

|              |                                                                                   |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 多様なシナリオを学習・提示する街作りAIの提案                                                           |
| Author(s)    | 山本, 大祐                                                                            |
| Citation     |                                                                                   |
| Issue Date   | 2013-03                                                                           |
| Type         | Thesis or Dissertation                                                            |
| Text version | author                                                                            |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/11319">http://hdl.handle.net/10119/11319</a> |
| Rights       |                                                                                   |
| Description  | Supervisor:池田心准教授, 情報科学研究科, 修士                                                    |

修 士 論 文

多様なシナリオを学習・提示する  
街づくり AI の提案

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

山本 大祐

2013 年 3 月

修 士 論 文

多様なシナリオを学習・提示する  
街づくり AI の提案

指導教官 池田 心 准教授

審査委員主査 池田 心 准教授

審査委員 飯田 弘之 教授

審査委員 長谷川 忍 准教授

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

1110064 山本 大祐

提出年月: 2013 年 2 月

## 概 要

本研究で着目する「街づくり」は本国における県や市、区などが運用主体となり、街づくりによって市民等の生活が大きく影響するため、政策の基礎として重要である。さらには、街の運用主体者を教育するツールが望まれている。しかしながら近年、情報化やグローバル化に伴い社会のダイナミクスは複雑さを増し、将来の予測や意思決定が困難になっている。コンピュータシミュレーションはこの困難さに対する有力な手段であり、ABS(Agent-based Simulation)は為替介入効果の分析や将来の人口推計などの実際の現代社会に対して用いられており、その技術が注目されている。とりわけ、社会システムのシミュレーションをゲーム形式にした“シリアスゲーム”は、教育をするツールとして適しており、金融市場や、大学経営を対象と学ぶために大学で導入の実績がある。シリアスゲームは座学と異なり、学習者が様々なシナリオや行動をその場で試すことができ、視覚的にダイナミクスが学べるのがその大きな特徴である。

本研究では、社会システムの中でも「街づくり」に着目する。街づくりには住民や、道路や駅などの交通機能、市や区といった街の運用主体など様々なステークホルダが関係し、また「人口」「収入」「公害」「通勤時間」「犯罪率」などその評価基準が多様であること、さらに、ある時点での政策決定が何年後、何十年後に遅れて影響すること、といった予測や意思決定を困難にする特徴があり、コンピュータによる支援が有効と考えている。これまでの研究として、町の発展のみをモデル化した研究、非常に単純なモデルで単目的のAI(Artificial Intelligence)を作成した研究はすでにあるが、現代社会を対象とし街づくりの運用主体の教育を念頭に置いたモデルは存在していない。

本研究では街の運営主体への教育のための現代社会のメカニズムの理解や発見を促すために、幅広く実際の教育現場で導入されているシリアスゲームの特長である、複数のシナリオや行動ができ、視覚的に現代社会にあるような要素を取り入れた街づくりゲームを提案した。本研究では現代社会にあるような要素は複数の区画が利用される「複雑な影響関係」や環境汚染による健康被害がすぐには影響しない「影響の遅れ」、住人の商業施設の利用が非線形変化し偏る「非線形性」を取り入れた。また、多様な街づくりを行うAIとして、政策直接探索法を用い、意図に合わせ目的変数を変更するだけで適切な意思決定を行えるようにした。探索手法として局所最適法とシミュレーテッドアニーリング法、および局所探索法に $\alpha$ を加えた探索を提案した。

提案した街づくりモデルにおいてプレイヤーによる実験を行い、結果として区画同士の影響関係を考えなければ収益を上げることが示せた。また局所探索法とシミュレーテッド・アニーリング法を実装し、単純な多目的最適化ではあるが、多様なシナリオを提示しうることを示せた。

# 目次

|            |                    |           |
|------------|--------------------|-----------|
| <b>第1章</b> | <b>はじめに</b>        | <b>1</b>  |
| 1.1        | 背景                 | 1         |
| 1.2        | 目的                 | 1         |
| 1.3        | 論文の構成              | 2         |
| <b>第2章</b> | <b>街づくりゲームのあり方</b> | <b>3</b>  |
| 2.1        | シリアスゲーム            | 3         |
| 2.2        | 既存の街づくりモデル         | 5         |
| <b>第3章</b> | <b>提案する街づくりゲーム</b> | <b>6</b>  |
| 3.1        | 概要                 | 6         |
| 3.2        | 必要となる要素            | 8         |
| 3.3        | ルール                | 9         |
| 3.3.1      | 複雑な影響関係            | 9         |
| 3.3.2      | 影響の遅れ              | 12        |
| 3.3.3      | 非線形性               | 13        |
| <b>第4章</b> | <b>提案手法</b>        | <b>14</b> |
| 4.1        | 政策表現               | 14        |
| 4.2        | 局所探索法              | 15        |
| 4.3        | シミュレーテッド・アニーリング法   | 15        |
| 4.4        | $\alpha$ を加えた探索    | 16        |
| <b>第5章</b> | <b>実験</b>          | <b>17</b> |
| 5.1        | 人によるプレイ            | 17        |
| 5.2        | 局所探索法              | 19        |
| 5.3        | シミュレーテッド・アニーリング法   | 21        |
| <b>第6章</b> | <b>被験者実験</b>       | <b>25</b> |
| 6.1        | 概要                 | 25        |
| 6.2        | プレイに関するアンケート       | 26        |
| 6.3        | 街づくり AI のグループ分け    | 28        |

|            |    |
|------------|----|
| 第 7 章 おわりに | 29 |
| 謝辞         | 30 |

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

近年、情報化やグローバル化に伴い社会のダイナミクスは複雑さを増し、将来の予測や意思決定が困難になっている。コンピュータシミュレーションはこの困難さに対する有力な手段であり、ABS(Agent-based Simulation)は為替介入効果 [1] の分析や将来の人口推計 [2] などの実際の現代社会に対して用いられており技術が注目されている。とりわけ、社会システムのシミュレーションをゲーム形式にした“シリアスゲーム”は、教育をするツールとして適しており、金融市場を対象とした U-Mart[3] や、大学経営を対象とした Virtual U[4] など、学ぶために大学で導入の実績がある [5]。シリアスゲームは座学と異なり、学習者が様々なシナリオや行動をその場で試すことができ、視覚的にダイナミクスが学べるのがその大きな特徴である。

本研究では、社会システムの中でも「街づくり」に着目する。街づくりには住民や、道路や駅などの交通機能、市や区といった街の運用主体など様々なステークホルダが関係し、また「人口」「収入」「公害」「通勤時間」「犯罪率」などその評価基準が多様であること、さらに、ある時点での政策決定が何年後、何十年後に遅れて影響すること、といった予測や意思決定を困難にする特徴があり、コンピュータによる支援が有効と考えている。これまでの研究として、町の発展のみをモデル化した研究 [4]、非常に単純なモデルで単目的の AI (Artificial Intelligence, 人工知能。本論文では、街づくりゲームの自動プレイヤとして何らかの意味で知的な行動選択を行うプログラムのことを簡単に AI と呼ぶ) を作成した研究 [5] はすでにあるが、現代社会を対象とし小中学生など社会について学ぶ学生や、将来的には街づくりの運用主体の教育を念頭に置いたモデルは存在していない。

## 1.2 目的

そこで本研究では、街づくりの運用主体の教育を念頭に置き、遅れや非線形性など現実社会における現象の理解を困難にしている特長取り入れたモデルを構築し、多目的的な最適化によって、多様な街づくりシナリオを提示する AI を提案することを目的とする。

## 1.3 論文の構成

本論文の構成は以下のようになっている.

### 第 2 章 街づくりゲームのあり方

本研究で対象とするシリアスゲームやこれまでの既存の街づくりゲームについて紹介し, 問題点を述べる

### 第 3 章 提案する街づくりゲーム

前章を踏まえた上で, 問題点を解決する街づくりゲームのユースケースや, 解決するために必要な要素, 実際のルールについて述べる.

### 第 4 章 提案手法

多様なシナリオを提示するために既存手法を踏まえた上で提案手法を述べる

### 第 5 章 実験

前章で述べた提案手法と実際のプレイヤーがプレイした結果を踏まえて実験, 評価を行う.

### 第 6 章 おわりに

全体のまとめと今後の課題, 展望を述べる.

## 第2章 街づくりゲームのあり方

### 2.1 シリアスゲーム

シリアスゲームとは藤本 [5] によれば「教育をはじめとする社会の諸領域の問題解決のために利用されるデジタルゲーム」として定義されている。ここで社会の諸領域というのは政治や公共政策、ビジネス、軍事、企業内教育といった現代社会に問題が起こりうるまたは起きている分野が対象となる。

実際に存在するシリアスゲームの例として 2000 年に Virtual U (図 2.1) が大学経営シミュレーションとして発表され、これまでに世界 250 校の大学で利用された。Virtual U ではプレイヤは大学の経営者として、予算配分や施設のコスト調整などの財務的な管理や教育や入学といった政策的な判断を行う。さらに与えられた状況下で学生数の増加や研究業績の向上と行った目標を達成するシナリオが用意され、プレイヤは様々なシナリオをプレイしながら大学経営について学ぶことができる。2002 年に America's Army がアメリカ陸軍が新兵募集マーケティングのために、実際の射撃や作戦行動の訓練過程を再現したシューティングゲームとして発表された。

シリアスゲームの普及は日本でも進んでおり、金融市場のメカニズムの理解を目的に作成された U-Mart (図 2.2) は、京都大学やの経済学部や大阪市立大学の経済学部において利用されている。U-Mart ではプレイヤは仮想的な市場で金融商品を取引するトレーダとして参加し、取引を行いながら市場の値動きや分析、トレーダの意思決定について学ぶことができる。また LAN(Local Area Network) やインターネットを通じてプレイヤと同時に市場に参加でき、授業等で生徒がまとまって参加することで市場のメカニズムを再現が可能となる。

実際の教育現場で導入されているシリアスゲームの特長として以下の点がある。

- 学習者が様々なシナリオや行動をその場で試すことができる
- 視覚的に現象のダイナミクスが学べる

以上のように、近年シリアスゲームは現代社会に起こりうる問題をシナリオとして設定し、手元で試すことのできる教育的なツールとして実際の教育で用いられている事がわかる。

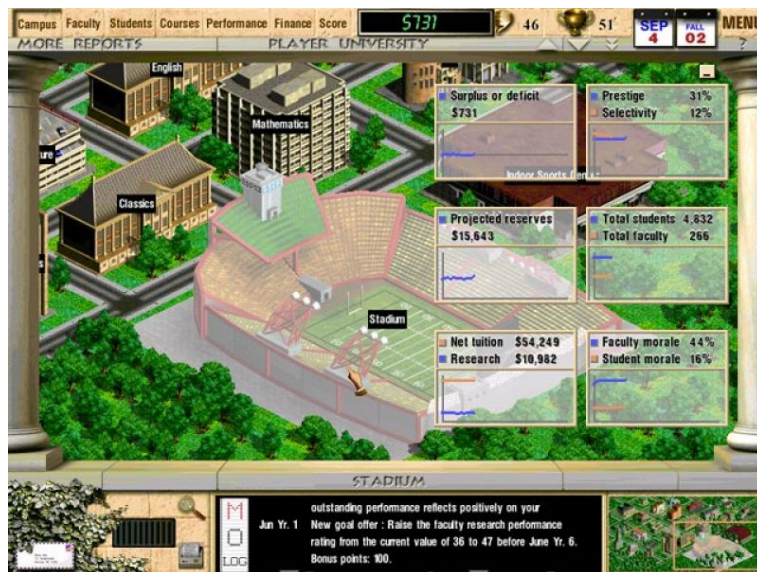


図 2.1: Virtual U の実行画面

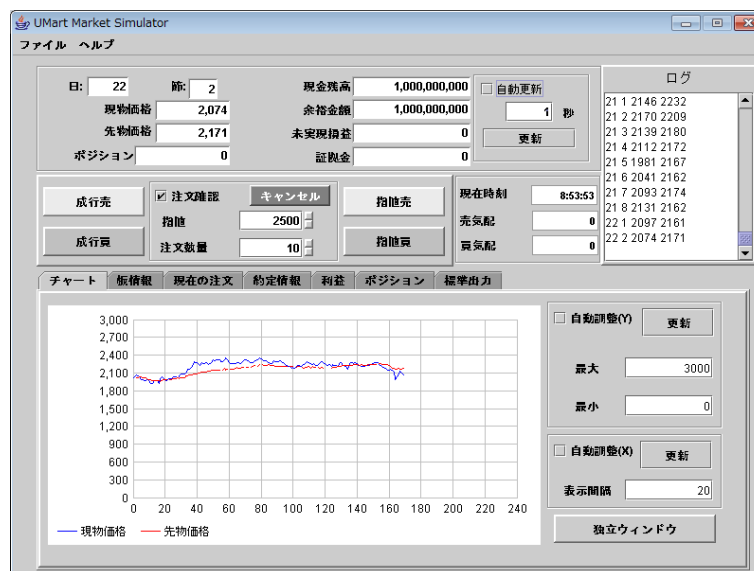


図 2.2: U-Mart の実行画面

## 2.2 既存の街づくりモデル

ここではこれまで提案されてきた街づくりモデルを述べ、街づくりの運営主体の教育に適した街づくりモデルにむけた問題点を挙げる。

秋山ら [6] は地方都市の中心市街地を対象に住民や交通機関、商業施設といったステークホルダを人工社会モデルにより表現し、街づくりの政策として公共交通機関の利用を活性化させる政策や商業施設の魅力を向上させる政策、住民を中心市街地に定住させる政策を実施した場合の商業施設の利用金額について着目し、それぞれの政策の評価を行っている。この研究の街づくりのモデルではシミュレーション開始時に政策の決定を行い、指定した期間が終了するまで行動はできない。また Jong ら [7] はプレイヤーが街の運営主体となり住宅と工場を建設し収入を得る街づくりモデルを提案した。具体的には工場で収入を得るためには働き手が住む住宅を設置する必要がある、簡単な影響関係を理解しなければ収入が得られないモデルである。加えて Jong らは、提案した街づくりモデルにおいて収入を最大化する AI を提案している。

しかし、現実の街の運営主体は、日々変化する街に対して柔軟に意思決定をしなければならず、さらには住民や労働者、交通機関といった様々なステークホルダが関係し、様々な施設が複雑な影響関係があり、影響の遅れや非線形性の要素が、運営主体者の教育にとって必要である。

## 第3章 提案する街づくりゲーム

### 3.1 概要

本研究で提案する街づくりゲームはプレイヤは、街の運用主体として居住区画または商業区画，工業区画のいずれかをお金を消費して配置する．配置した区画に街の利用者の需要があれば建物が建設され，利用に応じた収入を得ることができる．この区画配置と収入のステップを繰り返して定められた期間の街を運用する．本ゲームの実行例を図3.1に示す．

提案する街づくりゲームは，将来において市や区などの街の運用主体となる担当者が対象とし，現代社会システムで起こりうる現象のうち，将来の予測を困難にする要素を取り入れ，運用主体の担当者の教育となるように設計する．教育に適したデジタルゲームとしてシリアスゲームにおいても，様々なシナリオや行動をその場で試せ，かつ視覚的に社会のダイナミクスを学べる点が普及につながっていた．

提案する街づくりゲームにおけるユースケースは，以下の二通りを想定している（図3.2）．

- 収入が最大になるように配置や時間を試行錯誤することで，現代社会システムのダイナミクスを確認または発見する
- ゲーム途中で行動に迷った場合に，AIによって様々なシナリオを提示されることで，学習者が考える以外の社会のダイナミクスを発見する

このように学習者がダイナミクスを確認するとともに，学習者が想定していた範囲を超えたダイナミクスをAIが提案する街づくりゲームによって発見できるのが大きな特長である．



図 3.1: 提案する街づくりゲームの実行画面

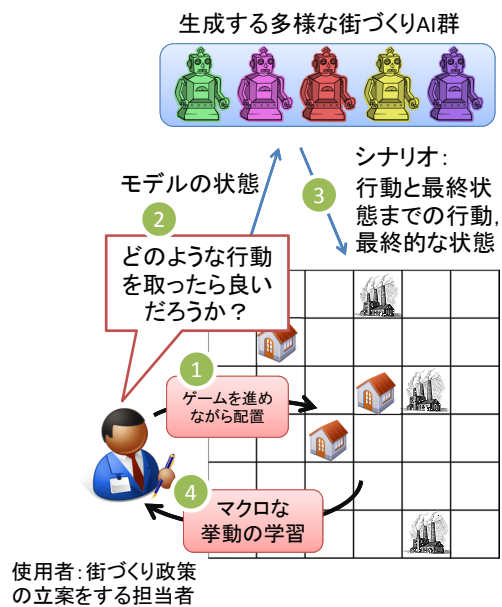


図 3.2: 提案する街づくりゲームのユースケース図

## 3.2 必要となる要素

3.1 節で示した本研究で提案する街づくりゲームにおける、想定するユースケースを達成するために、多様なシナリオを示す AI の構成方法は 4 章で述べるとして、ここでは社会システムのダイナミクスを表現するための必要な要素を挙げる。

### 複雑な影響関係

工業区画で労働をする人は居住区画を利用し居住区画を利用する人は商業地区を利用する。さらに居住区画間または商業区画間では人を取り合い、結果的に収入が減少する事がありうる。

### 影響の遅れ

工業地区から環境汚染があったとしても“すぐには”居住区画の維持費の増加にはならない。つまり住人への環境汚染は医療費用が増加するため、居住区画の維持費用が増加する。また工業区画が撤去された場合にも、環境汚染の影響は“すぐには”なくならず時間が経過するごとに減少する。

### 非線形性

住民による区画の利用は利用先の利用具合、つまり混雑具合により変化する。住民はまったく利用されていない区画や混雑している区画は好まず、ある程度利用されて混雑していない区画を好んで利用する。

以上の 3 つの要素を提案する街づくりゲームに取り入れることで、本研究で想定しているユースケースの中の社会システムのダイナミクスの表現ができると考える。

## 3.3 ルール

### 3.3.1 複雑な影響関係

まず本研究で提案する街づくりゲームの基本的なルールとして、プレイヤーは街の運営主体としてゲーム開始からゲームから終了までに、お金を消費して区画を配置する。ここで注意が必要なのは、FACTORY モデルでは住宅や工場を実際に建設していたのに対し、提案する街づくりゲームではプレイヤーが区画を用意する(配置する)だけに過ぎず、実際に建設されるには人が利用したいと考える必要がある。配置した区画に需要があれば建物が建設され、人が利用した数に応じて収入が得られる。1 ターンにとれる行動数に限りはないため、例えば1 ターン目にすべてのマップに区画を配置ができる。また行動として、居住区画、工業区画、商業区画、指定した区画削除、なにもしないがある。プレイヤーはこれらの5つの行動を組み合わせ、終了ターンまで街が維持できるような配置を試行錯誤する。提案する街づくりゲームで用いたパラメータを以下と表 3.1 示す。

- ゲームターン数：100
- マップサイズ：5 × 5
- 初期金額：4500

表 3.1: 提案する街づくりゲームで用いたパラメータ

|      | 無し | 居住区画 | 工業区画 | 商業区画 | 駅 | 港 | 区画削除 |
|------|----|------|------|------|---|---|------|
| 設置費用 | 0  | 20   | 30   | 30   | 0 | 0 | 400  |
| 維持費用 | 0  | 115  | 160  | 160  | 0 | 0 | 0    |
| 基本収入 | 0  | 140  | 200  | 200  | 0 | 0 | 0    |

2.2 節で示した FACTORY モデルでは住宅と工場のみ建設できたが、本研究で提案する街づくりゲームにおいては、居住地区と工業地区、および商業地区の区画が配置できる。さらに、以上の3つの区画の他に、交通機関である駅と工業区画の資源が集まる港の2つが加わり、それぞれ5区画同士が複雑な影響関係を持ち、街を利用する人々によって配置する区画の利用が決定される。

まず基本的な影響関係として概要図を図 3.3 に示す。港と駅にはゲーム開始時からある程度利用され、対応する区画を設置すれば利用され収入を得ることができる。例えば、港の近くに工業区画を配置した場合には利用されるが、居住区画や商業区画を配置しても利用されない。同様に駅の近くに居住区画を配置した場合には利用されるが、工業区画や商業区画を配置しても利用されない。しかし、港の近くに工業区画を配置し、工業区画の近くに住宅地区を配置し、住宅地区の近くに商業地区を配置した場合には、次のターン時に住人が3つすべての区画を利用する。

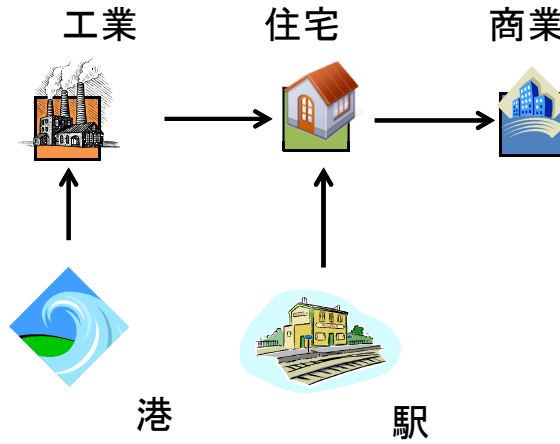


図 3.3: 基本的な影響関係の概要図

区画が実際に利用されている度合いとして、各区画に「利用度」という値を 0 から 100 まで定める。各区画の収入の算出もこの利用度を使用し求める。利用度は図 3.3 の矢印である 1 対 1 の関係の一つずつ算出する。例えば、居住区画数が 1 つと商業区画が 2 つある場合には利用度の算出が 2 回行われる。利用度を求めるには、利用元の区画の利用度  $u_{src}$  と利用先元の区画数  $N$ 、利用元と利用先のマンハッタン距離  $dist$ 、距離に対する定数  $C_{dist}$  と、距離に対する重み  $w_{dist}$  とすると、式 3.1 定義できる。ただし、 $C_{dist}$  と  $w_{dist}$  は表 3.2 に従う。例えば、利用元の利用度が少ない場合に周りに多くの区画を配置すると、人の利用の取り合いが発生し、街全体としての収益が減少する、といったことも再現している。

利用度が移動する例として、利用度が 30 の駅があり、駅から距離 1、利用度 0 の居住区画と駅から距離 2、利用度 0 の居住区画が配置された場合を考える（図 3.4）。利用元の利用度が 30 であるため、右上の居住区画は 12.0 の利用度の増加、右下の居住区画は 7.5 の増加となる。

$$u_{dest} = w_{dec} \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2} \cdot u_{prev} + \frac{u_{src}}{N \cdot dist + C_{dist}} \cdot w_{dist} \quad (3.1)$$

表 3.2: 利用度算出パラメータ

| 利用元と利用先の区画の種類 | $C_{dist}$ | $w_{dist}$ |
|---------------|------------|------------|
| 港から居住区画       | 3.0        | 1.6        |
| 駅から居住区画       | 3.0        | 2.0        |
| 工業区画から居住区画    | 3.0        | 1.3        |

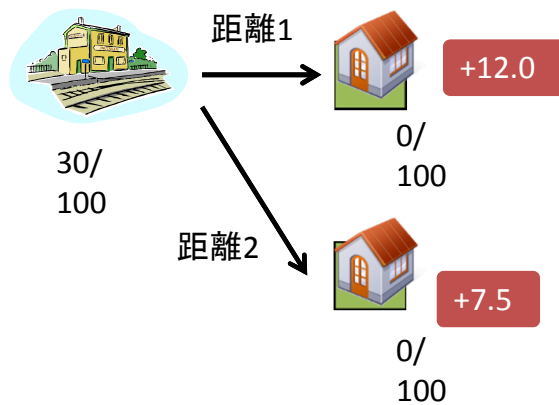


図 3.4: 基本的な影響関係の利用度算出の例

次にもう一つの複雑な影響関係として、基本的な影響関係に駅から配置できる3つの区画へ利用がなされる影響関係を提案する。その概要図を図 3.5 に示す。これは、近年存在する都心へ通勤する人の住宅地として発展したベッドタウンや、港から資源が多く輸入できるがゆえに発展した工業都市など現実にある街づくりに対応するためである。式 3.1 に従い、 $C_{dist}$  と  $w_{dist}$  はそれぞれ 0.0, 3.0 を使用し、駅からの区画への距離は 1 または 2 のみの区画に限定する。

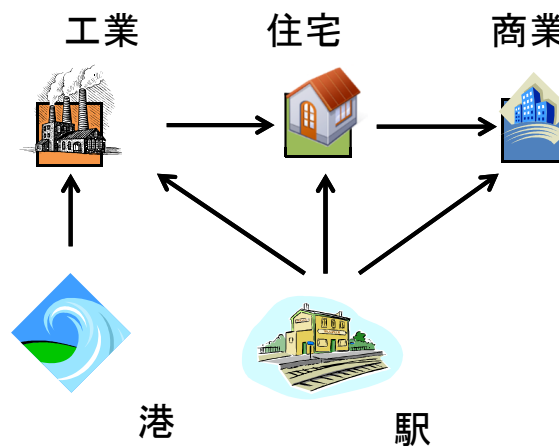


図 3.5: オプションを適用した複雑な影響関係の概要図

### 3.3.2 影響の遅れ

環境の遅れを実現するために「汚染度」を導入し、工業地区の利用に従い周囲の区画に環境汚染が発生し、居住区画に住む住人たちの健康維持費用の増加として維持費が増加する。各区画の汚染度の算出は、工業地区の利用度  $u_{ind}$  と工業地区から各区画との距離  $dist$ 、および汚染度重み  $dist$  によって式 3.2 が定義できる。居住区画の維持費は、対処となる区画汚染度  $pol$  と工業地区の利用度  $u_{ind}$ 、重み  $w_{cost}$ 、維持費用  $cost_{basic}$  によって式 3.3 が定義できる。汚染度の毎ターン減少率は 0.85 である。なお各区画の収入は利用度  $s$  と基本収入  $income_{basic}$  によって式 3.4 が定義できる。

$$pol_{dest} = \frac{u_{ind}}{dist \cdot w_{pol}} \quad (3.2)$$

$$cost_{red} = pol \cdot u_{ind} \cdot w_{cost} + cost_{basic} \quad (3.3)$$

$$income = \frac{u}{100} \cdot income_{basic} \quad (3.4)$$

### 3.3.3 非線形性

本研究で導入する非線形性は、居住区画に住む人が商業区画を利用する利用度が、商業区画の利用度によって非線形変化する事であると定義する。これは、私たちが飲食や買い物などのサービスを受けるためにお店に向かう場合に、なるべく待ち時間を少なくしたい場合や、快適にサービスを受けたい場合において、住人がそのお店自体の混雑具合を考慮すると考えるためである。一方で、お店があまり混雑しない場合、言い換えると利用がされていない区画に対して、住人は、お店の利用が少なければサービスの品質が悪いと考えるため、住人による利用が少なくなってしまう。

以上の現象を再現するために、商業地区の利用度の算出を利用元の区画の利用度  $u_{src}$  と住民が住みたいと思う度合い  $w(u_i)$ 、利用元と利用先のマンハッタン距離  $dist$ 、距離に対する定数  $C_{dist}$  と、距離に対する重み  $w_{dist}$  とすると、式 3.5 定義できる。ただし、 $w(u_i)$  は式 3.6 によって求められる。また  $C_{dist}$  を 3.0 および  $w_{dist}$  を 2.0 に設定した。

$$u_{dest} = u_{src} \cdot \frac{w(u_i)}{\sum_k w(u_k)} \cdot \frac{1}{dist + C_{dist}} \cdot w_{dist} \quad (3.5)$$

$$w(u_i) = \begin{cases} 0.10 & (0 < u_i \leq 30) \\ 0.20 & (30 < u_i \leq 60) \\ 0.30 & (60 < u_i \leq 90) \\ 0.15 & (90 < u_i \leq 100) \end{cases} \quad (3.6)$$

## 第4章 提案手法

### 4.1 政策表現

本研究では、「行動スケジュール」という形で政策  $x$  を記述し、それをシミュレータで評価して評価値  $f(x)$  を得、 $x$  を直接探索法で最適化する Direct Policy Search (DPS) の枠組みを用いる。行動スケジュールとは、「ある時刻  $t_i$  に、ある場所  $(x_i, y_i)$  に、施設  $b_i$  を置く」という行動  $(t_i, x_i, y_i, b_i)$  の集合  $(t_i, x_i, y_i, b_i)_i$  のことである。また、if-then で決定される事例  $(s_j, a)$  の良さが評価できないため、事例の集合を得ることが難しい。

政策表現法として、状態-行動型表現がある。これは「状態  $s \in S$  では行動  $a \in A$  を取るのが良い」という表現方法である。事例の集合  $\varepsilon = \{(s_j, a_j)\}_j$  が与えられた時にある状態のクラスを推論できれば、次を取るべき行動ができ、定義されていない未知の状態についても対応できる。

別の政策表現法として、状態-価値型表現がある。これは状態  $s$  においてその状態に対する評価として好ましき  $r$  を与える表現方法である。つまり一つの事例の表現として状態  $s \in S$  の好ましき  $r \in \mathbb{R}$  である事を表現する。ある状態を何らかの関数近似手法を用いることにより、任意の状態に対して好ましきを推定することができる。

次の政策表現方法として、状態-状態型表現がある [8]。これは一つの事例を状態  $x \in S$  は状態  $y \in S$  よりも好ましいことを表現する方法である。この表現方法は状態同士の好ましきを大小関係で表現するために、クラス分類手法を用いて任意の状態対に対してその好ましきの大小を推定することができる。この政策表現では状態を複数個生成した場合にそのなか最も良い行動の選択ができることができる。

本研究における政策表現は行動群-価値型表現を用いる。これは一つの事例を行動群  $a \in A$  と、その行動に対する好ましき  $r$  よりも好ましいことを表現する方法である。この表現方法では、状態に依存することないため行動を生成できれば、モデルにおけるルールが変更された場合にも対応できる。本研究では街づくりゲームのルールが、実際の使用者の意見を取り入れたルールになったとしても対応できるように、政策表現は行動群-価値型表現を用いる。

## 4.2 局所探索法

本研究で提案する、多様な街づくりをする AI の基本となる局所探索法を提案する街づくりゲームに適用したことについて述べる。4.1 で述べた行動群-価値型表現にてゲームにおける行動を解として表現する。局所探索法では1ステップごとに近傍解を生成し、生成した解を提案した街づくりゲームのルールに従いプレイヤーが持つ最終的な「お金」を評価基準としてし、行動群-価値型表現ができる。本研究で適用した局所探索法の手順を以下に示す。近傍解としてある解  $x$  における行動群から行動を一つランダムに選択し、(a)～(f) の中から行動を変化させる種類をランダムに変化させて生成する。

1. 解  $x$  (1 ゲームの行動リスト) をランダムに作成し、 $f(x)$  を評価する
2. 解  $x$  を少し変化させた解を近傍解  $x'$  を生成し、 $f(x')$  を評価する
  - (a) ターン数を変化させる
  - (b) 行動の種類を変化させる
  - (c) 区画を置く座標を変化させる
  - (d) ターン数と座標を-1～+1 まで変化させる
  - (e) ランダムに行動を追加する
  - (f) 行動を削除
3.  $f(x)$  よりも  $f(x')$  の方が評価が高い場合は解  $x'$  を解  $x$  とする (置き換え)
4. (2)～(3) を指定した回数を繰り返し、終了時に保持している解を最適解とする

## 4.3 シミュレーテッド・アニーリング法

Kirkpatrick ら [9] によって提案されたシミュレーテッド・アニーリング法 (Simulated Annealing) は、別名焼きなまし法とよばれ、探索空間における局所最適解に陥りにくくするために、温度というエネルギー関数を導入し、確率的探索アルゴリズムを行い大域的最適解を得ようとする手法である。探索中に温度が高い場合には生成した近似解の評価が悪くても保持解とすることで、探索空間を広く探索することができる。本研究で適用したシミュレーテッド・アニーリング法の手順を以下に示す。

1. 現温度  $t$  に初期温度  $T_0$  を代入する
2. 解  $x$  をランダムに作成し、 $f(x)$  を評価する
3. 解  $x$  を少し変化させた解を近傍解  $x'$  を生成し、 $f(x')$  を評価する

- (a) ターン数を変化させる
- (b) 行動の種類を変化させる
- (c) 区画を置く座標を変化させる
- (d) ターン数と座標を-1～+1 まで変化させる
- (e) ランダムに行動を追加する
- (f) 行動を削除

4.  $e^{((f(x')-f(x))/t)} > \text{Rand}(0.00, 1.00)$  を評価

- 満たす場合：近似解  $x'$  を保持解とする
- 満たさない場合：保持解  $x$  をそのまま保持解とする

5. 温度  $t$  に冷却率  $w_c$  をかける

6. (3)～(5) を繰り返し、温度  $t$  が終了温度  $T_{end}$  以下になれば探索終了.

7. これまで生成された最も評価が高い解を最適解とする

## 4.4 $\alpha$ を加えた探索

ここでは局所探索法を基本とした本研究で提案する，多様な街づくりをおこなう AI について述べる．4.2 節で述べた局所探索法の手順 (3) における評価はプレイヤーが持つ最終的な「お金」を評価基準としていた．ここでは一例として，お金  $m$  と汚染度  $pol$  に重み  $\alpha$  を加えた線形和として以下の式 4.1 ように定義できる．評価に汚染度とその重みを加えることによって，探索時に様々な  $\alpha$  の値を試しながら，本研究で期待するような多様な街づくりを行う AI の作成が期待できる．

$$f(x) = m - \alpha \cdot pol \quad (4.1)$$

## 第5章 実験

### 5.1 人によるプレイ

4章で示した3つの手法の前に、人がプレイし3.2で示した提案する街づくりゲームに必要な要素が影響や利用度の移り変わりが自然だと思えるかや、簡単に街の収益をプラスにすることができるかを考察する。

3.3.1節において駅から居住区画へ利用がなされる基本的な影響関係と、駅から近くのすべての種類の区画へ利用がなされる複雑な影響関係の二つを提案した。まず基本的な影響関係における人によるプレイした結果を、図5.1と図5.2に示す。それぞれの最終的なお金は9545, 3953であった。

図5.1では港の近くに工業区画が配置され、駅から居住区画の利用および工業区画から住宅区画の利用が移り変わっているのがわかる。さらに住宅区画から商業区画へ利用が移りそれぞれ100の利用度になっているのがわかる。図5.2では工業区画を配置せずに商業区画と居住区画のみで街づくりしている。しかしその結果の最終的なお金は3953であり、初期所持金額よりも少ない結果となった。



図 5.1: 基本的な影響関係で人間がプレイングを行った例 1

次に複雑な影響関係における人によるプレイした結果を図5.3と図5.4に示す。それぞれの最終的なお金は11282, 11412であった。

図5.3では図5.1と同様に、港の近くに工業区画、駅の近くに居住区画と商業区画を配置している。しかし商業区画を需要よりも大きく配置してしまったために、一部の商業区

|            |            |             |              |              |
|------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 0/100<br>0 | 0/100<br>0 | 0/100<br>0  | 0/100<br>0   | 0/100<br>0   |
| 0/100<br>0 | 0/100<br>0 | 79/100<br>0 | 100/100<br>0 | 0/100<br>0   |
| 0/100<br>0 | 0/100<br>0 | 30/100<br>0 | 79/100<br>0  | 0/100<br>0   |
| 0/100<br>0 | 0/100<br>0 | 0/100<br>0  | 0/100<br>0   | 0/100<br>0   |
| 0/100<br>0 | 0/100<br>0 | 0/100<br>0  | 0/100<br>0   | 100/100<br>0 |

図 5.2: 基本的な影響関係で人間がプレイングを行った例 2

画の利用度が著しく低い値となっている．図 5.4 では図 5.2 と同様に，工業区画を配置せずに商業区画と居住区画のみで街づくりしている．その結果の最終的なお金は 11412 であり，図 5.2 よりもお金が多い結果となった．

|             |               |               |               |               |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0/100<br>0  | 0/100<br>0    | 0/100<br>0    | 0/100<br>7    | 0/100<br>0    |
| 79/100<br>0 | 100/100<br>0  | 100/100<br>14 | 100/100<br>14 | 0/100<br>7    |
| 0/100<br>0  | 100/100<br>14 | 30/100<br>14  | 100/100<br>14 | 0/100<br>14   |
| 0/100<br>7  | 0/100<br>14   | 0/100<br>27   | 0/100<br>61   | 0/100<br>27   |
| 0/100<br>14 | 0/100<br>27   | 0/100<br>61   | 100/100<br>0  | 100/100<br>61 |

図 5.3: 複雑な影響関係で人間がプレイングを行った例 1



図 5.4: 複雑な影響関係で人間がプレイングを行った例 2

## 5.2 局所探索法

ここでは提案する街づくりゲームにおいて局所探索法を行った結果について述べる。局所探索法に使用するパラメータは以下の通りである。

- シミュレーション試行回数：10
- シード値：300-309

なお局所探索法を行う等に使用した実験機のスペックは以下の通りである。

- OS：Windows 7
- CPU：Intel(R) Core(TM) i5-2500 @ 3.30GHz
- メモリ：8.0GB

基本的な影響関係で局所探索法を行った金額の推移を図 5.5 と複雑な影響関係で局所探索法を行った金額の推移を図 5.6 に示す。金額は複雑な影響関係の方が多いが、利用の移り変わりが違うため厳密な比較はできない。しかし図 5.5 では標準偏差：276 なのに対して、図 5.6 では標準偏差：1171 であり、駅から様々な区画に対して利用の移り変わりが起きており、似通った配置がなされていない可能性が考えられる。

基本的な影響関係で局所探索法を行った統計情報を以下に示す。

- 最大：13105
- 最小：12200
- 分散：76240.09

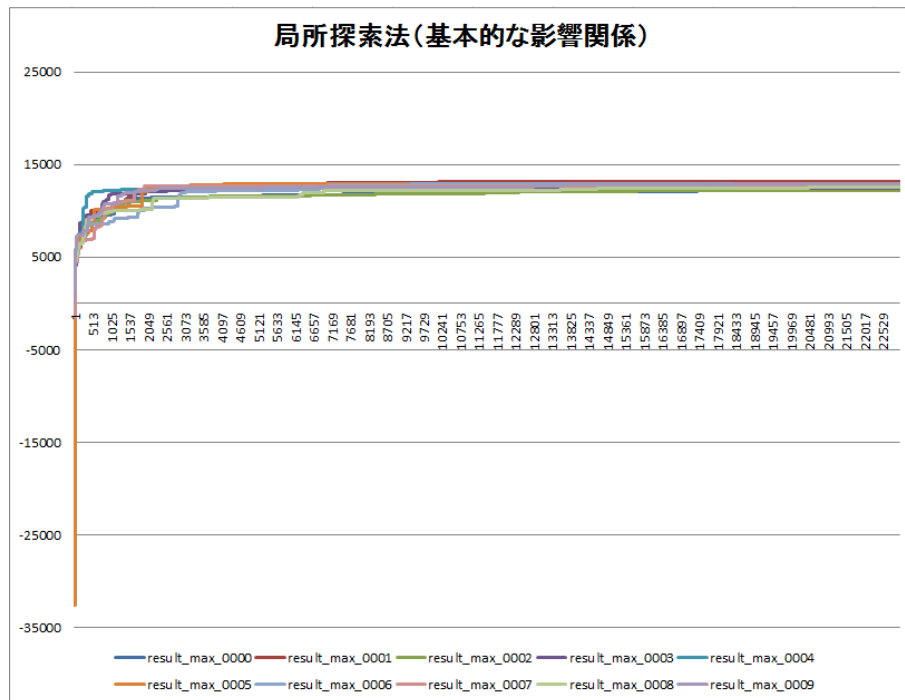


図 5.5: 基本的な影響関係で局所探索法を行った金額の推移

- 標準偏差 : 276.1160807
- 平均 : 12699.9

複雑な影響関係で局所探索法を行った統計情報を以下に示す.

- 最大 : 20199
- 最小 : 16705
- 分散 : 1372731.96
- 標準偏差 : 1171.636445
- 平均 : 18454.8

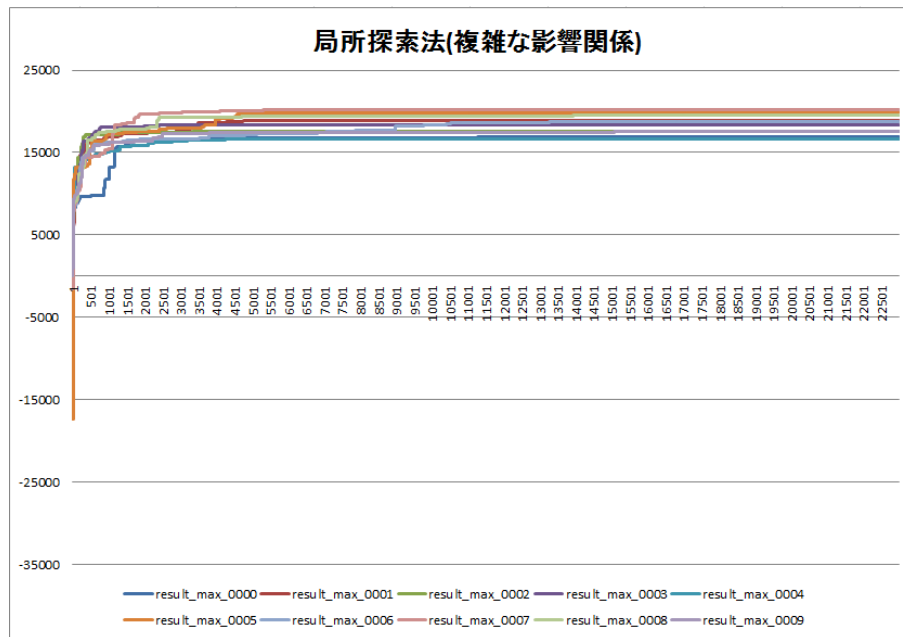


図 5.6: 複雑な影響関係で局所探索法を行った金額の推移

### 5.3 シミュレーテッド・アニーリング法

ここではシミュレーテッド・アニーリング法(以下, SA 法)を本研究で提案したパラメータ群を表 5.1 を示す. SA における結果の統計的情報表 5.2 を示す. 基本的な影響関係において SA のパラメータ a を行った最適解の推移を図 5.7 に, 基本的な影響関係において SA のパラメータ b を行った最適解の推移を図 5.8 に, 複雑な影響関係において SA のパラメータ a を行った最適解の推移を図 5.9 に, 複雑な影響関係において SA のパラメータ b を行った最適解の推移を図 5.10 に示す. SA(a) の 1 シミュレーションあたりの繰り返しゲーム数は 18419 回, SA(b) では 23025 回であった.

局所探索法と比べると, まず基本的な影響関係における SA(a), SA(b) とともに局所探索法よりも, シミュレーションの試行回数が 10 回という事もあり, 性能の良さは断言することはできないが, 局所探索法と SA の性能の明確な差違はなかった. しかし複雑な影響関係における SA(a), SA(b) では逆に平均値や最大値, 最小値が局所探索法のほうが優れていた.

表 5.1: SA に用いたパラメータ

|      | SA(a)   | SA(b)  |
|------|---------|--------|
| 開始温度 | 10000   | 5000   |
| 冷却率  | 0.99975 | 0.9990 |
| 終了温度 | 100     | 500    |

表 5.2: SA における結果の統計的情報

|      | SA(a)(基本的) | SA(b)(基本的) | SA(a)(複雑) | SA(b)(複雑) |
|------|------------|------------|-----------|-----------|
| 最大   | 13070      | 10162      | 18646     | 13070     |
| 最小   | 11074      | 8540       | 16249     | 11074     |
| 分散   | 304540.4   | 245101.2   | 502735.1  | 304540.4  |
| 標準偏差 | 551.8      | 495.0      | 709.0     | 551.9     |
| 平均   | 12664.9    | 9487.6     | 17469.2   | 551.8     |

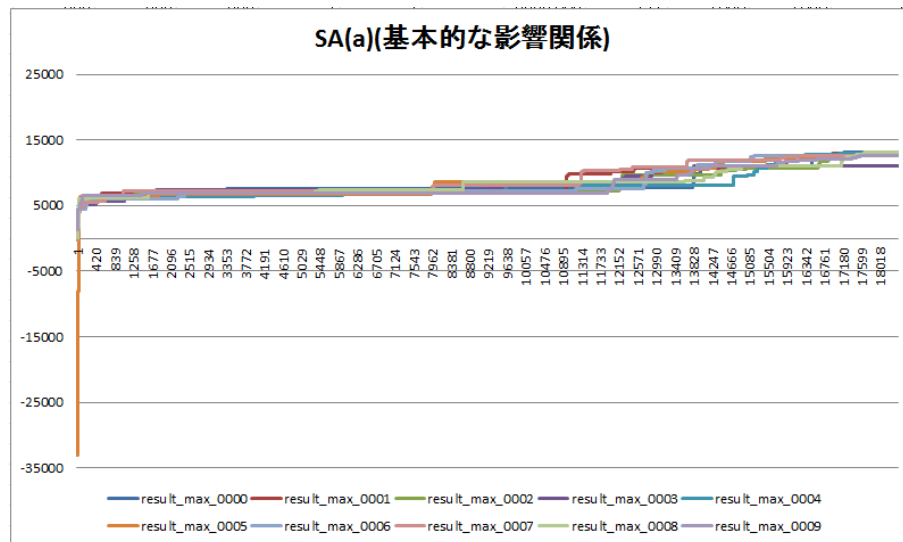


図 5.7: 基本的な影響関係で SA(a) を行った最適解の推移

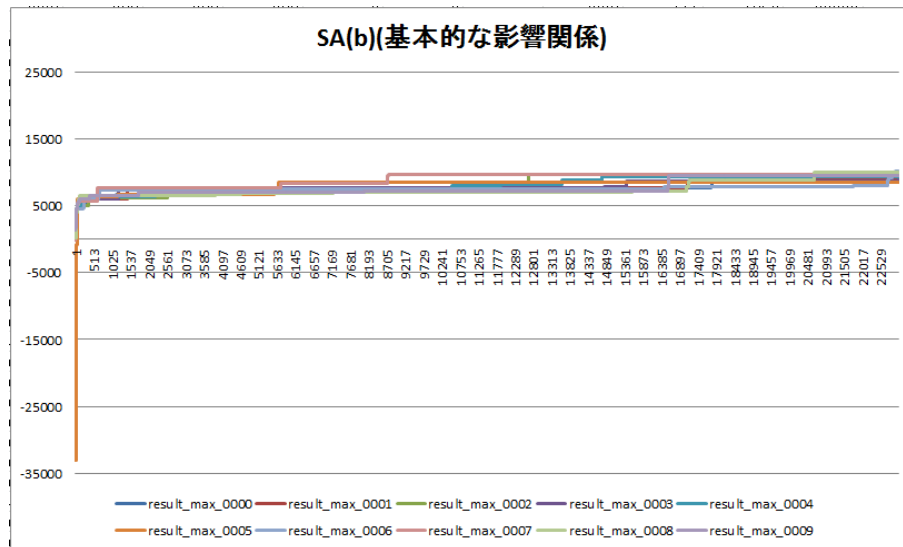


図 5.8: 基本的な影響関係で SA(b) を行った最適解の推移

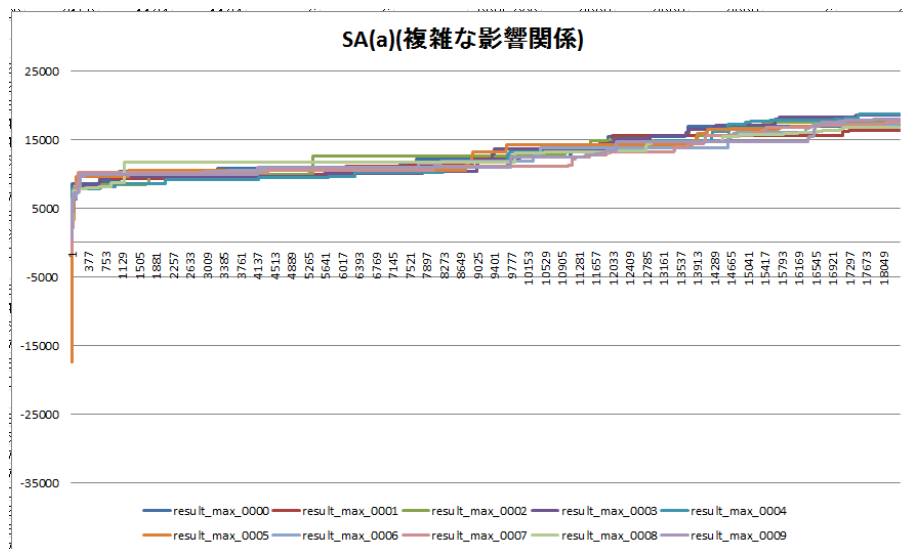


図 5.9: 複雑な影響関係で SA(a) を行った最適解の推移

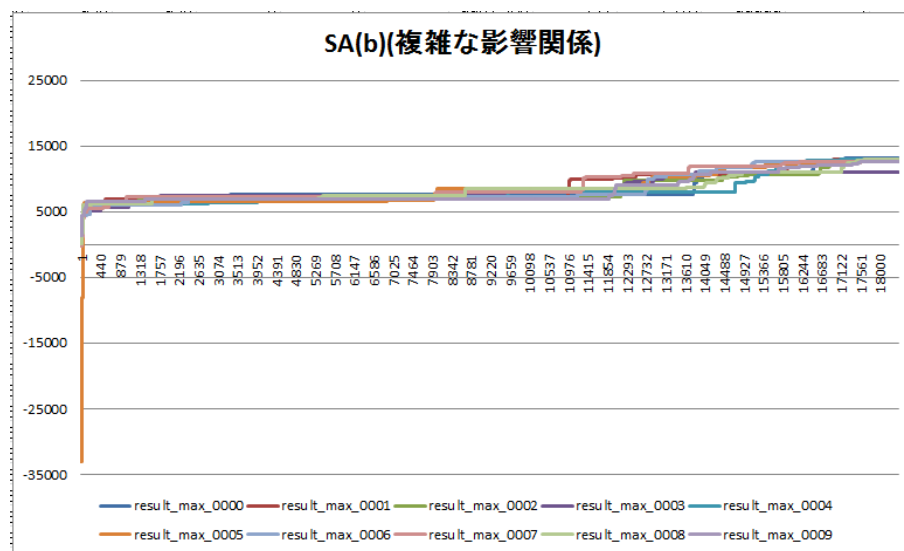


図 5.10: 複雑な影響関係で SA(b) を行った最適解の推移

## 第6章 被験者実験

本章では提案した街づくりモデルおよび街づくり AI が教育ツールとしてどの程度適しているか、および多様な街づくりが達成できているのかを被験者実験により評価を行う。

### 6.1 概要

被験者実験では、理解のしやすさとして被験者が目標に達するまでにどのくらい難しいかを計測し、本研究で取り入れた 3 要素について、不自然な点を感じたかどうかを回答してもらう。被験者実験は以下の手順を踏む。

1. 被験者に被験者実験の手順を説明する。(5 分)
  - プレイ 1 : 最終的な資金を最大化するプレイ (15 分)
  - プレイ 2 : 最終的な平均汚染度を 20% 以下にし、収入を最大化するプレイ (10 分)
  - アンケート回答 (5 分)
2. 被験者は AI が示す解を 3 つのグループに分ける (10 分)

実験条件は以下の通りである。

- 被験者対象の人数 : 10 人
- 最適化手法 : 局所探索法
- 式 4.1 のパラメータ  $\alpha$  の値 : 0.00, 0.10, 0.30

ここで、被験者には簡単なゲームルールとして以下の情報を伝える。

- 初期金額は 4500, 1 ゲームにつき 100 ターンである
- 最初の街には港と駅が配置されている
- 工業, 住宅, 商業区画を配置および撤去ができ, 1 ターンに複数行動ができる
- 区画を配置した場合には維持費が必要となる
- 各区画には住人が利用した数である「利用度」と, 環境の良さを示した「汚染度」が存在する
- 住人の利用度に応じた収入が得られる

## 6.2 プレイに関するアンケート

以下に資金を最大化するプレイと汚染度を考慮したプレイの後に被験者に記入してもらうアンケートを以下に示す.

### 1. ゲーム全体について

#### 1.1. 収入を多くするために難しいと感じたか

そう思う    どちらかといえばそう思う    どちらでもない    どちらかといえばそう思わない    そう思わない

#### 1.2. 汚染度を 20% 以下にしながら収入が多くするのに難しいと感じたか

そう思う    どちらかといえばそう思う    どちらでもない    どちらかといえばそう思わない    そう思わない

### 2. 複雑な影響関係について

#### 2.1. 利用度の変化に不自然な点があったか

そう思う    どちらかといえばそう思う    どちらでもない    どちらかといえばそう思わない    そう思わない

#### 2.2. 2.1 の回答で「ある」と考えた方は、その理由を記述してください

### 3. 影響の遅れについて

#### 3.1. 汚染度の増え方に不満はあったか

そう思う    どちらかといえばそう思う    どちらでもない    どちらかといえばそう思わない    そう思わない

#### 3.2. 3.1 の回答で「ある」と考えた方は、その理由を記述してください

#### 4. 非線形性について

4.1. 住宅の住民が商業区画を利用する場合，商業施設の利用度によって変化すること気づいたか

そう思う   どちらかといえばそう思う   どちらでもない   どちらかといえばそう思わない   そう思わない

4.2. 商業区画の利用度の変化のしかたに不自然な点があったか

そう思う   どちらかといえばそう思う   どちらでもない   どちらかといえばそう思わない   そう思わない

4.3. 4.2 の回答で「ある」と考えた方は，その理由を記述してください

アンケートを集計し，まとめた結果を以下に示す.

- プレイに関する項目

- － プレイ 1 について難しいと感じたか：7 名
- － プレイ 2 について難しいと感じたか：3 名

- 要素に関する項目

- － 複雑な影響に不自然な変化があったか：2 名
- － 影響の遅れに不自然な変化があったか：3 名
- － 非線形変化があることに気がついたか：1 名

開始の 15 分のプレイ 1 では多くの人が難しいと感じていたが，プレイ 2 では追加のプレイ時間を取ることで，ルールがわかるようになったと考える．また取り入れた要素には不自然な点は，複雑な影響関係および影響の遅れでは少なかった．しかし商業地区の利用度によって住民の利用度が変化する非線形性に関しては気づいている人が少なかったと言える．

## 6.3 街づくり AI のグループ分け

街づくり AI のグループ分けをする際に被験者に配った解答用紙を以下に示す.

### 1. グループ分け

AI の解 (a~i, 9 個) は 3 種類の AI から 3 ずつ解が生成されています.

AI の解を 3 つのグループに分けてください.

グループ 1 : (            ,            ,            )

グループ 2 : (            ,            ,            )

グループ 3 : (            ,            ,            )

### 2. AI による解の提示について

AI による街づくりが, 実際にあるような街の配置でも存在しうと思いますか

そう思う    どちらかといえばそう思う    どちらでもない    どちらかといえばそう思わない    そう思わない

ここで AI のグループ分けの集計の方式は, 各グループの回答に誤りがあった場合に 1 点減点した合計を用いる. 結果として合計の減点で 43 点であり, 正答率は 53% であった. また AI が提案した街づくりは実際の街にあるような配置だと思うかという項目に対して, 3 名の被験者が「そう思う」「どちらかと言えばそう思う」と回答した. 被験者から実際の地形によって街づくりがなされるので一概には言えないといったコメントがあった.

## 第7章 おわりに

本研究では小中学生など社会について学ぶ学生や、将来的には街づくりの運用主体への教育を対象に、現代社会のメカニズムの理解や発見を促すために教育ツールの提案を目指した。幅広く実際の教育現場で導入されている教育ツールであるシリアスゲームは、複数のシナリオや行動ができ、視覚的に具体例を示せることがメリットであった。本研究では教育ツールとしての街づくりゲームを実現するために、現代社会の予測や意思決定を困難にする特徴を取り入れ、AIによる複数のシナリオの提示を実装した。

本研究では現代社会にあるような要素は複数の区画が利用される「複雑な影響関係」や工業区画を配置した影響がすぐには発生しない「影響の遅れ」、住人の商業施設の利用が非線形変化し偏る「非線形性」を取り入れた。また、多様な街づくりを行うAIとして、政策直接探索法を用い、意図に合わせ目的変数を変更するだけで適切な意思決定を行えるようにした。探索手法として局所最適法とシミュレーテッドアニーリング法、および局所探索法に $\alpha$ を加えた「 $\alpha$ を加えた探索」を提案した。

提案した街づくりモデルにおいてプレイヤーによる実験を行い、結果として区画同士の影響関係を考えなければ収益を上げることが示せた。また局所探索法とシミュレーテッド・アニーリング法を実装し、単純な多目的最適化ではあるが、多様なシナリオを提示しうることを示せた。本研究の最大の貢献は、今まで、単純すぎるモデルか、複雑だが学術的でないモデルしか存在しなかった街づくりという対象に対して、必須な要素を組みこみかつ簡素なモデルを提案したことである。さらに、直接政策探索法によって多様な街づくりが可能なことを示し、被験者実験を通してモデル・手法が有望であることも示せた。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，数多くの方々からのご指導，ご支援を承りました．まず指導していただいた北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科の先生方に感謝の意を表します．

とりわけ，修士論文として二年間の成果をとりまとめることができましたのも，同研究科の指導教員である池田心准教授と副指導教員である飯田弘之教授のご指導の賜物であると存じております．

また，所属した飯田・池田研究室の皆様や同学の友人には，自然に囲まれた環境の中で学業だけでなく，私生活をともに過ごし常に精神的な大きな励ましをいただきました．心より厚くお礼申し上げます．

## 参考文献

- [1] 松井 宏樹, 東条 敏 人工市場アプローチによる介入エージェントを用いた為替介入効果の分析 人工知能学会論文誌 AI 20, 36-45, 2005-11-01
- [2] Shunsuke Hara, Hajime Kita, Kokoro Ikeda, and Masahiro Susukita. Configuring agent 's attributes with simulated annealing. The Seventh International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS2012), 2012.01.
- [3] U-Mart の教育への展開 <http://www.u-mart.org/html/contents/education.html>
- [4] Virtual U <http://www.virtual-u.org/>
- [5] 橋本徹. シリアスゲーム 教育・社会に役立つデジタルゲーム. 東京電機大学出版局, 2007.
- [6] 秋山 孝正, 奥嶋 政嗣, 井ノ口 弘昭. 人工社会モデルによる地方都市まちづくり政策に関する考察, 知能と情報：日本知能情報ファジィ学会誌 23(4), 428-437, 2011
- [7] Steven De Jong, Pieter Spronck, Nico Roos. Requirements for resource management gameAI. In Proceedings of the IJCAI 2005 Workshop on Reasoning, Representation, and Learning in Computer Games, pp. 43-48, 2005.
- [8] 池田 心, 小林 重信, 喜多 一. 多様な戦略選択を可能にする事例ベースの政策表現とそのGAによる最適化, 人工知能学会論文誌, 1346-0714 25 2 pp. 351-362, 2010
- [9] C.D. Gelatt S. Kirkpatrick and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. Science, Vol. 220, , 1983.