

人の適応的プランニング過程のモデルベース解析

～人は動的環境にいかに対応しているのか～

Model Base Analysis of Human Adaptive Planning Process

～How does the human correspond to dynamic environments?～

佐藤 敦史[†] 石川 悟^{††} 大森 隆司^{†††} 山内康一郎[†] 栗原 正仁[†]

[†]北海道大学大学院情報科学研究科 ^{††}北星学園大学文学部 ^{†††}玉川大学脳科学研究所

キーワード プランニング, 動的環境, モデル, 行為の柔軟性, トップダウン, ボトムアップ

1. はじめに

人の行為には、柔軟性があると言われている。例えば立食パーティの時には、料理を取ろうとすると他人が取っている最中であつたり、飲み物を取りに行くとき欲しいものがなくなっていたりするなど想定外の事態が発生する。そのような場面では、行為の順番をあらかじめ厳密に定めても有効ではなく、事態を把握してその場面に適した行為を行っていかねばならない。このような、場面に合わせてうまく行為を実行する人の認知過程は「柔軟性をもっている」といえる。ギブソンは、機能を獲得した行為の単位を「タスク」とし、一つの対象に対する一回の操作を「運動」とした上で、柔軟性は「タスクを構成するために埋め込まれる運動単位に潜在している置き換え可能性」と定義した [1]。この定義に従えば、柔軟に行為を行う人の認知過程は、タスクを達成するためにたくさんの獲得済みの運動の中から実行する運動を選択し順番を決める、というプランニングを行っていると考えられる。

また、人は環境に触発された運動を実行する。これは「アフォードダンス」と呼ばれ [3]、人はそれを利用して行為を行う一方で、時としてタスクの達成に必要な不合理な運動をすることもあつた。例えばインスタントコーヒーを取ろうとして手を伸ばしたが途中でさじを取りに行く、などである。このような現象は「マイクロスリップ」と呼ばれ、実行する運動選択の失敗など様々な理由によって生じると考えられている [4] [5]。このように、置かれている環境に依存した運動選択によつても人の認知過程の柔軟性は実現されている、と考えられる。

柔軟性を持つ行為を生み出す人のプランニングはいかに実現されるか、その認知過程についてモデル化し理解する、それが本研究の目的である。これまでの人工知能におけるプランニング研究では、工場の製造過程のプランニングのような事前探索や、プラン実行不可能時におけるプランの再探索、あるいは不確定状況をあらかじめ予測したプランニングといった研究が行われた [2]。しかし人の置かれている環境は時空間的に動的に大きく変化する。また人は置かれている環境全てを観測できない部分観測状態にあり、さらにその環境の情報を正確に保持できない。また日常的な行為の場合、タスクを達成するプランを熟考してから行為を始めるのではなく、プランニングと行為実行が同時となる。したがって人の柔軟な行為を生み出すプランニングには、これらの特徴・制約が想定されなければならない。

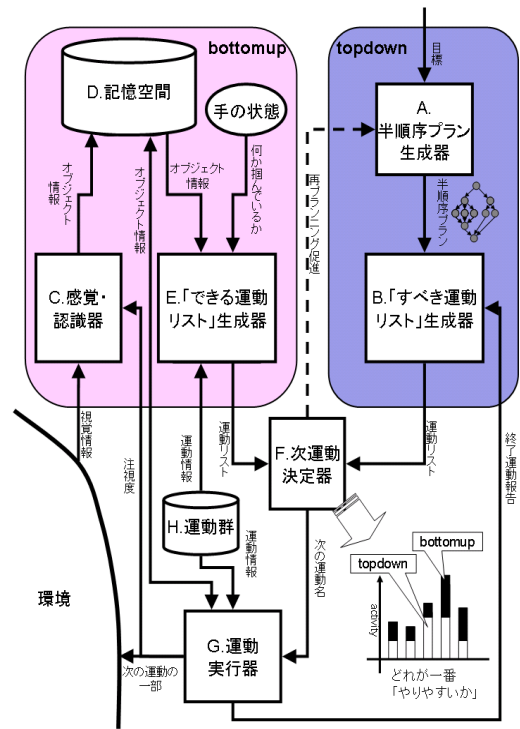


図1 提案モデルの機能ブロック図。右上の部分はトップダウンプロセス、左上の部分はボトムアッププロセスであり、以降の合成プロセスでそれらが統合されて各瞬間の運動を計画していく。

そこで本研究では、人のプランニングを動的かつ部分観測な環境に適応したものと捉え、知覚できる環境が時空間的に動的・部分的であり、その記憶保持は不確かである、という人の認知過程の制約を加えたモデルを提案する。そして、提案モデルが人のような柔軟な行為を生み出すプランニングと行為実行を行うかどうか、「制約がある中でも効率的に行為を行う」・「見えたものに反応してタスク達成に必要な余計な運動を時々してしまう」の2つに注目して検討した。

2. 適応的プランニングモデル

本研究の提案モデルは、与えられたタスクに基づいて決まるが制約によりいつ実行すべきか決定されない「現在すべき(トップダウンの)運動リスト」と、環境からアフォードされた「その瞬間に実行できる(ボトムアップの)運動リスト」を組み合わせ、その瞬間に最も実行しやすい運動を選択することで周りの

環境変化に合わせた運動が実行され、効率的なタスク達成を実現する。本研究ではこのモデルを適応的プランニングモデルと呼ぶ。この適応的プランニングでは、「トップダウンの運動リスト」はタスクに対応した半順序プランによって与え、この半順序プランは事前に獲得されているものとした^(注1)。また、アフォーダンスを利用して環境変動に応じた運動の順序変更（スケジューリング）が行われる、とした。一方「トップダウンの運動リスト」と「ボトムアップの運動リスト」の調節がうまくいかなかった場合、タスク達成には不必要な運動が選択される可能性があり、人で見られるマイクロスリップ現象が生じ得ると考えた。以下に、機能単位ごとにモデルを概観する。

2.1 トップダウンプロセス（「現在現在すべき運動リスト」生成）
半順序プラン生成器 「目標」が入力されるとそれを達成する半順序プランを生成する（図1右上部A）。この「目標」とは「左右の靴を履く」「コーヒーを作る」といった一連の行為によって実現可能な状態である。半順序プランにはその目標を達成するのに必要な運動順序の制約が表現される。例えば「左と右の靴はどちらを先に履いても良いが、靴を履く前に靴下を履かなければならない」といった制約のグラフ表現である。

「現在すべき運動リスト」生成器 半順序プラン生成器で生成された半順序プランを入力とし、現在するべき運動のリストを出力する（図1右上部B）。この運動のリストには、運動の種類および「タスク達成に対する現時点での重要性」の指標（トップダウンアクティビティ）が含まれる。

2.2 ボトムアッププロセス（「その瞬間に実行その瞬間に実行できる運動リスト」生成）

感覚・認識器 環境からの視覚情報を入力として、どの物体（オブジェクト）がどの位置に見えたかといったオブジェクト情報を記憶空間に格納する（図1左上部C）。

記憶空間 感覚・認識器により得られた個々のオブジェクトに関する情報（名前、位置、前回見てからの時間、覚えている程度など）が保存される（図1左上部D）。記憶空間での情報保持の不完全さにより、人の記憶の忘れやすさや曖昧さを表現した。

「その瞬間に実行できる運動リスト」生成器 記憶空間のオブジェクト情報と、現在の自分の手および運動の状態についての情報を入力として、現在実行可能な運動のリストを出力する（図1左部E）。このリストには、運動の種類および運動のし易さの指標（ボトムアップアクティビティ）が含まれる。

2.3 合成プロセス

次運動決定器 トップダウンとボトムアップの両プロセスから出力された運動リストを入力とし、合成運動リストを作成する。その際、合成運動リスト中の各運動ごとにトップダウンとボトムアップのアクティビティを足し合わせた合成アクティビティを求め、一番高い運動を次に行う運動として決定する（図1中央部F）。

運動実行器 決定された次運動を実行する。運動は「手を伸ば

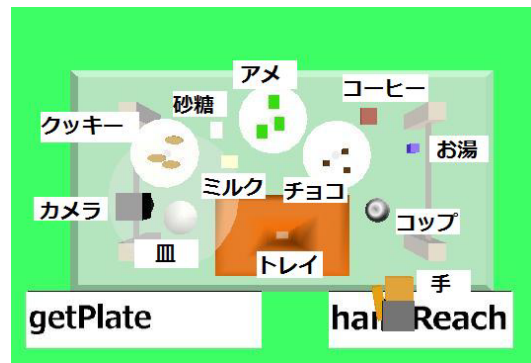


図2 シミュレーション環境を上から見た図。テーブル上にオブジェクトが多数ある。コーヒー粉・砂糖・ミルク・お湯は直方体で表した。

し・～を掴み・持ってきて・離す」等の部分運動に分解される。本モデルではこれら4つをメソッドと名付けてそれぞれ個別のものとして定義した。このモデルの1サイクルの間にはメソッドが実行される。これにより、ある運動をしている中でも違う運動への変更が起こることを可能とした。

運動群 既に獲得済みの運動要素が格納され、その情報は「その瞬間に実行できる運動リスト」生成器や運動実行器に送られる。運動には「対象（何を取るのか）」「目的地（どこへ持っていくのか）」などの情報も付与された。さらに運動と視線移動は密接な関係を持つとして、運動の中に視線移動も含めた。

3. 適応的プランニングの検証

提案モデルの妥当性について検討するため、動的環境における行為実行場面を準備し計算機シミュレーション実験を行い、提案モデルが動的環境において「制約がある中でも効率的に行為を行う」「見えたものに反応してタスク達成に必要な余計な運動を時々してしまう」、という柔軟性を持つ人のプランニングと行為実行の特徴を実現するかどうか検討した。

3.1 設定

シミュレーション環境には、日常の行為と考えられる「コーヒーメイキング」場面を選択し、複数人が同時に行う行為を行っている状況を想定し動的環境とした。提案モデルを実装した「行為者」は、一杯のコーヒーを入れ規定数のお菓子を皿に取ることを求められる「コーヒーメイキング」課題を課せられた。

テーブルと課題達成に必要な材料を（図2）のように準備した。テーブル上にはトレイを置き、その周囲に皿・クッキー・砂糖・ミルク・アメ・チョコ・コーヒーの粉・お湯・コップを置いた。動的環境は、アメとチョコの配置場所を5%の確率で入れ替えることにより実現した。

行為者は、カメラを通してテーブル上の物体（以下「オブジェクト」とする）についての情報を得た。カメラには視野があり、視野内のオブジェクトの同定と位置取得が行われるものとした。視野はシミュレーション画面上では薄い白の円錐として示した（図2）。カメラにより得られたオブジェクト情報は、提案モデルのプランニングプロセスに入力され、タスク達成のための運動の決定に使われた。また、行為者に準備した運動は

(注1)：半順序プランが獲得されているとしたのは、本研究は日常生活における適応的プランニングの過程について議論し、あるタスクをどのように行うかという知識は過去の何度もの経験によって既に獲得されていると考えるためである。

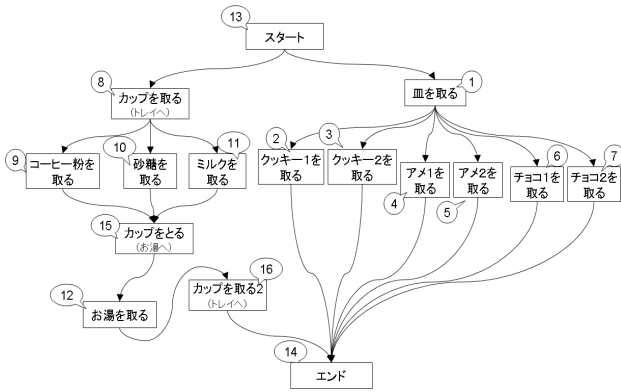


図3 コーヒーメイキングタスクに対応した半順序プラン. それぞれのノードは運動を表している.

表1の通りである. 各運動は, 働きかけるオブジェクトである「対象」とその「目的地」についての情報が決められていた(表1中央・右列). この表にある運動の中で(スタート)と(エンド)はタスクの開始と終了を表し, 実質的な動作は行わないが半順序プランの遷移に必要なため準備した.

行為者のカメラや手は, モデルの運動実行器が一度働く度にひとつ操作(1ステップ)された. カメラは1ステップごとに「対象」のアクティビティが一定以下ならそれを見, そうでなければ元の視点近くでランダムに動くように設定した. 手は選択された運動の「対象」方向に1ステップごとに少し移動し, 手と「対象」の距離が移動距離未満と判断すると「対象」を掴み, 「目的地」方向に1ステップごとに少し移動し, 手と「目的地」の距離が移動距離未満と判断すると「対象」を離れた.

コーヒーメイキングタスクを達成するために必要な半順序プランは既に獲得されているとし, 図3のように用意した. この半順序プランより「現在すべき運動リスト」を求めた. タスク開始時は「カップをトレイへ取る」と「皿を取る」がリストに登録され, 「カップをトレイへ取る」の完了と同時にそれがリス

表1 運動の種類

	運動名	対象	目的地
1	皿を取る	皿	トレイ
2	クッキー1を取る	クッキー1	皿
3	クッキー2を取る	クッキー2	皿
4	アメ1を取る	アメ1	皿
5	アメ2を取る	アメ2	皿
6	チョコ1を取る	チョコ1	皿
7	チョコ2を取る	チョコ2	皿
8	コップをトレイに取る	コップ	トレイ
9	コーヒーの粉を取る	コーヒーの粉	コップ
10	砂糖を取る	砂糖	コップ
11	ミルクを取る	ミルク	コップ
12	お湯を取る	お湯	コップ
13	(スタート)		
14	(エンド)		
15	コップをお湯の前取る	コップ	お湯
16	コップをトレイに取る2	コップ	トレイ

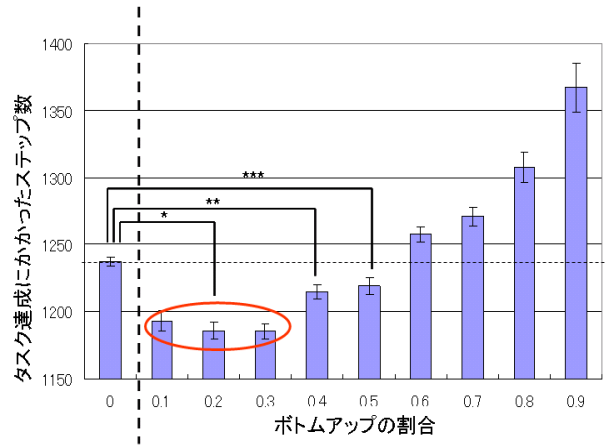


図4 タスク達成までにかかった平均ステップ数. * $p < .01$ ** $p < .05$ *** $p < .10$. エラーバーは標準誤差を表している.

トから削除され, 次の「コーヒー粉を取る」「砂糖を取る」「ミルクを取る」が登録された. 「現在すべき運動リスト」に「エンド」が登録されることによりタスク達成とした. また, このリスト中の運動にはタスクが達成されるように恣意的に番号を決め, 「現在すべき運動リスト」のみでもタスクを達成できるようにした.

さらに入力されたオブジェクトに従ってボトムアッププロセスにより生じる運動は以下のように実装した. 記憶空間に入力されたオブジェクトの情報は時間とともに劣化し, 最も劣化の少ないオブジェクトから順に, それを「対象」とする運動が「その瞬間に実行できる運動リスト」に登録された. したがって視野が移動しオブジェクトの入力が更新されると, 更新されたオブジェクトを「対象」とする運動が引き起こされやすくなった.

また, トップダウン・ボトムアップの合成時にボトムアップの割合をどの程度にするかを定める指標を $bottomupRatio$ (以降 $bRatio$ と表記) として定義した. $bRatio = 0.0$ とするとトップダウンプロセスのみから次の運動を決める. 逆に $bRatio = 1.0$ とするとボトムアッププロセスのみから次の運動を決める. $bRatio = 0.1 \sim 0.9$ がトップダウン・ボトムアップの組み合わせとなる. 今回のシミュレーション実験では, $bRatio$ を $0 \sim 1.0$ の範囲で 0.1 間隔で設定し, タスク達成数, およびタスク達成までにかかる平均ステップ数や実行される運動の遷移を調べた.

3.2 結果

タスク達成までにかかった平均ステップ数を各 $bRatio$ ごとに図4に示す. ボトムアッププロセスのみでのプランニング ($bRatio = 1.0$) と行為実行については, 一度も課題達成ができなかったため除外した.

トップダウンプロセスのみのプランニング ($bRatio = 0$) と, トップダウン・ボトムアップの組み合わせによるプランニングを比較すると, $bRatio = 0.1 \sim 0.5$ では組み合わせモデルの方が課題達成に要するステップ数が小さな値となった. t 検定(両側)を行ったところ, $bRatio = 0.1 \sim 0.3$ の時は 1% 水準で有意(それぞれ $t(193) = 4.32, p < .01$, $t(183) = 5.37, p < .01$, $t(174) = 5.61, p < .01$), $bRatio = 0.4$ では 5% 水準で有

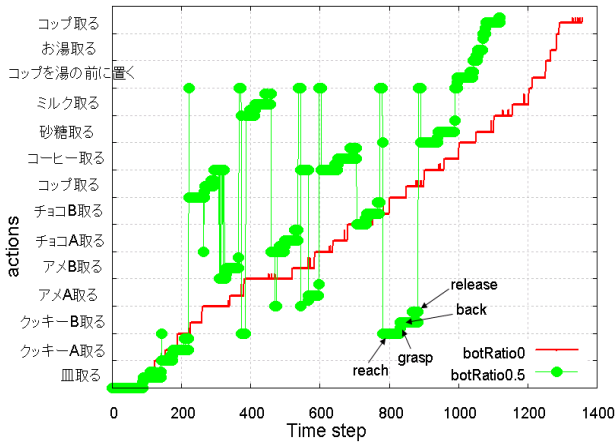


図5 ある試行における、トップダウンプロセスのみのプランニング時 ($bottomupRatio = 0.0$) とトップダウン・ボトムアップ組み合わせのプランニング時 ($bottomupRatio = 0.5$) の運動の遷移。

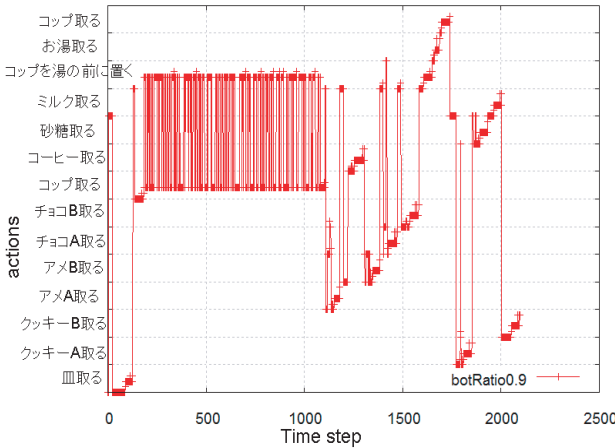


図6 ある試行における、ボトムアップの割合を大きくした時のプランニング時 ($bottomupRatio = 0.9$) の運動の遷移。

意 ($t(191) = 2.26, p < .05$), $bRatio = 0.5$ では 10% 水準で有意傾向 ($t(181) = 1.90, p = .06$) であった。

次にトップダウンプロセスのみのプランニングとトップダウン・ボトムアップ両プロセスを組み合わせさせたプランニングのそれぞれで、運動中に運動の遷移が起こっているか、またどのように起こっているか試行ごとに調べた (図5は $bRatio = 0$ と 0.5, 図6は $bRatio = 0.9$)。図5に示す通り、トップダウンプロセスのみのプランニングでは運動はグラフのような階段状に遷移し、運動中での他の運動への遷移は見られなかった。一方、トップダウン・ボトムアップを組み合わせさせたプランニングでは、300ステップ付近で見られるような「コーヒーを取ろうとする途中でアメBを取ろうとする」といった運動中における他の運動への遷移が見られた。また図6では、200ステップでコップを取りに行った後トレイに置か湯の前に置か両方の運動を遷移し続ける行為が生じたことが確認された。

4. 考察とまとめ

本研究では、人の柔軟な行為実行の特徴を「1. 制約がある中でも効率的に行為を行う」そして「2. 見えたものに反応し

てタスク達成に必要な余計な運動を時々してしまう」と定義し、このような人の行為がトップダウンとボトムアップの両方のプランニングによって導かれていると考え、その行為を実現するモデルを提案した。以下では、シミュレーション実験において、この提案モデルによって人のような行為が出現したかについて考察し、提案モデルの妥当性を検討する。

1つ目については、制約として「動的環境・不正確な記憶・プランニングと行為実行は同時進行的」を与えた環境において検討した。これらの制約はシミュレーション実験では「アメとチョコの位置の変化、記憶空間の劣化処理、トップダウンプロセスによる半順序プランとボトムアッププロセスによる最終順序づけ」として実現した。図4に示したように、トップダウンプロセスのみのプランニングよりも、ボトムアッププロセスの割合を弱めに調節したトップダウン・ボトムアップ両プロセスの組み合わせられたプランニングの方がコーヒーメイキングタスク達成までに要した平均ステップ数が抑えられた。したがって、提案モデルは効率的な行為実行を実現すると考えられる。

2つ目についてはタスク実行中の運動遷移により検討した。図5,6より本研究で提案したプランニングでは様々な運動遷移が見られ、特に図6で示したように「コップを取ったが良いが持って行く場所に迷って手が右往左往する」といったタスク達成には必要のない冗長な運動も再現された。したがって提案モデルは行為の柔軟性・不定性を実現すると考えられる。

このように、本研究で提案したプランニングによる行為実行では、人のような行為の特徴と考えられる二つの要素が認められた。したがって、人のような柔軟な行為の実現には本研究で提案したモデルのようなプランニング過程が関与していることが示唆される。

本研究では人のプランニングと行為実行における制約を3つ挙げてきたが、人はその他にもプラン中の完了運動についての記憶の劣化等の制約を持つと考えられる。これらの制約がどのようにプランニングと行為実行に関与しているか、今後検討する必要がある。また、本研究では半順序プランは既に獲得しているとした。しかし、この半順序プランの獲得方法や修正方法はプランニングと行為実行において明らかにしなければならない大きな問題であり、今後の検討が必要である。

文 献

- [1] Gibson, E. J. An ecological psychologist's prolegomena for perceptual development : A functional approach. In Dent-Read, C. & Zukow-Golding, P. (Eds.), *Evolving explanations of development : Ecological approaches to organism-environment systems* ; American Psychological Association, 1998
- [2] Russell S. J., Norvig P. *Artificial Intelligence -A Modern Approach-* ; Prentice Hall 1995 (古川康一【監訳】「エージェントアプローチ 人工知能」, 共立出版, 1997)
- [3] 佐々木正人 知覚はおわらないアフォーダンスへの招待 ; 青土社, 第一版, 2000
- [4] 鈴木健太郎, 佐々木正人 行為の潜在的なユニット選択に働くタスク制約: 日常タスクに観察されるマイクロスリップの分析 ; *Cognitive Studies*, 8(2), pp121-138, 2001
- [5] 佐藤宏昭, 大森 マイクロスリップにみる人間の日常行動実行プロセスのモデル化 ; 日本認知科学会第20回大会発表論文集, 116-117, 2003