

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500125

研究課題名（和文）逆シミュレーション手法による協調熟練技能の抽出とその継承手法の研究
 研究課題名（英文）A Study of Technology Extraction and Succession from Expert Skills Using Inverse Simulation

研究代表者

倉橋 節也（KURAHASHI SETSUYA）

筑波大学・大学院ビジネス科学研究科・准教授

研究者番号：40431663

研究成果の概要（和文）：

本研究では、熟練技能の伝承支援を目的に、その抽出手法と継承手法の両面に焦点を当てた研究を行った。時系列データからのプロセス応答モデルの構築を通して、相互相関分析、プロセス応答モデル、制御ルールの抽出、ワークフローの抽出、妥当性検証、といった改善サイクルを提案した。本研究の主な貢献は、MDL 基準に基づく学習分類子システムとタブー検索手法に基づく意味のあるルールの抽出、および逆シミュレーション手法による知識抽出にある。これらの提案手法は、バイオケミカルプラントに適用され、妥当性と効果の検証が行われた。また、本手法を応用し、社会学・歴史学の分野で文化資本（知識・芸術・技能・規律など）と呼ばれる継承構造の解析を行った。これは、家系図などの歴史資料を用いるものであり、知能工学手法による文化・社会資本研究の基盤技術を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：

This study has proposed a novel method to develop a process response model from continuous time series data. The method consists of the following phases: (1) Reciprocal correlation analysis, (2) Process response model, (3) Extraction of control rules, (4) Extraction of a workflow, (5) Validation. The main contribution of the research is to establish a method to mine a set of meaningful control rules from Learning Classifier System using the Minimum Description Length criteria and Tabu search method. The proposed method has been applied to an actual process of a biochemical plant and has shown the validity and the effectiveness. We also conclude that advanced agent-based models are able to contribute to discover new knowledge in the fields of historical sciences.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：シミュレーション、エージェント、遺伝的アルゴリズム、社会ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

製造業における熟練技能および知識発見は日本の競争力を支える上で重要な技術である。特に、派遣労働者比率が急増する装置産業では、熟練技能継承が急務となっていた。しかし、プロセス異常など非定常運転時の熟練操作を知識化する研究は未成熟であり、優れた技能の抽出に多くの試行錯誤と労力を必要としていた。

一方、社会学の分野においても、知識や技能など優れた文化資本伝承の重要性が指摘されているが、データからこれらの伝達手法を発見する研究は未踏のままであった。

2. 研究の目的

第1に、逆シミュレーション技術と意外性のある知識発見技術を適用し、熟練者のみが発見できる異常状態の予兆発見手法をコンピュータ上に実現すること。

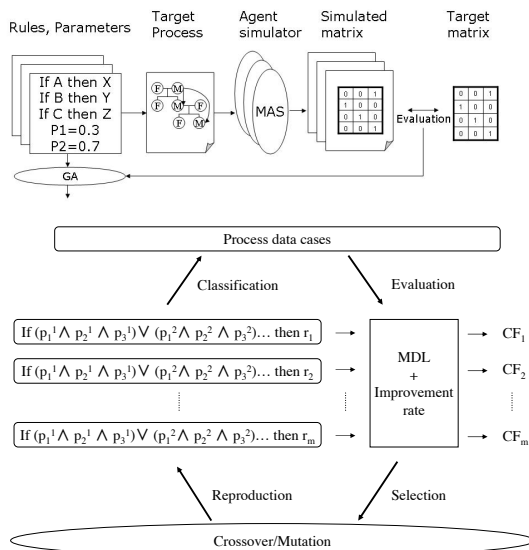
第2に、製造現場での作業記録、操作履歴、プロセス時系列データから、非定常時ワークフローを発見する手法を実現し、協調行動を含めた熟練技能の伝承を支援すること。

第3に、逆シミュレーション技術による、歴史資料に基づく優れた文化・知識・技能伝承構造の解析技術を確立すること。

これらを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

本提案に関連して解決すべき第1の技術課題は、大量のデータを高速に分散処理する逆シミュレーションエンジンを開発することであった。これにより、従来の研究環境では困難であった、実データにより近い数百次元の時系列データから微小なプロセス状態変化を捉え、熟練者が持つプロセス異常の予兆発見技能を解明することを目指した。



本手法によって、時間順序を持つ一連のル

ール抽出が行えるようになり、従来抽出が困難であった手作業を伴う非定常時ワークフローを、熟練者による作業記録と製造時系列データから抽出する技術が確立した。

これらに引き続き、抽出するワークフローを複数オペレータによる協調行動に拡張した。そのために、時系列データの異常予兆検出エンジンの開発を行った。

4. 研究成果

高機能化学材料など多品種少量で高品質な化学製品の製造には、高度な自動制御システムに加えて、熟練オペレータによるプロセス状態の確認と必要に応じた手動操作が欠かせない。このように熟練者の判断、協調作業を、大量のプロセス情報と現場帳票から効率的に抽出し、継承することが求められていた。

・モデル構築の手順

本研究では、このような複雑に見えるプラント操作時系列データから、熟練者の操作情報を取り出すことを目的とした。プロセスデータ解析のためのモデル構築のステップを以下に示す。

1) プロセスデータ収集

プロセスデータを定周期で収集し、プロセスデータベースに時系列データとして格納する。

2) データの正規化

収集したプロセスデータのスケールはそれぞれ異なるため、0.0~1.0 に正規化する。

3) 相互相関分析

正規化された二つのプロセスデータを選択し、時間を徐々にシフトして最大の相関を示す時間差を探索する。

4) プロセス応答モデル

シフト時間と相関係数から、プロセスデータ間の関係を応答モデルとして記述する。

5) 制御ルールの発見

プロセス応答モデルから、注目するプロセスデータをクラスとして、MDL 学習分類システムを実行し、制御ルールを見出す。

6) ワークフローの発見

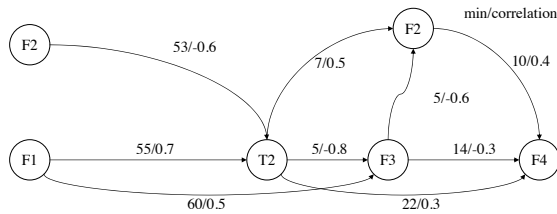
運転操作イベントとプロセスデータに対して、タブー学習分類システムを実行し、それぞれの発生時刻が異なるシーケンシャルな操作に対応したワークフローを見出す。

7) 評価

発見されたワークフローに基づいて運転支

援システムを修正し、プラント運転を実行しその評価を行う。

データ間の関係に着目し正規化された時系列データの相互相関係数を、ここで示した手順に従ってモデルを構築して求めたプロセス応答モデルは次のようになった。



このようにして多数の時系列タグデータから相関の高いタグを抽出し、プロセス応答モデルを構築することができる。このプロセス応答モデル図にあるように、T2のデータに対して、F2は53分前に-0.6の相関係数で変化をしており、またF1は55分前に0.5の相関係数で変化をしていることが明らかとなっている。これは、逆に見れば、約50分前にT2の変化を予測できることを示している。プロセスタグ間の時系列相関と時間シフトの情報により、プロセス応答の構造を簡潔に示すことができている。

・制御ルールの発見的探索

ピッツアアプローチを変形して DNF (disjunctive normal form) の条件部と、ひとつの結論部を持つ学習分類子システム LCS(Learning Classifier System)を採用した。ランダムサンプリングによって事象の分布を推定する学習方法を用い、対象事象の多さに対応した。実際の操業では最終品質を安定させる制御ポイントの発見が重要となる。プロセス応答モデルで得られた相関の高いタグのデータを対象に MDL 基準に基づく学習分類子システムによる制御ルールの探索を行なった。得られた分類子の例を以下に示す。

(75% <F2) and (75% <F3) then 50% <T2
このときの MDL 値は 32.9 bit となっていた。

・既存手法との比較

時系列データの分析と時系列モデルは統計学分野で発展してきた。経済指標の予測を行ったモデルも多く報告されており、大量のデータから意味のある情報を見出す方法として多くのデータマイニング手法が研究されている。また、学習分類子のルールや遺伝的プログラミングの枝の膨張を押さえながら、一般性を失わないための手法として、MDL 基準を適用した研究が行われている。しかしこれらは、ルールの持つ情報量や分類階層の深さなどを対象とするものであり、本提

案のようなモデルそのものの記述長と分類されたデータ長の両者の変化を同時に考慮するのではなく、また具体的な操作をオペレータへ示すような制御ルールを発見することはできない。

決定木などでは大規模な枝が発生してしまうことが多い。標準的な C4.5 を用いて、実際のプロセスデータを分析した結果、枝刈り前でノード数が 87、枝刈りを行ってもノード数が 43 となり、大規模なツリーが出現してしまう。プロセスモデルの場合、より確実な制御応答性能を求められ、簡潔なモデルで、確実な情報を導出することが必要となる。

C4.5 決定木と MDL 基準による学習分類子システムとの比較を行い、MDL、分類エラー率とも枝刈り前後の C4.5 決定木よりも MDL が低くなっていることが確認された。

・熟練者からのワークフローの抽出

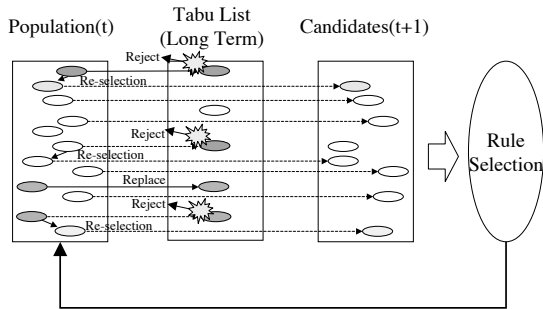
プラントの熟練者運転員は自動制御操作以外に、自らの判断により手動で設定値や操作量を随時変更しているのが一般的である。しかし、従来これらの操作は明示的に記録されているわけではなく、一般化され形式化された知識となっていなかった。そこで、本章ではこれらの熟練者の操作を発見するために、これまでの手法に加えて、操作ワークフローを生成する。

はじめに、バルブの開閉やスイッチのオンオフのようなイベントデータと、プロセス制御のための温度や圧力、流量などの設定値を操作したタイムスタンプ付データを収集する。これらは、プロセス制御コンピュータからプロセスデータベースに記録される。次に、原料組成が変化する前後のデータから、先の手法を用いて制御ルールを探索する。発見されたこれらの制御ルールは、その時系列データに時間シフト以前のタイムスタンプが付いていることから、操作時間順に並べ替えることができる。ここで用いる MDL 基準の学習分類子システムは、時間シフト後のデータに対しては、同一時刻に操作を行ったようになるため、複数のルールを同時に発見する必要がある。ところが、学習分類子システムは、あるひとつのプロセス状態に至るための制御操作に対し、最適化の結果としてもっとも適応度の高い制御ルールを発見することになる。これでは、もともとは異なる時刻に操作したはずのルールを発見することができない。例えば、次のようなひとつのルールとなってしまう。

$0.5 < F2 \leq 0.75$ then $T2 \leq 0.25$

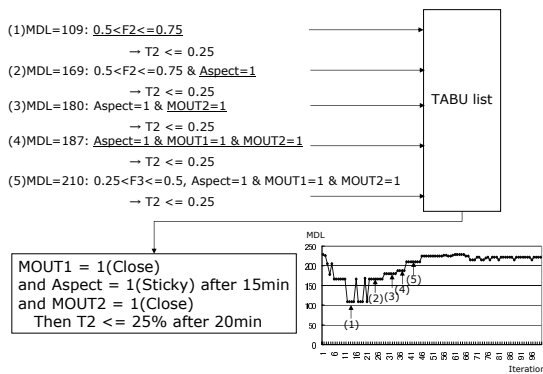
これは、MDL 原理自身が冗長なルールを除外するように働くことによる。オペレータが実行した複数の操作や、異なるオペレータによる異なる操作が、この方法では発見できない。そこで、タブー探索の手法

を取り入れることで、この問題を解決した。タブー探索とは、一度探索した解候補を一定期間探索制限することで、局所的な解に留まることなく、より多様な解を見つけることを促す手法である。下図にタブー探索を用いたタブー学習分類子の概要を示す。

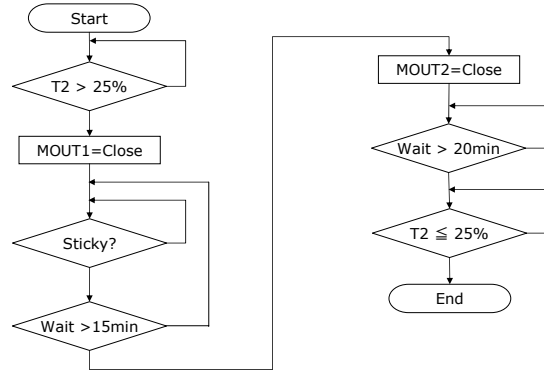


図にあるように、タブーリストは親分類子集合と候補集合の間に位置し、タブーリストの格納されている遺伝子に近似した親分類子は、候補集合への通過を拒否され、他の分類子が選択される。一方、タブーリストにある分類子と近似していても、より適応度の高い分類子は、以前の分類子と入れ替えに、タブーリストに格納される。

下図は、タブー学習分類子システムを実行した結果である。最初に発見したルールのMDLは109であり、これをタブーリストに格納した後、次に発見されたルールのMDLは169であった。最終的に、5件のルールを発見したところで、MDLが低下しなくなったため、ここで探索を停止した。



これらのルールを時系列順に並び替え再構成したワークフローを下図に示す。このワークフローは小規模ではあるが、手動操作記録とプロセスデータからオペレータの操作を抽出したものとなっている。これらの操作は、普段は意識されていないものであり、熟練運転員の暗黙知の発見であると考えられる。本手法の採用により、これらの知識のように、ベテランの運転員から未熟練運転員へ熟練技能を伝承していくことが可能となる。



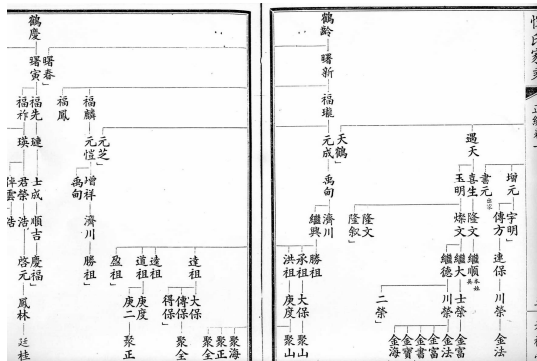
このようにプラントなどの制御ルールにおいては、オペレータが対象プロセスの状態を早急に把握し、制御を行うために、簡潔で明快なルールの発見が必要となる。この手法を、複数の作業者が同時に操作を行う時系列データに適用するために、タブー探索機能を持ったMDL原理に基づく学習分類子システムを開発した。

・歴史資料に基づく、文化・技術の伝承

本手法を応用し、社会学・歴史学の分野で文化資本（知識・芸術・技能・規律など）と呼ばれる継承構造の解析を行った。これは、家系図などの歴史資料を用いるものであり、知能工学手法による文化・社会資本研究の基盤技術を確立することができた。

Bourdieu が文化資本と教育に関して再生産の構造を提起してから30数年が経つ。その中で彼は、家庭における規範システム（ハビトゥス）が文化資本を再生産し、社会階層の選別に決定的な役割を持つことを示した。

しかし現代社会において、グローバル化が進行し、社会制度や地域社会が変化し、それぞれの地域で伝統的家族が変化を余儀なくされている。このような中で、社会システムの基本要素である家族の機能を知ることは、ますます重要となってきている。下図に、今回の研究で使用した家系図データを示す。



・シミュレーション

これらの歴史人口学および社会ネットワークの視点を基礎に、エージェントベースモ

デルを構築し、約 500 年間に渡る中国のひとつの家系における家族システムの分析を行った。

・族譜のエージェントシミュレーション

族譜の世系データと世表データから、シミュレーションで扱える形式のデータを作成する。世系データは、父親と息子の関係を表示しており、これから隣接行列を作成できる。ここで用いた Y 家の族譜には合計 1237 名のデータがあり、親子関係を表す隣接行列は 1237×1237 となり、0、1 で親子関係を表している。同様に、世表データから各人の属性行列を作成する。属性としては、進士、挙人、貢生、生員、監生、捐納、商人、画家、詩文、妻実家と娘婿家の科挙資格などがあり、それぞれ 0、1 でその属性を表している。これら二つの行列から属性付き系図が再構成でき、これを元にシミュレーションを実行する。各自は出生年代別に集約され、コーホート別合格者数として集計される。

エージェントの動作は次のようになる。

・各エージェントは、隣接行列で示された系図に沿って、父親から子、母親から子、祖父から孫、曾祖父から曾孫へと、Face to Face で文化資本を伝達することができる。

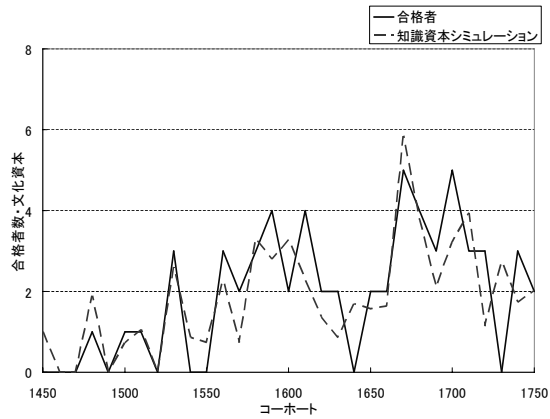
・エージェントは、文化資本として知識文化資本と芸術文化資本の 2 種類を持つことができる。

・子は、生まれもって知識特性と芸術特性という個性を持っている。この特性値は、それぞれの子供にランダムに与えられる。

・子供の特性と他者から伝えられる文化資本を要素として、子供の文化資本度が決定される。ただし、科挙合格に影響するのは知識文化資本のみであり、芸術文化資本は当人の科挙合格率には影響しない。

逆シミュレーション手法は、一般的な順シミュレーション手法と異なり、エージェントや環境が持つ行動ルール、パラメータを明示的に与えることはしない。その代わりに、モデルが説明したいマクロな社会指標（例えば不平等度、中心性、シェアなど）を目的関数として与え、逆問題を解く形式で最適手法を用いてエージェントの行動パラメータを探索する手法である。

逆シミュレーション実験を以下の条件で実施した。トーナメント選択、交叉率 0.8、突然変異率 0.05、モデル個体数 100、世代数 100。逆シミュレーションの結果を下図に示す。実データとシミュレーション結果に対する単回帰モデルによる分析の結果は、t 値:6.04、p 値: 1.41×10^{-6} となり、有意な相関があることが確かめられた。



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 7 件)

- (1) 倉橋節也, “進化計算を用いたプラントデータからの運転技能抽出システム”, ふえらむ, Vol.16, No.3, pp.172-177, 2011 (査読無)
- (2) Setsuya Kurahashi, Masato Ohori, “Analysis of greenhouse gases trading system using conversations among stakeholders”, International Journal of Computer Applications in Technology (IJCAT), Vol. 38, No. 4, pp. 274-282, 2010 (査読有)
- (3) Chao Yang, Setsuya Kurahashi, Keiko Kurahashi, Isao Ono, Takao Terano, “Agent-Based Simulation on Women’s Role in a Family Line on Civil Service Examination in Chinese History”, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 12, no. 25, 2009 (査読有)
- (4) Setsuya Kurahashi, “Real-Valued LCS Using UNDX for Technology Extraction”, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (Lecture Notes in Computer Science), Vol 5178/2008, pp.1026-1033, 2008 (査読有)
- (5) 倉橋節也, “歴史をシミュレーションする 中国における科挙・家族・文化資本の関係”, コンピュータソフトウェア, vol. 25, no. 4, pp. 252-260, 2008 (査読有)
- (6) Setsuya Kurahashi, Takao Terano, “Historical Simulation: A Study of Civil Service Examinations, Family Line, and Cultural Capital in China”, Advances in Complex Systems (ACS), Vol.11 No.2 pp.187-198, 2008 (査読有)

- (7) Setsuya Kurahashi, "Technology Extraction from Time Series Data Reflecting Expert Operator Skills and Knowledge", International Journal of Computer Applications in Technology (IJCAT), Special Issue on: "Computer Applications in Knowledge-Based Systems", Vol. 33, Nos. 2/3, pp.157-163, 2008 (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

- (1) Keiko Mori, Setsuya Kurahashi, "Optimizing of Support Measures for the New Graduate Employment Market using Reinforcement Learning", 3rd World Congress on Social Simulation, SES-07_III-03, 9.8.2010(German)
- (2) Chao Yang, Setsuya Kurahashi, Isao Ono, Takao Terano, "Pattern-Oriented Inverse Simulation for Agent-Based Modeling: An Analysis of Family Strategies", Evolutionary Computation and Multi-Agent Systems and Simulation (GECCO/ECOMASS 2010), pp1801-1808, 7.7.2010(USA)
- (3) Setsuya Kurahashi and Masato Ohori, "An Analysis of GreenHouse Gases Trading System: An agent-based approach", The 6th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2009), No. 58, 9.15.2009(UK)
- (4) Chao Yang, Toru Takahashi, Bin Jiang, Takashi Yamada, Isao Ono, Setsuya Kurahashi, and Takao Terano, "A Grid-Oriented Social Simulation Framework for Large Scale Agent-Based Modeling", The 6th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2009), No. 80, 9.15.2009(UK)
- (5) Yang Chao, Setsuya Kurahashi and Takao Terano "Agent-Based Simulation on Women's Role in a Family Line on Civil Service Examination in Chinese History", the Fifth Conference of the European Social Simulation Association (ESSA2008), No. 54, 9.5.2008(Italy)
- (6) Setsuya Kurahashi, "Understanding history of Civil Service Examinations, Family Line, and Cultural Capital in China", The 5th International Conference of Socionetwork Strategies and Policy Grid Computing 2008 "Social Agent Modeling and Computation for Policy Making", pp.149 -161,

3.17.2008(Japan)

以上査読付き国際会議

- (7) 小畑崇弘, 倉橋節也, "実数値遺伝的アルゴリズムを用いた変数選択手法と株価共変動の分析への応用", 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2009, 2009.12.21(沖縄)
- (8) 森敬子, 倉橋節也, "新規学卒者採用市場における最適支援策シミュレーション", 合同エージェントワークショップ&シンポジウム2009 (JAWS2009), W-2, 2009.10.29(宮城)
- (9) 森敬子, 倉橋節也, "エージェントアプローチによる新規学卒者採用市場の分析", 計測自動制御学会第35回知能システムシンポジウム, W2D-2, 2009.3.18(京都)
- (10) 倉橋節也, 稲垣文達, "タブー学習分類子によるプラント運転熟練者の技能発見手法", 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会, 3B2-3, 2008.11.28(兵庫)
- (11) 小野功, Yang Chao, 岡本正宏, 寺野隆雄, 倉橋節也, "グリッド向けGAフレームワークによる逆シミュレーション手法の高速化", システム制御情報学会研究発表講演会, Vol. 52, pp.233-234, 2008.5.16(京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉橋 節也 (KURAHASHI SETSUYA)
筑波大学・大学院ビジネス科学研究科・准教授
研究者番号：40431663

(2) 研究分担者

津田 和彦 (TSUDA KAZUHIKO)
筑波大学・大学院ビジネス科学研究科・教授
研究者番号：50302378
(~H21)

吉田 健一 (YOSHIDA KENICHI)
筑波大学・大学院ビジネス科学研究科・教授
研究者番号：40344858
(H21)