画像からのカメラの位置姿勢推定と、その推定結果を用いて撮影画像を正面から撮影したような画像へと補正可能なため、図2(b)に示すように固定位置からの回転による撮影が可能となる。そのため、従来の撮影方法と比較し、撮影ごとに装置を移動させる必要がないため、より手間なく容易に撮影が可能である。

2. 4 大域画像と局所画像

壁面に発生するひび割れや剥離等の損傷をカメラを用いて点検する場合、その損傷状態を正確に捉えた画像を撮影する必要がある。例えば、0.2mm程度の幅のひび割れを画像から捉えたい場合、撮影する画像の分解能も0.2mm/pix程度は必要となる。そのため、それだけ細かく壁面を撮影していかなければならず、広域な壁面全体を高分解能で撮影し続けることは、本装置を用いた場合であっても負担の大きい作業となる。

そこで本研究では、図3に示すように、壁面の広範囲を一度に撮影する大域的な撮影と、損傷箇所付近のみピンポイントに高分解能で撮影する局所的な撮影の二通りでの撮影を行った。本撮影方法により、損傷箇所のみ高分解能で記録していくことで、損傷の有無に関わらず壁面全体を細かく撮影する場合よりも撮影回数を大幅に削減した。これ以降は前者の撮影で得られた画像を大域画像、後者の撮影で得られた画像を局所画像と呼ぶ。

大域画像と局所画像の利用用途として、大域画像は壁面全体の状態や特徴を把握する際に使用でき、従来の点検作業における手書きスケッチの代わりとして利用可能であ



(a) 壁面大域を撮影 (b) ズームして照射点を撮影

図4 大域画像の2枚セットでの撮影

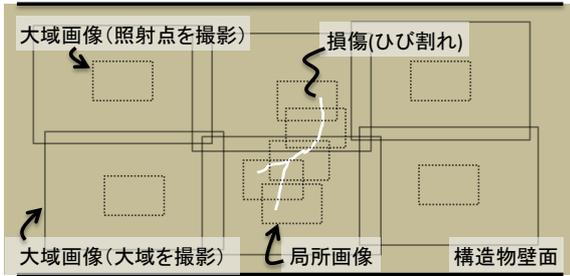


図5 撮影画像のイメージ

る。局所画像は個々の損傷状態を細かく把握する際に使用でき、正確な損傷形状の抽出や計測等を行いたい場合などに利用可能である。

2. 5 大域画像の統合における問題

大域画像の撮影では、壁面の広範囲を一度に捉えるため、レーザーポインタの照射位置を画像中より抽出することが困難となる。輝点座標が抽出できない場合、カメラの位置姿勢も推定できないため、撮影画像の正面補正やその後の統合処理も行うことができない。

そこで大域画像を撮影する際には、図4に示すように、大域画像(図4(a))を撮影後に、同位置よりカメラの位置姿勢を変えないまま照射点が画像中に大きく写るようズームした画像(図4(b))も合わせて撮影した。これにより、照射点をズームして撮影した画像の輝点座標を利用して位置姿勢の推定を行い、その推定値を壁面大域の画像に適用することで、大域画像における正面補正を可能とした。

3. 撮影画像の処理

図5に2章で述べた大域及び局所での最終的な撮影画像のイメージを示す。本章では、これらの撮影画像を用いて統合画像を生成するまでの画像処理について述べる。

図6に撮影画像の処理フローを示す。まずはじめの基準画像と較正画像は、壁面の撮影を開始する前の撮影であり、後の統合処理の際に必要なパラメータを抽出する。次に実際の壁面を撮影する際には、まず大域画像から撮影を行う。大域画像の撮影とその統合処理により壁面全体を写した統合画像が生成できれば、その後は生成した画像と実際の壁面を照らし合わせながら作業を進めることが可能である。局所画像は損傷箇所ごとに撮影を行うため、損傷の数や形状により撮影回数は変化する。また、大域及び局所の統合処理では、図6右側のフローに示すように、撮影した画像ごとにカメラ位置姿勢推定を行い、推定された値を

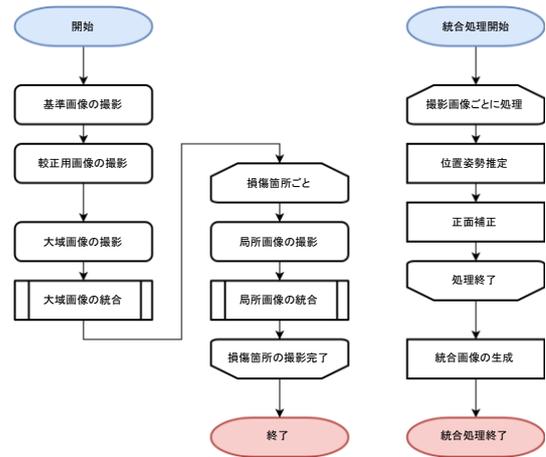


図6 撮影画像の処理フロー

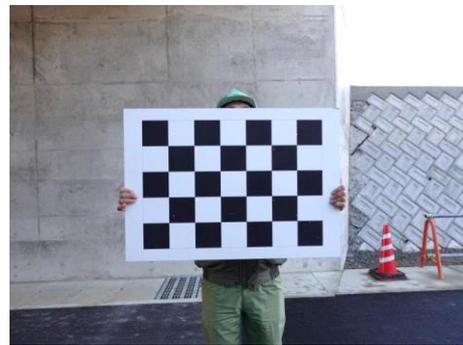


図7 キャリブレーションボードを使用した撮影用いた正面補正により画像を変換後に統合処理を行う。以降各処理の詳細について順に述べる。

3. 1 基準画像の撮影

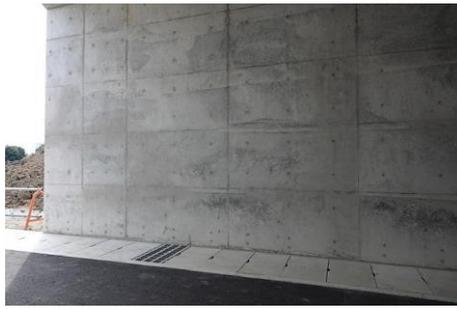
本装置により撮影された画像からカメラの位置姿勢を推定し、正面向きの画像へと補正するためには、装置が壁面に対して正対している状態での各レーザーポインタの基準となる照射位置を予め取得する必要がある。また、その際の壁面に対する距離情報も合わせて必要となる。

そこで、点検対象となる壁面の撮影開始前に、図7のようにキャリブレーションボードを装置に対して正対させた状態の基準画像を1枚撮影する。キャリブレーションボードを用いることで、画像中の各照射点の座標値と撮影距離の情報を同時に取得することが可能である。

3. 2 較正用画像の撮影

本装置に固定された各レーザーポインタの光線はカメラ光軸と平行となることが理想である。しかし、実際には微細な角度のズレが発生してしまうため、撮影装置と壁面との距離が大きくなるにつれ、ズレの影響により位置姿勢推定精度が悪化する。

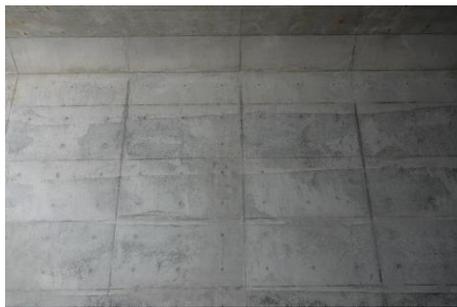
そこで、基準画像と同様の方法で撮影を行うことで、各レーザーポインタの微細な傾きを予め算出し、位置姿勢推定の際に補正値として使用する。較正用画像には撮影距離の異なる画像が2枚以上必要となるため、撮影装置やボードの位置を前後に変化させながら撮影を行う。



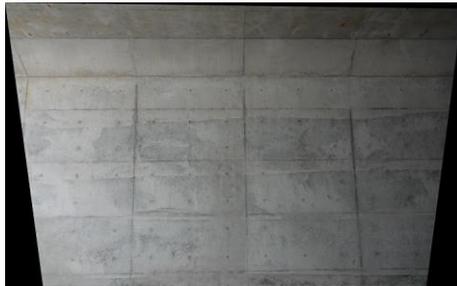
(a) 壁面に対して左に傾けて撮影



(b) (a)の画像の正面補正後



(c) 壁面に対して上に傾けて撮影



(d) (c)の画像の正面補正後

図8 撮影画像(大域画像)と正面補正後の画像

3. 3 カメラ位置姿勢推定と正面補正

壁面の撮影開始前に準備した基準画像と較正用画像から求めたパラメータと、実際に壁面を撮影した画像から求めたレーザーポインタの照射点の座標値を用いてカメラの位置姿勢推定を行う。推定処理の結果として、壁面に対して正対した状態からのカメラの鉛直方向と水平方向の回転角度、カメラの光軸方向での壁面との距離の3つのパラメータを得ることができる。

次に正面補正処理では、推定処理で算出したパラメータ

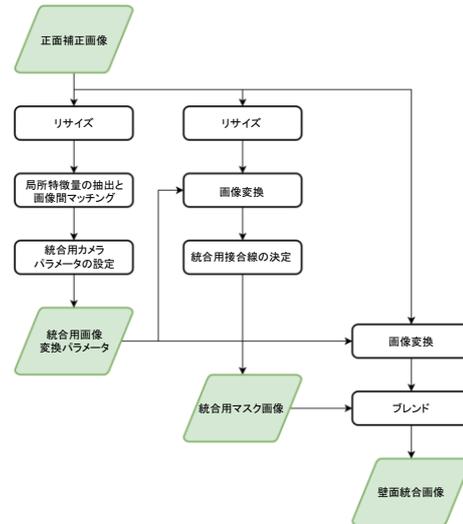


図9 壁面統合画像の生成処理フロー

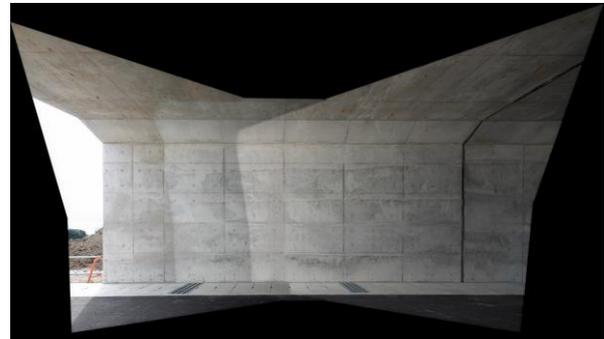


図10 大域統合画像

を使用することで、壁面に対して正面から撮影したような画像へと変換を行う。変換の際には、推定された角度の分だけ画像を逆回転させることで正面向きへと変形可能である(図8)。また、撮影距離も同時に推定できているため、画像を撮影した際のズーム率の情報と合わせることで、正面変換後の画像のスケールも既知となる。

3. 4 壁面画像の統合

最後に、正面補正された複数枚の画像を統合することで実際の点検作業で利用可能な壁面統合画像を生成する。統合画像の生成処理フローを図9に示す。

統合処理は3つのフェーズで構成されている。一つ目のフェーズでは、正面補正した画像から局所特徴量を抽出し、他の統合用画像とのマッチングにより、統合の際の各画像配置や変換用パラメータを決定する。本研究では局所特徴量としてBRISK^[3]を使用し、統合に使用する画像は、同一のカメラ位置から回転変化のみで撮影された画像であることを前提としパラメータを算出した。二つ目のフェーズでは、画像を統合する際の接合線を決定し接合用マスク画像を生成する。最後に、三つ目のフェーズでは、ブレンド処理により実際に合成処理を行うことで統合画像を生成する。統合処理は大域画像と局所画像で別々に処理し、大域同士の統合結果を大域統合画像、局所同士の統合結果を局所統合画像と呼ぶ。図10に生成した大域統合画像の例を示す。

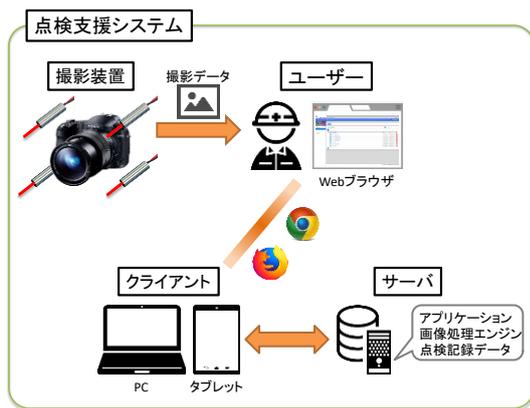


図11 点検支援システムの構成

4. 点検支援システム

4. 1 システム概要

本研究で開発した点検支援システムは、図11に示すように、2章で述べた壁面撮影装置と、3章で述べた壁面統合画像を生成するための画像処理エンジン、撮影画像や統合画像を用いて点検作業を行うためのアプリケーションソフトウェアから構成される。

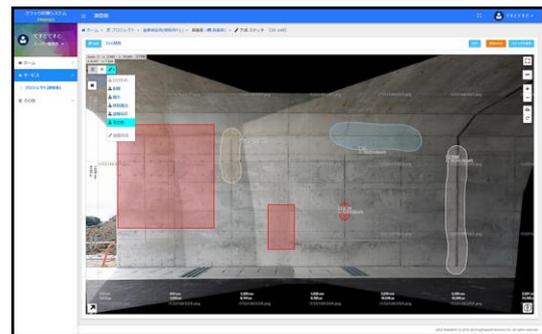
本ソフトウェアはWebブラウザ上で動作するウェブアプリケーションであり、ユーザーはPCやタブレット等のインターネットに接続されたクライアント端末からサーバへアクセスすることで、ソフトウェアの各種機能やサーバ内のデータを利用できる。そのため、点検作業者は撮影装置と合わせてタブレット等の端末を現場に持ち込むことで、現場で撮影した画像をその場でサーバにアップロードし、事務所に戻ることなく画像処理エンジンによる処理結果の確認や編集が可能となる。

4. 2 アプリケーションによる点検支援機能

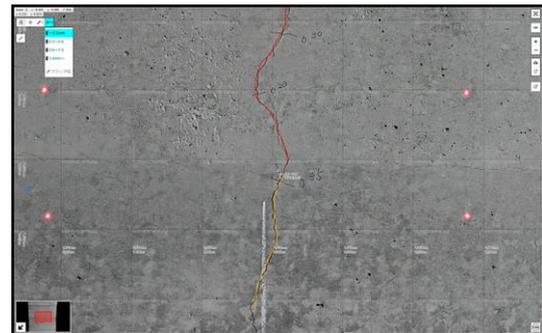
サーバ上の本アプリケーションには、画像を用いた現場や事務所での点検作業を支援するための機能が含まれている。その一つとして、図12に示すように、画像処理により生成された統合画像へのスケッチ機能がある。

図12(a)は大域統合画像へのスケッチの例であり、従来の点検作業における損傷位置の全体マップへのスケッチを紙ではなく、統合した画像上に直接書き込むことができる。本機能により、従来の手書きスケッチによるあいまいな記録作業に対し、画像を参考にしながらより正確に損傷位置を書き込むことが可能である。また、現場での作業を終え、事務所に戻ってからの点検記録の電子データ化の作業は必要なくなるため、作業時間の短縮も可能である。

図12(b)は局所統合画像へのスケッチの例である。損傷箇所を詳細に確認できるため、ひび割れ位置を正確にトレースし、現場での計測結果を記録する際になどに有効である。また、画像のスケールは既知なため、画像中の損傷位置を指定すれば、損傷形状や大きさを画像から計測することも可能である。



(a) 大域統合画像へのエディット



(b) 局所統合画像へのエディット

図12 スケッチ機能による統合画像編集画面

5. まとめ

本研究では、社会インフラ構造物の維持管理に関する問題解決に向け、コンクリート構造物の壁面の点検作業を対象とした点検支援システムの開発を行った。本システムは、カメラとレーザーポインタを用いた壁面撮影装置と、本装置により撮影された画像から壁面統合画像を生成するための画像処理、生成された画像を用いて点検を行うためのウェブアプリケーションで構成されている。

壁面撮影装置は、昨年度製作した装置の改良により小型化と軽量化を実現した。壁面の統合画像の生成では、二通りの撮影方法により撮影された大域画像と局所画像に対し、使用用途の異なる統合画像をそれぞれ生成することで、壁面全体を詳細に撮影することなく点検作業に使用可能な統合画像の生成を実現した。ウェブアプリケーションでは、生成された統合画像を活用した点検作業を行うための点検支援機能を実装することで、現場や事務所での作業の効率化を実現した。

今後は、本点検支援システムの有効性を検証するため、従来の点検作業に本システムを導入した場合の効率的な作業方法や、その際に作業負担がどの程度軽減されたかを検証する必要がある。また、点検支援システム全体の汎用性や使い勝手を向上させるため、画像処理による統合精度の向上やアプリケーション機能の改良を行う。特に、画像処理による統合された画像からの損傷候補の自動抽出や、その損傷形状の自動計測を実現するための技術について検討する。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、壁面撮影装置の製作にご協力いただきましたTMDテクノジャパン株式会社の皆様に深く感謝致します。また、ウェブアプリケーションの開発にご協力頂きました株式会社ライトスピードソリューションズの皆様に深く感謝致します。

本研究の一部は、岐阜市の産官学連携事業の補助を受けたものである。

文 献

- [1] 国土交通省, “道路橋定期点検要領”, 2014.
- [2] 生駒晃大, 渡辺博己, 浅井博次, 棚橋英樹, 鈴木真宏, 林忍, 加藤光章, 江口真澄, 原田宣男, “レーザーポインタを用いたカメラ位置姿勢推定技術の研究開発”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.19, pp.51-56, 2018.
- [3] S. Leutenegger, M. Chli, R. Siegwart, “BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints”, In Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011.

重負荷作業を解消する直感操作型運搬補助システムの開発(第3報)

坂東 直行 山田 俊郎

Development of an intuitive operation type transport assist system for eliminating heavy load work(3rd Report)

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA

あらまし 画一的な操作感であった従来のホイストに対し、自在に操作している感覚を与えられるインタフェースを開発することを目的に研究を行った。

作業内容に応じて適切なインタフェースは変わるという考えのもと、4つのインタフェースを開発し、これらをシームレスに使えることを示した。また、荷物に直接力を与えることで操作可能なこと、動作時の衝撃を抑えた操作が可能であることを示した。

これにより、本研究でねらいとした操作感が得られるものと期待できる。

キーワード ホイスト、インタフェース、無線通信

1. はじめに

本研究では、荷揚げ荷降ろし作業に着目し、身体に対する負荷の軽減を図るため、荷の重量を機械が負いつつ、かつ、作業性を損なわないよう直感的な操作ができるシステムの開発を目指している。シンプルな解としてホイストを改良することとし、これまでに巻き上げ機の本体構造を見直して電磁ブレーキなしに機能する動力伝達機構を開発した(図1)。これによりスムーズな動き出しが可能となった。

今年度は、操作者による操作入力を検知し、巻き上げ機本体を動かす信号に変換するインタフェースを開発したので報告する。

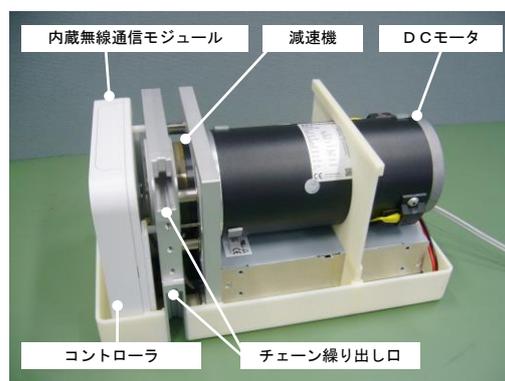


図1 開発した巻き上げ機本体

2. 開発したインタフェース

本研究では4種類のインタフェースを開発した。以下に概要を示す。

2. 1 スライドインタフェース

図2はスライドインタフェースと呼ぶユニットで、荷物を吊るチェーンに固定し、スライダを上下に操作することでチェーンの巻き上げ・繰り出しを制御できるようにするものである。スライド量に応じて無段階に速度をコントロールできる。また、操作者がスライダをある空間高さに固定したらチェーンがそこまで繰り出されて止まるため、自在に高さコントロールができる。なお、スライダの一部はボディから突き出している。この部分は、操作者がコントロールを誤り、チェーンを巻き上げすぎ

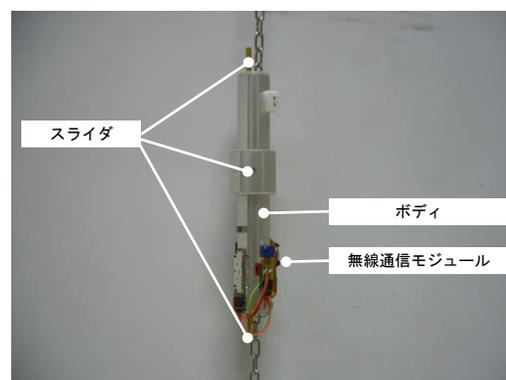


図2 スライドインタフェース

た際にそれを検知できるようにするため、巻き上げ機等に接触するよう設けている。よって、スライドインタフェースは安全装置としても働く。

2. 2 フェーダイインタフェース

図3はフェーダイインタフェースと呼ぶユニットで、ワイパーをスライドガイドに従って滑らせた量に応じてチェーンの巻き上げ・繰り出しを制御するものである。ガイド横のボタンはモード切替スイッチとなっており、速度制御もしくは位置制御を選択できる。

速度制御モードでは、ワイパーは内蔵モータによってスライドガイド中央に位置決めされる。操作者はモータによる位置決め制御がなされているワイパーをスライドさせるため、操作反力を感じることができ、そこから速度と操作量の関係を推察できる。

位置制御モードでは、ワイパー位置はチェーンの繰り出し量と対応付けられる。スライドガイドの長さに対し、適当なゲインを乗じた長さだけチェーンは動く。ゲインはモード切替スイッチの下にあるボリュームで調整できる。ワイパーは現在のチェーンの繰り出し長さに対応するスライドガイド上の位置に内蔵モータによって位置決めされる。操作者はモータによる位置決めがなされているワイパーを動かし目標繰り出し量を指定する。その目標量となるようチェーンは繰り出され、目標量と現時点の繰り出し量との間にギャップがある間、操作者には反力が返る。チェーンの繰り出し量が目標量と一致したとき反力はゼロとなり、ここから操作者は繰り出し量が指定した量になったことを知ることができる。

2. 3 フォースインタフェース

図4はフォースインタフェースと呼ぶユニットで、内蔵する荷重センサにより外力を検出してチェーンの巻き上げ・繰り出しを制御するものである。

荷物を吊り下げ、静止した状態でセットスイッチを押すと、その時点の荷重センサの出力をゼロとし、ここからの外力の変化によって繰り出し速度を制御する。これにより操作者は荷物に直接触れて力を加えた方向に動かすことができ、インタフェースの存在を意識することなく作業することができる。

2. 4 ボタンインタフェース

図5はボタンインタフェースと呼ぶユニットで、従来ホイストの吊り下げ式ボタンコントローラを無線式にしたものである。ボタンで操作する方式のため、速度は一定速であるが、本体から離れた位置からでも操作することができる。

本研究では、直感的操作のできるインタフェースの開発を目的としているが、作業内容によっては直感性よりも単純さが求められるシーンもありうると想定される。ボタンインタフェースを用意したのは、直感性を必要とするシーンではそれに適うインタフェースを、単純さが求められるときはボタンインタフェースを使うなど、状況に応じて使い分けられるようにし、作業全体での操作

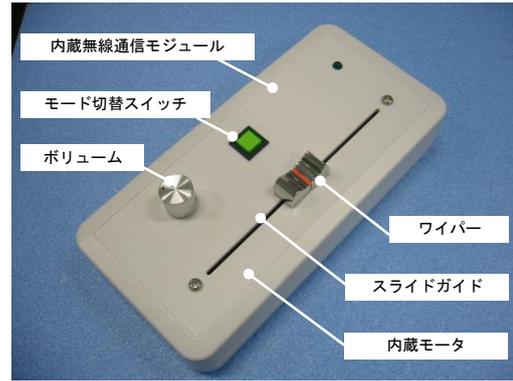


図3 フェーダイインタフェース

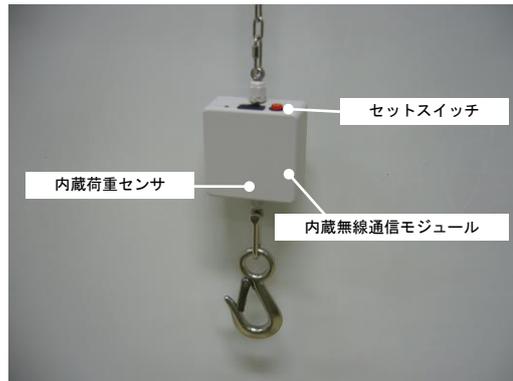


図4 フォースインタフェース



図5 ボタンインタフェース

感の向上を狙ったためである。

これらのインタフェースと巻き上げ機本体の間では、IEEE802.15.4規格に準じた無線によって通信を行っており、Wi-Fi等のように起動後コネクション確立まで待たされることなく、即時使うことが可能である。

3. 操作の特徴

3. 1 シームレスな操作

前述したインタフェースは個々に機能するとともに、同時利用もできる。

図6に各インタフェース操作に基づく制御信号、実際に

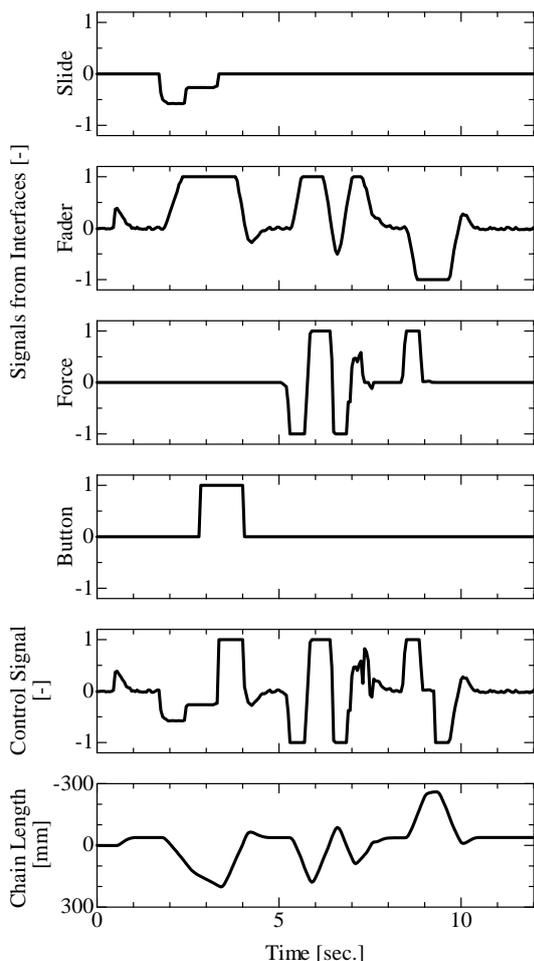


図6 インタフェースを同時操作したときの動作

用いられた制御信号およびチェーンの繰り出し量を示す。横軸は時間[sec.]を表し、縦軸の制御信号は巻き上げ機の最大出力を1とした単位で表しており、符号+は巻き上げ動作、符号-は繰り出し動作を表す。チェーンの繰り出し量は+の場合は繰り出し、-の場合は巻き上げを表す。

各インタフェースには優先度が設けられており、スライドインタフェース、フォースインタフェース、ボタンインタフェース、フェーダインタフェースの順になっている。例えば、フェーダインタフェースが入力されている状態で、フォースインタフェースが操作されると、本体制御信号もフォースインタフェースによるものに直ちに切り替わり、操作がなくなるとフェーダインタフェースによるものに戻る。

これにより、操作内容に応じて、最も使いやすいインタフェースを選んで適時切り替えながら即操作することができる。

3. 2 荷物をもった操作

図7にフォースコントローラを使った操作の事例を示す。ここでは長尺物の両端を人が持つ状況を想定し、そ

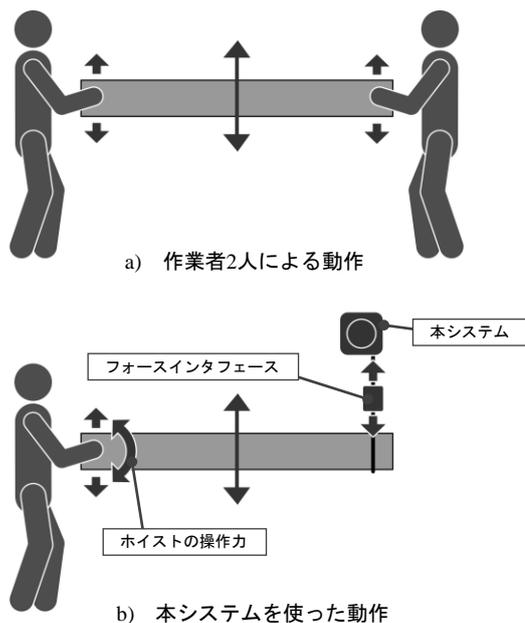


図7 フォースインタフェースによる操作例（長尺物の昇降動作）

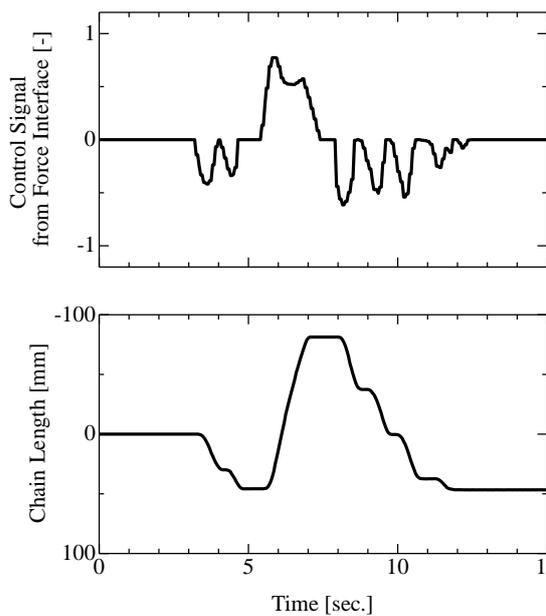


図8 フォースインタフェースによる長尺物の操作結果

のうち一人を本システムに置き換え、一人で操作できるかを試している。

図8に示すように、荷物自体に力を加えることでチェーンの繰り出し動作を制御できており、インタフェースに手が届かない場合や、荷物から手を離せない場合でも本システムは機能することがわかる。

3. 3 衝撃の少ない操作

従来のホイストはボタン入力があるとモータ出力を最大にして動き出そうとする。その際荷物には衝撃が働く。

岐阜県情報技術研究所研究報告 第 20 号 平成 30 年度

発行 令和元年 12 月
編集発行所 岐阜県産業技術総合センター
岐阜県関市小瀬 1288
TEL: 0575-22-0147
FAX: 0575-24-6976
<http://www.gitec.rd.pref.gifu.lg.jp>
