



2足歩行恐竜型ロボットの製作とその歩行理論

宇佐見 義之*

江上 正**

Bipedal Dinosaur Robot and Its Locomotion

Yoshiyuki USAMI*

Tadashi EGAMI **

1. はじめに

ティラノサウルス・レックス (T-Rex) は重すぎて走ることはできないという研究がハッチンソンらによって提唱され、この考え方が現在のところ広まっている (Hutchinson & Garcia 2002)。果たして、これは正しい学説であろうか? このことをいくつかの角度から研究し、恐竜の生態を可能な範囲で再現するのが本研究の目的である。また、筆者は恐竜を含む古代の生態系を再現する作業に取り組んでいる。

2. ハッチンソンの T-Rex は走れないという説について

ハッチンソンは2002年、T-Rex は走れないという論文を Nature 誌に投稿し、その結果が広まることとなった。しかし、その論文を読んでも、肝心なことが論文には無く、supplement にあり、どのような仮定をおいた計算からそのような結論に至ったかともわかりにくい論文であった。あくまでも筆者の感想であるが、この論文の内容を把握している人はほとんどおらずに、なんだかわからないけど T-Rex は走れないという結果だけを信じる雰囲気があるように思われる。この点から明らかにした方がよいと思われるので、まずハッチンソンの計算のポイントから要約することにしよう。ハッチンソンの理屈は次のようなものである。

- (1) T-Rex は、約時速 15Km で走るとき、図 1 のような中間姿勢をとると仮定する。
- (2) この中間姿勢の時、垂直方向にかかる力は体重の重

力の 2.5 倍とする。

- (3) その際のトルクを計算すると、その為に必要な筋肉は、両足で体重の 43% 必要となる。



図 1 ハッチンソンらが仮定したティラノサウルスの走行の中間姿勢

このことを検証する為に筆者らは、人間の動きをモーションキャプチャしたデータを分析することにした。

2-1 人間の走行についてのモーションキャプチャデータの分析。

モーションキャプチャは江原義弘、山本澄子ら主催の臨床歩行セミナーの際に得られたものから再構築した。データの変換ソフトは WaveEye から得られたデータを使った。

*准教授 物理学教室

Associate Professor, Institute of Physics

**教授 建築学科

Professor, Dept. of Mechanical Engineering

図 1 が左足の各関節の角度の時間的したものである。床からの鉛直抗力を合わせて描いてある。まず、膝の角度

は、接地時に鉛直抗力と同様のカーブを描く。

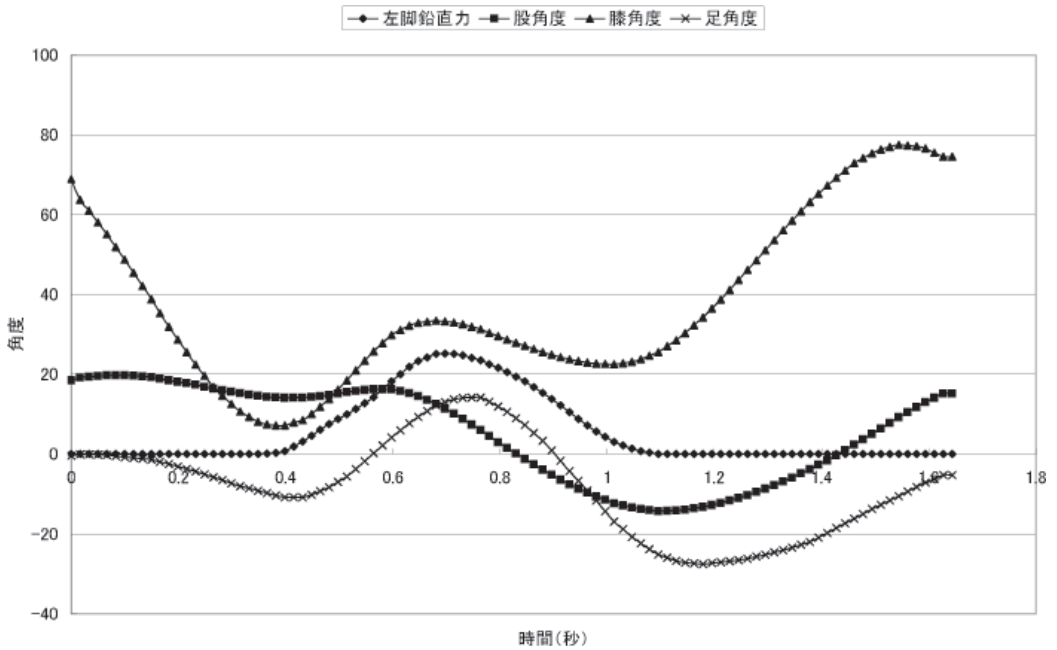


図2 人間の走行の際の各関節の角度の時間変化

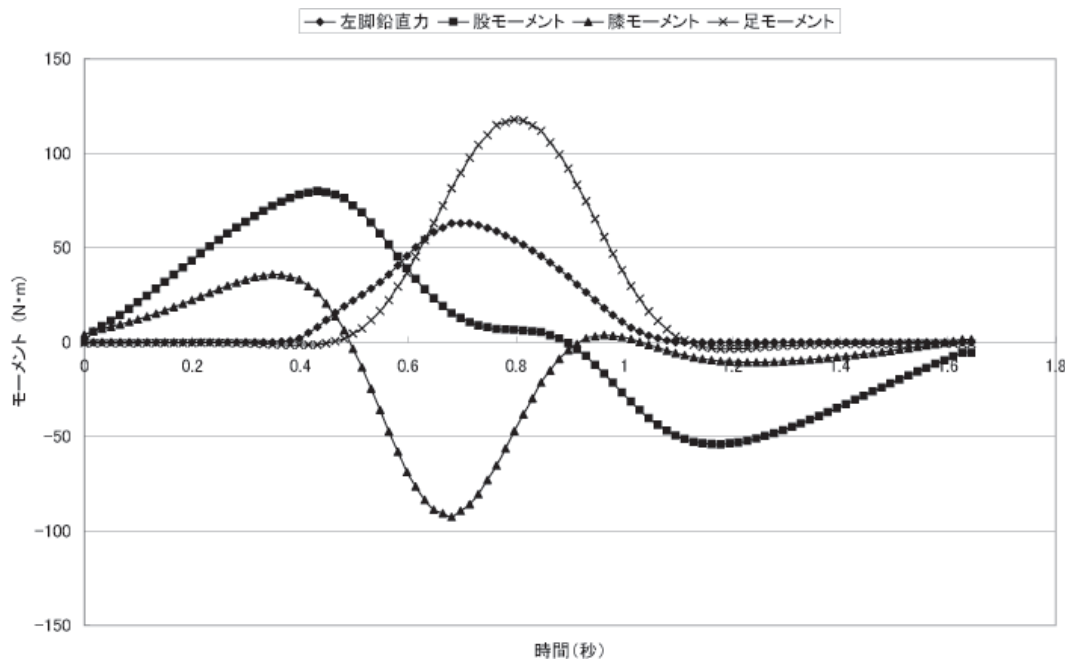


図3 人間の走行の際のモーメント(トルク)の時間変化

更に、その後の非接地時には大きく角度を狭める。股関節はこれとは異なり、接地時にプラスからマイナスへ大きく変化する。このことから、次のことが言える。つまり、走行に関しては、膝がクッションの役目を果たし主に上下運動を生じさせる。これに比して、走行のドライブングフォースは股関節によって行われる。すなわち、接地時に多く角度を変えることで、前進する力の元となる。足の関節の変化の特徴は、接地時以降のマイナスへの変化で、前進する為のキック力となっている。

2-2 トルクの変化

次に各関節のトルク(モーメント)の変化を見てみよう。接地時にピークがあるのは膝関節と足関節であるが、ピークの位置は微妙に異なる。まず足関節からいうと、接地時の少し前に大きなトルクがかかっていることがわかる。これは接地に際してのバネの役割を果たす際に、地面への緩衝となる為に前倒しで力がかかった形になっていることを示している。次に足関節は膝関節よりも大きなトルクがかかっている。更にそのタイミングは接地時から遅れた時間にピークがある。これは接地後に前進する為に後押しの形で力を働かせている結果と言える。

一方、腿関節の接地時のトルクはあまり大きくなく、むしろゼロに近いとさえ言える。簡潔に表現するなら、腿関節のトルクは接地時にはゼロに近く慣性力によって動き、前と後ろのターンオーバーの時にトルクが最大になっていると言える。

2-3 垂直運動について

垂直方向の運動を調べるために、重心の上下位置をプロットしたものが図4である。被験者は身長 175cm であるが、その重心の位置の平均は 92.5cm のところにあり、その上下 3.5cm の幅で単振動を起している。この運動をフィッティングするときれいに \sin 関数に乗ることがわかった。すなわち、上下運動については、主に膝関節を使ったばねの運動として理解することができる。

運動の動力学を考える時に、FRF (Floor Reaction Force) あるいは GRF(Ground Reaction Force) と呼ばれる地面から受ける力は重要な要素となる。モーションキャプチャにおいては、床に測定器を置きこの力を直接計っているが、理論的にはこれは重心が受ける力と同じであり、これが再現できているかどうかの一つのポイントと言える。このことを確認したものが図5である。計測した重心の加速度の変化と重力加速度に体重をかけたものと FRF を重ねてプロットした。その結果、重心が受ける力と FRF が等しいことが確認された。

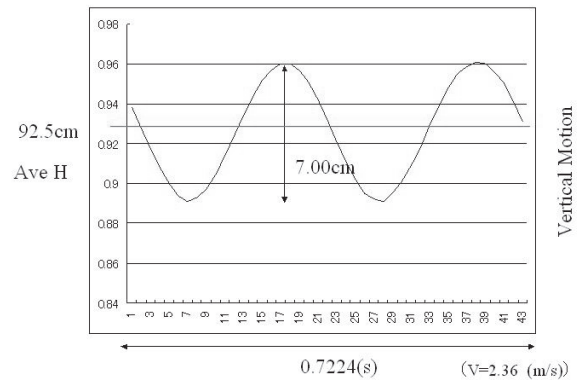


図4 重心の上下運動の時間変化

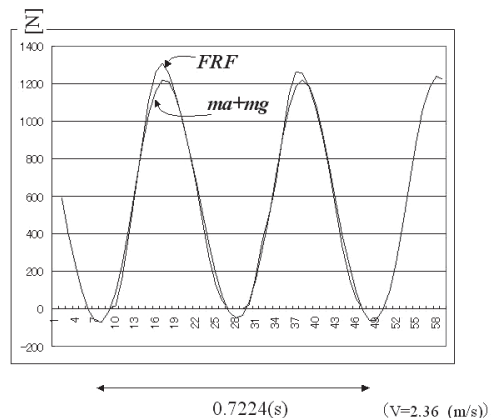


図5 床反発力 (FRF) と加速度などとの比較

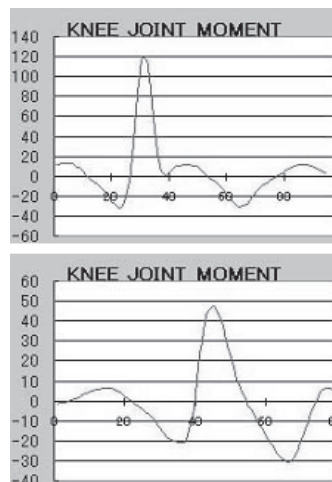


図6 歩行と走行のモーメントの比較

表1 人間とT-rexの歩行・走行の比較

	Man Adult walk	Man adult run	Man child sprinting	Man adult sprinting	T-rex walk	T-rex run	T-rex sprinting
stride (m)	0.515	0.855	1.280	1.850	1.674	2.781	6.010
pitch (1/s)	1.936	2.770	3.890	4.310	1.936	2.770	4.31
speed (m/s)	0.997	2.368	4.979	7.974	3.241	7.703	25.903

また、ハッチンソンの仮定(3)、走行の中間姿勢の鉛直方向にかかる力は体重の重力の2.5倍という仮定についても調べてみた。図6に歩行時と走行時の力のモーメントを示してある。この図を読み取ると、歩行時の鉛直方向の力は体重にかかる重力とほぼ等しく、更に、走行時はその2.6倍であることがわかった。このことにより、ハッチンソンの仮定(3)は妥当であることが検証された。

2-4 人間の走行とT-rexの走行

T-rexの走行と人間の走行の詳細を考える前に、T-rexの走行の概要を把握しておくことにする。平均的な人間が歩く場合と軽くジョギングする場合、更に全力で走る場合の歩幅とピッチ、スピードを表にした(表1)。T-rex

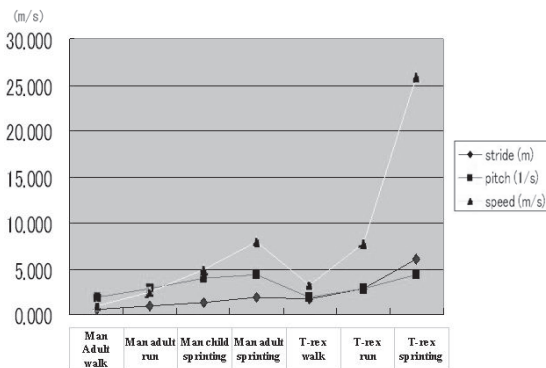


図7 人間とT-rexの歩行・走行の比較

のピッチは分からないので仮に人間と同じものと仮定し、歩幅だけT-rexの骨格に合わせて大きくしたものを表1の載せた。また、この結果をグラフにしたものが図5である。これらにより、T-rexが軽くジョギングすると、人間の全力疾走と同程度の秒速7.7m/s程度で走ることがわかる。また、仮に人間と同じピッチがであるとすると秒速26m/s、時速93Kmで走ることとなる。

2-5 ハッチンソンの結果に対する疑義

ここまでの検証で、ハッチンソンの仮定(2)は妥当であることが示された。ここでは(1)の仮定、中間姿勢が図1のようなものであるかどうかの検証を行う。

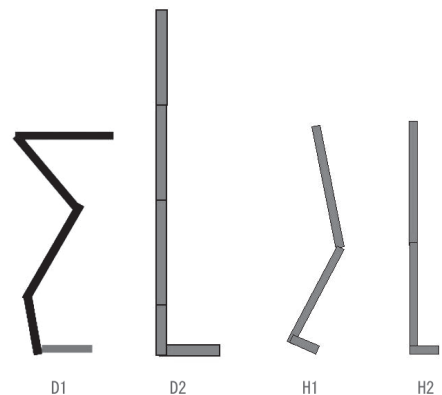


図8 D1:ハッチンソンの中間姿勢(T-rex)、D2:それを直立させたもの。H1:人間の走行(ジョギング)の中間姿勢、H2:それを直立させたもの。

図8がハッチンソンの仮定した中間姿勢を直立させたもの(D2)である。比較として、人間の走行(ジョギング)の中間姿勢と直立させたものを示した(H1, H2)。これらを比較してみると、明らかにハッチンソンの仮定した中間姿勢を深く屈み過ぎであるように思われる。

それでは、正しい走行の姿勢はどのようなものであろうか?このことを追求する為に次節で示す研究を行った。

3. 人間の走行の理論的分析

3-1 人間の走行姿勢はどのように決まっているか?

ここで、走行の姿勢を決める要因は何かという問題について考察する。T-Rexに行く前に、結果がわかっている

人間の場合で考察する。

走行を含む運動の姿勢は果たしてどのような要因で決まっているのだろうか？このことについての決定的な答えは未だ知られていないように思われるが、いくつかの第一原理を考えることができる。

- (a) エネルギー最小原理
- (b) トルク最小原理
- (c) エネルギー+ α の最小原理
- (d) 一義的に決まる
- (e) 一義的には決められない。

(a)-(c)の発想は容易なので、これらに関する研究はこれまでにも多数存在するものと思われる。また筆者らの研究においても、今後研究する予定である。人間の足に関しては、関節の数が3と少ない為、走行の姿勢は一義的に決まってしまうのではないかとすることも考えられる。このことを追求する為に、次のような計算機実験を行った。

3-2 人間の走行姿勢の再現

図4にみられるように重心の上下運動はごくわずかである。すると全体から見ると走行において体全体はほぼ水平に直進運動を行い、それを実現するような足の動きがなされているということが考えられる。このことを調べてみる為に次のような仮定をおいて計算機実験を行った。

- (I) 重心の移動はほぼ等速直線運動である。
- (II) 足が水平に地面に接地する時間がある時間間隔で実現されている。
- (III) 重心の鉛直方向の距離は一定とする。
- (IV) 足の接地時間と体軸からの距離の和を評価値とする。
- (V) 足の運動をフーリエ級数展開で表し3次までをとる。
- (VI) 最初にフーリエ係数として最初に乱数を与え、上記(I)-(V)の条件の範囲の運動を調べる。

この結果を図9に示す。モーションキャプチャをフーリエ分解した係数との近さを白棒で、評価値の大きさを黒棒で示す。シミュレーションは1000個の試行について行い、その中で評価値が最も大きいところの結果を

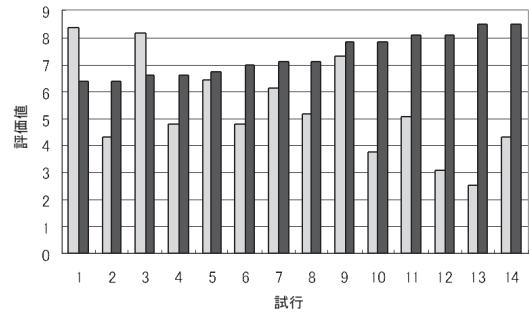


図9 (I)-(VI)の考えに基づいて行った計算機実験。黒棒は評価値の大きさ。白棒はフーリエ係数の近さを表す。

示してある。この結果から評価値を(IV)とするだけで、フーリエ係数が最も近い運動、すなわち走行の運動様式を再現してしまうことがわかった。つまり、(a)-(e)の原理の中で、(d)だけで再現できることがわかった。この結果と(a)-(c)との関連は今後追求する予定である。

4. T-Rexの走行姿勢の再現

人間の走行原理の一端はわかったことが前節で示された。それではT-Rexの場合はどうであろうか？残念ながら、T-Rexの場合は関節の数が人間よりも1つ多い為に、(d)の原理が適用しにくいように思われる。結果的に(e)のような不定問題、ある原理からは決められないということになるのかも知れない。このような一つの原理からの運動の再現は今後の課題である。

唯一の解を定めることはできないが、近似的に、上記の延長でT-Rexの走行様式の候補を定めることは可能である。



図10 ハッチンソンの中間姿勢を仮定した走行姿勢。この走行姿勢はあまりにも膝を屈め過ぎると考えられる。



図 1 1 人間の走行を参考にした T-Rex の走行姿勢。

そのような可能性の中の1つの軌道を図 1 1 に示した。人間の場合との違いは関節の数が1つ増えたことと、中間姿勢の高さの調節である。ここで中間姿勢の高さは人間の走行に近い値を候補として選んだ。

表 2 中間姿勢の関節モーメント

	関節モーメント(103 N・m)	
	ハッチンソン	浅い角度
第一関節	17.8	18.9
第二関節	72.3	51.1
第三関節	27.2	4.1
第四関節	48	4
合計	165.3	78.1

この表を見ると、中間姿勢の関節モーメントはハッチンソンの計算の半分以下になる。



図 1 2 人間の走行と T-rex の走行の比較。人間の走行は筆者が2 3号館前をかなり力を入れて走ったもの。T-rex の走行はジョギング程度の走行であり、これらの速度の比較は表 1 にある。また、このような場合の中間姿勢の関節モーメントは表 2 にある。

以上をまとめて人間と T-rex の走行のアニメーションを合成したものを図 1 2 に示す。T-trex の走行のアニメーションは現在ではいくつかのものが公表されているが、それらは T-rex 単体のものであり、大きさのスケール感がいまひとつつかめない。そこで、筆者が実際に2 3号館の前をかなり力を入れて走ったものと、T-trex が軽くジョギングをする程度の走行をしたものとを合成した結果を示す。このように合成したアニメーションを作成すると大きさのスケール感とスピード感がわかるようになる。T-trex が走る場合の特徴は、全体が大きいかかわらなく、上下方向の運動はほぼ人間と同じようなものなので、全体から見ると上下方向の移動がほとんど感じられない点である。その結果、T-trex の体は上下運動をせずに一直線に運動するように感じられる。ここで中間姿勢の関節モーメントを求めると表 2 のようになった。

5. 恐竜ロボットの脚部の試作

T-Rex の動きを再現するために、実際の T-Rex にできるだけ忠実なプロポーションを持った恐竜ロボットを試作する。ただし、原寸大のロボットを作るのは難しいので、実際のスケルトン模型から求めた寸法比を保ちつつ、実現可能な大きさまでスケールダウンしたものを考える。

今年度は動きを再現する際に要となる脚部の試作を試みた。ただし、実際の歩行を追求すると、アクチュエータの性能などから忠実なプロポーションを実現するのは難しくなるので、ここでは歩行動作を実現することに重点を置いている。

5-1 仕様

すでに述べたように実際の T-Rex の脚は4関節あるた

め、本ロボットはこれを再現するために4関節とし、根元から順に1~4関節とする。実際のT-Rexの動きを出るだけ再現できるように第1関節はPitch軸とRoll軸の2自由度、第2~4関節はPitch軸のみの1自由度とする。

横方向からみた全体を表したリンク図を図13に示す。第1関節から第4関節に向かって下に順を追ってPitch軸の関節を①~④とする。また、股関節の左右方向に動くRoll軸の関節を①'とする。各関節の駆動角度は、シミュレーションなどから、表3のようにする。

各リンクの寸法は、スケルトン模型の計測より、各リンクの比率 $L_1 : L_2 : L_3 : L_4$ を $9 : 9 : 5 : 4.5$ とし、全長がほぼ1mになるように

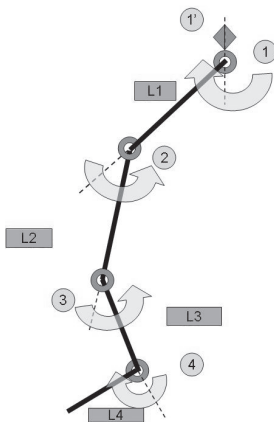


図13 恐竜ロボットの脚部のリンク図

$$L_1=0.330\text{m}$$

$$L_2=0.330\text{m}$$

$$L_3=0.183\text{m}$$

$$L_4=0.165\text{m}$$

と決定し、全長は1.008mとなる。

表3 各関節の駆動角度

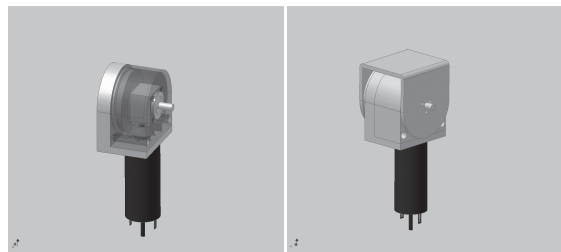
関節	駆動角度
①'	-5 ~ 5 [deg]
①	-20 ~ 20 [deg]
②	0 ~ 80 [deg]
③	0 ~ 30 [deg]
④	-50 ~ 0 [deg]

5-2 直交変換装置の導入

通常、ギヤ付きモータは全長が長くなるため、これをそのまま用いるとモータが脚部から飛び出した形状になってしまう、実際の脚部の形状と大きく異なってしまう。また左右の脚のモータが接触してしまうおそれもある。このため直交変換装置を用いて駆動装置を直線上に設置することが必要になる。

通常よく使う直交変換装置はギヤ付きモータをベベルギヤやスパイダルベベルギヤで直交変換するものであるが、ギヤの減速比が大きいとギヤの許容トルク以上の大トルクがギヤにかかってしまったり、モータの軸径がギヤとあわなかったりして、市販されているものでは適当なものがみられなかった。

そこで本研究ではスパイラルベベルギヤとハーモニックギヤを組み合わせた直交変換装置を試作した。この直交変換装置ではモータの回転をスパイラルベベルギヤで直交変換した上でハーモニックギヤで減速する構造となっている。このためスパイラルベベルギヤに大きなトルクがかかるのを防ぐことが可能になる。さらに図14に示すように両持ち構造にし、コンパクトな構造としている。このため軸径が大きなモータでも対応でき、ハーモニックドライブを用いているためバックラッシュがないなどの特長も持っている。



(a) スケルトン図

(b) 外形図

図14 試作した直交変換装置

5-3 モータおよびギヤの選定

リンク部には厚さ3mmで50×50mmの正方形断面のアルミ角柱(JIS5052)を用いる。最大で1秒間に2.5往復の走行が可能ないように計算によって求めた必要な最大トルクと必要回転数は表4のようになる。なお第2~4関節の必要トルクは負荷が最大となる水平方向の場合で算出を行っている。

表4 必要トルクと必要回転数

関節	必要トルク[Nm]	必要回転数[rpm]
①'	2.342	13
①	7.410	52
②	7.464	105
③	1.909	39
④	0.195	65

表4に対して、モータ及びギヤの選定を行った。モータは種類が豊富でロボットなどへの使用実績も多いmaxon社のものを選定した。一番トルクが必要で、高い回転数も要求される第2関節については1つのモータでは仕様を満たすことが困難であったので2つのモータを用いることにした。またドライバやカバーをアルミフレームに取り付けることにし、将来的には外皮なども取り付けることを想定して、必要トルクの1.5倍以上のトルクが得られるように選定した。モータおよびギヤの選定結果を表5に示す。第1関節はハーモニックギヤのみを用い、第2関節は5-2の直交変換装置と原理は同じで2つのモータでスパイラルベベルギヤを回転させた上にハーモニックギヤを用いる構造にしている。また第3～5関節は5-2に示した直交変換装置を用いており、トータルギヤ比は50:1～100:1となっている。得られる各関節のトルクと回転数を表6に示す。表4と比較して回転数、トルクとも十分であることがわかる。とくにトルクは第1関節のPitch軸が必要トルクに比べて1.61倍になっている以外はすべて2.5倍以上になっていることがわかる。

5-4 脚部の試作

試作した恐竜ロボットの脚部の外形図及び写真を図15、16に示す。第1関節はPitch軸およびRoll軸の2軸から構成されており、第2関節はひとつのスパイラルギヤを2つのモータで回す構造になっている。第3、4関節はそれぞれPitch軸のみの構成になっている。図15でアルミのフレームについているのは各モータのドライバであり、図16の実際の試作機ではすべてカバーがついている。

表6 得られるトルクと回転数

関節	トルク[Nm]	回転数[rpm]
①'	6.000	160
①	12.000	80
②	21.600	160
③	4.752	133
④	1.123	117



図15 恐竜ロボットの脚部の外形図

表5 モータ及びギヤの選定

	モータ	スパイラルギヤ	ハーモニックギヤ	トータルギヤ比
第1関節 Roll	RE40 150W	—	50:1	50:1
第1関節 Pitch	RE40 150W	—	100:1	100:1
第2関節 1	RE40 150W	2:1	50:1	100:1
第2関節 2	RE40 150W	2:1	50:1	100:1
第3関節	RE35 90W	2:1	30:1	60:1
第4関節	RE25 20W	2:1	30:1	60:1



図16 試作した恐竜ロボットの脚部

試作した恐竜ロボットの脚部の制御システム構成図を図17に示す。各関節のモータは24V電源にて駆動される。各関節には最終段にポテンシオメータが取り付けられており、初段（モータの出力軸）にはエンコーダが取り付けられている。エンコーダのスリット数は第4関節のみ100でそれ以外は500となっている。6枚のモータコントローラはUSB-HUBを通じてパソコンへ接続されている。

試作した恐竜の脚部ロボットをシミュレーション通りに動かす作業は現在進行中である。

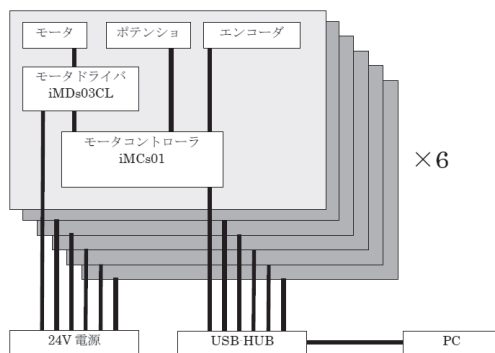


図17 恐竜ロボットの脚部の制御システム構成図

Appendix

Trex の走行に関してはハッチンソンの論文 (Hutchinson & Garcia 2002) 以降、走れるとした論文も提出されている (Sellers *et al.* 2003, Sellers *et al.* 2004, Sellers *et al.* 2005)。

参考文献

- Hutchinson, J. R. & Garcia, M. 2002 Tyrannosaurus was not a fast runner. *Nature* 415, 1018–1021.
- Sellers, W. I. & Paul, G. S. 2005 Speed potential of giant tyrannosaurs. *Artif. Intell. Study Behav. Q.* 121, 3.
- Sellers, W. I., Dennis, L. A. & Crompton, R. H. 2003 Predicting the metabolic energy costs of bipedalism using evolutionary robotics. *J. Exp. Biol.* 206, 1127–1136.
- Sellers, W. I., Dennis, L. A., Wang, W. & Crompton, R. H. 2004 Evaluating alternative gait strategies using evolutionary robotics. *J. Anat.* 204, 343–351.