

(2016年9月14日講演)

グランドチャレンジの彼方へ

株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所
代表取締役社長 北野宏明委員

今年（2016年）の人工知能学会でさせてもらった話を中心にしたいと思う。

1. RoboCup

RoboCup は、日本の研究者を中心に 90 年代前半に提案して、今非常に大きな世界的なプロジェクトとなっている。人工知能とロボティクスの長期的な研究をどれだけ加速できるかといったときに、一つのグランドチャレンジを設定するべきであろうということに考えが至ったわけである。そこで 2050 年までに完全自律型ヒューマノイドロボットのチームで、FIFA ワールドカップサッカーのチャンピオンチームに勝利するという目標を掲げた。もちろん、サッカーで勝つのも非常に面白いが、その過程でいろいろな技術が生み出されて社会産業を変革していくであろうという仮定の下に、これをスタートした。当時、日本には NPO 法がなかったので、スイスのベルンに法人登記をした国際委員会をつくった。

Apollo Missions

RoboCup を始めるときに、FIFA ワールドカップのチャンピオンと戦うというので、FIFA のほかに、オリンピック、フォーミュラ 1、アメリカズカップ等いろいろ参考にした。プログラムの組み方として、やはり一番参考になったのは Apollo である。Apollo は月面の科学的探索が目標であるが、米国の議会証言記録等のドキュメントを調べると、実際にはその過程で次世代の米国産業の基盤となる技術が開発されることにも大きな狙いがあることが明確に書かれている。アメリカの宇宙における軍事的な優位を保つ、または次世代の航空宇宙システム科学産業の技術基盤を一気に作ってしまうというのが、もう一つのアジェンダである。議会証言記録等に全部書いてあるので、隠れているわけではなく、明確な目標である。同時に、Step-wise にやっていくということで、いきなり月に行こうではなく、Mercury 計画があつて Gemini があつて Apollo というマイルストーンがきちんとあつた。

出口戦略から決定されたタスクセット

RoboCup も、基本的に FIFA ワールドカップサッカーのチャンピオンチームに勝利するという目標が月面着陸に相当するが、その手前で出てくるものを世の中に展開していこうということでは同じようなロジックを作っているし、Step-wise のプログラムがいろいろな

ところにビルトインされている。なぜサッカーにしたかという、出口戦略からこれを決めている。

20年後30年後に何が重要になってくるだろうといったときに、自動走行（当時はITSという言われ方もしていた）が非常に重要になるだろうと考えた。災害救助用ロボット、介護ロボット、物流ロボット、一般のロボットでは産業ロボット、サービスロボット、こういう物が非常に重要になってくるに違いない。それらに向けた技術が自律エージェントや、実世界認識・行動、実時間認識・行動、分散協調システム、不完全・不正確・不確実な情報の処理という技術であった。

これが全部包含されていて分かりやすいタスクというところで、サッカーになった。当時、数年後にIBMのDeep Blueが人間の世界チャンピオンに勝つだろうと関係者の中では読めていた。チェスは静的なゲームであり、ターン・テイキングで進んでいく。さらに、完全情報問題であって、シンボリックな問題であって、中央制御型である。これとは、全く逆に、ダイナミックで、リアルタイムで、不完全情報で、ノンシンボリックで、分散型であるというタスクを設定することが重要になった。

サッカーはすぐ思い付いたが、他のスポーツだと、野球はほとんどピッチャーとバッターの勝負なのであまり面白くないし、アメリカとアジアの一部だけのローカルスポーツである。アメリカンフットボールもアメリカだけで、ラグビーはもう少し広いが、基本的に当たって強いほうが勝つ。強いロボットは造れるが、人を怪我させることにもなり望ましくない。サッカーはコンタクトスポーツで確かにぶつかるが、イエローカード、レッドカードなどペナルティーがあるので非常に良い。バレーボールはネットがあってダイナミックがあまりない。ということで、基本的にサッカーである。

またスポーツ以外では、災害救助ロボットの世界大会をやるかと考えたが、国によって発生する災害が違うので、その災害はうちの国では起こらないからとなってしまう。最初に立ち上げるには適していない。だから、もう少し抽象化されたもので、例えばゲームとかスポーツでないと世界中が乗れない。介護用ロボットも考えたが、当時そこから始めると5年後にはロボットを造るよりも家の中を少し改造してルールを引いてしまったほうが良いという議論になって、これに関しては全然勝てない。短期的なあまりにも具体的なものはやりにくいので、やはり最初は遊んでいると思われるようなものをやろうということで、最終的にサッカーになった。2050年までにサッカーのワールドカップチャンピオンに勝つロボットを造ると言ったら、これはもう世界中の誰を捕まえてきてもやりたいことが分かる。

50年はどのくらいのスパンか。ライト兄弟の飛行機ライトフライターから月へ行くまでが60年少しである。45年ぐらいでデ・ハビラントという会社がコメットというジェット旅客機を造っているので、飛行機が初飛行してから50年以内にジェット旅客機までもうできている。ENIACからDeep Blueまでが大体50年、Double Helixの構造が見つかったからヒト・ゲノムシーケンスのドラフトが大体完了するまでが50年ということで、大体50年である。ということで、基本的にRoboCupが始まってから50年で目標達成で、技術が

本格的に浸透するのはそれからプラス 20 年だろうと思っている。

人工知能研究における Grand Challenge

人工知能研究というのは、基本的に Grand Challenge でかなり進んでいるところがあり、チェス、将棋、囲碁、こういう問題を解くことによって非常に進歩している。例えばチェスの研究では最初のころから様々なサーチのアルゴリズムが出てくる。カーナビの経路探索から何から利用されているが、これらは実は、そのときの最初の成果の一つである。今ではごく当たり前になってしまっているので、チェスの人工知能研究の成果だとはもう言わない。

今回の AI ブームの一つは Deep Learning で、もう一つが IBM Watson だと思う。IBM Watson が「Jeopardy!」(アメリカのクイズ番組)で勝ったわけである。これは将棋とか囲碁とは違うが、疑似完全情報問題である。目の前に全部情報があるわけではないが、探せばあるというのが疑似完全情報問題で、完全情報問題の一部である。結局、大規模データ、大規模並列計算、機械学習の 3 つのペアになる。チェス同様、将棋、囲碁も人間の思考と違うのではないかという議論がたくさんあるが、確かに同じではない。だが、人間のグランドマスタークラスは過去の棋譜を全部覚えていて、大規模データをある意味で使っているわけであるし、ものすごく先読みできるという意味では計算している。並列かどうかはあるが。また学習は当然必要になるが、人間も自然学習をしているという意味で、実は本質的にはそれほど当たらずとも遠からずで、エンジニアリング的には再定義だと考えられなくもないと思っている。自動走行もサッカーもすべての情報があるわけではないし、情報にはノイズや誤りも入っている、複数の人や車が同時に動いている、正解が無いという問題に対して実用的な技術を作っていくのが非常に重要ではないかと考えている。

第 1 回 RoboCup は 1997 年に名古屋で行われた。そのときの映像があるが、動かない(笑)。サッカーロボットの世界大会をやると言ったので、BBC や NHK などのカメラが並んでいる。だが、動かない。いつ試合が始まるのだと(笑)。5 分前からやっているのだが、という感じになる。ところが、2014 年の映像をご覧くださいとはっきりおわかりいただけと思うが、この段階では完全にインテンションが読めるようになって、パスコースをきちんと決めて正確にパスを送れるというレベルになった。当初は戦略やロボットの動きをアルゴリズムでプログラムしていたチームもあったが、今は完全に機械学習である。機械学習できちんとシミュレーションし、実機を使ってトレーニングをしないと全く太刀打ちできないという状況がもう十数年前から続いている。

中型リーグの 50、60 センチぐらいのロボットは大きくて結構資金が必要なので、15 センチぐらいの小さいものを使うリーグも設定されている。これは速い。エキシビションで、人工知能で完全に制御されているチームと、人間がジョイスティックで操作して対戦しても、人間のチームはボールに全く触ることができない。サブミリ秒で意思決定してやっているから、当たり前であるがそのスピードはもう人間が付いていけないわけである。ゴールしたか人間が見ても分からないので、非常に速いビジョンシステムで判定させる段

階に入ってきている。これが RoboCup の現状である。このリーグでは 2000 年ごろにコーネル大学の Raffaello D'Andrea が 5 連勝した。

アイボリーグもあった。これは非常にかわいい。ソニーがワンメイクでアイボを提供して、チームはソフトウェアを作った。ソフトウェアは、ほかのチームも共有するということでリポジトリを作ったが、アイボの開発にもかなり役に立った。

小型リーグで 5 連勝したチームをリードしていた、Raffaello D'Andrea 教授らがその技術を使ってウェアハウスマネジメントをする KIVA System という会社を作った。倉庫の物流ロボットは割と大きなシステムをがちり組み込むものが多かったが、これは自律ロボットであるから、倉庫の大きさに応じてロボットの数を増やせばよい。床のマーカーや他の位置情報、棚情報を見ながらピッキングステーションに自律的に運んでくる。必ずしも同じ場所に戻るのではなく、その時点でのデマンドを反映した場所に戻る。倉庫の配列も自動的に再配置するシステムになっている。

基本的な技術は RoboCup のロボットで、分散協調型のウェアハウスマネジメントロボットを造った。この会社が Amazon に 774 million US ドルで買収され、今では Amazon ロボティクスになっている。Amazon はこれを北米のウェアハウスを中心に展開し、その後にヨーロッパで、日本・アジアはしばらく先になるようである。

ただ、Amazon はピッキングのところができていないので、RoboCup で Picking Challenge をやっている。今年もライブチックでやり、去年より少し速かったが、まだ遅い。20 チームぐらい出場し、来年は名古屋でやる。今年の優勝は RoboCup の常連チームのデルフトであるが、現場でのいろいろな問題点をよく分かっているチームがやはり勝ったという感じである。4~5 年すると多分決着してしまい、スピンアウトした大学をまた Amazon が買収するのではないか。今年 ABB が三菱のアームを、Preferred はファナックを 2 台持ち込んでいた。またリシク・ロボティクスが多かった。そういうところのマニピュレーターを皆持ち込んでいる。産業用ロボットのマニピュレーターをこちらに利用しているというのが現状である。

ソニーがアイボをやめてしまったので、アイボリーグに続くスタンダードプラットフォームを公募した。アイボリーグのフランスチームだったエンジニアたちがアルデバランロボティクスという会社を作り、Nao という小さなロボットを使ったプラットフォームを提案して、これが公募で選ばれスタンダードカップをやっている。

ヒューマノイドはスタンダードやオリジナルのロボットが幾つかあるが、オリジナルは 120 センチ、アダルトサイズで 150 センチぐらいのロボットが出ている。スタンダードはポータブルで簡単にソフトウェアの研究ができるところが重要で、運動能力は制限されるが、安く買えるのでこれでやっている。あるときソフトバンクがこのアルデバランに 100 億投入して何が起きるのだろうと思ったら、Pepper が出てきて、今ソフトバンクロボティクスになっているという展開である。

さらに、RoboCup の場合は、RoboCup ジュニアの教育リーグと、RoboCup レスキューのレスキューリーグがある。さらに RoboCup インダストリーと RoboCup@ホームもでき

た。2001年8月の頭、シアトルのRoboCupレスキューが終わって夏休みで戻ってくると、ワールドトレードセンターなどでの9.11のテロがあった。RoboCupレスキューのチームに現場投入できないか打診があり、すぐに行った。飛行機が飛んでいないので、セントラル・フロリダ大学のチームは車で12時間かけて現場投入し、ロボットで生存者を探すというサーチ&レスキューをした。その後、フロリダ・タンパのFIMAのグループがロボットに特化された時期がある。また2009年の千葉工大のチャンピオンロボットは、走破性能が一番良かったものを福島原発用に改造して入っている。

今年ライブチヒで開催されたRoboCupは、大体3万平米の会場で、研究者3,000人、ジュニアリーグ3,000人ほどが参加した非常に大きなイベントだった。ライブチヒメッセを全部借り切ってやった。2013年のオランダ・アイントホーフエンではマキシマ王女が観覧された。開催国の経産大臣クラスまたは皇族がオープニングかクロージングのときに臨席するようなイベントになってきた。また、いろいろな企業とのコラボレーションもあり、RoboCupインダストリーでは、FESTOやKUKAといったところがスポンサーになって、いろいろリーグを作ってやっていただいている。

また、アルデバランやアイボがやったようなことをやろうと、RoboCup@ホームというリーグで各自ロボットを造る+スタンダードプラットホームを公募した。十数社の応募のうち7社がファイナルに選ばれて、トヨタのHSRとソフトバンクのPepperの2つがスタンダードプラットホームになった。これは楽に決まったわけではなく、中国やUAEなどのかなり良いロボットが出てきていて少し議論になった。ほかの国のロボットの能力が急速にキャッチアップしている。

2. ERATO 北野共生システムプロジェクト

当時、RoboCupと並行して、北野共生システムプロジェクト、JSTのプロジェクトをやっていた。システムバイオロジーと共生系知能ということでロボットをやって、ここからいろいろな企業ができた。谷口委員のZMPもそうである。iXS Researchは高速道路、橋の点検、ビルメンテナンスなどを行うロボットの会社である。デザイン会社フラワーロボティクスはRT CORPORATIONという部品屋を秋葉原でやっているが、部品屋と受注のロボット開発を行っている。ほかにXiborgという義足の会社や、バイオロジーでは、SBI、SBX等、いろいろ出てくる。ERATO Foundersとあって、当社のプロジェクトから起業した社長・オーナーが年1~2回集まっている。

いろいろな会社ができたわけだが、北野共生システムプロジェクトで何をやったかというところ、最初はSIGという上半身ヒューマノイドを造った。これは視覚と聴覚、運動感覚野も融合したロボットを造るというプロジェクトである。次にPINOという全身のヒューマノイドを造った。すでにアシモなどもあったから、最高性能のヒューマノイドではなく、ミニマムの物を造るのが目的であった。

小型ヒューマノイドは、東大の稲葉雅幸先生などが造っていたが、論文には設計情報がない。設計情報がないとやはり造れないので、PINO は設計情報を全部公開する必要があると考えた。秋葉原で買える部品、東急ハンズの工作精度を制約にしたが、かなり無謀である（笑）。一応、歩くが、よたよたした歩き方である。その代わり設計情報は全部公開して部品も全部ばらまくということを実際にやった。おそらく最初のオープン・ハードウェアプロジェクトだったと思う。しかし、当時はほぼ理解されず、学会で発表すると、なぜハーモニックドライブを使わないのかなどと、いろいろ言われた。ハーモニックドライブを使えばきちんと動くのは当然分かっている。だが、それでは多くの人には買えないだろうと考えたわけである。要するにフタバのサーボモーターしか買えない人でもトライできるという状況も重要だと考えたわけである。アシモは東急ハンズでは造れない。

実際に設計情報を公開してみると、ダウンロード数がものすごく、いろいろな国の人がこれを造った。企業もこれを研修に使ってきた。中身を見たらしょぼいという感じがするが、外側はある意味で 3 次元プリンターの走りである光造形で造った。デザインは非常に秀逸で、ベネチア・ビエンナーレで展示したり、ニューヨーク近代美術館で招待展示した。ヒューマノイドロボットをこういうところに展示したのは、これが初めてだと思う。スピルバーグの映画「AI」のキャンペーンでは、ウィル・スミスと一緒に並んだりもしている。

ERATO を源流とする企業と組織

その後に、千葉工大の未来ロボット技術研究センターのヘッドになっている古田貫之君と LEADING EDGE DESIGN の山中俊治氏と一緒に Morph を造った。自動車のプロトタイプを造る日南で、金を掛けて造ったので、非常に精度が高かったと思う。

そして、SIG の視覚をやっていた中川友紀子氏が RT CORPORATION を作り、PINO のメカニカルのところをやっていた山崎文敬君が iXs Research を作っている。デザインをやった松井龍哉君がフラワー・ロボティクスを作った。一番有名なのはスターフライヤーで、空飛ぶロボットというコンセプトで、コーポレートアイデンティティーから全部やった。またルイ・ヴィトン、ゲランやラグジュアリープロダクツのショーによく使っている Posy などもあるが、今度 Patin というものを造ろうとしている。

PINO の制御をやった遠藤謙君は、MIT のメディアラボで義足の研究を始めて、今ソニー CSL に来ている。同時に、Xiborg という会社を彼に作ってもらい、ハイテク義足を作っている。非常にレベルが高い物である。両足義足でサッカーができるというのはかなりインパクトがある。また、ジャイプールクリニックとのコラボで、インド向けの義足を作っている。インドの場合、今はほとんど棒のようなものなので、歩きやすいものを 10 ドル以下で作るということで、一緒にいろいろなことをやっている。現地に 3D プリンターが設置できれば、デザインしたものを送って、現地でプリントして調整することができる。

パラリンピック用義足の製品化もやっている。パラリンピック用義足には製品しか使えない。1 個でも製品として売られていけばよいので、Xiborg で製品として開発した。佐藤選手が使っているのが Xiborg ジェネシスという義足である。昨日の 400 メートルリレーで

銅メダルを見事取った。Xiborg の目標は、リレーもそうであるが、東京パラリンピックの 200 メートル走でゴールドメダルを取ることである。どの選手と組むかが今度ポイントとなってくるが、オリンピックの 200 メートル走記録を上回ると、パラリンピック選手のほうがトップレベルの健常者よりも速いことになるから、ハンディキャップとは一体何かという非常に大きな問題提起ができることになる。そうなったときに、彼が造っている義足の技術をどのように一般の人に展開していくかを考えている。

ZMP については、この前、谷口委員のお話があった。ZMP は PINO から造っている。宇多田ヒカルのプロモーションビデオに PINO が出て、その後 PINO の関連グッズの版權でそれなりの利益を上げさせてもらった。しかし、その後ヒューマノイドを造っていたがどうも売れず、車のほうに方向転換して今に至っているという感じである。

3. 知能は進化の副産物

共生システムのもう一端では、生物学をやっていた。生物と知能のところは、実は結構リンクしている。私が生物学をやろうと思った一つの理由は、知能は進化の副産物で、生命が理解できなければ、知能の本質は理解できないと思っているからである。

Aging ---Cellular Senescence

最初のプロジェクトは 94 年から始めた老化の研究である。特に細胞の老化の研究はいろいろなデータと理論があるが、どうも説明がうまくつかないので、当時慶應の今井眞一郎先生（現ワシントン大学セントルイス校教授）と一緒にやらないかということになって本格的に始めた。

細胞はだんだん増殖しなくなって止まってしまったりする。それはどうもつじつまが合わないことがあり、当時はオミックスのような技術はないから、非常に限られたデータで推定しないとイケない。ビッグデータではない、非常にスパースなデータポイントから、ほとんどシャーロック・ホームズのようなことをやらないとイケなかった。いろいろな仮説があったが、どうも合わないので自分たちで仮説を作った。2つのプロセスがパラレルに動いているに違いないという仮説である。

そのモデル構造を決めるときに、遺伝子の制御をするのは 2つのプロセスが同じマスター制御機構なのか、またはそのプロセスの最後に行くターゲットが同じグループなのか、制御機構は違うがターゲットは同じなのか、制御機構は同じだがターゲットが違うのか、制御機構もターゲットも違うのかという組み合わせがたくさんあるわけであるが、これをきちんと決めなければいけない。さらに、そのターゲットの遺伝子が動いたときに、それ自体が細胞の増殖を止めるのに自分自身に聞くのか、隣に聞くのか。両方とも自分自身、片方は自分自身、片方は隣など、逆のパターンや、両方とも同じなど、いろいろな組み合わせがある。それ以外にも組み合わせはたくさんある。

今までの生物学だと、具体的なモデルの構造を決めるのに、これはなさそうだ、いやこれだと実験する。当たらないと、ポスドクがラボに寝泊まりする状況が延々2年ぐらい続いて、やっぱり駄目だとかなる世界である。これが今までの生物学だったが、我々はシステムティックに全部やって、仮説の全解探索をやった。あり得るモデルを全て、しかも、コンピューターシミュレーションを使って片方の実験をするということをやって、系内培養をかなり忠実に再現するコンピューターシミュレーションを作った。これにより50万通りのパターンがあるのが分かったので、50万通りを半年ぐらい延々シミュレーションしていった。今は1週間ぐらいでできるが、当時は半年は掛かったので、3台ぐらいワークステーションを専用にして延々とシミュレーションした。50万細胞の確率計算であるから、微分方程式をただ解くのではなく確率計算が入るので非常に時間が掛かる。ただ、このシミュレーションをしても、幾つか解釈に幅があり、データに合うものがたくさん出てきて絞り切れないのではないかと思ったが、データに合うものがバシッと出てきた。唯一それだけだった。その構造があるモデルでないとデータの再現ができなかった。これは極めてラッキーで、要するに2つのプロセスが、違う制御機構と違うターゲットで画一的なプロセスの場合は隣接細胞の増殖停止をして、カウンティングプロセスというか、決定論的なプロセスは自分自身の増殖停止をするということである。

このときの理論というのは、細胞の老化は自分自身の老化を決定して、隣接細胞は変わらないというもので、これはかなり異端の説だったので全く相手にされなかった。しかし、これだということ、生物学的にどう解釈するかというので、いろいろな解釈をした。モデルが出てきて数学的な構造は決まっても、それが生物学的に何を意味するのかは、やはり解釈になってしまう。例えばヘテロクロマチン構造があり、それが重要だということで、多分こうなっているだろうと推測をして、実際に染色してみると確かに予想どおりの染色像が見えたとか、大体ほぼ確信しているのであるが、その中で、具体的な遺伝子は何かも決めないといけない。これも推定になり、AIで出てくればよいが、なかなか出ない。今でも多分まだ難しいと思う。

老化という、種を越えて保存されていてクロマチン構造を制御するものであるから、酵母ではSIRプロテインというものがあることが分かっていたので、SIRプロテインに違いないと。その中でSIR2というタンパク質がヒューマンホモログ、つまり人間にも保存されていることが分かったので、多分これだろうと推定した。そして、MITに留学した今井氏が、SIRプロテインのSIR2が実際に酵母の寿命延長に関わっていることを確認して、*Nature*に論文が出たというのが、非常に有名なSirtuins Familyの発見の最初のストーリーである。人間ではSIRT1からSIRT7までである。それ以外の予測していたところも、20年たってすべてのメカニズムが実際に存在することが分かってきた。このSIRT1を過剰発現するマウスの実験が今井氏のところで行われて、雌のマウスで20%、雄で12%寿命延長されていることが分かったわけである。それを活性化する、安定的な物質、 β -ニコチナマイドモノヌクレオチドの生成に成功し、これを使って慶應で臨床試験を始めた。基本的なモデルを95年頃に見つけているから、それから20年掛かっている。これがやはりパイオ

ロジーのタイムスパンになる。

発見のプロセスでは、問題の設定から基本分子機構候補の推定のところはやはり人間が考えている。計算モデルによる絞り込みはシステマティックにやっている。しかし、システマティックにできているのはここだけなので、計算モデルでは確かに結果的に正しかったが、インテュイションが違う解釈を我々がしていれば、この結果に至っていない。結局全然違うことになった可能性もある。これは非常にまずいと思っている。

4. GARUDA

また、情報基盤があまりにも脆弱である。特にバイオメディカル分野では本当にばらばらで、これを統合しなければいけない。大きな Moonshot プロジェクトをやるには、ビジョンと理論とプラットフォームとマネジメントが要る。アポロ計画などがそうであるが、プラットフォームが全然ないので、これをきちんと作らなければいけないと、Markup Language でデータ表現の標準化をやった。いろいろなワークショップを開いて *Nature* を巻き込んだりして、データの標準化はバイオのエリアで大きく進んだ。

ところが、今度はソフトウェアでインターアベイラビリティがほぼない。例えばクリエイティブクラウドであるとか、コンピューターミュージック、また映像関係ではフォトショップ、コンピューターグラフィックスなど、これらはサードパーティーのものがプラグインしてスムーズに動く。これがバイオメディカルでは全部ばらばらで話にならないというので、GARUDA というプロジェクトを作った。

次世代バイオ医療を支える Garuda プラットホーム

数年前からシステム・バイオロジー研究機構でやっているが、ゲノムからライフスタイルデータの水平統合と、細胞または細胞内分子細胞の統合作用からヒトの生体データまでの垂直統合ができるようなインターアベイラビリティのあるプラットフォームを作って End-to-end のデータ解析ができるものを作って、GARUDA のゲートウェイからソフトをダウンロードして GARUDA コアの上に API が上げてあって、そこを使ってもらえれば総合運用できるということで、既に実際に導入されている。

GARUDA ゲートウェイは AppStore のようなものである。デバイスも、ゲノム解析などだけではなく、やはりウェアラブルデバイスにつながなければいけない。とにかく、ありとあらゆるウェアラブルデバイスをつなげることができる。例えばアルディーノやラズパイ、レゴマインドストームにもつながるということで、何でも全部つながる。資料分析、ゲノム解析、そういうところとつながるように今はなっている。

ただアカデミックに使うてよいと言うと、製薬会社はファイアウォールがあるのでターナーキーシステムにして持ってきてほしいとなり、そこで SBX テクノロジーという会社を作り、ターミナルターナーキーシステムのパッケージで売らせてもらっている。ブルームバー

グターミナルのようなビジネスモデルでは情報量があまりにも多いので、スクリーンが 4 面ぐらい要る。ただ、実際 4 面スクリーンを使っている人はいない。目立ってしまうので、せいぜい 2 面か 3 面にしてほしいと、後でダウングレードリクエストが来る (笑)。

我々はアライアンスのコアのところを作り、40~50 の大学や研究所がこのアプリケーションを作っている。クライアントサイドもアカデミックにはどんどんダウンロードするが、企業でターンキー納入されている武田薬品工業株式会社がローンチカスタマーで、日本の製薬会社もほとんど入っているし、海外のメガファーマも入り始めている。バイオメディカル系ではないところ、モビリティや製造業関連といったところからも、これを使いたいという話が来ている。

どういものがあるかという、生物学的にはパスウェイが書けて、それに対してナビゲーションできるソフトであるとか、データをオーバーレイしてエクスペクションプロファイルの時系列をアニメーションしてみたり、これを解析したりするものもあるし、また連動できるからインテグレートド・アナリシスができる。クリニカルデータから特定の薬は何を使うべきかというようなことを連動解析したりしている。

まずクリニカルデータベースから、かなり細かく遺伝子の特徴を解析するアプリケーションにこれが連動していく。それと同時に、セルラインも、データでどのようになっているのか全部見られるわけである。それをチェックして遺伝子ごとに例えば、PTEN 遺伝子がどのデータではどうなっているかを見る。また、ゲノム上に突然変異を取っている遺伝子がどのように分布しているのかも連動して見える。さらに、それを今度は SNPs と、各々の創薬ターゲットになりそうな遺伝子の点変異、SNPs に関わるかどうかの連動解析をして、例えばソラフェニブとエルロチニブという薬のバイアスが効くかどうかの確認をする。それからパスウェイにマッピングして、パスウェイ的に総合作用で見たときに、そのターゲットで本当によいのか、今までの臨床例で、それによって効果がどうだったかをデータベースからスプレッドシートに引っ張り出して確認するということが連動解析できる。それを解析して、コンビネーションにしたほうがよいのかということで、コラテラルなパスウェイがないのかも調べられる。かなり我々専門でやっているの、こういうことができるということである。

JSPS の HD フィジオロジープロジェクトとなると、ADME/PK から心臓まで全部連動解析ができる。というので、複数の 7 つぐらいのソフトウェアを連動して使って、例えば CT スキャンから心臓モデルの再構成をして、「京」か阪大のスパコンで 1 週間回して心臓の電気生理をきちんと再現できる。すると FDA が興味を持って、審査の段階での副作用の予測をシミュレーションでやりたい、プロジェクト化するというので FDA とサインした。また、これをファンドするというのでプロジェクトが始まっている。

デバイスもつなぐ Garuda プラットホーム

さらに、いろいろなデバイス、リープ・モーションやフィットビット、アップルウォッチなどをつなげて、パーキンソンなどの震えが出ると、自動的にリアルタイムで解析して

アラートを出す。セットアップすれば、薬を飲んでほしいと医者が指示を出すことも技術的にはできる。実際にできるかどうかは FDA や PMDA の承認の問題があるからその手続きは必要となるが、このようなセンサーデータをインテグレート解析する技術は提供できる。インテグレーションのプラットフォームも GARUDA プラットホームで、さらにデータアナリシス AI のプラットフォームを我々は持っているので、これと連動して非常に高度な解析ができる。

この分野はあまりにも論文数が多いので、論文を一つ一つ読むというのは本当にコンパスのようなものであるから、やはりサーチライトが必要だということで、知識を抽出するシステムを作ったり、いろいろなことをやっている。

5. グランドチャレンジ

次にやろうとしているのは、我々だけでは多分できない大きなプロジェクトである。GARUDA プラス AI をデザインするバックエンド（ガンダーラ・フレームワーク）を作ったことで、バイオメディカルエリアに関しては情報がほぼすべて統合できるプラットフォームができた。さらにこの上にインテリジェンスを乗せることをやりたい。RoboCup はサッカーだったが、今度は頭のほうのグランドチャレンジをやろうというので、2050 年までに医学・生理学賞分野でノーベル賞級の発見をする人工知能システムを作るチャレンジをしようということである。

AI Magazine や人工知能学会誌などに論文を書いたが、基本的な認識としては、科学的発見プロジェクトは産業革命以前の状態にあるだろうと思っている。これを何とかしなくてはいけない。

科学者は、いかに発見するか？

セレンディピティーと幸運な間違い。間違いがあつたがそれが良かった、科学的直感にすぐれているなどと言うのは、よく考えてみると非常に運任せともいえることで、これはいかなものかと。地球温暖化や様々な病気を前にして、このようなことをやっている余裕があるのかと言ったら、多分ないだろうというのが私の考えである。

この前 DeepMind のデミス・ハサビスと話をしたら、彼も全く同じことを言って、今の科学的発見ではとても間に合わないぞと、非常に盛り上がった。これをシステムティックにしたい。

実は、我々は、科学的発見が得意では無い

また、我々は科学的発見が得意ではないことを認めなければいけない。サイエンティストは絶対認めないが、おそらくリアリティーは得意ではない。

例えば生命科学分野で年間 150 万本の論文が出る。読めるわけがない。1日 4,000 本。自

分の分野だけだとしても数十から数百出る。EGFR Pathway というがんに関係する 1,500 本の論文を非常に詳細まで読んで、総合作用をデータベース化し、マッピングしているが、これは大変である。半年ぐらい掛かったが、その後 10 年間アップデートは不可能である。アルツハイマーは 2,000 本読んでいます。このアップデートは、ちょくちょくやっているが大変である。Yeast Cell Cycle や現存する生物種でシグナリングのパスウェイがすべて記述されている最初の例で、イーストのような小さいものでも大変である。これも 2,000 本ぐらい論文を読んでいる。

“Mapathon” =Mapping Marathon

辻井先生と一緒にいろいろ試したが、やはり自然言語で自動的にやるのはまだ無理なので、極めて原始的に読んで、書いて、ポストイットを貼るというやり方で、まとまってくるとデータベース化してきちんと絵を描くという、ほとんど曼陀羅を作っているような状態である。しばらくすると論文がたくさん出て、また修正をするという状態である。しかも、問題なのは自然言語である。例えばある論文から、核から細胞質へタンパク質が移送されるという図を描く。しかし、核から細胞質に行くかどうか、文章には書いていない。我々に生物学的知識があるので分かる。また、どのような分子か、分子もアセチル化やリン酸化などがあるから、そういうときに修飾してあるか、どのタイプが相互作用に関わるかどうか書いていない。だが、何となく、情報は不完全であるが、一応書いて分かるようにして我々は次へ進む。こういう能力が重要であるが、それだけでやっているサイエンスにならないので、もっと厳密にしないとイケない。自然言語の曖昧さが良いのではあるが、それがやはり問題にもなる。

MINORITY REPORT 問題

MINORITY REPORT 問題というものがある。99%、A が B を活性化するとき、1%のリポート、例えば 3 件が、A が逆に抑制すると言ったときに、まずそれに気が付くか、気が付いたときに無視するか、それともある特殊な条件での大きな発見だと思うか。これは極めて難しい問題で、効率的に探して評価するのは、手作業ではできない、ほとんど無理である。では、どうやって効率的にやるかということ、やはりコンピューターの力が必要である。IBM の Watson が東大で非常にレアな白血病を発見したのが、その一例である。要するにレアな情報を見つけてきて提示する、人間が見られないものを見るという、ある意味で非常に高度な検索技術である。これは Deep Learning とはまた違うところであるが、非常に重要である。

さらに、バイオメディカル分野の対象は非線形高次元である。これをどう記述するか。まず軸を決めるが、この軸でいいのか。分割して大中小とするが、大中小とやるとエラーが出る、はみ出す。はみ出さないようにこれを細かくすると精度は上がるが、何を言っているのか分からない、コミュニケーションできない。これで診断基準とやると、もう診断基準が分からない。現実的に現場で使えない。

人間の認知バイアス

また、認知バイアスがある。Korzybski が Map is not the territory と言っている。territory は Reality で、Map は我々の抽象化した言語であるが、イコールではないし、言語にした瞬間に、言語のコンテキストでバイアスが掛かる。George Lakoff によれば、あるアボリジニの文化では、Women、Fire、Dangerous、Things が同じ言葉で表せる。例えば認知症の分類でも、何か当てはまらないものがあつたり、非常に曖昧である。がんなども、ステージ 1 とステージ 3 が決まっていて、ステージ 2 は 1 と 3 ではないものというようなステージングもあつたりする。大体そのレベルである。このような問題にすぐに対応できるかという、Deep Clinical Phenotyping で多分できると思う。非常に大規模なデータから学習をさせて、人間にはできない精度の高い患者分類をして、それに対するバイオマーカーを見つけることができる。

Unsupervised learning for patient stratification

GARUDA を使って理研と組んでやっていることの一つに精密臨床分類がある。東大から関節リウマチのデータを提供してもらい Unsupervised learning でこれをやる。診断自体の精度の問題があるので、実際の検診と、その予後情報だけで分類をする。一つ一つのデータも取れるし、あるグループで、ある患者に近いネイバーはと探すと、そのネイバーが出てきて予後の情報が全部見られる。

ダミーデータであるが、上のほうは outlier か、データが間違っているのか、黄色に自動的に分類されているが、真ん中がとんでいる。これは transitional なのだが、実はあそこまでが黄色の領域なのか。ブルーがどうも 2 つに分かれているようだが、本当に分かれているのか。分けると治療法が変わるのだったら意味があるが、何をバイオマーカーにして判断できるのか。またグリーン分布でも何か違うのか。ビジュアルにすると非常によく分かるので、インタラクティブなインターフェイスを提供している。

実際 SBI では製薬会社の創薬のコンサルティングや、クリニカルサイエンスでやっているから、創薬のエフィシエンシーが低い一つの理由は、やはり患者コホートのセレクションがどうしてもやり切れないためである。臨床サイドで非常に精密にできれば、患者のどのグループに効くのか実際にかなりよく分かる。きちんと指定した臨床研究、臨床治験をやれば、製薬の創薬プロセスの成功率が格段に上がると思う。これはもう我々情報サイドのプロセスを見ているので分かる。

見えないものが見えるという有名な例であるが、オリジナルイメージのスクールバスが、Deep Learning されたものを見せると、ダチョウに見える。これは Deep Learning が画像でノイズを乗せているのだが、ノイズをある程度マニピュレートすると違うものに判定する。Deep Learning のネットワークをだませるといふ絵である。ノイズの差分を取って 100 倍ぐらい拡大して、よく見るとダチョウのように見える (笑)。DeepMind の囲碁も、変なところに打っていると思ったら、実際には我々が読めないところを読んでいるわけである。

我々の囲碁は真ん中は読めないで周辺部から打つが、DeepMind はその真ん中を読んでいる。すると、後で気が付くと真ん中に膨大な領土が出てきたということがよくあったわけである。それがやはりポイントになって、サイエンティフィック・ディスカバリーや臨床診断で、我々が見えないものが見えるのではないかと思っている。

Asking Right Question

このサイエンティフィック・ディスカバリーでは、Asking Right Question が非常に重要だろうと言われる。私もそう思っていた。資源に限界があるからである。

我々のサイエンティストのキャリアというのは実際現役が 20 年 30 年ぐらいしかない。自分がボスになって 10 年 20 年ぐらいの間に発見しないとサイエンティストは成功しないので、Asking Right Question が重要となる。現状では、発見のプロセスは、恐ろしく時間が掛かる。先ほどのサーチイン遺伝子に関して、計算機予測から臨床レベルでの研究になるまで、実際 20 年掛かっている。20 年で 1 つといたら失敗できない。だが、もしこれが大量の仮説を生成して高速で検証してロボットも使えてとなると、Asking Right Question はそれほど重要ではなくなる、もっといろいろなことができるわけである。資源制約がゼロではないので、Asking Right Question が全く重要でなくなるわけではないが、今ほどクリティカルではなくなれば、いろいろなことができる。制約が外れるから全然違うサイエンスのやり方になる。サーチイン遺伝子の発見のときは、しらみつぶしにやってドンと一つの仮説が決まったので、あとは解釈だけで済んだ。しかし、今は情報がたくさんあるから、あのモデルから何が解釈できるのか、まだ全部は無理かもしれないが、自動的にある程度のサジェスチョンができるレベルにあると思う。20 年前は全部自分で考えなければいけなかったが、そういうことができるようになればサイエンスの分析は根本的に変わってくると考えている。

科学的発見の本質

そうすると、サイエンスの本質は、やはり大規模仮説空間の探索としての科学的発見ではないか、そういう意味では、私が言い出したシステムバイオロジーと大規模 AI の融合ではないかと思ひ、今非常に一生懸命やろうと思っているのが、科学的発見のエンジンとしての人工知能である。より正確な現象分類と相関の理解ができるし、大規模仮説生成と高速検証ができる。これは AI だけではなくロボティクスも本当に使わないといけないが、また知識の一貫性が非常に我々は曖昧で、これをどう維持するかである。

そういう意味ではバーチャル・ビッグ・サイエンスにしないといけない。大規模な 1 つのセンターではどうにもできないので、やはり分散型の部分も入れながらクラウド的な部分と集約するような場所を取ってやるという、このソーシャル・エンジニアリングが非常に重要になってくると思う。

ロボットの利用も重要である。マンチェスターのロス・キングは、非常に限定的であるが仮説を作って、それをロボットで動かして検証するというので、*Science* や *Nature* に論

文を出している。最近のものでは、**The Dark Reactions Project** というプロジェクトを始めた研究者もいる。これは失敗した実験のデータをどんどん入れて、機械学習で、次はこれをやればうまくいくというサジェスチョンくれるというもので、今年の 2 月号の *Nature* に出ている。こういうものがだんだん出てきた。したがって、サイエンスの分野で AI を使って加速する、または今までではできないサイエンスのスタイルができるようになっていくと思う。

このグランドチャレンジの進展は、何をもたらすのか？

グランドチャレンジの進展が何をもたらすか。まず、そもそも科学的発見とは何かということの理解と再構築が非常に進む。今まで曖昧に直感と言っていたものが、そうではないことがわかるし、人間とは違う科学的発見プロセスとなる。AI との共同作業で科学的発見に飛躍が生まれると思う。

チェスで **DeepBlue** が勝ったが、今はカスパロフが言い出したアドバンスト・チェスである。AI システムと人間のチームが、AI システム単独、人間単独よりも強い。IBM のチームに聞いたら、やはり戦略的な思考はまだ人間が強いので、将来は分からないが、今は戦略的なところは人間がやり、それ以外のところを全部 AI にやらせるのが良いという話である。サイエンスの部分はやはりチェスに比べるとはるかに探索範囲が広いから、人間が戦略的な判断をし、AI を使いながら研究するのが大変重要である。そして AI が研究に不可欠なツールになるので、5 年 10 年たつと人工知能システムがない研究所は競争力を失う。これは研究所だけではなく企業も多分同じになると私は思う。

さらに、人工知能、生命科学、ロボットを全部つなげようと思っている。

文明の進化はやはり道具の進化である。石や骨を使って力を得て、産業革命で動力を得て移動をし、通信情報革命で計算、通信をするという新しいイノベーションがあったところで、今人工知能が考える道具を造っている。ほとんどの人工知能はいろいろ学習させたりして考える道具を造っているが、サイエンス・ディスカバリーになってくると知識を生み出す道具になる。考える道具と知識を生み出す道具は根本的に違って、これから何が起こるかという、我々のあずかり知らないところで知識が生み出されるようになる。膨大な知識がどんどん生み出されて、我々が、何が起きているか一生懸命それを探索するという世界が多分生まれると思う。恐らくこれは文明が自律的に進化していくことになって、映画の「トランセンデンス」や「インターステラー」のような世界になると思う。経済成長は今まではフロンティアがやっていた。新大陸、サイバースペース、次は新しい知識のフロンティアができる。その知識は誰かが見つけ出すのではなく、明示的にもうできているものを探して、我々がそれを理解しなければいけないという全く新しいタイプである。今はもちろん発見する知識はインプリシットしかなく明示化されていない。人工知能はそれを明示化して少なくとも金塊は発掘しておいてくれる。人間がそれを精製しなければいけない。今は金塊がどこにあるか分からず掘って大体外れる。AI システムは金塊を発掘して山積みにしておいてはくれるが、精製はやれというように多分なると思う。人工知

能が精製までしたら全部持っていかれてしまうので、そこは頑張らなければいけないと思う。人工知能でサイエンティフィック・ディスカバリーというのは、本当の文明の最終 Moonshot になるのではないかと考えている。これは非常に重要なプロジェクトで、我々だけではできないので、グローバルなプロジェクトを作ってやりたいと考えている。