

# Rolling Model 基底クラスの数式解説 (rolling\_model\_base.h)

Open DEM Japan

2025年6月29日

LIGGGHTS では転がり抵抗 (rolling resistance) を通常の接線摩擦とは独立のモデル階層として実装し、基底クラス RollingModelBase が以下の力学的役割を担う。

粒子回転  $\implies$  転がりすべり変位  $\xi_r \implies$  抵抗トルク  $M_r$

■**転がり変位の定義** 粒子  $i$  と  $j$  が接触点  $c$  を共有するとき、接触法線を  $e_n$ 、角速度を  $\omega_i, \omega_j$  とする。相対角速度

$$\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j \quad (1)$$

を接線成分に射影し、半径  $R_i, R_j$  で重み付けした転がり変位率

$$\dot{\xi}_r = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} (\omega_{ij} - (\omega_{ij} \cdot e_n) e_n) \quad (1)$$

を取る。時間積分により

$$\xi_r(t + \Delta t) = \xi_r(t) + \dot{\xi}_r \Delta t. \quad (2)$$

■**弾性 - 粘性トルク** ばね係数  $k_r$ 、粘性係数  $\gamma_r$  を導入し

$$M_r^{\text{spring}} = -k_r \xi_r, \quad (3)$$

$$M_r^{\text{damp}} = -\gamma_r \dot{\xi}_r, \quad (4)$$

転がり抵抗トルク

$$M_r = M_r^{\text{spring}} + M_r^{\text{damp}}. \quad (5)$$

■**クーロン上限 (転がり摩擦係数)** 法線力  $F_n$  と転がり摩擦係数  $\mu_r$  を用いた Coulomb - タイプ制限

$$\|M_r\| \leq \mu_r F_n R^*, \quad R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j}, \quad (6)$$

を課し、超過分があれば

$$M_r \leftarrow -\mu_r F_n R^* \frac{M_r}{\|M_r\|}. \quad (7)$$

■**運動方程式への寄与** 粒子  $i$  への角運動方程式は

$$I_i \dot{\omega}_i = M_i^{\text{contact}} = M_r + (r_{ci} \times F_t), \quad (8)$$

ここで  $I_i$  は慣性モーメント、 $F_t$  は接線力、 $r_{ci}$  は接触点から粒子重心へのベクトルである。粒子  $j$  には符号反転したトルクが作用する。

## ■クラス設計との対応

- `surfacesIntersect` : 式 (??) - (??) に従い  $\xi_r, M_r$  を逐次更新し, (??) のトルク項を `ForceData::delta_torque` に加算する。
- `surfacesClose` : 接触消滅時に  $\xi_r = \mathbf{0}$  とし, 履歴を消去する。
- `beginPass/endPass` : マルチモデル結合時の前後処理 (例: ステップ内でのトルク合算) に用いる。

以上により基底クラスは「転がり変位の蓄積」「弾性 - 粘性トルクの計算」「摩擦上限の適用」というロジックを共通実装として提供し, 派生クラスは  $k_r, \gamma_r, \mu_r$  の定義や追加物理 (粘着性, 速度依存係数など) を実装するだけで済む構造になっている。