

画像認識に基づく複数ロボットの適応的な協調動作の研究 (3)

Adaptive Control and Cooperation of Many Robots Using Visual Information (3)

藤井 隆司

長坂 保典

藤吉 弘亘

佐伯 守彦

柴田 祥一

出口 達也

伊藤 有香

山田 真人

上田 徳之

足立 圭

Takashi FUJII

Yasunori NAGASAKA

Hironobu FUJIYOSHI

Morihiko SAEKI

Shoichi SHIBATA

Tatsuya DEGUCHI

Yuka ITO

Masato YAMADA

Noriyuki UEDA

Kei ADACHI

1 はじめに

近年、ロボットの発展はめざましく、通信業界や自動車業界などの大企業もロボットの研究に力を入れている。近い将来、様々な用途のロボットが身の回りに存在する社会になるであろう。自動車産業では、自動で白線をはみ出さないように走行する技術や、人や車を検知して運転者よりも早くブレーキをかける技術などがすでに市販化されている。これらは、自動車自身が状況を判断し自ら動作することから、ロボット自動車とも言える。このような人々の生活に密着したロボットは、単独で存在するのではなく、別の機能を持った複数のロボットが協調し、その場の状況により、互いに的確な判断で効率的に動作することが重要である。本研究では、ロボットの協調動作の基礎研究として、画像認識に基づき複数台のロボットを協調動作させる研究を行う。研究対象は、「1. ルール（規則）が明確である」、「2. 個々の立場を理解・判断し、協調して動作する」ことが必要となる。このような協調動作の例として、スポーツ競技が良いと考え、特にロボットを用いたサッカー競技に着目した。RoboCup[1][2][3][4]の環境、競技、ロボットを研究のプラットフォームとして用い、複数のロボットが協調して一つの目標を達成する課題を中心に扱う。

具体的には、カメラから得た画像情報を分析してロボットが置かれている状況を把握し、各ロボットに適切な役割、行動を割り当てることにより、全体として効率良く課題を達成する方法を検討している。また、ロボットが状況に応じた動作を行うそのために必要なハードウェアの研究も同時に行う。

本稿では、今年度取り組んだ研究内容の中から、新しい協調動作戦略システムに関する研究、戦略システムを実現するためのロボットのハードウェアに関する研究の成果について報告する。なお、ロボットのハードウェアに関する研究の報告では、ロボット本体に装着されるキックデバイス（ボールのシュート機構）、ロボット本体の回路設計について報告し、ヒト型ロボットの開発では、サーボモータの制御基板の開発について報告する。

2 戦略システムに関する研究

中部大学のRoboCup参加チームが今まで使用していた戦略システムは、1人の開発者が受信プログラムから機体制御まで全てのプログラム開発を行っていた。そのため、プログラムの複数箇所にも不都合が生じた場合、1人の開発者が全てを修正することとなる。実際の試合中など時間が限られている場合に、このような事態が発生した場合、すべての修正は作業量的に困難であった。そこで、新たな戦略システムでは、ロボットの動作(Action)ごとに分離させ、複数の開発者がプログラムの修正を可能とし、全体的なプログラム開発の効率化を図る。具体的には、プログラム初心者は単純なロボットのActionプログラムを担当し、上級者には、複数台のロボットが協調して行うセットプレイのActionプログラムを担当するなど、開発する人のプログラミングスキルにより最適なロボットの動作を開発可能とする。これにより1人の開発者がすべてのプログラムを担当するのではなく、モジュール単位でプログラムを開発し、それを組み合わせることにより大きな規模な戦略システムを構築することが可能となる。以下に詳細を示す。

・システムの基本構成

中部大学 RoboCup 参加チームにおける戦略システムの構成を図 1 に示す。SSL-Vision はフィールドの上に配置した複数カメラの画像情報から各ロボットの位置を認識し、各チームの戦略システムに送信する画像処理プログラムである。RefereeBox は試合において主審の判断を各チームの戦略システムに送信する審判命令送信プログラムである。戦略システムは、この SSL-Vision と RefereeBox から情報を得て、戦略プランの決定と各ロボットへの制御命令を行う。

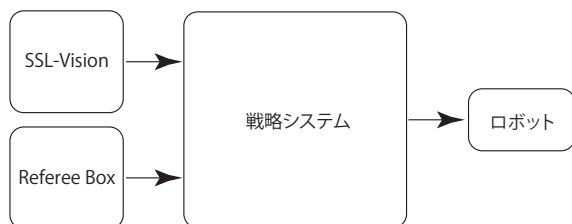


図 1: システムの基本構成

・戦略システム概要

戦略システムの機能は、図 2 のように、SSL-Vision の受信部、RefereeBox の受信部、ロボットに送信する動作コマンドを決定する戦略部 (AI 部分)、ロボットの動作コマンド送信部で構成される。各機能にはそれぞれスレッドを振り分けることで、プログラムの割り込みなどによる停止を回避している。

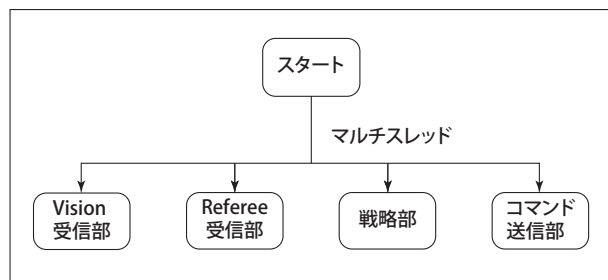


図 2: 戦略システムチャート

Vision 受信部は、SSL-Vision からのロボットの ID と位置情報およびボールの位置情報を受信して戦略部に転送する部分である。データは、Protocol Buffer によりデータをバイト列に変換し、UDP マルチキャストで送信されてくる (図 3)。Vision 受信部は、この送られてきたデータを構造化データに復元して情報を解析、判断をしている。SSL-Vision からの情報は、カメラ間の認識のずれやマーカーの誤認識による誤差が生じる。そのため戦略システムでは、受信した各カメラの情報を統

合し、誤認識となる可能性の高いデータの除去も行う。

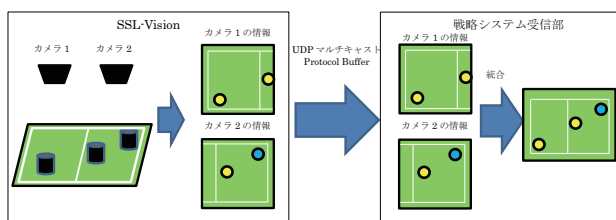


図 3: ロボット位置情報の復元

RefereeBox 受信部は、RefereeBox とよばれる PC から送られてくる信号を受信して戦略部に転送する部分である。RefereeBox とは、試合の開始、ストップ、スローイン、ゴールキックなど試合に関する命令を共通の PC で管理しており、この RefereeBox からの信号を判断してロボットを制御している。RefereeBox は SSL-Vision と同様に Protocol Buffer によりデータをバイト列に変換し、UDP マルチキャストで送信される。

戦略部は、本プログラムの中核となる部分である。SSL-Vision と RefereeBox からの情報を総合的に判断し、各ロボットの次の行動を決定する部分である。詳細は後に述べる。

コマンド送信部は、戦略部で決定されたロボットの動作を無線送信機を用いて送信する部分である。ロボットとの通信には Xbee 無線機を使用した単方向シリアル通信を使用している。ロボットを指定する ID 番号、各モーターの回転数、ホールド装置およびキック装置の使用などの情報を送信する。

・戦略部の開発

戦略部は図 4 のように、Planner と Action で構成される。Planner は、SSL-Vision データおよび RefereeBox からの情報と現在のフィールド状況から最適な Action を選択する。Action は、すべてのロボットがまとまって動作する集団 Action と個々のロボットが単独で行動する個別 Action に分かれる。個別 Action が選択された場合、ロボットの数だけ Action が実行されることとなる。選択した Action の動作は、モータの回転数などに変換され、コマンド送信部から各ロボットに送信される。

Action の詳細を図 5 に示す。Planner で選択された Action が実行される際に、戦略部から送られるデータは、基本的な情報 (ロボット情報、ボール情報、試合の流れ、ロボットの目的座標) となる。これらの情報は、すべての Action に共通となっており、使用しないパラ

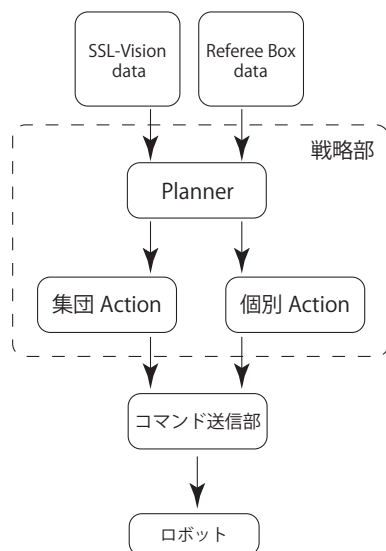


図 4: 戦略部 フロー

メータ値は Action 内で破棄される。また、Action から出力する値も、すべての Action が共通化されており、その内容はロボットを指定する ID 番号、各モーターの回転数、ホールド装置およびキック装置の使用となる。

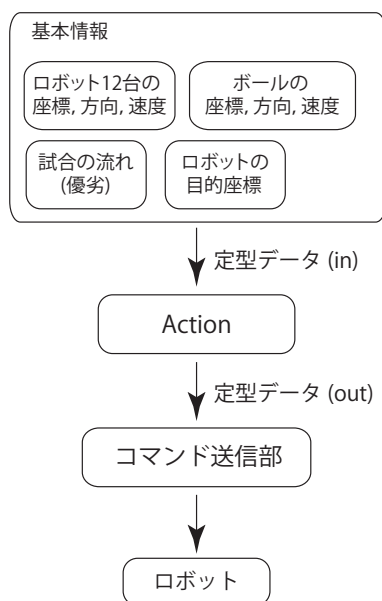


図 5: Action 部 フロー

具体的な Action の例を図 6 に示す。Action には、ロボットを一定距離前進させるだけの単純なプログラムから、相手ゴールに一番近い味方ロボットにパスを出すと言った高度なプログラムまで様々な動作が存在

する。Action では、この動作の複雑さによって開発の難易度が設定されている。新しい戦略システムでは、この Action 部分の開発を分担して行う。プログラミングスキルが高い人は、動作が複雑なプログラムを担当し、逆にプログラミングスキルの低い人は、単純なロボットの動きのプログラム開発を行う。これにより、従来のすべてのプログラム開発を 1 人で行うことによる負担を軽減することが可能となる。また、開発者のプログラミングスキルにより開発するプログラムの難易度を設定するため、開発速度のスピードアップとプログラムミスが軽減すると考える。さらに、プログラミングスキルの低い人は、徐々に複雑なプログラムを開発していくことにより、プログラミングスキルの上達が見込まれる。

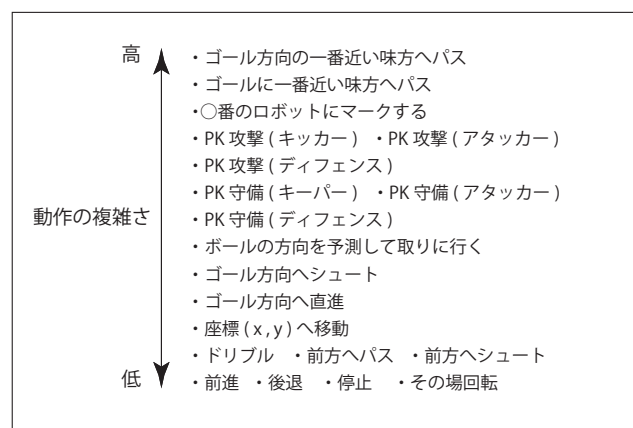


図 6: Action 例

・まとめ

本報告で開発した戦略システムは、サッカー競技という時々刻々と変化する様々な状況の中で、ロボットを効率よく動作させるプログラムとなる。戦略システムは、ロボットの位置などの Vision 情報や RefereeBox の状況から最適なロボット動作を選択する Planner と、具体的なロボットの動作となる Action から構成される。Action プログラムは 1 人で開発するのではなく、入出力パラメータを統一規格として複数の人間が開発することができる。また、Action プログラムは、ロボットの単純な動作から、複数台が連携して動作するような複雑なプログラムまで存在する。そのため、開発者のプログラムスキルにより、最適な難易度のプログラムを担当し、開発作業の効率化を図ることが可能となる。今後は、Action プログラムの数を増やすことにより、ロボット動作の偏りを減らし、幅広い戦略パターンでロボットを動作させることを目指す。

3 ハードウェアに関する研究

先に述べた戦略システムを実現するために、ロボット本体のハードウェアに関しても設計の見直し、改良を行った。主な改良点は、「シュート機構の改良」および「回路基板の再設計」である。また、ヒト型リーグの新しいロボットの開発として、小型サーボモータの制御基板の開発も行った。

3.1 シュート機構の改良

RoboCup サッカー小型リーグでは、ボールをキックするシュート機構が備わっている。ロボットのシュート機構は、直接ゴールへシュートする場合やロボット間へパスを行うために使用する**ノーマルキック機構**と、ボールをロボットよりも高い位置に蹴り出し、ロボットを越えてパスやシュートを行う**チップキック機構**の2種類を持つ。本報告では、チップキック機構の改良について報告する。

・チップキック機構の問題

ノーマルキックとチップキックの2つの機構を持つサッカーロボットを開発するには、限られたスペースに搭載する必要がある。そのため、サイズや形状に制約が多く、昨年製作した機構は、図7に示すようにプッシュタイプのソレノイドを2本使い、下に配置したソレノイドで蹴り上げ部品を押す形式であった。しかし、この形式では、ソレノイドの力をキック機構に十分に伝える事ができず、ボールを十分な高さまで蹴り上げることができなかった。そこで、本年度はチップキック機構を見直し、実用レベルの性能を有するチップキック機構を開発することを目標とする。具体的には、間接フリーキックを想定し、高さ150mmの敵ロボットが500mm離れた位置にあってもこれを飛び越すことができるチップキック機構の開発を目指す。

・新しいチップキック機構の概要

これまでのチップキック機構はノーマルキックの下側に配置するため、タイヤを駆動するモータが配置されているなどのスペース上の制約が大きかった。それに対し、ロボットの上部は制御用基板が搭載されている以外はスペース的に余裕があり、この部分を利用する方法が有効であると考えた。そこで、ノーマルキックの下に配置していたチップキック用のソレノイドを上部に移動する構成を考えた。図8に概念図を示す。この機構はソレノイドの配置をこれまでの逆向きにしてプルタイプとしており、キック機構の一部を図の矢印の方向に引

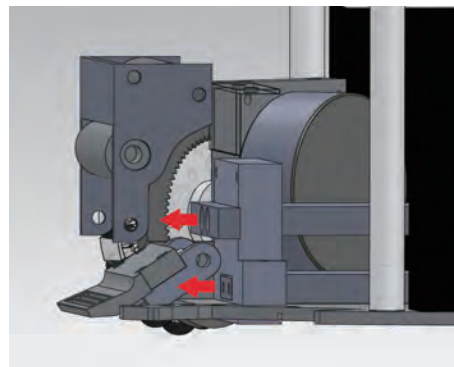


図7: 押し出し式チップキック機構

張ることで支点を中心にして反対側のキック部分を押し上げる機構となっている。

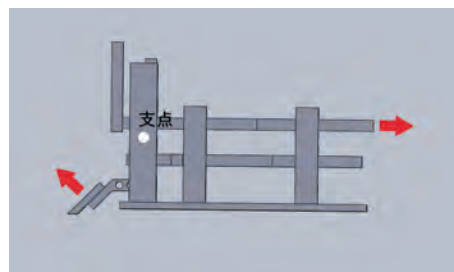


図8: 新しいチップキック機構

・試作機の製作

ロボットに実装する前に実際に十分な機能を発揮することができるかを検証するため、図9および図10に示す試作機を設計・製作した。

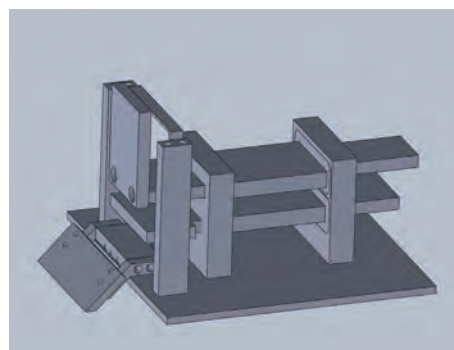


図9: 設計したチップキック機構試作機

製作した試作機を用いて実際に蹴り上げることができるか実証実験を行った。検証では高さ150mmのロボッ

トを 500mm 離れた位置に置き，そこからボールを蹴り上げて実験を行った．実験結果を 図 11 に示す．図より，500mm 離れたロボットに当たることなくロボットの上をボールが通過することが確認できた．これより，今回製作した試作機が十分な性能を有していることがわかった．

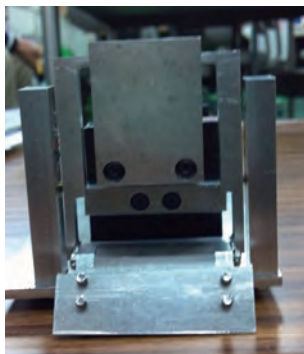


図 10: 製作したチップキック機構試作機

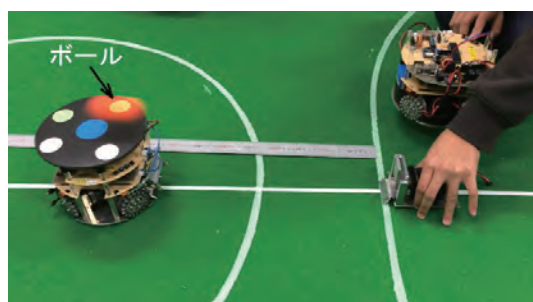


図 11: 試作機を使ったチップキックの様子

・チップキック機構の実装

前述の実験により，今回考案したチップキック機構が十分な性能を有していることが確認できたので，実際のロボットに搭載できるように設計を見直した．設計中のロボットの概観を図 12 に示す．このようにロボットのほとんどの部分は完成しているが，チップキック機構をロボットに実装する場合，他の機構との干渉が問題となる．具体的にはキック機構の前にはボールに逆回転を与えるホールディング機構があり，この機構が十分に機能しないとチップキックの性能を発揮することができない．しかし，現時点では，ホールド機構を吊り下げる状態となっており，十分なホールディング力を発揮することができないことが新たな問題となっている．これにつ

いては今後の課題としたい．

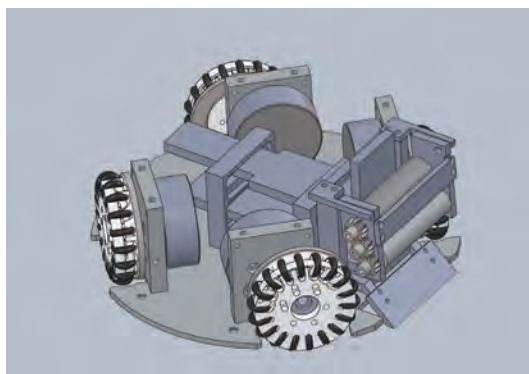


図 12: 設計中の新チップキック機構搭載型ロボット

3.2 回路基板の改良

従来のサッカーロボットの回路基板は，モータドライブ基板，制御基板，昇圧回路基板で構成されている．本節では，これらの回路基板の改良について報告する．

・コネクタ配置場所の変更 (モータドライブ基板)

モータドライブ基板は，車輪型ロボットのブラシレスモータを回転制御する基板である．モータドライブ基板を図 13 に示す．従来のモータドライブ基板上的コネクタは，モータからのフラットケーブルとの着脱が容易となるように基板の外側に配置されている．しかし，長いフラットケーブルがタイヤに干渉することにより断線し，ロボットの動作不良の原因となる．そのため改良基板では，フラットケーブルコネクタを内側に配置することにより，ケーブルがロボットの内側となり，タイヤとケーブルが干渉しないようにした．



図 13: モータドライブ基板

・モータ制御 IC の変更 (モータドライブ基板)

ブラシレスモータの制御 IC は、マイクロチップ・テクノロジー・ジャパン (株) の PIC マイコン (以下 PIC) を使用する。また、PIC の動作プログラムも同時に開発した。モータの制御命令は、モータ ID と回転数がメイン基板から各モータ用の PIC にシリアルデータで送られる。PIC は、すべてのモータ回転データの中から自分のモータ ID の制御信号を受け取り実行する。そのため、個別のモータ ID をそれぞれの PIC プログラムに書き込む必要がある。これにより、PIC を基板から取り外してしまうと、どの PIC に対してどのモータ ID 用のプログラムが入っているかがわからなくなり、ロボットが誤動作を起こす原因となっていた。このようなミスをなくすために、今回の改良では制御 IC に PIC を用いるのではなく、ブラシレスモータ専用ドライバ IC を導入した。専用のドライバ IC を用いることにより、ID の振り分けが不要になり、管理が容易となる。また、専用 IC にすることにより正弦波駆動になりモータの動きがなめらかになり、ノイズが軽減される。

・基板の一枚化

従来の回路基板は、各モータのドライブ基板と制御基板が分離されていた。その理由として、それぞれのドライブ基板が故障した場合、取り外しを可能とすることで、交換修理を容易にするとの理由からであった。しかし、実際に試合などでロボットを動かしていると、ドライブ基板が故障することがほとんどないことが判明した。また、前述の新型キック機構がこれまで基板が配置されていたスペースに干渉するため、基板の省スペース化が必須となる。そのため、ドライブ基板と制御基板を一枚にまとめ、基板の高さを抑えるよう改良した。

・基板材質の変更

これまではモデル「MDX-20」を使用して、紙フェノール製の基板を削り出して作成していた。しかし、実際に試合などで使用してみると、ロボット同士が衝突し、その衝撃で基板に割れが生じたり、パターンがはがれてしまったりと強度に問題が発生した。このような基板の破損を防ぐため、基板の強度を上げる必要がある。そのため、プリント基板の材質を従来の紙フェノールからガラスエポキシに変更した。

・基板との接続 (昇圧回路)

昇圧回路は、前節のキック機構の回路となる。キック機構は、ソレノイドと呼ばれるコイルに対して瞬間的に大量の電流を流すことで大きな磁場を発生させ、その力

で鉄芯を打ち出す仕組みである。そのための昇圧、放電を制御する回路となる。昇圧の方式としてはダイオードとコイルを用いたチョッパ方式で、パワー MOSFET を用いたスイッチングにより昇圧されている。コンパレータにより電圧監視を行い、既定の電圧まで電気を蓄積したコンデンサはサイリスタにより、ソレノイドに一度に放出される。昇圧回路を制御する信号は、メインとなる CPU から、昇圧スイッチングパルス、電圧監視信号、サイリスタ信号、サイリスタターンオフ信号が直接昇圧回路に送られる。そのため、メイン基板の CPU の処理量が膨大となり、その負荷も限界であった。それに加えて、コネクタに使われている二列ピンソケットは接触ノイズが多く発生することも判明した。コネクタに伝わる信号の中にはサイリスタをターンオフするための信号があり、この信号をこのようなコネクタにしておくこととサイリスタのターンオフがうまく動作せず、昇圧回路の誤動作の原因の一つでもあった。今回の改良では、新しい昇圧回路 (図 14) に PIC16F886 を採用することにより、メイン基板から送られてくる信号をノーマルキックとチップキックなどのシュート信号、シュートの威力を調整する信号の二つの信号と GND 線のみと簡略化し、従来の電圧制御などを昇圧回路内での処理とした。これにより、コネクタ数を減らすことができ、その結果コネクタの接触ノイズを大幅に減少させることに成功した。

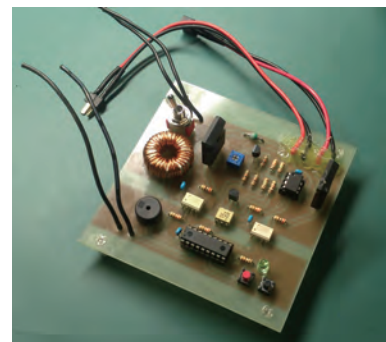


図 14: マイコンが搭載された昇圧回路

・今後の課題

今回改良した昇圧回路は、他チームに比べ昇圧時間が長いことや回路の不具合が多いことが問題となっており、今後改良していきたい。また、モータ基板とメイン基板をまとめ、最終的には昇圧回路とロボットを制御する基板を 1 枚に集約してトラブル発生時の交換が容易であるようにしていく。さらに、バッテリーの低下を知らせる回路などロボット自らを保護する機能もつけていく。

今後の目標として、メンテナンスが簡単で故障場所が特定しやすい回路の開発を行う。

3.3 サーボモータの制御基板の開発

本学の RoboCup チームは、過去の大会においてヒト型リーグで優勝している。しかしながら、現状のロボット動作は歩行、キックなどあらかじめ決められたモーションと呼ばれる動作を単に組み合わせて連続的に再生したものである。このような決められた動作ではなく、逆運動学によるモータ制御や、それに対応した制御基板およびソフトウェアの開発が必要である。本節では、昨年度に報告した逆運動学による制御 [6] も可能となるサーボモータ制御基板の開発について報告する。

・ハードウェア仕様

サッカー競技を行うヒト型ロボットの制御基板に必要な機能は、機体の加速度などのセンサ情報の取得、PC との通信機能、各デバイスを制御する機能、サーボモータの制御機能である。今回開発した基板は、これらの機能を内蔵する。制御基板の特徴と詳細を以下に示す。

1. 加速度などのセンサ情報の取得

センサの X 方向、Y 方向、Z 方向の 3 軸方向の加速度を検知し、その値をアナログ信号に変換する IC (MMA7361) を使用して基板の加速度を取得する。

2. PC との通信

1 対多数の通信を可能にし、小型で低コストな無線機 TWE-Lite-DIP を使用して、PC とのシリアル通信によってロボットを制御可能とする。

3. 各デバイスの制御

I/O 制御、シリアル通信、A/D 変換、の三つの機能を持ち合わせている、SH7125F マイコンを使用し基板内のデバイスの制御する。

4. サーボモータの制御

マイコンからの RS232C 信号を、サーボモータの制御信号である RS485 信号に変換するため、シリアルポートから LTC485CN8 を経由した後、サーボモータのバスに接続する。また、今後の応用性を考えて、この回路を二つ内蔵し、複数のサーボモータの制御を可能とする。

・ソフトウェア仕様

新しいロボットを開発するにあたり、逆運動学による制御の前段階として、従来のモーション動作でも各サーボモータを制御する必要がある。そのため、マイコン内の ROM にモーション番号と動作データを書き込んでお

き、それぞれの命令に対してモーションが再生されるようプログラムを開発した。これにより、昨年までのハードウェア仕様が異なるロボットと混在して動作させたとしても、PC 側の戦略プログラムは大きな変更なく使用が可能である。

また、加速度センサ (MMA7361) によって取得した加速度データは、各軸毎にマイコンの A/D 変換ポートに割り当て、センサ値を取得する。この取得した値を、PC 側に送信することでロボットの各軸の加速度を戦略プログラムが解析可能となる。

・完成基板

作成した基板を図 15 に示す。従来の CPU 基板よりもサイズがコンパクトとなった。また、CPU 内のプログラムも自由に開発が可能となり、様々なセンサ情報やモータ数の増減にも柔軟に対応が可能となる。

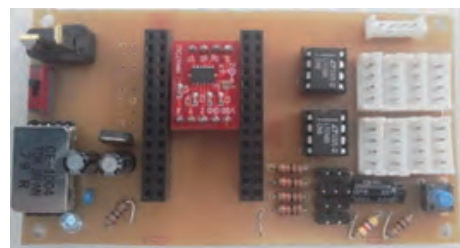


図 15: 新型サーボモータ制御基板

・今後の課題

今回開発した基板は、モーションデータをマイコン内の ROM に書き込んでおり、新たなモーションの追加作成や修正を行う際に、毎回マイコンの書き込みを行わなければならない。今後は、microSD など外部 ROM を搭載し、これらのモーションデータを外部 ROM に書き込み、メインプログラム実行時にデータを読み込む方式に変更したい。そうすることにより、開発の作業効率の向上が期待できる。また、次のステップとして、個々のモータを制御し、モーションではなく逆運動学によるリアルタイム制御が可能となるようなプログラムを開発したい。

4 おわりに

本稿では、今年度これまでに開発してきた RoboCup サッカー小型ロボットリーグ用ロボットの技術の中から、ソフトウェアに関しては、新しい協調動作戦略シス

テムの開発について、ハードウェアに関しては、シュート機構の改良、回路基板の改良、新しいサーボモータの制御基板の開発について述べた。戦略システムの開発では、従来の1つの大きな戦略プログラムではなく、個々のモジュールに分割することにより、問題点の抽出や改良、戦略プランの追加が容易となる。これにより、一人がすべてを開発するのではなく、作業を分担してプログラムの開発が可能となる。シュート機構の改良では、チップキックの改良を行った。ソレノイドの稼働方式を従来のプッシュ型からプル型に変更し、チップキック機構内に支点を設けて力の伝達を行う。これにより、ボールをシュートする際の力の伝達が飛躍的に向上した。回路基板の改良では、昨年開発した回路設計はそのままとして、モータドライブ基板の一枚化、およびコネクタ位置の変更などを行った。さらに、制御ICの変更や基板材質の変更なども行い、堅牢で安定したロボット回路とした。これらの改良により、先に述べた新しいキック機構における設置スペースの問題も解決することとなる。また、ヒト型リーグなどに用いられるサーボモータの制御基板の開発も行った。これにより、CPUを制御するプログラムも柔軟に変更することが可能となり、その結果、モータ数の増減やセンサなどが追加された場合でも対応が可能となる。さらに今後は、サーボモータを逆運動学による制御へ変更も行う。しかしながら、ロボットの制御やシュート機構の正確さなど問題点も多く存在する。今後はこれらの問題点を改善し、さらなる協調した戦略プレイやドリブルパスシュートなど実際のサッカーに見られるような連係プレイ動作も視野に入れて開発を行っていきたい。

謝辞

本研究は、工学部情報工学科の岡崎明彦教授の協力を得て行われた。また、RoboCup チーム「Owaribito-CU」に所属する工学部機械工学科、電気システム工学科、電子情報工学科、情報工学科、ロボット理工学科の学生メンバーの皆さんの協力を得て行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] <http://www.robocup.org/>
- [2] <http://www.robocup.or.jp/>

- [3] <http://kiyosu.cs.chubu.ac.jp/SSLJapan/>
- [4] 長坂保典, 「RoboCup 道しるべ 小型ロボットリーグ」, 情報処理, Vol.52, No.1, pp.95-110, 2011.
- [5] 長坂保典 他, ”画像認識に基づく複数ロボットの制御と協調動作の基礎研究(2)”, 情報科学リサーチジャーナル, Vol.18, 2011
- [6] 長坂保典 他, ”画像認識に基づく複数ロボットの適応的な協調動作の研究(2)”, 情報科学リサーチジャーナル, Vol.21, 2014



藤井隆司

全学総合教育科講師
本プロジェクトでは技術指導
の全般を担当，現在は2足歩
行ロボット部門の指導も行っ
ている



出口達也

電子情報工学科
戦略プログラムの開発を担当
している



長坂保典

ロボット理工学科教授
パターン認識・理解，画像処
理，自律ロボットの研究に従
事



伊藤有香

機械工学専攻
チップキック機構の開発を担
当している



藤吉弘亘

ロボット理工学科教授
計算機視覚，パターン認識・理
解の研究に従事



山田真人

機械工学科
チップキック機構の開発を担
当している



佐伯守彦

機械工学科准教授
機械の知能化，超精密加工の
研究に従事



上田徳之

電子情報工学科
制御用電子回路，マイコンの
プログラム開発を担当してい
る



柴田祥一

創造理工学実験教室・情報工
学科（兼任）教授
宇宙線の研究に従事



足立 圭

電子情報工学科
サーボモータ制御用回路，プ
ログラム開発を担当している