

凝着説に基づく物体表面の弾性変形を考慮した摩擦音の生成手法の提案

中塚 貴之†

森島 繁生‡

† 早稲田大学

‡ 早稲田大学理工学術院理工学総合研究所 / JST CREST

1 はじめに

CG映像を演出する効果音は、実際の音の録音やシンセサイザを用いた合成により作成されている。効果音の中でも摩擦音は車両のブレーキ音や擦弦楽器の音など多岐にわたり、個々の映像に合った音を作成するためには多くの労力と高い技術力が必要となる。したがって、摩擦音を手軽に生成することに対する需要は高い。

このような問題に取り組んだ研究として、物理シミュレーションを用いたものがある。Renら[1]は三段階のスケールでの物体の表面モデルから摩擦音を生成したが、剛体以外には適用できない問題があった。Anら[2]は布が他物体に接触している時のメッシュ頂点の速度とデータベース上の摩擦音を対応付けることで摩擦音を生成した。しかし、データベース作成の際には布同士を様々な速度で摩擦させて生じる音を録音する必要があり、多大な労力がかかるという問題があった。

そこで本研究では、摩擦現象を説明する理論の一つである凝着説に基づく物理シミュレーションによる摩擦音の生成を行う。スティック・スリップ現象をCoulomb力により表現し、スリップによる物体の振動を計算することで、物体に合った摩擦音の生成を可能とする。

2 摩擦現象の原理

摩擦について、(i) 摩擦力は垂直抗力に比例する、(ii) 摩擦力は見かけの接触面積に依らない、(iii) 最大静止摩擦力は動摩擦力よりも大きい、という三つの事実が認識されている。摩擦の現象論的考察として最も浸透している凝着説[3]では、特に(ii)の事実に基づき、物体の表面には十分小さなスケールにおいて凹凸が存在し、物体表面の真実接触点と呼ばれる部分が真に接触している。真実接触点では、分子間または原子間の相互作用による物体同士の結合(凝着)が生じている。この凝着は物体の運動によって切断され、切断時の刺激により真実接触点まわりで振動が生じる。真実接触点の凝着・切断が繰り返される現象をスティック・スリップ現象といい、摩擦音が発生する原因となっている。

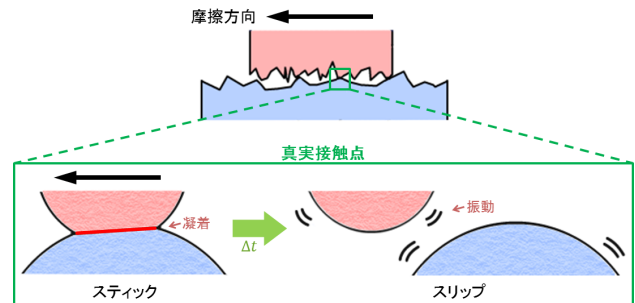


図1 凝着説

3 摩擦音の生成

提案手法では、凝着説に基づく摩擦の物理シミュレーションを行い、摩擦音の生成する。具体的には、摩擦力によって生じる真実接触点の振動を計算した後に、各点で生じる音を観測点にて合成し摩擦音を生成する。

3.1 真実接触点近傍の振動の計算

摩擦によって生じる真実接触点の振動を算出するため、摩擦力によって生じる接触点の運動量変化に着目する。真実接触点の位置をPosition Based Dynamics[4]によって表現される点の位置に凝着による制約を考慮することで算出する。真実接触点の位置に対する制約項 C は物体の形状を制御する項 $C_{\text{Deformation}}$ 及び物体間の相互作用を表すCoulomb項を用いて以下のように表される。

$$C = C_{\text{Deformation}} + C_{\text{Coulomb}} \quad (1)$$

式(1)によって得られる制約を真実接触点の位置について微分することで真の接触点の位置が得られる。物体の頂点位置の変化から、各点における運動量を求める。物理シミュレーションの時間幅を Δt 、任意の時間 t における物体の i 番目の頂点位置を $\mathbf{x}_i(t)$ とすると、 i 番目の頂点位置における運動量 $\mathbf{p}_i(t + \Delta t)$ は以下の式になる。

$$\mathbf{p}_i(t + \Delta t) = \frac{\mathbf{x}_i(t + \Delta t) - \mathbf{x}_i(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

摩擦による運動量変化を求めるため、物体頂点の中で他物体と接触している点に注目し、摩擦力 F を以下のように計算する。

$$F = \frac{\mathbf{p}_i(t + \Delta t) - \mathbf{p}_i(t)}{\Delta t}, \quad (i \in \text{接触点}) \quad (3)$$

“Friction sound generation with elastic deformation of object surface”

†Takayuki NAKATSUKA, Waseda University

‡Shigeo MORISHIMA, Waseda Research Institute for Science and Engineering / JST CREST

物体に摩擦が生じると、その接触点を中心に波が伝播する。物体中において波は減衰し 0 に収束する。そのため、接触点近傍の矩形領域の振動は固定端を境界条件とし、波の減衰の程度を表す窓関数を乗じることで表現できる。矩形領域 D を $D = \{(x, y) | -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\}$ とすると、任意の位置 (x, y) における変位 u_{mn} と固有角周波数 ω_{mn} は以下のように計算される。

$$u_{mn} = A \sin \frac{m\pi(x + \frac{a}{2})}{a} \sin \frac{n\pi(y + \frac{b}{2})}{b} e^{-R+i\omega_{mn}t} \quad (4)$$

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left\{ \left(\frac{m}{2a} \right)^2 + \left(\frac{n}{2b} \right)^2 \right\} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\sigma(1-\nu^2)}} \quad (5)$$

A は振動の振幅, m, n は振動のモード, R は減衰項, E はヤング率, h は厚さ, σ は単位体積あたりの質量, ν はポアソン比である。振動の振幅 A は、摩擦力 F により決定する。また、矩形領域の辺 a, b に関しては式 (5) より摩擦音の音高 ω が真実接触点の速度 v に依存することから式 (6) によって決定する。

$$\frac{1}{a} = \alpha v, \quad \frac{1}{b} = \beta v, \quad (\alpha, \beta \text{ は定数}) \quad (6)$$

ここで、物体面の粗さを表現するため領域の辺の長さ a, b は分散 σ_a, σ_b の正規分布に従うものとする。

3.2 音の合成

音源を近似することで、接触点近傍の矩形領域の振動を単純化する。矩形領域の一辺の長さ a, b は接触点から観測点までの距離 $|r|$ と比べ十分小さいため、面音源を点音源に近似できる。したがって、面音源を点音源に近似するため、 $a, b \rightarrow 0$ の極限操作を行う。このとき、位置 r , 時刻 t における音圧の空間分布 $P(r, t)$ は、空気密度 ρ , 音速 c , 振動速度 V_0 , 波数 k を用いて

$$P(r, t) = i\rho c V_0 \frac{k}{4\pi r} e^{-ikr} \quad (7)$$

ただし、振動速度 V_0 は

$$V_0 = iA\omega_{mn}\alpha_{mn}e^{i\omega_{mn}t} \quad (8)$$

$$\alpha_{mn} = \begin{cases} 1 & m+n \equiv 0 \pmod{2} \\ -1 & m+n \equiv 1 \pmod{2} \end{cases} \quad (9)$$

そして、各接触点の振動により生じる音を観測点にて合成する。 i 番目の接触点によって生じる音を P_i とすると、観測される音は式 (10) のように表せる。

$$\text{sound} = \sum_i P_i(r_i, t) \quad (10)$$

表 1 物理シミュレーション時の条件一覧

	時間幅 Δt [s]	辺 a, b [mm]	分散 σ^2
サンプル 1	1/44100	3	0.0
サンプル 2	1/44100	0.1	5.0×10^{-5}

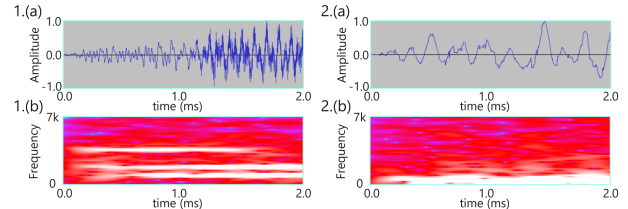


図 2 生成された音声 (a) 波形と (b) スペクトログラム

4 結果と考察

金属の摩擦音と表面が粗い物体の摩擦音を生成するため、表 1 のパラメータを使用した。サンプル 1 が金属に、サンプル 2 が表面が粗い物体に対応する。生成結果の波形とスペクトログラムを (図 2) に示す。

図 2 のスペクトログラムにより、サンプル 1 は倍音構造を持ち、サンプル 2 は倍音構造を持たないことがわかる。これは、金属の接触面が均一であることと、表面が粗い物体の接触面が不均一であることに対応する。

5 まとめと今後の課題

本研究では、凝着説に基づく摩擦の物理シミュレーションを行い、物体に依存しない摩擦音の生成手法を提案した。パラメータを変化させることで、音色に明確な差異が現れることを確認できた。今後の課題として、音の反射・屈折・回折といった音色に影響を及ぼす周囲の環境・空間特性を反映するために、物体と観測点の間より詳細な音波の伝達を考慮したい。また、各パラメータと実際の物体の対応を取り、生成された音と実際の摩擦音の類似度を評価したい。

謝辞 本研究の一部は JST CREST 「OngaCREST プロジェクト」の支援を受けた。

参考文献

- [1] Z. Ren, et al. Synthesizing contact sounds between textured models. *Proc. IEEE VR*, pp. 139–146, 2010.
- [2] S.S. An, et al. Motion-driven concatenative synthesis of cloth sounds. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, pp. 102–111, 2012.
- [3] 松川宏. 摩擦の物理. 岩波書店, 2012.
- [4] M. Müller, et al. Position based dynamics. *JVCIR*, Vol. 18, No. 2, pp. 109–118, 2007.