バーチャルリアリティ技術を用いた科学的可視化のメリット* — 様々な研究事例を通して —

清川 清**

Merits of Scientific Visualization Using Virtual Reality Technology — Through a Variety of Studies —

Kiyoshi KIYOKAWA

1. 緒 論

ゲームなどの民生用のバーチャルリアリティ (VR) 機器が急速に普及しており, これに伴い VR 技術を用いた科学的可視化を利用することがこれまで以上に容易になってきている. しかしながら, 一般的な PC モニタなどを用いた可視化に比べて, VR 技術を用いた科学的可視化にどのようなメリットがどの程度あるのかは必ずしも明らかではない. 本稿では, 様々な研究事例を通して, VR による可視化のメリットについて議論する.

2. バーチャルリアリティと可視化

VR は人間が受容するすべての感覚を扱う広範な概念であり技術分野である. その実現形態は様々であるが, 典型的にはリアルタイムに視点追従する立体映像を伴う. 即ち, 目の前に立体的な映像が表示され, 現実世界と同様に右から見れば右側が, 左から見れば左側が観察できる. また, 自らの手 (コントローラ) を動かして様々な操作ができることが多い. こうした特性を活かして VR を 3 次元データの観察に利用しようという考え方はその黎明期から存在した. 例えば 1991 年に NASA Ames Research Center が発表したバーチャル風洞は VR を利用した科学的可視化システムの先駆けと言える¹⁾. このシステムでは Boom と呼ばれるアーム付きの立体ディスプレイと DataGlove と呼ばれる手形状入力装置を用いて, $32 \times 25 \times 4$ ボクセルの時系列気流データの可視化を行っていた. 1993 年にはイリノイ大学シカゴ校が周壁面ディスプレイ CAVE²⁾を用いた可視化アプリケーションの数々やその特性を報告している³⁾. 具体的には, 建築, 天文, フラクタル幾何 (Fig. 1), 計算機の処理状況, MRI, 圧電結晶, 超伝導体, 分子動力学, 気候, 脳構造などの可視化事例が挙げられている. CAVE は前面, 床面, 左右面に立体映像を提示するディスプレイ

Fig. 1 Early visualization by using VR³⁾ (1993. Fractal Explorer by Randy Hudson, Alan Verlo, John Hart (University of Illinois at Chicago) and Jim Crutchfield (Santa Fe Institute). Image courtesy of the Electronic Visualization Laboratory, University of Illinois at Chicago).

で, 映像の中に自身が入り込んでいる感覚, 「没入感 (sense of immersion)」が極めて高い.

2000 年には van Dam らが没入型 VR を用いる科学的可視化の現状をまとめている⁴⁾. van Dam らは没入型 VR を科学的可視化に用いる積極的な理由としてデータ量の指数関数的増加を挙げている. ムーアの法則に従って計算機の性能が向上するにつれて, それ以上の速度でより大容量のデータを扱う要求が生じ, その計算結果を容易に把握できなくなった. そこで高解像度のタイルドディスプレイや没入型 VR を用いて, 人間の高度な知覚・認識能力を活用することで複雑になり過ぎたデータを読み解こうというのである. 人間の空間知覚, 奥行き知覚, パターン認識, 周辺視野, 体性感覚, 直感的な身体性インタラクションなどをフルに活用することで, より正確かつ高速なデータの把握や操作が可能であると「期待される」. Hamming は「コンピューティングの目的は数ではなく洞察である」と述べているが, インタラクティブな可視化はまさに洞察を得るための作業であり, 没入型 VR はそうした作業に非常に適していると「考えられる」.

* 原稿受付 2017 年 5 月 12 日

** 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
(〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5,
E-mail: kiyo@is.naist.jp)

「期待される」、「考えられる」と括弧書きにしたのは、直感的に想像されるメリットに比べて、それを実際に検証した研究例が少なく、いまだに未解明の部分が多いからである。初期の研究ではすでに没入型 VR によって 3 次元やより高次元のデータをより効率よく探索できること⁵⁾や、身体性を活かして 3 次元空間把握が容易になること⁶⁾⁷⁾が報告されている。しかしながら、今日に至るまで、没入型 VR による可視化が一般的な PC モニタなどによる可視化に比べてどのような点でどの程度のメリットをもたらすのかは、あまり理解が進んでいない。特に、建築や自動車設計などのヒューマンスケールの応用分野と異なり、分子モデルや天体データ、核融合など非ヒューマンスケールあるいは非日常的現象の可視化の場合、そのメリットは自明ではない。van Wijk が「可視化の目的は洞察ではなく予算獲得である」と揶揄するように⁸⁾、特に大型可視化設備はその導入自体が目的化されることもあり、その（費用対）効果の検証は不十分な場合が多かった。

現在ではゲーム用のヘッドマウントディスプレイ (HMD) が普及するなど、VR ハードウェアの導入コストは飛躍的に低下しつつある。では VR による可視化は誰にでも推奨されるべき万能の処方箋になったと言えるのだろうか。優れた VR システムを用いた場合、可視化データの把握や探索の効率はどの程度向上するのだろうか。あるいは逆に、目的のパフォーマンスを得るためにはどのような項目についてどの程度のスペックの VR システムを導入すればよいのだろうか。こうした問題は未解明の部分が多岐に多い。しかし、一方では着実に研究が進展しており、様々な知見が少しずつ蓄積されている。

そこで本稿では、従来研究を取り上げながら、没入型 VR を用いた可視化のメリットについて議論する。

3. バーチャルリアリティの映像特性

VR による可視化を議論する前に、VR の映像にどのような特性があるのかを明確にする必要がある。以下では Laha の分類⁹⁾を参考に以下の特性について議論する。

3.1 視野角 (Field of View, FOV)

一般的なオフィスワークでは、PC モニタの水平視野角は 30 度程度である。一方、人間の視野は水平 200 度×垂直 125 度（下 75 度、上 50 度）程度に及ぶ。近年の典型的な VR 用 HMD は水平 80 度、垂直 90 度程度の視野角があり、CAVE 型ディスプレイはその中心で正面前方を向いた場合水平 270 度の視野角を提供する。視野角の広さは VR ディスプレイが PC モニタなどと最も顕著に異なるポイントの一つである。

人間の視野は注視点を中心とする幾つかのいびつな同心円状に分類される¹⁰⁾。情報受容能力に極めて優れるのは網膜上の中心窩に対応するわずか視野角 2 度程度の領域に過ぎず、次に視機能が優れる中心 5 度程度の領域は弁別視野と呼ばれる (Fig. 2 (1))。眼球運動のみで瞬時

Fig. 2 Structure of the visual field ¹⁰⁾ (© 1991 精密工学会).

に情報受容できる領域を有効視野と呼び、水平 30 度、垂直 20 度程度である (Fig. 2 (2))。眼球運動に加えて頭部運動で注視点が迅速に安定して見える領域を安定注視野と呼び、水平 60~90 度、垂直 45~70 度程度である (Fig. 2 (3))。水平 90 度以上の領域は空間座標系への誘導効果があり立体感や臨場感に関連する誘導視野が広がる (Fig. 2 (4))。さらにその外側には刺激の存在を知覚できる程度の補助視野が広がる (Fig. 2 (5))。また、映像に誘発される自己運動感覚（ベクション）は、臨場感の重要な指標であるが、その誘発は画角が水平 20 度程度から起こりはじめ、60~80 度程度で飽和するとされる。

3.2 動眼視野角 (Field of Regard, FOR)

Field of View (FOV) と混同しやすい概念として、Field of Regard (FOR) がある。FOR が同時に観察できる視野範囲であるのに対して、FOR は逐次的に観察できる視野範囲の全体を指す。日本語では動眼視野角や補償視野角などと呼ぶようである。例えば、頭部回転に対応した映像を提示する HMD は、FOV によらず全方位を見渡せるため、FOR の立体角は 4π となる。CAVE のような固定ディスプレイの場合、FOR はスクリーンを見込む立体角の合計となる。全周スクリーンでない場合には厳密には立ち位置によって FOR は変化する。

3.3 視点追従 (Head-tracking, HT)

視点追従、即ち、ユーザの視点に合わせて映像を更新することは、3 次元物体があたかもその場に存在するかのように表示するために必須の機能である。これも VR ディスプレイが PC モニタなどと顕著に異なるポイントである。レンダリングは眼球位置が変化するたびに更新する必要がある。一方、眼球位置が変化せず視線方向のみが変化する場合、HMD ではレンダリングの更新が必

要であるが、固定ディスプレイでは更新する必要がない。もちろん、シーン自体が動的に変化する場合はその限りではない。

3.4 両眼立体視 (Stereoscopy, ST)

左右眼に視差のある映像を提示することで立体映像を提示する。HMD では左右眼それぞれにディスプレイユニットを提供し、固定ディスプレイでは偏光フィルタや時分割シャッタなどで左右の映像分離を行う。現在では立体映像は家庭用テレビや映画、ゲーム機などで広く普及しているが、手軽にリアリティを高められるため VR ディスプレイにおいても利用価値の高い機能である。調節、運動視差など奥行きを感じさせる様々な要因の中で、視距離 10m 以内の場合の奥行き感度は両眼視差が最も優れていることが知られている (Fig. 3)。

3.5 ディスプレイサイズ (Display Size, DS)

ディスプレイの物理的な大きさが様々なパフォーマンスに影響を及ぼすことが知られている。視野角が同じであっても、物理的に大きな(従ってより遠い)ディスプレイを用いるほうが映像コンテンツをよく記憶したり¹²⁾、自己運動を正確に把握できたりすることが報告されている¹³⁾¹⁴⁾。

3.6 ディスプレイ解像度 (Display Resolution, DR)

ディスプレイの解像度もパフォーマンスに影響を与える要因である。初期の VR ディスプレイである VPL 社の EyePhone は片眼あたり約 208×139 画素のカラー画像を提示していたが、現在のゲーム用 HMD である Oculus Rift CV1 では片眼あたり約 45 倍の 1080×1200 画素になっている。ただし、これでも人間の視力限界にはほど遠い。通常の視力の解像度は約 50 CPD (cycles per degree) であり、1 画素あたり約 0.6 arcmin となる。これを 1 面あたり画角 90 度の CAVE 型ディスプレイに展開すれば 1 面あたり 9000×9000 画素程度となる。全方位を覆うためにはこの 6 倍程度の画素が必要となる。固定ディスプレイの場合、スクリーンに近づくとも角度分解能が低下する点にも注意が必要である。

Fig. 3 Depth sensitivities for various cues as a function of viewing distance ¹¹⁾ (© 1977 テレビジョン学会).

3.7 写実性 (Realism)

シーンの複雑さやテクスチャ、陰影、物理的振舞いなど、レンダリングの写実性が変化すると、パフォーマンスに影響があることが知られている。特に、陰影は空間把握を高める影響が大きい。一方、過度に写実性を高めると些末な映像の変化に気をとられて、探索タスクなどのパフォーマンスが低下する場合もある。

3.8 フレームレート (Frame rate)

VR 環境の描画頻度 (GPU がフレームを生成する頻度) もパフォーマンスに影響を与える。いわゆるビデオレートは 30 fps (frames per second) であり、VR の場合はより早いフレームレートが望ましい。人間の頭部は最大で 800 degrees/sec 程度の角速度で回転するので、90 fps の描画ではフレーム間で約 8.9 度ものギャップができる。

3.9 リフレッシュレート (Refresh rate)

フレームレートと混同しやすいが、リフレッシュレートはディスプレイハードウェアが実際に映像を切り替える頻度であり両者は独立である。フレームレートがリフレッシュレートより高くなると実際には廃棄されて表示されないフレームが生じる。リフレッシュレートは通常システムによって固定であり、固定ディスプレイでは 60~120Hz、HMD では 60~90Hz 程度である。さらに、HMD では残像があると映像が定しなくなるため、これを避けるために 1 フレーム内での映像提示期間を短縮する low persistence 表示を行うことが増えている。

3.10 遅延 (Latency)

ユーザの運動からそれを反映した映像提示までの遅延 (motion-to-photon latency) がパフォーマンスに与える影響は大きい。かつての VR システムでは 100ms 程度の遅延はごく一般的であった。HMD を用いたシステムでは遅延の影響が特に大きく、首振りによって VR シーンが遅れてついてくるために VR 酔いの要因となる。近年の HMD では高速ジャイロなどを用いて一旦描画した映像の表示位置を再補正することで見かけ上の遅延を 2~3 ms 程度に軽減している。

全ての VR ディスプレイがこれらの特性を高いレベルで備えるわけではない。例えば、PC モニタで視点追従 (HT) と立体視 (ST) を用いる VR (フィッシュタンク VR) では FOR や DS は高くない。CAVE では FOR, HT, ST などを備え DS も大きい。一般に DR は高くない。高解像度 2D モニタで構成した周壁面タイルドディスプレイでは FOR や DS, DR は高いが ST がない。これらの個々の特性を念頭に、メリットを議論する必要がある。

4. バーチャルリアリティによる可視化のメリット

4.1 HMD やフィッシュタンク VR を用いた研究例

VR ディスプレイとそれ以外のディスプレイを比較評価した研究例は数多く存在する。1993 年には既に Pausch らが固定ディスプレイに比べて HMD では 40%

以上探索効率がよいことを¹⁵⁾、また、Arthur らがフィッシュタンク VR では HT・ST のない 2D モニタより一桁も木構造データの追跡タスクの効率がよいことを¹⁶⁾、それぞれ報告している。Arthur らの報告ではさらに、HT が ST よりも効果が高いことや、高い遅延は低いフレームレートよりも影響が大きいことなどを報告している。1996 年に Ware らは 3 次元の抽象データの観察タスクにおいて、HT と ST が両方ない場合に比べて、HT と ST を併用した場合には 3 倍、HT のみの場合には 2.2 倍、ST のみの場合には 1.6 倍、それぞれパフォーマンスが向上することを報告している¹⁷⁾。1999 年に Ruddle らは多くの部屋からなる建物の VR 環境でのナビゲーションタスクにおいて、2D モニタよりも HMD を用いる方が移動時の距離感覚が正確であることを報告している¹⁸⁾。このように、特に 1990 年代には HMD やフィッシュタンク VR を用いて HT や ST の効果を調査する研究が数多く実施された。

4.2 CAVE や大型ディスプレイを用いた研究例

1990 年代の後半から、CAVE 型ディスプレイとそれ以外のディスプレイを比較した研究が盛んになる。1999 年に Arns らは構造把握タスクにおいて、CAVE の方がデスクトップ環境よりもパフォーマンスに優れる一方で、操作タスクではデスクトップ環境の方が好まれることを報告している¹⁹⁾。2001 年と 2003 年に Zhang らは 2D の静止画と比較して CAVE では拡散テンソル MRI 画像のボクセルデータをよりよく理解できることを報告している²⁰⁾²¹⁾が、詳細な実験の条件や結果は不明である。2004 年に Johansson らは工業製品の誤りを発見するタスクにおいて、没入型ワークベンチ、フィッシュタンク VR、2D モニタを比較し、統計的有意差はないもののフィッシュタンク VR が最も優れると報告している²²⁾。同年、Gruchalla らは、CAVE を用いた場合に複雑な 3 次元タスクを 2D モニタよりも素早くかつ正確にこなせることを報告している²³⁾。2007 年に Schuchardt らは 4 面 CAVE (HT・ST あり) と正面スクリーンのみの 1 面 CAVE (HT・ST なし) を比較し、前者の方が複雑な 3 次元探索タスクを後者よりも素早くかつ正確にこなせることを報告している²⁴⁾。2008 年に Prabhat らは CAVE、フィッシュタンク VR、2D モニタを詳細に比較し、この順で 3 種類のボリュームデータの理解度を評価する 20 以上のタスクの正規化パフォーマンスが優れることを報告している²⁵⁾。

CAVE のように物理的にディスプレイサイズ (DS) が大きいことのメリットについても調査されている。Tan らは見かけの画角が同程度でサイズ (横 76 or 14 インチ) と距離 (136 or 25 インチ) の異なる 2 つのディスプレイを比較し、大型ディスプレイの方が空間定位タスクのパフォーマンスが 26% も優れることを報告している²⁶⁾。このような差は図形判読タスクでは生じおらず、大型ディスプレイがユーザ周囲に定位するシー

ンを提示する場合に特に有用であることを示している。また、大型のタイルドディスプレイを用いて、ディスプレイ解像度 (DR) の影響を調査した研究例もある。Ball らは 17 インチ SXGA 解像度のモニタを用いて 1×1, 2×2, 3×3 の 3 種類の (タイルド) ディスプレイを構成し、高解像度モニタが詳細な 2 次元情報のナビゲーションに有用であることを報告している²⁷⁾。

4.3 より系統的な研究例

上記を含む多くの研究では、CAVE と 2D モニタのように大きく異なるディスプレイシステムをトータルで比較しており、FOR や HT, ST などの個々の特性の違いがどのようにパフォーマンスに影響したかまでは検証できていない場合が多い。近年はこれらの個々のディスプレイ特性の影響をより系統的に調査する研究例が増えている。特に筆者と親交の深いバージニア工科大学の Bowman らのグループでは優れた研究を継続的に発表している。ここでは、同グループの Laha らの研究²⁸⁾をそのような好例として詳しく紹介する。

Laha らの研究²⁸⁾では、マウスの下肢や化石の CT データを用いた観察タスクで、FOR 2 水準 (水平視角度 270 度, 90 度) × HT 2 水準 (あり, なし) × ST 2 水準 (あり, なし) の 8 条件でパフォーマンスを比較している (Fig. 4)。比較に用いたタスクはマウスのデータについて 4 種、化石のデータについて 7 種であり、具体的には以下のようなものであった。M はマウスのタスク、F は化石のタスクを表す。

- M1. 1 分間で独立した軟組織の個数をカウント
- M2. 1 分間骨髄を観察しその様相を言葉で記述
- M3. 2 分間で独立した骨組織の個数をカウントしそれぞれ形状の最も似たアルファベットを回答
- M4. 3 分半で上下から観察でき横から観察できない血管の本数をカウント
- F1. 1 分間化石を観察しその様相を言葉で記述
- F2. 3 分間で化石内部を観察し細胞の個数をカウント

Fig. 4 A participant experiencing the dataset²⁸⁾ (© 2012 IEEE).

- F3. 1分半細胞を観察しその境界や結合部の様相を記述
 F4. 3分間で細胞内組織の有無やその個数をカウント
 F5. 1分半で細胞内組織の細胞内での位置を特定
 F6. 1分半で細胞内組織の形状の類似性や相違を記述
 F7. 1分半である亀裂が貫通する細胞の個数をカウント

個々のタスクのパフォーマンスはそれぞれ0から1の範囲に正規化する。さらにM1～M4, F1～F7のそれぞれに対して重み付き線形和 ΣM と ΣF を求める。なお、重みは重要度に応じて各分野の専門家が設定している。

40名の被験者に対して実験を行い膨大な実験結果を得ている。以下、一部を抜粋して記す。まず、タスクの正確性については、以下のそれぞれについて統計的有意差が認められた。^{*}印の2箇所を除いて、それぞれより没入性の高い条件でより正確であった。F1とF2ではSTなしの方がより正確であった。

FOR: M1, M3, ΣM , F1, F4, ΣF

HT: M1, M4, ΣM

ST: M4, ΣM , F1^{*}, F2^{*}

一方、タスク達成時間についてはほとんど主効果が見られなかった。唯一、M4ではSTありの方が却って遅くなっている。

全体に、高いFORは多くのタスクをより正確にするが、タスクが素早くこなせるようになるわけではない。HTありは幾つかのタスクをより正確にするが、やはり素早くなるわけではない。STについては正確になるタスクもあれば、不正確になるタスクもあった。STがあることでタスクが素早くこなせるようになるわけではない。ただし、STありだと、主観的には多くのタスク(F3, F4, F5, F7)がより容易に感じられることが報告されている。

また、興味深いことに幾つかの項目で交互作用が見られている。FORとHTについては、幾つかの条件において(高FOR／HTあり)や(低FOR／HTなし)の場合にパフォーマンスが高く、(高FOR／HTなし)や(低FOR／HTあり)の場合にパフォーマンスが低かった。FORとSTの間でも幾つかの交互作用が見られている。

これに続く研究²⁹⁾では、HMDを用いてFORが全周囲(水平FOR 360度)となる環境を模擬し、FORが270度以上かつHTありの場合に空間的に複雑なタスクに有利であることなどを報告している。さらに最近の研究³⁰⁾では、等値面の可視化についてより多様なタスクで実験し、STは探索効率や空間的判断に有効、FORは空間的判断に有効、HTは被験者自身がタスクを正確に実施できたという確信度に有効といった結果を報告している。この研究でも、FORが大きい場合はHTありが良く、FORが小さい場合はHTなしのほうがむしろ良いなど、交互作用が見られることが報告されている。一方、

同じくBowmanのグループのRaganらの研究³¹⁾では、複雑な3次元ネットワークのギャップを探索するタスクにおいて、HTとFORは正確性に寄与するがSTは正確性に寄与しないこと、STとHTは素早さに寄与するがFORは素早さに寄与しないこと、STとHTが両方ありの場合はさらに素早くタスクをこなせること、などを報告している。

これらの一連の研究から、可視化データやタスクの種類によって没入型VRの効果が大きく異なることが分かる。また、交互作用が多く見られており、VRディスプレイの個々の特性について没入性の高いパラメータを選択することが常に最適ではなく、他の特性との組み合わせによって良し悪しが変化することも分かる。

5. 結 論

本稿では、没入型VRを用いた科学的可視化のメリットについて議論した。様々な知見が蓄積され、一定のメリットが明らかになりつつある一方で、どのような場合にどの程度のメリットがあるかはケースバイケースであり、単純には予測できないことも明確になってきた。可視化に最適なVRシステム(ディスプレイ)を簡単には決定できないということであり、VRの研究としては益々面白くなってきたと言えるが、可視化の研究としては益々悩ましくなってきたとも言えるかも知れない。また、本稿では触れなかったが、データ空間を移動するインタラクション方法についてもVRディスプレイとの相性が指摘されており³²⁾、さらなる研究が求められる。

一方、没入型VRを用いた科学的可視化を扱った学術論文がほとんど増えていないという指摘がある。例えば、IEEEではVisとVRというそれぞれの専門会議があるが、いずれにおいても当該論文は毎年数件以下しか発表されていない。応用展開において有用であっても新規性の問われる学術論文としては書きにくいといった事情があるのかもしれない。現在は単発の研究事例が散在しているが、VR可視化の成功事例を収集したりポジトリを用意することで、知見を集約し、後続の研究開発を促すことができると思われる。ゲームエンジンUnityのようなVR可視化の標準プラットフォームの登場も期待される。VRハードウェアの廉価化によりVRが誰の手にも届く「VRの民主化」が進んだが、今後は「VR可視化の民主化」が進展することを期待したい。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、貴重な資料を提供いただいた、Maxine Brown氏、Eric Rogan氏、Bireswar Laha氏に感謝する。

参考文献

- 1) Bryson, S. and Levit, C.: Virtual Windtunnel: An Environment for the Exploration of Three-Dimensional Unsteady Flows, *Proceedings of the IEEE 2nd Conference on Visualization* (1991), pp.17-24.
- 2) Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. and Hart, J. C.: The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment, *Communications of the ACM*, Vol.35, No.6 (1992), pp.64-72.
- 3) Cruz-Neira, C., Leigh, J., Papka, M., Barnes, C., Cohen, S. M., Das, S., Engelmann, R., Hudson, R., Roy, T., Siegel, L., Vasilakis, C., DeFanti, T. A. and Sandin, D. J.: Scientists in Wonderland: A Report on Visualization Applications in the CAVE Virtual Reality Environment, *Proceedings of the IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality* (1993), pp.59-66.
- 4) Van Dam, A., Forsberg, A., Laidlaw, D., LaViola, J. and Simpson, R.: Immersive VR for Scientific Visualization: A Progress Report, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.20, No.6 (2000), pp.26-52.
- 5) Leigh, J., Vasilakis, C. A. and DeFanti, T. A.: Virtual Reality in Computational Neuroscience, *Proceedings of Conference on Applications of Virtual Reality*, Earnshaw, R. ed., British Computer Society (1994).
- 6) Pausch, R., Proffitt, D. R. and Williams, G.: Quantifying Immersion in Virtual Reality, *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (1997), pp.13-18.
- 7) Bryson, S.: Virtual Reality in Scientific Visualization, *Communications of the ACM*, Vol.39, No.6 (1996), pp.62-71.
- 8) Van Wijk, J. J.: The Value of Visualization, *Proceedings of the IEEE Visualization* (2005), pp.79-86.
- 9) Laha, B.: Immersive Virtual Reality and 3D Interaction for Volume Data Analysis, *Dissertation in Computer Science and Applications*, Virginia Polytechnic Institute and State University (2014).
- 10) 畑田 豊彦: 視覚効果による人工現実感, 精密工学会誌, JSPE-57-08 (1991), pp.1330-1335.
- 11) 長田昌次郎: 視覚の奥行距離情報とその奥行感度, テレビジョン学会誌, Vol.31, No.8 (1977), pp.649-655.
- 12) Reeves, B. and Nass, C.: The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places (1996), pp.193-201.
- 13) Tan, D. S.: Exploring the Cognitive and Social Benefits of Physically Large Displays, *PhD thesis*, Carnegie Mellon University (2004).
- 14) Bakdash, J. Z., Augustyn, J. S. and Proffitt, D. R.: Large Displays Enhance Spatial Knowledge of a Virtual Environment, *Proceedings of the 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (2006), pp.59-62.
- 15) Pausch, R., Shackelford, M. A. and Proffitt, D.: A User Study Comparing Head-Mounted and Stationary Displays, *Proceedings of the IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality* (1993), pp.41-45.
- 16) Arthur, K. W., Booth, K. S. and Ware, C.: Evaluating 3D Task Performance for Fish Tank Virtual Worlds, *ACM Transactions on Information Systems*, Vol.11, No.3 (1993), pp.239-265.
- 17) Ware, C. and Franck, G.: Evaluating Stereo and Motion Cues for Visualizing Information Nets in Three Dimensions, *ACM Transactions on Graphics*, Vol.15 (1996), pp.121-140.
- 18) Ruddle, R. A., Payne, S. J. and Jones, D. M.: Navigating Large-Scale Virtual Environments: What Differences Occur between Helmet-Mounted and Desktop Displays?, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol.8, No.2 (1999), pp.157-168.
- 19) Arns, L., Cook, D. and Cruz-Neira, C.: The Benefits of Statistical Visualization in an Immersive Environment, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality* (1999), pp.88-95.
- 20) Zhang, S., Demiralp, C., Keefe, D. F., DaSilva, M., Greenberg, B. D., Basser, P. J., Pierpaoli, C., Chiocca, E. A. and Deisboeck, T. S. and Laidlaw, D. H.: An Immersive Virtual Environment for DT-MRI Volume Visualization Applications: a Case Study, *Proceedings of IEEE Visualization* (2001), pp.437-440.
- 21) Zhang, S., Demiralp, C. and Laidlaw, D. H.: Visualization Diffusion Tensor MR Images Using Streamtubes and Streamsheets, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.9, No.4 (2003), pp.454-462.
- 22) Johansson, P. and Ynnerman, A.: Immersive Visual Interfaces-Assessing Usability by the Effects of Learning/Results from an Empirical Study, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.4, No.2 (2004), pp.124-131.
- 23) Gruchalla, K.: Immersive Well-Path Editing: Investigating the Added Value of Immersion, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality* (2004), pp.157-164.
- 24) Schuchardt, P. and Bowman, D. A.: The Benefits of Immersion for Spatial Understanding of Complex Underground Cave Systems, *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (2007), pp.121-124.
- 25) Prabhat, Forsberg, A., Katzourin, M., Wharton, K. and Slater, M.: A Comparative Study of Desktop, Fishtank, and Cave Systems for the Exploration of Volume Rendered Confocal Data Sets, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.14, No.3 (2008), pp.551-563.
- 26) Tan, D. S., Gergle, D., Scupelli, P. and Pausch, R.: With Similar Visual Angles, Larger Displays Improve Spatial Performance, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2003), pp.217-224.
- 27) Ball, R. and North, C.: Effects of Tiled High-Resolution Display on Basic Visualization and Navigation Tasks, *Extended Abstracts of the ACM Conferences on Human factors in Computing Systems* (2005), pp.1196-1199.
- 28) Laha, B., Sensharma, K., Schiffbauer, J. D. and Bowman, D. A.: Effects of Immersion on Visual Analysis of Volume Data, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, No.4 (2012), pp.597-606.
- 29) Laha, B., Bowman, D. A. and Schiffbauer, J. D.: Validation of the MR Simulation Approach for Evaluating the Effects of Immersion on Visual Analysis of Volume Data, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.19, No.4 (2013), pp.529-538.
- 30) Laha, B., Bowman, D. A. and Socha, J. J.: Effects of VR System Fidelity on Analyzing Isosurface Visualization of Volume Datasets, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.20, No.4 (2014), pp.513-522.
- 31) Ragan, E. D., Kopper, R., Schuchardt, P. and Bowman, D. A.: Studying the Effects of Stereo, Head Tracking, and Field of Regard on a Small-Scale Spatial Judgment Task, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.19, No.5 (2013), pp.886-896.
- 32) Ragan, E. D., Wood, A., McMahan, R. P. and Bowman, D. A.: Trade-Offs Related to Travel Techniques and Level of Display Fidelity in Virtual Data-Analysis Environments, *Proceedings of ICAT/EGVE/EuroVR* (2012), pp.81-84.