

# ワイヤ・ハーネスの変形シミュレーションと設計支援システム

橋 間 正 芳<sup>†</sup> 千 田 陽 介<sup>†</sup> 佐 藤 裕 一<sup>†</sup>

製品全般に組み込まれているワイヤ・ハーネスの配置設計は、曲げなどの変形を考慮して経路や長さを決めるため、現物合わせで配置を決めることが多かった。そこで本論文では、機構と連動したワイヤ・ハーネスの変形シミュレーション方法、および3次元モデル上で仮想的にワイヤ・ハーネスの配置検証ができる設計支援システムを提案する。シミュレーションでは、運動学(キネマティクス)を中心とする機構シミュレーションと、ポテンシャルエネルギーから静的な安定形状を求めるハーネスシミュレーションを組み合わせて、高速なシミュレーションを行う。また、設計支援システムは、ハーネスの配置や操作に対してリアルタイムに干渉や曲率のチェックを実行し、インタラクティブ性を重視したシステムとした。

## Real-time Simulation and Design System for Wire-harnesses

MASAYOSHI HASHIMA,<sup>†</sup> YOSUKE SENTA<sup>†</sup> and YUICHI SATO<sup>†</sup>

This paper describes a real-time deformation simulation and an efficient routing design system of wire-harnesses for mechanical products. In this system, a 3-D wire-harness is exactly modeled with an effect of its stiffness and gravity, and can be smoothly deformed together with real-time motions of virtual mechanical systems. This system enables designers to design wire-harnesses on a 3-D model of product, verifying exact length, maximum curvature and collision detection, before an actual prototype is completed.

### 1. はじめに

現在、製造業における製品開発では、開発のコスト削減・期間短縮、および品質の向上を実現するため、機械系3次元CAD(Computer Aided Design)を活用した設計開発が重要となっている。従来の開発では、設計と試作を繰り返して製品の完成度を高めていたが、計算機上の3次元モデルを試作機の代用とすることで、無駄な試作や設計変更を減らすことが可能となった。たとえば、3次元モデルを使うことで、部品間の干渉などの不具合検証や解析による最適設計などを試作に頼らずに行えるようになった。しかしながら、いまだに試作を完全になくすには至っていない。この要因の1つは、3次元CADでモデル化できるものは剛体と仮定できる部品だけであって、ワイヤ・ハーネスやバネ、ベルトなどの変形する部品についてはモデル化が難しいためである。このような柔軟物は、実際に、問題が発生しやすい箇所でもある。特にワイヤ・ハーネスは、製品全般に広く組み込まれており、その3次元モデル化が期待されている。

ワイヤ・ハーネス(以下ハーネスと呼ぶ)とは機械や装置全般に組み込まれたケーブル類のことで、車では1台で数kmもの長さのハーネスが使われるなど、非常に多数のハーネスが組み込まれている。このようなハーネスの設計開発においては、まず、電気と機械の両方の設計データが必要になるという特徴がある。そのためハーネス設計は、これらの設計完了を待つことになり、遅れがちになる傾向がある。また、ハーネスでは余分な遊びを持たせて配置するが、この余長の正確な決め方がなく、ほとんどの場合、試作機ができあがってから現物合わせで決めることになる。いずれにしても、不具合の発見が遅れてしまうことが大きな問題となっている。

これに対して、ハーネスの設計支援システムがいくつか開発されている。Pro/Engineer<sup>1)</sup>やAutoCAD<sup>2)</sup>などの機械系3次元CADでは、機械設計と並行して3次元モデル上でハーネスの配置検証を行うことができる。また、Cabling Designer<sup>3)</sup>では、電気系CADと連携してハーネスの電氣的検証を行うことができる。また、Holtら<sup>4)</sup>は没入型Virtual Realityを使った配置設計・組立の支援システムを提案している。しかし、これらはいずれも固定して動かないハーネスを対象としており、機構と連動して変形するようなハーネ

<sup>†</sup> 株式会社富士通研究所  
Fujitsu Laboratories LTD.

スを扱っていない。ハーネスは、移動や回転する機構の中にも組み込まれており、動作範囲に対して適切な長さであるか、動作中に引っ掛かりや挟み込みがないか、なども重要な設計検証項目である。

そこで本論文では、機構の動きを考慮したハーネスの設計支援システムについて提案する。本研究では、実物に近い感覚でハーネスの操作を行い、インタラクティブに配置と検証ができることを目標とする。これを実現するため、我々が開発している3次元リアルタイムシミュレーション“VPS (Virtual Product Simulator)”<sup>5),6)</sup>の機構シミュレーション機能を使い、この上にハーネスのシミュレーション機能を構成した。ハーネスのシミュレーションでは、ハーネスの曲線形状を近似的に求め、それに沿った簡易的な3次元モデルを生成している。これにより、高速にハーネスの変形シミュレーションを行うことができる。また、このハーネスシミュレーションに干渉チェックなどの検証機能を組み合わせることで、実物そっくりなハーネスの配線と検証ができるハーネス設計支援システムを構築した。

以下、2章で機構の動きを高速にシミュレーションする機構シミュレーション方法について概説する。3章では、機構と連動して動くハーネスのシミュレーション方法について述べる。4章では仮想的にハーネスの配置検証ができるハーネス設計支援システムについて説明する。最後に、これらの有効性を明らかにするため、5章でハーネスシミュレーションの検証結果を示し、6章でハーネス設計支援システムの適用例を示す。

## 2. VPSの機構シミュレーション

機構シミュレーションには、運動方程式を利用して機構に働く力と動きの関係を解く動力学(ダイナミクス)シミュレーションと、力については考えずに位置や速度などの運動だけを扱う運動学(キネマティクス)シミュレーションの2つの方式がある。前者は正確な動きを計算できるが、複雑な機構では非常に計算時間がかかる。一方、後者では、動きは設計者が定義するので厳密ではないが、その代わりに高速に計算することができる。VPSは、マウスなどを使ってリアルタイムに3次元モデルを動かす、インタラクティブに動作の検証を行うことを目的としている。そのため、機構シミュレーションとしては後者の運動学シミュレーションをベースにしている。

この機構シミュレーションでは、機構の基本動作を関節で表現している。関節とは、固定部品に対する可動部品の相対運動を記述するもので、回転関節と並進

関節がある。回転関節では回転軸と回転角を設定し、並進関節では並進軸と移動量を設定する。回転角と移動量は動きの量を表す変数で、ここでは関節値と呼ぶことにする。

機械製品の機構では、図1に示すように複数の関節が結合して動きを伝達している。この動きを高速にシミュレーションするため、連動する関節間の関節値だけに注目する。駆動側と受動側の関節値の関係は、機構の設計時にその理想的な入出力関係が決まっているので、これをシミュレーションで使う。この関係としては、歯車のギア比のような線形関係と、カムのような非線形関係がある。非線形関係に対しては、2つの関節値の対応をテーブル形式で持つことで高速に計算できる。

部品が動くときは、その部品に固定されている部品も同時に動くことになる。このような固定部品の関係は、木構造を使って実現している(図2)。各部品モデルをノードに割り当て、複数部品を組み立てたユニットを1つのノードとして親ノードとする。ここで、子ノードの座標を親ノードに対する相対座標で定義する。これにより、親ノードを動かすと子ノードも同時に動く。関節についても1つのノードとして木構造に組み込み、固定部品と関節のノードを同じ親の下に置き、可動部品を関節の子ノードとする。これらを組み合わせると、ユニットを可動部にした関節を設定してユニット単位で動かしたり、関節の子ノードに関節を入れて多自由度の関節を構成したりすることができる。

以上の手法を用いた機構シミュレーションのフローは次のようになる。

- (1) マウス操作などにより、駆動側関節値を入力する。
- (2) この関節と連動関係にある関節に対して、関節値を更新する。
- (3) 関節値を更新した関節の子ノードに対して、位置姿勢を更新する。
- (4) 位置姿勢を更新したノードの子ノードに対して、再帰的に位置姿勢を更新する。
- (5) 部品モデルを描画する。

このフローでは、描画処理を除けば、更新する変数はわずかである。マウス操作などのユーザ操作に対し、上記のフローを繰り返すことで、インタラクティブに3次元機構モデルを動作させることができる。

## 3. ハーネスのシミュレーション

本研究では、ハーネスが図3に示すようにコネクタやクランプによって適当な位置で固定されていると

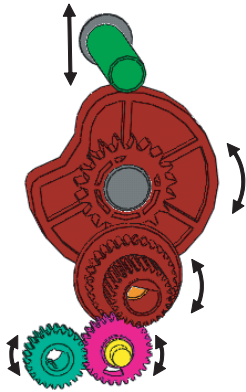


図 1 関節の運動  
Fig. 1 Joint interaction.

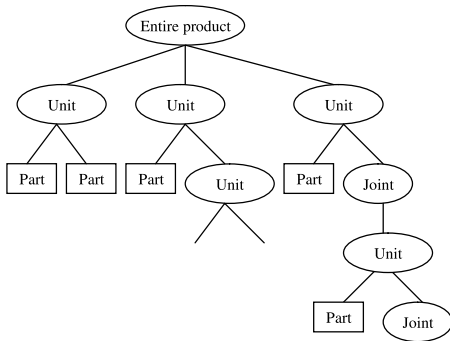


図 2 部品モデルの木構造  
Fig. 2 Tree structure of parts model.

仮定する．これにより，固定位置でハーネスを区切り，各区間ごとにモデリングを行うことができる．このとき，各区間のハーネスの幾何学的制約条件を，両端における点の位置と接線方向，およびハーネス長さとする．この条件に対して高速にハーネス形状を計算し，機構の動きによって刻々と変化する両端点の位置・接線方向に対してハーネス形状を更新することで，リアルタイムなハーネス変形シミュレーションを実現する．ハーネス形状に関しては，断面形状が一定の線状柔軟物と定義する．これにより，ハーネス形状の計算は，曲線形状の決定と，曲線形状の3次元モデル化の2つに分けて考えられる．それぞれに対する高速な処理方法，および機構シミュレーションとの結合方法について述べる．

3.1 曲線形状のモデリング

曲線形状のモデリング方法については，ハーネスの種類から簡易的な方法と力学特性を考慮した方法の2つを考えた．ハーネスは，複数の銅線と皮膜から構成された複雑な構造のものと，光ファイバやゴムホース

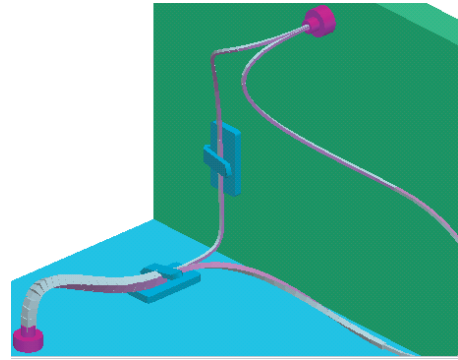


図 3 ハーネスの設置の例  
Fig. 3 Fixing of harness.

のように均質な構造のものの2つに分類できる．前者は，その形状を正確に解析することは難しいが，逆に，形状を指定しても正確に配置することは難しいので，無理に正確な曲線形状を求める必要はない．一方，後者の単一材質のハーネスは，曲がり具合が性能に影響することがあり，剛性などを考慮して正確に曲線形状を求める必要がある．以上より，ハーネスの種類によって，自由に形を作れる簡易的な曲線形状モデリングと，力学特性を考慮した正確な曲線形状モデリングの2つを分けて用いる．

3.1.1 簡易的な曲線形状モデリング

正確さを要しないモデリング方法としては，自然な曲線形状を表現できるベジエ曲線を適用した．ベジエ曲線  $r(t)$  は次式で表される．

$$r(t) = \sum_{i=0}^m C_i^m (1-t)^{m-i} t^i P_i \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (1)$$

$m$  はベジエ曲線の次数， $P$  は制御点の位置， $C_i^m$  は2項係数である．ベジエ曲線の次数は，3次元の曲線を構成するうえで最小の次数である3次とした．ハーネスの幾何学的制約条件から，3次ベジエ曲線の4つの制御点は，図4に示すように始点と終点，始点から接線方向の延長線上，終点から接線方向の延長線上に決まる．ここで制御点  $P_1$  と制御点  $P_2$  を決めるため，ベクトル  $\overrightarrow{P_0P_1}$  とベクトル  $\overrightarrow{P_3P_2}$  の大きさが同じになるものとし，その大きさを  $|\overrightarrow{P_0P_1}| = |\overrightarrow{P_3P_2}| = k$  とする． $k$  はハーネス長さ  $L$  の制約条件から求める．

$$\int_0^1 |\dot{r}(t)| dt = L \quad (2)$$

式(2)の左辺は数値積分によって計算し，二分法などの反復法により式(2)を満たす  $k$  を求める．式(2)の左辺は  $k$  に対して単調増加なので解は一意的に求められる．

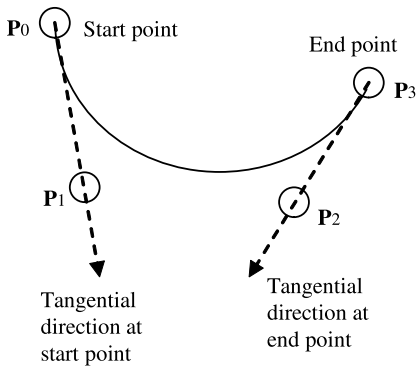


図4 ベジエ曲線 (P<sub>0</sub>~P<sub>3</sub>:制御点)  
Fig.4 Bezier curve (P<sub>0</sub>~P<sub>3</sub>: control point).

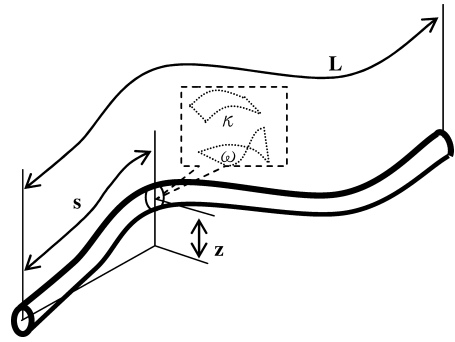


図5 線状モデル  
Fig.5 Linear model.

3.1.2 力学特性を考慮した曲線形状モデリング  
ハーネスの最大曲率などを正確に評価できるモデリング方法として、ハーネスの剛性と重力の影響を考慮する。関連研究としては、Chipperfield ら<sup>7)</sup> が有限要素法を使った構造解析により厳密な曲げ形状を求めている。しかし、計算時間が非常にかかり、今回の用途には向かない。また、布のシミュレーションなどではバネ・マスモデルを使った高速な計算法が研究されているが<sup>8)</sup>、精度や計算の安定性に問題がある。

これに対して、Wakamatsu ら<sup>9)~11)</sup> は、ポテンシャルエネルギーを最小にすることで、線状物体の静的な形状を求める手法を提案している。物理モデルの妥当性と高速で安定な計算の可能性から、この手法を曲線形状モデリングに適用することにした。

ハーネスのポテンシャルエネルギーとして、曲げとねじれによる弾性エネルギー、および重力による位置エネルギーを考えると、ハーネス全体のポテンシャルエネルギー  $U$  は次のように表される。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L R_f \kappa^2 ds + \frac{1}{2} \int_0^L R_t \omega^2 ds + \int_0^L Dgzs ds \quad (3)$$

$s$  はハーネス曲線に沿った始点からの距離、 $\kappa$ 、 $\omega$ 、 $z$  は距離  $s$  の点における曲率、ねじり率、高さである(図5)。また、 $R_f$ 、 $R_t$ 、 $D$  はそれぞれ曲げ剛性係数、ねじり剛性係数、単位長さあたりの質量であり、ハーネスの材料特性から決まる。また、 $L$  は曲線長である。

ここで曲線の式を  $\mathbf{r}(s)$  とすると、曲線上の位置  $\mathbf{r}$  における曲率  $\kappa$ 、ねじり率  $\omega$  はそれぞれ次のようになる。

$$\kappa = (\mathbf{n} \cdot \ddot{\mathbf{r}}) / |\dot{\mathbf{r}}|^2 \quad (4)$$

$$\omega = (\mathbf{b} \cdot \ddot{\mathbf{r}}) / (\kappa |\dot{\mathbf{r}}|^3) \quad (5)$$

$\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{b}$  はそれぞれ主法線ベクトル、陪法線ベクトルで、

$\mathbf{r}$  から導出できる。式(4)、(5)より式(3)は  $\mathbf{r}(s)$  の式となるので、ポテンシャルエネルギーを  $U(\mathbf{r}(s))$  と表す。静的に安定な曲線形状の計算は、ハーネスの幾何学的制約条件を含めて以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} : U(\mathbf{r}(s)) \\ & \text{subject to} : \mathbf{r}(0) = \mathbf{P}_a \\ & \mathbf{r}(L) = \mathbf{P}_b \\ & \dot{\mathbf{r}}(0) = \mathbf{D}_a \\ & \dot{\mathbf{r}}(L) = -\mathbf{D}_b \\ & \int_0^L |\dot{\mathbf{r}}(s)| ds = L \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{P}_a$ 、 $\mathbf{P}_b$  はそれぞれハーネスの始点と終点の位置、 $\mathbf{D}_a$ 、 $\mathbf{D}_b$  はそれぞれハーネスの始点と終点の接線方向ベクトルである。式(6)は、曲線  $\mathbf{r}(s)$  を適当な基底関数で近似し、その未知パラメータを制約付き最適化問題として解くことができる。

この基底関数として Wakamatsu らは三角関数を用いたが、我々は、曲線  $\mathbf{r}(s)$  としてベジエ曲線を用いた。これは、ベジエ曲線の方が少ないパラメータで滑らかな曲線形状を表現できると考えたためである。これにより、最適化計算のパラメータ空間を絞り、計算量を減らすことができる。ベジエ曲線の次数については、次数が多いほど曲線形状の表現力が高くなるが、計算時間が増大するというトレードオフがある。我々は、通常のハーネスを表現でき、リアルタイム性を確保できる次数として、5次のベジエ曲線を適用した。

5次ベジエ曲線は式(1)において  $m = 5$  として表され、制御点  $\mathbf{P}_0 \sim \mathbf{P}_5$  が変数となる。ここで、ハーネスの幾何学的制約条件から、両端は  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_a$ 、 $\mathbf{P}_5 = \mathbf{P}_b$  となり、 $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_4$  は  $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_a + k_1 \mathbf{D}_a$ 、 $\mathbf{P}_4 = \mathbf{P}_b + k_2 \mathbf{D}_b$  となる ( $k_i$  は任意定数)。  $\mathbf{P}_2 = \{P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}\}$ 、 $\mathbf{P}_3 = \{P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}\}$  とすると、求める未知パラメータは、 $\mathbf{a} = \{k_1, k_2, P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}, P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}\}$  の8個である。

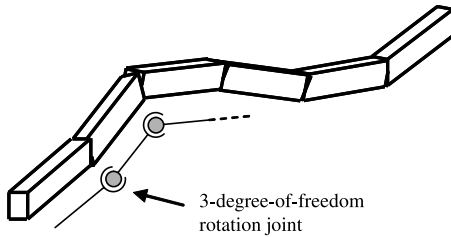


図6 ハーネスの3次元モデル  
Fig.6 3-D harness model.

結局、曲線形状の計算は、以下のような制約付き最適化問題に変換される。

$$\begin{aligned} \text{minimize} & : U(\mathbf{a}) \\ \text{subject to} & : \int_0^1 |\dot{\mathbf{r}}(t)| dt = L \end{aligned} \quad (7)$$

これをラグランジュ乗数法により制約なしの最適化問題に変換する。

$$U(\mathbf{a}) + \lambda \left( \int_0^1 |\dot{\mathbf{r}}(t)| dt - L \right) \quad (8)$$

ただし、 $\lambda$  はラグランジュ乗数である。式(8)は未知パラメータ  $\mathbf{a}$  に関して偏微分可能で、準ニュートン法を使って解くことができる。一方、未知パラメータの初期値に関しては、解に近い値を与える必要がある。そのため、シミュレーションの開始時は、前述した簡易曲線モデリングを使って概略形状のパラメータを与え、その後の形状更新時は、直前の曲線形状パラメータを用いて計算した。

### 3.2 3次元形状のモデリング

曲線形状モデルから3次元モデルを生成するには、ハーネスの断面形状を曲線に沿ってスイープすればよいが、表面が曲面で構成されるため、ポリゴン数が多くなって描画処理が重くなることや、ポリゴンの生成処理に時間がかかることが問題となる。そこで、図6に示すように、ハーネスを細かく分割して、多角柱の連結構造としてハーネスを表現する。多角柱と多角柱の間には3自由度の回転関節を持たせることで、自由に变形することができる。これにより、变形時は関節値だけを変化させればよい。

### 3.3 ハーネスシミュレーションと機構シミュレーションの結合

機構シミュレーションの部品モデルにハーネスモデルの始点・終点を結合することで、部品の動きと連動してハーネスの変形をシミュレーションすることができる。この結合は、部品モデルの子ノードにハーネスの始点・終点を設定することで実現できる。シミュレーションのフローは次のようになる。

(1) マウス操作などにより、機構の駆動側関節値を

入力する。

- (2) 機構シミュレーションにより、連動する関節の関節値と位置姿勢、関節の子ノード部品の位置姿勢を更新する。
- (3) ハーネスの始点・終点の位置と接線方向を計算する。
- (4) ハーネスの曲線形状を計算する。
- (5) 曲線形状に沿うように多角柱間の関節値を決め、多角柱の位置姿勢を更新する。
- (6) 部品モデルと多角柱を描画する。

このようにハーネスシミュレーションは、高速な機構シミュレーションをベースとして構成することが可能である。これにより、マウス操作などで機構を動かすと同時に、ハーネス形状をリアルタイムに変形させることができる(図7)。

## 4. ハーネス設計支援システム

以上のシミュレーション技術をベースにして、仮想環境上で実際と同じような感覚でハーネスを配置し、不具合を検証するハーネス設計支援システムを構築できる。このシステムで重要なことは、ユーザが容易にハーネスを配置でき、その配置に対して速やかに検証できることで、これにより不具合があれば即座に配置を修正し、効率良く最適な配置を設計することが可能となる。ハーネスの配置においては、図3に示したようにハーネスは途中で分岐したり、クランプで固定されたりしているので、これらを考慮して容易に設定・変更できる必要がある。また、ハーネスの検証項目としては、ハーネスの長さ、他部品との接触や干渉、および曲がり具合が重要である。

### 4.1 分岐・結合の表現

まず、ハーネスデータの管理方法について述べる。ハーネスは1本の曲線ではなく、前述したように分岐や結合を繰り返している。またハーネスは、コネクタやクランプなどを介して長い距離にわたって配線されている。このようなハーネスを効率良くモデル化するため、ハーネスをいくつかの部分に分割してグラフ構造によりデータを管理する。グラフのノードには分岐点や固定点を割り当て、ノード間のエッジで1つのハーネス曲線を管理する。また、始点や終点のデータはノードで管理する。これにより、分岐や結合を表現できるとともに、ハーネスの部分的な追加や挿入、形状変更などが容易になる。

### 4.2 配置設計

3次元モデル上でハーネスを配置する方法として、実際のハーネスの組み付けをイメージして、ハーネス

の片方の端から順番に通過点を配置する方法と、両端を決めてハーネス全体を設定した後、途中の通過点を指定していく方法の2つの方法が考えられる(図8)。

#### (1) 端からハーネスを配置する方法

この方法では、いちばん端から順番に通過点位置と長さを指定し、通過点と通過点の間にハーネス曲線を設定していく。複雑な経路や分岐がある場合に必要な配置方法である。

#### (2) ハーネス全体から設計する方法

この方法では、まず両端の位置と全長を指定し、ハーネス全体のモデルを生成した後、通過点を設定していく。通過点を追加するたびにハーネスを分割するが、ハーネスの長さをどのように振り分けるかが課題である。今回は、各ハーネス曲線の曲がり具合がだいたい同じになるよう、通過点間の直線距離の比で全長を分配している。

#### 4.3 長さの検証

図9に示すような可動部品に取り付けられたハーネスでは、可動部品の移動位置によってハーネスの長さが足りない場合がある。本システムでは、シミュレーション中、ハーネスの長さよりも始点・終点間の距離が長くなった場合、シミュレーションを止めてアラームを上げている。一方、長すぎて他部品に引っ掛かる場合、次に述べる干渉状態を表示させている。設計者は、ハーネス長の調整と可動部の動作確認を繰り返しながら、最適な長さを決めていくことができる。

#### 4.4 他部品との干渉チェック

ハーネスが他部品と交錯しないか、扉などを閉めるときに挟み込まないか、などを確認するために、リアルタイムに干渉チェックを行う機能が重要である。VPSでは3次元モデル間的高速な干渉チェック機能を持っており<sup>12)</sup>、これを利用してハーネスの多角柱形状に対しても動的に干渉チェックを行っている。ハーネスが部品と干渉していれば、図10に示すようにアラームを提示する。

#### 4.5 最大曲率の確認

ハーネスは曲がりすぎると破断や性能劣化の原因となるため、事前に曲がり具合を検証しておく必要がある。そこで、本システムではハーネスの曲線形状を計算するとき最大曲率の値と位置を計算するようにしている。許容範囲を設定すれば、ハーネスのシミュレーション中にチェックを行い、曲がりすぎた場合にアラームを上げることができる。

#### 4.6 その他

上記の検証機能は、配置作業中もつねに行い、ハーネスの配置と同時に確認ができるようにしている。ま

た、ハーネス設計を総合的に支援するため、ハーネスの信号情報や端子間のFromToリスト(配線接続情報)などの属性管理機能、平面レイアウト図への自動展開機能などを開発し、実用的なシステムとしている。

### 5. ハーネスシミュレーションの実験と考察

まず、力学特性を考慮したハーネスモデリング手法における静的安定状態での曲線形状の精度を検証するため、実際のハーネスと曲線形状を比較した。使用したハーネスは、単芯の光ファイバ素線で、直径0.1mmの石英ガラスとそれを覆う樹脂皮膜からできており、全体の直径は0.9mmである。この光ファイバを図11のように配置して、光ファイバ上の一定間隔おきの位置を定規で測定した。

シミュレーションでは、各材質の材料特性を合成して、曲げ剛性係数を約7.1Nmm<sup>2</sup>、ねじり剛性係数を4.9Nmm<sup>2</sup>、線密度を0.6g/mmとして計算した。ハーネスの長さを300mmおよび250mm、両端の間隔を150mmとしたときの計算値と測定値を図12に示す。誤差は最大で約5mmであり、ほぼ一致することを確認した。

次に、シミュレーション時間について計測した。CPU: Intel Xeon 2.7GHzのPCで、ハーネス曲線の計算時間は、簡易モデリングで約2ms、力学考慮モデリングで約80msであり、リアルタイムにシミュレーションできることを確認した。

以上より、精度、速度とも実用的なレベルでハーネス形状をシミュレーションできることを確認した。今回は、5次のベジエ曲線を用いたが、これで表現できない曲線形状に対しては誤差が大きくなる。たとえば、車両連結部のハーネスのような非常に硬いハーネスでは図13のような形状もあり、6次以上の次数が必要である。このような場合に対してベジエ曲線の次数を増やすことは可能であるが、計算処理が重くなる。リアルタイムに変形させるためには事前にオフラインで計算しておくなどの工夫が必要である。

また、今回の実験では構造が単純なハーネスを用いたが、強化繊維で皮膜された多芯の光ファイバなど、材料特性が簡単には分からない場合がある。このような場合に対しては、実際のハーネスの曲線形状に合うように材料特性パラメータをキャリブレーションする方法を考える必要がある。

### 6. ハーネス設計支援システムの適用例

図14は、本システムを実際の光ファイバの配置設計に適用した例である。ハーネス全体を設置した後、

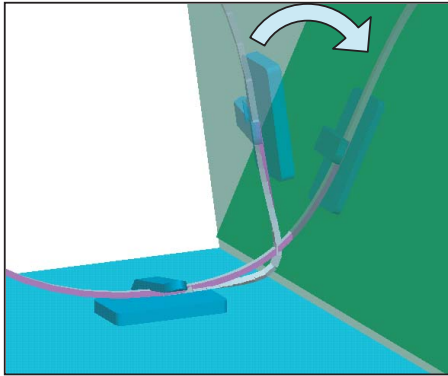


図 7 機構とハーネスの運動

Fig. 7 Interlock between mechanism and harness.

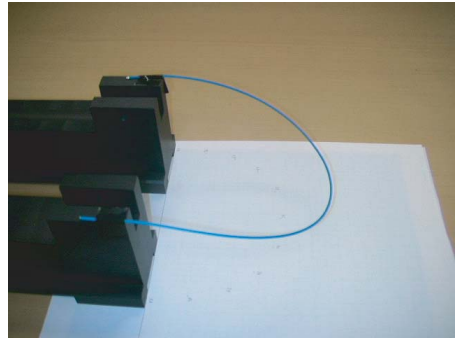
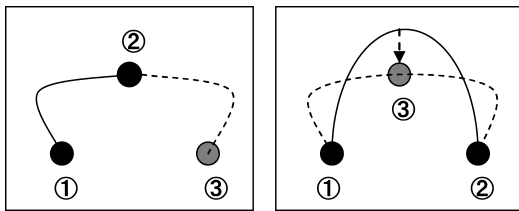


図 11 精度検証実験でのハーネスの配置

Fig. 11 Harness layout in precision verification experiment.



(1) Layout from end

(2) Layout from whole

図 8 ハーネスの配置手順

Fig. 8 Harness layout procedure.

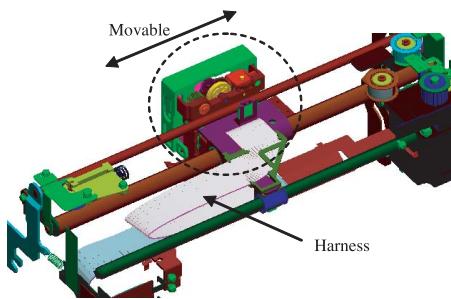


図 9 ハーネスの長さの検証

Fig. 9 Verification of harness length.

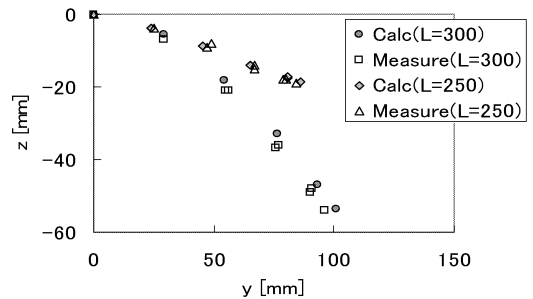
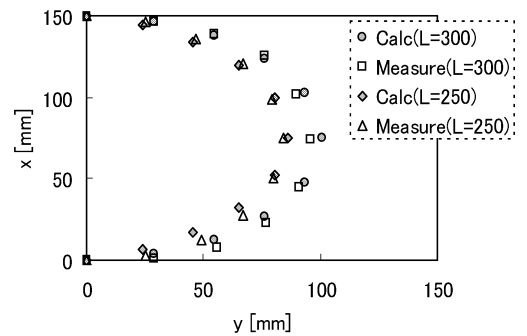


図 12 精度検証実験データ (上: 水平方向, 下: 垂直方向)

Fig. 12 Precision verification experiment data (x: width, y: depth, z: height).

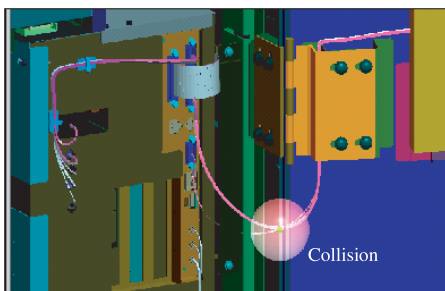


図 10 ハーネスの干渉チェック

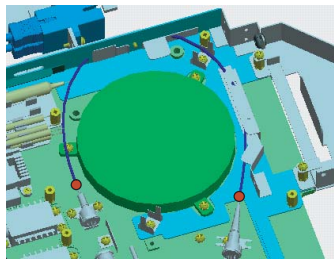
Fig. 10 Harness collision check.



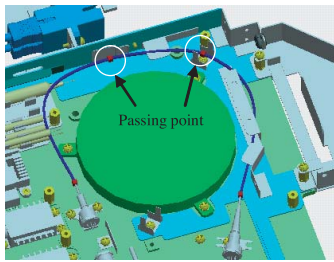
図 13 5 次のベジエ曲線で表現できないハーネス例

Fig. 13 Example of harness that cannot be described by a fifth-order bezier curve.

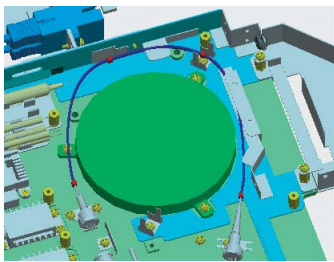




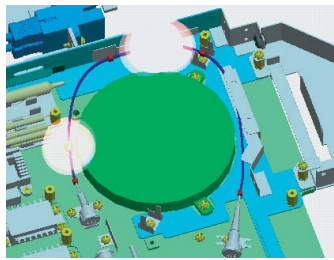
(a) Layout of ends point



(b) Layout of passing point



(c) Adjustment of harness length



(d) Collision and curvature check

図 14 ハーネスの配置設計の例 1

Fig. 14 Example of harness layout design.

通過点と長さを調整し、干渉や曲率を検証しながらインタラクティブにハーネス経路を設計できることを確認した。

また、図 15 は、多数のハーネスを組み込んでいる装置に適用した例で、扉を開閉させながら各ハーネスの長さを調整していき、ハーネス長さを正確に設計することができた。

本システムを社内で適用した結果、開発早期に質の高いハーネス設計を行うことが可能となり、無駄な試

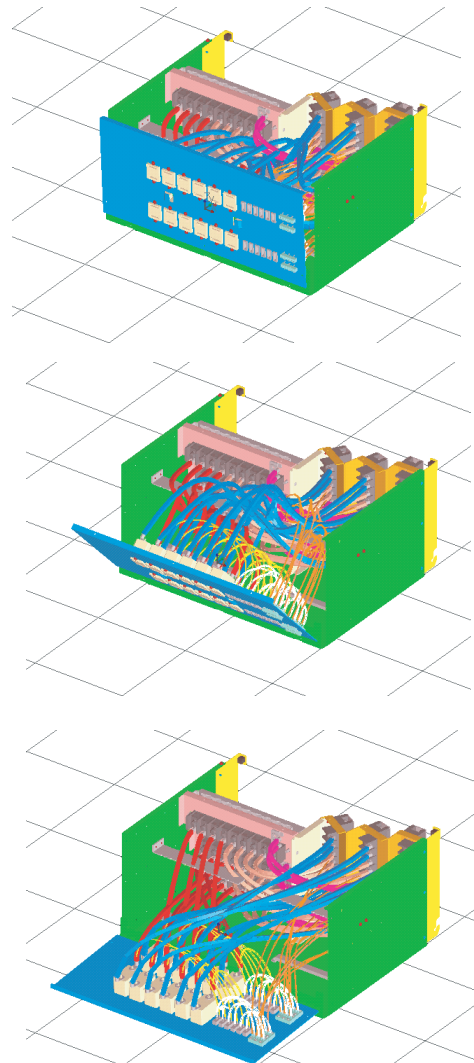


図 15 ハーネスの配置設計の例 2

Fig. 15 Example of harness layout design.

作を削減できるようになった。また、従来の設計に比べ、設計工数を半分に短縮することができ、開発コストの削減などの効果を得ている。

本システムは、現在、VPS の拡張機能として製品化されている<sup>13)</sup>。

## 7. おわりに

設計が後回しにされがちであったハーネスの配置設計に対して、3次元モデル上で早期にハーネスの設計検証ができるハーネス設計支援システムを構築した。ハーネスの形状をリアルタイムにシミュレーションし、仮想環境上でのハーネスの配置と干渉などの検証をインタラクティブに繰り返ししながら、最適な配置を設計できるようになった。



今後の課題としては、まず、ハーネスが部品と接触したときのならい動作があげられる。この場合、部品の表面に沿ってハーネスが変形する様子をシミュレーションする必要がある。また、最大曲率の検証のほかにも最大ねじり率の検証が必要である。これは、ねじれによってコネクタ部で接触不良などの不具合が発生する可能性があるためである。そのほか、柔軟物部品としてパネやベルトなど、3次元的な変形を扱うことも今後の重要な研究課題である。

謝辞 本研究への貴重なアドバイスとモデルデータを提供して下さった富士通(株)先行生産技術開発部の関係者各位に感謝いたします。

### 参 考 文 献

- 1) <http://www.ptc.com/>
- 2) <http://www.autodesk.com/>
- 3) <http://www.zuken.com/whd/>
- 4) Holt, P.O'B., Ritchie, J.M., Day, P.N., Simmons, J.E.L., Robinson, G., Russell, G.T. and Ng, F.M.: Immersive Virtual Reality In Cable and Pipe Routing: Design Metaphors and Cognitive Ergonomics, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.4, pp.161-170 (2004).
- 5) Hashima, M., Senta, Y. and Sato, Y.: Design and Manufacturing Methodology for Mechanical Systems Using Virtual Product Simulator, *ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, DETC/CIE-34384 (2002).
- 6) 千田陽介, 橋間正芳, 佐藤裕一: 3D CAD データを用いた組込み用ソフトウェア開発支援システムの構築—第一報システムの概要と基本設計, 情報処理学会「グラフィックスとCAD」研究報告会, CG-109, pp.1-6 (2002).
- 7) Chipperfield, K.A. and Vacne, J.M.: Stiffness Testing of Hydraulic Hoses, *ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, DETC/DAC-34067 (2002).
- 8) Baraff, D. and Witkin, A.: Large Steps in Cloth Simulation, *Proc. SIGGRAPH*, pp.43-54 (1998).
- 9) Wakamatsu, H., Hirai, S. and Iwata, K.: Modeling of Linear Objects Considering Bend, Twist, and Extensional Deformations, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.433-438 (1995).
- 10) 若松栄史, 平井慎一, 岩田一明: Bounded Force Closure に基づく変形しやすい物体の把持に関する静力学的解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.64, No.618, pp.508-515 (1998).
- 11) 若松栄史, 和田隆広: 線状物体のモデリング, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2, pp.145-148 (1998).
- 12) Sato, Y., Hirata, M., Maruyama, T. and Arita, Y.: Efficient Collision Detection using Fast Distance-Calculation Algorithms for Convex and Non-Convex Objects, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.771-778 (1996).
- 13) <http://salesgroup.fujitsu.com/plm/vps/>

(平成 17 年 11 月 7 日受付)

(平成 18 年 11 月 2 日採録)



橋間 正芳

昭和 41 年生。平成 3 年東京工業大学大学院精密機械システム専攻修士課程修了。同年(株)富士通研究所入社。ロボット、シミュレーション技術の研究開発に従事。平成 15 年度グラフィックスと CAD 研究会優秀研究発表賞受賞。日本ロボット学会会員。



千田 陽介

昭和 42 年生。平成 6 年東北大学大学院精密工学専攻修士課程修了。同年より同大学工学部機械電子工学科助手。平成 9 年(株)富士通研究所入社。平成 17 年より(財)九州システム情報技術研究所へ出向中。シミュレーションシステムの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会各会員。



佐藤 裕一(正会員)

昭和 33 年生。昭和 61 年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了。同年(株)富士通研究所入社。ロボット、制御、シミュレーション技術の研究開発に従事。平成 6 年より仮想試作システム VPS (Virtual Product Simulator) の開発を開始し、製品化を主導。平成 13 年度、VPS で Software Product of The Year (情報処理推進機構およびソフトウェア情報センター主催)を受賞。平成 11 年より VPS の製品出荷を開始し、現在までに社内ユーザを含めて 3,000 本以上の出荷を達成。理学博士。日本ロボット学会、ACM 各会員。