

当財団では、産・学・官のネットワークづくりと情報交換の場を提供することを目的として、社会、経済から最新技術に至る幅広い分野の中から、時宜にかなったテーマを選定し、中部社研フォーラムを開催しております。

本レポートは、第282回（2016年7月21日）での講演「未来社会のカギはAI・ロボットとの共生」を元に、講演者の大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授浅田稔氏に執筆いただいたものです。

未来社会のカギはAI・ロボットとの共生

大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻
教授 浅田 稔



1. はじめに

本稿は、2016年7月21日、名古屋市のウインクあいちで開催された第282回中部社研フォーラム（公益社団法人中部圏社会経済研究所主催）での講演の概要を著したものである。

まず最初に、今回の講演のプロローグとして2つの話題を紹介する。1つは、特定非営利活動法人ダ・ヴィンチミュージアムネットワークの理事長として、昨年の2015年にダ・ヴィンチのアンドロイドを製作し、ミラノのレオナルド・ダ・ヴィンチ博物館に1ヶ月展示し、その後、大阪うめきたのナレッジキャピタルでも展示した。なぜ、ダ・ヴィンチか？それは、彼が、科学・技術、そして芸術をも包括した学際的な研究者・芸術家のパイオニアであり、現代に生きていたなら、必ずロボット研究者になっていただろうと察せられるからである。ロボティクスは単なる工学だけでなく、脳科学、心理学、社会学、そして哲学をも含むうる、まさに学際的な研究分野であり、そのアンドロイドを披露することで、子どもたちに科学・技術の夢を持ってもらおうという意図である。図1は、日経カレッジカフェでの連載の第一稿の表紙である。

2つ目は、ロボカップの話題である。第1回世界大会を1997年名古屋で人工知能の国際会議と一



図1 日経カレッジカフェでの連載の第一稿の表紙
(<http://college.nikkei.co.jp/article/49164311.html>)

緒に開催したのが、約20年前である。今年は、ドイツのライプチヒで第20回記念大会が盛大に開催され、そして来年2017年、再度名古屋で開催される。まさに20年後のロボカップであり、これからの未来のロボットとの共生を描く大会になると期待される。

さて、本題に入ろう。囲碁の世界で、最強の棋士を破るなど、最近、AIの活躍が目覚ましい。これまで、「人工痴能」と擲揄されてきたが、やっと使える道具になってきた感がある。そもそも人工知能とは何か？それ自体がタイトルの書籍が最近発行され、筆者も一章上梓している [浅田 16b]。国内の精鋭の研究者がそれぞれ、異なる価値観から多様なあり方を主張しており、その多様性こそ、研究の本質であろう。

(※1) <http://davinci-museumnet.org>

ところで、シンギュラリティ問題^(※2)も含めて、人間を凌駕するとの警告書も多い。例えば、マーティン・フォードの「ロボットの脅威」[マーティン・フォード 15]では、ブルーカラーの仕事だけでなく、ホワイトカラーの仕事も奪われると主張する。著者は最新技術の進化に楽観的で、それがもたらす未来社会に悲観的だが、筆者（評者）はその逆で、ある分野の進化がすべて全般に起こるとは考えにくいのと、未来社会はこのような技術と対峙^{たいじ}ではなく、共生だと信じている [浅田 16a]。そのためには、ロボットにも心のような機能が必要だ。心の理論 [デイヴィッド 05] は、霊長類の行動観察から提起され、最近では自閉症などの発達障害との関連も含め話題となっている。筆者は、心の種類を以下のように考えている [浅田 10b]。

- 心：人間の大人の心（定型発達）。
- こころ：未熟もしくは、こころらしきものがあると考えられる動物のこころなど。非定型発達者の場合も含まれるかもしれない。
- ココロ：人工物の心もどき、もしくはこころもどきが近いかもしれない。カタカナは四角くて、いかにもである。

本講演では、ココロを創る試みを通して、子どもこのころの発生や発達のなぞに迫ろうとするアプローチを紹介し、この問題を皆さんと多面的に捉えたい。そのための研究パラダイムとして、筆者らは、人間の認知発達過程の構成的理解を目的とする認知発達ロボティクスを提唱・推進 [Asada 01、浅田 09a、Asada 09] してきた。そこでは、核となるアイデアとして、「身体性」と「社会的相互作用」を掲げ、特に、人工システムの知的行動生成の必要条件として「身体」の重要性を説いてきた [浅田 98、浅田 01、浅田 04c、浅田 04b、浅田 09a、浅田 09b、浅田 10a]。そして、身体をベースに情動から知能への道筋を探ってきた。

本講演では、情動から共感に至る過程の理解と

構築を目指す構成的発達科学を導入する。まず、共感に至る過程を復習し、構成的発達科学の概要を示す。そこには、自己認知の発達に応じた段階的過程が存在する。具体的なアプローチの例として、脳を神経振動子ネットワークでシミュレーションすることで、脳神経系のポテンシャルを明らかにしようとする初期の基本構造に関するもの、親子間の情動共有（共感）のシミュレーションを通じた社会的相互作用の例、そして、心的印象が社会的相互作用によってどのように変化するかを心理・行動学的データおよびイメージング研究から明らかにしようとした研究を紹介する。本講演でのロボティクスの意味は以下である。

- (1) 設計理論：計算機シミュレーションや実ロボットなどの構成的手法を用いて、認知的な課題にアプローチする。
- (2) 発達の側面：事前に賦与するのではなく、可能な限り学習や発達で獲得する。
- (3) 人間の行動や心の研究のためにロボットを道具や刺激として用いる。

2. 感情の共有の発達

感情の共有は、一般に共感と考えられるが、感情・情動の場合と同様に、共感や同情なども、各研究者ごとに定義が異なるとも言われている。人工共感の設計に向けて、共感に関連する心的機能との関係について筆者がまとめた解説 [Asada 15、浅田 14] から、概念図として図2を示す。

詳細説明は、これらの解説に委ねるが、図2に示すように、一個体のなかの内部状態表現が各種認知機能の発達により、例えば、ミラーニューロンシステムを介して、自己の内部状態の中に、完全には自他分離がなされていないような表象が想定され、情動感染や物まね現象が生じる。次に自己への気づきを通じ、情動的共感が、さらには他者視点取得や心の理論、メンタライジングなどの高度心的機能が発達することで、認知的共感に至

(※2) コンピュータの知能が人間を超える現象のこと。2045年にはコンピュータの性能が人間の脳を超えるのではないかとわれている。

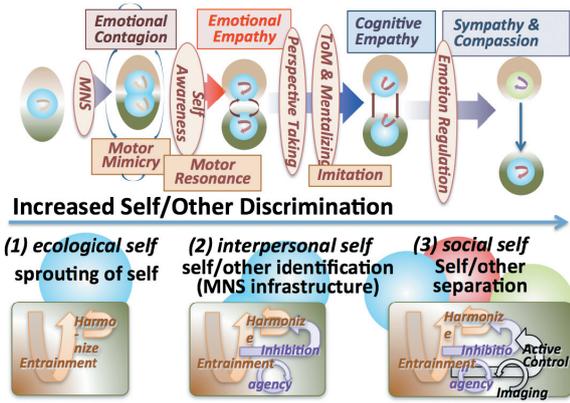


図2 人工共感の発達概念図
(文献 [Asada 15] のFig.6を改変)

る。そして、図には示されていないが、情動制御機能により同情や哀れみが生じる。この発達過程は、文献 [Gonzalez-Liencrea 13, Waal 08] などを参考にまとめたもので、自己の発達、自他認知、共感や模倣とも強く関連している。

3. 構成的発達科学の提案

解説 [浅田 04a] では、他の種と共通の原始的な情動応答から、高度認知機能を内包するヒト特有の情動応答まで情動の階層性を議論した。図2では、共感の発達過程を前提や帰結となる認知機能の系列と並行させている。人工システムの情動設計を考慮した場合も、これらの段階に応じた社会的応答を実現することが考えられる。設計者が表層的ななぞりを埋め込む段階から、学習発達過程を経て、各個人にカスタマイズされた共感ロボットの構築に至る過程である。

一般に発達過程は多様であるが、おおよその系列的な変化を想定し、ある段階の学習過程では、前提となるのが、前段階の学習過程で獲得された機能であり、現段階の学習過程で獲得される機能は、次の段階での学習過程の前提となる。先に説明したように、図2では、ミラーニューロンシステムを前提とすることで、情動感染が生じ、結果として自己の気づきに至るが、これが、次の段階の情動的共感の獲得の前提となるという具合である。必ずしも経路は1つではないが、ハンディキャッ

プの多い人工システムとしては、まずは、この経路を第一段階としてチャレンジすべきであろうと考えている。実際、どこまで埋め込んで、どこから学習過程に任すかは、ロボットにおける「氏と育ち」の問題であり、2016年のIEEE ICRA (International Conf. on Robotics and Automation : ロボット関係の世界最大規模の会議の1つ) で開催されたワークショップ「Nature vs nurture in robotics」では、この課題が議論され、筆者は先の段階的発達過程を内包する構成的発達科学を示した [Asada 16]。

情動や共感からもう少し枠を広げ、自己、自他認知、意識などの課題もより大きな枠組みでは、考慮されるべき対象である。実際、図2の下部には、すでに自他認知発達過程が共感の発達と並行して描かれている。このより大きな枠組みでのアプローチは、認知発達ロボティクスの拡張であり、構成的発達科学として提案する。その概念図を図3に示す。根源的な神経アーキテクチャから始まり、身体性や社会的相互作用に基づき、学習手法を介して、機能分化が段階的に生じる過程を描いている。学習規範として、予測的学習が注目されている。

構成的発達科学の究極のゴールは、系列的な発達段階すべてを通じた実現であるが、現状は、各段階において、試行錯誤している、根源的な神経アーキテクチャによる計算機シミュレーション、

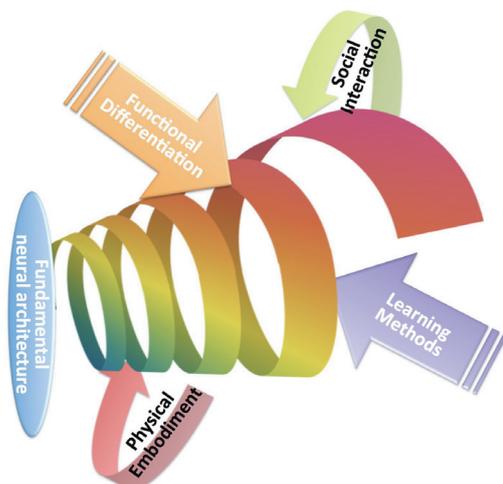


図3 構成的発達科学の概念図

fMRI（磁気共鳴機能画像法）やMEG（脳磁図）などのイメージング研究、心理・行動実験、それらを支えるロボットプラットフォームの研究が交差し、新たな価値観の創出を目指している。以下では、いくつかの試みを紹介する。

4. 神経ダイナミクス：最も基礎的なシステムの形態

身体と環境の相互作用により、さまざまな行動が創発する際の感覚運動系と脳神経系がどのような関係にあるかは、構成的発達科学における基本課題である。Park et al. [Park 15] は、非線形振動子のニューロンから構成される脳神経系がヘビのようなロボットの筋骨格系を通じて、環境と相互作用した際に生じるネットワーク構造について、情報の移動エントロピーを基に解析した。初めに、各関節角の時間相関を特徴ベクトルとして、行動パターンを解析し、おおまかに2つの運動パターンを抽出した。それらは、安定な行動パターン（継続時間が長い）とそれらを行き交う不安定な行動パターン（継続時間が短い）である。

次に、それぞれの行動パターン時の神経ネットワークを調べた。最初与えられた物理的に結線されたネットワーク（解剖学的ネットワーク）が固定であるのに対し、情報の移動エントロピーの計算により、推定された運動時のネットワーク構造は、行動パターンの安定、不安定により異なるサブネットワーク構造が生じた。図4にその結果を示す。中央の物理ネットワーク構造に対し、左右の因果

ネットワークが生じた。左は、安定行動パターンでまばらにつながった（一見、密度が高そうだが移動エントロピーは低い）多数のサブネットワーク構造で、環境との結合も弱い。片や、右は不安定鼓動パターンで1つの大きなサブネットワークが環境と強く結びついている。安定行動パターンは高次元状態空間でのアトラクターに、不安定行動は、安定行動パターン間の遷移を表し、全体としてカオス遍歴の様相を呈し、環境との相互作用による神経ネットワークのダイナミクスを表している。

1つの憶測は、原初的な意識（不安定状態：例えば崖っぷちの歩行）・無意識（安定状態：例えば通常の歩行）に対応していないかという期待である。情報統合理論 [Tononi 15] による統合情報量の計算は困難を極めるが、不安定状態の方が安定状態よりも大きいと察せられる。

5. 共感の発達

前節の研究では、学習も価値システムも導入されておらず、それらが無い場合の神経ネットワークのポテンシャルを示したものである。先の安定状態でのサブネットワーク構造は、それぞれに機能があると期待される。機能創発には、タスクの設定や学習アルゴリズムが必要となる。以下では、少しジャンプするが、共感の発達過程のモデル化、さらに人間の心理的欲求の1つである関係性への欲求に注目した親子間相互作用の動機づけモデルを示す。養育者が子どもの情動的な顔の表情をまねしたり、大仰にしたりする直観的親行動は、発達心理学において、母親の足場作りと見なされている [Gergely 99]。子どもたちは、これに基づいて、共感を発達させるとされている。Watanabe et al. [Watanabe 07] は、ロボットが共感的な応答を学習するために、ロボット自身の内部状態と養育者がまねしたり、誇張した顔の表情とを関連づける人間の直感的親行動をロボットを使ってモデル化した。内部状態空間と顔の表情を心理学的知見を用いて定義し、それらは、外的刺激に応じて、ダイナミックに変化する。学習

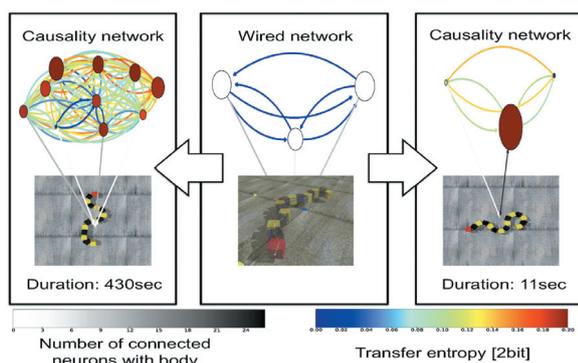


図4 互いに遷移しあう二種類の因果ネットワーク

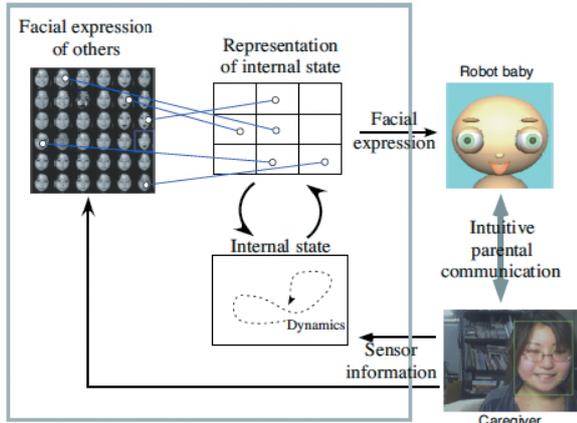


図5 直感的親行動に基づく子どもの共感発達の学習モデルにおける自身の内部状態と観察される他者の顔表情との連合

後、ロボットは人間の顔表情を観察することで、養育者の内部状態に応答する。そして、ロボットは、それに呼応するように、自身の内部状態を変化させ（共感）、それに対応する顔の表情を表出する。

図5は、養育者の直感的親行動を通じて、共感の感覚を発達させる子どもの学習モデルを示す。子どもが情動的な体験をし、顔の表情を変えることで、その感覚を表出し、養育者は共感し、付随して、誇張された表情を示す。そして、子どもは、経験した情動と養育者の顔表情の間の関係を発見し、相互に情動と顔表情を結びつける。この図の情動空間は、Russell [Russell 80] が提案したモデルに基づいて構成されている。この再分化過程は、情動伝染から情動的共感への発達を表して

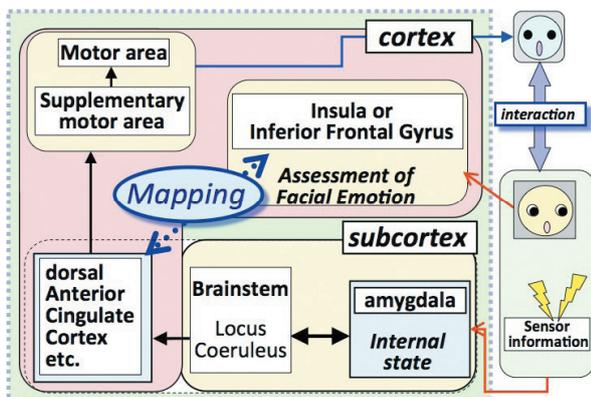


図6 文献 [Watanabe 07] における計算モデルのための神経解剖学的構造

いるとも考えられる。

関連文献 ([Fana 11、Shamay-Tsoory 09、Liddell 05]) 中の共感に関する神経学的実体を考慮して、上記の計算モデルのための神経解剖学的構造の概要を図6に示す。それぞれの文献では、異なるタスクデザインと機器で行っており、神経学的実体の統一性は保証されない。むしろ、この構造はおよそのネットワーク構造を伝えることを意図している。学習者が相互作用中に偶然遭遇する養育者の顔表情は、下前頭回 (IFG) と島で処理されると想定され、背側前帯状皮質 (dACC) に投影される。そこは、自身の情動状態を表出するための顔筋を駆動する学習者の情動空間を保守管理すると想定される。

6. 社会脳解析

構成的発達科学のもう1つの側面は、人間の発達過程の新たな理解のための手段やデータを提供することである。ロボットは、心理実験などにおいて、再生可能でバイアスがかからないシステムティックな刺激や道具として利用可能である。

Takahashi et al. [Takahashi 14] は、異なるエージェントとの社会的相互作用が心的能力の印象に、いかに影響を与えるかを調べた。彼らは、人間、アンドロイド (Actoroid F)、メカ的ヒューマノイド (infanoid)、ペットのようなロボット (Keepon)、そしてコンピュータの5種類のエージェントを用意し、まず最初に印象をアンケートにより尋ねた。次に、fMRIスキャナーの中で、硬貨合わせゲームを被験者にさせた。アンケートの主成分分析の結果、第一、三主成分が心的機能評価 (マインドホルダー) とエントロピー (高い値がゲーム戦略の複雑さを表す。マインドリーダー) と対応した。図7は、5種類のエージェントの2次元配置を示しており、x、y軸は、それぞれマインドホルダー軸、マインドリーダー軸を表している。それぞれの相手に対する主成分の評価値は、被験者全員の平均を表している。人間、アンドロイド、ヒューマノイドは、マインドホルダーとマ

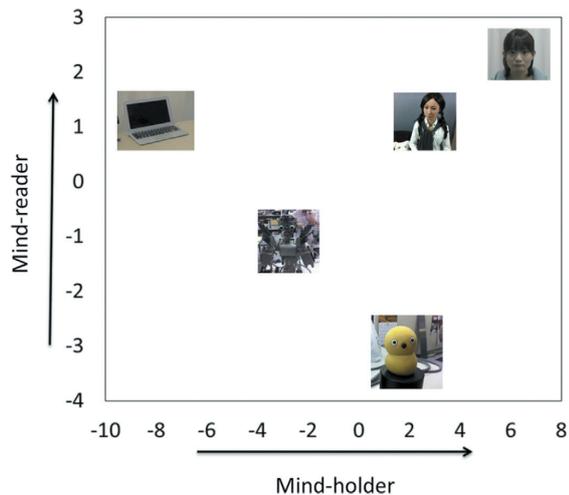


図7 5種類の相手の2次元配置。x軸はマインドホルダーを、y軸はマインドリダーを、それぞれ表す(本文参照)。それぞれの相手に対する主成分の評価値は、被験者全員の平均を表している [Takahashi 14]

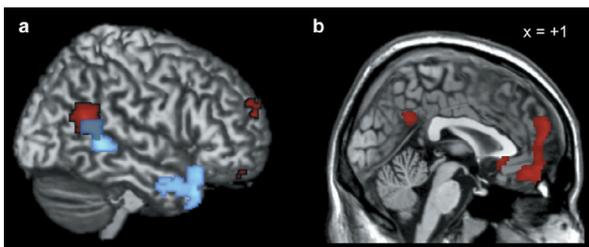


図8 fMRI計測の結果：マインドホルダー(赤)とマインドリダー(青)によって活動した脳領域。(a)では、MNI標準脳の側面に領域が描かれ、(b)では、矢状断面 $x = +1$ 上に領域が描かれている。青灰色は、両方に共通して活性化した領域である [Takahashi 14]

マインドリダーの正の相関を持っているが、Keepon(コンピュータ)は、負の相関で、高い(低い)マインドホルダー性でかつ低い(高い)マインドリダー性を示した。

これらの2つの社会的印象の側面が、2つの異なる脳内ネットワークの活動と対応していることをfMRI計測結果は示した。マインドホルダー(赤)は、背側-内側帯状回路を、マインドリダー(青)は、前腹側TPJ(側頭頭頂接合部)と側頭極をそれぞれ賦活している(図8)。マインドホルダーやマインドリダーなどのエージェントとの社会的相互作用は、社会脳の脳内表象を明瞭に形作り、意志決定に役立っている。マインド

ホルダー性とマインドリダー性は、共感の情動的/認知的側面に部分的に対応するかもしれない。それらの発達過程を解きほぐすことは、構成的発達科学の課題である。

7. おわりに

共感の設計をシンボリックなゴールと想定して、感情や情動の発達を構成的に明らかにすることをもくろむ構成的発達科学を導入し、その試みの一部を紹介した。神経ネットワークのダイナミクスでは、環境との相互作用により生み出される動的パターンが意識・無意識の原初的な構造にならないかとの期待がある。統合情報量は、その計算が難しいが、なんらかの指標により、その構造を明らかにしたい。共感発達では、関連する機能モジュールを設計者が用意したが、本来は、身体や環境の複雑さが増すことで、機能分化が生じ、社会的要素を導入することで、更に機能分化が生じ、結果、ネットワーク構造のなかで感情や同情の表象が生まれると期待したい。社会脳解析で得られた心的要素としての認知的・情動的側面は、発達の観点からは、当初未分化で、徐々に分化していくと考えられる。これもサブネットワーク構造の機能分化として発現させたく、その際の社会的環境の要件などを明らかにしなければならない。最後に本講演のメッセージとして、以下を示しておく。

- ココロを創る試みを通じて、心やこころの新たな理解を深めよう。
- ココロを創る試みを通じて、未来社会で人間と共生するロボットの設計論にいかそう。
- 多様な心(こころ)のあり方を社会が受け入れと同時に、多様なココロのあり方を許容しよう。
- ロボットは対峙する相手ではなく、共生するパートナーとしての存在。

謝辞

本講演の一部は科学研究費補助金特別推進研究

「神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学」(JP24000012)の支援によって行われた。本研究の参画メンバーおよび研究室メンバーに感謝する。

参考文献

- [Asada 01] Asada, M., MacDorman, K. F., Ishiguro, H., and Kuniyoshi, Y.: Cognitive Developmental Robotics As a New Paradigm for the Design of Humanoid Robots, *Robotics and Autonomous System*, Vol.37, pp. 185-193 (2001)
- [Asada 09] Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M., and Yoshida, C.: Cognitive developmental robotics: a survey, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol.1, No.1, pp.12-34 (2009)
- [Asada 15] Asada, M.: Towards Artificial Empathy, *International Journal of Social Robotics*, Vol.7, pp.19-33 (2015)
- [Asada 16] Asada, M.: Robot nature via robot nurture: from cognitive developmental robotics to constructive developmental science, in *In Proceedings of the IEEE ICRA Workshop on Nature vs nurture in robotics*, p. Vol.USB (2016)
- [Fana 11] Fana, Y., Duncana, N. W., Greckc, de M., and Northoffa, G.: Is there a core neural network in empathy? An fMRI based quantitative meta-analysis, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol.35, pp.903-911 (2011)
- [Gergely 99] Gergely, G. and Watson, J. S.: Early Socio-Emotional Development: Contingency Perception and the Social-Biofeedback Model, in Rochat, P. ed., *Early Social Cognition: Understanding Others in the First Months of Life*, pp.101-136, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum (1999)
- [Gonzalez-Liencrea 13] Gonzalez-Liencrea, C., Shamay-Tsooryc, S. G., and Br " u nea, M.: Towards a neuroscience of empathy: Ontogeny, phylogeny, brain mechanisms, context and psychopathology, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, Vol.37, pp.1537-1548 (2013)
- [Liddell 05] Liddell, B. J., Brown, K. J., Kemp, A. H., Barton, M. J., Das, P., Peduto, A., Gordon, E., and Williams, L. M.: A direct brainstem-amygdala-cortical 'alarm' system for subliminal signals of fear, *NeuroImage*, Vol.24, pp.235-243 (2005)
- [Park 15] Park, J., Mori, H., and Asada, M.: Analysis of causality network from interactions between non-linear oscillator networks and musculoskeletal system, in *Late Breaking Proceedings of the European Conference on Artificial Life 2015*, pp.25-26 (2015)
- [Russell 80] Russell, J. A.: A circumplex model of affect, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol.39, pp.1161-1178 (1980)
- [Shamay-Tsoory 09] Shamay-Tsoory, S. G., Aharon-Peretz, J., and Perry, D.: Two systems for empathy: a double dissociation between emotional and cognitive empathy in inferior frontal gyrus versus ventromedial prefrontal lesions, *Brain*, Vol.132, pp.617-627 (2009)
- [Takahashi 14] Takahashi, H., Teradad, K., Moritaa, T., Suzukie, S., Hajib, T., Kozimag, H., Yoshikawah, M., Matsumotoi, Y., Omorib, T., Asadaa, M., and Naito, E.: Different impressions of other agents obtained through social interaction uniquely modulate dorsal and ventral pathway activities in the social human brain, *Cortex*, Vol.58, pp.289-300 (2014)
- [Tononi 15] Tononi, G. and Koch, C.: Consciousness: here, there and everywhere?, *Phil. Trans. R. Soc. B*, Vol.370: 20140167, p. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2014.0167> (2015)
- [Waal 08] Waal, de F. B.: Putting the Altruism Back into Altruism: The Evolution of Empathy, *Annu. Rev. Psychol.*, Vol.59, pp.279-300 (2008)
- [Watanabe 07] Watanabe, A., Ogino, M., and Asada, M.: Mapping Facial Expression to Internal States Based on Intuitive Parenting, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.19, No.3, pp.315-323 (2007)
- [デイヴィッド 05] デイヴィッドプレマック, アンブレマック, 長谷川寿一 (監修), 鈴木光太郎 (翻訳): 心の発生と進化: チンパンジー, 赤ちゃん, ヒト, 新曜社 (2005)
- [マーティン・フォード 15] マーティン・フォード (著), 松本剛史 (翻訳): ロボットの脅威一人の仕事がなくなる日, 日本経済新聞出版社 (2015)
- [浅田 98] 浅田稔: 身体性による知能の発現, 人工知能学会誌, Vol.13, No.1, pp.14-15 (1998)
- [浅田 01] 浅田稔: 再考: HAL設計論, 人工知能学会誌, Vol.16, No.1, pp.86-89 (2001)
- [浅田 04a] 浅田稔: エンタテイメントロボティクスと情動・知能, 人工知能学会誌, Vol.19, No.1, pp.15-20 (2004)
- [浅田 04b] 浅田稔: 意味を取り出すためのハード -身体, けいはんな社会的知能発生学研究会 (編), ブルーバックス B1461知能の謎 -認知発達ロボティクスの挑戦, pp.91-109, 講談社 (2004)
- [浅田 04c] 浅田稔: 認知発達ロボティクスによる赤ちゃん学 の試み, ベビーサイエンス, Vol.4, pp.2-27 (2004)
- [浅田 09a] 浅田稔: 身体・脳・心の理解と設計を目指す認知発達ロボティクス, 計測と制御, Vol.48, No.1, pp.11-20 (2009)
- [浅田 09b] 浅田稔: 認知発達ロボティクスによる身体・脳・心の理解と設計の試み, 心理学評論, Vol.52, No.1, pp.5-19 (2009)
- [浅田 10a] 浅田稔: ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, pp.18-25 (2010)
- [浅田 10b] 浅田稔: ロボットという思想 -脳と知能の謎に挑む-, NHKブックス (1158) (2010)
- [浅田 14] 浅田稔: 情動発達ロボティクスによる人工共感設計に向けて, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.8, pp.666-677 (2014)
- [浅田 16a] 浅田稔: ブックレビュー: 迫力ある記述で描く未来予測ロボットとの共生を探る手がかりに, 日経サイエンス, Vol.46, No.2, p.120 (2016)
- [浅田 16b] 浅田稔: 認知発達ロボティクスによる知の設計, 松尾豊 (編), 人工知能とは, 第6章, pp.115-138, 近代科学社 (2016)