

特集 ■ 人・社会のモデル化の最前線

デジタルゲームのための人工知能の基礎理論



三宅陽一郎

Miyake Youichiro

スクウェア・エニックス

1. デジタルゲームにおける人工知能の歴史

エンタテインメントにおけるデジタルゲームの人工知能の最も大きなミッションは、人工知能を用いて多様なユーザエクスペリエンス（ユーザの体験）を作り出すことである。体験と言っても、感激、悲嘆、恐怖、緊張、解放、様々な言葉を越えた多様な体験があり、それらを産み出すためにデジタルゲームは、ゲームデザイン、グラフィクス、シナリオ、音楽、人工知能など様々な要素を融合し [1], ユーザにゲームでしか得られない体験を提供する（図 1）。そして時代と共により豊かな経験を提供することが求められる。歴史的には人工知能技術はあくまで補助的な技術として使われて来たが、この数年のゲームのスケールの拡大と多様化に伴い、本格的な技術の導入が始まっている [2-5]。

インタラクティブな次元でユーザの体験をデザインするのがデジタルゲームである。人工知能はその一翼を担っている。かつて NPC (Non-Player-Character, ゲームに登場するプレイヤー以外のキャラクタ) は、80 年代、90 年代を通して一定の決められた役割を果たすことが主な役割であった。「プレイヤーがある場所に来たら襲いかかる」「決められた順番に攻撃する」「決められたセリフを話す」などゲーム内の静的な一要素として堅実な機能が求められた。現在でもこういった NPC はゲームの規模にかかわらず必ず必要とされる。しかし 2000 年以降 NPC には「プレイヤーのアクションに応じて攻撃を行う」「広く複雑な地形でプレイヤーを追跡する」「プレイヤーの癖を読んで攻撃する」「プレイヤーのスキルに応じてゲームの難易度を変化させる」など、変化するゲーム状況に動的に適應する行動が要求されるようになった。その要求がデジタルゲームの人工知能分野に大きな可能性と多様性を拓き、逆にそこで培われた人工知能技術がフィードバックしてデジタルゲームのゲームデザインの可能性を引き上げ広げつつある。ここでは主に

ハイエンドな大型ゲームの AI にフォーカスして、ゲーム産業が培って来た人工知能の理論的体系・技術的体系の基礎と、そこからユーザエクスペリエンスを産み出す過程を解説して行く。

2. デジタルゲーム AI の定義

デジタルゲームに特有のアクションゲームの人工知能と特徴を説明するために伝統的な AI の研究分野である囲碁・将棋・チェスなどボードゲームの AI と比較して解説する。ボードゲームの AI はゲームの外側に存在しプレイヤーの代わりをする AI であり、盤面を俯瞰して最適な手を求める（例えば [6-8]）。駒のひとつひとつに知能が埋め込まれているわけではない。一方、デジタルゲームのアクションゲームや RPG の AI の対象は、主にゲーム内に存在するモンスターや味方 NPC であり、それに知能を持たせることで、ゲームそのものを内側から構成する。また将棋や囲碁では、最初からゲームが存在し、ゲームそのものと AI は関係がない。デジタルゲームは開発当初はゲームそのものがなく、開発過程の中で AI がその一要素として組み込まれながらゲームそのものが組み上げられて行く。例えば、RPG ではモンスターの人工知能は欠かすことはできないゲームの面白さを直接決定する重要な要素のひとつである。AI はゲームデザインを決定して行く一要素になるのである [5][9][10]。

3. ユーザエクスペリエンスの科学としての AI

デジタルゲームには 2 つの次元がある。グラフィクス、AI、サウンド、インタラクティブなどの「要素技術」の次元と、これらを用いて生成された「ユーザエクスペリエンス」の次元である（図 1）。前者は一般的な技術であり、後者はデジタルゲームの特有の領域であり、他のインタラクティブなメディアからもゲームが蓄積して来たノウハウへの需要が高まっている [11]。さらにユーザエ

クスペリエンスを生み出すには主に2つの段階がある。

- (1) ゲーム世界を客観的な空間として構築する段階
- (2) ゲーム世界を土台にユーザ体験を形成する段階

(1)の「ゲーム世界」は空間、地形、構築物、配置物(オブジェクト)、エフェクト、サウンド、NPCたち、ゲームルールなど、ゲームの舞台(レベル)を組み上げるシミュレーション空間である。この空間はデジタルゲームでは「レベルデザイン」と呼ばれる。従来は、例えばレーシングゲームなどでは、リアルな物理ではなく操作感の良い物理やコミカルな破壊など、ゲーム固有のデフォルメされたシミュレーションが多かったが、現世代機(2004年以降)では物理・剛体・粒子・光学・群集・社会シミュレーションが導入されるようになり、デジタルゲーム空間は大勢としては様々なシミュレーション技術を内包する現実に近い空間に近づくこととなった。実際は負荷の高い技術は避けてリアルタイムで駆動可能なシミュレーション技術に限られる場合が多い。

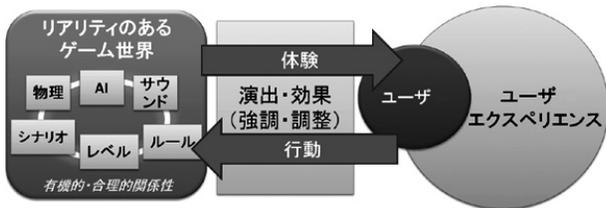


図1 ゲームとユーザエクスペリエンス

この数年、ゲーム産業は「リアリティ」(reality)を標語として技術進化を推進して来たが、「リアリティ」はこういった客観的な舞台設定としてのゲーム世界の現実感を指す言葉である。リアリティの向上は一般にユーザの没入感(a sense of immersion)の向上を目的とする。

(2)は、こういった精密に構築されたシミュレーション世界を背景として、ユーザに向かって様々なエンタテインメント体験を構築して行く過程である。譬えて言えば、これは遊園地を作った後に、お客さんに向けて様々なイベントや演出をすることに似ている。例えば、敵にプレイヤーを襲わせる、味方にセリフを言わせる、イベントを起こし注意を引く、音楽を流す、カメラを自動的にコントロールする、NPCは見事にやられる、助ける、謎解きをさせる、終わった後にファンファーレを流す、などユーザの行動に応じて舞台を変化させながら、ひとつひとつの体験を継続的にユーザの内側に形成し緻密に積み上げて行く。また逆にユーザの行動も、その効果を拡大して演出する。例えば剣

を振ると、そこに光輝く軌跡が描かれる、敵に当たると心地よい音が出る、コントローラーが震える、などである。この体験と行動はインタラクティブに結びれており、行為と認識が強調・調整されてユニークな体験を生み出す(図1)。これはアクションゲームのみならずパズルゲームやRTS(Real-time Simulation)などデジタルゲーム全般で共通する原理である。

多くの場合、ユーザに最も近い場所でインタラクションを行うのはNPCの役割である。そこでNPCは極めて精緻な部分までユーザエクスペリエンスに干渉し得るチャンスを持っている。NPCのAIのテーマは、どのようにNPCを通してユーザエクスペリエンスを形成できるか、という点にある。

4. キャラクタAIの2つの側面

キャラクタAI(キャラクタに実装するブレインとしての人工知能)においては2つの開発段階がある。

- (3) 一個の自律した人工知能として制作する段階
- (4) これを用いてユーザ体験を形成する段階

(3)はこの10年で、アカデミックな人工知能研究で培われて来た知識と技術が、一気にゲーム産業に流入すると同時に(「学習と進化」は除く。学習と進化をデジタルゲームAIに応用することはこれから次世代の課題である)、ゲームAIに適応した構造化が為されている[3-5][12][13]。2000年以前は、キャラクタの行動を状況に応じてスクリプティングやコーディングによって実装することが殆どであった。AI技術が未成熟であったのと、その技術で制限された役割しか与えられないという膠着状態の中にあっただからである。しかし、そういった制約も現世代(2004-現在)を経てゲームの進化と共に解放され、ゲームAI技術はゲームデザインと共進化の関係にある。

(4)の「AIを用いたユーザエクスペリエンスの形成」は、エンジニアのみならず、ゲーム開発の現場でノウハウとして蓄積されて来た領域である。例えば、FPS(First Person Shooter, 一人称視点シューティングゲーム)では「一発目は当てない」というノウハウがある。これは着弾音によってプレイヤーに敵NPCの位置を認識させプレイヤーにゲーム状況を把握させる役割を持つ。この後、NPCが本格的な攻撃を開始することで、プレイヤーにダメージを受ける理由を理解させた上でゲームを進行させることができる。プレイヤーに理由もわからずダメージを与えることは違和感を与えゲームそのものに対する評価を下げてしまうことになる。このようなノウハウが幾百、幾千と存在するが、まとめられた文献は殆どなく

口承が現場で伝えられるのみである。整理される必要が待たれている。また (4) の段階は必ずしも個体 AI に限るものではなく、群衆 NPC であったり、ゲームイベントと共に連動するものであるから、AI のみならずレベルデザイン全体で総合的に考える必要がある。ただその場合にも AI の自律性が高ければ高いほど、もはやスクリプトで一挙手ごとに行動をカスタマイズする必要がなく、例えば目的だけ与えて実行手段は自律的に考えさせるなど (ゴール指向 [14]), AI をロバストにコントロールすることが可能であり、より多様なユーザエクスペリエンスを生成できるポテンシャルが高くなる。

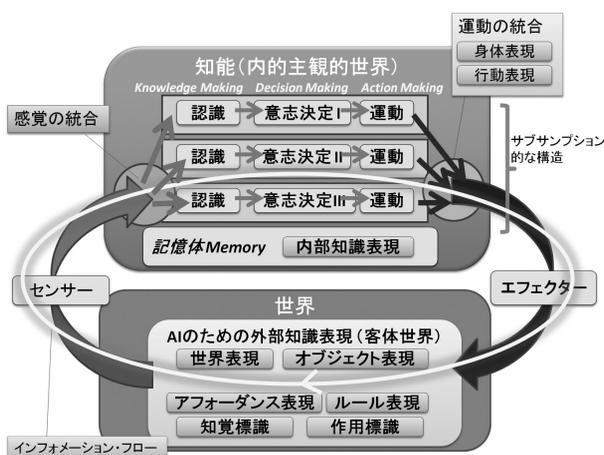


図2 エージェント・アーキテクチャ

5. 自律した存在としてのAI

ゲーム世界で自律したキャラクター AI を作る技術は 2 つの技術の流れがある。ひとつは伝統的人工知能の「シンボルに基づく AI」の技術 [15-20] であり、ひとつは心理学や生物学の中で培われて来た「生態学的な AI」である (例えば [21-23])。シンボルに基づく AI は、世界をシンボルによって表現しようとする手法であり、世界と AI を真っ向から分離・対立させ、そこから再び世界を理解しようとする。一方、生態学的 AI は、環境との結びつきの中で知能を捉える。知能が無意識に捉えているアフォーダンスや、長い進化の中で環境との契約によって成立している関係、認知の次元で捉えている世界像などを、知能を構築する要素として取り込む。仮想空間におけるキャラクター AI はこの 2 つの人工知能の流れが融合する分野であり、一方で環境とキャラクターが身体・無視意識的な結びつきを維持しながら、一方で環境から独立した自律思考を持つという相反する 2 つの属性を両立させる必要がある、ここに新しい AI の可能性がある。

また「知能とは表現である」という標語がソフトウェアの人工知能を作る場合には、常に意識しておくべきことで

ある。知識も表現であり、知能の構造も表現であり、行動そのものも、また認識された知識も表現として定義されなければならない。その表現が設計と実装の出発点となる。

6. 世界に埋め込まれた知性

人工知能における最も中心的な「記号 (シンボル) に基づく人工知能」という方法は、認識すべき対象をシンボルで表現し、シンボル操作によって思考を行う。問題は、対象をどのようにシンボル化に関連して表現するかである。ここではわかりやすいようにロボットと比較して説明を行う。

ロボットは現実世界の中に存在し、現実世界の物や空間のそれぞれの特徴・性質・属性をセンサーを通じて取得する。ロボットは超越的な現実世界から、自分の行動に必要な情報をセンサーによって切り取り、収集し、総合して自分の内側で認識世界を再構築する。

一方で、キャラクターはゲーム世界に存在する。ゲーム世界はデジタルデータの世界であるが、AI から見た場合に「意味のある」世界になっていない。地形はポリゴンの集まりであり、ひとつひとつのオブジェクトも同様であり、データであっても認識ではない。そこでデジタルゲームでは、AI がゲーム世界を認識するためのデータを作成するという方法を取る。最も簡単な例は、ナビゲーション・データである。これは AI がゲーム世界を自由に移動するためのデータである。特に地形に沿って三角形 (一般には多角形メッシュ) を連結したデータ形式をナビゲーション・メッシュと呼び、この連結グラフ上で経路検索を行うことで任意の二点間の経路をリアルタイムに計算することができる (図 3)。つまり、描画データ、衝突判定データとは別に第三のデータとして AI 用のデータが存在し、AI はこのデータを参照することで世界を認識する。さらに、各三角形メッシュの上に、その領域の歩きやすさ (コスト) や、地表状態 (土 / 水 / アスファルト / 沼など)、周囲からの見えやすさ (警戒時に使う)、の情報を持つことで、AI のより詳細な環境認識を助けると共に、地形の特徴に応じた経路検索を可能にする [24][25]。このように地形全体をデータ表現することを世界表現 (World Representation) [25] と言う。同様にオブジェクトに関しても、それを動かせるのか、食べられるのか、押すことができるのかなどの「アフォーダンス表現」 (Affordance Representation) [22] や、例えばスイッチを押すと何が起こるかなどの「因果関係」や、五感に応じた堅い柔らかい、色、匂いなどの「属性情報」をパッケージしたデータをオブジェクト表現 (Object Representation) と呼ぶ (図 3)。世界表現もオブジェクト表現も知識表現 (KR, Knowledge Representation) の一種であり、知識表現を精密化することで、AI によ

り深く世界を理解させ、より深く世界との関係を持たせることができる。知識表現はまた意思決定思考を構築する際に、必要かつ確実な基礎を与えるものである。

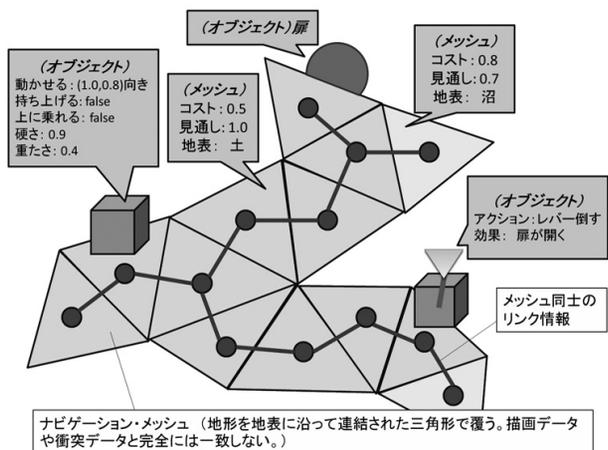


図3 ナビゲーション・メッシュとオブジェクト表現

7. キャラクターの内側の知性

一般に世界と生物の間には、物質の循環と情報の循環を持っている。前者は生物的代謝であり後者は知能である。知能は世界から情報を獲得し、意思決定を行い、最終的に行動を出力する。情報を獲得する部位をセンサー、世界に影響を及ぼす部位をエフェクターと呼び、この2つによって知能が世界と結びついているとするモデルを「エージェント・アーキテクチャ」と呼びロボット工学と同様、キャラクターAIにおいても基本概念のひとつである [3-5][7][14][15] (図2)。2000年にMITのグループが発表したエージェント・アーキテクチャにブラックボード・アーキテクチャを適用したモデルをC4アーキテクチャと呼び、00年代のFPSのAIの基本アーキテクチャとなった [26-28]。このモデルの特徴は、記憶を保持するブラックボード部分と複数の思考モジュールが明確に分離されている点である [28]。さらにこれにサブサンプション・アーキテクチャ (Subsumption Architecture) [29] を適用し多層化したモデルが、現代におけるキャラクターAIの標準的なモデルである (図2)。情報の入り口である各種のセンサー情報が統合されるのを「感覚統合」 (sensory integration)、一方出口である断片的な行動候補がひとつの身体へ全体的・有機的な運動へ向けて統合されるのを「運動統合」 (motion synthesis) と呼ぶ。本来、こういった統合は意識的ではなく、普段、知能の無意識化で行われている過程であるが、キャラクターAIではそれらを明示的に実装する必要がある。これが先に述べた生態学的な側面のひとつである。

センサー、認識生成、意思決定、運動生成、エフェクターを通してエージェントと世界との間で情報が循環する仕組みをインフォメーション・フロー (Information flow) と呼ぶ。多くの場合、インフォメーション・フローの上で様々なモジュールがデータ駆動する実装形式が取られる [3][4] (図2)。

生物は感覚器と効果器によって世界に根付いている。感覚から得る情報 (知覚標識) と行動を形成するために必要な情報 (作用標識、例えばターゲットの位置など) をセットとして対象を認識する。これがユクスケルの「環世界」の考え方である [21]。知覚と運動の間で意思決定が知覚情報から行動情報へ情報形態を折り返していると同様に、逆に環世界の記述ではセンサーとエフェクターで世界内の対象をつかんでいると考える。そこで世界表現やオブジェクト表現では、感覚的情報と共に行動表現に必要な情報を記述する (図2)。

8. AIからユーザエクスペリエンスへ

ここではプレイヤーが複数の敵キャラクターを倒しながらゴールを目指すアクションゲームを例に、AIからユーザエクスペリエンスを形成して行く過程を解説する。NPCたちはまず初期状態を指定され、マップ上に配置され、ゲーム開始と同時に動作を開始するように準備される。この「セットアップ」の目的は、環境に「状況を作る」ことにある。NPCとレベルをセットアップすることで戦場、街、ダンジョンなど固有の状況を実現する。この段階はあくまで客観的なリアリティのある空間を目指すものであるが、ユーザに見えている・見えるであろう範囲に見かけ上の整合性が取れていれば良い。しかし、マルチプレイヤーを前提とするオンラインゲームでは、世界の全体としての整合性が必要とされる。ここからゲームが開始される。

ゲーム内ではまずプレイヤーに襲いかかるキャラクターが選択される。各キャラクターとプレイヤーとのアクションレベルの戦闘は、キャラクターアニメーションと深く関わって来る部分である。実際、キャラクターの内部実装においてAIとアニメーション部分の境界を定めることは難しい [1]。AIシステムとアニメーションシステムをどのように接合するか、に関して明確な仕組みと理論を打ち立てることは次世代における重要な課題である。AIはプレイヤーの剣劇を認識しながら、時にダメージを与え、時に攻撃を外し、時に防御するアクションを生成する。こういったキャラクターとプレイヤーのインタラクションの時間的な積み重ねがユーザエクスペリエンスを形成する。

複数の敵がいる場合は、「チームAI」 (team AI) と呼ばれるNPC群を制御する上位AIが、どのNPCをプレイ

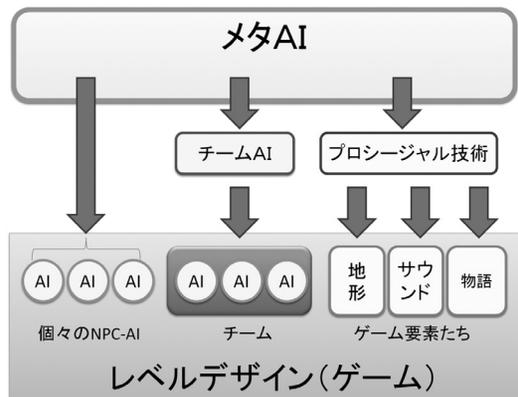


図4 3種類のAIとプロシージャル技術

ヤーに向かわせるか決定する(図4)。チームAIがNPCを指定する場合もあれば、各NPCからの提案を調整し許可を与えるだけの場合もある(階層型、ファシリテータ型)。多くの場合プレイヤーに襲いかかるNPCの数か戦力の上限が決められており、これもチームAIが管理する。チームAI自身は局面全体を認識し、適切なチーム戦略を決定し、それに基づいて各チームメンバーに命令やゴール・目的位置を与える。それを受け取ったNPCは、そのゴールを達成するために、各自周囲の状況から必要な行動を作成する[4][14][30]。

プレイヤーが前進し、敵を倒して行くに従い、状況は刻一刻と変化する。そういったゲーム状況の動的な変化に対しても、ゲームはやはりユーザにとって没入できる面白い状況を保たねばならない。そこで、そういった状況を動的に調整するAIシステムが必要であり「メタAI」(meta-AI)と呼ばれる[4][5][7][30]。メタAIはゲームシステムに実装されるAIであり、ゲーム状況をコントロールするAIである。例えば、プレイヤーの移動予測経路と体力、戦力を監視しながら、適切なタイミングでNPCの生成(スポウニングと言う)を制御する。また逆にプレイヤーから見えない場所でNPCを消滅させプレイヤーに対決させる戦力を調整する。メタAIから個々のAIへの命令はチームAIを介する場合もあれば、そうでない場合もある。またメタAIは、時間軸上でもプレイヤーのリラックスと緊張が交互に来るように攻撃タイミング・攻撃継続時間・撤退タイミングを決定し、緩急のついた攻守を実現する。このような三重の構造のAIシステムの連携によって、ユーザエクスペリエンスが動的にデザイン・調整されている。

9. これからの展望

地形やダンジョン、ストーリーまでゲーム要素全般をゲーム内で自動生成する技術を「プロシージャル技術」

(Procedural Technology) という。プロシージャル技術は、オブジェクト、地形、音楽、ストーリーまであらゆるゲーム要素について開発・研究が進められており、膨大なコンテンツを質高く作る必要のあるゲーム産業において必須の技術となりつつある(例えば[2]第4章,[30][31])。

メタAIにプロシージャル機能をコントロールさせることによって、従来は開発時に固定化されていた様々なゲーム要素を柔軟に変化・生成することが可能となる(図4)。これによって「ゲームコンテンツ=出荷時に固定」というパラダイムから「ゲームコンテンツ=無限に変化」というパラダイムへシフトすることが可能となる。メタAIにプロシージャル・モジュールをコントロールさせることで、ゲームの進行やコンテキストに応じて、コンテンツが生成・変化・増幅する。

これからの課題は、プロシージャル技術で生成されるコンテンツの質を上げること(現在は自動生成の方が質が低い)、ゲームのコンテキストに沿ったコンテンツを自動生成できるようになること(ストーリー・会話生成などプレイヤーの履歴に沿った生成では特に必要である)、自動生成されたコンテンツと準備されたコンテンツを組み合わせる一つのゲームコンテンツとしてインテグレーションするノウハウの蓄積、などが挙げられる[7]。

またこれからの10年はエンタテインメントにおけるデジタルゲームのAIに学習・進化が大きく導入されると予想される。これまでの10年(2004-2013)はデジタルゲームAIのための基礎技術と基礎理論の構築の時期であった。いわば基礎固めの時期であった。そこでは、デジタルゲームAIのためのフレームとアーキテクチャが探究された。パラメーター空間で不安定な状態を経る必要がある学習と進化アルゴリズムは、量産とクオリティ管理、かつ細かいカスタマイズが必要とされる手堅いコンテンツ制作では敬遠される傾向にあった。そこで学習・進化は、毎年ほんの数例が商業タイトルに応用されるだけであった[3][4][32]。

しかし、これからの10年はアーキテクチャとフレームを柔軟に適用する時代であり、アーキテクチャ内の各モジュール単位(意思決定、認識の形成、動作生成の各モジュール)や開発工程のパラメーター調整において学習と進化アルゴリズムが応用されるようになると予想される。そこでゲームAIはより大きな構造的進化と深いパラメーター空間の探究を通して発展し、デジタルゲームAI制作のパラダイムを大きく変革して行くことになるだろう。

以上のように、研究課題と開発課題は山積みであり、そのためにデジタルゲーム産業と大学・研究機関が協調して、この分野を推進して行く必要がある。

参考文献

[1] J. グレゴリー：ゲームエンジン・アーキテクチャ，ソフトバンク クリエイティブ (2010)

[2] 三宅陽一郎：ゲーム AI 分野，平成 19 年度デジタルコンテンツの保護・活用に関する調査研究等補助事業デジタルコンテンツ制作の先端技術応用に関する調査研究報告書，第 3 章，pp.39-113，デジタルコンテンツ協会(2007)

[3] 三宅陽一郎：ディ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，23 巻，1 号，pp.44-51 (2008)

[4] 三宅陽一郎：デジタルゲーム AI，デジタルゲームの教科書，第 23 章，pp.431-482，ソフトバンク クリエイティブ (2010)

[5] 三宅陽一郎：これからデジタルゲームの AI の進む道を知るために知っておきたいこと，デジタルゲームの技術，第 5 章，pp.127-214，ソフトバンク クリエイティブ (2011)

[6] 小谷善行，岸本章宏，柴原一友，鈴木豪：ゲーム計算メカニズム，コロナ社 (2009)

[7] 三宅陽一郎：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，ゲームプログラミングワークショップ 2012 論文集，pp.108-113 (2012)

[8] 羽生善治，松原仁，伊藤毅志：先を読む頭脳，新潮社 (2006)

[9] 岩谷徹：パックマンのゲーム学入門，エンターブレイン (2005)

[10] 遠藤雅伸：ゲーム AI とはどんなものか？，遠藤雅伸のゲームデザイン講義実況中継，第 6 回，pp.123-134，ソフトバンク クリエイティブ (2012)

[11] サイトウ アキヒロ：ゲームニクスとは何か，幻冬舎 (2007)

[12] 三宅陽一郎：人工知能は数学を理解できるのか，考える人，No.45，2013 年夏号，pp.48-53，新潮社 (2013)

[13] 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，pp.87-120，技術評論社 (2012)

[14] 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講演予稿集，2-2(2008)

[15] S.J.Russell, P.Norvig: エージェントアプローチ人工知能 第 2 版，共立出版 (2008)

[16] Jeff Orkin : Constraining Autonomous Character Behavior with Human Concepts, AI Game Programming Wisdom 2, 3.1, pp.189-197, Charles River Media (2003)

[17] Jeff Orkin : Applying Goal-Oriented Action Planning to Games, AI Game Programming Wisdom 2, 3.4, pp.217-227, Charles River Media (2003)

[18] Jeff Orkin : Symbolic Representation of Game World

State: Toward Real-Time Planning in Games. Proceedings of the AAAI Workshop on Challenges in Game AI (2004)

[19] Jeff Orkin : Agent Architecture Considerations for Real-Time Planning in Games. Proceedings of AIIDE 2005 (2005)

[20] Jeff Orkin : Three States and a Plan: The AI of F.E.A.R. , Proceedings of the Game Developers Conference 2006 (2006)

[21] J. ユクスキュル, G. クリサート: 生物から見た世界, 岩波書店 (2005)

[22] J.J. ギブソン: 生態学的視覚論, サイエンス社 (1986)

[23] 森川幸人: マッチ箱の脳, 新紀元社 (2000)

[24] 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)

[25] R.Straatman, A.Beij, W.D.Sterren: Dynamic Tactical Position Evaluation, AI Game Programming Wisdom 3, 5.2, pp.389-403, Charles River Media (2006)

[26] D. Isla, R. Burke, M. Downie, B. Blumberg : A Layered Brain Architecture for Synthetic Creatures, IJCAI'01 Proceedings of the 17th international joint conference on Artificial intelligence, Vol.2, pp.1051-1058 (2001)

[27] R.Burke, D.Isla, M. Downie, Y.Ivanov, B.Blumberg: CreatureSmarts: The Art and Architecture of a Virtual Brain, Game Developers Conference 2001 (2001)

[28] D. Isla, B. Blumberg: Blackboard Architecture, AI Game Programming Wisdom, Vol.1, 7.1, pp.333-344, Charles River Media (2002)

[29] ロドニー・ブルックス: ブルックスの知能ロボット論, オーム社 (2006)

[30] 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.91-102 (2010)

[31] 三宅陽一郎: プロシージャル技術, デジタルゲームの教科書, 第 22 章, pp.395-430, ソフトバンク クリエイティブ (2010)

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

【略歴】

三宅陽一郎 (MIYAKE Youichiro)
 株式会社スクウェア・エニックス
 テクノロジー推進部 リード AI リサーチャー
 1999 年京都大学総合人間学部卒業，2001 年大阪大学理学研究科物理学専攻修士課程終了。2004 年東京大学工学系研究科博士課程 (単位取得満期退学)，2004 年株式会社フロム・ソフトウェア入社。2011 年より現職。専門はデジタルゲームにおける人工知能。共著『デジタルゲームの教科書』『デジタルゲームの技術』，監訳『ゲームプログラミングのための C++』『C++ のための API デザイン』。