

行動センシングデータを用いた ペトリネットの作成とワークフローの修正法

A Method of Constructing a Petri Net and Improving the Workflow Through the Petri Net Using Human Behavior Data

白山 晋¹

Susumu SHIRAYAMA¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

1. はじめに

操業現場では、生産効率の向上とともにコスト低減のために、操業の自動化による業務の少人数化が進んでいる。一方で、熟練者の経験や勘に依存する部分が少なからず存在するという認識がある。このため、多くの操業現場において、技術継承、技能伝承の重要性が指摘されている。また、経験や勘に属するものを情報化し、知識として蓄積し、伝承するという試みがなされている。しかし、その方法の確立は難しい。現在でも、“見て、聞いて、まねて、覚える”という形態やOJT (On-the-Job Training) による伝承は少なくない。さらにいえば、近年の熟練操業者の減少は、そのような方式による伝承をも難しくしている。

このような状況において、ICTや知識工学などの方法を活用して、技術、技能、あるいは知識の伝承を効率的、かつ効果的に行う方法や、伝承を補完、あるいは代替するようなシステムが模索されてきた。現在では、IoTからのデータを機械学習（あるいは人工知能技術）によって分析するという最先端に位置づけられる研究が始まっている。

しかし、根幹をなす考え方は、従来研究と変わらず、「今ある課題を解決するために必要な情報の抽出と、情報からの知識化」、「人間とシステムの円滑な連携」という文脈に存在することが少なくない。

一例として、伊藤らが開発した操業支援システム[1]を挙げる。彼らは高炉内の温度計測によって操業を支援しているが、システム維持の困難といった問題が指摘されている。システム活用のためには人間とシステムの的確な連携が必要になることを意味する。また、操業者は形式的に表現できないルールを持っており、そのルールとシステムが示す情報には齟齬がある場合の対処が問題になる。現在においてもこの状況は変わっていない。

手順や判断基準をワークフローによって形式化し、ワークフローを介した知識伝承の可能性を探るという研究も以前からなされているものの一つである。Kimuraらは熟練設計者のCAD操作画面を動画によってキャプチャし、手順や判断基準をワークフローによって形式化し、ワークフローを介した知識伝承の可能性を述べている[2]。成子らは、Kimuraらの知見に基づき、ワークフローをマクロフローとミクロフローに分類し、知識のデータベース化を試みている[3]。

Kimuraらと成子らの研究は、経験や勘であっても、元となるワークフローが存在すること、また熟練者の経験や勘から、より良いワークフローが生成できる可能性を示すものでもある。同様の方法は和らによっても示されている。和らは、セマンティックウェブの造船設計システムへの応用について考察し、ワークフローの重要性について指摘し、ワークフローベースの知識集約システムの構築を行っている[4][5]。そのシステムを利用することで、ヒアリングによって初期ワークフローを生成し、そのワークフローに相当する実作業を分析することでワークフローの修正を行い、初期ワークフローと修正後のワークフローの差から知識抽出を試みている[6]。

以上述べたものは、操業者の知識として記述されていない慣習的な行動や気づきを、ワークフローを介し、作業の観察、操業者へのヒアリング、ピアレビュー等によって顕在化するものでもある。

一方、システムと操業者のやり取りや操業者自身の行動に着目すると、操業に関連する有用なデータが自然な形で日々大量に生じていることが以前から注目されている。そのようなデータの分析によって、操業者の知識として記述されていない慣習的な行動や気づきを顕在化するという試みもある。行動に対するセンシングデータの取得とその分析が一例である。文献7の石油プラント保守・点検作業支援システムは初期の研究例である。ヘルメットにつけたカメラからの動画像と加速度計からのセンシングデータを用いて注視度合いや姿勢を判定し、操業者の行動について個体間の差異や個々の平均的行動と特定場面における差異を抽出している。

このような方法での分析は、センシングデータの直接的な分析よりも、行動の行動素への分解に基づく分析に移行する。行動素は、「身体の各部位の動きをクラスタリングすることで得られる身体動作の基本要素」として定義付けられている[8]。センシングによって取得したデータを、行動素に照らし合わせて、関連する行動を抽出する、あるいは予測するというものである。

さらに、ワークフローと行動分析の組み合わせへと発展する。竹林のグループは、行動に対するセンシングとワークフローを結び付けている[9]。彼らの注目した対象は、船舶ブリッジにおける音声コミュニケーションである。音

声データに基づく行動記述を行い、音声データとワークフローを結び付けている。自然な形で生じる行動からのデータをワークフローに結び付けたことが鍵である。ただし、ワークフローと関連付けているが、ワークフローへの対応付けの仕組みは示されていない。また、ワークフローの修正、あるいは詳細化を介した知識抽出は行っていない。

一般には、ワークフローによって、作業者が従うべきすべての行動の記述は難しい。また、記述されたものでも適応的に修正されることが多い。このため、ワークフローを利用するためには、作成法や修正法が必要になる。また、熟練者の経験や勘によってワークフローが変化していると考えると、その変化を情報化することが重要になる。

我々のグループでは、操業者の行動分析に基づくワークフローの詳細化手法[10]を提案し、行動分析からのワークフローの修正を試みている。しかしながら、ほとんどが手作業であり、センシングデータに基づく行動分析と行動モデルの生成が必要になっている。また、行動モデルとワークフローの対応付けの方法も確立させる必要がある。

以上の背景に基づき、本研究の目的を述べると、

「操業者の知識として記述されていない慣習的な行動や気づきを行動分析から情報化するために、行動分析に適したセンシング法の確立、およびセンシングデータの分析からの行動モデルの生成、行動モデルを用いたワークフローの修正法を確立すること」となる。

センシングデータの取得法は、日々進化しつつある。一方、データの分析法は試行錯誤の状況にある。そこで、本稿では、センシングデータが得られたものとし、そのデータの分析から行動モデルの生成、行動モデルを用いたワークフローの修正法を提案する。

2. 提案手法

2.1 概要

提案手法は、文献 10 で提案した、行動センシングを利用したワークフローの修正法を基本としている。はじめに、この方法の概略を示しておく。

第 1 に、ヒアリング等によって図 1 に示すような初期ワークフローを作成する。図では、2名の作業者とシステムに関するものを例としている。図 2 は、図 1 を BPMN によって記述したものである。ここで、SYSTEM は操作対象となるシステムとする。

第 2 に、このワークフローに基づく操業者に対して、行動センシングを行い、データを取得する。

第 3 に、取得データを行動に対応付ける。この際、初期ワークフローに記述されていない行動を行動素として抽出する。第 4 に、初期ワークフローに対して、時間軸を利用して行動をマッピングする (図 3 上)。

最後に、初期ワークフローに実際の行動を反映させて、ワークフローを修正する (図 3)。

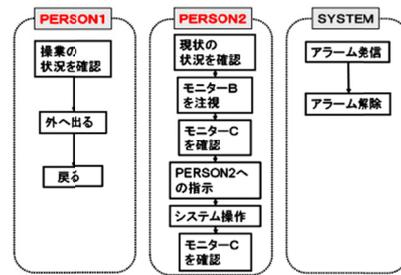


図 1 初期ワークフローの例

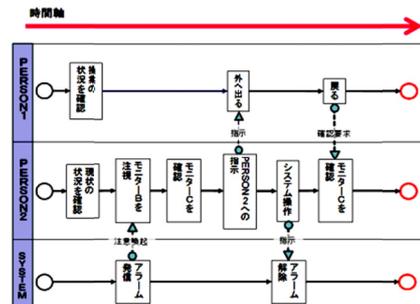


図 2 図 1 のワークフローの BPMN による表現

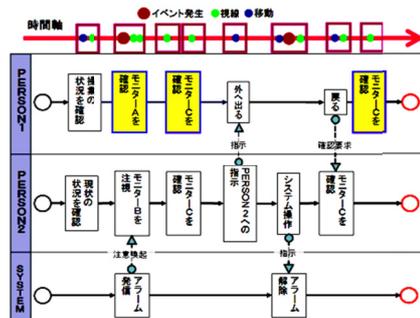


図 3 修正後のワークフローの例

この行動センシングを利用したワークフロー修正法は概念的なものである。この概念に、行動モデルとしてのペトリネットを加え、ワークフローの修正法を具現化したものが提案手法であり、以下の 5 つのステップで構成される。次節以降でいくつかの項目を詳述する。

Step 1. 初期ワークフローの抽出

Step 2. 初期ワークフローのペトリネットへの変換

Step 3. 複数の操業者の行動計測

Step 4. Step 3 で得られた行動センシングデータと、ペトリネットを用いたシミュレーションによってペトリネットを修正

Step 5. 修正されたペトリネットをワークフローに変換

2.2 行動素の抽出

初期ワークフローからペトリネットを作成する。ここで、ワークフローを構成する要素間を「経路」と呼ぶことにする。また、植浦ら[8]らの行動素という考えを用いる。ただし、本稿では、抽出しうる行動素を位置情報に基づくものに限定し、「移動」と「静止」、「回転」とする。また、

場所を何かしらの特徴,あるいは指定された区分等に基づいて符号化しておく。

以下において,それぞれの抽出方法について示す。

(i) 移動の抽出

符号化された位置情報の切り替わりで判断する。例えば,場所 A から場所 B へ移動したことがわかれば,切り替わりの時に「A→B へ移動」という行動を抽出する。

(ii) 静止の抽出

設定時間以上,同じ場所にいたとき,静止と判断する。例えば,位置情報で場所 A に 1 分居続けたとき,1 分経った時に「場所 A で静止」という行動を抽出する。

(iii) 回転の抽出

回転は,図 4 に示す符号化された向きの切り替わりで判断する。例えば,向き A→D といった形で切り替わった時点で,「向き A から D へ回転」という行動を抽出する。

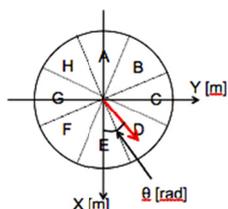


図 4 向きの符号化

以上のように,単純な行動素が抽出される。しかし,実際には,ワークフローにおけるアクティビティに対応する複雑な行動を抽出しなければならない。

実際の行動を抽出する際には,予めアクティビティと位置データとの対応を定義しておく必要がある。図 5 に示す初期ワークフローを例として説明する。



図 5 初期ワークフローの例

このようなワークフローにおけるアクティビティに対して位置データとの対応を定義したものを表 1 に示す。なお,便宜的に場所を P で示している。

定義を与える際には,行動素を組み合わせる。表 1 では,「移動」と「静止」のみから,アクティビティを抽出するような定義としている。このように,実際の業務に基づいて,例えば「P での業務」を「業務開始後 3 分静止」と定義付けする。したがって,この定義付けは,業務の観察から抽出する,あるいは与える必要がある。

また,例外的な行動をとった場合の位置データは,アクティビティに対応付けることができない。この場合,位置データから行動素を抽出し,それぞれの行動素を新たなアクティビティとして処理する。これにより,定義されてい

ないアクティビティについて対応する。

表 1 アクティビティと位置データの対応付け

アクティビティ	位置データ
P へ移動する	P へ移動 かつ 1 分静止
業務開始	3 人が所定の位置へ移動
P での業務	業務開始後, 同じ場所に 3 分静止
最終確認	業務開始後, 同じ場所に 7 分静止

2.3 初期ペトリネットの作成とシミュレーション

本稿では,真部ら[11]の行動モデル作成方法に基づき,以下のルールでペトリネットを作成する。

- (a) ワークフローにおけるアクティビティを,真部ら[11]における「状態」と「行動」に分類する
- (b) 「状態」と分類したものをプレースとして,「行動」と分類したものをトランジションとして表す
- (c) トランジションとトランジションの間に,プレースを加える
- (d) ワークフローを構成するそれぞれの経路をペトリネットの経路に置き換える

図 5 に示す 3 名の作業員 (α, β, γ) に与えたワークフローからのペトリネットの作成例を示す。それぞれの行動をトランジションとして表現し,間にプレースを挟み入れることでペトリネットを作成する。これにより,初期ワークフローに基づいた初期ペトリネットが作成される。

ワークフローからペトリネットへの変換によって,ペトリネットを行動モデルとしたシミュレーションが可能になる。一例を図 6 に示す。図中の黒い点がトークンである。トークンが移動することで状態遷移を表現することができる。また,イベント開始を基準とし,トークンが図の配置に至るまでに発火させたトランジションの合計発火遅延時間によって時間を表すことができる。なお,本稿では,Snoopy [12]というペトリネットツールを用いている。

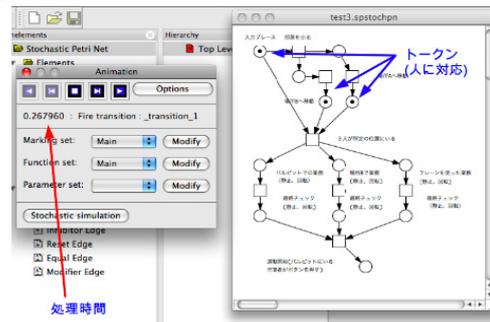


図 6 ペトリネットからのシミュレーション

2.4 ペトリネットの修正

初期ペトリネットに,行動センシングから得られた作業員の行動を対応付け,かつワークフローの性能評価指標を参照としてペトリネットを修正する。

本稿では,ワークフローの性能評価指標を,「正確さ」と「効率」とする。「正確さ」を,与えられたタスクを正

しく行うことができたかを表す指標とする。「効率」を、ワークフローを処理する速さとし、前項で示したシミュレーションでの処理時間とする。

はじめに、行動センシングから得られた作業者の行動から修正候補となるペトリネットを仮に作成する。

次に、行動選択をする部分で、間違っただ行動群を除去する。位置データに基づいてペトリネットを修正したとき、実際にすべき行動をとらずに、必要な行動が省略されることが考えられる。そこで、タスクを達成するために必要なアクティビティを実行できなくなるような選択肢を除去する。これにより、正しい行動のみを表現したペトリネットが作成される。

また、行動選択の場面では、その始点と終点の部分のみを取り出し、シミュレーションによって処理時間の差を比較する。処理時間の小さい選択肢を残し、大きい方を消去する。これにより、行動選択のない確定的な行動（以降、確定行動と呼ぶ）を表現するペトリネットが作成される。

2. 5 ワークフローへの変換

前節で述べた方法で、修正されたペトリネットをワークフローに変換する。ただし、変換されたワークフローが実作業に即したものを判断する必要がある。このため、手作業で修正を加える必要がある。

3. 実験

3. 1 実験の概要

作業空間内の監視業務を行う部屋を模擬した実験環境を図7に示す。部屋は、6つの領域A~Fに区切られており、1つの領域に対し、壁面に1つか2つのモニタを模擬した画用紙が貼られている。以降、この画用紙をモニタと呼ぶことにする。

図に示す空間内で、モニタを見るというタスクを行ってもらう。なお、「モニタ X を見る」と指示された場合は、Xの領域へ移動し、必ずその中で壁側を向いて見るように指示している。また、「Xを見る」と指示された場合は、図8に示されるように、領域Xの外側にある、それぞれ対応付けられたモニタを見る。このときも、決められた領域内に移動してから見るように指示している。

はじめに、被験者に初期ワークフローを与え、タスクを記憶してもらい、その後、実験を開始する。設定したタスクは、以下の通りである。

- (1) 部屋（実験環境）に入る
- (2) 指定した領域へ移動する
- (3) 領域のモニタに示された数字を計算用紙に代入し、計算する（例： $3 \times \square =$ 結果、 \square 内に数字を記入）
- (4) 指示が続く場合は、計算結果を、次の四則演算の左に書き写し、(2)へ戻る。
- (5) 指示がない場合は部屋（実験環境）を出る。

与える計算用紙は、図9のように、初期値と、指示する回数だけの四則演算記号が記されたものである。被験者に

よって初期値と記号は変えてある。ただし、難易度は同程度になるようにしている。

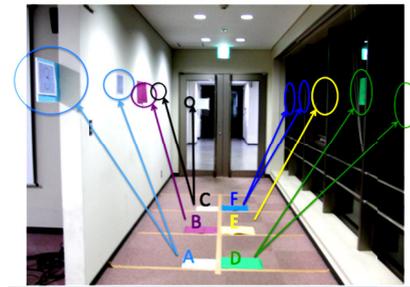


図7 実験環境

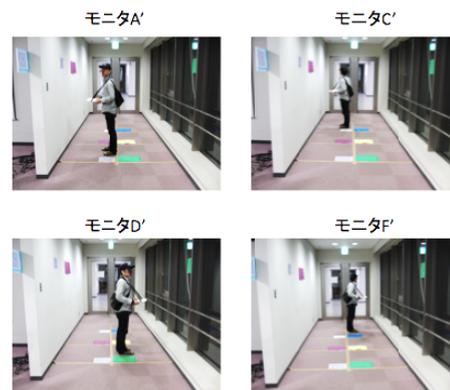


図8 モニタを見るとき行動例

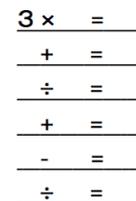


図9 計算用紙の例

3. 2 実験結果

被験者は、大学生と大学院生の3名である。実験で用いる初期ワークフローを、「モニタ B → E → D → C' → A → F' → E → A」の順に見て計算する」とした。

はじめに、初期ワークフローに書かれたタスクを順番とともに覚えてもらう。その後、タスクを実行する。

3.2.1 初期ペトリネットの作成

行動に注目すると、例えば、モニタ B を見て計算する、というアクティビティは、領域 B へ移動 → モニタ B を見る → 計算する、という形で詳細化される。アクティビティをトランジションに変換し、間にプレースを置くことでペトリネットを作成する。

3.2.2 行動計測と行動素の抽出

本稿では、外部のビデオカメラから俯瞰して撮影したものに対し、目視で位置を判断し、記録することにした。

はじめに、取得された位置データをガントチャート的に情報化する。被験者1の位置データの一部を図10に示す。縦軸のAからGは場所を示す。Gは、A~Fと部屋の外の

間に便宜的に設定した領域である。横軸は時間である。色は、図 11 に示された、顔の向きを表している。

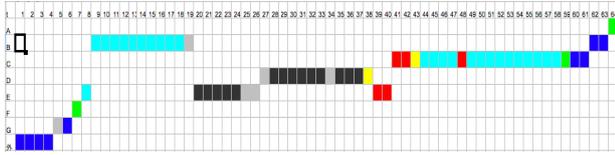


図 10 被験者 1 の位置データの一部

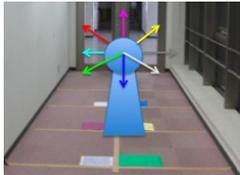


図 11 顔の向きと色の対応関係

次に、ルールを決め、行動を抽出する。本実験では、ワークフローのアクティビティに対する位置データ対応付けのルールを以下のように設定した。

- ① 「X へ移動」：指定場所へ位置情報が切り替わってから 3 秒静止している時点で移動と判定し、切り替わった瞬間を「移動」とする。
- ② 「X を見る」：移動が生じた時、必ずどこかを見て計算するものとする。A, C, D, F にはモニタが 2 つあるのに対し、B, E にはモニタは 1 つしかない。領域によって判定方法を変える。
 - (i) 領域 A, C, D, F の場合
モニタ A', C', D', F' については、移動後 3 秒以内に 1 回でも、それぞれの方向を見た時点で「見た」とする。一度も対象の方向を向いていないときは、それぞれ、モニタ A, C, D, F を「見た」とする。
 - (ii) 領域 B, E の場合
移動した時点で、モニタ B, E を「見た」とする。
- ③ 「計算する」：指定場所へ位置情報が切り替わってから 5 秒静止している時点で、向きも考慮し「計算した」と判断する。
- ④ 「部屋に入る」：部屋の外から部屋の中に位置情報が切り替わった時点で部屋に入ったと見なす。
- ⑤ 「部屋から出る」：部屋の中から部屋の外に位置情報が切り替わった時点で部屋を出たと見なす。

本実験では、この 5 つの行動からワークフローとペトリネットを記述している。

3.2.3 行動センシングデータからのペトリネットの修正

被験者 1 の位置情報を使って、ペトリネットを修正したものが図 12 である。図中の丸で囲まれた部分が修正された部分である。

修正は、初期ペトリネットと異なる動きをしている部分に注目し、行動素によってトランジションを分けて追加している。それぞれのトランジションの発火時間や、行動選択の確率も反映させている。次に、このペトリネットを使

って、ワークフローの評価と修正を行う。

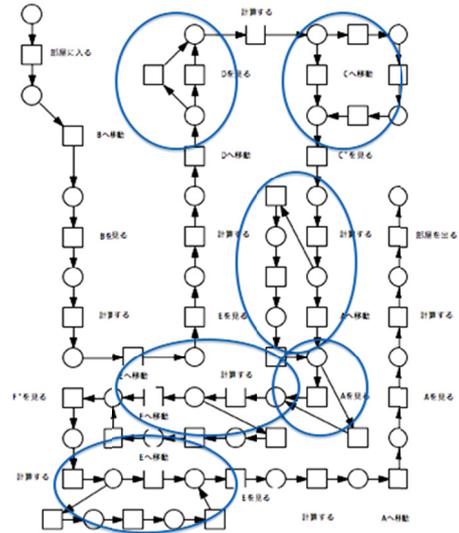


図 12 被験者 1 の位置情報を反映させたペトリネット

3.2.4 性能評価指標からのペトリネットの修正

行動分析からの「正確さ」とシミュレーションからの「効率」の観点から、確定行動のみで構成されるという前提の下で、前項で修正したペトリネットを確認する。確率行動が抽出される場合、確定行動を確率行動とみなして、ペトリネットを修正し、その修正をワークフローに反映させる。

はじめに、「正確さ」という観点から考える。例えば、指示通りにモニタを見ていないという情報があれば、その部分をペトリネットから除去する。

被験者 1 に関しては、「モニタ D を見る→モニタ D' を見る」、「モニタ A を見る→モニタ A' を見る」と 2 箇所において間違えた行動が検出された。そこで、この 2 箇所に対応するトランジションを除去する (図 13)。左図は、D→D'、右図は A→A' と間違えたことを示している。

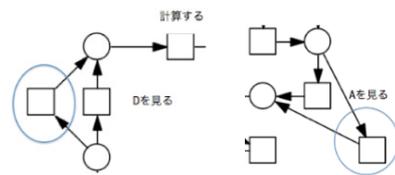


図 13 トランジションの除去

また、見ているモニタは正しいが、計算を間違えた箇所についても同様に除去する。このようなミスは、同じモニタを見直すという行動に現れることが多い。

最後に、行動選択の部分では、どちらの行動による正解者が多いかという基準で比較する。どちらも正解者が等しい場合は、シミュレーションの処理時間が短い方を選択する。ただし、本稿では、簡単のため、トランジションの数の違いで判定した。

これらの評価と修正により、最終的に図 14 に示すペトリネットが作成された。丸で囲まれた部分が、初期のペトリネットから変化した部分である。

3.2.5 ワークフローの修正

このように、位置センシングデータとペトリネットを用いて、初期ワークフローでは想定していない行動が抽出できる。また、実際には、確率行動である可能性が高い確定行動も検出できる。これらによって、初期ワークフローの修正が可能になる。

例えば、ペトリネットの変更箇所において、「計算後に再び対象モニタを見て静止している」という共通点に注目し、ワークフローに変換すると、初期ワークフロー：「モニタ B→E→D→C'→A→F'→E→A の順に見て計算する」は、「モニタ B→E→D→(計算や順番の)確認→C'→A→確認→F'→確認→E→A」といった形で D と A と F の後に確認作業を入れつつ、順番に見て計算する」と修正される。

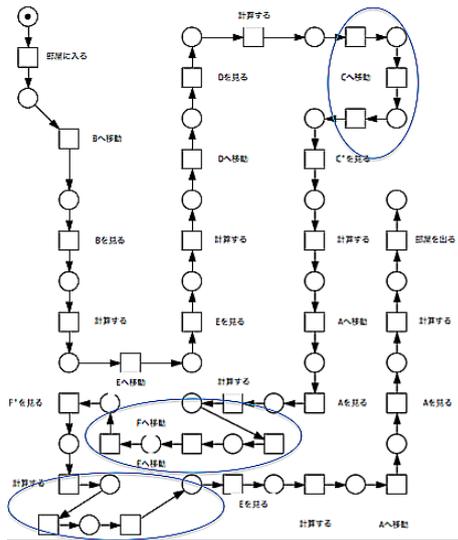


図 14 最終的に作成されたペトリネット

3.3 考察

本実験により、位置データから行動が抽出でき、抽出された行動が実際にすべき行動と異なる場合があることを示した。また、被験者によって、共通して実行されるアクティビティと、そうでないアクティビティがそれぞれ存在することを示した。これは、真部ら[11]が主張する「確定行動」と「確率行動」に相当する。確率行動に対しては、どの行動をとるのがワークフローとして良いのかを決めることもできる。しかしながら、実際に、どんな行動が実現されるかという点については考慮が必要である。行動センシングによってデータが増えれば、この点についても言及できるものと考えられる。

4. 結論

近年の操業現場では、作業者の少人数化が進み、製品の安定供給や設備の安定稼働を続けるために、技術、技能、あるいは知識の伝承を効率的、かつ効果的に行う方法が模索されている。一つの方法が操業者の行動センシングである。しかし、行動センシングには、データ取得後のデータ分析手法や分析結果の活用法が確立されていないとい

う問題がある。

本稿では、行動センシングデータからのワークフロー修正法を提案した。現状のワークフローからペトリネットを導出し、取得した位置データをそのペトリネットに対応付ける。また、ペトリネットを利用した行動モデルを構築する。この行動モデルに基づいて、計測データから人間の確定行動と確率行動を抽出し、ペトリネットの修正や詳細化を行う。修正されたペトリネットからワークフローを修正するというものである。

タスクを与えた実験によって、最初に与えられたワークフローが提案手法によってより良いものに修正されることを示した。また、ワークフローとペトリネットの併用によって、確定的行動と、時と場合によってある程度ランダムに変化する確率的行動を表現しうることを示した。

本論文執筆にあたり、先行研究を行った八木達也氏（研究当時東京大学）に感謝します。

参考文献

- [1] 伊藤雅浩, 松崎真六, 柿内一元, 磯部誠: 高炉操業解析総合支援システム Venus の開発, 新日鉄技報第 379 号, pp.32-38, 2003.
- [2] Kimura, F., Ariyoshi, H., Naruko, Y. and Yamamoto, H.: Capturing Expert Knowledge for Supporting Design and Manufacturing of Injection Molds, Annals of the CIRP, Vol.53, No.1, pp.147-150, 2004.
- [3] 成子由則: モノづくりにおける知識・ノウハウの伝承, 情報管理, 49.8, pp.439-448, 2006.
- [4] 大和裕幸, 安藤英幸, 増田宏, 白山晋, 佐藤昌弘, 唐澤武郎, 田村雄介, 釧吉謙: セマンティックウェブの造船設計システムへの応用, 日本造船学会論文集, 192 号, pp.387-396, 2002.
- [5] 大和裕幸, 安藤英幸, 唐澤武郎, 内藤紀彦: セマンティックウェブを用いた造船設計 CAD システム, 日本造船学会秋季講演会論文集, Vol.2, pp.31-32, 2003.
- [6] 中澤崇, 稗方和夫, 大和裕幸, 安藤英幸, 造船設計における知識マネージメントに関する研究 (第三報), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol.1, pp.441-442, 2005.
- [7] 人間生活工学センター, 東洋エンジニアリング: 石油プラント保守・点検作業支援システムの開発, H19 年度プロジェクト事後評価用資料, 2007.
- [8] 植浦総一郎, 岩井儀雄, 谷内田正彦: 準教師有リクラスターリングによる行動素抽出, 情報処理学会研究報告—コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.2008, No.36, pp.29-36, 2008.
- [9] 青島大悟, 鈴木敦志, 桐山伸也, 杉山岳弘, 竹林洋一: マルチモーダルセンシングによるブリッジ業務分析システムの開発, 第 22 回人工知能学会全国大会講演論文集, CD-ROM, 3D3-08, 2008.
- [10] 楼天甲, 白山晋, 稗方和夫, 大和裕幸: 操業者の行動分析にもとづくワークフロー詳細化手法, 情報処理学会研究報告 (MPS), Vol.2008, No.126, pp.21-24, 2008.
- [11] 真部靖弘, 服部元史, 田所 諭, 高森 年: ペトリネットによる人間の行動パターンモデルと行動予測, 日本機械学会論文集, Vol.63, No.609, pp.1693-1700, 1997.
- [12] Heiner, M., Herajy, M. Liu, F., Rohr, C. and Schwarick, M.: Snoopy – A Unifying Petri Net Tool, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7347, pp.398-407, 2012.