

**プロジェクト名：崖面作業用 6 足歩行ロボットによる  
難所調査技術の高度化  
代表者：程島 竜一（理工学研究科・助教）**

## 1. はじめに

山間地の多い日本では、岩盤崩落や落石事故を防止するために、遠望や遠隔調査手法による難所の老朽化調査や健全度診断がこれまで行われてきた。難所の調査には重機や仮設足場が必要であり工期やコストの制約が大きかったためである。そこで、より精度の高い調査を行うべくロープを用いて直接難所を調査するロープアクセス技術による調査法が導入されてきた。そして近年では、ロープアクセス技術を基にした特殊高所技術

(Fig.1) が利用される機会が増加してきている。ロープを伝って登高・下降や横移動などを安全・迅速に行えるため、特殊高所技術は、岩壁や高層建築物など多くの難所において、調査専門家が近接調査する業務へと活用の幅が急速に広がった。具体的には、ダム、ビル、橋梁などのコンクリート・鋼構造物における劣化および亀裂・破損調査や、岩壁・急傾斜地における岩塊等の安定度調査などにも適用され始めている。国土交通省の新技術情報提供システム（NETIS）にも登録されており、活用の促進が図られる「有用な新技術」との期待がある。

しかしながら、難所調査は本質的に危険な作業であり、滑落等の労働災害をいかに防止するかが大きな課題である。また専門技術員を育成・確保するコストや時間も問題となっている。そこで、研究代表者はこのような極限環境下において歩行ロボットが発揮できる特性に注目し、既存の調査法を改良することを目標とした作業移動ロボットを開発することとした。

## 2. 移動型広域作業システムの概念

### 2.1 ワイヤ支持型歩行ロボットの特長

研究代表者は、このような斜面作業の機械化を実現するには、ワイヤで支持された歩行ロボット形態が最適であることを指摘し、移動作業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。ワイヤ支持型歩行ロボットが最適である理由は以下の通りである。

- (1) 凹凸のある不整地を安定に移動でき、障害物を非接触で回避できる。
- (2) スリップなしで全方向移動ができる。
- (3) 静止時に安定な姿勢を取れるため、搭載機器のための能動的な作業台と成り得る。
- (4) ワイヤにより支持することで自重補償性および安全性を確保する。

研究代表者はこのような特徴に注目し、ワイヤ支持型歩行ロボットで難所調査を行うことを提案する。また歩行ロボットによる不整地歩行を想定した場合、脚形状は胴体の外側に張り出す昆虫型とし、脚は可能な限り長いことが望ましい。そこで本研究では、自然界において岩場や樹上を活発に歩き回るザトウグモの形態を規範とし、長脚と小型胴体を有する 6 足歩行ロボットとワイヤ式自



Fig.1 Steep slope operation by rope

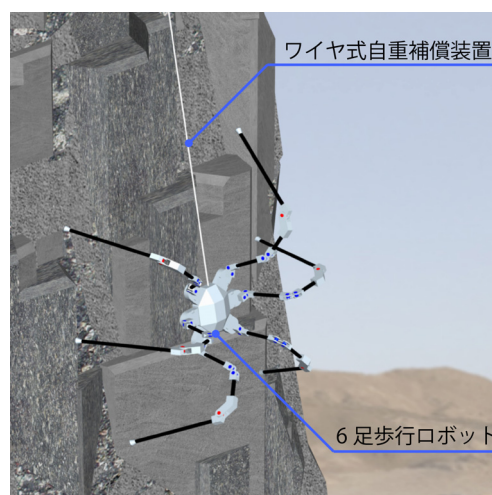


Fig.2 Concept of dangerous spot investigation by hexapod walking robot

重補償装置を開発する (Fig.2)。まずは、崖面作業用 6 足歩行ロボットの開発を中心に行ったので、その結果について報告する。

### 2.2 崖面作業用 6 足歩行ロボット

提案する崖面作業用 6 足歩行ロボットを下記のように決定した。

- (1) 実際のザトウグモの脚自由度を省自由度化し、脚機構の自由度は 4 とした。
- (2) 膝関節には二重関節を導入し、脛関節にはオフセット関節を導入した。
- (3) 全方向移動性を考慮し、脚は胴体周りに放射状に配置することとした。
- (4) ザトウグモの身体的特徴から、脚長体長比を 4.0 程度に設定する。
- (5) 足先には複数節で構成される爪先機構を導入する。

6 足歩行ロボットの概念図を Fig.3 に示す。

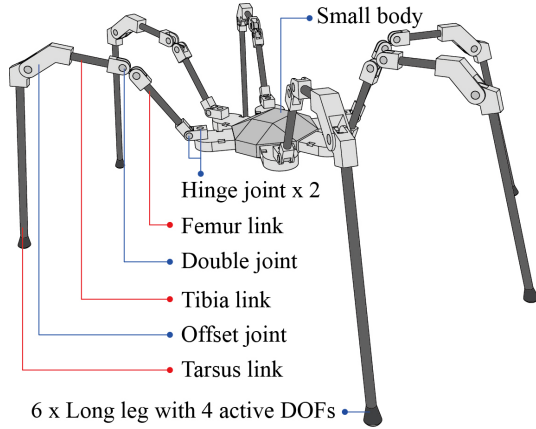


Fig.3 Concept of hexapod walking robot

### 3. 脚機構設計

#### 3.1 脚機構の概要

本研究では、脚長の長い歩行ロボットの実現を目標としている。その実現のための脚機構の仕様として、胴体から離れた位置で自重を支持できる出力を脚先で生成でき、広い可動範囲と高い剛性を有することが挙げられる。これらの課題を解決するために、本研究では干涉駆動の概念を導入する。干涉駆動は装備したアクチュエータを最大限有効に利用することを目的とする設計手法である。この干涉駆動とパンタグラフ機構を導入して設計した脚機構の概念図を Fig.4 に示す。脚関節 1 および 2 は駆動リンク 1 および 2 により駆動される。脚第三関節は駆動リンク 3 および脚リンク 2 により駆動される。脚関節 4 は関節軸にアクチュエータを配置し直接駆動する。

#### 3.2 脚機構の出力解析

脚先の位置座標を  $A = (A_x, A_y, A_z)^T$  とすると、脚先の位置、関節角度  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$  とアクチュエータ角度  $\theta^{act} = (\theta_1^{act}, \theta_2^{act}, \theta_3^{act}, \theta_4^{act})^T$  との微分関係は次式で表せる。

$$\dot{A} = J \dot{\theta}^{act}$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial A_{ex}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial A_{ex}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial A_{ex}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial A_{ex}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial A_{ey}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial A_{ey}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial A_{ey}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial A_{ey}}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial A_{ez}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial A_{ez}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial A_{ez}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial A_{ez}}{\partial \theta_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial \theta_1^{act}} & \frac{\partial \theta_1}{\partial \theta_2^{act}} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1^{act}} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_2^{act}} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial \theta_1^{act}} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \theta_2^{act}} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \theta_3^{act}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \theta_4}{\partial \theta_4^{act}} \end{pmatrix}$$

このとき、脚機構の静力学関係はアクチュエータの出力を  $\tau$ 、脚先で発生可能な力を  $F$  とすると、 $\tau = J^T F$  である。この式を基に脚機構の出力解析を行った。Fig.5 は、関節角度 1 が 0[rad] の場合における脚の鉛直方向への支持力を脚先の可動範囲内で示したものである。これにより、提案する脚機構を用いれば、体幹長の約 1.7 倍の段差を乗り越えられることが確認できた。

### 4. おわりに

本研究では、歩行ロボットが発揮できる特性に注目し、ワイヤ支持型歩行ロボットにより難所調査を行うことを提案した。そして提案したシステムの実現のため、長脚と小型胴体を有する 6 足歩

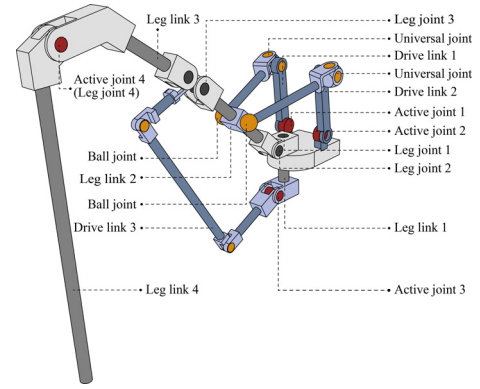


Fig.4 Leg drive system and DOF configuration

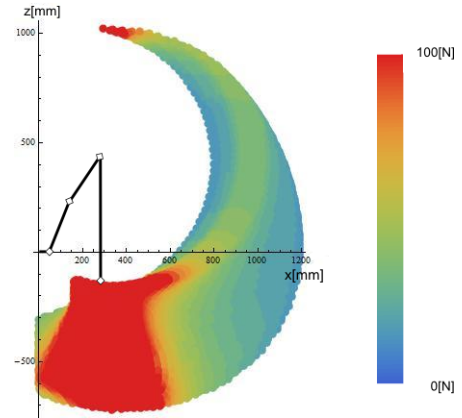


Fig.5 Output force distribution to the downward at the tiptoe

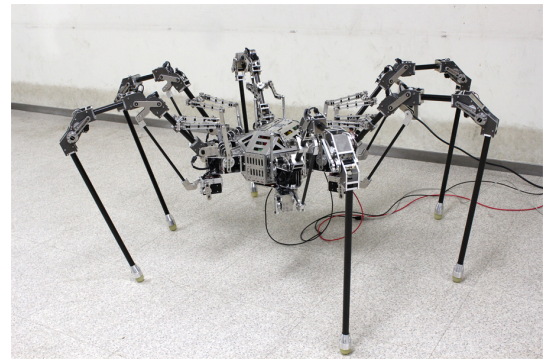


Fig.6 Prototype of hexapod walking robot

行ロボットとワイヤ式自重補償装置を導入することとした。そして本稿では特に 6 足歩行ロボットの開発について報告した。脚機構の設計では、干涉駆動の設計法とパンタグラフ機構を導入した脚機構を提案し、設計と機構解析を行った。そして、これらの設計・解析結果から Fig.6 に示す崖面作業用 6 足歩行ロボットの試作機を完成させた。

今後は、(1) 脚機構の平行リンク系の最適化、(2) ザトウグモの歩容を規範とした対地適応歩容生成、(3) 触覚情報を用いた環境情報の取得システム、(4) 爪先機構、(5) ワイヤ式自重補償装置の開発、などに取り組む予定である。早急にこれらの技術課題を検討し、6 足歩行ロボットによる難所調査を実現する。