航空機用ワイヤーハーネス結束型における紐経路の設計

Route Design of a String for a Tying Tool to Bind Wire Harnesses for Airplanes

石原 佑真*・若松 栄史*・森 永英二**

Yuma ISHIHARA, Hidefumi WAKAMATSU and Eiji MORINAGA

(Received 30 April 2021, Accepted 28 June 2021)

Wire harnesses for airplanes are manufactured by bundling multiple wires together with strings by human workers. We designed a guide part to develop a tool to improve the efficiency of the bundling process. We proposed a method to calculate the optimal path in the whole process while minimizing the number of predetermined design parameters, and made a prototype of a guide part with the path determined by this method for verification.

Key Words: Assembly, Wire Harness, Knot Tying, Developable Surface

1. 緒言

1.1 研究背景と目的

航空機内部には信号や電力を供給するため、多数のワイヤーハーネスが張り巡らされている。ワイヤーハーネスとは、電線が絡まないよう機能的に束にして、端子やコネクタを組み付けた集合部品のことである。航空機用ワイヤーハーネスは、表面を特殊コートした幅 2.00 mm、厚さ 0.25 mm のポリエステル製の带状紐によって結束される。国内におけるハーネス製造では、すべて手作業によって紐で結束した後に機体に組み込んでいる。一般的には数十メートルの長さの電線を、中央付近では 30 cm 間隔、端付近では 10 cm 間隔、分岐部ではさらに集中して結束する。1 本のハーネスの結束にかかる時間は、熟練者でも 10 分以上となる。また、天井や床下へハーネスを取り付ける際にも結束作業は発生するが、機体の中で結束を行う必要があるため、作業性が悪化する。

結束時間の短縮や作業性の悪い場所での容易な結束が実現できれば、航空機用ワイヤーハーネス製造は効率化する。今後の航空機の新規製造需要の増加を考えると、ワイヤーハーネスの生産性向上は必須である。したがって本研究では、航空機用ワイヤーハーネス製造のための紐による結束作業の効率化を目的とする。

1.2 結び作業の自動化を目的とした先行研究

結び作業を自動化させることを目的として、過去に多くの研究がなされている。その手法の一つにロボットを使用した方法がある。紐など変形しやすい物体のハンドリング

において、視覚情報を用いてマニピュレータの動作を計画、確認、修正することで、結び操作を実現しているもの¹⁾、紐の入れ替えと紐の引き抜きの操作を導入し、ロボットによる実現を考慮したロボットハンドの操りスキルに基づく結び目の生成手法を提案したもの²⁾、紐に起こる望ましくない変形が小さくなるよう、高速でロボットを動かすことで軌道生成や制御が容易になると説き、高速ビジョンと高速アームシステムを用いて投げ上げたものを掴み、多指ハンドを用いた紐の入れ替え操作により紐結びを実現したもの³⁾等がある。

それに対し、結び目と位相の等しい溝を掘りその中に紐を通す「型」を使用した手法がある。直線と円弧の組み合わせによって曲率の小さな経路を設計し、空気流を用いて型に糸を通した後、型の開閉機構で結び目を自動的に形成できる機構を完成させたもの⁴⁾、型を四つの部品に分解することでどのような結び目も作成でき、かつ単純な結び目なら速く確実につくることができることを示したもの⁵⁾等がある。

型を使用する手法の利点として、安定した結束が可能であること、作業による結束時間や品質の差が生じないこと、紐が管に沿って動く場合はねじれの制御も可能であること、視覚情報が不要であることなどが挙げられる。そこで本研究では、型による結束方式を採用する。

型を使用した先行研究として、宗田らは、電線束を収める円柱状の穴を持ち、この穴の中心軸を含む面で複数個に分解可能な型を用いて自動結束することを提案している^{6), 7)}。ダブルオーバーハンドノット部分には、紐の形状と経路の

* 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

** 大阪府立大学大学院 人間社会システム科学研究科 (〒 599-8531 大阪府堺市中央区学園町 1-1)

Graduate School of Humanities and Sustainable System Sciences, Osaka Prefecture University (1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan)

形状が一致する管経路を採用している。紐と電線束が接触するクローブヒッチ部分には、電線束側の面が開いた溝経路を採用している。宗田らの型の問題点として、溝経路から管経路への接続部分で紐が引っ掛かりやすいこと、経路決定の際に恣意的に与える設計パラメータが多く、算出された経路が紐を通すのに最適な形状とは限らないことが挙げられる。以上の問題点を解消するために、本研究では管経路のみを用いた型を提案する。溝経路から管経路への接続部分がなくなるため、紐が引っかかる箇所が減る。経路内に空気を流すなど、紐にはたらく動摩擦力を軽減させるための応用が利くことも考えられる。加えて、恣意的に与える設計パラメータを極力少なくする設計手法を提案する。

2. 紐を通す経路の設計

2.1 要求項目

本研究で対象とする航空機用ワイヤーハーネスの紐の結び方は、Fig. 1 に示すクローブヒッチを結んだ後にダブルオーバーハンドノットを結ぶよう指定されている。結び目や型に対する要求は、以下の項目が挙げられる。

要求1：紐の緩みやねじれは厳禁

要求2：最終的な結び目は菱形になることが理想

要求3：滑らかな経路を持つ

要求4：電線束を収める直径 35 mm の円筒穴を持つ

要求5：型と紐が分離できるよう経路を分割面が通る

要求6：電線束を取り出せるよう、電線束の中心軸を分割面が通る

要求7：型全体は 100 mm 辺の立方体に収まる

以上の要求を満たすように設計を行う。

2.2 带状柔軟物体のモデリング

2.2.1 紐の性質における前提条件

結束紐は伸縮性を持たない。また、本来の紐は複数本の繊維束を編んだものに特殊コートを施して带状にしたものであるが、本研究では均一な線形弾性体とする。加えて、変形前に中心軸に直交していた紐の断面は変形後も平面を保ちながら中心軸に直交するという Bernoulli-Navier の仮説が成り立つものとする。

Fig. 1 The sketch of the knot.

2.2.2 紐の形状表現

紐の形状は、中心軸形状、幅、厚みによって表現できる。Fig. 2 のように、空間座標系の原点を O とし、長さ L 、幅 w 、厚さ h の紐に中心軸 AB を設定する。点 A から紐の中心軸に沿った長さを s とし、中心軸方向に ξ 軸、法線方向に η 軸、幅方向に ζ 軸が一致するように物体座標系 $P(s) - \xi\eta\zeta$ を設定する。ここで、点 $P(s)$ 上の物体座標系における ξ 軸、 η 軸、 ζ 軸方向の単位ベクトルをそれぞれ $\xi(s)$ 、 $\eta(s)$ 、 $\zeta(s)$ とおく。点 $P(s)$ と紐の中心軸 AB に沿って微小距離 ds だけ進んだ点 $P(s+ds)$ の 2 点間において、Fig. 3 のように紐の幅方向周りの曲げ変形の曲率を $\omega_\xi(s)$ 、法線方向周りの曲げ変形の曲率を $\omega_\eta(s)$ 、中心軸 AB 周りのねじれ変形のねじれ率を $\omega_\zeta(s)$ とする。中心軸上の各点 $P(s)$ における各軸方向の単位ベクトルの微小変化は、剛体の運動における各軸周りの回転速度との類似性により、以下の式 (1) で表すことができる⁸⁾。

$$\frac{d}{ds} [\xi(s)\eta(s)\zeta(s)] = [\xi(s)\eta(s)\zeta(s)] \begin{bmatrix} 0 & -\omega_\xi(s) & \omega_\eta(s) \\ \omega_\xi(s) & 0 & -\omega_\zeta(s) \\ -\omega_\eta(s) & \omega_\zeta(s) & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

本研究では、 $h \ll w$ としている。紐が厚さ方向に曲がる場合、すなわち ξ 軸回りの曲率 ω_ξ を持つ場合には、紐表面および裏面において若干の伸縮が生じることになる。一方、紐が幅方向に曲がる場合、すなわち η 軸回りの曲率 ω_η を持つ場合には、紐の左右両端において、厚さ方向への曲げよりも相対的に極めて大きな伸縮が生じることになる。実際の紐は殆ど伸縮性を持たないため、本研究においては、厚さ方向への曲げによる伸縮は許容できても、幅方向への曲げによる伸縮は許容できないものとする。すなわち、常に $\omega_\eta = 0$ と仮定する。よって、中心軸の接線ベクトルに相当する ζ 軸方向ベクトルの微小変化量は

$$d\zeta(s) = -\eta(s) \omega_\xi(s) ds \quad (2)$$

となる。変形後の紐の点 $P(s)$ における中心軸方向 $\zeta(s)$ は、

Fig. 2 Setting of the object coordinate system on a belt-like string.

Fig. 3 Deformation of a belt-like string.

紐の始端における各軸方向 $\xi(0)$ 、 $\eta(0)$ 、 $\zeta(0)$ と各点における曲率、ねじれ率が分かれば、式 (2) の微分方程式より、Runge-Kutta 法などを用いて数値的に求めることができる。式 (2) を積分すると式 (3)、さらに積分すると点 $P(s)$ の空間座標を表す式 (4) が得られる。

$$\zeta(s) = \zeta_0 - \int_0^s \eta(s) \omega_\xi(s) ds \quad (3)$$

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{p}_0 + \int_0^s \zeta(s) ds \quad (4)$$

ここで、 ζ_0 は点 A における中心軸の接線ベクトル、 $\mathbf{p}_0$ は点 A の空間座標を表す。以上より、点 $P(s)$ の空間座標 $\mathbf{p}(s)$ は曲率 $\omega_\xi(s)$ とねじれ率 $\omega_\zeta(s)$ を用いて表現できる。

続いて、若松らが提案した帯状物体の変形形状モデリング手法⁹⁾を用いて紐の形状を表現する。紐は伸縮性を持たないという前提より、変形後の紐の表面は可展面となる。可展面には母線が含まれているため、曲率が 0 となる方向が必ず存在する。Fig. 4 において、 $\mathbf{d}_2$ は $P(s)$ における主曲率方向の一つで、母線方向を表す。もう一方の主曲率方向 $\mathbf{d}_1$ は $\mathbf{d}_2$ に直交し、 $\mathbf{d}_1$ 方向の法曲率が最大となる。よって、紐は $\mathbf{d}_1$ の方向にしか曲がらず、 $\mathbf{d}_2$ の方向には曲がらない。つまり、変形した紐には曲げとねじれが生じているように見えるが、実際には $\mathbf{d}_1$ 方向に主曲率 κ_1 で曲がっているだけとみなすことができる。ここで、 ζ 軸と $\mathbf{d}_1$ 方向とのなす角を $\alpha(s)$ とおく。ただし、 $\alpha(s)$ は $-\pi/2 \leq \alpha(s) \leq \pi/2$ を満たす必要がある。この $\alpha(s)$ に対する上限・下限を排除するため、更に $\beta(s) = \tan \alpha(s)$ という変数を導入する。すると、 $-\infty \leq \beta(s) \leq \infty$ となる。この $\beta(s)$ を用いて、 $\mathbf{d}_1$ 方向の ζ 軸方向成分と ξ 軸方向成分の比は $1:\beta(s)$ と表される。紐の法線方向である η 軸の変化量 $-\omega_\zeta \xi + \omega_\xi \zeta$ は $\mathbf{d}_1$ 方向に平行なので、

$$\omega_\zeta : -\omega_\xi = 1 : \beta \quad (5)$$

と表される。したがって、ねじれ率 $\omega_\zeta(s)$ は

$$\omega_\zeta = -\omega_\xi \beta \quad (6)$$

と表される。以上から、中心軸上の点 $P(s)$ の空間座標 $\mathbf{p}(s)$ と物体座標系の向きは、 ω_ξ と β で表すことができる。物体座標系の向きが確定すれば、 $\xi\zeta$ 平面内で $\mathbf{d}_2$ の方向に母線を伸ばすことで、紐上の任意の点の空間座標を求めることができる。よって紐の変形形状は、中心軸 AB 上で定義される二変数 $\omega_\xi(s)$ 、 $\beta(s)$ で表すことができる。この時、主曲率 κ_1 は、これら二変数を用いて

Fig. 4 Definition of the rib angle α .

$$\kappa_1 = \omega_\xi (1 + \beta^2) \quad (7)$$

と表される。

2.3 目的関数の設定

管経路では、紐は経路に沿って移動する。よって、経路の形状を設計するためには、紐の変形形状を考えればよい。紐を挿入しやすくするためには、紐の先端にはたらく動摩擦力を小さくする必要がある。ここで、紐先端の動摩擦力は紐の先端にはたらく垂直抗力に比例する。よって、垂直抗力が小さくなる管経路について考える。Fig. 4 に示すように、紐は $\mathbf{d}_1$ 方向にのみ主曲率 κ_1 で曲がっていると見なすことができる。ある点において $\mathbf{d}_1$ 方向へ屈曲させるためのせん断力は、

$$F = \frac{Ewh^3}{6\cos\alpha} \frac{d\kappa_1}{ds} \quad (8)$$

と表せる。ここで、 E を紐のヤング率とする。実際には、紐と同じ形状の管経路を紐が通過していくので、紐の各点でのせん断力は、その点を紐先端が通過する際の垂直抗力と見なすことができる。 E 、 w 、 h は定数であるので、管経路全体において、垂直抗力を極力小さくするために、以下のような目的関数を設定する。

$$V = \int_0^L \left(\frac{1}{\cos\alpha} \frac{d\kappa_1}{ds} \right)^2 ds \quad (9)$$

2.4 位相的制約の表現

2.4.1 ベクトルの回転量の表現

一般的に、結び目には、「ある部分は別の部分の上に来るが、ある部分は別の部分の下に来る」や「この部分から先を一回転させて、別の部分の上に重ねる」といったような、具体的な点の具体的な位置は指定しないものの、満たさなくてはならない制約があり、これが異なることで、結び目の種類も異なる。本研究では、このような制約を位相的制約と呼ぶ。紐で結び目形状を生成するためには、位相的制約を定式化する必要があるが、点の位置を指定するようなやり方だと、紐の形状を過剰に拘束してしまう可能性があるため、定式化には工夫が必要となる。

本研究において対象となる結び目を作成するには、ある軸の周りに紐を巻き付ける作業が必要である。そのまきついた状態を制約として表現するため、ベクトルの回転量を制御する手法を用いる。

紐を巻き付ける軸を法線方向とする平面で、軸を n 個に分割する。それぞれ分割平面での紐の位置を Q_i とし、軸から紐に向かうベクトルを $\mathbf{q}_i$ とする。第 0 分割面での紐の弧長パラメータを $s=0$ 、第 n 分割面での紐の弧長パラメータを $s=l$ とする。軸は等間隔で分割する必要はないため、紐の弧長パラメータが $s = il/n = i\Delta s$ となる点で軸を分割すると仮定する。本項では説明を分かりやすくするため、軸は x 軸に一致し、分割平面は yz 平面に平行であるとする。この時、ベクトル $\mathbf{q}_i$ は

$$\mathbf{q}_i = \left[y_0 + \int_0^{i\Delta s} \zeta_y ds \quad z_0 + \int_0^{i\Delta s} \zeta_z ds \right]^T \quad (10)$$

で表される。ベクトル $\mathbf{q}_i$ ($i=0, \dots, n$) を一つの平面に描くと、**Fig. 5** のようになる。ここで $\Delta\varphi_i$ を

$$\Delta\varphi_i = \sin^{-1} \frac{|\mathbf{q}_i \times \mathbf{q}_{i+1}|}{|\mathbf{q}_i||\mathbf{q}_{i+1}|} \quad (11)$$

とおくと、ベクトル $\mathbf{q}_i$ と $\mathbf{q}_{i+1}$ がなす角 $\Delta\theta_i$ は

$$\Delta\theta_i = \begin{cases} \Delta\varphi_i & (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_{i+1} \geq 0) \\ \pi - \Delta\varphi_i & (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_{i+1} \leq 0 \text{ かつ } \Delta\varphi_i > 0) \\ -\pi - \Delta\varphi_i & (\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_{i+1} \leq 0 \text{ かつ } \Delta\varphi_i < 0) \end{cases} \quad (12)$$

と表される。ベクトル $\mathbf{q}$ の回転量 θ は

$$\theta = \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \quad (13)$$

で表される。よって、始端ベクトル $\mathbf{q}_0$ と終端ベクトル $\mathbf{q}_n$ を設定し回転量 θ を与えれば、軸に紐を巻き付ける制約を表現することができる。

2.4.2 始端ベクトルと終端ベクトルの設定

まずは **Fig. 6** に示すダブルオーバーハンドノットについて考える。 yz 平面に投影した経路は自身と交差する。紐の始端を E_s 、終端を E_e とし、始端 E_s から紐をたどり初めて出会う交差から順に番号をつけていく。始点 E_s から数えて i 番目の交差を C_i と表す。また、紐同士における交差 C_i のうち、始点 E_s から辿ったときに近い点を C_i^+ 、終点 E_e から辿ったときに近い点を C_i^- と表す。紐以外と交差する場合は、符号を書き加えない。この表現方法に従うと、結び目は $E_s - C_1^+ - C_2^+ - C_3^+ - C_4^+ - C_5^+ - C_1^- - C_2^- - C_3^- - C_4^- - C_5^- - E_e$ と表現できる。 C_m^+ を始点、 C_m^- を終点とするベクトル $\mathbf{c}_m^d$ を交点間ベクトルと呼ぶこととする。**Fig. 7** に示すように、 $\mathbf{c}_m^d$ を y 軸の向きに 2π 回転させると、 $\mathbf{c}_{m+2}^d$ と同じ方向を向く。よってダブルオーバーハンドノットの位相を表現

Fig. 5 Representation of twining.

Fig. 6 Crossing state of double over hand knot.

するには、始端ベクトルを $\mathbf{c}_1^d, \mathbf{c}_3^d$ 、終端ベクトルをそれぞれ $\mathbf{c}_3^d, \mathbf{c}_5^d$ とし、交点間ベクトルの回転量を y 軸の向きに 2π とすればよい。

次に **Fig. 8** に示すクローブヒッチについて考える。経路を xy 平面に投影すると、経路自身と交差する点と、電線束と交差する点が現れる。紐の状態を表すと、結び目は $E_s - C_1^+ - C_2^- - C_3^- - C_1^- - C_4^- - C_5^+ - C_6^- - C_7^- - C_5^- - E_e$ と表現できる。点 C_m と交差する電線束の中心軸上の点を A_m とし、 A_m を始点、 C_m を終点とするベクトル $\mathbf{c}_m^c$ を放射ベクトルと呼ぶこととする。**Fig. 9** のように $\mathbf{c}_2^c, \mathbf{c}_4^c$ を x 軸の向きに 2π 回転させると、それぞれ $\mathbf{c}_4^c, \mathbf{c}_2^c$ と同じ方向を向く。よってクローブヒッチの位相を表現するには、始端ベクトルを $\mathbf{c}_2^c, \mathbf{c}_4^c$ 、終端ベクトルをそれぞれ $\mathbf{c}_4^c, \mathbf{c}_2^c$ とし、放射ベクトルの回転量を x 軸の向きに 2π とすればよい。

Fig. 7 Vector rotation in double over hand knot.

Fig. 8 Crossing state of clove hitch.

Fig. 9 Vector rotation in clove hitch.

本項で設定した点に対応する弧長パラメータを Fig. 10 のように与え、制約を適用すると、始端の座標と姿勢、終端の座標、クローブヒッチにおける点 C_4 の座標を与えるだけで、結び目の位相を表現できる。その他の点の弧長パラメータや座標は全て未知数とし、最適化によって決定する。

宗田らは、経路を複数に分割し、それぞれの形状を求めている。経路を分割すると、各パートの始端終端の座標や姿勢を与える必要があり、設計パラメータが増加する。本研究の手法を用いると、経路を分割せずとも、ダブルオーバーハンドノット、クローブヒッチ両方の形状を一度に算出できる。それによって、宗田らの研究では 13 個与えていた設計パラメータを、本研究では 4 個まで減らすことができた。

2.5 制約条件の定式化と経路の導出方法

経路全体での制約条件は以下ようになる。

制約 1-1：変形後の紐の表面は可展面であることから、経路において母線同士は交差しない。Fig. 11 に示すように、幅の経路の進行方向に対し左側のエッジにおいて、点 $P(s)$ の母線と点 $P(s+ds)$ の母線が交差すると仮定する。Fig. 11 において、三角形 CDE は半径 $w/(2\cos\alpha)$ 、円弧の長さ $\cos\alpha ds$ 、中心角 $d\alpha$ の扇形とみなすことができる。この時、 $d\alpha/ds = (2\cos^2\alpha)/w$ となる。 α の変化量がこれ以上大きくなると、母線は経路の内部で交差してしまう。同様に、右側のエッジでの交差を考慮すると、上記の制約は変数を用いて、式 (14) で表される。

$$-\frac{2}{w} \leq \frac{d\beta}{ds} \leq \frac{2}{w} \quad (14)$$

制約 1-2：始端となる点 $P(s_0)$ から紐を挿入する。 $P(s_0)$ を原点上にとり、点 $P(s_0)$ の中心軸方向は y 軸と、法線方向

Fig. 10 Arc length parameters.

Fig. 11 Intersection of generatrices on an edge of a strings.

は z 軸と平行とする。

制約 1-3：経路全長を L とすると

$$p(s_{22}) = p(s_0) + \int_0^L \zeta ds \quad (15)$$

本研究では、 $p(s_{22}) = [0.0 \ 60.0 \ 0.0]^T$ とした。なお、最適な経路全長は不明であるため、 L は未知数とする。 L の範囲は $0 \leq L \leq \infty$ となるが、便宜上、十分大きな値を持つ上限を L' とし、 $0 \leq L \leq L'$ とする。 L がこの範囲内に収まるよう、

$$L = \frac{L'}{2} (1 + \cos \varepsilon) \quad (16)$$

とおき、式 (9) が最小となる ε を求めることで、最適な経路全長 L が求まる。

制約 1-4：経路同士は交わらない。

ダブルオーバーハンドノットでの制約条件は以下のようにになる。

制約 2-1： $P(s_1)$ と $P(s_{17})$ 、 $P(s_2)$ と $P(s_{18})$ 、 $P(s_3)$ と $P(s_{19})$ 、 $P(s_4)$ と $P(s_{20})$ 、 $P(s_5)$ と $P(s_{21})$ は yz 平面において重なる。つまり、 y 座標、 z 座標がそれぞれ等しい。

制約 2-2：結び目の位相を維持するためには、5 つの点の y 座標は、式 (17) の大小関係を満たす必要がある。

$$y(s_1) < y(s_2) < y(s_3) < y(s_4) < y(s_5) \quad (17)$$

制約 2-3：始端ベクトルを c_1^d 、 c_3^d 、終端ベクトルをそれぞれ c_3^d 、 c_5^d とし、交点間ベクトル回転量を y 軸の向きに 2π とする。

クローブヒッチでの制約条件は以下のようにになる。

制約 3-1：クローブヒッチの位置を制御するため、 $P(s_{11})$ の x 座標と y 座標を以下のように設定する。

$$\begin{cases} x(s_{11}) = \frac{x(s_0) + x(s_{23})}{2} \\ y(s_{11}) = \frac{y(s_0) + y(s_{23})}{2} \end{cases} \quad (18)$$

制約 3-2： $P(s_7)$ と $P(s_{10})$ 、 $P(s_{12})$ と $P(s_{15})$ は xy 平面において重なる。つまり、 x 座標、 y 座標がそれぞれ等しい。

制約 3-3：電線束の中心軸の y 座標 $e_y (= 30.0)$ と、 $P(s_8)$ 、 $P(s_9)$ 、 $P(s_{11})$ 、 $P(s_{13})$ 、 $P(s_{14})$ の y 座標は等しい。

制約 3-4：結び目の位相を維持するためには、5 つの点の x 座標は、式 (19) の大小関係を満たす必要がある。

$$x(s_{13}) < x(s_{14}) < x(s_{11}) < x(s_8) < x(s_9) \quad (19)$$

制約 3-5：電線束の中心軸の z 座標を $e_z (= -40.0)$ とする。結び目の位相を維持するためには、5 つの点の z 座標は、式 (20) の大小関係を満たす必要がある。

$$\begin{cases} z(s_8), z(s_{11}), z(s_{14}) > e_z \\ z(s_9), z(s_{13}) < e_z \end{cases} \quad (20)$$

制約 3-6：電線束を通すため、経路は電線束の中心軸を中心とした内半径 $R_i (= 20.0)$ の円柱より外に存在する。

制約 3-7：始端ベクトルを c_2^e 、 c_4^e 、終端ベクトルをそれぞれ c_4^e 、 c_7^e とし、放射ベクトルの回転量を x 軸の向きに 2π とする。

以上の制約の下で、式 (9) で表される V を最小化することにより経路の形状を求める。最適化には Ritz 法¹⁰⁾ を用いる。未知の関数である ω_ξ と β を、基底関数の $e_i(s)$ 重み付き線形和として、以下のように表す。

$$\omega_\xi = \sum_{i=1}^n a_i^\xi e_i(s), \beta = \sum_{i=1}^n a_i^\beta e_i(s) \quad (21)$$

このように表現することで、経路形状の導出は、未知の係数群 a_i^ξ と a_i^β 、および式 (16) の ε に関する最適化問題に帰着できる。本研究では、基底関数として、3 次の B スプライン関数を用いた。B スプライン関数は、複数の区間ごとに定義され、特定の区間以外は 0 となる特徴がある。この関数を s 方向にずらしながら重ね合わせることで、経路の局所的な形状変化も表現することができる。最適化変数に関する制約付き最適化問題を解く際は、ラグランジュの未定乗数法により制約を持たない最適化問題に変換した後、Nelder-Mead 法¹¹⁾ を利用して最適解を求めた。導出された経路の形状を Fig. 12 に示す。最適化変数とした経路の全長 L の値は、 $L=620$ mm と求まった。

3. 結束工具の型の設計と検証実験

3.1 型製作と検証実験における諸事項

設計した管経路の妥当性を検証するため、管経路を含む型を試作し、検証実験を行った。型は、BRULÉ 社の 3D プリンタ Zortrax M300 Dual を使用して製作した。型の素材は PETG 樹脂を使用した。紐は芯に巻かれた状態で保管されており巻き癖が残る。紐が想定外の挙動を示さないために、アイロンを当て、巻き癖を直した。また、紐先端の両脇がほつれて経路に引っかかりやすくなることを防ぐために、紐先端を三角形になるよう切り落としてから紐を挿入することにした。

3.2 型の製作

型の外形は Fig. 13 に示すように、幅 60 mm × 奥行 60

mm × 高さ 90 mm の直方体から、紐の出口となる経路の断面と平行な面を 1 つだけ持つ高さ 40 mm の四角柱を切り取り、電線束を収める直径 35 mm の円筒穴をくりぬいた形状とした。そこから紐経路を差演算した。経路断面の寸法は、幅 3.4 mm × 厚さ 1.6 mm とした。

経路表面をやすりで削って滑らかにするため、部品表面に経路の側壁が現れるように型を分割した。部品表面に側壁が現れるよう分割すれば、型から紐を取り出すことができる。分割面を設計するために、経路の中心軸を通る面を分割面とした。本来は、部品数を増やすと分割のための機構が必要となるため、分割数を最小限に抑える必要がある。しかし、部品の形状が複雑となり、3D プリンタ印刷時のずれを修正するのが難しい。よって、部品数を増やしすぎない程度に抑え、比較的単純な面で型を分割した。加えて、3D プリンタ印刷時のずれを抑えるため、ダブルオーバーハンドノット経路を構成する部品で他の部品と接触する面を 0.3 mm トリミングした。分割面の両面に 0.15 mm の厚みを持たせたオブジェクトを外形から差演算して、Fig. 14 に示す型を得た。

3.3 検証実験

全ての部品を組み合わせ検証を行ったところ、ダブルオーバーハンドノット後半部分に差し掛かった辺りで紐が座屈した。出口側から紐を挿入すると、クローブヒッチとダブルオーバーハンドノット前半部分の分割面を超えた辺りで紐が座屈した。ダブルオーバーハンドノット経路を構成する部品のみ、クローブヒッチ経路を構成する部品のみを組み合わせ、それぞれ始端側から紐を挿入すると、紐は出口まで通った。次に、型に紐を通すことができたと仮定して、電線束に結び目を作成できるか検証した。部品を外して紐の両端を引っ張ると、Fig. 15 に示すように、指定された位相通りの結び目を作成できた。

Fig. 12 The optimized shape of the path.

Fig. 13 The designed mold.

Fig. 14 The designed mold.

3.4 考察

全ての部品を組み合わせて紐を挿入したところ、紐は出口まで到達しなかった。ダブルオーバーハンドノット経路、クローブヒッチ経路のみの部品を組み合わせて紐を挿入すると、出口まで到達した。

この原因として、まず、経路の全長が考えられる。経路が長いと紐全域の動摩擦は無視できなくなる。また、紐は芯に巻かれた状態で保管されている。芯の端で紐が折り返す部分で癖が付いており、紐が座屈しやすい。その部分を除いた紐で結束するためには、その間隔より短い経路を設計する必要がある。

次に、紐を挿入する力が紐先端に伝わりにくいことが考えられる。紐を出口まで到達させるためには、紐先端にはたらく進行方向の力を、紐を挿入する力に近い値まで保つ必要がある。紐先端にはたらく進行方向の力に相当する値を、紐の剛性や経路の曲率などの特性を用いて表現し、経路設計の際に考慮するのが好ましい。

最後に、部品数の多さが考えられる。部品数が多いほど部品間にある隙間の数は増え、それが多いほど紐が引っ掛かりやすくなる。部品数を最小限に抑えながら型の分割面を求める手法が必要となる。また、経路を設計する時点で部品数や分結面に関する制約を考慮できれば、結束工具として最適な経路や型を得ることができると思う。

4. 結言

本論文では、航空機用ワイヤーハーネス結束作業を効率化する工具に用いる型の設計を目的とした。宗田らが提案した型の問題点を挙げ、それらを解消するために管経路のみを用いた型を採用した。次に、紐の形状表現を定式化し、紐先端にはたらく垂直抗力に相当する式を目的関数として設定した。そして、結び目の位相的制約を表現する手法を提案し、それらを適用すると恣意的に与える設計パラメータの数を4個に抑えられることを説明した。さらに、満たすべき制約条件を設定し、経路を決定した。最後に、その

Fig. 15 Tying the knot.

経路を持つ型で検証実験を行い、指定された結び目の位相的形狀の作成に成功した。今後の課題として、紐の自動挿入の達成、分割面の自動算出、紐を自動で締結する機構の考案が挙げられる。

参考文献

- 1) 稲葉雅幸, 井上博允: “ロボットによる紐のハンドリング”, 日本ロボット学会誌, **3** (1985), 538-547.
- 2) 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: “ロボットハンドの構造・運動を考慮した操りスキルの統合に基づく結び目の生成計画”, 日本ロボット学会誌, **31** (2013), 283-291.
- 3) Y. Yamakawa, A. Namiki, and M. Ishikawa: “Motion Planning for Dynamic Knotting of a Flexible Rope with a High-Speed Robot Arm”, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2010), 49-54.
- 4) H. Kikura, S. Shintaku, T. Kinari, and T. Shimokawa: “Designing Yarn Path on a Mold for Knot Formation”, Journal of Textile Engineering, **54** (2008), 83-91.
- 5) M. Bell, W. Wang, J. Kunzika, and D. Balkcom: “Knot-tying with four-piece fixtures”, The International Journal of Robotics Research, **33** (2014), 1481-1489.
- 6) 宗田あずみ, 若松栄史, 森永英二, 荒井栄司: “ワイヤーハーネス結束のための結び工具の開発ークローブヒッチの実現方法ー”, 日本ロボット学会誌, **37** (2019), 73-80.
- 7) 宗田あずみ, 若松栄史, 森永英二, 荒井栄司: “航空機用ワイヤーハーネスの自動結束を目指した結び工具の設計”, 日本機械学会第28回設計工学・システム部門講演会講演論文集, Paper No.2404.
- 8) 原島鮮: “力学”, 裳華房, (1970), 174-176.
- 9) H. Wakamatsu, E. Arai, and S. Hirai: “Fishbone model for Belt Object Deformation,” Robotics: Science and Systems III, The MIT Press (2008), 89-96.
- 10) L. E. Elsgolc: “科学者・技術者のための変分法” (瀬川富士訳), プレイン図書出版, (1972), 144-157.
- 11) McKinnon KIM: “Convergence of the Nelder-Mead Simplex Method to a Nonstationary Point”, SIAM Journal on Optimization, **9** (1998), 148-158.

代表者メールアドレス

石原佑真 yuma.ishihara@mapsc.eng.osaka-u.ac.jp