

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	網状の索道を自走するロボットの研究(ケーブル変形を考慮した網状索道架設計画法の開発)
Title(English)	Study on Robot Traversing and Moving on Spatially Structured Cableway (Development of Spatially Structured Cableway Planning Method Taking Cable Deformation into Consideration)
著者(和文)	一條 敦弘, 馬場 星明, 袴田 遼典, 菅原雄介, 遠藤央, 石井裕之, 干場功太郎, 武田行生
Authors(English)	Atsuhiko Ichijiyo, Hoshiaki Baba, Ryouyusuke Hakamata, Yusuke Sugahara, Mitsuru Endo, Hiroyuki Ishii, Kotaro Hoshiba, Yukio Takeda
出典(和文)	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 予稿集, , , pp. 532-537
Citation(English)	, , , pp. 532-537
発行日 / Pub. date	2022, 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) 2022 The Society of Instrument and Control Engineers

# 網状の索道を自走するロボットの研究

## (ケーブル変形を考慮した網状索道架設計画法の開発)

○一條 敦弘 (東京工業大学), 馬場 星明 (東京工業大学), 袴田 遼典 (東京工業大学),  
菅原 雄介 (東京工業大学), 遠藤 央 (東京工業大学), 石井 裕之 (早稲田大学),  
干場 功太郎 (東京工業大学), 武田行生 (東京工業大学)

## Study on Robot Traversing and Moving on Spatially Structured Cableway (Development of Spatially Structured Cableway Planning Method Taking Cable Deformation into Consideration)

○Atsuhiko ICHIJŌ (Tokyo Tech), Hoshiaki BABA (Tokyo Tech),  
Ryosuke HAKAMATA (Tokyo Tech), Yusuke SUGAHARA (Tokyo Tech),  
Mitsuru ENDO (Tokyo Tech), Hiroyuki ISHII (Waseda Univ.),  
Kotaro HOSHIBA (Tokyo Tech), and Yukio TAKEDA (Tokyo Tech)

Abstract: The authors develop the mobile robots traversing and moving on spatially structured cableway. Towards the applications of the robots, the method to plan the cableway through which the robots can pass without collision from the data of the start and destination position and the obstacle, is needed. In this paper, the algorithms to compute the cableway candidates using Q-RRT\* and determine whether the robot collides with obstacles by deriving the tension and deformation based on the elastic catenary model are presented.

### 1. 緒言

ドローンや地表走行ロボットは広範囲での飛行・移動が可能だが、非整備環境での運用においては墜落やスタックのリスクが問題となっている。レールを敷設すれば移動ロボットの運用は容易になるが、敷設コストが大きい。そこで Sudiono らはケーブルをクモの巣状に相互に接続し空間的に架設した網状索道上を自走するロボット(網状索道自走機)を提案している[1]。網状索道を森の中で架設するイメージを図1に示す。ケーブルは自走機が走行する主索と、主索を支える副索の2種類で構成され、結び目以外のケーブル端は支柱で固定する。

先行研究[2]では自走機が開発された(図2)。自走機本体の仰角, 右旋回角, 左旋回角, 傾斜角を図3に示すように  $\gamma, \theta_{nR}, \theta_{nL}, \varphi_n$  とすると, この自走機は  $|\gamma| \leq 30^\circ$  である場合はケーブル上を走行可能で,  $20^\circ \leq \theta_{nR} \leq$

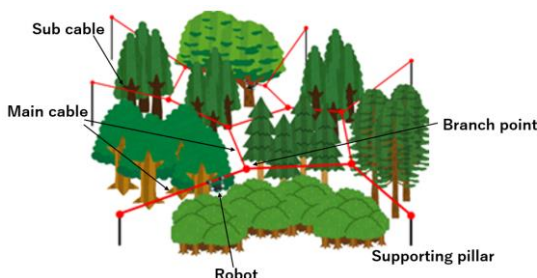


Fig. 1: Image figure of spatially structured cableway

$80^\circ, 20^\circ \leq \theta_{nL} \leq 80^\circ, 100^\circ \leq \theta_{nR} + \theta_{nL}, |\varphi_n| \leq 30^\circ$  である場合, 結び目を乗り越え, 次に進入するケーブルの向きに方向転換することが可能である[2]。

この自走機を運用する際, どのような網状索道を架設すればよいかを計算する方法は明らかにされていない。そこで著者らは, 障害物の位置などの環境モデルや, 目的地などの作業モデルが与えられたとき, 自走機が障害物と干渉せずに走行可能となる網状索道の張り方を導出するアルゴリズムの開発を長期的目標と設定し



Fig. 2: Developed robot [2]

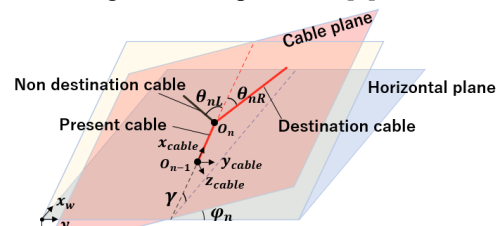


Fig. 3: Elevation angle( $\gamma$ ), tilt angle ( $\varphi_n$ ) and turning angle ( $\theta_{nR}, \theta_{nL}$ )[2]

た. 特にこの際, 自走機の自重によるケーブル変形が発生する場合でも自走機やケーブルが障害物と干渉しないよう, アルゴリズムではケーブルの弾性や懸垂も考慮する必要がある. その第一段階として, 本報では, 環境モデルと作業モデルから主索経路を複数生成し, その中から総距離と分岐点の数を最小化する経路を 1 つ選択し, この主索経路を実現するための副索の張り方を導出し, さらに自走機の自重によるケーブル変形量を導出することでこの索道上を自走機が障害物と干渉せずに走行可能かを判定するアルゴリズムの開発を目的として行った結果について述べる. ただし, 今回は, 索道を走行する自走機は 1 台, 導出された網状索道が主索 2 本・副索 1 本で構成される (分岐点が 1 つである) 場合を対象とする.

## 2. 問題設定

研究目的を踏まえ, 以下の通りに問題設定を行った:

- 事前に与えられる値
  - ・ 環境モデル: 障害物の位置と大きさ
  - ・ 作業モデル: スタート地点とゴール地点の位置
- 導出対象
  - ・ 以下の条件を満たした複数の主索経路の候補
  - ・ 複数の候補の中での最短経路
  - ・ 主索経路が最短経路となるための副索の張り方 (副索の長さ, 端点の位置, 方向)
- 条件
  - ・ 自走機が自力で走行可能であること (仰角と旋回角の限界値の考慮)
  - ・ 自走機の走行時にケーブル変形や結び目の位置変化が発生した場合でも, 自走機やケーブルが障害物と干渉しないこと

## 3. 開発したアルゴリズムの, 詳細

### 3.1 フローチャート

本節では今回開発したアルゴリズムの流れを説明する. 計算の詳細は次節以降で説明する. フローチャートを図 4 に示す.

計算①: 主索経路の候補を複数生成し, その中から最短の経路を選択する

計算②: 導出された主索経路を実現する副索の張り方を導出する

計算③: 自走機走行時の張力とケーブル変形量を導出し, 自走機が全区間走行可能かを判定する

### 3.2 主索経路の候補の生成方法

主索経路の候補を生成するアルゴリズムとして Q-RRT\*[3]を参考にした. Q-RRT\*は, スタート地点からゴ

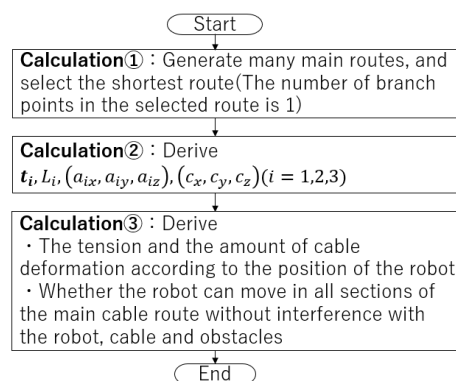


Fig. 4: Flowchart of the developed algorithm

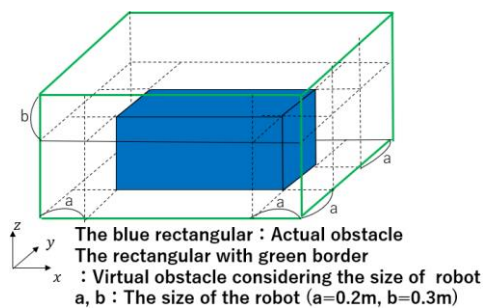


Fig. 5: Virtual obstacle considering the size of robot

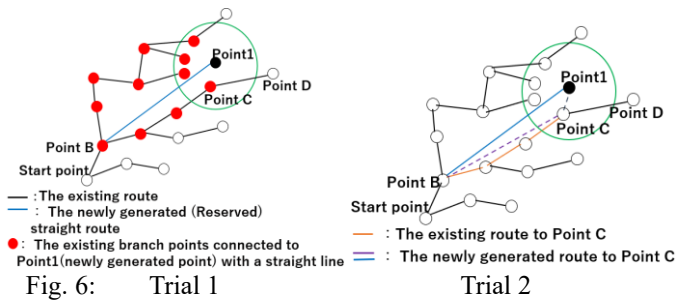
ール地点までの障害物を避けた経路の候補を複数生成し, 候補の中から最も短い経路を選択するアルゴリズムである. 他の既存アルゴリズムと比較して少ない計算回数で, 総距離が短く, 直線的な (分岐点の数が少ない) 経路の導出が可能である点に着目し採用した.

さらにここでは Q-RRT\*を拡張し, 自走機の大きさや性能 (仰角などの角度の制限) を考慮した, 主索経路の候補を生成するアルゴリズムを作成した. 自走機の大きさの考慮については, 論文[4]の手法を参考に, 図 5 のように自走機の大きさを障害物の周りに付与することで「自走機の大きさを付与した障害物」を考え, これを避けた主索経路の候補が導出できるようにした.

計算の流れとしては, 以下の試行 1, 2 を  $n$  回繰り返すことで複数の主索経路の候補を生成し, その後その中から最短経路を選択する. これにより仰角と旋回角の条件を満たした主索経路候補の中から最短経路を選ぶことが可能になる. 導出された主索経路において, ケーブルの両端は支柱により固定する. またこの計算において各主索は直線と仮定する.

#### ➤ 試行 1 (経路生成) (図 6)

- ・ ランダムに 1 つ点 (Point1) を生成
- ・ Point1 中心の球を生成する. 計算開始前の球の半径を  $d$  (定数) とし, 計算回数  $i (i \leq n)$  に反比例して半径を短くする
- ・ 球内の全ての分岐点と, 球内にある各分岐点から  $t$  個前までの全ての分岐点を Point 1 と線分で結ぶ ( $t$  は任意の自然数, 今回は  $t=2$  とした)
- ・ 下記の条件 1 を全て満たした Point 1 までの経



路候補の中から最短経路を保存する（その経路内にある、Point 1 と線分で結ばれた点を Point B とする）

■ 条件 1

- 生成された主索と「自走機の大きさを付与した障害物」の干渉がないこと
- 生成された主索の仰角の絶対値が30°以下であること
- 選んだ分岐点が終点の主索と、生成された主索間のなす角の大きさが20°以上80°以下であること

➤ 試行 2（経路変更）（図 6）：以下の計算を球内の全ての分岐点で行う

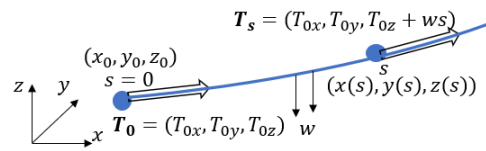
- 円内の分岐点 1 つを Point C とし、Point B と Point C、Point 1 と Point C を線分で結ぶ
- 以下の条件 2 を全て満たした Point C までの経路候補の中から最短経路を保存する

■ 条件 2

- 生成された主索と「自走機の大きさを付与した障害物」の干渉がないこと
- 生成された主索の仰角の絶対値が30°以下であること
- Point C までの主索と、Point C の 1 つ前の分岐点が終点の主索間のなす角の大きさが20°以上80°以下であること
- Point C の終点の主索経路が変更された場合は、Point C までの主索と、Point C-Point D の主索によるなす角の大きさが20°以上80°以下であるときに限り、Point D を経由する経路を既存経路から新たに生成された経路に変更する

3. 3 各主索の初期長さ、張力の仮定値、副索の張り方、支柱の位置の導出

主索経路が導出されたら、次に副索の張り方を求める。自走機走行時にケーブル変形量が小さくなるように張ることが望ましいので、主索経路導出後に、たわみがある許容値以内となる各主索の初期長さ（張力や外力が加わる前のケーブルの長さ）を導出し、張力を仮定



した上で副索の張り方を導出する手法を考案した。

たわみが十分小さい場合における、たわみと張力、初期長さの関係式と、カテナリー曲線の式[5]に基づく、図 7 において、EA：ケーブルの弾性係数、w：ケーブルの単位長さあたりの重さ、s：ケーブルの始点からの初期長さとして定義された固定座標（s = 0 の点が片方のケーブル端を示す）、(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>)：固定座標系で表した s = 0 の位置、(x(s), y(s), z(s))：固定座標系で表した s の位置、T<sub>0</sub>：s = 0 における張力ベクトル、T<sub>s</sub>：s における張力ベクトルとした場合、各主索の初期長さや張力の仮定値（分岐点の位置座標が 3・2 で導出された値で一定とした時の張力）の関係は以下ようになる（張力ベクトルの向きは接線方向と一致すると考える）。

$$x(s) - x_0 = \frac{T_{0x}s}{EA} + \frac{T_{0x}}{w} \ln \frac{|T_{0z} + ws| + \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + (T_{0z} + ws)^2}}{|T_{0z}| + \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + T_{0z}^2}} \quad (1)$$

$$y(s) - y_0 = \frac{T_{0y}s}{EA} + \frac{T_{0y}}{w} \ln \frac{|T_{0z} + ws| + \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + (T_{0z} + ws)^2}}{|T_{0z}| + \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + T_{0z}^2}} \quad (2)$$

$$z(s) - z_0 = \frac{1}{w} \left( \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + (T_{0z} + ws)^2} - \sqrt{T_{0x}^2 + T_{0y}^2 + T_{0z}^2} \right) + \frac{1}{EA} \left( T_{0z}s + \frac{1}{2}ws^2 \right) \quad (3)$$

主索経路が与えられてもケーブルの初期長さや張力が未知の値であるが、これらの値は後述の副索の張り方や自走機走行時のケーブル変形量の導出に必要である。そこで文献[5]に記載されている、たわみが十分小さい場合においてたわみの大きさからケーブルの初期長さや張力を導出する手法を参考にして、以下の手順 1~3 に示した、予め設定したたわみの大きさから各主索の初期長さ及び副索の張り方を導出する方法を開発した。各主索をスタート地点側から順に主索 1、主索 2 と表記し、主索 i の初期長さやたわみの最大値をそれぞれ L<sub>i</sub>, f<sub>i</sub> とする。なお、この計算において分岐点の座標値は 3. 2 のアルゴリズムで導出された値とする。

➤ 手順 1

- 図 8 のように支柱で固定された主索経路の両端の位置、分岐点の位置の座標を (a<sub>1x</sub>, a<sub>1y</sub>, a<sub>1z</sub>), (a<sub>2x</sub>, a<sub>2y</sub>, a<sub>2z</sub>), (c<sub>x</sub>, c<sub>y</sub>, c<sub>z</sub>) とする
- f<sub>i</sub> = a (a は任意の定数) とおき、式(4)(5)から初

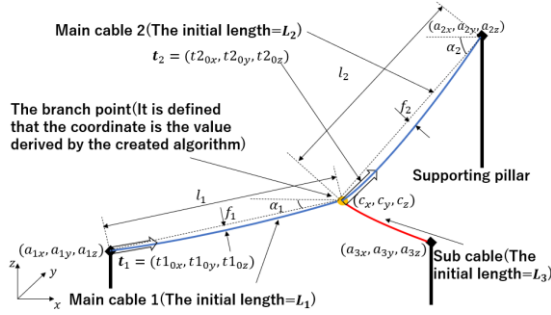


Fig. 8: Coordinates of the branch point and the fixed position by the supporting pillar

期長さ $L_i$ を導出する（文献[5]によれば、たわみが十分小さい場合は、たわみの最大値 $f_i$ は式(4)のように表され、両端における張力の大きさは等しいと仮定できるので、 $f_i$ から式(4)(5)を利用して張力・初期長さの導出も可能となる）

$$f_i = \frac{l_i^2 w \cos \alpha_i}{8T} \quad (4)$$

$$L_i = l_i \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_i}{l_i} \right)^2 \right\} - \frac{T l_i}{EA} \left\{ 1 + \frac{16}{3} \left( \frac{f_i}{l_i} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

➤ 手順 2

- 図 8 のように主索 1, 主索 2 のスタート地点側の分岐点における張力ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{t}_1 = (t_{10x}, t_{10y}, t_{10z})$ ,  $\mathbf{t}_2 = (t_{20x}, t_{20y}, t_{20z})$  と仮定する（ベクトルの向きは進行方向と一致）
- 主索 1 において,  $s = L_1$ : 初期長さ,  $(T_{0x}, T_{0y}, T_{0z}) = (t_{10x}, t_{10y}, t_{10z})$ : 張力ベクトルの仮定値,  $(x_0, y_0, z_0) = (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})$ : スタート地点側のケーブル端の固定座標系で表した位置,  $(x(s), y(s), z(s)) = (c_x, c_y, c_z)$ : ゴール地点側のケーブル端の固定座標系で表した位置とし、これらの値を式(1)~(3)に代入して主索 1 の張力の仮定値を導出する
- 主索 2 において,  $s = L_2$ : 初期長さ,  $(T_{0x}, T_{0y}, T_{0z}) = (t_{10x}, t_{10y}, t_{10z})$ : 張力ベクトルの仮定値,  $(x_0, y_0, z_0) = (c_x, c_y, c_z)$ : スタート地点側のケーブル端の固定座標系で表した位置,  $(x(s), y(s), z(s)) = (a_{2x}, a_{2y}, a_{2z})$ : ゴール地点側のケーブル端の固定座標系で表した位置とし、これらの値を式(1)~(3)に代入して主索 2 の張力の仮定値を導出する

➤ 手順 3

- 分岐点近傍における副索の張力ベクトルを導出する（手順 2 で導出された  $\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$  から  $(T_{0x}, T_{0y}, T_{0z}) = (t_{10x} - t_{20x}, t_{10y} - t_{20y}, t_{10z} + L_1 w - t_{20z})$  と表される）
- 上記の値を式(1)~(3)に代入し、支柱や副索が設

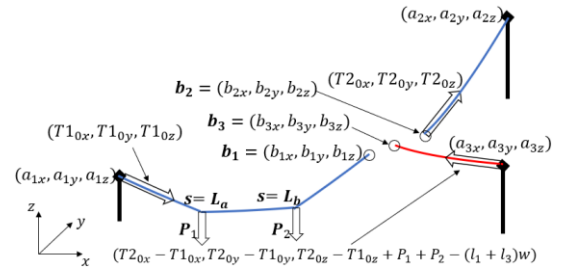


Fig. 9: Coordinates of each cable edge and positions of concentrated load point about pattern 1

置可能な  $(x(s), y(s), z(s)) = (a_{3x}, a_{3y}, a_{3z})$  を導出する（副索の初期長さ $L_3$ の最小値を 0.3m とし、 $L_3$ を伸ばして支柱や副索が設置可能かを判定する計算を支柱や副索が設置可能な  $(a_{3x}, a_{3y}, a_{3z})$  が導出されるまで繰り返す）

### 3. 4 自走機走行時の張力とケーブル変形量の導出

走行時のケーブル変形量は自走機の位置により異なるが、主索経路上においてスタート地点からの初期長さが $L_a$ および $L_b$ である点に自走機の前部駆動部・後部駆動部が接触しており、この点に集中荷重 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ が加わると仮定してケーブル変形量を導出する。自走機の位置に応じたケーブル変形量や張力、自走機やケーブルが障害物と干渉するかどうかを文献[6]で提案された手法により導出する。今回は計算を簡単にするため、 $L_b - L_a = m$  ( $m$ は一定) とした。図 9 のように主索 1, 主索 2, 副索の分岐点側のケーブル端の座標を  $\mathbf{b}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ ,  $\mathbf{b}_2 = (b_{2x}, b_{2y}, b_{2z})$ ,  $\mathbf{b}_3 = (b_{3x}, b_{3y}, b_{3z})$  とすると、導出した網状索道の実現には  $\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_3, -\mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3$  がどちらも微小になる張力ベクトルの導出をすればよいことになるが、直接導出は難しい。そこで以下の式(7)~(12)、前述の式(1)~(3)、後述の式(13)~(22)を使用した計算により適切な張力ベクトルを導出する。

$$\{\hat{\mathbf{T}}\}_{|\alpha|} = [T_{10x} \ T_{10y} \ T_{10z} \ T_{20x} \ T_{20y} \ T_{20z}]^T \quad (7)$$

$$\{\hat{\mathbf{x}}\}_{|\alpha|} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_3 \\ -\mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\{\hat{\mathbf{T}}\}_{|\alpha+1|} = \{\hat{\mathbf{T}}\}_{|\alpha|} - \theta_{|\alpha|} [U_X]^{-1} \{\hat{\mathbf{x}}\}_{|\alpha|} \quad (9)$$

$$\theta_{|\alpha|} = \min \left( \frac{\alpha}{n}, 1 \right) \quad (10)$$

$$A(s) = \left( \frac{1}{EA} + \frac{1}{|T(s)|} \right) \mathbf{I} - \frac{\mathbf{T}(s)\mathbf{T}(s)^T}{|T(s)|^3} \quad (11)$$

$$[U_X] = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int_0^{L_1} \mathbf{A} ds & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \int_0^{L_2} \mathbf{A} ds & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \int_0^{L_3} \mathbf{A} ds \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし、 $\{\hat{\mathbf{T}}\}_{|\alpha|}$ : 張力成分を合わせた行列,  $\{\hat{\mathbf{x}}\}_{|\alpha|}$ : 不適合ベクトル, 式(9): 張力の修正式,  $\theta_{|\alpha|}$ : 未定定数,  $n$ : 任意の自然数,  $U_X$ : 接線係数,  $\alpha$ : 繰り返し回数である。

集中荷重点の位置パターンは駆動輪の位置から、パターン1 (2つの駆動輪が主索1上にある場合,  $0 \leq L_a \leq L_1 - m$ ), パターン2 (駆動輪が主索1, 主索2上にある場合,  $L_1 - m \leq L_a \leq L_1$ ), パターン3 (2つの駆動輪が主索2上にある場合,  $L_1 \leq L_a \leq L_1 + L_2 - m$ ) の3種類ある (パターン1を図9で表した).  $\mathbf{T}(s)$ は以下のように表される.  $s=0$ の位置は, 各主索: スタート地点側のケーブル端, 副索: 支柱による固定位置とする.

➤ パターン1

・ 主索1:

$$\mathbf{T}(s) = \begin{cases} [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws]^T (0 \leq s \leq L_a) \\ [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws - P_1]^T (L_a \leq s \leq L_b) \\ [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws - P_1 - P_2]^T (L_b \leq s \leq L_1) \end{cases} \quad (13)$$

・ 主索2:

$$\mathbf{T}(s) = [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws]^T \quad (14)$$

・ 主索3:  $\mathbf{T}(s) =$

$$[T2_{0x} - T1_{0x} \ T2_{0y} - T1_{0y} \ T2_{0z} - T1_{0z} + P_1 + P_2 - w(L_1 + L_3 - s)]^T \quad (15)$$

➤ パターン2

・ 主索1:

$$\mathbf{T}(s) = \begin{cases} [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws]^T (0 \leq s \leq L_a) \\ [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws - P_1]^T (L_a \leq s \leq L_1) \end{cases} \quad (16)$$

・ 主索2:

$$\mathbf{T}(s) = \begin{cases} [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws]^T (0 \leq s \leq L_a - L_1) \\ [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws - P_2]^T (L_a - L_1 \leq s \leq L_2) \end{cases} \quad (17)$$

・ 主索3:  $\mathbf{T}(s) =$

$$[T2_{0x} - T1_{0x} \ T2_{0y} - T1_{0y} \ T2_{0z} - T1_{0z} + P_1 - w(L_1 + L_3 - s)]^T \quad (18)$$

➤ パターン3

・ 主索1:

$$\mathbf{T}(s) = [T1_{0x} \ T1_{0y} \ T1_{0z} + ws]^T \quad (19)$$

・ 主索2:  $\mathbf{T}(s)$

$$= \begin{cases} [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws]^T (0 \leq s \leq L_a - L_1) \\ [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws - P_1]^T (L_a - L_1 \leq s \leq L_b - L_1) \\ [T2_{0x} \ T2_{0y} \ T2_{0z} + ws - P_1 - P_2]^T (L_b - L_1 \leq s \leq L_2) \end{cases} \quad (20)$$

・ 主索3:

$$\mathbf{T}(s) = [T2_{0x} - T1_{0y} \ T2_{0y} - T1_{0y} \ T2_{0z} - T1_{0z} - w(L_1 + L_3 - s)]^T \quad (21)$$

計算の流れとしては, まず

$$\{\hat{\mathbf{T}}\}_{[1]} = [t1_{0x} \ t1_{0y} \ t1_{0z} \ t2_{0x} \ t2_{0y} \ t2_{0z}]^T \quad (22)$$

とおき, 式(1)~(3)および式(7)~(22)から $\{\hat{\mathbf{T}}\}_{[2]}$ を導出し,  $\{\hat{\mathbf{T}}\}_{[2]}$ と式(1)~(3)および式(7)~(21)から $\{\hat{\mathbf{T}}\}_{[3]}$ を導出する計算手順を $\{\hat{\mathbf{x}}\}_{[\alpha]}$ が微小になるまで繰り返すことで正確な張力とケーブル変形量を導出する. この計算を, 角パターンの範囲内で $L_a, L_b$ を微小変化させて張力やケーブル変形量, 自走機の位置の計算を繰り返して, 張力

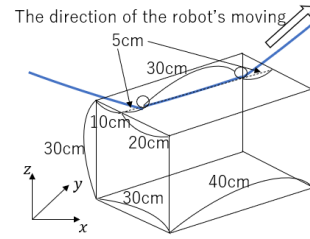


Fig. 10: Dimension of the robot to consider interference with obstacles

やケーブル変形量の変化, 自走機の軌跡を導出する.

自走機と障害物の干渉判定については, 自走機の形状を図10のように設定し, 張力とケーブル変形量の導出後に, 自走機の上の面と下の面が障害物と交差するかどうかを計算し, 交差する場合は自走機が障害物と干渉したと判断する.

#### 4. 出力結果

以下の設定の下でアルゴリズムを10回実行した.

・ 障害物の位置と大きさ:

$$1.2 < x < 1.8, \ 1.2 < y < 1.8, \ 0 < z < 0.9$$

・ 主索経路の始点 = (0,0,0.8)

・ 主索経路の終点と点(3.0, 3.0, 0.85)との直線距離: 0.05m 以内

・ 主索経路の候補及び経路変更を行う回数: 100回

・  $EA = 3530 \text{ N}$  [7]

・  $w = 0.0209 \text{ kg/m}$  (測定結果による)

・  $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_2 = (0 \text{ N}, 0 \text{ N}, -50 \text{ N})$

・  $L_b - L_a = 0.3 \text{ m}$  (一定)

・ たわみの最大値  $a=0.001$  (3・3に記載)

この結果, 3.2 (各主索は直線で自走機は走行していないと仮定) で導出された主索経路は終点の位置などは異なるが, すべて直線的でかつ仰角と旋回角の条件を満たすことが確認できた. 出力結果の例として, 網状索道 (水色線: 主索, 赤線: 副索) と, その上を走行中の自走機の進行方向後ろ側の駆動輪の軌跡 (赤線: 走行可能な地点, 黒線: 仰角などの条件を満たしていないことによる走行不能な地点) を図11 (例1), 図14 (例2) に示す. また, 自走機の移動による仰角などの角度変化を図12, 図13, 図15, 図16に示す (分岐点の乗り越えが行われるパターン2については  $\theta_{nR}, \theta_{nL}, \theta_{nR} + \theta_{nL}, \varphi_n$  も導出). 図11, 図14より導出された主索経路を実現するための副索の張り方や主索・副索の固定点が得られること, 主索・副索の弾性や初期長さの考慮から自走機走行時の張力・ケーブル変形量や駆動輪の軌跡が得られることが確認できた. 例1の網状索道は図12, 図13より主索経路全区間で  $|\gamma| \leq 30^\circ, |\varphi_n| \leq 30^\circ, 20^\circ \leq \theta_{nR} \leq 80^\circ, 20^\circ \leq \theta_{nL} \leq 80^\circ, 100^\circ \leq \theta_{nR} + \theta_{nL}$  を満たすことから自走機が全区間走行可能であること,

例 2 の網状索道は図 15, 図 16 より  $20^\circ \leq \theta_{nL} \leq 80^\circ$  が満たさないことから自走機が一部区間走行できないことが判定できることが確認できた。確実に分岐点を乗り越えることが可能になる副索の張り方を導出するよう

な各主索の初期長さや張力の仮定値を定める手法の開発は今後の課題である。

## 5. 結言

本論文では、環境モデルと作業モデルから主索経路を複数生成し、その中から総距離と分岐点の数を最小化した経路を 1 つ選択し、この主索経路を実現するための副索の張り方を導出し、さらに自走機の自重によるケーブル変形量を導出することで網状索道上を自走機が障害物と干渉せずに走行可能かを判定するアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムから作業モデルや環境モデルに基づいた主索経路が導出されることが確認できた。またケーブルの弾性や初期長さの考慮から、自走機の位置に応じた張力やケーブル変形量を導出することで、自走機が走行可能かどうかの判定が可能になったことが確認できた。

なお今回は主索経路の導出の際に傾斜角の制限を考慮できておらず、今後検討の余地がある。今後は、自走機が確実に走行可能となる副索の張り方を導出するアルゴリズムの作成、複数の網状索道の張り方の候補を生成し、その中から最適解を選択するアルゴリズムの作成、分岐点が 2 点以上の網状索道上を自走機が走行する時の張力やケーブル変形量を導出するアルゴリズムの作成に取り組んでいく。

## 謝辞

本研究の一部は競輪の補助を受けて実施した。

## 参考文献

- [1] R.Sudiono, et al.:“Cable Traversing Robots on Spatially Structured Cableway for Reconfigurable Parallel Cable System”, ROBOMECH2019, 1A1-S02 (2019)
- [2] 加納他：“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-”, ROBOMECH2021, Vol.39, No.8, pp. 767-770 (2021)
- [3] I.Jeong, et al.:“Quick-RRT\*: Triangular inequality-based implementation of RRT\* with improved initial solution and convergence rate”, Expert Systems with applications, Volume123, pp. 82-90 (2019)
- [4] M.Endo,et al.:“Trajectory Generation for Multiple Robots of a Car Transportation System”, Distributed Autonomous Robotic Systems 8, pp. 305-314 (2009)
- [5] 土木学会鋼構造委員会ロングスパン・スペース構造研究小委員会, “単一ケーブルの力学”, 鋼構造シリーズ 11 ケーブル・スペース構造の基礎と応用, pp. 7-18 (1999)
- [6] 阿井他：“ケーブル構造に関する-理論解析”, 土木学会論文報告書第 260 号, pp. 17-32 (1977)
- [7] 株式会社ユタカメイク, “ロープ豆知識”, URL [http://www.yutakamake.co.jp/syohin/gain\\_rope.html](http://www.yutakamake.co.jp/syohin/gain_rope.html), (2022 年 9 月 23 日参照)

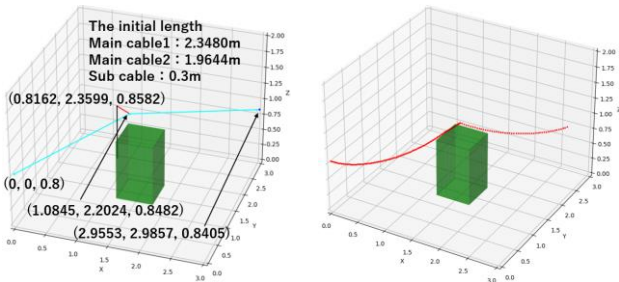


Fig. 11: Spatially structured cableway and trajectory

(Example 1)

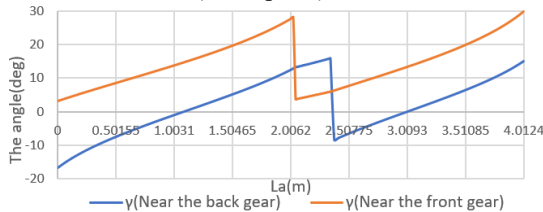


Fig. 12: Change of elevation angle for example 1

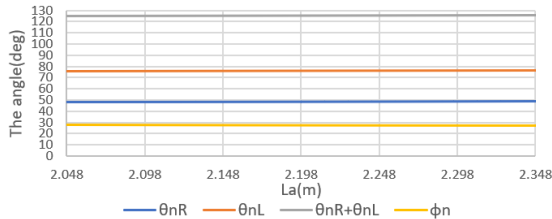


Fig. 13: Change of turning angle and tilt angle for example 1

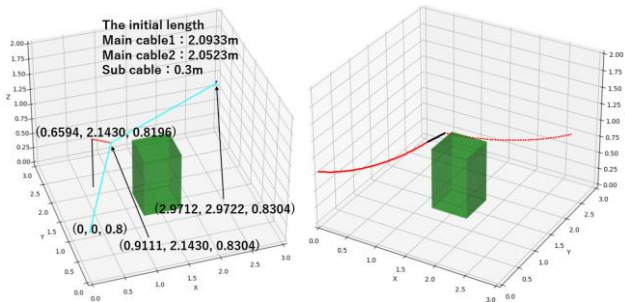


Fig. 14: Spatially structured cableway and trajectory

(Example 2)

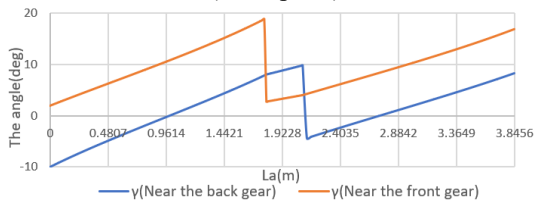


Fig. 15: Change of elevation angle for example 2

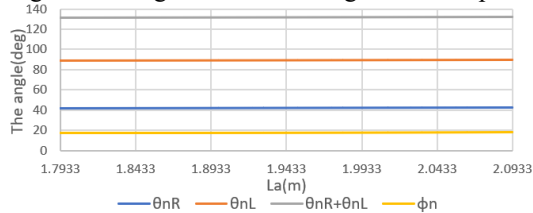


Fig. 16: Change of turning angle and tilt angle for example 2