

仮想現実における記号接地問題の重要性：リアルタイム制約下におけるモデル ヒューマンプロセッサ(MHP/RT)に基づくミーム中心の解決策

Muneo Kitajima (北島 宗雄) Makoto Toyota (豊田 誠) Katsuko T. Nakahira (中平 勝子)

Nagaoka University of Technology

Nagaoka, Niigata, Japan (長岡技術科学大学) Chiba, Japan (T メソッド) Nagaoka, Niigata, Japan (長岡技術科学大学)

Email: mkitajima@kjs.nagaokaut.ac.jp

T-Method

Nagaoka University of Technology

Email: pubmtoyota@mac.com

Email: katsuko@vos.nagaokaut.ac.jp

Abstract— VR環境では、ユーザが知覚してインタラクトするオブジェクトが提示され、それらを知覚して生起するユーザのインタラクションの内容を反映して、VR環境は次の状態に遷移する。VR環境とユーザのインタラクションがシームレスに継続するためには、VRアプリケーションの作成者がVR環境に提示するオブジェクトに対して設定した意味と、そのオブジェクトを経験するユーザがそれに対して抱く意味が一致していることが必要である。本研究では、VRアプリケーションが提示するオブジェクトを記号と捉え、それが内包する意味と、それを体験するユーザが抱く意味との関係を、人工知能の分野において挑戦的な課題として位置付けられている記号接地問題によって捉えることにより、VR環境とユーザのシームレスなインタラクションを実現する方法を提案する。日常的な環境における行動選択の理論であるMHP/RTに基づいて、ユーザの行動選択の内容が世代を超えて伝承するミームに基づいていることに着眼し、ユーザが日常行動の中で利用しているミームを観測し、抽出されたミームをVRシステムに実装することによって、記号接地問題が解決され、ユーザとシステムをインターフェースする記号に対して共通の理解を持ちながらシームレスなコミュニケーションを成立させられることを示唆する。

Keywords- 記号接地問題；ミーム；仮想現実；人工知能；MHP/RT；構造化ミーム理論

I. はじめに

本論文は、過去にAIVR2025 [1]で発表された研究に基づいている。第IV章に、新たに第IV-A節を設けることで、記号接地を考慮する際に存在していることが必要な「記号」が生成されるプロセスとミームとして構造化されるプロセスを論じている。また、第IV-C節を設けることで、実生活において、記号接地が保障された記号の利用のされかたを説明し、構造化されたミームの観測可能性について論じている。

人間は五感を介して外界の情報を取得し、知覚・認知・運動のプロセスを稼働させて、その時点の状況において適切な行動を選択し、実行する。知覚された情報を知覚プロセスにおいて符号化し記号として表現することにより、認知プロセスにおいて思考することが可能になる。思考プロセスでは、記憶が利用され、記号が逐次に変換されていく。思考の結果の一部は運動プロセスで実行可能な行為系列の表現を与える。人間の知能は記号を操作する思考プロセスによって捉えることができるとの考えのもと、Newellは人間の知能の理論として物理記号システム（Physical Symbol System）を

提唱した[2]。この考え方は、認知アーキテクチャであるSoarの基盤を提供した[3], [4]。

感覚器を介して知覚プロセスに入力される情報には、現実世界にその源となる実体が存在する。知覚・認知・運動プロセスを経て生成される記号により表現された行為系列に従って、現実世界の中で行為が実行され、現実世界が更新される。人間が現実世界の中で行うこのようなインタラクションを、物理記号システムにより実現しようとするとき、システムには、記号表現を実世界の参照に結びつけ、環境とのインタラクションから意味のある理解を獲得する能力を有することが必要になる。

この能力の実現は人工知能（AI）研究における基本的な課題であり、記号接地問題[5]と呼ばれている。機械がそのシンボル表現を実世界の参照に結びつけ、環境との相互作用から意味のある理解を獲得する能力に関するものである。言い換えれば、機械がどのようにして世界の物体、概念、出来事の意味を理解し、表現することができるかということである。記号表現を実世界に根付かせる能力がなければ、機械は言語処理、画像認識、意思決定などの知的行動に必要な豊かで複雑な意味を獲得することはできない。人間のように知覚し、推論し、行動できる機械を作るためには、記号接地問題に取り組むことが極めて重要である。

人間がインタラクトする環境に仮想現実がある。仮想現実（VR）では、ユーザは、コンピュータ・モデリングおよびシミュレーションを使用して人工的な3次元（3-D）視覚環境またはその他の感覚環境とのインタラクションを行うことができる。VRアプリケーションは、現実をシミュレートするコンピュータ生成環境にユーザを没入させる。VR環境中では、VRアプリケーションによって提供されるユーザにとって知覚可能なオブジェクトを介して、ユーザとのインタラクションが進行する。VRアプリケーションが生成するオブジェクトにユーザが与える意味がユーザのオブジェクトとのインタラクションを決定づける。VRアプリケーションはオブジェクトに対してユーザが与える意味を適切に扱う能力を有することによって、シームレスなインタラクションを実現できる。ここに、シームレスなVR環境の実現に記号接地問題が無縁ではないことがわかる。本論文では、VRにおける記号接地問題への対応の方法を提案する。

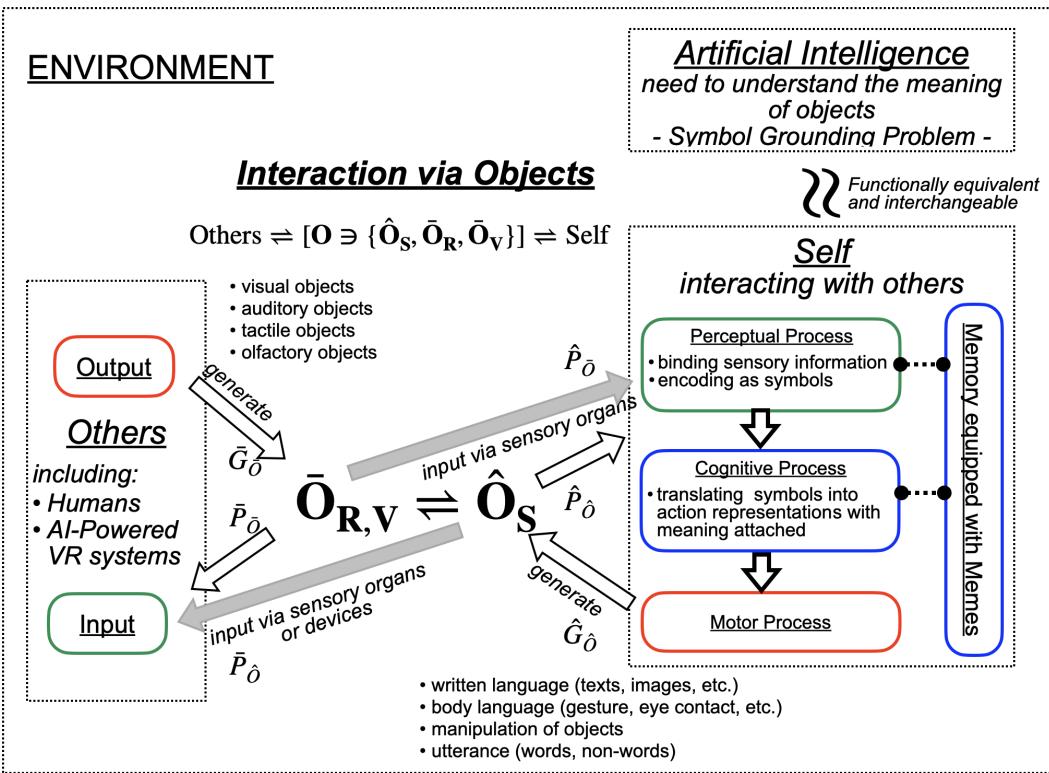


Figure 1. オブジェクトを介したインタラクション (adapted from [1, Figure 1])

本論文は、次のように構成されている。第II章では、オブジェクトを介したインタラクションを扱う枠組みを示す。第III章では、自身とオブジェクトのインタラクション、AIにおける記号接地問題のインタラクション視点での捉え方、自身とVRとのインタラクションの捉え方について述べる。第IV章では、記号接地を担保したVR環境の生成方法を示唆する。第V章では、本論文の結論をまとめ、今後の研究展望を示して締めくる。

II. オブジェクトを介したインタラクション

本章では、オブジェクトを介して個々の人間がインタラクトする様相について、第II-A節で分類を行う。続く第II-Bでは、インタラクトする個々人の知覚・認知・運動プロセスと記憶について説明する。

A. インタラクションのタイプ

個々の人間は、自身の周りに存在する多数のオブジェクトとインタラクトしながら日々の生活を送っている。オブジェクトは、自身が直接的に関与するのか、関与するオブジェクトを誰が生成したのかによって、以下のように分類される。

- $\hat{\mathbf{O}}_S$ ：自身が直接的に生成したリアルなオブジェクト（自身の発話、書いた文字、図形、ジェスチャ、造形物、など）。これを、自己生成オブジェクトと呼ぶ。
- $\bar{\mathbf{O}}_R$ ：直接的にインタラクトしている他の人間が生成したリアルなオブジェクト。これを、他者生成オブジェクトと呼ぶ。

• $\bar{\mathbf{O}}_V$ ：直接的にはインタラクトしていない人間、あるいは、機械が生成したオブジェクト。これを、仮想オブジェクトと呼ぶ。

これら3タイプのオブジェクトをまとめて \mathbf{O} ($\ni \{\hat{\mathbf{O}}_S, \bar{\mathbf{O}}_R, \bar{\mathbf{O}}_V\}$) と表現する。図1では、中央に「 \mathbf{O} 」、その右側に \mathbf{O} とインタラクトする「自身」、左側に \mathbf{O} とインタラクトする「他者」を配置している。また、「自身」の上には、自身と機能的に等価で置き換え可能な「人工知能」が位置している。自身は、知覚・認知・運動プロセス (PCMプロセス) を稼働して、オブジェクト $\hat{\mathbf{O}}_S$ を生成する ($\hat{G}_{\hat{\mathbf{O}}_S}$)。また、それを、知覚する ($\hat{P}_{\hat{\mathbf{O}}_S}$)。自身が知覚するオブジェクトには、他者が生成したオブジェクト $\bar{\mathbf{O}}_{R,V}$ も含まれる ($\hat{P}_{\bar{\mathbf{O}}_{R,V}}$)。一方、他者はオブジェクト $\bar{\mathbf{O}}_{R,V}$ を生成する ($\bar{G}_{\bar{\mathbf{O}}_{R,V}}$)。他者が人間である場合は、自身と同様に記憶を利用したPCMプロセスを稼働してオブジェクト $\bar{G}_{\bar{\mathbf{O}}_R}$ を生成する。機械は独自に備えた生成機構を動かして $\bar{G}_{\bar{\mathbf{O}}_V}$ を出力として生成する。他者への入力は、他者自身が生成したオブジェクト $\bar{\mathbf{O}}_{R,V}$ である場合 ($\bar{P}_{\bar{\mathbf{O}}_{R,V}}$)、あるいは、図中の自身によって生成されたオブジェクト $\hat{\mathbf{O}}_S$ である場合 ($\bar{P}_{\hat{\mathbf{O}}_S}$) がある。以上をまとめると、オブジェクトを介したインタラクションは、以下の記号で表現することができる。

$$\text{Others} \Leftrightarrow [\mathbf{O} \ni \{\hat{\mathbf{O}}_S, \bar{\mathbf{O}}_R, \bar{\mathbf{O}}_V\}] \Leftrightarrow \text{Self}$$

B. 自身と \mathbf{O} のインタラクション

自身と $\mathbf{O} \ni \{\hat{\mathbf{O}}_S, \bar{\mathbf{O}}_R, \bar{\mathbf{O}}_V\}$ のインタラクションは、自身が動かす知覚・認知・運動プロセス (PCM)

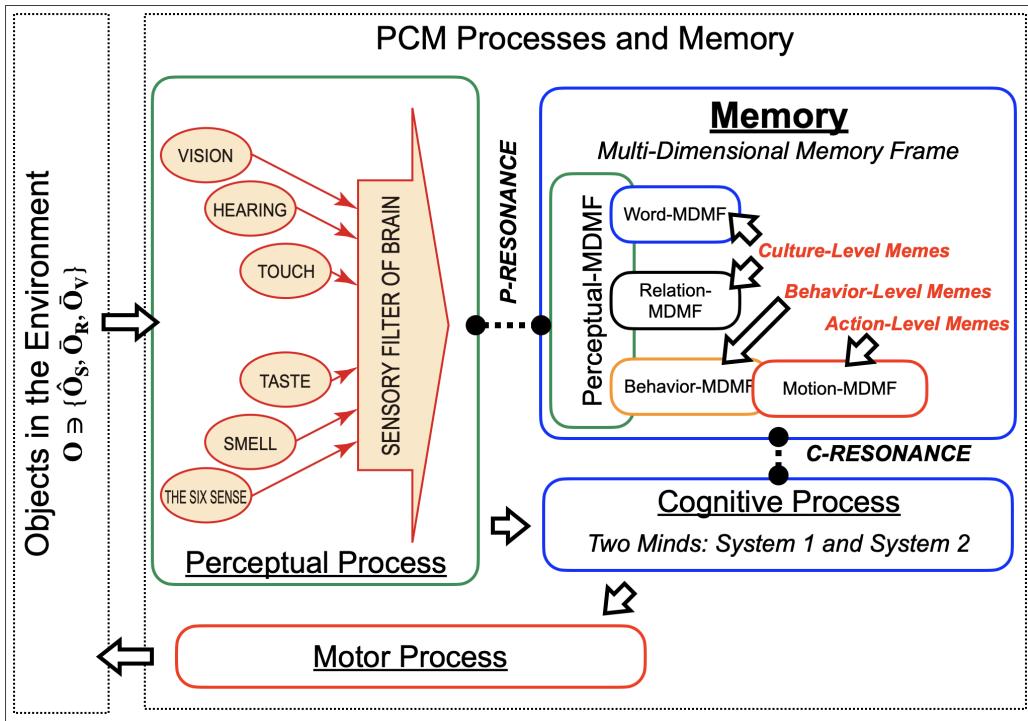


Figure 2. PCMプロセスと記憶 ([6, 図1]を改変), および, 環境中のオブジェクトとのインタラクション (adapted from [1, Figure 2])

と, PCMで利用され, PCMプロセスの実行の結果として更新される記憶プロセスにより, 実行される。本節では, PCMと記憶プロセスの概要を, 日常的な行動選択をシミュレートできる認知アーキテクチャである「実時間制約下のモデルヒューマンプロセッサ(MHP/RT)」[7]-[9]を基本に据えて説明する。

1) PCMプロセス: 環境中のオブジェクトとのインタラクションを行う際に, 人間は, オブジェクトから発せられる物理的・化学的な刺激に対して, 環境とのインターフェースに配置されている感覚神経が反応し, 生体内に環境情報を取り込む。脳は複数の感覚器官を通じて, 現在の自己の活動に関する環境情報を取得し, 現在の環境に適した身体の動きを生成する。環境と自己の間の安定した持続可能な関係は, 自己の活動と, 自己の次の行動に影響を与えるはずの環境の変化との間の継続的な調整によって確立される。

図2 ([6, Figure 1]を改変)は, MHP/RT [8], [9]をもとにして, 環境情報が感覚神経を介して生体内に取り込まれ, 脳内での情報処理を経て, 運動神経を介して外界に働きかけるプロセスを示している。このプロセスには, 多次元記憶フレームとしてモデル化される記憶と, 知覚・認知(Two Minds)・運動プロセスが関わる。多次元記憶フレームは, 知覚-, 行動-, 運動-, 関係-, 言語多次元記憶フレームから構成されている。知覚多次元記憶フレームは行動-, 関係-, 言語多次元記憶フレームとオーバーラップしている。これにより, 知覚-から運動多次元記憶フレームに活性が伝播する。

環境から感覚器を介して取り込まれた知覚情報は, 共鳴(P-共鳴)を介して多次元記憶フレームとして構造

化された記憶ネットワーク内の情報を活性化する。図中, ●—●で示している。共鳴は, 多次元記憶フレーム内の知覚多次元記憶フレームでまず起こり, 記憶ネットワークが活性化する。そこから, 活性は, 知覚多次元記憶フレームとオーバーラップする記憶ネットワーク, 行動-, 関係-, 言語多次元記憶フレームに伝播し, 最終的に, 運動多次元記憶フレームに到達する。Two Mindsによる認知処理では, C-Resonanceを介して言語多次元記憶フレームと関係多次元記憶フレームを利用するシステム2による意識的処理と, C-Resonanceを介して行動多次元記憶フレームと運動多次元記憶フレームを利用するシステム1による無意識的処理が相互に関連して進行する。認知処理の結果である運動多次元記憶フレームに従って, 運動系列を発現する。行動を発現する際に関わった記憶は, その利用過程の痕跡を反映して更新され, 将来の行動選択過程に影響を及ぼす。

2) 記憶とミーム: PCMプロセスが稼働すると, 知覚プロセスに対応して知覚多次元記憶フレーム, 認知プロセスに対応して言語-, 関係-, 行動多次元記憶フレーム, 運動プロセスに対応して運動多次元記憶フレームの内容が更新される。図2は, PCMプロセスが稼働したことの痕跡としての記憶にフォーカスして, 多次元記憶フレームを, 知覚-, 言語-, 関係-, 行動-, 運動多次元記憶フレームに分類している。要するに, これらは, 知覚・認知・運動プロセスの実行に伴う記憶の更新に着目した構造化のされた表現となっている。

一方, 記憶の利用の観点から, 記憶システムを捉えることができる。知覚情報とのP-共鳴により, 最初に, 知覚多次元記憶フレームが活性化され, それに結合してい

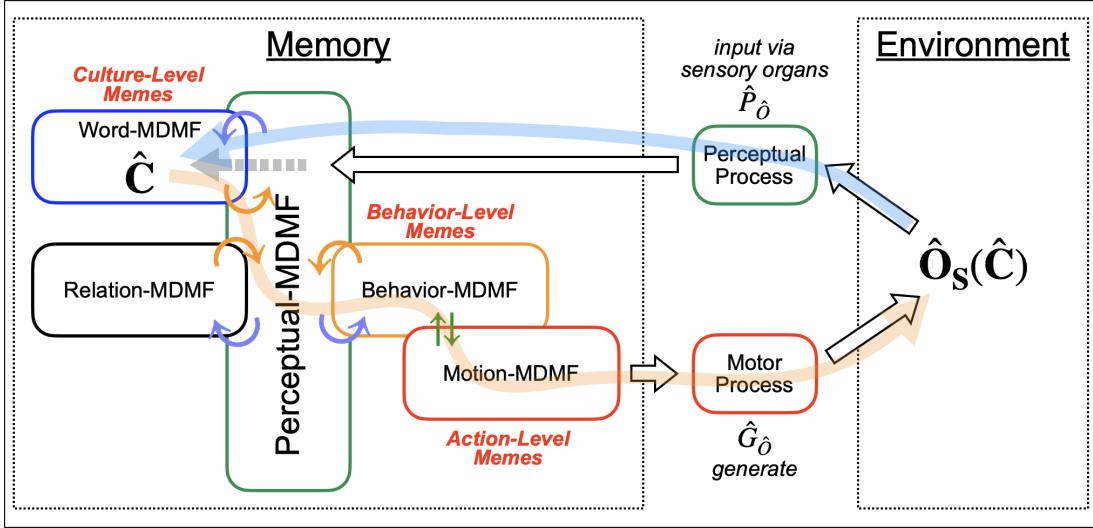


Figure 3. 自身が概念 \hat{C} を具現化するオブジェクト $\hat{O}_S(\hat{C})$ を生成する場合の記号接地 (adapted from [1, Figure 3])

る言語-, 関係-, 行動多次元記憶フレームに活性が伝播し、運動神経に結合している運動多次元記憶フレームに活性が到達する。行動の基本は模倣である。従って、世代を超えて模倣可能な行動が持続可能な行動として保存される。このようにして、PCMプロセスにより利用され、その実行により更新される多次元記憶フレームを、世代を超えて継承できるミームの観点から整理することができる [10]。

「ことば」はミームの典型とされている[11]。ことば（シンボル）は個々人の言語多次元記憶フレームの内部に存在する。ことばを利用することを通じて、個別言語、あるいは、文化言語として、言語多次元記憶フレーム内で整理されていく。個別言語とは、類義語や関連する概念でグループ化された単語のリストであるシーラスや、直接的な使用だけでなく比喩的な使用も含まれる可能性がある個人対個人のコミュニケーションに使用される言語である。文化言語とは、特定のコミュニティで確立された常識の適切な理解がコミュニケーションの成功に不可欠である文化的な文脈で使用される言語である。これらは、人々の間で循環し、世代を超えて持続する[12]。

類語、個別言語、文化言語は、環境中の対象との結びつきのパターンから見て、この順に複雑さを増していく。類語辞典は、誕生から3歳までの初期発達段階において、神経回路網にコード化された環境中の対象と関連している。個々の言語は、環境中の対象物だけでなく、すでに環境中に取り込まれたシンボルとも結びついている。文化的言語も同様である。言語多次元記憶フレームの記号に環境中のオブジェクトを特徴づけるパターンをマッピングする過程は、マッピングの複雑さによって3つの過程に分けられる。類語、個別言語、文化言語にマッピングされたパターンは、それぞれ豊田らによって提唱された構造化ミーム理論で導入された運動レベルミーム、行動レベルミーム、文化レベルミームである[10]。

ミームの3つのレベルと多次元記憶フレームの関係は以下の通りである（図2）：

- 文化レベルのミームは（C-ミーム），関係-と言語多次元記憶フレームに格納されている文化を表す。
- 行動レベルのミーム（B-ミーム）は、行動多次元記憶フレームに格納された環境での行動を表す。
- 運動レベルのミーム（A-ミーム）は、運動多次元記憶フレームに格納された身体的な行動を表す。

III. 自身とOのインタラクションの詳細

本章では、前の章で導入したインタラクショントイプごとに、個々の人間の知覚・認知・運動プロセスと記憶がどのように働くのかを説明し、それに記号接地問題がどのように関わり、どのように解決されるのかを明らかにする。

A. 自身と \hat{O}_S のインタラクション

概念 \hat{C} を表現するオブジェクト $\hat{O}_S(\hat{C})$ を自身が生成し $(\hat{G}_{\hat{O}(\hat{C})})$ 、生成された結果を知覚して $(\hat{P}_{\hat{O}(\hat{C})})$ 、概念と合致するオブジェクトを生成する過程を、図2を基本に用いて、図3に示す。まず、生成過程における多次元記憶フレーム内での活性の流れと知覚可能なオブジェクト生成は、図4に示したようになる。

この過程は、図3において、太い橙色の矢印に沿って示されている。これは、記号を用いて、次のように表記される。

生成パス（図3の太い橙色の矢印）[G-SS]

$$\hat{C} \Rightarrow \left[\frac{W-, R-, B-MDMF \rightleftharpoons M-MDMF}{P-MDMF} \Rightarrow \hat{O}_S(\hat{C}) \quad (1)$$

ここで、 [...]で示した部分は多次元記憶フレーム内の活性伝播の様子を活性化された場所からの視点で示している。 [...]内の記号は、[Generate - symbol in Self via memory of Self]と読む。

- 1) 概念 \hat{C} はC-ミーム内の記号として表現され、言語多次元記憶フレーム内のノードが活性化される。
- 2) 活性が言語多次元記憶フレームから知覚多次元記憶フレームに伝播する。
- 3) 活性が知覚多次元記憶フレームからC-ミームに属する関係多次元記憶フレームに、また、B-ミームに属する行動多次元記憶フレームを介してA-ミームに属する運動多次元記憶フレームに伝播する。
- 4) 活性化された運動多次元記憶フレームの内容に従って、運動プロセスが動き、身体の動きとして表出され、環境中に知覚可能なオブジェクト $\hat{O}_S(\hat{C})$ が生成される。

Figure 4. オブジェクト生成過程 (adapted from [1, Figure 4])

生成過程[G-SS]を、世代を超えて伝承されているミーム、つまり、記憶されているコンテンツ、の視点から整理し直すと以下のようになる。

ミームマッピング

$$\hat{C} \Rightarrow \left[\frac{\text{C-memes} \rightleftharpoons \text{B-memes}}{\text{P-MDFM}} \rightleftharpoons \text{A-memes} \left]_{\text{M-S}} \Rightarrow \hat{O}_S(\hat{C}) \quad (2)$$

生成された $\hat{O}_S(\hat{C})$ は、言語多次元記憶フレーム内の概念 \hat{C} を起点として、多次元記憶フレーム内での活性伝播のプロセスで活性化されたC-, B-, A-ミームが、介在した知覚多次元記憶フレーム内の要素によって結び付けられた状態、 $\dots]_{\text{M-S}}$ で示した部分 (\hat{C} から $\hat{O}_S(\hat{C})$ へのミームを介したマッピング (ミームマッピングと呼ぶ))、と関連づけられている。

- 1) 生成された $\hat{O}_S(\hat{C})$ を知覚し、知覚多次元記憶フレーム内に活性が伝播する。
- 2) 知覚多次元記憶フレームから言語多次元記憶フレームに活性が伝播し、知覚表象に関連する記号が活性化する。

Figure 5. オブジェクト認識過程 (adapted from [1, Figure 5])

次に、認識過程は、図5に示したようになる。この過程は、図3において、太い青色の矢印に沿って示されている。

認識パス (図3の太い青色の矢印)

$$\hat{O}_S(\hat{C}) \Rightarrow \left[\frac{\text{P-MDFM}}{\text{W-MDFM}} \right] \Rightarrow \hat{C} \quad (3)$$

[R-SS]は、[Recognize object - generated by Self using memory of Self]と読む。[R-SS]において、概念 \hat{C} が強く活性化されれば、 $\hat{O}_S(\hat{C})$ は、正しく \hat{C} を現実世界の中に具現化していることになる。このとき、[G-SS]と[R-SS]は閉じ、認識的には、記号 \hat{C} と $\hat{O}_S(\hat{C})$ は置き換え可能なものの、 $\hat{C} \equiv \hat{O}_S(\hat{C})$ となる。この状態は、自身の中で記号接地が達成された状態と見なすことができる(図6)。

- C-ミームの記号 \hat{C} は知覚多次元記憶フレームを介してB-ミームとA-ミームを活性化し、 $\hat{O}_S(\hat{C})$ を生成する。
- 多次元記憶フレームにおける $\hat{O}_S(\hat{C})$ の知覚は \hat{C} を活性化し、それに関連した活性化パターンを示す。
- 知覚多次元記憶フレームにおける $\hat{O}_S(\hat{C})$ の知覚表象は、言語多次元記憶フレームにおける \hat{C} と関連付けられる。
- 今後、言語多次元記憶フレーム内の \hat{C} は、たとえそれが現実世界に存在しなくても、 $\hat{O}_S(\hat{C})$ の知覚表象を活性化し、実際に対象を生成するために必要な言語多次元記憶フレームの活性化とともに、自己が概念を知覚的にシミュレートすることを可能にする。

Figure 6. 自身の中での概念 \hat{C} の記号接地 (adapted from [1, Figure 6])

B. AIにおける記号接地問題

図1に示したAIにおける記号接地問題は、自身が \hat{O}_S を生成する過程で生じる多次元記憶フレーム内のミームの活性化が、人工知能の中でも同様に生じることで解決される。つまり、人工知能の内部で、第III-A節に示したミームマッピングが生じることを保証することで、 $\dots]_{\text{M-AI}} \equiv \dots]_{\text{M-S}}$ の関係が成立することで人工知能は自身の代替となり得る。まとめると、図7のようになる。A-, B-, C-ミームは、世代を超えて継承される知識なので、記号により表現することが可能と考えられる。また、人工知能内知覚情報エンコーディングも、感覚器と同等の機能を発揮するセンサーにより環境情報を符号化することにより生成することができる。人工知能における記号接地問題は、ミームを解明することにより解決されると考えられる。

C. 自身と \bar{O}_R のインタラクション

他者がオブジェクトを生成する過程を考えてみよう。他者は、[G-SS]の他者版、即ち、 $\bar{C} \Rightarrow \dots \Rightarrow \bar{O}_R(\bar{C})$ の多次元記憶フレームの部分を他者自身のものに置き換えたものを利用して、他者が抱いた記号を現実世界に具現化する。また、オブジェクト生成過程で利用されるミームは、 $\dots]_{\text{M-O}}$ と表現される。次に、他者のジェスチャ、発話、描画などの知覚可能なオブジェクトを知覚し、自身の記号として認識する場合を考える。

他者生成物の認識パス

$$\bar{O}_R(\bar{C}) \Rightarrow \left[\frac{\text{P-MDFM}}{\text{W-MDFM}} \right] \Rightarrow \hat{C} \quad (4)$$

ここで、他者の抱いた記号 $\bar{C} (\equiv \bar{O}_R(\bar{C}))$ と自身の抱いた記号 \hat{C} が一致していれば、他者が表出したオブジェクトを介して記号が伝達されることになる。例えば、他者がある言葉 \bar{C} をこころに抱きそれをジェスチャによって身体的に表現し、それを見た自身がそれに対して言葉 \hat{C} を割り当てる。他者の潜在的なことばが、自身の潜在的なことばに、他者の身体行動を介して結びついたことになる。次に、言葉を介したコミュニケーションを

-
- 1) C-ミーム内の記号 \hat{C} （自身のものと共通）は、人工知能内にエンコードされている人工知能内知覚情報エンコーディングを活性化するとともに、AI内の関連するC-ミームを活性化する。
 - 2) 活性化された人工知能内知覚情報エンコーディングを介して、AI内のB-ミームを活性化する。
 - 3) AI内のB-ミームとオーバーラップするAI内のA-ミームを活性化する。
- ステップ1, 2, 3により、AIにおけるミーム・マッピング $[\dots]_{M-AI}$ が構成される。
- 4) AI内のA-ミームに表現されている内容を $\hat{O}_{AI}(\hat{C})$ としてアクチュエーターを介して現実世界に生成する。
 - 5) 生成された $\hat{O}_{AI}(\hat{C})$ が人工知能に入力されると人工知能内知覚情報エンコーディング内に活性が伝播し、AI内C-ミーム内の記号 \hat{C} が活性化する。
 - 6) 人工知能内知覚情報エンコーディング内の $\hat{O}_{AI}(\hat{C})$ に対応する部分とAI内C-ミーム内の記号 \hat{C} は、ステップ1, 2, 3で活性化されたAI内のC-, B-, A-ミームを統合して、連合を形成する。このとき、 $\hat{C} \equiv \hat{O}_{AI}(\hat{C})$ の関係が成立している。すなわち、AIと自己が共通に認識する記号 \hat{C} は、 $[\dots]_{M-AI} \equiv [\dots]_{M-S}$ の関係が成立していることにより、 $\hat{C} \equiv \hat{O}_{AI}(\hat{C}) (= \hat{O}_S(\hat{C}))$ となり、双方で共通の記号接地が実現されている。
-

Figure 7. 人工知能における概念 \hat{C} の記号接地 (modified from [1, Figure 7])

考えてみる。自身と他者がことば \hat{C} を共有している状態から始める。例えば、同じ単語を見ているという状況である。自身と他者は、それぞれの生成パスに従って、記号接地を行う。ここで、 $[\dots]_{M-S}$ と $[\dots]_{M-O}$ がそれぞれの記号接地に介在する。自身と他者が同じ環境で、即ち、共通するミームの中で成長してきたのであれば、 $[\dots]_{M-S} \equiv [\dots]_{M-O}$ が成立すると考えられ、共有している記号は同じ意味を持つ。しかしながら、 $[\dots]_{M-S} \neq [\dots]_{M-O}$ の場合には、視覚的に共有されたすべての記号の持つ意味が共有されることはない可能性がある。例えば、「1階で会いましょう(meet on the first floor)」というフレーズは、このフレーズを読んだ人の所属する文化によって異なる行動を引き起こすかもしれない。

D. 自身と \bar{O}_V のインタラクション

自身と他者のインタラクションの場合には、双方とも人間なので、インタラクションは対称的である。つまり、生成パス、認識パスで記号とオブジェクトを繋ぐ $[\dots]$ で示した部分において、自身・他者がそれぞれ持つ多次元記憶フレームの内部を活性が伝播する。一方、自身と仮想現実システムとのインタラクションの場合においては、システム側の生成パス・認識パスは、人間のものとは異なる。即ち、生成パスにおいては、システム内で定義された記号が、ユーザである人間が

知覚できるオブジェクトに変換される。認識パスにおいては、人間が生成したオブジェクトがセンサーを介してシステムに入力され、システムが扱える記号に変換される。いずれの変換も、システム内に実装されたプログラムによって実行される。

仮想現実環境においては、人間が発する情報をデジタル化してシステムに取り込み、それに対する反応を決定する。人間が発する情報は、記号である場合もあれば、センサで入力可能なオブジェクトである場合もある。いずれにしても、システムに入力された時点で、記号、 \bar{C} として表現される。システム内では、この入力に対する応答に対する次のステップで伝達すべき記号 \bar{C} を設定し、記号・オブジェクト変換を行い $\bar{O}_V(\bar{C})$ をユーザにとって知覚可能なオブジェクトとして出力する。この生成パスを[G-VV]と表現する。

自身は、システムが生成したオブジェクト $\bar{O}_V(\bar{C})$ を知覚し、認識パス[R-VS]により、オブジェクトを記号として認識する。認識された記号を \hat{C}' とする。この記号に対して生成パス[G-SS]により認識された記号に係る多次元記憶フレームを活性化し、対応するオブジェクト $\hat{O}_S(\hat{C}')$ を得る。 $\hat{O}_S(\hat{C}') \equiv (\text{or } \approx) \bar{O}_V(\bar{C})$ が成立すれば、インタラクションはスムーズに進むが、成立しない場合には、インタラクションは破綻する。

IV. 記号接地を担保した \bar{O}_V 生成の方法

システムにおけるオブジェクト生成パス[G-VV]がユーザのミームマッピング $[\dots]_{M-S}$ に準じて実行される場合に限り、すなわち、システム内のミームマッピングが $[\dots]_{M-AI}$ に基づいて実行されている場合に限り、記号接地を保障したインタラクションを進行することが可能になる。ミームは、世代を超えて伝承される知識なので、記号で表現することが可能である。本章では、システム内にミームマッピングを実装する方法を提案する。そのために、まず、外界とインタラクトする過程において多次元記憶フレーム内で活性化されるパターンに対して新規に記号が付与され、そして、他者とのコミュニケーションの中で繰り返し利用されるようになるプロセス、つまり、「パターンがミーム化するプロセス」を説明する。次に、このプロセスを踏まえて、II-B2で導入したA-, B-, C-ミームに対する説明を加え、行動観察をすることによってミームを外化する方法を提案する。

A. パターンのミーム化

図8は、ミームが現実の場で伝播する様子を示している[12]。この伝播のプロセスの中心に、「記号化」がある。図8を使って、ミームの伝播プロセス[12]を、記号化のプロセスに焦点を当てて見ていく。

1) 環境中のオブジェクトとのレゾナンス: 環境の中にオブジェクト、 $Object-O \in \{Object-O_1, Object-O_2, Object-O_3, \dots\}$ が出現したとする(図中、左下)。これらのオブジェクトは、図1に示した $O \in \{\hat{O}_S, \bar{O}_R, \bar{O}_V\}$ の要素である。ここでは、オブジェクトがどのようにして生成されたのかは問わない。自身の前に、ただ単に、出現しているという状況である。それぞれが、まず、自身の知覚多次

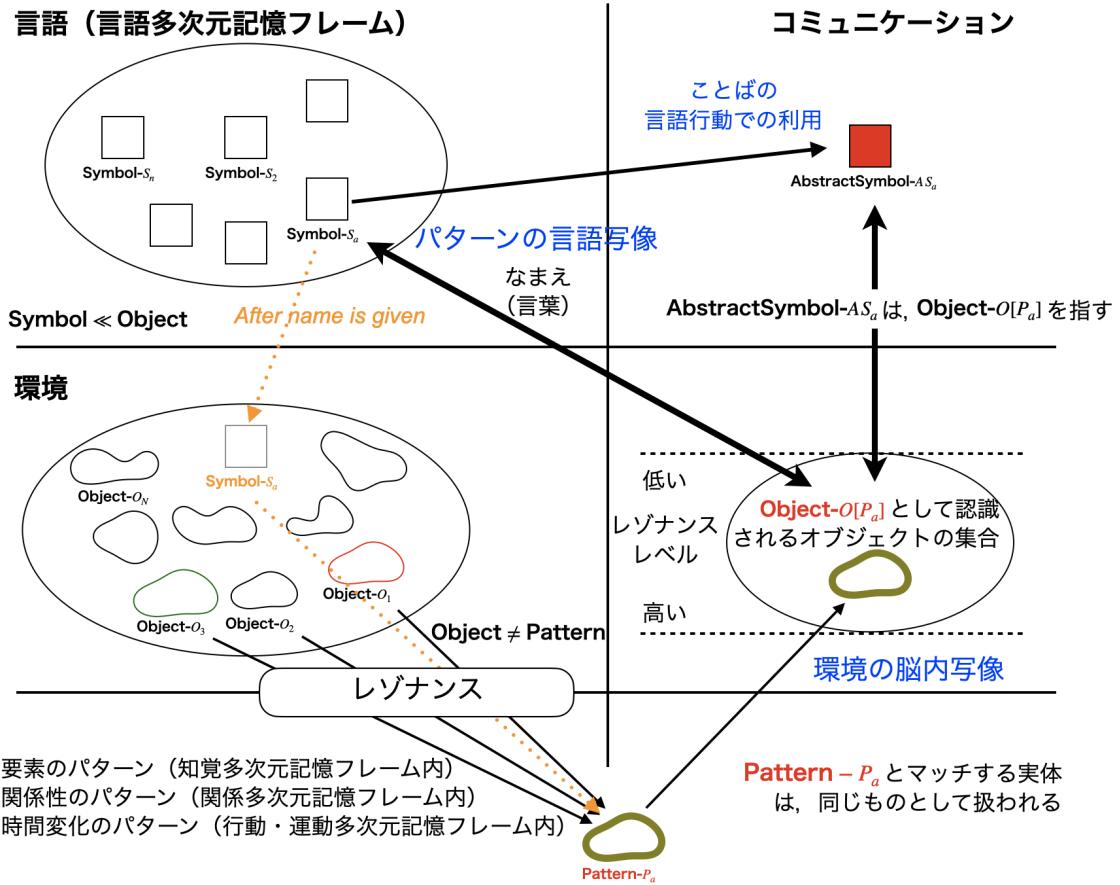


Figure 8. パターンのミーム化([12, Figure 4]を改変)

元記憶フレーム内の要素のパターンとレゾナンスする。これは、図2にP-Resonanceとして示されている。さらに、多次元記憶フレーム内の連鎖発火により活性が記憶内を伝播し、関係性-, 行動-, 運動多次元記憶フレームを活性化させる。活性化された記憶の部分、 $Pattern-P_a$ （図8の中央最下部）はシステム1・システム2とレゾナンスすることにより行動選択に使われる。これは、図2にC-Resonanceとして示されている。ここで、 $Pattern-P_a$ は、知覚多次元記憶フレームにおいてはオブジェクトの要素、関係多次元記憶フレームにおいてはオブジェクト間の関係性、行動-, 運動多次元記憶フレームにおいてはオブジェクトの時間変化に関する情報を含んでいる。

2) 環境の脳内写像: $Pattern-P_a$ とレゾナンスする環境中の実体、 $Object-O \in \{Object-O_1, Object-O_2, Object-O_3, \dots\}$ 、はシステム1・システム2による行動選択においては単一のオブジェクト $Object-O[P_a]$ として扱われる（図中、右下）。

3) パターンの言語写像（符号化）: $Pattern-P_a$ に $Symbol-S_a$ というユニークな名前（言葉）が付けられると、 $Symbol-S_a$ は $Pattern-P_a$ との対応を保つつ、言語多次元記憶フレームに保存される。このことを図8では、パターンの言語多次元記憶フ

レームへの写像として示している（図中、右下と左上を結ぶ矢印）。 $Symbol-S_a$ は $Object-O$ のいずれかの要素 $\{Object-O_1, Object-O_2, Object-O_3, \dots\}$ と関連づけられる可能性がある。パターンの持つ多くの情報が一つのシンボルに集約されるプロセスである。より多くの情報を集約することによりシンボルによって表現される範囲は広がる [13]

4) 「言葉」の環境への取り込み: $Pattern-P_a$ が $Symbol-S_a$ として自身の言語多次元記憶フレーム内に符号化されると、その符号は、環境の一部になる（図中、左上から左下に向かう矢印）。つまり、 $Symbol-S_a \in \mathbf{O}$ となる。これにより、 $Symbol-S_a$ が環境中のオブジェクトとして出現した時に、知覚多次元記憶フレームと P-レゾナンスを起こし、 $Pattern-P_a$ が活性化される可能性が生まれる。その結果、関係多次元記憶フレーム内の関係性のパターン、並びに、行動-, 運動多次元記憶フレーム内の時間変化のパターンが活性化し、C-レゾナンスを起こすことが可能になる。第III-A節では、概念 \hat{C} がすでに存在していると仮定して、それを表現するオブジェクト $\hat{O}_S(\hat{C})$ が生成されるパスを示した（図3と式(1)を参照のこと）。他方、本節では、自身の中で符号が割り当てられていない作者不詳のオブジェクト $\mathbf{O}(\ast)$ が環境中に出現した時

に、それに対して新たに符号Symbol- S_a が割り当てられる。その結果、自身がその符号を環境中に認識した時に、オブジェクト $\hat{O}_S(\text{Symbol-}S_a) \equiv O(*)$ を式equation(1)に示した生成パスに沿って生成可能となる。作者不詳のオブジェクト $O(*)$ から始めて、Symbol- S_a が生成されているので、オブジェクト $O(*)$ はSymbol- S_a として認識される。記号Symbol- S_a は、環境中の実オブジェクト $\hat{O}_S(\text{Symbol-}S_a) \equiv O(*)$ に記号接地している。

5) 言葉の言語行動での利用: ここまでPattern- P_a を中心としたフローは、自身と環境の中で閉じていた。これは、第III-A節で説明したインタラクションの状況に対応する。自身の備えたSymbol- S_a は、第III-C節で説明した他者とのインタラクションであるコミュニケーションの中でも利用可能である。このとき、言語多次元記憶フレームに保存されているSymbol- S_a が、言語を利用した行動で使われる（図中、左上から右上への矢印）。言語行動は、図2に示した言語-, 関係-, 行動-, 運動多次元記憶フレームに順次、活性が伝播して生起する。この行動生成に関わる記憶は、システム1・システム2がレゾナンスにより利用する部分である。この部分は、環境とレゾナンスしたPattern- P_a （図中、左下から中央最下部への矢印）が、ニューロンの発火連鎖により活性を伝播させて生成する環境の脳内写像Object- $O[P_a]$ （図中、中央最下部から右下への矢印）に相当する。

自身の言語多次元記憶フレームに符号化されているSymbol- S_a が他者とのコミュニケーションにおいて利用される状況においては、自身における当該符号Symbol- $S_a(\text{self})$ は、他者においては、他者の言語多次元記憶フレームに符号化されている見かけ上同一なSymbol- $S_a(\text{other})$ に接続する。ここで自身と他者を接続している符号を抽象概念AbstractSymbol- AS_a と表現する（図中、右下と右上を結ぶ矢印）。

6) 抽象概念の維持・継承: 第III-C節では、抽象概念AbstractSymbol- AS_a に対する自身の言語多次元記憶フレーム内の符号Symbol- $S_a(\text{self})$ と他者の言語多次元記憶フレーム内の符号Symbol- $S_a(\text{other})$ を、それぞれ、 \hat{C} と \bar{C} と表記し、自身と他者のそれぞれの記号接地に介在するミームマッピング、 $[\dots]_{M-S}$ と $[\dots]_{M-O}$ が一致している場合に限り、AbstractSymbol- $AS_a \equiv \{\hat{C}, \bar{C}\}$ を介したコミュニケーションが双方共通の記号接地を保持しながら成立するということを説明した。このようにしてコミュニケーションが進行する時、抽象概念AbstractSymbol- AS_a は維持され、継承される。これが、ミームの実態である。Symbol- S_a の共鳴レベルが高くなればなるほど、AbstractSymbol- AS_a は効果的なコミュニケーション・メディアとして長く維持・継承されると考えるのが妥当である。

B. ミームの脳内への取り込み

第IV-A節では、新規に符号が言語多次元記憶フレームに生成され、それと連合している実世界のオブジェクトの集合と共に実世界の要素として実在するようになり、他者のコミュニケーションを通じて、自身と他者を含む行動生態系内で循環するようになることを説明した。コミュニケーションの中で使用される記号が同一の記号接地をしていることが循環の必要条件である。行動生態内で

循環するものはミームと呼ばれる。個々人の成長にしたがって、獲得されるミームの内容が変化する。第II-B2節で説明したように、まず、基本的な行為に関わる運動レベルのミームが獲得される。次に、行為の系列である行動レベルのミームが獲得される。そして、最後に、行為・行動の背景にあり、それらの形成のバックグラウンドとして支えていた文化レベルのミームが獲得される。

図9は、図8の中央最下部に表示されているPattern- P_a を拡大して示している。図8に「環境の脳内写像」「パターンの言語写像」として示した処理を図9の右下と右上に、それぞれ示している。「パターンの言語写像」のプロセスは、写像の複雑さの度合いによって、図9に示したように、発達の段階に従って、上の3種類に細分化することができる[10]。

1) 運動レベルミーム (A-ミーム): 人間は臨界期と呼ばれる生後から2~3歳ぐらいまでの期間に、脳内の神経回路の接続シナプスを大量に生成し、可能な限りの情報を取り込む。そして、その後、シナプスの生成速度を低下させ、それまでの情報分布をもとに知覚器官の基礎特性を決定する。それと同時に、身体動作を開始し、周囲の人間の動きを模倣することにより、個人生態として経験蓄積的に形作られた身体動作を身に付けていく。これは、筋肉などの成長を外部からの制約力に合わせ調整させるという生命の巧みな手法を用いて形成される。このとき、知覚器官情報と身体動作の連結も同時に進行される。このとき形成される最も人間にとて重要な身体機能が、声と手の機能である。この段階までの機能を、A-ミームとよぶ。

2) 行動レベルミーム (B-ミーム): その後、声は言葉への道を、また、手は道具の使用への道を切り開く。そして、継続的な模倣を通じて周囲の人間の用いる言葉や道具の使い方を身に付ける。このとき、特定の音の集まりが特定の反応を引き起こすこと、触覚により体感される手の感触と視覚的に捉えられる道具の動きが、道具を経由して一体化して捉えられることを、整理してまとめて、人間は新たな階層の行為として身に付ける。これは、脳回路上に形成されているA-ミームを、それらが利用されている状況に合わせて結び付け、まとまりとして利用できるようにすることにより可能となる。この新たな階層の機能を、B-ミームとよぶ。

3) 文化レベルミーム (C-ミーム): さらに、言葉は言語への道を、道具はより複雑な機械などの使用への道を切り開く。この段階に至ると、模倣だけではなく集団の一員としての自律的活動体験を通して、自身の属する集団の文化・文明の担い手の一員としての行動を身に付ける。このとき、B-レベルミームを複合的に用いるように拡張が行なわれ、文化固有の行動パターンが形成される。この新たな階層の機能を、C-ミームとよぶ。

C. 実時間制約がある行動生態の中でのミームの利用

図3は記号接地が実現されている状況を表している。これには、概念から始めて、活性化された行為を発動し、オブジェクトが生成されるプロセスが含まれている。しかしながら、このプロセスは、図3の中の知覚多次元記憶フレームと言語-, 関係-, 行動多次元記憶フ

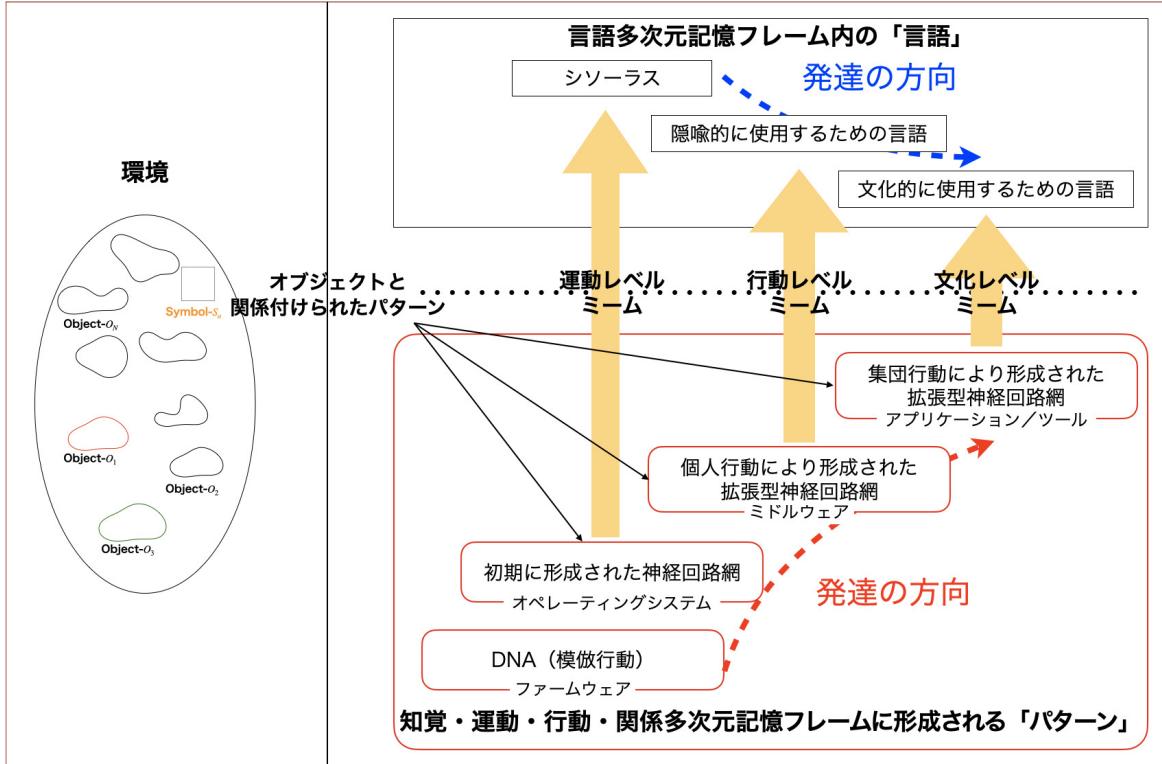


Figure 9. ミームの構造 ([12, Figure 5]を引用)

レームのやり取り、つまり、知覚的実在と結びついていることによる実在性の担保、を介さずとも実行しうる。実際、実在性担保を行いながらのオブジェクト生成は効率が悪いので、実生活においてはそれが省略される[14]。記号接地が保証されているオブジェクトを記号接地を確認することなく、つまり、生成されたオブジェクトが記号に接地していることを陽に確認することなく、コミュニケーションの中で利用することが、実時間制約のある中でのコミュニケーションでは行われる。この時、式(2)に示したミームマッピングは、以下のように書き換えられる。

$$\hat{C} \Rightarrow \left[\begin{array}{c} C\text{-memes} \rightleftharpoons B\text{-memes} \rightleftharpoons A\text{-memes} \\ \text{no reference to P-MDMF} \end{array} \right]_{M-S} \Rightarrow \hat{O}_S(\hat{C}) \quad (5)$$

D. ミームの情報システムへのマッピングによるミームの抽出

ミームは符号なので、言語により表現可能である。式(5)に現れるいづれの要素も言語により観測可能である。日常生活の中で知覚多次元記憶フレームを介さないでトップダウンで実行される行動の言語による記述を、ミームの3レベルで整理することで、A-, B-, C-ミームを抽出することが可能である。ミームは情報システムに似ている。このことを、図9の右側下段に示す。遺伝子は行動レベルの活動を模倣するファームウェアの役割を果たす。運動レベルのミームは、空間的・時間的行動機能の一般的パターンを定義するオペ

レーティングシステムの役割を果たす。行動レベルのミームは、一般的なパターンを具体的なパターンに拡張するミドルウェアの役割を果たす。文化レベルのミームは、具体的なパターンを多くの人々のグループで機能するものへと拡張するアプリケーションツールとして機能する。

情報システムの内部処理は記号によって表現される。システムとユーザが共通の記号接地をするための必要条件は、 $[\dots]_{M-AI} \equiv [\dots]_{M-S}$ が成り立っていることである。式(5)における $[\dots]_{M-S}$ の内容に含まれるミームを記述しようとするとき、各レベルのミームとシステムのメカニズムとの類比（アナロジー）ができるることは、ミームを情報システムになぞらえて記述するというアプローチが有効であることを示している。VRシステムが実装される行動生態系におけるミームを情報システムの記号で表現することは、 $[\dots]_{M-S}$ と等価な $[\dots]_{M-AI}$ を表現したことにもなり、記号接地を保証したシステム実装の道が開ける。

E. ミームの抽出事例

我々は、日常的な行動選択がMHP/RTに従って行われるということを仮定して、様々な場面における人々の行動選択について、「こういう状況下において、この属性を有する人は、このような行動を発現する」という形式によって、人々の行動選択を理解することを試みてきた。その際に、どのように行動するのかはPCMプロセスがどのように働くのかが関わり、何を行うのか、つまり、行動の内容には調査対象の人々の多次元記憶

フレームの内容であるミームと行動実行時に活性化したミームが関わる。このアプローチによる行動理解の方法論として認知的クロクロノエスノグラフィ（Cognitive Chrono-Ethnography; CCE）を開発し、様々な場面に適用してきた[15]。鉄道駅において案内表示から情報を取得しながら目的地に辿り着こうとする際の行動を観測してミームを抽出した研究[7]、陶芸家がミームを獲得することによる技能継承[16]、熟練ピアノ演奏者が演奏会に向けての練習の中で活用するミーム[17]などの研究により、ミームの抽出は試みられている。VR環境でのインタラクションにおけるミームの解明も、これらの手法をベースにして適宜変更して行えると期待される。VR環境で活性化するミームを、情報システムの語彙で表現することにより、VRシステムの内部でユーザが行う記号接地をシミュレートすることができるようになるので、ユーザとシームレスにつながるVR環境の構築を見通しよく行うことができるようになる。

V. おわりに

現実世界であっても仮想現実であっても、個々の人間はインタラクトしている世界に出現しているオブジェクトに対して、知覚・認知・運動プロセスを動かして選択した行動を、インタラクトしている世界の中で実行する。本研究では、オブジェクトの担う意味が、インタラクトしているエージェントの間で共有されることが、スマーズでシームレスなインタラクションの実現には不可欠と考え、AIの分野で語られている「記号接地」の概念を、仮想現実とユーザのインタラクションの場で扱うことを試みた。人間と同じ構造化されたミームをAIに入れないとAIは記号接地しない。本研究では、ミームが観測可能であることを示しながら、それがどのように可能となるのかの道筋を示した。

ある記号から生成されるオブジェクトを知覚・認識したときにその記号と結びつくことで、記号接地が実現されることを主張した。オブジェクト生成過程では、文化レベルミーム、行動レベルミーム、運動レベルミームが、記号からオブジェクトへの変換に関わる。ミームは、世代を超えて継承されるものなので、観察により符号化可能であることを、先行研究を参照しながら、示した。これらの議論は、MHP/RTを基礎に置いている。VRアプリケーションとユーザがインタラクトする際に提示されるオブジェクトを、記号接地の視点から評価できるようにすることは、VRアプリケーション開発を進める上で重要な課題である。

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 19K12246 / 19K12232 / 20H04290 / 22K12284 / 23K11334, and National University Management Reform Promotion Project. The authors would like to thank Editage (www.editage.com) for the English language editing.

REFERENCES

- [1] M. Kitajima, M. Toyota, and K. T. Nakahira, “Addressing the Symbol Grounding Problem in VR”, in *AIVR 2025 : The Second International Conference on Artificial Intelligence and Immersive Virtual Reality*, 2025, pp. 56–62.
- [2] A. Newell, “Physical Symbol Systems”, *Cognitive Science*, vol. 4, no. 2, pp. 135–183, 1980. eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1207/s15516709cog0402_2.
- [3] A. Newell, *Unified Theories of Cognition (The William James Lectures, 1987)*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.
- [4] J. E. Laird, A. Newell, and P. S. Rosenbloom, “Soar: An architecture for general intelligence”, *Artificial Intelligence*, vol. 33, pp. 1–64, 1987.
- [5] S. Harnad, “The symbol grounding problem”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 42, no. 1, pp. 335–346, 1990, [retrieved: 2, 2025], ISSN: 0167-2789. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6).
- [6] M. Kitajima *et al.*, “Basic Senses and Their Implications for Immersive Virtual Reality Design”, in *AIVR 2024 : The First International Conference on Artificial Intelligence and Immersive Virtual Reality*, 2024, pp. 31–38.
- [7] M. Kitajima and M. Toyota, “Simulating navigation behaviour based on the architecture model Model Human Processor with Real-Time Constraints (MHP/RT)”, *Behaviour & Information Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 41–58, 2012. DOI: [10.1080/0144929X.2011.602427](https://doi.org/10.1080/0144929X.2011.602427).
- [8] M. Kitajima and M. Toyota, “Decision-making and action selection in Two Minds: An analysis based on Model Human Processor with Realtime Constraints (MHP/RT)”, *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 5, pp. 82–93, 2013.
- [9] M. Kitajima, *Memory and Action Selection in Human-Machine Interaction*. Wiley-ISTE, 2016, ISBN: 9781848219274.
- [10] M. Toyota, M. Kitajima, and H. Shimada, “Structured Meme Theory: How is informational inheritance maintained?”, in *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 2008, p. 2288.
- [11] D. C. Dennett, *From Bacteria to Bach and Back: The Evolution of Minds*. W W Norton & Co Inc, Feb. 2018.
- [12] M. Kitajima, M. Toyota, and J. Dinet, “How Resonance Works for Development and Propagation of Memes”, *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, vol. 14, pp. 148–161, 2021.
- [13] M. Kitajima *et al.*, “Language and Image in Behavioral Ecology”, in *COGNITIVE 2022 : The Fourteenth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*, 2022, pp. 1–10.
- [14] M. Kitajima, M. Toyota, J. Dinet, and K. T. Nakahira, “Transforming Conscious Goals into Unconscious Actions in Real-world Interactions: Real-world Use of Behavioral Ecological Memes via GOMS”, *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, vol. 18, no. 3 & 4, in press, 2025.
- [15] M. Kitajima, “Cognitive Chrono-Ethnography (CCE): A Behavioral Study Methodology Underpinned by the Cognitive Architecture, MHP/RT”, in *Proceedings of the 41st Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Cognitive Science Society, 2019, pp. 55–56.
- [16] M. Kitajima, M. Toyota, and J. Dinet, “Art and Brain with Kazuo Takiguchi”, in *COGNITIVE 2023 : The Fifteenth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*, 2023, pp. 1–10.
- [17] K. T. Nakahira, M. Kitajima, and M. Toyota, “Understanding Practice Stages for a Proficient Piano Player to Complete a Piece: Focusing on the Interplay Between Conscious and Unconscious Processes”, *International Journal on Advances in Life Sciences*, vol. 16, pp. 164–177, 2024.