

なめらかなシステムを目指して

栗林 健太郎^{1,a)} 三宅 悠介^{1,b)} 松本 亮介^{1,c)}

概要：情報システムが人間に対して有用なものであるためには、工学的な効率性に依拠するのみならず、(1) 利用者の主観的な判断基準や選好等の利用者それぞれに固有のコンテキストを、システムの作動に際して織り込む必要がある。また、(2) そのような利用者のコンテキストはシステム利用に先立って明確に定まっているとは限らず、むしろ利用者と情報システムとのコミュニケーションを通じて徐々に形成されていくという前提で、システムを構想する必要がある。ユビキタスコンピューティングを背景に登場したコンテキスト・アウェアネスは(1)を課題とする。基礎情報学は、(2)に対して、利用者と情報システムとが互いに影響を及ぼし合う総体として複合的にシステムを捉える視点を提供する。本論文では、生命体のしくみに倣いシステムを構想してきたこれまでの工学的伝統を引き継ぎつつ、先行研究の知見を踏まえることでこれら2つの課題を同時に解決することが可能なシステム観を、「なめらかなシステム」という新たなシステム観として提案する。また、当該システム観に基づいて我々が取り組んでいる、実際の研究についても紹介する。

Toward The Coherently Fittable System

Kentaro Kuribayashi^{1,a)} Yusuke Miyake^{1,b)} Ryosuke Matsumoto^{1,c)}

1. はじめに

複雑で激しく変化する環境に対して自律的に適応する情報システムを構築することは、人類にとって積年の課題である。また、そのようなシステムの構想に際しては、しばしば生命体のしくみが参照されてきた。第二次世界大戦後、数学者・工学者・神経生物学者らのネットワークから発したサイバネティクスは、上述したような工学的伝統の典型である [1]。ギリシャ語で「船の舵を取る者」を意味するサイバネティクスという言葉が、動物と機械とに共通するしくみを表す言葉として中興した [2] ノーバート・ウィナーは、サイバネティクスが工学的なシステムの構想に対してもたらすであろう展望について、以下のように述べている [3], p.15.

ある装置が、過去の経験によって、特定の構造なり機能をもつようにくふうできるということか

ら、工学においても生物学においても非常に興味深い新しい態度が生じてくる。工学においては、このようなくふうによって、ゲームを行ったり、特定の目的を追求して行動する装置がつけられるばかりでなく、過去の経験によりその動作をたえず改善してゆくようにすることも考えられる。(中略) 生物学的には、たぶん生命現象の中心であると見られるものと、少なくとも類似なものを見出すことができる。

また、画像からの教師なし学習による一般物体認識を実現した Google の研究 [4] や、数々のコンペティションで圧倒的な成績をあげてきたチームの登場 [5] が話題となった 2012 年以降、現在にいたるまで、脳のしくみに倣ったニューラルネットを活用した深層学習による研究が盛んである。そこにもまた、視覚と脳のしくみをモデル化したパーセプトロン [6] 以来の、生命体のしくみを参照しつつ自律的に適応する情報システムを構想する歴史が息づいていると、我々は考える。

ところで、情報システムが、人間が介在することなく環境に対して自律的に適応できたとしても、そのシステムか

¹ GMO ペパボ株式会社 ペパボ研究所
Pepabo Research and Development Institute, GMO Pepabo, Inc., Tenjin, Chuo ku, Fukuoka 810-0001 Japan

a) antipop@pepabo.com

b) miyakey@pepabo.com

c) matsumotory@pepabo.com

ら利便を得るべき人間にとって有用でなければ、そうしたシステムは目的を果たすものであるとはいえない。近年盛んに研究が行われている自動運転が実用化されれば、機械のみからなる情報システムによる究極の自動化が実現するかに思える。すなわち、システム利用者の主観的な判断基準など入りようのない、むしろ、だからこそ完全なシステムが成立し得るのではないかという展望である。しかし、完全な自動運転によっても人間の偶発的な行動による事故は避けられない以上、左右どちらにハンドルを切っても加害を避けられない場面において、どちらを選択することがより少ない被害を結果するかという「究極の選択」はなお課題であり続ける [7], [8]。この課題については、2.1.1 項において、コンテキスト・アウェアネスを検討する中で考察する。

さらには、情報システムが有用性を提供するべき対象である利用者は、何が自分にとって有用であるかという選好をシステムの利用に先立って自覚しているとは限らない。たとえば、一般消費者向けの EC サービスの場合、特定の商品を購入する目的達成に対して明確な行動を取る利用者もいるが、ザッピング的な閲覧行動の過程において偶発的に出会った商品の購入に至った結果、事後的に自らの選好を自覚することもある。そのようなシステム利用者観は、典型的には、オンライン上で人々が商品の認知から購買にいたる過程をモデル化した AISAS[9], [10] のような、オンライン広告において探求が続けられている課題である。この課題については、2.2 項において、基礎情報学を検討する中で考察する。

そもそも情報システムとは、人間に対して何かしらの有用性を提供することを目的に構築されるものであることは言を俟たない。とすれば、情報システムの構想に際しては、その構成を生命体のしくみに倣う伝統からさらに踏み込んで、システム利用者の主観的な判断基準や選好等の、利用者それぞれに固有のコンテキスト^{*1}を織り込む必要がある。また、そのような利用者のコンテキストはシステムの利用に先立って明確になっているとは限らないという前提に立ち、むしろ利用者システムとのコミュニケーションの過程においてコンテキストが形成されていくものとして、利用者システムとの関係を把握する必要がある。以上から、既存のシステム観を以下の2点の要求を満たすべくアップデートする必要があると我々は考える。^{*2}

- 要求 (1) : 機械からなる情報システムのみではなく、利用者の主観的な判断基準や選好等の利用者それぞれに固有のコンテキストをも織り込んだ、利用者情報システムとからなる総体としてのシステムを考える

^{*1} 正確には、システム利用者の主観のみがコンテキストを構成するのではない。詳細な定義については2.1.1 項で見る。

^{*2} 本要求を、以下では「1 章で述べた2つの要求」、あるいは端的に「要求 (1)」「要求 (2)」「要求 (1) および (2)」と表記して参照する。

こと。

- 要求 (2) : 利用者^{*3}それぞれに固有のコンテキストは必ずしも事前に明確ではなく、情報システムとのコミュニケーションを通じて事後的に形成されるという前提を置くこと。

そこで我々は、生命体のしくみに倣いシステムを構想してきたこれまでの工学的伝統を引き継ぎつつ、上記の要求を満たすようなシステム観について探求していきたい。そのことで、環境に対して自律的に適応できるシステムを実現するに際して、システムの利用者それぞれに固有のコンテキストに寄り添い、また、それらのコンテキストを都度々々において形成していく、情報システムのみならずその利用者も含んだ総体としてのシステムを構想することができるようになるのである。

本論文の構成を述べる。2 章では、これまでのシステム観について例をあげて検討し、我々のシステム観へのヒントを抽出する。3 章では、提案するシステム観について、2 章で検討したシステム観との比較の上で、概括する。4 章では、提案するシステム観に基づくシステム構築のために、我々が実際に取り組んでいる研究について紹介する。最後に、5 章でまとめと今後の展望を述べて結びとする。

2. 先行研究の検討

本章では、先行研究におけるシステム観を検討することで、生命体のしくみを参照して新たなシステムを構想する工学的伝統に則りつつ、1 章で述べた2つの要求を満たすシステム観について考察するヒントとする。その際、本論文の論旨からして、検討する先行研究を網羅的に調査することが目的ではなく、要求 (1) および (2) を満足する知見を得られれば十分である。そのため本節では、これから見ていく通り、その意味で必要十分な知見を提供するコンテキスト・アウェアネスおよび基礎情報学についてのみ検討する。

2.1 コンテキスト・アウェアネス

2.1.1 概要

コンテキスト・アウェアネスは、ユビキタスコンピューティング [11] やモバイルコンピューティングの登場を背景に現れたコンセプトであり、1994 年に初めて提唱されたシステム観である [12]。現在のスマートフォンの普及は、単にモバイルコンピューティング機器が広く行き渡ったということにとどまらず、ユビキタスコンピューティングの実

^{*3} 利用者という用語は情報システムのいわゆる「ユーザー」が想定されるが、我々は開発運用者についてもまた、当該情報システムの利用者の範疇にある存在とみなしている。なぜなら、情報システムを開発運用する当の本人たちにすら、自分たちがその情報システムによっていかなる目的を達成したいかは必ずしも前もって自明ではないからであり、その意味では、開発運用者はユーザーに対して特権的な位置づけにあるわけではない。

現に近づいているように思われる。また、IoT の発展がその真の実現を担うと期待される [13]。

コンテキストおよびコンテキスト・アウェアネスについて、広く採用されている定義は以下の通りである [14]。

コンテキストの定義：

Context is any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between a user and an application, including the user and applications themselves.

コンテキスト・アウェアネスの定義：

A system is context-aware if it uses context to provide relevant information and/or services to the user, where relevancy depends on the user's task.

たとえば、利用者の位置情報というコンテキストに基づいてモバイルアプリ内に表示する広告の内容を変更するといったことは、いまでは当たり前に行われている。また、行動ログからのプロファイリングに基づき、より複雑なコンテキストを抽出し、特定のユーザ向けに特化したサービスを提供するパーソナライゼーションもまた、コンテキスト・アウェアネスの一例と考えることができる。

また、コンテキスト・アウェアなアプリケーションが持つ特徴として、[13] は以下の 3 つを挙げる*4。

- (1) 利用者に対する適切な情報やサービス提供のため、コンテキストを用いること。
- (2) その際、自動的にサービス提供が行われること。
- (3) センサーデータがいかなるコンテキストに属するかを決定するために、コンテキストに対してタグ付け・注釈が行われること。

2.1.2 評価

1 章で述べた 2 つの要求を満たすシステム観を構想する上で、コンテキスト・アウェアネスは大いに参考になる考え方である。そのシステム観の構想において必ずしも明示的に生命体のしぐみを参照しているわけではないにせよ、すべての生命体が何らかの外的コンテキストに適応しながら生きていくことは明らかであり、その意味において、コンテキスト・アウェアネスもまた、本論文の述べる工学的な伝統を共有すると見てよい。

前述の「コンテキスト・アウェアなアプリケーションが持つ特徴」に見た通り、コンテキスト・アウェアネスにおいては、まさに要求 (1) の述べる事態を想定することで、システムがその利用者にとって適切な有用性を提供することが特徴づけられている。一方で、要求 (2) を満たすにはもう一歩踏み込んでシステムを構想する必要がある。す

*4 翻訳文による引用ではなく、文意を損ねない程度に表現を変更している。

なわち、システムの利用者それぞれに固有のコンテキストが存在するだけでなく、そもそもシステムへの利用者の要求事項そのものが、利用者自らにとってすら不明確であるという状況もあり得るからである。そのため、コンテキストに沿った情報やサービスを提供するだけでは不十分であり、利用者の要求そのものの形成に影響を及ぼすシステムを構想する必要がある。

2.2 基礎情報学

2.2.1 概要

基礎情報学 [15], [16] は、西垣通を中心に構築されてきた新たな学問領域である。情報工学、応用情報科学、社会情報学をまたぎ、学際的な情報学の基礎づけを目的とするその議論の射程は、非常に広範にわたる [17]。そのため本項では、基礎情報学を情報システムの構想に応用することを試みるドミニク・チェンの論考 [18] を導き、我々のシステムの構想に即して基礎情報学について検討する。

基礎情報学は、ウンベルト・マトゥラーナとフランシスコ・ヴァレラとによって提唱されたオートポイエーシス理論を批判的に継承し、「階層的自律コミュニケーション・システム」(以下、HACS: Hierarchical Autonomous Communication System) と呼ばれるシステム観を提唱する。それは、オートポイエーシスと比較して、以下の特徴を持っているとされる [16], [18]。

- 特徴 (1): 単独のシステムではなく、システムの観察と既述を行う人間と構造的カップリング*5した複合システムであること。
- 特徴 (2): 階層性をもつこと。そのため、あるシステムは同階層から見れば自律的にふるまうように見えるが、上位の階層から見れば他律的であるように見える。
- 特徴 (3): 構造的カップリングされたシステム同士のコミュニケーションの継続発生によって、システムの安定的な維持が示されること。逆に見れば、コミュニケーションが途絶えた時、そのシステムが維持されているとはみなされない。

図 1 は、特徴 (1) を図示したものである。人間とシステムとが構造的カップリングした総体としての複合システムを示している。この図を発展させて、情報システムをその利用者からなるコミュニティと開発プロセスとを含む総体としての複合システムとして図示したのが図 2 である。特徴 (2) の階層性を織り込み、特徴 (3) におけるコミュニケーションの継続発生によるシステムの維持が行われている状態を示している*6。

*5 「2 つの APS (HACS) 同士がその作動において強く結びつき、相互作用することである」[16]、「異なるシステム同士が構造のレベルで接続し、互いの構造の算出を助け合う関係を結ぶ」こと [18] などと定義されるが、ここではさしあたり「情報システムとその利用者が、互いに影響を及ぼし合う継続的な関係にあること」と理解しておく。

*6 このような図表による説明は、フォーマルな定式化とは異なり、

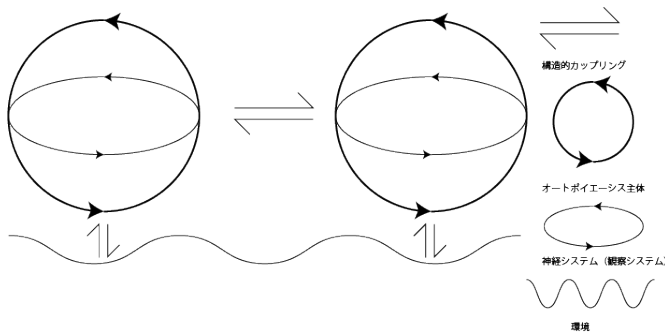


図 1 自律システムの基本構造 (出所: [18], p.15)

Fig. 1 A basic structure of autonomous systems.

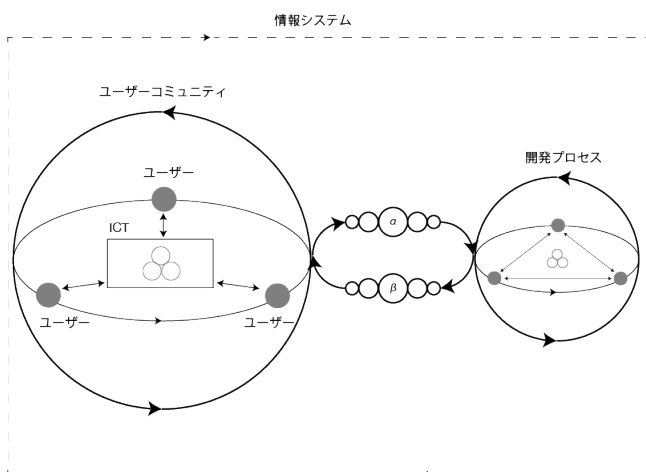


図 2 情報システムの概要 (出所: [18], p.32)

Fig. 2 An illustration of information system.

2.2.2 評価

1で述べた2つの要求を満たすシステム観を構想する上で、基礎情報学は大きな進展をもたらしてくれるものであると考える。一方で、図2においてICT(ここでは、情報通信技術のみからなる狭義の情報システムを指す)があくまでも利用者のコミュニケーションを媒介するものに留まっていることに限界を見ざるを得ない。

西垣は、情報システムは、自律的な生命システムに反して、あらかじめプログラムされた予測可能な、他律的なものに過ぎないと繰り返す[16], [17], [19]。しかし、本当にそうだろうか?西垣は、鳩が「人物」という概念を学習することができることを示したりチャード・ヘルンスタインの研究[20]を引きつつ、こう述べる[16]。

ハトは「人物とは何か」を学んだのだ。これは概念学習であるとヘルンスタインは述べている。

ここには、HACSである生物の特徴があらわれている。コンピュータに代表される他律システム(機械)にこの種のパターン認識をさせることが

概念を一意に表現することには不向きではあるものの、本論文が取り扱う「システム観」のように、ある程度は解釈の幅を残しておく必要のある議論を行うに際しては、発散させつつも一定の枠を設けるといった観点で、適切な方法であると考えられる。

きわめて困難であることは、よく知られている。(中略)概念とは生命活動と関わっており、外部から与えられるのではなく、むしろ内発的な存在であるということ、ここで銘記しなくてはならない。

ここで「困難」とされる概念の獲得は、深層学習により情報システムにおいても既に達成されている[4]。そのことは、情報システムは単に他律的な存在であるにとどまらず、新たな概念を認識可能な存在として見るべきものとして考える必要をもたらす。すなわち人間と情報システムとのコミュニケーションの過程において、前節でみた「コンテキスト」を創出し得るということではないか。そのため我々の「なめらかなシステム」は、ICTがあくまでも媒介に過ぎない位置づけにある図2を改訂し、人間と情報システムとが互いに継続的な影響を及ぼし合う複合システムとして、システムを捉える。

3. なめらかなシステム

2章ではコンテキスト・アウェアネスおよび基礎情報学について検討し、1章で述べた2つの要求を満たすシステム観を見出すという観点から、それぞれについて評価を行った。生命体のしくみに倣いシステムを構想してきた工学的伝統に則りつつ、要求(1)および(2)をともに満たす我々のシステム観を「なめらかなシステム」*7と名付け、前章における検討・評価をまとめ、以下のように定義する。

なめらかなシステムとは、情報システムのことをいうのみならず、互いに影響を及ぼし合う継続的な関係にある利用者(ユーザーおよび開発運用者)と情報システムとからなる総体としてのシステムであり、以下の要件を満たす。

- 要件(1): 利用者情報システムとが継続的な関係を取り持つ過程において、利用者それぞれに固有のコンテキストを見出したり、新たなコンテキストを創出したりできること。
- 要件(2): 要件(1)を、利用者による明示的な操作を課すことなく実現できること。
- 要件(3): 要件(1)および(2)によって得られたコンテキストに基づき、情報システムが利用者に対して最適なサービスを自動的に提供できること。

図3は、2.2節で参照したドミニク・チェンによる情報

*7 「なめらかなシステム」というフレーズは、鈴木健氏による著書のタイトル『なめらかな社会とその敵』[22]に由来する。この「なめらかな」という形容詞は、インターネットサービス業界関係者によって、[23]や[24]に見られる通り、情報システムによって障壁が取り払われた世界を示す語として用いられている。「この説明にメタファー以上のものを求めてはならない」[22], p.41という警告を受け止めた上で、インターネットサービス業界において「なめらか」というアジェンダを設定したことの功績に鑑み、我々もまた「メタファー」としての「なめらか」を採用する。

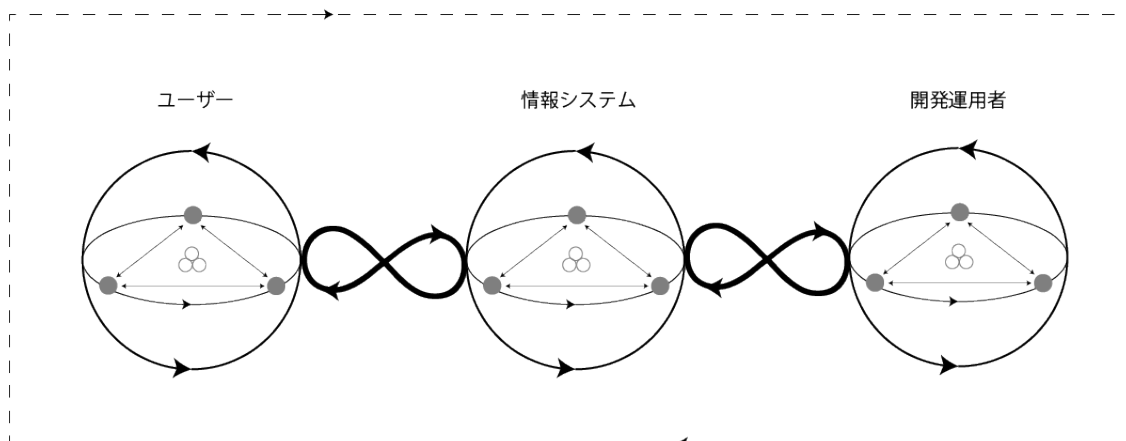


図 3 なめらかなシステムの概要 ([21] を改変して作成)

Fig. 3 An illustration of coherently fittable system.

システムの図表を改変して、なめらかなシステムを図表として示したものである。図 2 とは異なり、情報システムが単なる媒介であるにとどまらず、ユーザーと開発運用者の双方と、互いに影響を及ぼし合う継続的な関係にある独立したシステムであることを示しており、それらの総体からなる複合システムが「なめらかなシステム」であることを示している。

なめらかなシステムにおいては、利用者と情報システムとが継続的な関係を取り持つ過程で、必ずしも利用者にとって事前に明確であるとは限らない選好が、徐々に明らかになっていく (要件 (1))。その際、コンテキスト・ウェアネスや深層学習等の本論文で参照している先行研究の手法を取り入れ、利用者による明示的な操作を課すことなく新たなコンテキストを創出することで、利用者は労苦なく情報システムとの関係を継続できる (要件 (2))。そして、固有のコンテキストに即して情報システムが最適なサービスを自動的に提供することで、結果として利用者にとって高い有用性を得られることを期待できる。

4. 研究の具体例

本章では、本論文で提案する「なめらかなシステム」というシステム観に基づいて筆者らが実際に行っている研究を紹介することで、読者がなめらかなシステムについてより具体的なイメージを描けるよう便宜を図る。

4.1 なめらかなマッチング

筆者らの勤務する GMO ペパボ株式会社では、minne[25] という、ハンドメイド・手作り・クラフト作品のマーケットを提供する C2C プラットフォームを運営している。必ずしもプロの手になるものではないとはいえ、高いクオリティの一点ものを購入できる場所として評価を得ている。一方で、一点ものの商品が多いということにはデメリット

もある。すなわち、既製品の EC サイトと比較して、利用者と情報システムとで商品についての概念を共有するのが難しいということである。そのため、EC サイトにおいて通常提供されているキーワード検索だけでは、利用者のコンテキストを見極めることが難しい。

そこで筆者らは、類似画像による関連商品検索システムを研究している [26]。情報システムの利用者に対して情報推薦を行うにはなんらかのコンテキストを見出す必要がある。たとえば、ユーザーベースの協調フィルタリングは、あるユーザの行動に基づき、別のユーザと類似したコンテキストを持つと仮定する方式である。それに対して我々の方式は、作品画像という、よりユーザの抱く概念に近いと想定されるデータソースを用いて、ユーザの持つコンテキストを深めることを目的としている。

さらには、ユーザーが単に商品を閲覧しているだけなのか、あるいは、何か目的を持って商品を探しているのか等の、要求段階を精緻に見極めることで、より購買つながり得るコンテキストの創出を行えるシステムを作り出すことが今後の課題である。

4.2 Web ホスティング

筆者らの勤務する GMO ペパボ株式会社では、ロリポップ! [27] という、高集積マルチテナントアーキテクチャ [28] を採用した Web ホスティングサービスを提供している。コストダウンのため数万にもおよぶ数の仮想ホストによって物理サーバーを共用しつつ、ユーザーが独自アプリケーションを設置できる等の高い自由度を提供しているため、いつ、いかなる原因でサーバーの負荷が増大するかを予測することは困難である。一方で、ユーザーのリソース利用に対して大幅な制限を行うとサーバーの負荷は収まるが、サービス品質を低下させてしまう。

そこで我々は、リクエスト単位で仮想的にハードウェア

リソースを分離する Web サーバのリソース制御アーキテクチャを研究している [29]. これまでの仮想ホスト単位でのリソース利用の制御を行っていた方式ではなく, リクエスト単位でリソース制御を行える方式を導入したことは, 本論文の文脈においては, 情報システムとしての Web サーバとそれに対するリクエストを行う利用者としてのユーザーのコンテキストを精緻に捉えることで, より高い利便性をもたらすということであるといえる.

5. おわりに

本論文では, 生命体のしくみに倣いシステムを構想してきたこれまでの工学的伝統を引き継ぎつつ, 1章で述べた2つの要求を満たすシステム観を, コンテキスト・アウェアネスおよび基礎情報学の知見を検討しつつ, 模索してきた. その結果として, 「なめらかなシステム」というシステム観に行き着いた. また, 当該システム観に基づく, 実際の具体的な研究についても, 簡単に紹介した. 我々は, 引き続きなめらかなシステムの実現を目指して, 研究開発を続けていくつもりである.

ところで, 今後, AI や IoT がさらに飛躍的に発展し, 情報システムが新たな概念を膨大に学習していくことが見込まれる. それらの多くは, 人間にとってただちに理解可能なものではないだろう. なぜなら, そこにはシンボル・グラウンディング問題 [30] が存在するからである. しかし, 1章で述べた通り, 自動運転のようなシステムであっても, 人間の主観的な判断基準を織り込むことなしに工学的効率化のみを追求することは, 社会的に許されない. すなわち, 人間には意味不明に聞こえる機械たちのごわめきを, 我々は了解可能な言葉として聞き取らなければならないのである.

そうであれば, 機械からなる諸システムを開発運用していく我々は, それらとの間に継続的な関係を取り持ち続け, 根気強くコミュニケーションを交わし, シンボル・グラウンディング問題を解決していかなければならないだろう. そのためにも, 本論文の「なめらかなシステム」というシステム観は必須のものとなるだろうと, 我々は考えている. すなわち, 我々自身がシステムの内部観測者となるような, そんなシステム観に基づいて開発運用を行っていくということである.

参考文献

- [1] Steve J Heims. *The cybernetics group*. MIT Press, 1991. (忠平美幸 (訳). サイバネティクス学者たち—アメリカ戦後科学の出発. 朝日新聞出版. 2000) .
- [2] Dmitry A Novikov. CYBERNETICS 2.0. *Advances in Systems Science and Applications*, Vol. 16, No. 1, pp. 1–18, 2016.
- [3] Norbert Wiener. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Vol. 25. MIT press, 1961. (池原止戈夫, 彌永昌吉, 室賀三郎, 戸田巖 (訳). サイバネティクス—動物と機械における制御と通信. 岩波書店. 2011) .
- [4] Quoc V Le. Building high-level features using large scale unsupervised learning. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 8595–8598. IEEE, 2013.
- [5] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, and Geoffrey E Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems*, pp. 1097–1105, 2012.
- [6] Frank Rosenblatt. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological review*, Vol. 65, No. 6, p. 386, 1958.
- [7] MIT Media Lab. Moral Machine. 入手先 (<http://moralmachine.mit.edu/>) (参照 2018-05-06) .
- [8] Ritesh Noothigattu, Snehal Kumar Neil's Gaikwad, Edmond Awad, Sohan Dsouza, Iyad Rahwan, Pradeep Ravikumar, and Ariel D Procaccia. A voting-based system for ethical decision making. *arXiv preprint arXiv:1709.06692*, 2017.
- [9] Kotaro Sugiyama and Tim Andree. *The Dentsu Way: Secrets of Cross Switch Marketing from the World's Most Innovative Advertising Agency*. McGraw Hill Professional, 2010.
- [10] 近藤史人. Aisas マーケティング・プロセスのモデル化. *JSD 学会誌システムダイナミクス*, No. 8, pp. 95–102, 2009.
- [11] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 3, No. 3, pp. 3–11, 1999.
- [12] Bill N Schilit and Marvin M Theimer. Disseminating active map information to mobile hosts. *IEEE network*, Vol. 8, No. 5, pp. 22–32, 1994.
- [13] Charith Perera, Arkady Zaslavsky, Peter Christen, and Dimitrios Georgakopoulos. Context aware computing for the internet of things: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, Vol. 16, No. 1, pp. 414–454, 2014.
- [14] Gregory D Abowd, Anind K Dey, Peter J Brown, Nigel Davies, Mark Smith, and Pete Steggle. Towards a better understanding of context and context-awareness. In *International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, pp. 304–307. Springer, 1999.
- [15] 西垣通. 基礎情報学: 生命から社会へ. NTT 出版, 2004.
- [16] 西垣通. 統基礎情報学: 「生命的組織」のために. NTT 出版, 2008.
- [17] 西垣通. 基礎情報学の射程: 知的革命としてのネオ・サイバネティクス. 情報学研究. 学環. 東京大学大学院情報学環紀要, Vol. 83, pp. 1–30, 2012.
- [18] ドミニク・チェン. 基礎情報学の情報システムデザインへの応用に向けた試論. 基礎情報学のヴァイアビリティ—ネオ・サイバネティクスによる開放系と閉鎖系の架橋, pp. 9–38, 2014.
- [19] 西垣通. 暫定的閉鎖系についての一考察. 基礎情報学のヴァイアビリティ—ネオ・サイバネティクスによる開放系と閉鎖系の架橋, pp. 205–227, 2014.
- [20] Richard J Herrnstein and Donald H Loveland. Complex visual concept in the pigeon. *Science*, Vol. 146, No. 3643, pp. 549–551, 1964.
- [21] ドミニク・チェン. Graphics for Fundamental Informatics. 入手先 (<https://github.com/dominickchen/fundamentalinformatics>) (参照 2018-05-09) .
- [22] 鈴木健. なめらかな社会とその敵: PICSY・分人民主義・構成的社会契約論. 勁草書房, 2013.
- [23] 家入一真. なめらかなお金がめぐる社会.—あるいは、なぜあなたは小さな経済圏で生きるべきなのか、—というこ

- と。ディスクカバー・トゥエンティワン, 2017.
- [24] 名村卓, 曾川景介. 「よりよい社会をつくる」に挑戦できる環境は整い始めている | メルカリ CTO ×メルペイ取締役対談. 入手先 <http://mercan.mercari.com/entry/2018/03/16/113000> (参照 2018-05-07) .
 - [25] GMO ペパボ株式会社. minne — ハンドメイド・手作り・クラフト作品のマーケット. 入手先 <https://minne.com/> (参照 2018-05-09) .
 - [26] 三宅悠介, 松本亮介, 力武健次, 栗林健太郎. 特徴抽出器の学習と購買履歴を必要としない類似画像による関連商品検索システム. 研究報告インターネットと運用技術 (IOT) , Vol. 2017-IOT-37, No. 4, pp. 1-8, 2017.
 - [27] GMO ペパボ株式会社. ロリポップ! レンタルサーバー. 入手先 <https://lolipop.jp/> (参照 2018-05-09) .
 - [28] 松本亮介, 栗林健太郎, 岡部寿男. Web サーバの高集積マルチテナントアーキテクチャと運用技術. 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J101-B, No. 1, pp. 16-30, January 2018.
 - [29] 松本亮介, 栗林健太郎, 岡部寿男. リクエスト単位で仮想的にハードウェアリソースを分離する web サーバのリソース制御アーキテクチャ. 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 3, pp. 1016-1025, mar 2018.
 - [30] Stevan Harnad. The Symbol Grounding Problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 42, No. 1-3, pp. 335-346, 1990.