

SyncSight: 空間情報把握支援のための2D地図と3D都市モデルの組み合わせ表示

早川 達也¹ 石黒 祥生² 大谷 健登¹ 西野 隆典³ 武田 一哉¹

概要: 本研究は、2D の地図と都市モデルによる 3D 表示を組み合わせる新たな可視化システムを提案し、ユーザの空間情報の把握支援に貢献することを目的とする。空間情報の 2D 可視化は位置関係の把握に優れており、3D 可視化は立体的構造を表現することができる。そのため、2D 表示で位置を確認しながら 3D 表示で詳細を把握する必要がある場面では 2D と 3D を同時に提示するための可視化技術が必要である。本研究では、複数の表示形式のための可視化技術の中で、Focus+Context 手法に注目し、2D と 3D の地理情報をそれぞれの位置関係を保ったまま表示するシステムを開発した。真上から表示する 2D と斜め上から表示する 3D の境界で発生する視覚的な歪みの問題を解決するため、立体視ディスプレイと平面ディスプレイの二つを使用し、2D 地図上の一部の領域が立体視できる構成を実現した。提案システムの評価として、ドローン経路設計タスクを設定し、タスク完了時間と経路長について、2D と 3D の同じ領域を左右に配置する並列表示システムと比較する実験を行った。その結果、提案システムは、3D 空間の位置関係の把握をサポートし、また、3D 空間を局所的に表示することで手前の立体物によるオクルージョンの影響を低減させ、地図の回転操作を減らせることがわかった。

1. はじめに

地形や建物など形状や位置の情報を持つ空間情報を可視化する方法は、大きく分けて 2 次元 (2D) の可視化と 3 次元 (3D) の可視化の 2 つに分類され、それぞれに特有の利点がある。2D 可視化は、平面的な位置関係や対象物の相対的な位置を直感的に把握しやすいため、一般的な地図で多く利用されている。一方で、3D 可視化は、地形や建物などの物体を立体的に表現できるほか、建物のフロアなどの多層的な構造も可視化することが可能である。そのため、建築や都市計画、経路案内など、詳細な立体情報が必要とされる分野で利用されている。しかし、3D 可視化で一般的に用いられる斜め上からの視点では、オクルージョンの影響で一部の空間が見えないことや、手前と比べて奥の空間が小さく表示されることで距離感が掴みづらく、平面的な位置関係の把握が難しい。そのため、多くの応用領域では、3D の立体的な情報に加えて 2D の平面的な情報も必要となる。例えば、詳細なナビゲーションや都市計画、ハザードマップの作成、ドローンの経路設計では、2D 表示で位置を確認しながら 3D 表示で詳細を把握する必要がある。このような背景から、2D と 3D のデータを同時に表示

する可視化手法が必要とされている。

航空写真と地図や拡大画面と縮小画面のような二つの形式の情報を同時に可視化する手法の一つとして、インタラクティブレンズと呼ばれる手法がある。この手法は、フォーカス領域と周囲のコンテキスト領域を空間的な繋がりを保ちながら表示する「Focus+Context」の一種であり、これによりユーザは特定の領域に注目しつつ、その周囲の全体的なコンテキストを把握することが可能である。

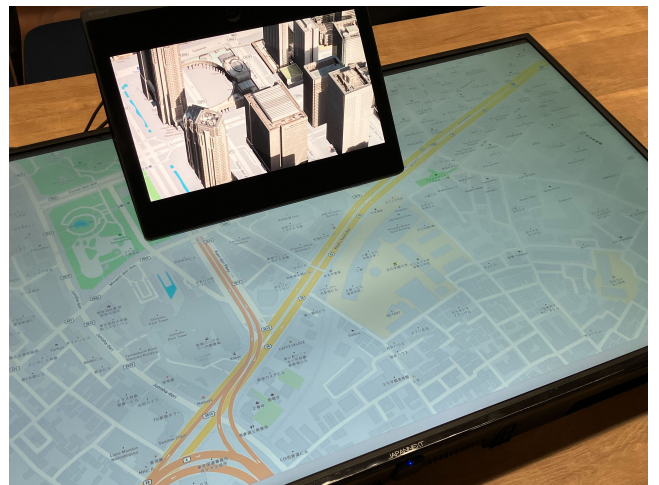


図 1 SyncSight の様子。2D 地図が表示された平面ディスプレイの上に、3D 空間が表示された立体視ディスプレイを置くことで、2D 地図から 3D 空間が飛び出して見える構成。

¹ 名古屋大学
² 東京大学
³ 名城大学

「Focus+Context」では主に 2D 表示において議論されてきたが、2D と 3D の組み合わせに関しては十分に議論されていない。この組み合わせにおける課題は、2D と 3D の表示方法が使用する視点の違いにある。つまり、真上から表示することが多い 2D と斜め上から表示することが多い 3D の境界で視覚的な歪みを引き起こす。

2D 地図と 3D 都市モデルを統合して可視化するためには、両者の位置合わせを 3D 空間内で行う必要がある。地面として表示される 2D 地図の上に 3D の都市モデルを配置し、3D データが地図上に立体的に飛び出る構成となる。

このような可視化には立体視技術が用いられる。立体視を行う場合、Head Mounted Display (HMD) が使われることが多い [24]。しかし、重量や装着方法の説明の必要性、正しく装着できているかを把握することが難しいといった装着の煩わしさや、衛生的な問題があり、科学館での展示というような用途や、多くの人が交代で利用するような場面には適さないことがある。また、Meta[25] や Apple[26] の HMD 使用に関するガイドラインによれば視覚への影響で 13 歳未満の使用が推奨されないという問題もある。

一方で、3D データを直接立体視できるディスプレイが存在しており、中でも裸眼立体視ディスプレイは、特殊な装置を装着せずに 3D 視覚を提供できる利点がある。しかし、2D 地図を地面として使いながら 3D データを立体視ディスプレイで表現する場合、ディスプレイ面そのものが地図として機能しないため、2D ユーザインターフェースとしての直感的な操作性が損なわれるという課題が残る。

本研究では、裸眼立体視ディスプレイである「Spatial Reality Display (SRD)[16]」と通常の平面ディスプレイを組み合わせることで、2D と 3D をシームレスに接続できるシステム SyncSight を提案する。2D 地図を表示する平面ディスプレイを 3D 空間の地面と見立て、その上に置いた SRD が地図上の一部の領域を 3D で表示することで、インタラクティブレンズのように、2D 地図の特定の領域を 3D で表示するプロトタイプアプリケーションを開発した (図 1)。このシステムの有効性を検証するために、ドローンの経路設計タスクを実装し、空間把握のしやすさやシステムの使いやすさについて評価を行った。本論文では、SyncSight の詳細およびその評価結果について述べ、2D と 3D のデータ可視化における新たなアプローチを示す。

2. 関連研究

2.1 マルチスケールインターフェース

複数のスケールでのインターフェースは、ユーザが異なるレベルの詳細を持つデータを効果的に扱うために発展してきた。最も一般的な手法の一つが「Pan & Zoom[2]」である。これは、表示画面を拡大・縮小することでデータのスケールを調整しながら、水平方向や垂直方向に移動できる機能であるが、画面を拡大すると全体的なコンテキスト

が失われてしまうという欠点が指摘されている [3]。

「Overview+Detail[4], [5]」は、一般的にズームと併用して用いられ、詳細ビューと概要ビューを同時に表示する方法である。この手法により、ユーザは全体像を把握しながら特定の詳細部分にもアクセスできるが、表示領域が別々のスペースに分かれるため、ユーザの注意が分散しやすいという課題がある。

「Focus+Context」では、フォーカス領域とコンテキスト領域を一つの表示領域に統合し、ユーザの注意が一つの画面内に集中するように工夫されている。この手法の一例が「Magic lens[6]」や「Sigma Lens[7]」で、これらはインタラクティブレンズ [27] を用いてフォーカス領域を表示しながら、異なるスケールのコンテキスト領域との間を意図的に歪ませて表示し、フォーカス領域とコンテキスト領域のつながりを強調する。インタラクティブレンズを用いた「GTMapLens[8]」では、レンズの内外でスケールの違いはなく、レンズ内に地理的なテキスト情報を表示するなど、表示する情報をユーザが選択できる特徴がある。さらに、紙や他のディスプレイなどの物理的なオブジェクトをレンズとして使用し、テーブルトップディスプレイの上の空間を利用することもある [28], [29], [30]。

また、2 種類の表示形式を同時に表示する手法として、画面を左右半分に分けて表示する「並列表示」、その左右の比率を調節する「スワイプ」、両方の地図を重ね合わせ、透明度を調節する「透明オーバーレイ」が提案されている [1]。これらの手法の中で、それぞれの表示ビューが最も干渉しない「並列表示」は 2D と 3D の表示に問題ないと推測できる。ただし、2 種類の 2D 地図を用いた探索タスクの比較 [1] により、インタラクティブレンズと比べ、タスク完了時間が遅く、左右を見比べる注意の分散があることが指摘されている。

本研究では、物理的なオブジェクトを使うインタラクティブレンズのように、2D 地図の一部分を 3D として表示する構成を実現した。この構成により、ユーザは 2D と 3D の両方のデータを扱う際に、注意を分散させることなく視覚的な情報を理解することができると考えられる。

2.2 地理情報の 3D 可視化

近年、地理空間情報の可視化において、より詳細な現実空間を表現するために、2D 地図ではなく 3D データが積極的に利用されている [9]。3D 表示は都市モデルと、人種や気候、自然災害などの環境情報を組み合わせることで、都市環境に関するデータをより効果的に可視化できる手法として注目を集めている [11], [12]。特に、都市設計や都市計画の分野では、従来の 2D 表示の限界を補うために 3D 表示の活用が提案されてきた [13]。3D 表示によって立体的な空間が直感的に理解できるという利点があるが、注目したい建物以外の立体物が視界を妨げることや、ユーザの注意

が目的の場所以外に分散する可能性が指摘されている [13].

本研究では、3D 表示の利点を活かしつつ、画面の一部に 3D 表示を制限することで、ユーザが関心のある空間に焦点を合わせ、周辺の重要な情報を効率的に把握できるインターフェースを提案する。

2.3 2D と AR の組み合わせ

平面ディスプレイと拡張現実感 (Augmented Reality; AR) を組み合わせたインターフェースが提案されている。Head Mounted Display (HMD) を利用した AR[10] は、平面ディスプレイの表示領域を仮想的に拡張する技術として注目されている。例えば、「Marvis[14]」は、モバイルデバイスの小さなディスプレイを AR を用いて周囲や上方に拡張し、ユーザが持つ情報の範囲を広げることができるシステムである。このシステムでは、モバイルデバイスの触覚フィードバックと AR を組み合わせることで、正確なインタラクションが可能である。また、「DesignAR[15]」は、平面ディスプレイと AR を組み合わせ、3D モデルを効率的に作成するためのシステムを提案している。これにより、ユーザは正確な操作を平面ディスプレイ上で行いながら、3D データの直感的な理解を実現できる。

本研究では、2D の地図表示に平面ディスプレイを使用し、地図の操作を正確かつ直感的に行う一方で、一部の情報を 3D として表示することで、立体情報も提供する。この構成により、ユーザは 2D と 3D の両方の視点から空間データを効率的に理解できると考えられる。

2.4 立体視ディスプレイ

近年、HMD を装着することなく、裸眼で立体映像を視聴できる立体視ディスプレイ技術が開発されている。この技術により、HMD を装着する際の煩わしさや、映像視聴時に起こりがちな酔いといった課題を解決することが期待されている。

これまでの研究により、立体視ディスプレイである「Spatial Reality Display (SRD)[16]」の有効性が確認されている。Ariwa ら [18] は、HMD を使用した AR と SRD を比較し、1.0 メートル以内に表示される 3D-CG モデルの観察誤差を検証した。その結果、近距離で高い精度が求められるシーンにおいて、SRD が優位性を示した。また、Lazzarotto ら [19] は、圧縮された 3D 点群データを用いて、SRD と平面ディスプレイの視覚品質スコアを比較し、加えてユーザへの体感品質に関するアンケート調査を行った。その結果、SRD は没入感や視覚的な自然さにおいて、平面ディスプレイよりも高い評価を得た。

本研究では、3D 都市モデルを SRD に表示することで、HMD のような装置を装着せずに、建物や都市空間を立体的に観察できるシステムを提案する。このアプローチにより、ユーザは 3D モデルをより自然な形で視覚的に理解し、

効果的に利用できると考えられる。

3. SyncSight

3.1 システムコンセプト

本研究で提案する SyncSight は、2D 地図の平面表示と 3D 空間の立体表示を組み合わせることで、ユーザは二つの情報の位置関係を維持したまま同時に見ることができる。そこで、2D 地図を表示する平面ディスプレイと、立体空間を表示する立体視ディスプレイ (SRD) を組み合わせ、平面ディスプレイの奥側に立体視ディスプレイを配置する (図 2)。

このシステムは、2D 地図を表示する水平に配置された平面ディスプレイと、その上に物理的に設置された SRD で構成されている。SRD は、直方体の立体空間を視覚的に表示できるため、2D 地図を地面として見立て、その一部の領域を立体的に表示することで、2D と 3D のデータを歪みなく接続できる。2D 地図と 3D 空間の面積の比率は SRD のサイズと平面ディスプレイのサイズで決まる。本論文では 15.6 インチの SRD と 50 インチの平面ディスプレイを使用しており、画面全体の約 11% が 3D で表示される。このシステムは、SRD を使用することで HMD のような装置を装着する必要がないため、装着のわずらわしさが無い。また、複数のユーザが連続してデバイスを利用する展示会のような環境においても、衛生管理や装置の交代が簡単に行える。

本システムは、2D と 3D を空間的に統合することで、従来の 2D 表示や 3D 表示のみのシステムでは得られなかった複数の利点を提供できると考える。

● 3D 空間の位置把握の向上

3D 可視化は、奥行きや高さなどの情報を直感的に提供できるが、時にはユーザが自分の見ている位置や範囲を見失うことがある。SyncSight では、3D で注目している領域が 2D 地図上のどの位置に対応しているかを常に把握できるため、空間的な位置関係を把握しやす

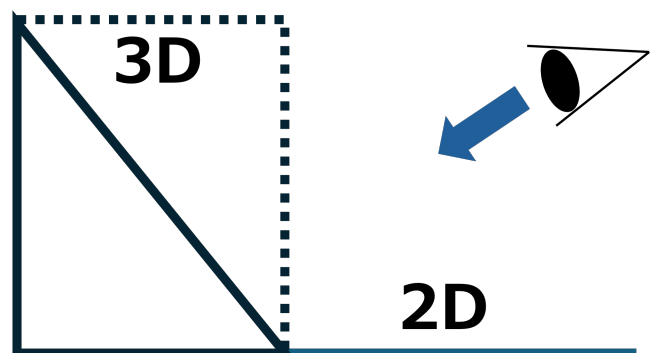


図 2 SyncSight を横から見た簡略図。2D 地図と 3D 空間の地面を一致させている。実線の三角形の立体視ディスプレイが、点線部分を含めた空間を立体的に表示する。

い。2D 地図の提供する俯瞰的な情報により、ユーザは 3D 空間の周囲のコンテキストを理解しやすくなる。

● オクルージョンの影響の低減

3D 空間の可視化では、建物やその他の立体物が視界を妨げる「オクルージョン」現象が発生することがある。従来の 3D 表示システムでは、斜め上からの視点で空間を確認することが多いため、注目したい領域の手前に他の建物や物体がある場合、それらが視界を遮ってしまう。しかし、本システムでは、SRD によって表示される立体空間は直方体の形状で切り取られており、オクルージョンが発生しにくく、注目したい部分のオクルージョンを回避できる。

● 2D の直感的な操作

3D 空間の操作は、複雑でユーザに負担がかかる場合がある。しかし、SyncSight では、移動や回転操作は 2D 地図上で行えるため、ユーザは従来のマウスやタッチパネルなどの慣れた操作方法で、システムを操作できる。これにより、3D 空間の複雑な操作を必要とせず、ユーザの負担を軽減しながら、効率的にデータを扱うことが可能となっている。

3.2 実装

2D 地図の表示には 50 インチの平面液晶ディスプレイを使用し、3D 表示には裸眼立体視ディスプレイ「Spatial Reality Display, SRD[17]」を使用し、実装には Unity 2021.3.22f1 を使用した。3D 都市モデルは国土交通省 PLATEAU[20] による「PLATEAU SDK for Unity[21]」を使用し、2D 地図は Mapbox 社の「Maps SDK for Unity[22]」を使用した。3D 都市モデルと 2D 地図は中心となる緯度経度に同じ値を入力し、中心を一致させた。地図のズームレベルは 17 に設定した。PLATEAU の 3D 都市モデルは事前に読み込んだ都庁周辺 (2000 m × 2000 m 程度) のデータのみを使用して、アプリケーション実行中に新たに読み込まれることはない。Mapbox の 2D 地図はアプリケーション起動時に、事前に指定した広さ (3D 都市モデルが収まる範囲) を読み込み表示する。SRD で表示する直方体の空間は、都市モデルが十分に表示される高さ 200 m を基準とし、実空間のスケールで幅 500 m、奥行き 200 m、高さ 200 m とした。

システムはサーバークライアントモデルを使用して実装されており、50 インチの平面ディスプレイがサーバーとして機能する。平面ディスプレイに表示する 2D 地図はマウスのドラッグでの移動・回転操作が可能であり、表示されている地図の中心と回転角がクライアントの SRD 側のアプリケーションに送信される。送信された内容をもとに、SRD で表示する空間を平面ディスプレイに合わせて移動させる。

4. 実験評価

実際の使用を想定した場面での SyncSight の有効性を評価するために、「ドローンの経路設計」を例に挙げ、実際にいくつかのパターンで経路を設計する実験と、システムの学習のしやすさを評価するために繰り返し同じ経路を設計する実験を行った。

4.1 ドローンの経路設計

ドローンの経路設計は、空中での衝突や障害物の回避、飛行空域の規制を考慮しながら、安全かつ効率的なルートを計画するプロセスである。ドローンはその経路に沿って飛行するため、経路が障害物と交差しないように経路を設計する必要がある。しかし、起伏の激しい地形やビルの乱立する都市部などでは、立体的に交差するなど、高さ情報のない 2D 地図だけで経路を設計することは難しい。また、日本においては、空港周辺や人口集中地区の上空などの特定飛行に該当する飛行を行う場合、飛行計画を事前に国土交通省に申請する必要がある [23]。特定飛行に該当しない場合でも、飛行地域や通過地点の詳細な設定は、安全確保の観点から極めて重要である。

このドローン経路設計において本研究では、裸眼立体視ディスプレイ「Spatial Reality Display (SRD)」と通常の平面ディスプレイを組み合わせた SyncSight を用いる。このシステムを用いることで、2D 地図上での大まかな経路設計と概観把握、SRD による 3D 空間での詳細な確認を同時に行うことができ、2D と 3D 画面が独立して表示されるような従来のシステムと比べてより短時間で効率的な経路を設計できると考えた。

システムはユーザに地図情報を提示し、その中にスタート地点とゴール地点、複数の中継地点が配置されている (図 3)。ユーザはスタート地点から全ての中継地点を通り、ゴール地点まで、建物に衝突する経路がないように通過地点 (マーカー) を配置していく。スタート地点とゴール地点は高さ 0 m、中継地点は高さ 40 m から 180 m の空中に設定されている。ユーザがマーカーを設置することで、2D 地図と 3D 空間の両方でその位置が反映され、ドローンの飛行経路を可視化することができる (図 4, 5)。

4.1.1 実験手順

参加者には操作説明マニュアルを読ませ、タスクの概要を把握させる。次に簡単なコースと実際のシステムを用いて、タスクを完了する方法の説明をする。また、できるだけ短い時間でタスクを完了させるよう指示する。その上で次の手順に従うように実験を行う。

(1) 参加者が自分のタイミングで「開始ボタン」を押すことで開始される。

- 画面には、タスク開始前に詳細は表示されず、タス

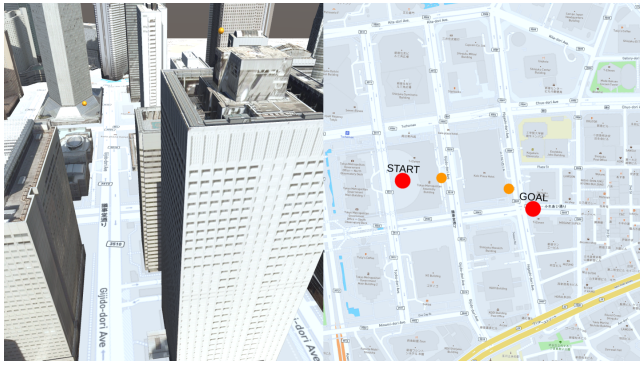


図 3 並列表示システムでのタスク開始時。スタート地点（赤色）と中継地点（橙色）、ゴール地点（赤色）が指定される。

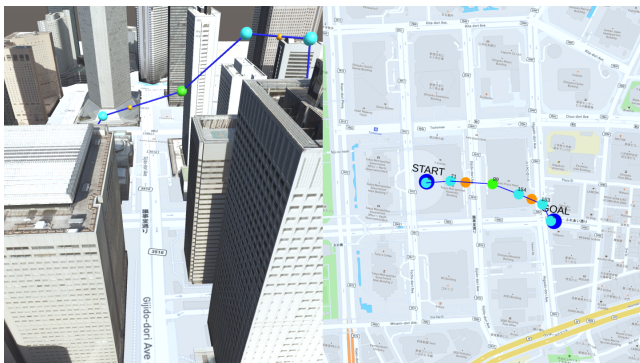


図 4 並列表示システムでの経路設計後。マーカー間に青色の直線経路が表示される。

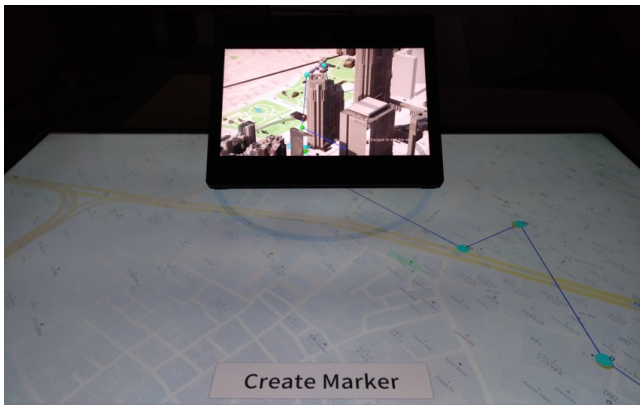


図 5 SyncSight での経路設計後。

ク開始後にコースのスタート地点などの位置が明示される。

(2) 参加者は、タスク開始後、自分のタイミングで画面隅にある「タスク終了」ボタンを押すことができる。

- スタート地点とゴール地点、全ての中継地点を通過していない場合、タスクは終了されない。満たしていない条件が画面隅に表示され、経路を修正することが求められる。
- 経路が建物に衝突していた場合も同様に修正する必要がある。

(3) 「タスク終了」ボタンを押したとき、すべての指定地

点を通過し、経路の衝突がなかった場合、タスク終了となる。

4.2 比較システム

SyncSight と比較するために並列表示システム [1] を用いた (図 3, 4)。これは、2つの異なる地図表示画面を同時に提示する方法であり、これによりユーザが異なる視点や情報を同時に確認できるようにする。この手法は、SyncSight やインタラクティブレンズと異なり、2種類の地図表示画面が空間的にシームレスに接続されておらず、それぞれの画面が独立して表示される点が特徴である。

並列表示は、通常、画面全体を左右半分に分割し、左側と右側にそれぞれ異なる情報を表示する。この手法では、2つの画面の中心を互いに対応させることが一般的であり、これによりユーザは左右の画面に表示された異なる情報を比較しやすくなる。例えば、左側に 2D の地図を、右側に航空写真を表示することや、左側に縮小地図、右側に拡大地図を表示することができる。このように、スケールの異なる情報や異なる視点の情報を組み合わせることが可能であり、複数の視点から同時に地理情報を確認することができる。

本研究では、2D と 3D という視点の異なる情報を同時に表示することを目的としているため、SRD を使用せずにこれらの情報を同時に表示できる点で、この手法を比較システムとして採用した。並列表示は、各画面が干渉せずに独立して機能するため、異なる地図情報を同時に参照する際に有効な方法であり、SyncSight と比較するための基準として適していると考えられる。

4.3 実験アプリケーションの実装

実験手順で述べた経路設計に必要な操作として、以下の機能を実装した。

● 地図の移動

ユーザは、地図上にマウスカーソルを置き、ドラッグ操作を行うことで、表示される地図の中心を移動できる。この操作は、ドラッグ開始時にマウスカーソルがマーカーや設置ボタン上にない場合にのみ有効となる。

● 地図の回転

マウスの右ドラッグ操作を使用して、地図全体を画面の中心を軸に回転させることが可能である。これにより、ユーザは異なる視点から地図を確認できる。

● マーカーの設置

画面下部に配置された「マーカー設置ボタン」を押すことで、画面の中心にマーカーが生成される。このマーカーは、経路の基点として使用され、ユーザが次に設置するマーカーとの接続点となる。

● マーカーの移動

ユーザがマウスカーソルをマーカーの上に置き、ド

ラッグ操作を開始すると、そのマーカーはマウスカーソルと共に移動する。マウスボタンを離すと、マーカーの移動が終了し、その地点に固定される。この操作により、経路の微調整が行える。

● 高さの変更

マウスホイールの上下操作を用いて、特定のマーカーの高さを変更することができる。この操作は、3D空間にあるマーカー選択を簡略にするために、SRDの表示領域を基にして最も中心に近いマーカーに適用される。並列表示システムでは2D地図の中心に近いマーカーに適用される。高さ操作対象になっている間、マーカーの色が青から緑になる（図4の2D地図の中心）。つまり、高さの変更を行う際は、ユーザが該当のマーカーをSRDの表示領域の中心に見えるように、地図の移動操作をする必要がある。

ユーザがマーカーを設置する際、2D地図上には円形のアイコンとその地点の高さを示すテキストが表示され、3D空間では、対応する位置と高さに球体のオブジェクトが表示される。このマーカーは、設置後もドラッグ操作によって移動可能であり、ユーザは必要に応じて経路を柔軟に修正できる。また、経路はマーカー間を直線的に接続するように設定される。この直線がドローンの飛行予定経路に相当する。2D地図上では、マーカー間を結ぶ経路は2D地図上では細い直線で可視化され、3D空間では細長い円柱オブジェクトで接続される。この円柱は直径1.5mの太さを持ち、見た目と同様に衝突判定を持つオブジェクトとして設定されている。簡略化のため、経路は建物との一定距離を維持する必要はなく、経路のオブジェクトが建物に衝突しない限り、経路の設計は完了とみなされる。

4.4 実験1: 複数の飛行経路での比較

実験1は、異なる飛行経路設計の条件下で、SyncSightの有効性を検証することを目的として実施した。実験参加者は、複数の地点を通過するドローンの飛行経路を設計するタスクに取り組み、2種類の異なる表示システム（SyncSightと並列表示システム）でのタスク完了時間と経路長を比較した。

実験用にスタート地点とゴール地点、複数の中継地点の集合「コース」を6種類設定し、それぞれ異なるコースの広さと中継地点の数で構成された。以下に各コースの詳細を示す。

- コース1: 狭い範囲、2つの中継地点
- コース2: 狭い範囲、3つの中継地点
- コース3: 狭い範囲、4つの中継地点
- コース4: 広い範囲、2つの中継地点
- コース5: 広い範囲、3つの中継地点
- コース6: 広い範囲、4つの中継地点

「狭い範囲」のコースは、スタート地点、ゴール地点、

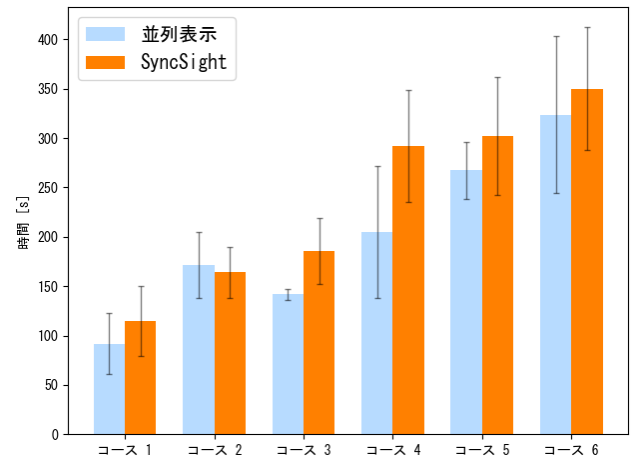


図6 コースごとのタスク完了時間

および中継地点が実空間の500m四方に収まるものである。この範囲内では、SRDの表示領域にほとんど収まる。一方、「広い範囲」のコースは、1500m四方に広がり、2D地図を積極的に利用する必要がある状況を設定しており、SyncSightが広範な領域で使いやすいかどうかを検証する目的がある。また、各コースの中継地点の間には必ず建物を挟むように設定しており、参加者はドローンが建物と衝突しないように経路を設計することが求められる。

4.4.1 実験参加者

実験の参加者は、22歳から25歳の男性15名であり、全員が正常または正常に矯正された視力を持っていた。全ての参加者は立体視ディスプレイを扱う経験はなかった。

参加者を以下の3つのグループに分け、それぞれ異なるコースで実験を行った。実施するコースの順番は参加者ごとにランダムに指示した。

- グループ1: コース1と4を並列表示、コース2と5をSyncSightで実施
- グループ2: コース2と5を並列表示、コース3と6をSyncSightで実施
- グループ3: コース3と6を並列表示、コース1と4をSyncSightで実施

4.4.2 実験1の結果

コースごとのタスク完了時間の平均値を図6に、コースごとの経路長の平均値を図7に示す。スチューデントのt検定による有意差とCohenのdによる効果量測定を行った。

タスク完了時間において、SyncSightを使用した場合、コース3とコース4では有意に遅くなることがわかった ($p_3 = 0.016, p_4 = 0.041$)。効果量はコース1から順に、 $d_1 = 0.683, d_2 = 0.242, d_3 = 1.83, d_4 = 1.40, d_5 = 0.744, d_6 = 0.367$ であった。SyncSightが並列表示システムと比較して、コース2はタスク完了時間が短くなる小の効果、コース6は長くなる小の効果、それ以外のコースは

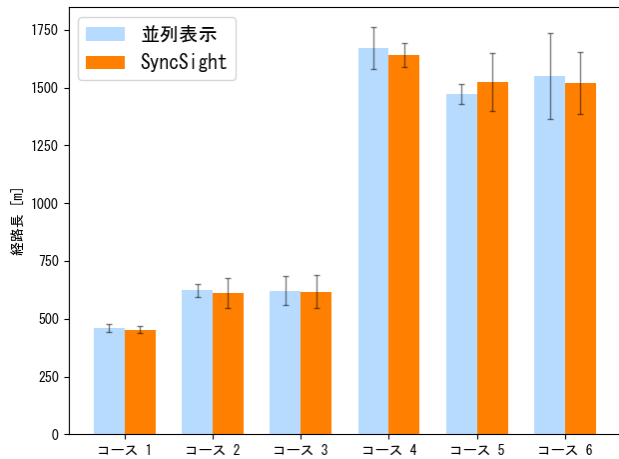


図 7 コースごとの経路長

中以上の効果でタスク完了時間が長くなった。

経路長において、SyncSight を使用した場合、コース 5 以外のコースで並列表示システムよりも短くなった。全てのコースで有意な差はなかった。効果量はコース 1 から順に、 $d_1 = 0.387, d_2 = 0.220, d_3 = 0.065, d_4 = 0.419, d_5 = 0.522, d_6 = 0.183$ であった。SyncSight が並列表示システムと比較して、コース 1 から 4 とコース 6 は小から中の効果で経路が短くなり、コース 5 は中の効果で長くなった。

4.5 実験 2: トレーニング効果の調査

実験 2 では、トレーニング効果を評価するために、共通のコースを複数回試行し、参加者がシステムに慣れた状態でのパフォーマンスを調査した。本実験では、実験 1 と同様に、スタート地点、中継地点、ゴール地点を通過する経路設計タスクを行ったが、異なる点として、全ての参加者が同じ 1 つのコースを 10 回連続で実施することで、システムへの慣れがタスク完了時間に及ぼす影響を比較した。

コースは、スタート地点（高さ 0m）とゴール地点（高さ 0m）が地面にあり、1 つの中継地点が高さ 90m に設定されている。さらに、スタート地点と中継地点、中継地点とゴール地点の間には建物が配置されており、建物を避ける経路を設計する必要がある。コースの広さは実空間の 1000m × 1000m である。

この設定により、SyncSight の使用によってタスク完了時間が遅くなるという実験 1 の結果に対して、参加者がシステムに慣れることでパフォーマンスが改善されるかどうかを検証した。また、SyncSight は初めて使用する際に、並列表示に比べて操作の難易度が高く感じられることが示唆されていたため、試行回数の増加が並列表示と比較してどのような影響を与えるかについても調査した。

4.5.1 実験参加者

実験の参加者は、22 歳から 25 歳の男性 26 名であり、全員が正常または正常に矯正された視力を持っていた。この

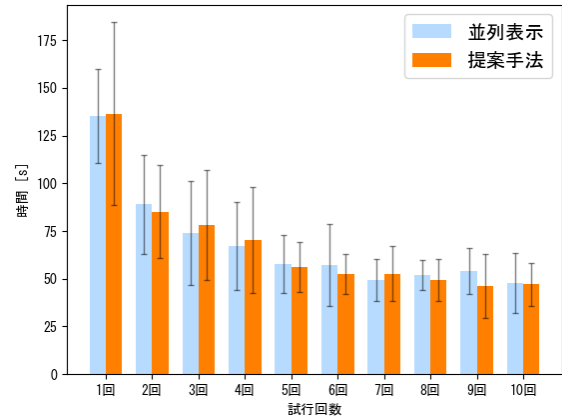


図 8 試行回数ごとのタスク完了時間

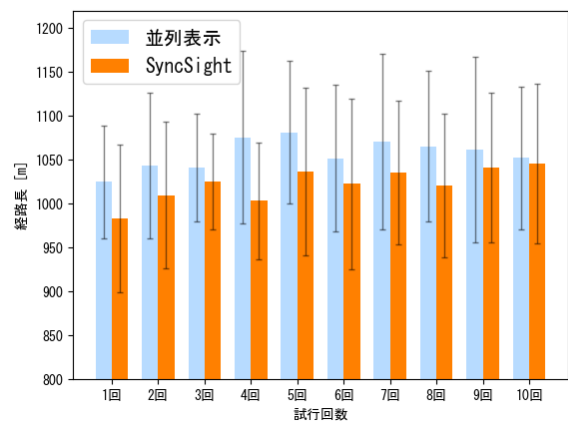


図 9 試行回数ごとの経路長

うち、9 名の参加者は実験 1 にも参加しているが、約半年の間隔を経ており、それ以外で立体視ディスプレイを扱う経験はなかった。残りの 17 名は過去に立体視ディスプレイを扱う経験はなかった。

参加者は無作為に 2 つのグループに分けられた。1 つのグループは並列表示システムを使用し、もう 1 つのグループは SyncSight を使用した。各グループの参加者は、割り当てられたシステムのみを使用し、同じコースを 10 回連続で実施した。

4.5.2 実験 2 の結果

タスク完了時間の試行回数ごとの平均値を図 8 に、経路長の試行回数ごとの平均値を図 9 に示す。なお、並列表示システムを使用した参加者の 1 名については、システムの不具合によりデータが正しく取得できなかったため、分析対象から除外した。スチューデントの t 検定による有意差と Cohen の d による効果量測定を行なった。

タスク完了時間は、両システムにおいて、試行回数を重ねるごとに減少する傾向が見られた。各システムのタスク完了時間が安定した試行回数を見つけるために、タスク完

表 1 タスク完了時間の平均値を基に計算した線形回帰の傾き

	SyncSight	並列表示
1-10 回目	-7.7322	-7.2444
2-10 回目	-4.8842	-4.3876
3-10 回目	-4.2541	-3.2536
4-10 回目	-3.3127	-2.527
5-10 回目	-1.9293	-1.6068
6-10 回目	-1.7209	-1.4241
7-10 回目	-1.9682	-0.2654
8-10 回目	-1.111	-2.1428
9-10 回目	1.0193	-6.4474

了時間の平均値を基に、 x 回目から 10 回目までのデータ ($x = 1, 2, \dots, 9$) を用い、 $(10 - x + 1)$ 個の値に対して線形回帰を行い、その傾きを表 1 に示す。傾きの変化が小さくなっている 5 回目以降の 150 試行 (6 試行 $\times$ 25 名) を用いて、両システムのタスク完了時間の平均を比較したが、有意な差は見られなかった ($p = 0.242$)。効果量は 0.115 であり、SyncSight が並列表示システムと比べ、小の効果でタスク完了時間を短くした。これにより、1 回目の試行では実験 1 の結果と同様に、SyncSight のタスク完了時間が並列表示システムよりも長い、複数回試行後は、並列表示システムよりも短時間でタスクを完了できることがわかった。

経路長については、試行回数ごとの変化は見られなかったため、全ての試行 (10 試行 $\times$ 25 名) を用いてシステム間の比較を行った。その結果、SyncSight が並列表示システムと比較して、経路長が有意に短くなることがわかった ($p = 0.00093$)。効果量は 0.400 であり、SyncSight を使用した参加者が中の効果で短い経路を設計した。

5. 考察

5.1 タスク完了時間

実験 1 や実験 2 の初見などの初見のコースの試行において、SyncSight を使用した場合にタスク完了時間が延びたのは、2D と 3D の配置方法の違いによるものと考えられる。並列表示システムは同じ地理的領域を左右に配置しており、ユーザが視点を画面左右に向けることで、3D で見ている領域を 2D 地図でも見ることができる。SyncSight は 2D 地図の一部が 3D で表示されるような画面構成となっており、3D で見ている領域は 2D で見ることができない。初見のコースでは、多くの参加者が 2D 地図を見ながら経路を設計し、建物の位置関係を十分考慮しないまま、まずスタート地点と中継地点にマーカーを配置する傾向が見られた。その後、3D 表示で経路周辺を見たときに経路が建物を貫通していることに気づき、修正作業が必要となるケースが多発した。この修正作業では、迂回経路を形成するために既存のマーカーを移動させながら、新たなマーカーを 1 から 3 個追加する必要があった。経路はマーカーを画面

上のボタンで生成した順番に接続していくため、既に設置したマーカー A と B が存在する状態で迂回経路を作成するには、マーカー B を迂回する通過地点に置き、新たに設置するマーカー C を B があった場所に設置する作業となる。SyncSight では 3D で見ている領域は 2D 地図側に表示されないため、経路の修正が必要な際には、まず 2D 地図側でマーカーの位置を修正し、再び 3D 地図側で高さを調整するという手順を踏むことが求められ、地図移動操作が増加することになった。一方、並列表示システムでは、3D で確認しながら 2D 地図でもマーカーの位置が確認でき、修正時の地図移動操作が不要であった。この操作性の違いが、初見のコースでのタスク完了時間において、並列表示システムが優位であった理由と考えられる。

実験 2 の 5 回目以降の試行では、両システムのタスク完了時間が短くなっていった。これは、同一のコースを連続して試行したために、参加者が経路衝突が起こりやすい場所を把握したことと、両システムの経路設計に慣れていったことが考えられる。SyncSight を使用した参加者は、2D 地図側で複数のマーカー (スタート地点、迂回のための 1 から 3 個、中継地点の合計 3 から 5 個程度) を概略的に配置し、その後、3D 表示で高さのみを順番に調整するという手順を取るケースが増加した。3D 表示で高さを調整する際に位置を微調整する場合もあったが、マーカーを 3D 表示で見た状態で、3D 空間の地面の 2D 地図上で位置調整を行う参加者が多かった。これは SyncSight は「3D で見ている領域は 2D で見ることができない」という画面構成を理解し、2D と 3D の操作を分離することで地図移動操作を減らせると気づいたと考えられる。さらに、SyncSight の 3D 表示では、立体視ディスプレイ (SRD) で表示する直方体の空間に対し、位置を調整することで必要な部分のみを表示させることができる。そのため、地図の回転操作をすることなく、見通しを妨げる手前の建物の表示を回避し、必要なマーカーの部分にのみ集中できた。一方、並列表示システムでは、3D 表示において建物が経路設計を遮ることが多く、マーカーの高さ調整を行う際には、必ず回転操作が必要となる場面が発生した。この回転操作が、実験 2 の 5 回目以降の試行において、SyncSight が並列表示システムよりも小の効果でタスクを速く完了できた原因だと考えられる。

つまり、初見のコースにおいては並列表示システムの方が地図移動操作の影響でタスク完了時間が短くなる。一方で、反復的な操作により経路設計のパターンが定まると、SyncSight の特徴である 3D 表示の局所的表示によるオクルージョンの影響の低減により、地図の回転操作を最小限に抑えられることでタスク完了時間が短くなった。

5.2 経路長

実験 1 と実験 2 の両方で、SyncSight を使用した場合、並

列表示システムと比較して経路が短くなった。SyncSightを使用した参加者の多くが、マーカー間の高度の変化を緩やかに設定したり、建物の迂回を最小限に抑えた経路を設計する傾向があった。これは、SRDの3D表示画面を見ているとき、平面ディスプレイ上の2D地図が自然に視野に入り、次の経路を見据えたマーカーの設置が特別に意識することなく行えたと考える。このことが、SyncSightでの経路長の短縮に寄与したと考えられる。一方、並列表示システムを使用した参加者は、大きな迂回を行ったり、余分な高度設定をするケースが多発した。3D表示では、建物が経路の一部を遮ることや、SRDと異なり奥行きが把握がしづらい点が影響し、経路の概形は把握しづらい。そのため、SyncSightと同様に2D地図で経路の概形を把握する必要がある。しかし、並列表示システムは2D表示と3D表示の画面が左右に分かれており、2D地図を見るためには3Dで見ている視点を画面左側から右側へ向ける必要がある。3D表示画面で高さや迂回経路の調整をしているとき、2D地図の経路の概形情報を十分に活用できなかったことから、次の経路を見据えたマーカーの設置がSyncSightよりもできていなかったと考えられる。

このことから、SyncSightを使用することで、並列表示システムと比べて、3D表示の周囲の位置関係を把握しやすいと言える。

5.3 改善点

SyncSightでは、経路上の途中にマーカーを増やすような修正をする際に、2Dと3Dへ交互に地図移動操作をする必要があり、これがタスク完了が遅くなることに影響した。両システムの現状のアプリケーションでは、既存のマーカー間の中間に追加のマーカーを挿入することができず、経路を途中で折れ曲げるには既に設置した他方のマーカーを動かす必要がある。そのため、経路の修正に大きな作業負荷があった。この修正作業の負荷は、マーカー間の直線の経路部分を選択できるように設定し、マウスのドラッグ操作などによって、マーカー間に新たにマーカーを挿入する機能を実装することで軽減ができる。

また、後半の試行で見られた「事前にマーカーの平面的な位置を決定し、その後に高さ調整を行う」という手順は、SyncSightによる効率的な経路設計に有効であると考えられる。この手順は、実験2で同じコースを連続して使用したことで、参加者が建物の位置を把握していたため行うことができた。そのため、初見のコースでこの手順を行えるように、2D地図として実測図のような建物の正確な形がわかる地図を使用することで、建物の位置を考慮しながら経路が建物を貫通しないように当たりをつけて設計することができる。

このようなアプリケーションの操作方法の改善や2D地図で提示する情報を変更することで、SyncSightを使用す

る場合により速く経路設計を行えると考える。

また、表示形式を柔軟に変更するための手段も検討する必要もある。立体視ディスプレイ（SRD）で表示する中心と2D地図の中心を一致させる並列表示（またはオフセットレンズ[1]）のような方法や、必要に応じて「レンズ」と「並列表示」を切り替えられるようなシステム構成も有効と考えられる。SRD上で表示する空間をアプリケーションにより動的に指定するだけで、この切り替え機能は実装可能である。これにより、経路設計の初期の大まかな配置は「並列表示」で行い、高さの調整や位置の微調整は「レンズ」で行うというような、状況やユーザの好みに合わせることができる。

「レンズ」と「並列表示」の切り替え以外に、「ズームレンズ」としての利用も考えられる。SRDで表示する空間のスケールを保持したまま2D地図を縮小することで、ユーザは広範囲に配置されたマーカーを一度に視認することが可能となる。このアプローチでは、2Dと3Dでスケールが一致したSyncSightと異なり、2D地図の一部が3D表示によって隠れるという問題がある。これは、Focus+Contextで行われるアプローチ[7]である2Dと3Dの境界周辺を魚眼レンズのように歪ませることで、スケール変更の際の視野の狭まりを補うことで解決する可能性がある。実験参加者からも、より広範囲の視野確保の要望が示されており、「ズームレンズ」としての可視化方法も有効であると考ええる。

6. 結論

本研究では、2D地図の平面表示と3D空間の立体表示を組み合わせ、二つの情報の位置関係を維持したまま可視化するシステムSyncSightを開発した。このシステムを評価するため、ドローンの経路設計タスクにおいて、並列表示システムと比較した実験を実施した。その結果、SyncSightを用いることで、経路の概形や3D表示の周囲の位置関係を把握しやすいことがわかった。また、3D空間を局所的に表示することでオクルージョンの影響を低減させ、地図の回転操作を最小限に抑えることができ、タスク完了時間が短くなることがわかった。一方で、SyncSightでは設計した経路の修正作業に高い操作負荷がかかったことから、2Dで行う操作と3Dで行う操作をできるだけ分離する必要があるという知見が得られた。そして、2D地図による詳細な地形情報の提供やスケールの調整、3D空間の位置変更などによって、2Dと3Dを組み合わせる可視化システムがより使いやすいものになる可能性が示唆された。

参考文献

- [1] M.J. Lobo, E. Pietriga and C. Appert: *An Evaluation of Interactive Map Comparison Techniques*, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors

- in Computing Systems (CHI '15), pp. 3573-3582, 2015.
- [2] B.B. Bederson and J.D. Hollan: *Pad++ a zooming graphical interface for exploring alternate interface physics*, Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 17-26, 1994.
 - [3] D. Nekrasovski, A. Bodnar, J. McGrenere, F. Guimbretiere and T. Munzner: *An evaluation of pan & zoom and rubber sheet navigation with and without an overview*, In Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'06), pp. 11–20, 2006.
 - [4] S. Pook, E. Lecolinet, G. Vaysseix and E. Barillot: *Context and interaction in zoomable user interfaces*, Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, pp. 227-231, 2000.
 - [5] K. Hornbæk, B.B. Bederson and C. Plaisant: *Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview*, ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), Vol. 9, No. 4, pp. 362-389, 2002.
 - [6] E. A. Bier, M. C. Stone, K. Pier, W. Buxton and T. D. DeRose: *Toolglass and magic lenses: The see-through interface*, Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93), pp. 73–80, 1993
 - [7] E. Pietriga, O. Bau and C. Appert: *Representation-Independent In-Place Magnification with Sigma Lenses*, IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 16, No. 3, pp. 455–467, 2010.
 - [8] C. Ma, Y. Zhao, S. AL-Dohuki, J. Yang, X. Ye, F. Kamw and M. Amiruzzaman: *GTMapLens: Interactive Lens for Geo-Text Data Browsing on Map*, Computer Graphics Forum, pp. 469-481, 2020.
 - [9] N. Shiode: *3D urban models: Recent developments in the digital modelling of urban environments in three-dimensions*, GeoJournal, Vol. 52, No. 3, pp. 263-269, 2000.
 - [10] R.T. Azuma: *A survey of augmented reality*, Presence: teleoperators & virtual environments, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
 - [11] R. Chang, G. Wessel, R. Kosara, E. Sauda and W. Ribarsky: *Legible cities: Focus-dependent multi-resolution visualization of urban relationships*, IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 13, No. 6, pp. 1169-1175, 2007.
 - [12] M. Vuckovic, J. Schmidt, T. Ortner and D. Cornél: *Combining 2D and 3D Visualization with Visual Analytics in the Environmental Domain*, Information, Vol. 13, No. 1, p. 7, 2022.
 - [13] S. Judge and L. Harrie: *Visualizing a Possible Future: Map Guidelines for a 3D Detailed Development Plan*, Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, Vol. 4, 2020.
 - [14] R. Langner, M. Satkowski, W. Büschel and R. Dachsel: *MARVIS: Combining Mobile Devices and Augmented Reality for Visual Data Analysis*, Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21), pp. 1-17, 2021.
 - [15] P. Reipschläger and R. Dachsel: *DesignAR: Immersive 3D-Modeling Combining Augmented Reality with Interactive Displays*, Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '19), pp. 29-41, 2019.
 - [16] K. Aoyama, K. Yokoyama, T. Yano and Y. Nakahata: *Eye-sensing light field display for spatial reality reproduction*, SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 52, No. 1, 2021.
 - [17] SONY: *Spatial Reality Display ELF-SR1 Technical Background*, https://www.sony.com/en/SonyInfo/sony_ai/siggraph2021/assets/img/event_session04-01.pdf, (2022.09.23)
 - [18] M. Ariwa, T. Itamiya, S. Koizumi and T. Yamaguchi: *Comparison of the Observation Errors of Augmented and Spatial Reality Systems*, Applied Sciences, Vol. 11, No. 24, p. 12076, 2021.
 - [19] D. Lazzarotto, M. Testolina and T. Ebrahimi: *On the impact of spatial rendering on point cloud subjective visual quality assessment*, International Conference on Quality of Multimedia Experience, 2022.
 - [20] 国土交通省: *PLATEAU*, <https://www.mlit.go.jp/plateau/>, (2022.12.19)
 - [21] 国土交通省, 株式会社シナスタジア: *PLATEAU SDK for Unity*, https://assetstore.unity.com/PLATEAU-SDK?srltid=AfmB0oq7HEN03MixzD9oT6C5jG_MtyJuML0R9x1Rsb2BRjb0SdPVMiet, (2024.9.30)
 - [22] Mapbox: *Maps SDK for Unity*, <https://www.mapbox.com/unity>, (2022.12.19)
 - [23] 国土交通省: 無人航空機の飛行許可・承認手続, https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html#anc01, (2024.9.30)
 - [24] I. Lochhead and N. Hedley: *Designing virtual spaces for immersive visual analytics*, KN-Journal of Cartography and Geographic Information, 71(4), pp. 223-240, 2021.
 - [25] Meta: *Meta Quest Safety Center*, <https://www.meta.com/jp/en/quest/safety-center/>, (2024.12.24)
 - [26] Apple: *Apple Vision Pro の安全性に関する重要な情報* <https://support.apple.com/ja-jp/guide/apple-vision-pro/c0c84db82a44/visionos#:~:text=Children.,while%20using%20Apple%20Vision%20Pro>.
 - [27] C. Tominski, S. Gladisch, U. Kister, R. Dachsel and H. Schumann: *Interactive lenses for visualization: An extended survey*, In Computer Graphics Forum, Vol. 36, No. 6, pp. 173-200, 2017.
 - [28] M. Spindler, S. Stellmach and R. Dachsel: *PaperLens: advanced magic lens interaction above the tabletop*, In Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 69-76, 2009.
 - [29] M. Spindler, C. Tominski, H. Schumann and R. Dachsel: *Tangible views for information visualization*, In ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 157-166, 2010.
 - [30] A. Ebert, C. Weber, D. Cernea and S. Petsch: *TangibleRings: Nestable circular tangibles*, In CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 1617-1622, 2013.