

8. ロボットによる通信ケーブル敷設システム

三浦洋靖・奥川雅之

1. はじめに

現在、トンネルや橋梁などの社会インフラ構造物は、我々の日常生活を支えるとともに、産業や経済活動の基盤としても重要な役割を担っている。一方で、日本のインフラ構造物は、高度成長期に集中的に建造されたものが多く、老朽化が懸念されている¹⁾。これら社会インフラの崩壊や機能不全は社会や人命に大きな影響を及ぼすことから、適切な頻度での定期点検の実施など、インフラ設備の保全／災害予防が望まれている。また、工場などのプラントにおいても老朽化は深刻な課題となっており、インフラ設備と同様に保全／災害予防が望まれている。しかし、これらの設備は点検箇所によって容易に人が近づけない場所、高所などの危険な場所などがあり、点検足場、交通規制などの付帯作業の増加、点検作業者の安全確保が課題となっている。また、近年は点検項目の多様化や高度化、点検対象設備が非常に多いことなど、点検作業の効率化も課題となっている。これらの解決策として、遠隔地から安全に短時間で調査できる遠隔操作ロボット調査システムの活用が期待されている。

2. 研究課題

危険を伴う場所や人が近寄れない場所でロボットによる調査を行う場合、調査者の安全確保が重要であり、そのためには、安全な遠隔地からの操作が有効である。その際、現場において安定した高品質な長距離通信用ローカルエリアネットワークを迅速に構築することが求められる。本研究では、「群ロボットによる長距離通信インフラ構築の実現」を技術課題として問題の解決を目指している。

2.1 長距離通信インフラ構築における従来手法の動向

トンネルや地下街のような長距離閉鎖空間内における通信インフラ構築問題に対して、大型指向性アンテナを使用した可搬型長距離無線システムや無線アドホックネットワークシステム²⁾、羽田らが提案している有線と無線のハイブリッド通信システム³⁾など、いくつかの手法が提案されている。しかし、これらの手法では、無線LANの多数連携によるホッピング問題や、一度設置した通信ノードにより調査範囲が制約され、想定外の状況や未知の環境への柔軟な対応に対して問題がある。未知の環境調査における長距離通信インフラには、調査環境（電波状況、距離）に対する頑健性、耐障害性、そして適応性を有していることが望まれる。

2.2 コンセプト

本研究では、図1に示すように、ケーブルオートリールを搭載した群ロボットにより有線LANケーブルの敷設を行うとともに、無線アドホックネットワークを併用することで点検ロボットの移動自由度を確保しつつ、高品質な通信ネットワークを構築することを目的としている。ロボット群により通信ネットワークの中継ノード（無線LANアクセスポイントに相当）を構成することで、通信状況に応じて中継ノードを移動することができ、これにより、通信環境の最適化や通信障害に対するネットワーク環境の動的かつ適応的な再構築を可能にし、通信品質の頑健性、耐障害性、さらには適応性を実現できることを特徴としている。

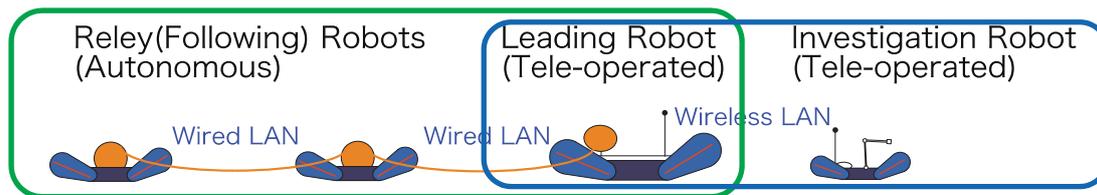


図1 群ロボット通信システム

2.3 群ロボットによるケーブル敷設の課題

本研究における群ロボットによるケーブル敷設では、図2に示すように複数のロボットにケーブルリールを搭載し、先頭の遠隔操作ロボットに後続の自律追従ロボットが隊列走行しながら遠隔操作エリアに近い方から順次

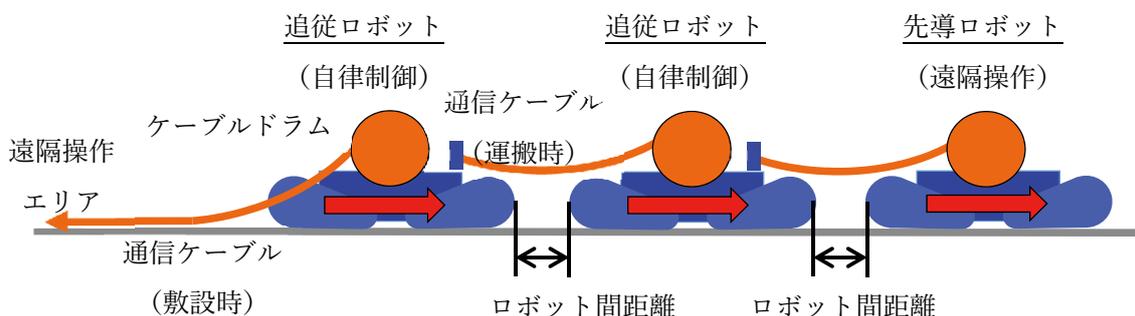


図2 群ロボットケーブル敷設イメージ

ケーブルを送出することでケーブルを敷設していく。本研究では、「ケーブルにダメージを与えずに運搬、移動する」「少人数でケーブルを敷設する」「敷設後にケーブルを再配置する」を目標としてケーブルオートリール装置の開発を進めている。

3. ケーブル張力計測機構の開発

3.1 オートリール装置の課題

ケーブルオートリール開発における目的は「ケーブルをスムーズに送り出す」「ケーブルを整列して巻き取る」「ケーブルに生じる過度な張力を緩和する」であり、ケーブル送出/巻取を適切に行うことが求められる。従来手法では、ロボットの移動量によりケーブルドラムの回転を制御することでケーブルを操作していた。この場合、ロボットの走行滑り、路面の凹凸や起伏により、ケーブルに過度の張力が生じてしまうことや、ロボットとケーブルドラムのダイナミクスの差により、巻取時に緩みが生じケーブルが絡まってしまうなどの問題があった。これに対して、本研究では、ケーブル張力によりドラム回転を制御することで問題の解決を試みている。これら解決手法の技術課題を整理すると「ケーブル整列機構の開発」「ケーブル張力の把握」となる。本年度は「ケーブル張力の計測手法」について研究を行った。なお、「ケーブル整列機構の開発」については、別の機会に発表済みである。

3.2 ケーブル張力推定

3.2.1 張力計測方式

敷設するケーブル張力に応じてオートリール装置ドラムの回転制御を行うにあたり、ケーブルに生じている張力を把握することが必要となる。この課題に対して、先行研究⁴⁾では、ケーブルに追従して揺動する計測レバー

を用い、その角度変化を張力変動として捉えることでケーブル張力の把握や巻取ドラムの回転制御を実現している。本計測方式は、シンプルな機構で実現可能であり、装置の小型化が期待できることから、本研究でも本計測法式を採用することとした。

3.2.2 張力計測機構の構造

本研究では、ケーブル敷設および運搬という大局的な目的から、ケーブル張力を計測する機構のコンセプトを以下のように設定し、図3のようなレバー機構とした。

- ・小型移動ロボットへの搭載を考慮し、開発済みの小型オートリールへの追加機構とする
- ・ケーブルへの負荷をできる限り軽減するため、計測レバー復帰バネはなしとする
- ・計測レバー角度をセンシングし、ケーブル張力を推定する

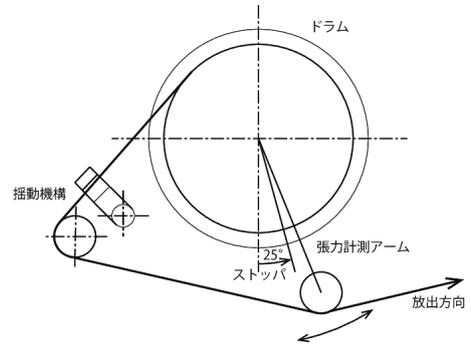


図3 ケーブル張力計測機構概略

3.2.3 張力推定方法

ケーブル張力を推定するにあたり、計測レバーおよびケーブル接触部（揺動機構側、ケーブル送出側）の位置関係を図4のように定義する。ここで、 T^* はケーブル張力、 x^* 、 θ^* 、 A^* は角度を示す。力の釣り合いからケーブル張力は、以下のように表すことができる。

$$\begin{cases} T_1 \cos \theta_1 - T_2 \cos \theta_2 = 0 \\ T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2 = F \end{cases} \begin{cases} \theta_1 = A_1 - x_1 \\ \theta_2 = A_2 - x_2 \end{cases}$$

また、角度 A^* は、図5に示す幾何学的な関係から、規定寸法である a 、 b^* 、 c^* と、レバー角度 B^* を用いて、以下のように表すことができ、レバー角度を取得することで、ケーブル張力を推定することができる。

$$\cos A_1 = \frac{c_1 - a \cos B}{\sqrt{a^2 + c_1^2 - 2ac_1 \cos B}}$$

4. ケーブル張力計測実験

4.1 張力計測機構の製作

前章の機構コンセプトをもとに図6のようなケーブル張力計測機構を製作した。レバー角度は、ポテンシオメータを用いて計測する構造とした。なお、張力計測アームはアーム角度が $B_2 > B_1$ の場合に、レバーが元の位置に復帰できない特異点となることから、これを防止するための下限ストッパを設けると共に、ケーブルと接触するパーツは円筒形とし、さらにケーブルとの摩擦を低減するため、自由に回転できる機構としている。

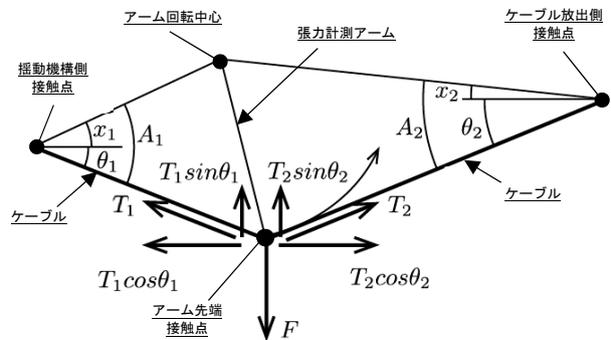


図4 張力計測機構関係

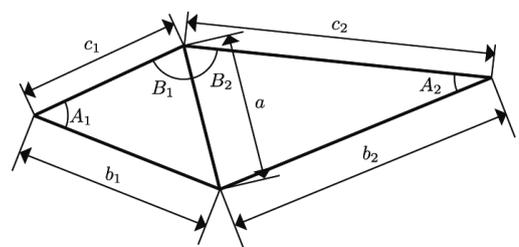


図5 張力計測機構の各角度と辺の関係



図6 張力計測機構

4.2 張力計測実験

4.2.1 実験環境

2台のロボット間におけるケーブル張力変動を模擬するために、2台のケーブルオートリールを用いた実験環境にてケーブル張力計測実験を実施した。実験環境を図7に示す。この実験環境では、小型オートリールと再現用オートリールのドラム回転角速度 ω_1 と ω_2 により、ケーブル張力変動を再現している。なお、実験は「ケーブル送出」および「ケーブル巻取」で実施した。

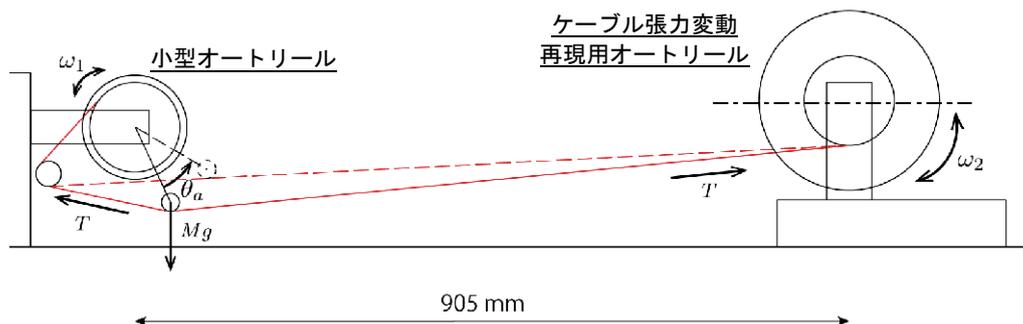


図7 張力計測実験環境

4.2.2 ケーブル張力変動実験

4.2.2.1 ロボット同期移動時のケーブル張力変動

2台のロボットが同じ速度とタイミングで移動する際、ロボットのダイナミクスの違いによるケーブル張力変動模擬実験を実施した。各オートリールのドラム回転角速度は、以下のように設定した。

- ・ $\omega_1 = \omega_2 = 1.0$ [rad/sec]
- ・ ω_1 と ω_2 を同じタイミングで、 1.0 [rad/sec] $\rightarrow 2.0$ [rad/sec] $\rightarrow 1.0$ [rad/sec] $\rightarrow 2.0$ [rad/sec] $\rightarrow 1.0$ [rad/sec] と変化させる

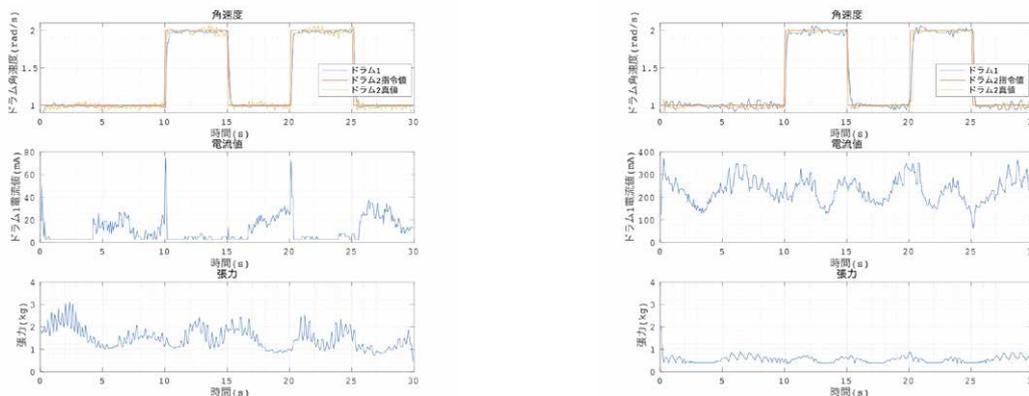
ケーブル送出と巻取実験の結果を図8(a)と(b)に示す。ケーブル送出時には、アーム角度および小型オートリールのドラム動作電流値のいずれからもケーブル張力変動を認識することができた。しかし、ケーブル巻取時はドラム電流値とケーブル張力の変動は確認できたものの、明確なケーブル状態を推定することはできなかった。ケーブル巻取時は、ケーブルの巻取方向と、計測レバーの自重による回転方向が同じであるため、巻き込み現象などが生じたものと推測している。

4.2.2.2 ロボット移動速度の違いによるケーブル張力変動

2台のロボットが異なる速度で移動した場合のケーブル張力変動模擬実験を実施した。各オートリールのドラム回転角速度は、以下のように設定した。

- ・ $\omega_1 = 2.0$ [rad/sec]
- ・ ω_2 を $2.0 \pm 1\%$ [rad/sec] で周期的に変化させる

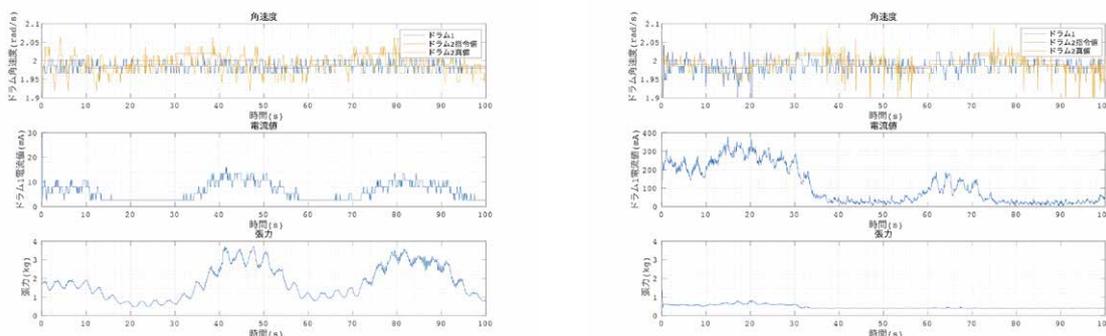
ケーブル送出と巻取実験の結果を図9(a)と(b)に示す。ケーブル送出時には、アーム角度および小型オートリールのドラム動作電流値のいずれからもケーブル張力変動を認識することができたが、ケーブル巻取時はドラム電流値とケーブル張力の変動は確認できたものの、明確なケーブル状態を推定することはできなかった。



a. ケーブル送出

b. ケーブル巻取

図8 ロボット同期移動模擬実験



a. ケーブル送出

b. ケーブル巻取

図9 ロボット速度差模擬実験

5. まとめ

本研究では、これまでに製作した小型オートリールにケーブル張力計測機構を追加し、計測機構レバー角度からケーブル張力の推定理論式を導出し、実験によりケーブル張力推定検証を行った。検証では、ケーブル送出時にはケーブル張力（張り、弛み）を推定できることが確認できた。一方で、ケーブル巻取時はケーブル張力を推定することができなかった。これは、巻取時はケーブル巻取方向と計測レバー回転方向が同じであるため、レバーの巻き込み現象などが生じ、ケーブル張力が顕著に現れなかったことと、今回製作した計測機構ではレバー自重の影響により低い張力を計測できなかったことが要因であると推察している。今後は、ケーブル張力計測機構の改良を進め、ケーブル張力変動を考慮した巻取ドラム回転制御則を導出していく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省「第2節 社会資本の老朽化対策等」、<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/html/n2220000.html>（最終閲覧日：2018年1月31日）
- 2) G. A. Kantor, et al., Distributed Search and Rescue with Robot and Sensor Teams : Field and Service Robotics:Recent Advances in Research and Applications, Springer, pp.529-538, 2006.
- 3) 羽田他4名：災害対応探索ロボット群の長距離遠隔操縦のための有線・無線統合型アドホックネットワーク、情報処理学会論文誌、Vol.51, No.4, pp.1204-1214, 2010.
- 4) 新井他1名、球型トレーラ型ケーブルリール機構の開発、B計測工学, Vol.43, No.3, pp.34-42, 2008.