

内骨格構造ロボットの設計・製作

～「愛・地球博」恐竜型2足歩行ロボット～

Design and Manufacturing of Dinosaur Robots

石崎 雅一
Masakazu ISHIZAKI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

大澤 忠明
Tadaaki OSAWA

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

川崎 俊和
Toshikazu KAWASAKI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

中村 優
Masaru NAKAMURA

川田工業(株)航空・機械事業部
ロボティクス部長

宮森 剛
Go MIYAMORI

川田工業(株)航空・機械事業部
HRIS開発室

ここで紹介する恐竜型2足歩行ロボットは、2005年に愛知県で開催された国際万博「愛・地球博」(以下、「愛・地球博」という)において3月25日から9月25日までの6ヶ月間の常設展示アトラクションを目的に、(独)産業技術総合研究所および(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より委託を受けて開発されたロボットである。本ロボットは、最新の恐竜学説に基づいた関節の配置、外装を有し、エンターテインメント性に特化したことを特徴としており、全長3.5 mと1/3.5のサイズで実物を再現している。この設計ではロボットが今までになく大型なため、CFRPによる内骨格構造を採用した。また全会期中に行われたデモンストレーションを通して十分な耐久性が確認された。本論文では、恐竜型ロボットの開発に関わる設計仕様の策定から、設計・製作についての具体的な開発手法を説明する。キーワード：恐竜型ロボット、内骨格構造、恐竜学説、ロボットハードウェアの設計・製作

1. はじめに

当事業部では恐竜型2足歩行ロボットの構造・機構・システムの設計・製作を担当した。このロボットの設計にあたっては、外観の意匠性ととともに、6ヶ月間の長期運用に耐えられる安定性に重点がおかれた。また、長期の運用中には2足歩行である以上避けては通れない、転倒事故の発生が予想されるが、修理に時間を割り当てるのが運用の性質上困難であると予想されたため、耐衝撃性の向上にも力を入れた。

当社では、以前から人間型2足歩行ロボットを製作しているが、その構造には外骨格構造を採用してきた。外骨格構造は、意匠性も備えながら外形形状が強度を受け持つことができるので、軽量高剛性が必要なロボット構造に対して有利とされてきた。しかしながら、今回の恐竜ロボットをこの構造で製作することは、意匠の確保が難しいこと、転倒時にロボットの受けるダメージが非常に大きいことの原因により不利になることが予想された。そこで恐竜型2足歩行ロボットの設計においては、外装の自由度と衝撃吸収の優位性を重視し、内骨格構造を採用することに決定した。

さらに、今回開発した恐竜型2足歩行ロボットは、機能としては歩行するだけではあるが、博物館等のアミューズメント市場の需要を見込み、HRPプロジェクトで確

立された2足歩行ロボットの技術を生かした製品の第一歩として、早期に商品化が期待できるロボットと考えられた。そこでわれわれは「愛・地球博」での半年間の運用期間を、構造・機構・システム・制御の不具合を抽出し、販売を視野に入れたロボットの完成度を高める試験期間と位置づけた。そのためには、機械的・電氣的に安定した信頼性、軽量高剛性、対衝撃吸収性と人に対する安全性(リスクアセスメント)の向上が必要となった。

本論文では、上記で述べた概念を満たす最適な仕様の策定方法と設計・製作過程について説明する。

2. ロボット製作仕様策定

本プロジェクトの目的は、「愛・地球博」で行う常設展示アトラクションとして全会期中デモンストレーションが可能な恐竜型2足歩行ロボットを開発することにあった。「愛・地球博」での常設展示アトラクションは、ロボットを2体使用し、1回15分のデモンストレーションを1日10回、開催全期間を通して総計2,000回程度行うことが予定されていた。また、当然のことながら製作するロボットも可能な限り生物らしいイメージに近づけることが望まれた。

前述のように恐竜ロボットの製作にあたっては、内骨格構造を採用し、その外殻を意匠性、衝撃吸収性を兼ね備えた柔軟な素材で被せることを方針として定めた。

また、長期の運用と商品化のためには、整備性を考慮する必要があり、外装の脱着性、構造、搭載品へのアクセス性の配慮も重要なポイントとなった。

関節等、減速機の詳細仕様においては、容量と寿命計算に特に注意を払った。

さらに、2種類のロボットを製作する必要があるため、極力部品の共通化を行うことに留意し、効率よく詳細設計を進められるようにした。

以下に策定した仕様について説明する。

(1) 外観意匠仕様の策定

「愛・地球博」にて常設展示アトラクションを行う2足歩行ロボットとして、白亜紀後期(約8500~6500万年前)に生息していた2足歩行恐竜としてはもっともポピュラーな肉食恐竜のTyrannosaurus rex(ティラノサウルス、以下、T-rexという)および草食恐竜のParasaurolophus(パラサウロロフス、以下、Parasaという)を選定した。

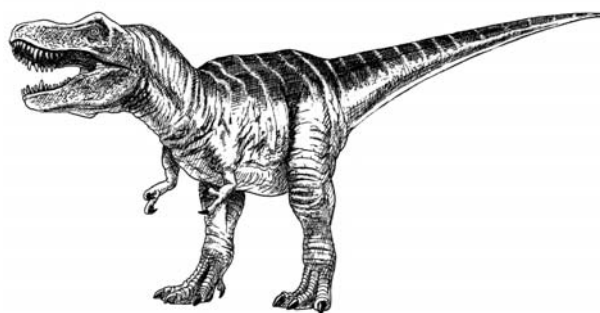
恐竜をロボットとして再現するために、「愛・地球博」にて常設展示アトラクションを行うステージの大きさと、運搬等の条件を考慮して、全長約3.5m(約1/3.5スケール)、体重90kg以下を設計目標とした。

外観意匠については、外形寸法を元に最新の恐竜学説に基づいた外形形状を満足した仕様策定を行った。設計時の資料¹⁾として、骨格形状が現在最も自然と言われるGregory S. Paul氏が1996年に発表したものを参考とした。外見に関しては、皮膚の質感や動作時の皮膚の自然なしわを再現するためにウレタンスポンジを主成型材とし、その表面にシリコン樹脂を塗布した外皮を装備することにした。図1にT-rex、図2にParasaの外観意匠を示す。

(2) 関節軸詳細仕様策定

関節軸仕様は、前記した最新の恐竜学説に基づいた関節の配置をできるだけ再現するとともに、デモンストレーション時にリアルな動きに見えることを考慮して決定した。脚部の軸配置に関しては歩行動作を優先として、これまでに開発してきたロボットの経験を元に決定した。しかし、頭部、首、胴体、腕部、尻尾に関しては軽量化のために、できるだけ少ない軸でリアルな動きを再現しなければならない。この点に関しては恐竜ロボットの開発に実績のある(株)ココロからの助言をいただき配置を検討した。また、目の脛に軸を配置し、脛を瞬きさせることでよりリアルな動物的表現をさせることにした。

関節軸トルク、速度の検討²⁾ではロボットの完成重量、歩行速度を想定し、ロボットの大まかな装置レイアウトを行い、重量重心およびリンク毎の動力学パラメータを求め、モータ、減速機の仮選定をした。これらのデータを元に図3に示すようにシミュレーションモデルを作成し、OpenHRPにて各動作パターンによる全関節軸の作動角と必要トルク・速度を求めた。シミュレーションより



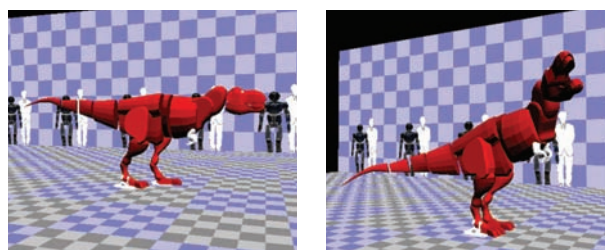
全長：12~14 m 推定体重：6.4 t

図1 T-rex外観意匠図



全長：約10 m 推定体重：4.5 t

図2 Parasa外観意匠図



a) 歩行

b) 吼える

図3 シミュレーションの一例

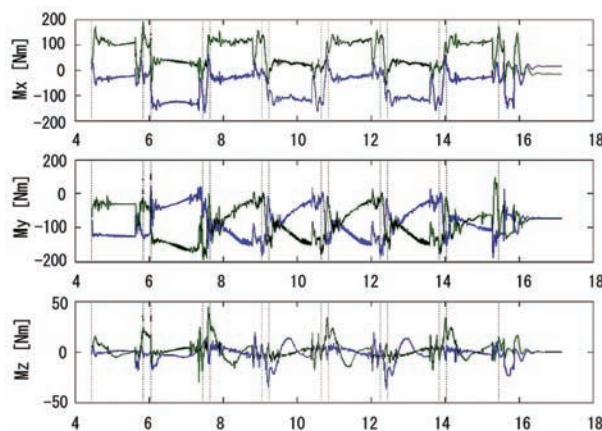


図4 脚関節軸トルク計算結果一例

求められた関節データの一部を図4に参考として示す。

シミュレーションによる計算には外装の摩擦による負荷を想定し、最終的な必要トルクとした。

(3) 構造の詳細仕様策定

恐竜型ロボットは人間型ロボットと異なり、全長3.5 mと大柄なので、HRPでの経験から従来のような製造手法では、目標体重90 kgを下回することは不可能であると考えられた。そこで今回の恐竜型2足歩行ロボットの主要構造部には、比強度の高いカーボンファイバー（Carbon Fiber Reinforced Plastic、以下、CFRPという）を採用し、使用する炭素繊維は、高弾性率で比較的熱伝導性の良いピッチ系炭素繊維を用いることにした。

特に2足歩行型ロボットでは、歩行制御が腰・脚の剛性に大きく依存するため、高剛性であることが望まれる。このような観点からもCFRPはロボット用として適した素材であると考えられる。表1に脚リンクに関する設計仕様を示す。

表1 脚リンク設計仕様

片持ちばり、片端固定で他端100 N印加時に最大撓み3 mm以下
フレーム長手方向100 N印加時に最大撓み0.03 mm以下

また、主要構造部以外の減速機等の構造部分は、アルミニウム合金の削り出しとして、ラックやカバー類は板金構造を適時採用することにした。

(4) 電装システムの詳細仕様策定

電装システムおよび制御系は、安定性と信頼性からこれまでの実績を考慮し、HRP-2³⁾、HRP-3P⁴⁾にて運用実績のあるシステムを優先的に採用することとした。また、運用上のリスクアセスメントで必要となる遠隔操作可能なイーネブルシステムを搭載することにした。

各電装部品についての具体的な仕様を以下に示す。

- コンピュータは、安定性を考慮しHRP-3Pにて実績のあるcPCIを採用する。
- 両脚の先端に6軸力センサ、胴体内部に姿勢センサ（ジャイロ・加速度センサ）を配置し、歩行およびアクションの制御に使用する。
- 20軸を超えるモータにはそれぞれにエンコーダが設置されており、この信号を利用して各関節の姿勢制御を行う。モータは（2）項で述べた関節軸仕様策定に基づき適切な出力のモータを選定する。
- 胴体後方下部にCCDカメラを搭載し、ロボットの位置決め動作に使用する。
- 胴体内にはバッテリーを内蔵し、また無線LANを搭載することによってケーブルレスでの作動を可能とする。
- 配線およびコネクタ類はHRP-2で実績のある接続信頼性の高いものを採用する。
- 以上のシステムは、メンテナンス性を考慮した配置とし、それらのユニットを一括して脱着可能とする。

(5) 全体製作仕様まとめ

T-rex仕様を表2に示す。このほかに、ロボットは各関節の動作角が非常に大きくなるため、各リンクの干渉に配慮が必要となる。また、胴体構造部も高密度実装が予測されることから、ノイズ対策と各接合部の信頼性に配慮が必要である。さらに、2種類のロボットを製作しなければならないため、設計負荷の軽減のために可能な範囲で部品の共通化に留意した仕様策定が必要ともなる。

外装については、(株)ココロが手がけている動刻の技術を用いて恐竜ロボットに最適な構成を検討した。

表2 T-rex仕様

主要寸法	全長3.57 m、全幅0.52 m、全高1.36 m(直立展長状態)	
重量	80 kg(バッテリー含む)、機構部65 kg、外装15 kg	
歩行速度	0~1 km/h	
関節総自由度数	27自由度(頭部7軸、腰1軸、尻尾3軸、腕部1軸×2、脚部7軸×2)	
関節部アクチュエータ	DC(AC)コアレスモータ+タイミングプーリ+ハーモニック減速機、RCサーボ	
コンピュータ	バス	cPCI、バックプレーンのスロット数5
	CPU	Intel Pentium4 1.6 GHz
	OS	ART-LINUX
	無線LAN	IEEE802.11b、11g
センサ	関節部	インクリメンタルエンコーダ
	胴体部	振動ジャイロ、加速度センサ
	脚部	6軸力センサ
	視覚	webカメラ(座標系確認用)
内部電源	ニッケル水素バッテリー 48 V 14.8 Ahr	
キャリブレーション	ハードストップ当て方法、ジグによる方法	

3. 設計・製作

本章では、前章「2.ロボット製作仕様策定」の仕様に基づいて実施した設計・製作について説明する。今回の製作手法として、機械設計された構造体へ手作業にて造形された外装を取り付け機能させることが課題としてあがり、その点に重点を置いて設計を行った。外皮部分は(株)ココロの協力を得て製作し、製作時間を短縮するために、モックアップを利用して構造設計・製作と外装製作を同時に行うこととした。

また恐竜型ロボットは、人間型ロボットと形状が異なり、前後方向に非常に長い形状をしている。このため前後方向の重量バランスにも充分考慮して設計を行った。

(1) 構造設計・製作

ロボットの骨格となる構造には、意匠を有する外装の装着と、関節の全可動範囲での動作の両立が求められる。そのためには、断面積ができるだけ少なく、軽量かつ剛性を持たせた構造であることが必要であるため、CFRPを用いて少ない断面積でありながら強度・剛性を支持できる構造を実現することとした。

まず、詳細な設計を始める前に、採用するCFRPの剛性を確認し各構造の断面積、構造解析のベースとした。前章「2. (3) 構造の詳細仕様策定」で説明した脚リン

クの剛性を満たすための確認試験を行った。試験は、ピッチ系炭素繊維を主としたパイプを製作し、図5に示すようにパイプ片端を治具に固定して、その逆側に荷重をかけて撓みを計測する方法で行った。試験体は、基本計画で想定したリンク断面（50 mm角）で製作している。試験の加重条件は、前章「2. (3) 構造の詳細仕様策定」に定められた条件で行った。

この試験結果を基に、素材のヤング率（E）を算出し、断面二次モーメント（I）を求め必要断面（S）を決定した。

胴体部については、中心部に脚構造が配置され、前後に頭部、尻尾部が連結されるため、設計重量から頭部・尻尾部および脚取り付け部の荷重に対して図6に示すようなFEMによる構造解析を前記試験結果のデータを基に行い、構造の最適化を行った。

この解析結果は、胴体構造脚取り付け部に片足立脚時で体重の2倍の荷重を加えた計算結果である。

脚リンクは、骨格部をCFRPのパイプとして、関節部となるギアボックスをアルミニウム合金の削り出し構造としてそれぞれを接着接合している。足裏構造も脚部イナーシャの低減のためにCFRP構造とした。

関節軸は、これまでのロボット同様にハーモニックドライブを用いたノンバックラッシュ減速機構とした。

(2) 外装設計・製作

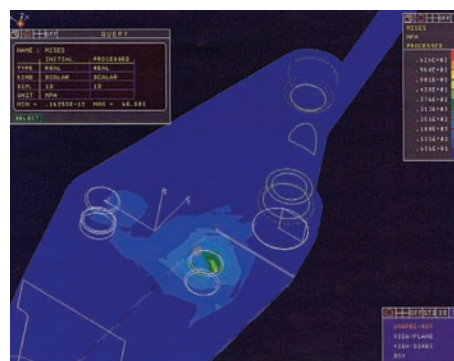
外装は意匠性を有し、ウレタンフォームの成形を手作業で行うため、CAD上で再現することが難しく、構造体との干渉や各断面における外装のマージンを確認することが困難であった。これらを回避するため、仕様策定において検討した構造外形を詳細に設計した後、図7に示すクレーモデルを製作し、3次元スキャニングすることで図8に示す3D CADモデルに変換して、構造への収まりや干渉を十分に検討した。この作業により機構・構造的に外装形状を変更しなければならない箇所を形状変更を最小限にすることが可能となった。

外装は、前章「2. (1) 外観意匠仕様の策定」に基づき形状検討を行った。まず、内骨格と外皮の隙間はウレタンスポンジなどの軽量の素材で基本形状を形成し、その表面にシリコンを塗布することで皮膚の質感を出し、動作時の皮膚の自然なしわを再現した。

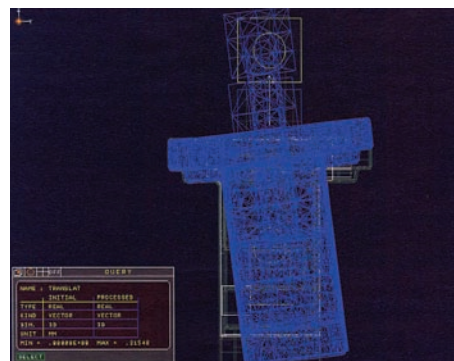
外装については、柔軟な素材でロボットを覆うことで転倒時や対人への衝撃吸収性を考慮している。この外装のウレタンスポンジ部分は、自然なしわを表現するための作り込みが可能であり、その結果として関節に与える負荷トルクを軽減させることが可能である。また、その柔軟性によってリンクの挟み込みを軽減させることが期待できる。ただし今回のロボットでは脚関節の作動角が非常に大きいため不自然なしわの発生と、関節への過大な摩擦力の発生が懸念された。これらを検証するため図9に示す製作実寸大



図5 撓み試験



a) 応力解析



b) 歪み解析

図6 胴体構造の構造解析



a) T-rex



b) Parasa

図7 クレーモデル



a) T-rex



b) Parasa

図8 3D CADモデル変換

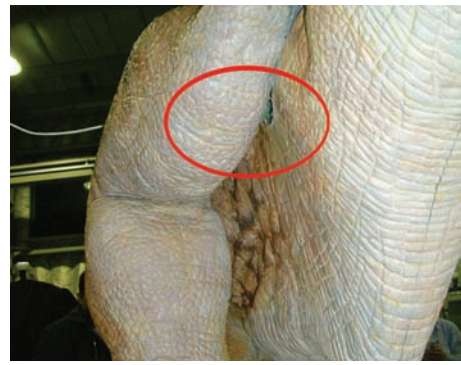


a) 外装摩擦確認モデル



b) 実機のしわの様子

図9 外装脚関節部のしわの様子



a) 脚付け根に設置した吸気口



b) 背中に設置した排気口

図11 通風口の様子



a) T-rex



b) Parasa

図10 実寸大骨格モックアップ

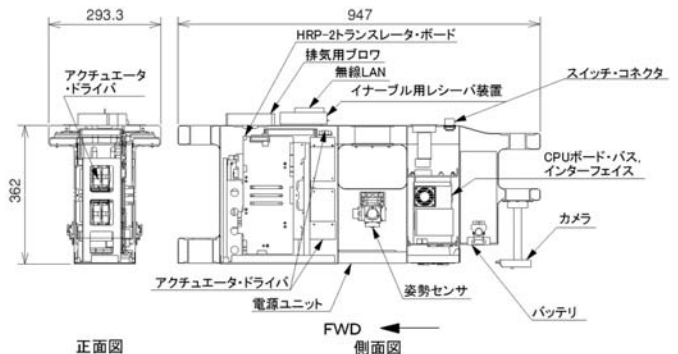


図12 胴体電装システムレイアウト

の骨格モックアップおよび外装を試作し、自然なしわを出すための工夫と外装への摩擦影響の確認を行った。また、関節を曲げるために必要な関節軸での摩擦トルクを計測し、関節軸仕様の策定時に想定したトルクの割り当てを超えることがないように調整を行った。

構造設計と外装の調整は、このモックアップを基準に詳細に進め、実機搭載用の外装製作では、構造の詳細設計を元に図10に示す骨格構造の原寸大モックアップを製作し作業を行うこととした。このようにモックアップを製作することで外装と構造部の製作を並行して進めることができ、工期の短縮と外装装着までに詳細な調整が可能となった。

外装の取り付けについては、整備性の面から外皮を数箇所まで分割し、全体を脱着可能な構成とした。ただし日常的なメンテナンスでは、全てを脱着することは難しいため、頻繁にアクセスする肩部（操作スイッチ部および吊り具位置）、腹部（電装搭載部・バッテリー収納部）に

については簡易式の脱着機構を採用することで、アクセス性を確保できるよう最適化した。冷却空気の流路についても図11に示すように脚部の付け根や背中上面の目立たない箇所に開口部を設けることで、冷却性と外観品質の両立を図ることとした。

(3) 電装設計・製作

図12に、恐竜ロボットの胴体内電装システムのレイアウトを示す。前章「2. (4) 電装システムの詳細仕様策定」で設定した仕様を満足し、かつ機器の信頼性・着脱性の向上を目指し、電装システムの主要な部位をユニット化できるように設計・製作を行った。特に制御系は安定性と信頼性を重視し、HRP-2、HRP-3にて運用実績のあるシステムを優先的に採用した。

各電装部品を実装するに際しての具体的な方法を以下に示す。

a) 電源のユニット化：全システムに電源を供給する

コンバータと、それを冷却するファンをひとつのユニットとして胴体後方下部に配置した。

- b) cPCIのユニット化：cPCIボード・6軸力センサボード・エンコーダインターフェースボードなどのボード類をユニット化し、胴体後方に配置した。またcPCIユニットは、冷却性・耐ノイズ性を考慮し、ユニットの筐体をアルミニウム板とし、冷却ファンを装備した。
- c) センサのユニット化：ロボットの制御に不可欠な、姿勢センサ（ジャイロ・加速度センサ）は、当社で開発実績のあるHRP-2と同様の一体式のセンサとしてパッケージングし、歩行の要である胴体中央部脚の付け根付近に水平面を確保して搭載した。センサ信号については熱によるドリフトの影響を勘案して事前に恒温層にてドリフト量を計測し、校正量を制御にフィードバックした。
- d) バッテリーのユニット化：バッテリーはHRP-2同様、Ni-MHセルを採用した。HRP-2の体重、動作時の消費電流から想定を行い40分程度の連続動作が可能な容量のユニット化を行った。また、充電のために交換のしやすさとロボット全体の重量バランスを考慮し、胴体後方に配置し、胴体下面から着脱できるようにした。
- e) その他搭載物：位置認識用のカメラは歩行姿勢時に両足踵部が画角に入る位置に設置し、取り付け地上高さは約700 mmとした。また無線LANおよびイーネブルシステム用レーザーは、通信の安定性を勘案して胴体フレーム上面に設置した。さらに配線およびコネクタ類は、HRP-2で使用実績のある接続信頼性の高いものを採用した。

(4) 設計・製作まとめ

設計は、ロボット製作仕様策定に基づき外観意匠を可能な限り忠実に表現し、CFRP部品を採用した軽量高剛性なフレームを実現し、十分な関節寿命を確保し、必要な電装品を全て内蔵させた。

部品の共通化に関しては、システムを搭載した胴体の共通化と脚部関節減速機の共通化ができた。このため開発した恐竜は2体であったが、設計負荷を最小限に抑えることができた。またこの設計手法を推し進めることで異種の恐



a) T-rex



b) Parasa

図13 恐竜型ロボット外観

竜ロボットを平行して製作する場合に、短期間で製作することが確認できた。完成したロボットを図13に示す。

4. ロボットの運用

完成した2体の恐竜ロボットは「愛・地球博」において2005年3月25日から9月25日まで185日間にわたってデモンストレーションを行った。デモンストレーションは1回15分、2体のロボットが交互に1日10回行い、7月7日に1000回を達成した。ここまでロボットに不具合は発生しておらず、基本設計の信頼性が確認できたと考えている。

また、1000回を迎えるまでに4回の転倒事故を起こしたがいずれも軽微な損傷で済み、簡単な修理を行うことで次回からのデモンストレーションを行っている。この実績からも外装による衝撃吸収性の優位性が確認された。

「愛・地球博」での具体的なロボットの運用の様子については本技報の技術紹介（106ページ）で詳述している。

5. おわりに

「愛・地球博」は、実用ロボットの実証試験の場であり、恐竜ロボットがデモンストレーションを行ったパビリオンでは毎日数千人の観客が訪れた。この観客の様々な反応から、われわれは恐竜ロボットのエンターテイメントロボットとしての手応えを強く感じた。しかしながら、販売して実運用を行うにはまだ技術的な課題が残っている。今後は、会期中に蓄積したロボットのデータ解析を行い、再度フィードバックして製品に向けた改良を行っていく予定である。

最後に、恐竜型ロボットは2005年3月25日から185日間をとおして愛知県で開催された「愛・地球博」において展示するため、(独)産業技術総合研究所と(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）により共同で開発されたものであり、当社がその詳細設計と製作をしたものである。関係者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Gregory S. Paul: The Complete Illustrated Guide to Dinosaur Skeletons, 1996.
- 2) 金子, 梶田, 金広, 森澤, 比留川: 恐竜型2足歩行ロボット, 慶応大学講演, 2005.9.16-18.
- 3) 赤地, 五十棲, 平田, 太田, 石崎: ヒューマノイドロボット・HRP-2の開発, 川田技報, Vol.23, pp.20-25, 2004.
- 4) 平成14年度採択「実環境で働く人間型ロボット基盤技術の研究開発」成果報告書, (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2004.