アセンブリモデルを用いた手機織機の表現*

佐 波 晶** 進 藤 幸 裕*** 北 嶋 克 寛†

Study on Representation of Assembly Models for the Hand Loom Machine

Sho SANAMI, Yukihiro SHINDOU and Katsuhiro KITAJIMA

The recent 3D-CAD has a performance to represent complicated mechanisms of a machine structure. On the other hand, it is still difficult to treat the object that is an indeterminate shape such as a string. We already proposed a method of representing the part as the combination of the shape and feature points. This framework is applicable to the indeterminate shape as a string. In this paper, we present the representation method of the hand loom machine by using the framework, and animations on the represented model can be made only by moving some parts.

Key words: assembly model, loom machine, constraint

1. 緒 言

戦後 60 年が経ち、手作業によって支えられた産業の多くは機械化されてきている。機械化は、低コスト化や大量生産という恩恵を世にもたらしたが、それと同時に職人の職を奪うことになり、口伝による技術が失われつつある。現在は、口伝による技術を記録するために、文章や図、ビデオを用いているが、人間の全身の動きから細やかな指先の動きまでを合わせて記録するには十分でなく、より表現力のある記録方法が期待されている¹⁾。

情報のデジタル化は、情報を劣化させないという点が注目され、保存手法として歴史的な芸術品や印刷物に適用されている。デジタル化された芸術品や印刷物は、保存場所や、保存状態の管理という点で、オリジナルに対して極めて低コストに運用することができる。そこで、このデジタル化された情報を用いた電子博物館が現実味を帯びてくる。電子博物館では、展示スペースの制限もなければ、展示品のメンテナンスの必要もなく、インターネットによる情報配信を用いれば、世界中どこからでも収蔵物に関する情報を得ることができる。しかし、絵画・彫刻・印刷物などの静的な対象は、画像や 3 次元形状データとして表現できるものの、動きを伴うような民俗的工芸品の多くを表現できるモデルが存在せず、保存の対象から外されているのが現状である。

本研究は、手機織機(てばたおりき。図 1。以降、単に機織機: はたおりきと呼ぶ)に注目して、その機械的構造を表現し、その構造を元に動作アニメーションの作成を行うことを目的とする。3 次元モデルを作成することで、閲覧者が自由な方向から注目したい箇所を見ることが可能になり、構造をも表現することで、動作する様子を観察することが可能になる。

機織機が全盛であった時代では、人手によって情報が伝達されていたので、伝達速度は遅く、経路は偏り、内容には誤りが含まれていた。その結果、実作業によって得られた機織機の知識がそのまま広まることはなく、機織機の特徴が地域によって異なる、という現象をもたらした。したがって、その構造自体も民俗学的に貴重な情報となっている。また、織り上げる織物

Fig.1 Toyoda wooden hand loom

Fig.2 The main mechanism

によっても少しずつ機構が変わっている²⁾ので、民俗学的な情報の記録という観点からは現存する機織機 1 台 1 台全てについて、デジタル化することが求められる。

機織機を再現するには、静的な形状の表現だけでなく、可動部品の動きに伴う状態の変化を表現することが重要である。そこで、部品形状と組立構造をアセンブリモデルによって表現しておき、入力となるいくつかの部品の状態から機織機の状態を求めるようにする。このような仕組みにすることで、すべての部品の時々刻々の状態を保持せずに、機織機の状態を矛盾なく再現することが可能になる。

一般に、剛体だけで構成される組立品であっても、すべての部品間の物理的な法則を厳密にシミュレーションことは複雑な問題となる。まして、機織機のように糸や紐で機構が表現される場合は、糸や紐同士、糸と土の張力による均衡までを計算しなければ

* 原稿受付 平成 19 年 4 月 18 日

** 正 会 員 大日本印刷株式会社 (東京都品川区西五反田 3-5-20)

*** キヤノン株式会社 (東京都大田区下丸子 3-30-2)

† 正 会 員 東京農工大学大学院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

ならず、きわめて複雑な問題となる。

糸や紐のように不定形で剛体へ置き換えできない部品を扱う場合、その部品形状を弾性体として物理シミュレーションを適用するか、厳密な形状再現を放棄し、簡略化した表現に置き換えるか、アプローチの選択を迫られる。

本研究では、後者のアプローチのひとつとして、糸や紐の形状とそれらによって拘束される特徴点を分離して扱うことでアセンブリモデルの枠組みで機織機を表現し、入力に対して動作する機織機を構築する手法を考案した。本研究のように、機織機の動的展示が目的である場合には、このような方法でも十分な効果が得られることを実験によって示す。

2. 関連する研究

個々の部品だけではなく、部品が組み込まれた製品（組立品）を扱うことができるアセンブリモデルは、コンピュータの進化とともに広く用いられるようになっていく。その利用法としては、組立順序の評価や機構の運動シミュレーションに用いられることが多い³⁾⁴⁾。アセンブリモデルおよびその応用に関する研究は、組立品を対象とした研究が始まった初期から継続して行われているが、これまでの研究では、対象物として現代の製品を念頭においていることから、すべての部品が剛体であることを前提としていることが多い。

早期の研究ではデータ表現に主眼が置かれており、Hillyardらによるデータ構造に基づく拘束問題を扱った研究⁵⁾などがある。この研究は、組立品に階層関係を導入したという点で大きな意味を持つが、どの構造にどのような情報を持たせるか、という具体的なデータ構造を示すことはできていなかった。

著者の一人は、早くからコンピュータによる組立品の表現に注目しており、部品同士の関係をグラフとして表す手法の研究⁶⁾や、階層的データ構造の提案⁷⁾を行った。また、組立品の構造から、組立品の各部品への拘束を方程式の形で抽出する手法を提案した⁸⁾。このように拘束条件を連立方程式の形で表現することで、問題によらず汎用的に扱うことが可能であることを示した。しかし、当時ではコンピュータの性能が低く、限られた条件の中での例示に留まっていた。

コンピュータの計算能力が向上し始めると、拘束問題を解くことが現実的になり、データ構造からいかに拘束問題を抽出するかに研究の注目が移っていく。拘束問題を方程式に置き換えることにより、静的な問題と動的な問題が同じ手法によって解決できることになり、DCM⁹⁾と呼ばれる拘束問題を一般的に解く汎用ソフトウェアが CAD システムのコアとして広く採用されることになる。

CAD システムは、操作によって変化する拘束に対し、インタラクティブに結果を提示することで設計作業の支援を実現する。このとき、数式に置き換えられない拘束問題は、逐次的に解くことになり、一般性が失われるので、DCM で扱える範囲は拘束を数式に置き換えられるような問題に絞られることになる。近代化された機械組立品の多くは、構成する部品のほぼすべてが剛体であるので、数式表現に適していると言える。一方、本研究で対象とするような産業革命前の民俗的な機械組立品では、紐に代表される不定形な部品が多く使われている。このような紐は、その形状が錘や摩擦などの物理的な力のバランスによって決まるので、厳密な数式表現に置き換えると物理シミュレーションを行うことに匹敵する複雑さになる。実際には、摩擦一つをとっても、接触する二つの部品の材質や表面の状態、かか

る力などが関係しており、紐同士の摩擦に至っては、厳密な表現自体が今なお実現されていないので、拘束問題として扱うことは現実的でない。紐の表現を追及せず、位相的な接続関係を中心に紐を表現する場合、アセンブリモデルを用いたリアルタイムな応答システムが実現できる。

著者らは機械組立品を表現するためのアセンブリモデルについて、部品間の関係の特徴点と呼ぶ点に対する拘束として表現することを提案した¹⁰⁾。このモデルにおいて、特徴点の定義が形状表現から独立とすれば、糸や紐のように形状が不定な部品もモデルに含めることができるようになる。また、紐は糸を縫ったものであるが、その性質の違いは形状に基づくものなので、形状表現から独立させることで糸と紐を同等に扱うことができる。そこで、名称として糸が使われているものを除き、糸と紐を合わせて紐と呼ぶ。本論文では、機織機における構造を元にして、アセンブリモデルにおける紐と紐による関係の表現手法を提案する。

3. アセンブリモデルの構造

組立品の状態は、組立品を構成する各部品の位置・姿勢などによって表現される。ある状態を表現する場合、ユーザがすべての部品の位置・姿勢・形状を矛盾無く与えることは現実的ではなく、コンピュータによるなんらかの支援が必要である。一般に、組立品を構成する各部品はそれぞれが独立に存在しているのではなく、目的の機能を発揮するために、他の部品と関係付けられて配置されている。この関係に、状態を制御する情報を付加することによって、組立品の状態を決めることができる。

機織機の状態を表現するには、各部品の位置・姿勢のほかに、剛体でない紐の形状を表現することが必要である。一方、機織機の状態を制御する情報は、人間が機織機を操作するときに行う部品の状態変化、例えば、足踏棒の角度の変化量などがそれにあたる。

本節では、アセンブリモデルを用いて、機織機の構造をどのように表現するかについて述べる。そのために、表現対象の構造と特徴的な機構およびその動作について述べ、機織機を表現するアセンブリモデルのデータ構造を提案する。

3.1 手機織機の構造と動作

機織機は、4つの機構の組み合わせによって機織動作を実現している。本論文では、もっとも単純な機織機であるそうこうが2つのものを対象とし（図2）、図中の用語¹¹⁾を用いる。

a. 経糸を張る機構

2本の巻取棒（緒巻棒と布巻棒）の回転によって経糸を張る。布巻は、緯糸が編みこまれた布を巻き取る。

b. 経糸を上下に分ける機構

張った経糸の間に緯糸を通すため、そうこうの通糸（本論文では糸の輪ではなく、金属の輪のもの）に経糸を通し、そうこうが上下することで経糸を二つに分ける。そうこうは足踏棒の上下に対応して上下する。

c. 上下に分けた経糸に緯糸を通す機構

シャトルの内部には糸巻が入っており、そこから糸を繰り出しつつ、シャトルを上下に分けた経糸の間に通すことで緯糸が張られる。

d. 布の織目を詰める機構

織目をならすために、シャトルで通した緯糸をおさで打ち込む。

Fig.3 The procedure of hand looming

Fig.4 A framework of assembly model

機織動作は、次の手順で行われる（図3）。

1. 初期状態
2. 経糸の間に緯糸を挿入する
3. 足踏棒を踏み、経糸の上下を入れ替える
4. 2,3.を繰り返す
5. おさで緯糸を詰める
6. 4, 5を繰り返す
7. 巻き取る

3.2 アセンブリモデルのデータ構造

筆者らはアセンブリモデルにおいて、部品形状と部品間の関係を定義する点（特徴点と呼ぶ）を分離することで、不定形な部品も統一的に扱うことができることを提案している⁷⁾。この枠組みを用いると、機織機の構造も表現することができる。本項では、アセンブリモデルのデータ構造について述べた後、機織機の特徴的な機構を構成している紐の表現方法への適用法を述べる。

3.2.1 基本データ構造

アセンブリモデルは、部品間の関係を表現すると同時に、複数の部品をひとまとめに扱うことで階層構造を表現できる。部品間の関係および階層構造は、特徴点に対して定義する。本研究でのアセンブリモデルは3つのクラスで表現する（図4）。

Fig.5 The representation of a string

Fig.6 A representation of the structure of the string of Fig.5

(1)Assembly（組立品）、Subassembly（部分組立品）、Part（部品）

各階層要素内の Feature、一つ下位の階層要素およびそれらの間の Relation を管理するリスト、および注目している階層要素から下位の階層要素の位置・姿勢を表す変換行列が格納される。また、Feature、Relation についての拘束条件も記述されている。

(2) Feature（特徴点）

2 者間の拘束（接続関係や寸法拘束など）が与えられる際の一方の形状特徴（軸や穴など）に依存して定められる座標系の位置・姿勢を表す変換行列が格納される。

(3) Relation（関係）

拘束関係をもつペアとなる 2 つの Feature 間の相対的な位置・姿勢を表す変換行列が格納される。

3.3 紐の表現

紐の不定形な性質を表現するため、紐は両端点および通過点によって定義する。通過点は部品の特徴点を用いて与える。通

Fig.7 Treadles and a head roller

Fig.8 Feature points with clockwise and counterclockwise

Fig.9 Strings generated by specifying a route

過点には順番が存在するので、端点から通過する順番にリストとして表現する(図5)。このリストは、紐部品における Feature の並び(図6内 fp1~fp4)であり、それぞれの Feature は通過点の部品の Feature (A.fp1, B.fp1, B.fp2, C.fp1) と同一点 (POINT) 関係として表現される(図6)。

3.3.1 紐の経路指定

紐は柔軟に変形するので、剛体との接点も状態によって変化する。そうこう棒を回り、足踏棒をつなぐ紐を考えると(図7)、紐の長さや足踏棒の角度、そうこう棒の太さなどによって、紐とそうこう棒の接点に変化する。この接点は紐の端点とそうこう棒の大きさ・位置・姿勢から自動的に計算する。

平面において、円外の1点から円へは2本の接線が存在する。したがって、そうこう棒に紐をかける場合、そうこう棒に対してどちらから紐が回り込むかを情報として保持する必要がある。このことを考慮し、円柱形状に紐をかける場合の特徴点(位置・姿勢を持つ)として、接点を軸に対して時計回りに設定する特徴点と反時計回りに設定する特徴点の二つを用意する(図8)。紐が通過する特徴点にどちらを関係付けるかによって回り込みの結果が変化する。このように紐の経路を与えることで、機械織機を構成する紐の表現(図9)が可能になる。

3.3.2 仮想紐

そうこうは、上下から紐で引かれた状態になっており(図10)、そうこうは紐と一体となって動くようになっている。この構造は、機能を考慮すると、一本の紐にそうこうが付着していると考えた方が扱いやすい。このような置き換えを容易にするため、紐と同じ性質を持つが、表示されない紐として、仮想的な紐を導入する。

仮想紐の導入により、図10のアセンブリは上下端を結ぶ仮想紐にそうこうが貼り付いているものと考えることができる。この場合、上下端の特徴点を確定すると仮想紐の状態が決定でき

Fig.10 A component of a harness

Fig.11 Structure of a component of a harness

る。その結果、仮想紐の長さを計算することにより、そうこうの適切な位置が求められる。

3.3.3 紐上の特徴点指定

紐の上に部品を配置するためには、紐の上に特徴点を配置する必要がある。この場合、紐のある点を基準に部品が紐の上に乗るように配置することが目的であり、紐の端点から距離一定の点として表される。従って、紐の上に部品を配置するには、3.3.1 および 3.3.2 によって紐の通過点および位置を決定し、その後に距離一定の点を計算する。この手順によって、仮想紐上に設定した特徴点に対し、上下3本ずつの紐とそうこうを付着させる(図11)。

3.3.4 紐の巻き取り

経糸系は両端が巻取棒によって巻き取られた状態となっている。編み上がった布は経糸に緯糸を編み込んでいるので、布を巻き取っていくと緯糸が増え、結果、計算量の増大につながる。これを避けるため、巻取棒に巻き取り量をパラメータとして保持し、経糸の長さを計算する場合には、このパラメータを加算する。これによって、布の織りこみから巻上げまでを統一的に表現することができる。

4 アセンブリモデルに基づくアニメーションの作成

組立品の状態は、その構成部品の位置・姿勢・形状として表現されるので、アニメーションにおける各フレームの作成には、その時刻における位置・姿勢・形状を決める必要がある。ユーザが、これらすべての値を矛盾なく与えることは困難だが、アセンブリモデル内に記述された部品間の関係を用いると、いくつかの部品の位置・姿勢・形状を与えるだけで、他の部品の位置・姿勢・形状を導きだすことができる。

アセンブリモデル内に記述された紐を、形状としてどのように表現するか、また、紐による動作伝達をどのように表現するかは大きな問題である。本論文では、紐の形状は特徴点へ影響を与えなく、また、張力のパラメータも持たないので、端点および通過点を常に直線で結ぶ形状として扱う。紐による動作の伝達では、動力学計算を行わないので幾何的に位置計算を行う。

Fig.12 Algorithm of state decision of parts

本論文では、いくつかの部品の位置、姿勢、形状およびアセンブリモデル内の情報からすべての部品の位置・姿勢・形状を得るための解法として、逐次的に決定していく手法を用いる。本章では、動作を与えた部品から、他の部品の状態を順番に決定していく手順について述べる。

4.1 動作源部品からの状態決定手順

機織機の動作は、いくつかの剛体部品の位置・姿勢の変化として表現する。実際の機織動作における人間の操作に対応して、どの部品を動かすかが決まる。動作を表すために部品の位置・姿勢を変化させることを部品に対する動作の入力と呼ぶ。組立品に対して動作を入力した部品を動作源部品 (motion source part) と呼ぶ。

組立品は初期状態として、すべての部品が矛盾無い状態に配置されている。この状態から、動作の入力に応じて部品の位置・姿勢・形状を変化させていくことで、次の状態を得る (図 12)。剛体部品と紐部品は、動作に対して位置・姿勢・形状の決定方法が異なるので、別の手順によって処理する。

4.2 動作の入力の生成

機織機のアニメーションを作成する上で、どのような動作かに応じて、動作を入力する部品とその動きが決まる。機織動作では、入力には次の3つの動作である。

a. 足踏棒の角度変化

二本の足踏棒を交互に押し下げる。一定の速度で足踏棒を回転させる。

b. 経糸の巻取棒の回転量変化

巻取棒を一定の速度で回転させる。

c. 緯糸の挿入動作

経糸の経路特徴点に緯糸との交点を追加する。

4.3 入力に対応する剛体部品の動作

剛体部品に対して動作が入力された場合、位置または姿勢が変化する。剛体部品が動作源部品であるなら、位置または姿勢

Fig.13 Motion of a part (fix position and free rotation)

Fig.14 Relation between a roll up parameter and rotation of a part

の変化を直接指定することになる。そうでない場合、動作は接続している部品から与えられるが、機織機では剛体部品同士によって動作が伝達する箇所がないので、本論文では紐部品からの入力に対する動作に限定して 4.4 で述べる。

4.4 紐部品を介した動作の伝達

紐部品の一方の端点を移動させると、もう一方の端点が引き寄せられる。この端点の動作、すなわち特徴点の動作が接続している部品に対する入力となる。この入力と、接続している部品の拘束状態により、動作を決定する。紐はたるみのように形状変化するが、この状態は扱わない。

4.4.1 位置が自由な剛体部品に接続している場合

現実では、一般に重心回りのモーメントが発生するが、動力学計算を行わないので、部品の姿勢を変えずに特徴点の移動の方向へ全体を並進移動させる。部品の原点を T_i とし、特徴点の移動ベクトルを V とすると、部品の移動後の原点位置 T_i' は次式で得られる。

$$T_i' = T_i + V \quad (1)$$

4.4.2 位置が固定で回転する剛体部品に接続している場合 (円筒形状における巻取りを除く)

部品 A と部品 B が紐で接続している場合 (図 13) に、部品 A が下方へ動くことによる部品 B の姿勢の変化は、部品 A に接続している特徴点 fa の新しい位置 fa' と特徴点 fb' と部品 B の回転中心 rb から作られる三角形について次式が成り立つ。

$$L \sin \theta_a = M \sin \theta_b \quad (2)$$

$$L \cos \theta_a + M \cos \theta_b = D \quad (3)$$

この式を解くことによって部品 B の回転量を求めるが、これは 2 円の交点を意味しており、2 つの解が存在する。アニメーション作成においては、フレーム間の違いが少ないので、部品 B の回転量が少なくなる方の解を用いる。

4.4.3 円筒形状の剛体部品に紐が巻きつく場合

機織機において特徴的な機構として、糸の巻きつきがある。これは、3.3.4 の紐の巻き取りに対応し、巻き取り量 D に応じ

Fig.15 An assembly tree of a loom machine

Fig.16 An image of a loom machine

で半径 r の円筒形状の回転量 θ が次式で決定される (図 14) .

$$\theta = D / r \quad (4)$$

5. 実行結果

前章までに述べた理論に基づいてコンピュータ内に機織機を構築した結果を示す. 機織機のアニメーション動作は次の4つになる.

1. 足踏棒を踏むことによってそうこうを上下させ, それに伴いそうこうを通る経糸を上下に分ける.
2. 緯糸を上下に分かれた経糸の間に挿入する.

a) Animation of harnesses

b) Animation of narrowing the space

c) Animation of rolling up

Fig.17 Animations of a hand loom machine

3. おさを使って、経糸と緯糸の隙間を減らす。
4. 手前にある布巻棒を回転させることで、経糸と経糸に絡み合う緯糸を布巻棒に同時に巻き取る。

これらの動作を前提とし、機織機のアセンブリツリーは、機織機を大きく外枠、経糸系、そうこう制御系の3つのサブアセンブリとして構成した(図15)。この3つのサブアセンブリを組み合わせて機織機を作成した(図16)。経糸が通糸を通して上下に分かれ、巻取棒へと回り込んでいる状態が表現できている。4つの動作のうち、シャトルの動きを除く1,3,4のアニメーションの様子を作成した(図17 a-c)。

6. 結 言

機織機を対象として、組立構造を表現するモデルおよび、その動作の決定方法を提案・実装した。全部品とその関係を入力して、組立構造をコンピュータ内に構築することができた。紐は、両端点および通過点によって代表し、形状が一定でない部品が扱えることを確認した。その拡張として、形状を持たない仮想紐を導入した。その結果、厳密に拘束を設定することが難しいそうこうや経糸の設置が容易に実現できた。

与えた入力と構築した組立構造から組立品全体の状態を計算することができた。部品間に対応した計算方法を選択し、動力を入力した部品から順次状態を決定することで全部品の状態を計算できることを示した。

これらの成果から、組立構造物としての機織機の表現が実現された。今後の課題としては、動的展示を目標とした見易さの検討や、民俗学的な要求に対応した操作者の動きまで含めた再現などが考えられる。将来的には、機織機の歴史に欠かせない紋織機械のジャカードや、より原始的な組紐台の表現が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 宮本八恵子：実測図からの展開－民具の情報を表現するための作図の手法－，民具マンスリー，**38**, 4 (2005) 1.
- 2) 東京農工大学工学部附属繊維博物館：第65回繊維博物館特別展－いま甦る手織機の世界，(2005).
- 3) H. Tokunaga: An assembly modeling using kinematic constraint representation in configuration space, Japan/USA Symposium on Flexible Automation, **2** (1996) 761.
- 4) J. Wang, K. Ohkura, U. Kanji: Automatic Generation of Assembly Sequences by Using CPR Graph, Japan/USA Symposium on Flexible Automation, **2** (1996) 795.
- 5) R. C. Hillyard and I. C. Braid: Characterizing non-ideal shapes in terms of dimensions and tolerances, Computer Graphics, **12**, 3 (1978) 234.
- 6) 吉川弘之，北嶋克寛：機械の構造規則，精密機械，**45**, 9 (1979) 1099.
- 7) 北嶋克寛，吉川弘之：階層的ネットワークモデルに基づく対話型機械設計システム HIMADES-1 の開発，精密機械，**47**, 12 (1981) 1490.
- 8) 北嶋克寛，吉川弘之：機械のネットワークモデルに基づく運動及び寸法に関する統一的規則の研究，精密機械，**48**, 6 (1982) 764.
- 9) D-Cubed: Dimensional Constraint Manager
- 10) 佐波晶，北嶋克寛：アセンブリモデルにおける統一的パラメトリックスの一手法，日本設計工学会誌，**37**, 3 (2002) 37.
- 11) 中西信弥：西陣織屋ことば辞典，ウインかもがわ，(2005).