

博士論文

地理情報システムのための地図描画高速化と
地図検索に関する研究

(Research on Fast-Map-Rendering and Map
Retrieval for Geographic Information Systems)

2016 年 9 月

立命館大学大学院情報理工学研究科
情報理工学専攻博士課程後期課程

坂入 威郎

立命館大学審査博士論文

地理情報システムのための地図描画高速化と
地図検索に関する研究

(Research on Fast-Map-Rendering and Map
Retrieval for Geographic Information Systems)

2016 年 9 月
September 2016

立命館大学大学院情報理工学研究科
情報理工学専攻博士課程後期課程
Doctoral Program in Advanced Information
Science and Engineering Graduate School of
Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

坂入 威郎
SAKAIRI Takeo

研究指導教員：仲谷 善雄 教授
Supervisor: Professor NAKATANI Yoshio

内容梗概

電子データとして管理される膨大な地図データを処理するシステムとして、地理情報システム（GIS: Geographic Information Systems）がある。現在は、Web ページ内の特定要素だけを描画更新する Ajax（「Asynchronous JavaScript And XML」の略）技術を適用した地図サービス（Ajax-GIS）が広く利用されている。本研究では、GIS の（１）システム面の課題、（２）利用面の課題の２つについて述べ、それぞれの解決手法について示す。

（１）システム面の課題については、GIS の主要機能であるが Ajax-GIS では実現が困難なレイヤ制御と図形編集に着目した。Ajax-GIS は、タイル状に分割された軽量のラスタ形式の地図画像（タイル画像）を組み合わせて地図を構成することで高い操作性を実現している。一方でタイル画像を用いることで、GIS の特徴的機能である地図データを種別毎に区分した階層（以下、「レイヤ」）の表示切り替え（制御）、図形の移動変形（編集）といった地図操作に制約が生じる。この課題を解決するために本研究では、サーバ側で描画処理を実行するサーバサイドレンダリングを用いた手法を提案した。レイヤ制御は、クライアントから送信される表示レイヤ情報に従い、サーバで表示レイヤの透過型タイル画像をリアルタイムに重ね合わせることで実現した。図形編集は、処理イベントの通信プロトコルを定義し、サーバで頂点移動や色変更などのイベントに応じた図形を描画し、クライアントに返信することで実現した。実地図データを用いた評価実験では、レイヤ制御に関しては従来法に比べて約 1.5 倍高速化し、図形編集に関してはクライアントで実施した座標移動、描画変更などの図形編集がサーバでリアルタイムに画像化され、クライアントに送信されることを確認した。一方、サーバサイドレンダリングは、クライアント単位で高負荷な描画処理を行うため、クライアントからのリクエストがサーバに集中した場合、サーバ側の処理負荷が高まる。その負荷対策については、各サーバの処理負荷を監視し、特定のサーバに負荷が集中しないように動的に処理を分散させることで解決した。本手法に対しても実地図データを用いて評価実験したところ、ラウンドロビン方式など従来法に比べて最大 20% 処理時間が短縮されることを確認した。

（２）利用面の課題については、利用頻度の高い地図検索に着目した。地名などのキーワードを検索キーとした既存の地図検索では、検索したい場所に対する記憶が曖昧であった場合は、検索のためのキーワードが想起できないためうまく検索できない。本研究では、空間認知の特性を考慮した認知負荷の小さい地図検索方式を 2 つ提案した。一つは、空間イメージ内にある点で表された複数のランドマークをそれらの相対的位置に基づいて平面上に配置することで、それらの属性と相対的位置関係を検索条件とする地図検索（ILS）である。検索キーとして用いるランドマークは、自位置と地図上の位置とを関連付けるために用いられ、移動や空間の記憶にとって重要な要素である。ILS は、ランドマークの種別に対応するアイコンを、相対的な位置関係を保ちつつ、相対的な距離に対応させて相互に離

して平面上に配置する．配置されたランドマークおよびランドマーク間の相対的な位置関係を検索の入力とし，それと実際の地図とを照合して類似している場所を出力する．地図データを用いた評価実験では，約 5 個のランドマークを配置することにより，ユーザの空間イメージに対応する場所を検索できることを確認した．もう一つは，さらに認知負荷を軽減するため，実際の風景中にあるランドマークを見たままに入力する地図検索（LSAS）を提案した．LSAS は，ランドマーク同士の位置関係や，種類，看板に示された文字列などの視覚的な特徴を検索条件とし，地図データからそれに適合する場所を検索する．評価実験では，Google ストリートビューを用いて市販地図にランドマーク情報を付加した地図データベースを用いた．実験の結果，70%の被験者が LSAS で入力したランドマークから当該場所を検索できることを確認した．今後は，ILS, LSAS の実システムへの適用を検討する．

Abstract

GIS is a computer system using digital map and has characteristics of free and smooth map operation differently from paper map. A technology that is called Ajax (Asynchronous JavaScript and XML) is applied to GIS (Ajax-GIS). This research presents two GIS issues that are (1) map rendering and (2) map retrieval, and moreover, addresses effective solution methods in order to solve these issues.

(1) Ajax-GIS uses divided raster image file called “tile image” in order to keep light handling. There are issues that multi-layer control and graphical feature editing are difficult for Ajax-GIS because of using raster image. To solve these issues, this research proposes to apply server side rendering to Ajax-GIS. The multi-layer control is realized by means of merging tile images in the server application as the requests from the client application. On the other hand, the graphical feature editing is realized by specifically defined protocol to edit a specific feature such as moving vertices and changing color. In an evaluation experiment for multi-layer control with an actual map data, average proceeding time that is proposal method is 1.5 times faster than previous method. Furthermore, when a client operates the feature editing such as moving coordinates or changing color, the server creates its image and transfers it to the client within a few hundred milliseconds at the latest. However when many clients request the Ajax-GIS server to render tile images, the server load will increase. As a result, the performance of displaying some tile images may get worse. In order to solve this problem, this research proposes the dynamic load-balancing and control by means of estimating server-side rendering request and monitoring server load. In an evaluation experiment of an actual map data, the proposal method has improved 20% shorter average processing time than static load round robin.

(2) When a user wants to retrieve a location map using GIS, he usually inputs keywords set relevant to the location, such as a name of places. However, a user sometimes cannot find appropriate keywords because of vague memory related to the place. To solve this issue, this research proposes two location search methods that are easy to use for all users by an intuitive operation based on the knowledge of spatial cognition. One proposal method (ILS) is the location search by the use of relative position of landmarks from user’s spatial image. The landmark is the most important element for identifying the present position in a map. In addition to that, the landmark is important as a clue when we memorize a movement course in a city. A user plots icons related to landmarks in consideration of relative positions of landmarks. The search

logic of ILS evaluates the similarity of the shapes from the relative positions of plotted landmarks and real map data. In experiments to evaluate ILS using commercially map data, this method was able to search an expected location by plotting an average of five landmarks. The other way of the location search method (LSAS) is by the use of attentional landmarks in actual scenery with visual elements. The search logic of LSAS evaluates the relative landmarks position and the visual elements. The visual elements such as color and signboard words are not included in a general map data. Therefore visual elements have registered into the spatial database by hand using the service of Google street view. In experiments to evaluate LSAS using this database, 70% of users were able to search an expected location by using attentional landmarks in the actual scenery. Although expected results were obtained in experiments, it is a future issue to apply ILS and LSAS to a GIS.

目次

1. はじめに	1
1.1. 背景	1
1.2. 研究の目的と特徴	3
1.3. 論文の構成	5
2. 地理情報システム GIS の動向	6
2.1. GIS の概要	6
2.2. GIS の活用事例と研究動向	10
2.2.1. 防災分野	10
2.2.2. 観光分野	12
2.3. Ajax-GIS の概要	14
2.4. 空間データベースの概要	17
2.5. まとめ	19
3. サーバサイドレンダリングを適用した Ajax-GIS	20
3.1. Ajax-GIS における課題	20
3.1.1. クライアントにおけるレイヤ制御	20
3.1.2. クライアントにおける図形編集	22
3.1.3. サーバにおける処理負荷の増大	22
3.2. サーバサイドレンダリングの適用	23
3.2.1. タイル画像合成によるレイヤ制御	23
3.2.2. 図形編集処理イベント通信による図形編集	25
3.2.3. サーバの動的負荷分散と制御	28
3.3. レイヤ制御および図形編集の評価	34
3.4. サーバにおける負荷分散の評価	39
3.5. まとめ	45
4. 空間認知と地図検索	46
4.1. 地図の読解	46
4.2. 認知地図の概要	49
4.2.1. 認知地図の歪み	49
4.2.2. 認知地図を構成する認知要素	50
4.2.3. 都市空間における注視対象	51
4.3. 地図検索	53
4.3.1. 地図検索の種類	53

4.3.2.	地図検索の課題	55
4.4.	まとめ	60
5.	ランドマークの相対的位置関係に基づいた地図検索.....	61
5.1.	ILS の基本概念.....	61
5.1.1.	ILS 概要.....	61
5.1.2.	ILS のシステム構成	63
5.1.3.	地図検索アルゴリズム	64
5.2.	ILS のアプリケーション開発.....	67
5.3.	実データを用いた ILS の評価実験.....	69
5.4.	まとめ	79
6.	風景内で注視されたランドマークを検索キーとする地図検索	80
6.1.	LSAS の基本概念	80
6.1.1.	LSAS 概要	80
6.1.2.	LSAS のシステム構成.....	83
6.1.3.	地図検索アルゴリズム	85
6.2.	LSAS のアプリケーション開発.....	87
6.3.	実データを用いた LSAS の評価実験	90
6.4.	まとめ	95
7.	おわりに.....	96
	謝辞.....	98
	参考文献	99
	著者発表論文.....	106

図目次

図 2-1	GIS 画面例	8
図 2-2	通行実績マップ	11
図 2-3	鯖江市が公開する「みんなのマップ」	13
図 2-4	従来の Web-GIS と Ajax-GIS の処理の違い	15
図 2-5	Ajax-GIS のシステムイメージ	16
図 3-1	クライアントでのレイヤ制御イメージ	21
図 3-2	サーバでタイル画像を生成するレイヤ制御イメージ	21
図 3-3	サーバサイドレンダリングのアーキテクチャ	23
図 3-4	サーバサイドレンダリングを用いたレイヤ制御	24
図 3-5	レイヤ制御処理フロー	24
図 3-6	図形編集処理フロー	26
図 3-7	図形編集画面例	26
図 3-8	図形編集プロトコル例	27
図 3-9	図形編集アーキテクチャ	28
図 3-10	システムアーキテクチャ	30
図 3-11	レイヤ制御処理時間の計測範囲	34
図 3-12	評価実験で使用するクライアントシステム画面	35
図 3-13	レイヤ数と処理時間合計値の関係	36
図 3-14	地図スクロール操作に伴う処理時間の変化	37
図 3-15	サーバにおけるタイル画像生成処理時間の計測範囲	39
図 3-16	処理サーバ数と処理時間の関係	41
図 3-17	従来法と提案法との処理時間の比較	42
図 3-18	処理サーバにおける図形数と地図画像生成時間の関係	43
図 3-19	提案法におけるレイヤ処理のリクエスト数と処理時間の関係	44
図 4-1	認知要素のイメージ	50
図 4-2	Spatial Query by Sketch による手描き地図例	55
図 4-3	日常的移動経験に対する地図表現の分類	58
図 5-1	ランドマーク配置と実地図との対応	62
図 5-2	ILS システム構成	64
図 5-3	ILS アプリケーション画面	67
図 5-4	ILS アプリケーション処理フロー	68
図 5-5	地図検索の流れ	68
図 5-6	ILS 実験評価シート	73

図 5-7	ILS 実験結果.....	74
図 5-8	ランドマークの配置と検索結果の変化.....	75
図 5-9	配置されたランドマーク数と SDQ-S 得点の関係.....	76
図 5-10	検索結果と実地図における方向関係の違い	77
図 5-11	距離感を意識させるための画面例	79
図 6-1	視覚イメージによるルートマップ型地図検索のイメージ	82
図 6-2	LSAS システム構成	85
図 6-2	LSAS システム構成	85
図 6-3	道路中心線に対する検索範囲の幅.....	87
図 6-4	LSAS アプリケーション画面.....	88
図 6-5	LSAS による検索結果表示例.....	89
図 6-6	評価実験で対象とした 3 道路.....	90
図 6-7	LSAS で検索に失敗した場所.....	91
図 6-8	烏丸通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較	92
図 6-9	四条通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較	93
図 6-10	河原町通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較.....	94

表目次

表 2-1	GIS の主な機能.....	7
表 2-2	GIS の特徴と課題	9
表 2-3	空間 DB の特徴.....	17
表 2-4	空間 DB の主な機能.....	18
表 3-1	図形編集プロトコル.....	27
表 3-2	評価実験に用いるハードウェアスペック	35
表 3-3	表示レイヤ数に応じた処理時間の変化.....	36
表 3-4	従来法と提案法による処理時間の比較.....	37
表 3-5	動的負荷分散の評価に用いたハードウェア環境.....	40
表 3-6	処理サーバ毎の重み付き係数.....	41
表 4-1	空間イメージの認知要素	50
表 4-2	ランドマークの関心要素	52
表 4-3	ランドマークが都市空間内で目立つ要因.....	52
表 4-4	既存の地図検索手法一覧	55
表 4-5	認知地図と地図学的地図の比較.....	57
表 5-1	ILS と関連研究の比較	63
表 5-2	幾何テーブル(feature_table).....	69
表 5-3	第一近接地物管理テーブル(neighbor_feature_table)	69
表 5-4	レイヤテーブル(layer_table).....	69
表 5-5	各レイヤに対する地物数と優先度.....	71
表 5-6	ILS 実験条件.....	72
表 5-7	SDQ-S の質問リスト	78
表 6-1	ILS と LSAS の比較	83
表 6-2	検索に用いるランドマークの着目点	84
表 6-3	烏丸通におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較	92
表 6-4	四条通におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較	93
表 6-5	河原町におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較	94

1. はじめに

1.1. 背景

地図は、地球上に存在する自然物や人工物の位置関係を、緯度経度などの数値や記号、文字などで表現したものであり、「現実世界の現象の抽象概念」である地物を基本単位として構成されている[1]。別の言い方をすれば、地図とは実空間上に存在する複数種類の地物の集合を一定の縮尺で平面上に表現したものである。地図を見ることによって、各地物の位置や大きさ、形、分布状況、名称などを把握することができ、その場所の様子を想像することができる。地図の種類には、日常目にする機会の多い地名などが併記された一般図や戸別名が付記された住宅地図がある。また、地表付近の地質構造を示した地質図[2]、土地利用の現況を示した土地利用分類図[3]など特定業務に特化した専門的な地図もある。このような地図は、実空間上の情報を特定の用途や目的、および地図の縮尺に応じて編集、加工することで、見やすいように工夫されている。

日進月歩で進展する情報処理技術に伴い、地図を取り巻く状況も大きく変化している。地図データの管理形態は、従来の紙媒体から大容量のデータを管理できる電子媒体へ変化したことにより、地図活用が多様化している。また、高精度測位技術の発達[4]、インターネット網の整備、スマートフォンなどのモバイル端末の普及、地理空間情報の利用に関する法整備[5]などの外的要因も地図利用状況の変化に大きな影響を与えている。

電子データとして管理される膨大な地図データを処理するシステムとして、地理情報システム（GIS: Geographic Information Systems）[6]がある。GISは紙地図とは異なり、地図のシームレスな拡大・縮小、スクロールなどの操作ができるのに加え、空間的特性を分析するための高度な機能も備わっている。従来 GIS を利用するためには、高度な専門知識が必要であったため、行政関係者や専門家など一部のみに GIS 利用は限定されていた。しかし近年 GIS は、システムの高度化や利用環境が整備されたことによって、インターネットによる地図サービスやカーナビゲーションなど日常生活の中で一般的に利用される身近な存在となった[7]。

さらに 2005 年には、Web ページ内の特定要素だけを非同期に描画更新する Ajax（「Asynchronous JavaScript And XML」の略）技術[8][9]が出現した。これにより、GIS の利用環境は激変した。Ajax は、Web ブラウザのみで別途プラグインが不要であり、非同期通信による Web ページの部分更新が可能なことから、今では様々な Web アプリケーションに組み込まれている[10]。GIS では、同じく 2005 年に GoogleMaps が Ajax を適用した高インタラクティブな地図サービス（Ajax-GIS）を無償公開したことに端を発し、GIS 利用が一般社会に広まった。現在ではスマートフォンを始め様々な情報機器で Ajax-GIS が一般的に利用されている。

このような GIS にはさまざまな課題がある。以下では、本研究で取り上げる GIS の課題について示す。Ajax-GIS が一般化する前のレガシーな GIS は、数値（ベクトル形式）で表

現される大容量の地図データ（点，線，面の地物の集合）をクライアント端末で管理し，高度な描画処理エンジンを用いて処理されるため，様々な地図表現や空間解析など高度な地図機能が利用可能である．そのため，様々な業務システムで利用されている．一方 Ajax-GIS は，プラグイン不要で Web ブラウザのみで動作する軽量の Web-GIS である．Ajax-GIS は，Web ブラウザがページ内の論理的構造を示す HTML を解釈して画面をレンダリングする特徴を活かし，タイル状に分割された軽量のラスタ形式の地図画像（タイル画像）を組み合わせることで高い操作性を実現している．しかしタイル画像を用いることで，GIS の特徴的機能である地図データを種別毎に区分した階層（以下，「レイヤ」）の表示切り替え（制御），図形の移動変形（編集）といった地図操作に制約が生じる．このように Ajax-GIS には，高い操作性を有している反面，上述したようなシステム面からみた課題がある．

また，Ajax-GIS を含め一般的な地図は，実空間上にある地物を図形や記号などを用いて，二次元平面上に抽象的に表現されている．地図は上空からの視点で広域を俯瞰することができるため，実空間構造を理解する上では有用である．しかし多くの人にとっては，日常的に目にする現実的な光景は，地上から見たものである．そのため，現実空間を二次元平面上に抽象的に表現した地図を理解するためには，実際の風景や地形を上空からの視点に変換し，さらに地図と照合する空間認知の能力を必要とする．この変換作業が苦手なために，地図を理解することが困難な人は少なからず存在している．Google が提供する地上目線の画像サービスであるストリートビューが広く利用されているのは，地図を利用する上での視点の変換や空間認知能力が考えられている以上に困難を伴うことを意味していると思われる．普段何気なく利用している地図だが，地図を理解するためにはこのような空間認知に関する能力が必要であり，ユーザの地図利用の側面からも課題はある．

1.2. 研究の目的と特徴

本研究では、1.1 で示したように、GIS を構成するシステム側、および GIS を利用するユーザ側の 2 つの側面に対する課題を解決し、GIS の高度化を図ることを目的とする。

前者の課題である GIS のシステム面に対しては、サーバサイドレンダリング技術を用いることで、Ajax-GIS においてもレガシーな GIS と同等の機能実現と性能確保を目指す。主要機能であるレイヤ制御と図形編集を対象に、従来クライアントのリソースを活用して実行していたこれら機能をサーバサイドで実行する。レイヤ制御は、サーバで表示領域に該当する透過型のタイル画像をレイヤ毎に作成し管理することで、クライアントからのレイヤ表示リクエストに応じてリアルタイムに重ね合わせる画像合成処理を行う。こうして複数レイヤが合成されたタイル画像が、クライアントに送られ表示される。この方式では、クライアントでの操作性を損なわずレイヤ制御が実現でき、またレイヤ毎のタイル画像を再利用することで画像合成処理を効率化している。一方、図形編集は、頂点移動や色変更などの図形編集処理イベントをサーバに送信し、それを元に対象図形をサーバで画像化する。この図形画像をクライアントに返信し、表示することで、ユーザはあたかもクライアントで図形を編集しているように違和感なく編集処理を行える。本論文では、図形編集処理イベントの通信プロトコルを定義し、これに基づきサーバサイドレンダリングを用いて図形編集を実現した。このイベント通信は図形編集確定まで行われ、確定後はサーバ内の対象地図データを更新する。このように Ajax-GIS を高度化するサーバサイドレンダリングは、クライアント単位で高負荷な描画処理をサーバで行うため、クライアントからのリクエストがサーバに集中した場合、処理負荷が高まることになる。そこで本論文では、サーバサイドレンダリングを実行する複数のサーバ負荷状態を監視し、特定のサーバに負荷が集中しないように処理を分散する。また、処理にかかる時間（処理負荷）を見積もり、クライアントへの応答時間が最短となるよう、当該処理を実行するサーバを決定し、処理を分散させる。

後者の課題である地図利用に対しては、GIS の中でも使用頻度が高く重要な機能である地図検索に焦点を当て、人間の空間認知の特性を考慮した認知負荷の小さい地図検索の実現を目指す。本論文では、人が頭の中で描いた情景（空間イメージ）をそのまま検索条件とした地図検索方式を提案する。検索の手掛かりとして、周囲のものの中でひととき目立ち、覚えられやすい特徴をもったランドマークに着目する。本論文では、空間イメージ中にあるランドマーク間の相対的位置関係を用いた地図検索と、実空間内（実際の風景中）で注視したランドマークからその場所を検索する 2 つ地図検索方式について提案する。前者を ILS (Incremental Location Search) と呼ぶ。空間イメージ内にある点で表された複数のランドマークをそれらの相対的位置に基づいて平面上に配置することで、ランドマークの属性と相対的位置関係を手掛かりにして目的地の地図を検索する。この提案方式では、ユーザの曖昧な空間イメージを曖昧なままに検索条件として入力でき、配置されたランドマークの相対的位置関係が多少異なる場合であったとしても、東西南北の方向がわからな

くても、場所の候補地を検索することが可能である。一方後者を LSAS (Location Search by Actual Scenery)と呼ぶ。 ILS が、空間イメージ中にあるランドマークを上空からの視点に置き換えて平面上に配置するのに対し、LSAS は実際の風景中にあるランドマークを見たままに入力し、ランドマーク同士の位置関係や、種類、看板に示された文字列などの視覚的な特徴を手掛かりに当該場所を検索することが可能である。これにより、ILS よりもさらに空間認知の負荷が小さく、より直感的な地図検索を目指す。

1.3. 論文の構成

本論文では、GIS の高度化として、現在幅広く利用されている Ajax-GIS の技術的課題に着目し、システムとしての高機能化を図るための研究を前半（2 章，3 章）で論じる．後半（4 章，5 章，6 章）では、GIS で利用頻度の高い地図検索機能に着目し、空間認知の知見に基づいたユーザフレンドリーな GIS の実現について論じる．以下、本論文の流れについて示す．

2 章では、GIS の概要や活用事例について述べる．次に現在広く利用されている地図サービスのベースとなっている Ajax-GIS について技術的背景や課題を示す．また、現在の地図アプリケーションを構築する上で必要不可欠となっている空間データベースについて概説する．

3 章では、GIS の主要機能であるが Ajax-GIS では実現困難なレイヤ制御と図形編集における技術的課題について示し、サーバサイドレンダリングを用いた提案手法について述べる．またこの提案手法を用いた場合に想定されるサーバの処理負荷が増大する課題については、処理負荷を見積もり適切なサーバに処理を分散させる動的負荷分散技術を用いた解決手法についても示す．これらについては、実際の地図データを用いた評価を行い、有効性について考察する．

4 章では、GIS を取り巻く環境や機能が向上しても、それを利用するユーザがうまく地図を使いこなせないケースが散見されるという課題に着目し、人の空間認知の観点から、地図の読解や空間イメージの特性などについて、関連研究をもとに概観する．さらに GIS の中でも使用頻度の高い地図検索に焦点を当て、既存の手法についても概説する．

5 章では、空間認知の知見に基づき、ユーザの空間イメージにあるランドマークを検索条件として地図検索する方式（ILS）を提案する．ILS は、空間認知において重要な要素であるランドマークに着目し、ユーザが 2 次元平面上に配置するランドマークの相対的な位置関係を検索の入力として、それと実際の地図とを照合することで、類似している場所を候補地として提示する．また実地図データを用いた評価実験についても示す．

6 章では、ILS よりさらに空間認知の負荷が小さな地図検索を実現するため、実空間内（風景内）で人が注視したランドマークを検索の手掛かりとし、ランドマーク同士の視野内での位置関係や、ランドマークの種類、看板に示された文字列などの視覚的な特徴を検索条件として地図検索する方法（LSAS）を提案する．LSAS においても、実地図データを用いた評価実験について示し、本手法の有効性について評価する．

最後に 7 章では、本論文のまとめを示し、今後の研究課題について述べる．

2. 地理情報システム GIS の動向

GIS は様々な場面で利用される非常に身近なシステムである。例えば、観光地を訪れた際、スマートフォンなどのモバイル端末を使って地図上から目的の場所を検索することはよくある。また車を運転する際、目的地へ向かうためにカーナビゲーションシステムを使って経路案内する。このように、GIS は我々の生活に密接に関わっており、必要不可欠なシステムとなっているが、ここに至るまでには様々な関連技術が開発されてきている。本章では、まず GIS の概要や活用事例について述べ、それらの実現に関連する技術を概観する。次に現在広く利用されている地図サービスのベースとなっている Ajax-GIS について、技術的背景を整理した上で、本研究との関係で課題を整理する。最後に地図アプリケーションを構築する上で欠かせない空間データベースについて概説する。

2.1. GIS の概要

本節ではまず GIS の歴史について概観する。GIS は、1960 年代に北米を中心に利用が開始された[11]。カナダでは、1962 年に森林資源管理や農村管理に GIS が利用された。また米国では 1967 年に GIS で使用するための 1/10,000 の地形図データが整備され、国勢調査、資源、土地管理などに活用された[12]。日本では、国土庁が 1974 年に国土数値情報の整備を開始し、1981 年にゼンリンが地図の電子化に着手した。GIS は業務用途に限られており高価であったことに加え、専門知識を必要とすることから、長い間普及して来なかった。しかし 1995 年の阪神大震災時に、情報収集状況の把握、被災状況の変化の把握、対応状況（対応済か未対応か）の把握などに活用され、再注目された[13]。その後、政府は 1995 年に「GIS 関係省庁連絡会議」を設置して、GIS の整備とその相互利用の推進を開始し、国土空間データ基盤の整備・普及を推進した[14]。総務省は 1999 年から 2002 年にかけて、3 次元 GIS の研究開発を実施し、技術ガイドラインとデータガイドラインを策定した。政府はさらに 2002 年に、e-Japan 重点計画に対応して 4 ヶ年計画の GIS アクションプラン 2002-2005 をスタートさせ、2006 年までに GIS に関する社会基盤の整備と標準化、普及支援、GIS を利用した質の高い行政サービスの提供等の実現を目指した。

次に GIS の基本的な仕組みについて述べる。GIS は、地図情報、それに付随する様々な属性情報をコンピュータ上で表示、管理、分析するシステムである。GIS では、地図の構成要素である地物やそれに付随する属性情報などを、レイヤと呼ばれる概念で種別ごとに管理する。地物をレイヤ毎に管理することで、必要なレイヤのみを表示することが可能である。またシステム上で地図情報を更新し、最新情報を共有することができる。GIS で扱う地図データには、ベクタデータとラスタデータの 2 種類がある。ベクタデータは、位置を座標値 (X, Y) で表現したもので、大きく点、線、面に分類される。一方ラスタデータは、ピクセルの集合体である画像形式で地図を表現したものである。これらは、電子媒体で管理され、用途に応じて使い分けられている。表 2-1 に GIS の主な機能を示す。GIS は紙地

図と異なり、様々な情報処理の仕組みを利用することができる。中でもよく利用される機能は、表示、編集、検索の 3 機能である。GIS を都市計画などの行政業務に利用する場合は、関連する統計情報の解析結果を地図上に表現する主題図や空間的特性を分析する高度な機能が利用される。こうした機能を備えた GIS の画面例を図 2-1 に示す[15]。多くの GIS は、一般的に画面左側にレイヤ切替などの地図操作などを行うユーザインタフェース (UI) が配置され、その隣には地図を表示するメイン画面で構成される。また用途に応じて、必要な機能がアドオンされ、ボタン類などの UI を通じて実行される。

表 2-1 GIS の主な機能

分類	機能	概要
表示	拡大・縮小	地図表示の縮尺を変更する。
	スクロール	マウス等を使い表示範囲を変更する。
	レイヤ制御	特定のレイヤの表示・非表示を切り替える。
編集	図形作成・編集	図形の作成や編集、削除などを行う。
検索	地図検索	住所や地名から該当する場所を検索する。
	属性検索	属性から該当する地物を検索する。
解析	主題図	地物が持つ属性情報を集計し、集計結果を地図上に表示する。 集計結果を階級に区分して色分け表示するコロプレス図などがある。
	空間分析	地物の形状や分布などから空間の特徴を分析する。 犯罪発生箇所などの点分布を密度図に変換するカーネル密度推定などがある。
	ネットワーク解析	地物の位相情報をもとにから最短経路探索などを行う。

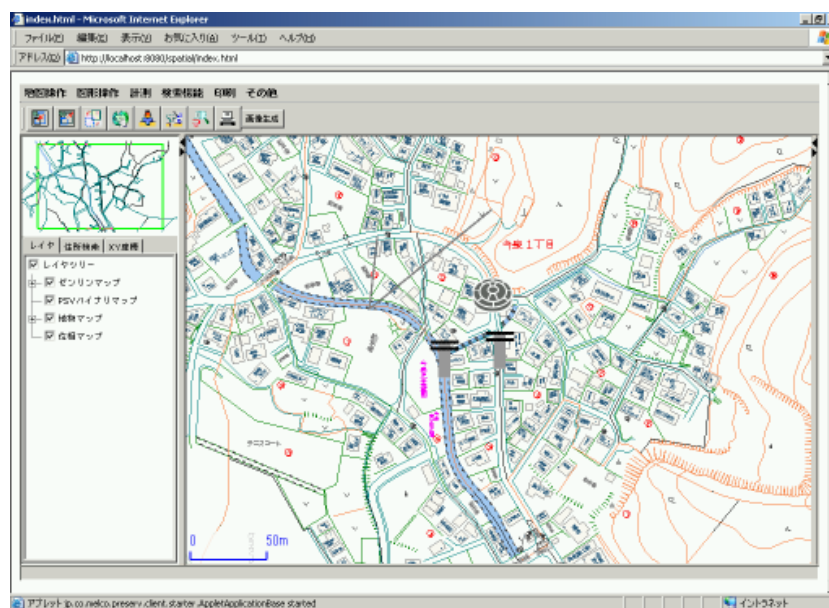


図 2-1 GIS 画面例（三菱電機社製「PreSerV」より）

表 2-2 は GIS の特徴と課題について示す。GIS では GPS (Global Positioning System) と連携することにより、現在位置や目的地の位置を地図上で確認することができる。また道路や路線などネットワーク網の接続関係を示すトポロジー情報を用いることにより、目的地までの最適ルートや移動時間見積もりなどのナビゲーション機能を実現することができる。また地図表示においては、3次元地図データ（緯度、経度、高度）を活用することでビルや地下街などの立体構造を3次元表示することなどができる。また、位置情報の他に地物に関連する属性情報（住所、店舗名など）を用いることで、多様な情報検索が可能である。さら位置情報を有する様々なマルチメディア機器やセンサー機器などと連携することで、当該機器に関するリアルタイム情報を地図上に重畳表示することも可能である。

一方 GIS の課題としては、地図を理解するという根本的な課題の他に、上述した様々な情報機器から発信されるビッグデータの効率的な処理や効果的な表示方法などが挙げられる。その他、地図の視認性といった情報端末特有の課題や、地図に関連する個人情報の取り扱いなども課題として挙げられる。

表 2-2 GIS の特徴と課題

特徴	課題
<p>ナビ: 目的地までの最適ルートを, 途中の立ち寄り場所も考慮して, 動的に検討できる. 移動時間も算出できる.</p> <p>位置情報: GPS との連携により, 現在位置や目的地の位置を地図上で確認し, それらを中心とする地図表示が可能.</p> <p>3次元表示: ビル, 地下街を始めとする立体構造を3次元的に表現できる.</p> <p>マルチ表示: 地域全体と特定場所を複数の画面に表示でき, 全体と詳細を同時に参照できる.</p> <p>地図連携: 写真・航空写真・イラスト・2D/3D-CG との連携で, 効果的な表示が可能.</p> <p>多様な検索: 住所, 施設名, 地名, 郵便番号, 駅名・路線名などの, 多様なキーワードを用いた検索が可能.</p> <p>情報連携: 周辺店舗・観光情報, 広告, 噂や評判, 交通状況, リアルタイム映像などを扱うアプリとの連携が可能.</p> <p>シミュレーション: 気象や災害, 交通流など様々なシミュレーションとの連携可能.</p> <p>地図の埋め込み: ユーザのホームページなどに電子地図の特定エリアを埋め込める.</p> <p>デバイス連携: PC, モバイルなど様々な情報機器で利用できる.</p>	<p>地図の読解: 方向音痴の人は地図と現場風景とのマッチングができない. また地図を読みなれていない人が地図から必要な情報を得る(理解する)ことは容易ではない. 地図の読解支援が必要となる.</p> <p>ビッグデータ処理: 位置情報と関連した統計情報や SNS などの個人が発信する情報, センサ情報, カメラ画像など, 高速なビッグデータ処理と効果的な表示方法が課題である.</p> <p>視認性: 屋外での利用の場合, スマフォや携帯, タブレット PC などで利用されるが, 画面サイズが制限されるため, 視認性が悪い. 拡大すると全体が見えなくなり, 縮小すると細部が見えにくい. 小さな画面ではマルチウィンドウを用いた支援も難しい.</p> <p>個人情報: 位置情報によって個人が特定される場合, 情報提供に制限をかける必要がある.</p> <p>ストリートビュー: 測定者が通れる道しか撮影されない(米国では, ほとんどの道は自動車で通れる. 路地は危険なので, 知らなくてよい). 日本や欧州では, 一般的に道は細く, 路地も多く, 米国流には限界がある.</p>

2.2. GIS の活用事例と研究動向

本節では、地図と関連の深い防災、観光の 2 分野を取り上げ、GIS の活用事例と研究動向について概観する。

2.2.1. 防災分野

防災分野では GIS を活用することにより、災害に対する事前予測シミュレーション、災害時における情報共有、被害状況把握、災害復興支援など防災に対する一体的な取組みが可能となる。IT (Information Technology) を活用した防災システムは、災害大国である日本の各自治体で積極的に構築されている。防災システムは、平常時と緊急時の連続性を確保し、緊急時においても普段から使い慣れているシステムとの差異をなくし、冷静に対処できることが重要である[16]。近年では、時間軸を考慮した時空間情報システムを防災分野に導入する動きが活発に見られる。研究の一例として、角本らの地理データベース構築方法[17]、多重仮説データ記述方式[18]、国際化を意識した多言語対応[19]、一般向け災害情報システムとしての時空間 Web-GIS 開発[20]及びその DB 構造[21]などがある。以下、災害が起こった時の被害を最小限に食い止めるための被害予測、災害が起こった時における被害の状況把握、被災後の復興の 3 段階に分けて、GIS の活用事例、研究動向について述べる。

被害予測

災害時のシミュレーションを行うことで、事前に災害に弱い箇所を突き止め、その防止策を講じることができる。

洪水被害に対する被害予測として洪水ハザードマップがある。ハザードマップとは、自然現象がもたらす災害の程度や危険度を予測し、地図上で表現したものである。火山、地震、洪水、津波などのハザードマップが主として作成されているが、近年では、犯罪の発生件数などを元に作成された犯罪マップも作られている。GIS を利用してハザードマップを作成し、それを Web で一般住民に公開している自治体は少なくない。山下らは、福岡市を事例に洪水ハザードマップの一般公表による住民意識の変化を調査し、ハザードマップが示す被害は住民によって捉え方に差があるため、その公表による防災意識の喚起にも個人差があることを課題に挙げている[22]。

地震被害においては、建物倒壊のシミュレーションシステムに関する研究があり、阪田らは、建物倒壊による道路閉塞の予測手法を示している[23]。また、東明らは、建物倒壊に加え延焼、避難シミュレーションのための倒壊予測モデル、延焼モデル、避難モデルを作成し、板橋区を例に構築したシステムの検証を行っている[24]。地震により鉄道等のインフラが破壊されることにより、都市部では帰宅困難者が多数発生すると思われる。それに関し、大佛らは、東京都市圏パーソントリップ調査のデータを用いて鉄道利用者の時空間分布推定モデルを構築し、帰宅困難者の時空間分布を検討している[25]。

このような被害予測に関する研究成果は、災害に対する計画支援の他、防災意識の高揚にもつながると思われる。

被災状況把握

Web-GIS を用いた防災システムは、実際に被災した場合において迅速な情報収集及びその把握が重要である。大震災後の建築物の被災状況を取得する方法について、初動期においてはリモートセンシングによる状況把握が具体的な復興計画には現地調査が重要である。また、ベースとなる地図に全国シームレスデータを利用した被災情報収集も有効な手段である[26]。

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震において、時空間情報システムを利用し、現地調査により得た被災状況の収集活動を通じて時々刻々と変化する被災現場の情報を時空間データベースで管理することにより、罹災証明書の発行や撤去家屋申請書の受付など復旧業務の支援が可能である[27]。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、被害状況把握に GIS が活用された。例えば図 2-2 に示すように、カーナビから送信される位置情報や速度情報などからなる走行データをもとに通行できる道路を把握し、通行実績マップとしてインターネット上に公開した[28]。これにより被災地に効率よく支援物資などを届けることができた。

このように被害状況を GIS で管理することにより、後の復興活動支援がスムーズに展開されることが様々な事例から実証されている。

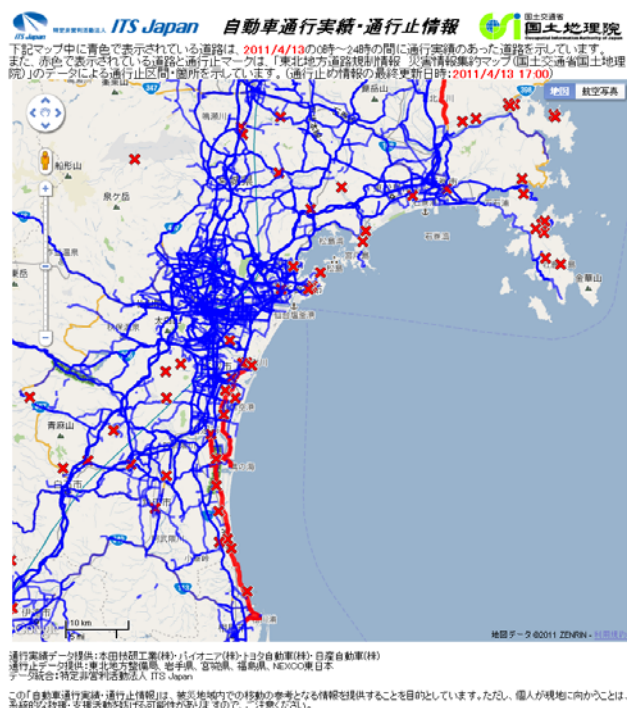


図 2-2 通行実績マップ

(出典：ITS Japan, <http://www.its-jp.org/saigai/>)

災害復興

新潟県中越地震の復興支援として、被災した家屋解体撤去業務を支援するための帳票データベースを構築し、GIS上で被災家屋の位置や撤去解体の進捗を管理することで、業務が効率化された。また農業被害情報の登録と復旧業務を地図上で一元的に履歴管理する業務にもGISが利用された[29]。

東日本大震災の復興支援においても被災行政業務の支援にGISが活用された。例えば罹災・被災者台帳管理システムとGISとを連携させ、地図上から被災場所を検索することができるため、窓口業務の省力化につながった。

このようにGISを用いることで、被災現場写真、被災建物情報等の各種情報を被災した場所と関連付けて管理することができるので、復興支援に資することができると思われる。

2.2.2. 観光分野

観光客が円滑に観光を行えるようにするためのツールの一つとしてGISが活用されている。現在では、モバイル端末の普及やインターネット環境が整備されたことから、各地の観光地では、様々な情報がインターネットを通じて発信されており、それが地図上にも重畳表示されている。またGPSと連動したナビゲーション機能を活用することで、自位置から観光地までの経路案内にも利用することもできる。以下、観光に関するGISの活用事例について示す。

観光に関する情報を発信するためのツールとしてGISを活用している事例は多数見られる。代表的な事例として福井県鯖江市が挙げられる。鯖江市は、市が持つ様々な情報を公開するオープンデータに日本で初めて取り組んだ。そのオープンデータを活用して、市内のトイレ位置や景勝地を地図上に配置するといった様々なアプリケーション(図2-3)も公開されている[30]。オープンデータには、市内の観光地の位置や説明、写真などの観光情報も含まれている。また地図情報に関しても、地図データのデファクトスタンダードであるShape形式で公開されているため、再利用性が高く加工がしやすい。

観光行動を促すためのGISの活用事例として、あえて詳細なルート情報を提供しないことで、観光地での偶然的な出会いや新たな発見を誘発・促進するという方法[31]がある。これは、「不便の中に益がある」という不便益[32]の考え方にもとづいている。この方法は散策観光時を主に想定しており、地図を現在地と目的地の位置関係を知るために用い、目的地の方向がわかればよいのであれば、直近のルートは目の前にある道から探せばよく、ナビは目的地の方向と、移動途中に見えるはずのランドマークだけを示せばよいというコンセプトにもとづいている。

観光地において災害が発生した時の非難誘導にGISを活用している事例も見られる[33]。例えば、京都市では、観光用WiFi網を用いて、災害時に観光客を避難先に誘導するシステムの構築を行っている。京都市の観光地は市の周辺部に散在している。一方、駅はJR、阪急、京阪などが市の中心部に集まっているため、災害時には市の周辺部から多数の観光

客が市の中心部に集まり混乱を招く危険がある．そこで WiFi 網を活用し，一時的な緊急避難場所として活用される観光地と駅との間，あるいは観光地そのものへ誘導する避難誘導方法が検討されている．



図 2-3 鯖江市が公開する「みんなのマップ」

(出典：鯖江市, http://neogis.net/sabae/index_opl_spot.html)

2.3. Ajax-GIS の概要

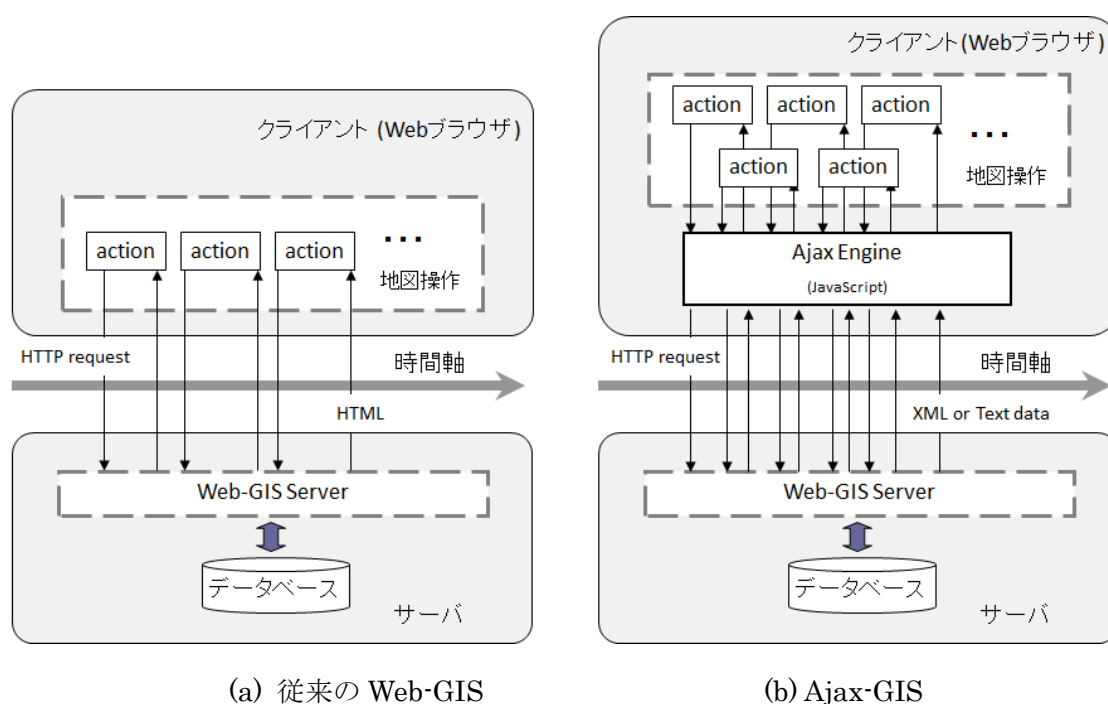
前節で述べた様々なサービスの使い勝手を飛躍的に向上させた技術として Ajax が挙げられる。Ajax は「Asynchronous JavaScript And XML」の略であり、インタラクティブな Web アプリケーションを開発するための技術である。Ajax という言葉は、Jesse James Garrett 氏が 2005 年 2 月に発表した「A New Approach to Web Applications」[34]という論文の中で命名した。以下に Ajax の技術条件を示す。

- ・ XHTML と CSS を用いた標準的なプレゼンテーション
- ・ DOM を用いた動的な表示・インタラクション
- ・ XML, XSLT, (テキスト) を用いたデータの交換・操作
- ・ XMLHttpRequest を使った非同期データ取得
- ・ 上記を JavaScript により結合

従来の Web アプリケーションでは、クライアントからの HTTP リクエストを受信したサーバ側は、HTML データそのものをクライアントに返却するため、ページ遷移が発生する。一方 Ajax を用いた Web アプリケーションでは、最初の HTTP リクエストをサーバ側に送信した後は、ユーザのアクションに応じて Ajax エンジンが XMLHttpRequest オブジェクトを利用して非同期にサーバからデータを取得し、HTML の該当部分のみを動的に変更させている。これにより、ページ遷移を伴わない動きが可能となっている。

2005 年 2 月、Web ページ内の特定要素だけを描画更新する Ajax 技術を適用した地図サービスである GoogleMaps[35]が無償公開された。このことは GIS の分野に大きな転機をもたらした。GoogleMaps は、ページ遷移を伴わないスムーズな地図スクロール、JavaVM などの特別なプラグインが不要といった特徴を有する。またアプリケーション開発用 API が公開されて以来、GIS 利用サービスのプラットフォームとして広範囲に利用され、当 API を用いて膨大な数のシステムやサービスが開発された。本論文では、Ajax 技術を適用した Web-GIS を Ajax-GIS と呼ぶ。

図 2-4 に従来の Web-GIS と Ajax-GIS の処理の違いを示す。従来の Web-GIS は、地図表示などの処理がシーケンシャルに動作する。つまり、クライアントはサーバにリクエストを送信後、サーバ処理結果を新たな Web ページとして受け取り画面表示する。この間クライアントは一切の画面操作を行うことができない。一方、Ajax-GIS は XMLHttpRequest を用いてサーバとクライアントが通信することで、Web ページの一部を更新するため、サーバからのレスポンスを待たずに他の操作を行うことが可能である。このように Ajax-GIS は、Web ブラウザのみで高操作性を有するリッチクライアントを実現している。



(a) 従来の Web-GIS

(b) Ajax-GIS

図 2-4 従来の Web-GIS と Ajax-GIS の処理の違い

図 2-5 は、Ajax-GIS のシステムイメージを示す。Ajax-GIS は、緯度経度など図形要素の座標値で表された大規模なベクトル形式の地図データではなく、軽量なラスタ形式の地図画像を用いることで地図操作性を確保している。この地図画像はタイル状に分割され（タイル画像）、データベースに保管されている。ラスタ形式であるこれらタイル画像は、クライアントに送信する前に、予めベクトル形式等からなる地図データから作成される。タイル画像のデータサイズは画像形式にもよるが、数十 KB（キロバイト）と非常に軽量である（<例>256pixel×256pixel の PNG 画像で約 20KB）。タイル画像は、ファイル名称に位置情報などを付与してデータベースで管理されているため、特定のタイル画像を効率的に取得することが可能である。地図スクロールや拡大、縮小といった地図操作に伴い表示状態が変化すると、クライアントから表示に必要なタイル画像をサーバに要求し、サーバではそのリクエストに応じたタイル画像を送信する。JavaScript で実装されたクライアントシステムは、それらタイル画像を組み合わせることによって地図を構成する。Ajax による非同期通信によって必要なタイル画像のみを更新することで、従来のように地図全体を再表示することがないため、地図スクロールを始めとする地図操作を高速に行える。

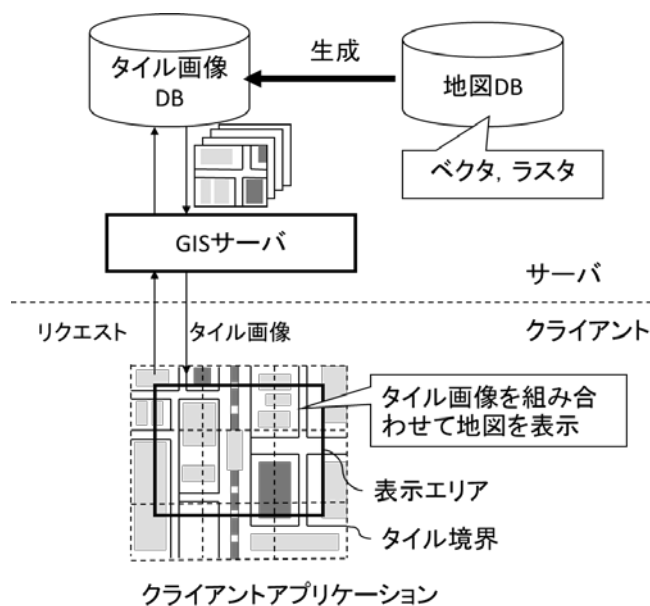


図 2-5 Ajax-GIS のシステムイメージ

Web-GIS の利活用に大きな革新をもたらした Ajax-GIS であるが、主な用途は地図参照である。Ajax-GIS を都市計画や施設管理などの業務システムに用いようとした場合、システム上の制約から様々な課題がある。Ajax-GIS はラスタ形式の地図画像を用いるため、表 2-1 で示した GIS の主要機能であり業務システムで多用される特定のレイヤの表示・非表示の切り替え（レイヤ制御）、図形の作成や編集、削除などの地図操作（図形編集）に制約が生じている。これら Ajax-GIS に関する課題については 3.1 で詳説する。

2.4. 空間データベースの概要

空間データベース（以下、「空間 DB」）は、空間情報を扱う機能を有したデータベースである。空間情報とは、位置や形状、位相構造（トポロジー）を表す空間情報とそれらに関連した属性情報から成る。

Open GIS Consortium（以下、「OGC」）[36]は、250 を超える団体からなる国際コンソーシアムであり、空間情報の共用に関する仕様などを開発している。1997 年、OGC は Open GIS Simple Features Specification For SQL[37]を公開し、RDMS を拡張して空間情報をサポートする為の手法を示した。空間 DB は、SQL 仕様などが OGC によって標準化されており空間データの共有環境、相互操作が図られている。空間 DB の主な特徴を表 2-3 に示す。

表 2-3 空間 DB の特徴

No.	特徴
1	空間情報を表現するデータ型が定義（Geometry 型）
2	空間情報へ高速アクセスするためのデータ構造（R ツリー、4 分木）などを提供。
3	空間情報を操作する機能（SQL コマンド）を提供。 (例)・幾何演算（座標間引き、積和演算） ・空間演算（距離、面積など）
4	データ形式、座標変換などを提供。

次に空間 DB の機能について概説する。空間 DB 機能は、大きく「蓄積」、「検索」、「解析」、「地図投影」に機能分類できる。蓄積では WKT (Well Known Text), WKB (Well Known Binary) の入出力, KML, SVG, Shape ファイルなどの他地図形式へのダンパ, Shape ファイルなどの他地図形式のローダなどがある。検索は任意エリアによる範囲検索, 空間インデックス管理などがある。解析には幾何管理, Geometry 同士の空間演算, 重心, 面積, 距離などを算出する幾何計算, Geometry 要素へのアクセッサ, Geometry 編集, アフィン変換などの拡張機能がある。また地図投影には, 座標系変換, 投影変換などがある。以上の機能を表 2-4 にまとめる。

表 2-4 空間 DB の主な機能

機能分類	機能	概要
蓄積	WKT データ格納	Well Known Text 形式データ格納
	WKB データ格納	Well Known Binary 形式データ格納
	OpenGIS フィーチャ対応	OpenGIS が定義する 7 種類データタイプに対応
	Ogr ライブラリ対応	ogr2ogr により Shape 変換等が可能
	データインポート	Shape 形式,WKT,WKB 等のデータインポートが可能
	データダンパ	KML,SVG,Shape,GML 形式データ出力
検索	範囲検索	指定範囲内の図形検索
	空間インデックス	GiST(Generalized Search Tree), B ツリー対応
解析	Geometry 管理	カラム追加, 削除等が可能
	空間演算	Geometry 同士の包含,内包,交差等の判定可能
	幾何計算	重心,面積,距離計算が可能
	Geometry アクセッサ	異常図形判定,座標数や N 番目座標の取得が可能
	拡張機能	Geometry 編集,アフィン変換,座標順序変更が可能
地図投影	座標系変換	Proj4 利用による座標系変換等が可能

次に空間 DB の特徴の一つである空間インデックスについて概説する。空間インデックスとは, 空間木構造などを用いて地物を効率的に管理するための仕組みである。一般的なインデックスとは異なり, 地物を扱うための専用のインデックスである。地物は, 空間的な広がりを持つため, その特徴を活かしたインデックスが導入されている。代表的なものとして, GiST, B ツリー, R ツリー, MD (Multi Dimension) ツリー[38], Quad ツリーなどがある。空間 DB で管理する地物に対し, いずれかの空間インデックスを付与することで, 特定の地物へ効率よくアクセスすることが可能となる。

2.5. まとめ

本章では、GIS の概要や活用事例を説明し、現在多くの地図アプリケーションのベースとなっている Ajax-GIS について概説した。

従来 GIS は、行政や専門機関などの特定の業務分野で利用されてきた。そこでは、地図表示や検索といった基本的な機能に加え、空間分析などの高度な機能も多用されてきた。近年では GoogleMaps をはじめとする Ajax-GIS が主流となり、モバイル端末の普及も相まって GIS を利用する機会が日常化してきた。Ajax-GIS は、タイル状の地図画像を非同期通信でサーバから取得して、必要部分のみを更新することによって軽快でシームレスな地図表示を行えるのが特徴である。そのため、地図を参照する用途に多用されている。しかし上述したように、業務システムとして利用するためには、レイヤ制御（表示・非表示）や図形編集などの GIS 基本機能が不可欠である。これら機能は、ベクトル形式の地図データを用いるレガシーな GIS と異なり、ラスタ形式の地図画像を扱う Ajax-GIS では実現が困難である。そこで本論文ではこの課題に着目し、地図参照が主な目的である Ajax-GIS においても GIS の基本機能であるレイヤ制御や図形編集を実現するための手法として、サーバサイドレンダリングの適用を提案する。サーバサイドレンダリングは、通常クライアントで行う図形操作（レイヤの表示・非表示や図形編集）をサーバ側で行う。そのため、サーバの処理負荷が高まることが懸念される。

次章では、サーバサイドレンダリングを適用した Ajax-GIS について述べる。

3. サーバサイドレンダリングを適用した Ajax-GIS

前章で述べたように Ajax-GIS は、XMLHttpRequest を用いた非同期通信で、タイル状に分割されたラスタ形式の地図画像をサーバから取得し組み合わせて表示することで、軽快な地図操作が可能である。しかしその一方で、特定のレイヤの表示・非表示の切り替え、図形を新規に追加するといった編集機能の実現は困難であるとの課題がある。

本章ではそれら課題を解決するための手法としてサーバサイドレンダリングの適用を提案する。また提案手法に対して、実地図データを用いた評価を行い、提案手法の有効性について考察する。

3.1. Ajax-GIS における課題

本節では、Ajax-GIS の課題をクライアント、サーバの両面から概説する。

先ずクライアントサイドにおける Ajax-GIS の課題について示す。Ajax-GIS は、分割された軽量のタイル画像を用いて地図を構成しているため、機能面に制約が生じる。例えば、特定レイヤの表示・非表示の切り替え、シームレスな縮尺変更、地物の追加・削除といった地図編集などにおいて、通常の GIS に比べると機能に制約がある。これらの機能は GIS を用いる業務システムでは必要不可欠である。通常の GIS は、クライアントサイドでベクトル形式の地図データを管理し、それを高度な描画処理エンジンを用いて処理するため、様々な表示が可能である。一方 Ajax-GIS はピクセルで構成されるラスタ形式の地図画像を用いるため、そのような高度な描画処理の実現が困難である。

次にサーバサイドにおける Ajax-GIS の課題について示す。現在クラウドコンピューティング（以下「クラウド」）が本格化している。Ajax-GIS においてもクラウド環境での利用が多く、地図データの保管、サーバでの地図データ処理などに活用される。特に災害時における情報共有システムに関する研究が多数見られる[39][40]。しかしクラウドを用いた場合、サーバに負荷が集中するため、サーバ負荷分散などの対策が必要となる。本論文で示すサーバサイドレンダリングについてもサーバで地図データを処理するため、サーバに負荷が集中する。Ajax-GIS の高速な操作性を保ちつつ、高度な地図機能を実現するためには、サーバにおける負荷分散が必要不可欠である。

以下では、上記で示した課題について具体的に示す。

3.1.1. クライアントにおけるレイヤ制御

必要なレイヤの情報だけを組み合わせる表示するレイヤ制御は、GIS の最も基本的な機能のひとつである。このレイヤ制御は、不要な情報を非表示とすることで、地域の特徴を浮き彫りしやすくなるため、地域分析[41]や商圏分析[42]など地図から地域性を分析する際に利用される。ベクトル形式地図は、図形を数値データで管理し、描画時に計算処理することで地図を表示するため、必要なレイヤの図形のみ描画するなどレイヤ制御が行いやす

い. 一方, Ajax-GIS で使用されるタイル画像は, 画素の集合体であるラスタ形式のため, ある特定図形の非表示といった描画変更が困難である. またタイル画像は予め決められた縮尺で生成されるため, 地図縮尺変更は, ベクトル形式地図のように連続的ではなく, 段階的となる. 以下, Ajax-GIS における既存レイヤ制御手法について述べる.

予めサーバに必要レイヤ分の透過型タイル画像を作成しておき, 表示するレイヤのタイル画像を返信し, クライアントにてそれらを重畳表示する手法がある[43] (以下, 「従来法 1-A」) (図 3-1). しかしこの手法では, 表示レイヤ数が増えるにつれ, 重畳表示するタイル画像数が多くなるため, 地図スクロールなどの地図操作に伴うサーバからのタイル画像転送やレンダリング処理に時間を要し, 結果クライアントの性能劣化をもたらす.

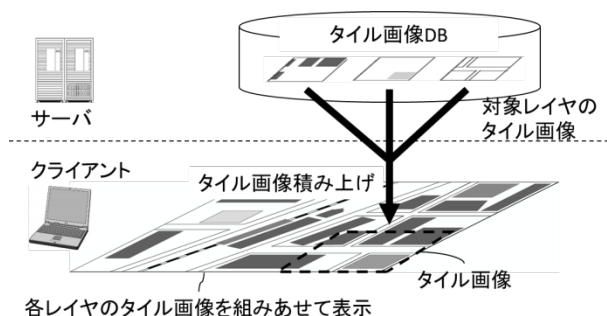


図 3-1 クライアントでのレイヤ制御イメージ (従来法 1-A)

また, レイヤ毎にタイル画像を予め生成せず, クライアントからのレイヤ制御に従い, リアルタイムにサーバでタイル画像を生成, クライアントに返信し表示する手法もある[44] (以下, 「従来法 2-A」) (図 3-2). クライアント毎に表示対象レイヤは異なるため, サーバではクライアントからの地図表示リクエストの度に, 地図データからタイル画像を生成しなければならない. このタイル画像生成処理は, 固有の GIS エンジンを実行するため, 処理負荷が大きくなり, また生成されるタイル画像は, クライアントのレイヤ制御に依存するため, 再利用性が低いという問題がある.

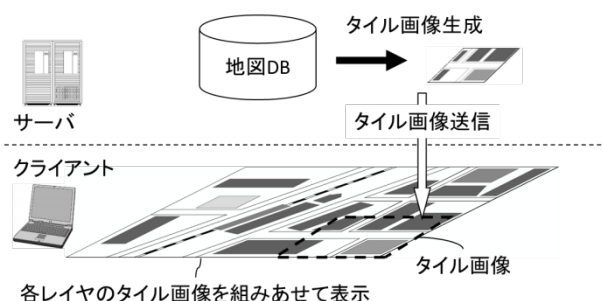


図 3-2 サーバでタイル画像を生成するレイヤ制御イメージ (従来法 2-A)

3.1.2. クライアントにおける図形編集

C や Java 等のプログラミング言語により開発されたデスクトップ型のレガシーな GIS は、ベクトル形式で管理されている地図データに対して、変更が生じた図形要素をシステム上からマウスやキーボード等を用いて編集することができる。また、高度なグラフィックス機能を利用し、複雑な図形を描画することができる。

一方 Ajax-GIS は、図形編集に限っては、サーバからクライアントにベクトル形式のデータを送り、ブラウザが備えるベクトル描画機能により図形編集を実現している[45]。しかし、この描画機能は、Web ブラウザ毎に実装が異なるためクロスブラウザ対策が必要となり、保守性や互換性に問題が生じる。Web ブラウザ上で図形を描画する仕組みとして、Canvas[46]、SVG[47]、VML[48]、WebGL[49]といった技術がある。Canvas は、次世代の Web 標準である HTML5 で採用された技術であり、多くの Web ブラウザで利用可能である。SVG は Scalable Vector Graphics の略で、タグと属性で図形を表現するマークアップ言語である。VML は Vector Markup Language の略で、図形を描画するための XML 言語である。WebGL は、OpenGL を JavaScript に移植したものであり、ブラウザを通してデバイスの GPU (Graphics Processing Unit) に直接アクセスすることにより、高速に図形を描画することができる。以上に示した Web ブラウザ上で図形を描画する仕組みにより Ajax-GIS 上でもベクトル形式の地図を描画することが可能である。しかし、地図は多数の地物で構成されており、特に都心部は多くの建物等が密集しているため、地物数が多い。このような地域の地図を Web ブラウザ上でベクトル描画する場合、性能問題が懸念される。特に、PDA や低スペック PC などではレンダリングコストが大きくなるため、描画する図形数が多い場合は、特に性能劣化が課題となる。

3.1.3. サーバにおける処理負荷の増大

クラウドは、アプリケーションやデータを個人の PC やモバイル端末に保存するのではなく、インターネット上にあるサーバにて管理、情報処理する。従来は、システムごとにサーバを用意し環境構築するため、サーバ購入やアプリケーション開発、運用・保守サービスなど、様々な費用がかかった。しかしクラウドを利用することで、トータルコストの抑制、Web ブラウザのみで動作可能なサービスの提供、セキュリティの確保などの効果が期待されている。しかし、サーバに大量のデータ（「ビッグデータ」）が集中することにより性能劣化が懸念されるため、データ処理の高速化が求められる。Ajax-GIS においても、クラウド環境を活用したサービスが提供されており、同様にデータ処理高速化の課題が挙げられる。

3.2. サーバサイドレンダリングの適用

Ajax-GIS をクラウド環境で利用する場合、軽量の GIS 機能の開発が必要となってくる。例えば、モバイル端末などの PC に比べて低性能な情報機器を用いた場合でも、高度な地図機能が求められる。例えば設備の維持、管理業務においては、モバイル端末を屋外に持ち出して現場にて地図業務処理を行うケースが考えられる。

図 3-3 に示すように、サーバサイドレンダリングは、地図描画処理など高負荷な描画（レンダリング）処理を、クライアントではなく、サーバで実行する技術である。サーバサイドで描画されたデータをクライアントが受信して表示するのみであるため、クライアントの処理負荷が低減し、操作性が向上する。また高価なグラフィックカードは不要となり、モバイル端末などの低スペックマシンでも複雑な図形が表示可能となる。近年、クラウドサービスが本格利用されており、サーバサイドレンダリングは、高精細な画像配信システム[50]、モバイル端末における 3D 描画システム[51]などに適用されつつある。

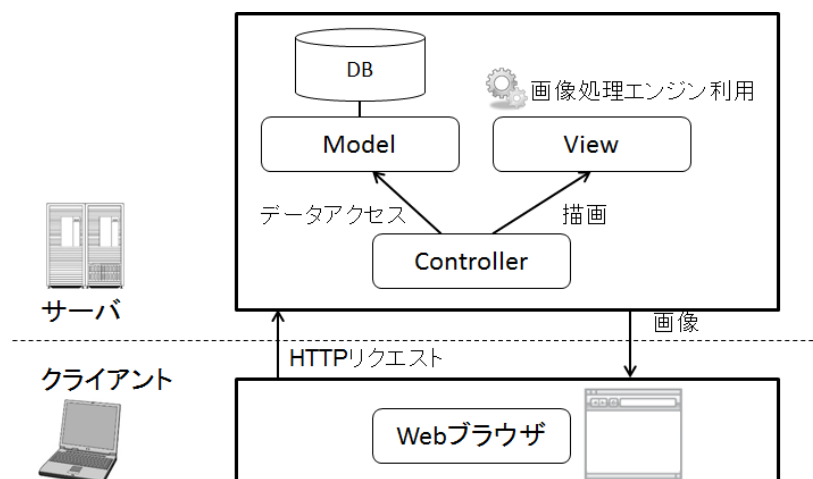


図 3-3 サーバサイドレンダリングのアーキテクチャ

3.2.1. タイル画像合成によるレイヤ制御

本節では、3.1.1 で示したレイヤ制御の課題に対し、サーバサイドレンダリングを用いた提案手法について示す。

提案手法では、図 3-4 に示すように、レイヤ毎に透過型のタイル画像を用いて、それらをクライアントからのレイヤ制御に従い、サーバでリアルタイムに合成処理し、クライアントに返信することでレイヤ制御を実現する。

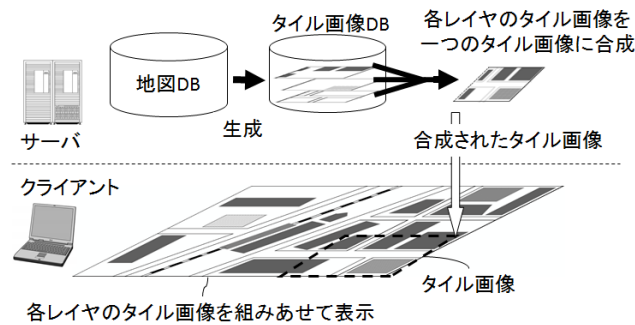


図 3-4 サーバサイドレンダリングを用いたレイヤ制御

図 3-5 にレイヤ制御フローの概要を示す．先ず(1)クライアントでは表示するレイヤを選択し，表示レイヤ情報をサーバに送信する．サーバでは，(2)表示レイヤ情報を元に，必要なレイヤ毎の透過型タイル画像の存在を確認，なければこれを生成（以下「タイル画像生成処理」）する．次に，(3)それらレイヤ毎のタイル画像を重ね合わせて，表示レイヤ情報が指示する画像に合成（以下，「タイル画像合成処理」）し，(4)クライアントに返信する．クライアントは(5)合成処理されたタイル画像を受信し表示を行う．

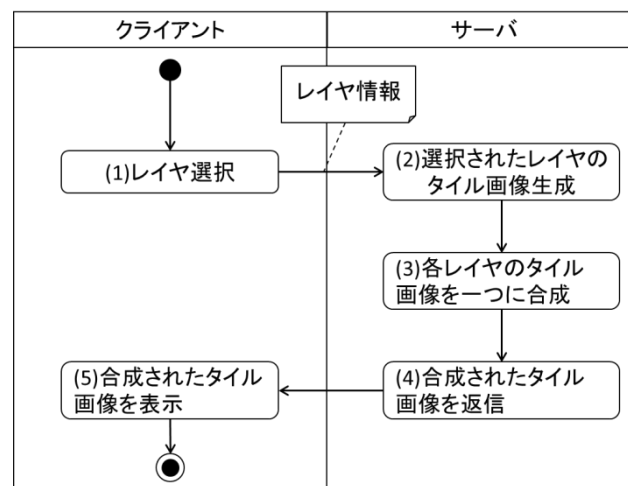


図 3-5 レイヤ制御処理フロー

Ajax-GIS で使用するタイル画像は，ベクトル形式，ラスタ形式から成る地図データより生成される．タイル画像生成処理は，クライアントから送信された表示レイヤ情報を元に行われる．この表示レイヤ情報には，生成対象レイヤ，タイル画像生成範囲，画像形式などのタイル画像生成に必要なパラメータが含まれている．これら地図データ，表示レイヤ情報を元に，サーバが備える GIS エンジンを使用して背景を透明にした透過型タイル画像をレイヤ毎に生成する．この時，生成するタイル画像内に図形が存在しない場合は，生成コスト削減のため作成しない．また本情報は，すべてのクライアントで共有されるレイヤ

とタイル座標で構成するハッシュマップに記録され、次回以降のタイル画像生成時、及び画像合成処理時に参照される。これにより、既存のレイヤ毎のタイル画像の再利用を進め、描画生成処理の削減を図る。なお、タイル画像をキャッシュする記憶装置は有限であるため、例えばアクセス頻度の低いタイル画像から順次廃棄するなどといった廃棄手段については、今後検討が必要である。

表示レイヤ情報に格納されたレイヤ表示順序に従い、表示優先度の低いレイヤから順に上書き処理する。背景を透過したタイル画像を用いるため、図形要素のある不透明な部分のみが上書きされる。クライアントからのレイヤ表示状態が変化するまで、合成後のタイル画像をキャッシュし、クライアントから再度同領域を表示する際には、当キャッシュを再利用することでタイル画像合成処理負荷を低減する。

3.2.2. 図形編集処理イベント通信による図形編集

本論文では、クライアントからの図形編集処理イベント通信により、ブラウザのベクトル描画機能を利用せずにサーバサイドレンダリングを用いることで図形編集を実現する。図 3-6 に図形編集フロー概要を示す。

クライアントでは編集対象図形を選択するため、(1)レイヤ、座標値などからなる図形検索条件をサーバに送信する。サーバでは、(2)検索条件を元に編集対象図形検索を行い、(3)当該図形情報をクライアントに返信する。クライアントでは、(4)編集対象図形情報取得後、編集処理を開始する。編集が開始されると、(5)サーバにて編集対象図形の画像化が行われクライアントに送信される。クライアントでは、(6)この画像化された図形、及び(4)で取得した編集対象図形情報を元に編集を行う。図 3-7 に示すように、編集対象図形を選択し、その頂点をマウスカーソルに追従させて移動できる。また頂点を指定すると、頂点座標編集メニューから、頂点追加、削除などを行える。色や線種などの描画情報は、描画属性編集メニューで操作する。クライアントでは、図形に対して編集を施す度にサーバに編集後図形情報を送信し、サーバで生成された画像を再度表示することで編集結果を確認することができる。この処理は、図形編集が確定するまで繰り返される。(7)編集確定後、サーバに通知し、(8)当該図形情報を更新することで図形編集が終了する。なお新規に図形を作成する場合は、検索処理が不要のため、(4)から開始する。

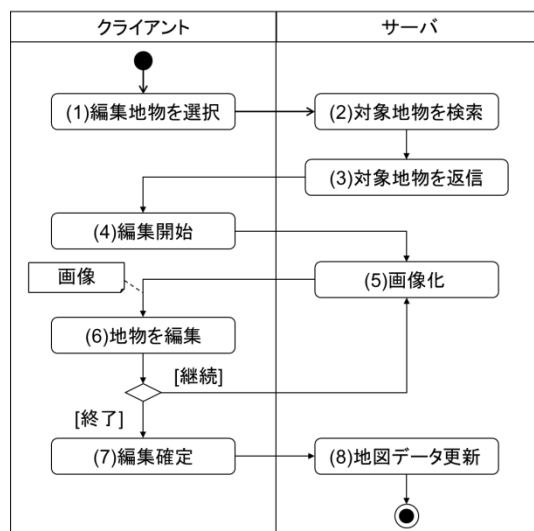


図 3-6 図形編集処理フロー

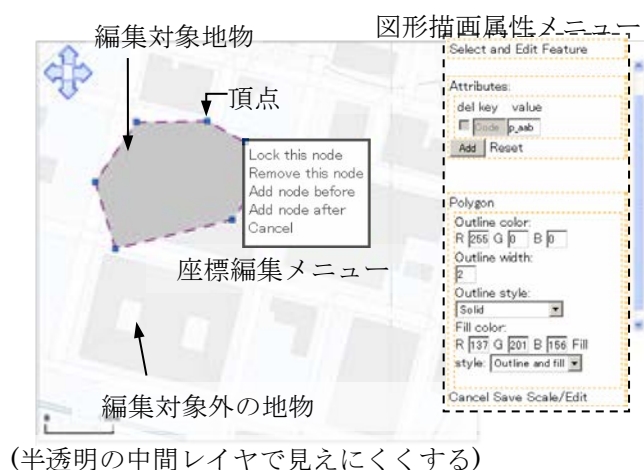
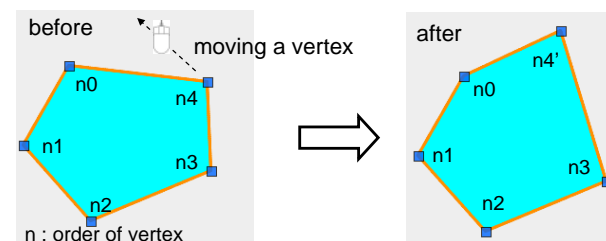


図 3-7 図形編集画面例

サーバサイドレンダリングにより図形編集を行うには、サーバ、クライアント間で共通的に認識できるプロトコルが必要である。提案法では、表 3-1 に示すような図形の色・形状・大きさなどに関する情報をクライアントからサーバに通知することで図形編集を実現する。また、図 3-8 に HTTP 通信の GET メソッドを使った図形編集イベントプロトコルの例を示す。このイベント通信は、クライアントで座標移動、線色変更などの図形編集操作を行う毎に、クライアントで図形編集処理イベントプロトコルに基づきイベント情報を作成し、サーバに通知することで行われる。本プロトコルは、図形編集時に座標全てをサーバに送信するのではなく、編集対象図形の中の対象座標 ID 及びその座標値のみを扱うことで通信コストの低減を図っている。

表 3-1 図形編集プロトコル

Key	項目	概要
cid	Client 識別 ID	クライアントを識別
oid	編集地物 ID	編集対象地物を識別
op	操作 ID	編集操作を識別 (e.g. 点座標追加,その他の操作については図 3-7 を参照)
t	編集地物の座標 ID	地物を構成する座標を識別
v	“t”の座標	編集地物の座標 ID に対する座標値
i	編集地物情報	編集地物の属性情報
lc	線色	線色 (e.g. blue, black)
fc	面色	面色 (e.g. gray, white)
w	線幅	線幅 (e.g. 2point)
ls	線スタイル	線スタイル (e.g. dotted line)
fs	面スタイル	面スタイル (e.g. fill)
s	縮尺	縮尺 (e.g. 1/10000)
ex	その他情報	アプリケーション特有の情報など



[Examples of editing protocol]

send data	explanations
http://localhost?	(Server URL)
cid=1946136682	("1946136682" is client ID.)
&oid=0	("0" is Object ID.)
&op=M	("M" is "Move. "A" is Add, "R" is Remove.)
&t=n4[-1132,1340.5]	(Order of target and its coordinate)
&v=n4[-1151.5,1296.5]	(Order of target and operated coordinate)
&i=-1235,1296.5,103,121	("-1235,1296.5" is upper left coordinate of bounding rectangle, "103" is image width, "121" is image height.)
&lc=255,143,0	(RGB of line color)
&fc=0,255,255	(RGB of face color)
&w=3	("3" is line width.)
&ls=0	("0" is solid line.)
&fs=2	("2" is fill.)
&s=0.5	(0.5 indicate meter per pixel.)

図 3-8 図形編集プロトコル例

図 3-9 に図形編集のアーキテクチャを示す。最下層に地図表示層があり，その上部に中間層が入る。この中間層は，図 3-7 に示すように編集対象図形の視認性を高めるために，

編集対象以外の図形を半透過させ、下層の地図表示を量かす役割を果たす。最上部には、図形編集層が位置し、サーバサイドレンダリングで描画された編集対象図形のイメージが配置される。

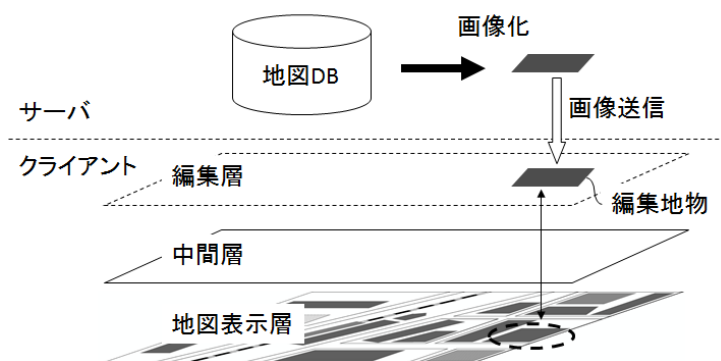


図 3-9 図形編集アーキテクチャ

3.2.3. サーバの動的負荷分散と制御

Ajax-GIS におけるサーバサイドレンダリングでは、多数のクライアントが同時にレイヤ制御や図形編集を行うと、サーバ処理負荷が増大し、クライアントへの応答性能が劣化する恐れがある。この課題に対し、サーバのスケールアップ（性能の高いハードウェアへの置き換え）やスケールアウト（サーバ台数の追加）を図ることにより、システムを拡張する方法がある[52]。本論文では、Ajax-GIS 利用上の特性を考慮し、多数の処理を同時並行的に実施することに適したスケールアウトによるサーバ負荷分散について提案する。

サーバ負荷分散は、クライアントから要求された処理（以下、「リクエスト」）を一元的に管理し、それを複数サーバに割り振る負荷分散装置と、当該リクエストを処理するサーバ（以下、「処理サーバ」）とで構成される。既存の負荷分散方法には、各処理サーバへリクエストを順番に割り振る「ラウンドロビン」、予め設定された比率で処理を割り振る「静的重み付きラウンドロビン」などがある[52]。GIS における地図画像配信サービスでは、処理サーバの CPU やメモリなどのリソース使用率などを監視しながら、動的に処理サーバを割り振る方法[53] [54]を用いて、地図画像を生成する処理サーバを動的分散する方法[55][56]がある。また、地図データをメッシュ状に分割して図形数を算出しておき、処理サーバの性能に応じて、領域毎に画像生成処理を実行する処理サーバを決めておく方式[57]がある。

以下、それぞれの従来法について概説する。

[1] ラウンドロビン

この手法は、各処理サーバに均等にリクエストを割り振る方式である。処理サーバ性能に違いがある場合は、性能の低い処理サーバにリクエストが蓄積されてボトルネックとなり、クライアントへの応答性能が劣化するという問題がある。

[2] 静的重み付きラウンドロビン

本手法は、処理サーバの性能に応じて、リクエストの分散比率を指定する方式である。高負荷なリクエストが性能の低い処理サーバに割り当てられた場合、そこがボトルネックとなり、クライアントへの応答性能が劣化するという問題がある。

[3] リソース稼働監視型ラウンドロビン

本手法は、CPU やメモリなどリソースの稼働状況をもとに、地図画像を生成する処理サーバを動的に割り当てる。しかし、処理サーバが地図画像生成を一定時間内に処理しきれずに処理が蓄積されていく状態（以下、「過負荷状態」）においては、使用率がどれも同じように高くなるため、これを指標に適切な割り当てを行うことは難しい。また、地図描画は高負荷な処理であるため、瞬間的にCPU使用率が高くなることもある。以上の理由から、CPU やメモリ使用率を用いた処理負荷分散は、実際のシステムにおいてその効果を発揮しにくいと考えられる。

[4] 領域分割型負荷分散

本手法は、領域毎に画像生成処理を実行する処理サーバ割り当て、負荷分散する。しかし、特定の地域に画像生成リクエストが集中した場合、他のサーバに余裕があったとしても、すべてその地域を受け持つサーバに割り当てられることになる。このため、クライアントへの応答時間が長くなる。

上記で示した従来手法の課題に対して、本論文ではクライアントへの応答性能を高めるため、サーバサイドレンダリングによる処理負荷予測を元に、処理サーバの負荷状況に応じてリクエストを動的分散する方式[58]を提案する（提案法 1-B）。さらにリクエスト処理にかかった実時間を処理負荷予測にフィードバックさせ、負荷の見積もり精度を向上させる方式についても検討する（提案法 2-B）。

なお本論文では、GIS の基本機能であり、複数クライアントから同時アクセスされる頻度の高いレイヤ制御に焦点を絞り、上記提案方式について検討する。また処理サーバにおける処理負荷を、レイヤ制御にかかる処理時間として定義する。つまり短時間で処理できるものは処理負荷が小さく、長時間を有するものは処理負荷が大きいと判断する。

図 3-10 に本提案方式を実現するためのサーバ構成を示す。サーバは、Ajax-GIS クライアントからのレイヤ制御リクエスト（以下、「レイヤ処理」）を受付け、動的に負荷分散を

行うゲートウェイ（以下、「GW」と）、サーバサイドレンダリングによるレイヤ制御を実行する処理サーバから構成される。GW は、クライアントからのレイヤ処理を受け付け、後述する負荷分散方式に基づいて処理サーバを決定し、レイヤ処理を転送する。また処理サーバで生成したタイル画像を受け取り、クライアントに返信する役割も担う。一方処理サーバは、GW から転送されたレイヤ処理を受け取り、サーバサイドレンダリングによってクライアントで表示するタイル画像を生成し GW に送信する。なお処理サーバは、システムの構成に応じて複数台利用することが可能である。

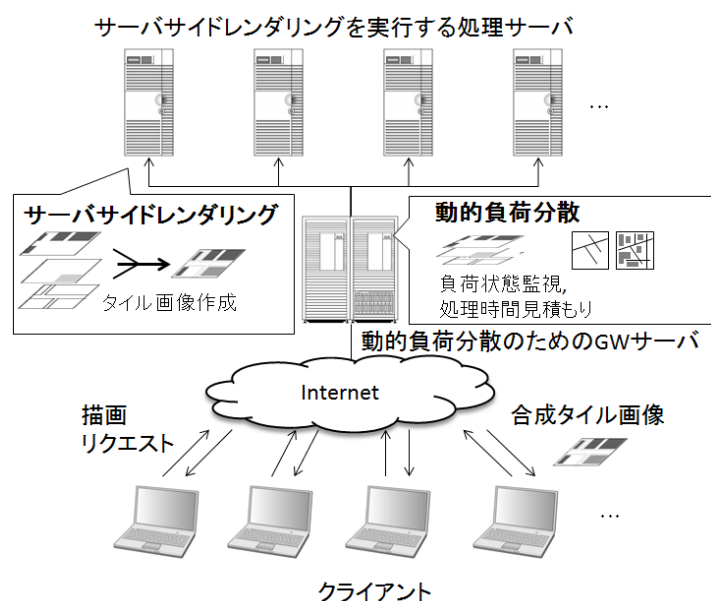


図 3-10 システムアーキテクチャ

既存手法は、一部の処理サーバに負荷が集中し、クライアントへの応答時間が長くなるという問題があった。本論文で提案する手法は、GW が処理サーバにおけるリクエストの処理状況を監視することで、処理サーバの負荷状態を把握、負荷の集中を防ぐものである。また、クライアントから要求されたレイヤ処理にかかる時間を処理サーバ毎に見積もる。GW はこれら 2 つの情報を元に、リクエストを転送する最適な処理サーバを選択する。以下、処理サーバ負荷監視、処理負荷見積もり、動的負荷分散アルゴリズムについて示す。

[1] 処理サーバ負荷監視

GW は、処理サーバにおける未処理のリクエストから、処理負荷を判断する。今、 k 番目の処理サーバのある時点での処理負荷は、そこで未処理状態として処理待ちとなっている i 番目のリクエストの処理時間 R_{ki} の合計値 $S_k = \sum R_{ki}$ として定義する。個々のリクエストの処理時間は、後述する処理負荷見積もりによって算出する。処理負荷が高い場合、未処理のリクエストが多数蓄積され、上記 S_k が大きい値を示す。一方、処理負荷が小さい場合は、

GW から転送されてきたリクエストをすぐに処理でき、上記 S_k が小さい値を示す。以上より、GW は処理サーバ毎に S_k から判断される処理負荷を管理し、クライアントからリクエストがきた時点における処理負荷が小さく、最も早くリクエストを処理し終わると推定されるサーバに当該リクエストを転送する方法を採る。

[2] 処理負荷見積もり

サーバサイドレンダリングを適用した Ajax-GIS では、次に示す 2 つのレイヤ制御方法がある。1 つは、3.1.1 で従来法 2-A として示したクライアントからのレイヤ制御リクエストを元に、サーバサイドで GIS エンジン起動してタイル画像を生成する方法（以下、「レイヤ制御方法 1」図 3-2）である。この画像には、リクエストで指定されたレイヤの図形が描かれる。2 つめは、3.2.1 で提案法として示した予め定義された縮尺、レイヤ毎にタイル画像を生成しておき、サーバサイドでこれらを重ね合わせて表示レイヤのタイル画像を合成する方法（以下、「レイヤ制御方法 2」図 3-4）である。

地図はレイヤ制御方法 1、またはレイヤ制御方法 2 によって描画される。つまり、クライアントが固定の縮尺を指定した場合は、レイヤ制御方法 2、それ以外の縮尺ではレイヤ制御方法 1 が採用される。これは、設備管理システムなどの業務システムにおいて、実際に採用されている方式である。クライアントは GW に対して表示レイヤ、表示範囲、縮尺などのパラメータを送信する。

レイヤ制御方法 1 では上記のようにタイル画像を描画生成によって生成する。この処理をタイル画像生成 (A) とする。タイル画像生成 (A) を任された処理サーバは、ベクトル形式、ラスタ形式で構成された地図データベースから必要な地図データを取得し、GIS エンジンを用いてタイル画像を生成する。タイル画像生成にかかる負荷、すなわち処理時間は、描画対象図形数に比例すると考えられる。そこで、両者の関係を把握するため、実際の地図データを用いた予備実験を行った。予備実験は、タイル画像生成毎に GIS エンジンのリセットして、後述する不確定要素を排除し、図形数と処理時間との関係を調査した。その結果、両者の相関係数は 0.7 以上と強い正の相関を示した。タイル画像生成にかかる処理時間 Ct は、 Ct を目的変数、図形数 Fc を説明変数とすると、 n 個のタイルにおける両者の組 $(Fc_1, Ct_1), \dots, (Fc_i, Ct_i), \dots, (Fc_n, Ct_n)$ は単回帰式(3-1)を用いてモデル化することが可能である。なお、傾き a 、切片 b は最小二乗法を用いて、式(3-2)、式(3-3)より算出できる。

$$Ct = a \cdot Fc + b \quad \dots\dots\dots \text{式 (3-1)}$$

$$a = \frac{n \cdot \sum Fc_i \cdot Ct_i - \sum Fc_i \cdot \sum Ct_i}{n \sum Fc_i^2 - (\sum Fc_i)^2} \quad \dots\dots\dots \text{式 (3-2)}$$

$$b = \frac{\sum Ct_i - a \cdot \sum Fc_i}{n} \dots\dots\dots \text{式 (3-3)}$$

しかしタイル画像生成に関しては、GIS エンジン独自の要素が入ってくるため、これに合致するとは限らない。GIS エンジンには、例えば図形描画を高速化するため、地図データをキャッシュしたり、地図データの先読みを行ったりする機能がある。実運用では、こういったタイル画像生成に関する不確定要素が入るため、上記で算出した処理時間見積もりと実時間との間に乖離が生じる可能性がある。そこで上記課題に対し、本論文では実際の処理にかかった時間を処理見積もりにフィードバックさせる手法を検討する。これは、タイル画像生成にかかった実際の処理時間、作成対象のタイル内図形数を GW 内部で管理し、式(3-1)を随時更新する方式である。サーバ単位で式(3-1)を更新し、個々のタイル画像生成では差が残るが、平均的には上記不確定要素を吸収し、実時間に合致するようにする。3.4 では、この方式についても評価実験を行う。

一方、レイヤ制御方法 2 では、レイヤごとのタイル画像の重ね合わせによって地図画像を描画する。これをタイル画像合成 (B) とする。GW からタイル画像合成 (B) 処理を任された処理サーバは、対象縮尺、表示範囲のレイヤ画像を元に、表示優先度の低いレイヤから順に既存のタイル画像を上書き処理する。タイル画像合成にかかる負荷、すなわち処理時間は、画像を構成する画素単位での処理であるため、重ね合わせるレイヤ数 Lc と処理時間 Mt は比例関係にあると考えられる。そこで、両者の関係を把握するため、実際の地図データからレイヤ毎に生成したタイル画像を用いて予備実験を行った。予備実験では、重ね合わせるレイヤ数を 1 から 10 と変化させ、重ね合わせるレイヤ数 Lc 、画像合成にかかる処理時間 Mt との関係を調査した。その結果、両者の相関係数は、0.95 以上と強い正の相関を示した。これより、タイル画像合成処理時間 Mt は、合成対象のレイヤ数 Lc により単回帰式 (3-4) を用いてモデル化できる。傾き c 、切片 d の算出方法は、上述の通り最小二乗法を用いて算出できる。タイル画像合成に関しては、タイル画像生成に比べてシステム固有の影響を受けにくい。よってあらかじめ評価式 (3-4) の係数を定めておく。

$$Mt = c \cdot Lc + d \dots\dots\dots \text{式 (3-4)}$$

[3] 動的負荷分散アルゴリズム

GW は、処理サーバの負荷状態を見て、クライアントから送信されたレイヤ処理にかかる処理時間を見積もった上で、どの処理サーバにリクエストを割り当てるかを計算する。以下に、GW における動的負荷分散アルゴリズムを示す。なお、処理時間 Rk_i は、 k 番目のサーバによる Ct または Mt のどちらかの値となる。

Step1: K 個の各処理サーバにおける未処理のレイヤ処理にかかる時間の合計値 $S_k = \sum R_{k,i}$ ($k = 1, \dots, K$) を参照する.

Step2: クライアントから来たレイヤ処理にかかる時間 $R_{k,new}$ を各処理サーバに対して見積もる.

Step3: クライアントから当該レイヤ処理を受信した時刻 T と, 各処理サーバから処理結果を最後に受信した時刻 T_k との差 $\Delta T_k = (T - T_k)$ を算出する. 時間経過の補正分である.

Step4: 当該レイヤ処理完了までの予測時間 E_k が最小となる処理サーバ (h 番目とする) に処理を割り当てる.

$$h = \arg \min\{E_k\}, \quad E_k = S_k - \Delta T_k + R_{k,new}$$

Step5: h 番目の処理サーバの未処理のレイヤ処理時間 S_k に当該レイヤ処理見積もり時間 $R_{k,new}$ を加え, 負荷状況を更新する.

$$S_k \leftarrow S_k + R_{k,new}$$

また, GW が処理結果を受信した場合, 以下のように負荷を更新する.

Step1: m 番目の処理サーバからその先頭のレイヤ処理結果を受信した場合, そのレイヤ処理見積もり時間 $R_{m,1}$ を差し引き, 負荷状況を更新する.

$$S_m \leftarrow S_m - R_{m,1}$$

Step2: 時刻 T_m を現在の時刻に更新する.

上記 GW における処理サーバの動的負荷分散により, 各処理サーバの処理負荷が平準化され, クライアントへの応答性能が確保される.

3.3. レイヤ制御および図形編集の評価

市販のデジタルマップを用いて、レイヤ制御、図形編集に関する提案手法の評価実験を行った。以下、評価仕様について説明する。

提案法の有効性を確認するため、3.1.1 に示した従来法との比較を行う。図 3-11 に示すように、クライアントからサーバに表示対象のタイル画像の取得をリクエストし、当該タイル画像を受信、表示するまでの時間（以下、「処理時間」）を計測し、評価に用いる。その際、ランダム関数を用いて生成した 100 回分の地図スクロールパスを用いて地図表示更新を行う。このとき 1 回の地図スクロールは平均約 200 ピクセルである。

レイヤ毎のタイル画像を生成するコストは大きい。そのため、提案法では必要となるレイヤ毎のタイル画像が生成済みかどうかで処理性能に違いが生じる。そこで、全レイヤのタイル画像がそろっている最良ケース（以下、「提案法ケース 1」）と、レイヤ毎のタイル画像がない状態から始める実際の利用場面を想定したケース（以下、「提案法ケース 2」）で検証を行う。従来法 1-A について重畳レイヤ数と処理時間合計値との関係を把握する（実験 1）。次に 100 回分の表示更新を行う移動パスを計 9 パターン用意し、それぞれに対して従来法 2-A、提案法ケース 1、提案法ケース 2 の比較を行う（実験 2）。この時、実際の利用場面を想定し、10 回地図表示する毎に表示レイヤ切り替え処理を行う。また、一度生成したタイル画像は動的にキャッシュし、次回以降、レイヤの切り替えなどがない限りこの画像を再利用する。

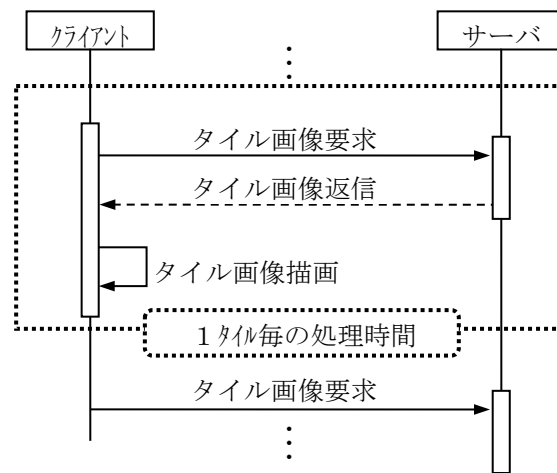


図 3-11 レイヤ制御処理時間の計測範囲

次に実験条件について示す。地図データには、地方都市（面積約 40km²）の市販地図を用いた。使用レイヤは、地図データを有する 78 レイヤとした。地図表示エリアは幅 600 ピクセル、縦 480 ピクセル、またタイル画像は、幅と縦が共に 250 ピクセルの透過対応の PNG

形式を採用した。図 3-12 に実験で用いた Ajax-GIS クライアントの表示例を示す。画面左側にレイヤ制御を行うためのレイヤパネル、画面中央に地図表示エリア、画面右側に図形編集操作パネルを設けている。また表 3-2 に本実験で使用したサーバ、クライアント環境を示す。

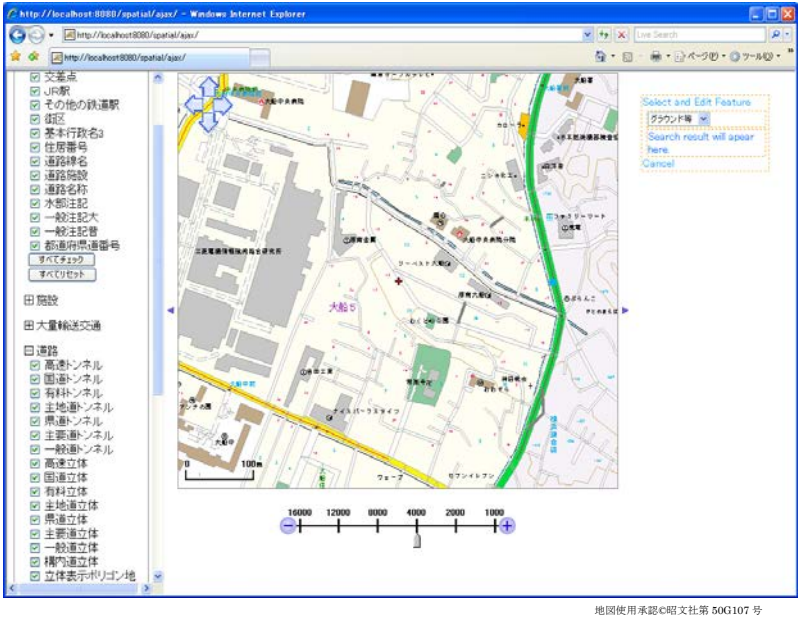


図 3-12 評価実験で使用するクライアントシステム画面

表 3-2 評価実験に用いるハードウェアスペック

	クライアント	サーバ
CPU	AMD Athlon 64 X2 4800+	Intel Core 2 Quad Q6600
RAM	4096MB	4096MB
OS	Windows XP SP2	Windows XP SP2

[1] 実験 1

従来法 1-A における実験 1 の結果を表 3-3 に示す。表示レイヤ数を変えて、100 回分の地図スクロールパスによる上記処理時間を計測した。またレイヤ数と処理時間合計値の関係を図 3-13 に示す。処理時間合計値とは、地図スクロールパスで必要となった全タイル画像の上記処理時間の合計値であり、順次地図画像を生成表示しつつスクロールパスを一巡する時間である。また、1 タイル画像あたりの平均処理時間とは、処理時間合計値をタイル画像数で割ったもので、タイル画像の平均的な処理時間を示している。従来法 1-A はレイヤ数に応じてタイル画像を重畳表示するため、処理時間合計が比例的に増加する。図 3-13 で示したレイヤ数と処理時間合計値は重相関係数 R^2 が 0.9403 であり、両者に強い正の相関があることが分かる。以上より従来法 1-A は表示するレイヤ数が多くなるほど処理時間

が増加し、その結果表示性能が劣化することが分かる。レイヤ数 3 の場合でも、処理時間合計値は後述する提案法の 5 倍以上を要し、地図スクロールが大幅に劣化する。これは、例えばレイヤ数の多い大規模施設管理を行う場合には、従来法 1-A の適用は困難であることを示している。

表 3-3 表示レイヤ数に応じた処理時間の変化

レイヤ数	タイル数	総処理時間(s)	1 タイル毎の 平均処理時間(ms)	タイル画像データサイ ズ 合計(kb)
3	1129	378.3	335.0	816.9
6	2082	483.2	232.1	1145.9
9	3881	955.7	256.6	3396.6
12	4890	1490.1	304.7	3911.4

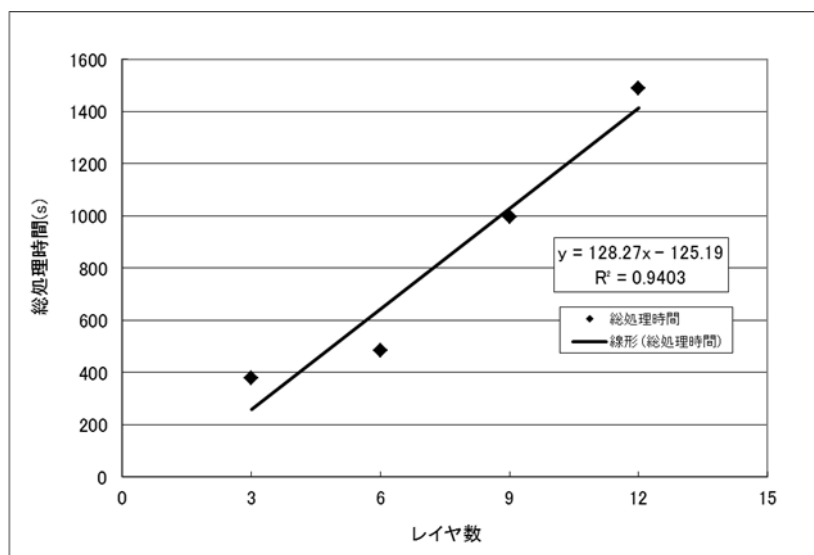


図 3-13 レイヤ数と処理時間合計値の関係

[2] 実験 2

表 3-4 は実験 1 で使用した地図スクロールパスを用いた実施結果である。本実験では、平均 6 レイヤを表示している。いずれの手法も従来法 1-A と比較すると大幅に処理時間が短いことが分かる。1 タイル画像平均処理時間は、レイヤ毎のタイル画像の生成を行わない提案法ケース 1 が最も短い。従来法 2-A は、地図データを読み込んでタイル画像に描画するコストが大きく、提案法ケース 1 に比べると処理時間が長くなっている。また提案法ケース 2 は、開始時にはレイヤ毎にタイル画像を描画生成することになり、さらにタイル画像合成処理を行うため、3 手法の中では最も処理時間が長くなった。なお、同じパスを移動したにもかかわらずタイル画像数に若干の違いが見られるのは、クライアントの読み込みタイミングに差があるためであるが、全体の 3%程度であるため特に問題とはならない。

次に実験1で使用した地図スクロールパスを含んだ計9パターンの実験結果を図 3-14に示す。実験は、地図スクロールパス 1 から順に実施した。従来法 2-A の処理時間は大きく変化することがないのに対し、提案法ケース 2 では、移動パスが進むにつれて処理時間が短くなっている。

提案法ケース 2 では、地図スクロールパス 1 は、レイヤ毎のタイル画像を全くキャッシュしていない状態から始まる。そのため、地図スクロールパス 5 までは、生成するタイル画像数が 2,000 以上あり、タイル画像生成処理コストが大きく、従来法 2-A より 1 タイル画像当たりの処理時間が長い。しかし地図スクロールパス 6 を超えてからは、移動パス内のタイル画像が既にキャッシュされているため、新規に生成するタイル画像数が減少する。そのため、提案法ケース 2 の処理時間は従来法 2-A よりも短くなり、徐々に提案法ケース 1 に近づいていく。地図スクロールパス 9 では新規に生成したタイル画像数が 65 であり、提案法ケース 1 との差は約 5ms まで縮まっている。

表 3-4 従来法と提案法による処理時間の比較

	タイル数	総処理時間(s)	1タイル毎の平均処理時間(ms)	タイル画像データサイズ合計(kb)
従来法 2-A	1160	78.9	68.0	3105.5
提案法 ケース 1	1190	50.9	42.8	3101.1
提案法 ケース 2	1200	87.5	73.0	3060.8

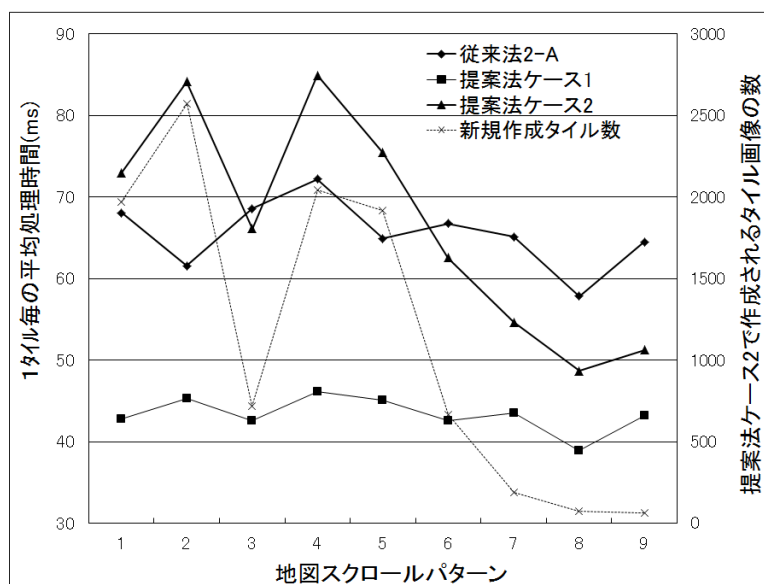


図 3-14 地図スクロール操作に伴う処理時間の変化

次に図形編集に関する評価について述べる．図形編集プロセスを実装し，提案法の有効性について検証する．

まずクライアントにてレイヤ及び検索範囲から検索条件を作成し，サーバに送信する．この検索条件をもとに，サーバで地図データから図形検索を実施し，該当する図形一覧をクライアントに返信する．クライアントはこの図形一覧から編集対象図形をひとつ選択し，編集処理を行う．図形が有する幾何は，図形を構成する頂点上に配置された矩形を操作することで実現し，また描画設定は線種，色などを設定するパネルを操作することで実現する．

図形編集処理イベントを非同期通信処理することで，クライアントはサーバレスポンスを待たずに別の地図操作を行うことが可能となった．また図形描画にブラウザのベクトル描画機能を使用しないため，図形回転や拡大・縮小など複雑な図形操作が容易に行えることが確認できた．クライアントにおいて，例えば図形の面色変更や頂点追加などの図形編集を指示すると，瞬時にサーバが作成した編集後図形が受信でき表示される．一例として，サーバサイドで座標数 100 の塗りつぶしポリゴンを生成する時間は 100ms 以下であった．これより，リアルタイム性が確認され，ユーザストレスなしに図形編集を実現できることが検証された．

3.4. サーバにおける負荷分散の評価

本節では、3.2.3 で示したサーバにおける動的負荷分散と制御の評価について述べる。

本実験では、提案法におけるスケールアウトの効果を検証するため、市販地図を用いて、サーバ数を 1 台、2 台、4 台と変化させる実験を行った。次に、3.2.3 で示した従来手法である（1）ラウンドロビン、（2）静的重み付きラウンドロビン、（4）領域分割型負荷分散と本提案法との比較実験を行った。（3）リソース稼働監視型ラウンドロビンは、問題となる負荷増加時に恒常的に高くなるが見込まれる CPU やメモリの使用率を用いて処理サーバを割当てている。PC 間で差が出ず、実システムへの適用時には効果が出ないため、比較対象から外した。また、タイル画像生成にかかった実時間をもとに、処理時間見積もり式（3-1）を更新する提案法 2-B の有用性についても検証する。

図 3-15 に示すように、クライアントから GW に対してタイル画像生成（A）、タイル画像合成（B）のレイヤ処理を要求し、GW を経て処理サーバで作成したタイル画像をクライアントに返信するまでの時間を処理時間として評価を行う。タイル画像生成（A）では、クライアントにおける任意縮尺での地図表示を想定した上記レイヤ制御方法 1 を対象とする。タイル画像合成（B）では、予め作成したレイヤ毎のタイル画像を用いる上記レイヤ制御方法 2 を対象とする。

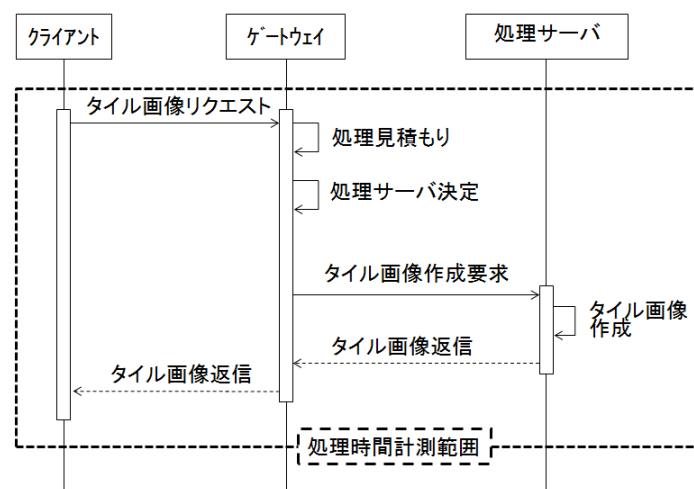


図 3-15 サーバにおけるタイル画像生成処理時間の計測範囲

また各手法におけるサーバ負荷分散効果を評価するため、多数のクライアントからの同時アクセスを擬似的に発生させる。今回の実験では、Web アプリケーションの負荷テストツールである JMeter[59]を用いた。GW と処理サーバとの通信には、処理サーバにおけるレイヤ処理結果のタイル画像をシリアルライズして GW に送信できる RMI (Remote Method Invocation) [60]を用いた。本実験では、上述の通り、従来法静的重み付きラウンドロビンと、サーバ処理負荷状況監視、処理負荷見積もりによる動的負荷分散を行う提案法 1-B との比較を行う。

地図データには、地方都市（面積約 40km²、人口約 17 万人）の市販地図を用いた。クライアントは縦横 250 ピクセルのタイル画像 16 枚を GW に要求する（表示エリアは縦横 1,000 ピクセルを想定）。本実験では、作成対象図形数、合成レイヤ数を変化させるため、表示レイヤを 1～10 個の間で変化させた。各レイヤの表示/非表示や表示地域については、ランダム関数を用い偏りが生じないようにした。本実験では、表示縮尺は固定としたが、リクエストの一部は上記レイヤ制御方法 1 を想定し画像生成（A）にて描画する。表示範囲を変化させる事により図形数の異なる地域が表示対象となるため、表示縮尺を変更するのと同じ効果がある。また、全ての処理サーバには、地図データキャッシュや地図データ先読み機能を有する同一の GIS エンジンを実インストールして使用した。

タイル画像生成（レイヤ制御方法 1 による任意縮尺表示）40%、タイル画像合成（レイヤ制御方法 2 による固定縮尺）60%とした。これは Ajax-GIS が高速に地図表示することの特徴としており、実利用を想定した場合、固定縮尺による地図表示の方が使用頻度は高いと考えたためである。なお、あらかじめこの比率を変えて実験を行ったが、後述する結論に変化がないことを確認済みである。実験では、JMeter を用いてクライアントから GW への処理負荷（1 分間に要求するリクエストの数）を変化させながら、処理サーバにおけるレイヤ処理時間との関係を把握する。表 3-5 に本実験で使用した GW、処理サーバのハードウェア環境を示す。本実験では、処理サーバ数を 4 台とし、従来の静的重み付きラウンドロビンと提案法 1-B との性能差を検証する。さらに、タイル画像生成の実処理時間を元に見積もり式を更新する提案法 2-B についても検証を行う。

表 3-5 動的負荷分散の評価に用いたハードウェア環境

	GW	処理サーバ 1	処理サーバ 2	処理サーバ 3	処理サーバ 4
CPU	Intel Xeon 3.00GHz	Intel Core i7 Extreme 3.34GHz	Intel Core i7 3.07GHz	Intel Core i7 3.20GHz	Intel Core i5 3.33GHz
RAM	16GB	12GB	4GB	4GB	4GB
OS	Windows 2003 Server	Windows 7	Windows XP SP3	Windows XP SP3	Windows XP SP3

本実験で算出した処理サーバ毎のタイル画像生成（A）、タイル画像合成（B）の処理時間の見積もり式(3-1)、式(3-4)、処理サーバ毎の重み付き係数を表 3-6 に示す。この重み付き係数は、実験で使用したデータの平均値（タイル画像生成対象の平均図形数 6,325、タイル画像合成対象平均レイヤ数 5.5）をそれぞれ代入し、さらにレイヤ処理比率（タイル画像生成 40%、タイル画像合成 60%）を乗算して算出している（ $Ct \times 0.4 + Mt \times 0.6$ ）。これより、重み付け係数が小さいほど、与えられたレイヤ処理を短時間で処理できるため、処理性能が高いと判断する。本実験では、処理サーバ 1 が最も高性能であった。静的重み付きラウンドロビンでは、本係数の逆数をリクエストの分散比率とし、処理負荷分散を行っている。

先ず、提案法によるスケールアウトの効果を検証するため、処理サーバ数を 1 台、2 台、4 台と増やした場合における実験結果を図 3-16 に示す。実験は提案法 1-B で実施した。処理サーバが 1 台の場合は、処理負荷 300 程度で過負荷状態になってしまうが、処理サーバを 2 台、4 台と増やすことでより高負荷処理にも耐えられることが分かる。これより、提案法のスケールアウト効果が確認できる。

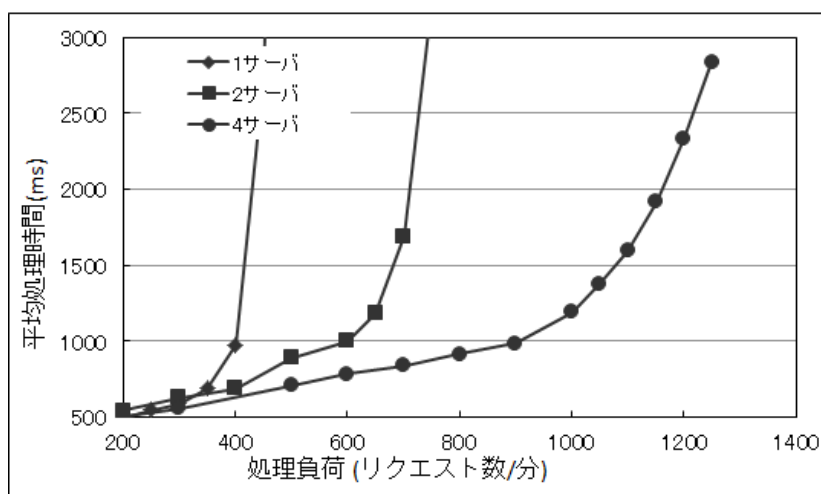


図 3-16 処理サーバ数と処理時間の関係

表 3-6 処理サーバ毎の重み付き係数

処理サーバ	タイル画像生成	タイル画像合成	重み付き係数
1	$Ct = 0.07 \cdot Fc + 411.0$	$Mt = 35.4 \cdot Lc + 75.5$	504
2	$Ct = 0.09 \cdot Fc + 479.4$	$Mt = 34.1 \cdot Lc + 133.4$	612
3	$Ct = 0.07 \cdot Fc + 409.5$	$Mt = 39.8 \cdot Lc + 116.2$	533
4	$Ct = 0.11 \cdot Fc + 803.4$	$Mt = 67.3 \cdot Lc + 328.1$	1,019

次に、従来法であるラウンドロビン、静的重み付きラウンドロビン、領域分割型負荷分散の3手法と、提案法との比較を行った結果を図 3-17 に示す。本実験では、いずれも処理サーバ 4 台を用いている。領域分割型負荷分散は、ある領域のタイル画像生成が集中した場合、負荷分散されず処理時間が増加してしまう。また、ラウンドロビン方式では、処理負荷 600 を超えると過負荷状態となったが、静的重み付きラウンドロビン方式では処理負荷 1,000 程度までは遅延なく処理できていることが分かる。サーバ処理負荷を監視し、処理サーバに割り当てる処理を見積もることで処理負荷の平準化を図る提案法 1-B と、静的重み付きラウンドロビンと比較すると、処理負荷 900 を超えた辺りから性能差が見られる。提案法 1-B では、処理負荷が高まり、特定サーバに処理負荷が集中することを防ぐ効果があるため、静的重み付きラウンドロビンに比べ最大 15% 平均処理時間が短くなっている。

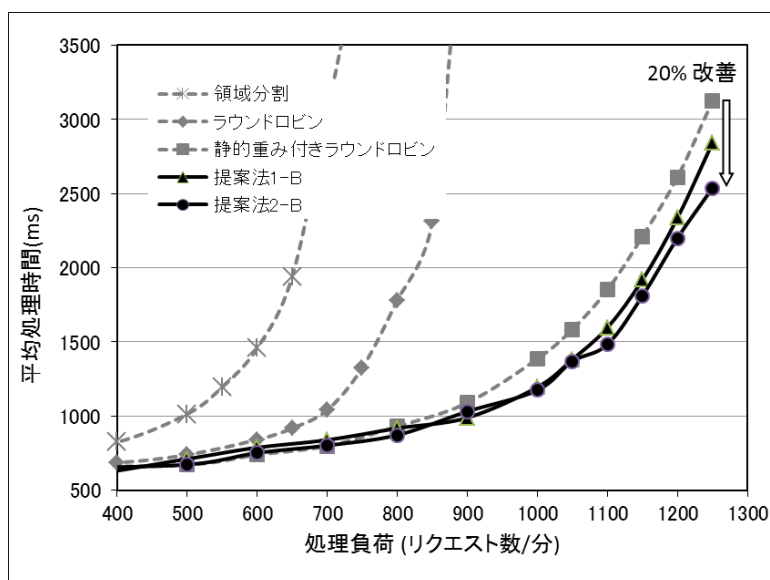
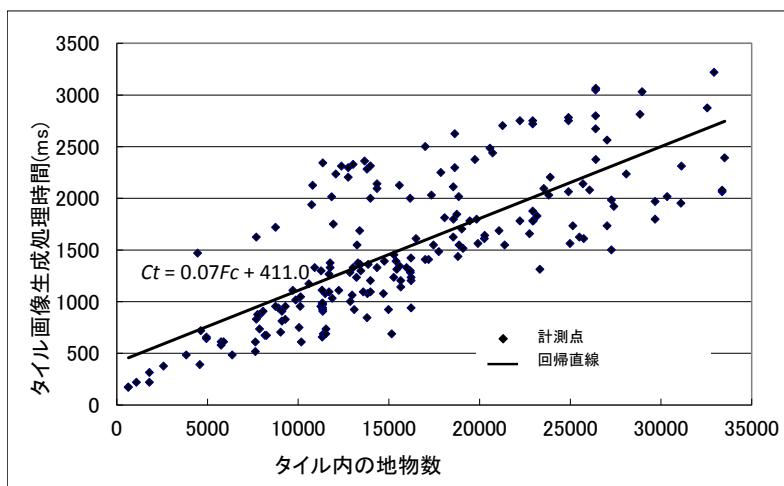


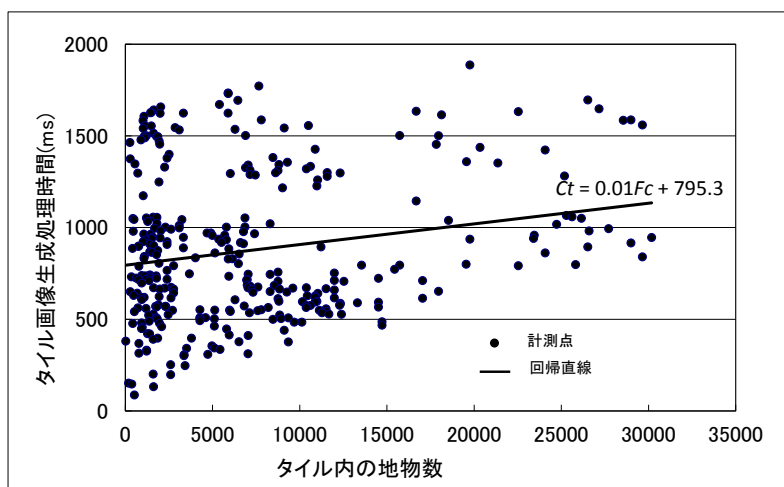
図 3-17 従来法と提案法との処理時間の比較

提案法 2-B では、タイル画像生成時における GIS エンジンの特徴（地図データキャッシュ、地図データ先読みなど）を考慮し、実際のタイル画像生成時にかかった処理時間と当該タイル内図形数との関係からタイル画像生成時間の見積もり式を動的生成している。実用上で時間短縮が切望される高負荷時、負荷 1,000 ぐらいから効果が現れ、提案法 1-B に比べ概ね 10%（静的重み付きラウンドロビンに比べ 20%）処理時間を短縮した。本実験で使用した GIS エンジンは、地図画像生成に使用する地図データをキャッシュする機能を備えており、実運用では当機能が有効に働くため、地図画像生成（A）の見積もり式（3-1）の随時更新する提案法 2-B が有効であった。図 3-18 に処理サーバ 1 における図形数と地図画像生成時間から算出した見積もり式を示す。図 3-18(a)は予備実験で求めた地図画像生成（A）の見積もり式（決定係数 0.6）で、地図データキャッシュなどが機能していない状態で計測した。図 3-18(b)は上記機能を有効にして処理を行い、その結果を基に更新した見積

もり式である（決定係数 0.2）。この傾向は、他処理サーバについても同様である。提案法 2-B は、見積もり式をサーバや GIS エンジンに適合したものに修正していくことになるので、それらの性能が未知の場合や更新した場合にも、適切な負荷分散を得られるようになる。



(a) 予備実験で求めた地図画像生成の見積もり式



(b) 提案法 2-B の結果を基に更新した地図画像生成の見積もり式

図 3-18 処理サーバにおける図形数と地図画像生成時間の関係

次に提案法 2-B において、表 3-6 に示した予備実験結果を用いず、全処理サーバを同一の見積もり式から開始した結果を示す。レイヤ処理のリクエスト数と処理時間の関係について、提案法 1-B, 2-B の実験結果を図 3-19 に示す。この実験では、図 3-17 の実験結果

をもとに、過負荷とならず処理を分散可能な処理負荷として毎分 1,100 のリクエストを与え続けている。横軸は累積の負荷(リクエスト数の累積値)であり、時刻に相当する。図 3-19 では、各時点で直前の 200 リクエストの平均処理時間をプロットしている。なお、提案法 1-B では表 3-6 の予備実験結果を更新せずに用いており、提案法 2-B ではタイル画像生成 (A)、タイル画像合成 (B) の見積もり式を、同一の初期見積もり式からリクエスト数 100 回毎に更新している。レイヤ処理のリクエスト数の累積値が 300 と少ない場合は、生成した見積もり式の精度が低いため、提案法 1-B の方が優位である。しかし、リクエスト数が増え、各見積もり式が修正されていくと、提案法 2-B は提案法 1-B に比べ約 10%処理が高速化した。

なお、双方グラフの左側が低いのは、実験開始時にサーバにリクエストが溜まっていなかったためである。また、グラフが上下するのは、表示地域をランダムに指定していて、描画図形数などにばらつきがあることに起因する。

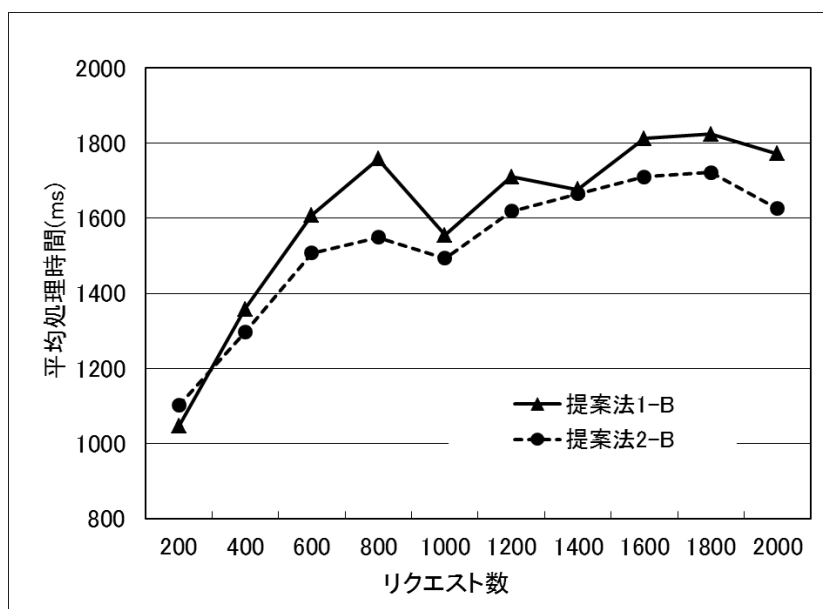


図 3-19 提案法におけるレイヤ処理のリクエスト数と処理時間の関係

以上より、提案法 1-B、2-B がクライアントへの応答時間の短縮に効果的であることが検証された。特に提案法 2-B は、事前に見積もり式や処理サーバ性能を算出する必要がないため、スケールアウトやサーバ移行などのシステム再構築に有効である。また、3.1.1 にサーバにおけるタイル画像を地図画像データベースに保管し、再利用するレイヤ制御方式を示した。再度同じリクエストが来た場合、保管されたこのタイル画像を再利用することで、タイル画像生成 (A)、タイル画像合成 (B) の処理数が少なくなる。しかし、再利用するタイル画像がない場合においては、クライアントに返信するタイル画像を生成する必要があり、その場合は本提案法のアプローチを適用することが可能である。

3.5. まとめ

本章では、現在一般的に利用されている Ajax-GIS のシステム面での課題に対して、サーバサイドレンダリングを用いたクライアント側におけるレイヤ制御および図形編集の実現について示した。また、これら機能を実現する上で懸念されるサーバ側における処理負荷に対しては、動的負荷分散および制御による解決手法を提案した。

レイヤ制御では、レイヤ毎にキャッシュしたタイル画像を、クライアントから送信される表示レイヤ情報に従い、サーバサイドで合成処理する手法を提案した。実データを用いた評価実験では、地図システム稼働時においては、キャッシュされたタイル画像が少なく新規にタイル画像生成処理する必要があるため、処理時間を要するものの、キャッシュされるタイル画像数が増えるにつれ、従来法より高速となることを確認した。

また図形編集では、図形編集処理イベントプロトコルを定義し、サーバはこれを解釈して編集結果を画像データとしてクライアントに返信する手法を提案した。評価実験では、クライアントで実施した座標移動、描画変更などの図形編集がサーバでリアルタイムに画像化され、クライアントに送信されることを確認した。これよりクライアント環境に依存せずに図形編集が実現できる。

サーバ側における処理負荷については、処理サーバの負荷状態の監視、タイル画像生成、タイル画像合成など GIS 特有の処理についての処理負荷見積もりを考慮した動的負荷分散を行うことで、従来法よりもクライアントへの応答時間が 15%短縮することを確認した。さらに、処理負荷見積もりを実運用時に見直す手法を適用することで、さらに処理性能が向上することが検証できた（従来法に比べ 20%処理時間短縮）。

以上のように、本章では GIS を構成するシステム側の課題について解決策を提案し、その効果を実証した。次章以降では、GIS を利用するユーザ側の課題の解決方法を提案する。

4. 空間認知と地図検索

これまで述べたとおり，近年普及している Ajax-GIS においてもサーバサイドレンダリングを用いることで高度な地図機能の実現が可能となってきた．このように地図システムを利用する環境や機能が向上しても，それを利用するユーザがうまく地図を使いこなせないケースが見られる．本論文の後半では，地図システムの中でも使用頻度の高い地図検索に焦点を当て，人の空間認知の観点を踏まえながら論じる．

本章では，5 章，6 章で示す空間認知に基づく地図検索を述べるために，空間認知と地図検索の概要について説明する．本論文における空間認知とは，David の定義[61]を参考に，自分が今どこにいるのかを認識し，また目的地へ向かう経路を空間環境から認識することと定義する．また地図検索とは，ユーザが入力した情報から目的地の地域や地点を地図上に示すことと定義する．

4.1. 地図の読解

2000 年以降，インターネットを使った GoogleMaps 等の地図サービスが無償公開され，地図の利用機会が増えたが，それをうまく活用できない人は少なくない．その原因のひとつに，地図を読解（以下，「読図」）する能力が関係する．読図には，空間をイメージする能力，さらに実際の風景や地形と地図とを照合する経験が必要である．

一般的な地図は，地形や地表に存在する地物の位置関係を，地図座標（緯度経度や平面直角座標系）を用いて平面上に表現し，利用しやすいように一定の縮尺で表現したものである．様々な種類の地物に関する情報を空間的な広がりの中で俯瞰できるため，一般的には具体的で理解しやすいと考えられがちである．しかし，ほとんどのユーザにとっては，目前に見えるストリートビューとしての風景を上空からの視点（鳥瞰図型）に変換して理解する必要がある．そのような体験は日常的には希少なため，高度に抽象的であり，理解は決して容易ではないと言える．

このような読図に関連して Shemyakin は，人の空間認知方法を「サーベイマップ型認知」と「ルートマップ型認知」の 2 つに大別した[62]．上述した鳥瞰図型地図とストリートビュー的空間認識は，それぞれが人の 2 種類の空間認識方法であるサーベイマップ型認知とルートマップ型認知に対応している[63][64]．

サーベイマップ型認知（以下「サーベイマップ」）とは，鳥瞰的に地形や街並みを上空から平面的に捉えた空間認知のことであり，自宅と最寄り駅や小学校などの地物との位置関係や距離感などを理解し易いという特徴がある．しかし，実際に自分の目で鳥瞰図的に地表を見下ろす体験は限られていることから，バーチャルな世界であると言える．通常は地図やイメージマップのような絵（図）として視覚的に表現される．

一方，ルートマップ型認知（以下「ルートマップ」）とは，あるルートを頭の中で移動する時に浮かぶ風景や特徴的な建物などの系列から構成されている空間認知方法である．例

例えば自分の家から駅までの経路について、家を出て左に曲がると小さな四辻があるので、そこを右に曲がると高校が見える、などの視覚イメージの系列を中心として、音（神社で鳥の声が聞こえる、など）、臭覚（ケーキ店から甘い匂いが漂う、など）、体感（坂道がきつい、など）からなるエピソード記憶[65]や体感記憶を含む。これらの知覚内容については、視点（目の高さ）、興味の対象、歩行速度なども関係し、極めて個人的な空間認識であると言える。ルートマップのもうひとつの特徴は、ことばによる表現が比較的容易な点である。移動の経験は、「家を出たら右に曲がる」、「まっすぐ行って、コンビニの手前を左に曲がる」などと時系列的な行動として表現できる。また進む、曲がるなどの特定の行動をとるべき場所についても、「右に赤い屋根の家が見えたら・・・」、「左に森を見ながら・・・」などのように、五感、特に視覚をベースにことばで表現できる。

前述したように、ほとんどの人にとって日常的な移動は、ルートマップに基づいて行われている。そのため読図には、ルートマップとサーベイマップとを対応づける能力が必要とされる。この対応付けをうまく行えない人が方向音痴と言われている[66]。しかし両者を関連付ける作業は、方向音痴でない人にとっても必ずしも容易ではない。Hart らは、人の発達時期と空間認識との関係を論じている[67]。それをベースとしてルートマップからサーベイマップへの移行過程を実証的に検討した研究がある[68]。そこでは、小学生 1～4 年生に手描き地図を描かせて地図の変化を見たところ、小学校 2 年次まではルートマップが卓越し、3 年次にサーベイマップに移行し、4 年次になると移動系列にあるランドマークをサーベイマップに再体制化が進むといった結果が得られている。また寺本ら[69]は、愛知県春日井市において小学生を対象に日常の遊び場の広がりや空間認知との関係を調査した結果、小学生 3～4 年生になると、遊び空間とともに認知空間も急速に拡大すると述べている。これらの研究は、小学生 3～4 年生の時期に空間認知が大きく変化することを指摘している。日本の学校教育では、小学校で基礎的な地図学習が導入されるが、それ以後は体系化された地図利用教育は行われていない。そのため、成人後も地図の利用が苦手な人は少なくない。方向音痴の原因のひとつは、目の前の風景（ルートマップ）と地図（サーベイマップ）との照合能力にあると考えられている。この能力は、現代社会においては「当然有する能力」と考えられているため、方向音痴の人の多くは、自分が方向音痴であることを恥ずかしく思い、そのことを隠す傾向にある。しかし上記のように、目の前の風景と地図を照合するという行為が極めて抽象的な作業であることを考えれば、地図利用能力は教育を通じて後天的に獲得されるべき能力であり、当然のようにこの技術に長けていない人は少なからず存在すると言える。身近な例をあげると、読図能力の高い人は、地図の方角と自分の向いている方向を脳内で一致させることができるが、方向音痴の人は移動する方向に合わせて地図を回転させながら進む。このような方向判断の遅れや間違いを、心理学や認知心理学では、整列効果と呼ぶ[66]。地図を読めない人が少なくない状況を前提とするならば、地図を地物や地形の整理用の表現形式として採用しつつも、少なくとも利用場面でのユーザインタフェースとしては、日常的な経験をベースとしたものが提供されるべきであり、そ

のようなユーザインタフェースへのニーズは決して小さなものではないと思われる。

また Lobben は、読図に関連する能力として下記の 5 つを挙げている[70]。

- ① 地図回転 (map rotation) : 方向転換時に、地図を回転させるか、頭の中の地図 (後述の認知地図) を回転させるかの能力。
- ② 場所認知 (place recognition) : 地図を見ながら、その先に何があるかを予測・認識する能力。
- ③ 現在地認知 (self-location) : 自分の位置を地図から認識する能力。
- ④ ルート記憶 (route memory) : ルートを地図から記憶する能力。
- ⑤ 方向認識 (wayfinding) : どの方向に進めば目的地に到着できるかを理解する能力。

上記からは、サーベイマップを使っても、ルートマップを使っても、いずれにしても現在自分がいる場所と、それらの地図を対応づける能力が必要であることがわかる。読図能力は、地図 (ルートマップの場合は方向) というシンボルと目の前の風景とのマッチング能力であることが再確認できる。

Google は 2007 年に地図と目の前の風景とのマッチングを地図サービスとして、特定の地点から見える風景を写真で示す「ストリートビュー」をアメリカで公開した。日本では 2008 年からサービスが開始された。ストリートビューは、自動車の屋根に設置された全天球カメラで街の風景を撮影すると同時に、GPS で撮影位置などの情報を取得し、それらをインターネット上で閲覧可能とするルートマップ型サービスである。ところがストリートビューを利用するためには、サーベイマップから該当場所を検索し、人型アイコンを地図中の該当場所に (顔の向く方向も考慮して) 置く必要がある。これでは、ルートマップとしてのストリートビューの特性を活かすことが難しい。

以上のように、GIS は一般的にサーベイマップ型システムであり、その利用にはある程度の読図スキルが必要である。すなわち、ルートマップからサーベイマップを再構成し、調べたい場所を地図中に探す必要がある。

4.2. 認知地図の概要

ある場所に関して、人が頭の中で描いている空間イメージを認知地図 **mental map** と呼ぶ [71]。認知地図は、1948 年に心理学者 E.C.Tolman が最初に提唱した概念であり、人々が体験に基づくルートマップをどのようにサーベイマップとして頭の中で表現しているのかを表すものであり、サーベイマップの地図検索方式における認知科学的ベースとなっている。すなわち、サーベイマップの地図検索を行うときに人々は、自分の認知地図と表示されたサーベイマップを照合させて該当箇所を検索していると考えられている。

認知地図に関する研究は、心理学と地理学の分野で活発に行われている。心理学からのアプローチでは、「どのようにして認知地図が形成されてきたのか」という人の成長過程に着目した研究が多い。例えば村越ら [72] は、ある空間に存在する様々な要素（地物）のうちの何を強く意識して認知地図として記憶するかは、人の年齢、性別、趣向、さらには時代によっても変化すると述べている。一方、地理学では「どのような認知地図を持っているのか」という認知地図を構成する要素についての研究が多い。

本論文では 5 章、6 章において、地理学的アプローチによる認知地図をベースとした地図検索方法を提案する。認知地図を扱う上では、地物間の位置関係の歪みや空間イメージを構成する認知要素、またどのような認知要素が認知地図において意識されやすいのか、は重要な視点である。以下では、それらについて整理する。

4.2.1. 認知地図の歪み

認知地図は認知操作によってルートマップからサーベイマップに変換されたものである。人の目線で建物や施設などの地物の系列を捉えた空間イメージを平面上に置き換えているため、その形成過程において歪みが生じる [73]。実際の距離と人が認知している距離感（認知距離） [74]、地物間の位置関係のずれが歪みの例である。

認知地図の歪みに関する研究の一例としては、若林らの歪みの計測に関する研究 [75] などが挙げられる。若林はその研究内で示した歪みの計測方法を用いて、札幌における大学生の認知地図の歪みについて計量的分析をしたところ、札幌における格子状街路の影響により認知地図と実際の地図との歪みが比較的小さいことを明らかにしている。さらに若林は、認知地図の歪みを、認知地図と現実地図とを重ねた時のずれである「絶対的歪み」と、平行移動・回転・伸縮を加えて相似変換（ヘルマート変換）した後に残ったずれである「相対的歪み」に大別している。絶対的歪みでは、認知地図におけるある 1 点を基準点として中心に据えた場合、遠方になるほど現実の地図とのずれも大きくなる傾向がある。一方相対的歪みでは、絶対的歪みとは性質が異なり、場所間の相対的距離は周辺部ほど過小評価され、中心部ほど過大評価される。また若林が行った実証的研究によると、認知地図における個々の地物の絶対的位置関係は不正確であっても、相対的位置関係の理解度は高いことが分かっている。このことから、認知地図における個々の地物間の詳細な距離や方角が曖昧あるいは不正確でも、それらの相対的位置関係は保たれていると言える。人の

認知地図には大きな絶対的歪みは存在する．しかし実際に街中を移動する際には，この絶対的歪みを除去し，相対的位置関係を手掛かりにしている．例えば，現実の地図の道路形状や距離感を簡略化したデフォルメ地図を使って，場所を把握することができる．デフォルメ地図は，経路に関係のない情報は削除されており，特徴的な道路やランドマークが論理的・位相的な関係が保たれ，なおかつ文字による案内文が付記されているため，絶対的歪みを有していても経路を理解することができる．

このように認知地図の歪みに関し，個々の構成要素の絶対的位置関係は不正確であっても，相対的位置関係が比較的に保たれていれば空間を認知することが可能である．本論文では，5章にてこの空間認知の特徴を利用した地図検索方法について提案する．

4.2.2. 認知地図を構成する認知要素

Kevin Lynch[76]は，人々が認知する都市の空間イメージの構成要素として，表 4-1 に示す 5 つを挙げ，都市を構成する地物の物理的な特徴を抽象化して整理することで，簡略化した形で認知地図をモデル化している．

表 4-1 空間イメージの認知要素

要素	種別	定義	地物の例
ノード	点	都市内部にある主要な地点	広場，駅，交差点など
ランドマーク	点	外部から見た場合の目印となるもの	建物，モニュメントなど
パス	線	人が通ることのできる道筋	道路，鉄道，川など
エッジ	線	同質の連続領域を分ける境界	海岸，行政界など
ディストリクト	面	同質の特徴がある地域	大規模公園，砂漠など

特定の空間に対して人々が持つ空間イメージは，これらの 5 つの要素で構成されており，それがパブリック・イメージとして人々の中に浸透する．以下，詳細に説明する．

図 4-1 は表 4-1 の 5 つの認知要素をイメージ化した図である．このように都市の物理的な形態を単純化することにより，人が持つ空間イメージを表現することが可能となる．

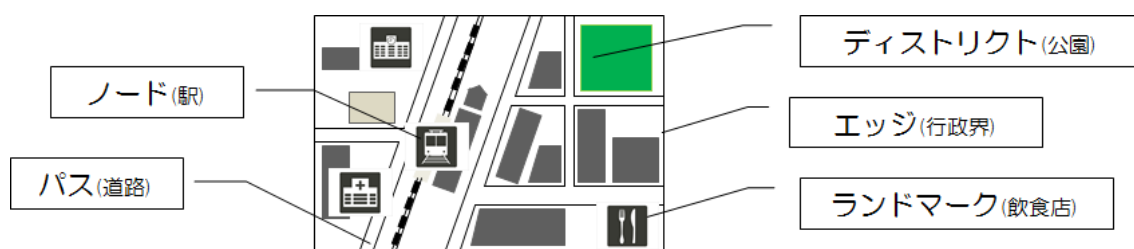


図 4-1 認知要素のイメージ

- 1) ノード (Node) : 都市内部にある主要な地点をいい、後述するパスの結節点をいう。例えば、広場や駅、交差点などが該当する。
- 2) ランドマーク (Landmark) : 空間の中で際立った特徴を持った地物であり、空間内を探索する場合の目印になるものをいう。例えば、歴史的建物やモニュメントなどである。
- 3) パス (Path) : 人が通ることのできる道筋であり、他の要素どうしを関連付ける役割を持つ。例えば、道路、鉄道、河川などである。
- 4) エッジ (Edge) : 同質の連続領域を分ける境界である。パスと同じ線状であるが、通路としての役割はない。例えば、海岸線や行政界などである。
- 5) ディストリクト (District) : 同質の特徴がある空間的な広がりを持つものである。例えば、大規模公園や砂漠、オフィス街などが該当する。

また Lynch は、空間を構成する要素の種類や配置に着目して、都市の「イメージしやすさ (Image Ability)」について、「わかりやすさ (Legibility)」、「見えやすさ (Visibility)」の観点から言及している。

- わかりやすさ (Legibility) : 都市の空間イメージをつくり上げる上で重要であり、地域、道路、ランドマーク (目印) がわかりやすい都市を構成するための要素であるとしている。
- 見えやすさ (Visibility) : 都市の各構成要素が周囲から見て認識しやすいかどうかを示す。

4.2.3. 都市空間における注視対象

日常生活の中で、人々が空間をどのように記憶し、理解しているかという視点は、地図システムが曖昧な場所の検索や思い出の場所の検索を支援する上で重要である。人は視覚が捉えた対象物の色や形などから、その意味を理解している。人が外界で移動する場合には、そこに存在する建物や自然物など様々な対象物を手掛かりにして自分の位置 (自位置) を認識し、目的地までの経路を導き出している。その時に注目する対象物は、周囲や背景と比較して目立つ特徴を有し、場所を探す時の目印となるものである。この目印が 4.2.2 で示した空間イメージ中にあるランドマークである。ランドマークは、自位置と地図上の位置とを関連付けるために用いられ、移動や空間の記憶にとって重要な要素である。ランドマークという概念は Lynch が定義して以降、様々な研究者が引用し、また独自の視点を加えて再定義している。本論文においてはそれらを考慮し、ランドマークを「地図上に点で表現され、都市空間内で周囲や背景との対比の中で認知度や視認性が高い地物」と定義する。以下、都市空間におけるランドマークの視認性や注視傾向に関する研究を俯瞰する。

Raubal[77]は、ランドマークの関心要素を視覚、意味性、構造の 3 つに分類し、それぞれに付随する属性について明示している（表 4-2）。視覚要素には、ランドマークを正面から見た時の面積、幅や高さなども考慮した形状、色、任意の地点からの見えやすさ、その他として材質や状態などを挙げている。意味性とは、ランドマークが文化的・歴史的に重要性を持っているか、看板やマークなどの目印としての機能を持っているかを意味する。以上の 2 要素は、ランドマークが周囲や背景との対比によって目立つかを判断するための要素である。構造要素は、ランドマークが交差点や駅などの交通結節点に位置しているのか、行政界などの境界内に位置しているのか、などが挙げられる。

表 4-2 ランドマークの関心要素[77]

要素	定義	具体例
視覚	見た目の特徴	建物の正面面積、形、色、見えやすさ、材質、状態など
意味性	魅了する意味的要素	文化的・歴史的な意味合い有無、看板、マークなど
構造	構造要因	交差点や駅など交通結節点との位置関係、行政界などの境界との位置関係など

ランドマークが都市空間内で目立つ要因として中澤[78]は、「種類別要因」、「空間的要因」、「環境要因」の 3 つを挙げている。種類別要因は、ランドマークの種類（コンビニ、銀行、飲食店など）を示す。例えば、人に道を伝える場合や認知地図を描く場合において、この種類別要因はランドマークを識別する上で重要な意味を持つ。空間的要因は大きさや形状を示す。大きさについては、自位置から遠くにあるランドマークの場合、象徴的なタワーのように、遠方であっても高いものに関しては目立つ傾向にある。また形状については、典型的な形状の建物よりも特徴的な形状や色の建物の方が目立つ。環境要因は採光やランドマークが接する道路幅を示す。以上 3 つの要因を表 4-3 に示す。これらは、ランドマークとしての認知のしやすさの要因として重要であり、例えば歩行者の移動を支援するための案内地図を作成する場合などで役立つ。

表 4-3 ランドマークが都市空間内で目立つ要因[78]

要因	定義	具体例
種類別要因	人が認知しやすいランドマークの種類	コンビニ、銀行など
空間的要因	視対象の物理的な要因	大きさ、形状
環境要因	空間の状態を決定する物理的な要因	人口照明、採光、空間の大きさ

古賀らは、ディスプレイに表示された東京の市街地の景観画像を用いて注視傾向の実験を行った。濃度の濃い看板に注視点が集中する傾向が見られ、注視行動と彩度に相関があることを示した[79]。また中村らは、街路空間において色やファサード面積などの建物の特徴とランドマークの目立つ要因との関係を定量的に評価した[80]。例えば、建物のファサード面積が大きいものが目立ちやすい傾向にあることが示されている。

以上のように、空間内で注視する対象は、人の関心要素や周辺との対比などによってある一定の傾向は見られるものの、個人差や空間の特徴によって注視対象は異なることが分かる。本論文ではこうした特徴を考慮し、空間イメージを検索条件とした地図検索について5章、6章で提案する。

4.3. 地図検索

近年、パソコンやモバイル端末が普及し、インターネットを通じて地図を利用する機会が増えている。その際よく使われる機能が地図検索であろう。例えば、観光地を訪れ昼食場所を探す時や友人との待ち合わせ場所を確認する場合など、様々な場面で地図検索を利用する。しかし、目的地となる場所を探す際、そのためにこういった情報を検索キーとして指定すればよいかわからないことがある。また、地図を読める人たちは、地名や施設名称がわかれば、その場所の地図を検索できるが、一方で地図を読めない人たちは一般的に、地名や施設名称への関心が低く、それらを覚えていないことが多い[81]。彼らが覚えていることは、「コンビニがあった」、「学校があった」などの一般的な施設分類のレベルであり、これらから検索できる支援方法が必要となる。地図を読める人たちも、昔に訪れた思い出の土地については、具体的な地名や施設名称についてはうろ覚えであり、地図を読めない人たちと同じような状況にあると考えられる。エンビングハウスの忘却曲線に見るように、人の記憶は時間とともに失われていくのである。しかしこの状況下でも特定の場所を検索したいことがある。例えば、過去に観光で訪れた場所や思い出の場所などの曖昧な記憶に基づいて検索するような場合である。過去に訪問した場所に関する当時の出来事や思い出を回想することで、これまでの自分自身の経験等を再認識することができると言われている。実際に東日本大震災で被害を受けた地域では、街の復元模型を作成し、そこに街の思い出を記入することで、街とそこに住む人々の記憶を残す取り組みが行われている[82]。このためには、思い出が該当する場所を検索できなければならない。

本節では、既存の地図検索方法について概観し、それらの課題について述べる。

4.3.1. 地図検索の種類

前述した通り、本論文では、ユーザが入力した情報から目的地の地域や地点を地図上に示すことを地図検索と呼ぶ。本節では、新たな地図検索方式の提案を行うに当たり、既存の地図検索手法について説明し、両者の違いを明らかにする。

地図検索で最も使用頻度の高い方法のひとつとして「キーワード検索」がある[83]。この

方法は、ユーザが想起した空間イメージを住所や施設名称などの検索キーワードに変換し、それを文字や音声を媒介して地図検索を行っている。空間データベースには、これらキーワードに対する位置情報が管理されている。キーワードには、住所、地名、駅名、道路、建物名、ランドマーク、電話番号など、位置情報を文字情報に置き換えたものを使用する。システムは、ユーザが入力したキーワードを元に、空間データベースで管理されている情報を検索することで、該当する場所の地図を検索することができる。

カテゴリ検索は、キーワードをカテゴリ毎に分類し、そのカテゴリを元に地図検索する方法である[83]。例えば、カテゴリに「ファミリーレストラン」を指定すると、検索範囲内に存在するファミリーレストランの一覧を検索することができる。

ブラウジング検索は、GIS の特徴である地図の拡大・縮小、スクロールを行い、地理的な条件を自由に変えながら目的の情報を検索する方法である[84]。上記カテゴリ検索と組み合わせられて利用されるケースが多い。例えば、カテゴリを指定し、それに該当するものが表示されている地図範囲内に含まれている場合には、別の画面領域にその結果が表示される。

例示検索 (Query by example) は、自分がよく知っている情報の中で検索した結果をもとに、別の場所においてそれが適合する例をユーザに提示する検索手法である[85]。この検索は、よく知っている地域の例を与えることで、あまり知らない地域の地理オブジェクトを検索することができるため、検索対象地域に関する事前知識を必要としないことが特徴である。

またその他の検索方法として、地理的な意味を持った単語 (ジオワード geo-words) 同士に関連性を分析し、検索キーワードの推薦を行う手法もある[86]。

一方、ユーザに認知地図を描かせ、それと地図とを照合して場所を検索する手法がある。その一例として、ユーザに手描き地図を描画させる「Spatial Query by Sketch」[87]がある。Spatial Query by Sketch は、手描きした地物の図形から幾何的な位置関係 (トポロジー) を抽出し、それを元に地図データが格納された空間データベース (空間 DB) への地図検索クエリ (SQL コマンド) を作成し、地図検索する。Spatial Query by Sketch の特徴は、手描き地図を検索の入力条件としている点にある。ペンタブレットを使った手描きイメージを図 4-2 に示す。このような手描き地図と地図データを照合し、街区や公園など面として与えられる地物が他とどのように交差しているか、施設など点として与えられる地物が、道路など線として与えられる地物の同じ側か反対側にあるか、が検索に用いられている。つまり、ある地物から見て他の地物がどの方向にあり、それらがどのような位置関係にあるかを幾何学的に捉えて、ユークリッド空間上で数値的に計算する。適切な検索キーワードを思いつかない場合にも検索できる点が特徴である。

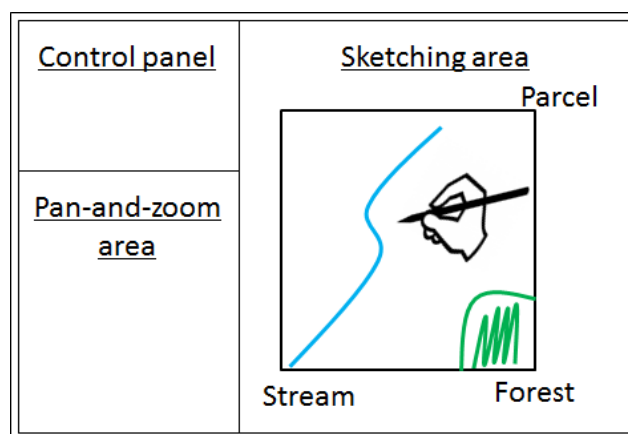


図 4-2 Spatial Query by Sketch による手描き地図例

Spatial Query by Sketch における手描きされた図形同士の幾何学的な位置関係については、9-Intersection model[88]を用いている。このモデルは、2つの図形の位置関係が外部、境界、内部のいずれに該当するかで判別している。この 9-Intersection model を拡張した研究としては、検索条件とする手描き地図を、「〇〇の中に存在する」(Overlapping 関係)、「〇〇の隣に存在する」(Adjoining 関係)、「〇〇の近くに存在する」(Neighboring 関係)の3種類に限定し、曖昧性を許容するように、幾何学的な演算を工夫した研究[89]や、ボロノイ図を用いることで2つの領域が離れていることを意味する Disjoint 関係を高度化する手法[90]、幾重にも重なる線形状、ドーナツ型に穴の空いた面など複雑な形状に対して、9-Intersection を適用する提案[91]などがなされている。しかしいずれも線や面などを入力条件とすることを前提としている。

表 4-4 に上で示した既存の地図検索手法についてまとめる。

表 4-4 既存の地図検索手法一覧

名称	特徴
キーワード検索	住所や施設名などの場所に関連したキーワードを用いた地図検索
カテゴリ検索	キーワードを上位概念で分類したカテゴリを用いた地図検索
ブラウジング検索	地図操作し表示範囲を変えながら目的の地図関連情報を検索
例示検索	ある場所に関連した検索結果からそれに似た場所を検索
手描き地図検索	手描きした地図と実地図を照合して、それに合う場所を検索

4.3.2. 地図検索の課題

本節では、4.3.1 で示した既存の地図検索に関する課題を述べる。

キーワードを用いた地図検索では、目的地がはっきりしており、検索キーワードが明確

に指定できる場合であれば、非常に有効な手法である。例えば、ある観光地に行き、自位置周辺のレストランを調べる場合、例えば「A 駅 レストラン」などのようなキーワードを入力することで、目的の地物（この場合、レストラン）を検索することが出来る。しかし、10 年以上前に訪れた場所や、訪れたことはないが人から聞いたことのある場所など、空間イメージが曖昧なために適切な検索キーワードを想起できない場合においては、この方法では当該場所を検索できない可能性がある。カテゴリ検索では、抽象的なレイヤを用いて検索できるが、対象が広くなりがちであり結果を絞り込むまでに労力を要する。ブラウジング検索は、試行錯誤的に地図を参照しながら目的の場所を探すため非効率である。このように一般的な地図検索では、空間イメージが曖昧な場合には、うまく検索できない可能性がある。

一方で、認知地図(空間イメージ)を具現化した手描き地図などを用いた地図検索(Spatial Query by Sketch など)の課題は、ユーザが頭の中でイメージした認知地図をサーベイマップとして正確に描かなければならないことにある。4.2 で示した通り、認知地図は主観的な要素に基づく各種の歪みを含んでいる。道路の形状や長さ、建物などの位置は、現実空間をデフォルメしたものとなる。例えば公園などの広がりを持つ地物では、ユーザがその鳥瞰的な形を把握していない場合がほとんどであるため描画が難しいが、この手法の場合にはそのようにして描かれた形や大きさが検索結果に与える影響が大きい。描画という行為そのものも、訓練が必要であり、すべてのユーザが簡単にできるものではなく、ユーザに精神的負担や時間的コストを要求する。また、地物間の位置関係についても、距離や方角などの具体的な要素が検索結果に与える影響が大きい。それらには主観的な歪みが含まれている。これらのことは、形や大きさや方角などが概略的で歪みを含む認知地図を、それらの要素が明確に表現される地図学的地図と直接的に比較しようとするものの問題点であると言える。表 4-5 に認知地図と地図学的地図との比較を示す。認知地図は、人のイメージに基づく知覚された世界であるために主観的な要素を多分に含んでおり、認知距離に個人差が見られるとともに、縮尺や方位は認知地図の部分間で不均一である。一方で地図学的地図は、現実的な世界を測量学に基づき客観的に計測し、それを数理的な距離に基づいて表現するため、縮尺や方位が正確に定まっている。そのため、人の手による手描き地図を用いた地図検索では、地図学的地図と比較するために認知地図の歪みが検索結果に大きな影響を与える。また、Spatial Query by Sketch では、実地図データを用いての検索結果の妥当性評価がなされていない。このため、この手法により手描き地図に対して実際どのような位置関係を有する地点が検索されたか、すなわち、ユーザが想起した地点が的確に検索されたかは不明であり、有効性を確認できない。

表 4-5 認知地図と地図学的地図の比較

認知地図	地図学的地図
主観的（個人的）	客観的（公共的）
非ユークリッド空間に表現（認知距離に個人差がある）	ユークリッド空間に表現（数理的な距離に基づく）
縮尺・方位は不均一	特定の縮尺と方位に基づく
人のイメージに基づく	測量に基づく
知覚された世界	現実的な世界

このように既存の地図検索手法では、ユーザが曖昧な空間イメージしか持たない場合の検索支援は困難であるといえる。そこで本論文では、キーワードや認知地図の描画を用いずに、人が頭の中で描いた情景（空間イメージ）をそのまま検索条件とした地図検索方式を提案する。

図 4-3 に、人の空間認識の分類と対応する地図検索方法を示す。人の空間認識の基本は日常的な移動経験である。①は移動経験、特に視覚的经验を中心とした空間認知で、ルートマップ的空間認知に相当する。この空間認知に基づく地図検索方式としては、見た風景に含まれる地物とその視野内での位置を検索キーとすることにより、該当する場所を検索するルートマップ型の地図検索が考えられる。②は具体的な移動経験から得られた地物間の相対的位置関係に基づく空間認知である。この方法は、ルートマップ的空間認知を通して想定する地物間の相対的かつ平面的な位置関係と実際の地図とを比較し、類似する地域の地図を提示するものである。③はある地域のイメージを元に描かれた手描き地図であり、②が詳細化されたもので、④の地図に近いが、位置関係が記憶の歪みや興味などによって影響される。このような手描き地図と実際の地図を対応づける方法として MapFan イラストマップサービス[92]が提供されている。手描き地図からその場所を検索する手法としては、前述した Spatial Query by Sketch がある。④は通常の地図学的地図（紙の地図や電子地図などのサーベイマップ）であり、上述したキーワードやカテゴリなどを用いて地図検索する。また図 4-3 下に示したように空間認知特性としては、①移動経験に基づく空間認知ほど直感的であり、④地図学的地図ほど現実空間を表現した具体的なものになる。



図 4-3 日常的移動経験に対する地図表現の分類

また空間を認知する認知負荷の観点で見た場合、④の紙の地図や電子地図は、前述した通り現実空間を抽象的に表現された情報を読み解く必要があるため、ユーザに大きな負荷を要求している。②の空間的イメージに基づいた地図検索方法の場合は、④の紙の地図や電子地図と比べれば、認知負荷が 2 ステップ分小さくできるが、見た風景から認知地図に変換するステップについてはユーザに委ねている。①と②は、言葉（キーワード）を用いずに抽象的に示された記号や図を用いて地図検索する。このように言葉（キーワード）を用いずに記号や図で地図検索を行う方法は、人の空間認知を直接検索に利用するという意味で効果的である。これを認知科学では、「図による推論 **diagrammatic reasoning**」[93]と読んでいる。図による推論は、非命題的な視覚情報に基づいた推論過程で、人工知能においても、その現実的場面への利用を研究する分野が存在する。図は必ずしも命題の別表現ではなく、図と命題は相補的な関係にある。人は、命題からしか得られない情報と、図からしか得られない情報の双方をうまく利用しているのである。一般的に、図による推論の特徴は以下のように整理できる。

- A) 図は概念を具体化する。電話で「大きさ」や「色」を表現することが難しいように、形、位置、色彩、大きさ、きめなどの視覚的情報は図で表現した方が理解しやすい。算盤経験者は算盤をイメージすることで計算が容易になるし、スポーツの指導もイメージ図があると理解しやすい。問題解決のための図は問題のイメージ表現であると言える。イメージはエピソード記憶（事例）の影響を受けるので、どれだけ豊富な「図の事例」を持っているかで効果的な問題解決が決まる。
- B) 図は情報を縮約し、同時に複数の情報をひとつの図として表現できる。例えば、部屋の絵は、室内の物のリストアップと配置を同時に表現できる。また、「図」と「地」を意識的に使用することで、見る者の注意を特定の図の要素に引き付けることで、1枚の図に複数の要素を盛り込むことができる。だまし絵はその例である。
- C) 図は概念間の橋渡しをする。特定の概念を表す図を見て、別の概念を想起することがある。設計において、初期のあいまいな図が豊かな発想を生むことが少なくないのは好例である。視覚は図の要素から様々なものを読み取ろうとする。この特性を性格判断に利用したものがロールシャッハテストである。

以上のように本論文では、言葉（キーワード）を使わずに人の空間認知の特性を活かした地図検索について提案する。②地物の相対的位置関係を用いた地図検索を5章で示し、①移動経験に基づく空間認知特性を活かした地図検索を6章で示す。

4.4. まとめ

本章では、空間認知と地図検索の概要について示した。

地図を利用する上では読図の能力が必要であり、そのためには空間をイメージする能力や実際の風景や地形と地図とを照合する経験が重要であることを示した。また人の空間認知方法として、サーベイマップ型認知とルートマップ型認知の2種類を示し、既存GISの多くはサーベイマップのシステムであり、その利用にはある程度の読図スキルが必要であることを示した。

地図検索に関しては、使用頻度の高い方法の一つであるキーワード検索やカテゴリ検索、ブラウジング検索などについて示した。またユーザに認知地図を描かせ、それと地図とを照合して場所を検索する **Spatial Query by Sketch** についても示した。いずれの地図検索においても、ユーザが曖昧な空間イメージしか持たない場合の検索支援は困難であることが分かった。

以上の議論を受けて本論文では、次章以降において、キーワードや認知地図の描画を用いずに、人が頭の中で描いた情景（空間イメージ）をそのまま検索条件とした地図検索方式を提案する。本論文では空間認識を、①移動経験に基づく空間認識、②地物の位置関係の記憶に基づく空間認識、③概略的な地図イメージ、④一般的な地図という4段階に分類し、認知負荷の低い地図検索として、①および②に対応する地図検索について提案する。

5. ランドマークの相対的位置関係に基づいた地図検索

本章では、ユーザの空間イメージをもとに当該場所の地図検索を実現するため、ランドマークとしての地物の相対的位置関係を用いた地図検索手法について提案する。読図が苦手なユーザや正確な地物名称、方角、位置関係を想起できないユーザの場合でも、ユーザの曖昧な空間イメージに基づいて、例えば思い出の場所を検索するような場合において、ユーザがイメージした地点を、より容易かつ確実に検索することを目的とする。

5.1. ILS の基本概念

5.1.1. ILS 概要

4.3.2 で述べたように、目的地のイメージが曖昧な場合はキーワードによる検索は困難である。空間認知研究によると、地図検索に有効な目的地に関するキーワードを思い出せなくても、ユーザは自身の行動の時系列に沿った記憶とその際に注視した地物の視覚的な位置関係は認識していると言われている[94]。そこで本論文では、キーワードを用いずに、人が頭の中で描いた情景（空間イメージ）をそのまま検索条件とした地図検索方式を提案する。ここで空間イメージとは、イメージ中に存在する地物とそれらの相対的な位置関係で構成されるものである。この提案方式では、認知地図の特性を考慮して、ユーザに曖昧なものを曖昧なままに表現することを許す。入力に用いる地物としては、Kevin Lynch[76]が提起した都市イメージの 5 要素のひとつであるランドマークに着目した。本論文で扱うランドマークは、表 4-1 に示したような代表的な建物、モニュメントに限らず、ノード要素に対応する駅、学校、商店など、地図上に点で表されるものとする。このようなランドマークを用いた理由は、ランドマークが空間認知において自身の位置と地図上の位置とを対応づけるために用いられ[78]、人々の空間行動を支え、空間イメージや原風景を形成する景観の一要素として位置づけられているためである[95]。

本提案手法では、空間イメージ中の点で表された複数のランドマークをそれらの相対的位置に基づいて平面上に配置することで、それらの属性と位置関係を手掛かりにして目的地の地図を検索する。このとき、空間イメージによって配置されたランドマークの相対的位置関係が実際とは異なる場合がある。しかし本方式ではこのようなずれがあっても、地図検索を可能とする。同種別のランドマークが密集している場合にも一定程度対応する。ユーザは近接する同種のランドマークを気にせずに想起したままに入力し、その同定は位置関係によりシステムが複数の候補を提示することで対応する。候補の絞り込みの際には、段階的なランドマークの追加を許す。ユーザから新たなランドマークが配置されるたびに、類似している 1 つ以上の場所を検索結果候補としてユーザに提示し、ユーザがランドマークを順次追加することで段階的に候補を絞り込めるようにする。

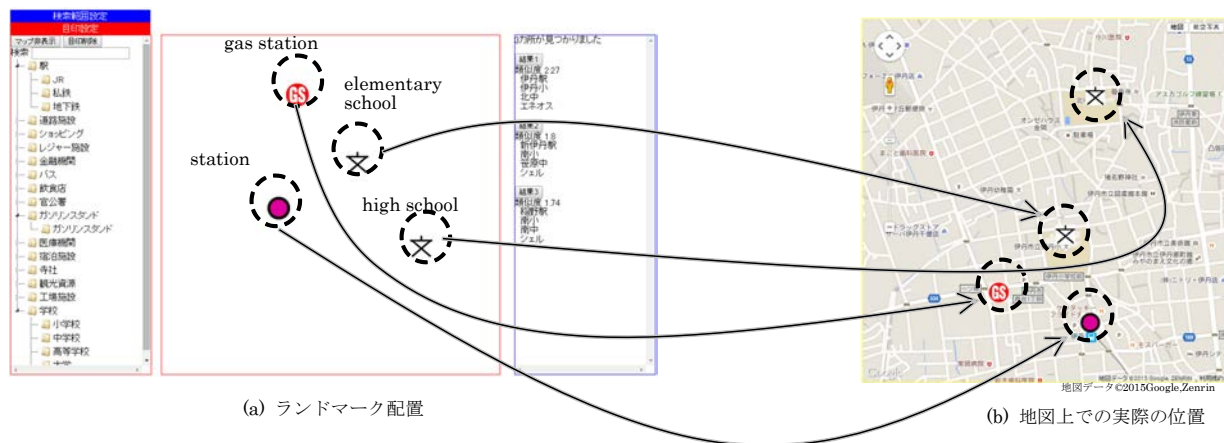


図 5-1 ランドマーク配置と実地図との対応

本提案手法では、抽象化したランドマークをアイコンとして用意する。目的地に対してユーザが想起したランドマークのアイコンを計算機画面上に配置することで、検索に必要な情報を入力する。図 5-1 に提案システムにユーザが入力したランドマークの配置と、それに対応した実地図上での検索結果との関係を示す。図中の矢印は、それぞれのランドマークの対応関係を示す。ユーザは想起したランドマークについて、そのランドマーク間の距離や方位を、空間イメージのままに 2 次元の画面上に入力する (図 5-1(a))。つまりユーザは、

- ・ランドマークの種別に対応するアイコンを、
- ・相対的な位置関係を保ち、
- ・相対的な距離に対応させて相互に離して、

平面上に配置する。相対的な位置関係については、東西南北にこだわらず、相対的に向かって右、あるいは左といった正確さがあればよい。システムの画面上部を北とも規定していないため、目的地の空間イメージ内で東西南北を認識したり指定する必要はない。

提案手法では、配置されたランドマークおよびランドマーク間の相対的な位置関係を検索の入力とし、それと実際の地図とを照合して、類似している場所を出力する (図 5-1(b))。このとき、検索結果候補として類似する複数の場所を類似度の順に提示する。ユーザがランドマークを順次追加し、その都度検索を実行して検索結果候補を提示することで、ユーザが段階的に候補を絞り込めるようにする。

以上の特徴を備えた地図検索システムを「ILS : Incremental Location Search」と呼ぶこととする。表 5-1 に ILS と関連研究と比較を示す。

表 5-1 ILS と関連研究の比較

検索方法	提案方式 (ILS)	Spatial Query by Sketch	テキスト検索
検索の入力条件	配置された複数のランドマーク (点) の相対的位置	手描きした地物 (点, 線, 面) で構成される地図	現実世界の場所から想起されるキーワード
検索方式	ランドマークの相対的位置関係により地図データを比較して整合する複数の候補を検索	描画された地物のトポロジーを基本に地図データを比較して整合する地点を検索	検索エンジンを用いて, 類似するキーワードを特定し, それに対応する場所を検索

5.1.2. ILS のシステム構成

ILS はネットワーク上に Web アプリケーションとして構築され, システムのユーザ端末であるクライアントと, 地図検索などを行うサーバから構成される. 図 5-2 に ILS のシステム構成を示す.

- ① クライアントは, Web ブラウザ上で地図アプリケーションを実行する. Web ブラウザのキャンバス上に配置されたランドマークについて, その位置情報やレイヤ情報などの地物情報をサーバ側に送信する. この地物情報は GIS サーバに HTTP 通信で送信される. Web アプリケーションは, 高インタラクティブな Web アプリケーション開発技術である Ajax を応用して実現する.
- ② サーバは, 地図データを管理する空間データベース (空間 DB) と, クライアントからの要求を処理する GIS サーバとで構成される. 空間 DB は, 地物が持つ位置情報を空間インデックスで管理する. これにより, 地物を高速に検索することができる. GIS サーバは, クライアントからの情報処理リクエストを受け, 空間 DB へデータアクセスし, 配置されたランドマークの位置情報と実際の地図データとの整合性を評価し, 地図検索結果をクライアントに返信する.

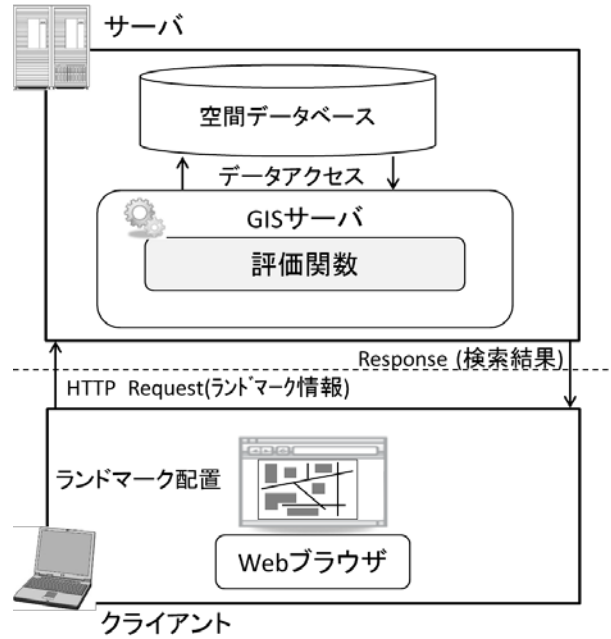


図 5-2 ILS システム構成

5.1.3. 地図検索アルゴリズム

ILS では、クライアントが配置したランドマークの相対的位置関係を元に、実際の地図データとの整合性を評価することで、ユーザがイメージした目的地の地図検索をする。具体的には、クライアントから送信された情報と、空間 DB で管理されている地物の位相関係を元に整合性を判定する。本節ではこのアルゴリズムを説明する。

整合性の定量的な評価指標として、Sorensen が示した空間的連関係数を用いた[96]。空間的連関係数は、2 つの地物分布パターン A, B の分布形状を比較し、その類似度を定量的に評価できることを特徴としており、空間分析等に利用されている[97][98]。空間的連関係数 C_s は、地物分布を構成する地物から他地物までの最近接距離に基づいて 2 つの地物分布の類似度を表す。点分布 A, B における分布内での i 番目の点から他の点までの最近接距離をそれぞれ dA_i, dB_i , 点分布 A における i 番目の点の点分布 B の点までの最近接距離 dAB_i , 同様に、点分布 B における i 番目の点の点分布 A の点までの最近接距離 dB_Ai とし、 n は点分布 A の点の総数、 m は点分布 B の点の総数を表すとする。このとき空間的連関係数 C_s は以下の式 (5-1) によって計算され、-1 と+1 の間を取り、+1 に近いほど、分布 A, B の類似性が高いと判定される。

$$C_s = \frac{\{(\sum_{i=1}^n dA_i + \sum_{i=1}^m dB_i) - (\sum_{i=1}^n dAB_i + \sum_{i=1}^m dB_Ai)\}}{\{(\sum_{i=1}^n dA_i + \sum_{i=1}^m dB_i) + (\sum_{i=1}^n dAB_i + \sum_{i=1}^m dB_Ai)\}} \quad \text{式 (5-1)}$$

本論文では、点分布 A をクライアントから送信されたランドマークの集合とし、点分布 B は後述のアルゴリズムを用いて実地図から取得したランドマークの集合で構成し、両者の点分布数は同じとする。つまり、点分布 B を作成する際、点分布 A においてキャンバス上に配置された各ランドマークの位置情報を、地図座標である緯度経度に変換し、その位置に直線距離で最も近い該当するランドマークを空間 DB から検索するため、必ず点分布 A に対応するランドマークによって点分布 B が形成される。厳密な座標値ではなく、最も近い地物を対応付けることによって点分布 B が形成されるため、ユーザが入力する空間イメージが歪んでいても地図検索が可能である。

検索アルゴリズムを以下に示す。なお、 i 番目にユーザが配置したランドマークの種別（レイヤ）を T_i 、キャンバス上の座標を A_i とし、それに対応する k 番目の検索結果候補の i 番目のランドマークの地図座標（緯度経度に対応）を B_{ki} とする。また、集合 $P = \{pk(B_{k1}, B_{k2}, \dots, B_{ki}) \mid k=1, \dots\}$ にて検索結果候補の地点集合を表す。またランドマークには、ランドマークとしての役割を考慮して決定した優先度を付与している。これは、認知地図において、交通の結節点である駅や有名な建物などのランドマークであるほど、重大な影響を与えと言われるためである[99]。

Step 1 検索対象とする地図の範囲を設定する。これは検索速度効率を向上させるためであり、ユーザが目的地を含むと推定する任意の範囲を設定する。

候補集合 P を初期化する ($P = \phi$)。

Step 2 i 番目のランドマーク入力を受けて、 T_i 、 A_i を設定する。

Step 3 i 番目のランドマークを空間 DB から検索する。

(1) $i = 1$ の場合

検索範囲にある種別 T_1 のランドマークを全て検索し、 $P = \{pk(B_{k1}) \mid k=1, \dots, j\}$ とする。ここで、 j は空間 DB から検索結果として得られたランドマークの数である。

(2) $i = 2$ の場合

P の各結果候補地点 pk について B_{k1} に直線距離で最も近い種別 T_2 の地物を検索し、 B_{k2} とする。 $P = \{pk(B_{k1}, B_{k2}) \mid k=1, \dots, j\}$ である。また、 A_1, A_2 をそれぞれ B_{k1}, B_{k2} に変換するヘルマート変換（相似変換） F_k を定義する。 $F_k(A_1) = B_{k1}, F_k(A_2) = B_{k2}$ である。キャンバス上の座標から地図座標への変換は、回転、平行移動、伸縮を伴うためヘルマート変換（相似変換）を採用している。ヘルマート変換は、地図補正で一般的に用いられる変換手法のひとつである。

(3) $i \geq 3$ の場合

P の各結果候補地点 pk について、ヘルマート変換 F_k を定義した 2 つのランドマークの種別と、入力されたランドマークの種別 T_i を比較し、 T_i のほうが高い優先度を持つ場合、

3つのうち優先度の高い2つのランドマークに基づくキャンバス座標を地図座標に変換するヘルマート変換に Fk を変更する（優先度が同じ場合、入力順が早いものを選択する）。各結果候補地点 pk について、 Ai をヘルマート変換 Fk により地図座標 $Fk(Ai)$ に変換する。この $Fk(Ai)$ に直線距離で最も近い種別 Ti のランドマークを空間 DB から検索し、その座標を Bki とする。結果候補地点の集合は、 $P = \{pk(Bk1, Bk2, \dots, Bki) \mid k=1, \dots, j\}$ となる。ただし今回は、 $Fk(A1)$ からの距離が 10km 以内に種別 Ti のランドマークが見つからなければその結果候補地点 pk を P から除く。この 10km という範囲は、日常生活における基本的な生活空間と考えられることから採用した[100]。

Step 4 P の各結果候補地点 pk について、式 (5-1) の空間的連関係数によって整合性 Ck を計算する。これは、 $\{Fk(A1), Fk(A2), \dots, Fk(Ai)\}$ を点分布 A、 $\{Bk1, Bk2, \dots, Bki\}$ を点分布 B として算出する。

Step 5 整合性 Ck が高い順に、結果候補地点 pk を結果表示する。

Step 6 さらにランダムマーク入力があれば Step 2 に戻る。

2点から定義されるヘルマート変換を用いて i 番目に入力されるランドマークの地図座標 $Fk(Ai)$ を求め、それに基づき空間的連関係数を計算することで計算時間を押さえている。短時間で検索結果候補地点を出力することは、ユーザがランドマークを入力するたびに検索を実行して結果を提示し、それに基づいてユーザがさらにランドマークを入力する使用方法を想定している本システムでは重要である。また、ヘルマート変換 Fk は 2 つのランドマークの種別と距離によって決まる。方位は関係しないため、ユーザが入力する空間イメージが実際の地図に対して回転していても構わない。距離も、入力された他のランドマークとの相対距離に近いランドマークを対応させているため、空間イメージに歪みがあったとしても検索を可能にしている。

5.2. ILS のアプリケーション開発

ILS は, ユーザの目的地に対する空間イメージを検索条件として当該場所を検索するため, 先ず空間イメージの具現化が必要である. そこで図 5-3 に示すように, 空間イメージから想起されるランドマークを配置する ILS アプリケーションを開発し, これを用いて評価実験を行った. ILS アプリケーションは, 画面左側がレイヤ部分, 画面中央にランドマークを配置するキャンバス, 画面右側が検索結果を表示する部分で構成されている.

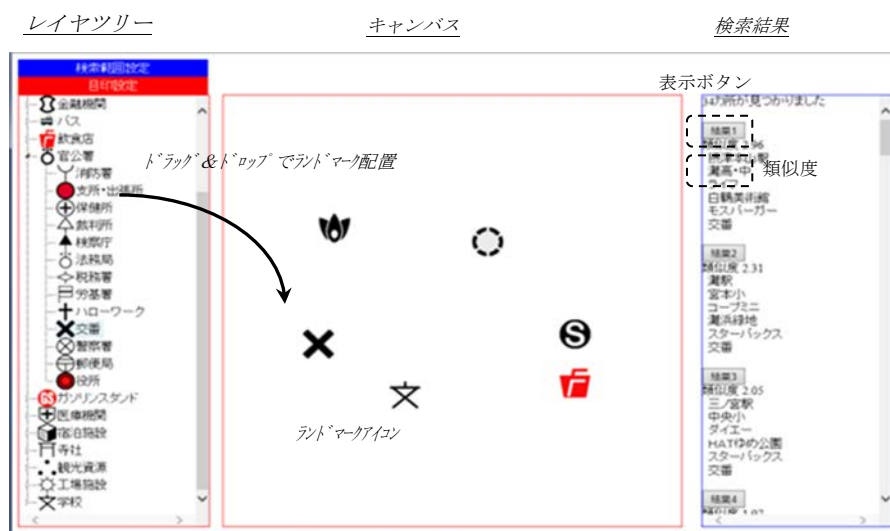


図 5-3 ILS アプリケーション画面

図 5-4 に ILS アプリケーションの処理シーケンスを示す. 先ずユーザはクライアント上で, 想起したランドマークに対応するアイコンの配置を行う. アイコン配置は, レイヤ部分からランドマークのレイヤを選択し, キャンバスへドラッグアンドドロップ操作によって配置する. レイヤ部分からランドマークを選択し, 配置する際にキャンバス上をクリックして配置箇所を決定する方法に比べ, 操作性に優れているため, ドラッグアンドドロップ操作を採用している[101].

図 5-5 は地図検索の流れをアプリケーション画面で示したものである. まず①検索範囲を絞り込み, ②ランドマークとしての地物を複数配置し, それらの位置関係をサーバに送り, 検索結果の候補地を③地図上に表示する.

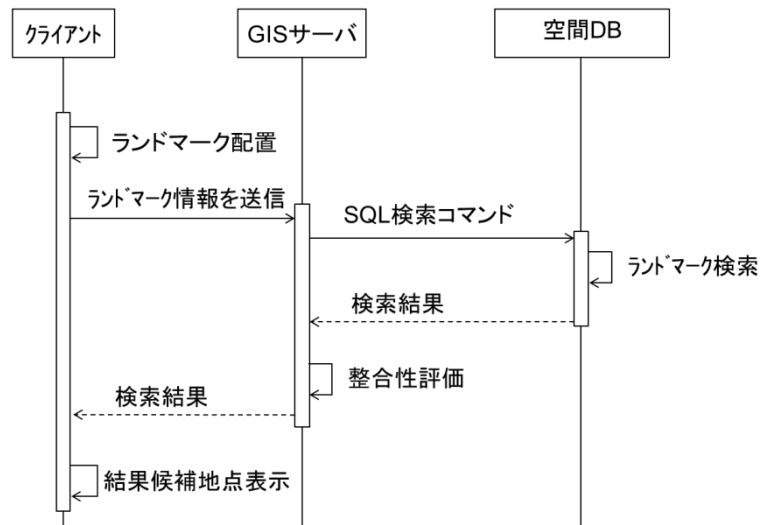


図 5-4 ILS アプリケーション処理フロー

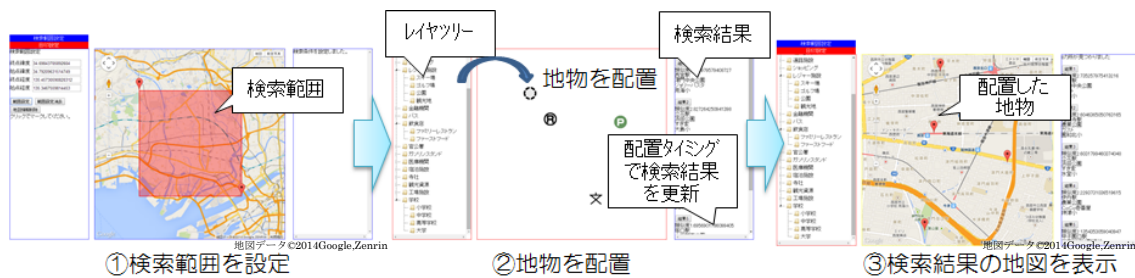


図 5-5 地図検索の流れ

ILS アプリケーションは、キャンバスにアイコンが配置されると、レイヤ種別と配置した画面の位置情報を、Ajax アプリケーションの特徴である非同期通信によって GIS サーバに送信し、検索結果のみを動的に更新している。GIS サーバは、アイコンの配置情報を受信すると、5.1.3 で述べた地図検索アルゴリズムを用いて、配置されたアイコンに整合する場所の情報をクライアントに返信する。クライアントでは検索結果を、ILS アプリケーション画面の右側に類似度順にリストとして表示する。ユーザが検索結果を選択すると、GoogleMaps などの別の地図アプリケーション上に当該場所をオーバーレイ表示する。これにより、空間イメージに基づき配置されたランドマークが実際の地図上のどれに対応しているかを確認することができる。

5.3. 実データを用いた ILS の評価実験

本提案手法の有効性を評価するため、兵庫県全域をカバーする市販電子地図（縮尺 25,000 分の 1）を用いて ILS の評価実験を行った。本実験では、この市販地図からランドマーク的役割を果たす 43 レイヤの点地物を抽出し、PostgreSQL[102]の空間 DB である PostGIS[103]を用いて地図 DB を構築した。各地物には、範囲検索などの空間演算を高速に実行するため、空間インデックスを付与した。空間 DB のテーブル構成について表 5-2 ～表 5-4 に示す。

表 5-2 は、地物のレイヤや幾何、属性情報を格納するメインのテーブルである。

表 5-3 は、各地物に対して最も近い位置にある地物（第一近接地物）のリストを管理するテーブルである。この情報は、あらかじめ全地物に対して最も近くにある地物を事前計算しデータ化しておくことで、検索処理を効率化している。

表 5-4 は、レイヤ情報を管理するテーブルである。

表 5-2 幾何テーブル(feature_table)

名前	フィールド名	型	NULL	Key
地物 ID	id	integer	NO	PK
レイヤ ID	layer_id	integer	NO	FK
幾何	geom	geometry	NO	
幾何種別(*1)	geom_type	integer	NO	
地物名	name	string	YES	

*1 幾何種別は、1:point(点), 2:line(線), 3:polygon(面)とする。

表 5-3 第一近接地物管理テーブル(neighbor_feature_table)

名前	フィールド名	型	NULL	Key
地物 ID	id	integer	NO	FK
レイヤ ID	layer_id	integer	NO	FK
参照地物 レイヤ ID	ref_layer_id	string	NO	FK
参照地物 ID	ref_id	integer	NO	FK

表 5-4 レイヤテーブル(layer_table)

名前	フィールド名	型	NULL	Key
レイヤ ID	layer_id	integer	NO	PK
レイヤ名	layer_name	string	NO	

また 5.1.3 の地図検索アルゴリズムにおいて示した優先度については、本評価システムでは、認知度、存在期間（更新頻度）、利用頻度、他ランドマークとの位置関係の観点から 43 レイヤのランドマークに優先度（高・中・低）を、以下のように主観的に設定した。

高：長期間存在していて認知度および利用頻度が高く、かつ一般的に同じ施設が近距離に隣接しないランドマーク

中：日常的な利用頻度が低い、または同じ施設が近距離に存在する可能性のあるランドマーク

低：認知度、利用頻度が低い、または更新頻度の高いランドマーク

優先度「高」は、例えば 10 年を超えて長期間存在することが期待され、認知度および利用頻度が高く（認知地図上の位置に大きなずれが生じにくく、他種ランドマークと混同されることも少ない）、かつ一般的に同じ施設が近距離に隣接しないランドマークとする。駅や学校、官公署が挙げられる。

優先度「低」は、比較的短期間で変化・消滅する恐れがあるもの、また、認知度および利用頻度が低いもの（認知地図上の位置が曖昧になり、混同もされる）、あるいは、近隣にいくつも存在するランドマークとする。一般的な商業店舗でも、コンビニエンスストア、ファミリーレストランなどはこれに分類した。

優先度「中」は、「高」と「低」の中間的なランドマークである。

しかし、ランドマークに対しては、個人の認知度の大小や感性の相違が関係するため、その認知・認識レベルの違いを明確に判断することは難しい[104]。そのため、この優先度は、任意に変更することを可能としている。本実験で用いたランドマーク 43 レイヤの地物とその数、優先度を表 5-5 に示す。

表 5-5 各レイヤに対する地物数と優先度

レイヤ名	地物数	優先度	レイヤ名	地物数	優先度	レイヤ名	地物数	優先度
JR の駅	138	高	銀行	180	中	警察署	53	高
私鉄の駅	217	高	バス停	6264	中	郵便局	864	高
地下鉄の駅	37	高	ファミリーレストラン	311	低	役所	52	高
IC・JCT	145	低	ファストフード	78	低	ガソリンスタンド	813	低
SA・PA	26	低	消防署	154	中	病院・診療所	371	中
橋	1348	中	支所・出張所	120	中	ホテル・旅館	214	中
トンネル	185	中	保健所	15	中	寺院	1774	中
デパート	15	高	裁判所	7	中	神社	1837	中
スーパーストア	527	中	検察庁	7	中	温泉	20	中
コンビニエンスストア	910	低	法務局	7	中	道の駅	21	中
スキー場	4	中	税務署	23	中	工場	1878	低
ゴルフ場	153	中	労基署	7	中	小学校	813	高
公園	422	高	ハローワーク	17	中	中学校	368	高
観光地	331	高	交番	567	中	高等学校	231	高
						大学	68	高

検索対象は兵庫県全域である。なお、ランドマークは域内に一様に存在している訳ではなく、特に山間部では疎になっている。提案システムでは、5.1.3 で述べた地図検索アルゴリズムの Step1 で示したように、初めに検索範囲を絞り込む必要がある。被験者が検索範囲を自由に設定した場合、その広狭の違いによって結果にばらつきが生じてしまうため、検索範囲の広さを統一した。本実験では、生活空間範囲に相当する「統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード」（昭和 48 年 7 月 12 日行政管理庁告示第 143 号）で規定されている第二次地域区画（約 10km 四方）を検索範囲の単位とし、被験者が検索区画を指定した。

曖昧な空間イメージの場所を検索対象とするため、被験者には以下の条件に基づく場所を想起してもらい、評価実験を行った。

- ① 過去も含め居住地や勤務地を除く。
- ② 1 ヶ月以内に訪れた場所を除く。
- ③ 複数回訪れたことがあり土地勘のある場所を除く。

本実験では、イメージした場所が検索結果の上位 5 件までに入れば、当該場所が検索されたと判断した。5 件としたのは、情報検索においてユーザは検索結果の上位 5 件までの結果を参照する割合が全体の 80%以上を占めるという調査[105] から、その中に検索対象場所が含まれる可能性が高いと推測し、評価基準に設定した。また検索結果では、ユーザが配置したランドマークと検索結果より示されたランドマークとが必ずしも全て一致しないことがある。また検索結果では、ユーザが配置したランドマークと検索結果より示されたランドマークとが必ずしも全て一致しないことがある。例えば、ユーザがコンビニエンスストアの A 町一丁目店のつもりで配置したのに対し、同じコンビニエンスストアの A 町二丁目店が検索されたといった場合である。しかし、本提案手法の目的は、曖昧な空間イメージを元に、それに適合する複数候補の場所からユーザの空間イメージの場所を探すことである。よって、他ランドマークによってでもユーザがイメージした場所に適合した場合は、検索は成功したと判断した。

本実験では、5.2 で示した ILS アプリケーションを用いて、(1) 被験者がイメージした場所の検索結果、(2) ランドマークを配置することによる検索の操作性、の 2 つについて評価する。表 5-6 に示す通り、本実験は延べ 21 人（20 代～50 代の研究員、男 16 人、女 5 人）に対して、ILS アプリケーションの実利用およびインタビューにより、検索結果および操作性について評価を実施した。また実験においては、図 5-6 に示す評価シートを用いて、実験内容を記録した。

表 5-6 ILS 実験条件

実験期間	2015 年 12 月 ～ 2016 年 1 月
実験方法	被験者による実操作およびインタビュー
被験者	被験者数: 21 人(男: 16, 女: 5) 平均年齢: 33.2 歳 (min: 26, max: 55) 被験者属性: 研究員

ILS評価実験シート

被験者名:		月 日	()回目	
場所	(いつ)	(どこ)	(目的)	
範囲	左上			
	右下			
回数	配置地物	ヒット件数	順位	検索時間
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
特記事項				
感想:				

図 5-6 ILS 実験評価シート

(1) 検索結果に関する評価

検索結果に関する評価では，被験者がイメージした場所を検索するために配置したランドマーク数，配置したランドマークと検索結果との比較を行った．

- ① 検索場所は，前節で示した条件に基づいて被験者の自由意思で想起してもらい，その大体の場所(JR 神戸駅付近など)から第二次地域区画を元に検索範囲を設定した．今回は，被験者の 16 人が市街地，5 人が郊外を設定した．
- ② 次に被験者に当該場所から想起されるランドマークを配置してもらい，検索に要したランドマーク数を調査した．検索過程で被験者は，検索結果にある複数の候補地からいずれかを選択し，実地図上にオーバーレイ表示されたランドマークの位置や名称などから，そこが想起した場所であるか否かを確認する．ランドマーク数は，想起した場所が検索結果の上位 5 件までに入った時までに入力された数とした．

実験結果を図 5-7 に示す。この図は、縦軸に被験者数、横軸にランドマーク数をとったヒストグラムである。認知地図の歪みがある中で検索結果の上位 5 番目以内に被験者がイメージした地点を検索するには、順次ランドマークを配置し、その種別とそれらの相対位置で候補を絞り込んでいくことになる。今回のデータに対しては、当該地点を検索するために平均 4.9 個（標準偏差 1.2）のランドマークの配置を要した。

最少の 3 つのランドマークを配置した時点で想起した場所が見つかった事例では、検索範囲が郊外であり、配置したランドマークがその検索範囲内に少なく、大学→駅→神社と優先度の高いランドマークから順番に配置したためであった。

一方、最多の 8 つのランドマークを配置したケースでは、検索範囲が市街地であり、配置したランドマークがその検索範囲内に多数存在していた。また私鉄→私鉄→JR など優先度の高いランドマークから順に配置したが、途中優先度の低いファミリーレストランなどを配置したため、検索結果を絞り込むまでに平均より多くのランドマークを配置することとなった。

このように検索範囲におけるランドマーク分布特性やランドマークの配置順序が検索結果に影響を与えと言える。また今回の実験では、市街地でランドマークが密集した場所において、優先度の低いランドマーク（例えば、コンビニエンスストア）から順番に配置した場合、ユーザがイメージした場所は検索できなかった。また遊技場や喫茶店など、実験で使用した市販電子地図に含まれていないランドマークを想起した場合も、検索できなかった。

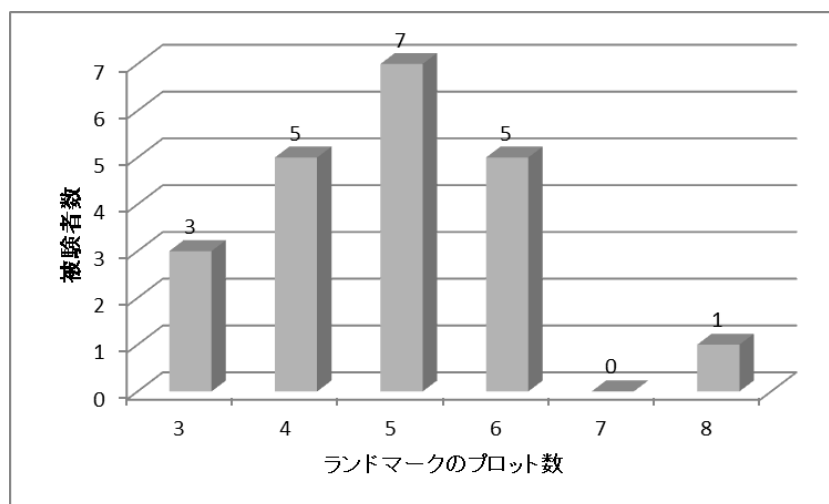


図 5-7 ILS 実験結果

実験では、空間分布係数（本論文では空間的連関係数を使用）を考慮せずに、点の配置のみで検索された地点数（候補数 A）と、空間分布係数を考慮して順序付けした結果から被験者が目的地を探しだした時の順位（B）を記録している。また候補地の検索では、平均 11.2

ヶ所（標準偏差 8.0）の地点が見つかった．空間的連関係数による順位付けでは，上位から平均 2.4 番目（標準偏差 1.1）にイメージした場所が置かれた．つまり，空間分布係数を用いて形状の類似性を考慮しない場合は，平均 11.2 件の候補地からユーザのイメージする場所を確認することになり，空間分布係数を用いることでユーザは平均 2.4 件を確認すれば候補地を見つけ出すことができる．本順位付けの有効性を評価するために，候補地におけるランドマーク間の距離を算出し，その総和が小さい地点から順位付けする（ランドマークが密集している候補地を上位とする）手法との比較を行った．この比較手法で順位付けした結果，上位から平均 5.1 番目（標準偏差 5.5）にイメージした場所が見つかった．両者の順位付けをウィルコクソンの符号付順位和検定を用いて検定した結果，有意差が認められた（ $p=0.018 < 0.05$ ）．以上より，ILS による検索結果の順序付けの有効性が示された．

次に，ある被験者を取り上げ，ランドマークの配置と検索結果の変化について例示する（図 5-8）．本被験者は 32 歳男性研究員であり，約 2 年前に訪れた友人宅を検索した．図 5-8 は，縦軸に検索結果における当該場所の類似度順位，横軸にランドマークの配置順を示し，図中の凡例は左側に配置したランドマーク種別，右側に検索結果数を示している．本被験者は，車で目的地まで移動したため道路施設である IC・JCT（インターチェンジ・ジャンクション）を配置し，さらに移動中に目立ちやすい JR 駅や病院などを配置した．5 番目にコンビニエンスストアを置いた時点で目的地が 5 番目にリストアップされて目的地を検索できたが，最後に JR 駅も想起できたため，最終的には上位 3 番目にリストアップされた．

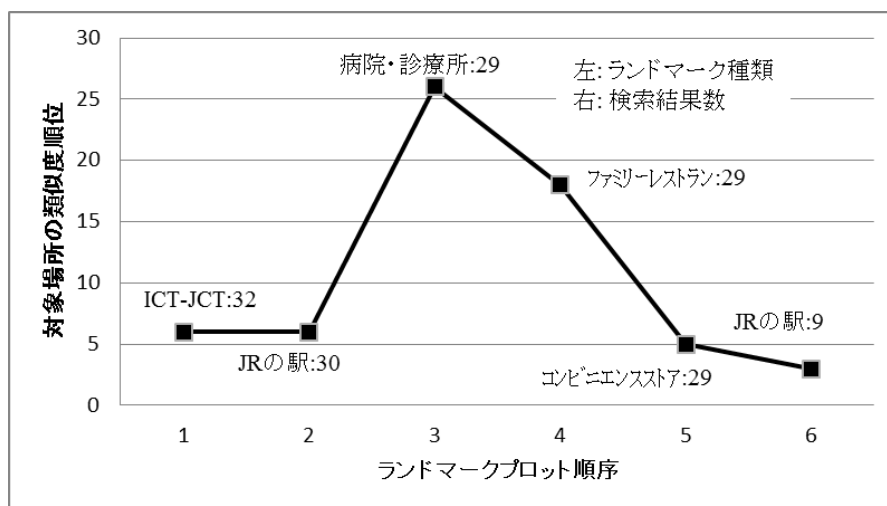


図 5-8 ランドマークの配置と検索結果の変化

(2) 検索操作性に関する評価

操作性に関する評価では、地図検索処理時間の計測、ランドマーク配置傾向の分析、被験者に対するインタビュー調査を行った。

地図検索処理時間は、被験者がランドマークを ILS アプリケーションのキャンバス上に配置してから、検索結果表示が更新されるまでの間を計測した。検索範囲や配置したランドマーク種別により多少の差は見られるものの、ランドマークを配置してから表示が更新されるまでは平均 3 秒以内であった。この処理時間については、検索処理を実行する GIS サーバの処理能力を向上させることにより、さらなる高速化が可能と考える。またインタビュー調査でも、検索処理に大きなストレスを感じるといった声は聞かれなかった。

前述の通り、ILS はユーザの空間イメージ中にある場所や地物の配置などの空間関係を推論する能力（空間認知能力）[106]に依らない地図検索を目的としている。そこで追加実験として、被験者の空間認知能力測定を行い、上記検索結果との関係性を評価した。空間認知能力測定には、認知心理学分野で研究されている方向感覚質問紙簡易版（SDQ-S）[107]を用いた。表 5-7 に示す通り、SDQ-S は 20 の質問で構成され、被験者が各質問に対して自身に対する 5 段階評価を行い、その得点によって方向感覚を判定するものである。合計得点が高いほど方向感覚が優れていると判断される。前述の被験者 21 名に SDQ-S を実施したところ、平均は 62.1 点（標準偏差 15.5）、最高は 89 点、最低は 38 点であった。図 5-9 は、縦軸に SDQ-S の点数、横軸に ILS を用いた実験で配置したランドマーク数をプロットした散布図である。両者の相関係数は-0.38 であり、相関は見られなかった。つまり検索に要したランドマーク数と SDQ-S の点数との間に相関はないことが示され、ILS は空間認知能力に関わらず、曖昧な空間イメージに基づく場所の検索に有効であるとの結果が得られた。

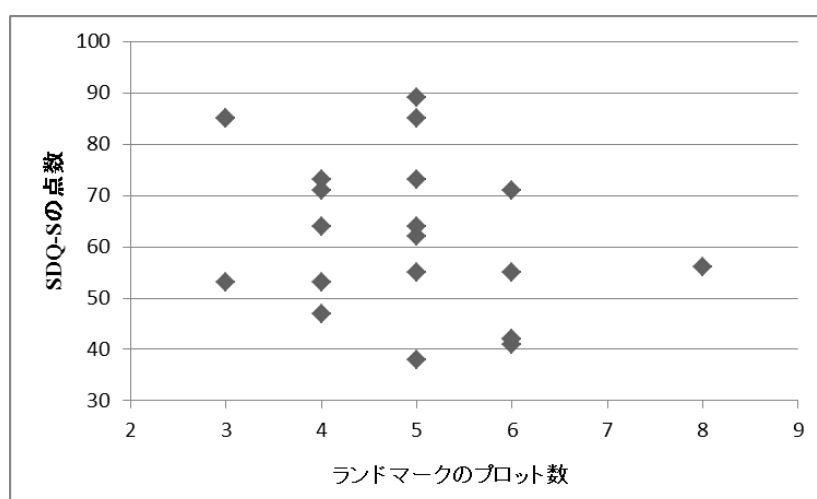


図 5-9 配置されたランドマーク数と SDQ-S 得点の関係

次にランドマーク配置傾向について考察する。ILS は、検索条件として方角を規定していない。すなわち画面上部を北としておらず、被験者の空間イメージにあるランドマークの相対的な位置関係から当該場所を検索している。本実験では、被験者 21 人中 4 人が画面上部を北に設定していなかった。なおこの 4 人の SDQ-S の平均点は 76 点であり、方向感覚は優れている。図 5-10 にその一例を示す。図中の線は配置したランドマークの概形を示している。本例では、被験者は結果として画面左側を北としてランドマークを配置（図 5-10 (a)）し、想起した空間イメージの場所を検索できた（図 5-10(b)）。本結果より ILS は、方角を意識することなく空間イメージにある方向感覚を用いて当該場所を検索でき、ユーザに高い操作性を提供することが可能であると言える。

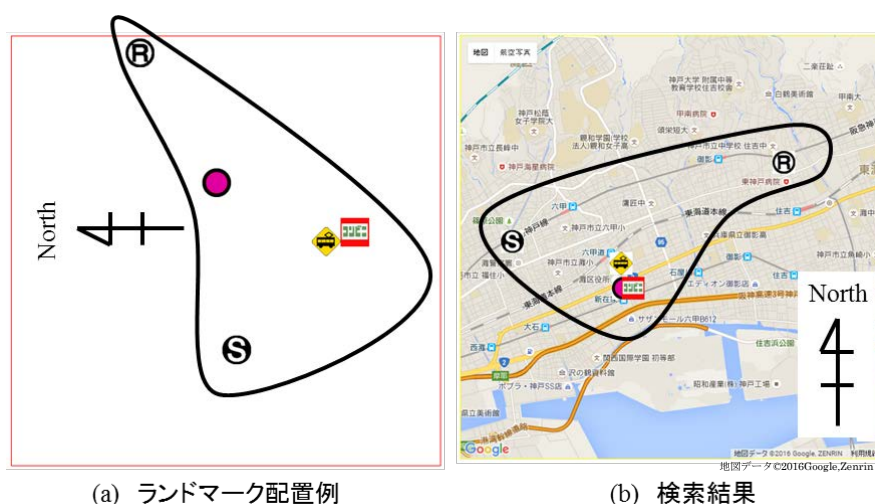


図 5-10 検索結果と実地図における方向関係の違い

次に被験者へのインタビュー調査によって得られた知見を示す。被験者の多くは、想起した場所に対して、そこに至る経路上の曲がり角や交差点などにあるランドマークを入力していたことが分かった。また、市販地図には含まれていないランドマークを設定したかった、という声も多数聞かれた。評価実験の中で、ユーザがイメージした空間にあるランドマークを ILS 上に配置したが、検索結果で提示された地物が別のものである場合があった。ある被験者は、A 社のコンビニエンスストアをイメージして配置したが、検索結果では B 社のコンビニエンスストアが提示された場合があった。しかしこの被験者は、「こんなところに別のコンビニエンスストアがあったのか」と、新しい発見があったことを述べている。別の被験者からは、「地図には存在していない情報として、例えば賑やかな繁華街エリア、野生のホタルが見える森、などの情報も検索条件にあると、空間イメージに基づいた検索がより効果的にできる」といった意見も聞かれた。その他では、配置した地物の位置調整、距離感をつかむためのスケールバーの追加、など操作性を向上させるためのシステム改善に関する意見も聞かれた。

表 5-7 SDQ-S の質問リスト

		はい	どちらでも			いいえ
Q.1	知らない土地へ行くと、とたんに東西南北がわからなくなる。	1	2	3	4	5
Q.2	知らない所でも、東西南北をあまり間違えない。	5	4	3	2	1
Q.3	道順を教えてもらう時、「左・右」で支持してもらうとわかるが、「東西南北」で指示されるとわからない。	1	2	3	4	5
Q.4	電車の進行方向を東西南北で理解することが困難。	1	2	3	4	5
Q.5	知らないところでは、自分の歩く方向に自信が持てず不安になる。	1	2	3	4	5
Q.6	ホテルや旅館の部屋に入ると、その部屋がどちら向きかわからない。	1	2	3	4	5
Q.7	事前に地図を調べていても、初めての場所へ行くことはかなり難しい。	1	2	3	4	5
Q.8	地図上で、自分のいる位置をすぐに見つけることができる。	5	4	3	2	1
Q.9	頭の中に、地図のイメージを生き生きと思い浮かべることができる。	5	4	3	2	1
Q.10	ところどころの目印を記憶する力がない。	1	2	3	4	5
Q.11	目印となるものを見つけれられない。	1	2	3	4	5
Q.12	何度も行っただことのある所でも、目印になるものをよく憶えていない。	1	2	3	4	5
Q.13	景色の違いを区別して憶えることができない。	1	2	3	4	5
Q.14	特に車で右折左折を繰り返して目的地に着いた時、帰り道はどこでどう曲がったら良いかわからなくなる。	1	2	3	4	5
Q.15	自分がどちらに曲がってきたかを忘れる。	1	2	3	4	5
Q.16	道を曲がるところでも目印を確認しない。	1	2	3	4	5
Q.17	人に言葉でくわしく教えてもらっても、道を正しく辿れないことが多い。	1	2	3	4	5
Q.18	住宅地で同じような家が並んでいると、目的の家がわからなくなる。	1	2	3	4	5
Q.19	見かけのよく似た道路でも、その違いをすぐに区別することができる。	5	4	3	2	1
Q.20	2人以上だと、人について行って疑わない。	1	2	3	4	5

5.4. まとめ

本章では、曖昧な空間イメージから当該場所の地図検索を実現するため、認知地図の知見に基づき、ユーザが頭の中で描いた空間イメージにあるランドマークを検索条件として、それらの相対的位置関係をもとに地図検索する方式を提案した。

空間イメージ中にあるランドマークに対応したアイコンを配置するアプリケーションを用いた評価実験では、約 5 個のランドマークを配置することにより、ユーザの空間イメージに対応する場所を検索できることを確認した。またユーザは、検索時に方角を意識する必要が無いため、高い操作性を提供できることを確認した。さらに被験者へのインタビュー調査からは、ILS によって提示された検索結果により、ユーザの空間イメージにはなかったランドマークの存在に気づき、新しい発見につながるという効果も確認できた。

本提案手法では、点で表されるランドマークの相対的な位置関係のみを用いて地図検索を行った。ランドマークには、川や道路など線で表されるものや、公園や湖など面で表されるものもある。さらにオフィス街や繁華街など同一イメージを持った地域が空間イメージとしてのランドマークになることがある。今後は、これら点以外のランドマークに対して、歪みを許容したまま検索する拡張方式について検討する。また、ユーザによっては、場所名の一部やランドマーク間の移動距離が徒歩数分、といったようにランドマークの位置情報以外についても想起できる可能性がある。ランドマークの位置情報に加え、距離感を意識した画面を用いた検索手法（図 5-11）や、ランドマークに対する個人差を考慮した検索方法についても検討する。それに加え、インタビュー調査で得られた操作性に対する改善、市販地図データには格納されていないランドマークの追加を行い、思い出の場所検索など実システムへの適用を目指す。

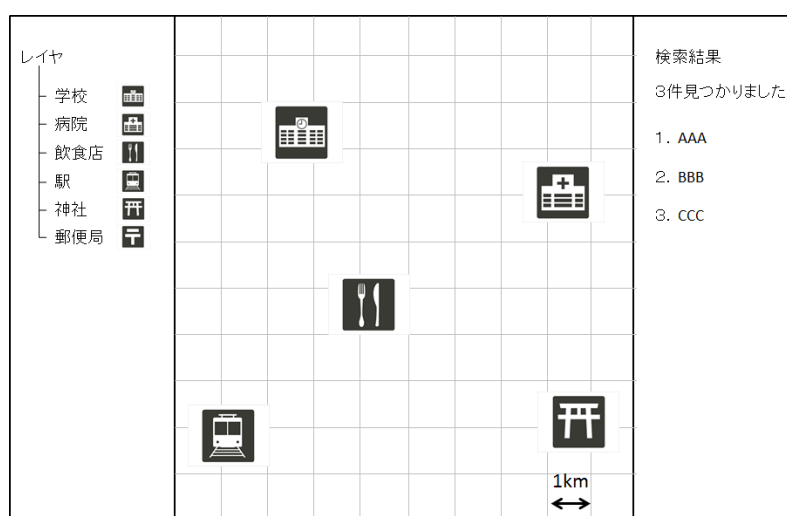


図 5-11 距離感を意識させるための画面例

6. 風景内で注視されたランドマークを検索キーとする地図検索

前章で示した ILS では、ユーザの認知地図内にあるランドマークの種別と相対的な位置関係を検索条件として該当する場所を検索した。ILS は認知地図としてサーベイマップを用いるため、ある程度広がりをもった空間内にあるランドマークを検索条件とする。しかし日常生活において、現在自分がいる場所を検索したい場合がある。例えば、人と待ち合わせをしている時に自分の位置を相手に伝える場面や、地下空間から地上に出た時に自分がいる場所を確認する場合などである。このような場合は、ルートマップの視点から地図検索したい場面であると言える。このとき、場所に関連するキーワードを検索条件として地図検索する方法が考えられるが、このような場面は初めて訪れる地理不案内な場所や土地勘の無い場所であることが多く、4.3.2 で示した通り検索キーワードとしての具体的な地名や施設名称などを想起できない場合がある。もちろん GPS データに基づいて現在位置を特定できる場合もあるが、測位精度の悪い都心部や地下街などの電波不受信場所においては、GPS が有効に利用できないことがある。特に地下街や駅構内などの閉鎖空間内では、地上に比べて方角が分かりにくく、見通しも悪いため、案内図を見ても現在地を特定しにくい。

そこで本章では、ルートマップの視点に立ち、実空間内（風景内）で人が注視したランドマークを検索の手掛かりとし、ランドマーク同士の位置関係や、ランドマークの種類、看板に示された文字列などの視覚的な特徴を検索条件とした地図検索方法 LSAS (エルサス Location Search by Actual Scenery) を提案する。

6.1. LSAS の基本概念

6.1.1. LSAS 概要

4 章で示した通り、読図は、先進国で地図が一般的に利用されるようになった最近 100 年程度に認識された能力であり[108]、ある意味では特殊な能力と言える。現在でも、地図を読み慣れていない人が、地図記号や建物の外形図だけから、そこを歩いたときに目の前に展開される風景をイメージすることは難しい。地図を片手に初めて訪れた町を歩いてみて、自分が地図の中のどの場所にいるのかが分からないという経験は多少なりとも誰にでもあられると思われる。これは地図に記載されている情報と眼前の風景が一致していないことによる。地図には小学校と書かれていても、眼前には長い塀が伸びているだけかもしれない。塀と小学校を結びつけるには、かなり高度な推論や経験を必要とする。風景は現実の地物である周囲の空間の情報を捉えただけでは生じず、その空間の情報とその空間を捉えた人の様々な心象が入り混じって構成されたものである[109][110]。また、地図は実際の 3 次元空間を 2 次元平面に写像したものであるため、地図から地形情報を得る（理解する）ことは容易ではない。初めての町に行く前に地図を見て予習したはずなのに、「こんな坂道だなんて予想していなかった」などの経験はよくあることである。

5 章で示した ILS は、空間イメージとしてのサーベイマップを用いることで、認知負荷

を小さくし、目的の場所を直感的かつ容易な地図操作で地図検索できることを確認した。ここではさらに、より認知負荷が小さく直感的な地図検索方法として、都市空間内で人が目にした風景中のランドマークを手掛かりに当該場所を検索する方法を考えたい。

図 6-1 にそのイメージを示す。(a)は実際の風景を示した写真、(b)は同じ場所をイメージとして描いた図、(c)は検索結果として提示したい正解の地図である。

実際の風景である(a)からわかることは、この箇所では道は左折していないこと、右手前には駐車場があること、さらに右手奥の店はコンビニというよりスーパーマーケットであること、左手の森はどうやら神社らしいことがわかる。一般的なユーザは、このようにランドマークを認識すると思われるが、人によって捉え方に差が生じる可能性がある。この差を考慮した上で正しく地域を検索できるかどうかが課題となる。

イメージとして描いた図である(b)では、ランドマークとして左手に森、右手前に駐車場、その右奥にコンビニがあり、中央に左方向に曲がる道が示されている。提案手法では、これらランドマークを検索条件として、その場所を探したいという場合にこの検索方法を用いる。

実地図(c)を見てみると、左手は稲荷神社であること（より大きな縮尺では表記されている）、右手はこの先でわずかに左に曲がること（ユーザにとってはこの先の印象が強かったということ）、右手はスーパーマーケットであることが確認できる。

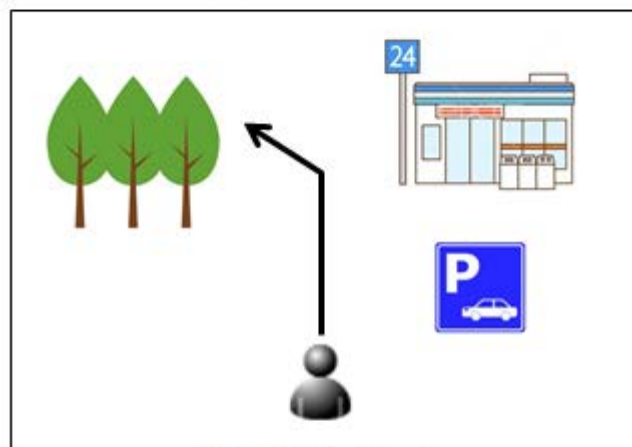
提案方式では、このようなイメージと現場との相違点を吸収（考慮）する仕組みが要求される。この例であれば、

- ① 道のカーブは印象が強く、探したい場所の近傍にカーブがある場合でも、その場所にあったと記憶される場合がある。
- ② 小規模なスーパーマーケットとコンビニは、中型商店としてひとくくりに認識される傾向がある。コンビニは生活に密着しており、小規模なスーパーマーケットはコンビニと認識されやすい。
- ③ 森（木が多い）の印象は強いと思われるが、それが何であるのかについては、ほとんど認識されない。森を形成する地物、例えば、神社、寺、街路樹、防風林などを同一のクラスターとして扱える仕組みを構築しておく必要がある。

本手法の利点は、人が見たままの風景中にあるランドマークを用いて地図検索を行えることである。4.3.2 で述べた通り、視覚情報を認知地図に変換する作業は、慣れないと負荷が大きく、方向音痴の人にとっては容易な作業ではない。本手法であれば、見たままの印象をそのまま使えるため、認知負荷が小さくすみ、より多くの人に容易に利用してもらえると期待できる。



(a) 実際の風景



(b) 検索イメージ



(c) 検索結果

図 6-1 視覚イメージによるルートマップ型地図検索のイメージ

本検索手法は、空間的イメージに基づいた地図検索方法である ILS と同様に、人の一般的な認知特性を考慮した検索アルゴリズムが必要になる。本検索方法に適した利用場面としては、スナップショット的な印象的場面を記憶している思い出の場所を検索する場合や、待ち合わせ場所でうまく待ち合わせることができない場合、昔撮った写真に写っているランドマークからその場所を検索する場合などを想定している。また外出先で自分の位置がどこなのかを確認することを想定し、モバイル端末での利用も想定している。また、ナビを行うサービスとの連携も考えられる。例えば、待ち合わせ場所でうまく待ち合わせることができないときに、「右に何が見える」「左に何がある」などを音声入力することで、図 6-1 (b)と同じ入力を行え、それに基づいて現在位置を特定し、待ち合わせ相手とうまく会えるようにナビすることが可能である。音声による入力サービスは、画面の小さなスマートウォッチに適したアプリであると言える。

以上の特徴を備えた地図検索システムを LSAS と呼ぶ。表 6-1 に ILS と LSAS の比較を示す。

表 6-1 ILS と LSAS の比較

	ILS	LSAS
認知地図	サーベイマップ (2 次元)	ルートマップ (3 次元)
認知負荷	やや小	小
検索条件	ランドマークの種類と相対的位置関係	ランドマークの視覚的要素(種別, 文字)と位置(左右, 手前・奥)
検索範囲	広い (日常生活圏程度)	狭い (ユーザの見える範囲)

6.1.2. LSAS のシステム構成

LSAS では、4.2.3 で示した都市空間における注視対象の中で、人によって空間認知の差が生じにくい要素に着目し、それを入力条件として用いる。本論文では、注視という言葉は、じっくりと見つめるというよりは「パッと目にとまり注目した」という意味で用いている。

Raubal が示したランドマークの視覚要素や中澤が示した空間的要因や環境要因に関連するランドマークの大きさ、形、色は、個人差が生じやすい。例えば、色に関して一言で「赤」といっても、人によってはピンクかもしれないし茜色かもしれない。また建物が複数の色で構成されていた場合、何色と答えればよいか悩ましい。こういった個人差が生じる情報は定量的に表現することが困難である。一方で、ランドマークの構造要因（交差点や駅など交通結節点との位置関係）、種類別要因（人が認知しやすいランドマークの種類、コンビニエンスストアやスーパーなど）、ランドマークの意味性（看板などに記載された文字列など）は、個人差が生じにくいと考えられる。

そこで LSAS では、風景内で注視されたランドマークに対し、表 6-2 に示す項目を用いて当該場所を検索する。位置関係としては、ユーザが向いている方向を中心として、入力するランドマークが左右どちらにあるかを示すものである。距離感については、ランドマークの大きさや個人の感じ方によって差が生じる可能性があるため、他ランドマークに対して入力するランドマークが手前にあるのか、奥にあるのかという、相対的な位置関係によって表現する。種別は、学校や駅などのランドマークの種類を示す。文字列は、ランドマークの名称や看板等にかかれた文字列などのランドマークに付随する属性情報である。位置関係と距離感については入力を必須とする。一方で種別または文字列については、どちらか一方が入力されれば検索可能であるため、必ずしも両方を入力する必要はない。

表 6-2 検索に用いるランドマークの着目点

検索キー	内容
位置関係	左, 右
距離感	手前, 奥
種別	住宅, 病院, オフィス, etc.
文字列	“ABC ビルディング”

図 6-2 に LSAS のシステム構成を示す。ISAS は ILS と同様にネットワーク上に Web アプリケーションとして構築され、システムのユーザ端末であるクライアントと、地図検索などを行うサーバから構成される。クライアントでは、ユーザが都市空間内で注視されたランドマークを入力する。ランドマークに関する情報は表 6-2 に示した通りである。入力されたランドマークに関する各種情報は、HTTP 通信を使って GIS サーバに送信される。一方サーバは、地図データを管理する空間 DB と、クライアントからの要求を処理する GIS サーバとで構成される。GIS サーバは、クライアントからの情報処理リクエストを受け、空間 DB へデータアクセスし、送信されたランドマーク情報と実際の地図データとを照合し、候補場所を検索する。検索された結果は、位置情報を伴ってクライアントに返信される。クライアントでは返信された情報を地図上に候補場所としてユーザに提示し、ユーザが目的地と合っているかを確認する。なお ILS ではクライアントがランドマークを配置する毎に地図検索をインクリメンタルに実施したが、LSAS では全てのランドマークの配置が完了してからサーバに検索条件を送信する。

ILS は、ユーザの空間イメージから想起されたランドマークをサーベイマップ上に配置し、当該場所を検索する。サーベイマップを元とするため、検索対象範囲はユーザのイメージした範囲に基づく。一方で LSAS は、人が見た風景であるルートマップを元としており、検索対象範囲は人の地上目線から見える範囲である。

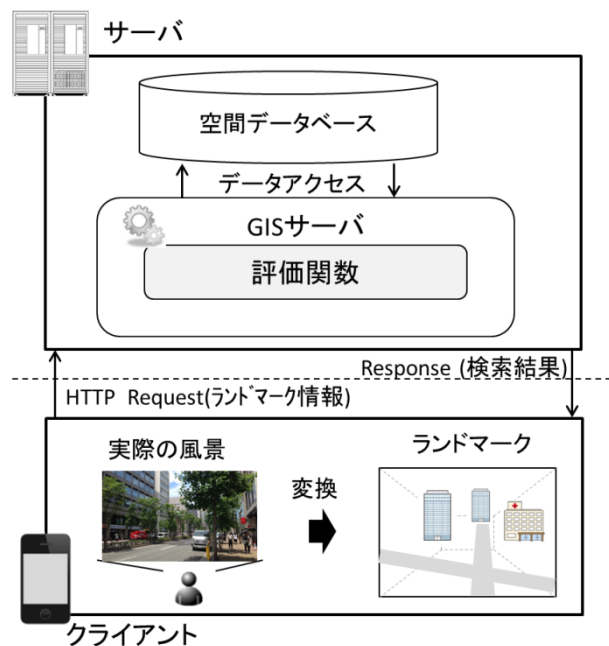


図 6-2 LSAS システム構成

6.1.3. 地図検索アルゴリズム

LSAS では、検索結果としてユーザのいる位置と向いている方向を示すため、最低でも 2 つ以上のランドマークを入力する必要がある。LSAS では、人の移動経路上にあるランドマークに着目している。そのため、ユーザは移動経路である道路上にいないことを前提としている。つまり道路上でない空間（例えば、広大な草原上にいる場合）は、今回は対象外としている。ランドマーク同士の位置関係については、ユーザの移動経路上にある道路に対して右側にあるか、左側にあるか、また同じ側にある特定のランドマークに対して、他のランドマークがそれよりも手前にあるか、奥側にあるか、といった相対的な位置関係を用いる。また当該ランドマークに対する情報として、ランドマークの種類や名称を文字列で入力する。以上を示したランドマークの位置情報と文字列情報を検索条件として用いる。

検索の結果、複数の場所が候補場所となる可能性がある。その場合は、候補場所におけるランドマークの密集度により、優先度を付与することとする。ランドマークが密集しているということは、ユーザの視覚内に入力されたランドマークが全て入っている可能性が高いことを示す。逆にランドマーク間の位置が離れている場合、ビルの影に隠れてユーザからは見えていないランドマークが検索された可能性がある。その場合、そのランドマークはユーザが注視したランドマークでない可能性が高いため、候補場所でないかもしれない。以上のことから、今回はランドマークの密集度によって候補場所に優先度を付与した。

アルゴリズムを以下に示す。なお、ユーザが配置したランドマークの種別（レイヤ）を T とし、配置されたランドマークの個数を k とする。また右側の手前から i 番目に置かれたランドマークを TR_i とし、左側の手前から j 番目に置かれたランドマークを TL_j とする。

Step1 検索対象とする地図の範囲を設定する．予め検索範囲をある程度絞っておくことにより，検索の効率性を向上させることができる．

Step2 ユーザによって設定された左右のランドマークを受けて， TR_i ， TL_j を設定する．

Step3 検索範囲にある TR_i ， TL_j のランドマークを空間 DB から検索する．

Step4 TR_i の検索結果 x 個からなるランドマークの集合を P とし，座標を TRA_x とすると， $P=\{p_x(TRA_1, TRA_2, \dots, TRA_x) / x=1, \dots\}$ ，として表現される．同様に TL_j の検索結果 y 個からなるランドマークの集合を Q とし，座標を TLB_y とすると， $Q=\{q_y(TLB_1, TLB_2, \dots, TLB_y) / y=1, \dots\}$ と表現される．

Step5 集合 P ， Q にあるランドマーク同士の距離を算出し，各ランドマーク間の距離和 L が小さくなる組み合わせを総当たりに探索し，検索結果候補 r とする．この時，距離和が小さい順にソートしておく．

Step6 距離和が小さい組み合わせから，左右それぞれ最も手前に設定した 2 地物の座標から垂直二等分線を引き，残りのすべての地物が Step1 で設定した位置関係に合致するかを判断し，合致するもののみを検索結果候補として残し，それ以外を候補から削除する．

Step7 合致するものを距離和 L が小さい順に，検索結果 r を表示する．

実際の利用場面においては，Step1 の検索範囲をモバイル端末が具備している GPS 受信機を用いて，大まかな位置として特定し，それを元にして設定することも可能である．また，Step6 における左右それぞれ最も手前にある 2 地物は，道路を挟んで向き合って存在しているとは限らず，数十メートルずれていることも考えられる．そこで，Step6 で設定する道路中心線を意味する垂直二等分線については，マージンを持たせて検索の幅を広げることとも想定される．図 6-3 はマージンを 20° に設定した場合を示している．図中オレンジの範囲が右奥と設定された地物が合致判定される範囲を示す．

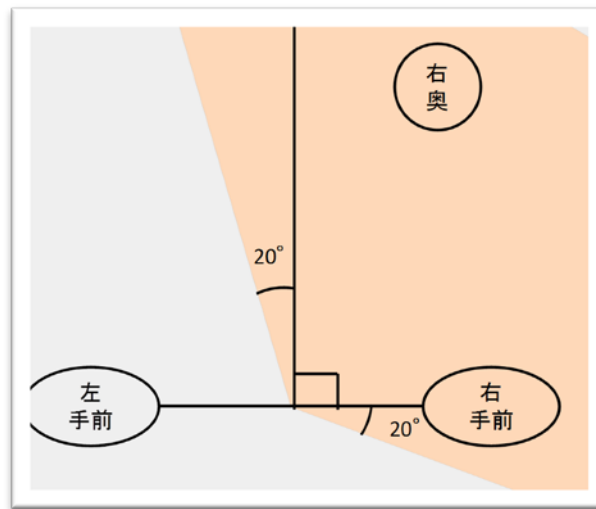


図 6-3 道路中心線に対する検索範囲の幅

6.2. LSAS のアプリケーション開発

LSAS は、ユーザが風景中で注視したランドマークを用いて検索するため、それを入力するためのユーザインターフェースが重要である。そこで図 6-4 に示すように、ランドマークの情報を入力するための LSAS アプリケーションを開発した。今回は、道路を中心としてその左右に存在しているランドマークの情報をを用いて当該場所を検索するためのアプリケーションを開発した。注視したランドマークをテキストフィールドに文字列として入力する。左右それぞれ 3 つずつ入力できるように画面設計しているが、必ずしも 6 個すべて入力する必要はない。また入力するランドマークは、通り沿いにあるもののみとし、遠くに見える山などは対象外とする。また入力する順番は、必ずしも手前からである必要はない。

今回は、表 6-2 に示す情報のみで地図検索できるかを確認するためのものであるため、ランドマークを文字列として入力するシンプルなユーザインターフェースとした。しかし将来的には、モバイル端末上でのアイコン入力や音声入力を検討したい。

検索する建物名を入力してください。

「右1」、「左1」は入力必須です。それぞれ手前にある建物名を入力して下さい。

入力クリア

検索開始

図 6-4 LSAS アプリケーション画面

検索ボタンを押下すると、入力されたランドマークの情報がサーバに送信され、6.1.3 で示した検索アルゴリズムによって候補地が算出される。図 6-5 に検索結果の表示例を示す。画面右部に検索結果が優先順位に従って表示される。候補地にはリバースジオコーディングにより取得した住所が付記されている。候補地を選択すると、当該場所の地図が表示され、設定されたランドマークに対応する実際の位置が示され、さらにユーザの位置と向いている方向が矢印で表示される。



図 6-5 LSAS による検索結果表示例

6.3. 実データを用いた LSAS の評価実験

LSAS の有効性を被験者実験により検証した．本実験では，京都市の市販電子地図（縮尺 25,000 分の 1）を用いた．京都市は，街路が格子状となっており，それに沿ってランドマークが多く存在しているため，評価場所として適切と考えて選定した．実験では，この市販地図からランドマーク的役割を果たす点地物を抽出し，PostgreSQL[102]の空間 DB である PostGIS[103]を用いて地図データベース（地図 DB）を構築した．しかしこの市販地図には，限られたランドマークしか格納されておらず，一方でユーザはそれ以外のランドマークを注視すること多いと思われるため，Google の地図サービスである Google ストリートビューを用いて，街路上にあるランドマークを手作業で地図 DB に登録した．この作業では，市販地図と内容が重複するものについては対象外としている．図 6-6 に示す通り，今回はランドマークが多数存在している京都市の烏丸通，四条通，河原町通の 3 道路を対象にランドマークのデータを作成した．手作業で入力したランドマークは，292 個（烏丸通：49 個，四条通：130 個，河原町通：113 個）である．

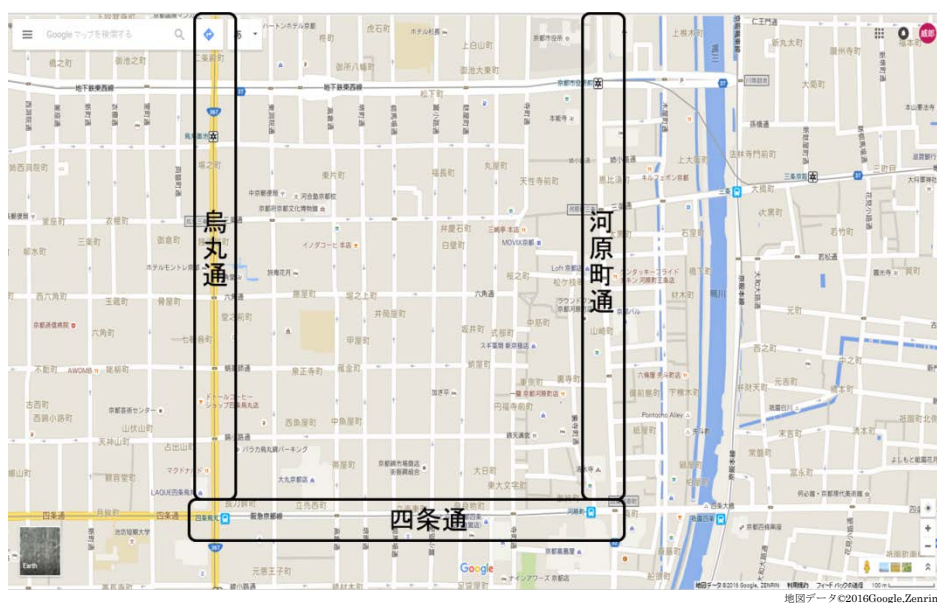


図 6-6 評価実験で対象とした 3 道路

実験では，（１）Google ストリートビューを用いて，被験者がある地点で注視したランドマークを LSAS に入力し，当該場所が検索できるかどうか（検索適合性）を確認する．また，（２）Google ストリートビューと現地で注視するランドマークの差異の 2 つについて評価する．

(1) 検索適合性に関する評価

実験では、被験者が Google ストリートビューのある地点で注視したランドマークを 6.2 で示した LSAS アプリケーションを用いて入力し、当該場所が検索できるかどうか（検索適合性）を調査した。本実験は、述べ 20 人（男 16 人，女 4 人）に対して行った。本実験では、選択した場所を相手に伝えることを想定し，ランドマークを挙げてもらった。

実験の結果，20 人中 14 人（70%）が，LSAS を使って想定した場所を検索できることを確認した。検索に失敗したケースとしては，被験者が入力したランドマークが地図 DB になかった場合が 3 件，被験者がランドマークの名称を省略語で入力した場合（例えば，ファミリーマートをファミマと省略）が 2 件，被験者がランドマークを取り違えた場合が 1 件見られた。

例えば，図 6-7 に示す場所では，被験者は左側に「Loft」，右側に「KFC」，「FLYING TIGER」と 3 つのランドマークを入力したが，KFC が地図 DB では「ケンタッキーフライドチキン」で登録されていたため，検索に該当しなかった。これらについては，検索ロジックの見直しや地図 DB の拡充などを実施することにより改善できると考える。



図 6-7 LSAS で検索に失敗した場所

また実験に参加した被験者からは，ランドマークの名称や種類に加えて，建物の特徴（色や形），ビル名や看板などもランドマークとしての特徴となるため，地図 DB に加えたほうがよいとの意見が聞かれた。

(2) ストリートビューと現地とで注視するランドマークの違い

次に、上述した実験で用いた Google ストリートビューで注視したランドマークと、実際現地に行って注視したランドマークとに違いが生じるかどうかについて評価した。本実験は、被験者 3 人（男 2 人，女 1 人）で、上記の 3 道路に対して実施した。ストリートビュー画面と現地写真の比較を図 6-8～図 6-10 に示す。また、被験者がストリートビュー画面で注視したランドマークと現地で注視したランドマークの比較を表 6-3～表 6-5 に示す。網掛けした部分は、ストリートビュー画面と現地とで共通して挙げられたランドマークであることを示す。



図 6-8 烏丸通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較

表 6-3 烏丸通におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較

被験者	ストリートビュー画面		位置	現地	
	左	右		左	右
A			奥	ドトール	
	ローソン			ローソン	セブンイレブン
	喫茶店	ホテル	手前	喫茶店	レストラン
B			奥	ドトール	
	ローソン	セブンイレブン		ローソン	セブンイレブン
	北陸銀行		手前		井戸
C			奥	ドトール	
	ローソン	セブンイレブン		ローソン	セブンイレブン
	L Café		手前	L Café	Spin Hair

烏丸通においては、ローソンやセブンイレブンといったコンビニエンスストアについては、ストリートビュー画面および現地で共通して注視され、各被験者においても挙げられている。現地では、ストリートビュー画面からは見ることができなかった井戸や、Spin Hair、L Caféといったランドマークが挙げられた。井戸については、実際に現地に行かないと確認することができないランドマークである。また Spin Hair や L Café は、Google ストリートビューでは、画質の制約からその文字列を認識することができなかった。

四条通においては、とらや、カメラ店（ナニワ）がストリートビュー画面および現地で共通して注視され、各被験者においても挙げられている。現地においては、マツモトキヨシや中央信用金庫といったストリートビュー画面からは確認することができなかったランドマークが挙げられている。



図 6-9 四条通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較

表 6-4 四条通におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較

被験者	ストリートビュー画面		位置	現地	
	左	右		左	右
A			奥	マツモトキヨシ	
	とらや			中央信用金庫	
		カメラ店	手前	とらや	カメラのナニワ
B			奥	マツモトキヨシ	
	とらや	日新火災		中央信用金庫	カメラのナニワ
		カメラ店	手前	とらや	JTB
C			奥	マツモトキヨシ	
				中央信用金庫	カメラのナニワ
	とらや	ナニワ	手前	とらや	JTB

河原町通においては、パチンコ、ドコモ、ファミリーマートがストリートビュー画面および現地で共通して注視され、各被験者においても挙げられている。現地においては、遠方に確認できた Round 1 がランドマークとして注視されている。



図 6-10 河原町通におけるストリートビュー画面と現地写真の比較

表 6-5 河原町におけるストリートビュー画面と現地で注視したランドマークの比較

被験者	ストリートビュー画面		位置	現地	
	左	右		左	右
A	パチンコ		奥	Round 1	
		ドコモ			
			手前	パチンコ	ドコモ
B			奥		
	パチンコ	ドコモ		パチンコ	
		ファミリーマート	手前	Suit Select	ファミリーマート
C			奥	Round 1	
	パチンコ	ドコモ		パチンコ	ファミリーマート
			手前		

以上に示す通り、ストリートビュー画面と現地とで注視されるランドマークについて比較した結果、概ね特徴的なランドマークについては共通して挙げられていることを確認した。よって、(1) で示したストリートビュー画面を用いた評価実験結果から、現地で行った場合においても概ね同様の結果が得られるものと推察される。

一方、ストリートビュー画面では死角となって確認することができなかったが、現地では注視できたランドマークも散見された。ストリートビューは、道路上から撮影した写真であるが、現地では歩道から見た風景であるため、両者に見え方に差が生じたと思われる。

6.4. まとめ

本章では、ルートマップの視点に立ち、都市空間内（風景内）で人が注視したランドマークを検索の手掛かりとし、ランドマーク同士の位置関係や、ランドマークの種類、看板に示された文字列などの視覚的な特徴を検索条件とする地図検索方法（LSAS）を提案した。LSASの特徴は、見たままの風景、あるいはその記憶をそのまま検索キーとして利用できる点にある。これにより、読図スキルに不安のある人であっても、地図検索を容易に行えることが期待できる。

LSASの評価に際して、市販地図に格納されているランドマークには地物数に制限があるため、Google ストリートビューを参照しながら、手作業でランドマークを空間 DB に登録した。本空間 DB を用いた評価実験では、70%の被験者が注視したランドマークから当該場所を検索できることを確認した。検索に失敗したケースにおいては、入力したランドマークの文字列に揺らぎがあったためであり、類語検索やあいまい検索などを検索ロジックに組み込むことで改善を図ることが可能である。また Google ストリートビューと実際の場所において注視するランドマークに違いが見られるかどうかを確認したところ、現地でしか見えないランドマークがあり、一定の限界があることが確認できたが、画面上で見えていればどちらの場合も注視するランドマークに大きな差異は見られなかった。このことから、ストリートビューを用いた評価実験の結果は信頼できると考える。

本論文で示した LSAS アプリケーションは、ランドマークの種類や名称を文字列として入力したが、より直感的なユーザインタフェースを実現するためには、アイコンや音声などを用いた入力があると考えられる。それらの実装については今後の課題とする。

7. おわりに

地理情報システム (GIS) は、地図情報、それに付随する様々な属性情報をコンピュータ上で表示、管理、分析するシステムである。紙地図とは異なり、地図のシームレスな拡大・縮小、スクロールなどの表示ができるのに加え、空間的特性を分析するための高度な機能も備わっている。従来は、専門家など GIS のユーザは限られていたが、情報処理技術の進歩に伴い、GIS を取り巻く状況も大きく変化した。システムの高度化、インターネット網の整備、モバイル端末の普及など、利用環境が整備されたことによって、GIS は徐々に利用範囲を拡大していった。2000 年代初頭に画面描画と通信を非同期で行い Web ページ部分更新を特徴とする Ajax を適用した Ajax-GIS の登場により、GIS は日常生活の中においても一般的に利用されるものとなった。Ajax-GIS はシステムの制約上、従来の GIS に比べ機能面において制約が生じている。

3 章では、Ajax-GIS におけるシステムの制約に対して、サーバサイドレンダリング技術を用いることで高機能化を実現した。具体的には、GIS の主要機能であり業務システムで多用される特定のレイヤの表示・非表示の切り替え、図形の作成や編集、削除などをリアルタイムの描画処理することで、Ajax-GIS の操作性を損なうことなく、高機能化を実現した。実データを用いた評価実験では、リアルタイム性を確保し、ユーザストレスなしにこれら機能の有効性を実証した。一方で、サーバサイドレンダリングは、多数のクライアントからのリクエストがサーバに集中すると、性能劣化を生じる。そこで、サーバサイドレンダリングを実行する複数のサーバの負荷状態を監視し、特定のサーバに負荷が集中しないように処理を動的に分散する手法を実現した。本手法についても実データを用いた評価実験を行った結果、従来の負荷分散手法に比べて最大 20% 処理時間が短縮できることを確認した。こうして Ajax-GIS が抱える地図描画に関する課題を解決し、高機能化を実現した。

一方、GIS には地図を利用する側においても課題がある。地図を利用する上では空間認知に関する能力が必要であり、また空間をイメージする能力や実際の風景や地形と地図とを照合する経験も必要とされる。そのため、こうした能力や経験に乏しいユーザの中には、地図をうまく利用できない場合がある。そこで本論文では、地図利用の中で最も利用頻度の高い地図検索に着目し、空間認知負荷の小さい 2 つの地図検索方式を提案した。

5 章では、空間イメージを構成する地物として重要な要素であるランドマークに着目し、曖昧な空間イメージ中から想起されるランドマークの種類や相対的位置関係を検索条件とする地図検索方式 (ILS) を提案した。実地図データを用いた評価実験では、約 5 個のランドマークを配置することにより、ユーザの空間イメージに対応する場所を検索できることを確認した。

6 章では、さらに空間認知負荷の小さい地図検索方式として、都市空間内 (風景内) で人が注視したランドマークを検索の手掛かりとし、ランドマーク同士の位置関係や、ランドマークの種類、看板に示された文字列などの視覚的な特徴を検索条件とした地図検索方法

(LSAS)を提案した。市販地図に加え手作業でランドマークを登録した地図データベースを用いた評価実験では、70%の被験者が注視したランドマークを手掛かりとして当該場所を検索することができた。さらに入力するランドマークのキーワードに対して、あいまい検索や類語検索などを検索ロジックに組み込むことで、さらに検索成功率は向上すると思われる。

今後は、ILS, LSASの実システムへの適用を検討する。さらに最新デバイスを活用しながら地理情報システムの高度化に関する研究を継続していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙な中にあっても大変丁寧かつ熱心にご指導およびご助言を頂いた立命館大学情報理工学部の仲谷善雄教授を始め，泉朋子講師，北村尊義助手に心より深く感謝致します。また，副査としてご助言，ご指導を頂きました立命館大学情報理工学部の桑原和宏教授，ならびに川越恭二教授に深く感謝致します。

筆者の所属する三菱電機（株）開発本部 役員技監 田中健一氏，先端技術総合研究所 所長 藤田正弘氏，総務部長 山崎肇氏，システム構築技術部長 中村稔氏，情報技術総合研究所 リアルタイムプラットフォーム技術部長 小中裕喜氏には，格別のご配慮を賜り，良好な研究環境を与えていただきました。人材開発センター主管技師長 瀬尾和男氏，地理情報通信技術グループマネージャ 伊川雅彦氏には，本研究を進める上で，多くのご示唆とご教示をいただきました。また本研究の過程において，亀井克之氏，渡辺昌志氏には多大なるご指導，ご協力をいただきました。さらに，同社の諸先輩，同僚には，研究を遂行する上で多くのご協力をいただきました。以上の方々に，心よりの感謝を捧げます。

最後に，筆者の研究生生活を心身ともに支えてくれた妻清香，絶えず明るい笑顔で励ましてくれた娘美羽，希羽に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 橋本雄一：「地理空間情報の基本と活用」，古今書院（2009）
- [2] 升本眞二，塩野清治，坂本正徳，弘原海清：「地質情報と GIS・地質図情報の特殊性について」，情報地質 Vol. 8, No. 2 P 99-106 (1997)
- [3] 王尾和寿，鈴木雅和：「国土数値情報による流域を単位とした土地利用変化の解析」，ランドスケープ研究，65(5)，pp.861-864，(2001)
- [4] 松岡繁，綾田春樹，浅里幸起：「準天頂衛星初号機 「みちびき」 による民間利用実証の推進（衛星通信，電波伝搬，一般）」，電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播，111(128)，pp.63-68(2011)
- [5] 柴崎 亮介：「地理空間情報活用推進基本法入門：NSDI 法と関連動向の解説」，日本加除出版（2008）
- [6] 村山 祐司，柴崎亮介：「GIS の理論」，朝倉書店(2008)
- [7] Aronoff, Stan: "Geographic information systems: a management perspective", Geocarto International , Volume 4, Issue 4 , pp.58 (1989)
- [8] D.Crane, E.Pascarello, D.James: "Ajax in Action" , Manning Publications (2005)
- [9] L.D.Paulson: "Building Rich Web Applications with Ajax", Computer, October, pp.14-17(2005)
- [10] 竹内豪，竹内まち子，佐野洋：「Ajax 技術を用いた語学教育用例検索インタフェースの開発」，情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告, Vol.2008, No.13 pp. 147-154 (2008)
- [11] 今井修：「日本及び外国の GIS の現状と展望」，騒音制御, Vol.29.2, pp.76-82. (2005)
- [12] 碓井照子：「英米における GIS 研究とその応用的利用」，奈良大学紀要 Vol.23, pp.123-132(1995)
- [13] 碓井照子，亀田弘行，角本繁：「阪神・淡路大震災の復興過程における瓦礫撤去状況調査からみた神戸市長田区における防災 GIS 導入効果の分析」，地理情報システム学会講演論文集 Vol.4, pp.39-42 (1995)
- [14] 三菱電機，NTT ドコモ，パスコ：「次世代 GIS の実用化に向けた情報通信技術の研究開発成果報告書」，(2006)
- [15] 三菱電機 WEB 地理情報システム構築パッケージ PreSerV,
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/service/preserv/> (2016/6/12 アクセス)
- [16] 角本繁，吉川耕司，畑山満則，小杉幸夫：「自治体情報管理と全庁型 GIS の構築－平常業務システムからリスク対応型地域情報システム－」，地理情報システム学会講演論文集, Vol11, p173-176 (2002)
- [17] 角本繁，浦山利博，山田博幸，古戸孝，小杉幸夫，浅野耕一：「災害軽減化と緊急時の地理データベース構築方法に関する研究－時空間情報システムと自治体・防災情報環

- 境の構築（１）－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p229-232（2004）
- [18] 浦山利博，角本繁，古戸孝，山田博幸，畑山満則：「時空間データベース構造における多重仮説データ記述方式の研究－時空間情報システムと自治体・防災情報環境の構築（２）－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p233-236（2004）
- [19] 古戸孝，神山正樹，山田博幸，浦山利博，角本繁：「国際化社会に対応した多言語対応防災情報システムの検討－時空間情報システムと自治体・防災情報環境の構築（３）－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p237-240（2004）
- [20] 小笠原茂宏，浅野耕一，水田敏彦，小川淳二，角本繁：「時空間 WebGIS の開発と一般向け災害情報システムへの応用－時空間情報システムと自治体・防災情報環境の構築（４）－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p241-244（2004）
- [21] 山田博幸，古戸孝，浦山利博，角本繁：「公開型 DB 構造の時空間 GIS で構築する防災情報システム－時空間情報システムと自治体・防災情報環境の構築（５）－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p245-248（2004）
- [22] 山下潤，伊藤和博：「洪水ハザードマップによる都市住民の防災意識の変換－福岡市を事例として－」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p159-162（2004）
- [23] 阪田知彦，寺木彰浩：「リンク内部の道路閉塞状況の予測を目的とした建物倒壊による道路閉塞シミュレーションシステムの開発」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p175-180（2004）
- [24] 東明佐久良，森康俊，大石裕，緩鹿奈緒美，立松岳史，清水一史，鍵屋一：「地震時の建物倒壊・延焼・避難シミュレーション・モデルの研究・開発」，地理情報システム学会講演論文集，Vol13，p185-188（2004）
- [25] 大佛俊泰，大谷郁子：「首都直下型地震を想定した防災計画のための鉄道利用者の時空間分布推定」，地理情報システム学会講演論文集，Vol14，p453-458（2005）
- [26] 寺木彰浩，阪田知彦：「大震災発生後の建築物被災状況把握に関する基礎的検討」，地理情報システム学会講演論文集，Vol11，p183-186（2002）
- [27] 増田真吉，福山薫，中島美由紀，角本繁，山田博幸，北村清隆：「被災地における現場情報の収集・整理と復旧業務への利用－中越地震における時空間情報システムを活用した自治体支援」，地理情報システム学会講演論文集，Vol14，p141-144（2005）
- [28] 浅沼亜紀，高橋秀幸，木下哲男：「能動的情報資源を適用した災害情報の集積・管理機能の設計」，研究報告コンシューマ・デバイス & システム (CDS)，pp.1-5（2012）
- [29] 澤田雅浩，八木英夫，林春男：「震災発生時における関連情報集約とその提供手法に関する研究：新潟県中越地震復旧・復興 GIS プロジェクトの取り組みを通じて」，地域安全学会論文集 7，pp.97-102（2005）
- [30] 上田洋，高橋徹，加藤文彦，松村冬子，小林巖生：「Linked Open Data による公開情報と GPS 位置情報を用いたイラスト地図アプリの作成」，人工知能学会全国大会論文集，Vol.27，pp.1-4（2013）

- [31] 仲谷善雄：「不便が楽しい：観光の新たな支援枠組み」，計測と制御，特集「不便の効用を活用するシステム」，第 51 巻，第 8 号，pp.732-737 (2012)
- [32] 川上浩司：「不便の益を活用するシステムデザイン」，計測と制御，第 51 巻，第 8 号，pp.699-703 (2012)
- [33] 杉山貴教，大窪健之，金度源，林倫子：「清水寺周辺における帰宅困難観光客避難誘導計画の改善に関する研究」，歴史都市防災論文集，pp.127-134 (2015)
- [34] Jesse James Garrett Ajax: “A New Approach to Web Applications”
<http://adaptivepath.org/ideas/ajax-new-approach-web-applications/>, (2016/5/7 アクセス)
- [35] <https://maps.google.com/>, (2016/5/7 アクセス)
- [36] Open GIS Consortium, <http://www.opengis.org/>, (2016/5/7 アクセス)
- [37] Simple Feature Access For Specification, <http://www.opengeospatial.org/standards/sfs>, (2016/5/7 アクセス)
- [38] 玉田隆史，中村泰明：「多次元データ構造に基づく 3 次元仮想都市空間の管理と高速描画」，電子情報通信学会論文誌 D，78(8)，pp.1205-1213 (1995)
- [39] 菊池瑤介，内田法彦，柴田義孝：「大規模災害を考慮したクラウド型災害情報共有システムの構築」，情報処理学会第 75 回全国大会，pp.4-813 (2013)
- [40] 小倉卓也，田村元臣：「自治体向けクラウド型防災システムの紹介 (2013 年 8 月 13 日版)」，研究報告情報システムと社会環境 (IS)，2013(5)，pp.1-7 (2013)
- [41] 藤田直子，熊谷洋一：「GIS を用いた地形と緑の連担性の分析による社叢空間を軸とした都市緑地の配置特性」，都市計画論文集，41(3)，pp.373-378(2006)
- [42] 酒井聡一，後藤真太郎，川口俊哉：「Web-GIS による商圈分析ツールの構築および地域利用に関する実証的研究」，地球環境研究，Vol.6，pp.125-130 (2004)
- [43] A.Sayar, M.Pierce, G.Gox: “Integrating AJAX Approach into GIS Visualization Web Services ” Proceedings of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services (AICT/ICIW 2006), IEEE Computer Society, pages 169 (2006)
- [44] 田中龍一，井上潮：「非同期通信による高インタラクティブ WebGIS フレームワークの研究」，地理情報システム学会講演論文集，Vol.15，pp.189-192 (2006)
- [45] 久保田貴文，垂水共之：「GoogleMaps を用いた地理統計データの可視化」，統計数理，Vol.55, No.1 pp.101-112(2002)
- [46] Fulton, S., & Fulton, J.: "HTML5 canvas", O'Reilly Media, Inc (2013)
- [47] Ferraiolo, J., Jun, F., & Jackson, D.: "Scalable vector graphics (SVG) 1.1 specification. World Wide Web Consortium (W3C) ". <http://www.w3.org/TR/SVG11> (2016/5/7 アクセス)
- [48] Mathews, B., Lee, D., Dister, B., Bowler, J., Cooperstein, H., Jindal, A., ... & Sandal,

- T. (1998). Vector markup language. World Wide Web Consortium Note.
- [49] Marrin, C. (2011). WebGL specification. Khronos WebGL Working Group.
- [50] L.D.Paulson: "Building Rich Web Applications with Ajax", Computer, October, pp.14-17(2005)
- [51] 竹内豪, 竹内まち子, 佐野洋:「Ajax 技術を用いた語学教育用例検索インタフェースの開発」, 情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告, Vol.2008, No.13 pp. 147-154 (2008)
- [52] Tony Bourke :「サーバ負荷分散技術」, オライリー・ジャパン(2001)
- [53] T.Morikawa, A.Inomata, M.Ikebe, Y.Okamoto, K.Fujikawa, H.Sunahara, S.Uda: "Proposal of Dynamic Resource Allocation Method for Load of Web Server in the Cloud", IEICE Tech. Rep., vol. 109, no. 438, IA2009-103, pp. 113-118, March 2010. 森川泰揮, 猪俣敦夫, 池部実, 岡本慶大, 藤川和利, 砂原秀樹, 宇多仁:「クラウドを考慮した Web サーバ負荷に応じた動的リソース割当て機構の提案」, 電子情報通信学会技術研究報告. IA, インターネットアーキテクチャ 109(438), pp.113-118(2010)
- [54] T.Yoshihara, M.Isomura, and H.Horiuchi: "Dynamic Load Balancing for Distributed Network Management", IEICE transactions on communications, Vol.J86-B,No.3, pp.438-448(2003)
吉原貴仁, 磯村学, 堀内浩規:「分散ネットワーク管理のための動的負荷分散方式」, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J86-B, No.3, pp.438-448(2003)
- [55] Guofeng Qin, Qiyang Li: " Dynamic Resource Dispatch Strategy for WebGIS Cluster Services", v4101 LNCS, Cooperative Design, Visualization, and Engineering- Fourth International Conference, CDVE2007, Proceedings, pp.349-352(2007)
- [56] M. Jo, Y. Jo, J. Oh, and S. Lee : "The design and implementation of dynamic load balancing for Web-based GIS services" The proceeding of 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, pp5-9(2001)
- [57] Pancheng W., Chongjun Y., Zhanfu Y., Yingchao R.: "A Load Balance Algorithm for WMS" Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 20-24 Sept., Toulouse, France. IEEE International, Volume5, pp2920-2922 (2004)
- [58] 坂入威郎, 渡辺昌志, 玉田隆史:「Ajax-GIS におけるサーバ負荷分散」, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2012, 第 4 分冊, pp.393 (2012).
- [59] JMeter, <http://jmeter.apache.org/> (2016/5/7 アクセス)
- [60] Java Remote Method Invocation
<http://docs.oracle.com/javase/6/docs/platform/rmi/spec/rmiTOC.html> (2016/5/7 アクセス)
- [61] David Waller, PhD, and Lynn Nadel, PhD: "Handbook of Spatial Cognition", Amer Psychological Assn (2012)

- [62] Shemyakin, F. N: "Orientation in space.", *Psychological Science in the USSR* 1 , pp.186-255 (1962)
- [63] 新垣紀子:「ナビゲーションにおける内的資源と外的資源」, *社会イノベーション研究*, 第1巻, 第1号, pp.61-78 (2005)
- [64] Okamoto, Kohei, Kei-ichi Okunuki, Toshibumi Takai: "Sketch map analysis using GIS buffer operation." *Spatial Cognition IV. Reasoning, Action, Interaction*. Springer Berlin Heidelberg, PP 227-244 (2005)
- [65] 佐藤浩一:「自伝的記憶の構造と機能」, 風間書房(2007)
- [66] Levine, M, Marchon, I., & Hanley, G.: "The placement and misplacement of you-are-here maps", *Environment and Behavior*, 16, pp.139-157 (1984)
- [67] Hart, Roger A., Gary T. Moore.: " The development of spatial cognition: A review. ", AldineTransaction, pp.246-288 (1973)
- [68] 谷直樹:「ルートマップ型からサーヴェイマップ型へのイメージマップの変容について」, *教育心理学研究*, Vol.28(3), pp.192-201 (1980)
- [69] 寺本潔, 大井みどり:「近隣における子供の遊び行動と空間認知の発達」, *新地理*, Vol.35(2), pp.1-20 (1987)
- [70] Lobben, Amy K.: "Navigational map reading: Predicting performance and identifying relative influence of map-related abilities.", *Annals of the association of American geographers* 97.1, pp.64-85 (2007)
- [71] 若林芳樹:「認知地図の空間分析」, 地人書房 (1999)
- [72] 村越真, 若林芳樹:「GIS と空間認知」, 古今書院(2008)
- [73] 若林芳樹:「空間の知覚と認知のモデル 地理空間の認知における地図の役割」, *認知科学*, Vol.15.1, pp.38-50 (2008)
- [74] 岡本耕平:「都市空間における認知と行動」, 古今書院 (2000)
- [75] 若林芳樹:「認知地図の歪みの計測方法に関する一考察」, 金沢大学文学部論集. 史学科篇 11 A1-A36 (1991)
- [76] Lynch Kevin (著), 丹下健三, 富田玲子 (訳):「都市のイメージ」, 岩波書店 (1968)
- [77] Raubal, Martin, and Stephan Winter. *Enriching wayfinding instructions with local landmarks*. Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [78] 中澤啓介, 北望, 高木健士, 井上智雄, 重野寛, 岡田謙一:「ランドマークの視認性に基づいた動的な案内地図作成」, *情報処理学会論文誌* 49.1 pp.233-241 (2008)
- [79] 古賀利郎, 岩田伸一郎:「市街地の景観における注視行動特性に関する研究」, *情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集*, Vol.31, pp.187-190 (2008)
- [80] Ishikawa, Toru, Uiko Nakamura: "Landmark selection in the environment: Relationships with object characteristics and sense of direction." *Spatial Cognition & Computation* 12.1 , pp.1-22 (2012)

- [81] 新垣紀子, 野島久雄:「方向オンチの科学」, 講談社 (2001)
- [82] 槻橋修, 山田恭平, 中村秋香, 平尾盛史:「被災地における街の記憶の復元と共有手法に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 79(699), pp.1129-1137 (2014)
- [83] 高木悟, 松本一則:「地図情報を利用した情報検索」, 情報処理, Vol. 41, No. 4, pp. 357-362 (2000).
- [84] 平松薫, 小林堅治, Ben Benjamin, 石田亨, 赤埴淳一:「デジタルシティにおける情報検索のための地図インタフェース」, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.12 (2000)
- [85] 加藤 誠, 大島 裕明, 小山 聡, 田中 克己:「地域コンテキストを考慮した動的な特徴空間に基づく地理情報例示検索」, 情報処理学会論文誌 52(12), pp. 3448--3460(2011)
- [86] 高橋克巳:「ジオワード・マイニングを用いたローカルサーチの研究」, Diss. 2006.
- [87] Enenhofer, M. J. "Spatial-query-by-sketch." Visual Languages, 1996. Proceedings., IEEE Symposium on. IEEE (1996)
- [88] Egenhofer, Max J., and David M. Mark. "The 9-Intersection: Formalism and Its Use for Natural-Language Spatial Predicates (94-1)." (1994).
- [89] 志水亨, 池崎正和, 渡邊豊英, 牛尼剛聡:「幾何学的位置関係に基づく地図検索」, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 3, pp. 522-531 (2009)
- [90] J.Chen, C.Li, Z.Li, and C.M.Gold: "A voronoi-based 9-intersection model for spatial relations", International Journal of Geographical Information Science, Vol.15, No.3, pp.201-220(2001)
- [91] M.Schneider, T.Behr: "Topological relationships between complex spatial objects", ACM trans. Database Syst., Vol.31, No.1, pp.39-81(2006)
- [92] MapFan イラストマップサービス: <https://www.mapfan.com/houjin/kankou/illust.html>, (2016/5/7 アクセス)
- [93] 仲谷善雄. "図による推論の研究の最新動向 (< 特集>「図による推論」)." 人工知能学会誌 9.2 (1994): 210-215.
- [94] 田中辰弥, 竹内亨, 鎌原淳三, 下條真司, 宮原秀夫:「マーキングマップによる空間認知に基づいた地域情報推薦手法」, 電子情報通信学会 第 14 回データ工学ワークショップ (DEWS2003) 論文集(2003)
- [95] 津川康雄:「ランドサインの成立過程と地域アイデンティティの関係」, 地域政策研究 8.1, pp.25-44 (2005)
- [96] Sorensen, A. D.: "A method for measuring the spatial association between point patterns.", The Professional Geographer 26.2, PP172-176. (1974)
- [97] 杉浦芳夫:「名古屋とその隣接地域における“アジアかぜ”の都市間拡散」, Geographical Review of Japan 48.12 , pp.847-867 (1975)
- [98] Leitner, Michael. "Residential patterns of graduate students and their professors—an application of spatial association and hot spots techniques." (2001)

- [99] 岡本耕平：「認知距離研究の展望」，人文地理 34.5, pp.429-448 (1982)
- [100] 川口太郎：「大都市圏の地域構造変化と郊外の生活圏」，人文地理 第50巻 第2号，pp.2014-209 (1998)
- [101] 櫻井広幸：「直感的操作に基づくものづくりに向けて」，日本官能評価学会誌 16.1 , pp. 36-42 (2012)
- [102] PostgreSQL : <http://www.postgresql.org/>, (2016/5/7 アクセス)
- [103] PostGIS : <http://postgis.net/>, (2016/5/7 アクセス)
- [104] 津川康雄：「地表空間におけるランドマークとその意義」，立命館地理学 9, pp.17-29 (1997)
- [105] Jansen, Bernard J., and Amanda Spink. "An Analysis of Web Documents Retrieved and Viewed." International Conference on Internet Computing. (2003)
- [106] 柳原崇男，三星昭宏：「方向感覚質問紙簡易版 (SDQ-S) を用いた視覚障害者の歩行能力測定と歩行支援システム評価への応用に関する研究-全盲者・重度弱視者を対象として」，土木学会論文集 D64.2, pp.285-298 (2008)
- [107] 竹内謙彰：「方向感覚質問紙 作成の試み (1)―質問項目の収集及び因子分析結果の検討―」，愛知教育大学研究報告，教育科学 Vol39, pp.127-140 (1990)
- [108] 村越真：「なぜ人は地図を回すのか 方向オンチの博物誌」，角川ソフィア文庫 (2013)
- [109] オギュスタン・ベルク：「日本の風景・西欧の景観」，講談社，pp.45 (1990)
- [110] 前田明子，星野裕司，尾野薫：「イメージに着目した日常生活における風景認識に関する研究」，景観・デザイン研究講演集，No.6, pp.154-159 (2010)

著者発表論文

本研究に関する主要論文

- [1] 坂入威郎, 玉田隆史, 亀井克之, 後藤幸夫, 中田秀男:「Ajax-GIS におけるサーバサイドレンダリングを用いたレイヤ制御と図形編集」, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.1 pp.146-153 (2010)
- [2] 坂入威郎, 渡辺昌志, 亀井克之, 玉田隆史, 後藤幸夫, 瀬尾和男:「Ajax-GIS におけるサーバサイドレンダリング処理の動的負荷分散と制御」, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.4 pp.891-898 (2013)
- [3] 坂入威郎, 渡辺昌志, 亀井克之, 小中裕喜, 北村尊義, 泉朋子, 仲谷善雄:「空間イメージ中にあるランドマークの相対的位置関係に基づいた地図検索方式」, 電気学会論文誌 C, Vol.136, No.10 (2016 年掲載予定)
- [4] Takeo Sakairi, Masahi Watanabe, Katsuyuki Kamei, Masahiko Ikawa, Takayoshi Kitamura, Tomoko Izumi, Yoshio Nakatani: "A Study on the Location Search by Landmarks in Consideration of the Spatial Image", 13th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (2016)

本研究に関する口頭発表等

- [1] Takeo Sakairi, Takashi Tamada, Katsuyuki Kamei, Yukio Goto: "Multi-layer Control and Graphical Feature Editing using Server-side Rendering on Ajax-GIS", HCI International (2013)
- [2] Takeo Sakairi, Masashi Watanabe, Hiroki Konaka, Tomoko Izumi, Yoshio Nakatani: "A study of the location search by use of relative position of landmarks from spatial cognition", In 2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 589-592 (2015)
- [3] 坂入威郎, 渡辺昌志, 小中裕喜, 泉朋子, 仲谷善雄:「空間的イメージに基づいた地図検索方式の検討」, 第 23 回 地理情報システム学会 学術研究発表大会 (2014)
- [4] 坂入威郎, 渡辺昌志, 亀井克之, 伊川雅彦, 泉朋子, 北村尊義, 仲谷善雄:「見た風景のイメージを検索キーとする地図検索手法」, 情報処理学会第 78 回全国大会 (2015)

その他

- [1] 坂入威郎, 十代田朗, 津々見崇:「過疎地域における地域情報基盤の 持続的活用に関する実証的研究」, 都市計画論文集, Vol.39 , No.3, pp.13-18 (2004)
- [2] Takeo Sakairi, Takashi Tamada, Hideo Nakata :「GIS Crisis-management systems using Ajax technology」, SICE Annual Conference, pp3043-3046 (2008)

- [3] 坂入威郎, 玉田隆史:「Web - GIS を活用した地域安全マップの作成に関する一提案」, 電子情報通信学会大会講演集, Vol.2006, pp.109 (2006)
- [4] 坂入威郎, 玉田隆史:「Ajax 応用 GIS 危機管理支援システム」, 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集, Vol.2008, pp.57-58 (2008)
- [5] 坂入威郎, 玉田隆史:「Ajax GIS を用いた危機管理支援システム—エレベータ管理への適用—」, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2008, No.4, pp.341 (2008)
- [6] 坂入威郎, 亀井克之, 玉田隆史:「Google Earth 連携三次元設備管理システム開発」, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2011, No.4, pp.342 (2011)
- [7] 坂入威郎, 渡辺昌志, 玉田隆史:「Ajax - GIS におけるサーバ負荷分散」, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2012, No.4, pp.393 (2012)
- [8] 渡辺昌志, 坂入威郎, 後藤幸夫:「差分データを用いた高速地図描画方式の検討」, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2013, No.3, pp.53 (2013)
- [9] 当麻英梨子, 玉田隆史, 坂入威郎, 亀井克之, 小中裕喜:「空間 DB を用いた並列地図簡略化手法」, 電気学会論文誌. C, 136(2), pp.210-217 (2016)
- [10] 当麻英梨子, 玉田隆史, 坂入威郎, 亀井克之, 小中裕喜:「大規模空間データベース上でのベクトル地図簡略化処理の並列化手法」, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.803-808 (2013)
- [11] 当麻英梨子, 坂入威郎, 亀井克之, 玉田隆史:「Google Earth と連携した 3 次元設備の見える化」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp.243 (2011)