

A Plane-Assisted Method for Efficient 3D Arrangement of Computer-Generated Objects

Yu Shimada[†], Changyo Han[†], Ari Hautasaari[†] and Takeshi Naemura[†]

Abstract When creating CG content, object placement is one of the most fundamental operations. In CG applications, moving objects in the desired direction on the screen often requires multiple steps, making the process time-consuming. This study proposes a method for moving CG objects more efficiently in the 3D space projected on the screen by using a visual plane as an aid. User experiments confirmed that the proposed method allows for faster placement compared to conventional methods.

Keywords : CG objects, user interface, object placement

1. Introduction

When creating CG content, object placement is one of the most fundamental operations. The environment where this content is created is usually on a desktop, where 3D space is projected onto a 2D screen. In the real world, objects are placed by moving them directly to the desired position. However, in CG applications such as Unity* and Unreal Engine**, objects are manipulated indirectly via the 2 degrees of freedom (DOF) of a mouse, with movement along the XYZ axes or within a plane parallel to the screen being the most common. An example of object placement using traditional methods is shown in **Fig. 1(a)**. For instance, to move an object on a plane and then move it again from a different perspective after rotating the view 90 degrees, two movements are required. If the object is moved without accurately understanding its position, the depth of the object may be incorrect, requiring further viewpoint adjustments and additional movement operations, thus increasing the number of steps and time needed for placement.

In previous research, the authors proposed a method to restrict the direction of CG object movement by using a constraint plane linked to a smartphone¹⁾. While this method led to slight improvements in operation speed, it did not show statistically significant results. The cause of this was attributed to the confusion caused by using both hands for operation.

In this paper, we propose a method for efficiently placing CG objects in 3D space by displaying an assistive plane linked to the user's viewpoint. Through user experiments, we confirmed that this proposed method improves placement efficiency compared to conventional methods.

2. Related Work

2.1 Degrees of Freedom in Manipulation

Research has shown that limiting the degrees of freedom in manipulation can improve object placement efficiency. Gloumeau et al.'s PinNPivot²⁾ and Pfeuffer et al.'s Bi-3D³⁾ are examples of studies that effectively restricted degrees of freedom to enhance placement efficiency within their respective environments.

PinNPivot²⁾ is a method for object placement in VR environments. By fixing a point on the object surface with a pin, the object's movement can be limited to 3 degrees of freedom, or its orientation can be limited to 3 degrees of freedom out of a total of 6. The experiment

2024年1月15日受付, 2024年6月20日再受付, 2024年7月30日採録

[†] The University of Tokyo

(〒113-8656 Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113C2, Eng. Bldg. 2, TEL 03-5841-6781)

* <https://unity.com/ja>

** <https://www.unrealengine.com/ja>

[Copyrights to Machine-Translated Content]

The copyright of the original papers published on this website belongs to the Institute of Image Information and Television Engineers.

Unauthorized use of original papers or translated papers is prohibited.

For details, please refer to the copyright regulations of the Institute of Image Information and Television Engineers.

CG オブジェクトを効率的に 3 次元配置するための平面補助手法の研究

A Plane-Assisted Method for Efficient 3D Arrangement of Computer-Generated Objects

島田 優[†], 韓 燦 教[†], ハウタサーリ アリ[†], 正会員 苗村 健[†]

Yu Shimada[†], Changyo Han[†], Ari Hautasaari[†] and Takeshi Naemura[†]

あらまし CG 制作をする上で、オブジェクトの配置はその基本的な操作である。CG アプリケーションにおいて、画面内のオブジェクトを意図した方向に動かすには複数回の操作が必要となり、時間がかかる。本研究では、CG オブジェクトを画面に投影された 3 次元空間内で効率的に配置するために、平面による視覚的な補助を用いたオブジェクト移動手法を提案した。ユーザ実験を行い、平面補助を用いた提案手法で従来手法より短時間で配置できることを確認した。

キーワード: CG オブジェクト, ユーザインタフェース, オブジェクト配置

1. ま え が き

CG 制作をする上で、オブジェクトの配置はその基本的な操作である。その制作環境は主にデスクトップであり、2D の画面内に投影された 3D 空間を扱う必要がある。現実世界でものを配置するには、その位置に直接移動させればよい。しかし、Unity*や Unreal Engine**のような CG アプリケーションでは、マウスの 2 自由度の入力で間接的に操作する必要があり、その操作として、xyz の 3 軸での移動や画面に対して平行な平面での移動が主流になっている。従来手法で配置する場合の例を、図 1(a) に示す。従来手法では、正しく位置を把握できていない場合、オブジェクトの奥行きがずれてしまい、正しい位置に配置できない。そのため、再度視点操作と移動操作を行う必要があり、操作の回数が増え、配置に時間がかかる。

筆者らはこれまでに、スマートフォンに連動した拘束平面に CG オブジェクトの移動方向を制限する手法を提案した¹⁾。操作速度の僅かな改善ができた一方で、統計的な有意差があるとは言えなかった。その原因として、両手の操作による混乱が考えられた。本稿では、視点と連動した補助平面を表示することで CG オブジェクトを効率的に 3 次元配置するための配置手法を提案する。

2. 関 連 研 究

2.1 操作の自由度

操作の自由度を制限することで配置効率を向上させた研究が存在する。

PinNPivot²⁾ は VR 環境でのオブジェクト配置手法である。オブジェクトの表面にピンを刺すことでその点を固定し、オブジェクトの位置と向きの 6 自由度から移動の 3 自由度に限定したり、向きの 3 自由度に限定したりできる。実験の結果、従来の多自由度の操作より、短時間で正確に配置できることが確かめられた。

Bi-3D³⁾ は、タッチディスプレイでのペンを用いた CG 制作ツールである。XY 平面の 2 自由度の移動をペンによって、Z 方向の移動を指による操作で実現している。実験では、球体のオブジェクトを対角上に動かし、立方体の内部に配置するというタスクを行った。実験の結果、従来のウィジェットより高速に配置できることが確かめられた。

以上の研究から、それぞれの操作対象となる環境に適した制限を加えることで配置効率を向上できると考えられる。また、実験のタスク設定にあたって、Bi-3D の配置タスクを参考にした。

2.2 平面を利用した操作

CG オブジェクトの操作を 3 次元から 2 次元に制限する手法について紹介する。

Katzakis らは、Plane-Casting という手法を提案した⁴⁾。Plane-Casting では、スマートフォンを用いて CG オブジェクトを操作する。スマートフォンの傾きに連動した平面を利用した移動が可能で、オブジェクトの移動方向はその平

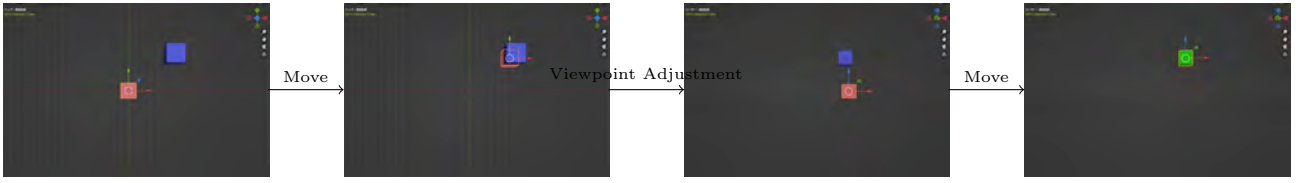
2024 年 1 月 15 日受付, 2024 年 6 月 20 日再受付, 2024 年 7 月 30 日採録

[†] 東京大学

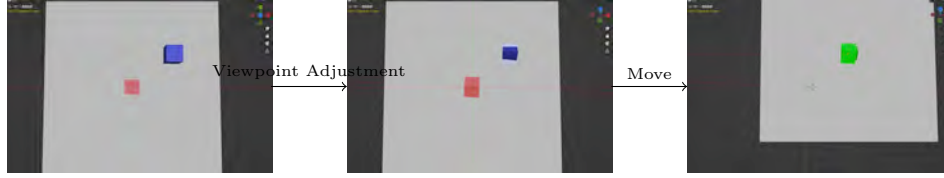
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 2 号館 11 階 113C2, TEL 03-5841-6781)

* <https://unity.com/ja>

** <https://www.unrealengine.com/ja>



(a) An example of object placement using traditional methods. Since the depth relationship with the target position is difficult to grasp, multiple placement operations may be required. In the second image, the red object has been moved behind the blue object, requiring further viewpoint adjustment and movement to correct the placement.



(b) An example of object placement using the proposed method. The gray plane is the viewpoint-linked auxiliary plane. Since it is possible to confirm that the destination is on the plane, placement can be completed in a single move. Although the plane is rotating in the global coordinate system, it is always drawn parallel to the screen.

Fig. 1: Examples of placing the red object at the position of the blue object using traditional and proposed methods

confirmed that objects could be placed more accurately and in less time compared to methods that allow full freedom.

Bi-3D³⁾ is a CG creation tool that uses a pen on a touch display. The pen controls movement in the XY plane (2 degrees of freedom), while movement along the Z-axis is controlled by finger gestures. In an experiment where a spherical object was moved diagonally and placed inside a cube, Bi-3D demonstrated faster placement times compared to traditional widget-based methods.

From these studies, it can be concluded that adding appropriate limitations to the degrees of freedom in specific environments can improve placement efficiency. For our experiment, we used the Bi-3D task setup as a reference.

2.2 Plane-Based Manipulation

This section introduces methods that limit the manipulation of CG objects from 3D to 2D.

Katzakis et al. proposed a method called Plane-Casting⁴⁾, where CG objects are manipulated using a smartphone. The movement of the object is restricted to a plane corresponding to the tilt of the smartphone. By utilizing gestures on the smartphone, objects can be moved along the plane's direction. Two types of methods, Pivot Plane-Casting (Ppc) and Free Plane-Casting (Fpc), were proposed. In Ppc, the plane is displayed at a specific position on the screen, while in Fpc, the plane is centered around the object. User experiments comparing the two methods showed that, while Ppc slightly outperformed Fpc in overall performance,

users preferred Fpc over Ppc.

Building on Plane-Casting, Katzakis et al. developed INSPECT⁵⁾, which expanded the manipulation techniques to include both movement and rotation. Since Fpc was preferred in Plane-Casting, INSPECT adopted Fpc-based techniques. INSPECT also introduced flick gestures for firing objects and pinch gestures for moving them along the plane's normal vector. It allowed switching between independent modes for movement and rotation by pressing the audio button on the smartphone. Compared with direct manipulation methods, such as virtual hand-based (Wand) techniques, INSPECT completed tasks 12 % faster.

These studies suggest that planes are effective when manipulating objects projected in 2D. Therefore, our study adopted Fpc for the plane-assisted manipulation method.

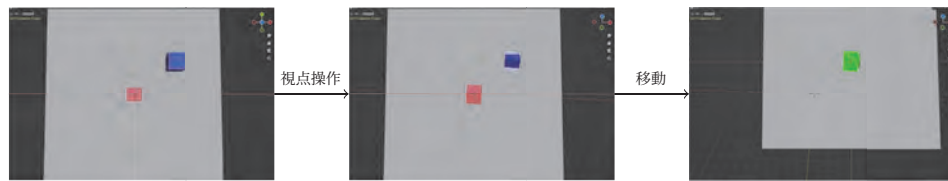
3. Proposed Method

The authors previously proposed a plane constraint method using a smartphone¹⁾. In this method, the plane's tilt is controlled in real-time using the smartphone's tilt, allowing the user to move the object with a mouse based on the plane's tilt. This method provided visual feedback on the movement direction, leading to slight improvements in operation speed. However, since both hands were used independently, the method was challenging to master, and it was difficult to achieve significant statistical improvements within the limited practice time.

In this paper, we propose a placement method that



(a) 従来手法の配置の例。移動先との奥行き関係が把握しにくいため、2 枚目では赤いオブジェクトが青いオブジェクトの奥に移動し、再度の視点操作と移動が必要となった。



(b) 提案手法の配置の例。灰色の平面が視点連動補助平面である。移動先が平面上にあることを確かめて移動できるため、1 回の移動で配置が完了する。平面はグローバル座標系では回転しているが、常に画面に平行に描画されている。

図 1: 従来手法と提案手法における赤いオブジェクトを青いオブジェクトの位置に配置する操作例

面方向に拘束される。スマートフォン上のジェスチャーによって、オブジェクトを拘束した方向に移動させることができる。Pivot Plane-Casting (Ppc) と Free Plane-Casting (Fpc) という 2 種類の操作手法を提案した。Ppc では平面がスクリーンの特定の位置に表示され、Fpc では平面がオブジェクトを中心に表示される。2 種類の操作手法をユーザー実験で比較した結果、全体的なパフォーマンスでは Ppc の方が僅かに良かった一方で、Ppc よりも Fpc を好むことを確認した。

Katzakis らは、Plane-Casting を発展させ、INSPECT⁵⁾を提案した。INSPECT では Plane-Casting の操作手法をもとに、移動・回転操作に対応した。Plane-Casting において、Fpc の方が好まれたことから、INSPECT では Fpc を元にした操作方法を取り入れた。直接操作技術であるパッチャルハンドタイプの操作手法 (Wand) と比較実験が行われた。移動タスクにおいて、INSPECT は Wand に比べて 12%速くタスクを完了した。

以上の研究から、2 次元に投影されたオブジェクトを扱うときには、平面が有効に働くと考えられる。また、本研究の平面補助では Fpc を用いることにした。

3. 提 案

筆者らは以前、スマートフォンを用いた平面拘束手法を提案した¹⁾。平面の傾きをスマートフォンの傾きを用いてリアルタイムに制御し、その傾きに応じてマウスでオブジェクトを動かすことができる。移動方向を視覚で提示できたことによって、操作速度の僅かな改善ができた。一方で、左右の手を独立に動かすため、操作の習得に時間がかかり、練習時間の間に十分に慣れることができたかどうか大きく左右され、統計的な有意差があるとは言えなかった。

そこで本稿では、平面の利点を活かしたまま片手で操作が完結する、視点連動補助平面による配置手法を提案する。

提案する配置手法のモードに入ると、選択中のオブジェクト位置に平面を表示する。この平面を視点連動補助平面と呼ぶ。このモード中において、ユーザは視点操作とオブジェクト移動の 2 つの操作を行う。マウスの中ボタンの操作を視点の操作に、マウスの移動をオブジェクトの移動に対応させる。このとき、平面の位置はオブジェクトの位置に連動し、平面の傾きは常に画面に対して平行となるよう視点操作に連動する。これにより、図 1(b) に示すように移動させたい方向を視覚的に把握しながら視点調整をでき、一度の移動操作でオブジェクトを配置できる。

3.1 実 装

今回、提案手法を Python により、Blender *** の拡張機能として実装した。特定のキー ('Q') を押すことで、視点連動補助平面が表示され、提案手法による操作が可能になる。

視点連動補助平面を以下のように設計した。現在の視点の位置を $A = (x_1, y_1, z_1)$ とする。視点の位置 A から視点の方向とズーム度合いによって決まる視野の中心点を $B = (x_2, y_2, z_2)$ とする。平面の 1 辺の長さを、画面中央にオブジェクトがあるときアプリケーションをフルスクリーンで表示すると画面全体に届く程度の長さである $0.45|AB|$ で定めた。平面の回転行列を視点の回転行列に連動させ、常に平面が正方形に見えるようにした。

オブジェクトの移動量 \vec{d} は以下のように定義した。平面の横方向のベクトルを \vec{x} 、縦方向のベクトルを \vec{y} とすると、マウスの移動量の差分を d_x, d_y として、

$$\vec{d} = \frac{|AB|}{1500} (d_x \vec{x} + d_y \vec{y})$$

と表せる。1500 は移動量の調整のためのパラメータである。マウスの移動とオブジェクトの移動ができる限り一致するように調整した。

*** <https://www.blender.org/>

allows single-handed operation while retaining the advantages of the plane. The proposed method uses a viewpoint-linked auxiliary plane to assist in object placement. When the user enters the placement mode, a plane appears at the selected object's position, which we call the "viewpoint-linked auxiliary plane." In this mode, the user can manipulate both the viewpoint and object movement. The middle mouse button is used to control the viewpoint, while mouse movement controls object movement. The plane's position is synchronized with the object's position, and its orientation is always parallel to the screen, following the user's viewpoint.

As shown in **Fig. 1(b)**, this allows the user to visually confirm the direction of movement while adjusting the viewpoint, enabling the object to be placed with a single movement operation. Since the plane does not move on the screen, we refer to this method as "plane assistance" rather than "plane constraint."

3.1 Implementation

In this study, we implemented the proposed method as a Python extension for Blender^{***}. By pressing a specific key ('Q'), the viewpoint-linked auxiliary plane is displayed, allowing users to operate using the proposed method.

The viewpoint-linked auxiliary plane was designed as follows. Let the current viewpoint position be $A = (x_1, y_1, z_1)$. The center point of the field of view, determined by the direction and zoom level from the viewpoint A , is denoted as $B = (x_2, y_2, z_2)$. The length of one side of the plane is set to $0.45|AB|$, which is large enough to cover the screen when the object is at the center of the screen and the application is displayed in full screen. The plane's rotation matrix is synchronized with the viewpoint's rotation matrix, ensuring that the plane always appears as a square.

The object's displacement vector \vec{d} is defined as follows. Let \vec{x} be the horizontal vector of the plane and \vec{y} the vertical vector. Let d_x and d_y represent the differences in the mouse movement. The object's displacement can be expressed as:

$$\vec{d} = \frac{|AB|}{1500}(d_x\vec{x} + d_y\vec{y})$$

Here, 1500 is a parameter to adjust the movement scale. This adjustment ensures that the mouse movement closely matches the object movement.

To enhance the visibility of the object's position relative to the plane, the plane is rendered as semi-

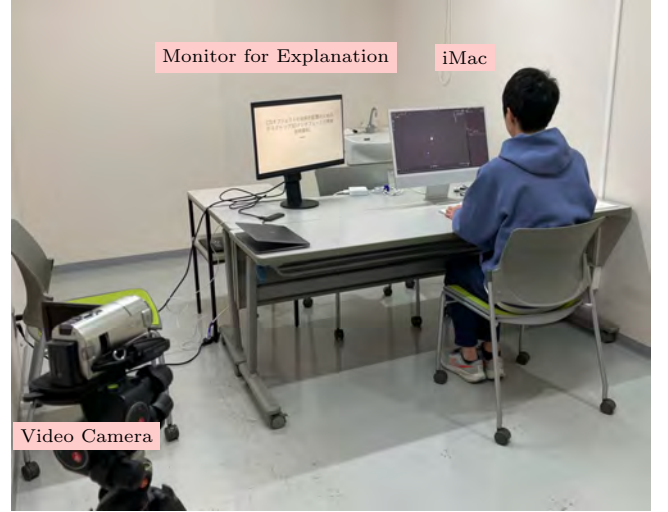


Fig. 2: Experiment Environment

transparent. The rendering process uses Blender's GPU module. Additionally, we implemented a continuous grab function to ensure the user does not face any restrictions related to the screen size during operation.

4. Experiment

We conducted an experiment with 22 participants (11 males and 11 females) aged between 18 and 30 years (mean age = 23.4, $SD = 3.3$). None of the participants had prior experience using Blender, although one participant used Unity daily as another CG application. The experiment environment is shown in **Fig. 2**. We used an iMac (24-inch, M1, 2021) with 16GB of memory as the PC, a Logicool M100r as the mouse, and Blender v4.0.x as the CG application.

The continuous grab feature was enabled in the preferences to prevent the mouse from leaving the drawing area during operation.

4.1 Experiment Details

Participants were tasked with aligning specified objects with target positions within a 2-minute time limit. During this period, participants repeatedly placed objects, and the number of placements was recorded. The screen used in Blender for the experiment is shown in **Fig. 3**. Cubes were used as objects, and participants could use visual cues such as shadows and the appearance of the objects to aid in placement. The red cube was the designated object, and the blue cube was the target position.

Initially, the designated object was displayed at the origin, and the target positions were displayed at eight randomly assigned locations: $(\pm 7, \pm 17, 13)$, $(\pm 17, \mp 7, 13)$, $(\pm 7, \pm 17, -13)$, $(\pm 17, \mp 7, -13)$ (sign

^{***} <https://www.blender.org/>



図 2: 実験環境

平面はオブジェクトの位置関係が見やすいように透過させた。描画処理は Blender の gpu モジュールを用いた。また、操作中に画面の大きさの制限を受けなくて済むように、連続グラフの機能を実装した。

4. 実験

18-30 歳 (平均 23.4 歳 ($SD = 3.3$)) の男女 22 人 (男性 11 名・女性 11 名) を対象に実験を行った。参加者の中に、Blender を普段から使っている人はいなかった。その他の CG アプリケーションとして Unity を毎日使っている人が 1 人いた。実験環境を図 2 に示す。PC としてメモリ 16GB の iMac(24 インチ, M1, 2021) を使用した。マウスとして、Logicool の M100r を使用した。また、CG アプリケーションとして、Blender v4.0.x を使用した。

プリファレンスで連続グラフの機能を有効化し、操作中にマウスが描画エリアからはみ出ないようにした。

4.1 実験内容

制限時間 2 分間の間に指定されたオブジェクトを目標位置に合わせるというタスクを行った。実験参加者は 2 分間オブジェクトの配置を繰り返し、その配置個数を計測した。実験で用いた Blender の画面を図 3 に示す。オブジェクトとして立方体を用いており、実験参加者は配置における重要な手がかりである立体の影や見え方による情報を得られた。赤い立方体を指定されたオブジェクトとし、青い立方体を目標位置とした。

初期状態では、指定されたオブジェクトは原点に表示し、目標位置を $(\pm 7, \pm 17, 13)$, $(\pm 17, \mp 7, 13)$, $(\pm 7, \pm 17, -13)$, $(\pm 17, \mp 7, -13)$ (複号同順) の 8 箇所からランダムな位置に表示した。以前の $(\pm 10, \pm 10, \pm 10)$ (複号任意) から目標位置を変更した理由としては、実験後のアンケートで以下のような記述があり、タスクに特化した操作での評価を防ぐためである。

置く場所が丁度 45 度ずれた場所に配置するため、

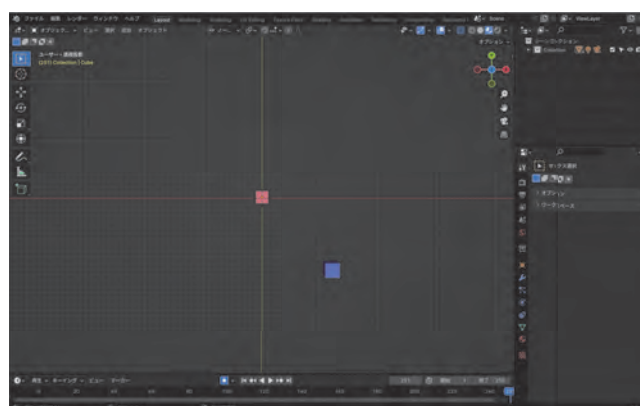
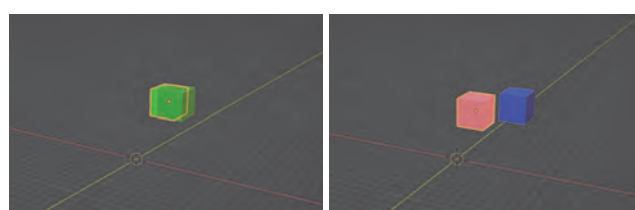


図 3: 実験に使用した Blender の画面。赤いオブジェクトを移動するオブジェクト、青いオブジェクトを目標位置として提示した。



(a) OK

(b) NG

図 4: 配置完了時の色の提示

従来手法においてタスクに特化した最適化ができてしまう

目標位置と指定されたオブジェクト位置の誤差が 2 秒間 x, y, z 軸でそれぞれ 1.0 以下であったとき、正しく配置できたとした。このとき、図 4 に示すように、オブジェクトの色を両方とも緑色に変化させることで、視覚的に正しく配置できたことを提示した。

目標位置に配置できた後、初期状態に戻り次の目標位置へ配置できるようにした。配置手法として、マウスのドラッグによる配置手法 (従来手法) と提案手法の 2 種類を比較した。従来手法には Blender のデフォルトの移動操作を利用した。オブジェクトをマウスの左クリックで選択した後、ドラッグにより、オブジェクトを移動させることができる。また、視点操作として、原点を中心とした視点の回転およびズーム操作をいずれの手法においても必要に応じて使用できた。これらの操作はマウスの中ボタンで行うことができた。

4.2 実験の流れ

参加者は 2 つの操作手法に取り組んだ。1 つ目の手法について、操作の説明を受けた後、10 分間の操作の練習時間が与えられた。その後、タスクに取り組む前に 1 分間で本番を想定した練習をした。練習が終了した後、2 分間のタスクに取り組み、アンケートに回答した。次にもう 1 つの手法についても、10 分間の練習ののち 1 分間の本番を想定した練習を行い、2 分間のタスクに取り組んだ。タスク

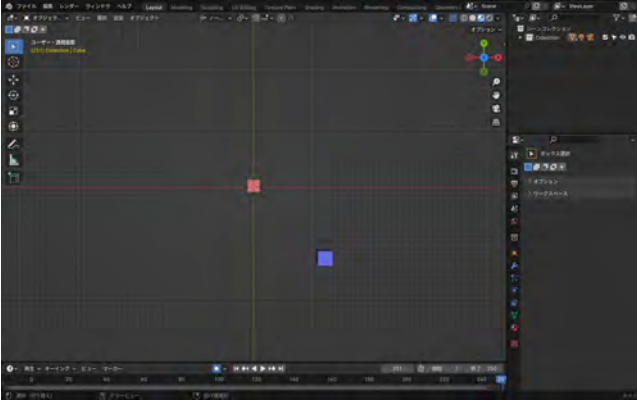


Fig. 3: Blender screen used in the experiment. The red object was the object to be moved, and the blue object indicated the target position.

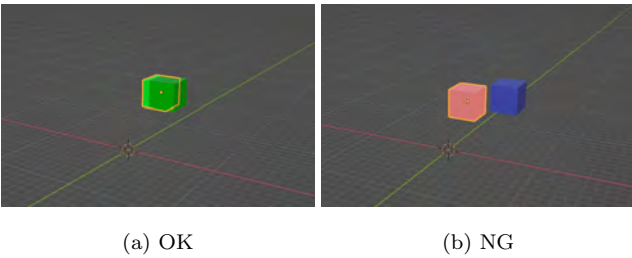


Fig. 4: Color display for completed placement

pairs correspond). The reason for changing the target position from the previous configuration of $(\pm 10, \pm 10, \pm 10)$ (any sign combination) was due to feedback in a post-experiment survey:

“The placement is optimized for tasks in traditional methods because the target location is exactly 45 degrees offset.”

If the error between the target and designated object positions was less than 1.0 on the x, y, and z axes for two seconds, the object was considered correctly placed. When this occurred, both objects’ colors were changed to green, as shown in **Fig. 4**, to visually confirm that the placement was correct.

After the object was placed at the target position, the scene was reset to the initial state, allowing for the next placement. Two placement methods were compared: a drag-and-drop method using the mouse (traditional method) and the proposed method. The traditional method used Blender’s default movement operation, where participants could select the object with the left mouse click and move it by dragging. Additionally, in both methods, participants could rotate or zoom the viewpoint centered on the origin as needed using the middle mouse button.

4.2 Experiment Flow

Participants completed tasks using two different operation methods. For the first method, participants received an explanation of the operation, followed by 10 minutes of practice time. They then engaged in one minute of task practice under real conditions before beginning the two-minute task. After completing the task, participants filled out a questionnaire. The second method followed the same structure: 10 minutes of practice, one minute of task practice, and a two-minute task. The entire experiment was recorded via video camera and screen capture. Lastly, participants answered a post-experiment questionnaire.

To avoid order effects, half of the participants performed the task using the two methods in reversed order.

4.3 Evaluation

The number of placements and placement time were compared as indicators of efficiency. Due to logging limitations, the start time for the first placement could not be recorded, so only the time from the second placement to the final placement was measured. Since participants had to wait two seconds after completing a placement, the placement time was calculated as follows:

$$(\text{placement time})_{n+1} - (\text{placement time})_n - 2 [\text{seconds}]$$

User experience was evaluated using the System Usability Scale (SUS)⁶⁾. The translation used was based on Sato et al.’s version, referenced from Yamauchi et al.⁷⁾. The NASA-TLX⁸⁾ was used to evaluate workload, based on Miyake et al.⁹⁾. The questions for SUS and NASA-TLX are shown in **app. Tables 1, 2**. Additionally, participants provided free-form feedback on the strengths and weaknesses of the placement methods. These questions were administered via a web survey.

4.4 Results

Due to unforeseen behavior within the application for two participants using the proposed method, the task was interrupted, and a new two-minute task was performed. The results for the number of placements, SUS, and NASA-TLX are shown in **Figs. 5–7**. For each distribution, normality was assumed (Shapiro-Wilk, $p > .05$), allowing for a paired t-test.

As shown in Fig. 5(a), the average number of placements was $8.3(SE = 0.56)$ for the traditional method and $11.7(SE = 0.79)$ for the proposed method. While the maximum number of placements was 13 for the traditional method, it reached 18 for the proposed method.

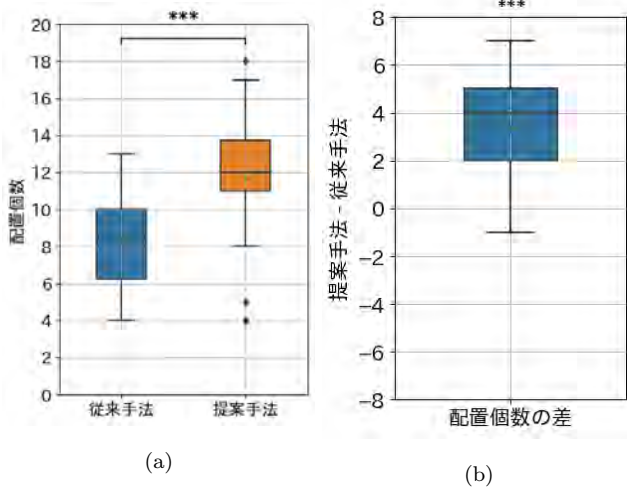


Fig. 5: Number of placements. *** indicates $p < 0.001$.

Of the 22 participants, 19 achieved more than eight placements with the proposed method, although three participants placed four or five objects. A participant-by-participant comparison is shown in Fig. 5(b). A t-test confirmed a significant difference between the number of placements ($t(21) = 6.7, p < 0.001$). Seventeen participants placed more objects using the proposed method, while four had the same number, and one placed more objects using the traditional method.

As shown in Fig. 6(a), the average SUS score was $62.2(SE = 3.7)$ for the traditional method and $63.4(SE = 2.2)$ for the proposed method. A participant-by-participant comparison is shown in Fig. 6(b). A t-test found no significant difference between the SUS scores ($t(21) = 0.33, p = 0.75$).

As shown in Fig. 7(a), the average NASA-TLX score was $51.2(SE = 3.8)$ for the traditional method and $47.3(SE = 2.9)$ for the proposed method. A participant-by-participant comparison is shown in Fig. 7(b). A t-test found no significant difference between the NASA-TLX scores ($t(21) = -1.1, p = 0.28$).

The average values for each item of the NASA-TLX are shown in Table 1. A graph showing the differences for each participant is presented in Fig. 8. For five items, excluding stress, more than half of the participants scored better using the proposed method compared to the conventional method. However, a t-test was conducted for each item, and no significant differences were found ($p = 0.09, 0.25, 0.83, 0.27, 0.64, 0.67$).

The distribution of median placement times for each participant is shown in Fig. 9. A regression analysis was conducted on the distribution. The regression line had a slope of 0.75, an intercept of -0.83 , and an $R^2 = 0.59$.

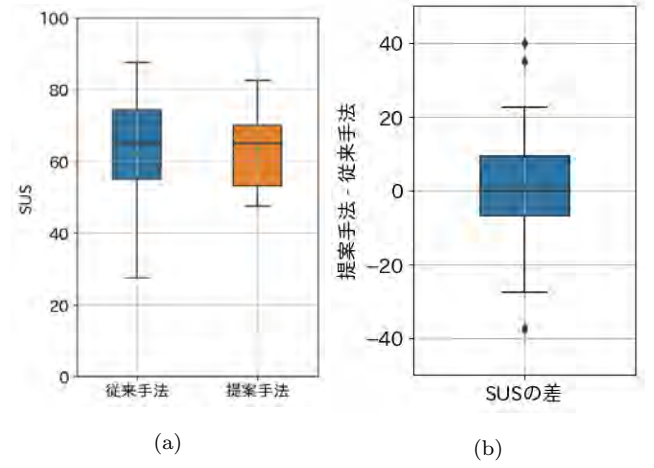


Fig. 6: SUS results.

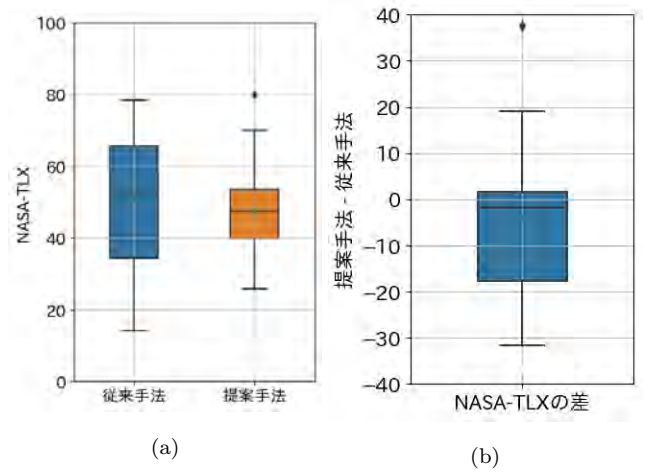


Fig. 7: NASA-TLX results.

4.5 Discussion

The significant increase in the number of placements using the proposed method is likely due to the assistance provided by the viewpoint-linked plane, which allowed participants to perform more precise viewpoint operations. In the traditional method, accurate placement often required multiple viewpoint adjustments, while in the proposed method, it could be done in one step, thus reducing placement time. However, as noted in the free-form responses, some participants struggled to master the operation. Among those who placed five or fewer objects using the proposed method, they tended to repeatedly move objects to positions where the red and blue cubes overlapped rather than utilizing the plane assist feature effectively. This indicates that, if participants cannot fully leverage the plane assist, the efficiency of the proposed method can be similar to that of the traditional method.

Although the proposed method showed better results for most items in both SUS and NASA-TLX (excluding

中はビデオカメラの撮影および画面収録を行った。最後に、実験全体に関するアンケートに回答した。

順序効果の影響を避けるため、半数の参加者で取り組む配置手法の順番を入れ替えた。

4.3 評価

配置の効率を比較する指標として、配置個数および配置時間を比較した。配置時間は、ログの関係上開始時刻を取得できず1回目の配置時間を取得できないため、2回目から最後に配置できた回数までの(配置できた回数) - 1回の時間を用いた。また、配置が完了した後、2秒間待機するため、以下の式で配置時間を取得した。

$$(n+1 \text{ 回目の配置時刻}) - (n \text{ 回目の配置時刻}) - 2[\text{秒}]$$

ユーザビリティの評価として、System Usability Scale(SUS)⁶⁾を利用した。佐藤らが使用した山内らの和訳⁷⁾を参考に和訳したものを用いた。ワークロードの評価としてNASA-TLX⁸⁾を利用した。三宅ら⁹⁾を参考に和訳したものを用いた。SUSとNASA-TLXの質問文を付・表1, 2に示す。また、配置手法の良かった点・悪かった点について、自由記述するようにした。以上の質問をWeb上で実施した。

4.4 実験結果

2人の参加者で、提案手法時にアプリ内の想定しない挙動が発生したため、タスクを1度中断し再度2分間のタスクを実施した。配置個数・SUS・NASA-TLXの結果を図5~7に示す。それぞれの分布において、(Shapiro-Wilk, $p > .05$)で正規性を仮定できたため、対応のあるt検定を行った。

図5(a)に示すように、配置個数の平均値は、従来手法で8.3($SE = 0.56$)[個]、提案手法で11.7($SE = 0.79$)[個]であった。従来手法では13個が最大であったのに対して、提案手法では18個が最大であった。提案手法において、22人中19人が8個以上の配置ができた一方で、4個と5個の人が合わせて3人いた。参加者ごとに差をとったグラフを図5(b)に示す。t検定を行い、配置できた個数間に有意差が確認できた($t(21) = 6.7, p < 0.001$)。17人で提案手法の方が多く配置でき、4人で同数、1人で従来手法の方が多く配置できた。

図6(a)に示すように、SUSの平均値は従来手法で62.2($SE = 3.7$)、提案手法で63.4($SE = 2.2$)であった。参加者ごとに差をとったグラフを図6(b)に示す。t検定を行ったが、SUSの平均値間に有意差があるとは言えなかった($t(21) = 0.33, p = 0.75$)。

図7(a)に示すように、NASA-TLXの平均値は従来手法で51.2($SE = 3.8$)、提案手法で47.3($SE = 2.9$)であった。参加者ごとに差をとったグラフを図7(b)に示す。t検定を行ったが、NASA-TLXの平均値間に有意差があるとは言えなかった($t(21) = -1.1, p = 0.28$)。NASA-TLXの各項目における平均値を表1に示す。それぞれの項目について、参加者ごとに差をとったグラフを図8に示す。ストレ

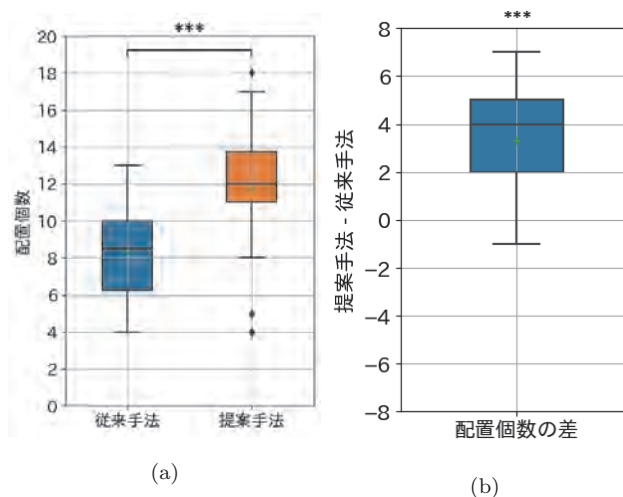


図 5: 配置個数. ***は $p < 0.001$ を示す。

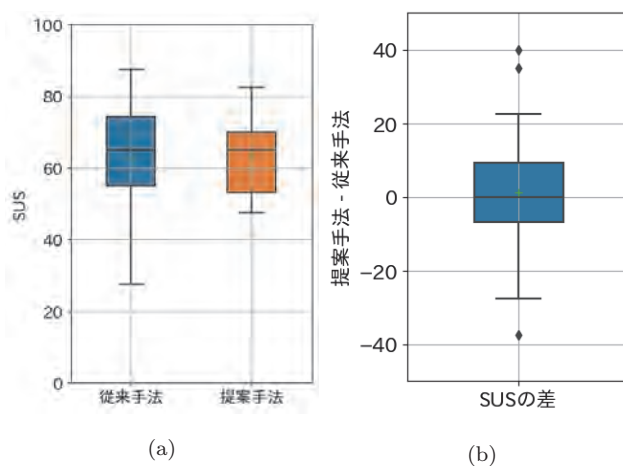


図 6: SUS

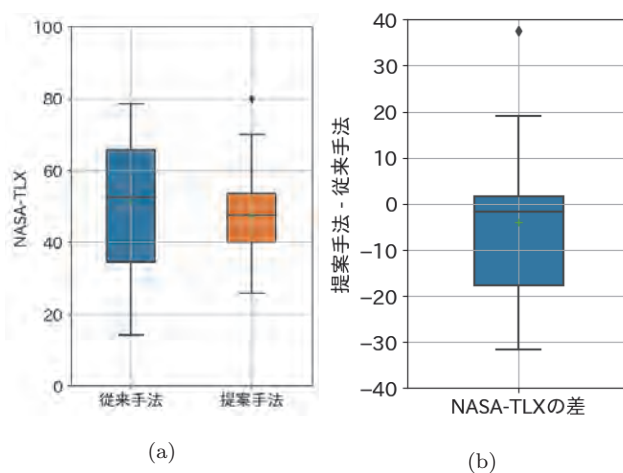


図 7: NASA-TLX

スを除いた5項目において、半数以上の参加者が従来手法より提案手法のスコアが良かった一方で、それぞれの項目についてt検定を行ったが、有意差があるとは言えなかった($p = 0.09, 0.25, 0.83, 0.27, 0.64, 0.67$)。

参加者ごとの配置時間の中央値の分布は図9のようになっ

Table 1: Average scores for NASA-TLX items

	Intellectual	Physical	Time Pressure	Task Performance	Effort	Stress
Traditional Method	60.5	48.0	46.4	57.5	56.1	38.6
Proposed Method	50.9	41.4	45.5	51.4	53.4	41.1

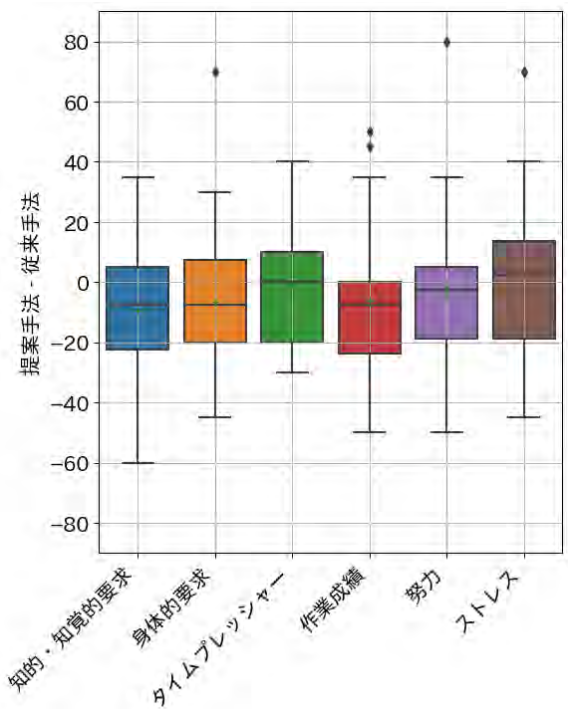


Fig. 8: Differences in NASA-TLX scores by item

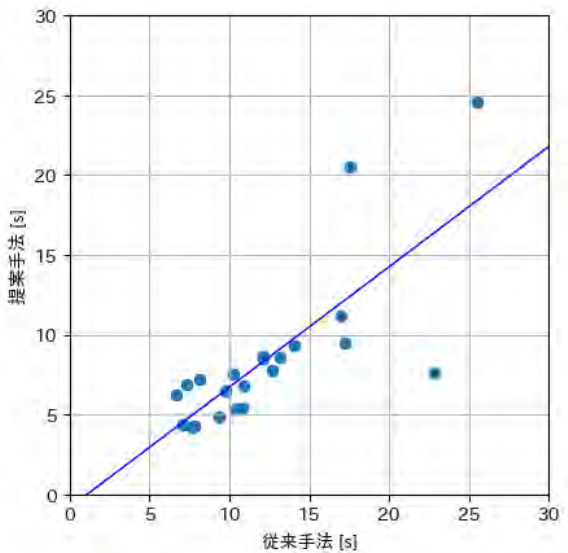


Fig. 9: Distribution of median placement times for each participant. The blue solid line represents the regression line with a slope of 0.75 and an intercept of -0.83 , $R^2 = 0.59$.

stress), the differences were not statistically significant. This might be due to the low physical and cognitive load of repeatedly dragging objects in the traditional method, even if each individual movement was imprecise.

cise.

Regarding the free-form feedback, some participants reported difficulty in determining whether the plane and object were correctly aligned. This issue could potentially be resolved by adjusting the angle of the plane or adding additional viewpoints. Familiarity with the operation was also cited as a factor, and it is expected that continuous use would allow users to better judge alignment. Another issue was the perceived latency in the proposed method, likely caused by the additional rendering processes combined with screen recording in Blender.

5. Conclusion

In this study, we proposed a placement method using a viewpoint-linked assistive plane to improve the efficiency of placing CG objects. The experiment confirmed that the proposed method improved placement efficiency compared to the traditional method while maintaining similar usability and workload.

For future work, we plan to address the fixed angle, color, and size of the plane, which may have impacted the visibility of object overlap. Adjustments to the plane's characteristics based on the object's position could further enhance the method's effectiveness.

Acknowledgments

This research was supported by the Nakayama Future Factory.

[References]

- 1) 島田, 韓, ハウタサーリ, 苗村: “CG オブジェクトの効率的配置のためのデスクトップ 3D インタフェースの開発”, 2023 年映像学年次大, 22C-4 (2023).
- 2) P. C. Gloumeau, W. Stuerzlinger and J. Han: “Pinnpivot: Object manipulation using pins in immersive virtual environments”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **27**, 4, pp. 2488–2494 (2021).
- 3) K. Pfeuffer, A. Dinc, J. Oberholte, R. Rivu, Y. Abdrabou, F. Shelter, Y. Abdelrahman and F. Alt: “Bi-3d: Bi-manual pen-and-touch interaction for 3d manipulation on tablets”, The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 149–161 (2021).
- 4) N. Katzakis, K. Kiyokawa and H. Takemura: “Plane-casting: 3D cursor control with a smartphone”, Proceedings of the 11th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction, pp. 199–200 (2013).
- 5) N. Katzakis, R. J. Teather, K. Kiyokawa and H. Takemura: “IN-SPECT: extending plane-casting for 6-DOF control”, Human-centric Computing and Information Sciences, **5**, 1, pp. 1–22 (2015).
- 6) J. Brooke: “Sus: a “quick and dirty” usability”, Usability evaluation.

表 1: NASA-TLX の各項目の平均値

	知的・知覚的要求	身体的要求	タイムプレッシャー	作業成績	努力	ストレス
従来手法	60.5	48.0	46.4	57.5	56.1	38.6
提案手法	50.9	41.4	45.5	51.4	53.4	41.1

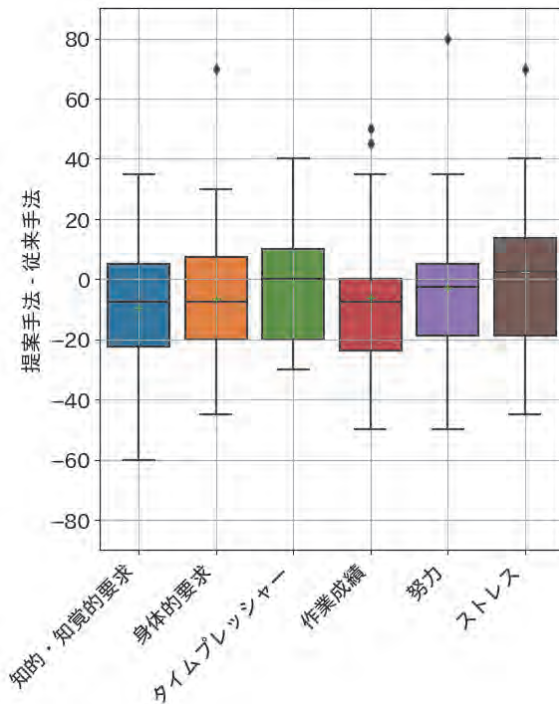


図 8: NASA-TLX の各項目における差

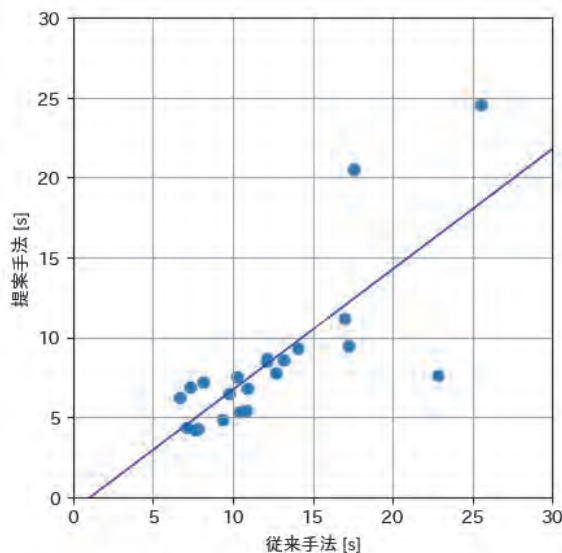


図 9: 参加者ごとの配置時間の中央値の分布. 青い実線で単回帰分析による回帰直線を示す. 回帰直線の傾きは 0.75 で, 切片は -0.83 , $R^2 = 0.59$ であった.

た. 配置時間の分布について, 回帰分析を行った. 回帰直線の傾きは 0.75 で, 切片は -0.83 , $R^2 = 0.59$ であった.

自由記述において以下のような意見が挙げられた. 初めに, 提案手法の良かった点について紹介する. 少ない操作回数で配置できたという意見やオブジェクトを平面に容易

に重ねられたという意見などが挙げられた. 次に, 提案手法の悪かった点について紹介する. 平面が重なっているかどうか分かりづらいという意見, 奥行きが分かりづらいという意見, 慣れるのにコツが必要であるという意見などが挙げられた. また, 提案手法において反応が遅く感じたという意見が挙げられた.

4.5 考 察

今回, 配置個数が大きく向上した理由としては, 視点連動補助平面によって視点操作を正確に行える補助ができたからだと考えられる. 従来手法では, 1 回の視点操作では正確に配置することが難しかったが, 提案手法ではそれが可能であったため配置時間を短くできた. その一方で, 自由記述で慣れるのにコツが必要であるという意見があったように, 参加者の中には操作に慣れることができない人もいた. 提案手法において, 配置個数が 5 個以下であった参加者では, 平面上にオブジェクトが合うように動かすのではなく, 立方体のオブジェクト同士が重なる位置に何度も移動させることを繰り返し行っていた. そのため, 提案手法の平面補助を上手く利用できない場合には従来手法と同程度の操作効率となってしまうという課題がある.

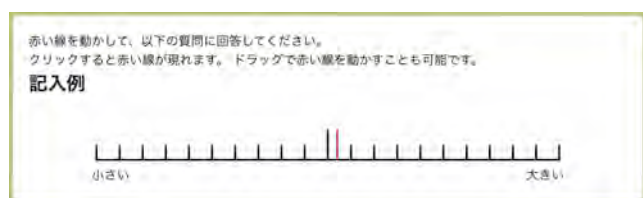
SUS や NASA-TLX において, ストレスを除いた項目において提案手法の方が良い結果となった一方で, 有意差があるとは言えなかった. 従来手法のマウスのドラッグによる操作では, 1 度で合わせることができなくても, 何回も行うことによる負荷が少ないためであると考えられる.

自由記述において挙げられた意見を取り上げる. 平面が重なっているかどうか分かりにくい問題は, 平面の角度の調整や別角度から見られる視点の追加などで改善できる可能性がある. また, 慣れの要素も大きいと考えられ, 使い続けることで平面と重なっているかどうかを判断できるようになると考えられる. 提案手法の反応が遅く感じたという問題は描画処理を追加で使用していることに加え, Blender を使いながら画面収録をしていた影響が原因として考えられる.

5. む す び

本研究では CG オブジェクト配置の効率化を目的に, 視点連動補助平面を使った配置手法を提案した. 実験の結果, ユーザビリティやワークロードを維持したまま, 従来手法と比べて配置効率を改善できた.

今回の提案手法においては, 平面の傾きや色や大きさは固定されていた. オブジェクトとの重なりがより見やすい平面の傾きや平面の色の調整やオブジェクトの位置に応じて平面の大きさを調整することは今後の課題とする.



app.Fig. 1: Screen used for NASA-TLX questionnaire responses

app.Table 1: System Usability Scale (SUS) Questions

質問項目	
1	このシステムを頻繁に使用したいと思う
2	このツールは必要以上に複雑だと感じた
3	このツールは使いやすいと感じた
4	このツールを使えるようになるためには専門家の助けが要るだろうと感じた
5	このツールはいろんな機能がうまくまとまっていると感じた
6	このツールにはちぐはぐな点が多すぎると感じた
7	このツールの使い方はたいいていの人がすぐに身につけるだろうと感じた
8	このツールはとても扱いづらいと感じた
9	このツールを使いこなせると確信している
10	このツールを使い始められるまでに学ぶことが多かった

app.Table 2: NASA-TLX Questions

質問項目	
知的・知覚的要求	どの程度の知的・知覚的活動（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか、単純でしたか、複雑でしたか、正確さが求められましたか大雑把でよかったですか
身体的要求	どの程度の身体的活動（押す、引く、回す、制御する、動き回るなど）を必要としましたか、作業はラクでしたかキツかったですか、ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが、休み休みでできましたか働きづめでしたか
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間の切迫感ほどの程度でしたか、ペースはゆっくりとして余裕のあるものでしたか、それとも早くて余裕のないものでしたか
作業成績	作業指示者（またはあなた自身）によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分が製作しようと思ったものができた度合いにどの程度満足していますか
努力	製作物を完成させたり製作を進めたりするために、精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたが
ストレス	作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか

ation in industry, **189**, 3, pp. 189–194 (1996).

- 7) 佐藤, 三富, 昆, 春名: “義肢装具領域における System Usability Scale (SUS) の信頼性の検討”, PO アカデミージャーナル, **30**, 1, pp. 32–37 (2022).
- 8) Human Performance Research Group NASA Ames Research Center: “Nasa tlx: Task load index”.
- 9) 三宅, 神代: “メンタルワークロードの主観的評価法”, 人間工学, **29**, 6, pp. 399–408 (1993).

〈Appendix〉

A. Questionnaire Used in the Experiment

The questions used in the System Usability Scale

(SUS) for the experiment are shown in app.Table 1, and the questions used in the NASA-TLX are listed in app.Table 2. The screen for the NASA-TLX questions is shown in **app.Fig. 1**. In the default display, no red lines are shown. The red lines appear based on where the participant clicks, and after making a selection, participants can also modify their responses by dragging the red line.



Yu Shimada Graduated from the Department of Electronic Information Engineering, School of Engineering, the University of Tokyo in 2022. Entered the Graduate School of Information Science and Technology at the University of Tokyo in the same year. Completed a master's degree in 2024 from the Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo.



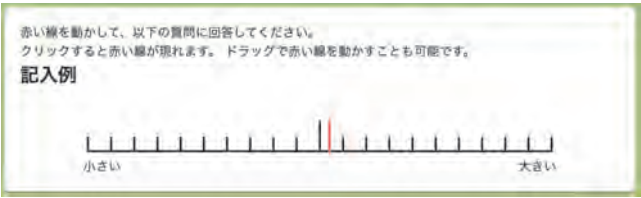
Changyo Han Completed a doctoral degree at the Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo in 2020. PhD (Information Science and Technology). After serving as a JSPS Research Fellow (PD), became an assistant professor at the Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, the University of Tokyo in 2021. Since 2020, has been a JST ACT-X researcher. Engaged in research on digital fabrication, user interfaces, and communication engineering.



Ari Hautasaari Completed a Master's degree in Information Processing at the University of Oulu. Completed a PhD at the Graduate School of Informatics, Kyoto University. Currently an associate professor at the Inclusive Engineering Research Collaboration Institute, the Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, the University of Tokyo. Engaged in research on HCI, CMC, CSCW, and emotional communication. PhD (Informatics).



Takeshi Naemura Completed a PhD in the Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo in 1997. Visiting Associate Professor at Stanford University (JSPS Overseas Research Fellow). After serving as an associate professor in the Department of Information and Communication Engineering, the Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo, became a professor in 2013 at the Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, the University of Tokyo. Engaged in research on stereoscopic imaging technology and media engineering. Vice President of this academic society in 2022. PhD (Engineering). Member.



付・図 1: NASA-TLX の回答に用いた画面

付・表 1: SUS の質問項目

	質問項目
1	このシステムを頻繁に使用したいと思う
2	このツールは必要以上に複雑だと感じた
3	このツールは使いやすいと感じた
4	このツールを使えるようになるためには専門家の助けが要るだろうと感じた
5	このツールはいろんな機能がうまくまとまっていると感じた
6	このツールにはちぐはぐな点が多すぎると感じた
7	このツールの使い方はたいいていの人がすぐに身につけるだろうと感じた
8	このツールはとても扱いづらいと感じた
9	このツールを使いこなせると確信している
10	このツールを使い始められるまでに学ぶことが多かった

謝 辞

本研究は中山未来ファクトリーの支援を受けて行われた。

〔文 献〕

1) 島田, 韓, ハウタサーリ, 苗村: “CG オブジェクトの効率的配置のためのデスクトップ 3D インタフェースの開発”, 2023 年映情学年次大, 22C-4 (2023).

2) P. C. Gloumeau, W. Stuerzlinger and J. Han: “Pinnpivot: Object manipulation using pins in immersive virtual environments”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **27**, 4, pp. 2488–2494 (2021).

3) K. Pfeuffer, A. Dinc, J. Obernolte, R. Rivu, Y. Abdrabou, F. Shelter, Y. Abdelrahman and F. Alt: “Bi-3d: Bi-manual pen-and-touch interaction for 3d manipulation on tablets”, The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 149–161 (2021).

4) N. Katzakis, K. Kiyokawa and H. Takemura: “Plane-casting: 3D cursor control with a smartphone”, Proceedings of the 11th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction, pp. 199–200 (2013).

5) N. Katzakis, R. J. Teather, K. Kiyokawa and H. Takemura: “IN-SPECT: extending plane-casting for 6-DOF control”, Human-centric Computing and Information Sciences, **5**, 1, pp. 1–22 (2015).

6) J. Brooke: “Sus: a “quick and dirty” usability”, Usability evaluation in industry, **189**, 3, pp. 189–194 (1996).

7) 佐藤, 三富, 昆, 春名: “義肢装具領域における System Usability Scale (SUS) の信頼性の検討”, PO アカデミージャーナル, **30**, 1, pp. 32–37 (2022).

8) Human Performance Resaerch Group NASA Ames Research Center: “Nasa tlx: Task load index”.

9) 三宅, 神代: “メンタルワークロードの主観的評価法”, 人間工学, **29**, 6, pp. 399–408 (1993).

〈付 録〉

A. 実験に利用したアンケート

実験で使用した System Usability Scale の質問項目を付・表 1 に, NASA-TLX の質問項目を付・表 2 に示す。NASA-TLX の質問を付・図 1 に示すような画面で質問した。デフォルトの表示状態では, 赤い線が表示されてい

付・表 2: NASA-TLX の質問項目

	質問項目
知的・知覚的要求	どの程度の知的・知覚的活動（考える, 決める, 計算する, 記憶する, 見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか, 単純でしたか, 複雑でしたか, 正確さが求められましたか大雑把でよかったですか
身体的要求	どの程度の身体的活動（押す, 引く, 回す, 制御する, 動き回るなど）を必要としましたか, 作業はラクでしたかキツかったですか, ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが, 休み休みできましたか働きづめでしたか
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感ほどの程度でしたか, ペースはゆっくりとして余裕のあるものでしたか, それとも早くて余裕のないものでしたか
作業成績	作業指示者（またはあなた自身）によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分が製作しようと思ったものができた度合いにどの程度満足していますか
努力	製作物を完成させたり製作を進めたりするために, 精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければならませんでしたか
ストレス	作業中に, 不安感, 落胆, いらいら, ストレス, 悩みをどの程度感じましたか。あるいは逆に, 安心感, 満足感, 充足感, 楽しさ, リラックスをどの程度感じましたか

い。回答はクリックされた位置に応じて赤い線を表示し, 一度回答した後もドラッグで修正ができるようにした。

しまだ ゆう
島田 優 2022 年東京大学工学部電子情報工学科卒業。同年, 同大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻に入学。2024 年, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。

ハン チャンギョ
韓 燦 2020 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士（情報理工学）。日本学術振興会特別研究員（PD）を経て, 2021 年より東京大学大学院情報学環・助教。2020 年より JST ACT-X 研究者。デジタルファブリケーション, ユーザインタフェース, 通信工学などの研究に従事。

Hautasaari Ari オウル大学情報処理学修士課程修了。京都大学大学院情報学研究科博士課程修了。東京大学大学院情報学環特任准教授（インクルーシブ工学連携研究機構）。HCI, CMC, CSCW, 感情コミュニケーションなどの研究に従事。博士（情報学）。

なえむら たけし
苗村 健 1997 年, 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了。米国スタンフォード大学客員助教授（日本学術振興会海外特別研究員）。東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻 准教授を経て, 2013 年, 東京大学大学院情報学環 教授。現在に至る。立体映像技術, メディア工学などの研究に従事。2022 年本学会副会長。博士（工学）。正会員。