

CDT 非線形 2 転がり抵抗モデルの数式解説 (rolling_model_cdtnonlinear2.h)

Open DEM Japan

2025 年 6 月 29 日

粒子 i と j (あるいは粒子と剛壁) が正規接触しながら相対転がりを示すとき、本モデルは法線力 F_n に比例するクーロン型抵抗トルクのみで転がり摩擦を近似する。ここで

$$R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j}, \quad F_n = (\text{正規モデルが計算した実効正規力}) \quad (1)$$

である (壁の場合は $R^* = R_i$, j 側反作用は壁へ加えない)。

■ 粒子角速度差

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \omega_i - \omega_j & (\text{粒子対}) \\ \omega_i & (\text{粒子-壁}) \end{cases}, \quad e_n = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \quad (2)$$

を接線に射影して

$$\dot{\xi}_r = R^*(\omega_{ij} - (\omega_{ij} \cdot e_n)e_n), \quad \omega_r = \|\dot{\xi}_r\|. \quad (3)$$

転がり摩擦係数 μ_r は型依存パラメタ `coeffRollFrict` とし、抵抗トルクの大きさを

$$M_{\max} = \mu_r F_n R^* \quad (4)$$

とする。よって瞬時トルクは

$$\mathbf{M}_r = \begin{cases} -M_{\max} \frac{\dot{\xi}_r}{\omega_r} & (\omega_r > 0) \\ \mathbf{0} & (\omega_r = 0) \end{cases}. \quad (5)$$

オプション `torsionTorque=false` の場合、法線ねじり成分を除去して

$$\mathbf{M}_r \leftarrow \mathbf{M}_r - (\mathbf{M}_r \cdot e_n)e_n. \quad (6)$$

粒子 i への角運動方程式は

$$I_i \dot{\omega}_i = -\mathbf{M}_r + (\mathbf{r}_{ci} \times \mathbf{F}_t), \quad \mathbf{r}_{ci} = -R_i e_n, \quad (7)$$

粒子 j には $+\mathbf{M}_r$ が作用する。ここで \mathbf{F}_t は接線摩擦力である。

本モデルはばねや粘性項を伴わず、正規モデルが返す現実の F_n を直接用いるため、非線形正規モデルでも一貫した転がり抵抗を提供できる。また接触消滅時にはトルクがただちにゼロ化され、エネルギー散逸の履歴を残さない。