

11. 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

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。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、災害発生後の迅速な調査による被害状況把握および早期復旧だけでなく、適切な頻度での定期点検の実施など、インフラ設備の維持管理による事前防災／減災が望まれている。現在、日本のインフラ建造物は、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⁾。では、2014年から国土交通省と経済産業省が連携し、社会インフラ構造物に対するロボット技術応用を推進する研究開発プロジェクトとして、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」が始まっている²⁾。

また、現在日本各地に防空壕や廃鉱などの特殊地下壕が多く残されている。これら地下壕では、崩落や陥没の危険があることから、国や自治体が主体となり地下空間を埋め戻すなどの対策が進められている²⁾。しかし、このような特殊地下壕は、地図などが存在していないことが多く、地下空間を埋め戻すためには、その規模を把握することが求められる。一方で、特殊地下壕は、天井や壁面が崩れやすいことから、地下空間内部の調査には危険を伴うという問題がある。このため、遠隔地から安全に地下空間内部を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³⁾。



図1. 亜炭鉱坑道内部

2. 研究課題

災害現場や特殊地下壕などの危険を伴う場所でロボットによる調査を行う場合、調査者の二次災害を避けることが重要であり、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⁴⁾、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⁵⁾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2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ハイブリッド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。

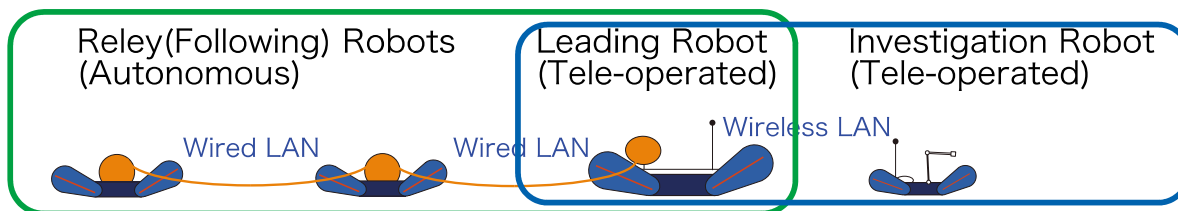


図2. 群ロボット通信システム

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3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

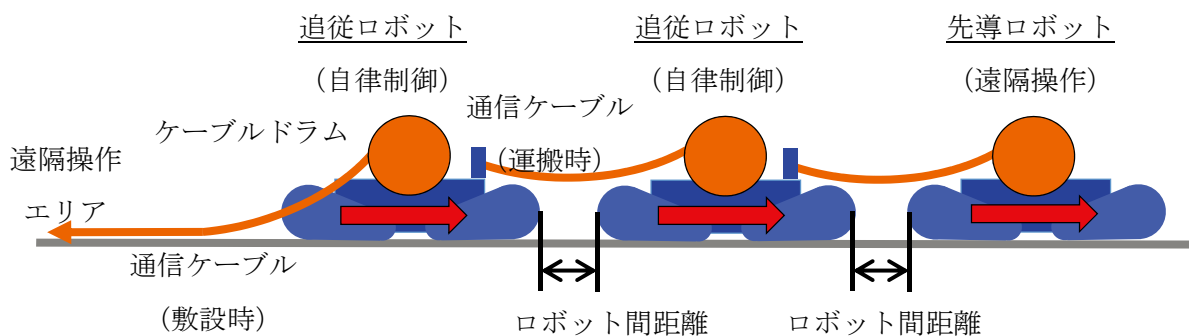


図3. 群ロボットケーブル敷設イメージ

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、これらを実現するための技術課題として以下を設定し、本年度は、ケーブルオートリール装置について研究を行った。

○ケーブルオートリール装置

- ・ケーブルリール装置の開発、張力によるケーブル送出／巻取制御

○自律追従制御およびロボット間相対位置把握

3. ケーブルオートリール装置の開発

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、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「ケーブルの整列巻き手法」について研究を行った。

3.2 ケーブルの整列巻き

3.2.1 整列巻きの定義

研究に先立ち、ケーブルの整列巻きについて以下のように定義した（図4参照）。

- ・ケーブルに重なりが生じていないこと。
- ・巻いたケーブル間隔がケーブル1本分よりも狭いこと。
- ・巻き取った層高さが均等であること。

3.2.2 仮想ケーブル理論の導入

本研究では、ケーブルの巻取間隔を変化させた場合のケーブル整列状態への影響を調査することでケーブル巻取ドラムとケーブル振り分け機構の回転角速度の関係式を導出することとした。

ケーブル巻取間隔を調整する方法として、仮想ケーブル理論を考案した。図5に示すように、巻き取るケーブル径 d に対して仮想的な被覆 α を設定し、この仮想被覆ケーブル径 V_1 が密接するようにケーブルを巻きとることで仮想被覆分のケーブル間隔 V_g ができ、仮想被覆径を調整することで、ケーブル巻取間隔を変化させることができる。

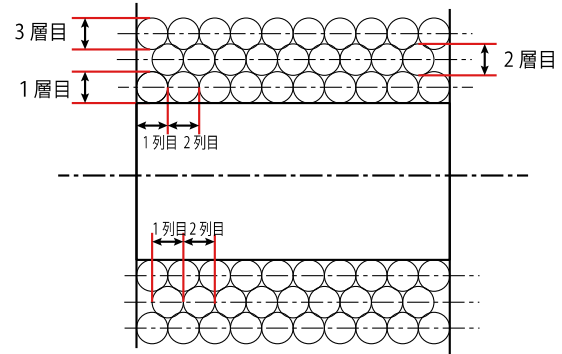


図4. ケーブルドラム巻取時の断面

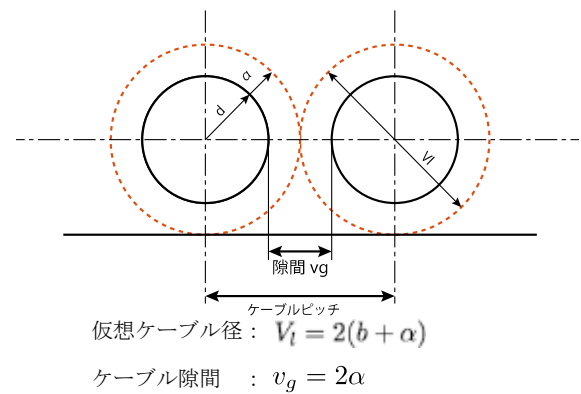


図5. ケーブルドラム巻取時の断面

3.2.3 整列巻き理論式の導出

ケーブルの整列巻き理論式導出にあたり、図6に示すように各パラメータを設定した。なお、理論式を簡単にするために、まずは振り分け機構を回転揺動式ではなく、送りねじによる直線往復式としケーブル巻取ドラムと振り分け機構における回転角速度の関係式を導出した。

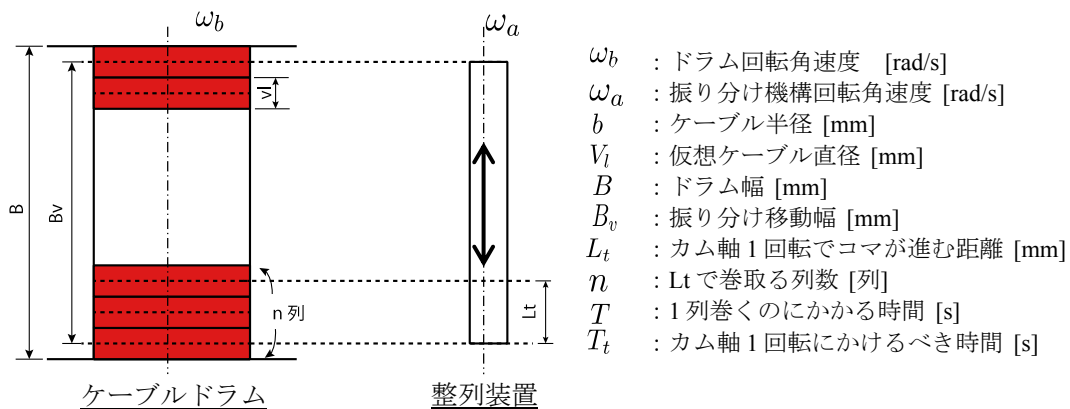


図6. ケーブルドラムと整列装置の各パラメータ（上面図）

仮想被覆 a を決定するために、ケーブルの巻取率 W_r を以下のように定義する。

W_t : ケーブルドラムに実際のケーブルを隙間なく巻き取った場合の列数

W_p : ケーブルドラムに仮想被覆ケーブルを隙間なく巻き取った場合の列数

$$W_t = \frac{B}{2d}, \quad W_p = \frac{B}{V_i} = \frac{B}{2(d+\alpha)} \quad \Rightarrow \quad W_r = \frac{W_p}{W_t} \times 100 \quad [\%]$$

ドラムと振り分け機構の回転角速度の関係は、実際のケーブル径 d 、振り分け機構の送り量 L_t 、ケーブル巻取率を用いて以下のように表すことができる。

$$\omega_a = \frac{200d}{L_t W_r} \omega_b$$

4. 導出理論式の検証

導出した理論式を用いて実験を行った。実験状況を図7、実験結果を図8に示す。

〈実験条件〉

- ケーブル：タコ紐（直径2mm）
- 巻取ドラム回転速度：2rad/s
- 巻取-送出ドラム間距離：390mm
- 巻取率：70%、80%、90%、100%

〈実験結果〉

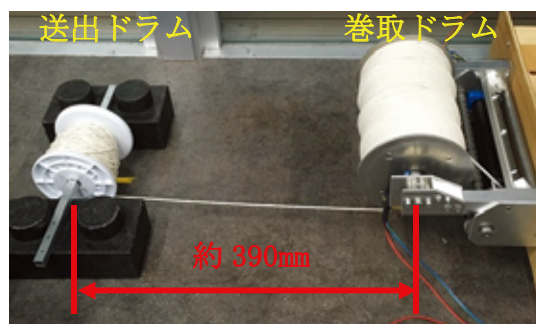
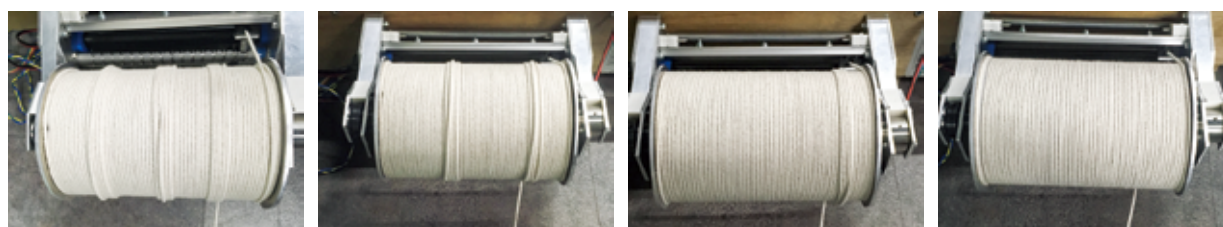


図7. 実機による検証試験



(a) 巻取率100%

(b) 巻取率90%

(c) 巻取率80%

(d) 巻取率70%

5. まとめ

巻取ドラムと振り分け送り機構における回転角速度の関係を理論式として導出し、実機を用いた実験により理論式の検証を行った。検証では、図9に示すように仮想被覆 a と巻取率 W_r の関係が理論値と実験値で異なる結果となった。これは、ケーブル張力が一定ではなく、送出ドラムや実験環境からの外乱が影響したためと推察している。

今後は、ケーブル張力取得装置の開発し、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。

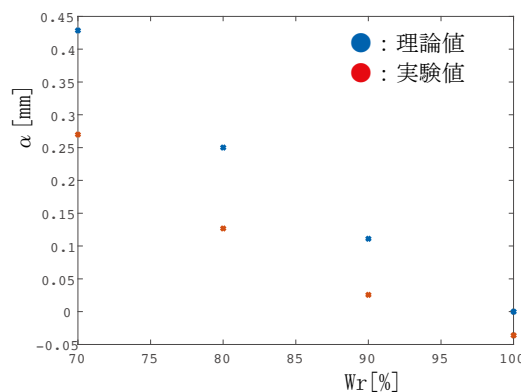


図9. 仮想被覆 a と巻取率 W_r の関係比較

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) 国土交通省「次世代社会インフラ用ロボット技術・ロボットシステム ～現場実証ポータルサイト～」、<https://www.c-robotech.info/> (最終閲覧日：2018年1月31日)
- 3) 都市防災：平成25年度特殊地下壕実態調査結果について、http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_fr_000015.html (最終閲覧日：2017年3月4日)
- 4) 久間英樹、皆尾登志美、福岡久雄、内村和弘、箕田充志、石原恵 利子：世界遺産「石見銀山」探査ロボットの開発と調査、日本ロボット学会誌、Vol.26、No.6、pp.599-605、2008.
- 5) 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.
- 6) 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.