

## 開放型3次元共生空間の構成に関する研究

著者	黒田 貴之
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/39898">http://hdl.handle.net/10097/39898</a>

平成 20 年度 博士学位論文 本審査資料

## 開放型 3 次元共生空間の構成に関する研究

東北大学大学院情報科学研究科  
情報基礎科学専攻  
博士課程後期 3 年の課程  
コミュニケーション論講座  
白鳥研究室

A6ID1002

黒田 貴之

平成 21 年 1 月 20 日

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.1.1	ユビキタス情報社会	1
1.1.2	ユビキタス情報環境の課題	2
1.1.3	共生コンピューティング	4
1.1.4	パーセプチャルウェアと3次元共生空間	5
1.1.5	3次元仮想空間	7
1.1.6	3次元仮想空間の問題点の概要	8
1.2	本研究の目的	10
1.3	本論文の構成	11
<b>第2章</b>	<b>ユビキタス情報環境における3次元仮想空間の利用に関する課題</b>	<b>14</b>
2.1	はじめに	14
2.2	3次元仮想空間の研究領域	15
2.3	分散型空間構成法に関する課題	17
2.3.1	分散型空間構成法に関する関連研究	17
2.3.2	分散型空間構成法に関する課題	18
2.4	利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題	18
2.4.1	利用者の知覚に基づく品質調整に関する関連研究	18
2.4.2	利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題	19

2.5	本論文における問題設定	20
2.6	本研究の位置付け	20
<b>第3章</b>	<b>分散型部分空間の結合に基づく開放型空間構成法</b>	<b>22</b>
3.1	はじめに	22
3.2	関連研究	24
3.3	分散形部分空間の結合に基づく開放型空間構成法の提案	26
3.3.1	提案手法の概要	26
3.3.2	本手法に基づく空間共有の例	28
3.3.3	本手法の効果の例	29
3.4	設計と実装	30
3.4.1	空間構成記述フォーマット SSML の定義	30
3.4.2	システムの全体構成	31
3.4.3	空間共有プロセス	32
3.4.4	アプリケーション提供プロセス	33
3.4.5	実装の概要	34
3.5	実験と評価	34
3.5.1	実験 (1): 従属結合した部分空間の共有実験	34
3.5.2	実験 (2): 結合した部分空間の共有動作の比較実験	36
3.5.3	評価	37
3.6	考察	38
3.6.1	関連研究との比較	38
3.6.2	今後の課題	40
3.7	おわりに	42

<b>第4章</b>	<b>利用者の知覚に基づく動的品質調整法</b>	<b>43</b>
4.1	はじめに . . . . .	43
4.2	関連研究 . . . . .	44
4.3	利用者の知覚に基づく動的品質調整法 . . . . .	46
4.3.1	提案手法の概要 . . . . .	46
4.3.2	RSP の定義 . . . . .	47
4.3.3	RSP の効果 . . . . .	49
4.3.4	RSP 知識の導入 . . . . .	50
4.3.5	RSP 知識に基づく動的品質調整 . . . . .	51
4.4	設計と実装 . . . . .	53
4.4.1	システム構成 . . . . .	53
4.4.2	実装の概要 . . . . .	56
4.5	実験と評価 . . . . .	59
4.5.1	実験 (1): RSP 知識獲得のための品質検査実験 . . . . .	59
4.5.2	実験 (2): RSP に基づく動的品質調整実験 . . . . .	64
4.5.3	評価 . . . . .	65
4.6	考察 . . . . .	68
4.7	おわりに . . . . .	69
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>71</b>
5.1	研究の背景 . . . . .	71
5.2	各章の要約 . . . . .	72
5.3	本研究の貢献 . . . . .	74
5.4	今後の課題 . . . . .	76

謝辭	77
參考文獻	78
發表論文	85

# 目次

1.1	u-Gap の概念	3
1.2	共認知に基づく RS と DS の相互理解と共生空間の概念	5
1.3	共生コンピューティングのアーキテクチャ	6
1.4	3次元仮想空間の研究領域の全体像と本研究の対象領域	9
1.5	本論文の構成	13
2.1	分散型空間構成法	17
2.2	3D モデルの解像度, 品質, および処理負荷の関係	19
2.3	本研究の位置付け	21
3.1	空間結合の片方向性	24
3.2	空間結合の排他性	25
3.3	対等結合と従属結合における空間結合の様子	26
3.4	従属結合による空間共有の様子	27
3.5	従来手法では困難な空間構成の例	29
3.6	SSML の記述例の一部	30
3.7	空間共有プロセス	32
3.8	アプリケーション提供プロセス	33
3.9	従属結合した部分空間の共有実験	35
3.10	結合した部分空間の共有動作の比較実験	36

4.1	RSPに基づく品質調整の効果	49
4.2	RSP知識の獲得方法の概要 (S1)	51
4.3	RSP知識に基づく品質調整法の概要 (S2)	52
4.4	提案システムの全体構成	54
4.5	RSP知識の具体例	58
4.6	プロトタイプRSP検査アプリケーションによる距離に基づく品質検査実験	60
4.7	視点からの距離に基づくRSP知識	61
4.8	プロトタイプRSP検査アプリケーションによる角度に基づく品質検査実験	62
4.9	視点からの距離と視線からの角度に基づくRSP知識	63
4.10	RSPに基づく品質調整の効果 - “広い範囲を眺める場合”	66
4.11	RSPに基づく品質調整の効果 - “ドライブシミュレータとして利用する場合”	67
5.1	共生コンピューティングへの貢献	74



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 ユビキタス情報社会

近年，ユビキタス情報社会の実現を目指した取り組みが，行政・企業・研究機関などで盛んに進められている．ユビキタス情報社会とは「いつでも・どこでも・誰でも利用者がコンピュータやネットワークを利用できる情報社会」を指す言葉であり，携帯電話をはじめとする移動端末や電子マネー決済に利用される IC カードなどの普及に伴い，その概念は広く一般にも認知されつつある．「ユビキタス (ubiquitous)」とは，ラテン語で「あらゆるところで」を意味する「ubique」が英語化した言葉であり，日本語では「偏在する」と訳されている．ユビキタス情報社会においては，コンピュータやネットワークが身の回りや街中のあらゆるところに「偏在」し，人々はそれらを簡単に，あるいは無意識のうちに利用しながら，便利で快適で豊かな生活を営むことができると期待されている．

こうしたユビキタス情報社会の基盤を成す技術に，ユビキタスコンピューティングやユビキタスネットワークがある．ユビキタスコンピューティングとは，コンピュータを現実空間上のあらゆるところに偏在させることを示した概念であり，1988年にゼロックス・パロアルト研究所のマーク・ワイザー氏によって提唱された．また，ユビキタスネットワークとは「あらゆる場所であらゆるものがネットワークに接続可能なネットワーク利用環境」のことであり，1999年頃から野村総合研究所によって提唱され始めた．ただし，一般的にはこれらの概念を総称してユビキタスコンピューティングという．あるいは単にユビキタスと称されることも多い．また日本国内においては，坂村健氏により1980年代初

頭にユビキタスコンピューティングと同様の概念が提唱されていたと言われている。現在、総務省が主導する国家プロジェクトとして u-japan 政策が打ち出され、国家レベルでも様々な研究・開発が進められている。

ユビキタス情報社会のための情報通信基盤であるユビキタス情報環境は、情報通信端末の偏在性と移動性の2軸によって成り立つと考えられている。具体的には、情報家電やウェアラブルコンピュータや超小型 IC チップなどに代表される埋め込み型コンピュータ、アドホックネットワークなどの無線ネットワークや携帯電話・PDA などの移動端末、そしてこれらをつなぎ合わせる IC タグ・RFID システムやセンサネットワークなどのセンサ技術などから構成される。近年、これらの技術は急速に発達し、その結果 IT (Information Technology) は人々の日常生活に深く浸透しつつある。これに伴い、ネットワークサービスの利用者也爆発的に増加している。

### 1.1.2 ユビキタス情報環境の課題

ネットワークサービスの利用者の増加に伴い、利用者の多様化とサービス利用状況の多様化も急速に進展した。コンピュータネットワークが主に研究や実験目的に使用されていた 1969 年から 1980 年代までは、研究に従事する研究者たち、すなわち、ある程度の知識や技術を備えた利用者のみが、一定の目的でネットワークサービスを利用していたといえる。しかし、インターネットが全世界に爆発的に普及し、今後ユビキタス情報社会に向けて、さらに利用者が増加することが確実視されている現在では、知識や技術、思想などが異なる利用者が様々な目的を持ってネットワークサービスを利用している。このことは、ユビキタス情報環境の利便性という光の側面だけではなく、これまでの社会には見られなかったユビキタス情報社会の影の側面の問題をも顕在化させることとなった。その具体的な例としては、情報の氾濫、サービスの複雑さや使いにくさ、プライバシーの侵害、IT 犯罪、デジタルディバイドなどがある。これらのユビキタス情報社会の問題へ対応す

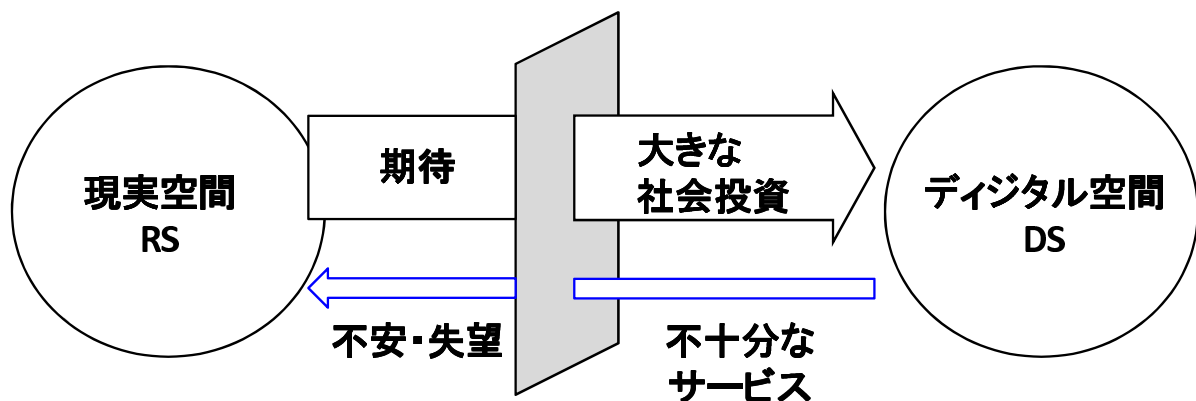


図 1.1: u-Gap の概念

るユビキタス情報環境の技術面での課題としては、情報検索、セマンティックウェブ、コンテキストウェアサービス、利用者指向のサービス提供、セキュリティ、ユーザインタフェースなどが挙げられる。これらの課題については、現在様々な研究機関において精力的に研究開発が進められている。

こうした現在のユビキタス情報社会の問題に対する取り組みは、それぞれの問題についての個別的な対応であると考えることができる。これに対し、我々はこれまで、共生コンピューティングの概念 [1, 2, 3] に基づき、次世代のユビキタス情報社会へ向けた様々な問題に対する包括的な研究活動を推進してきた。共生コンピューティングでは、ユビキタス情報環境における問題を総合的な観点で捉え、その要因のひとつとして、現実空間 (RS: Real Space) とデジタル空間 (DS: Digital Space) の間に存在するギャップに着目している。本論文では、このギャップを u-Gap と呼ぶ。u-Gap の概念を図 1.1 に示した。これまで RS 上の人々は DS に対して大いなる期待を抱き、大量の情報のアップロードや、様々なシステムやサービスの構築など、RS から DS への大きな社会投資を続けてきた。しかしながら、デジタルディバイドなどの問題が発生している通り、DS から RS への情報やサービスの提供は不十分であり、逆に IT 犯罪によって被害を受けることもあるなど、利用者は DS に対して不安や失望を感じる結果となっている。こうした、RS から DS への社会投

資の大きさに対する，DS から RS へもたらされる恩恵の小ささのギャップが u-Gap である．共生コンピューティングでは，現在のユビキタス情報環境においては RS と DS の間の相互理解が不十分であると考えており，これが u-Gap の発生原因であると捉えている．一例として，DS はセンサからの位置情報の取得や利用者からの入力により RS の情報を取得できるが，それだけでは利用者の意図や要求を十分に汲み取ることができるとは言い難い．それは，利用者の行動の理由や社会的な知識などが利用者の意図や要求を汲み取るために必要不可欠であるからである．このように，現状では DS は RS を十分に理解しているとはいえない状態である．また，現状では DS に氾濫する情報・サービス・知識が適切に分かりやすく RS に提供されているとはいえず，その結果，RS も DS を十分に理解しているとはいえない状態となっている．

### 1.1.3 共生コンピューティング

前節で述べた u-Gap を解消し，次世代のユビキタス情報社会を支える情報通信基盤技術が共生コンピューティングである．共生コンピューティングでは，RS と DS が互いを認知する“共認知”の実現によって u-Gap を解消し，便利・快適と安心・安全を兼ね備えた，豊かなユビキタス情報社会を実現すること目指している．

共認知に基づく RS と DS の相互理解と共生空間の概念を図 1.2 に示す．共認知は，DS が RS を認知する RS 認知と，RS が DS を認知する DS 認知からなる．RS 認知とは，RS の環境情報，個人や集団の行動，経験的知識などを DS が自律的に獲得することである．この RS 認知に関係する技術としては，利用者の入力支援，利用者の要求推測，センサデバイスなどが挙げられる．また，DS 認知とは，DS に存在するサービス，情報などを適切に使いやすく RS に提供することである．この DS 認知に関係する技術としては，情報検索，マルチメディア通信サービス，3次元仮想空間などが挙げられる．RS 認知と DS 認知が共に作用し共認知が形成されると，RS と DS の間に相互理解が生まれ，u-Gap は解消

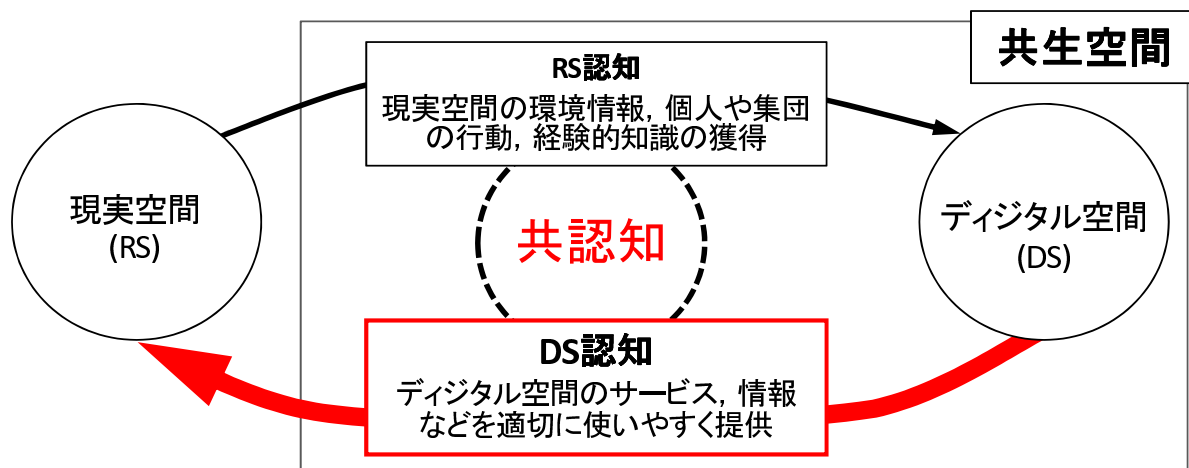


図 1.2: 共認知に基づく RS と DS の相互理解と共生空間の概念

される。本研究では、共認知のメカニズムによって拡張されたデジタル空間を“共生空間”と呼ぶ。

1.1.2 節で述べたように、u-Gap では RS から DS への社会投資に対し DS から RS へのサービスの提供が不十分であること、すなわち DS から RS へ向う情報やサービスの流れが悪いことが問題となっている。そこで本研究では、共認知のうち、特に DS 認知の拡大を目指し、DS から RS へ向かうサービスや情報の流れをよくすることによって u-Gap の解消を目指す。本研究では、DS 認知に関連する技術のうち、利用者に直観的な理解を与えるための高い効果が期待される 3 次元仮想空間を対象とする。

#### 1.1.4 パーセプチャルウェアと 3 次元共生空間

従来のユビキタスコンピューティングのアーキテクチャと共生コンピューティングのアーキテクチャを比較し、図 1.3 に示す。共生コンピューティングのアーキテクチャは、ユビキタスコンピューティングのアーキテクチャに、パーセプチャルウェア、ソーシャルウェア、ネットワークウェアの 3 層のソフトウェアコンポーネントを加えた構成となっている。

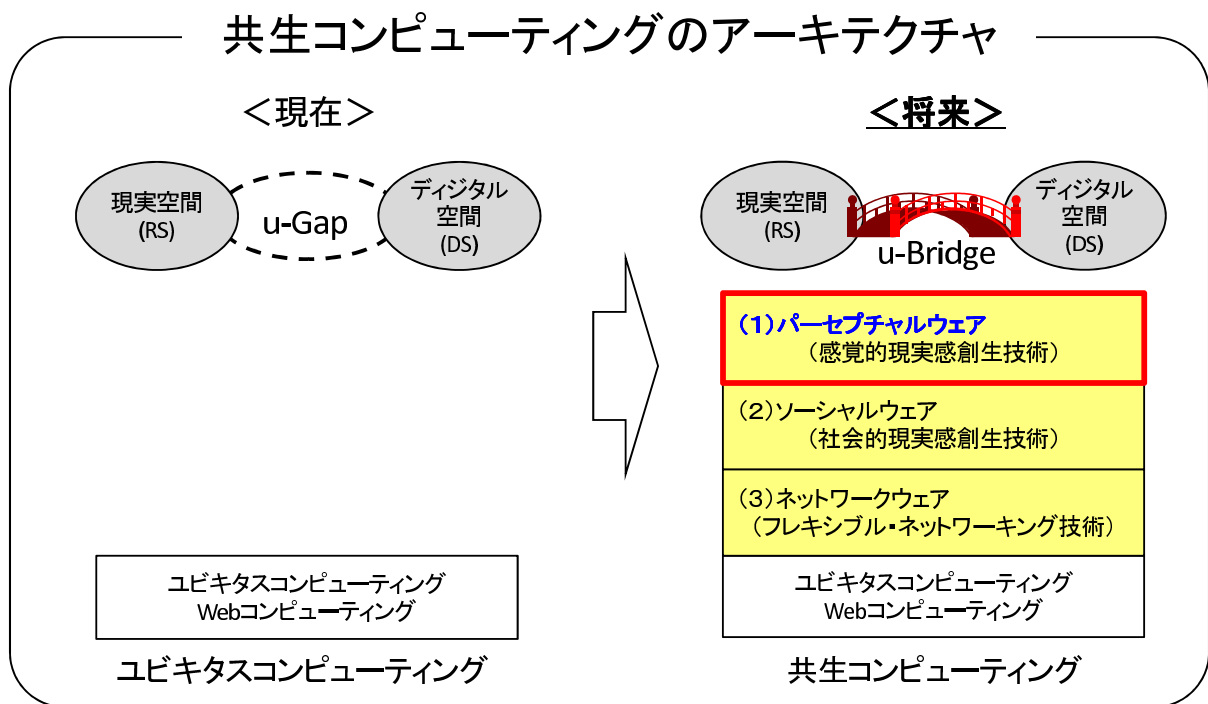


図 1.3: 共生コンピューティングのアーキテクチャ

パーセプチャルウェアとは、DS が提供するサービスを直感的に理解するための感覚的現実感を実現するためのソフトウェアの総称である。これらのソフトウェアは、RS のユビキタス機器などからの信号・データに基づき、人・集団の行動、環境の状態等を認知し、その情報を DS に提供する。また、DS から提供された情報を、人の状況や嗜好を反映して、感覚的現実感を高める形式で提供することにより、提供された情報に対する利用者の認知性を高める機能を持つ。

ソーシャルウェアとは、DS が提供する社会活動を支えるサービスの社会的現実感を実現するためのソフトウェアの総称である。ソーシャルウェアは、パーセプチャルウェアの提供する情報と社会の仕組み、規範、常識を組み合わせることにより、人の意図、心理状況などを理解し、その情報を DS に提供する。また、DS から提供された情報に社会的現実感を与えるための処理を行うことにより、これに対する利用者の安全・安心の感覚を高

める機能を持つ。

ネットワークウェアとは、フレキシブル・ネットワーキング技術を実現し、RS と DS の間のコミュニケーションを支援・強化するソフトウェアの総称である。情報・知識・サービスを、現実空間やデジタル空間内で効果的に流通させるための機能を提供する。

本研究では、これらのソフトウェアコンポーネントのうち、パーセプチャルウェアを主な研究対象とする。具体的には、3次元仮想空間により、利用者がDSから受け取る情報に対する感覚的現実感を高め、DS認知を促すための機能を対象とする。また、本研究では、共認知のメカニズムによって拡張されたデジタル空間である“共生空間”のうち、3次元仮想空間による実現形態を、特に“3次元共生空間”と定義する。

### 1.1.5 3次元仮想空間

3次元仮想空間とは、立体的な表示物、すなわち3Dモデルによって表現されたDS上の仮想的な空間である。

コンピュータの操作にモニタとキーボードを利用するようになってからの初期のユーザインタフェースは、文字のみを用いたCUI(Character User Interface)であった。1980年代頃から、アプリケーションの構成要素をグラフィカルに表示するGUI(Graphical User Interface)が登場し、利用者はマウスなどのポインティングデバイスを用いて、表示されたアイコンやウィンドウなどのアプリケーションの構成要素をクリックすることで、直観的にコンピュータを操作することが可能となった。3次元仮想空間を用いたインタフェースは、広義ではGUIに分類されるが、従来のGUIではモニタ上の平面的な位置のみを考慮していたのに対し、3次元仮想空間では、個々のアプリケーション構成要素に3次元的な位置情報を付加し、奥行きまでを考慮してモニタ上での表示位置を計算している点で、従来のGUIとは異なる。このような観点から、CUIを1次元インタフェース、従来のGUIを2次元インタフェース、3次元仮想空間によるインタフェースを3次元インタフェース

と呼ぶこともある。

3次元仮想空間の特徴の一つは、その高い表現力である。GUIがCUIに比べて高い表現力を持つように、3次元仮想空間は従来の2次元インタフェースと比べて高い表現力を持っているといえる。大規模な3次元仮想空間による仮想的な社会活動の場（メタバース）[4]や、3次元化されたパソコンのデスクトップ環境[5]などは、3次元仮想空間の高い表現力を活用した例であるといえる。また、3次元仮想空間のもう一つの重要な特徴として、現実空間と親和的に融合可能であるという点が挙げられる。これは、3次元仮想空間が我々が存在する現実空間と同様の構造を持っていることに由来する特徴である。この特徴を利用した例としては、立体的な表示による分かりやすい地図アプリケーション[6]、現実空間の視界上に重ね合わせた直観的な情報提示を実現する拡張現実技術[7, 8]、拡張現実を利用した立体的な建造物のレビュー機能や遠隔会議アプリケーション[9]などがある。このように、3次元仮想空間は表現力が高く、現実空間と親和的に融合可能であるという特長を備えており、利用者に“現実空間上の事物を扱っているような感覚”，すなわち“物理的なメタファ”に基づく直観的な理解を与える効果がある。こうした特長は、利用者同士のコミュニケーションや協調作業において特に有効であると考えられており、これまでも数多くの3次元仮想空間システムが研究されてきた[10, 11, 12, 13, 14, 15]。

以上より、3次元仮想空間は利用者のDS認知に必要な感覚的現実感の創出において、極めて重要な技術要素であるといえる。

### 1.1.6 3次元仮想空間の問題点の概要

3次元仮想空間は、個々のアプリケーションの構成要素に対して3次元的な位置情報を付加する必要があることから、アプリケーションを構成するための開発コストも高く、一般の利用者によるアプリケーションの構成も困難であった。しかしながら、次世代のコンピュータ利用環境であるユビキタス情報環境においては、アプリケーションはこれまでで以



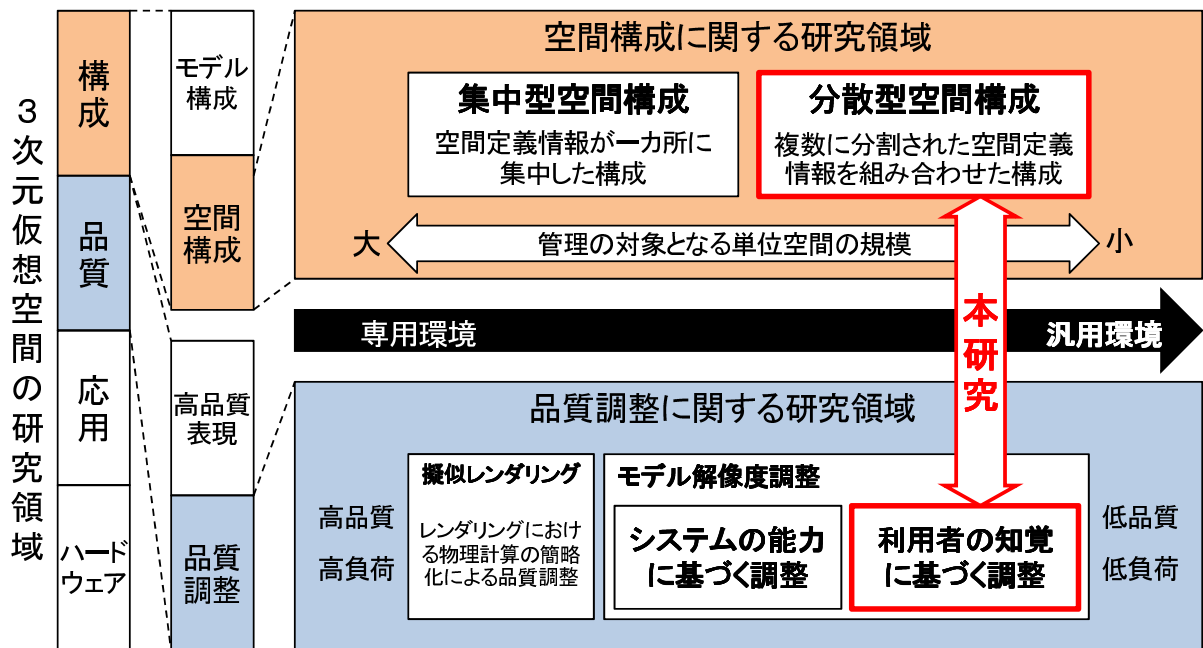


図 1.4: 3次元仮想空間の研究領域の全体像と本研究の対象領域

上に様々な利用形態で、多様な目的に利用されることが考えられるため、それぞれの利用形態に適応させるための開発コストの軽減は必要不可欠である。そのためには、利用者自身による利用形態や利用目的に合わせたアプリケーションの調整や構成が簡単に行えるような、新しい3次元仮想空間の構成法の実現が必須である。

また、3次元仮想空間は利用者への情報提示において、奥行きまでを考慮して表示位置を計算していることから、従来の2次元インタフェースと比べて一般にコンピュータやネットワークへかかる負荷が高い。そのため、これまでの3次元仮想空間は必要な計算資源やネットワーク帯域を安定して確保可能な専用環境における利用を基本として発展してきた。しかしながら、ユビキタス情報環境においては、必ずしも安定した資源を確保できるとは限らず、これにより3次元仮想空間の効果的な利用が困難になることが考えられる。

3次元仮想空間に関する研究領域の全体像と本研究の対象領域を図1.4に示した。3次元仮想空間の研究領域は、「構成」「品質」「応用」に関わるソフトウェアの研究領域と「ハー

ドウェア」の研究領域に大きく分類できる。このうち構成に関する研究領域は、さらに「モデル構成」と「空間構成」の2つの研究領域、品質に関する研究領域は「高品質表現」と「品質調整」の2つの研究領域に分類できる。本研究では、これらの研究領域のうち、上記の問題を解決して、ユビキタス情報環境における3次元仮想空間の効果的な利用を実現するための重要な研究分野である、以下の2つの研究分野に取り組む。

- 3次元仮想空間の空間構成
- 3次元仮想空間の品質調整

これらの研究分野に関する説明と、本研究で取り組む具体的な問題については2章で詳細に述べる。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、次世代の豊かなユビキタス情報社会の実現へ向けて、共認知のメカニズムを備えたデジタル空間である共生空間を構築することによるu-Gapの解消を目指す。特に本研究では、3次元仮想空間による共生空間の実現形態である3次元共生空間を対象とし、DS認知を促進することによってu-Gapの解消に貢献する。しかしながら、一般に3次元仮想空間を利活用するためには、高速な計算能力や広帯域なネットワークが必要となり、空間を構成する作業も容易ではない。そのため、これまでの3次元仮想空間は資源状況が安定し利用状況も限定された専用環境における利用を基本としており、ユビキタス情報環境における効果的な利用は困難であった。

そこで本研究では、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現を目的とする。そして、この目的を達成するための課題として、本研究では多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現を目指し、具体的には以下の2つの課題に取り組む。

(T1) 3次元仮想空間の空間構成に関する課題

利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

(T2) 3次元仮想空間の品質調整に関する課題

限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現

これに対し、本研究では、設計者間での事前の調整を必要としない開放型の空間構成法と、システムレベルの品質と利用者の知覚レベルの品質との対応関係に関する知識の導入による利用者の知覚に基づく品質調整法を提案する。また、提案手法に基づくプロトタイプシステムを構築し、実験を通じてその有効性を検証する。

### 1.3 本論文の構成

図 1.5 に本論文の構成を示す。本論文は全 5 章からなる。第 1 章「序論」では、本研究の背景と全体概要を示した。

第 2 章「ユビキタス情報環境における 3 次元仮想空間の利用に関する課題」では、本研究で扱う課題についての詳細を示し、関連研究などの現状と本論文の位置付けを示す。

第 3 章「分散型部分空間の結合に基づく開放型空間構成法」では、利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型 3 次元仮想空間構成法を実現するための、空間結合手法について示す。そして、提案手法を実現するプロトタイプシステムを構築し、それをを用いた実験により提案手法の有効性を示す。

第 4 章「利用者の知覚に基づく動的品質調整法」では、限られた資源状況でなるべく高い品質を提供する 3 次元仮想空間システムを実現するための、利用者の知覚に基づく品質調整法について示す。また、利用者の知覚レベル品質に関する検査手法およびその結果について示す。そして、提案手法を実現するプロトタイプシステムを構築し、品質検査の結果として得られた知識と構築したプロトタイプシステムを用いた実験により、提案手法の有効性を示す。

第5章「結論」では、まとめとして研究成果を要約し、本研究の結論を述べ、今後の課題を挙げる。

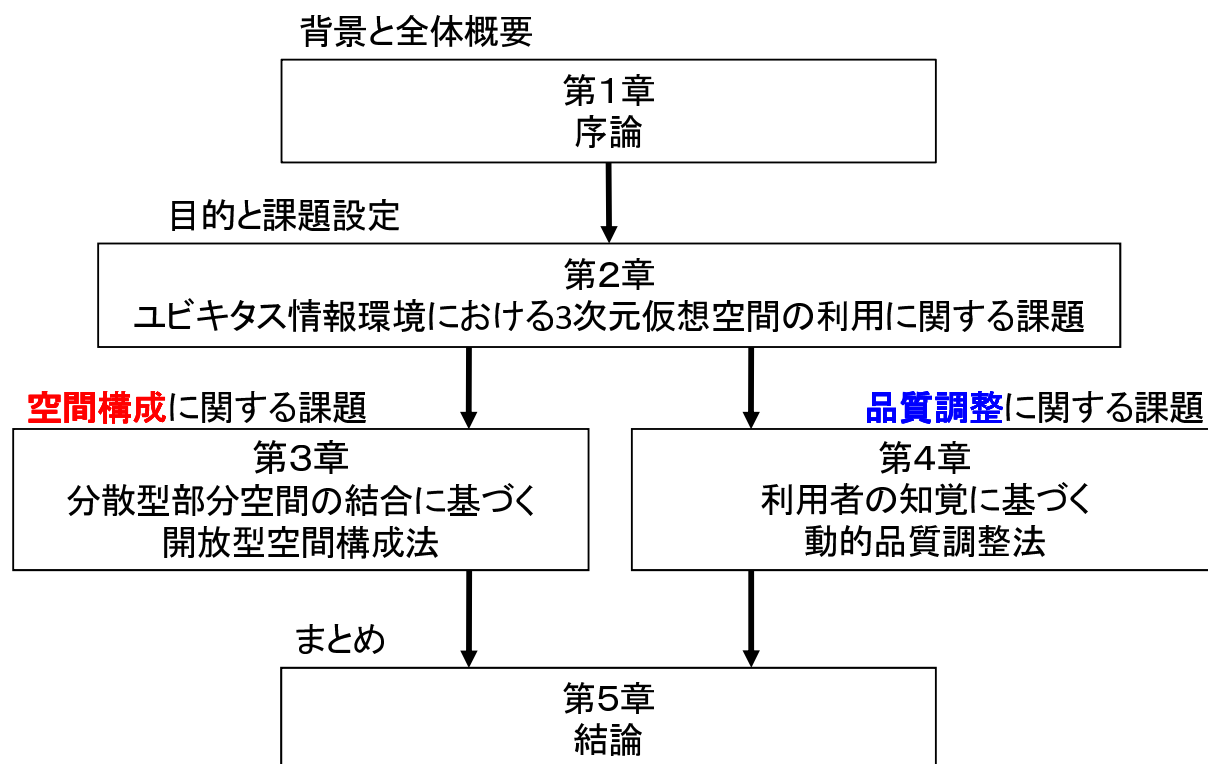


図 1.5: 本論文の構成

## 第2章 ユビキタス情報環境における3次元仮想空間の利用に関する課題

### 2.1 はじめに

近年，ユビキタス情報環境が社会基盤として広く普及し始めており，ユビキタス情報社会が着実に到来しつつある．しかし，それに伴うデジタルディバイドなどの問題も顕在化してきている．共生コンピューティング (Symbiotic Computing)[1, 2, 3] では，これらの問題の原因が現実空間 (RS: Real Space) とデジタル空間 (DS: Digital Space) の間のギャップ，すなわち u-Gap にあるとし，RS と DS が互いを認知する「共認知」による解決を目指している．「共認知」は，DS が RS を認知する RS 認知と，RS が DS を認知する DS 認知からなる．本研究では3次元仮想空間を用いて，RS 上の利用者が DS 上の情報を扱う際の感覚的現実感を創生し，DS 認知を促すことにより，共認知の促進と u-Gap の解消に貢献することを目指している．そのためには，資源状況の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現が必要不可欠である．

3次元仮想空間は，アプリケーション内の個々の表示要素についてその3次元的な形状情報を与えておき，描画の際には奥行きを考慮して画面上での表示位置を計算する必要がある．そのため，従来の2次元のインタフェースを持つアプリケーションと比較して，一般に開発コストやシステムへの負荷が高い．具体的には，大容量の空間定義情報の配送にかかる負荷，空間の描画処理にかかる負荷，空間定義に必要な開発コストなどが高い．そのため，これまでの3次元仮想空間は，必要な計算資源やネットワーク資源が安定して確保可能であり，空間の利用状況や利用目的も限定された，専用環境における利用を基本と

して発展してきた。このような専用環境における3次元仮想空間の利用例としては、ゲーム [16, 17] や軍事用トレーニング [18] などが挙げられる。

しかしながら、本研究で想定するユビキタス情報環境においては、資源状況は多様かつ不安定であり、利用状況や利用目的も多様に変化することを前提としなければならない。このような環境で3次元仮想空間を効果的に利用するためには、多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現が必須である。本研究では、そのための課題として、1.1.6 節で以下の2点を挙げた。

(T1) 3次元仮想空間の空間構成に関する課題

(T2) 3次元仮想空間の品質調整に関する課題

本章では、まず3次元仮想空間の研究領域全体を概観し、続いてこれらの課題のそれぞれについて、関連研究などの現状やその問題点の詳細を示し、本研究で取り組むべき具体的な課題を明らかにする。

以下、2.2 節では3次元仮想空間の研究領域全体の概要について述べ、2.3 節と2.4 節では、それぞれ(T1)と(T2)について、関連研究などの現状やその問題点を詳細に示し、2.5 節ではそれらの問題点を踏まえて、本研究全体の問題設定を定義する。

## 2.2 3次元仮想空間の研究領域

3次元仮想空間の研究領域の概要を図1.4に示す。

3次元仮想空間の研究領域は、「構成」「品質」「応用」に関わるソフトウェアの研究領域と「ハードウェア」の研究領域に大きく分類できる。このうち構成に関する研究領域は、さらに「モデル構成」と「空間構成」の2つの研究領域、品質に関する研究領域は「高品質表現」と「品質調整」の2つの研究領域に分類できる。本研究ではこれらの研究領域のうち、ユビキタス情報環境のような多様な環境への適応性を高めるための重要な研究領域として、「空間構成」と「品質調整」の2つの研究分野を扱う。

3次元仮想空間の空間構成法について、専用環境と汎用環境のいずれにおいて適性があるかという観点から分類すると、さらに集中型と分散型の2種類の空間構成法に大別できる。集中型空間構成法は、空間の定義情報が一つの端末やサーバに集中した形態の空間構成法である。集中型の空間構成は単純で分かりやすい反面、空間全体を一括して管理・運用する必要があるため、空間全体の規模が大きくなるほど管理コストも高くなる。すなわち、管理対象となる単位空間の規模が大きく、多様な利用状況や利用目的への適応性に欠ける専用環境向けの空間構成法であるといえる。一方、分散型空間構成法は、複数のサーバに分散配置された空間定義情報を必要に応じて組み合わせることが可能な空間構成法である。分散型空間構成法を用いると、他のサーバで管理されている空間の再利用や組み合わせの変更による空間構成の変更が可能となる。また、処理効率の面では、分散配置された空間同士の通信によるオーバーヘッドは生じるものの、空間全体を一括して処理する集中型とは異なり必要な部分に限定した通信を行うことで、より大規模な空間にも柔軟に対応可能な空間構成法であるといえる。すなわち、分散型空間構成法は、管理対象となる単位空間の規模が小さく、多様な利用形態や利用目的への適応性に優れた汎用環境向けの空間構成法である。本研究では分散型3次元仮想空間構成に関する課題を扱う。

3次元仮想空間の品質調整について、同様に専用環境と汎用環境における適性の観点で分類すると、疑似レンダリングによるレンダリング処理の簡略化に関する研究分野とモデル解像度の調整に関する研究分野に大別できる。また、モデル解像度の調整に関する研究分野については、さらにシステムの負荷に基づく調整と利用者の知覚に基づく調整の2つの分野に分類できる。このうち、疑似レンダリングによるレンダリング処理の簡略化の手法は、比較的高品質で高負荷な表現手法を用いる場合における品質調整法であり、やや専用環境向けの研究領域であるといえる。一方、モデル解像度の調整は低品質で低負荷な表現が必要な場合においても有効な品質調整法であり、汎用向けの品質調整法であるといえる。特に、利用者の知覚に基づく品質調整は、システムの能力に基づく品質調整と比べ



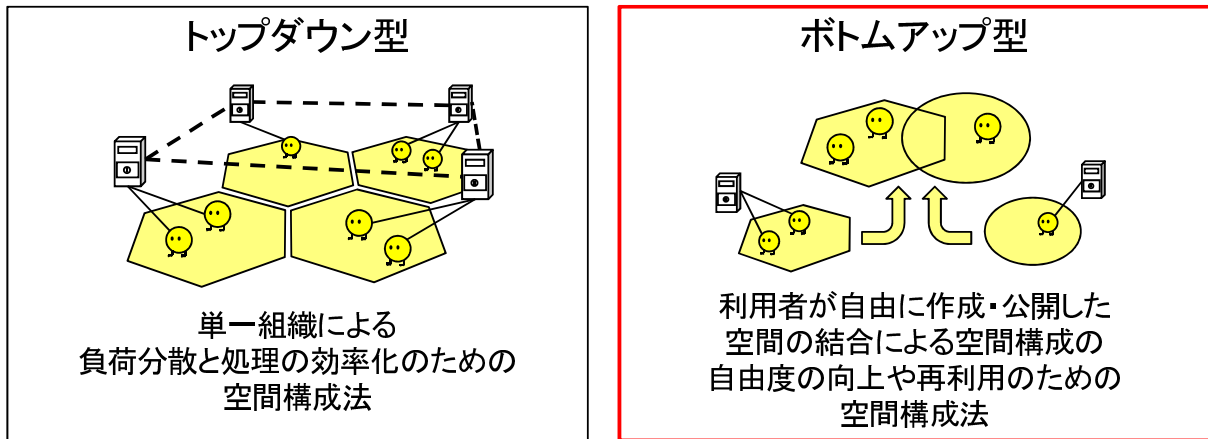


図 2.1: 分散型空間構成法

てきめの細かい品質調整が可能であり，広範囲にわたる品質調整が可能であることから，より多様な資源状況への適応性に優れた品質調整法であるといえる．本研究では利用者の知覚的に基づく品質調整を扱う．

## 2.3 分散型空間構成法に関する課題

### 2.3.1 分散型空間構成法に関する関連研究

分散型空間構成法とは，複数のサーバに分散配置された空間定義情報を必要に応じて組み合わせることが可能な空間構成法である．分散型空間構成法には，単一組織による処理の効率化と負荷分散のための空間構成法である“トップダウン型”の空間構成法 [19, 20, 21, 22, 23] と，利用者が自由に作成・公開した空間の結合による，空間構成の自由度の向上や空間の再利用のための空間構成法である“ボトムアップ型”の空間構成法 [14, 24] がある．図 2.1 に，これらの分散型空間構成法を示す．

トップダウン型は，系統的に整理された空間分割により効率的な通信や負荷分散が可能であるため，スケーラビリティに優れる空間構成法である．しかしながら，空間構成における利用者の自由度は低く，管理組織も必要であり，さらに利用者が一部の空間を流用し

て新しい空間を構成するなどといった空間の再利用は困難であるなど、やや専用環境向けの空間構成法であるといえる。

一方、ボトムアップ型は利用者の空間構成における自由度が高く、空間の再利用が可能であるなど、多様な利用形態への適応性に優れた汎用環境向けの手法であるといえる。

### 2.3.2 分散型空間構成法に関する課題

ボトムアップ型の空間構成法は、空間構成における自由度が高く、空間の再利用が可能であるなど、多様な利用形態への適応性が期待される分散型部分空間構成法である。しかしながら、この手法では全体を統括する管理組織が存在しないため、異なる利用者によって設計された設計方針の異なる空間同士の結合が必要な場合においては、それぞれの空間の設計者が互いに調整し合うなどの対応を取る必要があった。このことは空間の再利用性を大きく低下させる原因となるため、問題となっていた。

すなわち、空間の再利用性や結合の柔軟性の高い開放型の3次元仮想空間構成法を実現するためには、結合される空間同士の調整を必要としない空間結合手法を実現する必要がある。これが本研究における分散型3次元仮想空間構成の課題である。

## 2.4 利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題

### 2.4.1 利用者の知覚に基づく品質調整に関する関連研究

3Dモデルの解像度と利用者の知覚品質の関係を図2.2に示す。3Dモデルの解像度とは、具体的には、その3Dモデルを構成する頂点の数であり、利用者の知覚品質とは、その3Dモデルを見た利用者が実際に感じる主観的な品質のことである。図2.2中の左右の矢印に示したように、一般に3Dモデルの解像度と品質と処理負荷の間には、解像度が高いほど高品質ながら処理負荷が高く、逆に解像度が低いほど低品質ながら処理負荷も低いといったトレードオフの関係がある。

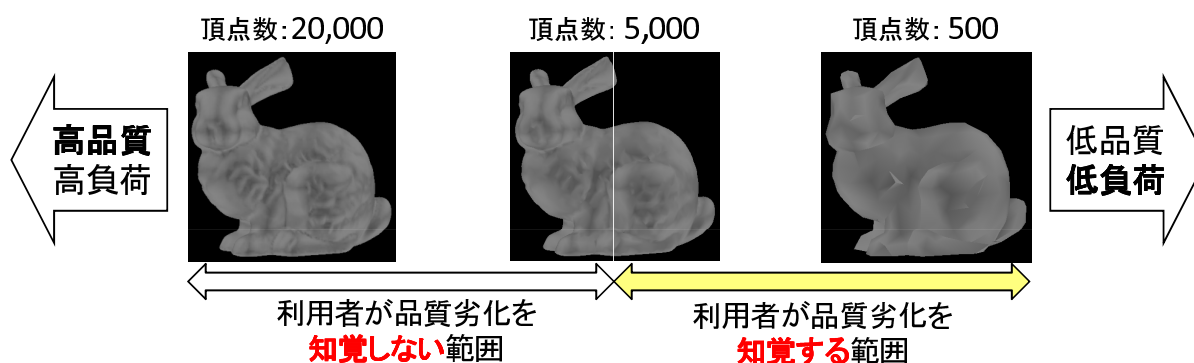


図 2.2: 3D モデルの解像度，品質，および処理負荷の関係

従来の利用者の知覚に基づく品質調整法 [25, 26] では，利用者が品質の劣化を知覚しない範囲内において最も低い品質を調整目標の品質としていた．すなわち，これらの手法の目的は，利用者に品質劣化を知覚させずになるべく処理負荷を低減することであった．この手法は資源状況がある程度安定した環境においては一定の効果があるが，利用者に品質劣化を感じさせない範囲に限定された調整手法であり，利用者が品質劣化を感じる事が避けられない程の資源状況の悪化時には，適切な調整は困難であった．

## 2.4.2 利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題

本研究では，不安定な資源状況への適応性を向上させるため，利用者が品質の劣化を知覚する範囲に及ぶ品質調整を対象とする．しかし，利用者が品質の劣化を知覚する範囲においては，3D モデルの解像度と利用者の知覚品質の間には非線形性な対応関係が存在するため，利用者の知覚品質に基づく適切な品質調整は困難である．

すなわち，利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題とは，利用者が品質劣化を知覚する範囲における利用者の知覚品質に基づく適切な品質調整の実現である．

## 2.5 本論文における問題設定

本研究の目的は、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現である。そのためには、ユビキタス情報環境へ対応するための、多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現が必要となる。そこで本研究では、3次元仮想空間の空間構成に関する課題のうち、特に分散型空間構成法に関する課題として、

(T1) 利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

3次元仮想空間の品質調整に関する課題のうち、特に利用者の知覚に基づく品質調整に関する課題として、

(T2) 限られた資源状況における利用者の知覚レベル品質に基づく品質調整法の実現

の2つを研究課題とする。

## 2.6 本研究の位置付け

本研究の位置付けを図2.3に示す。まず、分散型3次元仮想空間構成に関する位置付けを述べる。分散型3次元仮想空間構成に関する従来研究には、単一組織による処理の効率化のためのトップダウン的な分散型空間構成法、ボトムアップ的な分散型空間構成法のうち結合される空間の同士の調整により設計者の異なる空間の結合を実現する手法がある。これに対し、本研究では、結合される空間同士の調整を必要としない分散型空間構成法を実現し、空間の再利用性と空間結合の柔軟性を向上させた開放型の空間構成法を実現する。次に、利用者の知覚に基づく品質調整に関する位置付けを述べる。利用者の知覚に基づく品質調整に関する従来研究には、利用者の知覚レベル品質に基づくが利用者が品質の劣化を知覚しない範囲に限定された品質調整法、利用者が品質劣化を知覚する範囲に及ぶ

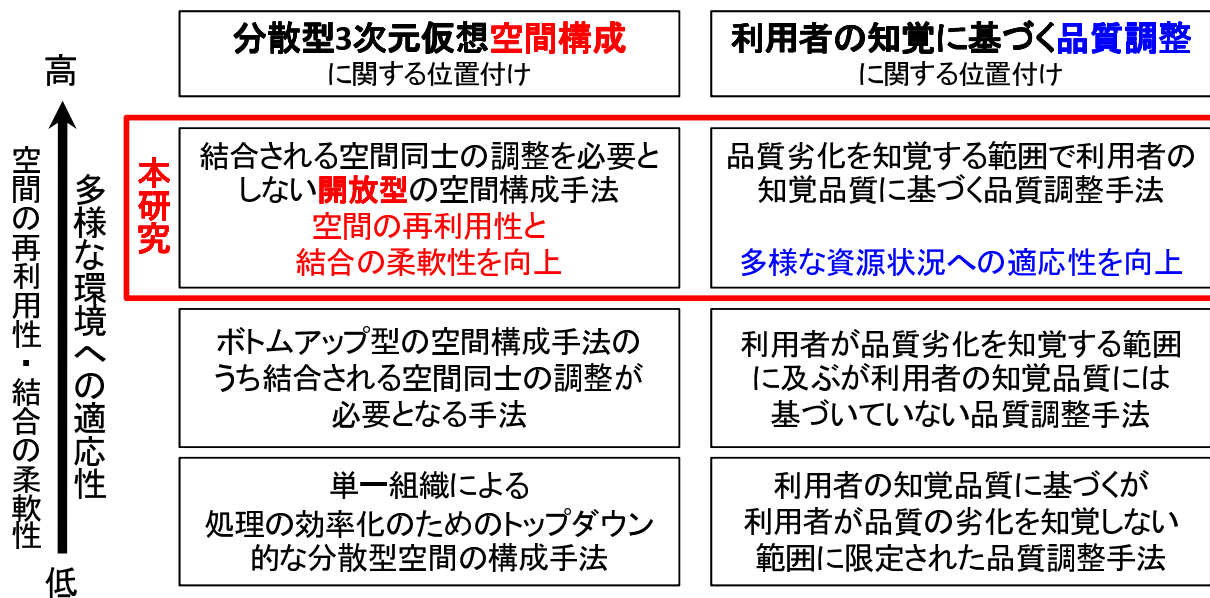


図 2.3: 本研究の位置付け

が利用者の知覚レベル品質には基づいていない品質調整法があるが、これに対し本研究では、品質劣化を知覚する範囲で利用者の知覚レベル品質に基づく品質調整法を実現し、多様な資源状況への適応性を向上する。これらの従来研究については、3.2 節と 4.2 節で詳細に述べる。

# 第3章 分散型部分空間の結合に基づく開放型空間構成法

## 3.1 はじめに

近年，ネットワーク・計算機端末の発達に伴い，ユビキタス情報社会を目指した取り組みがおこなわれており，IT(Information Technology) は人々の日常生活の中に深く浸透しつつある．その結果，ネットワークサービスの利用者の増加や利用状況の多様化が進んでおり，それに伴う情報の氾濫，サービスの複雑さや使いにくさ，プライバシーの侵害，IT 犯罪，デジタルディバイドなどの問題も顕在化してきている．共生コンピューティング(Symbiotic Computing)[1, 2, 3] では，これらの問題の原因が現実空間 (RS: Real Space) とデジタル空間 (DS: Digital Space) の間のギャップである u-Gap にあるとし，RS と DS が互いを認知する「共認知」による解決を目指している．「共認知」は，RS の環境情報，個人や集団の行動，経験的知識を DS が自律的に獲得する RS 認知と，DS に存在するサービス，情報などを適切に使いやすく RS に提供することである DS 認知からなる．本研究では，このうち DS 認知の拡張を目的とし，3次元仮想空間が持つ利用者に直観的な理解を与える効果に着目した．3次元仮想空間は一般に開発コストや運用にかかる計算処理やネットワークなどの負荷が高く，これまでは資源状況が安定し，利用状況も限定された専用環境における利用を基本として発展してきた．そのため，資源状況が不安定で利用状況が多様なユビキタス情報環境においては，3次元仮想空間の効果的な利用は困難であった．

本研究では，資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現を目的とし，そのための課題である多様な環境への適応性の高い

開放型の3次元仮想空間構成法の実現へむけた、より具体的な課題として、以下の2点を挙げた。

(T1) 3次元仮想空間の空間構成に関する課題

利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

(T2) 3次元仮想空間の品質調整に関する課題

限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現

本章では、このうち(T1)について述べる。ボトムアップ型の分散型空間構成法においては、一般の利用者が自由に空間を設計・公開することが可能であり、利用者は空間同士に参照関係を定義することによってそれらの空間を結合し、新たな空間として再利用することができる。しかしながら、従来の空間の結合方式においては、結合した空間同士の双方向性を実現するためには両方の空間を書き換える必要があることや空間の結合が排他的であるなどの制約があり、空間の効果的な再利用は困難であった。

この問題に対し、本研究では、同じ空間を共有する利用者間で全体空間構成が異なる状況を許容することにより、参照先空間へ移動した際に、移動先の空間が元の空間へ参照を定義していない場合でも全体空間構成を維持する空間結合手法を提案する。本提案では、従来の空間結合に存在した制約にとらわれない自由な結合により、空間の再利用性と空間結合の柔軟性を向上させる。

以下、3.2で関連研究について述べ、3.3節では提案である従属型空間結合手法についての詳細を述べる。3.4では提案手法を実現するプロトタイプシステムの設計と実装について述べ、3.5節では、プロトタイプシステムを用いた実験を通じて、提案手法の有効性を検証する。最後に、3.7で本章のまとめを述べる。

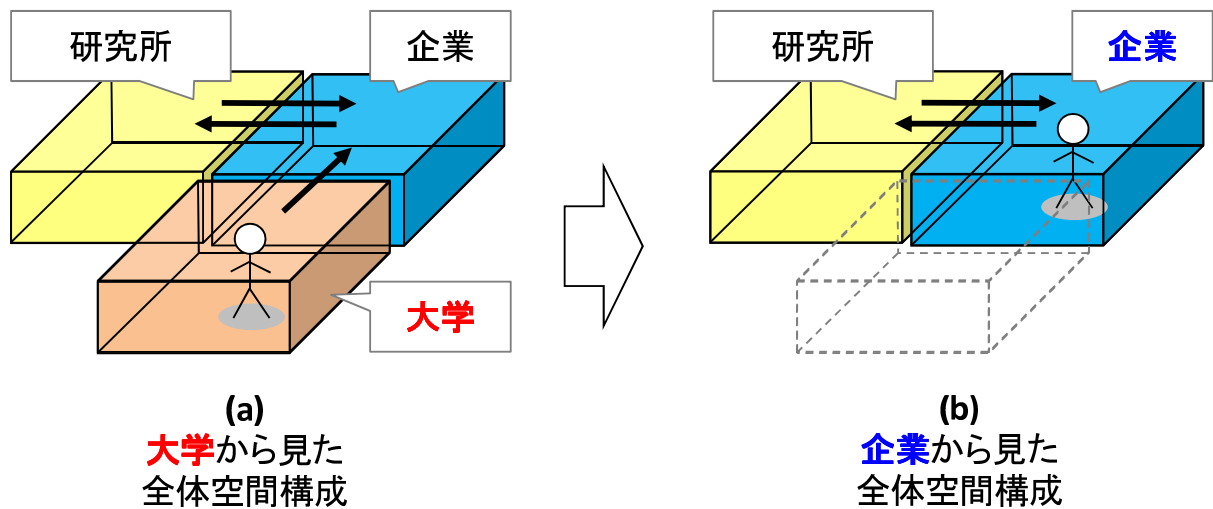


図 3.1: 空間結合の片方向性

## 3.2 関連研究

既存の分散型空間構成法には、大域的に設計した空間を部分空間に分割していく手法である“トップダウン型”の空間構成法 [19, 20, 21, 22, 23] と、まず部分的な空間を設計し、これを組み合わせて大域的な空間を設計する手法である“ボトムアップ型”の空間構成法 [14, 24] がある。前者のトップダウン型は、単一組織による処理の効率化と負荷分散のための空間構成法であり、全体として一貫性を保った空間を設計できるため、スケーラビリティが高いという利点がある。しかしながら、トップダウン型の空間構成法は、空間構成における利用者の自由度は低く、空間全体を管理する管理者や組織が不可欠であり、利用者が一部の空間を流用して新しい空間を構成するなどといった空間の再利用は困難であるなど、やや専用環境向けの空間構成法であるといえる。一方、後者のボトムアップ型は、空間構成における自由度が高く、空間の再利用が可能であり、空間全体を管理する組織も必要としないため、開放型の空間構成が実現可能な汎用環境向けの手法であるといえる。そこで本研究では、ボトムアップ型の空間構成法に着目する。

ボトムアップ型の空間構成法における既存研究には、Dive [14] や Spline[24] などがあ



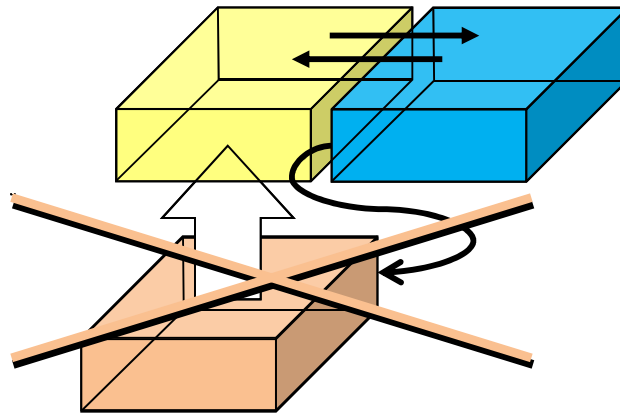
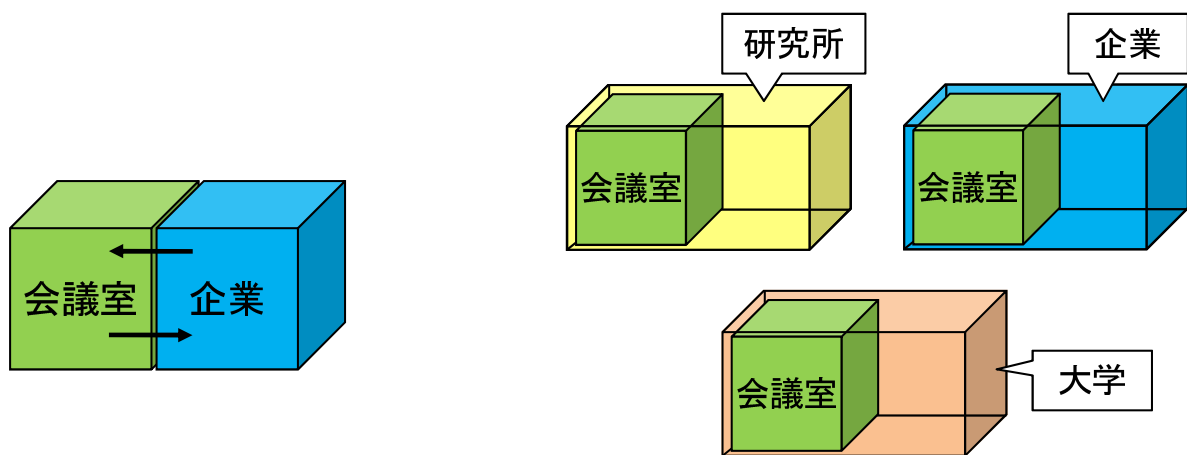


図 3.2: 空間結合の排他性

る。これらのシステムでは、ある空間から他の空間への参照関係を定義することにより、それらの空間を結合した新しい空間を構成する仕組みを実現している。これにより、参照の追加による空間の拡張や、異なる空間提供者によって提供される空間の組み合わせが可能となり、空間を再利用することができるようになる。また、利用目的に応じて空間の組み合わせを変更するなどといった、柔軟な空間構成が実現できる。

しかしながら、既存のボトムアップ型の空間構成法には、空間の結合と再利用における制約があり、問題となっていた。まず1つめの制約としては、結合した空間同士の双方向性を実現するためには、それら両方の空間を書き換えて、相互に参照関係を定義する必要があるという点が挙げられる。図 3.1 に示す例では、ある研究所の空間と企業の空間が互いの空間を双方向に参照し合っている。そのため、これらの空間は双方向に結合された空間となり、共同研究などに利用することが可能である。ここで、さらに大学の空間が結合しようとして、企業に対して一方的に参照を定義しているとすると、このとき、図 3.1 の (a) に示すように、利用者が大学の空間にいる場合には、大学の空間から企業の空間を見ることができ、これらの空間は結合しているように見える。しかしながら、利用者がひとたび企業の空間に移動すると、企業の空間から大学の空間への参照がないために、図 3.1 の (b) に示すように、大学の空間は消えてしまうことになる。すなわち、大学の空間が企業の空間と双方向に結



### 対等結合 (従来手法) の模式図

### 従属結合 (提案手法) の模式図

図 3.3: 対等結合と従属結合における空間結合の様子

合するためには、企業の空間からも大学の空間への参照を定義してもらう必要が生じる。また、2つめの制約としては、図 3.2 に示すように、空間の結合は排他的であり、ある空間から見て同じ位置に異なる 2 つ以上の空間を結合することはできないという点が挙げられる。

これらの制約により、既存のボトムアップ型の空間構成法には土地問題、すなわち参照を争奪する状態が発生しており、提供された空間をそのまま利用することが困難な状態となっていた。このため、提供される空間を効果的に再利用するためには結合される空間同士の調整が必要となり、これにより空間の再利用性は大きく損なわれていた。

## 3.3 分散形部分空間の結合に基づく開放型空間構成法の提案

### 3.3.1 提案手法の概要

3.2 で述べた問題点を解決し、利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型 3 次元仮想空間構成法を実現するため、本論文では、全体空間構成を維持する従属型の空間結合

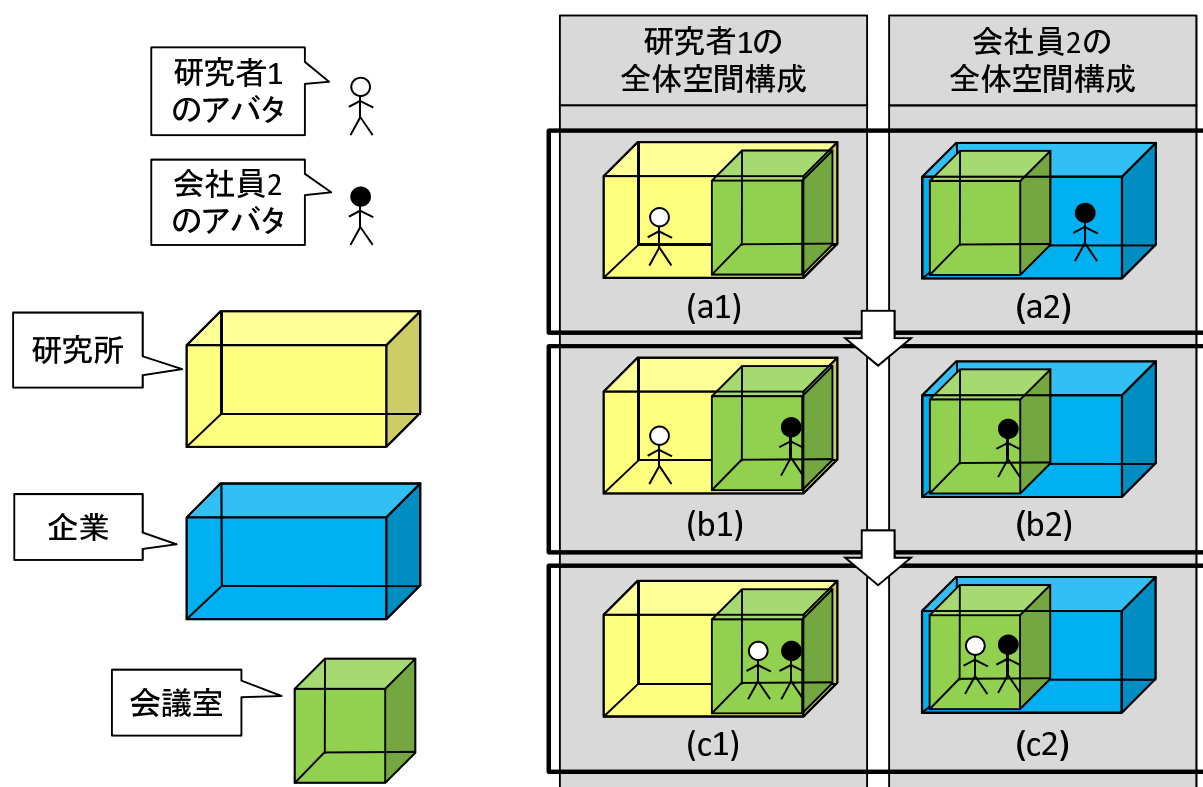


図 3.4: 従属結合による空間共有の様子

手法を提案する．従属型の空間結合手法とは，参照先空間へ移動した際に，移動先の空間が元の空間への参照を定義していない場合でも全体空間構成を維持する結合手法である．参照先空間と参照元空間の間に主従関係が存在することから，本論文ではこれを従属結合と呼ぶ．逆に，従来手法では参照先空間と参照元空間との関係が対等であることから，本論文ではこれを対等結合と呼ぶ．

図 3.3 に，対等結合と従属結合における空間結合の様子を示した．図 3.3 において，従来手法である対等結合では，ある企業の空間が会議室の空間から右隣への参照を獲得している場合，会議室の空間の右隣に存在できる空間は企業の空間のみとなる．一方，提案手法である従属結合では，会議室の空間からの参照には依存することなく，任意の空間が会議室の空間から見て同じ位置に結合することができる．この特徴は，次節で説明するよう

な，従属結合の空間共有における特殊なポリシーによって実現されている．

### 3.3.2 本手法に基づく空間共有の例

従属結合による空間共有の様子を図 3.4 に示す．図 3.4 中の (a1)(b1)(c1) は利用者である研究者 1 の全体空間構成を示し，(a2)(b2)(c2) はもう一人の利用者である会社員 2 の全体空間構成を示す．(a1) において，研究者 1 は研究所の空間におり，研究所の空間は会議室の空間と従属結合している．一方，(a2) において，会社員 2 は企業の空間におり，企業の空間もまた会議室の空間と従属結合している．ここで，(b1) と (b2) に示すように，会社員 2 が会議室の空間の内部へ移動すると，研究所の空間から従属結合されている会議室の空間にも会社員 2 が現れるため，研究者 1 は会社員 2 の姿を見ることができるようになるが，会社員 2 は研究者 1 を見ることができない状況になる．次に，(c1) と (c2) に示すように，研究者 1 も会議室の空間の内部へ移動すると，企業の空間から従属結合されている会議室の空間にも研究者 1 が現れるため，研究者 1 と会社員 2 は互いの姿を見ることができるようになる．ところで，以上の過程においては，それぞれの利用者の全体空間構成には変化がなく，各利用者は同じ会議室の空間を共有しながら，異なる空間の中に存在し続けたことになる．このように従属結合は，空間を共有する利用者間で全体空間構成が異なるという特殊な状況を許容する新しい空間結合手法である．この性質により，従属型の空間結合手法は，参照先空間へ移動した際に移動先の空間が元の空間への参照を定義していない場合でも全体空間構成を維持することが可能となる．また，参照元の空間は，参照先の空間が定義している参照関係の状態に影響されることがなく，逆にその空間への参照を定義することがその空間の空間構成に対して影響することもないため，自由に空間結合や空間構成の変更をおこなうことが可能となる．すなわち，結合される空間同士の調整を必要としない空間結合が可能となり，空間の再利用性と空間結合の柔軟性が飛躍的に向上する．

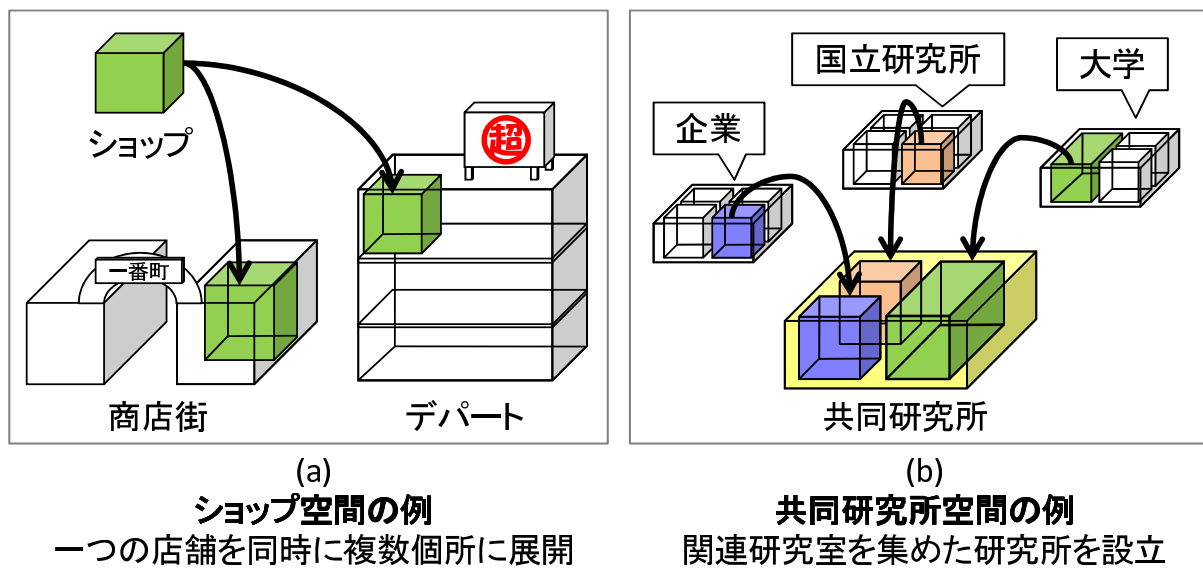


図 3.5: 従来手法では困難な空間構成の例

### 3.3.3 本手法の効果の例

本手法の効果の例として、従来手法では困難であった空間構成の例を図 3.5 に示す。図 3.5 の (a) は、あるショップ空間が商店街の空間とデパートの空間の両方から従属結合されている例を示している。この場合、ショップ空間の提供者は一つのショップ空間を運用するだけで、そのショップを同時に複数個所に展開し、集客することが可能となる。また、図 3.5 の (b) は、企業と国立研究所と大学の空間のそれぞれから、関連する研究室のみを集めた共同研究所を設立している例を示している。この場合、それぞれの研究室は企業や研究所や大学の空間の利用者から見れば、それらの空間の中の一室となり、共同研究所の空間の利用者から見れば共同研究所の一室となるなど、利用者によって構成が異なる運用が実現される。

このように、一つの共有空間を複数個所に偏在させた運用や、それぞれの利用者に合わせた構成による空間の提供が可能となることなどが、本手法の具体的な効果の例といえる。

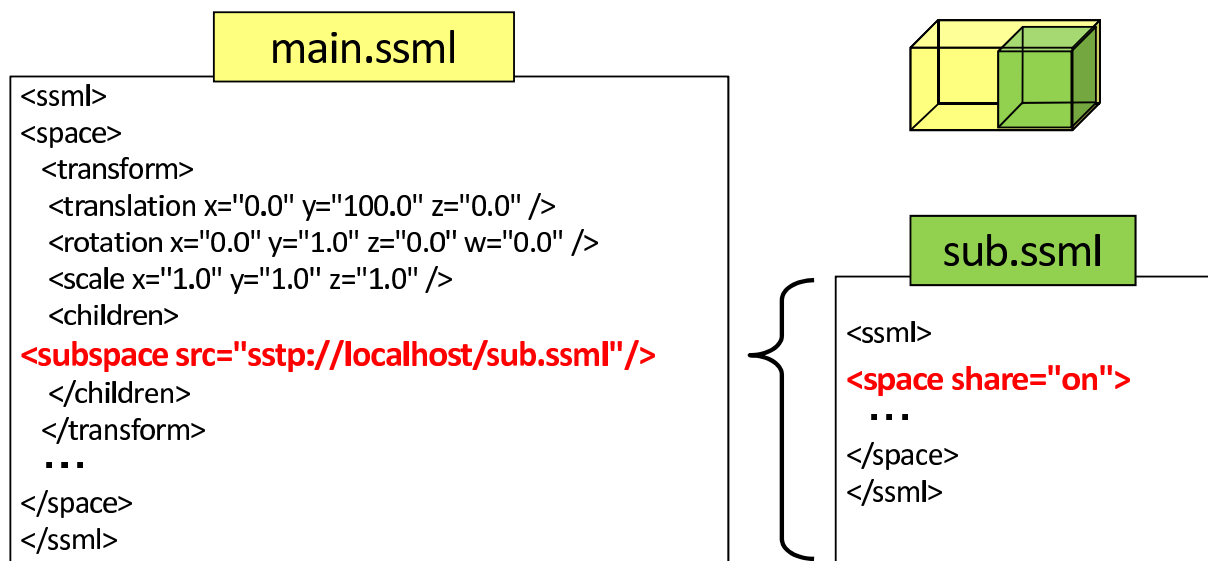


図 3.6: SSML の記述例の一部

## 3.4 設計と実装

### 3.4.1 空間構成記述フォーマット SSML の定義

提案する従属型空間結合手法を実現するため、本研究では他の空間定義への参照が可能な XML ベースの新しい空間構成記述フォーマットである SSML (Symbiotic Space Mark-up Language) を定義した。SSML の記述例の一部を、図 3.6 に示す。図 3.6 では、main.ssml と sub.ssml の 2 つの空間が記述されており、main.ssml からは sub.ssml への従属結合が定義されている。従属結合を定義する場合には、SSML 独自のタグである subspace タグを用いて、参照先の空間定義への URL を指定することができる。また、sub.ssml として示した例のように、その空間を共有空間とするための設定も、space タグの share 属性を on にすることにより、簡単に記述することができる。結合する空間は、transform タグを用いて、translation タグ・rotation タグ・scale タグのそれぞれに値を設定することによって平行移動・回転・拡大縮小をおこない、自由な位置へ配置することができる。また、対等結合も cospace タグを用いることで簡単に定義することが可能であり、状況に応じて従属

結合と対等結合を使い分けることができるようになっている。

また，SSML ファイルの転送や空間共有に必要な利用者情報などの通信をおこなうためのプロトコルとして，本研究独自のプロトコルである SSTP(Symbiotic Space Transfer Protocol) を定義した．図 3.6 において，subspace タグ内の URL のスキームとして指定している sstp は，このプロトコルを利用することを示している。

### 3.4.2 システムの全体構成

本研究では，提案手法を実現するためプロトタイプシステムとして，SSML を提供する SSML サーバ，3D モデルを提供するモデルサーバ，空間共有機能を提供する空間共有サーバ，空間上で利用するアプリケーションを提供するアプリケーションサーバ，および利用者端末である空間共有クライアントを実装した．これらはそれぞれ以下のような機能を備えている。

**SSML サーバ:** 空間共有クライアントからの要求に応じて SSML を配信する。

**モデルサーバ:** 空間共有クライアントからの要求に応じて 3D モデルを配信する。

**空間共有サーバ:** 利用者の参加状況や位置などの共有空間の状態情報を保持し，共有空間の変更をその空間を共有する利用者たちの空間共有クライアントに配信する。また，空間上に起動されたアプリケーションの状態情報についても保持し，アプリケーション状態の変更や処理の結果を共有クライアントに配信する。

**アプリケーション提供サーバ:** 空間共有クライアントが送信するインタラクション情報に基づいてアプリケーションを稼働させる。また，アプリケーションの出力を空間共有サーバに送信する。

**空間共有クライアント:** SSML を動的に読み込み，空間の従属関係に応じた全体空間を構成して利用者に提示する機能と，空間共有を実現するための機能を持つ。アバタが空間へ侵入した際，その空間が対等結合された空間であればその空間へ遷移し，利用者へ提示す

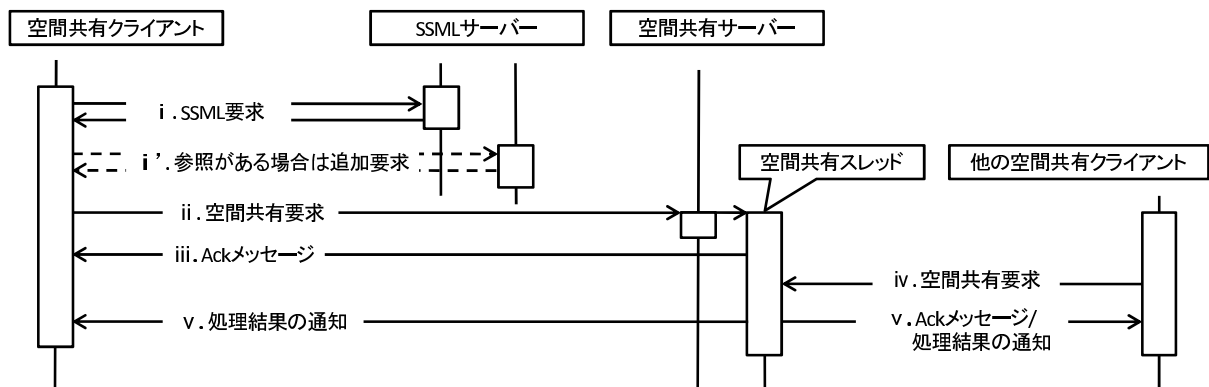


図 3.7: 空間共有プロセス

る全体空間をその空間を中心とした構成へと切り替える。また、アバタが共有された空間へ侵入した場合には、その空間の共有状態を管理する空間共有サーバに空間共有要求を送信し、空間共有に参加する。アバタが移動した場合には、逐一その空間に対する相対的な位置を計算して、空間共有サーバに通知する。

### 3.4.3 空間共有プロセス

空間の構成と共有の流れを図 3.7 に示す。空間共有クライアントは、利用者からの要求に従って、SSML サーバから SSML を読み込み、その記述に従って空間を構成する（図 3.7・i）。SSML 内に他の SSML への参照がある場合は適宜読み込み、先に読み込んだ空間と動的に結合する（図 3.7・i'）。構成した空間が共有空間を含む場合は、対応する空間共有サーバに共有空間への参加を要求する（図 3.7・ii）。要求を受けた空間共有サーバは、その空間共有の状態情報を扱うための空間共有スレッドを生成し、Ack メッセージを返答する（図 3.7・iii）。別のクライアントから共有空間への参加要求を受けた場合（図 3.7・iv）は、Ack メッセージと共に、既に参加している利用者の情報を返答する（図 3.7・v）。また、既に参加している利用者には、新規参加利用者の情報を通知する。以後、アバタの移動や離脱などの状態変化を空間共有サーバが媒介しアプリケーション提供サーバと空間



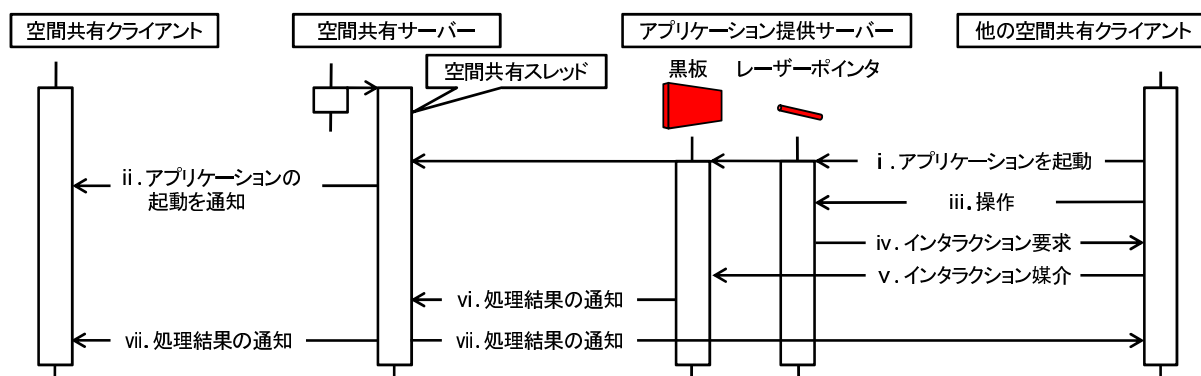


図 3.8: アプリケーション提供プロセス

共有クライアントに伝達することで、空間共有を実現する。

### 3.4.4 アプリケーション提供プロセス

アプリケーション提供の流れを図 3.8 に示す。まず、SSML にアプリケーションと空間上のオブジェクトとの対応付けを記述する。空間共有クライアントは SSML にアプリケーションとオブジェクトの対応付けの記述があったとき、アプリケーション提供サーバに対してアプリケーションの起動を要求する (図 3.8・i)。利用者がアプリケーションを操作した (図 3.8・iii) とき、そのアプリケーションは空間共有クライアントにインタラクション要求を送信する (図 3.8・iv)。インタラクション要求は、空間共有クライアントで構成された空間で媒介され、他のアプリケーションに伝達される (図 3.8・v)。これにより稼働しているそれぞれのアプリケーションは、処理結果を出力するため、オブジェクトの位置や形状、あるいはテクスチャの変更を要求する (図 3.8・vi)。このアプリケーションの出力は、空間共有サーバによって空間共有クライアント間で共有される (図 3.8・vii)。

### 3.4.5 実装の概要

本研究では、プロトタイプシステムとして、SSML サーバ、空間共有サーバ、アプリケーション提供サーバ、および空間共有クライアントを実装した。これらのサーバやアプリケーションの実装には Java を用いた。また、3次元仮想空間の実装には、Java ベースの 3D API である Java3D[27] を用いた。

SSML は XML ベースの空間構成記述フォーマットであり、本研究の提案である従属結合の定義や、従来手法である対等結合の定義が可能となっている。また、VRML[28] などの既存の空間構成記述フォーマットと同様に、3D モデルや背景などといった、様々な 3次元仮想空間の構成要素に関する記述が可能となっている。また、3D モデルに関する定義は別のファイルに分けて記述し、model タグを用いて参照することが可能となっており、空間構成の定義が 3D モデルの情報に埋もれてしまうことなく、簡潔に記述することができるようになっている。

SSML サーバは、一般的な Web サーバと同様に、指定された箇所に SSML ファイルを配置することで、作成した SSML を公開することができる。

空間共有クライアントには、Web ブラウザと同様に URL を指定するための textbox がついており、利用者はここに URL を入力することで、任意の SSML ファイルをダウンロードして、指定した空間へ遷移することができる。空間内では、キーボードを用いてウォークスルーしたり、飛び上がったり、視点をコントロールしたりすることができる。また、チャット機能を用いて、同一空間内の利用者と会話することもできるようになっている。

## 3.5 実験と評価

### 3.5.1 実験 (1):従属結合した部分空間の共有実験

従属結合した部分空間の共有実験として、2つの空間共有クライアントで従属結合を含む空間の構成をおこない、その空間上でアバタを移動させ、表示の変化を観察する実験を

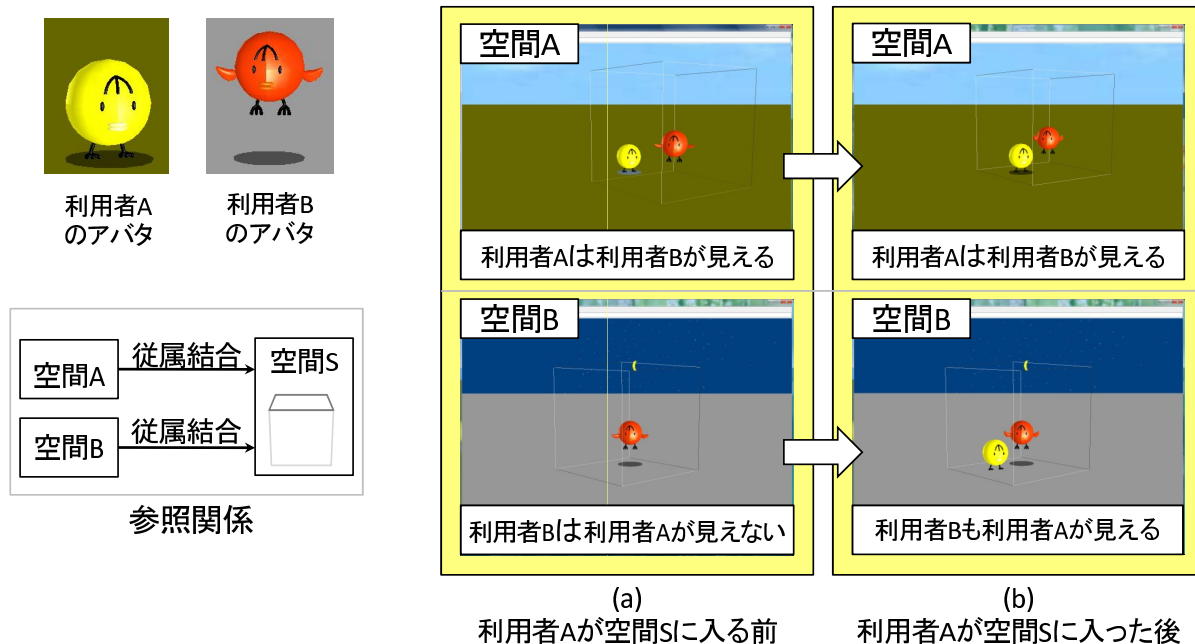


図 3.9: 従属結合した部分空間の共有実験

おこなった。得られた表示を図 3.9 に示す。図 3.9 にワイヤフレームで表示されている空間 S が共有空間であり、空間 S は空間 A と空間 B の双方から従属結合されている。利用者 A と利用者 B はそれぞれ空間 A と空間 B 上の利用者であるとする。図 3.9 の (a) では、利用者 B のアバタのみが利用者 A と利用者 B の双方の共有空間クライアントにおいて表示されている。これは、利用者 B のアバタのみが共有空間 S 内にあり、利用者 A のアバタは共有空間 S の外部にいるためである。一方、図 3.9 の (b) では、利用者 A のアバタも共有空間 S に進入したため、利用者 A、利用者 B の両者は互いのアバタの様子を見ることができている。また、これらの動作において、各利用者の全体空間構成には変化はなく、利用者 A と利用者 B は同じ空間 S を共有していながら、両者の全体空間構成は異なるという状況が実現できている。以上により、提案手法の動作を確認し、空間の従属関係に応じて正しくアバタの移動、および表示がおこなわれることを確認した。

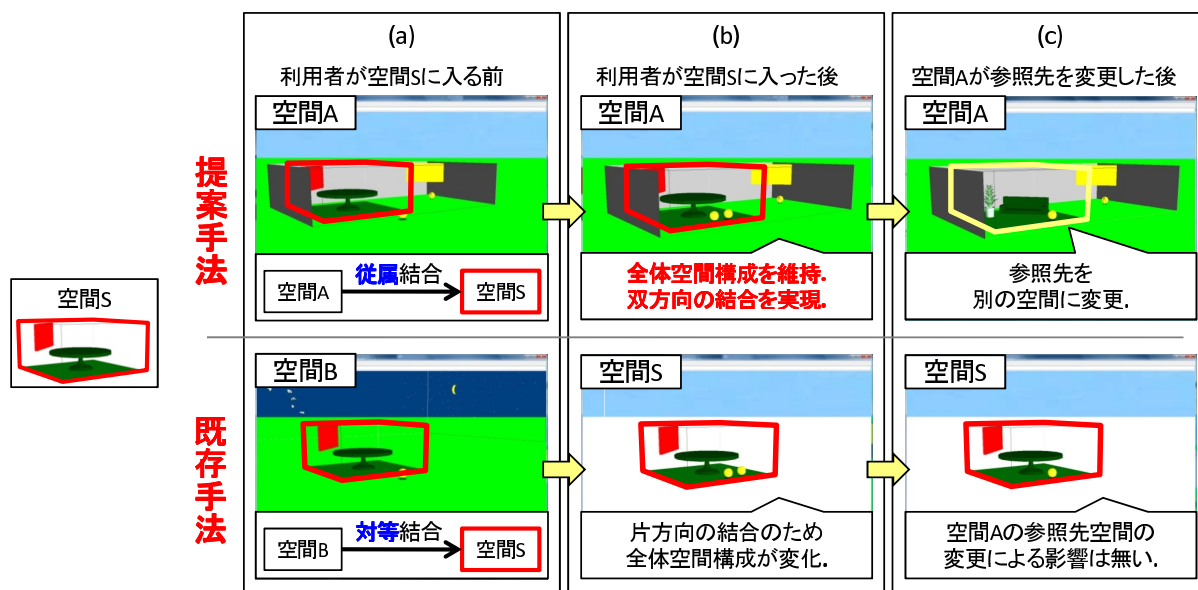


図 3.10: 結合した部分空間の共有動作の比較実験

### 3.5.2 実験 (2): 結合した部分空間の共有動作の比較実験

次に、結合した部分空間の共有動作の比較実験として、2つの共有空間クライアントでそれぞれ従属結合と対等結合を含む空間構成をおこない、その空間上でアバタを移動させ、表示の変化を比較する実験をおこなった。得られた表示結果を図 3.10 に示す。図 3.10 において、共有空間 S は空間 A と空間 B の双方から結合されているが、空間 A からは提案手法である従属結合、空間 B からは既存手法である対等結合によって結合されている。まず、図 3.10 の (a) では、各利用者のアバタは空間 A および空間 B 上の共有空間 S の外部にいる。次に、図 3.10 の (b) は、各利用者のアバタが共有空間 S の内部に侵入した後の状態を示している。提案手法である従属結合を用いた空間 A においては、全体空間構成は維持されており、空間 A から空間 S への片方向の参照によって双方向の結合が実現されたことが示されている。一方、既存手法である対等結合を用いた空間 B においては、アバタは参照先である空間 S を中心とした全体空間構成に遷移しており、空間 S からの逆方向の参照がないために、全体空間構成が変化してしまったことが示されている。さらに、

図 3.10 の (c) では、空間 A は空間 S への従属結合を解除し、同じ位置に別の空間への参照を定義している。これにより、空間 A の全体空間構成は一部が変化しているが、これまで参照されていた空間 S については、特に変化がない。これにより、提案手法では参照先の空間へも影響を及ぼすことなく、空間構成の変更が可能であることが示された。

### 3.5.3 評価

まず、3.5.1 節の実験結果から、提案する従属型空間結合手法が正しく動作していることを確認した。すなわち、アバタが移動した際、結合された共有空間の内部は正しく共有されつつ、空間の従属関係に応じて適切な全体空間構成が維持されること、そして同じ空間を共有する利用者間で全体空間構成が異なる状況が実現されていることを確認した。これにより、従来手法の問題点であった、空間結合の排他性が解消されていることが示された。

次に、3.5.2 節の実験結果から、従来手法では片方向の参照定義によって、利用者の意図に反した空間遷移が発生して、全体空間構成が変化してしまっているのに対し、提案手法では片方向の参照による双方向の結合が実現され全体空間構成が維持されたことを確認した。また、参照先となる他の空間に影響を与えない空間構成の変化が実現できたことも確認した。

以上より、本提案手法により従来手法の問題であったボトムアップ型の分散型空間構成法における土地問題、すなわち空間結合の片方向性と排他性の制約を解消し、設計者間での調整を必要としない空間結合を実現したといえる。これにより、利用者による空間再利用性と空間結合の柔軟性を大幅に向上させた。

## 3.6 考察

### 3.6.1 関連研究との比較

本研究では、利用者によって自由に設計・公開された3次元仮想空間を、再利用可能なコンポーネントとして効果的に扱うための、開放型の3次元仮想空間構成法を提案してきた。ある一定の機能や内容をソフトウェアの部品として独立させ、それを組み合わせて応用できるようにするコンポーネント化の概念は、Javaなどのオブジェクト指向言語の発展と共に広く普及し、2次元のインタフェースの開発などにおいては従来から一般的に利用されてきた。そして、これを3次元仮想空間に応用する試みについても数多くの研究事例が存在する。

Three-dimensional Beans[29]は、予め与えられた3D Beansと呼ばれる3Dモデルの部品を組み合わせることで、新しい3Dモデルを容易に構成するための機能を提案している。また、IntelligentBox[30]は、形状だけではなく固有の機能をもつ3Dモデルまでをコンポーネント化し、それを画面上で対話的に組み合わせることで機能合成するための先駆的な研究をおこなっている。また、3Dモデルの形状や空間上における位置などをネットワークを介して複数の利用者で共有するための機能についても、様々なコンポーネント化の事例がある。VSPLUS[31]、SPIN3D[32]、blue-c[33]などの研究では、共有に必要な機能を、シーングラフを構成するノードとして実装している。これを利用することにより、開発者は共有したいシーンをそのノードの子孫ノードとして定義するだけで、自動的に必要な情報が各利用者端末間で媒介されるようになり、共有が実現される。また、共有されたシーンを複数の利用者が同時に操作する場合に発生する競合への対処も自動的におこなわれる。また、RoomBox[30]は、先に紹介したIntelligentBoxの機能を用いて同様の仕組みを実現している。以上の研究は、3次元仮想空間におけるソフトウェアのコンポーネント化の基礎的な研究として大きな意義を持つが、これらは3次元仮想空間上の3Dモデルをコンポーネント化の対象としており、本研究が対象とする空間のコンポーネント化とは異なる

る．すなわち，例えばこれらの手法で共有の機能を実現する場合，どの 3D モデルが共有されるかはシーングラフの構成やコンポーネントの親子関係などの内部的な定義によって決定される．そして，これらの定義は基本的には 3 次元仮想空間上における 3D モデルの位置とは無関係である．本研究では 3 次元仮想空間を，利用者に直観的な理解を与えるためのインタフェースの一形態と捉えている．そのため，共有などの機能が与えられる場の境界は，空間を仕切る壁などによって視覚的に示されることが望ましい．

一方，3 次元仮想空間自体をコンポーネントと捉え，それらの組み合わせによる再利用を目指した研究にも，数多くの事例が存在する．これらの研究は，利用者が組み合わせられた 3 次元仮想空間の境界をまたぐ際の動作によって，いくつかの種類に分類することができる．まず，仮想空間記述言語の国際標準である VRML では，ある空間から別の空間への Link を定義することにより，異なる空間同士を組み合わせることが可能である．しかしながら，VRML における Link では，WWW における Anchor タグと同様に，参照元から参照先への移動は不連続におこなわれる．具体的には，利用者が Link を起動すると，まず現在表示されている参照元の空間が利用者端末上から消去され，続いて参照先の空間が読み込まれる．すなわち，3 次元仮想空間の境界は明示されておらず，利用者は参照先空間への移動が完了するまで参照先の空間内の状態を確認することができない．そのため，意図しない空間へ遷移してしまうことや，場合によっては移動先の空間が既に無効となっているために正しく遷移することができないといった問題が起こると考えられる．これでは，空間の組み合わせによる効果的な再利用は困難である．こうした問題を解決し，空間同士の連続的な結合を実現した研究には，3.2 節で挙げた Dive や Spline の他，WorldMirror/Bottole[34] や CurlSpace[35] などがある．また，既にサービスとして運用されているシステムに Splume[36] がある．これらのシステムでは，結合される 3 次元仮想空間は境界面をもっており，利用者が境界面をまたぐことによって，他の空間へ遷移することが可能である．この際，境界面の先には予め遷移先の空間の内部が表示されるため，

利用者は自分が移動しようとする空間内の様子を事前に確認しながら、連続的に遷移することができる。これが本研究における対等結合である。対等結合は、VRMLにおけるLinkのような不連続な結合ではなく、視覚的にも空間的にも連続した、利用者にとって自然な結合であり、極めて重要な空間結合手法である。

しかしながら、3.2節で述べたように、対等結合には空間結合の片方向性と排他性による制約があり、これが空間の再利用性を低下させるため問題となっていた。これらの制約は、同一の空間に存在する利用者が、常に同一の全体空間構成を持つことを保証する場合において発生すると考えられる。なぜなら、この場合には、同一の空間に存在することを検出するために、利用者が現在所属している空間を明確に区別する必要性が生じるため、空間を重ね合わせることができなくなり、これにより空間結合の排他性が発生するためである。また、空間結合の排他性が生じることにより、ある空間が2つの空間から参照を定義された場合には、いずれかの空間へは逆参照を定義することができなくなるため、結果として空間結合の片方向性が発生することになる。これに対し、本研究では、同一の空間に存在する利用者であっても全体空間構成が同一であることを保証しない。これにより、空間結合の片方向性と排他性による制約を排除し、それぞれの利用者の事情による自由な空間構成を認めている。また、そのようにして構成された空間をSSMLを用いて記述し、他の利用者へ提供する機能を実現している。これが本研究における従属結合である。このように、本研究では、同一の空間に存在する利用者であっても全体空間構成が異なる状況を許容することにより、空間結合の片方向性と排他性を解消し、空間の再利用性と空間結合の柔軟性を高めている。

### 3.6.2 今後の課題

本研究では、同一の空間に存在する利用者であっても全体空間構成が異なる状況を許容することにより、空間結合の片方向性と排他性を解消した空間結合手法として、従属型結



合手法を提案した。3.5.2 節で述べた実験に示すように、この手法ではある空間 S は異なる空間 A と B から同時に結合される可能性がある。そして、空間 A 上の利用者 A と空間 B 上の利用者 B が共に空間 S の内部にいる場合、利用者 A と利用者 B のそれぞれにとっての空間 S の外部の様子は異なるため、このことが利用者を混乱させてしまう場合があると考えられる。また、対等結合や従属結合によって、ある空間 C が別の空間 D から結合されている場合、空間 C 上の利用者 C は空間 D 上の利用者 D から自分の様子が見られている可能性があるが、現在の実装ではそれを把握することはできない。そのため、例えば空間 C を会議室として利用する場合には第三者に秘匿情報が漏えいしてしまったり、空間 C が厳粛な雰囲気の一部として結合されているにもかかわらず、そうと知らずに場違いな振舞いをしてしまったりするなど、利用者を混乱させてしまう危険性があると考えられる。

こうした問題への対策を考えるにあたり、他のシステムにおける状況を考えると、同様の危険性は WWW にも存在することがわかる。例えば、電子掲示板の内容が全世界に公開されていることを正しく理解していないために個人情報を掲載してしまうトラブルは未だに発生し続けている。また、例えば趣味で映画に関する情報を集めたサイトを運営する利用者が類似したサイトへのリンクを定義した場合、リンク先のサイトの管理者がサイトを閉鎖してしまったり、映画以外の情報を掲載するように方針を変更してしまったりした場合には、サイトの運営者や利用者は混乱する可能性がある。WWW ではこれらの問題への対応として、認証機能を付加することによる意図しない利用者への情報漏えいの防止や、CGI などの仕組みを用いてサーバ上でプログラム動作させることによる柔軟なアクセス制御の実行環境の構築や、トラックバックの仕組みによりリンク先のサイトにリンクを定義していることを通知できるようにするなどの対策が進められてきた。

本研究で扱った 3 次元仮想空間システムにおいても、認証機構や CGI やトラックバックなどの仕組みを実装することは可能である。これにより、利用者が存在する空間が一般に

公開されていることをその利用者に警告したり，その空間がどこから参照されているかを把握できるようにしたり，必要に応じて公開制限を設けたりすることで，上記の問題を解決することができると考えられる．また，会議室などの空間において適切なアクセス制御機構を実装するにより，空間内でやり取りされた情報がその空間内に見えている利用者間のみで共有されることが保証できれば，情報が誰によって共有されるのかを直観的に把握することが可能となり，より安心・安全で柔軟な情報共有システムが実装できると考えられる．

このような仕組みを整えるとともに，構築された空間が利用者にとって分かり易く自然で違和感がないものとなるかを検証することは，共認知の観点からも重要であるが，これについては今後の課題とする．

### 3.7 おわりに

本章では，本研究の目的である，資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現に対する課題の(T1)である“利用者の自由な設計・公開・再利用を可能とする開放型3次元仮想空間構成法の実現”のために，全体空間構成を維持する従属型空間結合手法を提案した．また，提案方式実現のための空間共有動作や空間構成記述フォーマット，および全体的なシステム構成について述べた．また，提案システムのプロトタイプの実装と提案する空間結合手法を用いた空間の構成をおこない，それらを用いて本提案手法の効果を確認するための実験をおこなった．その結果，従来の空間結合に存在した片方向性と排他性による制約を解消し，空間の再利用性と空間結合の柔軟性が向上したという結論を得た．

# 第4章 利用者の知覚に基づく動的品質調整法

## 4.1 はじめに

近年，ネットワーク・計算機端末の発達に伴い，ネットワークサービスの利用者の増加や利用状況の多様化が進んでおり，情報の氾濫，サービスの複雑さや使いにくさ，プライバシーの侵害，IT 犯罪，デジタルディバイドなどの問題が顕在化してきている．共生コンピューティング (Symbiotic Computing)[1, 2, 3] では，これらの問題の原因が現実空間 (RS: Real Space) とデジタル空間 (DS: Digital Space) の間のギャップである u-Gap にあるとし，RS と DS が互いを認知する「共認知」による解決を目指している．共認知は，DS が RS を認知する RS 認知と，RS が DS を認知する DS 認知から成る．本研究では，このうち DS 認知の拡張を目的とし，3 次元仮想空間が持つ利用者に直観的な理解を与える効果に着目している．3 次元仮想空間は一般に開発コストや運用にかかる計算処理やネットワークなどの負荷が高く，これまでは資源状況が安定し，利用状況も限定された専用環境における利用を基本として発展してきた．そのため，資源状況が不安定で利用状況が多様なユビキタス情報環境においては，3 次元仮想空間の効果的な利用は困難であった．

本研究では，資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される 3 次元共生空間の実現を目的とし，そのための課題である多様な環境への適応性の高い開放型の 3 次元仮想空間構成法の実現へむけた，より具体的な課題として，以下の 2 点を挙げた．

(T1) 3 次元仮想空間の空間構成に関する課題

利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

## (T2) 3次元仮想空間の品質調整に関する課題

限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現

本章では、このうち(T2)について述べる。3Dモデルの解像度に基づく品質調整を、資源が不足した状態、すなわち利用者が品質の劣化を感じる範囲においておこなう場合、利用者の知覚に基づく適切な調整をおこなうためには、システムレベルの品質である3Dモデルの解像度と利用者の知覚品質の間に存在する非線形な対応関係を考慮する必要がある。

この問題に対し、本研究ではシステムレベル品質と利用者の知覚品質との対応関係(RSP: Relationship between System level QoS and Perceptual level QoS)およびその変化に関する知識(RSP知識)の導入による利用者の知覚に基づく品質調整法を提案する。具体的には、RSP知識の獲得のためのRSPの変化要因ごとの品質検査実験と、実行時における変化要因の値の獲得に必要な利用者の注目箇所推測機能を提案し、資源の不足時における利用者の知覚に基づく品質調整法を実現し、3次元仮想空間の多様な資源状況への適応性を向上させる。

以下、4.2節で関連研究について述べ、4.3節では提案である利用者の知覚に基づく品質調整法についての詳細を述べる。4.4では提案する品質調整法を実現するプロトタイプの3次元仮想空間システムの設計と実装について述べ、4.5節では、プロトタイプシステムを用いた実験を通じて、提案手法の有効性を検証する。最後に、4.7で本章のまとめを述べる。

## 4.2 関連研究

3次元仮想空間において、一般に最も処理負荷や品質への影響が大きい要素は、3次元仮想空間内の表示要素である3Dモデルの解像度であり、解像度の調整による品質調整については様々な既存研究が存在する[25, 26, 37, 38]。このうち、利用者の知覚に基づく品質

調整法 [25, 26] は、きめの細かい品質調整が可能であり、多様な資源状況への適応性に優れた品質調整法であることを 2.2 節で述べた。

しかし、これらの既存研究では、あくまで利用者に品質の劣化を知覚させないことを前提とした上で、なるべくシステムの処理負荷を軽減させるための手法であり、本研究の焦点である資源の不十分な状況における対応は困難であった。

一方、これまで我々は、“やわらかいシステム” の概念 [39] に基づき、限られた資源状況で可能な限り良い品質を提供する、3次元仮想空間システムの研究開発を推進してきた [38]。しかしながら、これまでの品質調整の対象は、システムレベルの品質 (System-level QoS:以降 S-QoS と略記)、すなわち、フレームレートや頂点数など、システム内部における品質指標であり、利用者がアプリケーション利用時に実際に感じる品質である知覚レベルの品質 (Perceptual-level QoS: 以降 P-QoS と略記) に基づいた調整は困難であった。そのため、利用者が実際に感じる品質を可能な限り維持しつつ、使用する資源を削減するなどといった高度な品質調整は困難であった。

これを実現するためには、まず 3次元仮想空間におけるシステムレベルの品質と知覚レベルの品質との対応関係 (Relationship between S-QoS and P-QoS:以降 RSP と略記) を把握する必要があり、次に RSP を考慮した利用者の知覚に基づく品質調整機構を構築する必要がある。しかし、3D モデルの RSP に関する既存研究 [40] においては、S-QoS (3D モデルの解像度) と P-QoS (利用者の主観的な品質評価値) には非線形な対応関係が存在することは調査されているものの、その調査は極めて限定的な環境のみを対象としており、実際のアプリケーション利用における応用は困難であった。すなわち、例えば 3D モデルが遠距離にある場合はより低い S-QoS でも十分な P-QoS に感じられるなどというように、RSP はアプリケーション利用時の状況により大きく変化するため、その変化までを考慮した RSP の動的な取得手法が必要であった。

## 4.3 利用者の知覚に基づく動的品質調整法

### 4.3.1 提案手法の概要

本研究では、システムレベルの品質と利用者の知覚レベルの品質との対応関係 (RSP) について、そのアプリケーション利用時における変化までを考慮した、動的な品質調整法を提案する。そのために本研究では、まず RSP の変化に関する知識を導入する。これはアプリケーション利用時の様々な状況の変化に応じた RSP をまとめた知識であり、本論文ではこれを“RSP 知識”と呼ぶ。提案手法は以下に述べる (S1) と (S2) からなる。

#### (S1) RSP 知識の導入

RSP の変化要因の値ごとに利用者の主観的な品質検査を実施することにより、RSP の変化に関する知識、すなわち RSP 知識を獲得する。RSP の変化要因としては、利用者の知覚への影響が大きく、アプリケーション利用時の視覚的な状況を最もよく表す重要な要素である“仮想空間内の仮想的な利用者の目の位置と各 3D モデルとの間の距離”と“仮想空間内の仮想的な利用者の目の位置から利用者の実際の注目箇所へ向けた視線方向と各 3D モデルへ向けた方向との間の角度”の 2 つを用いる。以降ではこれらの RSP 変化要因は単に“視点からの距離”および“視線からの角度”と述べる。この (S1) はアプリケーションの実行に先駆けて事前に実施されるプロセスである。

#### (S2) RSP 知識に基づく動的品質調整

RSP 知識を用いて、適切な品質調整をおこなうには、アプリケーション利用時の RSP の変化要因の値を与えることで、それらの値に対応する適切な RSP を動的に取得する必要がある。RSP の変化要因のうち、視点からの距離は、システムの内部的な情報として得られる。視線からの角度を得るために、本研究では利用者の注目箇所推測機能を提案する。これを用いて利用者の注目箇所を推測し、利用者がその推測さ

れた注目箇所を見ていると仮定することで，利用者の視線方向を決定し，視線からの角度を得る．この (S2) はアプリケーション実行時のプロセスである．

以降，4.3.2 節において，まず RSP と RSP 知識を明確に定義する．次に，4.3.3 節にて，RSP の導入による効果について述べる．また 4.3.4 節と 4.3.5 節において，(S1)RSP 知識の導入と (S2)RSP 知識に基づく動的品質調整について詳細に述べる．

### 4.3.2 RSP の定義

本節では，RSP を定式的に定義する．

まず，3次元仮想空間  $W$  は，3D モデル  $o_i$  の集合で表現される．

$$W = \{o_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (4.1)$$

$W$  は  $n$  個の 3D モデルで構成されており，各  $o_i$  はアバタや背景などを含む 3次元仮想空間上の個々の表示要素に対応している．また，各  $o_i$  は，識別子  $id_i$ ，プロパティの集合  $O-PROP_i$ ，および RSP 知識  $K_i$  から構成されている．すなわち，

$$o_i = \langle id_i, O-PROP_i, K_i \rangle \quad (4.2)$$

$$O-PROP_i = \{prop \mid prop \in PROP\} \quad (4.3)$$

ここで， $prop$  とは，3D モデルのメタ情報を記述したシンボリックなプロパティであり， $PROP$  は，予めシステム上に用意されたプロパティの定義の集合である．また， $K_i$  は，視覚的な状況  $cond$  とそれに対応する RSP  $r$  からなる要素  $k$  の集合として定義される．

$$K_i = \{k \mid k = \langle cond, r \rangle\} \quad (4.4)$$

提案手法においては，RSP はアプリケーション利用時の視覚的な状況に応じて変化することが想定されている．本研究では，視覚的な状況  $cond$  を記述するパラメータとして，視線からの角度  $a$  と視点からの距離  $d$  の 2つの要素を導入する．

$$cond = \langle a, d \rangle \quad (a \in A, d \in D) \quad (4.5)$$

ここで， $A$  と  $D$  は角度と距離の取り得る値の集合であり，

$$A = \{a \mid a \in \mathbb{R}, 0 \leq a < 180\} \quad (4.6)$$

$$D = \{d \mid d \in \mathbb{R}, 0 \leq d\} \quad (4.7)$$

と定義される． $\mathbb{R}$  は実数の集合である．さらに，RSP  $r$  は，実際の P-QoS  $p$  と S-QoS  $s$  との対応関係である  $ds$  の集合で定義される．

$$r = \{ds\} \quad (4.8)$$

$$ds = \langle p, s \rangle \quad (p \in P, s \in S) \quad (4.9)$$

ここで，P-QoS と S-QoS の取り得る値の範囲を示す集合である  $P$  と  $S$  は，それぞれ

$$P = \{p \mid p \in \mathbb{R}, 1 \leq p \leq 5\} \quad (4.10)$$

$$S = \{s \mid s \in \mathbb{N}, 3 \leq s\} \quad (4.11)$$

と定義される．ここで， $\mathbb{N}$  は自然数の集合である．本論文では，S-QoS として 3D モデルを構成する頂点数を用いている．そのため，(4.11) では，1 つ以上のポリゴンが構成可能な頂点数として S-QoS の範囲を定義している．

ここまでの式で，RSP と RSP 知識の定義を示した．最後に，これらを再度，機能の観点から定式的に説明する．RSP  $r$  は， $P$  から  $S$  への関数  $f$  と解釈することができる．

$$f: P \rightarrow S \quad (4.12)$$

ここで，関数  $f$  の集合を  $F$ ， $A$  と  $D$  の直積を  $A \times D$  として，次のように表現する．

$$F = \{f \mid f: P \rightarrow S\} \quad (4.13)$$

$$A \times D = \{(a, d) \mid a \in A, d \in D\} \quad (4.14)$$

すると，RSP 知識  $K_i$  は，ある視覚的な状況  $cond$  における  $A \times D$  から  $R$  への関数  $g_i$  と表現することができる．

$$g_i: A \times D \rightarrow R \quad (4.15)$$



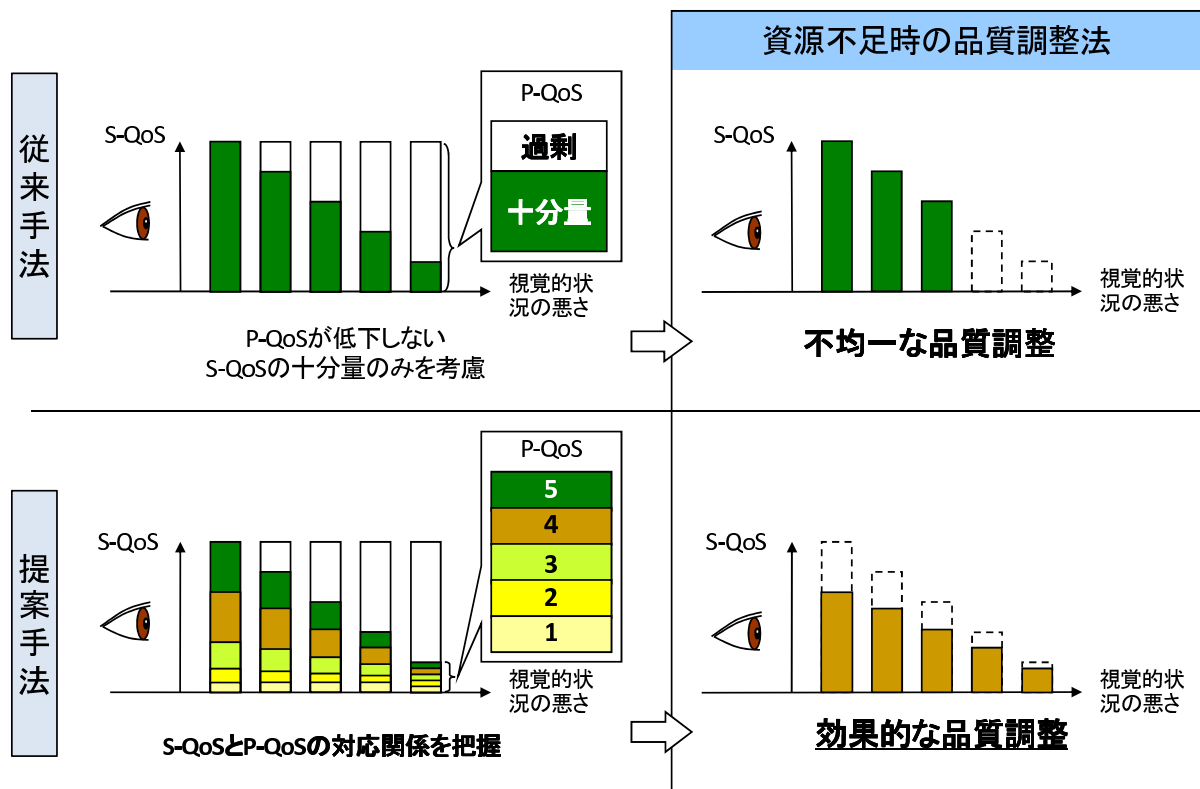


図 4.1: RSP に基づく品質調整の効果

### 4.3.3 RSP の効果

図 4.1 に、RSP に基づく品質調整の効果を示した。図 4.1 中の各グラフは、横軸は視覚的な状況の悪さ、すなわち視点からの距離や視線からの角度の大きさを示しており、縦軸は要求される S-QoS の量を示している。どのグラフも、横軸の値が大きいかほど縦軸の値が小さくなっているが、これは、視覚的な状況が悪いほど、利用者には S-QoS の値の低さが気にならず、十分な品質として感じられるため、要求される S-QoS の量が小さくなることを示している。このように、要求される S-QoS は一般に視覚的な状況が悪くなるほど少なくなる傾向がある。

従来の利用者の知覚に基づく品質調整法は、利用者が知覚的な品質の劣化を感じない範囲でなるべく低い品質を調整目標の品質としていた。すなわち、従来手法は、利用者に品

質の劣化を感じさせないことを前提として、その上でなるべく資源を節約することを目的としていた。この手法は、資源がある程度確保されている場合には効果的であるが、利用者に品質の劣化を感じさせることが避けられないほどの資源状況の悪化が起こった場合には、適切な品質調整をおこなうことが困難となる。これは、従来手法においては、利用者が品質劣化を感じない十分量の S-QoS の値だけが与えられており、使用可能な S-QoS が不十分な場合にはその適切な配分量の決定が困難なためである。その結果、従来手法では S-QoS の不足分を補うために、なるべく利用者が必要としていないと考えられる S-QoS の要求量の小さな部分から削除しており、図 4.1 の右上のグラフに示したような、不均一な品質調整となっていた。一方、提案手法においては、任意のレベルの P-QoS を与える S-QoS の量を事前に把握しておくことにより、図 4.1 の右下のグラフに示したように、資源が不足した場合にもそれぞれの表示要素を適切な品質に調整し、全体として高い利用者の知覚レベル品質を維持することが可能となる。

#### 4.3.4 RSP 知識の導入

図 4.2 に RSP 知識の獲得方法の概要を示す。

本研究では、4.3.2 節で定義した、視点からの距離や視線からの角度に応じた S-QoS と P-QoS との対応関係に関する知識である RSP 知識を導入する。本研究では、RSP 知識を獲得するために、既存研究 [40] で実施されていた利用者の主観的な品質評価実験に加えて、検査対象となる 3D モデルの視点からの距離や視線からの角度を変化させながら品質評価を繰り返す実験をおこなった。

提案手法では、P-QoS として利用者の知覚レベル品質、S-QoS として 3D モデルを構成する頂点の数をそれぞれ採用した。また RSP の変化要因としては、利用者の知覚に影響する重要な要因であり、アプリケーション利用時の視覚的な状況を最もよく表すと考えられる 2 つの要素、すなわち、視点からの距離と視線からの角度を扱った。本研究における

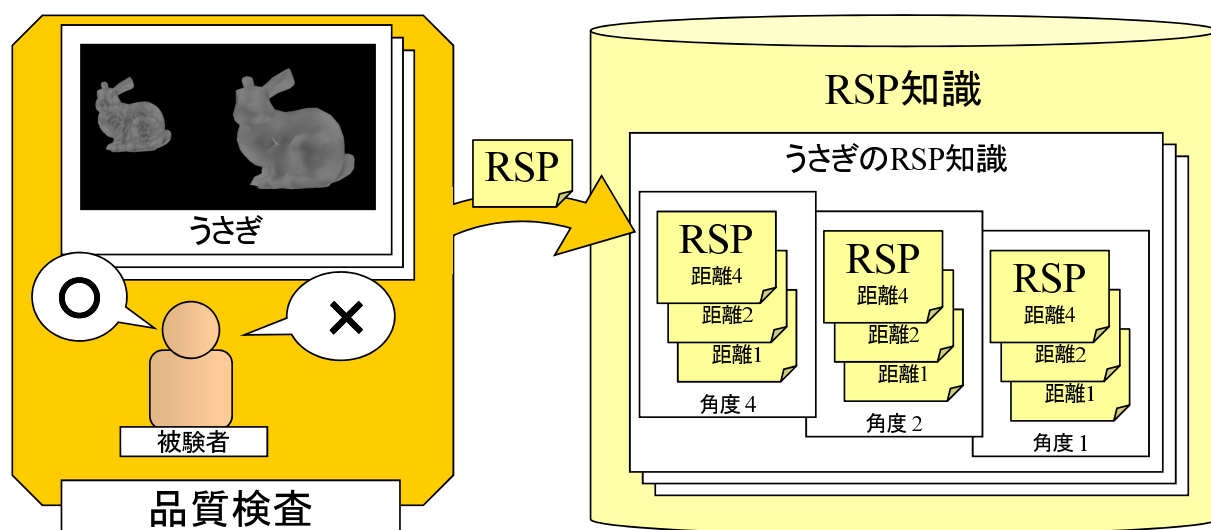


図 4.2: RSP 知識の獲得方法の概要 (S1)

提案の核である RSP 知識は，これらの変化要因の値に応じた RSP の集合として構成されており，これにより，任意のアプリケーションの利用状況に応じた適切な RSP を取得することが可能となる．利用者の主観的な品質評価実験に関する詳細は，4.5.1 節で詳細に述べる．

#### 4.3.5 RSP 知識に基づく動的品質調整

RSP 知識に基づく品質調整の実行プロセスを説明するために，まずいくつかの重要な概念に関する定義をおこなう．まず，3次元仮想空間をどのように利用するかを記述する“利用形態”を定義する．本研究における個々の3次元仮想空間は，それぞれが様々な目的に利用されることを想定している．例えば，“街”の空間では，利用者はショッピングをしたり景観を眺めたりすることもあれば，ドライブシミュレータを利用することもあると考

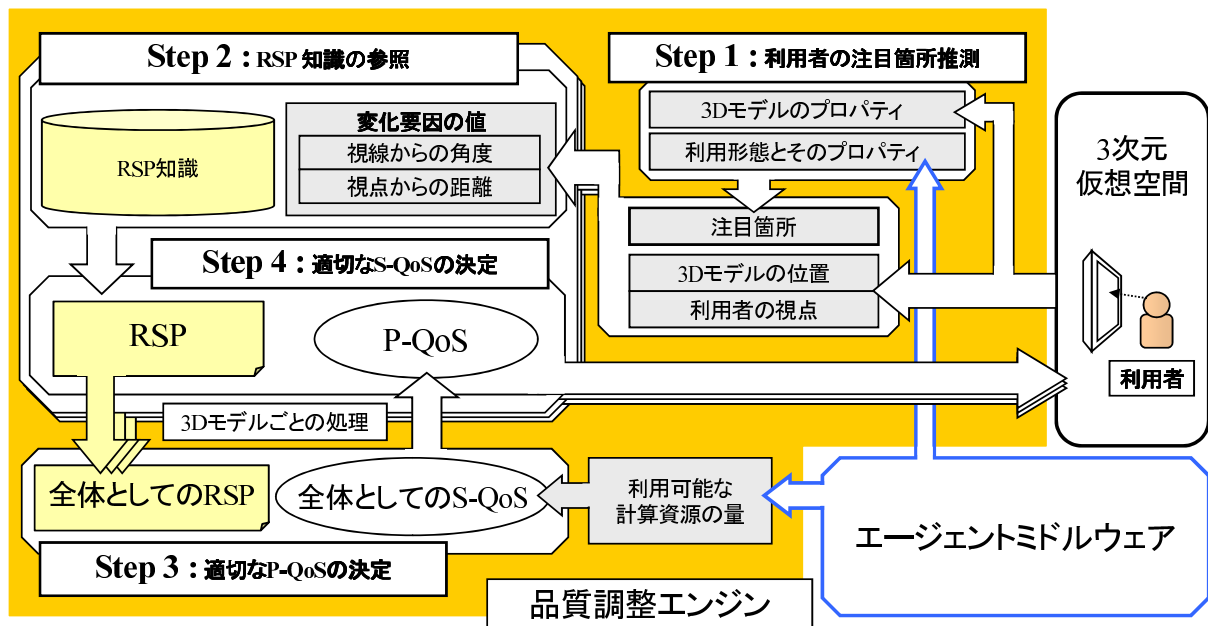


図 4.3: RSP 知識に基づく品質調整法の概要 (S2)

えられる．そこで，コンテンツ  $cont$  を利用形態の集合  $U$  と 3次元仮想空間  $W$  により

$$cont = \langle U, W \rangle \quad (4.16)$$

$$U = \{u_j \mid j = 1, 2, \dots, m\} \quad (4.17)$$

と定義する． $U$  は， $m$  個の利用形態からなる集合である．それぞれの利用形態  $u_j$  は，識別子  $id_j$  と，プロパティの集合  $U-PROP_j$  からなる． $U-PROP_j$  は，式 4.3 における  $PROP$  の要素の集合であり，それぞれの利用形態において，注目箇所となりやすい表示要素の性質を示している．

$$u_j = \langle id_j, U-PROP_j \rangle \quad (4.18)$$

$$U-PROP_j = \{prop \mid prop \in PROP\} \quad (4.19)$$

図 4.3 に，RSP 知識に基づく動的品質調整の処理の流れを示す．また，これらの処理の詳細について以下に述べる．

**STEP1:** 注目箇所推測機能により，利用者の注目箇所を決定する．システムは，利用者がここで決定された注目箇所を見ていると仮定することで，利用者の視線方向を獲得する．注目箇所推測機能は複数の箇所を注目箇所として決定する．システムは視界にある全ての表示要素について，最も近くにある注目箇所からの角度として，それぞれの視線からの角度を計算する．また，本論文においては，注目箇所は単純なプロパティの比較によって決定される．すなわち， $o_i$  は，条件  $(\exists x)(x \in O-PROP_i \cap U-PROP_j)$  が満たされる場合に，注目箇所であると決定される．また，アプリケーション利用時における適切な利用形態の決定は，4.4 節で述べるエージェントミドルウェアによっておこなわれる．

**STEP2:** 4.3.4 節で述べた方法によって事前に用意された RSP 知識を参照することにより，視点からの距離と視線からの角度に応じた各表示要素の適切な RSP を決定する．

**STEP3:** まず決定された全ての表示要素の RSP から，システム全体としての RSP を決定する．次に現在の資源状況により，システム全体として使用可能な S-QoS を決定する．そして，これらの RSP と S-QoS により，システム全体として提供すべき P-QoS を決定する．

**STEP4:** 最後に，決定された P-QoS を満たす各表示要素の適切な S-QoS をそれぞれの表示要素の現在の RSP から算出し，品質調整を実施する．

システムはこれらの処理を表示フレームごとに繰り返し，状況に応じた適切な品質調整を実現する．

## 4.4 設計と実装

### 4.4.1 システム構成

図 4.4 に，提案システムの全体構成を示す．これまで我々は，コンテンツや利用者のインタラクションから推測した利用者要求に応じて，様々な品質調整ポリシーを動的に切り替え可能な 3 次元仮想空間システムを開発してきた [38]．このシステムは，ミドルウェアとして構成されるソフトウェアエージェント群によって，計算やネットワークの資源，お

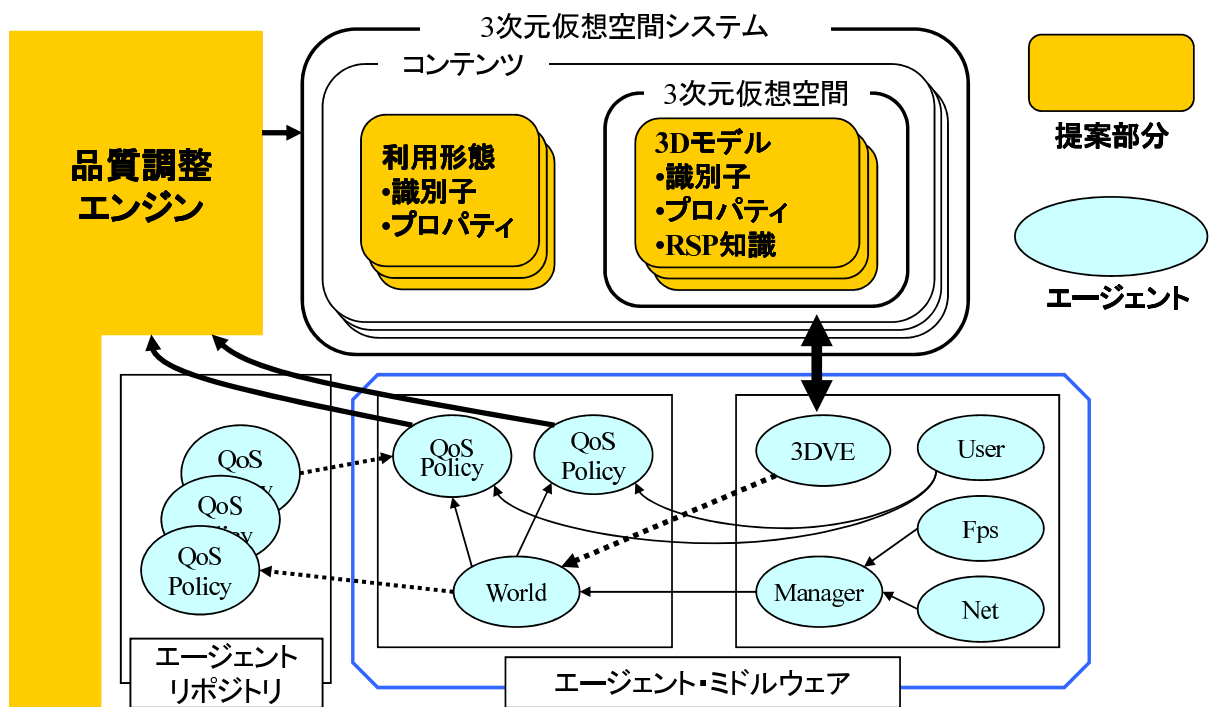


図 4.4: 提案システムの全体構成

よび利用者のインタラクションを監視し、その情報を元に、利用者要求や適切な品質調整ポリシーを選択する機能を持つ。本研究では、先行研究で開発してきたシステムに利用者の知覚に基づく品質調整のメカニズムを加えることにより、品質調整の能力を大幅に強化した新たなシステムを提案する。

提案システムではエージェントミドルウェアとして構成された個々のエージェントが、お互いの情報を交換し合うことにより、適切な品質調整ポリシーを選択する。図 4.4 の下段にエージェントの構成を示す。各エージェントの機能は以下の通りである。

**3DVS: 3次元仮想空間エージェント:**

3次元仮想空間アプリケーションをエージェント化したもの。アプリケーションとエージェントのインターフェースとなり、アプリケーションごとの差異を吸収する。

**QoS Policy: 品質調整ポリシーエージェント:**

品質調整ポリシーをエージェント化したもの。自分の担当するコンテンツ内のオブジェク

トを管理し，必要に応じて品質調整エンジンの動作を調整する．後述するユーザエージェントが推測した利用者の状態を自身が持つコンテンツの特徴・利用者の利用形態に照合し，利用者要求の推測をおこなう．また，品質調整ポリシーの変更要求の可能性があると判断した場合，後述する空間管理エージェントへ通知し，必要に応じてエージェントリポジトリに蓄えられている他の適切なエージェントと交代する．

**World:** 空間管理エージェント:

空間全体の管理をおこなうエージェント．また品質調整ポリシーエージェントを管理しており，情報伝達の仲介役を担うとともに，適切な品質調整ポリシー決定のための情報を管理する．品質調整ポリシーの変更要求入力インタフェースを持っており，品質調整ポリシーに対する利用者要求の最終的な決定をおこなう．

**Manager:** 管理エージェント:

全体のエージェントを管理し，各エージェントの初期化，メッセージの受け渡しをおこなう．また，各監視エージェントからの警告メッセージの監視をおこない，品質調整を指示する．

**fps:** fps 監視エージェント:

3次元共有空間アプリケーションの動きの滑らかさの品質を表す fps(frame per second) を監視するエージェント．閾値を超えて品質が変化した場合，管理エージェントに警告メッセージを送信する．

**Net:** ネットワーク監視エージェント:

ネットワークのトラフィックを監視するエージェント．閾値を超えてトラフィックが変化した際，警告メッセージを送信する．

**User:** ユーザエージェント:

利用者の3次元空間へのインタラクションを監視し，そこから利用者の状態を推測する．この情報を品質調整ポリシーエージェントに渡し，コンテンツの特性と照合することによ

り利用者の要求を推測する。

これらのエージェントはリポジトリと呼ばれる場所に格納されており，必要に応じてここからエージェントが呼び出され，動作する。新しいエージェントを開発した場合，このリポジトリに登録することで，利用者が使用するエージェントを更新することができる。

これらのコンポーネントに加え，本研究では 4.3 節で述べた提案の (S2) を実現するためのメカニズムである品質調整エンジンを導入する。また，3 次元仮想空間のコンテンツに品質調整に必要な設定情報を記述するための機能を導入する。設定情報には，注目箇所の推測機能に必要なコンテンツの利用形態情報や各 3D モデルのプロパティであるメタ情報，そして RSP 知識がある。

#### 4.4.2 実装の概要

提案手法を実現する主要なコンポーネントである品質調整エンジンの実装には Java を用いた。また，3 次元仮想空間の実装には Java ベースの 3D API である Java3D[27] を用いた。図 4.6 や図 4.8 に示した，プロトタイプの RSP 検査アプリケーションの実装にも Java3D を用いた。RSP 検査アプリケーションは検査対象の 3D モデルを表示し，検査のプロセスを管理する機能を持つ。検査対象モデルの品質は，スクロールバーを用いて被験者自身が調節することができるようになっている。また，被験者はキーボードを用いてモデルを自由に回転させることもできる。そして，“次へボタン”や“戻るボタン”および“判別不可ボタン”を用いて，検査対象モデルの品質を評価し，検査を進めることができる。3D モデルの単純化アルゴリズムには多数の研究事例 [41, 42, 43, 44, 45] があるが，本研究ではこれらのうち，“Quadric Error Metrics”[41] によるアルゴリズムを利用した。このアルゴリズムは，適用可能な 3D モデルの種類が多く，処理性能や得られるモデルの品質も高いため，3D モデルの単純化アルゴリズムとして広く利用されている。また，エージェントミドルウェアの実装には，Java によるルールベースのマルチエージェントフレームワー



クである DASH-1.3d (DASH:Distributed Agent System based on Hybrid architecture) [46] を用いた。RSP 知識は XML で記述されており、アプリケーション実行時に読み込まれ、各 3D モデルに格納される。図 4.5 に RSP 知識の具体例を示す。各タグの説明は以下の通りである。

**DistanceAngleRSP:**

この RSP 知識が視点からの距離と視線からの角度に応じた RSP 知識であることを示す。

**ModelName:**

この RSP 知識の対象となるモデルの名前を示す。

**AngleSample:**

この RSP 知識において、RSP をサンプリングする視線からの角度を示す。

**limit:**

品質の認知が不可能、すなわちこの角度の外側に位置するモデルは全て最低品質で表示しても利用者は品質の劣化を感じない、とみなすことができる限界の角度を示す。

**ScaleSample:**

この RSP 知識において、RSP をサンプリングする視点からの距離を示す。実際には、以下で定義する“基本距離”におけるサイズに対する倍率で表現する。

**BasicDistance:**

RSP 検査において、この RSP 知識が対象としているモデルを画面上になるべく大きく表示した状態での視点からの距離である“基本距離”を定義する。

**data:**

RSP 知識におけるデータ部分を定義する。

**angle:**

視線からの角度が value 属性の値である場合の RSP を定義する。

**scale:**

```

<DistanceAngleRSP>
  <ModelName>bunny</ModelName>
  <AngleSample>
    <value>0.0</value>
    <value>5.0</value>
    <value>10.0</value>
    <value>15.0</value>
    <value>20.0</value>
    <value>25.0</value>
    <limit>60.0</limit>
  </AngleSample>
  <ScaleSample>
    <value>1.0</value>
    <value>0.5</value>
    <value>0.25</value>
    <value>0.125</value>
    <limit>0.0625</limit>
    <basicDistance>10</basicDistance>
  </ScaleSample>
  <data>
    <angle value="0.0">
      <scale value="1.0">
        <rsp>
          <pqos sqos="103">1</pqos>
          <pqos sqos="593.714285714285">1.5</pqos>
          <pqos sqos="1084.42857142857">2</pqos>
          <pqos sqos="2004.25">2.5</pqos>
          <pqos sqos="2924.07142857143">3</pqos>
          <pqos sqos="5066.07142857143">3.5</pqos>
          <pqos sqos="7208.07142857143">4</pqos>
          <pqos sqos="13604.0357142857">4.5</pqos>
          <pqos sqos="20000">5</pqos>
        </rsp>
      </scale>
    <scale value="0.5">
      <rsp>
        <pqos sqos="103">1</pqos>
        <pqos sqos="593.714285714285">1.84046978223636</pqos>
        <pqos sqos="1084.42857142857">2.3001995577369</pqos>
        <pqos sqos="2004.25">2.99474138395987</pqos>
      </rsp>
    </scale>
  </data>

```

(以下略)

図 4.5: RSP 知識の具体例

視点からの距離が value 属性の値である場合の RSP を定義する .

**rsp:**

具体的な RSP , すなわち , P-QoS と S-QoS の対応関係を定義する .

**pqos:**

S-QoS が sqos 属性の値である場合の P-QoS の値を定義する .

これらのタグにより , 任意の視点からの距離と視線からの角度に応じた RSP を記述する . また , RSP 知識を用いて要求された距離と角度に応じた RSP を取得する際 , 具体的な値はサンプリングされた値を線形補間することによって求められる .

## 4.5 実験と評価

### 4.5.1 実験 (1): RSP 知識獲得のための品質検査実験

#### (1) 実験方法の概要

プロトタイプの RSP 検査アプリケーションを用いて , RSP 知識の獲得のための品質検査実験をおこなった . まず , 従来の RSP 検査手法 [40] について簡単に説明する . この検査手法では , 検査対象のモデルの左右に比較のためのサンプルである参照モデルを提示する . 一方の参照モデルは最高品質のサンプルであり , レベル 5 の品質で表示され , もう一方の参照モデルは最低品質のサンプルであり , レベル 1 の品質で表示される . 被験者は , これらの参照モデルと比較しながら , 検査対象のモデルの品質をレベル 1 からレベル 5 までの 5 段階のレベルで評価する .

本研究では , 視点からの距離と視線からの角度を変化させつつ , 基本的には従来研究 [40] における品質評価法と同様の方法で検査を実施する . しかしながら , 従来手法と全く同様の検査をおこなった場合 , 視点からの距離や視線からの角度が離れた場合においては品質の評価が非常に困難になるため , 信頼できる結果を得ることができなかった . そこで , 本研究では “官能検査ハンドブック” [47] を参考に , それぞれの状況に合わせた品質

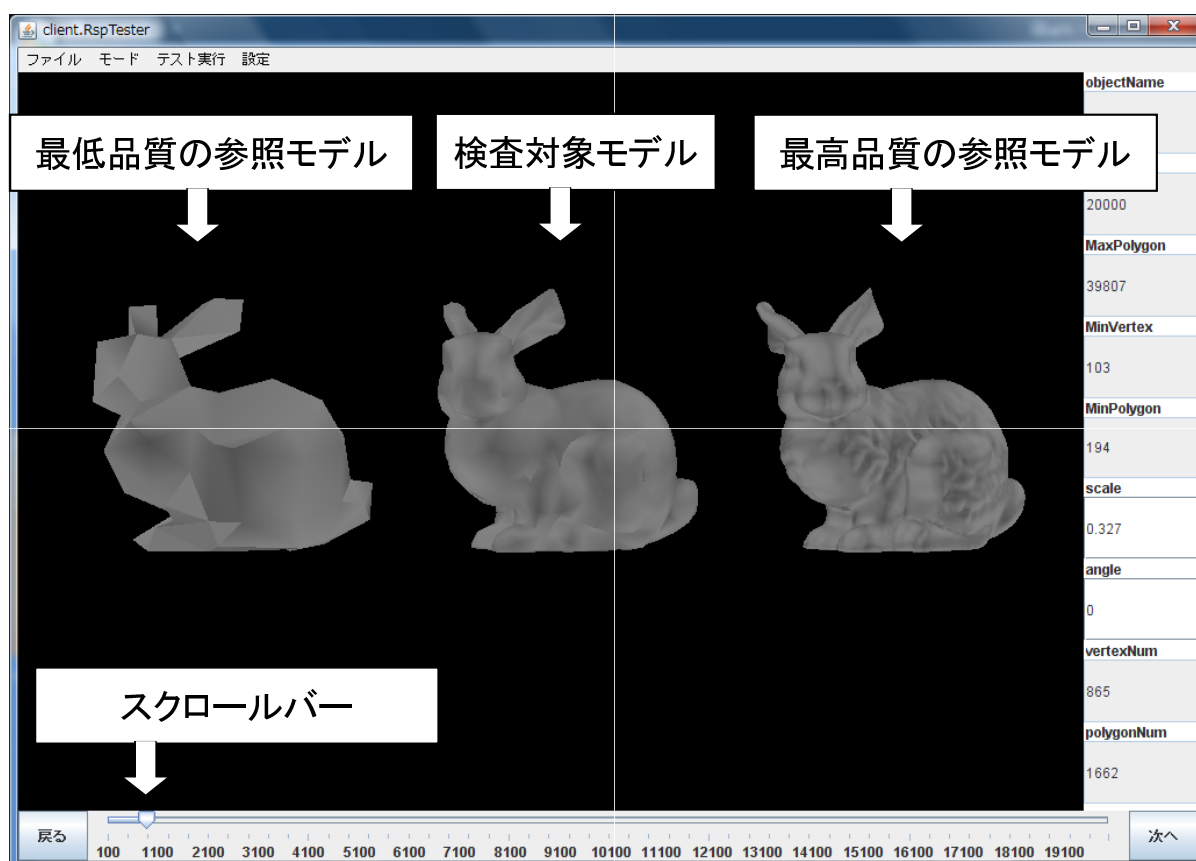


図 4.6: プロトタイプ RSP 検査アプリケーションによる距離に基づく品質検査実験

評価の容易性を高めた検査手法を新たに採用した．新たな検査手法については続く節にて詳述する．

本研究における全ての品質検査実験は，同じ型の PC とモニタを用いて，被験者の目の位置から画面までの距離を揃えて実施された．また，検査結果は 10 人の被験者についておこなわれ，その平均値として算出した．検査は，CG などの研究分野で最も多用されるテストモデルの一つである Stanford Bunny のモデルの他，4.5.2 節の実験で用いる 4 つのモデル（人，信号機，ビル，木）についても同様におこなわれた．

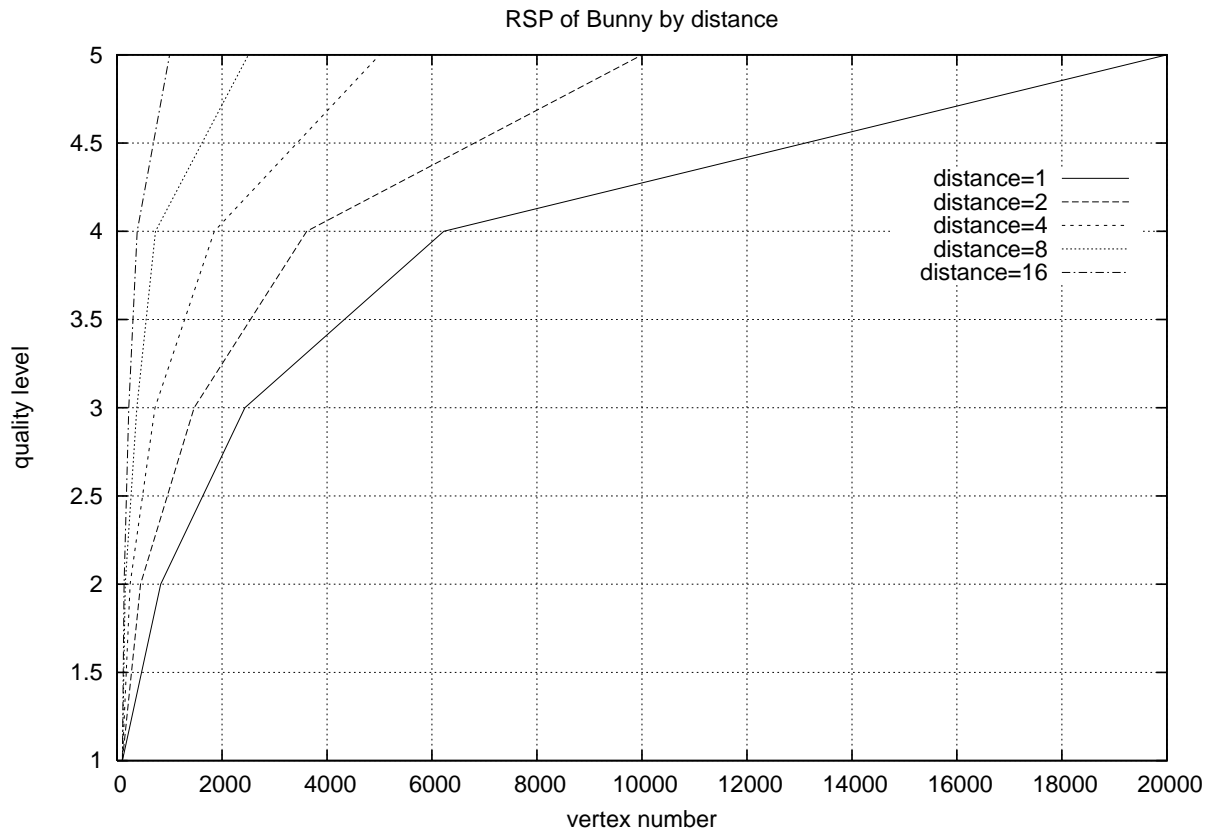


図 4.7: 視点からの距離に基づく RSP 知識

## (2) 視点からの距離に基づく RSP 知識の獲得

3D モデルの視点からの距離を変化させながら、図 4.6 に示した品質検査実験をおこなった。検査の容易性と検査結果の信頼性の向上のため、この検査では“中間法”に基づく検査手法を採用した。中間法では、被験者は提示される 2 つの参照モデルの中間の品質の決定を繰り返す。まず、最高品質の参照モデル（レベル 5）と最低品質の参照モデル（レベル 1）の中間の品質としてレベル 3 の品質が決定される。次に、レベル 4 とレベル 2 の品質は、それぞれレベル 5 とレベル 3 のモデルを参照した場合の中間の品質、およびレベル 3 とレベル 1 を参照した場合の中間の品質として決定される。以上の過程を、各 3D モデルが提示される視点からの距離を変えながら順次繰り返す。

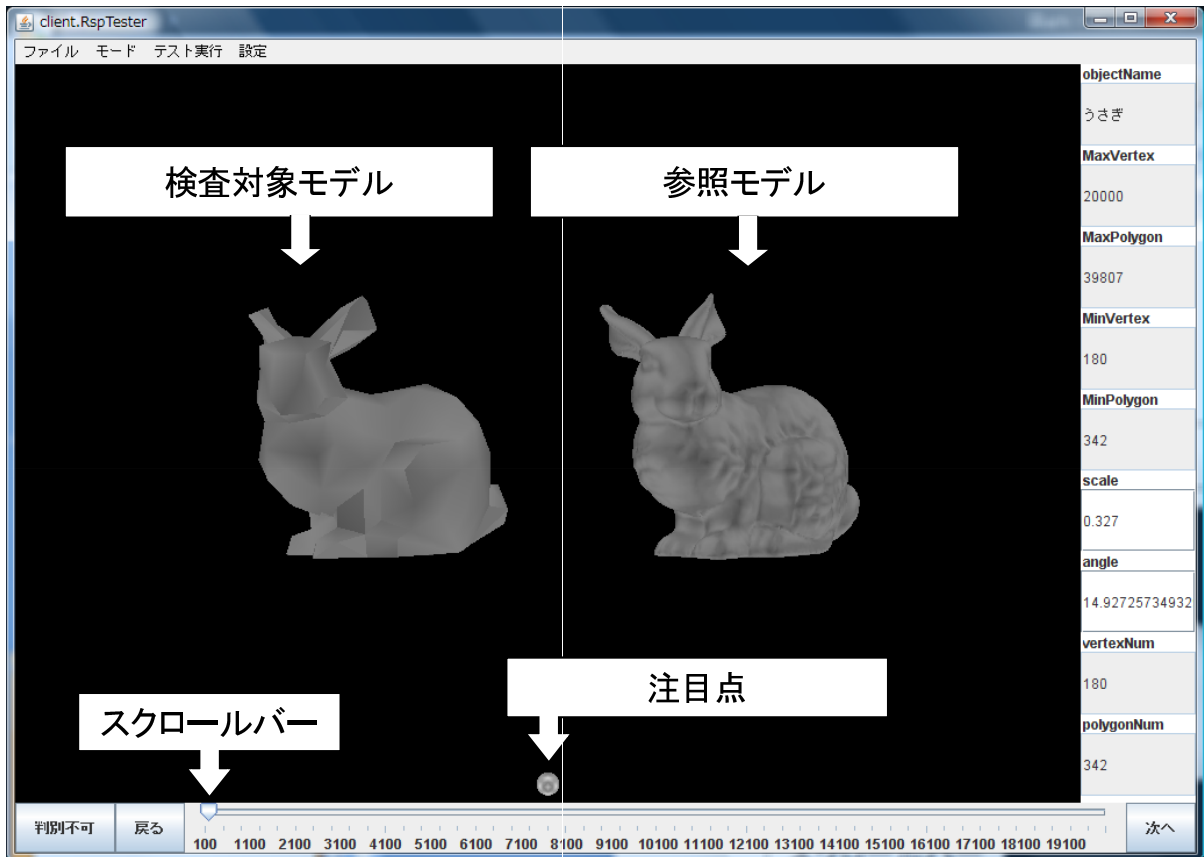


図 4.8: プロトタイプ RSP 検査アプリケーションによる角度に基づく品質検査実験

図 4.7 に、検査結果として得られた距離に基づく RSP 知識を示す。この図における、距離の単位は、検査対象のモデルを画面になるべく大きく表示した場合の視点からの距離を 1 としている。本研究では、この距離を“基本距離”と定義する。この結果より、視点からの距離が離れるほど、RSP の非線形性は大きくなることが確認できる。

### (3) 視線からの角度に基づく RSP 知識の獲得

3D モデルの視線からの角度を変化させながら、図 4.8 に示した品質検査実験をおこなった。この検査では、視線からの角度を定めるために、画面上に注目点を表示した。被験者は注目点を注視しながら検査対象モデルの品質を評価する。この場合には、4.5.1(2) 節で示した手法のように中間の品質を決定することさえほぼ不可能なほどに、品質検査が困難

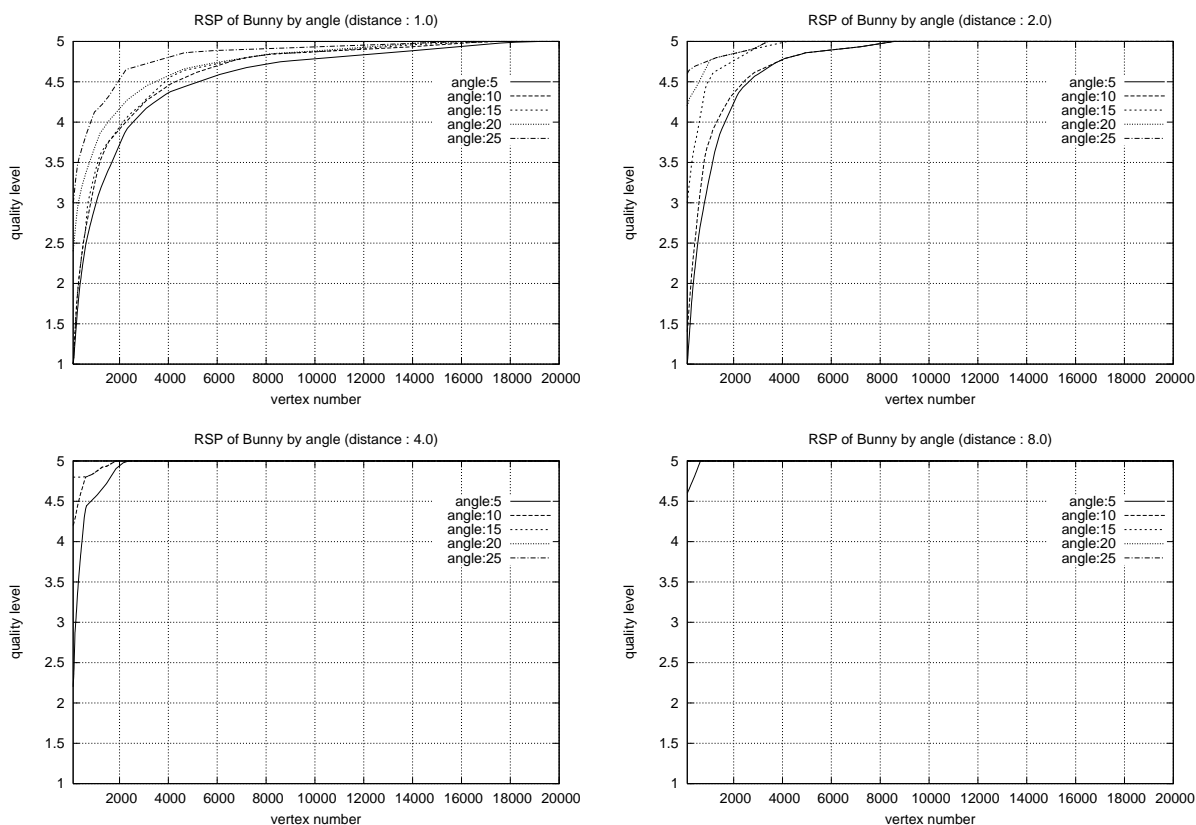


図 4.9: 視点からの距離と視線からの角度に基づく RSP 知識

となる．そこで，この検査では，“丁度可視差異 (JND: just noticeable difference)” と呼ばれる，知覚可能な最小の品質の差異に基づく検査法を採用した．

この検査法では，画面には2つのモデルを提示する．一方は参照モデルであり，もう一方は検査対象モデルである．最初の段階では，両方のモデルが最高レベルの品質で表示される．被験者は，検査対象モデルの品質を，最高品質から徐々に下げながら，2つのモデルの品質に差を感じるかどうかを注意深く観察する．このようにして，一段階の丁度可視差異を決定する．続いて，丁度可視差異の分だけ品質が低いモデルを参照モデルとして，さらに次の段階の丁度可視差異を決定する．これを，検査対象モデルの品質が最低レベルに至るまで繰り返す．こうして得られた数段階の丁度可視差異のそれぞれが，P-QoSの軸において同じだけの幅を持っていると仮定し，RSPを算定する．例えば，最高品質から最

低品質に至るまでに、2段階の丁度可視差異が見出された場合には、1つ目の丁度可視差異をレベル5からレベル3に至る2段階のP-QoSの差異、2つ目丁度可視差異をレベル3からレベル1に至る2段階のP-QoSの差異とみなして計算する。以上の過程をさらに逆向き、すなわち、最低レベルから始めて徐々に品質を上げながら最高品質に至る順序でも同様におこない、両過程の結果の平均から、ある視点からの距離と視線からの角度におけるRSPを決定する。そして、ここまでの過程を視線からの角度と視点からの距離を変えながら、さらに順次繰り返していく。

図4.9に、検査結果として得られた距離と角度に基づくRSP知識を示す。この結果より、視点からの距離や視線からの角度が離れるほど、特に角度については顕著に、RSPの非線形性が大きくなることが確認できる。

#### 4.5.2 実験(2): RSPに基づく動的品質調整実験

本研究の提案であるRSPに基づく動的品質調整法の有効性を示すため、実装した提案システムのプロトタイプを用いた実験をおこなった。実験では、使用可能なS-QoSの量を制限することにより、資源が十分でない状況下におけるRSPに基づく動的品質調整法の効果を検証した。この実験では、RSPの考慮をおこなっていないために資源の十分でない状況への対応が困難な、従来の品質調整法との比較をおこなう。

ここで、従来の品質調整法とは、ある一定の資源が確保できている場合には通常の品質調整をおこない、視点からの距離や視線からの角度に基づいてS-QoSを節約するよう振舞うが、品質の劣化が避けられないほどの資源不足の状態に陥った場合には、資源の不足分はなるべくP-QoSへの影響が少ない表示要素から削除していくことによって補うという品質調整法である。

まず、広い範囲を俯瞰した状況における品質調整の様子を図4.10に示す。まず、使用可能なS-QoSが100%十分にある場合には図4.10の(a)に示した画面を表示するものとす



る．ここで，使用可能な S-QoS を十分量の 39%まで制限した場合，従来手法では 4.10 の (b) に示すように，遠距離や視野周辺に偏った表示要素の隠滅が発生し，景観が著しく乱れてしまっている．一方，提案手法では 4.10 の (c) に示すように，全体的に均一に品質を低下させる効果により，景観の全体像を維持した適切な品質調整がおこなわれている．

次に，ドライブシミュレータ利用時における品質調整の様子を図 4.11 に示す．今度は，使用可能な S-QoS が 100% 十分にある場合には図 4.11 の (a) に示した画面を表示するものとする．ただし，今回は利用形態がドライブシミュレータであるので，注目箇所の候補が“路上の人”と“信号機”であるものとする．ここで，今度は使用可能な S-QoS を十分量の 20%まで制限した場合の様子を示す．従来手法では，図 4.11 の (b) に示すように，注目する表示要素である路上の人物や信号機が，視点から遠距離にあるために隠滅してしまっている．そのため，ドライブシミュレータとしてのアプリケーション利用が困難な状態に陥っている．これに対し，提案手法では，図 4.11 の (c) に示すように，注目していない木などの表示要素の S-QoS を適度に低下させることで必要な計算資源を確保し，注目する表示要素の隠滅を回避しており，ドライブシミュレータとしての機能を維持している．

### 4.5.3 評価

4.5.1 節に示した RSP 知識の獲得のための品質検査実験の結果より，RSP が視点からの距離や視線からの角度などの視覚的な状況に応じて大きく変化することが確認できた．また，RSP の非線形性は，視点からの距離や視線からの距離が離れるほど，より顕著になる傾向も示された．このことは，S-QoS が大幅に削減されても P-QoS に与える影響が小さい範囲や，逆に小さな S-QoS の削減が P-QoS の大幅な悪化を招く範囲が存在すること，そしてそれらの範囲はアプリケーション利用時に変化することを示している．そのため，この実験で得られた RSP 知識を活用することにより，アプリケーションの機能を満たす最低限の品質を維持しつつ資源の節約をおこなったり，限られた資源状況でなるべく高い

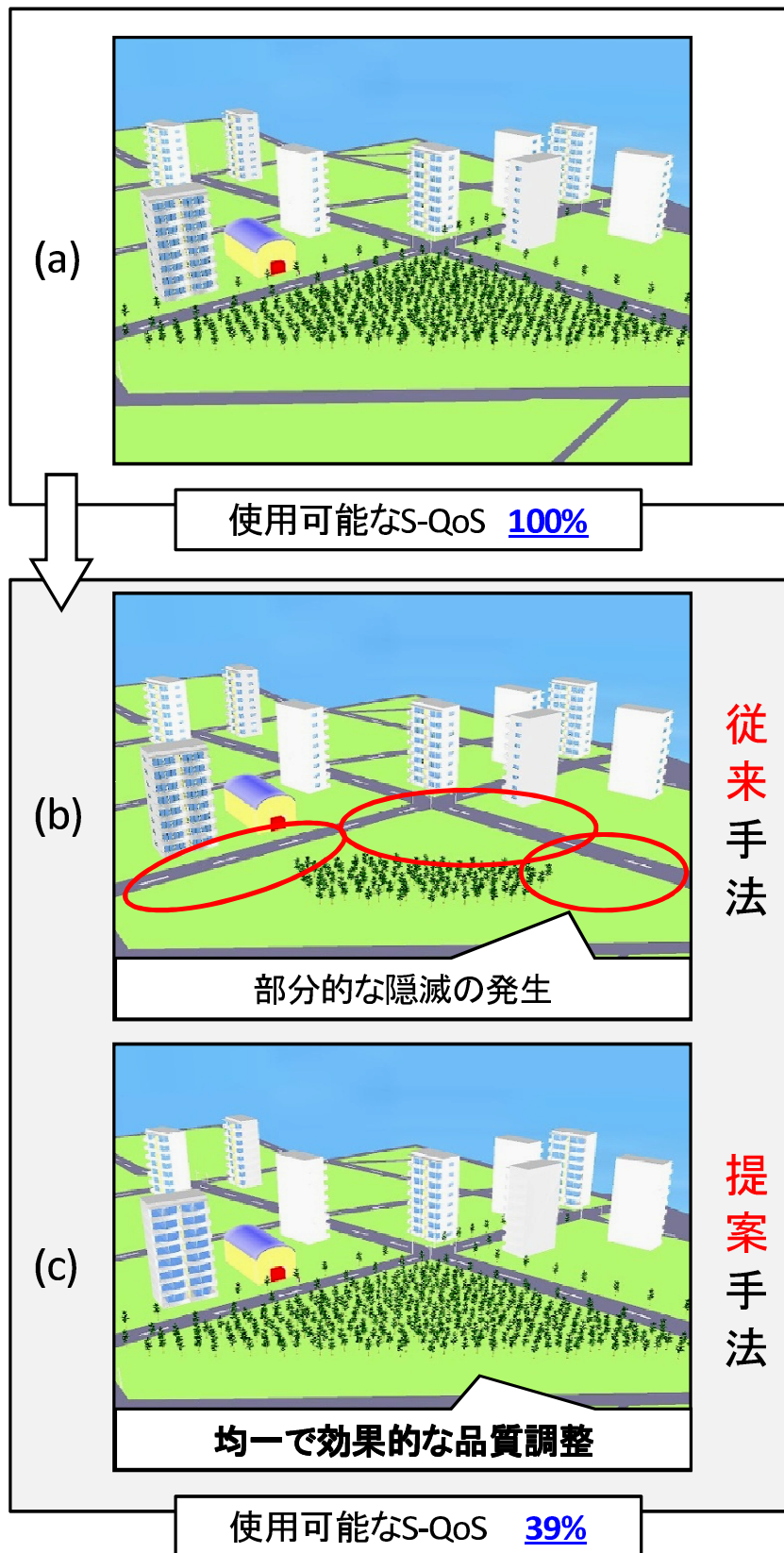


図 4.10: RSP に基づく品質調整の効果 - “広い範囲を眺める場合”

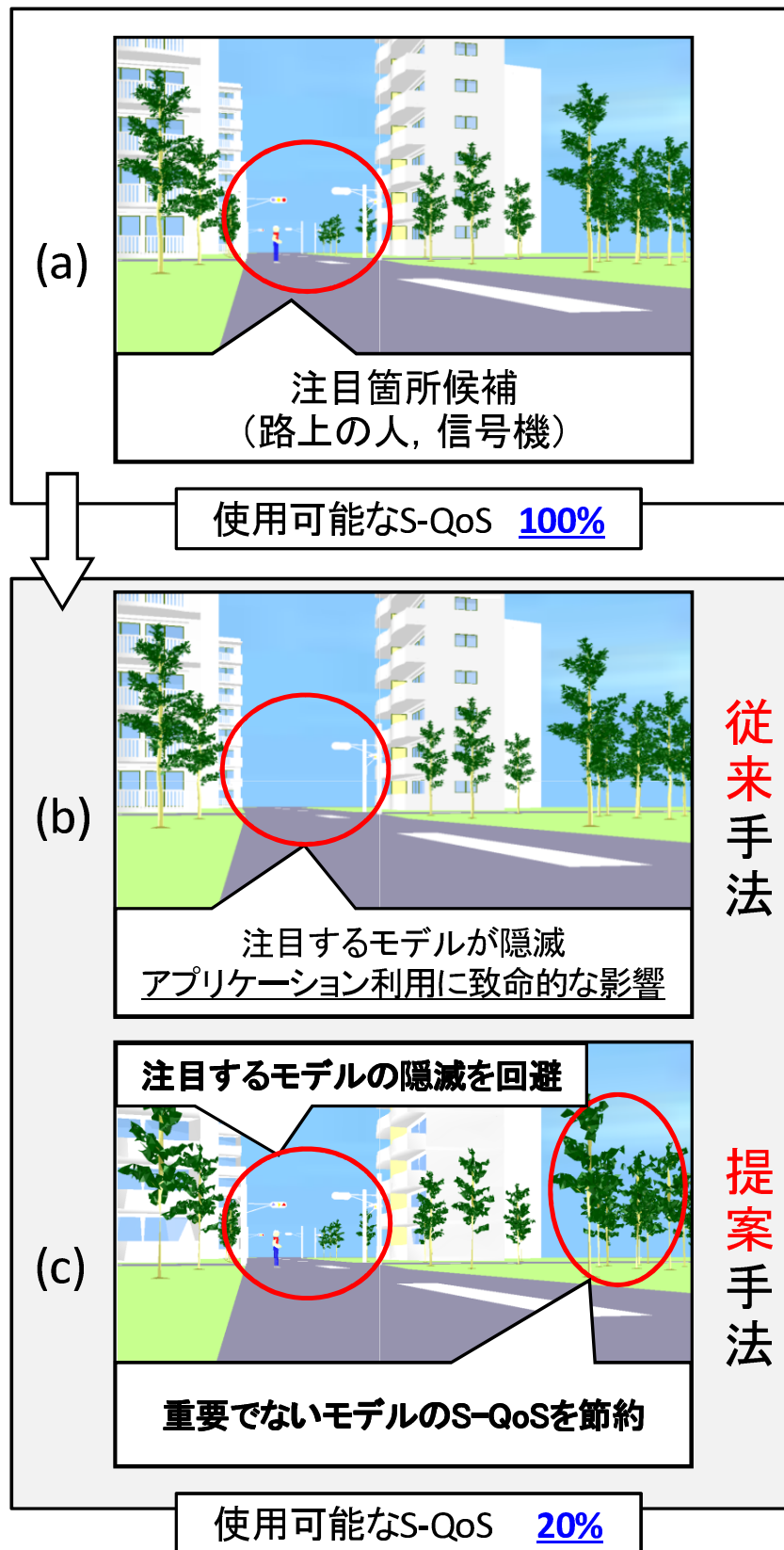


図 4.11: RSP に基づく品質調整の効果 - “ドライブシミュレータとして利用する場合”

知覚レベル品質を提供するなどといった、従来では困難であった高度な品質調整が実現可能となる。

さらに、4.5.2 節に示した RSP に基づく品質調整実験の結果より、提案手法の効果を確認した。具体的には、使用可能な資源が不十分であり、利用者が感じる品質の劣化が避けられない場合においても、利用者の知覚レベル品質に基づく適切な品質調整が実施され、可能な限り高い品質を提供するなど、従来よりも効果的な品質調整が実現されたことを確認した。また、注目箇所推測機能によって、アプリケーションの利用形態に応じた適切な品質調整をおこなう効果も確認できた。

## 4.6 考察

RSP は、利用者の主観的な品質評価によって決定されるため、利用者の違いによる個人差や、3D モデルの種類の違いによる差異が発生することが考えられる。

RSP の差異については、RSP に関する既存研究 [40] でも、詳細な考察が述べられている。この研究において、Yixin らは 3D スキャナで取り込んだ 3D モデルを対象として、利用者の主観的な品質評価と 3D モデルの精細さの関係、すなわち本研究における RSP について、詳細な調査と分析をおこなっている。3D モデルの精細さのパラメータとしては、形状解像度とテクスチャの画像解像度が扱われている。Yixin らは、まず RSP を定式化し、被験者による品質評価実験の結果として得られた RSP と比較することによって、式中に含まれる係数の値を定めると共に、定式化された RSP が被験者から得られた実際の RSP とよく一致することを確認している。また、被験者から得られる RSP について統計的な手法による分析をおこない、その標準偏差が十分に小さいことから、RSP の個人差は無視できることも確認している。一方で、3D モデルの種類ごとの RSP の違いについては、殆どの 3D モデルは非常によく似た RSP を持つものの、ごく一部の 3D モデルは大きく異なる RSP を持つことが示されている。例えば、丸い淵をもつ植木鉢は、形状解像度が低くなり淵が四角くなって

も、主観的な品質評価が高いという傾向が得られている。Yixin らは、この結果について、身の回りにある植木鉢には四角いものも存在するため、利用者が違和感を感じないという心理的な要因が関係していると分析しており、このような場合には定式化したモデルは適用できないとしている。

本研究における RSP 知識は、テクスチャの画像解像度は扱っていないが、視点からの距離と視線からの角度のパラメータが加わっている点が、Yixin らの研究とは異なる。これは、Yixin らはネットワークを介したモデルの転送効率を主な研究対象としているのに対し、本研究は利用者端末上での描画効率を主な研究対象としているためである。4.5.1 節で述べた本研究における品質評価実験の結果では、Yixin らの結果と同様に、RSP の被験者ごとの差異は無視できるほどに小さかったため、単純な平均値によって RSP 知識を構成した。一方、3D モデルごとの差異は大きかったため、本研究では利用する 3D モデルごとに RSP 知識を獲得するための品質検査をおこなっている。このため、現状では RSP 知識の取得にかかる手間は大きく、実用化は困難である。これを解決するためには、本研究における RSP 知識に適用可能な視点からの距離と視線からの角度、および 3D モデルの特徴までを含めた RSP の定式化をおこなうと共に、キャリブレーションの仕組みを追加することが有効であると考えられる。3D モデルの特徴を記述する際には、その 3D モデルが本来持っている複雑さ、すなわち最高レベルの利用者品質の提供に必要なシステムレベル品質の値が重要な要素となると考えられる。これら RSP の定式化とキャリブレーションの仕組みを取り入れることによって、本研究では無視していた個人差へも対応した適切な RSP が、効率的に提供できるようになると考えられる。これについては今後の課題とする。

## 4.7 おわりに

本章では、本研究の目的である、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される 3 次元共生空間の実現に対する課題の (T2) である“限られた資

源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現”のために、システムレベル品質と利用者の知覚品質との対応関係 (RSP: Relationship between System level QoS and Perceptual level QoS) およびその変化に関する知識 (RSP 知識) の導入による利用者の知覚に基づく品質調整法を提案した。具体的には、RSP 知識の獲得のための RSP の変化要因ごとの品質検査実験と、実行時における変化要因の値の獲得に必要な利用者の注目箇所推測機能を提案し、これによりアプリケーション利用時の適切な RSP の獲得を可能とした。また、RSP 知識の獲得のための具体的な品質検査方法や検査結果として得られた RSP 知識について述べた。さらにアプリケーション利用時の RSP の決定と、決定された RSP に基づく品質調整機構のマルチエージェントフレームワークを用いた実装についても詳細に述べた。また、提案システムのプロトタイプの実装をおこない、それらを用いて本提案手法の効果を確認するための実験をおこなった。その結果、提案手法により知覚品質に基づく適切な品質調整を実現し、致命的な資源状況悪化時にもシステムの必要機能を維持するなど、多様な資源状況への適応性が向上されたという結論を得た。

## 第5章 結論

### 5.1 研究の背景

近年，ネットワークや計算機端末の発達に伴い，ユビキタス情報社会を目指した取り組みがおこなわれており，ユビキタス情報環境の構成要素であるアドホックネットワークなどの無線ネットワーク，携帯電話・PDAなどの携帯型端末，ICタグ・RFIDシステム・センサネットワークなどのセンサ技術，情報家電やウェアラブルコンピュータなどに代表される埋め込みコンピュータなどが急速に発達している．その結果 IT(Information Technology) は人々の日常生活の中に深く浸透しつつあり，ネットワークサービスの利用者の増加や利用状況の多様化が進んでいる．しかし，それに伴う情報の氾濫，サービスの複雑さや使いにくさ，プライバシーの侵害，IT 犯罪，デジタルディバイドなどの問題も顕在化してきている．共生コンピューティング (Symbiotic Computing)[1, 2, 3] では，これらの問題の原因が現実空間 (RS: Real Space) とデジタル空間 (DS: Digital Space) の間のギャップである u-Gap にあるとし，RS と DS が互いを認知する「共認知」による解決を目指している．「共認知」は，RS の環境情報，個人や集団の行動，経験的知識を DS が自律的に獲得する RS 認知と，DS に存在するサービス，情報などを適切に使いやすく RS に提供することである DS 認知からなる．本研究では，このうち DS 認知の拡張を目指し，3 次元仮想空間が持つ利用者に直観的な理解を与える効果に着目した．3 次元仮想空間は一般に開発コストや運用にかかる計算処理やネットワークなどの負荷が高いため，これまでは資源状況が安定し，利用状況も限定された専用環境における利用を基本として発展してきた．そのため，資源状況が不安定で利用状況が多様なユビキタス情報環境においては，3 次元仮想空

間の効果的な利用は困難であった。

本研究では、共認知のメカニズムによって拡張されたデジタル空間を共生空間、3次元仮想空間によって実現される共生空間を3次元共生空間と定義した。そして、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現を目的とし、多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現のための課題として、以下の2点を挙げた。

(T1) 3次元仮想空間の空間構成に関する課題

利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

(T2) 3次元仮想空間の品質調整に関する課題

限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現

## 5.2 各章の要約

### 第1章 序論

1章では、研究の背景を示し、本論文の概要を述べた。

本研究は共生コンピューティングの概念に基づき、ユビキタス情報社会の進展を背景として近年発生しつつあるデジタルディバイドやIT犯罪などの新たな社会問題を解決することを目指している。共生コンピューティングでは、ユビキタス情報社会を取り巻く様々な問題の原因を現実空間とデジタル空間との間のギャップと捉えており、現実空間とデジタル空間の相互理解を促し「共認知」を実現することによりu-Gapを解消することができるとしている。本研究では、共認知のメカニズムによって拡張されたデジタル空間を共生空間、さらに3次元仮想空間によって実現された共生空間を3次元共生空間と定義した。そして、3次元共生空間の実現を通じてDS認知を強化することによって、共生コンピューティングの発展に貢献する。



## 第2章 ユビキタス情報環境における3次元仮想空間の利用に関する課題

2章では、本研究の目的と課題について示した。

3次元仮想空間は一般に開発コストやシステムにかかる負荷が高く、これまでは資源状況が安定し利用状況も限定された専用環境における利用を基本としてきた。そのため、資源状況が不安定で利用状況が多様なユビキタス情報環境においては、3次元仮想空間の効果的な利用は困難であった。本研究では、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現を目的とし、そのための課題として多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現を挙げた。具体的には、3次元仮想空間の空間構成と品質調整について、それぞれ以下の課題を挙げた。

(T1) 利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現

(T2) 限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現

## 第3章 分散型部分空間の結合に基づく共有仮想空間構成

3章では、本研究の目的達成のための空間構成に関する課題(T1)である、利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型3次元仮想空間構成法の実現のために、全体空間構成を維持する従属型空間結合手法を提案した。この従属型空間結合手法により、ボトムアップ型の分散型空間構成法における空間結合の片方向性と排他性の制約を解消し、結合される空間同士の調整を必要としない空間結合方式を実現した。これにより、空間の再利用性と空間結合の柔軟性を向上し、利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型空間構成法を実現した。本研究では、従属型空間結合を実現するための空間構成記述フォーマットとプロトタイプシステムを実装し、プロトタイプシステムを用いた実験を通じて、本研究の効果と有効性を確認した。

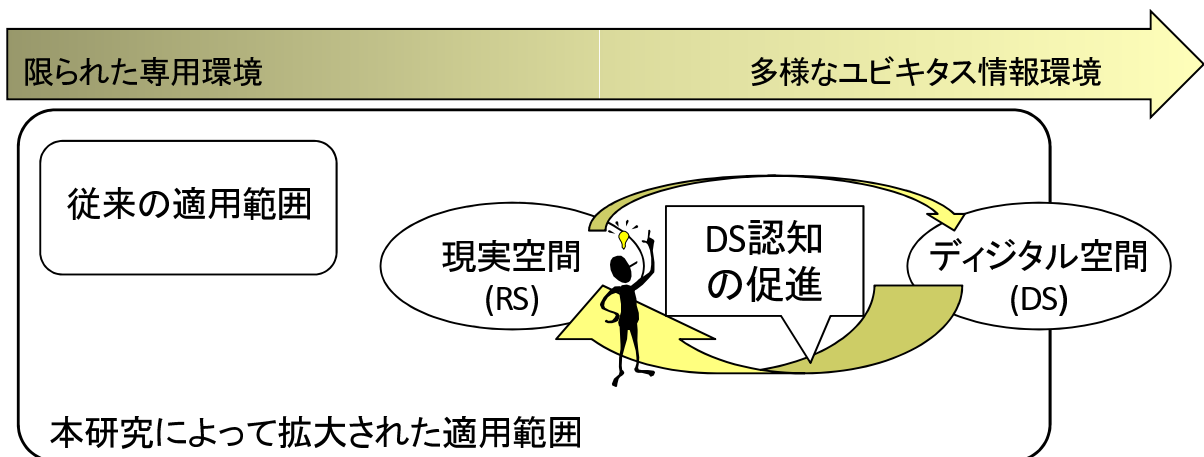


図 5.1: 共生コンピューティングへの貢献

#### 第 4 章 3 次元仮想空間における利用者の知覚に基づく動的品質調整

4 章では，本研究の目的達成のための品質調整に関する課題 (T2) である，限られた資源状況における利用者の知覚品質に基づく品質調整法の実現のために，システムレベル品質と利用者の知覚品質との対応関係 (RSP: Relationship between System level QoS and Perceptual level QoS) およびその変化に関する知識 (RSP 知識) の導入による利用者の知覚に基づく品質調整法を提案した．具体的には，RSP 知識の獲得のための RSP の変化要因ごとの品質検査実験と，実行時における変化要因の値の獲得に必要な利用者の注目箇所推測機能を提案し，これにより資源の不足時における利用者の知覚に基づく品質調整法を実現した．本研究では，提案システムのプロトタイプを実装し，プロトタイプシステムを用いた実験を通じて，本研究の効果と有効性を確認した．

### 5.3 本研究の貢献

本研究では，多様な環境への適応性の高い開放型の 3 次元仮想空間構成法の実現を課題とし，空間構成と品質調整の両面において 3 次元仮想空間の多様な環境への適応性を向上させた．空間構成については，従属型の空間結合手法により結合される空間同士の調整を

必要としない空間結合を実現した。これにより、空間の再利用性と空間結合の柔軟性を向上させ、利用者が自由に設計・公開・再利用可能な開放型空間構成法を実現した。また、品質調整については、システムレベルの品質と利用者の知覚レベルの品質との対応関係とその変化に関する知識の導入による利用者の知覚に基づく品質調整を提案し、限られた資源状況においても最大限の品質を提供する3次元仮想空間システムを実現した。

ユビキタス情報環境の発展に伴い、コンピュータやネットワークの利用者の爆発的な増加や利用状況の多様化が進んでいる。そのため、3次元仮想空間の空間構成を一部の専門家だけに委ねていては、そのユビキタス情報環境における効果的な利用は困難である。それに対し、3章で提案した開放型空間構成法では、提供される空間を自由に再利用することで、利用者自身が状況に応じた3次元仮想空間を簡単に構成することが可能となり、その効果的な利用が実現される。またユビキタス情報環境においては資源状況は多様かつ不安定であるため、計算機やネットワークへの負荷が高く資源状況に対する適応性が低い状態では、3次元仮想空間の効果的な利用は困難である。それに対し、4章で提案した利用者の知覚に基づく品質調整法を用いることで、多様な資源状況への高度な適応が可能となり、ユビキタス情報環境における3次元仮想空間の効果的な利用が実現される。こうして、本研究の課題である多様な環境への適応性の高い開放型の3次元仮想空間構成法の実現が達成された。これは、本研究の目的である、資源の不安定なユビキタス情報環境において多様な目的や状況で利用される3次元共生空間の実現に向けた重要な成果である。すなわち、本研究はDS認知を促進するための基盤技術の開発に貢献するものであり、本研究の成果は共認知に基づく共生コンピューティングを強化するものであるといえる。よって、本研究はu-Gapが解消された次世代のユビキタス情報社会の実現に貢献したといえる。

## 5.4 今後の課題

まず空間構成に関する課題として、今後は、ボトムアップ型の空間構成を用いた空間構成の大規模化のための処理の効率化について検討する。また、構築した空間内で利用するアプリケーションについても開放型のアーキテクチャを適用し、分散配置と自由な連携を実現するための仕組みを検討する。さらに、3.6節で議論した、結合された共有空間における情報漏えい対策や、参照元空間を把握できないことからくる混乱の解消を目指した取り組みについて検討していくとともに、提案手法に基いて構成された空間が利用者にとって分かり易く自然で違和感のないものであるかについて主観的な評価をおこなう。

次に、品質調整に関する課題として、4.6節で述べた研究課題である RSP 知識のモデル化と効率的な取得、および個人差への対応について検討する。また、現在は事前に設定したメタ情報による単純なマッチングで実現されている注目箇所推測機能の高度化を検討し、設定の手間を減らす手法や利用者の行動などに応じた注目箇所の推測などの実現を目指す。また、品質調整にかかる処理負荷の削減のために、品質の調整単位となるモデルを階層化し、状況に応じて切り替える手法について検討する。また、提案した品質調整手法のネットワークを介した空間定義情報の配信への適用を検討する。以上により、さらなる 3次元仮想空間の適用範囲の拡大を目指す。

# 謝辞

末筆ながら，本研究をおこなうにあたり，多くの方々に御指導・御助言を頂きました．ここに，心より深く感謝の意を表します．

特に，本研究をおこなう機会を与えて頂き，日頃から多くの暖かい御指導を賜りました，東北大学電気通信研究所教授の白鳥則郎先生に心より深謝いたします．

また，数多くの御助言と御指導をくださいました，東北大学サイバーサイエンスセンター教授の木下哲男先生に心より感謝いたします．

そして，本論文の審査をして頂き，有益な御助言をくださいました，東北大学大学院情報科学研究科教授の橋本和夫先生に心より感謝いたします．

さらに，本研究を進めるにあたり終始御指導を賜り，研究室生活においても支えて頂きました，東北大学電気通信研究所准教授の北形元先生に心より感謝いたします．

そして，本研究を進めるにあたり，有意義な討論と数多くの御助言を下された，東北大学電気通信研究所准教授の菅沼拓夫先生をはじめとする，東北大学電気通信研究所白鳥研究室の皆様へ，心からお礼申し上げます．

最後に，今日まで精神的・経済的に支えてくださった両親と，日頃から献身的な支援をしてくれた妻，そして妻のお腹の中から私をたくさん元気付けてくれたまだ見ぬ息子に心から感謝し，本論文を締めくくります．

## 参考文献

- [1] 白鳥則郎, 菅原研次, 菅沼拓夫, 藤田茂, 小出和秀. Symbiotic computing - ポスト・ユビキタス情報環境へ向けて -. 情報処理学会誌, Vol. 47, No. 8, pp. 811–816, 2006.
- [2] T. Suganuma, T. Uchiya, S. Konno, G. Kitagata, H. Hara, S. Fujita, T. Kinoshita, K. Sugawara, and N. Shiratori. Bridging the e-gaps: Towards post-ubiquitous computing. In *Proc. of the 1st International Symposium on Frontiers in Networking with Applications (FINA 2006)*, pp. 480–484, 2006.
- [3] Symbiotic computing webpage. <http://symbiotic.agent-town.com/>.
- [4] Second life. <http://secondlife.com/>.
- [5] Project looking glass. <https://lg3d.dev.java.net/>.
- [6] Google earth. <http://earth.google.co.jp/>.
- [7] Georg Klein and David Murray. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In *Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07)*, Nara, Japan, November 2007.
- [8] 胡振程, 内村圭一. 拡張現実感技術による次世代ナビゲーションシステム vicnas の構築. 第2回 ITS シンポジウム論文集, pp. 119–124, 2003.

- [9] 竹村雅幸, 大田友一. 協調型複合現実空間のためのアイコンタクトの復元～視線認知実験と顔映像の高精細化～. 情報科学技術レターズ, FIT2004, LK-003, pp. 243–246, September 2004.
- [10] Yasuaki Honda, Kouichi Matsuda, Jun Rekimoto, and Rodger Lea. Virtual society: extending the www to support a multi-user interactive shared 3d environment. In *VRML '95: Proceedings of the first symposium on Virtual reality modeling language*, pp. 109–116, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [11] Chris Greenhalgh and Steve Brmford. Massive: a distributed virtual reality system incorporating spatial trading. In *Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 27–34, 1995.
- [12] Chris Greenhalgh, Jim Purbrick, and Dave Snowdon. Inside massive-3: flexible support for data consistency and world structuring. In *CVE '00: Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*, pp. 119–127, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [13] Rodger Lea, Yasuaki Honda, Kouichi Matsuda, and Satoru Matsuda. Community place: architecture and performance. In *VRML '97: Proceedings of the second symposium on Virtual reality modeling language*, pp. 41–50, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [14] Olof Hagsand. Interactive multiuser ves in the dive system. *IEEE MultiMedia*, Vol. 3, No. 1, pp. 30–39, 1996.
- [15] 広田光一, 廣瀬通孝. マルチメディアバーチャルラボラトリ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 = Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol. 8, No. 1, pp. 47–56, 20030331.

- [16] Final fantasy xi. <http://www.playonline.com/ff11/index.shtml/>.
- [17] Lineage. <http://lineage.plaync.jp/>.
- [18] Michael R. Macedonia, Donald P. Brutzman, Michael J. Zyda, David R. Pratt, Paul T. Barham, John Falby, and John Locke. Npsnet: a multi-player 3d virtual environment over the internet. In *SI3D '95: Proceedings of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 93–ff., New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [19] Beatrice Ng, Rynson W. H. Lau, Antonio Si, and Frederick W. B. Li. Multiserver support for large-scale distributed virtual environments. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 7, No. 6, pp. 1054–1065, Dec 2005.
- [20] Luciene Cristina Rinaldi Rodrigues, José Remo Ferreira Brega, Antonio Carlos Sementille, and Ildeberto A. Rodello. Managing large scale virtual environments using portals. In *VRCAI '04: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, pp. 459–462, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [21] Kyungmin Lee and Dongman Lee. A scalable dynamic load distribution scheme for multi-server distributed virtual environment systems with highly-skewed user distribution. In *VRST '03: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 160–168, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [22] Qingping Lin, Hoon Kang Neo, Liang Zhang, Guangbin Huang, and Robert Gay. Grid-based large-scale web3d collaborative virtual environment. In *Web3D '07: Proceedings of the twelfth international conference on 3D web technology*, pp. 123–132, New York, NY, USA, 2007. ACM.



- [23] Jiung yao Huang, Yi chang Du, and Chien-Min Wang. Design of the server cluster to support avatar migration. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, pp. 7–14, 2003.
- [24] J.W. Barrus, R.C. Waters, and D.B. Anderson. Locales: supporting large multiuser virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 16, No. 6, Nov 1996.
- [25] David P. Luebke and Benjamin Hallen. Perceptually-driven simplification for interactive rendering. In *Proc. of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 223–234, 2001.
- [26] Jimmy Chim, Rynson W. H. Lau, Hong Va Leong, and Antonio Si. Cyberwalk: A web-based distributed virtual walkthrough environment. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 5, No. 4, pp. 503–515, Dec 2003.
- [27] Java 3d. <https://java3d.dev.java.net/>.
- [28] The virtual reality modeling language. International Standard ISO/IEC IS 14772-1:1997, 1997.
- [29] Ralf Dörner and Paul Grimm. Three-dimensional beans—creating web content using 3d components in a 3d authoring environment. In *VRML '00: Proceedings of the fifth symposium on Virtual reality modeling language (Web3D-VRML)*, pp. 69–74, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [30] 岡田義広. 3次元ソフトウェア開発システム intelligentbox における協調操作環境の実現. *コンピュータソフトウェア*, Vol. 14, No. 1, pp. 3–14, 19970116.
- [31] Yoshiaki Araki and Sony Music Entertainment (Japan) Inc. Vsplus: A high-level multi-user extension library for interactive vrml worlds. In *VRML '98: Proceedings of the third*

- symposium on Virtual reality modeling language*, pp. 39–47, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [32] Stéphane Louis Dit Picard, Samuel Degrande, Christophe Gransart, and Christophe Chailou. Vrmf data sharing in the spin-3d cve. In *Web3D '02: Proceedings of the seventh international conference on 3D Web technology*, pp. 165–172, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [33] Martin Naef, Edouard Lamboray, Oliver Staadt, and Markus Gross. The blue-c distributed scene graph. In *EGVE '03: Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003*, pp. 125–133, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [34] 伊藤正彦, 田中讓. 3次元仮想空間における空間のコンポーネント化の実現. *情報処理学会論文誌*, Vol. 42, No. 10, pp. 2403–2414, 20011015.
- [35] Ioannis Kotziampasis, Nathan Sidwell, and Alan Chalmers. Seamlessly integrated distributed shared virtual environments. In *SCCG '04: Proceedings of the 20th spring conference on Computer graphics*, pp. 138–147, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [36] Splume. <http://splume.jp/>.
- [37] Satoshi Oikawa, Koji Hashimoto, and Yoshitaka Shibata. Qos control function based on user's information on the 3d virtual shared space. In *Proc. International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2004)*, pp. 74–77, 2004.
- [38] Ryosuke Ohmae, Takuo Suganuma, and Norio Shiratori. Design and implementation of multi-user 3d-virtual space with qos awareness based on multi-agent framework. In *Proc. of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2004)*, pp. 68–74, 2004.

- [39] Norio Shiratori, Kenji Sugawara, Tetsuo Kinoshita, and Goutam Chakraborty. Flexible networks: Basic concepts and architecture. *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E77-B, No. 11, pp. 1287–1294, Nov 1994.
- [40] Yixin Pan, Irene Cheng, and Anup Basu. Quality metric for approximating subjective evaluation of 3-d objects. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 7, No. 2, pp. 269–279, Apr 2005.
- [41] Michael Garland and Paul S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. In *Proc. 24th Ann. Conf. Computer Graphics & Interactive Techniques (SIGGRAPH '97)*, pp. 209–216, 1997.
- [42] Jonathan Cohen, Amitabh Varshney, Dinesh Manocha, Greg Turk, Hans Weber, Pankaj Agarwal, Frederick Brooks, and William Wright. Simplification envelopes. In *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 119–128, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [43] Hugues Hoppe. Progressive meshed. In *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 99–108, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [44] Jonathan Cohen, Marc Olano, and Dinesh Manocha. Appearance-preserving simplification. In *SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 115–122, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [45] David P. Luebke. Developer 's survey of polygonal simplification algorithms. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001.

[46] Dash - distributed agent system based on hybrid architecture ! -. <http://www.agent-town.com/dash/>.

[47] 日科技連官能検査委員会. 官能検査ハンドブック. 株式会社 日科技連出版社, 1973.  
ISBN 4-8171-9002-7.

# 発表論文

## 学術論文

- (1) Takayuki Kuroda, Takuo Suganuma, Norio Shiratori, “An Effective QoS Control Scheme for 3D Virtual Environments Based on User’s Perception,” IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E91-D, No.6, pp.1604-1612, JUNE, 2008.
- (2) 黒田貴之, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “QuViE/P : 3次元仮想空間における利用者の知覚に基づく新しいQoS制御方式の提案と応用,” 情報科学技術レターズ, Vol.5, pp.385-388, 2006.
- (3) 酒徳哲, 黒田貴之, 北形元, 木下哲男, 白鳥則郎, “分散部分空間結合に基づく開放型アプリケーション連携法,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J92-B, No.4, Apr. 2009. (印刷中)

## 国際会議

- (4) Takayuki Kuroda, Takuo Suganuma, Norio Shiratori, “QuViE/P : An Effective QoS Control Scheme for 3-D Virtual Environments Based on User’s Perception,” Proc. of 21st International Conference on Advanced Networking and Applications (AINA’07), pp.297-304, 2007.(NEC C&C 財団 2007年度C & C 若手優秀論文賞)
- (5) Takayuki Kuroda, Akira Sakatoku, Gen Kitagata, Debasish Chakraborty, Norio Shiratori, “Flexible Open 3D Digital Space Combination Scheme for Symbiotic Collaborative

Works,” Proc. of 7th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI 2008), pp.310-316, Aug. 2008.

- (6) Takayuki Kuroda, Akira Sakatoku, Gen Kitagata, Debasish Chakraborty, Norio Shiratori, “Open 3D Shared Space Construction Scheme for Symbiotic Collaborative Works,” Proc. of 10th International Workshop on Multimedia Network Systems and Applications (MNSA-2008), pp.78-83, June. 2008.
- (7) Takayuki Kuroda, Takuo Suganuma, Norio Shiratori, “A Dynamic QoS Control Scheme for 3-D Virtual Space Based on User’s Perception,” Proc. of The Joint international Conference of The 4th International Symposium on System Construction of Global-Network-Oriented Information Electronics and student-organizing international mini-conference on information electronics system (IGNOIE-COE06 & SOIM-COE06), pp.366-367, Jan. 2007.
- (8) Takayuki Kuroda, Akira Sakatoku, Gen Kitagata, Norio Shiratori, “Open 3D Shared Space Combination Scheme for Symbiotic Collaborative Works,” Proc. of The 1st Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems (SOIM-GCOE08), pp.163-164, Oct. 2008.

## 国内ワークショップ・研究会

- 黒田貴之, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “3次元仮想空間における利用者の知覚を考慮した動的 QoS 制御方式の実装と評価,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム論文集, IPSJ Symposium Series Vol.2006, No.6, pp.605-608, 2006. (DICOMO2006 プレゼンテーション賞)

- 北形元, 酒徳哲, 黒田貴之, 木下哲男, 白鳥則郎, “共生型協働作業支援のための開放型三次元デジタル空間構成法,” 電子情報通信学会技術研究報告, 人工知能と知識処理研究会, Vol.107, No.353, AI2007-18, pp.41-46, 2007.
- 酒徳哲, 黒田貴之, 北形元, 白鳥則郎, “オブジェクトのインタラクションに基づく3次元仮想協調作業環境のためのアプリケーション間連携方式の提案”, 電子情報通信学会 IN 研究会, Vol.107, No.222, IN2007-76, pp.191-195, 2007.
- 酒徳哲, 黒田貴之, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “分散型部分空間の結合による共有仮想空間の構成法,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム論文集, IPSJ Symposium Series Vol.2007, No.1, pp.1682-1689, 2007.
- Akira Sakatoku, Takayuki Kuroda, Gen Kitagata, Takuo Suganuma, Norio Shiratori, “A Construction Scheme for Shared Virtual Space based on Distributed Partial Spaces,” 平成 18 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.6, 2006.
- 黒田貴之, 今井信太郎, 武田敦志, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “3次元共有空間における利用者の知覚を考慮したエージェント型 QoS 制御方式,” Jaws2005 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2005 講演論文集, pp.535-542, 2005.
- 黒田貴之, 今井信太郎, 武田敦志, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “利用者の知覚に基づく3次元共有空間の動的 QoS 制御方式,” 信学技報, IN2005-85, pp.143-148, 2005.
- Takayuki Kuroda, Takuo Suganuma, Norio Shiratori, “An Evaluation Scheme for Flexible System and Its Application,” 平成 17 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.5, 2005.
- 黒田貴之, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “やわらかいシステムにおけるやわらかさの評価法とその応用,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2005) シンポジウム論文

集, IPSJ Symposium Series Vol.2005, No.6, pp.809-812, 2005.

- 黒田貴之, 北形元, 菅沼拓夫, 白鳥則郎, “やわらかいシステムのモデルとネットワークシステムへの応用,” 平成 16 年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p.200, 2004.