T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	4足歩行ロボットTITAN XIIの開発と大型障害物踏破力学の基本的検討
Title(English)	Development of Quadruped Walking Robot TITAN XII and Basic Consideration about Mechanics of Large Obstacle Climbing
著者(和文)	小松洋音, 尾形勝, 程島竜一, 遠藤玄, 広瀬茂男
Authors(English)	Hirone Komatsu, Masaru Ogata, Ryuichi Hodoshima, Gen Endo, Shigeo Hirose
出典(和文)	, , , pp. 496-502
Citation(English)	, , , pp. 496-502
会議名称(和文)	第17回ロボティクス・シンポジア
ConferenceName(English)	
発行日 / Pub. date	2012, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

4足歩行ロボットTITAN XIIの開発と大型障害物踏破力学の基本的検討

○小松洋音[*1]，尾形勝[*2]，程島竜一[*3]，遠藤玄[*1]，広瀬茂男[*1]

Development of Quadruped Walking Robot TITAN XII and Basic Consideration about Mechanics of Large Obstacle Climbing

Hirone KOMATSU[*1], Masaru OGATA[2], Ryuichi HODOSHIMA[*3], Gen ENDO[*1] and Shigeo HIROSE[*1]

[*1] Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan
[*2] Canon Co. Ltd.
[*3] Department of Mechanical Engineering, Saitama University, Shimookubo 255, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 328-8570, Japan

Quadruped walking robots are expected to be utilized for several works on rugged terrain because of its high terrain traversability. In this paper, we propose a quadruped walking robot "TITAN XII" to traverse on large obstacles and discuss its design concept and system integration. Then we show the result of large step climbing experiment by TITAN XII. Furthermore, in order to establish the basis of gait control of quadruped walking robots on large obstacles, we make simulation experiments about body rising motion. We investigate the appropriate foot positions and horizontal internal forces which eliminate negative power consumption, then optimize the motion in consideration of the actual characteristics of the installed actuator.

Key Words : Quadruped Walking Robot, Active Ankle Mechanism, Body Rising Motion

1. は　じ　め　に

4足歩行ロボットは,

1. 常に静的安定性を保ちつつ移動が可能な最少脚本数であり，軽量かつ簡素な構成である
2. 接地点でスリップすることなく全方向に移動することが可能である
3. 3脚で接地して1脚の先端に作業用ツールを取り付けることで不整地で作業を行うことができる

などの特徴があり，不整地において物資運搬，建設，地質調査，レスキューなど様々な作業を行うのに適していると考えられ，長年に渡り研究が行われている[(1)]．しかし，これまでに平地や斜面などの比較的平坦な環境における歩行の研究は盛んに行われているものの，車輪やクローラなどの従来型移動機構と比べて歩行ロボットの有効性が発揮される，大きな起伏の存在する環境の踏破に関する研究はまだ十分に行われていない．

近年アメリカではLittleDogと呼ばれる小型4足歩行ロボットを用い，ロボット本体と比べて比較的大きな起伏が存在する環境の踏破に関する研究が複数の大学で行われている[(2)]．また我々は急斜面において崖崩れ防止工事を行うための全重量7000kgの大型4足歩行ロボットTITAN XIを開発している[(3)]．しかし，LittleDogのように小型のロボットを利用して得られた知見は，強度が断面積 (代表長さの2乗) に比例するのに対して質量は体積 (代表長さの3乗) に比例するといういわゆる2乗3乗則から，作業用機器を積んだ大型の歩行ロボットに直接利用することは危険であると考えられる．例えばLittleDogの脚先は球状であるが，これを大型の4足歩行ロボットにそのまま用いようとすれば接地圧，安定性などの問題が生じるだろう．また，TITAN XIはワイヤで自重を支持しているため歩容制御則は平地での移動と比べて大差ない．

したがって将来的に大型の4足歩行ロボットを実現するためには，まずサイズがある程度大きい4足歩行ロボットを試作して問題が生じないかを動作実験により検証することが必要である．また，大型障害物を乗り越えるための歩容の検討は筆者らの知る限り全く検

[*1] 東京工業大学大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 I1-52）{komatsu, endo, hirose}@robotics.mes.titech.ac.jp
[*2] キヤノン (株)
[*3] 埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門（〒 328-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255）hodoshima@mech.saitama-u.ac.jp

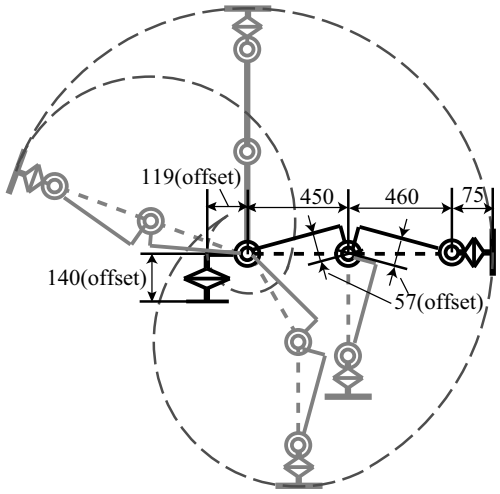


Fig. 1　Workspace of Leg

討されていないため，新たに検討する必要がある．

このような理由から，我々は新たに大型障害物踏破実験用 4 足歩行ロボット TITAN XII を開発することにした．本稿では，まず TITAN XII の設計，及びシステム構成について報告する．そして試作した TITAN XII 実験機により段差踏破実験を行い TITAN XII の基本性能の確認をする．さらに 4 足歩行ロボットが大型障害物を乗り越えるような基本的にエネルギ消費を伴う動作を効率よく行うための基本的考察を行う．

2. TITAN XII の開発

2·1　脚機構

2·1·1　脚の構成　　大規模な凹凸環境に対応するには脚の可動範囲を十分大きくすることが望まれる．これまで開発されてきた 4 足歩行ロボットでは直動関節を使用している例が多数あるが [(1) (4)]，直動関節で十分な可動範囲を確保するためには長いストロークが必要となり，機構の重量化，大型化を招くため問題となる．したがって，TITAN XII の脚は 4 足歩行ロボットの脚構成として一般的な 3 自由度シリアルリンク機構を採用し，十分な関節可動範囲を確保するために関節 2,3 にはオフセットを設けることにした．Fig.1 に TITAN XII の 1 脚の構成と脚の到達可能範囲，Fig.2 に実際に製作した脚の様子および関節可動範囲を示す (なお Fig.1 では各関節を直線的に結ぶ仮想的なリンクを考えている)．このように TITAN XII は胴体下部から上部にかけて広い範囲に到達できるようになっている．

2·1·2　駆動系　　我々は静的安定余裕を重視して昆虫型脚配置を採用しているが，この脚配置では関節 2 で大きな力を負担することになる．また，凹凸の激しい環境を歩行する場合には地形に合わせて胴体姿勢を変化させつつ移動する必要があるため，平地歩行とは

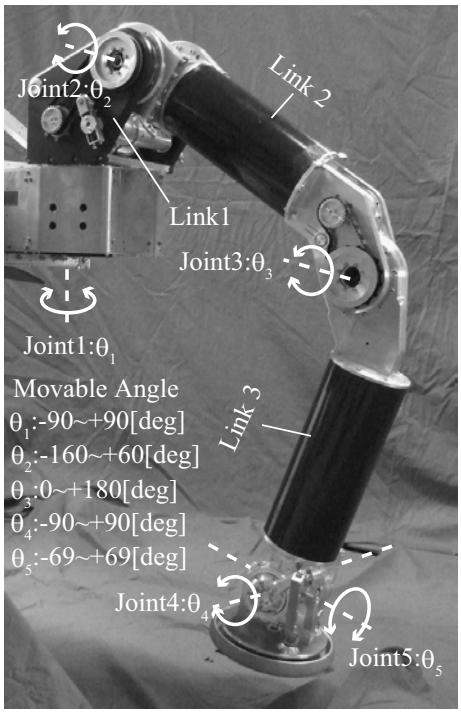


Fig. 2　Leg mechanism of TITAN XII

異なり関節 1 でも力を負担することが必要となる．したがって，関節 2 の出力は大きくし，関節 1，関節 3 は関節 2 ほどではないがある程度の出力が必要となる．

そこで各関節駆動用アクチュエータとして，関節 1，関節 3 に 150W DC モータ (Maxon RE40:148877) を 1 つずつ，また関節 2 では関節構造の重量化，大型化を防ぐため同型のモータを左右に 1 つずつ計 2 つ使用した．また，主減速機構としてハーモニックドライブを使用している．モータは各関節付近に配置することにし，モータの出力はタイミングベルト・プーリによりハーモニックドライブに伝達している．脚の軽量化のために材料として，リンク部には CFRP パイプを用い，その他の構造部には強化アルミを，一部にはユニレート®を用いて軽量化を実現できるようにした．

2·2　足首機構　　4 足歩行ロボットが不整地で安定な歩行を実現するためには，足首機構により，(1) 脚先を路面に適応させる，(2) 足裏面積を有効に利用するために足首で転倒モーメントに対抗するトルクを生成する，という能力が必要である．これらを同時に満たすためには能動足首が適していると考えられる．我々は多足歩行ロボット用の能動足首をこれまでに開発しており [(5)]，TITAN XII はこの能動足首を搭載している．以下に設計の要点をまとめる．

1. 軽量化：脚を素早く振る必要があるために脚先慣性は小さい方が良い．軽量であるためには搭載するアクチュエータ数を最小限にすべきである．4 足歩行ロボットでは路面法線方向の姿勢はあまり

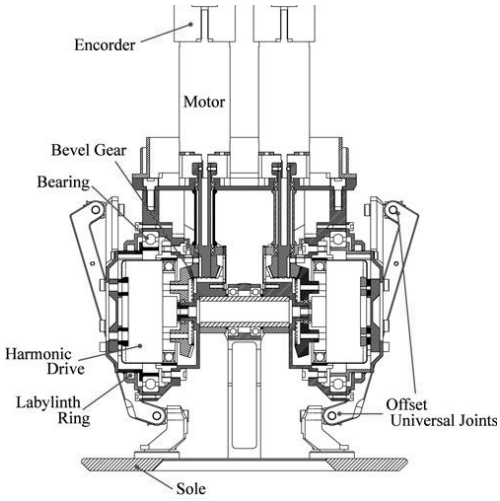


Fig. 3　2DOF active ankle mechanism

重要ではないので，2 自由度を能動的に駆動し，残り 1 自由度は受動対偶による構成で問題ない．

2. 可動範囲の確保：市販のユニバーサルジョイントやボールジョイントは可動範囲が非常に限られているため，Fig.3 に示すようにオフセットされたユニバーサルジョイントを設計した．これと足首機構の中央部をえぐりこむことでリンクとの干渉を避け Fig.4 に示すように広範な可動範囲を確保している (ただし，Fig.4 の矢印は左右のアームの回転方向を表す).
3. 強度：自重や歩行時の衝撃に耐えられる構成でなければならない．そこで並進力は中央部のユニバーサルジョイント部で支持し，モーメントはアクチュエータで支持する構成とすることで大きな荷重に耐え得るようにした．

実際に設計した足首機構を Fig.3 に示す．左右のアームを足首の回転中心と同軸に設けたことで左右のアームの角度差によりロール軸の角度が決定され，和によってピッチ軸の角度が決定される一種の差動機構となっている．アクチュエータとしては 60W DC モータ (Maxon RE30:310009) を計 2 つ搭載しており，モータ出力は傘歯車とハーモニックドライブで減速している．また，防塵対策として駆動系全体が覆われることで露出を少なくし，摺動部はラビリンスリング、シールドベアリングを用いている．

2·3　TITAN XII の仕様　以上の検討を基に 4 足歩行ロボット TITAN XII を製作した．Fig.5 に概観を，Table.1 に基本仕様を示す．制御回路は胴体に格納される構成となっている．また，PC，電源は外部に設置してある．

2·4　制御システム構成　Fig.6 に TITAN XII の制御システム構成を示す．まず，外部に設置した PC 上で動作するソフトウェアで歩容計画を行い，最終的には時々刻々の関節指令値を生成する．このソフトウェアは，CG によるロボット動作の確認，ロボットの動作の選択，開始，停止などの操作を行うユーザインターフェースが構築されている．関節のローカルなフィードバック制御としては SH2 マイコンにより角度検出用センサの信号を読み取り PID 制御を行っている．PC と SH2 マイコン間は RS232 で通信を行い，SH2 同士は HCAN で通信する接続方式とした．1 つの SH2 マイコンを RS232-HCAN 変換用のゲートウェイとして用いている．SH2 マイコンは関節角度の制御用に 1 脚

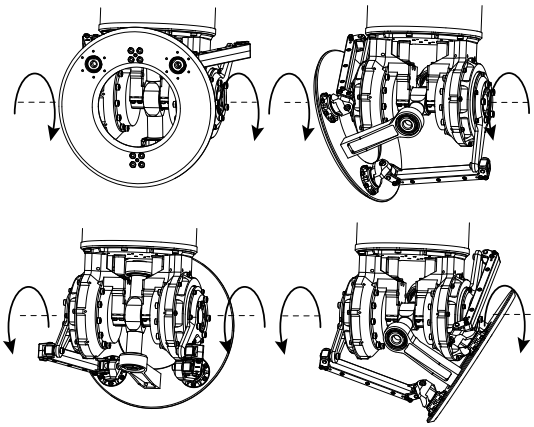


Fig. 4　Workspace of 2DOF active ankle mechanism

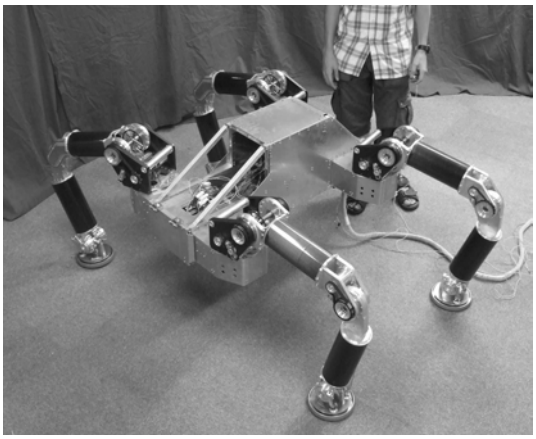


Fig. 5　Overall view of TITAN XII

Table 1　Specification of TITAN XII

Size[mm]	L:1061×W:1698×H:645.5
Weight[kg]	Aprox.100
DOFs per 1Leg	Limb:3, Ankle:2
Motor	Joint1∼3 150[w] Joint4,5 60[w]
Reduction Ratio	Joint1∼3 294.5:1 Joint4,5 150:1
Max Leg Vertical Force	over 50[kgf](Constant)
Max Leg Horizontal Velocity	1.5[m/s] (Theoretical Value)

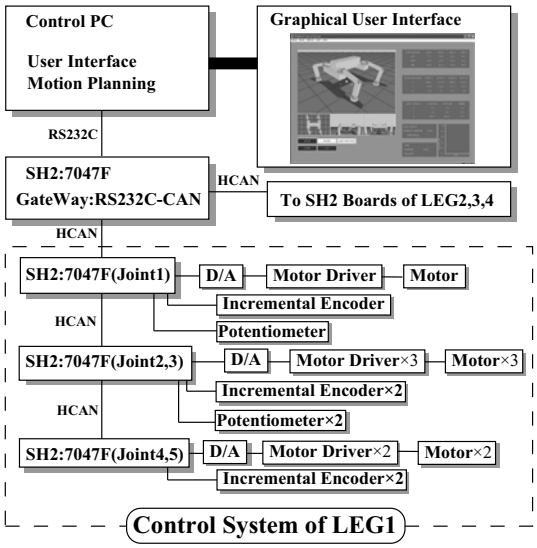


Fig. 6　Control system

につき 3 台使用しており，ゲートウェイも含めて計 13 台使用している．PC 指令の制御周期は 20msec，SH マイコンの制御周期は 1msec である．

関節角度の検出は DC モータに直結したインクリメンタルエンコーダを用いている．また，関節角度の絶対位置を決定するために関節 1∼3 では関節出力側にポテンショメータを，能動足首機構では初期姿勢で，電源投入時にエンコーダ値を初期化している．

モータドライバ回路は，150W モータ用に Titech Driver Ver.1（最大出力電圧 (連続)45V，最大出力電流（連続）16.7A）を，60W モータ用に Titech Driver Ver.2（最大出力電圧 48V，最大出力電流（連続）10A）を用いている．また，使用したモータドライバはいずれもアナログ入力であるため，SH2 からデジタル出力信号をローパスフィルタを通してアナログ信号に変換している．

3. 段 差 踏 破 実 験

開発した TITAN XII の基本性能を検証するために胴体姿勢変化を伴う段差乗り越え実験を行った．段差高さは，平地歩行時の基準姿勢，すなわち膝を 90 度曲げた歩行では乗り越えが困難な高さである必要があるため，ここでは高さ 560mm のステップ状段差とした．

まず，段差踏破を行う前の予備実験として基本的な動作である，胴体上昇，胴体傾斜，平地歩行の動作実験を行い，いずれも安定に実現可能であることを定性的に確認した．

段差踏破実験の様子を Fig.7 に示す．一連の動作は約 240[sec] かけて実行した．このように能動足首を用いて脚先を路面に沿うように適切に変化させることで胴体姿勢を変える必要がある動作でも安定に移動可能



Fig. 7　Large step climbing experiment

であることが確認できた．本実験により，TITAN XII が高度な凹凸が存在する環境を静的安定性を保持しつつ踏破するための基本的性能を有することを定性的に確認できた．

4. 大型障害物踏破力学に関する基礎的考察

4·1　歩行動作のエネルギ特性　脚の質量が無視できる歩行ロボットが地面を一定高さで等速に移動する地上歩行の場合，脚先で発生する力と速度の方向は互いに直交するため，理想的には全くパワーを必要としない．つまり，各関節のアクチュエータが発生するパワーが全てゼロという状態でないかぎり，正･負それぞれのパワーを発生する関節が混在する．負のパワー消費とは外部からアクチュエータにパワーが供給されている状態である．しかし，歩行ロボットは重量化・構成の複雑化の問題から回生システムの搭載が困難であり，負のパワーは多くの場合回生できずに熱として散逸されてしまう．つまり，負のパワーの発生は移動に必要のない本質的に無駄なエネルギ消費である．このように負のパワー消費はエネルギー効率の低下につながるため，我々は水平方向速度生成のため速度のみを生成する関節と，鉛直力生成のためトルクのみを生

成する関節に分離する GDA(Gravitationally Decoupled Actuation) を提案し，歩行姿勢により GDA を実現する方法について検討している [6].

一方，Fig.7 のような大型障害物踏破を考えると，胴体上昇分だけポテンシャルエネルギが増加しているため，本質的にエネルギ消費を伴う動作であることが分かる．すでに述べた地上歩行というエネルギ消費が理想的にゼロの動作では正・負の符号が異なるパワーを消費する関節が混在していたが，本質的にエネルギ消費が必要な動作時に各関節の消費パワーをどのように変化させる動作が望ましいかに関しての検討は筆者らの知る限りこれまでに行われていない．そこで，本質的にエネルギ消費を伴う運動として最も単純な，4 脚で接地して胴体を上昇させる Fig.8 に示す「立ち上がり動作」を解析することによって，大型障害物踏破歩容生成の基礎を確立する．

4·2　脚幅と消費エネルギ　　立ち上がり動作時に変えられるパラメータとしては接地時の脚先位置，すなわち脚幅が考えられる．ここでは 4 足歩行ロボットが Fig.8 のように脚を胴体の真横に張り出し 4 脚接地した状態でロボットが一定速度で脚鉛直方向距離を $H_0 = 0.3$[m] から $H_1 = 0.7$[m] まで変化させることで胴体を 0.4[m] だけ準静的に上昇するような立ち上がり動作を行った場合に，脚幅を変化させたときの関節での機械的消費エネルギ変化について解析した．解析には動力学シミュレータ Open Dynamics Engine(ODE) を用いた [7]．解析用モデルは脚質量が無視でき，TITAN XII と同サイズ，重量の 4 足歩行ロボットとする．ここでは 1 脚が負担する力は均等に自重の 1/4 である 245[N] で，4 脚とも動作条件が全く同じであるとし，1 脚における消費エネルギ変化のみを調べて 4 倍することで 4 脚での消費エネルギを求める．脚幅を表すパラメータ y は，関節 2 から脚先までの水平距離（外側に正，内側に負）を第 2 リンク長 l で正規化した値で表わすことにする．y が負の姿勢は可動範囲，静的安定性など実用上問題があるため，y を正の範囲でいくつか変化させることにした．なお立ち上がり動作中は胴体を常に水平に保つとした．この場合，関節 1，足首ではパワーを負担しないので，以降関節 2，3 の消費エネルギを調べている．

このときの関節 2，3 および全体の機械的消費エネルギを Fig.9 に示す．関節 3 に関しては機械的消費エネルギを正と負の各消費パワーの積分値に分けて表わしている．ここでは負の消費エネルギはゼロとみなし，正の消費エネルギの和を全体の消費エネルギとして算出している．Fig.9 から y がおよそ $0.95l$ 以上になると負の消費エネルギが発生しはじめ，さらに y が大きくなると負の消費エネルギ生成はより顕著になることが

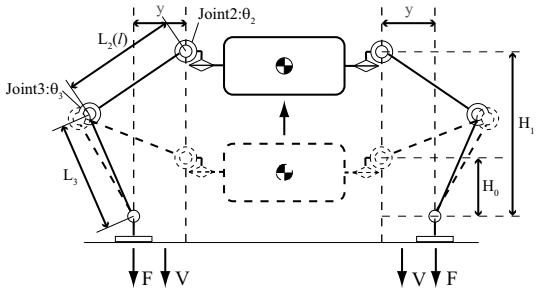


Fig. 8　Body rise motion

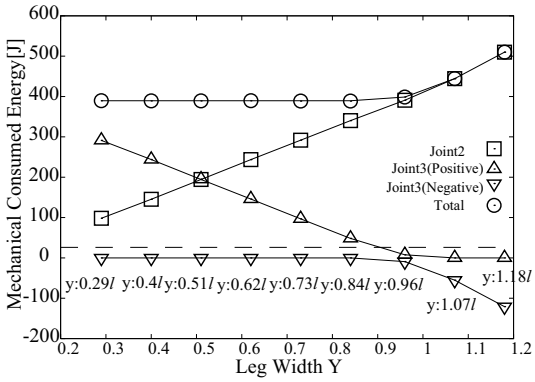


Fig. 9　Energy consumption change by leg width

分かる．これは，y が $0.95l$ 付近になると立ち上がり動作の途中で脚先と関節 3 の水平方向位置が逆になり，トルクの向きが逆転するためである．この解析結果から，立ち上がり動作のように本質的に正の仕事が必要な動作であっても場合によっては負の消費エネルギを生成し，負の消費エネルギの生成を抑えるためには脚先位置をある範囲内（ここでは y が約 $0.95l$ より小さく）にする必要があることが分かった．

4·3　水平方向に内力を負荷したときの消費エネルギ
不整地で移動を行う場合には，ロボットの可動限界，路面形状などの問題から接地可能範囲が限られ，負の消費エネルギ生成を伴う姿勢を取らざるを得ない状況も考えられる．このような場合に，脚先に内力を発生させても Fig.10 に示すように脚先力が摩擦円錐内に収まる範囲であれば脚先で滑りを生じない．すると脚先力の向きと大きさが変化し，各関節のトルク配分も変化するため，関節でのパワー配分を変化させられると考えられる．

そこで，先ほど負の消費エネルギ生成が顕著であった y が $1.18l$ という姿勢での立ち上がり動作において接地面水平方向に負荷する内力を変化させた際の各関節での消費エネルギの変化を調べることにした．前節での解析と同様に鉛直方向の脚先力は 4 脚で 245[N] ずつ均等に出力するものとする．接地面の摩擦係数は 0.4 であるとし，この場合，内力がおよそ 100[N] まで

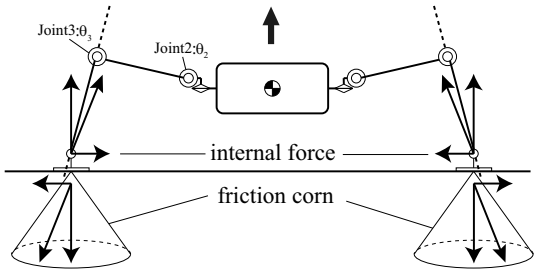


Fig. 10　Body rise motion with horizontal internal force

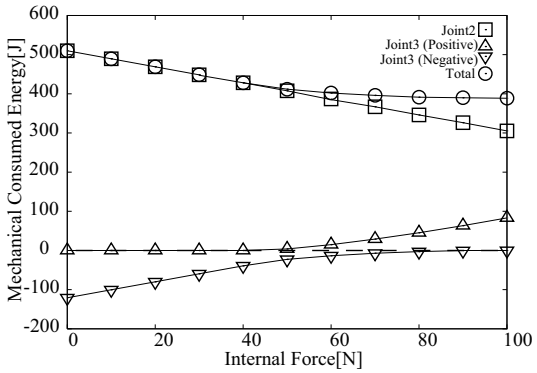


Fig. 11　Energy consumption change by internal force

は脚先での滑りを生じないため，内力無負荷の状態から 100[N] まで 10[N] ずつ変化させ，それぞれの場合について機械的消費エネルギを調べた．なお解析には前節と同様，ODE を用いることとした．

Fig.11 に関節 2,3 および全体の機械的消費エネルギを示す．関節 2 では内力の増加に伴い消費エネルギが低下し，関節 3 では逆に消費エネルギが増加していることが分かる．そして最終的に内力が 100[N] の状態では負の消費エネルギは完全に抑制できていることが確認できるが，内力が 100[N] の状態はちょうど Fig.10 のように表され，内力無負荷の場合に対して関節 2 で負担するトルクは符号一定のまま減少，関節 3 では負担するトルクの符号が変化するように脚先力が生じているためである．以上の解析および考察から，内力を適切に負荷することで負の消費エネルギ生成を抑制し得ることが分かった．

4·4　アクチュエータ特性についての考察　ここまでの考察では負の消費エネルギは回生できないが効率は 100% のアクチュエータを考えていた．しかし実際のアクチュエータでは動作点によって効率は変化する．したがって効率的な動作を行うためには負の消費エネルギ生成を防止することに加えて，効率の高い動作点でアクチュエータを駆動することが必要である．そこでアクチュエータとして一般的に用いられる DC モータを搭載している場合のアクチュエータ動作点による効率までも考慮した最適な立ち上がり動作について以降検討する．

まず DC モータの条件について明確にする．DC モータは構造上発熱量がある閾値以下の動作しか連続して行うことができない．この連続動作が可能な動作領域は，銅損と鉄損，風損などを電気抵抗で表わした等価回路モデルを用いると次式のように楕円領域で表わされる [6] [8]．

$$\frac{R_a}{K^2}{\tau_m}^2+\frac{2R_a}{R_h}\tau_m\omega_m+\frac{K^2}{R_h}\left(\frac{R_a}{R_h}+1\right){\omega_m}^2 \leq \frac{2p_{max}}{\sqrt{1+R_h/R_a}-1} \qquad (1)$$

τ_m はモータトルク，ω_m はモータ角速度，R_a は銅損，R_h は鉄損，風損などを代表する抵抗，K はトルク定数，p_{max} は最大出力を表す．モータ特性は TITAN XII に搭載している DC モータの特性を用いており，$R_a=1.16[\Omega]$，$R_h=667[\Omega]$，$K=0.0603$[Nm/A]，p_{max}=150[W] である（ただし，R_h に関しては DC モータのカタログに記載してある最大効率と銅損から算出している†）．DC モータでの消費パワーは，機械的消費パワーが正の場合には機械的消費パワーと式 (1) 左辺で表わされる DC モータ発熱量の和であり，機械的消費エネルギが負の場合には機械的消費エネルギが回生されないものとし，DC モータ発熱量のみとする．なお，TITAN XII では関節 2 を 150W DC モータ 2 個で駆動しているため，関節角速度，トルクからまず 1 つの DC モータでの消費パワーを算出し 2 倍することで消費パワーを導出している．立ち上がり動作での消費エネルギは 1 脚につき 4 個，計 16 個のモータでの消費パワーの和を積分することで求める．ここでは 4.2 節と同様の立ち上がり動作時に脚幅と胴体速度を変化させた際のロボットの消費エネルギ変化を数値解析ソフトウェア MATLAB を用いた計算機シミュレーションにより調べた．

ここでは脚幅パラメータ y を $0.2l$ から $1.0l$ まで，上昇速度を 0.1[m/s] から 0.9[m/s] まで変化させた場合のシミュレーション結果を Fig.12 に示す（この図ではアクチュエータの限界特性範囲外の値も含む）．Fig.12 から，y は各上昇速度において約 $0.6l$ のときに消費エネルギは最小で，また上昇速度が増加するほど消費エネルギが小さくなることが分かる．また，式 (1) で表わされる発熱に関する制約式とアクチュエータ回転数の上限（最大印加電圧時の最大連続トルク生成可能な最大回転数 7000[rpm]）を拘束条件とし，消費パワーが最小となるパラメータを逐次二次計画法により調べ

†銅損 R_a，最大効率 η_{max}（ここでは 92%）から鉄損，風損などを代表する抵抗 R_h を求める式は $R_h=\frac{4\eta_{max}}{\sqrt{1-\eta_{max}^2}}R_a$ と表わされる [8]．

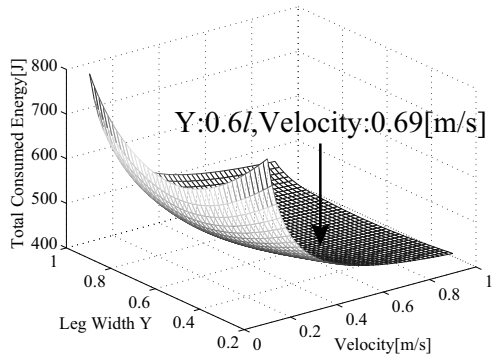


Fig. 12　Actuator consumed energy

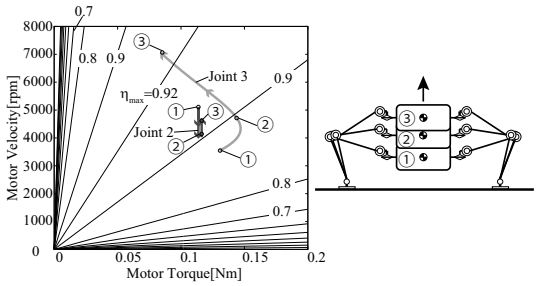


Fig. 13　Trajectory of DC motor operating point

たところ，y が 0.6l，上昇速度が 0.69[m/s] のときに消費エネルギは最小であり，このときの消費エネルギ量は 434[J] であった．このとき立ち上がり動作時のポテンシャルエネルギ増分は 392[J] であることから，平均効率は 90.3% である．また，Fig.13 にこのときのアクチュエータでの動作点の変化およびこのときの立ち上がりの様子を示す．Fig.13 の直線は効率が一定である範囲，直線上の数値が効率を表す．η_{max} は最大効率線である．関節 2，3 ともに比較的効率の高い領域で動作していることが確認できる．

以上の手順により，立ち上がり動作を最適化することができた．この結果から，効率の良い大型障害物踏破を行うための基本的指針として，

1. 適切な脚先位置，脚先力を設定することで関節における負の消費エネルギ生成を防止する．
2. さらに効率が高い動作点でアクチュエータが駆動できるように脚先位置，脚先力，および胴体速度を設定する．

が導かれる．この基本的指針をもとにして今後詳細に大型障害物踏破方法について検討していく予定である．

5. お　わ　り　に

本稿では，まず大型障害物の乗り越えが可能な大型 4 足歩行ロボット開発の背景，不整地歩行が可能な 4 足歩行ロボット実験機開発の必要性について述べた．次に大型障害物踏破を実現可能な 4 足歩行ロボット TITAN XII の機構設計および具体的なシステム構成について論じた．そして，開発した TITAN XII により段差踏破実験を行い，大型障害物踏破を行うための基本的性能を有することを確認した．さらに，大型障害物踏破歩容生成に関する基本的考察としてエネルギ消費を伴う基本的動作である立ち上がり動作の最適化について検討を行い，まず脚先位置，脚先内力の適切な選択により負の消費エネルギ生成を防止し，そのうえで効率の高い動作点にて DC モータ駆動をする，という大型障害物踏破歩容の最適化に関する基本的指針を見出した．

今後は脚長と比較してサイズが大きい段差を踏破対象とし，本稿で述べたエネルギ消費を伴う動作の最適化指針を基礎として 4 足歩行ロボットによる大型障害物踏破歩容生成方法の理論的検討を詳細に行っていく予定である．

参 考 文 献

(1) S. Hirose, T. Matui, H. Kikuchi: “TITAN III: A Quadruped Walking Vehicle -Its Structure and Basic Characteristics-”, Robotics Research(2nd Int. Symp.), The MIT Press, pp.325-331, 1985.

(2) M. P. Murphy, A. Saunders, C. Moreira, A. A. Rizzi, M. Raibert: “The LittleDog Robot”, The Int. J. Robotics Research, vol. 30, no. 2, pp. 145-149, 2011.

(3) R. Hodoshima, T. Doi, Y. Fukuda, S. Hirose: “Development of TITAN XI: a Quadruped Walking Robot to Work on Slopes -Design of system and mechanism-”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 792-798, 2004.

(4) S. Hirose, K. Yoneda, H. Tsukagoshi: “TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope.”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.494-500, 1997.

(5) M. Ogata, S. Hirose: “Study on Ankle Mechanism for Walking Robots -Development of 2 D.O.F. Coupled Drive Ankle Mechanism with Wide Motion Range-”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3201-3206, 2004.

(6) 有川敬輔, 広瀬茂男: “3D 荒地歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行).”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720-726, 1995.

(7) 遠藤玄, 有川敬輔, 広瀬茂男: “研究ツールとしての Open Dynamics Engine の定量的評価-4 脚歩行機械 TITAN-VIII 実機歩行との比較-”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3D3-4, 2010.

(8) 広瀬茂男: “ロボット工学”, 裳華房, 1987.