

第39回 日本大学理工学部図書館公開講座

「人工知能とロボットの最新知見—医工連携による医療用マイクロロボットの実現に向けた取り組み—」

令和4年6月17日（金）18時からビデオ会議ツール「Zoom ミーティング」を使ったONLINEライブ配信と対面を併用したハイブリッド講座として、第39回日本大学理工学部図書館公開講座が開催された。

今回は、理工学部精密機械工学科の齊藤健教授による「人工知能とロボットの最新知見—医工連携による医療用マイクロロボットの実現に向けた取り組み—」をテーマとして、281名（ONLINE受講者267名を含む）の参加者に向けて、医学と工学の連携による医療用マイクロロボットの実現という大きな夢に向けた未来への挑戦、そして今まさに進化しているAIやロボットの最先端の科学技術について、興味深い話題を交えて講演が実施された。講演時間は質疑応答をあわせて約70分であった。

齊藤教授ご自身から発せられた「遊びから始まったロボットへの挑戦」は、医療用ロボットの実現に向けた、魔の川・死の谷・ダーウィンの海を越える航海の船出を迎えた。夢から現実へ歩む素晴らしい要素技術のリアルな姿を、多くの人々と共有して講演会は終了した。

○はじめに

最初に齊藤研究室で作製された、世界最小のAI（人工知能）を持つわずか5mmの歩行ロボットの紹介から講演は始まった。そして自己完結するAI搭載ロボットの実例を交え、人体内部に入るマイクロロボット作製の夢へと話題が進んでいった。

マイクロロボットを研究する者たちすべてが望む、人体内部で活躍するロボットをつくりたい。しかしロボット開発にあたって医療に応用することは大変難しい現実がある。そこで齊藤教授は医学部の先生方とディスカッションを続けているうちに重要なポイントに気がついた。それは「医師は昔ながらの道具を使って手術をしている点」である。これは安全性・信頼性というメリットがあるが、実際の手術では、医師・スタッフが長時間にわたって、手術室で飲まず食わずの状態トイレにも行けないまま、手術を完了しなければならない。8時間を越える手術もある。これらを工学で支援することができるのではと考えた。

○齊藤教授の紹介

齊藤教授は日本大学理工学部電子工学科出身で、生物の脳を電子回路で実現する研究をしていた。その後、日本大学文理学部物理学科・物理生命システム科学科の助手として採用された。齊藤稔教授が生物の脳の信号を計測していたため、その振る舞いを電子回路で実現する研究を行うことで、生物の脳のモデル化を行っていた。そして、日本大学理工学部精密機械工学科内木場文男教授の研究室に移り、昆虫型マイクロロボットの研究にたどり着いた。研究室では人体内部で活動するロボットを作りたいという議論を常にしていた。そんな中、カリフォルニア大学バークレー校に1年間留学する機会を得た。

カリフォルニア大学バークレー校はノーベル賞受賞者のみが駐車できる駐車場があるほど、ノーベル賞受賞者をたくさん輩出しているスーパー級の有名大学である。マイクロロボット・メカニカルエンジニアリングの研究で有名な先生が多数存在し、齊藤教授はその先生方とさまざまな議論を行いながら、電子回路を使った人工知能をロボットに搭載する研究をした（2021年まで同大学の研究員を兼務）。研究が活発なアメリカでは、Ronald Fearing先生（ネイチャーやサイエンスなどの学術雑誌の表紙を飾るような有名な先生、跳ね回るカンガルー、ゴキブリや蜂を模倣したロボットを作製）、Kristofer Pister先生（世界で初めて太陽電池を搭載した小型ロボットを作製、現在齊藤教授と共同研究）、Sarah Bergbreiter先生（ノミのような小さくて跳ね回るロボットを作製）、Robert Wood先生（世界最小の空を飛ぶマイクロロボットを作製）、世界最初にMEMS技術で静電モータを作製したといわれるRichard S. Muller先生とRichard M. White先生をはじめ、その他多くの分野（MEMS技術を使ったマイクロロボット、小型ロボットによる群知能（集団としての知能）、小型建築マイクロロボットなど）で活躍している先生方が在籍しており、齊藤教授はこれらの先生方と一緒に研究する機会を得た。齊藤教授は現在でもこれら多くの先生方と交流し共同研究を行っている。

○ロボットについて

現物と似たサイズで生物を模倣した、人間型ロボット、動物型ロボット、ゴキブリや蜂の昆虫型ロボットなどが研究され作製されている。

【昆虫 vs. ロボット】

齊藤教授は昆虫型ロボットをつくりたいと考えた。昆虫は、脳・感覚器・エネルギー源・筋肉のすべてが機能性材料でできている。しかもミリメートルサイズの中にすごい機能が満載されている。それに対してロボットは、コントローラ・センサ・発電デバイス・アクチュエータがそれらに対応して機能している。現在、サイズ、消費電力、機能全てにおいて昆虫の方が圧倒的に優れている。

【Micro Electro Mechanical System (MEMS)】

微小な電気要素と機械要素をシステム化していく。これらはコンピュータのCPUが微細化高度化していく中で培われた技術であり、半導体やレーザ加工技術などが元となっている。その中でAT&T Bell研究所による超小型シリコン3連ギアやUCBのMEMS静電モータが開発された。要素技術として微細加工技術(Micro Mechanical Systems: ロボットの筐体, センサ, アクチュエータ, 発電デバイスの開発)に加えてアナログ高集積化技術(Micro Electro Systems: ハードウェアニューラルネットワークの開発)の融合によりMicro Electro Mechanical Systems (MEMS)としてシリコンウェハに生命を与えるものでありシリコンウェハによる昆虫型マイクロロボットシステムで、マイクロマシンとも呼ばれている。

【人工知能とロボットに係る国内外の動向】

国内の動向は、2013年6月に政府が日本再興戦略を発表、続いて2014年9月から継続的にロボット革命実現会議が開かれロボット革命の実現に向けた取り組みの現状と課題について議論された。2015年の1.6兆円から2035年には9.7兆円へ成長が期待されている。生活支援ロボット、次世代社会インフラ用ロボット、製造分野・サービス分野・農林水産分野など、日本は今後ロボットで発展していこうとする強い意思が感じられる。日本が今後10年間で特に力を入れるところは、超スマート社会サービスプラットフォームに必要となる技術(サイバーセキュリティ, IoTシステム構築, ビッグデータ解析, AI, デバイスなど)、新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術(ロボット, センサ, バイオテクノロジー, 素材・ナノテクノロジー, 光・量子など)といわれている。本講演で取り上げたAI, ロボットがその中心にあげられている。

海外の動向は、ドイツで生まれたインダストリー4.0に向けた取り組みがある(第1次産業革命イギリス・フランス等18世紀後半(工業化), 第2次産業革命アメリカ・ドイツ等19世紀後半(重工業), 第3次産業革命アメリカ・日本等20世紀後半(電子技術エレクトロニクス))。第4次産業革命では極端な自動化, コネクティビティになると言われている。

○人工知能とロボットの研究

【人工知能(ニューロデバイス)】

日本大学名誉教授関根好文先生(故人)が考案した人工知能の元となるパルス形ハードウェアニューロンモデルと名付けられたアナログ電子回路モデルがある。パルス形ハードウェアニューロンモデルは生物の脳と同様に、ニューロンが出力するパルス波形そのものをモデル化したモデルである。パルス波形を出力するモデルは細胞体モデルであり、シナプスモデルは細胞体モデル同士を結合してパルス波形を伝達する。細胞体モデルとシナプスモデルを組み合わせてパルス形ハードウェアニューロンモデルである。シナプスモデルには、パルス波形を促進する興奮性シナプスモデルと抑える抑制性シナプスモデルがあり、互いを助けるように興奮性シナプスモデルで細胞体モデルを接続すると手をつなぐように同期してパルス波形を出力するようになる(同相同期)。これはまるでたくさん並んだ音叉のひとつを鳴らすことで全体に振動が伝わり共振

する現象のようである（YouTubeなどでよく見かける）。逆に抑制性シナプスモデルで邪魔をするように細胞体モデルを接続すると、最初は手を取り合って出力していたものが、反対の信号を出すようになる（逆相同期）。これらを応用して4つの細胞体モデルを抑制性シナプスモデルで全接合すると、4つのバラバラな信号を得ることができる。この信号のひとつを、例えば左前足の動きに、もうひとつを右前足の動きに使い、信号の順番を入れ替えたりすることでプログラムなしにさまざまな動きを制御することができる。これらは集積回路に組み込むことでマイクロロボットに応用している。

【階層型のニューラルネットワーク】

AIやディープラーニングは階層型のニューラルネットワークでできている。これは人間の脳の視覚野が階層構造になっているのを模倣している。一般のAIは行動を数式で表現しパソコンで計算して判断しているが、それとは異なり回路を集積化してディープラーニングのようなものを実現する研究も行っている。

さらにニューロンモデルの回路の一部を圧力センサに変えて、圧力センサを押すと信号周波数が変化するような回路ができる。ちょうど触覚から脳に信号を送る入力部となる回路である。さらにニューロンモデルの回路の一部を光センサに変えて、光をあてると信号周波数が変化するような回路ができる。これは目に対応する回路としてロボットの目になる。こういった回路を集積回路として構築し、シリコン製ロボットに搭載したものが齊藤研究室のマイクロロボットになる（電源は現在ライン供給）。

【昆虫型マイクロロボット】

シリコンデバイスの実装例(マイクロロボット)として、SMA (Shape Memory Alloy 形状記憶合金)アクチュエータでモータの役割を担わせる人工筋肉がある。これは形状記憶合金を温めて変形動作させて回転運動や伸縮運動を実現し、足の動力にしている。シリコンでさまざまなモータや発電機をつくることできれば、すべてシリコンに書き込んで、回路・モータ・電源が実現できれば、シリコンに命を吹き込むような研究ができる。究極は人体内部・血管の中に入れるロボットがつくられるようになれば最高である。

現在、このうちの電源が問題になっている。東京大学の三田吉郎教授の小型発電デバイスは7.5mm角の中に144個の太陽光パネルを並べ、直列につないだ60V（短絡70V）太陽電池である。出力は1.1mwの出力があり、マイクロロボットのすべての動作を賄う電力が供給可能となる。強力な光を当てればより高出力になる（やりすぎると溶ける）。なお人体内部では太陽電池は使えないのでQi充電のようにコイルを使ってエネルギーを伝送供給する研究が必要となる。

形状記憶合金の人工筋肉は温めて動作するためエネルギー効率が悪い。そのため静電気力を使ったアクチュエータをKristofer Pister先生と共同研究した。並行平板に電圧をかけ、その静電気力による吸引力をピストンの動作に変換し、ピストンを押し引きさせて動作させる静電モータを作製した。その結果、三田教授の発電デバイスで動作できるアクチュエータを作製することができた。現在この静電モータをマイクロロボットに実装する研究をしている。

また、磁気アクチュエータを日本大学理工学部電子工学科の塚本新教授、芦澤好人准教授と共同研究をした。磁気由来の熱でくっついたり離れたりを制御するようなさまざまなモータの研究をしている。

【4足歩行ロボット】

ロボットは頭脳にあたるマイクロコントローラとサーボモータがあれば動かすことができる。センサがあればなお良い。プログラミングした命令をサーボモータに送れば、ロボットを操り人形のように動作をさせることができる。一方で、プログラミングをせずに、ロボットの各足にニューロ回路を設置し、足裏に圧力センサを付けるだけで制御することができるようになる。ニューロ回路のパルス信号は、自らを抑制する回路の抑制性シナプスモデルによって圧力センサの信号に対応したパルス信号の制御・抑制（発振をゆっくりにする）だけで動作を制御できる。実際に小型4足歩行型ロボットにニューロ回路を実装して歩行実験を行った。実験当初は生まれたての小鹿のようなぎこちない動きであったが、回路定数やロボット自体を工夫することで、スタスタと歩くようになった。これには「どの順番でどのように足を動かせ」などという命令は何

も入れていない。ロボット本体を持ち上げると、足裏の圧力センサの情報が全て0で同じになるので、足は同じ動作になる。地面置いた瞬間にバランスが崩れ、圧力センサの情報を基にスタスタと上手に歩行動作をする。坂に置いた場合でも、最初は戸惑うような動きをした後、恐る恐る歩くようになる。

馬の後ろ脚の大きく曲がる部分は、進行方向を右にとると、ひらがなの「くの字」の曲がり方をしている。一方猫の後ろ脚は「逆くの字」に曲がる構造になっている。これを参考に関節の曲がり方を猫のように変更したロボットにすると、しばらく動作をしているうちに猫のような歩行・動作になる。

これらのロボットはニューロ回路をモータに実装しただけで、「どの順番でどのように動かせ」というようなプログラムをしていないにもかかわらず、動物の動きに近くなっている。ロボットの本体自体に「歩様」、「歩き方」、「足の動き方」が宿っており勝手に（自然に）その動きになるのである。

また、新たに得られた研究成果として、4足ロボットのサーボモータをゆっくり動かしていると、しばらくしてそれぞれの足の動きの位相が90度ずれた位置に変化し、スタスタと歩くようになる（歩行）。これを少し速くすると、異なる位相に落ち着き、トロット（速歩）・小走りの動きに近くなっていく。

人間・動物は、全てその体に適した歩き方を持っており、極めて単純な原理でこの動きを実現できる。足裏のセンサだけで体全体の動きとバランスを制御することができる。

さらに iPS 細胞をロボットに搭載したいと考え、東京大学生産技術研究所 池内与志穂准教授と共同研究をしている。電気回路やプログラミングで人工的な脳や人工知能を作ってしまうと、人間とかけ離れたものになってしまう。そこでヒト iPS 細胞由来の3次元脳組織を利用して、ミニ脳をつくっている。

これをロボットに実装する予定である。実際にロボットに搭載するには、ロボットの動きに合わせて培養液がちゃぷちゃぷと動いてしまうので、ミニ脳がダメージを負ってしまう可能性があり対策が必要である。

○医療用マイクロロボット

齊藤研究室で開発している医療用マイクロロボットを取り巻く環境やどのようなロボットを目指しているのかを説明した。

【医療用ロボットの概説】

最も有名な手術支援ロボットである da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical 社) は高額である（価格3億5千万円、年間維持費3千万円）。日本では人の手で腹腔鏡下胃切除術（悪性腫瘍切除術）を行った場合、保険点数64,120点でこれをロボット併用で実施した場合の保険点数は64,120点と全く同じ（料金が同じ）であり、高額の装置を導入しにくい環境にある。しかし2019年に da Vinci Surgical System の特許技術の多くが期限切れになり、国内外で研究開発が盛んになってきた。国内メーカーでは hinotori : メディカロイド社、EMARO : リバーフィールド社などが有名である。これまで人間の食道の中を観察するロボットとして、内視鏡のマイクロカプセルとして実現化されている (Endo Capsule : オリンパスメディカルシステムズ株式会社) がある。

【医療用マイクロロボット】

1cmのマイクロロボットならば大動脈や食道・腸などの臓器に入れる医療補助用マイクロロボットが実現すると言われている（10年後の未来）。また10 μ mのマイクロロボット（赤血球と同じぐらいの大きさ）ならば da Vinci でも手術ができない脳の血管に入り込む医療補助用マイクロロボット（30年後の未来）が期待されている。その実現を目指し、これからも医学系の先生との共同研究が必要である。日本大学では、次世代型ロボットシステム開発をめざしている。

実際の腹腔鏡手術においては、難しい特別な手術では外科・内科の専門家が協力して手術を行う必要がある（日本大学医学部 消化器外科 山下裕玄教授が執刀し、消化器肝臓内科 後藤田卓志教授が内視鏡で術部の視界を確保するための操作を行っている様子が紹介された）。

※※※エピソード 内視鏡を実際に体験※※※

内視鏡に変わる医療用ロボットを開発するうえで、現状を実体験したいと思い、実際に内視鏡による検査（ビデオスコープを挿入：胃カメラ（鼻から）や大腸検査（肛門から））を日本大学病院で行った。

胃カメラは後藤田教授に実施頂き全く苦痛が無く検査が終わった。また、実際の大腸の検査ではわずか数分で検査やポリープ切除ができ、本当にすごい技術であることを実感した。

※※※※※※※※※※※※※※※※※※

大腸全体の内視鏡検査を行う医療補助を担うロボットは、現在はカプセル内視鏡のみであり治療介入操作はできない（腸内を自然移動しているときに撮影を行うのみ）。腸内を自由に行動して手術・支援（粘膜病変切除）ができるロボットが実現できるか？ということが学術的な問いとなる。従来の大腸内の内視鏡検査（ビデオスコープ）では、肛門から1.5mの長さのビデオスコープを大腸深部まで一気に挿入し、引き抜きながら検査し、病変があれば即座に切除する。この従来の内視鏡検査・手術において解決すべき課題は、内視鏡の挿入に術者の高い技術力が必要であること、必ず一方向性であり後戻りができないこと、そして複雑な手術が困難なことである。表層のポリープの切除はできてもそれ以上の複雑な手術は別の方法が必要となる。そこで、大腸内に入るときは小さな卵形の状態で挿入し、病変発見時に大腸内で脚部を展開（変形）し自由に自ら歩き進み、搭載した医療器具で摘出まで行うロボットの研究開発をしたい。これは映画『ミクロの決死圏』の世界を実現するような研究である。現在プロトタイプを製作（チタン合金製の直径2cm程度の脚部や医療器具が折りたたまれたタマゴ型医療用マイクロロボットの試作・制御システムの開発。3Dプリンタでプロトタイプを製作し、各機構の動作の確認を実施。筐体や脚部の折りたたみ機構、ハサミやスネアの収納機構などの設計）し、大型研究費の獲得に向けて実績を重ねている状況である。

○まとめ

“医工連携には大きなポテンシャルがあり”，医学の「ニーズ」と工学の「シーズ」の融合によって新しい手術の仕方が生まれる可能性があることがわかった。今後も継続的な連携によって大きな成果が期待できると考えている。

○終わりに

外部機関が使用可能な、日本大学理工学部の施設・設備、日本大学マイクロ機能デバイス研究センター（センター長：齊藤教授）について紹介された。また参加された聴講者、日本大学関係者、学外共同研究者、研究室学生・大学院生、ご家族への謝辞を表明された。時間の許す範囲で質疑応答を行った。その中で、昆虫型ロボットを作った最初のモチベーションは遊びで、生物に近いロボットを作りたいかったこと。ニューラルネットワークを活用し複雑化すれば人間に近づけること。新たな開発をしていくとき、魔の川（さまざまな要素技術がある中で、それに押し流され、技術を育てるプロセスに結びつかない）、死の谷（開発が本格化すると、市場への出口作り・事業としての実現性の判断が必要）、ダーウィンの海（製品がたくさん出ると競争力がなくて生き残れない）などについて回答が行われ終了した。

以 上