

## 仮想現実環境を相互作用する人間と完全に共鳴させるための中核的構成要素

Muneo Kitajima  (北島 宗雄)

*Nagaoka University of Technology*

Nagaoka, Niigata, Japan (長岡技術科学大学)

Email: mkitajima@kjs.nagaokaut.ac.jp

Makoto Toyota (豊田 誠)

*T-Method*

Chiba, Japan (T メソッド)

Email: pubmtoyota@mac.com

Katsuko T. Nakahira  (中平 勝子)

*Nagaoka University of Technology*

Nagaoka, Niigata, Japan (長岡技術科学大学)

Email: katsuko@vos.nagaokaut.ac.jp

**Abstract**— 人間生活の多くの部分は、自身を取り巻く環境に存在する人工的なオブジェクトとインタラクトして行動することにより形作られている。ここで、人工的なオブジェクトが自然法則に従って振る舞うのではなく、人工物デザイナーが作成したアルゴリズムにより振る舞うとき、環境は仮想環境と考えることができる。我々のこれまでの研究は、人間とオブジェクトのインタラクションプロセスを、環境の動きと同期して稼働する知覚・認知・運動プロセス、並びに、環境の動きとは非同期に稼働する記憶プロセスとして捉え、それらの間を結びつける共鳴によって捉えてきた。より具体的には、リズム覚、空間覚、数覚から成る基本感覚によって引き起こされるP-共鳴が知覚過程と知覚多次元記憶フレームを結びつけ、C共鳴が多次元記憶フレーム内に確立されたゴール・オペレータ・メソッド・選択規則 (GOMS) 構造を介して多次元記憶フレームと認知過程を結びつける。本論文では、仮想環境に存在するオブジェクトと、人間のインタラクションをスムーズに進行させるためにオブジェクトが備えるべき条件を示す。

**Keywords**- 共鳴; 基礎覚; ミーム; GOMS; MHP/RT; 記号接地

### I. はじめに

人間は、五感を介して外界の情報を取得し、知覚・認知・運動 (PCM) 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。これらのプロセスは脳により司られている。脳は非常に多くの細胞から構成される複雑な仕組みを形成している。しかしながら、脳内に入力される情報を適宜変換し、脳外に出力する情報処理装置として機能面から見た場合、かなりシンプルな認知アーキテクチャモデルとして捉えることができる。

Card, Moran, Newell [1]は、情報処理装置であるノイマン型コンピュータへの類比により、脳を「記憶」「プロセッサ」「プログラム (記憶とプロセッサの結合の仕方を規定)」を構成要素として備え、人間の知覚・認知・運動プロセスをシミュレートできる認知アーキテクチャモデル、Model Human Processor (MHP)を考案した。記憶は、記憶容量、記憶減衰時間、データ型により、また、プロセッサは、単位タスクの処理時間であるサイクルタイムにより特徴づけられる。記憶には、視覚および聴覚イメージ貯蔵庫、作業記憶、長期記憶があり、互いに異なった役割を持つ。上記により仕様が規定された情報

処理装置を稼働させる状況、シミュレーション対象ドメインとして、次の状況が想定された。それは、明確に定義される問題空間内を合理性原理に基づいて問題解決を行い、設定されたゴールを達成するという状況である。この状況で必要とされる知識は、ゴール、オペレータ、メソッド、選択規則 (GOMS) として整理されている。

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。記憶も記号によって表現される。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、思考を問題空間を操作する問題解決過程と捉えることを基礎とする認知アーキテクチャであるSoarの基盤を提供した[3][4]。

しかしながら、人間がインタラクトしている実環境は、環境自身が内在しているメカニズムに基づいて時々刻々と状態を変えていく。メカニズムは線形である場合もあれば、非線形である場合もある。後者の場合には、原理的に、状態の時間発展を予測することはできない。このような実環境と対峙して、実環境の状況に応じて適切な行動を、あらかじめ定義されたwell-definedな問題空間内での合理的な問題解決過程として、十分に捉えることは難しい。我々は、MHPやSoarが対象としている well-defined な問題空間内のナビゲーションによりモデル化できる行動ばかりでなく、適応的で柔軟な行動もシミュレートできる認知アーキテクチャモデル—実時間制約下のモデルヒューマンプロセッサ (Model Human Processor with Realtime Constraints (MHP/RT)) —を開発した [5][6]。MHP/RTは、MHPの構成概念に最新の脳神経科学や認知科学の研究成果を織り込みながら、個人の行動生態を理解するモデルと、集団の行動生態を理解するモデルを統合している。

MHP/RTは、以下の3要素から構成されている。それらは、人間の実空間とのインタラクションを、実空間の

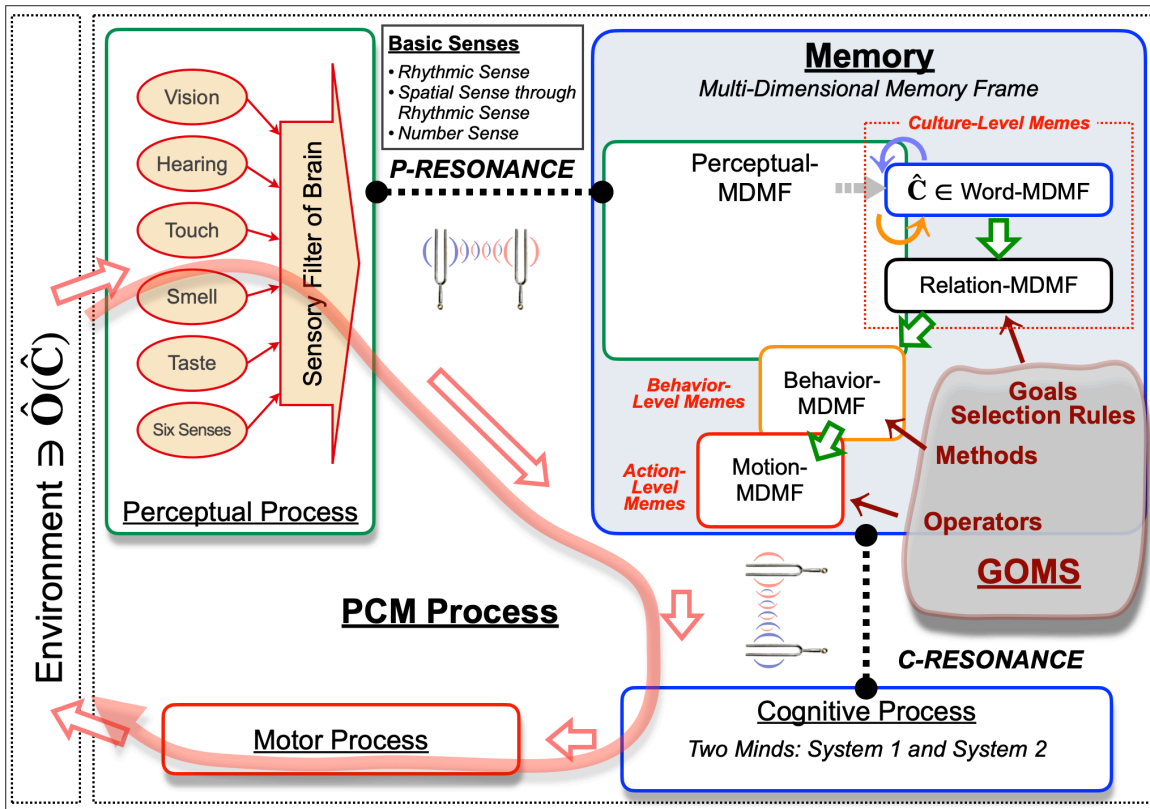


Figure 1. 環境と同期して稼働するPCMプロセスと非同期に稼働する多次元記憶フレーム([7, Figure 2]と[8, Figure 6(b)]を合成し, 変更を加えて作成)

状態推移に時間軸上で同期して, 生命体としての人間システムを破綻させることなく, 満足のいく結果をもたらすであろう行動を選択・実行する「知覚・認知・運動 (PCM) プロセス」; PCMプロセスの実行結果を蓄積し, また, 行動選択・実行時に利用されるように働く, 実環境とは非同期に動く「記憶プロセス」; 環境同期型のPCMプロセスと, 環境非同期型の記憶プロセスを繋ぐ「共鳴」メカニズムである。PCMプロセスの稼働の仕方は個人の行動生態を表し, 記憶の内容は世代を超えて継承される文化の中での人工物とのインタラクションの結果を蓄積したものであり集団生態を表す。

環境の中で行動する人間を理解する鍵は, 以下の通りである。

- (1) タスクに依存してさまざまなモードで稼働するPCMプロセス,
- (2) PCMプロセスを稼働させながら獲得されPCMプロセスに利用される記憶の構造と内容,
- (3) 知覚プロセスと記憶を繋ぐP-共鳴,
- (4) 記憶と認知プロセスを繋ぐC-共鳴,

これらの各要素を, 有機的に関連づけ, 全体としての動きを把握できるようにすることで理解が達成される。

実際の動的環境で発生する行動事象は様々な様相を表す。本論文では, それらを分析理解する上で留意すべき要因を, 我々の研究過程で得た知見を上記の4項目に沿って整理し, 環境とのインタラクションがスムーズに進むという視点から, そのための要件を示す。

本論文は, 次のように構成されている。第II章では, PCMプロセス・記憶プロセスとそれらの間を繋ぐP-共鳴, C-共鳴について説明する。第III章では, スムーズなインタラクションをデザインする際に考慮すべき事項を, 共鳴が惹起される条件として提示する。第IV章では, 本研究をまとめる。

## II. PCM・記憶プロセスと共鳴

本節では, PCMプロセス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 (Model Human Processor with Realtime Constraints; MHP/RT)」[5][6][9]を基本に据えて説明する。

### A. 人間と環境中のオブジェクトとのインタラクション

人間と環境中のオブジェクト  $\hat{O} \in \text{Environment}$  とのインタラクションは, 人間が稼働させるPCMプロセスと, PCMプロセスで利用され, 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, および,  $\hat{O}$  内で進行するプロセスにより, 実現される。図1は, その全体的な概略を示している。

$\hat{O}$  は時間の経過に伴って状態が変化する。変化は  $\hat{O}$  に対する人間の働きかけが原因となって生じる場合もある。  $\hat{O}$  に内在するメカニズムによって生じる場合もある。いずれの場合であっても, 人間が  $\hat{O}$  との間のインタ

ラクシオンを円滑に継続させるためには、自身のPCMプロセスを $\hat{O}$ の状態の変化に同期して稼働させることが必要である。

一方、記憶は、PCMプロセスで実行される内容を規定する。記憶には、PCMプロセスの実行の結果が蓄積されている。そして、記憶は、PCMプロセスの実行時に提供される。蓄積と提供のプロセスは、環境の時間発展には非同期的に実行される。

環境に同期して稼働するPCMプロセスと環境と非同期に稼働する記憶プロセスは協働して環境中で行動する人間の振る舞い（何をどのように実行するのか）を、それらの間を共鳴により結びつけることで実現している。共鳴には、知覚プロセスと記憶の間で起こるP-共鳴、認知プロセスと記憶の間で起こるC-共鳴が存在する。これらにより、PCMプロセスは記憶を利用し、環境中で行動を生起させることが可能になる。

## B. 環境と同期して稼働するPCMプロセス

1) PCMプロセス: 環境中のオブジェクトとのインタラクシオンを行う際に、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。そして、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1（([7, Figure 2]と[8, Figure 6(b)]を合成し、変更を加えて作成）は、MHP/RT [5][6]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、図1右上に示した多次元記憶フレームとしてモデル化される記憶と、図1中、赤色の矢印で流れが示されている知覚・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。

PCMプロセスと記憶プロセスの接続関係を説明する。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させる。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、知覚多次元記憶フレームが活性化される。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-共鳴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-共鳴を介して行動-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、運動系列が

同期モード	
- モード1:	システム1主導モード 知覚刺激が生物帯・認知帯でフィードフォワードプロセスを開始する。上位の活動帯域（認知帯，論理帯，社会帯）から，システム2によるフィードバックを適時に受ける。
- モード2:	システム2主導モード 知覚刺激が認知帯でシステム2が関与するフィードバックプロセスを開始する。システム2による意識的な行動選択が完了すると，生物帯・認知帯でシステム1による無意識のフィードフォワードプロセスをシステム2の監視のもとに実行する。
非同期モード	
- モード3:	システム1・2「同相」自律活動モード 複数の知覚刺激が生物帯・認知帯で複数スレッドのフィードフォワードプロセスを開始する。各スレッドは，上位の活動帯域（認知帯，論理帯，社会帯）から，システム2によるフィードバックを適時に受ける。
- モード4:	システム1・2「異相」自律活動モード 複数の知覚刺激が生物帯・認知帯で複数スレッドのフィードフォワードプロセスを開始する。スレッドの中には，上位の活動帯域（認知帯，論理帯，社会帯）から，システム2によるフィードバックを適時に受けるものもあるが，全く受けられないものもある。

Figure 2. MHP/RTの4つの動作モードと、Newellの人間行動の時間スケールにおける4つの帯域[3, Figure 3-3]との関係 ([13, 表I]を引用)

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) 4動作モード: 人間は人工物とインタラクトし、PCMプロセスのサイクルを回すことで適切な行動を選択し、行動目標を達成する。MHP/RTでは、行動選択プロセスはシステム1とシステム2によって制御される。自己のシステム1とシステム2は協調して知覚と運動を結びつけ、協調の度合いはMHP/RTがインタラクトしている外部環境の状態によって変化する。図2は、システム1とシステム2の関係によって特徴づけられる4つの動作モードを示している。

相互作用は、4つの動作モードのいずれかで行われる。モード1あるいはモード2で実行される相互作用は、システム2が適時にシステム1によって実行される行動が正常な軌道から逸れていないかどうかを監視しているという意味で、健全である。望ましくないこと起こる兆候が認められれば、システム2によるフィードバック制御が働き、正常な状態に復帰できる。一方、モード3およびモード4には、監視されていないフィードフォワードシステム1プロセスが含まれている。これは、相互作用に不安定性が引き起こされる可能性があることを示している。

モード2では、システム2がシステム1によって実行されるPCM処理に頻繁に介入する。より正確に言えば、相互作用のペースはシステム2によって制御される。システム1の役割は、必要なPCMプロセスを実行し、主要

なシステム 2-環境相互作用を推進することである。インタラクションが進展するなかで、状況が変化するたびに、システム 2を起点として行動の内容が決定されシステム 1により実行される。これは、本論文で取り上げているスムーズなインタラクションが実現されているという状況には当たらない。

これに対し、モード1では、システム 2の介入が弱い状態である。外部環境は、システム 1によって無意識に行われる自動的プロセスを支え、スムーズなインタラクションが実現する。これは、本論文が対象とするスムーズなインタラクションである。本研究では、P-共鳴とC-共鳴が生じることにより、これが実現されると考える。我々の先行論文[13]は、モード1およびモード2のインタラクションを実現する人工物設計のためのガイドラインを示している。モード1のインタラクションを支援するガイドラインは以下の通りである。

#### ガイドライン [B]

1. 通常のモード1の相互作用では、システム 1とシステム 2の両方に情報を提供し、システム 1主導のプロセスが円滑に実行されるようにする。
2. 集中的なモード1の相互作用（例：ビデオゲームやeスポーツ）においては、システム 1のサポートに焦点を当てる。

本研究では、このガイドラインの項目を実装する際の考慮事項を詳細に示していることになる。

#### C. 環境と非同期で稼働する記憶プロセス

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1右上に示した記憶では、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は知覚-、言語-、関係-、行動-、運動多次元記憶フレームに分類されている。これは、PCM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かたの表現となっている。

行動の基本は模倣である。従って、模倣行動の結果は多次元記憶フレームに構造化して表現され、多次元記憶フレーム内の活性伝播により模倣行動が生起する。模倣は個体間で生起し、世代を超えて継承される模倣行動が存在する。したがって、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、世代を超えて継承されるミームの観点から整理することができる [14]。

「ことば」はミームの典型とされている[15]。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言語として存在する。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、多次元記憶フレーム内は整理されていく。個別言語（行動レベルミーム）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ソーラスや、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（文化レベルミーム）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。これらの言語は、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（運動レベルミーム）に関連づけられて発達する。これらは、人々の間で循環し、世代を超えて持続する[16]。

上記したミームの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：

- 文化レベルミーム（C-ミーム）は、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。

#### D. P-共鳴

本節では、知覚プロセスと知覚多次元記憶フレーム間のP-共鳴が生起する仕組みについて、我々の先行研究[10]に基づいて説明する。

1) 知覚多次元記憶フレームの特徴：人間は、時々刻々と変化する環境の中で行動する。生成される行動は、時空間上での環境情報を含む連続事象として観測される。

記憶は、この連続事象をサンプリングして形成される。そのため、記憶が形成された瞬間に、絶対時間・空間座標に関する情報が消失してしまう。位置や時間データを持たない多次元記憶フレームで表現される記憶は、オブジェクト間の関係性を表す。したがって、行動生成に際して多次元記憶フレームを利用するには、記憶の内容に対して、現在の時間と空間スケールに合わせるための位相変換を行うことが必要になる。ここでは、事象間の関係性情報しか含まない記憶に、行動している時空間情報をバインドすることで、記憶を現実世界で実行可能にしている。

現時点で収集される知覚情報の正確性は、過去の記憶と、それに関連する時間・空間の値に基づいて向上させることができる。知覚多次元記憶フレームは単にオブジェクト関係の記憶である。これに対し、物理的行動の順序における実体の行動時刻に関連するオブジェクト関係が行動多次元記憶フレームに保存されている。また、システム 2によって認識される手順および時間概念に関連するオブジェクト関係が関係多次元記憶フレームに保存されている。行動-と関係多次元記憶フレームには、知覚多次元記憶フレームと重なる部分があり、そこを介して、知覚多次元記憶フレームの情報が強化される。

2) 基礎覚：時々刻々と変化する状況において環境と同期した適切な行動を生成するためには、多次元記憶フレームに時空間情報を結合し、運動多次元記憶フレームを実行可能とすることが必要である。この結合問題を解決するための構成概念として基礎覚が提案され、それが、P-共鳴の実相であるとされた。[10]。P-共鳴は、リズム覚・空間覚により、外部刺激と知覚多次元記憶フレームの間に起こる。さらに、数覚により、認知オブジェクトが生成される。

a) リズム覚：実際の人間の行動によってもたらされる変化は、周期的な活動における微小な変化である。これらの微細な変化は、行為者自身と他者を巻き込む環境との間の相対的な状況を変化させる。しかし、人間の知覚における3次元的理解からすると、これらの変化は時間軸に沿った連続的な変化として知覚される。逆に、人体で活動している器官を見ると、それらは概日リズムのもとで進化し発達してきた。その結果、心臓のような周期的に活動する器官が形成され、独自のリズムを生み出すようになった。

環境面を見ると、地球の周期的な活動のもとで、様々な再現可能なリズムを持つ変化が生じている。したがって、環境の変化に適應するためには、様々な手続き記憶によって形成される循環ネットワークの接続回路において、「基本的な知覚のリズム覚」が形成されているはずである。これが、聴覚を中核とし、知覚全般において、記憶と知覚情報を時間軸上で柔軟に結びつけることを可能にする「リズム覚」である。

ここで、リズム覚によるP-共鳴により、知覚多次元記憶フレーム内でそこに保持されている記憶の時間的循環パターンと照合する領域が活性化される。

b) 空間覚：身体活動には、3次元空間において自身の身体部位の位置を変える動きが含まれる。絶対位置に依存しない運動多次元記憶フレームに保存された情報から実行可能な身体活動を構築するには、3次元空間の現状認識が必要である。運動に関連する固有の次元は距離と時間であり、これらは移動を行うために必要である。時間は身体の内部リズムと関連しており、それが距離を測る尺度を定義する。したがって、外部環境における認識可能な物体間の距離に関する情報は、リズムに基づく尺度を通じて捉えられる。これが二番目の基礎覚であり、リズム覚を介して定義される「空間覚」である。さらに、人間の行動は成長に伴いその指向性や流通範囲を変えるため、関わる空間の規模は時間とともに変化する。したがって、こうして形成されたリズムを基本とした循環的な行動軌跡は、行動の変動範囲を反映した複雑な網へと発展し、人間は活動の帯域幅を拡大する。必然的に、空間認知の基盤となる「基本的知覚の空間覚」は、様々な手続き記憶によって形成される循環ネットワークの接続回路において、P-共鳴で機能する形で形成されるはずである。

ここで、手続き記憶は、知覚多次元記憶フレームと重なる行動-と関係多次元記憶フレームに形成されるので、P-共鳴が起こることにより、その領域が活性化される。

c) 数覚：人間が時々刻々と変化する環境において適切な行動を適時に選択するためには、大きさの大小、物体の数の多寡、距離の遠近、持続時間の長短といった量的比較に関する情報が不可欠である。この情報が選択の適切性を反映する報酬反応と結びつくことで、「基本的な数量識別能力」が形成される。これが三番目の基礎覚、「数覚」[17]である。

知覚情報は、リズム覚・空間覚によるP-共鳴により、知覚-、関係-、行動多次元記憶フレームを活性化する。このプロセスは、環境と人間活動の間で生じる同期、すなわち、時間幅または活動帯域幅内の同期である「弱同

期」の中で起こる[18][23]。数覚は、それらを意識的に操作できる認知オブジェクトに集約する。数覚により生成される認知オブジェクトは、以下の項目から構成される関係性ネットワークである。

- 1) リズム覚により活性化された知覚多次元記憶フレーム、
- 2) それと重なる領域に存在し、空間覚によって活性化された関係-と行動多次元記憶フレームと関連する知覚多次元記憶フレーム、
- 3) 1, 2と重なる言語多次元記憶フレームの領域に存在するシンボル

数覚によりこらが活性化され、多次元記憶フレームは認知プロセスでC-共鳴により利用可能になる。

## E. C-共鳴

本節では、認知プロセスと言語-、関係-、行動-、運動多次元記憶フレーム間でC-共鳴が生起する仕組みについて、我々の先行研究[8]に基づいて説明する。

1) C-共鳴の特徴：C-共鳴は、知覚-、行動-、関係-、言語多次元記憶フレームの活性パターンとして表現される認知オブジェクトとシステム1・システム2の間で起こり、認知プロセスが進行する。その結果、運動多次元記憶フレームに活性が伝播し、運動の脳内表現にマッピングされる。それは、運動プロセスにより時空間補間されて運動可能情報に変換され、運動神経を介して運動が生じる。ボディプラン（骨格）が省略値として補間プログラムのベースとして裏で全体を支えている。

多次元記憶フレームには、図1右上に示したように3つの階層により構造化されたミーム、C-、B-、A-ミームが存在する。これらのミームは多次元記憶フレームの各記憶に対応づけられる。具体的には、C-ミームは、言語-と関係多次元記憶フレームに、B-ミームは、行動多次元記憶フレームに、A-ミームは運動多次元記憶フレームに対応づけられる。C-ミームとB-ミームは、知覚多次元記憶フレームを共有することで互いに関連づけられる。B-ミームとA-ミームは、前者が存在する行動多次元記憶フレームと後者が存在する運動多次元記憶フレームの重なりを介して関連づけられる。これらの関連付けにより、互いに結びつけられるという構造になっている。そのために、現実世界と関連づけられている知覚情報によるリアリティが担保されている。

2) GOMSによるC-共鳴の実装：C-共鳴は、PCMプロセスが環境の変化に同期しつつ行動選択・実行しなければならないという時間制約がある状況のもとで働き、多次元記憶フレームと認知プロセスをつなぐ。C-共鳴を提案した我々の先行研究[8]では、知覚多次元記憶フレームを経由せずに、直接的に、言語-、関係-、行動-、運動多次元記憶フレームを結びつける仕組みとして、Card, Moran, Newell が提唱したGOMS[1]を導入した。

知覚多次元記憶フレーム経由によるインタプリタ的なミームの利用は、身体性を保証するが、逐一状況をモニターしながらPCMプロセスを進行させることになり、効率が悪い。この状況は、MHP/RTがシステム2主導のモード2で実行されていることに対応する。一方、GOMSによりコンパイルされた形での多次元記憶フレームの利用は、MHP/RTがシステム1主導のモー

ド1で実行されている状況に対応している。これにより、GOMSがC-共鳴を実装していると見なすことができる。

3) GOMSによるミームのバイディング: GOMSでは、ゴールが堅牢な階層構造をなしており、ゴールが、行動の組織化を媒介している。あるゴールGを達成するためには、それに先行するゴールG'の達成が必要とされる。この構造は、時間を主たるパラメータとしない。G'とGの間の順序が重要である。G'の実行に要する時間は、最下層に位置するオペレータに関連付けられており、これらはPCMプロセスの運動プロセスと接続している。この運動プロセスは、運動多次元記憶フレームの内容、すなわちオペレータ系列を現実世界に実装するものである。

時々刻々と状況が変わる現実世界と確実に同期をとりながら、破綻せずに行動発現を実現する方法として、絶対時間・空間情報を含まないA-, B-, C-ミームに対して、GOMSによる構造化が行われていると想定するのは妥当であろう。GOMSは、特定の状況に遭遇したときに、知覚多次元記憶フレームを介さないで、A-, B-, C-ミームがバインドされるという現象に対応し、C-共鳴という現象の実相を示している。これは、多次元記憶フレーム内において形成されている可能性のあるショートカットに対応する。ここで、GOMSは、知覚を経由せずに記号接地を担保するショートカットとして位置付けられている。

4) GOMSを介した記号接地: 自身が思い描いていた概念が現実世界で思い描いていたように具現化されること、(記号接地)は、インタラクションをスムーズに進めるためには、極めて重要である。

図1右上は、記号接地が担保されている言語から運動多次元記憶フレームへのマッピングをGOMSが代用する様子を示している。自身は、自身が現実世界で実現したい概念 $\hat{C} \in C$ -ミームに対して、知覚多次元記憶フレームを介して関係-, 行動多次元記憶フレームに活性を伝播させ、最終的に運動多次元記憶フレームを活性化させる。ここで言語表現されたゴールは概念の一種である。そして、運動プロセスを経てオブジェクト $\hat{O}(\hat{C})$ が現実世界に具現化する。ここで具現化されているものは、ゴールが達成された状態であり、それは環境中に知覚対象物として存在している。このオブジェクトは自身によって知覚され、P-共鳴を介して知覚多次元記憶フレームが活性化される。言語多次元記憶フレームに活性が伝播し、オブジェクトが $\hat{C}$ として認識されることにより、 $\hat{C} \equiv \hat{O}(\hat{C})$ が成立し、思い描いた概念を現実世界で具現化できたことになる。つまり、思い描いていたゴールを環境中に実現したことになる。この関係が成立することは、人工知能の分野で課題となっている記号接地問題[19]が解決されたことにもなる[7]。

### III. 共鳴する人工物デザイン

図3は、自身が達成したい状態に対応する概念 $\hat{C} \in$ 言語多次元記憶フレーム(C-ミーム)について、以下のことが起きていることを説明している。まず、認知プロセスが、それに対応するゴールを含むGOMSとC-共鳴してシステム2とシステム1を稼働させ、環境中にオブジェ

クト $\hat{O}(\hat{C})$ を生成し、続いて、それが、基礎覚を捕捉することでP-共鳴を惹起し、多次元記憶フレーム内に認知オブジェクトを形作る。認知オブジェクトが $\hat{O}$ につながれば、記号接地が担保される。以下に、人工物を十分にC-共鳴・P-共鳴させるために、デザインにおいて留意すべき事項をまとめる。

#### A. C-共鳴を促進するための留意事項

C-共鳴の実相はGOMSなので、仮想環境が利用される状況をGOMSにより表現することが必要である。これは、対象とする仮想環境における人間の行動生態のGOMS表現を構築することにより達成される。GOMSは、C-, B-, A-ミームを、図3に示した階層構造により整理したものである。したがって、GOMS構築の手順は、対象とする行動生態において世代を超えて継承されるミームを抽出することから始まる。ここでは、行動シミュレーションをMHP/RTにより行い、行動パターンを特徴づけるパラメータを特定し、パラメータのとり特徴的な値の組み合わせを示す人間の行動を観察し、行動生態の詳細記述を行うという方法(認知的クロノエスノグラフィー[20])が有効である。この方法はいくつかの事例研究で実践されてきた[21][22]。

A-ミームは可観測である。互いに区別できるA-ミームがオペレータ“O”を定義する。B-ミームは、A-ミームの系列が条件が満たされた時に再現性をもって生成されるパターンであるメソッド“M”に関連付けられたパターン系列である。条件が選択規則“S”を定義し、それは、システム2により意識的に処理される“IF 条件 THEN パターン系列名”と表現される。その上に、ゴール構造が展開される。

一方、最上位には、競争に勝つ、知的満足を得る、などの幸福・満足に関わるゴールが置かれ、下に向かって展開する。概念として表現されるゴールを、ゴール・サブゴールの形式で繋ぐことでゴール構造が表現される。なお、上位のゴールは、それにつながる下位のサブゴールを全て達成することで、達成される。

GOMSは、上位のゴールがシステム2により設定され、システム1がフィードフォワード制御により行為を実行する(モード1による実行)ので、行為の結果を意識的に評価しない。C-共鳴を促進するためには、人間が達成しようとしているゴール構造をあらかじめ正確に把握しておき、観測される行為の系列から達成しようとしているゴールを特定し、次に設定されるであろうゴールを適切に推測することが必要である。

#### B. P-共鳴を促進するための留意事項

リズム覚、空間覚、数覚が適用され、知覚多次元記憶フレームの共鳴部分から認知オブジェクトが生成される。そして、認知オブジェクトに対して、システム1およびシステム2による認知プロセスが実行される。人間は適応的行動の正確性を、知覚多次元記憶フレームを再利用しながらリズム覚、空間覚、数覚を発達させ、行動を繰り返すことで向上させることができる。環境中のオブジェクト $\hat{O}$ は、P-共鳴の起点であり、リズム覚、空間覚、数覚により知覚多次元記憶フレームの活性化のパターンを決定づける。個々の人間が限られた時間の中

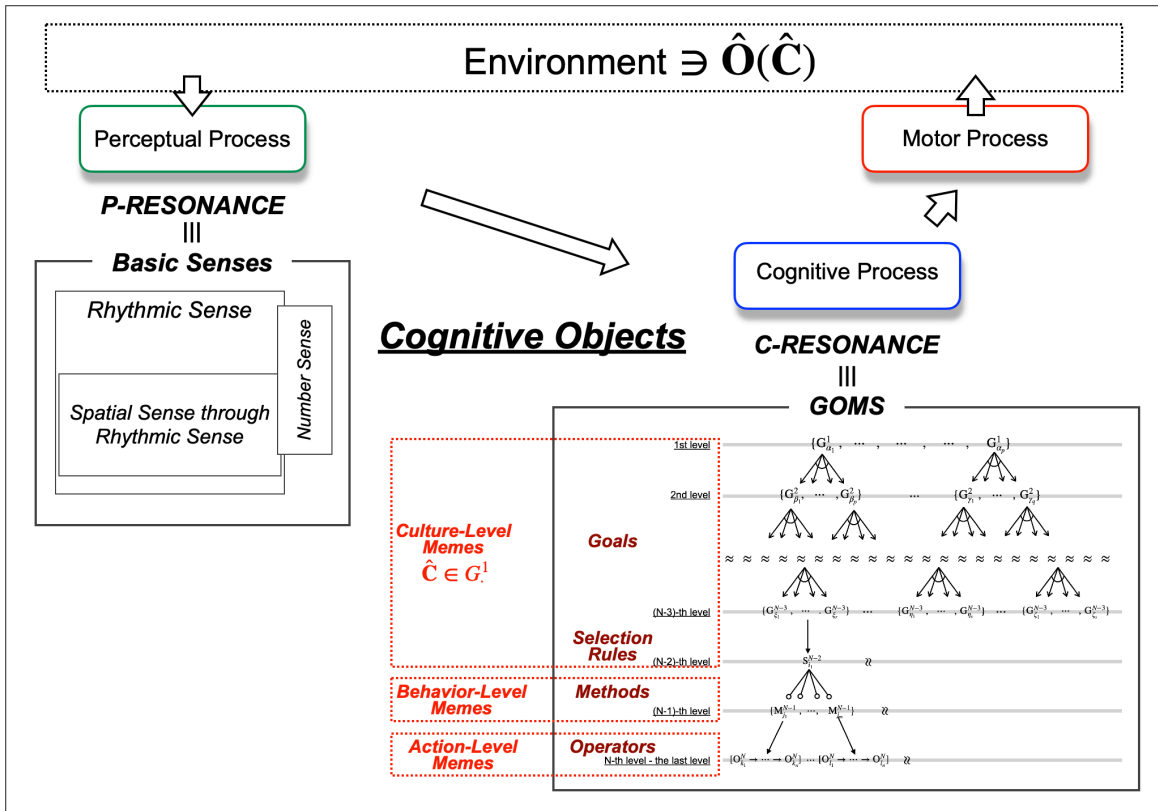


Figure 3. 環境同期したPCMプロセスと環境非同期の多次元記憶フレームの活性化—基礎覚によるP-共鳴，GOMSによるC-共鳴，それらを繋ぐ認知オブジェクト

で接触することができるオブジェクトの内容が、基礎覚の発達に影響する。したがって、基礎覚が反応するように環境中のオブジェクト $\hat{O}$ をデザインすることが必要である。

1) リズム覚を惹起する条件：人間は、環境の変化に適応するために、様々な手続き記憶によって形成される循環ネットワークの接続回路において、基本的知覚のリズム覚を形成している。認識されるリズムとは、リズム覚を介して生成される時間に沿って次々に生起する事象が示す主観的なまとまりであり、その性質は主に事象の生起間隔の長さによって決まる。事象が一定の規則に基づいて周期的に繰り返される場合、その時間的な構造のパターンがリズムとして認識される。リズムの最も基本的な要素は、事象の生起間隔に規則性や反復パターンが存在することである。この規則的な間隔によって、人間は次に何が起こるかを予測し、まとまりとして知覚することができる。事象の生起間隔の規則性や周期性が、リズムを知覚し、定義する上で中心的な役割を果たしている。したがって、インタラクションで生じる事象が時間軸上でパターンを生み出していることが、リズム覚が惹起される必要条件になる。

2) 空間覚を惹起する条件：リズムが決まるということは、環境中で生じている事象を特徴づける単位時間 $\hat{T}$ が決まるということである。時刻 $T$ に生じる事象 $E(T)$ は、時刻 $T + \hat{T}$ に生じる事象と比較可能になり、事象間の差分 $D(E(T + \hat{T}), E(T))$ が認識可能になる。3次

元空間で生起する事象を対象としたとき、認識される差分に基づいて空間の認知的な表象、空間認知が生成される。この空間認知は、環境と自身の相対位置の時間変化を認識・予測する際に参照される。

環境中のオブジェクトは独自のプログラムされたダイナミクスで3次元空間内で時間発展させ事象を生成することが可能であるが、受け取る人間側が単位時間 $\hat{T}$ で特徴付けられるリズムで事象を量子化していることを考慮することが必要である。

3) 数覚を惹起する条件：空間覚を働かせることにより、環境と自身の相対関係の時間発展を、知覚-, 行動-, 関係多次元記憶フレームの活性パターンとして生成している。当面の行動目標に向けて事態を進展させるためには、その活性パターンをシンボルに集約し、システム 2 による行動目標と比較して評価することが必要である。数覚は、時々刻々と変化する環境において適切な行動を適時を選択するために必要とされる、3項目程度の量的比較に関する情報を選別するのに利用される。評価は多元的に行い得るが、3項目以内の比較が望ましい。プログラムされた外部環境の変化を特徴づけるパラメータが目標が達成されたか否かの評価に関連づいていることが必要である。

#### IV. おわりに

人間が目標の達成を目指して、自身を取り巻く環境に働きかけ、その結果を評価して達成を実感できること

は望ましいことである。環境が、人間の働きかけによって、あらかじめプログラムされた反応を返すという状況を考えた時、環境は実環境ではないという意味で仮想的な環境と見なすことができる。自身の働きかけの結果として、仮想環境から何らかのオブジェクトが返される。その中に、自身の働きかけの内容が見出され、次の働きかけの内容を設定することができれば、人間と仮想環境のインタラクションはスムーズに進展していると見なすことができる。

インタラクションは、時々刻々と変化する環境と同期をとりながら進行するPCMプロセスにより実行される。その実行内容は、環境の変化とは同期することなく動作する多次元記憶フレームの活性パターンによって決定される。スムーズなインタラクションを継続するためには、基礎覚によって生じるP-共鳴の内容を制御すること、GOMSによって生じるC-共鳴の内容を制御することが重要となる。本論文では、これらの制御において考慮すべき事柄を示した。

一般的にガイドラインは抽象的な言葉で語られているため、現実の人工環境デザイン場面に適用するためには、ガイドライン実装方法が伴われることが必要である。本研究では、図2に示したMHP/RTの動作モード（具体的には、モード1）に関連して提案されているガイドライン[13]を実践するデザインとして、P-共鳴、C-共鳴が生起されるようなデザイン、基礎覚やGOMSが機能するようなデザイン、を目指すことが効果的であることを示した。基礎覚が機能するか否かは、提供される知覚情報に対する表現を与えることで検討できる。GOMSについては操作選択に必要な知識を表現することで検討できる。いずれも、静的な分析が基本となる。

P-共鳴においては、知覚情報を起点とした知覚-、関係-、行動多次元記憶フレームの活性化が、環境と人間活動が弱同期している状況で生じることに留意することも重要であることを指摘した。システムと人間が共鳴している時、両システムは、時間軸上の特定の時刻で二つのシステムが噛み合い、同期している。一方、弱同期[18][23]は、時間幅または活動帯域幅内で生起する人間活動を対象としたときの同期の考え方であり、前述の同期の概念を拡張している。具体的には、時刻 $T$ で実行される行動には、MHP/RTが事前に実行する2と1、事後に実行する1と2が関わり、これらの4つの処理プロセスと時刻 $T$ におけるシステムイベントが同期している。この同期の仕方を弱同期という。我々は、弱同期に関連したデザインガイドラインも提案している[13]。

MHP/RTの4つの動作モードに関連したP-共鳴、C-共鳴に由来する人工物デザインガイドラインの実践が、MHP/RTの外に存在する概念である基礎覚とGOMSに着目することで可能になることを示したのと同じように、MHP/RTの4つの処理モードに関連した弱同期（P-共鳴の生起条件）に由来する人工物デザインガイドラインを、MHP/RTの外に存在する概念を導入して実践可能にすることが、次の課題である。ここでは、時間軸上でインタラクションの様子を対象とした動的な分析が基本となる。例えば、VR学習環境において提示される視覚オブジェクトに関する潜在情報を聴覚的

に提供する状況において弱同期の程度を、視行動や瞳孔反応を計測し、その結果と視聴覚体験の記憶との関係进行分析することで検討することができる[24][25]。

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by JSPS KAKENHI (Grant Numbers 19K12246 / 20H04290 / 22K12284 / 23K11334) and the National University Management Reform Promotion Project.

#### REFERENCES

- [1] S. K. Card, T. P. Moran, and A. Newell, *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [2] A. Newell, "Physical Symbol Systems", *Cognitive Science*, vol. 4, no. 2, pp. 135–183, 1980. DOI: 10.1207/s15516709cog0402\_2[retrieved:February,2026].
- [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] 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, ISSN: 2212-683X. DOI: 10.1016/j.bica.2013.05.003[retrieved: February,2026].
- [6] M. Kitajima, *Memory and Action Selection in Human-Machine Interaction*. Wiley-ISTE, 2016, ISBN: 9781848219274.
- [7] M. Kitajima, M. Toyota, and K. T. Nakahira, "Why the Symbol Grounding Problem Matters in Virtual Reality: A Meme-Focused Solution Based on the Model Human Processor with Real-Time Constraints", *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, vol. 18, no. 3 & 4, pp. 162–172, 2025.
- [8] 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, pp. 173–186, 2025.
- [9] 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[retrieved:February,2026].
- [13] M. Kitajima, M. Toyota, and J. Dinet, "Guidelines for Designing Interactions Between Autonomous Artificial Systems and Human Beings to Achieve Sustainable Development Goals", *International Journal on Advances in Intelligent Systems*, vol. 15, pp. 188–200, 2022.
- [14] 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.
- [15] D. C. Dennett, *From Bacteria to Bach and Back: The Evolution of Minds*. W W Norton & Co Inc, Feb. 2018.
- [16] 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.
- [10] 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.

- [17] S. Dehaene, *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Revised and Updated Edition (English Edition)*. Oxford University Press, Apr. 29, 2011, p. 604.
- [18] J. Dinet and M. Kitajima, "Immersive interfaces for engagement and learning: Cognitive implications", in *Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference*, ser. VRIC '18, Laval, France: ACM, 2018, 18/04:1–18/04:8. DOI: 10.1145/3234253.3234301[retrieved:February,2026].
- [23] M. Kitajima, J. Dinet, and M. Toyota, "Multimodal Interactions Viewed as Dual Process on Multi-Dimensional Memory Frames under Weak Synchronization", in *COGNITIVE 2019 : The Eleventh International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*, 2019, pp. 44–51.
- [19] S. Harnad, "The symbol grounding problem", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 42, no. 1, pp. 335–346, 1990, ISSN: 0167-2789. DOI: 10.1016/0167-2789(90)90087-6[retrieved: February,2026].
- [20] 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.
- [21] M. Kitajima, M. Toyota, and J. Dinet, "Art and Brain with Kazuo Takiguchi - Revealing the Meme Structure from the Process of Creating Traditional Crafts -", in *COGNITIVE 2023 : The Fifteenth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications*, 2023, pp. 1–10.
- [22] 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.
- [24] Y. Kurihara, M. Shino, K. Nakahira, and M. Kitajima, "Visual behavior based on information foraging theory toward designing of auditory information", in *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 1: HUCAPP, INSTICC, SciTePress*, 2024, pp. 530–537. DOI: 10.5220/0012474600003660[retrieved:February,2026].
- [25] R. Hirabayashi., M. Shino., K. N. T., and M. Kitajima., "How auditory information presentation timings affect memory when watching omnidirectional movie with audio guide", in *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 2: HUCAPP, INSTICC, SciTePress*, 2020, pp. 162–169. DOI: 10.5220/0008966201620169[retrieved: February,2026].