機械のアセンブリ計画の自動生成 (第2報)*

——システムの実現——

伊 藤 公 俊** 曾 布 川 拓 司***

Automatic Generation of Assembly Plans of Machines(2nd Report)
- System Implementation -

Masatoshi ITO and Hiroshi SOBUKAWA

This paper describes a detailed implementation of the automatic assembly plan generation system of which formalization as disassembling sequence generation has been given in the previous report. The disassembling procedure is composed of two phases which are called a dismounting phase and a transferring phase of a part or a set of parts. In a dismounting phase Part_Interfaces are cut moving each part to the position at which the part is separated from its "parent" part in the Plan Tree which is heuristic partial order introduced in the previous report. In a transferring phase each part is transferred to the outside of the assembly. Both of these phases are composed of moving direction selections and moving distance selections. Candidates of directions and distances are selected among Conceptual Vectors which are the local coordinates of the authors' design object modeller CONMOTO. The total disassembling problem solver has a hierarchical structure and is implemented in NODE language which has been developed by the authors and is much suited to retrieve actions in hierarchical backtracking. Some examples are shown finally.

Key words: computer-aided design, design verification, design object modeler, problem solving method, assembly sequence generation

1. 結 言

本研究は、アセンブリ計画を自動的に生成することによりアセンブリの組立可能性を検証するシステムの実現を目的としている。前報¹⁾において、そのための定式化を行い、アセンブリ計画生成を分解手順の問題解決に帰着させた。本報では、その定式化に基づき開発したシステムの詳細を述べる。

2. 部品分離の定義

部品を包含し、世界座標系のそれぞれの座標軸に垂直な平面で構成される最小の直方体を、部品の包含モ

デルと呼ぶことにする。設計対象モデルに表現された二つの部品が分離したとは、それぞれの部品の包含モデルが互いに三次元空間を共有しないことであると定義する。包含モデルが接する場合も部品は分離したとする。この定義は、直観的な意味での部品分離の十分条件となる。

アセンブリを構成する部品すべてが互いに分離した状態になったとき、そのアセンブリは分解されたと定義する。包含モデルは、コンピュータグラフィックスでは干渉判定の前処理にしばしば利用されるが、本研究でも部品間の干渉検出の前処理にも利用している。

3. ブラン木に基づく分解計画の立案

前報で定式化したブラン木は部品分解の半順序を与えるから、実際に分解計画を得るシステムでは、ブラン木の葉の部品に逐次着目し、それを分離してゆくという方策を基本とすることができる。ただし、ブラン木が部品の機能的な結合関係のヒューリスティクスに基づくものであることから、それに従っても常に部品

* 原稿受付 平成2年4月16日・昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

** 正会員 東京工業大学総合理工学研究科(横浜市緑区長津田町4259)

*** 正会員 (株)荏原製作所藤沢工場(藤沢市藤沢4720)

の移動が可能であるとは保証されない。すなわち、プラン木に従って着目する部品または部品集合を他の部品集合から分離させる（アセンブリから抜くと呼ぶ）際に、その移動の障害となる他の部品（障害部品とよぶ）が存在する場合を生ずる。そのため本研究では、この障害部品の除去を問題解決の副目標とすることによって、プラン木の半順序性を有効に利用することとした。本研究における分解の方策は、アセンブリ全体を含む包含モデルの空間から着目部品を除去して行く過程とみることができる。障害部品の除去も、着目部品の移動のための空間から他の部品を除去する過程であるから、それ自身が本研究の原問題となり、全体として多重の再帰的手続きとなる。

着目部品の選択は、可能な部品すべてについて分解が成功するまで試行する。抜くことに成功すれば、残りの部品集合について同様なことを繰り返す。その過程で、アセンブリが幾つかの部品集合に分離することがある。その場合には、それぞれの縮小されたアセンブリに対して独立に手続きを繰り返す。もし、葉の部品をアセンブリから抜くことに失敗した場合は、分解不能であるか、その部品を含む部分木が存在して部分木を構成する部品集合を一体で移動しなくてはならないかのどちらかである。

4. 分解手順における組付分離相と空間移動相

分解経路を得るための探索には、一般的に二つの局面を考えることができる。一つは、アセンブリの機能的な結合関係の切除、すなわち組み付けられた状態を分離する局面である。もう一つは、機能的な結合がはずれた部品の空間的な移動経路を探索する局面である。これらの局面では、必要とする情報が異なることから、アセンブリを表現する対象モデルも異なることになる。

円筒軸にはめ込まれたブッシュを軸から分離させようとする場合を例として考える。まず最初に、ブッシュと軸の結合をはずす必要がある。このとき、しばしば専用の治工具が必要となることもあるが、反面ブッシュを動かすべき方向や距離は限定されることが多い。また、この結合関係は、軸が長ければ所定の組付位置以外においても存在することがある。すなわち、軸からブッシュが抜けてゆく場合、ブッシュの移動中もはめ合わせの関係が存在する。計算機モデルを利用する場合にも、部品間の機能的な結合関係が適切に表現されている必要がある。特に、多面体近似されたソリッドモデルを用いると組み付けられた状態においても、形状干渉を生ずる危険がある。

次に、ブッシュを移動して軸から分離するところに来ると、軸とのはめ合わせ関係は消失する。このような状態での部品移動経路探索がもう一つの局面である。この局面では、移動中の部品の他部品との関係は、空間的に干渉するかどうかという関係のみとなる。そして計算機表現するにあたっては、はめあいなどの部品間の結合面の状態あるいは結合面の幾何表現精度などを問題とする必要はなく、空間的な移動経路がハウジングなどとの干渉が生じないように求められればよい。この局面では、アセンブリの機能的な情報はほとんど利用できず、干渉検査には通常のソリッドモデルの方が適している。

本研究では前者の局面を組付分離相、後者を空間移動相とよぶ。具体的には組付分離相とは、着目する部品あるいは部品集合を、プラン木における親部品と分離する位置に移動させる探索をいう。空間移動相では、組付分離相で親部品から分離した部品を干渉なく空間的に移動させ、他の部品すべてから分離した状態にするための探索を行う。本研究では、空間移動相のために CONMOTOシステム¹⁾からソリッドモデルを生成して利用している。また特別な場合として、組付分離相の移動のみによって分離してしまうことがある。あるいは、組付分離相における移動を若干延長するだけで分離してしまい、空間移動相を省略してよい場合もある。

組付分離相では、部品インタフェースを消失させるとともに部分的ではあるが空間移動相と同様な空間移動探索を行う。そのため、ソフトウェア構成が複雑になることが考えられる。しかし、組付分離相で行う空間探索は、空間移動相が空間的な関係のみに依存するのに対して、親部品との結合関係と深く関係するため、部品インタフェースの分離と（その幾何に依存する）空間移動を一括して行った方が探索効率がよくなるものと考えられる。例えば、段付軸の径の大きい部分にブッシュがはめ込まれているとしたとき、ブッシュを径の小さい部分に移動させれば部品インタフェースは消失し、ブッシュは軸に対して一応自由となる。しかし、それは段差分のガタのようなものであり、この段階から改めて空間探索を行うより、そのままの幾何で抜いてしまう方がよい。組み木パズル的な場合を除けば人間の直観にも整合しており、そのことは人間の設計した対象物にも反映している。

5. 組付分離相における分解

本研究では、分解手順における部品の位置は必ずアセンブリを構成する部品の持つ幾何に規制されると仮

定しているが、組付分離相ではアセンブリ中のすべての部品の持つ幾何を考慮する必要はなく、その部品のプラン木における祖先部品の幾何だけでよい。なぜなら子孫部品は、その部品と一体で移動することになるか、あるいは既に分離してしまっている。また、疎部品は、その部品の移動に全く関係しないか、障害部品となった時点で考慮の対象となるからである。

5.1 個別方策

組付分離相においては、個々の部品インタフェースごとに組付けの仕方が異なることを反映して分解方法も個別的となる。本システムでは、着目部品がプラン木において他の部品とどのような関係にあるか、あるいはそれ自身がどのような機能を持っているかに基づいて個別方策を用意した。代表的なものは以下の五つである。

- (1) SHAFTSTGY : 着目部品が回転軸の場合。
- (2) CYLJKPSTGY : 着目部品が軸部分木に含まれ、回転軸とはめ合わせ関係にある場合。(本研究で利用したCONMOTOでは、はめあいを表現していない。)
- (3) KEYSTGY : 着目部品がキーの場合。
- (4) SCREWSTGY : 着目部分木がねじ部品素で祖先部品と結合している場合。
- (5) CYLSTGY : 着目部分木が祖先部品とはめ合わせ関係にある場合。

5.2 移動方向候補の数え上げ

部品相互が結合する部品素(面)の規定する方向に平行あるいは垂直な方向を移動方向の候補とする。すなわち、移動方向は部品素を規定する概念ベクトルの局所座標軸から選ばれる。そのため、世界座標系に対して傾いた方向を選択することも可能となる。個別方策は以下のようなになる。

- (1) SHAFTSTGY : 軸部分木の根である着目部品が祖先部品とはめ合わせの関係にある場合は、祖先部品と平面接続を生じない軸方向を候補とする。はめ合わせがない場合は、祖先部品と平面接続を生じない方向をすべて候補とする。
- (2) CYLJKPSTGY, SCREWSTGY, CYLSTGY : 祖先部品とはめ合わせのある部品素の円筒軸方向で、祖先部品と平面接続を生じない方向を候補とする。

5.3 移動距離候補の数え上げ

本システムではプラン木における親部品と分離する位置をその候補とするが、一部の方策ではそれに加えて部品インタフェースの関係が成立しなくなる位置も

候補とする。方策の詳細は以下のようなになる。

- (1) SHAFTSTGY : 着目部品の回転軸からプラン木を遡って最初に出会うハウジング部品を探し、そのハウジング部品と回転軸(すなわちそれを根とする軸部分木全体)とが分離する距離を候補とする。ハウジングが存在しない場合は着目部品が、その親部品と分離する距離を候補とする。
- (2) CYLJKPSTGY : 軸部分木の根部品(回転軸)の軸端から分離する距離を候補とする。
- (3) SCREWSTGY : おねじの場合は、親部品との部品インタフェースが消失する位置を与える移動距離と、親部品と分離する距離を候補とする。めねじの場合は、相手ねじ面と(軸方向で)分離する距離と、ねじ接続している相手部品と分離する距離とを候補とする。
- (4) CYLSTGY : 接続する祖先部品の円筒部品素(面)と(軸方向で)分離する距離と、着目部品と接続する祖先部品と分離する距離とを候補とする。

6. 空間移動相部の分解

6.1 移動方向候補の数え上げ

組付分離相と異なり、空間移動相の部品の移動位置候補は、アセンブリを構成する部品の持つ幾何すべてが対象となる可能性がある。その場合かなり多量の探索を要するとともに、より複雑な探索手続きを必要とし、ソフトウェアの実現上困難が大きい。

本研究においては、組付分離相で選択された移動方向とその局所座標系の残りの座標軸方向のみを候補とするように制限している。この制限によって、空間移動相では移動中に何度も方向を変更するような移動経路を発見することはできなくなる。例えば、ハウジング内部で複雑に移動させなければどうしても取り出すことのできない部品が存在し得るが、本システムではその部品を分解不能と判定する。ただし、実際の設計ではそのような場面は少なく、また良い設計とも考えにくい。

6.2 移動距離の数え上げ

着目部品が与えられた方向においてアセンブリの外に出るための距離を候補とする。すなわち、着目部品あるいは着目部品集合の包含モデルが、それ以外の部品全体の包含モデルと分離する距離を算出する。この距離は、前報5章(1)のヒューリスティクスから、一つの方角に対して通常唯一である。

7. 機械の分解経路生成システム

7.1 問題解決の階層

以上に述べた手続きの階層を図1に示す。プラン木が複数存在する一般形で表されているが、最初はプラン木は一つであり実行に伴って分離する。図では、枠の入れ子の関係で部分手続きの依存関係を示し、ブロック構造言語PASCALに試行錯誤ブロックを追加したインプリメント言語NODE²⁾の予約語で手続きの動作を示している。ChoiceとChoice_Endで囲まれた範囲において試行錯誤が行われ、Failを実行するとChoiceまで戻って再試行する。Successが実行されると、そのブロックを成功として抜け出す。数え上げた探索候補すべてを試みても成功しなかったときは、Choice_Failを実行する。この場合、手続きは上位の手続きにバックトラックすることになる。同時にそのChoiceブロックで行われたデータ操作、本研究の場合は主として部品の移動が、途中で呼ばれた手続きのものを含めてすべて復元されるようになっている。

7.2 システムの実行情例

システムは問題解決部がNODE言語で4000行程、プラン木生成などCONMOTOとのインタフェースにPASCALで2000行程である。図2に、システムの全体構成を示す。ソフトウェアはApollo社のエンジニアリングワークス

テーション上に実現し、各サブシステム間の情報交換はプロセス間交信によって行っている。ただし、CONMOTOからソリッドモデルを生成する部分は、本来自動的に行われるべきであるが、人手によって行っている。また、部品移動時の干渉検査には立体が掃引する空間を求める必要がある。そのための手続きをソリッドモデルに追加したが、凸包分割を採用しているため³⁾、PASCALで900行程である。

図3および図4に、生成された部品移動の幾つかのステップを示す。表示は、ソリッドモデルを利用した

Remove P

Dismounting Phase

Enumerate plausible directions;

CHOICE

Select a direction;

If no more direction then CHOICE_FAIL;

Enumerate plausible distances;

CHOICE

Select a distance;

If no more distance then

CHOICE_FAIL;

Remove obstacles;

If obstacles cannot be removed then FAIL;

Move P;

If P is outside of the other parts then SUCCESS;

Transferring Phase

Enumerate plausible directions;

CHOICE

Select a direction;

If no more direction then CHOICE_FAIL;

Enumerate plausible distances;

CHOICE

Select a distance;

If no more distance then CHOICE_FAIL;

Enumerate plausible distances;

Remove obstacles;

If obstacles cannot be removed then FAIL;

Move P;

If P is outside of the assembly then SUCCESS

else FAIL;

CHOICE_END;

CHOICE_END;

CHOICE_END;

Fig.1 Hierarchy of procedures for disassembling

が、歯車などの詳細形状は省略している。図3は、前報においてプラン木の構成例に用いた機構であり、(a)に分解前の状態を示す。(b),(c),(d)はプラン木の葉部品で、GearBoxBを根とする部分木を固定しているボルトをはずす様子を示す。(e)では、GearBoxBを根とする部分木が一体として分離されている。図4は、文献4)に示されたAny-Angle Tool Viseの例である。(a)が全体図であり、(b)では障害部品となるストッパねじ

がはずれている。(c)ではストッパがはずれたため、ホルダが分離されている。

実行所要時間はアセンブリを定義した後で、ソリッドモデルによる干渉評価を除いて、図3、図4の例では5分から10分である(CPU:Motola68010,8MHz)。これには、NODE実行系が機械語レベルのインタプリタであることが大きく影響している。

Fig.2 Total Software System

Fig.3 Part of disassembling sequence of a gearbox

(e) A subassembly including GearBoxB is removed

Fig.3 (Cont.)

(b) Obstacle part Pin is removed

(a) Any-angle Tool Vise

(c) Holder can be removed

Fig.4 Part of disassembling sequence of Any-angle Tool Vise

8. 結 言

本研究の結果をまとめると以下になる。

- (1) アセンブリの分解過程における組付分離相と空間移動相を定式化した。
- (2) 前報で定式化したプラン木に基づき、分解手順を得るための問題解決の階層構造を明らかにした。
- (3) アセンブリ分解計画生成システムを、NODE処理系によって階層的問題解決システムとして実現した。
- (4) 幾つかの例に対してシステムを適用し、本研究のシステムの有効性を確認した。

今後、設計検証の立場からは、設計者が考える概略的な組立手順の意図の設計対象モデルへの入力法および表現法を拡充する必要がある。また、システムの能力としては、部品姿勢の変更を許容するように方策を追加することが先決と考えられる。部品姿勢を変更さ

せながら組み立てられる機械はかなり多いが、そのような方策の適用場面は限定されるから、計算コスト的な増大は少なく、本研究で開発した方法の拡張によって実現可能となるものと予想される。

参 考 文 献

- 1) 伊藤公俊, 曾布川拓司: 機械のアセンブリ計画の自動生成 (第1報) 問題の定式化, 精密工学会誌, 56, 7 (1990) 1262.
- 2) 伊藤公俊, 東 智治, 川野辺 衛, 高田昌之, 曾布川拓司: CAD における非決定性処理ハード・ソフトウェアシステム: NECO/NODE, 情報処理学会グラフィクスとCADシンポジウム (1985) 205.
- 3) 伊藤公俊, 佐々木安彦: Consistency の実現を目的とする多面体モデラの開発, 情報処理学会グラフィクスとCAD 研究会6-4 (1982).
- 4) F.E.Giesecke et al.: Technical Drawing, Macmillan, New York (1980) 482.