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)	
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(En glish)	
発行日 / Pub. date	2012, 3

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 OGATA², 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,
- 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.

*2 キヤノン(株)

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

^{*&}lt;sup>1</sup> 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 2-12-111-52) {komatsu, endo, hirose}@robotics.mes.titech.ac.jp

^{*&}lt;sup>3</sup> 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150WDC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.

 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.

- 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



Fig. 4 Workspace of 2DOF active ankle mechanism



Fig. 5 Overall view of TITAN XII

Table 1Specification 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	over 50[kgf](Constant)	
Vertical Force		
Max Leg	1.5[m/s] (Theoretical Value)	
Horizontal Velocity		

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. 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1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0.951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0.951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0.951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 1.18*l* 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⁾.

$$\frac{R_a}{K^2} \tau_m^2 + \frac{2R_a}{R_h} \tau_m \omega_m + \frac{K^2}{R_h} \left(\frac{R_a}{R_h} + 1\right) \omega_m^2 \leq \frac{2p_{max}}{\sqrt{1 + R_h/R_a} - 1}$$
(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, pmax 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], pmax=150[W] である(ただし, Rh 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 $R_h = rac{4\eta_{max}}{\sqrt{1-\eta_{max}^2}}R_a$ 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.
- 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

- 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.