

## 4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI

土居隆宏・広瀬茂男・岡本俊仁

山間地の多い日本では道路や鉄道などを通すため、山肌を削ってコンクリートフレームで固めた法面を形成する工事が多く行われている。法面では崩落を防ぐアンカーボルトの設置のため、表面から岩盤まで削孔する作業が必要となる。筆者らはこの作業の自動化のため、4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発を行っており、これまでに、最大全長約 10 [m]、重量 7,000 [kg] の実際に工事作業が可能な機体を製作し、模擬法面にて移動と削孔工事が可能であることを確認しており、まさに現場投入を待つ段階に到達している。

本稿では、TITAN XI のシステムの中で、力センサとウインチによるワイヤ張力制御、歩容（歩き方）、削孔、操縦方法、自動運転のための測量データの利用と追尾機構による自己位置姿勢計測について述べる。

キーワード：法面、コンクリートフレーム、4足歩行ロボット、削孔、ワイヤ、油圧

### 1. はじめに

山間地の多い日本では道路や鉄道などを通すため、写真—1に示すように、山肌を削ってコンクリートで固めた法面を形成し、その崩落を防ぐために表面から岩盤まで削孔し、アンカーボルトを打ち込んで固定する工事が数多く行われている。

筆者らはこの作業の自動化には、足場を組むことなく凹凸のある法面を自由に歩き回って削孔ができる歩行型の作業機械が適していると考え、4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI<sup>1)</sup>（写真—2）の開発を行っており、本誌 2005 年 1 月号<sup>2)</sup>でその基本コンセプトと機構設計について紹介させていただいた。このロボットは、2007 年 10 月現在で脚を含めた全長が最大約 10 [m]、重量が約 7,000 [kg] という、4足歩行型のロボットとしては、世界最大規模のものである。現在もその開発は継続しており、模擬法面での移動と削孔工事实験に成功し、現場投入を待つ段階にある。

TITAN XI の作業環境である法面は、写真—1のように凹凸のある急傾斜の山肌にコンクリートフレームが設置された環境であり、このような場所で自在に動き、指定箇所へ削孔を行う作業を目標としている。コンクリートフレームは特にそのエッジが破損しやすく、修復は手作業で行わなければならない非効率的であるため、ロボットはその脚先がフレームに干渉するのを避け、跨いで移動することが望ましい。



写真—1 大規模な法面の例

このように目標を設定した場合、まず、ロボットの滑落を防ぐワイヤ牽引支持が不可欠である。さらに、歩行に際しては、ロボットの転倒を防ぐために、ロボットの重心と脚先の着地位置との位置関係による安定性を確保した歩き方（歩容）が重要である。

さらに、ロボットの運用方法として、作業者が操縦する方法と、完全自動で行う方法が考えられる。操縦による運用方法では、ジョイスティックにより各脚と胴体部を駆動し、歩行、削孔を行うシステムが必要に



写真一 2 TITAN XI

なる。自動運転による運用においては、凹凸に適応するための環境地形情報の事前の測量、運転中の滑りなどの誤差に対応するため、ロボットの位置姿勢の計測が必要となる。

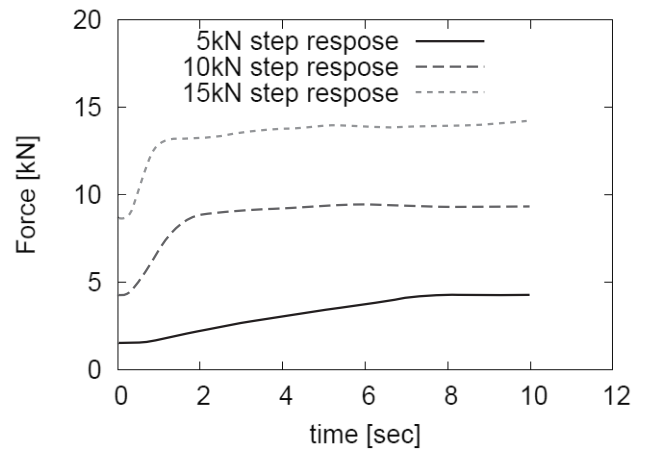
以下にこれらの要素技術の詳細について具体的に説明する。

## 2. ワイヤによる牽引支持

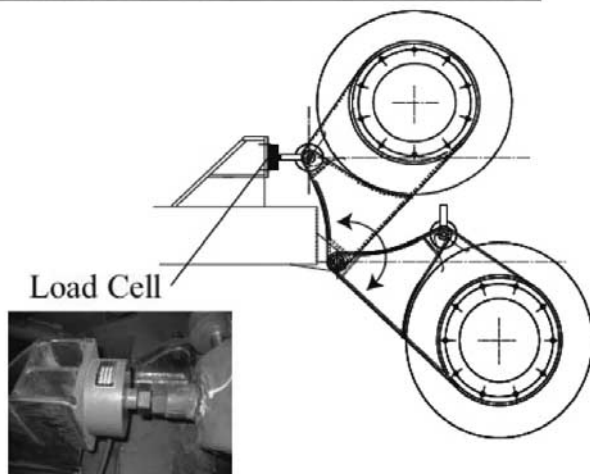
ロボットの法面からの滑落を防ぐには、ワイヤによる法面上方からの牽引支持が有効である。ロボットは

法面上を上下左右に移動するため、牽引ワイヤは、ウインチと組み合わせてロボットが登る際には巻き取り、下がる際には手繰りだす操作が必要となる。

TITAN XIにおいては、この操作を自動化するため、図一1に示すように胴体後部に取り付けたウインチの台座部分を可動式にし、ワイヤ張力により台座部分がロードセルを押す機構を用いることで、ワイヤの張力を計測できるようにした。さらに、計測した張力情報を、ウインチを回転させる油圧モータへフィードバックすることで張力を一定に保つシステムを構成した<sup>3)</sup>。一定の張力指令に対する追従性を示すグラフを図一2に示す。張力を一定に制御することにより、ロボットが前進する際にはワイヤの張力が下がることでワイヤが巻き取られ、ロボットが後退する際にはワイヤの張力が上がることでワイヤが手繰りだされることになる。これによりロボットは一定の力で斜面上方



図一 2 指令牽引力への追従性



図一 1 ウインチと張力計測機構



写真一 3 TITAN XI のウインチ性能検証

に向けて常に牽引されるサポートを受けることができる。この張力を、ロボットが自重により斜面下側に引かれる力とつり合わせれば、斜面にいながらあたかも平地を歩くような移動が可能となる。

TITAN XIでは2本のワイヤにより自重を支えることで、左右の移動も可能になっているが、後述する自己位置計測装置により、ワイヤの張る角度を計算し、自重を支える牽引力を計算することで、移動後のワイヤの牽引方向の変化があっても、自重を変わず支えることができる。また、写真—3に示すように、TITAN XIが垂直になりすべての自重がワイヤにかかるように鉄骨のタワーからぶら下げ、ウインチで巻き取る実験も行い、ウインチの出力が十分であることを確認した。

### 3. 歩容（歩き方）

車輪やクローラによる移動機構と違い、歩行ロボットには転倒の可能性があるため、実用的な動きをさせるためには、安定性を確保した歩容を検討する必要がある。

これまでに筆者らは、4足動物の最も安定な歩容であるクロール歩容をさらに安定化した間歇クロール歩容<sup>4)</sup>、さらに、胴体を地面につけることで、安定性をさらに向上させたインチウォーム歩容<sup>5)</sup>、クリープ型インチウォーム歩容<sup>6)</sup>、を提案している。

間歇クロール歩容は、足を浮かせて前に運ぶ動作（遊脚）時に、胴体を支える脚（支持脚）が成す3角形の中心に重心を配置する歩容であり、胴体を浮かせた状態では理論的に最大の安定性を有する。推進方向は左右揺動を含みジグザグになる。

これに対してインチウォーム歩容では、遊脚時には

胴体を地面につけてしまうことで、転倒を回避する。遊脚は全ての脚で同時に行い、その後胴体を持ち上げて前に運ぶ歩容となっている。

さらに、クリープ型インチウォーム歩容は、胴体の一部だけしか接地できなくとも、遊脚を個別に行うことで安定に歩行を続けることができる歩容である。これらの3通りの歩容により、模擬法面を移動できることを、実機を用いた実験で確認した（写真—4）。

### 4. 削孔

法面には凹凸があり、アンカーボルト用の穴は、法面表面に垂直に削孔する必要がある。したがって、削孔機の角度は、法面の表面の方向に応じて調整する必要がある。TITAN XIは4本の脚機構を有し、これらを協調的に制御することで胴体と、そこに搭載した削孔機の位置姿勢を自由に变化させることができる。

削孔機はその付け根を軸に回転させることで、角度を変化させることができる。歩行時には寝かせておき、削孔位置付近に接近したら立てるという運用が可能となっている。その先端のドリル部は伸縮、回転、打撃、圧搾空気の噴出が可能である。この機構を用いた削孔動作を模擬法面上で確認した<sup>6)</sup>（写真—5）。



写真—4 模擬法面を歩行する TITAN XI



写真—5 模擬法面で削孔を行う TITAN XI

### 5. 操縦による運用

ロボットによる法面工事の実用化において、その初期の段階では、操縦によって運用することが現実的かつ有効である。なぜなら計算機を直接操作することなく無線コントローラを用いて駆動箇所を指定して動かすため、作業員にとって操作を理解しやすく、動作の中断や微調整といった柔軟な運用が可能だからである。

無線操縦装置としては、大和機工株式会社製の、4

本のアナログジョイスティックとロータリースイッチを有するものを使用し（写真一六）、スイッチにより、①手動、②削孔、③自動の3つのモードを切り替えられるようにした。



写真一六 無線コントローラ

①の手動モードでは、各関節のシリンダを個別に駆動する方式となっており、レバーを倒した角度に比例した速度で各シリンダが伸縮する。どの脚を動かすかはロータリースイッチで切り替え、関節は各レバーに割り当ててある。

②の削孔モードでは、削孔機の先端部分の伸縮、回転、打撃、圧搾空気バルブ開閉を行う。

③の自動モードでは、TITAN XIに搭載した計算機を介して操縦することが可能になる。計算機はCFディスクからLinuxを起動することができ、電源投入後、OS立ち上げ時に操縦プログラムが自動的に実行されるようになっている。現在実装されている操縦アルゴリズムにおいては、各脚を個別に駆動するモードと、全ての脚を協調させて動かす胴体推進モードがあり、これらはロータリースイッチで切り替えられるようになっている。また、これらの駆動方法は、単純に各シリンダを動かすのとは異なり、現在の位置に対して胴体座標系でx, y, zの座標軸を設定し、どちらの方向に動くかを計算して動かすことができる。それぞれの関節には角度センサ（ポテンシオメータ）が取り付けられており、計算機で指令した角度を実現できるように制御されているため、一つのレバーを倒すことで、複数の関節が同時に動き、希望の方向にロボットの脚先や胴体を動かすことができる。胴体に関しては、並進だけでなく、ボタンを押しながらレバーを倒すことでロール・ピッチ・ヨー回転も可能である。

この操縦システムと、クリープ型インチョーム歩容を用いて、模擬法面での移動と削孔に成功した<sup>6)</sup>（写真一七）。



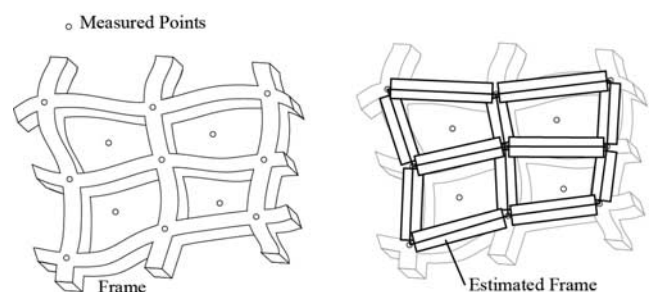
写真一七 模擬法面での移動と削孔

## 6. 自動運転による運用

最終的な目標は、スイッチ一つで作業員が介入することなく作業が完了できる、削孔工事の完全自動化である。このためには、ロボットは周囲の地形形状の地図を持ち、時々刻々の自己位置姿勢を知る必要がある。

移動環境の形状の計測方法としては、ステレオビジョン、レーザーレンジファインダ（Cyra<sup>7)</sup>、MENSI<sup>8)</sup>、Riegl<sup>9)</sup>などを搭載して移動しながら計測する方法が考えられるが、削孔に使う機械に適用することを考えると、レーザーレンジファインダは価格が1000万円以上と高価であること、削孔の際の溶けたコンクリートや泥などが飛散する状況では光学式のセンサは使いにくいこと、などから適さないと判断した。そこで、事前に計測した地図データと、自己位置姿勢の計測装置を組み合わせた方法により、地形に適応した動作を実現する。

環境の計測には、測量用の3次元レーザーセンサ（トプコン・トータルステーション<sup>10)</sup>）を使用する。これは、コーナーキューブミラーと呼ばれる入射光を同じ方向に反射させるミラーを追尾してその位置を計測する装置であり、価格も300万円程度と比較的安価である。今回対象とする環境は、コンクリートフレームで覆われた法面であるため、図一三のようにフレームの交点のみを計測し、その間をつなぐようにフレームと地表面を作成することで、少ない計測箇所でも、使



図一三 フレームの直線近似

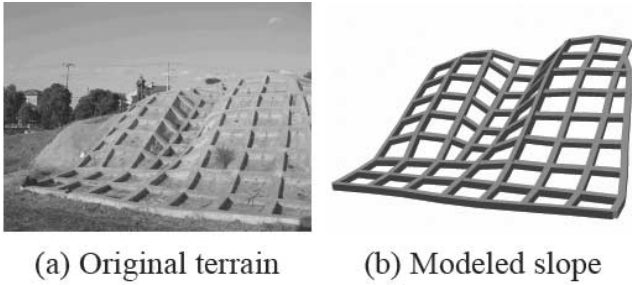


図-4 元の地形と、測量により生成した地図データ

しやすい地図を生成することができた。実際の法面と、計測データと近似により生成した地図データを図-4に示す。

この地図情報に基づき、平地での歩行実験、模擬法面での歩行実験を行った。あらかじめ測量したデータから地図を生成し、その地図を用いてシミュレーションを行って間歇クローラ歩容での動作データを生成した。そのデータを実際のロボットの計算機に入力し、自動運転で実行させた。実験の結果ロボットはフレームを跨いで歩行することができ、これにより、地図データおよびロボットの脚位置制御の有効性が確かめられた。写真-8、図-5に、それぞれ平地、模擬法面での実験の様子を示す。



写真-8 平地での模擬フレーム跨ぎ越え実験

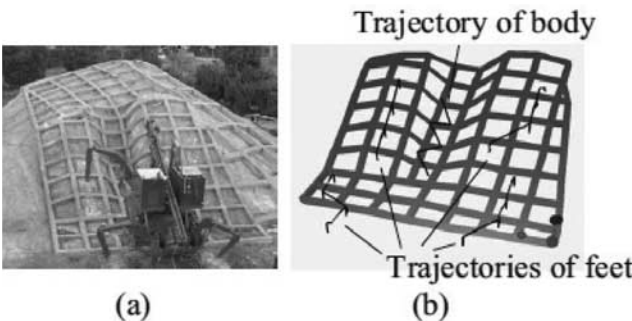


図-5 間歇クローラ歩容による模擬法面歩行実験

さらに、自己位置姿勢の計測方法に関しても、同じ3次元レーザーセンサを利用したシステムを提案している<sup>11)</sup>。これは、写真-9のように、ある半径で回転可能な機構の先端にコーナーキューブを取り付け、このコーナーキューブの位置を、ロボットを停止させ、機構を回転させて計測することにより、回転中心軸ベクトルの方向と、回転中心がわかるというものである。このシステムと姿勢センサを組み合わせることで、ロボットの位置姿勢を計測することができる。図-6に、ロボットが模擬法面を登って降りる往復移動を行った際の、コーナーキューブの位置の計測結果を示す。



写真-9 コーナーキューブ回転機構

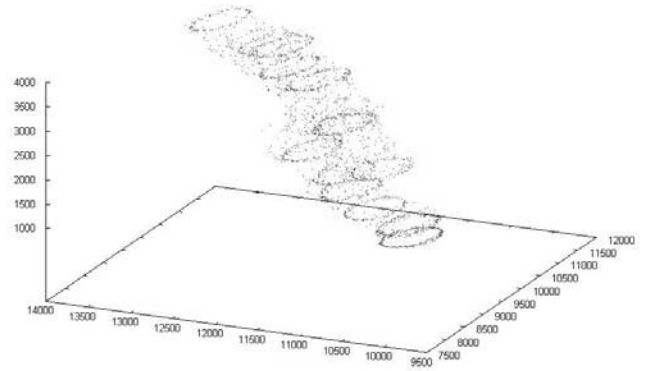


図-6 ロボットの自己位置計測結果 単位 [mm]

### 7. おわりに

以上 TITAN XI を実際の現場での作業に投入するために必要となる要素技術について述べた。移動と削孔に関する機能は、模擬法面において確認済みである。今後は、実際の法面工事現場において運用する中で現実に即した形で機能を改善し、有効性を検証する。

なお、本研究は、平成 14～16 年度の経済産業省の大学発事業創出実用化研究開発事業費を用いて行われたものである。

最後に、共同で研究開発を行っている東京工業大学機械系 21 世紀 COE 研究員程島竜一氏、玉川大学福田靖氏、大昌建設株式会社 森純一氏に感謝の意を表す。

《参考文献》

- 1) 程島竜一・土居隆宏・福田靖・広瀬茂男・岡本俊仁・森純一：4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試験，日本ロボット学会誌，**23** [7] pp.847-857 (2005)
- 2) 福田靖・広瀬茂男・岡本俊仁：4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発，建設の施工企画 2005 年 1 月号，pp.34-41
- 3) 土居隆宏・程島竜一・福田靖・広瀬茂男・岡本俊仁・森純一：4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発第 6 報 ロボットの作業環境地図の生成とその利用，ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 予稿集，2P1-S-056 (2005)
- 4) 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，**17** [2] pp.301-309 (1999)
- 5) 土居隆宏・程島竜一・福田靖・広瀬茂男・岡本俊仁・森純一：4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発第 8 報 インチウォーム歩容の提案，日本ロボット学会学術講演会'06 予稿集 (2006)
- 6) 土居隆宏・程島竜一・福田靖・広瀬茂男・岡本俊仁・森純一：4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発第 9 報 クリープ型インチウォーム歩容と削孔作業に関する考察，日本ロボット学会学術講演会'07 予稿集，1K27 (2007)
- 7) <http://www.cyra.com>
- 8) <http://www.mensi.co.jp/>
- 9) <http://www.riegl-japan.co.jp/Japanese/>
- 10) <http://www.topcon.co.jp/>
- 11) 特許公開 2005 - 291879 歩行ロボット用歩行データの測定方法

[筆者紹介]

土居 隆宏 (どい たかひろ)  
 中京大学 生命システム工学部  
 身体システム工学科 助手



広瀬 茂男 (ひろせ しげお)  
 東京工業大学理工学研究科  
 機械宇宙システム専攻  
 教授



岡本 俊仁 (おかもと としひと)  
 大昌建設株  
 代表取締役社長



## 建設の施工企画 2005 年バックナンバー

平成 17 年 1 月号 (第 659 号) ~平成 17 年 12 月号 (第 670 号)

1 月号 (第 659 号)

建設未来特集

6 月号 (第 664 号)

建設施工の環境対策特集

10 月号 (第 668 号)

海外の建設施工特集

2 月号 (第 660 号)

建設ロボットと IT 技術特集

7 月号 (第 665 号)

建設施工の環境対策—大気環境特集

11 月号 (第 669 号)

トンネル・シールド特集

3 月号 (第 661 号)

建設機械施工の安全対策特集

8 月号 (第 666 号)

解体・再生工法特集

12 月号 (第 670 号)

特殊条件下での建設施工機械特集

4 月号 (第 662 号)

建設機械施工の安全対策特集

9 月号 (第 667 号)

専門工事業・リースレンタル特集

■体裁 A4 判

■定価 各 1 部 840 円  
(本体 800 円)

5 月号 (第 663 号)

災害復旧・防災対策特集

■送料 100 円

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>