

人と協調して行動するロボットの知能

Intelligence of the Robot that behaves in Cooperation with Human Being

山田 茂雄

要約 常に変化し複雑かつ不確実な環境の中で人のように知的に行動する——常識的な思考により世界を認識し、ゴールを描き、それに向かって人と協調して行動する——ロボットの知能はどのようなものか。本論は、それを人が持つ知能の精神的な側面で捉え、課題として考えるべき重要な知的能力を挙げ、先行研究を足掛かりにしてそれらを掘り下げて考察する。最後にロボットをとりまく現実の世界とロボットの内面世界との境界を橋渡しするための個別技術について簡単にふれる。

Abstract This paper presents a brief discussion of the intelligence of the robot with human-like cognition, that is, the robot acts in the world of uncertainty and complexity, and it perceives, and recognizes the world to set its goal and to fulfill the goal by collaboration with human beings. And also this paper explains on robot's intellectual abilities and its problems based on previous studies. Finally, individual technologies to bridge the boundary between the real and mental world are briefly explained.

1. はじめに

私たちが日々暮らす世界は常に変化し複雑かつ不確実であり予期せぬ出来事に満ちあふれている。たとえば、休日に自動車で海へ向けてドライブを楽しんでいるという状況において、どこかで渋滞が発生するかもしれないし、道路わきから子供が飛び出してくるかもしれない。その中で私たちは世界の今を捉え、自分を含む世界のあるべき姿、すなわちゴール、をここに描き、そこに向かって行動する。そこに他者も関わるならば、皆でゴールを描き、そこに向けて共に協調して行動する。私たちは世界を捉えた心的なイメージを持っており感覚器官を通じて世界の変化を知覚し今の状態を認識する。そしてここに描いたゴールと今までの体験を通じて学んだことを鑑みて行動方針を立て、次にとるべき行為を選び、行動する。時にその行動の試みは考えたとおりには進まずに失敗したり、ゴールに到達するための行為の選択肢が無い行き詰まりの状況に陥ったりする。しかし、そのようなときにもそこで止まることなく、今の環境により良く順応するようにゴールを変更したり、ゴールを達成できる他の環境を選んだり、あるいはゴールを達成できるような環境を整えたりしてそのような状況を脱する。

こうした知的な行動を発現させる人のこのころのメカニズムはどのようなものなのか、そして、いかにして機械にそれを実現するか。これらの問いに対し先人らは多くの知見を見いだしてきた。本論はそれら知見を足掛かりにして、常に変化し複雑かつ不確実な環境の中で人のように知的に行動する——常識的な思考により世界を認識し、ゴールを描き、それに向かって人と協調して行動する——ロボットの課題を知能という観点で捉え論ずる。

以下、2章にて知的なロボットに求める知能について述べ人工知能の位置づけを整理し、その実現の課題として考えるべき重要な知的能力を挙げ、それぞれについての考察を与える。3

章ではロボットをとりまく現実の世界とロボットの内面世界との境界を橋渡しする方法について簡単にふれる。

2. 私たちと行動を共にするロボットに求める知能

私たちは自動車を運転して目的地に向かうとき、前途に渋滞があれば交通量の少ない小路に廻ってそれを避ける。あるいは道の前方にボールが転がってくるのを見て、それを追いかける子供が前に飛び出してくることを察してブレーキペダルを踏み事前の回避行動をとる^{*1}。必要な時に運転を代わってくれる自動運転車（ロボットカー）にも同じような判断と行動がとれることを期待したい。

以下、最初に知的なロボットに求める知能について述べ人工知能の位置づけを整理する。それに引き続いて構想実現のための重要課題を挙げる。

2.1 ロボットの知能

知能とは何か、ロボットに求める知能は何か。知能とは何かという問いに対する共通理解は無いが、ハワード＝ガードナーは人の知能が八つの側面を持つことを見いだしている。それらは、(1)ことばを効果的に使う言語的 (Linguistic) な知能で相手のことばを聞きとったり言語を使って考えたりする能力、(2)計算や推論をする論理数学的 (Logical-Mathematical) な知能で概念的・抽象的な思考を用いてパターンや関係性を考える能力、(3)空間的 (Visual-Spatial) な知能で建築家や航海士がするような物理空間について思考する能力、(4)音楽的 (Musical) な知能でリズムや音を感じる能力、(5)身体動作的 (Bodily-kinesthetic) な知能で肢体を効果的に用いる能力、(6)対人的 (Interpersonal) な知能で人を理解し共に行動する能力、(7)対自己的 (Intrapersonal) な知能で自分の感情やゴールを内省する能力、(8)博物学的 (Naturalistic) な知能で自然界に存在するものを特定したり分類したりする能力である^[1]。このような多面性を持つ人の知能は多くは成長の過程でからだところの発達に伴い発現するもので生得的なものは少ない。それゆえ人の知能は身体と切り離して考えることはできない。

人は知的な活動を機械に肩代わりさせることを夢見てきた。1940年代に電子計算機が登場して論理数学的な知能が機械に備わり、その後、人工知能 (Artificial Intelligence) の研究領域が開かれ、人並みの知能を機械に実現することを目指して^{*2} 幾多の試みがなされてきた。しかし、人の知能は汎用性が高く強力であり、それを機械に実現するまでには至っていない。近年では人工知能を知的なエージェント^{*3} の設計技法と捉える見方が主流を占めている。それらは、たとえば自然言語処理や画像・音声の認識処理など、機械学習が適用できるような特定の領域に特化した問題を興味の対象としている。一方、人並みの知能の全般を機械に実現するという所期の目標を実現するための新たな試みとして汎用人工知能 (Artificial General Intelligence = AGI) の研究が始められている。AGIについてはベン＝ゲーツェルが文献^{[2][3]}にて導入と解説を与える。

ロボットは身体を持つ知的なエージェントとして捉えることができる。人と行動を共にする知的なロボットを製作するときには、ガードナーが提唱する人が持つ知能の八つの精神的な側面からロボットが具備すべき知的能力を捉え、それを実現する設計の個別技法としての人工知能と、行動を発現させる身体機構を含む認知アーキテクチャを考えねばならない。本稿における主な興味の対象は最初の課題であるロボットが具備すべき知的能力にある。

人と行動を共にするロボットにはさまざまなものが考えられるが、それらに共通の課題として考えるべき重要な知的能力は、自己の行動を内省する能力、常識的な思考で世界を捉えるコモンセンス思考能力、言葉を交わし人と意思の伝達を図るコミュニケーション能力、そして、ゴールを描いて人と協調して行動したり人の感情と付き合ったりする対人的能力である。以下、これらを掘り下げて考察する。

2.2 『自己』の考えや行動を内省する

私たちは、あるひとつの考えがうまく進まなくなったときにその『考え』について考え始める—内省する—能力を持っている。行動の判断に行き詰まれば、どのように考え方を変えるべきかを考え、新しい考え方に切り替える。この能力は、常に変化し不確実な世界を生き抜くために進化を通して人間が身につけた知的な能力のひとつである。それを用いれば、ある行動の試みが考えたとおりには進まずに失敗したりゴールに到達するための行為の選択肢が無い行き詰まりの状況に陥ったりしてもそこで止まることなく、今の環境により良く順応するようにゴールを変更したり、ゴールを達成できる他の環境を選んだり、あるいはゴールを達成できるような環境を整えたりしてそのような状況を脱することができる。

ミンスキーは人の意識に少なくとも六つのレベルから成る思考過程の階層構造があることを見出している（文献^{[4][5]}）。それらは最も低いレベルから順に、本能的反応（instinctive reactions）、学習反応（learned reactions）、熟考（deliberative thinking）、内省的思考（reflective thinking）、自己内省的思考（self-reflective thinking）、自意識に関する感情（self-conscious emotions）である^[6]。このような思考過程の階層はどのようにして発現するのか。人には、音を聞いて振り向いたり、唇に物が当たれば吸うというような本能的反応が生まれたときから既に備わっている。やがてすぐに母の声を覚え（学習反応）、からだの成長に伴ってより高いレベルの思考のやり方（熟考、内省的思考、...）を学んでゆく。そして、価値観や理想などに照らして良い・悪いというような判断（自意識に関する感情）をするようになる^[4]。

この思考過程の階層をロボットに実現すれば人のように臨機応変に行動できるようになるだろう。しかし、少なくとも最下位層の思考過程の実装は人とは全く異なるものになる。何故ならば、ロボットは生きるという本能的欲求を持たず、外界からの刺激に対する本能的反応（無意識な思考過程）の意味合いが人とは異なるからである。第2層の学習反応の思考過程の実装には深層学習の設計技法が応用できる。そして、第3層から高位の思考過程はより記号的な思考法を必要とする。

2.3 常識的な思考で世界を捉える

私たちはどのように世界を知覚し捉えるのか。網膜が捉える光学的なパターン（視覚）、鼓膜が捉える音圧の変化（聴覚）、舌や鼻が捉える味や匂い（味覚や嗅覚）、皮膚などカラダの表面が捉える肌触り（触覚）——人は感覚器官からのリアルタイムで連続的な感覚体験（刺激）をいつ・どこに・何がという観点に意味づけて現実の世界を知覚する。そしてまた、私たちは世界を捉えた心的なイメージを持っている。それは日頃私たちが目の前にあるものを知覚したり状況を認識したりそれらについて思考したりするときの基底をなしている。たとえば「自動車に乗って海岸沿いの道をドライブする」というエピソードに対する（言葉で表現された）イメージには、〈自動車の座席に乗って移動する〉〈自動車は道路のセンターラインの左側を走る〉

〈前方には道路が見える〉〈海は横に見える〉...などを挙げることができよう。それらの中でつぎに示すような一般的で広く適用できるものは私たちの常識的な思考の基底をなしている；〈自動車は道路を走る（水の上は走らない）〉〈海は水のようなものである〉〈水はモノを支えずに包み込む〉〈モノは落ちる（逆はない）〉... 私たちが生まれたときには未だこのようなイメージを持っておらず、大人に成長してゆく日々の生活の中でそれらが獲得され形成されてゆく。

このようなイメージを持つことで、熟考せずとも目の前にあるまだ見たこともないものの特徴を推測したり、過去に起こったであろう事象を推測したり、あるいは状況の変化を見越したりすることができる。たとえば、いま、目の前につぎのような光景が目に入ったとする：『部屋に入るとそこにはテーブルがあり、テーブルの足下は水浸しで、割れたガラスの破片と花が散乱している』。この光景から、『花が生けられた花瓶がテーブルから落ちて割れた』という過去に起きた事象を（熟考することなく）直ちに推測することができる。このような常識的な思考や認識はコモンセンス^{*4}と呼ばれている。

人と協調して行動を共にするロボットが日常世界を私たちと同じように捉えることができるようにするためには、人の持つこのコモンセンスをロボットと共有しなければならない。

2.4 ことばを使い人と意思の伝達を図る

相手がロボットであることを意識しない自然な発話を用いた対話を通じて互いの意思を確認し合うために、ことばを効果的に使う言語的な知能と人と協調して行動する対人的な知能を要する。ここでは例として以下の二つのシーン^{*5}を考える。

【シーン1】 自宅のリビングでロボットと一緒に IKEA のキットテーブルを組み立てている。テーブルを手で支えながらロボットに箱の中に入っているネジを手渡してくれるよう依頼する。(P)ちょっとネジ取って—(R)はい—どうぞ

【シーン2】 親しい友人夫婦と自宅で7時に夕食会を予定している。ロボットカーの自動運転で帰宅の途中、混雑を回避するため有料道路にルートを変更する。(P)うーん 間に合うかなあ—(R)いつものルートは混雑するかもね 東名に乗りましょう—(P)そうしよう

この二つのシーンにおける対話において、発話の果たす役割は言語的な伝達の側面よりも相手が自ら次の動きを調整するための手掛かりを与える側面が大きい。言語の持つこのような機能的な役割を扱う言語理論としてハリデー^{*6}の選択体系機能理論 (Systemic Functional Theory = SFT) がある。山口が文献^[7]で解説するように、言語は、図表・写真・音楽などの記号や、身振り・表情・服装・相手との間合いなどの身体的行動と共に、対人的相互作用のモードである。SFT ではそれらモードを用いた一連の相互作用の列をテキストと呼ぶ。

【シーン1】では、『(P)ちょっとネジ取って—(R)はい—[ネジを手渡す]—どうぞ』という一連のやりとりがテキストとなる。このテキストには

- {一次的活動領域 ⇨ 家具の組み立て、
- 一次的役割関係 ⇨ 人が組み立て、ロボットが手伝う、
- 一次的伝達様式 ⇨ 対面で聴覚と視覚が媒体}

という状況や、使用域

{二次的活動領域 ⇨ 協力を依頼する}

などの『コンテキスト』が「たたみこまれている」^[7]。そして(P)の発話「ちょっとネジ取って」という表層表現はネジを手元に持ってくるという行為を相手に依頼することを意味している。ロボットにはこのようなテキストを解釈したり生成したりする知能が求められる。

2.5 ゴールを描き、人と協調して行動する

ある状況において人とロボットが膝を突き合わせつつ互いに協力して作業をするケースを考える。作業の目的やゴールは人もしくはロボットのいずれか一方がその場で即興的に決め、他方には事前に与えられていないものとする。このとき、人とロボットはどのようなインタラクションによりその目的やゴールを共有することができるか。また、それを達成するための行動プランやそれぞれの役割や担うタスクを合意することができるか。ここでは、具体的なケースとして2.4節で導入した【シーン1】を題材に取り上げ、その方法について考察する。

このシーンにおける共同作業の目的はバラバラなキットの部品からテーブルを組み上げることにある。もしこのシーンが自宅のリビングではなく、テーブルの製造工場のセル^{*7}での出来事であれば、その目的は始めから決まっており、組立の工程や人とロボットの役割や担うタスクもあらかじめ決められていて双方ともに同じ認識の上に立っているので冒頭の問いへの答えは簡単である。ロボットはプロトコルを事前に学習したり、あるいはコーチングを通じてそれぞれの役割や担うべきタスクを学ぶことができるだろう。ロボットはその目的を知る必要すらない。しかし、実際にはこのシーンは自宅のリビングでの即興的な出来事であり、テーブルを組み上げるといふ人の目的はロボットにとっては既知でない。自由な文脈において人が相手と目的を合意するための自然なやり方はことばや身振り手振りを使い対話によりその目的を伝えることである。それ故このやり方を取るのであれば、冒頭の問いは人とロボットの対話に関するものとなり、テキストを生成するコンテキストをどのようにして作り出すかという問いとなる。では、コンテキストの中の状況

{一次的活動領域 ⇨ 家具の組み立て、

一次的役割関係 ⇨ 人が組み立て、ロボットが手伝う}

はどのような対話を通して組織化されるか。それは{一次的活動領域 ⇨ 共同作業の開始}という状況を持つ別のコンテキストによる対話により創り出される。山口はこのような言語処理の基盤となるSFTの自然言語モデルの構図の中で、意味ベース(meaning base)と状況ベース(situation base)の必要性を提起している^[7]。ロボットは体験による学習でそれらの知識を獲得してゆく。他にもロボットは家具の組み立てに関するドメイン知識やコモンセンスを持っていなければならない。

シンはミンスキーのこころの6層モデル^[4]の下位3層(reactive, deliberative, reflective)^{*8}に対するコモンセンスを実装し、その考察を与えている(文献^[8])。その中で、図1に示すような仮想世界の中で一本の腕を持つ二人のエージェントが協調してテーブルを組み立てる事例

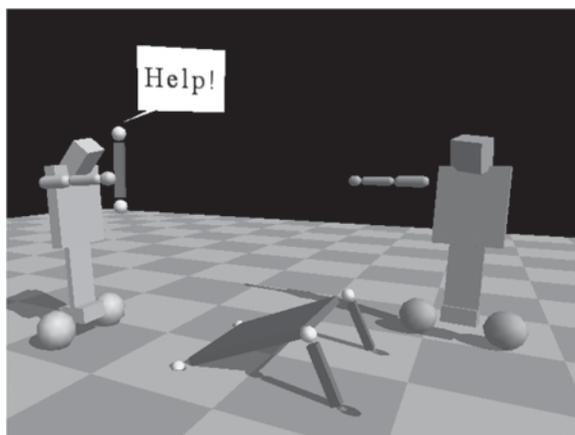


図1 仮想社会の中で2人のエージェントが協調してテーブルを組み立てるシナリオ^[8].

が取り上げられている。図1にて、左側のエージェントはテーブルに脚を取り付けたいが自分一人ではそれを達成できない。そこで近くにいる右側のエージェントに「Help!」と声をかけて手伝いを求めている。助けを求められた右側のエージェントは相手が手にテーブルの脚を持っていることを見て相手のゴールを推察する。この時点において、テーブルを分解するというゴールと、テーブルを組み上げるというゴールの2通りの可能性が考えられる。その後、右側のエージェントは助けを求めたエージェントが前者のゴールを持つと考えてテーブルの分解を手伝い始めるが、その動作を観察した左側のエージェントに「No!」と言われ、後者のゴールであるテーブルを組み上げる手順に切り替える。このシミュレーションにおいて、エージェントは身体能力的な側面・社会的な側面・心的側面のそれぞれの面からメタ知識と内省を用いて思考するコモンセンスを持っている。また、ドメイン知識であるテーブルを組み立てたり分解したりするために二人のエージェントがとるべき動作手順はスクリプトとして与えられている。

自由な文脈のもとでエージェントが協調して行動するときには、それがうまく進むよう、エージェントには、己の取る行動がどのように相手に認知されるかを考え（自己内省的思考）、行動を決め（自意識に関する感情）、行動に対して相手が示す反応からそれを確かめる対人的な知能が不可欠となる。

2.6 人の感情と付き合い

人には感情があり己の行動に影響を与えている。嬉しい・楽しい・怖い・腹立たしいなどの感情は主観的なものでありその当人にしかわからないが、強い感情はそれに伴い涙が出たり顔が赤くなったり動悸が激しくなったり乱暴な行動をとったりするような身体や行動に表れる変化として客観的に捉えることができる。

私たちはどのようにして自分の感情を認識しコントロールするのか。感情は人が成長しころが発達してゆく過程で単純なものからより複雑な感情に分化してゆく。まだことばを知らない幼児にも感情がある。ある教育現場では子どもの感情の発達に重きをおく教育が行われている。そこでは幼児が自分自身の感情と向き合うことができるよう「水だね、冷たいね」「笑ってるね、楽しいのかな」などのように大人が幼児の口の代わりとなり語りかけて、今体験して

いる行動や感覚、感情とその言語表現とを対応づけるトレーニングを実践している。また言語をある程度獲得している幼児に対しては、行動によりこころが動いて感情の変化が訪れたときに「いまどんな気持ち？」と尋ね、『Happy』『Sad』『Angry』などの感情を表す顔の表情とラベルが描かれたイラスト（図2）の中から今の自分の気持ちを子どもに選ばせ指し示させる感情のラベル付けのトレーニングを実践している。ミンスキーが文献^[4]で考察するように、たとえば『怒り』などの人の感情は原子的なこころの状態ではなく、空腹や渇きなどの『生きる』ことへの脅威に対するこころの反応である。その脅威に対して『怒り』は攻撃的な行動を誘い『恐れ』は逃避的な行動を誘うこころの状態である。それ故、時に『怒り』と『恐れ』どちらの感情が訪れているのかを自分でも区別できない状態に陥る。感情のラベル付けのトレーニングは幼児にそのような自己の感情を内省することを促す。子どもの感情が発達しグレードが上がるにつれて感情のラベルもより細かな多くの語彙を持つよう発達してゆく。このようなトレーニングにより基礎的な感情にラベルが付けば、捉えようのない複雑な感情の訪れに対しても（ラベルを使って）自己の感情を内省し合理的に行動することができるようになる。さらに、学校や家庭において日々色々な状況で互いに自分の今の感情を言葉で伝えあうトレーニングを通じて、自分の感情と行動が相手の感情をどのように変えるかを幼児は学んでゆく。このようにして自分の感情を内省し、相手の感情を察することができるようにこころが発達してゆく。



図2 湘南インターナショナルスクールの幼児教育で使われる感情を表す顔の表情とラベルが描かれたイラスト。

ロボットにこのような感情を扱う対自己的な知能や対人的な知能を持たせることはできるか。本章の冒頭で述べたように、人の感情の下位概念である情動は客観的に捉えることのできる現象として観測できるので、人のからだや行動に表れる変化からその時の情動のラベルを予測する分類モデルを構築することができよう。しかし、ロボットには人のような感情がないので『悲しい』『うれしい』などのラベルの意味を人と同じように捉える（接地する）ことはできない。

それでもロボットが人の感情を扱うことには意義がある。もし相手（人）の今の感情を察するラベル付けをすることができれば、ロボットはその意味を捉えられなくとも、「悲しいですね」「怒ってますか？」と語りかける反応動作をとることが可能となる。人と接するセラピスト・ロボットや人と行動を共にする愛玩ロボットにはこのような対人的な能力が求められよう。また、人は物質的なモノに対しても、それがあたかも意思を持つ生き物であるがごとく、『感情』を持っているように感じたり持っていてほしいと願ったりすることがある。たとえばエンジンが掛からない自動車に対して「今日は機嫌が悪く動きたがらない」といった感覚を持ったりする。長い年数を共にするパーソナルロボットにはあたかも個性や何らかの感情を持っているかのように人に感じさせる演出ができれば愛着を持つ要因となろう。

3. 現実の世界と内面世界との境界

ロボットは私たちと同じ現実世界の時空間で行動する。2章ではロボットの知的能力、すなわち、ロボットの内面世界を概観したが、このふたつの世界をどのように橋渡しするか、本章では、両世界の境界における本能的反応と学習反応を取り上げ、その個別の要素技術について簡単にふれる。

ロボットが世界を知覚する仕組みは必ずしも人と同じような感覚チャネルを通ずる必然性はない。たとえば、ロボットは通信ネットワークを通じて株価の変動や道路の混雑状況の変化などをリアルタイムに感じ取ったり、赤外線領域の光を見る目を通じてそのスペクトルから対象物の温度を感じたりすることもできる。

個々のセンサーからの情報は連続的（アナログ）で時間軸に対する変量であり、そのままでは並列分散的な意味を持たない潜在的な因数であるにすぎない。それらの情報を統合し安定した明示的な因数を生成することによって感覚として捉えられる。センサー刺激から感覚へ統合する仕組みの実装は生物の神経回路を真似る。大脳新皮質の構造と動作特性から着想を得た Hierarchical Temporal Memory (HTM)^[9]はロボットの複数のセンサーからの連続的で時間軸に対する刺激の変化を入力し、より抽象度の高い統合された因数に畳み込んで感覚として出力する機構として有望な技術となる。

感覚も連続的な値を持つ時間軸に対する変量である。感覚は本能的反応層（第1層）への入力となり、処理され、本能的反応行動を誘発させ、ロボットの駆動系への出力（アナログ）となる。たとえば、感覚から危険度を評価して逃避行動を誘発させたり、新たな刺激を求めて接近行動を誘発させたりする。なお参考までに、ヒトの場合にはこの過程は無意識な行動となる。

感覚は、同時に、学習反応層（第2層）への入力となり、そこで記号的に表現された対象として知覚され、学習反応による判断を誘発させる。たとえば、『危険』と書かれた表示を知覚してその場から立ち去る判断をする。感覚から知覚へ変換する仕組みの実装には深層学習の設計技法を応用する。

4. おわりに

不確実な世界にて人のように常識的な思考により世界を認識し、ゴールを描き、それに向かって人と協調して行動する知的なロボットの実現に向けた課題とその取り組みへの指針を示した。このようなロボットが集まって単独では達成することができないより大きなゴールに向けて協調し、さらに人のチームと交じりコミュニケーションをとりながら共に課題に取り組む——近い将来にそのような姿が訪れるであろう。本稿がその実現のための一助となれば幸いである。

最後に、人の感情に関する多くの示唆と気づきを下さった湘南インターナショナルスクールの岩澤ゲイティ ファウンダーと子供たち並びにスタッフの方々にこの場を借りて感謝の意を表する。

- * 1 ジル＝リーマンらによる例示を借りた。元の出典は、Jill Fain Lehman, John Laird, Paul Rosenbloom: A Gentle Introduction to SOAR, an Architecture for Human Cognition: 2006 UPDATE
- * 2 人工知能の開発は人並みの知能を目指しているのか。人工知能 (Artificial Intelligence) という研究領域を提唱しその研究の第一人者であるジョン＝マッカーシーは、この問いに対してつぎのように答えている。「そのとおりである。その究極は人と同じように世の中の問題を解決し目標を達成するコンピュータプログラムを作り上げること。しかしながら、個別の研究領域を専攻する研究者の多くはとてども保守的でありこのような考えを持っていない。」——言辭は筆者による意訳。原文はスタンフォード大学が公開しているジョン＝マッカーシーによるAIの解説WHAT IS ARTIFICIAL INTELLIGENCE?の中の次の記述——“Yes. The ultimate effort is to make computer programs that can solve problems and achieve goals in the world as well as humans. However, many people involved in particular research areas are much less ambitious.” <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/node1.html>
- * 3 エージェントとはその置かれている環境を知覚し行動する存在物のことである。
- * 4 通常私たちが「コンセンサスを持っている」というとき、それは世間一般の共通理解 (常識) に照らして正しい判断やふさわしい行動をとることを意味するが、人工知能研究の領域ではより広く捉えられている。
- * 5 ダイアログにて、(P)は人の発話、(R)はロボットの発話を示す。
- * 6 Michael Alexander Kirkwood Halliday は選択体系機能理論 Systemic Functional Theory の主導者である。
- * 7 この例えはワークセル生産方式を想定している。
- * 8 再下位層である instinctive reactions を除く。

- 参考文献**
- [1] Gardner H., Frames of mind: The theory of multiple intelligences, New York, Basic Books, 1983
 - [2] ゲーツェル ベン, 汎用人工知能概観, 人工知能, 人工知能学会, 20 卷 3 号 (2014), pp.228-233
 - [3] Goertzel B., Artificial General Intelligence: Concept, State of the Art, and Future Prospects, Journal of Artificial General Intelligence, Volume 5, Issue 1 (2014), pp.1-48
 - [4] Minsky M., The emotion machine: Commonsense thinking, artificial intelligence, and the future of the human mind, New York, Simon & Schuster, 2006
 - [5] Minsky M., The society of mind, Simon & Schuster, Inc. New York, NY, USA, 1986
 - [6] M. ミンスキー, 竹林洋一 (訳), ミンスキー博士の脳の探検—常識・感情・自己とは—, 共立出版, 東京, 2009
 - [7] 山口 登, 選択体系機能理論による自然言語モデルの構図:(その1): コンテキスト, システム, テキスト, 日本ファジー学会誌 Vol.10 No.3, pp.414-425 (1998)
 - [8] Singh P., Minsky M., EM-ONE: An Architecture for Reflective Commonsense Thinking, 2005 Doctoral Dissertation, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA, USA
 - [9] Hawkins, J., Hierarchical temporal memory, concepts, theory, and terminology. Numenta, Tech. Rep. (2006)

執筆者紹介 山田 茂雄 (Shigeo Yamada)

1983年日本ユニパック(株)(現日本ユニシス(株))入社。心的能力を備える知的エージェントや認知アーキテクチャの研究開発に従事。ACM, IEEE 各会員。

