

原子炉建屋内の運搬作業を担う 4足歩行ロボットの制御技術

Control Technologies for Quadruped Walking Robot to Facilitate Carrying Operations in Reactor Buildings

菅沼 直孝

上原 拓也

中村 紀仁

■SUGANUMA Naotaka

■UEHARA Takuya

■NAKAMURA Norihito

東日本大震災で被災した東京電力(株)福島第一原子力発電所では、高レベルの放射線環境下のために原子炉建屋内に人が近づくことができない状況となった。そのため、建屋内の調査や作業を行う遠隔操作型のロボットへの期待が高まった。

東芝は、遠隔地点から操作し、様々な作業に応じたツールを運搬できる4足歩行ロボットを開発し、2012年12月に2号建屋の冷却水の漏えい箇所調査に適用した。このロボットは脚の軌道と重心位置を自動で計画し、状況に応じて操作者が脚の着地位置や胴体の姿勢を修正することで、安定した階段昇降ができる。更に2脚を腕のように使って胴体上部に搭載した運搬物をみずから降ろすマニピュレーション機能により、高い機動性と作業性を併せ持つ。

At the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Co., Inc., which was seriously damaged by the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, it has been difficult for workers to approach the reactor buildings due to the hazardous surrounding environment. The need has therefore arisen for remote-controlled robots to facilitate inspection and restoration work on behalf of workers in such a high-level radiation environment.

Toshiba has developed a quadruped walking robot that can carry various tools for decommissioning work. This robot is capable of maintaining its balance while walking on uneven surfaces, slopes, and stairs due to the adoption of control technologies to not only autonomously determine the leg trajectories and center of gravity, but also to correct the leg landing positions and posture with operator intervention according to the walking situation. It also offers high mobility and workability through a manipulation function that allows it to unload tools carried on its back storage area by using two of its legs like arms. This quadruped walking robot was applied to the investigation of suspected water leakage areas in the reactor building of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 in December 2012.

1 まえがき

2011年に発生した東日本大震災によって深刻な被害を受けた東京電力(株)福島第一原子力発電所では、放射線被ばくりスクの高い環境下で作業員の被ばくを低減するため、ロボットによる遠隔作業が必須となった。廃炉に向けた作業には、建屋内部の映像や線量の調査、配管の切断、床面や壁面の穿孔(せんこう)、配線接続、バルブ開閉など様々な作業が想定される。これらの作業では使用するツールの運搬だけでなく、電源や通信インフラの機材を設置する準備でもロボットによる遠隔作業が望まれている。

こうした作業をロボットで行うためには、原子炉建屋内での移動性能が重要になる。建屋内は人が通行することが前提であり、非常に狭い通路や急勾配の階段やスロープなど、従来の車輪やクローラを使用したロボットが移動困難な環境となっている。このような環境下でバランスを崩さずに安定して移動するための歩行制御技術が必要である。また、ツールや機材を設置するためには、目的の場所で積み降ろす機能が必要である。

東芝は、今まで運転プラント向けに様々なロボットを開発してきたが、原子炉建屋内の作業をはじめ、災害救助や、施設警備、林業の作業支援などへ広く応用できるように、不整地

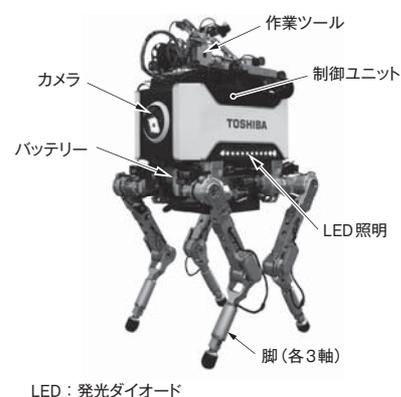
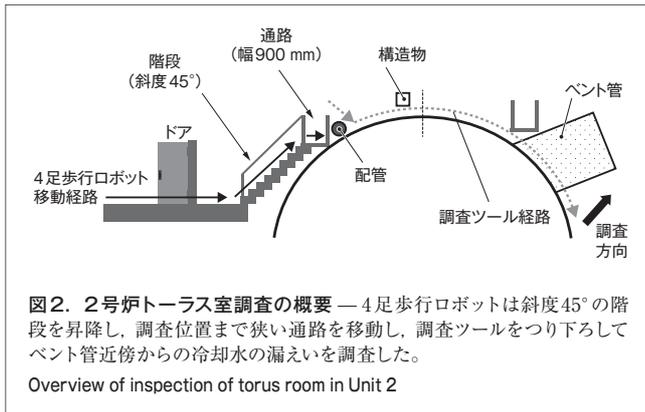


図1. 4足歩行ロボット — 脚部の関節に電動モータを用いたコンパクトな設計であり、作業ツールを搭載できる運搬能力を持つ。

Quadruped walking robot

や傾斜地を安定して走行する機能を備えた4足歩行ロボットを開発した(図1)。このロボットを2012年12月に福島第一原子力発電所2号機の原子炉建屋地下階のトラス室における冷却水の漏えい箇所調査に適用した⁽¹⁾(図2)。ここでは上記の調査を可能にするために開発した4足歩行ロボットの階段昇降のための歩行制御と、今後必要になる運搬物の積み降ろしを実現するための方法について述べる。



2 4足歩行ロボットの概要

2.1 目的と要求仕様

原子炉建屋内の環境下で階段や段差、散乱した瓦れき上を移動し、目的の場所まで調査や作業のためのツールを運搬する作業を行うためのロボットへの要求仕様を次のように定めた。

- (1) 移動性能
 - (a) 幅900 mmの通路上で歩行及び方向転換ができること
 - (b) 斜度45°、段差220 mmの階段を昇降できること
 - (c) 20 kg以上の作業ツールを運搬できること
- (2) 遠隔操作 約500 m離れた免震重要棟からの遠隔操作ができること。

2.2 特長

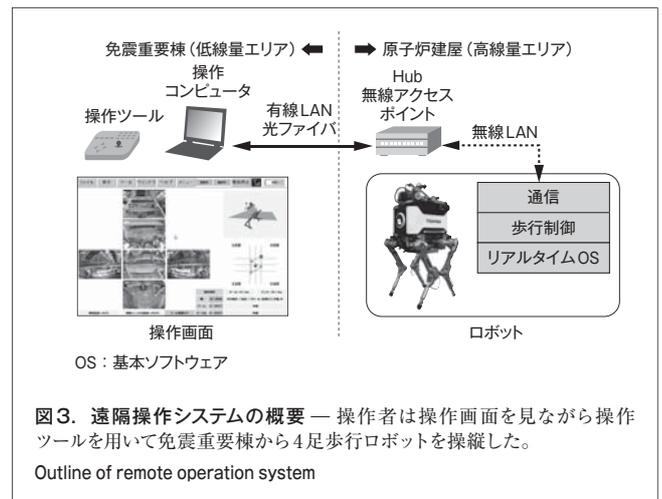
ここでは、4足歩行ロボットの設計のポイントについて述べる。ロボットは、原子炉建屋内の通路上で方向転換ができる寸法にし、階段を昇降する際の歩行姿勢がとれる前後脚の間隔と各脚の長さで設計した。階段昇降で足先以外の部分を階段に接触させずに動作でき、胴体を前後左右方向へ移動できるように、各脚を腿(もも)リンクと脛(すね)リンクの2リンクとし、膝関節に1軸、腿リンクと胴体の間に2軸の合計3軸の関節軸の構成とした。関節軸を構成するモータと減速機は、可搬質量20 kgを合わせた本体質量85 kgを保持し、移動速度が最大1 km/hとなるように選定した。4足歩行ロボットの仕様を表1に示す。

トラス室調査では、原子炉建屋から直線距離で約500 m離れた免震重要棟から遠隔操作を行った(図3)。放射線の影響がほとんどない免震重要棟から、原子炉建屋の外までは敷設された有線LANを用い、高線量のため人が立ち入ることが困難な原子炉建屋内では無線LANでロボットとの通信を行った。広角レンズを取り付けたカメラを、前後左右に加えて前後の足元を見るために合計6台配置し、操作者はロボットから送られてくる映像を見ながら操作を行った。操作にはジョイスティックを用いることで簡単に操作ができるシステムを実現した。ロボットには加速度センサ、ジャイロセンサ、及び歩行時の

表1. 4足歩行ロボットの仕様

Specifications of quadruped walking robot

項目	仕様
外形寸法	624(幅)×587(長さ)×1,066(高さ) mm
旋回直径	830 mm
質量	65 kg
移動速度	1 km/h(最大)
可搬質量	20 kg
階段昇降	段差220 mm(斜度45°)
動作時間	2 h(バッテリー駆動)

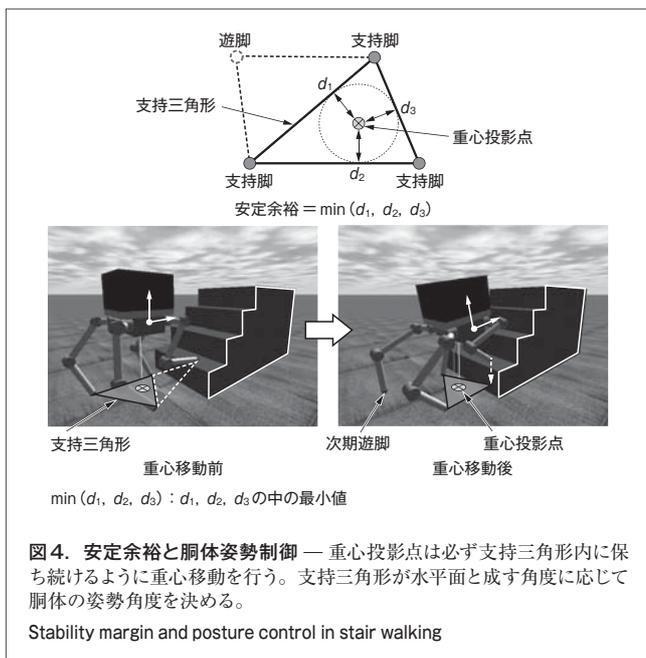


床反力を計測する力センサを搭載し、これらのセンサ情報を用いて脚の動きや胴体の姿勢などの条件を自動で生成させた。操作者はロボットの進行方向を指示するとともに動作中の周囲との接触を監視し、必要に応じて脚の着地位置を修正できる操作介入機能を付与した。

このように正確な計算による動作条件の生成などのロボットが得意とする点と、大局的な判断や転倒の危険予知のような人が得意とする点を、ロボットと操作者で役割分担することで、操作者の負荷の軽減と高い信頼性を両立させた遠隔操作システムを構築した。

3 歩行制御

原子炉建屋内で運用する遠隔操作型のロボットに求められるもっとも重要なことは、作業を完遂して必ず帰還するという信頼性の高さである。人が近づくと困難な現場でロボットがなんらかの理由で停止して操作不能に陥ることは、停止したロボットが数少ないアクセスルートを塞いでしまうことになる。脚型ロボットにとって停止に陥るもっとも危険性が高い事象は、階段などの平坦(へいたん)ではない地形を歩行中にバランスを崩して転倒することである。そのため、いくつかの4足歩行ロボットの歩き方のパターン⁽²⁾のうち、不整地では安定性



の高いクロール歩行を採用した。

図4に示すように、クロール歩行は常に4脚のうち3脚以上が接地した状態で歩行するパターンであり、接地している3脚（支持脚）の接点を結んで作られる三角形（支持三角形）の中に、重心を投影した点（重心投影点）が入るように胴体を移動し、残り1脚（遊脚）を踏み出す。重心投影点が支持三角形の中にあれば常に安定な状態を保つことができるため、不整地などの転倒の危険性が高い場所における歩行に適している。

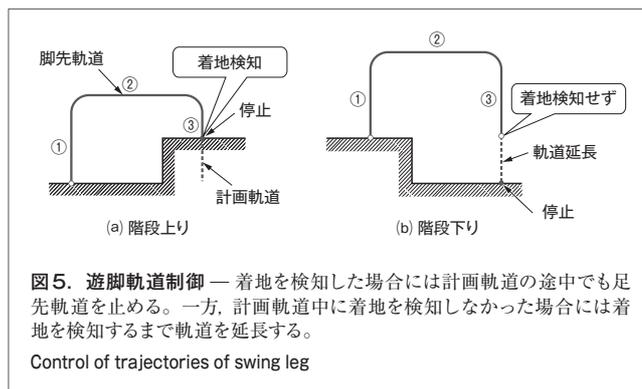
当社は、不整地歩行、特に階段昇降で転倒しない信頼性の高い動作を実現するために、クロール歩行に適した歩行制御技術を開発した。

3.1 階段昇降

ここでは、階段昇降のための歩行制御の詳細を4項目に分けて述べる。

(1) 重心位置制御 階段における支持三角形の面積は傾斜角度に応じて小さくなるため、重心位置の制御には精度が求められる。重心位置制御は、図4に示したように実際の重心投影点と支持三角形の3辺との距離の最小の値（安定余裕）が、安定を維持できる計算上の最小距離（しきい値）を上回るように重心位置を制御する方法である。しきい値には重心位置の高さに比例した値を採用することで、高さ方向に対する安定性も確保できる。

(2) 胴体姿勢制御 階段昇降時に胴体を水平に保ち続けようとすると脚の関節軸どうしを結んだリンク長さと関節可動域の関係から、足先が到達できる範囲が制限されてしまう。胴体姿勢制御は、図4のように支持三角形の傾斜面と水平面との角度差に応じて、ロボットの胴体姿勢を傾斜面に倣わせる制御方法である。



(3) 遊脚軌道制御 階段昇降をする際にステップの正確な高さを事前に把握することは困難である。遊脚軌道制御は、高さが未知の地形に対する遊脚の軌道生成方法である（図5）。遊脚の軌道は、①昇降可能高さまで垂直に上げる、②進行方向（前方）に送り出す、及び③着地位置まで垂直に下ろす、の3段階から成る。③では①で上げた高さ分だけ下げる軌道で動作させる。階段上りでは計画軌道の動作中に脚の力センサで着地を検知して動作を停止し（図5(a)）、下りでは計画軌道中に着地を検知しないため、自動的に軌道を延長して着地するまで動作を継続する（図5(b)）。

(4) 転倒回避制御 遊脚を上げる際に足場の影響や不十分な重心移動の結果によって、重心移動後でも次に遊脚となる脚に過剰な荷重が残ってしまう場合があり、その反力で転倒する可能性がある。転倒回避制御は、遊脚をわずかに上げて停止させ、荷重が除去されたことを確認する方法である。遊脚に荷重がなくなれば動作を継続し、荷重が残っていれば元の位置に戻す動作を選択することで、転倒を事前に回避できる。

これら四つの歩行制御技術により、操作者はロボットの重心位置について意識する必要はなく、方向の修正と遊脚の着地位置の確認をするだけで、安定した階段昇降が可能になった。

3.2 操作介入

4足歩行ロボットの遠隔操作システムは、操作者がロボットのカメラ映像を監視することによって周囲との接触や転倒の危険性を事前に把握できるよう構成している。接触や転倒のリスクがあるとき、ロボットの自動動作を中断し、操作者によるマニュアル操作に切り替えられる操作介入機能を設けた。

遊脚の着地位置は自動制御で決まるため、環境によっては次の重心移動で不安定になる可能性がある。操作介入は遊脚が階段の端部に着地した場合に、操作者が着地し直しの判断をして、カメラ映像を見ながらジョイパッドを用いて遊脚の着地位置を修正する機能である（図6）。

歩行制御では重心移動と遊脚動作とが排他的に切り替わるため、遊脚動作中は必ず重心投影点が支持三角形の内部にあ

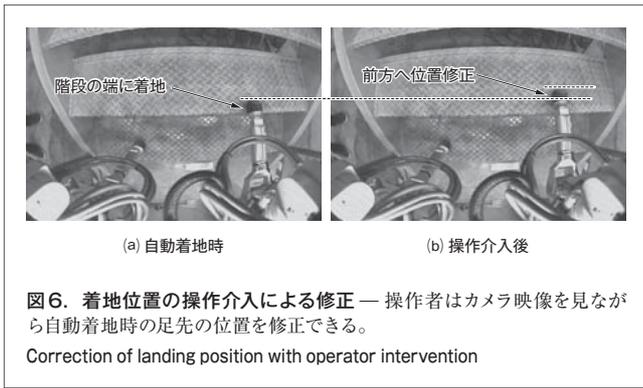


図6. 着地位置の操作介入による修正 — 操作者はカメラ映像を見ながら自動着地時の足先の位置を修正できる。
Correction of landing position with operator intervention

り、着地の直後に遊脚を上げ直しても転倒することはない。重心移動と遊脚動作の終了時には着地位置の修正の要否に関わらず待機状態とし、操作者からの動作継続指令によって次の動作へ移る。これにより操作者は状況を冷静に判断する時間を確保でき、ヒューマンエラーの少ない遠隔操作システムを実現した。

4 運搬物の積降ろし

トラス室調査の際は2 kgの調査ツールを積み降ろすための専用アーム(8 kg)を搭載して運用した。今後は4足歩行ロボットで様々な作業に応じた専用ツールを取り扱い、20 kg以上の運搬物を積み降ろす計画である。しかし、重量物を積み降ろすために大型のアームを搭載することは困難である。そこで、新たな取組みとして、図7に示すような胴体下部を接地させて着座させた状態で、前脚2脚を用いて運搬物を積み降ろす制御方法を開発している。

脚を用いて積み降ろす場合には、積降ろし中の運搬物の位置変化によって4足歩行ロボットの重心位置とのつり合いを保てずに転倒するリスクがある。

そこで、図8のように運搬物を積み降ろす側に後脚の接地位置を制御することで、転倒モーメントを小さくする姿勢制御方法を開発し、24 kgの運搬物でも転倒せずに降ろせることを

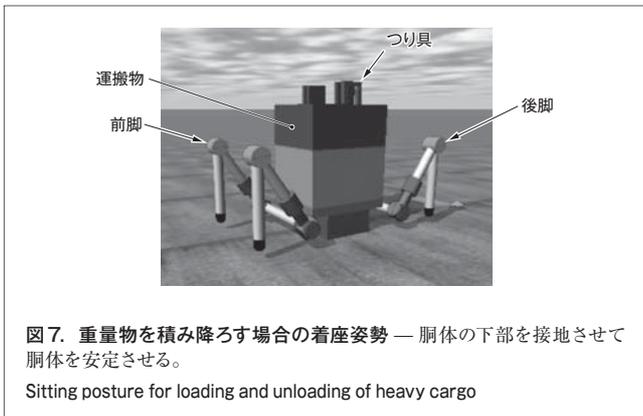


図7. 重量物を積み降ろす場合の着座姿勢 — 胴体の下部を接地させて胴体を安定させる。
Sitting posture for loading and unloading of heavy cargo



図8. 転倒回避姿勢 — 後脚の接地位置を制御して転倒回避姿勢をとりながら前脚で荷物を積み降ろす。24 kgの運搬物を降ろせることをシミュレーションで確認した。
Overturning prevention posture by controlling landing positions of back legs

シミュレーションで確認した。

今後は積降ろし中に運搬物を落下させないための把持力制御を導入するなど、信頼性の高い運搬機能を開発する。

5 あとがき

4足歩行ロボットを開発し、福島第一原子力発電所の格納容器の状況調査に運用され、成果を上げた。今後、積降ろしなどの運搬機能を向上させて、廃炉措置に向けた作業に貢献するよう、更には他分野へ広く展開できるよう開発に取り組んでいく。

文献

- (1) 東京電力. “福島第一原子力発電所 2号機ベント管下部周辺調査結果について”. 東京電力ホームページ. <<http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130315-03j.html>>, (参照 2014-06-27).
- (2) 古荘純次. 歩行ロボットの研究展開. 日本ロボット学会誌. 11, 3, 1993, p.306 - 313.



菅沼 直孝 SUGANUMA Naotaka

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 機械システム開発部主務。原子力施設向けロボットの研究・開発に従事。日本ロボット学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



上原 拓也 UEHARA Takuya

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 機械システム開発部主査。原子炉内保全装置の研究・開発に従事。日本機械学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



中村 紀仁 NAKAMURA Norihito

電力システム社 原子力事業部 原子力システム設計部主務。制御棒駆動機構・サービス機器の設計・開発に従事。

Nuclear Energy Systems & Services Div.