特集②

Global Monodzukuri Summit

世界ものづくりサミット

グローバル アライアンス フォーラム

大阪大学シンポジウム

脳科学・認知科学が切り拓く未来工学
―認知脳システム学創成―

■講演概要

脳科学･認知科学が切り開く未来工学 ～認知脳システム学創成～

大阪大学大学院 工学研究科 教授　石黒　浩

本日のシンポジウムは、特別企画「脳科学・認知科学が切り開く未来工学～認知脳システム学創成～」です。大阪大学としてどんな研究展開をしていくのかについて話します。タイトルにあるように、今後は認知脳システム学を創っていきたいと考えています。脳科学・認知科学は単に工学だけでなく、人間を理解しながら、より人間に快適な未来社会を築くための工学をつくる。そうした新しいものづくりが、今後は重要になってくると思われるため、大阪大学の中で、医学研究科、人間科学研究科、工学研究科、基礎工学研究科が連携して流れをつくろうとしています。私から全体イメージを紹介したいと思います。

これまでは、インターネット技術や自動車技術など便利な技術を世の中に普及させようと躍起になってきましたが、その結果として様々な弊害も出ています。インターネットは世の中を変え、銀行オンラインシステムなどを含め非常に便利になってきました。その一方で、例えば子供社会ではネット社会に過剰に依存している状況があります。特定の利便性だけを追求しすぎると、人間のトータルな解決策を無視した傾向になります。同じことが製造業や医療にも見られます。自動化した措置や機械が使われ、生産効率が良くなっていますが、生産効率だけを向上させるだけでよいのでしょうか。一方で、知らない所で人間への負荷が大きくなっています。

世の中が便利になってくることは、未来社会にとっても本当に便利なことなのでしょうか。例えば高齢者にも自由に利用してもらうような技術開発がされているかと問えば、そうでもないわけです。携帯電話は高齢者には必ずしも便利でなく不向きであり、ネットを見れば何でもできると言ったところで、高齢者たちが情報を取り込むためにはもっと工夫が必要です。誰もが気軽に情報や機械を利用できるような開発をしなければなりません。

様々な問題をもう少し詳しく見ると、例えば子供社会ではネット社会に過剰に依存しているがために、社会性を失ったり、偏ったモダリティ（映像、テキスト）の集中利用によって思考が偏ったり思考力が低下するという問題があります。情報・機械の過剰利用では、ストレスが増加、うっかりミスが起こる。システムは便利だが、人間のトータルなシステムに合っていないと、注意力の低下を招いたりします。高齢者が利用できない情報・機械では、高齢者が社会から隔離されることにもなりかねない。それらを過剰信頼するがゆえに、大きな被害に遭うこともあるし、操作ミスによる被害も出てきます。

こうした問題に対して、認知科学、脳科学、医学の力を借りながら、今までは無視してきたような問題について人間を理解する研究の立場から解決し、

そうしたシステムを含めて人間に快適な工学、未来社会の要素技術を創っていく。それを認知脳システム学と呼んでいます。

広い意味でのロボット工学と認知脳システム学がなぜつながるのでしょうか。従来の工学は、人間が持つ機能を機械に置き換え、例えば移動する、情報を提示するなど特定の機能と利便性向上だけを考えてマーケットを創ってきました。それは人間の脳の適正を考えていないわけで、どこかに歪みが生じ、人間の脳に大きな負担をかけています。私たちがとろうとしているアプローチは次のようなことです。そもそも人間は、人間と関わるための脳の機能や身体の機能を持っている。人間を模した総合的インターフェースであるロボットをテストベットとして、さらに人間を理解し、人間と機械のかかわり方をどのように制御すれば快適になるのかを研究しようというものです。テストベットであるロボットを使って、脳の活動を調べる研究や脳と機械を結びつける研究などを組み合わせながら、今後どんなシステムを創っていくのが重要なのか、その設計指針を取り出そうというのが、私たちが考えている新しい研究の流れです。

脳科学、認知科学、ロボット研究が結びつくわけですが、具体的には認知科学の研究に、脳科学で研究されてきた脳機能をイメージングするような技術を持ち込み、より高次の脳の機能を精緻に調べていく。特に情報システムや機械システムを使っているときに脳はどのように活動しているのかを調べて、その知見に基づき新しい情報システムや機械システムを創る。その際にもう１つの脳科学の研究成果が利用できると思っています。それがブレイン・マシンインターフェースで、これはキーボードでロボットを操作するのでなく、直接に脳の信号を読み取って操作する。ある意味で究極のインターフェースになると思いますが、こうした脳科学で研究されている成果を取り込んでいき、未来社会における人間に親和性の高いシステムの設計指針が、大阪大学のグループから提案していけるのではないかと思います。

ロボット研究と、この後に講演していただく眞下先生、苧阪先生、吉峰先生らの認知科学の研究、脳科学の研究などを統合し、世界をリードできる拠点をつくっていこうと考えています。例えば子供の問題では、偏ったモダニティの集中利用による脳への負担を軽減し、適切な人間形成を築くシステムの設計指針が提案できると思います。情報・機械の過剰利用では、自動化機器利用における、脳への負担を軽減するインターフェースを実現できるでしょう。高齢者に関しては、高齢者にも利用可能な情報・機械システムを実現する。こうしたものを実現することが、私たちにとっては重要なことだと考えています。

そのために大阪大学の中で、個々のロボット研究、脳科学、認知科学だけでなく、新しい認知脳システム学という体系をつくっていくグループを立ち上げて、世界に発信できるような研究開発にしていきたいと思います。大阪大学にはアジアやヨーロッパ、北米にすでに拠点がありますが、それに加えて各先生の共同研究なども含めて主要大学との連携をしています。これらのネットワークを活かしながら、世界の中で新しい動きを先導できるような拠点に大阪大学がなることを目指しています。

手の難治性疼痛 CRPS に伴う視空間知覚障害と眼－手協調運動障害

大阪大学大学院 医学研究科 教授　眞下　節

皆さんが普段感じている痛みは、外傷などによって痛みの原因物質が産生され、それが神経終末の侵害受容器を刺激して電気信号に変換され脳に伝達されて痛いと感じる、というものです。そのように理解していると思います。しかし、痛みはそれほど単純なものではなく、いろんな難しい痛みがあり、外傷もないのに痛いと感じる場合があります。最終的に痛みは脳で認知されるわけですが、最近は脳での痛みの認知のメカニズムがかなり解明されてきました。以前は痛みの中枢は視床と考えられていましたが、視床も痛みの中枢の一部ではあるが、脳のかなり広い範囲で痛みが認知されていることが分

ってきました。

今回、焦点を絞って紹介する痛みの疾患はCRPS（Complex Regional Pain Syndrome）です。日本語に訳すると複合性局所疼痛症候群と呼ばれ、痛みを中心として、感覚異常、自律神経系異常あるいは炎症、運動異常、精神科的異常などによる様々な症候がみられます。CRPSは骨折や捻挫などを契機にして発症します。通常は骨折が治れば痛みがとれていくはずですが、痛み、運動異常、血流障害、発汗異常、浮腫、萎縮性変化などが慢性的に続くという奇妙な疼痛症候群です。

CRPSの運動異常は、痛みが原因で起る脳の感覚―運動供応の障害によって引き起こされ、筋力低下、協調運動障害、振戦、ジストニアなどの症状や徴候がみられます、CRPSの空間認識異常では、患側の上肢が自分のものではないという奇妙な感覚（ネグレクト現象）や四肢の協調運動障害がみられることがあります。疼痛患者においてこれらの認知や運動の異常がどうして起こるかについてはよく分かっておらず、研究の対象になっています。

われわれは、四肢のCRPS患者において空間認知が変化するのか、さらにCRPS患者の四肢運動障害に空間認知異常が関与するのかなどについて調べています。視覚と体性感覚は相互的な関係にあるわけですが、これがCRPS患者では正常でなく、体性感覚の空間認知に異常がみられることが明らかになりました。

主観的自己正中判断タスクの実験を、患者さん20人と健常成人12人を対象に行いました。これは被験者の頭位を固定しておき、赤色の光点が動いて、自分の正中に来た際に「はい」と返事をする。その判断が客観的な正中からどれだけ離れているのかを調べるものです。明るい所と暗い所で行ったところ、明るい所ではCRPS患者も健常者も正中判断はほとんど一致します。しかし暗い所では、左に患肢があるCRPS患者では正中が左に偏位し、右に患肢があるCRPS患者では右に偏位します。正常の場合は少し左に寄ります。痛みのある患肢の方向に引っ張られるように主観的自己正中判断がずれてくる現象が起こってきます。それをどのように理解するのか。物体の空間認知では、座標軸が自己中心座標では右に見えて、物体間中心座標では左に見えるとことになります。CRPS患者では自己中心座標が偏位しており、物体間中心座標が機能していない暗所では自己中心座標のみで空間定位を行っていることになります。つまりCRPSでは暗所では主観的自己正中判断が患側に偏位することになるわけです。しかし、暗所で自己中心座標の異常によって正中判断の偏位がみられても、明所では視覚によって物体間中心座標から見て正中を判断できるので正中判断は正常となります。正常人では自己中心座標は余りずれないのですが、CRPS患者のように痛みという強い感覚障害が存在すると、他の認知機能である自己中心座標が患肢の方向に偏位するものと理解できます。

今回、自己中心座標の偏位を矯正することによって体性感覚情報と視覚情報との統合を正常化すると、運動障害も改善し痛みも軽減するかどうかを試みてみました。プリズムを使って、自己中心座標を正常化することを患者さんにやっていただきました。その結果、プリズム矯正によって痛みが軽減するとともに、運動異常などの様々な徴候も改善することが分かりました。CRPSなどの痛みの患者さんにおいて、認知を矯正することによって痛みだけでなく運動の異常も治療できることが明らかになってきました。

以上のことをまとめると、視覚と体性感覚で運動がコントロールされるわけですが、この部分が疼痛患者では障害を受けている。そうすると、運動そのものに異常をきたすのではないかということが研究によって分かってきました。四肢の難治性疼痛の治療はわれわれにとって大きな課題ですが、脳の認知について研究する、あるいは脳科学を研究することによって、脳の機能を正常化することから痛みの治療を行うことができるのではないのか。これは将来的な課題でありますが、われわれはそんなことを考えております。

……

ワーキングメモリ　行動を導く記憶

大阪大学大学院 人間科学研究科 教授　苧阪満里子

ワーキングメモリという言葉を知らない方も居られると思いますので、ワーキングメモリの簡単な実習コーナーも設けて話を進めたいと思います。話の概要として、①ワーキングメモリ②ワーキングメ

モリの個人差③リーディングスパンテスト④ワーキングメモリの脳内基盤⑤個人差を導く脳のメカニズム⑥高齢者の問題、そして最後に、未来社会に向けたワーキングメモリへの配慮について触れます。

1950年代以降、人間の記憶は短期記憶と長期記憶の大きく２つに分けて考えられています。短期記憶は、電話番号の記憶のようにプッシュホンを押す間だけ頭に憶えているような記憶。それに対して長期記憶、これは長期間にわたって保持される記憶です。短期記憶は、20秒以内に約90％が消えてしまう。しかし、それは憶えている内容を口に出して繰り返す（リハーサル）ことで、記憶にとどめておくことが可能です。1956年にアメリカの心理学者ミラーが「マジカルナンバー７±２」という学説を発表しました。それは人間の記憶できる情報の数が７桁±２だという説で、何が不思議な数かといえば、例えば数字の並びですと７桁ですが、「119」などまとまった単位（チャンク）があれば大きくなることです。よく知っている「夏目漱石」などの人の名前ですと、これも１チャンクと数えられる単位になります。短期記憶は容量制約がありますが、長期記憶は容量制約がほとんどありません。

ワーキングメモリは、「処理」と「保持」を支える記憶システムをさします。イギリスの心理学者バドレーとヒッチが、何か行動しながら憶える範囲はどのくらいかという疑問から生まれた概念です。例えば数字を暗算で足し算をするとき、「23＋15＝38」はともかくとして、「46＋78＝124」になると難しいのはなぜなのか。これは繰り上がりがあるわけで、繰り上がりがある場合には一時的に活性化状態で保持し、その内容を頭の中でアンテナを張っておきながら、計算処理そのものを実行することになるからです。言語理解でも同様で、言葉の意味を追いながら、すでに読んだ内容を心の中に保持していく。この機能により、文脈の形成につながっていくわけです。

ワーキングメモリは一時的な情報の保持と処理を支えるダイナミックな「active memory」であると考えます。なぜダイナミックかといえば、私たちは会話するとき、単に一方的に話しているわけでなく、過去の知識や自分自身（自己）を知っている。そして会話している相手（他者）の表情も認知し、場面理解をしながら会話するなど、非常にダイナミックな側面を持っているからです。バトレーがつくったワーキングメモリのマルチコンポーネントモデルですが、ラグビーのゲームから思いついたそうです。モデルの中の音韻ループが、いわゆる言語性の短期記憶です。それに対して非言語性の短期記憶があり、両脇のサブシステムの中央に注意制御システムがあります。さらにバドレーは2000年、このモデルに長期記憶からの検索に対応し得るエピソードバッファを追加しています。目から入った情報、耳から入った情報は中央実行系によって制御されると考えられます。

さて、ワーキングメモリの大きな特徴は、資源制限があって、一度にできる処理資源には限界があることです。非常にボトルネックな特性を持っています。最近になって、アメリカの心理学者カウアンが「マジカルナンバー４±１」ではないかという論文を発表しました。一度に処理できる情報の単位は、ほぼ４ということになります。このように処理資源に制約があるため、それに対して注意をうまく配分していかなければなりません。

ワーキングメモリの個人差に関して、どのような特徴が個人差を引き起こし、言語理解の差をもたらしているのか。それは、中央実行系に依存した注意制御が個人差を引き起こすと考えられます。例えば高い得点の人と低い得点の人とを比較すると、このテストは本来リハーサルなどの方略を使いにくくしたテストですが、高い得点の人は方略をよく使っていることがわかっています。しかし、低い得点の人は方略を使っても１種類程度です。一方、高得点の人は２種類、３種類と使っている。それは方略を変更していることを示していて、方略がうまく働いているかどうかを、自分でモニタリングができていると考えられます。

このテストを使って脳の画像を撮ってみました。前頭領域で、単語を記憶するだけ、あるいは文を聴き取るだけの単純課題と比べて、リスニングスパンテストでは活動が増強します。高得点群の人たちは、

より増強が大きいことがわかります。高得点群と低得点群とではどこが違っているかといえば、前頭前野背外側領域（DLPFC）と前部帯状回（ACC）です。この２つの領域の変動を時系列的に表してみると、高い得点の人のほうが両領域の変動に相関性が高いことが私たちの研究で得られています。他のスパンテストでも、同様の結果が得られています。高い得点の人たちのほうが背外側前頭皮質と前部帯状回の機能的ネットワークをうまく使っているのではないでしょうか。この２つの領域はどんな働きをしているかといえば、背外側前頭皮質はトップダウンな注意保持、それに対して前部帯状回は自動的反応の抑制制御や自己モニタリングなどを行っている。リーディングスパンテストにおいて、例えば注意の制御はどのような必要性があるかといえば、ターゲット語を活性化させて持続させる注意保持の働きがあります。もう１つはターゲット語以外に重要な単語がある場合です。その場合には、ターゲットと他の単語の間で葛藤を生じます。その場合は必要でない情報を抑制していかなければならない。このような場面では、前部帯状回は葛藤の抑制制御に関わっていくのではないかと思われます。

私たちは未来社会において、人間のワーキングメモリにどんな配慮をしていけばよいのかについて、少し提案をします。１つはワーキングメモリの資源制約を配慮したデザインです。容量は４±１であること。それ以上の情報が一度に送り込まれると、オーバーフローしてしまいます。ボトルネックであるのは、何を意味しているのかということです。

もう１つは、長期記憶からの検索を配慮したやさしいデザイン。人に優しいものというのは、長期記憶からの検索を導き出せるようなものではないだろうかと私は思います。そしてもう１つは、アクティブなメモリシステムであるワーキングメモリを生かしたデザインです。例えば、カーナビは確かにどこにでも行けて便利ですが、しかし地図を何も憶えていないことに歴然とすることがあります。

ワーキングメモリは言語理解と関係があると述べましたが、言語理解、すなわち思考の基盤です。これは、人間にとって大切な芸術や文化の理解にもつながっていくのではないでしょうか。ワーキングメモリを生かしていける未来社会が望まれます。

ヒト脳によるロボットコントロール ～ブレイン・マシン・インターフェイス～

大阪大学大学院 医学系研究科 教授　吉峰　俊樹

私たちはヒトの脳でロボットを動かそうと取り組んでいます。これはブレイン・マシン・インターフェイスと呼ばれる技術の１つですが、私どもが脳外科手術で脳を扱ってきた経緯から取り組み始めたものです。ブレイン・マシン・インターフェイスとはごく最近、話題になってきたものですが、厳密にいうと脳情報（だけ）を用いて外部装置をコントロールする技術とされています。

では、どのような脳情報を用いるかということですが、いくつかの種類があります。電気信号としての脳波、MEG（脳磁図）による磁気情報、またｆ―MRI、NIRS（近赤外線）から得た血流情報などです。このうち有用性の面では脳波が一番すぐれていると思えますが、脳波は日常検査でおこなわれているように頭皮上においた電極から記録するもののほか（頭皮脳波）、開頭して脳の表面に電極をおいて直接記録することもできます（脳表脳波）。これは極めて精度が高く、雑音の少ない良質の情報となります。手術という侵襲的手技が入るのが短所ですが、脳神経外科領域では脳表電極をよく使っており、さまざまのデータが蓄積されています。例えばこのビデオのように脳の表面に多数の電極（脳表電極）をおいて順番に電気刺激していきますと、５番の電極の刺激で、腕が上下します。これは肩の筋肉が動いているわけです。次に１cm離れた６番目の電極を刺激すると手首が動きます。そして７番目は指全体、８番目は親指だけが動きます。脳表１cmごとに体のちがう部分が動くわけです。これから考えて、それぞれの電極からの情報を解析すれば脳が体のどこを動かそうとしているかが分かるのではないか、ということで私たちの研究が始まりました。

この臨床試験では難治性疼痛の治療のために刺激電極を運動野においた５人の患者さんに親指を曲げ

る、手を握る、肘を曲げるという３つの簡単な運動をしていただき、脳波を記録し、分析しました。そうすると運動ごとにそれぞれの電極で記録された脳波に微妙な違いがみられます。これをサポート・ベクター・マシンという学習アルゴリズムによって解析し、脳がどのような運動を行なおうとしているのかを推定しました。その結果、脳、とくに中心溝といわれる部分であれば、たった４つの電極だけから記録した脳波で８～９割の精度で運動を弁別できることがわかりました。

これをロボットハンドにつなぎますと、患者さんが「グー」「チョキ」「パー」の３種類の運動をすると、それを瞬時に解読し、リアルタイムでそのとおりにロボットハンドを動かすことができます。たまに間違うこともありますが、平均すると８～９割の正答率になります。そもそも人が何かをしようとするときには、まず運動の発議がなされ、つぎにその運動を行なうためにはそれぞれの筋肉を時間、方向、速度などどのように組み合わせて動かすとよいか、運動前野や補足運動野で考え、その結果が一次運動野に送られます。このような脳の活動は、実際に身体の運動がはじる０.５秒から１秒程度も前から始まると言われています。そのため脳情報の解析の方法によっては手が動く前に運動を弁別して、ロボットハンドのほうが手よりわずかに早く動くこともあります。

また、結果をロボットハンドではなく、コンピューターに接続すると手を使わなくてもコンピューターを操作することができます。この実験では握るとカーソルを右とか上というように決めてディスプレイ上で動かせています。実際に手を動かさなくとも、考えただけで操作できるわけです。

このように、ブレイン・マシン・インターフェイスは、今のところ簡単なことならできるようになっています。アメリカのサルをつかった実験では、脳内に多数の針電極を刺し差し込んで信号を取り出し、これを解析することによりサルがロボットアームでえさを食べることに成功しています。このような脳内刺入型電極にはまだいくつかの問題があり、現時点ではむしろ私どもが用いている脳表電極のほうが現実的ではないかといわれています。このような脳表電極は疼痛患者さんの電気刺激療法のための装置があり、私どもはすでに50人程度の患者さんを治療しています。

では、このようなBMIは実際にはどのようなかたの役に立つのでしょうか？　昨年、非常にめずらしい映画ができました。実在するフランスの雑誌エルの編集長の話です。このかたは運転中に脳卒中で倒れ、気がつくと全身が完全に麻痺し、手も足も口も全く動かない状態でした。身体の運動はもちろん、話すことのもできず、意思の伝達がまったくできないわけです。ただ、唯一、左目だけが瞬きできるということです。そのため、彼は左目の瞬きによってイエスとノーを伝え、わずかに意思を伝達できたと言うことです。ただし、このかたの立派なところは、この瞬きだけで文字を選び、一冊の自伝を書きあげたところです。医学的には閉じ込め症候群といわれるような状態ですが、このようなかたにとっては、手術をしてでもBMIを利用して意思伝達や運動する手段を手に入れることは値打ちがあるのではないかと思っています。自身の住環境を整えるための電化製品を使うこともできますし、インターネットで情報を得たり、創造的な仕事を始めることもできるかも知れません。

浅田共創知能システムプロジェクトの概要

大阪大学大学院 工学研究科 教授　浅田　　稔

本日は現在進めているプロジェクトの概要を紹介することで、大阪大学が目指す「脳科学・認知科学が切り拓く未来工学」の様子を説明できるのではないかと思います。これはCBスクエアと呼ばれるチャイルドロボットです。生物的な身体を持った子供ロボットになるのですが、これはいろんな意味で全世界に発信され、世界で初めて等身大で物理的な接触を許したヒューマンノイドです。なぜこのようなことをしているのかといえば、前世紀は科学技術が進展し、人

類史上非常に大きな飛躍を遂げたわけです。知的人工物として具現化され、人間社会に貢献してきたわけです。今世紀は脳の世紀。人間をはじめとする生物の理、特に人間という存在のミステリーに迫る試みがあるのですが、解析を中心とする説明原理に基づく従来の科学規範だけでは難しい。解決困難な多くの課題があり、その中の１つが認知機能の発達です。人間が言語を含めてどのようにして機能を獲得していくかを理解するとともにロボットとして具現化する。逆にロボットで仮説を立てて設計することで、人間自身がどのように発達するかのミステリーに新しい理解を加えたい。もちろん脳科学、心理学、AI、ロボティクス、認知科学、社会学などの多くの分野が関与するのですが、問題の本質は唯一無比の解が存在すると断言するには、現状はあまりにも乏しい知識とそれに基づく表層的な具現で終わっているわけです。

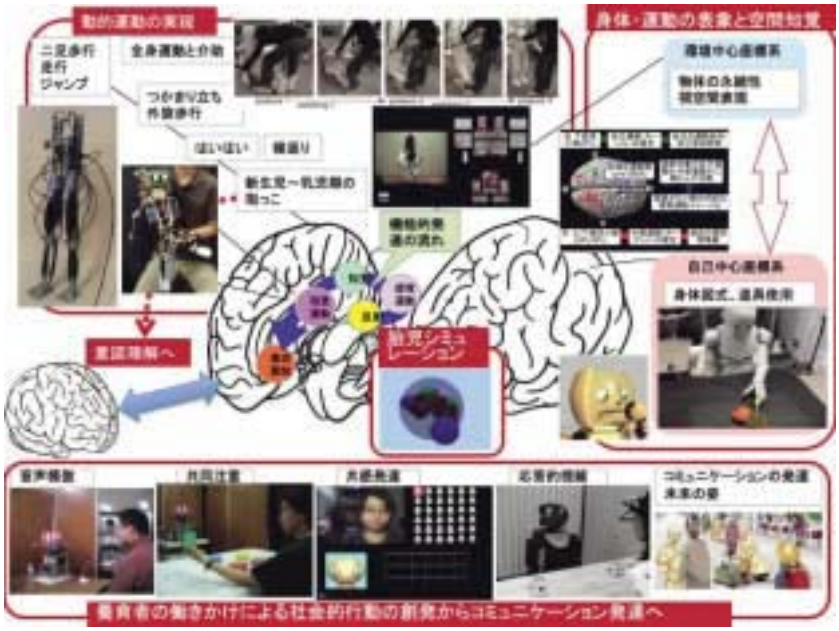
なぜかというと、ヒトの認知機能のメカニズムが分かっていない。そのため、人工的なシステムの構築が、設計者による表層的な機能の理解にとどまった上でなされている。あたかも知能を持ったロボットを見てみると、何のことはなく、単に音声を発生しているだけということがあるわけです。また、このようなことに内在する課題でもあるのですが、より重要な課題としては、認知機能がどのようにして獲得されたかという学習発達過程が、メカニズムの観点から分かりません。さらに、認知機能が低次機能からの発達で獲得されたとするならば、その前提となる低次機能について、現状の理解と実現でよいのだろうかという疑問ばかりが出てきます。

これらに答える可能性として、構成的手法があります。つまり、創り込んでいくことで何か新たな理解が生まれるのではないのかということです。説明原理ではなく設計原理に基づくことで、新たな視点が導入され、一つの分野に閉じた議論だけでなく、分野を超えた議論と実現が必須だろうということです。特に私たちが焦点をあてているのが「身体性」という言葉です。身体性とは、行動と環境との相互作用を身体が規定すること、およびその内容、環境相互作用に構造を与え、認知や行動を形成する基盤となる。脳神経、筋骨格、感覚器、体表面などの身体が、じつは環境の中でいろんな相互作用を起こすことによって、身体がある構造によって規定される。そのこと自身が身体の表象をつくり、さらには身体自身が他者との関わりの中で、何か自分との関係を発見していく。そうしたことが認知発達の基本だろうということから、身体性に着目しているわけです。

ヒトの認知発達過程の理解と構築を通じて考えてみようというわけですが、いくつかのプロジェクトがあり、身体では柔軟かつしなやかな運動の創発。これは従来の電動モーターによる動きとは異なり、筋肉が入ると違う動きをします。身体を筋肉から考えようということからの人工筋を使った運動実験。そして赤ちゃんロボットによる認知発達実験。子供アンドロイドを使ったコミュニケーション発達実験。グループの中では、身体的共創知能・対人的共創知能・社会的共創知能がロボット系。これに対して共創知能機構は脳科学、神経科学の先生にグループリーダーをやっていただき、そうした知見からモデルをつくっていただきロボット側に反映させていこうというものです。

例えば次頁に示した図は神経科学の脳の発達の図ですが、受精から18日、20日、22日、24日というように、わずか２日間毎に脳神経系ができていくのは奇跡としか思えません。次第に大きくなり、大人の脳に近づく構造になっていきます。それと同時に、最近では胎児の動きが観察され、受精時からの週数に伴いどんな動きがしているかが分かります。感覚器では触覚が７週辺りから始まり、視覚や聴覚は18週辺りから始まってくるわけですが、赤ちゃんが純粋無垢の状態で生まれてくるという説は真っ赤なうそで、体内においてかなりの学習発達過程を得ていると考えられます。私はヒアリングの中で１歳半くらいの赤ちゃんをつくると断言してしまったのですが、考えてみると、とてつもなく難しい課題を赤ちゃんは解決しています。

どんなアプローチをするのか。関連する分野としては発達心理の分野、計算脳科学、ロボティクスでは認知発達ロボティクス。これらが交じり合うことで共創知能をつくっていきます。アプローチとしては、①個体ベースの認知発達（主に初期）②個体間の相互作用による社会性の発達（主に後期）ということで、前半は脳科学・神経科学、後半は発達心理がメインになりますが、あまりにギャップが大きいので、それらを埋めようというのが我々のアプローチです。実際にどのようなことをするのかといえ



神経科学の脳の発達の図（版権：JST ERATO 浅田プロジェクト）

ば、認知発達の計算モデルを構築し、仮説生成、コンピュータシュミレーション、実エージェント（人間、動物、ロボット）によるモデル検証を繰り返しています。そして人間を知るための新たな手段やデータの提供。これはイメージングによる脳活動の計測、ヒト、動物を対象とした検証実験、新たな計測手段の開発と利用などをやっております。

じつはものすごく多くの計画があるのですが、本日は時間がありませんので、全体の発達をまとめた図を示します。脊髄・脳幹・皮質ネットは原初の運動系だけがある部分です。そこから反射・感覚・知覚ということで、これは脳の進化過程とよく似ているのですが、個体発生的にもこうした発達過程を経ているのではなかろうか。特に運動系においては、はいはい、つかまり立ち、全身運動と介助、二足歩行、ジャンプなどがあり、抱っこの実験などもやっております。また、イメージングを中心として座標系がどこで表されているのか。これ自体は自己と他者の識別につながるだろうということでの研究です。さらには養育者の働きかけによる社会的行動の発達。初期の場合は身体が物理的な条件・拘束で自分の要素をつくっていく過程です。後期の場合は、他者という働きかけが社会的構造を与えることによって、赤ちゃんロボット側が社会機能や認知機能を発達させていくというモデルです。

実際に動的運動の実現としては歩行やジャンプ、赤ちゃんロボットをつくったり、胎児のモデルなど。学校実験もやっており、例えば触覚センサスーツをお母さんと赤ちゃんに着てもらい、触覚パターンを見ることを世界で初めての試みをし、なかなか面白いデータが得られています。社会的働きかけでは、音声模倣、共同注意、共感発達など様々なことをやっていますが、この中には養育者側がある種の社会的行動を与えていることになります。例えば音声模倣では、グッドデザインを受賞した音声ロボットがあります。これはお母さんとの模倣し合いで聴覚層と構音層にデータを貯めて学習することをやってみた初期バージョンです。母音の発声をしています。（＝映像）当初の方式を空気圧に変更したことで、人間と同じようになまめかしい声になりました。さらに唇、リップ形状を真似すると、より自然な発声に近づきます。これに眼があり、手があり、いろんなことを加えていくことで、認知機能が発達させられるのではないか。そのことによってモデルを検証し、人間自体の理解を深める。そして、そうしたものを使いロボットをつくっていくことによって、人間社会に共生するロボットの設計論が確立されるのではないかと思います。

最後に、NHK 教育番組「ロボット未来世紀」の中で、本日話したことがいくつか入っています。総合番組でも２月に再放送されますので、ぜひご覧ください。