

ワイヤ・ハーネスの3次元設計支援システム

橋間正芳 千田陽介 佐藤裕一
(株)富士通研究所

製品開発において、ワイヤ・ハーネスの経路を決める配置設計は、従来、試作機が出来上がってから現物合わせで決めることが多く、不具合の発見が遅れるという問題があった。そこで、CADで作成した3次元モデル上で、仮想的にワイヤ・ハーネスの配置設計ができるシステムを構築した。剛性と重力を考慮したハーネス経路を高速に計算し、多角柱の多連結構造でハーネスをモデリングすることで、3次元ハーネスモデルをリアルタイムに変形させることができる。このハーネスモデルに干渉チェックなどの検証機能を組み合わせることで、実用的なハーネス設計支援システムを構築した。

Real-Time Simulation and Design System for Wire-Harnesses

Masayoshi HASHIMA, Yosuke SENTA, and Yuichi SATO

Fujitsu Laboratories LTD.

Abstract — This paper describes 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

電気製品や装置全般に多数組み込まれているケーブルやワイヤ・ハーネス(以下ハーネス)の配置設計は、メカとエレキの両方の設計結果に依存するため、設計が後回しにされる傾向があった。実際、試作機が出来上がってから現物合わせで配線経路を決めることも多く、ハーネスに関する不具合の早期発見が課題となっている。

一方で、3次元CADを中心としたデジタルエンジニアリングが普及しており、バーチャルな製品モデルを使って様々な検証を行い、試作機を作る前に大部分の不具合を取り除く設計手法が進んでいる。ハーネスに関しても3次元設計手法は提案されており、ハーネス設計機能を備えた3次元CAD^[1]やハーネス設計専用ソフト^[2]がある。しかし、これらは3次元のモデル作りに重点が置かれており、配置結果を検証する機能が十分ではない。

例えば、CADデータは静的であるため、メカ機構とハーネスが連動した場合のハーネス長さの検討や引っ掛かりなどの確認はできない。また、剛性を考慮したモデリングではないので、正確な曲率の検証は無理である。また、ハーネスは曲面が主体のモデルになるので、描画の処理量が非常に大きくなるという問題がある。

これに対して、我々は、製品の3次元仮想モデル上で本物そっくりなハーネスの配線や不具合の発見ができるハーネス設計支援システムを開発した。このシステムでは、リアルタイムにハーネスの挙動をシミュレーションすることができ、干渉チェックなどの検証をインタラクティブに行える。このようなシステムを実現するため、シミュレーションでは、ポテンシャルエネルギーが最小となる曲線形状を求め、剛性を考慮したハーネス形状を高速に計算する。また、その3次元形状

を多角柱の多連結構造で構成し、ハーネスの変形をリアルタイムにシミュレーションする。

本報告では、ハーネスのリアルタイムシミュレーション技術と、それをベースにしたハーネス設計支援システム、および実際の適用結果と効果について述べる。

2. シミュレーション技術

2.1 モデリング

ハーネスの形状を求めるにあたって、構造解析を行う方法があるが^[3]、厳密解が得られる半面、計算結果を得るのに多大な時間を要する。ハーネスのような柔軟物の場合、時間をかけてまで高精度に計算する必要はなく、設計ツールとしては、むしろ、即座に結果を把握できる方法が望ましい。一方、高速な計算方法として、布などを簡易的にシミュレーションできるバネ・マスモデルがあるが^[4]、精度や計算の安定性が問題である。

これに対し、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方法がある^[5]。物理モデルの妥当性と高速で安定な計算の可能性から、この方法をハーネスシミュレーションに適用することにした。本システムでは、ハーネスを線状の曲線と仮定し、そのポテンシャルエネルギーを曲げとねじれの弾性エネルギーおよび重力による位置エネルギーの和とすると、ポテンシャルエネルギー U は次のように表される。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L R_f \kappa^2 ds + \frac{1}{2} \int_0^L R_t \omega^2 ds + \int_0^L D z ds$$

ここで、 s はハーネス曲線に沿った端点から距離、 κ 、 ω 、 z は距離 s の点における曲率、ねじり率、高さである(図1)。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、単位長さ当たりの線重量で、ハーネスの材料特性から決まる。また、 L は曲線長である。ハーネスの始点と終点の位置と方向、およびハーネスの長さを幾何学的な拘束条件として、制約付き最適化問題を解くことで、このエネルギーを最小にするハーネス曲線を求めることができる。

なお、このハーネス曲線の基底関数には、自由曲線を表現するベジエ曲線を用いている。近似した曲線を用いることで、最適化計算のパラメータ空間を絞り、計算量を減らしている。

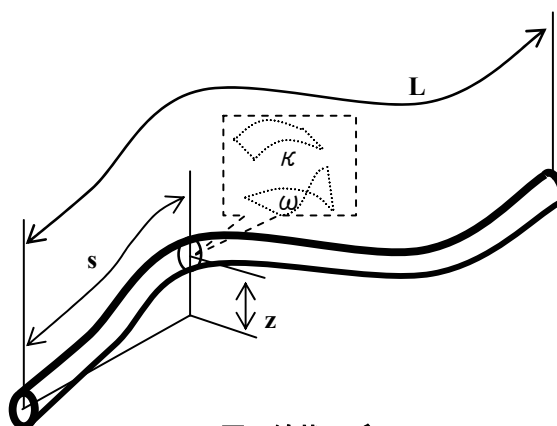


図1 線状モデル

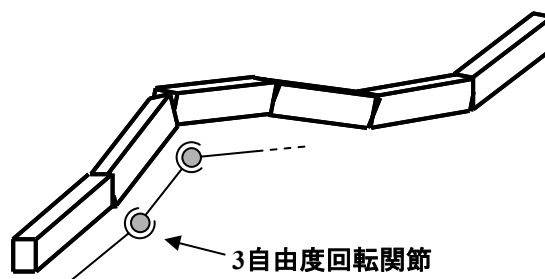


図2 ハーネスの3次元モデル

2.2 3次元モデル

線状モデルを3次的に表現するには、ハーネスの断面形状を曲線に沿ってスイープしていけばよいが、曲面で構成されるため描画処理が重くなってしまう。また、ハーネスが扉などの機構と連動する様子をシミュレーションするためには、ハーネスの3次元モデルを変形させる必要がある。そこで、図2に示すように、ハーネスを分割して、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、自由に変形することができる。

2.3 リアルタイムシミュレーション

製品全体の3次元モデル上でハーネスのシミュレーションを行うため、VPS (Virtual Product Simulator)^{[6],[7]}にハーネスのモデリング機能を組み込んだ。VPSとは、我々が開発したリアルタイム機構シミュレータで、3次元CADから部品の形状データと位置データを取り込み、それに関節やギヤなどの機構データを設定することで、本物そっくり動く仮想メカを構築するものである。この仮想メカの部品上にハーネスの始点と終点を

結合することで、部品の移動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。シミュレーションは以下の手順で行う。

- 1) マウス操作などによる部品の移動命令に対し、部品の位置姿勢を更新する。
- 2) 部品の新しい位置姿勢から、ハーネスの始点と終点の位置方向を計算する。
- 3) ハーネス曲線を計算する。
- 4) 新しいハーネス曲線に沿うように多角柱間の関節を動かし、多角柱の位置姿勢を更新する。

これらの処理は軽いので、マウスなどで部品を移動させながら、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3)。

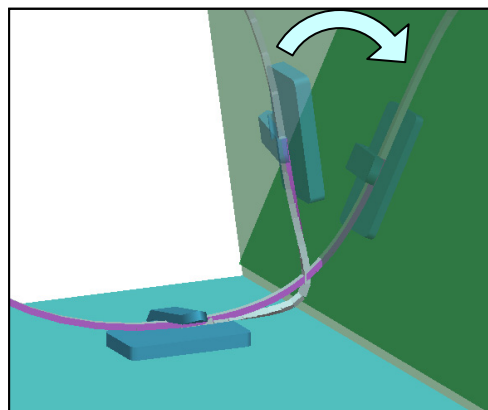


図3 機構とハーネスの連動

3. ハーネス設計支援システム

実用的なハーネス設計支援システムを構築するためには、実際のハーネス設計の勘所を押さえる必要がある。まず、ハーネスは図4に示すように途中で分岐したり、クランプで固定されたりしており、これらを容易に設定・変更できる必要がある。また、ハーネス配置の仕様としては、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となる。この章では、上記のシミュレーション技術をベースに、実用的な配置・検証機能を備えたハーネス設計支援システムについて述べる。

3.1 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渡って配線されている。このようなハーネスを効率よ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。

3.2 配置設計

仮想メカ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、両端により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つを用意した(図5)。

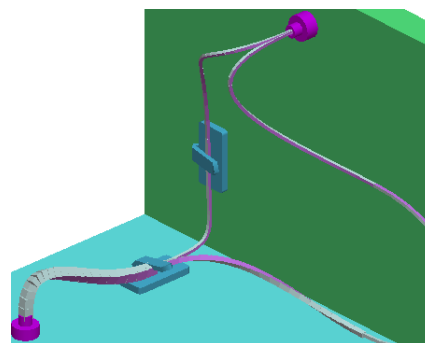
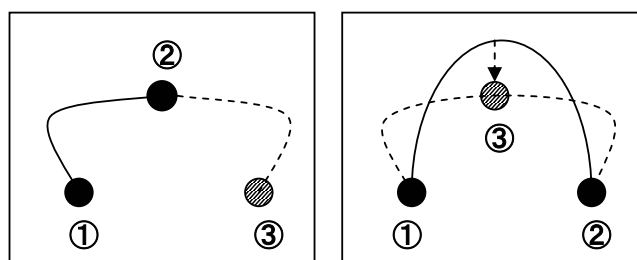


図4 ハーネスの分岐・結合



(a) 端から配置 (b) 全体から配置

図5 ハーネスの配置手順

(a) 端からハーネスを配置する方法

この方法では、最初の始点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。

(b) 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。

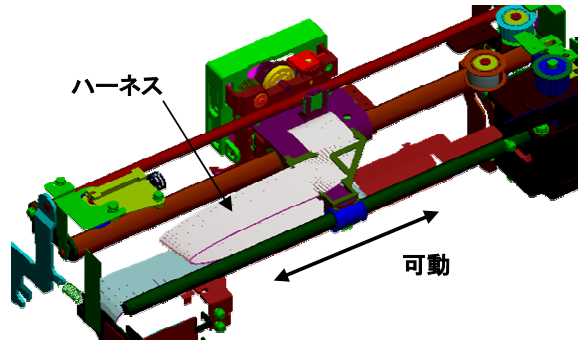


図6 ハーネスの長さの検証

3.3 長さの検証

図6に示すような可動部品に取り付けられたハーネスでは、可動部品の位置によってハーネスが届かない可能性がある。本システムでは、シミュレーションにおいて、ハーネスが届かないと判断された場合、シミュレーションを止めてアラームを上げている。一方、長過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。

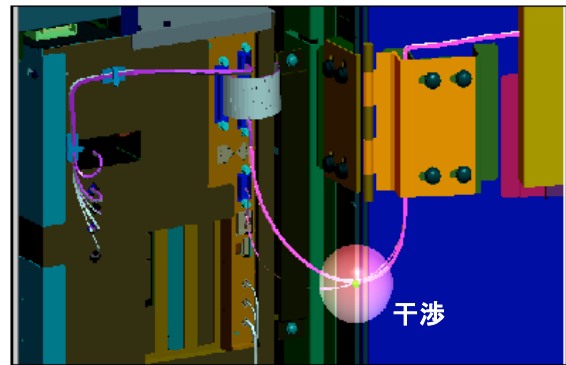


図7 ハーネスの干渉チェック

3.4 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^[8]、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(図7)。

3.5 最大曲率の確認

ハーネスは曲がり過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、本システムでもハーネス曲線を計算するときに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、曲がり過ぎた場合にアラームを上げることができる。

3.6 その他

これらの検証機能は、配置作業中も常に行い、ハーネスを配置すると同時に確認できるようにしている。また、ハーネス設計を統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、2次元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。

4. 適用例

本システムの試作結果について示す。まず、シミュレーション時間について計測した結果、CPU: Intel Xeon 2.7GHzのPCで、ハーネス曲線の計算時間は約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。また、剛性係数を変えてシミュレーションした結果、図8に示すように、硬いハーネスに対し、軟らかいハー

ネスでは重力によって大きくたわんでいるのが分かる。図9は、本システムを実際の光ファイバーの配置設計に適用した例である。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、本システムの社内適用の結果、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、無駄な試作を削減することができた。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、開発コストの削減に貢献できた。

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^[9]。

5. おわりに

設計が後回しにされがちであったハーネス設計に対して、3次元モデル上で早期に設計検証ができる環境を構築した。ハーネスの変形をリアルタイムにシミュレーションし、仮想的にハーネスを配置しながら干渉や曲率をインタラクティブに確認することができる。

現在、本システムは各種装置の設計・開発に適用されており、開発効率の改善に効果を得ている。

今後は、スナップフィット部品など、3次元的な部品の変形を扱うことができるシミュレーション方法を開発する予定である。

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)のものづくり推進本部先行生産技術開発部の関係者各位に感謝致します。

参考文献

- [1] http://www.ptc.com/solutions/routed_systems/index.htm
- [2] <http://www.ctc-g.co.jp/~embassy/>
- [3] Kurt A. Chipperfield and Judy M. Vacne, “Stiffness Testing of Hydraulic Hoses”, ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC/DAC-34067, 2002.
- [4] D.Baraff and A. Witkin. “Large Steps in Cloth Simulation”, Proc. SIGGRAPH98, pp.43-54, 1998.
- [5] H.Wakamatsu, S.Hirai, and K.Iwata, “Modeling of Linear Objects Considering Bend, Twist, and

Extensional Deformation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 433-438, 1995.

- [6] M.Hashima, Y.Senta, and Y.Sato, “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.
- [7] 千田, 橋間, 佐藤, 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, 109-1, pp.1-6, 2002
- [8] Y.Sato, M.Hirata, T.Maruyama, and Y.Arita, “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.
- [9] <http://salesgroup.fujitsu.com/plm/vps/>

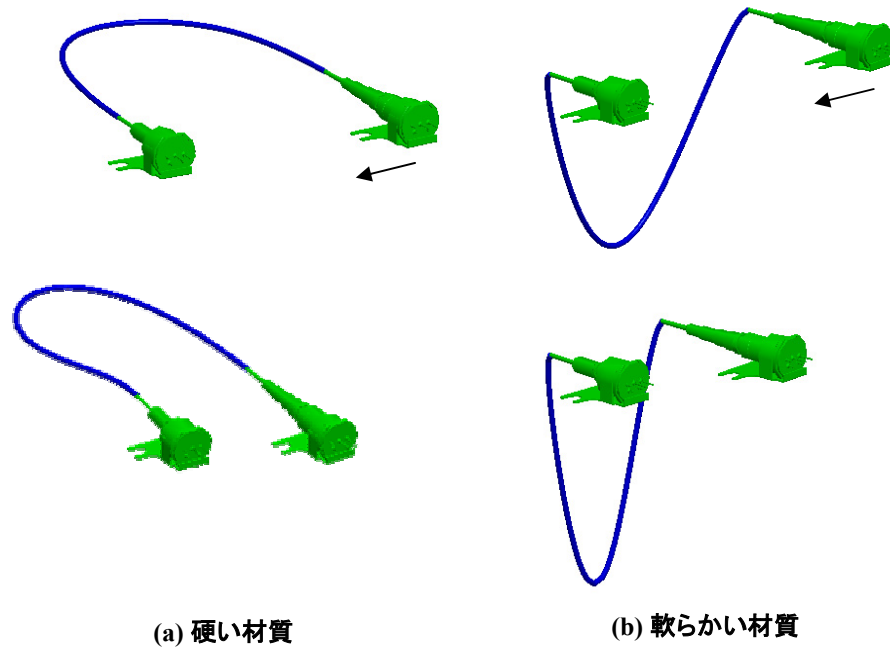


図8 ハーネスの剛性を変えた例

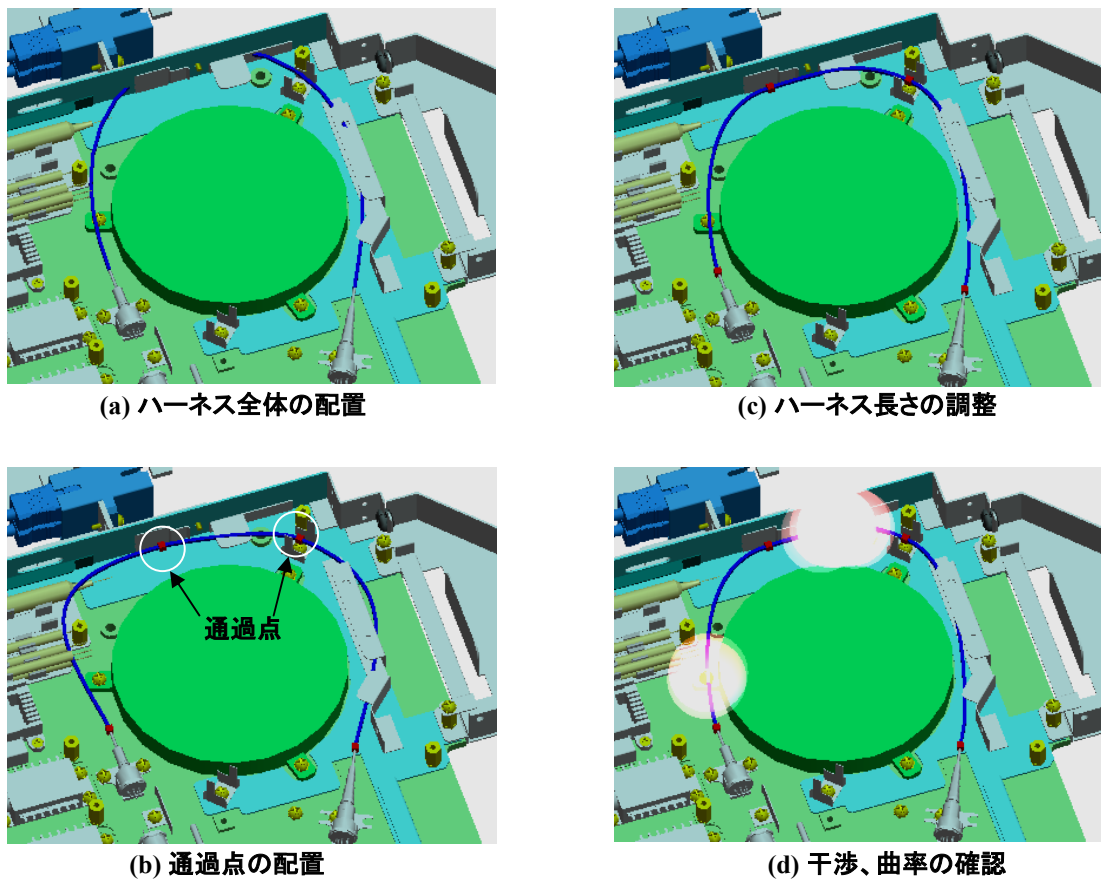


図9 ハーネスの配置設計の例