

## 不均一なモジュールの組み合わせによるロボットの構築 Robot construction by combination of non-uniform modules

足立 匠 (中部大学大学院工学研究科)  
長坂 保典 (中部大学工学部)  
藤井 隆司 (中部大学全学共通教育部)  
佐伯 守彦 (中部大学工学部)  
柴田 祥一 (中部大学工学部)  
岡崎 明彦 (中部大学工学部)

\* Takumi ADACHI(Chubu Univ.), Yasunori NAGASAKA(Chubu Univ.),  
Takashi FUJII(Chubu Univ.), Morihiko SAEKI(Chubu Univ.),  
Shoichi SHIBATA(Chubu Univ.), Akihiko OKAZAKI(Chubu Univ.)

[te11002-7372@sti.chubu.ac.jp](mailto:te11002-7372@sti.chubu.ac.jp), [any@isc.chubu.ac.jp](mailto:any@isc.chubu.ac.jp), [fujii@cs.chubu.ac.jp](mailto:fujii@cs.chubu.ac.jp), [saeki@isc.chubu.ac.jp](mailto:saeki@isc.chubu.ac.jp),  
[shibata@isc.chubu.ac.jp](mailto:shibata@isc.chubu.ac.jp), [okazaki@cs.chubu.ac.jp](mailto:okazaki@cs.chubu.ac.jp)

*Abstract*—We present robot construction concept by introducing combination of non-uniform functional robot modules. It has two merits, the higher availability and reliability come from modular system, and the higher adaptability and wide range of available work come from problem specific module design. We defined several type of modules. The control module has two functions. They are communication with outside of the robot, and sending commands to other modules and controlling them as a robot brain. The locomotion module gives a locomotive function to the robot. The arm module works like arms or legs of animals. It can mount other modules on the top of itself. The "other" module includes any other functional modules, like sensors, actuators, special devices. We built three different prototype robots as combination of modules. They have common body and different locomotion, four omni-wheel drive mechanism, two wheel drive mechanism, biped walking. In experiments we investigated whether those robots can be controlled by single series of commands. As a result, we confirmed that each robot moved correctly by single series of commands.

### 1. はじめに

一般にロボットを設計する際、その制御方法により、集中型制御と分散型制御に分類される。集中型制御は一つの高速なプロセッサでロボット全体の制御をしており、その特徴は各制御対象を直接制御するため、複雑な動作や特殊な機材を扱えることにある。しかし、全体を制御しているメインシステムに障害が発生した場合、全機能が停止する可能性がある。一方、分散型制御方法は、ロボットの制御を複数の構成要素のプロセッサに分散して一つの処理を行う方式であり、複数のシステムが分かれているため、一つのシステムが機能停止した場合でも全体に及ぼす影響は低い。しかし、一定の共通な規格が決められており、全てのシステムがその規則に準じていなければならないという欠点を持つ。また、複数のシステムを管理するためのシステムが必要となる。分散型制御を利用したロボットは多く存在する。

一般に、モジュール型ロボットと呼ばれるロボットも分散型制御を採用したロボットであり、代表的なロボットとして産業技術総合研究所の M-TRAN[1, 2] や Lund 氏が開発した ATRON[3] が挙げられる。これらのロボットは均一なモジュールで構成されており、個々のモジュールにアクチュエータが搭載されている。そして、このモジュールを共通化された接続部で連結し様々な形状・動作を可能にしている。

また、制御部も個々のモジュールに搭載されているため、一部のモジュールにトラブルが発生しても、システム全体への影響は少ない。その場合、正常なモジュールと交換することにより修復することが可能である。しかし、均一なモジュールだけで構成されたモジュール型ロボットは、モジュールの機能が限定されるため、可能な作業は集中型制御と比較すると少なく、動作のパターンも限られてしまう。それを補うように、モジュールに様々な機能を搭載した場合、モジュール自身の巨大化やシステムが複雑化してしまう。

本報告では分散型制御でありながら均一なモジュールではなく、不均一なモジュールで構成されたモジュールロボットシステムを提案する。均一なモジュールでは、先に述べた問題により、特殊な機能をモジュールに搭載することはできないが、不均一にすることによりそれぞれ独自の機能を搭載することが可能となる。機能ごとにモジュールを製作することにより、状況に応じて、必要なモジュールだけでロボットを構成することが可能となり、現場の環境や課題に対し、優れた適応が図れると考える。また、モジュール型を採用することにより、トラブル発生によるシステム全体への影響を最小限に抑えると共に、独自の機能を搭載したモジュールの組み合わせによる現場や環境への高い適応度を実現することを目的とする。実証実験として本報告では基本的なモジュールに移動モジュールとロボットアームを使用して RoboCup サッカーのサッカーロボットに適用する。

実験では同じ命令系を使用して異なる構成のロボットを動作させることにより、不均一なモジュールの組み合わせによるロボットの構築が可能かを検証する。

## 2. モジュール

分散型制御により、それぞれの機能単位毎にマイコンやアクチュエータが組み込まれている。これらを構成する1つの集合をモジュールとする。

モジュールは大きく分けて、コアモジュールとエンドモジュールに分けられる。コアモジュールは、システム全体を管理するモジュールであり、エンドモジュールは実際に作業をするモジュールを指す。

全体の構成は Figure 1 に示すように、一つのコアモジュールに、複数のエンドモジュールを接続する。

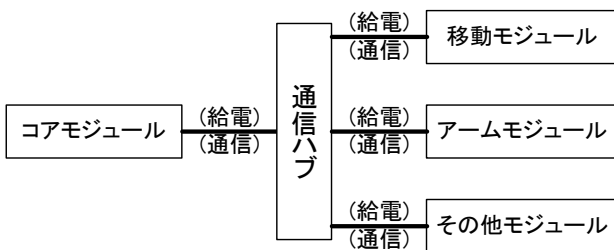


Figure 1: Structure of whole robot

一つのコアモジュールへの最大接続数は、給電される電源の容量とコアモジュールに搭載されたマイコンの処理能力により決定される。今回使用するコアモジュールは電源の容量が小さく、システムを単純化することから、接続数の上限を 10 モジュールとする。

### 2-1. コアモジュール

コアモジュールは、他のモジュールを管理するためのモジュールであり、ホストから受信する命令を判断して、各モジュールへ送信する役割をもつ。コアモジュールの構成を Figure 2 に示す。

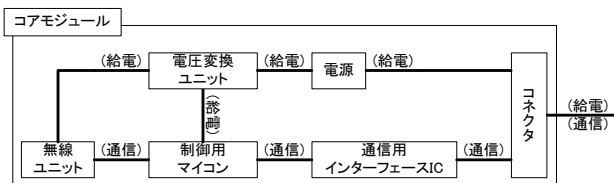


Figure 2: Structure of core module

コアモジュールは、ホストと通信するための無線ユニットが搭載されており、制御用マイコンへと接続されている。また、エンドモジュールと通信するための通信用インターフェース IC が搭載されており、通信ハブを経由してエンドモジュールへ通信や給電を行う。

### 2-2. エンドモジュール

エンドモジュールは Figure 3 に示すように、ベースユニットと制御対象（モータ、センサなど）から構成される。

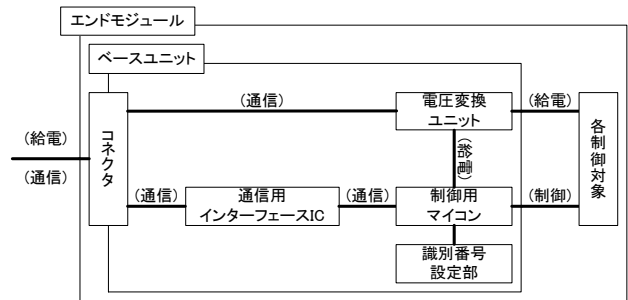


Figure 3: Common controller of modules

ベースユニットは、コアモジュールと通信するための通信用インターフェース IC、エンドモジュールを制御する制御用マイコン、個々を判別するための識別番号設定部、給電される電源の電圧を変換し、マイコンなどに供給する電圧変換ユニットで構成される。本報告ではエンドモジュールの例として移動モジュール（歩行型、4 輪型、2 輪型の 3 種類）、アームモジュール、その他モジュールを製作した。

#### ・移動モジュール

移動モジュールはコアモジュールから命令を受信し、ロボット全体を指定された目的地まで移動するためのモジュールである。歩行型移動モジュールの構成を Figure 4 に示す。

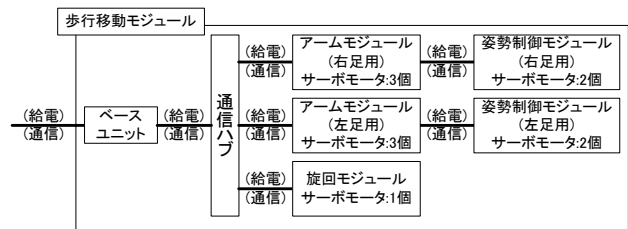


Figure 4: Structure of locomotion module

歩行型移動モジュールは 2 つのアームモジュールとその先端に姿勢制御モジュール、移動モジュールの上部に設置されているモジュールを旋回させるための旋回モジュールで構成される。本実験では、移動モジュール全体の構成を簡易化するため、これらモジュール群を 1 つの移動モジュールとした。これにより歩行型移動モジュールは、ベースユニット部分 1 つと 11 個のサーボモータとなる。

#### ・アームモジュール

アームモジュールは、主にその先端に取付けた別のモジュールを指定された目的地まで移動させるモジュールである。Figure 5 にアームモジュールの構成を示す。

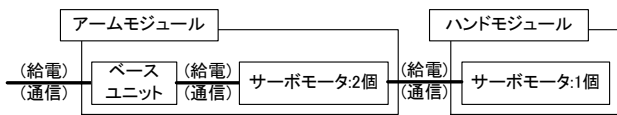


Figure 5: Structure of arm module

アームモジュールはベースユニットとアームの駆動を行うサーボモータ 2 個で構成されている。アームの先端には、その他のモジュールが接続可能となっており、給電や通信方式はすべて同じ規格となっている。本実験では簡単な構造のハンドモジュールが接続されており、ベースユニットは簡略化されているが、複雑な機構のモジュールを接続する場合は、ベースユニットとそれぞれのデバイスを接続する必要がある。

### ・その他のモジュール

その他のモジュールは、前で述べたモジュール以外のモジュールを指しており、コアモジュールを通して外部からの固有の命令によって動作するモジュールである。本報告では、その他モジュールとして、ソレノイドのプッシュ機構を利用したキックデバイスモジュールを用いる。このモジュールは RoboCup サッカー小型ロボットリーグの 4 輪型ロボットでも使用されているキックデバイスである。Figure 6 にキックデバイスモジュールの構成を示す。

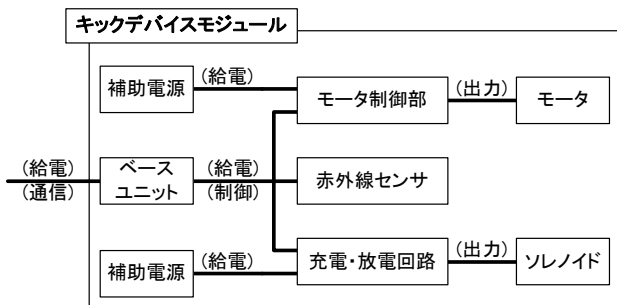


Figure 6: Structure of kick device module

キックデバイスモジュールが制御するデバイスは、ボールを保持するホールディングデバイスのモータ、ボールが保持されたかを検出するための赤外線センサ、ボールをキックするためのソレノイドを駆動する充電・放電回路の 3 つで構成される。このデバイスはコアモジュールから供給される電源のみでは必要な電力を賄うことができないため、別途専用の補助電源を搭載している。それぞれの電源供給はマイコンが管理しており、コアモジュールを通して外部操作が可能となっている。

## 3. モジュールの動作

コアモジュールはシステムの管理および、受信した命令を判断しエンドモジュールに伝送する。エンドモジュールはモジュールの種類ごとに決められた抽象的な共通命令を実行する。本報告では、ロボットの移動命令とアームへの命令を用いる。ロボット

の移動命令では、進行方向と速度を示すベクトルと回転の情報が与えられ、アームへの命令には、モジュールの取り付け位置からの先端座標の相対座標が送信される。

### 3-1. コアモジュールの動作

コアモジュールは接続されたエンドモジュールの種類、機能の把握を行う。エンドモジュールの把握は、接続時に行われる通信によってコアモジュール内にエンドモジュールの情報が記録されることにより行われる。その通信内容はモジュールの提供可能な操作を指示するものであり、今回の例では「全体移動」「ロボットアームによるモジュールの移動」「特殊な命令による動作」の 3 つに分けられる。

Figure 7 のように、ホストとなる PC からロボットに命令を送信すると、通信ユニットを搭載しているコアモジュールがロボット全体への命令か、特定のモジュールへの命令か判断する。全体への命令の場合、命令内容が実行可能であるモジュールに対して命令を送信する。特定のモジュールを対象とした命令は、指定されたモジュールへ命令を送信する。エンドモジュールは受信した命令が動作可能か判断し、もし実行不可能な場合はエラーとしてコアモジュールへ送信する。エラーを受信したコアモジュールは代用可能なモジュールを判断し、存在しない場合はその旨をホストへ送信する。

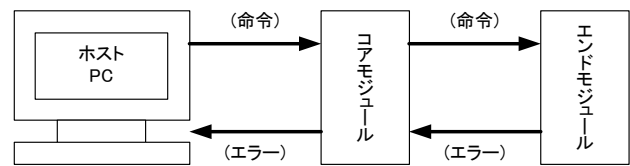


Figure 7: Communication process

### 3-2. 移動モジュールの動作

移動モジュールは各モジュールに進行可能な角度が記録されている。受信したベクトルの角度が動作可能か判断し、不可能な場合は微少旋回動作を行う。Figure 8 に歩行型、4 輪型、2 輪型の進行可能角度を表した単位円を示す。

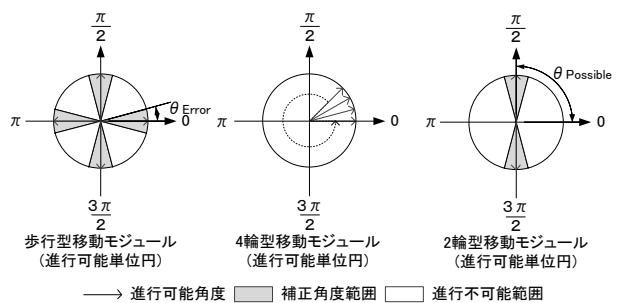


Figure 8: Unit circles indicate the angles which each locomotion module can move

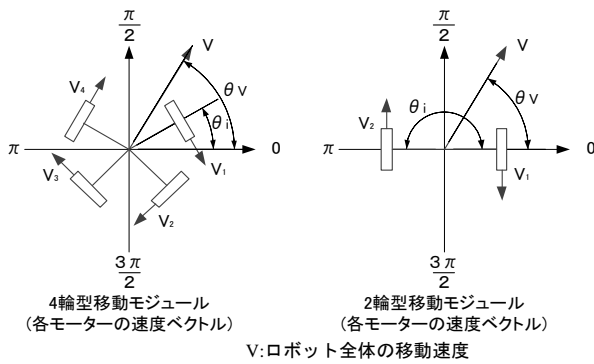
### ・歩行型移動モジュール

歩行型移動モジュールの動作は、前後左右の移動に対応するモーションがモジュールに登録されており、対応する移動可能範囲内に命令されたベクトルが入ることにより、該当するモーションが再生される。移動速度はモーションに依存するため、歩行型移動モジュールでの移動は一定の速さとなる。

### ・車輪型移動モジュールの計算モデル

車輪型移動モジュールの動作は、モジュールにより進行可能角度が限定されており、その角度を中心に補正角度範囲が設定されている。この補正角度範囲内にコアモジュールから送信されてきた進行方向が入っている場合、進行方向とロボットの角度がそろったと判断し、移動を実行する。また、進行方向が補正角度範囲内に入っていない場合は、補正角度範囲内に入るまで旋回動作を行う。4輪型移動モジュールは全方向移動が可能のため、全ての角度が進行可能となる。

移動に対する各モータの制御パラメータへの変換は、それぞれを Figure 9 のようなモデルとし、以下の計算モデルにより変換される [5]。



V: ロボット全体の移動速度  
 $\theta_v$ : ロボット全体の回転速度  
 $V_i$ : 各モータの回転速度 ( $i=1,2,3,4$ )  
 $\theta_i$ :  $V_x$  軸と回転軸のなす角 ( $i=1,2,3,4$ )  
 $L$ : 中心からオムニホイールまでの長さ

Figure 9: Motor rotation speed and moving direction of locomotion module

4 輪型移動モジュールの各モータの回転速度は次の式で求められる。

$$V_i = V_x \cos\left(\theta_i - \frac{\pi}{2}\right) + V_y \sin\left(\theta_i - \frac{\pi}{2}\right) + \theta_v L$$

$$= V_x \sin\theta_i + V_y \cos\theta_i + \theta_v L \quad (1)$$

(1) 式の  $i$  に ( $i=1, 2, 3, 4$ ) を代入する。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & L \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & L \\ \sin\theta_3 & -\cos\theta_3 & L \\ \sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

同様に、2 輪型移動モジュールの 2 個のモータの回転を求める。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & L \\ \cos\theta_2 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \theta_v \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 3-3. アームモジュールの動作

アームモジュールの動作は逆運動学を用いて数式による解析的方法で各関節の角度を決定する。しかし、関節の構造によっては、各関節の角度の解が複数個ある場合や存在しない場合があり、手先の姿勢パラメータ (ロール、ピッチ、ヨー) を自由に決めるには 6 自由度以上なければならない [6]。よって、これらの問題を解決するため、以下の条件を使用し各関節の角度を決定する。

- それぞれの関節の回転角度が相対的に最も少ないパターンを選択する
- 手先の位置を手先の姿勢より優先とし、それぞれ位置、姿勢において X、Y、Z の順に優先度とする。

アームモジュールの共通命令は、付け根部分を原点として先端の相対座標と相対回転角とする。この共通命令を受信したモジュールは、実際にその座標・回転角が実現可能か判断し、実現が不可能な場合はエラーとして本体へその旨を伝え、実現が可能な場合は、それぞれのアクチュエータの回転可能範囲内かを確認する。回転範囲外の場合はエラーとしてコアモジュールへ送信され、回転可能な場合命令が実行される。

### ・簡易マニピュレータ計算モデル

今回使用したアームのモデルを Figure 10 に示す。

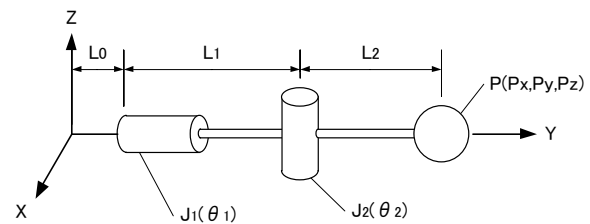


Figure 10: Joint model of arm module

このアームモジュールは、目標座標 P の X 軸座標、Y 軸座標、Z 軸座標の中から 2 つの座標が決まると残り座標の 3 つ目が決まる。このことから、各入力要素の優先順位より、X 軸座標、Y 軸座標を優先し、式(4)により Z 軸座標を演算により求める [6]。

$$P_z = \sqrt{L_2^2 + P_x^2 + (P_y - (L_0 + L_1))^2} \quad (4)$$

このロボットアームはピッチに関係する関節は  $\theta_1$  だけなので、 $\theta_1$  はアームの先端位置  $P_x, P_z$  を使用し式(5)で求められる。

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_z}{P_x}\right) \quad (5)$$

$\theta_2$  は次式により求める。

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{P_y - (L_0 + L_1)}{\sqrt{P_x^2 + P_z^2}}\right) \quad (6)$$

### 3-4. その他モジュールの動作

その他モジュールは、共通命令の定義はなく、独自の命令プロトコルで動作する。命令を受信したその他モジュールは、実行可能か判断し、実行不可能な場合はエラーを返信する。本実験では RoboCup 小型サッカーリーグで用いられている、キックデバイスモジュールを使用した。キックデバイスモジュールは、モータ、赤外線センサ、ソレノイドの複合モジュールで構成される。命令はモータの ON/OFF 命令によるホールドディングデバイスの制御とソレノイドを用いたキックデバイスの制御の 2 種類あり、キックデバイスについてはセンサの情報を元に実行の判断をする。

## 4. 動作実験

実験では、1. 構造を変更した際に同じ命令系で動作させた場合の各モジュールの動作を確認、2. 各モジュールのエラーに対応する動作の確認を行う。

### 4-1. 実験 1 (構造を変更した際の同じ命令での動作検証)

コアモジュール、アームモジュール、移動モジュールを組み合わせ、3 種類のサッカーロボットを構成し、同じ命令を送信することにより、異なるモジュール構成であっても動作をするのかを検証する。操作は、パソコンから全体移動やキックなどの命令を無線で送信するものとする。

#### ・歩行型タイプの構成

Figure 11 に歩行タイプロボットの外観を示す。

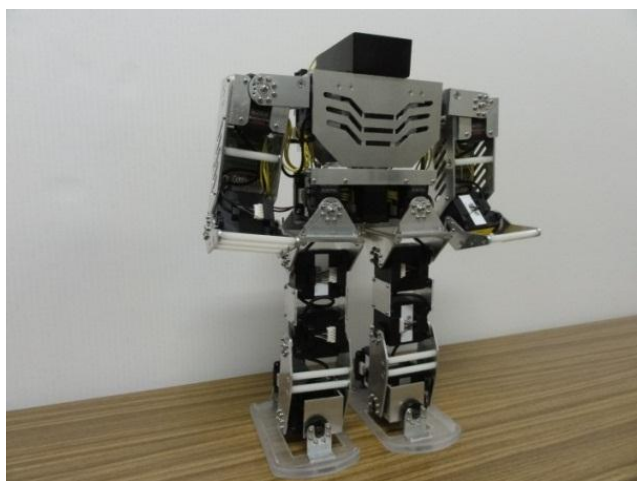


Figure 11: Structure of biped walk type locomotion module

上半身はコアモジュールとアームモジュールで構成されており、下半身は歩行型移動モジュールで構成されている。ボールをキックする動作については車輪型の構成とは異なりキックデバイスモジュールを搭載していないが、脚部(アームモジュール)の移

動によりキックを行う。

#### ・4 輪型タイプの構成

Figure 12 に 4 輪型タイプロボットの外観を示す。

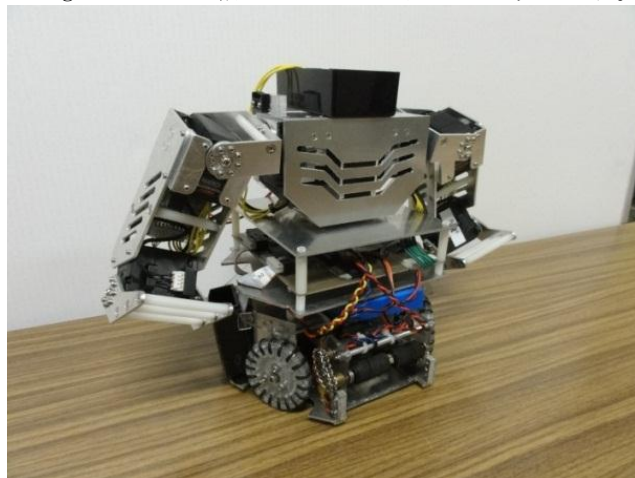


Figure 12: Structure of 4-wheel type locomotion module

上半身はコアモジュールとアームモジュールで構成されており、下半身は全方向移動型の 4 輪型移動モジュールとキックデバイスモジュールで構成されている。ボールのキック機構はキックデバイスモジュールに搭載されているソレノイドによってキックする。

#### ・2 輪型タイプの構成

Figure 13 に 2 輪型タイプロボットの外観を示す。上半身は 4 輪型ロボットと同じ構成となっており、下半身は 2 輪型移動モジュールとキックデバイスモジュールとなっている。

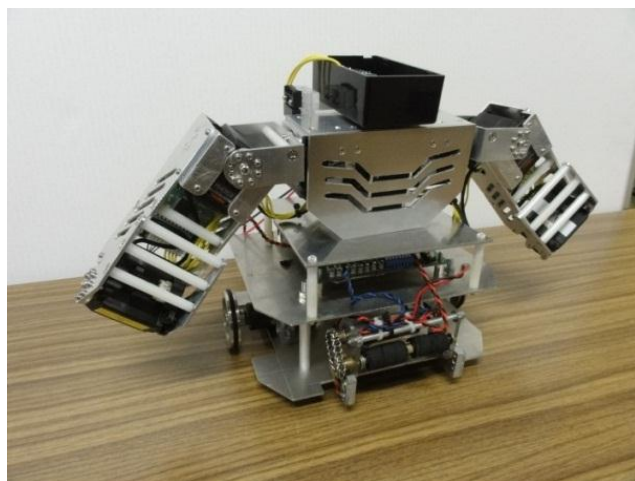


Figure 13: Structure of 2-wheel type locomotion module

#### ・結果

はじめに、それぞれの構成において進行可能な 90° 方向 (前方) への直進命令を送信した。この命令に対し歩行は前進モーションを再生し、4 輪型の構成と



2 輪型の構成は各モータを制御し前進した。よって、命令したベクトルを進行可能範囲内であると判断し、指定された方向への移動動作を実行することを確認した。

次に、ロボットへ送信する命令のベクトルを  $90^\circ$  から  $0^\circ$  へ微小角度ずつ変化させた。歩行型の構成と 2 輪型の構成は、命令のベクトルを  $90^\circ$  から数度傾けた場合でも前進動作を実行したが、一定角度を境に旋回動作を実行した。よって、補正角度範囲内は指定された方向への移動動作を実行し、進行不可能範囲内では旋回動作を実行することを確認した。

一方、4 輪型の構成の場合は、 $90^\circ$  から  $0^\circ$  への変化に対し、指定されたベクトル方向へ進行した。よって、進行不可能範囲を持たない 4 輪型の構成は旋回動作を実行せず、命令のベクトルを進行可能範囲だと判断し、指定された方向への進行動作を実行した。

以上より、異なる構成であっても同じ命令で操作することが可能であることを確認した。

#### 4-2. 実験 2(各モジュールエラーに対する動作検証)

本来は接続されているモジュールに対してエラーの状態を発生させ、どのような動作となるかを検証した。その方法は、ロボットの構成を上半身はコアモジュールとアームモジュール、下半身を歩行型移動モジュールにし、仰向けもしくはうつ伏せにして配置する。その状態で、直立をするように起き上がりモーションを命令する。その時、コアモジュールの左右に接続されているどちらかのアームの配線を切り離した際、コアモジュールが、その内容を判断し、適切に動作するか検証をする。

##### ・結果

左右ともにアームの配線が接続されている場合は、左右の腕を前後に伸ばし、立ち上がることができた。左右のアームのいずれか一方の配線を切り離した場合、断線しているアームからエラーが検出され、接続されている方のアームで代行し立ち上がった。左右ともにアームの配線を切り離したとき、左右のアームからエラーが検出され、コアモジュールから動作不可能というエラーがホスト PC に送信された。

以上より、モジュールでトラブルが発生した場合でも、その内容を判断し対応することが可能であることを確認した。

#### 5. まとめ

本報告では、分散型制御を用いたロボットの一種である、モジュール型ロボットを基礎とし、モジュールの不均一化によるロボットの拡張性の向上を提案した。コアモジュールとエンドモジュールを組み合わせることでロボットを構成し、異なる構成でも共通の命令で動作することを確認した。また、意図的にモジュールにエラーを発生させ、モジュールが

使用不可能な状況に陥った場合でも、動作可能なモジュールを判断しエラーに対応することを確認した。

以上より、集中型制御の複雑な制御の可能性と分散型制御のシステムの安全性・保守性を兼ね合わせることが可能なことを確認することができた。

このシステムは、広範な環境や課題が存在する災害現場など緊急時に即座に対応できることも期待できる。

今後の課題は、アームの状態とロボット全体の姿勢の演算、モジュール同士の衝突回避が必要である。また、外界センサを取り付け、環境から受ける外乱に対しコアモジュールに判断をゆだねるのではなく各モジュールで判断、動作をする人間の“反射”に類似した研究をテーマにしていきたい。

#### 謝辞

本研究は、中部大学情報科学研究所および中部大学特別研究費(CP)の支援を得て行われた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 神村, 村田, 吉田, 黒河, 富田, 小鍛: 自己組立可能なモジュール型ロボットシステムに関する研究, 日本機械学会論文集(C編) Vol. 68 No. 667, pp. 886~892, 2002.
- 2) 黒河, 吉田, 神村, 富田, 村田, 小鍛: 変形し移動する自立モジュール型ロボット, 日本ロボット学会誌 Vol. 21 No. 8, pp. 855~859, 2003.
- 3) M. W. Jorgensen, E. H. Ostergaard and H. H. Lund: "Modular ATRON: Modules for a self-reconfigurable robot," Proc. of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent
- 4) 川内, 稲葉, 福田: セル構造化ロボットシステムに関する研究(適応性、自己組織性、自己進化性のあるロボットを目指して)、日本ロボット学会誌 Vol. 12 No. 1, pp. 1116~132, 1994
- 5) 渡部, 王碩, 石田, 井上, 河田, 水野, 木村: 全方向移動型歩行訓練機の経路追従の制御、日本機械学会 Vol. 2008 No. 46, pp. 423~424, 2008
- 6) 出村 公成, 簡単! 実践! ロボットシミュレーション、森北出版株式会社