

段取り技能の自動獲得、マニュアル化の試み

堀 聡* 瀧寛和**

*ものつくり大学, **和歌山大学

我々が解決しようとしている技能継承問題は、旋盤やマシニングセンタなどの製造装置の操作手順や保守点検手順の共有化である。生産ライン操作や保守作業では、初心者と熟練者の間には段取り・手順（段取り技能）に違いが現れ、生産性に差が出る。我々は、熟練者の作業手順を蓄積し共有化する手法を研究している。試作した **Wearable** 作業記録システムは、カメラで作業内容を録画すると同時に、手足につけた加速度センサで作業者の動作を記録する。このシステムを用いて、作業記録マニュアルを自動生成できることを示した。「段取り技能」獲得のボトルネックは、これを聞き出し記録に残すコストが高いことである。「段取り技能」の共有化のためには、実際の作業を自動的に記録しマニュアル化（形式知化）する仕組みが必須である。

キーワード：動作研究, 作業記録, IC 加速度センサ, マルチメディア・マニュアル

1. はじめに

1.1. 研究の背景と目的

製造ラインや保守サービスで働く作業者は、経験から得た高度な技能（暗黙知）を持つ。この技能は、NC 工作機を上回る精度を実現するような人間が感覚的・身体的に保有している技（手わざ技能）と、装置の故障診断・対処に代表される判断力・ノウハウ等の技能（段取り技能知）とに分類される^(5,6)。

我々が解決しようとしている技能継承問題は、旋盤やマシニングセンタなどの製造装置の操作手順や保守点検手順の共有化である。装置の操作手順の多くは、スイッチやレバーなどの操作や警報ランプや画面メッセージの確認である。これらの作業は単純であり、長い身体的訓練を通して獲得する“手先の器用さ”などは必要ない⁽¹⁾。一方、製造装置の多くがコンピュータによって制御されているため、作業者にとってブラックボックスとなっている。その為に、誰もが正しい手順で操作できるように、操作マニュアルを整備することが求められている。

マニュアルの作成には多くの労力を必要とする。特に、製造ラインのように種々の装置があり、また改善などで頻繁に作業手順が変

更される場合、全ての装置に最新の正しいマニュアルを用意することは困難である。さらに、日常的に製造装置を使っているベテラン作業者は正しい手順を知っているが、マニュアル作成に費やす時間がない。

そこで、我々は、ベテランの正しい作業手順を記録し、自動的にマニュアルを生成するシステムを開発した。本システムは、日常の作業手順を記録するだけでなく、不具合が発生した際、ベテランが実行した復旧作業も記録しマニュアルとして蓄積できる。この機能を用いれば、不具合対処の経験を蓄積共有化できるので、経験の浅い作業者の生産性向上に寄与すると考える。

1.2. 開発したシステムの特徴と概要

作業を記録する最も簡便な方法は、ビデオ撮影である。しかし、日々の作業を撮影するのに、撮影担当の人員を貼り付かせるのは、経済的に不可能である。そこで、作業者に CCD カメラを装着し、彼の視野画像を記録することにした。単なる作業ビデオでは、時間的に冗長でありマニュアルにはならない。作業マニュアルでは、重要な作業ステップのみを記載し簡潔な説明が必要である。そこで、作業者の動作から重要な作業ステップを抽出して、その場面の画像を利用してマニュアルを生成することにした。本システムの特徴は、

1. 作業記録用の人員が不要。作業者が装着したカメラとセンサで記録する。
 2. カメラで作業者の視野画像を記録する。
 3. コンピュータが作業の重要なステップを判別し、その箇所の画像だけを蓄積する。
Industrial Engineering (IE)⁽²⁾の動作研究⁽³⁾では、重要な作業動作を基本動作と呼ぶ。装置操作で多く見られる基本動作を決定し、加速度センサを用いて基本動作を検出する手法を開発した。この基本動作が現れた時点の画像を蓄積する。
 4. マニュアル生成プログラムが、蓄積した画像をマニュアル書式に自動編集する。
- 図1にシステムの概要を示す。本システムは、動作記録とマニュアル生成の2つのサブ

システムから構成されている。動作記録サブシステムでは、IC 加速度センサを用いて実際の作業動作を観測する手法を開発した。この動作記録と、作業者の視野を記録するカメラと組み合わせて、作業を記録する。マニュアル生成サブシステムは、記録された動作と視野画像から自動的にマニュアルを生成するプログラムである。

このシステムを用いて、旋盤やシャーリング・マシンのベテランによる操作作業を記録し、自動的に生成されたマニュアルで、初心者や学生がこれらの装置を利用できるか実験した。この実験により、経験を電子的に蓄積し共有化することが出来ることを確かめた。

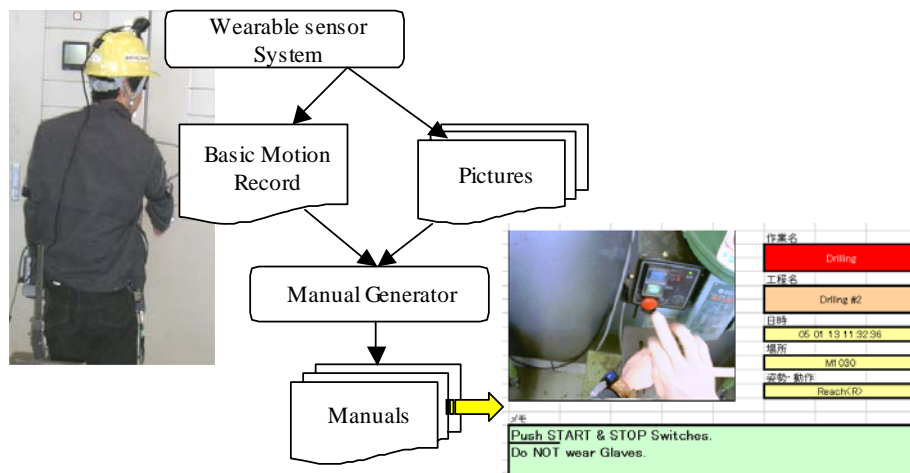


図1 作業記録システムの概要

1.3. 動作抽出手法に関する関連研究

作業記録システムでは、動作データを分節化し、認識する必要がある。中田ら⁽⁴⁾は行動認識の手法を提案している。その手法は、

1. 手足の動きを **Motion Capture** で観測
2. 手足の動きを生物の5つの基本運動様式にラベリング（舞紋）する
3. 舞紋が切り替わった時点で動作を区切り、動作分節とする
4. 動作分節の並びを既知の動作と照合し、似ている動作を判定する。

本手法は、基本動作を予め定義しなくても良い点がすぐれている。しかし、複雑な作業動作を判別するには到っていない。さらに装置

操作の場合には、基本動作を用意した方が現実的アプローチである。

我々の手法は、手足の各関節8箇所にセンサをとりつけ、ウェアラブルコンピュータでセンサからの信号を処理し、人間の動作を計測、解析するアプローチである。この方法では領域にしばられることはない。また、ウェアラブルコンピュータによりリアルタイムな計測、解析を行うことができる。その結果、PCから作業者へ指示を出すことも可能になる。よって、さまざまな機器を扱い作業領域が広範囲にわたる保守作業に適した動作解析アプローチであるといえる。

2. 作業記録システム

図1に示したように、我々のシステムは、動作記録とマニュアル生成の2つのサブシステムから構成されている。動作記録サブシステムでは、IC加速度センサを用いて実際の作業動作を観測する手法を開発した。この動作記録と視野カメラと組み合わせて、作業を記録する。マニュアル生成サブシステムは、記録された動作と視野画像から自動的にマニュアルを生成するプログラムである。

図2に作業記録システムの概念を示す。作業者は、小型カメラを頭に、加速度センサを手足に着けている。小型カメラは、作業者の視野を記録する。加速度センサで手足の動きを計測し、予め決められている基本動作を観測する。

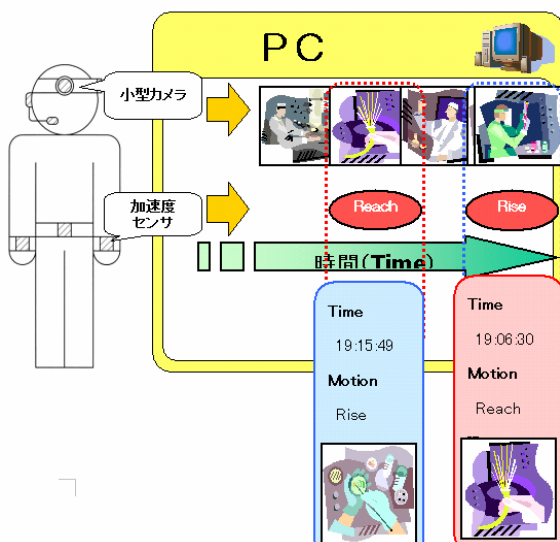


図2 動作記録システムの概念

例えば、手を伸ばす動作（Reach 動作）は、指さしやスイッチ操作など重要な作業を行う場合に多く発生する動作である。我々は、これらの重要なイベントに伴う幾つかの基本動作を定義した。基本動作が観測された時点は、重要な作業イベントが発生したと考えられるので、その箇所の5秒間のビデオクリップを時刻と共に蓄積する。この蓄積データを後述するマニュアル自動生成システムによって、マニュアルの書式に編集すると、どのような手順で作業が行われたか容易に理解できるマニュアルが完成する。

以下に基本動作とは何かを述べ、次に加速度センサによる基本動作の観測アルゴリズムを説明する。

2.1. 基本動作

手足の動きの連続データからでは、どのような作業が行われているか理解することは困難である。そこで、IEの動作研究の手法を用いて、作業者の行動を抽出する事とした。動作研究を行う際に広く用いられているのが、Therbligと呼ばれる、「のぼす」、「つかむ」、「位置決め」、「組立」などの18種類の基本動作である⁽³⁾。これらの基本動作は、加工組立作業で良く観測される重要な動作である。機械製造装置の操作に関する作業は組立作業とは異なるので、装置操作作業の動作を記録するに、5個の基本動作を策定し用いた（表1参照）。保守作業では、メーターの読み取り以外では、スイッチのOn/Offや、バルブの開閉などの動作が多い。従って、この基本動作の中で、腕を伸ばす動作（Reach）が、最も重要なイベントである。

表1 保守の基本動作(Therblig)

Therblig	シンボル	定義
伸ばす	R (Reach)	腕を伸ばす
移動	W (Walk)	離れたところへの移動
しゃがむ	SI (Sit)	しゃがむ
立ち上がる	RA (Raise)	立ち上がる
待機	WT (Wait)	動作ができない時間

2.2. 基本動作の計測

動作記録のためのセンサとして、加速度センサ（ADXL202 アナログデバイセス社）を用いた。ここでは使用した加速度センサ（以下、ADXL）とそれを用いた動作記録システムについて説明する。

ADXLの主な特長は、2軸加速度センサを単一のICチップ上に搭載し、±2Gの測定ができ、5mGの分解能を持つことである。ADXLでは重力加速度を測定し、手足の向きを測定し、どのような動作がされたか計測する。図4にスイッチなどを操作する際に現れる

“Reach”動作の判定を説明する。Reach動作前の状態において、手首、肘に装着したADXLの軸の向きはX軸が水平方向、Y軸が重力方向となっている。これが動作後の状態では軸の向きが90度変化し、X軸が重力方向、Y軸が水平方向となる。ADXLのX,Y各軸は軸が重力方向へ向いたとき、1Gまたは-1Gを取る。また、水平方向へ向いたときは0Gとなる。つまり、各関節の姿勢が重力方向であるか水平方向であるかの判定基準は、ADXLの各軸が1,0,-1Gのいずれの値かを調べればよい。ここで手首X、手首Y、肘X、肘Yの順で並べたセンサの値をGパターンと呼ぶ。Gパターンが0101から1010へ変化したときをReach動作として検出することができる。

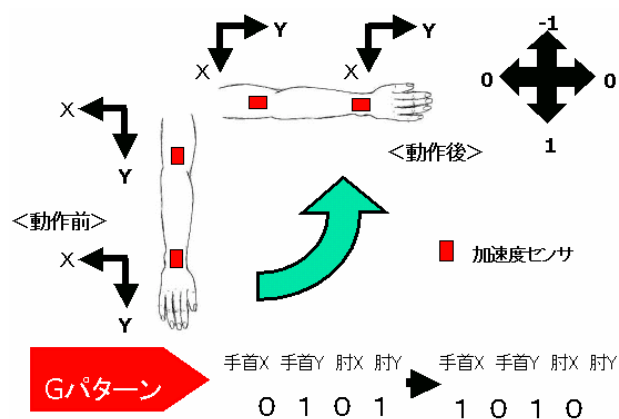


図3 基本動作の計測

Reach動作を例にして、加速度センサ・データから検出するアルゴリズムを以下に示す。Step-1、Step-2は全ての場合の共通処理である。Step-3のClassificationでは基本動作毎に異なる処理をする。

- Step-1. LPF (Low-Pass Filter) :
20ms でサンプリングしたデータの5個平均を取る。.
- Step-2. Labeling : データの値を、“-1”, “0”, “1”の3つの範囲に分類しラベリングする。.
- Step-3. Classification: ラベリング・データで値が変化している箇所を見つける。この値の変化は腕の姿勢の変化であるので、X軸、Y軸の変化からReach動作と判定する。

このセンサを両手両足計8箇所に着し、200ms毎のサンプリングで計測するADXLモーションキャプチャーシステムを製作した。さらに画像を記録するためにCCDカメラを取り付け、モーションキャプチャーと連携して画像を記録できるようにした。

2.3. 非標準作業の獲得

日常の作業手順を記録するだけでなく、不具合が発生した際、ベテランが実行した復旧作業（非標準作業）を記録しマニュアルとして蓄積できる。あらかじめ設定された標準作業と動作記録を照合し、実際に行われた作業手順を抽出する。この作業手順に、実行した作業者が補足説明を加え、新作業手順、不具合に対処する診断知識として獲得できる。

以下に、検出したい新たな作業の例を示す。この例では、ロボット起動が標準作業で失敗したとき、圧縮空気バルブを開閉すると成功したという経験を獲得する。

このロボットの標準始動手順は次のようなものである。

- Step-1.分電盤のブレーカーをONにする。
- Step-2.制御装置のブレーカーをONにする。
- Step-3.制御装置のスイッチをONにする。
- Step-4.スタートボタンを押す。

サービスマンAが、次のような非標準の経験をしたとしよう。“たまたま、常時「開」となっているはずのエアバルブが「閉」となっている時、装置は「エラー」を発生し起動しなかった。マニュアルを解読し1時間後、エアバルブに気がつき無事起動できた。”この経験をしたサービスマンAは、次回システムエラーが生じたとき、すぐさまエアバルブを「開」とし復旧出来るはずである。しかし、未経験の他のサービスマンは、また1時間も無駄に時間を費やす可能性が高い。本システムは、このような体験を自動的に記録し、形式知として蓄積することもできる。

図4に標準作業と動作記録の照合の様子を図示する。上記のエアバルブ操作が加わった動作記録の場合、照合に失敗し不都合な箇所が現れる。この不都合箇所を検出すれば図5に示すように故障木の形式で新しい枝（経験・知識）を獲得できる。

標準作業手順	動作記録
1. ブレーカー1 ON Area1	Area1 6sec REACH
2. ブレーカー2 ON Area1	Area2 3sec REACH Area3 1sec REACH
3. SW ON Area2	Area2 12sec REACH
4. Start!	Start!

図4 標準作業手順と動作記録の比較

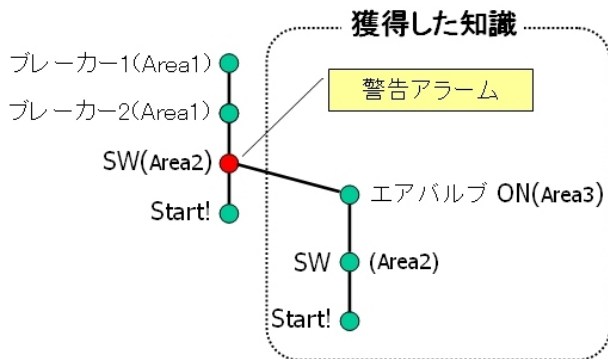


図5 獲得した経験知識

標準作業と照合して、作業記録から実際の作業手順を推論する推論機構には、探索方式を採用する。

以下に、作業記録、標準作業のデータ構造を定義し、最適探索アルゴリズムを説明する。

● 標準作業のデータ構造

標準作業では、ID 番号、標準作業時間[s]、作業エリア ID、基本動作の4つのデータが一つの作業に対して記述されている。

● 作業記録では、ID 番号、標準作業時間[s]、作業エリア ID、基本動作そして5枚の連続写真の5データが一つの作業に対して記録される。

推論の際の条件は以下である。

1. 作業エリア ID は完全一致。
2. 作業の順序は入れ替わってはならない。
3. 前段作業との経過時刻は近いほどよい。

探索アルゴリズムは以下ようになる。

Step-1. 一番目のレコード同士をマッチングさせる。

Step-2. Step-1 でマッチングしたペアを親ノード N とする。親ノード N より下位のレコードで、Motion と Area が一致するレコードを子ノード候補のリスト 1 に入れる。

Step-3. リスト 1 の中で、経過時間が近いレコードを子ノードとする。

Step-4. このノードを新たな親ノードとして Step-2 に戻る。

これを繰り返すと、作業記録データが終わっても標準作業の作業完了にたどり着かない。そこで「どうしたの?」の質問を発し、不具合症状を入力する。さらに、作業ステップで標準作業と異なった箇所「何したの?」の質問を発し、対策手順を記録できる (図 5)。

3. マニュアルの自動生成

3.1. マニュアル自動生成システム

マニュアル自動生成プログラムを説明する。動作記録システムから出力される CSV ファイル、bmp 画像ファイルから半自動的にマニュアルを作成する。このツールは Excel VBA により作成した。マニュアル生成の処理はシート作成、マニュアルフォーマット作成、画像貼り付け処理である。作業の鍵となる基本動作が観測される毎にマニュアルページを生成する。フォーマット作成後、日時、姿勢・動作が自動的に書き込まれる。貼り付けられる画像は、作業記録ツールで記録した 500ms ほどの計 5 枚の bmp 画像である。人間は、ページ毎にタイトルや短いコメントを加えるだけでマニュアルを作ることが出来る。図 6 に生成したマニュアル例を示す。



図6 生成されたマニュアルページ

3.2. システムの評価

本システムを利用して、ボール盤、シャーリング機の基本的な操作を説明するマニュアルを生成した。正確な操作ができる作業者に、動作記録システムを身につけてもらい、丁寧

に通常作業を実施してもらった。その後、動作記録データをパソコンに移し、マニュアル生成プログラムでマニュアルを生成した。そのマニュアルに必要なに応じてコメントなどを加えた。作業時間はおのおの3～4分である。マニュアルの自動生成は30秒程度でできる。コメント追記も含めて15分で完了した。

つぎに生成されたマニュアルの有効性を確認するために、8名の大学2年生にシャーリング機でアルミ板の切断作業をさせた。全員1年前にシャーリング機の操作を体験しているが、日常的には使っていないので完全には操作手順を体得していない。4名はマニュアルを見ながら作業した。他の4名はマニュアル無しで作業した。表3に表すように、マニュアルを利用した4名は全員作業完了したが、マニュアル無しの4名では、1名を除いて作業を単独では完了できなかった。

表2 シャーリング作業の比較

マニュアル利用	マニュアルなし
A: 作業完了 作業時間約	E: 操作手順を忘れて作業完了せず。
B: 作業完了	F: 操作手順を忘れ、人に教えてもらい作業完了。
C: 作業完了	G: 操作手順を忘れ、人に教えてもらい作業完了。
D: 作業完了	H: 作業完了

4. まとめ

本研究における主な成果は次の3つである。

1. 加速度センサ Motion Capture: 基本動作概念の導入と安価な加速度センサで手足の姿勢を計測することにより、作業動作を計測・認識する手法を開発した。
2. システムのウェアラブル化: このシステムは、工場やサービス現場で使うことができる実用的なシステムである。
3. 動作記録マニュアル生成: このシステムを用いることで、容易に作業内容を記録できるようになる。

実験結果で示したように、シャーリング作業のように単純な装置操作でも、不慣れな者

はマニュアルなしには作業を完了できない。また、ロボット起動作業に見るように、普段と異なる状態（エアーバルブ閉）に対処するには、広い知識と時間が必要である。しかし、その体験をマニュアルに残せば、効率化に大いに貢献する。このような「段取り技能」獲得のボトルネックは、これを聞き出し記録に残すコストが高いことである。「段取り技能」の共有化のためには、実際の作業を自動的に記録しマニュアル化（形式知化）する仕組みが必須である。

文 献

- [1] 小池、中馬、太田:もの造りの技能, 東洋経済新報社 (2001)
- [2] 藤田彰久: IE の基礎, 建帛社 (1978)
- [3] 津村、佐久間: 作業研究, 丸善 (1978).
- [4] Nakata: Automatic Generation of Expressive Body Movement Based on Cohen-Kestenberg Life like Motion Stereotypes, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.7 No.2, pp.124-129, (2003).
- [5] 岡根 ほか, 加工技術・技能継承支援ツール「加工テンプレート」の開発, 人工知能学会研究会資料, Vol. SIG-KST-07-02-03 (2007).
- [6] 中山, 知識継承のしくみづくり, 人工知能学会誌, Vol.22, No.4, pp.467-471 (2007).
- [7] 綿貫, VR技術を用いたものづくり基盤技術・技能における暗黙知および身体知の獲得, 人工知能学会誌, Vol.22, No.4, pp.480-490 (2007).
- [8] 古川, 堀 ほか, “身体知研究の潮流”, 人工知能学会誌 vol.20, no.2(2005)
- [9] 堀, 広瀬, 松浦, 瀧, “動作をトリガにした操作マニュアル生成システム”, 設備管理学会論文誌, Vol.19, No.2, pp41-46 (2007)