

# CG キャラクターの移動経路生成における 不可視エージェントの効果測定

川村 昇平<sup>1,a)</sup> 青木 輝勝<sup>2,b)</sup>

**概要:** 本稿では、不可視エージェントを用いた単体 CG キャラクター移動経路生成フレームワークを提案する。不可視エージェントは、観測者（視聴者やゲームプレイヤーなど CG コンテンツの利用者）に対して不可視化したマルチエージェントシステムである。提案フレームワークは、1つのエージェント動作を1種類の不可視エージェントで実現することで、エージェント動作毎の独立性を確保する。また提案フレームワークは、マルチエージェントシステムをベースとするシステムであるため、マルチエージェントシステムの学習機能を単体エージェントの機能として用いることができる。本稿では、提案本フレームワークによる独立性の高い移動経路記述と、単体エージェントへの学習機能の獲得を提案し、評価実験を通じて提案フレームワークの可能性を評価する。

## 1. はじめに

本稿では、CG キャラクターのための移動経路の自動生成に取り組む。CG キャラクターの移動は、CG アニメーションやビデオゲームでの CG キャラクターの機能の一つである。特にビデオゲームの用途では、動的な環境変化に対応できなければならない。この課題に対して、本フレームワークは学習機能を用いて対応する。

本稿の提案フレームワークの目的は2つあり、単体 CG キャラクターの動作に独立性を与え、簡単に動作の追加や削除を行えるようにすることと、環境の動的な変化に対応できる移動経路生成である。前者の例は、CG キャラクターの人工知能へ、新しい動作を追加する際に、既に組み込まれている動作を意識せず、新しい動作を加えることができることである。この利点は、人工知能に拡張性や複雑さの低減を実現できることである。

後者の例は、CG キャラクターの移動経路がゲームプレイヤーによって制限または封鎖される場合、制限された（または封鎖された）領域を避ける移動経路である。この移動経路の自動生成の利点は、事前にプレイヤーの行える移動経路封鎖のパターンを列挙し、各パターンに対応でき

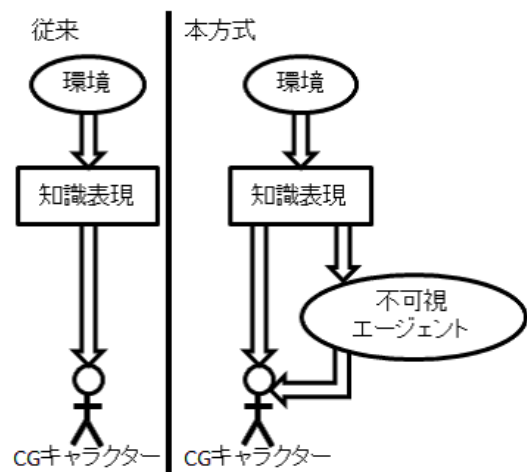


図1 CG キャラクターと環境の関係（左：従来，右：提案フレームワーク）

る移動経路を設計する必要のない点である。

本稿では、2つの目的を達成し、動的な環境下で複数の目的地を持つ CG キャラクターを簡単に構築するフレームワークを提案する。

本フレームワークの核は不可視エージェントである。不可視エージェントは従来の CG キャラクターと環境との概念図 [1] (図1左) における CG キャラクターと知識表現との中間に位置する (図1右)。

不可視エージェントは、観測者（視聴者やゲームプレイヤーなど CG コンテンツの利用者）に対して不可視化したマルチエージェントシステムである。

マルチエージェントシステムは“自律した個々の主体が

<sup>1</sup> 東北大学 大学院情報科学研究科  
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6番3号09 東北大学 大学院情報科学研究科

<sup>2</sup> 東北大学未来科学技術共同研究センター  
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-10 東北大学 未来科学技術共同研究センター 本館 602号室

a) kawamura@riec.tohoku.ac.jp

b) aoki@riec.tohoku.ac.jp

多数集まって、相互に依存し合っているシステム [2]”である。このシステムの特徴的な機能は学習である。本方式は、このマルチエージェントシステムの学習機能を取り入れることで、動的な環境変化に対応できる単体エージェントを構築する。

本稿では、観測者に対して不可視化されたマルチエージェントシステムを用いて、CG キャラクターの移動経路の記述と、動的環境変化に対応できる移動経路生成とを実現するフレームワークを構築する。提案フレームワークを用いて、マルチエージェントシステムの機能を応用する単体エージェントを構築する。

本稿の構成は6章で構成される。2章では、本稿の関連研究について概説し、提案フレームワークの要件をまとめる。提案フレームワークの基礎となる技術も同章で述べる。3章では、要件への対応と提案フレームワークの構成について述べる。4章では評価実験の方法について述べ、5章ではその結果についてまとめる。6章では、本稿についてまとめる。

また本稿では、CG キャラクターをエージェントと表記する。

## 2. 関連研究

本章では、エージェント移動経路生成関連研究とエージェント関連研究、マルチエージェント関連研究、アフォーダンス関連研究について述べる。エージェント移動経路の研究は、本方式の動的環境下での経路自動生成に対する比較対象である。エージェント構築の研究は、エージェント構築フレームワークの要件を得るために参照する。マルチエージェント関連研究は、本方式のベースとなる技術である。本方式で用いるフロアフィールドモデルについて概説し、その学習機能についても述べる。最後にアフォーダンス関連研究では、アフォーダンスの概説と応用例を示す。この概念は不可視エージェントの役割を示すために導入する。

### 2.1 エージェント移動経路生成関連研究

本節では、エージェント移動経路生成に関する研究として、ナビゲーションメッシュとA\* アルゴリズムについて述べる。

ナビゲーションメッシュ [3] は知識表現の一つであり、エージェントの移動できる空間を三角形平面 (メッシュ) の集合として表現する方法である。この集合に含まれる各メッシュはいくつかの辺を他のメッシュと共有する。エージェントの移動経路はメッシュの内側の移動と辺を共有する隣接するメッシュへの移動の組合せによって構成される。

また、メッシュをノード、共有する辺をパスに見立てることで、グラフ探索を用いてエージェントの移動経路を生成する事ができる。

この知識表現を用いて動的な障害物などの環境変化を表す場合は、環境変化の起きたメッシュを通行不可能にすることで表現できる。

A\* アルゴリズム [4] は、環境をノードとパスとを用いてグラフで表現し、スタートノードとゴールノードとが与えられた時、その2つのノード間を最短距離で移動することのできる方法である。また、ゴール地点の変更や障害物などによりノードの状態が変わる場合は、再計算を行うことで対応する。

ナビゲーションメッシュを用いてノードとパスを構築し、それをA\* アルゴリズムによって解く方法は、2つの問題点がある。一つは、動的環境変化に対応できるナビゲーションメッシュを制作することである。ナビゲーションメッシュは、動的な環境変化をメッシュ単位の通行不可で表現するため、障害物の大きさとメッシュの大きさを一致させなければならない。一致しない場合は、エージェントが障害物を大回りで避けること、障害物を通過することなどが発生する。これら問題の生じないナビゲーションメッシュを制作することは難しいと予想される。

もう一つは、動的変化による最短経路の再計算の問題である。A\* アルゴリズムは、環境の動的変化によってノードの状態が変更される度、現在位置からゴールノードまでの退散経路を再計算しなければならない。そのため、動的変化が連続して発生する環境では、エージェントの移動に遅れが生じると予想される。

したがって、この方法は、動的変化を含む環境での活用は難しいと予想される。

### 2.2 エージェント構築関連研究

本章では、エージェント構築関連研究としてC4アーキテクチャーとビヘイビアツリーについて述べる。

C4アーキテクチャー [5] は図2に示す構造を持つ、拡張性に優れたエージェント構築アーキテクチャーである。このアーキテクチャーでは、全てのエージェントの動作決定に関わる全てのシステムがブラックボードを経由してアクセスするため、各システムは独立性を持つ。したがって、エージェント動作のトリガーとなる入力情報や実行されるエージェント動作などを自由に追加・組み合わせることができる。

ビヘイビアツリー [6] [7] は、一方向のみに遷移できる環状構造を持たない有限状態機械を階層化させたものである。ビヘイビアと呼ばれるビヘイビアツリーの状態は、より抽象度の低いビヘイビアの集合として表せる。ビヘイビアツリーでは、最も抽象度の低いビヘイビアが実際のエージェントの動作と対応する。したがって、図3に示すように、ビヘイビアツリーは葉にエージェント動作を持つ樹状の構造となる。

この利点は、ビヘイビアツリーをルート側から見る場合

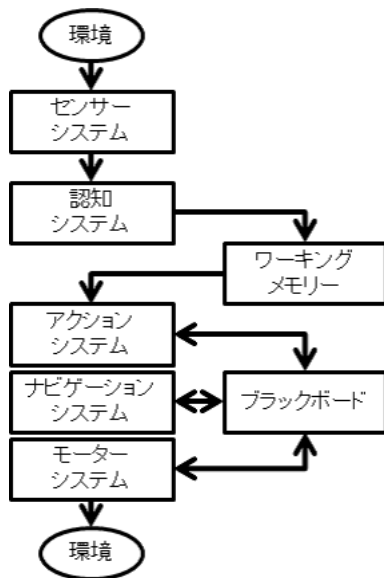


図 2 C4 アーキテクチャー 概要

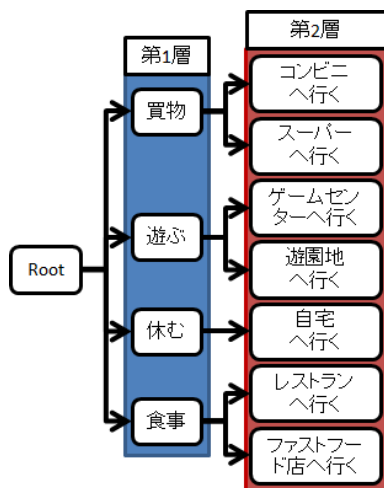


図 3 ビヘイビアツリー 概要

は、常に複雑さが隠ぺいされる点である。また、樹状構造のため、同じ階層同士のつながりを持たず、常にビヘイビア同士は高い独立性を保つことができる。

C4 アーキテクチャーは、認知システムやアクションシステムなど全てのシステムをモジュール化し、自由に組み合わせられるよう設計されている。またビヘイビアツリーは目的や機能毎に階層化し、最終的な動作は小さなステートマシンとしてカプセル化されている。これら既存研究では、エージェントの機能や動作を小分けにすることで、高い独立性を獲得している。

### 2.3 マルチエージェント関連研究

マルチエージェントシステムは、“自律した個々の主体が多数集まって、相互に依存し合っているシステム [2]”である。本論文での主体（エージェント）は環境に対して独立し、各エージェントの持つ複雑さはエージェント内に封じ込められているものとする。本方式では、フロアフィー

ルドモデルを用いるため、先に述べる。

フロアフィールドモデル [8] は、2次元セルオートマトンを用いて表現した環境を用いるマルチエージェントシステムである。このシステムでは、環境を表現した2次元セルオートマトンはフロアフィールドと呼ばれる。このシステムは静的フロアフィールドと動的フロアフィールド、エージェントから構成される。静的フロアフィールドは、壁や目的地などエージェントの行動などによって変化しない環境を表現する。加えて、それら環境がエージェントに与える影響も表現する。例えばエージェントが目的地へ移動する動作では、現在の位置から目的地までの距離を表現する。

動的フロアフィールドは、セル毎のエージェントの交通量などエージェントの行動によって変化する環境を表現する。

したがって、フロアフィールドの各セルは静的フロアフィールドの値と動的フロアフィールドの値の2つの情報を持つ。

エージェントはフロアフィールドの1つのセルを占有し、その周囲から情報に基づき自身の動作を決定する。例えば、占有したセルの上下左右に隣接する各セルから、静的フロアフィールドと動的フロアフィールドとの値を取得し、それらの値からそれぞれの方向への移動確率を求め、エージェントは高い移動確率を持ち、かつ、他のエージェントの占有していないセルへ移動する。

フロアフィールドモデルの特徴は、エージェントに目的地を設定しエージェントの移動方向を動的フロアフィールドによって収束する様に設計した場合、エージェントの移動経路がスタート地点から目的地までの最短経路に収束することである。本稿では、この特徴を学習機能とする。

### 2.4 アフォーダンス関連研究

アフォーダンス [9] は、道具などの使用に必要な情報は人間をとりまく環境そのものの中に実在している、という考え形である。本提案を現実世界の現象と照らし合わせた場合、この考え方は提案方式を解釈する助けとなるため、先に述べる。この考え形は、既にビデオゲームの知識表現として取り入れられている。[10] では、キノコがエージェントへ“自分を食べますか？”や“採集しますか？”などと提案する事例が示されている。

## 3. 提案方式

第2章では、ナビゲーションメッシュによるエージェント移動経路表現と、それに基づく A\* アルゴリズムを用いたエージェント移動経路生成手法について述べた。また、既存のエージェント構築アプローチとして C4 アーキテクチャーとビヘイビアツリーについて述べた。

その結果、前者では、本稿で述べたエージェント移動経路生成法は、環境の動的変化の対応に課題があることが示された。また後者では、エージェント構築は、エージェン

ト動作を独立性の高い機能ユニットとして設計できなければならないことが示された。

したがって、本章ではエージェント移動経路を独立性の高い機能ユニットとして記述でき、かつ、動的な環境変化に対応できるエージェント移動経路生成フレームワークを提案する。

本稿では、2つの要件を満たす方法としてマルチエージェントシステムを導入する。マルチエージェントシステムを構成するエージェントは、その性質上、独立性の高いユニットとして扱うことができる。また、マルチエージェントシステムは、システム全体として学習機能を持つため、環境の変化を学習して対応することができる。よって、マルチエージェントシステムは2つの要件を満たすことができると予測される。

しかし、単体エージェントとマルチエージェントシステムとは、システムの構成が異なるため、両システムを簡単に統合することはできない。

そこで、マルチエージェントシステムの不可視化と、“不可視化されたマルチエージェントシステムの参照機能”の単体エージェントへの追加とを行う。これにより、単体エージェントは、マルチエージェントシステムの性質を損なう事なく、要件を満たすための機能を獲得できる。

マルチエージェントシステムは不可視化されてもエージェントの性質を失わないため、単体エージェントはマルチエージェントシステムを独立性の高い機能ユニットとして扱える。同様に、システム全体としての学習機能も失われないため単体エージェントはマルチエージェントシステムの学習機能を活用することができる。

これらの考えに基づくエージェント移動経路生成フレームワークは図4の通りになる。提案フレームワークは、可視(単体)エージェントと不可視エージェントとの2種類エージェントから構築される。

#### 可視エージェント

可視エージェントは、観測者(例えばビデオゲームのプレイヤー)に単体エージェントとして提示されるエージェントである。このエージェントは自身を制御するための人工知能を持つ。人工知能は不可視エージェント参照機能と参照機能を制御するための状態とから構成される。可視エージェントは、参照機能を通じて不可視エージェントの動作を模倣することで、エージェント動作を実行する。

#### 不可視エージェント

不可視エージェントは、観測者に対して不可視化されたマルチエージェントシステムである。各不可視エージェントは、可視(単体)エージェントの実行する動作の一つと対応する。可視エージェントに参照された不可視エージェントは、自身に割り当てられたエージェント動作を実行し、可視エージェントに提示する。ま

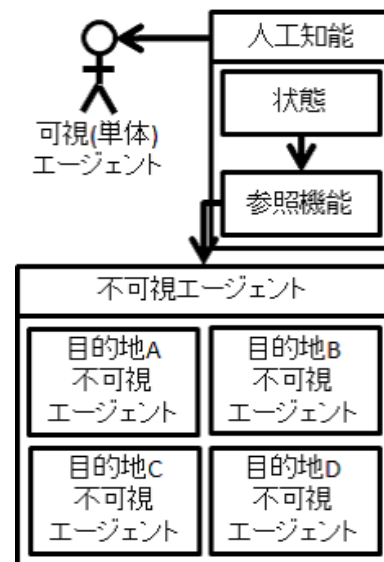


図4 提案フレームワーク全体像

た、現実の世界に置き換えた場合、このエージェントは空間のアフォーダンスであると解釈できる。

本章では、独立性の高いエージェント経路が記述でき、動的な環境変化に対応できるエージェント移動経路生成フレームワークの構築という目的に対して、不可視エージェントを用いた方法を提案した。不可視エージェントは観測者に対して不可視化されたマルチエージェントシステムである。提案フレームワークでは、エージェントの性質による独立性とマルチエージェントシステムの性質である学習を用いて2つの目的要件に対応する。

本稿では、マルチエージェントシステムはフロアフィールドモデルを用いる。また、単体エージェントの動作は、複数の目的地への移動とする。

## 4. 評価実験

本章では、第3章での提案フレームワークについて評価する。提案フレームワークは、不可視エージェントによる各エージェント移動の独立性と、動的環境下の学習機能とに重点を置いている。したがって、それら2点について評価する。

具体的には、単体エージェント動作として複数の目的地を与える場合、可視エージェントは、それぞれの目的地に対応する不可視エージェントを参照することで、それぞれの目的地へ移動することができる筈である。また、動的環境変化のある環境では、環境変化に対応する移動経路を探索し、目的地へ向かうことができる筈である。

評価実験は、図5の環境で行う。灰色の部分はエージェントの移動できない壁である。一方、白色の部分はエージェントの移動できる道を表す。

また、道と環境下端との交点をスタート、道と環境上端との交点をゴール、環境中央の右に位置する黒色の線をコ

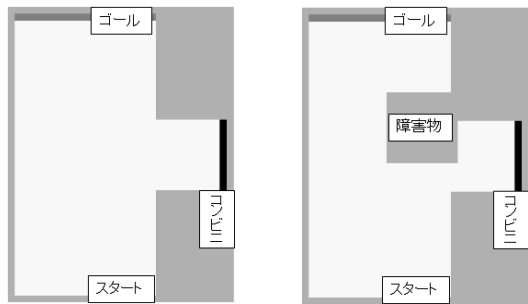


図5 実験環境 (左: 複数目的地実験, 右: 学習実験)

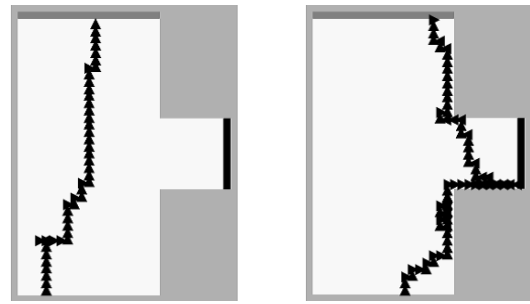


図6 提案方式 エージェント移動経路例

コンビニとする。

#### 4.1 複数目的地実験

この評価実験では、単体エージェント動作として複数の目的地を与えた場合の可視エージェントの移動経路を評価する。可視エージェントが与えられた複数の目的地に到達することのできる場合、不可視エージェントは単体エージェントの移動経路を記述できるとする。

実験環境は、図5左で行う。環境の状況は、突然の雨に遭遇したエージェントが駅(スタート)から大学(ゴール)へ向かう場面である。この場面では、エージェントはその中間にあるコンビニに寄り道をして傘を購入することができる。したがって、単体エージェントの目的地はゴールとコンビニとなる。

この実験では、不可視エージェントとしてゴールへ向かうエージェントと、コンビニへ向かうエージェントのみを制作する。可視エージェントは、壁に侵入しないこととコンビニへの寄り道の有無の記録を行う。可視エージェントがコンビニへ未到達の場合は、可視エージェントは最近傍の不可視エージェントを参照する。一方、コンビニへ到達済みの場合は、最近傍のゴールエージェントを参照する。

#### 4.2 学習実験

この評価実験では、動的に変化する環境下での可視エージェントの移動経路を評価する。可視エージェントが学習を実現できる場合、予期せぬ障害物に遭遇した可視エージェントは、学習を行わないエージェントと比べて、短い時間で障害物を回避しゴールへ向かうことができる筈である。そこで、この評価実験では、可視エージェントが障害物を回避しゴールへ到達するまでの所要時間を用いて、学習機能が実現されているかどうかを評価する。学習を行う可視エージェントのゴール到達所要時間が、学習を行わないエージェントの到達所要時間と比べて短い場合、可視エージェントは、不可視エージェントから学習機能を獲得したとする。

この実験では、可視と不可視の両エージェントの事前の設計に含まれない障害物を追加する。具体的には、図5左の環境に動的に図5右のように障害物を加える。

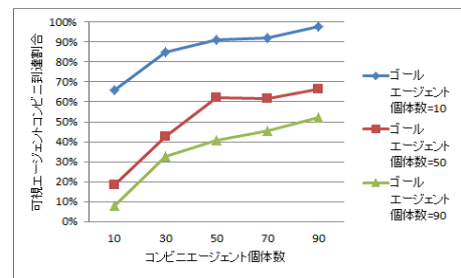


図7 不可視エージェント組合せ毎の可視エージェントコンビニ到達割合

本稿では、この2つの観点の評価が満たされた場合、提案フレームワークは、不可視エージェントによる動作記述と学習機能の獲得とを実現できるとする。

### 5. 結果と考察

本章では、先に示した評価実験の結果について述べる。まず、複数目的地の実験について述べる。

単体エージェントに与えられた複数の目的地を、複数の不可視エージェントを用いて実現した場合では、ゴールへ直進する移動経路と、コンビニを経由した後ゴールへ向かう移動経路との2種類が得られた。図6はその例であり、黒い三角形が可視エージェントの進路を示す。

この結果より、複数目的地を個別に不可視エージェントを用いて実現する場合、可視エージェントは、それぞれの目的地へ向かえることが示された。

併せて、不可視エージェント個体数の組合せによるコンビニ到達の割合を図7に示す。このグラフより、コンビニエージェント個体数の増加は、エージェントがコンビニに到達する確率を増加させること、ゴールエージェント個体数の増加は、コンビニ到達確率を減少させることが読み取れる。

この結果から、単体エージェントの複数の目的地への移動は、不可視エージェントを用いて個別の動作として記述できることが示された。また、その各目的の実行される割合はエージェントの個体数によって制御されることも示された。

次に、動的変化を含む環境での学習効果の評価実験では、図8の実験結果が得られた。図8左はスタートからゴールへ直進した場合の移動経路であり、図8右はコンビニを経

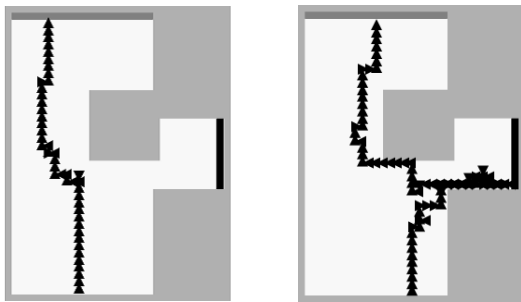


図 8 提案方式 障害物回避移動経路例

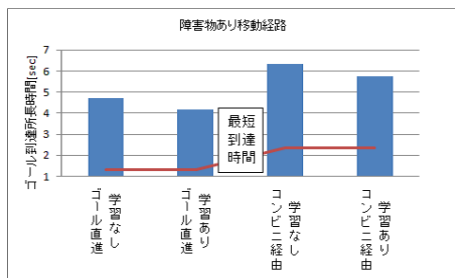


図 9 障害物あり移動経路 ゴール到達時間

由した後にゴールへ直進した場合の移動経路である。どちらの移動経路も障害物を避けた移動経路を実現している。

学習の効果を明らかにするために、障害物を追加した環境での学習なしと学習あり場合のそれぞれの経路のゴール到達所要時間を図 9 に示す。グラフにまたがる線は理論上の最短時間である。

図 9 の左側 2 つは、ゴールへ直進する経路のゴール到達所要時間を比較したものである。この結果は、学習ありの方が学習なしに比べ約 0.5 秒短い時間でゴールへ到達していることを示している。また図 9 の右側 2 つは、コンビニを経由した後ゴールへ直進する経路のゴール到達所要時間を示している。この結果でも、学習ありの方が学習なしに比べ短い時間でゴールへ到達していることがわかる。

したがって、提案フレームワークは不可視エージェントから学習機能を獲得できるとなる。

本章では、提案フレームワークを不可視エージェントによる単体エージェント動作記述の観点と、不可視エージェントから学習機能の獲得の観点から評価した。

前者の観点では、単体エージェントの目的地を個別の不可視エージェントとして実現した結果、可視(単体)エージェントはそれぞれの目的地に到達することができた。また、後者の観点では、動的環境変化に対して不可視エージェントの学習機能を導入した結果、可視エージェントは、学習を導入しない場合と比較して短い時間でゴールへ到達することができた。

これら 2 つの実験結果より、提案フレームワークは、不可視エージェントによる単体エージェント動作記述と、不可視エージェントから学習機能の獲得とを実現できるフレームワークであると示される。

## 6. 結論

本稿では、CG キャラクターの移動経路生成分野に取組み、動的環境変化を含む環境に対応するアプローチとして不可視エージェントを用いた移動経路生成フレームワークを提案した。

提案フレームワークは、エージェント動作毎の独立性と学習機能を持つことを目的とするエージェント移動経路生成法である。これら機能は、提案システムを構成する不可視エージェントによって実現される。不可視エージェントは、観測者に対して不可視化されたマルチエージェントシステムであり、エージェント毎の独立性と学習機能とを持つ。

評価実験では、エージェン動作毎の独立性と学習機能について評価し、それぞれの機能を持つことが示された。

今後は、提案フレームワークの限界を知るためにエージェントの目的地をさらに増やし評価実験を行う必要がある。また、異なる動作の種類として、その場の反応動作を導入する必要がある。

## 参考文献

- [1] 三宅陽一郎: 第 23 章 デジタルゲーム AI, デジタルゲームの教科書 知っておくべきゲーム業界最新トレンド, pp.431-482, ソフトバンククリエイティブ株式会社 (2010).
- [2] 大内東, 川村秀憲, 山本雅人: マルチエージェントシステムの基礎と応用—複雑系工学の計算パラダイム—, コロナ社 (2002).
- [3] Snook, G.: ナビゲーションメッシュによる 3D 移動とパス発見の単純化, Game Programming Gems, pp.279-294, 株式会社ボーンディジタル (2004).
- [4] Bourg, D. M. and Seemann, G.: 7 章 A\* アルゴリズムによる経路探索, ゲーム開発者のための AI 入門, pp.125-148, 株式会社オライリー・ジャパン (2005).
- [5] Isla, D., Burke, R., Downie, M., Blumberg, B.: A Layered Brain Architecture for Synthetic Creatures, IJCAI, pp.1051-1058, Aug., 2001.
- [6] 三宅陽一郎: 意思を持つかのように行動するしくみ はじめてのゲーム AI, WEB+DB PRESS, vol.68, pp.87-120, (株) 技術評論社 (2012).
- [7] Isla, D.: Gamesutra — GDC 2005 Proceeding: Handling Complexity in the Halo 2 AI, 入手先 ([http://www.gamasutra.com/view/feature/130663/gdc.2005.proceeding\\_handling\\_.php](http://www.gamasutra.com/view/feature/130663/gdc.2005.proceeding_handling_.php)) (2014.02.16).
- [8] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. and Zittartz, J.: Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol.295, Issues.3-4, pp.507-525, Jun., 2001.
- [9] 佐々木正人: 岩波 科学ライブラリー 12 アフォーダンス—新しい認知の理論, 株式会社 岩波書店 (1994).
- [10] 箭本進一: 4Gamer.net — [CEDEC 2011] AI に命を。「ぼかぼかアイルー村」のアフォーダンス指向による AI 事例と「ARMORED CORE V」の三次元的な移動経路検索, 入手先 (<http://www.4gamer.net/games/100/G010022/20110906085/>) (2014.02.16).