

## 四足歩行ロボットの研究開発

吉木大司\*1・森 信彰\*1・田村智弘\*1・松田晋幸\*2・永田正道\*3・楢本英嗣\*3・山田誠治\*4

### Development of Four Legged Walking Robot

Daiji Yoshiki, Nobuaki Mori, Tomohiro Tamura, Nobuyuki Matsuda,  
Masamichi Nagata, Eiji Sugimoto and Seiji Yamada

#### 1. 緒言

近年、アシモ（ホンダ）やスマートパル（安川電機）などの大手メーカーが開発するロボットに始まり、ROBO-ONEと呼ばれる二足歩行ロボットの格闘競技大会に参加する個人レベルのロボットまで、大小様々なロボットが登場している<sup>1)</sup>。また、「次世代ロボット開発ネットワーク RooB0」に代表されるような、企業グループが協力してロボットの研究開発を行う取り組みも全国各地で見られる。

現在、このようにロボットが注目されるのは、世界的な景気後退の影響を受けている中、新たな市場の一つとなることが期待されているからである。加えて、ロボットは組込み・制御技術、機構・構造、メカトロニクス、意匠デザインなどの「ものづくり」における主要な要素技術の固まりであることから、開発企業の技術力を明確に表す指標でもある。これらのことから、ロボットへの積極的な取り組みを行い、自社の強みを高めようとする企業が多いと考えられる。

そこで、産業技術センターにおいても「ものづくり基盤技術」の向上を図ると共に、要素技術を含めたロボット技術全般に関する知見を得ることを目的とし、併せて、産業技術センターの技術力（「設計から試作まで」）を外部発信するために、四足歩行ロボットの研究開発に取り組んだ。

#### 2. 四足歩行ロボット（モデルⅠ）の開発

##### 2.1 四足歩行ロボット（モデルⅠ）の概要

本研究は、平成20年度から22年度の3年間取り組んでおり、四足歩行ロボットを2台開発している。

初年度(20年度)に開発した四足歩行ロボット(以下、モデルⅠ)は、研究ベースとして早い段階で形にするため、市販のロボット用構造部品とデジタルサーボモーターを活用する14自由度(3自由度×4脚, 2自由度×頭部)の四足歩行ロボットとした(図1)。モデルⅠの開発においては、企画・設計から試作までを効率よく進めるために、構造設計及び外装デザインを三次元CAD(以下、3D-CAD)で行い、試作にはラピッドプロトタイプング装置(以下、RP装

置)を用いる開発手法を試みた。また、数値解析による四足歩行動物に倣った歩行パターン<sup>2)</sup>の検討も行った。

##### 2.2 3D-CAD/RP装置を活用したロボット開発

現在、製品の開発サイクルが短期間化すると共に、製品のデザイン(外装や質感、触感など)が重要視されてきており、迅速(Rapid)に試作(Prototyping)することが求められている。このため、3D-CADや樹脂積層式造型機などのRP装置を活用した製品開発が注目されている。

そこで本研究においても、3D-CAD/RP装置を活用した効率的な開発・設計及び試作モデルの製作を行った。以下に、図2と共に3D-CAD/RP装置を活用したロボット試作工程について説明する。

##### (1)各部品の設計及び3Dデータ化

機能的な性能を実現するための設計に必要な、各部品の設計及び3Dデータ化を行った。

##### (2)機能実現(四足歩行)を考慮した内部構造の設計



図1 四足歩行ロボット(Ⅰ)

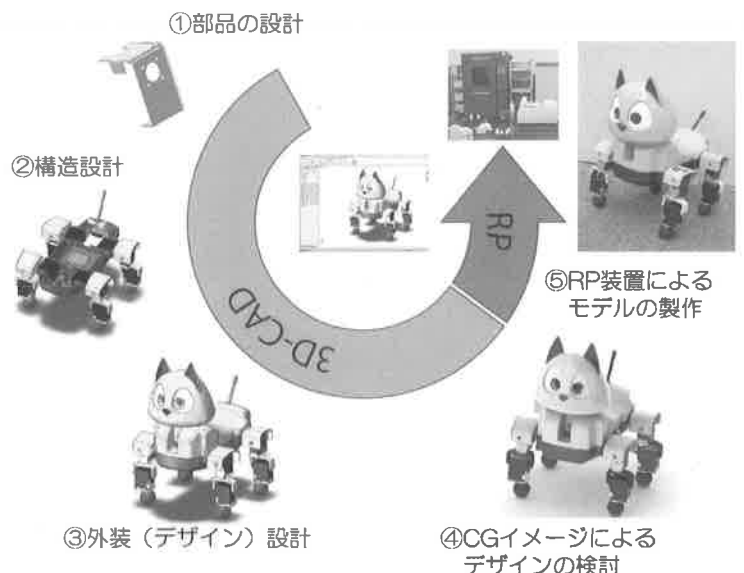


図2 3D-CAD/RP装置を活用したロボット開発工程

\*1 企業支援部 設計制御グループ  
\*2 企業支援部 デザイングループ  
\*3 企業支援部 加工技術グループ  
\*4 商工労働部 新産業振興課

四足歩行を実現するため、各部品の配置による重量バランスや、歩行するために必要な関節の回転角度の確保など、機能の実現を目的とした検討・設計を行った。これらの検討作業は3D-CADを利用することで、効率的な設計・開発を行うことができた。

### (3) 外装デザイン（意匠）の検討

モデルⅠは「四足歩行」機能を有していることから、試作ロボットの外装デザインとして「ねこ」のイメージを持たせることとした。

### (4) CGによる完成イメージの検討

試作モデルの完成イメージを確認するため、CGによるレンダリング画像を利用した。高品質のCG画像を利用することで、試作レスにおいても最終完成イメージの評価が容易になり、開発の効率化及び試作モデルの完成度を高めることが可能となった。

### (5) RP装置を利用した試作モデルの製作

CG画像にて確認した3Dデータに基づいて樹脂積層式のRP装置FDMTITAN (Stratasys) によって試作モデルの製作を行った。樹脂積層による試作モデルは、樹脂の積層跡が表面に残るため、外装デザインの完成度を高めるために塗装工程の前に図3に示すような、表面処理を実施している。これにより、CGによる完成イメージに近い試作モデルの製作が可能となった。

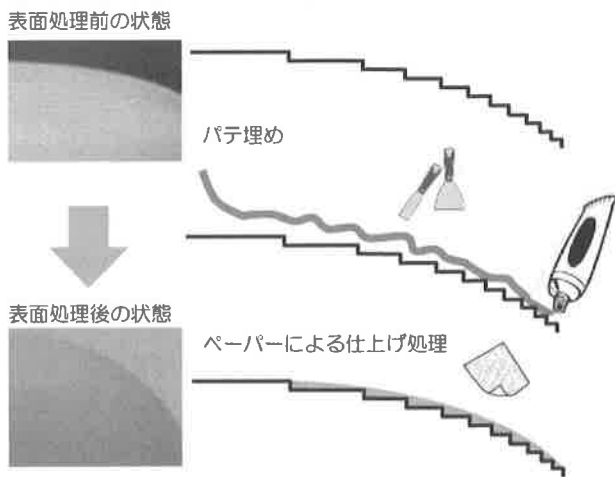


図3 外装部分の表面処理工程

## 2. 3 数値解析による歩行パターンの検討

四足歩行動物に限らず、歩行の形態には「重心の路面投影点が接地面あるいは接地面を結んだ多角形内部にある静的に安定した静歩行」と「歩行のある瞬間では安定していないが、歩行を続けることで動的に安定する動歩行」がある。さらに四足歩行動物では、脚の移動順序の違いによりいくつかの歩容（タイミングに着目した脚移動の繰り返しパターン）に分けられる<sup>2,3)</sup>。以下に代表的なものを上げる。

- ・クロール (crawl) : 4脚のうち3脚を支持脚とし、静的に安定した状態で1脚ずつ前に繰り出す静歩行。
- ・トロット (trot) : 対角にある2脚をペアとして、ペア同士を交互に前に繰り出す動歩行。

・バウンド (bound) : 前脚同士、後脚同士をペアとして、ペア同士を交互に前に繰り出す動歩行。

四足歩行動物の歩容が複数あるのは、体格や移動速度に応じて最適な歩容が違うからである。ロボット開発において、最適な歩容形態を選び出すためには、様々な条件を自在に設定できる数値解析（シミュレーション）による検討が有効である。そこで本研究においても、数値解析ソフトウェアMATLAB（日本マソワークス）を用いた歩行パターンの検討を行った。

モデルⅠで使用したサーボモーターコントローラーRCB-1（近藤科学）は、各サーボモーターを時系列で予め定めた回転角に制御する仕様であるため、時間に対する関節のサーボモーター角度を入力する必要がある。そこで、定めた歩容を実現する足先座標を設定し、その足先座標から逆運動学の計算を行い、関節角度を導く。今回は歩行パターンの1サイクルをクロールでは16ステップ、トロットでは8ステップに分け、それぞれのステップにおける関節角度を計算した。設定した歩行パターンに問題がないかグラフィカルに確認するため、歩行時の脚状態を表示するプログラムを作成し、MATLAB上で歩行シミュレーションを行った（図4）。なお、後述するが、四足歩行ロボット（モデルⅡ）ではMATLAB上で、力学計算も行っている。

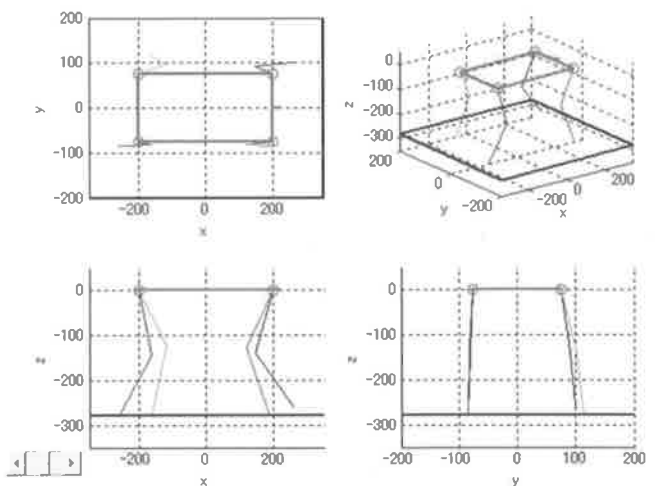


図4 歩行パターン（トロット）

## 3. 四足歩行ロボット（モデルⅡ）の開発

### 3. 1 四足歩行ロボット（モデルⅡ）の概要

モデルⅠの開発を受けて、平成21年度からは、2台目となる四足歩行ロボット（以下、モデルⅡ）の研究開発を行った。モデルⅡでは、自律走行を目指し、周囲環境の認識を行うカメラ、GPSなどを組み込み、制御PCを搭載することとした。このため、モデルⅠよりもより詳細に構造計算、フレームデザイン、センサー技術、制御技術などの要素技術を中心に研究開発を行った。

### 3. 2 構造設計及び構造計算

一般的な構造解析では、構造物の強度計算などを行うが、本研究においては各関節の関節トルクを算出し、サーボモーターの選定を行うために構造解析を行った。

(1) 構造設計

モデルⅡにおいてもロボットのイメージを「ねこ」としたが、より動物に近い体型にするために、骨格資料<sup>4)</sup>がある同じネコ科のライオンの骨格を基に、関節構造や関節長さを定めた。基本的な構造を図5に示す。ライオンの骨格は、脚の関節長さ  $l$  に対し前後脚間の距離は  $3l$ 、左右脚間の距離  $l$  であった。本ロボットでは、安定性を重視するため、左右脚間の距離は  $2l$  として設計した。関節構造は、四足歩行ロボットでも一般的な1脚につき3自由度を持つ構造とした。肩(又)関節に前後左右の2自由度、膝関節に前後の1自由度を用意することで、前後への足運びと左右への踏ん張りが可能となる。

(2) 構造計算

脚部に作用する荷重から関節トルクを計算した。計算に用いたモデルを図6に示す。各関節のトルクは以下の計算により求めた。なお、 $\tau$  は関節トルクベクトル、 $J$  はヤコビ行列、 $f$  は足先に作用する外力ベクトル、 $p$  は足先座標ベクトルである。

$$\tau = J^T f \quad \dots(1)$$

$$J(\theta) = \frac{\partial p(\theta)}{\partial \theta^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

各関節の角度から脚先座標を求める順運動学<sup>5)</sup>による足先座標ベクトル式(3)より、式(2)は次のようになる。

$${}^o p = \begin{bmatrix} s\theta_1 c\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) - l_2 c\theta_1 s\theta_3 \\ s\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) \\ -c\theta_1 c\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) - l_2 s\theta_1 s\theta_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots(3)$$

$$J = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) + l_2 s\theta_1 s\theta_3 & 0 & 0 \\ s\theta_1 c\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) - l_2 c\theta_1 s\theta & -s\theta_1 s\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) & l_2 c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - l_2 s\theta_1 c\theta_3 \\ c\theta_3 (l_1 + l_2 c\theta_3) & -l_2 s\theta_2 s\theta_3 & 0 \\ c\theta_1 s\theta_2 (l_1 + l_2 c\theta_3) & l_2 c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - l_2 s\theta_1 c\theta_3 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

次に、上式を用いてクロールとトロットの各姿勢における関節トルクを計算した。荷重は各脚に  $f_z=2[\text{kgf}]$  が作用するとして計算した。本来、遊脚時には荷重が0であるが、ここでは遊脚・接地脚に関係なく荷重を作用した場合の計算を行った。クロールの計算結果を図7、トロットの計算結果を図8にそれぞれ示す。横軸は歩行パターンのステップ番号、縦軸がトルクとなる。

クロールは後左脚・前左脚・後右脚・前右脚がそれぞれ

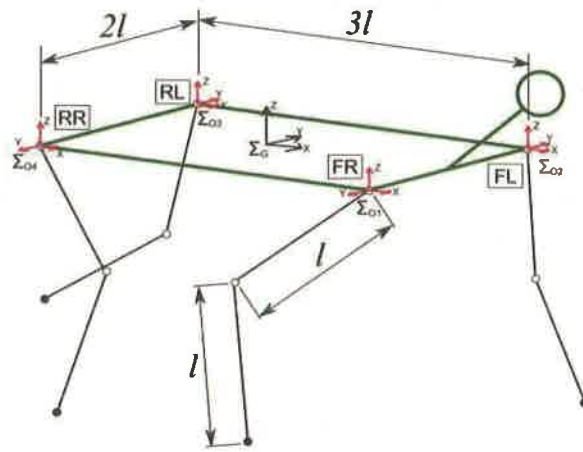


図5 ロボットの構造, 座標系

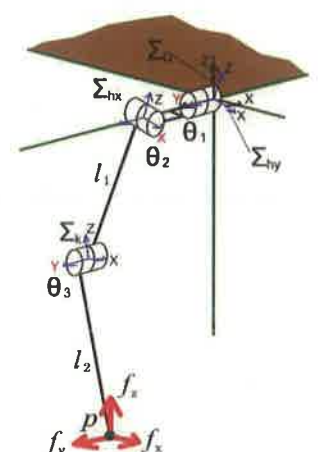


図6 計算モデルの座標系

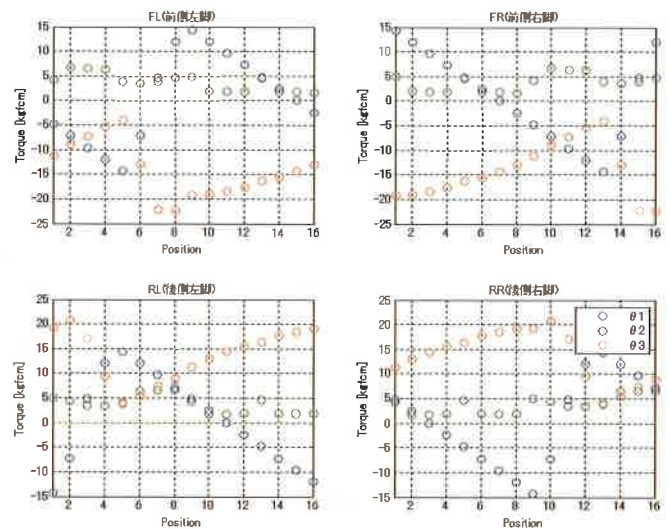


図7 クロールにおける静荷重に対する関節トルク

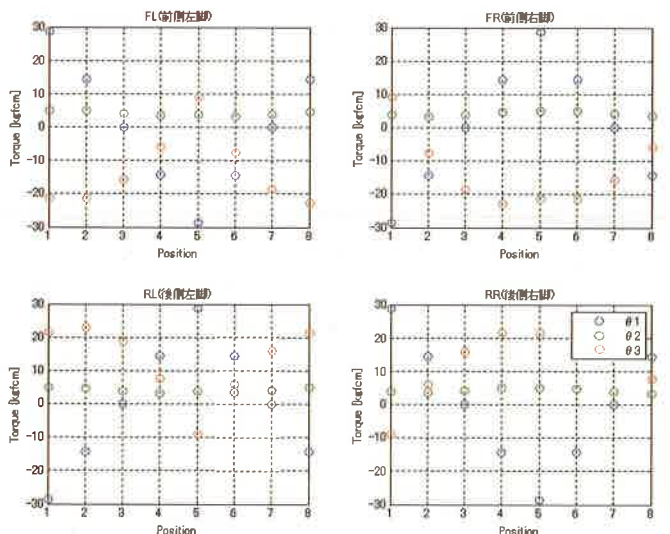


図8 トロットにおける静荷重に対する関節トルク

4ステップ、トロットは後左脚・前右脚と左前脚・後右脚の組が4ステップ位相が異なっているので、符号の違いはあるが計算結果もそのようになっている。歩行姿勢で受ける静的な荷重に対する関節の最大トルクは、クロールで約22[kgfc]、トロットで約30[kgfc]であった。

3.3 フレームデザイン

3.3.1 フレームデザイン

前述の力学計算より使用するサーボモーターが定まったので、試作するロボットの詳細設計を 3D-CAD (Siemense 製 NX I-deas) で行った。本体フレーム及び大腿部は CFRP, 下腿部にはポリカーボネートを用いることにより軽量化を図った。脚先には歩行時の衝撃を和らげるゴム製ブッシュを介し、接地時の安定性の得られる球形の足先を固定した。本ロボットの積載物で最も重い制御パソコンは、運動性を損なわないよう中央部の低い位置に配置した。カメラと LRF は前側に配置し、その質量をバランスを取るようバッテリーは後ろ側に配置した。3D-CAD 上で設計した四足歩行ロボットを図 9 に示す。

3.3.2 CFRP によるフレームの開発

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は繊維強化プラスチックの一種で、炭素繊維によって強化された複合材料の総称である。CFRP は軽量、高強度である点が注目され現在さまざまな産業分野で使用されているが、CFRP の使用にはその目的に合わせさまざまな構成が存在する。また製造方法についてもオートクレーブやホットプレス、射出成型など専用の製造設備を必要とするものから、ハンドレイアップ法のように全く設備を必要としない方法までさまざまである。本研究においては、ハンドレイアップ法で CFRP フレームを作成した。図 10 にハンドレイアップ法の概略を示す。

ハンドレイアップ法では型を作成し、型に離型のための表面処理を行う。樹脂を塗布しつつ繊維を型に張りつけ余分な樹脂、及び気泡を脱泡ローラで除去しつつ積層していく。樹脂が硬化した後、型から剥離し後加工を行う。製品を安定的に製作するという点では他の製作方法に比べ劣るが専用設備を必要としないのが利点である。

フレーム試作では合板で型を作成し剥離シートを用いて表面処理を行った。樹脂は 2 液混合型エポキシ樹脂 (AXSON

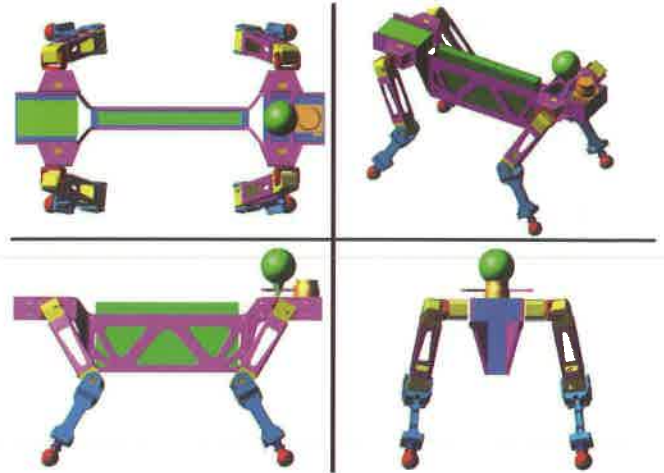


図 9 設計した四足歩行ロボット (モデル II)

L-400A) を使用し、炭素繊維は平織りのカーボクロス (繊維数 3K) を使用した。作成した CFRP の構成を図 11 に示す。

作成した CFRP は 4 プライのカーボクロスから成るもの (以下、4 プライ材) と、間に厚さ 3[mm] のハニカムコアマットをサンドイッチした構成のもの (以下、'ハニカムサンドイッチ材') である。ハニカムコアマットはハニカム状の樹脂含浸部を除く繊維間に樹脂が浸透しないバルーンが多数分散されたもので、樹脂を含浸させると肉厚方向にハニカム状の樹脂壁が形成されるものである。作成した 2 種類の CFRP の強度試験の結果を下表に示す。

	曲げ弾性率 [GPa]	曲げ強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	曲げこわさ [N・m <sup>2</sup> ]	比重 [g/cm <sup>3</sup> ]
CFRP (4 プライ)	40.8	729	0.12	1.38
CFRP (ハニカム)	19.6	248	3.25	0.88

4 プライ材は曲げ弾性率はガラス繊維強化プラスチック (1 方向材) とほぼ同程度であるが、曲げ強さに関してはピッチ系 CFRP (1 方向材) と同程度の値を示した。比重に関してはアルミニウムのほぼ半分の値であった。ハニカムサンドイッチ材に関しては曲げ弾性率、曲げ強さは 4 プライ材には劣るが曲げこわさに関しては大きく向上している。比重についてもハニカムにより空洞部が内部に形成されていることから更に軽量になっている。つまり 4 プライ材は強度に優れ、ハニカムサンドイッチ材は軽量でたわみにくい材料である。これらの 2 種類の材料を使いフレームを作成した。CFRP フレームを使用したモデル II を図 12 に示す。

剛性が要求されるロボットの基本骨格となる部分にはハニカムサンドイッチ材を使用し、ロボットの足やサーボモーター取り付け部などの強度が求められる部分には 4 プライ材を使用した。結果メインフレームは総重量 180[g] とロボット全体の重量 3430[g] と比較し軽量に作成することが出来た。

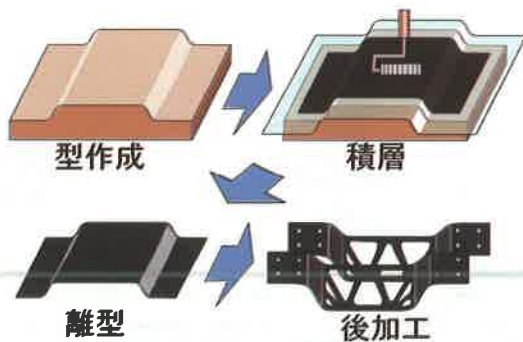


図 10 ハンドレイアップ法の概略



図 11 作成した CFRP の積層構造

### 3. 4 自律歩行制御

#### 3. 4. 1 センサー技術

ロボットを自律的に動作させるためには、ロボットの位置や進行方向、傾きなどの自己状態と、障害物の有無、路面状態などの周囲の環境情報を取得する必要がある。モデルⅡでは、なるべく少ないセンサー数で自律制御することを目指し、代表的なセンサーとして下記センサーを搭載した。

##### (1)GPS レシーバー

モデルⅡの自律歩行では、予め与えられた地図情報に従って屋外を移動することを考えたため、現在幅広く利用されているGPS (Global Positioning System) から現在位置を把握することとした。搭載したGPS レシーバーは、位置精度が2.5m以下で、USB インターフェースを持つGM-48-UB (San Jose Technology) である。

##### (2)デジタルコンパス

現在位置を把握後、移動するためにはロボットの進行方向を把握する必要がある。そこで、進行方向の方位を検知するためにデジタルコンパス HMC6343 (Honeywell) を用いた。この HMC6343 は三軸磁力センサーと三軸角速度センサー、マイコンを内蔵しており、自身の傾きと、傾き補正した方位を出力する。

##### (3)レーザー式測域センサー (LRF:Laser Range Finder)

GPS 及びコンパスにより、ロボットが移動するための準備は整うが、実際に移動するためには周囲の障害物の有無を把握する必要がある。そこで、レーザー走査による二次元測域センサーとして、URG-04LX-UG01 (北陽電機) を用いた。

##### (4)UBS カメラ

上記のセンサー類で、自律制御に必要な最低限の情報を得ることができるが、さらにモデルⅡには目標物の認識や監視目的に使用できるUSBカメラQcam Orbit AF (Logicool) を搭載した。

#### 3. 4. 2 RT ミドルウェアによる自律歩行制御

センサーによって集められた情報は、制御パソコン VPCP11AKJ (SONY) を通して遠隔監視パソコン CF-R8 (Panasonic) に送られ、周囲環境認識、自己位置認識、さらに行動決定が行われる。決定した行動指針は、制御パソコンに送り返され、そこからロボットに制御信号を送り、ロボットが動作する (図 13)。このため、センサー類、制御パソコン、遠隔監視パソコンは連携をとる必要がある。

今回は、このためのソフトウェア作成に RT ミドルウェアを利用した。RT ミドルウェアとは、独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門 タスク・インテリジェント研究グループが主体となって開発してきた日本初のロボッ

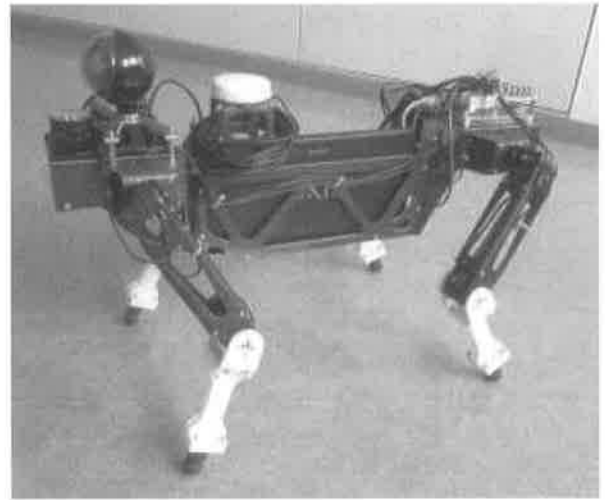


図 12 四足歩行ロボット (モデルⅡ)

ト用分散ミドルウェアである<sup>6)</sup>。

RT ミドルウェアでは、まずセンサー入力や、情報処理など、ロボットを構成するソフトウェアを規格に沿った形でコンポーネント化したもの (RT コンポーネント) を準備し、これを組み合わせることで、簡単にロボット開発を行うことを実現している。RT ミドルウェア自体は規格群であるので、その実装には幾つか種類があるが、今回は独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門が開発・公開している OpenRTM-aist<sup>7)</sup> を使用した。

前節で説明したセンサーについては既存の RT コンポーネントが存在しないため、Visual C++ 2008 (マイクロソフト) を用いて、新たに開発を行った。

##### (1)GPS コンポーネント

GPS レシーバーからシリアル通信で送られてくる NMEA-0183 形式データから、緯度・経度等のデータを抽出し、平面直角座標系<sup>8)</sup>に変換するコンポーネントである。図 14 は、産業技術センターの周囲を歩行した際の測位結果で、青線が測位した軌道を示す。細かいずれはあるものの、

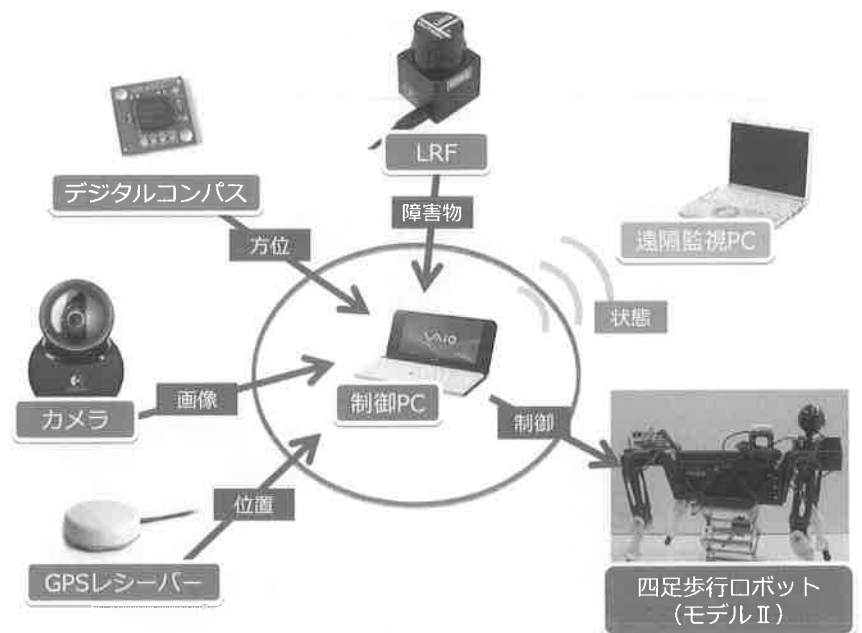


図 13 センサーと制御 PC の関係

ほぼ歩行軌道どおりの結果が得られた。

## (2) デジタルコンパスコンポーネント

デジタルコンパスからシリアル通信で送られてくる方位データ（テキストベース）を数値情報として出力するコンポーネントである。コンパスコンポーネントは、後述するロボット行動制御コンポーネントと一体化している。

## (3) LRF コンポーネント

LRF の制御ライブラリをラッピングしたコンポーネントで、走査角とその角度における障害物までの距離を出力する。図 15 はロボット前方と左右に障害物（パーティション）を設置した場合の測定結果である。白点が障害物、赤線が見通しを示しており、前方（図左側）及び左右（図中央）の障害物を検知できている。

## (4) カメラコンポーネント

カメラからの画像を取得し、他のコンポーネントに出力するコンポーネントである。入力画像の取得などは、オープンソースの画像処理ライブラリである OpenCV<sup>9)</sup>を用いた。図 16 は、図 15 におけるロボット前方の障害物のカメラ画像である。

## (5) 周囲環境認識、自己位置認識及び行動決定コンポーネント

GPS、コンパス及び LRF コンポーネントからのデータを基に自己位置の推定及び周囲環境の認識を行い、地図情報に従って目的までのルートを決めるコンポーネントである。

## (6) ロボット行動制御コンポーネント

行動決定コンポーネントで決定されたルート情報を基に、現在位置からロボットが実際に移動する距離、方向をモーターコントローラーに支持するコンポーネントである。モーターコントローラーにデジタルコンパスが内蔵されているため、コンパスのインターフェースコンポーネントとしても動作する。

## (7) カメラ画像表示コンポーネント

入力された画像を表示するためのコンポーネントである。これらのコンポーネントを OpenRTM-aist の開発ツール RT System Editor 上で組み合わせることで、モデル II の自律歩行制御を実現した（図 17）。

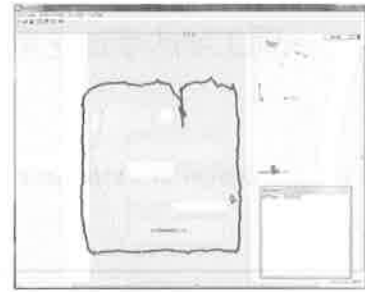


図 14 GPS コンポーネントによる測位結果

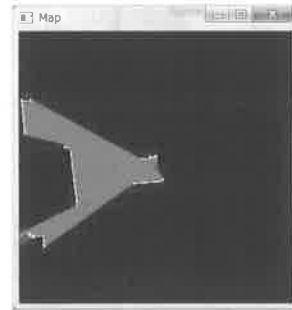


図 15 LRF による障害物検知



図 16 カメラ画像

モデル II における自律歩行制御は、まだ「よちよち歩き」レベルであるが、本研究を通じ、多くの要素技術にチャレンジし、修得することができた。

## 4. 結言

「ものづくり基盤技術」の向上を目的に、要素技術の塊であるロボットの研究開発を行った。2 台の四足歩行ロボットを設計から試作までセンター内で進めることにより、組込み・制御技術、機構・構造、メカトロニクス、意匠デザインなどの要素技術に対する技術力を高めると共に、センター内で「設計から試作まで」を支援できる体制を整えることができた。

今後は、開発した四足歩行ロボットの応用開発に加え、得られた要素技術を研究開発や企業支援に活かしたい。

## 参考文献

- 1) 比留川博久ら：パートナーロボット資料集成，NTS，(2005)。
- 2) 日本機械学会：生物型システムのダイナミクスと制御，養賢堂，(2002)。
- 3) 富山隆志：BROKEN's Advanced Vehicle Laboratory，<http://homepage1.nifty.com/BROKEN/project/walk/memo.htm>，(2003)。
- 4) W. Ellenberger, H. Dittrich, H. Baum: An Atlas of Animal Anatomy for Artists, Dover Publications, (1956)。
- 5) 小林一行：ロボットモデリング，オーム社，(2007)。
- 6) 長瀬雅之，中本啓之，池添明宏：はじめてのコンポーネント指向ロボットアプリケーション開発，毎日コミュニケーションズ，(2008)。
- 7) 産業技術総合研究所：OpenRTM-aist official website，<http://www.openrtm.org/openrtm/ja/content/openrtm-aist-official-website/>，(2005)。
- 8) 国土交通省国土地理院：平面直角座標系，<http://www.gsi.go.jp/LAW/heimencho.html>，(2002)。
- 9) Junichi IDO：OpenCV.jp，<http://opencv.jp/>，(2010)。

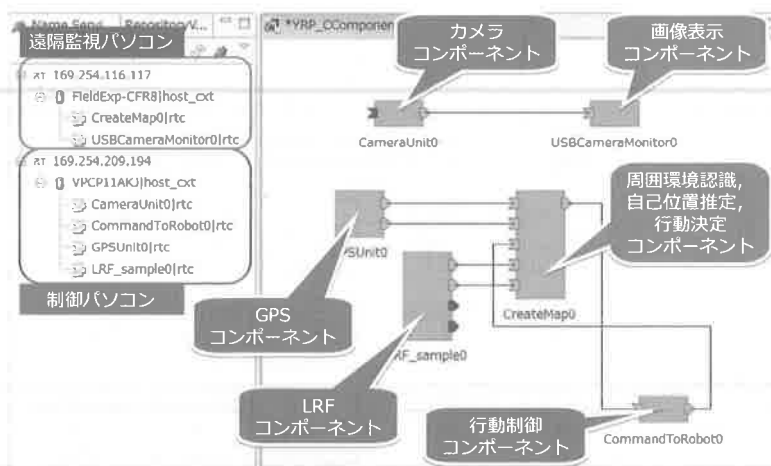


図 17 RT System Editor