

放射線環境下での作業員の被ばく低減に向けた 4足歩行ロボット2台の協調動作による荷物運搬技術

Cooperative Load Carrying Technologies for Two Quadruped Walking Robots to Reduce Risk of Radiation Exposure during Decommissioning Work

上田 紘司 菅沼 直孝 中村 紀仁
 ■ UEDA Koji ■ SUGANUMA Naotaka ■ NAKAMURA Norihito

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉に向けた作業のいくつかは高放射線環境下で行われることから、作業機材や工事資材の運搬のような単純作業は人に代わって遠隔操作装置で行い、作業員の被ばくを低減する必要がある。

東芝は、機材を積載して運搬できる4足歩行ロボットを開発し、建屋内の調査作業に活用してきた。今回、新たに2台の4足歩行ロボットを協調動作させて荷物を運搬する技術を開発することで、配管のような長尺重量物を運搬できるようにした。2台の動作を同期させ、各ロボットの歩行安定性を確保しながら2台間距離を一定に保つ制御技術を開発し、建屋内の通路を想定した100 mmの段差がある床面上で長さ2 m、質量45 kgの配管を運搬して荷降ろしできることを確認した。

At the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, several operations in the decommissioning work are taking place in a high-level radiation environment. The need has therefore arisen for remote devices to perform various simple tasks including the carrying of equipment and construction materials on behalf of workers in order to reduce the risk of radiation exposure.

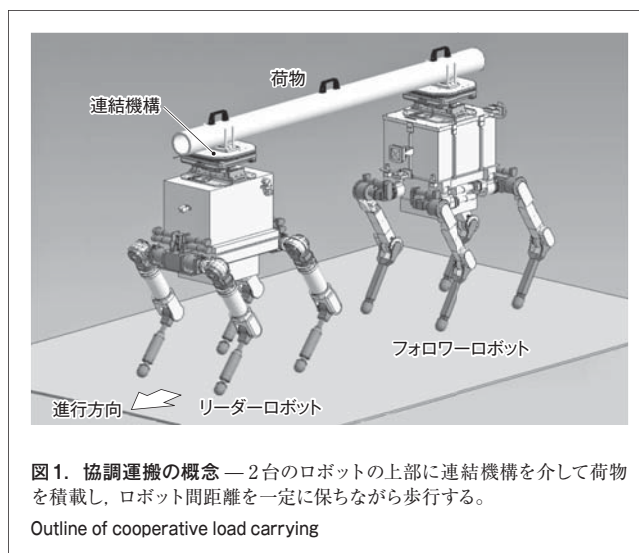
Toshiba developed a quadruped walking robot to carry packed work tools, which has been applied to the reactor building investigations. In order to carry long and heavy loads such as pipes, we have now developed the following cooperative load carrying technologies using two quadruped walking robots: (1) a control technology to synchronize the timing of the start of walking of two robots, and (2) a control technology to maintain a constant distance between two moving robots while ensuring a sufficient margin for each robot. Experiments using two robots in which these technologies had been implemented confirmed that they could carry and unload a pipe of 2 m in length and 45 kg in weight on a floor with a level difference of 100 mm.

1 まえがき

東日本大震災によって被災した東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉作業においては、建屋内部の状況調査や放射線量測定、床面や壁面の穿孔(せんこう)、配管や作業足場の敷設などの様々な作業が想定される。これらの作業のいくつかは高放射線環境下で行われることとなり、作業ツールや資材などの荷物運搬作業は、被ばく低減のために作業員に代わって遠隔操作装置で行うことが望ましい。

このような作業への活用を目指し、東芝は階段や凹凸のある不整地を安定して歩行する移動機能と、荷物の運搬と荷降ろしの機能を備えた4足歩行ロボットを開発した^{(1), (2)}。2012年12月及び2013年3月には、このロボットに調査ツールを積載して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⁽³⁾。

今後、原子炉建屋内では、原子炉に接続される冷却水の循環ラインやガス置換用の空調設備などの設置作業を行っていくこととなるが、これらの作業では配管や足場材などの長尺重量物の運搬が不可欠である。このような資材の運搬を1台のロボットで行うとバランスが悪く、更にロボットに積載可能な質量に制約がある。そこで当社は、2台の4足歩行ロボットを協調動作させて長尺重量物の運搬と荷降ろしを行う技術を開



開発した(図1)。

ここでは、協調運搬を実現するために新たに取り入れた方法として、2台のロボット動作の同期方法と、荷物を落下させないようにロボット間距離を一定に保つための胴体移動量の決定方法について述べるとともに、単体ロボットで実現した脚を使って荷物を降ろす動作を拡張し、2台のロボットを協調させて長尺物を荷降ろしする動作方法についても述べる。

2 2台のロボットによる協調運搬

2台の4足歩行ロボットに荷物を積載して落下させることなく運搬するためには、2台間距離を常に一定に保ちながら歩行する必要がある。そこで、荷物はスライド軸を持つ連結機構を介してロボットに積載する構成とし、2台間距離が変動した場合は、このスライド軸によって吸収する方式を採用した。更に、スライド軸のストローク範囲内に距離変動を取めるために、以下に示す協調制御技術を開発した。

2.1 協調運搬システム

これまでに発表された4足歩行ロボットによる協調運搬の例^{(4), (5)}では、ロボット間の通信は行わず、荷物とロボットとの間に取り付けられた力センサの情報を元に先頭を行くリーダーロボットに対してフォロワーロボットが自律的に追従するシステムとなっている。このシステムでは、リーダーロボットが異なる形態のロボットや人に代わった場合にも応用できるが、横方向への移動や旋回動作などは追従移動で実現できないため、移動方向の指示を共有する必要がある動作には対応が難しい。

そこで、各ロボットが持つ情報を互いに通信して共有する協調システムを構築した。これにより、オペレーターからの操作指令は両方のロボットで受け取ることができ、更にロボット間の通信によって協調動作に必要な情報を共有できる。

2.2 同期制御

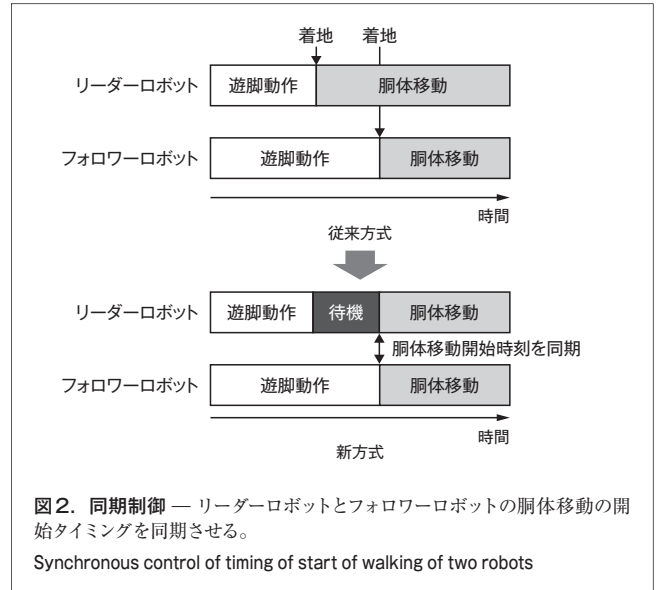
協調運搬時の移動方法として、クロール歩行と呼ばれる方式を採用した。この方式は、常に3本の脚で胴体を支える歩き方であり、不整地で踏み外しによる転倒を防ぐのに適している。また、胴体移動と遊脚動作（脚を上げて脚の位置を移動させる動作）を交互に行いながら歩行させるようにした。

この方式では、遊脚動作中は胴体を移動させないため2台間距離は変化しない。しかし、着地のタイミングは地形によって変化するため、各ロボットの遊脚動作時間は異なり、次の胴体移動の開始時刻に差が生じて2台間距離が変化する。そこで、遊脚動作が先に終了したロボットを待機させ、胴体移動の開始タイミングを合わせる同期制御を導入した（図2）。

2.3 胴体移動量制御

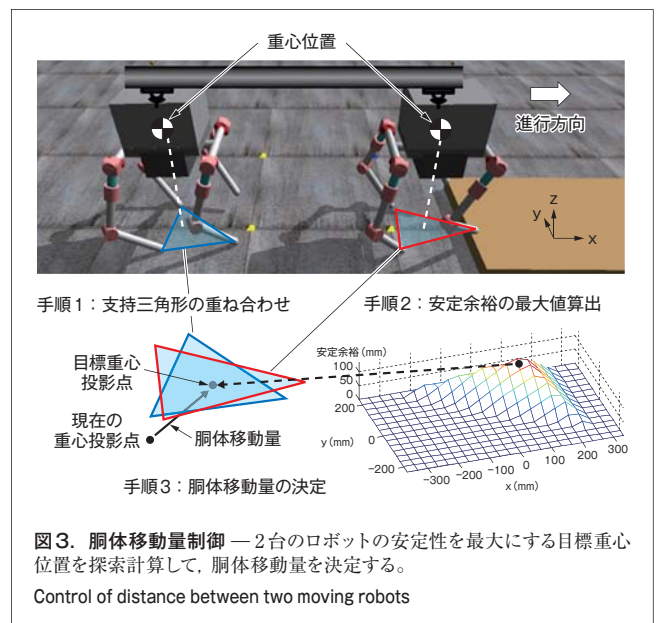
前節の同期制御を用いて同時に胴体移動を行っても、各ロボットの胴体移動量が異なると2台間距離が変化してしまう。クロール歩行では、3本の支持脚の脚先を頂点とする三角形（以下、支持三角形と呼ぶ）の内側にロボットの重心投影点が常に入るように胴体位置を制御して安定性を確保する。しかし、2台の移動量を単純に同一量とするだけではそれぞれの支持三角形の形状が異なる場合に一方のロボットの重心投影点が支持三角形の外側に出てしまうおそれがある。

そこで、各ロボットの重心投影点から支持三角形の最近傍の辺までの距離（以下、安定余裕と呼ぶ）を最大化するために、以下に示すようにリーダーロボットが共通の胴体移動量を決定



するプロセスとした（図3）。

- (1) 胴体移動を行う前に、次に脚を上げる際の支持脚が形成する支持三角形の頂点座標をフォロワーロボットからリーダーロボットに送信することで、2台のロボットの支持三角形を同一座標系上で重ね合わせる。
- (2) 二つの支持三角形が重なる領域内において、任意の点での安定余裕は各支持三角形に対して評価した値の小さいほうを採用するものとし、安定余裕が最大となる位置を探索する。
- (3) 現在の重心位置から手順(2)で探索した安定余裕の最大位置までの方向と距離を胴体移動量として、リーダーロボットからフォロワーロボットに送信して共有する。また、高さ方向については地形の凹凸の影響を受けずに荷

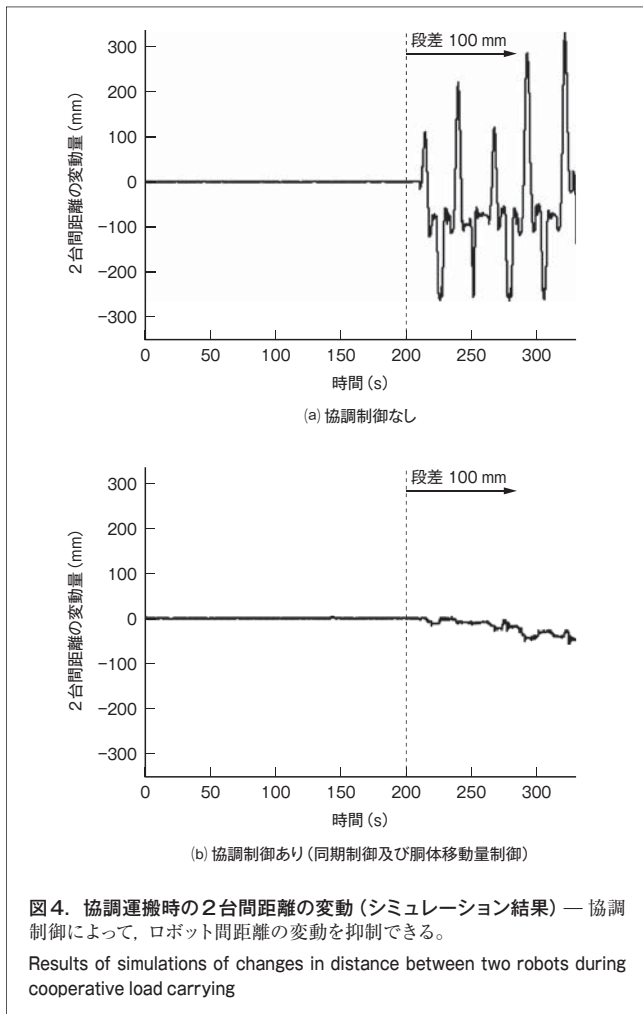


物を水平に保てるように、2台のロボットの目標胴体高さを地面に定義した座標系で一致させることとした。また、各ロボットの地面の高さが異なる際に、一方のロボットの脚が可動限界まで伸縮することを防ぐために、それぞれの遊脚の着地高さから決まる高さ方向の胴体移動量の平均値を、高さ方向の共通の移動指令量に設定することとした。

2.4 シミュレーション評価

協調運搬制御の有効性を確認するために、まずシミュレーション評価を実施した。平地を約1 m前進移動した後に、建屋内の想定経路上にある100 mmの段差を上る動作を行い、2台間距離の変動を評価した。

協調制御を行わない場合は、2台同時に歩行を開始してもリーダーロボットが段差を上る時点から各ロボットの胴体移動にタイミングのずれが発生した。この結果、試作した連結機構のストローク長 ± 95 mmで吸収できない、190 mmを超える距離変動が発生した(図4(a))。一方、同期制御と胴体移動量制御を用いた場合は、この変動を51 mm以内に低減でき、連結機構で吸収可能なストローク範囲に収まることを確認した(図4(b))。



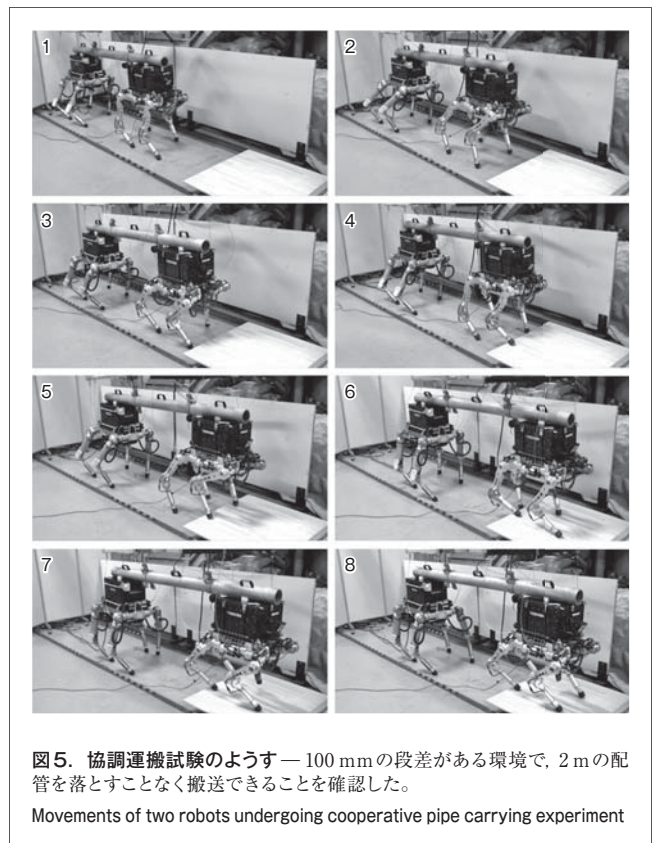
2.5 実ロボットによる試験

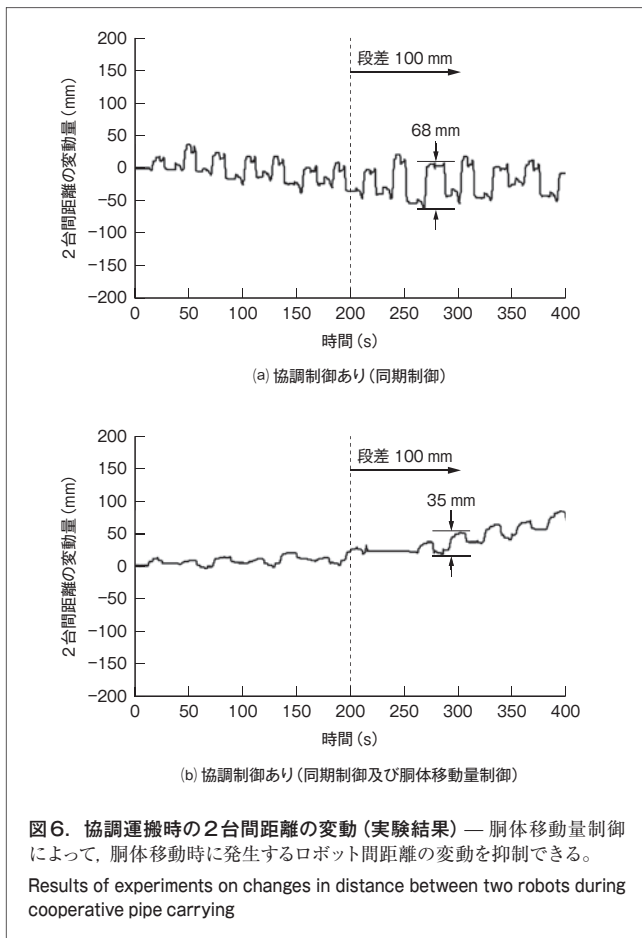
シミュレーションによって検証した協調運搬制御を実際のロボットに実装して試験を実施した。長さ2 m、質量45 kgの配管を積載して、シミュレーションと同様に100 mmの段差を上る動作を評価した。

配管運搬のようすを図5に、2台間距離の測定結果を図6に示す。2台間距離は、ワイヤ伸縮方式の距離計測センサをロボット間に取り付けて測定した。図6(a)は同期制御だけを適用した場合の結果で、図6(b)は同期制御に胴体移動量制御を組み合わせた場合の結果である。

協調制御時の2台間距離の変動は胴体移動時に発生するため、一連の歩行動作のうち1回の胴体移動で発生する距離変動に着目して評価する。同期制御だけを適用した場合は最大で68 mm変動していたが、更に同期制御に胴体移動量制御を組み合わせることで35 mm以内に低減した。これにより、導入した制御手法の有効性を確認でき、実際に配管を落下させることなく運搬できた。

移動距離が長くなるに従って2台間距離が徐々に増減する傾向が見られたが、これは2台の進行方向の初期ずれやロボットの個体差に伴う実際の移動量と目標値との差によって発生しているものと考えられる。これに対しては、連結機構のスライド量の測定値から2台間距離を判断し、胴体移動量の補正操作を行うことで変動量を低減させる運用を考えており、将来





的には自動補正することを目指している。

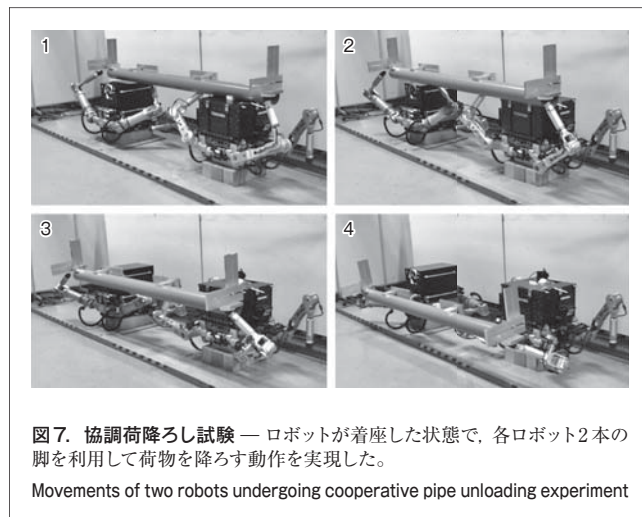
3 2台のロボットによる協調荷降ろし

目的の位置まで運搬した荷物は、その場所に降ろす必要がある。荷降ろし作業のためのアームをロボットに搭載すると、積載できる荷物の質量がアームの質量分だけ制限されることになる。そこで、ロボットが地面に着座した状態で前脚2脚を用いて運搬物を降ろす動作をこれまでに実現している⁽²⁾。ロボットの脚先は不整地の歩行を考慮した半球形状としており荷物をつかむことができないため、荷物側につり耳を取り付けてこれに脚先を掛けて持ち上げる方法を採用している。

2台のロボットによって長尺物を運搬する場合も同様に、各ロボット2本の脚を用いて荷降ろしを行うものとした。協調運搬と同じく荷降ろしの動作タイミングの同期を取ることで、2台の脚先位置の相対変動を抑制して荷物を保持できるようにし、2 mの配管を荷降ろしできることを確認した(図7)。

4 あとがき

作業員の被ばく低減のために人に代わって長尺物や重量物



を運搬することを目的として、4足歩行ロボット2台による協調運搬技術を開発した。今後は、旋回動作や斜面の協調運搬を実現して、建屋内の工作業の資材運搬に活用することで、福島第一原子力発電所の廃炉作業に貢献していく。

文献

- 菅沼直孝 他. 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. 東芝レビュー. 69, 10, 2014, p.48-51.
- Matsuzaki, K. et al. "Quadruped Robot for Improving Workability at Hazardous Environment: Development of Load Carriage Function". Proceedings of the 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). Chiba, 2015-05, JSME, ASME, and CNS. Tokyo, JSME, 2015. ICONE23-1232.
- 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. <<http://photo.tepco.co.jp/date/2013/201303-j/130315-03j.html>>, (参照 2015-08-31).
- 池田ひなた 他. 柔軟な連結部を持つ2台の脚ロボットによる自律的協調搬送. 日本ロボット学会誌. 18, 5, 2000, p.668-674.
- 原 光博 他. 動作ルールに基づく四脚ロボットによる物体の協調搬送. 日本機械学会論文集C編. 66, 645, 2000, p.1589-1596.



上田 紘司 UEDA Koji, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントサービス・応用技術開発部、博士(工学)。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



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 プラントサービス・応用技術開発部主務。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



中村 紀仁 NAKAMURA Norihito

電力システム社 原子力事業部 原子力機械システム設計部主務。原子力施設向けロボットの設計・開発に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.