

スケッチ入力による3次元の炎のシミュレーションの制御手法 A Control Method for 3D Fire Simulation via Sketch Input

工藤 理香[†]
Rika Kudo

佐藤 周平^{††}
Syuhei Sato

土橋 宜典[‡]
Dobashi Yoshinori

1. はじめに

コンピュータグラフィックスによる映像制作では、煙や炎などの流体现象の映像を物理ベースのシミュレーションを用いて制作するのが一般的になっている。物理シミュレーションを用いることでリアルな映像を制作できるが、目的とする表現を得るには多くの試行錯誤を伴うことが課題である。この課題に対して、新重らは二次元のスケッチによって炎の概形を指定することで、その線に沿ったセル画調の炎アニメーションを生成する方法を提案した[1]。

そこで、我々はこの手法を参考に、二次元上に描かれた炎の輪郭をもとに、その形状に沿うような三次元の炎の流れが得られるよう、シミュレーションを自動で制御する手法を提案する。

2. 提案手法

本手法では、ユーザが二次元平面上に描いたスケッチ線を入力とし、その形状に沿った三次元の炎の流れを物理ベースのシミュレーションにより自動で生成することを目的とする。スケッチの入力は、シミュレーションのウィンドウ上に直接マウスで線を描画する形式で行い、操作の直感性と手軽さを重視している。シミュレーションの制御対象は、新重らが提案した炎の大きさと輪郭線のランダム性[1]に加えて、炎が真上に流れている状態からの傾き度合いの三要素とする。これらの要素に対して、スケッチとシミュレーション結果の差異を最小化するように、比例制御と積分制御を組み合わせたPI制御に基づいてパラメータを動的に更新する。

三次元空間において炎の挙動を計算するために、Navier-Stokes 方程式に基づく物理ベースの三次元流体シミュレーションを採用する[2]。このシミュレーションで計算される速度場に加え、浮力や冷却を考慮するために、温度場の計算も行う。温度場 T は次の式で計算する。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)T - c_T \left(\frac{T - T_{air}}{T_{max} - T_{air}} \right)^4 \quad (1)$$

ここで、 T_{max} は最高温度、 T_{air} は空気中の温度を示し、 c_T は冷却定数を表している。これらのシミュレーションの結果から輪郭線を取得し、スケッチの輪郭線と形状特徴を比較する。シミュレーション結果から輪郭線を抽出するためのマスク画像は、レンダリング画像の輝度値に対して閾値処理を行い、その領域の輪郭として抽出する。

炎の大きさと傾き度合いの評価尺度として Axis Aligned Bounding Box(AABB)を用いる。入力されたスケッチからAABBを計算し、発生源を基準に左右の幅をそれぞれ L_{skt} , R_{skt} , 高さを h_{skt} とする。また、シミュレーション結

果から得られる AABB の対応する要素をそれぞれ L_{sim} , R_{sim} , h_{sim} とする。炎の大きさについては冷却項の係数 c_t を次の式で調整する。

$$c_t^{k+1} = c_t^k - \left\{ \alpha_p h_{dif}^k + \alpha_I \int_0^t h_{dif}^k d\tau \right\} \quad (2)$$

ここで $h_{dif}^k = h_{skt} - h_{sim}^k$ であり、 α_p, α_I は更新率を表す係数、 k はシミュレーションのタイムステップを示す。冷却項は、炎の上昇を抑制する項として温度場の時間発展に影響を与与える。 c_t が大きいほど冷却が強まり、炎の高さが抑制される。傾きの制御ではシミュレーションに加える水平力場に基づいて制御する。水平力場は、図1のような炎の中心に向かって外力を左右それぞれで一様に加える力場である。例えば、スケッチが左に傾いている場合は右側の外力を大きくするように変化させることで、傾きのあるスケッチに沿った炎の流れの生成を可能にする。このときの左右の外力の大きさ f_l , f_r を次の式で更新する。

$$f_l^{k+1} = f_l^k + \left\{ \gamma_p R_{dif}^k + \gamma_I \int_0^t R_{dif}^k d\tau \right\} \quad (3)$$

$$f_r^{k+1} = f_r^k - \left\{ \gamma_p L_{dif}^k + \gamma_I \int_0^t L_{dif}^k d\tau \right\} \quad (4)$$

ここで、 $R_{dif}^k = R_{skt} - R_{sim}^k$, $L_{dif}^k = L_{skt} - L_{sim}^k$ であり、 α_p, α_I は更新率を表す係数である。

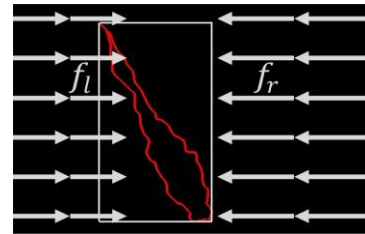


図1: 水平力場の定義。赤線は炎の輪郭、白矩形はAABB、白矢印は外力を表す。

輪郭線のランダム性の評価尺度としては、輪郭線の平均曲率を用いる。曲率はスケッチとシミュレーション結果の輪郭線のそれぞれの各点で計算され、それぞれの平均を平均曲率 $\bar{\kappa}_{skt}$, $\bar{\kappa}_{sim}$ とする。安定した曲率計算を行うために、輪郭線は一定間隔の点列として再標本化しており、この再標本化は線形補間によって実行される。輪郭線のランダム性の制御は、平均曲率の値に基づいて渦補正項[3]の係数 c_v を調整する。渦補正項は、炎のシミュレーションに外力項として追加され、流体の失われた渦を補正できる。そのため、係数 c_v を調整することで、流体の渦の度合いを制御できる。 c_v の調整は以下の式で行う。

$$c_v^{k+1} = c_v^k + \left\{ \alpha_p \bar{\kappa}_{dif}^k + \alpha_I \int_0^t \bar{\kappa}_{dif}^k d\tau \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\kappa}_{dif}^k = \bar{\kappa}_{skt} - \bar{\kappa}_{sim}^k$ であり、 α_p, α_I は更新率を表す係数である。

[†] 法政大学 Hosei University

^{††} 法政大学/プロメテック CG リサーチ Hosei University / Prometech CG research

[‡] 北海道大学/プロメテック CG リサーチ Hokkaido University / Prometech CG research

3. 実験結果

提案手法により得られた制御結果を図に示す。シミュレーションの格子サイズは $80 \times 128 \times 80$ である。図に提案手法で生成された 3 つの結果を示す。いずれもシミュレーション結果に加え、入力となるスケッチ (赤色曲線)、スケッチとシミュレーションでのそれぞれの AABB を表す矩形 (それぞれ白色と紫色) を表示している。図 2 は炎の高さが高く輪郭線が複雑に変化し傾きのないスケッチにより生成された結果であり、図 3 は炎の高さが高く輪郭線が複雑に変化し右に傾いているスケッチにより生成された結果である。これらの結果から本手法でスケッチに沿った三次元の炎のアニメーションが生成されたことが確認できる。特に傾きの制御に関しては、スケッチが右に傾いている場合には炎の向きが明確に右に傾き、左に傾いているスケッチに対しても同様の傾きが反映されていることがわかる。炎の高さについても、冷却項の調整によってスケッチとの整合性がとられており、AABB の矩形の一致からもその効果が確認できる。

一方で、輪郭線のランダム性に関しては、実際のシミュレーションでは輪郭線の形状が時間とともに大きく変化するため、安定して目標曲率を再現できていないと難しい。これは、炎の形状の不安定性により、瞬間的に目標とのずれが大きくなることが原因と考えられる。

4. おわりに

本稿では、二次元上に描かれた炎の輪郭をもとに、その形状に沿うような三次元の炎の流れが得られるよう、シミュレーションを自動で制御する手法を提案した。

今後の課題としては、まず炎シミュレーションの写実性向上が挙げられる。現状のモデルでは、温度場や密度場により炎全体を一様に記述しているが、燃焼反応における燃料ガスから高温生成物への変換を記述することで、より現実に近い視覚表現が可能になると期待される。この点に関しては、Nguyen らによる反応面モデルに基づく手法[4]が有効であると考え、今後の実装に取り組んでいる。また、現時点ではスケッチ入力が画面正面からの一方向に限定されており、任意の視点からの炎制御には対応していない。これを解決するためには、多視点からのスケッチ入力に基づく三次元的な形状制御が必要である。これにより、炎の空間的な振る舞いがより柔軟にデザイン可能となる。これらの拡張に関して、今後実験、検証を重ねていきたい。

参考文献

- [1] 新重 俊樹, 土橋 宣典, 「流体シミュレーションに基づくスケッチベースのセル画調の炎のアニメーション」, Visual Computing 2024, No. 3, 2024
- [2] Robert Bridson. 2015. Fluid simulation for computer graphics. CRC Press.
- [3] R. Fedkiw, J. Stam, and H. W. Jansen. 2001. Visual Simulation of Smoke. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001. 15–22.
- [4] Duc Quang Nguyen, Ronald Fedkiw, and Henrik Wann Jensen, "Physically Based Modeling and Animation of Fire", Computergraphics and interactive techniques SIGGRAPH 2002, pp.721-728

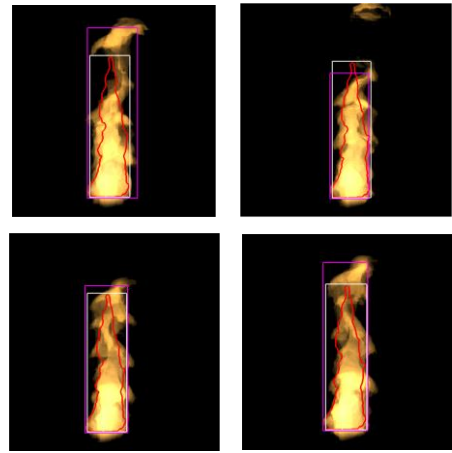


図 2 : 炎の高さが高く輪郭線が複雑に変化し傾きのないスケッチによる生成結果

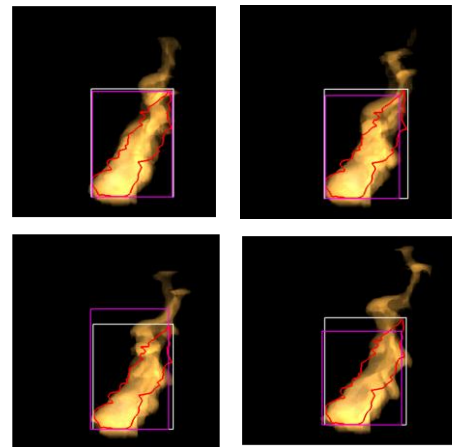


図 2 : 炎の高さが高く輪郭線が複雑に変化し右に傾いているスケッチによる生成結果

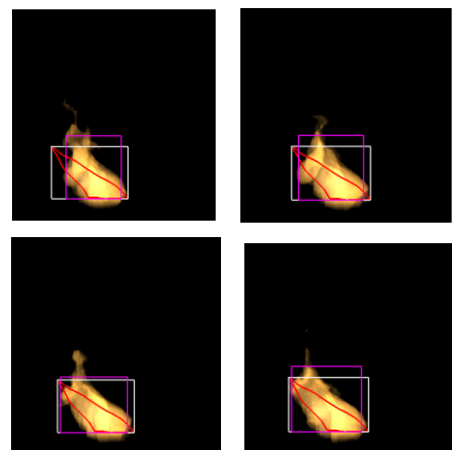


図 3 : 炎の高さが低く輪郭線の変化が少なく左に傾いているスケッチによる生成結果