

特集 「ゲーム AI」

デジタルゲームにおける人工知能技術の応用

How to Use AI Technologies to Develop Digital Games

三宅 陽一郎
Youichiro Miyake

(株) フロム・ソフトウェア
FromSoftware, Inc.
y_miyake@fromsoftware.co.jp, <http://www.fromsoftware.co.jp>

Keywords: game AI, knowledge representation, world representation, decision-making, genetic algorithm, FSM, goal-oriented, planning, NPC, multiagent.

1. はじめに

デジタルゲームにおける AI 技術（以下、ゲーム AI）は、これまで、描画やゲームシステムに限られたリソースの使用を優先され制限されてきたが、ハードウェアの発展によって拡大したメモリ空間と高速なシミュレーション能力を土台として、コンシューマゲーム機（PlayStation3, Xbox360, Wii など）、PC において、大きな応用の可能性を示しつつある。ゲーム AI においてゲーム開発者は、これまで不可能であると思っていた境界が崩され、広大なフロンティアを前にして、逆に何ができるのかを探求し始めた状況にある。また、グラフィック、サウンドなど、ゲームの各要素がリアリティを増していく中で、ゲーム AI のリアリティに対するプレイヤーの意識が高まりつつある。ゲーム AI は、今世代のゲーム開発において確実にキーとなる技術の一つであり、また、それは深くゲームコンテンツと結びつき、デジタルゲームそのものの発展の可能性を握っているのである。

デジタルゲームは、ゲーム世界をデジタル世界の内につくり出し、ユーザインタフェースによる相互作用を通じて、ゲーム世界をプレイヤーの現実感と結び付け、AI は、ゲーム世界内の知能として、あるいはゲーム世界をコントロールするゲームシステムとして実装される。「人工的に作り出されたゲーム世界内における知性」という点が、ゲーム AI の最大の特徴であり、ゲーム AI 特有の問題を生み出すのである。この文書は、ゲーム AI の広く多様な姿を紹介し、デジタルゲームにおける AI 研究への端緒となることを目的とするものである。

1.1 概論

ゲーム AI は、ゲームデザインが決定された後、主にキャラクターやゲームシステムに対する要求に応じて、技術者、企画者からなるチームによって開発ラインのワークフローの中で製作が開始される。

ゲームデザインとゲーム AI の関係には、主に二つの特徴がある。

(1) ゲームデザインと深く結びついて成立するために、汎用的なシステムの構築が困難である。

(デザインに対する依存性)

(2) ゲーム性によって大きく使用する AI 技術が変化する（同一ジャンル内でさえ大きく違う）。

(デザインに対する鋭敏性)

この二つの特徴は、ゲーム AI の多様さと広範さを生み出し、開発者から見た場合、汎用的なシステムの構築を模索しながらも、ゲームタイトルごとに違った実装方法を強いられる原因であり、研究者から見た場合、研究成果の応用のポイントを見いだすことを困難にする要因となっているのである。

チェス、将棋といったボードゲームにおける AI は、対称な完全情報のゲームという問題設定の上に、対戦者としての立場の AI を構築する、優れた仕事が積み重ねられてきた。しかし、デジタルゲームの AI は、それ以外に、ゲーム内のキャラクタなど、ゲームの動的な構成要素としての役割をもつケースがある。その場合、ゲーム AI は内側からゲームを形成する役割を果たすことになる。

ゲーム AI は、ゲーム開発の過程において、ゲームとの相互作用において形成される。ゲーム AI はゲームからの要求を超えていくことによって、ゲームはゲーム AI の能力を駆使することによって、相補的に発展し互いを形成する。ゲームの形が明確になっていくに従い、ゲーム AI の形も同様に明確に定義されていく。しかし、一端ゲームが完成すると、こういった発展の過程は完成の影に隠されてしまう。ゲーム AI の課題は、ゲーム開発過程において現れるため、その局面で、開発者と研究者が問題を共有し打開策を築くことが理想的である。欧米においては、研究者や博士課程の学生が開発メンバーとなって AI の設計に携わった『Halo2』（2004, Bungie Studio）、『F.E.A.R.』（2005, Monolith Productions）などのケースがあり、この仕事が、現在のゲーム AI における最先端の成果となっているのは注目すべきことである。しかし、おおむねゲーム開発企業は開発中のタイトルにおいて閉鎖的であり、研究者が開発中には当のゲ

ームコンテンツを対象にできないという事実が、ゲーム AI 研究のボトルネックになっているのである。

しかし、ゲーム AI という場を通して、開発者と研究者が交流することは、開発者は専門的な技術と知識を、研究者は研究題材を得ることにより、双方が相補的な利益を得て互いの発展につながっていく。これから産学の間取る姿勢がゲーム AI の発展の鍵を握っているのである。

1.2 ゲーム AI の情報源

米におけるゲーム AI は「開発技術の文書化の蓄積」と「産学連携」が、この数年で一定の成果を得た。実際のタイトルに使用されたゲーム AI 技術が、査読を経た論文として発表される例はわずかであるが、GDC (Game Developers Conference) を始めとするカンファレンスの資料や、Game Programming Gems[GEMS 00]、Game AI Programming Wisdom [AIW 02] を始めとするゲーム技術書籍の記事、あるいはゲーム AI の教科書 ([Mat 04] など、年に数冊) として集積されている。しかし、ほとんどが欧米の開発者による英文資料であり、日本の開発者が公表したものは希少である。参考文献リストにゲームタイトルごとにリストしておく。リストに含まれるパワーポイント資料などは、欄外のコメントから、補完して読み解いていくことが必要である。ほとんどが Web 資料であり、学術的文献の欠如は大学の研究体制との連携における障害となっている。

このように、ゲーム AI を含めゲーム産業の世界では、学術の世界や他の成熟した産業ほど、技術公開や文献の整備が為されていない状況にある。特にゲーム AI の発展は黎明期にあり、タイトルごとに固有の探求が進められ、さまざまな技術的発展の可能性が分散して開拓され、断片的な報告として積み重ねられている状況である。この事実は現時点における包括的な研究の困難さを物語るとともに、ゲームコンテンツに立脚したゲーム AI の多様な豊穡さを表している。これから数年は、ゲーム AI におけるさまざまな可能性が試される時期であり、その先にゲーム AI の体系化の段階がくると予想される。

2. ゲーム AI の歴史

ゲーム AI が扱う対象は、主にゲームシステムとゲームキャラクターがある。前者の「ゲーム世界をコントロールする知性」としてのゲームシステムの AI は、例えば、プレイヤーのレベルを解析して自動的に難易度を調整する「レベルコントロール機能」や「ダンジョンの自動生成」などがあたる。後者の「ゲームに登場する NPC (ノンプレイヤーキャラクター、プレイヤーの操作できないキャラクターのこと)」は、デジタルゲームの黎明期においては、ゲーム世界 (ゲームステージ) の一部として決められたパターンに従って運動していたが、現在では、自律的な思考をもってプレイヤーと対等に近い条件で戦い合う存在

とまでなっている。

ゲーム AI の歴史は「ゲーム世界からの NPC の知的独立」として捉えることができる。本章では、ゲームシステムと NPC の AI を二つの軸に、ゲーム AI の変遷を大きく三つの時期に分けて説明する。それぞれの時期に端緒を得た技術の流れは、途切れることなく現在でもゲーム AI の多層的な構造を形成している。

2.1 第 1 期 単純なパターン AI (1972 ~)

1970 年後から始まるアーケードや PC ゲーム、そしてファミリーコンピュータへと続く時期には、決められた配置から用意されたパターンを実行する NPC がほとんどであった。ボスからザコキャラクターまで特徴づけられた明確なパターンが存在し、プレイヤーにとってゲーム攻略とは「NPC の動作パターンをいかに克服するか」であり、開発者はそのパターンのバリエーションによってゲーム性を演出してきた。そしてゲームの発展とともに動作パターンはますます複雑になり、その複雑さが NPC の質そのものであった。[中沢 02] に、この時期のゲームの変遷について詳細がまとめられている。一方、ゲームシステムの AI 機能として、プレイヤーの戦績によって敵の強さをコントロールする「レベル自動調整」が導入された。これは主に、プレイヤー層の広がったコンシューマゲーム機のゲームにおいて、幅広いユーザーに適切な難易度のゲームを提供することで、途中で飽きさせないゲームをつくるための工夫である。また入る度に形状が変化する「ダンジョンの自動生成技術」の導入が開始された。

2.2 第 2 期 AI の構造化 (1994 ~)

2D から 3D ゲームへの変化は、プレイヤーの視点を俯瞰から一人称視点へ変化させ、操作を複雑化すると同時に、NPC が認識し処理するデータ量を格段に増加させた。NPC は、もはや単なる動作パターンではなく、抽象的な状況に沿った行動や移動が必要とされるようになる。そこで意思決定機構として「ルールベース法」(ここでは単に条件と行動のパターンを列挙する手法を指す) や「有限状態機械 (FSM)」といった、より構造化された AI の手法が導入されることになった。また、NPC のステージ内の移動方法として、リアルタイムパス検索の手法が導入され始めた。「ルールベース」の方法は、ゲーム企画者が、状況と行動の対応表を作成し、プログラマーが直接実装する、あるいは企画者がスクリプトで実装するという、現在でも基本となっている AI 製作のワークフローを基礎づけることとなった。一方、FSM は、NPC の状態図を定義し、各状態、あるいは遷移に行動を対応させ、キャラクター制御に用いられ始めた。いずれも、「状況と行動」の対応を増やしていくことで、より精緻な NPC をつくり込んで行った。

また『アストロノカ』(1998, MuuMuu) において

初めて本格的に遺伝的アルゴリズム (以下 GA) を応用したゲームシステムが実装された。

2.3 第3期 NPCのエージェント化 (2001～)

ゲーム AI は、描画、サウンドなどゲームが成立するための必須要素に対して常にリソースを譲ってきたが、PC、Xbox といった後続のハードウェア上では、AI にある程度のリソースを割り当てるのが可能になった。同時に、この時期に欧米では、『DOOM』(1993, id Software) のオープンソース化などを起源として、FPS (First Person Shooter, 一人称視点で銃によって敵を倒すゲームジャンル) が急速な勢いで PC ゲームから主に Xbox にわたって人気を獲得し、従来のスポーツゲームと並び欧米のゲーム産業を牽引する流れに発展した。FPS では、リアルな CG の実現と同時に、人間の兵士のような「リアルな AI」を求める嗜好がプレイヤーに高まり、それに答える形で、『Halo』(2002, Bungie Studio), 『Halo2』, 『F.E.A.R.』などいくつかのタイトルの NPC に自律型エージェントのアーキテクチャが導入された。エージェントの意思決定の手法としては、ルールベース、FSM, 評価値による方法に加えてゴール指向プランニングが導入され始めた。一方、日本ではこの時期に、第2期の技術の延長上に、「細かなパラメータのチューニングやルールの増大と精緻化」(「つくり込み」という)によってプレイヤーに対する AI の演出を強化させ、これが相対的に「日本のゲームのコンテンツ力」として海外にアピールされることになる。しかし、技術的なフレームを大きく変革することがなかったために、欧米に対し大きな技術的な隔たりをつくることになった。

2.4 現在、これからのゲーム AI ロードマップ

一つのゲームの中には、簡単な反射 AI から高度な判断能力をもつ知性まで、さまざまなレベルの NPC が存在し、第1期～第3期の技術が、知能のレベルに応じて応用されているのが普通である。ゲームのデザインは、通常、技術からではなく、「ゲーム市場におけるユーザーの嗜好」、「開発者の嗜好」、「企業の技術的な土壌」によって決定されるので、高いゲーム AI 技術をもち、かつ高度な AI を要求するゲームを開発するチャンスを得たゲームプロダクションが、ゲーム AI を牽引していく傾向にある。第3期から現在に続く「リアル指向の AI」というゲーム AI の発展の流れは、欧米の FPS というジャンルを通して培われ現在が続いているのである。

また、ハードウェアの発展は、ゲームにおけるフィールドのスケールの拡大と、その上のオブジェクト数の増大をもたらし、ゲームステージの複雑さを増大させた。これは NPC に対して、広大な空間の移動に伴う長時間にわたる行動の決定、およびフィールド内のオブジェクトの適切な処理を要求する。そこで、大規模な「リアルタイムパス検索」と、一連の行動生成のための「プラン

ニング」が、これからの NPC の AI の基本的な手法として導入されていくと予想される。

本章で紹介した技術を、3章では「ゲームシステムにおける AI」について、4章では「キャラクターにおける AI」について、その詳細な内容と研究課題を解説していくことで、ゲーム AI のもつこれからの研究フィールドを提示していく。

3. ゲームシステムにおける AI

ゲームシステムはゲーム世界とその進行、ユーザからのインタラクションなどを管理する。プレイヤーは長い時間、一つのゲームプログラム全体と相互作用を続けるので、ゲームシステム全体を、プレイヤーを楽しませる「エンタテインメント AI」として捉えることも可能である。ゲームシステムは具体的には、すべての情報の流れを管理し、予定どおりにステージや敵を出現させゲームを進行させる。さらにゲームによってはプレイヤーのスキルに合わせて難易度を動的に変化させ、ランダムにステージの形状や構成を変化させることもある。ゲームシステムは、このように基本的な進行機能に加えて、プレイヤーの入力を観察し、それに応じてゲームを変化させていく知的な機能をもつ場合もある。本章では、ゲームシステムにおける AI の技術トピックスについて説明していく。

3.1 キャラクタ管理

ゲームシステムは NPC をゲームの進行に沿って、種類、位置、数、タイミングを決定して出現させる。多くの場合、NPC の出現パターンは、開発段階においてゲームデザイナーによる入念な計算とテストの上に決定される。ゲームによっては、プレイヤーの履歴データから、プレイヤーの特性を解析し、それに応じて動的に敵の出現パターンを変化させる。多くの場合、戦績からプレイヤーの腕前をランク付けすることで、敵の難易度を調整する。この「レベル自動調整」[GW 05] の手法は、RPG やシューティングゲームで広く応用されている。代表的な例としては『ゼビウス』(1983, ナムコ)がある。また、RPG では単なるレベル上げが必勝法にならないように、

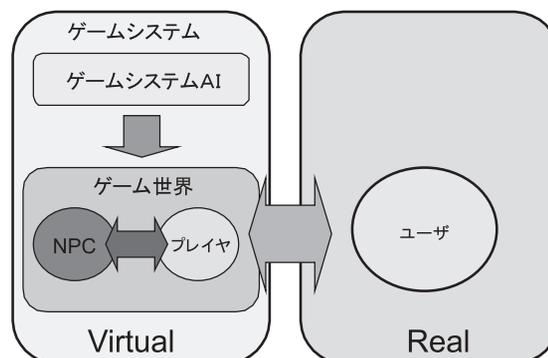


図1 ゲーム世界、プレイヤー、ゲームシステム AI の関係

プレイヤーのレベルに応じて敵の強さをコントロールするケースもある。

ゲーム開発者は、より深いレベルでプレイヤーの癖や性格といった特徴まで、プレイ履歴やパッドの入力から解析したいと望んでいるが、いまだそれを捉える手法は確立しておらず、その試みは実現されていない。

3・2 マップオブジェクト自動生成

PCや据置き型のゲーム機のタイトルには、質とともにユーザに対して十分な量のコンテンツを提供することが求められる。また、ハードウェアの進化は、これまでに比べて圧倒的に広いマップや膨大なオブジェクトをゲームに出現させる性能をもたらした。結果としてゲーム会社は、モデルやテクスチャといったコンテンツを大量に生産する必要に迫られている現状にある。そこで、製作負荷を軽減する手段として、オブジェクトの自動生成技術が注目を集めている。本節では、実際のゲーム内、およびゲーム開発で応用されている自動生成技術全般について紹介する。

§1 マップ自動生成

マップの自動生成はゲーム内では、主にダンジョンや迷路の自動生成など部屋や通路など要素として分解しやすいマップについて行われてきた。同時に敵とアイテムの配置も更新される。迷路・ダンジョンの生成には「棒倒し法」、「穴掘り法」などいくつかの方法がある。また、オープンソース化されている『Rogue』のクローンは、部屋を細い通路でつなぐ独自のアルゴリズムを実装し、『風来シレン』（1995、チュンソフト）シリーズなどに応用されてきた。最近では、『ファイナルファンタジー11』（2002、スクウェア・エニックス）などのMMORPGでダンジョン自動生成が応用される例が増加している。オンラインゲームにおけるダンジョン自動生成は、毎回新しいステージを提供するという目的のほかに、経験者が有利にならず、チームメンバが同じ条件で冒険に望ませるための手段としての可能性をもつ。

マップの自動生成の問題点は、そのクオリティにある。デザイナーによって計算し考え抜かれて設計されたマップは、プログラムによってアルゴリズムが自動生成されたマップより出来が良いのが普通である。そこで、自動生成されたマップは、プレイヤーが何度も訪れる可能性のあるマップに限られるのである。プレイヤーから見て多様な魅力的なマップの自動生成が求められており、さまざまな知識を背景としたゲームにおけるマップ自動生成技術の研究が期待される。自動生成によって生成されるマップの質が高まれば、良質のコンテンツをゲーム内で量産できると同時に、開発におけるゲームコンテンツの大量生産の負荷を軽減することができる。

§2 オブジェクト自動生成

ゲーム製作過程では、樹木や岩や雲、それに伴うテクスチャなど、自然造形物を自動生成するツールが使われ

始めつつある。『Oblivion』（2006、Bethesda Softworks）では、樹木を自動生成するソフト SpeedTree (Interactive Data Visualization, Inc.) を開発において用いてゲーム内の森を生成している。このツールでは、GUIによって細部の調整が可能である。自動生成を人の手で調整しながらコンテンツを生成していく手法が、これからの新しい手法として期待されている。

地形の自動生成はCGの研究で多く存在し、自動生成のツールがいくつか存在するものの、ゲームでは世界観に沿ったオブジェクトの生成が必要であり、現在のところ3Dグラフィッカーがモデリングする場合がほとんどである。

3・3 学習アルゴリズム

ニューラルネットや遺伝的アルゴリズム (GA) といった、AI研究を起源とする学習アルゴリズムのゲームAIへの導入は、開発者の大きな期待にかかわらず、それほど多くの成果が得られていない。このようなアルゴリズムのもつ数学的なダイナミクスを、ゲーム空間へ組み込むためには、

- (a) ゲームデザインの一部として機能させる
- (b) ゲームデザインに応じた微調整ができる
- (c) デバッグが可能である

ことが必要とされ、原理を理解したうえで、ゲームをデザインできる高い能力が必要とされるのである。そういった能力を育むためには、アルゴリズムの学習とともに、その上に創造的な発想を行う習慣・教育が必要である。

§1 遺伝的アルゴリズム

GAは、ゲーム内のキャラクタの進化などに使用される例が知られているが、ゲームデザインへ組み込まれ、最も本格的に応用された例として『アストロノカ』があげられる[森川 99]。『アストロノカ』は、遺伝子コードを埋め込まれたNPCが、プレイヤーの仕掛けたトラップが散りばめられたマップにチャレンジするゲームである。プレイヤーからは、一日に一回、一体のNPCがチャレンジしている画面しか見えないが、バックグラウンドでは同時に20個体のNPCのチャレンジのシミュレーションが繰り返され、トラップのクリア度を評価点として、GAによって一日に5世代分（これはプレイヤーから見た一日の進化のスピードを一定にするために上下する）の進化が行われる。この手法によって、GAのような統計的に緩慢な進化をシミュレーションゲームへ取り込むことに成功している。結果、NPCは徐々にさまざまなトラップをクリアできるように学習し、プレイヤーとの知恵比べを繰り返す。このように、アルゴリズムをゲームに取り込むには、ゲームデザインの巧みさと、技術的な工夫が必要とされる。しかし、これに続くGAを用いたゲーム開発の流れは生まれず、『アストロノカ』は現在でもGAを用いた最高峰のゲームの一つである。GAはアルゴリズムが十分に探求されてきた分野であり、

これからゲームにおける応用方法の提案が期待される。

3・4 ま と め

ゲームシステムは、ゲーム世界をコントロールすると同時に、プレイヤーのインタフェースを管理する役割をもつ。それに対応して、ゲームシステムにおけるAIは、プレイヤーを認識し、ゲーム世界を動的に変化させていく機能をもつ。そこでAIはゲームコンテンツに深く関わりながらゲームデザインを変革していく力をもつ。

4. キャラクタ制御におけるAI

§1 ゲームデザイナーがキャラクタAIに求めるもの

NPCはゲームデザインから、その役割や機能を定義されるが、同時に、ゲームを構成する一要素でもある。NPCの質はゲームタイトルの質に大きく影響する。

ゲーム開発者が理想とするNPCは、「人間らしい高度な思考や行動ができる」NPCである。「人間らしい思考」を求める理由は、NPCがプレイヤーに与える違和感をなくすためである。人は常に自分の知性を軸にほかの知性を評価するが、ゲーム内に登場する敵、特に味方のNPCに対しても同様である。ゲーム内の不自然なNPCの応答は、会話であれ、攻撃であれ、CGや音声が演出してきたリアリティを一気に喪失させる。リアルなCG、リアルな音声、リアルなAI、この三つがそろって初めてリアルなゲームの実現が可能となる。次に「高度な思考」を求める理由は、ゲームデザインの幅を広げるためである。NPCの知的能力の限界が、ゲームデザインの幅を決定する。ゲームデザイナーの提案する企画がNPCに担わせる役割が現在の技術を超えている場合、その企画を実現することはできない。そのために、常にゲームAIは高く多様な知的な能力を求められ続けているのである。

§2 ゲーム世界の一要素から自律型エージェントへ

2章で見たように、AIは単調な動作パターンから、構造化を経て、自律型エージェントへ発展してきた。NPCのゲーム世界からの独立は「NPCをゲームシステムによって外側から制御する」方法から「NPCに知性を与えて自ら判断させる」方法へのパラダイムのシフトを引き起こしてきた。従来の「制御命令を積み重ねる」手法と比較して、AIに「認識」、「意思決定」、「行動」といった機能をもたせる方法は、その内部にさまざまなAI技術を応用する空間を生み出し、より高度なAIをもつNPCをつくり出す可能性を拓いた。特に、MIT Media Labによって提案された、バーチャルな空間における自律的な知性のためのC4アーキテクチャは『F.E.A.R.』を始め開発者の注目を集め大きな影響を与えて来た[Isla 01a, Isla 01b]。NPCのゲーム世界からの独立は、近年のゲームAIにとって最も重要な転換点であると同時に、研究者にとっても、AI技術をNPCへ導入する下地が準備

されたという重要な意味をもっているのである。

4・1 ゲーム世界とNPCのAIの関係

§1 NPC

NPCは身体とAI、それに対応した内部状態をもつ。NPCは身体を通して、決められたルール（物理・ゲーム規則）に従ってゲーム世界と相互作用を行う。身体は、アクションゲームでは3Dモデルとして、シミュレーションゲームやボードゲームであれば、盤上の複数の駒として想定される。NPCの内部状態はゲームに応じて定義されるが、キャラクタの特徴として変化しない静的状態変数（レベルアップごとにしか変化しないHP（体力）の最大値など）と動的状態変数（常に変化する現在のHPなど）から構成される。

§2 ゲーム世界

デジタルゲームにおいてゲーム世界は、完全に人の手によって作り出された世界である。ゲーム世界は、オブジェクトどうしの相互作用（物理など）、ゲーム規則、ゲーム設定（武器や制限時間）から特徴づけられる。ゲーム世界も特徴に応じて内部状態をもち、NPCとの相互作用や自身のダイナミクスの中で変化していく。

§3 NPCとゲーム世界の相互作用

NPCはゲーム世界の中で、身体を通してオブジェクトとの相互作用やゲーム進行の作用を受け、状態を変化させていく。NPCのAIは、その変化に伴い、あらかじめ与えられた役割や自己防衛、自己保存のために、自律的な意思によって、最適な行動を決定する必要がある。

NPCのAIとゲーム世界は、ゲーム内で一つの情報の流れを形成する。この情報の流れからAIを捉え、NPCのAIのダイナミクスを明確に捉えることが可能である。以下にその流れをステップごとに説明する。

- ① NPCは、まずゲーム世界からセンサによって、敵の位置やゲーム世界の状態の情報を取得する。ゲーム世界は完全に定義された存在であり、NPCが必要とする情報は、あらかじめ知識表現・世界表現の形で、ゲーム世界のオブジェクトに埋め込んでおくことが可能である。
- ② 取得した情報は、認識過程で、決められた型のデータ構造として加工され、記憶としてスタックされる

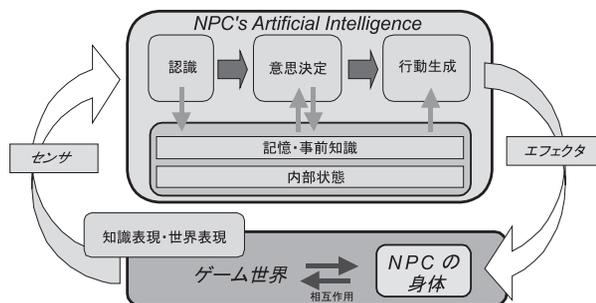


図2 ゲームにおけるNPCのエージェントアーキテクチャ

か、一時的な情報として前の情報に上書きされる。

- ③記憶、現在の情報、自身の内部状態、事前知識を基に意思決定を行う。意思決定は、「集積した情報」を「行動を指定する情報」へ変換する転換点となる。
- ④選択された意思に基づいて行動を生成する。具体的には、「いつ、どこで、何を、どのように、どうするか」という身体への命令コマンド（の列）が形成され、対象、パス経路、モーションが決定され、身体制御部に命令が送られる。その動作によってゲーム世界との相互作用が変化する。そして、①へ戻る。

このようにNPCとゲーム世界は、サイクルをなす情報の流れを動力として相互作用を形成している。以下では、その情報の流れの上のAIの各モジュールについて詳しく説明していく。

4・2 NPCのエージェントアーキテクチャ

§1 知識表現・世界表現

ゲーム世界はゲーム開発者によってつくられた世界であり、事前解析（開発中の計算）によってNPCが必要とする知識表現を用意することによって、ゲーム内でその知識を用いた高度な行動を可能にする。例えば、一つのオブジェクトに対して、破壊可能か、移動可能か、昇れるかどうか、など、キャラクタアクションに対するアフォーダンス情報を、各オブジェクトの属性情報として埋め込むことで、NPCはオブジェクトを用いた巧みな行動を取ることができるようになる [Isla 05a]。また、ウェイポイントやナビゲーションメッシュのようにマップ全体にわたる知識表現を世界表現 (World representation) という [Straatman 05]。パス検索データ (ウェイポイント、ナビゲーションメッシュなど) の上に、事前の地形解析などにより抽出した情報 (見晴らし、明度、各方向に対する射程の広がりなど) を埋め込むことで、詳細な地形情報に基づいた行動を行わせることが可能となる。例えば「なるべく敵に目撃されない暗いルートを通るパス検索から導く」、「見つかりにくい場所で敵を待ち伏せる」などである。また、障害物の破壊や天候の変化などに伴って各ポイントのデータの更新を行うことで、ゲーム内の環境変化に応じた行動が可能となり、これはプレイヤーに対して、NPCの知的能力の大きなアピールとなる。

ゲーム世界に対する知識表現は、ゲーム世界から情報を抽出しAIに渡す中間におけるフィルタの役割を果たすとともに、両者を明確に分離する中間データとして機能する。事前に準備する知識表現の形は、その上に構築するAIの質を大きく左右することになる。ゲーム世界に対する知識表現の構成の仕方はこれからの研究課題であり、たぐみな知識表現によっていかに高度なAIを実現するかが課題とされる。また、パス検索データに対しては、現在、複雑な形状のマップに対してはほとんど手動で作成されているが、マップスケールの増大とともに

自動生成手法の確立が懸案とされている。

§2 センサ

ゲームにおけるNPCのセンサは、ゲーム世界の知識表現、世界表現から、また簡単なデータであればゲームデータそのものから情報の取得を行う。センサには、主に2種類の情報取得方法がある。一つは、最新のゲーム世界の状態をデータ構造として受け取る、例えば目の前にあるオブジェクトの知識表現されたデータを取得する、といった単なる情報の取得である。もう一つは「敵から自分が見えているかの判定」「敵に見つからずに通過するパスを求めよ」などのパス検索のように「データ解析を伴う情報の取得」である [Orkin 05b]。後者は、3Dにおける最も計算負荷の高い過程の一つであり、アクションゲームのAIにおいて最も大きなボトルネックとなる。そのため、タイトルごとに負荷を軽減するさまざまな工夫が為されており、パス検索、可視判定は、古くから高速アルゴリズムが探求されてきた分野である。パス検索においてはA*アルゴリズムが標準的な計算手法として定着しつつある。また可視判定はレイキャスト計算が標準的な方法であるが、各ポイントから複数の方向に対する「見晴らし距離」の事前計算データを準備し、ゲーム内で簡単なアルゴリズムによって可視判定を行う研究がある [Straatman 05]。この手法は『Killzone』(2004, Guerrilla)において実装されている。

§3 認識過程

センサを通じて取得された情報は解析され、AIの記憶となるデータ構造に変換され蓄積されることで意思決定の基礎となる。記憶には、長期記憶と短期記憶があり、長期記憶には、例えば、発見したアイテムの場所、味方の陣地の位置情報などゲーム内で変化しない情報を記憶する。短期記憶は、新しい情報によって書き換えられる記憶であるが、常に更新されていく記憶や、対象ごとに一定数、タイムスタンプを押されてスタックされていく記憶の構成法などがある [Orkin 05b]。前者に対しては、黒板モデルを用いて情報を更新・解析していく手法がある。簡単な例としては、三つの部屋があり、プレイヤーが二つの部屋にいないことを確認することで、三つ目の部屋のいることが推論される、などである。黒板は、マルチエージェントシステムの情報共有に使われることもある。一方、一定数スタックされる記憶は、必要に応じてデータマイニングが実行される。例えば、蓄積された記憶から、プレイヤーなど対象の目撃場所とその時刻をトレースすることで目的地を推測することが可能になる [Isla 01b]。

認識過程における記憶の生成・蓄積と、そこから情報を抽出するという一連の機能は、AIに過去の情報を利用する機能を与える。常に瞬時的な情報から行動を決定する反射型のAIと比較して、継続した時間を一定の間隔で記憶として蓄積する情報の上に思考するAIは、世

界に対する詳細な知識モデルを構築し、高度な意思決定を行う能力を獲得するのである。

§4 意思決定過程

意思決定過程はNPCのAIの中核であり、取得した記憶、自身の内部状態、事前知識などから意思決定を行う。具体的に決定される「意思」とは、ゴール(目的)、方針、状態、あるいは単純なAIであれば行動を定義する数値データそのものである。意思決定の過程とは、定義された「意思」空間内から一つの点を選択する過程である。例えば、ある場合はNPCの座標であり、プランニングの場合はゴールである。意思決定に用いられる主な手法には、推論、ルールベース法、FSM、評価値による選択などである。意思決定は、判断に用いられる情報と、決定される意思の性質によって時間的な特徴をもつ。例えば、最も単純な場合として、記憶をもたないNPCは、現在の状況のみから次の行動を決定するので、瞬間的な条件による瞬間的な行動の決定を行う条件反射的なNPCができ上がる。アクションゲームの場合、これは昆虫のように条件反射による俊敏な動きを続けるNPCとなる。2章で説明した第2期に生産されたアクションゲームのNPCは、ほとんどがこの型に属している。逆に、最も高度な場合として、蓄積された記憶と現在の状態から、未来に対するゴールを決定する方法がある。こういったNPCは、記憶と意思決定によって、長い時間軸を認識する知性を持ち、俊敏な行動を失う代わりに、長期的に計画的な行動を取る能力を獲得する。

ゲームAIにおける意思決定過程は、ゲームが許容する時間内に完了するという条件を満たす限り、任意の意思決定の技術が応用可能である。上記以外でも意思決定について蓄積されてきた研究成果の応用が期待される。

§5 行動生成過程

行動生成過程では、決定された意思に基づく具体的な行動が生成される。例えば、FSMでは、各状態、あるいは、遷移に対して行動が対応づけられており、意思決定過程で決定された状態変化に応じて、一つの行動が指定される仕組みをもつ。最近では、より複雑になったゲーム状態の表現のためにHFSM(階層型FSM)が利用されている。『Halo2』では有向非環グラフ形式のHFSMが採用され、簡単なAIから複雑なAIまでを単一の形式で実装することに成功した(スケーラブルなAI[Isla 05a])。また、『F.E.A.R.』では、「ゴール指向アクションプランニング」(Goal-Oriented Action Planning) [Orkin 05a]と呼ばれるリアルタイムプランニングシステムによって、意思決定されたゴールから連鎖するアクションのシーケンスを生成している。

また、行動生成過程は意思決定と独立に、突発的なイベントに対して反射的な行動を生成する必要がある。例えば、障害物との衝突に対しては、意思決定過程を経ることのない反射的な機能として、現在の実行をいったん中止して、「攻撃によって障害物を破壊する」、「よける」

というアクションを実行する必要がある。また、プランニングの場合などには、突発的な状況に対応した即応プランニングを長期のプランニングへ挿入する手法が実装される[三宅 06b]。これらはサブサンプリング構造を導入するうえでも必要な構造である。

最終的に行動生成過程は、AIの身体に対して、生成した行動の命令コマンド列を与えることで制御を行う。アクションゲームであれば、動作アニメーションの配列であり、戦略ゲームであれば選択手の配列に対応する。

本章ではエージェントアーキテクチャ内の各モジュールを解説してきた。ゲームに応じて各モジュールをカスタマイズすることでさまざまな特徴を実現することが可能である。アクションゲームであれば行動生成の部分に、戦略ゲームであれば意思決定の部分に、さらにボードゲームであれば、認識過程・行動生成は単純化され、意思決定の検索アルゴリズムに比重を置いて開発される。この枠組みは、AI技術を各モジュールごとに集積することを可能とし、企業におけるAI技術の調査・研究の成果を再利用しやすい形で準備する基礎を築くものである。

4.3 マルチエージェント技術

複数のNPC制御におけるマルチエージェント技術は、主にNPCどうしの協調・連携の実現に利用される。特にエンタテインメントであるゲームAIにおいては、こういった協調・連携が、プレイヤーに対して目に見える成果としてアピールされる必要がある。オンラインゲーム『Chromehounds』(2006, FromSoftware)では、プレイヤーチームに対抗して最大6体のチームを組み、各NPC(ロボット)はゴール指向プランニングで戦略的に動作する。状況に応じて「仲間を助ける」、「援護する」といったゴールを評価値によって選択することで協調し、一つのゴールを共有し達成することで連携しながら、勝利条件を目指して15分間戦い続ける[三宅 06b, 三宅 07b]。しかし、現時点では、ゲームAIにおけるマルチエージェントの応用例も研究文献も少なく、ゲームにおける具体的な実現の仕方を明確にする解説や研究が待たれている。

4.4 補足：テスト技術

ゲーム産業は、バグを出す可能性のある、あるいは、デバッグ方法のわからない新しい技術より、デバッグ経験のある、一度タイトルに搭載したことのある技術を選択する傾向にあり、新しい技術に対して保守的な傾向がある。そのため、ゲーム開発に対して新しい技術を提案する場合には、単に技術やノウハウのみならず、デバッグ過程などテスト技術を含めたワークフロー全体を提案することが必要である。

5. ゲームAIの研究・開発の協調

エンタテインメント産業において生産されるデジタル

ルゲームは、デジタルゲームがもつ可能性の一つの形であり、デジタルゲーム自身は、その制約にとらわれず本来の大きな広がりをもっている。ゲーム AI もまた、その広がりに対応した広がりをもち、ゲーム AI 研究もその広がりの中で展開されるべきである。

研究者は研究成果を具体的にゲームの中で応用できるチャンスを望み、ゲーム開発者は人工知能技術を取り込むことで、より豊かなゲーム空間を構築することを望んでいる。ゲーム開発者から見た場合、人工知能は大きな興味を抱きながらも、入口まではよいが奥までは探求しにくい分野である。一方、研究者は、人工知能分野全体にわたる詳細な見識をもっているが、ゲームコンテンツを製作するノウハウに必ずしも精通しているわけではなく、ゲーム力学のうえでどう技術を展開していくか、見通しを立てにくい。また、ゲーム AI はコンテンツと深く結びつき、コンテンツ開発と歩調を合わせて開発する必要が高いが、大学においてゲームの細かなつくり込みを行う動機をもつことは難しい。このように開発者と研究者は相互に必要な技術とビジョンをもっており、産学連携は両者の協力によって互いに大きな成果を上げるチャンスがある。本文で解説してきたように、米では MIT Media Lab によって提案された C4 アーキテクチャを起源として、この 8 年間、FPS を中心としたゲーム AI の発展を見た。研究者と開発者が、ゲーム AI における大きな可能性に対するビジョンを共有することができれば、現在、不足しているコミュニケーションと技術交換を促すことが可能である。

日本のゲーム産業には欧米とは異なる多様なオリジナルのゲームコンテンツを生み出す力があり、それに対応してゲーム AI も多様な展開をもつ。開発者がゲーム AI 技術によってオリジナルのコンテンツをつくり出すと同時に、研究者は人工知能の研究に、オリジナルな活躍の場を与えることができるのである。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [AIW 02] *AI Game Programming Wisdom*, Vol.1-3, Charles River Media
 [GEMS 00] *Game Programming Gems*, Vol.1-6, 株式会社ボーナデジタル
 [GW 05] International Game Designers Panel, GameWatch (2005), http://www.watch.impress.co.jp/game/docs/20050312/gdc_int.htm
 [Mat 04] Mat, B.: *Programming Game AI by Example*, Wordware (2004). (松田晃一訳: 実例で学ぶゲーム AI プログラミング, オライリー・ジャパン (2007))
 [中沢 02] 中沢新一: ゲームフリークはバグと戯れる, 田尻 智: パックランドでつかまえて, エンターブレイン (2002)

以下、ゲームタイトル (開発元) ごとに参考文献を列挙する。

- アストロノーカ (1998, MuuMuu)
 [森川 99] 森川幸人: テレビゲームへの人工知能技術の利用, 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 2 (1999)
 MIT C4 Architecture (2001, MIT Media Lab)
 [Isla 01a] Isla, D., Burke, R., Downie, M. and Blumberg, B.: A layered brain architecture for synthetic creatures, *Proc. IJCAI* (2001). <http://characters.media.mit.edu/Papers/ijcai01.pdf>
 [Isla 01b] Burke, R., Isla, D., Downie, M., Ivanov, Y. and Blumberg, B.: The art and architecture of a virtual brain, *Proc. Game Developers Conference* (2001). <http://characters.media.mit.edu/Papers/gdc01.pdf>
 Killzone (2004, Guerrilla)
 [Straatman 05] Straatman, R., Beij, A. and Sterren, W. V. D.: Killzone's AI: Dynamic procedural combat tactics (2005) http://www.cgf-ai.com/docs/straatman_r_emco_killzone_ai.pdf, http://www.cgf-ai.com/slides_gdc2005.html
 [三宅 06a] 三宅陽一郎: IGDA 日本ゲーム AI 連続セミナー第 1 回資料 (2006). (巻末に参考文献リスト) <http://www.igda.jp/modules/mydownloads/> より
 F.E.A.R. (2005, Monolith Productions)
 [Orkin 05a] Orkin, J.: 3 States & a Plan: The AI of F.E.A.R., *Game Developer's Conference Proceedings* (2006). <http://web.media.mit.edu/~jorkin/> より
 [Orkin 05b] Orkin, J.: Agent architecture considerations for real-time planning in games, *AIIDE 2005* (2005). <http://web.media.mit.edu/~jorkin/> より
 [三宅 07a] 三宅陽一郎: IGDA 日本ゲーム AI 連続セミナー第 2 回資料 (2007). (巻末に参考文献リスト) <http://www.igda.jp/modules/mydownloads/> より
 Chromehounds (2006, FromSoftware, Inc.)
 [三宅 06b] 三宅陽一郎: クロムハウズにおける人工知能開発から見るゲーム AI の展望, *CEDEC2006* 講演資料 (2006). <http://www.igda.jp/modules/mydownloads/> より
 [三宅 07b] 三宅陽一郎: 人工知能が拓くオンラインゲームの可能性, *AOGC2007* 講演資料 (2007) <http://www.bba.or.jp/AOGC2007/2007/03/download.html>
 Halo (2002, Bungie Studio)
 [Griesemer 02] Griesemer, J.: The illusion of intelligence: the integration of ai and level design in Halo, *GDC2002 Proceedings Archive* (2002). http://www.gamasutra.com/features/gdcarchive/2002/jaime_griesemer.ppt
 Halo2 (2004, Bungie Studio)
 [Isla 05a] Isla, D.: Managing complexity in the Halo2 AI, *Game Developer's Conference Proceedings* (2005) <https://www.cmpevents.com/Sessions/GD/HandlingComplexityInTheHalo2AI.doc>
 [Isla 05b] Isla, D.: Dude, where's my Warthog? From Pathfinding to General Spatial Competence (2005) <http://www.aiide.org/aiide2005/talks/isla.ppt>

2007 年 11 月 1 日 受理

著 者 紹 介



三宅 陽一郎 (正会員)

1999 年京都大学総合人間学部基礎科学科卒業。2001 年大阪大学大学院理学研究科修士課程物理学専攻修了。2004 年東京大学大学院工学系研究科博士課程 (単位取得満期退学)。同年、株式会社フロム・ソフトウェア入社。