

株取引シミュレータの開発と自動取引戦略の開発

Development of stock exchange simulator and automated trading strategy

黒田直樹*¹ 横尾真*¹ 岩崎敦*¹
Naoki Kuroda Makoto Yokoo Atsushi Iwasaki

*¹九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of ISEE, Kyushu University

In current financial market, it is crucial to develop new trading strategies and support tools by utilizing information technologies. When developing such strategies and tools, having some trading simulators is very important to perform risk-free experiments and to shorten the development/verification time.

In this research, we develop a simulator called Stock Exchange Simulator (SES). In SES, an artificial stock market is created. The market integrates orders from real market and virtual trading agents in real time. While the results obtained in the SES is close to those in the real market, virtual trading agents in the SES interact with each other. We can use the SES to evaluate various trading strategies, as well as the interaction between multiple trading strategies. To demonstrate the capability of the SES, we have successfully implemented two automated trading agents and observed the interaction among them.

1. はじめに

金融市場の電子化やインターネットの普及によるリアルタイムな市場データの送受信化, 計算機の性能向上などを背景として, 株式市場など金融市場の現場では情報技術を駆使した新しい投資戦略や投資補助ツールの需要が急増している. また国内では, 一般より自動取引戦略を募集し, その中で選定されたいくつかの戦略を実運用に用いるカブロボプロジェクト [カブロボ 07] が注目を集めている.

実際の市場取引により投資戦略の開発や検証を行うことは非常に大きなリスクを伴う上, 投資戦略の開発や検証に長い期間が必要となるため, 投資戦略のシミュレーションが可能なシミュレータが有用である. またそのシミュレータも実際の投資結果との乖離が小さく, 多様な投資戦略が適用可能で, シミュレータに参加する仮想の投資家であるエージェント間に相互作用が発生するような仕様にすることが望ましい. このような性質を満たすシミュレータとして, 本研究では実市場の注文をリアルタイムに取り込み, エージェント間の注文を合わせて稼働する株取引シミュレータ Stock Exchange Simulator (SES) を開発した. SES では東証から公開される全ての種類のデータと同じ種類のデータをエージェントにリアルタイムに提供することが可能なため, デイトレーディングのような秒単位での投資戦略を含め, 多様な戦略のシミュレーションが可能である. また, エージェントの注文によって仮想市場に変動が起るため, エージェント間に相互作用が発生する一種のマルチエージェントシステムとなっており, 投資戦略の詳細で多角的な検証や改良に寄与できる.

さらに, 本研究では 2 種類の自動取引エージェントを実装し, SES 上でシミュレーション実験を行った. その結果, 2 種類のエージェントを同時にシミュレートした場合と, 個別にシミュレートした場合で結果に差が生じることが確認できた.

本論文の構成を以下に示す. まず 2 章では株式市場の構造について説明し, 3 章で Stock Exchange Simulator について解説する. 4 章で今回行った実験について述べ, 最後に 5 章で結論と今後の研究について述べる.

銘柄名:	トヨタ自動車	
現在値:	7,720 ↓	
出来高:	173,000	
売数量	価格	買数量
21,600	7,770	
21,700	7,760	
43,700	7,750	
41,700	7,740	
12,500	7,730	
	7,720	10,200
	7,710	24,600
	7,700	42,600
	7,690	39,900
	7,680	50,000

図 1: 時刻 t におけるトヨタ自動車株の実市場状況

2. 株式市場の構造

現在ほとんどの株式市場は電子化されており, 東京証券取引所 (東証) も既に完全に電子化されている. 全ての注文は証券会社を通して東証のコンピュータへ送られ, そのコンピュータ内で注文価格が交わった買い注文と売り注文が取引成立 (約定) する.

東証では, 現在の株価や, 出来高 (約定量) などのデータをリアルタイムで公開している. 特に, 集積された未約定の注文情報も一部公開されており, この情報は一般に複数気配情報とよばれている. 複数気配情報は売り, 買い共に優先順位の高い価格で 5 本分に区切られており, その価格の全ての未約定の注文量の足し合わせから成っている. 複数気配情報の例として, ある時刻 t のトヨタ自動車の複数気配情報を図 1 に示す.

今図 1 の状態にある時, 20000 株の成行買い注文が市場に投入されたとすると, 7730 円で 12500 株が約定し, 7740 円で 7500 株が約定することになる. この時 7740 円の売り注文は注文が早かったものから優先に約定する. ところが, 個別注文がどの位置にあるかという情報は東証のコンピュータの内部でのみ保持されている非公開情報公開である.

連絡先: 黒田直樹, 九州大学大学院システム情報科学府, 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地, (092)802-3576, kuroda@agent.is.kyushu-u.ac.jp

3. Stock Exchange Simulator (SES)

本章では Stock Exchange Simulator (SES) について説明する。実市場注文とエージェントの注文を合わせて稼動するシミュレータとして、Penn-Lehman Exchange Simulator (PXS) [Kearns 03] が提案されている。PXS は NASDAQ 上場銘柄を NASDAQ 市場外で独自に取り扱う私設取引所の一つである Island 社の市場から実市場注文を抽出して稼動するシミュレータである。Island 社の市場では、売り、買いともに優先順位の高い 15 個の個別注文が公開されており、PXS はこの注文とエージェントの注文を合わせて仮想市場を形成する。一方、SES は東証が公開する複数気配情報などから個別銘柄に集まる実市場注文を抽出し、エージェントの注文と合わせて仮想市場を形成する。SES は東証など株式市場が公開するデータとしてより一般的な情報から実市場注文を抽出するため、様々な市場に対応でき、PXS に対してより汎用性を持つと考えられる。また PXS では、Island 社の市場が公開する個別注文の個数が僅か 15 個に留まるため、仮想市場と実市場が乖離していくにつれ、シミュレーションの精度が低下しやすい。一方 SES は、東証が公開する 5 本分の複数気配情報は一般に 15 個の個別注文よりもはるかに多くの実市場注文を含むので、シミュレーションの精度も高い。ただし SES では PXS と違い、実市場の個別注文を抽出できないので、注文の優先順位を付けるための仮定を導入する必要がある。

3.1 実市場から新しい注文データの抽出

SES は、東証の公開情報から実市場の新規注文データを抽出する。今、実市場状況が時刻 t の図 1 の状態から時刻 $t+1$ になり、図 2 へと更新されたとする。この時、まず現在値、出来高の変化から新約定注文が抽出できる。

$$\text{新約定注文 (価格, 数量)} = (\text{現在値}, \text{出来高} - \text{前出来高})$$

さらに、新約定注文と複数気配情報の変化から新注文を抽出できる。

$$\begin{aligned} \text{新注文 (種類', 価格', 数量')} = & \\ & (\text{種類}', \text{価格}', \text{新約定注文 (価格') の数量} + \\ & \text{複数気配情報 (時刻 } t + 1, \text{種類}', \text{価格') の数量} - \\ & \text{複数気配情報 (時刻 } t, \text{種類}', \text{価格') の数量}) \end{aligned}$$

また同一の種類、価格の複数気配情報が新複数気配情報にしか存在しない場合は、“新出”フラグを立て、前複数気配情報にしか存在しない場合は、“消失”フラグを立てる。これは後述のエージェント注文に付される“ランク”に影響を及ぼす。以上より、この時抽出される新注文データは以下ようになる。新注文の数量がマイナスになる場合は、注文の取り下げがあったことを意味する。

- 新注文 (買 ,7730 ,20000 ※)
- 新注文 (買 ,7680 ,- 50000 , 消失)
- 新注文 (売 ,7730 ,200 ※)
- 新注文 (売 ,7750 ,- 1000 ※)
- 新注文 (売 ,7780 ,17500 , 新出)

銘柄名:	トヨタ自動車	
現在値:	7,730	↑
出来高:	173,000	
売数量	価格	買数量
17,500	7,780	
21,600	7,770	
21,700	7,760	
42,700	7,750	
41,700	7,740	
	7,730	7,300
	7,720	10,200
	7,710	24,600
	7,700	42,600
	7,690	39,900

図 2: 時刻 $t+1$ のトヨタ自動車株の実市場状況

注文	価格	数量	ランク (前)	消失量
エージェント注文 1	7730	20000	12500(0)	0
エージェント注文 2	7680	2000	40000(0)	0

表 1: 時刻 t の時のエージェント注文の状態

3.2 ランク

前章でも述べたように、各注文には優先順位があり、同じ価格の注文であっても、市場に投入された順序が早い注文の優先順位が高い。SES では、エージェント注文の優先順位をはっきりさせるために、同じ価格のエージェント注文を到着順のリスト構造で保持し、さらに各エージェント注文に、その注文より優先順位の高い実市場注文の量を表すランクを付す。ランクは、実市場注文の約定や取り下げによって単調減少していき、ランクが 0 となって以降にエージェント注文は約定できる。

ところが実市場注文の取り下げの場合には、その注文がエージェント注文より早く出されていた (優先度が高い) のかどうか分からない。そこで SES では、実市場注文の取り下げの場合には、“取り下げ注文量 * 優先順位の高い注文の割合”だけランクの値を減少させる。

今時刻 t の SES の市場情報が図 3 であり、また時刻 t には、二つのエージェント注文が存在しており、それぞれの状態は表 1 であるとする。この時、前節の新注文が SES 市場に投入され、SES 内で約定処理等が行われ時刻 $t+1$ に図 4 の状態になった時、各エージェント注文の状態は表 2 になる。

またこの時エージェント注文 2 は、実市場の 7680 円の買い注文 50000 株が“消失”したこと及び、消失前の前ランク 40000 を記憶しておく。もし時刻 $t+n$ ($n \geq 2$) に、エージェント注文 2 が全て約定する前に、7680 円の買い注文が消失量より少ない数量 45000 で“新出”したとすると、エージェント注文 2 のランクは、 $\text{ランク} = \text{前ランク} - (\text{消失量} - \text{新出量}) * \text{前ランク} / \text{消失量} = 40000 - (50000 - 45000) * 40000 / 50000 = 40000 - 4000 = 36000$ に設定される。また新出量が消失量より多かった場合には、 $\text{ランク} = \text{前ランク}$ に設定する。

3.3 エージェントへの公開情報

SES は、エージェントの問い合わせに応じて、公開情報をエージェントに提供する。SES が公開する情報は、現在値や出来高、売り、買い 5 本分の複数気配情報などの市場情報や、エージェントの出した注文の約定情報など、東証が公開する情報と同種の情報である。エージェントは、これらの公開情報を入力しながら、投資行動を決定することができる。

注文	価格	数量	ランク (前)	消失量
エージェント注文 1	7730	12500	0(0)	0
エージェント注文 2	7680	2000	0(40000)	50000

表 2: 時刻 $t + 1$ の時のエージェント注文の状態

SES市場
 銘柄名: トヨタ自動車
 現在値: 7,720 ↓
 出来高: 173,000

売数量	価格	買数量
21,600	7,770	
21,700	7,760	
43,700	7,750	
41,700	7,740	
32,500	7,730	
	7,720	10,200
	7,710	24,600
	7,700	42,600
	7,690	39,900
	7,680	52,000

図 3: 時刻 t のトヨタ自動車株の SES 市場の状況

3.4 ライブモードとヒストリカルモード

SES では、実市場が開いている時間にオンラインに稼働させるライブモードと、あらかじめ実市場の一日のデータを全て収集しておき、オフラインに稼働させるヒストリカルモードがある。実際にシミュレーション実験などに用いるのはヒストリカルモードである。

4. 実験

本章では、2種の自動取引エージェント Pair Trading Agent と Following Nikkei Futures Agent を実装し、TOPIX Core30 銘柄を対象として、SES 上で行ったシミュレーション実験について説明する。TOPIX Core30 銘柄とは東証が時価総額、流動性の特に高い 30 銘柄として選定したもので、現在の TOPIX Core30 銘柄については [東京証券取引所 07b] を参照のこと。

4.1 Pair Trading Agent

Pair Trading Agent (PTA) は PXS をプラットフォームとして、開催された自動取引戦略コンテストで良好な結果を収めた自動取引戦略 Market Making Strategy [Feng 04] を基に、SES 上で動作するように変更を加えた戦略を実行するエージェントである。PTA は、市場が開いている間、 M 分に 1 回の割合で、同じ銘柄の株に対して売りと買いの注文を両方出す。この際、売りと買いの注文も N 番目の位置にある売り気配と買い気配の価格で注文を出す。例えば、今時刻 t でトヨタ自動車の注文を出すとすると、 $N = 4$ の場合、図 3 より、買い注文の指値は 7690 円、売り注文の指値は 7760 円となる。PTA は、売りと買い両方の注文のペアが約定した場合、その差額が利益となる戦略である。例えば上記の両注文が約定したとすると、 $7760 - 7690 = 70$ 円が利益となる。また注文数量は、銘柄ごとの収益の影響を平均化するために、TOPIX Core30 銘柄の中で単位株購入に要する金額が最大となる金額を目安として、その金額以上となる最小の購入株数に設定するようにした。PTA のフローチャートを図 5 に示す。尚、実験では、 N と M の値に数種の値を試して最も結果の良かった $N = 5, M = 20$ を用いた。

SES市場
 銘柄名: トヨタ自動車
 現在値: 7,730 ↑
 出来高: 193,000

売数量	価格	買数量
21,600	7,770	
21,700	7,760	
43,700	7,750	
41,700	7,740	
12,700	7,730	
	7,720	10,200
	7,710	24,600
	7,700	42,600
	7,690	39,900
	7,680	2,000

図 4: 時刻 $t + 1$ のトヨタ自動車株の SES 市場の状況

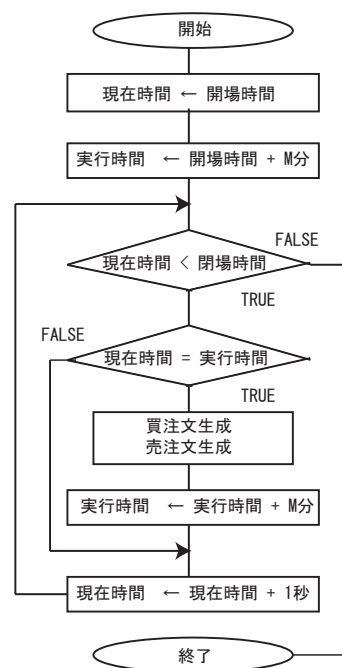


図 5: PTA の戦略フローチャート

4.2 Following Nikkei Futures Agent

個別株に対して先行した値動きを考えると考えられる日経平均先物に着目し、日経平均先物と値動きが乖離している銘柄を乖離が縮小する方向に売買する戦略を実行する Following Nikkei Futures Agent (FNFA) を開発した。FNFA は、売買後に乖離が縮小していく過程で差益を出すことを狙いとしている。日経平均先物と個別株の乖離度を以下の式で求める。

$$\text{乖離度} = (\text{現在値} / \text{始値}) - (\text{先物現在値} / \text{先物始値})$$

乖離度に関して買閾値と売閾値を設定し、乖離度が買閾値を下回った場合に買い注文が発生し、売閾値を上回った場合に売り注文が発生する。注文価格は現在値で、注文数量は前節と同様の手法で銘柄ごとの収益の影響を平均化する。注文が発生すると、次の両閾値はその時の乖離度を基準として新たに設定する。また閾値は、銘柄ごとの投資機会を平均化するために、一様な閾値では無く、その銘柄の株価と刻み値によって決定する。刻み値とは、何円単位で複数気配が構成されるかという値

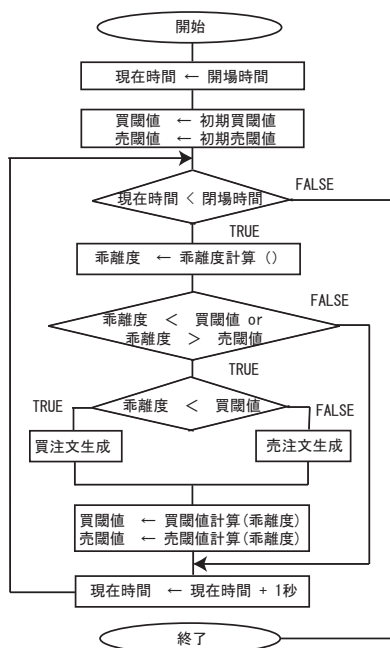


図 6: FNFA の戦略フローチャート

戦略	平均収益	標準偏差	シャープレシオ
PTA	139147.0	12988461	0.010713
FNFA	27706.7	1497560	0.018501
Core30	-0.4211	49.5	-0.008505

表 3: 自動取引戦略を個別にシミュレートした時の 3 戦略の結果

幅のことであり、1 円から 1999 円以下の株価の刻み値は 1 円、2000 円以上 2999 円以下の株価の刻み値は 5 円などと設定されている。FNFA のフローチャートを図 6 に示す。

4.3 評価方法

投資戦略の評価方法として、取引による損益額のみを比較する方法もあるが、これでは、株の売買に投下した資金量に左右される上、ある一日の結果だけで大きく結果が変動してしまう。そこで、本論文では投資戦略の評価方法としてシャープレシオを採用した。シャープレシオは“一日の平均収益 / 一日の平均収益の標準偏差”によって求められ、数値が大きい程、安定して大きな収益を得られた戦略となる。なお本実験では、株の売買時にかかる手数料等については勘案しておらず、市場閉場後に保持している株については終値で評価した。

4.4 実験結果

実験日は 3 月 14, 15, 16, 20, 22, 23, 27, 28, 29 日および、4 月 2, 3, 4, 5, 6, 10 日の 15 日である。また、2 種の自動取引エージェントの結果と、TOPIX Core30 のインデックス値 [東京証券取引所 07a] の前日比の値を一日の収益とする Core30 戦略の 3 つの戦略を比較した。2 種の自動取引戦略を個別にシミュレートした結果を表 3 に示し、同時にシミュレートした結果を表 4 に示す。

4.5 考察

Core30 戦略が赤字となる中、2 種の自動取引戦略は両者とも黒字を記録した。また、2 種の自動取引戦略を個別にシミュ

戦略	平均収益	標準偏差	シャープレシオ
PTA	134780.0	13009972	0.010360
FNFA	12373.3	1498093	0.008259
Core30	-0.4211	49.5	-0.008505

表 4: 自動取引戦略を同時にシミュレートした時の 3 戦略の結果

レートした場合は FNFA が最も良い結果を残した一方、同時にシミュレートした場合は PTA が最も良い結果を残し、結果が異なった。このことから、エージェントの投資行動が他のエージェントの投資行動に影響を与え、結果に差が出ることが確認できた。また、PTA は相場が一方向に動く場合に大きな損失を出し、FNFA は株価が騰がる銘柄と下がる銘柄とがはっきり 2 分するような場合に大きな損失を出したが、両者ともそれ以外の場合には安定した利益を出した。

5. 結論と今後の課題

本研究では、実市場の注文をリアルタイムに取り込み、取引エージェントの注文と合わせて仮想市場を形成し稼働する SES を開発した。SES は、多様な投資戦略のシミュレーションが可能であり、実際の投資結果との乖離が小さく、取引エージェントの行動が仮想市場を介して影響し合う一種のマルチエージェントシステムとなっており、投資戦略の詳細で多角的な検証や改良に有用である。

また、本論文では 2 種の簡単な自動取引エージェントを実装し、SES 上でシミュレーション実験を行い、その結果 2 種のエージェントを同時にシミュレートした場合と個別にシミュレートした場合で結果に違いが生じることを確認できた。

今後の研究では、長期取引戦略のシミュレーション、ファイナンス理論や学習 / 最適化等の技術を用いた新しい投資戦略の開発、複数の投資エージェントの相互影響による投資行動の変化の分析などについて研究していきたい。

参考文献

[Feng 04] Feng, Y., Yu, R., and Stone, P.: Two Stock-Trading Agents: Market Making and Technical Analysis, in Faratin, P., Parkes, D. C., Rodriguez-Aguilar, J. A., and Walsh, W. E. eds., *Agent Mediated Electronic Commerce V: Designing Mechanisms and Systems*, Vol. 3048 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pp. 18–36, Springer Verlag (2004)

[Kearns 03] Kearns, M. and Ortiz, L.: The Penn-Lehman automated trading project (2003)

[カプロボ 07] カプロボ 運営事務局: カプロボホームページ, <http://www.kaburobo.jp/> (2007)

[東京証券取引所 07a] 東京証券取引所 株式会社: TOPIX Core30 指数, <http://www.tse.or.jp/market/STATISTICS/08.html> (2007)

[東京証券取引所 07b] 東京証券取引所 株式会社: TOPIX ニューインデックスシリーズ及び東証規模別株価指数の構成銘柄, http://www.tse.or.jp/topix/core30/core30_200701.pdf (2007)