

1. はじめに

行動制御系は、行動を学習し、行動のモデルを作る過程と、行動を実現する過程と、行動を現実結果から補正する過程から成ります。行動は、意志の下、各種のセンサー値（画像のように、生のセンサー値を解析して得た情報も含みます）からアクチュエータ値のセットを出力し、目的に合った身体の動きを実現することです。センサーの主な物は、

- (1) 筋肉の張力と骨格の接続の角度・方向の変位、骨格に働くモーメント
- (2) 皮膚感覚（体重の掛り具合とか接触感）
- (3) 頭の傾きと回転（耳石と三半規管）
- (4) 音圧と音声
- (5) 明るさと画像

です。

アクチュエータの主な物は

- (1) 筋肉の張力
- (2) 骨格の接合部のトルク

です。

意志は、コマンドであり、アクチュエータを動かす（key,value）に落とし込み身体の動きに作用していきます。

行動制御で考慮すべき身体と世界の状況は、

- (1) 頭、首、胴体、肩、上腕、腕、手、指、尻、下肢、足、かかと、足の平、足指といった身体部品の形状と配置と相互作用
- (2) 身体への重力の影響
- (3) ものを支えるときの重力と重心の配置

です。これらは相互に影響し合い、最適な身体の動きを決定する要素になります。これらを最適に配置するアクチュエータ値を決定するため、身体と身体・外界関係を予測することが必要で、過去の情報から、未来を予測します。また、シミュレーションも有力な予測処理過程に成ります。

以下、身体の動きを制御する機構を詳細設計していきます。学習過程と行動実現過程と補正行動過程として明確に区切って考察していきます。設計していきます。

2. コマンドの接地と制御とコマンドの関係

コマンドは「意志」を表します。コマンドは記号でしかありませんので、これを実際にアクチュエータの値に接地しなくてはなりません。アクチュエータは (key,value) データオントロジーです。

例えば、「親指を伸ばす」というコマンドは、
(stretch,direct_object_case,親指)
ですが、これは、「親指」というコンセプトの下、
(stretch,50)
とかの、オントロジーに落とされるわけです。

「足を伸ばした状態にする」というコマンドは
(be,agent_case,足,attribute_case,一直線)
ですが、これは、「足」というコンセプトの下、
(angle_of_joint_of_right_leg,0)
とかの、オントロジーに落とされるわけです。この2つの例は、運動を起こすのもと、状態を指定するものの2つで、コマンドはこの2種類あります。

学習は、実際に人がロボットを操作することで、操作のアクチュエータ値と操作のコンセプト・コマンドを同時提示するという関係をもって、実現します。

更に、大局な操作、例えば「ネジを回す」ですと、次のコマンドを意志として発行します。
(spin,direct_object_case,ネジ) ;

これは、次のコマンドシーケンス（より詳細なコマンド群）に落とされます。

- (1) ネジの所に、親指とヒトサシ指を移動する
- (2) ネジを親指とヒトサシ指で掴む
- (3) 次を交互に行う
 - (3-1) 親指を引き、ヒトサシ指を出す
 - (3-2) 親指を出し、ヒトサシ指を引く

これらのコマンドを発行すると、文脈から（行動のモデルから）、手の移動と親指とヒトサシ指以外は、手のひらに巻き込むとか、ときには、腕の形状も、胴体のありかた、目の位置を定めるから顔の向きも関連して、関連コマンドを発行することになるでしょう。「意志」はあくまで、「ネジを回す」でしかありません。

この制御の大局と詳細を学習し、学習したデータを利用し、補正して実行動を決定する機構が本書で追求していく事柄です。

学習は、試行錯誤と人手による教示とがあります。この点は本書の最後で考察します。

3. 行動の大局制御とオートマトンプール

前節で、行動の大局を部分行動から推定し、部分行動を実現する総合行動を決定していくことが重要と説きました。その目的の為に、オートマトンプールという技術を導入したいと思います。

オートマトンプールは、無数のオートマトンから構成されるアンサンブル系です。オートマトンが寄って立つデータは、意志とセンサー（画像認識結果も含む）とアクチュエータであり、どれも (key,value) というオントロジー形式をしているものです。位相を作るデータであると言うことが重要です。オートマトンは位相空間上に状態を持つグラフ形態のシステムなのです。オートマトンとオートマトンの状態群はコンセプトを構成し、他のシステムからコンセプト名で参照できるようになっているようにします。「頭」とか、「胴体」とか、「肩」とか、「腕」とか、「手」とか、「指」とかです。または、「傾いた身体」とか、「走っている身体」とかのコマンドに相当するコンセプトもあります。それらは、オートマトンになっていて、その状態は「頭」ならば、傾きとかが (direct, $\pi/2$) とかで表現されるものです。

身体は、木構造をしていますから、末端の指先から、手、腕と中心に向かって入れ子構造をしていると把握できます。その為、大局は、中心周りのコンセプトとして、そこから末端まで入れ子構造で制御していくことが簡単に実現できます。物を持った場合でも、ものを新しい末端として身体の一部として展開して制御が実現できます。

このようにオートマトンプールを考えて行くと、自由度の高い、適応性が高いシステムといえる制御システムを実現できることが分かります。

オートマトンの状態の検出は、意志とセンサー値を用いて行います。位相を持つマップの走査で実現します。そうして、状態の出力はアクチュエータ値セットです。この場合、注意しないといけないのは、状態の内容がチャンクであることと、身体と身体が置かれた空間の構造の情報をもって状態が配置されることです。チャンクは、小さな一連の入出力値対で、短い時間間の運動を決定します。空間情報は、認知される情報が空間と身体であることから、現状と目標の状態を明確に制御していくのに有効です。だから、この情報は一番重要な手がかりとなる制御パラメータになります。状態検索もこの情報を持ってすれば、構造があるものですから、高速なものが実現できるというメリットがあります。

大局制御の目的は、安定した姿勢を保つことです。安定は骨格の張力が想定内であり、接合部のモーメントが釣り合っている状態です。そのため、姿勢制御専門のサブオートマトンプールがします。それは重力や重心を考慮した物です。

4. 重力と重心

身体を動かすときとか、姿勢を維持するときには、重力が重要な要素になります。また、重心と慣性も重要で、行動の予測にも影響します。ものを支えるときには、重心と慣性と重力は特に重要な要素になります。

筋肉の張力を T とし、重心の質量を m 、重力定数を g としますと、

$T = m * g$ で、骨格の方向を向きます。これから、

$$m = T/g$$

となります。

また、間接に働くモーメントを M 、骨格の成す角度を θ 、重心の骨格方向の位置 L としますと、

$$M = m * g * L * \cos(\theta)$$

だから、 $L = M / (T * \cos(\theta))$

骨格と筋肉に働く力は、重心を考えれば良いだけで、ものの配置とか、骨格の配置とかは無視して良いですから、これらの式で、行動制御に必要な身体の状態は考慮ができるということです。この事実は、オートマトンとすることの強みとなります。

センサーですが、通常は筋肉の張力とか、間接に働くモーメントとか、皮膚感覚とかの他に、次の論理的なセンサーが必要になります。

- (1) 重さを支えている部位の圧力分布
- (2) 重心
- (3) ZMP
- (4) 支え点の3次元空間上の配置

行動のモデルが破綻したときには、ZMPを安定にする支持点を見て、最も安定した身体形状になるべく、アクチュエータを制御していきます。現在の姿勢と、目的の姿勢をオートマトンで決定し、その2点を結ぶパス上で、動作していきます。そのようなオートマトンがオートマトンプールにあるわけです。それは、最も緊急優先度が高いオートマトンになるものです。

5. システム全体の動き

意志の下で、行動を起こす。これは、人間で言いますと、運動野の仕事でしょう。また、センサー値とか、体全体を考慮した出力をアクチュエータに与えようとするでしょう。ですが、そんなにきめ細かな制御はできない。あるコマンド群で表現される、大局的な（しかし、やろうとしていることにはフォーカスしている）行動の発動です。

これを自動制御して、細かな配慮をした（特に重力を意識した、姿勢制御）行動にしていくのは、小脳の仕事になります。ここがオートマトンになっているというのが、著者の主張です。色々な行動ファクターを調停していくのが、行動制御でのオートマトンプールの役割と言うことです。

身体は木構造をしていますから、制御構造は末端から中心に向かって入れ子構造になっているでしょう。指先を末端とすれば、胴体・・・そうして身体全体のコンセプトが・・・中心となります。どの点にフォーカスを当てて制御しようとしても、身体全体のコンセプトが起動されて、そこから末端まで調停が成されていくことになり、最終的なアクチュエータ値セットが生成されます。

重力の姿勢への影響は大きなものがあります。専門のオートマトンプールがあるはずで、支持点として ZMP を求めて、安定のある姿勢を実現すべくアクチュエータ値を発行します。

そうした多くのオートマトンが出力に影響しあいながら、最終的な身体に発行するアクチュエータ値セットが決定されるのです。位相をベースにしていますから、衝突のあるアクチュエータ値については、近傍の点を補正しながら選択していきます。

【補償運動】

ここに上げたオートマトンプールの出力は想定内のセンサー値に対応するものです。現実にはセンサー値が想定外になることがあります。急なステートの変化も問題です。その場合には、ZMP を安定に置く操作が必要になります。そんな補償用のオートマトンプールもあるのです。

【シミュレーション】

シミュレーションは、オートマトンプールの中を検索することで、実現できます。意志の動きから、ステートの遷移を追って、センサー値の推移・・・とくに身体と空間の配置情報・・・を得ます。

【データの配置】

意志は、汎用制御系（脳だと前頭葉）に配置され、プロダクションシステムとして、コマンドがリストに登録されています。プランニングや、意志も下での行動の発動を司ります。

身体の持つ姿勢（身体部品の配置）、重心の配置、手足などの空間との関わり具合と空間の構造、ZMPなどは、3次元空間での管理が適当であります。各種のマップです。これは、脳ですと、体性感覚野が担っていると思われれます。

オートマトンによる行動制御の実現は脳ですと、小脳が担っていると思われれます。

【位相空間】

(key,value)の key は一つの一次元のマップであり、value はその中の1点です。ステートは、この1次元空間の束になった物です。点には名前が貼られ、一つのステートを表現します。1つの名前は、幾つものマップ上に現れ、その現れている点がステートの一つの要素であると解釈されます。

【システム動作例】

センサーとして、相対位置関係を表現する物もあります。この点注意が必要です。例えば、支持点と手とか胴体、足といったものとの位置関係から安定姿勢を得ていくということが考えられます。その支持を得る最終的な身体・世界空間イメージをゴールとして、現在の身体・世界空間イメージから遷移していくように位相空間上にパスを貼るわけです。それは、オートマトン上で、センサー値セットをキーにしてステートを探す問題であり、パターンマッチングの問題です。そうして、ステート遷移のパスを推定して、アクチュエータ値セットを出力していくことになります。

6. オートマトンの学習

学習のタイプは2つあります。

- (1) ロボットを人が動かしながらコンセプトを提示して、共起をもって、オートマトンを構築して行く
- (2) 試行錯誤で、目的の行動ができるように意志とセンサーとアクチュエータの関係をオートマトンに記録していく

いずれも、交差法で、詳細な行為要素を特定して、オートマトンのステートに纏めていくことになります。

先ず、コマンドとアクチュエータ値を結びつけなくてはなりません。これは、意志とアクチュエータ値セットとの結合で、意志がコマンドセットで、恣意的な記号でしかありません。だから、人手による教示が基本になります。ただ、試行錯誤で迫る方法があります。生きていく能力で必須となる、ダメージセンサーと心地よさセンサーです。ダメージには回避という目標がうまれます。心地よさには、更なる追求という活動があります。目標によって、解決策のプランニングが生まれ、それが意志となります。手足の動きが、この意志とマッチしたとき、共起して結びつきが生まれ得るものなのです。

暑くて外へ出たいときには、ドアのノブを回します。このとき、腕の回転を学習していきます。交差法によって、意志の基本要素が抽出されていきます。雑音は交差法で除去していきます。

ノブを回す仕方も色々です。学習が進むほどに最適な動きをしていけるようにしたい物です。(key,value)セットの値を、そしてその組み合わせを色々買えて、試行錯誤していくことになります。ただ、闇雲に試行錯誤しては効率が悪いわけです。評価関数と、その下での遺伝的アルゴリズムは推奨されます。プールとして、制御ストリングセットを設けるのが良いでしょう。ストリングは(key,value)セットの並びです。この key の位置関係と value を次々に変えていくのですが、交差と突然変異を繰り返していきます。そうしながら、最適に近い一群のストリングを残していくのです。

Value の精度が高いと試行が増えてしまいますから、適当にぼやかしを入れて、精度をおおざっぱにしておくことも有効です。

7. おわりに

意志という行動の基となるデータパスをオートマトンプールという、現実を加味したモデルで修飾しながら実際の行動を実現していくという仕組みは、優れた物だと思います。意志は、目的が達成されれば良いのであって、細かな過程で発生する問題は、それを専門に担う部署のものです。現実には、重力とか、支持物の分布とか、**ZMP**とか、身体と関わる環境の関わりが重要です。これらにどう対応していくか、これら进行处理しながら、意志を通すにはどうしたらよいか。その答えは、大脳運動野と小脳のモデルが提供してくれていると考える次第です。

大脳運動系は意志下の運動プランニングと運動（行動）の実行系であり、小脳は運動のモデルをもって、大局を考慮した補正を行っていく修飾系となっているように思えます。

どんな方式で、行動制御を実現するにせよ、意志のないところには行動はないわけで、意志を如何にアクチュエータに接続するかは重要な問題となります。生きるということが、如何にして意志となり、行動の発現になっていくか、ここの設計が重要となります。その技術体系が、汎用人工知能ということです。

おわり