

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2015 年度
修 士 論 文

モバイルセンシングを用いた建築物の調査支援技術の研究

A Study on Support Technology for Building Survey
with Mobile Sensing

2016 年 1 月 25 日提出
指導教員 瀬崎 薫 教授

鵜飼 祐太
Ukai, Yuta

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本論文の構成	1
第 2 章	研究背景	3
2.1	モバイルセンシングの概要	3
2.2	従来の建築物の調査における問題点	5
第 3 章	既存研究と本研究の目的	6
3.1	IT 機器を用いた建築物の調査における作業効率化・迅速化に関する研究	6
3.2	建築物及びその位置同定支援の技術に関する研究	8
3.2.1	画像認識を用いた同定支援の技術に関する研究	8
3.2.2	センサデータを用いた同定支援の技術に関する研究	8
3.3	本研究の方向性	9
3.4	本研究の目的	10
第 4 章	中国での実験	12
4.1	実験対象地	12
4.2	ツールの要件に関する実験	12
4.3	建築に関する知識の有無による写真撮影時の振る舞いの差異に関する実験	17
第 5 章	提案手法と同定手法の実験	21
5.1	提案手法の概要	21
5.2	調査票ツールの概要	22
5.3	同定手法の概要	25
5.3.1	柏キャンパスでの実験	26
5.3.2	代々木上原駅周辺での実験	29

5.3.3	道路幅の誤差が判定に与える影響	32
5.3.4	角度の誤差が判定に与える影響	34
第 6 章	議論	40
6.1	位置情報の誤差の発生要因とその誤差の解決法	40
6.2	撮影角度の誤差の発生要因とその誤差の解決法	40
6.3	道路幅の誤差の発生要因とその誤差の解決法	41
6.4	対象建築物の横幅の誤差の発生要因とその誤差の解決法	41
6.5	調査票ツールの実際の運用	41
6.6	実社会への貢献	42
第 7 章	結論	43
7.1	まとめ	43
7.2	今後の展望	44
謝辞	45

目次

図 1	モバイルセンシングの概要	4
図 2	Weather News	4
図 3	現地調査支援システムを用いた調査風景[18]	5
図 4	写真撮影者から写真に撮影されている事物までの距離に対する提案手法によって推定した値との誤差[34]	9
図 5	研究の目的の概念図	11
図 6	天津租界地区	12
図 7	ツールの概要	13
図 8	ツールの要件に関する実験の範囲	15
図 9	一人の人物の調査中の移動軌跡をマッピングしたもの	16
図 10	実験の考察から得た問題点	17
図 11	建築に関する知識の有無による写真撮影時の振る舞いの差異に関する実験の範囲	18
図 12	建築の知識を持っている学生と持っていない学生の写真撮影地点の比較	20
図 13	調査用の写真を撮影した際に調査項目を入力できるシステム	21
図 14	携帯電話から取得可能なセンサデータ (方位, 画角, 緯度, 経度) から同一の建物を判別する機構	22
図 15	ツール起動時の画面 (左) カメラ画面 (右)	22
図 16	写真撮影後の画面 (左) 調査票ツールの画面 (右)	23
図 17	ツールを使用している様子	24
図 18	同定手法の概要	25
図 19	柏キャンパスで取得したデータを可視化したもの	26
図 20	柏キャンパスで取得した建物の写真の一部	27
図 21	取得したデータ	28
図 22	データを用いた計算	28
図 23	代々木上原駅周辺で取得したデータを可視化したもの	29
図 24	代々木上原駅周辺で取得した建物の写真の一部	31
図 25	道路幅の誤差が発生した際の判定手法の概要	32
図 26	仮想的に道路幅に誤差を与えた際の判定成功率の推移	33
図 27	撮影角度の誤差が発生した際の判定手法の概要	34
図 28	角度の誤差に対する判定式の左辺 $W - (L - d_2 - d_1) $ の値	35
図 29	角度の誤差 1°ごとの判定式の値の差分のグラフ	36
図 30	角度の誤差に対する判定式の左辺 $W - (L - d_2 - d_1) $ の値	38

図 31 角度の誤差 1° ごとの判定式の値の差分のグラフ	39
--	----

表目次

表 1	観測地点数と撮影された写真の枚数.....	16
表 2	各ログ取得者の観測地点数と撮影した写真の枚数.....	19
表 3	柏キャンパスで取得したデータを用いた提案手法の判定成功率.....	29
表 4	代々木上原駅周辺で取得したデータを用いた提案手法の判定成功率.....	30
表 5	分析に用いたデータのプロフィール（柏キャンパスにて取得したデータ）.....	34
表 6	$\theta_1 = 70^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	35
表 7	$\theta_1 = 20^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	35
表 8	分析に用いたデータのプロフィール（代々木上原駅周辺にて取得したデータ）... ..	37
表 9	$\theta_1 = 84^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	37
表 10	$\theta_1 = 45^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	38
表 11	$\theta_1 = 24^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	38
表 12	$\theta_1 = 17^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合.....	38

第1章 序論

1.1 はじめに

近年、カメラ機能、GPS 受信機、加速度センサ等の多種センサを搭載する高性能携帯電話（スマートフォン）が急速に普及しつつあり、環境情報（撮影時の位置情報、方向情報、天気等）を取得し、そのメタデータが付与された写真を容易に撮影可能となった。この高性能携帯電話の普及により、街を往来する個人が多種センサを搭載したスマートフォンを用いて環境をセンシングし、携帯電話網を通してセンサデータを収集するモバイルセンシングの研究がセンサネットワークの構築手法として注目を集めている[1, 2]。このスマートフォン内蔵センサで収集したデータを一般のユーザから集約・解析することで、環境モニタリングや交通状況の監視、ヘルスケアや世論調査などの幅広い分野に応用される可能性を秘めている[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]。従来のセンサネットワーク技術に比べてモバイルセンシングは置き型のセンサを設置するコストや手間などを必要とせず一般のユーザを社会インフラとして利用できる点が大きなメリットとなっている。また、機械ではなく人間がデータを取得・生成し、送信することから機械のセンサのみを用いた際に判断が難しいような情報を取得・収集できることもメリットである。

一方、建築物についての調査には未だに紙面を用いたアナログな調査手法が主流となっている。しかし、紙の調査票を用いた場合、調査件数の増大によって調査票が大量に必要になり、持ち運びに手間がかかるようになり、紛失のリスクも上がる。これに加え、調査データの集計に多くの時間を要する等の問題も発生する。本研究ではこのモバイルセンシングを用いて、紙面ベースでの調査が主に行われている建築物の調査の労力の削減及び作業の効率化を図る。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

まず、第2章では、本研究で用いる技術であるモバイルセンシングについてその概要と課題に関して解説を行う。その後現在の建築物の調査における問題点を指摘する。

次に、第3章では第2章でまとめた課題についてそれぞれに関連した既存研究を紹介し、問題点を明らかにした上で、本研究の目的について論じる。

第4章では中国での実験について概要を示し、結果及び考察を述べる。

第5章では第4章の実験で得た知見を元に本研究において提案するツール及び携帯電話から取得可能なセンサデータから同一の建物を判別する機構について概要を述べた後、提案した機構の有効性の検討のために行った実験についてその結果と考察を述べる。

第 6 章では提案した手法を用いる際に起こりうる誤差の発生要因とその解決法について議論を行った後、本研究で提案したシステムの実社会への貢献について述べる。
最後に、第 7 章にて全体をまとめ、今後の展望を述べる。

第2章 研究背景

本章では、研究背景としてのモバイルセンシングの概要と、従来の建築物の調査における問題点について述べる。

2.1 モバイルセンシングの概要

近年の半導体技術の進歩によって、超小型かつ低消費電力の CPU モジュール、無線通信モジュール、センサモジュールの開発が可能となった。これらのモジュールの出現によって生み出されたものがセンサネットワークである[14]。このセンサネットワーク技術とは、センサを搭載した小型のコンピュータが無線を用いて相互に通信を行い合いながら、実空間上の情報をサイバー空間に取り込むための技術である[1, 14]。センサネットワーク技術の中でも近年のスマートフォンに代表される高機能性携帯電話の急速な普及を背景に期待されているのがモバイルセンシングである。

モバイルセンシングとは、携帯電話端末ユーザにセンシングへの参加を促し、その参加ユーザから集めた大量かつ広範囲のデータを統合・解析することによって様々な施策やアプリケーションに利用するセンサネットワーク技術である(図1)。センサは携帯電話端末に標準で装備されているため、従来のセンサネットワーク技術に比べて置き型のセンサ設置のコストがかからず、データ収集においてより安価・網羅的にデータを収集できるという利点がある。また、携帯電話端末本体によって電源が確保されており、電源の容量が低下する際にはユーザが充電を行うため、センサネットワークの大きな課題である消費電力の問題を気にする必要がないという点も利点である[14, 15]。特に携帯電話端末の所有者が多く、人口密度の高い都市部においてこの技術の活用が期待されている。例えば[16]の論文の中で筆者たちは NoiseTube というシステムを開発・用いることで実験参加者達から都市地域における騒音情報をスマートフォンによってセンシングしてもらい、そのデータを集約・解析することで高粒度な環境騒音地図を構築している。

モバイルセンシングの身近な実用例としてはウェザーニュース[17]が挙げられる。ウェザーニュースはウェザーニューズ社の提供するサービスで、有償で会員登録したユーザがウェザーリポーターになる権利を与えられる。リポーターとなったユーザは自分の所在地の天気の情報について携帯電話を用いてテキスト形式でウェザーニューズ社へ報告を行うことができる。報告を受信した後に企業側で報告内容のチェックを行い、気象予報サービスの一部として反映が行われる仕組みとなっている(図2)。

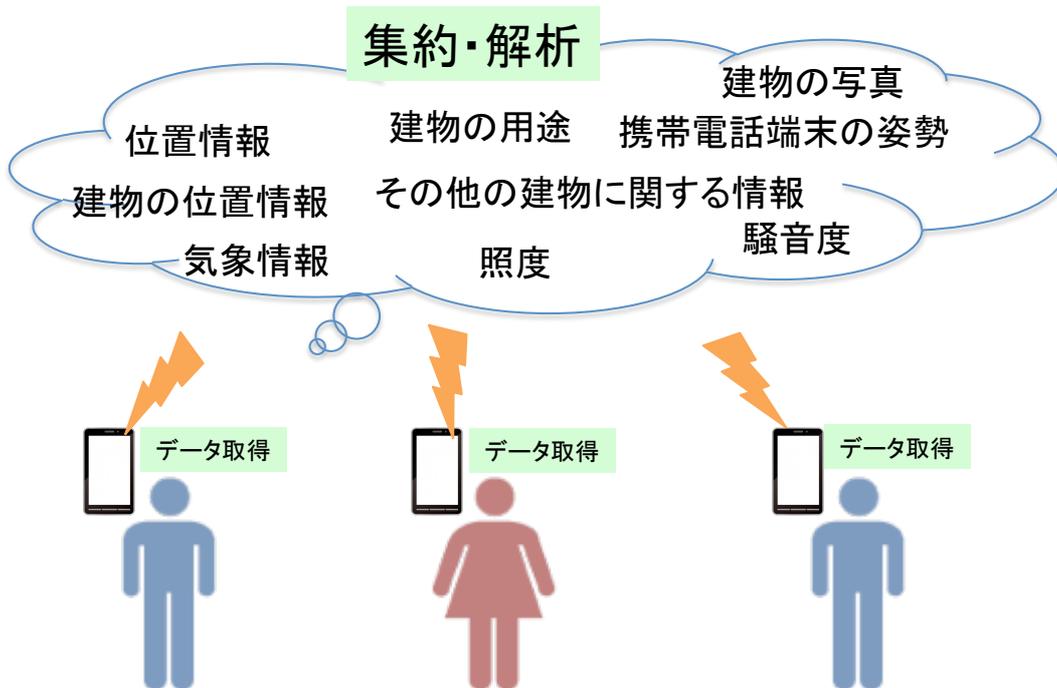


図 1 モバイルセンシングの概要

weathernews

【お天気セミナー】に参加しませんか？今週は近畿で開催！

2016年01月09日 16時51分03秒

00時42分から16時40分までのレポートを表示

ALL Channel MyCh.

ウェザーレポート

全国 関東

ウェザーレポート Ch.

Map検索 Report検索

全国	北海道	道央	道南	道北	道東
東北	青森	岩手	秋田	宮城	山形
福島					
関東	茨城	栃木	群馬	埼玉	千葉
	東京	神奈川	伊豆		
中部	山梨	長野	新潟	富山	石川
	福井	静岡	愛知	岐阜	
近畿	三重	滋賀	京都	大阪	兵庫
	奈良	和歌山			
中国	岡山	広島	鳥取	島根	山口
四国	徳島	香川	愛媛	高知	
九州	福岡	佐賀	長崎	大分	熊本
	宮崎	鹿児島			
沖縄					

1/09 16:38 - 東京都台東区
いい夕焼け前。

WEATHER REPORT

天気予報の編集に参加する
プロジェクト
詳しくは
コチラ

ガチな天気予報セミナーを開催

お問い合わせ ご利用に際して 個人情報の取り扱い

© 1996-2016 WEATHERNEWS INC. ALL RIGHTS

図 2 Weather News

2.2 従来の建築物の調査における問題点

序論でも述べたように、従来の建築物の調査は紙を用いて行う手法が一般的である。この調査手法では調査内容や項目の軽微な変化にも容易に対応できる他、複数機関がチームを組成して調査に参加する場合においても紙の調査票のファイルを共有することができ、調査件数が増えた場合においても新規に調査票を印刷することで即座に対応することができるなどの様々な利点がある。しかし、この方法で調査を行った場合、建築物の写真を撮影し、調査表に各種調査項目を記入し、調査表を集計する等の非常に煩瑣な処理を施さなければならず、調査量が膨大になった際の調査表の持ち運びの手間や調査中及び調査後の調査票の紛失等のリスクがある。これらの紙の調査票の問題を解決するために、IT 機器を用いた調査支援ツールやシステムが提案されてはいるが、被災地調査や被災後の建物被害認定のためのアーカイブ作成など特定の目的での利用に留まっているのが現状である [18, 19].



図 3 現地調査支援システムを用いた調査風景[18]

第 3 章 既存研究と本研究の目的

本章では前章の背景を踏まえた上で関連する研究を紹介し、本研究の方向性を明らかにした上で目的を定義する。

3.1 IT 機器を用いた建築物の調査における作業効率化・迅速化に関する研究

IT機器を用いた建築物の調査の作業効率化や迅速化に関する研究は数多く行われており、寺木らはその論文[20]の中で、大震災発生後の建築物の被災状況を的確に把握するための調査及び、その結果の分析や施策の検討等のあらゆる局面において作業の迅速化、効率化が求められているとし、地理情報システムの導入によってそれが叶うとしている。そして、震災発生後の時間経過によって復興までの期間を 3 つの区分に分け、各区分において必要な被災データを整理し、そのデータの取得方法について検討を行っている。特に阪神・淡路大震災の際に震災発生翌日(1995 年 1 月 18 日)から開始された被害状況把握調査が補足調査まで含めて同年 2 月 14 日まで行われており[21, 22]、そのデータの単純集計に 3 月下旬まで時間を要したことや日本建築学会・日本都市計画学会による悉皆調査の結果公表まで時間を要したことを事例として挙げ、技術的な支援による作業効率化を強く訴えている。また、この震災において瓦礫の撤去状況に関する調査が継続的に行われ、時系列を追う形でデータの整備が行われたこと[23]を例に挙げて、連続的なデータの取得及びその保存は市街地の更新状況を把握する上で重要な資料となりうるとしている。また、リモートセンシングによる倒壊建築物の迅速な把握の限界が示唆された。特に半壊や一部損壊など小規模な被害が多数生じる建築物の詳細な被災状況を知ることが必要な復旧・復興計画を支援する技術としては限界があり、詳細な被災状況を知るためにも現地調査を避けて通ることはできないとしている。この問題を解決するために目黒ら[19, 24]は写真アップロードシステムを開発し、その有効性について検証している。具体的には、被災地内の調査員がスマートフォンのアプリケーションを用いて写真撮影を開始する住宅の GIS 上のデータや場所の確認を行い、建物の全景写真を撮影した後、建物の各方向からの損傷部位を写真に撮影し、各写真を紐付けた上で専用のクラウドサーバにアップロードした後、遠隔で建物被害認定を行うというものである。検証の結果、リモートセンシングによってカバーすることができなかった半壊や一部損壊などの被害形態の場合においても、被害部位のクローズアップ写真を用いることによって正確に被害を把握することが可能であることが確認された。

また、石井らはその論文[25]で被災時の建築物の現地調査に求められる携帯型情報端末

の機能要件について過去の複数の現地調査支援ツール[26, 27]を紹介したのちそれを整理した上で概括を行っている。機能要件はソフトウェアに求められるものとハードウェアに求められるものに分けられる。それぞれの機能要件を以下に示す。

ソフトウェアに求められる要件

- a) 調査対象建物及び位置の同定支援
- b) 入力支援と入力ミスを極力減らすユーザインターフェース
- c) 入力内容の整合性確認
- d) 調査レコード・調査者・調査端末の識別
- e) 画像データとの連携

ハードウェアに求められる要件

- a) 調査の際にアプリケーションの動作に不備を起こさないような十分なマシンパワーを持つ CPU, メモリ, グラフィックス等の処理装置
- b) 地図の判読やデータの入力が十分可能な画面サイズ
- c) 調査所要時間に対応したバッテリー持続時間
- d) データのバックアップ機能
- e) 耐衝撃・防水・防滴性能

以上の機能要件の中で、ハードウェアに求められる要件に関してはデバイス自体のスペックに依存しており、現状での改善は難しいと考える。一方、ソフトウェアに求められる要件の d) と e) に関してはツール開発の際に撮影した写真に撮影した端末の ID を埋め込むような仕様にすれば解決が可能であるとしている。また、b) と c) に関してもモバイルセンシングの技術を用いて、多数の人物からデータを取得してそれを集約することで仮に入力ミスがあるデータがあったとしても、確度の高いデータが多く集まっていれば不正解のデータを除外することが可能であるとする。最後に残った a) に関して、GPS を用いた調査対象の建物の同定が有効としているが、誤差の存在や Wi-Fi を併用して測位性能を向上させた場合でもオフライン時にはそれが機能しない点を問題として挙げている。この問題を解決するために GPS が使えない環境においては調査支援ツールに事前に詳細な地図を格納しておき、調査者がその地図の中から正しく建物を判読して調査対象建物を選択できるような形式にするか、調査対象建物のポリゴンデータもしくはポイントデータを事前にツールに格納して調査時にそれを選択して属性データを書き込むことで解決できるとしている。しかし、仮に詳細な地図や位置データを格納したとしても人間が調査を行う以上はヒューマンエラーが起こることは避けて通れず、詳細なデータを格納すればするほどハードウェアにかかる負担が大きくなり、ツールの挙動の遅延に繋がると考える。この調査対象建物及びその位置の同定支援に必要と思われる技術に関しては次節で紹介を行う。また、同時に多数の調査者が携帯型情報端末を用いた現地調査を行う際に調査データの効率的な回収方法や大量の端末の充電方法に関してノウハウが不足している点が多く残されているとしている。

最後に、石井らは別の論文において[28]被災建物の現地調査支援ツールの課題抽出と運用マニュアル等の作成を行い、被災時だけではなく平常時にも携帯電話情報端末を活用するための汎用性のある現地調査支援ツールの機能要件の整理についても提言を行っている。

3.2 建築物及びその位置同定支援の技術に関する研究

建築物及びその位置同定支援の技術に関する研究には大きく分けて撮影された写真に対して画像認識を用いるものとセンサデータを用いるものがある。以下にそれぞれの研究を紹介していく。

3.2.1 画像認識を用いた同定支援の技術に関する研究

Snavely らはその論文[29]の中で、多視点の画像から Structure from Motion[30]を用いて建築物をデジタル空間で復元する手法を提案している。この手法を用いることで画像間の対応付けから建築物の 3 次元構造及び撮影したカメラの位置と姿勢を知ることができる。しかし、実験に用いている画像データが不特定多数の者が撮影した写真であるため、同一の建築物の壁面を撮影している画像ペアを特徴点のマッチングを用いて見つける必要がある。この画像ペアの検出には画像の枚数が多くなればなるほど計算量は増えていき、論文の中ではローマの街並みを再現するために用いられた画像は 150,000 枚程あり、画像間の対応付けの作業だけで 500 台の計算機を用いて 13 時間もの処理時間を要したとされる。このように多量のデータを用いた際に起こるデータ間の関連付けの問題に関しては他の論文[31, 32, 33]でも議論がなされており、前述の計算にかかる所要時間の問題の他に質の悪い画像データが混入した場合において関連付けの精度が下がることも問題としている。また、画像データにタグを付した場合の情報の信頼性についてもその精度には疑問が残るとしている。この関連付けの処理を行う前段階で携帯電話のセンサから取得した情報を用いて画像ペアの判定を行い、関連付けに使用する画像の数を減らすことができれば、画像処理によってコンピュータにかかる膨大な負荷の省力化に貢献できると考える。

3.2.2 センサデータを用いた同定支援の技術に関する研究

Qin らはその論文[34]の中で、モバイルセンシングの普及により、Creek Watch[35]や Ecosnapp[36]等に代表されるユーザがセンシングしたデータや写真を Web 上にアップロードすることによって環境モニタリングや空間マネジメントを行えるようなツールが数多く開発されていることを背景として挙げ、それらのツールの改善が必要な要件として、位置情報の精度及びアップロードされている写真の信頼性という 2 つの要素を挙げている。具体的には、位置情報の精度に関して、写真をアップロードされる際に付与される位置情報は写真の撮影者の位置を表しており、その写真に写っている事物の位置情報に関しては付与されることはない。この問題を解決するために様々な論文[37, 38]で改善手法が提案

されてはいるが、画像認識によって写真撮影者から写真に撮影されている事物までの距離を逆算しているために、写真撮影者に複雑な作業を要求したり[37]、撮影時のジッターや天気の変化や光の強さによって撮影した写真のクオリティが低下し、処理の工程が複雑になったり精度が落ちる[38]等課題は多い。これを解決するために論文内では画像認識を用いることなく、写真撮影者から写真に撮影されている事物までの距離をスマートフォンのセンサから取得できる情報、具体的には位置情報、加速度、端末の縦方向の傾きから算出する手法を提案している。その結果、写真が撮影されている事物と写真撮影者の実際の距離が50m以内なら、提案手法によって推定した値との誤差は7m以内に収まることが確認された。

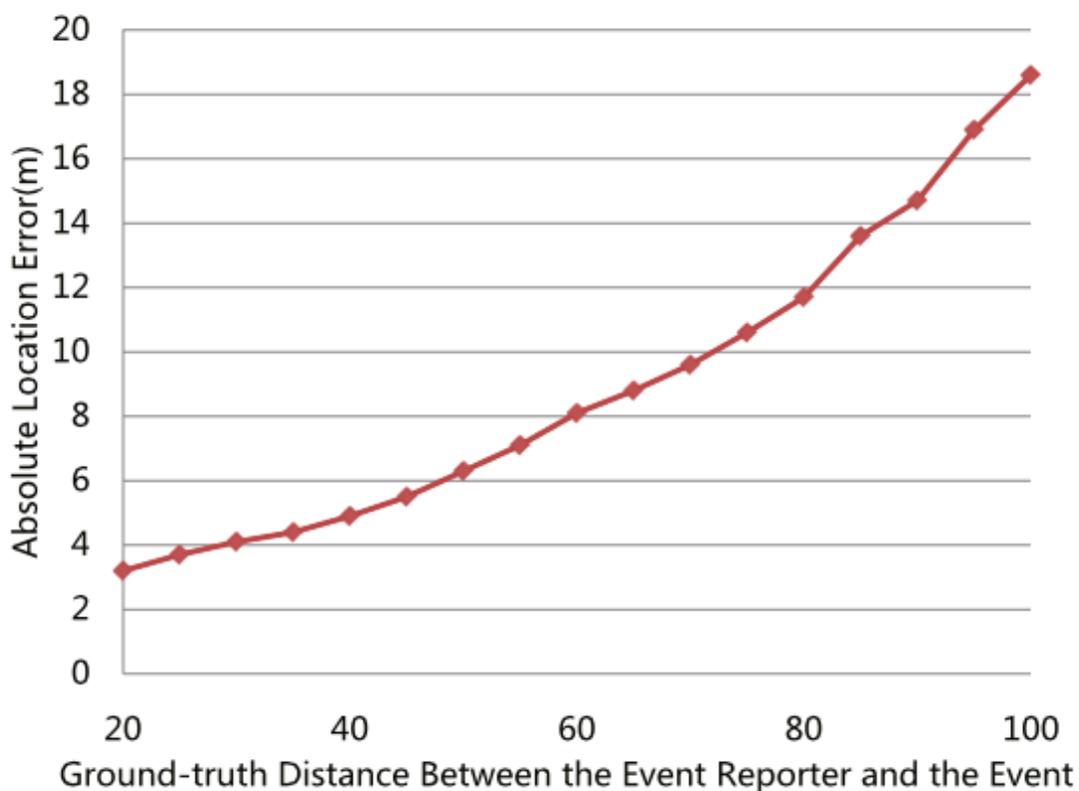


図 4 写真撮影者から写真に撮影されている事物までの距離に対する提案手法によって推定した値との誤差[34]

3.3 本研究の方向性

本節ではここまで概覧してきた本研究に関連する分野の現状をまとめ、本研究の方向性について定義する。

まず「IT 機器を用いた建築物の調査における作業効率化・迅速化に関する研究」では、現在まで行われてきている IT 機器を用いた建築物の調査における作業効率化・迅速化のための研究の現状について紹介した。この節では調査ツールに求められる要件の内、モバイル

センシングを用いてデータを収集・集約することで要件を容易に満たせる可能性を示唆した。一方、求められている要件の内、調査対象の建物とその位置の同定支援に関して課題がまだ残っていることを指摘した。また、現在までの流れの中で、現地調査支援ツールは主として災害発生時の調査を容易に行い、その記録を残すことにフォーカスされていたが、より汎用的な調査のための現地調査支援ツールが必要になってきていることも示した。

前述の調査対象の建物とその位置の同定支援に関する課題を解決するために「建築物及びその位置同定支援の技術に関する研究」では、画像認識を用いるものとセンサデータを用いるものの 2 つに手法を分けて研究の紹介を行った。画像認識を用いるものでは画像が大量になった場合の計算時間増加の問題や画像データの質によって精度が変わりやすい等の問題があった。そのため、次に紹介したセンサデータを用いた同定支援を行っている論文では、画像認識を用いることなく、センサデータから写真に写っている場所と写真撮影者の距離を高精度で推測できることを示した。しかし、この手法はあくまでも写真に写っている場所と写真撮影者との距離であり、撮影された画像データ間の紐付けは画像認識に頼っている。そこで本研究では、画像認識を用いることなくセンサデータを用いて写真に写っている建築物の紐付けが行えることを目指す。

3.4 本研究の目的

背景やこれまでの既存研究の紹介でも述べたように建築物に関する各種の調査は建築の専門家が膨大な手間をかけて行う。また、デジタルアーカイブを作成する際にもプロジェクトを組成し、事業を遂行するためには人的な手間やコストが継続的にかかるばかりでなく、大型な設備や高価な機材を導入すると、コストがかかるとともに機材を現地に搬入する手間もかかってしまう。IT 機器を用いてこの手間を解消する研究も行われてはいるが、災害発生後の迅速な調査のための研究が主に行われており、より汎用的に調査に用いることのできるツールが期待されている。本研究はモバイルセンシングを用いてこれらの問題を緩和させることを目的とする。具体的には、モバイルセンシングを用いることで建築の専門家ではない者でも建築物の調査に貢献できる機構の開発を行う。この目的を達成することで、都市に関するデータがより効率的に安価且つ細粒度に取得されるだけでなく、継続的に時系列情報が付与されたデータを取得できる。そしてそのデータが都市管理ツールやデジタルアーカイブの開発に活かされ、都市に住まう人々の豊かな生活に貢献していくと考えている。

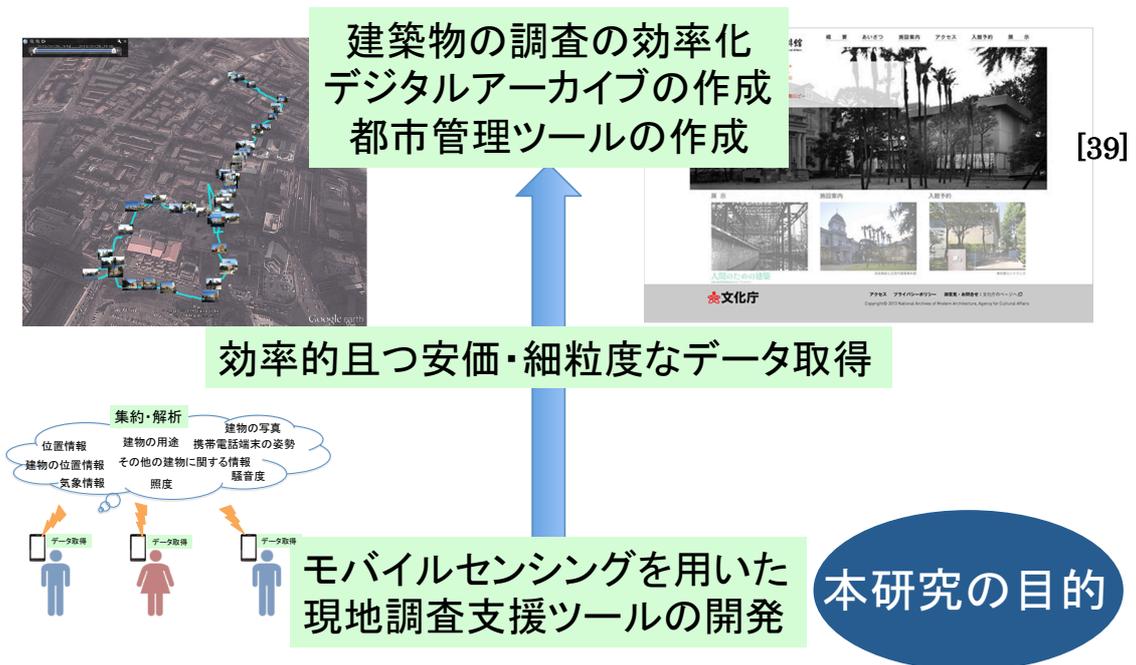


図 5 研究の目的の概念図（図中で用いた Web サイトは[39]）

次章からはこの目的を達成するために行った実験及び手法の提案について詳しく説明を行う。

第4章 中国での実験

本章では中国の天津租界地区で行った実験の概要及び得られた知見について説明を行う。

4.1 実験対象地

天津租界地区

租界（そかい）とは、かつて中国に存在した行政自治権や治外法権をもつ外国人居留地である。1840年代以降、不平等条約により中国大陸各地の条約港に設けられた。数ある租界の内、天津租界には最も多くの国の居留地が存在しており、多様性に溢れたかつてのまちの有り様を映し出している。しかし、再開発が進み、現代的な建築も多々見受けられる。

本研究で提案したツールはこの地域の調査を行っている天津大学建築学院の関係者が使用する予定である。



図 6 天津租界地区

4.2 ツールの要件に関する実験

実験の目的

建築物の調査で行われる全数調査（悉皆調査）において本研究で使用予定のアプリケーションの使用可否及び建築調査においてどのような機能が必要になるのかを調べるため、共同研究を行っている天津大学建築学院の関係者の協力の下実験を行った。以下に本実験で使用したツールの概要を示す。

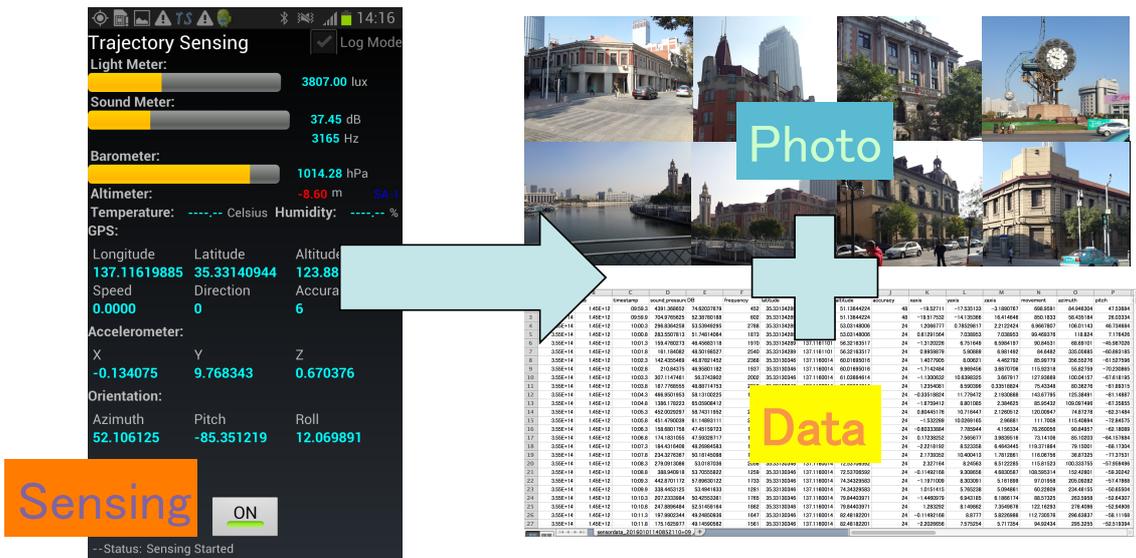


図 7 ツールの概要

ツールの概要を図に示した。このツールは Eclipse[40]を用いて java[41]によって開発されており、このツールを用いることで所得できるデータは

- ・ 画像データ (.jpg 形式)
- ・ 緯度
- ・ 経度
- ・ 高度
- ・ タイムスタンプ
- ・ 音圧
- ・ 周波数
- ・ 三軸の加速度
- ・ 方位
- ・ 端末の縦方向の傾き
- ・ 端末の横方向の傾き
- ・ ジャイロ
- ・ 三軸の地磁気
- ・ 三軸の重力加速度
- ・ 照度

である。センサデータはツール内のセンシング開始ボタンを押してから 0.5 秒間隔で取得される。取得したデータは Android 端末内に生成した `trajectorysensing` ファイルの中に保存される。画像データ以外のデータはそれぞれ `sensor.csv` 及び `photoLog.csv` の 2 つのファイルに保存される。`sensor.csv` ファイルにはセンシング開始ボタンを押してから 0.5 秒間隔で取得されたセンサデータが保存され、`photoLog.csv` にはツールに内蔵されたカメラによ

て画像データが撮影された際に紐付けられたデータが保存される。各々のファイルに格納されるデータを以下に示す。

sensor.csv に書き込まれるデータ

- ・ Android 端末の ID
- ・ タイムスタンプ
- ・ 音圧
- ・ 周波数
- ・ 緯度
- ・ 経度
- ・ 高度
- ・ センサデータの精度
- ・ 三軸の加速度
- ・ 方位
- ・ 端末の縦方向の傾き
- ・ 端末の横方向の傾き
- ・ バッテリーの残量
- ・ GPS のタイムスタンプ
- ・ 三軸の重力加速度
- ・ 三軸の地磁気
- ・ 三軸のジャイロ
- ・ 照度
- ・ 大気圧
- ・ 標高
- ・ 気温
- ・ 湿度

photoLog.csv に書き込まれるデータ

- ・ Android 端末の ID
- ・ タイムスタンプ
- ・ 写真撮影時の時刻（センサデータ取得開始からの経過時間）
- ・ 撮影した画像データのファイル名（.jpg 形式）
- ・ 緯度
- ・ 経度
- ・ 高度
- ・ センサデータの精度

- ・ 方位
- ・ 端末の縦方向の傾き
- ・ 端末の横方向の傾き
- ・ 照度
- ・ 写真撮影時のカメラの画面の傾き

実験条件

調査地：イタリア租界（補修・開発が進んでいる, 観光地にもなっている, 建物が集中, 2000年に住民全員が租界の外に移動した.）

調査日時：2015年 6/21 15:30～18:00

調査人数：8人

対象地を3つのエリアに分け, エリア内の建物全ての写真を撮影した. 実験を行った範囲を以下の図に示す.

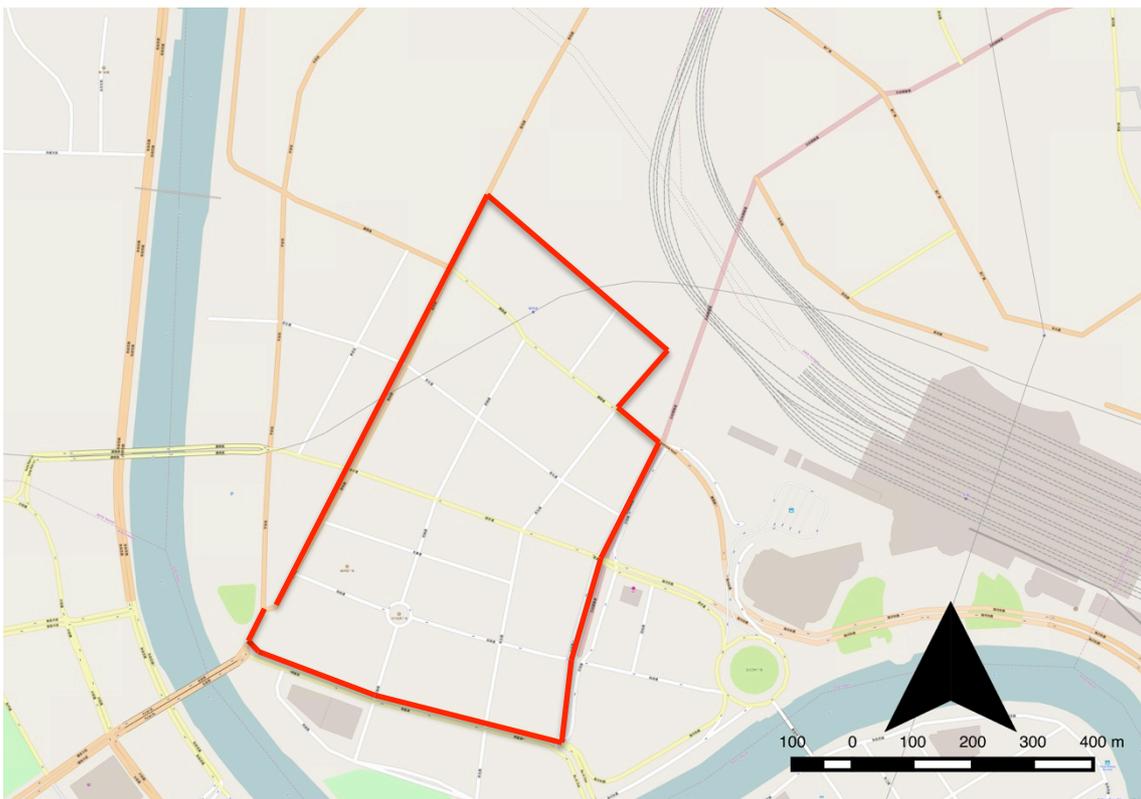


図 8 ツールの要件に関する実験の範囲

実験結果

表 1 観測地点数と撮影された写真の枚数

ID	Androidのバージョン	備考	観測した点の数	撮った写真の数
EVA-02	4.1.2		5088	87
EVA-05	4.1.2	Photologにlat,lonがない→Google accountを入れることで解決	4737	82
EVA-07	4.1.2		7496	109
Mark.8	4.1.2	Photologに不備が見つかるが、後に解決	4414	84
EVA-10	4.1.2		5400	215
EVA-12	4.1.2		5157	165
博士学生使用端末	4.3	Photologにlat,lonがない→Google account入れることで解決予定	13343	189
Nexus5	5.1.1	写真撮影機能が呼び出せない バッテリーが途中で切れた	18022	
平均			7957.125	133



図 9 一人の人物の調査中の移動軌跡をマッピングしたもの

実験の考察

本実験に使用したツールでは撮影地点と移動データのログを常に取得しているので仮にこれをリアルタイムで可視化できれば、調査の際にこのツールを用いた場合に調査票の記入や写真撮影を行わなければならない調査対象の建築物の漏れを減らせると考える。また、調査の際に道に対してどちら側の写真を撮影するのか等のルールを決めておかないとそれ

ぞれの撮影者の撮影した建物が被りが出てきてしまう恐れや、Web 上で写真をマッピングした際に実際の建築物の位置とは異なる地点に写真が差し込まれる可能性がある。これを解決するために、携帯電話端末から取得したセンサデータを用いて、同一の建築物を撮影した写真を検出する機構が必要であると考える。

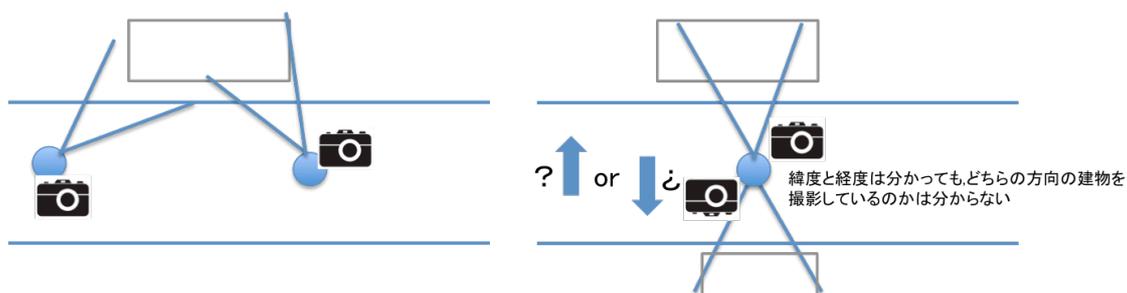


図 10 実験の考察から得た問題点

4.3 建築に関する知識の有無による写真撮影時の振る舞いの差異に関する実験

実験の目的

建築に関して専門的知識を有する人物とそうではない人物それぞれが写真撮影の際にどのような振る舞いをするのかを調べるために実験参加者にデバイスを配布したのち、「自由に歩き回って自分の興味が湧いた写真を撮ってください」という指示のもと、実験を行った。

実験条件

調査地：フランス租界（金融街）

調査日時：2015 年 6/23 10:40～11:50

調査人数：6 人



図 11 建築に関する知識の有無による写真撮影時の振る舞いの差異に関する実験の範囲

調査結果

表 2 各ログ取得者の観測地点数と撮影した写真の枚数

機体名	ログ取得者	観測した点の数 (点)	撮影した写真の数 (枚)
EVA-02	建築を専攻としていない学生	6824	58
EVA-05	建築を専攻とする教員	4817	116
EVA-07	建築を専攻とする教員	3763	96
Mark.9	建築を専攻とする学生	4149	123
EVA-10	建築を専攻としていない教員	4239	121
EVA-12	建築を専攻としていない学生	4077	75
平均		4645	98

調査結果を表 2 に示した。現地大学の関係者を建築を専攻とする教員及び学生として示し、瀬崎研究室の関係者を建築を専攻としていない教員及び学生として示した。現地大学の関係者は 100 枚前後写真を撮っているのに対して、瀬崎研究室の実験参加者の多くはそれより少ない撮影枚数に留まっている。

実験の考察

建築の知識を持っている学生と持っていない学生の写真撮影地点を地図上に可視化したものが図 12 である。図の上から下に向かって歩き、写真を撮影している。写真撮影枚数は建築の知識を持っている学生（黄緑色）の方が多かった。また、実験開始時序盤では両者ともメインストリートの脇道に入って写真を撮影していたものの、実験終了間際になると建築の知識を持たない学生（オレンジ色）は写真の撮影枚数が減り、脇道に入って写真を撮影する頻度が少なくなった。これはモバイルセンシングによってデータを収集した際に、建築の知識をあらかじめ持っている人物と建築の知識を持たない人物でデータの偏りが起こり、正しい分析が行えない可能性がある。以上より、調査票のツールを作成する際に建築に関して知識を持っているかどうかでデータ取得者の属性を区別してデータを取得できるような仕様にするのが望ましいと考える。

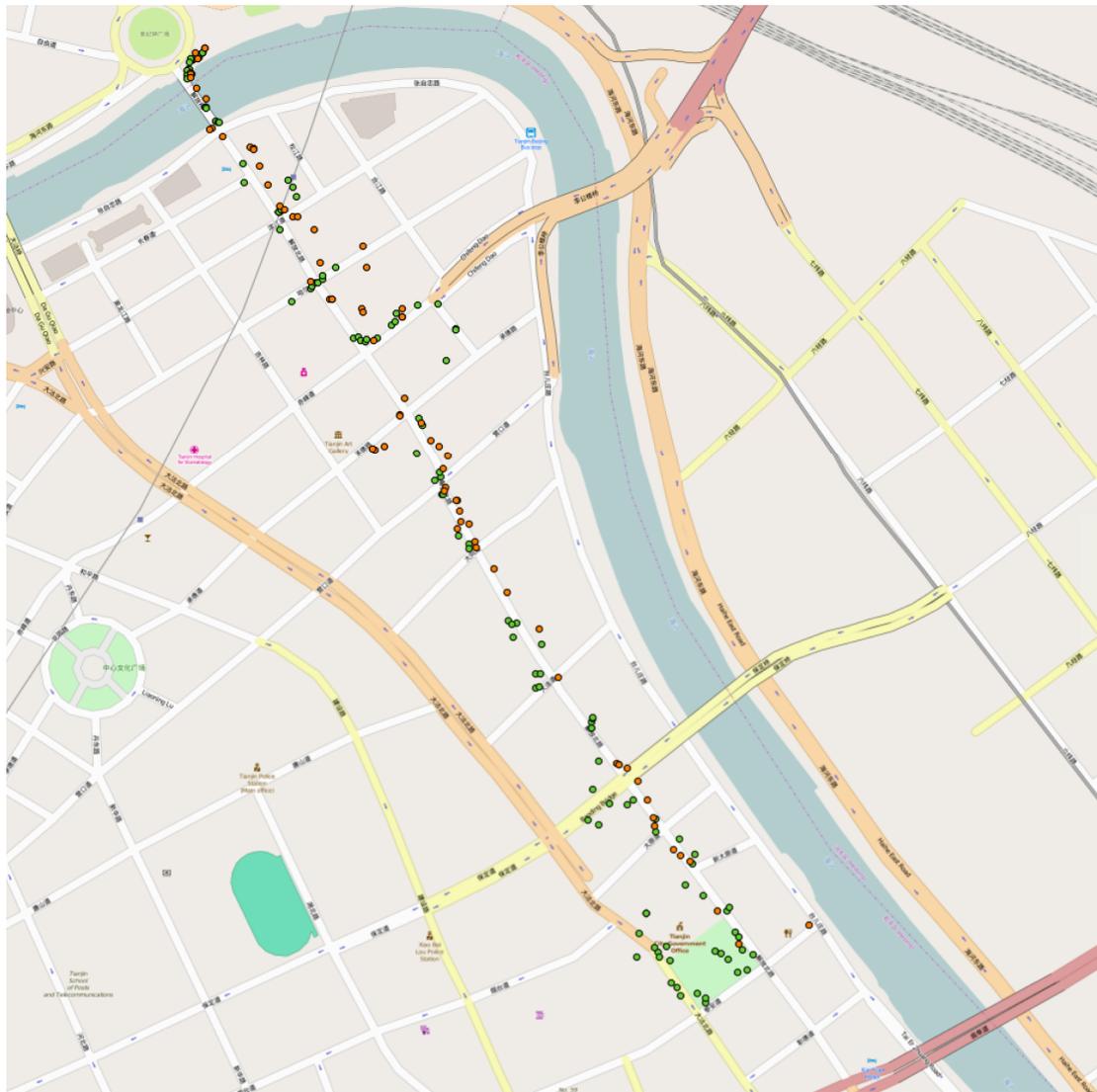


图 12 建築の知識を持っている学生と持っていない学生の写真撮影地点の比較

第 5 章 提案手法と同定手法の実験

本章では提案手法の概要及び開発した調査票ツールの説明を行う。その後、提案した同定手法の有効性検証のために行った実験について説明を行い、考察を述べる。

5.1 提案手法の概要

第 4 章の実験の考察から得た知見から手法を提案する。建築物の調査における調査票ツールに加えて、携帯電話から取得可能なセンサデータ（方位、緯度、経度）を用いて異なる地点から撮影された同一の建築物を検出する機構を提案する。この機構を用いることで、人手によらずに 1 つの建築物に対する調査票とその調査票に対応する別の者が撮影した同一建築物の紐付けを行うことができる。機構の開発のために、前述のセンサデータを用いて対象物の位置推定を行っている論文等から手法の検討を行った。異なる地点から撮影された同一の建築物の写真を検出する手法の実験及びその検討は第 3 節において説明を行う。手法の概要を図 13 に示す。

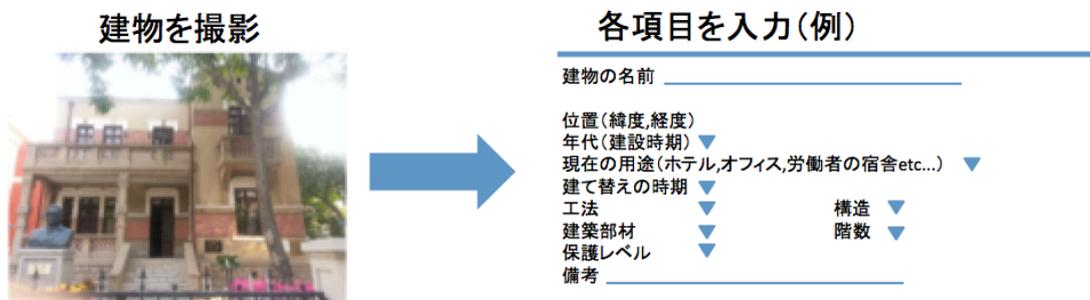


図 13 調査用の写真を撮影した際に調査項目を入力できるシステム

調査時に建築物を撮影した後に画面が遷移し、調査票の各項目の入力画面が現れた後、各項目を書き込んでいく。本章 2 節においてその概要を説明する。

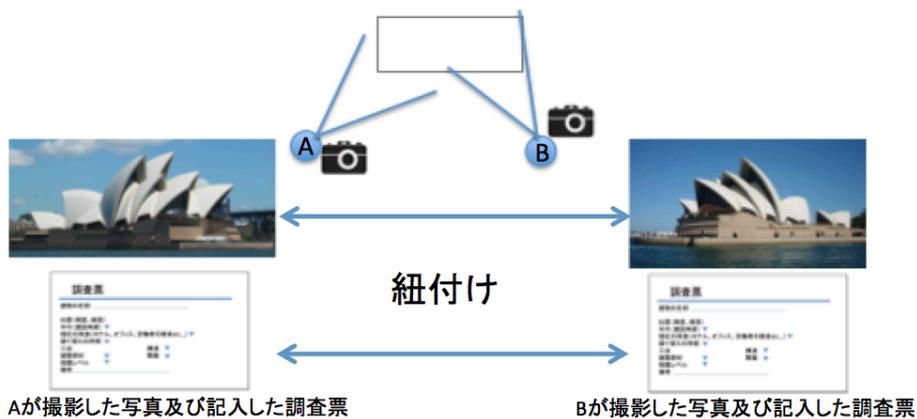


図 14 携帯電話から取得可能なセンサデータ（方位，画角，緯度，経度）から同一の建物を判別する機構

5.2 調査票ツールの概要

開発したツールを以下に示す。

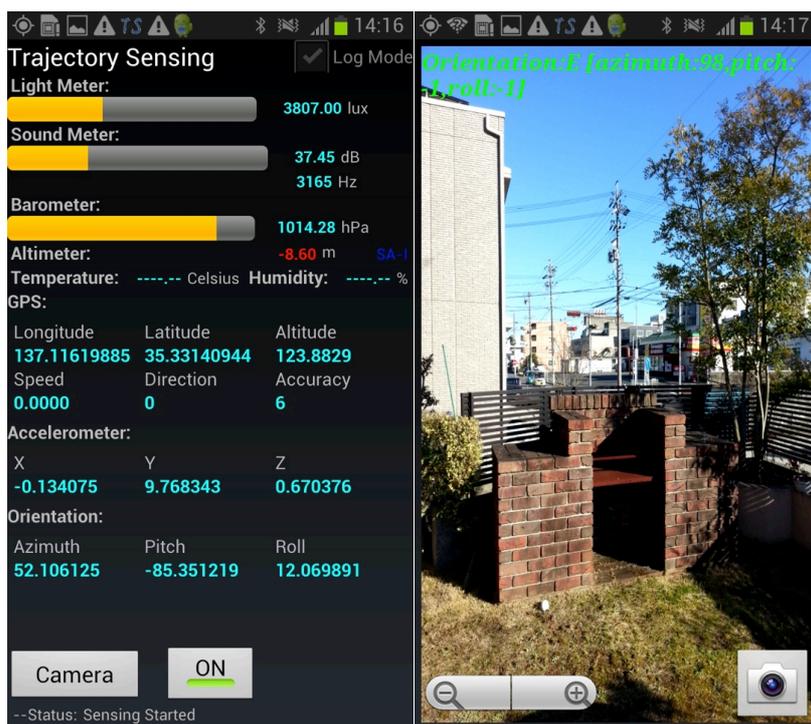


図 15 ツール起動時の画面（左） カメラ画面（右）

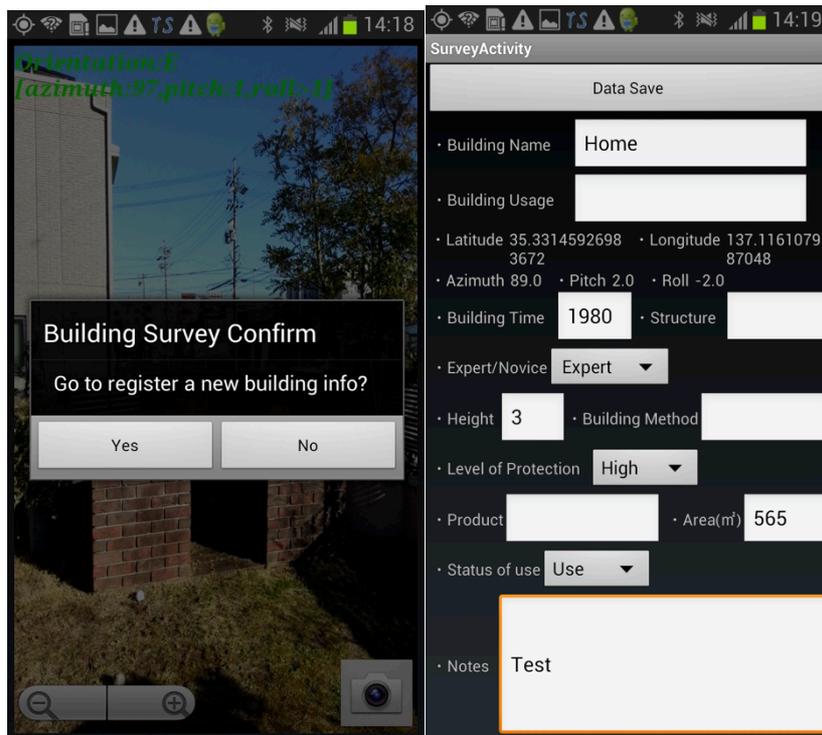


図 16 写真撮影後の画面（左） 調査票ツールの画面（右）

このツールは Android 端末のアプリケーションとして Java を用いて開発した。アプリケーションを起動すると最初にセンサデータを取得する画面が最初に表示され、ON/OFF スイッチの切り替えによってセンサデータの取得が開始される。Camera ボタンを押すことによって写真の撮影の画面に遷移し、写真を撮影することが可能となる。写真を撮影した後、調査票ツールの書き込み画面に移動するかどうかの画面が現れ、撮影した建築物のデータを書き込みたい場合は Yes のボタンを、撮影に失敗した場合は No のボタンを押す。ツールを使用している様子を図 17 に示す。



図 17 ツールを使用している様子

調査票ツールに書き込める項目を以下に示す。調査票の各項目に関しては共同研究を行っている天津大学建築学院の青木信夫教授及び徐蘇斌教授，そして青木教授の研究室の学生と議論を行い決定した。

- ・ 建築物の名前
- ・ 建築物の現在の用途（ホテル、オフィス、労働者の宿舎等）
- ・ 位置（緯度・経度）
- ・ 写真を撮影した方位
- ・ 写真撮影時の端末の縦方向の傾き
- ・ 写真撮影時の端末の横方向の傾き
- ・ 建築物の建設時期（年代）
- ・ 建築物の構造
- ・ 建築に関して専門的な知識を有しているかどうか
- ・ 建築物の階数
- ・ 建設時の工法
- ・ 建築物の保存レベル

- ・生産物
- ・建築物の面積
- ・現在の使用状態（使用中 or 部分的に使用 or 使用停止）
- ・備考欄（写真で判断できないこと及び調査票ツールの書き込み項目に存在しない情報を書き込む項目）

以上の全 16 項目である。項目を入力した後、Data Save ボタンを押すことによって入力した項目が Android 端末内のフォルダ内の SurveyLog.csv に書き込まれる。Surveylog.csv には前述の調査票ツールの項目に加えて

- ・調査票の項目を入力した建築物のファイル名（.jpg 形式）
- ・タイムスタンプ
- ・調査票ツールを書き込んだ時刻

以上の 3 項目が追加で書き込まれる。

次節において、携帯電話から取得可能なセンサデータ（方位，緯度，経度）を用いて異なる地点から撮影された同一の建築物を検出する機構を開発するために行った実験について説明する。

5.3 同定手法の概要

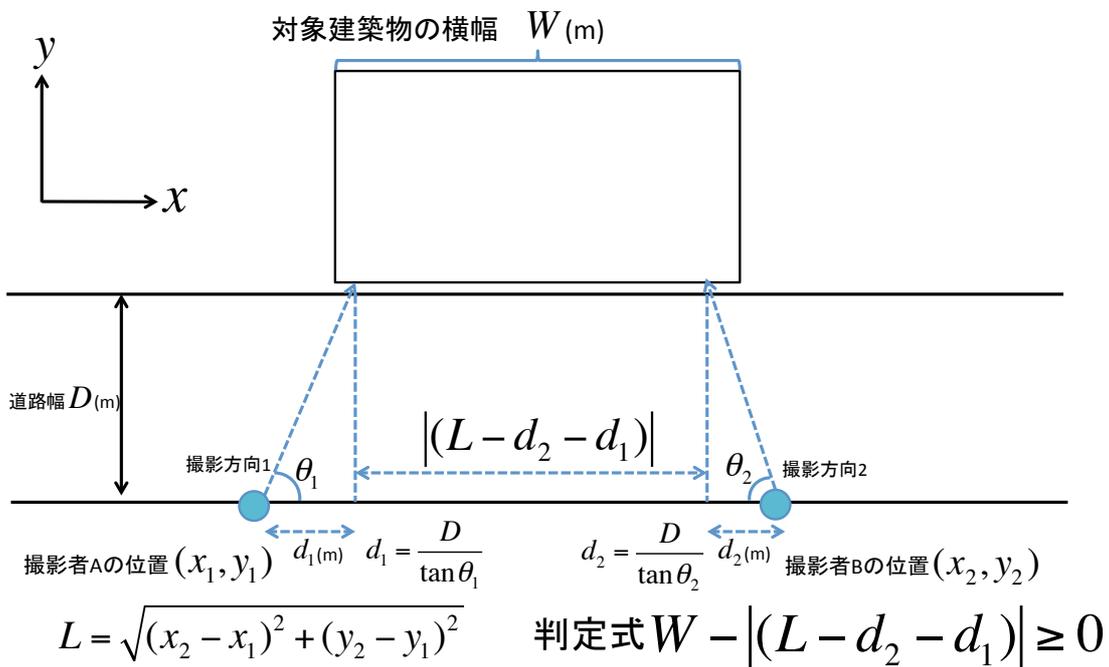


図 18 同定手法の概要

手法の概要を説明する。まず前提として対象とする建築物に対して平行に道路が伸びて

おり、撮影者 A と撮影者 B は建物の直ぐ正面の道路の反対側の端から写真を撮影していると仮定する。また、地図データは存在していると仮定し、道路幅 D 及び建築物の横幅 W は既知であると仮定する。撮影者 A の位置 (x_1, y_1) 及び B の位置 (x_2, y_2) と写真を撮影した方向の角度 θ_1, θ_2 は前章で提案した調査票ツールの GPS 及び方位センサを用いることで取得可能である。

まず、GPS から取得した撮影者 A と撮影者 B の緯度及び経度を世界測地系 1984 (WGS84) 上の x 座標及び y 座標に変換する。変換には緯度と経度から投影座標値との相互変換を行うオープンソースのライブラリである proj4 [42] を用いた。撮影者 A と撮影者 B の位置座標を算出した後に撮影者 A と撮影者 B の距離 L が算出される。そして、道路幅 D 及び写真を撮影した方向の角度 θ_1, θ_2 から d_1, d_2 が算出される。この d_1, d_2 の値を前述した L の値から差し引いた値が撮影対象としている建築物の横幅 W の値よりも小さければ撮影者 A 及び撮影者 B の撮影した建物の写真は同じ建物を撮影したものと判定される。次項以降からこの同定手法の有効性検証のために行った実験について説明を行う。

5.3.1 柏キャンパスでの実験



図 19 柏キャンパスで取得したデータを可視化したもの

前述した判定式の精度を調べるため、東京大学柏キャンパスにおいて第 7 章で提案した

調査票ツールを用いてデータを取得した。この時、写真を撮影する際には地面に対して垂直に携帯電話の端末を向けると仮定してデータを取得した。つまり、写真撮影時の端末の縦方向及び横方向の傾きはほぼないものとした。判定の対象とする建物から芝生の終了地点までの距離と道路幅 D とし、建物の幅を W とする。 D 及び W の値は測量用巻尺を用いて測定した。この時の D 及び W の実測値は $D = 11.1\text{m}$, $W = 27.5\text{m}$ となった。取得した位置情報を OpenStreetMap[43]を用いて可視化したものが図である。実際の写真撮影地点と比べて可視化した撮影者の位置情報に誤差が存在するため、判定式の計算の際には実際に写真を撮影した地点である芝生の終了地点上、つまり道路の反対側の端に撮影者の位置が拘束されるようにマップマッチングを行った上で計算を行った。



図 20 柏キャンパスで取得した建物の写真の一部

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	building_id	unix_times	survey_date	building_name	Label	longitude	latitude	azimuth	pitch	roll	x	y	width_road	width_building	deg	inclination_of_building_deg
2	building_20151104155733	1.45E+12	57:33.0	Experiment	A-1	139.9362703	35.90095439	161	-3	-1	15577634.35	4287001.39	11.1	27.5	71	27.5
3	building_20151104155751	1.45E+12	57:52.0	Experiment	A-2	139.9362211	35.90100792	158	-3	0	15577628.88	4287008.75	11.1	27.5	68	27.5
4	building_20151104155806	1.45E+12	58:07.0	Experiment	A-3	139.9361128	35.9009518	160	-3	1	15577616.82	4287001.04	11.1	27.5	70	27.5
5	building_20151104155818	1.45E+12	58:19.0	Experiment	A-4	139.9360738	35.9009095	148	-3	0	15577612.48	4286995.22	11.1	27.5	58	27.5
6	building_20151104155835	1.45E+12	58:35.0	Experiment	A-5	139.9360838	35.9009217	106	-4	0	15577613.59	4286996.9	11.1	27.5	16	27.5
7	building_20151104155847	1.45E+12	58:47.0	Experiment	A-6	139.9360206	35.90092588	110	0	2	15577606.56	4286997.48	11.1	27.5	20	27.5
8	building_20151104155921	1.45E+12	59:22.0	Experiment	C-1	139.9364277	35.90102147	-153	-4	-1	15577651.87	4287010.61	11.1	27.5	63	27.5
9	building_20151104160004	1.45E+12	00:05.0	Experiment	C-2	139.9363546	35.9010015	-179	-3	0	15577643.74	4287007.87	11.1	27.5	89	27.5
10	building_20151104155630	1.45E+12	56:31.0	Experiment	C-3	139.9364431	35.90104205	-173	-1	0	15577653.59	4287013.44	11.1	27.5	83	27.5
11	building_20151104155649	1.45E+12	56:49.0	Experiment	C-4	139.9364444	35.90096376	-165	-3	1	15577653.73	4287002.68	11.1	27.5	75	27.5
12	building_20151104155713	1.45E+12	57:14.0	Experiment	C-5	139.9363133	35.9010297	171	-1	1	15577639.14	4287011.74	11.1	27.5	81	27.5

図 21 取得したデータ

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	width_building	deg	inclination_of_building_deg	tan	cos	d	x1-x2	(x1-x2)_calibration	(x2-d)-(x1+d)	W-(x2-d)*(x1+d)	判定	
2	27.5	71	27.5	98.5	-0.691156238	0.887010833	-1.658906115					
5	27.5	68	27.5	95.5	-10.38539708	0.887010833	-1.068808435	5.469999999	6.166779248	8.894493798	16.6055062	TRUE
6	27.5	70	27.5	97.5	-7.595754113	0.887010833	-1.461342723	17.53	19.76300553	22.88325437	4.616745634	TRUE
7	27.5	58	27.5	85.5	12.70620474	0.887010833	0.873588946	21.87	24.65584318	25.44116035	2.058839654	TRUE
8	27.5	16	27.5	43.5	0.948964567	0.887010833	11.69695939	20.76	23.40444922	13.36839594	14.13360406	TRUE
9	27.5	20	27.5	47.5	1.091308501	0.887010833	10.17127603	27.79	31.3299443	22.81757439	4.682425614	TRUE
10	27.5	63	27.5	35.5	0.713293068	0.887010833	15.56162607	17.52	19.75173171	5.849011755	21.65098825	TRUE
11	27.5	89	27.5	61.5	1.841770886	0.887010833	6.026808266	9.390000001	10.58611648	6.218214331	11.28178567	TRUE
12	27.5	83	27.5	55.5	1.455009029	0.887010833	7.62881864	19.24	21.69082866	15.72091613	11.77908387	TRUE
13	27.5	75	27.5	47.5	1.091308501	0.887010833	10.17127603	19.38	21.84866213	13.33629221	14.16370779	TRUE
14	27.5	81	27.5	108.5	-2.988684963	0.887010833	-3.714008046	4.790000001	5.400159527	10.77307369	16.72692631	TRUE
18	27.5	68	27.5	95.5	-10.38539708	0.887010833	-1.068808435					
21	27.5	70	27.5	97.5	-7.595754113	0.887010833	-1.461342723	12.06	13.59622628	16.12637744	11.37362256	TRUE
22	27.5	58	27.5	85.5	12.70620474	0.887010833	0.873588946	16.4	18.48906393	18.68428342	8.815716582	TRUE
23	27.5	16	27.5	43.5	0.948964567	0.887010833	11.69695939	15.29	17.23766997	6.609519013	20.89048099	TRUE
24	27.5	20	27.5	47.5	1.091308501	0.887010833	10.17127603	22.32	25.16316505	16.0609746	11.43930254	TRUE
25	27.5	63	27.5	35.5	0.713293068	0.887010833	15.56162607	22.99	25.91851096	11.42569332	16.07430668	TRUE
26	27.5	89	27.5	61.5	1.841770886	0.887010833	6.026808266	14.86	16.75289573	11.7948959	15.7051041	TRUE
27	27.5	83	27.5	55.5	1.455009029	0.887010833	7.62881864	24.71	27.85760791	21.2975977	6.2024023	TRUE

図 22 データを用いた計算

11 地点でデータを取得した。この取得したデータの中から 2 地点を選び、全てのデータの組み合わせに対して前述の判定式を用いて同一建築物の写真が撮影されているかどうかの判定を行った。また、判定式の条件を満たした組み合わせの総数を全ての組み合わせの総数で除したものを判定成功率と定義し、計算を行った。

以下に判定成功率の算出に用いた式を示す。

$$\text{判定成功率} = \frac{\text{判定式の条件を満たした組み合わせの数}}{\text{全ての組み合わせの総数}}$$

上記の式を用いて判定成功率を求めたところ、判定を行った 2 地点の全ての組み合わせ ${}_{11}C_2 = 55$ 通りの内 44 通りの組み合わせが判定式の条件を満たし、判定成功率は 80.000% となり、比較的高い数値を示した。

表 3 柏キャンパスで取得したデータを用いた提案手法の判定成功率

GROSS	TRUE	FALSE
55	44	11
	80.000%	20.000%

5.3.2 代々木上原駅周辺での実験

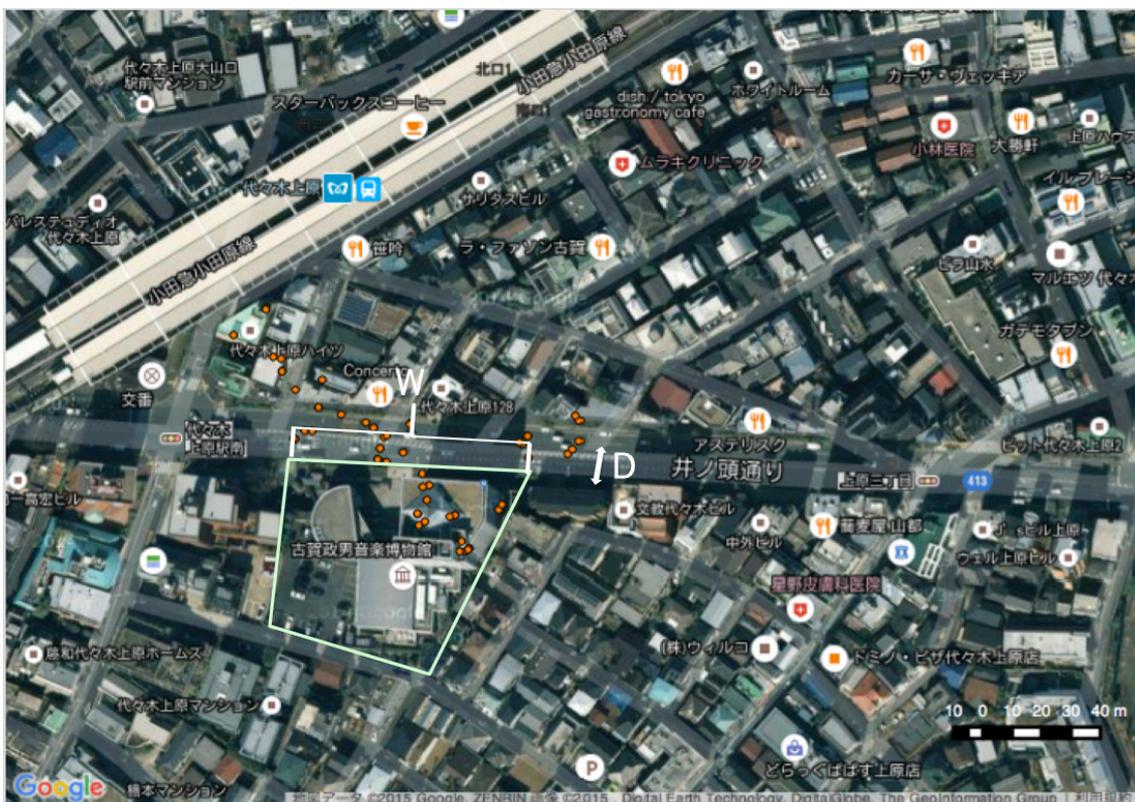


図 23 代々木上原駅周辺で取得したデータを可視化したもの

柏キャンパスにおいて行った実験と同様に代々木上原駅周辺の建物を1つ対象とし、第4章で提案した調査票ツールを用いてデータを取得した。この時、写真を撮影する際の携帯端末の姿勢の仮定は柏キャンパスでの実験と同様である。今回は判定の対象とする建物の前面にある道路の道路幅を D とし、建物の幅を W とした。 D の値は Google Maps のルーラー機能を用いて測定し、 W の値は測量用巻尺を用いて測定した。この時の D 及び W の実測値は $D = 22.1\text{m}$, $W = 67.1\text{m}$ となった。柏キャンパスでの実験の時と同様に GPS を用いて取得した位置情報を可視化したものが図 23 である。こちらも撮影者の位置情報にバラつきが存在するため、判定式の計算の際には実際に写真を撮影した地点である道路の歩道上に各撮影地点を補正した上で計算を行った。そして、上前述の判定成功率の式を用いて判定成功率を求めたところ、判定を行った2地点の全ての組み合わせ ${}_{65}C_2 = 2080$ 通りの内 1959 通りの組み合わせが判定式の条件を満たし、判定成功率は 94.183% となり、柏キャンパスでの実験の時よりも判定の成功率が上がった。これは、対象とする建物の横幅 W が十分に大きいためであると考えられる。一方で、データを取得した地点の位置情報を可視化してみると、柏キャンパスで取得した位置情報を可視化したものよりも実際に写真を撮影した地点からの誤差がより大きくなった。これは、写真撮影時に写真を撮影していた筆者のすぐ後方に民家が立ち並んでおり、遮蔽物の影響から電波が遮られ、GPS の精度が低下したものと考えられる。

表 4 代々木上原駅周辺で取得したデータを用いた提案手法の判定成功率

GROSS	TRUE	FALSE
2080	1959	121
	94.183%	5.817%



図 24 代々木上原駅周辺で取得した建物の写真の一部

また、本実験中にバッテリーの消費量を計測したところ、17分間に16%バッテリーが消費された。仮に提案したツールを用いてバッテリーを100%消費した場合、バッテリーの消費率が線形的に推移するものだとすると1時間46分15秒でバッテリーは全て消費されることになる。建築に携わる人物が調査のためにこのツールを用いた場合、途中でバッテリーを充電しない場合には前述の時間内で調査を完了させるような調査設計に留意する必要があると考えられる。また、建築に関して知識を持たない人物がクラウドセンシングに協力する場合を想定した場合、携帯電話を普段使用している時よりも消費電力が増加すること危惧してセンシングに参加してもらえない可能性がある。このセンシングの参加者の携帯電話端末の消費電力増加のデメリットを解消し、センシングに協力してもらえるようなインセンティブの付与の議論も必要であると考えられる。

5.3.3 道路幅の誤差が判定に与える影響

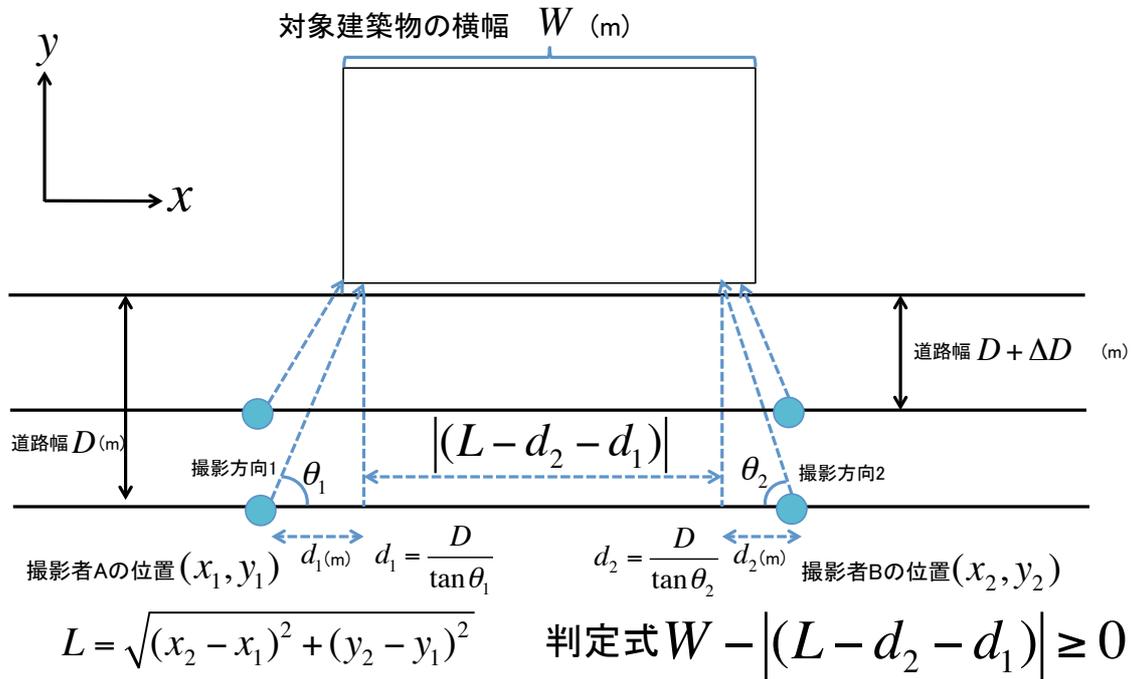


図 25 道路幅の誤差が発生した際の判定手法の概要

道路幅 D の誤差が判定に与える影響を調べるために、実験時に取得した道路幅 D の実測値に仮想的に誤差 ΔD を与えて再度判定の計算を行った。概念図を図 25 に示す。まず、柏キヤンパスで取得したデータに対して、道路幅 D の値のみを 1m の間隔で仮想的に誤差を与えて判定成功率の推移を調べた。推移のグラフを下図に示す。

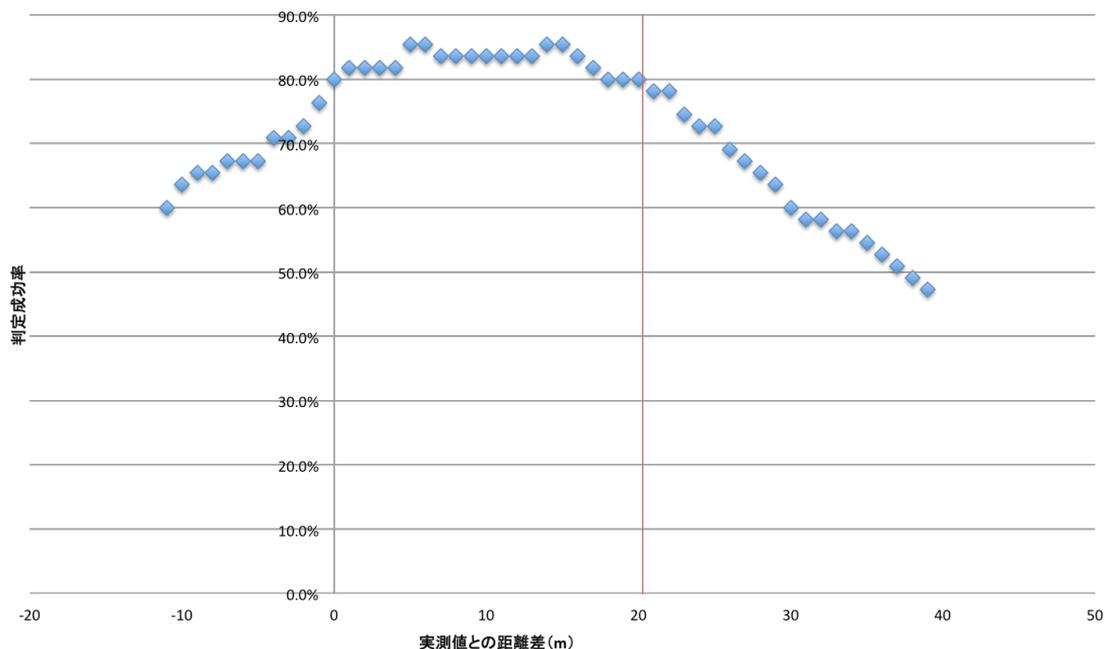


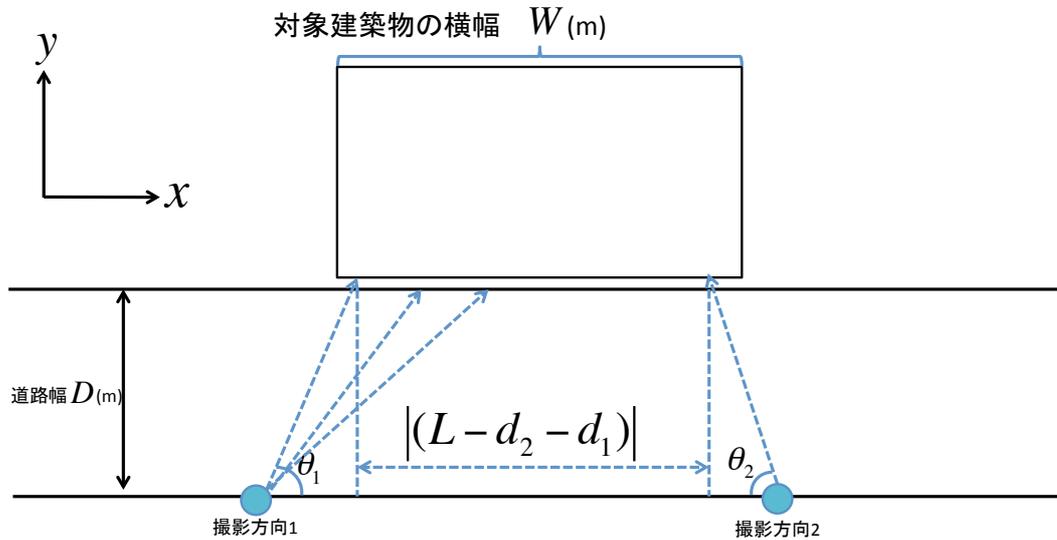
図 26 仮想的に道路幅に誤差を与えた際の判定成功率の推移

仮想的に道路幅 D に誤差を与えた際の判定成功率の推移は上図となった。 ΔD の値が負の値，すなわち撮影者が建物に対して近づいていくにつれて，判定成功率は低減していった。しかしながら， ΔD の値が -11m の地点においても判定成功率は 60% となり，ある程度の判定成功率は担保されていることが確認された。 ΔD の値が正の値，すなわち撮影者が建物に対して遠ざかっていく場合， ΔD の値が 20m の地点までは実測値を用いた判定成功率の値よりも良い数値を示し，それ以降の値では判定成功率は徐々に低減していった。判定成功率が 50% 以下になった値は $\Delta D = 38\text{m}$ の地点となった。

道路幅の誤差 ΔD が存在する場合の判定式の差分は撮影角度 θ_1, θ_2 を用いて以下の式で表される。

$$-\Delta D \left(\frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{\tan \theta_1 \tan \theta_2} \right)$$

5.3.4 角度の誤差が判定に与える影響



$$\text{判定式 } W - |(L - d_2 - d_1)| \geq 0$$

図 27 撮影角度の誤差が発生した際の判定手法の概要

撮影角度 θ の誤差が判定に与える影響を調べるために、撮影角度 θ_2 の値を固定したまま、実験時に取得した θ_1 の実測値に仮想的に誤差 $\Delta\theta_1$ を与えて再度判定の計算を行った。概念図を図 27 に示す。まず、柏キャンパスで取得したデータに対して、撮影角度 θ_1 の値のみを $-25^\circ \leq \Delta\theta_1 \leq 25^\circ$ の範囲で仮想的に誤差を与え、実測値の場合を含めた全ての誤差の組み合わせ 51 通りの内、判定に成功した組み合わせの割合を調べた。分析に用いたデータを表 5 に示す。

表 5 分析に用いたデータのプロフィール（柏キャンパスにて取得したデータ）

Label	longitude	latitude	x	y	D	W	θ
角度の誤差を与えるデータ (θ_1)							
A-3	139.9361128	35.9009518	15577616.82	4287001.04	11.1	27.5	70
A-6	139.9360206	35.90092588	15577606.56	4286997.48	11.1	27.5	20
角度を固定するデータ (θ_2)							
C-2	139.9363546	35.9010015	15577643.74	4287007.87	11.1	27.5	89

表 6 $\theta_1 = 70^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	34	17
	66.667%	33.333%

表 7 $\theta_1 = 20^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	31	20
	60.784%	39.216%

結果は表 6, 7 になった. 判定に成功した割合は $\theta_1 = 70^\circ$, すなわち道路に対する撮影角度が深い時のデータの方が大きくなった.

次に, 先程と同様に撮影角度 θ_2 の値を固定させたまま撮影角度 θ_1 のパラメータを実測値から変化させて判定式の左辺の値 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ がどのように推移したかを調べた.

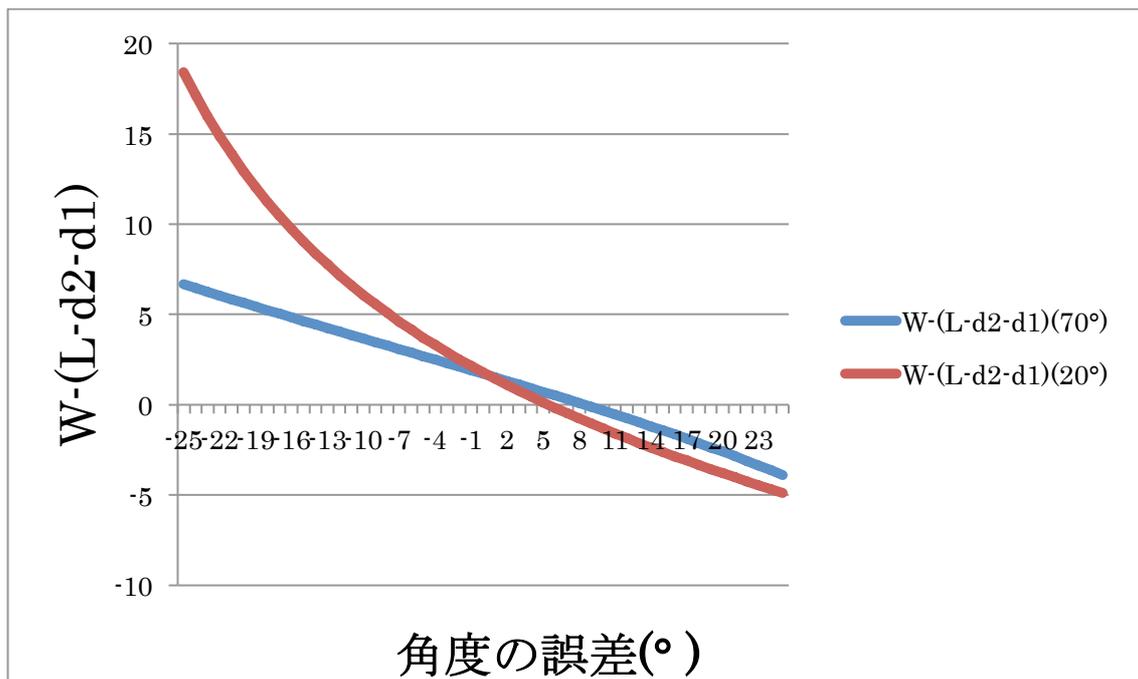


図 28 角度の誤差に対する判定式の左辺 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値

結果を図 28 に示す. 道路に対して浅い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では, $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値は角度の誤差が大きくなればなるほど値が大きく推移し, 逆に道路に対して深い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では, 浅い角度で写真を撮影した

データを用いた分析と比べて値の推移が小さくなった。

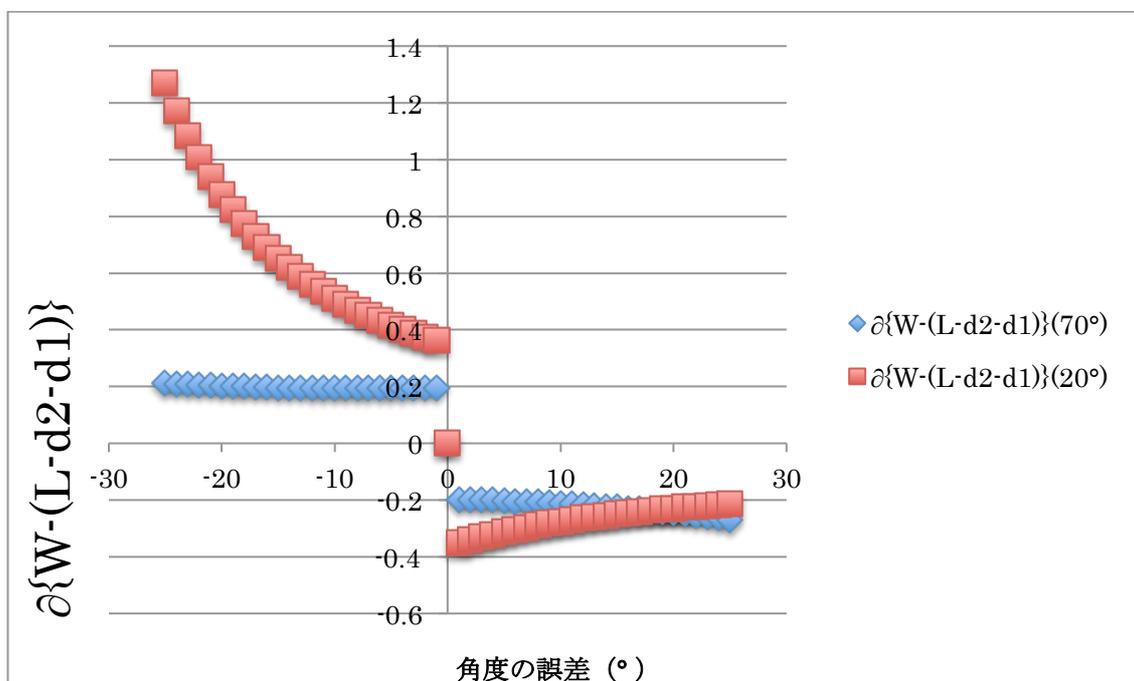


図 29 角度の誤差 1°ごとの判定式の値の差分のグラフ

次に、角度の誤差がどの程度 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値に影響したのかを調べるために前述のデータを用いて感度分析を行った。感度分析とはあるベースケースに対して変化させる一つの値を変化させ、他の値を全てベースケースの値に固定させた時に、結果の値の変化を把握する手法である[44]。具体的にはシステムの構成要素をパラメータで変化させ、パラメータの変動に対するアウトプットの変化を感度係数(Sensitivity Derivative)として算出する。例えば車を対象として、インプットとしての時間を用いてアウトプットとして速度が出せることとすれば、速度を時間で微分した加速度が感度係数となる。この感度係数が大きければ、アウトプットに対する影響が大きいことを示している。本実験におけるベースケースとは実測値を用いた判定式の計算値にあたり、変化させる値は写真を撮影した際の角度である。感度係数は以下の式で表される。

$$\left| \frac{\partial Y}{\partial X_i} \right|_{X^0}$$

上の式において X はインプットの数値、 Y はアウトプットの値である。本分析においては X が誤差を与えた撮影角度を表し、 Y が判定式 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値を表す。角度の誤差 $\Delta\theta$ が存在する場合の判定式の差分は以下の式で表される。

$$-D \left(\frac{\tan^2 \theta \tan \Delta\theta + \tan \Delta\theta}{\tan^2 \theta + \tan \theta \tan \Delta\theta} \right)$$

感度分析の結果を図 27 に示す。前述の角度の誤差に対する判定式の左辺 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値の関係と同様に道路に対して浅い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では感度係数の値が大きく動き、感度係数の値自体も道路に対して深い角度で撮影した時よりも大きくなった。

次に柏キャンパスのデータを用いた時の分析と同様に、代々木上原で取得したデータを用いて撮影角度 θ の誤差が判定に与える影響を調べた。撮影角度 θ_2 の値を固定したまま、実験時に取得した θ_1 の実測値に仮想的に誤差 $\Delta\theta_1$ を与えて判定の計算を行った。撮影角度 θ_1 の値のみを $-25^\circ \leq \Delta\theta_1 \leq 25^\circ$ の範囲で仮想的に誤差を与え、実測値の場合を含めた全ての誤差の組み合わせ 51 通りの内、判定に成功した組み合わせの割合を調べた。分析に用いたデータを表 8 に示す。

表 8 分析に用いたデータのプロフィール (代々木上原駅周辺にて取得したデータ)

Label	longitude	latitude	x	y	D	W	θ
角度の誤差を与えるデータ ($\theta 1$)							
A-55	139.6804941	35.66820345	15549161.48	4255062.2	22.1	67.1	17
A-51	139.6804049	35.66799972	15549151.55	4255034.28	22.1	67.1	24
A-58	139.6805133	35.66822702	15549163.61	4255065.43	22.1	67.1	45
A-20	139.6799819	35.66814628	15549104.46	4255054.37	22.1	67.1	84
角度を固定するデータ ($\theta 2$)							
A-65	139.6806932	35.66828957	15549183.64	4255074	22.1	67.1	46

表 9 $\theta_1 = 84^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	51	0
	100.000%	0.000%

表 10 $\theta_1 = 45^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	51	0
	100.000%	0.000%

表 11 $\theta_1 = 24^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	35	16
	68.627%	31.373%

表 12 $\theta_1 = 17^\circ$ のデータを用いて誤差を与えた時の判定の割合

GROSS	TRUE	FALSE
51	25	26
	49.020%	50.980%

結果は表 9～12 となった。柏キャンパスでのデータを用いて分析を行った際と同様に、道路に対する撮影角度が浅くなればなるほど、角度の誤差を与えた際に判定に失敗する割合が高くなった。

先程と同様に撮影角度 θ_2 の値を固定させたまま撮影角度 θ_1 のパラメータを実測値から変化させて判定式の左辺の値 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ がどのように推移したかを調べた。

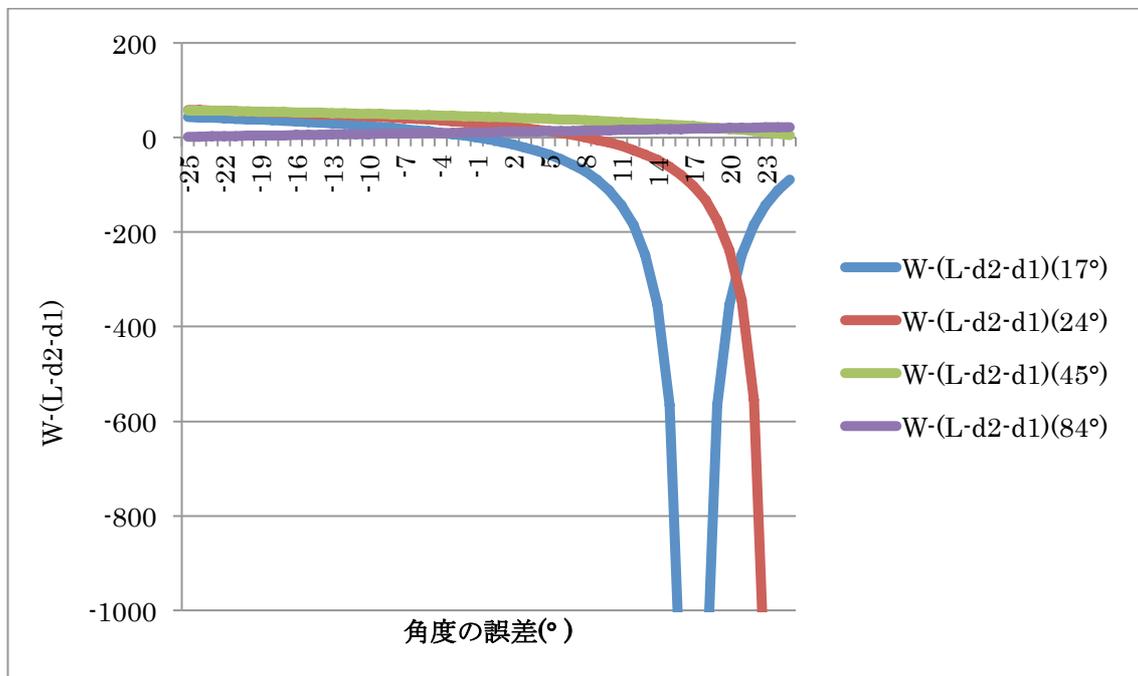


図 30 角度の誤差に対する判定式の左辺 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値

結果を図 30 に示す。柏キャンパスでの分析と同様に、道路に対して浅い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では、 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値は角度の誤差が大きくなればなるほど値が大きく推移し易く、逆に道路に対して深い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では、浅い角度で写真を撮影したデータを用いた分析と比べて値の推移が小さく、安定している。

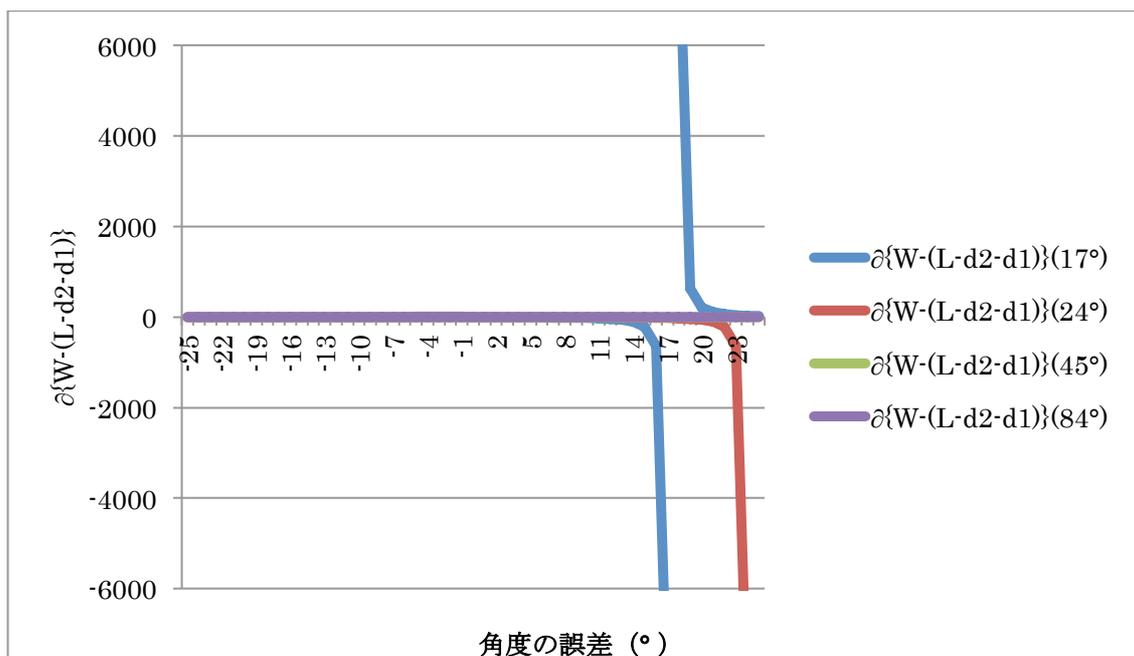


図 31 角度の誤差 1°ごとの判定式の値の差分のグラフ

柏キャンパスで取得したデータの分析の時と同様に、角度の誤差がどの程度 $W - |(L - d_2 - d_1)|$ の値に影響したのかを調べるために前述のデータを用いて感度分析を行った。結果を図 31 に示す。道路に対して浅い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では感度係数の値が大きく動き、感度係数の値自体も道路に対して深い角度で撮影した時よりも大きくなった。

以上の分析及び結果より、道路の方向に対して浅い角度で写真を撮影している場合、角度の誤差の発生により同一建築物の判定に支障をきたし易いことが確認された。この結果から、ユーザに対して写真を撮影する際に特定の撮影角度以下で写真を撮影しないようにデバイス側で促すことや、判定の計算を行う際に特定の撮影角度以下の写真を判定の計算対象から除外する等の対策が考えられる。

第6章 議論

本章では、同定手法を用いる際に起こりうる誤差の発生要因とその解決法について議論を行った後、本研究で提案したシステムの実社会への貢献について述べる。

6.1 位置情報の誤差の発生要因とその誤差の解決法

本研究で使用した Android 端末に搭載されている GPS は A-GPS と呼ばれ、端末の電波の届いているエリアであればその測位誤差は市街地で $\pm 10\text{m}$ 、建物内では $\pm 20\text{m}$ とされている。位置情報の誤差の発生要因は主に端末依存のものと場所依存のものに分けられる。端末依存の誤差は単純に調査に使用した端末自体のスペックが低く、位置情報取得の精度が低下することで発生する。この解決方法は端末自体をアップグレードするしか方法はない。場所依存の誤差は遮蔽物の存在によって GPS の信号が遮断され、正確な位置情報の取得が妨げられてしまうことによって発生する。この解決法としては、写真を撮影する際に周辺の遮蔽物が少ない地点を選んでデータを取得することが考えられるが、調査を行う地域によっては難しい場合がある。他の解決法として GPS とともに Wi-Fi を併用してアクセス情報ポイントからより正確な位置情報を割り出すことも考えられるが、既存研究での項でも述べた通り、オフライン時にはこの手法は使用できない。また、建物内の写真を撮影し、紐付けを行いたい時にも GPS の精度が屋外でデータを取得するよりも低下するため、本研究の提案手法では紐付けは難しい。解決法としては、提案ツールの中で紐付けを行う写真を選択することで紐付けを行える機構を格納することが考えられる。しかしこの解決法を用いても、一人の調査者が撮影した建築物に対しては紐付けを行うことができるが、調査者が複数になった場合、異なる調査者間の写真の紐付けができない。今後の技術の発展によって GPS の精度が向上することが望ましい。

6.2 撮影角度の誤差の発生要因とその誤差の解決法

撮影角度の誤差は前章での分析の通り、提案手法の判定に大きな影響を及ぼす。この誤差の発生要因は調査時のヒューマンエラーと方位センサの誤差に依るものである。まず、ヒューマンエラーに関する解決法は提案ツールの写真撮影画面に、新たに特定の角度の範囲外で写真を撮影しようとした際にデバイス側で注意を促す機能の追加が考えられる。この機能の追加のためには、調査時の調査員の位置情報の軌跡から道路データを推測し、撮影角度を自動判定する機構を提案ツール内に格納する必要があると考えられる。この機構の開発には前節と同じように GPS の精度が問題になってくる。この問題を解決するためには Pedestrian Dead-Reckoning (歩行者自律航法)を用いて加速度センサやジャイロセンサ、

そして地磁気センサを用いて位置情報を補正する方法も考えられる。

次に方位センサの誤差の解決法について説明する。スマートフォン端末の方位センサは地磁気センサと加速度センサの2つのセンサの値を合成して値を算出している。この2つのセンサの内、地磁気センサの方が方位センサの値に影響を及ぼす。地磁気センサの誤差は周辺の磁気の干渉によって発生する。具体的にはセンサ周辺の磁性・電流、日較差、磁気嵐、磁気の経年変化、地質の影響等である。この問題を解決するために、調査を行う際にはなるべく他の磁気を発生させるものを端末のそばに置かないことや、調査前に端末を振ってキャリブレーションを行ってから調査を開始する等の工夫が考えられる。

6.3 道路幅の誤差の発生要因とその誤差の解決法

本研究の提案手法は道路データを既知のものとして計算を行っているが、道路幅の誤差の発生要因は道路データとして整備されていないデータの存在が挙げられる。例えば建物が道路に面しておらず、セットバックが存在している場合である。この解決方法は調査時に事前にセットバックの値を実測し、代表的な値を用いて計算を行うか、空間情報データのさらなる整備が挙げられる。しかし、前章でも述べている通り道路幅の誤差が $\pm 10\text{m}$ の誤差の範囲内では判定成功率に影響をあまり及ぼさなかったことから、各誤差の中でも改善すべき優先順位は低いと考える。

6.4 対象建築物の横幅の誤差の発生要因とその誤差の解決法

本研究の提案手法では対象建築物の横幅も道路幅と同様に既知のものとして計算を行っているが、仮に誤差が発生した場合、解決法としては道路幅の誤差の解決法と同じように実測を再度行うことが考えられる。または、航空写真を用いて対象となる建築物の四隅の位置情報を取得することも考えられる。この手法を用いることで四隅の位置情報を取得することができれば、本研究の提案手法のように写真撮影者間の相対的な距離に頼ることなく、単一の調査者が取得したセンサデータと写真だけで撮影した建築物の同定が可能になるため、より効率的に調査者が撮影した写真の同定が可能になると考える。

6.5 調査票ツールの実際の運用

本節では、本研究で提案したシステムの実際の運用に関して考察する。まず、建築物の専門家及び実務家の他に建築物の知識を持たない人々にもツールを用いて調査を行う際のインセンティブ付与の必要性があると考えられる。より具体的には、第5章で述べた携帯電話のバッテリー消費増加のデメリットや調査時の手間を負ってでも建築物の調査に貢献したいというインセンティブの付与である。このモバイルセンシングにおけるデータ取得者のインセンティブ付与に関する研究は数多くなされているが、報酬を与えることでこれを確保する方法が一般的である。しかし、前述のモバイルセンシングの例で挙げたウェザーニュースのようにユーザが無償でモバイルセンシングに参加する事例もある。これは気象情報と

いうユーザ本人の実生活に関わるデータを扱っていることや、自ら発信した情報が他のユーザの役に立っているという意識がインセンティブとなっていると考える。以上を踏まえると本研究で提案したツールを建築物の知識を持たない人々に利用してもらうためには、スタンプラリーのように調査に必要な情報を一定以上取得した際に報酬が手に入るような制度を設計することや、都市の紹介ツールとしてこのツールを使用してもらうことが望ましいと考える。これを行うことで都市に関するメタデータが収集できるだけでなく、備考欄に各種建物や写真を撮影した場所に関する質的な情報が書き込まれ、撮影者がどのようにその都市やその写真を撮影した場所を認識しているのかが分析可能になると考える。また、ツールを実際に使ってもらう際に使用方法に関して対面で実演を交えて説明することが望ましいが、それが難しい場合のためにツール自体に使用方法に関して各画面に遷移したタイミングで注意を促す画面の設計が望ましい。例えば写真を撮影し、各種項目を入力する際に写真の同定が行えないほど浅い角度で写真を撮影していた場合、写真を再度撮影するように促す等である。前章の実験の項目でも述べたように写真撮影時の角度は同定手法の判定成功可否に大きな影響を及ぼすため、データの取得に関してデリケートになる必要があると考える。

6.6 実社会への貢献

本節では、本研究で提案したシステムの実社会への貢献について述べる。まず、建築の専門家ではない人々も建築物の調査に参加できるようになれば、専門家のみで調査を行う時よりもより網羅的且つ細粒度にデータが取得できるようになる。これによって都市管理ツールや建築物のデジタルアーカイブがより効率的に作成できるようになり、都市計画や震災が起こった際の復興にも生かされていくと考える。また、専門家ではない人々が調査票を記入することで、専門家では気付かなかった視点やまちづくりのヒントが生まれてくる可能性があると考えている。これに関連して、仮にその都市に住まう人々が調査票ツールを用いて都市の性状を記録し、建築物の評価をするようになれば、シビックプライドの醸成に繋がり、都市に住まう住人が当事者意識を持った上で都市計画に関与することができるようになると思う。さらに、過去の歴史地図と時系列データとの融合を行えば、建築史等の教育ツールとしても機能すると思っている。

第7章 結論

本章では、本研究により得られた成果を総括し、今後の展望について述べる。

7.1 まとめ

本研究ではモバイルセンシングの概要とその技術を用いて従来の建築物の調査に関わる負担を低減させ、より効率的な調査が行えるように建築物の調査における調査票ツールに加えて、携帯電話から取得可能なセンサデータ（方位、緯度、経度）を用いて異なる地点から撮影された同一の建築物を検出する機構を開発・提案し、その評価を行った。本節ではそれらを整理する。

まず第1章、第2章において、GPS受信機、加速度センサ等の多種センサを搭載する高機能携帯電話の普及を背景に、近年注目を集めつつあるモバイルセンシングについて解説を行った。それと同時に、従来の建築物の調査における問題点を指摘した。

そして、第3章でこれらに関する研究をまとめた後に研究の目的を、具体的にはモバイルセンシングを用いることによって建築の専門家ではない者でも建築物の調査に貢献できる機構の開発を行うこととした。

次に第4章において中国で行った実験により、開発するツールの要件及びシステムモデルを議論した後、その考察を踏まえた上で、第5章において建築物の調査における調査票ツールに加えて、携帯電話から取得可能なセンサデータ（方位、緯度、経度）を用いて異なる地点から撮影された同一の建築物を検出する機構を提案した。その後、提案した機構の有効性の検討のために、東京大学柏キャンパス及び代々木上原駅周辺において取得したデータに提案手法を適用して実験を行い、結果を示した。また、提案した手法において取得したデータに仮想的に誤差を与えた場合の判定式の値や判定成功率についてその結果と考察を述べた。実測値を用いて提案手法を適用した結果、判定成功率はどちらも80%を超えた。仮想的に道路幅 D に誤差を与えた際の判定成功率は撮影者が建物に対して近づいていくにつれて低減していったが、値が取りうる最小値になっても判定成功率は60%となり、ある程度の判定成功率は担保されていることが確認された。また、仮想的に一地点の撮影角度 θ に誤差を与えた際の判定に成功した割合は道路に対する撮影角度が浅くなればなるほど撮影角度の誤差を与えた際に判定に失敗する割合が高くなった。そして、誤差を与えた際の判定式の値の推移を感度分析によって調べた結果、道路に対して浅い角度で写真を撮影したデータを用いた判定では感度係数の値が大きく動き、感度係数の値自体も道路に対して深い角度で撮影した時よりも大きくなった。続く第6章では提案した判定式のパラメータに発生する誤差を最小限に留めるための議論を行った後、実際の運用に関する考察

と本研究で提案したシステムがどのように実社会に貢献していくのかも論じた。また本章では他の技術との組み合わせにより、より効率的に撮影された建築物の同定を行えることを示唆した。

7.2 今後の展望

本研究で提案したモバイルセンシングを用いて建築の専門家ではない人々が建築調査に貢献する調査票ツール及び異なる地点から撮影された同一の建築物を検出する機構に関して今後の展望を述べる。まず、調査票ツールに関して今後は写真撮影画面にアノテーションの機能を追加する等、実際の写真の個々の部分に対して分かりやすく説明を加えることができるような機能の追加が必要であると考え。また、本論文では判定の対象とする建築物を1つに限定して実験を行っているため、今後は複数の建築物が立ち並んでいる際に撮影された建築物の写真の同定手法の開発及び検討が望まれる。この問題は、第3章で述べた画像認識を用いた同定手法を併用することで解決が可能であると考えている。本研究で提案した調査票ツールによって建築の専門家ではない人々も建築物の調査に参加できるようになれば、より網羅的且つ細粒度にデータが取得できるようになる。また、専門家ではない人々が調査票を記入することで、専門家では気付かなかった視点やまちづくりのヒントが生まれてくる可能性があると考えている。

本研究が天津租界の今後の都市計画に少しでも寄与するだけでなく、発展研究等によって都市のマスタープラン策定の際の意思決定がより効率的に行われ、センサデータ等を用いた環境モニタリングが行える都市管理ツールの開発によって、その都市に住まう人々が豊かな生活を送ることができるようになることを願う。

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 修士課程に在籍中に筆者が瀬崎薫教授の元で行った研究をまとめたものです。この修士論文を執筆するにあたり多くの方々にお世話になりました。

大学院入学前のフリーターの頃から今日に至るまで研究に対する助言だけでなく、進学の相談、研究に対する姿勢、研究発表時の心構えや話し方、研究テーマに対する相談、数値データの取り扱い方等の多岐にわたる面で瀬崎薫教授にご指導頂きました。特に研究テーマがなかなか決まらない私に対して決して見捨てることなく、的確なアドバイスでテーマ決定に対するヒントを与えてくださいました。心より感謝致します。

天津大学建築学院の青木信夫教授、徐蘇斌教授には研究のフィールドを与えていただいただけでなく実験の相談、調整、協力、実験後の議論、そして中国における建築物の調査の現状の共有等の多くの支援を頂きました。また、青木教授の研究室の学生の皆さんには長時間に渡る実験に協力して頂きました。ここで御礼申し上げます。

東京大学 生産技術研究所 伊藤昌毅助教には研究テーマの決定や実験の相談、資料の見せ方等のご指導を頂きましたことを感謝致します。また、研究に限らず様々な問題に対して私に的確な助言と激励を下された東京大学 空間情報科学研究センター 小林博樹 助教にも深く感謝の意を表したいと思います。副指導教官である貞広幸雄教授にはご多忙であるにも関わらず、そもそもの研究の意義から提案手法に至るまで数多くの助言や客観的な意見を頂き、感謝致します。

研究室の先輩として研究に対する真摯な姿勢を常に示して頂いた東京大学 瀬崎研究室 博士課程の牛コウ氏、青木俊介氏、Dunstan Matekenya 氏、江甜甜氏、孫堯氏、中山悠氏。

修士課程の先輩として中村直人氏、稲葉瞳氏、加藤弘則氏には日頃から研究の動向を気にかけて下さり、的確なアドバイスだけでなく暖かい励ましの言葉を頂き、大変感謝しています。

後輩でありながら高い研究意欲と能力によって多くの刺激を与えてくれつつも大変親しく接してくれた星野光玖氏、鈴木孝男氏、西井香織氏、合間優陽氏、研究室で最も長く共に時間を過ごした同期である森英記君、牧山紘君、山本直人君、松野有弥君には、プライベートでの出来事から研究、学会や就職活動の相談などの有意義且つ楽しい時間を一緒に過ごすことができ、掛け替えのない存在でした。感謝申し上げます。そして、瀬崎研究室 OB である劉広文氏には、ご多忙であるにも関わらず研究の相談に気軽に乗って頂き、研究に使用する調査票ツールの開発や実装のアドバイス等多方面で助けて頂きました。

研究活動や出張の手配等の研究生活を常日頃から支えてくださった秘書の松本夏穂さん、

内藤潤さん，柏に行くことは稀でしたが柏に行った際には院生室で取り留めもない話や真面目な話をした社会文化環境学専攻の同期たちにも感謝の意を表したいと思います。

最後に，生まれてから現在に至るまで筆者を暖かく見守り，支え続けてくれた両親と家族への敬愛と感謝の言葉で，本論文を締めくくりたいと思います。

2016年1月25日

鵜飼 祐太

発表文献

鵜飼祐太, 伊藤昌毅, 青木信夫, 徐蘇斌, 瀬崎薫, “モバイルセンシングを用いた建築物の調査支援技術の開発”, 電子情報通信学会 2016 年総合大会

参考文献

- [01] Diao, M., Zhu, Y., Ferreira Jr, J., Ratti, C. “Inferring individual daily activities from mobile phone traces: A Boston example Environment and Planning B.” *Planning and Design*, pp.1-10, 2015
- [02] Lane, N. D., Miluzzo, E., Lu, H., Peebles, D., Choudhury, T., & Campbell, A. T.. “A survey of mobile phone sensing.” *Communications Magazine, IEEE*,48(9), pp.140-150, 2010
- [03] 青木俊介, 岩井将行, 瀬崎薫, “参加型環境センシングを用いた統計情報構築のためのプライバシー保護手法.” *電子情報通信学会 論文誌 B*, vol.J97-B, no.1, pp.41-50, 2014.
- [04] S. Reddy, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, M. Srivastava, “A framework for data quality and feedback in participatory sensing.” *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems ACM*, pp.417-418, 2007
- [05] L.G. Jaimes, I. Vergara-Laurens, M.A. Labrador, “A location-based incentive mechanism for participatory sensing systems with budget constraints.” *Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2012 IEEE International Conference on IEEE*, pp.103-108, 2012
- [06] J.-S. Lee, B. Hoh, “Dynamic pricing incentive for participatory sensing,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol.6, no.6, pp.693-708, 2010.
- [07] D. Yang, G. Xue, X. Fang, J. Tang, “Crowdsourcing to smartphones: incentive mechanism design for mobile phone sensing,” *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking ACM*, pp.173-184, 2012.
- [08] S. Reddy, D. Estrin, M. Hansen, M. Srivastava, “Examining micro-payments for participatory sensing data collections.” *Proceedings of the 12th ACM international conference on Ubiquitous computing ACM*, pp.33- 36, 2010
- [09] M. Musthag, A. Raij, D. Ganesan, S. Kumar, S. Shiffman, “Exploring micro-incentive strategies for participant compensation in high-burden studies,” *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing ACM*, pp.435-444, 2011
- [10] M. Von Kaenel, P. Sommer, and R. Wattenhofer, “Ikarus: large-scale participatory sensing at high altitudes,” *Proceedings of the 12th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications ACM*, pp.63-68, 2011
- [11] P. Mohan, V.N. Padmanabhan, R. Ramjee, “Neri-cell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones.” *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded*

- network sensor systems ACM, pp.323–336, 2008.
- [12] E. Kanjo, J. Bacon, D. Roberts, P. Landshoff, “Mob-sens: Making smart phones smarter,” *Pervasive Computing*, IEEE, vol.8, no.4, pp.50–57, 2009
- [13] M. Linnap, A. Rice, “The effectiveness of centralised management for reducing wasted effort in participatory sensing.” *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2014.
- [14] 猿渡俊介, 森川博之, “ユビキタスセンサネットワーク.” *日本ロボット学会誌*, vol.28, no.3, pp.1–4, 2010.
- [15] 石塚宏紀, “ユーザ参加型センシングの研究.”, 2012
- [16] D’Hondt, Ellie, Matthias Stevens, An Jacobs, "Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring." *Pervasive and Mobile Computing* 9.5, pp681-694, 2013
- [17] 株式会社ウェザーニューズ, “ウェザーニューズ”, <http://weathernews.jp/>
- [18] 柴山明寛, “携帯情報端末を用いた被災建物調査支援システムに関する研究.” *日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道)*, pp1175-1176, 2013
- [19] 藤生慎, 大原美保, 目黒公郎, "大規模地震災害向け遠隔建物被害認定システムの適用可能性の検討." *社会技術研究論文集* 11.0, pp12-21, 2014
- [20] 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.” *GIS-理論と応用* Vol.11(No.2), pp57-62, 2003
- [21] 寺木彰浩, “大規模災害発生時の建築物被災情報集約の問題点.” *都市計画報告集* 4.0, pp41-44, 2005
- [22] 建設省建築研究所, “平成7年阪神・淡路大震災建築物の応急危険度判定活動調査報告書.” 建設省建設研究所, 1996
- [23] 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= Papers and proceedings of the Geographic Information Systems Association* 4, pp39-42, 1995
- [24] 藤生慎, 大原美保, 目黒公郎, “大規模地震災害向け遠隔建物被害認定システムに関する実証実験の実施と評価.” *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)* 70.4, I_263-I_272, 2014
- [25] 石井儀光, 寺木彰浩, 阪田知彦, 加藤哲, 森大, 丸山智康, 岩田司, “建築物の現地調査に求められる携帯型情報端末の機能要件.” *地理情報システム学会研究発表大会論文集*, 21 B-7-1, 2012
- [26] 糸井川栄一, 岩田司, 寺木彰浩, “34. 兵庫県南部地震における建築物被災情報等の

GIS化の問題点と電子野帳の開発.” 地域安全学会論文報告集 6, pp269-277, 1996

[27] 建築研究所, “携帯型情報端末による現地調査支援ツール.” 2001

[28] 石井儀光, 岩田司, “携帯型情報端末を用いた現地調査の効率化に関する研究.” 国立研究開発法人 建築研究所 住宅・都市研究グループ研究開発課題リスト, pp41-42, 2013

[29] Snavely, Noah, Steven M. Seitz, Richard Szeliski. “Photo tourism: exploring photo collections in 3D.” ACM transactions on graphics (TOG). Vol. 25. No. 3. ACM, pp835-846, 2006

[30] <http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>

[31] Fergus, Robert, Pietro Perona, Andrew Zisserman, “A visual category filter for google images.” Computer Vision-ECCV 2004. Springer Berlin Heidelberg, pp242-256, 2004

[32] Berg, Tamara L., David Forsyth, “Animals on the web.” Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on. Vol. 2. IEEE, pp1463-1470, 2006

[33] Schroff, Florian, Antonio Criminisi, Andrew Zisserman, “Harvesting image databases from the web.” Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 33.4, pp754-766, 2011

[34] Qin, T., Ma, H., Zhao, D., Li, T., Chen, J., “Crowdsourcing Based Event Reporting System Using Smartphones with Accurate Localization and Photo Tamper Detection.” Big Data Computing and Communications. Springer International Publishing. 141-151, 2015

[35] Creekwatch. <http://creekwatch.researchlabs.ibm.com/>

[36] Ecosnapp. <http://www.hbssp.org/china/>

[37] Ouyang, R. W., Srivastava, A., Prabakar, P., Roy Choudhury, R., Addicott, M., McClernon, F. J. “If you see something, swipe towards it: crowdsourced event localization using smartphones.” In Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing, pp23-32, 2013

[38] Shangquan, L., Zhou, Z., Yang, Z., Liu, K., Li, Z., Zhao, X., Liu, Y., “Towards accurate object localization with smartphones.” Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 25(10), pp2731-2742, 2014

[39] <http://nama.bunka.go.jp/>

[40] <https://eclipse.org/>

[41] <https://java.com/ja/about/>

[42] <https://trac.osgeo.org/proj/>

[43] <https://openstreetmap.jp/>

[44] https://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_analysis

