

4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発

福田 靖・広瀬 茂男・岡本 俊仁

山間地の多い日本では、線路や道路を通すため、山の側面を削ってコンクリートフレーム、ロックボルトなどで法面（斜面）を形成する工事が多く行われている。しかし、このような工事はほとんど人手で行われ、作業効率が悪いうえ、多大なコストと時間を要し、しかも、人が滑落する危険があるため、従来から法面形成工事の自動化が強く望まれていた。

そこで、筆者らは、法面形成工事の自動化を目指して、コンクリートフレームがある法面上を歩行し、ロックボルト用の削孔作業を行う4足歩行型法面作業ロボット TITAN XI を開発している。このロボットは、脚を含めた全長が最大約10m、重量が約6,000kgという巨大なロボットで、歩行のための油圧式の4つの脚、本体をワイヤで牽引するためのウインチ、ロックボルト削孔のための削孔装置を搭載している。法面の地図を参照しながら、コンクリートフレームのエッジ近傍を避けた場所に脚の着地点を選択し、「間歇クローラ歩容」と呼ぶ安定性の高い歩容（歩き方）で歩行する。そして、コンクリートフレームの格子点に4脚を用いて削孔装置の先端の位置を合わせて削孔作業を行う。

現在、試作モデルがほぼ完成し、地上での基礎的な歩行実験により、全体システム、脚機構、制御システムなどの基本性能を検証している。

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、無足場ロックボルト工法

1. はじめに

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を形成する工事が頻繁に行われている。一般に、これらの法面では、崖崩れを防止するため、鉄筋コンクリートフレームを設置し、さらに、ロックボルト、永久アンカーボルトを用いてフレームを岩盤に固定する工事が行われる。従来、これらの工事は写真—1（上）に示すように大規模な工事であるにも関わらず、ほとんど人手で行われていた。極めて作業効率が悪く、多大なコストと時間を要し、しかも、人やクレーンや削孔装置などの機器の滑落などの危険性があるため、従来から法面形成工事の自動化が強く望まれていた。

そこで、東京工業大学では、法面作業の自動化を実現するにはワイヤで支持された4足歩行ロボット形態が最適であることを指摘し、TITAN VII¹⁾ と呼ぶ歩行ロボットに関する研究を行ってきた。ワイヤ牽引式4足歩行ロボットは以下の特徴を持つ。

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

こと無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、ロボット本体を軽量化しやすい。
- ③ ワイヤにより支持することで自重補償し、滑落などの危険を防止できる。
- ④ 静止して作業する時に脚を制御することにより、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。

また、大昌建設株式会社では、写真—1（下）に示す削孔専用の無足場削孔機を開発、実用化し、クローラや車輪によって法面上を移動し、削孔機によってロックボルト用の深い穴を掘るという作業の自動化を行ってきた。この建設機械を用いた工法は「無足場ロックボルト工法」²⁾ と呼ばれ、削孔専用の無足場削孔機と斜面上部の推定崩落線上より奥に設置されたアンカーをワイヤで確実に固定し、無足場並びにラジコンによる遠隔操作で作業を行う工法である。

この工法により、高所法面、急斜面、ダム工事現場などで足場を組立てなくてもロックボルト施工を迅速かつ安全に行うことが可能である。仮設足場の組立て、解体の作業が全くなくなるので、大幅な工期短縮、省

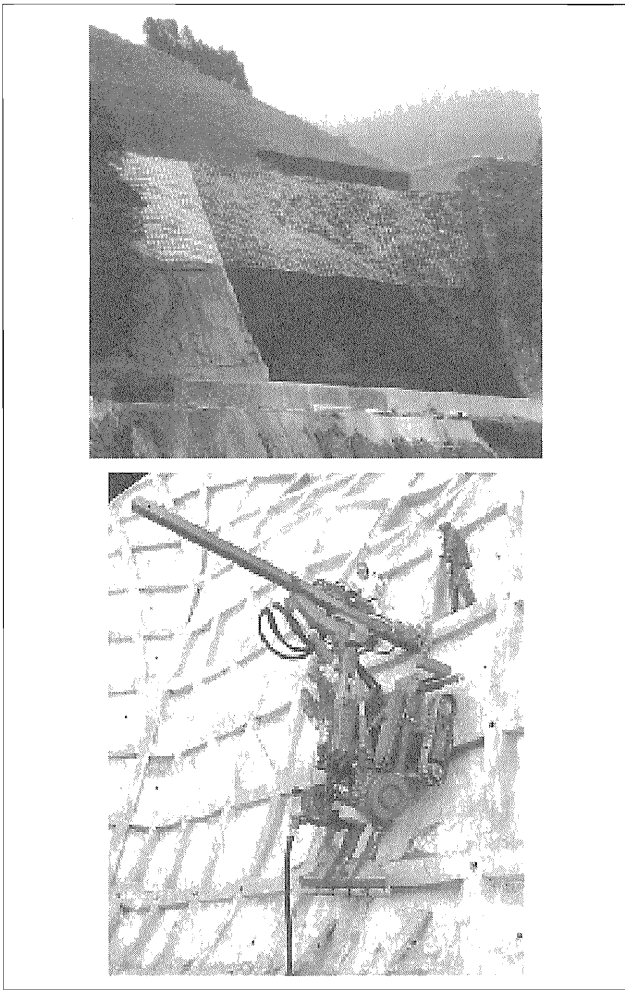


写真-1 従来の法面工事

力化が可能で、しかも、高所の垂直斜面はもちろん、オーバーハングの斜面でも、登降坂でき、任意の場所に削孔出来るという長所を持つ。

一方、無足場ロックボルト工法は、法面が比較的水平な場合には適用しやすいが、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な形状をしている斜面等では適用難しいという問題があった。このような法面では、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、コンクリートフレームを破損させやすい。

さらに、屋外で作業を行う脚式歩行ロボットとしては、米国オハイオ州立大学の6足油圧式歩行ロボットASV³⁾、Plustech社の林業用6足油圧式歩行ロボットThe Walking Forest Machine⁴⁾、米国カーネギーメロン大学の惑星探査ローバー用6足歩行ロボットAmbler⁵⁾などが研究開発されている。

しかし、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無く、多くのロボットが研究段階に留まっている。

そこで、4足歩行型法面作業用ロボットTITAN XI

の開発においては、これまで研究開発してきたワイヤ牽引式4足歩行ロボットTITAN VIIの移動技術、及び「無足場ロックボルト工法」による削孔専用無足場削孔機の油圧制御、ワイヤ牽引、削孔などの技術をベースとして、複雑な形状をした法面の歩行及び削孔作業を行う実用的な歩行ロボットの実現を目標としている。

2. 4足歩行型法面作業ロボットTITAN XIの設計

(1) システム・コンセプト

TITAN XIが行う作業は、下記の通りである。

- ① コンクリートフレーム構造の法面上で自動的に環境を認識し、4本の脚で移動し、削孔装置を所定の位置まで安全に運搬する。
- ② 脚を使用して削孔装置の姿勢を制御し、ロックボルトを設置するため削孔作業を行う。
- ③ 地上から法面、法面から地面へ、歩行動作にて自動的に乗り移る。

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50m前後歩行することが必要とされる。

このような要求に応えるため検討したTITAN XIのシステム・コンセプトを図-1に示す。

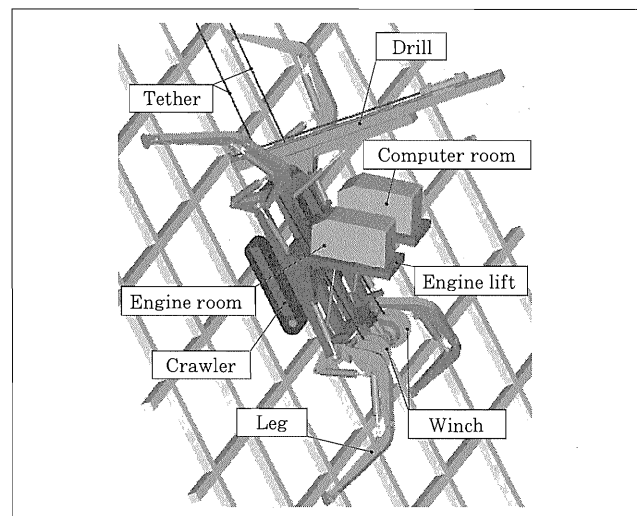


図-1 TITAN XIの概念図

TITAN XIには移動のための4脚機構とクローラを装備し、クローラで地面上の移動と運搬車からの乗降を行い、脚機構で法面上を移動する。脚機構は油圧式で、各脚3自由度、合計12自由度を持つ。

本体の自重を支持するため、斜面の上方でワイヤにて支持し、本体搭載のウインチを回転させて、ワイヤの長さを変える。本体にはエンジンを搭載し、焼付け

を防止するためエンジンリフト機構で、エンジンを水平に維持する。また、ロックボルト削孔作業のための削孔装置を搭載する。

また、TITAN XI による法面工事は図-2 に示すように以下の手順で行う。

- ① 工事現場近くまで、搬送トラックにより輸送される。

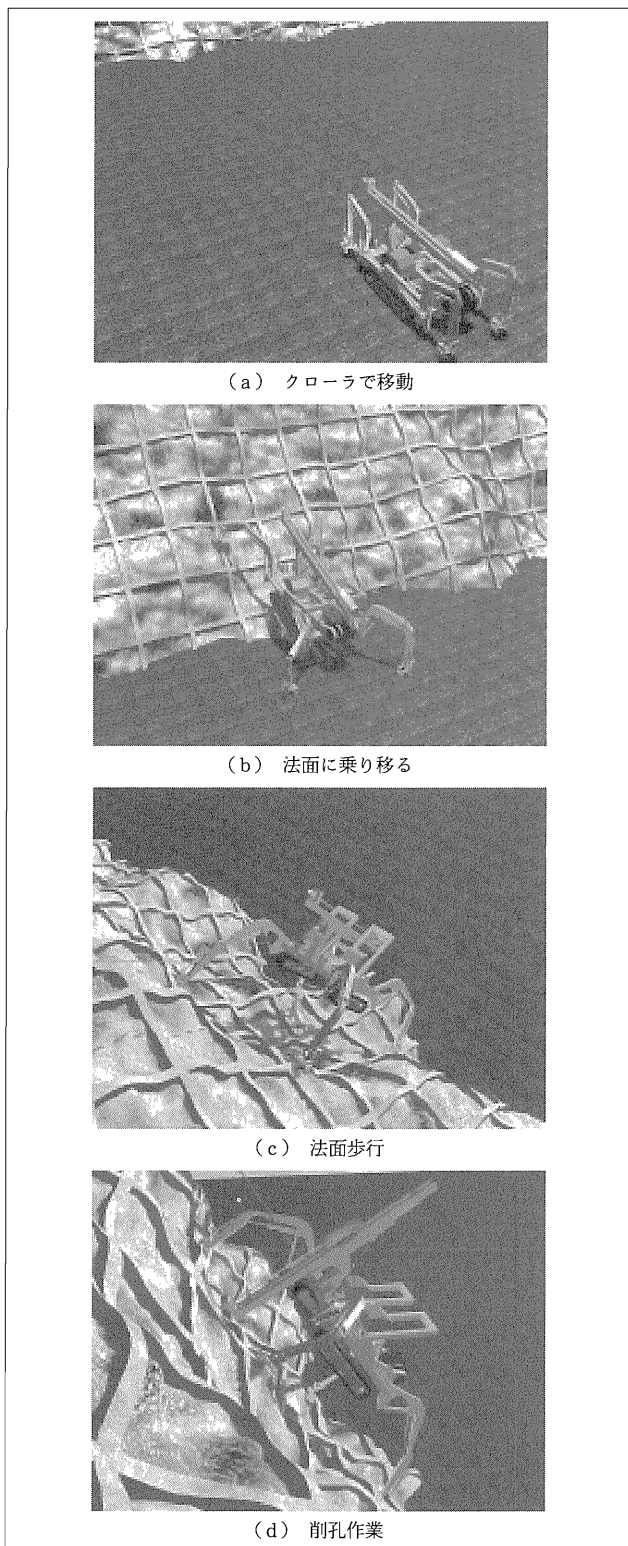


図-2 TITAN XI による法面工事

- 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、法面上方で吊った2本のワイヤで本体を支持する。
- ④ ワイヤで本体を支持しながら、平地から法面に乗り移る。
- ⑤ 法面を歩行し、削孔装置を工事地点（主にコンクリートフレームの交差点）まで運ぶ。
- ⑥ 削孔機の姿勢を脚で調整し、削孔する。
- ⑦ ⑤、⑥を繰り返す。

(2) システム構成

TITAN XI システムは以下に示す各要素により構成される。

- ・油圧系、電気系（コントローラ）、動力系（エンジン）などを搭載した本体
- ・法面での歩行のための4つの脚
- ・地上での走行及び搬送用トラックからの昇降のための補助移動クローラ
- ・牽引補助ワイヤを巻取るためのウインチ
- ・ロックボルト用の削孔のための削孔装置
- ・エンジンを水平に保つエンジンリフト

TITAN XI は急な法面を登坂するため、牽引補助用ワイヤで本体を支持し、ロボット本体の落下を防止するとともに、斜面における脚出力を低減することとした。ワイヤで牽引することにより、ロボット本体にかかる見掛けの重力は実際のものより小さくなり、ロボットの本体の見掛けの質量は軽くなる。

基本的に、現場作業者がラジオコントローラ（送信機）を操作してロボットを運転できるように構成した。すなわち、操作者がラジオコントローラ（送信機）のジョイスティック、スイッチなどによって、歩行や削孔作業、緊急時の直接制御などの命令を送る。TITAN XI はロボット本体搭載のボード・コンピュータでその命令信号を受信、処理し、ロボットの各部を協調的に制御する。

3. 4足歩行ロボットの基準歩容

歩行ロボットの歩容（歩き方）には、下記の2つがある⁹⁾。

① 基準歩容

平坦地において歩行する場合に取るべき、移動効率と安定性の良いリズムカルな歩行。

② 適応歩容

荒地において、安定性を保ちながら、安全な足場を見つけ障害物を回避するなどのようにして選択される、荒地に適応した歩行。

自然環境での移動を前提とする場合、基準歩容のみしかとれないのでは、安定な歩行を持続できない。そこで、TITAN XIでは、常時地図を参照しながら対地適応的な適応歩行を行い、地形が許す限りの範囲で基準歩容への収束を図る「基準収束型適応歩容」を用いることとする。

(1) 間歇クロール歩容を基にした基準歩容

TITAN XIは本体重量が大きく、斜面での安定性を確保するため、基準歩容としては、本体推進時には必ず4脚支持状態にて行う「間歇クロール歩容」⁷⁾を用いることとした。

図-3(b)に示すように、間歇クロール歩容の動作シーケンスは、「左後脚→左前脚→胴体推進→右後脚→右前脚→胴体推進」の順であり、以下の特徴を持つ。

- ① 4脚支持状態で本体推進を行う。
- ② 脚は、復帰動作→本体推進動作→本体推進動作というサイクルを繰り返す。
- ③ 1サイクルの脚軌跡を上方より見ると、三角形

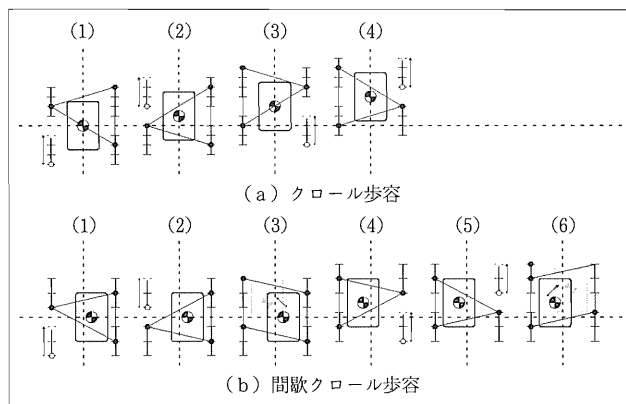


図-3 間歇クロール歩容

を形成する。

図-3(a)に示すクロール歩容と比較すると、間歇クロール歩容では左右への本体揺動により、特に後脚の復帰時の安定性が増している。

図-4に、間歇クロール歩容のタイム・チャートを示す。通常は、揺動無しの間歇クロール歩容にて歩行し、安定性を向上する場合、揺動有りの間歇クロール歩容に切替える。

(2) 基準歩容による脚の仕様検討

(a) 脚の可動範囲

TITAN XIが歩行の対象とする法面には、主として、格子状フレームの格子間隔が2m、幅、高さが共に0.3mの規格のコンクリートフレームが設置されている。したがって、TITAN XIはこのようなコンクリートフレームを跨ぎながら歩行する必要がある。また、山の斜面が凹凸や段差等で複雑な部分ではこの規格外の部分があり、このようなコンクリートフレームにも対応する必要がある。

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2m程度、高さ方向に1m程度、旋回角度90deg程度を設計の目標に設定した。

(b) 脚の出力

4足歩行ロボットが平地を歩行する際、支持脚対角線上を本体が横切る状態があり、自重の半分以上を支持する必要がある。今回想定しているTITAN XIの質量は6,000~7,000kg程度を目標としているので、一脚で出力30kN以上発生できることが必要である。

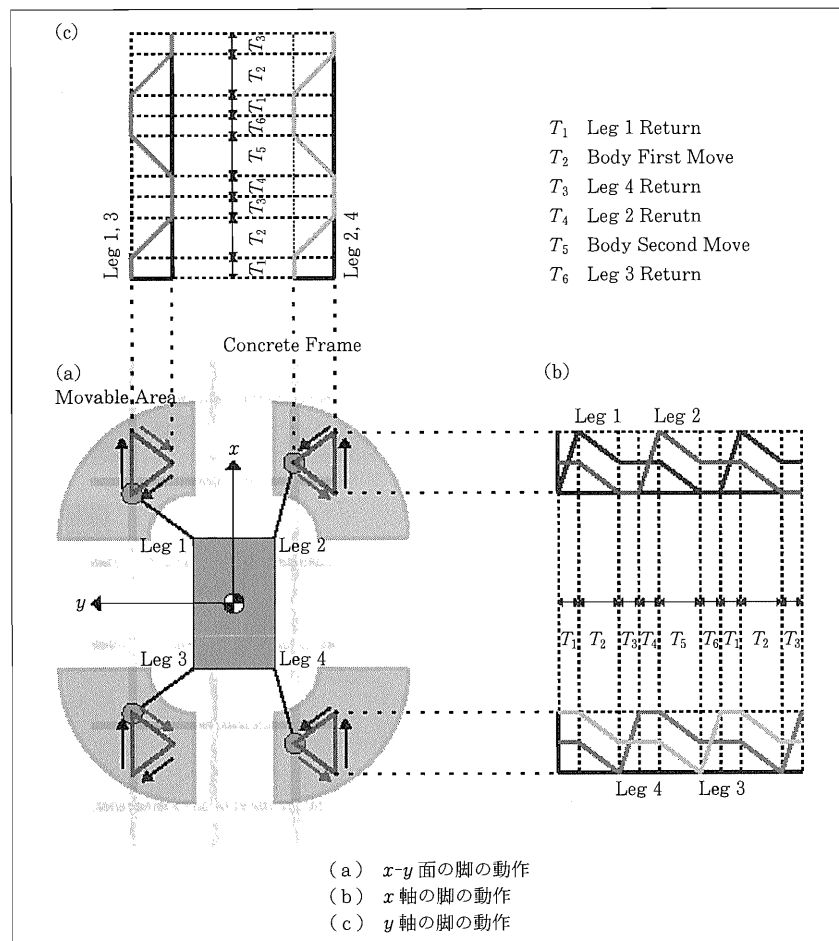
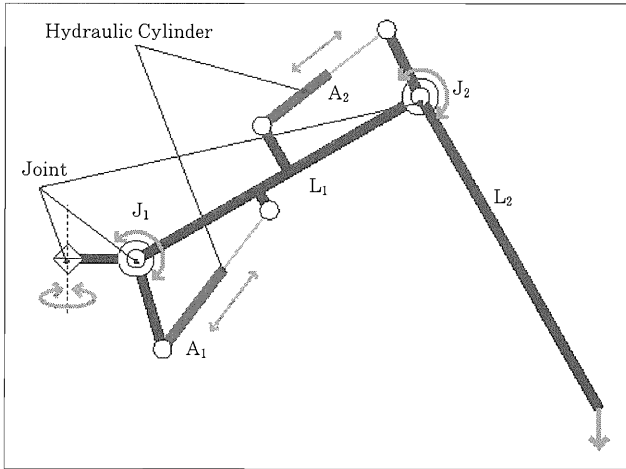


図-4 間歇クロール歩容のタイム・チャート

4. 脚機構の設計

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、図一5 に示す市販のバックホウを使用することを計画した。



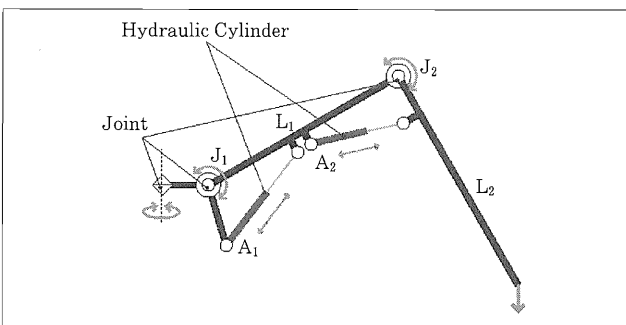
図一5 バックホウによる脚機構

しかし、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おり、新たに脚機構を設計することとした。

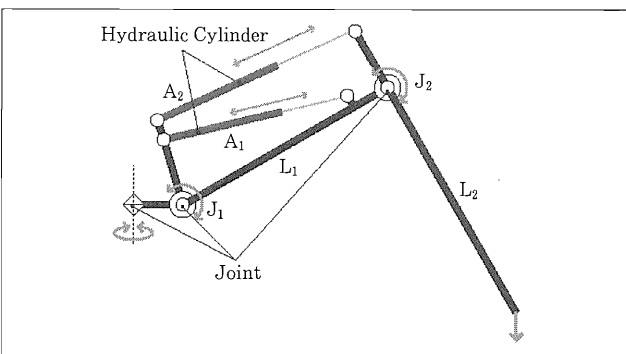
新たな脚機構として、次の二つの方式の脚機構を検討する。

① 第1の脚機構

バックホウを改造した脚機構(図一6, 写真一2(a))。



図一6 バックホウを改造した脚機構



図一7 干渉駆動を用いた脚機構

② 第2の脚機構

干渉駆動を用いた脚機構(図一7, 写真一2(b))。

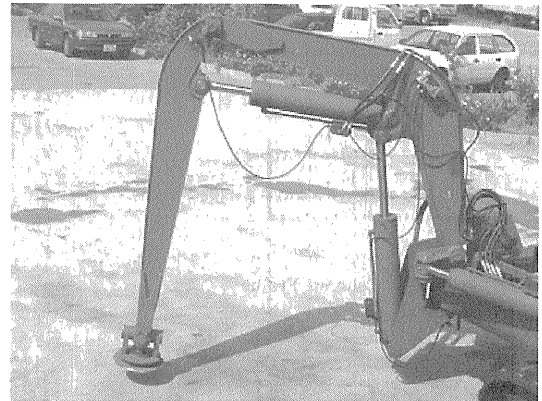
(1) 第1の脚機構

第1の脚機構は、必要な支持力と可動範囲を実現可能なように、バックホウの寸法とアクチュエータの特性を最適化した脚機構である。通常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することにより、胴体の近傍に脚を着地した時(脚を折畳んだ時)ほど大きな力を発生させる設計とした。

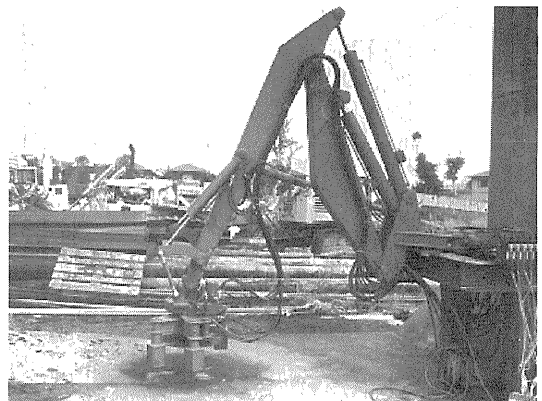
表一に示すように、第1の脚機構では、歩行に必要なと想定される可動範囲内で自重の半分程度を支持可能で、脚のストロークも水平方向に約2.0m、垂直方向に約1.0mあり、想定している脚への最低限の性能を満たせることが確認できた。また、軽量に設計できたため遊脚時の重心変動も少なく、歩容を計画しやすい。

表一 脚機構の仕様比較

仕 様	バックホウを改造した脚機構	干渉駆動を用いた脚機構
質 量 (kg)	480.0	970.0
長 さ (m)	3.7	3.8
ストローク (水平) (m)	2.0 (1.0~3.0)	3.0 (0.5~3.5)
ストローク (垂直) (m)	1.0 (1.0~2.0)	1.5 (0.5~2.0)
出 力 (kN)	30.0	40.0



(a) バックホウを改造した脚機構



(b) 干渉駆動を用いた脚機構

写真一2 開発した脚機構

(2) 第2の脚機構

第2の脚機構は、干渉駆動⁸⁾を導入した機構である。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、機構を構成するアクチュエータ群全体から必要とする出力を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駆動方式である。市販のバックホウでは、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、各々が各関節を独立に駆動する (図-5)。

これに対し、干渉駆動型脚機構は、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 (図-7)。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である。

表-1 に示すように、主に歩行で用いる胴体よりも低い可動範囲の大部分で出力が約 40 kN、脚のストロークが水平方向に約 3.0 m、垂直方向に約 1.5 m となるなどバックホウよりも可動範囲、出力共に大きくできる。

しかし、干渉駆動を可能にするためアクチュエータに長い動作ストロークと大出力に耐える脚機構が必要となり、重量が増大した。

(3) 脚機構の選定

二つの脚機構を比較検討した結果、以下に示す理由により第1のバックホウを改造した脚機構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 地面から法面へと滑らかに乗り移る動作があり、上方の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時、脚を人間が自ら操縦することが望ましいため、手動制御が簡単な方が良い。
- ④ 法面上でワイヤにより牽引されるので見かけ上の重量が減少するため、法面での歩行では脚の支持力が多少低くても問題とはならない。
- ⑤ 実用化には、製作が容易で価格が安いことが求められる。

5. TITAN XI 試作モデル

(1) TITAN XI の仕様

以上の検討の結果を踏まえて、写真-3 に示す TITAN XI の試験モデルを製作した。TITAN XI の

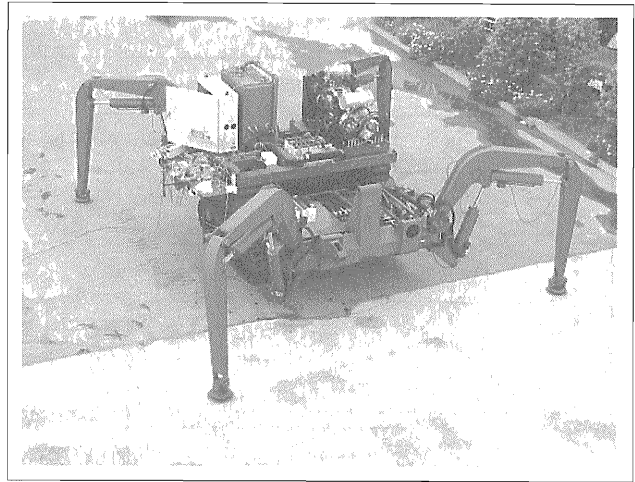


写真-3 TITAN XI 試作機

表-2 TITAN XI の仕様

寸法 (m)	4.8×5.0×2.0
質量 (kg)	5,500 (ドリルを含まない)
出力 (PS)	54

仕様を表-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 SS 400 で製作した。脚は本体の四隅に設置し、脚の旋回軸については、平地や法面において過大な荷重は加わらないので、可動範囲が大きくなるようにした。

本体の中央は削孔機、後部にワイヤを巻取るためのウインチを設け、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。

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姿勢を計測するための傾斜計を備え付けて、本体の位置、姿勢を計測する。

(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ゼロ点付近に不感帯があり、また、制御応答が遅く、サーボ制御が困難である。したがって、通常高精度なサーボ制御が必要とされ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 は屋外で移動し、しかも削孔作業の際、粉塵が飛散する。また、脚機構には多くの油圧シリンダを用いる。さらに、脚を望みの場所に着地するためには、ある程度の制御精度が必要である。

そこで、TITAN XI では比例制御弁を採用し、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) を改善する油圧制御システムを構成した (図-8)。

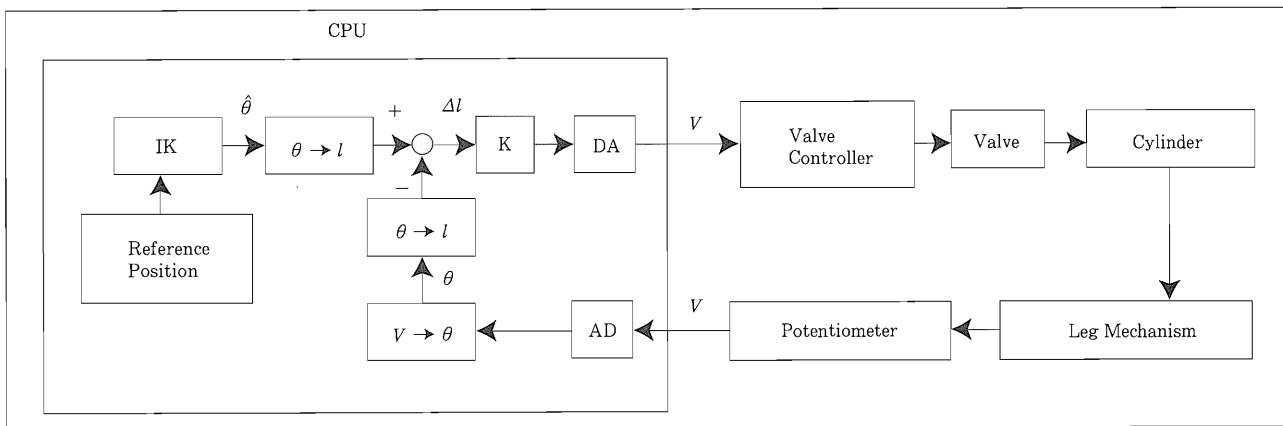


図-8 TITAN XI の油圧制御システム

そして、脚の制御においては、まず、関節に取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。

(3) 足首機構とウィンチ機構

TITAN XI の足首機構は、写真-4 に示すように、3 自由度の受動関節で構成した。2 自由度をユニバー

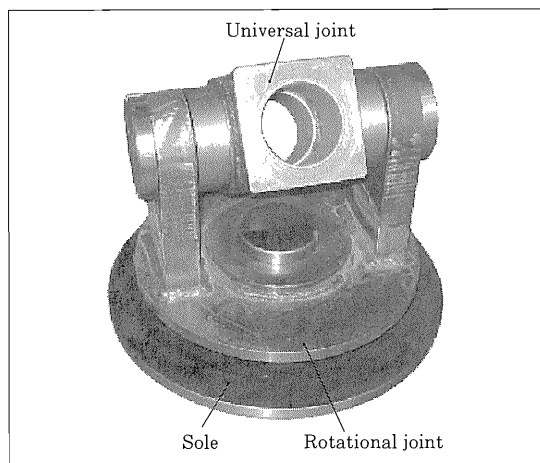


写真-4 TITAN XI 足先機構

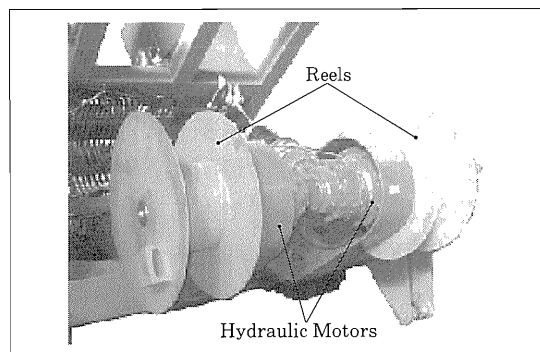


写真-5 TITAN XI ウィンチ機構

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ている。

TITAN XI のウィンチ機構は写真-5 に示すものであり、このウィンチの支持構造体にロードセルを取付け、張力計測を可能としている。

(4) 制御システム

TITAN XI の制御システム構成を図-9 に示す。これは、本体に搭載された 3 つの PC 104 plus 準拠のオンボード・コンピュータで構成したものである。各々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及びエンジンリフトの制御

B：本体の右半身と 2 つのウィンチの制御

C：全体統括制御及び命令受信

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。そして、A

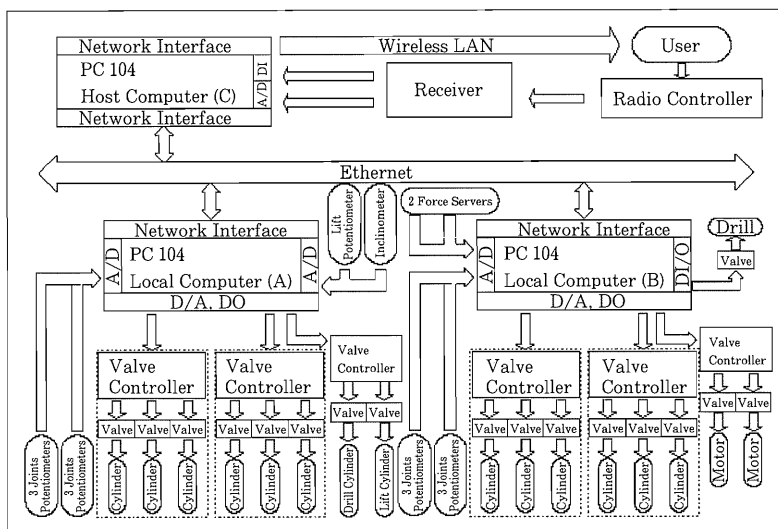


図-9 TITAN XI の制御システム

とBのコンピュータはEthernetでCと接続している。

操作者がラジオコントローラ（送信機）のジョイスティック、スイッチなどを使って、歩行時の進行方向、速度、本体高さ指令、削孔作業時の削孔装置の角度、削孔動作指令、さらに緊急時の停止指令などを送り、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取り、処理し、各々の動作指令をA、Bのローカル・コンピュータに送信し、ロボットは各部を協調的に制御する。

今回開発した制御ソフトは、地図情報処理、歩容生成、脚の運動学演算、アクチュエータ制御、データ通信などのタスクに分解し、階層化された構成とした。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。さらに、GUI（Graphical User Interface）を製作し、歩容生成アルゴリズムの確認やロボットからの受信データのモニタリングを可能とした。

現在、試作モデルがほぼ完成し、地上での基礎的な歩行実験により、全体システム、脚機構、制御システムなどの基本性能を検証している。今後、法面の地図を参照しながら、コンクリートフレームのエッジ近傍を避けた場所に脚の着地点を選択するための歩容決定、アルゴリズムの作成、シミュレーションによる検証を実施し、模擬法面上のコンクリートフレームの歩行及び削孔試験を行う予定である。

6. おわりに

法面形成工事の自動化を目指して、コンクリートフレームがある法面上を歩行し、ロックボルト用の削孔作業を行う4足歩行型法面作業ロボットTITAN XIの全体機構システムの構成、脚駆動系の設計、間歇クロール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述べた。このロボットは、脚を含めた全長が最大約10m、重量が約6,000kgという巨大なロボットである。

現在、試作モデルがほぼ完成し、地上での歩行実験

により基本性能を検証している。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財団法人理工学振興会・土居隆宏氏、東京工業大学大学院機械宇宙システム専攻博士課程・程島竜一氏、大昌建設株式会社・森純一氏に感謝の意を示す。

J C M A

《参考文献》

- 1) 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.
- 2) <http://www.taisho-kk.com/index.htm>
- 3) Waldron, K.J., and McGhee, R.B., "The Adaptive Suspension Vehicle," IEEE Control Systems Magazine, 6 (6), pp.7-12, 1986.
- 4) <http://www.plustech.fi/>
- 5) E. Krotov, R. Simmons, "Perception, Planning, and Control for Autonomous Walking With the Ambler Planetary Rover," The Int. J. of Robotic Research, Vol.15, No.2, pp.155-180, 1996.
- 6) 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.46-66, 1985.
- 7) 塚越秀行, 広瀬茂男, "間歇クロール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.
- 8) 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.20-27, 1989.

[筆者紹介]



福田 靖（ふくだ やすし）
財団法人理工学振興会（東京工業大学 TLO）
プロジェクト研究員



広瀬 茂男（ひろせ しげお）
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
教授



岡本 俊仁（おかもと としひと）
大昌建設株式会社
代表取締役社長