

# 力覚提示装置を用いた嵌合作業の検討

横山 哲也

## Development of Prototype to Fit Operation using Haptic Display

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし CADソフトの普及に伴い、デジタルデータを用いた作業性の評価が可能となっている。デジタルデータを利用することで、実機無しの評価が可能となり、開発期間や費用の低減に期待がかかる。ただし、市販ソフトの多くは計算機内で完結する数値シミュレーションにとどまっており、作業者の疲労主観評価を行うことはできない。本研究ではデジタルデータと力覚提示装置を用いて、組付け作業で多用される嵌合作業を対象とした疲労主観評価が可能要素技術の確立を図る。本年度は、嵌合部位をモデル化し、反力提示が可能であるか検討を行った。

キーワード デジタルモックアップ、嵌合作業、力覚提示

### 1. はじめに

近年、CADソフトの普及に伴い、デジタルデータを用いた設計や評価が可能となっている。デジタルデータを利用することで、計算機内で設備、工程を評価することが可能となり、開発期間や費用の低減に期待ができる。ただし、市販ソフトに取り入れられている手法の多くは計算機内で完結する数値シミュレーションにとどまっており、作業者の疲労主観評価を行なうことは難しい。

自動車の艤装工程に代表される組付け作業において、部品の締結手段として嵌合が多用されている。嵌合とは、クリップや爪を利用して凹凸を嵌め合うことで締結する技術である。通常、外部から加わる振動や力によって部品が容易に外れないようにするために、嵌合力は高めに設定してある。このため、組付け作業において、作業者は嵌合部位に非常に大きな力を加える必要がある。また、嵌合部位は多数あり、作業者の取り付け姿勢も一定でないことが作業者の負担となっている。そこで、組付け工程を設計する際は、嵌合部位の組付け力に主観的に求めた上限値を設けている。この上限値を求めるため、モックアップを製作し、実際の作業姿勢で嵌合を模擬しているが、モックアップを製作するため開発コストがかさむ問題が生じている。

そこで本研究では上記問題を解決するため、嵌合部位をデジタルモックアップで計算機内に実現し、力覚提示装置を用いた嵌合作業の検討を行う。

### 2. 嵌合部位のモデル化

デジタルモックアップにおける問題点として、物体間の干渉が挙げられる<sup>[1]</sup>。現実世界では物体同士は干渉しないため、デジタルモックアップでは干渉量に応じた力を部品

間に発生させることで干渉を防いでいる。ただし、物体形状が複雑になると干渉量算出が困難となる。そこで本研究では、物体の変形を利用して物体同士の干渉を防ぐこととした。そして操作者に提示する反力の計算も、物体の変形を利用することとした。なお、嵌合部位の変形モデルには、物体の特性値を考慮できる有限要素法を用いた。

ノード数  $n$  で表現される線形有限要素モデルによる3次元の剛性方程式は、荷重  $f \in R^{3n}$ 、変位  $u \in R^{3n}$  と剛性行列  $K \in R^{3n \times 3n}$  を用いて式(1)で与えられる。

$$f = Ku \quad (1)$$

剛性方程式(1)を以下のとおり書き直す。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_u \\ u_k \end{pmatrix} \quad (2)$$

添字の  $u$  は未知ノード、 $k$  は既知ノードを指す。本研究では強制変位を取り扱うため、 $u_k \in R^{3l}$  は接触箇所の強制変位、 $u_u \in R^{3(n-l)}$  は非接触箇所の変位、 $f_u \in R^{3l}$  は接触箇所に働く未知荷重とする。ここで  $l$  は強制変位が働くノード数である。式(2)の左辺第1行は外から荷重が働かないため0である。

未知変位  $u_u$  は式(2)の第1行より、以下のとおり求める。

$$u_u = -K_{11}^{-1} K_{12} u_k \quad (3)$$

未知荷重  $f_u$  は式(2)と式(3)より、

$$f_u = (-K_{21} K_{11}^{-1} K_{12} + K_{22}) u_k \quad (4)$$

となる。

### 3. 衝突判定法

物体同士の干渉を判定するため、衝突判定法を実装する。変形形状を有する物体の衝突判定法としては、

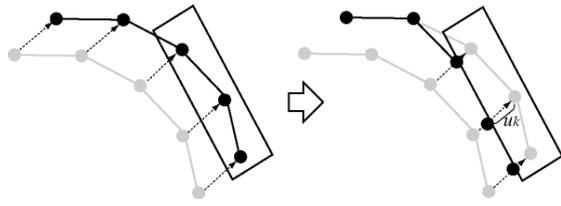


図1 衝突判定

OpenGLの機能を用いた手法<sup>[2]</sup>が有名であるが、単純形状しか適用できないため、ここでは以下の手法で衝突判定を行う。

物体はパッチで表現されているとする。物体表面パッチを構成するノードについて、サンプル前後で各々のノードを結ぶベクトルを生成する。そのベクトルが相手方物体のパッチと交差するか、Cyrus-Beck アルゴリズム<sup>[3]</sup>を用いて判定を行う。ベクトルがパッチと交差する場合は、交差する点にノードを強制移動させる。その際の移動量を  $u_k$  とする。図1にイメージ図を示す。

全てのノードに対して衝突判定を行うと、計算量が増大となる。そこで法線ベクトルを基に、衝突の可能性の低い箇所に対しては衝突判定法を行わないことで計算量を削減した。

#### 4. 実装

嵌合部位のモデルとして、雄にクリップ、雌に穴付板とした。モデルは3次元CADで作製し、メッシュ生成にはgmsh<sup>[4]</sup>を用いた。

処理手順を図2に示す。操作者が操る力覚提示装置のエンドエフェクタの動きに応じて、物体の位置・姿勢が更新される。その後、衝突判定を行い、物体同士の干渉があれば、その干渉を避けるように、(3)式によって物体を変形させる。物体が変形した際には、(4)式によって反力を計算し、力覚提示装置に出力する。力覚提示装置には米国SensAble社のPHANToMを用いて、操作者に反力提

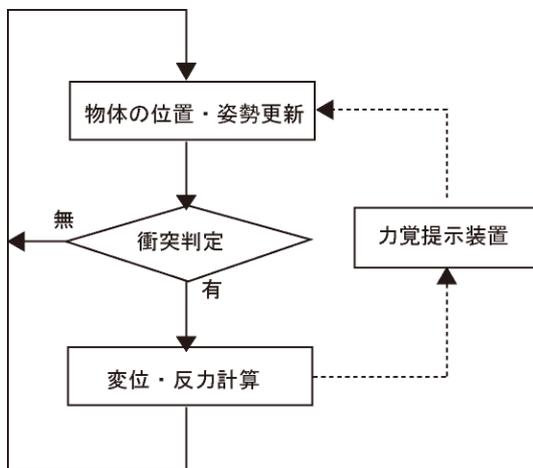


図2 処理手順

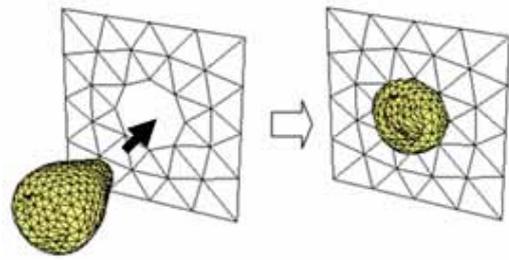


図3 嵌合作業の検証

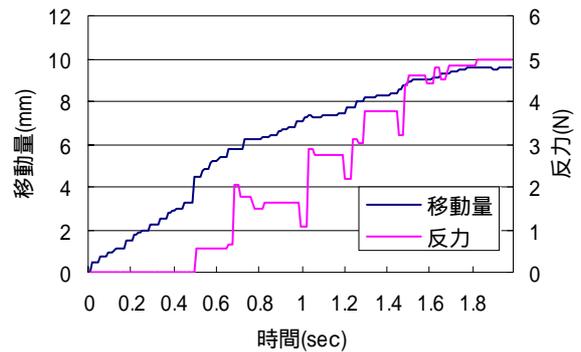


図4 反力の計算結果

示を行った。

図3に示す、クリップを穴に嵌めた際の挿入方向に働く反力値を図4に示す。0.5secでクリップが穴周辺部に衝突し、それ以降クリップの移動量の増加に伴い、反力が大きくなるのがわかる。ただし、本手法は計算量が多く計算周期が大きいため、反力値が離散で更新される結果となった。

#### 5. まとめ

本研究では、組付け作業で多用される嵌合作業を、デジタルモックアップと力覚提示装置を用いて実現した。デジタルモックアップ特有の問題を回避するため、有限要素法を用いて物体の変形計算を行ったが、衝突判定を含めた計算量が予想以上に膨大となり、実時間処理に問題が生じた。計算量を削減することが今後の課題となる。

#### 文献

- [1] 神徳徹夫, “仮想空間における拘束感生成手法に関する研究”, 機会技術研究所報告, 192, 2001.
- [2] Jean-Christophe Lombardo, “Real-time collision detection for virtual surgery”, Proc. Of Computer Animation '99, pp.33-39, 1999.
- [3] Matthew Moore and Jane Wihelms, “Collision Detection and Responses for Computer Animation”, Proc. Of SIGGRAPH, pp.289-298, 1988 .
- [4] <http://geuz.org/gmsh/>