

マルチコンタクト表面モデルの数式解説 (surface_model_multicontact.h)

Open DEM Japan

2025年6月29日

本ソースは「半無限弾性体 (Fix multicontact/halfspace) と連携し、複数接触を同時に考慮する DEM 表面モデル」である。粒子-粒子の場合にも半空間理論の拡張を視野に、接触位置または拡張半径と作用正規力を履歴として保持し、他モジュール (半空間コンタクト解) に情報を渡す。以下で実装の数学的内容を述べる。

■1. 接触ジオメトリ 中心間距離 $r = \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|$ と法線 $\mathbf{n} = (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)/r$ はデフォルトモデル (前節) と同一である。オーバーラップ $\delta_n = (R_i + R_j) - r$ も同様であるが、履歴配列への登録方法が異なる。

■2. 履歴に格納される量

• 壁接触時

接触点 \mathbf{x}_c は粒子中心 \mathbf{x}_i から $\mathbf{x}_c = \mathbf{x}_i - R_i \mathbf{n} + \frac{\delta_n}{2} \mathbf{n}$ で得られる。座標成分 (x_c, y_c, z_c) が履歴 `surfPos_{x,y,z}` として保存される。

• 粒子-粒子接触時

半空間モデルが粒子半径に外部「膨張厚さ」を加味できるように、

$$\tilde{R}_i = R_i + e_i, \quad \tilde{R}_j = R_j + e_j \quad (1)$$

を履歴 `radij, radji` に格納する ($e_{i,j}$ は後段の半空間解から更新され得る)。

• 正規力連続的な半空間応答の入力とするため、

$$f_n = |\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n}| \quad (2)$$

を履歴 `fn` に保持する。式 (2) は `endSurfacesIntersect` で加算されるので、力学モデル側で F_n が決まった後に呼び出される。

■3. 運動学量の算出 速度分解・回転寄与の扱いはデフォルトモデル式 (4) - (9) に完全に一致する。よって

$$\mathbf{v}_{tr} = \mathbf{v}_t - \boldsymbol{\delta} \times \boldsymbol{\omega}_{\text{eff}}, \quad \boldsymbol{\omega}_{\text{eff}} = \frac{\tilde{R}_i \boldsymbol{\omega}_i + \tilde{R}_j \boldsymbol{\omega}_j}{r} \quad (3)$$

を用いるが、 $\tilde{R}_{i,j}$ が履歴と同期している点のみが差異である。

■4. 半空間モデルへのインタフェース `Fix multicontact/halfspace` は全接触の $\{\mathbf{x}_c, \tilde{R}_i, \tilde{R}_j, f_n\}$ を受け取り、 $g(\mathbf{x}_c) = e_i$ のように局所的な変位場 (拡張厚さ) を返送する。この双方向通信に備え、当モデルは

$$\text{neighbor contact_distance_factor} = 2.0 \quad (4)$$

を設定し、粒子半径分の外側にも接触探索を拡張している。

■5. 接触終了時の後処理 粒子が分離するとき、履歴の意味が \mathbf{n} の方向ベクトル／半径に切り替わるため

$$\mathbf{h}^{\text{new}} = \begin{cases} R_i \mathbf{n} & (\text{壁}) \\ (R_i, R_j) & (\text{粒子}) \end{cases} \quad (5)$$

へリセットする。これにより再接触時に古い f_n や \mathbf{x}_c が誤用されない。

■6. まとめ `surface_model_multicontact.h` は

$$(\mathbf{x}_c, \tilde{R}_i, \tilde{R}_j, f_n)$$

を履歴管理し、Fix `multicontact/halfspace` と協調して多点接触を半無限弾性体理論で解くための **前段処理** を担う。運動学分解は従来モデルと同一であるため、他の力学モデルと完全互換となる。