

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K01692

研究課題名(和文)取引の高速化とHFTのAI化がもたらす証券市場の質的变化の解明

研究課題名(英文)Elucidation of qualitative changes in securities markets caused by accelerating transactions and AI

研究代表者

中島 義裕 (Nakajima, Yoshihiro)

大阪市立大学・大学院経済学研究科・教授

研究者番号：40336798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：証券市場の高速化とアルゴリズム取引の急増及びAI技術の進展が証券市場にもたらす影響を評価するために下記を行った。(1)人工市場を用いたシミュレーション研究により、取引エージェントの組成と、その相互作用がもたらす複雑さに焦点を当てた研究を行い、個々の取引アルゴリズムが伝統的な手法であっても、組み合わせにより生じる複雑さが大きなものであることを示した。(2)深層学習を用いた取引エージェントを開発し、電力市場において高いパフォーマンスを得られることを示した。(3)上記の研究を行うため、人工市場シミュレータU-Martシステムを改良して用いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、証券市場の高速化とアルゴリズム取引の急増及びAI技術の進展が証券市場にもたらす影響を調べるための方法として、エージェント・ベース・シミュレーションの1形態である人工市場研究が有効である事を示すことができた。実際、単純な取引アルゴリズムが複数組み合わせられることで生じる複雑さは、複雑系研究で分類された範疇を超えるものであり、暴落や暴騰の予測可能性などを議論する際には、こうした実験的方法が必要となる。また、また、ディープラーニングを始めとした複雑な内部規則を持つアルゴリズム取引の有効性を評価するためには、様々な環境における行動と結果を吟味する必要がある。

研究成果の概要(英文)：The following three studies were conducted to ready the impact of the acceleration of the securities market, thee increase in algorithm trading, and the development of AI technology on the securities market. (1) Through simulation using artificial markets, we research the complexity arisen from trading by various agents and the complexity brought about by their interactions. We found even if each trading algorithms are simple traditional methods, combination of trading algorithm arise the complexity. (2) We developed a trading agents using deep learning and the agents showed sufficient performance in the artificial electric power market. (3) In order to carry out the above research, the artificial market simulator U-Mart system was improved and used.

研究分野：複雑系経済学

キーワード：人工市場 HFT U-Mart

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初の背景として、(1)東京証券取引所を始めとする世界中の証券取引所の高速化とアルゴリズム取引の急増、(2)AI技術の急速な進展があった。従来からの人間が行う取引にミリ秒単位で反応するアルゴリズム取引が混入し、2010年に10%であったシェアが、2014年には60%を超える規模になった。それに伴い、flash crashと呼ばれる、短時間の間に生じる急落と、そのリカバリーなどが見られるようになった。こうした状況は、取引市場の混乱を予防し、混乱したときの回復を行うには、ミリ秒単位で反応できるアルゴリズムによる対策が必要であることを示唆していた。また、当時はアルゴリズム取引においても、受動的マーケット・メイクや裁定取引など比較的単純な取引が多かったのに対し、ディープラーニングに代表されるAI技術の進展が著しく、これらが証券取引、とりわけアルゴリズム取引に応用された時に、何が生じるのか予想できない状況にあった。

2. 研究の目的

この研究の目的は(1)アルゴリズム取引のシェア拡大により証券市場における時間スケールの多様性が増した事、AI導入によりアルゴリズムの複雑性が増す事によって、市場特性がどのように変化するのかを明らかにすることである。これは、今後一層の高速化とアルゴリズム取引のシェア拡大、アルゴリズムの複雑性の増大が予想される中で、証券市場が社会的役割を果たすために必要な安定性や効率性、健全性などを持つために必要な施策を提案し、実験するための基礎となる研究である。

3. 研究の方法

本研究では、主に人工市場を用いたシミュレーションを中心に、様々なアルゴリズム取引からなる市場が持つ複雑性を示すため、3つの方向から研究を進めた。1つ目は市場の複雑性に関する研究である。人工市場は、取引アルゴリズムに従って取引を行うエージェントの相互作用によって構成される。個々の取引アルゴリズム自体の複雑さよりも、多くの種類のアルゴリズムが参加することにより、市場がいかに複雑になるのか調べた。2つ目はAIエージェントの開発である。マーケット・メーカーは市場を安定化する役割を果たし、他の取引エージェントは、自身の利益を最大化するように取引を行う。それらにAI技術を含めた機械学習を取り入れたエージェントを開発した。3つ目は、こうした研究を行うための人工市場シミュレータの開発である。2000年から20年に渡って開発し、研究や教育のテストベッドとして活用されてきたU-Martシステムをライブラリ化し、様々な人工市場研究を行えるように改良した。

4. 研究成果

市場の複雑さについては、U-Martシステムが2001年から行ってきた取引エージェントの大会で配布している標準エージェントセットを用いた研究を行った。U-Martシステムは外生的に与えられた株価指数を原資産とする先物市場のシミュレータである。研究や教育で利用するための最初のサンプルとして、現物の株価指数データと裁定取引やトレンドフォロー、移動平均、RSIなど代表的なテクニカル分析の手法からなる取引エージェントをパッケージに含めていた。取引エージェントの比率が適正な場合、現実の先物市場と同じように変動する。そのように組成比率をチューニングしたものを標準エージェントと呼ぶ。この複雑性を考察するため、ウルフラムがFully Random Interactive Cellular Automata (FRICA)を用いて行った複雑性についての方法を応用した。エレメンタリーセルラーオートマタ(ECA)のルール110が万能チューリングマシンと同値でありクラス4に分類される事は良く知られている。ウルフラムは、ルール110にランダムな挙動を示すクラス3のルールを混入させる事でクラス4が如何に生じるかを示した。ECAやFRICAにおける複雑さに関する研究を株価時系列分析や人工市場における取引エージェントの売買行動分析に応用するため、0や1の連続出現に関する頻度分布(Length Distribution: LD)を用いた。クラス1では0または1が計測時間Tの長さだけ継続する。クラス2では周期パターンに応じ、特定の長さの系列のみが出現する。クラス3では0や1が連続して出現する確率は二項分布に従う。クラス4においては、二項分布よりも裾野が広い分布が得られる。FRICAの各事例について、LDを調べた所、同じクラス4であっても、LDの分布に違いがあること、特に、LDを両対数表示した時にベキ則が見られ、その傾きが異なることがわかった。標準エージェントセットからなる時系列データにおいても、同じ枠組みで検証し、エージェントの組成比率が一定であれば、参加エージェントの絶対数を増やしても時系列の性質に違いがないことを示

した。

AI の技術を応用した取引エージェント開発として、深層強化学習をベースにした提案を行なった。その一つは、深層強化学習の拡張である。Hassel らは、深層強化学習の研究分野で提案されている6つの拡張を同時に実施する Rainbow を提案している。これは(1)次のとるべき状態の選択とその評価が同じQ値によることによる過大評価を是正するため、Q値の計算を二回実施する Double DQN、(2) 予測誤差の大きな経験を優先的に選択して学習する Prioritized Experience Replay、(3) 行動の価値と状態の価値を別々に学習する Dueling Network Architecture、(4)n-Stepの報酬を用いた教師データを用いる Multi-step Returns、(5)報酬の期待値ではなく、報酬分布を学習する Distributional Reinforcement Learning、(6) ネットワークの重みに直接ノイズを与える Noisy Nets である。これらを応用した取引エージェントを作成した。株式市場は、上記のように数種類の取引エージェントが混入するだけで極めて複雑な様相を示す。一方で電力は、取引が実需をベースにしていること、在庫が持てない商品であることから、単一の取引アルゴリズムの評価をするには電力市場の方がふさわしい。上記の深層学習型エージェントは、遺伝的アルゴリズム型エージェントに比べて適切な売買を行っていることを示した。

最後に、人工市場シミュレータの開発として、U-Mart システムのライブラリ化を行った。これにより、上記のテクニカル分析に基づく複数の取引アルゴリズムの相互作用をシミュレーションする他、電力市場や、従来型の理論研究を接続するため、コブダグラス型需要関数を離散型の人工市場シミュレータに移植するシステムを開発できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Aruka Yuji, Nakajima Yoshihiro, Mori Naoki	4. 巻 1009
2. 論文標題 The Minimum Heterogeneous Agent Configuration to Realize the Future Price Time Series Similar to Any Given Spot Price Time Series in the AI Market Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Intelligent Systems and Computing	6. 最初と最後の頁 85 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-38227-8_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinohara Shuji, Manome Nobuhito, Suzuki Kouta, Chung Ung-il, Takahashi Tatsuji, Gunji Pegio-Yukio, Nakajima Yoshihiro, Mitsuyoshi Shunji	4. 巻 190
2. 論文標題 Extended Bayesian inference incorporating symmetry bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biosystems	6. 最初と最後の頁 104104 ~ 104104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystems.2020.104104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinohara Shuji, Manome Nobuhito, Suzuki Kouta, Chung Ung-il, Takahashi Tatsuji, Okamoto Hiroshi, Gunji Yukio Pegio, Nakajima Yoshihiro, Mitsuyoshi Shunji	4. 巻 15
2. 論文標題 A new method of Bayesian causal inference in non-stationary environments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0233559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aruka Yuji, Nakajima Yoshihiro, Mori Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 The Minimum Heterogeneous Agent Configuration to Realize the Future Price Time Series Similar to Any Given Spot Price Time Series in the AI Market Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Decision Economics: Complexity of Decisions and Decisions for Complexity	6. 最初と最後の頁 85 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-38227-8_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinohara Shuji, Manome Nobuhito, Suzuki Kouta, Chung Ung-il, Takahashi Tatsuji, Gunji Pegio-Yukio, Nakajima Yoshihiro, Mitsuyoshi Shunji	4. 巻 190
2. 論文標題 Extended Bayesian inference incorporating symmetry bias	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biosystems	6. 最初と最後の頁 104104 ~ 104104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystems.2020.104104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aruka Yuji, Nakajima Yoshihiro, Mori Naoki	4. 巻 2018 November
2. 論文標題 An examination of market mechanism with redundancies motivated by Turing's rule selection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Evolutionary and Institutional Economics Review	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40844-018-0115-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yuji Aruka, Yoshihiro Nakajima, Naoki Mori
2. 発表標題 The Minimum Heterogeneous Agent Configuration to Realize the Future Price Time Series Similar to Any Given Spot Price Time Series in the AI Market Experiment
3. 学会等名 The First Conference on Zero/Minimal Intelligence Agents (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有賀裕二、中島義裕、森直樹
2. 発表標題 異質的エージェントの最小構成による価格時系列の再現とインタラクティブセルラーオートマン
3. 学会等名 第25回進化経済学会 静岡大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青野義樹, 小川恭子, 森 直樹, 岡田 真
2. 発表標題 U-Mart システムに基づく電力取引シミュレータにおける実市場再現手法の提案
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川 恭子, 森 直樹
2. 発表標題 進化型機械学習に基づく問題解決手法の提案
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門情報システム技術委員会第78回情報システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 大典, 森 直樹, 松本 啓之亮, 渡邊 順一朗
2. 発表標題 深層強化学習を用いたデイトレード戦略獲得手法の検討
3. 学会等名 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 洋志, 大嶺 貴晃, 森 直樹, 松本 啓之亮, 平野 秀明, 北村 聖一, 森 一之
2. 発表標題 U-Martシステムを基盤としたエネルギー取引シミュレータの提案
3. 学会等名 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 大典, 森 直樹
2. 発表標題 深層強化学習 Rainbow を用いたデイトレード戦略獲得手法の獲得
3. 学会等名 電気学会 システム産業計測制御合同研究会「確率的最適化の動向と産業応用ベンチマーク問題」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakajima, Isao Ono, Naoki Mori
2. 発表標題 Systemic Risk in Order Driven Market
3. 学会等名 International Workshop on Artificial Market 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Isao Ono, Naoki Mori and Yoshihiro Nakajima
2. 発表標題 U-Mart Toolkit: A General-Purpose Artificial Market Development Toolkit Library
3. 学会等名 International Workshop on Artificial Market 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshihiro Nakajima, Isao Ono, Naoki Mori, Hiroshi Sato, Yuji Aruka
2. 発表標題 Difference Between Demand and Order based Models in Artificial Stock Market
3. 学会等名 The 56th PES Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 有賀 裕二	4. 発行年 2020年
2. 出版社 中央大学出版部	5. 総ページ数 514
3. 書名 価値創造と分散型市場設計 第三章 分担執筆	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	森 直樹 (Mori Naoki) (90295717)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (24403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------