



私のブックマーク

デジタルゲームの人工知能^{†1}

三宅 陽一郎 (株式会社スクウェア・エニックス)

1. はじめに

デジタルゲームにおける人工知能研究は、現実そっくりの仮想シミュレーション空間で、キャラクタという身体をもつ知能をつくって試す、という取り組みです。そこでは複雑な三次元の地形をつくって、複雑な身体の動作を決めさせることもできれば（例えばファンタジー世界で溪谷を歩かせるなど）、長時間に及ぶ複雑なミッションを解かせる（例えば、敵の基地に潜入して設計書をもって帰る）こともできます。時間を素早く進めて進化アルゴリズムや学習アルゴリズムを用いることもでき、ニューラルネットワークで動作や選択を学習することもできます。デジタルゲームは多様で巨大な実験の場でもあります。しかしゲーム大国といわれる日本、事実新しい種類のゲームを出すことにおいては他の追随を許さない日本において、2017年現在デジタルゲームの人工知能の研究者はとても少ない状態にあります。ここでは、研究を始める端緒、ご興味をもっていただく契機としてデジタルゲームの世界を深く広く俯瞰する文献をご紹介します。導入を考えて、あえて学術文献・論文のみに絞らずに、Web記事や書籍、Web上の解説なども含ませてありますので、ご了承ください。

- (1) デジタルゲームの人工知能とは
- (2) デジタルゲーム AI の産業団体・産業会議
- (3) デジタルゲーム AI の学術団体・学術会議
- (4) デジタルゲーム AI の書籍
- (5) キャラクタ AI
- (6) ナビゲーション AI
- (7) メタ AI
- (8) 学習・進化アルゴリズムとデジタルゲーム AI
- (9) 身体アニメーションと人工知能
- (10) ソーシャルゲームと人工知能
- (11) 会話とキャラクタ AI
- (12) コンテンツ自動生成のためのプロシージャル技術
- (13) 群衆 AI
- (14) In Game Cinematics (カットシーン) とキャラクタ AI
- (15) ゲーム AI ツール
- (16) カメラ AI
- (17) ゲームエンジンの中の人工知能
- (18) デジタルゲーム AI の歴史
- (19) 哲学とゲーム AI
- (20) 日本におけるゲーム AI 事例

(1) デジタルゲームの人工知能とは

デジタルゲームの人工知能とは、狭義では「デジタルゲームの中で使用される人工知能技術」を指しますが、広義では「ゲームに登場するキャラクタにおける技術、ゲームを面白くするダイナミック（動的）な仕組み」まで含

^{†1} http://www.ai-gakkai.or.jp/my-bookmark_vol32-no4

みます。通常の「人工知能」の指す領域を定義することが難しいように、「デジタルゲーム AI」の領域は日々成長しており、厳密に定義することは難しいのですが、大まかに上記のようにいうことができます。

まずこちらのインタビュー形式の解説で概要をつかんでください。

- ・ 21 世紀に「洋ゲー」でゲーム AI が遂げた驚異の進化史, 電ファミゲーマー (2017) [1]

デジタルゲーム AI の現状を解説論文の形でまとめたものです。100 以上の参考文献がありますので、参考文献を含めてご利用ください。

- ・ 三宅陽一郎: デジタルゲームにおける人工知能技術の応用の現在, 〈特集〉エンターテインメントにおける AI, 人工知能, Vol. 30, No. 1, pp. 45-64 (2015) [2]

次に, 本誌 Vol. 32, No. 2 では, 特集「ゲーム産業における人工知能」が組まれています。こちら AI 書庫にてすべての記事を読むことができます。

- ・ AI 書庫, 人工知能, Vol. 32, No. 2 (2017) [3]

また次の二つのサイトによくまとまっています。

Cygames Engineers' Blog

- ・ ゲーム AI —基礎編—『知識表現と影響マップ』[4]
- ・ ゲーム AI —基礎編 (2) —『はじめてのエージェントベースアーキテクチャ』[5]

講義の参考本として, また最初に読む本としては, 以下の書籍があります。巻末に参考文献リストが充実しています。

- ・ 三宅陽一郎: 人工知能の作り方—「おもしろい」ゲーム AI はいかにして動くのか, 技術評論社 (2016) [6]
- ゲームタイトルへの実際的な応用事例としては以下の二つの文献で概要をつかむことができます。

- ・ 長谷洋平: 複数タイトルで使われた柔軟性の高い AI エンジン (CEDEC 2015) [7]
- ・ 三宅陽一郎 ほか: 大規模ゲームにおける人工知能—ファイナルファンタジー XV の実例をもとに—, 人工知能, Vol. 32, No. 2, pp. 197-213 (2017) [8]

ゲーム AI の資料があるのは, 主に「CEDiL」(日本のゲーム産業カンファレンス CEDEC の講演資料置き場), 「GDC Vault」(米のゲーム産業カンファレンス GDC の講演資料置き場), 「NUCL.AI」欧州のゲーム産業カンファレンス), AIIDE (AAAI の分科会), IEEE CIG, そして人工知能学会 AI 書庫です。

- ・ CEDiL (無料登録ですべての資料を閲覧可能) [9]
- ・ GDC Vault (一部有料) [10]
- ・ NUCL.AI (有料登録のみ) [11]
- ・ AAAI AIIDE (Proceedings をすべて公開) [12]
- ・ IEEE CIG (Proceedings をすべて公開) [13]
- ・ 人工知能学会 AI 書庫 [14]

以下では主にこの六つの中から文献を紹介して行きます。

(2) デジタルゲーム AI の産業団体・産業会議

デジタルゲーム AI の世界の進歩は日進・月歩であり, 「建設中」という標語がふさわしい分野です。さまざまな方向が毎年のように試されます。そこからブレイクスルーが生まれますので, 世界的には開発者・研究者の距離も近く, 同じフィールドを探索する同志のようです。

デジタルゲームの開発者・研究者における団体は,

- ・ AI Game Programmers Guild [15]

です。主にメーリングリストで毎日のように議論が展開されています。上記サイトから登録を申請すると入ることができます。ただ個人が管理しているので, 返信が来なくても根気良く何度も申請するのがコツです。ここに登録しておくことで, 最先端の産業ゲーム AI の動向を知ることができます。

産業のカンファレンスとしては, 毎年, 2~3 月にサンフランシスコで開催される Game Developers Conference (GDC) 内の AI Summit, および GDC の Regular Session としての AI 系の講演群が最も大きなものです。

- ・ Game Developers Conference [16]
- ・ GDC AI Summit [17]

ただ AI Summit は GDC 5 日間の前 2 日間のチュートリアルという色合いが濃く, これと併せて後半 3 日間の中にある各タイトルの AI セッションを聴講したり, 発表することで意味があります。

GDC Vault で, 講演資料, 講演動画 (一部有料) が公開されています。

- ・ GDC Vault [18]

また, 情報サイトとしては

- ・ AiGameDev [19]

が有名です。この AiGameDev が主催する欧州のカンファレンスは **Game AI Conference** といいます。毎年、サイトで資料が公開されていました。最近では名前を変えて、Nucl.AI という名前になり継続されています。ただ、これは Alex さんとその会社のプライベートなカンファレンスであり、2017 年は休止されています。

- ・ NUCL.AI [20]

こちらは有料ですが、資料と動画が公開されています。過去の資料は AiGameDev 上にもあります。

- ・ Paris Game AI Conference '10: Highlights, Photos & Slides [21]

また、ゲーム情報サイト

- ・ Gamasutra [22]

には、ときどきゲーム AI の記事が掲載されます。その中でも重要な記事は、2005 年の「HALO2」(Bungie) に関する人工知能の記事です。

GDC 2005 Proceeding: Handling Complexity in the Halo 2 AI (Gamesutra) [23]

ここで解説された Behavior Tree という方法が、現在のキャラクタの意思決定をつくる標準的な形式となっており、必読の記事の一つです。

国内としては、ゲーム産業カンファレンス

- ・ CEDEC [24]

があります。毎年 8 月下旬～9 月上旬に横浜で開催されています。かつては数個でしたが、現在は AI 関連のセッションが 10～20 程度あります。

ゲーム AI の国内の団体としては、

- ・ 国際ゲーム開発者協会日本 (IGDA 日本。毎月、ゲーム開発に関するさまざまなセミナーを開催している) [25]

の中の

- ・ IGDA 日本ゲーム AI 専門部会 [26], [27]

があり、定期的にセミナーを実施しています。セミナーのアナウンスは IGDA 日本のサイトで行われます。

(3) デジタルゲーム AI の学術団体・学術会議

デジタルゲーム AI の学術会議としては二つあり、AAAI の分科会の一つである

- ・ AIIDE [28]

があり、毎年プロシーディングスが公開されています。発表時間が比較的長く、基調講演は産業界からの招待も多いので、産学を近づける場として機能してきました。一つ一つの発表に重みがあります。これに併設されていた

- ・ Intelligent Narrative Technologies (INT) [29]

は物語自動生成をテーマとするカンファレンスで、萌芽的な研究が発表されています。

また

- ・ IEEE CIG (IEEE Computational Intelligence and Games) [30]

があります。こちらでもプロシーディングスが公開されています。テーマは広範囲に及びます。AIIDE は産学連携の傾向が強いですが、IEEE CIG は学術的な発表の集合です。

(4) デジタルゲーム AI の書籍

- ・ Mat Buckland: AI Techniques for Game Programming, Cengage Learning PTR (2002) [31]

は学習・進化アルゴリズムをゲームへと応用したデモを作成し解説しています。

デジタルゲーム AI 全般については、代表的な教科書があります。

- ・ Mat Buckland: 事例で学ぶゲーム AI プログラミング, オライリージャパン (2007) [32]

- ・ Mat Buckland: Programming Game AI by Example [33]

は自身がゲーム AI 開発でもあり、優れた本や記事の著者です。

2001 年から発行されシリーズ化されることになる「Game Programming Gems」(ボーンデジタル) は、さまざまなゲーム開発者によるゲーム開発技術を解説した書籍であり、第 8 巻まで刊行されています。第 1 巻の「AI 章」はほぼパス検索の記事ばかりでした。実際、この記事からパス検索が広まっていきました。

- ・ Game Programming Gems [34]

ゲーム AI 開発技術を集めた書籍「AI Game Programming Wisdom」シリーズはそれぞれのゲーム AI 開発者が記事を寄稿した形の本ですが、2002 年以来、全 4 巻が刊行され、2010 年までの代表的なゲーム AI の知見が集められ

ています。

- ・ AI Game Programming Wisdom [35]

現在は「GAME AI PRO」という名前で第3巻まで刊行されています。刊行から2年経つと記事がWeb公開されますので、以下のサイトから全部の記事を読むことができます。パス検索の記事も豊富です。

- ・ GAME AI PRO [36]

(5) キャラクタ AI

デジタルゲームの人工知能の中心的課題は、やはり「キャラクタに知能を入れる」ことです。この分野を「キャラクタ AI」といいます。認識、意思決定、身体運動まで、キャラクタの活動のすべてを扱います。またゲーム産業内の方言として、キャラクタのことを単に「AI」という場合もあります。ゲームのキャラクタは身体をもっており、ロボットのように身体を含んだ全体的な知能を築く必要があります。そこで2000年頃からロボティクスの知能の技術を取り入れて自律的な知能の実現を目指してきました。

キャラクタ AI の歴史については、

- ・ 「デジタルゲームにおける人工知能技術の応用」, 人工知能学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 44-51 (2008) [37]
- にまとめてあります。その起源は、2000年を前後する「MIT Media Laboratory's Synthetic Characters Group」の研究にあります。このグループは、現在はありませんが、研究成果をこちらからご覧いただけます。

- ・ MIT Media Laboratory's Synthetic Characters Group [38]

この研究室に属していた Damian Isla 氏が AI リードを務めた『Halo 2』(2004), 『Halo 3』(2008) (Bungie Studio) は世界的なヒット作となり、AI においても好評を博します。Damian Isla 氏のサイトにその設計書や研究成果が掲載されています。

- ・ Naimad Games publications [39]

2006年頃から「エージェントアーキテクチャ」の枠組みの中でつくることがデフォルトになってきます。Jeff Orkin 氏の「F.E.A.R.」(Monolith Productions, 2004)における、エージェントアーキテクチャを基礎として、意思決定モジュールに「ゴール指向アクションプランニング」GOAP)を組み込んだ仕事は有名です。これはリアルタイムに、ゲームでいうと 1/30 秒, 1/60 秒の中で行動プランニングを行うという開発方向の始まりであり、2000年代で最もインパクトのあった仕事といわれています。こちらに論文と発表資料があります。

- ・ Jeff Orkin さんの AI 文献置き場 [40]

日本でもこの流れを受けてキャラクタの内面が構造化されていきます。

- ・ 長谷洋平: 汎用ゲーム AI エンジン構築の試みとゲームタイトルでの事例, 人工知能, Vol. 32, No. 2, pp. 189-196 (2017) [41]

が実例を踏まえてよくまとまっています。さらに、思考を階層化しタスクプランニングまで用いたのが『KILLZONE 2』(Guerrilla Games, 2009)というタイトルで、階層型タスクネットワーク (Hierarchical Task Network) という方法で毎秒 500 個に及ぶ思考を生成します。

- ・ Alex J. Champandard: Hierarchical Task Networks for Mission Generation and Real-time Behavior, AiGameDev (2010) [42]

キャラクタ AI の研究の方向は「リアルタイム」ゲームでは 1/30 秒など) でいかに深い意思決定を行えるかです。リアルタイムで動いていなかったさまざまな意思決定アルゴリズムをリアルタイムに動かす方向で、ゲーム産業は学術における成果を援用してきたのです。

(6) ナビゲーション AI

キャラクタはまた環境を認識する必要があります。環境認識のための知能を「ナビゲーション AI」といいます。これはカーナビのようにパス検索をしたり、雪が降って地表の状態が変わったり、木が倒れて道が塞がれたり、車が移動して障害物になったりする環境の変化を認識する役割をもっています。デジタルゲームでは、ナビゲーションを行う母体となる「ナビゲーションデータ」を衝突モデルと呼ばれる物理のインタラクションのためのデータから自動生成します。さらにそのうえで、Dijkstra アルゴリズムや A* アルゴリズムでパスをリアルタイムに検索します。

まずこちらの記事や動画からパス検索のイメージをつかんでいただければと思います。

- ・ [SQEXOC 2012] FFXIV で使われている AI 技術～敵 NPC はどうやって経路を探索しているのか?, 4gamer.net (2012) [43]

YouTube などでも「A* pathfinding」などで検索するとたくさんのデモが見られます。

- ・ RTS — Pathfinding A* [44]

ナビゲーション AI は比較的独立した分野として開発される場合が多く、『Dragon Age: Origins』(BioWare, 2009) では、カナダのアルバータ大学のゲーム AI 研究室と共同開発がされています。

- ・ The University of Alberta GAMES Group[45]
- ・ 『Dragon Age:Origins』のパス検索動画 (公式サイト) [46]

パス検索は現在ではほぼデフォルトの技術になっていますが、検索するだけでなく周囲の地形を深く理解することで、より環境を用いた行動ができるようにすることが重要な役割です。

ナビゲーション AI の研究の方向は、変化し続ける環境をいかに自分の身体性能に応じて認識するか、です。つまり、環境の中で今自分が何を行えるかを局所的・大局的に瞬時に把握することが課題です。

- ・ CGF-AI [47]

こちらのサイトは、ナビゲーション AI のつくり込みで有名な「Killzone」Guerrilla Games (2005) のナビゲーション AI をつくったチームの解説文書の置き場です。

また

- ・ NavPower [48]
- ・ Autodesk Navigation [49]

のように、市販されているパス検索ミドルウェアも複数存在します。

また、最新の技術として「位置解析技術」があります。これはキャラクタ自ら、自分の能力に合った地点を地形の中から見つけだす能力です。

- ・ CryEngine [51]

において実装され、「Lichdom」Maximum Games (2014) というゲームで応用されています。

- ・ Matthew Jack and Mika Vehkal: Spaces in the Sandbox: Tactical Awareness in Open World Games (GDC 2013) [52]

UNREAL ENGINE (EPIC GAMES) では、EQS という名称で用意され、利用することができます。

- ・ Environment Query System [52]

こちらのビデオで EQS に導入からさまざまな応用までを知ることができます。

- ・ 「スクウェア・エニックスにおける UNREAL ENGINE 4 を用いた人工知能技術の開発事例」 [53]

(7) メタ AI

「メタ AI」は物理的実体を持ちませんが、ゲーム全体を観測し、ユーザが楽しめるようにゲーム全体の展開をもっていく。戦闘中などにはプレイヤーに楽しんでもらえるように、敵チームがうまく戦闘で緩急をつけたり、一度にプレイヤーを襲わなかったり、逃げる方向をわざと空けておいたり、味方チームが回復魔法を適切なタイミングで掛けたり、敵の攻撃から体を張って助けてくれたり、という、ゲーム全体の調整を施します。

プレイヤーが役者だとすれば、「メタ AI」は映画監督で「AI ディレクター」と呼ばれる場合もありますが、メタ AI は、俯瞰的に状況を認識し、ゲームが面白くなるようにキャラクタや地形変化を動的に行います。

メタ AI の歴史は古く「パックマン」(ナムコ, 1979) まで遡ります。こちらの起源については、パックマンの作者である岩谷 徹教授のインタビュー記事があります。

- ・ “世界最古” にして現代ゲーム AI の先駆。21 世紀に『パックマン』が再評価される理由を、作者・岩谷徹氏× AI 開発者・三宅陽一郎氏が解説【仕様書も一部公開!】、電ファミゲーマー (2017) [54]

この記事に掲載されているとおり、古典的メタ AI は「パックマン」に起源をもち、現代のメタ AI は「LEFT 4 DEAD」(Valve, 2009) に始まります。Valve Corporation は、ゲーム AI を牽引してきた企業です。彼らの「AI Director」の発表資料はこちらで公開されています。2009 年の三つの資料が「AI Director」に関する資料です。

- ・ Valve publications [55]

「メタ AI」はこれからの技術です。古くて新しく、ようやくメタ AI が活躍する土台が出来上がったのが、この数年といえます。それは「プロシージャル技術」や「物語生成」と結び付き、ゲームそのものをつくり出す人工知能へと変貌しようとしています。

「Warframe」Digital Extremes (2013) では、ダンジョン自動生成から敵の配置、出現タイミングまですべてメタ AI が管理しています。

- ・ Daniel Brewer: AI Postmortems: Assassin's Creed III, XCOM: Enemy Unknown, and Warframe (GDC 2013) [56]

また、戦闘の場を整える AI としてもメタ AI は機能しています。

- ・ 上段達弘, 下川和也, 高橋光佑, 並木幸介: FINAL FANTASY XV におけるレベルメタ AI 制御システム (CEDEC

2016) [57]

- ・『FFXV』におけるAI制御の事例・対応例を解説 AI技術がどのようにコンテンツを成立させていくのか【CEDEC 2016】(ファミ通.COM) [58]

さらにサッカーゲームの試合を組み立てるプランニング技術を用いた人工知能としてもメタAIは現れます。

- ・安藤 毅：リアルタイムサッカーシミュレーションゲームのAIシステムの一手法について，人工知能，Vol. 32, No. 2, pp. 180-189 (2017) [59]
- ・田邊雅彦：「WCCF AI エンジニアリング」(DiGRA JANAN 2009年5月公開講座，東京大学) サッカーゲームAIの設計と実装 [60], [61]
- ・ロボカップサッカーシミュレーション [62]

は，同じデジタルゲームということで，ゲーム産業の人工知能と近い位置にあります。

- ・「WORLD CLUB Champion Footballを支える5つのAI－DiGRA JAPAN 5月公開講座」Inside Games(2009) [63]

では，日本デジタルゲーム学会のセミナー（於：東京大学山上会館）として，セガの田邊雅彦氏と電気通信大学の西野順二氏の講演と対談が行われました。

(8) 学習・進化アルゴリズムとデジタルゲームAI

「学習・進化アルゴリズム」はゲームAIではそれほど多く使われません。年に数タイトルが使う程度です。デジタルゲームの多くは商業作品ですので，どちらかというと，きっちりとデータをつくってしまう伝統的な知識ベースの人工知能がほとんどです。「学習・進化アルゴリズム」は，学習結果，進化結果にさまざまな可能性があります。ゲームから見ると，これはユーザに提供するコンテンツが揺らいでしまうので，その揺らぎをうまくゲームデザインに取り込む必要があります。学習・進化アルゴリズムとゲームデザインの間の関係をみごとに説明した，この分野の世界的パイオニアである森川幸人氏の解説論文があります。

- ・森川幸人：ビデオゲームとAIは相性が良いのか？，人工知能，Vol. 32, No. 2, pp. 166-171 (2017) [64]

森川氏はまた，自身の開発したゲームにニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを用いています。

- ・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, pp. 214-218 (1999) [65]

また，Microsoft Researchでは格闘ゲームやレーシングゲームを使って強化学習などの研究が推進されています(DOWNLOAD から)。

- ・Microsoft Research: Video Games and Artificial Intelligence [66]

デジタルゲームは工業製品でもありますので，厳密なワークフローをつくります。そこで学習や進化アルゴリズムは強い自律発展性をもっており，その特性をワークフローやゲームデザインに組み込む必要があります。そういった知見がまだ圧倒的に不足しています。

またこれとは全く違った視点で，ゲーム自体を進化させる「ゲーム進化」という方向があります。これは例えば，ゲームデザインの要素を遺伝子として設定して，遺伝的アルゴリズムによってゲームを進化させていく方法です。以下のサイトにゲーム進化の情報がまとまっています。

- ・M. J. Nelson: Bibliography: Encoding and Generating Videogame Mechanics [67]

「Black & White」Lionhead Studios (2001) は，ニューラルネットワークでキャラクタを進化させており

- ・Richard Evans (Lionhead Studios): Varieties of Learning, AI Game Programming Wisdom, 1巻 [68]

また，「Supreme Commander 2」Gas Powered Games (2010) では，ニューラルネットワークで敵ターゲットイング選択を学習させています。

- ・Chris Jurney, Michael Robbins and Ben Sunshine-Hill: Off the Beaten Path: Non-Traditional Uses of AI (GDC 2012) [69]

Creatures シリーズは1990年代にニューラルネットワークでキャラクタとユーザとのインタラクションの中で学習させた画期的なゲームでした。

- ・Creatures Wiki (参考文献に技術文書へのリンクがあります) [70]
- ・Grand Steve, Cliff, Dave and Mahotra Anil: Creatures: Artificial Life Autonomous Software Agents for Home Entertainment, AGENTS'97 Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (1996) [71]

(9) 身体アニメーションと人工知能

キャラクタは身体をもちます。身体動作を研究するのは「アニメーション」分野ですが、身体動作の指示を出すのはAIや反射動作だったりします。この身体と知能をどう結べばよいかは明確なモデルがなく、これからの研究分野です。知能と身体という二つを結ぶことは見掛け以上の深い問題をはらんでいます。キャラクタのアニメーションは、かつては「手付け」といってモーションデザイナーがツール上で作成していましたが、現在は、モーションキャプチャで役者を使って実際のモーションを取ってから加工するのが主流です。もう一方の考え方が計算によって動作をつくり出す「プロシージャルアニメーション」です。

- ・ [CEDEC 2011] リアルな動きを無限につくり出す、機械学習 & データ駆動によるプロシージャルアニメーションの試み, 4gamer.net (2011) [72]
- ・ [CEDEC 2012] 「クララが立った！」的なバイナリードメインのボスの二足立ちに、キミはAIとアニメーションの相互連携の可能性を見るか, 4gamer.net (2011) [73]

プロシージャルアニメーションとプリセットでつくるアニメーションを組み合わせるのが現代的なつくり方です。

- ・ 「FFXV -EPISODE DUSCAE-」のAI&アニメはどう作られたか?, GameWatch (2015) [74]

2016年から注目されているのが、「モーションフィールド」の考え方で、たくさんのモーションを取った後で、高次元のベクトルの流れに展開し、行動の指針に応じてそれらの間を遷移するというモデルです。

- ・ Simon Clavet: Motion Matching Road to Next-gen Animation (GDC 2017) [75]

このように、キャラクタアニメーションの目的は、本来柔軟な身体をもつ人間を、単純化した身体モデルの上に、もう一度人間らしい動きをリアルタイムに実現しようとするところにあり、プロセッシングパワーの上昇に応じてより高度な技術が導入されています。このようなアニメーションによる身体の制御とともに、キャラクタの意思決定と身体認識能力の向上を同期させて向上させることができていないことが、これからの課題です。

(10) ソーシャルゲームと人工知能

2008年以降、携帯電話上のゲームが著しく、この分野では蓄積されるデータを時間ごと、日ごとに解析しゲームの展開・調整・進行へフィードバックする必要があります。特にユーザ同士のインタラクションを前提とするゲームをソーシャルゲームといいます。ソーシャルゲームは主に携帯電話上からプレイできますが、PCからも参加することができます。そこでデータ解析としての人工知能が必要となってきます。

- ・ 井澤正志：データマイニングによって変わった「大熱狂!! プロ野球カード」のKey Performance [76]
- ・ 森 貴寛、伊藤茂雄：今更訊けない！ データマイニングに基づいたソーシャルゲーム運営法 [77]
- ・ 野上大介：決定版：サービスの盛り上がり具合をユーザの数(DAU)から読み解く方法 [78]
- ・ 村松祐希：SED 勉強会、第5回ソーシャルゲームの行動解析 [79]

データサイエンスの流れがゲーム産業に入ってきたのは、2010年以降の流れです。日々積み重なるデータから特徴やパターンを抽出しゲームを変化させていくのは、イテレーションが多く更新の素早いソーシャルゲームのワークフローに融合したからです。

少し視点を変えてみると、人工知能がゲームを理解できるのか、という問題があります。ソーシャルゲームのデータの痕跡から、人工知能がゲーム全体を認識できるかという挑戦でもあります。

(11) 会話とキャラクタAI

デジタルゲームにおいてキャラクタの会話はほぼあらかじめ脚本でつくられた台詞を話すことがほとんどです。それはデジタルゲームが一般的なシチュエーションではなく、「プレーヤの代わりになって敵と戦う」、「命をかけてメッセージを届けに来る」など特殊な状況に応じたドラマチックな役者的な役割をもっているからです。

しかし、街のキャラクタや状況のある程度決まったキャラクタには会話の能力が必要です。また会話をメインとするゲームでは特にそれが必要とされます。言語を扱う分野はゲーム産業では応用例が少なく、2016年以降急速に世の中の流れに沿って必要とされているにもかかわらず追いついていません。しかし、その中でも「シーマン」は会話AIのゲームとして絶大な人気を博しました。本誌上のインタビューがあります。

- ・ シーマンは来たるべき会話型エージェントの福音となるか? : 斎藤由多加インタビュー, 人工知能, Vol. 32, No. 2, pp. 172-179 (2017) [80]

デジタルゲームにとって会話はこれからの課題ですが、状況やゲームの抽象的な設定(オントロジー)を用いて高度な会話を生成する貴重な研究の場でもあります。

- ・ 人狼知能プロジェクト [81]

は会話ゲームである「人狼知能」をテーマとした人工知能研究であり、ここからも、デジタルゲームで役立つ成果

が出てくると期待されます。

(12) コンテンツ自動生成のためのプロシージャル技術

デジタルゲームの人工知能技術は、キャラクタ AI やメタ AI のような人工知能技術と、それとは全く違う「プロシージャル技術」に分かれます。ここでいう「プロシージャル技術」とは「コンテンツ自動生成」のことで、ゲームのアセット（ゲームに必要な要素）を自動的につくる技術です。つまり、アーティストの代わりに人工知能技術を作成するという意味で人工知能なのです。例えば、最も古くから行われているのがダンジョン自動生成、その次に地形自動生成です。

- ・ 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，知能と情報：日本知能情報ファジィ学会誌，Vol. 22, No. 6, pp. 745-756 (2010) [82]

3D 空間の地形やオブジェクトの自動地形生成は ACM SIGGRAPH で探求されてきた分野ですが、2000 年代に入ってゲーム産業にも応用されるようになりました。「Far Cry 2」(Ubisoft) は植物を自動生成する DUNIA ENGINE をつくり上げました。

- ・ Far Cry 2 Dunia Engine - Growing Vegetation [83]

このような植物生成，自動配置は現在では各企業のゲームエンジンに組み込まれています。「The Witcher 3」(CD Project RED) は RED ENGINE という自社エンジンに地形自動生成が組み込まれています。

- ・ Marcin Gollent: Landscape Creation and Rendering in REDengine 3 (GDC 2014) [84]

「No Man's Sky」Hello Games (2016) は惑星まるごとを，そこに住まう生物を含めて自動生成しています。

- ・ Innes McKendrick: Continuous World Generation in "No Man's Sky" [85]

また一歩進んでカットシーン（会話シーン）を自動生成する人工知能も組み込まれています。ツール上で書かれたシナリオとシーケンス，シーン設定情報からカットシーンを自動生成します。

- ・ Piotr Tomsinski: Behind the Scenes of Cinematic Dialogues in "The Witcher 3: Wild Hunt" (GDC 2016) [86]

通常，カットシーンは大型ゲームでは何百とありますから，最初の段階だけでもこのように自動生成し，徐々にカスタマイズしていけば大幅な工程削減とクオリティアップになります。この手法は「HORIZON ZERO DAWN」Guerrilla Games (2016) でも同様に使用されています。

- ・ Dan Sumaili and Sander van der Steen: CREATING A TOOLS PIPELINE FOR HORIZON ZERO DAWN (GDC 2017) [87]

また同タイトルでは植物を，地形を認識しながら適切な位置に自動配置します。

- ・ Jaap van Muijden: GPU-BASED PROCEDURAL PLACEMENT IN HORIZON ZERO DAWN (GDC 2017) [88]

自動生成の手法はさらなるゲームの大規模化に対してますます必須の技術となっていきます。デジタルゲームのあらゆる領域に対する自動生成の研究が待たれています。

(13) 群衆 AI

ゲームではたくさんのキャラクタを一度に出して臨場感を表現するという手法があります。それだけではなく，それぞれのキャラクタとインタラクティブに戦うなどで，単なる見せる群衆ではなく，戦う群衆，あるいは障害物となる群衆を表現する必要があります。

このようなゲームの代表格として「Assassin's Creed」(Ubisoft) シリーズがあります。これは群衆に満ちた街の中でミッションを行う，というゲームですので，群衆の出来がゲームに影響します。

古典的にはクレイグ・レイノルズ氏の生物学的な群れ（フロック）の有名な仕事があります。

- ・ RED3D (レイノルズ氏のページ，多数のデモがある) [89]

この視点を起点として，さまざまなゲームで群衆が探求されてきました。

- ・ Sylvain Bernard: Taming the Mob: Creating Believable Crowds in ASSASSIN'S CREED (GDC 2008) [90]

群衆の AI では通常 LOD (Level of Detail) という技術が使われます。これは，グラフィクスであればプレーヤからの距離に応じてモデルやアニメーションをラフにしていくことです。プレーヤから見れば遠くのキャラクタは小さく見えるだけなので，ラフなモデルやラフな動作でもわかりません。3 段階ぐらいの距離に分けるのが普通です。また AI の制御も距離に応じて変化させます。これを AI LOD といいます。

- ・ Francois Cournoyer: Massive Crowd on Assassin's Creed Unity: AI Recycling (GDC 2015) [91]

また映像では，映画「トロン・レガシー」や「ロード・オブ・ザ・リング」で使われた Massive というミドルウェア

アが有名です。

- ・ Massive software [92]

また IGDA 日本の SIG-AI セミナー

- ・ 三宅陽一郎：社会シミュレーションとデジタルゲーム [93]

でも情報が集約されている。

(14) In Game Cinematics (カットシーン) とキャラクタ AI

ゲームの中のキャラクタは自律的な生命という側面と、舞台の上の役者という二重性をもちます。ゲームの進行に合わせて台詞をしゃべり、演技をする必要があります。このような演技をするシーンを「カットシーン」といいます。キャラクタは自律的な知性としての行動と、この「カットシーン」の間をスムーズに行き来する必要があります。これもゲーム AI の重要な課題です。

- ・ ゲーム内でのリアルタイムな演出映像 “In-Game Cinematics (IGC)” の現状をゲーム開発者が語り合うパネルディスカッション 【CEDEC 2013】, famitsu.com (2013) [94]

(15) ゲーム AI ツール

ゲーム産業はエンジニアとアーティストの共同作業です。そこでゲームデザイナーができるだけコードを書くことなしに人工知能をつくれる仕組みが必要です。それはまた制作ワークフローを円滑にし、制作パイプラインを効率化します。

- ・ [CEDEC 2015] 「FFXV」で導入されるゲーム AI の仕組みが明らかに。ゲームエンジン「Luminous Studio」の先進的 AI システム (4gamer) [95]

(16) カメラ AI

3D ゲームでは、いったん 3D 空間を作成した後は、その空間をある座標、ある角度から見る仮想的なカメラを設置することで、平面の絵をつくります。カメラの位置取りはまた「カメラマンの AI」として重要な研究課題です。

- ・ Remi Lacoste: Creating an Emotionally Engaging Camera for Tomb Raider (GDC 2013) [96]

また、ゲーム内の「格好いい」スクリーンショットを自動的に撮る、という必要が時にあります。どのタイミングで、どの構図を写すという判断を人工知能を使って判断させる、という場合もあります。

- ・ How Prompto's AI-driven selfie system in Final Fantasy XV was built (Gamasutra) [97]
- ・ 【電撃 PS】『FF15』の信頼できる仲間たちは挑戦的 AI で作られた。開発者がその手法を解説！(電撃オンライン) [98]

(17) ゲームエンジンの中の人工知能

現代のゲーム開発はゲームエンジン上で行われます。ゲームエンジンとは、ゲームの開発を支える全体の仕組みのことです。描画、物理、アセット管理、などのどんなゲームでも共通に必要な機能の集合体と、ゲームを実際に動作させるランタイムからなります。コンテンツに近い、人工知能のモジュールは最も後回しになりますが、それでも、パス検索、ビヘイビアツリーなどは、標準的に実装されていることが多くあります。

代表的なゲームエンジンとしては、

- ・ Unreal Engine [99]
- ・ Unity3D [100]

がありますが、現在では、ある程度利益が出るまでは無料で使えるようになっています。

(18) デジタルゲーム AI の歴史

デジタルゲームは 40 年の歴史がありますが、ゲーム AI という分野がほんやりと形成されてきたのは 1990 年代前半、ちょうど、デジタルゲームが俯瞰的な 2D ゲームから 3D ゲームへと移行する時期で、その中で活動するキャラクタの人工知能にとっても分化の時期でありました。よってそのほとんどの文献は、1990 年代中期以降となります。それは主にゲーム産業内において開発が進められてきましたが、デジタルゲームのアカデミックな研究は、95 年頃から MIT メディアラボなどのいくつかの大学で研究されてきました。

さらに、デジタルゲームの人工知能という分野がはっきりと形成されてきたのは、この 2000 年代以降のことです。大きな意味では、2017 年現在、日本のゲーム産業がこういった欧米の流れにいまだに合流していません。また同時に、それがアカデミックにおいても同様です。技術的には見掛け上キャッチアップしていても、リードする状況になって

いないのが現状です。それは極端に言ってしまうと、欧米のゲームがゲーム世界をシミュレーション世界として作りそこに生きる・戦う存在としてキャラクタの人工知能を形成するのに対して、日本のデジタルゲームが各ステージの細かい仕掛けのつくり込みによってゲームを成立させキャラクタの知能に対する負荷がそれなりに軽減されている、という対照によります。

しかし時代は大きく移り、ゲームの規模は以前よりはるかに大きくオープンワールドと呼ばれる 50 km 四方の広大で地続きのステージとなり、その中でキャラクタ達はある時は仲間として、ある時は敵として、ある時は野生動物として、ある時は導き手として活動と演技をしなければなりません。また一方で、2008 年以降、携帯ゲーム機、携帯電話上のゲームが著しく、この分野では蓄積されるデータを時間ごと、日ごとに解析し、ゲームの展開・調整・進行へフィードバックする必要があります。

- ・ 山根信二：ゲーム AI における産学連携戦略の 10 年 (CEDEC 2009) [101]
- ・ 大学からゲームメーカーへ—AI 研究で広がるステキなゲームの世界とは？ (ITMedia) [102], [103]

(19) 哲学とゲーム AI

キャラクタの知能をつくる、ということは、時計仕掛けの機械をつくることと違う領域があります。そこには、キャラクタが内側から感じる主観的な世界を形成したい、という場合があるからです。そのためには、外部からの部品を組み上げるだけでなく、生物が世界とともに主観をつくり上げる、環境と主体の相互作用をそこに実現する必要があります。そのような工学を支える哲学は、現象学をはじめ、今世紀に誕生した哲学ジャンルが多く、開発の足場を支える哲学として機能します。

- ・ 三宅陽一郎：人工知能のための哲学塾, BNN 新社 (2016) [104]

(20) 日本におけるゲーム AI 事例

以下に上記でご紹介できなかった国内ゲーム AI 事例の文献をあげておきます。

- ・ 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 (CEDEC 2006) [105]
- ・ 森川幸人：AI DAY (3) ゲームと AI はホントに相性がいいのか？ (CEDEC 2008) [106]
- ・ 大橋晴行, 高橋義之, 鎌田浩平：AI DAY (4) 魔ごころを, きみに〜「勇者のくせになまいきだ。」が目指した自己組織化アルゴリズム〜 (CEDEC 2008) [107]
- ・ 田邊雅彦：WCCF AI エンジニアリング (DiGRA JANAN 2009 年 5 月公開講座, 東京大学), サッカーゲーム AI の設計と実装 [108], [109]
- ・ 安藤 毅：「サクつく」のサッカー試合 AI システム (CEDEC 2010) [110]
- ・ 並木幸介：ぼかぼかアイルー村における, アフォーダンス指向の AI 事例. AI に多様な振る舞いをさせる手法 (CEDEC 2011) [111]
- ・ 佐竹敏久, 池谷 章：ファンタシースターポータブル 2 のキャラメイクシステム (CEDEC 2010) [112]
- ・ 小川卓哉：Phantasy Star Online 2 におけるプロシージャル BGM システム (CEDEC 2012) [113]
- ・ 岡村信幸：ARMORED CORE V の対戦 AI における階層型ゴール指向プランニングと機体制御 (CEDEC 2011) [114]
- ・ 岡村信幸：ARMORED CORE V のパス検索 (CEDEC 2011) [115]
- ・ 横山貴規, グラヴォ・ファビアン：FFXIV サーバーサイド経路探索システム [116]
- ・ 三宅陽一郎：次世代キャラクター AI アーキテクチャーの構築 (CEDEC 2012) [117]
- ・ 長谷洋平：LOST REAVERS における AI Director の試み (CEDEC 2015) [118]
- ・ 長谷洋平：複数タイトルで使われた柔軟性の高い AI エンジン (CEDEC 2015) [119]
- ・ 長谷洋平：プレイヤーに反応するだけの AI はもう古い! ゲーム AI へのプランニング技術の導入 (CEDEC 2016) [120]
- ・ 松本吉高, 友部博教：FINAL FANTASY Record Keeper におけるユーザー体験の定量化に基づくゲームバランス設計事例 (CEDEC 2015) [121]
- ・ 友部博教, 半田豊和：AI によるゲームアプリ運用の課題解決へのアプローチ [122]
- ・ 佐藤勝彦：Shadowverse のゲームデザインにおける AI の活用事例, 及び, モバイル TCG のための高速柔軟な思考エンジンについて (CEDEC 2016) [123]
- ・ ゲーム AI 実践編—Shadowverse に見る TCG AI 開発の事例 (1) — Cygames Engineers' Blog [124]
- ・ ゲーム AI —基礎編 (2) —『はじめてのエージェントベースアーキテクチャ』— Cygames Engineers' Blog [125]

- ・ ゲーム AI — 基礎編 — 『知識表現と影響マップ』 Cygames Engineers' Blog[126]
- ・ 白神陽嗣, 三宅陽一郎, 並木幸介, 横山貴規: FINAL FANTASY XV — EPISODE DUSCAE — におけるキャラクター AI の意思決定システム (CEDEC 2015) [127]
- ・ 上段達弘, 下川和也, 高橋光佑, 並木幸介: FINAL FANTASY XV におけるレベルメタ AI 制御システム (CEDEC 2016) [128]

Credit

FINAL FANTASY XV はスクウェア・エニックス社の商標または登録商標です。

FINAL FANTASY XIV はスクウェア・エニックス社の商標または登録商標です。

Halo 2 はマイクロソフトコーポレーションの商標または登録商標です。

F. E. A. R. は Warner Bros. Entertainment 社の商標または登録商標です。

KILLZONE, ILLZONE 2 はソニー インタラクティブ エンタテインメント ヨーロッパ リミテッドの商標または登録商標です。

Dragon Age:Origins はイーエイ・インターナショナル・(スタジオ・アンド・パブリッシング)・リミテッドの商標または登録商標です。

パックマンは株式会社バンダイナムコエンターテインメントの商標または登録商標です。

LEFT 4 DEAD はバルブ コーポレーションの商標または登録商標です。

Warframe はデジタル エクストリームズ リミテッドの商標または登録商標です。

WCCF, WORLD CLUB Champion Football は株式会社セガゲームスの商標または登録商標です。

Black & White はマイクロソフト社の商標または登録商標です。

Supreme Commander 2 はスクウェア・エニックス社の商標または登録商標です。

バイナリードメインは株式会社セガゲームスの商標または登録商標です。

大熱狂!! プロ野球カードは株式会社 gloops の商標または登録商標です。

シーマンはオープンブック株式会社の商標または登録商標です。

Far Cry 2 は Ubisoft Entertainment の商標または登録商標です。

The Witcher 3 は CD PROJEKT Brands S.A. の商標または登録商標です。

No Man's Sky はソニー・インタラクティブエンタテインメントの商標または登録商標です。

HORIZON ZERO DAWN は株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメントの商標または登録商標です。

Assassin's Creed は Ubisoft Entertainment の商標または登録商標です。

Tomb Raider はスクウェア・エニックス社の商標または登録商標です。

クロムハウズはフロム・ソフトウェア社, セガ社の商標または登録商標です。

勇者のくせになまいきだ。は株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメントの商標または登録商標です。

サカつくは株式会社セガゲームスの商標または登録商標です。

ぽかぽかアイルー村は株式会社カプコンの商標または登録商標です。

Phantasy Star Online 2 は株式会社セガゲームスの商標または登録商標です。

ARMORED CORE V は株式会社フロム・ソフトウェアの商標または登録商標です。

LOST REAVERS は株式会社バンダイナムコエンターテインメントの商標または登録商標です。

FINAL FANTASY Record Keeper はスクウェア・エニックス社の商標または登録商標です。

Shadowverse は株式会社 Cygames の商標または登録商標です。

Lichdom は Maximum Games 社の商標または登録商標です。

UNREAL ENGINE はエピック・ゲームズ・インコーポレーテッドの商標または登録商標です。

Unity3D は Unity IPRAps の商標または登録商標です。

CRYENGINE は Crytek IP Holding LLC の商標または登録商標です。

その他掲載されている会社名, 商品名は, 各社の商標または登録商標です。

All other trademarks are the property of their respective owners.

- [1] https://news.denfaminicogamer.jp/interview/gameai_miyake
- [2] <http://id.nii.ac.jp/1004/00001730/>
- [3] https://jsai.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_snippet&index_id=457&pn=1&count=20&order=7&lang=japanese&page_id=13&block_id=23
- [4] <http://tech.cygames.co.jp/archives/2272/>
- [5] <http://tech.cygames.co.jp/archives/2364/>
- [6] <http://gihyo.jp/book/2017/978-4-7741-8627-6>
- [7] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1287
- [8] <http://id.nii.ac.jp/1004/00008567/>
- [9] <http://cedil.cesa.or.jp/>
- [10] <http://www.gdcvault.com/>
- [11] <https://nucl.ai/>
- [12] <https://sites.google.com/view/aiide2017/>
- [13] <http://www.ieee-cig.org/>
- [14] <https://jsai.ixsq.nii.ac.jp/ej/>
- [15] <http://www.gameai.com/>
- [16] <http://www.gdconf.com>
- [17] <http://www.gdconf.com/conference/ai.html>
- [18] <http://www.gdcvault.com/>
- [19] <http://aigamedev.com/>
- [20] <https://nucl.ai/>
- [21] <http://aigamedev.com/open/coverage/paris10-report/>
- [22] <http://www.gamasutra.com/>
- [23] http://www.gamasutra.com/view/feature/130663/gdc_2005_proceeding_handling_.php
- [24] <http://cedec.cesa.or.jp>
- [25] <http://www.igda.jp/>
- [26] <https://sites.google.com/site/igdajsigai/>
- [27] <http://blogai.igda.jp/>
- [28] <https://sites.google.com/view/aiide2017/>
- [29] <http://icids2016.ict.usc.edu/about-int9/>
- [30] <http://www.ieee-cig.org/>
- [31] <https://www.amazon.co.jp/Techniques-Game-Programming-Mat-Buckland/dp/193184108X>
- [32] <https://www.oreilly.co.jp/books/9784873113395/>
- [33] http://www.ai-junkie.com/books/toc_pgaibe.html
- [34] <https://www.amazon.co.jp/Game-Programming-Gems-Mark-DeLoura/dp/4939007286>
- [35] <http://www.aiwisdom.com/>
- [36] <http://www.gameapro.com/>
- [37] http://igda.sakura.ne.jp/sblo_files/ai-igdajp/paper/YMiyake_200801_23_1_p44_51.pdf
- [38] <http://characters.media.mit.edu/>
- [39] <http://naimadgames.com/publications.html>
- [40] <http://alumni.media.mit.edu/~jorkin/>
- [41] <http://id.nii.ac.jp/1004/00008566/>
- [42] <http://aigamedev.com/open/coverage/htn-planning-discussion/>
- [43] <http://www.4gamer.net/games/032/G003263/20121205079/>
- [44] <https://www.youtube.com/watch?v=95aHGzzNCY8>
- [45] <https://webdocs.cs.ualberta.ca/~games/>
- [46] https://www.youtube.com/watch?v=l7YQ5_Nbifo
- [47] <https://www.cgf-ai.com/products.html>
- [48] <http://www.babelflux.com/>

- [49] <https://www.autodesk.com/products/navigation/overview>
- [50] <https://www.cryengine.com/>
- [51] <http://www.gdcvault.com/play/1018136/Spaces-in-the-Sandbox-Tactical>
- [52] <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/AI/EnvironmentQuerySystem/>
- [53] <https://www.youtube.com/watch?v=BV2GTGbSjq8>
- [54] http://news.denfaminicogamer.jp/kikakuthetower/aitalk_miyaiwa
- [55] <http://www.valvesoftware.com/company/publications.html>
- [56] <http://www.gdcvault.com/play/1018223/AI-Postmortems-Assassin-s-Creed>
- [57] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1544
- [58] <https://www.famitsu.com/news/201608/26114282.html>
- [59] <http://id.nii.ac.jp/1004/00008565/>
- [60] http://digrajapan.org/?page_id=279
- [61] <http://digrajapan.org/?wpdmact=process&did=OS5ob3RsaW5r>
- [62] https://www.ai-gakkai.or.jp/my-bookmark_vol26-no2/
- [63] <https://www.inside-games.jp/article/2009/05/31/35497.html>
- [64] <http://id.nii.ac.jp/1004/00008563/>
- [65] <http://id.nii.ac.jp/1004/00004617/>
- [66] <http://research.microsoft.com/en-us/projects/ijcaiigames/>
- [67] http://www.kmjn.org/notes/generating_mechanics_bibliography.html
- [68] http://www.aiwisdom.com/resource_aiwisdom.html
- [69] <http://www.gdcvault.com/play/1015667/Off-the-Beaten-Path-Non>
- [70] [https://en.wikipedia.org/wiki/Creatures_\(video_game_series\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Creatures_(video_game_series))
- [71] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=267663>
- [72] <http://www.4gamer.net/games/000/G000000/20110910013/>
- [73] <http://www.4gamer.net/games/125/G012513/20120908012/>
- [74] <http://game.watch.impress.co.jp/docs/news/718117.html>
- [75] <http://www.gdcvault.com/play/1022985/Motion-Matching-and-The-Road>
- [76] https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/890
- [77] https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/921
- [78] https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1053
- [79] <http://www.slideshare.net/zyanki/sed5-52241372>
- [80] <http://id.nii.ac.jp/1004/00008564/>
- [81] <http://aiwolf.org/>
- [82] http://igda.sakura.ne.jp/sblo_files/ai-igdajp/paper/YMiyake_JSFTII_22-6_2010_11_25.pdf
- [83] <https://www.youtube.com/watch?v=FI3oR6vqn1Q>
- [84] <http://www.gdcvault.com/play/1020197/Landscape-Creation-and-Rendering-in>
- [85] <http://www.gdcvault.com/play/1024265/Continuous-World-Generation-in-No>
- [86] <http://www.gdcvault.com/play/1022988/Behind-the-Scenes-of-Cinematic>
- [87] <https://www.guerrilla-games.com/read/creating-a-tools-pipeline-for-horizon-zero-dawn>
- [88] <https://www.guerrilla-games.com/read/gpu-based-procedural-placement-in-horizon-zero-dawn>
- [89] <http://www.red3d.com/>
- [90] <http://www.gdcvault.com/play/292/Taming-the-Mob-Creating-believable>
- [91] <http://www.gdcvault.com/play/1022411/Massive-Crowd-on-Assassin-s>
- [92] <http://www.massivesoftware.com/>
- [93] <https://www.slideshare.net/youichiromiyake/ss-51550428>
- [94] <https://www.famitsu.com/news/201308/30039207.html>
- [95] <http://www.4gamer.net/games/075/G007535/20150831093/>

- [96] <http://www.gdcvault.com/play/1018141/Creating-an-Emotionally-Engaging-Camera>
- [97] http://www.gamasutra.com/view/news/292883/How_Promptos_AI-driven_selfie_system_in_Final_Fantasy_XV_was_built.php
- [98] <http://dengekionline.com/elem/000/001/470/1470940/>
- [99] <https://www.unrealengine.com/ja/blog>
- [100] <http://japan.unity3d.com/>
- [101] http://cedil.cesa.or.jp/2009/ssn_archive/pdf/sep1st/AC38.pdf
- [102] <http://gamez.itmedia.co.jp/games/articles/0901/08/news129.html>
- [103] <http://www.itmedia.co.jp/games/articles/0901/09/news075.html>
- [104] <http://www.bnn.co.jp/books/8210/>
- [105] https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/50
- [106] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/156
- [107] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/162
- [108] http://digrajapan.org/?page_id=279
- [109] <http://digrajapan.org/?wpdmact=process&did=OS5ob3RsaW5r>
- [110] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/379
- [111] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/697
- [112] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/299
- [113] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/773
- [114] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/591
- [115] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/593
- [116] <http://www.4gamer.net/games/032/G003263/20121205079/>
- [117] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/891
- [118] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1475
- [119] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1287
- [120] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1476
- [121] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1353
- [122] https://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1511
- [123] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1586
- [124] <http://tech.cygames.co.jp/archives/2853/>
- [125] <http://tech.cygames.co.jp/archives/2364/>
- [126] <http://tech.cygames.co.jp/archives/2272/>
- [127] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1437
- [128] http://cedil.cesa.or.jp/cedil_sessions/view/1544