

仮想空間における機械部品の組立て可能性と 可視化による機構の検証システム

田 中 和 明[†] 和 田 敦[†] 鄭 降 宇[†]
安 部 憲 広[†] 何 守 杰^{††} 滝 寛 和^{†††}

近年、機械部品設計はCAD化され、さらにその切削加工も計算機システム化されつつある。しかし、製作された機械部品の組立てが可能であり、かつ全体として正しく機能するかを可視化し、検証する計算機システムは存在していない。本稿では仮想空間上で機械部品の組立て可能性および機能テストを支援する計算機システムの実現手法について述べる。現状では設計した機械部品を試作し、実際に組み立てることにより機能検証が行われるが、本システムはこの作業を仮想空間上に置き換えることを基本としている。具体的に適用する技術としては、物体モデルの衝突、モデル結合、結合関係に基づく運動の伝達機構、およびこれらの過程を可視化する表現技法等がある。

A System for Verifying Assemblability of Machine Parts and Visualizing Machinery of Assembly Using Virtual Reality Environment

KAZUAKI TANAKA,[†] ATSUSHI WADA,[†] JIANG YU ZHENG,[†]
NORIHIRO ABE,[†] SHOUJIE HE^{††} and HIROKAZU TAKI^{†††}

In addition to the CAD for the design of mechanical parts, computer application has been extended to the machining of the mechanical parts in recent years. However, it still remains challenging to come up with a computer system which visualizes the process of verifying the assembly possibility and the functionality of a complete assembly. This paper presents a method for building a computer system, which verifies the assembly possibility and the functionality by using virtual reality technologies. The steps include the generation of the designed mechanical parts, the assembly of the parts, and the verification of the functionalities. The key technologies include the detection of the collision, the representation of the assembly relations among object models, the inference of the mechanism of motion transmission involved, and the techniques for the visualization of these processes.

1. はじめに

商品の企画から設計・生産へと至るサイクルをいかに短縮するかは、企業が消費者の多様なニーズに迅速に応え、生き残るための1つの大きな鍵となっている。このような設計・生産工程を効率化するため、

CAD/CAMのように計算機を利用した設計・生産支援システムを導入し、設計時間の短縮・設計作業の原価低減・製品品質の向上などの効果をあげる企業が多い。しかし、設計された機械部品が実際に組立て可能であり、かつ組み立てられた部品が全体として正しく機能するかを簡単に検証できる計算機システムは存在していない。もちろん、機構検査プログラムは存在するが、部品等の制約を特別な形式で正確に書くのが困難であり、設計・生産・組立て・機構検査を一貫して取り扱えなくなっている。

現在のところ、切削加工した部品またはそのクレイモデルを作成し、実際に組み立て、機能検査を行い、その結果に基づいて設計仕様変更を行うのが実状である。開発期間の短縮や開発コストの削減を考えるうえでは、これまで行われていた試作や実験の回数をなる

[†] 九州工業大学情報工学部機械システム工学科
Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

^{††} 九州工業大学情報工学部電子情報工学科
Department of Computer Science & Electronics, Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

^{†††} 三菱電機株式会社先端技術総合研究所
Mitsubishi Electric Inc.

べく減らす必要があり、これらの作業を計算機上で行えるシステムが要求されている。

他方、実世界における現象をシミュレートし、結果を分かりやすく表現するうえで、CG はきわめて有効なユーザインタフェースであるといわれる。一般にシミュレーションは数式と数値で行われるが、結果や過程を直観的に理解することは難しい。そのため、CG を用いて結果を表示することが頻繁に行われるようになった。CG により生成した仮想空間上で、設計された機械部品を組み立て、稼働させれば、結果を可視化できるため、ユーザに問題点を直接提示することができる。また、仮想空間上に配置する部品モデルの形状データは、近年の三次元 CAD の普及により容易に獲得することができる。

本研究では、仮想空間において機械部品の組立て可能性および機能テストを支援する計算機システムを製作した。具体的に適用する技術としては、物体モデルの衝突検出、モデルの結合、結合関係に基づく運動の伝搬機構、運動軌跡または運動により掃引される三次元領域と物体モデルとの衝突検出、およびこれらの過程を可視化する表現技法等がある。

ところで、従来研究として、適切に組立て配置された機械部品の定性的振舞いや動的振舞いを解析するシステムが報告されている^{1),2)}。しかし機械部品を組み立て、組立ての不具合を発見したり、組立てによって生じる接続関係や衝突を発見し、また動作にともなう生じる部品間の接続関係の生成や消滅等を考慮して、機械部品の運動学的機能解析を行った研究は本研究以外には存在しない。言語指令から組立ての終了状態を推測するシステム³⁾が存在するが、言語辞書や構文規則の準備が面倒であり、問題がある。teaching by showing により、人間の組立て過程をコンピュータビジョンに観測させ、組立ての学習を行わせる研究もある^{4),5)}。しかし物体形状と手の動作認識を視覚のみで行うのはきわめて困難であり、学習対象は積み木等の簡単な物体のピックアップ・プレースや単純な挿入動作に限定されている。本研究は、この teaching by showing を仮想空間において実行するという点では同じだが、組立て対象の運動推論が部品の接続関係と、仮想空間内での動作模擬結果とを必要とすることを明らかにした点が従来研究とは異なっている。

2. システムのデータ構造

本システムは Inventor⁷⁾ で記述されているが、そのデータ構造は、グラフィックスを司る部分と、部品間の接続関係を記述する部分から成る。前者は、頂点、

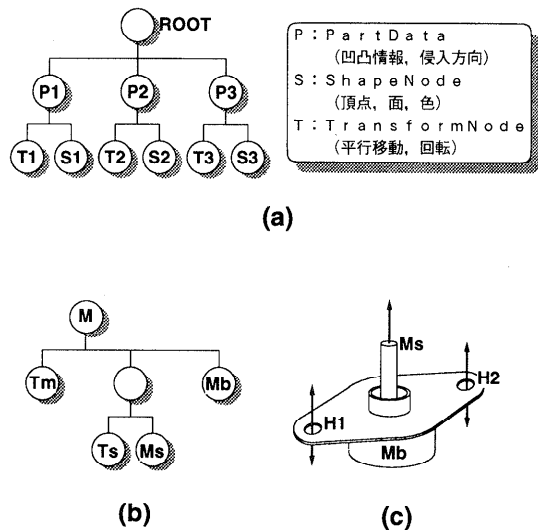


図1 グラフィックスデータ

Fig.1 Graphics data.

面、面の法線、色、また、translation, rotation, scale 等のモデルの変移量など、機械部品をサーフェスモデルとして可視化するために必要なデータと、モデルの機械要素となりうる部分の座標、また、その部分が他の部品と接続される場合の可能な侵入方向など、機械部品としてモデルを表現するために必要なデータが、図1のように木構造のデータとして登録されている⁷⁾。図1(a)に示す木構造は、構造の上位オブジェクトは下位オブジェクトを支配し、同一階層内のオブジェクトでは左方ほど右方を支配する力が強いという規約を持っている。したがって、図1(a)は3つの部品 P1, P2, P3 があり、各 T_i に並進移動、回転、スケールを与えることにより、各部品を構成する面 S_i の位置・姿勢・サイズが決定される。これに対して、図1(b)の木構造は、モータ M がシャフト Ms とそれ以外の部分(本体) Mb から成り、 T_m に値を与えるとモータ全体が影響を受けるのに対し、 T_s に回転量を与えるとシャフトだけが回転することを表現している。もし(a)の T_1 と T_2 に同じ並進量を与える仕組み(後述 3.5.1 項)を加えると、両者を同時に移動させることが可能となる。また T_1 に与える量と T_2 に与える量の関係式を与えておけば、片方に与えられる量に応じて、もう一方に関係式から求めた量が自動的に与えられるため、様々な運動の伝搬が可能となる。図1(a)の凹凸情報は、図1(c)に示すモータのシャフト Ms が図のように凸形状であり、組立て方向を示す補助線が矢印の向きに与えられていることを意味する。一方、 H_1, H_2 は穴すなわち凹形状であり、補助線は図のよ

接続関係は以下のデータを有する構造体のリストで表現する

- ・対象部品と接続した従属部品の番号
- ・対象部品と従属部品の接続関係
- ・対象部品の接続場所
- ・従属部品の接続場所

図2 接続関係を示すデータ

Fig. 2 Data representing joint relation.

うに与えられている。これらはグラフィックスを表示する際に使用されると同時に、組立て可能性判定時の任意の部品間の干渉判定、組付け終了ごとの接続関係の類推等にも使用される。後者は、部品どうしの接続関係を図2のような双方向リストによって表現するものであり、組立て時における部品の拘束状態からの可能な移動形態の類推、動作時における固定、拘束、伝達の類推等にも使用される。

3. 組立て可能性テスト

設計変更が自由に行えるシステムにおいては、生成時に組立て可能であったものが、変更後に組立て不可能となることは十分起こりうることであり、作成されたデータが組立て物として無意味になっていないこと、すなわち組立て可能性の条件を満足しているかを確認する必要がある⁹⁾。冒頭で触れたように本システムでは、組立て可能性判定を仮想空間上で実際に部品モデルを組み立てることにより検証する。

部品どうしを接続させるにあたり、部品の任意の箇所の組合せから発生する機能は本来無数にあると考えられる。しかし、機械部品として設計されたからには、設計者の意図しない部分を接続の対象としても無意味であり、部品の接続箇所を選択する際の任意性をシステムが完備しておく必要はないと考えてよい。したがって、本システムに登録される部品のデータには、設計者が意図し、接続することによって組立て物として意味をなす部分の場所や性質があらかじめ記述されており、このデータをもとに組立て作業を行う。

3.1 組立ての手順

本システムでは仮想空間上に配置した機械部品の選択を、スクリーン上に表示されたマウスカーソルによって行う。選択した機械部品に複数の組立て要素が存在する場合には、各々の場所から複数の補助線が表示される。今、図3(a)において、部品1を部品3の右側の穴に挿入したいとしよう。移動対象部品として部品1を選択すると、部品1に定義されている補助線がすべて（この場合は1本）表示される。次に、相手

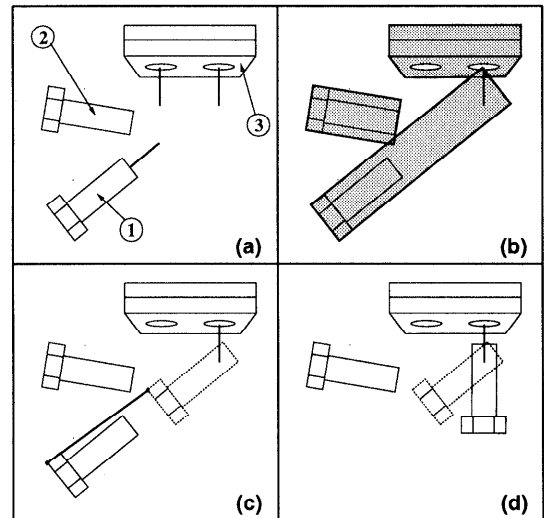


図3 移動経路の衝突検出

Fig. 3 Collision detection on a moving path.

となる静止部品3を選択すると、補助線は2本表示されるので、マウスで右側を指定する。図4に、組立ての基本的な流れを図示する。組み合わせる部品が決まると、移動部品の並進移動が行われるが、詳細は3.3節で示す。

ここで、部品の組立て方法について述べておく。通常、ネジ等の挿入には、並進回転運動が必要であるが、機械の組立て説明図(Technical Illustration)では、並進運動のみで移動経路を表現するのが一般的である。そこで本システムもこの方法を採用する。部品の表面、突起部、穴等に補助線を設定したのは、この並進移動の方向を表現するためである。歯車やウォームのかみ合せのように回転を必要とする場合は、特殊キーを入力し、システムに回転中心の設定をするように伝達しなくてはならない。

3.2 干渉判定

3.2.1 面と線分の交差

組立て時における移動経路の衝突検出、移動部品の停止位置の算出、機構の動作時における部品どうしの干渉判定など、本システムにおいては、面と線分の交差を検出することがすべての操作の基本となる。図5において、三角形の面と線分が交差する条件を以下に示す。

- ・交点 Q が存在し、かつ $\overrightarrow{QP_1} \cdot \overrightarrow{QP_2} \leq 0$ 。
- ・ $\overrightarrow{P_1Q}$ は $\overrightarrow{P_1P_2}$, $\overrightarrow{P_1P_3}$ を用いて $\overrightarrow{P_1Q} = \alpha \overrightarrow{P_1P_2} + \beta \overrightarrow{P_1P_3}$ と表せるが、このとき $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, $\alpha + \beta \leq 1$ を満たす。

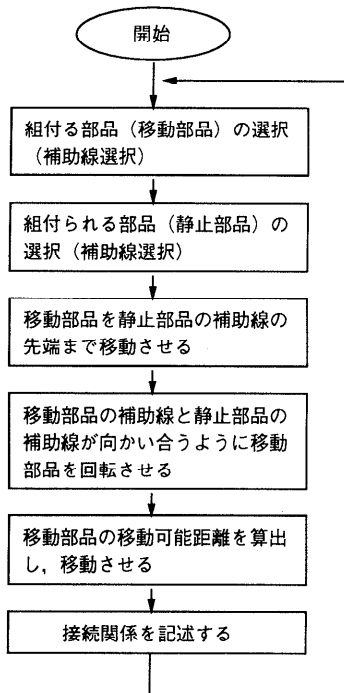


図4 組立ての流れ
Fig. 4 A flow of assembly.

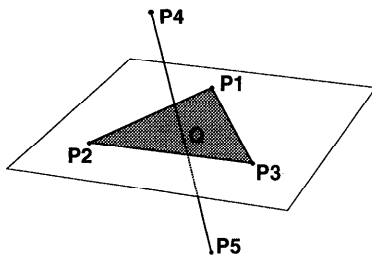


図5 三角形の面と線分の交差
Fig. 5 Intersection between a triangle and a line.

3.2.2 オブジェクトどうしの干渉判定

仮想空間上に配置する機械部品はすべて三角形パッチで構成されている。また、本システムで使用するバウンディングボックス（境界箱）は従来のものと異なり、すべて三角形パッチで生成された直方体である。このようなオブジェクト間での干渉判定は、各々の三角面を1枚ずつ取り出し、これらの三角面が交差しているかを調べることにより行う（図6参照）。三角面の交差は一方の三角面を3つの線分に分解し、得られた線分ともう一方の三角面との交差を調べることにより判定する。

3.3 移動経路の衝突検査

3.3.1 移動部品の取扱い、考え方

図3(a)の部品1のように組付け部品（移動部品）

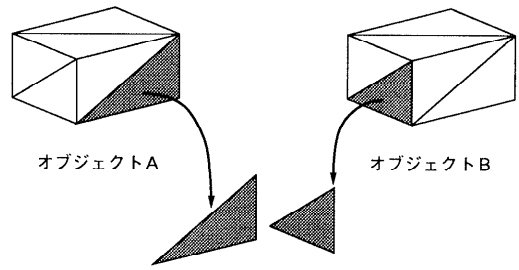


図6 オブジェクトの構造
Fig. 6 A structure of an object.

として選択された機械部品は、まず図3(b)の部品3のような組み付けられる部品（静止部品）の補助線の先端位置を目指して移動する。その際、移動経路上に障害物がないことを確認するために、移動部品と他の部品間での衝突検査をする必要がある。移動部品との衝突検査にはいくつかの方法が考えられるが、前節で述べた面と線分による干渉判定を用いる場合、移動部品を微小距離移動させるごとに干渉判定をしていたのでは大変な時間を要することになる。そこで本システムでは部品の移動経路が直線的であることから、移動部品を移動経路に沿って掃引して得られる物体として扱い、1度の干渉判定で移動経路上の衝突検査を行う。現在多くのシステムには衝突検出機能があるが、文献2)にも述べられているように、衝突するはずだが、移動物体の1回の移動量が大きいと相手物体を通り過ぎてしまし、小さすぎると衝突までに何度も衝突検出が必要になり、衝突面や点の発見に膨大な時間が必要になる。本システムの組立て操作の多くが直線に沿ったものであるので、上記の方法を用いている。

3.3.2 境界箱（バウンディングボックス）

部品どうしの干渉判定は、各々の部品を構成する面のすべての組合せについて交差判定をする必要がある。そのため部品どうしが十分離れている場合に、始めからこの方法を適用してしまうと多大な計算時間を要することになる。一般的には、精密な干渉判定を行う前に境界箱を用いたラフチェックを試みることによって判定を効率化する⁷⁾。

しかし、通常用いられる境界箱はワールド座標系のX, Y, Z軸に沿う形で生成されるため、部品に任意の回転が加わっている場合には余分な空間を含んでしまい、部品どうしが十分に離れている状態であるにもかかわらず境界箱の干渉を検出してしまう可能性がある。そこで、本システムで使用する境界箱はなるべく体積が小さくなる方法で生成した。

機械部品モデルは形状が幾何学的であるため、通常、外接直方体の体積が最小となるのは部品に回転がまっ

たく加わっていない状態の場合である。境界箱を生成するには、まず対象部品をいったん回転の加わっていない状態にし、その時点で対象部品を形成する頂点の座標の最大値、最小値を算出する。それを基にサーフェスモデルとして境界箱を生成し、対象部品のもとの回転を加える。

境界箱による移動経路の大まかな衝突検査は、図3(b)のように移動経路に沿って引き延ばされた移動部品の境界箱に対してすべての部品の境界箱との干渉を判定することにより行う。

3.3.3 詳細な衝突検査

境界箱による移動経路の衝突検査の結果、移動経路上に障害物があると判定された場合は、図3(c)のように面と線分の交差を判定することによって精密な衝突検査を行う。交差判定は、移動部品の移動前、移動後の頂点の座標を結ぶことによって得られる線分と、図3の部品2のように境界箱の干渉判定によって障害物と判定された部品の面との間で行う。交差が検出された場合は移動経路上に障害物があることを検出したことになる。静止部品の補助線の先端までの移動経路上に障害物が存在する場合、障害物の色を赤く塗り変えて表示し、部品の移動は行わない。移動経路上に障害物がない場合、移動部品は図3(d)のように静止部品の補助線の先端まで移動し、互いの部品の補助線が一致するように回転する。障害部品検出時には、別の位置に移動させる部品として、障害部品、移動部品、静止部品のいずれかをメニューから選択し、マウスで目的地に移動させた後、処理を続行させる。

3.4 部品の停止位置の決定

移動部品が静止部品の補助線の先端まで移動、回転した後も、停止位置までの移動経路上の衝突検査を行い、組み付けられる部品以外の障害物が存在するかを調べる。しかし、この場合は障害物が存在しなくても図3(d)における部品1, 3のように、静止部品との間に必ず衝突が発生する。したがって、そこまでの移動可能な距離を求め、移動部品の最終的な位置を決定する。移動可能な距離は次のようにして求める(図7参照)。

- 移動部品を形成する頂点の1つの点aを通り方向ベクトル $\vec{n}$ に平行な線分 aa' を得る。
- 交点bを求め、線分abの長さを求める。

以上の処理を移動部品を形成するすべての頂点について行い、最も短い線分の長さを移動可能距離とする。

3.5 接続関係の記述

機械部品の組立て作業や組み立てた機械の稼働シミュレーションを実現するため、本システムでは組立

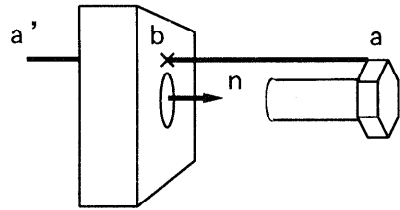


図7 部品の停止位置の決定

Fig. 7 A way determining the stopping position of a part.

表1 接続関係

Table 1 Joint relation.

形状A	形状B	接続関係
cylinder	hole	cylindrical-pair
screw	hole	cylindrical-pair
screw	tapped-hole	screw-pair
cylinder	groove	slider-pair
worm	worm-wheel	worm-gear

て作業が1段階行われるごとに、部品どうしの接続関係を2章で述べた双方向リストに記述する。部品間の接続関係に注目する理由は、形状の持つ機能はそれ単体では存在しえず、特定の形状が特定の形状と特定の関係で接続されたときに発生すると考えるからである。表1に特定の形状どうしが接続されたときに発生する接続関係の例を示す。一般に、機構において、2つの物体が互いに接触して一方が他方に対してある運動を行うとき、その組合せは対偶(pair)と呼ばれる⁸⁾。表1には接続した際に対偶をなすものだけを示す。cylindrical-pairは軸回りの回転運動と軸方向の並進運動の両方が可能であるとし、はめあいはすべて適度なすきまばめ(たとえば円柱と丸穴に対して穴の直径>円柱の直径、が成り立つ)と仮定している。screw-pairは、前述のように、軸方向の並進運動と軸回りの回転運動が可能であるが、回転角と並進量の間一定の比例関係があるため、運動は並進量のみで表される。slider-pairは溝(groove)の形状に依存した溝方向の運動が可能である。

3.5.1 グラフィックス上での接続表現

いったん接続された部品は以降の組立て作業の際に、いずれかの部品が移動部品として選ばれる場合がある。この場合、選ばれた部品に接続している残りの部品も同時に移動しなければならない。そこで、1つの接続が完了した後、接続関係の記述とは別に、図8に示すように、グラフィックスのデータ構造も変更しておく。接続関係の情報より同時に移動する部品を把握するこ

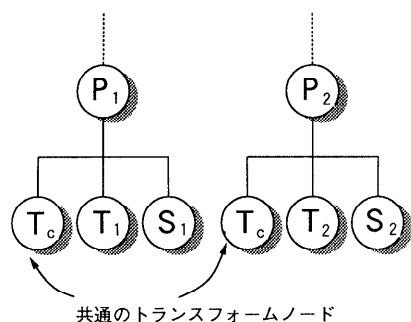


図8 グラフィックス上での接続表現

Fig. 8 Representation of joint relation in terms of graphics.

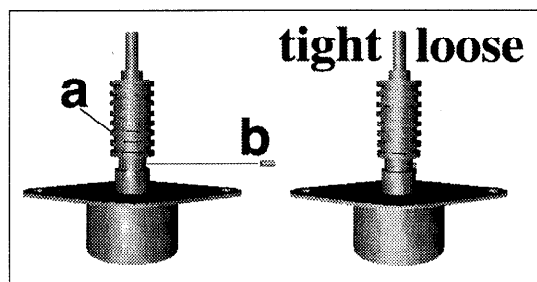


図9 ねじの締付け

Fig. 9 Selection of fastening mode of a screw.

とも可能であるが、移動時に回転が加わると各々の部品の座標系での中心を求めなおす必要があり、より簡単な方法で実現した。すでに接続された部品を移動させるには、図8のように、移動させる部品のTに接続に要する並進量（回転運動の場合は回転量）を与えた後、両者の木構造表現の最左端に新しくTcを加える。並進回転量をこのTcに与えれば、2つの部品は一体化して移動する。古いTは組立てが失敗した際に元の位置へ戻すために使われる。

3.5.2 ねじの締付け

機械部品の組立てを行う際には、ねじは強く締め付けるだけでなく、途中の工程として仮止めの状態にしておくことが頻繁にある。本システムではこのねじの締付け状態をtight, looseの2種類で表現する。図9のaの部品の側面にあるねじ穴と、bの止めねじは接続するとねじ接続が発生する。接続後、tight, looseの文字がスクリーン上に表示され、いずれかをマウスで選択すると接続関係のデータにねじの締付け状態が記述される。

3.5.3 副作用的に接続される部品の把握

本システムにおいて、組立ては2つの対象部品を選択することによって行うが、それらが部分組立て品の

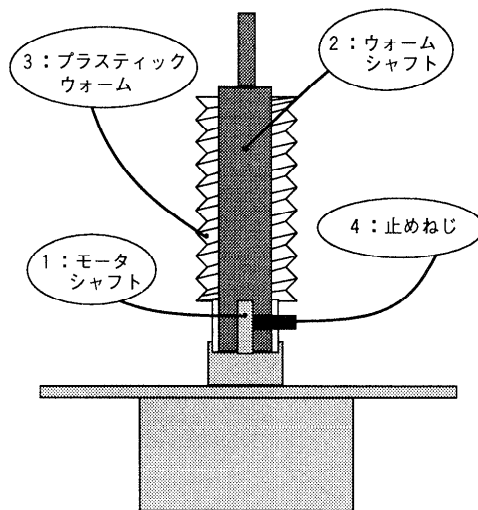


図10 接続部品の断面

Fig. 10 Cross section of assembled parts.

一部である場合、生じる接続関係は1つとは限らない。移動部品が組付け対象部品に接続されると、組付け対象部品以外の部分で接続が生じたり、逆に衝突が生じることがある。これらを正しく把握しておかないと、組立て失敗の検出や、副効果として生じる接続関係を見落とすことになる。

図10は図9の機械部品の断面図である。4の止めねじと3のプラスチックウォームの側面のねじ穴は、組立て対象部品として選択され接続された状態にある。これらの接続関係がねじ結合であることは部品を選択した時点で分かっている。しかし、止めねじがその他の部品と副作用的に接続したことを把握するためにはいくつかのプロセスを経る必要がある。まず、止めねじは1のモータシャフトと接触することによって停止したことが分かっており、止めねじとモータシャフトとは接触していることが分かる。さらに、図9に示したネジの締結の際にtightが選択されたとすれば、強く接触しているということも分かる。次に、2のウォームシャフトの側面のネジ穴との関係を調べる必要があるが、モデルのねじ山は省略して表現しているため接触は生じていない。そこでまず、移動部品であった止めねじを、侵入時に用いた補助線を軸として同心円状にわずかに膨張させる。その状態で、止めねじが侵入時において境界箱が干渉した部品だけを対象に、面と線による干渉判定を行う。干渉が観測されれば止めねじとウォームシャフトが何らかの形で接続されていることになる。これ以前の組立て工程において、プラスチックウォームのねじ穴とウォームシャフトのねじ穴が重なっていることが分かっており、止めねじが

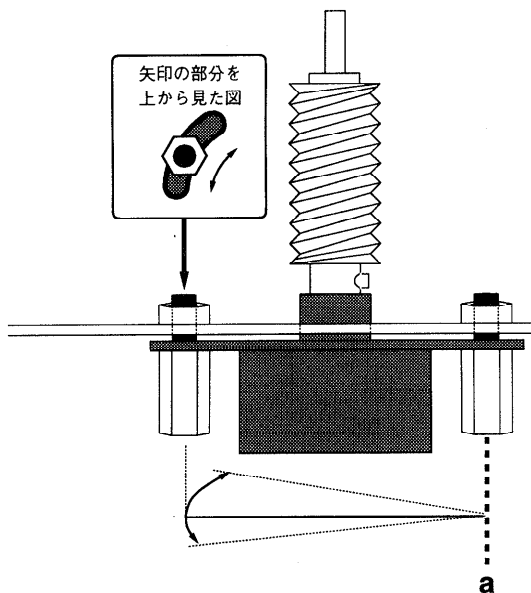


図 11 ウォームとウォームホイールの接続作業

Fig. 11 A joint operation between a worm and a worm wheel.

ウォームシャフトのねじ穴を貫通していることが分かる。上記のような副作用的に接続された部品の接続関係もデータに記述しておく。

3.6 組立て時に接続情報が必要な場合

図 11 は、図 10 のモータがハウジングに取り付けられた状態を示している。モータの両脇はボルトとナットで仮止めされている。ハウジングの一方の穴が細長くカットされているため、モータは軸 *a* を中心にわずかに回転することが可能である。ここでは、モータを回転させてウォームを移動させることにより、ウォームとウォームホイールを接続する作業を行う。

作業を行うには、まず、回転を行うことをシステムに知らせる。システムは、モータが軸 *a* に対してのみ回転できるというモータの拘束状態を把握しなければならない。そこで、部品の接続関係のデータを利用してこれを導く。モータの右側の穴とボルトは、ボルトが仮止めの状態であるために回転の自由度を持つ。左側も同様であるが、もしハウジングに空いた穴が両方とも円形であればモータは固定されていることになり自由度は 0 となる。しかしこの場合、一方がスライダ結合であるから、軸 *a* を中心に回転できることが分かる。

システムはモデルの回転中心を軸 *a* にセットした後、回転入力を受け付ける。モータをマウスでドラッグすると、軸 *a* を中心としたウォームの移動が実現できる。

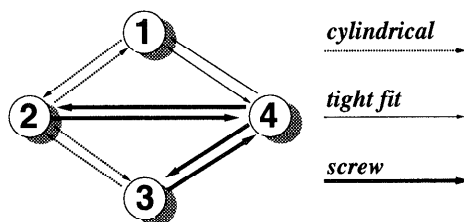


図 12 接続関係の探索

Fig. 12 Search of join relation.

4. 機構の可視化

組立て可能性の条件を満足していたとしても、組立て物が設計者の意図したとおりに機能するとは限らない。本システムでは、機械部品の組立てシミュレーションの際に生成した接続関係のデータを基に、組立て部品の固定、運動拘束、運動伝達を類推し、組み立てられた機構の振舞いを可視化する。

4.1 接続関係の探索

まず、以下で用いる用語の説明をしておこう。節とは、複数の部品が組立てにより一体化して機構を司る部分を指し、原動節とは、それ自体が運動して他の節に運動を伝える部分を、そして従動節とは、他の節から運動を伝えられる部分を指すものとする。組み立てられた機構がどのような振舞いをするかを知るには、まず原動節、従動節となる部品を把握する必要がある。したがって本システムでも、機構の動力部から接続関係をたどることにより運動の伝達を把握する。

例として図 10 のモータが稼働した場合を考えてみる。図 1 で説明したように、モータはあらかじめモータシャフトとは別々にモデリングされており、モータ稼働の命令を与えるとモータシャフトだけが回転する。全体がどのような動作をするかは、このモータシャフトの運動がどのように伝達されるかを接続関係から導く。

図 12 より、1 のモータシャフトと 4 の止めねじとは固定されており、止めねじは 2 のウォームシャフトと 3 のプラスチックウォームに固定されていることから、すべての部品がモータ軸に固定されていることが分かる。したがって、モータの稼働時にはすべての部品がモータ軸と同期して回転する。

4.2 運動の伝達

図 11 に示した操作によって、ウォームホイールがプラスチックウォームに組み付けられた状態における運動の伝達を考えてみる。図 13 の 5 の部品がウォームホイールである。3 のウォームと 5 のウォームホイールの接続関係は gear 結合である。運動は 1 のモータ

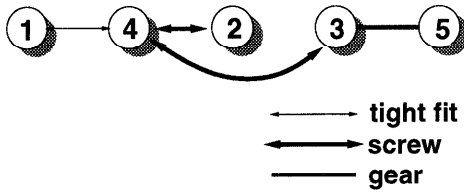


図 13 運動の伝達

Fig. 13 Transmission of movement.

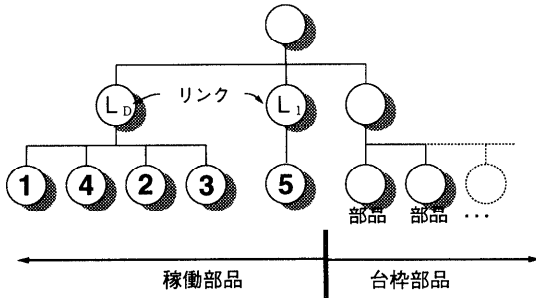


図 14 データの変更

Fig. 14 Modification into data description.

シャフトから右側へ伝達されていく。図 13 の結果よりグラフィックスを管理するデータを図 14 のように変更する。4, 2, 3 の部品は 1 に固定されているので、部品集合 (1, 4, 2, 3) は機構を司る 1 つの節として 1 か所にまとめられる。そしてこの節の運動を記述するために、新たなトランスフォームノードが加えられる。図 8 のよう最左端にそれを加えることも可能であるが、ここでは節 (5) のトランスフォームノードとの関係を表現するために、それぞれの上位ノードにリンクを与えている。リンクには、その支配する節のトランスフォームと、運動伝達関係を持つ節との関係が記述される。この場合は、図 14 の 2 つのリンクには節 (1, 4, 2, 3) と (5) の回転に関する関係が登録されており、それらは一定時間ごとにトランスフォームノードの値を変化させ、他のリンクと同期して物体を運動させる機能を有する (文献 7), pp.327-357 参照)。3 のウォームと 5 のウォームホイールの動作関係は L_D , L_1 に記述されており、 L_D を稼働させると L_1 にも運動が伝達される。つまり、 L_D には部品集合 (1, 4, 2, 3) の回転を表現するトランスフォーム T と、 L_1 との関係が記録されている。

4.3 動作時の干渉判定

組み立てた機械の動作を可視化することにより、大まかな機構の検証が可能になる。しかし、詳細に欠点を指摘することは、可視化だけでは困難である。そこで、動作時に機構を司る節どうしの干渉判定をするこ

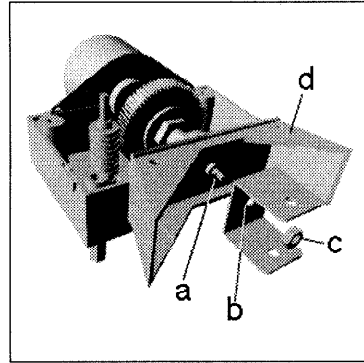


図 15 接続情報から動作の特定できない部品

Fig. 15 A part with movement not specified using joint relation alone.

とによりこれを補う。

4.3.1 接続情報だけでは動作が特定できない場合

図 15 の部品 d と a は回転軸を共有しているが、通常、両者は互いに独立して回転するだけである。しかし、部品 b が a と c によって固定されると、b と d がひっかかるようにして同時に回転しようということが、接続関係からは把握できない。そこで、動作時の干渉判定の結果を利用して運動の伝達を類推する。

d が回転すると d と b の間に干渉が観測される。このときに b がどのように他の部品に拘束されているかを調べると、d の回転中心と同じ軸上に回転の自由度を持っていることが分かる。a, b, c は固定されているので 1 つの節を形成し、これらの部品は回転可能な節としてグラフィックスデータに再登録される。

以上に記したようなパターンを示す組立て物は多いと考えられる。たとえばカム装置のような機構は、組立て時にその要素であるカムと、その回転を受けて往復運動をするフォロアが最初から接触していることはほとんどない。しかし、カムが回転時にフォロアに接触したことを感知すれば、お互いがカム装置であることを把握できる。このように、干渉判定と接続情報を組み合わせる方法は、機構全体を把握するうえできわめて有効であると考えられる。

5. システムの適用例

図 16 ~ 図 18 にロボットハンドの一部を本システムに適用した例を示す。使用した部品はすべて剛体と仮定できるものである。また、はめあいが生じる場合はすべてが適度なすきまばめであるとし、はめあいの摩擦による固定は考慮しない。その他、適用した部品モデルはすべて多角形近似されているため、歯車のように複雑に噛み合っている機構の動作時に干渉判定

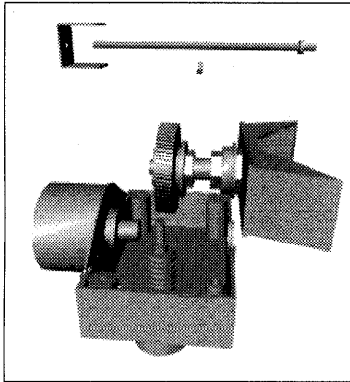


図 16 組立て作業の様子

Fig. 16 A state under assembling operation.

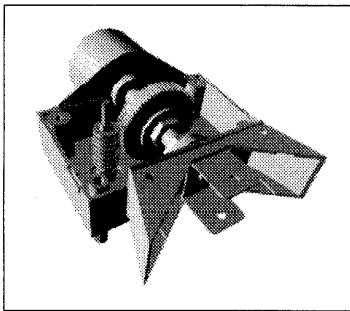


図 17 組立て完了時

Fig. 17 A complete state of an object.

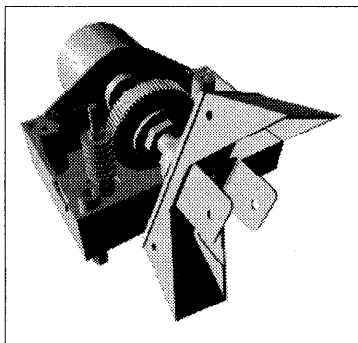


図 18 ハウジング底のモータ稼働時

Fig. 18 A state of the object when a motor at a housing bottom is in operation.

を実施すると、正しく設計された部品であるにもかかわらず干渉を検出してしまふおそれがある。そのためウォームとウォームホイールだけは干渉判定の対象外とした。

6. ま と め

本研究では、形状の特徴データを付加した機械部品

モデルと面と線分による干渉判定を用いることにより、剛体と仮定できる部品の組立て作業が仮想空間上において可能であり、組立て可能性判定ができることを示した。また、組立て作業中に生成した部品間の接続関係を用いて、組み立てられた機構の振舞いが可視化でき、動作時に干渉判定を実施することにより詳細な機構の検証が可能であることを示した。さらに、干渉判定の結果と接続関係の2つの情報から、組立て完了時には一意的に決定できない機構の振舞いも類推可能であることを示した。

本システムは現在開発の途上にあり、今後さらに機能の充実をはかる予定である。厳密に組立て可能性を判定するには多角形近似されたモデルではなく、二次曲面、自由曲面を含んだモデルに対応する必要があるが、曲面を対象とした干渉判定の手法はすでに確立されており、本システムに应用することは容易であると考えられる。また、本システムが当面の課題とするのは、2つの節の関係からだけでは動作の特定が不可能な機構をどう扱うかである。機構には、いくつかの節が連鎖(chain)をなし、複雑な動作をするものが数多く存在するが、図14に示したリンクの羅列を全体として把握することにより、連鎖の運動が類推できないか検討中である。その他、ばね、ゴムなどの弾性体をどう扱うかも今後の課題の1つである。

参 考 文 献

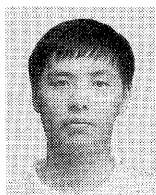
- 1) Joskowies, L. and Sacks, E.P.: Computational Kinematics, *Artif. Intell.*, Vol.51, pp.381-416 (1991).
- 2) Gelsey, A.: Automated Reasoning about Machines, *Artif. Intell.*, Vol.74, pp.1-53 (1995).
- 3) 安部, 石川, 辻: 組立説明文からの組立手順の生成, *人工知能学会誌*, Vol.3, No.5, pp.590-598 (1988).
- 4) Kuniyoshi, K., Inabaand, M. and Enoue, H.: Learning by Showing, *IEEE Trans. R&A*, Vol.10, No.6, pp.799-822 (1995).
- 5) 池内, カン: 視覚によるハンドの教示, *ロボット学会誌*, Vol.13, No.5, pp.599-602 (1995).
- 6) 安部, 鄭, 田中: 仮想現実空間と自然言語を用いる機器修復支援システム, 文部省重点研究・人工現実感システム平成7年度報告書 (1995).
- 7) Wernecke, J.: *The Inventor Mentor*, Silicon Graphics (1994).
- 8) 鳥谷, 千代倉: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版 (1991).
- 9) 安田仁彦: 機構学, コロナ社 (1990).
- 10) 北嶋, 西山, 吉川: 機械の有効接続グラフに基づく対話型組立可能性判定システムの開発, 精密

機械, Vol.49, No.2, p.208 (1983).

- 11) 関口, 小島, 井上, 本多: 回転機能部品の部品展開手法に関する研究, 精密機械, Vol.51, No.2, p.359 (1985).
- 12) 和田, 田中, 鄭, 安部: 仮想空間における機械部品の組立可能性と機構の可視化・検証システム, 信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会資料, MVE-95-57 (1995).

(平成 8 年 11 月 11 日受付)

(平成 9 年 7 月 1 日採録)



田中 和明 (正会員)

1991 年九州工業大学情報工学部知能情報学科卒業。1993 年同大学大学院修士課程修了。同年より同大学情報工学部勤務。現在, 同機械システム工学科助手。バーチャルリア

リティ, 移動ロボットのインタフェースに関する研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会各会員。



和田 敦

1994 年九州工業大学情報工学部機械システム学科卒業。1996 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 京都第一科学入社。在学中は, 仮想空間での組立シミュレーションの研究

に従事。



鄭 降宇 (正会員)

1983 中国復旦大・コンピュータ科学系卒業。1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程, 1990 年同後期課程修了。工学博士。その後 ATR 通信システム研究所奨励研究員。1992 年九州工業大学情報工学部講師, 1993 年同助教授。1991 年度情報処理学会研究賞受賞。3 次元画像処理と認識, ロボット制御, 仮想現実感に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



安部 憲広 (正会員)

1974 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。同年基礎工学部制御工学科助手, 助教授, 産業科学研究所助教授を経て 1991 年より九州工業大学情報工学部機械

システム工学科教授, 現在に至る。Lisp, prolog 処理系の作成, 言語画像処理システム, 機械の分解組立コンサルタントシステム組立図面の生成・認識, マニュアル理解, 機械システムと人工知能の融合, 人工現実感システムの研究に従事。著訳書, LispI, II, AI プログラミング I, II 等。電子情報通信学会, 人工知能学会, ロボット学会, VR 学会, 管理工学会, IEEE, AAAI, の各会員



何 守杰

1985 年中国ハルビン工業大学情報通信卒業。1992 年大阪大学大学院博士課程修了。同年大阪大学産業科学研究所助手。1993~1996 年シンガポール国立大学講師。1996 年

九州工業大学情報工学部電子情報工学科助教授。博士 (工学)。文書画像理解および応用, 画像の構造化表現, 言語と画像情報の融合, コンテンツに基づいた画像・ビデオデータ管理に従事。IEEE, AAAI 各会員。



滝 寛和

1980 年大阪大学大学院基礎工学研究科前期課程修了。同年三菱電機 (株) 入社, 生産技術研究所にて, 生産システム, ロボットの研究に従事。1986~1990 年 (財) 新世代コ

ンピュータ技術開発機構に出向, 知識獲得と学習研究に従事。現在, 三菱電機 (株) 設計システム技術センターにて, インテリジェント設計システム, CAE, Co-Engineering の研究開発に従事。工学博士 (大阪大学)。知能モデル, 人工知能の実応用に興味を持つ。IEEE, 人工知能学会, 電気学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。