輪講資料 Luc Steels: Towards a Theory of Emergent Functionality,

From Animals to Animats (Proc. Simulation of Adaptive Behaviors '90), pp. 451–461

新情報処理開発機構 理論新機能研究部 情報統合研究室 金田 泰

※ 以下，このマークではじまる段落は，金田のコメントである．

要旨

この論文は創発的機能性 (emergent functionality) の理論へむけての最初の 1 歩である．この理論は創発的機能性とはなにかを階層的機能性 (hierarchical functionality) と対比することによってあきらかにすることをこころみる．このアプローチの原理的な利点を解析し，創発的機能性をもつシステムに共通の形式的構造を推測する．

※ この論文を輪講でとりあげた意図：“創発性” にもとづく方法は，将来，従来の部品を階層的にくみたててものをつくる工学的な方法に部分的にとってかわる方法に発展しうるとかんがえられる．この論文は疑問の点もおおく，創発性の理論にどれだけ寄与するかはわからないが，ひとつのかんがえかたとして参考になる．

※ “創発性” ということばは “機能性” と対立するようにもおもわれるし，“創発的” と (散層的をふくむ) “階層的” とはかならずしも対立しないとおもわれる．しかし，この論文では従来の機能的なシステム構成法と対立するものを創発的機能性とよんでいる．

1. Introduction

a. 創発的機能性とは，要素や階層的なシステムによって直接に達せられるのではなく，より基本的な要素どうしあるいはそれらと世界との相互作用によって間接的に達せられる機能のことを意味する．
※ “副作用” によって達せられる機能 (?) [なにを主作用とよぶかにもよる]

b. 創発的機能性は人工生命や自律的エージェント (Brooks, 1989) の研究におけるおもなテーマとなっている．

c. 工学者や科学者は創発的機能性をしめすシステムをつくるのに直観にたよってきたが，創発的機能性とはなにか，どうやって達せられるか，いつ，なぜそれをつかうのがよいかということに関するはっきりした理論はまだない．

d. この論文は創発的機能性の原理を理解する研究と，それがシステムを設計・構築するためにどのようにつかえるかについて報告する．

2. Hierarchical systems

2.1 Characterization of hierarchical systems

a. 階層的なシステムは要素のあつまりである．

b. 各要素にはつぎの 3 つの面がある． (1) 入出力，(2) その要素を on/off する制御要素，(3) 明確に決定された (well-determined) 機能性．

-. 要素ごとに独立なテストが可能である．要素は全体の機能の部分機能を実現する．
入力をうける専用の要素がある．出力用，動作用，他の要素の制御用の要素がある．

c. ことなる要素は 2 つの方法で相互作用する．(1) 要素間のデータのながれ (入出力関係)，(2) 他の要素を on/off する制御のながれ．

d. 各要素の機能はモジュラーにくみたてられる：全体の機能はことなる副機能に分割される． ...

2.2 Examples of hierarchical systems

Example 1: Building a tree

Lisp program Figure 1

Example 2: Following a wall

Figure 2

Example 3: Collecting rock samples

a. 問題の説明
- ・とおい惑星で岩のサンプルをあつめるシステムをつくることをかんがえる．
- ・岩のサンプルの場所はあらかじめわからなが，あるところにあつまっている．
- ・沸く正常を移動できるのりものがあり，あとで地球にもどる宇宙船にもどる．

b. 階層的アプローチ
- ・全体の機能が分解される: サンプルをあつめる，サンプルをひろう，サンプルをのりものにうごかす．
- ・各部分機能はさらにこまかい機能に分解される．...

2.3 Features of hierarchical systems

a. 階層的なシステムの利点

構造と機能のあいだに明確な関係があること — モジュラーであること．これは設計，診断，修理に有利．

b. 階層的なシステムの欠点

1. Fault tolerant でない．1 個の要素がこわれるだけで動作しなくなる．
   ※ 階層性 – 創発性の問題と関係ない? 階層的でも冗長度をもたせた設計をすれば fault-torelant になる．あとで fault-torelant でない創発的システムの例も登場する．
2. あらかじめの解析に依存すること．解析時とはすこしでもことなる初期条件や不測の環境のもとではうまく動作しない．
3. 環境との相互作用が特定の要素に委任されること．環境との相互作用がかぎられ，環境変化への追随がおそくなる．
   ※ 直接相互作用すれば事態はよくなるのか ?
4. あらかじめの解析や相互作用の委任によって，システムがおかれる環境条件の範疇が限定される．
   ※ 未知の環境には適応できない．
   例: 環境からの入力はある集合の要素 (範疇がきまったもの) として，理論的に，また実際に規定される．
5. ロバストさが欠けている — あらかじめの解析と多数のかくれた仮定に依存するため．ロバストさとは，一時的にバランスがくずれた状況でもシステムが機能しつづけること．

3. Emergent functionality

3.1 Characterization of emergent functionality

1. 要素ごとに環境と相互作用する．各要素は環境変化に動的に応答し，環境からのフィードバックをただちにうけとる．
2. 要素は (他の要素ではなく) 環境によって直接起動される．前提条件がみたされれば起動される．
3. 要素は特定の機能性をもつが，これは全体の可能の副機能として認識されるのではない．要素は，副作用が全体の機能に貢献するようなふるまいを実現する．[分子のたとえ]

   各ふるまいには副作用があり，その全体がのぞむ機能をはたす．
   ※ 副作用ということばは「階層的な機能からはずれたもの」という意味だから ,これは創発的機能性の定義そのもの!

3.2 Examples of emergent functionality

Example 1: Building a tree

a. 自然は階層的な機構によって木をつくっているわけではない．木の形はプログラムされているわけではなくて，細胞の成長や reaction-diffusion のような基本的な機構からきまる．

b. Steels (1990) は，このようなやりかたで計算的に木をつくる実験をしている．

   0. 木は細胞の (配) 列，細胞には 3 つのグループがある：幹細胞，左分枝細胞，右分枝細胞．
   1. 幹細胞は幹成長物質，左分枝成長物質，右分枝成長物質をもつ．[※ 左分枝細胞は左分枝成長物質，右分枝細胞は右分枝成長物質をもつ．]
   2. 成長物質があるしきい値をこえると新細胞がつくられる．新幹細胞は幹細胞の上 (N)，新左 (右) 分枝幹細胞は幹細胞の左 (右) [※ E, W?] または左 (右) 分枝幹細胞の左 (右) [※ NE, NW ?] にできる．
   3. 根からの養分は特定のレートで細胞間にひろがり，成長物質の増加は養分に依存する．
   4. 幹細胞，左分枝，右分枝の存在が成長物質の増加をおさえる [※ ?]．

   ※ あまりにたわいのない例! ほとんどプログラムされている．

c. このシステムは 3.1 でのべられた特徴をもっている．

d. このシステムのおもな特徴は創発的であること：

   1. 木や枝のおおきさは養分の量やその拡散レートに依存する．
   2. 左成長と右成長の相互作用によって木のかたちがきまる．...．左右の分枝をつくる要素 (サブルーティン) がよびだされるわけではない．

e. 階層的なアプローチとのおもなちがいは，あたらしい環境からの影響をとりこむことが容易にできることである．たとえば温度による成長の増加をとりいれることができる (Figure 5 — rule 4 なし)．
   ※ 創発性や，階層的な方法より環境の影響をとりこむのが容易だという主張は説得力を欠いている．

Figure 4

Figure 5

Example 2: Following a wall

a. 創発的機能性にもとづく壁つたいロボットが Brooks によって提案され，実現されている．

b. ロボットの各要素は sensors および effectors とつながれている．要素はつぎのような動作を実現している．

1. 歩行： 前方に障害物がなければ，多少まっすぐにすすむ．障害物があればとまる．障害物が存在しつづければ，後退する．
2. 回避： 前方に障害物があれば右または左にまがる．
3. 整合 (align)： 後方の障害物のほうが前方のよりみじかい距離にあるとき，わずかに方向をかえる．

c. これらの動作は同時におこりうる．Figure 6 は 4 回の走行結果をしめす (Mataric, 1990)．上記の 3 動作のくみあわせによって壁をトレースする動作が創発している．

d. この例ではデータのながれと制御のながれが環境をとおりぬける．歩行によって整合しなくなると整合の動作が起動される．歩行と整合とのあいだにはデータのながれも制御のながれもない．

Figure 6

Example 3: Collecting rock samples

a. 創発的機能性にもとづく岩あつめの解が Steels (1990) によって報告されている．1 個ではなく多数の独立に動作する単純なロボット (蟻) をつかう．

b. ロボットは単純な動作を実現するつぎのような要素でつくられている．

1. ランダムなうごき： 動作をきめる他の要素が起動されなければランダムにうごく．
2. 障害物回避： 障害物があれば停止し，それからとおざかる．
3. 方向の誘引： crumb がある方向にうごく．
3. crumb のあつかい： サンプルをはこんでいるなら，2 つの crumbs をおとす．サンプルをはこんでいないときに crumbs をみつけたら，1 個ひろう．
4. サンプルの収集： サンプルをみつけたら，それをひろう．
5. 動作： のりものにいてサンプルをはこんでいれば，それをおとしてのりものを去る．探索領域の境界にしれば，反対を向く．

c. これらの要素の基本的な特徴は，直接環境と相互作用すること，データのながれも制御も環境をとおして

いること，要素の機能が全体の機能と直接の関係をもたないこと．

Figure 7

d. Figure 7 a: ひとつめのロボットがサンプルをみつけた．
b: 道が形成される．ふたつめのロボットがサンプルをみつけ，ひとつめがのりものにもどる．
c: crumbs はロボットにひろわれて，道がきえてまう．
d: ふたたび道ができる．ロボットはもっとも協調的に動作している．
e, f: ロボットはまたばらばらになる．

e. ここで創発的なのは，効率的な道をつくるためにロボットが協調していること．この協調は，「構造」(crumbs でみたされた領域) をつくることによって達成されている．あつめるサンプルがなくなるとこの構造がこわされることが重要な特性．

各例の相違点

a. 壁つたいではすべての要素はことなるが，石あつめでは同一の要素があつまっている．したがって，壁つたいロボットは fault-torelant でない．

b. 壁つたいロボットは環境のパラメタに直接に作用するが，他の 2 例においては補助的な構造 (成長物質や crumbs の領域) をとおして間接に作用する．

c. 構造は Prigogine がいう自己組織化をつうじて形成される．
※ Prigogine は非線形非平衡熱力学の業績 (Belousov-Zhabotinsky 反応のような自己組織的な化学反応などに関する理論) でノーベル賞をもらった．Steels と Prigogine はおなじ大学 (ブリュッセル自由大学) に所属している．

各例の共通点
環境との直接の相互作用，環境をつうじての制御，全体の機能と間接的にしか関係しない要素機能．

3.3 Features of systems with emergent functionality

1. 顕著なロバスト性がある．たとえば 壁つたいロボットは壁との距離をかえられてもそれを回復できる [※ 従来のプラニングでは摂動によわい]．蟻は形成された道をけしてしまうが，それはふたたび形成される．木の一部をけしても，また形成される (Figure 8)．

Figure 8

2. つよい状況依存性がある．これは，各要素が直接に環境と相互作用するからである．状況依存性の利点のひとつは，環境変化に直接すばやく反応すること．

3. 状況依存性はあたらしい種類のモジュラリティをもたらす．従来のモジュラリティはないので設計製造がむずかしいが，あたらしい環境依存性を追加するのがはるかに容易 (= あたらしいモジュラリティ)．

4. 環境とのあいだに媒介する要素がない．階層的なシステムにおいては環境からの入力をあつかう要素が状況をあらかじめきまった範疇のなかに分類する [※ 勝手に解釈する] が，創発的機能性においてはこのような必要がすくない．

5. Fault-torelance がある; 多数の [※ 冗長な] 要素の集合的なふるまいによっているから．

[※ Introduction における「いつ，なぜそれをつかうのがよいか」という問いへのこたえとして]
環境依存性がつよく，どのような状況でつかわれるかを予測しにくいときは，創発的機能性をつかうのがよい．

4. Formal structure

おおくの自然システムは，創発的機能性をしめす階層的な要素やサブシステムののくみあわせである．したがって，階層的機能性と創発的機能性の利点がくみあわされている．

創発的機能性をもつシステムの形式的な構造を推測する．それは 3 つの特性をもつ:

1. 動力学系である [※ として表現できる]．
   a. 動力学系 (dynamical system, 力学系) とは，時間とともに変化する変数によって記述されるシステムである．壁つたいロボットなら，インスタンス秩序度と壁からの距離が変数; ...．
   b. 変数は 3 種類： (1) システムによって制御される変数，たとえば... (2) システムが決定をおこなう際に直接または間接に参照される変数，たとえば... (3) 観測者だけにかかわる変数．たとえば...．要素の内部状態や環境の特性を参照する変数もある．
   c. 変数を X_i とすると，動力学系は $\mathrm{d}X_i/\mathrm{d}t = f(X_1, \ldots, X_n, t)$ とあらわされる．
      ※ 微分方程式であらわされるとはかぎらない．差分方程式，...
   d. 壁つたいロボットを単純化すると，3 つの変数がある: ロボットの位置 p, 壁への距離 d, 最近接壁の位置 w．p だけがロボットによって制御される．
      方程式はおよそつぎのかたち： $\mathrm{d}p(t)/\mathrm{d}t = f(a(d(t)), r(d(t)), p(t))$ (a: 壁への誘引，r: 壁からの反発)．
      ※ このように形式的にあつかったとたんに，環境からの入力の範疇は限定されてしまう．したがって，限定的でない入力は処理できないか，またはこのような理論ではあつかえない．
2. 創発的特性は変数ののぞまれる発展である [※ として表現できる]．
   a. この変数はつぎのような特性をもつ： (1) システムによって制御されない，(2) その発展は漸近安定である，(3) システムの機能の重要な部分である (?)．
   b. 漸近安定性について： Figure 9 — 摂動に対して安定．安定点に収束．ロバスト性にかかわる．

Figure 9

3. 創発的特性の発展を記述する関数は分解できる．
   a. f_i はすくなくとも 2 つの要素に分解できる．
   b. 2 つのばあい，正の要素と負の要素とよぶ．両者は変数の発展を反対方向にひっぱる (たとえば a と r — 3 つの例すべてにみられる)．
   c. 要素関数は正 (負) 帰還にかかわる性質をもつ:
      壁にちかづけばつよく反発する — 負帰還，蟻の道は強化される — 正帰還．

これらの仮説からいえる創発的機能性をもつシステムの同定・設計のガイドライン:

1. システムのおもな変数が同定される必要がある．それらの一部は直接制御され，他の一部は決定につかわれ，のこりは観測者からだけみえる．
2. 変数間の動的な依存がきめられる必要がある．制御変数のふるまいをきめる方程式がシステムの仕様をなす．
3. のぞまれる創発的特性は漸近安定な，制御されない変数によってしめされる．

4. 直接・間接に創発的特性をきめる制御変数が，発展を限界値にひっぱる 2 個以上の要素に分解される．

5. Conclusions

この論文は創発的機能性の理論の発展への最初のステップである．この理論は創発的機能性を階層的機能性からくべつし，どのような条件がなりたつときに創発的機能性をつかうのが適当であるかを理解することをめざす．それはまた，創発的機能性をもつシステムの基本的な構造を推測する．

※ この論文では，例としてパタン的 (条件をみたすパタンを生成する) な問題ばかりがとりあげられている (ALife でとりあげられる問題の大半はそうである)．記号的な問題でもおなじ特性がみいだされるなら，より普遍的な理論になるだろう．