

次世代デジタルゲームにおける人工知能の研究課題について

三宅陽一郎^{†1}

miyakey@square-enix.com

デジタルゲームにおける人工知能技術は、この 10 年でゲームメカニクスやキャラクター制御と言った要素から独立し、明確に一つの分野として独立した。同時に、ゲーム製作の中で引き受けることになった諸問題は大きく深い。デジタルゲームにおける人工知能は、そういった問題に対して、従来の人工知能技術のみならず、認知科学、心理学、生物学などから概念を借用しながら、徐々に問題を整理し技術を確認して来た。ここでは、これまで確認されて来た概念を基礎に、これからの次世代デジタルゲームにおいて中心的研究課題となる問題をリストし順番に簡単な解説を行う。それによって本分野の全体像を描く。

Recent Research Topics Summaries for Next-generation Digital Game AI

YOUICHIRO MIYAKE^{†1}

AI technology of digital games is established in these 10 years as a independent technology field. While it becomes now distinguished from game-mechanics or character control, it is responsible for many kinds of deep technical problems of game development. AI technology of digital game has overcome such problems by using not only traditional AI techniques but also knowledge of other academic field; cognitive science, psychology, and biology. This article, recent main research topics of digital game AI are listed and explained in, draws a whole image of the field.

1. はじめに

デジタルゲームには 40 年に渡る歴史があり、その中で AI が明確に独立した分野として確立したのは、この 10 年のことである。これまでゲームシステムやキャラクター制御といった他のゲーム製作に必要な分野と混在して来たが、次第に独立した分野として形成されると同時に、人工知能特有の問題を内包するようになり、それらの諸問題に対し AI の高度な技術がいよいよ必要とされるように至った。同時に、必要とされる AI 技術の高度さは、専門性の高いエンジニアと研究者を呼び寄せることになり、この数年間で、ゲーム AI に関する 2 つの国際的な産業カンファレンス (Game Developers Conference AI Summit、Game AI Conference) と 2 つの国際学会 (IEEE Computational Intelligence and Games, AIIDE) が設立されることになった。国際的にデジタルゲームにおける人工知能を研究する気運は高まりつつある。

しかし、全体的な進歩のスピードに対して情報環境が整備されておらず、依然としてデジタルゲームの AI に関する情報は集めにくい環境にあり、研究者もエンジニアもそのせいで参加がしにくい状況にある。資料は幾つかの書籍にも集められているが、多くはインターネット上のデータとして分散している。そもそも論文の体裁となっていない文献も多く、それらは研究者にとっては障壁である。それ

らを収集して全体像をつかむにはかなりの労力を必要とする仕事である。

そこで本稿ではデジタルゲーム AI の分野で大きな課題となっている研究テーマをリストアップし、簡単な解説を行うことで、デジタルゲームにおける人工知能分野の全体像を描いて行く。同時に、代表的な参考文献も示して行く。以下、本稿では、キャラクター AI と言えば、キャラクターの持つ知能の指し、キャラクターとエージェントという用語を同義で用いる。

2. 研究トピックス

(1) キャラクター・ナビゲーションのための世界表現

デジタルゲームでは、広いマップをキャラクターに移動させる場合、レベル (level、ゲームステージのこと) をナビゲーションメッシュ (Navigation Mesh) やウェイポイント (Waypoint) のネットワークグラフとして表現する。ネットワークグラフの 2 点間最短経路を導く A* アルゴリズムを使用し、ダイナミックに経路を計算して移動させる。ナビゲーションメッシュやウェイポイントのようにゲーム世界全体の表現は世界表現 (World Representation) と呼ばれる。世界表現には、他にも「影響マップ」や「ビジビリティマップ」など様々な種類があり、複数の組み合わせによって、より知的な移動や環境認識を実現することができる。

^{†1} (株)スクウェア・エニックス
SQUARE ENIX CO., LTD.

Remco Straatman, Arjen Beij,

"Killzone's AI : Dynamic Procedural Combat Tactics" (2005)

<http://www.cgf-ai.com/products.html>

(「Killzone」(Guerrilla,2004)というFPSゲームのAIの世界表現について解説した論文)

(2) 知識表現の問題

レベル上のオブジェクトのみならず、状況、ゲームのルールについてAIが認識するための知識表現 (Knowledge Representation) は、キャラクターAIにおける最も基本的な問題である。デジタルゲームではキャラクターを取り巻くゲーム世界のあらゆるオブジェクト、地形はデータであるから、そこに自由に情報を付与することができる。そこでAIがさまざまな対象をいかに認識するかヒントとなるデータ (=知識表現) をあらかじめ対象に付与しておく。例えば、リンゴの形をしたデータには「リンゴ、食べることができる、赤い」などAIの認識の助けとなる情報を付与しておく。こうすることで、単なるポリゴンの集まりに過ぎなかったゲーム世界がAIにとって意味を持ち始める。

D. Isla, P. Gorniak: "Beyond Behavior: An Introduction to Knowledge Representation", AI Summit GDC 2009

<http://naimadgames.com/publications.html>

(「Halo2」「Halo3」(Bungie Studio,2004,2007)のリードAIプログラマによる知識表現に関する講演資料)

(3) 意思決定アルゴリズム

キャラクターAIにおける意思決定アルゴリズムは主に (I)ケースベース (II) ステートベース (III) ゴールベース (IV)タスクベース (V)ビヘイビアベース (VI)ルールベース (VII)ユーティリティベース (VIII) シミュレーションベースの8つに分類される。さらにこれらを組み合わせることで多様な意思決定のアルゴリズムが生成される。一つ一つのアルゴリズムにもバリエーションがあり、また組み合わせ方にもコツがある。柔軟かつ一貫性のある思考を産み出すエンジニアリングが必要とされる。

三宅陽一郎: はじめてのゲームAI~意思を持つかのように行動するしくみ~, WEB+DB PRESS, Vol.68, 特集3

(6つの思考の型の分類と解説がされている)

(4) アニメーションと人工知能(意思決定)部分の接合

次世代ゲームのキャラクターAIにおいては、より複雑になるレベルデザインの中で、複雑になったキャラクター身体のアニメーションを制御する必要がある。周囲の環境を認識し、リアルタイムに自分の身体に応じた行動の可能性を見出し、環境に応じた柔軟な運動を実現する強力な人工知能が必要とされる。

John Bellomy : Animating NPC's in UNCHARTED, GDC 2011

<http://www.gdevault.com/play/1014819/Animating-NPC-s-in>

(「Uncharted 3」(Naughty Dog, 2011)のエンジニアによるキャラクターアニメーションの講演資料)

(5) 記憶の動的構造・静的構造

キャラクターが環境から得た情報をどのような形で(表現の問題)、どのような場所に格納して行くか(記憶の静的構造の問題)、という問題は心理学や認知科学のモデルを頼りに、ワーキングメモリ、短期記憶、長期記憶などの階層構造が導入されている。同時にその呼び出し方を定義する必要がある(記憶の動的構造の問題)。

(6) アフォーダンス

アフォーダンスは生態心理学の用語であるが、キャラクターAIで特別に重要な概念である。アフォーダンスは、レベルにある様々なオブジェクトとAIの行動を繋ぐ概念であり、キャラクターAIでは、人間が無意識下で行っている世界に対する意味付け (=アフォーダンス) を、データとして準備してやる必要がある。例えばある地形が「歩くことができる」かどうか、そのオブジェクトは「食べることができるかどうか」、そのドアは「開くことができるかどうか」という情報をオブジェクトに付与することで、AIはその場で行動し得る候補のリストを手に入れることができるのである。

[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, 4gamers (2011)

<http://www.4gamer.net/games/100/G010022/20110906085/>

(日本のゲーム産業カンファレンス CEDEC で発表された、実際のタイトルで大きくアフォーダンスの概念が適用された講演の記事)

(7) メタ AI

メタ AI はゲーム内に身体的実体を持たず、ゲーム全体を俯瞰しゲームをコントロールする AI である。例えば、プレイヤーのスキルを計測し難易度を調整する、プレイヤーの経路を予測しプレイヤーのスキルに合ったモンスターの配置を行う。つまりメタ AI はゲームの外側からリアルタイムにゲームの内容をコントロールする AI である。メタ AI は新しい分野で、これまで静的に固定されていたゲームコンテンツを柔軟にし、動的にゲーム内容を変化させて行く可能性を持つ。

Michael Booth, "The AI Systems of Left 4 Dead," Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference at Stanford (2009)

Michael Booth, "Replayable Cooperative Game Design: Left 4

Dead," Game Developer's Conference (March 2009).

<http://www.valvesoftware.com/publications.html>

(「Left 4 Dead」(Valve Software,2008)でユーザーの緊張度に応じてゲーム内容を変化させるメタ AI の事例を解説した講演資料)

(8) エージェント・アーキテクチャの設計

キャラクターAI を構築するフレームとしてエージェント・アーキテクチャが様々な発展している。複数のモジュールや多様なアルゴリズムを内包して一つの知性としてパッケージングして行くアーキテクチャとは何かを模索されている。現代のFPS のキャラクターAI のエージェント・アーキテクチャの原型は、すべて MIT Media Lab Synthetic Characters Group の C4 アーキテクチャを端緒としている。

R. Burke, D. Isla, M. Downie, Y. Ivanov, B. Blumberg:
CreatureSmarts: The Art and Architecture of a Virtual Brain,
GDC 2001

<http://alumni.media.mit.edu/~solan/creatureSmarts.pdf>

(9) インフォメーション・フロー

デジタルゲームにおける AI は、世界から AI に情報が流れ(認識し)、AI から世界に影響を与える(情報を流す=行動する)と見ると、AI と世界の間で環を為す情報の流れ(インフォメーション・フロー)が形成されている。このインフォメーション・フローをどのように構築し、流れる情報にどのような構造を持たせるか、という観点は、ソフトウェア科学とキャラクターAI を繋ぐ中心概念である。

Jaime Griesemer,Chris Butcher:The Illusion of Intelligence,
GDC 2002

<http://www.bungie.net/inside/publications.aspx>

(「Halo」(Bungie Studio,2002)のキャラクターAI のアーキテクチャの講演資料)

知能の構造図

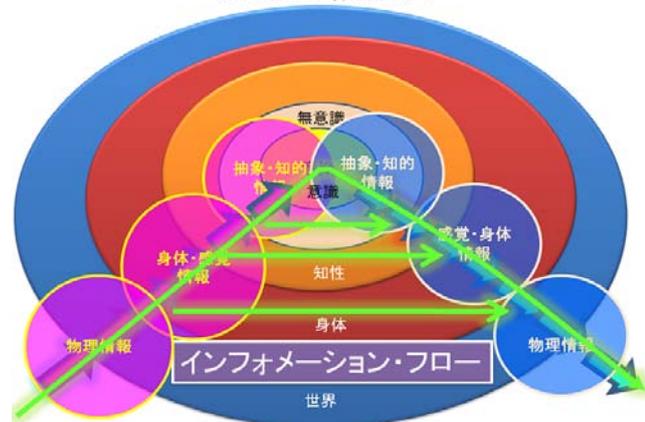


図1 インフォメーション・フローと知能の構造図
Figure 1 Information Flow and Structure of Intelligence

(10) コミュニケーション

デジタルゲームではこれまで真正面からキャラクター同士のコミュニケーションに取り組んで来なかった。その理由の一つはデジタルゲームが扱う状況が AI 同士のコミュニケーションを有効に活用できるほど大きくなかった、もう一つはコミュニケーションに負荷をかけるよりゲーム的演出でごまかす、という方法が取れるからである。しかし次世代ゲームに向けて、ゲームのスケールと複雑さが増し、そういったごまかしが利かなくなり、リアリティのある AI が求められるようになった。AI と AI、AI とプレイヤー間のコミュニケーションはゲームデザインを幅を広げるために必要な技術である。コミュニケーションの形式やプロトコル、知識交換や知識更新の仕組みの整備が必要である。三宅陽一郎:「社会シミュレーションとデジタルゲーム」、IGDA 日本ゲーム AI 連続セミナー第7回 (2010)

http://igda.sakura.ne.jp/sblo_files/ai-igdajp/AI/GameAI_seminar_7th_21.pdf

(IGDA 日本ゲーム AI 専門部会が主催している連続セミナー第7回講演資料)

(11) 感情

感情はデジタルゲームのさまざまなジャンルにおいて最も難しい問題の一つである。デジタルゲームでは感情をパラメーターに還元させたり、動作に還元するというアプローチがメインであり、あまり深く踏み込むことはしない。なぜなら、どんなにキャラクターの内部に複雑な感情モデルを作っても、プレイヤーがそれに対して信憑性(believability)を持つとは限らないからである。エンターテインメントとしてのデジタルゲームは、ユーザーを楽しませることが目的であるから、ユーザーが主観的にキャラクターが感情を持っていると感じさせること、キャラクターに実装した客観的な感情の仕組みの二つは区別して考える必要がある。

(12) 協調の仕組み

AI 同士が理解し協調するにはどのようにすればよいのか。黒板モデルを用いた協力の他、リアルタイムに運動するエージェント間の協調について、様々な方式が開発されている。コミュニケーションとも関連して、浅い連携の仕組みから深い連携の仕組み、たとえば、他の AI の意図を汲んで協調するなど、さまざまな時間と空間のスケールの連携の方法が必要である。

三宅陽一郎、横山貴規、北崎雄之: エージェント・アーキテクチャに基づくキャラクターAI の実装、第4回デジタルコンテンツシンポジウム(2008)

http://igda.sakura.ne.jp/sblo_files/ai-igdajp/dcs2008/YMiyake_DCS_2008_6_11paper.pdf

(ゴール指向プランニングを用いた協調の仕組みの論文)

(13) エージェントによる創作

キャラクターたちが協力してデジタル空間の中で建築を作り上げる、というコンテキストは、これまで環境に対して受動的であったエージェントたちが、より積極的に環境を変えて行く技術として、次世代ゲームにおける一つのストーリーテーマとなると予想される。例えばキャラクターたちが協力して街に建築物を組み上げる、渡れない河に橋をかける、などである。

(14) マルチエージェント～群知能

マルチエージェントから群知能まで、複数のエージェントを制御する AI は、一部のシミュレーションゲームを除けば、デジタルゲームでは使用されて来なかった技術である。なぜなら、こういった制御は俯瞰視点から見れば連携の面白さが見えるが、プレイヤー・キャラクターの一人称・三人称視点からは、その面白さが見えにくいからである。プレイヤーの視点から見えるマルチエージェントの面白さを見せる技術が必要とされる。

Damian Isla, Building a Better Battle: The Halo 3 AI Objectives System, GDC 2008.

<http://naimadgames.com/publications.html>

(「Halo3」におけるエージェント協調の仕組みの講演資料)

Alex J. Champandard, Remco Straatman, Tim Verweij: On the AI Strategy for KILLZONE 2's Bots, GDC 2010 AI Summit

Remco Straatman, Tim Verweij, Alex Champandard: Killzone 2 Multiplayer Bots, Paris Game AI Conference

<http://aigamedev.com/open/coverage/killzone2/>

(Killzone2(Guerrilla,2009)におけるエージェント協調の仕組みの開発者による講演資料)

(15) プランニング

F.E.A.R.に導入されたキャラクター・アクションをリアルタイムに生成するプラナーは2004年以降の登場以来、この10年で最も革新的な仕事としてゲーム産業で高く評価されて、さらにいくつかのタイトルにも応用された。次世代キャラクターの意思決定アルゴリズムとして、プランニングは最も有望な技術であり、さまざまな種類のプラナーが導入され続けている。「変化し続ける環境におけるプランニング」によってロバストな AI を作る仕組みが求められている。

Jeff Orkin: Three States and a Plan: The A.I. of F.E.A.R., GDC 2006

<http://web.media.mit.edu/~jorkin/>

(「F.E.A.R.」(Monolith Productions,2005)というFPSで導入されたアクションをプランニングで繋いで一連の動作を構築するGOAP(Goal Oriented Action Planning)と呼ばれるプランニングに関する解説。)

(16) 学習

産業におけるデジタルゲームのAIと学術におけるデジタルゲームのAIの大きな違いは、産業においては学習アルゴリズムを使用することは殆どないという点である。学習アルゴリズムは開発者にとって(a)原理の理解が難しく(b)収束を制御することが難しく(c)さらにゲームデザインに沿ってカスタマイズすることが難しいからである。しかし次世代へ向けて次第にいくつかのタイトルで学習アルゴリズムが使われつつあり、次世代では学習によるゲームAIのブレイクスルーがあると予想される。よって事前に学習に関する研究を進めておく必要があるが、学術における数値的なレベルの学習アルゴリズムと異なり、キャラクターAIではエージェントのアーキテクチャを構築した上で、その構造に則った内部学習を考える必要がある。また最新の研究分野のトピックとしては、囲碁AIにおいて大きな威力を発揮した「モンテカルロ木探索」の方法が、アクションゲームへも応用の領域を広げている。

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)

<http://www.ai-gakkai.or.jp/jsai/whatsai/PDF/article-iapp-7.pdf>

(遺伝的アルゴリズムを用いてAIを進化させた「アストロノカ」(MuuMuu,1998)のAIに関する解説記事)

(17) プロシージャル・コンテンツ・ジェネレーション

プロシージャル・コンテンツ・ジェネレーション(PCG、Procedural Contents Generation)は、デジタルゲームの内部において、アルゴリズムによって、或いは一定のデータからアルゴリズムによってコンテンツ(オブジェクトモデル、テクスチャ、アニメーション、音楽...)を自動生成することを言う。30年前からRogueなどの自動生成ダンジョンなどが例があるが、時代と共により複雑なコンテンツを生成できるようになって来た。SIGGRAPHなどにおける90年代の自動生成の研究成果が、時間を置いて、ゲーム開発の現場で使用されている。

三宅陽一郎：オンラインゲームにおける人工知能・プロシージャル技術の応用、日本知能情報ファジィ学会誌 Vol.22, No.6 (2010)

http://igda.sakura.ne.jp/sblo_files/ai-igdajp/image/JSFTII_22-6_online20game_Miyake.pdf

(18) ストーリー・ジェネレーション

特に米においてストーリーを自動生成する研究が盛んになりつつある。主にプランニングを使った手法が多いが、まだ初期的な研究段階にある。IEEE CIG や AIIDE で多く研究が見受けられる。

Michael Mateas, Andrew Stern: Facade (2005)

<http://www.interactivestory.net/>

(ドラマ自動生成の作品として広く知られている。)

(19) 物理と AI

動的な環境の下で、人間が物の運動を考慮して予測の上で自らの行動を決定するように、AI も自分を取り巻く世界の法則を知り、周囲のオブジェクトの運動をシミュレーションしながら自分の行動を決めて行く必要がある。AI が主観する理解する物理（定性物理）や、シミュレーションベースの思考は、それによってしか解けない運動の問題があり重要である。

(20) ソーシャル AI

ソーシャル AI とは、社会性を持った AI のことを言う。これまでデジタルゲームでは AI は主にプレイヤーを倒す役割を持った孤立した攻撃的な AI であったが、一方で生活シミュレーションやストーリーベースのゲームでは日常的な会話を行ったり、社会生活を営む AI が必要とされる。そのようなソーシャル AI において必要とされる AI 技術の研究はこの 2,3 年で急速に盛り上がりつつある。

Richard Evans: Modeling Individual Personalities in The Sims 3, GDC 2010

<http://www.gdcvault.com/play/1012450/Modeling-Individual-Personalities-in-The>

(The Sims 3 という人間の生活をシミュレーションしたゲームの AI の仕組みを解説した講演資料)

Prom Week (2010)

<http://games.soe.ucsc.edu/project/prom-week>

(UC Santa Cruz の研究グループのソーシャル AI の作品。社会生活を営む AI たちが様々な形でインタラクションを行う。)

(21) ソーシャルゲームにおける AI

携帯電話や SNS をプラットフォームとして、簡単な動作で人と連携してプレイできるソーシャルゲームは、新しいゲームのジャンルとしていかに AI を導入するかが課題とされている。

R.Zubek: Engineering Scalable Social Games. GDC 2010

http://gdcvault.com/play/1012230/Engineering_Scalable_Social_Games

(Zynga のエンジニアによるゲーム内の AI に関する講演資料)

(22) チューリングテスト

あるゲームを人間がプレイした映像と、AI がプレイした映像を比較して、どちらが人間がプレイしたかを当てることで、AI のチューリングテストを行う AI をより人間に近づけることに役立つ。例えば、2KBotPrize では、FPS ゲームを題材に、毎年、Bot のプログラムが募集されており、人間と Bot が混在したマルチプレイゲームの中でプレイヤーや他の Bot から人間と見分けがつかないかを評価する。

The 2K BotPrize

<http://botprize.org/>

(23) 意識モデル

意識モデル (Machine Consciousness) はエージェントを単なる効率の良い情報処理体から、自意識やアテンションを持つ知性へとレベルアップさせようとする試みであり、様々なモデルが提案され動作検証が為されている。認知科学や心理学の知見をエージェント・アーキテクチャに導入している。

Raul Arrabales, Agapito Ledezma, Araceli Sanchis:

CERA-CRANIUM: A Test Bed for Machine Consciousness Research, International Workshop on Machine Consciousness 2009

<http://novamente.net/machinecs/Arrabales.pdf>

(The 2K BotPrize でも優勝した CERA-CRANIUM アーキテクチャの論文)

3. まとめ

本稿ではゲーム AI の中心的な課題をリストアップし簡単な解説を行った。しかし、デジタルゲーム AI 分野は日々進歩しており、毎日キャッチアップする必要がある。以下に情報源となるサイトを挙げておく。

(i) Web サイト

AIGameDev

<http://aigamedev.com/>

デジタルゲーム AI で最も有名なサイトである。一部有料記事であるが、ゲーム産業における動向を追うことができる。

デジタルゲームの教科書 (SBCr) サイト

<http://www.s-dogs.jp/dgame/index.html>

リファレンスのところにゲーム AI とプロシージャル技術に関する主要な文献 300 件に渡るリンクリストがある。

(ii) 学会

IEEE CIG (Computational Intelligence and Games)

<http://www.ieee-cig.org/>

IEEE であるので学術よりの学会である。

AIIDE (Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference)

<http://www.aiide.org/>

毎年、スタンフォード大学で開催される。シリコンバレーという土地柄もあってゲーム開発者も参加する。

またこれらの学会では、ゲーム AI の産業応用を目指して、StarCraft、レーシングゲーム、FPS など各ジャンルの AI の競技会 (コンテスト) が開催され、この分野の発展のエンジン役を担っている。

(iii) 産業カンファレンス

GDC AI Summit

<http://www.gdconf.com/conference/ai.html>

世界最大のゲーム産業カンファレンス GDC の前二日に開催されている。

Game AI Conference

<http://gameaiconf.com/>

AIGameDev が主催する欧州を中心としたゲーム AI カンファレンスである。

(iv) メイリングリスト

AI Game Programmers Guild

<http://www.gameai.com/>

AI プログラマのコミュニティ。ギルドという名前とは違って普通のコミュニティである。ゲーム AI の仕事をした開発者に限られると書かれているが、実際それほど制限も強くない。メイリングリストが活発。業界の中心的人物が集まる。

(v) 書籍

AI Game Programming Wisdom I-IV

<http://www.aiwisdom.com/>

公募による投稿から審査を経たゲーム AI に関する記事が集められる書籍。2-3 年ごとに一冊のペースで刊行されている。記事によって質の違いはあるが、重要なゲーム AI に関する記事が多数収録されている。

(vi) GDC Vault, CeDIL

年に一度開催される世界最大のゲーム産業カンファレンス Game Developers Conference の講演資料置場。一部有料制限がかかっているが多くの資料に無料でアクセスできる。

GDC Vault

<http://www.gdcvault.com/>

日本最大のゲーム産業カンファレンス CEDEC の資料置場は以下で、登録すれば全ての資料にアクセスが可能。

CeDIL

<http://cedil.cesa.or.jp/>

(vii) 教科書

Mat Buckland: 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

はこの分野で最も出来の良い入門の教科書である。

三宅陽一郎 (共著) : デジタルゲームの教科書, SBCr, 2010

は、比較的最近のゲーム AI とプロシージャル技術の動向がまとめられている。また参考文献が充実している。

(文書おわり)