学術・技術論文

ワイヤーハーネス結束のための結び工具の開発
―クローブヒッチの実現方法―

宗田 あずみ* 若松 栄史* 森永 英二* 荒井 栄司*

Development of a Tying Tool to Bind a Wire Harness
—Implementation of Tying a Clove Hitch—

Azumi Muneta*, Hidefumi Wakamatsu*, Eiji Morinaga* *and* Eiji Arai*

This paper describes the development of a prototype tool to be used to tie a clove hitch in order to bind a wire harness. The wire harnesses which are installed in airplanes are bound with belt-like strings. The binding process, which involves tying a clove hitch and then a double overhand knot, is still performed by human workers. To promote efficiency, simplifying the process by using tools is more practical than automating it with robots. We propose a tool that has a groove through which a string is pushed to form a clove hitch. The shape of the bottom of the groove is very important in order to ensure that the belt-like string goes through the groove without jamming. We formulated the bottom's shape based on the theory of surfaces and designed the shape to minimize changes in its curvature and torsion. We made a physical model of the prototype tool and confirmed its performance with tying experiments. As a result of the experiments, we found that there was a 93% probability of a successful tie occurring.

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

1. 緒　　論

航空機内には，信号や電力を送る数多くの電線が，人間の血管や神経のように張り巡らされている．ワイヤーハーネスは，それらの電線が絡まらないように機能的に束にして，端子やコネクタを組み付け集合部品にしたものである．国内における航空機用のワイヤーハーネスの製造では，機体に電線を這わせてから結束するのではなく，工場において，設計図面を貼り付けたボードの上に各電線を這わせ，それらを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．結束バンドやチューブ，粘着テープのようなものは使用できない．プラスチック製の結束バンドの場合，経年劣化により割れが生じ，さらにその割れた一部が機内に飛散してトラブルの原因になる恐れがある．また，粘着テープやチューブのような電線を覆うものは，電線表面の識別用の文字を隠してしまうため，断線した際にどの電線が切れたのか即座に確認することができない．ほかにも重量や結束力の保持性などの点から，航空機用ワイヤーハーネスでは，表面を特殊コートしたポリエステル製の帯状の紐を用いて，電線を束ねている．

一般的に，数十メートルの長さの電線を，10〜30 [cm] 間隔で結束するため，1 ハーネスの結束にかかる時間は 10 分以上となる．1,500 本のハーネスが搭載された航空機では，250 時間以上をこの結束時間に費やしていることとなる．また，天井や床下などへのハーネスの取り付け作業に付随する結束作業は機体内で行うため，作業性が著しく悪化する．結束に要する時間を減らすこと，作業者によらず結束の品質を安定させること，作業性の悪い場所でも容易に結束ができるということは，ワイヤーハーネスの製造の効率化に直接的に関係する．今後の国産航空機の量産を考慮すると，ワイヤーハーネスの生産性の向上は必須である．よって本研究では，航空機用のワイヤーハーネス作成のための紐による結束作業の効率化を図る，工具を提案することを目的とする．

原稿受付　2018 年 1 月 29 日
*大阪大学
*Osaka University
■ 本論文は提案性（システム設計・構築分野）で評価されました．
■J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます．

2. 結束工具の設計

2.1 結び目に対する要求と生成に必要な操作

本研究で対象とする航空機用ワイヤーハーネス結束紐は，幅 2.0 [mm]，厚さ 0.25 [mm] の帯状の柔軟物体であるが，伸縮はほとんど生じない．この結束紐の結び方は，クローブヒッチ（巻き結び）をした後に，ダブルオーバーハンドノット（固め止め結び）をするように指定されている．この結束用結び目に対する要求としては，十分な結束力を実現するため，緩みが厳禁であるのはもちろんのこと，帯状紐の幅広の面がハーネスに密着しなくなるようなねじれも禁止されていることがあげられる．

まずは，当該結び目を生成するための定性的操作について考察する．結束用結び目の三次元形状をある平面に投影すると，**Fig. 1** のように投影された二次元曲線は自身と交差し得る．紐の一端を E_s，もう一端を E_e と表す．次に，端点 E_s から紐をたどり，初めて出会う交差に順に番号をつけていく．端点 E_s から数えて i 番めの交差を C_i と表す．各交差において，上側の紐が下側の紐の進行方向に対し，左から右に向かって交差していれば C_i^+，右から左に向かって交差していれば C_i^- と表す．

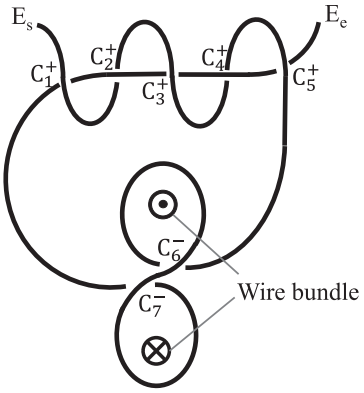


Fig. 1 Crossing state of the knot

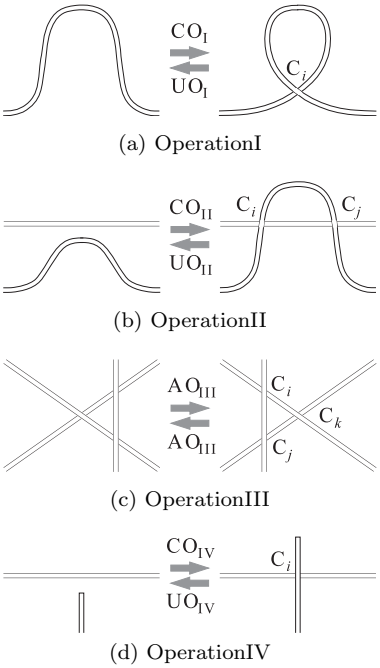


Fig. 2 Crossing/uncrossing operations

また，各交差における上側の紐の交点を C_i^{u+}，下側の紐の交点を C_i^{l+} のように表す．このような表現方法に従うと，結び目は $E_s - C_1^{u+} - C_2^{l+} - C_3^{u+} - C_4^{l+} - C_5^{u+} - C_6^{l-} - C_6^{u-} - C_7^{u-} - C_7^{l-} - C_1^{l+} - C_2^{u+} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{l+} - E_e$ と表現できる．若松らは，ある結び目が与えられたときに，交差状態からその結び目を生成できる可能性のある定性的操作列を自動生成する研究を行っている [1]．結び，解きの基本操作列は **Fig. 2** に示す四つになる．交点数を増やす操作として交差操作 CO_I，CO_{II}，CO_{IV} を，また，交点数を減らす操作として解離操作 UO_I，UO_{II}，UO_{IV}，さらに交点数の変化しない操作として入換操作 AO_{III} を定義する．解離操作 UO_I は，以下のような同じ交差番号を持つ交点が隣接する部分に適用することができる．

$$\cdots - C_i^{\pm} - C_i^{\pm} - \cdots \tag{1}$$

解離操作 UO_{II} は，以下のような交差状態の部分に適用することができる．

$$\cdots - C_i^{\pm} - C_j^{\mp} - \cdots - C_i^{\pm} - C_j^{\mp} - \cdots \tag{2}$$

$$\cdots - C_i^{\pm} - C_j^{\mp} - \cdots - C_j^{\mp} - C_i^{\pm} - \cdots \tag{3}$$

解離操作 UO_{IV} は，以下のような，両端点に最も近い交差に適用することができる．

$$E_s - C_i^{\pm} - \cdots - C_i^{\pm} - \cdots \tag{4}$$

$$\cdots - C_i^{\pm} - \cdots - C_i^{\pm} - E_e \tag{5}$$

目標の交差の状態から，交差がない初期状態になるまでの解離操作をみることで，その逆の操作をすれば結ぶ手順が分かる．現状のハーネス結束において，Fig. 1 に示す結び目の生成には UO_{IV} の逆操作である CO_{IV} のみが使用されている．UO_{IV} は端点があれば解離できるため，任意の結び目を解くことができるが，両端に最も近い交差のみを解離させる操作であるため，物体中心付近の交差を解離できないなど可能な操作が限定され，その逆操作である CO_{IV} のみによって結び目を生成する場合，作業効率が悪くなる可能性がある．文献 [1] の手法を適用して，Fig. 1 に示す結び目がどのような操作列で解けるのかについて調べた．その結果，解離操作 UO_I，UO_{II} は適用可能であった．しかし，操作手順を確認すると，それらの操作は，Fig. 1 に示した電線束の存在を無視したために得られたことが分かった．電線束の存在を考慮すると，解離操作 UO_{IV} のみを使用した手順しか得られなかった．つまり，この結び目は，端から順に交差させていく結び方でしか作成できず，現状の結び方より効率的な方法はないことが分かった．以上を踏まえて，結束方式について考える．

2.2 結束方式の決定

紐結びの自動化を対象とした研究は，ロボットを使う方法と，型を使う方法の大きく二つに分けられる．

ロボットを使用するには，結び目の状態表現だけでなく，ロボットアームの動きに合わせた結び操作の動作表現が必要である．Hopcroft らは結び作業を記述するための高次の言語を提案し，ロボット動作言語に変換，実行した [2]．Wolter と Kroll は，結ばれた紐の状態をグラフで表現する方法を提案した [3]．卓上においてロボットアームを低速で動かす場合，紐の把持点と移動方向を決定すれば，紐を自在に動かすことができる．稲葉らは，視覚情報を用いてマニピュレータの動作を計画，確認，修正するという静的なハンドアイ動作により，結び操作を提案した [4]．音田らは，交差部分に基づき記述した紐結びのタスクの表現方法と，動作摂動法を用いたタスクの実現方法を提案した [5]．これらの研究は，常に視覚情報を得て，紐の状態を把握しながら，ロボットアームを制御するものである．

片腕アームの場合，把持している紐の一部分をほかの部分の下にくぐらせる際には，一度把持している部分を置いたのち，もう一方の部分を動かす必要がある．双腕アームを用いたとしても，操作回数を減らすことはできるが，紐の持ち替え作業が必要となる．そこで山川らは，卓上における紐の持ち替え操作の代わりに，多指ハンドの動きによる輪の作成，紐の入れ替え，引っ張り，移動の四つの操作を導入し，ロボットハンドの操りスキルに基づく空中での結び目の生成計画手法を提案した [6]．また山川らは，重力の影響や自身の柔軟性により紐に起こる望ましくない変形が小さくなるような高速でロボットを動かすことにより，紐結びを実現した [7]．

対して木倉らは，視覚情報を必要としない箱のような固定具を使用する型の考えを提案した [8]．この型には，最終的な結び目と位相が等しい滑らかに入り組んだ管が掘られていて，管に紐を通し，型を分解すれば緩い結び目が取り出せるというものである．経路の移動，合成，分解を行い，曲率の小さな経路に作り替えていくことで，経路を決定する．空気流を用いて型に糸

を通し，型の開閉機構を取り付けることにより，結び目を自動的に形成することのできる機構を完成させた．また，Matthewらも同様の研究を行っており [9]，管の一部を切り，管内部の形状を詳細に設計することにより，分解せずとも結び目を取り出せるような型の設計手法も提案している [10].

本研究では，以下の理由から後者の型による結束方式を採用する．

- 装置の小型化が期待できる．
- 型の中に作る管の形状によっては，禁止されている紐のねじれを防ぐことができる．
- 型を使って CO_{I} や CO_{II} を実行するのは困難であるが，結び目生成に利用できる操作が CO_{IV} のみの場合，型による方式でも結束は実現可能である．

文献 [8] では，2 本の糸を型の中の管に通し，それらを結び合わせている．本研究においても，電線束と結束紐とを結び合わせる作業とみなすことができるが，基本的に電線束は固く，曲がりくねった管に通すことは困難であるので，直線状の電線束の回りに配置できるよう，型は中空円柱状とする．また，結束紐が電線束と接触する側に型の一部を配置すると，結束前にそれを取り除く必要があるため，型の構造が複雑となり，好ましくない．そこで本研究では，管ではなく溝を作成する．溝は電線束に向かって開放されているため，空気圧等によって結束紐を搬送することはできない．よって，直線と円弧の組み合わせで表現されるような簡単な形状ではなく，型の入口からの押し込み力だけで，結束紐が出口まで通過できるような溝形状を設計する必要がある．

2.3 紐の形状表現方法

Fig. 1 において，C_1 から C_5 はダブルオーバーハンドノットに含まれる交差，C_6 と C_7 はクローブヒッチに含まれる交差となっている．人間は，一般的に，交差 C_6 と C_7 を作成してクローブヒッチを締結した後，交差 C_1 から C_5 を作成してダブルオーバーハンドノットを締結している．しかし，型を用いる方法の場合，C_1 から C_7 までのすべての交差を一度に型の内部に作成することができる．その後，交差 C_6 と C_7 を含む部分の型のみを開き，交差 C_1 と C_7 の間，および交差 C_5 と C_6 の間の線分を引っ張ることにより，クローブヒッチのみを締結できる．次に，交差 C_1 から C_5 を含む部分の型を開いて両端を引っ張ることで，ダブルオーバーハンドノットも締結できる．よって，Fig. 1 に示す結束用結び目は，型を構成要素とする単一の工具で結ぶことができると考えられる．

結び目が十分な結束力を実現できるかは，クローブヒッチがゆるみなく結べているかに依存することから，本報では，開発の第一段階として，**Fig. 3** に示すクローブヒッチのみについて考える．これは，結束用結び目を表す交点列の中央部分 $-C_6^{\mathrm{l}-}-C_6^{\mathrm{u}-}-C_7^{\mathrm{u}-}-C_7^{\mathrm{l}-}-$ のみを取り出して，それに対応する型の一部分を設計することに相当し，ダブルオーバーハンドノットを結ぶ部分の型とは独立して考えることができる．また，本研究では，結束紐は溝内のすべての領域において溝底に接触しながら移動すると仮定する．この仮定により，溝底の形状を考えることは，結束紐の変形形状を考えることと同等となる．

そこで，紐の幾何形状表現について考える．**Fig. 4** 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．中心軸 AB 上の点 $\mathrm{P}(s)(0 \le s \le L)$ に，中心軸方向に ζ 軸が，紐の法線方向に η 軸が，紐の幅方向に ξ 軸が一致するように物体座標系 $\mathrm{P}(s)$-$\xi\eta\zeta$ を設定する．ここで，**Fig. 5** に示すように，紐の法線方向への曲げ変形の曲率を $\omega_\xi(s)$，紐の法線方向周りの曲げ変形の曲率を $\omega_\eta(s)$，紐の中心軸 AB 周りのねじれ変形のねじれ率を $\omega_\zeta(s)$ とすると，中心軸 AB 上の各点 $\mathrm{P}(s)$ における物体座標系と曲率・ねじれ率の関係は，以下の式（6）で与えられる．

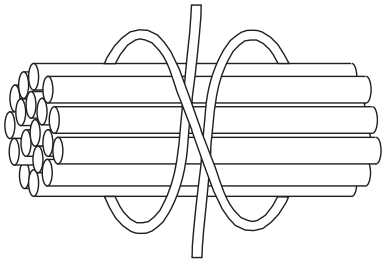


Fig. 3 The sketch of a Clove hitch

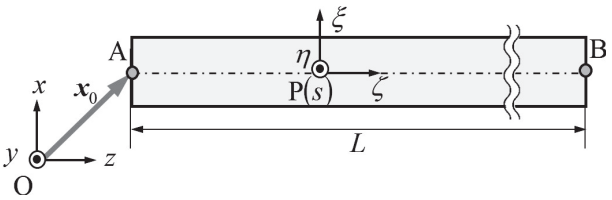
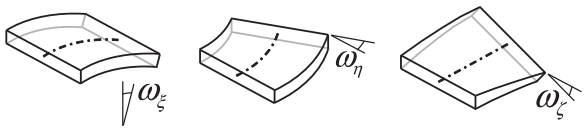


Fig. 4 Setting of the object coordinate system on a belt-like string



(a) Vertical bend (b) Horizontal bend (c) Torsion

Fig. 5 Deformation of a belt-like string

$$\frac{d}{ds}\left[\boldsymbol{\xi}(s)\ \ \boldsymbol{\eta}(s)\ \ \boldsymbol{\zeta}(s)\right] = \left[\boldsymbol{\xi}(s)\ \ \boldsymbol{\eta}(s)\ \ \boldsymbol{\zeta}(s)\right]\begin{bmatrix} 0 & -\omega_\zeta(s) & \omega_\eta(s) \\ \omega_\zeta(s) & 0 & -\omega_\xi(s) \\ -\omega_\eta(s) & \omega_\xi(s) & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

ここで，紐は伸縮しないという前提から，法線方向周りの曲げ変形は生じず，常に $\omega_\eta(s) = 0$ となる．よって，中心軸 AB 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

$$d\boldsymbol{\zeta}(s) = -\boldsymbol{\eta}(s)\omega_\xi(s)ds \tag{7}$$

となり，式（7）を積分すると式（8），さらに積分すると式（9）が得られる．

$$\boldsymbol{\zeta}(s) = \boldsymbol{\zeta_0} - \int_0^s \boldsymbol{\eta}(s)\omega_\xi(s)ds \tag{8}$$

$$\boldsymbol{x}(s) = \boldsymbol{x}_0 + \int_0^s \boldsymbol{\zeta}(s)ds \tag{9}$$

ここで，$\boldsymbol{\zeta}_0$ は点 A での中心軸 AB の接線ベクトル，$\boldsymbol{x}_0$ は点 A の空間座標を表す．以上より，点 $\mathrm{P}(s)$ の空間座標 $\boldsymbol{x}(s)$ は，曲率 $\omega_\xi(s)$ とねじれ率 $\omega_\zeta(s)$ から求めることができる．

続いて，若松らが提案した帯状物体の変形形状のモデリング手法 [11] を用いて．紐の形状を表現する．伸縮しないという前提より，変形後の紐の表面は可展面となる．可展面とは，直線分を三次元空間内のある軌跡に沿って掃引したときに生成され

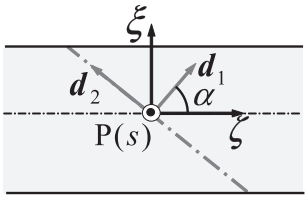


Fig. 6 Definition of the rib angle α

る曲面であり，円筒や円すいの側面などは可展面に相当する．掃引された直線分のことを母線とよぶ．可展面には母線が含まれるため，必ず曲率が 0 となる方向が存在する．**Fig. 6** において，$\boldsymbol{d}_2$ は $\mathrm{P}(s)$ における主曲率方向の一つで，母線の方向を表す．もう一方の主曲率方向 $\boldsymbol{d}_1$ は $\boldsymbol{d}_2$ に直交し，$\boldsymbol{d}_1$ 方向の法曲率が最大となる．よって，紐は $\boldsymbol{d}_1$ の方向にしか曲がらず，$\boldsymbol{d}_2$ の方向には曲がらない．変形した紐は ζ 軸方向に曲げとねじれが生じているように見えるが，実際には $\boldsymbol{d}_1$ 方向に曲がっているだけとみなすことができる．このとき，Fig. 6 に示すように，ζ 軸と $\boldsymbol{d}_1$ 方向とのなす角をリブアングル $\alpha(s) = \tan^{-1}\beta(s)$ とする．紐の法線方向である η 軸の微小変化量は式（6）から以下のように表される．

$$\frac{d\boldsymbol{\eta}}{ds} = -\omega_\zeta \boldsymbol{\xi} + \omega_\xi \boldsymbol{\zeta}. \tag{10}$$

ここで，紐が $\boldsymbol{d}_1$ 方向にしか曲がらないことから，上記のベクトルは $\boldsymbol{d}_1$ 方向に平行であるといえる．よってリブアングルは以下のように表すことができる．

$$\tan\alpha = \beta = -\frac{\omega_\zeta}{\omega_\xi}. \tag{11}$$

上式より，ねじれ率 ω_ζ は，ω_ξ と β を用いて以下のように表される．

$$\omega_\zeta = -\omega_\xi \beta. \tag{12}$$

したがって，中心軸上の点 $\mathrm{P}(s)$ の空間座標 $\boldsymbol{x}(s)$ と物体座標系の向きは，ω_ξ と β を用いて表すことができる．物体座標系の向きが確定すれば，$\xi\zeta$ 平面内で $\boldsymbol{d}_2$ の方向に母線を伸ばすことで，中心軸 AB 上にない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 上で定義される二つの変数 $\omega_\xi(s)$ および $\beta(s)$ で表すことができる．

2. 4 溝底形状の決定手法

溝に紐を通していく際，溝底の曲率やねじれ率が急変すると，紐が引っかかる可能性が高くなる．そこで本研究では，以下の値が最小となるような形状を溝底の形状として採用する．

$$V = \int_0^L \left(\frac{d\omega_\xi}{ds}\right)^2 ds + \gamma \int_0^L \left(\frac{d\omega_\zeta}{ds}\right)^2 ds \tag{13}$$

ここで，$d\omega_\xi/ds$ は紐の曲率の変化量，$d\omega_\zeta/ds$ は紐のねじれ率の変化量を表すため，式（13）の V を最小化するということは，曲率およびねじれ率の変化量の絶対値の総和を最小化することに等しい．式（13）の γ は，曲率の変化量とねじれ率の変化量の比率を表す値である．この値について考察する．一般に，線状物体のポテンシャルエネルギーは以下のように表される．

$$U = \frac{R_{f1}}{2}\int_0^L \omega_\xi^2 ds + \frac{R_{f2}}{2}\int_0^L \omega_\eta^2 ds + \frac{R_t}{2}\int_0^L \omega_\zeta^2 ds \tag{14}$$

ここで，R_{f1} は垂直方向の曲げ剛性，R_{f2} は水平方向の曲げ剛性，R_t はねじり剛性を表す．水平方向の曲げはないものと考えて，式（14）を整理すると，

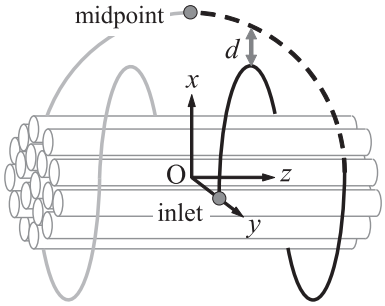


Fig. 7 The topological shape of a clove hitch

$$\frac{2U}{R_{f1}} = \int_0^L \omega_\xi^2 ds + \frac{R_t}{R_{f1}}\int_0^L \omega_\zeta^2 ds \tag{15}$$

となる．ここで，垂直方向の曲げ剛性，ねじり剛性，横弾性係数 G は一般的に以下のように表される．

$$R_{f1} = EI = E\frac{Wh^3}{12} \tag{16}$$

$$R_t = GI_p = G\frac{Wh^3}{3} \tag{17}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{18}$$

ここで，E は物体のヤング率，I は断面二次モーメント，I_p は断面二次極モーメント，ν はポアソン比を表す．式（16）〜（18）より

$$\frac{R_t}{R_{f1}} = \frac{2}{1+\nu} \tag{19}$$

となる．上の値は，曲げ剛性とねじり剛性の比であり，曲げにくさに対するねじりにくさと考えることができる．よって，本研究ではこの値を γ として採用する．さらに，式（12）を式（13）に代入することで，

$$V = \int_0^L \left\{ \left(\frac{d\omega_\xi}{ds}\right)^2 + \frac{2}{1+\nu}\left(\frac{d\beta}{ds}\omega_\xi + \frac{d\omega_\xi}{ds}\beta\right)^2 \right\} ds \tag{20}$$

となる．この V が最小となるような ω_ξ と β を求めることで，適切な溝底の形状を導出できると考える．

2. 5 溝底形状のための制約条件

Fig. 7 に示すクローブヒッチの形状から，溝底形状が満たすべき幾何学的制約について考える．クローブヒッチは中心点で対称であるため，右半分について考える．まず，Fig. 7 に示すように，空間座標を z 軸が電線束の中心軸方向に平行になるように設定する．溝の入口から中心点までの溝に沿った長さを L とする．溝底形状を，実線で示すパート 1 と破線で示すパート 2 の二つに分割する．このとき，満たすべき溝底形状の位相項目は以下のとおりである．

要求 1：可展面であることから，溝底において母線同士は交差しない．

要求 2：溝底は，パート 1 において，入口から z 軸正方向に進みながら，z 軸に対し時計回りに，少なくとも 270 度回転する．

要求 3：溝底は，パート 2 において，中心点に向かって z 軸負方向に進みながら，z 軸に対し時計回りに，90 度回転する．こ

のとき，パート 1 よりも電線束から離れた所を通る．

要求 4：それぞれのパートは連結部以外で接触することはない．

次に，工具の寸法に対する要求は以下の二つである．

要求 5：結束する電線束の直径は最大で 50 [mm] 程度．

要求 6：結束工具は手のひらサイズが望ましい．

以上より，溝底形状算出のための制約条件を以下のように設定する．

制約 1：溝底において母線同士は交差しない．

制約 2：入口での溝底の法線方向は y 軸に平行とする．

制約 3：中心点での溝底の法線方向は x 軸に平行とする．

制約 4：入口の空間座標 $x(0)$ を $[0.00, 40.0, 0.00]^{\mathrm{T}}$ [mm]，中心点の空間座標 $x(L)$ を $[40.0, 0.00, 0.00]^{\mathrm{T}}$ [mm] とする．

制約 5：中心点における溝底の進行方向の z 軸方向成分を -0.36 とする．

制約 6：入口と中心点での母線は，ξ 軸に平行とする．つまり，これらの点で溝底は進行方向にしか曲がらず，紐はねじることなく入れることができる．

制約 7：入口で溝底は x 軸正方向に進む．

制約 8：溝底は，入口から中心点まで，z 軸の周りを時計回りに 450 度動く．

制約 9：溝底は，外径 100 [mm]，内径 50 [mm] の中空円柱内に収まる．

制約 2 と制約 3 では，必要以上にねじれないようにするため，溝底の方向を定めた．制約 4 は，Fig. 7 に示す，パート 1 部分の溝とパート 2 部分の溝が交差する際の溝底の距離 d に影響を与える．距離 d が小さいと，パート 1（あるいはパート 2）部分の溝を通ってきた紐が，交差においてパート 2（あるいはパート 1）部分の溝に入り込んでしまう可能性が高くなるため，距離 d は大きいほうが好ましいが，大きくし過ぎると，型のサイズも大きくなってしまう．よって，本来は交差部分の距離 d を設計パラメータとして最適化すべきであるが，本報では，制約 4 のように座標値を固定した．同様に，制約 5 は，交差でのパート 1 とパート 2 のなす角度，およびパート 1 とパート 2 の連結部分の z 座標，すなわち型の z 軸方向の幅に影響を与える．よって，本来はこの角度と幅も設計パラメータとして最適化すべきであるが，本報では，制約 5 のように与えた．制約 4 と制約 5 については今後検討が必要であると考える．制約 9 では，要求 5 と要求 6 を満たすように，暫定的に外径を定め，直径 50 [mm] の電線束が収まる円筒穴を持つ形状とした．

次に，制約 1 から制約 9 を表す制約式について考える．

Fig. 8 に示すように，溝底の端において点 $\mathrm{P}(s)$ の母線と点 $\mathrm{P}(s+ds)$ の母線が交差すると仮定する．Fig. 8 において，三角形 CDE は，半径 $W/2\cos\alpha$，円弧の長さが $\cos\alpha ds$，その中心角が $d\alpha$ の扇形に対応している．このとき，

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{2\cos^2\alpha}{W} \tag{21}$$

となる．リブアングル α の変化量がこれ以上大きくなると，母線は溝底の内部で交差してしまう．また，同様に溝の反対側の交差も考慮すると，制約 1 は以下のように表される．

$$-\frac{2\cos^2\alpha}{W} \le \frac{d\alpha}{ds} \le \frac{2\cos^2\alpha}{W},\ \forall s \in [0, L]. \tag{22}$$

上記不等式条件は，変数 β を用いると以下のように書き換えられる．

$$-\frac{2}{W} \le \frac{d\beta}{ds} \le \frac{2}{W},\ \forall s \in [0, L]. \tag{23}$$

制約 2 と制約 3 は以下のように表される．

$$\boldsymbol{\eta}(0) = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}.\ \boldsymbol{\eta}(L) = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

制約 4 は以下のように表される．

$$\boldsymbol{x}_0 = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 40.0 \\ 0.00 \end{bmatrix}.\ \boldsymbol{x}_0 + \int_0^L \boldsymbol{\zeta} ds = \begin{bmatrix} 40.0 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}. \tag{25}$$

制約 5 は以下のように表される．

$$\zeta_z(L) = -0.36. \tag{26}$$

制約 6 は以下のように表される．

$$\alpha(0) = 0.00,\quad \alpha(L) = 0.00. \tag{27}$$

制約 7 は以下のように表される．

$$\zeta_x(0) \ge 0.00. \tag{28}$$

x，y，z 軸周りの回転率をそれぞれ ω_x，ω_y，ω_z とすると，これらは

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi} & \boldsymbol{\eta} & \boldsymbol{\zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_\xi \\ \omega_\eta \\ \omega_\zeta \end{bmatrix} \tag{29}$$

とおける．したがって，制約 8 は以下のように表される．

$$\begin{aligned} \int_0^L \omega_z ds &= \int_0^L \left(\xi_z\omega_\xi + \eta_z\omega_\eta + \zeta_z\omega_\zeta\right) ds \\ &= -2.5\pi. \end{aligned} \tag{30}$$

制約 9 は以下のように表される．

$$\left.\begin{aligned} x(s)^2 + y(s)^2 &\ge (25.0)^2 \\ x(s)^2 + y(s)^2 &\le (50.0)^2 \end{aligned}\right\}\ \forall s \in [0, L]. \tag{31}$$

さらに，後で示すように，本研究では 3D プリンタを用いて型を作製するため，成形の際の誤差も考慮して，溝底の幅を紐の幅より 1 [mm] 大きい 3 [mm] としたが，溝底の幅が広すぎると紐が自由に動いてしまうため，今後検討が必要であると考える．

以上より，溝底形状は，式（21）～（31）で表される制約の下で，式（20）で表される V を最小化することにより求めることができる．溝の半分の長さ L は未知数であるが，長すぎると式（31）で表した制約を満たすために必要以上に曲がる必要があるため，値 V が大きくなる．したがって，V を最小にすることで，L も最適化されると考えられる．

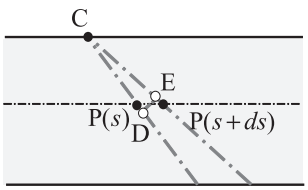
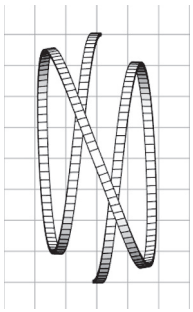
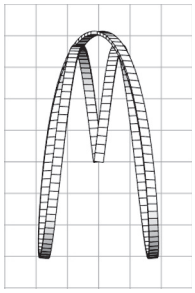


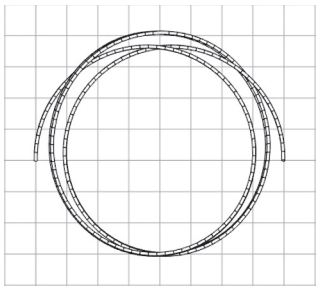
Fig. 8 Intersection of generatrices on an edge of a string



(a) yz-plane



(b) xz-plane



(c) xy-plane

Fig. 9 The optimized bottom shape of the groove

2.6 溝底形状の計算手法

前節より，種々の制約条件の下で，式 (20) で表される V が最小となるような $\omega_\xi(s)$ と $\beta(s)$ を求めることで，溝底形状を決定できる．これは変分問題に相当する．ここで，Ritz 法 [12] を用いて，$\omega_\xi(s)$ と $\beta(s)$ を以下のように既知の基底関数 $e_i(s)(i=1,\cdots,n)$ の重み付き総和で表す．

$$\omega_\xi(s)=\sum_{i=1}^{n}a_i^\xi e_i(s),\quad \beta(s)=\sum_{i=1}^{n}a_i^\beta e_i(s). \tag{32}$$

さらに，L も未知数であるため，以下のような係数ベクトル $\boldsymbol{a}$ を定義する．

$$\boldsymbol{a}=\begin{bmatrix} a_1^\xi & \cdots & a_n^\xi & a_1^\beta & \cdots & a_n^\beta & L \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}. \tag{33}$$

すると，上記変分問題は，係数ベクトル $\boldsymbol{a}$ に関する非線形計画問題に変換することができ，適当な手法を用いて数値的に解くことができる．本研究においては，乗数法を用いて制約付き問題を制約なし問題に変換し，Nelder-Mead 法 [13] を用いて，制約なし問題を解いている．また，基底関数としては以下のものを用いた．

$$e_1(s)=1 \tag{34}$$

$$e_2(s)=s \tag{35}$$

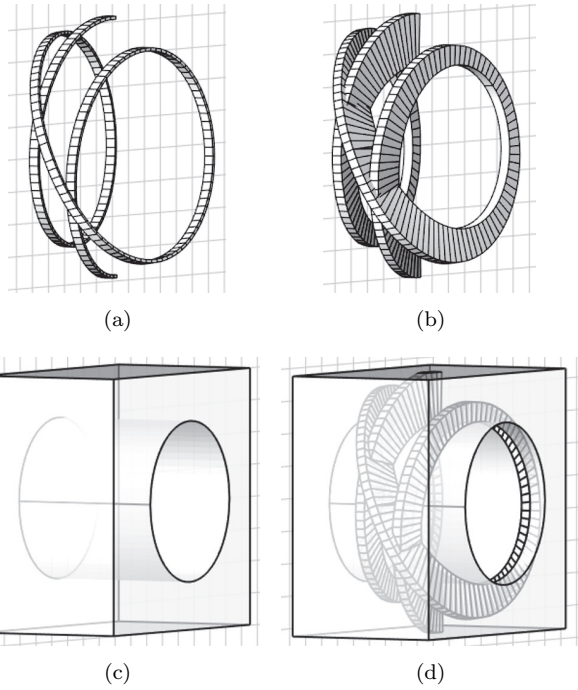
$$e_{2j+1}(s)=\sin\frac{j\pi}{L}s\ \ (j=1,2,\cdots,12) \tag{36}$$

$$e_{2j+2}(s)=\cos\frac{j\pi}{L}s\ \ (j=1,2,\cdots,12) \tag{37}$$

提案した手法により求めた溝底形状を **Fig. 9** に示す．溝底形状の左半分は，得られた右半分を回転複製している．溝底の全長 $2L$ は 550 [mm] となった．

2.7 型形状および各機構の決定

Fig. 10 に型形状の決定方法について示す．Fig. 10 (a) に示す，最適化計算によって得られた溝底形状を法線方向に掃引



(a) (b) (c) (d)

Fig. 10 The designed fixture

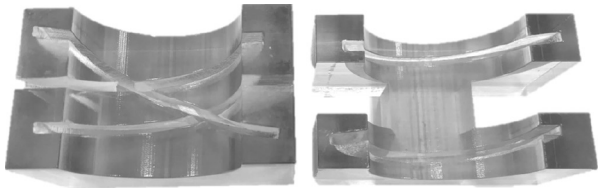


Fig. 11 Produced fixture

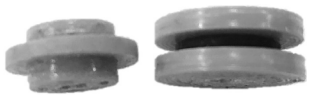
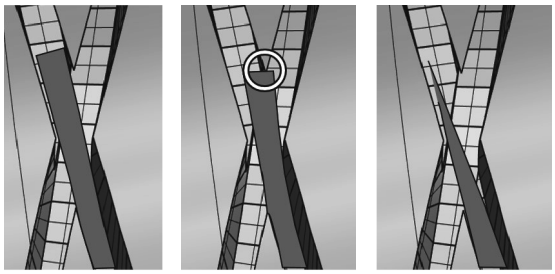


Fig. 12 Produced rollers

することによって，側壁の形状を決定した．得られた溝形状を Fig. 10 (b) に示す．これを，電線束を収める直径 50 [mm] の円筒がくりぬかれた直方体である Fig. 10 (c) から差演算することで，Fig. 10 (d) に示す型の設計図を得た．側壁の形状は，結束の際に紐が溝から抜けやすいか否か，またどの方向に抜けるのかに影響を与えるため，結束の成否，特に結び目の強度等を考慮する場合には，さらなる検討が必要であると考える．

溝に紐を通し，電線束を束ねるために，一対のローラーを入口と出口に 2 セット設置する．まず，入口のローラーと出口のローラーを同じ方向に動かす．入口では紐を押し出し，紐が出口に到達すると出口のローラーが紐を引っ張る．一定時間経過後，入口のローラーを逆回転させ，両端から紐を引っ張る．同時に，型を二つに分解する．各機構については，レゴ社のマインドストーム®を用いて実現した．型は，Stratasys 社製の 3D プリンタである Objet350 Connex 3 を用いて製作した．材料は同社の「FullCure810 VeroClear」を使用した．製作した型を **Fig. 11** に示す．Fig. 11 では，電線束を挟み込めるように Fig. 10 (d) に示す型を二つに分割し，さらにローラーを取り付ける部分をくり抜いている．また，**Fig. 12** に示すローラーは，iGUAZU 社の 3D プリンタ Cube®3rd generation を用い，ABS 樹脂で製作した．また，一方のローラーにゴムをつけることで，滑るこ



(a) (b) (c)

Fig. 13 Passing of an intersection point

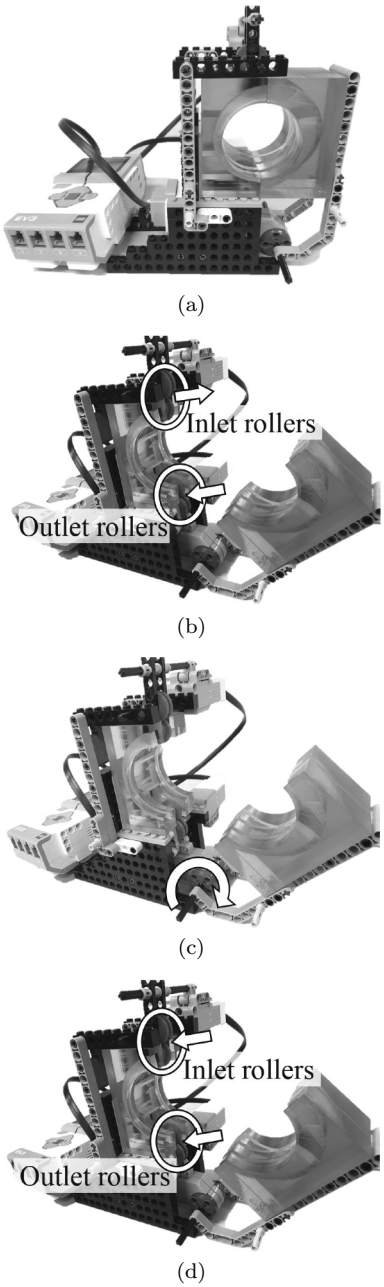
となく確実に紐を送られるようにした．

3. 評 価 実 験

製作した型で評価実験を行う前に，結束の成功率をあげるために手を加えた．溝の交点では，電線束に近いパート 1 側の溝底と側面が存在しない．そのため，本来 **Fig. 13** (a) のように通るはずの紐は，Fig. 13 (b) のようにわずかにずれてひっかかってしまう．このようなひっかかりをなくすために，Fig. 13 (c) のように紐の先端を斜めに切った．紐は結束後，両端を切り落とすため，このような加工を加えても結束作業に影響はない．紐先端の整形操作は，将来的には，工具内の紐の供給口の手前に適当な機構を付加することで，工具単体での実現が可能になると考える．**Fig. 14** (a) に示す試作工具を用いて評価実験を行った．操作機構について説明する．Fig. 14 (b) に示すように，入口と出口のモータを動かし，上部の入口のローラーから紐を入れる．このとき，実際は型は閉じている．紐は溝底に沿って進み，下部の出口のローラーから出てくる．次に，Fig. 14 (c) に示すようにモータを動かし，型を開く．最後に，Fig. 14 (d) に示すように上部の入口のモータを逆回転させ，両端を引っ張り結束する．

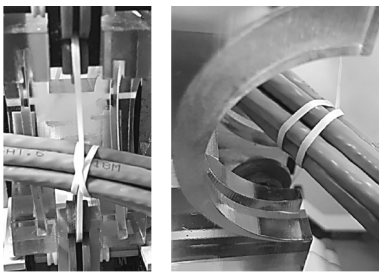
実際に現場で使用される紐を 30 本用意して，計 30 回の実験を行った．結果，30 回中 28 回の結束に成功した．結束の成功率は約 93%となった．工具に紐を入れてから，4.1 秒後に入口に設置したローラーを逆回転させ，1.8 秒間紐を両端から引っ張るように設定したところ，所要時間 5.9 秒で，**Fig. 15** のように，ねじれることなく電線束に密着したクローブヒッチが結束された．熟練の作業者はクローブヒッチとダブルオーバーハンドノット合わせて，15〜30 秒で結束していることから，5.9 秒というのは十分実用的であると考える．また，作業者の結束の成功率は約 70%である．ただし，これはダブルオーバーハンドノットも含んだものであり，失敗の理由は，結び目の強度不足等であって，結ぶこと自体を失敗しているわけではないので，直接比較することはできない．しかし，本実験の成功率は低い値ではないと考える．

失敗の原因について考察する．失敗したケースでは，パート 1 側の浅い溝を通ってきた紐が，溝の交点においてパート 2 側の深い溝に落ち込み，引っかかってしまった．これについては，パート 1 側の溝が再開する部分の溝底を少し深くする等して，紐の先端が深い溝に落ち込まないよう工夫する必要がある．以上のことから，溝内での実際の紐の挙動が重要であると考える．今後は，紐全体にかかる摩擦力を低減するために，型の材質の検討を行いつつ，溝底に沿って進む紐の先端の挙動について解析する．



(a) (b) (c) (d)

Fig. 14 The finished tying tool



(a) (b)

Fig. 15 Clove hitch tied successfully

4. 結 論

本論文では，航空機用ワイヤーハーネスの結束作業の効率化を目指し，帯状の紐を溝に通すことでクローブヒッチが結束できる工具を開発した．工具中の溝底はクローブヒッチと同じ位

相形状を持っており，入口から押し込まれた紐は，溝底に沿って出口まで進んだ後，両端を引っ張ることで溝から取り出されるとともに，工具中心に配置された電線束を結束する．帯状の紐は伸縮しないため，溝底が紐の幅方向にのみ曲がっていると引っ掛かってしまう．紐が引っ掛かることなく，その進行方向を幅方向に変えるためには，厚さ方向に曲げながら，中心軸回りにねじる必要がある．よって，当該工具によって結束を成功させるためには，溝底の形状が極めて重要となる．溝底形状の決定手法については，可展面の理論を基に提案した．適切な溝底の形状は，曲げとねじりの変化量が少ない形状と考えて，そのような溝を持つ工具を試作し，紐結びを実現した．成功率は93%であった．今後の課題として，紐の先端の状態が成功率に大きくかかわることから，紐の先端の挙動について考え，紐の通りやすい溝形状を検討する．

謝　辞　本研究における型の作製にあたっては，立命館大学理工学部の平井慎一教授，王忠奎助教にご協力いただいた．ここに謝意を表す．

参 考 文 献

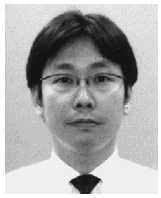
[1] 若松栄史，妻屋彰，荒井栄司，平井慎一：“結び／解き操作を含めた線状物体のマニピュレーション”，日本ロボット学会誌，vol.23, no.3, pp.344–351, 2005.
[2] J.E. Hopcroft, J.K. Kearney and D.B. Krafft: “A case study of flexible object manipulation,” Int. J. Robotics Research, vol.10, no.1 pp.41–50, 1991.
[3] J. Wolter and E. Kroll: “Toward assembly sequence planning with flexible parts,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1517–1524, 1996.
[4] H. Inoue and M. Inaba: “Hand-eye Coordination in Rope Handling,” Robotics Research: The First Int. Symp., vol.1, pp.163–174, 1985.
[5] H. Onda, S. Kudoh and T. Suehiro: “Handling and Describing String-Tying Operations based on Metrics using Segments between Crossing Sections,” IEEE Robotics and Automation Letters, DOI 10.1109/LRA.2016.2518741, 2016.
[6] Y. Yamakawa, A. Namiki, M. Ishikawa and M. Shimoj: “Knotting Manipulation of a Flexible Rope by a Multifingered Hand System based on Skill Synthesis,” IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2691–2696, 2008.
[7] Y. Yamakawa, A. Namiki and M. Ishikawa: “Motion Planning for Dynamic Knotting of a Flexible Rope with a High-Speed Robot Arm,” IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.49–54, 2010.
[8] 木倉寛隆，新宅救徳，喜成年泰，下川智嗣：“型を使用した二重機結び機の型経路”，Journal of Textile Engineering, vol.54, no.3, pp.93–101, 2008.
[9] M. Bell, W. Wang, J. Kunzika and D. Balkcom: “Knot-tying with four-piece fixtures,” The International Journal of Robotics Research, vol.33, no.11, pp.1481–1489, 2014.
[10] M. Bell and D. Balkcom: “Knot Tying with Single Piece Fixtures,” Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.379–384, 2008.
[11] H. Wakamatsu, E. Arai and S. Hirai: “Fishbone Model for Belt Object Deformation,” Robotics: Science and Systems III, The MIT Press, pp.89–96, 2008.
[12] L.E. Elsgolc: Calculus of Variations. pp.144–157, Pergamon Press, 1961.
[13] M. Avriel: Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Prentice-Hall, 1976.

宗田あずみ（Azumi Muneta）

2017 年大阪大学工学部応用理工学科卒業．同年同大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士前期課程進学，現在に至る．航空機用ワイヤーハーネス結束のための工具の開発に関する研究に従事．（日本ロボット学会学生会員）

森永英二（Eiji Morinaga）

2000 年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業．2002 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了．2005 年同後期課程修了．博士（工学）．2005 年大阪大学先端科学イノベーションセンター特任研究員，2007 年大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻助教となり，現在に至る．製品設計における概念設計支援方法論，製品設計・生産設計の統合設計方法論の研究に従事．



若松栄史（Hidefumi Wakamatsu）

1995 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程中退．同年大阪大学大学院工学研究科助手．2006 年同助教授となり，現在に至る．柔軟物のマニピュレーション，CAD に関する研究に従事，博士（工学）．（日本ロボット学会正会員）

荒井栄司（Eiji Arai）

1980 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了．同年神戸大学工学部助手．1984 年静岡大学工学部助教授．1992 年東京都立大学工学部助教授．1995 年大阪大学大学院工学研究科教授，2018 年同名誉教授となり，現在に至る．機械設計の次世代CAD/CAMに関する研究に従事．工学博士．