

## 6. 通信ケーブル敷設オートリールの開発

三浦洋靖・奥川雅之

### 1. はじめに

インフラ構造物やプラントでは、維持管理のため予防保全の観点から日常点検が行われている。また、災害発生時には、迅速な被災状況調査および復旧作業が求められる。調査点検作業者の安全確保の観点から、遠隔操作ロボットの活用が期待されているが、「通信帯域確保」「耐障害性」「長距離・広範囲通信」が課題となっている。本研究では、電波遮蔽物が多い閉所狭隘環境においてフィールド実験を行い、前述の課題に対する有線通信の優位性や必要性を確認している<sup>1) - 4)</sup>。また、省力化かつ迅速性／柔軟性の観点から、通信ケーブル自動送出／巻取機能を有するオートリールを搭載したロボット群による有線通信ケーブル敷設システムを提案している<sup>6)</sup>。本提案システムでは、ロボット移動時加減速などによって生じる過度なケーブル張力変動に対して、ロボットの移動速度や姿勢情報を用いるのではなく、レバー式の計測デバイスによりケーブル張力変動を直接計測し、オートリールを制御することで、ロボットの移動速度や姿勢が影響を受けやすい凹凸路面環境への適用が可能になると考えている。本年度は、ケーブル張力計測レバー（以降、計測レバーと記載）角度を状態変数とした状態空間モデルをもとに、ケーブル送出／巻取制御系の設計を試みた。実験結果を考察することにより、提案手法の有効性を検証する。

### 2. 制御対象のモデリング



図1. オートリール外観

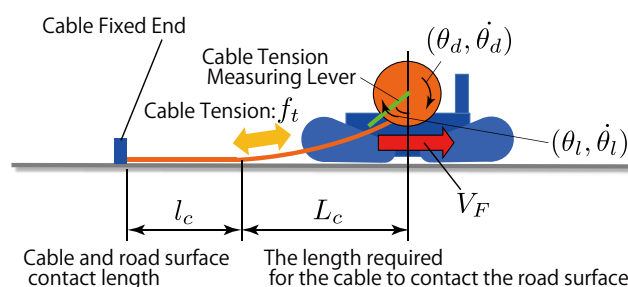


図2. ケーブル敷設イメージ

制御対象であるオートリールの外観を図1に示す。本装置には、張力計測レバー、ケーブル整列機構およびガイドローラを設けている。オートリールを用いたケーブル敷設イメージを図2のように定義する。ケーブル終端を固定端とし、ロボットが移動しながら搭載したオートリールによりケーブルを敷設/回収する。ケーブルの伸縮はない、ガイドローラとケーブルは常に接触していると仮定し、摩擦抵抗は考慮しないものとした場合、各構成要素の幾何学的なパラメータ $C_1$ および $\alpha$ を用いて、ドラム回転角度 $\theta_d(t)$ と計測レバーの角度変化量 $\theta_l(t)$ の関係は、式(1)のように表すことができる<sup>5) 6)</sup>。

$$\theta_d(t) = \frac{C_1}{\alpha} \theta_l(t) \quad (1)$$

ドラムに関する運動方程式を式(2)に示す。 $J_r$ はドラムの慣性モーメント、 $d_r$ はドラム回転制御用モータ回転軸に関する減衰係数とする。

$$j_r \ddot{\theta}_d(t) + d_r \dot{\theta}_d(t) = \tau(t) + \tau_d(t) \quad (2)$$

一方で、モータにおいて、発生するトルク $\tau(t)$ と入力電圧 $v(t)$ は比例関係であり、比例係数を $G$ とするとドラム回転角度と計測レバー角度変化は、式(1)(2)を用いて以下のようになる。

$$\frac{j_r C_1}{\alpha} \ddot{\theta}_l(t) + \frac{d_r C_1}{\alpha} \dot{\theta}_l(t) = Gv(t) + G_d v_d(t) \quad (3)$$

ここで、オートリールの慣性モーメント $j$ およびダンパ係数 $d$ を定義すると、以下のように整理することができる。

$$j = \frac{j_r C_1}{\alpha} \quad , \quad d = \frac{d_r C_1}{\alpha} \quad (4)$$

制御入力 $u(t)$ を電圧 $v(t)$ 、観測出力 $y(t)$ を計測レバー角度変化 $\theta_l(t)$ 、外乱 $T_d(t)$ を外乱電圧 $v_d(t)$ とし、状態変数を式(5)とすると、オートリールシステムの状態空間モデルは、式(6)のように表すことができる。

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \theta_l(t) \\ \dot{\theta}_l(t) \end{bmatrix} \quad (5) \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{E}T_d(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{d}{j} \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{G}{j} \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0] \quad , \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{G_d}{j} \end{bmatrix}$$

### 3. ケーブル送出/巻取制御

#### 3.1 制御系設計

前述した制御対象に対して、ケーブルの敷設時におけるドラム回転制御手法について考える。ケーブル張力を一定に維持する方法として、昨年度はドラム回転角度と回転角速度を状態変数として状態フィードバック制御を実装した。その結果、ケーブルたるみが測定できないこと、ケーブル送出/巻取を続けることでドラム回転角度が増減し続けるため、目標回転角度を常に更新しなければならないことから、ドラムダイナミクス情報では制御できないことが判明している。このため、本年度は、ケーブル張力計測レバーの角度および角速度を状態変数とした状態フィードバック制御により問題解決を試みた。また、閉ループ系にコンプライアンス制御の考え方を取り入れることで、任意のケーブル張力を維持することができ、連続的に送出/巻取を行うことができると考えている。

制御目的は、ケーブル張力を外乱 $T_d(t)$ とし、この外乱をケーブルが損傷しない範囲の張力変化で保ちながら連続して送出/巻取制御を行うこととしている。制御則を式(7)、フィードバックゲイン $\mathbf{K}$ を式(8)に示す。ただし、 $k_1$ 、 $k_2$ はフィードバックゲインとする。

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (7) \quad \mathbf{K} = [k_1 \quad k_2] \quad (8)$$

閉ループ系の状態方程式は、式(6)(7)を用いて式(9)のように表すことができる。ここで、極配置によりゲイン範囲を決めるために特性方程式を考えると式(10)となる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}T_d(t) \quad (9)$$

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = s^2 + \frac{d + k_2G}{j}s + \frac{k_1G}{j} \quad (10)$$

ここで、コンプライアンス制御則の硬さ定義を考える。本研究では、硬さを計測レバー系の固有角振動数 $\omega_n$ を用いて定義することとする。規範モデルを2次遅れ系と仮定すると、式(10)を $\omega_n$ と $\zeta$ を用いて式(11)のように表すことができる。 $\omega_n$ と $\zeta$ は、式(12)となる。

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (11)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1G}{j}} \quad , \quad \zeta = \frac{d + k_2G}{2\sqrt{jk_1G}} \quad (12)$$

以上から、 $k_1$ および $k_2$ の値により本制御系の硬さを任意に決定することが可能となる。

### 3.2 安定性

システムの安定性について考える。式(11)の解を $\lambda$ とすると、式(13)のように表すことができる。

$$\lambda = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (13)$$

$Re\{\lambda\} < 0$ のときシステムは安定となる。安定となる固有角振動数および減衰係数は、 $\omega_n > 0$ かつ $\zeta > 0$ であり、フィードバックゲインの条件は、式(12)から式(14)となる。

$$k_1 > 0 \quad , \quad k_2 > -\frac{d}{G} \quad (14)$$

## 4. 検証実験

### 4.1 実験内容

オートリール装置をロボットに搭載し、ロボットが移動する状況を模擬するために図3のような環境にて実験を行った。本項ではケーブル送出/巻取に関する問題を明確にするため、整列機構は使用せずに各種実験を行っている。実験目的は、計測レバー系のコンプライアンス性を可変することが可能か確認するために $\omega_n$ を変えたときの応答を確認すること、実験値とシミュレーションを比較し、モデリングが制御対象を表現できているかである。方法としてはドラム2で三角波の外乱を発生し緩やかな変化に対する応答を確認することでモデルリングの正確性を検証している。ドラム2の角速度 $\omega$ に指令値1 [rad/s] (ロボット移動速度換算: 0.5 [m/s])を入力し、巻取/送出で行う。事前実験から得た制御可能範囲をもとに $\omega_n = 4$  (柔らかい)と $\omega_n = 10$  (硬い)、 $\zeta = 2$  (定数)とし、ゲインは $k_1 = 178.76$ 、 $k_2 = 9.86$ と $k_1 = 23.64$ 、 $k_2 = 4.36$ 、 $j = 0.160$ 、 $d = 0.433$ としている。

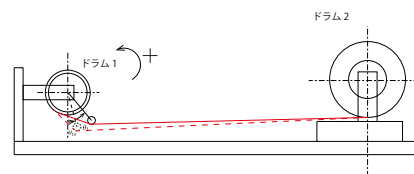


図3. 基礎実験装置

### 4.2 実験結果

実験結果を図4および5に示す。送出に関しては $\omega_n$ 大きくすることにより計測レバー系のコンプライアンスは高くなり、コンプライアンス性を実現できていることが確認できたが、ドラム回転系ではコンプライアンスが

低くなる結果となった。これは計測レバー角度変化の変動を小さくするためにドラムはより多くのケーブルを送出さなければならないためであるからである。巻取は計測レバー系のコンプライアンスが低いと巻取量が間に合わず計測レバーの機械的なストッパーで止まってしまう問題、硬い制御を行うと振動的になってしまう問題が顕在化した。送りはシミュレーションに近い結果となったが、巻取では振動的な現象がみられシミュレーションと異なる結果となった。要因としては外乱発生用のドラム駆動系の機械的な形によるインパルス状の外乱によるものと考えられる。一方で、昨年度的手法ではできなかったケーブルたるみ程度を把握すること、長距離のケーブルを送出/巻取ができる可能性が確認できた。

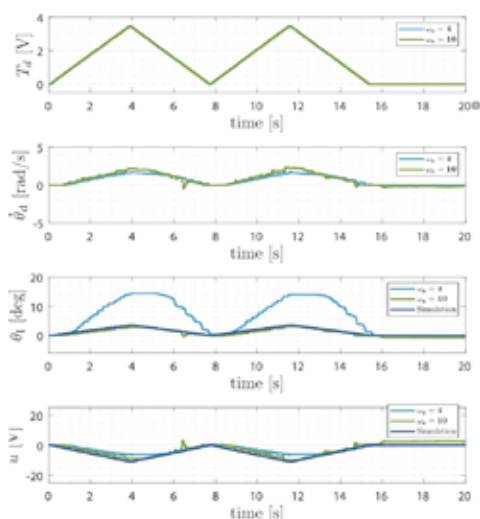


図4. 実験結果（送出）

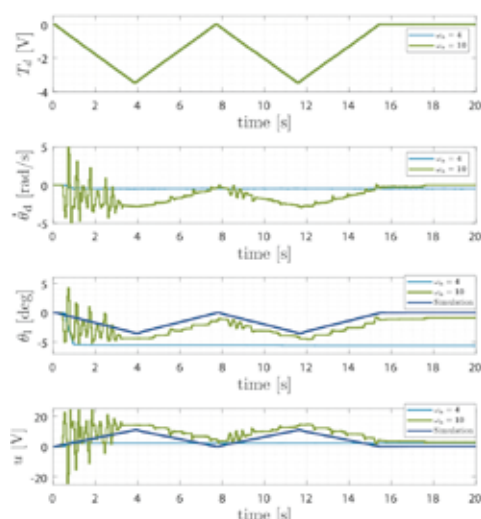


図5. 実験結果（巻取）

## 5. まとめ

本年度は、オートリールに設けたケーブル張力計測レバーの角度および角速度を状態変数とした状態フィードバック制御則による張力制御を試みた。制御対象のモデリングおよびコンプライアンス制御による制御系設計を行い、シミュレーション及び実装実験結果からモデル化誤差の影響、提案手法の有効性について考察した。その結果、ケーブル送出/巻取制御が可能であることを確認できた。今後は、装置の改良、モデリング精度の向上、非線形性をふまえた制御系設計方法の検討を進めていく。

## 参考文献

- 1) H. Miura, et al., Field Experiment Report for Tunnel Disaster by Investigation System with Multiple Robots, Proc. SSRR2016, Paper No.92, pp.276-277, 2016.
- 2) H. Miura, et al., Field Experiment Report for Verification of Abandoned Lignite Mines by Robotic Exploration System, J. Robot. Mechatron., Vol.30, No.6, pp.1004-1013, 2018.
- 3) H. Miura, et al., Verification and Evaluation of Robotic Inspection of the Inside of Culvert Pipes, J. Robot. Mechatron., Vol.31, No.6, pp.794-802, 2019.
- 4) H. Miura, et al., Plant Inspection by Using a Ground Vehicle and an Aerial Robot : Lessons Learned from Plant Disaster Prevention Challenge in World Robot Summit 2018, Adv. Robot., Vol. 34, Issue 2, pp.104-118, 2020.
- 5) 三浦他2名, ケーブルオートリールの張力ダイナミクスに関するモデル化, ROBOMECH2021講演論文集, 2P1-A19, 2021.
- 6) 三浦, 奥川, 群ロボットによる通信ケーブル敷設システム, 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, Vol.17, pp.45-48, 2021.