

2011 年度 修士論文

流れに凍り付いた曲線の バーチャルリアリティ可視化

神戸大学大学院システム情報学研究科
計算科学専攻

村田歌織

指導教員		陰山聡	教授
審査教員	主査	臼井英之	教授
	副査	陰山聡	教授
	副査	田中成典	教授

2012 年 2 月 6 日

Virtual reality visualization of flows with frozen-in lines

MURATA Kaori

Abstract

To analyze three-dimensional data of computational fluid dynamics and magnetohydrodynamics (MHD), a new visualization method based on virtual reality (VR) technology is developed. In this method, a “tracer line” is transported or advected by the target flow in three-dimensional VR space. Observing its deformation process, one can intuitively understand the flow’s structure, especially the stretching and twisting components. Since a tracer line is identical to a line of force of a vector field that is frozen-into the flow, the VR tracer line method proposed in this study can also be regarded as a new visualization method for the frozen-in vector field such as magnetic field in the ideal MHD or vorticity field in the Euler fluid. A program named TubeAdvect is developed for the implementation of the VR tracer line method. In TubeAdvect, its initial condition or the initial curve of a tracer line is intuitively specified by moving a portable controller or a 3D mouse in the VR space. The initial curve is then released to be advected by the target flow to be analyzed. When a distance between a pair of consecutive points becomes larger than a pre-defined length, a new point is inserted between them. Since the stretching and twisting components of the flow are key features of the magnetic field generation process in the MHD, the VR tracer line method is useful to analyze geodynamo or solar dynamo simulations. A problem of the VR tracer line method is that it does not convey local flow information around the curve. To resolve this problem, wheel-like objects are added to the tracer line. Radial change of a ring in each wheel shows the divergence component of the flow away from the tracer line at that position. Local colors of the tracer line and their temporal change convey stretching rate of the tracer line there. The original TubeAdvect and the improved one named wTubeAdvect are tested on three kinds of analytically defined flows as well as output data of a geodynamo simulation, and the usefulness of the VR tracer line method implemented by TubeAdvect and wTubeAdvect is confirmed.

流れに凍り付いた曲線のバーチャルリアリティ可視化

村田歌織

要旨

3次元流れ場を、バーチャルリアリティ(VR)装置CAVEの空間中で立体的かつ対話的に可視化するための新しい可視化手法「VRトレーサー曲線法」を考案した。VRトレーサー曲線法は、VR空間中に、流れに乗って動く曲線、トレーサー曲線を置き、その時間発展を3次的に追跡する手法である。この手法の特徴は、ねじれや引き伸ばしを伴う流れ場の速度分布がよくわかること、そして理想流体中の渦糸や磁力線など、流れ場に凍り付いたベクトル場の力線の可視化と等価であることである。CAVEのVR空間中でVRトレーサー曲線法を実装したTubeAdvecterプログラムを開発した。このプログラムは、利用者がCAVEのコントローラー、ワンドの動きで指定した任意形状の3次元曲線を初期条件とし、流れに乗って移流・変形するトレーサー曲線をOpenGLを用いて細くなめらかなチューブ状の物体として可視化したものである。曲線は、離散点列としてその位置座標がリストに保存される。隣り合う離散点の距離がある長さ以上になった時には、その間に新しい点が挿入される。これによって曲線の時間的变化をよりなめらかに追跡することができる。単純なトレーサー曲線(TubeAdvecter)ではトレーサー曲線の近傍の流れの詳細な情報を表示できないという課題がある。これを解決するため、トレーサー曲線の局所的伸び、渦度のトレーサー曲線に平行な成分、流れの発散のトレーサー曲線に垂直な成分を可視化する機能を追加した。まず、トレーサー曲線の引き伸ばし情報を可視化するため、トレーサー曲線が引き伸ばされる点の色を変化させた。渦度の平行成分と流れの発散の垂直成分を可視化するために、形状の変化する車輪状の物体をトレーサー曲線に付加させた。このように改良されたVRトレーサー曲線法をCAVE型の没入型VR装置で実装した。オリジナルのTubeAdvecterと、改良を行ったプログラム『wTubeAdvecter』を、それぞれ解析的に定義されたいくつかのテストデータに適用し、その有効性を確認した。また、地球ダイナモのシミュレーションデータに適用し、新たな情報を得ることができることを確認した。

目次

1	序章	0
2	流れ場の可視化手法	2
2.1	矢印表示	3
2.2	トレーサー粒子法	3
2.3	LIC 法	4
2.4	流線、流跡線、流脈線	5
2.5	タイムライン法	6
3	トレーサー曲線と流れに凍り付いた力線	8
3.1	流れに凍り付くベクトル場	8
3.2	3次元画像技術の必要性	11
4	バーチャルリアリティ技術	13
4.1	バーチャルリアリティ技術とは	13
4.2	VRの歴史	13
5	CAVE	14
5.1	CAVEの概要	14
5.2	pCAVEシステム	15
5.3	π -CAVEシステム	17
6	VRトレーサー曲線法	19
6.1	VFIVE	19
6.2	VRトレーサー曲線法	19
7	TubeAdvecter	21
7.1	プログラムの流れ	21
7.2	初期位置の決定	22
7.3	座標の更新と点の補間	23
7.4	チューブの描画	24
7.5	課題	25
8	wTubeAdvecter	26
8.1	局所的引き伸ばし	26

8.2	渦度	27
8.3	発散	27
9	テスト	30
9.1	Shear flow	30
9.2	Rigid-body rotation flow	35
9.3	Convergent flow	38
10	応用例	42
11	まとめと今後の課題	45
	謝辞	46
	参考文献	46

1 序章

流れの可視化技術は、流体力学とその関連分野を支える重要な基盤技術の一つである。水を使った流体の実験や、空気を使った風洞実験では、“場”としての流れの空間構造を一目でわかるように工夫された様々な可視化技術が駆使される。

コンピュータを用いて流体の基本方程式を数値的に解く、いわゆる数値流体力学においても、数値データとして出力される計算結果を解析し、計算機内部に再現された流れ場を視覚的に把握できるような画像を生成するプロセス —すなわち、数値データから画像データへの変換— は、研究の成否を決める重要なステップである [1]。流れの可視化は、流体现象の計算機シミュレーションを支える重要な二本柱の一つと位置づけられる。

スーパーコンピュータ「京」に象徴されるように、計算技術は現在でもムーアの法則に従った指数関数的な発展を順調に続けてきている。そのため、シミュレーションの対象となる流体现象は年々複雑化するとともに、計算結果として出力データのサイズも膨大化の一途をたどっている。つまり、可視化処理すべき出力数値データも指数関数的に大規模化、複雑化しているのが現状である。

一方、もう一つの技術的柱としての可視化技術は、このような出力データの爆発的变化に対応できていない。

可視化技術の発展の歴史を振り返ると、それは可視化結果としての画像の次元が増大してきた歴史と言える。初期には 1 次元的データを $y = f(x)$ という形のグラフで描くことで可視化としては十分であっただろう。しかし、計算機シミュレーションが高度化するにつれて、 x - y 平面上の物理量の分布を可視化する必要が出てきた。2 次元平面上のスカラー量は等高線やあるいは色の分布等で比較的容易に可視化することが可能である。流れ場のようなベクトル場であっても、それが 2 次元データであれば、平面上に矢印を分布させることで簡単かつ直感的な可視化が可能である。

計算機、特にスーパーコンピュータの進歩に伴い、1980 年代には 3 次元の流体シミュレーションが当たり前となってきた。3 次元シミュレーションの出力データの可視化は、2 次元データとは質的に異なると言えるほど難しい。1980 年代の終わり頃には“グラフィックワークステーション”と呼ばれるハードウェアと、“3 次元可視化ソフト”と呼ばれるソフトウェアが研究の現場で日常的に用いられるようになった。

3 次元可視化ソフトとは、3 次元の流体データを様々な手法で可視化し、UNIX の X-window システム等のウィンドウシステム上に表示させるソフトである。単なる画像データの表示だけでなく、マウスによる操作によってウィンドウ内に表示された可視化物体を回転させたり、拡大、縮小表示させることが可能であると

いう点がこの3次元可視化ソフトの特徴である。

3次元可視化ソフトウェアとグラフィックワークステーションの登場は、可視化の歴史の中で画期的な技術革新であったと言える。ところが、その後、可視化技術革新は明らかに計算技術の革新に追いつかなくなっている。スーパーコンピュータが、単一ベクトルプロセッサから並列ベクトルプロセッサ、そしてスカラプロセッサを大量に接続した今日の超並列スーパーコンピュータまで進化しているのに対して、研究の現場で用いられている可視化技術基盤は、(専用のグラフィックワークステーションが汎用PCと高速GPUの組み合わせに姿を変えたことを除けば) 80年代終わりから全く進歩していないと言える。計算技術と可視化技術の格差、アンバランスはもう限界に近い。可視化に関する技術革新が強く望まれている。

現在広く用いられているPCベースの可視化手法では、技術的な限界のために十分な解析ができない流れ場のデータの一例として、地球ダイナモシミュレーションのデータを挙げることができる。

地球ダイナモとは、地球の中心部、コアと呼ばれる領域にある液体鉄が流れることで、(その流れの運動エネルギーを変換して)電流を発生させる自然の発電機(dynamo)である。地球が固有の磁場を持つのは、この地球ダイナモのプロセスによってコア内部に電流が常に維持されているためである。従って、地磁気の起源を理解し、その未来を予測するためには、コアの液体金属の流れを計算機内部に再現する計算機シミュレーション(地球ダイナモシミュレーション)が有効であり、現在活発に研究されている。

地球ダイナモシミュレーションの流れ場の可視化解析の最終的な目的は、その流れがいかにして電流を作り、磁場を増幅しているかという物理過程(ダイナモプロセス)を理解することである。ダイナモプロセスを磁力線の描像に基づいて表現すれば、液体金属中の一本の磁力線が引き伸ばされ、ねじられ、曲げられることで最終的に何重にも折りたたまれた、きわめて長い磁力線に変形される過程であると言える。

わかりやすい例をFig.1に示す。1本のリング状の磁力線(a)が引き伸ばし((b)と(c))、ねじれ(d)、折りたたみ(e)の過程を経て、最終的には(f)のように2重のリング状磁力線に変形される。これは、磁力線の密度が2倍(すなわち磁場の強さが2倍)になったことを意味する。つまり、地磁気ダイナモシミュレーションを解析するためには、流れ場データの中から磁力線がどのような流れによって引き伸ばされ、ねじられ、折りたたまれるかという情報を引き出すことが鍵となる。

流れの引き伸ばしやねじれの成分を効果的に可視化することは(市販されている3次元可視化ソフトに組み込まれているような)標準的な可視化手段では極

めて難しい。このことが、地球ダイナモシミュレーションの発展を阻害する大きな要因の一つとなっている。引き伸ばしやねじれ成分を可視化する独自の可視化アルゴリズムを考案することは可能であり、実際、本研究で提案するのはそのような流れ場を新しい可視化手法である。しかし、その手法を PC 上で実装し、実際の研究ツールとして実現することは極めて難しい。その難しさの根源はこの手法が 3 次元空間中で解析者によってリアルタイムかつ対話的に処理される必要があるという性質をもつためである。PC の 2 次元画面をインターフェースとしたマウス操作による (疑似的) 3 次元処理では誤摩化せないほど本質的な 3 次元性を要求するのがこの可視化手法といえる。そこで我々は近年急速に発展を遂げている没入型バーチャルリアリティ (VR) 技術に注目し、この VR 技術を応用することで流れによる引き伸ばしやねじれを可視化する手法を開発した。この手法—VR トレーサー曲線法—の開発についてまとめたのが本論文である。なお、本論文の前半部分 (車輪オブジェクトを付加しない基本的 VR トレーサー曲線法) については、論文 [2] で発表した。後半の内容については、現在投稿論文を準備中である。

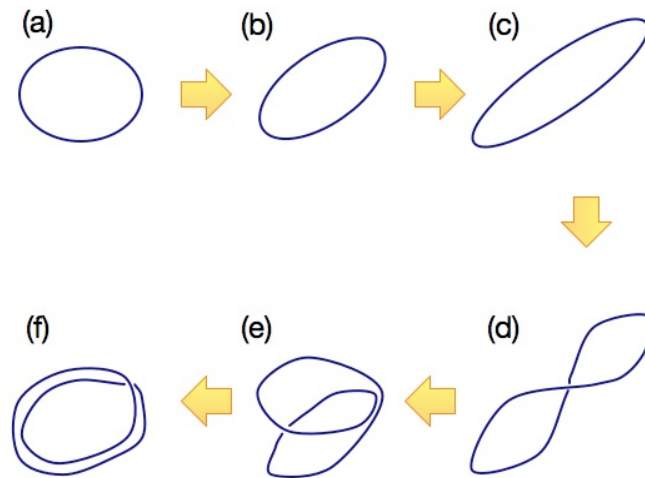


Fig. 1: The concept of magnetic field amplification by the formation of a magnetic field line of force by a flow with stretching (a) $\rightarrow$ (c) , twisting (c) $\rightarrow$ (d) , and folding (d) $\rightarrow$ (f) component.

2 流れ場の可視化手法

本研究では、VR 技術に基づいた流れ場の新しいデータ可視化手法を開発した。その手法は、これまでに開発された流れ場の可視化手法を組み合わせ、発展させ

たものである。そこで本章では、これら古典的な可視化手法を紹介する [3]。

2.1 矢印表示

矢印表示は、流れベクトルの方向と大きさを、矢印によって表示する手法である。Fig.2 は、以下のように表せる 2 次元の流れベクトル v を矢印で表示している。

$$v(x, y) = \begin{pmatrix} \sin(y) \\ \sin(x) \end{pmatrix} \quad (1)$$

このように、この方法を使うと、流れの大きさと方向がそのまま表示されるので、これらの情報の把握が容易である。

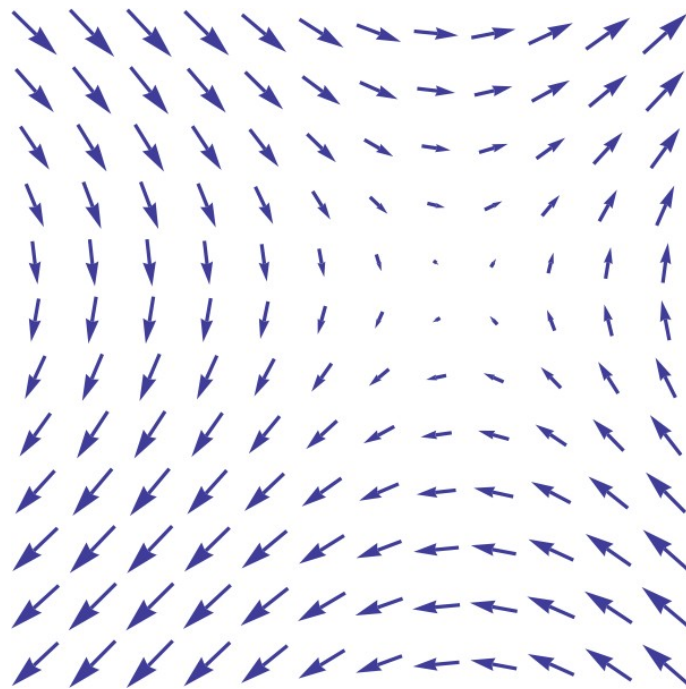


Fig. 2: An example of arrow visualization[4]. Arrows show direction and size of vector at the position.

2.2 トレーサー粒子法

トレーサー粒子法は、流れ場中に、重さのない仮想的な点を置き、それが流れに乗って動いていく様子を観察することによって、流れを可視化する手法である。

Fig.3 では、円柱まわりの流れを表している。この図では、トレーサー粒子の時間経過を、白いトレーサーの長さによって表している。このように、トレーサー粒子の運動を追うことで、流れの様子を知ることができる。

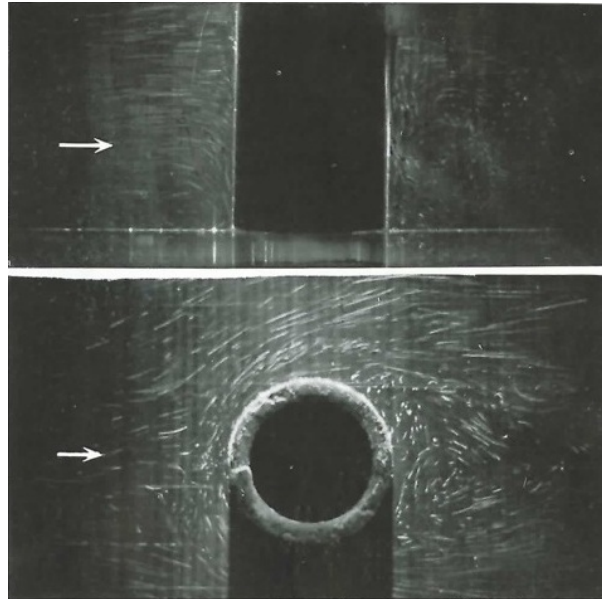


Fig. 3: Exxample of flow visualization by tracer particle method[3]. A flow around a cylinder is visualised. The upper panel shows a horizontal view. The lower panel shows a vertival view from the top.

2.3 LIC 法

LIC 法とは、線積分畳み込み法 (Line Integral Convolution) の頭文字をとったものである。この手法は、各ピクセルを起点とした流線に沿ってホワイトノイズを線積分して畳み込みを行うことで、流れ場全体を大局的な性質から局所的な性質まで表現することができる。Fig.4 の左が、円を描くような流れを、右が乱流を LIC 法で可視化したものである。流れが大きな円を描くように動く構造から、乱流のように細かい動きをする構造まで直感的に把握することができるがわかる。

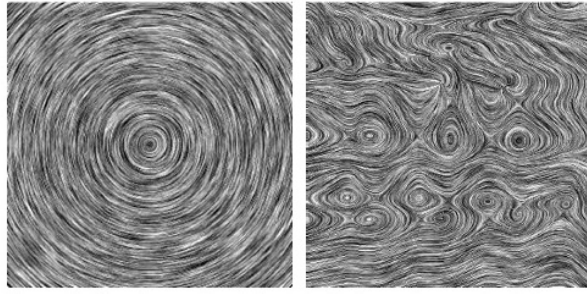


Fig. 4: Examples of LIC visualization method[5]. The left panel shows a circular flow, and the right panel shows a turbulent flow. The line integrals are applied with a white noise data in these visualizations.

2.4 流線、流跡線、流脈線

これら3つの可視化手法は良く似ており、定常流 (時間的に変化の無い流れ) に対しては同じ可視化画像を生成する。

流線は、その線上の任意の点における接線方向がその点での瞬間の流れの速度の方向に一致する線である。また、流跡線とは、1つのトレーサー粒子の軌道を流れの時間変動の中で描く曲線のことであり、流脈線とは、同一点から次々流れる複数のトレーサー粒子を、ある瞬間につないでできる曲線である。

Fig.5 は、流脈線の図である。左端にトレーサー粒子の発生点があり、そこから次々と粒子が流れてくる。この図の場合、円柱まわりの流れが可視化されている。このように、流脈線が複数あると、これらの線を見ることにより、流れ全体の構造を把握することができる。

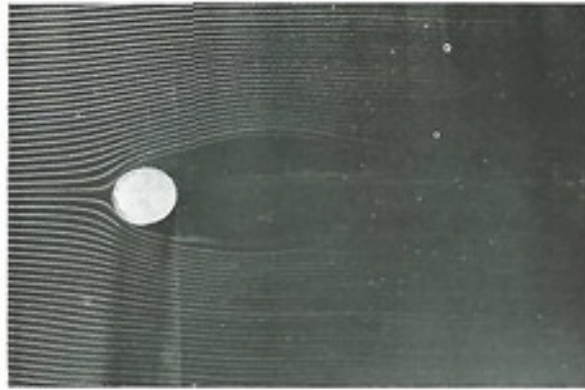


Fig. 5: An example of the streakline visualization method[3]. Many tracer particles are released from the left. A series of particles released from a fixed point construct a streakline (a white curve) .

2.5 タイムライン法

タイムライン法は、トレーサー粒子法の一種の拡張である。トレーサー粒子法は0次元の物体、即ち点が流れの中に置かれるのに対して、タイムライン法では、1次元の物体、即ち曲線が流れの中におかれる。この曲線をこの論文では、トレーサー曲線と呼ぶ。タイムライン法とは、多数のトレーサー曲線を用いる可視化手法である。

一本のトレーサー曲線は、流れを横切る線上から、トレーサー物質を一斉に発生させてできる。Fig.6のように、トレーサー曲線が流れとともに移動して行く様子を見ることで、速度分布の詳しい情報を知ることができる。このトレーサー曲線を、時間的に次々と放出することによって多数描き、ある瞬間のスナップショット写真を撮ることによって、流れをの様子を可視化するのが、タイムライン法である。Fig.7は、タイムライン法の様子を示している。同じ瞬間に撮られた、複数のトレーサー曲線の様子から、この図の場合、円柱を回り込むような流れがあることがわかる。この手法は従来、主に実験で用いられている手法である。

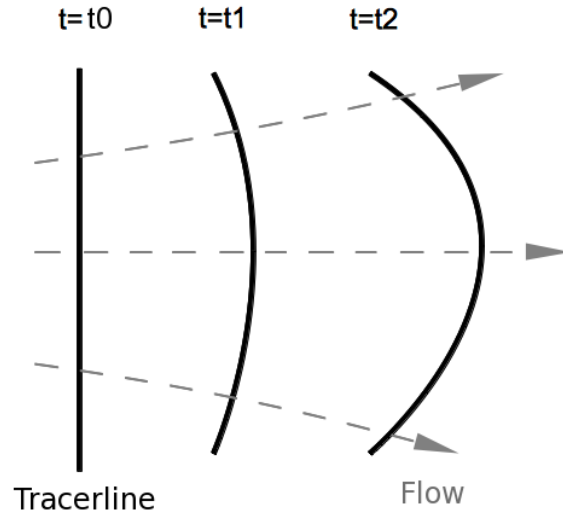


Fig. 6: A tracer line in a flow. The drifting motion with deformation of the curve visualizes the flow.

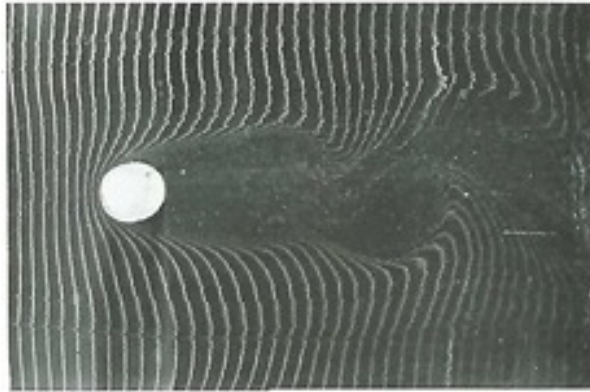


Fig. 7: An example of flow visualization by timeline method[3]. A series of tracer particles released from the left side construct a line. This line is advected by the flow as each particle in the line is transported by the flow. A series of these lines are released from the left side before the snapshot picture is taken.

3 トレーサー曲線と流れに凍り付いた力線

本章では、トレーサー曲線の重要な性質について述べる。それは、トレーサー曲線と流れに凍り付いたベクトル場の力線の等価性である。

3.1 流れに凍り付くベクトル場

2.5 節で述べたタイムライン法で用いられるトレーサー曲線は、トレーサー粒子が連結されたものである。トレーサー曲線は流れに凍り付くベクトル場の力線と解釈することができる。このようなベクトル場の例として、理想 MHD 流体中の磁場 [6] や、オイラー流体中の渦度場 [7] を挙げることができる。

一般に、ベクトル場 $\mathbf{a}$ の力線とは、パラメータ s を用いて

$$\frac{d\mathbf{x}(s)}{ds} = \mathbf{a}(\mathbf{x}(s)) \quad (2)$$

で定義される曲線 $\mathbf{x}(s)$ である。 $\mathbf{x}(s)$ は 3 次元空間中の位置ベクトルである。 $\mathbf{a}$ が磁場の場合、特に磁力線と呼ばれる。

このようにして定義された力線の流れ場中の運動について考える。理想 MHD 流体に対し、磁場を $\mathbf{B}$ 、流れ場を $\mathbf{v}$ とすると、 $\mathbf{B}$ の時間発展は

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

と書ける。

Fig.8 のように流体とともに運動する閉曲線 C と、それに囲まれる曲面 S を考える。この曲面 S を貫く磁束は

$$\phi = \frac{d}{dt} \int_{S(t)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

で与えられる。 ϕ の時間変化

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{S(t)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (6)$$

は、磁場そのものの時間変化と、二つの時刻における曲面 $S(t)$ と $S(t+dt)$ で囲まれる側面から逃げ出す磁束の和で表される。

したがって、微小時間 Δt の間に变化する磁束 $\Delta \phi$ は、

$$\Delta\phi = \int_{S(t+dt)} \mathbf{B}(t+dt) \cdot d\mathbf{S} - \int_{S(t)} \mathbf{B}(t) \cdot d\mathbf{S} \quad (7)$$

$$= \Delta t \int_{S(t)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} - \oint_{C(t)} \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{v} \Delta t) \quad (8)$$

$$= \Delta t \int_{S(t)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} - \oint_{C(t)} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \Delta t \quad (9)$$

$$= \Delta t \int_{S(t)} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} - \Delta t \int_{S(t)} \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{S} \quad (10)$$

これより、

$$\frac{d\phi}{dt} = \int_{S_m} \left[\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \right] \cdot d\mathbf{S} \quad (11)$$

が成立する。このとき、(4) 式から、右辺はどんな S に対しても常に 0 となる。これは、流体とともに動く任意の閉曲線を貫く磁束が保存されることを意味している。曲面 S を通る磁力線の集合はチューブ状になる。 S 以外の位置でこのチューブを切る任意の断面 S' を貫く磁束は、定義から S を貫く磁束 ϕ と等しい (Fig.9)。そして、 S' の周囲 C' も流れとともに動くとするとき式 (6) から式 (11) が得られたのと同じ論理から曲面 S' を貫く磁束は常に ϕ である。 S' の位置、すなわちチューブ状の磁力線の束を切る断面がどこであってもよいことを考えると、チューブ状の磁力線の束そのものが流れと共に運ばれたと解釈しても矛盾は無い。これを『磁力線は流れに凍り付く』と表現する。すなわち式 (3) と式 (4) に従うベクトル場 $\mathbf{B}$ の磁力線は流れと共に動くトレーサー曲線になっている。

また、非圧縮理想流体の渦度場 $\boldsymbol{\omega} (= \nabla \times \mathbf{v})$ の時間発展は

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\omega} = 0 \quad (13)$$

に従う。これは流れ場 $\mathbf{v}$ の下での磁場の時間発展の式 (3),(4) と同じ形である。したがって、渦度場 $\boldsymbol{\omega}$ の力線 (渦糸とも呼ばれる) も流れ場に凍り付いているとみなすことができる。

トレーサー曲線を可視化することで、流れ場自体の構造を知るのに有用であるだけでなく、その流れ場に凍り付いたベクトル場の時間発展を知ることができる。

特に、流体中の磁力線は、流れによって引き伸ばされるときに、そのエネルギーから磁場を生成する。そのため、磁力線の引き伸ばしの様子を知ることは、電気

伝導性流体が流れることで働く発電機構である MHD ダイナモ [8] の理解につながる。つまり、トレーサー曲線の可視化は、MHD ダイナモを理解するために極めて有効な可視化手法である。

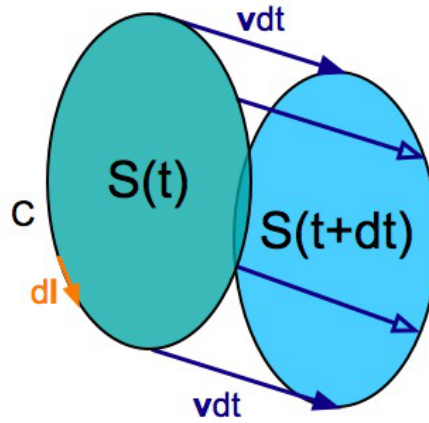


Fig. 8: A surface S in a flow through which magnetic field goes through.

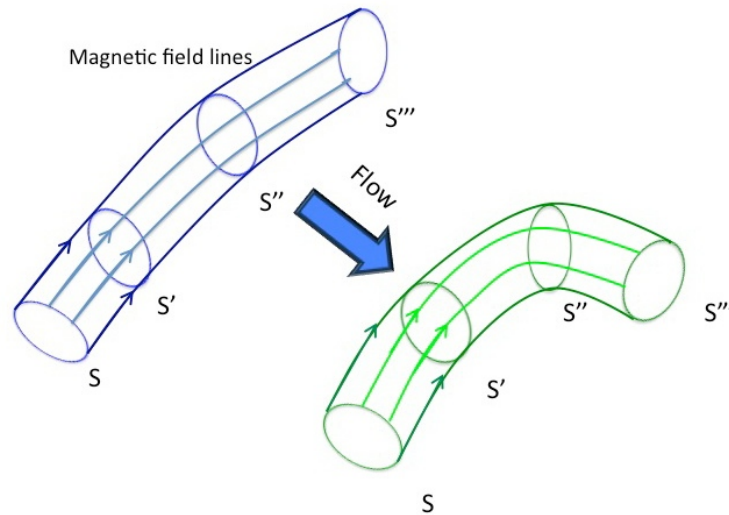


Fig. 9: A magnetic field flux that is “frozen-in” the flow.

3.2 3次元画像技術の必要性

トレーサー曲線を流れ場の可視化に応用することで、流れ場の情報と（その流れ場に）凍り付いた別のベクトル場の時間変化を可視化することができることを前節で述べた。では、なぜこれほど有用な可視化手法がこれまで一般的に用いられてこなかったのだろうか。その理由は、このトレーサー曲線法のアルゴリズムの問題ではなく、それを実現するための技術基盤とユーザーインターフェースの問題にある。

まず第一に、トレーサー曲線の時間発展は本質的に3次元的な現象であることに注意する。例えば、一本の短い線分のようにきわめて単純な形を初期条件としてトレーサー曲線の時間発展を追跡すること想像する。初期形状が単純だとしても、流れ場が複雑であれば、その流れによって移流される（運ばれる）トレーサー曲線は急速に変形され、3次元的に複雑な形状を持つようになる (Fig.10)。

3次元空間中に描かれた複雑な一本の曲線の形状を正確に把握することは、通常の (PCの画面上に表示されたウィンドウとマウスに基づいた) 技術的方法では難しい。複雑な3次元形状を (人間が持つ立体視能力を十分に活用しながら) 3次元のまま観察することを可能にするPC以上のハードウェアが要求される。

トレーサー曲線法を流れ場の有効な可視化手法として活用できるようにするためのもう1つの技術的課題は、初期条件 (曲線) の指定方法である。解析しようとする流れ場が単純なものであれば一本のトレーサー曲線をわずか1回放出し、その変形と運動を (3次元的に) 観察することで十分な情報が得られるかもしれない。だが流れ場が複雑になると、トレーサー曲線を放出する“実験”を初期条件 (初期曲線) の位置や形状を、多様かつ自由に指定して繰り返し試行することが簡単にできることが望ましい。PCの2次元的画面を通じた (マウスとウィンドウベースの) インターフェースでは奥行き方向を含めた初期曲線形状を自由自在に指定することは極めて困難である。空間中で手や指を3次元的に動かすことで自由に初期曲線の座標が指定できるのが理想的である (Fig.11)。

上に述べた2つの技術的課題“3次元表示”と“3次元ユーザーインターフェース”はどちらも (最近急速に発展している) 新しい技術, バーチャルリアリティ技術を応用することで解決できる。次章ではこのバーチャルリアリティ技術について紹介する。

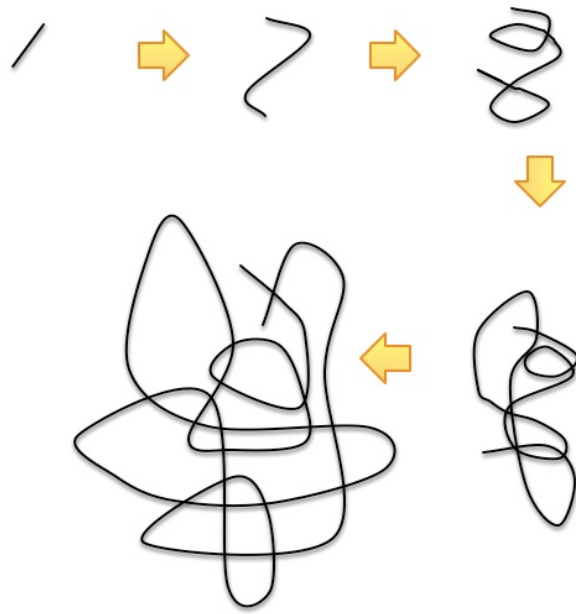


Fig. 10: Time development of a short and simple tracer line in complicated flow. When the background flow is complicated, the initial short line changes rapidly into a complicated curve.

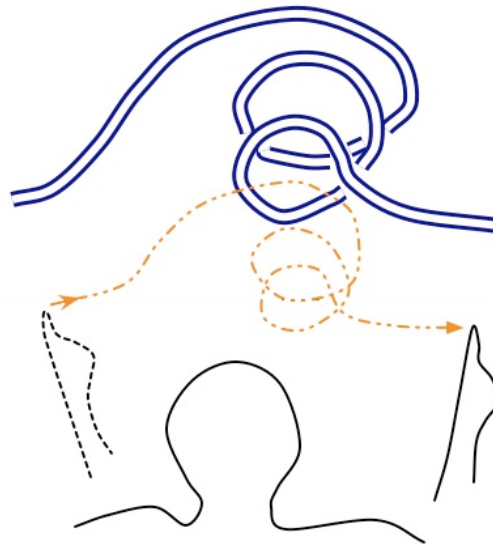


Fig. 11: Specifying an initial curve in 3-D space by the user's hand motion.

4 バーチャルリアリティ技術

4.1 バーチャルリアリティ技術とは

バーチャルリアリティ (VR) 技術 [9][10] とは、コンピュータグラフィックス技術を用いて計算機の中に仮想的な世界を構成し、それをユーザーの前に高い現実感と没入感を伴いつつ提示する技術のことである。立体画像投影装置を介して、あたかもそれが実在する世界であるかのようにユーザーに提示する。最新の立体提示装置を用いれば、極めて高い現実感と没入感が得られる。

また、仮想世界が本当にそこに存在するかのように感じるためには、その世界が立体的に見えるだけでは不十分で、観察者がその世界とやりとりできる対話性と、観察者がその世界に入り込んでいるという没入感も重要となる。

4.2 VRの歴史

コンピュータを用いたバーチャルリアリティ技術が登場してきたのは、1960年代である。コンピュータグラフィックスの分野での最初のバーチャルリアリティ装置は、I. Sutherland が開発したヘッドマウントディスプレイ (HMD) であった。これは、小型の CRT に提示された映像を鏡を介して見るもので、その大きな特徴として、利用者の頭の回転を計測するシステムを備えていた。これによって、利用者が右を向けば右の、左を向けば左の映像を見ることができた。

また、M. Heilig は、SENSORAMA という街をバイクに乗って走り回るシミュレーションゲームを開発した。このゲームでは、音や匂い風によって、利用者に実際にその世界が目の前にあるかのように感じさせるシステムが搭載されていた。しかし、これは録画されたものを流すだけで、対話的なシステムではなかった。

さらに、1980年代には、HMDを用いた戦闘機用のコクピット VCASS の開発や、宇宙船内のコクピットとして、VR ディスプレイ環境 IVED (Virtual Visual Environment Display) が提案されている。また、1981年には、N. Nefroponte らによって Media Room の開発が行われた。このシステムは、HMDを用いるのではなく、ユーザーは椅子に座って、壁面に表示された情報を、音声、ジェスチャー、ジョイスティックなどのインタフェースを用いての操作するものだった。

近年では、スクリーンの壁でできた部屋の中で可視化を行い、高い没入感と現実感を得ることのできる CAVE というシステムがイリノイ大学で開発されている。また、拡張現実 (AR) という、現実の環境に VR の情報を重ねて表示することで、現実世界での情報提供を支援する概念も研究が行われている。

現在、VRのシステムは、その簡単で強力な機械の対話操作という特徴から、多くの分野で使われている。ゲームなどはもちろん、数値データの可視化や建築物の可視化、自動車などの設計やデザインの構築、飛行シミュレーションなどの訓練や医学の教育のため、また、自分の目の前にあるものを操作するかのようにロボットを遠隔操作するためなどに使われている。

5 CAVE

様々な方式のVRシステムの中で、CAVE、あるいは没入型ディスプレイ方式と呼ばれるタイプのVR装置は最も高い没入感と現実感を提示することが知られている。

5.1 CAVEの概要

CAVEは、イリノイ大学シカゴ校において開発された。CAVEの中心部分は、大きな立方体の部屋で、その正面、左右の壁面、床が全て1辺が10フィートもしくは3メートルのスクリーンとなっている。そこにステレオプロジェクタで立体映像を投影する。体験者は、立体眼鏡をつけ、ワンドと呼ばれるコントローラを持ってその部屋の中に立つ。眼鏡にはヘッドトラッキングシステムが装着されており、体験者の目の位置と視線の方向がリアルタイムで検出されているため、その情報をもとにスクリーンに投影される画像がリアルタイムに調整される。つまり体験者がCAVEの中を歩き回ってもそれに伴って見ている画像が変化する。

この処理は、CAVELibが行っている。CAVELibとは、ヘッドトラッキングやそれに基づくリアルタイムの投影画像の調整など、VRを実現する上で必要となる最も基本的な処理をする基本ライブラリ(API)である。CAVELibが自動で処理を行っているため、ユーザーはそれらの処理に煩わされることなく仮想世界の構築に専念することができる。

本研究ではCAVELibと、OpenGL[11]を利用してプログラムを開発した。OpenGLとは、コンピュータグラフィックスの標準的なAPIである。OpenGLを使うことによって、点、線、多角形を組み合わせた3次元図形を描くことができる。また、その図形に対して、表面の質感や光源の位置などを設定することができるため、現実感の高いグラフィックスを比較的簡単に描くことができる。

5.2 pCAVE システム

本研究では、pCAVE と π -CAVE の2種類の CAVE システムを使用した。pCAVE は標準的な CAVE 装置とは違い、スクリーン (Fig.12) は正面の一つのみである。

利用者は、立体視のために眼鏡 (Fig.13) をかけ、操作のためのワンド (Fig.14) を持ってスクリーンの前に立つ。この立体眼鏡とワンドには超音波センサが組み込まれており、スクリーンの上部と左右に取り付けられた超音波発生装置から発せられる超音波を受信することにより、その位置情報を取得できる。また、眼鏡とワンドにはジャイロが組み込まれており、傾き情報も得ることができる。それらの情報は、位置センサー処理用 PC によって常に解析され、画像処理用のグラフィックワークステーション (GWS) に送られる。GWS では、その情報を元に、右目用と左目用の画像を作り、それをプロジェクターへ送り、プロジェクターではそれらを交互に高速に切り替えてスクリーンに映し出している。その切り替えに同期して、立体眼鏡では右目と左目に交互にシャッターが下りている。つまり、右目用の画像が表示されているときは右目でしか見えないようになっている。これによって、利用者は立体画像を見ることができる。

pCAVE の構成を Table.1 にまとめた。スクリーンの横幅は 325cm、高さは 249cm。プロジェクターはクリスティ・デジタル・システムズ社製の「Mirage S+4K」1 台。GWS は日本 SGI 社製の「Asterism Deskside ADT08C」。さらに、Intersence 社製の超音波位置センサ、液晶シャッター眼鏡、ワンドから構成されている。

Projector	Mirage S+4K
Tracking System	IS900
Computer	
PC	Asterism Deskside ADT08C
CPU	Quad-Core AMD Opteron 2350 ×2
Memory	64GB
GPU	NVIDIA Quadro FX4600
OS	SUSE Enterprise 10.2

Table 1: Specification of pCAVE



Fig. 12: The screen of pCAVE system on which stereoscopic images are projected from behind. The height is 2.6m.



Fig. 13: Liquid crystal shutter glasses for pCAVE. Shutter switches using liquid crystal are used for the stereo view.



Fig. 14: Wand, a potable controller for pCAVE. There are five buttons and one joy-stick.

5.3 π -CAVE システム

π -CAVE とは、神戸大学にある日本最大の CAVE 装置である。 π -CAVE の画面は正面と床面に 2 面、左右に 1 面ずつの、計 6 面のスクリーン (Fig.16) から構成される。利用者は、立体視のために眼鏡 (Fig.15(右)) をかけ、操作のためのワンド (Fig.15(左)) を持ってスクリーンでできた部屋の中に立つ。この立体眼鏡とワンドには 4 つのマーカがついており、これを π -CAVE の様々な場所に取り付けられたカメラでモーションキャプチャすることにより、その位置情報を取得できる。それらの情報は、位置センサー処理用 PC によって常に解析され、画像処理用のシステムに送られる。画像処理用のシステムは、2 つあり、一つは Linux のシステム、もう一つは、Windows の PC クラスタである。これらのシステムでは、その情報を元に、右目用と左目用の画像を作り、それをプロジェクターへ送り、プロジェクターではそれらを交互に高速に切り替えてスクリーンに映し出している。その切り替えに同期して、立体眼鏡では右目と左目に交互にシャッターが下りている。つまり、右目用の画像が表示されているときは右目でしか見えないようになっている。これによって、利用者は立体画像を見ることができる。また、この π -CAVE には、三次元音響システムが搭載されており、立体音響を用いることもできる。

π -CAVE の構成を Table.2 にまとめた。前面、床面スクリーンの横幅は 7.8m、側面スクリーンの横幅は 3m、高さは全て 3m である。プロジェクターはクリスティ・デジタル・システムズ社製の「Mirage WU12K-M」で、前、床用が 2 台ずつ、側面用が 1 台ずつの計 6 台。さらに、VICON 社製の 10 台のカメラ、液晶シャッター眼鏡、ワンド、そして 3D 三次元音響システムから構成されている。

Projector	Mirage WU12K-M $\times 6$
Tracking System	VICON Bonita $\times 10$
3D Audio System	X-spat boX2
Linux Graphics Workstation	
Computer	HP Z800
Memory	192GB
GPU	QuadroPLEX 2200 D2 $\times 3$
OS	Red Hat Enterprise Linux 5
PC Cluster	
Computer	HP Z400 $\times 7$ (1Master, 6Slave)
Memory	4GB
GPU	NVIDIA Quadro 5000
OS	Windows XP Professional x64 Edition

Table 2: Specification of π -CAVE.



Fig. 15: Portable controller and stereo shutter glasses of π -CAVE. For small balls are attached each devices for the optical tracking system.



Fig. 16: An overview of π -CAVE system. Stereo images are projected on the four(front, right, and left walls, and the floor) screens.

6 VRトレーサー曲線法

このVRトレーサー曲線法をCAVE中で実装するにあたり、CAVE内でのデータ可視化で実績のあるVFIVEという可視化ソフトウェアを利用した。

6.1 VFIVE

VFIVE[12][13]とは、CAVE装置を利用した可視化ソフトウェアで、複雑な3次元構造を持つ一般的なスカラー・ベクトル場を解析するための汎用ツールである。VFIVEには、CAVE装置の機能を用いたメニュー画面やワンド操作のための関数等が存在する。それを利用すると、プログラムのユーザーインターフェース等に関する部分の作成がしやすい。そこで、本研究で開発したプログラムは、このVFIVEのフレームワークに組み込んだ。

6.2 VRトレーサー曲線法

トレーサー曲線をOpenGLを用いて3次元上で表現する際、単純な曲線でトレーサー曲線を描くと、Fig.17のように、(立体視機能があっても)奥行き情報が

わかりづらく、トレーサー曲線の構造が理解しづらい。よって、この手法ではトレーサー曲線を有限の断面積を持つチューブで表現することにした。

Fig.18 は VR トレーサー曲線法による可視化の様子である。このようにチューブで表したトレーサー曲線が伸びていく様子から、流れの様子を知ることができる。

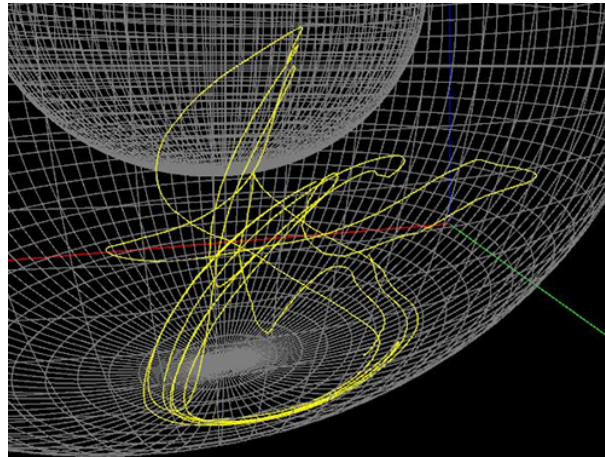


Fig. 17: A tracer line in a 3D flow data (yellow curve) . It is difficult to grasp relative positions of each element of the curve, even under the stereoscopic view is available.

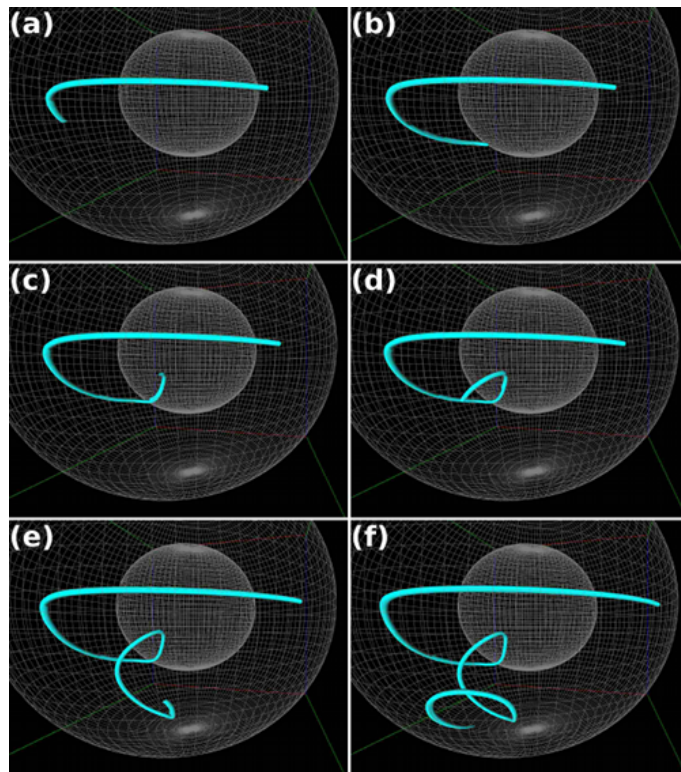


Fig. 18: Improved tracer line. The line is shown by tube with circular cross section.

7 TubeAdvector

初期条件 (初期曲線形状) を VR 空間内で自在に指定できるトレーサー曲線法を開発し、そのプログラムを TubeAdvector と名付けた。

7.1 プログラムの流れ

最初に、TubeAdvector の処理手順について説明する。プログラムは、大きく分けて 3 つに分けることができる。

まず、

(a) 利用者が決めた初期位置に点を置く

次に

(b) 点の座標の更新とその補間を行う

そして

(c) チューブを描画する

の3つである。以下でそれぞれについて説明する。

7.2 初期位置の決定

まず、(a) について説明する。利用者は、ワンドを使って、スクリーン上の任意の場所に曲線を描いて、トレーサー曲線の初期位置を決定する。ボタンを押している間に、ワンドの先から出たビームの先の座標を取得し、そのビームの指す座標が前に取得した点から一定の距離より離れると新しい点として座標が保存される。このように点をボタンを押している間に決め、それらを上の (c) の処理でつないだものが初期条件のチューブとなる。

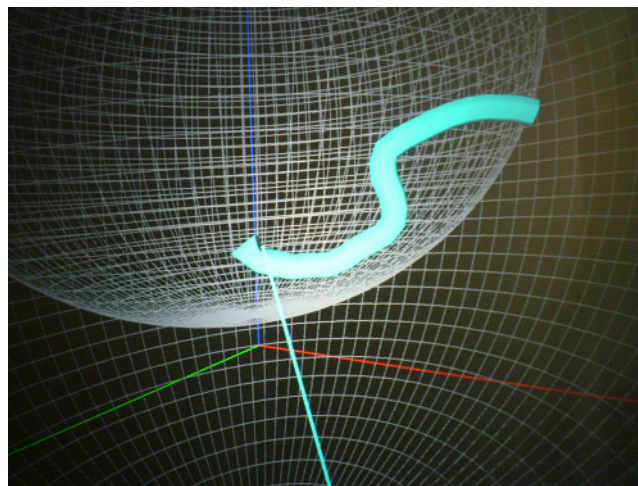


Fig. 19: Drawing step of the initial tracer line. The initial tracer line is drawn by the hand (or wand) motion. A thin line is beam from the wand. The initial curve is interactively drawn along the tracing of the beam's tip, following the wand motion in the VR space.

7.3 座標の更新と点の補間

次に、(b) のステップについて説明する。あらかじめ与えられている現在の位置の流れ場の速さの情報を元に、時間経過後の座標を計算し、その座標を点の新しい座標として保存する。また、もしも隣り合う二つの点の距離がある長さ以上になった時、その二つの点の間に新しい点を補間する (Fig.20)。これは、なめらかな曲線を描くために必要な処理である。

各点の速度はユーザがあらかじめ指定した入力流れ場のデータから空間3次精度の補間によって求める。速度の時間積分には6次精度のルンゲ・クッタ法を用いる。入力データの読み込み、空間補間、時間積分はすべて VFIVE が自動的に処理する。

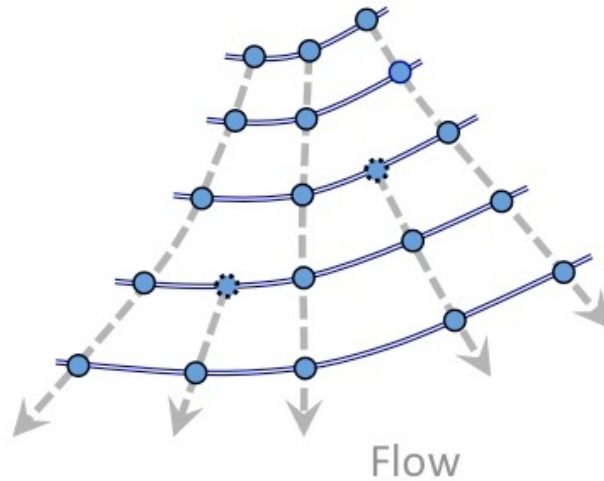


Fig. 20: Tracing algorithm of TubeAdvect. When a distance between consecutive points becomes larger than a pre-defined length, a new point is inserted between them.

7.4 チューブの描画

(c) のステップでは、すべての隣り合う点の間に円柱を描く。それがつながっていくことによって全体をみるとチューブのように見える。ここでは、この円柱の描き方を説明する。

OpenGL には、多角形の頂点で法線を指定すると、その多角形上の他の場所での法線は自動的に補間するという機能がある。[14](Fig.21) これを利用して、多角柱を描き、その頂点に中心から放射状に伸びる法線ベクトルを指定すると、平面の側面を円柱の一部のように見せることができる。つまり、円柱を描くには多角柱を作成すればよい。

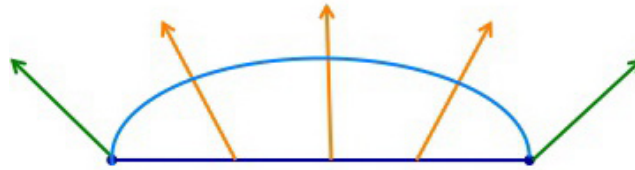


Fig. 21: Automatic interpolation of normal vectors by OpenGL. If normal vectors set on for green arrows direction at both ends, OpenGL interpolates other normal vectors. Then, a blue plane looks like a curved surface of light blue.

Fig.22 のように、点 M,N,P をとる。この 3 点は隣り合っていて、いまから M と N の間に多角柱を描くとする。まず、N 点のまわりに、多角柱の頂点を作る。多角柱を描くために必要なのは、多角柱の頂点の座標と、その頂点の法線ベクトルである。まず、点 N を起点に、点 M から点 P へ方向に向かうベクトル (黄色の矢印) を求める。次に、それと垂直になるような 2 本の互いに垂直なベクトル u と v (緑の矢印 2 本) を設定する。そのベクトル 2 本のベクトルと、 $\theta = 2 * \pi / n$ (n は多角柱の底面の頂点の数) を用いて、

$$a_x = \cos(i * \theta) * u_x + \sin(i * \theta) * v_x \quad (14)$$

$$a_y = \cos(i * \theta) * u_y + \sin(i * \theta) * v_y \quad (15)$$

$$a_z = \cos(i * \theta) * u_z + \sin(i * \theta) * v_z \quad (16)$$

と表せるベクトル a を i 個とる。 i は $1 \leq i \leq n$ となる整数である。これが、多角柱の各頂点での垂直ベクトルとなる。

そして、点 N の座標に求めた a を加えると、頂点の座標が求められる。それらの点と、前の段階で保存しておいた点 M の周りの頂点をつないで、スポークを描く。これを、全ての点について行うことにより、チューブを構成する。

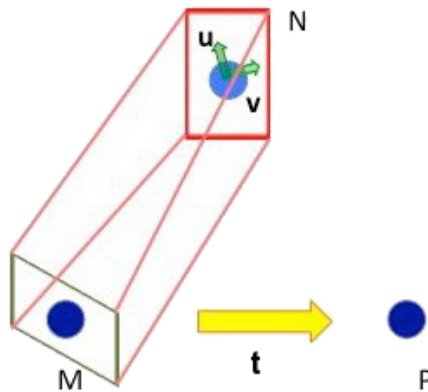


Fig. 22: The algorithm for a tube generation, in case of $n=4$. Two vectors u and v is vertical from A calculated vector t , and the base of prism is made from them.

7.5 課題

以上に述べた VR トレーサー曲線法には、いくつか問題点があった。

一つめは、局所的引き伸ばしが直感的に理解しにくいということである。トレーサー曲線は、局所的には引き伸ばされる部分と収縮する部分があり、それが及ぼす影響によって全体が伸縮している。Fig.18 を見ると、全体的な引き伸ばしの様子はよくわかるのだが、局所的にどの部分が伸び、どの部分が縮んでいるのかがわからない。

また、トレーサー曲線をひねるような流れを可視化するような必要もある。これは、雑巾をしぼるような動きに対応するもので、雑巾の中心軸だけを可視化することに相当するオリジナルの TubeAdvector では、トレーサー曲線周囲の“しぼる”ような流れ成分を可視化することができない。

そこで、TubeAdvector にこれらの問題点を解決する機能を追加した wTubeAdvector を開発した。

8 wTubeAdvect

8.1 局所的引き伸ばし

引き伸ばしが起こっている部分の色を変更することで局所的な引き伸ばしの可視化を実現した。

具体的な実現方法を説明する。TubeAdvect では、トレーサー曲線は多数の点列の連結で構成している。トレーサー曲線が引き伸ばされた時、つまり隣り合う点同士の距離がある一定の間隔よりも長くなったとき、その中点に線形補間で、点を挿入する。Fig.23 が示すように、その補間時に挿入した点と、それに隣接する点の色を変更することで、局所的な引き伸ばしを表した (Fig.24)。また、変化した色は、一定時間の経過とともに徐々に元の色へと戻っていくようにした。

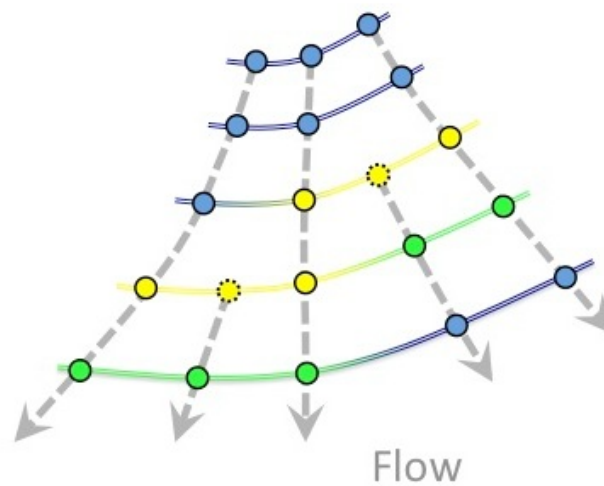


Fig. 23: Tracing algorithm of wTubeAdvect. A new point is inserted to a stretching region with different color.

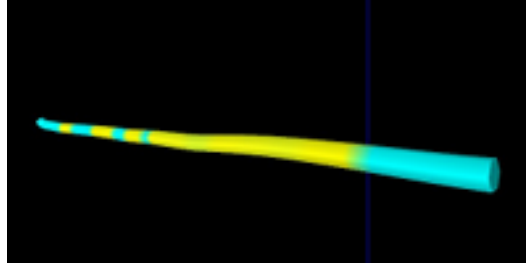


Fig. 24: A snapshot of improved TubeAdvecter with color change. A yellow part of the tube denotes a stretching part.

8.2 渦度

トレーサー曲線を“ひねる”ような流れ成分を可視化する目的で、トレーサー曲線上の渦度情報を表示する機能を開発した。トレーサー曲線のまわりに、渦度のトレーサー曲線の軸方向成分に対応して回る4本のスポークを表示するというものである (Fig.25(a))。

渦度の可視化は、以下のように行う。まず、格子上に与えられた速度場の情報から、各格子上での渦度 ω を計算しておく。

$$\omega = \nabla \times v \quad (17)$$

このとき、渦度の大きさの最大値も計算しておく。

次に、現在の位置での渦度を空間3次精度の補間で計算し、さらに、その渦度の、トレーサー曲線の軸成分に平行な方向成分 $\omega_{\parallel}$ を求める。

$$\omega_{\parallel} = \omega \cdot \frac{v}{|v|} \quad (18)$$

この値を、渦度の大きさの最大値で規格化した量を $\tilde{\omega}_{\parallel}$ とする。この $\tilde{\omega}_{\parallel}$ を、トレーサー曲線に垂直に表示した4本のスポークの角速度として表現する。スポークの回転角速度の大きさと向きが $\tilde{\omega}_{\parallel}$ の強さと符号を表現する。

8.3 発散

また、トレーサー曲線に向かって集まる流れ成分、あるいはトレーサー曲線から発散する流れ成分を可視化するため、トレーサー曲線軸方向に垂直な流れの発散に対応して大きさが変化する“リング”を表示することにした (Fig.25(b))。

はじめに、格子上に与えられた速度場から、各格子上での発散 $\kappa = \nabla \cdot \mathbf{v}$ を計算しておく。(非圧縮流では $\kappa = 0$ となる。)

次に、現在の位置での発散を空間 3 次精度の補間で計算する。その値から、トレーサー曲線に垂直な向きの流れの発散の値 $\kappa_{\perp}$ を、トレーサー曲線に平行な向きの流れの発散の値 $\kappa_{\parallel}$ を用いて以下のように求める。

$$\kappa_{\perp} = \kappa - \kappa_{\parallel} \quad (19)$$

ここで $\kappa_{\parallel}$ は、現在の位置でのトレーサー曲線に平行な流れの速度 $v_{\parallel}$ と、トレーサー曲線に沿って測った長さ $l_{\parallel}$ を用いて以下のように表される。

$$\kappa_{\parallel} = \frac{\partial v_{\parallel}}{\partial l_{\parallel}} \quad (20)$$

式 (20) は、発散を計算する点の位置 $\mathbf{x}_i$ 、それに隣接するトレーサー曲線のリストの前後の点の位置 $\mathbf{x}_{i-1}$ 、 $\mathbf{x}_{i+1}$ 、そして、各点での速度のトレーサー曲線に平行な成分 v_i 、 v_{i-1} 、 v_{i+1} を用いて以下のように表せる。

$$\kappa_{\parallel} = \frac{s}{t(s+t)}v_{i+1} + \frac{(t-s)}{st}v_i - \frac{t}{s(s+t)}v_{i-1} \quad (21)$$

$$t = |\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i| \quad (22)$$

$$s = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}| \quad (23)$$

このようにして求めた $\kappa_{\perp}$ を、適当な値で規格化して $\tilde{\kappa}_{\perp}$ とする。この $\tilde{\kappa}_{\perp}$ を、リングの半径の変化率として表現する。トレーサー曲線に垂直に表示したリングは、比率が正であるならより大きく、負であるならより小さくなっていくように表示することで流れの発散を表現する。

wTubeAdvecter では、さきほどの渦度を表す 4 本のスポークと流れの発散を表すリングを組み合わせた、車輪状の物体『ホイール (wheel)』として表示する。(Fig.26)

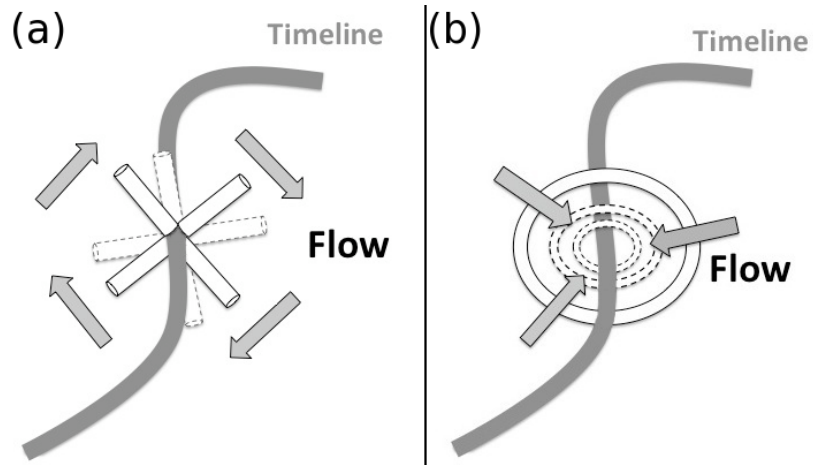


Fig. 25: “wheel” object attached to a tracer line for the visualization of vorticity and local divergence of flow. (a) Rotation rate of the four spokes denote the vorticity component of the flow parallel to the tracer line. (b) A ring changing its radius denotes the divergence component of the flow away from the tracer line.

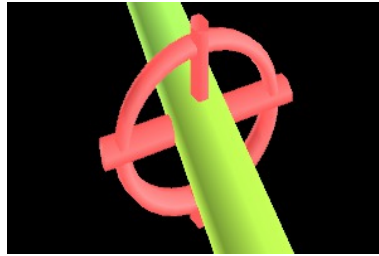


Fig. 26: A snapshot of “wheel” in wTubeAdvect. The wheel is a subsidiary object to visualize vorticity and local divergence.

9 テスト

上に述べた wTubeAdvecter の妥当性と有効性を確認するため、3 つのテストデータを用いて、オリジナルの TubeAdvecter との比較を行った。3 つのテストデータとは、以下に述べる、Shear flow、Rigid-body rotation flow、Convergent flow である。

9.1 Shear flow

テスト用の Shear flow として、ある軸を境に逆向きの方向に流れるような以下の流れ場を設定した。A は定数である。

$$\mathbf{v}(x, y, z) = \begin{pmatrix} 0 \\ -Ax \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

このとき、渦度 ω は

$$\omega(x, y, z) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A \end{pmatrix} \quad (25)$$

となる。

Fig.27 にこの Shear flow の x-y 面上の速度の分布を示す。z 軸方向への速度の変化はない。

この Shear flow を TubeAdvecter によって可視化した図が、Fig.28 と Fig.29 である。Fig.28 は、x 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間発展の様子である。トレーサー曲線が、時間がたつにつれ伸びてく様子が見える。

また、Fig.29 は z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間経過の様子である。トレーサー曲線が、引き伸ばされたり、縮んだりすることなく、その形を保ったまま流れて行く様子が見える。これは、z 軸に平行なトレーサー曲線が乗っている流れが、トレーサー曲線のどの場所でも同じ速度で、同じ方向を向いているためである。

このデータを wTubeAdvecter で可視化したものが Fig.30、Fig.31、Fig.32 と Fig.33 である。黄色に色が変化している部分が局所的に伸びている部分、また、赤いホイールが、渦度と発散を表す。

Fig.30 が x 軸、Fig.32 が z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの様子である。Fig.28 と Fig.30 を比べると、途中の (b) や (c) の時点で、伸びている部分と

伸びていない部分があり、最終的に (d) の時点では全体が伸びているということがわかる。また、Fig.31 は、トレーサー曲線のある位置での、渦度と発散を表すホイールの時間発展の様子である。4 本のスポークは回っていないが、リングの大きさが変化していることから、この場所では、渦度が 0 で、発散の値が大きい、ということがわかる。 x 軸に平行なトレーサー曲線では、引き伸ばしが起こるため、トレーサー曲線上の流れは、集まるように、トレーサー曲線の中心方向を向いている。このことがわかりやすく可視化されている。

次に、Fig.29 と Fig.32 を比べる。黄色くなっている部分はないので、局所的にも引き伸ばしは起こっていないことがわかる。また、Fig.33 は、トレーサー曲線のある位置での、ホイールの様子を表している。ここでは、Fig.31 とは違い、リングは表示されていない、つまり、初期の半径の大きさが 0 の状態から変化していないが、4 本のスポークは回っていることがわかる。このことから、この場所では発散が 0 で、渦度の大きさが大きい、ということがわかる。 z 軸に平行なトレーサー曲線では、渦度の大きさがそのまま、可視化される軸方向に平行な渦度成分となるので、渦度が大きくなる。

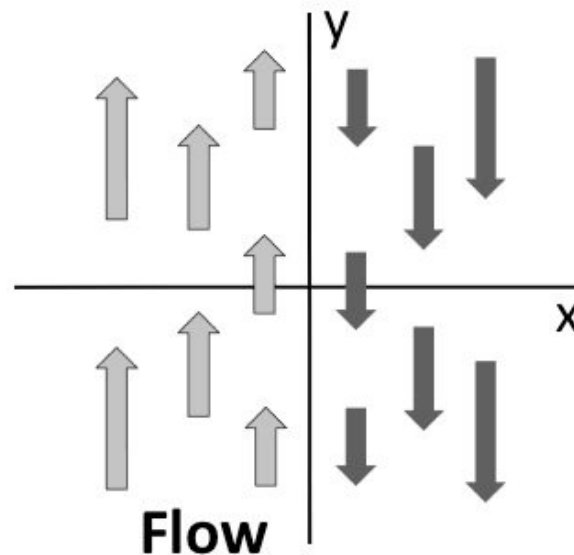


Fig. 27: The structure of the shear flow used for a test of wTubeAdvecter.

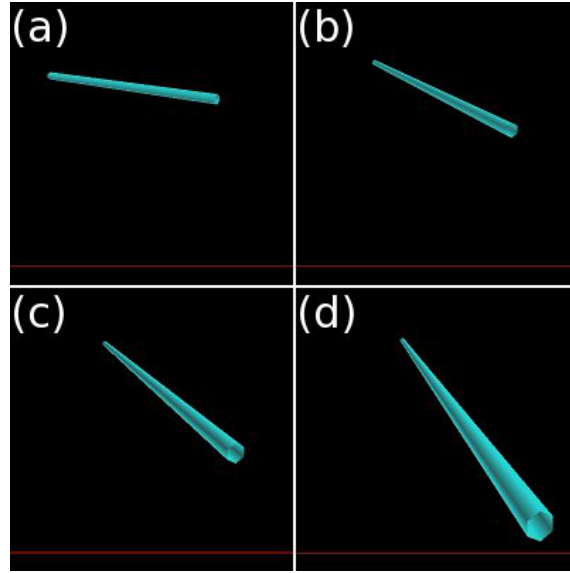


Fig. 28: Snapshots of TubeAdvecting in the shear flow, whose initial configuration was parallel to the x-axis. The line is stretched by opposite direction flow.

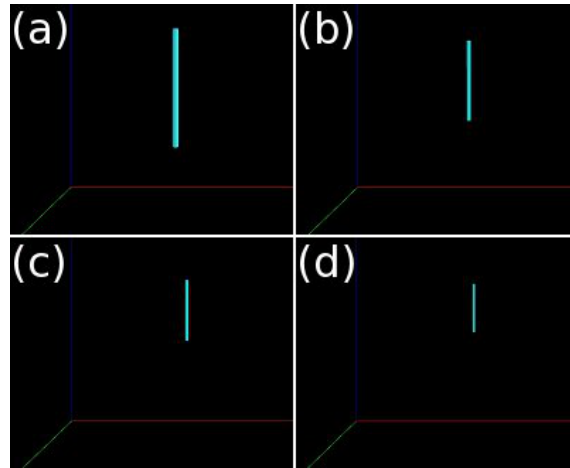


Fig. 29: Snapshots of TubeAdvecting in the shear flow, whose initial configuration was parallel to the z-axis. The line is flowing without a change of the shape.

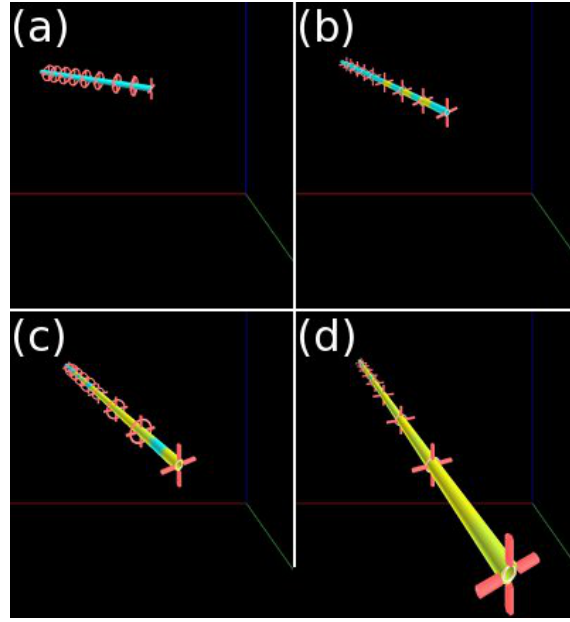


Fig. 30: Snapshots of wTubeAdvect with wheels (a ring and four spokes) in the shear flow whose initial configuration was parallel to the x-axis. The line are non-uniform stretching.

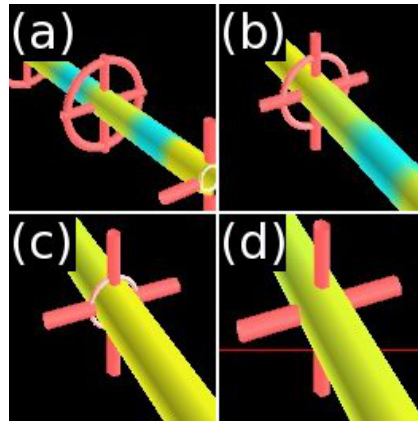


Fig. 31: Magnified view of a wheel on wTubeAdvect parallel to the x-axis in the shear flow. The four spokes do not rotate this case, while the ring changes its radius.

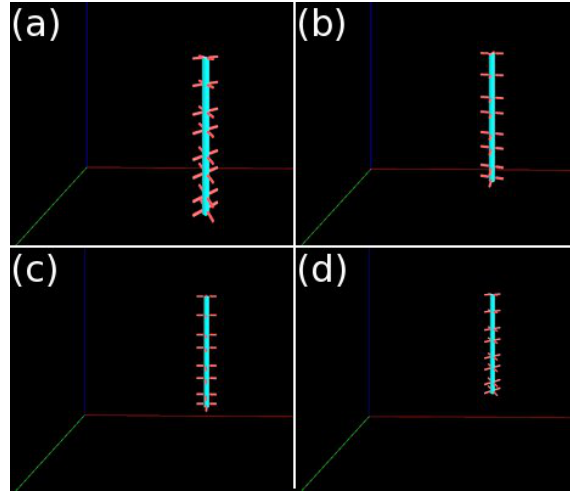


Fig. 32: Snapshots of wTubeAdvecter in the shear flow whose initial configuration was parallel to the z -axis. The line is flowing without changing color.

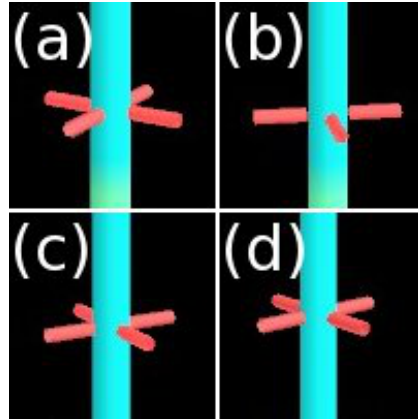


Fig. 33: Magnified view of a wheel on wTubeAdvecter parallel to the z -axis in the shear flow. The four spokes rotate this case, while the ring does not change its radius.

9.2 Rigid-body rotation flow

テスト用の Rigid-body rotation flow として以下のような流れを設定した。A は定数である。

$$\mathbf{v}(x, y, z) = \begin{pmatrix} -Ay \\ Ax \\ 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

このとき、渦度 ω は

$$\boldsymbol{\omega}(x, y, z) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2A \end{pmatrix} \quad (27)$$

となる。このデータでは、Fig.34 のように x-y 平面では剛体回転をする流れとなる。z 軸方向には一様な 2 次元流である。

この Rigid-body rotation flow を TubeAdvect によって可視化した図が、Fig.35 である。この図は z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間発展の様子である。トレーサー曲線が、引き伸ばされることなく、そのままの形を保ったまま円を描くように流れていくことがわかる。これは、Rigid-body rotation flow の流れの性質から期待される通りの動きである。このデータを wTubeAdvect で可視化したものが Fig.36 と Fig.37 である。この図は z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの様子である。

Fig. 35 と Fig. 36 を比べる。黄色くなっている部分はないので、局所的にも引き伸ばしは起こっていないことがわかる。また、Fig.37 は、トレーサー曲線のある位置での、ホイールの様子を表している。ここでは、リングは表示されていない、つまり、初期の半径の大きさが 0 の状態から変化していないが、4 本のスポークは回っていることがわかる。このことから、この位置では発散が 0 で、渦度の大きさが大きい、ということがわかる。z 軸に平行なトレーサー曲線では、渦度の大きさがそのまま、可視化される軸方向に平行な渦度成分となるので、渦度が大きくなる。

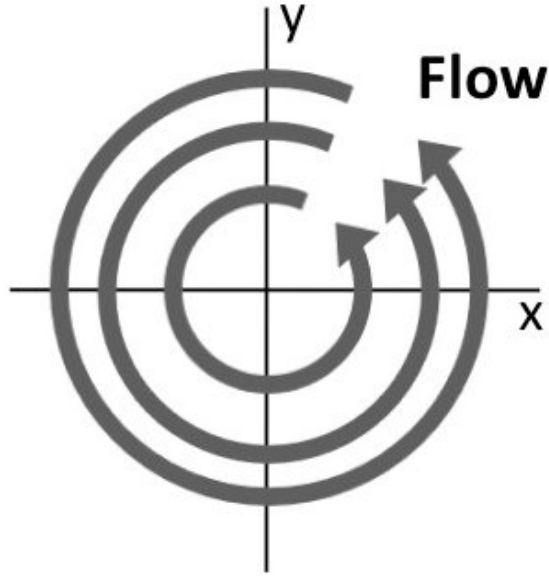


Fig. 34: The structure of the rigid-body rotating flow used for a test of wTubeAdvect.

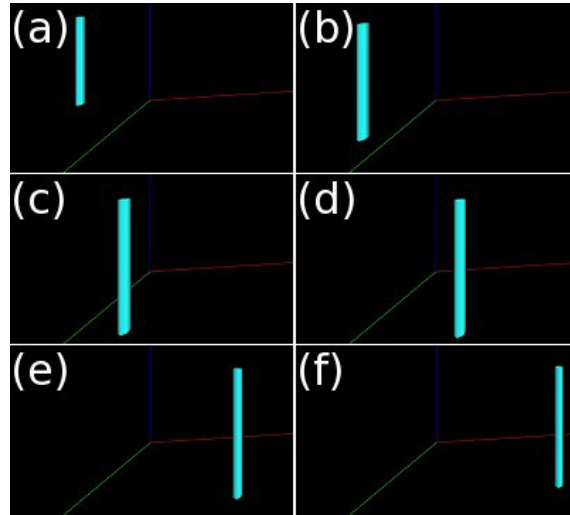


Fig. 35: Snapshots of TubeAdvect in the rigid-body rotating flow, whose initial configuration was parallel to the z -axis. The line is moving on a circle without changing the shape.

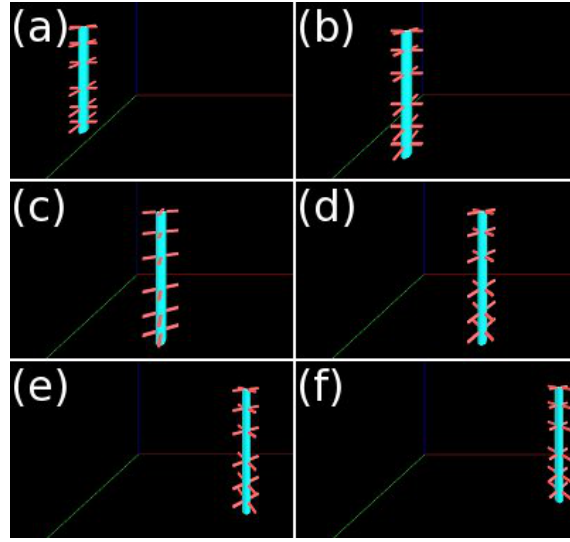


Fig. 36: Snapshots of spokes and wTubeAdvecter in the rigid-body rotating flow, whose initial configuration was parallel to the z-axis. The line is flowing without changing the color. It means there is no local stretching component.

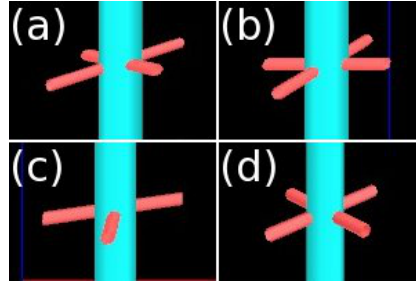


Fig. 37: Magnified view of spokes on wTubeAdvecter parallel to the z-axis in the rigid-body rotating flow. The four spokes are rotating. Ring does not appear. It means flow with vorticity and without divergence.

9.3 Convergent flow

テスト用の Convergent flow として流れが z 軸に集まり、 z 軸にそって登る上昇流と z 軸負方向へ下がる下降流からなる以下の流れを設定した (Fig.38)。 A は定数である。

$$\mathbf{v}(x, y, z) = \begin{pmatrix} -Ax \\ -Ay \\ 2Az \end{pmatrix} \quad (28)$$

これは非圧縮流である。即ち、

$$\kappa = 0 \quad (29)$$

となる。

この Convergent flow を TubeAdvecter によって可視化した図を、Fig.39 と Fig.40 に示す。Fig.39 は、 x 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間発展の様子である。トレーサー曲線が、時間がたつにつれ、短くなりながら上へ上がって行く様子がわかる。これは、トレーサー曲線が乗っている流れが、 z 軸の上方を向いているからである。

また、Fig.40 は z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間発展の様子である。トレーサー曲線が、流れながら伸びて行くようすがわかる。これは、トレーサー曲線が乗っている流れが、 z 軸の方向へ運ばれると同時に、流れの z 成分の強さが高さ z によって異なるために引き伸ばされるからである。

このデータを wTubeAdvecter で可視化したものが Fig.41、Fig.42、Fig.43 と Fig.44 である。

Fig.41 が x 軸、Fig.43 が z 軸に平行なトレーサー曲線を描いたときの時間発展の様子である。Fig.39 と Fig.41 を比べると、トレーサー曲線が不均等に縮んでいるのがわかる。また、Fig.42 は、トレーサー曲線のある位置での、 $\omega_{\parallel}$ と $\kappa_{\perp}$ を表すホイールの時間経過の様子である。4 本のスポークは回っていないので渦度 $\omega_{\parallel}$ は 0 であるが、リングの大きさがだんだん大きくなっていっているので、ここにトレーサー曲線の軸垂直方向に流れの発散 $\kappa_{\perp}$ があることを示す。式 (11) より、このデータ上では、 x 軸に平行なトレーサー曲線を左右から圧縮するような流れがある。このとき、トレーサー曲線に垂直な方向にはそれを放出するような流れが存在する。

次に、Fig. 40 と Fig.43 を比べる。色が黄色に変化している様子から、局所的な引き伸ばしがあることがわかる。また、Fig.44 は、トレーサー曲線のある位置での、ホイールの様子を表している。Fig.42 と同じで 4 本のスポークが回っていないので渦度 $\omega_{\parallel}$ は 0 であるが、リングに関しては、大きさがだんだん小さくなって

いるので、トレーサー曲線の軸垂直方向に流れの吸収があることがわかる。このデータ上では、 z 軸に平行なトレーサー曲線で引き伸ばしが起こるため、トレーサー曲線の軸垂直方向では流れの吸収が起こっている。

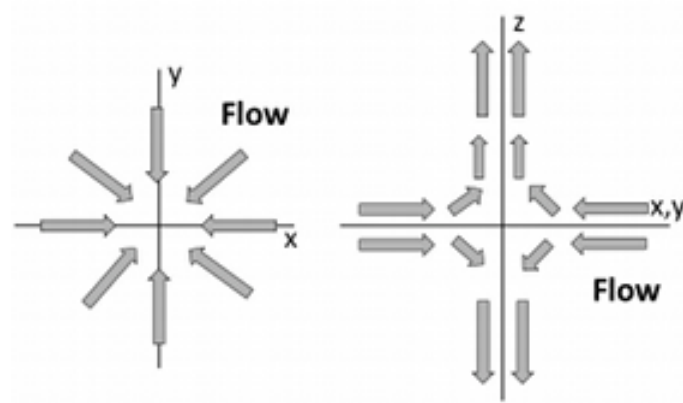


Fig. 38: The structure of the convergent flow, which is a divergence-free vector field.

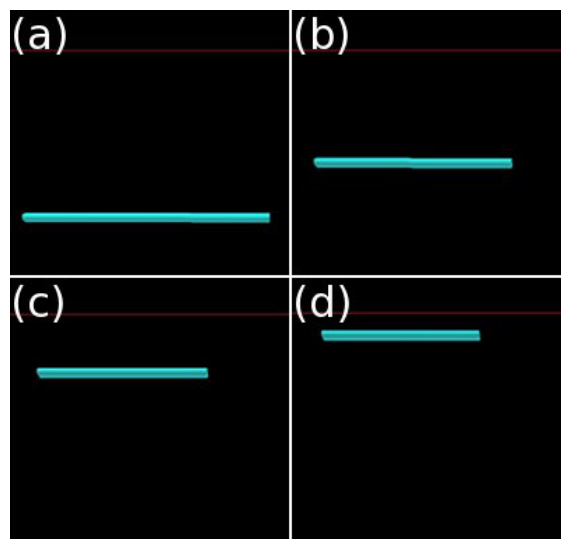


Fig. 39: Snapshots of TubeAdvecter in the convergent flow, whose initial configuration was parallel to the x -axis. The line shrinks as it approaches to the z -axis, and shifts to $+z$ direction.

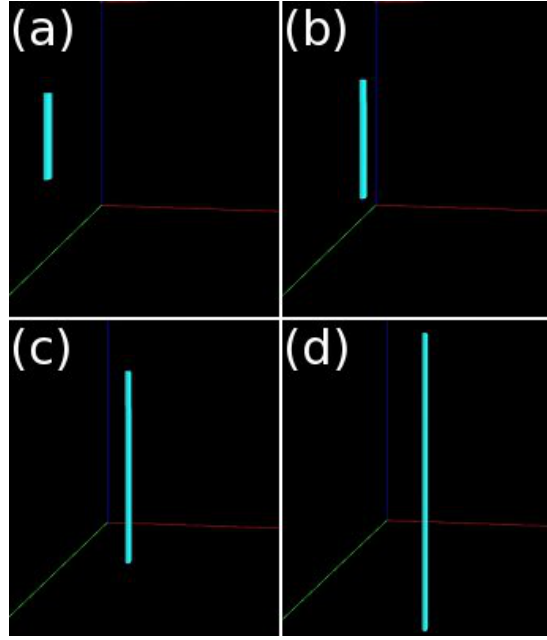


Fig. 40: Snapshots of TubeAdvect in the convergent flow, whose initial configuration was parallel to the z -axis. The line is stretched by the z -component of the flow.

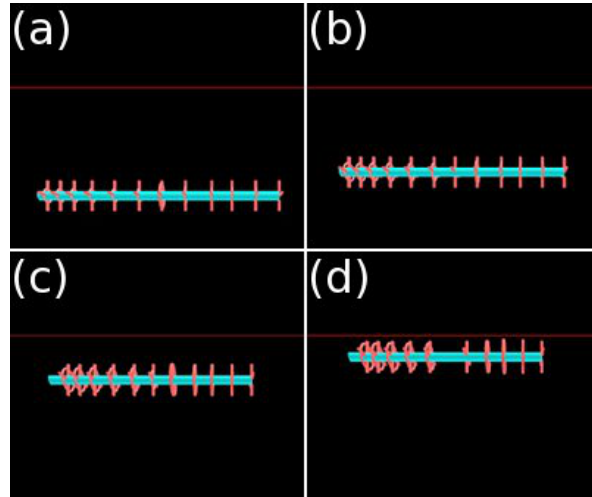


Fig. 41: Snapshots of wheel and wTubeAdvect in the convergent flow, whose initial configuration was parallel to x -axis. The wheels' distances show the tracer line's non-uniform shrinking process.

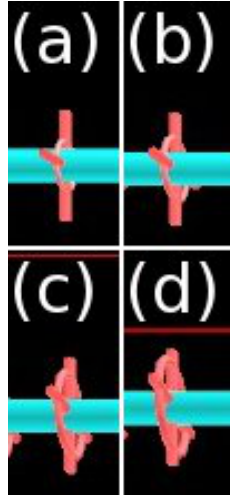


Fig. 42: Magnified view of a wheel on wTubeAdvecter parallel to the x-axis in the convergent flow. The four spokes do not rotate in this case, while ring becomes larger. It means that the flow has no vorticity and it has divergent flow away from the tracer line.

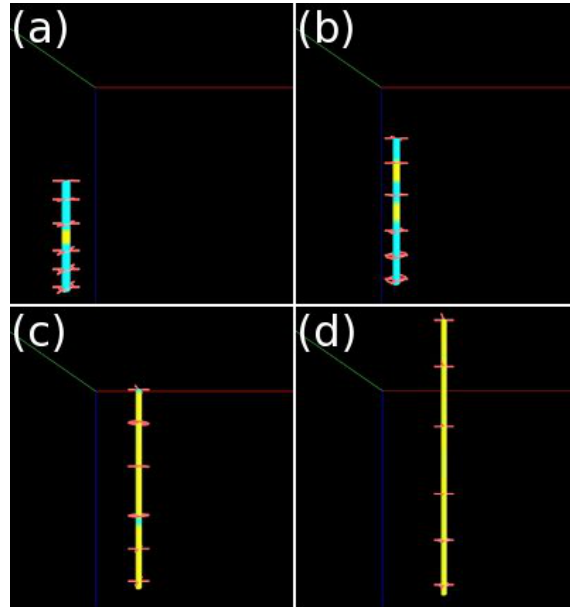


Fig. 43: A wheel and wTubeAdvecter in the convergent flow, whose initial configuration was parallel to the z-axis. The tracer line is stretched uniformly in z-direction.

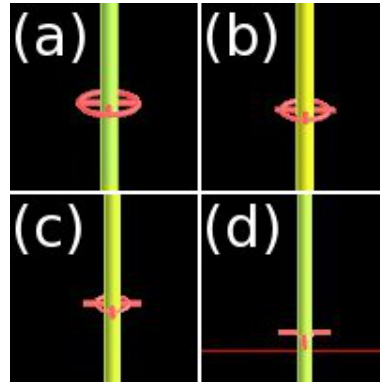


Fig. 44: Magnified view of wheel on wTubeAdvect parallel to the z-axis in the convergent flow. The four spokes do not rotate in this case, while ring becomes smaller. It means no vorticity and local negative divergence.

10 応用例

この章では wTubeAdvect を地球ダイナモシミュレーションのデータに応用した例を示す。

地球ダイナモとは、地球の核内部での液体鉄の対流運動によって大規模な磁場を作り出す現象のことである。地球ダイナモの解明を目指して、スーパーコンピュータを使った大規模なシミュレーション研究が近年盛んに行われている [16][17]。計算機シミュレーションによって得られた、地球の核内での流体金属の流れ場に対して、wTubeAdvect による可視化を適用した。

Fig.45、Fig.46、Fig.47 は同じ地球ダイナモデータの可視化の結果である。トレーサー曲線が伸びている部分が黄色、伸びていない部分が水色で示されている。また、赤いホイールが、 $\omega_{\parallel}$ と $\kappa_{\perp}$ を可視化したもので、その場所での値を示す。

Fig.45 は同じトレーサー曲線の時間発展の様子を示しているが、これを見ると、螺旋状になったトレーサー曲線が、全体が均等に伸びているわけではなく、伸びている部分と伸びていない部分があることがよくわかる。(a) や (b) を見ると、実際に形が変わっている上方の端の付近はあまり色の変化がなく、むしろ下方の螺旋部分の色が変化している。このことから下方の螺旋を描いている部分が、押し出すように上方の形の変化を引き起こしていることがわかる。

また、Fig.46、Fig.47 はトレーサー曲線上のある部分を拡大したもので、時間発展の様子を示す。渦度が強い部分と、トレーサー曲線に垂直な流れ成分の存在がよくわかる。

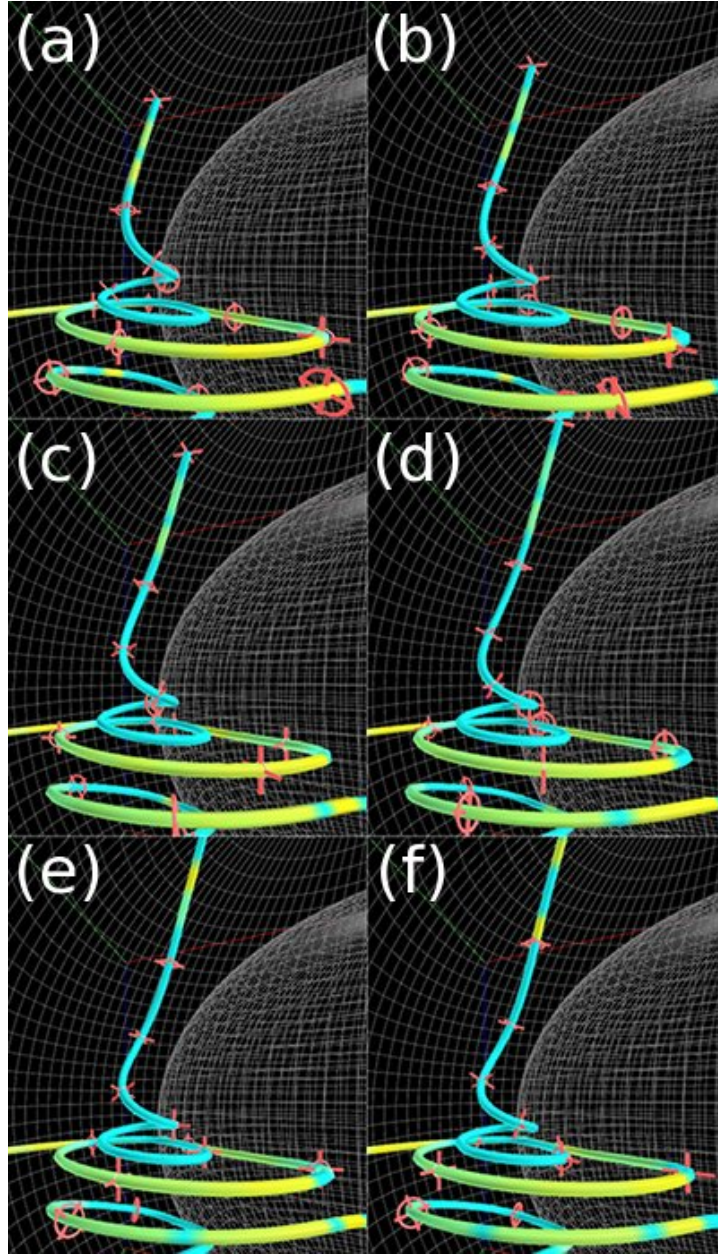


Fig. 45: Snapshots of wTubeAdvecter applied to a flow of a geodynamo simulation. This visualization shows stretching and twisting process of a tracer line (or a magnetic field line) by the flow.

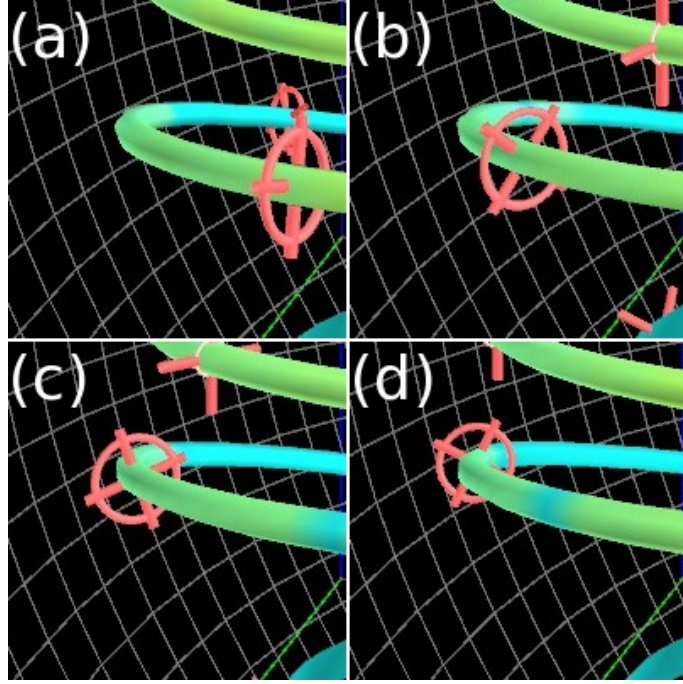


Fig. 46: Magnified view of wheels of wTubeAdvect. A rapid rotation of spokes indicates that there is large vorticity $\omega_{\parallel}$ there.

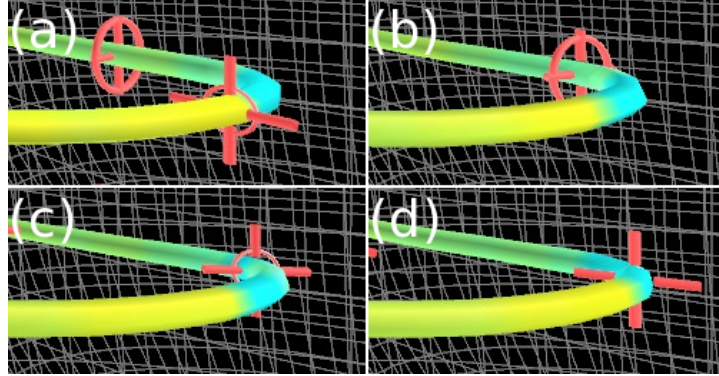


Fig. 47: Magnified view of wheels of wTubeAdvect. The growth rate of the ring shown the amplitude of $\kappa_{\perp}$, perpendicular divergence of the flow away from the tracer line.

11 まとめと今後の課題

流れの引き伸ばしやねじれ成分を可視化する新しい可視化手法を提案した。それは、バーチャルリアリティ技術を利用した3次元的な可視化手法である。

まず、流れ場自体の構造だけでなく、その流れ場に凍り付いたベクトル場も可視化するために、流れに凍り付いて動くトレーサー曲線を用いることにした。さらに、トレーサー曲線が必要とする3次元表示と、初期曲線の自由な指定の実現のため、どちらをも可能にするバーチャルリアリティ技術を応用した。また、奥行き情報を可視化するため、トレーサー曲線は太さをもったチューブで表現し、トレーサー曲線をバーチャルリアリティ空間中で実現するためのプログラム、TubeAdvecterを開発した。TubeAdvecterでは、その座標を点列で保持し、隣り合う点同士の距離がある程度開くと、間にひとつ点を補間する。これによって、トレーサー曲線の時間発展をよりなめらかに追跡することができる。

このTubeAdvecterには、トレーサー曲線近傍の流れ情報が表示できないという問題点があった。その問題を解決するため、TubeAdvecterを改良したwTubeAdvecterを開発した。まず、局所的な伸縮状態を可視化するため、トレーサー曲線が引き伸ばされている部分で色を変化させるようにした。次に、トレーサー曲線上で、渦度のトレーサー曲線に平行な成分と流れの発散のトレーサー曲線に垂直な成分を、スポークの回転と、大きさを変えるリングによって可視化した。

この改良を加えたwTubeAdvecterプログラムをテストデータに適用することにより、オリジナルのTubeAdvecterでは得ることができなかったトレーサー曲線近傍の流れ情報を可視化できることを確認した。また、実際に地球ダイナモデータにこのプログラムを適用して、磁力線の引き伸ばしの様子や、その変形の様子などを直感的に知ることができることを確認した。

このプログラムでは、流れが進み、トレーサー曲線が長くなるにつれて、ひとつのリストを辿って、大量の点の計算を行わなくてはならなくなるため、描画が遅くなってしまうという問題がある。これを解決するために、リストを描画用と計算用の2つを確保するようにプログラムを変更することが今後の課題である。また、描画自体の速度を向上させるため、OpenGLの機能のひとつである頂点配列[18]の利用なども考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた陰山 聡教授、政田洋平助教に深く感謝いたします。核融合研究所三浦英昭氏には、トレーサー曲線上に情報を付加する方法について示唆をいただきました。同研究室の古田 敦哉氏と吉田 真人氏には研究に関して様々なアドバイスをいただきました。

参考文献

- [1] 白山 晋, “知的可視化,” 日本計算工学会 (2006), pp.1-10.
- [2] Kaori MURATA, Akira KAGEYAMA “Virtual Reality Visualization of Frozen-in Vector Fields,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 6, 2406023 (2011)
- [3] 浅沼強, “流れの可視化ハンドブック,” 流れの可視化学会 (1977), pp. 199-267.
- [4] Jim.belk, “Vector field,” WIKIPEDIA, http://en.wikipedia.org/wiki/Vector_field (2009)
- [5] Brian Cabral, Leith Casey Leedom, “Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution,” *SIGGRAPH93, Conference Proceeding*, pp. 263-270 (1993)
- [6] P.A.DAVIDSON, “An Introduction to Magnetohydrodynamics,” *Cambridge University Press* (2001), pp. 40-45.
- [7] 今井功, “流体力学,” 岩波書店 (1970), pp. 28-34, pp. 96-98.
- [8] 陰山 聡, “コンパスはなぜ北を指すのか?,” 科学, Vol.77, No.5, pp. 532-538 (2007)
- [9] 館 ススム, 廣瀬 通孝, 佐藤 誠, “バーチャルリアリティ学,” 日本 VR 学会 (2010), pp. 16-22, pp. 184.
- [10] Tomasz Mazuryk, Michael Gervautz, “Virtual Reality - History, Applications, Technology and Future,” *Technical Report. TR-186-2-96-06. Institute of Computer Graphics. Technical University of Vienna* (1992)
- [11] 床井 浩平, “GLUT による OpenGL 入門,” 工学社 (2005), pp. 8-11.

- [12] Akira KAGEYAMA, Yuichi TAMURA, Tetsuya SATO, “Visualization of Vector Field by Virtual Reality,” *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No.138, pp. 665-673 (2000)
- [13] 陰山 聡 大野 暢亮 “バーチャルリアリティを用いた対話的 3 次元可視化ソフトウェアの開発とその応用,” *プラズマ・核融合学会誌*, Vol.84, No.11, pp. 834-843 (2008)
- [14] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo, “OpenGL Programming Guide The Official Guide to Learning OpenGL, Release 1(日本語版),” *Addison-Wesley Publishing Company* (1993), pp. 52-62
- [15] 村田歌織, 陰山聡 “タイムライン法による流れ場の VR 可視化,” 第 38 回可視化シンポジウム講演会論文集, pp. 309-313 (2010)
- [16] Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi, Tetsuya Sato, “Formation of current coils in geodynamo simulations,” *Nature*, Vol.454, pp. 1106-1109 (2008),
- [17] Takehiro Miyagoshi, Akira Kageyama, Tetsuya Sato, “ Zonal flow formation in the Earth’s outer core,” *Nature*, vol.463, pp. 793-796 (2010)
- [18] Richard S. Wright, Jr., Nicholas Haemel, Graham Sellers, Benjamin Lipchak, “OpenGL SuperBible, Fifth Edition,” *Addison-Wesley Professional* (2010), pp.484-492.