高専研究室紹介

SEAJ ジャーナル新春号では例年、セミコンジャパン「the 高専」に出展された皆様の出展レポートを掲載してまいりました。今回残念ながらバーチャル展示会となり現地会場出展がかなわなかったため、代表的な２校に研究室紹介の記事を頂きましたのでご紹介します。（SEAJ 事務局）

液滴室温ナノインプリントを用いた小・中学生のためのナノテクノロジー教育

舞鶴工業高等専門学校

電子制御工学科　准教授　清原 修二、准教授　石川 一平
電子制御工学科　本科５年　飯田 裕樹、藤原 魁人、山邊 弘太、吉永 修司
豊橋技術科学大学　電気・電子情報工学系　講師　針谷 達、教授　滝川 浩史
産業技術総合研究所　集積マイクロシステム研究センター　主任研究員　倉島 優一

1．はじめに

THE 高専 @SEMICON Japan 2020にて展示発表したいとのことで、清原研究室を希望した学生がいたが、7月下旬に延期という、いわゆる中止のお知らせを SCREEN グループの人事担当者から連絡を受けた。ぎりぎりまで開催するために対応をしていた関係者の皆様には感謝申し上げます。本校は4月から6月中旬まで遠隔授業となり、卒業研究も課題学習という形でレポート提出となった。6月下旬以降は対面授業となり、コロナ対策をしながら、卒業研究も進めている。

本研究室は、豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 滝川・針谷研究室、産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センターとの産学官共同研究を遂行しており、本研究で開発した超音波振動を利用した液滴室温硬化ナノインプリントリソグラフィによるダイヤモンドライクカーボン（Diamond-like Carbon：DLC）マイクロ・ナノ機能性デバイスの開発をしている。また、試作開発したポータブル室温ナノインプリントステムを用いて、主に次世代フラットパネル用 DLC ナノエミッタ、医療 MEMS 用摺動部品である DLC マイクロギヤの作製を目指している。また、地域貢献のため公開講座「小・中学生のためのナノテクノロジー体験教室」を毎年開催している。今年度、コロナ禍での公開講座の実施について報告する。

2．コロナ禍での公開講座の実施

2.1　液滴室温ナノインプリントを用いたナノテクノロジー教育

ナノテクノロジーは、IoT（Internet of Things）化が進むにつれ、5G による情報通信機器や AI、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）センサといった半導体分野で必要不可欠な技術となっている。本研究では、開発したポータブル室温ナノインプリントシステムを用いて小・中学生対象の公開講座を実施することにより、我々の生活に深く関わっている（スマートフォンやゲーム機など）ナノテクノロジーの基礎知識を小・中学生に認知、理解してもらうことを目的としている。そこで、コロナ禍での公開講座を令和2年11月8日（日）に開催するにあたり，以下の対策を行った。①新型コロナウイルスに関するチェックシートの提出、②常にマスクの着用、③入口にて検温と手指のアルコール消毒、④3密を避けるため付き添いの保護者は1名まで、⑤共用の実験器具などを触らないように役割分担、⑥10分毎に換気などを行った。

2019年度のアンケート結果から、小学生には光学顕微鏡を作製する時間がもっとあって欲しい、専門用語が多く難しかった、具体例を交えた説明が欲しいとの要望があり、それを改善すべく、2020年度は、小学生と中学生で班を分け、顕微鏡製作の時間の割合を変え、可能な限り全員が自力で組み立てるようにし、また説明の際には具体例を入れることでより理解しやすくした。さらに、インプリント時間が 20 min のため、待ち時間が長くなるので、インプリント時間の短縮を目的として、インプリント時にワンボードマイコンを用いた発振器により超音波振動を印加して液滴室温ナノインプリントを行った。

2.2　液滴室温ナノインプリントによるマイクロギヤパターンの形成

本研究で開発した室温硬化する可塑材料であるポリシロキサンを滴下する液滴室温ナノインプリントリソグラフィ（Droplet Room-temperature Nanoimprint Lithography：DRT-NIL）を公開講座で利用した。**図1**に示すように，本

研究室では超音波振動 DRT-NIL を用いて医療用 MEMS の摺動部品である DLC マイクロギヤの作製を目指している。

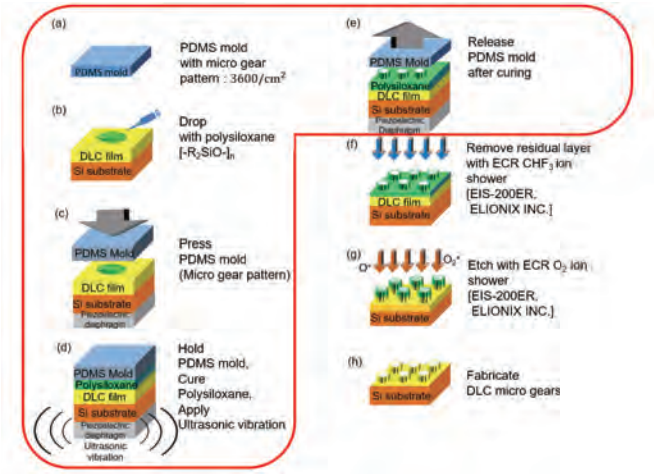

図1　超音波振動 DRT-NIL による DLC マイクロギヤの作製プロセス

公開講座では、**図1**（e）のマスクのマイクロギヤパターンの転写マスクパターンの形成プロセスまでを行った。**図2**には公開講座で行った超音波振動 DRT-NIL によるマイクロギヤの転写マスクパターン形成プロセスを示す。製作した光学顕微鏡での観察を可能とするため、基板は透過性のあるスライドガラスにした。

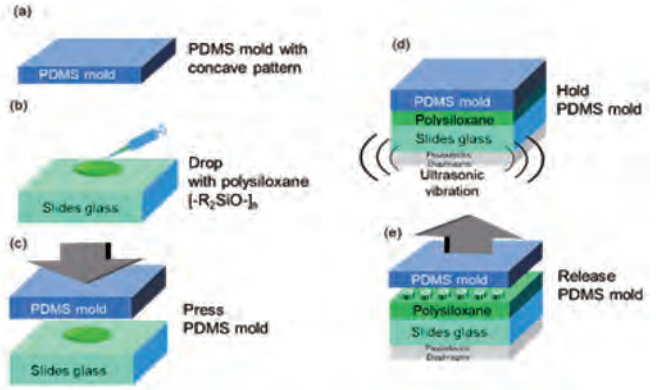

図2　超音波振動 DRT-NIL によるマイクロギヤの転写マスクパターン形成プロセス

本講座では、**図3**に示すように、歯先円直径 50μm のマイクロギヤパターン［3,600個 /cm²］を有するポリジメチルシロキサン（Polydimethylsiloxane：PDMS）［KE-106、信越化学工業 ㈱］モールドを用いた（a）。スライドガラス上にポリシロキサン［HSG-R7-13、昭和電工マテリアルズ ㈱］を0.01 mg 滴下した（b）。圧力0.6 MPa、時間20 min でモールドを基板に押し当てた（c）。このとき、ワンボードマイコンである Arduino Uno Rev3 [A000066、Arduino.CC] を用いた発振器で圧電振動板［7BB-35-3L0、村田製作所 ㈱］を振動させることにより、スライドガラスに振動を与えた（d）。そして離型すると（e）、マイクロギヤの転写パターンが形成された。

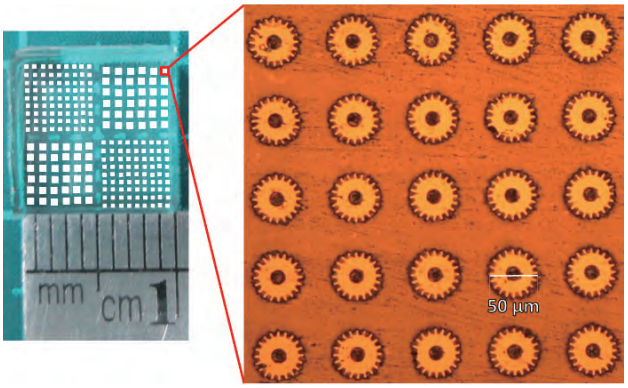

図3　マイクロギヤパターン［歯先円直径50 μm］を有する PDMS モールドの光学顕微鏡写真

本研究で開発したポータブル室温ナノインプリントシステムの構成を**図4**に示す。

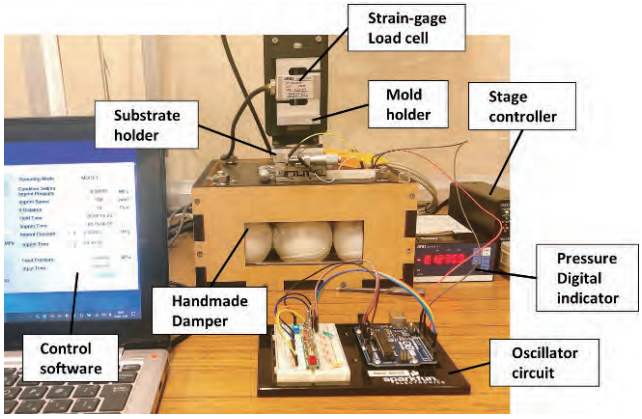

図4　本研究で試作開発したポータブル室温ナノインプリントシステムの構成

駆動力としてステッピングモータ［SGSP20-85、シグマ光機 ㈱］で加圧し、ストレインゲージ式ロードセル［LC1205-K050、㈱ エー・アンド・ディ］で圧力測定、繋がっているインジケータ［AD-4531B、㈱ エー・アンド・ディ］で圧力を数値化し、その値をコントロールソフトウェア（PC）上でフィードバック制御することにより、加圧時の圧力を一定値にしている。除振台は、軟式野球ボール［マルエスボール、A 号、J. S. B. B. 公認球、ダイワマルエス ㈱］を用いた。

また、パターン精度の向上とインプリント時間の短縮を目的として、インプリント時に振動を印加する際、ファンクションジェネレータでは大きく持ち運びに適さない。そのため、ワンボードマイコンで製作した発振器から出力された方形波信号（周波数：1k、10k、100k、1MHz、振幅：5 V）を圧電振動板に加えることで振動させた。

実際に超音波振動を印加してインプリント（圧力：0.6 MPa、周波数：100 kHz）を行った結果の金属顕微鏡写真を**図5**に示す。

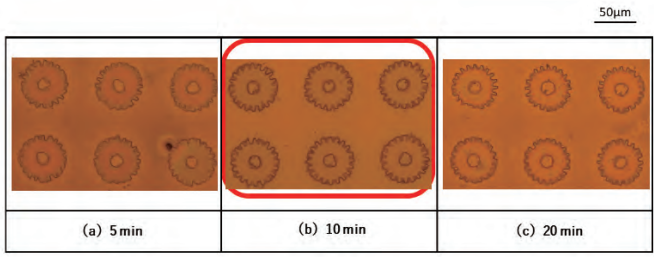

図5　超音波振動 DRT-NIL（圧力：0.6 MPa、周波数：100 kHz）によるマイクロギヤの転写パターンの金属顕微鏡写真

超音波振動を印加しない場合、インプリント時間20 min を要していたが、印加した場合10 min でもマイクロギヤパターンの歯先、内部の円形部といったパターン形成に関して、全体的に高精度な転写パターンが得られることがわかった。

2.3　公開講座の内容

小・中学生を対象とした公開講座を企画し、その内容は**図6**のように行った。本研究で試作開発したポータブル室温ナノインプリントシステムを用いてマイクロギヤの転写パターンの実験を行い、光学顕微鏡（300倍）を製作して、マイクロギヤパターンの観察と歯先円直径の算出をした。

講座後のアンケート結果から、初めてナノの世界が見れ、また新しく知ることも多く、とても勉強になったなど、参加者にナノテクノロジーに興味を持ってもらい、理解してもらえた。

2.4　公開講座のまとめ

インプリント時に超音波振動を印加することで、インプリント時間を20 min から10 min と1/2に短縮することができ、高精度な転写パターンが得られることがわかった。

また、公開講座を実施することで身の周りに使われているナノテクノロジーの一端を感じてもらうことができた。

3．おわりに

コロナ禍で半導体の需要はさらに増しており、我々が開発したナノインプリント技術が使われ、デバイス作製に寄与できることを期待している。新型コロナウイルスの感染拡大が収束し、2021年には、再び THE 高専 @SEMICON Japan が開催され、多くの高専が半導体製造に関連する最先端な研究成果を出展し、発表することを切に望みます。

(a) ナノテクノロジーの説明と大きさの単位について

(c) 光学顕微鏡[300倍]の製作およびマイクロギヤの観察と計測

(b) クリーンルーム（クラス1000）内でマイクロピペットによる液滴の練習

(d) 超音波振動を利用した液滴室温ナノインプリントによるマイクロギヤ転写パターンの形成

図6　公開講座の内容

『高専特集』
ロボカップサッカー小型ロボットの改良・開発に関する研究
豊田工業高等専門学校

専攻科　電子機械工学専攻　２年小田中　秋人、１年内藤　優星、鶴田　泰隆、光岡　稜真
指導教員　電気・電子システム工学科　教授　杉浦　藤虎（sugi@toyota-ct.ac.jp）

1. はじめに

例年12月に開催されるセミコンジャパンが、本年新型コロナウィルスの影響で、対面での実施が困難となり、残念ながら現地での高専出展もなくなった。しかし、日本半導体製造装置協会様のご厚意により、展示会に代わる研究発表の場を賜り、昨年からの本研究室の成果を紹介させて頂ける機会を得たので以下に紹介させて頂く。

昨年本校は、（株）ニコン様ご協賛の下、「ロボカップサッカーロボットを用いた人工知能（AI）によるサッカーミニゲーム」のデモンストレーションと解説を行った。本稿では、本年度新たに取り組んだ研究内容を述べる。

2. ソフトウェア開発

2.1　戦術システム

ロボカップサッカー小型リーグ（SSL）では、ロボットにどのようにパスやドリブルの判断をさせるかという戦略・戦術について、各チーム様々な研究を行っている。我々は2019年から、Monte Carlo Tree Search（MCTS）とニューラルネットワーク（NN）を用いた手法をSSLに導入することを検討し、現在までに、NNの導入、探索の並列化を実施した。

図1に示すMCTSは、数ある行動の選択肢の中から有望なものに絞りつつゲームの先読みをするもので、囲碁AIなどで用いられる手法の一つである。囲碁AIでは相手の応手を推測しつつあらゆる行動をとった場合の勝敗を集計し、最も勝率が高い手の導出を目指す。これをサッカーに応用するため、「得点の期待値が最も高い選択肢を導く」という問題に置き換えている。したがって、囲碁のように行動そのものが失敗しないゲームと異なり、サッカーではパスなどが相手の妨害で失敗する可能性についても推論しなくてはならない。

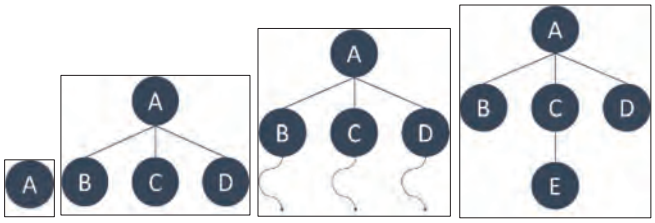

図１　MCTS法の手順　(a) 現在状態を表す根ノードの生成、(b) 葉ノードの拡張、(c) ランダムなゲームのシミュレーション、(d) 葉ノードの拡張

現在は、この推論にディープNNを使用している。NNでは、与えられた条件下で、過去の経験から行動が妨害される確率がどの程度かを推論する。この手法は、単純な条件分岐などの手法と異なり、理論的には一定時間内に深く広く探索するほど性能が向上する。一方、ロボカップサッカーでは囲碁のように十分に思考する時間はなく、60fpsで常にロボットを制御する必要があり、高速な処理が求められる。そこで、本システムではNNの推論にソニーネットワークコミュニケーションズ製のNNablaを使用し、探索部と合わせすべてC++で実装し、さらに、探索処理の並列化を行い、マルチコアCPUの性能を利用することで高速な処理速度を実現した（**図2**）。

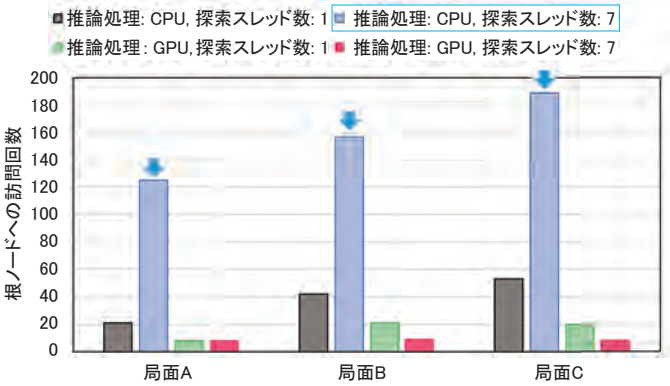

図2　探索の実行回数によるMCTSの性能評価

2.2　ゲームレポーターシステム

SSLは、スピード感や連携プレイが見所であるが、試合の展開が早く、またリーグ固有の複雑なルールにより、一般の観客が試合を素直に楽しめないという現状の課題がある。そこで、観客の理解を助け、試合をより楽しんでもら

えるよう、試合状況やルール解説を自動音声によって行うシステムの開発を試みた。

SSLではボールとロボットの位置情報はSSL-vision、ルール違反等の信号はAutoreferee、というリーグ共通のソフトにより、それぞれUDP（User Datagram Protocol）通信を介して対戦チームに配信され、両チームはこの情報に基づいて戦略や行動の決定を行っている。**図3**にゲームレポーターシステムの概要を示す。ローカルのPCと、クラウドサービスであるFirebaseをバックエンドとしたWebアプリで構成されている。Firebaseはアプリに必要となるホスティング機能、データベース、ストレージ、バックグラウンド関数の実行環境などが整えられており、環境構築を迅速に行うことができる。

ローカルのPCでは各チームが利用するUDPデータを受信し、処理を行ったのちクラウドへ保存する。クラウド上では試合の状況分析を実施し、Webアプリにて観客に試合情報を配信する。配信にWebアプリを用いることにより、ブラウザを搭載したデバイスであればWebサイトを開くだけでアプリを利用できる。そのため、大型のサイネージから観客個人のスマートフォンまで、デバイスのオペレーションシステムを問わず幅広く閲覧でき、試合の規模に応じた柔軟な運用が可能となる。また、観客個人がスマートフォンでアプリを開いた際、表示言語を切り替えることができるため、国際大会でも多言語での情報配信を実施することができる。

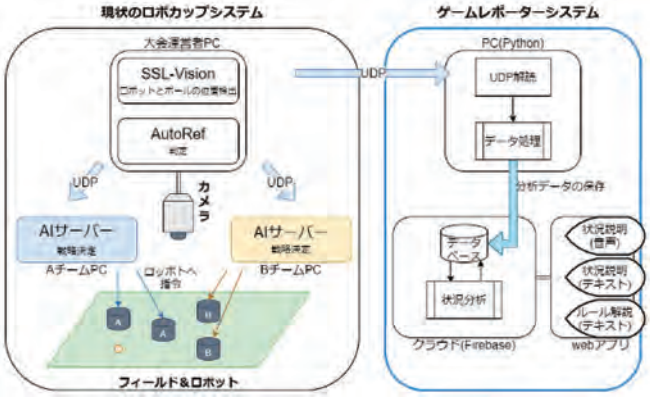

図3　ゲームレポーターシステムの構成

図4に開発したWebアプリ画面を示す。Realtime Database（Firebase上に存在するデータベース）を常時参照しており、状況分析の結果に応じて画面表示と音声案内を直ちに行う。試合進行中は、試合の様子を実況するとともに、判定情報などを画面に表示する。また、試合が長時間中断している場合には、ルール説明や見どころ解説などを音声と画面表示を組み合わせて実施する。

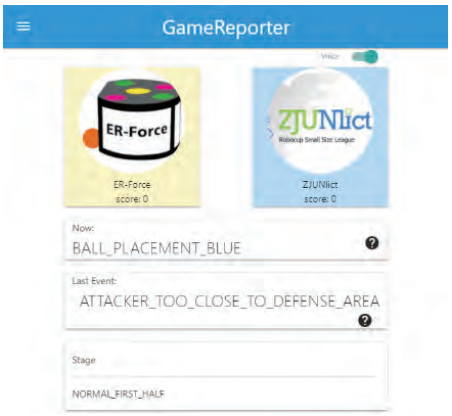

図4　Webアプリ画面の例

2.3　協調動作によるロボットの異常箇所診断

SSLでは、試合中、ロボットの全方向かつ高速移動による車輪の破損や、バッテリー電圧の低下による運動能力の低減などが必ず発生する。そのため、メンバーはロボットを交代させなくてはいけない事態の発生に備えて、常にロボットを注視している必要がある。しかし、相手チームのロボットも交えて十数台が高速で移動している中、特定のロボットの破損をすぐに発見することは難しい。そこで、バッテリーの低下に起因したロボットの動作の鈍化や、ある車輪に不具合が起こると特定の方向に移動できなくなる事象を利用して、トラブルの重症化や交代にかかる時間を低減する対策を講じることを検討した。すなわち、トラブルを最小限に減らすための動作確認を考察した。

例えば、車輪が正常に機能しているかどうか判断するには、360度全ての方向に移動できることを示せばよい。また、バッテリー低下の判断には、各ロボットを一定間隔に配置し、高速に協調動作をさせることで、あるロボットの遅れが客観的に判別しやすいようにすればよい。そこで、自転とともに公転を行う、協調動作によるロボットの異常箇所診断システムを導入した。現状、6台までのロボットを一定間隔に保ちながら、円運動させることができる。**図5**に示すように、ダンスの途中でロボットを追加したり、減らした

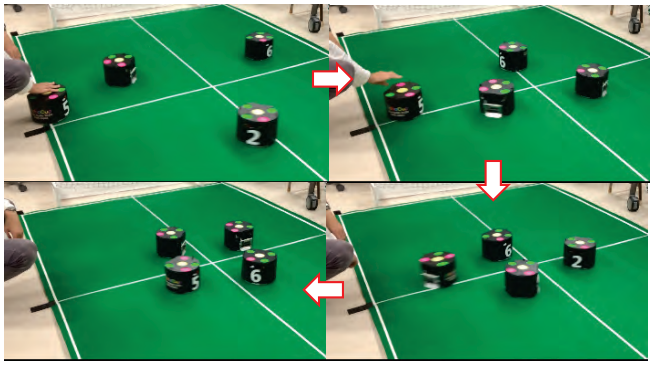

図5　アーティスティックダンスの様子

りしても衝突しないよう瞬時に等間隔の隊列を組むことができる。今後は、戦略にも応用できるよう、回転しながらボールのパス回しができる協調動作の導入と、出張授業向けに魅せるアーティスティックダンスの開発を予定している。

3. ハードウェア開発

3.1 新規回路基板の設計・製作

現在の回路基板は約6年前に作製したもので、経年劣化とともに性能の見劣りがするようになった。従来の問題点を挙げる。制御に関して、フィールド上空に設置されたカメラからの位置情報を基にサーバPC経由の指令でロボットを制御させているが、会場における電波の混信やVision-Blackout（グルーバルビジョンからの情報が途切れる）のトラブル発生時は、ロボットが暴走するという事態が発生していた。また、ロボットの内部処理が、サーバPCを介する処理と比べ高速なため、静止状態にも関わらず位置座標の誤差を反映して微動することがあった。加えて、Vision-Blackoutに対応するためには、ロボット側で取得した情報とサーバPC側の情報を合わせた、双方向の高速通信システムが必要となるが、従来回路ではできていなかった。そこで、本年、特に制御しやすい回路構成、高速な双方向通信の実現、Vision-Blackoutに対応できる機能の導入を方針に掲げ、新規回路基板の設計・開発に着手した。

2枚構成とした新規回路基板を**図6**に示す。左側がメインプロセッサにJetson Nanoを搭載したベース基板である。このプロセッサの性能は小型PC並で、ロボットにカメラを搭載できるなど機能の拡張性が高い。右側手前が拡張基板である。回路周りは3Dプリンタで作製した保護部品で覆っている。ボールを蹴るためのキッカー回路は別に用意する。現時点で基板の動作確認を終え、量産に向けて部品の調達中である。

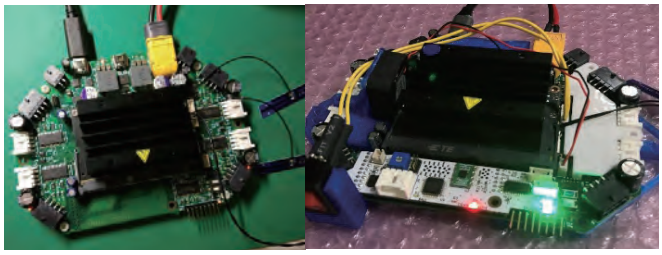

図6　回路基板（左：メイン基板、右手前：拡張基板）

3.2 ドリブル機構の改良

ロボットがボールを保持したまま移動できるようにする前部の回転機構をドリブル機構と呼ぶ。現在、SSLの一部のチームでは、キック機構とドリブル機構を組み合わせたカーブキックを実現している。我々もカーブキックが実現できれば、AIの戦略パターンを拡げ、試合を優位に進める上で極めて有効となる。そこで、新規にドリブル機構を設計・製作する。

開発したロボットは、**図7**に示すように、ドリブルユニットの上部にサーボモータを配置し、距離センサの値に応じてドリブルバーの角度を調整するようにした。すなわち、受け取ったボール位置に依らず、ドリブルバーの中心でボールを保持できるとともに、ドリブルバーに角度をつけることでカーブキックへの応用を目指す。また、ドリブルモータとドリブルバーは、省スペース、整備性、量産性に配慮し、縦に平行に配置するシンプルな構造とした。

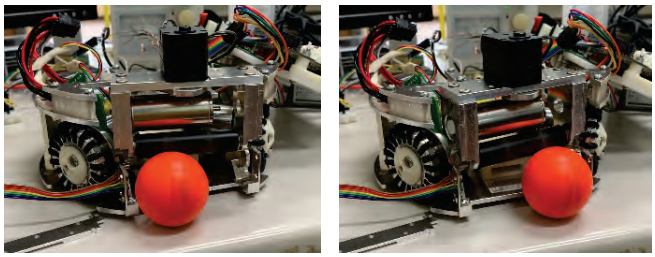

図7　新型ドリブルシステム（角度調整機構）

4. まとめ

囲碁の世界で利用されるMCTSとNNを、ロボカップサッカーのAIとして実装した。囲碁は時間・空間ともに離散的なゲームであるが、この手法をサッカーのような時系列環境に応用できれば、実社会で有用なロボット等の分野においてその効果が期待できるものと考えられる。また、SSLにおいて、試合状況を分析し、画面表示と音声案内を行うゲームレポーターシステムを開発した。試合状況はリアルタイムで案内でき、状況の変化は直ちに描画・音声に反映される。表示言語の選択機能も実装した。さらに、ロボットの協調動作による異常箇所診断手法の検討、およびアーティスティックダンスによる魅せるロボットシステムの開発を行った。

ロボットのハードウェアについても新規に回路基板とドリブル機構の設計・開発を行った。今後もロボカップサッカーロボットおよびシステム全体の性能向上を目指し、開発を継続する予定である。

謝辞

本稿で述べた、新規電子回路基板の作製には愛知県支援事業および科研費20K03263の補助を受けた。ここに記すとともに謝意を表す。