癒し系ロボットとソフトマテリアル

柴 田 崇 徳*

Soft Materials for Therapeutic Robot

Takanori SHIBATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan)

Seal Robot, Paro, has been developed as a therapeutic robot for people at hospitals and elderly institutions. The body of Paro is covered by "Ubiquitous Surface Tactile Sensor" beneath its artificial fur. The sensor has soft structure. Paro has other kinds of sensors and actuators for physical interaction with humans and its autonomous behaviors. Results of psychological experiment show importance of the physical interaction for interpretation of emotional behaviors of Paro and for high subjective evaluation value. Paro has been used for therapy at children's hospitals and elderly institutions as well as at home. Paro has three kinds of effects to humans; psychological effect, physiological effect and social effect.

Key Words : Therapeutic Robot, Human Robot Interaction, Tactile Sensor, Physical Interaction, Robot Therapy

1. は じ め に

人と共存・共生するロボットは、物理的な作業を行う場合もあるが、人の心へ影響を与え、主観的な評価を重視する機械である¹⁾。そのため、産業用ロボットのように客観化された環境とロボットという閉じたシステムではなく、ロボットと相互作用する人の精神や未知の環境を考慮し、開いたシステムとして設計する必要がある。つまり、人の主観や感性を考慮しなければならない複雑なシステムであるため、従来の科学技術の概念だけでは設計できない^{2,3)}。

本稿ではまず、人と共存・共生するロボットとして、感情的人工生物の研究開発について紹介する³⁻¹²⁾。感情的人工生物は、ペット動物のように、生活に必要以上の存在として、人と対等な存在関係を持ち、人から命令されて動作するだけではなく、自律的に心や感情を持つかのように行動し、人と身体的に触れ合う。その相互作用により、人に楽しみや安らぎなどの精神的な効果を与える。単なるおもちゃではなく、人の心を豊かにし、癒すことにより精神的な病を予防するとともに、日常生活の余暇に楽しみを与え、人のメンタルな部分でコミットする。これを「メンタルコミットロボット」と称している。

筆者はこれまでに、動物を導入することが困難な医療・福祉施設において、アニマル・セラピーの代わりに、ロボット・セラピーを実施することを目的にして、メンタルコミットロボットのうち、あまり身近ではない動物として、

タテゴトアザラシの赤ちゃんをモデルにした「パロ」を製作し、実証実験を行いその効果を検証しながら、改良を重ねてきた。

このメンタルコミットロボットを研究開発するに当たり、従来の心理学の研究や、人とロボットの触れ合いに関する自らの心理実験を通して、ソフトでさわり心地の良いテクスチャーを有するロボットの重要性を示した。その結果を基に、ソフトマテリアルを用いたユビキタス面触覚センサを開発し、パロに用いている。

2章では、客観性と主観性について述べる。3章では人と共存・共生するロボットが持つべき機能について、4章では、人とロボットの相互作用により主観的解釈の中に発現する感情的な行動について述べる。5章では、感情的人工生物としての動物型メンタルコミットロボットについて述べる。6章では、アザラシ型メンタルコミットロボットと触覚について述べ、最後に7章でまとめる。

*産業技術総合研究所能システム研究部門
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1)主任研究員、および科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「相互作用と賢さ」発展研究。平成4年、名古屋大学大学院博士課程電子機械工学専攻修了。博士(工学)。専門は、ロボット工学。

2. 人工物の設計における客観と主観

科学技術は客観主義によって発達し、その普遍化、共通化を図ってきた。「技術」は、科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し、人間生活に役立たせる技である。その基礎となる科学は、体系的であり、経験的に実証可能な知識である。

一方、「芸術」は、一定の材料、技術、様式を駆使して、美的価値を創造・表現しようとする人間の活動およびその所産である。美的価値を備えた実用品をつくることは工芸である。産業革命以降、自動化や人の労働補助のための機械は、人から与えられた作業目的に依存して、設計され、速度や精度等の「客観的尺度」により評価され、最適化されてきた¹³⁾(図1)。機械は、工場だけでなく、家庭生活においても使われてきた。20世紀の物質主義においては、客観的尺度により表現される量や力や速度などが豊かさの象徴でもあった。この考え方は、社会における共通的な大量生産・大量消費を奨励した。

しかし、今日の成熟した社会においては、物質主義に対する否定的な考え方が芽生え始め、その関心は環境やエネルギーの問題を捉え、その結果、生活の豊かさや快適さにおける尺度が変化しはじめた。本稿ではこれを精神主義と呼び、社会における物事に対する尺度の多様化の結果、個人の「主観的尺度」が重きを持つことを意味する。

精神主義の社会において、人と共存・共生する機械あるいはロボットの「価値」は、相互作用する人が主体かつ観察者として、主観的に評価する。特定の作業を目的としない場合には、芸術のように、完全に主観によって人がロボットを評価できる場合もある。そのため、人の労働の補助には役立たないと評価されたとしても、人の主観的評価が高い機械は存在しうる。逆に、主観的に評価の高い機械は、愛着を持って大切に長年使われ得る。また、商品としては、付加価値の高い物となる。そのため、資源の有効利用、省エネルギー、ゴミ排出の減少などの観点からも、非常に重要である。そこで、主観的価値をいかに創造するかは社会的に重要であり、本研究の目的の一つである。

図1 人工物の設計における応用分野別主観的評価と客観的評価

3. 人と共存・共生するロボット

人と共存・共生するロボットは、介護ロボット、お手伝いロボット、案内ロボット、ペット型ロボットなど様々な応用が想定できる¹⁾。工場で用いられている産業用ロボットとの大きな違いは、ロボットの「環境」と、ロボットの「自立性・自律性」である。これらは、ロボットの「知(インテリジェンス)」にも関わっている。

まず、「環境」について産業用ロボットの場合には、人がロボットに近づかないようにし、また一定の作業を正確・高速に繰り返すことができるような環境を整備している。一方、人が活動する環境は、屋外はもちろん、屋内であっても一定ではなく複雑・多様である。そのため人と共存・共生するロボットは様々な環境で複雑な行動・作業を行うことを求められる。そのためには、次の機能が必要である¹⁴⁾。

- (1) 環境情報と自己の状態を認知・認識するためのセンサーとその情報処理機能
- (2) アクチュエーターとその駆動制御
- (3) 環境に適合した制御、行動戦略のため価値観や知識を用いた推論機構
- (4) 人とのインタフェース

このような機能を統一的に満たすためのロボット制御システムは複雑である。ロボットの台数が複数になったり、人とのインタラクションがあったりする場合には一層複雑である。従って、ロボットの存在目的に応じて設計する必要がある。

次に、「自立性・自律性」について、産業用ロボットのように人の労働を補助し、道具として使われるロボットの場合には、人から行動・作業の目的を与えられ、客観的な評価尺度が規定される。整備された環境の中で、目的とする行動・作業を達成するための最適化問題として制御することとなる(例えば、^{15, 16)})。一方、人と共存・共生するロボットの場合には、応用目的に応じて、自立性と自律性のレベルが異なる。例えば、お手伝いロボットを考慮すると、人がマスターとしてロボットに命令を与えつつ、ロボットが自立して行動する必要があるが、自律して勝手な行動をとることは望まれない。人に従順であることを求められる。しかし、ペット型ロボットの場合には、動物のように完全に自律的に行動して、人と対等な関係を持つ場合や、あるいは人に従順な行動をとることを期待される場合がある。後者の場合には、ある程度の自律性を持ちながら、人の命令に従うような行動が期待される。

ここで、ロボットの「知」に関して考察する。産業用ロボットの動作は高速かつ正確であり、客観的尺度による評価は高い。しかし、人が作業目的や作業規範を与えているのであり、人を越える発想をロボットがしている訳ではな

い。人により整備された環境の中で「機械的」に作業を繰り返して行えるだけである。その作業を観察する人は、ロボットの動作を「素晴らしい」と解釈する人もいれば、「単純な動きの繰り返し」と解釈する人もいる。つまり、「観察者」が主観的に感じるロボットは必ずしも「知的」ではない。つまり、「知」は観察者によって決められているのである^{3, 17-21)}。

「知」があるように感じさせるロボットを作るためには、観察者の主観に訴える何かが必要である。その一つとして、ロボット自身が行動の目的や動機を生成し、不確かな環境の中で適応しながら行動する「自律性」が重要である。そして、自律性をもつロボットを人が観察する場合、ロボットに心や感情があるかのように解釈し、それをもって「知」の尺度にする。そこで、上記の(1)から(4)に加えて、次の(5)が、人と共存・共生する知的なロボットに重要な機能である。

(5) 心や感情を持つかのように感じさせるシステム(相互作用により発現)

ただし、心や感情の正確な解析的モデルが必要という意味ではない。相互作用する人が、主体としてロボットを観察したときに主観的に、ロボットが心や感情を持つかのように解釈できればよい。

このように、(1)から(5)の機能をもつロボットが知的なロボットになりうると考え、それを統合したロボットとして「感情的人工生物」の研究開発を93年から始めた³⁾。感情的人工生物は、人の命令により行動するのではなく、自律的に行動するので、人と対等な存在関係にある。お互い

にコミュニケーションにより情報を伝達し合い、刺激し合う。そのため、その相互作用を外部から観察するときには、フィードバックではなく、人と感情的人工生物の「カップリング」として観察できる^{6, 8)}。これらを実証するために、感情的人工生物として動物型ロボットの研究開発を進めてきた。

主観的な評価は、観察者である人が自らの尺度で対象を解釈し、評価する(図2, 3)。人と感情的人工生物とのインタラクションにおいては、主体である人が、観察者でもあるため、相互作用しながら対象である感情的人工生物を解釈・評価する。その折りに、主体が自らの感覚で受ける情報により自らの経験や知識に基づいて連想を行い、コミュニケーションにおけるコンテキストや自らの意図に依存して対象について解釈し、自らの価値観に依存して評価を行う。

4. 相互作用により主観的解釈の中に発現する感情的な行動

人が物を解釈するときには、客観的な尺度を利用して物を理解し解釈する場合もあるが、普通の生活においては、自らの主観的な尺度によって、その物をもつ意味や意図を理解しようとする場合が多い(図3)。そのとき、人は感覚を用いて、物を知覚する。

人工物に対する主観的解釈や評価について説明する。人工物には、彫像や絵画のように静的なものや機械やロボットのように動的なものがある。それらの人工物の作者(製作者・設計者)が存在し、自らの意図や価値観を人工物に埋め込んでいる。主体が人工物と相互作用するときには、自らの感覚により知覚するが、その解釈においては、自らの経験や知識に依存している。そのため、人工物そのものに依存して解釈・評価される場合と、作者に関する経験や知識にも影響を受ける場合がある。本研究においては、前者だけを扱う。また、作者により人工物に埋め込んである意図や価値観は、主体によって同じように解釈されるのではなく、主体が勝手に解釈する。

図2 主体とロボットの相互作用とその観察者

図3 インタラクションを通じた主観的解釈と評価

次に、人が持つ感覚について、古くからは五官(感)と呼ばれるが、現在では視覚、聴覚、嗅覚、味覚、皮膚感覚、運動感覚(自己受容感覚)、平衡感覚、内臓感覚の8系統が一般的である。皮膚感覚はさらに触覚、圧覚、温覚、冷覚、痛覚に分けられる²²⁾。

感覚の種類とそれに即した体験内容は感覚モダリティである。例えば、視覚と皮膚感覚はモードの違いであり、視覚における赤、青、黄色などの色彩の違いは、同一モードの中での質の差である。人の知覚については、人は感覚からの刺激を受けると、脳の中樞神経系がその刺激による連想と推論から意味づけを行っている。

例えば、コンピュータ内部の仮想動物と人との相互作用では、主体である人の視覚と聴覚を刺激するだけであり、身体的な触れ合いはない。そのため、人に対する刺激の質の違いとして情報量が多くても、人の知覚におけるモード数は少ない。

一方、身体を持つロボットと人との相互作用においては、実世界の中で人の視覚、聴覚、皮膚感覚、運動感覚、平衡感覚などを刺激する。従って、身体的な相互作用は、モードを多様化する。

そこで、感情的人工生物として本研究で扱う動物型ロボットが、相互作用する主体に対して本物の動物であるかのような解釈を行わせる、すなわち主観的に心や感情があるかのように解釈させるための仮説を次のように立てた。

- (1) 現実世界で身体をもち、動物を連想させるため人の多くのモードを適切に刺激することが必要である。
- (2) 人が推論を行いながら解釈するため、相互作用において、仮説的に人が意図を持って刺激を与えたときに、人の期待から大きくはずれない反応を示すことが必要である。ただし、予期しない行動もとりうる。
- (3) 相互作用におけるコンテキストに依存して、人が連想や推論を行うため、動物型ロボットの一連の行動が人の主観的解釈に影響を与えることを考慮しなければならない。

これらの仮説を検証するため、心理実験を行い、人の主観的解釈がどのように変化するかを調べた。この実験では、1つの触覚センサーをなでると、その刺激に応じて1自由度の棒が左右に振れ、その速度は、なでる頻度によって変

化した。被験者が、触覚センサーをなでた時、ただの棒が触れているときには、何ら意味を見出されなかった。次に図4のように、棒を犬の尻尾に見立てた場合、被験者が触覚センサーをなでた時、身体的相互作用を通じたカップリングとして、動き方、外観、発生する音、被験者が持つ意図によって、システムの挙動に対して人の主観的解釈に複雑さをもたらし、感情的な意味を見いださせることができた。ただ、被験者の解釈は一樣ではなかった。また触覚センサーの触り心地によっても、解釈に違いがあった。これらの結果を考慮して、動物型ロボットの研究開発を行った。

5. 動物型メンタルコミットロボット

感情的人工生物の応用分野として、エンタテインメントやコミュニケーションのインタフェースなどの研究があるが²³⁻²⁵⁾、本研究においては、アニマル・セラピーにおいて動物が果たす役割のように、人に楽しみや安らぎなどの精神的な効果を与え、人の心を癒したり、豊かにしたりすることを目的とする「メンタルコミットロボット」の研究開発を進めている^{10, 26-33)}。

5.1 動物型ロボットの形態による分類

人とロボットが短期間インタラクトするときに、主体である人が以前から有している自らの知識や経験に依存し、ロボットの動作を解釈したり、自らの価値観に依存してロボットを評価したりする。このとき、ロボットの形態からの連想は大きな意味を持つ。そこで、ロボットの形態に関して、動物型(非人間型)ロボットを3つのカテゴリーに分類した。

- (1) 日常生活でペットとしてなじみの深い動物(犬、猫など)
- (2) 認知度はあるが、普段は触れ合うことが少ない動物(アザラシ、鯨、ペンギンなど)
- (3) ほとんど知られていない動物、架空の動物・キャラクター等

カテゴリー(3)については、様々な設定ができるため、商品デザインとしては重要であるが、主体における知識や経験の度合いを測ることが困難なので研究対象とはしていない。また、短期間の相互作用では、人やロボットの学習機能の効果の影響がないが、長期間相互作用を継続すれば、

図4 主体が触覚センサをなでることによる尻尾の振れの変化

主体が元々持っている知識や経験に関わらず、主体がロボットに関する新たな知識や経験を獲得し、主観的解釈や評価に大きな影響を与えるようになり、また、ロボットも学習機能などにより、時間的に人との関係が築き上げられていくため、人に与える影響は変化する。

5.2 動物型ロボットのプロトタイプ

筆者は、犬型ロボット(95年から97年: MIT人工知能研究所に於いて, 図5), アザラシ型ロボット(Ver. 1)(98年: 同, 図6), ネコ型ロボット(98年: オムロンと共同開発, 図6)を研究開発した。なお, 犬型ロボットと言っても機械的なため, カテゴリー(3)にも分類され, 本物の

図5 初期犬型ロボット

犬とはほど遠い形態であったが仕草, 行動, 反応は犬を参考にした。図6(a)と(b)で, アザラシロボットと猫ロボットで, コスチュームの有無を比較する。コスチュームが無い状態で, アザラシや猫を連想することは難しく, またかわいさなどの主観的評価に大きな影響を与えと言える。

犬型ロボットは, 視覚, 聴覚, 触覚を有していた。視覚は, 動きのある物体に注意を向けたとき, その色を短期記憶し, 注意が続く間, トラッキングした。聴覚は, 音の強さと位相差から方向を同定し, 注意があれば, その方向に視覚を向けた。

触覚は, 図6のロボットを覆うファブリックの下で, 柔らかさを持ちつつ人の接触状況を認識するため, 「風船型触覚センサ」を開発し, 人がなでたり, 叩いたりしたときの圧力を検知した。それぞれのセンサからの刺激は, ロボットの内部状態を変化させた。そして, 内部状態の変化により, 注意の向け方が変えた。ロボットの持つ価値として, 軽く圧力が継続的にかかる状態(なでられる)を良い信号(心地よい)とし, 急激な圧力の変化(叩かれる)を悪い信号(いや, 痛い)とした。この価値をロボットの強化学習に用い, 行動ルールの修正に用いた。

猫型ロボットは, カテゴリー(1)に分類され, 本物の猫を模倣した外観を持ち, 行動を生成する。一般に猫はペットとして人と共存・共生しているが, 「気分屋」や「人の

(a) コスチュームなし

(b) コスチューム有り

図6 アザラシ型(第1世代)と猫型ロボット

図7 アザラシ型メンタルコミットロボット・パロ(第8世代)

命令に従わない」など自律性が高いイメージがある動物である。人との身体的相互作用を重視する構造として、ロボットは触覚と聴覚と平衡感覚のセンサーを身体に持つ。

触覚センサーは、頭部と背中に静電タイプのシート状のセンサーを用い、顎に3つのスイッチを用いた。この静電タイプのシート状の触覚センサーは、ベースにある程度硬さが必要であったため、触り心地は良くなかった。猫型ロボットを88名の人々に20分間触れ合ってもらい、その前後でアンケートによる主観評価を行ったところ、見た目だけでは、期待感があり、評価が高かった。20分間の触れ合いの後、評価が低かった人は、評価を高める傾向があったものの、最初に高い評価をしていた人は、本物の猫と比較して、触り心地や反応が違うなど厳しい評価があり、評

(a) ユビキタス面触覚センサー

(b) マトリクス配置のユビキタス面触覚センサー

価を落とす傾向があった。

初代のアザラシ型ロボットの場合には、触覚センサーとして、ひげとしてニードル型スイッチを用い、毛皮のしたでは、風船型触覚センサーを用いた。後者は、人に柔らかさを感じさせつつ、人がなでたり、叩いたり触れ方を認識できるように開発した。アザラシ型ロボットの場合には、触れ合いの前後での主観評価において、本物と比較されることがほとんど無く、触れ合った後で評価を高める傾向があり、多くの人々に受け入れられやすいことがわかった。そこで、アザラシ型ロボットをメンタルコミットロボット「パロ」として、改良を重ねた。

6. アザラシ型メンタルコミットロボットと触覚

アザラシ型メンタルコミットロボット「パロ」の改良にあたり、CPU機能の向上、静穏型アクチュエーターシステムの開発、学習機能、など多くの新規研究開発項目があったが、本稿では、人との身体的な触れ合いに関わる触覚について述べる。

パロの全身(床と接する腹部を除く)に触覚センサを埋め込むことにより、人との触れ合いによる相互作用のおりに、人からの接触情報を認識するようにした。同時に、人に対して、触り心地や抱き心地を良くするため、触覚センサーそのものの柔軟性が重要であった。第5世代のパロまでは、素材を改良しながら、エアバッグ式面触覚センサーを研究開発した。複数のエアバッグを人工毛皮の下に入れることにより、人の接触の位置、なでているのか叩いているのか、またなでる方向などの検出を行った。これらの情報は、パロによってなでられると心地が良く、叩かれると嫌がる、などの価値に用いた。しかしながら、長時間の使用により、パロの内部で温度変化がある場合に、エアバッグの内部圧力に変化があり、温度ドリフトが問題であった。

そこで、新たに柔軟なスポンジ状の構造を内部に持ち、その両面を導電シートで覆った静電タイプの面触覚センサーを開発した。形状、大きさ、厚み、硬さを設計でき、パロの胴体に限らず、様々な面を覆って触覚センサーとして

(c) 接触の位置と力情報の表示

図8 ユビキタス面触覚センサーとマトリクス状に配置されたシステムにおける接触情報

図9 ハーローによる子ザルの実験
(Harlow Primate Laboratory, University of Wisconsin)

用いることができることから、「ユビキタス面触覚センサー」と名づけている³¹⁾。第6世代のパロからは、ユビキタス面触覚センサーでパロの全身を覆い、人との触れ合いを認識しつつ、柔らかな構造を持つロボットとして、心地よい触れ合いに寄与している。なお現在の第8世代までに、素材や製造方法を改良し、10万回のなでテストを行うなど、耐久性、精度などを向上させている。

日本国内で約800名の人々を対象に、このパロのセラピーへの応用の目的やその効果などを説明した後、短期的に5分から10分間ほど触れ合ってもらい、パロに対する様々な主観評価をしてもらった。その結果、パロに対する評価は高かったが、それらのデータを統計的に分析すると、パロの「見た目」と「触り心地」に関連する項目が高い評価に寄与していることが明らかになった³²⁾。また世界各国で実施した主観評価実験でも、同様の結果であった³³⁾。そのため、パロに対する主観的な評価を高めるために、「触り心地」に関しては、ユビキタス面触覚センサーだけ

ではなく、人工毛皮の素材(抗菌糸)に依存する触り心地、温かみを感じるための温度制御、パロの重量とそのバランスなどの点も考慮して、パロを作り出している。

なお、身体的な触れ合いの観点では、ウイスコンシン大学のハーローの実験では、生後間もない小ザルに、ミルクを持った針金製の母ザルと、ミルクを持たないが柔らかな毛布で作られた母ザルを与えたところ、後者を選んだ³⁴⁾。その結果として、ミルクよりも、柔らかなものに触れることを子ザルが求めたことから、「触れる」ことは生物の本能として重要であることが示されている。

図10に、介護老人保健施設におけるロボット・セラピーの様子を示す。2003年8月から週2回、1時間ずつ、15名程度の高齢者が3体のパロと触れ合っている。1年半以上、パロと触れ合っているが、高齢者達は、毎回、大変楽しみにしている³⁰⁾。セラピーの効果として、心理的な効果として、気分の向上、「うつ」の改善、動機付け(杖をついたり、車椅子で自らパロの場所にやってくるなど)があり、生理的な効果としてストレスの低減(尿検査により検証)があり、社会的な効果として、高齢者同士や年齢に大きな違いがある介護者との会話が活発になるなどの効果がある。また大勢の高齢者に対し、1、2名の介護者だけで楽しく時間を過ごすことができ、介護者の心労の低減の効果もあった。

高齢者は、パロと触れ合うことにより、パロ自身を楽しむ人がいれば、昔飼っていたペットや孫や過去の赤ちゃんの養育などを回想していたりしている。図10の触れ合いの様子からもわかるように、身体的な触れ合いは、非常に

(a) パロへほおずりする

(b) パロを抱きかかえ、話しかける

(c) パロへキスする

(d) パロをなでる

図10 高齢者向け施設における高齢者とパロとの触れ合い

重要な要素であり、ソフトマテリアルによって構成されたパロの柔らかなボディが大きな役割を果たしている。

7. ま と め

人と共存・共生するロボットは、産業用ロボットのように、精度、速度などの客観的尺度だけでは評価できず、相互作用する人の主観的評価が重要である。特にロボットの自律性を重視する場合には、環境と人との相互作用から発現する行動が、観察者である主体の経験や知識に依存する主観的解釈によって意味づけされ、主体の持つ価値観で評価される。そのため、ロボットの設計者・製作者が埋め込んだ意図や価値観とは必ずしも一致しない。

本稿では、ロボットと相互作用する主体による主観的解釈を深め、主観的評価を高めるために、主体の感覚を適切に刺激し、連想記憶を引き起こす手法として、身体的触れ合いによる人とロボットのカップリングの重要性について、心理実験や形態により分類される3種のロボットを用いて検証した結果について概説した。結果として、主体からロボットの行動について、感情を意味する言葉により表現されることができ、ロボットに生命があるかのような解釈をされた。さらには、ロボット・セラピーとして、ロボットが人に心理的、生理的、社会的効果を与えるおりに、身体的な触れ合いが重要であることを示し、ロボットとの自然な触れ合いのために、インタフェースとしてのソフトマテリアルの重要性について述べた。本稿が、人と共存するロボットの要素技術として、新たなソフトマテリアルの開発や、その応用の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Sugano, S.: Robot, No. 128, pp. 8-11 (1999)
- 2) Shibata, T., Fukuda, T. ed.: Future of Artificial Life - Technology for Creation of New Creatures, Jiji Press (1994)
- 3) Shibata, T.: From Robot to Artificial Creature, System, Control and Information, **40**, (8) (1996)
- 4) Shibata, T. et al.: Project, Proc. of 5th IEEE Int'l Workshop on ROMAN, pp. 466-471 (1996)
- 5) Shibata, T. Irie, R.: Proc. of the IEEE/ASME Int'l Conf. on AIM'97 (Jun. 1997) paper #47 and 6 pages in CD-ROM Proc.
- 6) Shibata, T. et al.: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on SMC, pp. 2269-2274 (1997)
- 7) Tashima et al.: Proc. of RSJ 16th Conf., **1**, 11, 12 (1998)
- 8) Shibata, T., Tashima T., Tanie, K.: Procs of the IEEE ICRA (1999)
- 9) Tashima et al.: Proc. of RSJ 17th Conf. (1999)
- 10) Shibata, T.: Journal of RSJ, **17**(7), 943-946 (1999)
- 11) Shibata, T.: Journal of RSJ, **18**(2), 200-203 (2000)
- 12) Shibata, T., Tanie, K.: Proc. of the IEEE IROS-2000 (2000)
- 13) H. Petroski, Invention by Design, Harvard University Press (1996)
- 14) Shibata, T., Fukuda, T.: Fuzzy Robot - Soft Computing for

Intelligent Systems, Asakura Press (1997)

- 15) Sanchez, E., Shibata, T., Zadeh, L.: Perspectives of Fuzzy Logic and Genetic Algorithms, Scientific World Co. Ltd. (1997)
- 16) Shibata, T. et al.: Robotics and Autonomous Systems, **18**, pp. 65-73 (1996)
- 17) V. Britenberg, Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology, The MIT Press (1984)
- 18) Pfeifer, R.: 'Fungus Eater Approach' to Emotion: A View from Artificial Intelligence, Cognitive Studies, The Japanese Society for Cognitive Science, **1**(2)42-57 (1994)
- 19) Brooks, R.: Intelligence without Representation, Mind Design II (John Haugeland ed.) The MIT Press, pp. 395-420 (1997)
- 20) Toda: Design of Fungus-Eater, Behavioral Science, **7**, pp. 164-183 (1962)
- 21) Toda, M.: Emotion - Adaptive Program Controlling Human, Univ. of Tokyo Press (1992)
- 22) Katori, Sugimoto: Psychology, Univ. of Tokyo Press, pp. 119, 120 (1996)
- 23) Fujita, M., Kageyama, K.: Proc. of Agent'97 (1997)
- 24) Fujita, Y.: Journal of RSJ, **2**(2), 198-199 (2000)
- 25) Yamamoto, Mizutani: Journal of RSJ, **18**(2), 192-194 (2000)
- 26) Shibata, T. et al.: Proc. of the IEEE/ASME Int'l Conf. on AIM'01, paper number 182 and 6 pages in CD-ROM Proc. (2001)
- 27) Shibata, T., Wada, K., Saito, T., Tanie, K.: Proc. of Int'l Conf. on Information Technology in Mechatronics, pp.71-76, 2001
- 28) Wada, K., Shibata, T., Saito, T., Tanie, K.: Proc. of the IEEE, **92**(11), 1780-1788 (2004)
- 29) Saito, T., Shibata, T., Wada, K., Tanie, K.: Proc. of the 7th Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, **1**, 316-319 (2002)
- 30) Wada, K., Shibata, T., Saito, T., Sakamoto, K., Tanie, K.: Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (2005)
- 31) Shibata, T.: 2004 1st IEEE Technical Exhibition Based Conf. on Robotics and Automation Proc. pp. 5, 6 (2004)
- 32) Shibata, T., Mitsui, T., Wada, K., Tanie, K.: Jour. of Robotics and Mechatronics, **14**(1), 13-19 (2002)
- 33) Shibata, T.: Proc. of the IEEE, **92**(11), 1749-1758 (2004)
- 34) Harlow, H. F.: American Psychologist **13**, 673-685 (1958)

日本語表記参考文献

- 1) 菅野：ロボット，No. 128，pp. 8-11 (1999)
- 2) 柴田，福田，編著：人工生命の近未来－新たな生をつくるテクノロジー，時事通信社 (1994)
- 3) 柴田：ロボットから人工生物へ，システム/制御/情報，**40**(8)，(1996)
- 7) 田島，斎藤，大角，工藤，柴田：第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，**1**，11，12 (1998)
- 9) 田島，斎藤，柴田：第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1999)
- 10) 柴田：日本ロボット学会誌，**17**(7)，943-946 (1999)
- 11) 柴田：日本ロボット学会誌，**18**(2)，200-203 (2000)
- 14) 柴田，福田：ファジィロボット－インテリジェントシステムのためのソフトコンピューティング，朝倉書店，(1997)
- 21) 戸田：感情－人を動かしている適応プログラム，東京大学出版会 (1992)
- 22) 鹿取，杉本：心理学，東京大学出版会，pp. 119，120 (1996)
- 24) 藤田：日本ロボット学会誌，**2**(2)，198-199 (2000)
- 25) 山本，水谷：JRSJ，**18**(2)，192-194 (2000)