

作業者の知識の可視化に向けた自動化生産ラインの因果関係の記述

金棟植（東大） 白藤翔平（東大） 助川拓士（（株）デンソー） 斎藤賢宏（（株）デンソー）
小島史夫（（株）デンソー） 太田順（東大）

1. 緒言

日本の製造業では労働人口の減少等により慢性的な人材不足と、熟練した作業者の引退による熟練作業者の不足が問題化している [1]。一方で、複雑な自動化生産ラインでの効率の改善や故障の原因特定のような課題の多くは、熟練作業者の知見に依存している。自動化生産ラインは、産業用ロボットのような複雑な機械やそれを制御するシステムなど、さまざまな要素が絡み合った複雑なシステムになっている。そのため、このような複雑なシステム上で発生した異常は、システムを構成する要素間の関係を正しく理解し、起こり得る事象が分かっているなければ、原因の特定が難しい。熟練作業者は、上記のような知識を持ち、問題の解決に対して特有の作業パターンを有していると思われる。このような知見は経験や勘に基づく知識を含めていて、言語表現が難しいことから暗黙知と呼ばれている [2]。暗黙知を形式化することで、より効率的に熟練作業者を育成することや効率的な作業が実現できるはずである。

上記のような作業者の知識を明らかにするためには、作業者の行動を記録し、初心者や熟練作業者またはそれらの作業の違いを比較し、形式化する方法が考えられる。このような考えのもと、フローチャート [3] や FTA(fault tree analysis)[4]、Tree 構造といった手法が提案されている。しかし、フローチャートや FTA は、あくまで過去に発生した問題にもとづく関係を記述するもので、その背景にあるシステムの構造と結びつけて問題を捉えることが難しい。結果として、得られた知識は、そのシステム特有のものとなり、一般化が難しい。一方で、システムの構造を明確に記述しようとした場合、SysML などのモデリング言語を用いて、システムを構成する要素の状態遷移や、振る舞いを詳細に記述することができる。しかし、この記述をもとに生産システムを構成する要素間の因果関係と、作業者の行動を照らし合わせ、その背景にある知識を知るには、記述の複雑さが問題となる。

本論文では、システムのモデリング言語である SysML を用いて自動化生産ラインをモデル化したうえで、要素間に簡単な順序関係、つまり、システムに問題を起こし得る因果関係において原因となりえる要素と結果となり得る要素間で順序関係を定義する手法を提案する。さらに、この順序関係が束論における束の構造を満たすように記述する方法を提案し、作業者がシステムで発生した問題に対してその原因を絞り込む過程を、問題となりえる要素の集合の変化という形で可視化できるようにする。また、最後に実際のラインにおける因果関係のモデル化と、このラインで発生した問題に対する作業者の原因の絞り込みの過程の違いを、提案手法を用いて比較した結果も紹介する。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究では、システムをモデル化した SysML の各ダイアグラムの要素から、問題の原因となり得る要素とその結果となり得る要素間に順序関係を定義する。これにより、要素間の複雑な因果関係を記述したモデルの作成手法を提案するとともに、自動生産システムで発生した問題に対する作業者の行動をシステムの構造と照らし合わせながら検証する方法を提案する。提案手法の概要は、以下のような手続きとなる。

1. SysML を用いて、生産システムの構造を、パラメータの関係、状態遷移、情報やモノのやり取りの観点から記述する。
2. 個々のダイアグラムに対して、要素間の順序関係を定義する。
3. 他のダイアグラムとのつながりを考えて、システム全体の順序関係を定義し、モデル化する。
4. 生産ラインでの問題に対する作業者の行動を記録し、作成した因果関係のモデルと比較、検証する。

詳細を以下に示す。

2.2 SysML

SysML(System Modeling Language) は、UML(United Modeling Language) というモデリング言語から拡張された、システムを表現するためのモデリング言語である [7]。SysML には、システムを記述するために 9 種類のダイアグラムが用意されている。システム全体の構造や、パラメータ、状態、アクティビティ、システムの要素の包含関係などを記述することができる。本研究では、9 種類のダイアグラムの中から、システムを構成する要素とその間の関係を記述するうえで重要な、パラメトリック図、ステートマシン図、アクティビティ図を用いる。図 1 は、自動車のタイヤの自動組付け工程の一部を表したダイアグラムの例である。図 1a はマニピュレータの状態遷移を表すステートマシン図、図 1b はタイヤの軸穴の向きを判定する画像認識のアクティビティ図、図 1c はマニピュレータの順運動学におけるパラメータ間の拘束を表すパラメトリック図の例をそれぞれ表している。これらの図は例として用いた簡易なものであるが、ステートマシン図では遷移の条件を定義したり、アクティビティ図ではやり取りされるトークンを定義したりなど、システムの詳細なモデル化が可能である。

2.3 ダイアグラムの要素間の因果関係の定義

本提案手法では、先に示したようなダイアグラムの要素間に、システムで発生した問題の因果関係を意味する

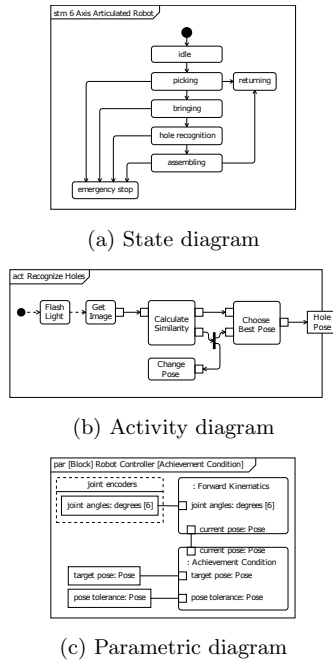


図 1: SysML におけるダイアグラムの例

順序関係を定義する．特に要素間の因果関係が分かりやすくなるように，順序関係に束論の束の構造が成り立つようにする．束は，次のように定義される．ある集合 P に対して， $x, y \in P$ の全ての x, y に対して，最小上界 $x \vee y$ と最大下界 $x \wedge y$ が一意に存在している場合，集合 P は束である [5]．束を用いることで，結び ($x \vee y$) と交わり ($x \wedge y$) のような代数的な演算を用いて，ある結果に対する共通の原因を探すことが可能になる．つまり，作業者が問題が生じている 2 つの要素があった場合に，その問題を引き起こす共通の要素（原因）や，それらの要素から共通して生じ得る問題の要素（結果）が一意に記述される．

本研究では，大小関係に置いて，原因が大，結果が小になるように，順序をシステムの要素間の因果関係とし，パラメトリック図，ステートマシン図，アクティビティ図におけるパラメータ，ステート，アクションの順序関係を定義する．ステートマシン図では，あるステートが他のステートに遷移するとき，遷移後のステートに何か問題があるとなると，遷移前のステートにもなにか問題があると考えられる．アクティビティ図では，あるアクションに問題があるとなると，そこからトークンを受け取る，アクションにも問題があると考えられる．つまり，ステートマシン図とアクティビティ図に置いては，上記における前者と後者が原因と結果の関係になることから，これらの間に順序関係を定義する．パラメータ図は，パラメータ間の拘束を表すため，ここに順序関係を定義することが難しい．パラメータ図内で，拘束式によりパラメータが同時に変化するのは，拘束式を含めこれらのパラメータを一つの要素として定義する．また，条件式など，パラメータ図内でパラメータ間の関係を表すが，これらのパラメータがお互いに影響を

与えないものに関しては，拘束（条件）式に対して，この式が参照するパラメータを大として大小関係を定義する．図 1 に示したパラメトリック図，ステートマシン図，アクティビティ図それぞれに対する要素間の大小関係を Hasse 図を用いて表したものを図 2 に示す．

上記の方法により個別のダイアグラムの要素の因果関係を表す順序関係が定義されたが，さらに，複数のダイアグラムを合わせて一つのシステム全体の要素間の因果関係のモデルを構成するために，SysML 内で記述される関係に合わせて次のようなルールを導入する．

1. 状態遷移が，アクションをトリガーとし生じる場合，このアクションを大，遷移後のステートを小とする．
2. ステートがアクションを生じさせる場合，このステートを大，アクションを小とする．
3. アクションがパラメータを変化させる場合，このアクションに対して，変化前のパラメータを大，変化後のパラメータを小とする．
4. 状態遷移が拘束（条件）式でブロックされる場合，この拘束式を大，遷移後のステートを小とする．
5. アクションの発生が拘束（条件）式でブロックされる場合，この拘束式を大，アクションがトークンを渡す次のアクションを小とする

なお，SysML では，ステートから発生するアクションとアクティビティ図のアクションや，アクティビティ図のトークンとパラメトリック図のパラメータといった要素が必ずしも対応付けられていないが，ここでは，これらが対応付けられているものと仮定している．

また，このように定義した順序関係は，必ずしも束の構造を持つとは限らない．つまり，ある 2 つの問題を起こし得る共通の要素が，複数ある場合などである．この場合には，これらの要素の間に中間要素を定義することで束の構造を持つ順序関係へと修正をおこなう．上記の手続きで，SysML のダイアグラムから，システム全体の要素間の因果関係を定義することができ，本研究では作成されたモデルをシステムラティスと呼ぶ．

2.4 作業者の原因の絞り込みの過程の可視化

上記の手法で作成したシステムラティスを用いた作業者の持つ知識の解析として，原因の絞り込みの過程の可視化が考えられる．作業者が問題を解決した際の確認事項を記録し，ある問題に対してシステムラティス内のどの要素を確認したかを確認する．各確認によって，どの程度のシステムの領域が絞り込めたのか，システムラティス内での大小関係を用いた集合論的計算で可視化することが可能である．これにより，各段階で確認した要素と，その確認によって間接的に確認された要素を検証できる．また，例えば原因探索の各段階で，原因となり得る要素の数の減少の過程を可視化し，作業者間で比較することも可能である．次の節では，実際の問題解決の過程で生じた作業者間の違いを上記の方法で検証した例を示す．

3. 実験

本節では，提案した手法を用いてシステム内の要素の因果関係を表すシステムラティスを構築し，作業者の問

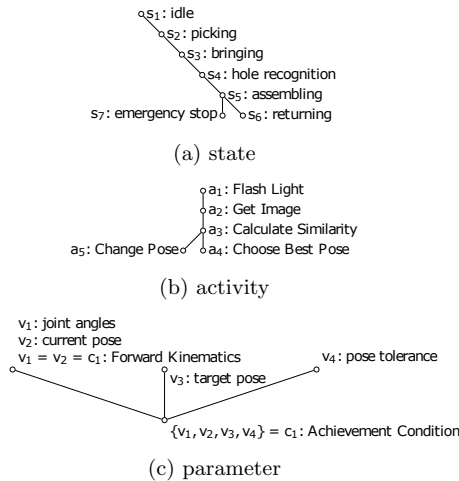


図 2: 図 1 の各ダイアグラムに対応した要素間の因果関係を表す Hasse 図

題の絞り込みの過程を可視化, 比較する実験をおこなった. 東京大学内に設置されている教育用のレゴカーを自動で組み立てる小規模の生産ライン (図 3) を対象の自動生産ラインとした. まら, 解析を簡単にするため, 自動でタイヤを組み付ける工程部分を抜き出したものを実験の対象とした. 上記の箇所でおこなわれる工程は次のようになっている.

- パーツフィーダでタイヤ, ベース, リア部品供給
- パレット上に部品を載せて次の工程へ移動
- 画像認識を用いてタイヤの向きを判定及び反転
- ロボットマニピュレータによりタイヤの仮組み
- シリンダにより圧入
- 圧入センサーにより, 正常判別

はじめに, SysML で上記の生産ラインのモデルを作成するとともに, 提案手法に従ってシステムラティスを構成する. そのうえで, 上記の生産ライン上で発生し得る問題とその原因を設定し, 実際のエンジニアが問題の症状から, その原因を特定までの確認作業をインタビュー形式で記録する. 問題となる現象として, ロボットによって仮組みされたタイヤを別のシリンダで押し込む際の圧入センサーの値が異常値 (正常値に対し上限または下限を超えている場合) を示している状況を想定し, その原因としては次のような三つの事象を設定した.

1. イメージセンサの誤作動によりタイヤの裏表判別ができていない
2. ワークを載せてベルトコンベア上を移動するパレットの中の一つが変形している
3. タイヤの軸穴の寸法が成形時の問題により小さくなっている

上のような原因によって, ロボットによるタイヤの組付けが失敗し, レゴカーにタイヤがついていない不良品が発生することで, シリンダでこれを押し込もうとした際の圧入値の値が異常値を示す, または, 圧入時に大きな圧入力値がタイヤの寸法誤差で大きく出るといった事象



図 3: ラーニングファクトリ

が起こる. 実験には, 勤続年数の異なるエンジニア (熟練作業員 3 名, 中堅 3 名, 初心者 3 名) を対象とした. 実験の参加者には, 実験に関する簡単な説明と問題の症状が与えられ, システムのある箇所を一つずつ口頭で確認していき, 原因を特定してもらった. この作業員の確認事項の履歴をシステムラティス上で表し, 原因の絞り込み過程の分析をおこなう.

4. 結果及び考察

図 4 に作成したラーニングファクトリのシステムラティスの Hasse 図を示す. 計 112 枚のダイアグラムから作成された, 850 個の要素間の因果関係が表現されている.

作業員がある現象に対して, システム内の特定の確認要素を確認し, その要素でも問題が発生していた場合, 原因はその要素よりも大きな要素の集合内にあると考えられる. 結果として, もともと問題の候補であった要素の集合と, 上記の集合の積集合が新たな問題の候補になる. 図 5 は, この絞り込みの過程の例を表しており, 青色は症状, 緑色は原因, 赤色は確認箇所, 灰色は原因となり得る要素, 白は原因ではないことが明らかな要素を表している. このような絞り込みの過程を, すべての実験参加者のすべての試行に対して計算し, 確認作業 1 回を 1 ステップとして定義し, ステップごとの問題の候補となる要素の数をグラフで表したのが図 6 である. 横軸は確認作業を行ったステップ番号, 縦軸はその時点で原因となり得るとされる要素の数を表している.

グラフにおいて, 数値が減るステップはシステム上, 候補の絞り込みがおこなわれたステップとして考えることができる. 一方, 数値が減ることなく, 横ばいになっているステップは, 確認作業により, 絞り込みに失敗したステップとして考えることができる. 実験 1 では, 作業員の平均ステップ数が熟練者で 5 回, 中堅で 7.7 回, 初心者で 8 回と, 熟練作業員の全体のステップ数が少ない傾向が見られ, かつ無駄な確認作業も少ない傾向 (熟練作業員が平均 1 回, 中堅が平均 2.7 回, 初心者が平均 4 回) が見られた. 他にも, 実験 2 では, 熟練作業員の全体のステップ数が少ない傾向 (熟練作業員で平均 10 回, 中堅で平均 12 回, 初心者で平均 12.5, ただし失敗した人が 1 人いた) かつ無駄なステップ数も少ない傾向 (熟練作業員で平均 4.7 回, 中堅で平均 6 回, 初心者で

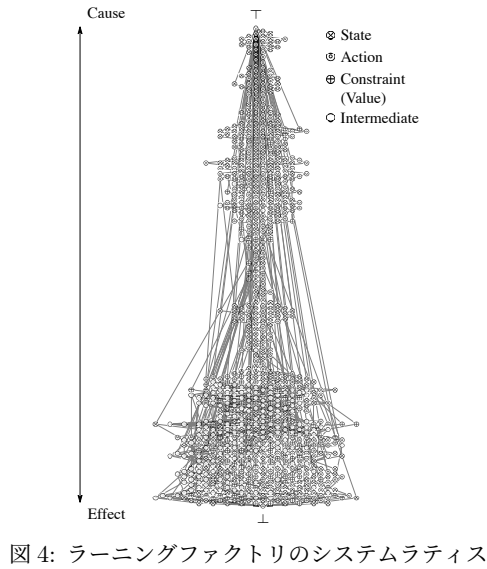


図 4: ラーニングファクトリのシステムラティス

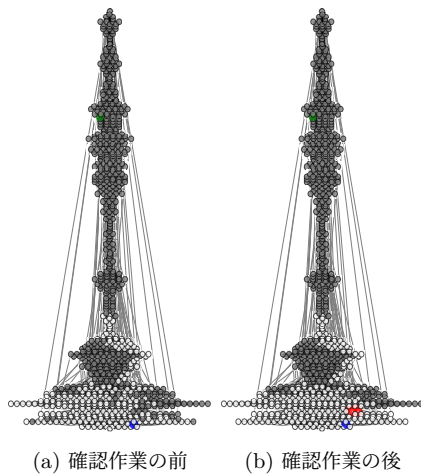


図 5: 原因の絞り込みによる候補となる要素の変化の例

平均 6.5) であった。実験 3 では、他に比べ大きな違いは見られなかった。これは、他の問題に比べ、比較的解決しやすい問題だったことが影響していると思われる。全体として、定性的ではあるが、熟練作業者は（無効なステップが少なく）滑らかに探索しているが、初心者の場合は、ある程度絞り込みをおこなったあと、それ以上の絞り込みがおこなえていことがわかる。

5. 結言

本研究では、SysML を用いた生産ラインのモデルから、その要素間の因果関係を表すシステムラティスを構築する手法を提案した。これにより、生産ラインで発生した問題に対して、作業者がどのように原因を絞り込んでいくかという過程を、システムの構造と照らし合わせながら、検証することが可能となった。実験を通して、熟練者が初心者に比べ、原因に結びつかない無駄な確認作業が少ないことがこれにより見て取れたが、今後

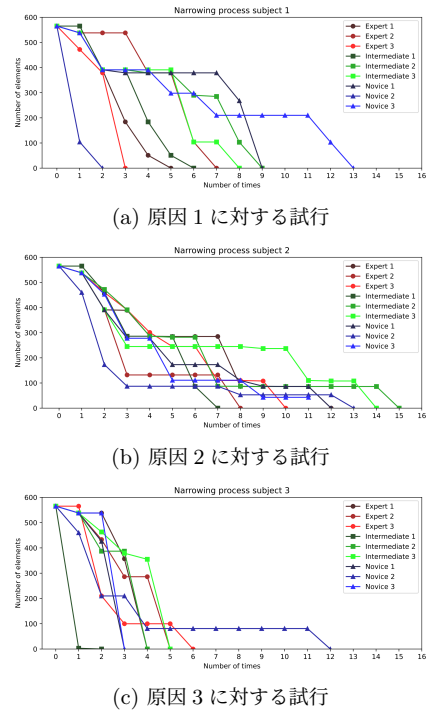


図 6: 原因の絞り込みによる候補となる要素の変化

は、これを熟練作業者の知識として表現するために探索箇所の検証および、そのパターンを表現する手法を開発する予定である。

謝 辞 この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP18002) の結果得られたものです。

参 考 文 献

- [1] 経済産業省: “2018 年版ものづくり白書”, 2018.
- [2] 松木則夫: “製造現場における熟練技能の抽出に関する研究 —技能の可視化および代替に関する研究—”, Synthesiology, Vol. 3, No. 1, pp. 47-55, 2010.
- [3] Scott D. Johnson: “Cognitive analysis of expert and novice troubleshooting performance”, Performance Improvement Quarterly, Vol. 1, No. 3, pp. 38-54, 1988.
- [4] S. Kabir: “An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis”, Expert Systems with Applications, Vol. 77, No. 1, pp. 114-135, July 2017.
- [5] Davey, Brian A., Hilary A. Priestley. “Introduction to lattices and order. Cambridge university press,” 2002.
- [6] Friedman, Scott, Kenneth Forbus, and Bruce Sherin. “Representing, running, and revising mental models: a computational model.” Cognitive science 42, no. 4 (2018): 1110-1145.
- [7] Friedenthal, Sanford, Alan Moore, and Rick Steiner. A practical guide to SysML: the systems modeling language. Morgan Kaufmann, 2014.