

VR による数学的対象の可視化

東京大学大学院数理科学研究科修士課程 名取雅生

2020 年 9 月 17 日

研究の動機

抽象的なトポロジーの概念を**視覚的に**認識したい。

可視化の例	問題点
絵を描く	平面的
動画	平面的, リアルタイムで操作できない
工作	物理的な制約, 材料などによる制限

VR の利点

- 立体的, 空間への没入感
- リアルタイムで操作可能
- 直感的な操作
- 物理的な制約がない



vrhmd.mp4

開発について

共同開発者

- 後藤祐輝 (東京大学 D1)
- 鶴崎修功 (東京大学 D1)
- 中村伸一郎 (東京大学卒)
- 若月駿 (信州大学 学振 PD)

東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター
「数学における「概念の可視化」とその教育支援への応用」
VR 機器の提供等の支援を受けています。

開発環境の整備にご協力いただいた同センターの青山一真様,
実装に関してアドバイスを下さった明治大学の阿原一志様に
この場を借りて御礼申し上げます。

開発環境

- 言語 : C#
- 3DCG ソフトウェア : Unity
- VR ヘッドマウントディスプレイ : Oculus Quest



開発したコンテンツ

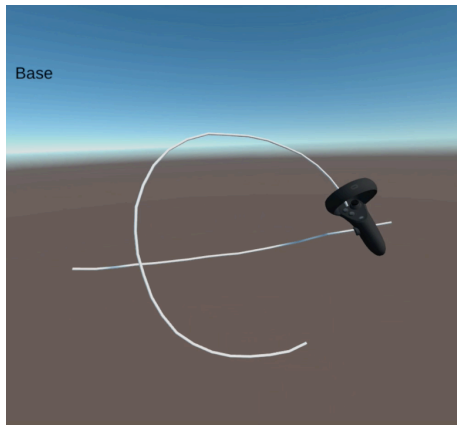
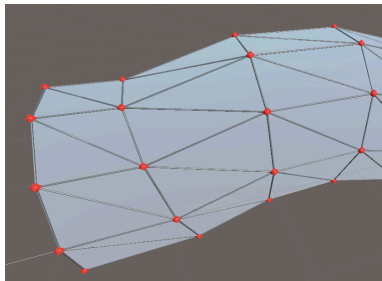
3次元空間内の曲線を取り扱うツールを作成した.

具体的な機能

- 曲線の描画
- 曲線の平行移動・回転
- 曲線の切断・結合
- Möbius エネルギーによる結び目の整形
- 手動による結び目の変形

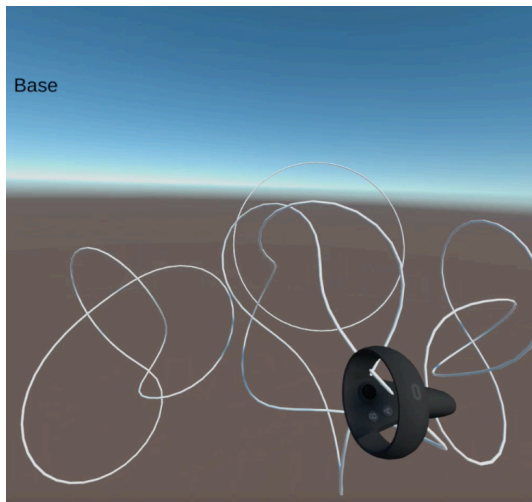
曲線の描画

曲線 = 各線分の長さが (殆ど) 一定な折れ線



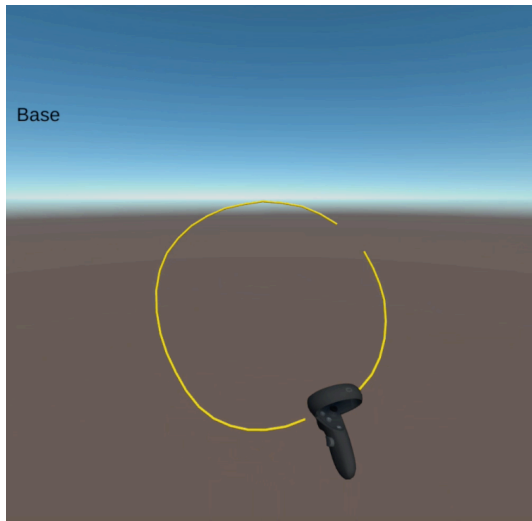
draw.mp4

曲線の平行移動・回転



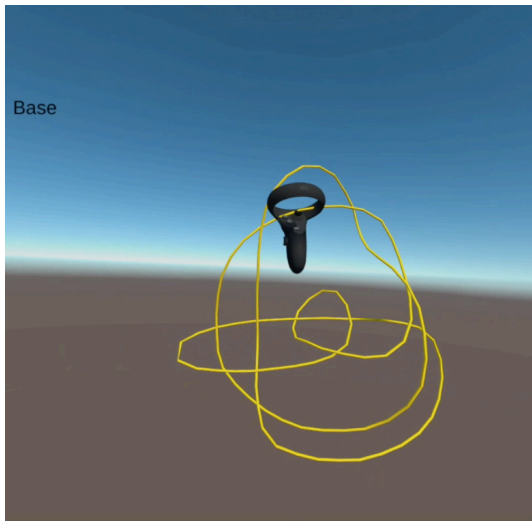
move.mp4

曲線の切断・結合



cutcombine.mp4

自明な結び目をほどく 1



trivialknot1.mp4

Möbius エネルギーによる結び目の整形

定義 (大原 1988)

$h: S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}^3$: 弧長でパラメトライズされた結び目
 h の Möbius エネルギーを以下で定める:

$$E(h) = \iint_{S^1 \times S^1} \left(\frac{1}{\|h(x) - h(y)\|^2} - \frac{1}{\delta(x, y)^2} \right) dx dy$$

$\delta(x, y)$: $h(x), h(y)$ の間の短い方の弧長

例

正円 $h(x) = ((\cos 2\pi x)/2\pi, (\sin 2\pi x)/2\pi, 0)$ のエネルギーは
 $E(h) = 4$.

この定義を次のように離散化する.

Möbius エネルギーによる結び目の整形

定義

$(v_i)_{i=0}^{N-1} \in (\mathbb{R}^3)^N$: 隣接する 2 点の間隔が一定な点列

$$\begin{aligned} E((v_i)_i) &= \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i \neq j} \frac{1}{\|v_i - v_j\|^2} \right) \left(\sum_i \|v_i - v_{i+1}\| \right)^2 - \frac{\pi^2 N}{3} + 4 \\ &= (\text{静電エネルギー}) \times (\text{弧長})^2 + (\text{定数}) \end{aligned}$$

事実 (大原)

$h: S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}^3$: 弧長でパラメトライズされた結び目

$(v_i^{(N)})_i$: h を弧長で計って N 等分した点列

このとき,

$$E(h) = \lim_{N \rightarrow \infty} E((v_i^{(N)})_i).$$

Möbius エネルギーによる結び目の整形

整形のアルゴリズム (阿原 1992)

$(v_i)_i$: 結び目を表す点列, s : 隣接する 2 点の間隔

$(v_i)_i$ に対して毎フレーム次の操作を行う.

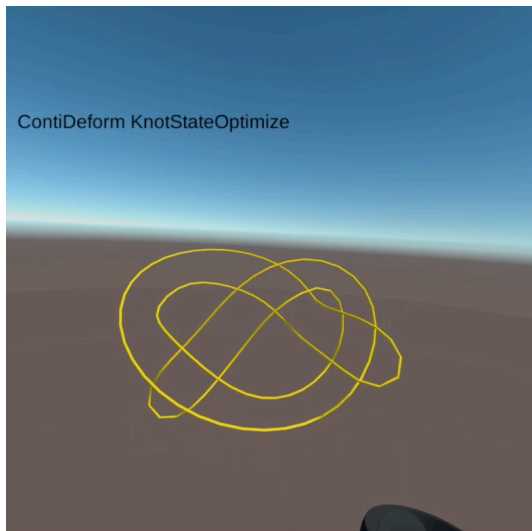
- ① 離散化された Möbius エネルギーの $(v_i)_i$ における勾配を $G((v_i)_i)$ とし, $(v_i)_i$ を $(v_i)_i - c \cdot G((v_i)_i)$ に置き換える.
- ② 弾性エネルギー

$$\frac{1}{2} \sum_i (\|v_{i+1} - v_i\| - s)^2$$

の勾配に沿って $(v_i)_i$ を変化させ, 点の間隔を s に近づける.

加えて, 収束を速くするために慣性項を加えるなどの工夫を行った.

Möbius エネルギーによる結び目の整形



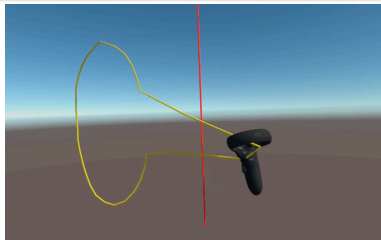
knotenergy.mp4

手動による結び目の変形

結び目上の 2 点を選択し、コントローラーを動かすと、2 点の間の短い方の弧がコントローラーの移動に合わせて変形する。

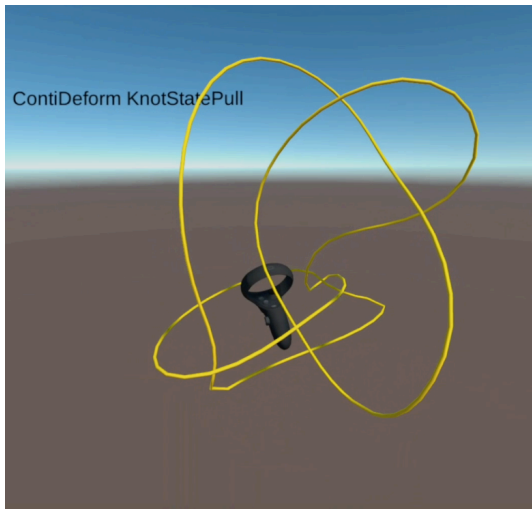
自己交叉しないための工夫

- 折れ線の各 2 線分間の距離の最小値が一定値を下回る場合は変形しない。
- 各フレームにおける変化量を一定値以下にする。



manual.mp4

自明な結び目をほどく



trivialknot2.mp4

今後の展望

- 結び目に対する数学的操作の実装
 - 結び目の変形のリンクやタングルへの拡張
 - Seifert 膜の生成
 - Jones 多項式等の不変量の計算
 - Kirby 計算
- 4 次元空間内の対象を VR の空間内で取り扱うための基本的な機能の実装 (開発中)
- 曲面を取り扱う機能の実装 (曲面の分類等)
- Hopf fibration などの具体的な幾何的対象の描画
- 3 次元リーマン多様体について, 計量と整合的な物理法則の実現

ご清聴ありがとうございました.