解説

ヒューマノイドの発達プロセスの研究

Research on Developmental Processes in Humanoids

稲 葉 雅 幸* *東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻
Masayuki Inaba* *The University of Tokyo

1. はじめに

ねがえりもできなかった子が全身で感じ全身で反応して育ち、歩きはじめ、片言を覚えて、少しは手伝いも頼めるようになる。そんな成長がどうして出来上がっているのか。運動、感覚、知能などの研究だけでなく、それらがすべて絡みあっているように見える人の成長のプロセスをどう研究すればよいのか。

人間の機能をもつヒューマノイドの実現研究、世の中への応用研究、人間との対話、模倣、知能の基礎研究など、ヒューマノイドを土台としてなされる研究が育ちつつあるなか、ヒューマノイドの試作と実験を容易にする方法論と環境を築くことで、発達段階の異なるヒューマノイドを同じ環境で研究できるようにもなり、人が段階的に成長し機能発達するプロセスをその環境のなかで考えることができる時代になってきた。

人間の知能の仕組み研究に計算機があるように、実体も含めた人間の成長の仕組み研究にヒューマノイドが必要である。どういう操作や環境があればそのレベルに育っていくのか。人間が何をしてヒューマノイドがどうするようになっていけば育つというプロセスが成り立つのか。出来上がったある段階のヒューマノイド自体でなく、それが発展させられていく各段階間を結ぶプロセス自体が重要な題材となる。運動能力も未熟で感覚も未発達なヒューマノイドから、様々な形の段階的な発達が試みられ、それぞれにおける発達のプロセスを表現し、それらにおける本質的な操作は何であったかを探る研究である。そういった発達プロセスの研究に対するアプローチの一つを概説する。

2. 発達プロセスの研究

発達するプロセスを研究するということは、ある段階へ到達すること自体の研究ではなく、発達の段階が刻まれ、その段階間の差と操作を明らかにするということである。

図1 発達プロセス研究の構図

図1において、A, B, Cは特定の目標レベル H_a , H_b , H_c をそれぞれ目指した研究開発であり、到達できた内容に重点がある研究におけるプロセスである。発達プロセスの研究は、 H_a , H_b , H_c の流れに対して、W, X, Yらの操作が何であったかを明らかにしようという研究である。

発達していく際の変化部分に着眼し、なにゆえにその変化が可能となったか。変化に必要なだった操作は何か、前の変化は今の変化とどうちがうか。共通性はあるか。次の変化は今の変化と同じ形で進めるか。各段階の変化が共通のもので表現されるには何が必要か。そういうことを形式化して見ようという研究である。

3. 研究の場とアプローチ

発達プロセスを研究するには、各段階の実体とその表現形を持ち、それらを統一的に見通すための場や枠組が必要である。(1) 各発達段階のための実体の開発が容易で、(2) 各段階の実体の表現形を統一的に表現でき、(3) 異なる表現形を比較し切替えることも可能で、(4) 同じ環境において、複数の発達段階の実体とその表現形の両方を相互比較できること、などが要求されよう。

リモートブレインロボット [1]~[3] の環境はこのような環境に適した条件をもっている。ボディ上に大規模な計算機を載せないためにボディのプロトタイピングが容易である。ボディの物理的条件に左右されないで大規模なブレイン用計算機や実体表現用計算機を使い得る。ブレインと仮想ボディを開発用計算機環境におけるため、それらの表現を簡単に操作できる。同じ実ボディに対してブレインプログラムを切替えて各種実験が簡単に行える。そして、複数の段階のヒューマノイドの実体とその表現を同じ環境に持

原稿受付 1997年8月13日

キーワード: Humanoid, Developmental Psychology, System Evolution, Remote-brain Approach

*〒113 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

つことも容易で、相互比較や異なる表現への入れ換えなどの操作も可能な形となっている。その実験的な環境において、実ボディ、動作、行動、感覚、神経、ブレインなどがそれぞれどのように進展してきているか以下に示す。

4. 身体構造と基本動作の展開

全身を使つての身体運動、移動行動、物体の初期操作までの段階的な発展を見るために、身体構造と複雑度が異なっているボディが複数台開発された。最初は10自由度からはじめ[4]、図2に示すような、16自由度2種類(図2a, b)[5]、22自由度(c)[6]、35自由度(d)[7]のボディが出来上がってきた。足の自由度数が(a)から(d)へ、3~6と異なっている。その自由度の違いから、それぞれのロボットにおいて、(a)ナックル歩行、(b)二足歩行、(c)抱え歩行、(d)上半身制御と立ち上がり動作を段階として区切った研究が行われてきた。

形態や運動性能の違いからできる行動とできないものが現れ、発展の段階が刻まれる。基本性能は満たしているがその運動を行う方法が未解決の場合もある。

ボディは市販のアクチュエータを関節モジュール化し、それらの組み合わせで作られる。ブレイン部においてそれらがEuslisp[8]を用いてモデル化される[9]。組み合わせ方を計算機上で考え評価する方向も生まれた[10]。すべて

のボディはクラス化され同じ継承機能を用いて新しく作られるボディもモデル化される[11]。

5. 視覚に基づく行動とその生成

視覚に基づく行動として、(1)目でバランスをとる。曲がった階段を登る[12]、(2)対象物を見つけて掴もうとする時に上肢下肢を適応的に使う[13]、(3)目で動きを知りブランコや鉄棒をする[14][15]、などがなされた。

これらの行動のソフトウェアは並列処理化も可能になったEuslisp[16]によって進展してきた。実時間性を保持する階層型のブレイン系が構成され、並列分散トランスペュータを用いるもの[17]から、高速化する並列ワークステーション上ですべてを行う形も進展しつつある[18]。

行動生成は、(1)ブレインプログラムの画面にユーザインタフェースを設け、実ボディを通して確認しながら作る方法、(2)ボディと視覚のモデルからプログラムで行動手順を組む方法、(3)入力用装置として人形を作り、ソフトウェアでそのデータをオンライン処理する方法[19]、(4)仮想環境を作りそのなかで動作をさせ評価基準を設けて動作を生成させる方法[20]がなされてきた。

6. 全身分布の触覚

椅子に座ったり立ち上がったたりするヒューマノイドが出来上がると、そこに座っているという感覚を持っていないことにあらためて気づかされる。次の発展形として触覚をもたせたい、それも全身に、という思いがおこる。

全身に分布させるには、軟らかさ、作りやすさ、使いやすさなどの評価基準をバランスよく満たしたセンサ機構と多数配線の実用的手法が課題となる。導電性の布と糸という素材を使い、センサスーツが出来上がった[21]~[23]。精度や分解能を求める段階への発展以前に、全身へ分布していることの重要性をもった段階が形成された。そして、全身の触覚に基づく行動実験、他の感覚情報との協調利用といった方向がなされてきた[24]。

幼児を抱えあげると、抱える動作に対して全身で合わせてくる。うまい抱えられ方を次第に覚えていく。全身の触覚がなければ出来上がってこない、そういった振舞いに向けて次のステップを始めている[25]。

7. 調節能力と体内神経

動きを考えその通りに動くのではなく、相手や自分に合った調節をしながら動くことができやすくなっていなければ次へ進み難くなった。体内に運動系の調節と運動系に密着した感覚系への神経系を設けることにした。体内にその経路を設けるための条件を考えた。配線量を減らせる。開発期間を長くしないとできない高性能機能への段階化は目指さず、小型ボディ用に自作できる普及品で作ることにし、

図2 発達段階の異なるヒューマノイドのセット

I2C シリアルバスを持ち、書き替え容易な EEPROM を持ち、A/D, I/O ポートを持ち、ワンチッププロセッサのネットワークで実現した [26] [27].

ノードのプロセッサはセンサ信号を多重化し、ブレインからアクチュエータへの信号の分配を行いつつ、各アクチュエータの内部の情報を読み出してセンサ情報としてブレインへ伝達する [18]. 視覚と全身触覚のほかに、3 軸加速度センサ、関節角度、関節負荷トルクなどの感覚をブレインに伝えることができ、関節のサーボ状態を調節可能なボディが出来上がった [26]~[30].

8. ブレインの形式と処理

ブレインの入力はセンサの情報がすべてである。出力は動作系への信号である。その入出力がどういうレベルになっており、その途中の処理をどういう具合に組織化するのがロボット行動開発の内容であった。発達プロセスの研究はこのブレインの入力、出力、行動が目指していた段階とその内部プロセスを明らかにし、どういう発達がどの変化によってなされるようになったかを見ることでなされる。

入力すべてをイメージ化し [31], 実時間部と上位部をつなぐ部分の発達にポイントをおいてきた [17]. 感覚系と行動系を結びつける形として、状況判断-行動のループ型シングルプロセスの構造、状況判断-行動部をルール表現化し並列に走らせる構造、並列プロセスのネットワークとして構成するビヘービアネット構造などが試された [32] [33]. そして、外界と触れ合うことを前提にした新しい振舞いの成長と実現機構を実際のロボットを用いてできるようになっている [25] [34].

9. 赤子から幼児における発達段階

発達の段階をどう刻むか。6 歳までの子供の成長段階がどう確認されているか表 1 に示す。運動能力だけでなく、感覚、言葉を使う知能、感情や創造性を伴う振舞いなど、正常にバランスよく育っているかを観察のみによって確認する形になっている。

運動項目でもヒューマノイドで試されていないものが多い。全身の反応、歩きはじめ、片言を覚え、少しは手伝いも頼めるようになるという成長には、運動能力以外にもバランスよく持つための枠組が重要であることが分かる。

10. お わ り に

発達プロセスをどう形式化して表現できるかはこれからである。人間の発達心理学のなかで子供はどのように発達するのだろうかという問いをもち、その過程をめぐって発達理論が提唱されている [35]. 生物学的条件、社会規制など内外から受動的に作用される存在としての発達、環境と能動的に相互作用する発達などいろいろある。人間の成長

表 1 保護者の記録欄 (母子手帳より)

1 カ 月	裸にすると手足をよく動かすか。 大きな音にビクッと手足を伸ばしたり、なき出すことがあるか、へそが乾いたか、お乳をよく飲むか、便の色は何色か。	
3 カ 月	首が座ったか。 あやすとよく笑うか。 目つきや目の動きはおかしいか。 見えない方向から声をかけるとそちらへ顔を向けるか。	
6 カ 月	寝返りをするか。 おすわりができるか。 7 カ 月	身体のおもちゃに手を伸ばしてつかむか。 家族といっしょにいるとき、話かけるような声をだすか、 テレビやラジオの音がしはじめるとすぐそちらを見るか。
9 カ 月	はいはい、つかまり立ちができるか。 小さい物を指でつまめるか。 10 カ 月	機嫌よく一人遊びができるか、 そっと近づいてささやき声でよびかけると振り向くか。 歯の生え方で気になることはないか。
1 歳	つたい歩きをするか。 バイバイ・こんにちなどの身振りをするか。 テレビの音楽に合わせて身体を楽しそうに動かすか。 大人の言う簡単な言葉（おいで、ちょうだいなど）が分かるか。 相手になって遊ぶと喜ぶか。	
1 歳 6 カ 月	一人で上手に二足歩行をするか。 自分でコップをもって水が飲めるか、 ママ、プープーなど意味のある言葉をいくつか話すか、 まぶしがったり、目の動きがおかしいか。 名前を後ろから呼んで振り向くか。	
2 歳	走ることができるか。 スプーンを使って自分で食べれるか クレヨンなどでなぐり書きをするか。 2 語文（ワンワン来た、まんま頂戴）などと言うか。 歯磨きの練習をさせているか。 肉・繊維のある野菜をちゃんと食べているか	
3 歳	手を使わずに階段が昇れるか。 円を書けるか。 衣服の着脱をひとりでしたがるか。 自分の名前を言えるか、歯磨き手洗いをしているか。 斜視はないか、物を見る時目を細めたりしていないか、 極端に近付けて物をみていないか。 耳の聞こえが悪いのではないかと気になることはないか。	
4 歳	階段を 2、3 段の高さから飛び降りるか。 片足でケンケンができるか、 はさみを上手に使えるか、 歯磨、口すすぎ、手洗い、おしっこを一人でできるか。 自分の経験したことを話せるか。 友達とごっこ遊びをするか。	
5 歳	でんぐり返しができるか。 思い出して絵を描けるか。 色が分かるか、はっきりと発音して話ができるか。 大便をひとりでするか、集団生活を楽しめるか、 動物や花をかわいがるか。 他人を思いやる気持ちをもっているようか。	
6 歳	片足で 5～10 秒程度立っていられるか。 四角の形をまねて書けるか、 自分の「前後」、「左右」がおおよそ分かるか。 一人で衣服の着脱ができるか。 ひらがなの自分の名前を読んだり、書いたりするか。 約束やルールを守って遊べるか。	

にかかわる部分は様々なレベルがあり、成長プロセスを形式的に理論化するための内部表現を作ることは難しい。

ヒューマノイドにおける発達プロセスの研究は、実現さ

れているシステムの内部表現がまず形作られるところから始める点が人間の発達心理学研究と大きく異なる。どのようにその表現内容が変化するか、その変化プロセスをどう表すか、変化プロセスがどうなっていれば自律的な発達が可能か、ということを経験的に議論できる形になる。

リモートブレイン環境では、今後出来上がってくる各段階のヒューマノイド自体の他分野での利用研究も行いつつ、ボディとブレインに対する産み、評価し、教えるといった母体からの操作をまず整理し[36]、その操作前後におけるヒューマノイドの発達がどう表現できるかを明らかにしていこうとしている。

参 考 文 献

- [1] M. Inaba: Remote-Brained Robotics: Interfacing AI with Real World Behaviors. In Robotics Research: The Sixth International Symposium, pp.335-344. International Foundation for Robotics Research, 1993.
- [2] 稲葉: “脳を持ち歩かないロボット—大学教育におけるプラットフォーム—”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.10-13, 1996.
- [3] 加賀美, 稲葉, 井上: “リモートブレイン方式におけるソフトウェアプラットフォームの構造化と実現”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.4, pp.550-556, 1997.
- [4] 稲葉, 金広, 井上: “脳を持ち歩かない2足2腕ロボットの開発”, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1993.
- [5] 金広, 稲葉, 井上: “倒れても起き上がるのでできる人間型ロボット”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.195-196, 1995.
- [6] 金広, 加賀美, 稲葉, 井上: “物を持ち運べる二足二腕型ロボットの研究”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.419-420, 1994.
- [7] 五十嵐, 稲葉, 井上: “35自由度を有する人間型ロボットの開発”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.309-310, 1994.
- [8] 松井, 稲葉: “Euslisp 対象指向に基づく lisp の実現と幾何モデラへの応用”, 情報処理学会記号処理研究会, vol.50, no.3, pp.1-8, 1989.
- [9] 稲葉, 金広, 加賀美, 井上: “Euslisp を用いたリモートブレインロボットのモデリング”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1045-1046, 1994.
- [10] 田宮, 星野, 稲葉, 井上: “22自由度を持つリモートブレイン人間型ロボットボディの設計と製作”, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.351-352, 1996.
- [11] 金広, 稲葉, 井上: “幾何モデルを中核とした人間型全身ロボットのソフトウェア環境”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1013-1014, 1997.
- [12] 金広, 加賀美, 稲葉, 井上: “脳を持ち歩かない二足二腕型ロボットにおける視覚を用いた歩行動作の研究”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'94, pp.197-202, 1994.
- [13] 稲葉, 五十嵐, 二宮, 加賀美, 井上: “35自由度2足2腕型ロボットにおける視覚に基づく上下肢統合動作の実現”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1093-1094, 1995.
- [14] 長阪, 稲葉, 井上: “GA と NN を用いた二足二腕型ロボットによる視覚誘導型プランコ動作”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'95, pp.1150-1153, 1995.
- [15] 長阪, 稲葉, 井上: “GA と NN を用いた二足二腕型ロボットによる視覚誘導型鉄棒運動”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.655-656, 1995.
- [16] 松井, 関口: “マルチスレッドを用いた並列 Euslisp の設計と実現”, 情報処理学会論文誌, vol.36, no.8, pp.1885-1896, 1995.
- [17] 加賀美, 稲葉, 井上: “リモートブレインロボットの事象駆動型並列視覚システム: BBIV-II”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.615-616, 1995.
- [18] 水内, 稲葉, 井上: “人間型ロボットにおける関節モータ駆動信号を利用する全身行動の実現”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.769-770, 1997.
- [19] 田宮, 加賀美, 稲葉, 井上: “オートバランスモジュールによる人間型ロボットの歩行動作生成”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'96, pp.1377-1378, 1996.
- [20] 長阪, 近野, 稲葉, 井上: “二足二腕ロボットの視覚誘導型プランコ動作における仮想動作獲得と実環境適応学習”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.495-496, 1997.
- [21] M. Inaba: “Extended Vision with Robot Sensor Suit: Primary Sensor Image Approach in Interfacing Body to Brain,” In G. Giralt and G. Hirzinger, editors, Robotics Research: The Seventh International Symposium, pp.499-508, Springer, 1996.
- [22] 稲葉, 星野, 井上: “導電性ファブリックを用いたロボットセンサスーツの開発”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.947-948, 1995.
- [23] 星野, 稲葉, 井上: “センサスーツを着た人間型ロボットにおける触覚情報の表現と処理”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.771-772, 1997.
- [24] 星野, 二宮, 加賀美, 稲葉, 井上: “センサスーツを着た人間型ロボットにおける視聴触覚センサを用いた感覚行動制御”, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.697-698, 1996.
- [25] 星野, 稲葉, 井上: “抱きかかえが可能な人型ロボットにおける人になじむ動作の実現”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.759-760, 1997.
- [26] 小室迫, 水内, 星野, 稲葉, 井上: “ロボットボディの組み込みプロセスモジュールの開発”, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.355-356, 1996.
- [27] 水内, 小室迫, 稲葉, 井上: “シリアルバスを用いたロボットボディプロセスネットワーク”, *ibid.*, pp.357-358, 1996.
- [28] 加賀美, 田宮, 稲葉, 井上: “オンボディネットワークを搭載した人間型ロボットによる適応的移動行動”, *ibid.*, pp.359-360, 1996.
- [29] 田宮, 稲葉, 井上: “高分子厚膜力センサデバイスをを用いた足底センサをもつ二足二腕ロボットの ZMP 検出と足踏み動作への応用”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.437-438, 1997.
- [30] 金広, 水内, 垣内, 稲葉, 井上: “体内 LAN による神経系を持つリモートブレインロボットの開発”, *ibid.*, 1997.
- [31] 長阪, 加賀美, 稲葉, 井上: “リモートブレインロボットにおけるビデオ信号へのスーパインポーズを利用したセンサフィードバック”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1025-1026, 1995.
- [32] 岡, 稲葉, 井上: “並列モジュール記述モデルに基づく自律ロボットの情報システム開発環境”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8, pp.878-885, 1997.
- [33] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, K. Takeda, T. Oka and H. Inoue: “Vision-Based Adaptive and Interactive Behaviors in Mechanical Animals using the Remote-Brained Approach,” Robotics and Autonomous Systems, vol.17, no.1-2, pp.35-52, 1996.
- [34] 小川原, 加賀美, 田宮, 稲葉, 井上: “2台の小型人間型ロボットによる全身を用いた物体の受渡し行動”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.783-784, 1997.
- [35] 岩田, 吉田, 山上, 岡本: 発達心理学. 有斐閣, 1992.
- [36] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, K. Nagasaka and H. Inoue: “Mother operations to evolve embodied robots based on the remote-brained approach,” In Artificial Life V, MIT Press, pp.319-326, 1997.

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1958年5月23日生。1986年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。1989年東京大学工学部機械情報工学科助教授、現在に至る。日本機械学会、情報処理学会、計測自動制御学会、人工知能学会会員。(日本ロボット学会正会員)