

ISSN 1882-8566

岐阜県情報技術研究所研究報告

第 10 号 平成 20 年度

岐阜県情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Information Technology

目 次

映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発	1
身体障がい者のQOL（生活の質）を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 ーマニピュレータの改良とリスクアセスメントによるリスク低減ー	7
身体障がい者のQOL（生活の質）を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 ー多様な操作装置の開発ー	11
身体への優しさを重視した作業動作カイゼン手法に関する研究開発	15
リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発	19
クリーン農業を支援するロボット（アイガモロボット）の応用技術に関する研究	23
水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発 ー水田除草用自律走行ロボットのための稲列検出手法の開発ー	27
水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発 ー太陽光電池パネルによる発電量の把握実験ー	33
水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発 ー自律走行のためのハードウェア検討ー	35
診療映像におけるシーン分割手法の検討（第2報）	40
位置情報に基づく救命救急処置の要約システム	43
触覚センサを用いた触行動の識別に関する研究（第3報）	45
カメラを用いた廊下見守りシステムの開発	50
画像を用いた食品評価に関する研究（第2報）	54
測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討	58
力覚提示装置を用いた嵌合作業の検討	60
効率的な映像伝送方法に関する開発研究	62

映像の動作解析技術を用いた「ポカよけ」手法の研究開発

— 締め付け作業への適用 —

清水 早苗 平湯 秀和 浅井 博次

Research of Failsafe Camera System using Motion Analysis

- Application to Fastening Work -

Sanae SHIMIZU Hidekazu HIRAYU Hirotsugu ASAI

あらまし 製造現場において、消費者ニーズの多様化による頻繁な製造品種の切り換えに柔軟に対応するため、人手による作業が増加している。しかし、人の作業において「作業忘れ」や「作業間違い」といった作業ミスは不可避であり、このミスに起因する不良の発生を早期に発見し、市場や後工程に流れないようにすることが大きな課題とされている。そこで、本研究では、作業者の動きに着目し、カメラを用いて作業者の動作を解析することで、作業ミスを検出する新しいポカよけ手法を提案する。具体的には、作業映像を動きの大きさと方向の情報から「手を伸ばす」、「ネジを締める」等の動作の単位に分割し、その動作の動きの特徴を抽出することで、事前に登録した標準作業の映像と実作業の映像との動きの類似度を評価し、作業ミスを検出する。本稿では、提案手法を自動車の組立工程におけるネジの締め付け作業に適用し、「締め付け忘れ」の作業ミスを検出するシステムを構築した。実際の現場において、撮影した作業映像1,120データに対して検証を行い、昼夜等の照明変化に対しても安定に作業評価が可能である結果を得た。

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

1. はじめに

自動車や家電などの製造現場では、製品の品質や生産性向上のため、製造機械の高度化が進められてきたが、近年は、大量生産から多品種少量生産への移行や製品サイクルの短期化等の激しい変化に対応する必要があるため、十分な設備投資が困難な状況である。そこで、このような変化に対して柔軟性が高い人手を用いて作業を行う現場が増加している^[1,2]。しかしながら、作業は人が行うため、「作業忘れ」や「作業間違い」といった人為的なミスによる不良の発生は避けられない。万が一、品質を満たさない不良品が市場へ流出した場合は、消費者に多大な迷惑がかかることはもちろん、企業も信頼を失い、企業の存続に関わる大きな問題となる^[1,3]。

そのため、人為的な作業ミスによる不良品が消費者や後工程へ流れることをなくす、もしくは少なくするための対策は非常に重要性が高く、製造現場ではこの作業ミスを検出する多くの取り組みがなされている。

これらの取り組みは、各作業工程の後に検査工程を設け、部品（製品）の機能や外観から作業ミスを検出する方法と、作業工程内で行われる個々の作業の過程で起きる事象（例えば、工具のトルク情報や部品数の変化等）

から作業ミスを検出する方法の大きく二つに分かれる。

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

一方、後者の方法は、工数の増加が不要なため、工程単位への適用が可能であり、より早期に作業ミスを検出することができる。その方法として、ポカよけがある。ポカよけとは、部品の取り付け忘れ等の「うっかりミス」や部品を間違えて付けてしまう等の「ポカミス」を避ける仕組みのことである。具体的な例としては、作業者が指定部品を正しくピッキングすることを促すことを目的として、複数の部品箱から指定の部品箱のみLEDを点灯させ作業の指示を行う装置や、その部品箱に手を入れたことを確認する光電スイッチを用いた動作確認センサ、また、作業の回数や部品の個数を工具やセンサで計測し、標準作業と異なる場合に作業ミスが発生したとして知らせる装置等がある。しかし、例えば、指定の部品箱に手を入れたことが確認できても、その部品を落としたり、



図1 作業と映像の階層構造

別の場所へ置き忘れたりすることにより、部品の取り付け忘れが発生する場合があります。このように、部品箱の挿入口の光電スイッチやトルクレンチの締め付け完了信号等、ある一点での動作を検出するセンサ情報のみでは作業全体の品質を十分に保証できない。

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

本稿では、作業台上の治具に取り付けられた部品に対して手と腕で行う作業を対象とする。具体的な作業として、自動車の組立工程におけるネジの締め付け作業を対象とし、「締め付け忘れ」の作業ミスを検出する手法について述べる。そして、実際の組立現場にて撮影した作業映像を対象とした評価実験により、提案手法の有効性を検証したので報告する。

2. 作業ミス検出手法の概要

2.1 作業の構造と記述

従来から、作業改善や作業設計を目的とした作業分析は、インダストリアル・エンジニアリング (IE) と呼ばれる工学的手法が用いられている^[4]。その中では、仕事のレベルが階層的に表現され分析される。本稿では、図1に示すように、仕事のレベルを3つの階層 (単位工程層、作業層、動作層) に分けて説明を行う。単位工程層は、一つの作業場において「10個のボルトを締め付ける」、「部品Aと部品Bを組み付ける」等の一つの組み付け部品に対して行う一連の作業を意味する。作業層は、「一つのボルトを取る」、「一つのボルトを締め付ける」等の意味ある目的行動の最

小単位であり、最下層の動作層は、「手を伸ばす」、「運ぶ」、「まわす」等の基本的な動作である。ここでは、一つの単位工程に対して撮影した映像を、作業層の作業単位や動作層の動作単位に分割することで、単位工程における作業の記述を行う。

動作層は動作単位の集合であるが、IEにおいて使用されるMTM(Methods of Time Measurement) 法では、動作単位を「手を伸ばす」、「運ぶ」等の手と腕による動作、「つかむ」、「まわす」等の手指による動作、目の動き、全身の動作等、全部で11種類に分類している。本稿では、作業台上での手や腕による作業を対象としているため、部品や製品に対して「手を伸ばす」、「運ぶ」といった手の移動動作やトルクレンチ等の工具を使う動作である「クランク運動」等、手と腕による動作をキーとして、作業の記述を行う。

2.2 システム構成

人間の動き情報を取得する手法として、モーションキャプチャシステムを用いる手法^[5]があるが、マーカ装着等のように作業者への拘束や、複数台のカメラを用いた高価で複雑な機器の導入が必要となる。そこで、本研究では、作業者への拘束を必要とせず、現状の作業環境に簡単に追加構築ができるよう、作業を撮影する1台のカメラと、画像処理による作業ミス検出処理を行う1台のPCという安価かつ簡単な機器構成とする。

ここで、作業者の手や腕が動く範囲を注目領域として撮影するため、カメラは作業者の前上方から作業台上の治具に向け設置する。

2.3 作業ミス検出の処理手順

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

まず、作業映像の各フレームに対して局所的動きベクトルの統計量を動き特徴量として抽出する。そして、その動き特徴量の時系列データの変化から作業映像を動作単位に分割する。次に、動作区間を一つの動作単位に対する開始フレームから終了フレームまでの区間と定義し、この動

作区間の動きを表す動作特徴量を，区間を構成する複数のフレームの動き特徴量から求める．そして，動作区間とその動作特徴量の時系列データである動作シーケンスを獲得する．

作業は複数の動作単位の集合体であり，動作シーケンスとして表現されることから，予め作業の種類ごとに定めた条件に従い，「部品の取り出し」，「ネジの締め付け」等の作業単位に動作シーケンスを分割する．

そして，リアルタイムに獲得される動作シーケンスを評価し，作業の回数，順序等に関して，標準作業の条件を満たさない場合を，作業ミスが発生として検出する．

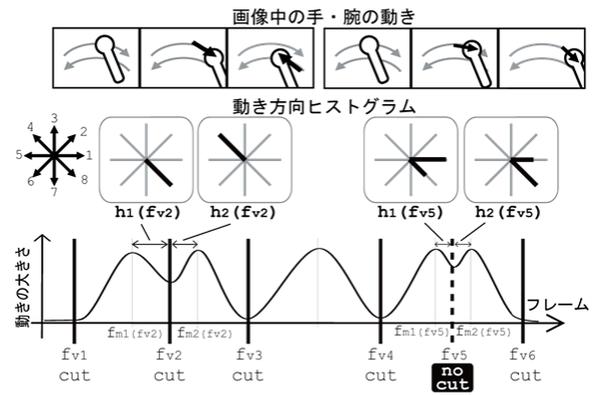


図2 動き特徴の時系列データからの分割点検出

3. 動作シーケンスの獲得

動きの特徴を有する動作区間の時系列データである動作シーケンスの獲得を行う．

3. 1 動き特徴量の抽出

画像から人間の動きの特徴を抽出する手法として，手や頭部等の注目する点や領域を切り出しその動き情報を用いる手法¹⁶⁻⁸⁾があり，行動やジェスチャー等の動作認識に応用され，照明条件や服装等が整備された環境下においては良好な結果を得ている．しかし，工場では，作業者の服装が定められていないことや，昼夜問わず作業を行う現場では照明条件が変化することがあり，正確に注目部位を切り出すことは困難である．

そのため，本研究では，注目部位を切り出すことなく，オクルージョン等の影響を受けにくい局所特徴の統計量を用いるアプローチ^{9,10)}をとる．具体的には，局所的な動きベクトルとしてオプティカルフロー¹¹⁾を用い，その統計量である動きの大きさや方向分布を表わす方向ヒストグラム^{12,13)}を動き特徴量として用いる．動きベクトルは，動きそのものの本質的な情報を含み，作業者の肌の色や服装等の影響が少なく，作業者の変化や時間経過に伴う緩やかな照明変化に対してロバストである．

3. 2 動作単位の分割

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

本研究では，作業における動作単位を始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定する．この仮定により，対象とする手の動作は，必ず静止状態から速度を上げ，ある地点で速度が減少し静止するという過程をもつことが利用できる．そこで，図2に示すように，速度の大きさが減少から増加する谷の時点 (f_{i2} から f_{i5}) と，零から増加に変化する時点 (f_{i1})，減少から零に変化する時点 (f_{i6}) を分割点として検出する．ここでは，分割点の候補である速度の大きさが減少から増加へ変化する時点を谷と呼び，速度の大きさが増加から減少へ変化する時点を山と呼ぶ．単純に谷で分割を行うと，人間の微妙な震えや手や腕の部分的隠れなどにより，一つの動作単位を過剰に分割する問題が生じる．そ

のため，谷での速度の大きさをその両隣の山での速度の大きさを割ったそれぞれの割合が閾値以上の場合には，速度の大きさの変化が小さいノイズと判定することで大まかなノイズ除去を行う．しかし，この速度の大きさについての閾値処理だけでは，速度の大きさ変化が閾値以上であるために残った f_{i5} のようなノイズにより，本来一つの動作単位が過分割されてしまう問題がある．

ここでは，作業の動作単位は，始点と終点を結ぶ無駄のない動きと仮定しており，一つの動作単位中に急激な方向変化はないという条件が利用できる．そこで，検出した分割点の候補に対して，両隣の方分布を比較し，類似度が低い場合は，両隣は異なる動作単位と考え，分割点と判定する．それに対して，類似度が高い場合は，両隣は一つの動作単位と考え，分割点としないこととする．

比較する2つの特徴量の類似度は，方向分布を表す方向ヒストグラムをベクトルとして扱い，2つのベクトルの余弦を用いる．フレーム f における方向ヒストグラム h_f は，方向分割数を d_n としたとき，抽出された各動きベクトルを方向 $d(d = 1, \dots, d_n)$ 毎に分類し，それぞれの方向 d について動きベクトルの大きさを積算した要素 $h_{d,f}$ からなる．本稿では，図2 (中段左) に示すように $d_n = 8$ とした．図2 (中段) は，図2 (上段) の手の動きに対する方向ヒストグラムを示しており，分類された方向におけるヒストグラム値を太線で示した．ヒストグラム値の大きさが，中心からの線の長さに対応する．分割候補点 f_v に対する両隣の特徴量 $h_1(f_v)$, $h_2(f_v)$ は，それぞれ，フレーム f_v から両隣の山 $f_{m1}(f_v)$, $f_{m2}(f_v)$ までの区間の方向ヒストグラムとする． $h_1(f_v)$ は，その区間($f_{m1}(f_v) \leq f < f_v$)内の各フレームの方向ヒストグラム h_f を，方向 d 毎に積算し，全ベクトルの大きさの和で割ることで算出する (式(1)) ．

$$h_1(f_v) = \frac{\sum_{f=f_{m1}(f_v)}^{f_v} h_f}{\sum_{f=f_{m1}(f_v)}^{f_v} \sum_{d=1}^{d_n} h_{d,f}} \quad (1)$$

$h_2(f_v)$ に対して f_v から $f_{m2}(f_v)$ までの特徴量を基に同様に算出する．そして， $h_1(f_v)$ と $h_2(f_v)$ の余弦が閾値未満の場合，この2つの特徴量の類似度は低く，両隣は異なる動作単位であると判定し， f_v を分割点として検出する．一方，余弦

が閾値以上の場合、類似度は高く、両隣は一つの動作単位と判定し、 f_s は分割点として検出しない。

また、本稿のように、手、腕といった一部位の動作の場合、対象の動きの方向と反対の方向（対象の動きが右であれば左）のベクトルは、微小な頭部の動きや治具、作業台の揺れ等のノイズである可能性が高い。そこで、同一軸上、つまり注目方向 d とその反対方向 d_o （図2中段左）では、例えば方向1と方向5）の2方向のヒストグラム値を比較し、式(2)の処理により、どちらか一方の方向の動きとすることで、ノイズの影響を低減する。これにより得られる特徴量 \hat{h}_f を各フレームの動き特徴量として用い、上述の特徴量の類似度に基づく分割処理を行う。

$$\hat{h}_{d,f} = \begin{cases} h_{df} - h_{d_o f} & \text{if}(h_{df} > h_{d_o f}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

3. 3 動作特徴量の抽出

注目分割点 f_e からその前の分割点 f_s までの区間($f_s < f \leq f_e$)を一つの動作単位を構成する動作区間とする。また、この動作区間の動きを表す動作特徴量は、各フレームの動き特徴量と同様に区間全体の方向ヒストグラムとする。動作区間の動作特徴量 H は、区間内($f_s < f \leq f_e$)の各フレームの方向ヒストグラム \hat{h}_f を、方向 d ごとに積算し、全ベクトルの大きさの和で割ることで算出する（式(3)）。

$$H = \frac{\sum_{f=f_s}^{f_e} \hat{h}_f}{\sum_{f=f_s}^{f_e} \sum_{d=1}^{d_n} \hat{h}_{d,f}} \quad (3)$$

4. 実験

本章では、自動車の重要保安部品の組立現場において、複数のネジの締め付け作業からなる単位工程での組立作業を対象として、提案手法によるポカよけシステムを構築し、評価を行う。

4. 1 複数ネジの締め付け作業のポカよけシステム

4. 1. 1 現場で発生する複数ネジの締め付け作業におけるポカ

本稿にて対象とする単位工程における作業の流れと発生するポカについて述べる。まず、作業の流れは、「組み付けられる部品を治具に固定する」→「複数のネジに対応する箇所を手締めする」→「各ネジに対して順に、トルクレンチを用いて規定トルクに達するまで締め付ける」という流れである。締め付ける箇所が複数であるため、途中、締め付け作業を忘れるポカが発生することがある。現在、この部品の組立現場では、トルクレンチが規定トルクに達した時に出力されるQL信号をカウントし、その数が締め付けるべきネジ数より小さい場合を、「締め付け忘れ」のポカの発生として検出している。しかし、このシステムでは、例えば、同一ネジに対して誤って2度締めした場合でも、異なる2つのネジを締め付けたと判断されるため、それ以降にネジを一つ締め付け忘れた場合には、QL信号数

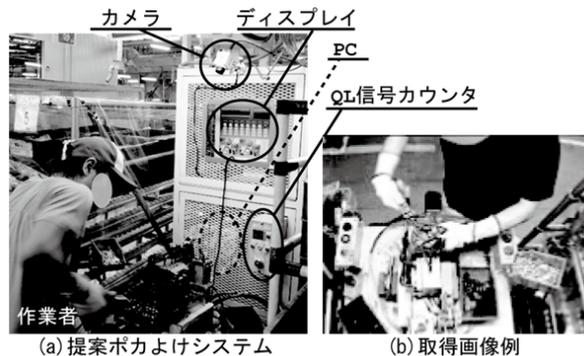


図3 作業環境における提案システムと取得画像例

とネジ数は一致し、「締め付け忘れ」を検出できない問題がある。これは、QL信号では、同一ネジへの複数の締め付け作業と複数のネジへの締め付け作業の区別できないためである。

4. 1. 2 提案システム

現状のQL信号のみを用いたシステムの問題に対して、カメラ映像から獲得した動作シーケンスを用いた動作の評価を加えることで、検出すべき正しい締め付け作業のみのカウントを行い、組立作業終了時に、正しい締め付け作業の数がネジ数より小さい場合、「締め付け忘れ」のポカを検出する。

システム構成は、図3(a)に示すように作業に支障がなく、手や腕が動く範囲を中心に撮影可能な位置に設置したカメラ1台と、ポカ検出の処理と作業の正否判定結果の表示を行う1台のPCとする。

検出すべき正しい締め付け作業は、手締めが行われた後、トルクレンチで締め付ける作業のため、規定トルクに達するまでに「締める」→「戻す」の動作単位が反復されるのに対し、2度締め等同一ネジを複数回締める場合は、一度トルクレンチにより締め付けがなされているため、「締める」動作単位を繰り返さないという動作単位の反復回数に違いがある。そこで、一つのネジに対する締め付け作業の終了を意味するQL信号の受信までの動作単位の反復回数を、動作シーケンスから求めることで、一つのネジに対する締め付け作業の正否判定を行う。

実際の締め付け作業の映像から、得られる動作シーケンスを図4に示す。グラフの上の数値は、図4(右)に示すように、動きベクトルの方向分割数を8にした時の分割区間の動作特徴量において、方向成分が最も値の大きい方向を示しており、「3(締める)」→「7(戻す)」→「3(締める)」→「7(戻す)」→・・・という反復の動作シーケンスとして表れることがわかる。このとき、注目動作単位とその2つ前の動作単位は、「締める」または「戻す」と同種の動作単位であり、この同種の動作単位の関係が連続する。動作シーケンスは、各動作区間に対して動作特徴量を持っており、この注目動作区間とその2つ前の動作区間の動作特徴量に対して、余弦による類似度を求め、閾値

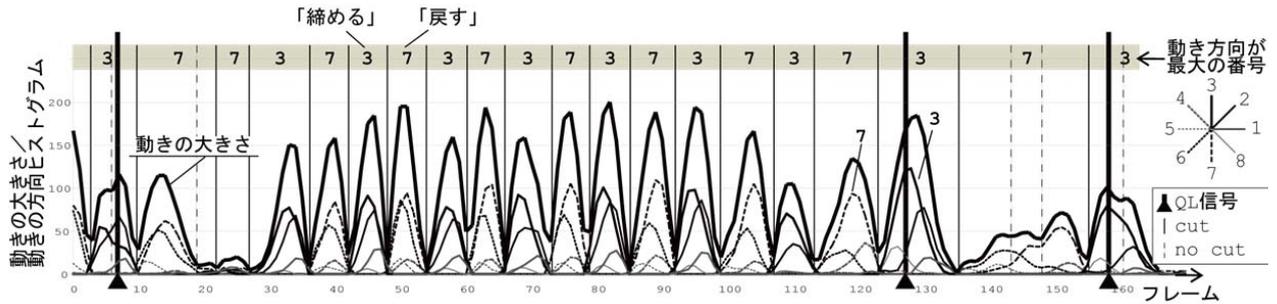


図4 分割点の検出結果

処理により、同種の動作単位か否かを判定する。この同種の動作単位の連続回数である反復回数が、締め付け作業の終了を示すQL信号の受信時に規定回数以上の場合、検出すべき正しい締め付け作業であり、規定回数未満の場合は、2度締めなどの作業ミスが発生したと判定する。

連続回数は、反復動作から異なる動作単位へ移った場合、または、停止した場合、作業の終了を意味するQL信号を受信した場合までの回数とする。

4. 2 実験条件

評価する作業データは、実際の工場において、撮影した作業映像を用いる。一つの作業データは、トルクレンチを手にとってから一つの組立部品に複数のネジを締め付け終わるまでの一つの組立作業に対する映像である。作業データは、ボカを含まない正しい組立作業（以降、OK作業と呼ぶ）のデータ1,116件、ボカを含む正しくない組立作業（以降、NG作業と呼ぶ）のデータ4件の合計1,120件を用い、評価を行った。

組立部品の種類は、ネジ数10個の部品とネジ数4個の部品の2種類があり、それぞれ作業データ数は、913件と207件である。また、作業者は2名であり、それぞれの作業データ数は、616件と504件である。これらの作業は、24時間行われており、作業データは、昼夜の時間経過に伴う照明変化も含んでいる。

ボカを含むNG作業データ4件は、従来のQL信号のみの評価では検出できず問題となっていたボカの発生状況を再現し、作業者が演じたものである。このNG作業の一つのシナリオは、ネジ数4個の部品に対して、まず1つ目のネジを規定回数以上の反復を行う正しい締め付け作業を行い、2つ目のネジも同様に正しく締め付け作業を行うが、次に誤って2つ目のネジを2度締めし、3つ目のネジを締め忘れ、4つ目のネジを正しく締め付けるというものである。他の3件のNG作業も部品種や締め付け忘れるネジは異なるが、同様のボカを再現したNG作業データである。

作業データは、非圧縮のカラー情報をグレースケールに変換して利用した。フレームレートは30fps、サイズは160pixel×120pixelとした。取得された画像例を図3(b)に示す。

分割候補点に対して、分割点かノイズかを判定する類似度の閾値は0.55、正しい締め付け作業として判定する

動作単位の反復回数に対する閾値は3回、また、同一動作単位を判定する類似度の閾値は0.6と、経験的に決定した。また、動きベクトルは、Lucas-Kanade法^[11]により推定したオプティカルフローを用いた。

4. 3 ネジ締め付け作業の正否判定結果

反復回数を評価することにより、正しい締め付け作業のみを検出し、その数がネジ数より小さい場合、「締め付け忘れ」のボカが発生したNG作業と判定する。

ここでは、予め正否がわかっている各作業データ（OK作業データ、NG作業データ）に対して、ボカ検出処理を行い、ボカを含まないOK作業かボカを含むNG作業かを判定し、評価する。本稿では、ボカの未検出率、過検出率を評価する。判定した結果を表1に示す。作業映像が動作単位に正しく分割され、QL信号受信時までの動作単位の反復回数が正しくカウントされているか否かは、目視により確認した。

OK作業データ1,116件に対して、1,104件がOK作業と正しく判定され、正解率は98.9%であった。2名の作業員別の正解率は、それぞれ99.3%、98.4%であり、作業員の個人差による影響は見られなかった。

ボカよけシステムでは、ボカを含むNG作業が誤ってOK作業と判定され、不良が流れることは許されない。つまり、NG作業データがOK作業と誤判定される未検出率が0%であることが重要である。ここでは、NG作業データ4件に含まれる2度締めの動作は、動作単位の反復回数が3回未満であったため、4件すべてにおいてNG作業と正しく判定され、未検出率は0%であった。

次に、OK作業データがNG作業と誤判定される過検出については少ないことが望まれるが、ここでは、OK作業データ1,104件に対して、12件がNG作業と誤判定され、過検出率は1.1%であった。これら12件の作業データは、照明変化に関わる作業時刻に関して昼や夜に偏りはなく、照明変化の影響は見られなかった。OK作業データが過検出された原因は、一つのネジに対する締め付け作業中に、動きの

表1 実験結果

		判定結果	
		OK作業	NG作業
入力	OK作業データ	1,116	1,104
	NG作業データ	4	12
		0	4

停止や注目部位以外の例外的な大きな動きが発生したことにより、その締め付け作業が反復動作と判定されないことによるものであった。過検出された具体的な状況のほとんどは、締め付け作業中に、工具のすべりや他の人から話しかけられ、動きが停止し、反復動作が中断した場合であった。また、同様に締め付け作業中に、本来部品を固定している左手が、顔の汗を拭いたり、メガネを直したりした動きが、動作単位の分割結果や動作特徴量に影響を及ぼし、反復動作と判定されなかった場合であった。これらは、標準作業として定められた作業から外れ、NG作業と判定されるべきものであり、1.1%の過検出は許容範囲と考える。

これらの結果から、提案手法によるポカよけシステムでは、従来のポカよけシステムでは検出できなかったポカの検出を可能とし、ポカ検出の信頼性を高めることができたことを確認した。また、一箇所での作業データであるが、昼夜を通した作業データに対して検出精度に影響がみられなかったことから、外光の照明変化には対応可能であると考えられる。

5. まとめ

製造業の組立工程における人の作業に対する品質の向上を目的として、カメラ映像を用い、作業者の動作を評価することで人為的な作業ミスであるポカを検出するポカよけシステムを提案した。作業映像から作業者の動きに関する特徴を抽出し、作業映像を動作単位に分割することで、作業を動作単位の時系列データである動作シーケンスで表現する手法について述べた。複数のネジの締め付け作業からなる組立作業を対象として、従来のトルクレンチのQL信号を用いたポカよけに、カメラ映像を用いた動作評価を加えることでポカ検出の信頼性を高めたポカよけシステムを構築した。実際の組立現場における作業映像に対して評価実験を行い、ネジの締め付け作業に対する提案システムの有効性を示した。

今後は、締め付け作業以外の作業へ適用することで、提案手法の「ポカよけ」への有用性について検討を行う。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導・御鞭撻を頂きました山本和彦教授（岐阜大学）に深く感謝致します。また、本システムへの助言や現場提供等、御支援・御協力を頂きました皆様に感謝致します。

文 献

- [1] 平野裕之，“品質保証と自動化”，日刊工業新聞社，2001.
- [2] 仲美雄，山崎辰夫，中村博，森口啓吾，前嶋和樹，土橋正臣，“低労務費地域における工程設計手法の

確立”，デンソーテクニカルレビュー，Vol.9, No.1, pp.41-47, 2004.

- [3] “平成17年度自動車のリコール届出内容の分析結果について”，国土交通省自動車交通局，2006.
- [4] 藤田彰久，“IEの基礎”，建帛社，1997.
- [5] 米元聡，有田大作，谷口倫一郎，“多視点動画画像処理による実時間全身モーションキャプチャシステム”，映像情報メディア学会誌，Vol.54, No.3, pp.409-416, 2000.
- [6] M.Brand, N.Oliver and A.Pentland, “Coupled hidden Markov models for complex action recognition”, Proc.CVPR, pp.994-999, 1997.
- [7] J.S.Boreczky and L.A.Rowe, “Comparison of video shot boundary detection techniques”, Proc.SPIE, Vol.2664, pp.170-179, 1996.
- [8] 浅沼克紀，大西正輝，小島篤博，福永邦雄，“色情報と領域追跡情報を用いた人物の顔と手の領域の抽出”，電学論C，Vol.119, No.11, pp.1351-1358, 1999.
- [9] T.Kobayashi and N.Otsu, “Action and Simultaneous Multiple Persons Identification Using Cubic Higherorder Local Auto-Correlation”, Proc.ICPR, 2004.
- [10] T.Kurita and S.Hayamizu, “Gesture recognition using HLAC features of PARCOR images”, IEICE Trans. on Information and Systems, Vol.E86-D, No.4, pp.719-726, 2003.
- [11] B.D.Lucas, and T.Kanade, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision”, Proc. Int. Conf. on Artificial Intelligence, pp.674-679, 1981.
- [12] J. Davis, “Recognizing Movement Using Motion Histograms”, Technical Report No.487, MIT, 1999.
- [13] 鈴木賢一郎，中嶋正臣，坂野鋭，三部靖夫，大塚作一，“動き方向ヒストグラム特徴を用いた映像データからのカット点検出法”，信学論(D-II)，Vol.J86-D-II, No.4, pp.468-478, 2003.

身体障がい者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 — マニピュレータの改良とリスクアセスメントによるリスク低減 —

千原 健司 藤井 勝敏

Development of a High-Performance Electric Wheelchair - Improvement of Manipulator and Adequately Reduced Risk -

Kenji CHIHARA Katsutoshi FUJII

あらまし 少子高齢化社会を迎える中で、障がい者に対する人的な支援には限界があるため、自助努力で豊かな生活を送るための補助となる器具や機器の開発は不可欠である。本研究所では平成18年度より、総合的に肢体不自由者を支援することが可能な、比較的狭い日本の住居で使用することを考慮した、コンパクトで安価なマニピュレータ付き高機能電動車いすの開発に着手している。本稿では、昨年度に実施した意見収集結果に基づき、残された課題を解決すべく、機能を拡張する改良設計を実施し、試作機によりその有効性を確認した結果を報告する。また、国際的な安全の考え方として今後必須と考えられる、リスクアセスメントによるリスク低減を行ったので、このプロセスおよび結果について報告する。

キーワード 軽量マニピュレータ、電動車いす、リスクアセスメント

1. はじめに

岐阜県では、福祉の充実を図るために、岐阜県障がい者支援プランを策定し、これに基づいて障がい者の支援を実施している。これによると、少子高齢化社会を迎える中で、障がい者に対する人的な支援には限界があるため、自助努力で豊かな生活を送るための、補助となる器具や機器は不可欠であり、その開発ならびに利用の促進が求められている。

そこで本研究所では、平成18年度より(株)今仙技術研究所および早稲田大学と共同し、身体障がい者のQOL(Quality Of Life:生活の質)を大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発に着手している。この電動車いすは、肢体不自由者の上肢による作業を支援するための軽量で安全なマニピュレータと、電動車いす、マニピュレータおよび家電製品などを統合的に扱う多機能指示端末を具備することを特徴としている。本年度からは、(財)テクノエイド協会から助成を受け、製品化のための改良に取り組んでいる。

本稿では、昨年度に実施した意見収集結果に基づき残された課題を解決すべく、機能を拡張する改良設計を実施し、試作機によりその有効性を確認した結果を報告すると共に、国際的な安全の考え方として今後必須と考えられる、リスクアセスメントによるリスク低減を行ったので、このプロセスおよび結果について報告する。

2. マニピュレータの改良

表1に、昨年度に収集し整理したマニピュレータに関する意見要望結果を示す。意見1～4を受け改良した結果については、昨年度に報告^[1]しているので参照されたい。本稿では意見5～7を受け、主にロボットハンドの改良と、自動収納機能を付加した結果について報告する。なお、意見8に対しては、共同研究機関の早稲田大学が検討を進めている。

2. 1 紙などを容易に拾えるロボットハンドの指構造と把持方法（特許出願中）

意見5～6を受け、大掛かりな装置あるいは複雑な制御を加えることなく、ハンド自身の形状等を工夫することにより、紙等の薄いものやエレベータ等のボタンを取り扱えるように、新たにロボットハンドを設計した。次節以下に基本原理および適用例を示す。

表1 マニピュレータに関する意見・要望

多く聞かれた意見・要望	
1	前輪とマニピュレータが干渉して床までハンドが下りないと困る
2	マニピュレータが近すぎて、狭み込みそうで怖い
3	飲物を飲むなら、もっと上まであがる必要がある
4	エレベータのボタンを押したい
5	床に落ちた紙を拾いたい
6	机上の封筒や紙を動かす作業にも使いたい
7	マニピュレータが車いすへ移乗する際に邪魔にならないか。移乗はスライドボードやリフトで行うが、障がい者の生活様式を考えて検討してほしい
8	手先にピッチ軸関節があったほうが、かごの物を取る時などは便利

2. 1. 1 基本原理

図1に紙を拾う基本原理を示す。図1では、ロボットハンドの指先のみを抽象的に示しており、例えば図2のようにロボットハンドの先端に具備し機能を発揮する。上部が斜視図、下部が側面図で、左から右に時系列に把持する様子を示している。指先Bで紙を上部から押さえつけた後、凹曲面を持つ指先Aの方へ物体を滑らせて、指先Aの腹まですくい上げて把持をする。これを可能とするために、指先Aの先端下部を、床と密着し物体がすくい上がるのが可能な凹曲面を持つ形状とし、摩擦係数の小さい材料で形成し、もう一方の指先Bの先端下部を、対となる指の先端の曲率とほぼ同じ凸曲面を有する形状とし、物体を押さえつけて摩擦力により物体を移動させることが可能な摩擦係数の大きい弾性材料で形成している。これにより、紙等の薄いものを傷や折り目を付けることなく把持することが可能であり、またクリップ等の小さなおかつ端面が曲面であるために滑りやすい物でも、接触面積が大きい向きに変えて把持できるため、安定して把持することが可能である。なお、曲率半径を可変パラメータとしたモックアップによる基礎実験で、すくい上がり、なおかつ実装の面で大き過ぎないという観点から、曲面の曲率半径は15mm程度が適当であった。

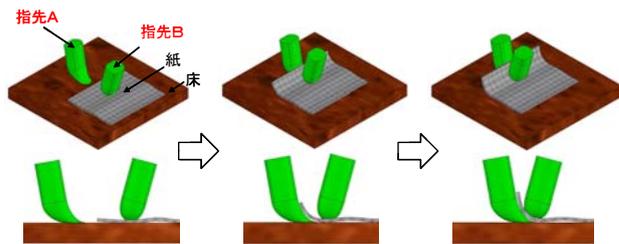


図1 基本原理

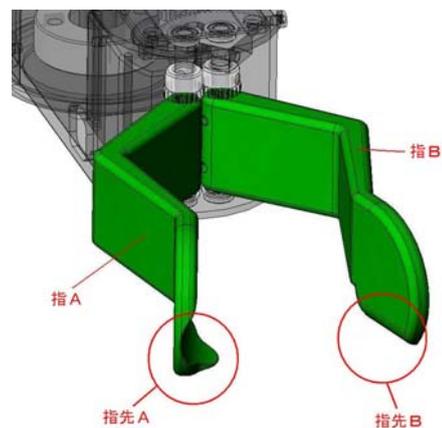


図2 グリッパー式ロボットハンドへの適用1

2. 1. 2 グリッパー式ロボットハンドへの適用1

図2はグリッパー式のロボットハンドの指先に前節の原理を適用したハンドの組立図である。指Aの先端下部に低摩擦で凹曲面を持つ指先Aを、指Bの先端下部に高摩擦で凸曲面を持つ指先Bを配しており、紙や小物を拾う際に使用する。また、ハンド先端の前方を円弧とすることにより、エレベータ等のボタンを押しやすい形状とした。ハンド先端の前方部分は人にも接触しやすい部分であるため、円弧形状にしたことにより安全性も確保できる。両指を樹脂（ポリアセタール）で形成し、指Bにのみアクリル・ウレタン・ゴムの共重合発泡体のシートを貼り付けることにより、低摩擦な指先A、高摩擦な指先Bを実現した。このロボットハンドを試作し、基本性能を確認した結果を図3に示す。意見4～6にある紙やエレベータのボタンを扱えることを確認した。また、本ハンドは1つのモータで駆動し、簡単な構造であるにもかかわらず、ペットボトルや筆記用具など、生活空間で使用する様々な物を扱うことが可能である。

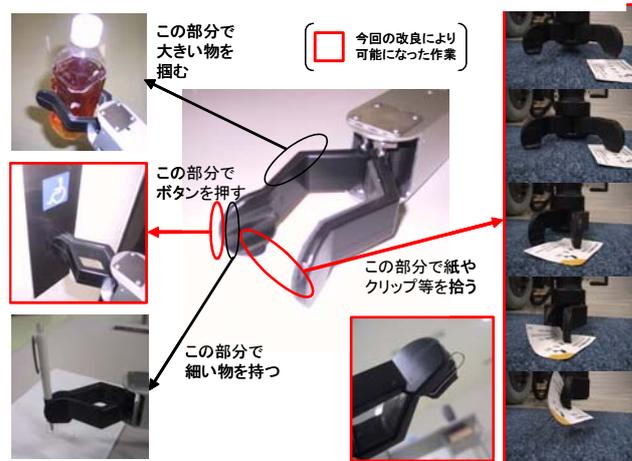


図3 基本性能の検証

2. 1. 3 グリッパー式ロボットハンドへの適用2

前節で適用したロボットハンドの指先Aは、通常、変形しないため、床が傾斜していたり凹凸があったりする場合に、床面に密着せず、薄い物がすくえない問題が生じていた。また、先端に鉛直で平らな部分が少なかったため、ハンド先端で細い物を持つ場合もやや困難であった。そこで図4に示すように、指先Aを弾性体（ゴム）に置き換えて新たにロボットハンドに適用した。この指先Aが床面に接すると変形し、おおよそ曲率半径が15mm程度になるように形状を設計した。

一般的に、ゴムは摩擦係数が高いが、指先Aは上述の通り低摩擦である必要がある。そこで今回、材料として

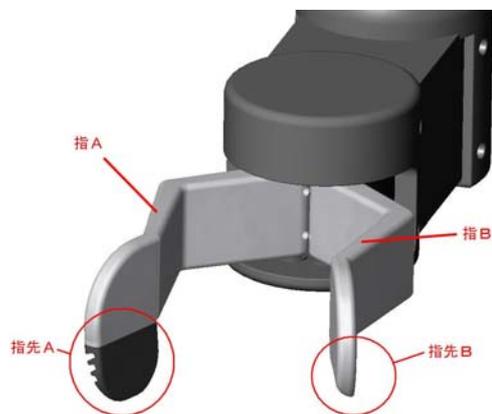


図4 グリッパー式ロボットハンドへの適用2

ウレタンゴムを用いて指先Aを形成（シヤ硬度Aは60程度）し、その上から表面処理をし、低摩擦化することを検討した。表面処理は別々に3種類行い、生活空間で代表的な床面と考えられるコーティングされた床と絨毯の上で、床に押し付けた時と同程度の鉛直荷重をかけたつ水平方向にバネ秤により引張り、最大静止摩擦係数を測定した。表面処理の種類ならびに測定結果を表2に示す。表面処理③のフッ素樹脂をベースにした表面処理が、本試験中では最も低摩擦化できることが分かった。

次に床面に接触させて、凹状の曲面を保ったまま滑らせることが可能かどうか試験を行った。図5左に示すように、凹状の曲面を保ったまま滑る場合は成功（○）とし、図5右に示すように、逆側に反り返ってしまった場合は失敗（×）とした。結果を表3に示す。表2の結果と照らし合わせると、最大静止摩擦係数が0.46以下であれば、所望の動作が実現できている。また、コーティングされた床、絨毯ともに成功したのは、表面処理③のみであり、試作機にはこの表面処理を適用することにした。

2.2 自動収納機能

表1の意見7を受け、利用者がベッド等から移乗する際に、マニピュレータを自動的に邪魔にならない位置に収納する機能を備えることにした。

これを実現するためには各軸の絶対位置を取得する必要があるが、これまで水平軸についてはコントローラ内蔵サーボモータの機能により取得できたが、上下方向についてはセンサを装備していないため、取得できなかった。今回、図6に示すように、水平方向のアームの根元部分にあたるスライドガイド部分に2個のリミットスイッチAとBを設けた。リミットスイッチAについては、収納位置に対して上部にあるか下部にあるか判断するためのドッグAを上部に設け、リミットスイッチBについては、上下の限界位置を判断するドッグB（本来はもっと離れた位置にあるが、説明の便宜上、図中では近距離に表示）を設けた。これにより、収納位置ならびに上下の限界位置を、2個のリミットスイッチのON-OFF信号により取得し、制御することが可能になる。本装置を試作機に実装し、収納機能を確認した。なお、ドッグは簡単に付け替えができるので、ベッド位置などの環境に応じて、収納位置を微調整することが可能である。

3. リスクアセスメントによるリスク低減

3.1 国際安全規格

ISO/IECガイド51により国際的な安全に対する考え方が示されており、WTO/TBT協定により国内規格（JIS等）もこれに準拠して改定が進んでいる。図7に、機械類に関する国際安全規格の体系を示す。全ての機械類で共通に利用できる基本概念、設計原則を扱うA規格を基本に、広範囲の機械類で利用できるような安全、又は安全装置を扱うB規格を組み合わせ、必要に応じて項目を追加・修正し、特定の機械に対して詳細な安全要件を規定するC規格が定められている。我々の開

表2 表面処理の種類と最大静止摩擦係数

表面処理	①	②	③
メーカー名	(株)ユニックス	(株)ダイゾー	(株)ダイゾー
製品名	UNY1	NTBX-W139	NTBX-140K
塗料の主成分	ウレタン	シリコンオイル	フッ素樹脂
床	1.86	0.86	0.43
絨毯	1.43	0.46	0.43



図5 滑り試験の成功/失敗写真

表3 滑り試験結果

表面処理	①	②	③
床	×	×	○
絨毯	×	○	○

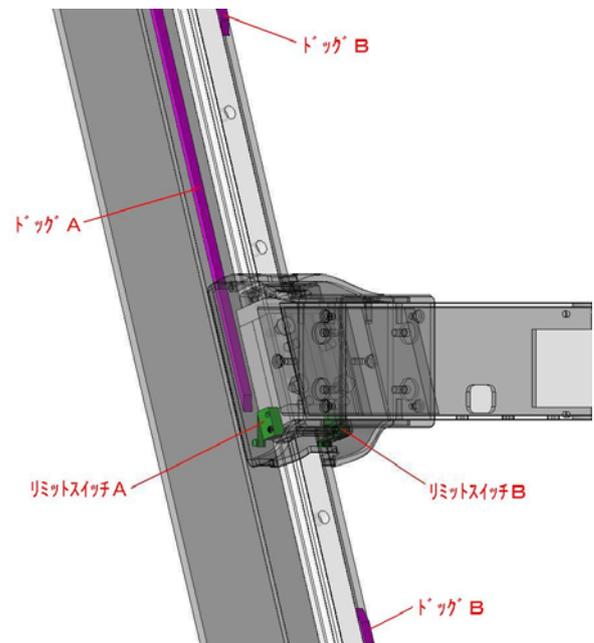


図6 リミットスイッチとドッグ

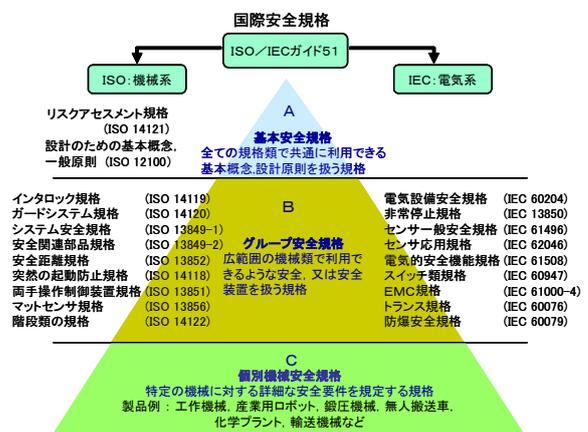


図7 機械類に関する国際安全規格の体系

発している電動車いす搭載用のマネジュラータも含め、人と同じ生活空間で作業するサービスロボットに関しては、現在、C規格は定められていない。経済産業省が平成19年7月に次世代ロボット安全性確保ガイドラインを策定しており、各団体が協力し、具体的な規格作成作業を進めている段階である。

3. 2 リスクアセスメントおよびリスク低減

前述のとおりC規格は定められていないので、今回はA、B規格および類似する機械を参考にリスクアセスメントおよびリスク低減を行った。具体的な手順を図8に示す。リスクアセスメントおよびリスク低減は、ISO14121 (JIS B9702^[2])およびISO12100 (JIS B9700^[3])により実施した。電動車いす本体はJIS T9203^[4]に準拠した標準品を使用するため、リスクアセスメントはマネジュラータと複合する部分のみ考慮した。図8中※1については、図9に示すようにマトリクス法により実施した。図8中※2については、米国のように合理的代替設計基準 (RAD:Reasonable Alternative Design) が日本にはないので、今回は独自に判断した。今後は判断基準や安全認証機関等の整備が待たれ、これにより実施すべきである。

安全技術は技術ノウハウにあたるため、共同研究契約上、すべては公開できないが、具体的に実施したリスクアセスメントおよびリスク低減策を一覧表にまとめた結果の一部分を図10に示す。元々、低出力でも駆動できるような機構にするなど本質的な安全設計をしていると考えていたが、それでも28箇所の危険源を同定し、その内半分にあたる14箇所は許容できないリスクレベルであることが分かった。これに対し、新たな保護方策を講じることにより、すべての危険源が許容レベル範囲内に収めることができる見通しを得た。

4. まとめ

機能を拡張する改良設計を実施し、試作機によりその有効性を確認した。またリスクアセスメントによるリスク低減を行った結果について報告した。今後は、共同企業が中心となり製品化に向けた開発が進められるので、しっかりと技術支援をしていく予定である。

謝 辞

本研究は、(財)テクノエイド協会の助成を受けて実施しました。ここに謝意を表します。また、本研究の遂行

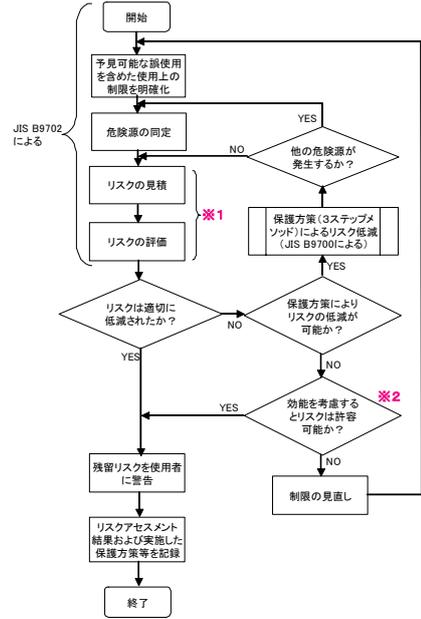


図8 リスクアセスメントおよびリスク低減の手順

被害の程度 被害の頻度	被害の程度			
	I. 重大災害 (死亡、又は身体障害 程度重く4級〜14級) 一人当たりレベル	II. 重症 (身体障害) 程度重く4級〜14級) 一人当たりレベル	III. 軽症 (身体障害) 程度軽く5級〜13級) 一人当たりレベル	IV. 予り備 (身体障害)に等しい 災害、 一人当たりレベル
A: しばしば起こる	1, ×	3, ×	7, △	13, ○
B: 耐用期間中に数回起こる	2, ×	5, ×	9, △	16, ○
C: 耐用期間中に時には起こる	4, ×	6, △	11, ○	18, ◎
D: 耐用期間中に起きそうもない可能性はある	8, △	10, ○	14, ○	19, ◎
E: 起きることは無いと推測される	12, ○	15, ○	17, ○	20, ◎

×: 基本的に設計の見直しが必要
 △: 顕在及び潜在的な危険性を軽減するように見直す
 ○: 重大な問題が生じることはないが、実施することが容易な設計上の変更は行う
 ◎: オペレータの快適性を促進するための設計変更を除き、現状のままでよい

図9 リスクの見積と評価の基準

にあたり、共にご検討下さいました(株)今仙技術研究所、早稲田大学菅野研究室、岐阜県立三光園、NPO法人バーチャルメディア工房ぎふの関係者皆様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 千原健司, 藤井勝敏, “身体障がい者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発—意見収集とマネジュラータの改良設計—”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.33-34, 2007.
- [2] JIS B9702 日本工業規格、機械類の安全性—リスクアセスメントの原則, 2000
- [3] JIS B9700 日本工業規格、機械類の安全性—設計のための基本概念／一般原則, 2004
- [4] JIS T9203 日本工業規格、電動車いす, 2006

No.	危険源同定				リスク見積/評価			保護方策			残留リスク見積/評価			備考		
	危険源の種類	危険区域/動作	危険状態	危険事象/危害	段階	対象	被害の程度	被害の頻度	リスクレベル	リスク評価	1:本質的安全設計 2:付加保護方策 3:付加保護方策 4:使用上の情報 5:制限の見直し	被害の程度	被害の頻度		リスクレベル	評価
1-1-1	1.機械的危険源 押しつぶしの危険源	ロボットアーム全体/ロボットの上移動時	可動範囲内に使用者または第三者が存在した場合にロボットアームが接触する。	低出力モータ、電流制限、タイミングベルトによるスリップにより速度の負荷は発生しないが、使用者に強い力を与えていけない身体箇所がある(実証試験により確認)	通常運転	使用者 第三者 物	III	A	7	△	2:使用者の接触に特に関係するアームの第1関節(写真1-1-1)に機械式リミットを設ける。 3:実証試験時には、委員が非常停止ボタンを押し、停止させる。 4:発生力を測定し、使用上の情報として提供する。 5:外力を与えてはいけない身体箇所がある使用者への使用を制限する。	IV	B	16	○	実証試験の結果により、通常運転では使用者に制限を設ける。
1-1-2	押しつぶしの危険源	関節1(写真1-1-2)/ロボットの上移動時	危険箇所使用者または第三者または委員が指を入れた場合	低出力モータ、電流制限、タイミングベルトによるスリップにより速度は負荷がないが、捕捉されおかつ車いすが動いた場合には骨折する可能性	通常運転 トラブル処理	使用者 第三者 委員	III	C	11	○	①指を挟み込まないように、隙間を25mm以上確保する。 ②もしくは、指を挟み込まないように蛇腹のガードを設ける。	IV	E	20	◎	EN12182:1999(障害者用テクノ/エイド—般的な要求事項と試験方法)
									5	×		IV	B	16	○	EN12182:1999(障害者用テクノ/エイド—般的な要求事項と試験方法)

図10 リスクアセスメントおよびリスク低減表の一部

身体障がい者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発 － 多様な操作装置の開発 －

藤井 勝敏 千原 健司

Development of High-Performance Electric Wheelchair

Katsutoshi FUJII Kenji CHIHARA

あらまし 電動車いすに走行以外の支援機能を装備させる本研究において、それらの機能を簡便に操作できるようにするための操作入力装置が必要であるが、利用者それぞれの身体条件に対応するためには、様々な形態や方式の入力装置が準備されるべきである。本研究では、多様な操作方式のいずれを選択しても、全ての支援機器を操作できるようにするための制御システムを開発するとともに、車いす標準装備のレバー式入力装置のほかに、押しボタンや加速度センサを用いた操作入力装置を試作して実験を行った。その結果、普段車いすを利用する被験者らがマニピュレータを使用する運搬作業を成功させることができた。

キーワード 電動車いす, 操作入力装置, 加速度センサ

1. はじめに

少子高齢化による将来の生産労働人口比率の減少を見込むまでもなく、昨今の景気後退と財政逼迫の状況から、人手による介助サービスへの対価を公的基金で賄うのは困難な情勢になりつつあり、障害者自立支援法に見られるように、保護から自立を促す構造的な改革が進められている。そのような情勢下において電動車いすは、自立歩行の困難な利用者がヘルパー等に頼らず、自らの意思で移動する手段を補助することによって自立を促すことを目的とした代表的な福祉機器の一つである。しかし、単に同等のサービスを利用するのに必要な人件費と比較してコスト的にメリットがある点ではなく、このような自立を促す機器において、電子・機械の要素技術が重要な役割を果たしていることに着目した。



図1 マニピュレータ搭載電動車いす

そこで電動車いす同様に、現在の電子・機械の技術水準において合理的なコストで実現可能な支援機器を開発することによって、障がい者のQOL(生活の質)を向上させることが、当研究所の果たすべき役割の一つであると考えている。筆者らは既報^[1]のとおり、過去のロボット類の研究開発経験を踏まえつつニーズ調査結果を基に、電動車いすにマニピュレータとテレビリモコン機能を搭載する研究開発を進めてきたが、本報ではこれらの機能の利用対象者の拡大を図るべく、制御システムの改善と、操作入力装置の選択肢を増やすための研究開発を実施し、実証実験を実施したので報告する。

2. 制御システムの改善

本研究の最大の特徴は、図1のとおり電動車いすにマニピュレータを搭載したことであるが、マニピュレータ操作に使用する主要な命令を10種類程度に絞ったことによって、容易に操作方法を理解できるようにしたことである。その操作入力装置を設計する際は、それらの命令さえる確に指示できるのなら、どのような形態、方式を用いても構わないため、利用者の利便性に配慮して自由に設計できる。具体的には、移動関係の動作命令の方向を直感的に分かりやすく配置するなどの配慮が必要になるが、押しボタンやレバー、各種センサモジュールなどのどれを組み合わせたとしても、有効な操作入力装置を構成することができる。

従って、単にマニピュレータ専用の操作入力装置を開発するのであれば、いかなる方法でも設計することができるが、この装置の主たる利用者には普段電動車いすを

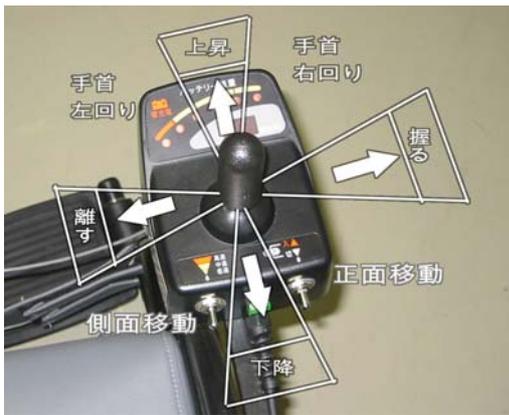


図2 標準レバーによるマニピュレータ操作

自分で運転している人を前提としていることから、その運転装置と共存できることを設計の条件に加える必要がある。共存の仕方には、

1. 車いす用、マニピュレータ用に別々の操作装置を搭載し、利用者がそれぞれを使い分ける
2. 利用者が使い慣れている車いす用の装置をマニピュレータ操作用に兼用する
3. 車いすとマニピュレータ両方を共通に操作できる新たな装置を使用する

の3通りがある。1の構成であれば、独立の制御システムを設計できるが、アンケートなどの結果によると、現実には複数の入力装置を持ち替えることが強い負担となる場合があるため、利用者の身体条件や利便性に配慮するならば、2,3の方法を選択できることが好ましい。

本研究のプラットフォームとして使用した電動車いすEMC-230(今仙技術研究所製)には、図2のような操作レバーが標準装備されており、前報ではこの標準操作レバーで電動車いすを操作できる利用者向けに、同じ操作レバーでマニピュレータが操作できる2の入力方式を提案した。標準レバーが利用困難な場合、ボタン式操作装置などがオプションとして供給されているが、マニピュレータ操作に兼用するにはボタン数が足りないなどの問題があり適さない。そこで今回はマニピュレータ用に開発した装置で車いすが動くという、3の方法が選択できるように制御システムの改善を行った。

2. 1 操作信号変換器

このような仕組みを実現するために図3に示す構成の制御システムを試作した。この構成の特徴は、車いす既存の標準レバーとスイッチの電気信号を一旦マイコンに入力し、ソフトウェアで処理した後、元の電気信号相当の信号を生成する仕組みにした点である。マイコンからマニピュレータ制御命令やテレビリモコン信号を発信する機能は従来通りであるが、マニピュレータ操作をするときにレバー操作で車いすが誤動作しないように特別な改造を必要としていた実装上の制限を解消している。

また、操作モード(制御対象機器)の選択方法については、電源スイッチをオフからオンに切り替えた直後は標準設定として車いす走行モードとし、マニピュレータの操作をする際は、電源スイッチ横に追加したモード切替用のボタンを押すことで切り替えられる(図4)。切り替えの結果、マニピュレータ操作モードに移るときはブザー音(ピーピー:モールス信号のA)を発するとともにモード表示用のLEDが点灯されるため区別できる。この切り替え操作は電源スイッチオフ時(標準でテレビ操作状態)にも有効である。

モード切替ボタンを2秒程度押し続けると、マニピュレータが収納動作を始める。収納動作中にもう一度ボタンを押すと、その動作を中断できる。このような切り替え方式に変更したことにより、3段トグルスイッチを使用していた前報の方法と比べて、マニピュレータ操作モードが単純化し、操作モードの把握が容易になった。

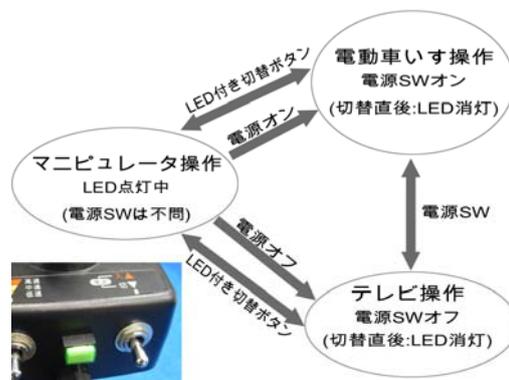


図4 モード切り替え

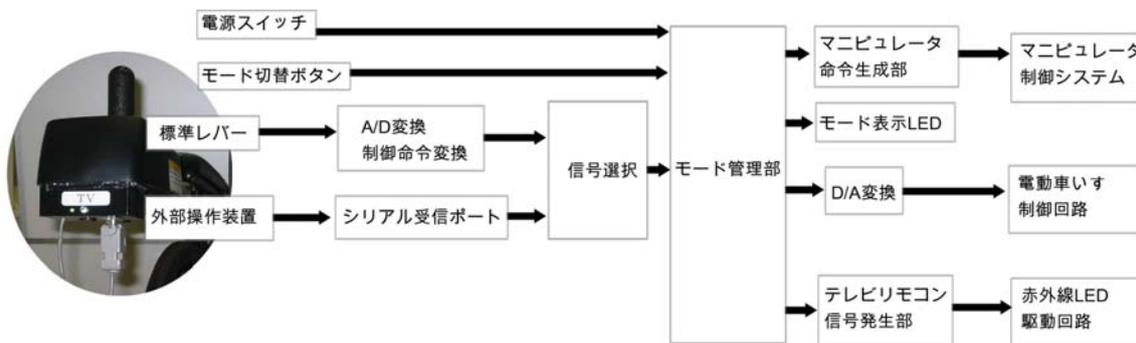


図3 操作信号変換器の内部システム構成

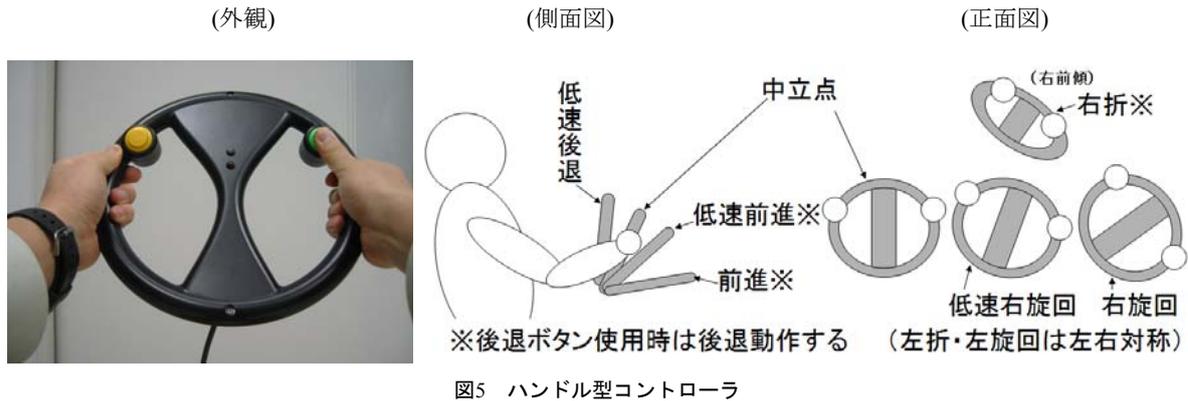


図5 ハンドル型コントローラ

外部操作装置の入力端子は電源供給兼シリアル受信ポートであり、任意の設計による操作入力装置から、規定の制御信号をマイコンなどで生成し送信することによって、標準レバー操作と同様に機器を操作することが可能である。なお、標準レバーの指示と外部操作装置の指示が異なる場合は、標準レバーによる操作を優先するようにしている(ソフトウェアで変更できる)。

2. 2 ハンドル型コントローラ

外部操作装置の一例として、自動車のステアリングハンドルを意識した図5のような操作入力装置を試作した。この装置には2つの動作ボタン(通常走行ボタンと後退ボタン)が点いているが、装置の内部には加速度式の傾斜検出センサ(KXM52-1050)とマイコン(PIC16F88)が組み込んであり、装置全体の傾斜状態を検知して、制御システム用の信号を発信する仕組みである。操作のしやすさ向上のため、また誤操作した場合でも転落のような重大事故を避けるために、

1. いずれかのボタンを押しているときのみ動作信号を生成し、離せば停止する
2. 前後、左右それぞれ中立時をLEDで提示
3. 普段は通常走行ボタンだけ使えばよい
4. 体勢を崩す恐れが高い高速の後退信号は、後退ボタンを押していなければ発信しないようにした

などの措置を施した。標準レバーと比較した場合の本装置の効果は、

- ① 多くの人に馴染みがある自動車用ハンドル型であるため、人生で初めて電動車いすに乗ることになっても抵抗感を和らげる
- ② 機械的動作部分が少なく磨耗の恐れがない
- ③ 両腕を大きく動かす操作であるため、廃用性萎縮の予防が期待できる

などを想定している。今回は車いす運転用に調整しているため、この装置を使ってマニピュレータを操作することは、不可能ではないが実質的に困難である。傾斜角度と生成信号の対応をマニピュレータ操作作用に調整すれば改善する見込みはあるが、敢えてこのハンドルでマニピュレータ操作をせずとも標準レバーで対処の方が実用的である。



図6 体験会の様子

3. 開発機器への評価

今回開発したマニピュレータ付き電動車いすおよび各種操作入力装置を、昨年同様、障がい者療護施設の岐阜県立三光園にて、理学療法士および職員の立会いの下、入所者に自由に触ってもらい体験会の形式で展示した。その際、体験内容として図6のようにペットボトルの搬送作業を準備し、最初に操作方法を説明してから、被験者自身が操作する様子を観察し、直接ヒアリングする方法で意見聴取を行った。

3. 1 12ボタン型コントローラ

最初に、マニピュレータの基本動作命令を各ボタンへ割り当てた操作入力装置(12ボタン型コントローラ)で実験したところ、適切な操作をすることができ、作業を完了することができた。ヒアリングによれば、前回使用したレバー入力方式よりも操作方法が理解しやすいとの感想であったが、ボタンを押すたびに手元とマニピュレータの手先を交互に見比べる動作が目立った。ボタン配置が完全に記憶できれば、よりスムーズな作業が期待できる。また、図6の被験者の場合、準備した操作装置では大きすぎて片手で保持することが困難な様子が見られた。試験的に電卓のボタンを押してもらったところ正確に入力できたことから、この被験者には、小型軽量の装置を準備することが適切であると考えられる。

3. 2 足を使う操作

次に、この12ボタン型コントローラを足の指で操作する被験者の様子を観察したところ、ボタンとマニピュ



図7 ボタンガイド

ータ動作の対応はすぐに理解できたようであったが、目的とするボタンと同時に別のボタンを押してしまうことがあった。そこで厚さ5mmの亚克力板製ボタンガイド(図7)を使用したところ、誤入力なくなり、順調に作業を達成することができたことから、改善効果が認められた。

なお、この被験者は普段は足で電動車いす標準レバーを操作して生活しているため、12ボタン式コントローラの実験の後にレバー式操作装置でマニピュレータを操作したところ、問題なく作業を達成した。さらに、この被験者の場合は操作レバーを見ずに足で扱うことに慣れているため、ボタン式のときよりもスムーズに操作できた。このことから、可能ならば使い慣れた操作入力装置をマニピュレータなどの拡張装置の操作に兼用する方法が有効であることが確認できた。

3. 3 その他の入力装置

標準レバーと原理的に同じ方式であるが、握るのではなく、指先の小さな範囲で動かして操作する入力装置(図8)を準備したところ、バネが強すぎて入所者の指先の力では動かせず、評価することができなかった。より軽い部品の選定か、指先移動量検出方式の見直しが必要である。

ハンドル型操作入力装置の評価は、入所者が移乗しての実験は現時点では危険であると判断したため、健常者による評価を実施したが、特殊な操作感覚に最初戸惑いはあったものの、少しの練習で上手く運転できる様子が見られた。電動車いすの標準レバーと比べての優位性は評価しなかったが、それに代替可能な装置の一つとして有効であり、利用者の選択肢を増やすことができたと言える。また加速度センサを応用しての電動車いすの操作が可能であることが分かったため、形態および装着方法を検討すれば、将来的には頸椎損傷等のレバー操作が困難な障がい者向けの操作入力手段と成り得る可能性も見出せた。



図8 小型レバー式操作入力装置

4. まとめ

移動支援を目的とする電動車いすに、物を拾うなどの支援機能を付加することで高機能化を図りつつも、利用者にとって、それらの新しい機能を使うことへ負担を極力抑えるためには、操作入力装置の設計・選択が重要な要素である。しかし、これらを必要とする利用者の身体条件は様々であり、個々に最適な入力方式を選択できるようにするためには、多様な操作装置を試作して準備しておくとともに、試用の際、容易に差し替えられるようにするためにインタフェース信号の共通化が必要であった。本年度はこの課題に取り組み、準備した上で電動車いす利用者らを対象とした体験会に臨んだところ、被験者によって準備した入力装置の向き不向きはあったが、当初から提案していた標準レバーによる操作方式を含めて、いずれの被験者もマニピュレータを使う作業を適切に完遂できる入力方式を提供することができた。

今後も様々なセンサデバイスを応用した操作入力装置を開発するとともに、画像処理や音声入力などからも同様な操作信号を生成できるようにすることで、利用者の選択肢を拡げていく計画である。

謝 辞

本研究は、財団法人テクノエイド協会の助成を受けて実施しました。ここに謝意を表します。また、実験に協力していただきました岐阜県立三光園入所者ならびに職員の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- [1] 藤井勝敏, 千原健司, “身体障がい者のQOLを大幅に向上させる高機能電動車いすの研究開発-多機能指示入力装置の評価と改良-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.35-38, 2008

身体への優しさを重視した作業動作カイゼン手法に関する研究開発

大野 尚則

Improve of the Motion in an Assembly Line

Naonori OHNO

あらまし 急激な少子高齢化により、近い将来、深刻な労働力不足に陥ることが懸念されている。そのため製造業を主幹産業とする岐阜県では労働者不足を補うために高齢者労働力の確保の重要性が更に高まると考えられる。本研究では高齢者の身体に優しい作業環境の実現を目指し、組立作業などの軽作業における筋肉の筋張力のデータに基づき、その作業性を評価する手法を提案する。本手法では作業空間内での基本動作について場所の違いによる負荷の度合いを身体負荷ポテンシャル場として定義し、この値が最小になる位置を最適な作業位置であることとした。ピッキング作業に関して評価した結果、右利きの身長170cmの作業者が奥行き40cmにある部品の組み付け作業を行う場合には高さ135cm、作業者中心から右40cmが最も身体的負荷が低いことがわかった。また、得られたデータからは一般成人と比べ高齢者は筋肉の負担が大きく、上半身の回転が伴う作業についてはその違いが顕著に現れた。

キーワード 改善, 作業性評価, 筋張力

1. 緒言

1. 1 背景

我が国では、急速な少子高齢化により平成7年をピークに労働人口が減少の一途をたどっており、近い将来、深刻な労働力不足に陥ることが懸念されている。厚生労働省のミレニアム・プロジェクトでは様々な視点から、高齢者が働きやすい製造現場を実現するための調査研究や基準づくりがなされた^[1]。

将来の超高齢化社会にむけて県内の主要産業である製造業における高齢者労働力の確保は重要な政策課題であり、そのため高齢者が働きやすい職場環境に関して改めて検討する必要がある。

1. 2 作業改善の取り組み

作業動作の改善に関する取り組みとして、作業者が歩く動線、部品位置、組立手順などから、動作のムダや時間的なムダを排除することが一般的である。これらの改善により副次的な効果として身体的負荷が軽減される場合もあるが、如何に効率的にモノを作るかといった視点に基づいて行われているため、すべてが身体に優しい作業になるとは限らない。

独立行政法人高齢・障害者雇用支援機構の共同研究事業では、身体的な負荷の軽減を目的とした多くの取り組みが報告されている^[2]。作業姿勢に注目して評価した事例や、人の動作を18の基本動作で分類しすべての作業はそれらの合成であるという考えから改善前後の作業性を数値的に比較し評価した事例が報告されている。これら

の手法は特殊なツールを使わない便利な手法であるが、腕の動きの方向や位置などといった詳細な動作の違いを評価することはできない。

1. 3 目的

本研究では岐阜県の主要産業である製造業において、少子高齢化に伴う労働力不足の解消と高齢者の雇用機会の増加に向けて、高齢者が快適に従事できる身体に優しい労働環境の実現を目的として、作業の身体的な負荷を最小にする作業改善手法の確立を目指す。

身体的負荷が低く、高齢者が従事しやすいと考えられるセル生産での組立作業を対象として長時間持続可能な作業環境の実現を目指し、任意の作業者に対して作業性を評価し快適な作業環境を提示する手法について検討を行う。

2. セル生産での組立作業の作業性評価

2. 1 身体的負荷の評価

身体的な負荷として疲労を用いる。疲労とは身体の使いすぎによる機能低下した状態という意味で用いられる。この疲労には肉体的疲労と精神的疲労に分けられるが、精神的疲労については解明されていない部分が多いため、本研究ではその仕組みが解明されている肉体的疲労を扱う。この肉体的疲労は主に3つに分類できる。

1) 重作業による疲労：

極度な負荷により筋肉が不酸素状態となり乳酸が蓄積し最大筋張力が低下する

2) 軽作業の疲労：

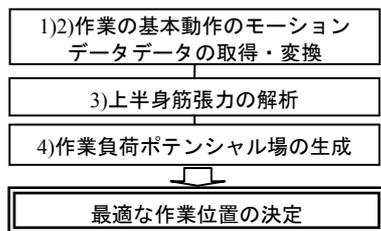


図1 作業環境の決定手順

筋肉の伸縮の連続に伴うエネルギー不足により最大筋張力が低下する

3) 血流不足による疲労：

筋肉の筋張力の持続により、血管が圧迫され血流量が減少することにより最大筋張力が低下し更に筋肉痛が生じる

本研究ではセル生産における組立作業の軽作業を対象とするため、2)3)が作業性評価の指標となるが、本年度は繰り返し作業による肉体的疲労について検討するため、2)についてのみ論じる。これに関しては、佐藤ら^[3]により、筋肉に与える疲労の指標として筋張力あるいは筋電位 (EMG) の積分値を用いることが有効であることが報告されている。よって本研究においても疲労の指標として、各筋肉の筋張力の積分値を用いることとした。

2. 2 提案する作業性評価手法

セル生産などの軽量部品を扱う組立作業における筋張力の発生はピッキング動作に占める割合が高い。したがって、各筋肉の筋張力の積分値を最小にする部品配置にすることにより、ピッキング動作に必要な筋張力は最小となると考えられる。

本提案では任意の作業姿勢から作業動作に係る全ての筋肉の筋張力の総和を身体負荷ポテンシャルと定義する。よって、すべての作業姿勢は作業内容・作業位置によって変化する身体負荷ポテンシャル場を持つ。本研究では、立位姿勢でのピッキング動作に注目し、ピッキング空間を身体負荷ポテンシャル場に関連づけて作業性を評価する手法を用いる。したがって、このポテンシャル値が高い位置ほどピッキング作業に係る身体負荷が高いため作業性が低いといえる。逆にポテンシャル値が低い位置でのピッキング作業は作業性が高いこととなる。

本研究で提案する手法は、一連の作業中に含まれる基本作業に対し、身体負荷ポテンシャルが最も最も低くなる作業姿勢と作業動作を求めるものである。その手順を図1に示す。

1)作業の基本動作のモーションデータの取得

身体負荷ポテンシャル場を生成するために、セル生産における組立作業にて想定される範囲内（手が届く位置など）での作業に含まれる基本動作のモーションデータを取得する。一般的に組立作業は「(ワーク又は部品の)ピッキング」「(部品のワークへの)組み付け」「(完成品を)置く」の3つの基本動作で構成される(図2)。複雑な組立作業も殆ど場合はこれらの組み合わせとなり、



「ピッキング」 「組み付け」 「置く」

図2 デジタルマネキンによる組立作業

これらの身体負荷ポテンシャルが最も低い動作となるピッキング位置が最適な作業位置であることとする。

基本動作「ピッキング」は手先が作業点から部品を取って作業点に戻るまでの動作であり、この動作に要した各筋肉の筋張力の積分値の総和が身体負荷ポテンシャルである。したがってピッキング位置によって身体負荷ポテンシャルが大きく変化する。また基本動作「組み付け」については作業者正面での作業台上での定点作業となるため、身体負荷ポテンシャルは作業台の高さに影響する。基本動作「置く」は作業の妨げにならない位置とし、複雑な組立作業においても1回のみである。

以上を考慮して実用上想定される範囲内において作業点の高さ、ピッキング位置を入力パラメータとした身体負荷ポテンシャル場を生成するためのモーションデータを取得する。

2)モーションデータの変換

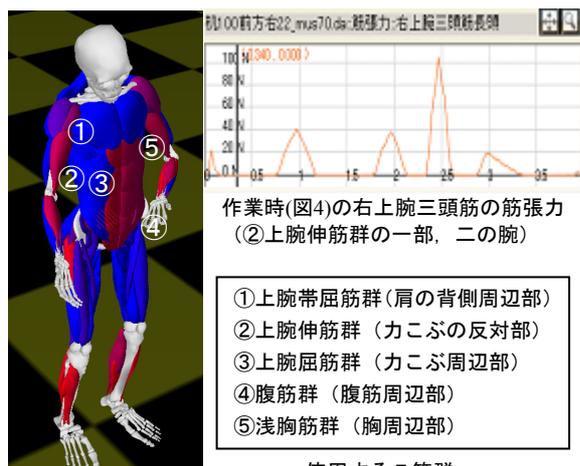
BVH(BioVison Hierarchical data)形式のデータを後述する筋張力解析システムの入力データ形式であるDIFF(Data Interface File Format)形式^[4]に変換する。BVH形式は拡張性が高い一方で身体形状や身体部位のラベル名が標準化されておらず、BVH形式からDIFF形式へ変換するための専用ツールを開発し、データ変換を行った。

3)上半身筋張力の解析

DIFF形式のモーションデータに基づき、セル生産での組み立て作業で使用する上半身を構成する筋肉の筋張力を算出する。筋骨系解析システムとしてARMO(株式会社ジースポーツ社製)を用いる(図3)。ARMOは関節数27、モデル化された筋肉192本を有する全身の筋肉シミュレータである。モーションデータから各筋肉の筋張力等を算出することが可能である^[5]。日本人の成人と高齢者の身体的慣性特性^{[6][7]}を加味しており、標準的な体型の筋張力を算出することができる。

4)作業負荷ポテンシャル場の生成

各基本動作の筋張力の総和を元に、作業空間における作業負荷のポテンシャル場を求める。本年度は組立作業の基本動作を対象にして作業性評価を行うため、作業の詳細作業に係わる指と手首の動きに必要な筋肉は対象外とする。図3に示す組立作業の基本動作に関係する上半身の5筋群の筋張力の総和を作業負荷ポテンシャルとして用い、作業負荷ポテンシャル場の極小値を最適な作業として決定した。



可視化画面
図3 筋骨系解析システムARMOと使用する5筋群

3. 実験

提案した作業性評価手法に対し実証実験を行った。

3.1 作業定義

想定した作業は図4のとおりであり、実験に使用した作業は、部品①に部品②、部品③、部品④を組み付けて、パレット⑤に完成品を置く、といった基本的な組立作業である。本実験では作業正面で高さ120cmを作業位置とし、ピッキング位置は高さ方向には80~150cmの範囲の10cm間隔、水平方向には作業正面を原点として-40, 0, +40cm, 奥行き方向には作業者の位置から40cmで固定した(図5)。これら24通りのピッキング作業をデジタルマネキンソフトウェアPoser (Smith Micro Software, Inc社製)でモデリングした。身長170cmの男性デジタルマネキンをを用い、1回のピッキングに要する時間を1秒に設定し、DVH形式でモーションデータをファイル出力した。

3.2 筋張力の解析とポテンシャル場の生成

24通りのピッキング作業に対し、作業者を身長170cm, 体重70kgとし、60歳以下の成人男性と、60歳以上の高齢者男性について、ARMOで筋張力の解析を行った。ARMOの身体セグメントパラメータとして、60歳以下の成人男性は文献6の値を用い、60歳以上の高齢者については文献7の値を内部的に用いている。

解析された各筋肉の筋張力データについて先に述べた5筋群について積分し総和を求め、身体負荷ポテンシャル場とした。そのデータを等高線表示したグラフを図6に示す。一般成人男性の右上半身と全身の身体負荷ポテンシャル場は図6(a), (b), 高齢者男性のデータは図6(c), (d)である。縦軸を床面からの高さ、横軸を作業者の中心からの水平方向への距離とした。

3.3 考察

図6の身体負荷ポテンシャル場のデータから身長170cmの右利きの作業者の組立作業におけるピッキング位置は、一般成人、高齢者共に高さ135cm, 右40cmが最適であり、その位置から内側にピッキング位置を設定し

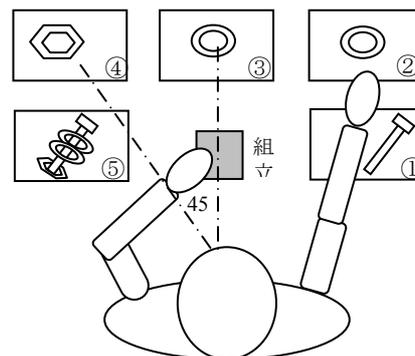


図4 実験における組立作業

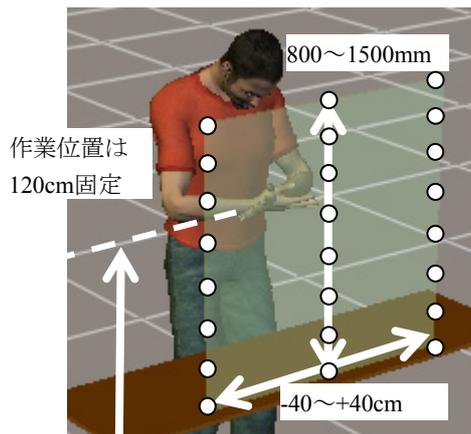


図5 ピッキングの範囲

た作業環境が最適であると推定できる。

また、図から、90cm以下の高さで利き手の反対方向20cm以上で急激に負担が増加することがわかる。

図6の一般成人と高齢者のポテンシャル場を比較した場合、身長、体重が同じである場合、全体的に高齢者の身体負荷ポテンシャルが高くなった。これは高齢者の下肢の筋肉の低下により、身体慣性特性のバランスが上半身に偏っている^{[6][7]}ことに起因することが考えられる。したがって高齢者は一般成人と比較し、同じ作業を行う場合にはポテンシャル値が高い上に筋力も落ちていることから身体的な負担が大きい。

また、腹筋群と浅胸筋群の体幹部分について一般成人と比較して、身体負荷ポテンシャル場の差が特に大きかった(図7)。本データからは、高齢者にとっては、体幹が動かないような動作が望ましいと考えられるが、筋肉の緊張状態が持続する場合には2.1で述べた血流圧迫による疲れとなる場合が考えられ、腰痛などの原因となる場合があるため、筋肉の適度な伸縮が必要である。本年度の作業改善手法には、筋張力の持続や、筋肉の休息による回復については考慮しなかったため、今後、このような項目も加えることを検討する。

4. まとめと今後の課題

高齢者の身体に優しい作業環境の実現を目指し、組立作業などの軽作業において筋肉の筋張力のデータに基づき、作業性を評価する手法を提案し、基本的な組立作業

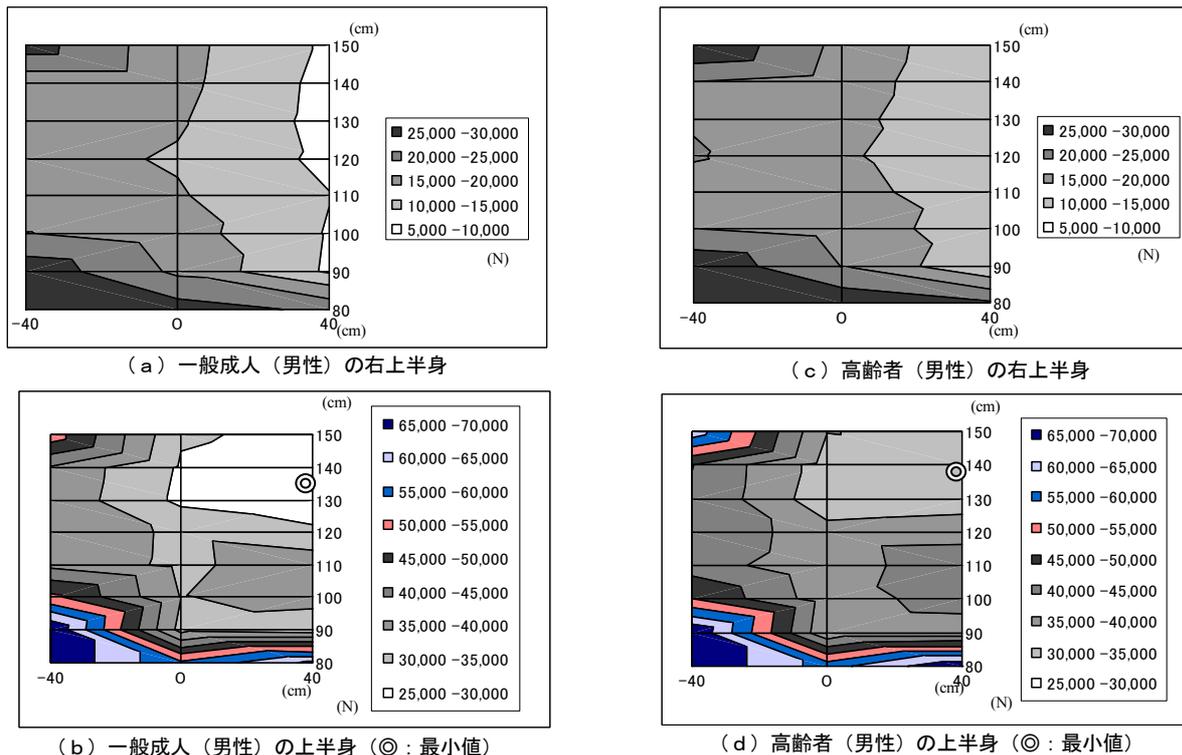
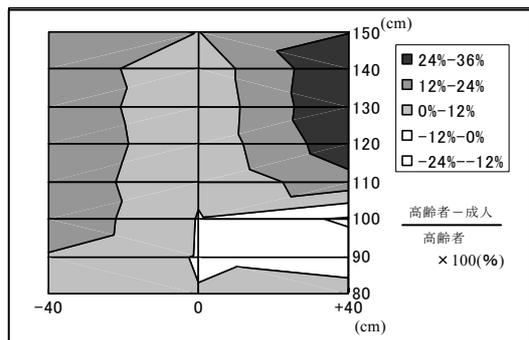


図6 身体負荷ポテンシャル場の等高線グラフ



を例に実験を行った。その結果、右利きの身長170cmの作業者が、奥行き40cmにある部品の組み付け作業を行う場合には高さ135cm、前方右45°が最も身体的負荷が低いことがわかった。

今後、今回生成されたデジタルマネキンでモデリングされたデータを元に生成された身体負荷ポテンシャル場と、モーションキャプチャ装置を用いて取得した動作データを用いて生成された負荷ポテンシャル場を比較し、その整合性を評価する。

また、本年度は筋張力の積分値とその和を用いて作業性を評価したが、腰痛などといった筋張力が持続した場合や筋張力が働いていない場合の筋肉の回復については考慮していない。今後、これらの要素も含めつつ、実際の組立作業に対して実証実験を行い、本手法の有効性を示す。

謝 辞

モーションデータの取得について板東主任研究員をはじめ岐阜県生活技術研究所の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] 厚生労働省, “ミレニアム・プロジェクト (高齢者の雇用・就労を可能とする経済社会の実現のための大規模な調査研究) の最終報告”, 厚生労働省ホームページ, 2002.
- [2] 株式会社トーエネック, “配電作業における作業者負担の定量評価法の開発とそれに基づく作業支援システム設計に関する調査報告”, 共同研究年報H16, pp.31-54, 2005.
- [3] 佐藤ら, “随意収縮および電気刺激による筋非老後の筋電図学的解析”, 山形保健医療研究第9号, pp.11-17, 2006.
- [4] 臨床歩行分析研究会, “DIFF解説書”, 1999.
- [5] 黒田篤, “Inverse Dynamicsによる筋活動シミュレーションと可視化技術”, 日本トレーニング学会学会誌第20巻2号, 2008.
- [6] 阿江ら, “日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定”, バイオメカニズム11, pp.18-61, 1992.
- [7] 岡田ら, “日本人高齢者の身体部分慣性特性”, バイオメカニズム13, pp.125-139, 1996.

リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発

- 個別ユニットエミュレータの試作 -

横山 哲也 田畑 克彦 藤井 勝敏 大野 尚則 稲葉 昭夫

Development of Real-time Emulator for Industrial Machine

- Prototype of Emulator for Arm Robot -

Tetsuya YOKOYAMA Katsuhiko TABATA Katsutoshi FUJII
Naonori OHNO Akio INABA

あらまし 産業用機械の組込みソフトウェアの開発には、実機の動作を模擬するエミュレータの活用が有効である。本研究では、産業機械を構成する個別ユニットを制御する組込みソフトウェアの検証用エミュレータとして、組込みソフトウェアの挙動と論理的に同期して実機の動作を模擬する「個別ユニットエミュレータ」の開発を行った。本稿ではその試作について報告する。

キーワード 組込みソフトウェア, マイコン, エミュレータ, HIL (Hardware In the Loop)

1. はじめに

近年、製造業で多用される産業機械の開発期間は短縮傾向となっている。また、産業機械における組込みソフトウェアへの機能要求が高度化している。このため、組込みソフトウェアの検証時間が十分に確保できずに、機能安全性の低下を招いている。実機と、実機を動かす組込みソフトウェアの統合検証は、両者の完成を待って行われる。多くの場合、組込みソフトウェアが先に完成することから、実機が完成するまでの間に手待ち状態が生じ、開発効率が低下する。また、複数の部署が開発を行う場合、実機が部署数分ないと並行して検証を行うことができないため手待ち状態が増加し、更に開発効率が低下する。この解決策として、数値計算に基づき実機と同様に振舞うシステム（以下、エミュレータ）を用いて、実機の完成を待たずに検証を行う手法、HIL(Hardware In the Loop)^[1]がある。HILは開発期間が短い自動車業界において、電装部品ECU(Electronic Control Unit)の検証に、多く活用されている。

エミュレータを実現するにあたり、組込みソフトウェアが実装される組込みコントローラとエミュレータ間で計算を同期させる必要がある。これは両者のクロックおよび計算量が異なることを前提に、論理的な時間軸（以下、論理時間）を同期させることである。先述のECU検証で利用されているHILによるエミュレータは、専用ハードウェアを用いてエミュレータクロックをECUクロックより速くすることで、同期を実現している。つまり、エミ

ュレータを高速化することで組込みコントローラの計算周期に同期している。しかしながら、エミュレータは組込みコントローラのクロックより高速な装置を用意しなければならないため、必然的に高価となる。

本研究では、産業機械を構成する個別ユニットの機構の挙動を、組込みコントローラの挙動と論理時間軸で同期して計算する「個別ユニットエミュレータ」を開発する。計算周期を論理時間軸で同期させることで、高速クロックの装置を用意する必要がなく、廉価な装置を開発できると考える。本稿では、平成19/20年で開発した個別ユニットエミュレータの試作について記述する。

2. 個別ユニットエミュレータ

個別ユニットエミュレータは、図1に示すエミュレータ部、デバッグインターフェースとデータコンバータで構成され、組込みコントローラで制御される。以下に、個別ユニットエミュレータの構成要素について記載する。

2.1 エミュレータ部

エミュレータ部は、産業機械を構成する個別ユニットの機構の挙動を、組込みコントローラの挙動と論理時間軸で同期して計算する。本研究では個別ユニットとしてアームロボットを取り上げ、機構解析ソフトMD adamsと数値計算ソフトMatlab/Simulinkを用いて、エミュレータ部を構築した。

エミュレータ部は、入出力部、モータモデル部、機構モデル部の3つのモジュールで構成される。入出力部は、

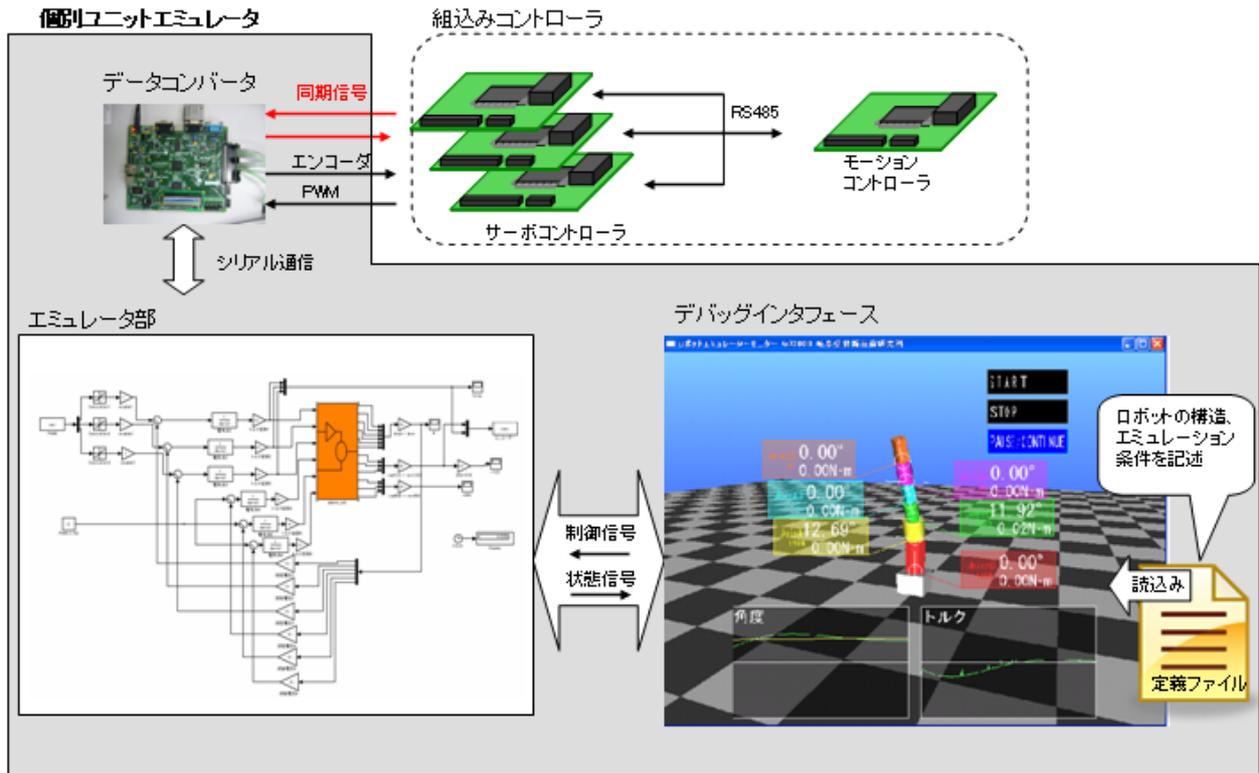


図1 個別ユニットエミュレータの構成

組込みコントローラからデータコンバータを介して制御信号を受取り、モータモデル部と機構モデル部の処理結果を、データコンバータを介して組込みコントローラに出力する。モータモデル部は、組込みコントローラからの制御信号と機構モデル部でのエミュレーション結果に基づいて、電氣的な挙動を模倣する。機構モデル部は、個別ユニットのアームロボット機構部分のモデルデータとモータモデル部の出力（トルク情報）に基づいて、機構の挙動をエミュレートする。

エミュレータを実現するにあたり、組込みコントローラとエミュレータ部間で計算の歩調を同期させる必要が

ある。本研究では、組込みコントローラの計算周期をエミュレータの計算周期に合わせる手法とした。同期信号のフラグに基づいて、エミュレータ部と組込みコントローラをあらかじめ定めた論理時間だけ実行することにより、両者の挙動の同期を実現した。

図2に機構解析ソフトで構築したアームロボットの機構モデルを示す。ロボットの機構は6関節を有するシリアルリンク型で、各関節には減速器を備えた構造となっている。

2.2 データコンバータ

データコンバータは、エミュレータ部と組込みコントローラとの通信を行うユニットである。その機能は、開発対象となる複数の組込みコントローラから送信されるモータ駆動用のPWM信号を計測し、必要データをエミュレータ部に送信すること、また、エミュレート後のモータ回転角を表すエンコーダデータを解析し、各コントローラにエンコーダパルスをフィードバックすることである。

前述したデータコンバータの機能は下記の3つの通信に分類することができる。これらの通信は、同期信号線を用いて送受信を行う。この通信の接続図を図3に示す。なお、図中では組込みコントローラの数として3としている。

組込みコントローラ間通信（モータ駆動関連）

各コントローラから指令値として、モータ駆動のためのPWM信号のパルス幅と回転方向を受信し、計測する。

現在、3個のコントローラが接続されており、それぞれの計測結果を時系列的に変換する機能を有する。



図2 アームロボットの機構モデル

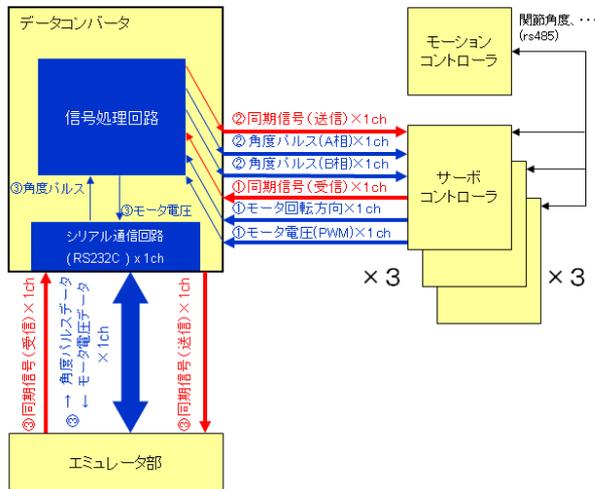


図3 データコンバータ信号配線図

組込みコントローラ間通信 (関節角度パルス関連)

エミュレータ部にて計算した結果として、制御周期間のモータ回転数(エンコーダパルス数)と回転方向が、データコンバータにシリアル通信で送信される。データコンバータは受信したデータをもとに、各コントローラへ擬似的なエンコーダパルスをパラレルに送信する。

エンコーダ送信用の信号は、A相およびB相パルスを生成可能とし、これらに位相差をもたせることで、実機と同様の手法でモータ回転方向を表現できる。

エミュレータ部間通信

エミュレータ部とデータコンバータとの通信は、1CHのシリアル通信を用いて行う。データコンバータは、3個のコントローラからのモータ駆動関連の信号をほぼ同時に受信するので、これらの信号情報を1CHで送信できるよう変換する。また、データコンバータは、エミュレート後の3個のコントローラに関する関節角度関連の信号を受信後、を介して各コントローラへ同時に送信する。

2.3 デバッグインターフェース

デバッグインターフェースは、エミュレータ部の計算結果を表示する機能、およびエミュレータ部に対する制御機能を有する。図1に記載する定義ファイルで、デバッグインターフェースの制御機能を定義することができる。デバッグインターフェースの具体的な機能を以下に記す。

▶ エミュレータ部の計算を一時停止/再開。

...GUI に表示されるボタンのクリックによって、エミュレータ部に制御信号を送ることができる。

▶ 計算結果の表示とログ保存

...エミュレータ部から送られてきたロボットの関節角度およびトルクデータを、数値として表示するとともに、グラフとしても表示する。また、ログファイルとしても記録し、後から参照できるようにする。

▶ ロボット機構のCG描写

...定義ファイルで記述されたロボットの構造に従って、CGで表示する。

▶ 条件ブレーク

...定義ファイルでロボットの関節角度、トルクの値の閾値を設定する。その閾値を越えた値を受信すると、エミュレータ部に対して、一時停止の制御信号を送る。

▶ ステップ実行

...エミュレータ部の計算を1ステップ毎に実行できるように、制御信号をエミュレータ部に送る。

図1に記載する定義ファイルでは、エミュレータ部にどのようなデータを送信するか、ユーザが決めることができる。また、ロボットアームの形状および構成も記述可としている。

3. 動作確認

個別ユニットエミュレータと組込みコントローラを用いて、アームロボットの動作を制御できるか確認する。

アームロボットの動きは、図1に記載する組込みコントローラを用いて制御する。組込みコントローラは、モーションコントローラとサーボコントローラに分類される。モーションコントローラはPCから送られるコマンドを解釈し、サーボコントローラにコマンドを送信する。サーボコントローラは、アームロボットの関節毎に用意され、ロボットの関節角度を制御する。ただし、ここではベース関節からの関節#1~3に対してのみ、サーボコントローラを用意した。図4に、組込みコントローラの構成を示す。PCとモーションコントローラ間はPeer to Peer (RS232C)、モーションコントローラとサーボコントローラ間はマルチドロップ (RS485) となっている。

関節#1に対して目標角度5度、関節#2に対して目標角度10度、関節#3に対して目標角度15度を与えた際のデバッグインターフェース画面を図5,6に示す。図5は目標値を与えた直後のスナップショットであり、グラフよりトルクが垂直に立ち上がっていることがわかる。図6は十分な時間が経過したあとのスナップショットで、目標角度に対して近い値にロボット関節が動いていることが、数値表示からわかる。

以上より、組込みコントローラを用いてアームロボットのエミュレータを制御し、その際のエミュレータ計算結果を、デバッグインターフェースを介してモニタできることを確認した。

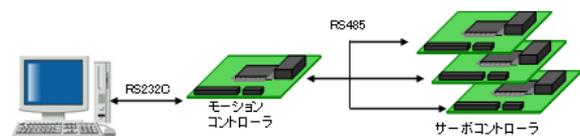


図4 組込みコントローラの構成

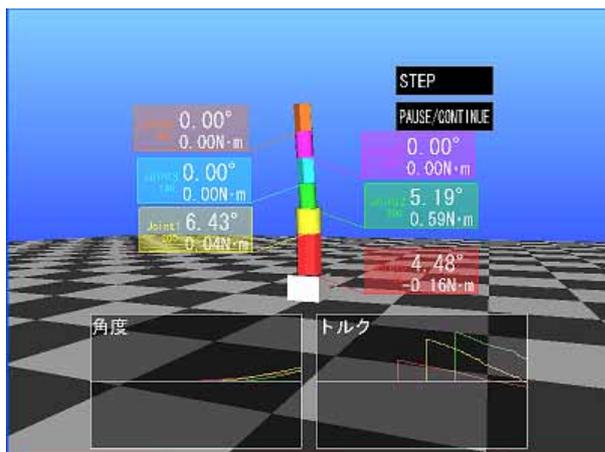


図5 デバッグインターフェース表示(1)

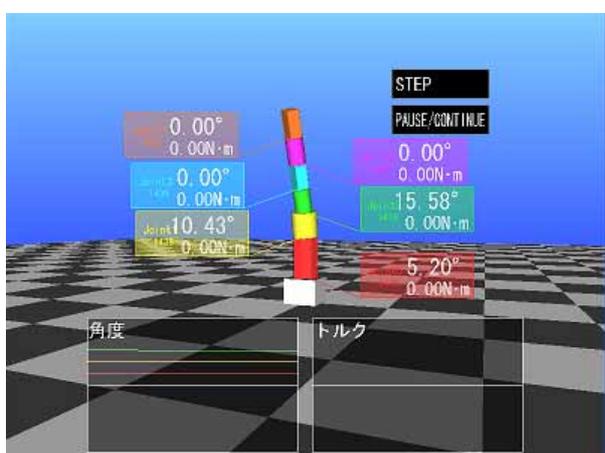


図6 デバッグインターフェース表示(2)

4. まとめ

本稿では産業機械を構成する個別ユニットと、組み込みコントローラの計算周期を論理時間軸上で同期させて模倣する「個別ユニットエミュレータ」の試作について述べた。

現在、個別ユニットエミュレータの機構解析部分を市販の機構解析ソフトウェアを用いて研究を進めているが、将来的にこの部分をハードウェア化することでより高速化・低コスト化を図り、実用化を目指す。

謝 辞

本研究は、経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業の一環として実施しました。

文 献

[1] dSPACE社, “ Solutions for Control 日本語版”, 2007.

クリーン農業を支援するロボット(アイガモロボット)の 応用技術に関する研究

光井 輝彰 広瀬 貴士* 遠藤 彰将** 鍵谷 俊樹* 大場 伸也*** 稲葉 昭夫

Research on Applied Technologies of Robot “AIGAMO ROBOT” for Clean Agriculture of Paddy Fields

Teruaki MITSUI Takashi HIROSE* Akimasa ENDO**
Toshiki KAGIYA* Shinya OOBA*** Akio INABA

あらまし これまでに、農業分野におけるロボット技術の応用として水田用小型除草ロボット（アイガモロボット）の開発を行ってきた。また、これを利用した水田内除草作業について、圃場実験を通してその有効性を確認しており、昨年度からは県内の3箇所の水稲栽培圃場に試験圃場を広げ、環境の異なる圃場での除草効果や、長期経年的な除草効果について調べている。本報では2年目となる県内3か所の水稲栽培圃場における除草実験の結果と、今年度から新たな試みとして開始したマコモ（水田の転作作物、健康野菜として注目されつつあり、県内では瑞浪市が特産化を図っている）栽培圃場における除草実験の結果について報告する。

キーワード ロボット, 除草, クリーン農業, 水稲, マコモ

1. はじめに

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

本研究では除草剤に代わる新たな除草手段として、水田用除草ロボットの開発を進めており^[3]、今年度は昨年度に引き続き、平野部（岐阜市）、中山間地（中津川市）、高冷地（飛騨市）の環境の異なる県内3箇所の圃場においてロボットの除草効果を調べた。また、昨今注目されつつあるマコモの栽培圃場においてもロボットによる除草実験を行い、その応用性について検討した。

2. ロボットによる水田内除草作業

ロボットによる除草作業は、稲を跨いで水田内を走行するだけである（図1）。除草（抑草）効果は主に以下の

要素から得られる。

- ・クローラによる雑草の踏み潰し
- ・クローラによる表層土壌の攪拌、雑草の掻き出し
- ・土壌攪拌による水中照度の低下の他、濁水中に浮遊する粘土粒子の土壌表面と幼雑草への堆積^[4]

水稲栽培における作業期間は、田植後の苗が活着する約1週間後から、生長して雑草害がほとんど問題にならなくなる約7週間後までの期間とする。

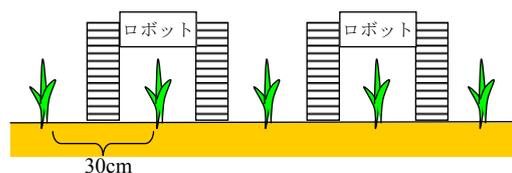


図1 ロボットによる除草作業イメージ

3. 水稲圃場での除草実験

除草実験は、標高、気候、土質や雑草種など各種条件の異なる県内3箇所の圃場で行った。表1に各試験圃場の特徴と実験のスケジュールを示す。

表1 試験圃場と実験スケジュール

場所	岐阜市	中津川市	飛騨市	
圃場標高	10m	390m	493m	
平均気温	16.2	13.9	11.3	
土壌	灰色低地土	多湿黒ボク土	灰色低地土	
供試品種	ハツシモ	コシヒカリ	コシヒカリ	
施肥	無施用	慣行への字	無施用	
試験区総面積	約400㎡	約140㎡	約75㎡	
日程	代かき	5/30	5/19	
	除草作業期間	6/6~7/25	5/26~7/14	5/26~7/14
	残草調査日	7/30	7/17	7/17

* 岐阜県中山間農業研究所

** 岐阜県東濃地域土岐農業改良普及センター

*** 岐阜大学

3. 1 実験方法と実験の様子

図2に実験で利用した試作ロボットを、表2に緒元を示す。実験ではロボットの操作はラジコンで行い、クローラ走行による除草効果を検証した。3か所の試験区に共通する試験条件として、週3回の往復走行による除草作業を設定した。

実験中のロボットは、圃場の土壌が締まった状態では図3のように安定した姿勢で約50cm/sの速度で走行が可能であったが、代掻き直後の軟弱土壌では、進行方向前方が持ち上がり、走行に苦勞する場面が見られた(図4)。また、岐阜市の試験区では面積を増やしたこともあり、ギアヘッドの損傷が頻発した。そのため、ロボットの軽量化や足回りの再改良が必要である。

3. 2 除草実験の結果

図5, 6に中津川市試験区の除草実験終了時点での圃場の様子を示す。無処理区は水面が見えないほど雑草が繁茂している。ロボット除草区は、無処理区に比較して明らかに雑草が少なく、残草はクローラベルトで走行出来ない株間(株際)に確認できる程度である。

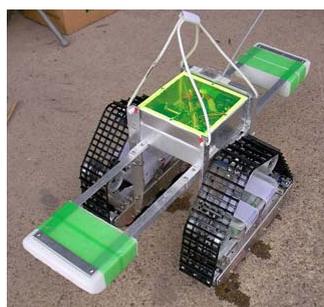


図2 試作ロボット

Length	400mm
Width	400mm
Hight	370mm
Width of Crawler Belt	90mm
Weight	4500g
Motor	380motor
Gear Ratio	59.77
Battery	Ni-HM3300mAh 7.2V



図3 ロボットによる除草作業



図4 軟弱土壌での走行の様子

図7に各試験圃場の残草調査結果を示す。グラフは残草乾物重の無処理区に対する割合と重量を示す。3か所の試験圃場ともに無処理区と比較して明らかに雑草が減っている。ただし、各試験区間で結果に大きな差があり、岐阜市と飛騨市の残草乾物重は大きな値となった。中津川市と比較すると全体的に雑草の量が多いことから、前作条件の違いによる土壌中の雑草種子量の違い等が影響していると考えられる。

米の収量は、残草乾物重の最も少なかった中津川市で比較したところ、除草剤を使用した試験区の約98% (慣行施肥) と88% (への字施肥) であった。残草のほとんどは株間に集中しており、収量の減少の無い良好な除草効果を得るためには株間の除草性能の向上が課題となる。



図5 無処理区 (7/22 中津川 への字施肥)



図6 ロボット除草区 (7/22 中津川 への字施肥)

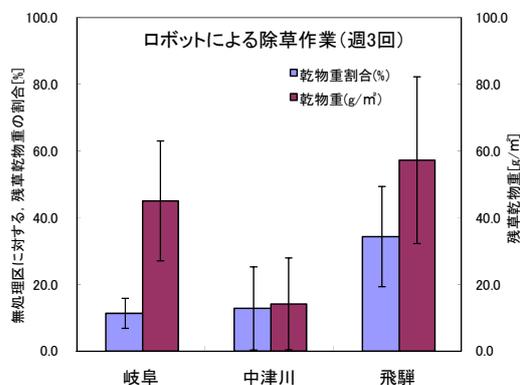


図7 各試験圃場の残草調査結果

4. マコモ圃場での除草実験

マコモは水田の転作作物、健康野菜として近年注目されており、県内では瑞浪市が特産化を図っている。イネ科の大型多年草で、春に株分けした30cm程度の苗が、秋には2メートル以上に育ち、肥大化した株元の新芽（マコモタケ）は食用や薬用として利用されている。ただし、マコモには登録農薬が無いため、現状では手取り除草が基本であり、雑草対策はマコモ栽培における大きな課題となっている。

4. 1 実験方法と実験の様子

マコモの試験圃場を図8に示す。一枚の水田を波板で3区画に仕切り、左手前から順に無処理区、紙マルチ処理区（紙マルチは土壌表面を覆うことで、雑草の生長を抑制する紙。5月21日に設置）、ロボット除草区とした。

実験で使用したロボットは図2のロボットと基本的に同じであるが、水稻圃場のように稲を跨いで走行する必要がないため、ロボットのクローラ間にローラーを取り付け、除草効果の向上を図った（図9）。さらに、図10に示すようにマコモは疎に植ええられるため、条間1.8mと株間1mの間をロボットは自由に走行することができる。そこで、図11のように条間と株間の両方向にロボットを走行させ、ロボット除草区の中で部分的に走行（除草作業）の密度に違いを持たせた。ただし、仕切りを設け

ていないため、土壌攪拌の効果は拡散することになる。

除草作業は5月2日から7月7日までの約2カ月間、週2回の頻度で行った。残草サンプリングは7月11日に行い、調査結果を図11に示す「条間と株間」「株間のみ」「条間のみ」「濁りのみ」の4つの部分毎にまとめた。

4. 2 除草実験の結果

図12に除草作業終了時点の圃場の様子を示す。浮草が多く水中の様子は分からないが、ロボット除草区は水面上に出てくるような雑草は無く、株際まできれいに除草されている。雑草が非常に多い無処理区とは対照的である。紙マルチは苗の移植後の条間に敷いたため、紙マルチで覆われた部分は雑草が無く効果が出ているが、紙マルチで覆えなかった株間の部分で雑草が繁茂している。

図13に残草調査の結果を示す。無処理区と比較してロボット除草区の残草は非常に少ないことが分かる。特に条間と株間を走行した部分にはほとんど雑草が残っておらず、非常に高い除草効果が確認された。



図9 マコモ圃場で使用したロボット

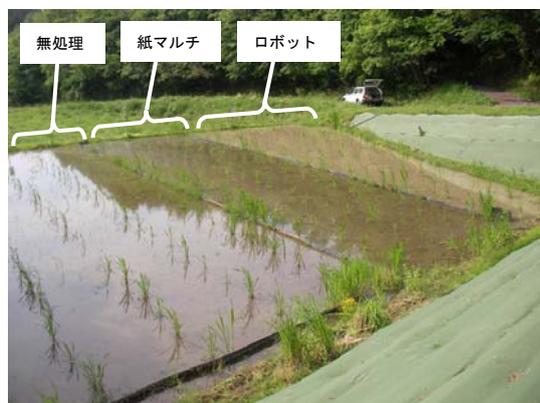


図8 マコモの試験圃場



図10 実験の様子

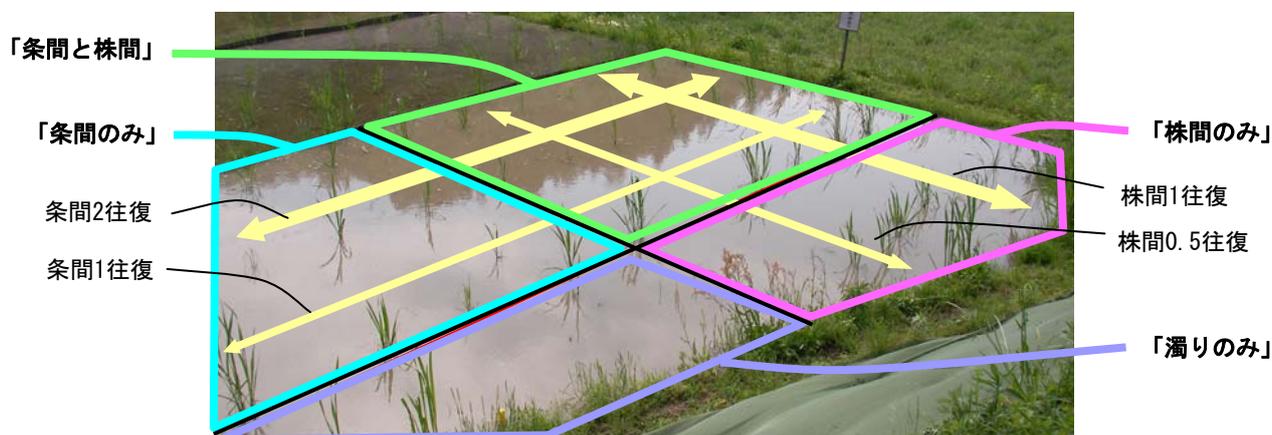


図11 ロボット除草区内での走行方法と区分け



図 1 2 各試験区の状況(7月7日)

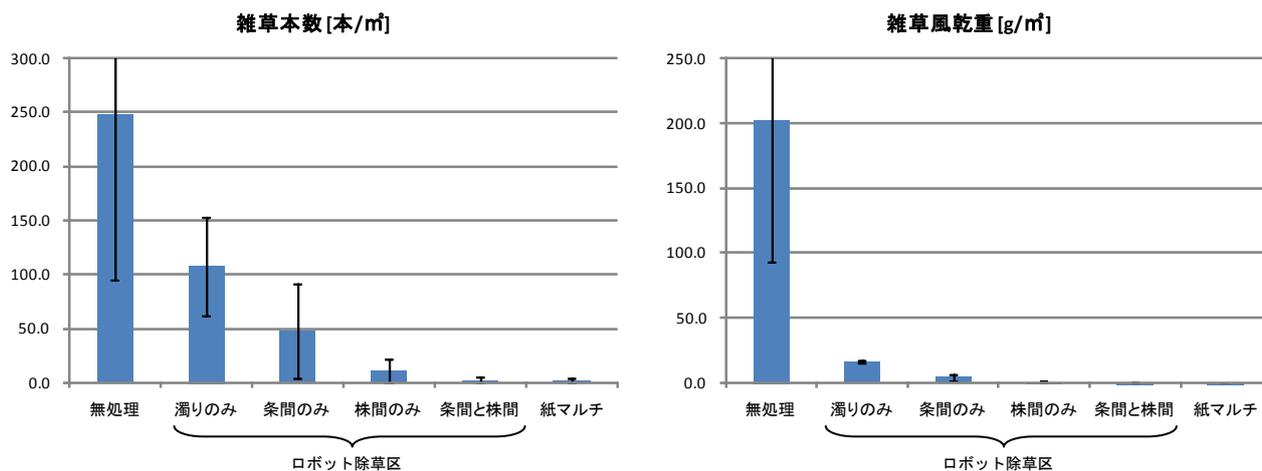


図 1 3 マコモ圃場の残草調査結果

5. まとめ

昨年度に引き続き、県内3か所の水稲栽培圃場において、ロボットの除草作業による雑草量の減少を確認した。ただし、3か所の残草数には大きな開きが見られた。米の収量を確保し、更なる除草効果を得るためには株間(苗際)の除草性能の向上が必要である。

マコモ栽培圃場においては、非常に良好な除草効果が得られた。ロボットは水稲栽培圃場のように稲株を跨ぐ必要が無く、圃場内を自由に苗際まで走行出来ることから、ロボットによる除草作業には水稲以上に適していると考えられる。

今後は、株間除草性能やロボットの走行性能の向上等、ロボットの実用化を目指した研究開発を企業との連携の下で進める予定である。これに関しては、今年度後半より、経済産業省の地域イノベーション創出研究開発事業において実施中である。

文 献

- [1] 農林水産省 環境保全型農業関連情報
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/
- [2] “ぎふクリーン農業”
<http://www.pref.gifu.lg.jp/pref/s11435/clean/index.html>

- [3] 光井輝彰, 小林孝浩, 鍵谷俊樹, 稲葉昭夫, 大場伸也, “アイガモロボットの開発”, 日本ロボット工業会機関誌, ロボット177号, pp.20-25, 2007
- [4] 福島和敏, 保田謙太郎, 芝山秀次郎 “田面水の攪拌が雑草の発生に及ぼす影響”, 雑草研究, Vol.48 (別), pp224-225, 2003

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 水田除草用自律走行ロボットのための稲列検出手法の開発 —

平湯 秀和 田中 等幸

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

- Development of Rice Plants Detection for Weeding Robot -

Hidekazu HIRAYU Tomoyuki TANAKA

あらまし 近年、農産物において、消費者の安心・安全・健康への関心が高まってきているため、農業生産者は環境負荷に配慮した生産方式が求められている。岐阜県では、化学合成農薬の節減を基本とする「ぎふクリーン農業」を推進し、その一環として当研究所では、水田除草を目的とした除草ロボットを開発し、除草効果を実証してきた。本研究では、除草ロボット自律走行のための稲列検出手法を開発したので報告する。

キーワード 除草ロボット, 自律走行, 近赤外画像, 稲検出

1. はじめに

近年、農産物において、消費者の安心・安全・健康への関心が高まっている。岐阜県においては、化学合成農薬の節減を基本とする「ぎふクリーン農業」を推進し、生産性と環境が調和できる農業施策を実施している。このような農業を行う上での最大の課題は、雑草対策である。現行、最も有力な方法として機械による除草があげられ、主要な手段としては乗用大型機械によるものである。しかし、高価であることや耕地面積が小さな圃場では取り回しに手間がかかる等の問題があり、中山間地の多い岐阜県では乗用大型機械の小型化が求められている。

当研究所ではこれまで、従来の除草方法の概念を覆し、安価で簡単な機構を持つロボットが稲列の間を繰り返し走行することで、高い除草効果を実現する手法を提案し、圃場実験でその効果を実証した^[1]。この高い除草効果の得られるロボットを実用化するためには、農作業者に手間をかけさせずに、除草作業を自律しながら行う走行機能の開発が必要である。そこで本研究では、ロボットが対象稲列に沿って自律走行を行うために、ロボットに搭載したカメラの画像情報を基に稲列を検出する手法の研究開発を目指す。

稲列の検出に関して、従来研究では可視光カメラを用いて葉の緑色領域を基にした色成分抽出法が提案されている^[2]が、天候や時間によって太陽光が変化するに伴い葉の緑領域の色合いが変化する等の影響で安定した緑色領域が検出できないといった課題がある。このため、本研究では、物質が光を吸収する際の波長が物質の種類や

構造に応じて固有の値となる特性^[3]を利用し、外乱光の影響を受けない近赤外領域による稲の検出手法について検討する。今年度は、下記の2点に関して研究をしたので報告する。

- 1) 稲を検出するための最適な波長帯域の選定
- 2) 稲列の画像特徴を基にした稲列の検出

2. 稲検出のための最適な波長帯域の選定

近赤外領域の波長帯における稲の反射特性を求め、稲検出に最適な反射率が最大となる波長の同定を行う。

2. 1 撮影システム

図1に分光画像の撮影システムを示す。撮影システムの構成は16bit冷却CCDカメラ (Apogee社製 Alta U2000)、液晶チューナブルフィルタ (Cri社製 VariSpec NIR) およ

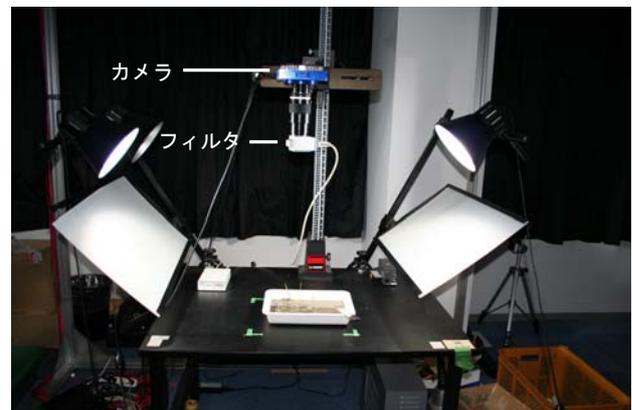


図1 撮影システム

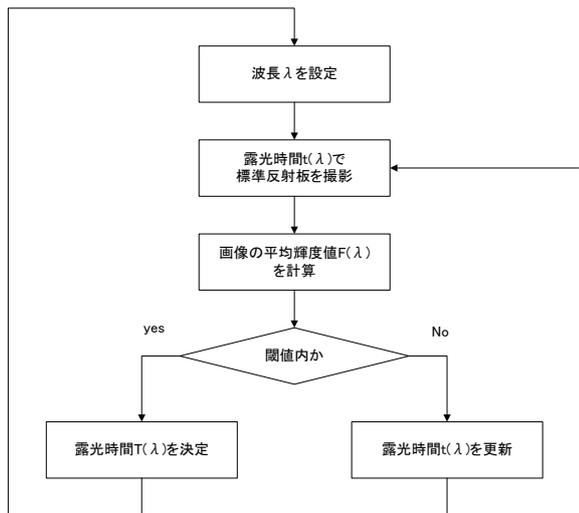


図2 キャリブレーション手順

び光源（岩崎電機社製 JPRF100V600WD）からなる。冷却CCDカメラは解像度が1600×1200であり、各画素において65535階調の高精細かつ高ダイナミックレンジなデータを取得可能である。撮影は650nm～1100nmの範囲で透過帯域を1nm刻みに変化させ実施する。

2. 2 キャリブレーション方法

カメラのCCD感度，分光フィルタの透過率，光源の特性は波長によって異なる。そこで，これらの影響による波長間の違いを解消するために，標準反射板（ミクロ社製 BN-R98-SQ12C）を使用し，いずれの波長においても一定の輝度値になるように露光時間を調整する。図2に標準反射板を利用したキャリブレーションの手順を示す。チューナブルフィルタを波長λに設定し，画像取得後の平均画素値F(λ)を求め，平均画素値が閾値範囲内に収まるまで露光時間T(λ)の調整を繰り返す処理を実施する。

2. 3 分光反射特性の作成

前節の手法を基にキャリブレーションを行った後，各々の波長に対して求めた露光時間で，標準反射板および試料の分光画像を撮影する。分光反射率は式(1)によって求める。波長λnmにおいて， $O_{\lambda}(x, y)$ は試料を撮影した分光画像の画素位置(x, y)の輝度値， $S_{\lambda}(x, y)$ は標準反射板を撮影した分光画像の画素位置(x, y)の輝度値である。また， $R_{\lambda}(x, y)$ は画素位置(x, y)の反射率を示している。波長ごとに得られた試料の輝度値を標準反射板の画素値で除算し，画素数で平均することで，反射板に対して試料がどの程度反射したかが分かる。

$$R_{\lambda}(x, y) = \frac{O_{\lambda}(x, y)}{S_{\lambda}(x, y)}$$

$$R(\lambda) = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H R_{\lambda}(x, y)}{W \times H} \quad (1)$$

$\lambda = 650 \sim 1100, W = 1600, H = 1200$

2. 4 稲の反射特性結果

図1に示す環境下で稲を撮影した。撮影は稲を撮影台上に固定し，稲以外の領域をマスク処理することで稲の平均反射率を計算する。図3に稲の反射特性を示す。680nm付近で反射率が急激に上がる特性を示していることが分かるが，760nm付近以降の反射率に著しい変化は確認されない。また，比較のため畑地等で自生しているイネ科のメヒシバについても同様の実験を行ったが，稲の反射特性との違いはなかった。従って，図3に示す反射特性は植物の葉緑素（クロロフィル）の反射特性であることが予想される^[4]。

2. 5 土泥の反射特性結果

稲の反射特性と土泥の反射特性が近い場合，近赤外画像において，稲と土泥の区別がつかないことになる。そこで，土泥の反射特性を調べるため，水田の土泥を採取し，乾いた土泥と水分を含んだ土泥の2種類について分光画像を撮影した。

分光反射特性の結果を図4に示す。乾いた土泥（実線）も水分を含んだ土泥（波線）も800nmから900nm辺りまで反射率が徐々に上がる傾向がある。また，水分を含んだ土泥の方が乾いた土泥よりも反射率が低い。これは水が強い吸収を持つとともに，土泥の光散乱に影響を及ぼすことが考えられる。

土泥の分光反射特性の結果から，50%以上の反射率を持つ稲の反射特性と比べると，一般的に水田内の土泥は水分を大量に含んでいるため，近赤外画像において稲と土泥の区別はつきやすいことが示唆される。

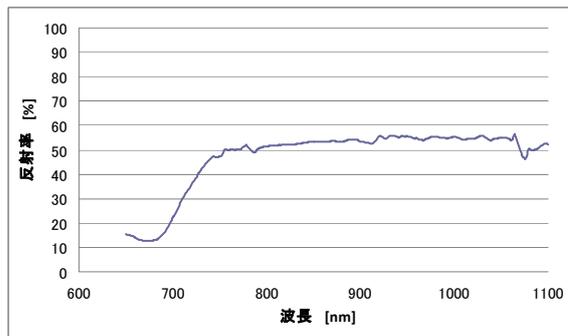


図3 稲の反射特性

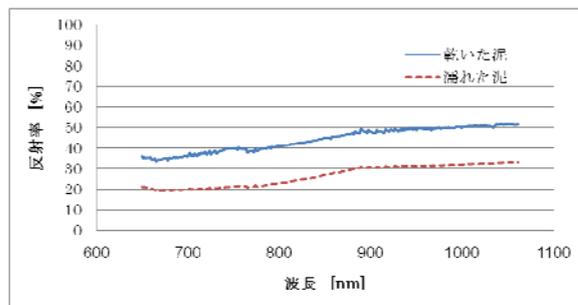


図4 土泥の反射特性

2. 6 屋外環境下での実験

2.4節は屋内環境下における、ハロゲンランプの照明環境で求めた稲の分光反射特性である。そこで、太陽光の照明環境下における稲の分光反射特性を確認するため、快晴の屋外環境下で同様に分光反射特性を求めた。図5に露光時間を1秒として標準反射板を撮影したときの平均輝度値を示す。

図5において、波長が大きくなるにしたがって平均輝度値は徐々に小さくなる傾向にある。これは、近赤外領域において太陽光の分光放射照度は波長が高くなるに従って低くなる傾向を示している。また、688nm付近や760nm付近などで平均輝度値が著しく小さくなるが、この波長は酸素分子の吸収バンド（フラウンホーファ線のA,B線）である。これは太陽光が太陽の外層のガス体を通過するときにガス体を構成する酸素分子に応じた波長が吸収されるため起きた現象であると言われている。

稲の分光反射特性を求めたところ、図3の反射特性とほぼ同じであった。物体の分光反射特性はその物体（本研究ではクロロフィル）特有の特徴を持っているため、照明環境による分光反射特性の違いはないことを確認した。

2. 7 稲列検出のための最適フィルタの検討

稲と泥の反射特性および太陽光の平均輝度を図6に示す。稲の反射率は700nm付近から上がり始め、800nm付近でほぼ50%以上になる。また、土泥は800nm付近から反射率が微少なながら上がるが、稲の反射率ほどの上昇は認められない。一方、太陽光の分光放射照度は波長が高くなるにつれて低くなる傾向にある。従って、より精度良く稲を検出するためには、太陽光の放射照度が高く、稲の反射特性の高い波長帯を選定することが望ましい。従って、780nm-820nmの波長幅が稲列検出に適している。

一方、ある特定の波長帯のみの近赤外画像を取得するには、特定の波長帯のみの光を透過する干渉フィルタが必要である。一般的に、市場にはある特定の波長帯の干渉フィルタしか流通しておらず、それとは異なる波長帯の干渉フィルタが必要な場合は特注となるため非常に高価になる。本研究では、干渉フィルタを付けたカメラを搭載したロボットの実用化を目指すため、市場で流通している波長帯が800nmもしくは810nmの安価な干渉フィルタを使用することとし、カメラレンズ先端に装着することとした。

3. 稲領域の画像特徴を基にした稲列検出

前章により、水田において、近赤外画像は可視光画像と比較すると、屋外の照明環境に影響されにくく稲列を検出しやすい。そこで、近赤外画像を用いて水田に植えられている稲の稲列を検出するため、稲のエッジ方向および存在確率を用いて稲列の検出を行った。本研究では検出する稲列は直線とみなす。なお、カメラはロボット

の前面で、かつ水田を見下ろす位置（本研究では地上45cmの位置）に設置し、水平角 68° 、焦点距離3.7mmのレンズを用いて広角画像を取得する。

3. 1 ロボット制御側に送る稲列検出情報

稲列を検出後、ロボット制御側に送信する稲列検出情報としては、下記の2点である（図7）。

- ・画像の鉛直軸に対する対象稲列の直線との角度 θ
- ・画像の水平方向の中央線からのずれ x

近赤外画像から稲列を求めた際、画像の鉛直方向の軸に対して角度 θ 、画像中央から x ピクセル離れた点を通る直線方向に進むことがわかるので、その2つの値(θ, x)をロボット制御部に送信し、ロボット制御側でロボットの移動方向の制御を行う。

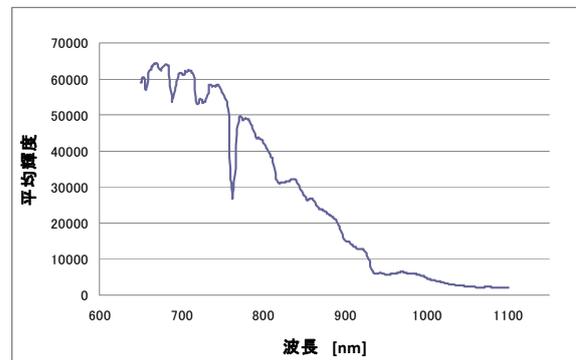


図5 太陽光における標準反射板の平均輝度値

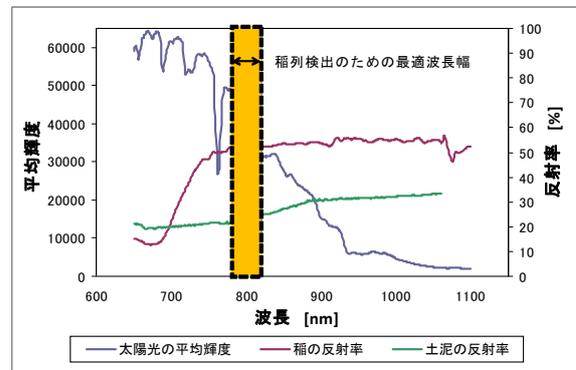
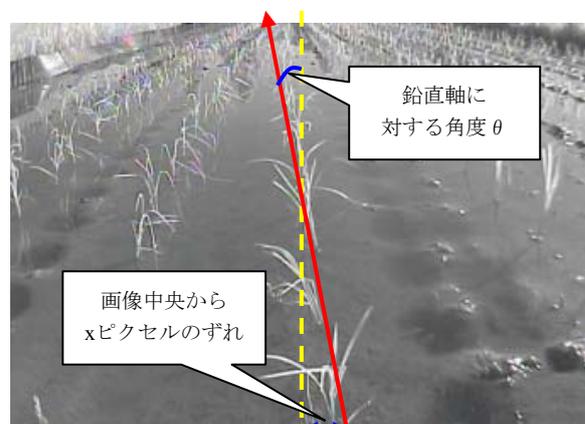


図6 稲と泥との反射特性および太陽光の平均輝度



波線：画像中央線、実線：稲列検出結果

図7 ロボット制御側に送る稲列検出情報

3. 2 稲のエッジ方向と存在確率を基にした稲列検出

図8のとおり、稲列をまたいだ状態でロボットを走行させた場合、対象稲列に関して、前フレームで検出した一番手前の稲 p' の画像位置近傍に、現フレームの一番手前の稲 P があると予想される。また、現フレームにおける対象稲列のベクトル方向は前フレームのベクトル方向（図8の画像中央実線）とほとんど変わらない。そこで、FPGA等への組み込みシステムにアルゴリズムを実装することを想定し、計算コストやメモリ使用量の小さい手法として、稲のエッジ方向および存在確率を基に稲列の検出を行う。

3. 2. 1 稲のエッジ方向の検討

稲列をまたいだ状態で撮影される画像において、稲は水平方向のエッジは少なく、むしろ、垂直方向のエッジや斜め方向のエッジが多い。そこで、当初は図9に示すとおり、垂直エッジ、右上エッジ、右下エッジの3つのエッジを使用したが、右上エッジや右下エッジがかえって稲列を検出する際の誤検出の原因となる事例が多かったため、本研究では垂直エッジのみを使用する。

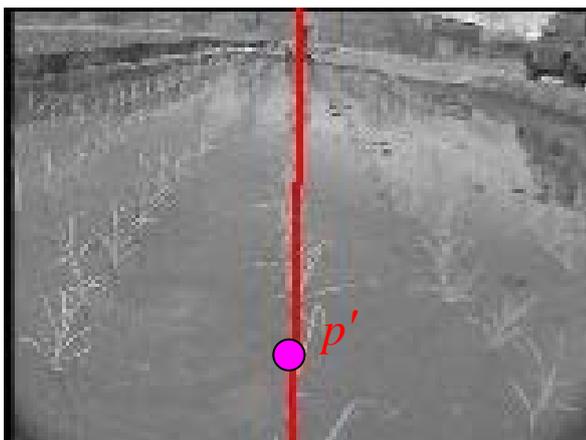
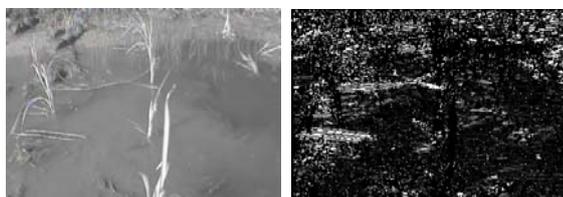
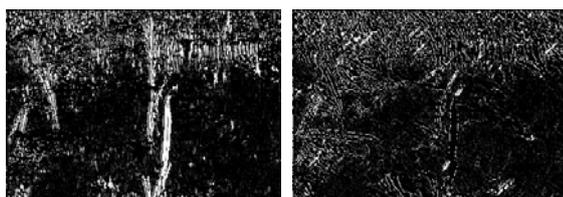


図8 前フレームでの稲列検出例



(a) 入力画像

(b) 水平エッジ画像



(c) 垂直エッジ画像

(d) 右上エッジ画像

図9 稲のエッジ方向検出結果例

3. 2. 2 稲の存在確率を基にした評価関数の適用

除草ロボットは対象とする稲列をまたいで平行に走行する。従って、得られる入力画像の中央下領域に対象稲列手前の稲が存在すると仮定することができる。ここで、図10に示す大きさが0.0~1.0のフィルタを適用する。図10(a)の白い領域は稲の存在確率が最も高く（1.0に近い値となる）、遠方になるにつれて黒い領域（0.0に近い値になる）となり、存在確率が放射状に低くなることを示している。本研究では前フレームで検出したロボットの手前の稲の位置情報も利用するため、前フレームで検出したロボットの手前の稲の位置を (x_p, y_p) とし、式(2)の評価関数を用いる。ここで、 $vr(m, n)$ は垂直エッジを、 $f(m, n)$ はフィルタ、画像

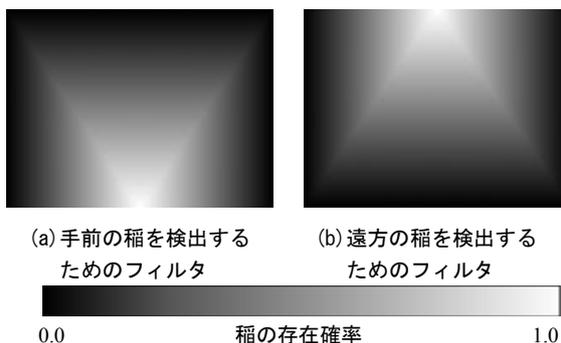


図10 稲を検出するためのフィルタ



図11 近赤外画像

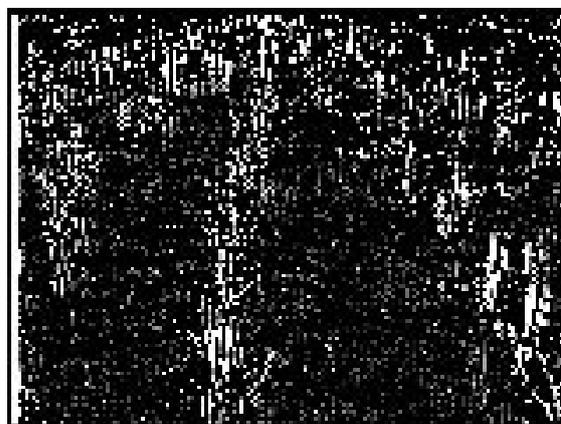


図12 垂直エッジ画像

の大きさをM, Nとする.

$$val(m,n) = \frac{1}{255} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f(m - \left(x_p - \frac{M}{2}\right), n) vr(m,n)) \quad (2)$$

図11の入力画像に対して、垂直エッジを求め(図12)、これに式(2)の評価関数を適用する。評価関数を適用した画像はノイズを含んだ画像であるため平滑化する(図13)。白い領域は評価値が高く、黒色の領域は低い値を示す。この評価値はロボットの手前の稲が存在する確率と同じであるため、図13の画像において評価値が最も高い座標(ピーク値: 丸枠の箇所)を検出することで、一番手前の稲の検出が可能となる。本研究では、ここで求めた手前の稲の画像位置を中心とした直線を引き、その直線上にある遠方の稲の評価値を加算していき、加算値が最大値となる直線が求める対象稲列となる。

そこで、手前の稲の位置を求めた後に、遠方の稲を検出する。ロボットは対象稲列をまたいだ状態で走行するため、対象稲列は画像上の上部中央に向かって直線上に写ると仮定することができる。そこで、遠方の稲を検出するため、画像上部中央に検出感度を高めたフィルタを適用する。本研究ではメモリ使用量を削減するため、前述で述べた図10(a)のフィルタを上下に反転した図10(b)のフィルタを図12の垂直エッジの画像に対して適用する。前フレームの情報を利用して現フレームの稲列を検出するため、式(3)の評価関数を用いる。ここで、前フレームで検出した稲列の直線と画像の上辺部の交点を (x_p, y_p) 、垂直エッジを $vr(m, n)$ 、図10(b)のフィルタを $f(m, n)$ 、画像の大きさをM, Nとする。

$$val(m,n) = \frac{1}{255} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (f'(m - \left(x_p - \frac{M}{2}\right), n) vr(m,n)) \quad (3)$$

また、評価関数を適用した画像に対して平滑化を行う(図14)。図13で求めた手前の稲の画像位置情報と遠方の最も高い評価値の結果を基に稲列の検出を行う。図13上で評価値が最も高い座標を通る直線を図14上で引き、その線上で積算された評価値が最も大きな値となる直線を現フレームでの稲列とする。稲列の検出結果を図15に示す。

4 圃場での走行実験

本手法による除草ロボットの自律走行を確認するため、岐阜大学のフィールドセンター内にある圃場にて走行実験を行った。圃場の長さは約12mで株間30cm、7条の稲列がある(図16)。圃場実験の様子を図17に示す。稲の手前に除草ロボットを置き、カメラ取得映像を外部のパソコンに有線ケーブルを介して転送し、走行制御パラメータ (θ, x) を除草ロボットに返す方法で実験を行った。処理速度を上げるため、解像度は160×120とした。使用

したパソコンはCPUがIntel Core2Duo、クロックは1.06GHz、メモリは1024MBである。その際の処理速度は約8フレーム/秒であった。

走行実験の結果、整地された状態では、稲列に沿って走行することができたが、欠株等がある場合や、著しく荒れた走行エリアに遭遇すると、ロボットが大きく傾き、隣の稲列を走行する事例があった。また、遠方の稲を検出する際、水面に反射した遠方の空は近赤外画像上ではかなり明るい(輝度が高い)画像となるため、対象稲列の遠方にある稲を誤検出する事例もあった。

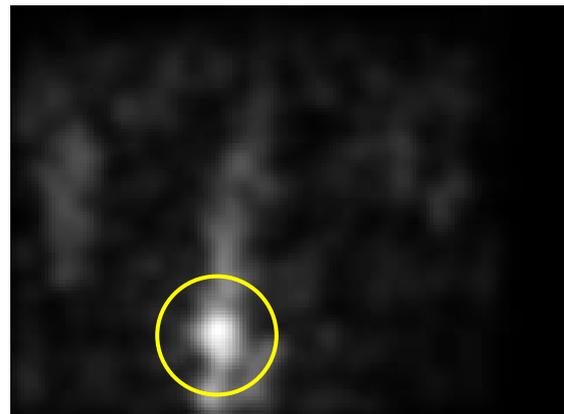


図13 評価関数を適応し平滑化した画像(手前の稲検出)

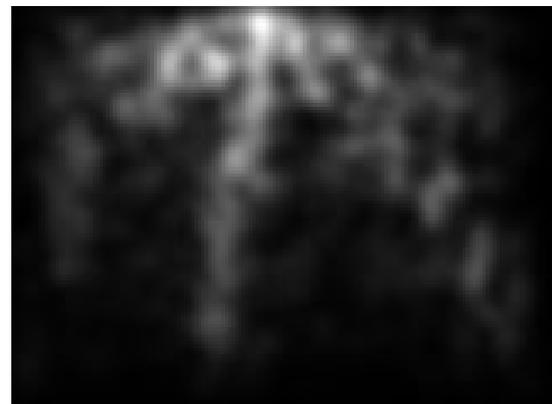


図14 評価関数を適応し平滑化した画像(遠方の稲検出)

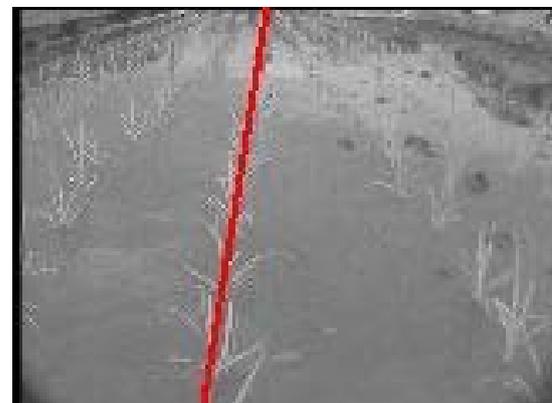


図15 稲列検出結果



図16 実験圃場



図17 実験の様子

- [2] 高原茂幸, 十川和士, 山浦浩二, “画像フィードバック制御による水田除草用自律走行車両”, 農業機械学会誌, 第66巻, 2号, pp.45-54, 2004.
- [3] 岩元睦夫, 河野澄夫, 魚住純, “近赤外分光入門”, 幸書房, 1995.
- [4] 近藤直, “生物生産におけるマシンビジョン —農業分野での画像の利用—”, 動的画像処理実用化ワークショップ DIA2009, pp.177-182, 2009.

5. まとめ

除草ロボットの自律走行を目的として, 屋外環境下で稲列を検出する手法の研究開発を行った. 稲の分光反射特性を調査し, 稲を検出するための最適な波長帯域を800nm近辺とした. 稲列を検出するアルゴリズムを開発し, 圃場において走行実験を行った. 実験の結果, 整地された状況下では正常に自律走行することができることを確認した. 今後は, 様々な状態の圃場において実験を重ね, 適正に走行するためのアルゴリズムの改良を図る予定である.

謝辞

本研究は経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の支援を受けて実施しました. ここに感謝の意を表します.

文献

- [1] 光井輝彰 他, “水稻のクリーン農業を支援するロボット (アイガモロボット) の実証研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.29-32, 2008.

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 太陽光電池パネルによる発電量の把握実験 —

田畑 克彦

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

- Experiments of Solar-Electric Power Generation -

Katsuhiko TABATA

あらまし 現在、我々は水田内の新たな除草手段として、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を行っている。本ロボットは、水田内を走行するだけで抑草効果が得られるというもので、慣行農業で多用されている化学農薬の使用量を低減する。さらに、動力源をバッテリーとすることで排気ガスを排出しないことで、環境に優しい農作業を行うことを目指している。一般的に、このような屋外作業ロボットは、太陽電池パネルの搭載によって有効に自然エネルギーを活用できるため、本ロボットに太陽電池パネルを付加することで、さらに環境負荷を低減することを検討している。しかしながら、小型ロボットに搭載するような比較的小型な太陽電池パネルが、実環境下において、どの程度の発電能力があるのかに関しては不明な点が多い。そこで、搭載する太陽電池パネルを用いて、実際の発電量を把握する実験を行ったので報告する。

キーワード 太陽電池パネル、屋外作業ロボット

1. はじめに

現在、我々は水田内の新たな除草手段として、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を行っている^[1]。本ロボットは、水田内を走行するだけで抑草効果が得られるというもので、慣行農業で多用されている化学農薬の使用量を低減する。さらに、動力源をバッテリーとすることで排気ガスを排出させないことで、環境に優しい農作業を行うことを目指している。

このような屋外作業ロボットは、太陽電池パネルの搭載によって自然エネルギーを活用できる。特に、我々が開発中の小型除草ロボットの活動環境は水田であるため、遮蔽物がなく、有効利用が可能である。そこで、小型除草ロボットに太陽電池パネルを搭載し、バッテリーからの供給電力の低減を図ることで、さらなる環境負荷の低減を検討している。

本稿では、本ロボットに太陽電池パネルを搭載するにあたり、実際の環境下において、どの程度の発電能力を期待できるかを事前に確認するため、その発電量を把握する実験を実施したので、その結果について報告する。

なお、本実験では発電量の傾向を把握することを主目的とし、高い計測精度は求めないこととする。なぜならば、太陽発電量に関係するパラメータは、次のように多数存在するので^[2]、それぞれのパラメータ値を把握し、時間をかけて精度の高い推定を行うことは、ロボット開

発の主眼から外れるためである。

- ・日射量の変動、日陰など
- ・パネルの汚れ、劣化、分光日射変動
- ・太陽電池の変換効率
- ・温度上昇における変換効率の低下
- ・蓄電池等の損失

等

2. 実験方法

本実験における構成図を図1に示す。太陽電池パネルは、バッテリーチャージコントローラに対して2枚並列に接続され、充電用バッテリーは、6Vの鉛蓄電池を2個直列にバッテリーチャージコントローラに接続する。バッテリーチャージコントローラは、太陽電池パネルの発電量と鉛蓄電池の残容量をモニタし、鉛蓄電池の充電と負荷への放電をコントロールするものである。また、今回は発電量を確認することが目的であるので、放電回路(負荷)は接続されていない。

各種測定値は、バッテリーチャージコントローラのLCDに、①バッテリー電圧[V]、②太陽電池パネル電圧[V]、③太陽電池パネル電流[A]、および④発電量[AH]が表示されるため、5分間隔で目視により記録した。

また、⑤太陽照度[klx]および⑥太陽電池パネル表面温度[°C]についてはデータロガー付デジタル計測器を用いて、10秒間隔で自動記録した。

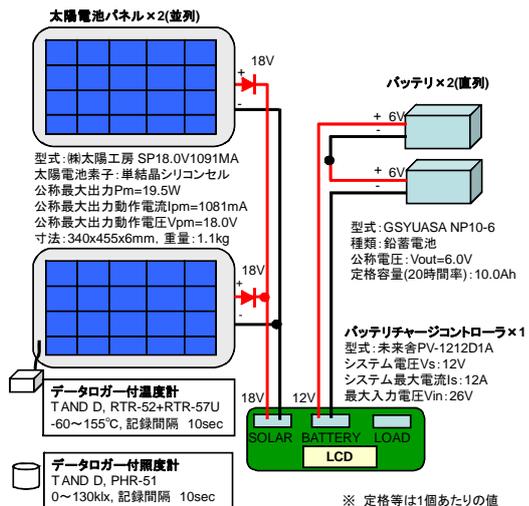


図1 実験構成図

3. 実験結果と考察

実験は、3日間のべ5時間にわたって実施した。季節は秋、時間帯は正午前に行った。

ある日の2時間にわたる太陽光発電量の実測例を図2に示す。この日の天候は快晴であったが、経過時間75分~105分において、太陽が雲に隠れたり現れたりしており、この間の照度(⑤)および電流(③)が急激に変動していることがわかる。

快晴時の太陽発電パネル電流(③)は、最大で1.4A程度であり、電源電圧が12Vであるから、16.8W程度の発電量である。これはロボットの総消費電力量の約25%である。

次に3日間にわたって取得した太陽照度(⑤)と太陽発電パネル電流(③)の関係を図3に示す。これらデータ間の関係を大局的に把握するため、これらのデータ群を線形近似した直線も同図に示す。

これにより、太陽照度x[klx]と太陽発電パネル電流y[A]との間に下記の近似式が成り立つ。

$$y = 0.018x - 0.292 \quad [A] \quad (1)$$

(1)式より、パネル電流yが0になる時の太陽照度は16.2[klx]程度であり、表1^[3]の照度と明るさの目安から、曇天午前10時太陽光の照度では、0.16A (1.9W)程度の発電量となるため、ほとんど太陽エネルギーによる発電は期待できないことがわかる。

4. まとめ

今回のロボット開発で用いる太陽電池パネルを使用した場合、快晴時にはロボットの総消費電力の25%程度を補うことができるが、曇天時にはほとんど発電できないことを確認した。

稼働時に太陽電池パネルを装着することを想定すると、二枚で2.2kgであることから、重量の増加に伴う電力消費

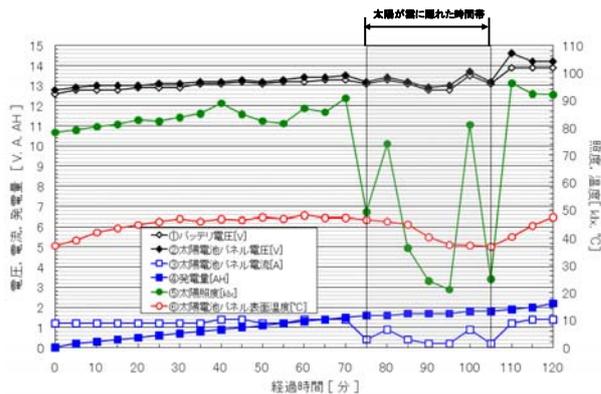


図2 太陽発電の実測値(一例)

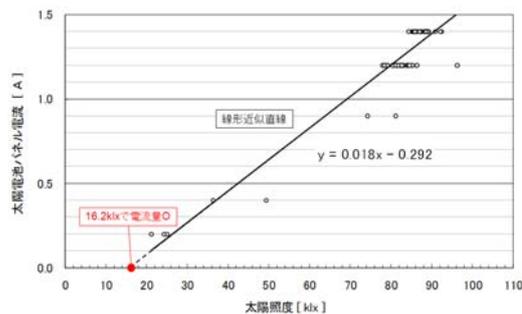


図3 太陽照度とパネル電流の関係

表1 太陽照度と明るさの目安

太陽照度[klx]	明るさの目安
100.0 以上	・雪山・真夏の海岸
100.0	・晴天昼太陽光
65.0	・晴天午前10時太陽光
35.0	・晴天午後3時太陽光
32.0	・曇天昼太陽光
25.0	・曇天午前10時太陽光
2.0	・曇天日出1時間後太陽光
1.0	・晴天日入1時間前太陽光

量の増大を考えるとあまり効果は期待できない。

したがって、軽量化したパネルを装着して走行させることや、ロボットが稼働していない時にパネルを装着しバッテリーを充電するなど、効果的な運用方法を検討する必要がある。

謝辞

本研究は、経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の支援を受けて実施しました。ここに感謝の意を表します。

文献

- [1] 光井輝彰 他, “水稻のクリーン農業を支援するロボット(アイガモロボット)の実証研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.29-32, 2008.
- [2] 日本工業標準調査会, “太陽光発電システムの発電電力量推定方法”, JIS C 8907, 2005.
- [3] 嘉数次人 他, “こよみハンドブック2006年~2008年”, 大阪市立科学館, 2006.

水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発

— 自律走行のためのハードウェア検討 —

田畑 克彦 光井 輝彰 稲葉 昭夫 平湯 秀和 田中 等幸

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

- Development of Robot System for Autonomous Drive Control -

Katsuhiko TABATA Teruaki MITSUI Akio INABA Hidekazu HIRAYU Tomoyuki TANAKA

あらまし 現在、我々は水田内の新たな除草手段として、水田用小型除草ロボット(アイガモロボット)の開発を進めている。本ロボットは、水田内を走行するだけで抑草効果が得られ、慣行農業で多用されている化学農薬の使用量を低減し、環境に優しい農作業を行うことが可能である。平成20年度からは経済産業省「地域イノベーション創出研究開発事業」の補助を受け、ロボットの実用化を目指した開発を進めている。本事業では、農業者の負担を軽減するために、対象とする水田に一定の条件を設定したうえで、ロボットが自律して走行(除草作業)することを目指している。本稿では、自律走行のための走行制御コントローラについて、ハードウェアの検討及び組み込みソフトウェアの開発を行い、走行実験により基本動作を確認したので報告する。

キーワード 小型除草ロボット、自律走行システム、組み込みソフトウェア

1. はじめに

食の安全や環境に関する意識の高まりの中で、水稻栽培においても有機栽培や減農薬栽培などの安全で環境負荷の少ないクリーンな農業が行われつつある。この農業の最大の課題は雑草対策であるが、これまで様々な手法が試みられているにもかかわらず、これを解決する有効な手段は見いだされていない。

この課題に対して、我々は小型除草ロボット(アイガモロボット)を用いた除草手法を提案し、その有効性を確認してきた^[1]。これまでに開発したロボットは、走行による抑草効果の確認を目的としたラジコン操作による実験用であったが、今後ロボットを実用化するためには圃場内での自律走行機能が必要となる。しかし、あらゆる条件の下でロボットを自律走行させる事は現実的でない。そこで、本研究では一定の条件を設定した水田において、ロボットの自律走行の実現を目指す。本年度は、上記自律走行のための制御コントローラの基本ハードウェアの開発、高速な画像処理を行うための画像処理ユニット基本機能の開発および走行制御アルゴリズムの基礎検討を行った。

2. 制御コントローラのシステム構成

水田用小型除草ロボットへの要求や使用用途を考慮し、制御コントローラのシステム構成について検討する。

開発する小型ロボットに要求される制御コントローラの主な仕様を以下に示す。

- ・画像処理により追従すべき稲列を検出し、その他の各種センサの情報と統合して、左右のクローラを制御し、圃場内を自律走行する。
- ・遠隔操作も可能とする。

制御コントローラは、その処理内容から、走行制御ユニット、画像処理ユニット、および各種センサ類から構成される(図1)。画像処理ユニットは、カメラ画像を取り込み画像処理により稲列を検出する。走行制御ユニットは、画像処理ユニットの処理結果と、各種センサ類(ジャイロセンサ、加速度センサ等)の情報から、実際にロボットの走行制御を行う。

なお、画像処理ユニットに関しては、ロボットの方向転換をスイッチバックにより行うことを想定し、ロボットの前方と後方に設置している。

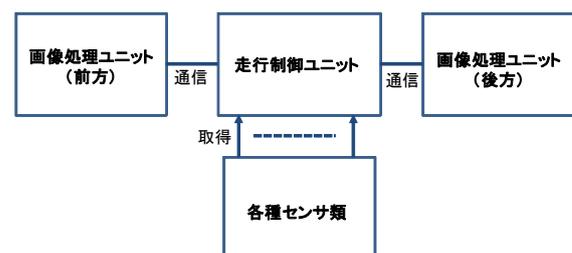


図1 水田用小型除草ロボットの制御コントローラ構成

2. 1 画像処理ユニット

画像処理ユニットは、本ユニットの処理結果に基づいてロボットの走行制御を行うことから、リアルタイムに画像処理を行う必要がある。これを組込システムで実現する方法として、フィルタリング等の画像処理をハードウェアで高速に処理し、かつ、画像の取り込みと画像処理を平行で実行することが考えられる。

この考えに従って、画像処理ユニットの仕様を次のように定めた。

- ・入出力部：カメラなどの撮像部から画像データを取得でき、また、デバッグのための画像表示部としてLCD（液晶ディスプレイ）を接続できること。
- ・外部メモリ：画像処理前および画像処理後のデータに対し独立にアクセスできるよう、フレームデータサイズ以上のデータ容量を持つものが、最低でも2つ以上あること。
- ・画像プリプロセッサ部：高速な信号処理を行い、かつ極力小型化するため、できるだけ多くの機能を1つのチップで実現する。よって、並行かつ高速処理が可能なFPGAが搭載されていること。
- ・稲列検出処理部：画像処理アルゴリズムの開発・実装や走行制御コントローラとの通信については、C言語により比較的容易かつ柔軟に開発可能なマイコンを有すること。

ここで、稲列検出処理部を設けた理由は、FPGAにおいては、ドライバ回路等のハードウェアに近いところからHDL言語で開発する必要があり、さらに、マイコンに比べてデバッグ環境が整っていないことから、すべての機能を画像プリプロセッサ部で実現するためには、多くの時間を必要とするからである。

本研究では上記仕様を満たす基板として、(株)イーエスピー企画のCQ-IMGP基板（表1）を採用した。

2. 2 走行制御ユニット

走行制御ユニットは、画像処理情報やセンサ情報に基づいてロボットの走行を制御する。このために必要なインタフェース機能を次に示す。

- ・画像処理ユニットとの通信
- ・各種センサやスイッチの信号の取り込み
- ・左右のモータの駆動
- ・内部状態（異常箇所等）の表示
（農業者とのインタフェースとして必要）
- ・デバッグインタフェース

本研究では、これらの機能をコンパクトに実装するため、必要なI/Oを1つのLSIの中に組み込んだマイコンモジュールをコアに走行制御ユニットを構成することとし、安価かつ低消費電力で高い処理パフォーマンスが確保できることから、ARM CORTEX-M3 (STM32F103ZE, 144pin)を使用することとした。

また、本ユニットの入出力（PIO, A/D）端子については、自律走行戦略検討におけるセンサ構成の変更に柔軟に対応することを考慮し、可能な限りのマイコンの入出力端子を割り付けた。

開発した走行制御コントローラの構成図を図2に示す。点線内がコントローラ基板である。

3. 画像処理ユニット基本機能の開発

本年度は画像処理ユニットに関して、画像処理を行うための基本機能を開発した。開発した基本機能の機能ブロックを図3に示す。各ブロックの処理の概要は次の通りである。

3. 1 画像プリプロセッサ部

画像プリプロセッサ部は、その要求される機能から、画像取得回路群、内部メモリおよびメモリアクセス回路群、画像表示回路からなり、並列処理を行うために、FPGA内部に構築した(図3の (1), (2), (3) のハッチング領域)。それぞれの回路の機能について、以下に示す。

(1) 画像取得回路群

- ・CMOSカメラから毎秒30フレームで送信されるVGA(640×480ピクセル)のYUV422形式の映像データの中から輝度（Y）データのみを8bit階調で取得する(図3①)。

表1 画像処理ユニット基板（CQ-IMGP）の主な仕様

機能項目	仕様等
高速データ処理部	FPGA x1: Xilinx社 XC3S1200E PROMx1: Xilinx社 XCF04s
高機能データ処理部	マイコンx1: STM社 STR912FA(ARM9)
外部メモリ	SRAMx2: シングルポート 2Mbyte x2
画像インタフェース	
画像取得	接続コネクタx5: PFC20pin x1, PFC30pin x1, PFC24pin x2
画像表示	デジタルLCD接続コネクタx2: PFC33pin x1, PFC40pin x1 アナログLCD接続コネクタx1: Dsub15pin DAコンバータ x1: アナログLCD表示用
通信インタフェース	CANx1, USBminix1, RJ45x1, JTAGx2(マイコンx1, FPGAx1)
その他	SDカードスロットx1, 赤外線LED投光コネクタx2 LCDバックライト用コネクタx1 等

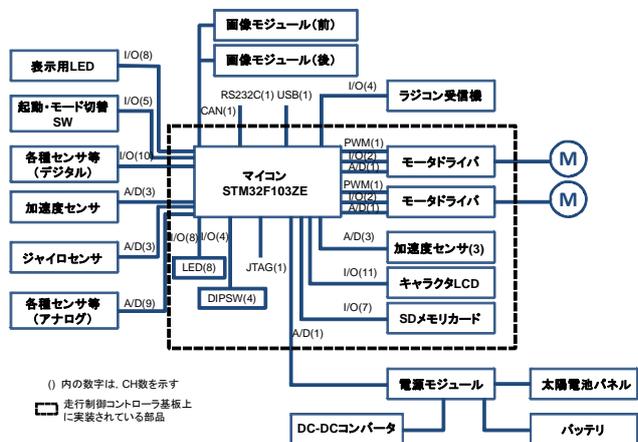


図2 走行制御ユニット

- 取得したVGAサイズの輝度データをQQVGA (160x120) サイズに縮小する。(図3②)
- (2) 内部メモリおよびメモリアクセス回路群
<内部・外部メモリへの書き込み>
- 画像取得回路群で取得したQQVGAサイズの輝度データを、FPGA内に構築した内部メモリ (BRAM1, 図3④) に格納する (図3③).
- マイコンからデータ (例えば画像処理後のフレームデータ) の書き込み命令に対して、データベース上に出力されているデータを指定されたアドレスの内部メモリ (BRAM2) に書き込む (図3⑤).
- 画像取得回路群で取得したVGAサイズの輝度データを、外部メモリ (SRAM1, 2) に書き込む。片方の外部メモリに1フレーム格納したら、次の1フレームはもう一方の外部メモリにデータを格納する。(図3⑥)
<内部・外部メモリからの読み出し>
- 画像表示回路からのQQVGAデータ読み出し命令に対しては、内部メモリ (BRAM2) から、マイコン側の書き込みデータ (画像処理後のフレームデータ等) を読み出し、画像表示回路に送信する。内部メモリはデュアルポートメモリのため、読み出しと書き込みが同時に行える。(図3③)
- マイコンからのデータ読み出し命令に対して、命令で指定されたアドレスのデータを内部メモリ (BRAM1) から画像処理前のデータを読み出し、マイコン側のデータベースにそれを出力する。(図3⑤)
- 画像表示回路からのVGAデータ読み出し命令に対しては、書き込み中でない外部メモリからフレームデータを読み出し、画像表示回路に送信する。(図3⑥)

(3) 画像表示回路

画像表示回路は、画像表示部(LCD)へ出力するためのコントロール回路で、主にデバックのために用いる(図3⑦)。表示可能なフレームデータには、画像処理を行っていないVGAサイズのフレームと、画像処理後のQQVGAサイズのフレームがあり、基板上のディップスイッチでどちらのフレームを表示するかを選択する。これにより、両者の画像を比較できるようにした。

また、本回路は、デジタルもしくはアナログのLCDの表示タイミングに同期させて画素データを出力し、毎秒60フレームの速度でVGAサイズの画像を表示させることができる。

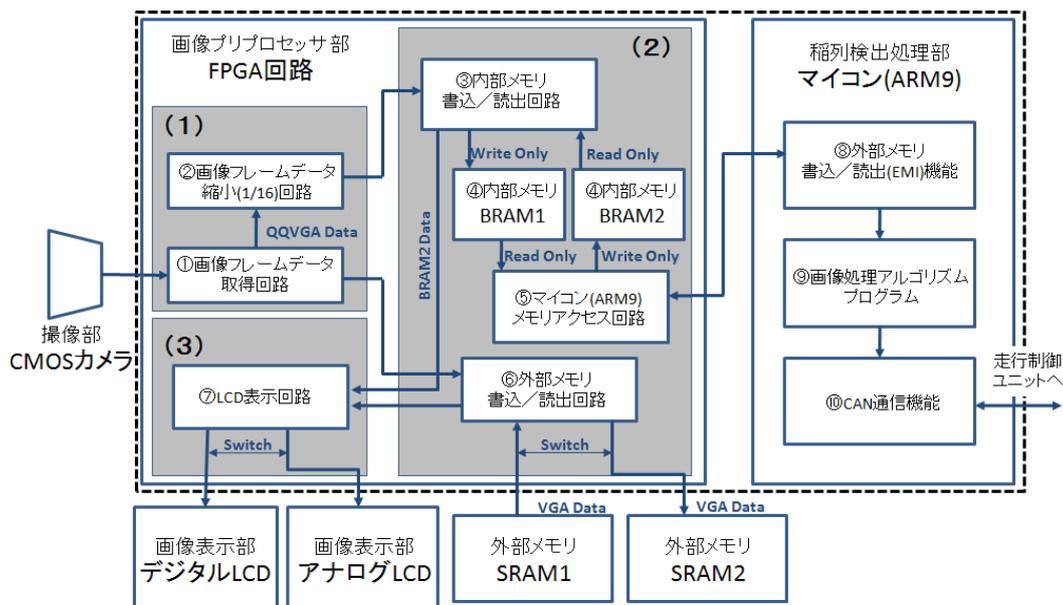
現状では、この表示速度に対して、図3⑥にて外部メモリから読み出されるVGAサイズのフレームデータの読み出しスピードが遅く、表示できない。このため、図3⑥は1ピクセルずつ読み飛ばしを行うことで表示速度に同期させ、320x480のフレームサイズを横2倍に引き延ばしてVGAフレームを表示している。また、③のQQVGAデータも見やすいよう、縦横4倍に引き延ばして表示している。

3. 2 稲列検出処理部

稲列検出処理部は、画像プリプロセッサ部(FPGA)から画像フレームデータを読み出し、画像処理によって稲列を検出する処理を行い、その処理結果を走行制御ユニットへ送信する機能を持つ。なお、ハードウェアとしてARM9マイコンを用いている。

本年度は、上述の機能を実現するための基本機能を開発した。概要は以下のとおり。

(1) 画像プリプロセッサ部とのメモリアンタフェース



□: 画像処理ユニット基板上的構成

(1)領域:画像取得回路群, (2)領域:内部メモリ、メモリアクセス回路群, (3)領域:画像表示回路

図3 画像処理ユニットの機能ブロック図

画像処理を行うためには、フレームサイズの画素データを取り込み、これを処理するために、比較的大きなメモリを使用する。

マイコンは、一般的にはこの処理ができるほどの内部メモリサイズを持っていないため、外部メモリにアクセスして、フレームデータの読み出しと書き込みを行うこととした。

ARM9マイコンは、外部メモリインタフェース機能を有しているため、この機能を利用している。また、FPGAの処理速度と整合が保たれるよう、メモリアクセス速度等を設定している。(図3⑧)

(2) 走行制御ユニットとの通信

画像処理ユニットの処理結果を走行制御ユニットへ送信する。今後の開発によっては、走行制御ユニットからの命令信号を受信することも考えられる。また、画像処理ユニットは2つ設置されていることから、双方向の多数間通信が可能なものが望ましい。

CAN(車載ネットワーク)通信は、これらの要求を満たし、かつARM9の基本機能として存在することから、これを採用した(図3⑩)。

CAN通信は、1Mbpsの速度で、双方向通信が可能であり、ID割り当てによるデータ優先度の管理が可能である。

3. 3 画像処理ユニットの開発結果

本ユニットで開発した基本機能を確認するため、図3⑨画像処理アルゴリズム部にFPGA内部メモリ(BRAM1)から読み出したデータを未処理でFPGA内部メモリ(BRAM2)に書き込むプログラムを実装し、アナログLCDから表示した。図4は、そのスナップショットである。本図より、画像の乱れがないことから、正常に動作していることを確認できる。

以上の開発により、図3⑨に画像処理アルゴリズムを実装すれば、ほとんど周辺のハードウェアを意識することなく、容易にアルゴリズムの開発および検証が可能となった。

4. 走行制御アルゴリズムの基礎検討

本研究では制御コントローラのハードウェア開発と並行して、圃場内を自律走行するためのアルゴリズムについて基礎的な検討を行った。



図4 稲列のスナップショット
(QQVGAをVGAサイズに拡大して出力)

4. 1 水田内走行制御アルゴリズム

実際の圃場には様々な条件が存在するが、これらのあらゆる条件に対応できる自律走行機能を開発することは、現在の技術レベルでは容易ではない。実用化を考える場合、コスト面からも現実的では無い。

そこで本研究では、農業者が受け入れ可能な圃場条件として、次の2つの条件を設定し、この条件下においてロボットの自律走行の実現を目指す。

条件1: 土壌表面は軽微な凹凸(田植機の轍等)のみで足跡などの大きな凹凸が無い。

条件2: 水田の外周部(あぜ際)への稲の植え込みを制限する(米の減反面積として計上可能)。

条件1は、スタックや急激な姿勢変化等の圃場内走行中の不確定要素を軽減する条件であり、条件2は稲列の端での折り返しを容易にする条件である。これらの条件を満たした圃場において、除草ロボットの移動経路を次のように設定する。ロボットは稲列に沿って走行し、稲列の端ではスイッチバックを繰り返す、圃場全体を走行する(図5)。この経路計画を実現するためのロボットの基本走行制御には次の2つがある。

- ・ 稲列に沿った走行制御
- ・ 稲列の端での折り返し走行制御

4. 2 実験機のシステム概要

4. 1で示した2つの基本走行制御について検証するため、今年度の開発機が完成するまでの間、図6に示す実験機を制作し、基礎的な走行実験を行った。ロボットの諸元を表2に示す。この実験機と開発機との共通点は、次のとおりである。

- ・ 同一のクローラの接地長
- ・ 走行制御ユニットのプロセッサは、開発基板と同じARM CORTEX-M3シリーズでピン数の少ないSTM32F103ZB(128pin)を使用
- ・ モータ及びモータドライバは同じ型番のものを使用

カメラは実験機上部に搭載し、約1.2m先が画像中心となるように進行方向斜め下向きに方向を調整した。このカメラは稲の葉が高い反射特性を有する近赤外領域に感度を持つカメラであり、その光学系には可視光カットフィルタを装着している。実験機のシステム構成を図7に示す。画像処理を外部のPCで行い、その結果をシリアル通信でロボットの制御コントローラに送る。

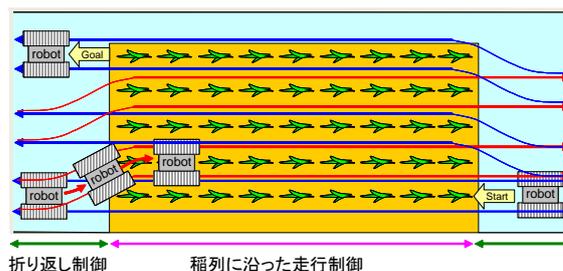


図5 水田内走行アルゴリズム

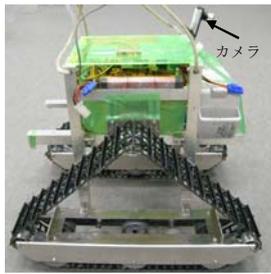


図6 走行実験機

表2 走行実験機の緒元

全長 (クローラ接地長)	500mm (300mm)
全幅 (クローラ中心間)	425mm (300mm)
全高 (クローラ間空間)	370mm (310mm)
クローラ幅	120mm
総重量	8800g
モーター	7.2Kg \cdot cm 18.5W x 2
バッテリー	NiMH 24V-3.8Ah

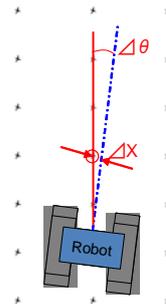


図8 画像処理情報



図9 走行実験の様子（試作機）

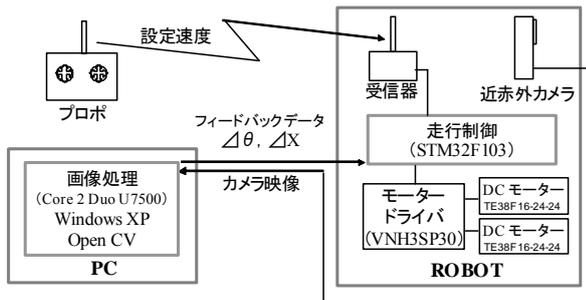


図7 システム構成

4. 3 走行実験

実験環境としては、温室で栽培した葉令約4.0の苗を定植し、対象とする稲列（水位を約5cmとし、苗が水面から10cm程度出ている苗の列）とした。また、ロボットの直進時の設定速度を約50cm/s、解析画像の解像度を160×120ピクセルに設定して実験を行った。

稲列に沿った走行制御は、搭載カメラ映像を画像処理することにより得られる追従すべき稲列とロボット位置とのズレ（相対位置 Δx 、相対角度 $\Delta \theta$ ）（図8）を最小にするようなPID制御により、ロボットの進行方向を制御した。走行実験の様子を図9に示す。実験の結果、稲列に沿った走行は可能であるものの、条間の中心をクローラがトレースすることは難しく、クローラが稲列へ接近したり接触したりする場合も見受けられた。さらに、欠株が続くと、隣の条間へ進入してしまうケースもあった。

稲列の端での折り返し走行制御については、終端部でのカメラ映像の撮影を行いながら、

- ・折り返し位置（稲の植えてある端）の検出手法
- ・折り返し位置での前後カメラ映像の利用方法

について検討を行った。現状では折り返し動作中に目標とする稲列終端を定めることができれば、稲列に沿った走行制御と同じ制御で折り返し後の稲列への進入が可能であった（図10）。

5. まとめ

本年度は、自律走行のための走行制御コントローラについて、ハードウェアの検討および組込みソフトウェア開発を行い、その基本動作を確認した。特に画像処理ユニットについては、FPGAおよびマイコンのハードウ



図10（左）稲列への進入実験の様子

（稲列端から約1m、斜め向き）

（右上）ロボット搭載カメラの画像

（右下）画像処理中の画像（ガウシアン処理後）

的な混成システムを構築することで、両者の長所を活かした画像処理システムのハードウェアを開発することができた。これにより、図3⑨に画像処理アルゴリズムを実装すれば、画像処理のソフトウェア開発者は周辺のハードウェアをほとんど意識することなく、容易にアルゴリズムの開発および検証することが可能となった。

今後は、稲列検出アルゴリズムの処理内容に応じて、FPGAによるデータ処理回路の実装方法や、外部および内部メモリの役割の見直しを行い、専用の画像処理ユニットの開発を行う予定である。走行制御実験に関しては、今年度の開発機をベースに実験を行い、上記画像処理ユニットの処理内容に応じて稲列に沿った走行制御と稲列の端での折り返し走行制御の精度を高め、目標とする自律走行機能の実現を目指す予定である。

謝辞

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

文献

- [1] 光井輝彰 他, “水稻のクリーン農業を支援するロボット（アイガモロボット）の実証研究”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第9号, pp.29-32, 2008.

診療映像におけるシーン分割手法の検討(第2報)

浅井 博次 田中 等幸

Investigation of Automatic Segmentation of Intervention Video (2nd report)

Hirotsugu ASAI Tomoyuki TANAKA

あらまし 近年、電子カルテの普及や手術や救急処置などの診療映像記録の一般化に伴い、膨大な医療データが電子データとして蓄積されつつある。これに連動して、電子化された医療データを解析し、医療教育、医療の質の底上げ・向上、病院経営などに活用したい、という要求が急速に高まっている。しかしながら、映像情報は一覧性・可読性の悪さから、解析はもとより、利活用すること自体、困難である。これに対し、我々は、シーン分割やラベリングにより診療映像をコンテンツとして利活用可能なものとするを目的に研究を進めている。本稿では、多種多様な処置が実施される診療映像に対し幅広く適用可能な分割手法として、ベッドを基準としたLog-Polar変換により処置者や医療機器の配置に基づいて診療映像を自動分節化する手法について提案する。また、心肺蘇生映像を対象とした実験により、提案手法の有効性を確認した。

キーワード 診療映像, シーン分割, Log-Polar変換

1. はじめに

近年、手術室や救急処置室など重要な処置を行う場所へのカメラシステム導入が進み、診療の様子を撮影した動画記録の蓄積が急速に進んでいる。これは、医療の透明性への要求、医療訴訟関連費用の病院経営への圧迫などに起因したものであるが、ハードディスクなどのデータストレージの価格低下や映像圧縮技術の向上に伴い、大量の映像を記録することが現実的なものとなったことが最も大きい要因と思われる。大量の診療映像の記録が可能となったことで、それらを解析し、医療教育、医療の質の底上げ・向上、病院経営の改善等に活用したい、という要望は増加しているが、一覧性・可読性の悪さとその膨大なデータ量から、解析はもとより、利活用すること自体、困難な状況である。

これに対し、我々は、映像のシーン分割やラベリングにより診療映像をコンテンツとして利活用可能なものとするを目的に研究を進めている^[1-4]。本稿では、多種多様な処置が実施される診療映像に対し幅広く適用可能な分割手法として、ベッドを基準としたLog-Polar変換により処置者や医療機器の配置に基づいて診療映像を似通った状態が継続する区間に自動分節化する手法について提案する。また、心肺蘇生映像を対象とした実験により、提案手法の有効性を検討したので報告する。

2. 診療映像のシーン分割

2.1 課題

本研究で対象としている手術や救急救命処置では、以下に挙げる特徴がある。

- ・処置内容が多種多様である
- ・数名のチームで処置が実施される
- ・状況に応じて臨機応変に処置が実施される

画像情報からの処置イベント検出を考えた場合、処置を一意に定義することが難しい上、同時に進行する複数の処置を切り分ける必要がある為、特定の処置イベントの検出は非常に困難である。更に、多種多様な処置への対応が要求されることも考慮すると、特定の処置イベントを検出する、というアプローチだけでは十分なシーン分割やラベリングを実現できない。そこで、本研究では、診療行為を似通った状態が継続する区間に分節化し、分類・提示することで、診療映像のたまかなシーン分割を行い、診療映像の内容確認の支援、ラベリング作業の簡素化を図る。

2.2 提案手法

医療の分野では、様々な処置に対し、詳細に渡った標準的な治療の判断や手順を定めた標準的な治療ガイドラインの策定が進んでおり、これらのガイドラインに従って実際の処置が実施される。また、処置が決まれば、処置に使用する機器や患者に対する人の配置が決まる。処置を行う患者の部位が変わるわけではないため、臨機応変な処置が実施される手術や救急処置においても、基本的な配置は大きく変わらない。これらに着目すると、人や医療機器の配置から、処置(あるいは処置の状況)をある程度推定できると思われる。

提案手法では、人や医療機器などの物の配置に基づいて診療映像をたまかに分節化する。具体的には、ベッドに横たわる患者に対して行う診療の様子をベッド上方の

天井から撮影した映像を対象とし、ベッドを基準として処置者や医療機器が「どの方向」に「どの程度いる（ある）か」を特徴量としてクラスタリングを行うことで、診療映像を分節化する。提案手法の手順は以下のとおりである。

1. Log-Polar 変換（変換中心；ベッド中心）
2. 処置者・医療機器領域抽出（背景差分）
3. 二値化&ベッド領域マスク
4. 二値化マスク画像の各画素に対し、行毎にヒストグラムを計算
5. 前項のヒストグラムを特徴量として各フレームをk-means 法によりクラスタリング



図1 提案手法処理イメージ

ベッド領域をマスクすることで、ベッド周辺の人や物の配置情報のみを抽出し、二値化した背景差分画像の行毎に計算したヒストグラムを配置情報特徴量として利用し、クラスタリングにより映像を分節化する。

ベッドを基準とした配置情報を記述するため、ベッドの中心を変換中心としたLog-Polar変換を使用した。図2に示すように、Log-Polar変換をそのまま適用すると、変換中心からベッド端面までの距離の遠い頭部方向と、距離の短い胸部側面方向では、ベッドから同一距離にいる人の大きさが変換画像上で大きく異なってしまう。また、ベッドを基準とした方向の記述についても、歪みが生じてしまう。ここでは、変換画像上でベッド領域が直線になるように処理することで、これらの問題に対応した。



図2 Log-Polar変換の工夫

3. 実験

シミュレーション人形を使用し、岐阜大学医学部附属病院等の医療従事者による処置者4名で行われた心肺蘇生処置映像を用いて本手法の有効性を検証した。使用した映像は160×120 pixel, 30fpsの非圧縮AVIファイルである。心肺蘇生処置では、主に胸骨圧迫、換気、除細動、薬剤投与などの処置が行われる。特に、胸骨圧迫をできる限り中断しないことが重要視されており、処置の大部分で胸骨圧迫が施されている。

分割結果例を図3に示す。クラスタ数は、経験的に7とした。図中、表上部が映像から手作業で抽出した実際の

イベント区間、下部が提案手法による分割結果である。また、下部に列挙した映像は各クラスタの映像例である。以下、分割結果について詳細に説明する。

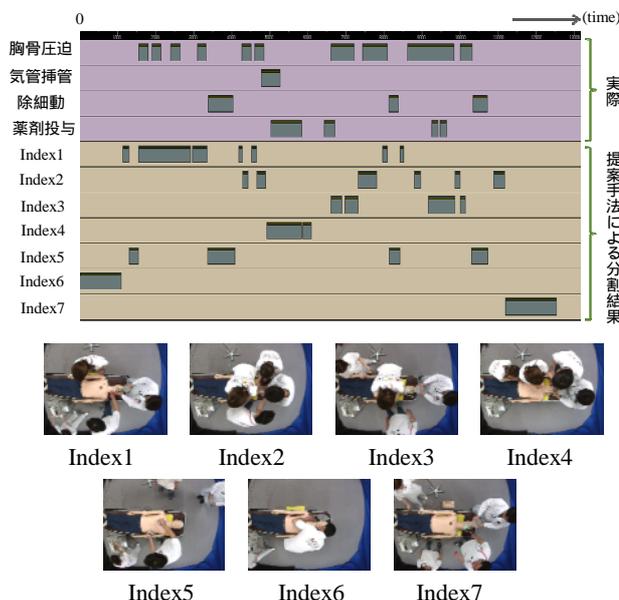


図3 分割結果例

Index1～4は、心肺蘇生処置において最も実施区間の長い胸骨圧迫が実施されている、あるいは、実施可能な位置に処置者がいるシーンである。その内、Index1～3は、胸骨圧迫と患者頭部に立って行う換気が実施されている（あるいは、実施可能な）状態でリーダーが状況確認や指示を行う、最も多いシーンである。それが更に3つに分割され、Index2が基準となるシーン、Index1、Index3は、患者左脚部、または右脚部に更に処置者がいる特殊シーンとして位置付けることができる。

Index6は、処置者が1名だけのシーンであり、患者搬入直後の初期診断と対応している。また、Index7は、ベッド周辺にまんべんなく処置者がいるシーンであり、患者の容態安定後の状況確認・次工程への指示シーンと対応している。

Index5は、除細動器のある患者左側面だけに処置者がいるシーンである。図4は実際に実施された除細動処置との比較をした図であるが、非常によく対応していることがわかる。一方、Index4は、Index5とは逆に、患者右側面以外に処置者がいるシーンである。図5に示すように、気管挿管と薬剤投与の最初に実施される静脈路確保の処置が行われている区間と対応している。

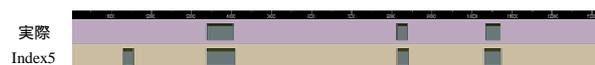


図4 分割結果との比較；除細動処置



図5 分割結果との比較；Index4



図6 分割結果との比較；胸骨圧迫

このように、「配置に基づいた分割」という意味では、人の認識と一致する有意な分割ができていたことが確認された。また、分割結果と実際に行われた処置との関連性についても、強い対応関係が見られる分割が得られており、提案手法の有効性を確認できた。一方、課題も明確になった。図6は実際に行われた胸骨圧迫処置と心肺蘇生処置において最も多いシーンに対応する配置である。Index1～3を比較したものであるが、Index1～3が実際の処置と対応した有意な分割となっていないことがわかる。これは、「配置 処置の実施」であることに起因している。配置がある処置を行う配置と一致していたとしても、実際にその処置を実施するかどうかはわからない。そのため、図6のように、ある処置が複数の配置に跨って実施される場合や複数の処置で共通して同じ配置が発生する場合には、人にとって有意な分割が得られないのである。

この問題には、医療知識の活用による処置に対応した映像領域を限定する解析方法や、位置情報など、他の手法による分割結果と統合することで対応できると考えている。

他の手法による分割結果との統合例として、動き情報の周波数解析による胸骨圧迫イベント抽出^[2]結果と提案手法による映像分割結果を統合した例を図7に示す。表中央の分割結果が周波数解析による胸骨圧迫検出結果である。胸骨圧迫処置と関連性が見られるものの有意な分割ではないIndex1～3を、胸骨圧迫を高精度に検出可能な当該手法による分割結果に置き換えることにより、診療映像全体の大まかな分割が実現できている。

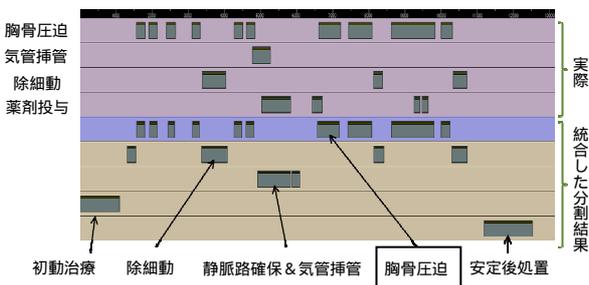


図7 他の手法による分割結果との統合例

4. まとめ

ベッドに横たわる患者に対して行う診療を対象に、ベッド周辺の人・物の配置に基づいて診療を大まかなシーンに分割する手法を提案し、実験により有効性を確認した。

提案手法は、ベッドのように作業対象を中心とし、その周りから中心にある作業対象に向かって作業を行うような対象であれば適用可能であることから、今後は、製造工程での作業映像など、他分野への適用を検討していく予定である。

謝 辞

本研究は文部科学省知的クラスター創成事業の一環としてなされたものである。

文 献

- [1] 浅井博次, 棚橋英樹, 田中等幸, 金川誠, 速水悟, “ビデオによる診療記録システムの開発”, 第26回医療情報学連合大会, pp.1011-1012, 2006.
- [2] 浅井博次, 田中等幸, “診療映像における自動イベント検出の検討”, 岐阜県生産情報研究所研究報告8号, pp.4-8, 2007
- [3] 浅井博次, 田中等幸, 清水早苗, “診療映像におけるシーン分割手法の検討”, 岐阜県情報技術研究所研究報告9号, pp.15-17, 2008.
- [4] 田中等幸, 浅井博次, 平湯秀和, “三次元位置に基づく救急医療処置の自動分割”, 岐阜県情報技術研究所研究報告9号, pp.18-22, 2008.

位置情報に基づく救命救急処置の要約システム

田中 等幸 浅井 博次 名知 祥*

Summary System for Emergency Care Based on Position Tracking

Tomoyuki TANAKA Hirotsugu ASAI Sho Nachi*

あらまし 一刻を争う救命救急の現場において、処置の記録は事後に行われることが少なくない。そのため、我々は経時的に処置内容を記録する診療記録システムを開発した。しかしながら、本システムは記録者によるマニュアル操作を必要とするため、システムに記録者が拘束される課題があった。そこで本研究では記録者を必要とせず、自動的に処置内容を記録することを目的とする。具体的には、位置センサを利用し、医師や医療機器の位置情報を基に、処置の内容を経時的に自動記録する要約手法を開発し、その有効性について検討した。

キーワード 救命救急処置、三次元位置、要約記録

1. はじめに

近年、医療の質の向上を図るための手段として、電子カルテシステムが普及しつつある。しかしながら、一刻を争う救命救急の現場では、キーボードやマウスによる操作方法によって記録することは困難であるため、メモ書きもしくは処置後の記憶を頼りにカルテを記録しているのが現状である^[1]。我々は、記憶による事後入力をできるだけ回避し、簡単な操作で処置の内容を記録する診療記録支援システムを開発した^[2-3]。本システムは簡単操作でリアルタイムに処置の記録を可能とする一方で、必ず記録者一人を必要とし、記録者は記録システムの画面の前に拘束される課題が残った。

そこで本研究では、様々なセンシングデバイスを利用して記録者を必要とせず、自動的に救命処置を推定し、要約することを目的とする。本稿では、三次元位置が計測可能なセンサを利用し、処置者や医療機器の軌跡およびそれらの相対的な位置関係の情報を基に救命処置を推定し、自動的に要約記録する手法について報告する。

2. 提案手法

2.1 救命処置の推定方法

救命処置は傷病者の反応や生体情報によって時々刻々と変化するが、ガイドラインによって処置の手順、処置者の役割、使用する医療機器、処置のタイミングなどが詳細に決められている。救命処置では処置者が医療機器を利用する処置が多くを占めていることから、救命処置に係わるすべての処置者と医療機器の空間的な位置、あ

るいはそれらの相対的な位置関係を検出することで、予測される救命処置をリアルタイムに推定する。

2.2 システム構成

あらかじめ救命処置室内に存在する観測対象物に発信器(50mm×50mm,40KHz)を装着しておく。観測対象物の行動軌跡は、三次元位置測定装置(古河機械金属株式会社製, Zone Positioning System)によって時経列的にコンピュータに蓄積される(サンプリングレート 50Hz, 発信器1個の時)。その計測原理は、固有のIDをもつ発信器から発射される超音波が3個以上のセンサによって受信され、到達時間の違いから三次元位置を計算するものである。

2.3 救命処置の検出空間の設定

救命処置は意識確認、気道確保、人工呼吸、胸骨圧迫、気管挿管、および静脈確保など多くの処置が実施される。これらの処置から観察されることは、処置者等は常に傷病者の様子を注視し、傷病者を中心とした救命処置を実施していること、傷病者を囲みそれぞれの役割を果たしていることが挙げられる。このことから、あらかじめ傷病者を中心とする相対的な領域について処置の検出空間を設定し、救命処置を検出する。患者の胸の位置を原点 $O(X_0, Y_0, Z_0)$ とし、床平面を XY 平面、床面法線を Z 軸と定義する。胸から足方向を X 軸とした場合、観測対象物の位置座標は原点 O と対象物との距離 r 、 X 軸からの角度 θ 、 XY 平面からの角度 ϕ をパラメータとする極座標値とする。例えば、除細動の検出であれば、検出領域を傷病者の胸部付近 (r_T, θ_T, ϕ_T) を設定し、この検出領域内に除細動器のパッドの位置が一定時間以上検出されたとき、除細動による電気的治療の実施開始とする。また、点滴や採血のように、処置の施術箇所が部分的であるような場合は、原点からの相対的な領域 (x_T, y_T, z_T) を設定し、点

* 岐阜大学医学部高度救命救急センター

滴チューブの位置が検出領域に一定時間以上検出されたとき、点滴の実施開始とする。なお、処置実施区間の開始・終了時刻は、検出判定に要した時間を差引いた時刻を記録する。

3. 実験

岐阜大学医療スタッフ6名の協力の下、トレーニング用マネキン人形を用いた2次救命処置を対象に実験を行い、救命処置の開始・終了時刻の正確性について検討した。検出対象の救命処置は、人工呼吸（もしくはバッグマスク換気）、胸骨圧迫、除細動、点滴、薬剤投与とした。したがって、観測対象物である処置者の手首、除細動パッド、バッグマスク、点滴チューブおよび注射器に発信器を装着した。

実験環境は、25個の位置センサを天井面に設置した4m x 4m x 2.7mの部屋である。また、実験の様子を撮影するため、4カ所からPTZカメラ4台と天井面に魚眼カメラ1台を設置した。なお、検出領域の設定には救命処置のガイドラインおよび人体寸法データベースを参考とした。

4. 結果および考察

4.1 自動記録の正確性の検証

図1に検出結果を示す。胸骨圧迫、換気、除細動および点滴の4つの救命処置について、それぞれVTRから目視によって救命処置の開始時刻を記録した結果を上段に、提案手法による検出結果を下段に示す。検出結果から、医療機器を利用した救命処置においてはVTR結果との差はないが、胸骨圧迫では正確に検出できない事例があった。これは位置情報の取得が時分割方式であるため、発信器の数が増すにしたがってサンプリング周波数が著しく低下すること、患者の胸部に処置者が密集する状況では外れ値となりやすいことがあげられる。そのため、検出領域内の存在有無のみで救命処置を判定せず、救命処置から構成される処置者や医療機器の有機的な相対関係から判定する手法や映像情報との融合によって、さらなる正確性の向上を図る必要がある。



図2 要約システム

4.2 提案手法の実装

提案手法に基づき、図2に示す要約システムを試作した。本システムは、カメラ映像、医療機器等の位置軌跡、生体情報を同時に蓄積し、記録者を必要とせず、処置開始・終了時刻および救命処置の内容を記録することが可能である。

5. まとめ

救急医療における処置の自動要約記録を目的として、救命処置室内に存在する観測対象物の位置を計測することによって救命処置を検出する手法を提案し、提案手法の実装を試みた。

謝辞

本研究は文部科学省知的クラスター創成事業の一環としてなされたものである。

文献

- [1] 小倉真治, 森 義雄, “電子カルテと救急医療の連携”, 新医療, 3号, pp.149-151, 2005.
- [2] 浅井博次, 棚橋英樹, 速水悟, “診療記録システムの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告7号, pp.5-7, 2006.
- [3] 田中等幸, 浅井博次, 平湯秀和, “三次元位置に基づく救急医療処置の自動分割”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告9号, pp.18-22, 2008.

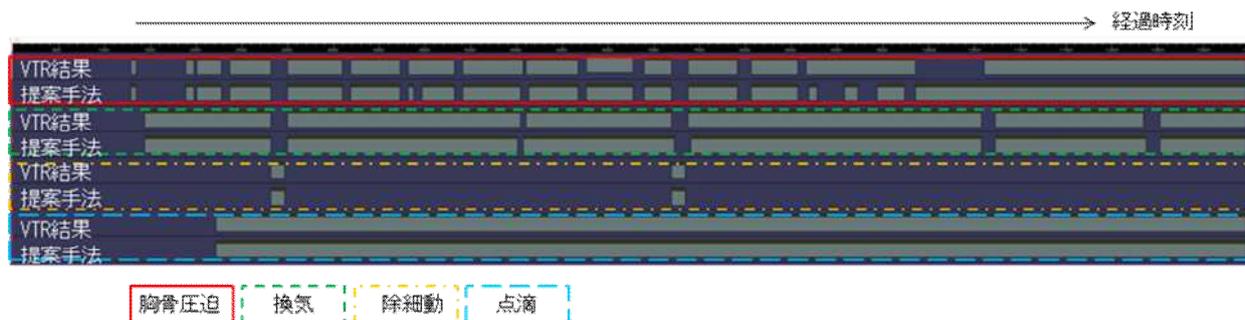


図1 検出結果

触覚センサを用いた触行動の識別に関する研究(第3報)

平湯 秀和 向井 利春*

Discrimination of Touching Behaviors with Tactile Sensor (3rd report)

Hidekazu HIRAYU Toshiharu MUKAI*

あらまし 人間と常に接しながらサービスを提供する人間共存ロボットにとって、サービスを受ける人間とコミュニケーションを行うために、その人の触行動を理解することは最も重要な課題の一つである。本研究では、(独)理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターが開発した人間の皮膚構造と同じ構造を持ち、かつサンプルレートが1kHzでデータ取得可能な柔軟な面状触覚センサを用いて、ロボットと人が接触してコミュニケーションを行う上で基本的な6種類の触行動の識別を行う。本稿では、6種類の触行動を識別するための特徴量として、圧力センサの情報を基に圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量と、動画像処理分野で行われている立体高次局所自己相関を特徴量として用いた場合のそれぞれの特徴量を比較することで評価検討を行った。

キーワード 人間共存ロボット, 面状触覚センサ, 触行動識別

1. はじめに

近年、少子高齢化社会が進んでおり、日本では2055年に生産年齢世代1.3人で1人の高齢者を支える社会が到来すると予想されており^[1]、被介護者の増加と共に介護者不足が深刻な社会問題となることが予測されている。そこで、その解決策として、人間と接しながら移乗介護支援や精神的癒し等の各種サービスを提供する人間共存ロボットが期待されており、その開発が進んでいる。その一つに、独立行政法人理化学研究所の移乗介護支援ロボットRI-MANがある^[2]。RI-MANは左右前腕・上腕・胴体部分の計5箇所にかわい面状触覚センサを搭載し、その情報を統合することで、被介護者を安全に移乗介護することが可能なロボットである。このように人と常に接するロボットにとって、サービスを受ける人間とコミュニケーションを行うために、その人の意図を理解することは最も重要な課題の一つである。

人が自分の意志を相手に伝えるための重要なコミュニケーションの一つに触行動がある。触行動の中でも「たたたく」「触れる」「なでる」等は触行動の根本的コミュニケーションの一つである。例えば、ロボットが「たたかれたり」、「押されたり」する状況は、人にとってロボットの位置や存在、行動が好ましくない状況と判断することができる。そのため、人の触行動を理解すべきロボットにとって、表皮となる触覚センサは重要なインタフェ

ースであるが、ロボットに搭載可能でかつ、人の触行動を認識可能な触覚センサが実用化された例は少ない。その理由としては、現在、ロボットの触覚センサとして感圧導電性ゴムやインクを用いたフィルム状センサやPVDF(ポリフッ化ビニリデン)フィルムを用いたセンサなどが開発されているが、ロボット上腕等の曲面状のロボット表面への装着が困難、耐久性や柔軟性が不十分、測定分解能が低いといった問題があるためである。更にサンプルレートが数十～100Hzと低いため、安定した触行動識別結果が得られない。そこで、この問題を解決するため、理化学研究所では高いサンプリングレートを持つ半導体圧力センサを感圧素子として弾性体に埋め込む方法を用いて、柔軟かつ1kHzのサンプリングレートで圧力データを取得可能な面状触覚センサを開発した^[3]。

本研究では、このセンサを用いて、人がロボットに対して行う触行動として、「たたたく」「つまむ」「なでる」「押す」「ひっかく」「つかむ」の6種類の基本的な動作の識別に関する研究を行う。昨年度は、面状触覚センサから得られる圧力データから、人が面状触覚センサに触れて動作を開始した時刻とセンサから手が離れる終了時刻を推定し、その期間(触行動時間)の圧力位置や重心移動、面積分布等から複数の特徴量を抽出し識別に用いた^[4]。今年度は、上記の特徴量と、時間を含む三次元データに対する特徴である立体高次局所自己相関特徴量のそれぞれの特徴量を用いて触行動の識別実験を行い、比較評価したので、その報告をする。

*独立行政法人理化学研究所

表1 対象とする触行動

	社会心理学による分類	本研究による分類	行 為
1	たたく	たたく	ひっかきよりも広い部分が触れている。手の形は可変的である
2	こつこつたたく		
3	つまむ	つまむ	親指と他の指が物に触れている。手は親指と他の指がつかむ形をしている
4	つかむ	つかむ	手が体の部分や物を包み込む。手の形は開いているか、閉じられている
5	なでる	なでる	手の広い部分が触れている。手の形は可変的である
6	ひっかく	ひっかく	爪もしくは指先のみが何かに触れている。手は開いている
7	押す	押す	手の内側で物や体の部分を押す
8	さわる		

2. 対象とする触行動

社会心理学において、人の接触行為に関する基本的な上肢動作は12種類に分類されることが知られている^[5]。本研究では、12種類の上肢動作の中で、「たたく」と「こつこつたたく」、「押す」と「さわる」は、人がロボットに対して行う触行動として、それぞれ同じであると見なし、「たたく」「押す」と定義する。そこで、10種類の触行動の中で、表1に示すとおり、「たたく」「つまむ」「なでる」「押す」「ひっかく」「つかむ」の6種類の触行動識別を実施した。残りの上肢動作「引っ張る」「回転」「支える」「止める」行為は、人が自分の意志を伝える触行動と関係がない、もしくはせん断力を求める等の必要がある動作のため、本研究の対象としなかった。

3. 触行動識別

本研究では、面状触覚センサから得られる圧力データから、人が面状触覚センサに触れて動作を開始した時刻と終了時刻を推定し、その触行動時間の時系列データから複数の特徴量を抽出する。次に、それらの特徴量を基に線形判別分析を行うことで触行動の識別を行う。

3.1 圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量

6種類の触行動において、「たたく」という行為は他の触行動と比較すると触行動時間が短く、触行動の開始直後の圧力が他よりも大きい。また、「つまむ」は2点で挟む行為であるため、2つの圧力分布が存在するなど、個々の触行動に特徴がある。従って、面状触覚センサの圧力分布や重心の移動の大きさ、圧力のかかる面積の変化量等に注目し、個々の触行動に関して異なる特徴となり得ると判断される下記の9個の特徴量を抽出した(図1)。

<時系列データ>

- ①触行動時間
- ②最大の圧力がかかるまでの時間

<圧力位置・領域面積変化>

- ③触行動時間全体における圧力のかかった重心位置と、各フレームで求めた重心位置との距離平均
- ④触行動時間全体における圧力のかかった重心位置と、各フレームで求めた重心位置との距離の分散
- ⑤各フレームにおいて、圧力のかかった領域面積に対する平均値
- ⑥各フレームにおいて、圧力のかかった領域(グループ)の個数に対する平均値

<圧力の時間的変化>

- ⑦動作開始後、10ms時点における圧力データ
- ⑧触行動時間を3等分し、1番目の時間帯(A領域)での圧力の(最大値-最小値)
- ⑨触行動時間を3等分し、3番目の時間帯(C領域)での圧力の(最大値-最小値)

3.2 立体高次局所自己相関を基にした特徴量

面状触覚センサは、超小型半導体圧力センサを8×8のアレイ状に配置した構造になっている。これは、カメラで得られた画像と同じく配列としてメモリに格納される。そこで、動画画像処理分野で行われている、時空間的な局所相関値を積分することで得られる特徴の一つである立体高次局所自己相関(CHLAC:Cubic Higher-order Local

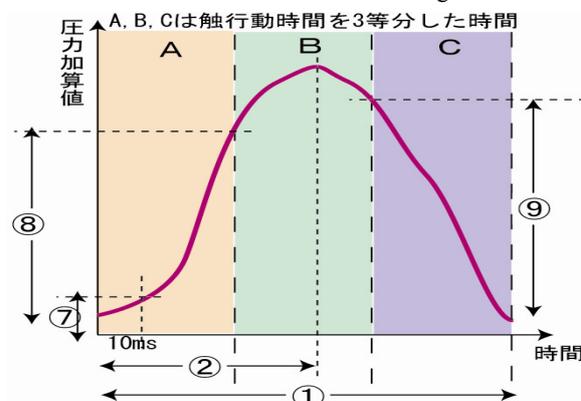


図1 圧力位置や重心位置等を基にした特徴

Auto-correlation) を用いた特徴量を抽出する。

CHLACは、二次元データである一つの画像(フレーム)内の相関関係を求める高次元自己相関(HLAC)を時間方向に三次元拡張し、時空間の相関関係をも考慮した特徴である^[6]。CHLACは、対象が画像(フレーム)内のどこにあって特徴量が変わらない位置不変性があると共に、同一フレーム中に複数の対象があった場合、動きが異なるそれぞれの対象の特徴量は個々の総和となる加法性を持っている。CHLACの成分数は、0次が1個、1次が13個、2次が237個の次数で、計251次元存在するが、6種類の触行動に対して、251次元分のCHLACを求め、正規化した結果、図2に示すとおり、1次(14次元)までの値は非常に大きい2次の値は非常に小さく、それぞれの触行動に差異はなかった。そこで、本研究では1次までの計14次元を特徴量として使用した(図3)。14次元の自己相関関数は、注目点 r での対象とする圧力データを $f(r)$ とすると、注目点を中心とし、 3×3 領域に限定したその周りの14個の変位 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{14}$ に対して、

$$x(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{14}) = \int f(r)f(r+a_1)f(r+a_2)\dots f(r+a_{14})dr \quad (1)$$

と定義される。本研究では、式(1)に示す 3×3 領域に限定したCHLACを使用した。

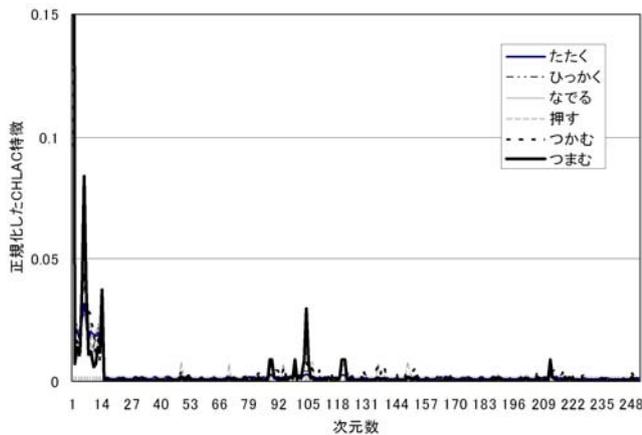


図2 6種類の触行動における251次元のCHLACの結果

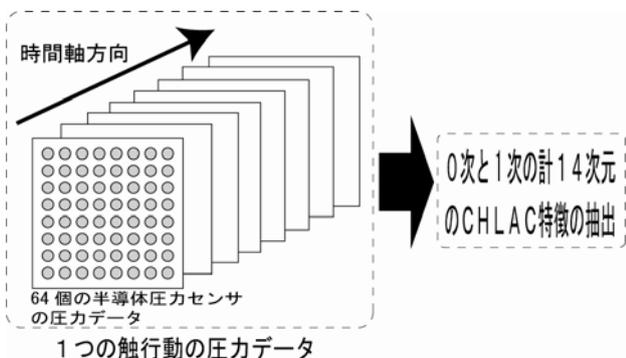


図3 CHLACを基に一つの触行動データからの特徴抽出

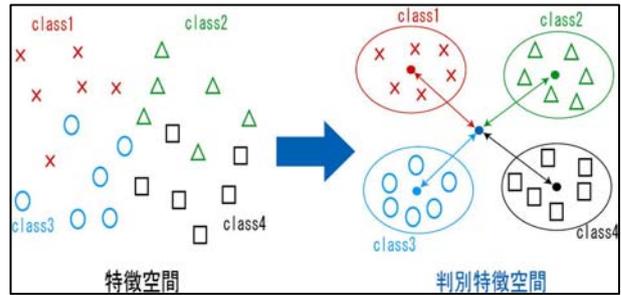


図4 線形判別分析

3.3 推定方法について

本研究では、前節で述べた特徴量を用いて、線形判別分析により得た判別空間で距離が最小となるクラスを識別結果とする手法を用いる。線形判別分析は、クラス内分散を最小に、クラス間分散を最大にするような特徴空間を生成する写像行列を求める。つまり、学習パターンを識別するのに最適な判別空間を生成することになる。本手法では、複数の特徴量を入力として、線形判別分析で得た写像行列を用いて判別空間へ投影し、標本が、各クラスの中心まで、どの程度の距離(マハラノビス距離)があるのか調べ、判別クラスとの距離が最小となるクラスを識別結果とする(図4)。

4. 実験と考察

3.1節で述べた特徴量と3.2節のCHLACを用いた特徴量のそれぞれの有効性を比較するため、実験を行った。7人の被験者が「たたく」「つまむ」「つかむ」「なでる」「ひっかく」「押す」の6種類の触行動をそれぞれ2回実施し、1つの触行動に対して14個のデータを得た。集めたデータ量が少ないため、交差検証法を用いて、触行動識別の実験を行った。具体的には、一つの触行動に対して14個のデータがあるため、13個をトレーニングデータとして、各触行動に対して前章の特徴量を抽出した。これらの特徴量からクラス分けするのに最適な判別空間を生成し、残りの1個のデータをテストデータとして、触行動識別の実験をした。

トレーニングデータのみを用いて最適な判別空間が生成できているか調べるため、トレーニングデータのみの触行動識別を行った。表2に圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量によるトレーニングデータの識別結果を、表3にCHLACを用いたトレーニングデータの識別結果を示す。圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量の場合、「たたく」動作の識別率は100%であったが、CHLACでは73.1%と6種類の触行動の中で最も低い識別率であった。また、「つまむ」「押す」動作は両方の特徴量共に90%以上の識別率であったが、「つかむ」動作は両方の特徴量とも70%台とトレーニングデータでは良好な判別空間が生成されなかった。

一方、テストデータに対する識別結果を、表4(圧力位

表2 圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量を用いた触行動識別結果（トレーニングデータ）

触行動	データ数 (13×14)	正解数 (13×14)	識別率 [%]
たたく	182	182	100.0
つまむ	182	168	92.3
つかむ	182	130	71.4
なでる	182	155	85.2
ひっかく	182	135	74.2
押す	182	172	94.5

表3 CHLACを用いた触行動識別結果（トレーニングデータ）

触行動	データ数 (13×14)	正解数 (13×14)	識別率 [%]
たたく	182	133	73.1
つまむ	182	181	99.5
つかむ	182	143	78.6
なでる	182	152	83.5
ひっかく	182	163	89.6
押す	182	167	91.8

表4 触行動別に分類したテストデータの識別結果
(圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量を使用)

触行動	上段：識別率[%]，下段：正解数／実験回数					
	たたく	つまむ	つかむ	なでる	ひっかく	押す
たたく	100.0 (14 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)
つまむ	0.0 (0 / 14)	85.7 (12 / 14)	7.1 (1 / 14)	7.1 (1 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)
つかむ	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)	57.1 (8 / 14)	14.3 (2 / 14)	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)
なでる	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	85.7 (12 / 14)	14.3 (2 / 14)	0.0 (0 / 14)
ひっかく	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)	7.1 (1 / 14)	71.5 (10 / 14)	7.1 (1 / 14)
押す	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	7.1 (1 / 14)	0.0 (0 / 14)	92.9 (13 / 14)

表5 触行動別に分類したテストデータの識別結果
(CHLACを使用)

触行動	上段：識別率[%]，下段：正解数／実験回数					
	たたく	つまむ	つかむ	なでる	ひっかく	押す
たたく	64.3 (9 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)	7.1 (1 / 14)	14.3 (2 / 14)
つまむ	0.0 (0 / 14)	92.9 (13 / 14)	7.1 (1 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)
つかむ	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)	50.0 (7 / 14)	7.1 (1 / 14)	7.1 (1 / 14)	21.4 (3 / 14)
なでる	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	78.6 (11 / 14)	7.1 (1 / 14)	14.3 (2 / 14)
ひっかく	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	21.4 (3 / 14)	78.6 (11 / 14)	0.0 (0 / 14)
押す	0.0 (0 / 14)	14.3 (2 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	0.0 (0 / 14)	85.7 (12 / 14)

置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量)と表5 (CHLAC)に示す。CHLACを適用した場合、圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量を用いた場合と比較すると全体的に識別率が低く、特に「たたく」「つ

かむ」動作は50～60%台と非常に低い値となった。特に、「つかむ」行為は「たたく」以外の4種類の触行動の全てに誤って識別された。これは、CHLACの特徴として、面状触覚センサのどこに圧力がかかっても同じ方向に力が

かかれば同じ特徴量となるためである。従って、「たたく」や「つかむ」動作は人によって、面状触覚センサにおける圧力のかかる方向は異なるため、2つの触行動は人によって特徴量が変わり、良好な判別空間が生成できなかったと思われる。一方、「つまむ」動作は面状触覚センサが円筒状に構成されている関係上、どの被験者も円筒面の主軸をつまむような動作となり、つまむ場所は異なるが同じような方向に力がかかるため、複数の被験者で同じような特徴量となり、良好な判別空間が生成でき、結果として識別率が高くなったと考えられる。

5. まとめ

人間共存型ロボットに搭載する面状触覚センサで人の触行動を識別する目的のため、(独)理化学研究所が開発した面状触覚センサから得られる触行動の時系列データから、二つの手法で特徴量を抽出し、それらを線形判別分析することで、6種類の触行動を識別する実験を行った。その結果、圧力位置や重心移動、面積分布等を基にした特徴量の方が、CHLACよりも良好に判別空間が生成されたことを確認した。

今後の課題としては、触行動を識別するのにより有効な特徴量の選定および実際にRI-MAN内部の超小型汎用コントローラへ組み込むことがあげられる。また、今回対象としなかった4種類の触行動（「引っ張る」「回転」「支える」「止める」）に関して、例えば、「引っ張る」動作に関してはせん断力を求める必要があり、本センサでは計測が困難なため、これらの触行動を識別するには更なるセンサの開発が必要である。

文 献

- [1] 内閣府「平成20年版高齢社会白書」：
http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2008/gaiyo/2_0indexg.html
- [2] T. Odashima et al., "A Soft Human-Interactive Robot RI-MAN", IROS2006, Video ID: v018, 2006.
- [3] 向井利春, 加藤陽, "ロボットに柔らかさを与える1ms柔軟面状触覚センサ", ROBOMECH2007 講演論文集, pp.53-54, 2007.
- [4] 平湯秀和, 向井利春, "触覚センサを用いた触行動の識別に関する研究(第2報)", 岐阜県生産情報研究所研究報告 第9号, pp.26-28, 2008.
- [5] ペーター・E.ブル, 市河淳章ら(編訳), "姿勢としぐさの心理学", 北大路書房, 2001.
- [6] T.Kobayashi and N.Otsu, "Action and simultaneous multiple-person identification using cubic higher-order local auto-correlation", in Proc. ICPR, 2004.

カメラを用いた廊下見守りシステムの開発

窪田 直樹 平湯 秀和

Development of Safety Passage System Using Camera

Naoki KUBOTA Hidekazu HIRAYU

あらまし 近年、転倒や浴室での溺死など、屋内事故に起因する死者の数が、交通事故による死者の数を上回っている。高齢化が進む中で、事故の件数も増えているが、これらの事故の中には、早期に発見すれば死に至らなかったケースが多く含まれる。本研究では、廊下での転倒事故の発見を目的とし、カメラを用いた廊下見守りシステムに必要なアルゴリズムの開発と実験を行ったので報告する。

キーワード 画像センシング, CHLAC, 見守りシステム

1. はじめに

近年、一人暮らしの老人が誰にも看取られること無く死亡する「孤独死」という言葉がマスコミに取り上げられるようになった。孤独死は、定義が曖昧であることや直接の死因(病死、事故等)では無いことから全国的な統計が取られていないが、阪神淡路大震災復興住宅では震災後10年間に600人余りが死後に発見されている。また、国内の死亡事故のうち、転倒や浴室での溺死など屋内事故による死者の数は、交通事故による死者の数を上回っている^[1]。これらの死亡事故の大半は、老人の一人暮らし、または家族や介護者が留守の間に発生しており、早期発見ができていれば死に至らなかったと思われるケースも多く含まれている。このような事態は、家族との同居や介護サービスの充実が進めば減少すると考えられるが、核家族化、少子高齢化が進む現状では困難である。一方、一人暮らしでも炊事・洗濯などの日常生活には支障がない老人も多い。これらの老人に対しては、事故が起きたときだけ手助けがあれば致命的な事故を避けることができると考えられる。

このような背景から、一人暮らしの老人向け見守りシステムが開発され徐々に普及し始めている。既存の見守りシステムは、通報の方法から大きく二つに分けられる。一つは、事故発生時に老人自身がボタンを押すことなどで介護者に通報するシステムであり、もう一つは、日常生活時の電気やガスの使用状況を定期的に介護者に通報するシステムである。しかし、前者は、突然の発作や、装置を離れていたところに置いていたなどの理由でボタンを押すことができないことがある。また、後者については、電気やガスの使用と事故の発生が直接関係してはならないため、事故発生後早期に発見することができないなどの問題点がある。

本研究では、システムが直接事故を検出し通報する見守りシステムの一つとして、段差のある玄関や動線の要となる廊下を対象に、カメラを用いた見守りシステムを開発したので報告する。

2. システム概要

カメラで撮影された映像から転倒を検出するには、映像からそこに写っている人物を抽出し、続いてその人物の状態を調べる方法が考えられる。すでに、映像から人物の行動を認識する試みは数多くなされているが、これらの手法の多くは、事前に多くの学習データが必要であったり、行動の認識に多大な計算コストがかかたりする。本提案システムでは、一人暮らしの老人を対象としていることから一人の人物の行動の様子だけ調べればよい。そこで、学習の必要がなく、処理コストも小さい背景差分法と限定CHLAC法を組み合わせたアルゴリズムを用いた。

2. 1 背景差分法

背景差分法は、人物が写っていない画像(背景画像)をあらかじめ用意しておき、入力画像との差分をとることで人物部分を抽出する方法である。本システムでは以下のような背景差分法を用いた。

まず、背景画像を作成する。人物が写っていない映像をしばらくの間取り込み、画素ごとに時間方向の平均輝度を求めた画像 $f_b(0, x, y)$ と標準偏差を求めた画像 $f_{bs}(0, x, y)$ を作成する。ここで、実際の背景は、照明の変化や外光の変化により明るさが変化するため、背景画像も時間とともに更新しなければならない。そこで、入力画像 $f_i(t, x, y)$ を用いて、式(1)を満たす画素(前景領域)を、式(2)のように更新する。

$$|f_b(t, x, y) - f_i(t, x, y)| \geq c_0 f_{bs}(t, x, y) \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{cases} f_b'(t+1, x, y) = f_b(t, x, y) \\ f_{bs}(t+1, x, y) = c_1 f_{bs}(t, x, y) + (1 - c_1) f_i(t, x, y) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

また、式(1)を満たさない画素(背景領域)は、式(3)のように更新する。

$$\begin{cases} f_b'(t+1, x, y) = c_2 f_b(t, x, y) + (1 - c_2) f_i(t, x, y) \\ f_{bs}(t+1, x, y) = c_2 f_{bs}(t, x, y) + (1 - c_2) c_3 |f_i(t, x, y) - f_b(t, x, y)| \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 c_0, \dots, c_3 は任意の定数である。

さらに、本システムでは、輝度変化の激しい玄関・廊下を対象としているため、カメラの自動露出調整機能や自動ゲイン調整機能を使用することを想定している。そのため、極端に明るさの異なる対象が写ったりするときに、画面全体の明るさが異なることがあるので、式(1)を満たす (x, y) の集合を P とし、次のような処理を加えている。

$$f_b(t+1, x, y) = f_b'(t+1, x, y) \frac{\sum_{x,y \in P} f_i(t+1, x, y)}{\sum_{x,y \in P} f_b'(t+1, x, y)} \dots\dots\dots (4)$$

このようにして、緩やかな輝度変化やカメラの自動調整機能に対応可能な背景画像を作成する。

続いて、背景と入力画像の差分をとる。すでに、式(1)を用いることで画像を背景と前景に分離しているが、この手法では壁や床面にできた影の影響を受けやすく、人物以外の広い領域も前景として抽出することがある。そこで、本システムでは、エッジ画像の差分を取得することとした。背景画像と前景画像の各エッジ画像 $f_{ai}(t, x, y)$, $f_{ii}(t, x, y)$ を作成する。また、背景画像のエッジ画像については、背景画像と同様にエッジ画像の標準偏差画像 $f_{abs}(t, x, y)$ を求め、式(2)(3)の $f_{bs}(t, x, y)$ と同様に更新している。最終的な背景差分画像 $f_{ab}(t, x, y)$ は、式(5)のようになる。

$$f_{ab}(t, x, y) = \begin{cases} 1 \cdot |f_{ai}(t, x, y) - f_{ii}(t, x, y)| \geq c_4 f_{abs}(t, x, y) \\ 0 \cdot |f_{ai}(t, x, y) - f_{ii}(t, x, y)| < c_4 f_{abs}(t, x, y) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

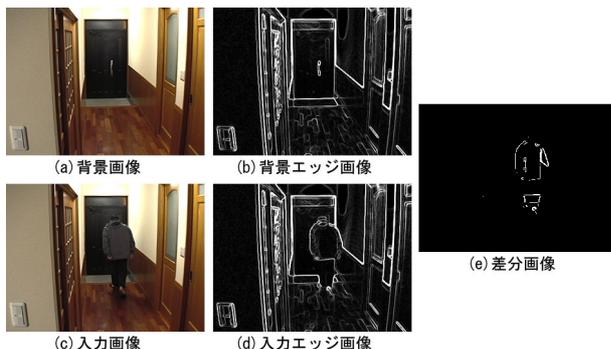


図1 背景差分画像の処理画像

図1に、背景差分画像の処理画像を示す。

こうして求めた背景差分画像より、人物の高さを求め、ある閾値より低い状態を転倒として検出する。なお、人の高さを算出するためには、廊下やカメラのパラメータが必要となるが、これらの入力方法については3章で述べる。

2. 2 限定CHLAC法

CHLAC法^[2]は、対象の位置に依存することなく統計的に対象の形状や動作の特徴を取得する手法である。本システムでは、CHLAC法の動作特徴量のみを利用する限定CHLAC法を定義し、転倒を検出する。

まず、入力画像に対し、式(6)のようにフレーム間差分画像 $f_{df}(t, x, y)$ を求める。

$$f_{df}(t, x, y) = \begin{cases} 1 \cdot |f_i(t, x, y) - f_i(t-1, x, y)| \geq c_4 \\ 0 \cdot |f_i(t, x, y) - f_i(t-1, x, y)| < c_4 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

この画像に対し、式(7)に示すCHLAC法を用いて、特徴量を求める。

$$c(t, n) = \sum_x \sum_y f_{df}(t-1, x, y) f_{df}(t, x + \Delta x(n), y + \Delta y(n)) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\begin{cases} \Delta x(n) = n \bmod 3 - 1 \\ \Delta y(n) = \lfloor \frac{n}{3} \rfloor - 1 \\ n = 1, 2, \dots, 9 \end{cases}$ である。

さらに、式(8)に示すように9つの特徴量を正規化する。

$$c_i(t, n) = \frac{c(t, n)}{\sum_n c(t, n)} \dots\dots\dots (8)$$

この $c_i(t, n)$ は、 $f_{df}(t, x, y) = 1$ の画素が上向きに移動すると特徴量 $c_i(t, 2)$ が他の特徴量より大きくなり、下向きに移動すると $c_i(t, 8)$ が大きくなる傾向にある。なお、移動方向と n の関係は図2のようになる。

この歩行中に転倒する映像に対し、この限定CHLAC特徴を調べると、図3のようになる。ここで、横軸は時刻 t 、縦軸は特徴量、各グラフは $n=1, 2, \dots, 9$ の場合の特徴量 $c_i(t, n)$ である。グラフより、歩行中は9つの特徴量にばらつきが見られるが、転倒中はばらつきが少なくなる傾向がみられる。そこで、転倒度 $T(t)$ を式(9)のように定義した。

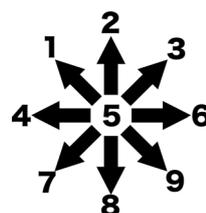


図2 移動方向とCHLAC特徴

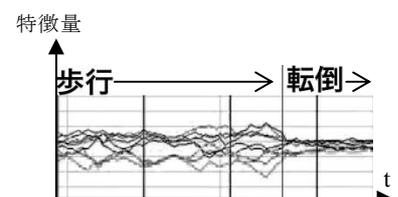


図3 歩行・転倒とCHLAC特徴

$$T(t) = -\sigma(t) \sum_n b(n) c_l(t, n) \dots \dots \dots (9)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (c_l(t, n) - \frac{1}{n} \sum_n c_l(t, n))^2}$$

ここで、

$$b(n) = \begin{cases} -2 \dots n = 2 \\ -1 \dots n = 1, 3 \\ 0 \dots n = 4, 5, 6 \\ 1 \dots n = 7, 9 \\ 2 \dots n = 8 \end{cases} \quad \text{である.}$$

転倒度 $T(t)$ は、9つのCHLAC特徴量のばらつきが小さいほど、また、画素の下向き移動量が多いほど値が大きくなる。この値が閾値を超えたときに転倒したとみなす。閾値は、転倒映像を処理した上で決定したが、図4に示すように、通常歩行時においてもこの閾値を超えることがある。これは歩行に伴う体の上下動により発生しているためであり、一定間隔で閾値を超えたり下回ったりする。そこで、転倒度が閾値を超えた状態が一定時間続いたときに転倒と見なすこととした。

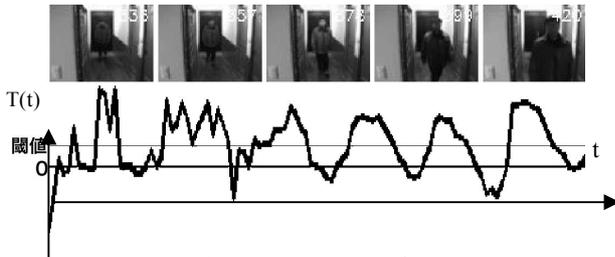


図4 歩行時のCHLAC特徴グラフ

3. 設定画面

一般に、画像処理に用いるカメラは、カメラの設置場所、向き、画角、絞り等を固定して使用するが、またはそれらの情報を外部に出力できる様になっている。また、画像処理プログラムはカメラの情報を事前に入力し、画像と撮影対象の対応を計算する必要がある。

本システムは一般住居でも導入しやすいように、詳細な情報の入力・設定を極力減らすことにした。図5に、設定画面を示す。画面の左側には、カメラからの



図5 設定画面

映像が、右側には設定用のインターフェースが並んでいる。

本システムが使用する画像処理アルゴリズムのうち、限定CHLAC法は対象の動きを検出するため、カメラの設置等に関する情報を必要としない。一方、背景差分法では、人の高さを算出するために、画素の大きさと実際の長さとの対応が必要になる。そこで、本システムでは、廊下の幅(cm)と、画面上の廊下の領域(左右の壁との境)を指定することとした。これにより、画像のy座標を特定することでその位置における画素の大きさと実際の長さとの対応をとることができる。背景差分法で抽出される領域の下端は足と廊下が接する点になるため、この点の1画素あたりの長さと、抽出された領域の高さから、人の高さを算出することができる。

4. 実験

前章までで述べた挙動判別および位置判別手法を用いて、廊下での転倒を検出する実験を行った。カメラは、できるだけ広い範囲を撮影するため、図5に示すように廊下隅の天井付近に、長手方向やや下向きになるよう設置した。

4. 1 照明状態が変化しない場合

図6に、人が奥の玄関ドアから入ってきて、靴を脱いだ後玄関の段差で転倒する模擬動作の映像での処理結

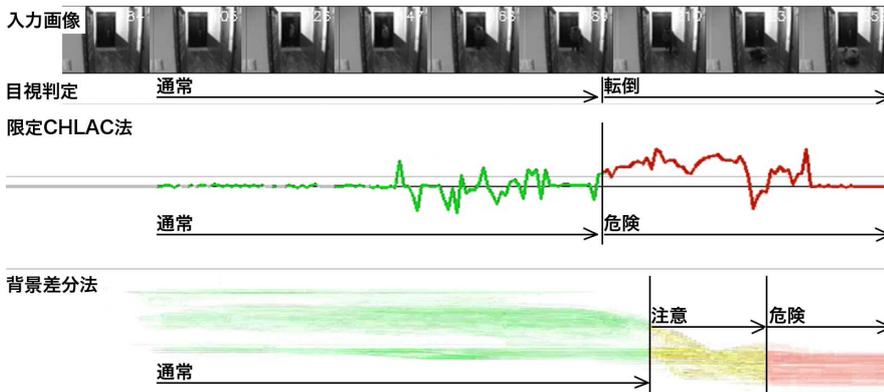


図6 転倒映像の検出結果

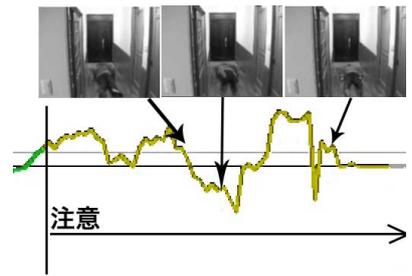


図7 限定CHLAC法の転倒検出失敗の例

果を示す。ここで、照明は点灯したままの状態に変化していない。図は、上から約1秒ごとの入力画像、目視による通常・転倒の区別、限定CHLAC法による危険度グラフ、背景差分法による対象の位置・大きさのグラフである。グラフは通常時を緑、注意を黄色、危険を赤で表示しているが、印刷の都合上矢印を入れることで区別している。限定CHLAC法と背景差分法で、転倒と判定するまでに若干の時間差があるが、いずれの方法も転倒を検知している。

同様に、廊下を手前から奥へ歩く途中で転倒する映像、転倒せずに通過する映像(通常歩行映像)について検証を行った。結果を表1および表2に示す。

表1 転倒映像の検出結果(照明一定)

歩行方向	手前から奥	奥から手前
背景差分転倒検出	2/2	2/2
CHLAC転倒検出	1/2	2/2

(ここで、1/2は、2種類の転倒映像に対し1回検出したことを表す)

表2 通常歩行映像の検出結果(照明一定)

歩行方向	手前から奥	奥から手前
背景差分転倒検出	0/2	0/2
CHLAC転倒検出	0/2	0/2

(ここで、0/2は、2種類の映像に対し転倒と誤検出しなかったことを表す)

通常歩行映像については、背景差分法、限定CHLAC法のいずれについても誤検出をしなかった。一方、転倒映像については、限定CHLAC法で検出できなかった映像があった。そのときの映像および危険度グラフを図7に示す。この映像では、人が転倒直後に、転んだ反動で大きく足を振り上げている。そのため、式(9)の Σ の値が負になり、危険度が大きく下がっている。結果、注意状態が一定時間以上連続せず、危険として検出しなかった。しかし、転倒時および振り上げた脚が下がるときに危険度が高くなっていることから、経過時間と転倒度の組み合わせから解決できると考えられる。

4. 2 照明状態が変化する場合

図8に、手前から奥へ歩く途中で転倒する映像での処理結果を示す。ここで、照明は最初消えているが、人

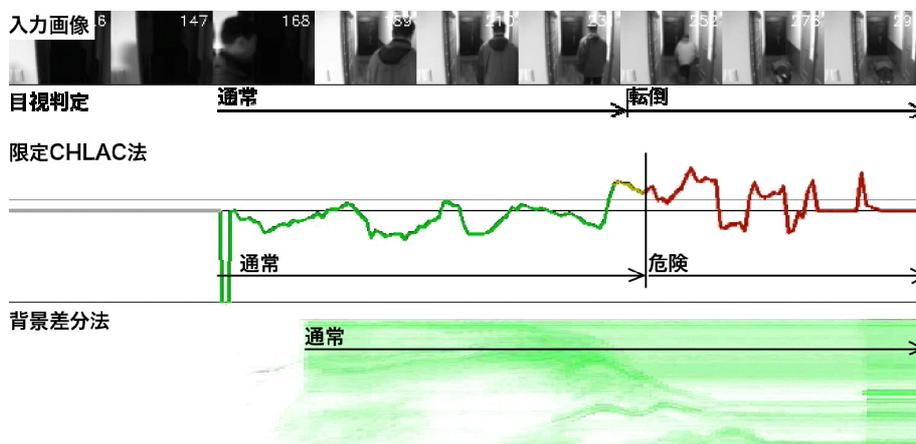


図8 照明状態が変化する場合

が近づくと点灯する検知センサー型である。

この条件では、限定CHLAC法では転倒を検出しているが、背景差分法ではできていない。これは、照明状態が変わったため画像の背景そのものが変わってしまい、適切な背景差分画像が得られなかったためである。図9に、照明が変わった直後の背景差分画像を示す。人物だけでなく、背景部分も抽出されていることがわかる。結果を表3に示す。

表3 転倒映像の検出結果(照明変化)

歩行方向	手前から奥	奥から手前
背景差分転倒検出	0/2	0/2
CHLAC転倒検出	2/2	1/2

4. 3 出力

背景差分法、限定CHLAC法の結果を組み合わせ、最終出力として表示することとした。図10に、出力画像を示す。上端に現在の状態を、中断に危険状態になった時刻を、下段に現在時刻を表示している。

5. まとめ

画像を用いた見守りシステムについて、人の転倒を検出する方法として、限定CHLAC法と、背景差分法を組み合わせることで、廊下を歩いている最中に転倒する人を検出できる見通しを得た。また、これに必要なユーザーインターフェースも作成した。

文 献

- [1] 厚生労働省, “死因簡単分類別にみた性別死亡数・死亡率” および “家庭内における主な不慮の事故の種類別にみた年齢別死亡数・構成割合”, 平成18年人口動態統計(確定数)の概況, pp15-17, 2007.
- [2] 下畠康幸, 大津展之, “立体高次局所自己相関特徴を用いた複数移動物体の同時認識”, 信学技報 PRMU2006-104, pp.1-6, 2006.



図9 背景差分画像



図10 出力画像

画像を用いた食品評価に関する研究(第2報)

田中 等幸 平湯 秀和 丸山 新*

Research of Food Valuation with Image Analysis (2nd report)

Tomoyuki TANAKA Hidekazu HIRAYU Shin MARUYAMA*

あらまし 牛肉の肉質評価は「牛枝肉取引規格」に基づいて、格付け職員の目視によって決定される。しかし、食肉に含まれるタンパク質、脂質及び水分など、食味に関する項目は肉質評価の対象としては含まれておらず、市場の取引価格に反映されていないのが現状である。そこで、本研究では、食味に関する情報を迅速かつ非破壊で分析することを目的とする。本稿では、総不飽和脂肪酸の割合が既知の腎臓周囲脂肪を対象として、近赤外分光画像から総不飽和脂肪酸の成分分布を推定及び可視化する手法を提案する。

キーワード 牛肉、肉質評価、近赤外分光、画像解析、総不飽和脂肪酸

1. はじめに

牛枝肉の肉質評価は、牛枝肉取引規格に基づき、格付け職員の目視によって脂肪交雑、肉の色沢、肉の締まり及びきめ、脂肪の光沢と質の項目から等級が決定されている。最近では、画像解析技術によって、脂肪交雑の割合や脂肪交雑子の粗さなどを数値化し、客観的に評価する方法が開発されている。しかしながら、食肉に含まれるタンパク質、脂質及び水分など、食味に関する項目は肉質評価の対象として含まれておらず、市場の取引価格に反映されていないのが現状である。

牛肉のおいしさは香り、軟らかさ及び多汁性が珍重され、これらに影響するのは脂（脂肪酸）であり、特に不飽和脂肪酸の割合が高いほど食味がよいと言われている。食味に関する情報を定量化する方法は、通常、理化学分析による破壊試験によって実施されるが、この方法では結果を得るために多くの経費と時間を要するため、食肉の検査現場などには利用されていない。このため、食味に関する情報を迅速かつ非破壊で検査する方法が研究されてきた^[1-3]。従来研究の多くは光ファイバーを利用して、微小な測定領域における近赤外光の拡散反射スペクトルを定量分析する方法である^[4-5]。この方法はスポット箇所を高精度に計測できる一方で、試験対象物全体を評価することは難しい課題がある。

そこで本研究では、スポット計測を面計測法に拡張し、食味に関する情報の分布を推定し、その分布状態を可視化する分析方法を開発する。本稿では、総不飽和脂肪酸の含有量が既知の牛抽出脂肪を対象として、近赤外分光画像から総不飽和脂肪酸の成分分布を推定及び可視化する

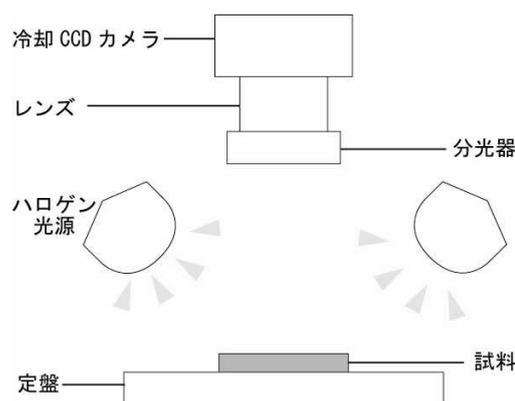


図1 撮影システム

る手法を提案する。

2. 方法

2.1 近赤外画像の利用

近赤外領域には農産物の主成分である、水、タンパク質、脂質及びデンプンなどの成分の情報が含まれていることが知られている^[6-7]。本研究では近赤外カメラとバンドパスフィルタを用いて分光画像を撮影し、それらの画像に基づく解析手法と成分分布の可視化手法を開発する^[8-11]。

2.2 計測システム

図1に分光画像の撮影システムを示す。撮影システムの構成は16bit冷却CCDカメラ（Apogee社製 Alta U260）、分光器（Cri社製 VariSpec NIR）および光源（岩崎電機社製 JPRF100V600WD）からなる。冷却CCDカメラは解像度が512×512pixel、各画素において65,535階調の高精細な

* 岐阜県畜産研究所

データを取得できる。分光器は液晶チューナブルフィルタを使用し、650nm～1100nmの範囲で任意の波長を1nm刻みで透過させることができる。

試料を定盤上に置き、鉛直下向きに冷却CCDカメラで撮影する。電圧変動による照明変動を防ぐため、光源は安定化電源を介して接続し、試料の表面上が一様に照射される位置に設置する。また、温度による試料の変質を回避するため、4の暗室にて撮影を実施する。

2.3 分光画像の取得

本稿では、図2に示すように波長帯域680nm～1100nm、10nmの波長間隔にて計43枚の分光画像を取得する。ただし、冷却CCDカメラの波長毎の感度の違いや分光器の透過率の違いを均一にするため、被写体に対する光量が一定となるように、事前に露光時間を調整する。本研究では、試料を撮影する前に各波長において、白色セラミック製の標準反射板を冷却CCDカメラで撮影し、得られた分光画像において、画像全体の平均画素値がある閾値内に収まるように露光時間を決定する。そして、各波長帯でそれぞれ求めた露光時間で、試料の分光画像を取得する。

2.4 検量線の作成手順

図3に分光画像から検量線を推定までの手順を示す。検量線とは画像の平均反射率から成分値を推定するモデル式をいう。分光画像に対して平滑化処理を行った後、試料と標準反射板の各波長の分光画像を用いて、式(1)に示す吸光度Aを算出する。式(1)はLambert-Beerの法則に基づくものであり、成分分析比と吸光度との間には比例関係が成り立つことを仮定している。ここで、波長において標準反射板の分光画像における画素(x, y)の輝度値をS_(x, y)、試料の分光画像における画素(x, y)の輝度値をO_(x, y)とする。

$$A_{\lambda(x, y)} = \log(S_{\lambda(x, y)} / O_{\lambda(x, y)}) \quad (1)$$

次に、ベースライン変動を除去し、埋もれたピークを顕在化するため、吸光度に対して2次微分処理を行い、各波長の画像全体の2次微分吸光度の平均値を求める。そして、試料の成分分析により得られた実測値と平均値を用いて、各波長において相関係数を求め、最も相関係数が高く、かつ水分等の影響の少ない波長を用いて検量線を作成する。なお、脂肪の成分分析は、試験試料について液クロマトグラフィ（島津製作所社製 SPD-10AV）を用いて脂肪酸組成を計測する。

最後に、作成した検量線を画像の各画素に適用し、各画素における総不飽和脂肪酸の割合を算出する。

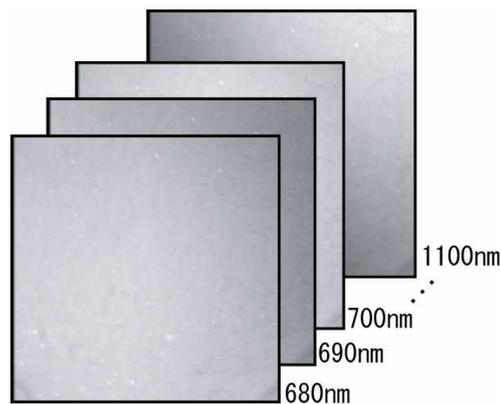


図2 分光画像の取得

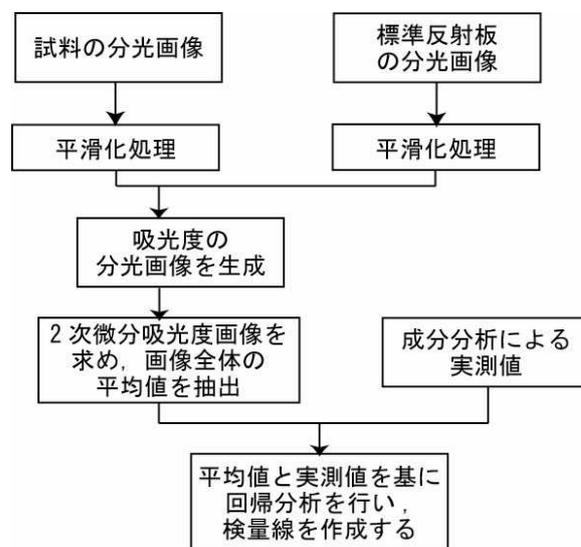


図3 検量線作成手順

3. 実験

3.1 試料

対象とする牛抽出脂肪は、牛の腎臓周囲脂肪（検量線作成用9検体、検量線評価用7検体）をそれぞれ135に加熱して、無水硫酸ナトリウムを用いて濾過し、直径70mm、深さ10mmのシャーレに入れ、4の環境に24時間以上静置したものを使用する（図4）。

3.2 検量線の作成

9種類の牛脂肪に関して、得られた分光画像から平均反射率を求め、吸光スペクトルを求めた。なお、吸光スペクトルとは吸光度の波長変化を意味する。吸光スペクトルの結果および吸光スペクトルに対して2次微分処理を行った結果を図5と図6に示す。なお、2次微分処理は式(2)より求めた。

$$d^2A = A_{(\lambda + 20nm)} - 2A_{\lambda} + A_{(\lambda - 20nm)} \quad (2)$$

図5 図6にそれぞれ吸光スペクトルと2次微分スペクトル



図4 牛抽出脂肪

を示す 総不飽和脂肪酸の割合が多ければ吸光度は高く、また、それぞれの試料において、930nm付近に最も高いピークがみられた。試料の違いはあるが、920~930nm付近には、脂肪含量と高い相関があることが報告されている^[3]。したがって、920~930nmは脂肪成分の含量を反映する波長として適当であると考えられる。

本稿では、総不飽和脂肪酸と最も相関のある波長を同定し、その波長における2次微分吸光度と総不飽和脂肪酸の実測値との検量線を作成する。そこで、図5で得られた各吸収ピーク波長に関して2次微分スペクトルと成分分析で得られた実測値との相関係数を求めた(表1)。いずれの波長も吸光度の2次微分スペクトルと総不飽和脂肪酸との間に負の相関があり、吸光度が高い波長ほど総不飽和脂肪酸との関係が強い結果を得た。表1に示す各波長において2次微分吸光度と総不飽和脂肪酸の実測値から回帰分析を行った。その結果、最も高かった波長は760nmで相関係数0.84、標準誤差は±2.51であった。しかしながら、この波長付近は、総不飽和脂肪酸との相関が高いが、水の吸収帯として知られており^[6]、水分による吸光度への影響を無視できない。そこで、2番目に波長の高い930nmの波長を採用し検量線を作成した。次に、検量線の精度を評価するため、検量線作成用試料とは別の検量線評価用試料を用いて、予測値と実測値から精度を確認した。図7は推定値と実測値との関係をプロットした結果である。検量線は式(3)に示す通りであり、2次微分吸光度と総不飽和脂肪酸との相関係数は0.81、標準誤差は±2.73%であった。

$$\text{予測値}[\%] = 25.547 - 190.154 \times d^2 A_{930\text{nm}} \quad (3)$$

3.3 総不飽和脂肪酸分布の可視化

総不飽和脂肪酸の実測値が異なる検量線評価用4試料を撮影した分光画像に対して、(3)式の検量線を適用し、総不飽和脂肪酸分布の可視化を行った。図8上段に総不飽和脂肪酸の分布画像を示し、下段に推定した総不飽和脂肪酸の平均値と成分分析により得られた実測値を示す。推定した総不飽和脂肪酸の平均値はほぼ実測値と同じ結果となった。また、画像によって、総不飽和脂肪酸の成分分布を視覚的に捉えることが可能である。

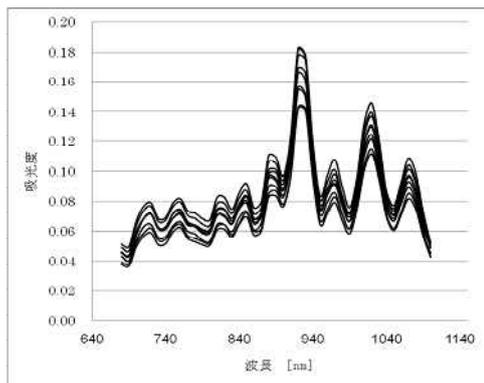


図5 吸光スペクトル

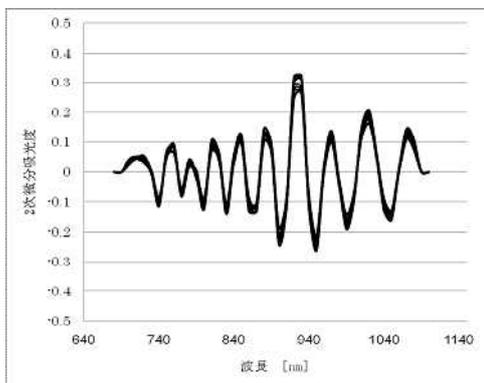


図6 2次微分スペクトル

表1 2次微分吸光度と総不飽和脂肪酸の単相関係数

波長[nm]	相関係数	標準誤差[%]
760	-0.84	2.51
810	-0.72	3.19
850	-0.49	4.05
880	-0.59	3.75
930	-0.80	2.80
970	-0.61	3.66
1030	-0.74	3.11
1080	-0.77	2.98

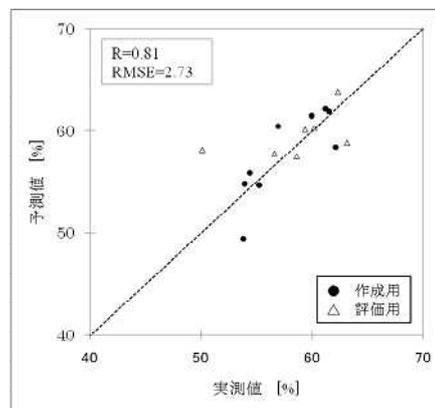


図7 総不飽和脂肪酸の検量線

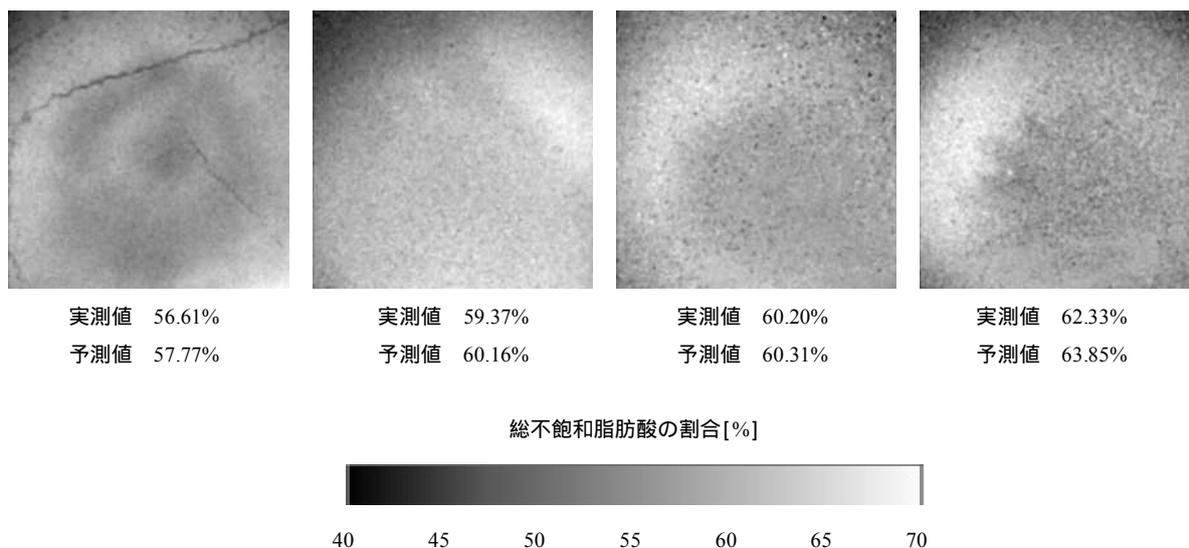


図8 総不飽和脂肪酸分布の可視化画像

4. まとめ

本研究では、牛肉のおいしさに影響を及ぼす総不飽和脂肪酸含有量とその分布状態を簡単かつ非破壊で計測することを目的とした。その前段階として総不飽和脂肪酸の含有量がほぼ既知の牛抽出脂肪を対象に、近赤外分光画像から総不飽和脂肪酸の成分分布を可視化する手法を提案した。本稿では、近赤外帯域に感度を有する冷却 CCDカメラ、分光器及びハロゲンランプの構成によって、680～1100nmの波長範囲で牛抽出脂肪の分光画像を取得し、拡散反射率と成分分析により得られた総不飽和脂肪酸の実測値との関係を回帰分析することで検量線を求めた。そして、検量線を用いて分光画像から総不飽和脂肪酸の成分分布の可視化画像を生成した。

今後は、更に試料の数を増やし、検量線の精度を向上させ、牛肉への適用へと進めたい。

謝 辞

本研究は農林水産政策を推進する実用技術開発事業 No.1673により実施した。

文 献

- [1] 三津本, “近赤外による肉質評価について”, 品質評価法と改善技術(前編), 全畜連情報 No.442. 8-9. 2005.
- [2] 堀内, 知久, 坂野, 河原, 曽根, 近赤外法を利用した軟脂豚の迅速評価法, 日豚会誌, Vol.30, No.4, pp.257-266, 1993.
- [3] 三津本, “近赤外分光法による畜肉の分析”食品の非破壊計測ハンドブック, pp.184-187, 2003.
- [4] 入江, “光学的手法による最新肉質評価技術”, 日本食

- 品工業学会誌, Vol.40, No.10, pp.747-754, 1993.
- [5] I.Gonzalez-Martin, C.Gonzalez, N.Alvarez-Garcia, J.M.Gonzalez-Cabrera, “On-line determination of fatty acid composition in intramuscular fat of Iberian pork loin by NIRs with a remote reflectance fiber optic probe”, Meat Science, 69, pp.243-248, 2005.
- [6] 岩元, 河野, 魚住, “近赤外分光法入門”, 幸書房, 2002.
- [7] 尾崎, 河田, “近赤外分光法”, 学会出版センター, 2008.
- [8] 平湯, 田中, 丸山, “近赤外画像を用いた牛脂肪の品質評価”, 動画処理実用化ワークショップ DIA2009, pp.278-281, 2009.
- [9] 田中, 平湯, 丸山, “近赤外画像による牛脂肪の解析手法の開発”, 第46回肉用牛研究会北海道大会, pp.69-71, 2008.
- [10] 丸山, 田中, 平湯, “近赤外画像を用いた牛脂肪の非破壊脂肪酸測定”, 第46回肉用牛研究会北海道大会, pp.43-45, 2008.
- [11] 曾賀野, 平湯, “画像を用いた食品評価に関する研究”岐阜県情報技術研究所報告 第9号 pp.8-10, 2008.

測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討

平湯 秀和

Integration of Multi-view Scanning Range Data Using ICP

Hidekazu HIRAYU

あらまし 生産設備等の設計において、手戻りのない設計を行うデジタルエンジニアリングを導入するためには、デジタルデータ化されていない既存の生産設備の三次元CADデータ化が非常に重要な課題となっている。この問題を解決するため、レーザレンジファインダが商品化されているが、非常に高価で、持ち運びも困難であるため、導入は進んでいない。本研究では、安価な測域センサを直交する直線上に複数台配置したシステムの開発を行い、計測により得られた複数視点の測定データを一つの座標系に統合する手法の検討を行った。

キーワード 測域センサ、三次元モデリング、デジタルエンジニアリング

1. はじめに

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

従来、既存設備を測量するには、巻き尺等を用いて1点1点手で計測する古典的方法を用いるか、レーザレンジファインダによる計測方法を用いるしかなかった。しかし、前者は非常に手間がかかり、後者は一つの測定位置では隠れが生じるため、対象物全体のモデルを作る場合には重量のあるレンジファインダを何度も移動・設置させて複数視点での測定が必要となる。また、購入・維持費が非常にかかるため、一般的な企業への導入は少ない。

この問題を解決するため、本研究では対象物に対して垂直方向と水平方向を同時に計測可能な安価なシステムを開発した。具体的には、複数の測域センサを直交する直線上に配置した構成となっている。本システムを用いて、移動しながら対象物を計測することで得られた複数視点での測定データを一つの座標系に統合する手法の検討を行う。得られた点群データに対して、三次元CADで面張り等の処理を行えば、三次元モデルとして扱うことができ、更に生産整備の機能やレイアウト等の評価検討を行うことが可能になる。

2. システムの概要

本研究では、安価で軽量ではあるが比較的高速かつ高精度に計測が可能な測域センサを用いて、生産設備等の三次元モデリングを行うシステムを構築する。しかし、

一般的な測域センサは一次元のラインスキャンセンサであるため、得られる三次元情報はレーザが通った三次元直線上にしか得られない。そこで、測域センサを直交する直線上に複数台配置し、対象物に対して、三次元直線上に水平・垂直方向の三次元情報を同時に取得するシステムを開発した。今回使用した測域センサはSICK社のLMS200である。LMS200は視野角が180°で最大計測距離80m、応答時間が13~53ms、システム誤差が±15mmの測域センサである。本システムは、二つのLMS200を図1のように直交する直線上に配置し三脚に載せることで、移動しながら対象物を計測することが可能である。

3. 自己位置推定手法

本システムは1回の計測で対象物の水平・垂直それぞれ1ラインの三次元情報を取得するため、対象物全体のモデリングを行うために、システムを移動させながら計測を行う。そこで、得られた複数の計測視点の三次元測定データは、個々に異なる座標系で構成されているため、一つの三次元モデルとしてまとめるには一つの座標系に統一する必要がある。そのため、個々の測定位置の三次元情報を推定する必要がある。

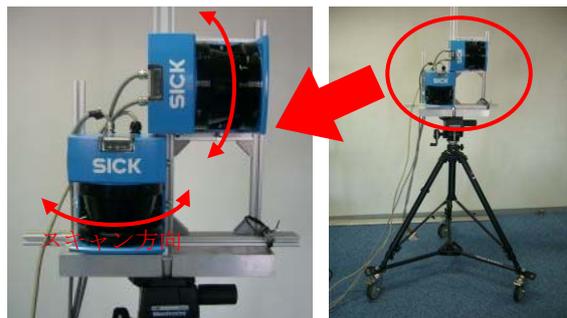


図1 システム外観

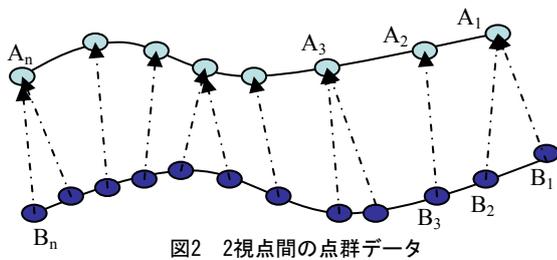


図2 2視点間の点群データ

本システムは高速に計測可能な測域センサを使用しているため、計測視点間は重複して計測されている部分が多い。また、視点間の相対的な移動量は少ない。そこで、本研究では、ICP(Iterative Closest Point)を用いて自己位置推定を行った。

ICPアルゴリズムは、複数の計測視点の点群データ間において、重複して計測された部分を用いて、繰り返し計算で、式(1)の誤差関数を最小化する変換パラメータ（回転行列Rと並進行列T）を求める手法である[1,2].

$$E(R,T) = \sum_{i=1}^n \|A_i - RB_i - T\|^2 \quad (1)$$

図2において、二つの点群A, Bがあるとき、点群A中の各点 $A_i (1 \leq i \leq n)$ について、点群B中の最近傍点 $B_i (1 \leq i \leq n)$ を対応点とする。そして、求められた複数の対応点の距離の2乗和を最小とする変換パラメータを推定する。上記の処理を繰り返すことで最適な変換パラメータを推定する手法である。本研究では、外れ値が対応点による最適化に悪影響を与えるため、(1)式に更に対応点間の距離に応じた重みを付けた手法で自己位置推定を行った。

4. 実験

本システムを用いて、室内のモデル生成を行った。室内環境の寸法等を図3に示す。本稿では、システムを部屋の中央辺りに設置し移動させず、床面に垂直な軸を中心に回転のみを行い、計測を行った。部屋全体を計測し、かつ、細かく計測するため、本稿では、システムを8°程度回転・計測を繰り返しながら、計44の計測視点で計測を行った。また、1回の計測で水平、垂直それぞれ最大381点の三次元点が得られるが、水平方向の三次元点を基に自己位置推定を行い、得られた変換パラメータと垂直方向の三次元点を基に、室内環境モデリングを行った。

ICPを基に水平方向のラインスキャンで得られた44視点を統合した結果を図4に示す。また、図4中の丸枠の点群データに対して、三次元直線を当てはめ、直線間の距離を求めたところ、平均3881.9mm、標準偏差15.7mmと



図3 実験で用いた室内環境

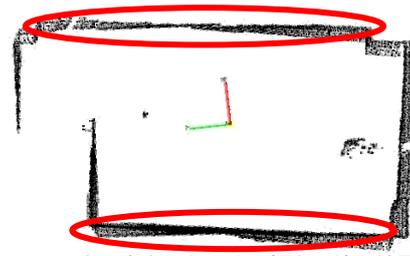


図4 水平方向における44視点の統合結果

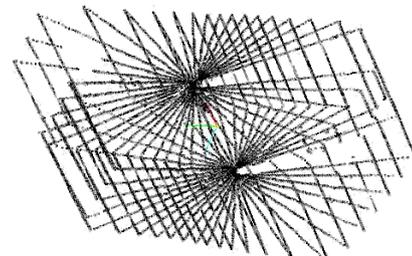


図5 垂直方向における44視点の統合結果（鳥瞰図）

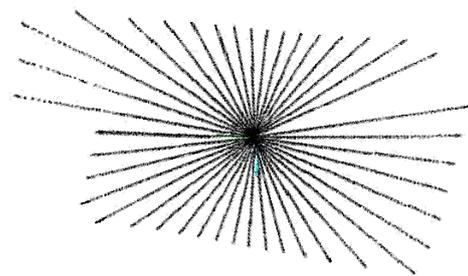


図6 垂直方向における44視点の統合結果（上面図）

の結果を得た。巻き尺による実測値は約3900mmであったことから、ほぼ精度良く自己位置が推定されている。また、対応する二つの視点間で求めた変換パラメータを基に、垂直方向のラインスキャンで得られた44視点の点群データを一つの座標系に統合し表示（鳥瞰図）した結果を図5に示す。また、天井面方向（上面図）から表示した結果を図6に示す。図6の放射線先端を結ぶと部屋全体の形状を表している。この形状は図3の左図の形状とほぼ同じであるため、視覚的に44の計測視点の点群データがほぼ統合されていることが確認できた。

5. まとめ

対象物に対して垂直方向と水平方向を同時に計測できるように、安価な測域センサを直交する直線上に複数台配置したシステムを用いて、室内環境を複数の計測視点で測定を行った。また、ICPアルゴリズムを基に、複数の測定視点で得られた測定データを一つの座標系に統合した。その結果、実測値に近い精度で統合できたことを確認した。

文献

[1] P.J.Besl and N.D.McKay, "A Method for Registration 3-D Shapes", IEEE Trans. PAMI, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
 [2] 金子俊一, 近藤友紀, 宮本敦, 五十嵐悟, "M推定を導入したロボスタICP位置決め法", 精密工学会誌, Vol.67, No.8, pp.1276-1280, 2001.

力覚提示装置を用いた嵌合作業の検討

横山 哲也

Development of Prototype to Fit Operation using Haptic Display

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし CADソフトの普及に伴い、デジタルデータを用いた作業性の評価が可能となっている。デジタルデータを利用することで、実機無しの評価が可能となり、開発期間や費用の低減に期待がかかる。ただし、市販ソフトの多くは計算機内で完結する数値シミュレーションにとどまっており、作業者の疲労主観評価を行うことはできない。本研究ではデジタルデータと力覚提示装置を用いて、組付け作業で多用される嵌合作業を対象とした疲労主観評価が可能要素技術の確立を図る。本年度は、嵌合部位をモデル化し、反力提示が可能であるか検討を行った。

キーワード デジタルモックアップ、嵌合作業、力覚提示

1. はじめに

近年、CADソフトの普及に伴い、デジタルデータを用いた設計や評価が可能となっている。デジタルデータを利用することで、計算機内で設備、工程を評価することが可能となり、開発期間や費用の低減に期待ができる。ただし、市販ソフトに取り入れられている手法の多くは計算機内で完結する数値シミュレーションにとどまっており、作業者の疲労主観評価を行なうことは難しい。

自動車の艤装工程に代表される組付け作業において、部品の締結手段として嵌合が多用されている。嵌合とは、クリップや爪を利用して凹凸を嵌め合うことで締結する技術である。通常、外部から加わる振動や力によって部品が容易に外れないようにするために、嵌合力は高めに設定してある。このため、組付け作業において、作業者は嵌合部位に非常に大きな力を加える必要がある。また、嵌合部位は多数あり、作業者の取り付け姿勢も一定でないことが作業者の負担となっている。そこで、組付け工程を設計する際は、嵌合部位の組付け力に主観的に求めた上限値を設けている。この上限値を求めるため、モックアップを製作し、実際の作業姿勢で嵌合を模擬しているが、モックアップを製作するため開発コストがかさむ問題が生じている。

そこで本研究では上記問題を解決するため、嵌合部位をデジタルモックアップで計算機内に実現し、力覚提示装置を用いた嵌合作業の検討を行う。

2. 嵌合部位のモデル化

デジタルモックアップにおける問題点として、物体間の干渉が挙げられる^[1]。現実世界では物体同士は干渉しないため、デジタルモックアップでは干渉量に応じた力を部品

間に発生させることで干渉を防いでいる。ただし、物体形状が複雑になると干渉量算出が困難となる。そこで本研究では、物体の変形を利用して物体同士の干渉を防ぐこととした。そして操作者に提示する反力の計算も、物体の変形を利用することとした。なお、嵌合部位の変形モデルには、物体の特性値を考慮できる有限要素法を用いた。

ノード数 n で表現される線形有限要素モデルによる3次元の剛性方程式は、荷重 $f \in R^{3n}$ 、変位 $u \in R^{3n}$ と剛性行列 $K \in R^{3n \times 3n}$ を用いて式(1)で与えられる。

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

剛性方程式(1)を以下のとおり書き直す。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_u \\ u_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

添字の u は未知ノード、 k は既知ノードを指す。本研究では強制変位を取り扱うため、 $u_k \in R^{3l}$ は接触箇所の強制変位、 $u_u \in R^{3(n-l)}$ は非接触箇所の変位、 $f_u \in R^{3l}$ は接触箇所に働く未知荷重とする。ここで l は強制変位が働くノード数である。式(2)の左辺第1行は外から荷重が働かないため0である。

未知変位 u_u は式(2)の第1行より、以下のとおり求める。

$$u_u = -K_{11}^{-1} K_{12} u_k \quad (3)$$

未知荷重 f_u は式(2)と式(3)より、

$$f_u = (-K_{21} K_{11}^{-1} K_{12} + K_{22}) u_k \quad (4)$$

となる。

3. 衝突判定法

物体同士の干渉を判定するため、衝突判定法を実装する。変形形状を有する物体の衝突判定法としては、

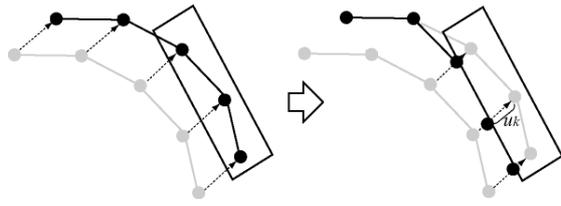


図1 衝突判定

OpenGLの機能を用いた手法^[2]が有名であるが、単純形状しか適用できないため、ここでは以下の手法で衝突判定を行う。

物体はパッチで表現されているとする。物体表面パッチを構成するノードについて、サンプル前後で各々のノードを結ぶベクトルを生成する。そのベクトルが相手方物体のパッチと交差するか、Cyrus-Beck アルゴリズム^[3]を用いて判定を行う。ベクトルがパッチと交差する場合は、交差する点にノードを強制移動させる。その際の移動量を u_k とする。図1にイメージ図を示す。

全てのノードに対して衝突判定を行うと、計算量が増大となる。そこで法線ベクトルを基に、衝突の可能性の低い箇所に対しては衝突判定法を行わないことで計算量を削減した。

4. 実装

嵌合部位のモデルとして、雄にクリップ、雌に穴付板とした。モデルは3次元CADで作製し、メッシュ生成にはgmsh^[4]を用いた。

処理手順を図2に示す。操作者が操る力覚提示装置のエンドエフェクタの動きに応じて、物体の位置・姿勢が更新される。その後、衝突判定を行い、物体同士の干渉があれば、その干渉を避けるように、(3)式によって物体を変形させる。物体が変形した際には、(4)式によって反力を計算し、力覚提示装置に出力する。力覚提示装置には米国SensAble社のPHANToMを用いて、操作者に反力提

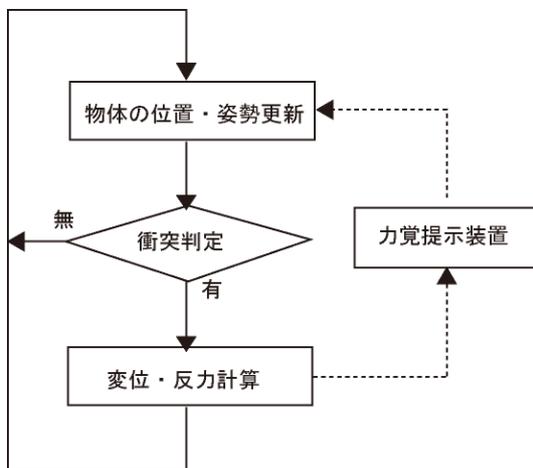


図2 処理手順

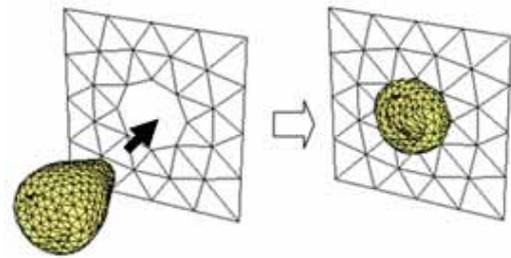


図3 嵌合作業の検証

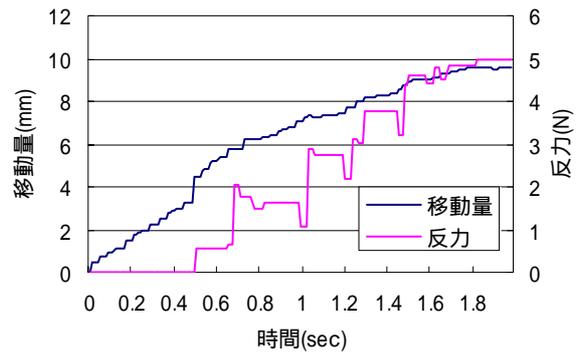


図4 反力の計算結果

示を行った。

図3に示す、クリップを穴に嵌めた際の挿入方向に働く反力値を図4に示す。0.5secでクリップが穴周辺部に衝突し、それ以降クリップの移動量の増加に伴い、反力が大きくなるのがわかる。ただし、本手法は計算量が多く計算周期が大きいため、反力値が離散で更新される結果となった。

5. まとめ

本研究では、組付け作業で多用される嵌合作業を、デジタルモックアップと力覚提示装置を用いて実現した。デジタルモックアップ特有の問題を回避するため、有限要素法を用いて物体の変形計算を行ったが、衝突判定を含めた計算量が予想以上に膨大となり、実時間処理に問題が生じた。計算量を削減することが今後の課題となる。

文献

- [1] 神徳徹夫, “仮想空間における拘束感生成手法に関する研究”, 機会技術研究所報告, 192, 2001.
- [2] Jean-Christophe Lombardo, “Real-time collision detection for virtual surgery”, Proc. Of Computer Animation '99, pp.33-39, 1999.
- [3] Matthew Moore and Jane Wihelms, “Collision Detection and Responses for Computer Animation”, Proc. Of SIGGRAPH, pp.289-298, 1988.
- [4] <http://geuz.org/gmsh/>

効率的な映像伝送方法に関する開発研究

大野尚則 加納鷹一* 吉田茂樹** 奥川雅之***

Development on an Efficient Communications System for Video

Naonori OHNO Yoichi KANO* Shigeki YOSHIDA** Masayuki OKUGAWA***

あらまし 近年、中小製造業においても生産拠点を海外に移す動きが加速しているが、現場の状況を的確に把握できないことから様々な問題が生じている。これらの問題に対し、映像配信システムは現場状況を把握するための有効なツールの一つであるが、通信コストの関係から円滑で詳細な映像が配信できず、実際に実務に組み込んで利用されている例は多くない。本研究では低品質の通信インフラ下においても実利用できる映像配信システム実現を目指し、1つの映像を背景部分と注視部分に分け、これらの品質、伝送レートを回線速度に応じて、各々指定できる効率的な映像情報伝達方法について提案し、その有効性を示すため実証実験を行った。インターネットVPNを用いてベトナムと日本の拠点間を接続して実験を行った結果、従来方法と比較して、体感的な情報量を落とさずに3~7倍の伝送レートで配信できることを確認し、その効果を確認した。

キーワード 映像伝送, MotionJPEG, 回線速度

1. 緒言

生産拠点のグローバル化により、海外における生産現場の管理に対する重要性が高まっている。現場のトラブルに対し対応が遅れることで、生産高の減少や納期への遅れなどが発生し、企業全体の損失をもたらす。特に現地工場の立ち上げ時など、生産システムとして安定していない時期には、現地との連絡を密に取り、その状況を把握することは必要不可欠である。

現地の確認や監視には情報量が多い映像情報が最善であるが、送信するための大きなネットワーク負荷が欠点である。特に企業進出が多い東アジアにおいては通信インフラの品質が悪く、滑らかで詳細な映像を送るためには膨大な通信コストがかかることから、中小製造業において実用的に利用されている例は少ない。

本研究では低品質の通信インフラ下においても実的に映像情報を配信できる映像配信システム実現を目指し、映像情報を限られたネットワーク回線容量内で、最大限の情報を伝達する新たな映像伝送方法について提案する。

2. 映像伝送方法

様々なネットワークカメラが市販されているが、これらはCCDカメラから得られた映像に対し、MPEGやMotionJPEGを用いてその情報を圧縮し、伝送している。しかしながら、通常、それらの映像には、工場の壁等の

長時間変化しない部分が多く含まれている。したがって、これらの業務に必要な情報を含んでいない部分の伝送レートや映像解像度を減らすことは、結果的に通信速度向上となるため非常に重要である。

本章では映像情報全体を背景映像、情報量が多く含まれる映像を抜き出した部分を注視映像として、各々、伝送レートと圧縮率を設定して送信する方法について述べる。その概略図を図1に示す。

この方法ではカメラ制御S(図中)経由で得られた品質パラメータ100であるMotionJPEG映像の1フレームに対して、クライアント側から範囲指定された注視画像と背景画像として記録する。この両画像の圧縮率と伝送レートについてもクライアント側から指定され、両画像は各々異なる画角、圧縮率、伝送レートにより、クライアント側にネットワーク経由で送信される。本研究ではネットワークプロトコル部分を除くシステムについてC#を用いて実装した。

3. 実験

この方法の有効性を確認するための実証実験として、従来方法との比較実験を行った。

ベトナムと日本の拠点間をインターネットVPNにより接続し、VGAサイズの映像が撮影できるネットワークカメラVB-C50i(Canon製)を用い、工場の映像をクライアント側に送信する。実験対象である工場の様子を図2に示す。事務所内でのトラフィックの影響を考慮し、事務所が休日の8:30, 11:00, 15:00の3回の実験を行い、JPEG品質パラメータが10毎に伝送レートの最大値と最

* 株式会社東海パワデックス

** 岐阜県立国際情報科学芸術アカデミー

*** 岐阜工業高等専門学校

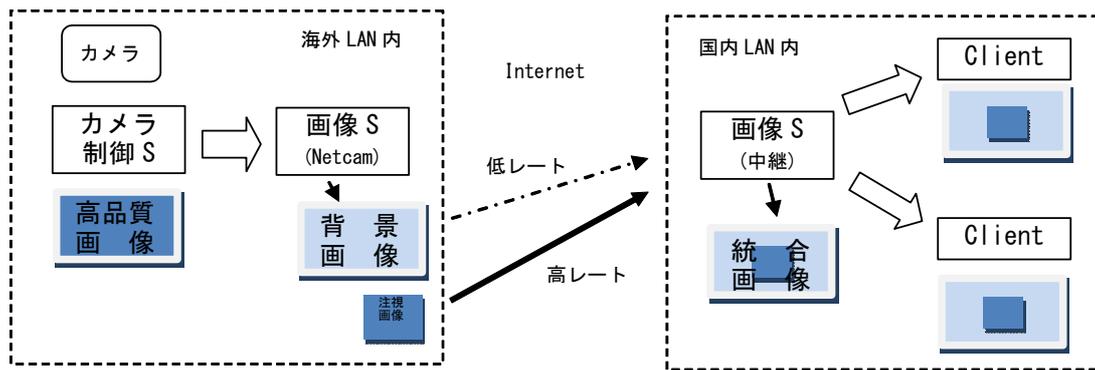


図1 伝送方法の概略図

表1 実験時の回線速度

時間	開始時	終了時
8:30	330	340
11:00	316	295
15:00	217	281
		単位: kbps



図2 実験に使用した映像

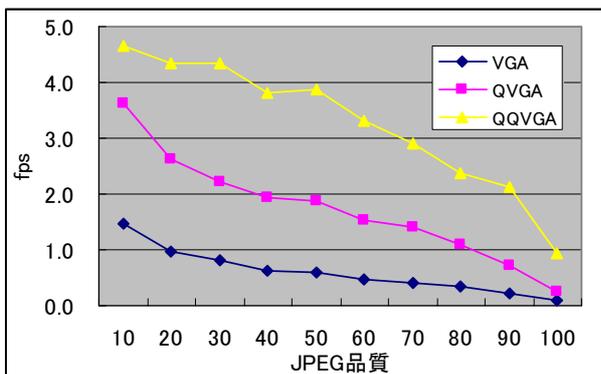


図3 実験結果 (JPEG品質と伝送レート)

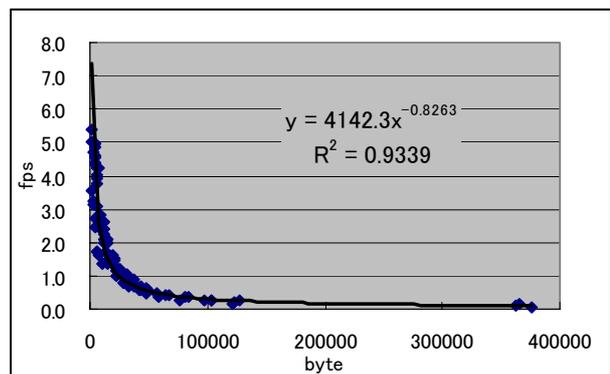


図4 実験結果 (フレームサイズと伝送レート)

小値についてシステムの負荷を考慮し目視で1分間測定した。3回の実験開始・終了時の回線速度を表1に示す。

実験3回の伝送レートの最高値と最低値の中間値を平均した結果を図3に示す。図3のVGAのグラフは、従来手法の実験結果であり、従来方法ではVGAサイズの映像全体をJPEG品質に変更して伝送を行っている。

それに対し、注視映像をQVGA、QQVGAサイズとして実験を行った結果は図3のQVGAとQQVGAのグラフである。目視で画像に圧縮ブロックノイズが見られないJPEG品質パラメータ値である50を基準に伝送レートを比較した場合、従来方法の0.59fpsに対し、注視映像の画角がQVGA、QQVGAの場合は順に1.87fps, 3.89fpsであり、約3倍と6倍の伝送レートが得られた。クライアント側から確認できる全体映像として、これらの映像は体感的には同一であることを確認している。背景映像の伝送レートに関しては、体感的にブロックノイズが発生したと感じるJPEG品質パラメータは20であり、背景として用いるには十分な品質である。このパラメータを用いた場合、1fpsで背景画像を送信することが可能である。

次に、回線速度が約330kbpsの場合において、実験パラメータを変更する毎に、1フレームを抽出したファイル

サイズと伝送レートの関係を示したグラフを図4に示す。図中の数式に示されるように累乗近似曲線で表現できた。この数式から回線速度に最適な注視映像のサイズや伝送レートを推定することが可能である。

4. まとめ

海外に存在する生産現場の把握や監視を目的とした映像配信システムの実利用を目的として、限られた通信速度で効率的に映像情報を配信する方法について提案し、国内と海外拠点間で実証実験を行った。その結果、体感的に情報量を落とさずに従来方法と比較して、注視映像のサイズがQVGAの場合では3倍、QQVGAの場合では7倍の伝送レートで映像を配信することができ、その効果が確認できた。

謝辞

岐阜県産業経済振興センターの砂田モノづくりセンター長からご支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。本研究はJST地域ニーズ即応型事業として行われた。

岐阜県情報技術研究所研究報告 第10号 平成20年度

発行 平成21年6月16日

編集発行所 岐阜県情報技術研究所

岐阜県各務原市テクノプラザ1-21

TEL:058-379-3300

FAX:058-379-3301

<http://www.gifu-irtc.go.jp>
