

エージェントベースモデルにおけるオンライン推定法の評価

相澤 景 総合研究大学院大学 統計科学専攻 博士課程（3年次編入学）5年

1. はじめに

- エージェントベースモデル(ABM)は個体や環境間で相互作用する多数のオブジェクトからなる動的モデルであり、経済学などの多様な領域で使われつつある。
- ABMではパラメータ推定のステップがしばしば欠けており、方法論的課題が指摘されている。近年、SMD(Simulated Minimum Distance)法やベイズ推定法による研究が進められている。[1]
- 近年開発されるような大規模なABMは、計算負荷が大きいためオンラインでのパラメータ推定法の適用が期待されている。[2]
- 本研究では、一般的なABMのパラメータに対するオンライン推定法を定式化し、適用結果を評価する。

2. 推定手法

- ABMを状態空間モデル表現として定式化
 - エージェントは環境上で動作（行動・相互作用）を行う $\mathbf{X}_t^{Agent} = \{x_t^{Agent,1}, \dots, x_t^{Agent,N}\}$
 - 環境はエージェントの動作によって状態が更新される $\mathbf{X}_t^{Env} = \{x_t^{Env,1}, \dots, x_t^{Env,M}\}$
 - 環境の状態は集約されて系列データの履歴が記録される $\mathbf{X}_t^{History} = \{x_t^{History}, \dots, x_{t-K}^{History}\}$
 - エージェントは系列データの履歴を認知する場合がある
 - 系列データの履歴の一部は現実に観測される $\mathbf{y}_t = \{y_t, \dots, y_{t-L}\}$
- 上記の仮定から非線形・非ガウス状態空間モデルとして定式化

$$\mathbf{X}_t = \{\mathbf{X}_t^{Agent}, \mathbf{X}_t^{Env}, \mathbf{X}_t^{History}\},$$

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{X}_{t-1}, \mathbf{v}_t | \boldsymbol{\theta}_{ABM}), \mathbf{v}_t \sim q(\mathbf{v}_t | \boldsymbol{\theta}_q),$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{h}_t(\mathbf{X}_t, \mathbf{w}_t), \mathbf{w}_t \sim r(\mathbf{w}_t | \boldsymbol{\theta}_r).$$
- 自己組織化推定法によるABMパラメータのオンライン推定
 - 拡大状態ベクトルを再定義し、拡大状態空間モデルに粒子フィルタを適用し事後分布の推定を実施

$$\boldsymbol{\theta}_{ABM} \sim s_1(\boldsymbol{\theta}_{ABM} | \boldsymbol{\theta}_{s_1}), \boldsymbol{\theta}_q \sim s_2(\boldsymbol{\theta}_q | \boldsymbol{\theta}_{s_2}),$$

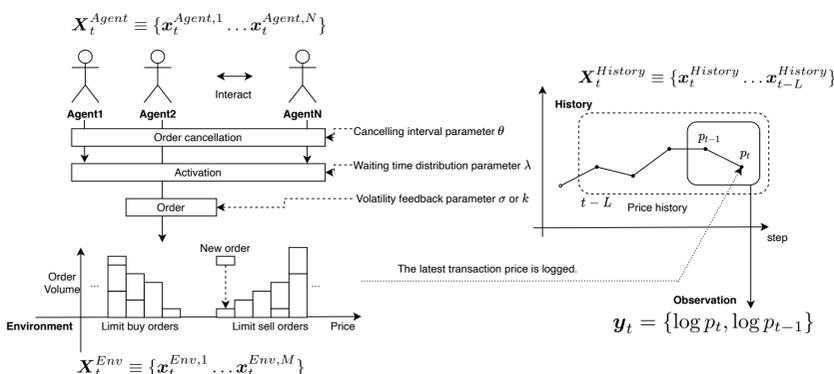
$$\tilde{\mathbf{X}}_t = \{\mathbf{X}_t^{Agent}, \mathbf{X}_t^{Env}, \mathbf{X}_t^{History}, \boldsymbol{\theta}_{ABM}, \boldsymbol{\theta}_q\},$$

$$\tilde{\mathbf{X}}_t = \tilde{\mathbf{f}}_t(\tilde{\mathbf{X}}_{t-1}, \mathbf{v}_t | \boldsymbol{\theta}_{ABM}), \mathbf{v}_t \sim q(\mathbf{v}_t | \boldsymbol{\theta}_q),$$

$$\mathbf{y}_t = \tilde{\mathbf{h}}_t(\tilde{\mathbf{X}}_t, \mathbf{w}_t), \mathbf{w}_t \sim r(\mathbf{w}_t | \boldsymbol{\theta}_r).$$

3. 双子実験

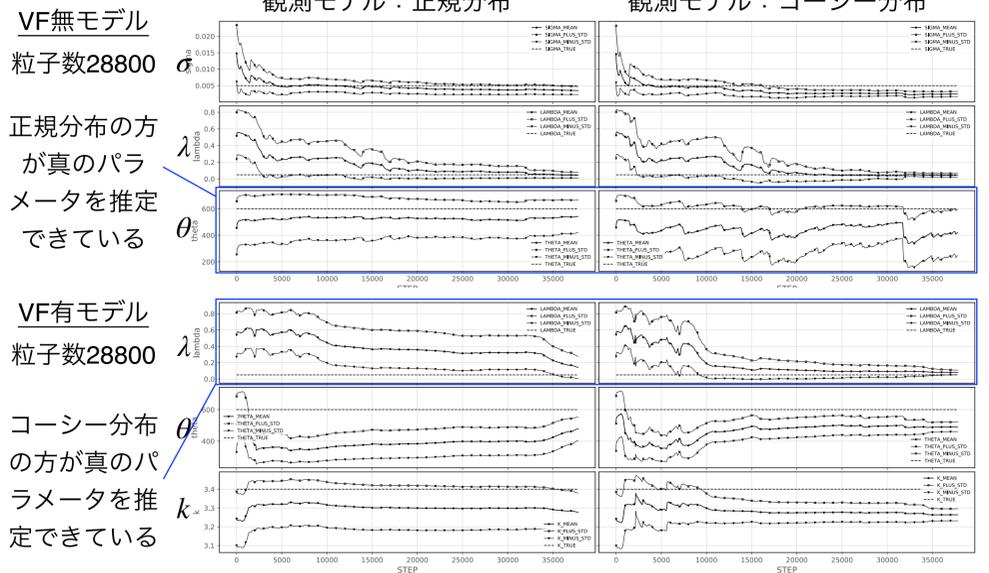
- 一般的なABMとして連続ダブルオークション市場モデル[3]で実験
- 当期と一期前の対数価格を観測とする
- Volatility feedback(VF)の有無で2パターンのモデルを仮定する
- 推定対象パラメータ： $\boldsymbol{\theta}_{ABM} = \{\theta\}, \boldsymbol{\theta}_q^{NOVF} = \{\lambda, \sigma\}, \boldsymbol{\theta}_q^{VF} = \{\lambda, k\}$
 - θ ：オーダーキャンセル発行迄のインターバル（定数）
 - λ ：エージェントの待ち時間を制御する指数分布のパラメータ
 - σ ：オーダー価格の変動を制御する正規分布の標準偏差パラメータ
 - k ：過去の値動きの変動の参照強度を表すパラメータ



- 観測モデルの仮定：2つの確率分布を仮定して実験

正規分布 $r_N(\mathbf{w} | \boldsymbol{\theta}_N) = N(\boldsymbol{\mu}_N, \boldsymbol{\Sigma}_N)$, コーシー分布 $r_C(\mathbf{w} | \boldsymbol{\theta}_C) = Cauchy(\boldsymbol{\mu}_C, \boldsymbol{\Sigma}_C, d_C)$,

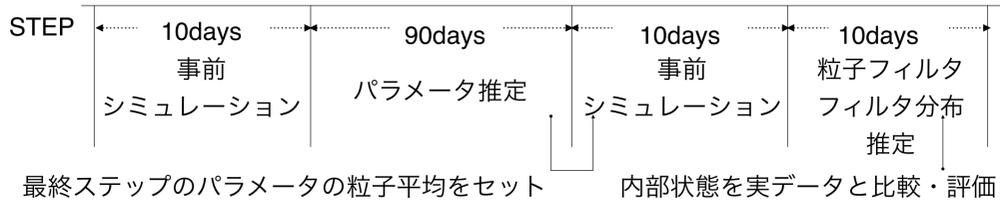
$$\boldsymbol{\mu}_N = \mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_N = \begin{pmatrix} 0.04^2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.04^2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu}_C = \mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} 0.04^2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.04^2 \end{pmatrix}, d_C = 2.$$



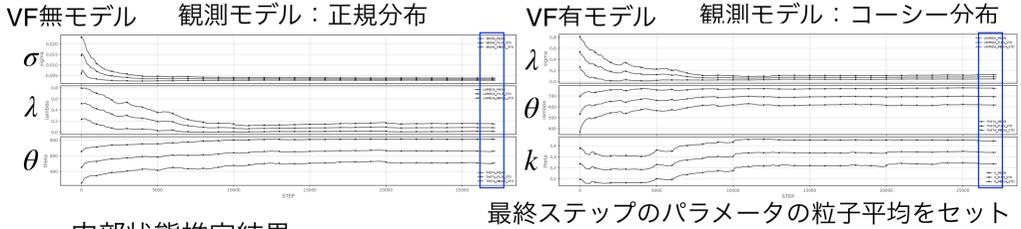
- 適切な観測モデルと粒子数の設定によるABMのパラメータ推定可能性を確認

4. 実証分析

- 実データをパラメータ推定期間と内部状態推定期間に分割
- 推定したパラメータで内部状態をうまく推定できているかを評価



- 実データ：JPXデータクラウド[4]で提供される株式データを利用
- パラメータ推定結果（粒子数28800）



- 内部状態推定結果



- 実データの板の気配価格（買い：赤線、売り：紫線）とABMから求めた内部状態のフィルタ平均（買い：青線、売り：灰線）を比較
 - 板の売り・買いの気配価格は近接する傾向があり、AのようにVF有モデルの方がその傾向を捉えている
 - Bのように価格変動の傾向を捉えられていない期間がある。

5. 結論

- 一般的なABMであっても、状態空間モデル表現と自己組織化推定法により効率的なパラメータ推定可能性があることを確認した。
- 内部状態の変動を捉えられていない箇所がある
 - より適切な事前分布・観測モデル設定方法の検討、平滑化分布の適用

参考文献

[1]Fagiolo, G., Guerini, M., Lamperti, F., Moneta, A., & Roventini, A. (2019). Validation of agent-based models in economics and finance. In *Computer Simulation Validation* (pp. 763-787). Springer, Cham.

[2]Lux, T. (2018). Estimation of agent-based models using sequential Monte Carlo methods. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 91, 391-408.

[3]Raberto, M., & Cincotti, S. (2005). Modeling and simulation of a double auction artificial financial market. *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, 355(1), 34-45.

[4]JPXデータクラウド. <http://db-ec.jpex.co.jp/category/C220/>