

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	力学的平衡状態に着目したパラレルワイヤマニピュレーション -第1報 : ワイヤ張力を制御するワイヤリール機構のコンセプトと設計-
Title(English)	Parallel Wire Manipulation Focusing on Mechanical Equilibrium -1st Report: Concept and design of wire reel mechanism for controlling wire tension-
著者(和文)	吉澤汐理, 遠藤央, 菅原雄介
Authors(English)	Shiori Yoshizawa, Mitsuru Endo, Yusuke Sugahara
出典(和文)	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予稿集, , , pp. 2631-2634
Citation(English)	, , , pp. 2631-2634
発行日 / Pub. date	2019, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2019 The Society of Instrument and Control Engineers

# 力学的平衡状態に着目した平行ワイヤマニピュレーション -第1報：ワイヤ張力を制御するワイヤリール機構のコンセプトと設計-

○吉澤 汐理 (日本大学), 遠藤 央 (日本大学), 菅原 雄介 (東工大)

## Parallel Wire Manipulation Focusing on Mechanical Equilibrium -1st Report: Concept and design of wire reel mechanism for controlling wire tension-

○ Shiori YOSHIZAWA (Nihon University), Mitsuru ENDO (Nihon University)  
and Yusuke SUGAHARA (Tokyo Institute of Technology)

Abstract : This study proposes positioning of an object passively using a parallel-wire mechanism controlling not length but tension of each wire. By controlling tension of each wire, problems due to length-error of each wire, such as position error and inner force, are not occurred. To realize a control of tension of a wire, in this paper, a novel mechanism utilizing a counter weight is proposed.

### 1. はじめに

平行リンク機構 [1] の手先に発生する力が大きいことや、手先位置の精度が高い等のメリット [2] を残し、作業空間が狭いというデメリットを克服するものとして、平行ワイヤ機構がある。これまでに、平行ワイヤ機構に基づいた多数のシステムや応用例が提案されてきた。ここで平行ワイヤ機構は、操作対象物を四方八方からワイヤで拘束する過拘束型平行ワイヤ機構 [3]<sup>etc</sup> と操作対象物を複数のワイヤで懸垂する懸垂型平行ワイヤ機構 [4]<sup>etc</sup> に分類される。過拘束型平行ワイヤ機構の概念図を Fig.1(a) に、懸垂型平行ワイヤ機構の概念図を Fig.1(b) に示す。図中の濃線がフレーム、淡線がワイヤ、球が操作対象物を表す。

従来、多くの研究例 [3]<sup>etc</sup> では、幾何学的にワイヤの長さを操作することで操作対象物の位置決め制御をする。これらの手法では、ワイヤ長の制御のためにリールの回転を操作することが一般的である。そのため、リール軸まわりの角度誤差に起因する課題が多く存在する。過拘束型機構では四方八方から拘束するため、リール角度誤差に基づくワイヤの長さの誤差により操作対象物に内力が発生する。また、懸垂型機構ではワイヤの長さの誤差は操作対象物の位置誤差となる。これら内力や位置誤差に対する取り組みは多数あり、未だ確立された手法はない。

これに対し本研究では、ワイヤ長の操作による操作対象物の幾何学的位置決めではなく、ワイヤの力学的な平衡状態に着目し、ワイヤの張力を操作することで、操作対象物が目的地にパッシブに収束し、位置決めを実現するシステムを提案する。そもそもワイヤの長さを制御せずにワイ

ヤ張力を制御するため、内力等の問題を議論する必要がない位置決め的手法である。本稿では、提案する張力を操作するワイヤリール機構のコンセプトとその設計について述べる。

### 2. ワイヤ張力調節型ワイヤリール機構

#### 2.1 カウンタウェイトを利用した張力調節

従来はリールの回転を操作することでワイヤの長さを制御し、操作対象物の位置決めをする。本稿で提案するワイヤリール機構ではワイヤリールは自由回転する軸に固定するとし、外力が加わるとそれに応じて自由にワイヤが引き出される。この時加わるのは軸周りの機械摩擦のみである。ここでリール機構にはスパイラルプーリの機構を採用し、ワイヤ引き出し位置が変化しないようにする。

ワイヤに張力を発生させるために、リール機構と相対位置を制御可能なカウンタウェイトを搭載する。カウン

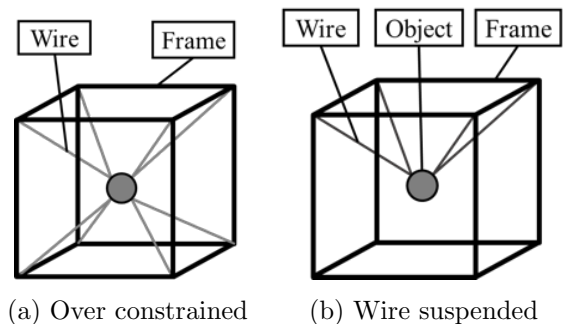


Fig. 1: Concept model of a parallel wire mechanism

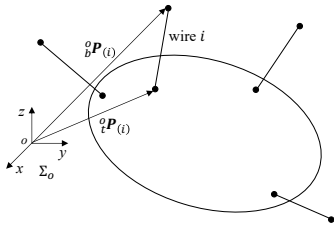


Fig. 2: Model of a parallel wire mechanism

タウエイトはリール機構に固定されるため、環境に対してはリール機構とともに自由回転する。カウンタウエイトはリール軸周りを回転する振り子型とし、環境に対するカウンタウエイトの振り角を任意の角度に位置決めすることで、リール軸周りのリール機構に発生するトルクを操作できる。このトルクを操作することでワイヤの張力を制御するものである。

## 2.2 運動モデル

Fig.2に示すように、操作対象物が  $n \in \mathbb{Z}$  本のワイヤより空間に位置決めされることを考える。このとき、グローバル座標系  $\Sigma_o$  は任意の位置の姿勢に定義する。このとき、 $i \in \mathbb{Z}$  番目のワイヤの操作対象物側の固定位置ベクトルを  ${}^o\mathbf{P}_{(i)} \in \mathbb{R}^3$ 、環境側の固定位置ベクトルを  ${}^i\mathbf{P}_{(i)} \in \mathbb{R}^3$  とする。 $i$  番目のワイヤが発生する張力の大きさ  $T_{(i)} \in \mathbb{R}$  は制御可能であるとする。このとき、 $i$  番目のワイヤが操作対象物に加える力ベクトル  ${}^o\mathbf{F}_{(i)} \in \mathbb{R}^3$  は次のようになる。

$${}^o\mathbf{F}_{(i)} = T_{(i)}({}^o\mathbf{P}_{(i)} - {}^o\mathbf{P}_{(i)}) \quad (1)$$

この力  ${}^o\mathbf{F}_{(i)}$  が  $n$  本のワイヤ分の操作対象物に加わり、合力として作用する。この合力ベクトルを  ${}^o\mathbf{F}_t \in \mathbb{R}^3$  とすると、次式の力のつり合い式が成り立つ。

$${}^o\mathbf{F}_t = \sum_{i=1}^n {}^o\mathbf{F}_{(i)} + {}^o\mathbf{G}_t \quad (2)$$

ここに、操作対象物の質量を  $m_t \in \mathbb{R}$  とし、 ${}^o\mathbf{G}_t \in \mathbb{R}^3$  は重力による力ベクトルであり、 ${}^o\mathbf{G}_t = [0 \ 0 \ m_t g]^T$  となる。なお、 $g \in \mathbb{R}$  は重力加速度であるとする。

操作対象物は空中にワイヤで固定され、ワイヤによる力および重力による力のみ加えることから、 ${}^o\mathbf{F}_t$  の方向に加速される。操作対象物が目標の位置にあるときに、力のつり合い状態になる  $T_{(i)}$  を各ワイヤで実現すると、目標の位置に収束することを文献 [5] で示した。

この位置決めを実現するために  $i$  番目のリールにおいて、ワイヤの張力  $\tau_i$  を実現することを考える。ワイヤの巻き取り位置  ${}^o\mathbf{P}_{(i)}$  はワイヤガイドで拘束されているとする。ワイヤガイドに原点  $O_i$  を固定し、任意方向に座標軸を定義する  $i$  番目の座標系  $\Sigma_i$  を定義する。このとき、 $\Sigma_i$  基準

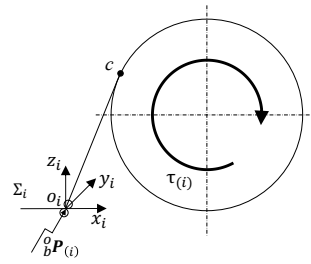


Fig. 3: Equilibrium of wire

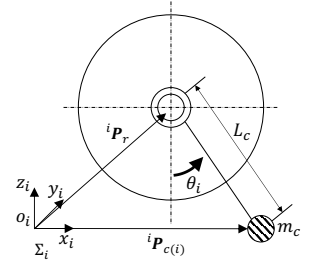


Fig. 4: Geometrical position of the counterweight

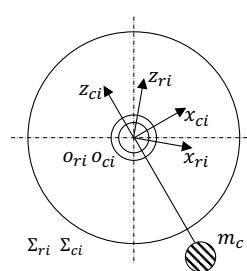


Fig. 5: Coordinate system

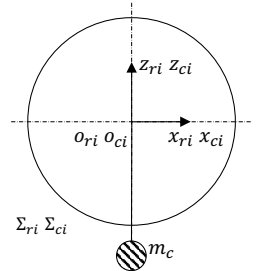


Fig. 6: Initial posture of counterweight

のリールとワイヤの接点  $c$  の位置ベクトル  ${}^i_c\mathbf{P} \in \mathbb{P}$  は変化せず、常に一定であるとする。ワイヤリールのリール軸まわりのトルク  $\tau_i \in \mathbb{R}$  はワイヤ張力  $T_{(i)}$  と次のつり合い関係を持つ。

$$T_{(i)} = T_{(i)} R_r \quad (3)$$

ここに、 $R_r \in \mathbb{R}$  はワイヤリールの半径である。

次に、トルク  $\tau_{(i)}$  について考える。Fig.4に示すように、ワイヤリールと相対的に角度を固定できるカウンタウエイトが搭載されるとする。このとき、カウンタウエイトの質量を  $m_c \in \mathbb{R}$ 、アームの長さを  $L_c \in \mathbb{R}$  とする。リールの軸上アームが取り付けられている位置の位置ベクトルを  ${}^i_r\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$  とすると、カウンタウエイトの位置ベクトル  ${}^i_c\mathbf{P}_{(i)} \in \mathbb{R}^3$  は次のようになる。

$${}^i_c\mathbf{P}_{(i)} = {}^i_r\mathbf{P} + \begin{bmatrix} L_c \sin \theta_i \\ 0 \\ -L_c \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $\theta_i \in \mathbb{R}$  は  $i$  番目のリールにおけるカウンタウエイトの重力方向に対する角度である。

この位置ベクトルより、リール軸まわりのトルクは外積に基づき次から求まる。

$$\tau_i(\theta_i) = {}^o\mathbf{Y}_i^T {}^o\mathbf{G}_c \times {}^i_c\mathbf{P} ({}^i_c\mathbf{P}_{(i)}(\theta_i) - {}^i_r\mathbf{P}) \quad (5)$$

ここに、 ${}^o\mathbf{Y}_i \in \mathbb{R}^3$  は  $\Sigma_o$  基準の  $\Sigma_i$  の  $y_i$  軸の方向ベクトル、 ${}^o\mathbf{G}_c \in \mathbb{R}^3$  はカウンタウエイトに加わる重力による力

ベクトルであり、カウンタウエイトの質量が  $m_c \in \mathbb{R}$  のとき、 ${}^o\mathbf{G}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_c g \end{bmatrix}^T$  である。 ${}^o_i\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は  $\Sigma_o$  基準の  $\Sigma_i$  の回転行列である。式 (5) より、リール軸まわりのトルクはカウンタウエイトのグローバル座標系における角度により決まるとわかる。

次に、リールの回転について考える。Fig.5のように、カウンタウエイト座標系  $\Sigma_{ci}$ 、リール座標系  $\Sigma_{ri}$  を設定する。それぞれ、カウンタウエイトとアームの軸の交点を原点とする。カウンタウエイト座標系はリール軸に  $y_{ci}$  軸を定義し、 $z_{ci}$  軸のマイナス方向にカウンタウエイトのアームが位置するようにカウンタウエイトに固定される。

また、リール座標系はリール軸に  $y_{ri}$  軸を定義し、任意方向に  $x_{ri}$  軸をとり、リールに固定される。このとき、グローバル座標系基準のそれぞれの回転角度を  ${}^o_{ci}\theta \in \mathbb{R}$ 、 ${}^o_{ri}\theta \in \mathbb{R}$  とする。初期姿勢は、Fig.6 の状態であるとし、 ${}^o_{ci}\theta = 0$ 、 ${}^o_{ri}\theta = 0$  である。ここで、その幾何学的関係より、 $\theta_i = {}^o_{ci}\theta$  であることがわかる。

リールとカウンタウエイトの相対角度は  $\Sigma_{ri}$  基準の  $\Sigma_{ci}$  の角度とみなせる。今、それを  ${}^{ri}_{ci}\theta \in \mathbb{R}$  とすると、次の関係が成り立つ。

$${}^{ri}_{ci}\theta = {}^o_{ci}\theta - {}^o_{ri}\theta \quad (6)$$

ここで、リール軸は環境に対して受動関節で固定されているとする。すなわち、次のダイナミクスで回転運動が発生する。

$$(J_r + J_c) \frac{d^2}{dt^2} {}^o_{ri}\theta = \tau_i \quad (7)$$

ここに、 $J_r \in \mathbb{R}$  はリールのリール軸まわりの慣性モーメント、 $J_c \in \mathbb{R}$  はカウンタウエイトのリール軸まわりの慣性モーメントである。実際は軸に摩擦が発生するので、次のようになる。

$$(J_r + J_c) \frac{d^2}{dt^2} {}^o_{ri}\theta + D_r \frac{d}{dt} {}^o_{ri}\theta = \tau_i \quad (8)$$

ここに、 $D_r \in \mathbb{R}$  はリール軸の粘性摩擦係数である。前述したように、リールに対してカウンタウエイトの相対角度が制御できるため、 ${}^{ri}_{ci}\theta$  はシステムにより位置決めできる。また、 ${}^o_{ri}\theta$  は式 (8) に応じてパッシブに決まる。したがって、式 (6) を変形し、カウンタウエイトの角度は次で決まる。

$${}^o_{ci}\theta = {}^{ri}_{ci}\theta - {}^o_{ri}\theta \quad (9)$$

この  ${}^o_{ci}\theta$  に応じて、リール軸まわりのトルク  $\tau_i$  が決まる。また、 ${}^o_{ri}\theta$  の増減により、リールのワイヤ巻き上げ量に変化する。

### 3. ワイヤリール機構の設計

先に示したコンセプトをおよび運動モデルをもとに、カウンタウエイトを用いたワイヤリール機構を設計し

た。Fig.7(a) に設計したワイヤリール機構の断面図を、Fig.7(b) に側面図を示す。Fig.8 にはワイヤリール機構のモデル図を示す。

#### 3.1 ワイヤリールモジュール

スパイラルプーリは円柱の側面にオネジ状に溝が掘られた部品である。スパイラルプーリは側面溝ピッチと同じピッチを持つボールねじに取り付ける。ボールねじの両端にベアリングを内蔵したフランジを固定させ、スパイラルプーリに貫通している3本のシャフトの両端はフランジに固定する。これらが一体となって回転することで、フランジは位置を変えずに回転し、スパイラルプーリはねじ軸に沿って並進する。

本研究では長さ 2.5 m の SUS フレームを 12 本用いて立方体を作成し、その中で操作対象物を位置決めする。ワイヤリール機構の最大巻き取り長さは、一辺が 2.5 m の立方体の対角線より長い必要があるため、5 m とした。ワイヤリール機構の最大巻き取り長さ  $L$  は式 (10) で表せる。

$$L = 2\pi R_r \frac{l}{p} \quad (10)$$

設計するスパイラルプーリの半径  $R_r$  を 37.5 mm とし、ピッチ  $p$  は 5 mm である。 $L$  は 5,000 mm であるため、軸方向の長さ  $l$  は 107 mm となる。また、ワイヤの引き出し位置は常に固定されており、ワイヤはスパイラルプーリが回転することで溝に巻き付けられる。これにより、スパイラルプーリの可動範囲は軸方向の長さの2倍の値が必要であるため、可動範囲を 214 mm とし、ボールねじとシャフトの長さを決定した。

スパイラルプーリの回転角度を検出するエンコーダは、ステータ裏に設置されており、エンコーダの軸端にプーリが取り付けられている。スパイラルプーリが回転することでフランジとフランジに固定されたプーリが回転する。これにより、ベルトを介してエンコーダの軸端に取り付けたプーリが回転するため、スパイラルプーリの回転角度が検出できる。

#### 3.2 カウンタウエイトモジュール

カウンタウエイトモジュールはモータとカウンタウエイトがアームに取り付けられている。また、アームはベアリングが内蔵されているため、スパイラルプーリやフランジに対して回転できる。そのため、モータが駆動するとモータの軸端に取り付けたプーリが回転し、モータの動力がベルトを介してフランジに固定されたプーリに伝達する。これによりフランジが回転するため、スパイラルプーリも同様に回転する。

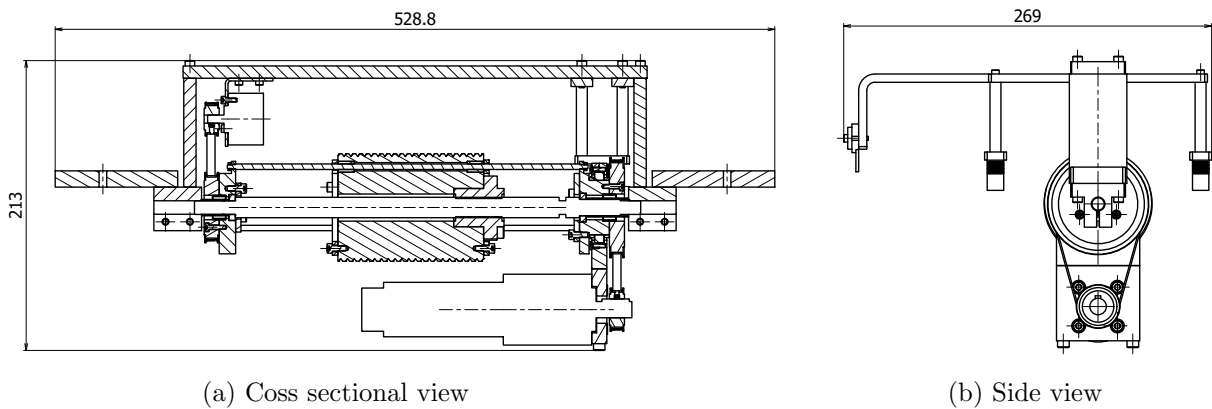


Fig. 7: Drawing of the wire reel mechanism

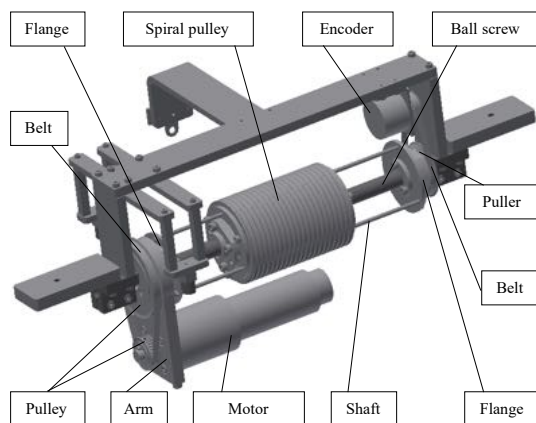


Fig. 8: Three dimensions model of the wire reel mechanism

スパイラルプーリの慣性モーメントは小さく無視できるとすると、カウンタウエイトの重さによるモーメント、慣性モーメントおよびワイヤ張力によるモーメントの和が0となる。カウンタウエイトの質量を  $m_c$ 、カウンタウエイトからスパイラルプーリの中心までの距離を  $l_c$  とすると、式 (11) が成り立つ。

$$m_c l_c g \sin \theta_i - m_c l_c^2 \ddot{\theta}_i - TR_r = 0 \quad (11)$$

ワイヤ張力によるモーメントとカウンタウエイトの重さによるモーメントがつり合っているとき、Fig.6 の位置でカウンタウエイトは静止するため  $\ddot{\theta}_i = 0$  となる。また、カウンタウエイトの重さによるモーメントが最も大きくなるのは  $\theta_i = \frac{\pi}{2}$  rad のときである。よって、式 (11) よりカウンタウエイトの質量と、カウンタウエイトからスパイラルプーリの中心までの距離は決定できる。

しかし、モータの質量  $m_m$  の 1,180 g も考慮する必要がある。モータはスパイラルプーリに接しないようにアームに取り付けるため、モータからスパイラルプーリの中心までの距離  $l_m$  は 75 mm とした。カウンタウエイトからス

パイラルプーリの中心までの距離を 140 mm とすると、式 (12) より、カウンタウエイトの質量は 270 g となる。

$$m_c l_c g \sin \theta_i + m_m l_m g \sin \theta_i - Tr = 0 \quad (12)$$

したがって、モータ自体がカウンタウエイトの役割を持つよう設計した。

#### 4. おわりに

本研究では、力学的平衡状態に着目し、ワイヤの張力を操作することによる操作対象物の位置決めを目的としている。本稿ではカウンタウエイトを用いたワイヤリール機構のコンセプトと設計について述べた。今後は、複数台のワイヤリール機構を実装し、操作対象物の位置決めについて検証する。

#### 謝辞

本研究は科学研究費助成事業 (若手研究 (B))17K14629 の補助により実施した。

#### 参考文献

- [1] 米田完, 他: “はじめてのロボット創造設計”, p.222, 講談社 (2008)
- [2] 楠田喜宏: “パラレルメカニズム実用化の展望”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.2, pp.118-122(2012)
- [3] 川村貞夫, 他: “パラレルワイヤ駆動方式を用いた超高速ロボット FALCON の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.82-89(1997)
- [4] 川村貞夫, 他: “非完全拘束型パラレルワイヤ懸垂機構の逆運動学解析と順運動学計算”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.1, pp.107-115(2002)
- [5] 遠藤央, 他: “機械的平衡点に着目したパラレルワイヤ機構による物体位の位置決め”, 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会講演論文集, No.18-6, (2018)