

ネットワーク化されたAI・ロボット社会において倫理基準を創発させるための技術フレームの提案

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 水産大学校 公開日: 2024-10-11 キーワード (Ja): キーワード (En): Machine Ethics; Ethical norms; Deep Reinforcement Learning; Multi-agent system 作成者: 石田, 武志 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2012169

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



ネットワーク化されたAI・ロボット社会において倫理基準を創発させるための技術フレームの提案

石田武志^{1†}

Proposal of new technological frame for emergence of ethical norm in the networked AI-robot society using deep reinforcement learning

Takeshi Ishida¹

Abstract : The introduction of networked AI-robots into society is estimated to bring numerous ethical issues to the fore. Moreover, there is a possibility that conventional ethics, such as engineering ethics and information ethics may not sufficiently address these issues. Hence, a new field called machine ethics is emerging that introduces ethical judgment and behavioral mechanisms into AI and robots. Accordingly, various technical elements are being studied to empower machines to make ethical decisions. Previously, symbolic reasoning systems were the main focus of this field; however, in recent years neural network models have also been utilized. In this paper, the limitations of conventional applied ethics are considered from the ethical viewpoint of the relationship between the autonomy and network complexity of networked AI-robots. Therefore, the possibility of multi-agent type deep reinforcement learning is considered as a method for overcoming the encountered limitations. From this, a technical frame for emergence of ethical norms in the networked AI-robot society is proposed.

Key words : Machine Ethics, Ethical norms, Deep Reinforcement Learning, Multi-agent system

緒 言

製品・サービスの提供においては、それに関わる技術者の倫理が強く求められてきた。従来であれば技術者が製品・サービスの設計から、ユーザーが使用する状況までを比較的容易に見渡すことができ、消費者への危害防止は、技術者の倫理に拠るところが大きかった。しかし近年の深層学習の実用的な場面での導入や、自律型ロボットの開発などは、技術者が設計段階では予想できないような挙動が生じる可能性を秘めており、技術者が設計した製品・サービスの社会の中での挙動を全て予想できるものではなくなりつつある。さらにIoT（物のインターネット）技術のように、様々な機器がネットワーク化され、機器間をソフトウェアのエージェントが動き回るような状況が一般的になり、「エッジAI」などセンサーや測定端末にAIが搭載されネットワークに接続される動向も生まれてきている。こ

のようなネットワーク要素の複雑性が一定レベルを超えると、個々の技術者では予想できない挙動が生まれる可能性がある。近年のネットワーク化された大規模情報システムなどは、一人の一人の技術者では、全体が見えなくなってきている。このため技術者は、従来の技術者倫理規定に従うだけで、倫理的責任を果たしていくことができるのか怪しくなっているのではないかと考えられる。

一方で、AIやロボットの自律性が高くなるにつれて、AI・ロボット自身に倫理的な挙動を組み込むという「機械倫理学」という研究分野が興隆してきている。この中にはAIに倫理的な判断をさせるという側面も含むものであり、「機械道徳」、「ロボット倫理学」、「AI倫理学」など様々な呼び方がある。また最近では、自動運転車による事故の責任の所在、深層学習AIによる人種差別的発言、敵対的生成ネットワーク（GAN）技術による偽画像の生成など、AI・ロボット技術を利用する面からの倫理的な規定

¹水産大学校海洋機械工学科（Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University）

[†]別刷り請求先（corresponding author）：ishida@fish-u.ac.jp

の構築が必要になってきている事例が多くなってきている。

今後はAI・ロボットが社会に導入され、さらにそれらがネットワーク化により多様化する中で、様々な倫理的課題が生じる可能性があるものの、従来の応用倫理学（技術者倫理、情報倫理、機械倫理など）の範疇では対応できない部分も増えてきており、新しい応用倫理学のフレームを考えていく必要があると考えられる。

本論文では、ネットワーク化されたAI・ロボットを対象に、その自律性とネットワーク度について、倫理的観点との関係を考察するとともに、従来の検討フレーム（技術者倫理、情報倫理、機械倫理など）の研究動向をレビューしたのち、その限界の考察を行った。さらに、その限界を克服する方法として、「マルチエージェント型の深層強化学習」の利用可能性を考え、「ネットワーク化されたAI・ロボットの社会」における「倫理的基準の創発」を検討するフレームを提案したものである。

AI・ロボットの動向と倫理的側面の関係

今後の技術動向として明らかな点は、AI・ロボットの自律性の程度が大きくなるということである。このため、AI・ロボットの動作や発言などに対して、設計した技術者の予測範囲を超える可能性が出てくる。もう一つ考えるべき点は、AI・ロボットやIT機器などが大規模にネットワーク化されることで、個々の技術者ではネットワークの全体を見渡せなくなっていることである。

このため、本研究ではこれら動向を「倫理性」、「自律性」、「ネットワーク度」の3つの軸で整理して、従来型の技術者倫理や情報倫理の及ぶ範囲を整理してみると図1のようになると考えられる。「自律性」「倫理性」の軸で見ると、自律性も倫理性も低いところにあるのが、従来の単一機能型の機械であり、これは技術者が設計から使用まで見渡せるものであり、技術者倫理を踏まえた対応で、利用者への危害を抑制できる部分である。また技術の利用においても従来型の情報倫理で対処できる範囲である。一方その対極として、倫理性も自律性も高いAI・ロボットは、道德意識を持ったものとなり、これは、技術者の管理の手を離れてもAI・ロボット自身で道徳的に行為できる存在である。しかしこのようなAI・ロボットは、「汎用人工知能」の開発などが前提となり、まだ未来技術的なものである。

また自律性が低い倫理性が高い機械については、様々な倫理的なアルゴリズムや制御を機能として追加する方法で、現状の機械倫理学においても検討されている部分である。一方で、自律性が高く、倫理性が低い領域は、AI・ロボットの暴走がおきる可能性が大きい領域であり、筆者は「機械倫理の谷」と呼んでいる。今後の技術開発の流れとしてはこの「谷」へとは向かわないように、倫理的な制御技術を実装したのち、自律性を高くしていくことが求められることがわかる。しかし、人工知能における「フレーム問題」（人間は無意識に常識（制約）として考えられることが、AIにはできないという問題）や、「シンボルグラウンディング問題」（AIの中では、記号を処理しているだけなので、現実社会の本当の物を理解していない問題）などが容易に解決できないことなどから考えると、汎用性の高い倫理判断システムを構築することは、短期的には非常に困難であると考えられる。

次にこの図1に「ネットワーク度」の軸を追加してみると、図2のようになる。ネットワーク度が高くなるにつれ、「機械倫理の谷」の領域が拡大していき、単一機能型の機械においてもネットワーク化された場合は、技術者が予想できない様々な障害が生まれる可能性がある。さらにネットワーク化されるものが、AI・ロボットになると、自律性、ネットワーク度ともに上がり、その挙動の不透明さがさらに増してくると考えられる。仮に自律性が低くてもネットワーク性が高くなると、個々の技術者では予測できない領域となる。自律性が高い場合は、さきほどの暴走するAI・ロボットの「谷」に落ち込む可能性があり、それらのネットワーク性が高くなると、人間の予測を超えた災害を起こす可能性も否定できなくなる。

汎用人工知能の技術が確立し、倫理意識を保持したAI・ロボットができれば、うまく技術者の手から放すことができるが、さらにそれらが大規模にネットワーク化された場合、どのような世界になるかは、SF的な想像の範囲となってしまい、その領域の制御が可能であるか、また倫理的な挙動がいかなるものになるかは今後の検討を待たなければならない。

このように、自律性、ネットワーク性が高くなっていくという技術開発の流れの中で、旧来型の技術者倫理や情報倫理では全てカバーできる状況ではなく広い領域が残されていることがわかる。また、究極的には道德意識をもった汎用AI・ロボットが可能となればよいが、これは汎用人工知能ができた後の少し未来の話であると考えられ、近未

来的には、倫理的なバックアップが抜けている「機械倫理の谷」が存在する。機械倫理学は、この領域を埋めるための技術開発が進められているが、埋めるべき領域は広大で

あり、フレーム問題などの壁が存在し、すぐに実用的な倫理システムが生まれることが難しい状況であると考えられる。

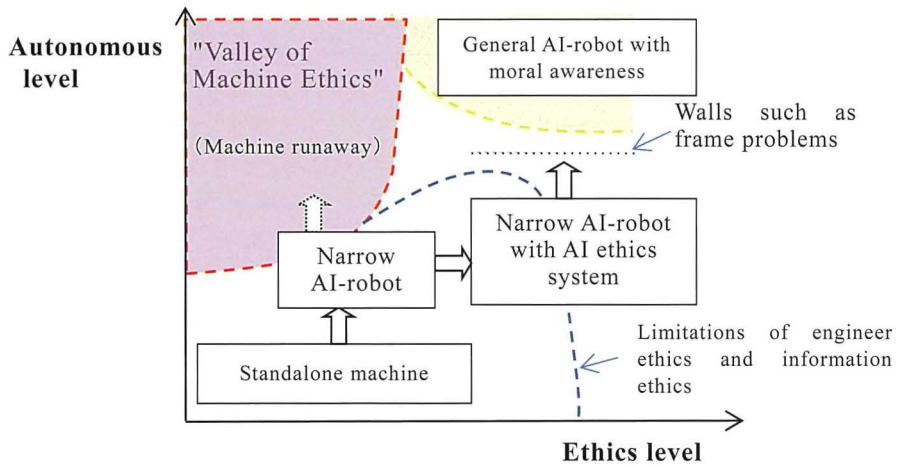


Figure 1. Relationship between autonomy and ethics in AI-robots

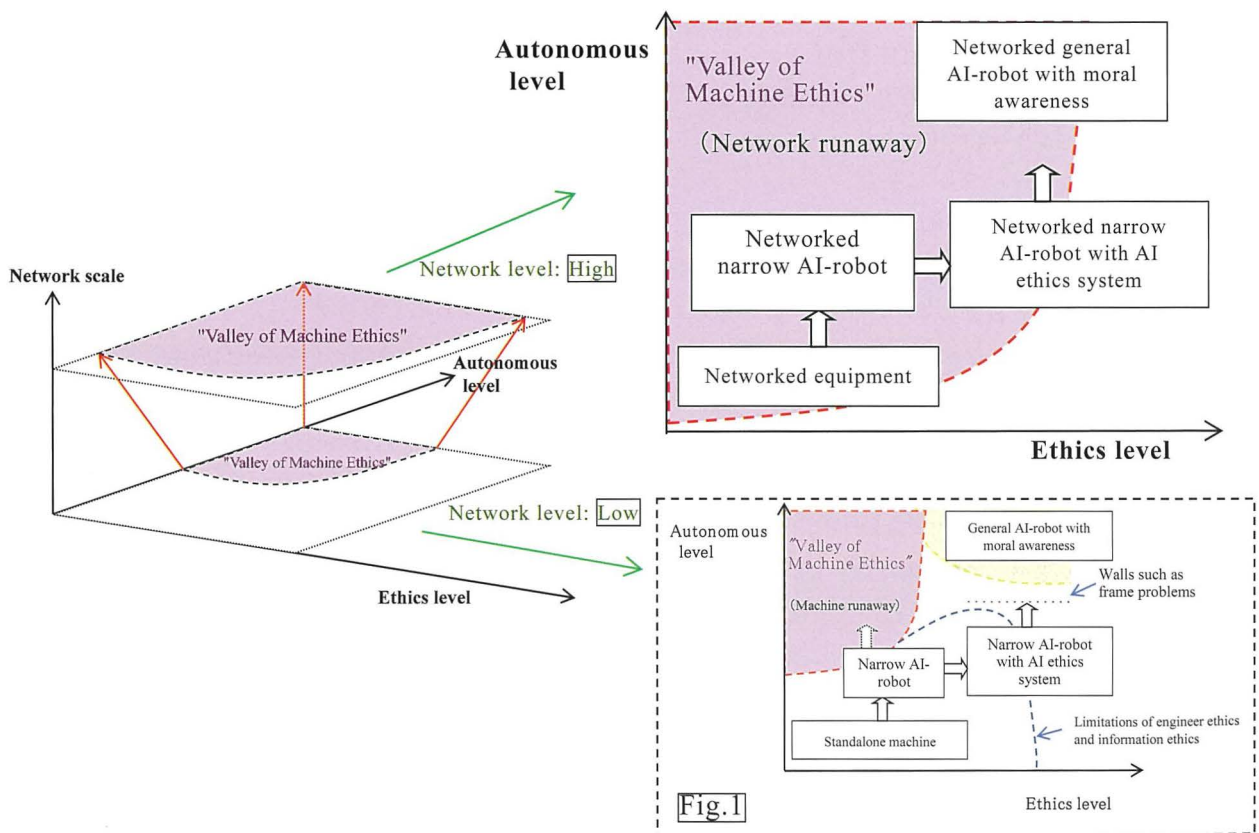


Figure 2. Relationship between autonomy, network scale and ethics in AI-robot

従来の倫理学フレームでの検討状況

AIやロボットの倫理を考えると、主に以下の3つのアプローチが考えられる。これらの関係を整理すると図3のようになる。

- ① AI・ロボットをつくる側の倫理
- ② AI・ロボットを使う側の倫理
- ③ AI・ロボットに備える倫理

①はAI・ロボットをつくる側の倫理で、これは技術者倫理に重なる部分である。アメリカ等では人工知能を搭載した無人兵器の開発が進められているが、極めて自律性の高いロボットをつくることの倫理的是非の議論などが典型的な事例である。ロボット兵士の利用により、自国兵士の犠牲を少なくできる反面、自律性の高いロボットに戦闘行為をどこまで許容するかなどの多くの問題が含まれている。この点については文献1など多くの研究が行われている。さらに、機械学習の進展、特に深層学習など出力結果が、それを構築した技術者にも予測できない場合が多くなっている。AI・ロボットの出力への責任に対して、それを構築した技術者がどこまで負うべきかなどの議論も必要になってくる。また、技術者の倫理判断を支援するシステムとして、SIROCCO（シロッコ）がブルース・マクラレンらにより開発されている²⁾事例がある。これは法律などの判例、事例などのデータに基づいて推論を行い、技術者が直面するジレンマについてアドバイスするシステムである。

次に②のAIロボットを使う側の倫理は情報倫理と重なる部分である。今後はAI技術により作られた偽画像が詐欺などに悪用されることも増えていくと考えられ、そのような偽画像の真偽が人間には見分けがつかないレベルに達している状況である。AIを利用した詐欺に騙されないリテラシーを持つことも重要であるが、さらにAIによる詐欺を見抜いて防止するAIなどのシステムも今後求められていく。欧州連合（EU）の欧州委員会は2019年4月に非差別、説明責任などを規定した「AI倫理指針」をまとめた³⁾。また、ペットロボットなどのように、人間に優しいユーザーインターフェースを持つAIロボットに対しては、人間が過度な感情移入や、道徳性を求めるという側面もあり、これも多くの課題が議論されている。

3つめの側面の「AI・ロボットに備える倫理」は、機械倫理学が中心となって進めてきている分野であり、AI・ロボットに倫理判断アルゴリズムを搭載して、道徳的な動

作を目指すものである。倫理学の理論をベースとして、AI・ロボットに倫理が必要か、倫理的行為者になれるのかなどの検討や、AIロボットが従うべき共通の倫理基準の作成、AI・ロボットの倫理性を評価するテストの必要性（AIにおけるチューリングテストのような倫理性診断テスト）、AI・ロボットの倫理逸脱防止システムの必要性、など様々な観点からの研究が進んでいる⁴⁾。

このような中で、AI・ロボットに倫理的な判断をさせるプログラムが構築できるのかについても、様々なアプローチが行われている。大きく分けると「トップダウン型のアプローチ」と「ボトムアップ型のアプローチ」に分けることができる⁵⁾。

トップダウン型アプローチは、知識データベースや帰納的推論システムを用いて、倫理的な問題をプログラムにより判断させるものである。研究事例としては次のようなものがある。ブルース・マクラレン（Bruce McLaren）によるTruth-Teller⁶⁾は1995年の先駆的な例であり、エキスパートシステムの一つで、論理ベースの倫理判断システムである。アンダーソンらによるGenEthシステム⁷⁾は、倫理学から得られた知識ベースによる汎用性を目指した倫理判断システムであり、様々な倫理的ジレンマを判断するものである。またアンダーソンは、2006年に医療現場における倫理的ジレンマを解決する助言用システムであるMedEthEx⁸⁾を開発した。さらにその2年後には、介護をサポートするロボットEthEl⁹⁾を開発している。

一方ボトムアップ型アプローチは、ニューラルネットワークによる学習などにより、倫理判断をできるシステムを導出させるものである。研究事例としては次のようなものがある。マルチェロ・グアリニ（Marcello Guarini）¹⁰⁾は、ニューラルネットワークを用いた機械学習を利用したモデルを提案している。これは、アシモフのロボット三原則をより具体的な例に落とし込み、限られた文脈から計算によって倫理的な判断を導くものである。Takagiら¹¹⁾は、インターネット上の文章を検索し、自然言語処理を用いて特定のフレーズが道徳的に良いか悪いかを、フレーズに関連する用語のネットワーク上での繋がりの強さから推定する方法を試みている。このほかに、両者を取り入れた複合的なアプローチも考えられる。これらの様々なアプローチは、文献4などにまとめられている。

ここまでの議論は、現在のAIやロボットについて、現状の技術水準をもとに比較的その延長線上での技術的進展を前提に考えている。すなわち、AI・ロボットには真の

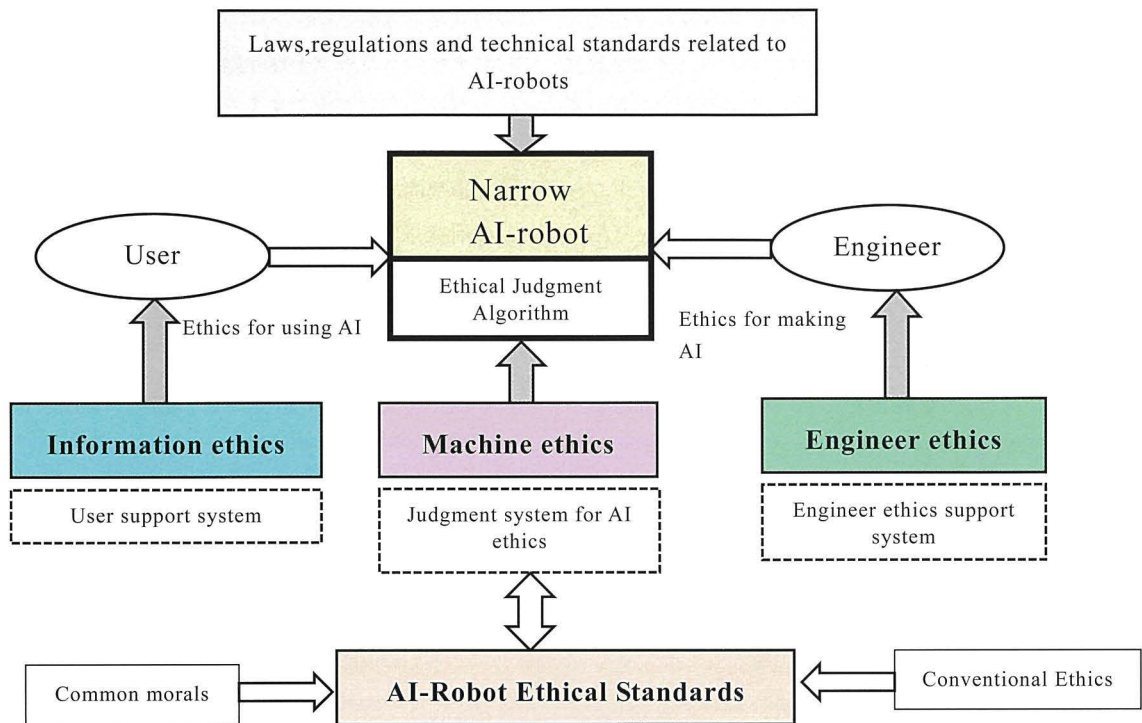


Figure 3. Relationship between AI-robots and various applied ethics

心・意識は保持しておらず、いわゆる「弱いAI」に分類されるものという前提である。

一方で意識、心を持ったAIについては、意識の理論の研究や、人工意識モデル、認知モデルの研究などが進んでおり、また人の感情を感知できるロボットも研究開発されている。少し先の未来技術になるが、「倫理感を持った人工意識を内蔵したAIロボット」も開発される可能性もある。これはいわゆる「強いAI」に分類されるもので、このような意識、心、感情などをもったAI・ロボットでは、さらに倫理的な事項を考慮することが多くなると考えられる。

例えばAI・ロボットをつくる側の倫理としては、生命倫理的な観点が必要になってくる。意識や感情をもったロボットを造ることや停止させることは倫理的に許されるのだろうか。また、AI・ロボットを使う側の倫理としては、AI・ロボットを道徳的存在として扱うことが求められ、例えば、AI・ロボットの意思に反した命令をしてよいのか、命令に従わない場合、苦痛などを与えてよいのかなど、多くの問題が出てくると考えられ、人間-ロボット間の新しい倫理学が必要になってくる。さらに、AI・ロボットに内蔵すべき倫理としても、人間と同じ倫理観を

保有できるのか、SF映画のような人間に反乱するAI・ロボットの可能性はないのかなどを考えていく必要がある。

これに加えて、人間とAIロボットが共生する社会において、地球環境や生態系などとのバランスを考えていく必要性もあり、環境倫理学との協調も求められていくと考えられる。

ここまで示した3つの倫理側面のいずれの面でも今後の技術開発が必要となってくる点では疑問の余地がない。しかし、先に検討したようにAI・ロボットが高度にネットワーク化され、相互作用する世界となった場合、従来型のフレームや研究アプローチでは限界があると考えられ、新しい検討の方向を考えていく必要がある。

機械倫理学の基礎モデルの提案

以上の検討フレームに基づいて、自律性とネットワーク度が高くなりつつあるAI・ロボット群に対して、倫理的フレームを構築していく必要がある。しかし、様々な状況下での確な倫理判断ができる機械システムとなるためには、最初から倫理基準を搭載するトップダウン型のアプローチでは限界があると考えられ、機械システムが自らの

経験から学び、ボトムアップ的に自らの倫理基準を構築していくことが求められる。この方向としては、深層学習などにより多くの倫理的事例を学んでいく方法があるが、先に述べたフレーム問題などの壁によりすぐに限界が見えてくると考えられる。さらに、AI・ロボットがネットワーク化される中で、他のシステムとの相互関係の中でAI・ロボット群が構成する「社会」での共通の倫理基準を創発させて、人類社会全体の福利を向上させていくが必要である。

このようなことを踏まえ、その解決の方向性として「群れ知能」などの利用が考えられる。これは群れの構成員が相互に作用する中で、知的な挙動が生まれる現象を利用するもので、蟻の群れによる群知能は有名である。アリは、個々の個体は高度な知能を持たないが、役割分担がなされた社会システムを構築することができる。これらの「知性」は決して人間のような高度な知能ではないが、これらが複雑にネットワーク化され、相互依存することで、生態系が恒常的に維持される状態を生み出している。「分散型人工知能」とも呼ばれ、ひとつひとつは高度な知能をもたず、高度な知的処理、言語処理はできないが、これらが群れやネットワークを構成することにより、知的な組織体を構成し、倫理的な活動を支え、そして社会をより望ましい方向にもっていくこともできるのではないかと考えられる。単一のAI・ロボットの知能を向上させていくことはフレーム問題などの限界があるが、AI・ロボット群に「群れ知能」を具備することは、個々のAI・ロボットに高い知能を要求されてないことから、技術的な実現性が高いと考えられる。

このような自らの倫理的行動を学び、他のシステムと協調して群れ知能を創発する基盤として、近年のソフトウェア技術を考えると、学習する部分は深層強化学習、協調の創発についてはマルチエージェント技術が利用できるのではないかと考えられる。本稿では、マルチエージェント型の深層強化学習を基本として、「倫理的基準の創発」を行うことで、従来型の倫理フレームを超えていける可能性があることを考察する。

マルチエージェント型の倫理判断の研究事例として、ピーター・ダニエルソンらは、ヴァーチャル生物（エージェント）が集団における他の存在の行動に対応して、適応できるシミュレーション環境を構築した。この「道徳的生態系」と呼ばれる空間で、各エージェントは、競争相手の行動についての情報を蓄え、この情報に基づき様々な協

力戦略を導出できるようにすることで、エージェント群は、それぞれのグループを作り始めたことが示された。さらに協力者は協力者同士で集まり、非協力的な「捕食者」同士も集まってグループを形成したことが報告され、これらにより道徳的エージェントの創発の可能性が示された^{12, 13)}。この研究以外にも集団の協調の創発の研究としては文献¹⁴⁾などがある。

一方で深層強化学習については、旧来からある強化学習の手法と深層学習の手法を合わせた深層Q学習（DQN）が2015年にDeepMind社により開発され発表された¹⁵⁾ことを契機に、広く利用されるようになってきたものである。DQNは強化学習のひとつであるQ学習と深層学習を組み合わせたもので、強化学習に基づいて解を探索しつつ、その解探索の経験データを学習用データとして深層学習モデルを導出するものである。DQNの応用は多岐にわたり非常に多くの研究が発表されているが、倫理的判断基準の創発などに、深層強化学習を応用した研究は国内外ともにみられない状況である。

深層強化学習は、エージェントが取る行動の「価値」を評価し、目的を達成するために必要な行動に高い価値を付加していく手法であり、価値を表現する関数のとり方により、倫理的行動の価値を評価していくことが可能であると考えられる。このため社会全体の功利を最大化しつつ、個人の最低限の水準を維持するAI・ロボットの行動ルールの導出を、強化学習による価値関数の更新により求めていくことが可能となると考えられる。

また、深層強化学習は単一のエージェントを用いることが多いが、多数のエージェントを利用したマルチエージェント型の学習の事例もあり（例えば文献16）、エージェント社会の共通規範を導出することも可能であると考えられる。以上のことをまとめマルチエージェント型の深層強化学習のモデルのイメージを図にまとめると図4のようなものが考えられる。

図4のEnvironmentの部分には、各エージェントが置かれた環境であり、各エージェントと解くべき課題が課せられている空間である。例えば図中には、迷路のそばにエージェント群（緑色）が配置され、迷路内の★印に行くことが課せられている。エージェントが一斉に★印に向かうと混乱、渋滞が発生するが、一定のルールに基づいて行動すれば、多くのエージェントが短時間で★印に順番にたどり着くことが可能となる。各エージェントには、行動関数と「価値」の値が保持されており、行動の選択肢として「価

値」の高いものを選択し、その行動結果から行動関数を更新して新たな「価値」を設定していく。行動関数の制約としては、「功利主義（最大多数の最大幸福）」に基づくAI・ロボット+人間社会の「価値」の最大化と、個人の最低限の福利の実現を制約として課していく。図中の例でいえば、各エージェントが★印に到達する時間をより短くするように各エージェントのQ値が調整され、全エージェントがいかに短時間で★印にたどり着くかが「功利主義的」な視点であり、各エージェントが必ず1回はたどりつくというのが、「個人の最低限の福利」の視点である。そして最終的にエージェント群が獲得した行動の手順のデータから深層学習によりエージェントの環境の状況に応じた行動選択を特定するモデルを構築することが可能となり、そのエージェント社会における行動規範として利用できるものとなる。このモデルは非常に単純な構成であるが、

「倫理的な行動規範」を導出する基礎となるモデルであると考えられる。

今後は提案したマルチエージェント型深層強化学習モデルについては、具体的なプログラム開発により、行動規範の創発可能性について検討を行っていく必要がある。さらに倫理規範が創発される条件についても、基礎モデルの計算で明らかにしていくことが考えられる。また「功利主義に基づくAI・ロボット+人間社会の価値の最大化と、個人の最低限の福利の確保」をQ値に結び付けることは、本提案のような簡単な迷路であれば自明であるが、実社会のなかで具体的な定量化の方法については、今後の検討であると考えている。階層化された社会においてQ値の設定も多重化されると考えられ、この点についてのより詳細に検討していくことが、「倫理的基準」創発モデルが実社会で実用化できるポイントになると予想される。

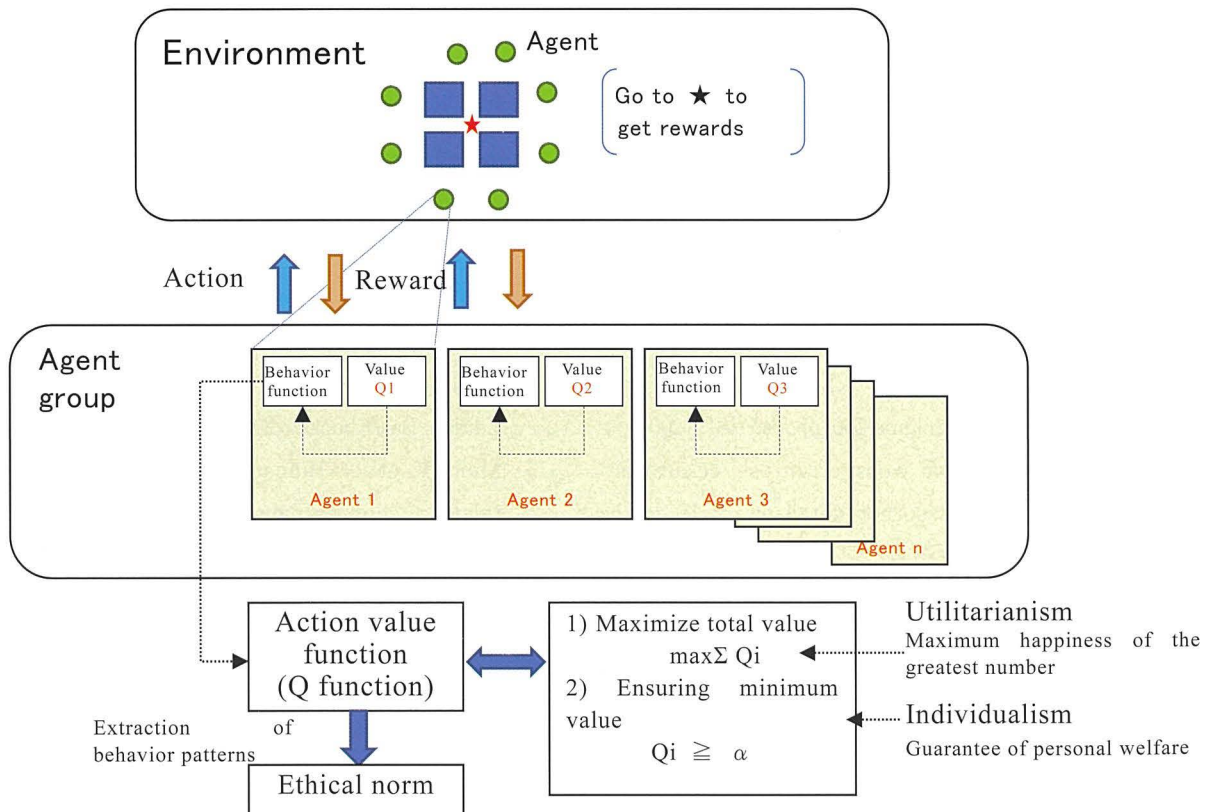


Figure 4. Multi-agent deep reinforcement learning model to emerge ethical norms

結 言

完全な意識、感情をもったAIロボットは少し未来の話であり、仮にできたとしても、人間と同じ身体を持たないAI・ロボットに、人間と同じ常識は通用しないかもしれない。一方で、自律性の向上、ネットワークの複雑化が進む中で、個々の技術者の倫理感だけでは限界があることも明らかである。今後は、本提案のマルチエージェント型の深層強化学習モデルに基づく機械倫理学の技術開発を進展させ、倫理的判断や制御ができるシステムの範囲を広げていくことにより、先の図1, 2に示す技術者倫理の限界の線を少しずつ広げて、「機械倫理の谷」を避けていく必要があると考えられる。

また群れ知能を応用する以外にも、生体システムが持つ「免疫システム」や「恒常性維持機能（ホメオスタシス）」などを参考に、機械エージェントの群れ（マルチエージェント）により倫理的逸脱を防ぐシステムなども可能性があり、今後検討していく必要があると考えられる。

本稿では、ネットワーク化が進むAI・ロボット群において倫理性を維持する新しい方向性を考察した。今後は、具体的なマルチエージェント型の倫理創発システムを実装してその有効性を示していく必要がある。

文 献

- 1) Schwarz, E. : Death Machines : The Ethics of Violent Technologies, Manchester Univ Press (2018)
- 2) M. McLaren, B. : Extensionally Defining Principles and Cases in Ethics: an AI Model, Artificial Intelligence Journal, Volume 150, pp. 145-181 (2003)
- 3) European Commission website : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1893 (2020年10月22日アクセス)
- 4) ウォラック, W., アレン, C. 著, 岡本 慎平, 久木田 水生 訳: ロボットに倫理を教える, 名古屋大学出版会 (2019): Wallach, W., Allen, C. : Moral Machines : Teaching Robots Right from Wrong, Oxford Univ Pr (2009)
- 5) Allen, C., Smit, I. Wallach, W. : Artificial morality: Top-down, bottom-up, and hybrid approaches, Ethics and Information Technology 7:149-155 (2005)
- 6) McLaren, BM., Ashley, KD. : Case-based comparative evaluation in TRUTH-TELLER, Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society (1995)
- 7) Anderson, M., Anderson S. L. : GenEth: a general ethical dilemma analyzer, Paladyn, Journal of Behavioral Robotics, Volume 9: Issue 1 (2018)
- 8) Anderson, M., Anderson S. L., Armen C. : MedEthEx: A Prototype Medical Ethics Advisor, Proceedings of the national conference on artificial intelligence, vol.21, 2, 1759 (2006)
- 9) Anderson, M., Anderson S. L. : ETHEL: Toward a Principled Ethical Eldercare Robot, Proceedings of conference on human-robot interaction (2008)
- 10) Guarini, M. : Particularism and the classification and reclassification of moral cases, IEEE Intelligent Systems, Vol.21, Issue: 4 (2006)
- 11) 荒木健治, Rzepka R., Ptaszynski M., Dybala P. :心を交わす人工知能—言語・感情・倫理・ユーモア・常識, 第4章, 森北出版 (2016)
- 12) Danielson, P. : Artificial Morality: Virtuous Robots for Virtual Games, Routledge (1992)
- 13) Danielson, P. : Modeling Rationality, Morality and Evolution, Oxford University Press (1998)
- 14) Axelrod R., The Evolution of Cooperation: Revised Edition, Basic books (2005)
- 15) Mnih, V. et.al. : Human-level control through deep reinforcement learning, Nature, vol.518, pp.529-533 (2015)
- 16) Miyashita, Y., Sugawara, T. : Analysis of coordinated behavior structures with multi-agent deep reinforcement learning, Applied Intelligence, pp.1-17 (2020)