4F-01

再構築ポリゴン壁に基づくSPH壁境界計算手法

笠　晃一

福岡工業大学 情報工学部

1．はじめに

流体力学における物理シミュレーションの一種に粒子法というものがある．これは粒子を使用して流体を表現するものであるが質量保存が容易に実現できるため，３次元コンピュータグラフィックスにおける流体の表現で頻繁に利用されている．現在までに開発されている粒子法として，SPH法とMPS法がある．ただし，MPSに比べSPHの方が計算コストが低いので，コンピュータグラフィックスで使用されるのはほとんどSPHであり，本研究でもSPHを用いている．粒子法では固体との境界を形成する壁も粒子で表現する．しかし壁粒子は離散的に配置されるため離散化誤差が発生して，斜面を流体が滑らかに流れないという現象が見られるし，壁から受ける力を正確に計算できないといった不具合も生じる．

原田らは壁境界を表現するのに粒子ではなくポリゴンメッシュを使用することを提案した[1]．これは流体粒子からポリゴンメッシュまでの距離を用いて壁から受ける力を計算するので，壁粒子を使用したときに生ずる問題は解決する．しかし，この手法では距離をいかにして計算するかという問題が新たに発生する．流体粒子からポリゴンメッシュまでの距離を計算する方法の一つに距離関数の利用があり，距離関数を高精度に求める手法も開発されているが計算コストが高く，ポリゴンメッシュが移動した場合の再計算の負荷が大きくなる．これに対し，原田らは離散境界を用いて距離関数を計算する手法を提案している[2]．この手法は従来の手法に比べ計算コストが低くなるが，離散化誤差が混入し，流体粒子が滑らかに流れないという現象を完全に除去することができない．また，依然として距離関数の値を３次元的に求める必要があるため，再計算の負荷は決して小さくない．そこで，我々はポリゴンメッシュの代わりに離散境界を用い，これにポリゴンメッシュの情報を持たせるという手法を新たに開発した．こうすることにより，ポリゴンメッシュの情報を高速に引き出し，流体粒子からポリゴンメッシュまでの距離を精度よく求めることが可能になる．また，この手法は壁境界が移動した場合でも，離散境界が持つ情報を更新するだけでよく，再計算のコストは低い．

Wall Boundary Calculation Model in SPH Based on Reconstructed Polygon Wall
Koichi Ryu
Fukuoka Institute of Technology

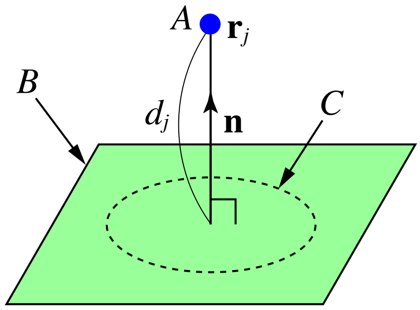


図１　離散境界の情報と平面の再構築

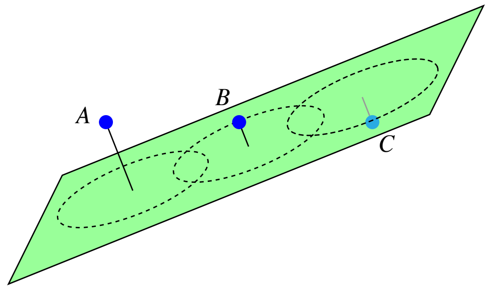


図２　離散境界の複数個の点による平面の再構築

2．ポリゴン壁の再構築

離散境界とは，ポリゴンメッシュの境界面を点によって離散化したものであり，ポリゴンメッシュをボクセル化し，各ボクセルの中心に点を作成することにより構築される．ポリゴンメッシュのボクセル化は，空間を格子で分割し，ポリゴンメッシュと交差する格子セルをボクセルとすることにより実行される．

ポリゴンを離散境界に変換する際，離散境界に元のポリゴンの情報を持たせることが可能である．図１においてAは離散境界を構成する点の１つを表し，Bはポリゴン平面を表している．ここで，平面Bの単位法線ベクトルを$\mathbf{n}$とし，点Aの位置ベクトルを$\mathbf{r}_j$，点Aの平面Bに関する符号付き距離をd_jで表すことにし，三つ組$<\mathbf{n}, \mathbf{r}_j, d_j>$を点$A$の持つ情報として記憶しておく．すると，これらの情報よりポリゴン平面Bの方程式が次のように得られる．

$$(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j)\cdot\mathbf{n}+d_j=0 \quad (1)$$

これは，点Aの持つ三つ組情報からポリゴン平面を局所的に再構築可能なことを意味している．図１のCが局所的に再構築されたポリゴン平面または壁を表している．また，図２は離散境界を構成する複数個の点によって再構築されたポリゴン壁を示している．

流体粒子iが与えられたとき，流体粒子から壁までの距離を次のようにして計算することにする．すなわち，まず離散境界のうち流体粒子に最も近い点jを求め，この点の三つ組情報を引き出す．これを＜$\mathbf{n}$，$\mathbf{r}_j$，d_j＞とすると，流体粒子から壁までの距離d_iは次のようにして計算される．

$$d_i=(\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_j)\cdot\mathbf{n}+d_j \quad (2)$$

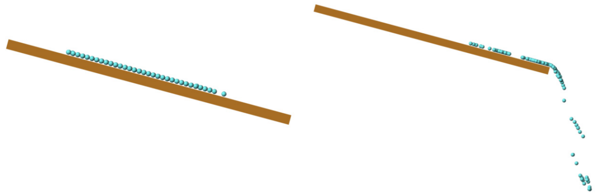
ただし，$\mathbf{r}_i$は流体粒子の位置座標である．なお，ポリゴン壁が移動や回転をしたときは離散境界の持つ情報のうち$\mathbf{n}$と$\mathbf{r}_j$を再計算する必要がある．しかしながら，これは行列を掛ける計算であり，しかも，距離関数の計算が３次元空間内の格子点に対して実行しなければならないのに対し，離散境界はポリゴンオブジェクトの表面付近にしか存在しないので高速な計算が可能である．

３．数値実験

15度の傾斜を持つ平らな斜面に立方体状の流体粒子を配置し，重力により崩壊させた後，斜面を滑り落とさせるいう実験を行った．立方体の１辺の長さは4cmとした．実験結果を図３に示す．(a) は境界壁として３層粒子壁を用いた場合の0.9sec後の流体粒子の様子を表しているが，粒子が斜面の途中で停滞しているのが観測された．これは，時間がさらに経過しても状況は変化しなかった．これに対し，(b) は再構築されたポリゴン壁を用いた場合の0.9sec後の流体粒子の様子を表している．粒子が斜面に沿って滑らかに流れ落ちているのがよく分かる．

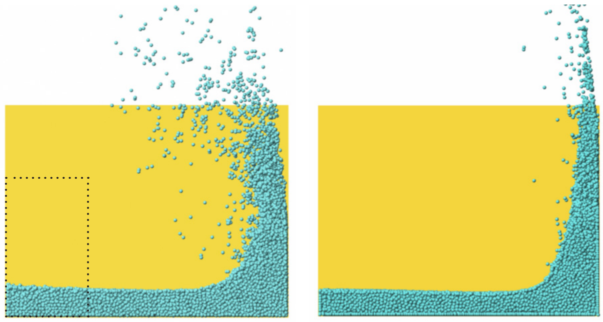
次に，図4(a) の点線で示すような直方体状の流体粒子を水槽内に配置し，重力により崩壊させた．これは計算流体力学における標準実験の１つであり，水柱崩壊実験などと呼ばれている．水槽の大きさを，幅×高さ×奥行きが40cm×30cm×20cmとなるようにし，水柱の大きさを12cm×20cm×20cmとした．

実験結果を図４に示すが，(a) と (b) はそれぞれ境界壁として３層粒子壁および再構築されたポリゴン壁を用いた場合の崩壊後の流体粒子の様子である．どちらの場合も右側の壁に衝突した粒子が全体的に最も高い位置に来る瞬間として物理時間t=0.467secを選択した．(a) の粒子が右側の壁より離反したのち散開しているのに対し，(b) の粒子は右側の壁に沿って高く上昇している．実際の水を用いた実験では，水が右側の壁に衝突した後，壁に沿って高く上昇するので，(b) の方がより実際の水に近い挙動を再現していると考えられる．そして，これは３層粒子壁よりも再構築されたポリゴン壁の方が，壁の近傍において流体粒子により適切な力が働いているということを示唆している．



(a) ３層粒子壁　　(b) 再構築ポリゴン壁

図３　平らな斜面を用いた実験



(a) ３層粒子壁　　(b) 再構築ポリゴン壁

図４　水柱崩壊実験

４．おわりに

今後の改良点として複数個のCPUやGPUを用いた並列処理が考えられる．特にGPUでは３次元幾何変換が高速に実行可能なので，壁境界が移動したときの移動変換や回転変換を短時間で実行できるものと思われる．

参考文献

[1] 原田隆宏，越塚誠一:SPHにおける壁境界計算手法の改良，情報処理学会論文誌，Vol. 48，No.4，pp.1838-1846 (2007).

[2] 原田隆宏，越塚誠一：離散境界を用いた距離関数の構築手法，情報処理学会論文誌，Vol. 48，No.4，pp.1820-1828 (2007).