

平成 29 年度修士論文

複数人で使用可能な 3D アイデアノートシステムの提案と実装

電気通信大学大学院 情報理工学研究科
情報学専攻 メディア情報学プログラム

田野 研究室

主任指導教員：田野 俊一

指導教員：橋山 智訓

学籍番号：1630012 / 猪膝 孝之

提出日：平成 30 年 1 月 29 日（月）

目次

1	はじめに	6
1.1	研究の概要	6
1.2	本論文の構成	6
2	研究背景と従来研究	7
2.1	研究の背景	7
2.2	従来研究	8
2.2.1	HMD を付けて複数人で使用することを想定したシステムを開発する研究	8
2.2.2	HMD を付けて広い空間で使用することを想定したシステムを開発する研究	9
2.2.3	HMD を使用して 3D 空間上に文字や図形を描くことに関する研究	10
2.3	従来研究の問題点	12
3	本研究のコンセプト	13
3.1	システムコンセプト	13
3.2	文字を表示するまでの問題点と解決案	14
3.3	3D 空間上のアイデア	15
3.3.1	描いて残すアイデア	15
3.3.2	話して残すアイデア	15
3.4	利用シーン	16
4	システム設計	18
4.1	全体構成	18
4.2	メモを入力	18
4.2.1	描いて残すメモ	18
4.2.2	話して残すメモ	21
4.3	メモを操作	24
4.3.1	近くにあるメモを操作	24
4.3.2	遠くにあるメモを操作	24
4.4	メモを共有	29
4.4.1	対面にいる相手にメモを共有	29
4.4.2	遠隔にいる相手にメモを共有	30
5	プロトタイプシステムの実装	31
5.1	プロトタイプシステムの構成	31
5.1.1	アプリケーション	31
5.1.2	サーバ	31
5.1.3	クラウドサービス	33
5.2	プロトタイプの実装	34
5.2.1	全体構成	35
5.2.2	3D 描画モード	35
5.2.3	付箋モード	36
5.2.4	Voice Line モード	39
5.2.5	首振りモード	40

6	プロトタイプの評価実験	41
6.1	実験の目的	41
6.2	実験の被験者	41
6.3	実験環境	41
6.4	実験方法	42
6.4.1	準備	42
6.4.2	シナリオ実験	43
6.4.3	課題解決実験	46
6.5	実験結果と考察	47
7	おわりに	58
7.1	本研究のまとめ	58
7.2	今後の課題	58

図目次

1	仮想空間への情報共有システム	8
2	ShareVR	8
3	実世界の場所に関連付けてアイデアを保存	9
4	機器を装着してるとときの様子	9
5	屋外環境で利用可能な複合現実感マルチプレイヤーゲーム	10
6	描いた情報	10
7	空気ペン	11
8	Multiplanes	11
9	3Dスケッチに関して分析を行う研究	12
10	システムコンセプト	13
11	描いて残すアイデアを分類	15
12	話して残すアイデアを分類	16
13	利用シナリオ: 家具の配置や部屋の模様替え	17
14	システムの全体構成	18
15	3Dの絵のメモ	19
16	3Dの文字のメモ	19
17	空間上にある2Dの文字のメモは仮想平面ごと回転	20
18	点の情報として空間上に残す	20
19	壁等に残したメモは自分や相手の目の前に表示	21
20	発声して3Dの図形を表示	21
21	仮想平面を用意してその平面上に話した内容を文字化	22
22	話しながら線を引いて線上に話した内容を文字化	22
23	動的に文字を回転させて表示させた場合	23
24	円ならば外側に向くように文字を表示	23
25	頭の上に表示	24
26	部屋全体を縮小	25
27	手元のバーを操作	25
28	目の前にリスト化して表示したものを選択	26
29	手元にオブジェクトを用意	26
30	操作のイメージ	26
31	手元のオブジェクトを操作	27
32	視線をメモに合わせる	27
33	「選択」と発声してメモを選択	28
34	手元にオブジェクトを用意	28
35	頭の動きと手元のオブジェクトの回転を利用して移動	28
36	同じ場所にメモがあるように見えるように共有	29
37	見せたいメモだけを共有	29
38	遠隔にいる相手にメモを共有	30
39	プロトタイプシステムの構成	31
40	アンカーを設置して座標の位置合わせを行い共有	32
41	Launch Sharing Serviceを選択	32
42	コンソールアプリを起動	33

43	IP アドレスを入力	33
44	日本語の音声をテキストに変換	34
45	APIKey を取得して入力	34
46	メニュー画面	35
47	システムの遷移図	35
48	3D 描画モード	36
49	吹き出しオブジェクト	37
50	付箋オブジェクトを表示	37
51	付箋オブジェクトを共有	38
52	正面から見た場合	38
53	ある程度横から見た場合	39
54	Voice Line モード	40
55	首振りモード	40
56	実験環境	41
57	実験中の様子	42
58	前方にある図形	43
59	シナリオ実験で掲示した資料：1 枚目	44
60	シナリオ実験で掲示した資料：2 枚目	44
61	シナリオ実験で掲示した資料：3 枚目	44
62	シナリオ実験で掲示した資料：4 枚目	44
63	シナリオ実験で掲示した資料：5 枚目	45
64	課題解決実験で掲示した資料	46
65	簡単な図形	49
66	複雑な図形	49
67	被験者が残した付箋の例	50
68	音声認識が失敗した付箋	50
69	他の被験者の声と混ざって残した付箋	51
70	落下した付箋	51
71	残したメモの例 1	52
72	残したメモの例 2	53
73	長い文章のメモ	53
74	文章が切れている例	54

表 目 次

1	実験で使用した機器	42
2	タスク 1 : 3D 描画モードを使用した入力、共有	45
3	タスク 2 : 付箋モードを使用した入力、操作、共有	45
4	タスク 3 : Voice Line モードを使用した入力、共有	46
5	タスク 4 : 首振りモードを使用して頭上の文字を確認	46
6	被験者 A～J のシナリオ実験の結果	48
7	アンケート集計結果	56

1 はじめに

本章では、1.1 節にて本研究の概要についてを、1.2 節にて本論文の構成について述べる。

1.1 研究の概要

近年では VR 関連のニュースや記事を目にすることが多くなった。また、HMD(Head Mounted Display)が普及しており、HMD に関する研究は医療分野やデザイナー向け、または日常向けと様々である。具体的には HMD を装着して 3D 空間上に文字や絵を描いたりする研究等がある。現在、HMD に関する研究は一人で使用することを想定していたり、特定の場所で使用することを想定していたり、手やペンで描くのみで入力手法が限定されているものが多い。

そこで、以上の問題点を踏まえた上で本研究は以下の三つを満たす HMD を使用したシステムを提案する。

- 複数人で同時に使用することが可能
- どこでも場所を選ばず利用が可能
- 簡単な操作で直感的で様々な入力が可能

以上のコンセプトに基づいたシステムを設計し、実際にプロトタイプシステムの実装を行った。また、評価実験ではシナリオ実験と課題解決実験の 2 つを行い、シナリオ実験での手順の遂行状況においてはほとんどの手順において成功率 100% を収めた。課題解決実験において多くの被験者がタスクを実行することが確認できた。実験後のアンケート結果では、プロトタイプシステムの機能によっては好みが大きく分かれるものもあったが、全体的な評価は高かった。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。本論文は全 7 章で構成される。

第 2 章では、本研究に至った研究背景と関連する従来研究について述べる。

第 3 章では、分析した課題点を踏まえて、新たなシステムのコンセプトの提案をする。

第 4 章では、第 3 章で提案したコンセプトを基にしたシステムの設計について述べる。

第 5 章では、プロトタイプシステムの実装について述べる。

第 6 章では、プロトタイプを用いた評価実験とその結果、及び考察について述べる。

第 7 章では、本研究の成果とまとめ、今後の課題について述べる。

2 研究背景と従来研究

本章では、研究の背景と従来研究について述べる。

2.1 研究の背景

アイデアはふとしたときに思い浮かぶことがあり、私達はそれを紙に書き留めたり、PC やスマートフォン等を利用してメモを取ることがある。しかし、アイデアが思い浮かぶのは座って作業しているときだけではなく、外で歩いているときや、机やホワイトボード等がないような場面でも突然思い浮かぶことがある。紙とペンを持ち歩いて思い浮かんだらすぐにメモを取る習慣ができる人はいいが、そうでない人はアイデアが思い浮かんでも「後でメモをすればいいや」と思ってすぐにメモを取ることを諦めてしまうだろう。実際に日頃からアイデアをメモに記録している人は少なくなってきた傾向がある[1]。思い浮かんだアイデアはできるだけ早くメモを取ったほうが良い。また、アイデアは一人で考えて生み出すものとは限らない。友人との話し合いをしているうちに一人では思いつかなかったアイデアが生まれたり、話が弾んで連鎖的にアイデアが生まれることもある。アイデアを効率的に生み出すための発想法がすでに何種類もあるが、これらの中には複数人で集まって話し合ってアイデアを出すものも多い[2]。

最近では VR 関連のニュースや記事を目にすることが多くなった。また、AR や MR 等といった言葉を聞くこともあり、どれが何なのか混乱しやすいという人もいる。VR とは「Virtual Reality」のことで、日本語では「人工現実感」等と訳される。VR ゴーグルを装着して、360 度すべての視界を覆うなどして高い没入感を得ることができる。近年の VR では、リモコンでの操作やタップ、クリック等を行うことで自分の行動を VR 映像内に反映させることもでき、より高度な没入感を得ることができる。また、AR とは「Augmented Reality」のことで、日本語では「拡張現実」等と訳される。AR を使用してできることは、現実にデジタル情報を付与して CG 等で作った仮想現実を現実世界に拡張することである。MR とは「Mixed Reality」のことで、日本語では「複合現実感」等と訳される。VR 環境と現実環境を融合する概念で、VR 環境と実環境が相互的に関連する世界を構成する考え方である。

近年、HMD(Head Mounted Display) が普及してきた。HMD とは頭部に装着するディスプレイ装置のことであり、ウェアラブルコンピュータの一つである。ディスプレイ方式は、装着すると外の様子を見ることはできず、完全に別の世界にいるかのようになる非透過方式や、装着すると外の様子を見ることはできないが、カメラを通じてディスプレイに外の様子が映し出されているので、利用者は安全に移動することができるビデオ透過(ビデオシースルー)方式、ディスプレイ装置はハーフミラーでできており、外の様子が見える光学透過(光学シースルー)方式がある。

HMD に関する研究はすでに多く行われている。医療技術に関する研究や、デザイナー向けの 3D スケッチに関する研究、他には 3D 空間上に文字や図形を描いたりする研究等もある。近年では MR も流行化しており、医療診断・手術計画や屋内外の誘導・案内・埋蔵物確認、都市計画・建築分野でのシミュレーション、アミューズメント産業等の応用分野から大きな期待がされている[3]。

現在、HMD に関する多くの研究は一人で使うことが想定されている。また、特定の場所において使用することを想定している場合も多い。そして、手やペンで描くのみで入力手法が限定されている場合も多い。現状では複数人で使用することを想定していたり、外などの広い空間で利用することを想定していたり、手で描くだけでなく音声でも入力可能なシステムを想定している研究やアプリケーションは少ない。そこで、複数人で使用できて、どこでも利用できて、様々な入力ができるシステムが必要だと考え、本研究の立案に至った。

2.2 従来研究

ここでは本研究に関連する従来研究について述べる。

2.2.1 HMD を付けて複数人で使用することを想定したシステムを開発する研究

長田ら [4] はスマートグラスを用いた仮想空間への手書き情報共有システムを開発した(図 1)。ジェスチャの認識を用いて指の追跡を行い、軌跡を描くことで手書き情報を実現した。空間への描画は物体の動きをカメラで捉え行う。これによって仮想空間において手書き情報を共有することができるようになった。

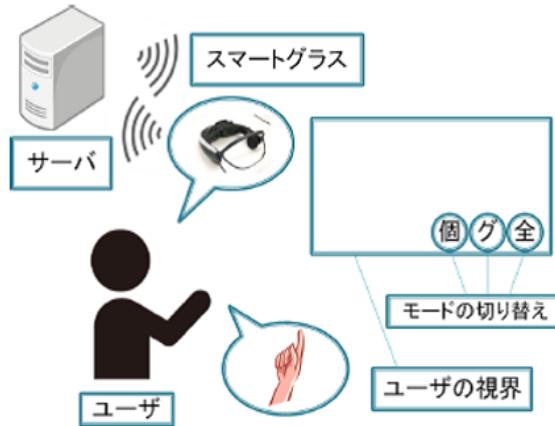


図 1: 仮想空間への情報共有システム

Gugenheimer ら [5] は HMD ユーザとのやり取りや VR 体験の一部となるように、非 HMD ユーザに仮想世界を視覚化するために、位置追跡と組み合わせてフロアプロジェクションとモバイルディスプレイを使用する ShareVR を作成した(図 2)。現行の VR システムは、HMD を着用しているユーザの没入感を高めることに主に焦点を当て、その結果、すべての非 HMD ユーザをその経験から除外している。そこでこの研究では非 HMD ユーザにも没入感を与えるようなシステムの開発を行った。

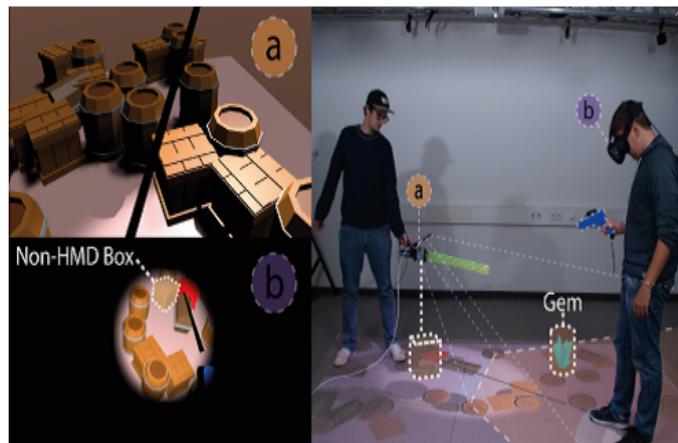


図 2: ShareVR

2.2.2 HMD を付けて広い空間で使用することを想定したシステムを開発する研究

高山ら [6],[7] は実世界のどのような時間・場所であっても、ユーザが思い浮かんだふとしたアイデアを、生起を誘発したコンテキストに対応付けて保存し、それを他のユーザと共有できるシステムを作成した(図 3, 4)。ユーザーは同じような状況の時にコンテキストに対応づけて保存したインフォーマル情報を見る事ができるようになった。多くのユーザーが思い浮かんだインフォーマル情報を保存することによって、実世界自体が巨大な掲示板のようになり、これによってユーザは状況に合った質の良い情報を得ることが可能になった。



図 3: 実世界の場所に関連付けてアイデアを保存



図 4: 機器を装着してるとときの様子

Bonfert ら [8] は屋外環境でスマートフォンと HMD を用いて再生可能な複合現実感マルチプレイヤーゲームの試作を行った(図 5)。プレイヤー間の相対的な位置は GPS を使用して追跡され、スマートフォンの背面カメラは仮想オブジェクトで環境とチームメイトを補強するために使用される。マルチプレイヤー、複合現実感、地理的位置と屋外行動の併用、手頃な価格のモバイル機器の組み合わせにより、斬新な戦略的ソーシャルゲーム体験が可能になった。

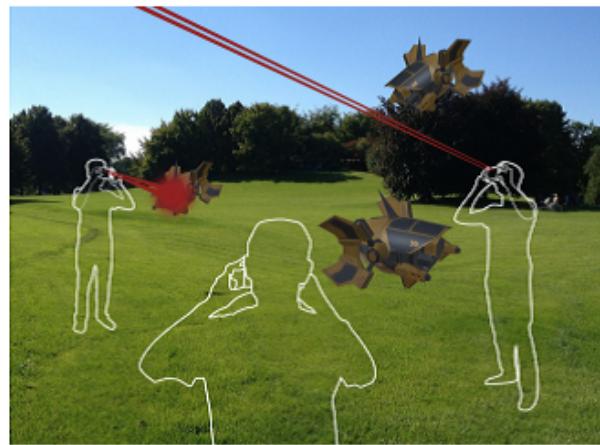


図 5: 屋外環境で利用可能な複合現実感マルチプレイヤーゲーム

2.2.3 HMD を使用して 3D 空間上に文字や図形を描くことに関する研究

椎尾ら [9],[10] は仮想の手書きメモによるコミュニケーションをウェアラブルコンピュータにより実現する空気ペンを試作した。空気ペンはユーザが任意の空間上に手書き情報を描画することができる機器である。HMD を利用することによって、空気ペンを使用して描いた手書き情報を見ることができる(図 6,7)。ペン本体には、ジャイロセンサ、加速度センサが内蔵されており、これらにより描いた情報の記録を行う。また、床上には RFID(Radio Frequency Identification) タグをつけることによって位置情報を取得している。



図 6: 描いた情報



図 7: 空気ペン

Machuca ら [11] はフリーハンド描画の柔軟性と完璧な形を描く能力をユーザに提供する VR 描画システム Multiplanes を作成した(図 8)。ユーザが描画を行っている間、システムは意図された形状に基づいてユーザのストロークは美化を行う。他のシステムとは違って、このシステムではユーザは手動で設定したり特別なジェスチャを必要としない。このシステムを用いることによってユーザのストロークは自動的に美化され、綺麗な図形を描くことを実現した。

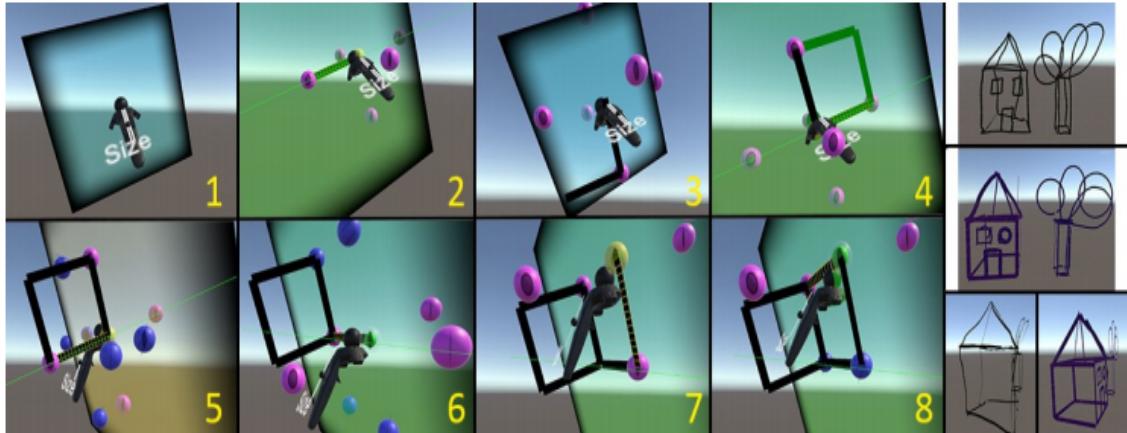


図 8: Multiplanes

Arora ら [12] は VR 環境で自由にスケッチできる人間の能力に影響を与える要因を分析をする研究を行った(図 9)。実験結果より、物理的な描画画面がないことが VR で描画することの不正確さの主な原因であることがわかった。また、付加的な視覚誘導を行うことは位置の精度を改善するが、綺麗にストロークを描くのに悪い影響を与えることもわかった。

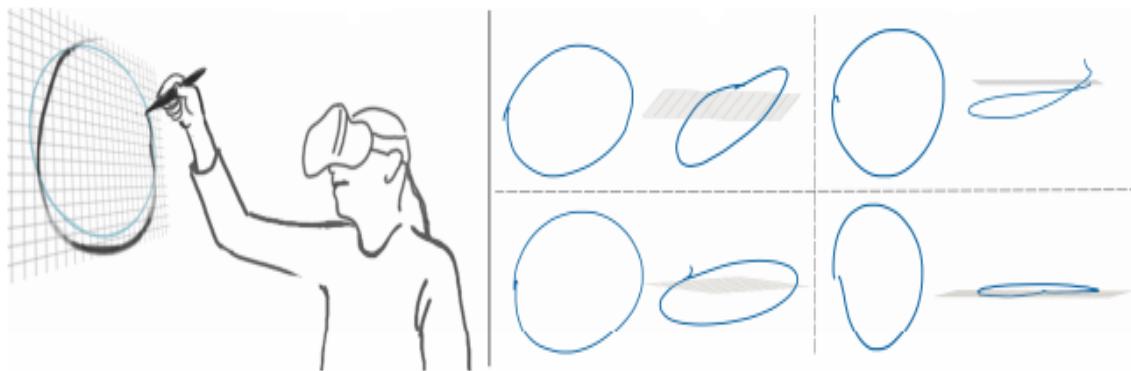


図 9: 3D スケッチに関して分析を行う研究

2.3 従来研究の問題点

従来研究の分析を行い、以下の三つの問題点にまとめる。

問題点 1 : HMD を付けて同時に複数人で使用することを想定していない

既存の研究の多くは一人で使用することを想定している。または、将来的には複数人で使用することを目標として開発を目指したが、現状では一人でしか使えない、同時に複数人では使うことができない等のシステムが多い。

問題点 2 : HMD を付けて使用するシステムで利用できる場所が限定されている

既存の研究の多くは特定の場所において使用することを想定している。または、持ち運びは一応可能であるが、多くの機器を装着しなければならない等のシステムで、実際に使用するのは厳しいというものが多い。

問題点 3 : HMD を付けて使用するシステムで入力手法が限定されている

既存の研究の多くは指のみの操作しかできない等で入力手法が限定されている。または、操作が複雑で慣れるのに時間がかかる等のシステムが多い。

3 本研究のコンセプト

本章では、前章で述べた問題点を踏まえた上でシステムコンセプトを述べる。また、3D空間上のアイデアについて分析した上で、利用シーンに関しても述べる。

3.1 システムコンセプト

2.3節でも述べた通り、従来研究ではHMDを付けて同時に複数人で使用することを想定していない、HMDを付けて使用するシステムで利用できる場所が限定されている、HMDを付けて使用するシステムで入力手法が限定されているという問題点があった。

そこで、2.3節の従来研究の問題点を踏まえ、本研究は以下の三つを満たすようなHMDを使用したシステムを提案する(図10)。

1. 複数人で同時に使用することが可能
2. どこでも場所を選ばず利用が可能
3. 簡単な操作で直感的で様々な入力が可能

それぞれについて以下に詳しく述べる。

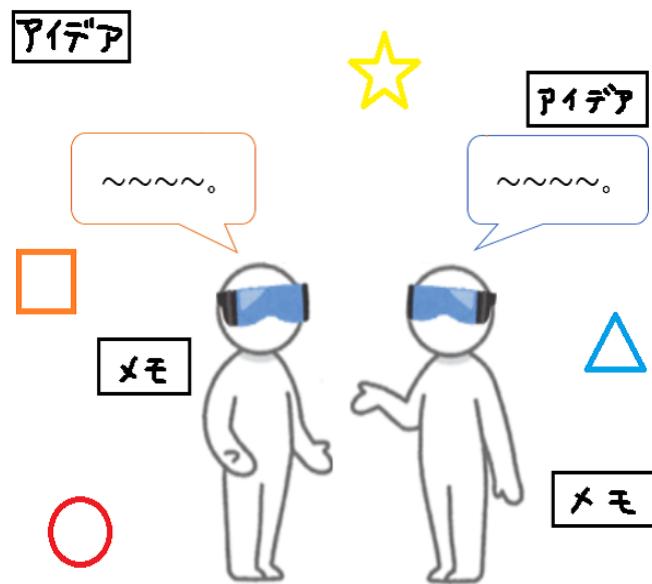


図10: システムコンセプト

特徴1：複数人で同時に使用することが可能

既存の研究では一人で使用することを想定したシステムが多かった。または、将来的には複数人で使用できるようにすることを目標にしてるが現状のシステムでは一人でしか使用できないというものも多かった。他には、複数人で使用することはできるが同時に使用することができないというものがあった。アイデアは一人で考えて生み出す場合もあるが、複数人で集まって話し合って一緒に考えることによってアイデアが生まれることもある。ある人がアイデアを出せば、そのアイデアに対して他の人が反応し

て新たな意見を出して、そこからまた新しいアイデアが生まれることもある。それが連鎖的に続くことによって結果的にアイデアをたくさん生み出すことに繋がる。アイデアを効率的に生み出す方法が既に何種類も存在するが、その中には実際に複数人で集まって話し合ってアイデアを出し合うというものも多い。したがって、複数人で同時に使用できて、お互いのメモをリアルタイムで共有できることが必要不可欠である。また、複数人で利用する際に空間上に文字を残す場合に問題点が発生する。その問題点については3.2節で詳しく述べる。

特徴2：どこでも場所を選ばず利用が可能

既存の研究では机やPCの近く、または特定の場所等のみでしか使用できないシステムが多かった。他には、どこでも利用可能ではあるが多くの機器を装着しなければならなかったり等、可搬性に問題があるシステムもあった。アイデアが生まれるのは椅子に座って机で作業しているときや、黒板やホワイトボード等の前に立っているとき等、何かノート等を使ってメモを取ることができる場所だけとは限らない。アイデアは思いがけない場所でふとしたときに突然思い浮かぶことがある。時には外で歩いているときや、軽い運動をしているときに思い浮かぶこともある。実際に動きながらメモを取るのは困難である。また、普段から常にメモ帳等を持っていてすぐにメモを取る習慣がついている人は良いが、そうでない人はメモを取ることを諦めてしまったり、後回しにしまいがちである。アイデアが思い浮かんだら、当然すぐにメモを取るほうが良い。したがって、どこでも場所を選ばずに利用できるようなシステムが必要である。

特徴3：簡単な操作で直感的で様々な入力が可能

既存の研究では空間上で描くのみ等で入力手法が限定されているシステムが多かった。または、特別なジェスチャを定義して使用する必要があったり、慣れるのにかなり時間がかかる等のシステムもあった。3.3節でも述べるがアイデアの形は文字や図形等、様々な形をとる。立体的な形を持ったアイデアもあれば、平面の形を持ったアイデアも存在する。仮に入力手法を空間上に描くのみにした場合、考えたアイデアが短い文章にまとまらないときメモを取ることが困難である。また、仮に入力手法を音声のみにした場合、シンプルな図形であれば表示できるかもしれないが、大きさを音声入力で指定しなければならなかったり、複雑な図形を描く際は困難である。したがって、簡単な操作で直感的で様々な入力ができるシステムが必要である。

3.2 文字を表示する上の問題点と解決案

複数人で空間上に文字のメモを残す際に、見る視点によって文字として見えないという問題点が発生する。解決案として、文字を動的に相手の方向に回転させて向けたり、文字のメモに触れたら自分の前に見えるように表示する等の方法が考えられる。しかし、文字を動的に相手の方向に回転させて向けてはいけない場合もある。それは、平面上に文字のメモを残した場合である。何故ならばその平面そのものに意味があるからである。このようなメモの表示に関する解決案は、その平面上に残した文字のメモに目線を合わせて、それ自体はそのままにしておき、その平面上に残した文字を目の前等の自分の見やすい位置に表示するという手法を提案する。

また、平面の形を持った文字以外に立体的な形を持つ文字が存在すると考えられる。立体的な文字に関してはそれ自体に意味を持つので回転したり等はしないほうがよいと考えられる。

3.3 3D 空間上のアイデア

アイデアの形は様々である。大きく分けると描いて残すアイデアと話して残すアイデアがあるが、それぞれのアイデアも様々な形がある。以下ではそれぞれのアイデアを細かく分けて分類した上でそれについて詳しく説明する。

3.3.1 描いて残すアイデア

描いて残すアイデアを細かく分けると図 11 のようになる。描いて残すアイデアは、最初に絵と文字に分けることができると考えられる。更に絵のアイデアは、立方体等のように空間上に線を引いて描く 3D のアイデアと、空間上に仮想的な平面を用意してそこに丸や四角形等のように平面上に線を引いて描く 2D のアイデアに分けることができると考えられる。また、文字のアイデアも同様に立体的な形を持つ 3D のアイデアと、平面上に描いて残す 2D のアイデアに分けることができると考えられる。この 2D の文字の文字に関しては実際に空間上に描いて残すには問題がある。この問題点に関しては 3.2 節で述べたが、具体的な解決案に関しては次章で述べる。

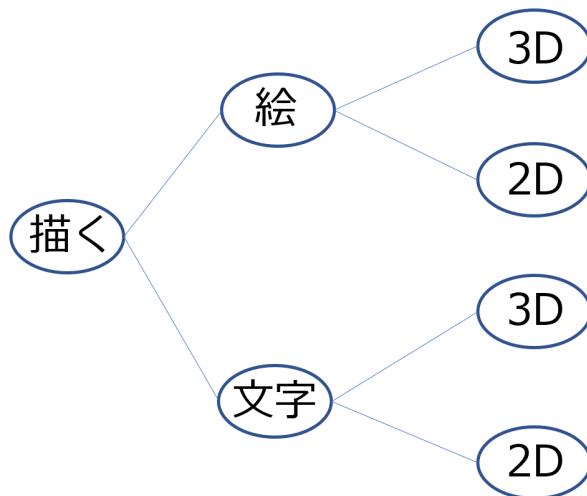


図 11: 描いて残すアイデアを分類

3.3.2 話して残すアイデア

話して残すアイデアを細かく分けると図 12 のようになる。話して残すアイデアは、最初に絵と文字と感嘆詞に分けることができると考えられる。更に絵のアイデアは、「立方体」と発声して立方体等を出現させて残す 3D のアイデアと、「四角形」と発声して平面の形をとった四角形等を出現させて残すアイデアがあると考えられる。また、文字のアイデアは視覚的に見ることができるテキスト形式のアイデアと、議事録のように話した内容をそのままを音声として残すバイナリ形式のアイデアに分けることができると考えられる。テキスト形式の文字のアイデアは実際に空間上に話して残すには問題がある。この問題点に関しては 3.2 節で述べたが、具体的な解決案に関しては次章で詳しく述べる。最後に感嘆詞についてであるが、人は考える際には「うーん」や「えーっと」等、思わず声に出してしまうことがある。また、声に出すことだけに限らず、頭を傾げたり、頷いたりすることもある。これらは一人で考える際には重要ではないが、複数人で話し合ってアイデアを出すときには相手がどう考えているかがある程度わかる可能性があると考えられる。

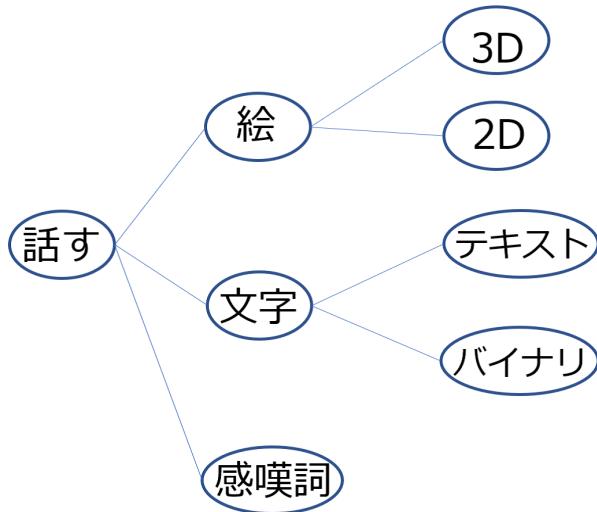


図 12: 話して残すアイデアを分類

3.4 利用シーン

本節では 3.1 で述べたコンセプトを基にした提案システムの利用シナリオについて述べる。

部屋や研究室等には多くの家具や機器が配置してあると思われる。仮に広い部屋で大まかに家具の配置がしたいという状況や部屋の模様替えがしたいという場合、既存のシステムでは特定の場所でしか使えなかったり、たくさんの機器を装着しなければならなかったり等、実際に使用するのは困難である。または広い部屋は一人だけで使用する可能性は低く、多くの人が使用する共用の場所だと考えられる。よって、家具の配置や部屋の模様替えをするには複数人で話し合って決めたほうがよい。既存のシステムでは一人でしか使用できない、または複数人で使用することを想定しているが同時には使用できないというものが多く、実際に複数人で話し合って部屋の配置決めをしたり模様替えをするのは難しい。

提案システムでは持ち運びが容易で広い空間のどのような場所であっても使用が可能である。例としては部屋のある場所に椅子やテーブルが配置したいという場合、大まかに線を描いて椅子やテーブルを配置することができる(図 13)。他には、部屋の高い位置に時計が配置したいという場合、手元で時計を描いて、その描いたものを操作して高い位置に移動させることによって配置することができる。また、その描画して配置した家具に対して気に入らなかったり、こうしたほうが良いと思う人が他にいたとき、それに対して新たに修正を加えたり削除することができる。描画したものに対して説明や補足をする場合、短い言葉であればそのまま手で描くことも可能であり、長い言葉で手で描くことが大変な場合は音声入力を使用して簡単にメモが残すことができる。

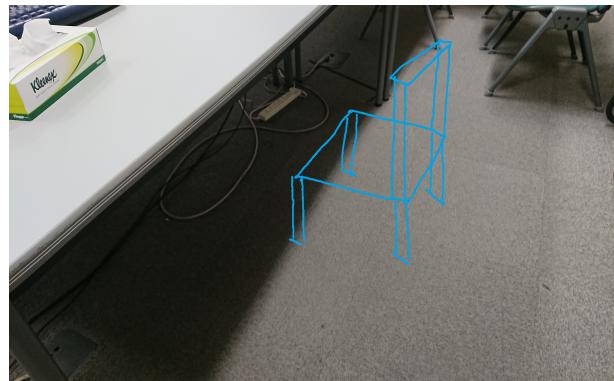


図 13: 利用シナリオ: 家具の配置や部屋の模様替え

4 システム設計

本章ではまず前章の3.1節で述べた(1)、(2)、(3)を踏まえた上でシステムの全体構成について述べる。その次にそれぞれの機能の設計に関して詳しく説明する。また、ハードウェアは可搬性を考慮して、マイクロソフト社のHoloLens[13]を使用する。

4.1 全体構成

(1)複数人で同時に話し合って使用できてお互いのメモを共有できるようにするために、サーバを介して空間を共有する機能が必要である。(2)どこでも場所を選ばずに利用できて、実世界の広い空間上に任意の場所にメモを置く際には、遠くにあるメモに対して操作する機能が必要である。また、(3)簡単な操作で直感的で様々な入力を可能にするには、3D空間上に描画する機能だけではなく、音声でも入力ができることが必要である。以上より、システムの機能としては大きく分けて、メモを入力、メモを操作、メモを共有の三つであり、以下に詳細を述べる(図14)。

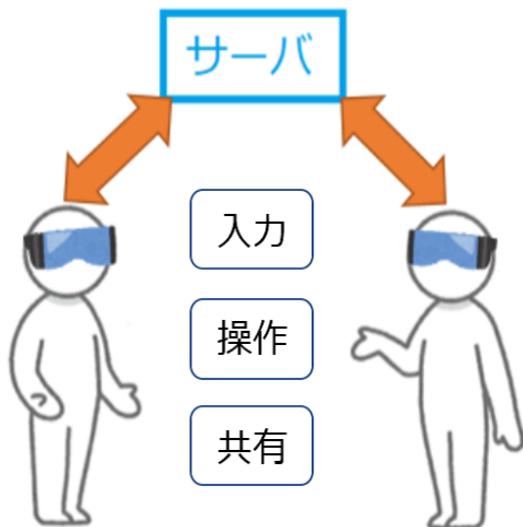


図14: システムの全体構成

4.2 メモを入力

4.2.1 描いて残すメモ

3.3.1より描いて残すアイデアは、最初に絵と文字に大きく分けることができることは述べた。まず、絵のメモをどうやって残すかについて詳しく説明する。3Dの絵に関しては、タップ&ホールドを使用して空間上に線を引いて描くようになる(図15)。ここで言うタップとは空間上で人差し指と親指を一度つまんで離す動作のことであり、スマートフォンで言えば画面を指で一度タッチする動作のことである。ホールドは人差し指と親指をつまんだ状態を維持することである。ホールドをしている間のみ空間上に線が出るようにして、立体制的な絵を描くことができるよう実現する。

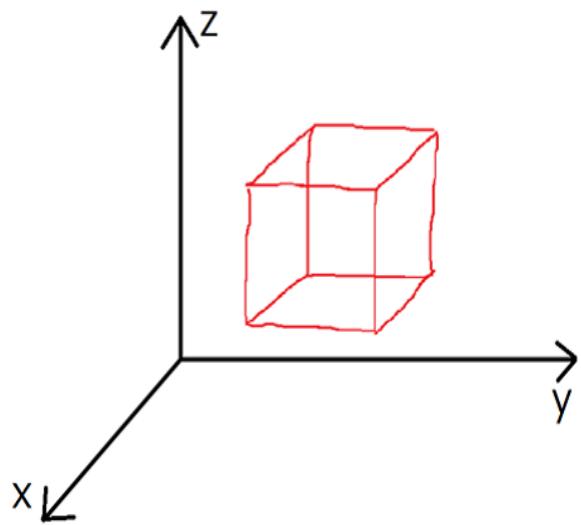


図 15: 3D の絵のメモ

2D の絵に関しては、空間上に仮想平面を用意してその平面上に丸や四角形の図形等を描くようとする。次に文字のメモをどうやって残すかについて説明をする。3D の文字に関しては、3D の絵と同様にタップ&ホールドを使用して空間上に線を引いて描くようとする(図 16)。

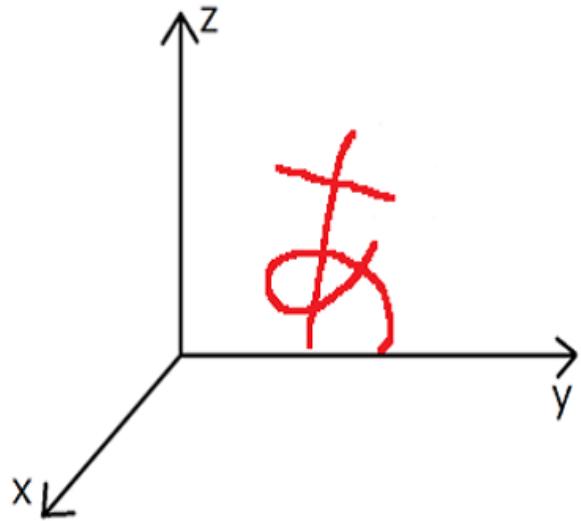


図 16: 3D の文字のメモ

2D の文字に関しては、3.3.1 で述べたように空間上に 2D の文字を残すと見る方向によっては文字が見えないという問題が発生する。この問題の解決策としては二つ提案する。一つ目は空間上に仮想平面を用意してその平面上に文字を書き、平面ごと相手の方向に向けるという方法を提案する(図 17)。

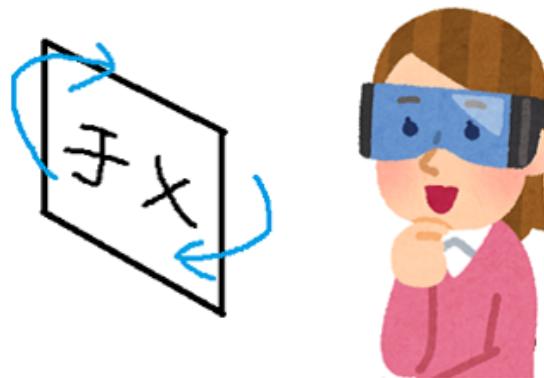


図 17: 空間上にある 2D の文字のメモは仮想平面ごと回転

二つ目は描いた内容を点の情報として残すという方法を提案する(図 18)。閲覧する際には点をタップすることによってメモの内容を目の前に表示する。

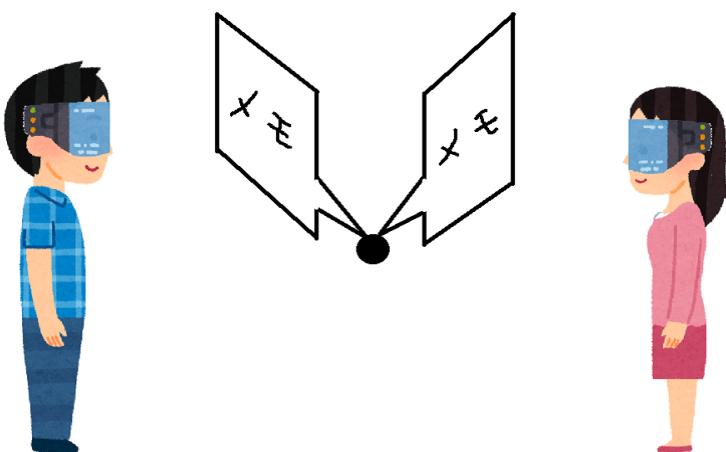


図 18: 点の情報として空間上に残す

また、壁上やテーブル上等の平面のところに 2D の文字を残した場合、どうやって表示するかという新たな問題が挙がる。先ほどの空間上に残したメモの場合なら仮想平面をそのまま回転させて相手に向ければよいが、壁等にメモを残した場合は、そのまま回転させてしまうと壁の中に文字が隠れてしまう等の問題が発生する。この問題の解決策としては、壁等に残したメモはそのままにしておき、メモの内容のみを見やすいように自分や相手の目の前に表示するという方法を提案する(図 19)。

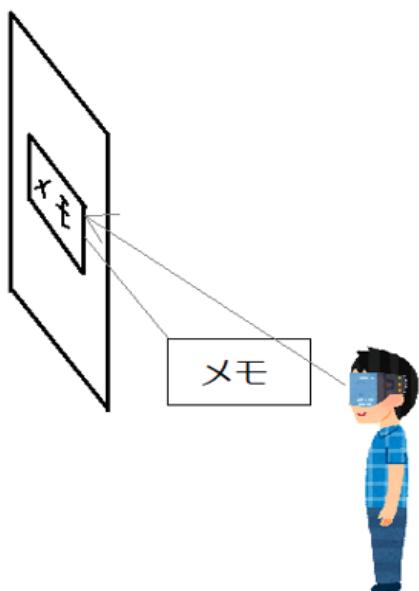


図 19: 壁等に残したメモは自己や相手の目の前に表示

4.2.2 話して残すメモ

3.3.2 より描いて残すアイデアは、最初に絵と文字と感嘆詞に大きく分けることは述べた。まず、絵のメモをどうやって残すかについて詳しく説明する。3D の絵に関しては、「立方体」等と発声することによって目の前に立体の图形を出現させる(図 20)。2D の絵に関しては、仮想平面を用意した上で「丸」や「四角形」等と発声することによって平面上に图形を出現させる。

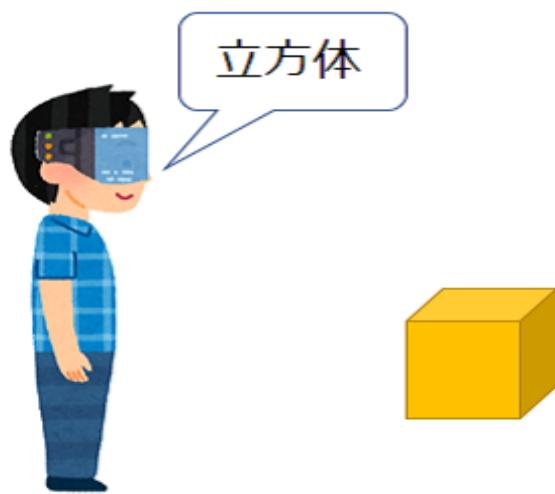


図 20: 発声して 3D の図形を表示

次に文字のメモをどうやって残すかについて説明をする。テキスト形式のメモに関してはここでは二つ提案する。一つ目は空間上に仮想平面を用意し、その平面上に話した内容を文字として表示する(図 21)。文字の向きの問題については、4.2.1 で述べた方法と同様の方法を使用して解決をする。

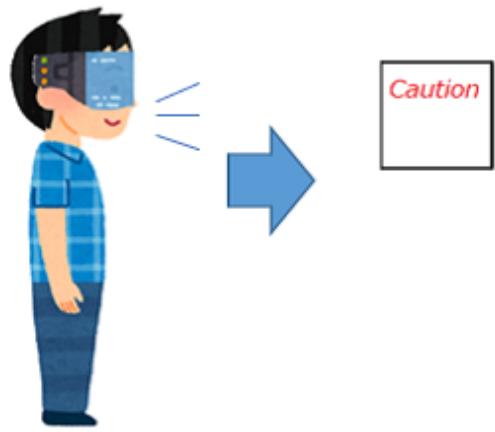


図 21: 仮想平面を用意してその平面上に話した内容を文字化

二つ目は話しながら空間上でタップ&ホールドをして線を引き、話した内容をその線上に文字として表示する(図 22)。



図 22: 話しながら線を引いて線上に話した内容を文字化

ここで円や曲がった部分に線を引いて線上に文字を残す場合、どうやって表示するかという問題が挙がる。文字を動的に自分または相手の方向にすべて向けてしまうと図 23 のようになり、かなり見づらくなってしまう。

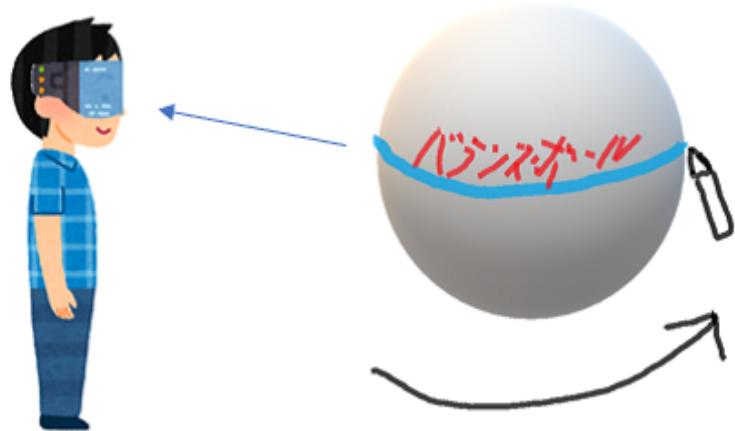


図 23: 動的に文字を回転させて表示させた場合

この問題の解決策として二つ提案する。一つ目はタップ&ホールドをして空間上に描くときに手をひねるようにして向きを変えて、それに合わせて文字の向きも変化させるという方法を提案する。二つ目は自分自身も動きながらタップ&ホールドをして目の前に描き、そのときの自分の方向に固定して文字を向けるという方法を提案する。例としては、円ならば外側を向くように文字を表示させるようとする(図 24)。

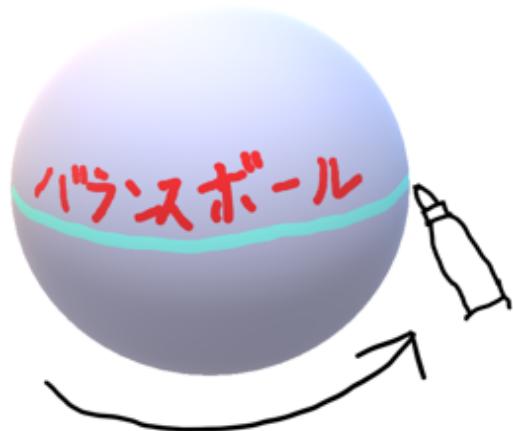


図 24: 円ならば外側に向くように文字を表示

最後の感嘆詞について説明をする。「おお！」等と発声したときや頷く動作をした場合、その人の頭の上に「！」等を表示する方法を提案する(図 25)。同様に「え？」や「うーん」等と発声したときや首をゆっくりかしげる動作をした場合、「？」等を頭の上に表示する。また、一定時間発声していない場合は頭の上に「無言」や「…。」等を表示をする。



図 25: 頭の上に表示

4.3 メモを操作

空間上に残したメモをどうやって操作するかについて、以下に近くにあるメモと遠くにあるメモに関してそれぞれ詳しく説明をする。

4.3.1 近くにあるメモを操作

操作に関しては大きく分けると選択、移動、削除に分けることができると考えられる。まず、メモの選択については視線を目の前にあるメモに合わせた状態で、タップをする。そして、タップ&ホールドを使用して、メモを掴んで自由に移動させる。削除に関しては、メモを選択した状態で新たに目の前に削除ボタンを用意してそれをタップするか、「削除」と発声してメモを削除する。

4.3.2 遠くにあるメモを操作

広い空間上でメモを操作するとき、遠くにあるメモをどうやって操作するかという問題が挙がる。ここでは以下の三つのインタラクションを提案し、それについて詳しく説明する。

- (1) ルームスケールチェンジ
- (2) 3D ラバーバンド
- (3) 3D フィッシング

まず、(1)のルームスケールチェンジについて説明する。広い空間上で遠くにあるメモを操作したいとき、部屋全体の形状のデータと部屋内にあるメモのデータを得る。そして、図 26 のように部屋全体の形状の大きさと部屋内のメモの大きさを縮小する。縮小については図 27 のように手元にバーを用意し、バーを操作することによって大きさを変化させる。最後に、縮小したメモを手元で操作する。このようにして、遠くにあるメモを手元で操作することによって実現する。

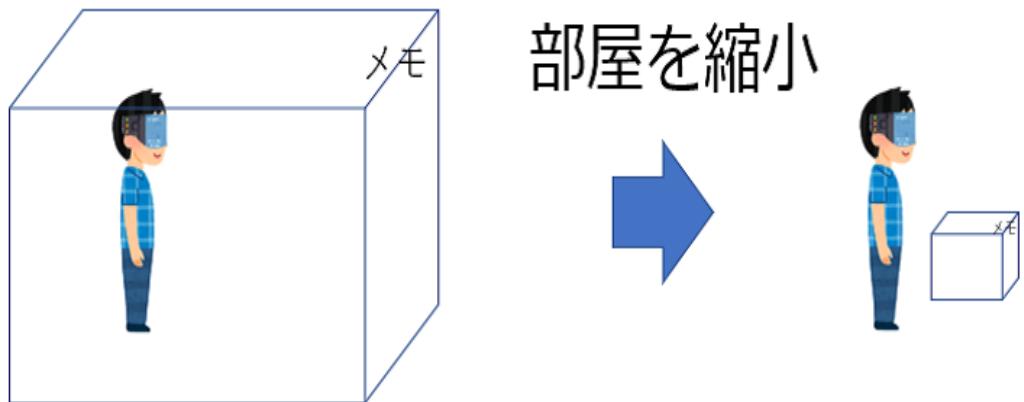


図 26: 部屋全体を縮小

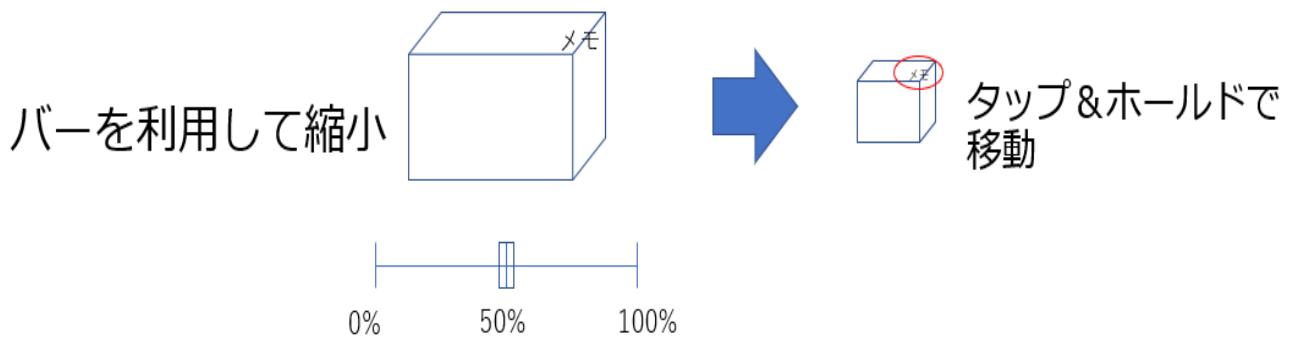


図 27: 手元のバーを操作

次に(2)の3Dラバーバンドについて説明する。メモを選択する際は、図28のように空間上に残したメモの一覧を目の前にリスト化して表示して選択を行う。空間上にあるメモとリスト内にあるメモは連動している。メモを移動する際には、目の前の移動ボタンをタップした後、図29のように手元に用意したオブジェクトを操作する。手元のオブジェクトの操作はイメージとしては輪ゴムを引っ張る感覚で引っ張り、引っ張った方向に空間上のメモも連動して移動する(図30,31)。オブジェクトが中心から離れれば離れるほど移動速度が増し、オブジェクトを離すと中心に戻り、メモも停止する。削除に関してはメモを選択して削除ボタンをタップする。

目の前にリスト化して表示

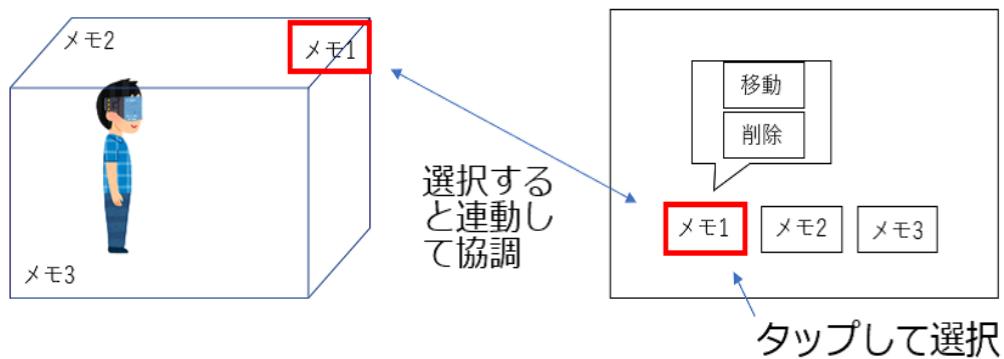


図 28: 目の前にリスト化して表示したものを選択

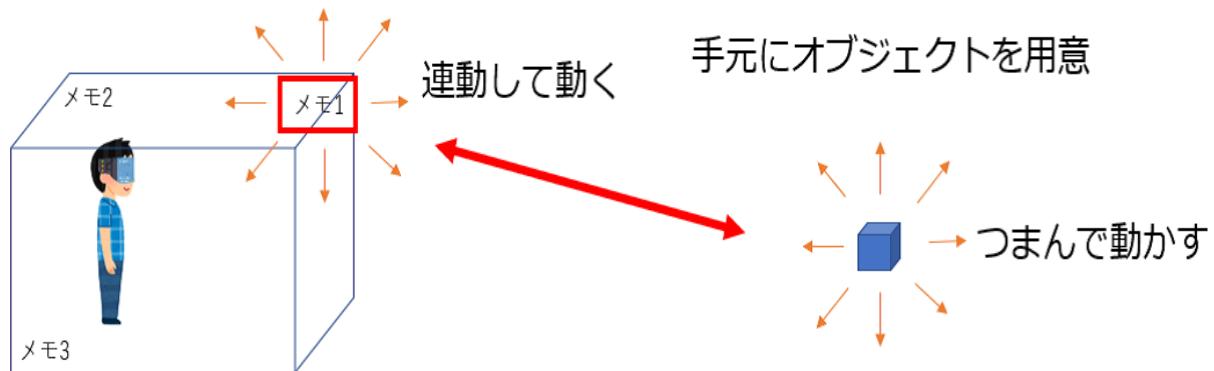


図 29: 手元にオブジェクトを用意

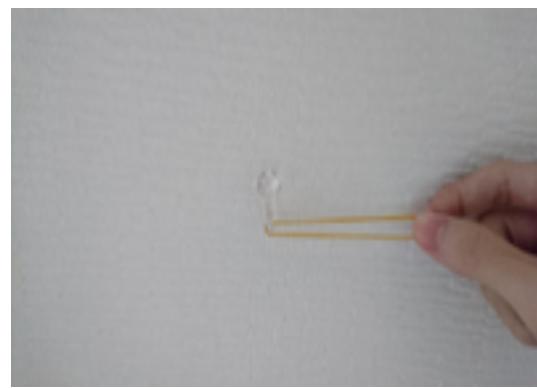


図 30: 操作のイメージ



図 31: 手元のオブジェクトを操作

最後に(3)の3D フィッシングについて説明する。最初に空間上に残したメモに視線を合わせて(図32)、「選択」と発声してメモを選択する(図33)。メモの移動については、手元にオブジェクトを用意して(図34)、頭の動きと手元のオブジェクトの回転を利用して移動させる(図35)。

視線を合わせる

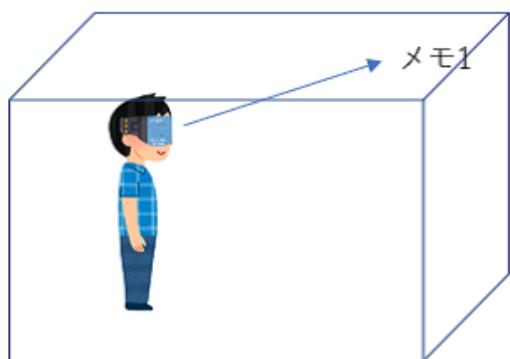


図 32: 視線をメモに合わせる

音声認識を利用して選択

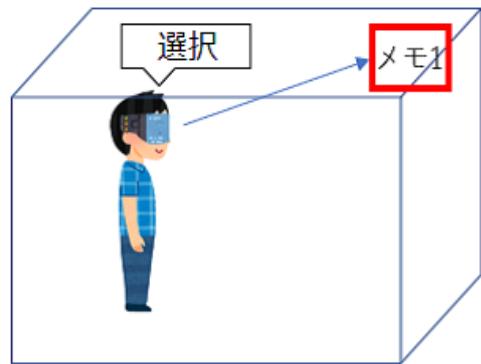


図 33: 「選択」と発声してメモを選択

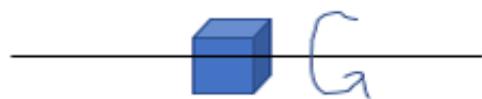


図 34: 手元にオブジェクトを用意

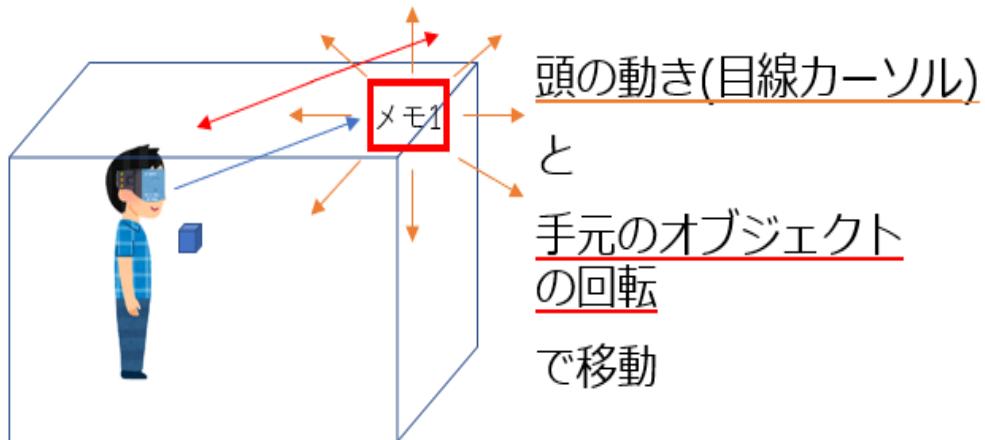


図 35: 頭の動きと手元のオブジェクトの回転を利用して移動

4.4 メモを共有

複数人で使用するにはメモを共有できなければならぬ。以下には対面にいる相手と遠隔にいる相手に共有する方法をそれぞれ説明する。

4.4.1 対面にいる相手にメモを共有

ここでは対面にいる相手にメモを共有する方法について説明する。リアルタイムで空間上に残したメモを共有したい場合、相手側から見ても同じ場所にメモがあるように見えるように座標をサーバに送信して共有を行う(図36)。

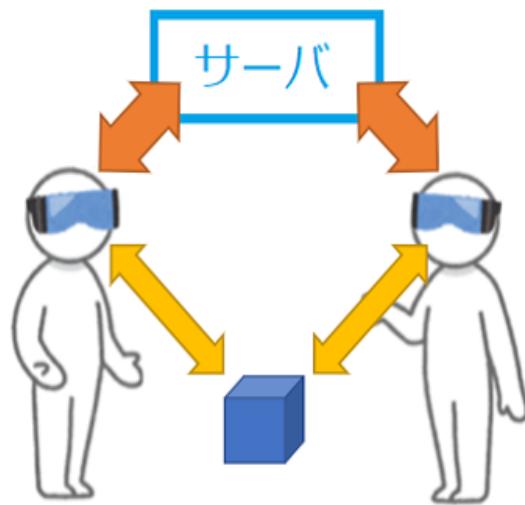
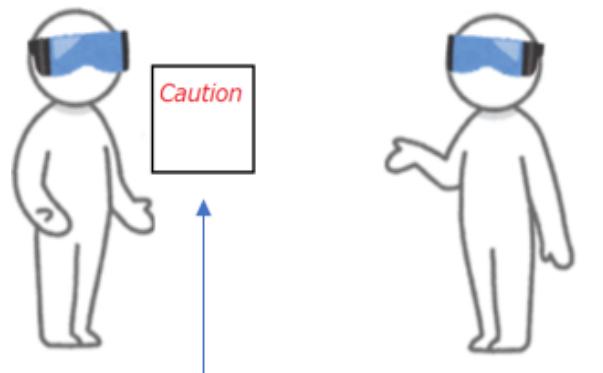


図36: 同じ場所にメモがあるように見えるように共有

また、自分が持っているメモの中で見せてよいメモと見せたくないメモがあることを考慮して、メモはタップするまでは相手には見えないようにする(図37)。



タップするまでは自分しか
見えない

図37: 見せたいメモだけを共有

4.4.2 遠隔にいる相手にメモを共有

ここでは遠隔にいる相手にメモを共有する方法について説明する。リアルタイムでこの場所に残したメモを遠隔にいる相手にも共有したい場合があるとする。リアルタイムでメモの共有を行っている際に、遠隔にいる相手が描いたメモが突然空間に現れるという問題が発生する。そこで、遠隔にいる相手はアバターを表示するという方法を提案する(図38)。

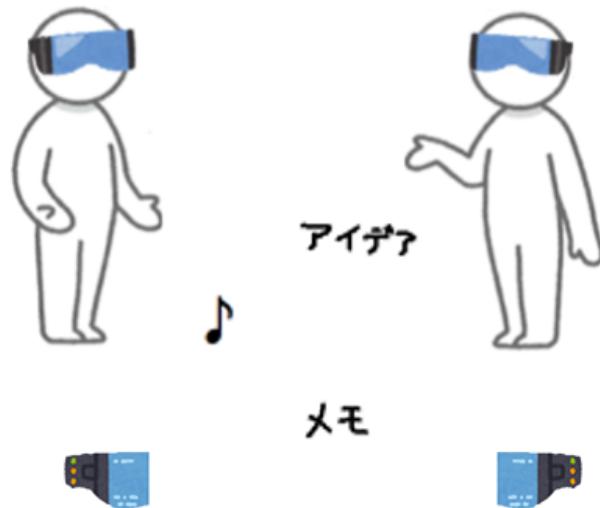


図38: 遠隔にいる相手にメモを共有

5 プロトタイプシステムの実装

本章では、設計したシステムを基に行ったプロトタイプシステムの実装について述べる。

5.1 プロトタイプシステムの構成

設計されたシステムは、ユーザがシステムの各機能を利用するため使うアプリケーションと、HoloLens 同士で相互接続するためのサーバ、ユーザが喋った内容をテキストに変換するクラウドサービスが存在する。図 39 にプロトタイプシステムの全体図を示す。以下でそれについて述べる。

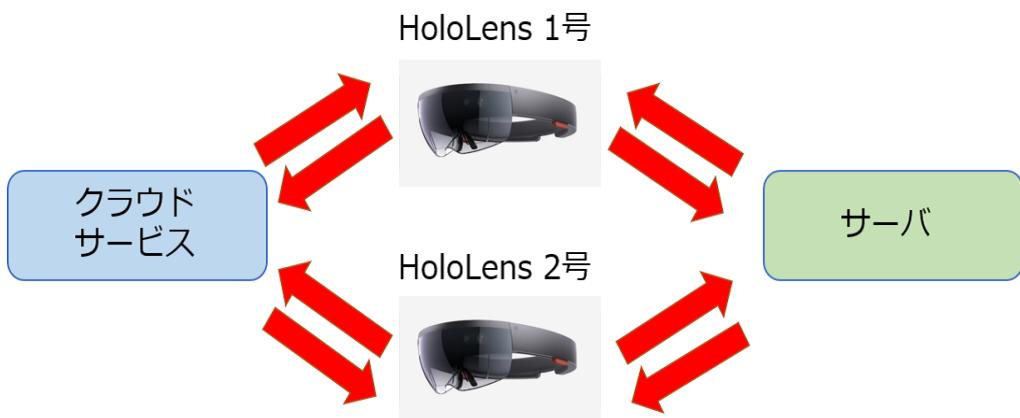


図 39: プロトタイプシステムの構成

5.1.1 アプリケーション

Windows 10 や Windows 10 Mobile 上で動作する UWP (Universal Windows Platform) アプリとして作成すると、HoloLens 上でもそのアプリケーションが動作する。アプリケーションの開発には、マイクロソフト社が配布している統合開発環境である Visual Studio 2017[14](Ver 15.0) と、ユニティ・テクノロジーズ社が配布している統合開発環境を内蔵した複数のプラットホームに対応するゲームエンジンである Unity[15](Ver 5.6.2f1) を使用した。また、Unity 用の HoloLens 向けのツールキットである HoloToolkit-Unity[16] の導入を行った。開発言語には、Windows 向けのアプリケーションの開発に主に使われる C# を採用した。

5.1.2 サーバ

実世界の任意の空間上に残したメモを他の HoloLens を使用している人に共有するには、HoloToolkit の Sharing[17] という機能を利用し、Sharing 用のサーバを介して空間の共有を行った。HoloLens の座標系は特殊であり、このまま共有をしても現実の空間の同じ位置で物体を共有することはできないという問題が発生する。この問題を解決するためにはアンカーの共有を行った(図 40)。アンカーとは船の錨の意味で空間内の絶対的な位置に居座ることができるオブジェクトのことである。これを設置することで位置合わせを行い、実世界の任意の空間上に残したメモの共有を行った。

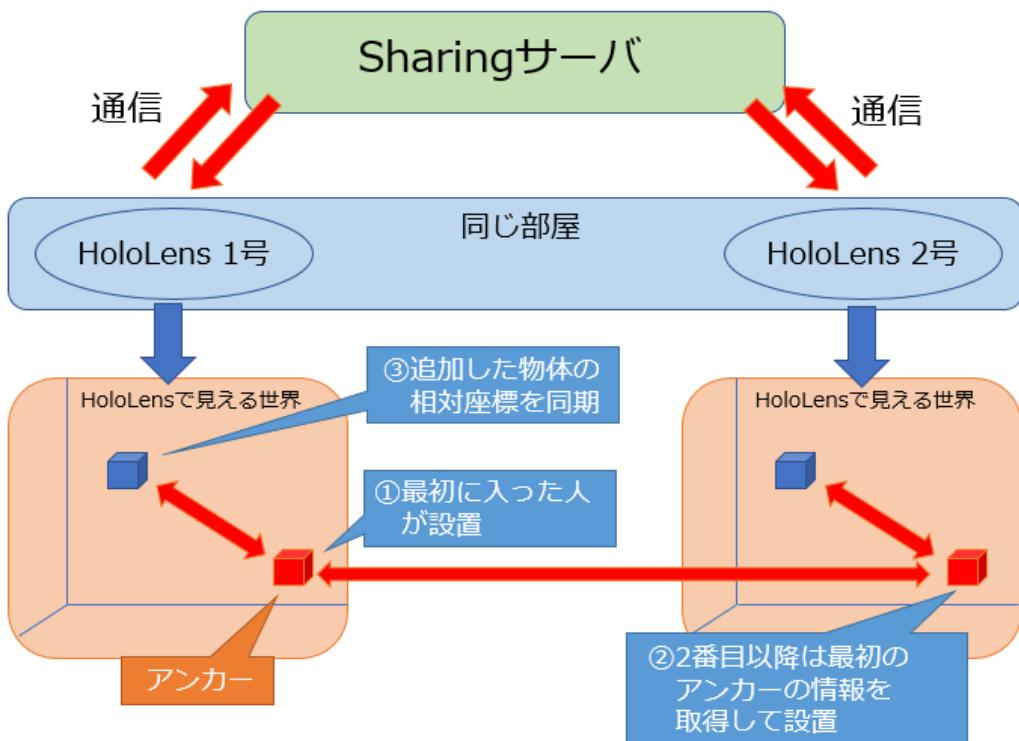


図 40: アンカーを設置して座標の位置合わせを行い共有

具体的な設定方法としては、Unity を起動してメニューの「HoloToolkit」を選択し、そして「Sharing Service」の中の「Launch Sharing Service」を選択をする(図 41)。選択後にコンソールアプリが立ち上がり、「Sharing Service」にサーバ IP が表示されるのでコピーする(図 41)。Sharing Stage スクリプトの Server Address に先ほど確認した IP アドレスを入力する(図 43)。そして、ビルドを行って HoloLens に配置を行う。

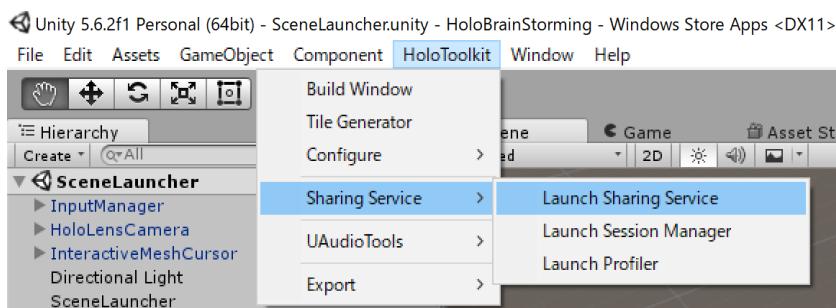


図 41: Launch Sharing Service を選択

```

Running Sharing Service locally. Enter 'q' to quit.
SharingService: ** Logging Session Began at 3:5:21, 1-28-2018
SharingService: *****
SharingService: ***** Sharing Service OnStart *****
SharingService: *****
SharingService: Server Info:
    Build Version: 1.1.0.0
    Schema Version: 17
SharingService: Listening for session list connections on port 20602 of all network devices of the local machine.
SharingService: Local IP addresses are:
SharingService: [REDACTED]
SharingService: 
SharingService: 
SharingService: 
SharingService: Created Session "Default" with ID 0 on port 20601

```

図 42: コンソールアプリを起動

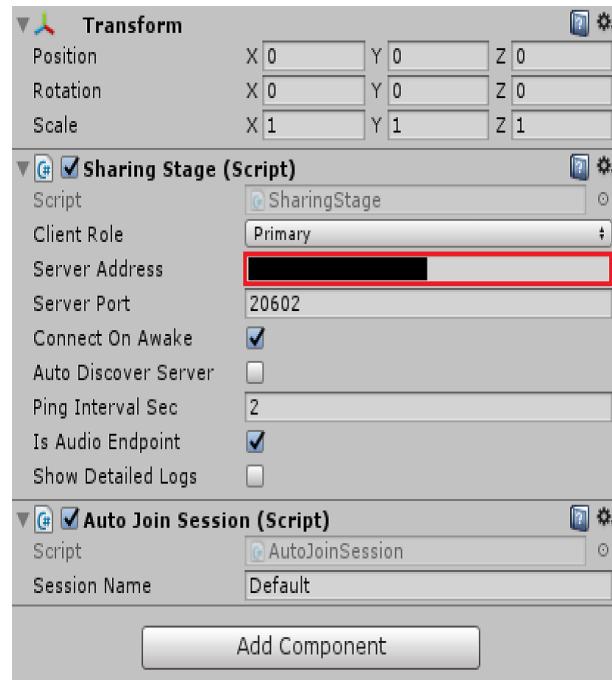


図 43: IP アドレスを入力

5.1.3 クラウドサービス

HoloLens の標準機能で音声入力はサポートされているが、現在利用できる言語が英語のみである [18]。そこで Google Cloud Speech API[19] を利用することにより、日本語の音声をテキストに変換する(図 44)。Google Cloud Speech API とは Google の持つ音声認識技術を使用し、音声をテキストに変換するサービ

スである。



図 44: 日本語の音声をテキストに変換

利用する際の具体的な設定方法としては、まず Google のサイトで設定を行って APIKey を取得する [20]。Unity を起動して Google Cloud Speech Recognition アセット [21] を導入し、取得した APIKey を GCSpeechRecognition の中の Api Key に入力して、Is Use API Key From Pre にチェックを入れて利用する(図 45)。

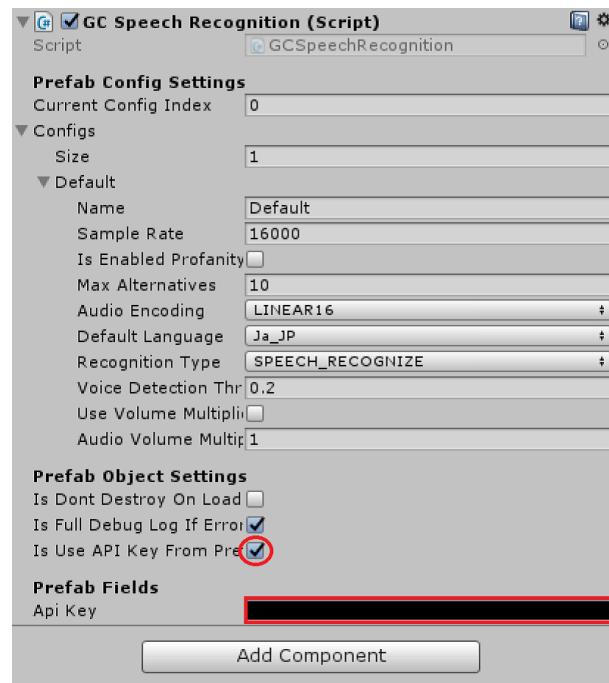


図 45: APIKey を取得して入力

5.2 プロトタイプの実装

ここではプロトタイプシステムの実装について詳しく述べる。

5.2.1 全体構成

アプリケーションを起動後、目の前に表示されるリストから機能をタップして選択を行う(図46)。プロトタイプシステムの機能は全てで4つである(図47)。機能を選択後は音声入力またはキーボードを使用してメニュー画面に戻ることができる。以下にそれぞれの機能について詳しく説明を行う。

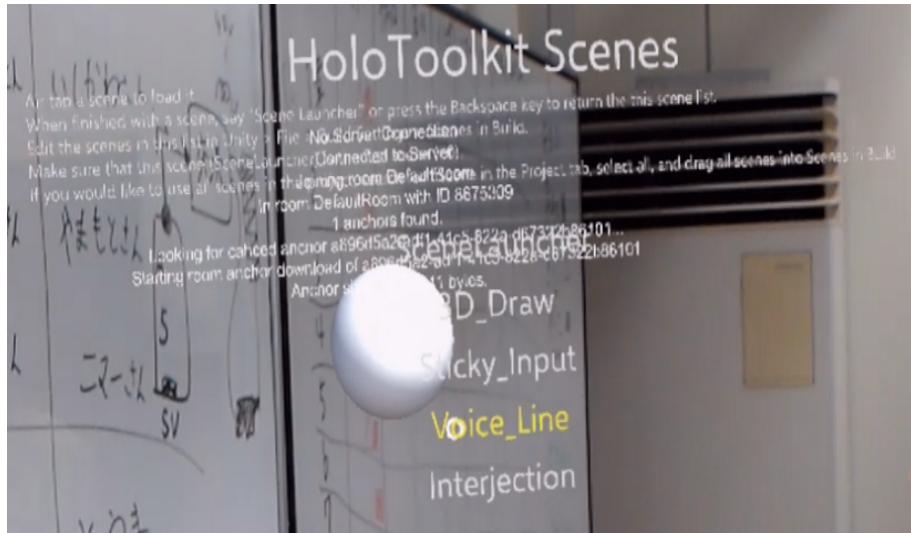


図 46: メニュー画面

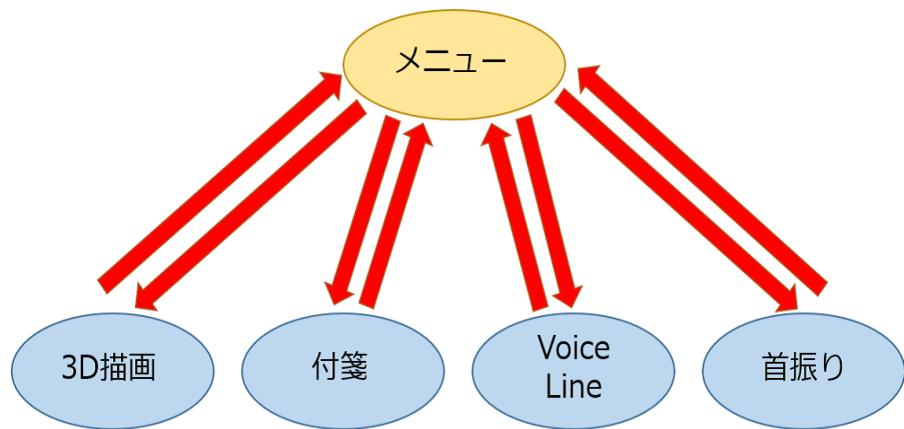


図 47: システムの遷移図

5.2.2 3D 描画モード

まずメッシュが手に追従するものを作成した。ここでは3D ObjectとしてCubeを追加した。次にSpatialMappingとInputManagerを追加し、カメラをデフォルトのものからHoloLensCameraに変更した。次に手の検出や位置を受け取るスクリプトを作成し、手の検出と手の状態を保持できるようにし、手の位置を取得をできるようにした。加えて、手の位置にオブジェクトを追従させるようにした。TrailRenderer[22]というオブジェクトが動く際に、オブジェクトの後ろに軌跡を作るスクリプトを使用し、3D空間上に複

数の線の軌跡を描画できるようにした。最後に Cube を透明にする処理を行った。また、線を共有するためにタップをしたかどうかのフラグとタップ&ホールド中の三次元座標のデータをサーバに送る処理を行った。受信する際は受け取った座標データ同士を全て線で繋ぐ処理を LineRenderer[23] というスクリプトを使用して行った。自分が描いた線を音声入力またはキーボード入力で削除できるように実装した。削除した場合はサーバに送信する処理を行った。

操作方法としては、3D 空間上で目の前でタップ&ホールドをすると描画が開始され、ホールドを解除すると描画をやめる。図 48 のように 3D 空間上に立体の図形を描いて表示することができる。



図 48: 3D 描画モード

5.2.3 付箋モード

まず、貼り付けるための壁を生成するために SpatialMapping を追加し、メッシュを取り除いた平面へと変換処理を行った [24]。次に InputManager を追加し、吹き出しオブジェクトを追加し、そのオブジェクトに目線カーソルを合わせた状態でタップ&ホールドをしている間は、音声を拾うように実装した(図 49)。音声を拾うことができたら音声はクラウドのほうに送信され、テキストとして変換されて返ってくる。目の前に付箋オブジェクトを自動で生成し、そのテキストを貼り付けるようにした(図 50)。その付箋を目線カーソルで合わせた状態でタップを行うと、三次元座標のデータとテキストデータをサーバに送る処理を行った(図 51)。テキストのデータは String 型のまま送信を行うと、日本語の場合相手側のほうで文字化けをしてしまうという問題が発生してしまうため、String 型のデータを byte 型配列のデータに変換する処理を行った。受信をする際には、byte 型配列のテキストデータを String 型に変換する処理をして、送られてきた三次元座標のデータの場所に付箋オブジェクトを生成し、その付箋にテキストを貼り付けるようにした。空間上の付箋オブジェクトに Billboard というスクリプトを紐づけて目線カーソルを合わせたら自分の方向に常に回転して向くようにした。

移動に関してタップ&ホールドで動かすことができるよう付箋オブジェクトに HandDraggable というスクリプトの紐づけを行った。また、移動の共有を行うためにタップ&ホールドをしている間は三次元座標のデータをサーバに送信する処理を行った。受信する際は座標データを受け取って移動の共有の実現を行った。壁に貼り付ける処理は HandDraggable スクリプトの中身を改変し、付箋オブジェクトが壁等の平面に接触したときに、接触した場所の座標に固定して、平面の法線ベクトルの方向に付箋オブジェクトの向きを固定して少し平面から浮かせる処理を行った。また、壁の貼り付けたことを共有する

ために付箋オブジェクトの三次元座標のデータと向きのデータをサーバに送信する処理を行った。受信をする際には付箋オブジェクトを受け取った座標データの場所に固定して、向きのデータの方向に回転して固定する処理を行った。また、貼り付けた付箋を壁からの角度が50度未満、つまりある程度横から見ると目の前に新たに付箋オブジェクトが表示されるような処理を行った(図53)。目の前に表示された付箋オブジェクトは貼り付けた付箋オブジェクトのテキストデータと同じものが表示されるようにした。貼り付けた付箋を壁からの角度が50度以上、つまり正面から見るとそのままで、目の前にすでに付箋オブジェクトが表示されている場合は削除する処理を行った(図52)。

付箋オブジェクトの削除に関しては、目線カーソルを合わせた状態で音声入力またはキーボード入力をすることで削除できるように実装した。共有した付箋を削除した場合はサーバに送信する処理を行った。



図49: 吹き出しオブジェクト



図50: 付箋オブジェクトを表示

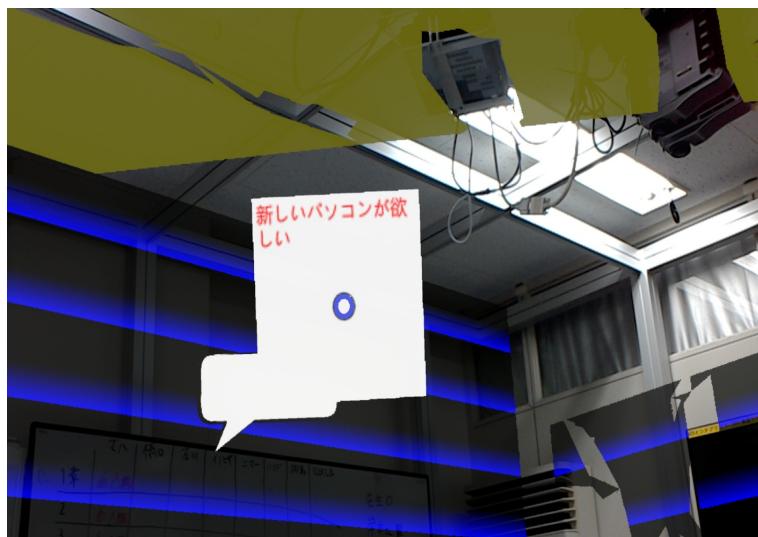


図 51: 付箋オブジェクトを共有

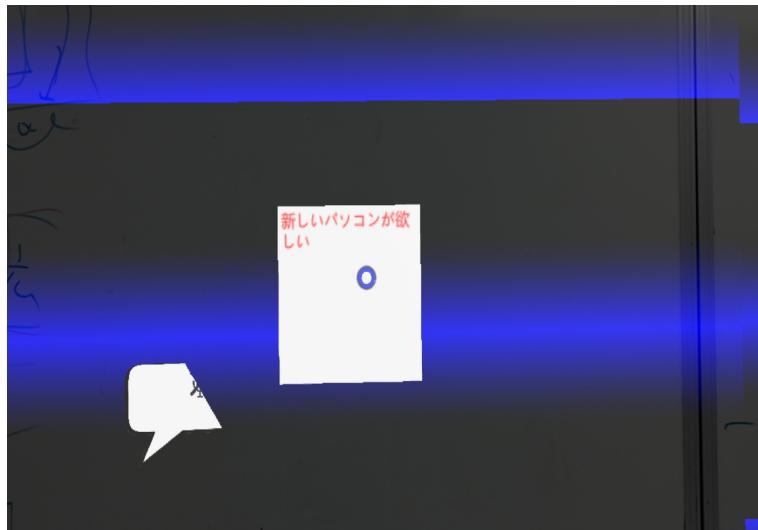


図 52: 正面から見た場合



図 53: ある程度横から見た場合

5.2.4 Voice Line モード

3D描画モードの実装と同様に手の位置にオブジェクトを追従させるようにした。タップ&ホールドをしている間は、音声を拾うように実装した。音声を拾うことができたら音声はクラウドのほうに送信され、テキストとして変換されて返ってくる。返ってきた文章を一文字ずつに分割し、描かれた線の位置に一定間隔で文字を配置する処理を行った。日本語の場合のときは文字化けするので、付箋モードの実装と同様の処理を行った。また、それぞれの文字には Billboard スクリプトの紐づけを行い、線を描いているときの自分の方向に向けるようにした(図 54)。また、共有を行うため空間上に配置された文字の三次元座標のデータと向きのデータをサーバに送信する処理を行った。受信する際には、受け取ったデータより同じ位置、同じ向きになるように空間上に文字の配置を行った。

自分が残した文字を音声入力またはキーボード入力で削除できるように実装した。削除した場合はサーバに送信する処理を行った。



図 54: Voice Line モード

5.2.5 首振りモード

まず、HoloLens の位置に半透明の Cube を配置する処理を行った。常に Cube の三次元座標のデータと向きのデータを保持するようにし、一定時間前に y 座標の値が減っていてかつ向きが下を向いていた場合、Cube より一定距離の大きさの位置(例えば、Cube の y 座標+10cm)に「Yes」という文字を表示するようにした。つまり、縦に首を振ると頭上に「Yes」と表示されるようにした(図 55)。同様の方法で首を右または左に振った場合は、頭上に「No」と表示された。また、一定時間経ったら頭上の文字が消えるような処理を行った。



図 55: 首振りモード

6 プロトタイプの評価実験

本章では、実装したプロトタイプシステムの評価のために行った実験について述べる。

6.1 実験の目的

本実験は実装したプロトタイプシステムの機能が正常に動作するかどうかの確認を行うことと、システムに実装されているそれぞれの機能をユーザに使用してもらうことで提案システムの有用性について検証を行うことの2つを目的としている。

6.2 実験の被験者

本実験の被験者は男性9人と女性1人の合計10人で、情報系を専攻する大学生および大学院生である。平均年齢は23.7歳で、右利きの人が7人で左利きの人が3人である。HoloLensの使用経験について、全くないと回答したのが4人、少しあると回答したのが5人、よく使うと回答したのが1人である。

6.3 実験環境

本実験では実装したプロトタイプシステムのアプリケーションを2台のHoloLensにそれぞれインストールして用意をした。また、共有を行うためなるべく確実にネットワークに接続ができるように研究室内のゼミ室で行った(図56)。この実験では、被験者2人で1グループとして同時に実験を行った。実験中に取り組んでもらうタスクに関する説明は、それぞれの被験者に渡せるように資料を作成して用意した。また、システムの機能の一部でキーボードを使用する箇所があるため、2つのBluetoothキーボードを用意した。

実験中の様子を図57に示す。また、表1に実験で使用した機器をまとめる。



図56: 実験環境

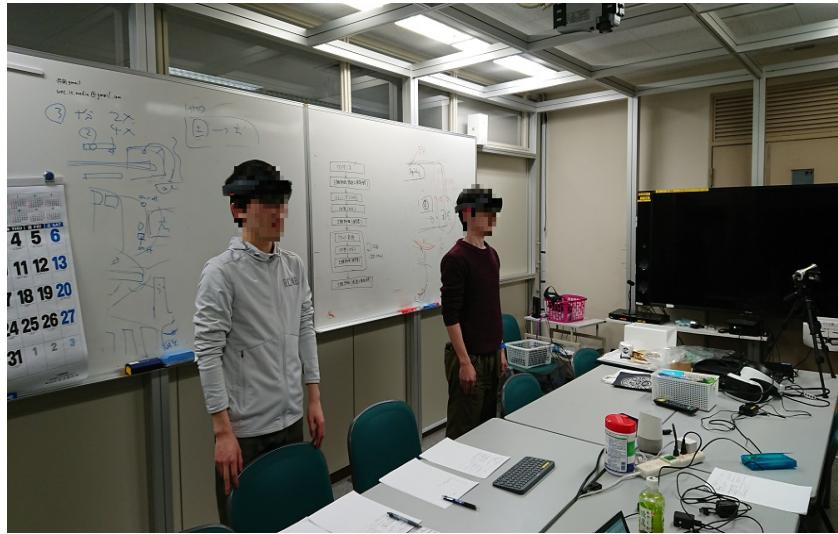


図 57: 実験中の様子

表 1: 実験で使用した機器

名称	型番	メーカー
ヘッドマウントディスプレイ	Microsoft HoloLens	Microsoft Inc.
ヘッドマウントディスプレイ	Microsoft HoloLens	Microsoft Inc.
Bluetooth キーボード	K380BK	株式会社ロジクール
Bluetooth キーボード	MC184J/A	Apple Inc.

6.4 実験方法

本実験は以下に示す 2 つの作業から構成される。

- シナリオ実験
- 課題解決実験

HoloLens を 2 台使用して共有を行うためそれぞれのタスクの前に準備を行った。それぞれで定められたタスクに取り組んでもらい、システムの動作状況やタスクの遂行状況などを確認して記録を行った。全てのタスクが終了した後に、プロトタイプシステムに関するアンケートに回答してもらった。各実験の詳細な手順についてを以下で述べる。

6.4.1 準備

それぞれのタスクを実際に行っていく前に、2 台の HoloLens で共有を行うための準備を行った。まず 1 人目の被験者に所定の座席に座ってもらい、前方にある図のような图形を見てもらいながら HoloLens をかぶってアプリケーションを起動してもらった。1 人の起動が完了したら一度その座席から離れて

もらい、2人目の被験者にも同様にその座席に座って前方にある図形を見てもらいながらアプリケーションを起動してもらった。2人目の起動が完了したら、それぞれのタスクに取り組んでもらうようにした。



図 58: 前方にある図形

6.4.2 シナリオ実験

シナリオ実験では、決められた手順に従ってそれぞれの被験者に操作をしてもらう。この手順は、プロトタイプシステムに実装されている全ての機能を使うように作られている。また、2人で同時にやって共有を行うため、1つの手順が終わったらそれぞれの被験者に完了したことを言うようにしてもらう。図 59～63 にシナリオ実験で取り組む手順が記された資料を、表 2～5 にシナリオの流れを示す。タスク 1 の内容は。この4つのタスクを一通り実施することで、プロトタイプシステムに実装されている機能の全てを体感することができる。

タスク 1: 3D 描画モードを使用した入力、共有
以下の手順に従って、空間上に線を描いて共有を行ってください。

手順	内容	補足
1 準備		
2 空間に線を描画	<ul style="list-style-type: none"> ・目の前にタップ＆ホールドをして線を描画する ・青い線が表示されることを確認する 	ホールドしている間に、線を表示します ホールドを解除すると線の表示をやめます 表示されない場合は言って下さい
3 相手が描いた線が共有できているか確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ピンク色の線が表示されているか確認する ・お互いに線が共有できているか確認する 	自分の線が青い色で、相手の線がピンク色で表示されます
4 描いた線を全て削除	<ul style="list-style-type: none"> ・「Delete」と発音して自分が描いた線が全て削除されているか確認する ・もしもはキーボードの「esc」キーを押して自分が描いた線が全て削除されているか確認する 	発音よく言わないと消えない場合があります

タスク 2: 付箋モードを使用した入力、操作、共有
以下の手順に従って空間上に付箋のメモを残して、操作、共有を行ってください。

手順	内容	補足
1 準備		
2 空間に付箋のメモを残す	<ul style="list-style-type: none"> ・目の前に吹き出しが表示されるので、目線カーソルを吹き出しに合わせる ・「Missing」と表示されるか確認する ・その状態でタップ＆ホールドをして「あいうえお」と発声して、その後ホールドを解除する ・目の前にピンク色の文字の付箋が表示されるか確認する 	うまくいかない場合は吹き出しから目線カーソルを離してもう一度合わせて下さい ホールドをしている間に発声してください 何度もやっても付箋が表示されない場合は言って下さい
3 付箋の共有	<ul style="list-style-type: none"> ・目線カーソルを付箋に合わせる ・タップをして文字の色が赤色に変化することを確認する ・相手に自分の付箋が共有されているか確認してもらう ・付箋に目線カーソルを合わせて付箋が自分のほうに向くか確認する 	うまくいかない場合は付箋から目線カーソルを離してもう一度合わせてタップしてください
4 付箋の削除	<ul style="list-style-type: none"> ・目線カーソルを付箋に合わせる ・「Delete」と発音して付箋が削除されているか確認する ・もしもはキーボードの「space」キーを押して付箋が削除されているか確認する 	発音よく言わないと消えない場合があります うまくいかない場合は付箋から目線カーソルを離してもう一度合わせてやり直してください
5 付箋のメモを残して共有	<ul style="list-style-type: none"> ・手順 2 と 3 を参考にしてもう一度付箋の入力と共有をする 	
6 付箋の移動	<ul style="list-style-type: none"> ・目線カーソルを自分が残した付箋に合わせる ・タップ＆ホールドをして付箋をつかんで移動できることを確認する ・お互いに付箋が移動できているか確認する 	ホールドを解除すると付箋の動きが止まります

次のページに続きます。

図 59: シナリオ実験で掲示した資料：1枚目

図 60: シナリオ実験で掲示した資料：2枚目

7	付箋を壁に貼る <ul style="list-style-type: none"> ・壁を見て青い模様の色になっている場所を確認する ・タップ＆ホールドで自分の付箋を移動して壁(青い模様の色の場所)に接触させて貼り付ける ・目線カーソルを付箋に合わせて付箋が回転しないことを確認する ・付箋を正面またはある程度横から目線カーソルを合わせて確認する ・横から見た場合に目の前に新たに付箋が表示されることを確認する 	
---	---	--

タスク 2: Voice Line モードを使用した入力、共有
以下の手順に従って空間上でタップ＆ホールドをして線を引きながら発声してメモを残して共有を行ってください。

手順	内容	補足
1 準備		
2 線が表示されるか確認	<ul style="list-style-type: none"> ・目の前に「Missing」と表示されているか確認する ・目の前にタップ＆ホールドをして線を引けるか確認する ・線を引いてる際、「Running」と表示されているか確認する ・ホールドを解除したら線が消えるか確認する 	何度もやっても表示が「Missing」のまま変化しない場合は言って下さい
3 線を引いて共有	<ul style="list-style-type: none"> ・目の前にタップ＆ホールドをして線を引くながら発声してください ・線を引いた場所にメモが表示されるか確認する ・お互いに残したメモが共有されているか確認する 	ホールドをしている間に発声してください 何度もやってもうまくいかない場合は言って下さい
4 メモを全て削除	<ul style="list-style-type: none"> ・「Delete」と発音して自分が残したメモが全て削除されているか確認する ・もしもはキーボードの「esc」キーを押して自分が残したメモが全て削除されているか確認する 	発音よく言わないと消えない場合があります

図 61: シナリオ実験で掲示した資料：3枚目

図 62: シナリオ実験で掲示した資料：4枚目

タスク 4: 首振りモードを使用して頭上の文字を確認		
以下の手順に従って相手の頭上の文字が変化しているか確認を行ってください。		
手順	内容	補足
1	準備	
2	実験者の指示に従って首振り動作を行う ・お互い向き合って相手の顔を見る ・首を縱または横に振る ・相手の頭上に文字が表示されているか確認する	声はなるべく出さいで下さい

図 63: シナリオ実験で掲示した資料：5枚目

表 2: タスク 1 : 3D 描画モードを使用した入力、共有

手順	内容
1	準備
2	空間上に線を描画
3	相手が描いた線が共有できているか確認
4	描いた線を全て削除

表 3: タスク 2 : 付箋モードを使用した入力、操作、共有

手順	内容
1	準備
2	空間上に付箋のメモを残す
3	付箋の共有
4	付箋の削除
5	付箋のメモを残して共有
6	付箋の移動
7	付箋を壁に貼る

表 4: タスク 3 : Voice Line モードを使用した入力、共有

手順	内容
1	準備
2	線が表示されるか確認
3	発声してメモを入力して共有
4	メモを全て削除

表 5: タスク 4 : 首振りモードを使用して頭上の文字を確認

手順	内容
1	準備
2	実験者の指示に従って首振り動作を行う

6.4.3 課題解決実験

課題解決実験では、シナリオ実験のような詳細な操作手順は用意しない。代わりに簡単な課題を被験者に出して、プロトタイプシステムを用いてその課題を解決するように指示した。被験者は、先に実施するシナリオ実験においてプロトタイプシステムの操作を一通り終えているので、被験者が自ら考えてプロトタイプシステムを操作して課題を解決することになる。図 64 に、課題解決実験で掲示した資料を示す。

タスク 5: 準備をした後、空間上に簡単な図形の描画を行ってください。
空間上に線を引いて簡単な図形(例:○、△、□等)を最低一つ描いてお互い確認し合ってください。何度も描いてもかまいません。難しい図形(例:立方体等)や椅子やテーブル等を描いてもかまいません。

タスク 6: 以下の文章を読んで、準備をした後に空間上にメモを残して話し合いを行ってください。
研究室でこれから新しい物を買うとします。しかし、一つしか買うことができません。自分が欲しい、または必要だと思うものを考えて二つぐらいあげてメモとして空間上に残し、お互いに共有して確認してください。お互いに話し合ってその中から一つだけを選んで壁に貼り付けてください。

タスク 7: 準備をした後、通常書きづらいと思う場所にメモを残してください。
この部屋の中で通常ならば書きづらいと思う場所(例:テーブルの角に注意書き等)に最低一つメモを残してお互いに確認し合ってください。メモの内容は自由です。何度もメモを残してもかまいません。

図 64: 課題解決実験で掲示した資料

6.5 実験結果と考察

まず、シナリオ実験に関するタスク1～4の達成状況について、表6に示す。表中の各セルには、被験者が各手順をどの程度達成できたかが3段階で示されている。○の場合、被験者はその手順について特に支障なく完了したことを示す。△の場合、手順の進め方が分からぬ等の理由で実験者へ質問等があり、被験者は実験者からの助言を元に手順を完了したことを示す。×の場合、その手順を完了させることができなかったことを示す。

表6よりタスク1～4のほとんどの手順で成功率が100%となった。一方で、タスク1で手順2において支障なくタスクの完了ができない被験者が1名確認された。手順2は、目の前でタップ&ホールドをして線を描画して、青い線が表示されることを確認するというものである。実験中に被験者Dから線の描画される位置がおかしいという申告があったため確認を行った。その結果、線の描画の位置はややズレはあったが表示はされていた。原因としては正しくタップができていない、またはHoloLensを正しく装着できていない等が考えられる。また、3D描画モードの線を描くときに位置が若干ズレが生じるのは仕様であるため、線の描画される位置を少し補正する等の処理が必要だったと考えられる。線の描画の表示自体は正しく行われていたので、そのまま被験者Dには手順を進めてもらった。

タスク2では手順7において支障なくタスクの完了ができない被験者が1名確認された。手順7は、空間上に残した付箋を壁に貼るというものである。実験中に被験者Hから付箋を壁に貼り付けようとしたら付箋が消えてしまったという申告があったため確認を行った。その結果、付箋が確かに被験者Hから見えないことがわかった。しかし、同時に実験を行っていた被験者Gからは消えたその付箋が見えるという報告があった。付箋モードでは機能を選択したときに最初に実世界の空間上を認識して壁を綺麗な平面として生成する処理を行っている。被験者Hのほうでは空間上的一部分を正しく認識しなかったため、壁を綺麗な平面として生成できなかった可能性がある。そこに付箋を移動して持つていって実世界の壁の向こう側に行ってしまい、生成した近くの平面に接触したため、平面の裏側に付箋が貼り付いてしまったからだと考えられる。被験者Hにはもう一度付箋を残してもらって壁に貼り付けてもらった結果、うまく貼り付いたとの報告があったのでそのまま手順を進めてもらった。

タスク4では手順2において支障なくタスクの完了ができない被験者が1名確認された。手順2は、実験者の指示に従って首振り動作を行ってもらいお互いの頭上の文字が変化しているか確認するというものである。実験中に被験者Hから相手の頭上の文字の表示がおかしいという申告があったため確認を行った。その結果、相手が首を縦に振ったのにも限らずNoと表示されてしまうことがわかった。何度も行ってもらっても変わらなかったため、被験者GとHのHoloLensを再起動し、もう一度手順1からやり直してもらった。その結果、少し改善されたとの報告があったのでそのまま手順を進めてもらった。原因として相手の被験者Gが縦に首振りをする際に、わずかに横に振ってしまい頭上にNoと表示されてしまったのではないかと考えられる。また、実験中被験者Hは手順1の準備で他の被験者と比較して明らかに時間がかかっていたため、ネットワークの状態があまり良くなかったのではないかと考えられる。

以上の結果から、本シナリオ実験によってほぼ全ての手順を支障なく完了することができたことがわかった。

表 6: 被験者 A～J のシナリオ実験の結果

タスク	手順	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	成功率
タスク 1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	2	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	90%
	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
タスク 2	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	7	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	90%
タスク 3	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
タスク 4	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
	2	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	90%

タスク 5～7 は課題解決実験である。この実験ではシナリオ実験のような詳細な操作手順は用意しない。手元にある資料の文章を読んでもらい、自ら考えて課題を行ってもらった。

タスク 5 は 3D 描画モードを使用して空間上に図形を描くというものである。大雑把だが丸や四角等の簡単な図形は描くことができている被験者が多かった(図 65)。また、描画がうまくいかず、描くのに苦戦をしてタップを何度も繰り返す被験者もいた。原因としてはしっかりとタップができていないため HoloLens がタップを検知しなかったからだと考えられる。被験者の中には複雑な図形を描く人もいたので、人によっては短期間でもそれなりにうまく描くことができる事がわかった(図 66)。共有に関しては問題なかった。



図 65: 簡単な図形



図 66: 複雑な図形

タスク 6 は付箋モードを使用して、それぞれの被験者に研究室で新しく買う物を何個か考えてメモを空間上に残して共有してもらい、お互いに話し合ってその中で 1 つ決めて付箋を壁に貼るというものである。全てのユーザが付箋を残すことができていて共有もできていた。例としては図(67)等である。被験者が残した付箋の中にはしっかりと発音ができていないため音声認識が失敗してしまったもの(図68)や、他の被験者の声も混ざって入っているものがあった(図69)。また、付箋が落下してしまう場合もあった(図70)。原因として考えられるのは壁以外のものに衝突してしまったためだと考えられる。付箋の文字の表示に関しては空間上にある場合も壁に貼り付けた場合も問題なかった。また、共有に関しても問題なかった。



図 67: 被験者が残した付箋の例

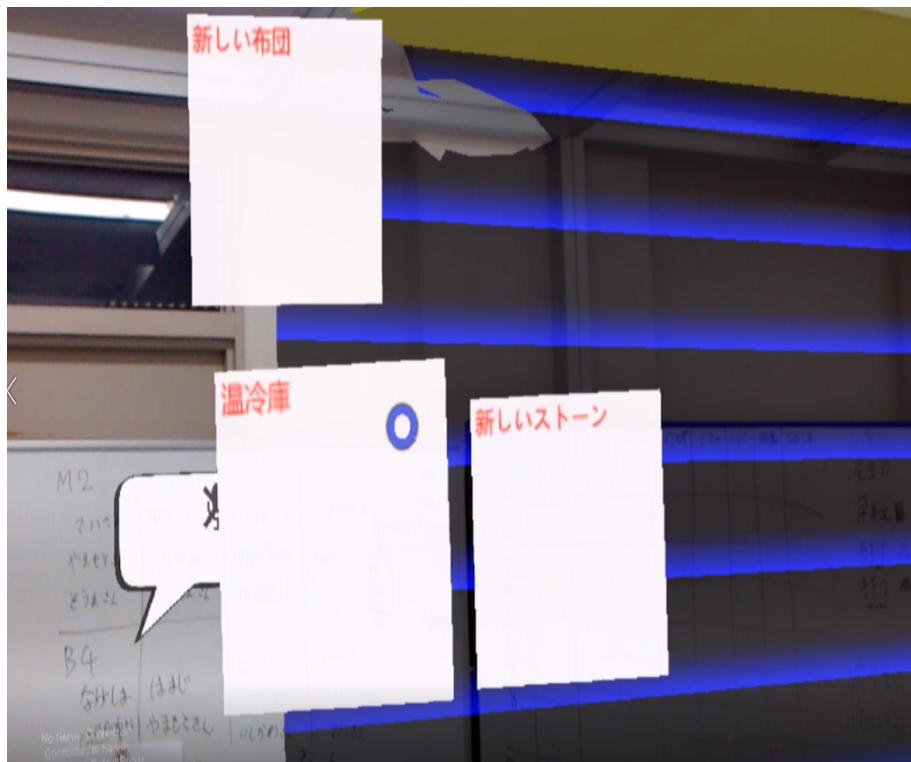


図 68: 音声認識が失敗した付箋



図 69: 他の被験者の声と混ざって残した付箋

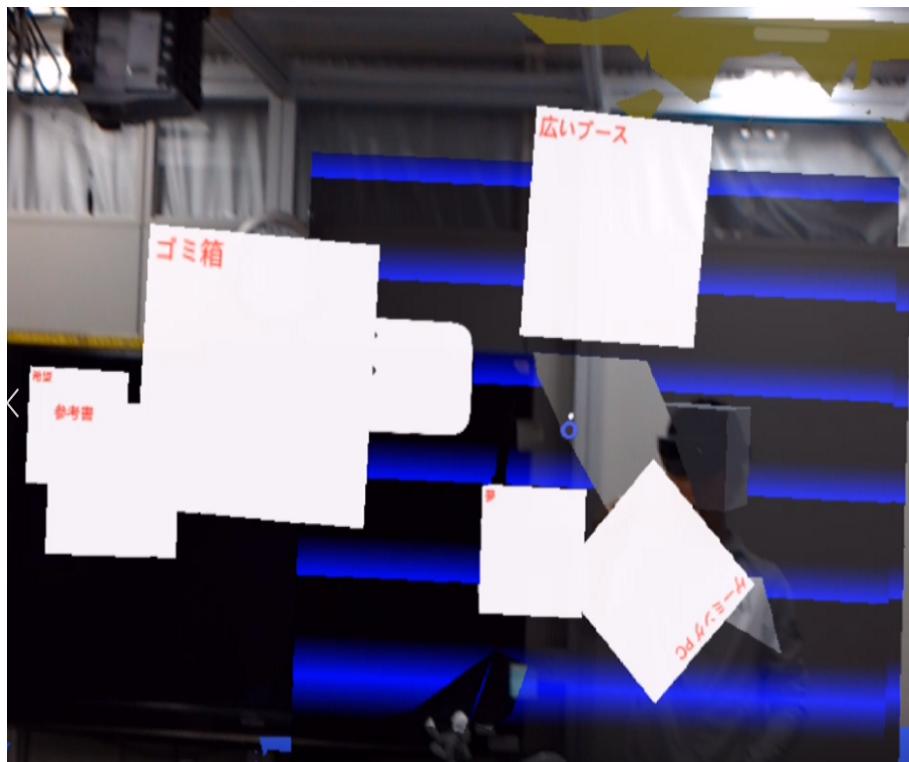


図 70: 落下した付箋

タスク 7 は Voice Line モードを使用して、描きづらいところと思う場所にメモを残すというものである。だいたいの被験者はメモを残すことができていた。例としては図 71 や図 72 である。それなりに長い文章を残している人もいた(図 73)。また、うまくいかず何度も線を引きながら発声している人もいた。原因としては正しくタップができていなくて HoloLens がタップを検知していないことや、線を引いていないときに発声していることが考えられる。他には文字は表示されているが、途中で文章が切れてしまっている場合もそれなりにあった(図 74)。引いた線の長さが短すぎることが原因だと考えられる。共有に関しては問題はなかった。



図 71: 残したメモの例 1

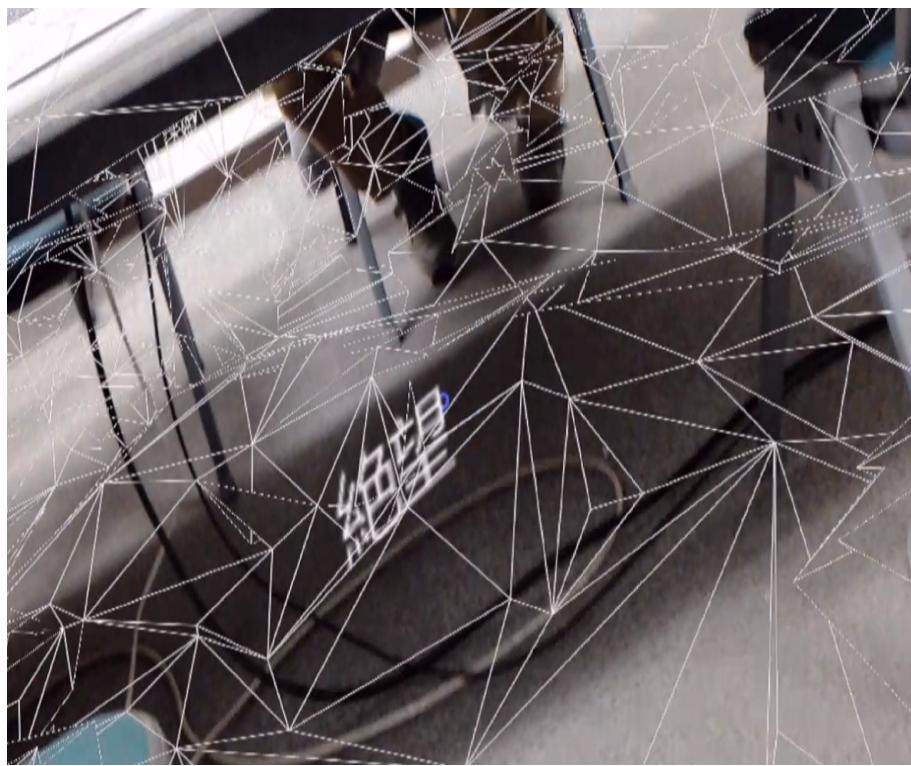


図 72: 残したメモの例 2



図 73: 長い文章のメモ

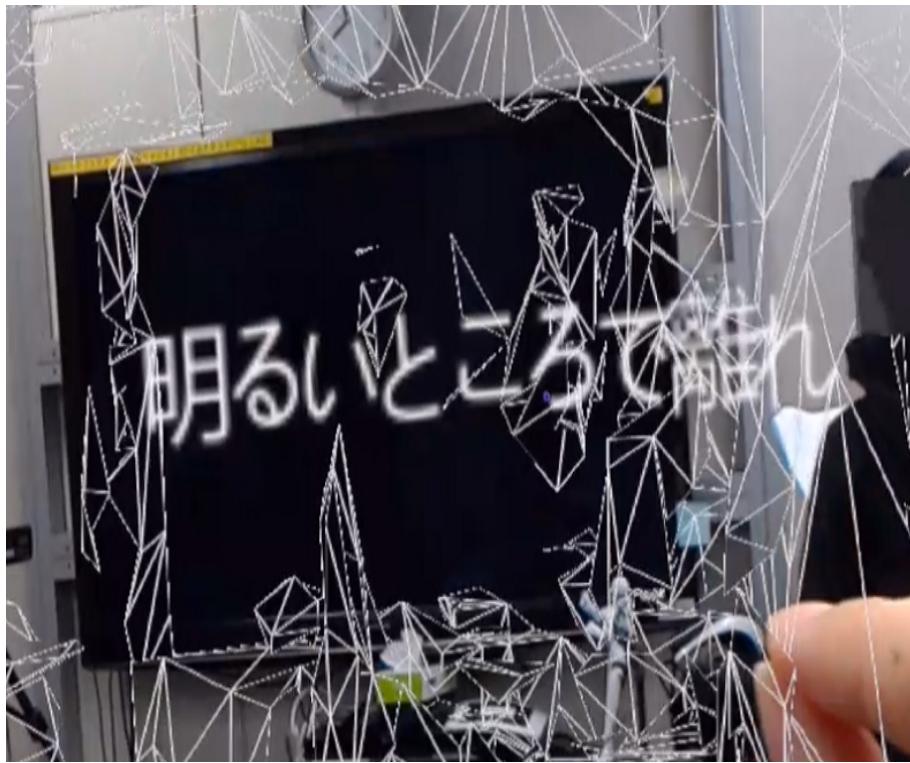


図 74: 文章が切れている例

アンケートの集計結果を表 7 に示す。番号 1.1～1.6 が 3D 描画モードについての質問、番号 2.1～2.9 が付箋モードについての質問、番号 3.1～3.7 が Voice Line モードについての質問、番号 4.1～4.3 が首振りモードについての質問、番号 5 がこのシステム全体についての質問である。質問は 5 段階評価になっていて、全くそう思わない (1pt) ～そう思う (5pt) で平均値を計算している。

3D 描画モードについての質問に関しては、番号 1.2 が平均値 2.9 と評価が低かった。番号 1.2 は線が描こうとしたところに正しく表示されているかどうかを問うものである。システムとハードウェアの仕様上、タップする場所の検知はあまり正確ではなく、精度が悪いと感じた被験者が多かったことがわかる。先ほども述べたが、線の描画される位置を少し補正する等の処理が必要だったと考えられる。番号 1.3 が平均値 4.8 とかなり高い評価であった。番号 1.3 は線の共有ができたかどうかを問うものである。結果より共有に関しては問題なかったことがわかる。番号 1.4 が平均値 3.8 だが、意見が大きく分かれていた。番号 1.4 は線の削除を音声入力またはキーボード入力で行えたかどうか問うものである。全ての被験者が音声入力での削除に失敗をしていたため、最初からキーボード入力に限定すべきであった。英語での発音は難しく、またシステムの仕様上音声認識が内部で複数動作していることが失敗率を高くしてしまう原因だと考えられる。

付箋モードについての質問に関しては、番号 2.4 を除いて平均値 4.0 以上と全体的に高い評価になった。番号 2.4 は付箋の削除ができたかどうかを問うものである。理由としては 3D 描画モードの削除と同様である。番号 2.1 が平均値 4.7 とかなり高い評価になった。番号 2.1 は付箋を残すことが簡単にできたかどうかを問うものである。結果からこの入力方法はほとんどの人が直感的で簡単にに入力できることがわかった。番号 2.3 が平均値 4.9 と一番高い評価となった。番号 2.3 は付箋の共有が簡単にできたかどうかを問うものである。これより共有に関しては問題がなかったことがわかる。

Voice Line モードについての質問に関しては、番号 3.3 が平均値 3.5 とやや評価が低かった。番号 3.3 はメモの位置が正しい場所に表示されていたかどうかを問うものである。理由としては 3D 描画モード

の表示位置のときの場合と同様である。番号 3.4 が平均値 3.8 だが、意見が大きく分かれていた。番号 3.4 はメモの削除ができたかどうかを問うものである。理由としてはこれも 3D 描画モードの削除の場合と同様である。番号 3.7 が平均値 3.6 とやや評価が低かった。番号 3.7 は普段書きづらいと思うような場所にもメモを残すことができたどうかを問うものである。これに関しては人によって異なるという感じであった。タップの検知する精度が良くなり正しい場所にメモが表示されていたら、もっと評価が高くなつたのではないかと考えられる。

首振りモードについての質問に関しては、他の機能と比較すると全体的に評価が低かった。

この機能をまた使用したいかどうかの質問は番号 1.6、2.9、3.7、4.3 である。結果より付箋モードは多くの被験者によって使いやすいと感じるということがわかった。また、3D 描画モードと Voice Line モードは人によって異なるという感じであったので、メモの表示位置がもう少し良くなれば評価が変わつたのではないかと考えられる。首振りモードに関しては評価が低かった。この機能はまだ完全なものとは言えないが、改善が必要だと改めて感じた。最後に番号 5 が総合的に見てこのシステムをまた使用したいかどうかを問うものであるが、それなりに評価が高く、このシステムがだいたいの人から受け入れられていることがわかった。

また、アンケートでは自由記述欄を設け、被験者から自由に意見を記述してもらった。後に結果を載せておいた。

表 7: アンケート集計結果

番号	質問内容	全くそう思わない	あまりそう思わない	どちらともいえない	まあそう思う	そう思う	平均
1.1	空間上に線の描画が簡単にできた	0	1	1	7	1	3.8
1.2	線が描こうとしたところに正しく表示されていた	1	4	2	3	0	2.7
1.3	線の共有がうまくできた	0	0	0	2	8	4.8
1.4	線の削除を行うことができた	0	1	4	1	4	3.8
1.5	簡単な図形を描くことができた	0	0	2	7	1	3.9
1.6	この機能をまた使ってみたいと思う	0	0	3	6	1	3.8
2.1	付箋を残すことが簡単にできた	0	0	0	3	7	4.7
2.2	付箋の移動が簡単に行うことができた	0	1	1	4	4	4.2
2.3	付箋の共有が簡単に行うことができた	0	0	0	1	9	4.9
2.4	付箋の削除を行うことができた	0	1	3	3	3	3.8
2.5	付箋をうまく壁に貼りつけることができた	0	1	0	5	4	4.2
2.6	空間上に残した付箋の文字が正しく表示されていた	0	1	1	4	4	4.1
2.7	壁に貼り付けた付箋の文字が正しく表示されていた	0	0	2	3	5	4.3
2.8	壁に貼り付けた付箋の文字をある程度横から見ると目の前にも付箋が正しく表示されていた	0	1	1	1	7	4.4
2.9	この機能をまた使ってみたいと思う	0	0	2	5	3	4.1
3.1	タップ＆ホールドをしている間、線が表示されていた	0	0	0	4	6	4.6
3.2	話しながら線を引いてメモを残すことが簡単にできた	0	0	3	4	3	4.0
3.3	メモの位置が正しい場所に表示されていた	0	1	4	4	1	3.5
3.4	メモの削除を行うことができた	0	1	3	3	3	3.8
3.5	メモの共有がうまくできた	0	0	0	3	7	4.7
3.6	普段書きづらいと思うような場所にもメモを残すことができた	0	2	3	2	3	3.6
3.7	この機能をまた使ってみたいと思う	0	2	3	2	3	3.6
4.1	相手の頭上に文字が正しく表示されていた	0	2	0	6	2	3.8
4.2	声に出さなくても相手の考えていることがある程度わかった	0	2	1	2	5	3.8
4.3	この機能をまた使ってみたいと思う	0	3	5	2	0	2.9
5	総合的に見てこのシステムをまた使ってみたいと思う	0	0	2	6	2	4.0

アンケートの自由記述の結果

- 首を振っている時点で、頭上に文字が出ていなくても意思はわかるのではないか。
- 付箋は使いやすくて良かった。もっと遠くまで投げることができたら、座ったままでも広い範囲に散りばめることができそう。
- 線書くときに色を変えて遊びたい。
- 付箋を物に貼ることができたら良い。
- 奥行き感覚が把握しづらかった。
- HoloLens の視野が調整しづらいときがあった。あと、ずっと付けていると頭が痛くなつた。
- タップ&ホールドの位置にズレが生じていて使いづらかった。
- 壁に貼り付ける操作でちゃんと貼り付いているかどうかがわかりづらかった。
- 音声認識は比較的良好で使いやすかった。
- 簡単な図形はテンプレとして作れれば簡単な 3DCG ソフトにできそう。
- タップしている位置と若干ズレたところから線が表示されていたので位置の補正が必要だと思った。
- メモのところに時間表示ができれば、どの時間帯に残したとかが振り返ることができると思った。
- 付箋モードは似た内容のものを合わせたり、付箋同士を結合できたらより実生活向きになると感じた。
- 首振りの頭上の文字が正しく表示されていないときがあった。
- 自分が線を描こうとした場所と少しずれて描画された。
- 付箋を壁に貼り付けるときに壁の向こう側に付箋が行ってしまい消えてしまった。しかし、相手からは確認できた。
- 音声認識の精度を上げるともっと面白い。
- デバイスの重さや酔いが結構きつい。
- Voice Line の時は正しい位置に文字が出てほしいと思った。
- 楽しさで順位付けをすると Voice Line > 付箋 > 3D 描画 > 首振り
- 付箋の時に追記、個別削除、文字色選択ができると良い。
- 付箋を分類分けできるように、枠を出して囲めると良い。

7 おわりに

本章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

7.1 本研究のまとめ

今日では HMD を使用したシステムを開発する研究が様々な研究が行われている。本研究では、既存の研究を分析して次に示すような 3 つの問題点を抽出した。

- HMD を付けて同時に複数人で使用することを想定していない
- HMD を付けて使用するシステムで利用できる場所が限定されている
- HMD を付けて使用するシステムで入力手法が限定されている

以上の問題点を踏まえた上で、以下のような HMD を付けていることを前提としたシステムコンセプトを提案した。

- 複数人で同時に使用することが可能
- どこでも場所を選ばず利用が可能
- 簡単な操作で直感的で様々な入力が可能

このコンセプトを基にしたシステムの設計を行った。様々な入力ができる実世界の任意の空間上にメモを残すことができて、遠くにあるメモも操作することができて、複数人で使用できるように共有できるようなシステムの設計を行った。

この設計を基にプロトタイプシステムの実装を行い、実装したプロトタイプシステムの評価をするための実験を行った。実験は、被験者に指示通りに遂行してもらうシナリオ実験と、自分で考えて課題を解決する課題解決実験の 2 つを行い、実験後にアンケートに回答してもらった。

シナリオ実験での手順の遂行状況においても、ほとんどの手順において成功率 100% を収めた。また、課題解決実験のほうでは、付箋モードに関しては被験者全員がプロトタイプシステムを使用して簡単にメモを残して共有ができることがわかった。3D 描画モードと Voice Line モードに関しては人によっては短期間でマスターして複雑な図形を描いたり、描きづらい場所にメモを残すことができる事がわかった。実験後のアンケートより付箋モードに関しては全体的に評価が高く、3D 描画モードと Voice Line モードに関しては人によって評価が異なるという感じであった。首振りモードに関しては全体的に評価が低かった。また、全体的に共有ができるかどうかについて質問に関しては高い評価を得られていることがわかった。

7.2 今後の課題

本研究の今後の課題としては、次のような点が挙げられる。

システムの各機能の改善

本研究のプロトタイプシステムは、コンセプトの基本的な部分のみが実装されているに留まっている。プロトタイプの評価実験においては、線の描画の位置が正確でなかったり、Voice Line の文字の位置が思ったところに出ない等の状況が確認されており、これを解決するにはハードウェア上の問題でもあるが、もう少し表示される位置を補正する等の処理が必要だと考えられる。首振りモードに関しては改善すべき部分が多いと感じた。音声認識が改善され、感嘆詞等も拾うようになればもっとより良いシステムになることが期待できる。

共有機能の改善

現状のシステムではそれぞれのユーザの三次元座標を合わせるために同じ場所、同じ方向を向いてアプリケーションを起動する必要がある。今後は Vuforia 等を使用して Sharing の接続成功率を上げて、手間をかけることなくより簡単に共有できるようにすることが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の全過程を通して多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました電気通信大学大学院情報理工学研究科情報学専攻の田野俊一教授に心より深く感謝いたします。

また、本研究の遂行にあたり、有益なご助言とご鞭撻を頂きました電気通信大学大学院情報理工学研究科情報学専攻の橋山智訓准教授と東京都市大学メディア情報学部情報システム学科の市野順子教授に厚く御礼申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、的確なご助言を頂きました TIS 株式会社の森真吾様、井出将弘様に深く感謝いたします。

最後に、研究活動や日々の研究室生活など様々な場面でお世話になりました、田野・橋山研究室の皆さんに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Evernote や OneNote 普及も…メモしない現代人の言い分; <<https://sirabee.com/2017/12/24/20161413693/>>2017年12月31日アクセス.
- [2] 7つのアイデア発想フレームワーク; <<https://creive.me/archives/6722/>>2017年12月31日アクセス.
- [3] 田村, 太田: 複合現実感; 情報メディア学会誌 Vol.52, No.3, pp.266-272(1998).
- [4] 長田, 佐々木, 島田, 佐藤: スマートグラスを用いた仮想空間への手書き情報共有システム; 情報処理学会第77回全国大会論文集, 3-205, 206(2015).
- [5] Jan Gugenheimer, Evgeny Stemasov, Julian Frommel and Enrico Rukzio: ShareVR: Enabling Co-Located Experiences for Virtual Reality between HMD and Non-HMD Users; Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI '17), pp.4021-4033(2017).
- [6] 高山, 瑞慶山, 田野, 岩田, 橋山: 実世界コンテキスト・情報を用いたユビキタスインフォーマルコミュニケーションの実装と評価; ヒューマンインターフェースシンポジウム 2005, pp.955-958(2005).
- [7] Tano, S., Takayama, T., Iwata, M. and Hashiyama, T.: Wearable Computer for Ubiquitous Informal Communication; Sixth International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing-IWSAWC 2006-(at 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS), pp.1-8(2006).
- [8] Michael Bonfert, Inga Lehne, Ralf Morawe, Melina Cahnbley, Gabriel Zachmann and Johannes Schöning: Augmented invaders: a mixed reality multiplayer outdoor game; Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology Article(VRST '17), No.48(2017).
- [9] 山本, 椎尾: 空気ペニー空間への描画による情報共有一; 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol.59, No.4, pp.39-40(1999).
- [10] 椎尾, 山本: コミュニケーションツールのための簡易型 AR システム; コンピュータソフトウェア, Vol.19, No.4, pp.246-253(2002).
- [11] Mayra D. Barrera Machuca, Paul Asente, Jingwan Lu, Byungmoon Kim and Wolfgang Stuerzlinger: Multiplanes: Assisted Freehand VR Drawing; Proceeding of Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology(UIST '17), pp.1-3(2017).
- [12] Rahul Arora, Rubaiyat Habib Kazi, Fraser Anderson, Tovi Grossman, Karan Singh and George Fitzmaurice: Experimental Evaluation of Sketching on Surfaces in VR, Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI '17), pp.5643-5654(2017).
- [13] Microsoft Inc.: HoloLens; <<https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>>2018年1月2日アクセス.
- [14] Microsoft Inc.; Visual Studio 2017: <<https://docs.microsoft.com/ja-jp/visualstudio/>>2018年1月27日アクセス.
- [15] Unity Technologies Inc.: Unity; <<https://unity3d.com/jp/unity>>2018年1月27日アクセス.

- [16] Microsoft Inc: HoloToolkit-Unity; <<https://github.com/Microsoft/HoloToolkit-Unity>>2018年1月27日アクセス.
- [17] HoloToolkit-Unity の Sharing の仕組みをできるだけ簡単に理解する; <<http://qiita.com/miyaura/items/da1d7bd253c3299327ba>>2018年1月27日アクセス.
- [18] HoloLens で言霊を撃ってみよう; <<https://atl-hiroo.recruit-tech.co.jp/showcase/archives/474>>2018年1月27日アクセス.
- [19] Google Inc.: Google Cloud Speech API; <<https://cloud.google.com/speech/?hl=ja>>2018年1月27日アクセス.
- [20] Cloud Speech API で音声をテキストに変換する; <<https://codelabs.developers.google.com/codelabs/cloud-speech-intro-jp/index.html?index=..%2F..%2Fgcp-next-tok#0>>2018年1月28日アクセス.
- [21] Google Cloud Speech Recognition; <<https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/google-cloud-speech-recognition-vr-ar-mobile-desktop-72625>>2018年1月28日アクセス.
- [22] TrailRenderer; <<https://docs.unity3d.com/ja/540/ScriptReference/TrailRenderer.html>>2018年1月28日アクセス.
- [23] LineRenderer; <<https://docs.unity3d.com/ja/540/ScriptReference/LineRenderer.html>>2018年1月28日アクセス.
- [24] Holograms 230; <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/holograms_230>2018年1月28日アクセス.
- [25] PTC Inc.: Vuforia; <<https://developer.vuforia.com/>>2018年1月28日アクセス.