

## 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」が課題であり、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。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>1)</sup>。昨年度の研究では、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た制御則を提案し、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が、一方で巻取では振動的な現象がみられるなどの問題が顕在化した。本年度は、最適レギュレータ制御を用いてこれら問題の解決を試みた。実験結果を考察することにより、本提案手法の有効性を検証する。

### 2. 制御対象のモデリング

#### 2.1 ロボットの移動とケーブルの関係



図1. オートリール外観

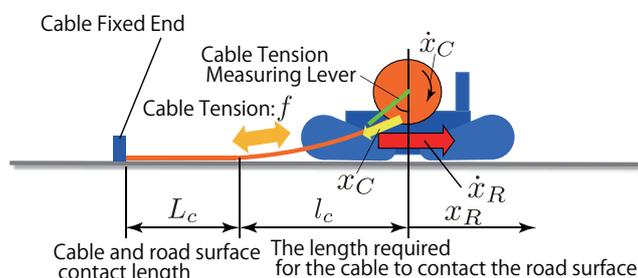


図2. ケーブル敷設イメージ

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。レバーを用いたケーブル張力計測は、先行研究にて有効性が確認されている<sup>3)</sup>。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、ガイドローラー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、以下が成り立つ。

- ・ ロボットの移動距離 ( $x_R$ ) = ケーブルの送出／巻取量 ( $x_C$ )
- ・ ロボットの移動速度 ( $\dot{x}_R$ ) = ケーブルの送出／巻取速度 ( $\dot{x}_C$ )

#### 2.2 ドラム回転系の状態空間モデル

次にドラム回転系の状態システムについて考える。入力  $u_d(t)$ 、電圧  $v(t)$ 、観測出力  $y_d(t)$ 、ドラムの回転角度  $\theta_d(t)$ 、ドラムの角速度  $\dot{\theta}_d(t)$ 、ドラムを駆動するモータの内部抵抗値とトルク定数で決まる固有値  $G$ 、ギア比  $g_r$  とすると、ドラムに関する運動方程式は式 (1) のように表すことができる。ここで  $j_d$  はドラムの慣性

モーメント、 $d_d$ は巻取/送出制御用モータ回転軸に関する減衰係数とする。

$$j_d \ddot{\theta}_d(t) + d_d \dot{\theta}_d(t) = \frac{Gv(t)}{g_r} \quad (1)$$

状態変数 $x_d(t)$ を式(2)として定義すると、ドラム回転系の状態空間システムは、式(5)のように表すことができる。

$$\mathbf{x}_d(t) = \begin{bmatrix} \theta_d(t) \\ \dot{\theta}_d(t) \end{bmatrix} \quad (2), \quad u_d(t) = v(t) \quad (3), \quad \mathbf{y}_d(t) = \begin{bmatrix} \theta_d(t) \\ \dot{\theta}_d(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_d(t) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d(t) + \mathbf{B}_d u_d(t) \\ \mathbf{y}_d(t) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}_d(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{d_d}{j_d} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{G}{j_d g_r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 張力計測レバーを含む状態空間システム

オートリールがケーブル敷設を行う際のモデルを考える。図3に示すようにケーブルを地面においていく際にD点を地面とした場合のケーブル長さの変化に注目する。本研究では、制御モデルを簡単にするため、ドラム回転角と計測レバー角度の関係を線形として考える。オートリールの各寸法から幾何学的に決まる定数 $C_3$ とし、式(7)のように近似式として表すことができる。導出過程については別の機会に報告済みのため省略する<sup>2)</sup>。

$$\theta_l(t) = \frac{D_d}{2C_3} \theta_d(t) \quad (7)$$

状態変数 $x_l(t)$ を式(8)として定義すると、状態変数変換行列は式(9)となり、これによりレバー式張力計測部を含むドラム回転系の状態方程式は式(10)のように表すことができる。

$$\mathbf{x}_l(t) = \begin{bmatrix} \theta_l(t) \\ \dot{\theta}_l(t) \end{bmatrix} \quad (8) \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{D_d}{2C_3} & 0 \\ 0 & \frac{D_d}{2C_3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_l(t) = \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l(t) + \mathbf{B}_l u_d(t) \quad (10), \quad \mathbf{A}_l = \mathbf{T} \mathbf{A}_d \mathbf{T}^{-1}, \quad \mathbf{B}_l = \mathbf{T} \mathbf{B}_d$$

一方でケーブル長さ変化する要因としてロボットの移動が考えられ、ロボットの移動によるケーブル長さ変化がロボット移動距離 $x_R$ と等価であると仮定すると、これらの関係は式(11)となり、ドラムが回転することによるケーブル移動量 $x_C$ とすると式(12)となる。これらにより計測レバー角度はドラム回転角度とロボット移動量を用いて式(13)のように表すことができる。

$$\Delta l_c(t) = x_C(t) + x_R(t) \quad (11) \quad x_C(t) = \frac{D_d}{2} \theta_d(t) \quad (12)$$

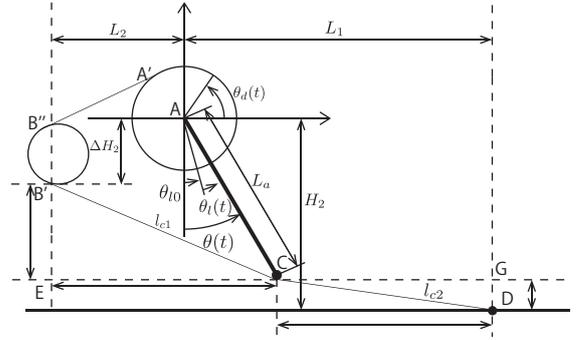


図3. 張力計測レバーを含む制御モデル

$$\theta_l(t) = \frac{D_d}{2C_3}\theta_d(t) + \frac{1}{C_3}x_R(t) \quad (13)$$

ここで、ロボット移動距離 $x_R$ とロボット移動速度 $\dot{x}_R$ を外乱 $d_l(t)$ とし、観測出力 $y_l(t)$ を計測レバー角度 $\theta_l(t)$ と計測レバー角速度 $\dot{\theta}_l(t)$ とすると、レバー式張力計測部を含む出力方程式は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{y}_l(t) = \mathbf{C}_l \mathbf{x}_l(t) + \mathbf{W} d_l(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{y}_l(t) = \begin{bmatrix} \theta_l(t) \\ \dot{\theta}_l(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}_l(t) = \begin{bmatrix} x_R(t) \\ \dot{x}_R(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_3} \end{bmatrix}$$

式(10)、(14)よりレバー式張力計測部を含む状態空間システムは式(15)となり、全体の因果関係は図4となる。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_l(t) = \mathbf{A}_l \mathbf{x}_l(t) + \mathbf{B}_l u_d(t) \\ \mathbf{y}_l(t) = \mathbf{C}_l \mathbf{x}_l(t) + \mathbf{W} d_l(t) \end{cases} \quad (15)$$

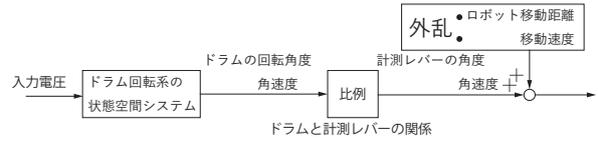


図4. 制御系のブロック線図

上記にてパラメータ同定を行った結果、定常特性についてはレバー回転方向で変化量が異なった。レバー下降方向はセンサ感度が低く、実際よりも制御性能が低いと見積もられハイゲインになりやすいことが確認されたため、センサ感度が高い計測レバー上昇方向のパラメータをノミナル値とした。値は $C_3 = 5.87 \times 10^{-2}$ である。

### 3. 最適レギュレータ制御系設計

状態フィードバック系を考え、フィードバックゲイン決定に最適レギュレータを適用し、その際入力が飽和しないように、定常状態で装置における最大入力の90%以内、過渡状態で10%の尤度となるよう重みを設定した。

評価式:  $u_d(t) = -\mathbf{F} \mathbf{x}_l(t) \quad (16) \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix} \quad (17)$

$$J = \int_0^{\infty} \{ \mathbf{x}_l(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_l(t) + u_d(t)^T R u_d(t) \} dt \quad (18)$$

最適レギュレータ解:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_l^T \mathbf{P} \quad (19)$$

$$\mathbf{A}_l^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_l - \mathbf{P} \mathbf{B}_l \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_l^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (20) \quad \mathbf{P} : \text{Riccati 方程式の正定解}$$

なお、ゲインはMATLAB/SUMULINKを用いて下記のように選定した。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1000000 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 100, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 100.00 \\ 3.13 \end{bmatrix}^T$$

## 4. ケーブル送出/巻取実験

### 4.1 実験方法

基礎実験として図5に示す実験装置を用いて、外乱発生用ドラムへ電圧 $v_d$ を与え回転させることでロボットの移動を模擬した外乱を与え、ケーブルの巻取/送出確認実験を行う。制御結果の確認は、巻取/送出においてシミュレーションと比較することで評価することとした。外乱は台形波の電圧指令を与えることとし、ロボットの発進と停止の際の応答を確認する。

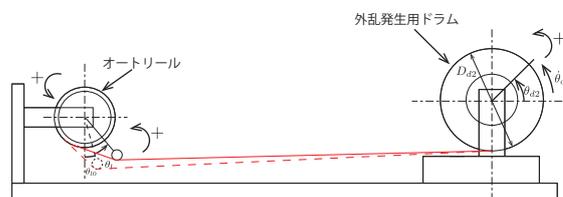


図5. 外乱模擬実験装置

### 4.2 実験結果

図6および図7から、ケーブルとロボットの移動速度は、0～4 sなどの外乱が与えられ始めるときに誤差が大きくなっており、5～15 sなどの一定外乱の場合は $\pm 0.004\text{m/s}$ 内に収まっている。移動距離は、初動で誤差が大きい結果となっているが4 s以降から0%付近の値になっており、送出および巻取でも同様であり、外乱が一定の場合は巻取/送出制御が行えていることがわかる。これは、最適レギュレーション制御を適用することで、ロボット移動速度の急激な変化に対して制御入力飽和せず、制御出力が振動的になることを抑制できたためと考える。

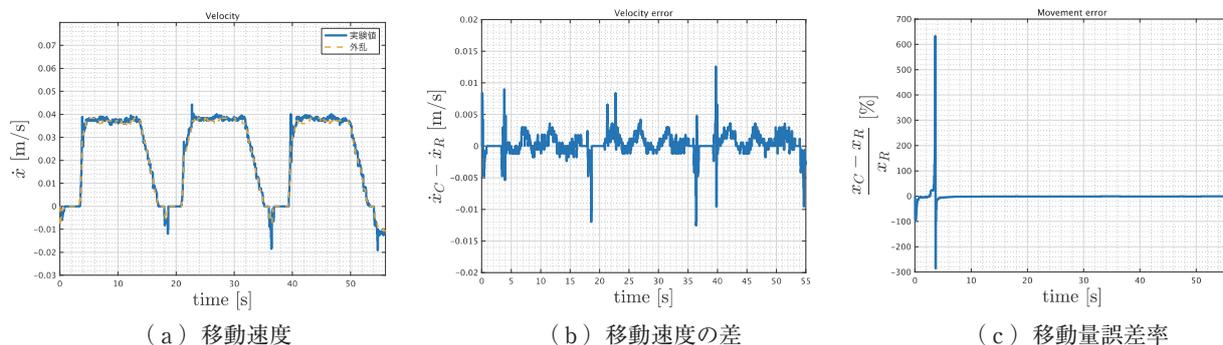


図6. 実験結果 (ケーブル送出)

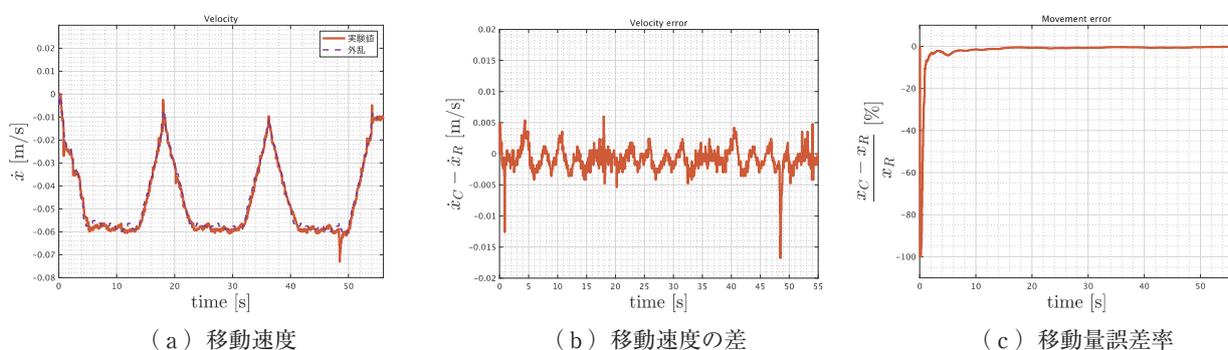


図7. 実験結果 (ケーブル巻取)

## 5. まとめ

本年度の研究では、レバー式張力計測機構を設けたオートリール装置のモデリングおよび自動巻取/送出制御に関する制御系設計手法、検証実験を行ない、以下の知見を得た。

- 計測レバーとオートリールドラムの関係を線形近似したが、巻取/送出制御を行える
- 制御系設計の際、計測レバー回転方向によって異なるパラメータとなったが、センサ感度の高い方をノミナル値としても巻取と送出に対応することができる
- ケーブル移動速度とロボット移動速度では、ロボットの移動開始時や停止時に誤差が出やすく、移動量では、初期状態から移動し始めの時に誤差が多くなるが、ロボットが進むに従って誤差は小さくなる

## 謝辞

本研究を進めるにあたり愛知工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 機械工学専攻 松下氏に多大な協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 三浦, 奥川, 通信ケーブル敷設オートリールの開発, 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, Vol.18, pp.35-38, 2022.
- 2) 松下他2名, 移動ロボットへの搭載を想定したオートリールによる巻取/送出制御, 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 1P2-G17, 2022.
- 3) N. M. Kircanski and A. A. Goldenberg, An Autonomous Cable Winding and Pay-Out System for Mobile Robots, AutonomousRobot, No.2, pp.237-253 (1995)