

手描き感を再現する ペイントシミュレータの最新研究紹介

大河原 昭

ak-ogawara@siliconstudio.co.jp



本講演でお話すること

- ペイントシミュレータに関する研究の紹介
- ペイントシミュレータの最新研究論文紹介



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
4. 結果
5. 今後の課題とまとめ



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
4. 結果
5. 今後の課題とまとめ

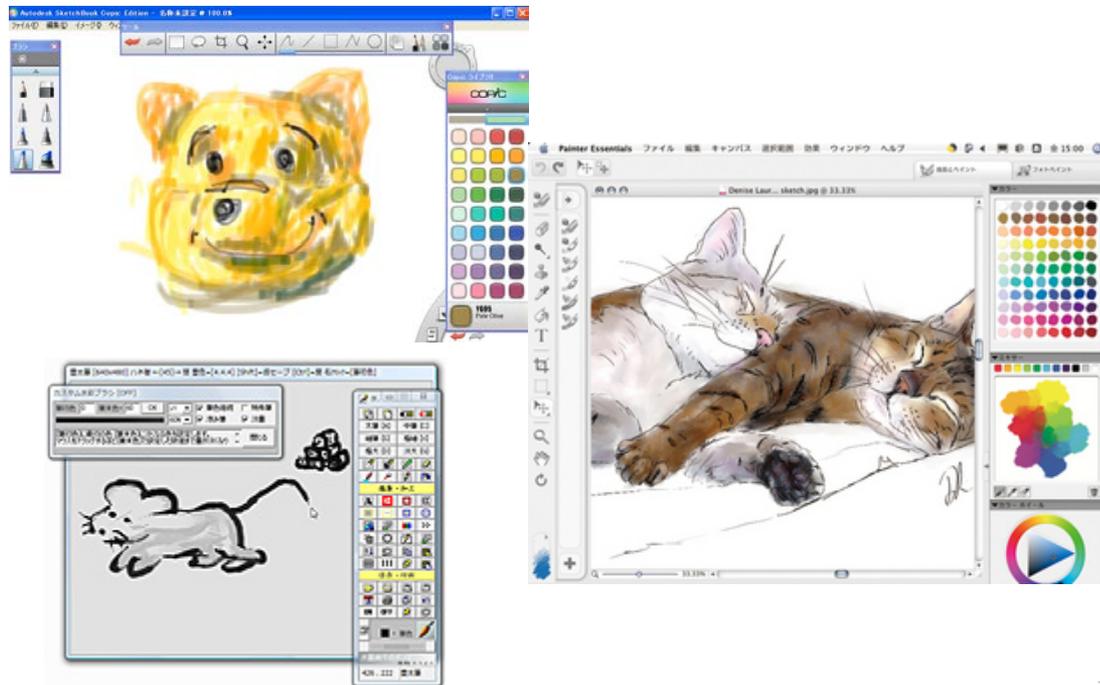


ペイントシミュレータとは?

- 絵を描く行為のコンピュータ上での再現
 - 利点
 - 現実の描き方の技法をそのまま生かせる
 - Undo/Redo, コピー
 - 描いた手順をすべて記録

ペイントシミュレータとは?

- 種類
 - 線画
 - 水墨画
 - 水彩画
 - クレヨン画
 - 油絵

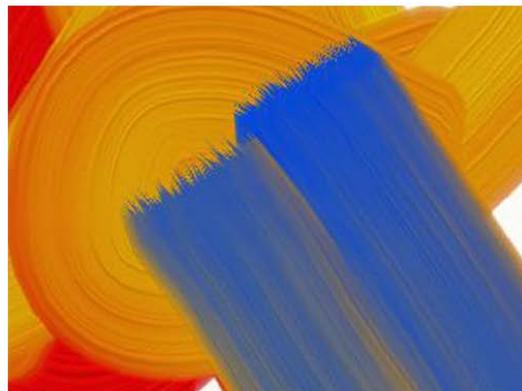


油絵の特徴

- 絵具の3次元形状
 - 盛り上がり
- 絵具の混ざり具合
 - 毛先による影響
 - 絵具同士



市販ソフトウェア



(a) ArtRage 4



(b) Fresh Paint

- 絵具の凹凸変化が単調
- 各ストロークによる絵具の混ざり具合の表現が不十分



ペイントシミュレータの制約

- ブラシ、絵具、キャンバスの複雑な相互作用を再現したい
 - ブラシの動き、絵具の移流
- リアルタイムに処理
 - タイムステップが大きい
 - シミュレーションが不安定
 - 計算資源が限られている
 - 正確な計算ができない



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
4. 結果
5. 今後の課題とまとめ

流体モデル

- グリッドベース
 - Height field, 3次元グリッド
 - 表現力が不十分
- パーティクルベース
 - そのままでは使いづらい



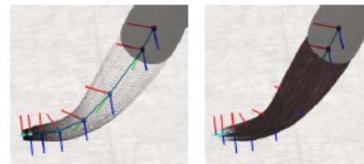
[Baxter et al. 2004a]



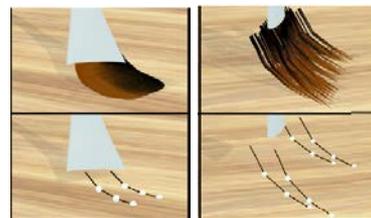
[Baxter et al. 2004b]

ブラシのシミュレーション

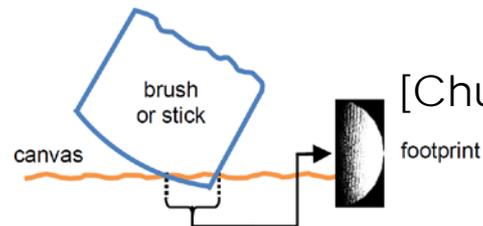
- スケルトン
- Subdivision surface
- Footprint
- ブラシ全体の形状だけを考慮



[Chu et al. 2002]



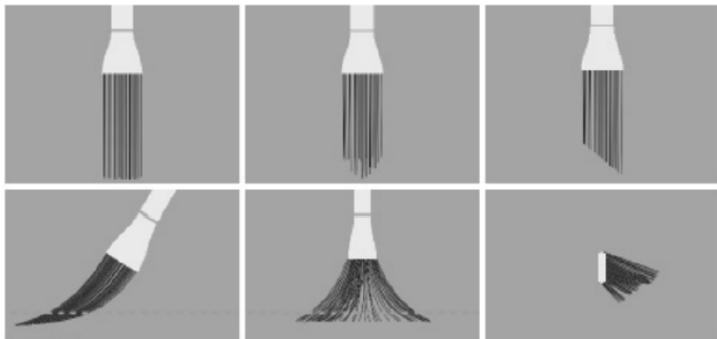
[Baxter and Lin. 2004]



[Chu et al. 2010]



毛先を1本ずつシミュレーション



[DiVerdi et al. 2010]

- 非慣性座標系で制御
- ペイント処理は2次元
- 毛先同士のインタラクションは考慮せず

最新研究

Wetbrush: GPU-based 3D Painting Simulation at the Bristle level

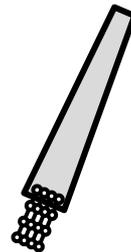
Zhili Chen Byungmoon Kim Daichi Ito Huamin Wang

- ブラシの毛先を1本ずつシミュレーション
 - 毛先 \Leftrightarrow 毛先、毛先 \Leftrightarrow 流体
- ハイブリッド流体モデル
 - パーティクル
 - 3次元グリッド



最新研究のアプローチ

- 毛先を1本ずつシミュレーション
– インタラクション
 - 毛先同士、毛先 \Leftrightarrow 流体
- ハイブリッド流体モデル
– パーティクル, 3次元グリッド



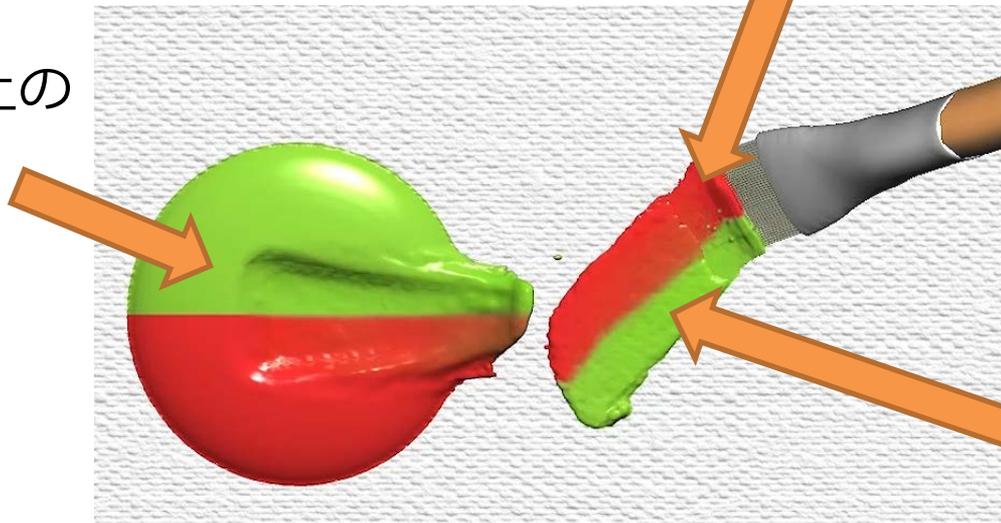
ブラシの周りはパーティクル



他はグリッド

結果

キャンバス上の
絵具を
引き伸ばす

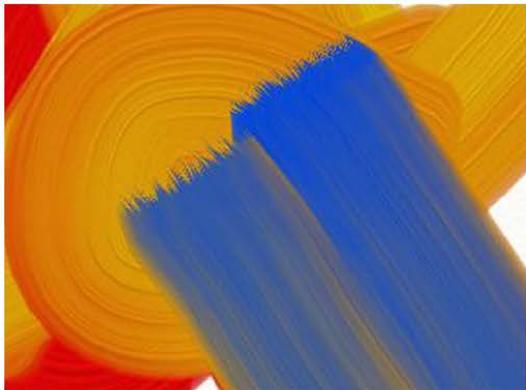


絵具が毛先に粘着

毛先上の絵具を
引き伸ばす



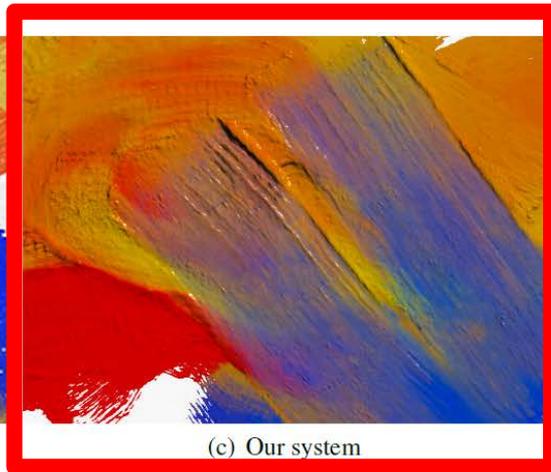
市販ソフトウェアとの比較



(a) ArtRage 4



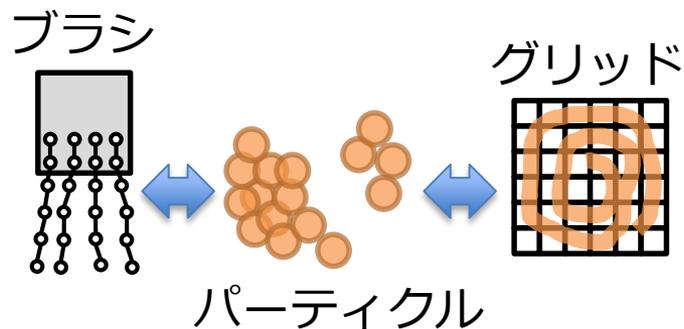
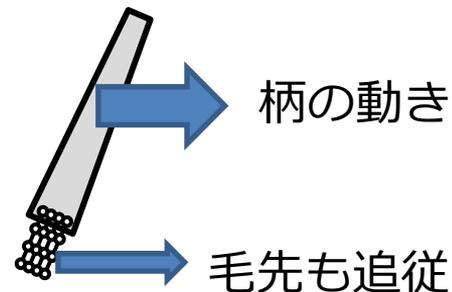
(b) Fresh Paint



(c) Our system

最新研究のポイント

- 非慣性座標系での慣性力の調整
 - 大きなタイムステップでも安定
- 流体モデルの組み合わせ
 - サブピクセルレベルのリッチな表現
 - 流体モデル間でのやり取り





発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
4. 結果
5. 今後の課題とまとめ



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り

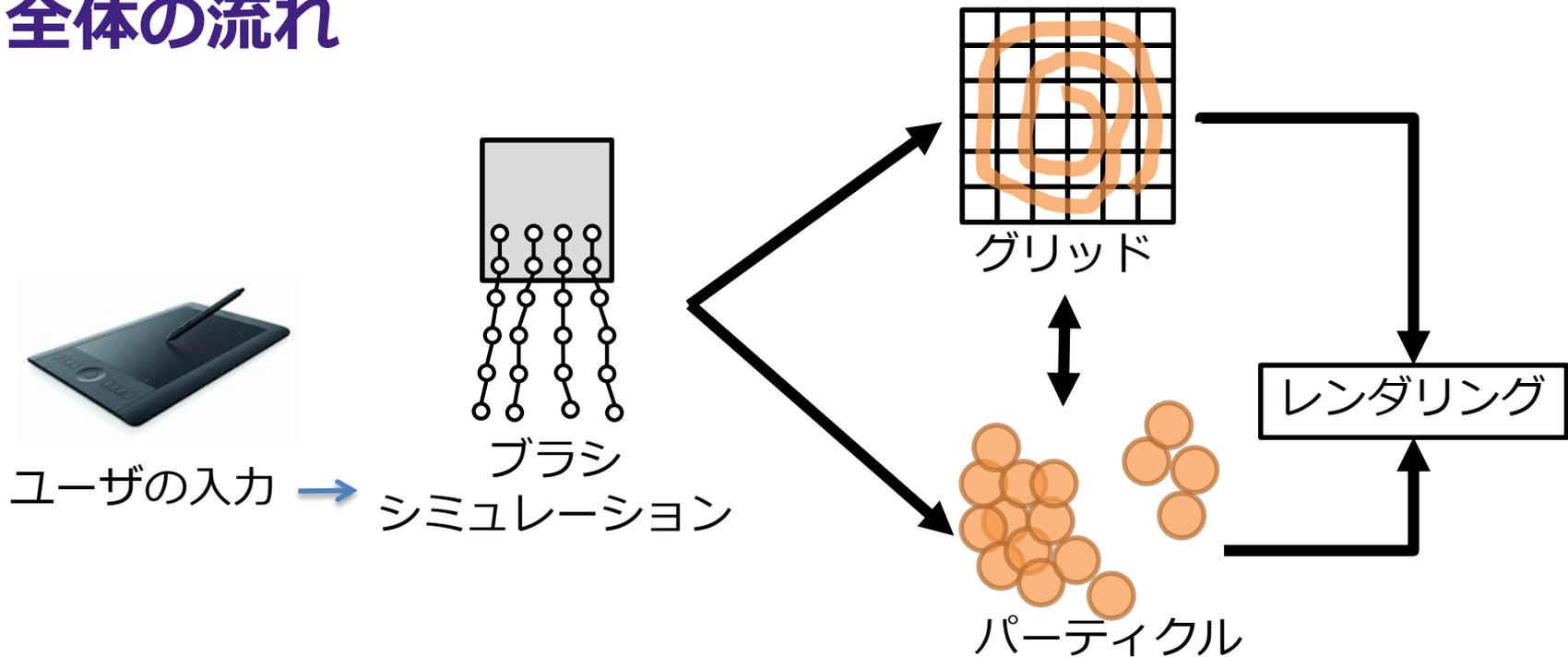


発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. ペイントシミュレータに関する研究の紹介
3. 最新研究の説明
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り

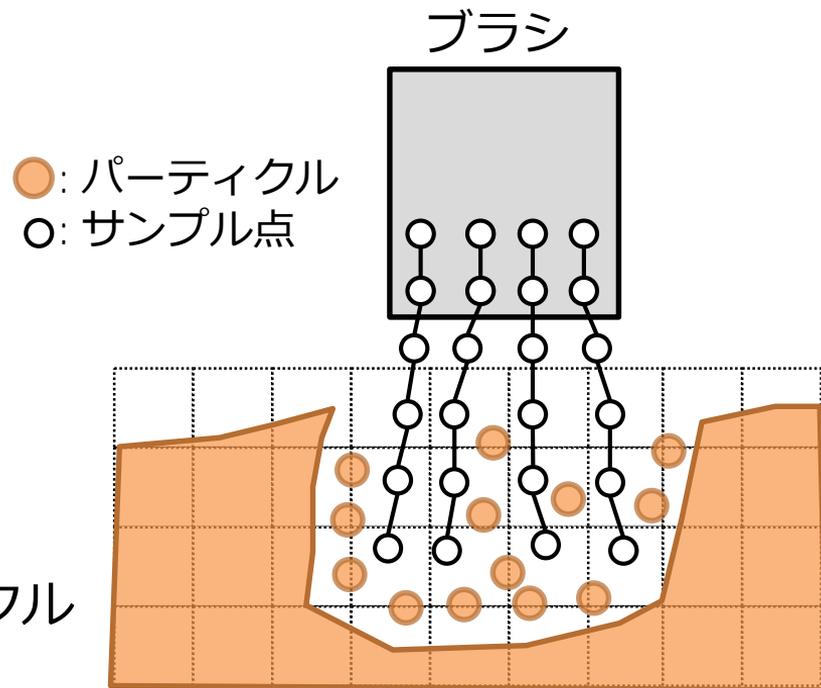


全体の流れ



全体の流れ

- ブラシのシミュレーション
 - どう動かすか
- 流体シミュレーション
 - グリッドとパーティクル
- 流体のやり取り
 - ブラシのサンプル点 \Leftrightarrow パーティクル
 - パーティクル \Leftrightarrow グリッド



グリッドシミュレーション

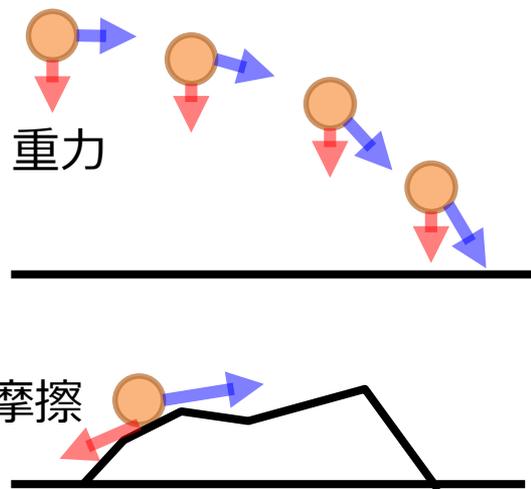
- 流れそのものを計算
 - 速度場 \mathbf{u} (ベクトル場)
- 毎ステップの更新
 - 速度場 $\mathbf{u}_t \rightarrow \mathbf{u}_{t+1}$
 - 速度場 \mathbf{u} でリソースも移動
 - 絵具の色、質量



パーティクルシミュレーション

- 毎ステップの更新
 - 位置
 - $+= \Delta t \times \text{速度ベクトル}$
 - 速度ベクトル
 - $+= \Delta t \times \text{加速度ベクトル}$

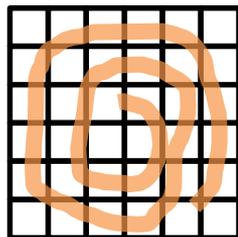
→ : 速度
→ : 加速度



流体モデルの比較

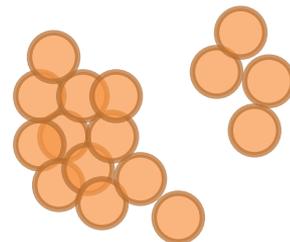
- グリッド

- 数値拡散しやすい
- 速い動きに追従できない
- 低負荷



- パーティクル

- 数値拡散しない
- 速い動きに追従できる
- 高負荷



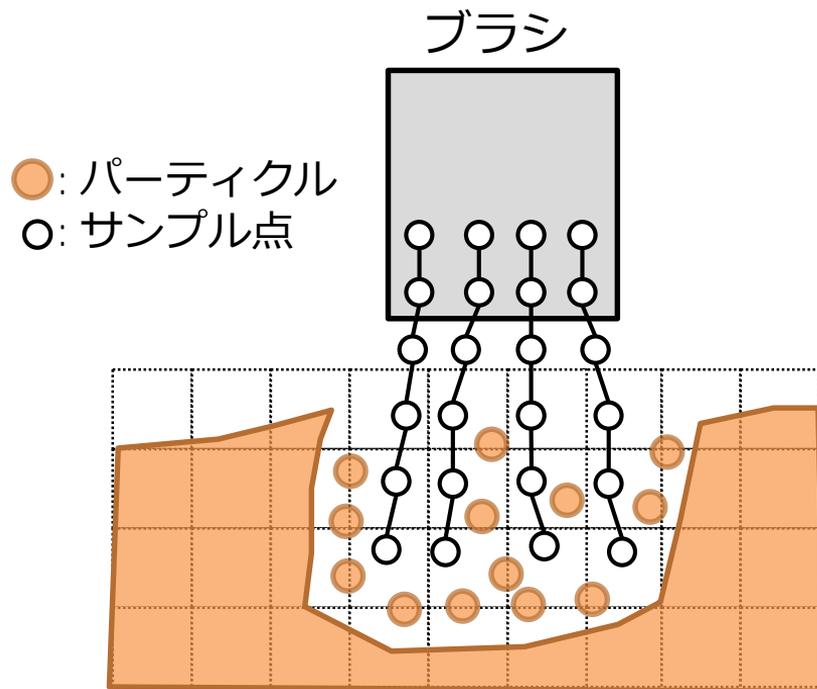


なぜグリッドとパーティクルを組み合わせるのか？

- どちらか一方ではどうなるか
 - グリッドのみ
 - ぼやけた見た目
 - パーティクルのみ
 - 多量のパーティクルが必要
 - 計算負荷的につらい
- シミュレーション箇所に応じて、組み合わせる

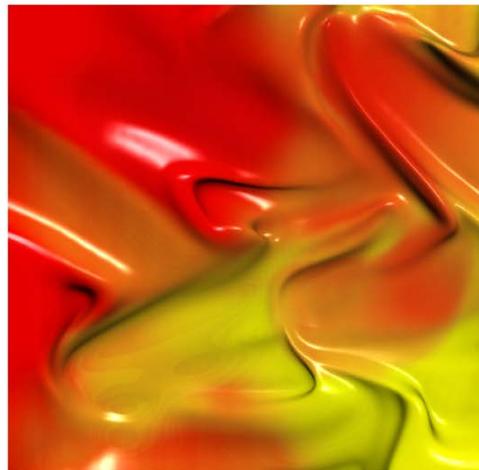
流体とブラシの関係

- ブラシの周りはパーティクル
 - 早い動き
 - 細かいシミュレーション
- ブラシから離れたらグリッド
 - 遅い動き

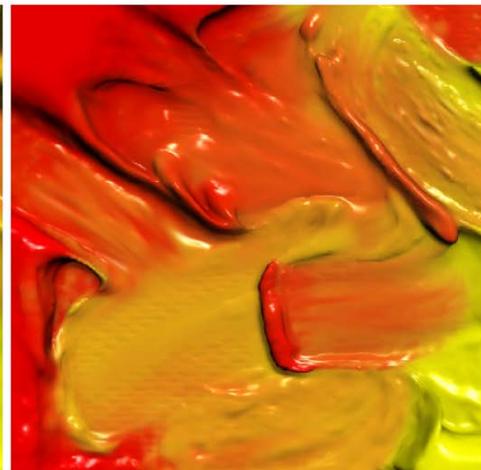


グリッドとパーティクルの組み合わせ

- グリッドのみ
 - 数値拡散しやすい
 - ぼやけた見た目



グリッドのみ



グリッドと
パーティクル

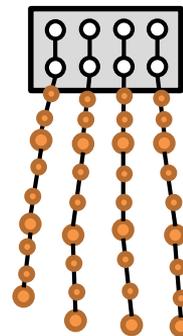
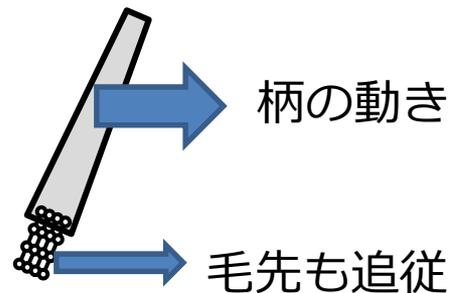


発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - **ブラシのシミュレーション**
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ \Leftrightarrow パーティクル \Leftrightarrow グリッド の流体のやり取り

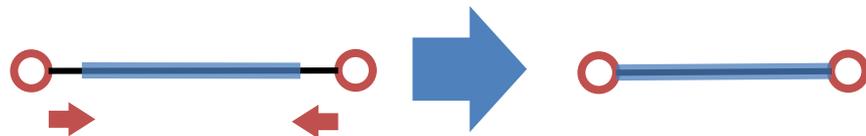
ブラシのポイント

- 毛先の頂点制御
 - 柄の動きに追従
 - 安定した動き
- ブラシのサンプル点
 - サブピクセルレベルで必要



ブラシの毛先の頂点移動

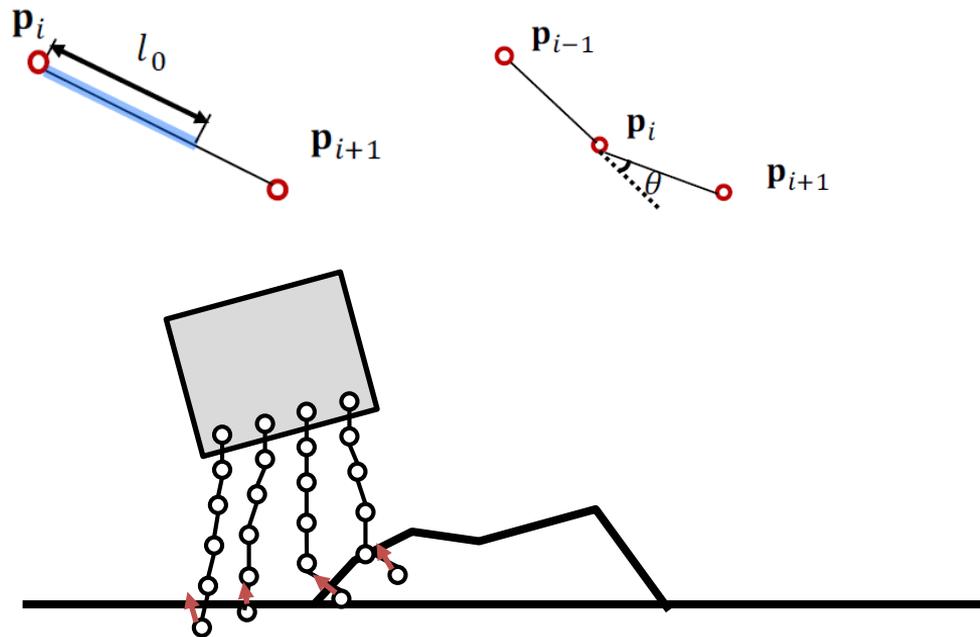
- Position Based Dynamics (PBD) [Muller et al. 2007]
 - 位置ベースの物理シミュレーション
 - 位置ベースの拘束条件
 - 頂点の位置で補正
 - 繰り返し適用
 - オーバーシュートしにくい
 - 衝突判定など



長さ拘束
頂点間の長さを一定に保つ

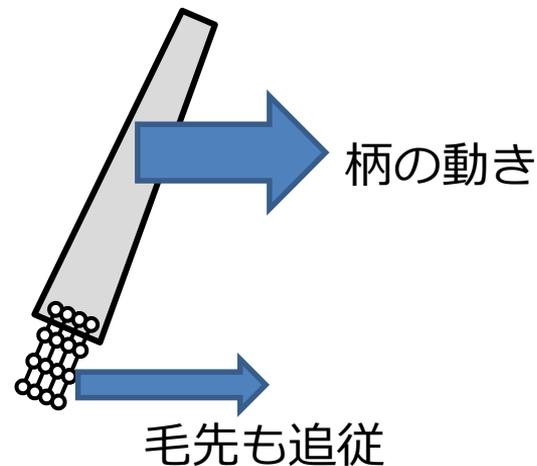
拘束条件

- 長さ拘束
- 曲げ拘束
- コリジョン拘束
 - 摩擦力も発生



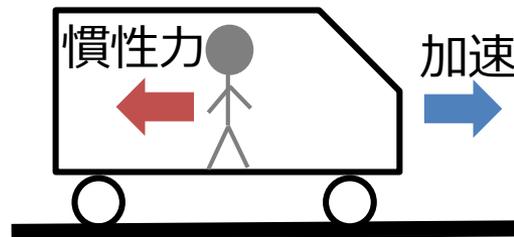
毛先の追従

- ブラシの毛先
 - ピンと張っている
 - 柄の動きに追従
- どう実現するか？
 - 毛先にかかる慣性力を直接制御



慣性力を弱める

- ブラシの座標系
 - ブラシ自体の加速度が変化 → 非慣性系



- ブラシの座標系での運動方程式

$$\dot{\mathbf{v}}_i^B = \mathbf{R}_B \mathbf{a}_i - \beta_B (\dot{\mathbf{v}}^B + \omega^B \times (\omega^B \times \mathbf{x}_i^B) + (\dot{\omega}^B \times \mathbf{x}_i^B) + 2\omega^B \times \mathbf{v}_i^B)$$

直進力
遠心力
オイラー力
コリオリ力

調整パラメータ



慣性力がある場合

- $\beta_B = 1$
 - 慣性力がかかる
 - 本体には追従しない

- デモ動画



慣性力が無い場合

- $\beta_B = 0$
 - 慣性力がかからない
 - ブラシの毛先が本体に追従

- デモ動画

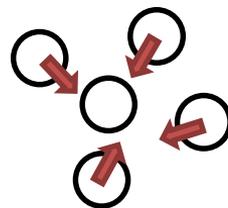
毛先同士のコリジョンやクラスタリング

- 真面目に計算するのは無理

- Position Based Fluid
[Macklin and Muller 2013]

$$W_{\text{poly6}}(\mathbf{r}, h) = \frac{315}{64\pi h^9} \begin{cases} (h^2 - r^2)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

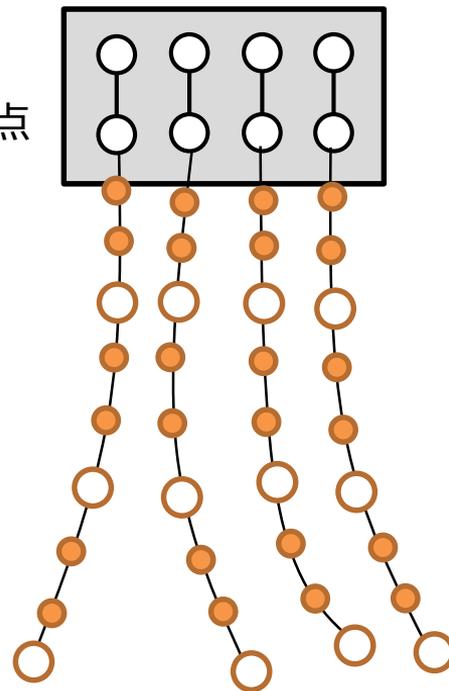
- カーネル関数で各頂点における密度を推定
- 最小密度を満たす拘束条件を追加



ブラシのサンプル点と頂点

- 頂点
 - ブラシシミュレーション
 - 1本につき10点ほど
- サンプル点
 - 流体のやり取りとレンダリング
 - 1本につき50点ほど
 - Cubic Hermite spline curveで補間

○ : 頂点+サンプル点
● : サンプル点





ブラシのシミュレーションのまとめ

- Position Based Dynamics
 - 伸び拘束、曲げ拘束、コリジョン拘束
- ブラシ座標系の慣性力を調整
- 毛先同士のコリジョン、クラスタリング
 - 最小密度を用いた拘束
- サンプル点を追加

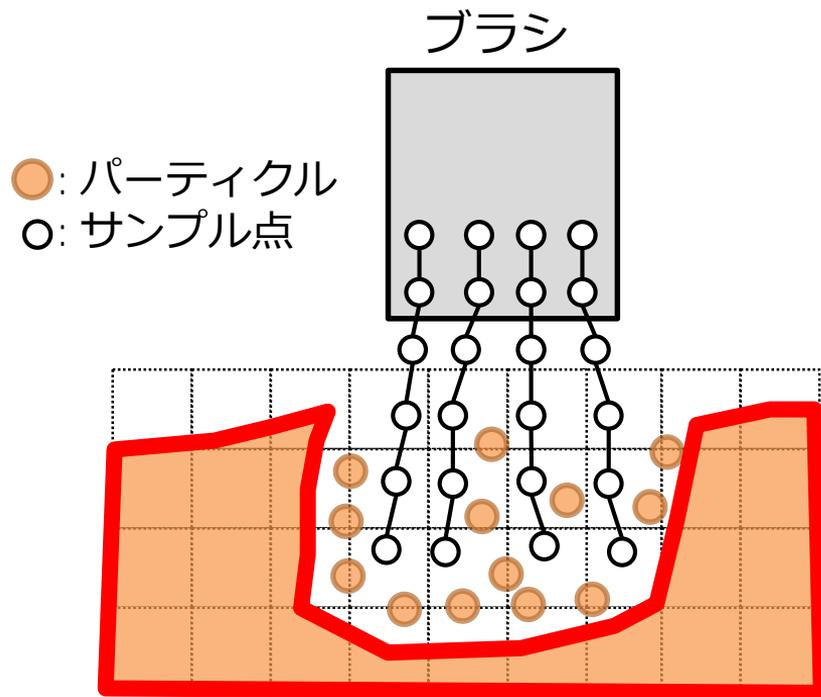


発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り

グリッドシミュレーション

- ブラシから離れた箇所
 - 動きが遅い
- パーティクルと比べて
 - 計算負荷が低い
 - 数値拡散しやすい



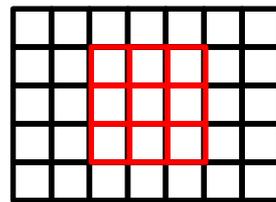
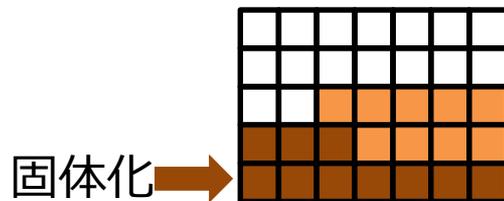
高解像度キャンバス

- キャンバス
 - 4096 x 4096 x 64
 - 1ピクセル⇔1グリッドセル
- シミュレーションの仕方を工夫

高解像度キャンバスのための工夫

- 速度場 \mathbf{u} の更新
- 絵具の固体化
- シミュレーション範囲を限定

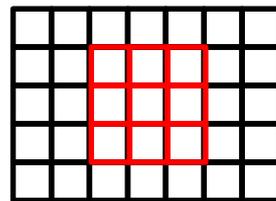
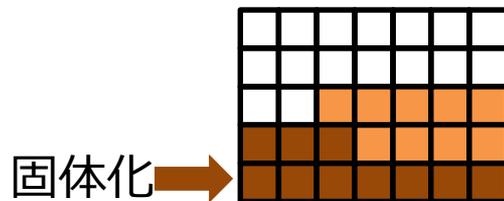
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \underbrace{-(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_{\text{移流}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{圧力}} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$



高解像度キャンバスのための工夫

- 速度場 \mathbf{u} の更新
- 絵具の固体化
- シミュレーション範囲を限定

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \underbrace{-(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_{\text{移流}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{圧力}} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$



速度場 u の更新

- ナビエ・ストークス方程式を解く
 - 速度場 u の時間変化を表す方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \underbrace{-(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_{\text{移流}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{圧力}} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

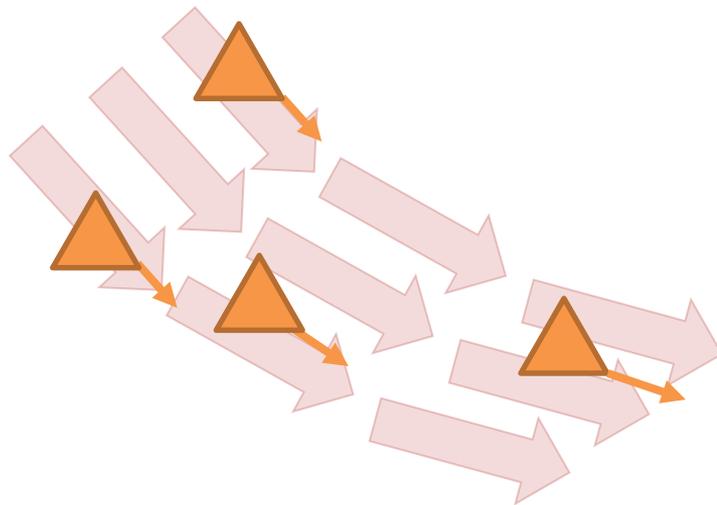
- 移流と圧力だけ計算



移流

- 流れに沿って移動する効果

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \underbrace{-(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_{\text{移流}} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$



圧力

- 非圧縮条件を満たすように働く力

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

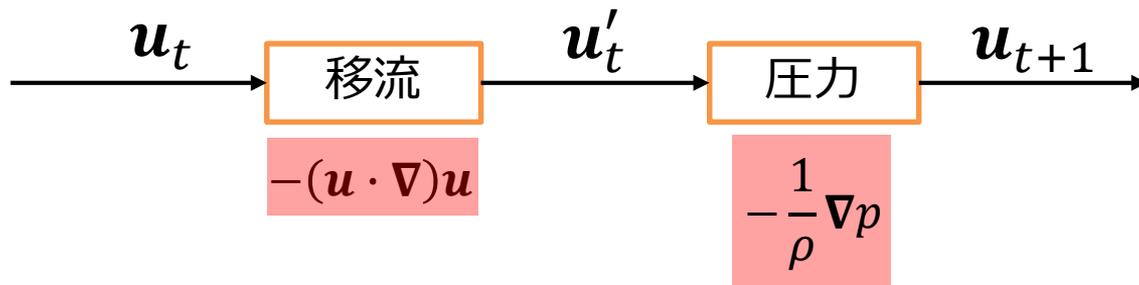
圧力

– 非圧縮条件

- 流体の密度が常に一定
- 水、音速を超えない空気
- 自然な流体表現を行うために必要

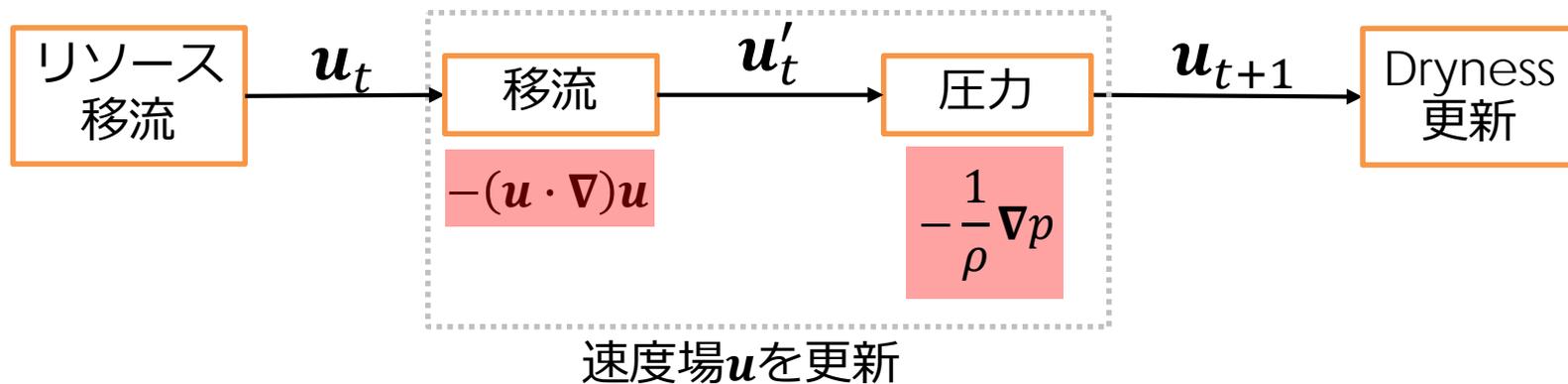
ナビエ・ストークス方程式を解く

- 全部一度に解くのは難しい
- 別々に考える
- 毎ステップの更新



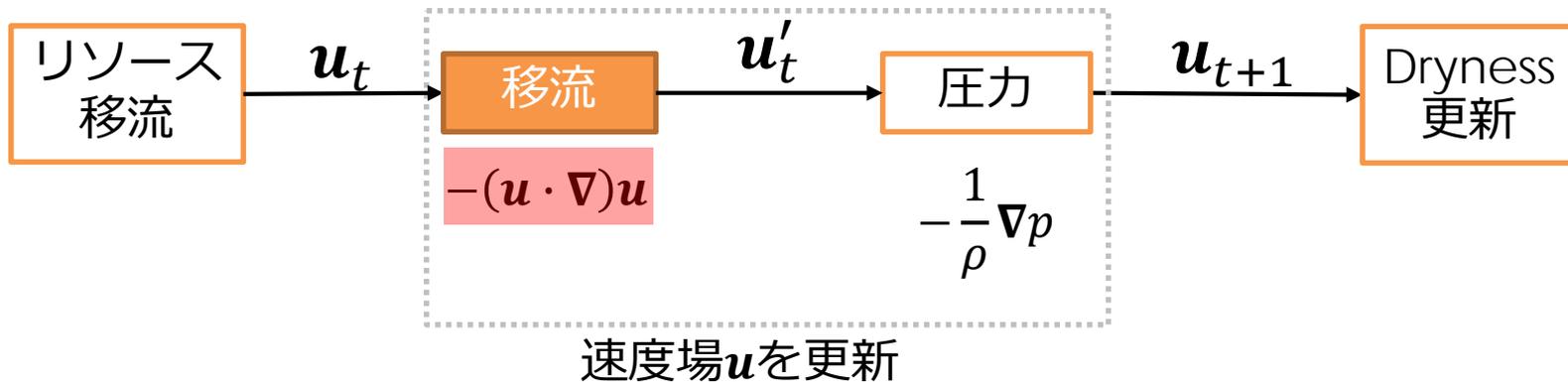
グリッドシミュレーションの流れ

- 毎ステップの更新



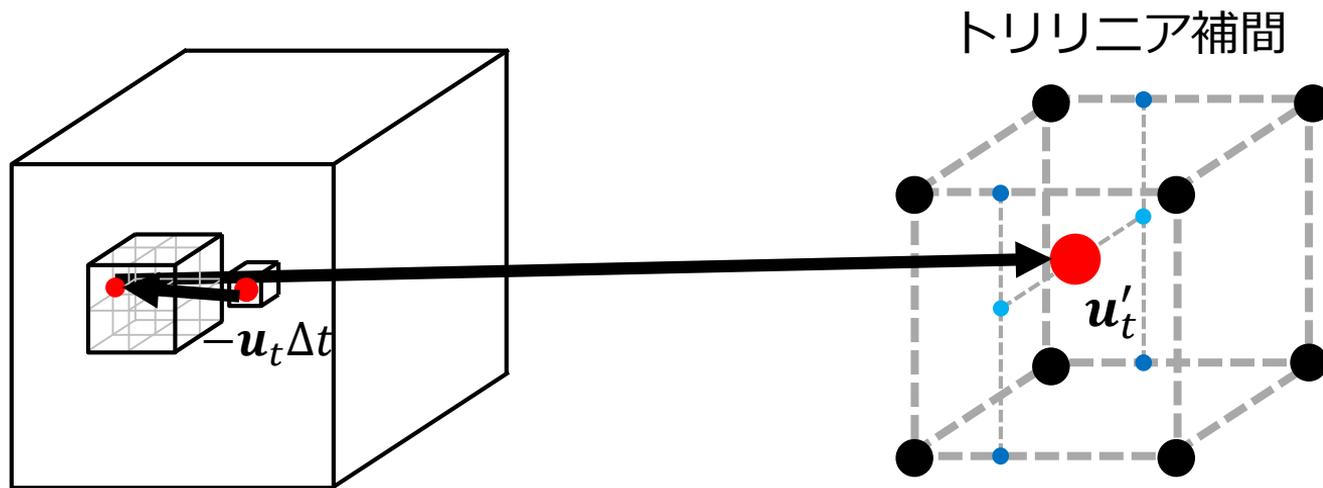
グリッドシミュレーションの流れ

- 毎ステップの更新





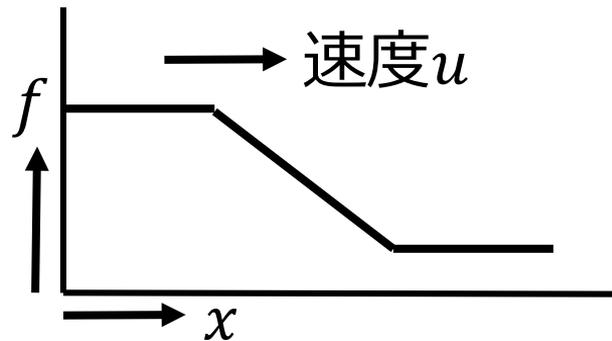
速度場 u_t を利用したトリリニア補間



1次元の移流で考えてみる

- スカラー値: f

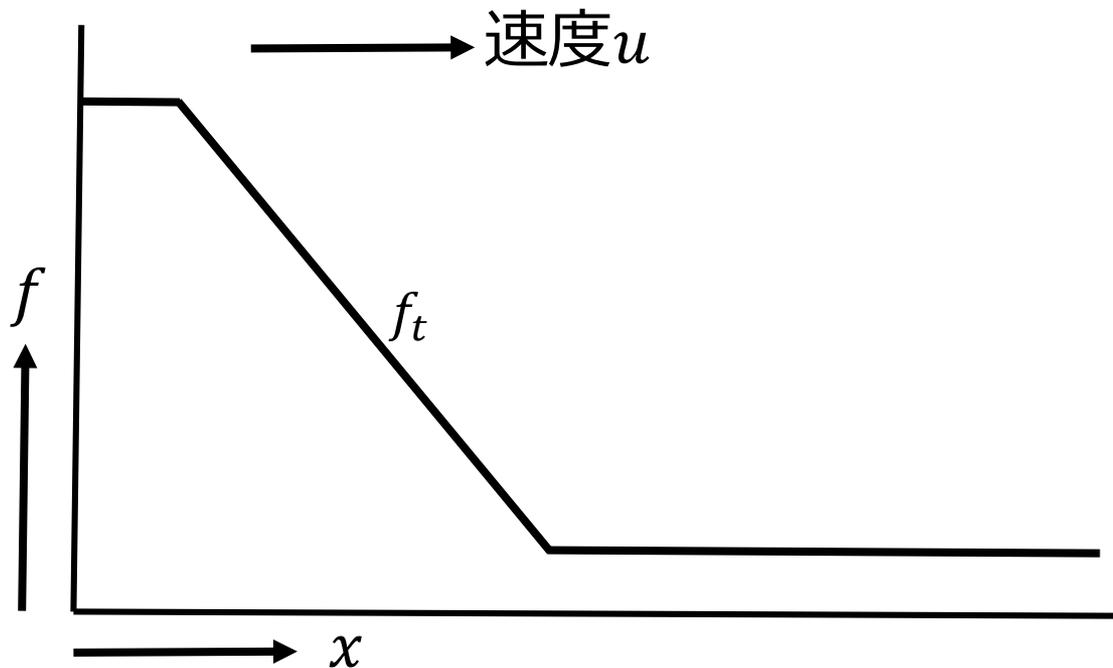
$$\frac{\partial f}{\partial t} = -u \frac{\partial f}{\partial x}$$



- 式変形してみると

$$\Leftrightarrow \frac{f_{t+\Delta t} - f_t}{\Delta t} = -u \frac{\partial f}{\partial x}$$
$$\Leftrightarrow f_{t+\Delta t} = f_t - u\Delta t \frac{\partial f}{\partial x}$$

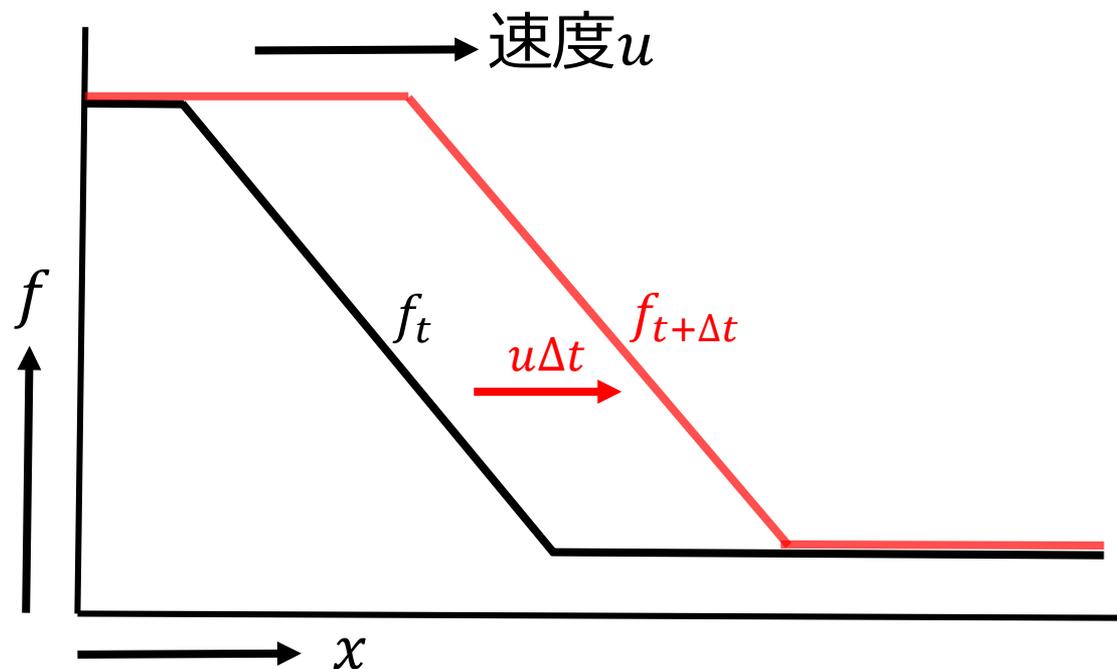
$f_{t+\Delta t}$ のグラフ



$$f_{t+\Delta t} = f_t - u\Delta t \frac{\partial f}{\partial x}$$

- グラフが $u\Delta t$ 進む
- f が速度 u で移動

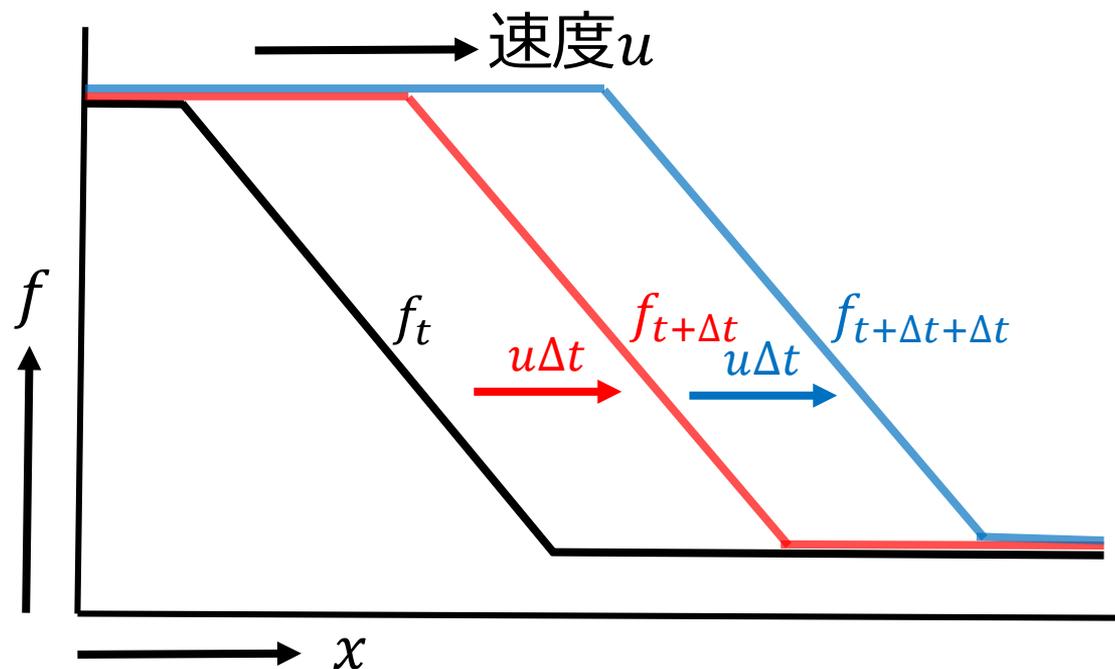
$f_{t+\Delta t}$ のグラフ



$$f_{t+\Delta t} = f_t - u\Delta t \frac{\partial f}{\partial x}$$

- グラフが $u\Delta t$ 進む
- f が速度 u で移動

$f_{t+\Delta t}$ のグラフ

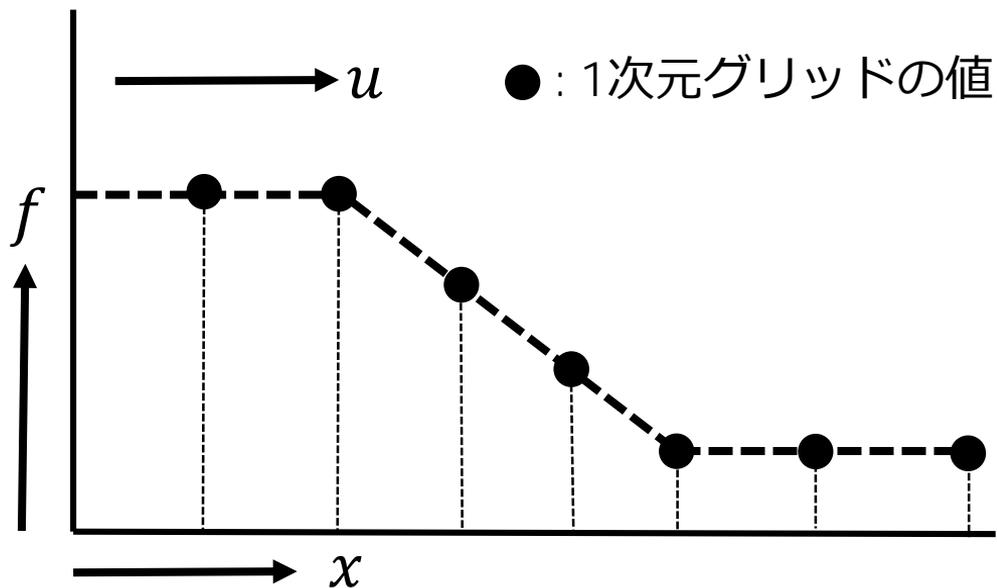


$$f_{t+\Delta t} = f_t - u\Delta t \frac{\partial f}{\partial x}$$

- グラフが $u\Delta t$ 進む
- f が速度 u で移動



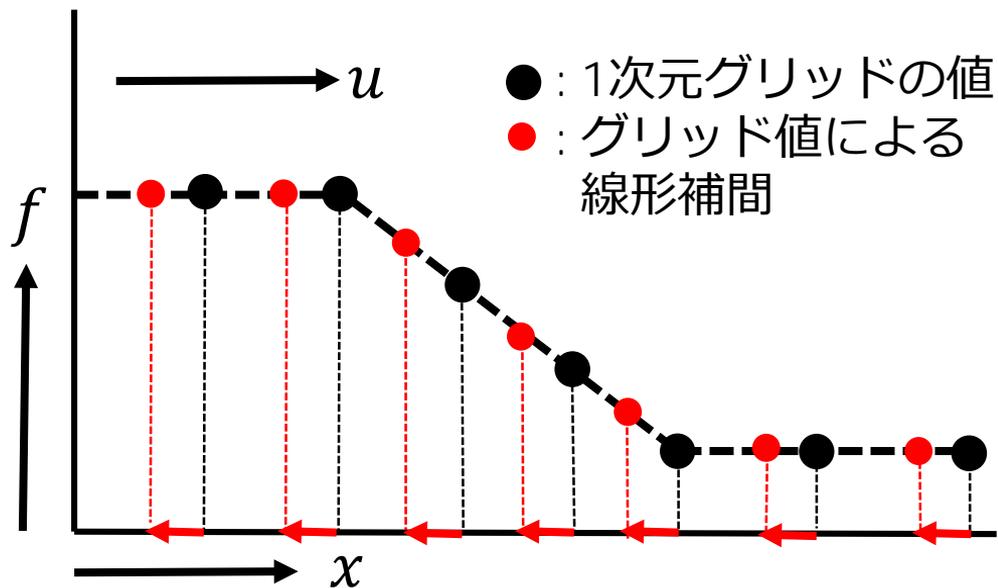
Semi-Lagrange法 [Stam 99]



- $u\Delta t$ 戻って、グリッドの値で線形補間

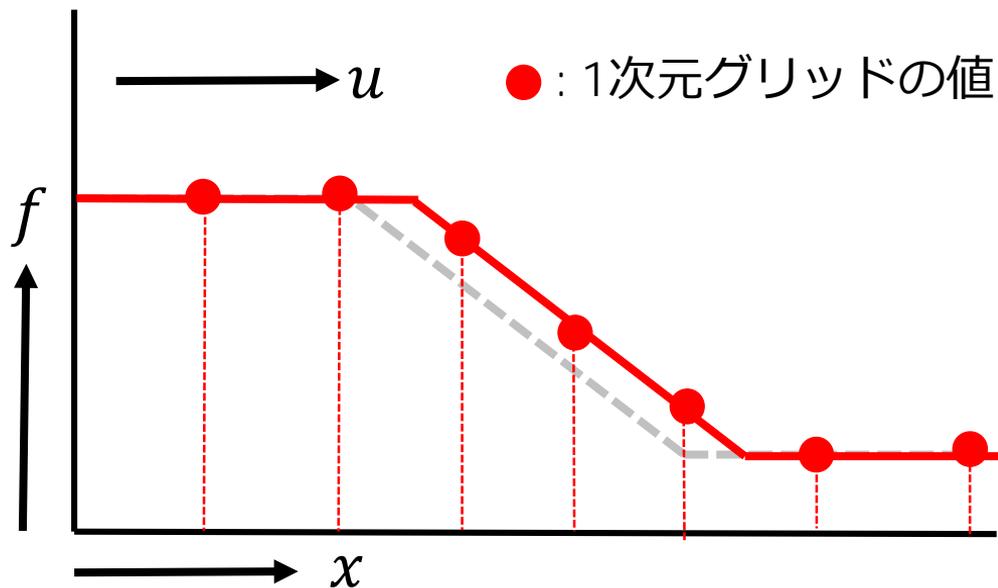


Semi-Lagrange法 [Stam 99]



- $u\Delta t$ 戻って、グリッド値で線形補間

Semi-Lagrange法 [Stam 99]



- $u\Delta t$ 戻って、グリッド値で線形補間
- $u\Delta t$ 進む

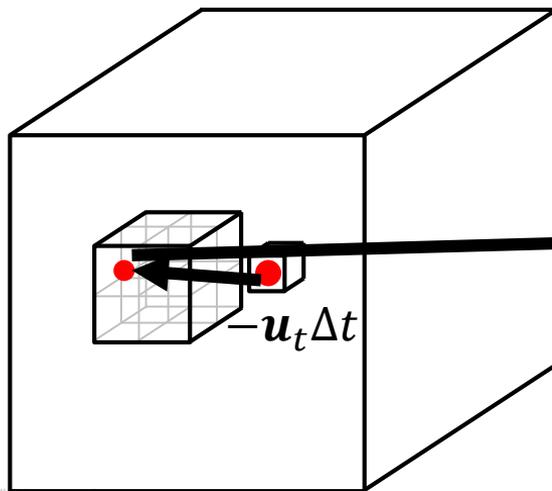
3次元速度場の移流

- 速度場自身を移流させる

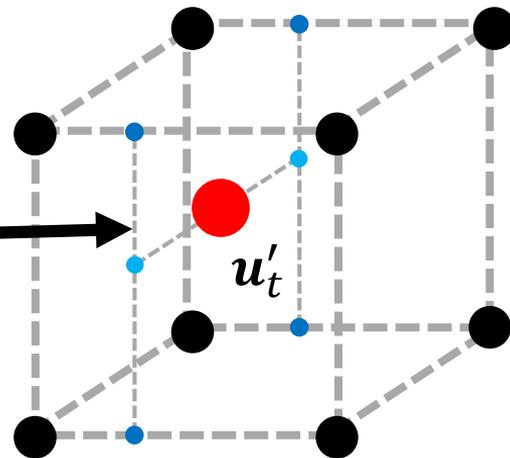
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial t} \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\mathbf{u} \cdot \nabla) u_x \\ -(\mathbf{u} \cdot \nabla) u_y \\ -(\mathbf{u} \cdot \nabla) u_z \end{pmatrix} \Leftrightarrow \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$$

トリリニア補間

- 速度場 u_t 自身を利用したトリリニア補間

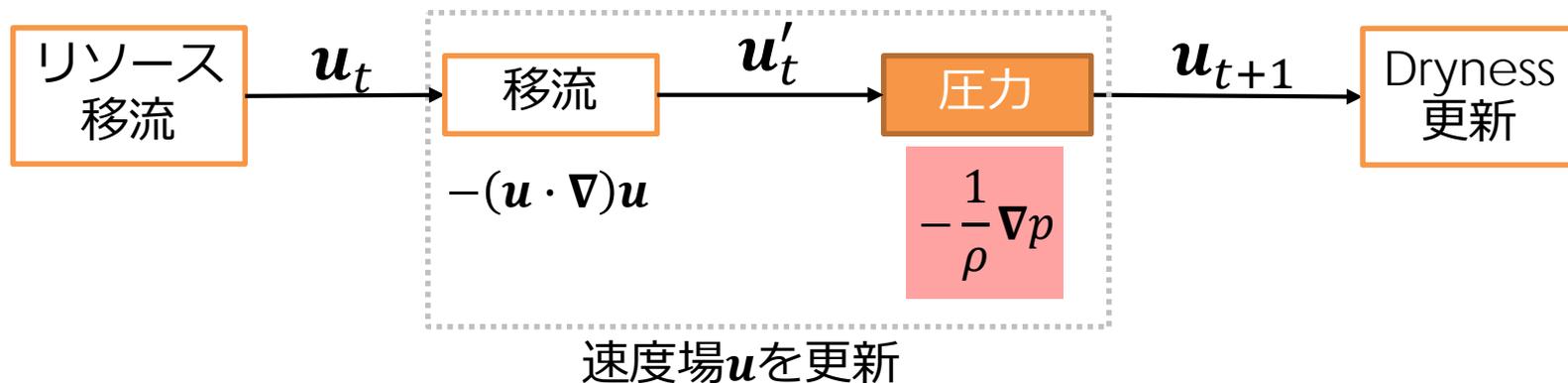


トリリニア補間



グリッドシミュレーションの流れ

- 毎ステップの更新



非圧縮条件

- 流体の密度が常に一定
- 速度で考えると?

– 発散が0

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

- 速度場 \mathbf{u} の各グリッドセルの流出入量の差が0
 - 近似手法で解く

スカラー圧力場

- 移流後の \mathbf{u}'_t は、非圧縮条件を満たさない
- Helmholtz分解

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}'_t - \nabla p) = 0$$

– スカラー圧力場 p を求める

- スカラー圧力場 p の微分を計算し、速度場 \mathbf{u}'_t から引く

$$\mathbf{u}_{t+1} = \mathbf{u}'_t - \nabla p$$

スカラー圧力場

- 以下のエネルギーを最小化して、スカラー圧力場 p を求める

$$E(p) = \int_{\Omega} \|\mathbf{u}'_t - \nabla p\|$$

- 大規模疎行列で表される方程式

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}'_t - \nabla p) = 0 \Leftrightarrow \Delta p = \nabla \cdot \mathbf{u}'_t$$

ラプラシアン Δ は、行列で記述可能



近似手法

- 定点法+ヤコビイテレーション

for $l = 1, 2, 3$ **do**

$p = \alpha p;$

$d = \nabla \cdot \mathbf{u};$

$p = \mathbf{One_Jacobi_Iteration}(p, d);$

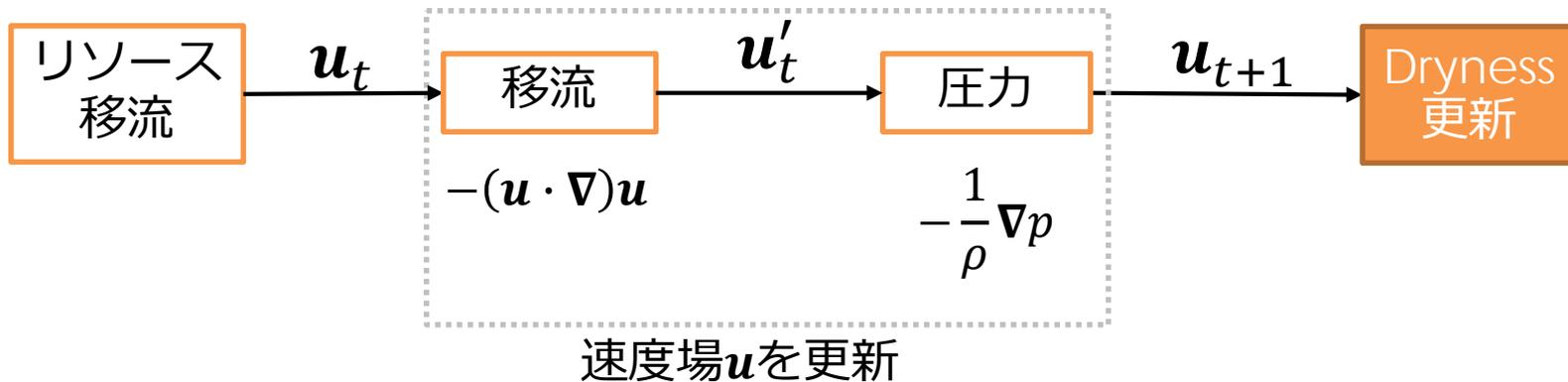
$p = \mathbf{One_Jacobi_Iteration}(p, d);$

$\mathbf{u} \leftarrow \mathbf{u} - \nabla p;$

return $\mathbf{u};$

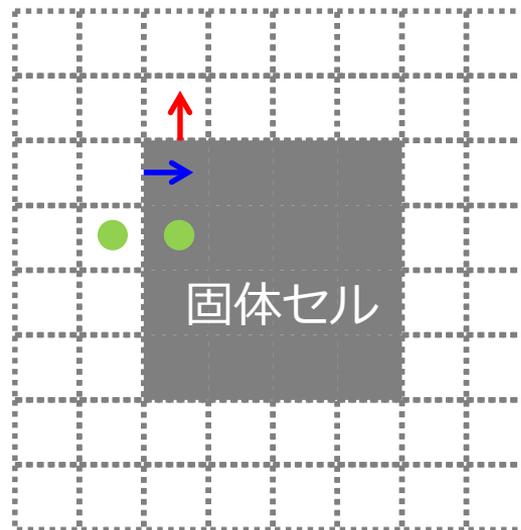
グリッドシミュレーションの流れ

- 毎ステップの更新



Dryness (乾燥度)

- 各グリッドセルのdrynessを加算
- 閾値を超えたら
 - 固体のグリッドセル
 - 境界条件
 - 境界で速度0
 - 圧力の微分値が0

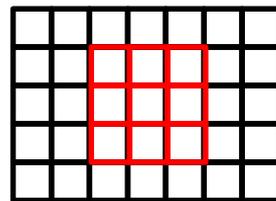
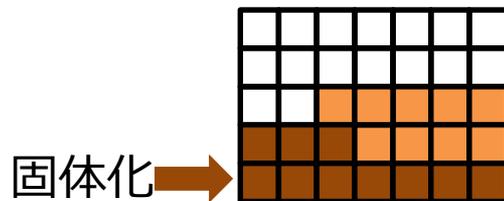


速度 $x \rightarrow$, $y \uparrow$ は0
圧力 ● は同値

高解像度キャンバスのための工夫

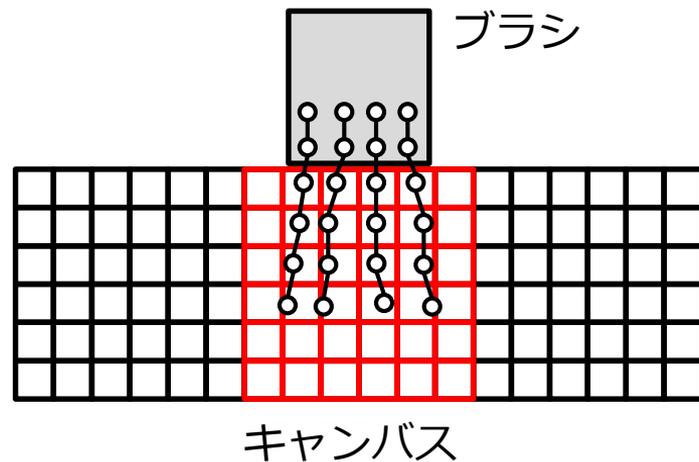
- 速度場 \mathbf{u} の更新
- 絵具の固体化
- シミュレーション範囲を限定

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \underbrace{-(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}}_{\text{移流}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\text{圧力}} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$



シミュレーションの実行範囲

- 全グリッドセルでのシミュレーションは困難
- ブラシ周辺のみシミュレーション
 - 論文のグリッド
 - ソルバ: $256 \times 256 \times 64$
 - キャンバス: $4096 \times 4096 \times 64$



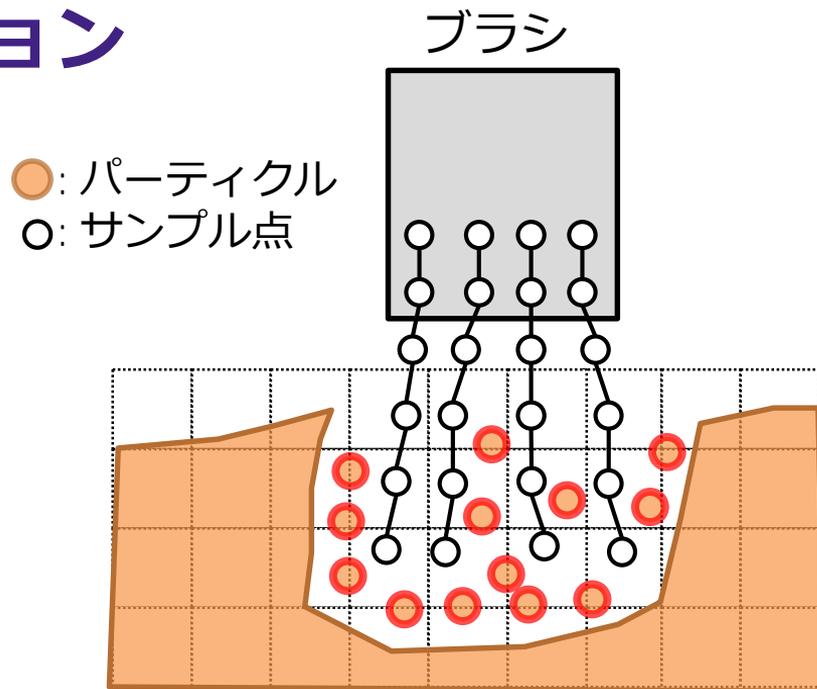


グリッドシミュレーションのまとめ

- ナビエ・ストークス方程式
 - 移流: Semi-Lagrange法
 - 圧力(非圧縮性条件): 定点法+ヤコビイテレーション
- Drynessによる固体セル判定
 - 境界条件
- ブラシ周辺のみシミュレーションを実行

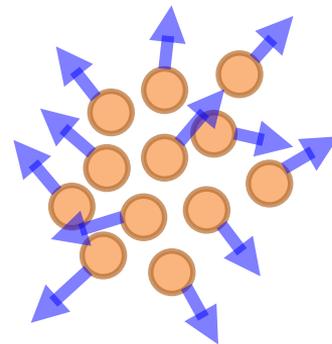
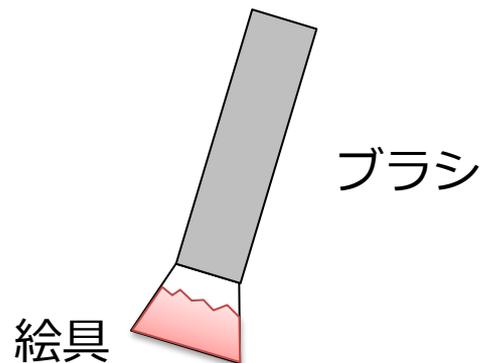
パーティクルシミュレーション

- ブラシ周辺で利用
 - 動きが早い
- 計算負荷が高い
 - グリッドとくらべて



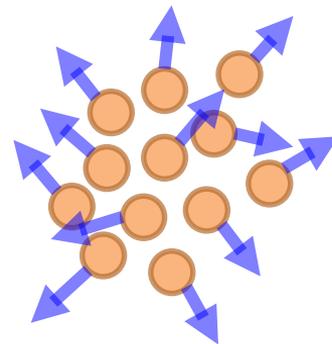
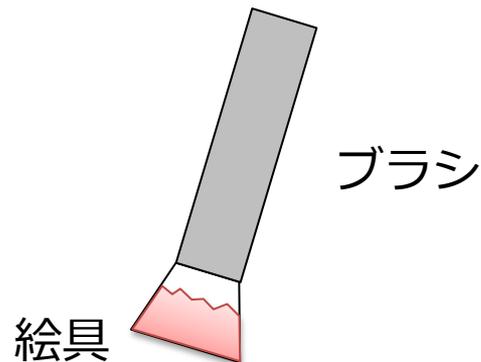
パーティクルのポイント

- 毛先への粘着
 - 絵具がブラシの毛先にくっつく
- 非圧縮性
 - そのままでは流体の密度が一定にならない



パーティクルのポイント

- 毛先への粘着
 - 絵具がブラシの毛先にくっつく
- 非圧縮性
 - そのままでは流体の密度が一定にならない



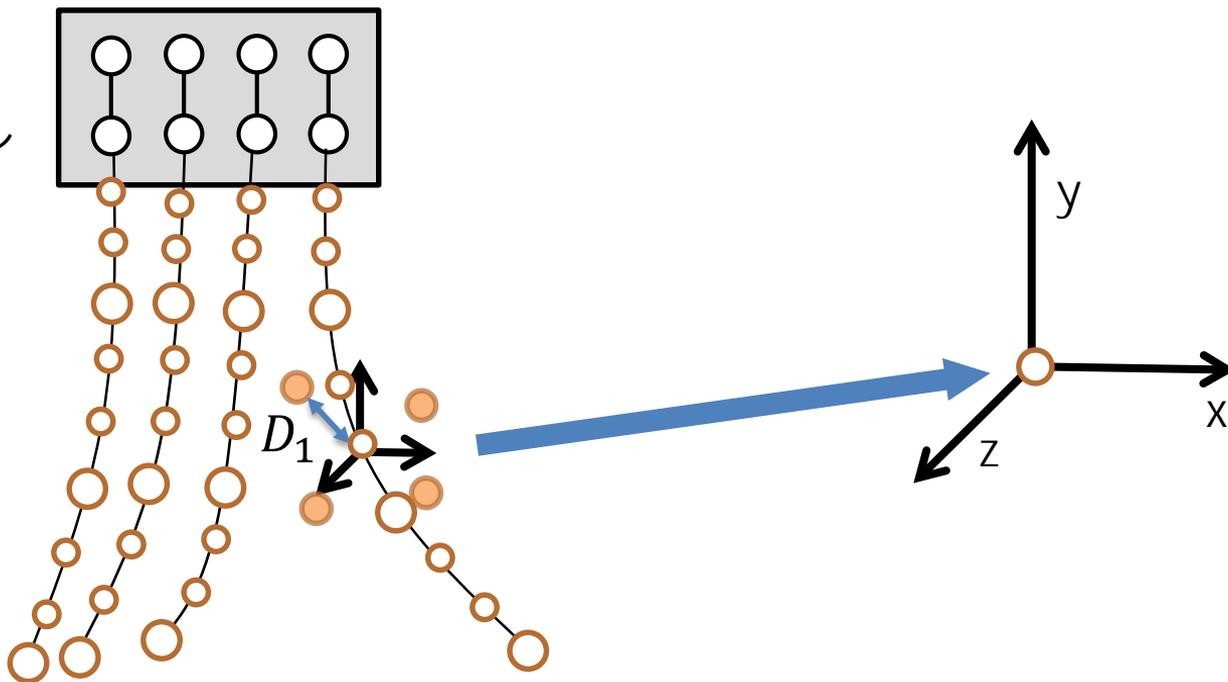


ブラシの毛先への粘着

- ブラシの毛先からの距離で外力を与えるのは？
 - 不安定になりがち
- 非慣性系で慣性力を制御
 - ブラシシミュレーションと同様
 - 各サンプル点を中心にした座標系

各サンプル点の座標系

- : サンプル点
- : パーティクル



サンプル点に追従させる

- サンプル点の座標系

- サンプル点の加速度が変化 → 非慣性系

- 運動方程式

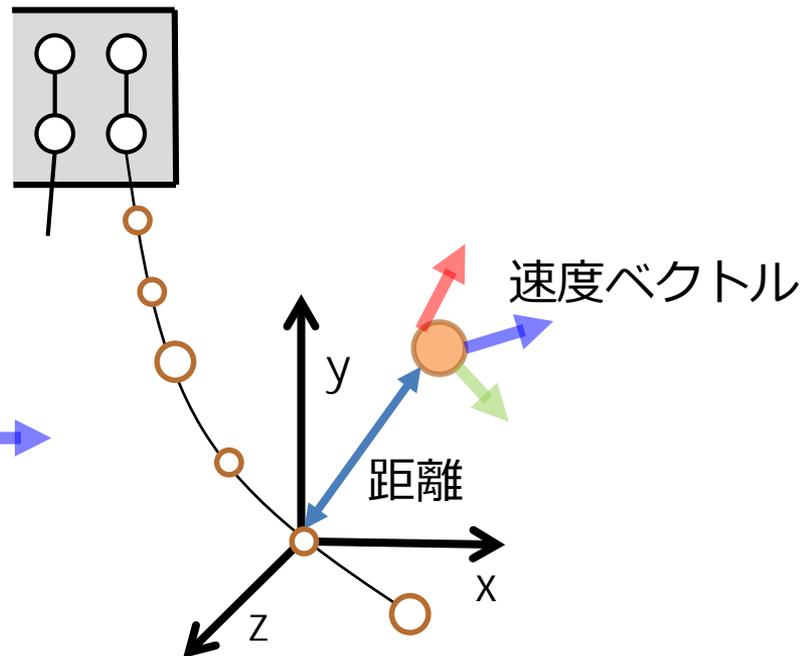
$$\dot{\mathbf{v}}_k^B = \mathbf{R}_L \mathbf{a}_k - \beta_L (\dot{\mathbf{v}}^L + \omega^L \times (\omega^L \times \mathbf{p}_k^L) + (\dot{\omega}^L \times \mathbf{p}_k^L) + 2\omega^L \times \mathbf{v}_k^L)$$

直進力 遠心力 オイラーカ コリオリカ

調整パラメータ

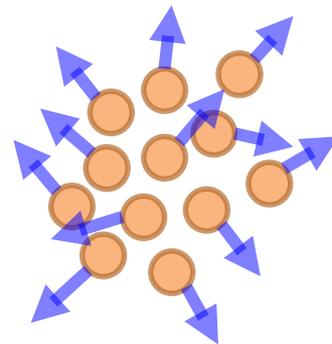
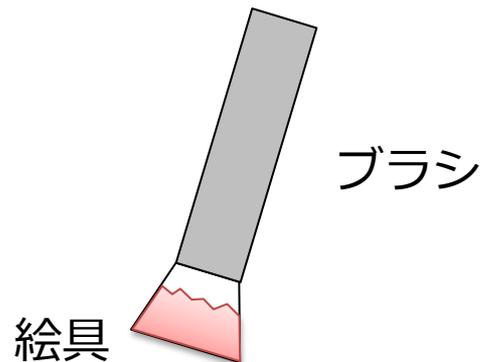
位置の計算

- 毛先の影響を調整
 - 離れたら追従しない
- サンプル点からの距離に応じて合成
 - 慣性力を調整した速度ベクトル →
 - 元の速度ベクトル →



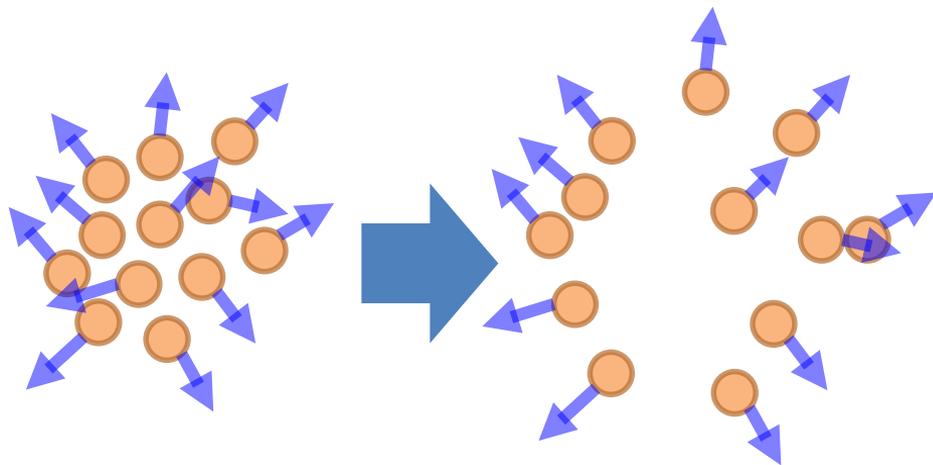
パーティクルのポイント

- 毛先への粘着
 - 絵具がブラシの毛先にくっつく
- 非圧縮性
 - そのままでは流体の密度が一定にならない



そのままだと？

- パーティクルが自由に移動
 - 密度が変化
 - 絵具の流体ぽく見えない
- 密度を一定に保つには？
 - 速度ベクトルを変化させる



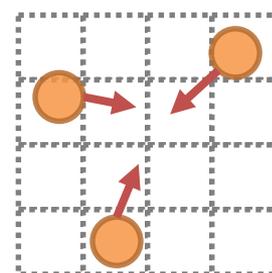
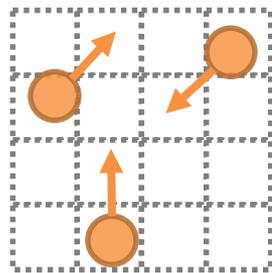


グリッドシミュレーションの圧力計算を間借り

- 圧力計算後の速度場 \mathbf{u}_{t+1} でパーティクルを補間
 - 速度場が非圧縮条件を満たす
- [Zhu et al. 2006]と似た手法
 - Fluid-implicit-particles/particles-in-cells (FLIP/PIC) liquids

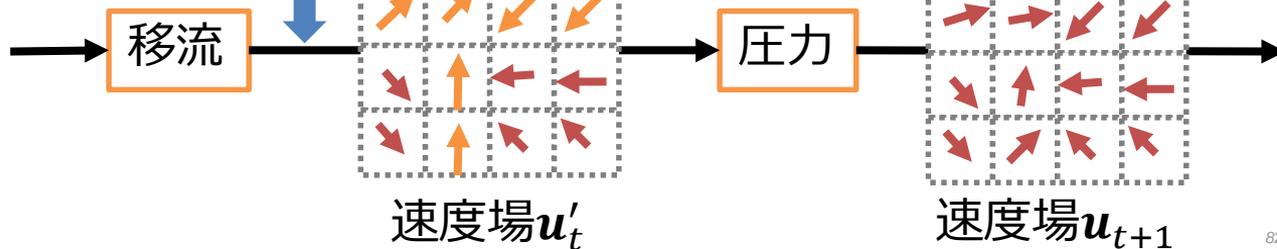
速度ベクトルのラスタライズと補間

パーティクル



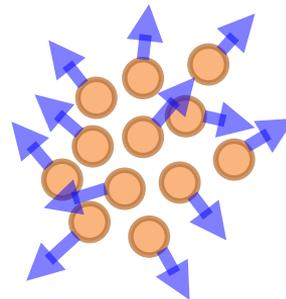
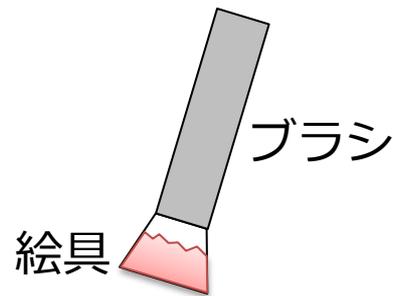
ラスタライズ

グリッド



パーティクルシミュレーションのまとめ

- 毛先への粘着
 - サンプル点の非慣性座標系
 - 慣性力の調整
- 非圧縮性
 - グリッドの速度場を用いて補間
 - FLIP/PIC形式



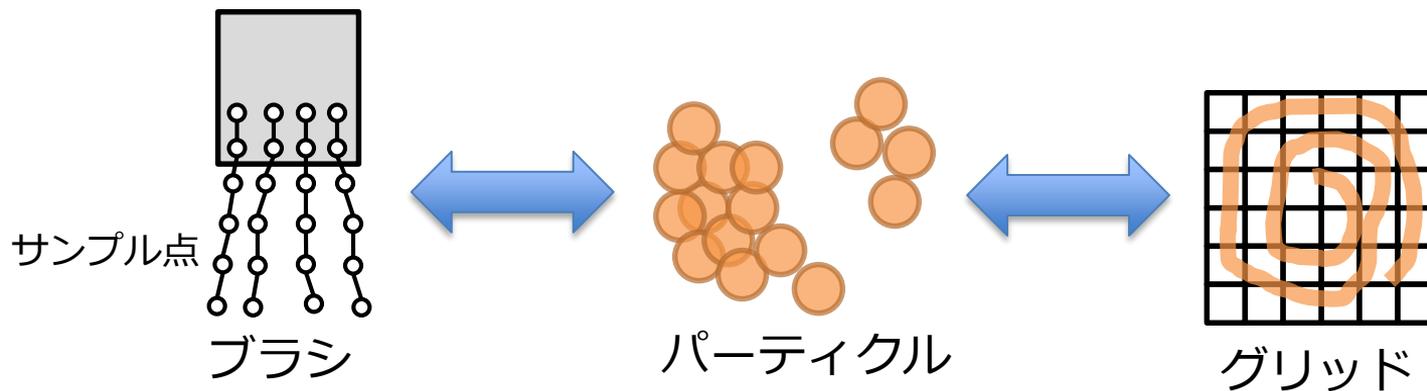


発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - **ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り**

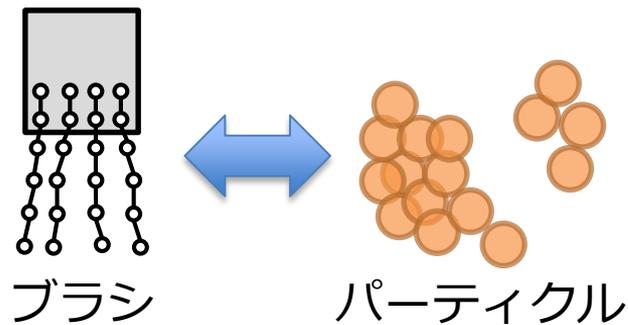


流体のやり取り



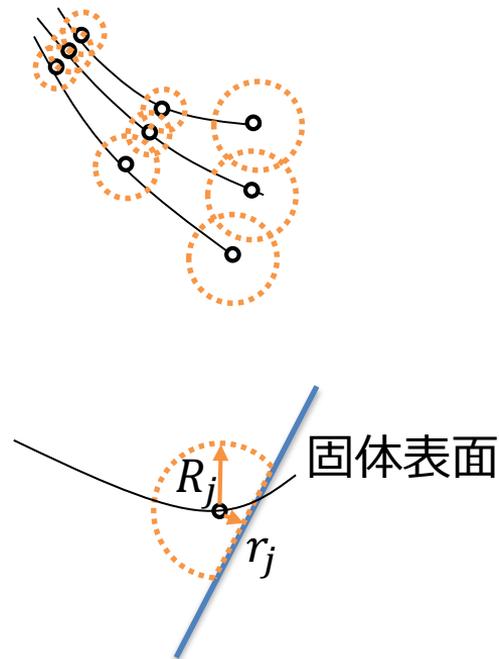
ブラシ⇔パーティクル

- ブラシのサンプル点の容量を計算
- サンプル点が現在保持している流体量と比較
 - 容量 > 流体量: パーティクルを吸収
 - 容量 < 流体量: パーティクルを放出



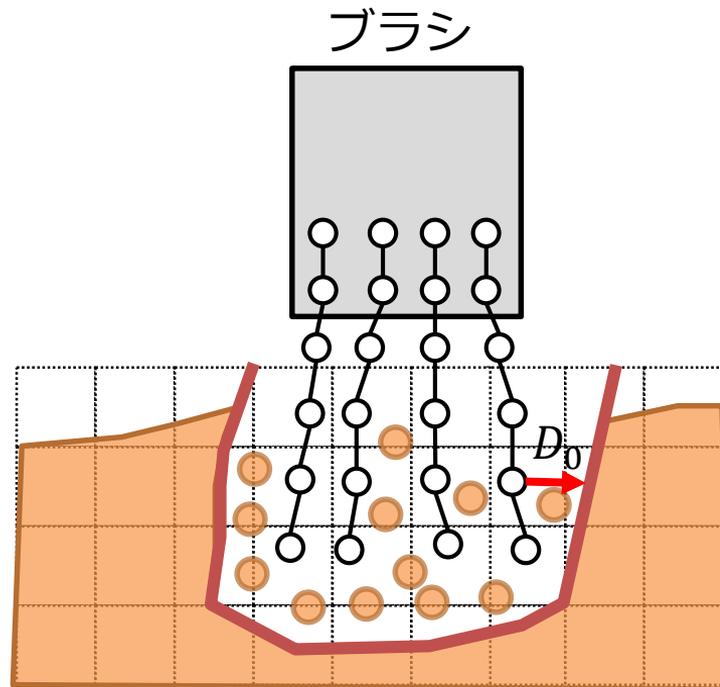
ブラシのサンプル点の容量

- サンプル点の密度フィールド
- 固体表面からの距離
 - 固体表面に近いほど容量が減る



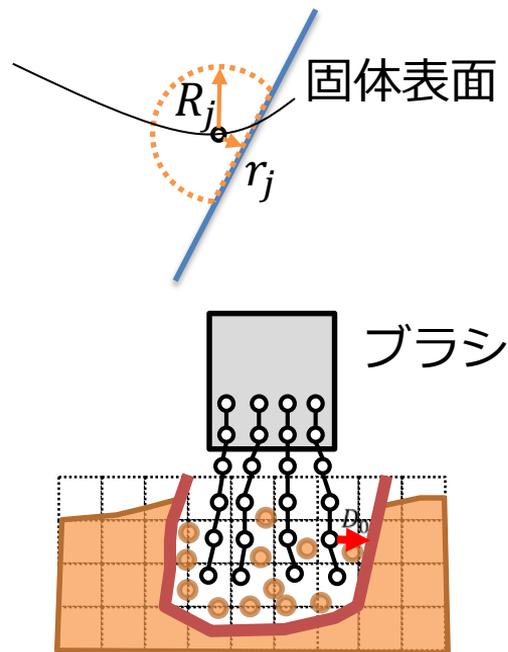
パーティクル ⇔ グリッド

- サンプル点からの距離
 - D_0 以上ならグリッド
 - D_0 未満ならパーティクル
- 密度をカーネル関数で補間
- 他のリソースは線形補間



流体のやり取りのまとめ

- ブラシ⇔パーティクル
 - サンプル点の容量変化
- パーティクル⇔グリッド
 - サンプル点からの距離で変換





発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
4. **結果**
5. 今後の課題とまとめ

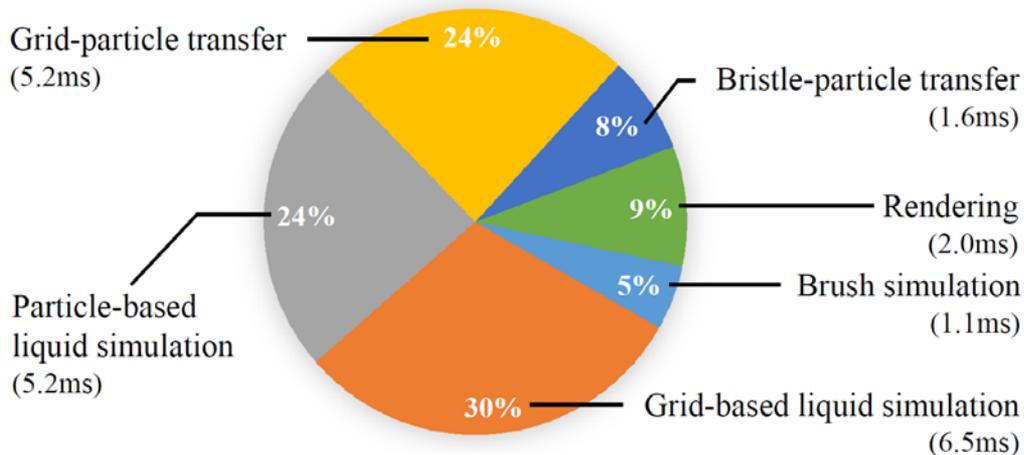


環境構成など

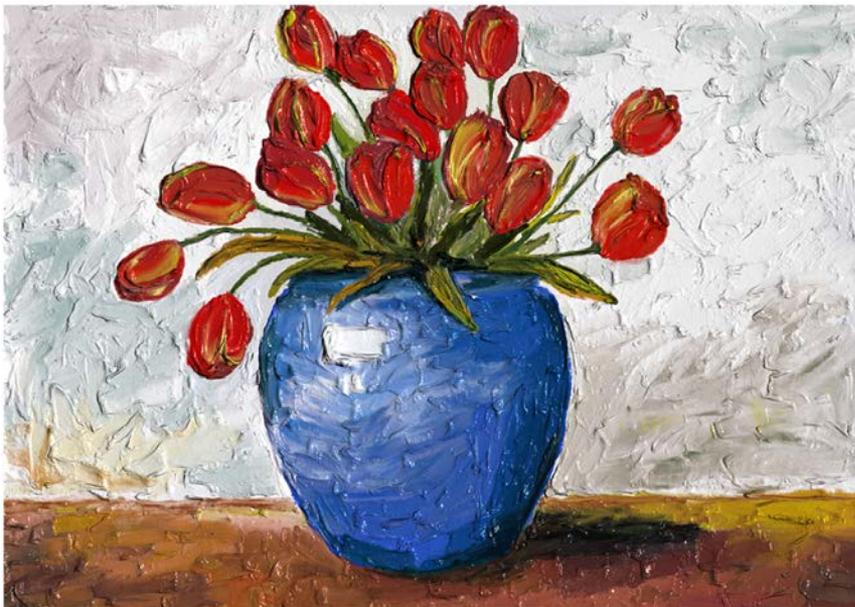
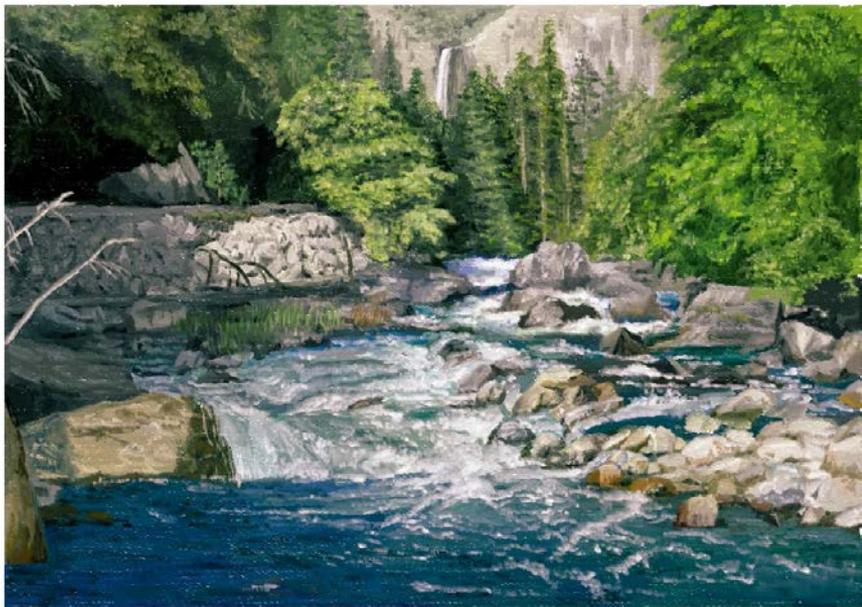
- CPU: Intel Core i7 5930K 3.5GHz
- GPU: Nvidia Geforce GTX Titan 12GB
- CUDAで実装
- レンダリング
 - ボリュームレンダリング
 - パーティクル
 - Screen Space Fluid Rendering with Curvature Flow [van der Laan et al. 2009]

結果

- パーティクル数: 210k
- グリッド解像度
 - 4096x4096x64
- 平均fps: 46



作品





発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
4. 結果
5. 今後の課題とまとめ

課題

- パーティクルが多くなないと、綺麗にならない
- 非圧縮性があまり保たれていない
 - FLIP/PIC形式を利用しているが . . .
- ユーザがコントロールしづらい
 - 直観的じゃないパラメータが多い
- ハイエンドなグラフィックスカードが必要

まとめ

- ペイントシミュレータに関する研究の紹介
- ペイントシミュレータの最新研究論文紹介
 - 毛先を1本ずつシミュレーション
 - インタラクション
 - 毛先 \Leftrightarrow 毛先、毛先 \Leftrightarrow 流体
 - ハイブリッド流体モデル
 - 3次元グリッド+パーティクル

著作権について

- 本スライド内で引用した論文の図の著作権は全て論文著者に帰属します

ご静聴ありがとうございました

参考文献

- [Baxter et al. 2004a] Baxter, W. V., Wendt, J., and Lin, M. C. 2004. IMPaSTo: A realistic, interactive model for paint. In Proceedings of NPAR, 45–56.
- [Baxter et al. 2004b] Baxter, W., Liu, Y., and Lin, M. C. 2004. A viscous paint model for interactive applications. Computer Animation and Virtual Worlds (CASA) 15, 3-4, 433–441.
- [Chu et al. 2002] Chu, N. S. H., and Tai, C.-L. 2002. An efficient brush model for physically-based 3D painting. In Proceedings of Pacific Graphics, 413–421.
- [Baxter and Lin, 2004] Baxter, W., and Lin, M. C. 2004. A versatile interactive 3D brush model. In Proceedings of Pacific Graphics, 319–328.
- [Chu et al. 2010] Chu, N., Baxter, W., Wei, L.-Y., and Govindaraju, N. 2010. Detail-preserving paint modeling for 3D brushes. In Proceedings of NPAR, 27–34.
- [DiVerdi et al. 2010] DiVerdi, S., Krishnaswamy, A., and Hadap, S. 2010. Industrial strength painting with a virtual bristle brush. In Proceedings of VRST, 119–126.

参考文献

- [Muller et al. 2007] MULLER M, HEIDELBERGER B, HENNIX M, RATCLIFF J: Position based dynamics. *J. Vis. Commun.* 18, 2 (2007), 109:118. 15
- [Macklin and Muller 2013] Macklin, M., and Müller, M. 2013. Position based fluids. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH)* 32, 4 (July), 104:1–104:12.
- [Stam 1999] Stable fluids. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '99*, 121–128.
- [Zhu et al. 2005] ZHU, Y., AND BRIDSON, R. 2005. Animating sand as a fluid. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, ACM, New York, NY, USA, SIGGRAPH '05, 965–972.
- [van der Laan et al. 2009] van der Laan, W. J., Green, S., and Sainz, M. 2009. Screen space fluid rendering with curvature flow. In *Proceedings of I3D*, 91–98.
- [Bergou et al. 2008] Bergou, M., Wardetzky, M., Robinson, S., Audoly, B., and Grinspun, E. 2008. Discrete elastic rods. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH)* 27, 3 (Aug.), 63:1–63:12.

参考文献

- CEDECセッション
 - 2005年 流体の鉄人 ～ゲーム屋さんのための流体入門～ 田村 尚希
 - 2014年 Position Based Dynamics Omelette 中川 展男

補足スライド



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り
 - レンダリング



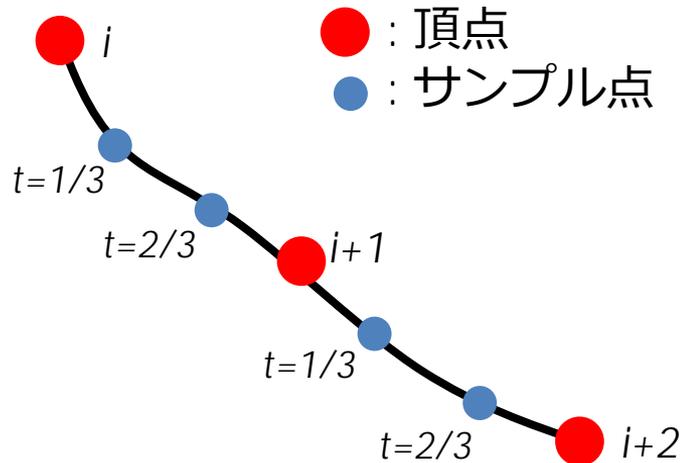
発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - **ブラシのシミュレーション**
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ \Leftrightarrow パーティクル \Leftrightarrow グリッド の流体のやり取り
 - レンダリング

サンプル点を追加

- 頂点だけでは足りない
- サンプル点を、頂点から補間
– Cubic Hermite spline curve

$$p(t) = (2t^3 - 3t^2 + 1)p_0 + (t^3 - 2t^2 + t)m_0 + (-2t^3 + 3t^2)p_1 + (t^3 - t^2)m_1$$





発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り
 - レンダリング



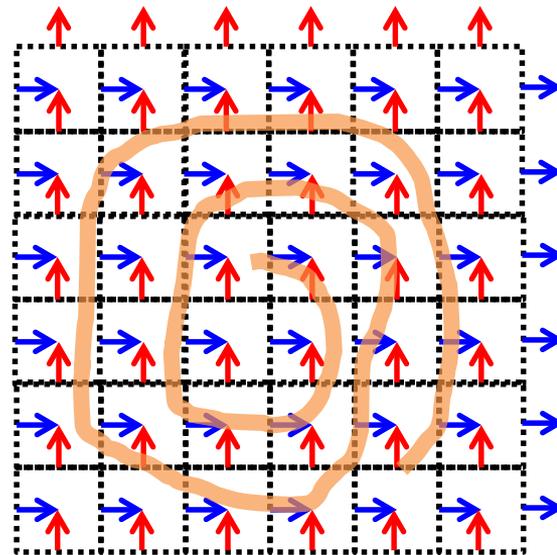
発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り
 - レンダリング

スタッガード格子

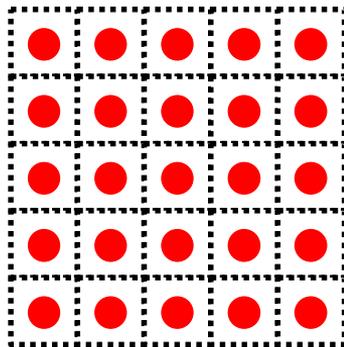
- グリッドセルの境界が1次元の速度を持つ
- 誤差を抑える効果

速度x: u_x →
速度y: u_y ↑

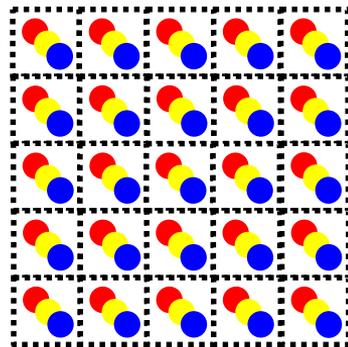


リソースの移流

- グリッドセル値を, 速度場によって移流
 - スカラー値
 - Density(密度)
 - Dryness(乾燥度)
 - oil density(オイル密度)
 - ベクトル
 - Pigment(色)



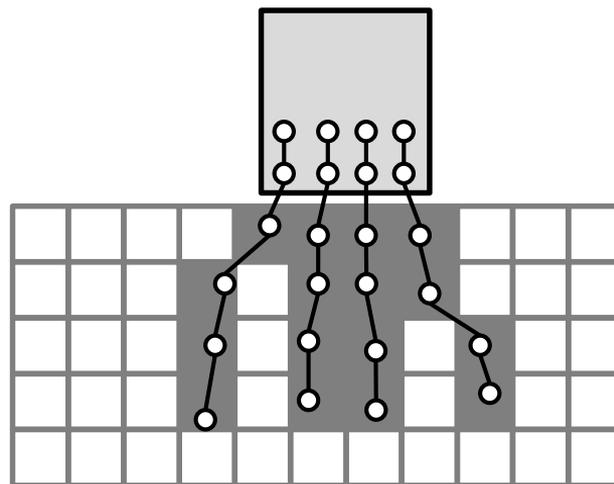
スカラー値



ベクトル

ブラシのサンプル点をラスタライズ

- 境界条件として利用
 - ラスタライズされたボクセルの境界
 - 境界で速度0
 - 圧力の微分値が0





発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, **パーティクル**)
 - ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り
 - レンダリング

摩擦力

- 固体面との摩擦

$$\mathbf{f}_k^{\text{friction}} = -\max((1 - \delta d_k)^2, 0) \mathbf{v}_k$$

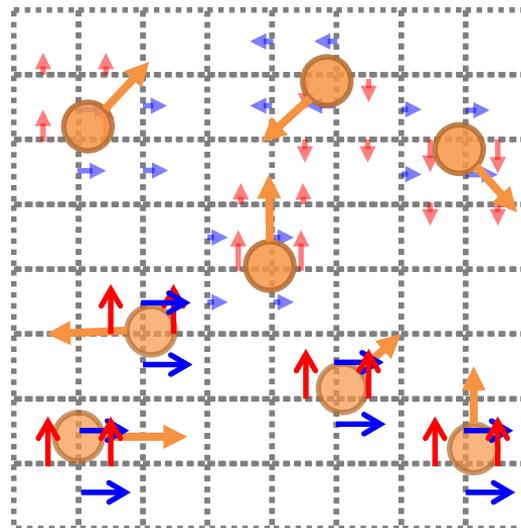
\mathbf{v}_k : パーティクルの速度ベクトル

d_k : 固体面までの距離

δ : 制御パラメータ ($0 < \delta < 1$)

グリッドへのラスタライズ

- : パーティクルの速度ベクトル
- : 速度場のXベクトル
- ↑ : 速度場のYベクトル



速度場を適用

- 2つの速度場を用いて、パーティクルの速度ベクトルを更新
 - $\bar{\mathbf{u}}$: 非圧縮性を満たすような速度場
 - \mathbf{u} : ラスタライズした直後の元の速度場

$$\mathbf{v}_k^{\text{new}} = \gamma \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{p}_k) + (1 - \gamma)(\mathbf{v}_k + \bar{\mathbf{u}}(\mathbf{p}_k) - \mathbf{u}(\mathbf{p}_k))$$

γ で調整する(大体0.8)

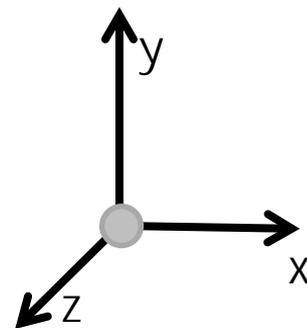


サンプル点の座標空間の基底ベクトル

- ブラシの毛のネジレが小さくなるように
- Discrete elastic rods[Bergou et al, 2008]



●: サンプル点



発表の構成

1. ペイントシミュレータとは?
2. 既存研究の紹介
3. 最新研究の紹介
 - 全体の流れ
 - ブラシのシミュレーション
 - 流体のシミュレーション(グリッド, パーティクル)
 - **ブラシ ⇔ パーティクル ⇔ グリッド の流体のやり取り**

ブラシのサンプル点の容量(その1)

- ブラシシミュレーションで計算した密度フィールドを利用

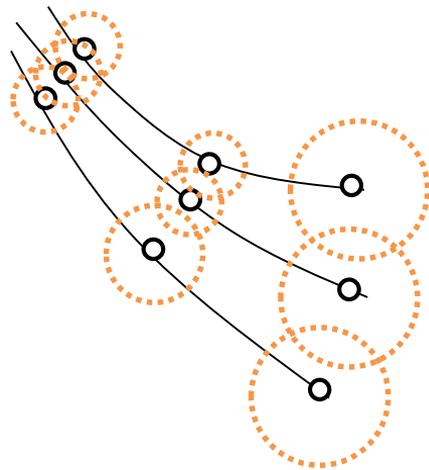
μ : コントロールパラメータ

$\psi(\mathbf{x}_j)$: サンプル点の密度

M_{\max} : サンプル点の容量の最大値

M_{\min} : サンプル点の容量の最小値

$$\text{容量その1: } M'_j = \max \left((1 - \mu \cdot \psi(\mathbf{x}_j)) M_{\max}, M_{\min} \right)$$

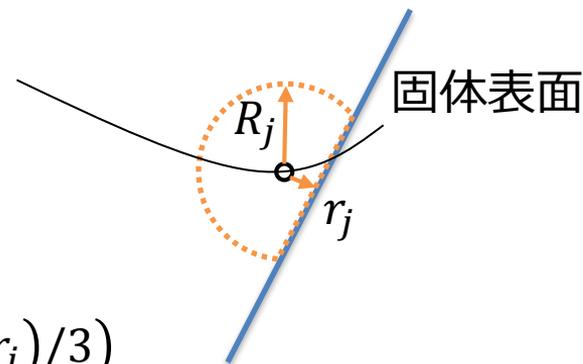


ブラシのサンプル点の容量(その2)

- 固体表面からの距離で、容量を変化
 - 固体表面に近いほど容量が減る

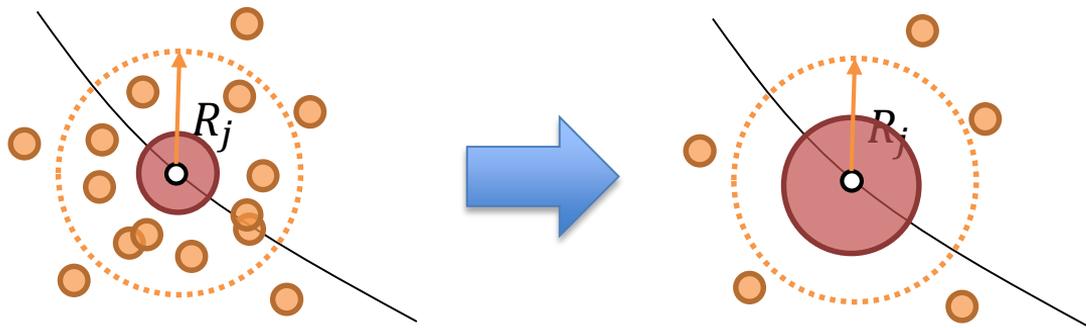
$$R_j = \sqrt[3]{\frac{3M'_j}{4\pi\rho_0}} \quad \rho_0 = 1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

$$\text{最終結果: } M_j = M'_j - \rho_0 \pi (R_j - r_j)^2 (R_j - (R_j - r_j)/3)$$



パーティクルを吸収

- サンプル点が保持する流体量が、容量を下回っているとき
 - R_j 内にあるパーティクルを吸収
- 色に関しては、常にパーティクルからサンプル点へ合成



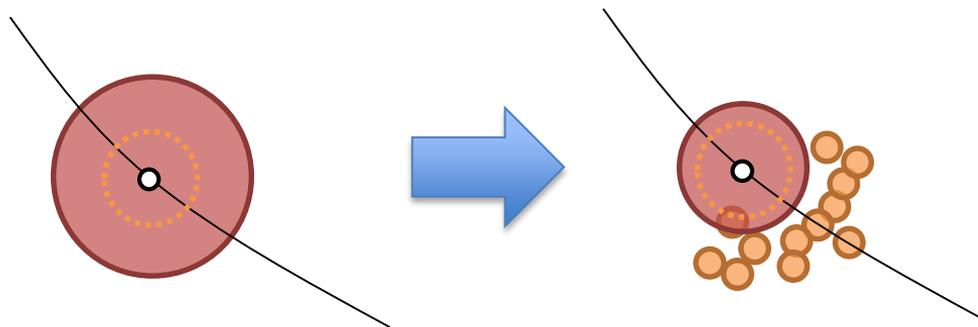
サンプル点からのパーティクル放出

- サンプル点の容量より、保持する流体量が多いとき

$$m_j > (1 + \epsilon)M_j$$

m_j : 保持する流体量

M_j : 容量



グリッドからパーティクル生成

- グリッドのセルが、 D_0 以内に入った時
- グリッドの密度を減らし、パーティクルを生成

$$\rho_c^{\text{new}} = \max \left(\rho_c - m_k \sum_{k=1}^K W(\mathbf{p}_k - \mathbf{x}_c, h), 0 \right)$$

$\{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_K\}$: パーティクルの位置

m_k : パーティクルの質量

x_c : グリッドセルの位置

W : カーネル関数

ρ_c : グリッドセルの密度

パーティクルをグリッドへ統合

- グリッドへ統合する条件
 - パーティクルが、ブラシのサンプル点から D_0 離れる
 - パーティクルの速度が閾値を下回る
- パーティクルを削除して、グリッドの密度を増加

$$\rho_c^{\text{new}} = \rho_c + m_k \sum_{k=1}^K W(\mathbf{p}_k - \mathbf{x}_c, h)$$