

デジタルモックアップのための剛体運動シミュレーションに関する研究

横山 哲也 飯田 佳弘

Research on Haptic Display of Rigid Body Simulation for Digital Mock-Up

Tetsuya YOKOYAMA Yoshihiro IIDA

あらまし デジタルモックアップを用いた組み立て（分解）検討は、問題の早期発見が可能で開発期間の短縮が期待される。本研究では力覚装置デバイスを用いた部品組み立て検討を想定し、インタラクティブで干渉なく拘束感を提示できるシミュレーション技術の実現を目的とする。人がシステム中に介在し、力覚を通してインタラクティブな操作を行うためには実時間処理が必然である。そして組み立て時の動的状態の部品形状妥当性を検討するには、部品同士が干渉することなく拘束感を提示する必要がある。そこで、幾何交差と最短距離を利用した衝突判定法、物体の非侵入性を利用した多点接触の拘束感提示方法を提案することで、計算量が少なく、干渉なく拘束感提示を実現することができた。また両側拘束が働くケースにおいて、有効に作用していることを実験で確認した。

キーワード デジタルモックアップ、剛体運動シミュレーション、衝突判定、非侵入性、拘束感提示

1. はじめに

近年、CAD/CAMの発達によりデジタルモックアップの活用が増えている^[1]。特に組み立て（分解）検討は不具合発見時の出戻りの影響を小さくすることができ、開発期間の短縮が期待される。

組み立て作業は複数の部品が集まるアセンブリを対象とするため、組み立て順序によっては部品同士が干渉しあい組み立てが出来ないことがある。従って試行錯誤的な検討作業となるため、インタラクティブに組み立て検討できるシステムの実現が望まれる。こうしたシステムでは操作空間が3次元であるため部品の動きを既存のマウス等の装置で行うことは難しく、人が部品を手で持ち、運ぶような直感的操作で部品を動かすデバイスが必要である。更に、力覚装置を用いて拘束感を提示できれば作業効率を向上させることができる。

人がシステムに介在し、インタラクティブな操作を行うためには、応答の遅れは違和感を与え操作性の低下につながる。このため実時間で衝突判定、接触箇所特定を行う必要があるが、従来の衝突判定法では一般的な形状に対して前処理なしで実時間処理を行うことは難しい。最短距離計算手法^[2]は、凸形状の性質を利用した物体間距離により判定するため、接触箇所を容易に求めることは出来るが、非凸形状に関して凸形状に分解する必要がある。形状の幾何交差を利用して物体間の体積干渉有無を判定する方法^[3]は形状に依存されることはないが、接触箇所を実時間処理で求めることが難しい。

また、物体間の干渉排除（侵入解除）、反力計算（拘束感提示）も操作性に影響を与える。実装が容易で処理量が少ないペナルティ法^[4,5]は物体間干渉を許して反力を計算する。神徳ら^[5]は、はめ合いにおいて、一方の接触点での干渉により実質的な穴の径が膨らみ、他方の接触点で発生するべき接触が見落とされ、現実では不可能なはめ合いが可能になることを指摘しており、組み立て作業への適用は難しい。そのため現実に即した物体操作実現^[6,7]、つまり物体同士が干渉することなく拘束感を提示する必要がある。足立ら^[8,9]は干渉することなくインタラクティブな拘束感提示を可能とした。しかし多点接触を複数回の1点接触に分けて取り扱うため、両側拘束が働くケースを想定していない。1点接触は片側拘束となり1方向のみの運動を制限するが、両側拘束は両方向の運動制限であり、当然、多点接触でないと記述できない。組み立て作業中、はめ合いのような両側拘束となるケースがあるため、多点接触を考慮する必要があると考える。

本研究では力覚装置デバイスを用いた組み立て検討作業を想定する。そしてインタラクティブで干渉なく拘束感を提示可能なシミュレーション技術を実現するため、幾何交差と最短距離を利用した衝突判定法
物体の非侵入性を保証した多点接触の拘束感提示
を提案する。

2. 剛体運動シミュレーション

本研究における剛体運動シミュレーションの概略処理

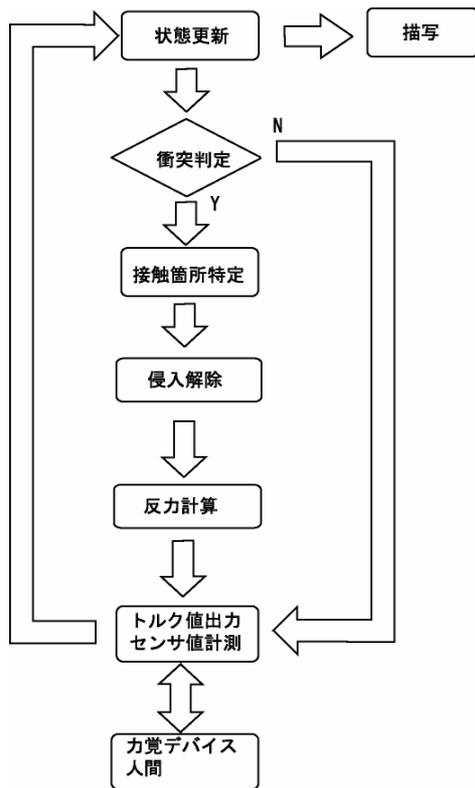


図1 剛体運動シミュレータの処理手順

手順を図1に示す。

物体の状態が更新後、衝突判定で物体間の干渉有無を判定する。衝突判定は複数の物体間で体積共有部分を持つ干渉状態を検出するアルゴリズムである。剛体シミュレーションでは衝突判定だけでは不十分で、力が作用する接触箇所を特定しなければならない。接触箇所より、拘束運動を行うための微小移動距離を求める。それと同時に操作者に拘束感提示するため反力計算を行う。これらの処理ループに掛かる時間を小さくすることで、インタラクティブな操作の実現が可能となる。

なおトルク値出力、センサ値計測は共有メモリを介して、1kHzの独立処理ループで動く。

3. 幾何交差と最短距離を利用した衝突判定

衝突判定法を大別すると、物体間の最短距離に着目した最短距離計算手法^[8]や、形状の幾何交差を利用して物体間の体積干渉有無を判定する方法^[9]がある。剛体シミュレーションは力が作用する接触箇所を特定するため、幾何交差を利用した判定法のみ適用はできない。その場合は干渉判定の結果を利用し、接触点探索を行う必要がある。この接触点探索は効率的な方法がなく、干渉判定の結果によっては計算量が増加してしまう。最短距離計算手法は、物体間の最短距離がある値より小さくなったときに衝突と判定し、そのときの最近接要素から容易に接触箇所を求めることは出来る。ただし、最短距離計算手法は凸形状の性質を利用しているため、物

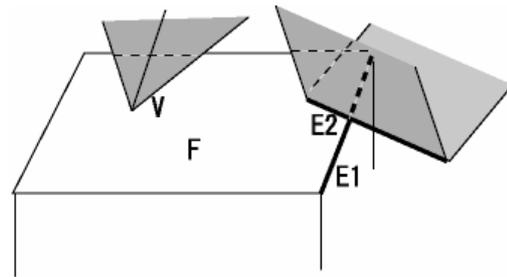


図2 基本接触モデル

体の形状に非凸がある場合、物体形状を凸形状の組み合わせで分解する必要がある。幾何交差を利用した判定法では形状分解する必要はない。

本研究では2種類の衝突判定法を組合せることで、実時間で一般形状の部品間同士の接触箇所を、形状分解の前処理なしで求める。幾何交差を利用した判定ライブラリV-Collide^[10]を用いて2物体間に交差面を特定し、各々の交差面が凸形状であることを前提に最短距離を求める。最短距離計算手法のみでは、物体形状を凸形状に分解する必要があるが、併用して一般形状に対応したV-Collideを利用しているので、分解する必要がない。V-Collideは衝突時、互いに交差している面のリストを戻り値として返すため、接触箇所を特定することができないが、最短距離計算手法を併用することで、容易に接触箇所を特定できる。

3.1 基本接触モデルの導入

物体間の接触には、多様な形態が考えられる。本研究では基本接触モデルとして、図2に示す面-頂点接触、稜線-稜線接触を定義し、このモデルの組み合わせで一般的な接触を表現する。また1つの接触箇所をみると、そこは凸形状同士の接触同士とみることができる。この基本接触モデルが次節の衝突判定、次章の侵入解除において、対象とする最近接要素対、侵入部位となる。

3.2 提案手法

2物体間(移動物体A, 静止物体B)の衝突判定処理手順を図3, 補足説明を下記(A)~(D)に示す。図3の最近接要素対のデータ構造を図4に示す。

- V-Collideを用いて干渉判定を行う。干渉を検知したとき、物体A, Bで交差している面のリストを返す。
- 干渉を解除するため、物体Aの交差面構成頂点の速度反対方向に微小距離 l_0 だけ物体Aを移動させる。 l_0 はフレーム毎の物体頂点移動距離より小さい。
- 1ステップ前の最近接要素対及びその隣接要素に対して最短距離計算手法を施し、最近接要素対及び最短距離 l_i を更新する。
- l_{min} 以下の最短距離 l_i が1個以上でも存在する場合、衝突とみなし、侵入解除を行う。

最短距離計算手法は2物体間の最短距離 l_i をフレームごとに追跡することで衝突を判定する。運動シミュレーションでの時間的に前後したフレームでは、最近接要

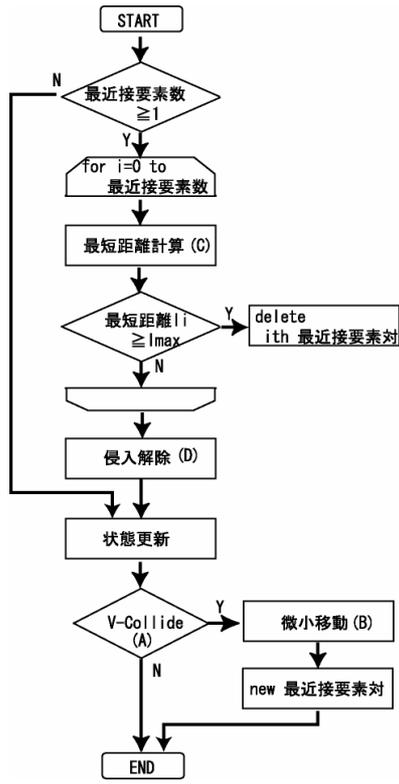


図3 衝突判定処理手順

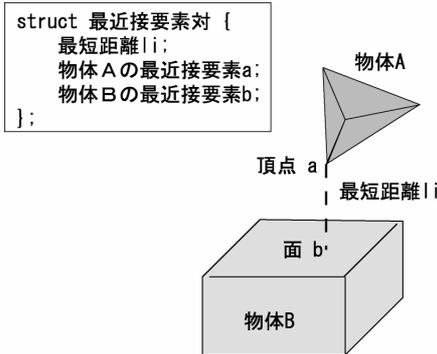


図4 最近接要素対

素対は物体上を大きく移動しない性質を利用している。物体を構成する各要素は隣接する要素が事前に既知であることから、探索候補を隣接する要素に絞込むことで計算量を減らすことができる。接触点が複数存在するような場合、最短距離計算手法は接触点毎に処理を行うため、接触点の数に応じて計算量は変動する。2物体間において、Windows2000, Pentium 866MHz DualのPCにおける1ループあたりの衝突判定、接触箇所特定処理平均時間Tは、

$$T = 0 \sim 2.0 + 0.2N \text{ [msec]} \dots(1)$$

となった。右辺の第1項はV-Collide処理時間、第2項は最短距離計算処理時間、Nは接触点数である。V-Collideの計算量は物体の形状、物体間の相対位置に依存し2msec変動するが、インタラクティブな操作には問題ないと思われる。具体的な作業では複数部品の衝突判定を

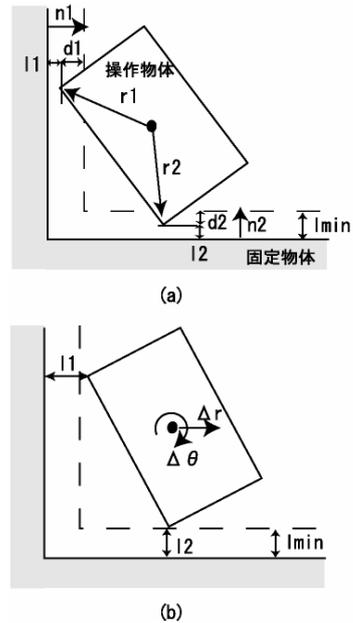


図5 微小移動による侵入解除

行わなければならない。その時は空間中に存在する全ての部品に対して衝突判定を行うのではなく、Bounding Sphereを用いて衝突候補の部品を絞り込み、効率的に行うことができる。

4. 非侵入性を利用した多点接触拘束感提示

現実世界で形あるモノに対しその領域を侵入しようとすると、それを妨げる反力が働く。これを物体の非侵入性という。本研究では非侵入性を、拘束力ベース手法^[11,12]を参考に実現することで、干渉することなく拘束感を提示する。同様なことは撃力ベース手法^[13,14]を用いても可能であるが、多点接触を1点接触に振り分けるため、両側拘束への適用が可能であるかは疑問である。拘束力ベース手法は、多点接触の剛体運動を近似的に実現するため、両側拘束への適用が期待できる。

4.1 剛体運動に基づく侵入解除

物体間の最短距離 l_i が l_{min} 以下となった状態を侵入したとみなし、侵入が発生したと同時に微小移動によりその解除を行う(図5参照)。その微小移動ができるだけ自然に見えるよう、剛体運動を利用して微小移動を求める。なお、侵入に至った瞬間は衝突判定法で検出できる。以下では2物体間(移動物体A, 静止物体B)の侵入解除について述べる。

図4のように物体Aが物体Bに侵入した時を考える。 r_i は物体Aの重心から侵入要素までの位置ベクトル、 d_i は侵入量(= $l_{min} - l_i$)、 n_i は面の単位法線ベクトルとする。このときの干渉排除のための条件式は

$$\times r_i + \Delta r \geq d_i n_i \dots(2)$$

で表される。 Δr は物体Aに働く侵入解除のため

の微小並進量，微小回転量であり，

$$\Delta \mathbf{r} = \frac{1}{m} \sum_i^n f_i \mathbf{n}_i \dots (3)$$

$$= \sum_i^n f_i \mathbf{I}^{-1} (\mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i) \dots (4)$$

で表せる． f_i は接触点に働く侵入解除の作用力の大きさであり $f_i > 0$ ． m, \mathbf{I} は物体 A の質量，慣性モーメント． n は侵入部位数とする．式(3),(4)を式(2)に代入し，まとめると以下の式になる．

$$\mathbf{A} \mathbf{f} \geq \mathbf{d}, \quad \mathbf{f} \geq 0 \dots (5)$$

ここで $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n)^T \in R^n$, $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)^T \in R^n$ である．

係数行列 $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ の要素 a_{ij} は

$$a_{ij} = (\mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{I}^{-1} (\mathbf{r}_j \times \mathbf{n}_j) + \frac{1}{m} \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{n}_j \dots (6)$$

となる．評価関数

$$J = \sum_i^n f_i \dots (7)$$

を最小にするもとで式(5)を満たす，物体 A の微小移動（式(3),(4)）を求めることで侵入解除を行う．以上の計算は線形計画法となるため，効率的な解法としてsimplex法を用いる．

侵入部位の数に応じて式(5)の次数は大きくなるが，simplex法の反復回数は多項式オーダーであるため，実時間で処理できる．また，式(3),(4)は粘性の大きな媒質中の運動⁶⁾に相当しており，微小移動 $\Delta \mathbf{r}$ は自然な動きとなる．これより現実に即した剛体運動に基づき，物体同士が干渉することなく，多点接触の剛体運動を実現できる．

4.2 拘束感提示方法

反力の計算には接触時の操作物体重心位置 \mathbf{X} と，デバイスのペン先位置 \mathbf{Y} の偏差 \mathbf{E} を利用する．

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{Y} \dots (7)$$

接触していない状態では $\mathbf{E} = 0$ とする．操作物体 A が物体 B に接触すると，侵入解除が働き操作物体 A は物体 B の表面から先には侵入しないが，デバイスは移動するため偏差が生じる．このときの反力 \mathbf{F} を

$$\mathbf{F} = k(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) + d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{Y}}) \dots (8)$$

とする． k は剛性係数， d は減衰係数である．

根本的に，移動距離を利用して力を計算するため，現実の衝突とは少し異なった感覚を受ける．パラメータ調整により剛性を高めることで，現実に近い衝突は得ることができるが，同時に振動を発生する可能性もある．また，今回使用したPHANTOMは提示できる力が弱いこともあり，あえて剛性は高めなかった．

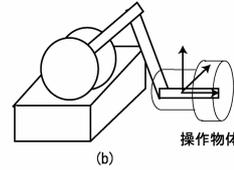
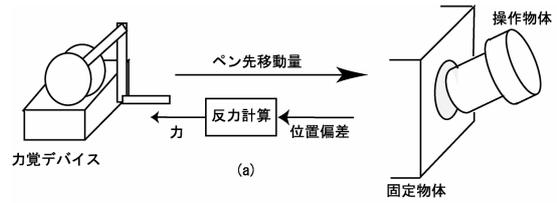


図6 実験システム

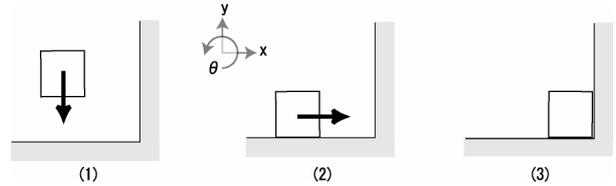


図7 a 実験手順 A

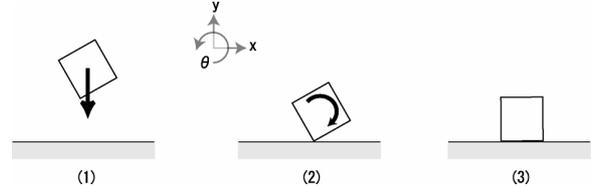


図7 b 実験手順 B

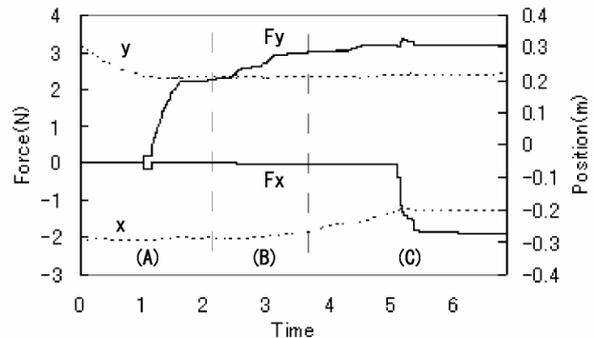


図8 a x y 方向の位置、反力

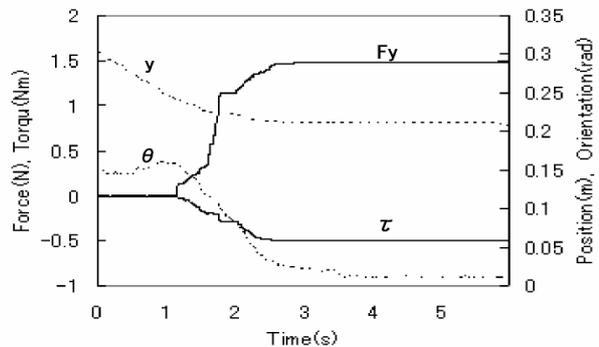


図8 b 方向の回転、反力

5. 実験

提案する手法の妥当性を検証するために2つの実験を行った。1つは接触時に、物体の姿勢、状態に応じた反力が出力されているかどうかの検討。もう1つは両側拘束の適用検討である。

5.1 システム構成

図6(a)にシステムの構成図を示す。仮想空間内では力覚提示装置の入力に応じて動く操作物体と、空間に固定された物体が存在する。力覚提示装置にはSensAble Technologies社製のPHANTOM 1.5/6DOFを用いる。操作者はPHANTOMのペン型のグリップを自由に動かすことで、位置、回転の6入力を行うことができる。仮想空間内の操作物体位置、姿勢はPHANTOMのペン先の移動量を基に更新している。図6(b)のように物体重心とペン先位置を一致させることで、操作者は仮想物体の重心を持ち操ることになる。本研究は組み立て検討作業を想定しており、組み立て易さの作業性は考慮していない。そのため物体の慣性は無視し、ペン先移動量に応じて物体を動かすようにした。

5.2 反力検討

立方体形状の操作物体を使用して、図7 a, bに示す手順に従い、壁への押し付けを行った。そのときの重心位置、姿勢、反力を図8 a, bに示す。

図8 aの(A), (C)において、物体が壁に衝突したタイミングで反力が加わることが確認できる。壁に接触した状態でなお力を加えた場合(B), 重心位置 y は変わることはない。図8 bでは、傾きをもって衝突した物体に、床面に平行になるようなトルクが加わることが確認できる。実物体を操作した場合と比べ、妥当な反力と運動が得られることが確認できる。

5.3 両側拘束の適用検討

今回提案した手法は多点接触の同時処理を考慮しているため、両側拘束の実現が期待できる。そこで両側拘束となりやすいケースの1つとして、図9で示すはめ合いを取り挙げ、PegをHoleに挿入した時のPegの重心位置を計測した。その結果を図10 aに示す。比較のため、同じ条件で侵入解除を撃力ベース手法に置き換えたときの結果を図10 bに示す。

図10 a, bにおける重心位置 y の軌跡の頂点、鞍部はHole側面への衝突が発生した時点である。衝突直後、提案手法の拘束力ベースは滑らかに動くのに対して、撃力ベースはその場で振動し停滞している。また同時に単位時間あたりの x 方向移動量も小さい。その理由に関して次のように考えられる。はめ合いはクリアランスを伴う円筒対偶であり、Hole軸に対しPeg軸が傾くと、並進方向の両側拘束が発生する。特に衝突直後はPeg姿勢が変化するため、両側拘束になりやすい。撃力ベース手法は両側接触のような多点接触を同時に扱えないため、衝突の反動で反対側のHole側面に衝突する可能性がある。それが

連続で続くとその場から動かなくなり(振動発生)、人が力を加えることでその状況から脱出することになる。

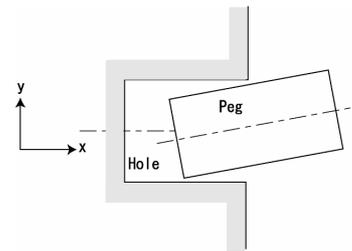


図9 はめ合い

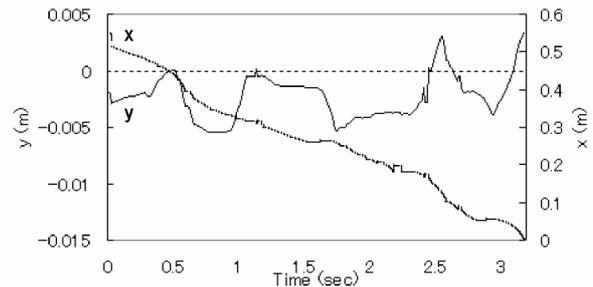


図10 a 拘束力ベース手法における挿入のPeg重心位置

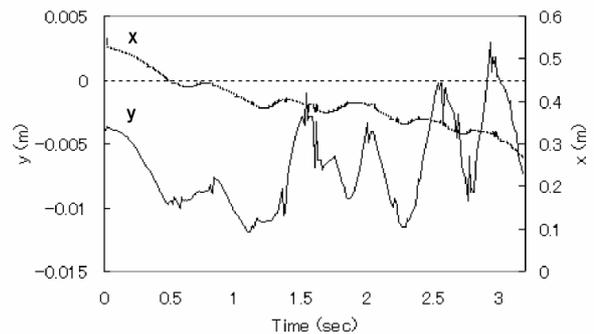


図10 b 撃力ベース手法における挿入のPeg重心位置

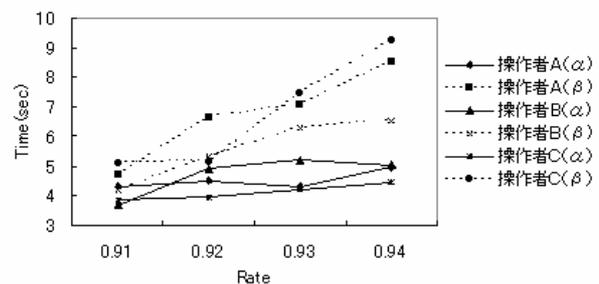


図11 作業時間の比較

両側拘束が操作性に影響があるかを見るため、Peg直径 d の変更でクリアランスを操作し、両側拘束の発生確率を変化させたときの作業時間への影響を調べた。時間測定する期間はPeg先端がHole表面に達したときから、Peg重心がHole表面に達するまでとする。実験中はPegの直径 d をランダムに変え、Peg/Hole直径比 $= (0.91, 0.92, 0.93, 0.94)$ とした。操作者は3名で行った。図11に結果を示す。図中の は拘束力ベース手法、 は撃力ベース手法を示

す。

撃力ベース手法ではクリアランスの減少に伴い、平均作業時間が増加した。両側拘束となるケースが多く発生し、振動による停滞によって時間がかかったと思われる。拘束力ベースでは、撃力ベースほど作業時間は増加していない。これより、両側拘束のような多点接触において有効に作用していると思われる。

今回のシステムでは物体の慣性を無視し、力覚デバイスのペン先移動量に応じて操作物体を動かした。もし慣性も考慮したシステムであれば、今回のような結果とは別になる可能性がある。

7. まとめ

本研究では力覚装置デバイスを用いた組み立て検討作業を想定し、剛体運動シミュレーション研究を行った。

幾何交差と最短距離計算手法を併用した衝突判定法、

物体の非侵入性を利用した多点接触の拘束感提示の提案により、計算量が少なく、違和感ない拘束感を提示可能なシステムを構築した。そして両側拘束が働くはめ合いにおいて、有効に作用していることを確認した。これは組み立て検討作業において、操作者にストレスを与えず、インタラクティブな操作が実現可能だと思われる。今後は具体的な組み立て検討作業に適用できるよう、システムの開発を行いたい。

文献

- [1] “デジタルモックアップ活用の分かれ道”, 日経デジタル・エンジニアリング, pp.48-49, No.2, 2002.
- [2] 例えば, Ming C.Lin, Dinish Manocha and John Canny, “Fast Contact Determination in Dynamic Environments”, Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.602-608, 1994.
- [3] 例えば, Stephen Gottschalk, Ming C.Lin and Dinish Manocha, “OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.171-180, 1996.
- [4] Matthew Moore and Jane Wilhelms, “Collision Detection and Response for Computer Animation”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.289-298, 1988.
- [5] 神徳徹雄, 谷江和雄, “仮想環境のための干渉力発生アルゴリズム”, 計測自動制御学会論文誌, pp.347-355, No.3, 1993.
- [6] 北村喜文, “仮想世界の物理法則”, 日本機械学会誌, pp.36-39, No.971, 1999.
- [7] 武田捷一, 丸山稔, “物理法則に基づくシミュレーション手法”, 電子情報通信学会論文誌, pp.860-869, J79-D-II-5, 1996.
- [8] 足立吉隆, 池本明夫, “力覚インターフェースを備えた先進的デジタルモックアップシステムの開発”, 日本VR学会第7回大会, 2002.
- [9] 足立吉隆, 池本明夫, “仮想作業環境における物体の操作と操作感の発生”, 精密工学会誌, pp.800-806, No.6, 2002.
- [10] http://www.cs.unc.edu/~geom/V_COLLIDE/
- [11] David Baraff, “Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.223-232, 1989.
- [12] David Baraff, “Fast contact force computation for non-penetrating rigid bodies”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.23-34, 1994.
- [13] Brian Mirtich and John Canny, “Impulse-based simulation of rigid bodies”, Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.181-188, 1995.
- [14] Beeling Chang and Edward Colgate, “REAL-TIME IMPULSE-BASED SIMULATION OF RIGID BODY SYSTEM FOR HAPTIC DISPLAY”, Proc. of the ASME Dynamic System and Control, pp.145-152, 1997.