T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	網状索道自走ロボット
Title(English)	Cable Traversing Robots on Spatially Structured Cableway
著者(和文)	菅原 雄介
Authors(English)	Yusuke SUGAHARA
出典(和文)	日本機械学会2022年度年次大会講演論文集, , , F113-03
Citation(English)	, , , F113-03
発行日 / Pub. date	2022, 9

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

網状索道自走ロボット

菅原 雄介 [*1]

Cable Traversing Robots on Spatially Structured Cableway

Yusuke SUGAHARA[*1]

[*1] Dept. of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology
I6-15, 2-12-1, Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552 Japan

1. 諸言

近年のドローンや地表走行ロボットの技術の進歩は目覚ましいが，山林内や災害現場などの非整備環境における運用には，墜落やスタックのリスクなど，依然として課題が多い．既知の環境における定期的な巡回や物資運搬などを考えると，レールを敷設することで移動ロボットの運用は容易になるが，敷設のコストは小さくない．比較的容易に架設できるケーブルを軌道として利用するシステムには林業用の自走式搬器 (1) があるが，2 点間を直線的に結ぶ軌道に限られる．ケーブルを相互に接続することで蜘蛛の巣状の空間的構造（spatially-structured cableway，網状索道とよぶ）を形成し，これを軌道として利用する自走式ロボットが実現できれば，前述のような作業を行う上で有用であると考えられる．

このような網状索道上を自在に走行するには，索道上の分岐点を越え，進行する枝を選びながら自走する機能が必要である．途中で分岐点や障害物のあるケーブル上を自走するロボットには (2–4) のような研究例がある．ただし (2) は送電線上の障害物の乗り越えに特化したものであり，(3) は進行するケーブルを選ぶことができない．(4) は網状索道上を走行できるが，姿勢を制御する機能を持たず，索道は平面的構造に限られている．

これに対し著者らは，自然環境や災害現場等における見回り，物資運搬，調査，救助，作業への応用を目的として，空間的構造をもつ網状索道を自在に走行可能なロボットの開発をすすめてきた (5,6)．本稿では，これらの概要を紹介する．

2. 1 次試作機の開発 (5)

網状索道自走ロボットの第 1 次試作に際し，その機能的要求を以下のように設定した：

(A) ケーブルの分岐点において進行するケーブル（主索）を選択し進行する機能
(B) 主索を把持し駆動する機能
(C) 進行しないケーブル（副索）との干渉を防ぐ機能

これを実現するため，鼓形の断面を持つプーリを対向させた駆動部（図 1(a)）と，3R 球面シリアル機構を用いたリモートセンタ機構（RCM）によりなる腕部（同図 (b)）を開発した．駆動部は一対の車輪の間に空隙があり，またプーリ外周に副索の径と同径の半円状の隙間を等間隔で設けてある．分岐点乗り越えの際にはこの空隙にケーブルの分岐点を通し，同時に外周のすき間に副索を通すよう車輪を駆動する．また腕部は，分岐点において駆動部を Roll・Pitch・Yaw 各軸回りに回転させ，プーリ外周の隙間を副索方向に向ける機能を持つ．RCM を用いることで，分岐点を把持する中心の位置を変化させることなく駆動部を回転させることができる．

第 1 次試作では，この機構を用いた自走機を 2 通り開発している．

[*1] 正員，東京工業大学（〒152-8552　東京都目黒区大岡山 2-12-1，I6-15）
Email: sugahara.y.ab@m.titech.ac.jp

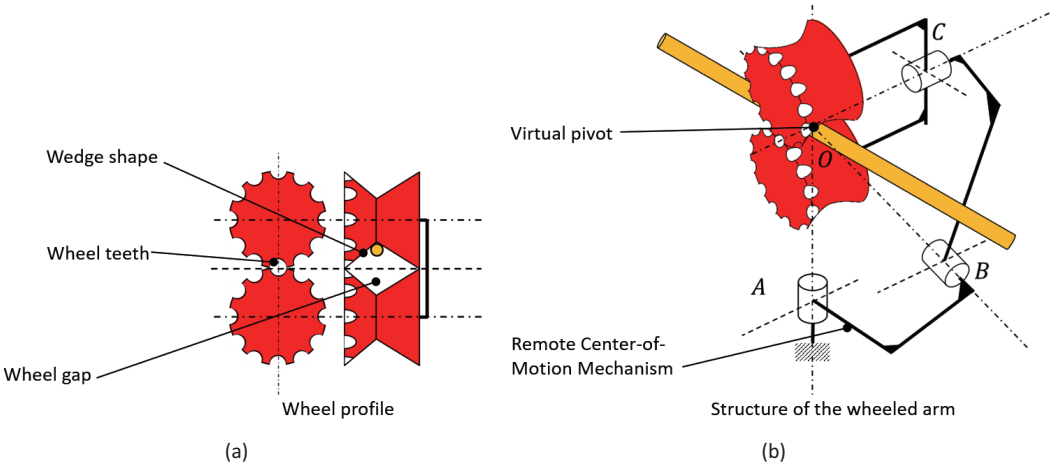


Fig. 1: Structure of wheels and remote center-of-motion mechanism[5].

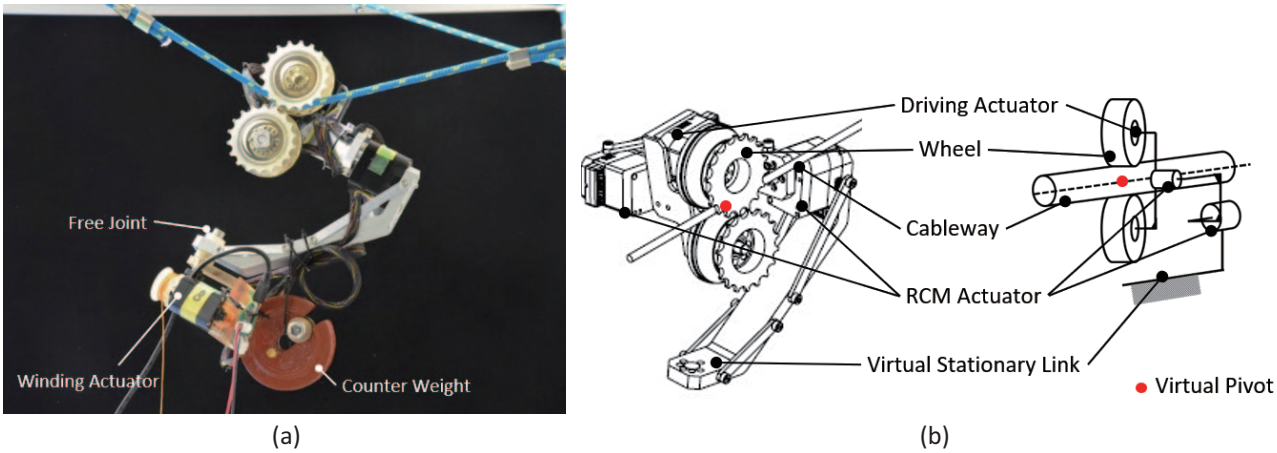


Fig. 2: Photograph and structure of single-arm type cable traversing robot TCC78S (Tokyo Tech Cableway Crawler - No. 78 Single-arm type)[5].

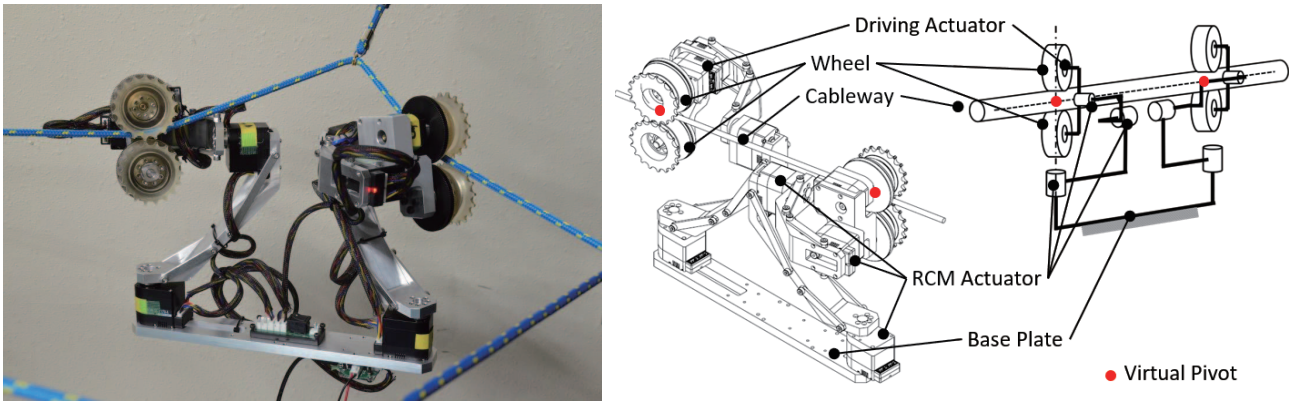
まず，この駆動部と腕部を 1 つのみ備えるシングルアーム式網状索道自走ロボットを開発した（図 2）．シングルアーム式は原理上機体の鉛直軸まわりの角度の制御ができないが，プーリ駆動モータを含め 3 つのモータのみで構成可能であり，安価でシンプルである．TCC78S は，最大 52 deg の傾斜ケーブルの昇降，平面内では最大 80 deg の旋回角を有する副索への進入，最大 37 deg の傾斜と最大 75 deg の旋回角を有する副ケーブルへの進入を実現している．

また，この駆動部と腕部を前後に二つ備えるダブルアーム式網状索道自走ロボットを開発した（図 3）．ダブルアーム式は片方の駆動部が分岐点を乗り越えているときにもう片方の駆動部が安定に主索を把持して駆動することが可能であり，安定性に優れている．TCC78D は，最大 72 deg の傾斜ケーブルの昇降，平面内では最大 85 deg の旋回角を有する副索への進入，最大 48 deg の傾斜と最大 63 deg の旋回角を有する副索への進入を実現している．

3. 運動学の定式化，動作計画と 2 次試作機の開発 [6]

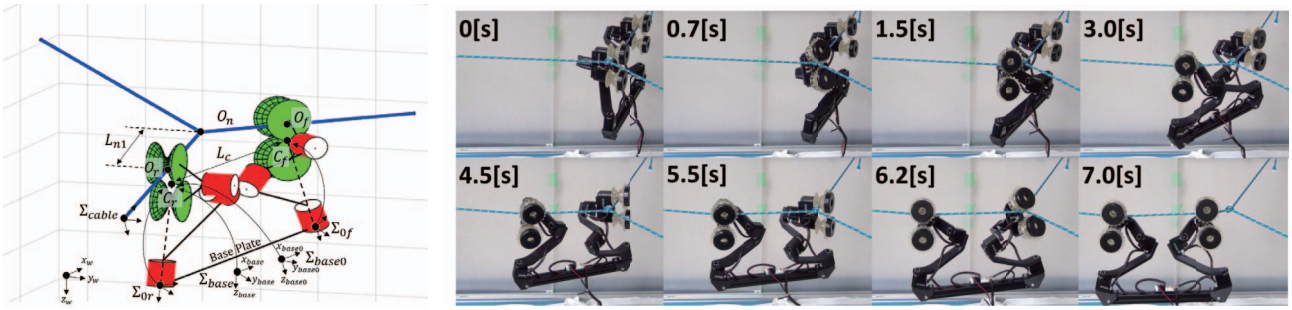
第 1 次試作では運動学の定式化は行なっておらず，制御は各軸のマニュアル操作で行われており，また機構はケーブルとの干渉や特異点の問題が生じ操作は容易ではなかった．そこで第 2 次試作では，ダブルアーム型の網状索道自走機について，運動学の定式化およびこれに基づく動作計画手法の開発と機構の最適化を行い，これらにより自動での分岐点通過を実現することを目的とした．

分岐点のあるケーブルのモデル化を行い，一つの分岐点を主索の仰角，主索まわりの傾斜角，行先副索と非行先



(a) (b)

Fig. 3: Photograph and structure of double-arm type cable traversing robot TCC78D (Tokyo Tech Cableway Crawler - No. 78 Double-arm type)[5].



(a) (b)

Fig. 4: Kinematic model and traversing experiment of double-arm type robot TCC80D (Tokyo Tech Cableway Crawler - No. 80 Double-arm type)[6].

副索の旋回角の 4 つのパラメータで表した．またダブルアーム型自走機が前後に有する 3R シリアル球面機構の運動学関係を求めた．さらにこれらのモデルに基づき，6 つの能動関節の角変位と駆動部の姿勢の関係の定式化を行った．また，特にこの機構（図 4 (a)）はケーブル軸周りのモーメントを発生できないため，ケーブルモデルに対する前後の駆動部の姿勢を与えてもこの姿勢が実現できるとは限らない．そこで，与えられた二つの駆動部の姿勢を実現する際に，静力学的なつり合いを考慮した運動力学的逆問題（kineto-static inverse problem）を解くことでロボットがケーブルに対しとりうる姿勢を算出する計算手法を開発した．

さらに，この手法をもとに，分岐点を持つケーブルを通過するための動作計画法を開発した．進行する副索の方向に対し，分岐点を通過しその方向に走行するために必要な駆動部の姿勢の遷移を算出し，これをクォータニオンを用いて球面線形補間することで目標関節角を生成するものである．

以上の動作計画法の開発に加え，これを利用した分岐点走行の一連の動作において，ケーブルとの干渉が起こらずまた特異点の問題を生じないよう，干渉の有無と可操作度を考慮した目的関数に基づく機構定数の最適化を行った．この結果に基づき開発した試作機 TCC80D のケーブル分岐点通過の様子を図 4 (b) に示す．

4. 自然環境モニタリングのための予備実験

網状索道自走ロボットは，ドローンに比べ速度では劣るものの，静かで可搬重量の制限が少なくエネルギ効率もよく長時間の運用が可能であるため，自然環境モニタリングに適していると考えられる．

図 5 (a) は自然環境における野生動物の生態調査のために製作した機体 TCC80DR である．制御用 PC とバッテリを搭載し WiFi 経由の無線操作による自立稼働が可能であり，また撮影用の全天球カメラ 2 台を搭載している．

(a) (b)

Fig. 5: TCC80DR (Tokyo Tech Cableway Crawler - No. 80 Double-arm type Refined) and its operation experiment at black-tailed gull colony on Rishiri Island (July 2022).

同図 (b) は，本機を用い，北海道・利尻島のウミネコの営巣地においてウミネコのヒナの近接撮影を試みた様子である．なお本実験は，早稲田大学人間科学部野生動物生態学研究室によるウミネコ生態調査の一環として実施した．

5. 結言

本稿では，著者らが開発を進めてきた，網状索道自走ロボットの概要を紹介した．これまでに，網状索道を自走する機体構造と運動学，動作計画，設計法について基本的な手法を構築し，自然環境モニタリング用途として運用実験を開始している．

今後は，現在手動で測定している分岐点パラメータの自動認識や，環境モデルとタスクモデルから主索の経路を自動で計画する方法の開発に取り組む予定である．

また，自走ロボットを複数用い，さらにここから繰り出した複数のケーブルによりエンドエフェクタを駆動する構造可変型直列・並列ハイブリッドパラレルワイヤ機構についても検討している（図 6）．

将来的には，非整備環境における継続的な物資運搬や見回りなどに有用な高効率で信頼性の高い移動ロボット，またこういった環境における調査や救助，作業に有用な高出力な作業移動ロボットのための技術開発を進めていく．

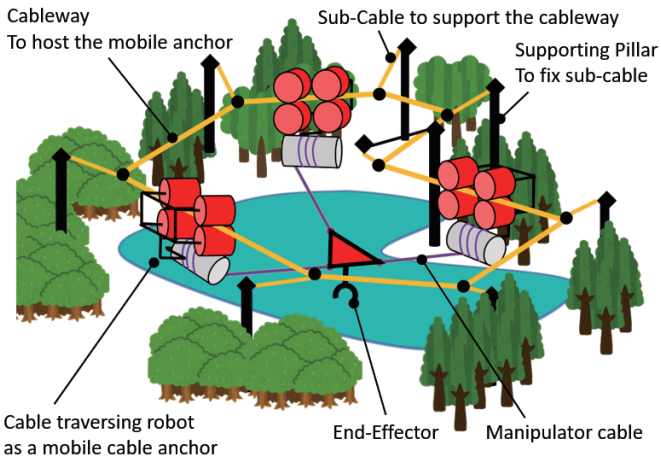


Fig. 6: The conceptual image of reconfigurable cable-driven parallel robot using cable traversing robots on spatially structured cableway[5].

謝　辞

本研究の一部は競輪とオートレースの補助を受けて実施した．本研究の一部は遠藤央特任准教授（東工大工学院），石井裕之教授（早大理工学術院）との共同研究である．利尻島での実験に際しては風間健太郎准教授（早大人間科学学術院）に多大なるご協力を頂いた．感謝の意を表す．

文　献

(1) イワフジ工業（株），http://www.iwafuji.co.jp/products/forest_bcr.html

(2) Debenest, P., and Guarnieri, M., “Expliner – From Prototype Towards a Practical Robot for Inspection of High-Voltage Lines,” Proc. of CARPI (2010), pp. 1–6.

(3) Phillips, A., Engdahl, E., McGuire, D., Major, M., and Bartlett, G., “Autonomous overhead transmission line inspection robot (TI) development and demonstration,” Proc. of CARPI (2012), pp. 94–95.

(4) Notomista, G., Emam, Y., and Egerstedt, M., “The SlothBot: A Novel Design for a Wire-Traversing Robot,” IEEE Robot. Autom. Lett., Vol. 4, No. 2 (2019), pp. 1993–1998.

(5) Sudiono, R. R., Sugahara, Y., Endo, M., Matsuura, D., and Takeda, Y., “Cable Traversing Robots on Spatially Structured Cableway for Reconfigurable Parallel Cable System,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 予稿集 (2019)，1A1-S02.

(6) 加納弘嗣，菅原雄介，遠藤央，石井裕之，武田行生，“空間に構造的に架設された網状の索道を自走するロボットの研究（ダブルアーム型の運動学，動作計画と機構の最適化について）”，日本ロボット学会誌, Vol. 39, No. 8 (2021)，pp. 767–770.