

表面モデル基底クラスの数式解説 (surface_model_base.h)

Open DEM Japan

2025年6月29日

本ファイルは「粒子 ↔ 三角形メッシュ (壁・障害物) 接触」を抽象クラスとして定義し、他の具象 SurfaceModel が継承するための枠組みである。以下では基底クラスが前提とする物理量・演算を数式で示し、個々の派生モデルがどの関数でどの式を実装・上書きするかを明示する。

■ 三角形メッシュ上の単一面 (頂点 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$) に対し、接触候補粒子 i の重心位置を \mathbf{x}_i 、半径 R_i 、速度 \mathbf{v}_i とする。面の単位法線を

$$\mathbf{n} = \frac{(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)}{\|(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)\|}, \quad (1)$$

粒子中心の法線方向距離を

$$d = (\mathbf{x}_i - \mathbf{v}_1) \cdot \mathbf{n}. \quad (2)$$

■ 衝突判定 (checkSurfaceIntersect) 粒子と面が法線方向に重なる条件は

$$\delta_n = R_i - d > 0. \quad (3)$$

さらに投影点 $\mathbf{p} = \mathbf{x}_i - d\mathbf{n}$ が三角形内部に入るかをバリュ法・面積比等で判定し、両方満たすとき true を返す。

■ 力学量の準備 (surfacesIntersect 前半) 接触点を

$$\mathbf{c} = \mathbf{p} + \frac{\delta_n}{2} \mathbf{n}, \quad (4)$$

正規貫入速度を

$$v_n = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{\text{mesh}}) \cdot \mathbf{n}, \quad (5)$$

接線速度を

$$\mathbf{v}_t = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{\text{mesh}}) - v_n \mathbf{n}, \quad (6)$$

と定義。ここで \mathbf{v}_{mesh} は面上接触点の壁速度 (静的壁なら $\mathbf{0}$)。

■ 正規力計算 (例: Hooke, Hertz 等) 派生モデルで

$$F_n = k_n \delta_n - \gamma_n v_n \quad \text{または} \quad F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} - \gamma_n v_n \quad (7)$$

などを選択し、 $\mathbf{F}_n = F_n \mathbf{n}$ 。

■ 接線力計算 (Coulomb 限界付きスプリング - ダッシュポット) 接線ばね伸縮量 ξ_t の時間更新

$$\xi_t(t + \Delta t) = \xi_t(t) + \mathbf{v}_t \Delta t, \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_t^{\text{trial}} = -k_t \xi_t - \gamma_t \mathbf{v}_t, \quad \|\mathbf{F}_t^{\text{trial}}\| > \mu |F_n| \implies \mathbf{F}_t = -\mu |F_n| \frac{\mathbf{v}_t}{\|\mathbf{v}_t\|},$$

さもなくば $\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_t^{\text{trial}}$.

■ 力・モーメントの粒子への加算 (surfacesIntersect 後半)

$$\mathbf{F}_i += \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t, \quad \mathbf{M}_i += (\mathbf{c} - \mathbf{x}_i) \times (\mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t). \quad (9)$$

壁側 (三角形メッシュ) は反作用をメッシュノードへ積算し, 温度計算や変形壁の場合には tally_pw が使用される。

■ 接触終了 (surfacesClose) $\delta_n \leq 0$ に転じた時点で $\xi_t = 0$ とし履歴ばね変位をリセット。熱収支や消散エネルギーもここで後処理する。

■ パス管理 beginPass / endPass でセル走査ループ毎に初期化や集計を行う。壁全体に渡るエネルギー集計 $Q = \sum \mathbf{F}_t \cdot \mathbf{v}_t \Delta t$ 等を tally_pw へ送り, 粒子-粒子の場合の tally_pp も同様に設けている。

■ まとめ surface_model_base.h は

- 接触判定 (??) と位置幾何量 (??) - (??),
- 派生クラスが実装する力学モデルの受け皿 (??) - (??),
- 粒子・壁への力およびモーメント作用 (??),

を抽象インターフェースとして規定し, LIGGGHTS 内の多様な表面モデル (粗面壁, 熱壁, 摩擦・粘着壁など) の共通土台を提供している。