4足歩行型法面作業ロボット TITAN XIの開発

—基本設計と脚機構の動作実験—

程 島 竜 一*¹ 土 居 隆 宏*² 福 田 靖*³
 広 瀬 茂 男*¹ 岡 本 俊 仁*⁴ 森 純 一*⁴

Development of a Quadruped Walking Robot TITAN XI for Steep Slopes Operation

—Conceptual Design and Basic Experiment of Leg Driving Mechanism—

Ryuichi Hodoshima*¹, Takahiro Doi*², Yasushi Fukuda*³,
 Shigeo Hirose*¹, Toshihito Okamoto*⁴ and Junichi Mori*⁴

This paper describes the basic system and design of a quadruped walking robot TITAN XI. TITAN XI is designed to perform construction task on the operation site of steep slopes. Such a task is strongly demanded especially in Japan to construct highway in mountainous area. TITAN XI will be suspended by tethers on the steep slopes and walks around by four legs to avoid the damage of the ferro-concrete frames and perform the task to drill deep holes for rock bolts. We discussed fundamental design problems of TITAN XI; the selection of the system configuration, design of the leg mechanism and hydraulic driving system, suitable standard gait based on the intermittent crawl and the total controlling system. We have constructed mechanical model of TITAN XI 7,000 [kg] in weight, and 3.7 [m] in leg length, and we have successfully demonstrated very basic walk of TITAN XI on even ground with the average velocity of 2 [cm/s].

Key Words: Quadruped Walking Robot, Construction on Steep Slopes, Hydraulic Drive, Tethered System, Intermittent Crawl Gait

1. 序 論

山間地の多い日本では、線路や道路を通すため山の側面を削って法面（斜面）を形成する工事が多数行われている。これらの法面では崖崩れ防止のために、鉄筋コンクリートフレームを設置して法面を安定させる工事や、法面に穴を掘りロックボルト・永久アンカーボルトを打ち込んで法面を補強する工事が行われる。そして、通常ボルトを打ち込む法面の補強工事では、ボルトを打ち込むための穴を掘る削孔工が必要であり、それは以下の手順で行われる。

- (1) 地上から法面へ穴を掘るための削孔機構を移動させる。
- (2) 削孔機構をコンクリートフレームが設置された法面上の作業現場まで運搬する。

- (3) 削孔機構の姿勢を制御しロックボルトを設置するための削孔を行う。

従来の削孔工事は、(1) 人力、(2) 足場組み、(3) クレーンに大別され、これらの工法はこれまでほとんどの工程が人手で行われてきた。しかし、その作業は Fig. 1 の左の図に示すように高所で行われるうえ大規模であるため、以下のような問題があることが確認されている。

- (1) 人力による削孔は作業員が直接法面を登って作業するため、コスト・工期がかかるうえに危険性が非常に高い。
- (2) 足場を組み削孔機械を用いる工法は、足場作成のコスト・

Fig. 1 Conventional mechanized construction method on slopes

原稿受付 2004 年 9 月 14 日

*¹東京工業大学大学院

*²中京大学

*³玉川大学

*⁴大昌建設株式会社

*¹Tokyo Institute of Technology

*²Chukyo University

*³Tamagawa University

*⁴TAISHO KENSETU Corporation

工期がかかる。

- (3) クレーンを使つての削孔では、クレーンの作業空間の確保やそのクレーンのブームの長さに限界がある。

つまり、従来の削孔工事は著しく非効率で多大なコストと時間を要し、また滑落などの事故に繋がるため危険度が高い。したがって、その作業の自動化が強く望まれているのが現状である。

この要求に応えるため、Fig. 1 の右の図のようなクローラや車輪を用いたロックボルトを設置するための深い穴を掘る建設機械が開発され、この建設機械による工法は「無足場工法」[1]として確立されている。しかし、この工法はコンクリートフレーム施工前の法面や既存のコンクリートフレームが平坦な場合に適用しやすいが、山地の多い日本の複雑な地形を反映している凹凸のある斜面、段差のある斜面、コンクリートフレームが複雑に設置されている斜面等では適用しにくいという問題を有している。このような環境では、クローラや車輪型車両では、自在に動き回ることができず、また設置されたコンクリートフレームを破損させやすいからである。そこで、筆者らはこのような凹凸型不整地において脚形態が発揮できる特性に注目し、既存の建設工法を改良するため実用化を目指した実用的な歩行型法面作業ロボット TITAN XI を開発することとした。

一方、世界的にも屋外での活動を想定した歩行ロボットの開発は継続して行われている。

オハイオ州立大学の 6 足油圧歩行機械 ASV [3] は、遊脚の近接センサからの情報を基に局所的な斜面の傾きを推定しながら歩行している。ヘルシンキ工科大学の MECHANT [4]、The Walking Forest Machine [5] などは林業用に開発したもので油圧駆動の 6 足歩行ロボットであり、静歩行により全方向移動を行っている。カーネギーメロン大学の Ambler [6] は、惑星探査用ローバの開発を目指したものであり、6 脚の移動機構とレーザレンジファインダにより地形を計測して移動している。同大学の DANTE II は、テザーにより牽引補助を受け 8 脚で火山の火口傾斜面を歩行する実験を行っている。しかし、現在脚式歩行ロボットが産業界で実用的に活用されている例はほとんどなく、多くのロボットが研究段階にとどまっている。

TITAN XI の開発においては、真に実用的な歩行ロボットを実現するというを目的とし、それに必要な総合的考察を行うことにする。

2. 法面作業ロボットの仕様と設計

2.1 TITAN XI 概要

筆者らは、このような法面作業の自動化を実現するには、テザーで支持された 4 足歩行ロボット形態が最適であることをすでに指摘し、TITAN VII [2] と呼ぶ歩行ロボットに関する研究を続け歩容制御、センサ制御系などについて検討してきた。

テザー支持型 4 足歩行ロボットが最適である理由は以下の通りである。

- (1) 脚を用いることにより離散的な接地点で自重支持できるため、コンクリートフレームを破壊することなく全方向移動ができる。
- (2) 静歩行を行う多脚式ロボットの中でも、4 脚構成は最も簡潔な機構構成であり軽量化しやすい。

Fig. 2 Construction steps by TITAN XI

- (3) テザーにより支持することで自重補償性および安全性を発揮する。
- (4) 脚を開いた静止姿勢を取ることで、安定した多自由度プラットフォームになり高度の作業性を得られる。

筆者らはこのような特徴に注目し、テザー支持型 4 足歩行ロボット TITAN XI で削孔工事を行うことを提案する。

TITAN XI による法面工事の手順は、従来の削孔工事の工程に従い Fig. 2 に示すように設定した。

- (1) 工事現場近くまで、搬送トラックにより輸送される。
- (2) 補助クローラにより搬送トラックから降車し、工事現場である法面の近くまで整地をクローラで移動する。
- (3) 法面に近づいたら歩行に切り替え、平地から法面に乗り移る。
- (4) 法面を歩行し、削孔機構を工事地点（主にコンクリートフレームの交差点）まで運ぶ。
- (5) 削孔機の姿勢を脚で調整し、削孔する。
- (6) (4)、(5) を繰り返す。

TITAN XI は 1 日に約 20 個の穴を開けることを目標としており、そのためには、設置されているコンクリートフレームの規格から 50 [m] 前後歩行することが必要とされる。

2.2 TITAN XI のシステム構成

TITAN XI は要求された特性を発揮するため、Fig. 3 に示すように次の各機構要素から構成することとした。

- (1) 2.2 [m]×3.4 [m]×0.2 [m] の箱型の本体
- (2) 四つの同等な特性の脚
- (3) 整地を移動するための補助移動クローラ
- (4) 牽引補助ワイヤを巻き取るためのウィンチ
- (5) 削孔機構
- (6) エンジンを水平に保つエンジンリフト

このほかに、ロボットの姿勢や斜面の勾配を計測するための姿勢センサ、地形を計測するための光学システムを搭載することとした。

TITAN XI は寸法・重量共に大きいため、3 自由度を有する脚は油圧シリンダによって駆動することとした。自由度構成は

Fig. 3 Concept of TITAN XI

全方向性を考慮して Roll-Pitch-Pitch 型とした。

また、脚の構成は昆虫型を採用した。それは、

- (1) 脚を外に張り出した形態のため、歩行時・作業時とも安定性が高い。
 - (2) 脚の可動範囲を地表面に対して広く取ることができ、対地適応歩行が実現しやすい。
- などが考えられるためである。

TITAN XI は、法面を登坂するためと非常時の安全確保のため牽引補助のテザーで支え、自重を補償するとともに転落防止を計ることとした。テザーの一端を法面上部でアンカにより固定し、TITAN XI が地面から法面に乗り移ったときに後部のウィンチにより巻き取る。テザーは、前部に備えたフェアリーダにより任意の方向へ手繰りだせるようにした。Fig. 4 にテザー支持型の歩行ロボットの概念を示す。

Fig. 4 に示すように、テザーの牽引力を制御することにより、重力ベクトルの傾斜面に平行な成分を打ち消し傾斜面に垂直な成分だけを残すことができ、新たな仮想水平面を形成することが可能である。その場合ロボット本体にかかる見掛けの重力は本来のものより小さくなり、ロボットの本体の見掛けの重量が軽くなったような効果を示す。この効果により傾斜面でも高い安定余裕を維持できると考えられる。また、安定余裕を維持するだけでなく、張力を巧く制御すれば安定余裕を増加させることも期待できる。

急斜面を単純に上下する作業を行う場合は、Fig. 4 に示す 1 本のテザーで十分であるが、広い範囲内で上下左右に歩行するために、Fig. 5 のように 2 本のテザーでロボットを牽引する 2 自由度システムを構成することとした。

2 本のテザーの牽引力の合力が、重力の斜面に平行な成分と等しくなるように牽引すると、歩行機械はテザーの固定端間の中央部にいる限り安定で自由な歩行が保証される。

TITAN XI は動力として 2,800 [cc] エンジンを搭載し、焼付けを防ぐため法面上でもエンジンを水平に保つようにエンジンリフトを設置した。また、目的法面まで効率良く移動するため

Fig. 4 Concept of tethered system

Fig. 5 Omni-directional motion of a walking robot pulled by a pair of two wires

に補助移動用クローラを備え付けた。そして、工事のための大型の削孔機構を背負うように装備した。

TITAN XI システムは、安全のため操作者の遠隔制御によって運用できるように構成した。これは操作者がラジオコントローラ（ジョイスティック）によって、歩行や削孔作業、緊急時の直接制御等の命令を送るというものである。

3. 4 足法面歩行ロボットの基準歩容

TITAN XI を運用する際、法面で安全性の高い歩行を継続的に実現することが最も重要である。そこで、TITAN XI の脚機構を設計するに当たり、できるだけ高い安定性を保ちながら移動できる基準歩容の検討を最初に行った。

基準歩容は一定の脚の動きが周期的に繰り返される歩容であり、主に比較的単純な環境での移動に用いられる歩行ロボットの基本的な運動である。したがって、基準歩容を検討することにより TITAN XI の基本的な運動様式を決定し、所期の歩行運動が生成できるよう脚機構の設計仕様を得ることとした。

なお、地形等の条件に応じて脚の運動を変化させる非周期的歩容（適応歩容等）も当然必要であるが、その詳細な検討は別報で行う予定である。

3.1 間歇クローラ歩容を基にした基準歩容

TITAN XI は山間地の法面という危険な場所で使用され、歩

行速度はそれほど速くなくてもよい。そのため基準歩容として、間歇クロール歩容 [8] を用いることとした。間歇クロール歩容は、歩行速度が他の歩容に比べて遅いが安定余裕を大きく確保できるためである。

Fig. 6 に、水平面において確保する NE 安定余裕 [9] の値の大きさと脚相対軌道（揺動量）の関係を示す。このように、大きな安定余裕を保つためには左右への重心の揺動量を大きくする必要があることが分かる。

間歇クロール歩容は、Fig. 7 に示すように「左後脚の遊脚 → 左前脚の遊脚 → 胴体推進 → 右後脚の遊脚 → 右前脚の遊脚 → 胴体推進」の順に動作させるものであり、さらに以下のような特徴を有する。

- (1) すべての周期的歩容において、最も静的安定性を保持したまま歩行を継続できる。
- (2) 胴体推進は前脚の遊脚動作の直後、4 脚支持相時にのみ行う。
- (3) 胴体の同じ側の 2 脚について、後脚の遊脚動作の直後に前脚の遊脚動作を行う。
- (4) 脚の胴体座標系における相対軌道は三角形を描く。
- (5) 遊脚速度に制限が存在しない。
- (6) おのおのの脚が等しいストロークを有する。
- (7) 支持脚相の場合、同一側面の脚の位置はおのおのの脚の座標系において同じである。
- (8) 4 脚支持相時、左右の脚の位置はおのおのの脚座標において半ストロークだけずれている。

以上のような一般的な間歇クロール歩容の特徴に加え、TITAN XI に採用する基準間歇クロール歩容に以下の特性を追加することとした。

Fig. 6 Relation between leg trajectories and normalized energy stability margin

Fig. 7 Sequence of crawl gait and intermittent crawl gait

- (1) 胴体座標系における脚の相対軌道は、遊脚軌道を底辺とする二等辺三角形とする。つまり、胴体の揺動運動は、1 周期において等しい運動を左右に 1 回ずつ行う。
- (2) 脚のストロークは可動範囲内で最大となるようにし、胴体の揺動量は前もって設定した NE 安定余裕を満たす範囲で最小となるように設定する。

ここで、Fig. 8 に間歇クロール歩容の平面における胴体座標系での脚の相対軌道の一例を示す。

この軌道計画には歩容の高さ情報は記入されていないが、基準歩容のすべてのタイミングが記されており、運動計画の指針がこれから誘導可能である。

3.2 基準歩容による脚の仕様検討

3.2.1 脚の可動範囲

TITAN XI が歩行の対象とする法面は、Fig. 1 に示すようにコンクリートフレームで覆われた斜面である。コンクリートフレームの設置工事には Fig. 9 のように規格があり、山の斜面が凹凸や段差等で複雑でない場合は、およそこの規格に沿って施工されている。

つまり法面のコンクリートフレームは主に間隔が 2 [m]、高さ

Fig. 8 Relative foot positioning of intermittent crawl gait

Fig. 9 Example of concrete construction

が0.2[m]であり、このようなコンクリートフレームを跨ぎながら歩行できなければならない。

これらの基準歩容時の条件と適応歩容を行うことを想定し、TITAN XIの脚の最低の可動範囲は、ストロークは水平方向に2[m]程度、高さ方向に1[m]程度、旋回角度90[deg]程度を設計の目標に設定した。また、前提として大きさは搬送トラックの荷台に載せることを考える。

3.2.2 脚の出力

4足歩行ロボットは、歩行時に支持脚対角線上を本体が横切る。そのため、法面に乗り移る前に平地を歩行するときは少なくとも1脚で自重の半分以上を支える能力が必要である。また、場合により本体の重心が前後に偏ることも考えられるので、自重の半分以上を支えられることが望ましい。今回想定しているTITAN XIの質量は6,000~7,000[kg]程度を目標としているので、1脚で30[kN]以上発生できることが必要である。

4. 脚機構の設計

4.1 脚機構の検討

TITAN XIの脚機構として、初期にはコスト削減や開発期間の短縮、信頼性を考慮し、Fig. 10に示す市販のバックホウを使用することを計画した。

そして、その脚の可動範囲と脚先での出力（自重を支える能力）の解析を行った。解析に用いたバックホウはリンク L_1 （ブームと呼ばれる）2.5[m]、リンク L_2 （アームと呼ばれる）1.3[m]である。バックホウの運動は、旋回と鉛直面内の運動に分けら

れる。今回、自重を支える能力に密接に関係してくるのは鉛直面内の運動であるから、これに注目して解析を行った。この解析にはよく知られている式 $\tau = J^T F$ を用いた。ここで、 τ は関節トルクベクトル、 J はヤコビ行列、 F は脚先に加わる荷重ベクトルである。今回は回転関節が油圧シリンダにより駆動されているため、ヤコビ行列としては、

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial l_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \theta_2}{\partial l_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \theta_3}{\partial l_3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

を用いた。これは、関節速度と先端速度の関係を表したヤコビ行列、シリンダ速度と関節速度の関係を表したヤコビ行列、の二つの合成であり、 x, y, z はバックホウの先端位置、 θ_i は関節 i の角度、 l_i は関節 i を駆動するシリンダの長さである。ここで示される θ_i は l_i に関する逆余弦関数と二次関数の合成関数である。

この式を用いて市販のバックホウの特性を解析した。その結果をFig. 11に示す。これは、鉛直面内での脚の可動範囲における、バックホウ先端の支持力分布である。

Fig. 11に示す解析結果より、市販のバックホウでは想定している歩行に対して、可動範囲と先端での出力が不足していることが明らかとなった。したがって、バックホウをそのまま脚機構として用いず新たに脚機構を設計することとした。

4.2 第一の脚機構：バックホウを改造した脚機構の特性

第一の改善策として、バックホウの寸法とアクチュエータの特

Fig. 10 Backhoe drive mechanism

Fig. 12 Backhoe-modified drive mechanism

Fig. 11 Output force distribution to the downward at the tip of the conventional backhoe

Fig. 13 Output force distribution to the downward at the tip of the backhoe-modified drive mechanism

性を調整した脚機構を検討した。リンク L_2 が短い市販のバックホウの形状を改めて、リンク L_1 を 1.9 [m]、リンク L_2 を 1.8 [m] に変更し、望みの支持力と可動範囲を生成できるように油圧シリンダを選択したものである。設計した脚機構を Fig. 12 に示す。

この改善案では、通常のバックホウとは異なりリンクの同じ側に油圧シリンダを配置した。これは、脚に大きなストロークを求めず着実に進ませることを優先し、胴体の近傍に脚を着地したとき（脚を折畳んだとき）ほど大きな力を発生させるためである。そして、常に大きなトルク負荷が加わる関節 J_1 は、直動駆動系 A_1 により大トルクを発生しやすいようにシリンダを配置し、脚先を変位させるために関節 J_2 の直動駆動系 A_2 はトルクよりはスピードを重視してレバー比が低くなるように構成した。

この機構に関するバックホウと同様な支持力解析の結果を、Fig. 13 に示す。ヤコビ行列はバックホウのものと同じである。ここで、アクチュエータである油圧シリンダの仕様は、ボア径 120 [mm]、ロッド径 50 [mm]、油圧は 20.6 [MPa] を選択している。

この結果から設計した脚機構によれば、歩行に必要と想定される可動範囲内で自重の半分程度を支持できることが確認できた。また、脚のストロークも水平方向に約 2.0 [m]、垂直方向に約 1.0 [m] あり、想定している脚への最低限の性能を満たせることが確認できた。

4.3 第二の脚機構：干渉駆動を用いた脚機構の特性

第二の改善案は、干渉駆動 [12] を利用した機構である。

干渉駆動とは、複数のアクチュエータを相互に積極的に干渉させ、必要とする機構からの出力を機構を構成するアクチュエータ群全体から可能な限り分散して生成するように機構を設計し、全体として効率化・軽量化を図ろうとするものである。Fig. 14 が干渉駆動機構を用いた脚機構である。

市販のバックホウでは、Fig. 10 に示されているように、関節 J_1 と関節 J_2 に独立の直動駆動系 A_1 、 A_2 が備えられ、おののが各関節を独立に駆動する。それに対し提案する干渉駆動型脚機構 Fig. 14 は、関節 J_1 はバックホウと同様に A_1 のみで駆動するが、関節 J_2 に関しては A_1 、 A_2 により駆動する構造となっている。このような構成では、 A_2 のみでは関節 J_2 の角度が決定せず、 A_1 により関節 J_1 が決定して初めて関節 J_2 が決定される。つまり、一つの直動駆動系 A_2 が両関節にトルクを生成できることになり、直動駆動系の力が干渉され、脚先で大きな支持力を生成可能となることが期待できる。

この干渉駆動でのヤコビ行列は、式 (2) で示される。

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial l_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \theta_2}{\partial l_2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \theta_3}{\partial l_2} & \frac{\partial \theta_3}{\partial l_3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

この式を基にバックホウと同様の可動範囲内での支持力の分布を計算した結果を、Fig. 15 に示す。ここで、リンク L_1 は 1.8 [m]、リンク L_2 は 2.0 [m] としている。

この結果、主に歩行に使用すると考えられる胴体よりも低い可動範囲の大部分で約 40 [kN] を出力できること、脚のストロークも水平方向に約 3.0 [m]、垂直方向に約 1.5 [m] と大きくなる

Fig. 14 Coupled drive mechanism

Fig. 15 Output force distribution to the downward at the tip of the coupled drive mechanism

ことなど、バックホウよりも可動範囲が大きく耐荷重性も増加できることが分かった。

4.4 脚機構の比較と選定

以上の二つの機構を Fig. 16 (a), (b) に示すように、実際に試作して具体的な特性・操作性など比較し、TITAN XI に採用する脚機構を検討した。それぞれの脚機構の特性を Table 1 に対比して示す。

第一の脚機構であるバックホウを改造した脚機構は、設定した最低限の仕様しか満たしていない。したがって、歩容計画を工夫する必要がある。しかし、軽量に設計できたため遊脚時の重心変動も少なく、歩容を計画しやすい。それに対して第二の脚機構である干渉駆動を導入した脚機構は、長所として広い可動範囲を持ちかつ大きな耐荷重性を備え、移動能力も高く作業範囲も広い。しかし、干渉駆動を可能にするためアクチュエータに比較的に長いストロークと大出力に耐える構造が必要となり、重量が結果的に増加してしまった。

このようにどちらの脚機構も興味深い特性を示すが、結果的に以下のような理由で第一のバックホウを改造した脚を採用することとした。

- (1) 作業環境が法面という高所であるため、ロボットは可能な限り軽量なことが望ましい。
- (2) TITAN XI には地面から法面へと滑らかに乗り移る動作があり、このためには可動範囲が広い方が望ましい。
- (3) 万が一システムが故障したとき、脚を人間が自ら操縦できることが望ましいため、手動制御が簡単なほうがよい。

- (4) より製作しやすく安価となる。
- (5) TITAN XI は、法面上でテザーにより牽引されるので見かけ上の重量が減少する。そのため支持力が低めでも問題になりにくい可能性が期待できる。
- (6) 力（トルク）を主に出力するアクチュエータと、速度（角速度）を主に発生するアクチュエータに分けて駆動でき、GDA [11] (Gravitationally Decoupled Actuation) が可能で、歩行時のエネルギー効率を上げられる。なお、GDA に基づく歩行とは文献 [13] に述べたように、最適な歩行姿勢（例えば脛が歩行平面と垂直、つまり膝関節での発生すべきトルクがゼロ）を選択することで、アクチュエータのパワーを有効に利用して効率的に歩行させるものである。

なお以上の検討では、平面における重力方向への支持力のみを検討したが、法面を登坂する場合には法面の傾斜により脚にかかる荷重の大きさ・方向が変化する。そのために、脚機構は様々な方向の荷重に耐えられる性能が不可欠である。そこで、様々な方向への脚出力も解析した。その結果の代表的な脚の出力例の分布を Fig. 17 に示す。

これにより、今回設計した第一のバックホウを改造した脚機構は平面で自重を支えられる能力に加え、法面においても十分な自重支持能力を発揮できることが分かった。

(a) Backhoe-modified (b) Coupled drive

Fig. 16 First design and second design

Table 1 Comparison of the performance between two leg designs

Feature	Backhoe-Modified	Coupled Drive
Mass [kg]	480.0	970.0
Length [m]	3.7	3.8
Stroke(horizontal) [m]	2.0(1.0-3.0)	3.0(0.5-3.5)
Stroke(vertical) [m]	1.0(1.0-2.0)	1.5(0.5-2.0)
Output [kN]	30.0	40.0

Fig. 17 Output force distribution at the tip of the backhoe-modified drive mechanism

5. TITAN XI の全体構成

5.1 TITAN XI の仕様

以上の議論を基に、Fig. 18 に示すように TITAN XI の試験機を製作した。またその仕様を Table 2 に示す。

TITAN XI は主に厚さ 12 [mm] の一般構造用の圧延鋼材である SS400 で製作した。脚は本体の四隅に設置し、脚の回転軸については、他の軸と同様に油圧シリンダで駆動することとした。平地や法面において回転軸には過大な荷重は加わらない（加えない）ので、可動範囲が大きくなるようにした。

本体の中央は削孔機、後部にテザーを巻き取るためのウィンチを設け、胴体左部にはエンジン、胴体右部には計算機等の電装系を設置した。

5.2 油圧駆動システム

バックホウの油圧シリンダに使われている比例制御弁は通常応答が遅く、Fig. 19 に示すようなサーボ制御を困難なものとする広い不感帯をゼロ点付近に持っている。

したがって、高精度なサーボ制御が必要である産業用ロボットではサーボ弁が使用される。しかし、サーボ弁は高価であり作動油の汚れに弱い。

TITAN XI では多自由度であること、活動場所が劣悪であること、産業用ロボット程の制御精度が必要ないことなどから、比例制御弁によってサーボシステムを構築する方策を探った。そして、比例制御弁の不感帯を市販されている弁コントローラ（ゲイン調整、出力オフセット、ディザ周波数調整）で改善する Fig. 20 のシステムを構成してその特性を検討してみることにした。

このサーボ系には単純な位置指令を与える。つまり、関節に取り付けた回転型ポテンショメータで関節角度を測定し、逆運動学により関節角度とシリンダ長を求め、計測（計算）値と命令値のシリンダ長の差に比例ゲインを乗じたものを出力値とす

Fig. 18 Prototype of TITAN XI

Table 2 Specifications of TITAN XI

Size	4.8 [m] × 5.0 [m] × 2.0 [m]
Mass	7,000 [kg]
Power	41.9 [kW]

Fig. 19 Dead band

Fig. 20 Proposed servo system for one leg

る。そして、出力値を電圧値に変換し弁コントローラの補正を与え、最終的に電流値に変換しシリンダの速度命令として弁に出力するというものである。

5.3 足首とウィンチ機構

TITAN XI の足首機構を Fig. 21 に示す。TITAN XI の足首機構は 3 自由度の受動関節で構成されており、2 自由度をユニバーサルジョイントで、残り 1 自由度をそのユニバーサルジョイントに垂直な回転自由度で構成した。つまり、3 自由度が一点で交わる球対偶である。また、足裏が地面に着地した際に足を挫くことを防ぐためにできるだけ関節位置を低くなるように構成した。現段階では、足首は受動関節であるが将来不整地への能動的な対地適応性が求められた場合には、能動関節への置き換えも検討していく予定である。なお、足首には大きな可動範囲を持たせるためユニバーサルジョイントの可動角はおおの 140 [deg] を確保した。

導入したテザー機構は Fig. 22 に示すものであり、おのおの二つのウィンチの支持構造体にロードセルを取り付け張力計測を可能とした。また、姿勢センサにより算出した目標合力からおのおののテザーの目標牽引力を算出するために、テザーを手繰り出す角度を計測することにした。

テザーを 2 本用いた場合の牽引力はロボットの移動地点によって異なるため、テザーの手繰り出し角度の計測とその情報に基づくおのおののテザーの目標牽引力の算出、およびそれに追従するためのテザーの手繰り出し量の決定をサンプリングタイムごとに行う。そして、この目標牽引力に追従するような制御系を構成するために、目標牽引力とテザーにかかる力の実測値との偏差に応じた速度でウィンチを駆動することとした。

ウィンチは油圧モータで駆動し、搭載するテザーは約 100 [m] にした。また、テザーは安全のため最大で 1 本当たり 10 [t] ま

Fig. 21 Ankle mechanism and sole

Fig. 22 Winch mechanism

5.4 制御システム

TITAN XI の制御システム構成を Fig. 23 に示す。これは、本体に搭載された三つのオンボード・コンピュータで構成したものである。おのおののコンピュータの制御の役割は次の通りである。

- (A) 本体の左半身と削孔機およびエンジンリフトの制御
- (B) 本体の右半身と二つのウィンチの制御
- (C) 全体統括制御および命令受信

TITAN XI のコンピュータシステムは PC104plus 準拠のオンボード・コンピュータを使用した (CPU: NS-Geode 300 MHz, Compact Flash Disk: 512 MB, Memory: 256 MB, LAN device, OS: Linux)。 (A) と (B) のコンピュータは Ethernet で (C) と接続している。 (A) と (B) は油圧シリンダ等のアクチュエータのローカル・フィードバック制御を担うローカル・コンピュータであり、 (C) は歩容生成や脚の運動学計算等、上位の制御を担うホスト・コンピュータである。

TITAN XI を遠隔制御により運用できるようにするため、ラジオコントローラ (ジョイスティック) によって、歩行や削孔作業、緊急時の直接制御等の命令を送り、 (C) のホスト・コンピュータはそれらの命令や各種センサからの信号を受け取り処理し、さらにそのデータを (A)、 (B) のローカル・コンピュータに送信するという構成にした。ラジオコントローラは堅牢性と実績を考慮し、市販の建設機械用のコントローラを使用した。また、制御コンピュータはすべて TITAN XI 内に実装し、独立した制御系を構築することとした。また、環境を認識するための自己位置・姿勢測位システムと傾斜による姿勢の変化を計測するための傾斜計を備え付けて作業を補助させることにした。

計算タスクは制御ソフトの中で階層化させ分散させた。今回

Fig. 23 Computer architecture

開発した制御ソフトは、アクチュエータ制御、運動学、歩容生成、地図情報の処理、データ通信等の各処理層ごとに分けた。これらの制御ソフトは Linux や Windows でコンパイル可能な C++ 言語でインプリメントした。また、GUI を製作し歩容生成のアルゴリズムの確認とロボットからの受信データのモニタリングも可能にした。

6. 脚運動と歩行の基本動作実験

6.1 サーボシステムの検証試験

提案する比例制御弁を用いた油圧サーボシステムの性能を確認するために基本的な検証試験を行った。実験は開発中の TITAN XI の 1 脚機構を用いた。実験は簡単な位置指令で脚を与えた軌道に追従させるものである。Fig. 24 はその CP 制御実験の結果を表している。Fig. 24 (a)~(c) はそれぞれが直線、長方形、半円の軌道を与えた時の脚先の位置履歴、Fig. 24 (b-1)~(b-3) は長方形軌道運動時の脚の各関節（脚の根元から第 1~3 関節）の変化履歴を示したものである。

実験の結果、脚は誤差 ± 100 [mm] 以内で軌道を追従できることが確認できた。この誤差はまだかなり大きい、制御パラメータの調整で今後さらに改善できると考えられる。そのため、TITAN XI の歩行のために、この比例制御弁を用いたサーボシステムでも十分実用的であると判断した。

6.2 基準歩容試験

以上開発した機構系と制御系を組み合わせ、開発中の TITAN XI を用いて基準歩容を行った。その様子を Fig. 25 に示す。ここでの動作は以下のシーケンスに対応している。

- (1) 歩行開始
- (2) 左前脚遊脚後、左前方へ胴体推進
- (3) 右後脚遊脚後、右前脚遊脚、右前方へ胴体推進
- (4) 左後脚遊脚後、左前脚遊脚、左前方へ胴体推進
- (5) 右後脚遊脚後、右前脚遊脚、右前方へ胴体推進
- (6) 左後脚遊脚後、左前脚遊脚、左前方へ胴体推進

このときの歩行は 1 周期 90 [s]、1 周期における本体移動距離は 1.6 [m] であった。また、その時の運行表と脚先の位置履歴を Fig. 26 に示す。

この結果により、脚機構で十分な支持力を生成でき今回開発

Fig. 24 Result of CP control experiment

Fig. 25 Snapshots of basic walking experiment of TITAN XI

したサーボシステムでも安定な歩行が実現できることが確認できた。

Fig. 26 Relative foot positioning of the basic walking experiment shown in Fig. 25

7. 結 論

本論文では、車輪やクローラなどの機構では移動困難なコンクリートフレームで覆われた法面を、安定に移動し作業する4足歩行型ロボット TITAN XI の開発の重要性を論じた。そして、この作業のためには歩行型で特に昆虫型4足歩行形態の移動作業ロボットが適することを明らかにし、その全体機構システムの構成、脚駆動系の設計、間歇クローラ歩容を基本とする歩容生成システム、制御システムの構成などを論じた。そしてそれらの考察の妥当性は実際の機械モデルの試作、実験によって検討した。そして、最終的に全システムを結合した機械モデル TITAN XI の基本歩行実験を行った。

以上の様に本研究により、4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の基本機構システムと制御システムが一応完成したが、実用化にはまだいくつかの技術課題が残されている。それらは、

- (1) いまだ調整不十分なため現状では著しく出力を絞った状態での歩行であったため、今後さらに調整を行って高速・高出力化を計る。
- (2) 脚に荷重が加わることで脚先に変位が生じる（本体が沈み込む）ことが観察されたが、脚のコンプライアンス等

を補正することで改善していく。

- (3) テザーの張力制御を利用した法面での歩行実験。
- (4) 光学システムを用いた地形計測とその情報を用いた対地適応歩容の実現。
- (5) 平地から法面への移動動作。
- (6) 法面を歩行し、削孔機構を工事地点（主にコンクリートフレームの交差点）まで運ぶ。
- (7) 削孔機構の姿勢決定制御と作業実験。

などである。今後早急にこれらの技術課題を検討し、実験を積み重ねて実用機の実現を計っていく予定である。

謝 辞 本研究は、経済産業省の大学発事業創出実用化研究開発事業費を使用して行われたものである。

参 考 文 献

- [1] <http://www.taisho-kk.com/index.htm>
- [2] S. Hirose, K. Yoneda and H. Tsukagoshi: "TITAN VII: Quadruped walking and manipulating robot on a steep slope," In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.494-500, 1997.
- [3] K.J. Waldron and R.B. McGhee: "The Adaptive Suspension Vehicle," IEEE Control Systems Magazine, vol.6, no.6, pp.7-12, 1986.
- [4] K. Hartikainen, A. Halme, H. Lehtinen and K. Koskinen: "Control and Software Structures of a Hydraulic Six-Legged Machine Designed for Locomotion in Natural Environment," In Proc. Int. on Intelligent Robots and Systems, pp.590-596, 1992.
- [5] <http://www.plustech.fi/>
- [6] E. Krotov and R. Simmons: "Perception, Planning, and Control for Autonomous Walking With the Ambler Planetary Rover," Int. J. of Robotics Research, vol.15, no.2, pp.155-180, 1996.
- [7] J. Bares and D. Wettergreen: "Dante II: technical description, results, and lessons learned," Int. J. of Robotics Research, vol.18, no.7, pp.621-649, 1999.
- [8] 塚越秀行, 広瀬茂男: "間歇クローラ歩容の提案とその生成原理", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.301-309, 1999.
- [9] 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田完: "不整地における歩行機械の静的安定性評価基準", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1076-1082, 1998.
- [10] 広瀬茂男, 福田靖, 菊池秀和: "4足歩行機械の制御システム", 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.304-324, 1985.
- [11] 広瀬茂男, 梅谷陽二: "歩行機械の脚形態と移動特性", バイオメカニズム学会編, バイオメカニズム5 (動体の機構と制御), pp.242-250, 1980.
- [12] 広瀬茂男, 佐藤幹夫: "多自由度ロボットの干渉駆動", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-135, 1989.
- [13] 有川敬輔, 広瀬茂男: "3D 荒地用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.

程島 竜一 (Ryuichi Hodoshima)

1976 年 8 月 26 日生。2000 年東京工業大学工学部機械宇宙学科卒業。2002 年同大学大学院機械宇宙システム専攻修士課程修了。同年同大学大学院機械宇宙システム専攻博士課程進学。現在に至る。歩行ロボット、地雷処理ロボット等の研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

福田 靖 (Yasushi Fukuda)

1959 年 8 月 23 日生。1985 年東京工業大学大学院修士課程 (機械物理学専攻) 修了。同年 (株) 東芝入社。 (財) 理工学振興会 (東工大 TLO)、 (独) 理化学研究所などを経て、2005 年より玉川大学工学部機械システム学科助教授。博士 (工学)。ロボットの研究開発に従事。1987 年第 1 回日本ロボット

学会論文賞受賞。

(日本ロボット学会正会員)

岡本俊仁 (Toshihito Okamoto)

1954 年 5 月 25 日生。1973 年千葉県立長生高等学校卒業。1982 年大昌建設株式会社設立 (代表取締役社長)。1989 年テレスコプームマシン (高所掘削機械) 開発。1991 年ロッククライミングマシン (高所掘削機械) 開発。1997 年アンカーロックマシン (無足場ロックボルト削孔機)

開発。同社技術開発室において土木建設機械の設計開発に従事。

土居隆宏 (Takahiro Doi)

1974 年 2 月 3 日生。1997 年東京理科大学工学部機械工学科卒業。2003 年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士課程修了。同年財団法人理工学振興会 (東工大 TLO) プロジェクト研究員。2005 年中京大学生命システム工学部身体システム工学科助手。現在に至る。移動ロボットのための三次元視覚情報処理、歩行ロボットの研究に従事。博士 (工学)。

(日本ロボット学会正会員)

広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 5 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了 (工学博士)。同大学助手助教授を経て 1992 年東京工業大学機械物理工学科 (2000 年以降機械宇宙システム専攻) 教授。ロボット創造学の研究に従事。IEEE Robotics and Automation Society より 1999 年 Pioneer in Robotics and Automation Award など受賞。主な著作は、ロボット工学 (裳華房)、「生物機械工学」(工業調査会)、Biologically Inspired Robots (Oxford University Press, 1993) など。

(日本ロボット学会正会員)

森 純一 (Junichi Mori)

1950 年 11 月 14 日生。1969 年千葉県成田高等学校卒業。現在大昌建設株式会社技術開発室に所属。主に情報処理などの研究に従事。