

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420398

研究課題名(和文) 熟練作業の数値化と記号表現のためのセンシング技術に関する研究

研究課題名(英文) Research on Sensing Technology for Digitizing and Coding of Human's Skilled Tasks

研究代表者

橋本 学 (Hashimoto, Manabu)

中京大学・工学部・教授

研究者番号：70510832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「熟練」作業を数値化し、記号列として自動記述するためのセンシング技術を提案した。距離センサを用いて作業者の手の動作と、刻々と変化する製造物の状態を実用的な処理時間内で、非接触、かつ自然に計測する新手法を提案した。また、これらを記号列を、提案したフォーマットで記述することにより、熟練者の作業からリズム感を抽出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have proposed a technology for automatic description of human's skilled tasks. Motion of human's hands and objects are successfully recognized by our sensor system. It is very natural for human because any markers such as color tags are not used. In addition, by using our system, we have shown that it is possible to extract rhythm from motion data of human with high skills.

研究分野：Computer vision

キーワード：Human sensing Motion analysis Object recognition Automatic description Big data analysis  
Human-Object interaction Manufacturing systems

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、画像計測手法、特に生産分野におけるヒト（手や腕）の認識と物体計測、およびそれらの分析技術を取り扱う。

この技術が想定する適用先は、例えば、セル生産工程における組み立て作業である（図1）。熟練者による動作を計測・定量化し、自動分析することによって、ものづくり現場の「匠の技」を単なる「わざ」としてではなく、次代に伝えるべき有形の資産としてアーカイブするとともに、初心者による熟練者級のものづくりを支援することができる。

### 2. 研究の目的

本研究では、「熟練」作業を数値化し、記号列として自動記述するためのセンシング技術を確立する。ヒト（作業員）の手の動作と、刻々と変化するモノ（製造物）の状態を、実用的な処理時間内で、非接触、かつ自然に計測する新手法を提案する。特に、色マーカーなどの特殊な付属物を身体に装着する必要がない手法を探求する。さらに、これらを記号列を用いて、あたかも音楽演奏における楽譜のように記述するフォーマットを提案し、熟練者の作業を可視化し、分析する。

最近では3Dプリンタの急速な普及により、部品の試作・加工以前の工程については大幅な効率化が可能になったが、これに続く組み立てプロセスに関しては、大規模工場においてさえ、未だに熟練作業員による「匠の技」に頼った状態であり、未解明のままである。本研究では、この点にスポットを当て、熟練者が熟練者たる所以を科学的に解明するための指針を得ることも目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究においてブレークスルーすべき課題は、(A)連続距離画像列から手作業動作を非接触で認識する手法を提案すること、(B)3次元対象物体をリアルタイムに認識する手法を提案すること、(C)これらの成果をもとに作業認識システムを試作して実際に「熟練者」の作業を記述・分析すること、の3つである。これらを解決するための研究を、平成26年度から始まる3年間で遂行することとした。

研究の初期段階としては、上述の(A)および(B)に関する方式提案とアルゴリズム設計・試作をおこない、手の動作記述と高速3次元物体位置姿勢認識が、各々単体として実現可能であることを実証することとした。これに続く段階では、この成果を受けて手の動作と作業対象物体の動きを統合する一連の方式を提案し、人物の作業動作を記述する。さらに研究の最終段階では、実際にセンサシステムとコンピュータによって動作する作業認識のプロトタイプシステムを試作し、被験者実験によって「熟練者」の作業を客観的かつ定量的に分析することとした。

### 4. 研究成果

(1) 手作業動作の非接触認識および3D物体のリアルタイム認識手法の提案

手作業動作の非接触認識および3次元物体の認識、さらに人物動作識別手法の提案と実証を行った。まず最初に、図1のような動作プリミティブを定義した。

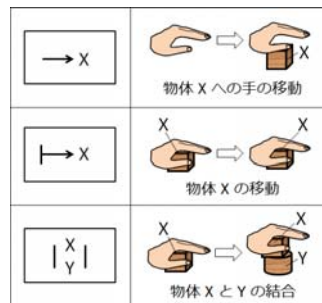


図1. 定義した作業動作プリミティブの例

次に、手作業動作の認識としては、連続距離画像からの手の認識手法として、パターンマッチングによる手法を提案し、動画からの自動認識が可能であること、ならびに別途検出した作業対象物体との位置関係を自動記述することも可能であることを実現した。このとき、手の位置と対象物の位置をそれぞれ占有率確率マップで表現し、統合する手法も開発した。また、パターンマッチングにより検出した指先候補群をもとにパーティクルフィルタを利用して手首を含めた手の全体位置を認識する手法も提案した。これについては3次元的な手のモデル（3次元ハンドモデル）を利用した仮説検証アルゴリズムを構成し、正しい仮説を効率よく探索できることを示した。図2に提案システムの構成を示す。

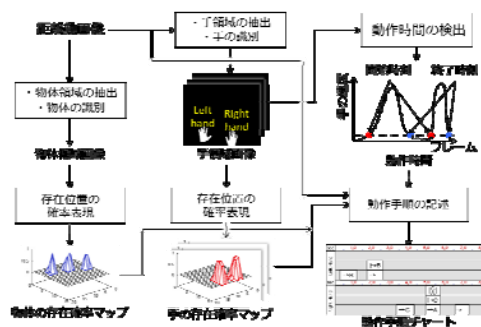


図2. 提案した作業動作認識手法の概要

次に、3次元物体認識手法としては、少数データを用いる対象物の位置姿勢認識手法を提案し、基本的な性能を検証した。既開発のVPM法の考え方を取り入れた物体認識のための新たな3次元特徴量と、その最適化手法を提案し、類似パターンとの識別性能の点で従来法をしのぐ手法であることを実証した。また、多視点レンジデータをもとに、一部が

遮蔽されている対象物に対しても有効に対象物を抽出できる基本アイデアを提案し、手持ち物体のモデリングという基本課題に対して有効であることを実証した。図3に提案した特徴量とそれによるキーポイント検出結果の例を示す。

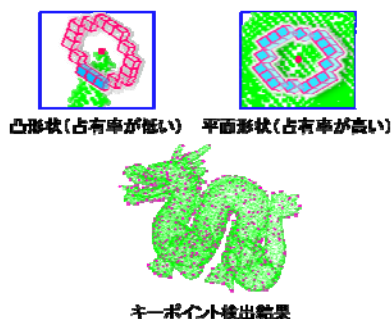


図3. 占有率を利用した局所特徴量とキーポイント検出結果の例

また、作業動作分析には人物のボディの認識も重要であることが判明したため、作業行動における各場面すなわち行動を構成する各動作を、パターン識別問題としてとらえ、各識別クラス毎に用意されたHMM(隠れマルコフモデル)識別器群とそれらの動作遷移確率を統合的に用いることを特徴とする、動作識別アルゴリズムを提案し、人物の一般的な行動分析を例に、有効性を実証した。図4に提案手法の概要を示す。

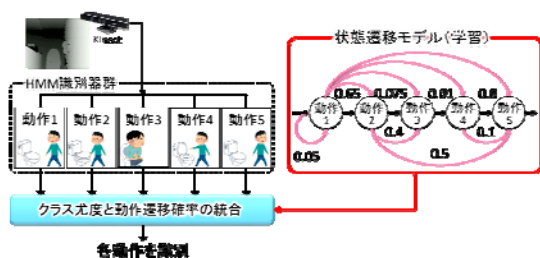


図4. HMMと動作遷移確率を用いた人物動作認識アルゴリズム

## (2) 作業動作センシングシステムの高度化

(1)で開発した技術を高度化した。具体的には、手作業動作の非接触認識、3次元物体認識、人物動作識別の3つの項目に関する研究を実施した。

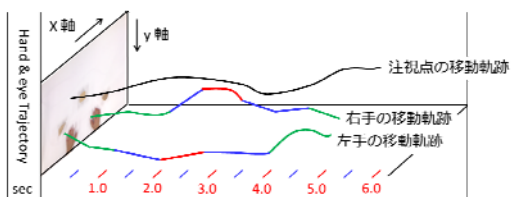


図5. 視線検出を伴う出力結果の例

手作業物体認識としては、距離動画からの手の位置の認識を実現し、これを確率分布として表示することができた。さらに視線方向を記録するための方法として、簡便なセンサを作業者頭部に配置する手法を提案し、効果を実証した。この記録データを昨年度の提案フォーマットに追加した。図5に、視線検出を伴う出力結果の例を示す。

次に、3次元物体認識手法としては、組み立て作業の対象物の多様性確保のために、従来の距離データに加えてRGB画像を有効に利用する手法を検討し、さらに複数の物体の同時認識に対応するための仮説検証手法に発展させた。図6に提案手法の概要を示す。

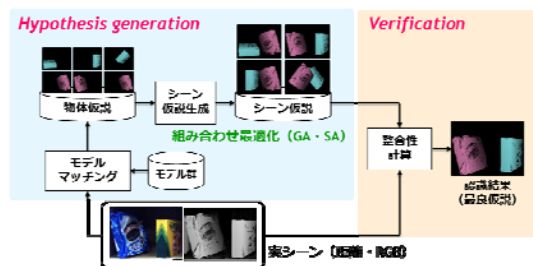


図6. 仮説検証に基づく複数物体同時認識アルゴリズムの概要

この結果も、対象物の識別尤度という形で、確率値として表現できた。また本技術の実利用シーンを鑑み、物体認識の高速化を目的として、マルチスケールの新特徴量を提案した。これは、従来の3次元特徴量が法線ベクトルの計算を必須としていたことに比べて、空間ボクセル内のポイントクラウドデータをカウントするのみという極めてシンプルな計算で済むことから、従来比2倍以上の高速化を実現できた。また、対象物のモデルの事前準備が困難な実利用シーンを考慮し、対象物をセンサの前にかざすだけで自動モデリングする手法を提案した。

また、これまでの研究によって、作業動作分析には人物ボディの認識も重要であることが判明したことから、作業行動の各場面をHMM(隠れマルコフモデル)識別器を用いて識別手法を提案したが、本年度はこの手法を、確率分布の観点から理論的に考察するとともに、完成度の高い実験用ソフトウェア群として整備し、これを用いて実画像による従来手法との実験的比較を通して提案手法の優位性を実証した。

## (3) 試作システムを利用した熟練者の動作の記述とその分析手法の提案

試作した作業認識システムを利用して「熟練者」による作業の定量分析を実施した。

まず最初に、キーポイントマッチングによる3次元物体認識の精度を高めるため、3次

元計測データから得られる点群密度変化に頑健な局所参照座標系について検討した. 図7に提案した局所座標系の概要を示す. また, 演算コストを低減するために, マルチスケール領域の点群占有率に基づく3次元特徴量を提案し, 効果を確認した. 図8に提案した特徴量の概要を示す.

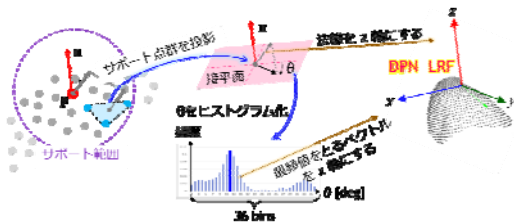


図7. 提案した局所参照座標系の概要

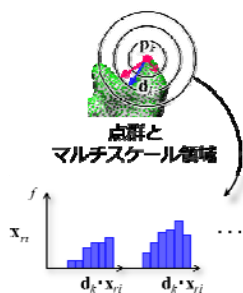


図8. 提案したマルチスケール特徴量

次に, 動作認識のための予備実験として, 熟練者と非熟練者を模擬した動作を実演してデータ処理を行った結果, 熟練者と非熟練者の違いが作業動作のリズムの違いに現れやすいことが判明したことから, 本年度のケーススタディとして「リズム抽出」を設定した. 簡易な組み立て作業を想定し, 熟練者と非熟練者の作業を試作システムによって作業記述フォーマットに置換した. このとき, リズムを作業動作, 特に手の動作の周期性と考え, 周期の開始点(位相)と周期の2つのパラメータを自動抽出する手法を提案した.

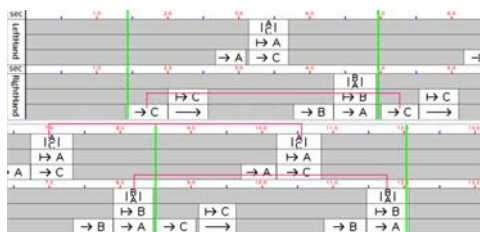


図9. 提案手法によって抽出されたリズムデータの例

組み合わせ最適化問題の枠組みで動作の周期性が高くなるよう位相と周期間隔を逐次自動決定するアイデアを実装し, リズム抽出に成功した. 実験としては, 5種類のデータセットを用いて位相と周期を推定したと

ころ, 位相については最大誤差3フレーム(約0.1秒), 周期については最大誤差5フレーム(約0.16秒)で推定できたことを確認した. 図9に提案手法によって抽出されたリズムデータの例を, また, 表1にリズム抽出誤差を, 位相, 周期の2つの指標で評価した結果を示す.

表1. リズム抽出誤差の評価結果

位相の精度評価結果

データセット	位相 [frame]	Ground Truth [frame]	誤差 [frame]
DataSet1	30	30	0
DataSet2	43	46	3
DataSet3	42	45	3
DataSet4	27	27	0
DataSet5	97	99	2

周期間隔の精度評価結果

データセット	周期間隔 [frame]	Ground Truth [frame]	誤差 [frame]
DataSet1	99	96	3
DataSet2	106	108	2
DataSet3	155	160	5
DataSet4	221	220	1
DataSet5	148	150	2

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 武井翔一, 秋月秀一, 橋本学, マルチスケール領域の点群占有率に基づく3次元特徴量の提案, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 136, No. 8, pp. 1078-1084, 2016/8.
- ② 秋月秀一, 橋本学, 3次元キーポイントマッチングのための点群密度変化および欠落に頑健な Local Reference Frame, 電子情報通信学会論文誌D, 査読有, Vol. J99-D, No. 8, pp. 727-736, 2016/8.
- ③ 渡邊瞭太, 橋本学, 組み立て作業分析のための動作手順と手・注視点の移動軌跡の自動記述システム, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 82, No. 5, pp. 473-480, 2016/5.
- ④ Shuichi Akizuki, Manabu Hashimoto, Stable Position and Pose Estimation of Industrial Parts using Evaluation of Observability of 3D Vector Pairs, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 27, No. 2, pp. 174-181, 2015/4.

[学会発表] (計20件)

- ① 秋月秀一, 橋本学, 形状の整合性および配置実現性に基づく3次元物体認識, 精密工学会春季大会学術講演会, A76, pp. 75-76, 神奈川県横浜市慶應義塾大学, 2017/3/15.
- ② Shuichi Akizuki, Haruki Aruga, Manabu Hashimoto, Hand Pose Estimation using Global Shape and Hand Parts Consistency, International Workshop on Advanced Image

- Technology(IWAIT2017), 5B, pp.1-4, Equatorial Hotel, Penang, Malaysia, 2017/01/10.
- ③ Shuichi Akizuki and Manabu Hashimoto, Physical Reasoning for 3D Object Recognition using Global Hypothesis Verification, European Conference on Computer Vision Workshops (2nd International Workshop on Recovering 6D Object Pose), LNCS Computer Vision - ECCV 2016 Workshops, Part III, Vol. 9915, pp. 595-605, Amsterdam, Netherlands, Oct.9, 2016.
- ④ Shuichi Akizuki, Manabu Hashimoto, Multiple 3D Object Recognition using RGB-D Data and Physical Consistency for Automated Warehousing Robots, In Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISAPP), pp. 605-609, Rome, Italy, 2016.
- ⑤ 北村友香, 橋本学, 動作の代表シンボルと遷移確率を用いたトイレ内の非定常動作検出手法, 電気学会研究会(知覚情報/次世代産業システム合同研究会), PI-16-48 IIS-16-79, pp.41-46, 静岡県浜松市静岡大学, 2016/9/5.
- ⑥ Shuichi Akizuki, Manabu Hashimoto, Relative Point Density (RPD) Feature for Object Recognition Independent of Point Cloud Sparseness, The Korea-Japan joint workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), pp.137-140, Takayama, Japan, 2016/2/19.
- ⑦ Ryota Watanabe and Manabu Hashimoto, Automatic Human Motion Description System for Assembly Operation Analysis, The Korea-Japan joint workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), pp.391-395, Takayama, Japan, 2016/2/19.
- ⑧ Shuichi Akizuki, Manabu Hashimoto, DPN-LRF: A Local Reference Frame for Robustly Handling Density Differences and Partial Occlusions, 11th International Symposium on Visual Computing (ISVC), LNCS 9474, Part I, pp.878-887, Las Vegas/USA, 2015/12/15.
- ⑨ 秋月秀一, 橋本学, RGB-D 整合性と物理的整合性評価に基づく3次元多品種物品の識別と姿勢認識, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2015), OS2-H4 (IS1-18), pp.78-81, 神奈川県横浜市パシフィコ横浜, 2015/12/03.
- ⑩ Shoichi Takei, Shuichi Akizuki, Manabu Hashimoto, SHORT: A Fast 3D Feature Description based on Estimating Occupancy in Spherical Shell Regions, Proceedings of the 30th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), Auckland, New Zealand, 2015/11/24.
- ⑪ 渡邊瞭太, 橋本学, 組み立て作業分析のための動作手順と注視点軌跡の自動記述手法, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, G4-2, 愛知県名古屋市名古屋工業大学, 2015/9/29.
- ⑫ 秋月秀一, 橋本学, 点群の密度変化と欠落に頑健な Local Reference Frame の提案, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, M1-7, 愛知県名古屋市名古屋工業大学, 2015/9/28.
- ⑬ 北村友香, 渡邊瞭太, 橋本学, 動作の出現パターンの確率的表現に基づくトイレ内の非定常動作検出システムの提案, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, C1-3, 愛知県名古屋市名古屋工業大学, 2015/9/28.
- ⑭ 朝倉茉理, 武井翔一, 秋月秀一, 橋本学, 時系列距離データの合成と手領域の自動削除による手持ち対象物体の3次元モデリング手法の提案, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, Po1-42, 愛知県名古屋市名古屋工業大学, 2015/9/28.
- ⑮ 北村友香, 渡邊瞭太, 橋本学, 動作の統計的パターン性を利用したトイレ内の非定常動作検出手法の提案, IAIP サマーセミナー, pp.37-40, 静岡県熱川ハイツ, 2015/8/24.
- ⑯ 武井翔一, 秋月秀一, 橋本学, 高速3D物体認識のためのマルチスケールシェル特徴量の提案, IAIP サマーセミナー, pp.25-28, 静岡県熱川ハイツ, 2015/8/24.
- ⑰ 北村友香, 有賀治樹, 橋本学, 非定常動作検出のための定常動作識別の高信頼化とトイレ空間への応用, 第21回画像センシングシンポジウム (SSII2015), IS2-1-1-6, 神奈川県横浜市パシフィコ横浜, 2015/6/11.
- ⑱ 武井翔一, 秋月秀一, 橋本学, 3次元点群の空間的広がりに着目した高速キーポイント検出, 第21回画像センシングシンポジウム (SSII2015), IS1-18-1-5, 神奈川県横浜市パシフィコ横浜, 2015/6/11.
- ⑲ Yuka Kitamura, Haruki Aruga, Manabu Hashimoto, Improvement of HMM-based Action Classification by using State Transition Probability, Proceedings of 12th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Vol.9534, 9534OS-1-7, Le Creusot, France, 2015/6/4.
- ⑳ 朝倉茉理, 武井翔一, 永瀬誠信, 秋月秀一, 橋本学, 手持ち物体の3次元モデリングのための時系列距離データ合成 ～オクルージョン領域の自動検出と抑制～,

動的画像処理実利用化ワークショップ  
(DIA2015), IS1-D4, pp. 1-6, 広島県広  
島市広島工業大学, 2015/3/5.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 学 (Manabu Hashimoto)  
中京大学・工学部・教授  
研究者番号：70510832

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )