

## 任意の多面体間に対する高速最近点算出アルゴリズムの開発

4C-4

佐藤 裕一\* 平田 光徳\*

\* (株)富士通研究所

丸山 次人\* 有田 裕一\*\*

\*\*富士通株式会社

### 1.はじめに

ロボテックスにおけるバスプランニング、機械系CADを使った設計解析、更にゲーム、ウォークスルー等のVRシステムでは、3次元空間上に配置した二つの多面体間の最近点及びその間のユークリッド距離を高速に算出する問題が重要となっている。今回我々は、この問題に対し、任意の多面体に適用可能な高速アルゴリズムを構築した。本アルゴリズムでは、凸用と非凸用の2種類のアルゴリズムを用意し、それらを距離に応じてスイッチングしながら使用すると共に、最近点を時間に対して連続的に追跡していく。これにより、例えば、対象を3次元的にマウスで移動させながら、他の対象との干渉状態を連続的に追跡していくといったリアルタイムチェックが可能となった。本報では、アルゴリズムと評価結果の概略について報告する。

### 2.従来法

従来、凸多面体間の距離を総頂点数に比例する計算時間で求めるアルゴリズムは幾つか知られており、その中でもGilbertによる方法は特別な前処理を必要としない極めて安定した方法（以下、Gilbert法と呼ぶ）である[1]。一方、非凸多面体の場合には、長らくポリゴン数の積のオーダーのアルゴリズムに甘んじていたが、最近、球を使って対象を階層表現することで探索領域を狭める方法（以下、Bubble Collision法と呼ぶ）が提案され、かなり良い性能を得ている[2]。

### 3.アルゴリズムの概要

これらに対し、今回、我々が提案する方法は上記の2手法を融合し、1)対象同士が充分離れている場合は非凸の対象を凸と見なしてGilbert法を適用し、Gilbert法で求めた距離を指標にして、その値があるしきい値より小さくなり互いに入り組み始めたら非凸多面体に対するBubble Collision法にスイッチする、2)最近点を時間に対して連続的に探索し、前サイクルで求めた距離情報を次サイクルにおける計算に

有効に活用する、という実用的手法を採用して大幅な高速化を図ったものである(図1)。特に、2)の手法によってGilbert法を連続時間用に拡張したことにより、凸多面体間に対しては、一回の最近点算出時間が頂点数にほとんど依らなくなり、そのため、Gilbert法で求めた距離を指標とした1)のスイッチングを極めてスムーズに行うことが可能となった。

#### 3.1 前処理

我々のアルゴリズムでは、1)非凸多面体から、それを包絡する凸多面体を構成する凸包構成、2)凸包上の各頂点における近接点構成、3)Bubble Collision法における2分木階層球構成[2]、の三つの前処理を行う。1)に関しては、計算幾何学で良く知られた $O(n \log n)$ の手法を数値誤差に対して極めて頑強にしたアルゴリズムを使用した[3],[4]。これに関しては、現在、小野氏から入手したプログラムを組込んで使用している。2)は、図1に示すように、凸包を構成する各頂点に対し、エッジで繋がった近接点をポインタで辿れるようにするものである。この処理は凸包構成と同時に行って結果を専用のファイルに落すため、次回以降は単に専用の凸包データの読み込み処理となる。3)の2分木階層球の構成は、分割統治法を使いポリゴンデータ読み込みと同時に毎回行う。

#### 3.2 基幹アルゴリズム

まず、対象同士が充分離れている場合を想定する。この場合、最初のサイクルではGilbert法をそのまま適用し凸包間の距離ベクトルを求める。Gilbert法では、以下の内積計算を繰り返すことにより、最近点ベクトルを張る頂点候補を選び出し、ベクトル $\eta$ を最近点

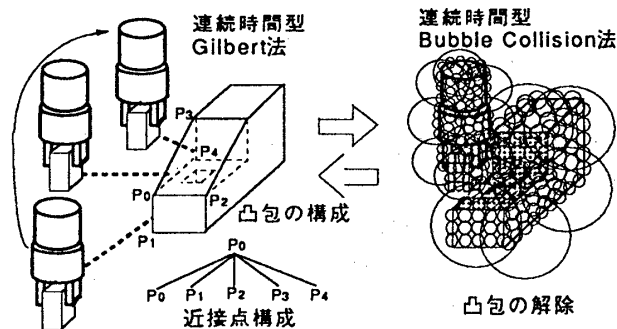


図1 アルゴリズムの概要

A Practical and Efficient Algorithm for Obtaining the Closest Points Between Non-Convex Objects

Yuichi Sato\*, Mitsunori Hirata\*, Tsugito Maruyama\*, Yuichi Arita\*\*

\*Fujitsu Laboratories Ltd. \*\*Fujitsu Ltd.

ベクトル $\eta_{final}$ に収斂させていく。

$$h_x(\eta) = \max\{x_i \cdot \eta : x_i \in X\},$$

$$h_y(\eta) = \max\{y_i \cdot \eta : y_i \in Y\}.$$

ここで $x_i, y_i$ は各凸包を構成する頂点ベクトルである。 $\eta$ の初期値には、各凸包の幾何重心を結ぶベクトルを取る。内積計算は、凸包を構成する頂点全体に渡るため、最初のサイクルは総頂点数に比例した処理時間となる。次サイクル以降は、3.1で述べた近接点の情報を使い、内積を取る範囲を前サイクルで求めた最近点ベクトル $\eta_{final}$ の端点の廻りに限定する。従って、次サイクル以降の処理時間は一定値以下、正確には各サイクルにおける $\eta_{final}$ の端点の局所領域内に存する総頂点数に比例した値となる。次に、対象同士が接近し互いに入り組み始める場合を想定する。連続時間型Gilbert法を使って常に凸包同士の距離 $d_c$ をモニタし、 $d_c$ の値があるしきい値以内に入ったならば、以下で説明する連続時間型のBubble Collision法を起動し、Bubble Collision法で求めた距離 $d_b$ を対象間の距離とする。対象同士が再び離れ、 $d_c$ の値がしきい値の外に出たならば連続時間型Bubble Collision法を停止し、 $d_c$ の値をそのまま対象間の距離とする。

Bubble Collision法では、2分木階層球で包み込んだ対象同士に対し、深さ優先(depth-first)の探索を施し、最も接近するポリゴン上の微小球のペアを引出す。最後に球の中心が乗っているポリゴンのペアにGilbert法を適用することにより最近ベクトルを算出する。我々が拡張した連続時間型アルゴリズムでは、前サイクルにおけるポリゴンペア（多点接触の場合には複数組存在する）の情報をメモリ上に保持し、数サイクルの間はこれらのポリゴンペア上に最近ベクトルが留まるとして2分木の探索を省く。多点接触状態が変化した時などには、ポリゴンペアを更新しなければならないため数サイクルに一度の割合で、2分木の探索を復活させる。そのサイクル間隔をCとする時、この手法により、処理時間は通常のBubble Collision法の $1/C$ 近くになる。

#### 4. 評価

図2は連続時間型Gilbert法における1サイクル当りの計算時間と総ポリゴン数の関係を示している。測定には、16Mflopsの計算機を使用した。通常のGilbert法が右上がりの線形依存を示しているのに対し、連続時間型Gilbert法ではポリゴン数が増えても傾きがフラットで0.6ms以下に抑えられている。図2は、球形状の凸包同士に対するデータであるが、この結果は形

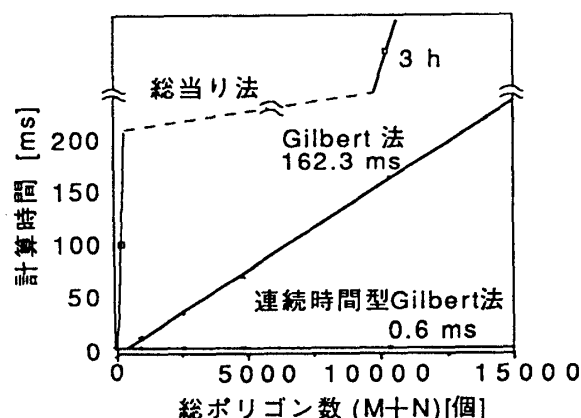


図2 凸多面体における処理時間の比較

状にはほとんど依存しない。連続時間型Bubble Collision法の性能は、対象の形状、ポリゴン数、2分木階層球の階層数、相対距離、相対誤差パラメータ[2]、及び2分木探索を復活させるサイクル間隔C等の多数のパラメータに依存するが、1万ポリゴン以下の非凸形状に対して $C=10$ 程度に設定すると、通常のBubble Collision法に比べ10倍近く高速化し、1サイクル当たり1秒以下の性能を確保できる。これによりマウスを使ったインタラクティブな干渉チェックにもほとんど支障がないことを確認している。なお、前処理に要する時間は、1万ポリゴン程度の対象に対し、凸包構成、近接点構成に2~3分、2分木階層球の構成に10数秒である。この内、凸包、近接点の情報は、専用のファイルに落すためモデルを更新しない限り再度行う必要はない。

#### 5. おわりに

今回提案したアルゴリズムは、グラフィックス系、ウィンドウ系プログラムと合わせ、凸包構成部分を除いたその他全てをC++にて実装し、現在、富士通社内にて試用を重ねている。

#### 参考文献

- [1] Gilbert, E.G., Johnson, D.W. and Keerthi, S. S., "A Fast Procedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space", IEEE Journal of Robotics & Automation, Vol.4, No.2, pp.193-203, 1988.
- [2] Quinlan, S., "Efficient Distance Computation between Non-Convex Objects", Proc. of IEEE International Conference of Robotics & Automation, pp.3324-3329, 1994.
- [3] 杉原 厚吉著, "計算幾何工学", 培風館, 1994.
- [4] 小野 剛, "Use of A Perturbation Technique in The Construction of A Convex Hull," Senior thesis, Dept. of Information Science, Univ. of Tokyo, 1994.