

# 半加算器を用いた動因形成メカニズムのモデル化とその応用可能性

## — 包摂アーキテクチャによる自律ロボットへの適用

### The Modeling of Forming Drive Mechanism by Half Adder and its Applicability

#### Application for the Autonomous Robot with Subsumption Architecture

大郷 友海  
Tomomi DAIGO

#### Abstract

Recently, as seen in autonomous car and humanoid robot, artificial intelligence (AI) technology is being advanced rapidly. In such a society, it is natural to have a question about the difference between human and AI. This research granted the difference of both is the heart and focused on its ability of making will, and attempted to model the mechanism of forming will (“drive” in psychological word) by using half adder. This model can be used for measuring the satisfaction and discontent of a robot, so this research conducted an experiment to reveal relationship between robot’s satisfaction and score of a task. Clear result has not been observed, but applicability for measuring robot’s state has shown. And the usage as full adder is also prospected in both psychology and production technology.

**Keywords:** half adder, subsumption architecture, SA, motivation, drive, autonomous robot, simulation

#### 1. 背景

近年、Google 社や自動車メーカー各社により、自動運転技術が実用化されつつある。また、ソフトバンクロボティクス社の Pepper など、人間とのインタラクションが可能なロボットが一般化し、IBM 社のコグニティブテクノロジーである Watson がクイズ番組で人間に勝利するなど、人工知能分野での研究成果が急速に普及し始めている。2045 年には“機械の能力が人間を完全に超えてしまい、機械の行うことを人間が制御できなくなってしまう”ことを予測する研究者もいる<sup>1)</sup>。

このような社会にあって、今後ますますロ

ボットや人工知能の技術は発達し、より高度な人工物と共生する時代が来ることが確実視される。そのような人工物は、人間と同様に経験から学習し、人間の感情を理解した適切なふるまいが可能になることが予想される。そのような人工知能やロボットとの共生を考えた場合、人間と人工知能はどう違うのか、人間にはあって、人工知能には存在しないものがあるのかという疑問が自然に浮かび上がる。

現在は一般的に、ロボットは心を持たないと考えられており、ロボットが心を持つかどうかに関する研究や<sup>2)</sup>、人に安心を与えるロ

ボットは心を持ったロボットに近いことを示す研究もある<sup>3)</sup>。心のはたらきは、悟性・感情・意志の3つに区分される<sup>4)</sup>が、本研究ではこのうちの「意志」に着目した。

心理学では、“人が一定の目標に向かって行動を開始し、それを維持する一連のはたらきを動機づけ(*motivation*)”という。また、“人の内部にあって、人の行動を引き起こすものを欲求(*need*)、または動因(*drive*)”、“外部からその人の行動を誘発する要因を誘因(*incentive*)”と呼び、動機づけはこれらのいずれか、または両方によって引き起こされると定義されている<sup>5)</sup>。

本研究では「意志」を動機づけのはたらきととらえ、そのもととなる動因がどのように形成されるのかについて、演算装置の一種である半加算器を用いてその過程をモデル化することを試みる。また、応用として、このモデルをロボットに搭載した状況におけるロボットの状態とタスクの達成度に関する計測実験を行う。

なお、動機づけや、人間らしいロボットに関しては研究が盛んであるが、演算装置としての半加算器と人間の動機づけとを関連付けて論じた研究は前例がなく、本研究は人間の心のメカニズムの解明に貢献できる可能性がある。また、ロボットの状態管理手段として、生産技術分野への応用も考えられる。

## 2. 提案モデル

### 2-1. 論理回路によるモデル化

提案モデルは、デジタル回路を用いたロボットの構築を想定して説明する。デジタル回路における半加算器は、二進数数の一桁同士の加算を実現する演算装置である。これをAND素子とXOR素子を用いて構成したものを掲載する(図1)。図の上側がXOR素子、下側がAND素子である。AND素子は2つの

入力端子(図中のAまたはB)にともに1が入力されたとき1を出力し、XOR素子は2つの入力異なる時のみ1を、それ以外は0を出力する。

XOR素子の真理値表を掲載する(表1)。

これらを用いた半加算器はXOR側を加算結果の下位

桁、AND側を桁上がりとして使用することで、二進数の加算を実現している。

前述のように、人間がある行動を動機づけられる際、その原因はその人物の外部の要因(誘因)と内部の要因(動因)に分けられるが、これらのうち内部の原因によって行動を起こす場合のメカニズムに関してXORおよびAND素子による半加算器を用いてモデルを構築する。

はじめに、半加算器のXOR素子側について説明する。XOR素子の2つの入力のうち、一方には望ましい状態として任意に設定した1または0のデジタル信号を、もう一方にセンサからの出力信号を入力する。センサには、種類により、反応時に電流を流すものと、電流を流さなくなるものがあるが、ここでは理想状態に設定した値に対応した適切な挙動となるよう設定する。例えば、このモデルを搭載するロボットが前進する際、前方に障害物がない状態が望ましいとする。このとき、このロボットにとっての理想状態は、障害物がない「0」であり、この理想状態が達成されたときに、センサは理想状態と同じ値「0」を出力する必要がある。したがってこの場合のセンサは遮光時にON(デジタル信号の1を出力する)となるよう設定した拡散反射型光電

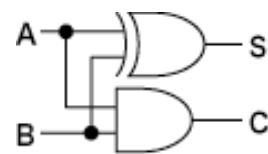


図1: XOR素子とAND素子による半加算器  
([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ja/b0/Half\\_adder\\_using\\_xor.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ja/b0/Half_adder_using_xor.png))

表1: XOR素子の真理値表

入力1	入力2	出力
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

センサ等が適当であろう。ここでの要点は、理想的な状態に達したときに、理想状態に設定した値と同じ値を、センサが出力することである。

このように、半加算器の一方の入力には 0 または 1 の理想状態を電気信号として入力し、もう一方には対応するセンサの出力を接続する。この状態で、半加算器の XOR 側の出力（以降、出力 S とする）に、モーター等のアクチュエータを接続する。

この状態において、理想状態として設定された状況と、ロボットが置かれた現在の状況とが異なっている場合は、センサからは理想状態の値とは逆の（理想状態が 0 ならば 1 の）信号が出力される。つまり、半加算器の XOR 側に入力される 2 つの信号は互いに異なるものとなる。XOR 素子の特性に従い、異なった信号が入力された場合は半加算器の出力 S は 1 を出力する。これにより、出力 S に接続されたアクチュエータが動作する。これらを俯瞰してみると、ロボットの置かれた状況が、その理想状態と異なっていた時に、ロボットはアクチュエータによって何らかの行動を起こすことになる。つまり、その行動はロボット個体にとっての理想状態と、現状との差によって引き起こされたとみなすことができる。理想と現状との差によって動因が形成され、ロボットは行動を動機づけられたのである（図 2）。

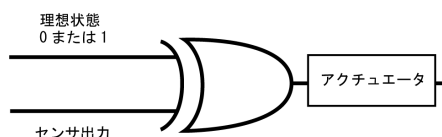


図 2: XOR 素子のみで構成したモデル

次に、AND 素子側について説明する。AND 素子は前掲のように、入力信号全てが 1 でなければ 1 を出力せず、一つでも 0 があると 0 が出力される。そこで、先ほど定義した理想

状態について、値を 0 と 1 から任意に決めるのではなく、すべての理想状態を 1 に固定することを考える。このとき、半加算器の入力側に接続するセンサは、ロボットの理想とする状態を満たしたときに必ず 1 を出力するように設定する必要がある。このように設定すると、ロボットにとって理想的な状態では、半加算器の入力は 2 入力とも 1 であるため、AND 素子の特性に従って半加算器の AND 側出力（以降、出力 C とする。）には 1 が出力される。また、このとき前述の出力 S は、XOR 素子の特性に従い、0 を出力する。理想的な状態でなくなると、半加算器の入力のうち理想状態は変化せずに 1、センサ出力は変化して 0 となるため、AND 素子の特性に従って半加算器の出力 C は 0 を出力する。このとき、先ほど同様、XOR 素子の特性から出力 S は 1 となる。以上をまとめたものが表 2 であり、これは半加算器の真理値表と同値である。

表 2: 半加算器の真理値表

入力 1	入力 2	出力 S	出力 C
1	1	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0
0	0	0	0

本提案モデルにおいて AND 素子側が意味するのは、理想状態が充足された、つまりロボット個体がある状態について満足した、ということである。前述のように、ロボットは状況がその理想とする状態と異なっている場合に半加算器の XOR 側によりアクチュエータが起動することで行動を起こす。アクチュエータにより状況が変化し、理想的な状態に達したとき、やはり XOR 素子の働きでアクチュエータの動作は停止する。同時に、半加算器の AND 側出力が 1 になるため、ロボットの理想状態が充足されたことを検出可能である。以上が本提案モデルの基本形である。

次に、このように構築したセンサ・半加算

器・アクチュエータを一つのモジュールと見なして、このモジュールがロボットの複数の理想状態のうちの一つに対応すると考える。複数の理想状態というのは、例えば「前方に障害物がないことが望ましい」とか「エネルギーが十分残っていることが望ましい」といったものである。一つの理想状態に対して、1対1に対応する半加算器モジュールを構築し、ロボットに実装する。実装した各半加算器モジュールは、それぞれ個別に設定した理想状態（値はすべて1）とセンサからの入力によってのみ動作し、それぞれの機能を独立に遂行する。この提案モデルを図3に示す。

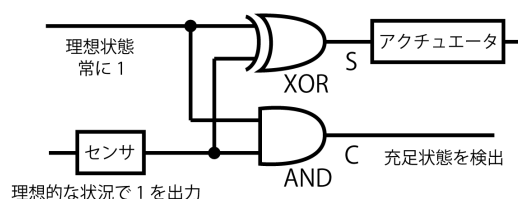


図3: 半加算器を用いた提案モデル

## 2-2. 包摂アーキテクチャとの関連

ここで、知的ロボットの制御に関する処理形態である包摂アーキテクチャ(サブサンプリング・アーキテクチャ、以下 SA)について概説する。SAはロドニー・ブルックスが1986年に発表した。その特徴は、従来の直列的・中央集散的な制御方式と対照的に、並列的・分散的な処理によってロボットを制御する点であり、かつ、その処理は従来の「入力・処理・反応」という重い処理ではなく、「感知・反応」という中間処理を欠いた軽い処理系となっていることである。すなわち、SAによるロボットは「動き回る」、「障害物を回避する」、「地図を作成する」といった複数の小規模なタスクを実行するモジュールをそれぞれのタスクごとにもち、それらが同時に、自律的に動作することで環境に適応したダイナミックな挙動を実現することが可能である。ブルックスが用いた従来の処理系の構成図およびSAの

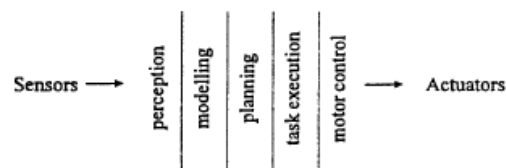


図4: 従来の処理系

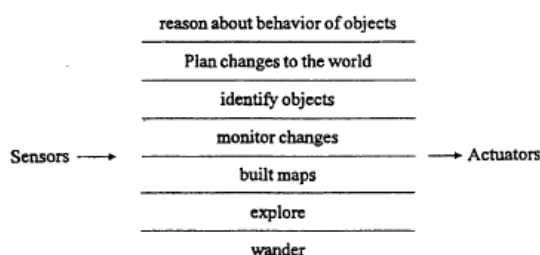


図5: SAによる処理系。  
図中央の処理モジュール群は階層的に見えるが、各モジュール間に支配・従属関係はない。

構成図を掲載する(図4、5 どちらも五味(1995)より引用)。

本研究では、本提案モデルにおける「センサ入力・半加算器・アクチュエータ」の単純な処理の流れや、複数の理想状態に対して各半加算器モジュールが独立に動作する点がSAの設計思想と非常に相性が良いため、SAを用いて提案モデルを搭載したロボットを構築可能であると考えられる。

## 3. 仮説

本提案モデルにより、動因は理想状態と現状との差異により形成されることが示唆された。また、理想状態との差異がない状態は、当該状況について満足した状態であり、その状態を計測可能であることを示した。そこで、あるタスクを実行する際、本モデルを搭載したロボットの各種の理想状態、言い換えれば各種の欲求(動因)がより多く充足された状態であるほど、タスクの成果が上がるのではないかと、さらには、複数のロボットがタスクに参加する場合、各ロボットの欲求の充足具合の和が大きいほど、タスクの成果が上がるのではないかと仮説を立てた。そこで、仮説を検証するための実験を実施することとした。

#### 4. 目的

本実験の目的は、上記の仮説を検証し、本提案モデルの産業応用可能性を探ることである。生産の効率化と最適化は現代の高度情報社会において必至の課題となっており、仮説が立証されれば各種ロボットによる生産性の向上に結び付くことが想定される。

#### 5. 研究方法

##### 5-1. 開発環境

前述のように、本提案モデルは SA を用いたロボット構築に適している。ただし本研究では諸般の事情により、実際のロボットではなく、提案モデルおよび SA の設計構造を持ったロボットを、コンピュータシミュレーションにより実装する。開発環境は Windows8.1 OS、Intel i5-3230M(2.6GHz) プロセッサ、メモリ 4GB を搭載したノート PC を使用し、オープンソースのビジュアルアート用開発環境・プログラミング言語である Processing(バージョン 2.2.1)によりシミュレーションソフトウェアの開発を行った。

##### 5-2. 実験方法

タスク実行時のロボットの欲求の充足度とタスクの成果との関連を調べるため、実験はプログラム内の円形領域内にランダムに配置した 9 個のブロックを、同領域中央から右下に向けて赤色に着色された棒状の領域に移動させるタスクをロボットに与えるものとした(図 6)。ロボットの台数は 1、3、5 台の 3 通りとして、それぞれ 30 回ずつ実験を行った。この回数は、予備実験において、計測されたパラメータについて分散を取り、ほとんどばらつきが見られないことから決定した。また、シミュレーションプログラムのフレームレートは 30fps とし、実験の制限時間はフレーム数を用いて計測した。実験時間は 7 分間(12,600 フレーム)をロボットの台数で除した値、すなわちそれぞれ 7 分(12,600 フレーム)、2 分 20 秒(4,200 フレーム)、84 秒(2,520 フレーム)

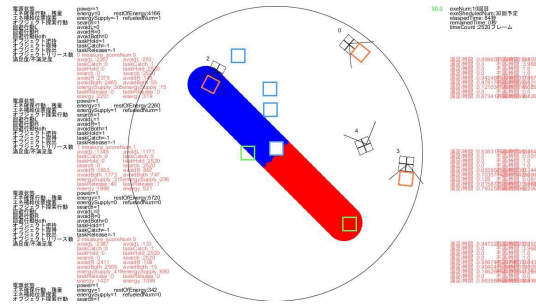


図 6: 設定した実験を実行するプログラム。図はロボット数を 5 としたものの。図中の「田」の字のように見えるものがロボット。  
移動可能なブロックは水色、移動中はオレンジ色、移動が完了したブロックは緑色で示される。中央から左上に伸びる青色の領域はエネルギー補給地点。

ーム)とした。フレーム数で計測することで、何らかの理由で処理が遅延した際にも各実験間で実質的な実験時間をそろえることができる。すべてのブロックを移動させた、または制限時間が経過した場合その回は終了し、次の実験へと自動的に移行する。次の回の開始時には全パラメータがリセットされ、ブロックは再びランダムに配置される。なお、ブロックが試験領域外に配置されることや、ブロック同士が完全に重なって配置されることはない。

ロボットは実験中に各種動作を行うことでエネルギーを消費する。エネルギーが尽きると行動できなくなるが、このエネルギーの初期値は 30,000 をロボットの台数で除したものとし、ロボットの台数によるタスク達成効率の不均衡を防止した。なお、ロボットはブロックを保持すると移動速度が低下する。

前述のように、ロボットに実装した半加算器モジュールは、2 つの入力信号が異なっている状況(理想状態と現状に差がある状況)で、出力 S は 1 を、出力 C は 0 を出力する。理想的な状態では出力 S は 0 を、出力 C は 1 を出力する。実験では、各半加算器モジュールにつき、出力 S が 1(欠乏状態)である時間と出力 C が 1(充足状態)である時間をフレーム単位で計測することで、ロボットの充足状態または欠乏状態とタスクの成果との関係を調べた。

実験のプログラムは、実験終了後に各回の計測データを CSV ファイルとして出力し、結果の解析は Excel2003 を使用して回帰分析で行った。また、不測の事態に備えて、プログラムは各実験終了時の様子をスクリーンショットとして出力している。なお、ロボットに実装したセンサの中には起動条件がそろわない場合に-1 を出力するものがあるが、その状態については計測を行っていないため、実験中のロボット本来の状態と異なる状態が記録されることはない。

### 5-3. 実装

ロボットには、タスクの実行のため、以下の状況を検出するセンサを実装した。

1. [エネルギー残量]センサ  
自身のエネルギーが一定以下になったことを検出
2. [エネルギー補給地点]センサ  
自身のエネルギー補給地点への到達（エネルギー残量が理想的でない場合であってはじめてセンサに通電する）
3. [左回避]センサ  
左前方の障害物への接近
4. [右回避] センサ  
右前方の障害物への接近
5. [両回避] センサ  
上記の左右センサの同時起動を検出
6. [タスク継続] センサ  
タスクの未完了
7. [ブロック確保] センサ  
自身前方にブロックが存在し、かつブロックが静止していること
8. [ブロック保持] センサ  
自身がブロックを保持していること  
(1)
9. [ブロック放棄] センサ  
自身がブロックを保持していること  
(2)（ブロック移動先領域へ到達した状態ではじめてセンサに通電する）

また、2 節で説明したように、各センサに対する理想状態はすべて 1 とし、ロボットが理想状態と異なる状況に置かれている場合は、各センサはそれぞれの理想状態を NOT 演算した値（すなわち、本実験では常に 0）を出力するものとした。各モジュールのセンサおよび半加算器の値は 1 フレームごとに更新される。

次に、アクチュエータについては前述のセンサに対応して以下のような挙動をするものとした。

1. [エネルギー残量]機能  
[エネルギー補給地点]センサの起動条件となる
2. [エネルギー補給地点]機能  
エネルギー補給地点を発見していれば、補給を開始する。（補給中は一切のアクチュエータが停止する。）
3. [左回避]アクチュエータ  
ロボットの左側面に装備された(と仮定した)タイヤを駆動する
4. [右回避]アクチュエータ  
上記同様、右側面のタイヤを駆動する
5. [両回避]アクチュエータ  
右側面のタイヤにブレーキをかける（これにより、左右のセンサが同時に反応するような障害物が存在した場合にも、右折によって回避可能となる。）
6. [タスク継続]アクチュエータ  
前進する
7. [ブロック確保]アクチュエータ  
ブロックを確保する
8. [ブロック保持]アクチュエータ  
該当するアクチュエータなし（後述する。）
9. [ブロック放棄]アクチュエータ  
ブロックを放棄する

上記モジュール 2. の機能であるが、この機

能は、実装上は[エネルギー補給地点]モジュールの出力 C が 1 の時に起動する。これは本提案モデルの出力 S が 1 の時に動因が形成されているとの主張と矛盾するように見える。しかし、当該出力 C が 1 になる条件にはエネルギー残量が理想的でないことが含まれるため、[エネルギー残量]モジュールの出力 S と[エネルギー補給地点]モジュールの出力 C を入力とする半加算器を新たに設け、その出力 S を起動条件としたものと考えれば、本提案モデルに反しない。ソフトウェアではエネルギー補給地点に到達しなくてもエネルギーを補給できてしまうためこのような処理としている。

モジュール 8. については、アクチュエータを実装していない。これは、提案モデルの心理学的な応用を考え、実験的に「理想状態を満たすと同時に理想状態の値そのものを書き換える」という処理を実装したためである。この結果、当該モジュールの現状は、常に理想状態と異なることになり、出力 S は常に 1 を出力するため、行動発現の条件としては使用できない。

また、モジュール 9. についても複雑な条件となっているが、ブロックを移動先に放棄する際、まず移動先の領域に到達していることが前提条件になっている。領域への到達を確認することでセンサに通電（センサの電源が入る）し、ブロックを保持していれば、[ブロック放棄]モジュールのセンサは理想状態 1 を NOT 演算した 0 を出力する。これに伴い、当該モジュールのアクチュエータはブロックを放棄するという流れである。このモジュールは起動条件を複数回変更しているが、本実験のブロック放棄動作のような状況における人間の一般的な動因形成順序を筆者が正しく再現できていない可能性は完全には排除でき

ない。

## 6. 実験結果

はじめにロボット数 1 での実験結果を説明する。実験は全部で 30 回行い、終了時のスクリーンショットおよび計測データに異常が認められなかったため、30 回分すべてのデータを解析した。ロボット数 1 をはじめ、すべてのロボット数において、すべてのブロックを運び終えてタスクが完了した回はなかった。前述の計算方法により 1 回の実験時間は 420 秒間で、フレーム数の合計は 12,600 フレームとなる。フレームレートは 19.3 から 39.3 の間に収まっていた。

解析には、実験中のロボットの各モジュールの出力 C が 1 (充足状態) であった状態のフレーム数と、出力 S が 1 (欠乏状態) であった状態のフレーム数について、実験の総フレーム数で割った値(以下、それぞれ充足度および欠乏度)を用い、その実験中にブロックを所定位置に運んだ数（タスク達成数）との相関関係を調べた。充足度・欠乏度とタスク達成数、およびロボットのエネルギー補給回数をまとめたものが表 3 および表 4 である。

各モジュールのタスク達成数と、充足度・欠乏度およびエネルギー補給回数それぞれについて 30 回分の値で散布図を作成し、線形近似での決定係数  $r^2$  の値によって相関関係を調べた。各モジュールの決定係数  $r^2$  の値をまとめたものが表 5 である。括弧内が正なら近似曲線の傾きが+、負なら-であることを示す。なお、モジュールの設計上、出力の値が必ず一定値となるものについては当該箇所を空欄にしている。

表 3：ロボット数 1 における各モジュールの充足度

基本情報			充足状態									
実験No.	タスク達成数	補給回数	1フレーム当り 欠乏度総和	[エネルギー残量]	[エネルギー補給地点]	[左回避]	[右回避]	[両回避]	[タスク継続]	[ブロック確保]	[ブロック保持]	[ブロック放棄]
0	0	0	3.496190476	0.571269841	7.93651E-05	0.993730159	0.934365079	0.996746032	0	0	0	0
1	2	0	3.497222222	0.571269841	7.93651E-05	0.99515873	0.933015873	0.996666667	0	0	0	0.001031746
2	3	0	3.401190476	0.554285714	7.93651E-05	0.972539683	0.880555556	0.990873016	0	0	0	0.002857143
3	0	0	3.446587302	0.560555556	7.93651E-05	0.92484127	0.973174603	0.987936508	0	0	0	0
4	1	0	3.457698413	0.567301587	7.93651E-05	0.898333333	0.993253968	0.997698413	0	0	0	0.001031746
5	2	1	3.866746032	0.85452381	0.124126984	0.92547619	0.973015873	0.984285714	0	0	0.00531746	
6	1	0	3.496031746	0.571031746	7.93651E-05	0.932539683	0.994444444	0.996269841	0	0	0	0.001666667
7	3	0	3.342698413	0.534126984	7.93651E-05	0.860555556	0.965	0.976031746	0	0	0	0.006904762
8	0	0	3.51047619	0.575396825	7.93651E-05	0.936904762	0.998333333	0.998333333	0	0	0.001428571	
9	2	0	3.452222222	0.559920635	7.93651E-05	0.983492063	0.914047619	0.990714286	0	0	0	0.003968254
10	1	0	3.501746032	0.573015873	7.93651E-05	0.933095238	0.996190476	0.998253968	0	0	0	0.001111111
11	4	0	3.380238095	0.540873016	7.93651E-05	0.919603175	0.939761905	0.97515873	0	0	0	0.004761905
12	0	0	3.456190476	0.563571429	7.93651E-05	0.925396825	0.978571429	0.988333333	0	0	0.000238095	
13	1	0	3.495714286	0.570634921	7.93651E-05	0.932857143	0.99484127	0.995952381	0	0	0	0.001349206
14	0	0	3.44968254	0.561190476	7.93651E-05	0.922380952	0.976031746	0.988571429	0	0	0	0.001428571
15	2	0	3.432063492	0.559285714	7.93651E-05	0.873412698	0.999047619	0.999126984	0	0	0	0.001111111
16	0	0	3.460952381	0.564206349	7.93651E-05	0.926269841	0.98	0.990396825	0	0	0	0
17	0	0	3.510555556	0.57547619	7.93651E-05	0.936269841	0.998650794	0.998650794	0	0	0	0.001428571
18	2	0	3.368095238	0.544365079	7.93651E-05	0.868968254	0.967301587	0.983650794	0	0	0	0.003730159
19	1	0	3.457460317	0.563095238	7.93651E-05	0.924285714	0.978968254	0.989920635	0	0	0	0.001111111
20	2	0	3.476031746	0.56452381	7.93651E-05	0.98968254	0.926984127	0.993253968	0	0	0	0.001507937
21	0	0	3.502539683	0.573015873	7.93651E-05	0.935238095	0.996428571	0.996666667	0	0	0.001111111	
22	5	1	3.851666667	0.810238095	0.131349206	0.96031746	0.950793651	0.989603175	0	0	0	0.009365079
23	3	0	3.422698413	0.548888889	7.93651E-05	0.867539683	0.98047619	0.991825397	0	0	0	0.033888889
24	0	0	3.444206349	0.561666667	7.93651E-05	0.982063492	0.910952381	0.988015873	0	0	0	0.001428571
25	1	0	3.50047619	0.571825397	7.93651E-05	0.934285714	0.99484127	0.997142857	0	0	0	0.002301587
26	0	1	3.643888889	0.571269841	0.172619048	0.947301587	0.963730159	0.988968254	0	0	0	0
27	4	1	3.815396825	0.872777778	0.120714286	0.880238095	0.959047619	0.971904762	0	0	0.010714286	
28	1	0	3.458809524	0.564206349	7.93651E-05	0.926587302	0.978571429	0.988253968	0	0	0	0.001111111
29	2	0	3.500714286	0.572142857	7.93651E-05	0.935396825	0.995396825	0.996666667	0	0	0	0.001031746
平均	1.433333333	0.133333333	3.503206349	0.591531746	0.018362434	0.931492063	0.967526455	0.990862434	0	0	0.003431217	
分散	1.912222222	0.115555556	0.015842166	0.007355221	0.002230473	0.001333704	0.000925294	4.95229E-05	0	0	3.87989E-05	
標準偏差	1.382831234	0.339934634	0.125865666	0.085762587	0.047227884	0.036519911	0.030418638	0.007037248	0	0	0.006228876	

表 4：ロボット数 1 における各モジュールの欠乏度

基本情報			欠乏状態									
実験No.	タスク達成数	補給回数	1フレーム当り 欠乏度総和	[エネルギー残量]	[エネルギー補給地点]	[左回避]	[右回避]	[両回避]	[タスク継続]	[ブロック確保]	[ブロック保持]	[ブロック放棄]
0	0	0	2.932698413	0.428730159	0.428650794	0.006269841	0.065634921	0.003253968	1	0.00015873	1	0
1	2	0	2.932936508	0.428730159	0.428650794	0.00484127	0.066984127	0.003333333	1	0.000238095	1	0.00015873
2	3	0	3.048015873	0.445714286	0.445634921	0.027460317	0.119444444	0.009126984	1	0.000396825	1	0.000238095
3	0	0	2.993095238	0.439444444	0.439365079	0.07515873	0.026825397	0.012063492	1	0.000238095	1	0
4	1	0	2.976507937	0.432698413	0.432619048	0.101666667	0.006746032	0.002301587	1	0.000396825	1	7.93651E-05
5	2	1	2.284603175	0.14547619	0.021428571	0.07452381	0.026984127	0.015714286	1	0.00031746	1	0.00015873
6	1	0	2.93484127	0.428968254	0.428888889	0.067460317	0.005555556	0.003730159	1	0.00015873	1	7.93651E-05
7	3	0	3.130714286	0.465873016	0.465793651	0.139444444	0.035	0.023968254	1	0.000396825	1	0.000238095
8	0	0	2.915634921	0.424603175	0.42452381	0.063095238	0.001666667	0.001666667	1	7.93651E-05	1	0
9	2	0	2.992539683	0.440079365	0.44	0.016507937	0.085952381	0.009285714	1	0.000555556	1	0.00015873
10	1	0	2.926587302	0.426984127	0.426904762	0.066904762	0.003809524	0.001746032	1	0.00015873	1	7.93651E-05
11	4	0	3.084603175	0.459126984	0.459047619	0.080396825	0.060238095	0.02484127	1	0.000634921	1	0.00031746
12	0	0	2.980634921	0.436428571	0.436349206	0.074603175	0.021428571	0.011666667	1	0.00015873	1	0
13	1	0	2.935238095	0.429365079	0.429285714	0.067142857	0.00515873	0.004047619	1	0.00015873	1	7.93651E-05
14	0	0	2.990714286	0.438809524	0.438730159	0.077619048	0.023968254	0.011428571	1	0.00015873	1	0
15	2	0	3.010079365	0.440714286	0.440634921	0.126587302	0.000952381	0.000873016	1	0.00015873	1	0.00015873
16	0	0	2.975238095	0.435793651	0.435714286	0.073730159	0.02	0.009603175	1	0.000396825	1	0
17	0	0	2.91547619	0.42452381	0.424444444	0.063730159	0.001349206	0.001349206	1	7.93651E-05	1	0
18	2	0	3.091666667	0.455634921	0.455555556	0.131031746	0.032698413	0.016349206	1	0.000238095	1	0.00015873
19	1	0	2.981111111	0.436904762	0.436825397	0.075714286	0.021031746	0.010079365	1	0.00047619	1	7.93651E-05
20	2	0	2.961349206	0.43547619	0.435396825	0.01031746	0.073015873	0.006746032	1	0.000238095	1	0.00015873
21	0	0	2.925634921	0.426984127	0.426904762	0.064761905	0.003571429	0.003333333	1	7.93651E-05	1	0
22	5	1	2.348571429	0.189761905	0.058492063	0.03968254	0.049206349	0.010396825	1	0.000634921	1	0.000396825
23	3	0	3.063174603	0.451111111	0.451031746	0.132460317	0.01952381	0.008174603	1	0.000634921	1	0.000238095
24	0	0	2.995793651	0.438333333	0.438253968	0.017936508	0.089047619	0.011984127	1	0.000238095	1	0
25	1	0	2.930238095	0.428174603	0.428095238	0.065714286	0.00515873	0.002857143	1	0.00015873	1	7.93651E-05
26	0	1	2.78547619	0.428730159	0.256190476	0.052698413	0.036269841	0.011031746	1	0.000555556	1	0
27	4	1	2.323571429	0.127222222	0.006587302	0.119761905	0.040952381	0.028095238	1	0.000634921	1	0.00031746
28	1	0	2.978412698	0.435793651	0.435714286	0.073412698	0.021428571	0.011746032	1	0.000238095	1	7.93651E-05
29	2	0	2.928650794	0.427857143	0.427777778	0.064603175	0.004603175	0.003333333	1	0.00031746	1	0.00015873
平均	1.433333333	0.133333333	2.909126984	0.408468254	0.390116402	0.068507937	0.032473545	0.009137566	1	0.000309524	1	0.000113757
分散	1.912222222	0.115555556	0.042923503	0.007355221	0.01569693	0.001333704	0.000925294	4.95229E-05	0	3.24809E-08	0	1.20447E-08
標準偏差	1.382831234	0.339934634	0.207179881	0.085762587	0.125287391	0.036519911	0.030418638	0.007037248	0	0.000180225	0	0.000109749



表 5: ロボット数 1 におけるロボットの各モジュールの充足・欠乏度とタスク達成数との関係。

モジュール名	決定係数 $r^2$	
	充足状態	欠乏状態
総和	0.0778(正)	0.1158(負)
[エネルギー残量]	0.282(正)	0.2061(負)
[エネルギー補給地点]	0.0034(負)	0.1817(負)
[左回避]	0.0463(負)	0.0463(正)
[右回避]	0.1148(負)	0.1148(正)
[両回避]	0.2379(負)	0.2379(正)
[タスク継続]		
[ブロック確保]		0.0011(正)
[ブロック保持]		
[ブロック放棄]	0.282(正)	1(正)
補給回数	0.1395(正)	

表から明らかなように、[ブロック放棄]モジュールの欠乏度はタスク達成数と完全な相関（正の相関）を持つが、それ以外の項目とタスク達成数の間には相関関係は見られない。

次に、ロボット数 3 について説明する。こちらも実験は 30 回行ったが、終了時のスクリーンショットおよび計測データの値が異常であったもの 3 件（実験 No.5, 19, 21）を除外した 27 回分について解析を行った。スクリーンショットとデータにつき、異常が認められた実験は一致しており、そのすべてにおいてロボット 1 台が試験領域から消失していた。これは、何らかの理由でロボットが領域外へとコースアウトしたものと考えられる。ロボット数 1 に対して、実験条件はロボット数の増加以外の変更はなく、また、各ロボットには個体差が一切ないため、同実験と同様の結果が得られることが予想された。そこでロボット 1 台ごとの各モジュールの充足度の総和、

欠乏度の総和、および[ブロック放棄]モジュールの欠乏度について、ロボット 3 台分の値を足し合わせたものと、その回のタスク達成数との関係を調べた。結果を表 6 に示す。

表 6: ロボット数 3 における各ロボットの充足度・欠乏度・補給回数の全和とタスク達成数との関係

モジュール名	決定係数 $r^2$	
	充足度	欠乏度
モジュール総和の全和	0.505(正)	0.4902(負)
[ブロック放棄]全和		1(正)
補給回数全和	0.5264(正)	

ロボット数 1 と同様、[ブロック放棄]モジュールの欠乏度全和はタスク達成数と完全な相関関係にある。そのほかの項目については、ロボット数 1 の時と比べ決定係数  $r^2$  の値が大きい。また、3 台のロボットそれぞれを単独に、同様の項目について解析を行った結果、ロボット数 1 の場合よりも強い相関関係がみられた（表 7）。

表 7: ロボット数 3 におけるロボットごとの充足度・欠乏度・補給回数の総和とタスク達成数との関係

モジュール名	個体	決定係数 $r^2$	
		充足度	欠乏度
モジュール総和	0	0.4152(正)	0.4737(負)
	1	0.195(正)	0.2194(負)
	2	0.2301(正)	0.2351(負)
[ブロック放棄]	0		1(正)
	1		1(正)
	2		1(正)
補給回数	0	0.4496(正)	
	1	0.2722(正)	

	2	0.4933(正)
--	---	-----------

最後に、ロボット数 5 について説明する。こちら全 30 回のうち、ロボットが試験範囲から消失した 3 件(実験 No.10, 13, 23)を除いた 27 件のデータを解析した。ロボット数 3 と同様の項目について結果を表 8 に掲載する。

表 8: ロボット数 5 における各ロボットの充足度・欠乏度・補給回数の全和とタスク達成数との関係

モジュール名	決定係数 $r^2$	
	充足度	欠乏度
モジュール総和の全和	0.0032(負)	0.0008(正)
[ブロック放棄]全和		0.9886(正)
補給回数全和	0.0451(正)	

ロボット数 3 よりも決定係数  $r^2$  の値は小さく、よりロボット数 1 に近い。[ブロック放棄]モジュールの欠乏度全和とタスク達成数の相関が完全なものではなくなったが、強い正の相関を保っている。また、5 台のうちロボット個体 3 を抽出して個別に解析を行ったが、5 台全体と同様の傾向を得た(表 9)。

表 9: ロボット数 5 における個体 3 の充足度・欠乏度・補給回数の総和とタスク達成数との関係

モジュール名	決定係数 $r^2$	
	充足度	欠乏度
モジュール総和	0.0345(負)	0.0464(正)
[ブロック放棄]		1(正)
補給回数	0.0006(正)	

## 7. 考察

まず、ロボット数 1 について、[ブロック放棄]モジュールの欠乏度がタスク達成数と完全な相関関係（正の相関）にあるとの結果が得られた。[ブロック放棄]モジュールのセンサはロボットがブロックの運び先に到達してい

る状態で通電し、その状態ですでにブロックを保持している場合に、理想状態 1 を NOT 演算した 0 を出力する。これにより半加算器の出力 S が 1 を出力することで、ブロックは放棄される。つまり、タスク達成数とこの項目が完全な相関を持つのは当然の帰結である。

次に、ロボット数 3 について、モジュール総和の全和（ロボット個体内の全モジュールの充足度または欠乏度の和を、実験に参加したロボットすべてについて足し合わせた値）とタスク達成数に関して、決定係数  $r^2$  の値は  $0.4 < r^2 \leq 0.7$  となっており、相関関係にある。つまり、この回においては試験領域内の全ロボットの充足度とタスクの成果には何らかの関係があると読み取れる。しかし、各ロボットにつき個別に解析した結果では、ロボット 0 については  $r^2=0.4152$  で相関関係があるものの、他 2 台について関係は見られない。また、ロボット数 3 以外の回では、決定係数  $r^2$  の値は総じて小さく、相関関係にあると言えるほどのものはない。ロボット数 3 において、このような結果が出た理由は明らかではないが、今回のロボットのモジュール構成には、ロボット自らがブロックを発見し、接近するという機能が含まれておらず、たまたま目前にブロックが存在した場合に確保し、同様に偶然に満たされた条件により放棄する構成であることが原因として考えられる。本実験でのロボットは、自身以外のロボットやブロックおよび試験領域によって受動的にその進行方向を左右されるため、タスクの遂行意図（動因）が発生しても自ら目標に向かうことができない。そのためこのような一貫性を欠く結果が得られたものと推測される。ロボット数 5 についてはロボット数 1 と同様である。

また、ロボット数 1 の場合と比べて、ロボット数が 3 および 5 の場合に、補給回数と達成数についての決定係数  $r^2$  の値が高いことについて考察する。今回の実験領域内の配置では一度ロボットが試験領域に沿って円運動を始めると、もはや独力でそのほかの動作に復帰することは難しく、ほかのロボット（特にブロックを保持していないロボット）や、ブロックに阻まれる等の外的要因がなければ、ブロック移動先やエネルギー補給領域には到達できない。ロボット数が複数であることで、あるロボットが領域端での円運動をし続ける可能性が減少し、補給領域に到達する可能性は高くなる。そのような場合には、円運動を続けるよりも多くのブロックに接触するため、タスク達成数は増加する。そのため、補給回数とタスク達成数に正の相関がみられたものと考えられるが、ロボット数 5 で見られたように、この関係は絶対的なものではない。

また、ロボット数 1 および 3 と、ロボット数 5 の間では、各モジュールの充足度および欠乏度総和の近似曲線の傾きが逆になっている。ロボット数 3 での個体 2 とロボット数 5 の個体 3 の充足度・欠乏度の各モジュールの 27 回の平均値が、それぞれどれだけの割合を占めるかを比較したが、同様の傾向を示しており、傾きが逆転した理由は明らかではない。

## 8. 結論

実験の結果、ロボットにおける各モジュールの理想状態充足度が高いほどタスク達成数が高いとの仮説は立証に至らなかった。また、複数のロボットが参加するタスクにおいて、各ロボットの充足度の和が高いほどタスク達成度が高いとの仮説についても同様であった。ただし、その値がタスクの成果と直結する[ブロック放棄]モジュールの欠乏度、及び参加ロ

ボットの当該欠乏度の和については、タスクの成果と完全な相関関係にあることから、ロボットの各モジュールの構成方法によっては仮説を立証できる可能性も否定できない。

本実験により、本研究で提案したモデルは、モジュールとしてロボットに搭載することでそのモジュールの充足・欠乏状態および、ロボット全体としての状態を示すことが可能であることが示された。

## 9. 展望

今回の実験を踏まえ、今後は人間にとっての作業における一般的な意図形成順序および動作順序を調べ、それを踏襲したロボットのモジュール構成を再考する必要があると考えられる。

また、半加算器の論理回路としての性質を利用した応用が考えられる。本実験ではロボットに搭載するモジュールは 1 モジュールにつきセンサ、半加算器、アクチュエータを備えていたが、このうちのセンサを別のモジュールの半加算器に置き換え、そのモジュールの出力 C を入力として接続する、つまり、全加算器として使用することにより、「あるモジュールの理想状態が充足した場合に、自身の理想状態を充足するモジュール」を実現可能である。これにより、生理的な一次的欲求が満たされることによって生じる心理社会的な二次的欲求<sup>5)</sup>を工学的にモデル化することが可能だと考えられる。

さらに、半加算器および全加算器が本来加算を実現する回路であることから、本提案で述べてきた各モジュールの状態を、数値として扱うことについても検証の余地が残されている。これは、本提案でのモジュールまたは全加算器として構築したモジュールの出力を、ロボットの状態を表す二進数の 1 つの数とし

て一括管理することができるのではないかという意味であるが、これが実現できれば、包摂アーキテクチャの分散処理のメリットを生かしつつ、効率的なロボットの状態管理が可能になり、整備・保守面におけるメリットを享受できる可能性がある。

## 引用文献

- 1) 堀 浩一(2015)：人工知能の研究開発をどう進めるか 技術的特異点（シンギュラリティ）を見据えて、250-258、情報管理 58(4)
- 2) 八鍬 博敏(2009)：ロボットは「心」を持つか—『PLUTO』から考えるロボットの「心」と人間の「心」—、学習院大学人文科学論集XVIII
- 3) 小山 虎(2013)：心を持つロボットと安心されるロボット、ROMBUNNO.1J3-04、日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM) 31st
- 4) 井上 義彦(2006)：最終講義「カントの"真善美"の哲学について」、153-163、長崎大学総合環境研究 8(2)
- 5) 無藤 隆、森 敏昭、遠藤 由美、玉瀬 耕治(2004)「心理学 (New Liberal Arts Selection)」、192-193、有斐閣
- 6) 五味 隆(1995)：サブサンプリング・アーキテクチャ、909-930、日本ファジィ学会誌 Vol.7, vol.5

## 参考文献

赤間 世紀 著(2012)「自然言語処理教科書」、工学社  
新井 紀子 著(2010)「コンピュータが仕事を奪う」、日本経済新聞出版社  
安西 祐一郎 著(2003)「問題解決の心理学 人間の時代への発想」中央公論新社  
伊藤 一之 著(2007)「ロボットインテリジェ

ンス—進化計算と強化学習」、オーム社

伊藤 芳子、長谷川 修(2004)：包摂アーキテクチャ上の協調学習を用いた群ロボットによる作業効率の改善、The 18<sup>th</sup> Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence

稲邑 哲也(2006)：エージェントシステム/創造情報学特論 I 第 13 回講義参考資料

岡田将吾、伊藤 芳子、長谷川 修(2007)：包摂アーキテクチャ上のパラメータ探索を用いた群ロボットによる適応的行動生成、人工知能学会論文誌 22 巻 3 号 D

鹿取 廣人、杉本 敏夫、鳥居 修晃(2011)：「心理学 第 4 版」、東京大学出版会

呉羽 真(2009)：ロボットは反表象主義の夢を見るか？、11、京都大学文学部哲学研究室紀要:Prospectus(2009)

高田 司郎、新出 尚之、五十嵐 新女、間瀬 健二(2001)：合理的エージェントのコミュニケーション実現方式、187、インタラクション 2001 予稿集

西川 泰夫 著(2006)「認知行動科学—心身の統合科学をめざして」放送大学教育振興会  
平賀 譲(1994)：行動の観点から見た認知科学、J. SICE Vol. 33 No. 4

前田 隆、青木 文夫 著(1999)「新しい人工知能 基本編」、オーム社

—— (2000)「新しい人工知能 発展編」、オーム社

森山 徹、Vladimir B. Riabov、右田 正夫 (2005)：オカダンゴムシにおける状況に応じた行動の発現、188-206、Cognitive Studies 12(3)

森山 徹 著(2011)「ダンゴムシに心はあるのか」PHP 研究所