

身体性に基づく基盤概念の獲得に関する実験的考察

An Experiment of Grounded Concept Acquisition Based on Embodiment

花形 理

Osamu Hanagata

金沢工業大学大学院 高信頼ものづくり専攻

Research Laboratory for Integrated Technological Systems, Kanazawa Institute of Technology

The concepts are constructed by experience which means physical interactions between body and environments. The symbol grounding problem is inevitable for natural communications between humans and robots. In this paper, we discuss that how to acquire grounded concept from physical experience.

The physical interactions involve restrictions. A virtual agent moves around in 3D-computer virtual space. The agent gets food or poison while walking in the virtual space. The agent decreases probability of survival when the agent walks on hazard region. We simulate the agent and evolve the agent by genetic algorithm. We discuss the construction of grounded concept based on agent action. Finally, we discuss relation between sensor and emotion.

1. はじめに

記号と実世界を結びつけることは、記号接地問題 [1] と呼ばれ、様々な試みがなされている [2, 3, 4, 5]。筆者は身体と環境との相互作用の経験から概念が獲得されるという点に注目し、シミュレーション実験を行い検討を行ってきた [6, 7, 8]。仮想的な三次元空間において地面を移動手段を持ち、離れた場所にある物体 (オブジェクトと呼ぶ) を検出するセンサを備えたエージェントを進化させるシミュレーションを行った。仮想空間上にあるこれらのオブジェクトは二種類あり、エージェントがオブジェクトを摂取することで、内部エネルギーを増加または減少する。内部エネルギーを増加させるオブジェクトを餌、減少させるオブジェクトを毒と呼ぶ。エージェントが仮想空間上を自由に移動することで餌または毒を摂取しながら、エージェントの内部エネルギーが 0 になるとエージェントは死亡する。生き残ったエージェントを遺伝的アルゴリズムにより進化させることで、エージェントは餌に向かい毒を回避する行動を獲得した。

本稿では、これまで仮想空間上においてエージェントが動き回る環境は一様であったものを、一定間隔ごとに領域をつくりエージェントが領域内にいる場合は生存に不利な状況におかれることとした。エージェントは領域があることを領域外からは分からず、エージェントがその領域に入ると生存に不利な状況となり、その領域から出ると不利な状況は解消される。この領域を危険領域と呼ぶ。エージェントにはセンサを設け、エージェントが危険領域の内か外にいるかをセンサにより検出する。このエージェントを仮想空間内に放ち、遺伝的アルゴリズムにより進化させる。最後に、エージェントの動作の元となっているエージェントの内部状態と生物の情動との関連性に関する考察を行う。

2. シミュレーション

仮想空間上におかれたエージェントを図 1 に示す。エージェ

ントは二個の車輪をもち、それぞれの車輪はアクチュエータにつながれている。エージェントはオブジェクトを検出する複数のセンサと自分自身が危険領域にいるかを検出するセンサを持つ。オブジェクトセンサは餌か毒を選択的に検出するのであって、餌を検出するのか毒を検出するのか分かっている訳ではない。例えて言えば、赤の色を検出するセンサと青の色を検出するセンサがあり、餌と毒がそれぞれが赤と青の色をしているということで、オブジェクトの機能と色の特徴の関連付けは経験によって獲得されるものである。領域センサは二種類あり、一方のセンサは領域に入ると ON、出ると OFF となるセンサで、自身のいる場所を直接的に知る事が出来る。もう一方のセンサは時間的な履歴を持ち、領域内に入ると少しずつ一定の割合で増加し領域から出ると少しずつ減少する。図 2 に危険領域センサ、危険領域履歴センサの出力を示す。増加の場合はある一定値で飽和となりそれ以上は増加せず、減少の場合も同様に一定値以下にはならない。

オブジェクトセンサはオブジェクトのエージェントからみた方向、距離に従ったスカラ値を出力する。センサ i 番めの出力 x_i は、オブジェクトまでの距離を r 、センサと軸とオブジェクトの方向がなす角を θ としたとき、以下のガウス分布

$$x_i = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{(\theta - \phi_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (1)$$

にしたがった値を出力する。ここで、 σ_i は分散でありセンサの指向性の鋭さを表したものであり、 ϕ_i はセンサの向いている方向である。センサはスカラ値であるため単独では距離と方向が特定できるものではない。つまり、センサ軸の正面であるが遠くにある場合とセンサ軸との角度が大きいが近くにある場合にセンサは同じ値を示す。

センサの出力は、三層フェードフォワード型のニューラルネットワーク (NN) の入力につながっており、NN の重み行列によって計算される。出力値 o_i は以下の式で得られる、

$$\eta_i = \sum_j (w_{j,i} x_j + b_i) \quad (2)$$

$$h_i = s(\eta_i) = \frac{2}{(1 + \exp(-2\eta_i))} - 1 \quad (3)$$

連絡先: 花形 理, 金沢工業大学大学院高信頼ものづくり専攻, 〒105-0002 東京都港区愛宕 1-3-4 愛宕東洋ビル 12F, TEL: 03-5777-2227, E-Mail: hana@neptune.kanazawa-it.ac.jp

$$\zeta_i = \sum_j (w_{j,i}^h h_j + b_i^h) \quad (4)$$

$$o_i = s(\zeta_i) \quad (5)$$

ここで、 h_i は隠れ層のアクティベーションレベルで、 $s()$ はシグモイド関数、 $w_{i,j}$ は重み行列、 b_i は入力バイアスである。NN の出力 (o_i) はアクチュエータにつながれトルクを発生し二つの車輪を動かす。二つの車輪のトルクの差によって左あるいは右にカーブを描きながら進む。

2.1 遺伝的アルゴリズム

エージェントは内部エネルギーを蓄えることができ、内部エネルギー (e) は

$$\frac{de}{dt} = -|v_l| - |v_r| - c \quad (6)$$

で与えられる、ここで $|v_l|, |v_r|$ はそれぞれ、車輪の左、右の速度の絶対値であり、 c は定数である。エージェントは、適当な値を内部エネルギーの初期値として、6 式で与えられる式にしたがって減少していき、エネルギーがなくなるとエージェントは動けなくなり消滅する。

車輪に加えるトルクは NN の出力であり、センサ情報が NN の入力となっている。エージェントは餌と毒のある仮想空間上を自由に動き回る間、餌を摂るとエージェントの内部エネルギーが一定量増加し、毒を摂るとエージェントの内部エネルギーが一定量減少する。

一定時間後のエージェントの内部エネルギーの値を適応度とし、NN の重み行列 $w_{i,j}, b_i$ とセンサの向き ϕ_i 、分散 σ_i を遺伝子として遺伝的アルゴリズムにしがって進化させる。次世代のエージェントの選択方法は、適応値に比例した確率で選ばれるルーレット選択 [10] を用いる。すなわち個体 i が選ばれる確率、 p_i は適応度を f_i としたときの式 (7) となる。

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (7)$$

2.2 実験環境

仮想空間内の地面に相当する平面上をエージェントが動き回り、その平面上に一定間隔ごとに危険領域をおく。図 3 に仮想空間上にある危険領域の例を示し、図の灰色の部分に危険領域である。危険領域の大きさと頻度は、エージェントが一生涯の内に何度か危険領域に入ることが可能となるような値とする。

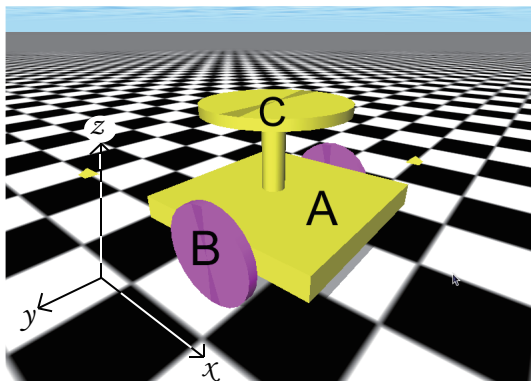


図 1: 仮想空間上のエージェント (胴体 A, 2 つの車輪 B, センサ C)

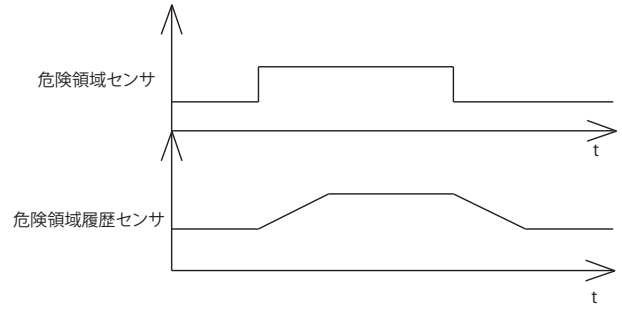


図 2: 危険領域センサ、危険領域履歴センサの出力

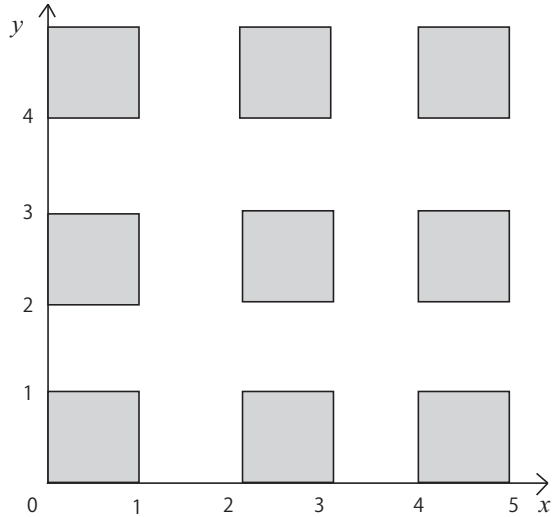


図 3: 平面上の危険領域 (灰色) の分布

危険領域は二種類あり 1) エネルギーの消費が大きくなる環境 (エネルギー的危険領域と呼ぶ)。2) 危険領域にいると確率的に内部エネルギーが突然 0 になり死亡する (確率的危険領域と呼ぶ)。実験では危険領域の履歴センサを動作させるものと無視するものの二種類のエージェントを使い、環境は 1) 危険領域のない環境、2) エネルギー的危険領域が点在する環境、3) 確率的危険領域が点在する環境、の三つで実験を行った。ただし、危険領域の無い環境では危険領域センサは意味をなさないため、表 1 に示すよう 5 通りの実験となる。オブジェクトセンサは餌と毒にそれぞれ 4 つ計 8 つのセンサで実験を行った。NN の規模は入力がオブジェクトセンサと領域センサで計 9-10 入力、出力は左右の車輪で 2 つ、中間層のニューロンは 8 つである。

エネルギー的危険領域は、実世界での危険領域は生存する

	危険領域の種類別	危険領域センサ	履歴センサ
1	なし	なし	なし
2	エネルギー的	あり	あり
3	エネルギー的	あり	なし
4	確率的	あり	あり
5	確率的	あり	なし

表 1: 危険領域とセンサの組み合わせ

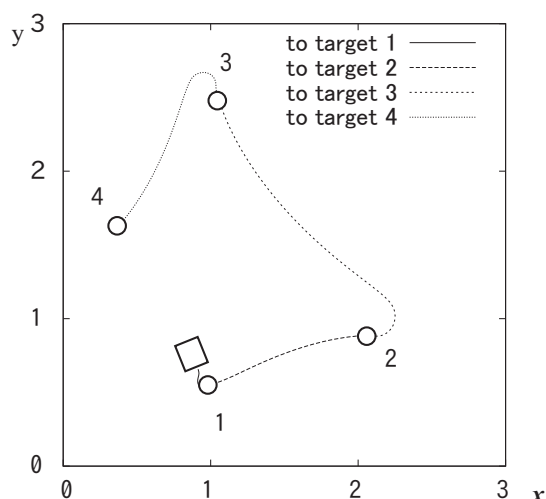


図 4: 危険領域がない環境においてエージェントが餌を獲得しながらとった軌跡例

のに過酷な部分が点在するような環境をモデル化したもので、確率的危険領域のある環境は、危険領域には天敵が活動して、確率的にエージェントが捕食されてしまうことをモデル化したものである。

3. 実験結果

図 4 は、危険領域が無い環境において進化した後の典型的なエージェントが餌を摂りながら動く軌跡を図示したものである。エージェントは初期位置 (四角) から餌 (丸印) を 1 から順番に摂りながら移動している。

図 5 は、危険領域がある環境で、エージェントが進化した後の典型的な行動を図示したもので、1,2 は危険領域履歴センサが無い場合、3 は危険領域履歴センサがある場合の軌跡を示す。エージェントは初期位置 (点線四角) にいた後、餌 (丸) に向かっていくが危険領域 (灰色四角) に入るとセンサが働き回避行動を示す。1 の位置にいるエージェントの場合、餌に向かい危険領域に入った後回避行動をとる。その後回避行動のおかげで危険領域から抜け出すと再び餌に向かって進み再び危険領域に入ること繰り返す、振動しその場から抜け出せなくなる。2 の位置からスタートしたエージェント場合は、何度か回避行動を繰り返した後、餌センサとの角度が大きくなりその結果餌を見失い餌から離れていく。3 は危険領域履歴センサがあるエージェントで、餌を捕捉した後危険領域から抜け出している。以上のような行動は確率的、エネルギー的両方の危険領域の環境に共通に見られる行動である。結果として、危険領域履歴センサがないエージェントでは危険領域上にある餌を摂る行動が発現する進化をしなかった。

それに対し、危険領域履歴センサがあるエージェントでは、あたかも危険領域がない環境で進化したかのように、危険領域に入っても回避行動をとらず餌に向かっていく行動をとるよう進化した。またこのときの行動の特徴として、危険領域に入っている間、通常の領域のスピードより 1.5 倍から 4 倍にスピードを速めている。つまり、危険領域に滞在している時間を短くするために危険領域センサは回避行動をとらず車輪のトルクを増すように進化したこととなる。

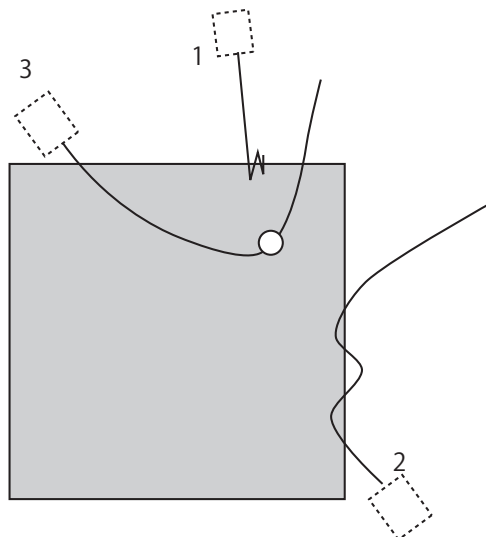


図 5: 危険領域を回避する行動の例

4. まとめと考察

仮想空間上に餌と毒を検出出来るエージェントを放つと、餌に向かい毒から逃避行動をとるエージェントが進化した。生存確率が低くなる危険領域がある環境においては、エージェント自身が危険領域にいるかの状態を直接に検出するセンサだけでは危険領域内の餌を得るための行動が選択される進化は起こらなかった。危険領域であるかの履歴をもった状態が検出できると、危険領域上の餌を取得する行動をよに進化することが確認された。

危険領域履歴センサが必要となる原因として考えられるのは、危険領域履歴センサがなく危険領域のみの場合、一旦危険領域に入った後の状態を区別することが出来なくなるため、危険領域にいる期間の情報が得られずに餌による利益の期待値が分からないため安全な行動すなわち危険領域からは常に回避行動を採ることとなる。それに対して、危険領域履歴センサがある場合には、危険領域にとどまっている時間の情報が間接的にも得られるため高い期待値、すなわち危険領域に入っても餌を採る行動を選択するものと思われる。さらに、危険領域におけるエージェントの速度が増加すれば、危険領域にいる時間を短くすることが出来るため、生存確率を上げ進化に有利に働いたものと考えられる。しかしながら、移動スピードを速めるためにはトルクを増す必要があり消費エネルギーが増えることになる。消費されるエネルギーの期待値より、餌を採ることによるエネルギー増大するの期待値の方が大きかったものと思われる。

さて、このようなセンサと行動との関連性は、実際の生物においてどのような役割を果たしているのであろうか。まず、危険領域の情報のみでは有効な行動が発現されず、危険領域の直接的な情報は必要とせず履歴のある情報が必要であった。つまり履歴情報は危険領域に対する概念とは異なったものであり、生物の内部状態としてとらえることが出来る。言い換えると、履歴情報は、危険領域を概念化したものよりさらに抽象化したものであるといえる。危険領域履歴センサを生物が感じている恐怖といった情動として考えてみる。危険領域は、エネルギー的、確率的危険領域のどちらでも、最終的にはエネルギーが 0 になり死亡する確率が高く、なおかつ、危険領域であることの直接的なセンサ情報は無視されているため、視力聴力といった

感覚器官は無視されていることとなる。また、領域内にいるという状態で死亡確率が高くなっていることから、生物の内部状態とみる事ができ、生物の内部状態の中でも、特に生命の危険性と密接に関わり原始的な仕組みであると思われる。したがって、危険領域履歴センサは通常概念をより抽象化した恐怖といった情動として対応して考えることができる。

消費エネルギーと餌のエネルギーとの関連性や危険領域の頻度や危険領域履歴センサについて、今後は定量的に行きたい。また、本稿では、履歴センサを天下りの的に与えたが、履歴センサの仕組みや機能の違いによる行動の変化、履歴センサのような働きが発達するメカニズムについても今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Harnad, Stevan: The symbol grounding problem. *Physica D*, 42, 335-346, 1990.
- [2] T. R. Gruber. A translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2):199-220, 1993.
- [3] Rodney Brooks, *Intelligence without Representation*, *Artificial Intelligence*, Vol.47, pp.139-159, 1991
- [4] Rolf Pfeifer, Christian Scheier *Understanding Intelligence*, MIT Press, 1999
- [5] George Lakoff, Mark Johnson: *Metaphors We Live by*, University of Chicago Press, 1986 (「レトリックと人生」, 大修館書店, 1986年)
- [6] Osamu Hanagata, *Metaphor and Embodiment in Robotics*, Proceedings of the 2009 International Workshop on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp. 384-387, 2009.
- [7] 花形 理, 身体性に基づく方向付け概念獲得の実験的考察, 人工知能学会全国大会 2010.
- [8] Osamu Hanagata, *Experimental Study of Acquisition of Orientational Concept Based on Embodiment of Virtual Agent*, Proceedings of the IEEE World Congress on Nature and Bio-inspired Computing (NaBic2010)
- [9] Hornby, G.S., Takamura, S., Yokono, J., Hanagata, O., Yamamoto, T. and Fujita, M.: Evolving Robust Gaits with AIBO. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 3040-3045. 2000.
- [10] Darrell Whitley, *A Genetic Algorithm Tutorial*, *Statistics and Computing* (4):65-85, 1994.