

論文の内容の要旨

論文題目 Subjective Coupling and Embodied Cognition in Simulated Vehicles
主観的相互作用と身体性認知のシミュレーションモデル

飯塚 博幸

認知モデルの方法は研究の立場によって、大きく2つに分かれる。一つは、古典的 AI 的な考え方を基にし、あらかじめ主体のなかに知識として、表象をモデルの中に組み込んで行う方法である。それに対して、もう一つの方法は、身体をもつ主体におけるセンサーレベルの入力と振る舞いを生み出す出力の協調動作（センサーモータカップリング）がすべてであるとする考え方である。本論文では、後者を基盤としている。この考えでは、環境、身体、主体内部、それぞれがダイナミクスをもち、それらのダイナミクスが結合されることによって動的な認知構造が形成される。つまり、認知構造は静的に定義されるものではなく、環境との相互作用、ここでは特に運動をするということ自体がその認知構造を動的に構築しているという立場において認知を捉える。

この立場は、ギブソンのアクティブパーセプションによって与えられ、現在、身体性認知科学と呼ばれ、ロボットとシミュレーションによる研究が行われている。ある種の弁別タスクにおいては、運動することが入力ダイナミクスを適応的に作りだし、そのダイナミクスと内部のダイナミクスが協調することによって task を容易に解くことが確認されている。これは、身体をもちいることによって1人称的に問題の解決を目指し、運動という新たな要素を付け加えることによってセンサーモータカップリングを通した問題解決の方法を与えた。また、Braitenberg や Walter によって、構成論的にビークルを設計するこ

とによって、観測者にとって高度な認知を行っているように感じさせる複雑な行動パターンを構成することが可能であることが示されている。このように、タスクを行う振る舞いや、認知プロセスを思わせる振る舞いは、主体に対して身体を与えてやることによって実現され、我々と似たような振る舞いを生成するようになっていく。しかし、我々と似た振る舞いを出すことが、認知のプロセスの解明を意味するわけではない。タスク処理においては、環境との相互作用のもとで、問題解決のために、身体の一連の動きの流れを見つけたのみであり、ビークルでは、その環境との相互作用のもとで、感情を持っているかのように振舞う身体の一連の動きを示したに過ぎない。そこで、本論文はそのセンサーモータカップリングを超えたシミュレーションモデルを目指し、新しい身体性認知モデルの提案と考察を行う。

ここでは、二つの拡張を試みる。一つの拡張方向として2者間での相互作用（2章）を考え、もう一つは、環境との相互作用において、主体が主観的に相互作用を決定する構造（**subjective coupling**）を明示的に含めたモデル（3章）である。

2章では、2者間の相互作用を扱い、その各々の主体は、通常タスク環境とは異なり、相手の行動を積極的に予測や期待、信頼、裏切りなどのもとで、行動を行う。そのような環境下では、主体は身体と内部ダイナミクスにより振る舞いを作り出し、相手の内部のダイナミクスに影響を与える。相手はその内部ダイナミクスに基づいて振る舞いを決定し、今度はその相手の振る舞いの影響を受ける。そして自分のダイナミクスを変える。それらが相互に絡んでいる構造がある。つまり、いつも最適な一連の行動選択があるわけではなく、相手の振る舞いに合わせた自分の振る舞いが要求される。そこにセンサーモータカップリングを超える要素がある。

シミュレーションモデルでは、内部ダイナミクスを保持することのできるリカレントニューラルネットワーク（**RNN**）を用いることで主体をエージェントとして表現する。ここで、鬼ごっこの鬼の役割が前もっては決められていない **turn-taking** ゲームを提案する。2次元空間上を自由に動き回りながら、追いかけてたり追いかけられたりする役割が自発的に替わる2人ゲームである。ここでのターンは相手の後ろの領域をとることと定義し、両者が同時にターンをとることができない。つまり、エージェントはゲームの中で、相手にターンをとらせることと自分でターンをとる反対の運動を同時に作り出さなければならない。**RNN** を使って表現されるエージェントの行為、予測、内部ダイナミクスは、**Genetic Algorithm(GA)**によって強化学習的に評価し、そのネットワークが進化することによって獲得される。

シミュレーションの結果、様々な **turn-taking** の振る舞いが得られた。それらは大きく3つに分けられる。幾何学的な軌跡を描く **geometric turn-taking**、軌跡やターンの切り替わり方が規則的に生じない **chaotic turn-taking**、ノイズの不安定性を利用しターンの切り替わりが生じる **noise-driven turn-taking** である。

また、進化したペアのエージェント間における相互作用のあり方を調べるために、**virtual**

agent を使った。virtual agent は non-reactive なエージェントで、テープに録画しておいた運動を描くように、以前行った運動を相手の運動によらずに生成する。進化したネットワークをもった adaptive なエージェントの場合は運動にノイズが入ったとしてもお互いが相互に協力することによってそのノイズの影響は抑制される。また、chaotic な運動を示すネットワークで、non-reactive と adaptive が相互作用した場合、微小なノイズでさえもそのノイズは拡大してしまう。つまり、リアルタイムに相互作用しているなかで、相手の適応的な振る舞いに対する期待と相手の振る舞いに対する自分の適応的振る舞いが両立することによって、主体間に協調的振る舞いが作られていることを示している。これは、シミュレーションモデルで従来考えられてきたタスク環境での適応行動とは異なる適応能力を求める。

さらに、この考えに沿って、進化して得られたエージェントを、世代を変えて相互作用をさせた。geometric turn-taking を行うエージェントは限定された相手と turn-taking を構築することができる。一方、chaotic turn-taking を行うエージェントは比較すると geometric なものより多くのものと turn-taking を行うことが可能であることがわかった。これは、chaotic なエージェントの方が RNN の内部に様々な運動を作り上げる潜在能力があると考えられる。それは、geometric なエージェントの場合は、自分の振る舞いを相手の振る舞いを合わせようとするよりも、自分の運動に引き込む傾向に強くて、chaotic な運動は相手の運動に合わせてたり、新たな運動を作ったりすることがあることから推測される。よって、ここでは、単なるセンサーモータカップリングを超えた adaptability の獲得がなされた。こうした adaptability のシミュレーションの報告は我々が初めてである。

3章では、エージェントの環境との主観的相互作用 (subjective coupling) と主観性に焦点をあてる。タスクとしては2章とは異なり discrimination task を与えるが、2章でも議論したセンサーモータカップリングを超える構造を観察するために、明示的にエージェント内部のニューラルネットワークに特殊な構造を埋め込む。この特殊なネットワークは、環境との相互作用を繋いだり (ON)、遮断したり (OFF) することができる。そうすることによって、主体内部に環境のタイムスケールに制約されない内部ダイナミクスを作ることが可能となる。また、その内部ダイナミクスによって ON/OFF のダイナミクスは制御される。こうすることによって、入力を受身的に入るものではなく、内部の状態によってとりにいくものになる。これがこの章で議論される内部ダイナミクスのアクティブ性である。

タスクはある周期で点滅するライトの区別とした。早い周期から遅い周期まで、10種類のライトを見せ、そのうちの半分のライトに近づき、半分のライトをとらないように学習をさせる。そのときのエージェントの見せる運動、内部のダイナミクス、ON/OFF の切り替えダイナミクスに焦点あて、シミュレーションを行う。

結果として、進化したエージェントの運動は大きく approaching, avoiding, wandering に分けられる。ON/OFF の切り替えダイナミクスは明らかにライトをとりにいくときと、避けるときとで異なった。そして、そのエージェントの切り替えダイナミクスを無作為に

行った場合、運動の切り替えが生じないことから、ON/OFF の切り替えダイナミクスを効果的に使うことによって、3つの運動の切り替えが行われているのを確認した。また、内部のダイナミクスにおいては、相互作用がオンになったときのあるニューロンの活動が **approaching** のときにはほぼ周期的に活動し、**avoiding, wandering** のときにはそれが非周期的活動をしていることがわかった。その周期運動は、オンになったときのインプットと内部のダイナミクスが絡むことで維持されている。反対に、相互作用がオンになったときに期待される入力がない、もしくは、内部ダイナミクスがある状態にないと、その周期運動は維持されない。つまり、ここでは、内部ダイナミクスは相互作用をオンにしたときのインプットの予測を内部に構成していると考えられる。相互作用をアクティブに ON にすることによって、エージェント内部、運動、ゲート、環境のカップリング・ダイナミクスが結果としてのエージェントの **discrimination** を達成する。

これらの結果は、構成的なシミュレーションモデルにおいて、新しい側面を切り開いている。単なるセンサーモータカップリングではなく、身体の内側からのアクティブさを作り、主観的相互作用の導入を行うことによって、適応行動、認知モデルに対して新しい可能性を示した。