

3章 インタラクティブコンテンツデザイン

3-1 デジタルゲームにおける人工知能エンジン

三宅陽一郎[†]

キーワード：キャラクタ、ゲームエンジン、インフォメーションフロー、エージェントアーキテクチャ、遠心性コピー、ブラックボードアーキテクチャ

1. まえがき

デジタルゲームの大規模化と多様化に伴い、ゲーム内のAIも構造化が進められて来た。AIの構造化とは、ゲーム内のステージの変化を認識するのみならず、自分の身体を通した物理的インタラクションなど、複数の経路でもたらされる膨大な情報を解釈し、そこから同じく複雑な自分の行動を継続的に生成し続けるための「知能としてのメカニズム」を意味する。このメカニズムの探求はこの10年強、ゲーム産業内やキャラクタAIを研究する学会において進められて来た。本文では、そのメカニズムの基本概念を説明することで、ゲームのみならずリアルタイムに駆動するAIの作成に有効な技術と方法を提示する。

まず今回説明する「人工知能エンジン」は、ゲームエンジンの一部である。人工知能エンジンはゲームから情報を得て情報を吐き出す。すべてが情報として扱えるところに、仮想空間のAIの最も顕著な特徴の一つがある。まずこの「情報の流れ」について解説する(1.3項)。この情報の流れを受けて情報処理を行うのが「エージェントアーキテクチャ」であり(2節)、このアーキテクチャはゲーム環境と知能の間を情報交換することで結合させ、一連の情報の流れ(インフォメーションフロー)を形成する(2.1項)。このインフォメーションフローの中で情報は形を変えて循環する。その情報の形を「知識表現」と呼ぶ(2.2項)。この知識表現を工夫することで、認識と行動に新しい形がもたらされ、新しい知的特徴を実現することができる。知識表現の中でも、行動を定義する行動表現は行動の特徴を決定する重要な知識表現である(2.3項)。ここまです基礎的な概念であるが、さらに発展として、多様な情報処理に耐えられる形にアーキテクチャは進化しており、最も顕著な特徴は階層化である(3.1項)。階層化はインフォメーションフローの分岐、並行プロセス、統合を引き起こす。最終的にAIは身体を通して世界に影響に及ぼす。具体的に身体をどう動かすかという問題はアニメーションの問題である(3.3

項)。さらに高度な知性の特徴としては、アーキテクチャ内部に情報の循環を持つようになる(3.4項)。この内部のインフォメーションフローは、外部とのインフォメーションフローと相互作用しながら、一つ上位の知性を実現する基本構造となる。1節で概論を述べた後、2、3節で上記で述べたエージェント内部の構造についての基本概念を一つ一つ説明して組合せて行くことで、エージェントの知能の構造のダイナミクス全体を解説して行く。

1.1 デジタルゲームAIに求められるもの

デジタルゲームに「ユーザに対して映画やお化け屋敷のようなセットの中で演出をして遊ばせる」、「デジタル空間の中に一つの世界を作って遊ばせている」という二つタイプがある。近年、デジタルゲームの大型化で、この両者の軸がより明確に顕在化されており、デジタルゲーム内のキャラクタ(エージェントとも呼ばれる)の果たす役割も、この二つの軸の要求に沿う形となる。前者におけるキャラクタは役者のように振舞う「演出性」が必要とされる。例えば、特定の状況で決められたタイミングでプレイヤーを攻撃し決められた台詞を言い、味方がやられた時に駆け寄って抱きかかえる、などの演技である。後者では、ゲーム世界の中で自律的に活動・生活する「自律性」が必要とされる。例えば、戦闘領域で岩などに隠れながら前進しながら敵を殲滅する、あるいは、仮想的な街の中で日常生活を営む、などである。このようにデジタルゲームにおけるAIは「演出性」と「自律性」の二つ属性が求められる。その比重はゲームタイトルとその中でキャラクタの果たす役割に依存する。

1.2 人工知能エンジン

ゲーム全体が大規模になるに従い、デジタルゲームは、ソフトウェア構造として基本機能を提供する「ゲームエンジン」部分と、その上に構築される「ゲームコンテンツ」部分に分離することとなった(図1)。「ゲームエンジン」は、ラインタイムにおけるコアとモジュールのみならず、ゲーム製作環境を含む総合的環境を指すようになって来た。「ゲームコンテンツ」を作る側は、プログラマ、プランナに加えて、グラフィック、コンポーザなどアーティストである。マウス操作、ペンタブレット操作、(ビジュアル)スクリプトイン

[†] 株式会社スクウェア・エニックス テクノロジー推進部
"Interactive Contents Design: AI Engine in Digital Game" by Youichiro Miyake (Advanced Technology Division, SQUARE ENIX Co., Ltd. Tokyo.)

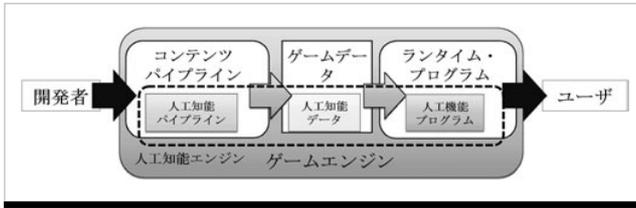


図1 ゲームエンジンと人工知能エンジン

グによるデータ制作を連携して一つのコンテンツを生成して行く。アセット（コンテンツデータ）が複数の開発者の手をわたって加工されながら最終データになる過程を「コンテンツパイプライン」、「アセットパイプライン」と呼び、具体的にはツールの連携「ツールチェーン」による「データ生成パイプライン」が形成され、全体として開発者全員の「ワークフロー」が定義される。開発の初期においては、ゲームデザインと並行して、このようなコンテンツを積み重ねるため環境を構築する作業が主となる。人工知能部分も同様であり、人工知能パイプライン、人工知能ツールを整備する必要がある。ここでは、デジタルゲームにおける人工知能エンジンの基本的な構造について解説する。

1.3 環境と知能の間の情報と力の流れ

デジタルゲームのAIは、ゲームステージやプレーヤの状態など、深くゲーム部分と絡むためにゲームコードの一部として、裸の状態のコードや関数の形でコーディングされる場合が多かった（現在でもそういう実装はある）。しかしゲームの大型化に際しAI部分は、ゲーム部分からある程度独立したモジュールとして実装されるようになった。AIモジュールは「知能」と「身体」を持ち、それにしたがって、AIは環境と内部の間に「情報の流れ」（インフォメーションフロー）と「身体・物理的な力の流れ」を持つことになる。この二つの流れが混在しているところに、知能を作る難しさと面白さの課題がある。

アーキテクチャの役割はAIの内部（身体・知能）構造を定義し、外部（環境）との情報と力学のやりとりを定義することである。内部と外部の接続と独立を実現するために、AIモジュールは世界から情報を取る「センサ」、世界へと影響を与える「エフェクタ」、さらに、その中間の「意思決定」が直列に組合されたアーキテクチャを持つ（図2）。

2. エージェントアーキテクチャ

AIの内部構造は、エージェントアーキテクチャと呼ばれる¹⁾。デジタルゲームのキャラクタにおけるエージェントアーキテクチャの基礎となるのが、MITメディアラボのSynthetic Characters Group²⁾が2000年に提案したC4アーキテクチャである³⁾。このアーキテクチャの特徴は、ブラックボードアーキテクチャ（Blackboard Architecture）を採用している点であり、データを管理するブラックボードと呼ばれる共有メモリー空間と、そのデータを操作する権限を持

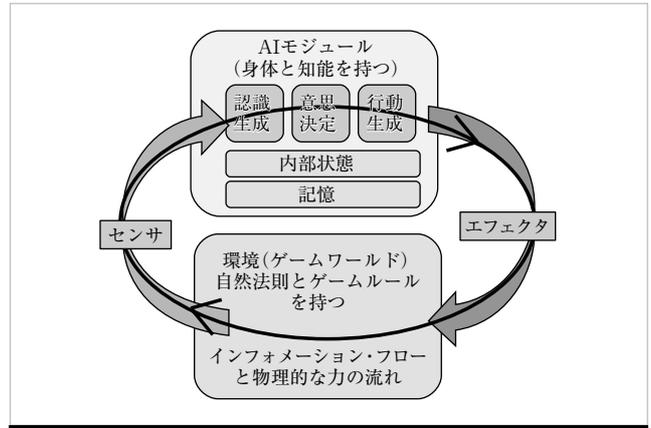


図2 循環するインフォメーションフローと力の流れ

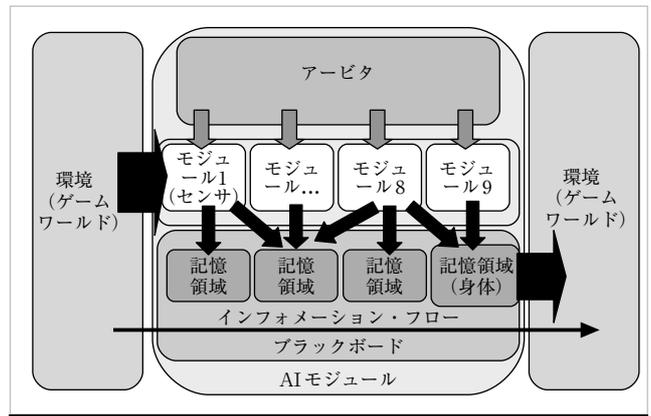


図3 ブラックボードを用いたエージェントアーキテクチャ

つモジュールに明確に分離されている点にある⁴⁾⁵⁾。モジュール同士の直接の連携は制限され、ブラックボード上のデータを介して連携する形となっている（図3）。

この構造によって、各モジュールの独立性が確保されると同時に、モジュールを入れ替え知能の多様なバリエーションを実現する多様性を獲得することになる。

各知能モジュール群はそれぞれ専門的な機能を持ち、ブラックボードを介して連携することで一つの総合的な知能を実現する。例えば意思決定モジュール、移動ナビゲーションモジュール、状況予想シミュレーションモジュール、運動生成モジュールなど独立に実装され、ブラックボードを介してデータを読み書きすることで連携する。知能モジュール群の上位にあるアービタは、各モジュールをいつ、どのタイミングでアクティブ・非アクティブ化にするかを、AIの内部と外部の状態を監視しながら適切にコントロールする。それによって状況に応じたモジュールの制御を実現し適切なインフォメーションフローをダイナミックに産み出す。

このアーキテクチャはその後のHalo2 (Bungie Studios, 2004) や、F.E.A.R. (Monolith Productions, 2005) といった

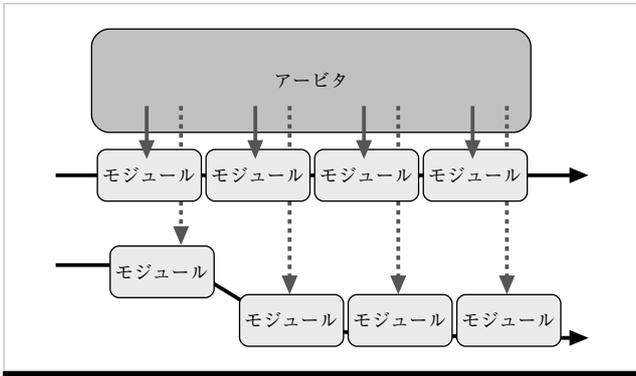


図4 アービターとインフォメーションフローの変化

FPS (First Person Shooter) ジャンルのエージェントに応用され、この10年でゲーム産業内で広く応用されるに至った⁶⁾。また、大学におけるゲームエージェント研究の基礎ともなった。現在、C4アーキテクチャは拡張され、ブラックボードを多層化・階層化したり、モジュール間の複雑な連携を実装したり、さまざまな方向に発展している⁷⁾⁸⁾。

2.1 インフォメーションフロー

インフォメーションフローは各モジュールの連携によって形成される。逆に一度形成されたインフォメーションフローはヒステリシスを持ち、環境の変化に対して変化しながらも、流れを維持するように各モジュールを連結する。結果として、インフォメーションフローは各モジュールを結びつける機能を果たすことになる(図4)。

インフォメーションフローは、内部(記憶)・外部(環境)からさまざまな情報が流れ込むことで変化して行くが、アービタはモジュールを駆使して、状況に合ったモジュールをアクティブにすることで、インフォメーションフローをAI内部と環境の間に形成し、環境に適応した思考を産み出すことになる。

2.2 ブラックボードアーキテクチャと知識表現

インフォメーションフロー上にある情報は、環境から新しく取得された情報、それが思考によって解釈され抽象化された情報、そこから生み出された意思決定情報、などである。各情報はブラックボード上の特定の位置に配置される。

ブラックボード上に展開される情報は静的に変化することのない情報と、動的に変化する情報がある。例えば、「この敵にはこの魔法が効く」、「回復薬を飲めば体力が上がる」というルール of 知識は静的であるが、体力や魔法のパラメータ(HP, MP)は変化し続ける。ブラックボード上に点在する各情報はパラメータとシンボルの集合であり、モジュールの操作で結ばれている。例えば、ある情報が変化すると連動して他の情報も変化し、時間的に消滅する、などである。

それぞれの情報の形式は、知識表現(Knowledge Representation)と呼ばれ、知識体の構造や操作方法を定

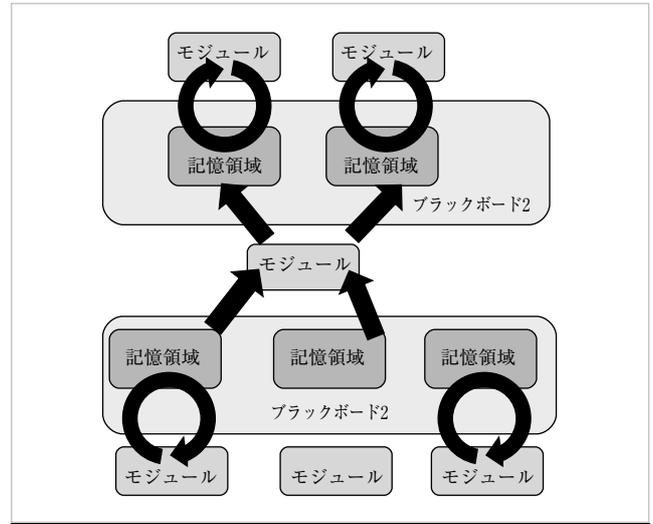


図5 内部運動を持つ記憶領域としてのブラックボード

義する。例えば取得した情報に対して、取得時刻、取得センサ、信頼度など管理情報を付与することで、知識をメタ的にマネジメントすることが可能となる。例えば、敵Aの位置は自分の目で見たのでその時点で信頼度は1.0、だが時間の経過とともに情報の信頼度は減衰し30秒後は0.2、仲間から聞いた情報なら信頼度0.5、10秒後は0、などと情報を内容にかかわらず外側から評価することが可能となる。

知識表現もブラックボードアーキテクチャも、歴史的にはエージェント間のコミュニケーションを指向して、1970年代、1980年代を通して発展した技術であるが⁵⁾、デジタルゲームAIはそれをエージェント内部で使用している。

2.3 記憶のダイナミクス

ブラックボード上の記憶たちは、インフォメーションフローの上で変換されて行くだけではなく、アーキテクチャの内部で運動と変化を持っている(図5)。例えば、あるモジュールは幾つかの情報から、より抽象的な情報を抽出し、別のモジュールは得た情報から新しい別の情報を推論する。またあるモジュールは古くなった情報を破棄する。このように、ブラックボード上の情報はモジュールの自律的な活動によって整理・発展する。それはまるでブラックボード全体を「生きている情報体」のように機能させる。

2.4 行動形式

知識表現の中でも行動を定義する知識表現は、キャラクターAIの中心的課題である。例えば、行動の定義とは「どのターゲットに、どの武器(魔法)で、どのタイミングで、攻撃するか」、「どの方向に、どのタイミングで、何をしながら、退却するか」などである。前者をA、後者をBとすれば、意思決定モジュールはAとBを同時に提案(生成)し、評価値や優先度によってどちらかを選択する、多くの行動案を生成しその中から選択する意思決定法は、ユーティリティベース(Utility-Based)と呼ばれる。ゲームではこれを

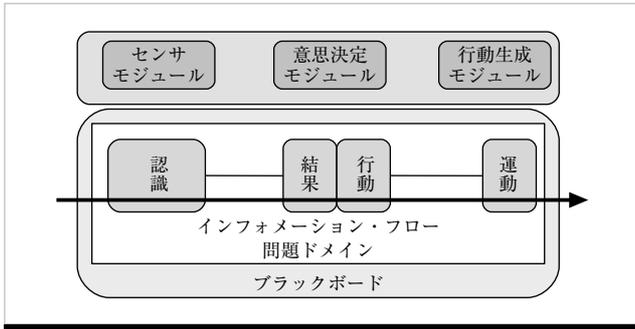


図6 「認識」、「結果」、「行動」、「運動」と問題ドメイン

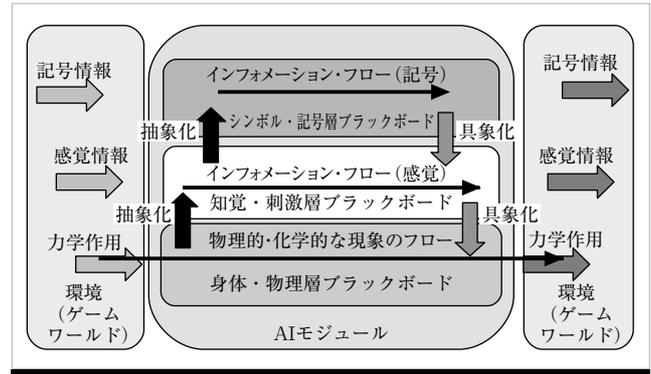


図7 AIの階層的表現

含めて7つの代表的な意思決定法がよく使用される⁹⁾。

行動がインフォメーションフロー上で意思決定されると、身体へと向かってより具体的な情報へ分解されながら、行動生成モジュールで実際の運動が生成される。実際の運動が行われると、環境とのインタラクションによって反応が得られる。

知能がこの反応を「結果」として認識するためには、結果の知識表現が準備されなければならない。例えば、結果の知識表現は「どのターゲットが、どのような状態変化し、どのような状態になったか」あるいは「自分自身の体力、魔法力、ステータスがどう変化したか」などである。結果の表現が決められると、そこからその結果を形成する情報を集めるためのセンサ・認識のパスが決定される。例えば、「暗闇の中で石を投げて床の状態を知る」のであれば聴覚（正確には石と床の衝突した面の属性）を、「右パンチで相手を叩く」のであれば右手とターゲットの衝突検出の有無を判定する必要がある。

行動の知識表現と、結果の知識表現の実体は同一のインフォメーションフロー上で対応付けられ、これによって行動の評価と学習が可能となる。つまり「認識」、「結果」、「行動」、「運動」の四つ要素は一つの問題ドメインを形成するためのセットであり、インフォメーションフロー上で一連の要素(シーケンス)として結ばれることになる(図6)。

3. エージェントアーキテクチャ内部構造の発展

より複雑な環境における高度な役割を持つエージェントは膨大な情報処理能力を必要とするため、内部を構造化する。ここでは、階層化、サブサンクション、内部循環インフォメーションフローなど、より発展したエージェント内部の構造を解説する。

3.1 階層化

特にその構造化の中で顕著に見られる特徴は階層構造である(図7)。ここで代表的な三つの階層を解説する。

(1) 身体・物理層

生物は内部的に、食欲や排泄の生理的機能や自己保存本能を持ち、内部現象に起因する生理的な自律的運動を行う。

逆に外部的に環境で運動する身体は世界からの作用を物理的に受ける。例えば、外部からの力に応じて体勢を維持する、安全な場所に逃げ込むなどの物理的運動を行う。これは情報に対する反射とは別の物理的・身体的な反作用であり、身体の状態がこれによって変化する。知能が行動の生成した時に自分自身として想定する運動(遠心性コピー)と、実際の結果として運動の差が、身体に対する作用として認識される。

(2) 知覚・刺激層

五感から得た情報を中心に、情報処理、反射の結果として行動を行う。例えば、危険な敵を認識したから逃げる、食べ物の匂いがしたから近づく、などである。

(3) 言語・シンボル層

感覚によって得た情報を総合・抽象化して新しい判断を行う。文字・シンボルなどの記号情報操作による高い情報伝達的能力を使用し、記号情報に基づいて知的な行動する。例えば、命令を受け取って行動する、自分の意思を言葉や泣き声で仲間に伝える、求愛する、などである。

このように生物は自己の知能を階層的に構造化しながら外部世界に対応している。これによって生物は、その根底で原始的に環境と深い結びつきながらも、抽象化した情報レベルでも世界に応答することができる。

そこでブラックボードは、単なる情報の置き場を超えて、身体を表現する領域、知覚を表現する領域、記号情報を表現する領域として段階的に拡張され、統合して「階層型領域ブラックボード」⁵⁾としてキャラクタの内部状態全体を表現する。各階層には異なるインフォメーションフローが並列して流れ、異なる問題ドメインを解決する思考が並行してエージェントアーキテクチャ内部を流れることになる。

3.2 サブサンクションアーキテクチャ

階層化とともに導入される構造がサブサンクションアーキテクチャである(図7)。

上位の階層はそれより以下の階層のメタ表現であり、上位の階層はより下位にある層を監視・コントロールすることができる。これは、拡張されたサブサンクションアーキテクチャである。各階層は独立かつ並列に運動しながら協

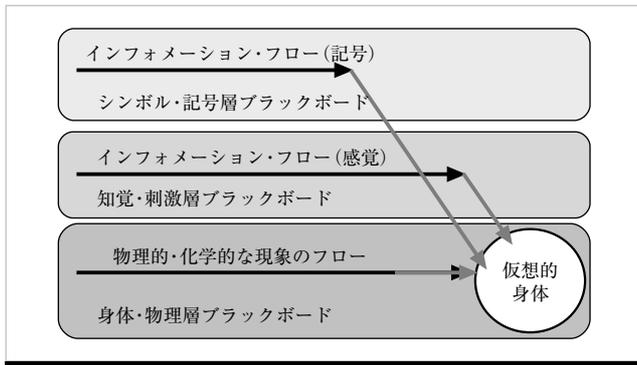


図8 複数の運動生成パス

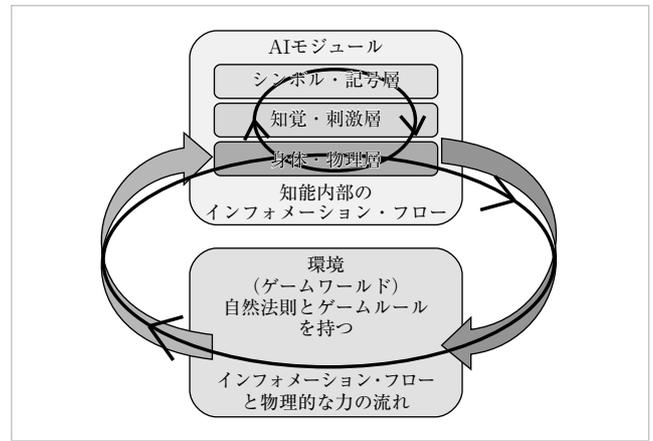


図9 情報の内部循環と外部循環

調する。各層が自分自身に必要な情報を集めて意思決定を行い、行動を決定し競合しながら身体を制御を行う。

各階層において行動と結果の表現は決定されており、その対応にしたがって各階層ごとの記憶と学習が可能となる。例えば身体層は、運動の記憶と学習であり、知覚の層は認識と行動の学習であり、最上層はシンボルに基づく学習である。一般に生物進化は下位から上位に向かって進化して来たと考えられるが、各階層で解決される問題領域が異なるため、それぞれの層で、ゲーム要件に応じた問題ドメインのフレームを設置して行く必要がある。

3.3 身体運動の形式

身体運動を制御するアニメーションモジュールとAIモジュールの協調の方法は、近年の高度なエージェントの設計で最も重要な課題の一つである。離散的な意思決定思考に対して、アニメーションは時間的に連続なシステムであり、準備されたアニメーションデータ群を接続・複合するか、プロシージャルに自動生成することで必要なアニメーションを状況に合わせて作り出す。アニメーションは環境要因(いきなり床が抜ける、目の前にボールが飛んで来る)など身体的に反応する必要がある反射的行動と、跳び箱やハードルを飛ぶ、敵から隠れる、など思考のもとで運動を作って行く計画的行動がある。

そこで実現したい運動問題のドメインによって、複数の経路で運動を形成して行く必要がある。階層構造を用いて「身体レベルで解くパス」、「知覚レベルで解くパス」、「抽象的思考で解くパス」など複数の運動形成パスを並列に動作させ、最終的に身体レベルで統合する手法が考えられる(図8)。さらに生成された運動に対して、ポストプロセスとしてアレンジを加える手法がある¹⁰⁾。

知能は複雑すぎる身体そのものの情報をすべて扱うことはできない。そこで、「仮想的身体」として実際の身体を簡易的な表現として持つ(身体の知識表現)。この表現をインタフェースとして、アニメーションモジュールは身体を知覚し操作することが可能となる。

3.4 内部循環インフォメーションフロー

環境から身体を通して情報が集積し意識が作られ、逆に、知性は意識から身体を通して環境に働きかける。その途切れることのない継続的な循環を示すのがインフォメーションフローであるが、一方で内部で循環するインフォメーションフローが存在する(図9)。内部で循環するインフォメーションの主な機能は蓄積された記憶の整理と、そこから推論・演繹される新しい情報の抽出と獲得である。

外部と内部をつなぐインフォメーションフローの中で運ばれた情報は記憶として蓄積される。内部循環インフォメーションフローは、現前で知覚している対象をキーとして内部記憶を検索し、連想される記憶をもって知覚対象を修飾する。例えば、目の前の「モンスターA」を見ている時、その「モンスターA」に付随する記憶が連想され、その記憶が「モンスターA」に紐付けられ、その集合体が新しい認識となる。

また生物は眠っている時、外部からの情報が極限まで制限され、内部におけるインフォメーションフローのループが大きくなり、蓄積した記憶が変化・整理されて行く。これは夢の作用と同じである。内面で閉じたインフォメーションフローは知能内部の強い自己構造化に寄与していると予想され、今後のエージェント内部構造の研究課題の一つである。

4. むすび

知性はその属する世界に存在することは、世界と深い関わり合いの中で生きるということである。単に見えている現象を超えて、知性と環境の間では長い進化の過程で知性と環境の相互の関係が形成されており、知性は変化する環境の中の動的平衡系として存在している。それは身体・物理的にも、また知覚情報的にも同様である。

知性は身体と頭脳を持ち、この二つは深い関連の中であり、どちらかを単独で考えることはできない。人間が身体を動かしながらも、知覚から得た情報を解析して行動を形

成するように、人工知能も身体・物理的な知と制御を持ち、同時に情報的な知と制御を持っている。知能は常に環境に対して相対的なものであり、環境の中の身体とあり方に強く影響されている。

このように、ゲームにおける人工知能は情報処理的なフレームを超えて、環境における身体・物理的なインタラクションを同時に考えることで、新しい研究課題を産み出し続ける。それは、単に情報的に定式化された問題を超えて、流れ続ける情報と変化する環境の中で、情報の存在・物理的存在としての自己の均衡を保つことである。

本文では、まずゲームという仮想的世界のキャラクタに対して、エージェントアーキテクチャという大きなフレームを用意した。さらに、エージェントアーキテクチャ内部で「リアルタイムに情報処理と意思決定が行われるためには、どのようなモジュール設計が必要か」という問題に対して、この十年のゲーム産業で蓄積されて来た基本的な設計アイデアを紹介した。そこでは、情報の存在と同時に物理的存在として安定化しようという二重の力の相克があり、階層構造やサブサンクションアーキテクチャが応用されることになる。ここで解説した技術は、変化し続ける環境の中でリアルタイムAIを作ろうとするエンジニアリングにおいて必ず直面する問題に対する一つの解答を与えており、ゲームで培われたリアルタイムAIの技術が、ゲームを超えて広く応用されることを期待するものである。

(2013年11月26日受付)

〔文 献〕

- 1) S.J.Russell, P. Norvig: "エージェントアプローチ人工知能第2版", pp44-51, 共立出版 (2008)
- 2) MIT Media Lab, Synthetic Characters Group <http://characters.media.mit.edu/> (2013.12.17)
- 3) R. Burke, D. Isla, M. Downie, Y. Ivanov, B. Blumberg: "CreatureSmarts: the Art and Architecture of a Virtual Brain", Game Developers Conference 2001 (2001)
- 4) D. Isla, B. Blumberg: "Blackboard Architecture", AI Game Programming Wisdom, Charles River Media, 1, 7.1, pp333-344, (2002)
- 5) 石田亨: "分散人工知能", pp70-91, コロナ社 (1996)
- 6) 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, ソフトバンククリエイティブ, pp431-482 (2010)
- 7) 三宅陽一郎: "次世代キャラクタAIアーキテクチャの構築", CEDEC (2012), <http://cedil.cesa.or.jp/session/detail/891> (2013.12.17)
- 8) R. Arrabales, A. Ledezma, A. Sanchis: "Towards the Generation of Visual Qualia in Artificial Cognitive Architectures", BICS 2010 (2010)
- 9) 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, 68, 技術評論社, pp87-120 (2012)
- 10) B. Anguelov: Managing the Movement, GDC2013 (2013)



三宅陽一郎 みやけ しょういちろう 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修了。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)フロム・ソフトウェア入社。2011年より、(株)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。専門はデジタルゲームにおける人工知能。共著に、『デジタルゲームの教科書』、『デジタルゲームの技術』、監訳『ゲームプログラマのためのC++』、『C++のためのAPIデザイン』。