

協調的知能研究のためのパーソナルパートナーエージェントの検討

Personal Partner Agents for Cooperative Intelligence Research

船越 孝太郎*

島崎 秀昭†

熊田 孝恒‡

辻野 広司§

Kotaro FUNAKOSHI Hideaki SHIMAZAKI Takatsune KUMADA Hiroshi TSUJINO

1 はじめに

深層学習の成功により人工知能技術 (AI) への注目が高まっている。固定・整備された環境において人間の処理能力を遥かに超える大量のデータを大量の計算資源で単独処理するインフラ型の AI に対し、複雑・動的な環境下で、限られた資源を最適に使い、他者、特に人と協調しながら目標を達成するという、協調・協力を重点を置いた AI¹ を、我々は協調的知能 (Cooperative Intelligence; CI)² とよび、その理論的基盤の整理と、CI システムの実現に必要な技術に関する研究を進めている。ここで強調すべき点は、何かが達成されることにおける協調の価値 (達成コストの低減, 成功率の向上) 以上に、協調の過程・協調すること自体から得られる価値 (体験・感情を他者と共有できる喜び, 他者との繋がりにおいて役に立っていると感じられる喜び) を重視することである。

CI の概念は未だ漠然としたものであり、その全容はこれから明らかにされるものである。本稿では、手探りで研究を進め始めた現状において、本研究プロジェクトを着実に進めるために設定した CI に内在する階層性についての作業仮説を簡潔に説明し、その作業仮説の上に設定した研究目標を提示する。そして、研究目標を具現化するためのプラットフォームとしての飛行船型ドローン [21] の活用について、利点と課題を議論する。

2 協調的知能の階層性

協調・協力という言葉聞いてまず思い浮かべるのは、日頃から目にする人と人との間の相互扶助的な集団行動である。実際、人に固有にみえる高度な知能の源泉はその協力への志向性にあるとも指摘されている [17]。一方で、人のように他者を認識し集団レベルでの意図を持っているとは思えないアリのような昆虫でも、協調的とよべる集団行動をとることがあることは広く知られているとおりである。さらに集団という要素を捨象して一個の

個体に注目しても、それが環境と相互作用して適応する様子についてみれば、そこにもある種の協調的な要素・関係が環境との間にあるように見える。

そこで我々は、以上の事柄を念頭に、協調的知能という概念が以下の 4 つの要素群から階層的に構成されるという作業仮説を設定する。

Collective Intelligence: 魚やアリなどの集団における協調の土台となるものである。マスがマスを、ヒトがヒトを、同種の仲間として認知し共生する能力、木村はこれを、同種の生物個体間の生命的連帯感の根底として働くものとして、私的間主観性とよぶ [7]。第 1 の要素群に含まれるものは、私的間主観性を成立させる原理・能力を含め、主に生物が進化によって獲得する本能に類するものである。進化ロボティクスにおける協力についての研究 [3] などはこの層に取り組んでいる。

Adaptive Intelligence: 生物は世代交代を繰り返すなかでの自然淘汰による進化によって長期的な環境変化に追随・適応することができるが、多くは一世代の中でも環境の変化に随時適応しながら生きている。特に脳をもつ動物は、環境の変化を予測し、予測誤差を最小化することによって適応 (学習) を行っていると考えられる [5, 15]。第 2 の要素群である適応する能力は、第 1 の要素群とともに協調を下支える基盤となる。

Coordinative Intelligence: coordinative には、同調的と訳すほうが収まりの良い意味合いと、調整的と訳すほうが収まりの良い意味合いと 2 つが含まれていて、それぞれ collective な側面と、次に述べる collaborative な側面とに接近している感があるが、いずれにしても、協調的な活動と切り離すことのできないコミュニケーションの問題と密接な関わりがある。

ヒトのコミュニケーションにおける同調として、話者間の心拍や顔きについての引き込み (entrainment) [20] あるいは共振 (resonance) [12] が知られている。坂本 [12] は、スポーツの楽しみの観点から、共振の重要性を指摘している。心理的な楽しさの状態を表すフロー (flow) [2] が個人スポーツの領域にとどまることを指摘した上で、リズムの「共振」として捉えることにより、集団スポーツにおける「楽しさ」を「共同性の次元のフロー」として捉える視点を提示している。共感 (empathy) も、同調といえる現象の 1 つである。生物学的には、感情

*京都大学/Kyoto University

†京都大学/Kyoto University

‡京都大学/Kyoto University

§Honda Research Institute USA

¹http://www.jp.honda-ri.com/research_areas/ci/index.html

²CI を単純に直訳すれば協力的知能とするほうが自然とも思われるが、日本語においては「協力」よりも「協調」の方が我々の意図するニュアンスを適切に伝えると思われるため、協調的知能としている。

的・認知的な結びつきを強めることで集団内の結合・連携を強化する役割があると考えられ、ヒト以外の多数の哺乳類にも様々な事例が観察されている [4]。これらの要素は、ヒトにも受け継がれており、普遍的な前言語的コミュニケーション能力 [8] の一部をなしていると考えられる。

言語がコミュニケーションの要であることは間違い無いが、ヒトの言語使用（ある表現・ある発話行為の意味をどう解釈するか）の相当な部分は慣習（convension）によっている。言語に限らず慣習の使用は、調整ゲーム（coordination game） [13] を解くことに相当する [9]。また、Clark [1] の分析により、ヒトの言語使用、すなわち会話は、意味・意図の交換のレベルに限らず、すべからず調整（coordinate）により生じる共同行為であることが明らかにされている。例え会話する 2 者が敵対的なゼロ和ゲームに従事しているとしても（例えば、恐喝するものとされるもの）、その下では必ず調整ゲームが相互の協力によりなされているのである。

Collaborative Intelligence: we-intention [14] とよばれる共同体の意図に基いて、ヒトとヒトが協働することに関わる要素群である。先にも触れたように、ヒト以外の哺乳類も、共感する能力、他者の次の行動を予測する能力をある程度有しているが、チンパンジーのような霊長類であってもヒトとの間には決定的な違いが存在する。それは他者が意図を持った主体として行動・思考する存在であると理解し、手段と目標を分離して捉える能力とされる [16]。ヒトはその上で、意図と手段を他者と調整し、協働することができる。

3 パーソナルパートナーエージェント

前節で示したように、協調的であるとされる現象、それを機械によって実現しようとしたときに必要となる原理・能力は実に多様である。協調に関係し研究課題となりうる要素は他にも多数あって、前節で言及できたものはごく一部である。

そこで研究の焦点をある程度しぼってプロジェクトの方向性を明確にしつつ、多様性を失って狭い領域だけに落ち込むことを避けるために、1 対 1 の関係性を基本とし、Coordinative Intelligence に特に注目するアプローチを取る。そのようなアプローチの上にある目標として、「人に愛される同調的存在としてのパーソナルパートナーエージェント」の実現を目指す。そして上記パーソナルパートナーエージェント（以下 PPA）を、以下のような存在として特徴づける。

- 持ち主をサポートするとともに、持ち主のサポートも必要とする
- 持ち主とは別個の意思を持って自律行動する存在であるが、一生寄り添い、共に成長する

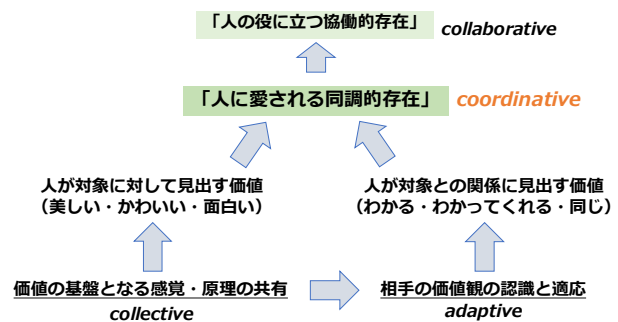


図 1: CI の階層性と研究アプローチ

- 持ち主と何時も一緒にいる相棒であり、イヌやネコよりも人に好かれる

端的に言えば、愛玩・保護対象としてのペットと、お互いに影響しあう対等な友人との中間に位置づけられるような存在を目標とする。様々な動物がペットとして人の愛玩の対象となるが、代表的なものはやはりイヌおよびネコである。しかし、これらのいずれかがよりペットとして優れているということではなく、いずれが好まれるかは所有者の価値観によって決まるものだと我々は考える。従って PPA がイヌやネコよりも好かれるための鍵は、それらよりも所有者の価値観と同調できることとなる。

人に愛される同調的存在となるためには、人が自分とは独立に対象そのものに対して見出す価値（例えば、美しい・かわいい・面白いといった価値）を備えることと、人が対象との関係に見出す価値（わかる・わかってもらえる・自分と同じだと共感できる価値）を備えることの 2 種類が求められると考える。前者がなければ関係を築こうとする意欲がわからないものであるし、前者だけで後者が無いままでは、いずれ人は飽きてしまうだろう。持続的な関係を維持するには、両方の価値が必要である。この 2 種類の価値を下支えするのが、Collective Intelligence に関する諸要素であり、Adaptive Intelligence に関する諸要素であると位置づけることができる。そして、これらに支えられた Coordinative Intelligence の上に、人の役に立つ Collaborative Intelligence を築くことができると我々は考える。図 1 に上記の関係性を示す。

愛されること・役に立つことと、協調的であることとの関係を整理した図を、図 2 に示す。冒頭で強調したように、協調的知能は、協力によって役立つことだけでなく、その過程で人が感じる価値を最大化することを目的とする。最終的には人の役に立つことを目指すことは確かであるが、そこに至る過程として、PPA に関する本研究は、図中の D の領域に特に注目するものである。そこから G の領域を目指す。

前述のように Coordinative Intelligence はコミュニケーションに深く関わるものであるが、これまでの対話エージェント [10] の研究は、図中 E の領域に偏り過

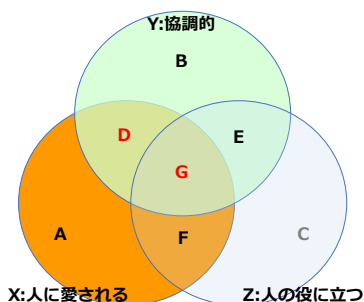


図 2: 愛されること・役に立つことと協調的であること

ぎていたといえる。パロ [19] のようなセラピーロボットは、協調的要素よりも、見た目を人が好む動物に近づけることによって得られる価値に強く依存しており、F の領域に位置づけることができる。

近年の対話エージェントの研究においては、課題指向であっても、雑談の前置・挿入によって関係性の改善を行うことが重要であることが認識されてきている [6]。雑談に関する研究は関係性の構築を重視する点で E よりも D の領域に近いといえるが、表面的な言語処理に留まる部分が多く、研究の掘り下げが期待される。

4 PPA としての飛行船型ドローン

前節で「人に愛される同調的存在としてのパーソナルパートナーエージェント (PPA)」の実現を研究目標とすることを述べた。この研究目標のもとで開発した適応・認識技術やインタラクション技術の実証実験を行ったり、エージェントと人との関係性を分析・評価するためには、何らかの形で PPA を具現化する必要がある。そのための研究プラットフォームとして、Yao ら [21] によって提案されている飛行船型ドローンが有望であると考えている。

飛行船型ドローンには、従来のコミュニケーションロボットや仮想エージェント・スマートフォン上の音声アシスタントでは実現することが困難な、優れた特性を持たせることができる。持ち主のサポートを必要とするという点では岡田の提案する弱いロボット [11] が既にあり、博物館等での実証実験も行われているが、常に行動を共にすることは難しい。また常に人と行動を共にし体験を共有することを目指したロボット [18] も提案されているが、肩に載せられたロボットの位置と視点はほぼ固定で、別個の意思を持って自律行動する存在となるには難がある。ドローンであれば、3次元空間の中で自由に自律行動することができ、その時の持ち主の状態 (感情、関心、意図等) に応じて、持ち主との位置関係を適切かつ様々に取ることができる。

一方で、通常のクワドコプタ型のドローンでは、浮遊し続けるために常にプロペラを高速に回転し続ける必

要があり、小型でなおかつプロテクタがつけられていたとしても、風圧やモータ音による恐怖感で近づき難い。電力消費が激しいため滞空時間は短くせいぜい 10 分程度に限られてしまう (小型にすればするほど滞空時間は短くなる)。ヘリウム風船により浮力を得る飛行船型ドローンであれば、常時プロペラを高速で回す必要がないので滞空時間を長くできるし、静かで至近距離に共存できる存在になる。

親しい存在との関係性においては、物理的な接触も重要な要素である。クワドコプタでは静止時に手の平に載せることがせいぜいであるが、飛行船型ドローンであれば、手だけでなく持ち主の顔や胴との接触も (飛行中でも) 可能である。

風に弱いため高速での移動や屋外での移動にはどうしても制限があるが、風船のように紐をつけそれを持ち主が牽くことで、持ち主のサポートを受けながら、どこでもどこまでも行動をともにすることができる。非常に軽量であるので、子供でも負担が少ない。現状の地上移動型のロボットの場合、持ち主がいつも連れて歩くことが困難であるだけでなく、運搬されている最中の自律性はほとんどないに等しい。飛行船型ドローンであれば、牽引されている間でも、飛行高度やカメラを向ける向きについては一定の自律性を確保できる。そのため持ち主とは別視点で周囲に注意を向けることができ、車の接近を警告するなど、子供の安全を見守る用途にも活用できる。

5 飛行船型 PPA の物理的制約と試作

前節では飛行船型 PPA の理論上の利点を列挙したが、実際に実現するにあたっては相応の課題・難しさがあることは否めない。

一番問題となるのは重量とサイズの関係である。気温にもよるが、100g 程度の浮力をヘリウムガスで得るためには、およそ 90 リットルの体積が必要になる。これは一般的な円形のアルミ蒸着フィルム風船 (気囊) の場合、直径 75cm 厚み 20cm ほどのサイズに相当する。常に気軽にそばに置くためには更に一周り・二周り小型化したいサイズである。この大きさの気囊はそれ自体の重量が 40g 弱あるため、この気囊を用いて動力なしで浮遊させようとする場合、ドローンの最大重量はバッテリー込みで 60g ほどに制限されてしまう。気囊のサイズを小さくしたいと思えば、ドローンの重量制限は更に厳しくなるが、先に述べたように、小型になればバッテリー容量が制限されることで飛行可能時間も短くなってしまう。

バッテリー込みで 60g 未満のラジコン型ドローンを作ることは難しくない。市販の部材で試作した飛行船型ドローンを図 3 に示す。鉛直方向の浮上用モータ 2 個と、水平方向の推進・方向転換用モータ 2 個を備えている。この大きさでも加速度・ジャイロセンサと気圧センサを搭載しているため、自律的な姿勢・高度の安定化制御は

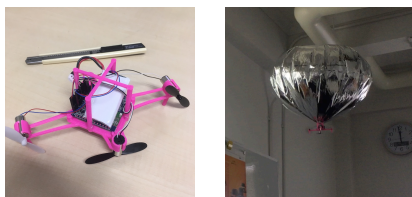


図 3: 試作機

可能である。しかしながら我々の目的では、これに加え最低1つのカメラとマイクを備える必要があり、その情報を無線通信で外部のサーバに送ることができなければならない。BLE通信を使えば低消費電力で音声送信程度は可能であるが、通常の動画並のフレームレートでの画像送信は難しい。WiFi通信を使えば帯域幅の問題はないが、電力消費が著しく増えてしまう³。通信を減らすためにオンチップでの計算処理を増やせば、今度はその消費電力が問題となり、アルゴリズムまで考慮したハードウェア設計が必須となる [22]。

これらの制約に対しては、電力供給の面からいくつかの解決策が考えられる。1つは牽引用の紐を通じた電力供給である。紐の重量分の増加や、安全性とのトレードオフが発生するが、浮力の一部をプロペラ推力で賄うことにすれば気嚢の小型化も可能である。もう1つは燃料電池に類する電源を搭載し、燃料の定期的な補充によって所有者が電力を供給する方法である。牽引とは別の形の所有者によるサポートであり、ちょうどペットにエサを与えるような形で、PPAと持ち主との関係性の構築・維持に貢献できる可能性もある。その他にも牽引動力を利用した風力発電や、塗布型の太陽電池の利用も考えられるが、現状では得られる電力に対する重量増を考えると、先の2案よりも実現性は低いように思われる。

6 まとめと今後の展望

本稿では、協調的知能研究について概説し、その中で我々が進めようとしている研究テーマ「人に愛される同調的パーソナルパートナーエージェント (PPA)」と、その具現化手段としての飛行船型ドローンの活用を検討した。

協調的知能の実現には、私的間主観性の共有が重要な要素であることを指摘したが、機械であるPPAが、どこまでヒトと同じ生物学的感覚・身体基盤を共有する必要があるのか・できるのかは明らかではなく、今後の研究を要する。PPAの実現にむけては、知能化技術だけでなく、人の価値観や様々な知識の取扱いのモデル化、機械との協調に適したインタラクション様式、などに関する脳科学・心理学・社会学からの研究も重要である。

³Yaoらの実装 [21] では、移動制御系とは独立した無線アナログカメラを搭載することで対応しているが、その分自由度は制限される。

参考文献

- [1] H. H. Clark. *Using Language*. Cambridge University Press, 1996.
- [2] M. Csikszentmihalyi. *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper and Row, 1990.
- [3] F. D. and K. L. Evolution of adaptive behaviour in robots by means of darwinian selection. *PLoS Biology*, 8(1), 2010.
- [4] F. B. M. de Waal and S. D. Preston. Mammalian empathy: behavioural manifestations and neural basis. *Nature Reviews Neuroscience*, 18:498–509, 2017.
- [5] K. Friston. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Review Neuroscience*, 2010.
- [6] 東中, 船越. 対話システムの理論と実践. 言語処理学会 第22回年次大会 チュートリアル, 2016.
- [7] 木村. からだ・こころ・生命. 講談社, 2015.
- [8] S. C. Levinson. Turn-taking in human communication – origins and implications for language processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(1), 2016.
- [9] D. Lewis. *Convention*. Harvard University Press, 1969.
- [10] 中野, 駒谷, 船越, 中野. 対話システム. コロナ社, 2015.
- [11] 岡田. 弱いロボット. 医学書院, 2012.
- [12] 酒本. スポーツ理解における「共振」概念の重要性—「引き込み現象」と「フロー」の統合という視点から—. *スポーツ社会学研究*, 20(2), 2012.
- [13] T. C. Schelling. *The Strategy of Conflicts*. Harvard University Press, 1960.
- [14] J. R. Searle. Collective intentions and actions. In *Intentions in Communication*, pp. 401–415. 1990.
- [15] 島崎. 認識と行動の適応原理. 日本神経回路学会誌, 2018. (to appear).
- [16] M. Tomasello. *The Cultural Origins of Human Cognition*. Harvard University Press, 1999. (大堀・中澤・西村・本多訳『心とことばの起源を探る』勁草書房, 2006).
- [17] M. Tomasello. *Why We Cooperate*. MIT Press, 2009.
- [18] R. Totsuka, S. Satake, T. Kanda, and M. Imai. Is a robot a better walking partner if it associates utterances with visual scenes? In *Proc. HRI 2017*, 2017.
- [19] K. Wada and T. Shibata. Living with seal robots—its sociopsychological and physiological influences on the elderly at a care house. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):972–980, 2007.
- [20] 渡辺, 大久保. コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価. *情報処理学会論文誌*, 39:1225–1231, 1998.
- [21] N. Yao, E. Anaya, Q. Tao, S. Cho, H. Zheng, and F. Zhang. Monocular vision-based human following on miniature robotic blimp. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017.
- [22] Z. Zhang, A. Suleiman, L. Carlone, V. Sze, and S. Karaman. Visual-inertial odometry on chip: An algorithm-and-hardware co-design approach. In *Robotics: Science and Systems*, 2017.