人間型ロボットの研究*

Studies on Humanoids

石黒 浩**

Hiroshi ISHIGURO

Key words humanoid, android, bio-inspired robotics, cognitive developmental robotics, android science

1. はじめに

ホンダの人間型ロボット P3, そしてそれに続く ASIMO¹⁾が開発されて以来, 日本では, 人間型ロボットの研究開発が急に盛んになってきた. このホンダの貢献は, 無論独自の新しい技術開発もあるが, それまでの技術を丁寧に積み上げれば, ロボットの研究開発にたずさわる者が夢に見てきた, 人間型ロボットを実現できるということを知らしめたことであろう.

ホンダに続いて, 産業技術総合研究所や早稲田大学や東京大学などで, 研究開発用の人間型ロボットが開発されるとともに, ラジコンサーボを用いた小型の人間型ロボットを製作販売する企業も幾つも現れた.

人間型ロボットの研究開発の当初の目的は, 二足歩行という実現が困難であると思われていた移動手段を確立することであったり, さらに, 人間の姿形で人間が日常的に行う作業を代行することであった.

しかし, 日常的な作業を代行するという目的の実現はいまだ遠い. 特に, 近年その必要性が高まる高齢者の介護等の作業においては, 人間型ロボットではなく, それぞれの作業に特化した形態をもつロボットが利用されている. 日常的な作業の代行においても, 当面はこのような特殊なロボットが状況や目的に応じて開発されていくと考えられる.

その一方で, 人間型ロボットの研究開発の目的は, 作業から人との相互作用にその研究の焦点が移ってきている.

「なぜ人間型ロボットは人間のような姿形を必要とするのか?」という問いに対する答えには二通りある. 日常作

業を目的とするロボットにおいては, 「人間と同じ環境で活動するため」であるが, 人との相互作用を目的とするロボットにおいては, 「人間が相互作用しやすい姿形が人間型であるため」である. この後者の答えが, 最近一部で研究が盛んになりつつある人間型ロボットの研究の基本仮説となっている. 本稿ではこのようなロボットの動向を筆者の研究を中心に紹介する.

2. 人間型ロボットの研究動向

ホンダが比較的大きな P3 に続いて, 子供サイズの ASIMO を 2000 年に開発した一つのきっかけは, 人と自然にかかわれるロボットを造るという目的があったと聞く. 同様のことが, 産業技術総合研究所で開発されている人間型ロボットの HRP シリーズにもいえる. HRP-2 までは, 人間が行う日常的な作業や, 人間との協調作業 (2 人でテーブルを運ぶ等) が, ロボットのタスクとして紹介されてきた.

しかし, 最近 (2009 年) 開発された HRP-4C²⁾は HRP-2 とは少し異なる目的をもっている (図 1 参照).

図 1 HRP-4C ((独)産業技術総合研究所開発)

*原稿受付 平成 21 年 10 月 22 日

**大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻 (大阪府豊中市待兼山 1-3)

石黒 浩

1991 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了, 工学博士. その後, 山梨大学, 大阪大学, 京都大学, カリフォルニア大学, 京都大学, 和歌山大学, 大阪大学 (工学研究科) を渡り歩く. 2009 年より現職および ATR 知能ロボ

ティクス研究所客員室長.

図2 アンドロイド Repliee Q2
(大阪大学と(株)ココロの共同開発)

HRP-4C は、産業技術総合研究所で研究開発が行われてきた実時間 Linux, RT ミドルウェア, ロボットシミュレーター OpenHRP3, 音声認識, 二足歩行技術等の RT (ロボットテクノロジー) 基盤技術を利用したユーザ指向ロボットオープンアーキテクチャにもとづき開発されている。この HRP-4C は、身長 158 cm, 体重 43 kg (バッテリー含む) で、関節位置や寸法は「日本人人体寸法データベース 1997-98」の青年女性の平均値を参考に、人間に近い外観を実現しており、エンターテインメント分野, 人間シミュレーターとして人間用の機器の評価, 人間の動作を補助する機械への応用が期待されている。

このように、HRP-4C においても、単なる日常作業から、人間とのかかわりを意識した設計になってきている。

3. 人間酷似型ロボットとその発展

人間とのかかわりを最も重視したのが、筆者が(株)ココロとともに 2004 年に開発したアンドロイド (人間酷似型ロボット) Repliee Q2³⁾である (図2参照)。人とかかわるロボットの開発においては、動きだけでなく、見かけも重要である。Repliee Q2 はこの見かけの問題を研究するために開発された。

ロボットの見かけの研究において問題となったのが、不気味の谷⁴⁾である。ロボットは見かけに応じた動きをもつ必要があるが、そのバランスが取れていないと、ロボットは急に不気味になる。

Repliee Q2 は、この不気味の谷を越えるために、見かけだけでなく、動作や表情も人間らしくなるように設計されている。動きの範囲は限られてはいるが、上半身に組み込まれた 43 本の空気アクチュエータで、人間のような自然な動作が可能となっている。また、さらには、皮膚センサや、ロボットの周りに多数の床センサ、カメラ、マイクを備え、それらのセンサネットワークを用いて、訪問者の動作認識が安定に行えるようになっている。

図3 ジェミノイド HI-1
(ATR 知能ロボティクス研究所開発)

Repliee Q2 は、もはや大きな不気味感は伴わなくなったが、多くの人はその見かけから人間らしく対話することを期待する。しかしながら、その対話能力には限界がある。これはすべての人間型ロボットに共通する問題であり、人工知能研究の限界でもある。

この問題を解決し、さらに研究を進めるために、筆者自身をモデルにした、遠隔操作機能をもつ実在人間に酷似したアンドロイドを開発した。これをジェミノイド (Geminoid HI-1)⁵⁾と呼ぶ (図3)。このシステムでは、音声と大まかな動作に関する情報を送ると、ジェミノイドがそれに応じた唇の動きや、人間らしい自然な動きを再現するようになっている。すなわち、遠隔操作によってジェミノイドに本人が乗りうつり、遠隔地の人と対話することができるのである。

このシステムは非常に興味深い現象を生む。例えば、操作者は、しばらくシステムを使うと、ジェミノイドの体が自分の体であるかのような錯覚を覚える。それと同時に、ジェミノイドと対話する訪問者も、自然にジェミノイドの目 (カメラの機能はない) を見て、普通に話すようになる。すなわち、相互に適応し、操作者も訪問者もこのジェミノイドを私本人の体であるかのように思うようになるのである。

このアンドロイドを用いた一連の研究を、アンドロイドサイエンスと呼ぶ。アンドロイドサイエンスでは、科学と工学が同居する。より人間らしいアンドロイドを実現するために、認知科学や脳科学の知見をヒントにする。一方で、開発されたアンドロイドは認知科学や脳科学の仮説を検証するというテストベッドになるのである。

アンドロイド Repliee Q2 の開発において、その基本問題は人間らしさであった。人間はどうやってその人間らしさを表現しているのか? そして、その人間らしさはアンドロイドで表現できるのか? という科学的問題と工学的問題に同時に取り組んでいた。一方、ジェミノイドでは、

図4 子供ロボット CB2
(JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト開発)

人間の存在とは何かという、より哲学的な問題にまで踏み込んでいる。

近年、このアンドロイドやジェミノイドの研究は、さらに発展し、ブレインマシンインターフェース (BMI) の研究とも関連をもってきている。ジェミノイドは遠隔操作型のアンドロイドであるが、BMI の技術を用いれば、人間の脳の反応とジェミノイドを直接結びつけられる可能性がある。

4. 認知発達ロボット

ロボットがアンドロイドのように複雑化してくると、次に問題となるのが、制御方法である。実際に、多数の空気アクチュエータをもつアンドロイドの制御は非常に難しい。空気で駆動するために DC サーボモータのように正確には動かない。また、他のアクチュエータが動くと、その周りのアクチュエータの動作にも影響を与える。ある意味、人間の筋肉に近いのであるが、そのことが制御を非常に難しくしている。

一方で、人間はより多くの筋肉 (アクチュエータ) と感覚器 (センサ) をもちながらも、その複雑な体を巧妙に制御している。無論生まれた直後は、うまく自らの体を制御できない。しかし、1, 2 年のうちに自分の体を制御する方法を学習できるのである。

複雑なロボットのソフトウェア開発においては、この人間のように発達する機能の実現が必要不可欠である。この研究は、浅田 (大阪大学) を代表とする JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトで取り組まれている⁶⁾。図はこのプロジェクトにおいて、発達するソフトウェアを開発するためのテストベッドとして開発されたロボット CB2 である (図4 参照)。このロボットは、全身に 56 本の空気アクチュエータ、約 200 の皮膚センサ、2つのカメラ、2つのマイクロフォン、音を発する人工声帯をもつ、非常に複雑なロボットである。

このロボットを用いて、幾つもの研究成果が報告されている。例えば、ロボットが運動学習する際の介助者の助け

である。ロボットが複雑な機構をもつ場合、ロボット自らが、自らの力だけで運動を学習することは難しい。人間同様に親や周りの者の助けが必要となるのである。ロボットが介助者に助けられながら立ち上がる運動を学習するために、どのような制御が必要となるかが研究されている。

また、このロボットは複数のモダリティをもつ。従来のロボットの研究では、視覚や聴覚など個々のモダリティに注目して、それぞれ独立にその機能を実現してきた。しかし、人間は複数のモダリティを同時に学習している。実際に複数のモダリティを同時に学習する機能を、このロボットに実装すると、個々のモダリティを学習するよりも遙かに早い速度で学習できることが確認されている。

5. 生体原理模倣型ロボット

CB2 は人間の赤ちゃんの発達をヒントに開発されたが、それでも、人間とは根本的に異なる。その最も大きな違いが、ノイズの利用である。

生体システムは、分子から細胞、個体、さらには社会のレベルに至るまで、ノイズを巧妙に利用しながらその複雑なシステムを超低消費電力で制御しているのである。例えば、人間の脳は 1 W の電力しか必要としないが、それにも劣ると思われるスーパーコンピュータは、50000 W の電力を必要とする。すなわち、これまでの人工物は、多大なエネルギーでノイズを抑制していた。一方、生体システムは、ノイズを抑制するのではなく、むしろ積極的に利用しているのである。このノイズ利用のメカニズムを「ゆらぎ」⁷⁾と呼ぶ。

ゆらぎの一般式を以下に示す。

$$\frac{d}{dt}x = f(x) \cdot \text{activity} + \eta, f(x) = \frac{-dU}{dx}$$

このメカニズムの構成要素は、次の 3 つに整理される。1 つ目はもちろん「ノイズ」 η である。システムの詳細な構造を曖昧にすることで、高次元システムの有効次元数を減らしコアス化する上でも有効に働く。2 つ目はポテンシャル $U(x)$ で、ゆらぎを受け入れコアスなオーガナイズを可能にする構造をもつエネルギー関数である。3 つ目は上の例でいうバイアス activity で、環境変化に応じてポテンシャルを変調させ、ゆらぎによるアトラクター選択を実現する。系にとっての「都合の良さ」を表している。

ゆらぎ方程式は生物の制御原理を示すと同時に、複雑なロボットや情報システムの制御にも利用できる。ゆらぎの一般式において、従来の制御方法は、 $dx/dt = f(x)$ に相当する。すなわち、対象を正確にモデル化した $f(x)$ を基に最適解を探索してきた。しかし問題は、複雑な問題においては、対象が正確にモデル化できなかったり、対象が変化することである。この問題を生物は、 activity によって、自らがもつノイズや環境に存在するノイズ η とモデル $f(x)$ のバランスを取りながら、適応する。この activity は一般には、目標状態までの近さを表すセンサ値である。すなわち、目標状態から遠いときは、 activity を下げるこ

図5 生体模倣型腕ロボット（大阪大学開発）

で、ノイズを利用してランダムに探索し、目標状態に近いときは、*activity* を高くして、モデル $f(x)$ に従って、効率的に目標状態に近づくのである。

このゆらぎによって、従来の制御方法では制御できない複雑なロボットが制御できることを示すために、図5に示す腕ロボットを開発した。この腕ロボットは、人間骨の構造と筋肉の配置を模倣した、26本のアクチュエータで構成されており、複雑さから、従来の制御方法では容易に制御できない。しかし、ゆらぎ方程式に従った制御方法では、腕を目標に近づけたり、腕をぐるぐる回すというような制御が可能になった。

生体がゆらぎをどのように利用しているかはすべてが明らかにされているわけではない。例えば、生物ではノイズ

として、ブラウン運動だけでなく、Levy flight という特殊なノイズを用いていることや、ゆらぎによる制御だけでなく学習が巧妙に組み合わされていることや、ゆらぎの制御が階層的に組み上げられていることも分かりつつある。今後、生体の仕組みがより明らかにされれば、さらに効率的で複雑な動作が可能になると期待される。

6. おわりに

本稿では、人間型ロボットから始まって、人間酷似型ロボット、認知発達ロボット、さらには生体模倣型ロボットの研究を紹介した。人間型ロボットの研究は、それ自体が人間理解の研究でもある。今後はより関連分野との連携を密にしながら、新たな人間理解の研究として発展していくと期待される。

参考文献

- 1) <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- 2) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090316/pr20090316.html
- 3) H. Ishiguro: Scientific Issues Concerning Androids, International Journal of Robotics Research, **26**, 1 (2007) 105-117.
- 4) 森政弘：不気味の谷, Energy, **7**, 4 (1970) 33-35.
- 5) 西尾修一, 石黒浩：人として人とつながるロボット研究, 電子情報通信学会学会誌, **91**, 5 (2008) 411-416.
- 6) M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro and T. Inui: Cognitive Developmental Robotics towards Understanding and Designing Body, Brain, and Mind, IEEE Trans. Autonomous Mental Development, **1**, 1 (2009) 1-24.
- 7) 柳田敏雄, 四方哲也, 石黒浩, 村田正幸：生体ゆらぎに学ぶ知的人工物と情報システム, 応用物理, **78**, 8 (2009) 788-794.