

2009年度 修士論文

歩行者を対象とした  
地図情報システムに関する研究

— 屋内における位置特定手法 —

指導教授 大附 辰夫 教授

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科  
情報理工学専攻

5108B053-2

佐久間 拓也

2010年2月5日

# 目次

第1章 序論	1
1.1 本論文の背景と意義	2
1.2 本論文の概要	3
第2章 歩行者向け地図情報サービスの技術動向	4
2.1 本章の概要	5
2.2 屋外におけるLBSの技術動向	6
2.2.1 屋外向け携帯端末向け地図情報配信・ナビゲーションシステム	6
2.3 屋内におけるLBSの技術動向	9
2.3.1 屋内空間ナビゲーションサービス	9
2.3.2 屋内空間のデータ化・座標系の課題	9
2.3.3 位置測位, 位置情報の表示の課題	10
2.4 その他のLBSの技術動向	12
2.4.1 位置情報の解析とレコメンドサービス	12
2.4.2 Augmented Reality	12
2.5 本章のまとめ	15
第3章 屋内空間での位置測位手法	16
3.1 本章の概要	17
3.2 屋内における位置測位技術の概要とその精度とコスト	18
3.2.1 三角測量による測位手法	19
3.2.2 環境分析による位置特定	19
3.2.3 近接法	19
3.2.4 GPS互換の屋内位置測位(IMES)	20
3.2.5 RFID	20
3.2.6 Ultra Wide Band	21
3.2.7 WLAN	21
3.2.8 その他の無線を用いた位置測位	22
3.2.9 コストと管理面の課題	22
3.3 画像ベースの位置特定手法	23

3.3.1	3次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法	23
3.3.2	2次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法	23
3.3.3	マーカーを用いた位置特定手法	25
3.4	本章のまとめ	26
<b>第4章</b>	<b>ランドマークベースの位置特定システム</b>	<b>27</b>
4.1	本章の概要	28
4.2	システムの概要	29
4.2.1	提案システムの目的と意義	29
4.2.2	システムを構成する2つのフェーズ	32
4.2.3	屋内ランドマークと認識・検索手法	34
4.2.4	複数候補の提示と選択の要求	34
4.3	画像の特徴点・高次元特徴量	35
4.3.1	色情報を用いたSIFT	37
4.4	Bag-of-keypoints	37
4.5	本章のまとめ	40
<b>第5章</b>	<b>提案システムの実装と実験</b>	<b>41</b>
5.1	本章の概要	42
5.1.1	実験システムの実装の概要	43
5.2	実験の概要	45
5.3	実験の結果と考察	47
5.3.1	マッチング精度に関する考察	47
5.3.2	実行時間に関する考察	50
5.4	本章のまとめ	53
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>54</b>
	謝辞	57
	参考文献	58

# 第1章

## 序論

## 1.1 本論文の背景と意義

近年、無線通信技術やハードウェアの小型化技術を背景に、メールや Web ブラウジングなどをはじめとする、様々な携帯端末向けサービスが生み出され、実用化されている。

中でも、利用者の位置に応じた情報配信サービス (Location Based Service:LBS) は、2007 年度より総務省が携帯電話事業者に対し、第三世代携帯電話端末への GPS(Global Positioning System) 測位機能の搭載を原則義務付けしたことから、人々に広く受け入れられつつある。これまでに歩行者向けのナビゲーションサービスや子供のみまもりサービス、位置情報の記録を用いたレコメンドサービス等の画期的なサービスが生み出され、提供されている。このような GPS 測位による位置情報を用いた屋外サービスが実現・運用されてくるに従い、新たなビジネスチャンスを求め、LBS 分野の注目は屋内空間を対象にしたものに移ってきている。

屋内空間の特徴・課題として、携帯電話端末に搭載されている GPS を用いての位置の計算が難しいという点がある。GPS による位置測位では、GPS 衛星から発信された電波を用いて三角測量を行い、端末 (利用者) 地球上の座標を計算するが、屋内空間では GPS 衛星からの電波の多くが遮断されるため、三角測量が困難であるか、又は多くの測位誤差が発生する。また、階層構造をもつ建物では、経度や緯度の情報だけでなく、利用者がどの階層のどこにいるのかという情報を得ることができなければ、地図情報の表示やナビゲーションを行うことができない。

屋内における位置測位技術に関しては、無線 LAN、RFID、Bluetooth や UWB 等の無線通信技術を応用した位置測位技術が提案されてきた。しかし、多くの方法は新規にインフラを構築する必要があり、その初期投資 (デバイスの費用や機器の設置の費用) や維持費 (故障修理や電気代) の課題や、LBS・LBS ビジネスの実現のために、それらの費用を誰が負担すべきなのかという課題があり、この課題に対する決定的な答えは未だ見つかっていない。

このような背景を踏まえ、本研究では、携帯端末に搭載されたデジタルカメラの撮影画像を用いる「位置特定」を対象とした研究を行い、ランドマークベースの位置特定システムを提案する。提案するシステムは、データである画像情報とその位置情報データベースに格納し、これを利用者の現在位置と結びつけるシステムであり、位置情報の取得・管理とサービスの運用を、LBS の運営者が統一がして行うことが可能となると考えている。

ここで、「位置特定」について定義を行う。「位置特定」とは利用者が自分の求める精度の位置を、空間上に実在するオブジェクトと結びつけることで、LBS システムや利用者が空間上の位置を認知することを指す。

また、「位置測位」についても定義を行う。「位置測位」とは、利用者やシステムが求める精度に関わらず、単に無線通信等の技術を用いて「位置を計算する」こととする。

## 1.2 本論文の概要

本論文では、屋内空間内でのLBSアプリケーションの利用における、位置特定の方法の一つの形として、カメラ撮影画像を用いたランドマークベースの位置特定システムを提案する。本論文は5章で構成される。

第2章「歩行者向け地図情報サービスの技術動向」では、多様化しつつある現在のLBSの技術についてその全体像を示す。屋外・屋内のLBSについてその構成技術を述べ、また最新の話題についても取り上げる。

第3章「屋内空間での位置測位手法」では、第2章で取り上げたLBSに関する技術・研究の中でも、本研究の研究対象である屋内空間での位置測位手法・位置特定手法について無線技術を用いた位置測位の原理や、画像を用いた既存の屋内位置特定手法についてその概要や原理を取り上げる。

第4章「ランドマークベースの位置特定システム」では、カメラ撮影画像を用いたランドマークベースの屋内位置特定手法について提案を行い、システムの目的や意義、利点やシステムの仕組みについて説明する。

第5章「提案システムの実装と実験」では、画像を用いた屋内位置特定手法についてその画像処理部を実装し、実験を行った結果を示す。実験・実装の詳細や考察も合わせて述べる。

第6章「結論」では、本論文の結論と今後の課題を述べる。

## 第2章

# 歩行者向け地図情報サービスの技術動向

## 2.1 本章の概要

ハードウェアの小型化・高性能化や無線通信網の整備・普及，そしてGPS測位方式の普及により，位置情報を元に携帯端末に地図を配信する地理情報配信システムは既に広くサービスが展開され受け入れられつつある．一つの大きなアプリケーションであった自動車・歩行者を対象とした地図情報表示とナビゲーションサービスの開発が一段落し普及しつつあるに伴い，更なるビジネスチャンスを求めLBSの技術開発は多様化しつつある．

本章では，多様化しつつあるLBSの全体像と，その要素技術について取り上げる．

第2節「屋外におけるLBSの技術動向」では，屋外でのLBS技術の動向の例として，地図情報配信サービス，ナビゲーションサービス，みまもりサービスについて，実際の運用例などを挙げて紹介する．

第3節「屋内におけるLBSの技術動向」では，最近のLBS技術開発の一つのターゲットとなりつつある，屋内空間についてその要素技術と技術課題を紹介する．屋内空間のデータ化・座標系の課題，経路情報の課題，位置測位，位置情報の表示の課題等がある．

第4節「その他のLBSの技術動向」では，屋外・屋内問わず今後の発展が期待できる最新のLBS関連技術として，位置情報の解析・レコメンドサービスやAugmented Realityについて紹介する．



## 2.2 屋外におけるLBSの技術動向

屋外における地図表示とナビゲーションの技術開発は、国内外の各種企業や研究機関の努力・成果により、デジタル形式の地図データの製作や、位置情報の取得というLBSの土台となる基本的な技術開発は一段落したといえる。

本節では、現在サービス展開されている屋外歩行者向けLBSについて、地図配信・ナビゲーションシステム、みまもりサービスについて取り上げる。加えて最近の話題として、準天頂衛星システムについても取り上げる。

### 2.2.1 屋外向け携帯端末向け地図情報配信・ナビゲーションシステム

地理情報のデータは多種・多様かつ膨大なものであり、携帯端末内の記憶媒体に全てのデータを保存し、使用することは現実的ではない。従って、現在の携帯端末向け地図情報配信システムでは、無線通信を通じて携帯端末と地理情報システムがクライアント・サーバ型の構成で位置情報や地図画像のやり取りを行い、サービスを実現している。

経路の探索においては、交差点をノード、道路をリンクと見立てたグラフとし、ダイクストラ法 [4] などのグラフの最短経路探索のアルゴリズムを使用することで、目的地までの経路を算出する。ここで、必ずしも計算上で最短の経路が歩行者に好まれるわけではなく、ギャップが生じる事もある。グラフの重みを適切に変更することにより、歩行者の嗜好に近づけていくことが可能であり、ゼンリンやナビタイム等のアプリケーション運営会社を中心に精力的な調査・開発が行われている。

#### EZナビウォーク

EZナビウォーク [22] はKDDI株式会社のau携帯電話端末でGPS受信機を搭載した機種へのサービスである。端末に搭載されたGPS受信機により携帯電話本体が位置演算を行うため、短時間のGPS測位を可能とし、連続した現在位置確認も実現している。

EZナビウォークは、GPSで得られた位置情報を使用して現在位置付近の地図を表示するだけでなく、目的地を設定することによって、鉄道・タクシー・バスも踏まえたルートから最適な経路を探索し、テキストやアイコンだけでなく、音声や携帯電話のバイブレーションを使用してのナビゲーション機能も備わっている。

近年では、2D地図表示・文字のナビゲーションだけに留まらず、3次元地図を用いたナビゲーションや、音声入力によるナビゲーション、音声による目的地選択などサービスの幅を広げつつある。



図 2.1: Google ストリートビュー (Web サイト [24] より) .

### Google マップ, Google マップストリートビュー

検索サービス大手の Google が展開する地図情報サービスが Google マップ, Google ストリートビュー [24] である。Google マップは 2 次元地図情報の提供サービスであり, ゼンリンの地図データと共に衛星画像も利用できる。一方の Google ストリートビューは道路を撮影しその動画像を元に, 3 次的に再構成し表示するサービスである。再構成したデータをユーザは比較的自由にクローズアップや視点の変更ができ, 自宅や職場に居ながらにして, 目的地付近の経路の事前確認などをより視覚的・直感的に行えるようになった。Google ストリートビューの利用の様子を図 2.1 に示す。

Google マップ・Google ストリートビューはサービス開始当初こそ PC 用途が中心であったが, 次第にモバイル端末にもサービスへの対応がなされてきた。Google マップ, Google ストリートビューのサービスは, 国内の他の LBS 運営会社と異なり無料で利用できるため今後更に利用者が増えていくと予想される。

### みまもりサービス

近年子供を狙った犯罪が増加しており, 子供のいる保護者の不安に答えるサービスの一つとして, 子供が今どこにいるのかを親が知ることができる, みまもりサービスが注目されている。AU(KDDI) は個人向けサービスの「安心ナビ」, NTT ドコモは法人向け (学校や塾等) 子供見守り ASP サービス「こどもニタ」を提供している。

これらの、サービスは子供にGPS搭載の携帯端末を持たせ、子供のGPS搭載端末が定期的にGPS位置情報を測位し、サーバーに送信することによって、保護者や学校へ通知等を行うことによって実現されている。

### 準天頂衛星システム

GPSは10m程度の誤差で位置測位精度を世界各地に提供するが、位置情報を元に車両同士の衝突を防ぐ等の、ITSアプリケーションにはより精細な位置情報が求められるサービスも存在する。

準天頂衛星システムは、GPSの補完のために日本が構築を目指している準天頂衛星を利用した衛星測位システムであり、文部科学省、総務省、経済産業省、国土交通省の4つの省が共同で研究開発を進めている。この準天頂衛星システムにより、位置測位精度の向上に加え、GPS信号補足の高速化等も期待できる。

カーナビゲーション等の分野でランドマーク(風景や道路標識)データベースとカメラ画像を用いて、GPSの位置測位を補正する研究(日立製作所、トヨタ自動車)がなされてきたが、準天頂衛星システムの実現により、このような補正システムを必要とすることなくGPS単体の測位で十分な測位が可能となると期待される。

## 2.3 屋内におけるLBSの技術動向

屋外においてはGPSを用いた位置情報の取得が普及し、カーナビゲーションシステムやGoogle マップ等のサービスが既に実用化されており、技術開発は一段落した感がある。これに従い近年は、屋内をターゲットとした研究開発が増えてきている。本項では、屋内のLBSの技術動向について取り上げる。

### 2.3.1 屋内空間ナビゲーションサービス

屋外と同様、屋内LBSの最もメジャーなアプリケーションはナビゲーション [17] となると考えられる。東京駅や新宿駅など都市部の駅などでは入り組んだ複雑な構造となっており、場所に不慣れな旅行者等にとって、屋内のナビゲーションサービスの需要は大きいと考えられる。

屋外と比較した時の屋内空間のナビゲーションの特色として、その立体構造について考慮する必要がある点がある。また、屋外では道路をリンク、交差点をノードとみなしてグラフ構造を作成すればよかったが、屋内空間においてはグラフ構造を生成するための、明確な目安というものが存在しない。エスカレーターやエレベーターなど、単純に直線距離を重みとして定式化することができない経路も存在し、経路の設置や重みの定式化の研究が複数発表されている [10][19]。また、屋外ナビゲーションとの経路探索の統合なども将来的な課題となる。

### 2.3.2 屋内空間のデータ化・座標系の課題

ナビゲーションなどのLBSは屋内空間のデータが定義されて始めて、そのアプリケーションを作成することができる。屋外においては国土地理院が古くから道路情報ベクトルデータや標高のメッシュデータ等の、地形情報を作成・管理してきたが、屋内空間内でのサービスが現実的になるに従い、新しい枠組みが求められるようになってきている。例えば、地理情報の測量を行う場合には、現状では測量法により国家資格を持つ測量士や測量士補しか測量ができないなどの制約があり、急速に進歩・発展するLBSの成長・発展の防げとなることが懸念される。

屋内空間については、現状経済産業省が中心となり [28]、技術・仕様の検討を行っている。2009年度現在の、複数の方法が検討されている。例えば、対象とする屋内空間を代表する点である「代表点」を世界座標系(WGS84系)で定義・位置を測位し、この代表点を元に屋内空間ないの座標を算出する方法等がある。屋内データを作成する方法としては建物の建設時に作成したCAD図面を用いる方法が有力である。

### 2.3.3 位置測位，位置情報の表示の課題

屋内空間においてLBSを行うためには，屋外と同様利用者の位置情報を取得する必要がある．しかし，建物のコンクリートの壁などの影響により屋内ではGPS衛星が発信する電波を利用者の端末が補足ことが難しいため，屋内では屋外と同様な位置測位を行うことができない．代替となる技術は複数研究されているが，コストとそのビジネスモデルの兼ね合いで未だに決定打となっている手法は存在していない．屋内における位置測位・位置特定手法については第3章にて詳しく述べる．

また，複雑な構造を持つ屋内空間をどのようにユーザに表示するかという課題もある．多くのLBSアプリケーションが携帯端末を用いるものと予想され，このため利用者に提示できる情報は端末のディスプレイに制限されてしまうという課題がある．屋外と同様に2Dのデータ表示を行う手法や，2.5Dのデータを表示する手法 [1][11][17] 等，複数の情報提示手法が提案されている．また事項で述べる Augmented Reality などの新しいインターフェース技術もLBSとの親和性が高いとされ，注目を集めている．



図 2.2: 屋内地図の研究事例 (文献 [1]) .

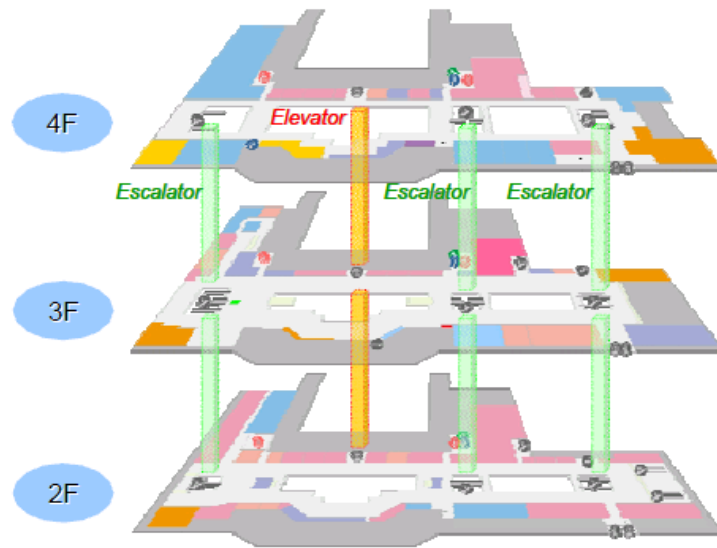


図 2.3: 屋内地図の研究事例 (文献 [11]) .

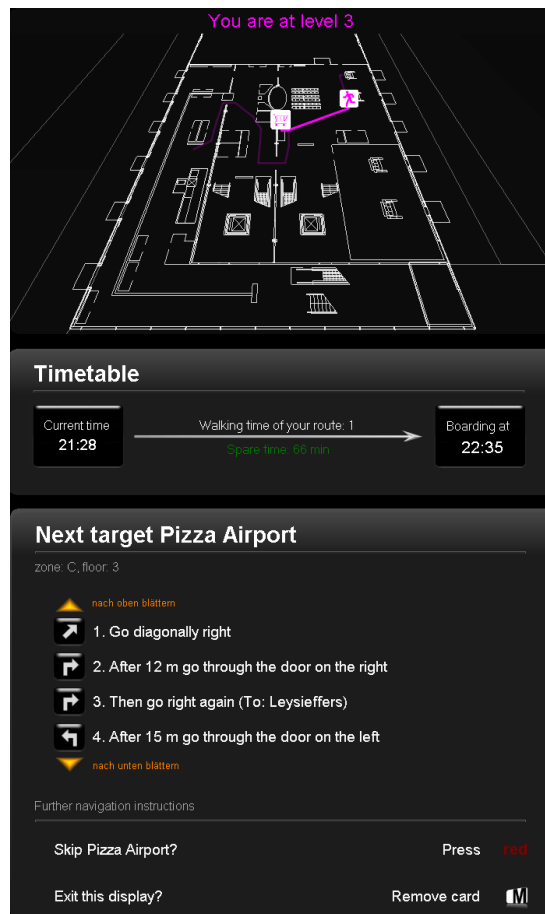


図 2.4: 屋内地図の研究事例 (文献 [17]) .

## 2.4 その他のLBSの技術動向

ハードウェア技術の進歩によるモバイル端末の性能向上や、クラウドコンピューティングなどのサーバー技術等の進歩の恩恵を受け、ナビゲーションだけに留まらない多彩なサービスの技術開発が進められている。

本節では、今後のLBSの技術開発の主流になると予想される、位置情報の解析とレコメンドサービスの話と、拡張現実（Augmented Reality）の話について軽く触れる。

### 2.4.1 位置情報の解析とレコメンドサービス

GPSが携帯電話端末にほぼ標準搭載された現在、プライバシーの課題などは依然残るものの、個人・団体の位置情報を収集することが以前に比べ難しくなくなった。それに従い、この収集された位置情報を利用し、次のサービスに繋げる技術の開発も、近年盛んになってきている。

収集された位置情報の分析には、Webのレコメンドシステムにおいて良く採用される「動線解析」の手法を位置情報に適用する手法が主流である。

#### ターゲティング情報配信 ASP サービス「次ナビ」

位置情報の分析技術は、様々な企業や研究機関が技術開発を行っているが、NTTドコモ[29]は2009年3月に他社に先駆けて、位置情報を活用したターゲティング情報配信 ASP サービス「次ナビ」を提供を開始している。「次ナビ」は、携帯電話向けコンテンツ配信サービスの提供を行う企業に対し、NTTドコモが取得した利用者の位置情報を元に、位置情報と連動した情報配信機能、利用者行動分析の機能の両方を提供する ASP サービスである。このサービスを利用する企業は、利用者の現在位置情報や利用者の行動を予想情報により、広告内容を変更し効果的な広告戦略を行うことができるようになる。

### 2.4.2 Augmented Reality

コンピュータビジョンやロボット工学の研究分野にて、仮想現実（Virtual Reality：VR）や拡張現実（Augmented Reality:AR）等の仮想の物体を現実空間上に表示する研究が古くからなされてきた。現在では、携帯端末に高精細な映像が撮影できるカメラや位置情報を取得するためのGPS、加速度センサ、地磁気センサ等が搭載されるようになりハードウェア技術の進歩もあいまって、携帯端末においてもVirtual RealityやAugmented Realityの技術が適用・転用できるようになり、新しいサービスの可能性が生まれつつある。

## LBS と Augmented Reality

Augmented Reality の技術は、カメラを通じて利用者の身の回りの風景に付加情報を重ねる性質上、LBS のとの相性が良くユーザインターフェースを大幅に向上させることができるとされている。

例えば、LBS の代表的なアプリケーションであるナビゲーションサービスにおいては視覚的にわかりやすい地図表示や道案内の実現が求められるが、Augmented Reality をナビゲーションに用いて目的地の方角や現在進むべき道の等のナビゲーション情報を現実世界に重ね合わせて提示することにより、地図を読むことが苦手な利用者にとって、直観的に周辺の地理情報を容易に把握できるようになると期待される。これは複雑な構造を持つ屋内空間のナビゲーションにおいても同様に有効な情報提示手法になる私は考えている。

次項では、携帯における Augmented Reality 技術の代表的な例としてセカイカメラを取り上げる。

### セカイカメラ

セカイカメラは頓智・(トンチドット) が提供する iPhone アプリケーションである。セカイカメラは、デジタルカメラで撮影した景色の上に、エアタグと呼ばれるその場所に関連する付加情報をリアルタイムに重ね合わせて表示する Augmented Reality アプリケーションである。セカイカメラの動作の様子を図 2.5 に示す。



図 2.5: 風景に付加情報を重ねるセカイカメラ (Web サイト [32] より)。



## 第2章 歩行者向け地図情報サービスの技術動向

セカイカメラは Augmented Reality アプリケーションであるものの複雑な画像処理技術は用いておらず、端末に搭載された測位デバイスによって取得した位置情報と方角の情報によって、画面上のエアタグの位置を決定している。

現在のセカイカメラは位置情報を GPS と PlaceEngine で、方角の情報を iPhone 内臓の電子コンパスより取得し利用している。

## 2.5 本章のまとめ

自動車のカーナビゲーションシステムから一般に広く普及し始めた個人向けLBSは、現在では携帯端末を用いたものが主流になり、より人々の生活に身近なサービスとなりつつある。

LBSのサービスもナビゲーション(道案内)のみに留まらず、位置情報に応じたレコメンデーションサービス・広告サービスや、人の行動を解析してビジネスに生かす法人サービス等技術分野の裾野が広がりつつある。また、今後は、端末が取得する位置情報のみに留まらず、駅の改札での情報や買い物履歴の情報等と組み合わせられて、より個人の嗜好にマッチしたサービスが生み出されていくと私は期待している。

LBSが人々の生活に身近になるにつれ、より高い位置情報の精度が必要となる。様々な研究がなされてはいるものの、現状では位置測位・位置特定の決定打となる手法は存在していない。これは主に、多くの手法において広がる屋内空間をカバーするだけのインフラ整備に、莫大なコストが必要とすることが予想されるからである。

## 第3章

# 屋内空間での位置測位手法

## 3.1 本章の概要

第2章で述べたように、無線通信技術やハードウェアの小型化技術を背景に、位置情報(Location Based Service)に関係する様々なサービスの研究・開発がなされている。LBSにおいて利用者やその端末の位置情報はサービスに必要な不可欠な要素であり、現在までに屋内・屋外を対象とした様々な位置測位手法が提案・実現されている。屋外における位置特定には衛星を用いたGPS(全地球測位システム)測位が代表的かつ広く普及しており、GPS測位デバイスを持ってさえいれば世界中の至る所で自身の位置測位を知ることができる。

一方、屋内空間においては、衛星からの測位電波が届かないためこのGPSによる測位を行うことはできない。代替となる技術・手法が各所で研究されているものの、装置の設置・維持コスト等の課題から決定的な解決案は見つかっていない。

本章では、現在研究・技術開発が行われている、屋内における位置測位技術についてその全体像を示す。

第2節「屋内における位置測位技術の概要とその精度とコスト」では、無線通信技術を応用した位置測位技術について、その技術の概要を示す。位置情報の算出方法や通信方式による違い、コストの課題などについて取り上げる。

第3節「画像ベースの位置特定手法」では、本研究で提案するシステムでも採用している携帯カメラによる撮影画像や動画を用いる方針をとっている位置特定の手法の研究事例について紹介する。3次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法、2次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法、マーカーを用いた位置特定手法について取り上げる。

## 3.2 屋内における位置測位技術の概要とその精度とコスト

先に述べたとおり、衛星からの電波を用いる GPS 位置測位は、屋内空間ないでは壁などの影響により衛星からの電波を捕捉できないため、位置測位を行うことができない。

屋内における位置測位手法は多数提案されており、多くの位置測位手法は無線通信をベースとしている。既存の屋外の GPS 測位を拡張したものや、RFID、UWB、Bluetooth、WLAN(IEEE 802.11) 等、様々な方法が提案されている。初めに、各種手法の位置測位精度とコストの関係を図 3.1 に示す。

屋外での GPS に代表されるように、位置測位手法の多くは無線通信の技術を応用したものである。本稿では、無線通信による位置の測位手法について、その原理と技術例をとりあげる。無線通信を用いた位置測位手法では電波の特性を利用し、既知の点を基準として三角測量により位置を算出するものが主流であるが、三角測量にも電波強度を測定するものや到着時間を用いるもの等複数の方式があり、また他にその場その場の「環境の特徴」を元に位置を推定する手法などもある。

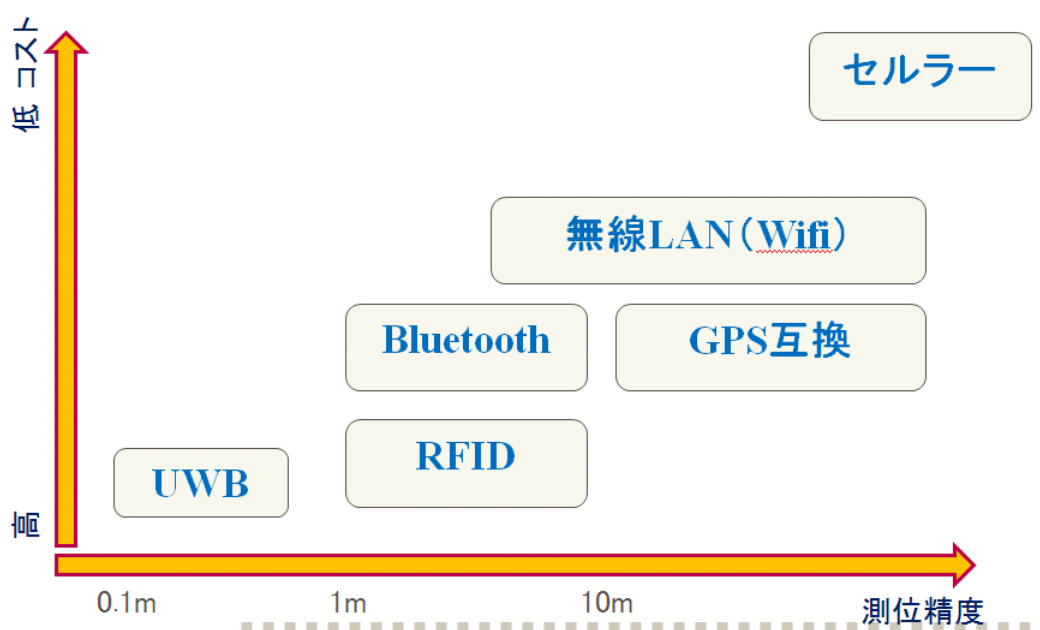


図 3.1: 屋内における位置特定手法の測位精度とコスト。

### 3.2.1 三角測量による測位手法

無線を用いた三角測量はまず2つの分野に分類することができる。一つは距離を見積もる lateration , もう一つは角度を用いて三角測量の交点を算出する angulation である。lateration には電波強度を測定する RSS(received signal strengths) や、到着時間を用いる TOE(time of arrival) , TDOA(time difference of arrival) 等が代表的である。angulation には AOA(angle of arrival) が代表的である。角度を用いている性質上、2次元空間では2個、3次元空間では3個の測位基地局で測位を行うことができる。しかし、ハードウェアが複雑かつ大きくなる点や無線通信ではシャドイングやマルチパスの影響があるため、常に正しい角度情報を得られる保証がない点等がある。

### 3.2.2 環境分析による位置特定

LBS用途を対象とした位置測位のレベルでは、三角測量を行い直接座標を求めるのではなく、周囲の電波状況などの「環境の特徴」を元に位置を推定する手法も有効である場合が多い。後に述べる PlaceEngine も環境分析による位置特定を行っている手法の一つである。環境の特徴は location fingerprint と表されていることが多い。環境分析による位置特定には、確率的手法や k 近傍法 (k-NN) を用いたもの、ニューラルネットワークや SVM(Support Vector Machine) を用いた手法などがあり、機械学習関係の手法が多く使われる。

環境分析による位置特定処理はオンラインステージとオフラインステージの2つの段階に分けられる。オフラインステージでは端末が周囲の状況、つまり近隣の基地局やの調査を行う。オンラインステージではオフラインステージで端末が収集したデータと、データベース内の過去に収集されたデータとを照合し、端末の位置を推定する。環境分析での位置特定においては、電波強度が反射や回折によって影響を受けやすい点が課題となる。

### 3.2.3 近接法

先に挙げた2つの方法に加えて、近接法 (Proximity) という考え方がある。この近接法は極めて単純な考え方であり、端末が基地局や測位局より受ける電波の中で、最も電波強度の強い基地局について、その基地局の位置を端末の位置とする考え方である。

### 3.2.4 GPS 互換の屋内位置測位 (IMES)

IMES は indoor messaging system の略称であり宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と測位衛星技術が共同開発した技術である。IMES は GPS 衛星の識別に使われる PRN コード (擬似雑音記号) を拡張し、それを屋内の送信機に割り当てることで、地上で「GPS 衛星を見立てて」GPS 測位を行う。

IMES の最大の長所は GPS との互換性があることにより、屋内・屋外の位置測位をシームレスに行うことができる点や、小型化し省電力化が求められている携帯端末に対し、新規にデバイスを搭載する必要がなく小型化・省電力化の点で優位であるとされる。

IMES は日本国内において最も代表的な GPS 互換の位置測位手法である。海外においては文献 [13] や GPS 信号再放射システム HNRKIT[25] 等の技術が開発されている。

IMES の価格は発信装置は 1 台当たり数千円程度に抑えられると言われている。

### 3.2.5 RFID

RFID(Radio Frequency IDentification) タグを用いた位置測位手法も数多く提案されている。この手法では、RFID タグを屋内空間に設置し、設置された RFID タグの情報を RFID リーダで読み込むことによって位置情報を取得する。RFID にはそのデータの取得方法によりパッシブ型とアクティブ型の 2 つがあり、それぞれ測位できる範囲とリーダ整備のコストが異なる。

パッシブ型 RFID は、屋内空間に設置される RFID タグには電源を内蔵されておらず、電源を内蔵せず、リーダーライターから発信される信号を電力に変換することにより、情報を通信する。パッシブ型 RFID タグは電源を内蔵しないため、低コストで製造でき、ほぼ永続的に使用することができるといったメリットを持っている。しかし、電波の受信範囲が現状 1m ~ 2m と、空間的な適用範囲は狭いことが欠点である。パッシブ型 RFID を用いた位置測位には、屋内 (屋外) 空間内に多数のタグを設置する方法、案内板などの人の目に着くランドマークにのみ設置し、歩行者の位置はその RFID タグの位置とする方法 (Proximity) 等がある。

アクティブ型 RFID では、タグに電池を内蔵しておりタグ自身が自発的に通信電波を発信する。従って、タグとリーダーライター間において数十 m の通信距離が可能である。歩行者 (携帯端末) は、アクティブ型 RFID から発せられる電波を元に三角測量や環境分析などの手法を用いて位置情報を算出する。

電池を内蔵していることから非接触電力伝送技術を利用しているパッシブ型 IC タグと比較して小型化に難があり、パッシブ型 RFID に比べて高価である。また、電池がなくなると交換を余儀なくされるため大量設置には向かないとされる。

アクティブ RFID タグの場合価格は 1 個 2,000 ~ 3,000 円程度であるようである。これに加

え、電池の消費に合わせて電池の交換のための電池本体・メンテナンス費用が必要となる。

### 3.2.6 Ultra Wide Band

Ultra Wide Band(UWB)は無線通信方式の一つで、近距離で高速通信が可能な無線技術である。一般的にUWBと呼ばれ、UWBを用いた位置測位は日立製作所等が「日立 AirSense」という製品を発表・発売しており [26]、誤差 30 センチメートルの精度で位置を検知することが可能であると発表されている。

UWB無線電波の反射波を用いることで、人やモノにタグや測位デバイスを持たせることなく位置情報を取得する技術なども発表されているが、現状はかなり高価であり<sup>1</sup>、普及には今しばらく時間が必要であると予想される。

海外においては UbiSense[33] という製品もある。

### 3.2.7 WLAN

WLAN(無線LAN)アクセスポイントから受け取る電波を用いた位置特定手法は、LBSだけでなくロボット工学の分野などでも古くから研究されており、多数の技術がある [16][2][23][20][18][31]。国内ではソニーコンピュータサイエンス研究所にて開発された、PlaceEngine[18][31]が代表的である。

WLAN基地局は国内の家電量販店でおよそ4000円からの値段で販売されているが、家庭や商店、駅などにおいてWifiアクセスポイントが広く普及し始めており、新規投資の他にこの既存のインフラを利用できるのがWLAN(無線LAN)による位置測位の最大の長所である。ビジネスモデルの観点では一番有力とされている。

#### PlaceEngine

現在、屋内での測位を行うことができる手法の代表例としてPlaceEngineについて紹介する。PlaceEngineはソニーコンピュータサイエンス研究所にて開発された無線LANを用いた位置測位手法であり、2章にて取り上げたセカイカメラ [32]にもそのコア技術として組み込まれている。

この位置測位システムはWiFiアクセスポイントが定期的に発信するビーコンパケットをクライアント機が受信し、そこで得られるアクセスポイントのMACアドレスと受信信号強度(RSSI:received signal strength indication)を位置測定に用いる。機器が周辺のアクセスポイントの信号強度を測定し、その結果が $(AP_1RSSI_i, \dots, AP_nRSSI_n)$ であった場合、機器の位置の推定には以下の式によって行われる。ここでdistはRSSI値から位置を推定する関数

<sup>1</sup>UWB 端末(送信機)4台、UWB 測位基地局(受信機)4台で三百万円から



とする。

$$pos = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{1}{dist(RSSI_i)} pos(AP_i) \quad (3.1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{dist(RSSI_i)} \quad (3.2)$$

PlaceEngine の大きな特徴として実世界集合知による位置データベースの更新がある。これはユーザの位置リクエスト時にアクセスポイントが発見された場合は新規のアクセスポイントデータベースに登録する等を行い、現実世界得られた誤差情報を次々とデータベースに反映していくものである。無線 LAN を用いたサービスは、無線 LAN 基地局の増設や移動の課題に対応する必要があるが、PlaceEngine ではユーザからのフィードバックを貰い、これを元に適時自動的にデータベースを更新することで、位置測位インフラの維持コストを抑えている。街中に設置してある無線 LAN のビーコンパケットを利用するだけであるので、サービス運用者が無線 LAN 基地局を持つ必要がないため、導入のための費用が少なく済み、電気料金のような維持費の面でも優位性がある手法である。

### 3.2.8 その他の無線を用いた位置測位

これまで取り上げたものの他に、Bluetooth を用いた手法や、セルラーネットワークを用いた位置測位手法がある。セルラーベースの位置測位は端末の基地局の位置とその電波を用いて測量を行うものである。現在の携帯電話網を利用するため新規のインフラ構築測位を行うことは可能であるが、測位精度は高くない傾向にある。セルラーベースの位置測位は、屋外での GPS 測位での GPS 衛星の補足を高速化するための目安として現在広く使われている。

### 3.2.9 コストと管理面の課題

ここまでに取り上げたように、現在までに多数の屋内位置測位の技術が開発・発表されている。しかし、屋内での位置測位インフラは未だほとんど普及していないのが現状である。これは、設備コストの課題、特にその設置のコストや維持のコストとそれを誰が受け持つのかというビジネスモデルの課題である。

設置のためのコストには、機器本体のコストだけでなく、設置するための基地局等の座標の測量のための人件費なども必要であり、維持コストには基地局等の故障時のメンテナンスや電気代などが含まれる。屋内の LBS(屋外でも同様である) は大きな市場規模は期待されているものの、ナビゲーションに続くコアアプリケーションが未だ生み出されておらず、コストを負担してインフラを構築するメリットが未だ見出されていない。

### 3.3 画像ベースの位置特定手法

次に、画像ベースの位置特定手法について述べる。近年携帯電話端末にはカメラが搭載されるものが多く、これを画像処理技術と組み合わせて利用する方針である。

画像を用いた位置特定手法は、ロボット工学・ロボットビジョンの技術分野において古くから技術開発がなされてきた [6]。コンピュータの場所を特定するという点では、ロボットも携帯端末を持つ人間も同じであり、現在はまだ多くないものの今後はロボットビジョンの技術を応用し、歩行者用に移植する位置特定手法は今後多く発表されると私は予想している。

無線ベースの画像ベースの位置特定手法のメリットとしては、携帯端末・インフラの両方面で、専用のデバイスを新たに加える必要がないことがある。

本項では、画像ベースの位置特定手法の例として、3次元データベースを用いる手法、3次元データベースを用いる手法、マーカーを用いる方法を紹介する。

#### 3.3.1 3次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法

屋外を対象とした手法であるが、奈良先端技術大学院大学にて3次元地理データベースを用いた位置特定手法が提案されている [15]。

この手法は、ナビゲーションやARへの応用を目指し、全方位カメラを用いて作成した3D地理データ(図3.2)を元に、ユーザ撮影のカメラ静止画像を入力とし、その特徴点についてマッチングを取り、投票によりカメラの位置や向きを特定を行う。

この手法は、位置特定の手法として非常に優れている面があるが、文献 [15] において位置の特定の処理までに1分(CPU:Pentium4 3GHz, Memory:1.5GBの環境にて64秒)もの時間が必要であると記述されている。これは、現状時間がかかり過ぎでありユーザビリティの点で課題が残っている。

#### 3.3.2 2次元データベースと画像処理を用いた位置特定手法

文献 [8] は、屋内における Augmented Reality を用いたナビゲーションを目的とした位置特定手法である。

文献 [8] では、カメラ撮影による画像をエッジ抽出処理などを用いて、通路の「角」の情報を抽出し、2次元屋内地図データ(フロアデータ)の中から探索しマッチングを取ることにによって位置の特定を行う。文献 [8] の手法は、用意するのが2Dのフロアデータのみであり、ナビゲーションを想定した位置特定システムとしては、位置特定のために新規に用意するものがないため(ナビゲーションのために2Dのフロアデータが必要不可欠である)、コストの観点では理想的である。

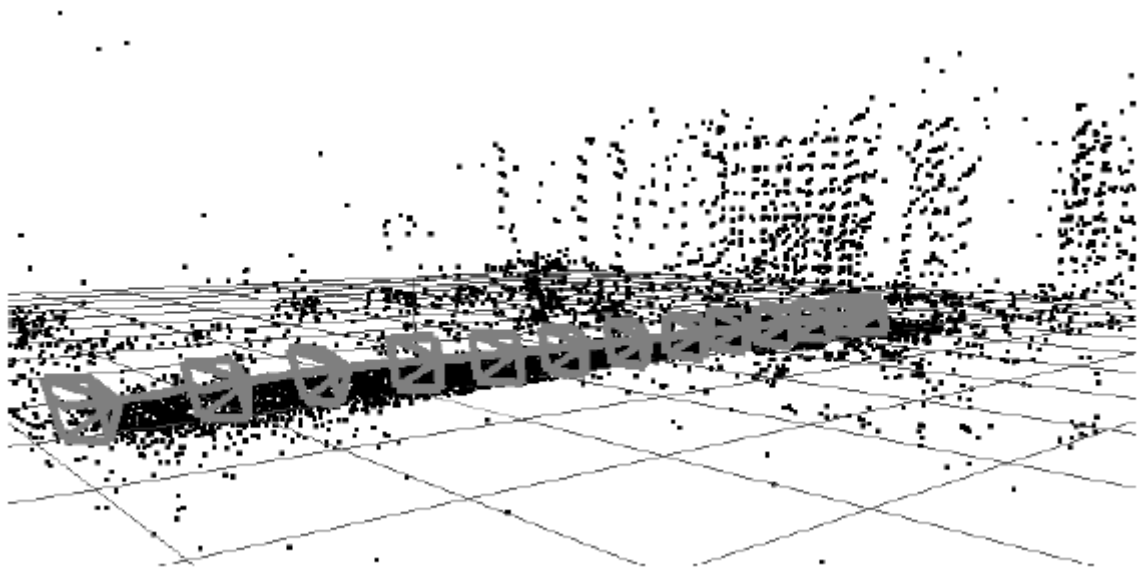


図 3.2: 中川らの研究による 3次元特徴点データ (文献 [15] より) .

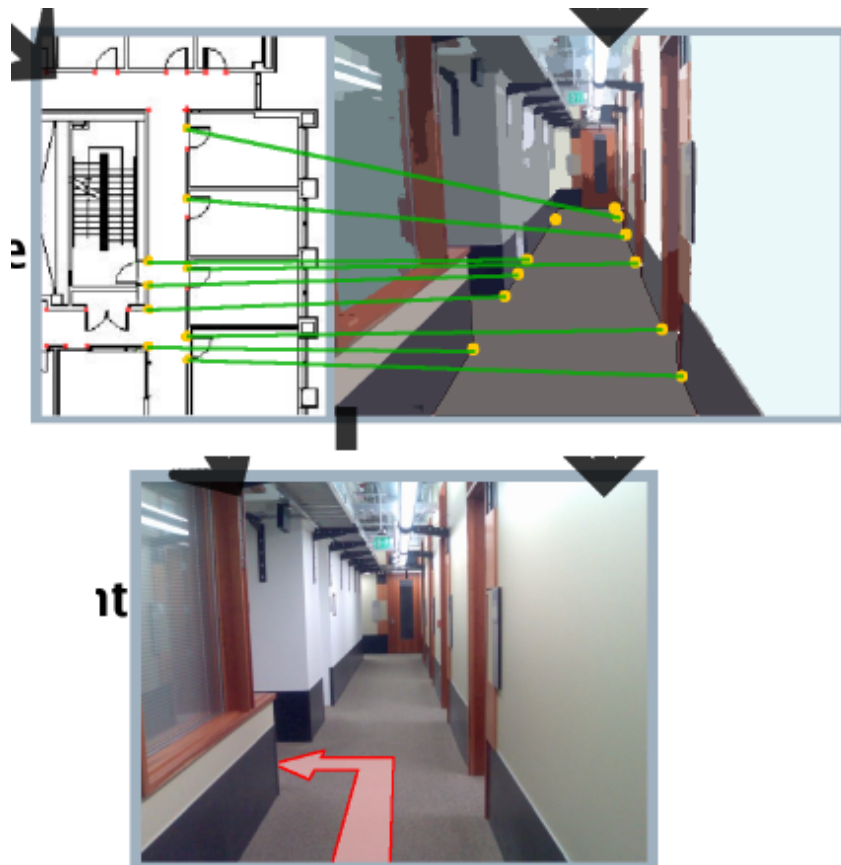


図 3.3: 画像情報と 2次元地図情報のマッチングと経路情報の表示 (文献 [8]) .

しかし、通路の「角」の情報とフロアデータ内の「角」の情報とを RANSAC アルゴリズムを用いてマッチングさせているが、探索数がネックとなり位置の特定までに時間を要するようであり、文献 [8] の著者らは試行錯誤の上、Wifi 測位と組み合わせ、Wifi 測位により 10m 程度まで情報を絞りこんだ上で、拡張現実のために必要な位置精度・カメラ向きを特定させる方法が現実的であるとの結論に至っている。

文献 [8] における画像情報と 2 次元データベースのマッチングの様態及び、経路情報表示の画像への重ね合わせによるナビゲーションのデモの様子を図 3.3 に示す。

### 3.3.3 マーカーを用いた位置特定手法

先に取り上げた二つの方法は実空間には何も手を加えないという点が一つのメリットであるが、位置情報の目安として ARtoolkit[21] のマーカーや QR コード等を屋内空間内に配置し、ユーザがそれをカメラ画像で読み取ることで利用者の位置情報を特定すれば良いという考え方もある。これがマーカーを用いた位置特定手法である。

マーカーを用いた位置特定手法では、実空間上に位置情報を保持するマーカーを配置し、これを携帯端末のカメラで撮影し、現在位置の情報を取得する。マーカーを用いた位置特定手法には文献 [1][12] 等がある。

技術的なハードルもほぼクリアされているが、景観を損なうとの指摘も多く、技術開発・研究の場では何かと敬遠されがちである。

### 3.4 本章のまとめ

屋内空間においては、衛星からの測位電波が届かないためこの GPS による測位を行うことはできない。そこで、屋内での LBS の実現のため代替となる技術・手法が各所で研究されている。

本章では、屋内における位置測位手法の技術の全体像を示した。無線を用いた技術には、GPS との互換性を持つ技術や WLAN, RFID, UWB 等多様なデバイスを用いた手法が提案されている。多くの無線による屋内位置測位手法は多くの場合新規にインフラを構築する必要がある。

次に、画像を用いた位置特定手法について取り上げた。画像を用いた位置特定手法は新規に物理的なインフラを構築しなくてよいメリットがある。しかし、現状多くの計算が必要であり屋外の GPS 測位や、無線を用いた屋内位置測位と同等の位置特定スピードは期待できない。

本章にて多くの屋内位置測位・位置特定手法を取り上げたが、装置の設置・維持コストとその負担者の課題、そして生み出されるビジネスモデルとのトレードオフが未だ折り合いが付いておらず、屋内 LBS のための位置測位・位置特定手法の決定的な解決案は未だ見つかっていないのが現状である。

## 第4章

# ランドマークベースの位置特定システム

### 4.1 本章の概要

第3章に述べたように、高まる屋内でのLBSの実現に答えるため、GPS測位が難しい屋内空間の新しい位置測位技術・手法が各所で研究されているが、装置の設置・維持コストとそのビジネスメリットのトレードオフに関する決定的な解決案は未だ見つかっていない。

本章では、屋内LBS用途を対象とした位置特定におけるコストの削減やサービス運営の統一をめざし、屋内LBSの位置情報取得の一つの方法としてランドマークベースの位置特定システムを提案する。

第2節「システムの概要」では、提案するカメラ撮影画像を用いてのランドマークベースの位置特定システムについて、その概要と意義やメリット、システムの流れについて述べる。

第3節「画像の特徴点・高次元特徴量」では、画像とデータベースとのマッチングをより剛健に行うために、提案システムの中で採用する画像の特徴点・高次元特徴量手法について、その原理を説明する。

第4節「Bag-of-keypoints」では、システムのデータベースマッチング部で、マッチング処理の高速化のため提案システムに採用する Bag-of-keypoints と呼ばれる手法について説明する。

## 4.2 システムの概要

本研究では、ランドマークベースの位置特定システムについて提案する。最近の携帯電話端末には、デジタルカメラの画像・動画撮影機能が備わっていることが一般的となっており、本研究ではこの機能を利用した画像ベースの位置特定手法を提案する。

システムは、携帯電話のカメラで撮影されたランドマークを含む画像を受け取り、画像からランドマーク情報を抽出・解析し、ランドマークデータベースと照合することで位置特定を行う。システムの全体像を図 4.1 に示す。<sup>1</sup>

ランドマークとは一般的には一定の地域を移動中にまたそこに戻ってくるための目印とする地理学上の特徴物を指すと一般的に定義されている。屋内空間内では図 4.2 のようなショップの看板や、案内看板などがあると考えている。一つだけでは一意に場所を特定できず、複数のランドマークの組み合わせることで初めて位置を一意に特定できるケースも現実空間に多々存在すると考えられるが、本論文の範囲では、屋内空間内にユニークに存在するランドマークのみを、システムの対象として扱うこととする。

### 4.2.1 提案システムの目的と意義

本システムの目的は、「屋内 LBS のための位置特定における必要コストの削減やサービス運営の統一を目的とした簡易な位置特定システムを提案・構築し、屋内 LBS の実現への第一の土台となるシステム」である。

屋内 LBS のための位置情報の管理には屋外と同様、無線を用いた手法の方が幅広い用途に利用できる本質的な位置情報管理方法である。しかし、コストやその負担の課題の目途がついていない、いつ目途がつくのかわからない以上、ナビゲーションなどの需要の高いと思われるアプリケーションについてを簡易な形で実現し、その他の LBS アプリケーションの需要やビジネスメリットを図り、本格的なインフラ構築の足がかりとすることは意義があると私は考えている。

提案するランドマークベースの位置特定システムの利用例としては、現在位置確認や周辺案内サービス、ナビゲーションサービスにおいて経路探索の起点を決定し案内(目的地までの経路情報の表示等)を開始する等を想定している(図 4.3)。

本システムの利点としては、以下のようなものがある。

- 位置情報の管理のためのインフラ構築・保守を LBS 運営者に運用を統合できる。
- 既に屋内空間内に存在するランドマークを利用するため景観を損なわない。

<sup>1</sup> 「位置特定」とは利用者が自分の求める精度の位置を、空間上に実在するオブジェクトと結びつけることで、LBS システムや利用者が空間上の位置を認知することを指す。



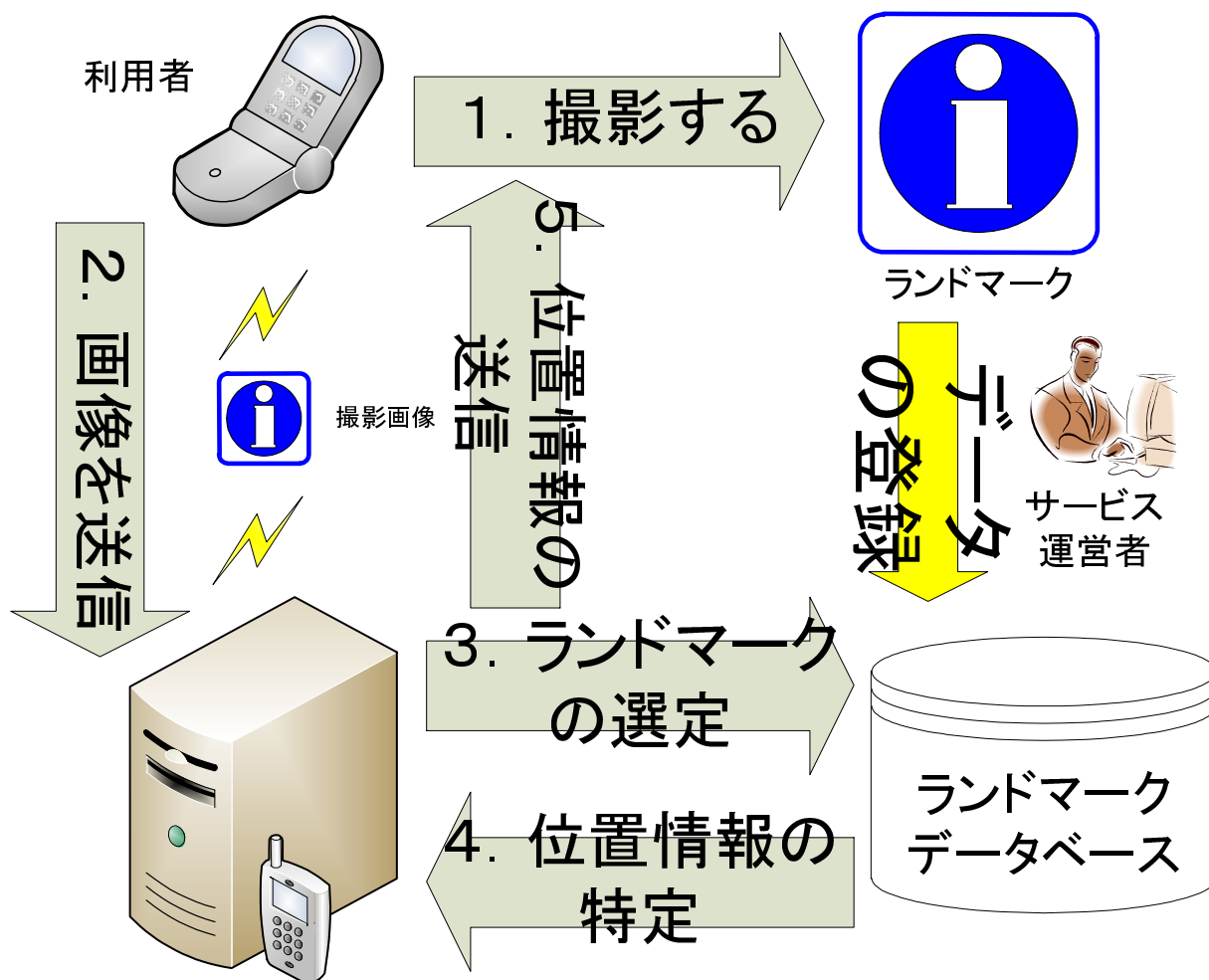


図 4.1: ランドマークベースの位置特定システムの概要



図 4.2: 本研究で想定するランドマークの例 .

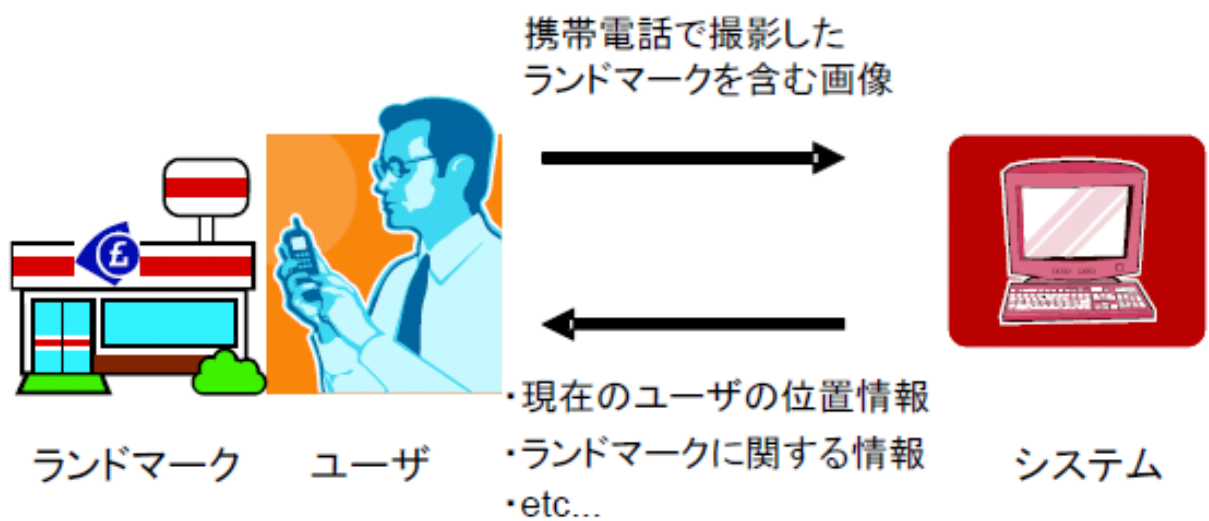


図 4.3: ランドマークに基づく情報提供システム

- 情報の探索範囲を絞っているため高速な情報探索，迅速なユーザへフィードバックが可能である．
- 新たなデバイスを端末に加えなくて済む．

LBS 運営者とは，LBS を直接運用することで収益・利益を得る者を指す．ナビゲーションサービスならばナビゲーションシステム提供者，特定の施設内でのサービスならばそのサービス提供者となる．初期コストの面では，屋内空間でのランドマーク登録（画像データとその位置座標データ）の作業が必要であるが，屋内空間上での厳密な位置の測量を必要とせず<sup>2</sup>，サービス運営者が保有する屋内空間地図データ上での座標上でランドマークを設定すればよい．維持コスト面では，データはサーバ上に保存されるため，基地局のように破損することがない点，電気代を必要としない点等のメリットがある．また，保守コストにおいて，屋内空間の改装やショップの新規開店・撤退等ランドマーク情報の変更が生じる場合，これはコストとなるが，サービス運営者には同時に屋内空間の地図データ・地図情報を更新する必要性が生じる．従って，サービス運営者にとってコストの発生は予測しやすく，またその作業・必要コストは屋内地図データ・地図情報の更新作業と統一できコストを削減できる<sup>3</sup>．

また，近い将来，電子ペーパーによる看板・広告とその管理システムが広く普及すると予想される．この電子ペーパー看板を提案システムでのランドマークみなし広告の内容のカメラ撮影画像と管理システムの広告管理情報（デジタルサイネージ表示内容・表示場所の管理）を組み合わせるとの位置特定システムも一つの新しい低コスト位置特定システムの形であると考えている．

以上の理由により，位置情報の管理のためのインフラ構築・保守をLBS運営者に運用を統合できると考える．

### 4.2.2 システムを構成する2つのフェーズ

本システムはデータベース作成・登録フェーズと，位置情報特定フェーズの2つに分けられる（図4.4）．データベース作成・登録フェーズでは，ユーザはランドマークの位置情報と共にランドマーク画像の情報をサーバに登録する．

位置の特定フェーズでは，ユーザがランドマークの画像を撮影しサーバへ送信，サーバ内部では画像処理技術を用いてデータベースの登録画像とのマッチングをとり，画像と共にデータベースに登録された位置情報データを引き出す．最後にサーバはユーザ端末に情報を送信し，サービスへとつなげる流れとなる．

<sup>2</sup>第3章で軽く触れたが無線技術を用いた三角測量などの位置測位では，基地局の3次元座標（ $x, y, z$ 座標系や経度，緯度，高度等）を厳密に測量し，設置する必要がある．

<sup>3</sup>初期コストについても屋内空間地図データとシステム立ち上げを同時に行うならばこれと同様のことが言える．

位置情報特定フェーズにおけるシステムの流れを図4.5に示す。

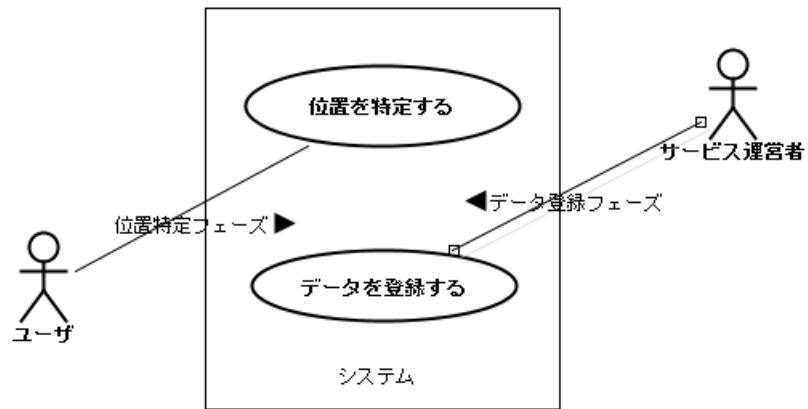


図 4.4: データベース作成・登録フェーズと位置情報特定フェーズ

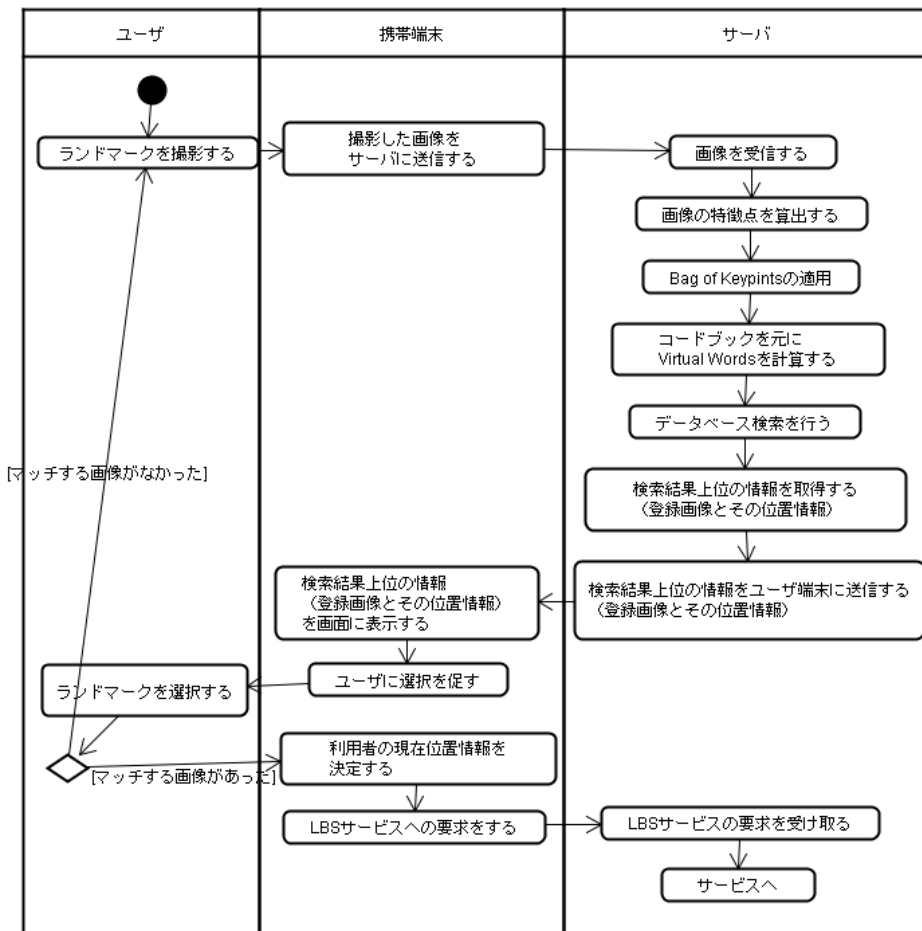


図 4.5: 提案システム位置特定フェーズのアクティビティ図

### 4.2.3 屋内ランドマークと認識・検索手法

本システムにおいてはランドマークという普遍性のあるシンボルをマッチングの対象とする。ランドマークデータの登録・マッチングには一般物体認識の技術が必要であり、またユーザがストレスなく利用するために、その処理速度について考慮する必要がある。この要求を実現するために画像のマッチング・検索には特徴点・高次元特徴量を用い、探索の高速化のために Bag-of-keypoints を採用する。これは後に詳しく説明する。

### 4.2.4 複数候補の提示と選択の要求

画像を用いた位置特定システムは、理論上は一意に場所が決定されるが、画像認識技術を用いるその性質上、三角測量など無線を用いた手法と比べ、誤特定の可能性が高い。また、位置の誤特定はナビゲーションサービスなどでは、経路探索などにて大きな悪影響を及ぼすため、避けられるべきである。そこで、本システムではマッチング候補のランドマーク(画像)を複数提示し、ユーザに選択・確認を求めることで、誤特定を防ぐこととする(図4.6)。



図 4.6: ユーザーへのランドマーク候補の提示と選択のイメージ

### 4.3 画像の特徴点・高次元特徴量

先に述べたとおり，撮影ランドマークの画像内での大きさや，回転，照明変化等に適応できるロバストな手法が求められる．本研究では，入力画像のロバスト性を重視し，画像の特徴量を用いたマッチング手法を採用する．高次元特徴量を用いた画像マッチング手法に SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)[14] や SURF(Speeded Up Robust Features)[7] がある．SIFT はその名前の通り，スケール変化に柔軟な手法である．

SIFT や SURF のような高次元特徴量を用いた画像マッチング手法は，特徴点の検出 (detection) と特徴量の記述 (description) の 2 段階のフェーズにて実現される．SIFT の実装では detection フェーズにおいて，DoG(Difference-of-Gaussian) 処理による特徴点の算出と，特徴点として向かない点の間引きを行う．また，description フェーズにおいては，detection フェーズによって検出された特徴点について，その周辺の画像情報から特徴量を算出する．

detection フェーズによって検出された特徴点について，特徴点周囲の各ピクセルについて勾配強度  $m(u, v)$  と勾配方向  $\theta(u, v)$  を以下の式により算出する (図 4.7 左) ．

$$m(u, v) = \sqrt{f_u(u, v)^2 + f_v(u, v)^2} \quad (4.1)$$

$$\theta(u, v) = \arctan \frac{f_v(u, v)}{f_u(u, v)} \quad (4.2)$$

$$f_u(u, v) = L(u + 1, v) - L(u - 1, v) \quad (4.3)$$

$$f_v(u, v) = L(u, v + 1) - L(u, v - 1) \quad (4.4)$$

また，特徴点周辺の領域について縦横に 4 分割 (16 分割) を行い，それぞれの領域について，勾配強度  $m(u, v)$  と勾配方向  $\theta(u, v)$  の和を算出し，8 方向の正規化されたベクトルを算出し，この  $4 \times 4 \times 8$  の合計 128 次元ベクトルを特徴ベクトルとする．SURF は SIFT のアルゴリズムを改良し特徴ベクトルの長さを 64 次元に抑えることで，計算の高速化を行ったものである．

SIFT での特徴量 (特徴ベクトル) 算出の概要を図 4.7 にて示す．

特徴量を用いた画像マッチングの例として，SURF を用いてマッチング実験を行った様子を図 4.8 にて示す．このマッチング処理には Intel(R) Core 2 Duo CPU(E6750) @ 2.66GHz の CPU，メモリ 2G バイトの自作デスクトップ PC 上で，C++言語の OpenCV ライブラリを用いて実装したものである．SURF は 128 次元ベクトルに拡張したものを採用しており，また 2 つの画像のサイズは  $640 \times 480$  ピクセルと  $320 \times 240$  ピクセルである．画像 2 つのマッチングに 84 ミリ秒 (0.084 秒) の時間を要している．10 組みの画像でマッチング時間を図ったところ平均 90 ミリ秒の処理時間を要した．

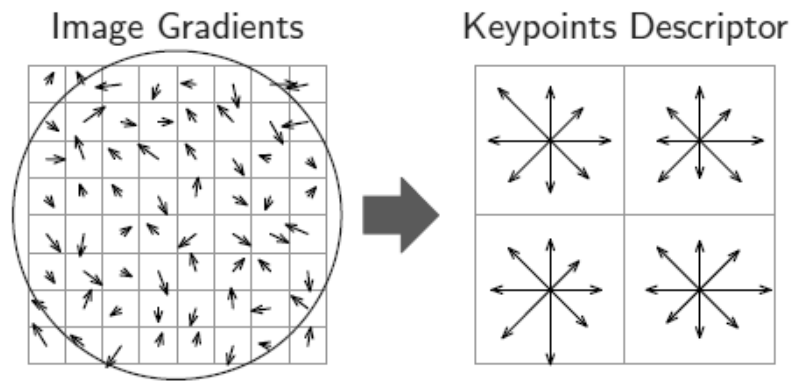


図 4.7: SIFT での特徴量の算出 .

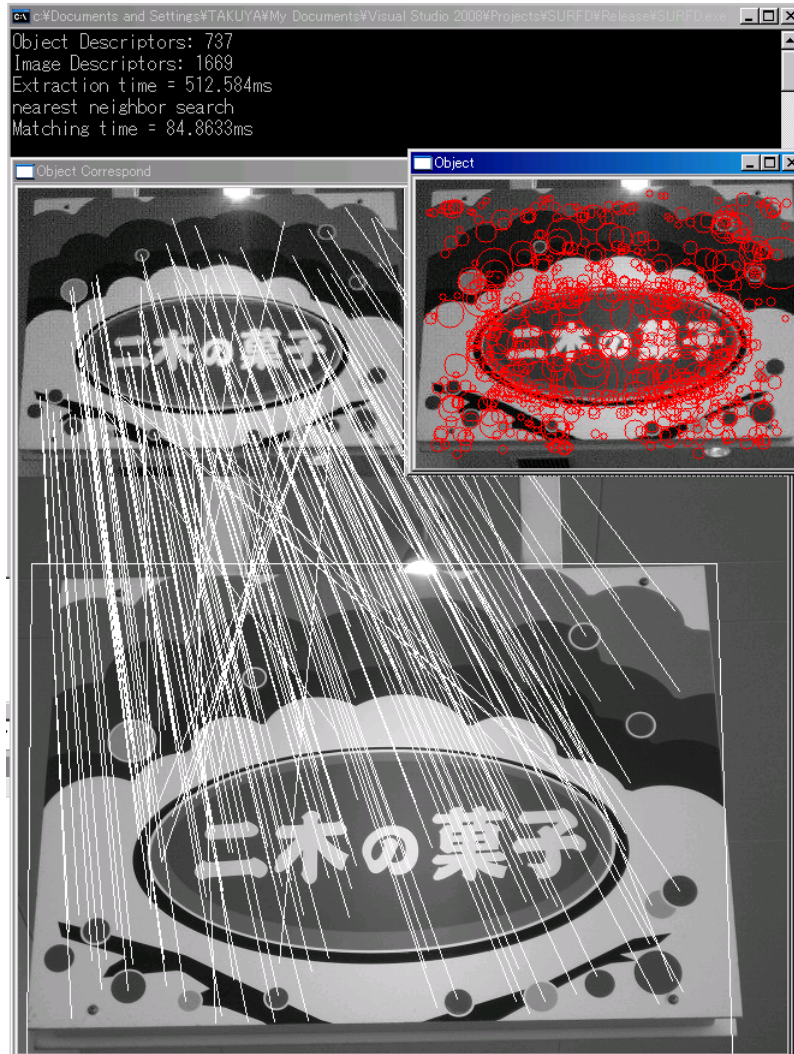


図 4.8: SURF による画像マッチングの様子 .

### 4.3.1 色情報を用いた SIFT

SIFT, SURF 等の高次元特徴量は非常に強力な手法であるが, Lowe の提案する古典的な SIFT[14] の古典的な実装では処理がグレースケール画像 (又はグレースケールに変換されて) で特徴点・特徴量の算出が行われるため, 撮影画像の色情報を反映できないという改善点があった.

これに対して, RGB や HSV, Lab など, 3 つの色成分ごとに SIFT で特徴抽出を行う Color SIFT という手法が提案された. 3 つの色成分ごとに SIFT で特徴抽出を行うため, 特徴ベクトルは 384 次元になる (128 次元  $\times$  3).

看板等のランドマークは, 色情報で大きく大別できるので, 本研究では SIFT に色情報を適用した Color SIFT を採用する.

## 4.4 Bag-of-keypoints

高次元特徴量による画像マッチングの最も単純な方法は, 画像から取得した全ての高次元特徴点の組に対して, その高次元特徴量ユークリッド距離を全探索し, 最もユークリッド距離の短い対を探す方法である. しかし, 高次元特徴量は SIFT 等の古典的な実装 [14] においては, 一つの画像より数千・数万単位の特徴量が算出されるため, これを複数の画像に対して計算を行う場合, その計算時間 LBS のような即時性が求められるサービスには適さない可能性がある. 具体的には, 画像 1 枚を入力とし,  $N$  枚の画像の中から探索を行う時の計算量は, 画像中の特徴点の平均個数を  $m$  とすると下記のようになり, 計算量は検索対象の画像の数に比例する.

$$\text{マッチングのための計算量} = m^2 \times N \quad (4.5)$$

この全探索によるマッチング処理は, 図 4.8 の実験例では 1 枚当たり 0.09 秒程度<sup>4</sup>の時間を必要としており, モバイル環境での LBS 等で大量の画像マッチングを行うと, ユーザへのフィードバックが遅いユーザのストレスを生むシステムとなる可能性がある.

この課題を解決する方法の一つが, Bag-of-keypoints である [5]. Bag-of-keypoints はカテゴリ認識の分野 (Web の画像分類や物体認識) で多く使用される. 従来の固有空間法や領域分割等の認識対象の全体を利用した方法認識技術ではオクルージョンや変形に弱いという課題があり, Bag-of-keypoints はこれに対する手法として考案された局所パターンの分布に基づく認識複数の部分の組み合わせで認識方法である. Bag-of-keypoints では SIFT 等の画像特徴ベクトルをベクトル量子化し, Visual words の集合とみなすことで, 画像の特徴を標準化された Visual words ヒストグラム一つの形で表現する (図 4.10).

<sup>4</sup>これはあくまで一例である. 計算時間は画像の大きさ (出力される特徴点の数) に依存する.



線形での探索の特徴点群による画像の表現では、情報量が特徴量次元 (64 次元, 128 次元, 384 次元等) × 特徴点 (数百 ~ 数万) の数の情報量を必要とするが, Bag-of-keypoints は一つの高次元ベクトル (512 ~ 4096 程度が一般的) で表現するため, 線形全探索でも高速化の効果が期待できる他, ヒストグラム一つの形で表現されるため, Web 検索などの技術が応用できる。

ここで, Visual words のについて説明する。Visual words は画像を表現するための「単語」にあたるベクトルである。学習画像 (正例, 負例) を用意し, SIFT 等の画像の特徴ベクトルを全画像から抽出し (枚数が多い場合は, ランダムサンプリング) 高次元ベクトル空間内でクラスタリングを行う<sup>5</sup>。各クラスタの中心ベクトルが特徴ベクトルを代表する Visual words である。Visual words 算出の一連の流れを図 4.10 に示す。

画像から得られた特徴量情報から Visual words ヒストグラムへの変換の処理は, 各画像特徴量について最も近い (ユークリッド距離が最も小さい) Visual words のベクトルを算出し, 各 Visual words に対し最も近いとされた画像特徴量の数をヒストグラムの形で表現する。各画像から算出される特徴量は画像により増減するため, 最後に正規化処理を行う必要がある。

Bag-of-keypoints の利用例としては, 画像検索の分野においてテキストとして表現された visual words の集合をテキスト検索 (Web サイト検索) の手法を応用し, 高速画像検索を実現する等の例がある。カテゴリ認識の分野においては, Visual words によって表現された特徴ベクトルに対し, Naive Bayes, SVM などの機械学習手法で分類を行っている。

本研究では, データベースに登録された画像情報の探索高速化のためにこの Bag-of-keypoints を採用する。

---

<sup>5</sup>多くの場合 k-means 法によるクラスタリングが行われる。

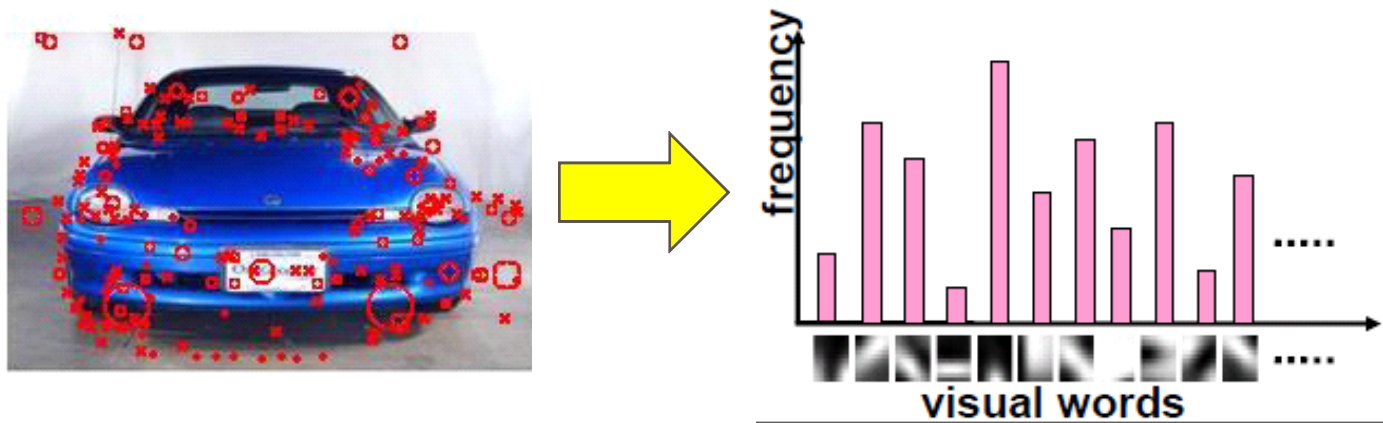


図 4.9: 画像特徴の visual words の集合への変換 .

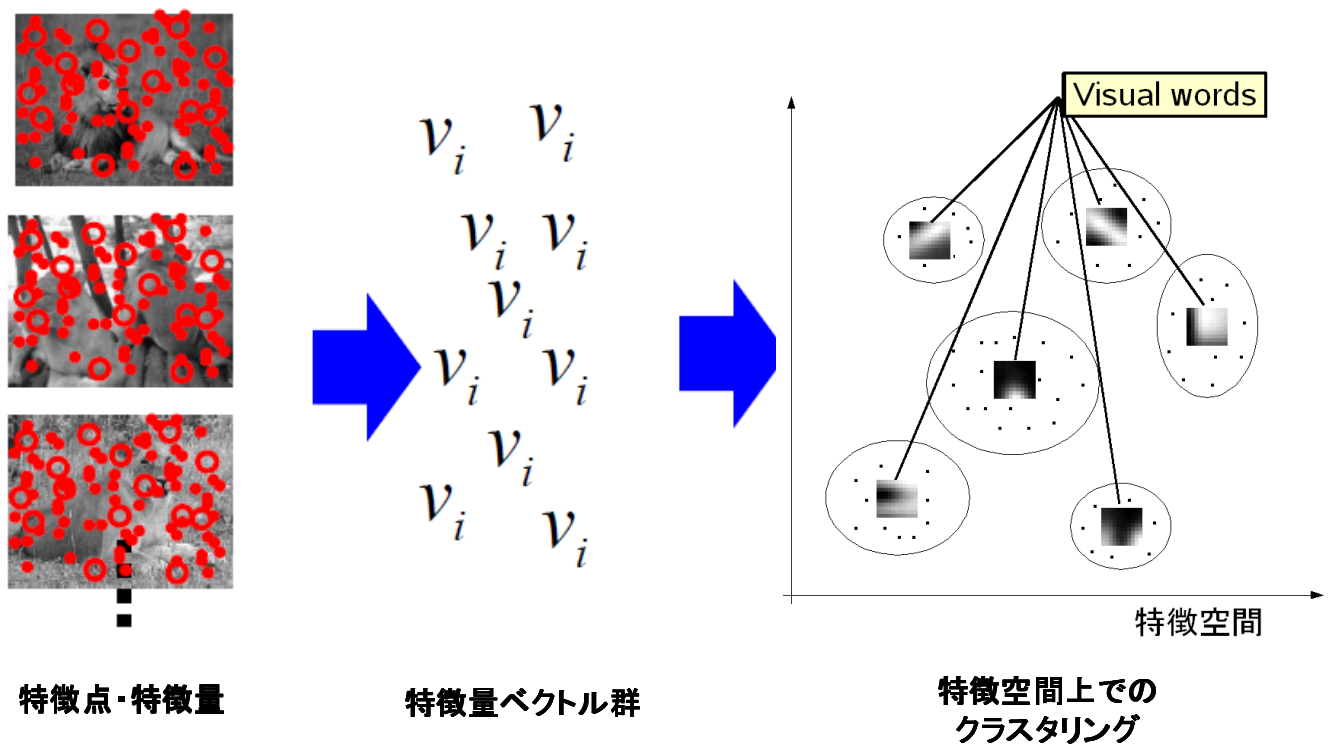


図 4.10: 画像特徴群からの visual words の算出 .

## 4.5 本章のまとめ

屋内でのLBSの実現のためGPSの代替となる技術・手法が各所で研究されているが、装置の設置・維持コスト等の課題、トレードオフから決定的な解決案は未だなされていない。

そこで、本研究では、屋内LBS用途を対象とした位置特定における位置情報の管理とサービスの運営をLBS運営者が統一を目指し、ランドマークベースの位置特定システムを提案する。システムは現在位置確認や周辺案内サービス、ナビゲーションサービスにおいて経路探索の起点を決定し案内(目的地までの経路情報の表示等)を開始する等の利用を想定した簡易・暫定的な位置情報特定システムである。データの管理をサービス運営者のサーバーに一元化することで、コストの削減とその運営の一元化を図る。

本システムはデータベース作成・登録フェーズと、位置情報特定フェーズの2つに分けられる。データベース作成・登録フェーズでは、システム運営者がランドマークの位置情報と共にランドマーク画像の情報をサーバに登録する。位置の特定フェーズではユーザの撮影した画像を元にデータベースとのマッチングを行い位置情報候補を算出し、ユーザのフィードバックを経て位置を特定する。

画像を用いる性質上、情報の誤探索・誤特定は避けられない面があるが、ナビゲーションなどのアプリケーションでは位置の誤特定は致命的である。従って、提案システムにおいては複数の位置候補をユーザに提示し、ユーザに確認をとることで位置を特定するという形式をとることとする。

本研究においてはランドマークという普遍性のあるシンボルをマッチングの対象とするため、マッチングのために画像の高次元特徴点を算出する手法であるSIFT(Color SIFT)を採用する。SIFTは大きさや、回転、照明変化等に適応できるロバストな手法である。またシフトは先に述べたようなロバストな手法である反面、処理に時間を要する課題があり、提案システムではデータの探索時間を抑えユーザがストレスなく利用するために、Bag-of-keypointsを用いることで探索処理の高速化を図る。

## 第5章

# 提案システムの実装と実験

## 5.1 本章の概要

第4章において、ランドマークベースの位置特定システムを提案した。提案システムは、データの管理をサービス運営者のサーバーに一元化することで、コストの削減とその運営の一元化を図るものである。システムは画像の特徴点・高次元特徴量の手法と Bag-of-keypoints を採用し、マッチングのロバストネスと探索の高速化の両立を実現する。

本研究では、提案するシステムの評価のため、2010年1月にランドマークの例として千葉県内のアウトレットモールにおける、ショップ看板を用いてシステムの画像探索部について実験を行った。

本章では、この実験におけるシステムの実装の概要と実験の方法、実験結果とその考察について述べる。

第2節「実験システムの実装の概要」では、第4章で提案したランドマークベースの位置特定システムについて、実験で用いたシステムの具体的な実装方法を述べる。

第3節「実験の概要」では、2010年1月に千葉県のアウトレットモールにて行った実験について、その実施概要を述べる。

第4節「実験の結果と考察」では、行った実験についてその結果を示し、マッチング精度と実行時間の観点から評価・考察する。

### 5.1.1 実験システムの実装の概要

画像からの特徴点の算出にはアムステルダム大学の Koen 氏による ColorDescriptor Software の実装 [27] を用いた。特徴点の算出には Harris Laplace のアルゴリズムをパラメータとして入れ、特徴量には最も基本的な色情報を用いた SIFT の拡張実装である RGSIFT の出力を行う (図 5.1)。

Visual words の算出のための K-means クラスタリング処理には、ニュージーランドの Waikato 大で開発されたデータマイニング・ツールである Weka[34] の K-means ライブラリの実装を用いた。Visual words の単語数 (クラスタリングを行うクラスタ数) は 512 としている。

Visual words を元にしての画像情報ヒストグラムへの変換処理 (図 5.2) や、Visual words ヒストグラムによるデータ探索 (図 5.3) は全て Java 言語を用いて実装を行った。なお、ヒストグラムデータ探索は、データベース上に格納された全てのデータについて全探索 (線形探索) を行っている。具体的には、探索の中で入力画像の特徴ヒストグラムとデータベース上のデータの特徴ヒストグラムについて、そのユークリッド距離を算出し、全探索後に算出さ

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Color Descriptors v2.0
=====

Created by Koen van de Sande - (c) University of Amsterdam, Koen van de Sande

Sun 01:41:40,796 INFO [Sandbox.koen.mainColorDescriptor ] Input file: yasu_oldPA0_0007.JPG
Sun 01:41:40,812 INFO [Sandbox.koen.mainColorDescriptor ] Loaded image at 0h0m0.00s
Sun 01:41:41,937 INFO [Sandbox.koen.HarrisLaplaceDetector ] Harris found 1059 (0h0m0.43s); Laplacian left 548 (0h0m1.12s)
Sun 01:41:43,875 INFO [Sandbox.koen.mainColorDescriptor ] Completed in 0h0m3.07s

Color Descriptors v2.0
=====

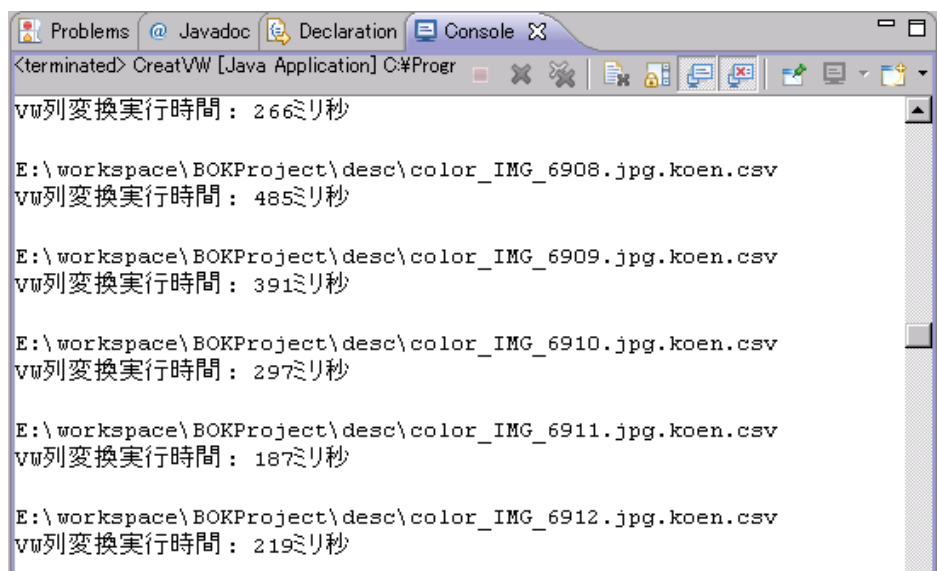
Created by Koen van de Sande - (c) University of Amsterdam, Koen van de Sande

Sun 01:41:43,890 INFO [Sandbox.koen.mainColorDescriptor ] Input file: yasu_oldPA0_0008.JPG
Sun 01:41:43,906 INFO [Sandbox.koen.mainColorDescriptor ] Loaded image at 0h0m0.00s
Sun 01:41:45,046 INFO [Sandbox.koen.HarrisLaplaceDetector ] Harris found 727 (0h0m0.44s); Laplacian left 310 (0h0m1.14s)

```

図 5.1: ColorDescriptor の算出。

れたユーグリッド距離を元にソーティングを行い，ユーグリッド距離が小さい順（画像の特徴ベクトルが似ている順）に表示を行う．検索結果の表示は1～10位までを行い，検索結果が11位置以降である場合には本実験の実装では検索失敗とした<sup>1</sup>．



```

<terminated> CreatVW [Java Application] C:\Progr
vw列変換実行時間： 266ミリ秒

E:\workspace\BOKProject\desc\color_IMG_6908.jpg.koen.csv
vw列変換実行時間： 485ミリ秒

E:\workspace\BOKProject\desc\color_IMG_6909.jpg.koen.csv
vw列変換実行時間： 391ミリ秒

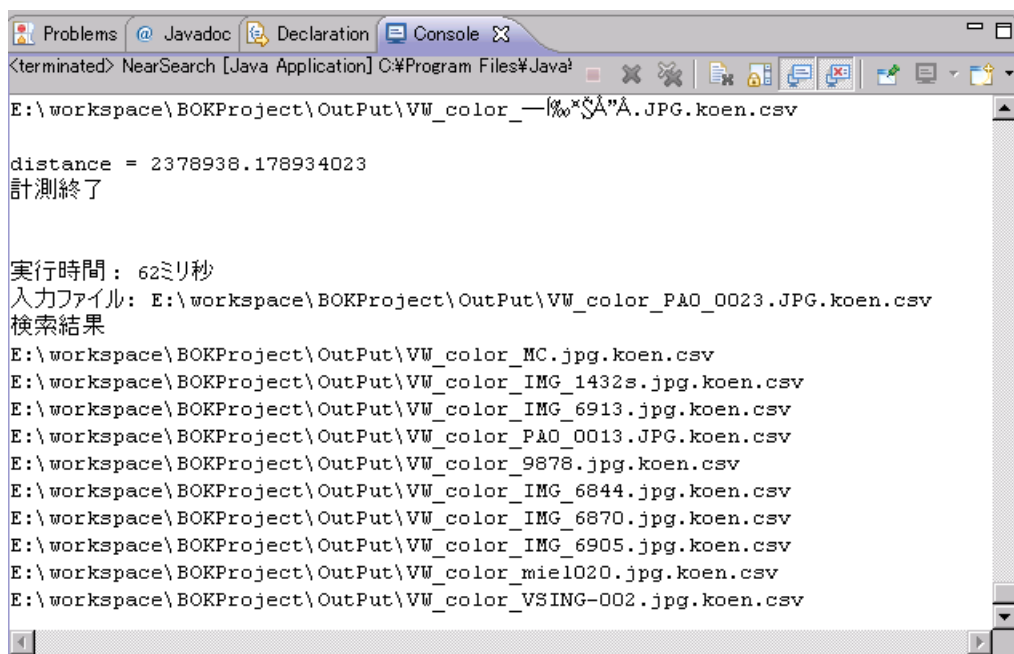
E:\workspace\BOKProject\desc\color_IMG_6910.jpg.koen.csv
vw列変換実行時間： 297ミリ秒

E:\workspace\BOKProject\desc\color_IMG_6911.jpg.koen.csv
vw列変換実行時間： 187ミリ秒

E:\workspace\BOKProject\desc\color_IMG_6912.jpg.koen.csv
vw列変換実行時間： 219ミリ秒

```

図 5.2: Visual words ベクトルへの変換の様子 (Java,Eclipse) .



```

<terminated> NearSearch [Java Application] C:\Program Files\Java\
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_-%*\$A".JPG.koen.csv

distance = 2378938.178934023
計測終了

実行時間： 62ミリ秒
入力ファイル： E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_PAO_0023.JPG.koen.csv
検索結果
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_MC.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_IMG_1432s.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_IMG_6913.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_PAO_0013.JPG.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_9878.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_IMG_6844.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_IMG_6870.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_IMG_6905.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_miel020.jpg.koen.csv
E:\workspace\BOKProject\OutPut\VW_color_VSING-002.jpg.koen.csv

```

図 5.3: 画像の検索結果の様子 (Java,Eclipse) .

<sup>1</sup>失敗とせず検索結果を順にサーバとの通信を用いて順次表示する方法もある．今回の実験では「1つの画面上に適切なランドマーク画像が表示されること」を重視し，11位以降を失敗とした．

## 5.2 実験の概要

千葉県印西市にあるアウトレットモールBIG HOP(図5.4)において, そのショップの看板をランドマークとして用いて, システムの画像処理部について実験を行った.

BIG HOPでは, 看板が各ショップの前に一つずつ設置されており, これをランドマークとして用いることにより場所を一意に特定できる.



図 5.4: BIG HOP のマップ (1F) .

データベース用の画像にはキャノン製のデジタルカメラ IXY DIGITAL 55 で撮影したものを使用した. また, システムへの入力画像にはパナソニック製の AU 携帯電話 W62P を用い, QVGA(240 × 320) サイズ画像を撮影したもの(図5.5)を用いた.

システムに入力として与える携帯端末での撮影画像は W62P を用いて 40 枚撮影し, データベースには IXY DIGITAL 55 を用いて 45 枚(実験対象のランドマーク 40 枚含む)撮影し, 2048 × 1536 サイズの撮影画像を 640 × 480 のサイズにリサイズしてデータベースに登録した. また, 検索のノイズとして Google の画像検索(キーワード: 看板)を用いて看板の画像を 50 枚インターネット上からダウンロードして, システムの検索対象のデータベースに追加した. また, 入力として与える携帯撮影画像も 45 枚についても同様な検索ノイズとしてデータベースに加えており(図5.6), データベースに登録された画像は合計 135 枚である.





図 5.5: 撮影看板画像の例 .



図 5.6: 検索ノイズとしてDBに登録した画像の例 .

いずれの処理も Intel(R) Core 2 Duo CPU(E6750) @ 2.66GHz の CPU , メモリ 2G バイトの自作デスクトップ PC 上で実装・実験を行っている .

なお , データベース画像の撮影は 2010 年 1 月 15 日に , W62P を用いての実験用入力データの撮影は 2010 年 1 月 20 日に行った .

### 5.3 実験の結果と考察

実験における実験結果 (検索順位とその枚数) の実験結果を表 5.3.1 , グラフを図 5.7 に示す .

#### 5.3.1 マッチング精度に関する考察

実験結果 (図 5.7, 図 5.3.1) に示すように , 入力画像のうち 88% が上位 6 位以内に入り 93% が上位 9 位以内に検索された . 今の携帯端末での画像のブラウジングは図 5.8 のような表示形式になっており , 9 枚の画像が画面に表示される状態に慣れ親しんでいると考えられるので , 上位 9 位検索結果を表示で適切なランドマーク画像を選択できる考えている .

探索が失敗した 3 枚のマッチングについては , 図 5.9 のようにシステムに登録したデータベース画像が悪かったのが主な原因であったと考えている . ランドマーク近くの光源により色情報が変わっており , また撮影対象の本来の形とは異なる不要なエッジ情報が画像内に発生してしまい , ランドマークの特徴として表すには不適切な特徴点記述子が算出されたものと考えられる . 今回の結果ではデータベースの登録において不適切であったが , ユーザの利用時にもこの照明の問題は発生すると考えられ , 一つの課題である .

また , 似たような色の撮影ランドマークが複数存在する場合には , 検索順位が上下しやすい結果となった . 特に , 実験を行った Bighop には全体が黒で , 白く小さな文字の入った看板が複数あり (図 5.10) , 現状の Color SIFT と Bag of Keypoints の実装では上手く特徴を表現しきれないようである . この課題は特徴点の位置情報を考慮した Bag of Keypoints 等が提案されており , これを利用することで改善が可能であると考えている .

表 5.1: 実験結果一覧.

入力画像	検索順位	入力画像	検索順位
PA0_0000.JPG	4	PA0_0020.JPG	1
PA0_0001.JPG	2	PA0_0021.JPG	1
PA0_0002.JPG	失敗	PA0_0022.JPG	6
PA0_0003.JPG	5	PA0_0023.JPG	1
PA0_0004.JPG	5	PA0_0024.JPG	1
PA0_0005.JPG	失敗	PA0_0025.JPG	1
PA0_0006.JPG	1	PA0_0026.JPG	3
PA0_0007.JPG	1	PA0_0027.JPG	1
PA0_0008.JPG	失敗	PA0_0028.JPG	1
PA0_0009.JPG	6	PA0_0029.JPG	1
PA0_0010.JPG	1	PA0_0030.JPG	1
PA0_0011.JPG	1	PA0_0031.JPG	1
PA0_0012.JPG	1	PA0_0032.JPG	1
PA0_0013.JPG	1	PA0_0033.JPG	2
PA0_0014.JPG	1	PA0_0034.JPG	1
PA0_0015.JPG	1	PA0_0035.JPG	1
PA0_0016.JPG	7	PA0_0036.JPG	5
PA0_0017.JPG	1	PA0_0037.JPG	1
PA0_0018.JPG	1	PA0_0038.JPG	1
PA0_0019.JPG	1	PA0_0039.JPG	8

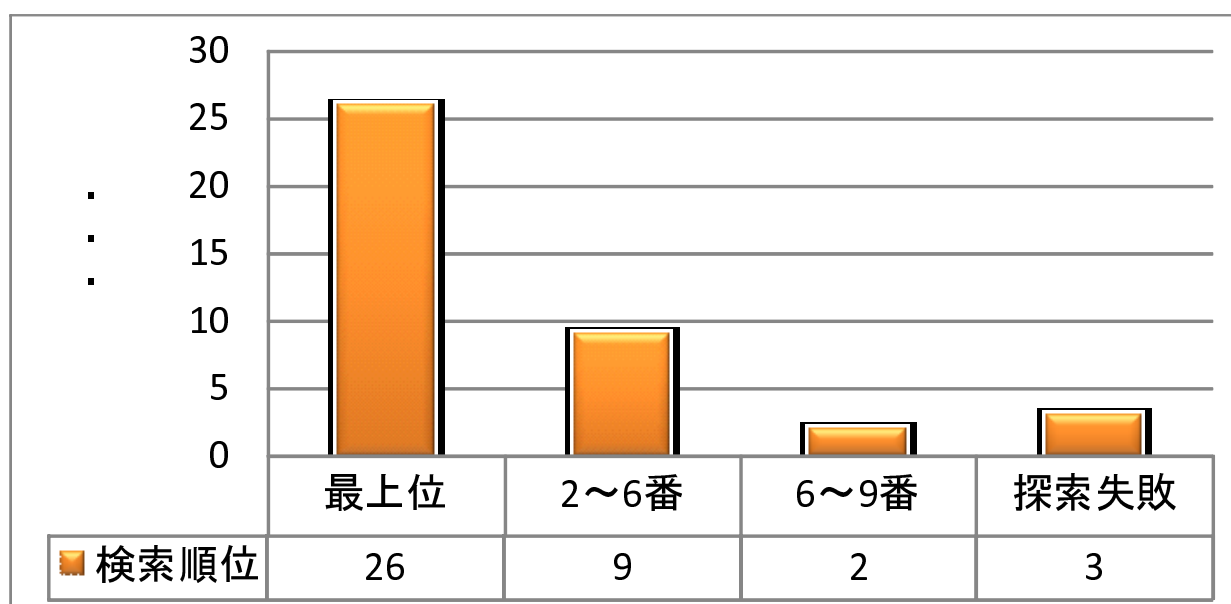


図 5.7: 実験結果 (検索順位とその枚数).



図 5.8: 携帯電話 (W62P) の画像表示の様子 .



図 5.9: マッチングに失敗したデータベース画像の例 .



図 5.10: 検索結果が上下した画像の例 .

### 5.3.2 実行時間に関する考察

システムの実行時間について考察を行う．Koen 氏のライブラリによる ColorSIFT の算出（特徴点の抽出・特徴量の計算）の計算時間は平均 1.4 秒であり，事前に計算しておいた Visual words を用いてのヒストグラム変換処理には平均 320 ミリ秒（0.32 秒），データベース探索（探索・ユークリッド距離の算出・ソート）処理に要した時間は 80 ミリ秒（0.08 秒）である．従って，今回の実験環境・実験システムの上では約 1.4 秒 + 約 320 ミリ秒 + 約 80 ミリ秒 = 約 1.8 秒で探索が終了する．Bag Of Keypoints を用いない場合には約 1.4 秒 + 135(枚) × 約 90 ミリ秒<sup>2</sup> = 約 13.55 秒の探索時間が理論上必要であり，Bag Of Keypoints を用いて，画像の特徴を一つのベクトルで表現したことにより，およそ 7.5 倍の処理の高速化を実現できた．

ユーザから見たシステム全体の応答時間についても考察する．QVGA(240 × 320) サイズ画像を携帯端末からサーバーに送信する時間については，AU 携帯電話 W62P による QVGA 画像のデータ量が 10 ~ 20kbyte 程度であるので，QVGA 画像のデータ量を 20kbyte，携帯データ網の上り回線速度が 144kbps と仮定して<sup>3</sup>理論上およそ 0.13 秒の時間を必要とする．これに加え，約 1.8 秒のサーバー側処理（特徴量の算出，特徴ヒストグラムへの変換，データベース探索）が必要であり，また，ランドマーク候補画像 9 枚の送信のために，端末が受信する QVGA 画像のデータ量を 20kbyte と 9 枚のランドマーク候補画像を端末側に表示すると仮定し，携帯データ網の下り回線速度が 600kbps と仮定する<sup>4</sup>と，理論上通信のために約 0.3 秒の時間を必要とする．従って，システム全体の合計時間としては約 2.23 秒必要である．

実際の運用においては，検索結果の精度を保つため・不要な情報探索を避けるために，基地局や GPS の測位等を用いてデータの探索範囲を絞り込んだ上で，データの探索を行う．これが LBS において一般的・現実的な実装方法である．この場合，ユーザからサーバに送信された撮影画像への特徴点抽出処理及び，Visual words ヒストグラムへの変換処理は，基地局や GPS の測位<sup>5</sup>によるデータ探索範囲の絞り込み処理と並列化することができる（図 5.11）．基地局によるユーザ位置情報の算出は数秒程度とされており，これは撮影画像への特徴点抽出処理及び，Visual words ヒストグラムへの変換処理の処理時間（およそ 1.7 秒）と，同等かそれ以上の時間を必要とすると見られる．従って，システムの実行時間を支配するのはデータ

<sup>2</sup>この 90 ミリ秒という値はあくまで目安の値として例示するものである．第 4 章の図 4.8 を複数の画像に対し実験を行い実行時間の平均をとったものであるが，第 4 章図 4.8 での実験は 128 次元ベクトルの SURF 記述子を用いているものの，本実験では 3 倍のデータ量を持つ 384 次元 Color SIFT 記述子を用いているため，厳密なマッチングスピードの比較にはなっていない．Color SIFT を用いた場合の全探索による画像マッチング時間は，この平均 90 ミリ秒よりも長くなると予想される．

<sup>3</sup>au(KDDI) の CDMA 1X WIN 方式による上りの理論上最高速度は 144kbps であるとされている．実環境での利用を考慮し 2 分の 1 の転送速度とした．

<sup>4</sup>au(KDDI) の CDMA 1X WIN 方式による下り方向（ダウンロード）の理論上の最高速度は 2.4Mbps である．平均でも 600 ~ 800kbps のスピードが出るとされる．

<sup>5</sup>携帯端末での「初回」位置測位では GPS 衛星から取得したデータを基地局に送信し，携帯端末内ではなく基地局・サーバにおいて位置計算を行う．その後は端末側で連続測位を行う（MS-Based 方式）．

探索範囲の絞り込み処理とデータの探索処理であり、システムのユーザへの応答時間は、屋外 LBS における一般的な地図サービス (例えば現在位置確認・地図表示サービス) と同等になると考えられる。Bag Of Keypoints を用いない全探索の場合には、GPS 測位や基地局測位等による広域データ探索範囲の絞り込み処理の後に、135(枚) × 約 90 ミリ秒=約 12.15 秒の時間を必要とすることになる。

人間の操作に対するシステムの反応速度については、一般的に次のような関係が見られると言われている<sup>6</sup>。

- 0.1 秒：ユーザは、自分がシステムを「直接」操作していると感じる。
- 1 秒：ユーザの思考を止めない限界。反応に時間がかかっていることに気づき、システムの存在を意識する。
- 10 秒：ユーザが操作に集中できる限界。待っている間に何らかの形で処理の途中であることを伝えないと、容易に他のことに興味に移る (離脱する)。

Bag Of Keypoints を用いない全探索の場合には、データ探索だけで 10 秒以上の処理時間が必要であり、この関係に従うとユーザの注意を引く限界を超えてしまうことになる。Bag Of Keypoints を用いて高速化を行った提案手法では、データ探索・整列に必要な処理時間は極めて短時間で終了していることから、現在の屋外 LBS での現在位置確認のための必要時間 (7~8 秒) を考慮すると、ユーザから見たシステムの応答時間は 10 秒以内には抑えることができると考えられる。従って、提案手法での Bag Of Keypoints を用いての探索の高速化は有効であると考えられる。

---

<sup>6</sup>Carleton University Human Oriented Technology Lab のディレクターである Dr. Gitte Lindgaard らの調査による。

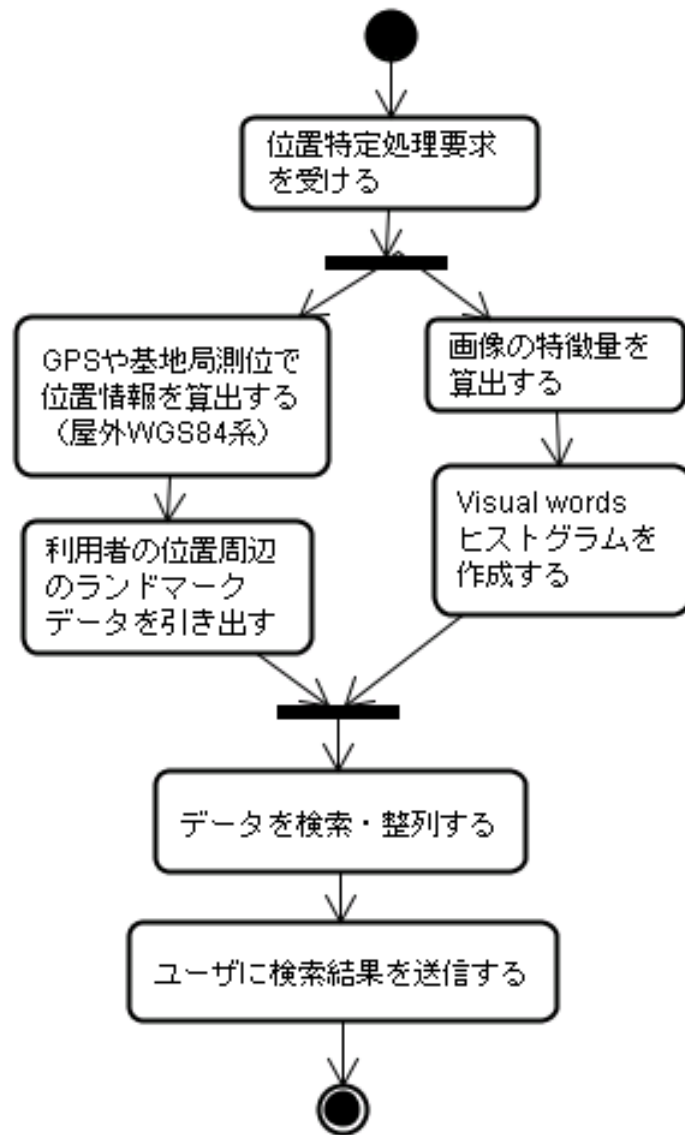


図 5.11: 一般的な実装方法によるサーバ処理のフロー .

## 5.4 本章のまとめ

本章では第4章で述べたランドマークベースの位置特定手法について、その画像処理システムの実装を行い、実験を行った結果を示し、システムを評価した。

千葉県印西市にある Bighop でのショッップの看板をランドマークとして用いて、画像マッチングの実験を行ったところ、88%が上位6位以内に入り93%が上位9位以内に検索された。画面上に6枚や9枚の画像を表示するインターフェースは、携帯電話システムでは一般的でありユーザは適切なランドマークを選択・確認できると考えている。

また検索時間については、Bag Of Keypoints を採用し画像の特徴を一つのベクトルで表現して高速化したことにより、実装したシステムでの比較ではおよそ7.5倍の処理の高速化が確認できた。また、システムの人間の操作に対するシステムの反応速度は10秒がユーザが操作に集中できる限界とされるが、Bag Of Keypoints を用いない純粋な全探索では探索のみで10秒以上を必要とし、この要求を満たすことができない。Bag Of Keypoints を採用した提案手法では、データの探索・ソート処理が80ミリ秒で探索が可能であることから、ユーザから見たシステム応答の時間の観点では、現在の屋外での現在位置確認システムと同等のレスポンスを持ち、10秒以内にユーザにフィードバックを行うことが期待できる。



## 第6章

### 結論

本論文では、屋内空間内でのLBSアプリケーションの利用における、位置特定の方法の一つの形としてカメラ撮影画像を用いたランドマークベースの位置特定システムを提案した。

第2章「歩行者向け地図情報サービスの技術動向」では、多様化しつつあるLBSの技術についてその全体像を示した。GPSを用いたLBSの最大のアプリケーションであるナビゲーションサービス(自動車・歩行者)の開発が一段落し、LBSの技術開発は多様化を迎えつつある。

屋外においては、携帯端末に向けた地図の表示・ナビゲーションサービスが日本のほぼ全土で利用できるようになった。また実際にその場所に行く前に様子を確認することができるGoogle Mapストリートビューや小さな子供のいる世帯向けにみまもりサービス等の画期的なサービスが実現されている。

また、近年ではよりきめ細かなLBSへの需要・期待に答えるため、屋内を対象とした技術開発が多くなってきている。屋内空間を対象としたLBSの実現には、屋外に比べてより詳細な屋内地図データが必要であり、これをいかに低コストで構築して行くのかという点や、その中での座標系の定義や屋内空間内での位置測位の方法等、乗り越えるべき課題は多数ある。

また、最新の技術の話題として、位置情報の解析・レコメンドサービスと、位置情報を利用した新しいユーザインターフェースの形である、Augmented Realityについて取り上げた。

第3章「屋内での位置測位手法」では、第2章で取り上げたLBSに関する技術・研究の中でも、本研究の研究対象である屋内空間での位置測位手法について無線技術を用いた位置測位の原理や、画像を用いた既存の屋内位置特定手法についてその概要や原理を取り上げた。

無線を用いた技術には、無線LAN(Wifi)やRFID, Bluetooth, UWB等、各種の無線通信方式を用いたものが提案されている。この中でも三角測量, 環境分析, 近接法といった複数の方法が提案されている。

次に、本研究と近い、既存の画像を用いた位置特定手法について触れた。3次元特徴データベースを用いたものや、屋内地図とのマッチングをとるもの、屋内空間内にマーカーを設置する方法などが提案されている。

無線を用いた手法は位置測位精度などは実証されているが、その導入・維持コストが必要不可欠であり、屋内空間で期待できるLBSビジネスのメリット・市場価値とのトレードオフとなっている。屋内空間LBSの市場価値がまだ予測できていない現在、決定的解となる無線測位手法は今のところ存在していない。また、その導入・維持コストを誰が持つのかという課題も存在する。

画像を用いた位置特定手法は、導入・維持コストを比較的安く抑えることができると期待でき、また、サービス運営者が位置情報取得のためのインフラとLBSの両面を統一して管理できるメリットがある。しかし、データの用意や、位置特定のためのデータベースシステムや、計算時間とユーザビリティのトレードオフなどの課題がある。

第4章「画像を用いた位置特定システム」では、屋内LBS用途を対象とした位置特定における位置情報の管理とサービスの運営の統一を目指したランドマークベースの簡易位置特定システムを提案した。システムは現在位置確認や周辺案内サービス、ナビゲーションサービスにおいて経路探索の起点を決定し案内(目的地までの経路情報の表示等)を開始する等の利用を想定した簡易・暫定的な位置情報特定システムである。データの管理をサービス運営者のサーバーに一元化することで、コストの削減とその運営の一元化を図っている。

提案するランドマークベースの位置特定システムはデータベース作成・登録フェーズと、位置情報特定フェーズの2つに分けられる。データベース作成・登録フェーズでは、システム運営者がランドマークの位置情報と共にランドマーク画像の情報をサーバに登録する。位置の特定フェーズではユーザの撮影した画像を元にデータベースとのマッチングを行い位置情報候補を算出し、ユーザのフィードバックを経て位置を特定する。また、提案システムではデータの探索時間を抑えユーザがストレスなく利用するために、Bag-of-keypointsを用いることで探索処理の高速化を図っている。

第5章「システムの実装と実験」では、第4章で提案したシステムを実装しアウトレットモールにてショップの看板をランドマークとして用いた画像マッチングの実験を行った。画像のマッチングでは88%が上位6位以内に入り93%が上位9位以内に検索される結果となり、画面上に6枚や9枚の画像を表示するインターフェースは、携帯電話システムでは一般的でありユーザは適切なランドマークを選択・確認できると考えている。

また検索時間については、Bag Of Keypointsを採用し画像の特徴を一つのベクトルで表現して高速化したことにより、実装したシステムでの比較ではおよそ7.5倍の処理の高速化が確認できた。また、システムの人間の操作に対するシステムの反応速度はユーザから見たシステム応答の時間の観点では、1ユーザが操作に集中できる限界とされる10秒以内にユーザにフィードバックを行うことが期待できる。

今後の課題としては、より多様なランドマークでのデータ探索実験、携帯端末やサーバシステムへのシステムの実装、静止画ではなく動画でのマッチング処理(画像をサーバと通信する頻度:通信帯域と端末の消費電力のトレードオフ)、テキスト高速検索技術を適用してのデータ探索の高速化・データベース処理等や、各種センサ(電子コンパスや加速度センサ)との組み合わせ等がある。また、第4章にて少し触れたが、電子ペーパーによる広告表示システムとの組み合わせでの位置特定システムも面白いだろう。

# 謝辞

本論文全般にわたり，御指導ならびに御助言を授かった戸川望準教授，柳澤政生教授，大附辰夫教授に深く感謝いたします．

また，2008年の夏季インターンシップにおいて，LBSシステムの研究の第一線を体験する機会を頂き，大学内ではできない非常に有意義な議論をさせて頂いた日立製作所中央研究所の浅原彰規氏に感謝いたします．

最後に，本論文に関する研究活動全般にわたり支援していただいた大附研究室の皆様へ感謝いたします．

## 参考文献

- [1] A. Mulloni, D. Wagner, I. Barakonyi, D. Schmalstie, “Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones,” In *IEEE Pervasive Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 22-31, 2009.
- [2] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, I. Smith, J. Scott, T. Sohn, J. Howard, J. Hughes, F. Potter, J. Tabert, P. Powledge, G. Borriello, and B. Schilit, “Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild,” In *Proc. of the 3rd International Conference on Pervasive Computing 2005 (PERVASIVE2005)*, Munich, Germany, pp.116–133, 2005.
- [3] B. Karp and H. T. Kung, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* , Volume 37, Issue 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [4] E. W. Dijkstra ,“ A note on two problems in connexion with graphs, ”*In Numerische Mathematik*, vol. 1, 1959, S. 269–271.
- [5] G. Csurka, C.R. Dance, L. Fan, and C. Bray ,“ Visual categorization with bags of keypoints, ”in *Proc. of ECCV Workshop on Statistical Learning in Computer Vision*, pp. 1–22, 2004.
- [6] G. N. DeSouza and A. C. Kak, “ Vision for Mobile Robot Navigation:A Survey, ”*IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 237–267, 2002, .
- [7] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. V. Gool,“ SURF: Speeded Up Robust Features, ”in *Proc. of ECCV Workshop on Statistical Learning in Computer Vision*, pp. 404–417, 2006.
- [8] H. Hile and G. Borriello, “Positioning and Orientation in Indoor Environments Using Camera Phones,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 32–39, 2008.
- [9] H. Huang, and G. Gartner, “A Survey of Mobile Indoor Navigation Systems,” *Cartography in Central and Eastern Europe*, Part 3, pp. 305–319, 2009.
- [10] H. Wu, A. Marshall, W. Yu, and G. Borriello, “Path Planning and Following Algorithms in an Indoor Navigation Model for Visually Impaired,” in *Proceeding of the 2nd International Conference on Internet Monitoring and Protection*, pp. 38, 2007.

- [11] I. Yutaka, I. Takeshi, Y. Kiyoshi, Y. Tomohisa, S. Akio, and K. Koichi, “Usability Study of Indoor Mobile Navigation System in Commercial Facilities,” in *Proc. of the 2nd International Workshop on Ubiquitous Systems Evaluation (USE 2008) in UbiComp 2008*, pp. 45–50, 2008.
- [12] J. Kim and H. Jun, “Vision-based location positioning using augmented reality for indoor navigation,” in *Proc. IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Volume. 54, Issue. 3, pp. 954–962, 2008,.
- [13] J. Stone, E. A. LeMaster, J. D. Powell, and S. M. Rock, “GPS Pseudolite Transceivers and their Applications,” *Institute of Navigation National Technical Meeting*, San Diego, California USA (1999) .
- [14] D. G. Lowe , “ Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,” *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, 2004.
- [15] 中川 知香, 佐藤 智和, 横矢 直和, “ランドマークデータベースを用いた投票による静止画像からのカメラ位置・姿勢推定,” *情報処理学会研究報告. CVIM 2006(5)*, pp. 93–100.
- [16] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “Rader: an inbuilding RF-based user location and tracking system,” in *Proceedings of IEEE Info-com2000*, Vol. 2, pp.775–784, 2000.
- [17] P. Ruppel, F. Gschwandtner, C. K. Schindhelm, and C. Linnhoff-Popien, “Indoor Navigation on Distributed Stationary Display Systems,” in *Proc of 2009 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*, Volume 1, pp. 37–44, 2009.
- [18] 曆本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇, ”PlaceEngine:実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤”, *インターネットコンファレンス 2006*, pp.95-104, 2006.
- [19] T. Becker, C. Nagel, and T. H. Kolbe, “Supporting Contexts for Indoor Navigation Using a Multilayered Space Model,” in *Proceedings of the 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware* , pp. 680–685, 2009.
- [20] AirLocation II, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/07/07>.
- [21] ARToolKit, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>.
- [22] au ホームページ, <http://www.au.kddi.com/index.html>.
- [23] Ekahau, <http://www.ekahau.com/>.
- [24] Google マップ, <http://maps.google.co.jp/>.

- [25] HNRRKIT: "Hanger Network GPS Re-Radiating Kit", <http://gpsnetworking.com/>.
- [26] 日立製作所 AirSence, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2007/12/1210a.html>.
- [27] Homepage of Koen van de Sande, <http://staff.science.uva.nl/~ksande/research/colordescriptors/>.
- [28] 経済産業省ホーム 地理空間情報の活用推進, [http://www.meti.go.jp/policy/it\\_policy/GIS/](http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/GIS/).
- [29] NTT ドコモオフィシャルウェブサイト, <http://www.nttdocomo.co.jp/>.
- [30] Open Computer Vision Library“ <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/> ”.
- [31] PlaceEngine.com“ <http://www.placeengine.com/> ”.
- [32] Sekai Camera Support Center, <http://sekaicamera.com/>.
- [33] UbiSense: "Local position system and sentient computing", <http://www.ubisense.net/>.
- [34] Weka 3: Data Mining Software in Java, <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>.