

## 8. 群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

近年、日本国内でも多く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、また工場プラント設備においても老朽化が懸念されていることから、適切な頻度での定期点検の実施などによる保全や災害予防が望まれている。設備点検の現場において、ロボットを遠隔操作する際の課題として、操作者とロボット間に通信ネットワークを構築する作業が挙げられる。本研究では、現地で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い、有線LANと無線LANを併用したハイブリッド通信システムを構築することで問題の解決を試みている<sup>1)</sup>。

本研究では、群ロボットの隊列走行における追従特性およびケーブルオートリールにおけるケーブル操作特性に対して、従来行われているフィードバックゲインのチューニングではなく、コンプライアンス制御の考え方を応用し、直感的な硬さ（柔らかさ）を指定することにより各特性を可変すること、オートリールでは不整地への適用を考慮し、ロボット移動量ではなくケーブル張力を一定にするようにドラム回転を制御し、ロボットの状態変化に依存せずケーブルを操作することを特長としている。群ロボットによるケーブル敷設における研究課題の中から、昨年度はケーブル張力計測機構の改良および、その効果と新たな課題について報告した<sup>2)</sup>。本年度は、昨年度に引き続きケーブルオートリール装置開発における課題に取り組み、主にケーブルオートリールにおける張力ダイナミクスに関するモデル化について研究を行った。

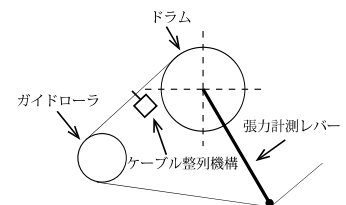
### 2. ケーブルオートリールにおける張力ダイナミクス

#### 2.1 オートリール装置構造

本研究において、開発を進めているケーブルオートリール装置（以降、オートリールと記載）を図1に示す。



(a) 装置外観



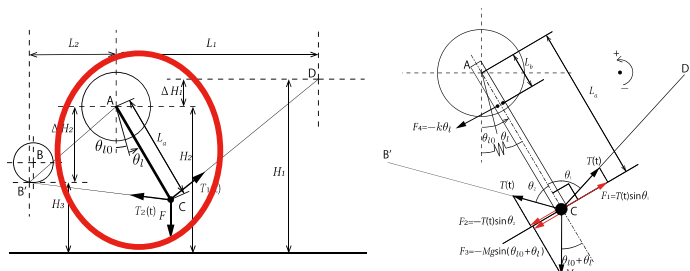
(b) 装置構造

図1. オートリール構造

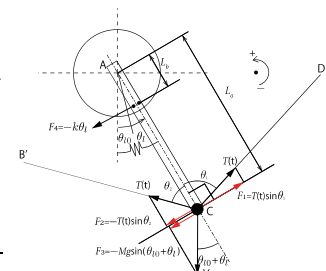
#### 2.2 ケーブル張力

##### 2.2.1 計測張力

ケーブル張力は、外乱により変化する。本研究では、この張力変化を計測レバーで測定するため、オートリールにおけるケーブル張力と計測レバーの関係を考える。ドラムを回転しない場合のケーブル張力を $T(t)$ とし、図1(b)をもとに各構造部品の位置関係を図2(a)、張力計測レバー（以降、計測レバーと記載）各部の関係を図2(b)のように定義する。



(a) 各部位置関係



(b) 計測レバー

図2. オートリール構造定義

幾何学的な関係からケーブル張力 $T(t)$ は、式(1)のように表すことができる。

$$T(t) = \frac{Mg \sin(\theta_{10} + \theta_l) + \frac{L_b k}{L_a} \theta_l}{f_1(\theta_{10} + \theta_l) - f_2(\theta_{10} + \theta_l)} \quad \begin{cases} f_1(\theta_l) = \sqrt{1 - \cos\theta_1} \\ f_2(\theta_l) = \sqrt{1 - \cos\theta_2} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $T(t) = C_1\theta_l + C_2$ の形に整理すると、 $C_1$ および $C_2$ は以下ようになる。

$$\begin{cases} C_1 = \frac{(Mg \cos(\theta_{10} + \frac{L_b k}{L_a})(f_1(\theta_{10}) - f_2(\theta_{10})) - Mg \sin\theta_{10}(f_1'(\theta_{10}) - f_2'(\theta_{10})))}{(f_1(\theta_{10}) - f_2(\theta_{10}))^2} \\ C_2 = \frac{Mg \sin\theta_{10}}{f_1(\theta_{10}) - f_2(\theta_{10})} \end{cases}$$

ケーブル張力 $T(t)$ は、ケーブル初期張力 $T_0$ と計測レバー角度 $\theta_l$ を変化させた計測張力 $\bar{f}_t$ の和であることから、 $T(t) = \bar{f}_t + T_0$ と考えることができる。

これより、計測張力および初期張力は、式(2)となる。

$$\bar{f}_t = C_1\theta_l \quad T_0 = C_2 \quad (2)$$

### 2.2.2 ドラム張力

一方、ケーブル張力はドラム回転によっても変化することから、外乱がない場合のケーブル張力変化をドラム張力 $f_t$ とし、ドラム回転との関係を考える。ケーブル送出/巻取時における張力モデルを図3のように定義する。 $\theta_d$ はドラムの初期角度からの回転角度変化 [rad]、 $\dot{\theta}_d$ はドラムの回転角速度 [rad/s]、 $D_d$ はドラム径 [mm]、 $x_c$ はドラム回転により移動するケーブル量 [mm] とする。外乱がない場合のドラム回転により生じるドラム張力 $f_t$ はドラム回転によるケーブル移動量 $x_c$ に比例していると考えることができ、式(3)のようにドラム回転角度変化 $\theta_d$ を用いて表すことができる。なお、 $C_3$ はケーブルの伸びや摩擦により決定する定数とする。

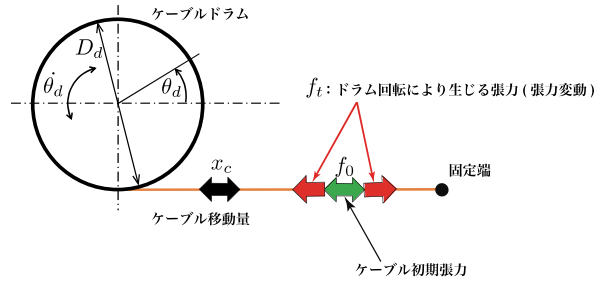


図3. ドラム張力とドラム回転との関係

$$f_t = \alpha\theta_d, \quad \alpha = C_3 \frac{D_d}{\pi} \quad (3)$$

### 2.3 モデリング

オートリール装置の状態空間モデルを図4に示す。入力 $u$ 、観測出力 $y$ 、状態変数 $x$ を式(4)と定義し、 $\tau$ はケーブルドラム(以降、ドラム)の回転トルク、 $T_d$ は張力変動による外乱トルク、 $f_t$ はドラム回転により生じるケーブル張力、 $\theta_d$ はドラム回転角度、 $\dot{\theta}_d$ ドラム回転角速度とする。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \tau \\ T_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = f_t, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_d \\ \dot{\theta}_d \\ f_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

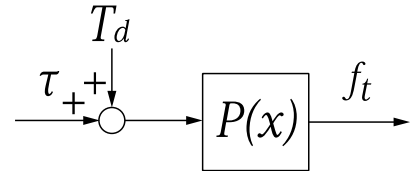


図4. 状態空間モデル

ドラムに関する運動方程式を式(5)に示す。 $J_r$ はドラムの慣性モーメント、 $d_r$ は減衰係数とする。

$$J_r \ddot{\theta}_d + d_r \dot{\theta}_d = \tau + T_d \quad (5)$$

式(3)、(4)、(5)を用いて、このシステムの状態方程式および出力方程式は、式(6)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_d \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{d_x}{j_r} & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \dot{\theta}_d \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{d_x}{j_r} & \frac{d_x}{j_r} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ T_d \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \dot{\theta}_d \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)より、このシステムの状態空間は、以下のように表すことができる。

$$P(x) = \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{d_x}{j_r} & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{j_r} & \frac{1}{j_r} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = [1 \ 1 \ 1] \quad (7)$$

### 2.4 ドラム回転制御

ドラム回転制御における状態フィードバックモデルを図5に示す。このシステムへの入力 $r$ を式(8)と定義すると、制御入力 $\tau$ は式(9)のように表すことができる。今後、偏差 $e$ に関するレギュレーション問題と考え、状態フィードバック制御として定式化を進めていく。ここで、 $\theta_r$ はドラムの目標回転角度、 $\dot{\theta}_r$ は目標回転角速度とする。

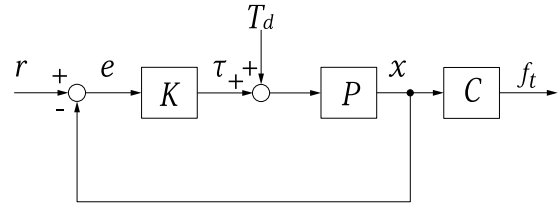


図5. ドラム回転制御系

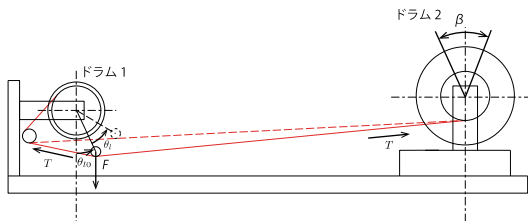
$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \theta_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [k_1 \ k_2 \ k_3] \begin{bmatrix} \theta_r - \theta_d \\ \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_d \\ f_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

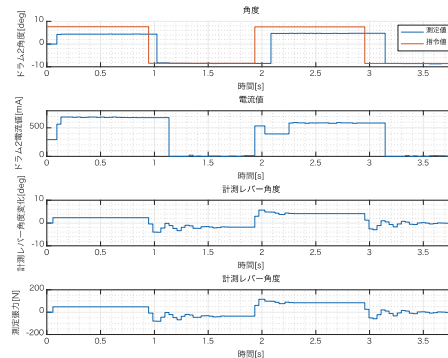
## 3. オートリール実験

### 3.1 動的荷重実験 (外乱)

初期張力で張られたケーブルに外乱 $T_d$ を与えた時のケーブル張力変動 $f_t$ を調べる。実験環境は、図6(a)に示すように本研究に用いているオートリール(ドラム1)固定、ドラム2を初期角度に対して $\pm 8$  [deg] ( $\beta = 16$  [deg])で揺動させることで、ロボット追従走行においてロボット間距離の変動により生じるケーブル張力外乱を模擬している。本実験では、図6(b)に示すように、ケーブルが緩むと計測レバー角度変化が振動的になる事象が確認された。これより、ケーブルの張り(緩み)によりケーブルの剛性が変化し、ケーブル自体のインピーダンスが変化する可能性が考えられる。



(a) 実験環境



(b) 実験結果

図6. 動的荷重実験 (外乱)

### 3.2 動的荷重実験（ドラム回転）

初期張力で張られたケーブルにドラム回転による入力トルク  $\tau$  を与えた時のケーブル張力変動  $f_t$  を調べる。実験環境は、図7（a）に示すようにドラム2を固定、オートリール（ドラム1）とし、初期角度に対して  $\pm 8$  [deg]（ $\beta=16$  [deg]）で揺動させる。本実験から実験結果を図7（b）に示すように、ケーブルの送り出し時と巻き取り時で計測レバーの角度変化量に違いが見られ、ケーブル巻き取り時にケーブル張力が大きくなっているにも関わらず計測レバー角度が変化しない事象が見られた。このことから、オートリールの送り出し時と巻き取り時に張力変化が異なることが考えられる。その要因として、ケーブル送出/巻取方向を変えるためのガイドローラによるトルク損失が考えられる。

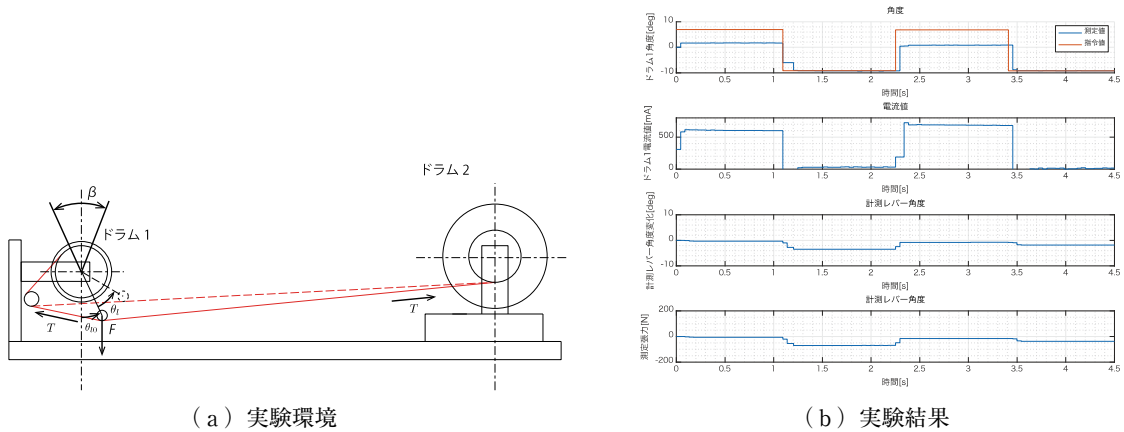


図7. 動的荷重実験（ドラム回転）

## 4. まとめ

本年度の研究では、ケーブルオートリールにおけるダイナミクスに関するモデル化を行うと共に、模擬実験により張力外乱およびドラム回転によるケーブル張力変動への影響を確認し、ケーブル張力変化によるケーブル剛性変化およびオートリール構造において送出/巻取の特性の違いが張力計測に対して影響を及ぼす可能性があることが判明した。今後は、伝達特性の把握（状態空間モデルのパラメータ同定）とコンプライアンス制御理論に基づくフィードバックゲインの設計及び性能評価を進めていく予定である。

### 参考文献

- 1) Hiroyasu MIURA, Ayaka WATANABE, Soichiro SUZUKI and Masayuki OKUGAWA, Field Experiment Report for Tunnel Disaster by Investigation System with Multiple Robots, Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Paper No.92, pp.276-277, 2016.
- 2) 三浦洋靖, 奥川雅之, 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.16, pp.44-47 (2020.9)