

都市デジタルツインを実現する共創プラットフォームの進化ゲームを用いた分析

Analysis of Co-Creative Platform for Realizing Digital-Twin City Using Evolutionary Game

近藤 海斗

上山 憲昭

Kaito Kondo

Noriaki Kamiyama

立命館大学 情報理工学部

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1. はじめに

現実世界の多種多様なデータを収集し、サイバー空間上でシミュレーションを行うことで、現実世界で生じる様々な現象を予測するデジタルツインが注目されている。「まちのデジタルツイン」は住環境や市街の様々な環境データを用いたデジタルツインであり、人々が暮らす社会の将来の状態や状況を予測する。そして共創型デジタルツインは「まちの住人」からデータを収集してシミュレーションを行うデジタルツインであり、多種多様なデータが必要となる「まちのデジタルツイン」を実現する方法として注目されている。住人からデータを収集しシミュレーションを行い、様々な予測結果を提供するのがプラットフォーム事業者であり、住人に対してどのようにデータ提供のためのインセンティブを提供するかといったビジネスモデルが、持続可能な「まちのデジタルツイン」を実現する鍵となる[1]。そこで本稿では、共創型デジタルツインのプラットフォームのビジネスモデルとしてどのようなものが考えられるかを検討する。そして利害関係者(ステークホルダー)間の動的な関係を微分方程式で解析できる進化ゲーム理論を用いて、どのようなビジネスモデルが望ましいかを検証する。

2. 進化ゲーム理論

進化ゲームはプレイヤーの出生死滅過程で集団中の戦略分布が時間の経過に伴い変化する動学的な体系であり、プレイヤーの出生死滅や学習を仮定することで集団中の戦略分布の変化を明示的に微分方程式により記述する[2]。進化ゲームの中でも、集団モデルを対象にプレイヤーの出生死滅を通して各戦略を用いるプレイヤーの割合の変化を分析するものがレプリケータ・ダイナミクスである。レプリケータ・ダイナミクスでは、各集団固有の個体は単位時間にある確率でランダムに選択した相手と対戦し、利得から決まる数の子孫を残し自身は死亡すると考える。そして各戦略の適応度をその戦略も用いた場合の子供の数の期待値として定義し、期待値の基準値からの増減を戦略の利得と定義する。

3. まちのデジタルツインへの進化ゲームの適用

ステークホルダーはプラットフォーム(PF)、中間業者(ブローカー)、まちの住人(データ提供者)の3者であり、PFは1つ、ブローカーは多数(変動)、データ提供者は多数(一定)であると想定する。PFはデータ提供者の持つデータの収集をブローカーに依頼し、データを受け取り、料金を支払う。ブローカーは自身の利益の増加のために利益が最大となると予想される戦略を選択し、データ提供者からデータを受け取り料金を支払い、PFにデータを渡し料金を受け取る。データ提供者は自身のデータを高く買い取るブローカーを選択し、データを提供し料金を受け取る。

ブローカーの戦略として、質優先型(QP: quality prioritize)と量優先型(VP: volume prioritize)の二種類を想定し、ブローカーが市場に参加、撤退することで各戦略を用いるブローカーの数が変化する。このブローカー数の変化で、どのブローカー戦略が普及するかを調べる。データ提供者のデータはデータの質と量でブローカーに評価される。データ提供者 i のデータの質を q_i 、量を v_i とすると、 q_i 、 v_i は平均と標準偏差が各々 (μ_q, σ_q) 、 (μ_v, σ_v) で、相関係数が ρ の2変量正規分布に従うことを想定する。ここで、QPはデータの質に、VPは量により大きな重みを付与し、各ブローカー型のデータの質に対する重みを α_{QP} 、 α_{VP} とすると、データの量に対する重みは $1 - \alpha_{QP}$ 、 $1 - \alpha_{VP}$ となる。データ提供者 i がブローカー s から得る料金は、 $p(s, i) = \alpha_s q_i + (1 - \alpha_s) v_i$ となる。データ提供者 i は、QPのブローカーの提示する料金 $p(QP, i)$ とVPのブローカーの提示する料金 $p(VP, i)$ を比較して高いほうを選択する。

各戦略を選択したデータ提供者に対して支払う料金の平均をブローカーから見たコスト $c(s)$ とする。ブローカーが集めたデータをプラットフォームに渡すときに得られる金額である一人当たりの収益の期待値を r とし、本稿では、すべてのデータで一定

であるとする。そのため、ブローカーの一人当たりの利益の期待値は、収益の期待値からコストを引いた $r - c(s)$ となる。この利益の期待値をもとに利得を決定し、進化ゲームを適用する。事業継続最小利益を π_0 、 i のブローカーが j のブローカーと対戦したときに得られる利益の期待値を π_{ij} とし、利得関数 $\phi(\pi)$ を定義する。利益 π が π_0 のとき $\phi(\pi_0) = 0$ となり、 π の増加に対し $\phi(\pi)$ は単調増加となる。利得関数 $\phi(\pi)$ を用いて、ブローカー数に関する微分方程式をRunge-Kutta法で数値計算する。

4. 数値評価

ブローカー数の初期値をどちらの戦略も10、データ提供者の人数を100,000、 $\mu_q = 11$ 、 $\mu_v = 10$ 、 $\sigma_q = \sigma_v = 2.5$ 、 $\rho = 0.8$ 、 $r = 15$ とし、(a) $\alpha_{QP} = 0.51$ 、 $\alpha_{VP} = 0.49$ 、(b) $\alpha_{QP} = 0.99$ 、 $\alpha_{VP} = 0.01$ と重みの偏りが異なる2つのパラメータでシミュレーションを行う。両ブローカータイプの重み和は便宜上、1になるようこれら重みを設定する。(a)、(b)のどちらの場合でもブローカーのQPの選択確率(ϵ_{QP})は等しく、 ϵ_{QP} は約0.735であった。QP戦略のブローカー数を m_1 、VP戦略のブローカー数を m_2 とし、図1に各戦略のブローカー数の時間推移を示す。(a)、(b)のどちらの場合でも、QPの選択確率 ϵ_{QP} が高いため、 m_1 が優位である。 $\alpha_{QP} > \alpha_{VP}$ であるとき、どのような値に重みを設定しても常にQPのブローカーで最終的に市場が占有される。これは $\mu_q > \mu_v$ であるため、QPの選択確率 ϵ_{QP} が0.5以上となり、収益の利益に対する影響より選択確率の利益に対する影響が大きいためである。

(a)、(b)で、 m_1 と m_2 の増減の仕方に大きな差異はないが、 m_2 が0になるまでの時間には差異がある。 $\alpha_{QP} > \alpha_{VP}$ において両者の差異が大きいほど、VPのブローカーが消滅するまでに要する時間が増加する。 $\mu_q > \mu_v$ であるため、一人当たりのQPのコスト > 一人当たりのVPのコストであり、一人当たりのQPの利益 < 一人当たりのVPの利益となる。しかし、選択確率により、ブローカー当たりのQPの利益 > ブローカー当たりのVPの利益となる。このとき重みの差を増加させると、QPでは質の影響が大きくなり量の平均の影響が小さくなるので、コストは増加、VPでは、質の影響が小さくなり、量の影響が大きくなるので、コストは増加するがそれはQPと比較して小さい。その結果、重みの差を増加させると、一人当たりのコスト、利益の差は増加し、 m_1 の優位性が下がり、 m_2 の優位性が上がる。これにより重みの差が大きいほど、 m_2 の消滅までに要する時間が増加する。安定した共創型デジタルツインの運営のためには、ビジネスモデルが破綻せず、継続することが望ましいが、重みの差異が大きくなれば複数のビジネスモデルが共存する期間が長くなる。また、各ブローカーの特徴がより明確になることで、多くのデータ提供者が受け取る金額が増加するため、多くのデータ提供者に対して魅力が向上する。

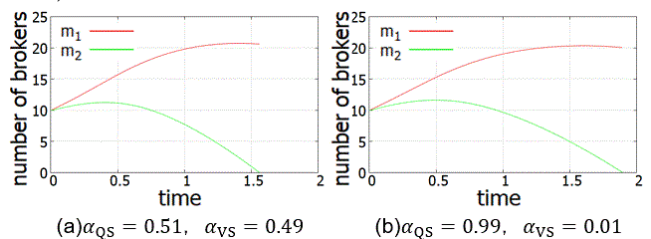


図 1: Time series of number of brokers

謝辞 本研究成果はJSPS 科研費 21H03436 と 23H03388 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 保戸山英俊, 渡部仁, 宮田純子, 金井謙治, 山崎訥, "共創型デジタルツイン実現に向けた提携型ゲームによるデータ取引のモデル化とその数値解析", 信学技報, IN2022-116(2023-03)
- [2] J. W. Weibull, Evolutionary Game Theory, The MIT Press, 1997