

博 士 論 文

(2014年 12月 1日 提出)

論文題目

鉄道空間における空間情報技術と位置情報の活用に関する研究

指導教員

吉川 眞



大学院 工学研究科

博士後期課程 都市デザイン工学 専攻

申請者氏名

清水 智弘



大阪工業大学大学院

第1章	緒論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	環境デザインや都市デザインと空間情報技術の役割	1
1.1.2	空間情報技術の動向	4
1.2	研究の目的と本論文の構成	12
1.2.2		16
第2章	鉄道空間（屋外環境）における施設管理の検討・開発	18
2.1	序論	18
2.1.1	社会的背景	18
2.1.2	研究の目的と方法	22
2.2	3Dモデルを活用した維持管理システム	25
2.2.1	3Dモデルの構築	25
2.2.2	写真管理	46
2.3	検査・工事履歴管理	52
2.4	2D図面の作成・出力	57
2.5	3Dモデルを活用した維持管理システム開発	59
2.6	ICTを活用した橋りょう検査ツール	61
2.6.1	現場作業に適した携帯機器に関する検討	61
2.6.2	デジタルカメラからの写真画像無線転送に関する検討	62
2.6.3	現場作業を支援するための機能設定	63
2.7	まとめ	65
第3章	鉄道空間（屋内）における測位手法の検討・開発	68
3.1	序論	68
3.1.1	社会的背景	68
3.1.2	屋内測位のための具体的技術と課題	70
3.2	サインを活用した屋内位置速手法の検討	76
3.2.1	対象サインの選定	76
3.2.2	ケーススタディ	77
3.2.3	画像処理を用いたサイン（ピクトグラム）の抽出	80
3.2.4	エリア範囲（おおまかな推定位置）の抽出・推定	92
3.2.5	写真測量技術を用いたポイント位置の推定	107
3.3	まとめ	114
第4章	結論と課題	118
4.1	結論	118
4.2	課題と展望	120

第1章 緒論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 環境デザインや都市デザインと空間情報技術の役割

都市や地域の開発プロジェクトは、社会基盤の構築という重要な役割を果たしてきた。量的に豊かになった現在、人々は質的に豊かな社会基盤の整備を進めてきている。従来型の経済一辺倒の豊かさではなく、良好な自然環境や美しい景観の形成、安全かつ快適でゆとりのある生活空間の形成、環境負荷の低減、ユニバーサルデザインの推進が求められるようになってきた（1. 1）。くわえて、2011年3月の想定を超えた大地震に見舞われたことを契機に、今後予想される首都直下地震や南海トラフ地震なども含めて、日本は巨大災害への対応が問われる時代に入った。さらに、人口減少が2008年に策定された国土形成計画で見込んでいた以上の急速なペースで進んでいる。そのような中で、人々が生活のために必要となる各種サービスを効率的に提供するために都市を集約化（コンパクト化）する必要がある。しかし、単なるコンパクト化では都市の孤立化が進む恐れもあり、圏域・マーケットが縮小し、提供するサービスの質的レベルを維持することができなくなる可能性がある。そこでコンパクト化した圏域をネットワークでつなぎ、各種の都市機能に応じた圏域人口を確保するという考え方が重要になる。

国土交通省は、巨大災害の切迫、本格的な人口減少社会、異次元の高齢化、インフラの老朽化など国土をめぐる急速な状況が変化してきたことを受け、このような時代の衰勢を危機感として共有するために、50年後を見据えた国土づくりを国土形成計画のバックキャストとして打ち出している（1. 2）。その中で「コンパクト+ネットワーク」をキーワードとしている。すなわち、都市圏域の高密度化とそれらの間での連携の強化が実現されることによって、圏域人口やマーケットの規模の確保だけではなく、そこにおける人・モノ・情報の高精度な交流が促進されることで、国全体の生産性を高めていく新たなイノベーションが生まれることが期待されている。これが新たな国土構造のイメージである。すなわち、都市や地域を集約化していく中で個性を深め、多様性を再構築し、主体的に自らの資源に磨きをかけ、さらには、それら都市や地域間で情報・モノ・情報の交流を活発化させる「対流」を引き起こしていくことが必要とされており、今後ますます環境デザインや都市デザインの果たすべき役割は大きいといえる。基本戦略として以下の12点が掲げられている。

- ① 国土の細胞としての「小さな拠点」と、高次地方都市連合等の構築
- ② 攻めのコンパクト・新産業連合・価値創造の場づくり
- ③ スーパー・メガリージョンと新たなリンクの形成
- ④ 日本海・太平洋2面活用型国土と圏域間対流の促進
- ⑤ 国の光を観せる観光立国の実現
- ⑥ 田舎暮らしの促進による地方への人の流れの創出
- ⑦ 子どもから高齢者まで生き生きと暮らせるコミュニティの再構築
- ⑧ 美しく、災害に強い国土
- ⑨ インフラを賢く使う
- ⑩ 民間活力や技術革新を取込む社会
- ⑪ 国土・地域の担い手づくり
- ⑫ 戦略的サブシステムの構築も含めたエネルギー制約・環境問題への対応

都市・地域間の連携の強化を図り、人・モノ・情報を交流させるためには、交通ネットワークにくわえて情報ネットワークが重要な役割を果たす。情報通信技術（Information and Communication Technology：ICT）の発展により、通信の高速化などによる情報ネットワークを通じて人・モノ・情報の交流が可能となり、物理的な距離の隔たりが意味をなさなくなっている。さらに、交通ネットワークでも今後、LCC（Low Cost Carrier：格安航空会社）の普及やリニアモーターカーの実用化などによって利便性が向上していく中で、物理的な「距離」だけでなく、時間「距離」や手続き的「距離」といったあらゆる「距離」の制約を克服していくことになる。国土グランドデザイン2050の中でも50年に1度の「交通革命」と実物空間と知識・情報空間を融合させるCPS（サイバーフィジカルシステム）という「新情報革命」による距離の制約の克服が「コンパクト+ネットワーク」の展開を支えていくとされている（1.3）。

とりわけ、新情報革命は、今後、劇的な変化を生み出すものと期待されており、その中核をなすものとして「空間情報技術の高度な活用」が謳われている。これは、交通ネットワークや情報ネットワークの高度化によって「距離」の存在が大きな障害とならなくなっていく中で、その場所の事象を示すための人・モノ・情報の「位置」情報そのものが重要になるからだと考えている。さらに、空間情報技術の高度活用によって都市や地域の実物空間とそれに対応する目には見えない知識・情報空間が3次元的な立体空間の中で「位置情報」をキーとして融合したものを国土として捉え、その下で多様な地域間におけるヒト・モノ・情報の活発な循環、すなわち「対流」が不断にあらたな価値を創出していくことが「対流促進型国土」の実現に向けて必要ではないだろうか（図1. 1. 1）。

このように「環境デザイン」や「都市デザイン」という対象論と、それを解決するための道具として「空間情報技術」によってそれを援用しようとする方法論は、今後の社会基盤ひいては国土構造を構築していくうえで非常に重要なアプローチである。

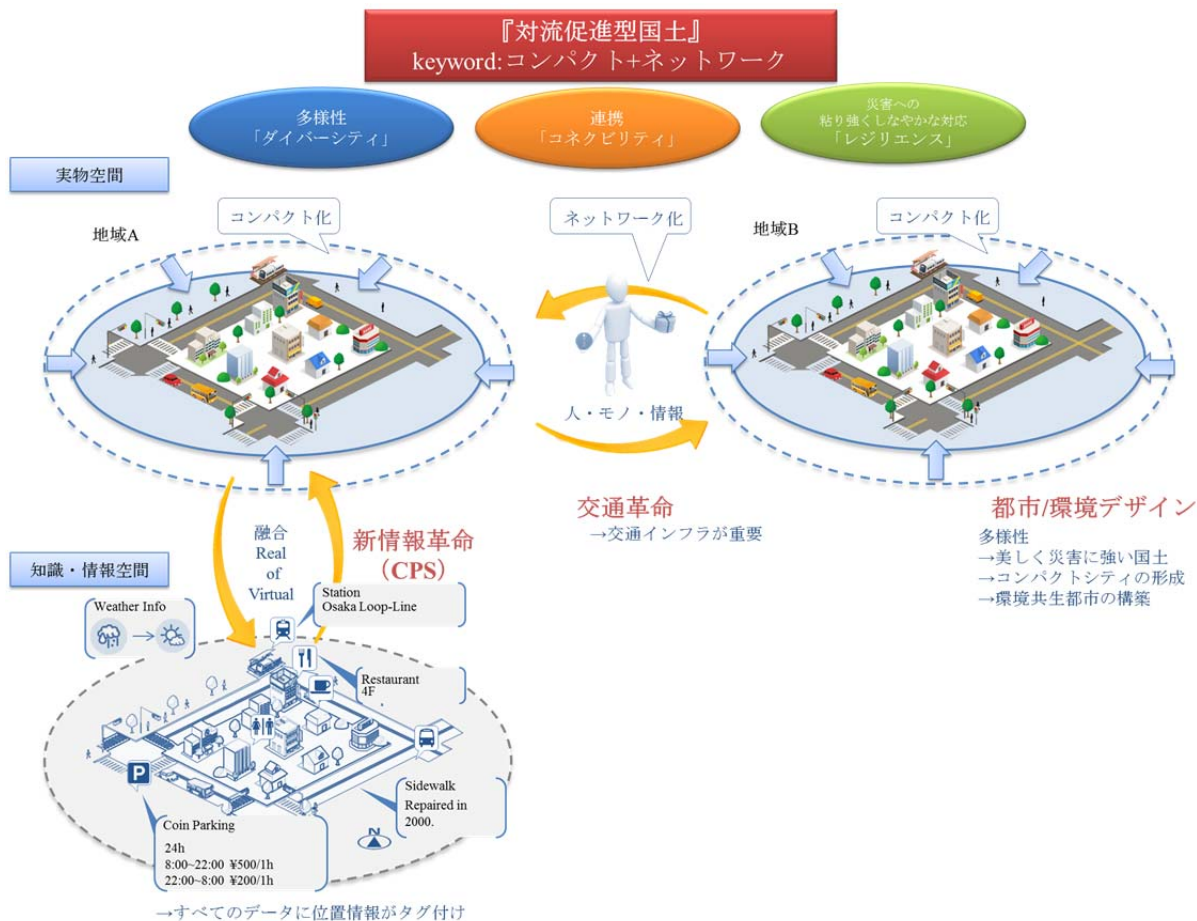


図1. 1. 1 国土グランドデザイン 2050 の概要 (1. 2)

1. 1. 2 空間情報技術の動向

前項でも述べたように空間情報技術の高度活用は今後ますます重要になってくる。近年は、情報通信技術（ICT）の躍進により GIS や CAD/CG に代表される空間情報技術は日進月歩で進化しつづけており、新しい概念や技術が次々と出現している。本項では、最近の空間情報技術の動向について述べる。

(1) GIS

国際学術雑誌 Nature によれば、イノベーションを興し多くの雇用機会を増やす重大3分野として、「ナノテクノロジー」、「バイオテクノロジー」、「地理空間情報技術(Geotechnology)」の3つをあげており、GIS を利活用する技術の重要性を裏付けている。GIS に先行するシステムとして、計算機援用設計システム (Computer Aided Design System : CAD System)、リモートセンシングシステム、コンピュータ地図作成システム、データベース管理システムなどがあげられるが、GIS は、これらをもとに進化しており、共通の機能・特徴を持っている。GIS は、それを取り巻く情報システムにより取得・作成・管理された地理情報に関するデータを統合し、空間検索やオーバーレイなどの空間分析機能を用いて意味のある情報を作成するという点で、情報システムの中心に位置づけられる(1. 4)。また、GIS はデジタル地図の表示、検索、修正・編集などに利用されるケースが多い。修正・編集は、地図に描かれた幾何情報(図形情報)を直し、同時に不整合が生じないようにそれに対応する属性情報を修正する。このように GIS を通じてさまざまなデータベースをリンクさせ、統合的に使用することができる。さらには、位置や空間に関する情報を持ったデータ(空間データ)を総合的に管理・加工し、視覚的に表示できる高度な分析や迅速な判断を可能にする技術でもある。多様化・複雑化する都市空間の様相をよりの確に、同時に多面的に捉えることを GIS は可能とすることから環境デザインや都市デザインの分野においても非常に有効な手法であるといえる。

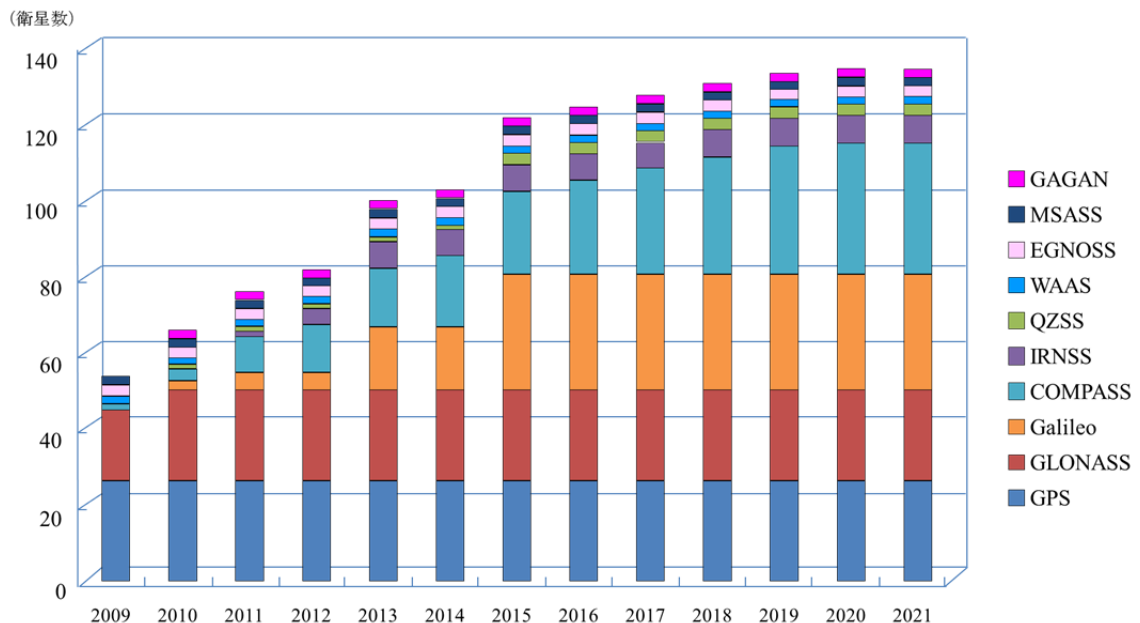
また、GIS が創り出すバーチャル・スペースによってデータ統合などの現実空間と対応づけを行い、さらには、現実空間では表現のできない空間分析をも可能とする。まさに、GIS の理論・手法が新情報革命の目指す「位置情報」をキーとした実物空間と知識・情報空間の融合、ひいては「対流促進型国土」の実現を担っている。

スマートフォンを含む ICT (情報通信技術) と、地図や GPS の位置情報を融合させたサービス分野を「G 空間」と呼ばれている。G 空間という表記は近年、政策で使われる機会が多く、2013 年 6 月 14 日に閣議決定された「世界最先端 IT 国家創造宣言」では、ビッグデータの一例として「G 空間情報」という表現が登場している(1. 5)。また、2013 年 3 月から 6 月にかけて総務大臣主宰による「G 空間×ICT 推進会議」が総務省で開催されている(1. 6)。その中で高精度な 3 次元地図の利活用環境の整備

など G 空間シティの構築によって新産業・新サービスの創出を目指している。また、国土地理院では、誰もが自由に利活用できる場所・位置に関するさまざまな情報を登録・検索できる地理院地図（電子国土 Web）を整備し、無償公開・提供しているが 2014 年には日本全国の地形を 3D モデルとして表示・取得できるサービスを開始している（1. 7）。このように GIS の分野においても 3D 化の動きが活発になってきており、いわば GIS の CAD/CG 化が進んできているといえる。

（2） GPS

今後さまざまな利活用が期待されている G 空間であるが、その経済効果は 2012 年度に約 19 兆 8000 億円の市場規模が、20 年度には約 62 兆円に拡大すると予測している（1. 6）。その大きな要因となっているのが位置情報に関するサービス（Location Business System : LBS）の進展である。屋外における位置情報取得は、衛星測位システム（Global Navigation Satellite System(s) : GNSS）の進化によって利用範囲や利用時間の拡大、さらに精度の向上が期待されている（センチメートル測位社会の到来）。具体的には、2020 年までに GNSS の稼働衛星数は、約 140 機まで増加する見通しである（図 1. 1. 2）。とくに、アジア・オセアニア地域は、世界でいち早く多くの次世代衛星が利用でき、衛星測位の性能の向上が期待される特徴的な地域となっている（図 1. 1. 3）。



出典：「第9回衛星測位と地理空間情報フォーラム」JAXA提出資料

図 1. 1. 2 各国の GNSS 稼働衛星数（1. 8）

アジア・オセアニア地域は新しいGNSS時代のショーケース
GPS+GLONASS+Galileo+COMPASS+IRNSS+QZSS

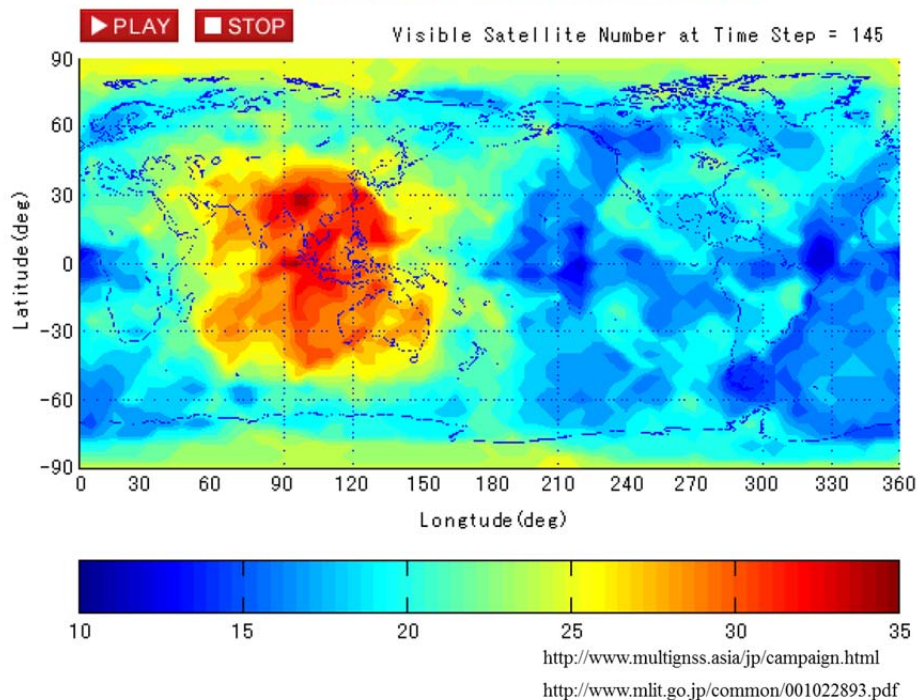


図1. 1. 3 2020年における地上から利用できる衛星測位数の分布(1. 8)

わが国においても2010年の準天頂衛星初号機(愛称:みちびき)が打ち上げられ、GPS(全地球測位システム)と組み合わせて使うことによって測位可能な場所・時間を拡大し、サブメートル級やセンチメートル級の高い精度での測位を可能としてきた。2018年には、4機体制による日本版GPSの本格的な実用化が予定されている。さらに、将来的には7機体制とすることでGPSによる補完を必要とせず、日本の衛星システムだけの高精度な単独測位を目指している(1. 9)。

これまでの位置情報サービス(LSB: Location Based Services)は、現在地の把握や目的地までの案内・追跡を行う「ナビゲーション」や「トラッキング」のサービスなどの限定的に利用に留まっていた。しかし、準天頂衛星の打ち上げをはじめ、GNSSの進化にくわえスマートフォンやタブレット端末といったスマートデバイスの普及にとともに、利用者が移動することで楽しめる「位置ゲー」や利用者の位置情報に応じたおすすめの「スポット情報」を提供するなど新しい位置情報サービスも進んできている(1. 10)。さらには、拡張現実(AR: Augmented Reality)のための利用やSNS(Social Networking Service)で位置登録(チェックイン)し、コミュニケーションを深めるなど位置情報の活用方法がより多様化してきている。つぎのステップとして、衛星測位利用の困難な屋内における位置情報の取得が重要視されている。2012年に策定された新たな「地理空間情報活用推進基本計画」の中でも地理空間情報高度活用社会(G空

間社会)の実現に向けて、屋内測位技術を充実させ、屋外・屋内を区別せず測位できるシームレスな測位基盤の整備を重要視している。また、屋内環境での位置情報サービスの展開に向けた取り組みを推進すべきとしている(1.11)。さらにGPSやジャイロなどの測位技術の向上により、すべてのデータに位置情報がタグ付けされ、リアル空間とサイバー空間との一対一的な対応を連携が可能となってきた。このように準天頂衛星や屋内測位技術による高精度測位および地理空間情報の高度化などにより、だれもがストレスを感じず、迷うことなくスマートに移動し、言語の壁を越えて、どこでも膨大なデータを高度利用しながら世界とつながる「高精度測位社会」の構築を目指している。

「コンパクト+ネットワーク」による国土づくりに重要なことは、各々の「位置」を磨くことである(1.1)。さらにそれぞれの「位置の連携」により、新しいサービスや価値が創出される。その連携のためには、拠点間やマルチモーダル間の連携(たとえば、高速道路ICと物流施設の直結や、異なる鉄道会社間の相互乗り入れなど)をスムーズにするために、ノード(地域)とリンク(交通機関)のネットワークの機能を十分に高めていくことが重要となる。まさに空間情報技術によって得られる「位置情報」は、今後の社会基盤ひいては国土形成のために欠くことのできないものになってきているといえる。

具体的な取り組みとして、国土交通省は、2014年9月に「東京駅周辺高精度測位社会プロジェクト検討会」を設置した。これは、屋内外の測位技術などを活用したさまざまなサービスを生み出し、国内外に広くアピールするもので、電子地図や屋内測位環境などの空間情報インフラを整備していくことを目的としている。また、実証実験と空間情報インフラの整備・更新体制などの検討をより充実させるため、屋外・屋内空間における高精度でシームレスな測位環境を構築し、活用するうえでの課題を検証する実証実験に協力する団体を募集している。具体的には、国土グランドデザインの最初の節目(マイルストーン)として施策の推進が図られることになっている2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて、高精度測位技術を活用した防災や観光、施設管理などさまざまなサービスを東京駅周辺で先行的に実現するため、技術的課題の抽出、解決手法の検証を行うとしている。なかでも、都市型災害に対応できる避難誘導に向けた屋内外シームレスで高精度な測位環境のあり方やそれに対応した電子地図の整備要件などを明確にすることを目的としている。

(3) CAD/CG

コンピュータグラフィックス (Computer Graphics : CG) は、静止画や動画像を生成、処理する技術である。一方、CAD (Computer Aided Design) は、反復的な作業をコンピュータに処理させることによって設計者の作業を軽減させ、また、人間の不注意による誤りを軽減させ、さらにコンピュータに備わった多くの利用可能な計算や記憶の能力を積極的に利用し、設計をコンピュータ支援により行うことをいう。広義で捉えると、コンピュータ援用による設計手法や設計全般を指す CAD には、それぞれに互いの機能を有しており、図面より構築された 3 次元モデルなどは、両者の意味を含むことから、一般的に CAD/CG と総称されている (1. 12)。

とくに近年では、3次元化利用が各分野において活用されている (表 1. 1. 1)。3次元化利用については、機械設計・製造分野では 1970 年代から CAD (Computer Aided Design) と CAM (Computer Aided Manufacturing)、CAE (Computer Aided Engineering) を統合化した CIM (Computer Integrated Manufacturing) が推進され、その中で 3D-CAD も利活用されていった。その後、建築分野でも、CIM (Computer Integrated Manufacturing) などの情報化技術によって建築生産の合理化に取り組んできた (1. 13)。さらに、BIM (Building Integrated Manufacturing) が普及してきており、意匠や構造、設備などの設計から FM (Facility Management System) などの維持管理まで幅広く利活用されている。一方、土木インフラ分野に目を転じてみると 2008 年に策定された「CALS/EC アクションプログラム 2008」の中で (1. 14) 情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) を活用した建設生産システムの構築を目指して「3次元情報の利用を促進する要領整備による設計・施工管理の高度化」が押し進められたものの十分に浸透せず、今もなお 2D モデルの利活用が多い状況にある。実務の現場での電子納品、情報化施工、情報共有システムなど CALS/EC によって一定の成果が得られたものの、一方で CALS/EC が目指してきた調査～計画～設計～積算～施工～維持管理までの建設プロセスを一貫して情報化させるためのシステム構築について実現には至らず課題として残っていた (1. 15)。

そのような中、2012 年になると土木版 BIM と呼ばれる CIM (Construction Information Modeling) が国交省から提唱された (1. 16)。CIM とは、施設や構造物の 3D 形状情報にくわえ属性情報 (材料・部材の仕様、性能、コストなどの情報) を併せもつ建設情報モデルのことである (1. 17)。建設プロセス全体で関連情報を一元的に共有・活用させることにより生産性の向上を図ることを目的としており、これは BIM の概念を参照している (図 1. 1. 4)。Computer Integrated Manufacturing は形状のみで、各々の形状に意味を持たせていない 3D モデルを扱うことが主流であるのに対し、Construction Information Modeling は、形状に加え属性情報 (意味情報) を持たせた 3D モデルであるといえる。

公共事業の計画・調査・設計段階から3次元モデルを導入し、その後の施工、維持管理の各段階においても3次元モデルに連携・発展させ、あわせて事業全体にわたる関係者間で情報を共有することで、建設生産システムの効率化・高度化、公共事業の品質確保や環境性能の向上およびライフサイクルコストの縮減を図る CIM (Construction Information Modeling) の導入に向けた取り組みを行っている。2012年から全国11の直轄事業をモデル事業として選定し、詳細設計においてCIM導入の試行を開始し、効果・課題などを検証している。2013年には概略設計・予備設計、工事施工段階においても試行を導入・拡大し、制度・技術の両面からCIM導入に向けた検討を進めている。また、2013年度は、3件の直轄事業において、BIM活用事業の施行を行い、BIM導入の効果・課題などを検証している。くわえて官庁営繕事業におけるBIMを利用する場合の基本的な考え方と留意事項を「官庁営繕事業におけるBIMモデルの作成および利用に関するガイドライン」としてまとめている。

このようにBIM (Building Information Modeling) やCIM (Construction Information Modeling) といったCAD/CGを用いた3次元のデジタルモデルにGISの属性情報の要素を付与させたデータベース管理システムによって建設生産性の向上が図られている。これは言い換えればCAD/CGのGIS化であり、まさにCAD/CGとGISとを融合させた一つの概念であるといえる。また、BIMはGISの概念を建築へ適用させ、CIMはBIMを土木・建設へ拡大させたといえる。

また、BIMやCIMは、次元(軸)を「評価軸」として捉えている。立体的な構造物を示す3Dにくわえ、「時間」軸を考慮した4Dや「コスト」軸を考慮した5Dを含めた活用の検討が進められている。さらには「維持管理」軸を考慮した6Dが出現し始めてきており(1.18、1.19)、わが国においても少子高齢化、技術の伝承、施設の更新などの社会資本を取り巻く環境が変化してきている中でBIMやCIMを活用した「維持管理の効率化・高度化」が国土形成の中でも重要となっていくと考えている。

表 1. 1. 1 3次元都市モデルの用途 (1. 20)

都市計画 (Urban planning)	主に都市デザインの場面で、景観や日照、特定の場所からの見晴らしなどを直感的に把握できる三次元表現手段としてもちいられる。この他、立地問題、地区計画、コミュニティ計画、市民参加の際の説明材料に提供される例もみられる。
建築デザイン (Architecture)	都市計画と同様、立地やデザインの検討に利用されるほか、細かいスケールの建物美や周辺景観との調和の確認にも活用される。
都市基盤・公共施設 (Facilities and utilities management)	上下水道、電力、ガスパイプライン、道路網、鉄道網など、各種基盤設備の保守管理。交通量をリアルタイムに把握したり、道路の交差を三次元的に表示する技術は、カーナビゲーションシステムにも利用される。
医療・緊急業務 (Emergency services)	犯罪防止、災害対策、消火・救急時のアクセス経路などの確保。複雑な都市構造を把握して、目的地への最適到達路をみいだすことが鍵になる。建材や階高などの建物属性と、風力、波力などの自然条件を入力して、災害シミュレーションをおこなうものもこれにあたる。
通信業務 (Telecommunications)	移動体通信の発信ステーションのエリアカバーや電波送信範囲の確認。とくに高層高密度な中心市街地においては、移動体通信、固定電話ともに発信基地からの良好な電波受信の確保が重要になる。
マーケティング (Marketing and economic development)	さまざまな商業・経済活動の商圈・需要分析。二次元および三次元モデルは、都市環境を視覚的に把握するのに適しており、特定のサービス業務に対する需要・顧客の所在の確認に役に立つ。
不動産分析 (Property analysis)	商業・経済活動の分布とも関連するが、より広範な都市全体としての活動の広がり、周辺地区における空地状況、取引価格などをとらえて、不動産・地価を鑑定するもので、総合建設業、不動産業などにも需要がある。
電子商取引 (E-commerce)	いわゆる仮想都市と総称されるもので、電子決済機能のみに特化した平面的なものから、町並みのひろがりやをあらわした完全な三次元モデルまで、さまざまな形態のオンラインショッピングモールがある。
環境 (Environment)	二次元および三次元モデルによって、交通計画や開発計画に対する環境影響評価を表現したり、環境汚染の現状評価をおこなうもの。
教育・学習 (Education and learning)	さまざまなレベルのユーザーが、都市の機能について学習できるようなインターフェースの開発。仮想都市の環境をもちいた遠隔教育システムの構想もある。
観光・娯楽 (Tourism and entertainment)	観光資源の情報や所在地を表示したり、都市内の交通、宿泊ガイドなどにリンクすることで、旅行者に情報を分かりやすく提供する。
行政・自治体の案内 (City portals)	都市情報の中枢へのアクセスポイントとしての二次元・三次元モデルの活用。地方自治体の業務内容をわかりやすくしめすことができる。



図 1. 1. 4 CIM の概念

(4) 統合型空間情報システムから融合型空間情報システムへ

計画・設計の現場でも CAD/CG や GIS といったコンピュータ支援の導入は、もはや当然となっている。これまで GIS による計画支援と CAD/CG による設計支援に大別され利用されてきたが先述したとおり空間情報技術の統合的な利用が進められつつある。そのような中で本研究室では、空間情報技術を統合的さらには融合的に利用した多くの研究が先駆的に取り組まれ、成果を挙げてきている。吉川らは、GIS と CAD/CG を統合化したトータルな空間情報システムを構築し、環境デザインに応用する手法を提案している (1. 21)。また、さまざまな空間情報技術と空間データをそれぞれ融合して 3次元都市モデルを構築するとともに市街地の都市計画街路や再開発計画といった実際の建設プロジェクトにくわえて (1. 22)、歴史的景観の保全や伝統的な街並みの保存といった課題へも適用している (1. 23)。

「コンパクト+ネットワーク」国土形成の実現のためには GIS や CAD/CG をはじめとする空間情報技術を有機的に連携させて融合させるシステムの構築がより一層必要となってくる。

1. 2 研究の目的と本論文の構成

「対流促進型国土」の実現のためには、人・モノ・情報といった高精度な「位置情報」の交流をいかに活性化させるかが重要であることを前節で指摘した。そのためには、ノード（地域）とリンク（交通機関）のネットワークの機能を十分に高めていくことが重要となり、駅というノードと、幹線（沿線環境）というリンクのネットワーク構造で構築されている鉄道空間はまさにその縮図といえる（図1. 2. 1）。

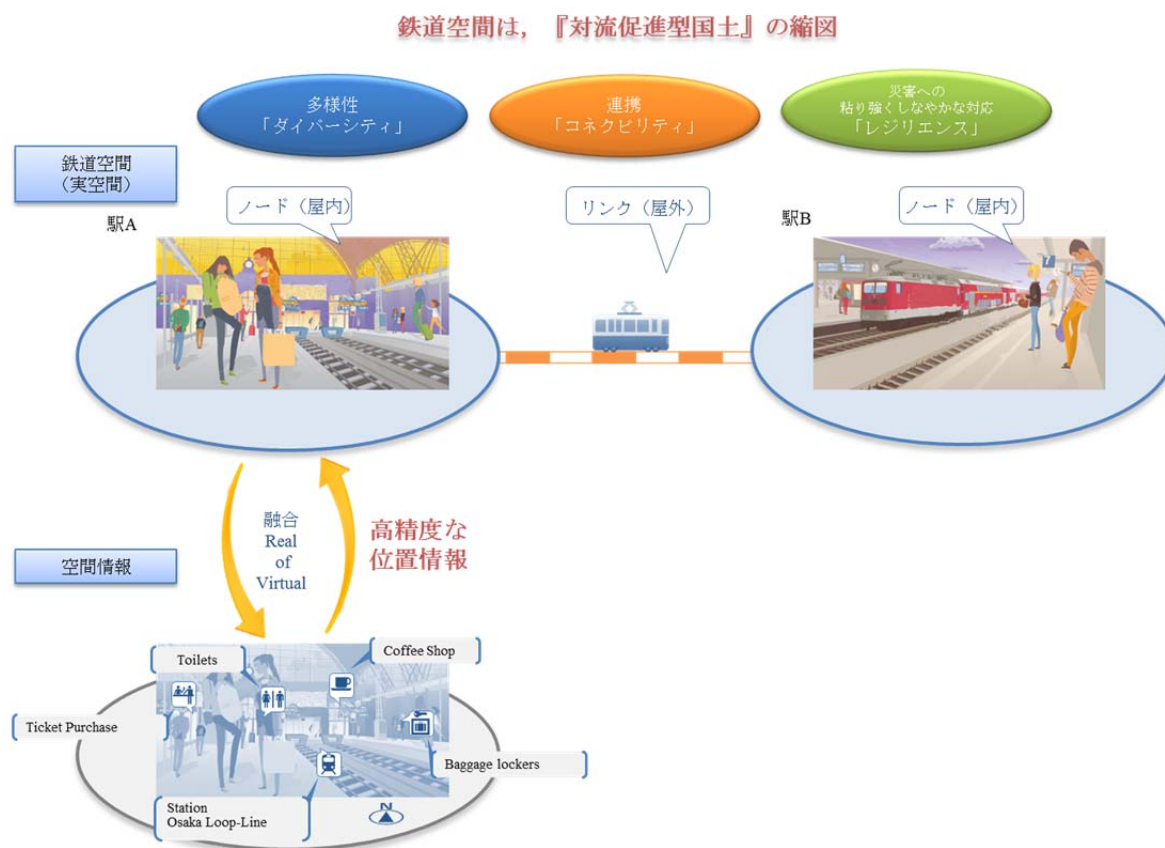


図1. 2. 1 鉄道空間

また、少子高齢化が進む中、都市・地域の多様性を高め、都市・地域間の連携を強化していくために交通インフラが重要である。とくに、CO₂ 排出量の少ない鉄道空間を拠点とすることで、環境負荷の小さい低炭素型の都市・地域づくりが可能となる。さらに、都市・地域間と連携させる交通ネットワークという観点でも高齢者をはじめとする人々が自家用車に過度に依存するのではなく、鉄道のような公共交通を活用していくことが重要となる。以上を踏まえ、本研究では、「鉄道空間」に着目することとする。

国土グランドデザインの最初の節目（マイルストーン）として施策の推進が図られることになっている2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて、やはり東京駅といった「鉄道空間」が着目されている。その「鉄道空間」においても前節で記

述した通り、これまで位置情報に関する測位技術は、GNSS が利用可能な「屋外」だけでなく、「屋内」での測位技術も含めた両測位技術が進歩していくことによって、鉄道空間における高精度測位環境が実現できるものと考えている。しかし、これまでの鉄道空間は「屋外」、言い換えればリンク（幹線や沿線環境）やノード（駅）を含むネットワークそのものが着目されてきたといえる。

図1. 2. 2は、地理的情報や空間情報をコンピュータで扱う理論、データ取得、データの構造、データ検索・演算を含むすべての処理技術、手法・アルゴリズム・プログラミング、表示・出力技術、それらの実際への応用・適用などに関する一般社団法人地理情報システム学会が発行している論文集「GIS—理論と応用」の投稿の中で「鉄道」を含む論文を抽出した結果である。大半が「鉄道」を論文の主旨としたものではなく、本文中に「鉄道」の記載があるものであったが、「鉄道」空間を主旨とした論文だけ抽出してみるとほとんどが、屋外（リンクあるいはネットワーク）を対象とした論文であり、屋内を対象としたものは10%程度しかないことがわかった。前節の測位技術の動向をみれば、今後、鉄道空間においても屋内環境に関する論文が増えてくると予測できるが、これまでの鉄道空間は、リンクやネットワークといった「屋外」が着目されてきたといえるひとつの指標である。

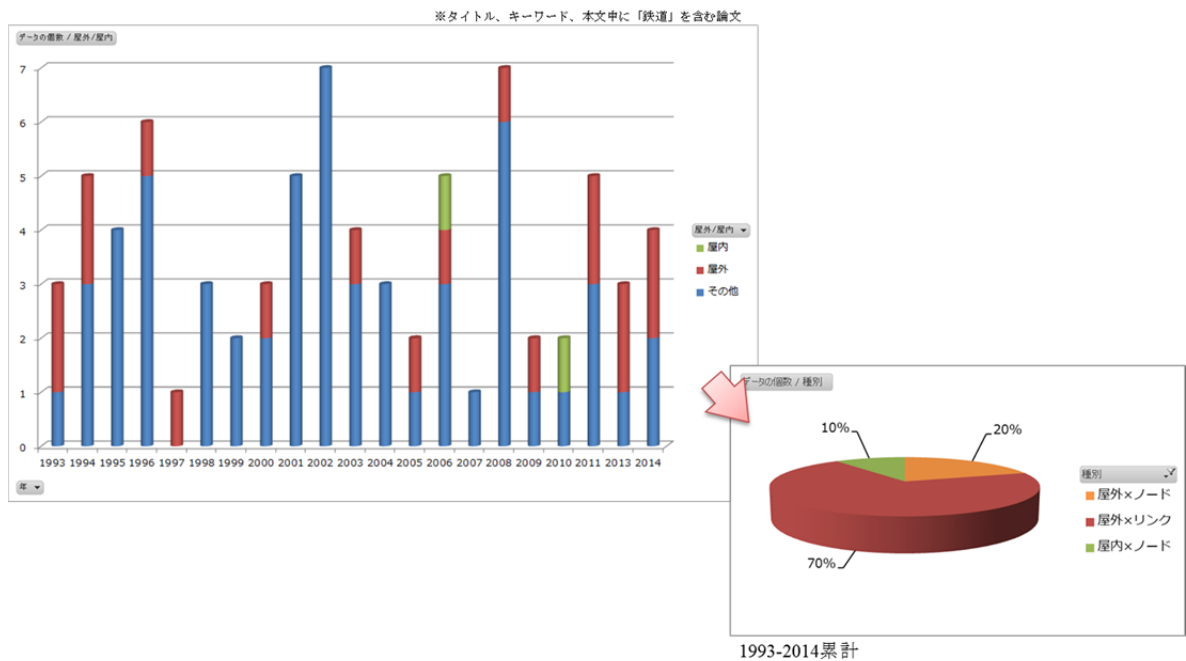


図1. 2. 2 論文（GIS—理論と応用）投稿数

これまで交通結節点として存在していた、屋内（駅）であるが、近年、駅ビル化が急速に進められてきている。図1. 2. 3は JR 西日本における駅ビル・ショッピングセンター・百貨店などの開業年・リニューアル年を示したものである。近年（直近10年ほど）で開発が進んでいることがわかる（図1. 2. 3）。これは、単なる交通結節「点」として人やモノを運ぶだけではなく、駅に滞在・回遊させ、新たな価値を創出する「空間」へと変貌してきたことを表しているといえる。すなわち、鉄道空間においても「駅」自身の価値も高まってきており、駅構内といった「屋内」環境における位置情報の利活用が今後ますます求められるようになってくる。

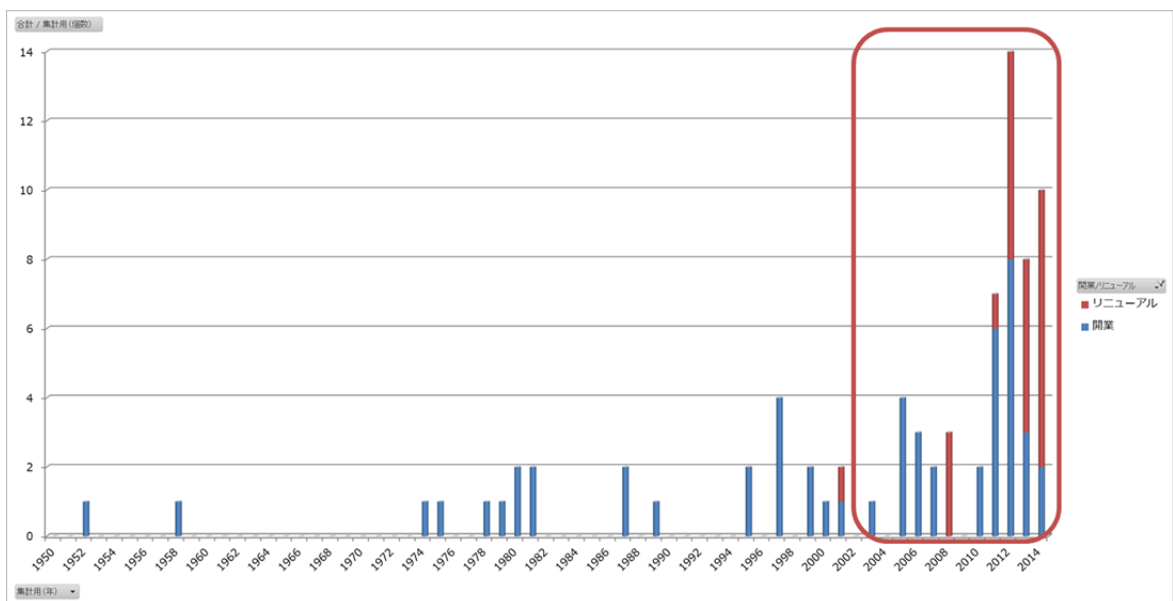


図1. 2. 3 JR西日本における駅ビル化の推移

先述したさまざまな背景を鑑みれば、鉄道空間においても「屋外から屋内へ」あるいは「屋外だけでなく屋内も」位置情報の活用が進められていくことが考えられる。そこで本研究は、「鉄道空間における空間情報と位置情報の活用に関する実証的研究と位置情報システムの開発」を目的としている。その中で、鉄道幹線や沿線環境、さらには駅前広場などの「屋外」環境と駅構内や駅ビル・駅ナカといった「屋内」環境の両面から鉄道空間を捉えることで、鉄道空間全体として安全でやさしい空間の創出を目指した空間情報技術を活用することの可能性を探るとともに、位置情報のあり方について考察している。

本論文は全4章で構成されている。まず、第1章では、社会的背景と空間情報技術の動向について紹介し、「鉄道空間における空間情報技術と位置情報の活用」に関わる課題を提起し、本研究の位置づけと目的を明確にしている。

第2章では、鉄道空間の中でも屋外環境における空間情報技術と位置情報を活用することによる施設管理の手法について述べている。とくに、老朽化が急速に進展していることから、喫緊の課題として解決が求められているインフラ構造物に着目した。インフラ構造物の急速な老朽化だけでなく、国土の脆弱性にくわえ人口減少や厳しい財政制約などインフラ構造物の取り巻く環境がますます厳しくなっている中で、インフラ構造物の状態を客観的に把握・評価し、将来の健全度を予測し、必要な補修・補強などの措置の最適な時期と方法と判定して、経済的制約の中でライフサイクルコストが最小となるよう管理計画を実現させる「アセットマネジメント」を推進していくとともに、損傷が著しくなってから対策を行うという「事後的管理」から損傷の早期発見・早期改修という「予防保全的管理」に転換していくことが重要となる。すなわち、維持管理・更新のPDCAサイクルに対して計画的かつ戦略的に取り組んでいく必要がある。その中で、単に既存の技術やシステムを前提としているだけでは不十分であり、先進技術やシステムを積極的に活用し、より頭脳化された「スマート・インフラ」へと進化させていくことが求められる。そこで本研究では、写真測量技術と3次元プロダクトモデル、いわゆるCIM（Construction Information Modeling/Management）といった空間情報技術に着目し、「位置情報」をキーとして融合的に活用することによって適切かつ効率的な維持管理手法の開発を試みるとともに、今後のインフラ構造物を維持管理していくうえで「位置情報」のあり方について提案している。

第3章では、鉄道空間の中でも屋内環境における空間情報技術と位置情報を活用した測位手法について述べている。屋外における「測位」技術は、全地球測位システム（Global Positioning System : GPS）や準天頂衛星システム（Quasi-Zenith Satellite System : QZSS）などの衛星測位システム（Global Navigation Satellite System : GNSS）がデファクトスタンダードな手法になっているのに対して、屋内での測位に目を転ずれば、これまでもさまざまな仕組みが構築されてきたものの、各方式とも一長一短あり、いずれかに絞られる段階には至っておらず、今後も屋内による測位は、場所や用途に応じてふさわしい方式を選択あるいは組み合わせるようになっていくと考えている。そこで本研究では、鉄道空間にふさわしい屋内環境における高精度な測位システムの開発を試みている。具体的には、サインの設置位置や形状、内容に関わるさまざまな位置情報をサインデータベースとして構築し、画像処理技術や写真測量技術を用いて、さらには、サインデータベースをもとにした屋内空間のボロノイ分割とドローネ三角網によるネットワーク分析を活用することで、従来の屋内測位技術にはない鉄道空間らしい測位方式について実証的検討を行っている。

1. 2. 2

1. 1) 国土交通省：国土形成計画，2008，
<<http://www.mlit.go.jp/common/000019219.pdf>>(入手 2014.09.10).
1. 2) 国土交通省：国土のグランドデザイン 2050~対流促進型国土の形成~，2014，
<<http://www.mlit.go.jp/common/001047113.pdf>>(入手 2014.09.10).
1. 3) 国土交通省 国土政策局：高精度測位社会に向けた取組状況，2014，
<http://www.eiseisokui.or.jp/ja/pdf/forum_12/05.pdf> (入手 2014.09.10).
1. 4) Maguire,D.J.：GIS の概観と定義，GIS 原点—地理情報システムの原理と応用—[I]，Maguire,D.J., Goodchild, M.F., Rhind, D.W. (編著)，小方登，小長谷一之，確井照子，酒井高正 (訳)，古今書院，1998.
1. 5) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：世界最先端 IT 国家創造宣言，2013,<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20130614/siryoul.pdf>(入手 2014.09.10).
1. 6) 総務省：G 空間×ICT プロジェクトについて，2014， <
http://www.soumu.go.jp/main_content/000280935.pdf>(入手 2014.09.10).
1. 7) 国土地理院 HP：<<http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/>>(入手 2014.09.10).
1. 8) (独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)：準天頂衛星初号機「みちびき」の運用状況について，第9回衛星測位と地理空間情報フォーラム (SPAC) 資料，2011， <
http://www.eiseisokui.or.jp/ja/pdf/forum_09/forum_09-05.pdf> (入手 2014.10.08).
1. 9) 宇宙開発戦略本部：宇宙基本計画,2013，
<<http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan.pdf>>(入手 2014.09.10).
1. 10) シード・プランニング：「モバイル位置情報ビジネス(民政用)の市場規模予測」，
<<https://www.seedplanning.co.jp/press/2011/2011092701.html>> (入手 2014.09.10).
1. 11) 国土地理院：地理空間情報活用推進基本計画，2012， <
<http://www.gsi.go.jp/common/000065943.pdf>> (入手 2014.11.11)
1. 12) 天野貴文，山野高志，吉川眞：統合化空間情報システムの開発と構造景観への適応，構造工学論文集，46A， pp.431-438，2000.
1. 13) Godfried Augenbroe：Integrated Building Design Systems in Context of Product Data Technology， Journal of Computing in Civil Engineering， Vol. 08， No.04， pp.420-435，1994.
1. 14) 国土交通省：国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2008， <
<http://www.mlit.go.jp/common/000036985.pdf>> (入手 2014.09.10).
1. 15) 元永秀：CIM が目指す理想を実現するために，2013，
<http://committees.jsce.or.jp/cceips07/system/files/CIM02_motonaga.pdf> (入手 2013.06.20).
1. 16) 国土交通省：CIM の導入検討について，2013，
<<http://www.mlit.go.jp/common/000221538.pdf>> (入手 2013.06.20).

1. 17) CIM 技術検討会：CIM 技術検討報告会 平成 24 年度報告，2012，
<http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/Contents/CIM_Report130430.pdf> (入手 2012.06.20).
1. 18) 情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略，2013，
<<http://www.mlit.go.jp/common/000991631.pdf>> (入手 2013.06.20).
1. 19) Behzad Abbasnejad, Hashem Izadi Moud : BIM and Basic Challenges Associated with its Definitions, Interpretations and Expectations, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 03, Issue02, pp.287-294, 2013.
1. 20) (財)日本建設情報総合センター研究助成事業：三次元都市モデルの開發現状に関する調査, 及び GIS データとの整合性を考慮した三次元モデルの構築・実証に関する研究報告書, pp.07, 2007.
1. 21) 吉川眞: 都市・地域情報の視覚的表現ツール, 都市計画, Vol.46, No.6, pp.53-56, 1998.
1. 22) 山野高志, 奥住洋介, 吉川眞: 統合化空間情報システムによる都市景観デザインー可視・不可視分析を用いたモデリング手法の提案ー, 地理情報システム学会講演論文集 vol.10 pp.311-314, 2001.
1. 23) 近藤大地, 吉川眞: 歴史的景観の保全と復元, 地理情報システム学会講演論文集、Vol.14, pp.341-344, 2005.

第2章 鉄道空間（屋外環境）における施設管理の検討・開発

2. 1 序論

2. 1. 1 社会的背景

わが国では、高度経済成長期に大量の社会資本（インフラ）が整備・蓄積されてきた。一方、米国では1920年代以降、大規模にインフラ整備が進められてきたことがわかる（図2. 1. 1）。1980年代の米国では、複数の橋りょうで損傷や崩落事故が発生するなどインフラの老朽化が深刻化し、大きな社会問題となった。このように日本に先じてインフラ整備が行われた米国では、インフラの老朽化がすでに顕在化している。コンクリート構造物の寿命は半永久的（100年以上）でメンテナンスフリーであると考えられてきたが、このような米国の状況を鑑みると50～60年というのがひとつの目安と考えられる。わが国においても多くの社会資本ストックは、建設後すでに30～50年の期間を経過していることから、今後、急速に老朽化が進行していくと想定される（表2. 1. 1）。

わが国の国土は、気象、地形、地質が極めて厳しい条件下にあり、毎年のように水害、土砂災害が発生している。さらには地震や火山噴火などが活発な地域でもある。このような国土の特徴や厳しい自然条件をもつわが国では、インフラ整備において、高度な耐震性確保や軟弱地盤対策などの高い水準の防災機能が求められるほか、道路や鉄道などのネットワーク整備においても山地や河川が多く急峻な地形に対応するため、諸外国に比べて橋りょうやトンネルなどの構造物の比率が高くなっており、それに伴って社会インフラの維持管理・更新に関するコストは高くなると考えられる。

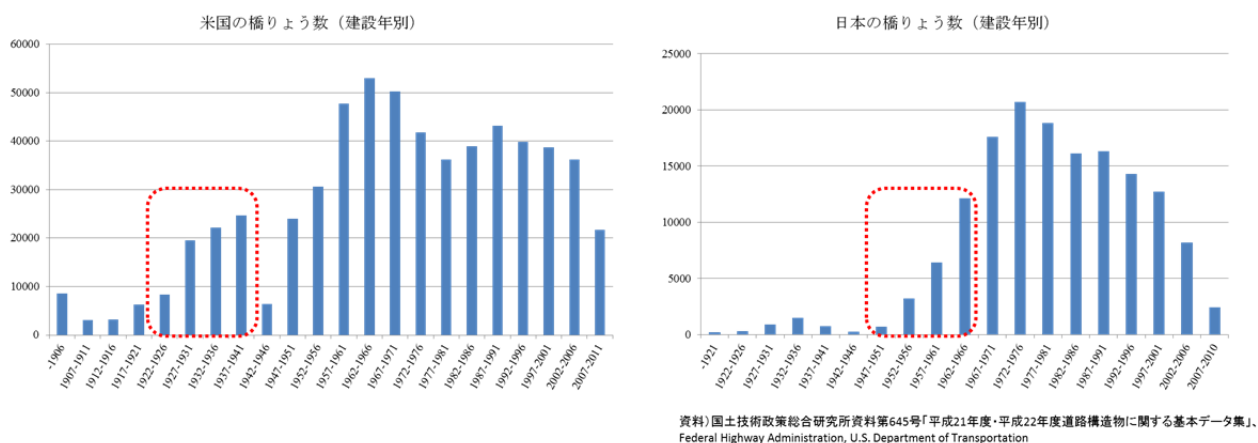


図2. 1. 1 建設年別橋りょう数（2. 1）

表2. 1. 1 建設後50年を経過する社会資本の割合（2. 1）

	2013年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [(約40万橋 ^{※1} （橋長2m上の橋約70万のうち）]	約18%	約43%	約67%
トンネル [約1万本 ^{※2}]	約20%	約34%	約50%
河川管理施設(水門等) [約1万施設 ^{※3}]	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ [総延長：約45万km ^{※4}]	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{※5} (水深-4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%

※1：建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。
 ※2：建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。
 ※3：国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設についてはおおむね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)
 ※4：建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについてはおおむね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を案分し、形状している。)
 ※5：建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

資料) 国土交通省

国土の脆弱性にくわえ、人口減少や厳しい財政制約など、社会インフラをとりまく環境がますます厳しいものになる中、社会インフラを適切に維持管理することでその機能を適切に発揮させるとともに、持続的に維持管理が行われていくよう戦略的に取り組んでいくことが必要である。社会資本の維持管理に関する課題として、①維持管理費用の制約、②大量の高齢化したストックの発生、③既存ストックの補修・補強履歴の欠如、④維持管理マスタープランの欠如などが挙げられる。国土交通省も的確な設備更新を最重要の政策課題と位置づける（2. 1）。このような課題に対して、グランドデザイン2050の基本戦略にも掲げられているようにインフラを「賢く」使う、すなわちストックされた社会インフラをより効率的かつ有効に活用できる仕組みをつくり、既存ストックを最大限に活用することが必要である。具体的には、さまざまな人・モノ・情報の流れを活発化する「対流基盤」としてのインフラの高度化を図るとともに、先進技術を積極的に活用し、より頭脳化された「スマート・インフラ」への進化を促進していくことが重要である。

これまでの社会資本における維持管理については、機能的な信頼度が直ちに大きく損なわれるような事象が少なかったことから、損傷が発生してから修繕などの対処をする「事後的管理」が行われていた。しかし、今後、高齢化したストック（社会資本）が増大していくと致命的な損傷が発生する可能性が飛躍的に高まる。そのような中、事後的な対処で万全を期すことは困難であり、結果として安全性が大きく損なわれる恐れがある。既存の構造物を効率的かつ適切に維持・管理・更新していくためには、早期に修復が必要な箇所を発見することにより、構造物の長寿命化を測る「予防保全的管理」への転換が必要である。

とくに鉄道構造物については、老朽化が進んでおり、その対処は喫緊の課題となっている（図2. 1. 2）。わが国における鉄道構造物は、橋りょう（1m以上）が102,

293 施設、トンネルは4, 737 施設に上る。鉄道は自動車（マイカー）の普及以前に整備された路線も多く、平均経年数は橋りょうが 56 年、トンネルが 62 年で、100 年以上にわたり継続使用させる橋りょうやトンネルは 15, 000 施設を超えているといわれている（2. 2）。そこで、本研究では、鉄道構造物の中でも橋りょうに着目した。

一方、近年、少子高齢化に伴う現場の技術継承の困難さやそのような状況のもと、国交省は 2007 年に鉄道施設の検査方法や検査周期といったメンテナンスに関する技術基準となる「維持管理標準」を試行し（2. 3）、2013 年になるとその検査の周期や方法などについて妥当性を検討し、必要な対応を検討するなどの見直しが進められている（2. 2）。現在は、すべての鉄道事業者が共通の体系でメンテナンスに取り組んでおり、土木構造物が供用期間を通じてその要求性能を満足するよう、定期的に検査を行い、必要に応じて措置を講じている（図 2. 1. 3、図 2. 1. 4、表 2. 1. 2、表 2. 1. 3）。

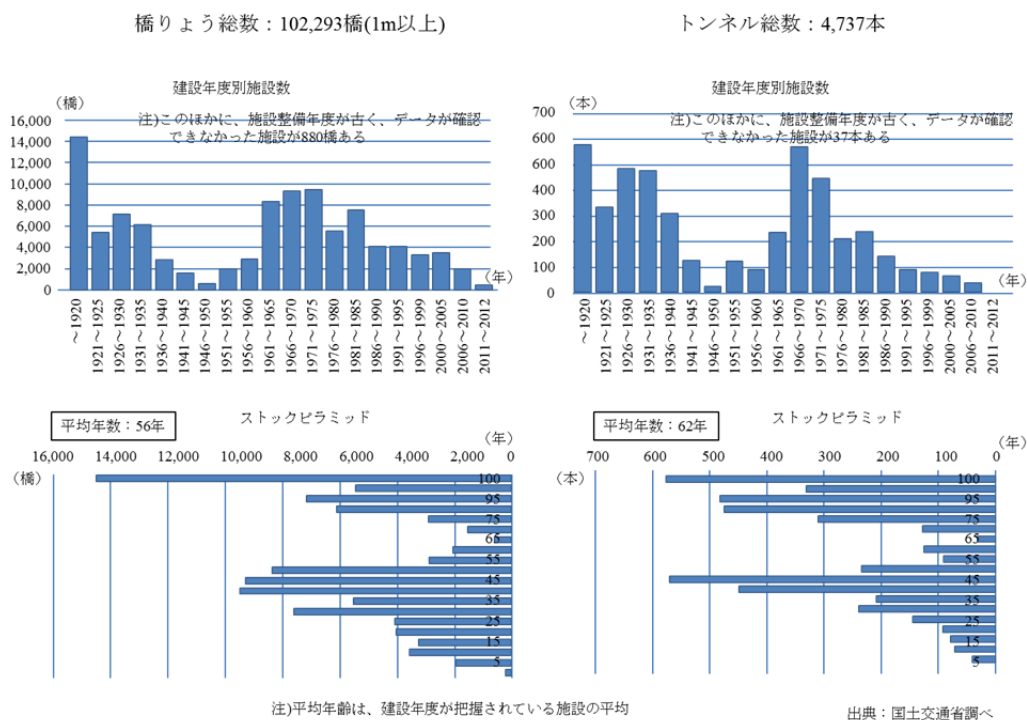


図 2. 1. 2 鉄道施設のストック量（橋りょう、トンネル）（2. 2）

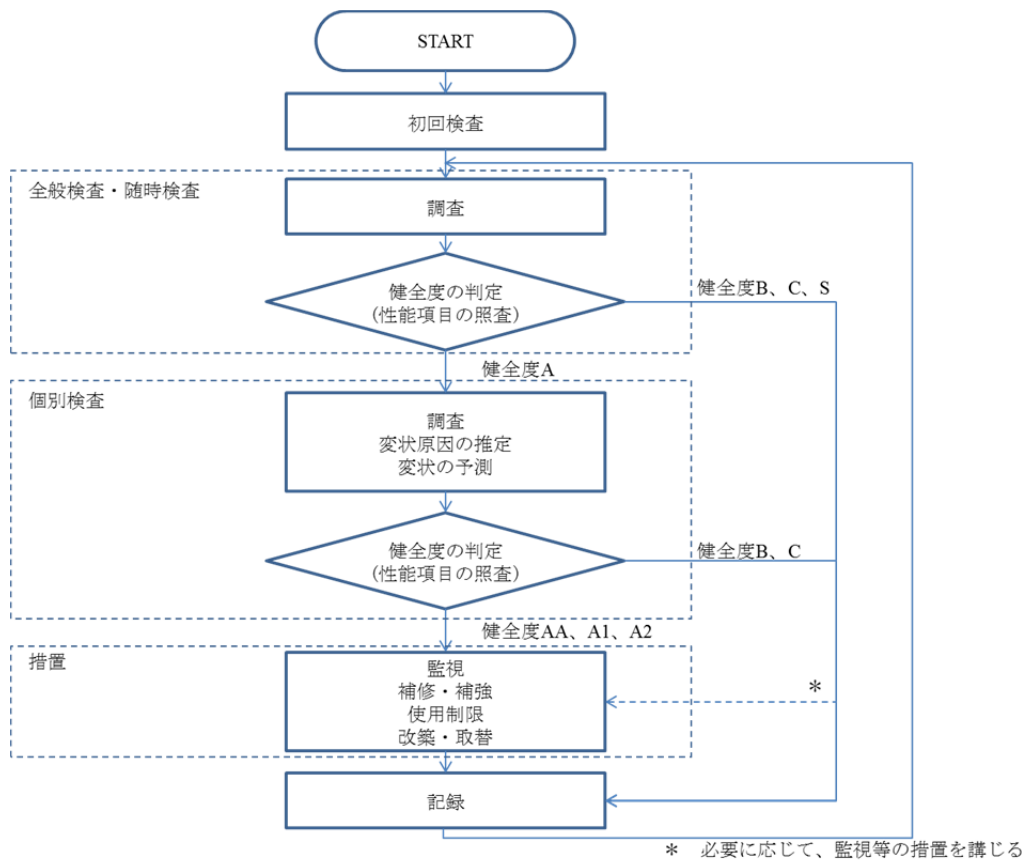
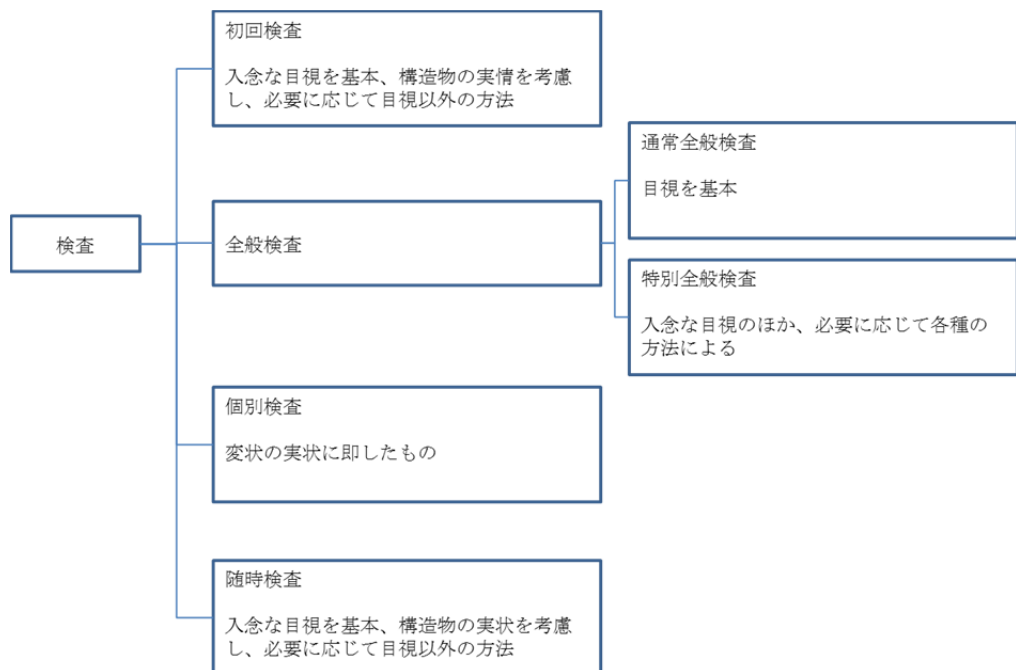


図 2. 1. 3 標準的な維持管理の手順 (2. 2)



検査の時期：「施設及び車両の定期検査に関する告示」に基づき、適切に定める

図 2. 1. 4 検査の区分と調査方法 (2. 2)

表 2. 1. 2 構造物の状態と標準的な健全度の判定 (2. 2)

健全度	構造物の状態
A	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはその恐れのある変状等があるもの
	AA 運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり、緊急に措置を必要とするもの
	A1 進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの、または、大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失う恐れのあるもの
	A2 変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させる恐れのあるもの
B	将来、健全度Aになる恐れのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

注：健全度A1、A2および健全度B、C、Sについては、各事業者の検査の実状を勘案して区分を定めてもよい。

表 2. 1. 3 トンネルはく落に関する変状の状態と標準的な健全度の判定 (2. 2)

健全度	変状の状態
α	近い将来、安全性を脅かす剥落が生じる恐れがあるもの
β	当面、安全性を脅かす剥落が生じる恐れがないが、将来健全度 α になる恐れのあるもの
γ	変状が認められるものの、安全性を脅かす剥落が生じる恐れがないもの

2. 1. 2 研究の目的と方法

厳しい財政状況や技術者の不足といった制約のなかで、今後の「予防保全的管理」を進めていくためには、構造物の劣化状況や進展状況を効率的、高精度に把握し、余寿命を分析、予測する新技術の開発・活用をすすめていく必要がある。たとえば、鉄筋コンクリート構造物のひび割れの現状・進展状況を、それら情報をデータベース化し、長期にわたる構造物の電子カルテとして蓄積して、構造物の診断に活用するなどして効率的に把握する必要がある。また、劣化予測を的確に行うために最新の計測技術を用いるなどして劣化箇所などの新旧情報が比較でき経年変化が把握可能となるよう位置情報を高精度に把握する必要がある。このように社会資本における適切かつ効率的な管理と評価技術の高度化が一層求められる状況にある。くわえて、安全が確保できる現場の支援方策についてもニーズとして求められる。このため、デジタル画像や3Dレーザなどに代表される遠隔からの測定・計測できる手法を用いて、インフラ構造物のモニタリングへ活用することが期待されている(2. 4、2. 5)。このような状況下における鉄道構造物の維持管理に関する技術的要求を大別すると、「点検・診断・監視技術の高度化」、「保守作業のシステム化」、「老朽構造物の延命化」の3つが

挙げられる。

さらに、「予防保全管理」として構造物の機能を維持していくためには、検査業務だけに留まらず、検査～計画～工事という一連の流れの中で、各種データを蓄積するとともに、これらを常に最新のデータに更新しておくことを継続的に実施していく必要がある。しかしながら、現在の検査～計画～工事までの一連のアセットマネジメントにおいては、2Dの図面（展開図）の基本管理図と呼ばれる構造物管理用図面を用いるのが一般的である。この方法は、熟練した技術者のみで作業を進めていくのであれば有効である。しかしながら、実際は一連の維持管理サイクルの中にさまざまな関係者が多数存在し、長い維持管理業務の中で担当者が代わることも少なくない。その場合、2Dの情報のみで維持管理に関わる内容などを十分に理解し合うことは難しい。最悪のケースでは、関係者間で十分な合意形成ができないまま作業を進めてしまい、その結果、作業の手戻りや作業期間の延長といった問題が発生してしまうことも考えられなくはない。すなわち2Dのみの管理では、適切な維持管理が難しく生産性を低下させてしまう可能性がある。また、既存ストックを効率的に維持管理していくためには、劣化の進行具合や補修・補強の履歴などのデータを蓄積しておくことが不可欠である。これまでもアセットマネジメントを行うために台帳ベースのデータベースシステムが構築されてきている（2.6）。しかし、これもまた2Dの図面（展開図）同様、直感的な把握が難しい。適切な維持管理を行うためには、関係者間で検査や工事段階の知識を簡単に共有することが重要であり、視覚的表現に優れた3Dプロダクトモデルを活用する方法が効果的である。とくに橋りょうのように構造が複雑であればより効果的である。

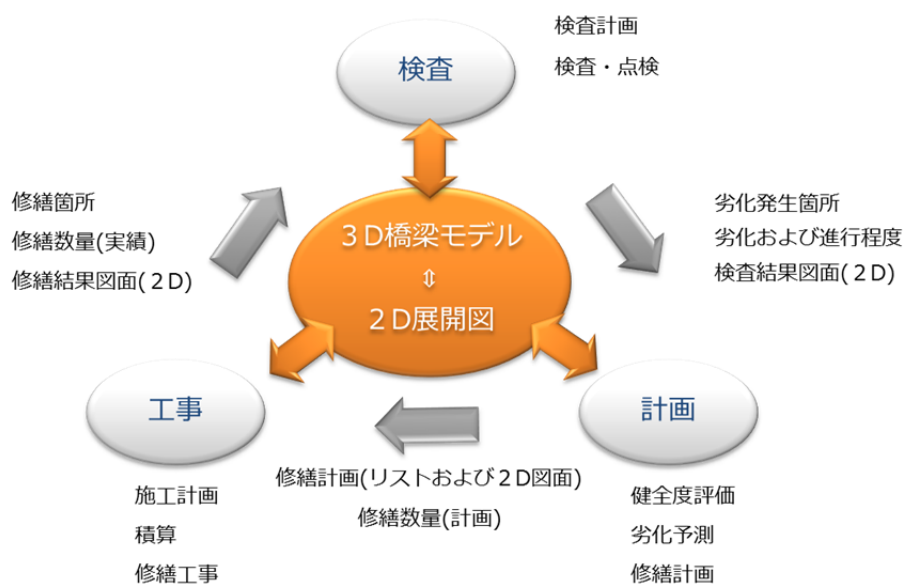


図2. 1. 5 従来の維持管理の流れと本研究の比較
(従来：一方方向矢印、本研究：双方向矢印)

国土交通省は、2012年にCIM(Construction Information Modeling/management)を提唱した。施設や構造物の3Dの形状にくわえ属性情報(材料・部材の仕様、性能、コストなどの情報)を併せもつ建設情報モデルのことであり、調査・設計段階から3Dモデルを導入することで、一連の建設生産システムの効率化を図ることが狙いである。建設プロセスの各段階におけるさまざまなリスクをより上流で管理する「フロントローディング」がCIMの目指すべき方向として掲げられている(2.7)。そのため、計画や設計段階におけるCIMの活用について積極的に取り組まれている(2.8)。また、各地方整備局でCIMの試行事業が実施された。2012年度は、橋りょう、道路、調整池、トンネル、地盤改良、詳細設計段階で11件の試行事業が実施された。2013年度は、予備設計や概略設計など、より上流段階での試行がなされており、まさに「フロントローディング」での適用事例が増えてきている。一方、維持管理に関するCIMの取り組みは、実施されていないのが現状である。計画や設計段階で施工や維持管理を見据えてどこまでのデータを作成するかを見極めることはCIMが普及するうえで欠かせない。しかしながら、施工や維持管理を考えて作成したつもりのデータが、実際の施工や維持管理の場面で役に立たなければ、設計の手間が無駄に増えてしまうだけになる。すなわち「フロントローディング」を効果的に進めていくうえでも下流の施工や維持管理において3Dモデルがどうあるべきかといったあり方についても併せて議論し、3Dモデルの重要性について「ボトムアップ」していくこともCIMを推進していくうえで重要であると考えている。

以上の点を踏まえ本研究では、予防保全的管理を目指した維持管理を支援していくための適切かつ効率的な手法を開発するとともに、今後のCIMを活用した建設プロセスの重要性について維持管理(アセットマネジメント)の観点から考察する。

2. 2 3Dモデルを活用した維持管理システム

2. 2. 1 3Dモデルの構築

今後、老朽化した構造物が急速に増大していくことが予想される中で適切に維持管理を行っていくためには、いかに効率よく3Dモデルを作成することができるか、さらにいかに容易に2D図面に変換できるかが重要となってくる。本項では、橋りょう維持管理のために必要とする3Dモデルの構築手法について述べる。具体的な作業フローを図2. 2. 1に示す。

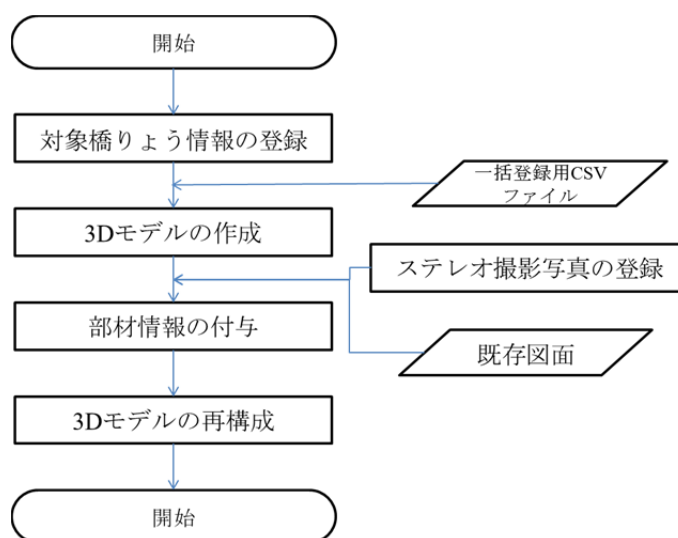


図2. 2. 1 3Dモデル構築フロー

(1) 構造パラメータによる3Dモデルの構築

一般的な3DCADソフトを利用し、対象となる橋梁を一つずつモデリングしていくことは、費用的にも時間的にも困難であると考え、本システムでは、構造パラメータを入力するだけで簡易的な3Dモデルが作成される仕組みを構築した。なお、橋りょう3Dモデルのデータ形式は、Microsoft社のDirectXで扱われている標準データ形式であるXファイルを採用している。Xファイルの特徴としては、ポリゴンメッシュと呼ばれる三角形の集合体と、マテリアルと呼ばれる表面の情報を格納するファイル形式となっている(図2. 2. 2)。本研究では、2D図面への変換も課題と考えているためXファイルが有効と考えた。

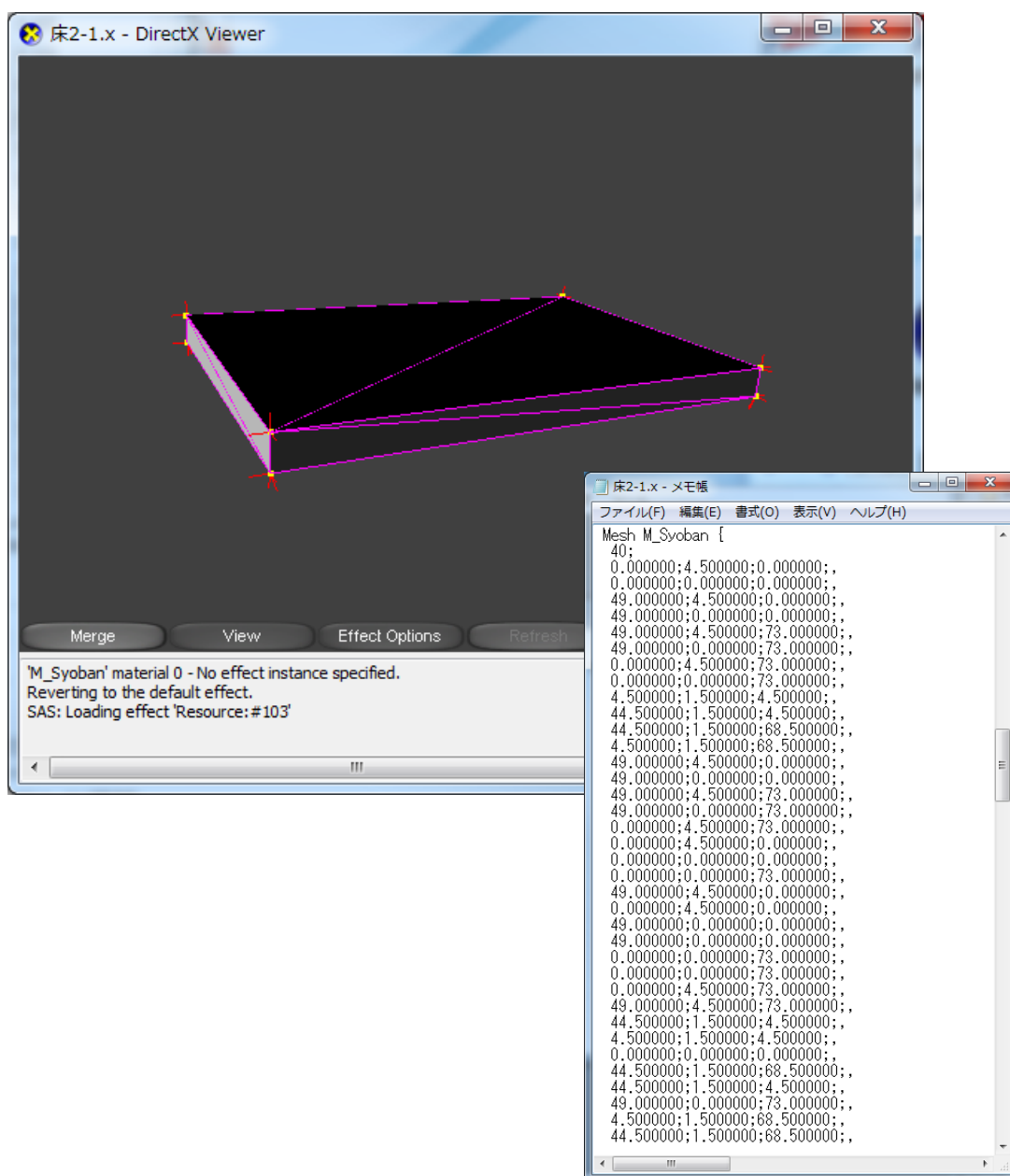


図 2. 2. 2 3Dモデル表示結果

橋りょう 3Dモデルは、図 2. 2. 3に示すように、柱、縦ばり、横ばり、床版などの各部材の 3Dモデルから構成される。これら部材の 3Dモデルデータが「柱 i-j.x」、
「縦 i-j.x」、「横 i-j.x」、「床 i-j.x」などとし、各部材の線路方向 (i: 起点から終点の方向) および線路直交方向 (j: 左から右への方向) の位置を定義している (図 2. 2. 4)。

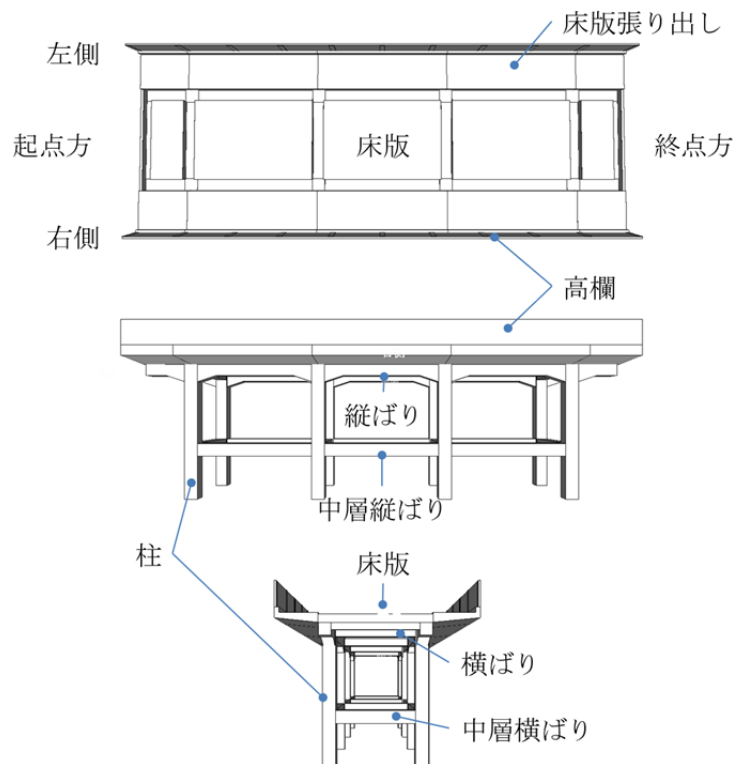
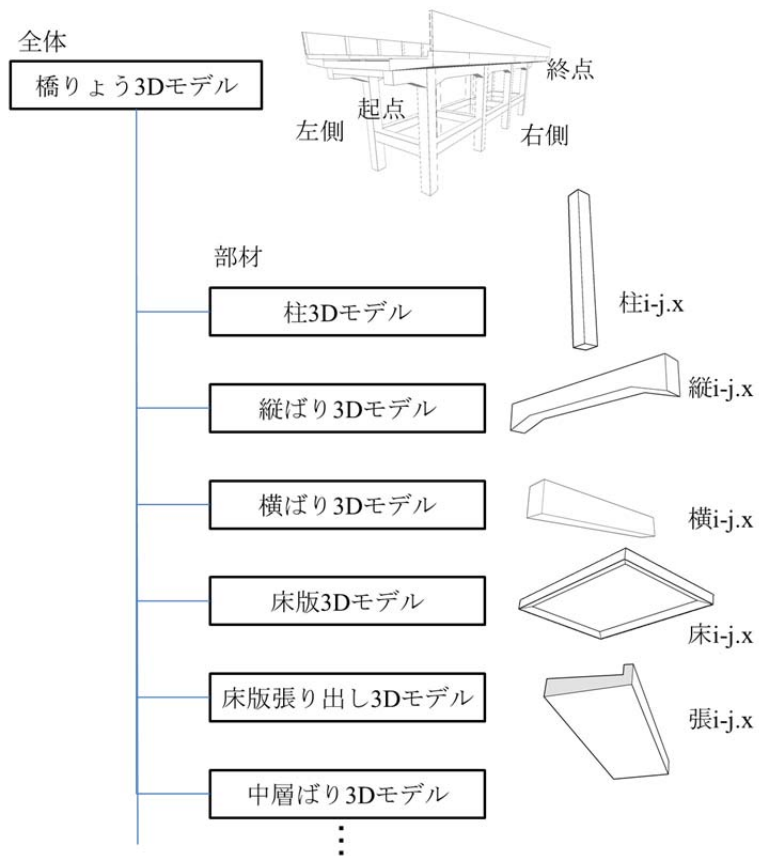


図 2. 2. 3 3Dモデルの構成

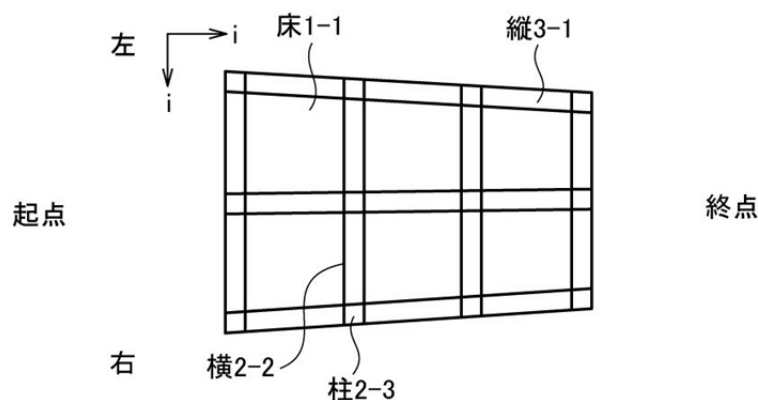


図2. 2. 4 各部材の位置管理

まず、橋りょう構造別の3Dモデルから対象橋りょうと同タイプの3Dモデルを選択すると標準的なモデルが自動的に構築される(図2. 2. 5)。具体的には、橋りょう名、橋りょう形式、路線名、橋りょうコード、セット(連)番号、起終点駅名、キロ程、橋りょう種別、撮影作業予定者、撮影予定日、対象橋りょう構造パラメータを入力することにより、対象橋りょうの各種情報が記憶部に登録される。なお、システムでは、ラーメン高架橋、コンクリート単T桁(ゲルバー桁)、コンクリート単版桁(スラブ桁)、PC単T型桁、PC単I型桁、箱型桁から選択することができる。ついで、部材寸法がわかる図面などを参照して構造パラメータに部材寸法を入力することで詳細な橋りょう3Dモデルを再構築することができる(図2. 2. 6)。詳細な構築フローについては、図2. 2. 7に示す。橋りょう構造は類似している場合が多い。類似性の高い構造物についてはあらかじめ用意しておいた標準的なモデルに構造パラメータを用いて修正が必要となる部材に対して再構築を行うといった手法は有効である。

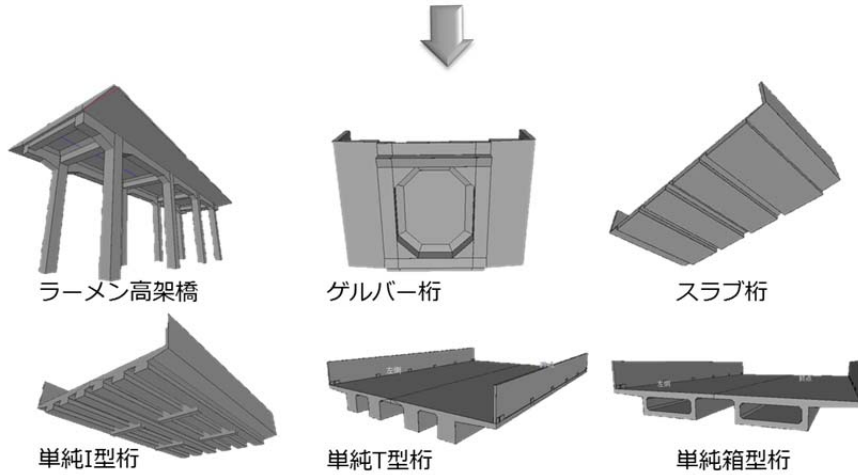


図 2. 2. 5 構造タイプの選択

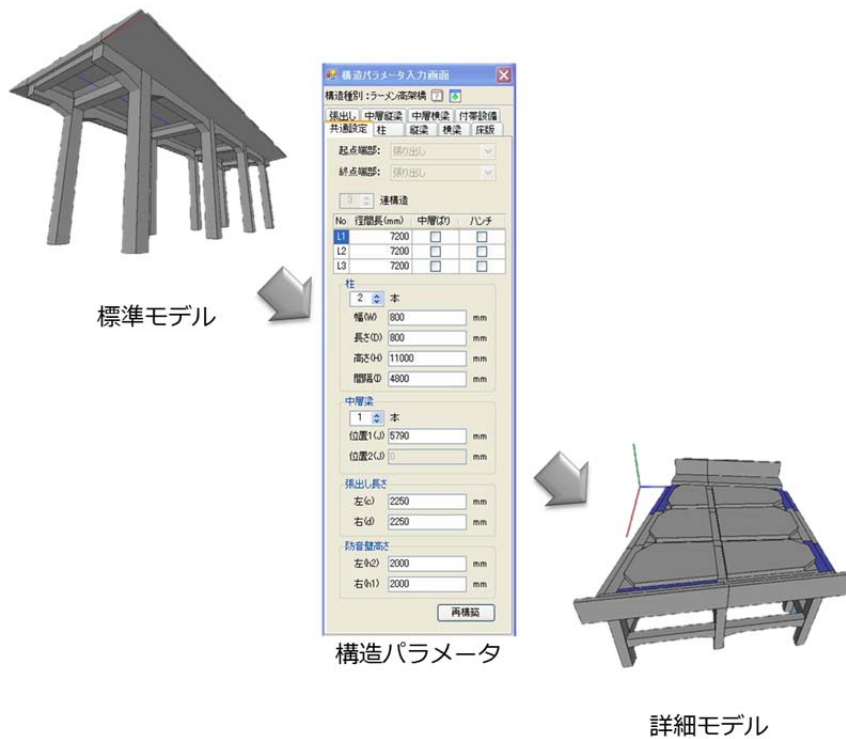


図 2. 2. 6 詳細モデルの構築

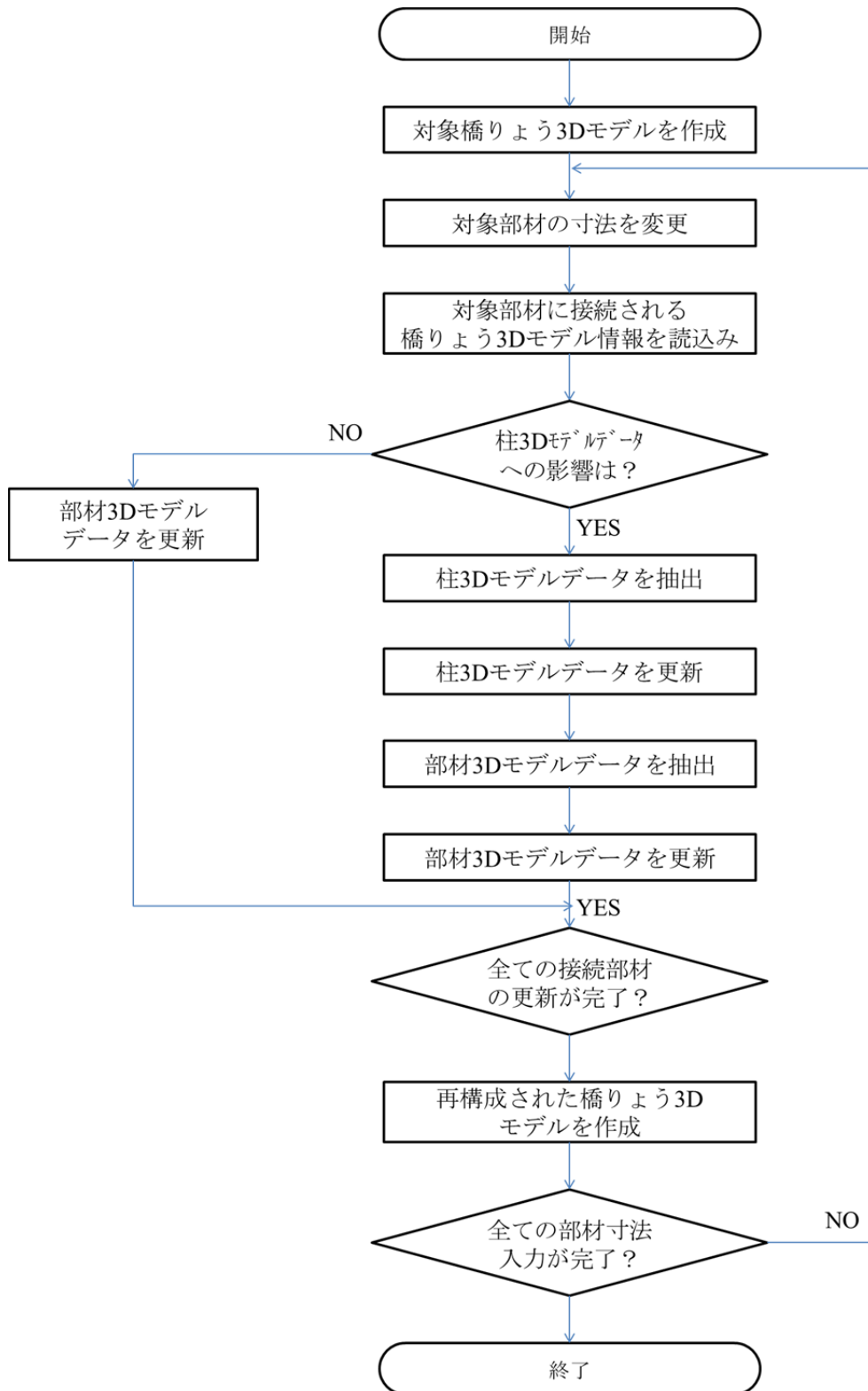


図 2. 2. 7 詳細モデルの構築フロー

(2) ステレオ計測装置

部材寸法入力に必要となる図面がない、読み取りにくいなどの場合がある。その場合は、現場での測量作業が必要となる。構造物に近接できる場合は、メジャーによる測定など（図2. 2. 8）手動で計測する方法が適用できるが、橋りょうのような巨大な構造物の場合において近接して測定できない場合も多い。また、高所作業車での作業が必要となるケースもあるため接触の測定には安全面にも課題が残る。



図2. 2. 8 メジャーによる計測風景

一方、遠隔にて非接触による測定手法がある。非接触の測定方法としては、TS（トータルステーション）や地上レーザによる方法がある。これらは、非常に高い測定精度が得られるものの設置位置の正確な座標算出が必要となる。また、複数の地点からの観測や測定データを必要とし、その解析にも時間がかかるなどの課題がある。近年、インフラ構造物の維持管理に限らず、高精度かつ効率的な3次元形状の計測技術が求められている。3次元計測法にも接触式と非接触式がある（図2. 2. 9）。

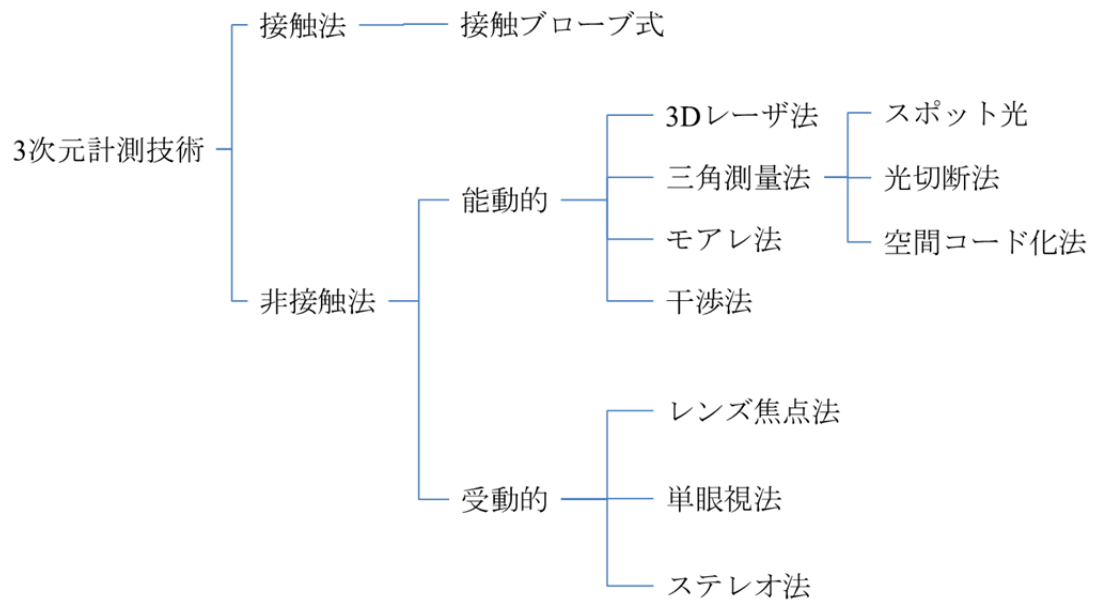


図2. 2. 9 3次元計測技術 (2. 9)

維持管理において現場での作業を以下に簡略化するかが重要となる。そこで、以下の要件を満たす単眼視法とステレオ法に着目した。

- ① 遠隔・非接触による計測とし安全性を確保する。
- ② コンクリート橋りょうの柱や梁などの寸法をターゲット不要で計測できる。
- ③ 携帯性に優れ、作業者の個人差がなく誰もが簡易に操作可能とする。
- ④ 部位寸法精度 10cm を満足する測定精度とする。
- ⑤ 民生品を利用し低コストとなる設計をする。

単眼視法、ステレオ法ともに2枚以上の撮影写真を用いた測定法である。それぞれの撮影方式は、長所・短所があり、測定対象物、測定精度、さらには作業対象者を考慮し、最適な撮影方式を選択する。2つの撮影方式を比較した結果(表2. 2. 1、図2. 2. 10)、橋りょう3Dモデル作成の目的で橋りょう構造の各部位寸法を測定する目的においては、基準点などのターゲット設置の現地作業不可、ステレオ撮影の確実性、さらに撮影作業者および室内作業の負担軽減を考えステレオ法を採用した。

表 2. 2. 1 撮影方式の比較

	単眼視法	ステレオ法
概 要	1台のカメラを使用し、撮影位置を順次移動しながらステレオ撮影を行う方法 (図 2. 2. 10 (a)を参照)	図 2. 2. 10 に示すように、2台のカメラが正確に計測された距離 (B、基線長と写真測量では呼ぶ) だけ離されて、平行光軸になるように固定されているカメラ(ステレオカメラ)を用いて、撮影位置毎にステレオ撮影を行う方法 (図 2. 2. 10 (b)を参照)
長 所	<ul style="list-style-type: none"> ◆ステレオ撮影架台や同時シャッターが不用で、かつ1台のカメラのみの撮影のため、撮影機材が安価である。 ◆基線長を可変に自由に設定可能であり、必要な測定精度への柔軟な対応が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆2台のカメラが水平・平行に設置されているため、撮影後の測定作業が容易となる。 ◆測定したい方向に向け撮影すれば、過不足なくその範囲の撮影が可能である。 ◆測定対象に測量ポールなどの基準尺が不用である。
短 所	<ul style="list-style-type: none"> ◆撮影前計画を確実にしなければ、必要な測定箇所の撮影漏れが発生する。 ◆測定対象に測量ポールなどの基準尺を必ず複数配置する必要がある。 ◆異なる地点からの撮影のため、写真内の同じ場所を見つけることが困難である。とくに、複雑な構造物であるほど、死角になる箇所が多数発生する。 ◆ステレオ測定を行う2枚の写真選定が煩雑である。 ◆構造物などの測定では一般的にターゲット貼付が行われる。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ステレオ撮影架台や同時シャッターが必要で、またカメラも同機種が2台必要となるため、撮影機材が高くなる。 ◆携帯性を考えた場合、基線長の長さに制約を受ける。 ◆測定可能な撮影範囲(ステレオ範囲)に制約を受ける。 ◆固定基線であるため、求める測定精度仕様から、対象までの測定可能な撮影距離に制約を受ける。

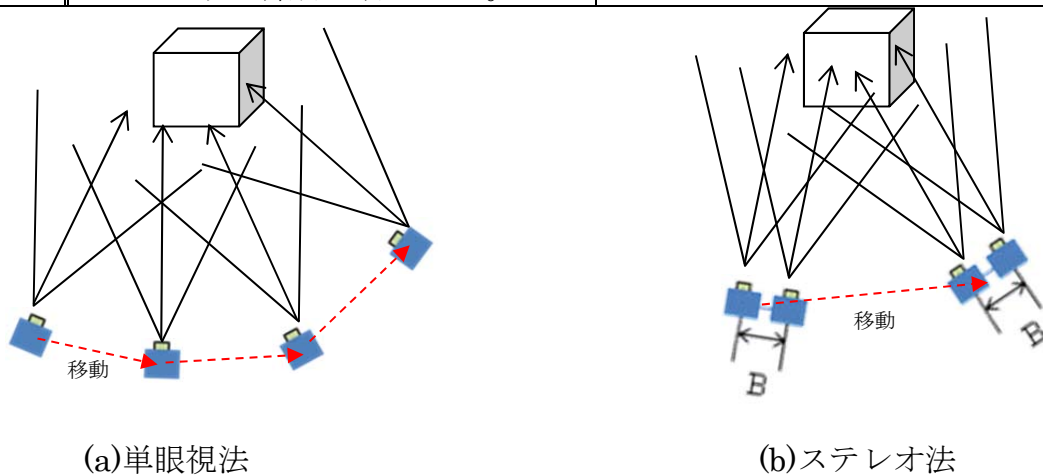


図 2. 2. 10 撮影方式比較

測定精度に影響を与える要因を説明する。図 2. 2. 11 は、ステレオ写真による測定原理を示したものである。

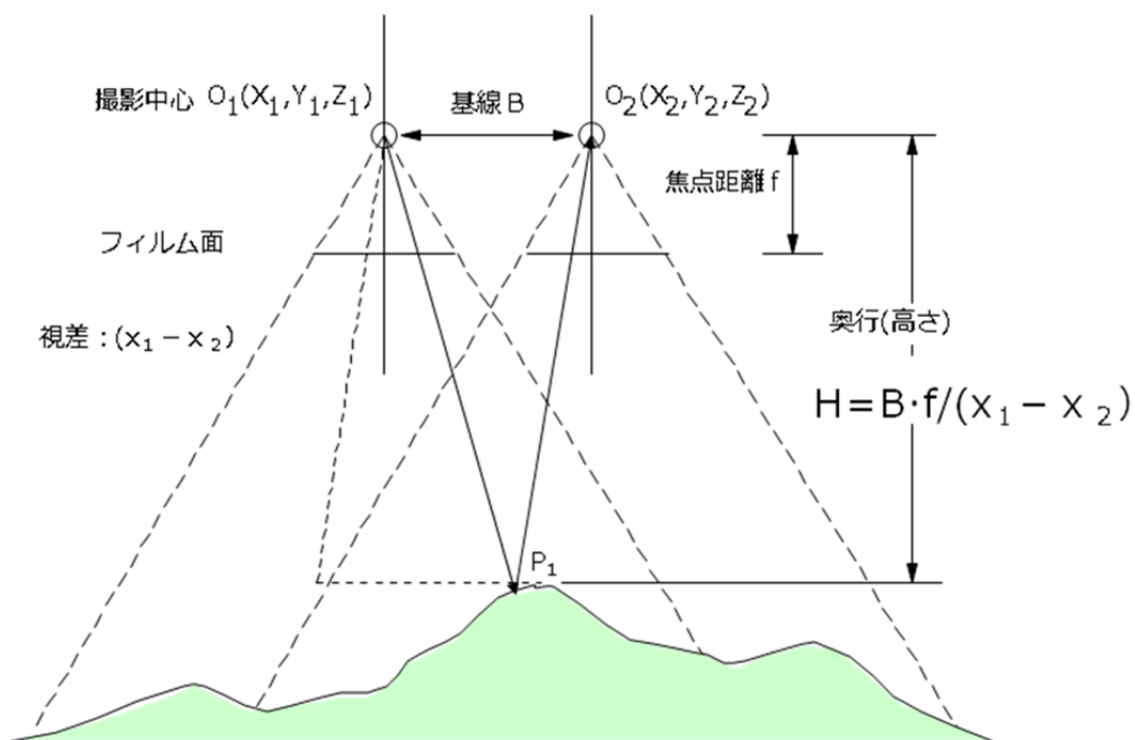


図 2. 2. 11 ステレオ写真による測定原理の模式図 (2. 10)

ステレオ撮影における基本的要因から生じる測定誤差量（理想的な場合）は次式で算出される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X, Y &= k \times (L/f) \times \Delta \text{CCD} \\ \Delta Z \text{ (撮影方向)} &= k \times (L/B) \times (L/f) \times \Delta \text{CCD} \end{aligned} \right\} \text{式 2. 2. 1}$$

ここで、

k : サブピクセル計測実施時の経験的な係数 (k : 1.00、画像処理にサブピクセル精度 : $k=0.5$ は可能)

(L/B) : 計測三角形の形態強度 (写真測量では B/H を BH 比と呼ぶ、一般に、 $1/2 \sim 1/10$ が望ましい)

(L/f) : 撮影スケール

上式は、カメラ間距離 (B 、一般に基線長と呼ぶ)、対象までの距離 (L or H)、カメラレンズ焦点距離 (f)、さらにカメラ CCD 素子間隔 (ΔCCD) により、計測時の誤差量が決定される。一般に、つぎのようにいえる (図 2. 2. 12)。

- ① L/f が小さくなると計測誤差は小さくなる。
- ② B が長くなると (広くなると) 計測誤差は小さくなる。
- ③ ΔCCD が小さくなると計測誤差は小さくなる

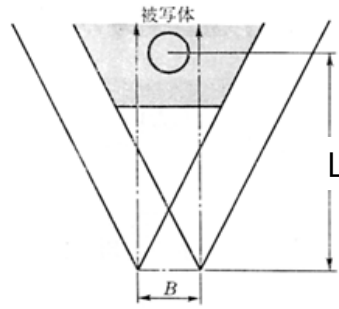


図 2. 2. 12 ステレオ写真による測定原理の模式図 (2. 10)

ステレオ撮影による測定を行う場合、一般的に測定対象の実座標系において XYZ 座標値が既知のターゲット（基準点と呼ばれる）を最低 3 点は配置する必要がある。図 2. 2. 13 で示される左右撮影点 (O_1, O_2) の位置座標 (X_0, Y_0, Z_0) と撮影方向 (Ω, Φ, K) は、地上の測点 P (X, Y, Z) とカメラ座標系におけるカメラ座標 (X', Y', Z') において式 2. 2. 2 が成立する。

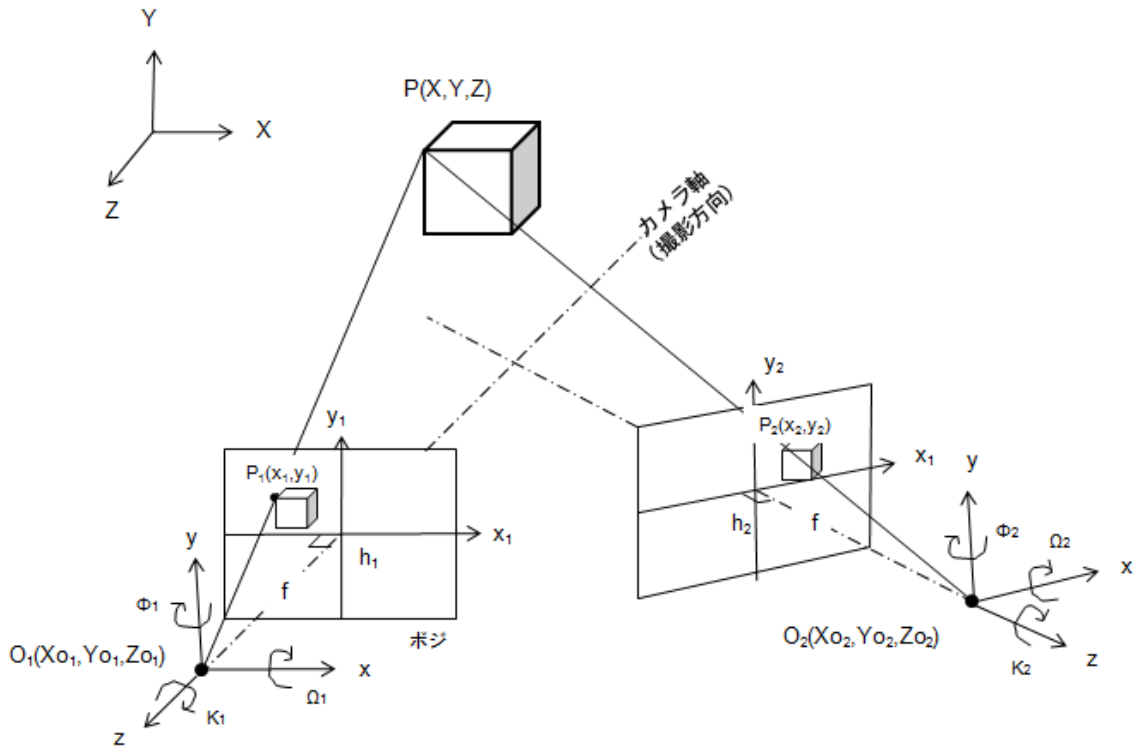


図 2. 2. 13 写真測量による前方交会法による 3 次元座標算出

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R_{\Omega\Phi K} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega & \sin \Omega \\ 0 & -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Phi & 0 & -\sin \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Phi & 0 & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos K & \sin K & 0 \\ -\sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{式 2. 2. 2}$$

式 2. 2. 2 より、共線条件観測式である式 2. 2. 3 が得られる。この式 2. 2. 3 より明らかなように 6 個の未知量 ($X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, K$) を求めるためには最低 3 個の基準点が必要となる。ここでの角度はカメラ座標系の地上座標系 (X, Y, Z) に対する角度である。

$$x = -f \frac{x'}{z'} \quad \text{式 2. 2. 3}$$

$$y = -f \frac{y'}{z'}$$

そこで、2 台のカメラの基線長を固定する固定基準方式を採用することにした。この方式によって撮影点 O_1 と撮影点 O_2 の想定的な位置関係が事前に正確に算出することができる。さらに橋りょうの部位寸法測定という点から絶対座標系での測定は必要としない。そのため、図 2. 2. 14 で示す左右カメラの相対的な関係（写真測量では相互標定と呼ぶ）より左右カメラの角度 ($\kappa_1, \phi_1, \omega_1, \kappa_2, \phi_2, \omega_2$) が求められる。このとき、モデル座標系 (X, Y, Z)_M とカメラ座標系 (x, y, z) の間に式 2. 2. 4 の関係式が成立する。

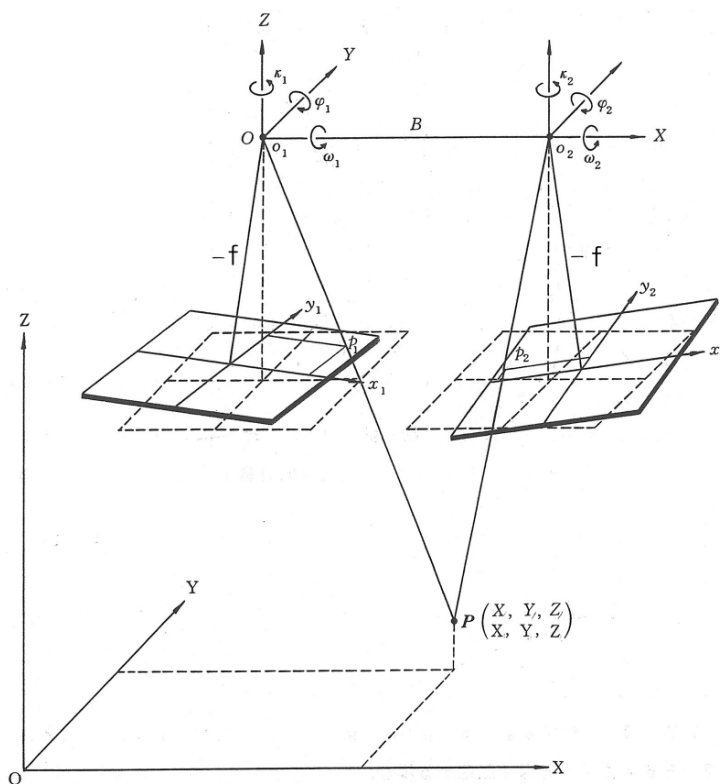


図 2. 2. 14 相互標定

左カメラ

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}_M = \begin{pmatrix} \cos \phi_1 & 0 & \sin \phi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_1 & 0 & \cos \phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa_1 & -\sin \kappa_1 & 0 \\ \sin \kappa_1 & \cos \kappa_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f_1 \end{pmatrix}$$

右カメラ

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}_M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_2 & -\sin \omega_2 \\ 0 & \sin \omega_2 & \cos \omega_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi_2 & 0 & \sin \phi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_2 & 0 & \cos \phi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa_2 & -\sin \kappa_2 & 0 \\ \sin \kappa_2 & \cos \kappa_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

式 2. 2. 4

式 2. 2. 4 を回転角 $(\kappa_1, \phi_1, \omega_1, \kappa_2, \phi_2, \omega_2)$ で傾きのない状態の写真 (鉛直写真、図 2. 2. 11 の波線) における xv 座標値 $(x, y)_c$ に変換すると式 2. 2. 5 が成立する。

左カメラ

$$x_{c1} = -f_1 \frac{X_{M1}}{Z_{M1}}$$

$$y_{c1} = -f_1 \frac{Y_{M1}}{Z_{M1}}$$

右カメラ

$$x_{c2} = -f_2 \frac{X_{M2}}{Z_{M2}}$$

$$y_{c2} = -f_2 \frac{Y_{M2}}{Z_{M1}}$$

式 2. 2. 5

式 2. 2. 5 により、鉛直写真の写真座標に変換された座標を用いて式 2. 2. 6 によりモデル座標値 $(X, Y, Z)_M$ が計算される。

$$\left. \begin{aligned} X_M &= \frac{x_1'}{x_1' - x_2'} \\ Y_M &= \frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) \\ Y_{M1} &= \frac{y_1'}{x_1' - x_2'}, \quad Y_{M2} = \frac{y_2'}{x_1' - x_2'} \\ Z_M &= \frac{-f}{x_1' - x_2'} \end{aligned} \right\} \text{式 2. 2. 6}$$

モデル座標値 $(X, Y, Z)_M$ と $(X, Y, Z)_G$ の間には、式 2. 2. 7 の関係式が成立する。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G = B \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega & -\sin \Omega \\ 0 & \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Phi & 0 & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos K & -\sin K & 0 \\ \sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_M + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{式 2. 2. 7}$$

撮影点の位置、回転角を算出するためには、最低 3 点の基準点が必要である。しかし、橋りょう部位寸法測定では、基準点を使用しない測定方法を目指している。そのため、あらかじめ測定算出したカメラ間距離 (B)、および図 2. 2. 15 で示すステレオカメラ方向を X 軸とする任意の地上座標系 (原点を左カメラ撮影位置 (0,0,0) とし、回転角はすべて 0 と仮定した座標系) により式 2. 2. 7 は式 2. 2. 8 となる。

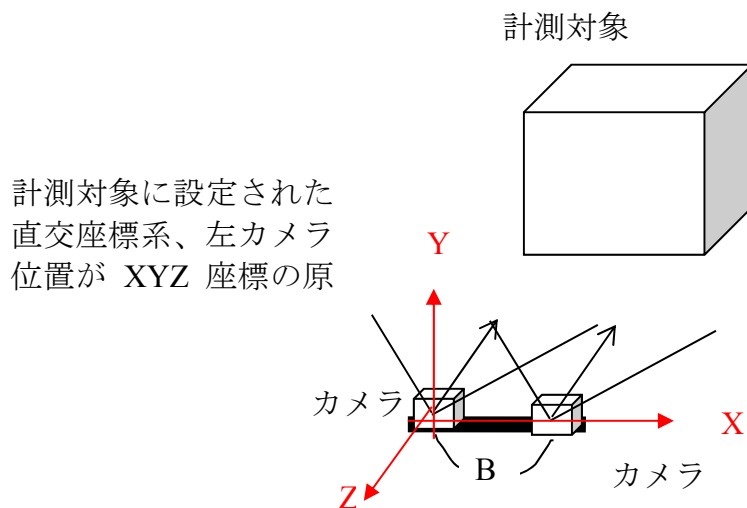


図 2. 2. 15 左カメラ任意実座標系

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G = B \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_M \quad \text{式 2. 2. 8}$$

このように、部位寸法測定が目的の場合、基準点などのターゲットを必要としないステレオ撮影方が可能となる。ステレオモデルパラメータについても2台のカメラの関係性が崩れないように強固な構造が実現できていれば、あらかじめ算出したパラメータを撮影したすべてのステレオ写真に対して適用できるため、現地で撮影したステレオ写真ごとにステレオモデルパラメータを算出する必要はない。これにより作業量の負担を軽減することが可能であり、目的の3Dモデルを作成するための部位寸法測定に専念することができる。

要求仕様を以下のようにまとめ図 2. 2. 16 のステレオ撮影装置を開発した。

- デジタルカメラの要求仕様

<ステレオカメラとして機能するための必須条件>

- ① 2台同時にシャッターを切ることができる
- ② 焦点距離などを2台同じ状態に容易に設定することができる
- ③ 2台搭載しても十分軽量である

<計測用カメラとして機能するための必須条件>

- ① 十分な解像度を持つ（撮影素子が1000万画素以上）
- ② ピントを含め焦点距離が固定できる
- ③ 絞り量を固定できる
- ④ 手ブレ防止機能を搭載しないか、あってもオフにできる

<基図作成用のカメラとしての必須条件>

- ① 焦点距離が28mm（35mmフィルム換算値）以下、あるいは撮影距離10mにおける撮影範囲が12m以上であること
- ② 外部バッテリーに繋ぐことができること
- ③ 本体重量が300g以下であること

<基図作成用のカメラとして望ましい条件>

- ① 3倍以上の光学ズーム機能を有すること
- ② GPS機能を有すること
- ③ センサ素子サイズが大きいこと
- ④ 高性能なレンズを搭載すること
- ⑤ 外部ストロボを利用できること

● ステレオ撮影装置の仕様

ステレオ撮影装置の仕様は、デジタルカメラの仕様に加え、ステレオ架台部、一脚の仕様として、つぎのことを満足したものであることが要求される。

<デジタルカメラ必要条件性能仕様>

- ① 2台同時シャッターリリースが本体改造、あるいは付属品対応で可能であること
- ② 焦点距離が 24mm (35mm フィルム換算値で) 以下、あるいは撮影距離 10m における撮影範囲が 12m 以上であること
- ③ ピント無限大での撮影が可能であること (マニュアルフォーカス機能)
- ④ 撮像素子センサが 1/1.7 型より大きく、かつ有効画素数が 1000 万画素以上であること
- ⑤ 外部バッテリーが利用可能なカメラの構造であること (これは作業効率上、重要)

<ステレオ架台必要条件>

- ① 2台のカメラを、30cm 以上の間隔で取り付け可能であること。(ステレオ架台部)
- ② 2台のカメラを、しっかりと固定できる構造であること。(ステレオ架台部)
- ③ 自由雲台があること。(一脚の仕様)
- ④ 軽量であること (カメラなどを含む重量は 1.5kg 以下)。

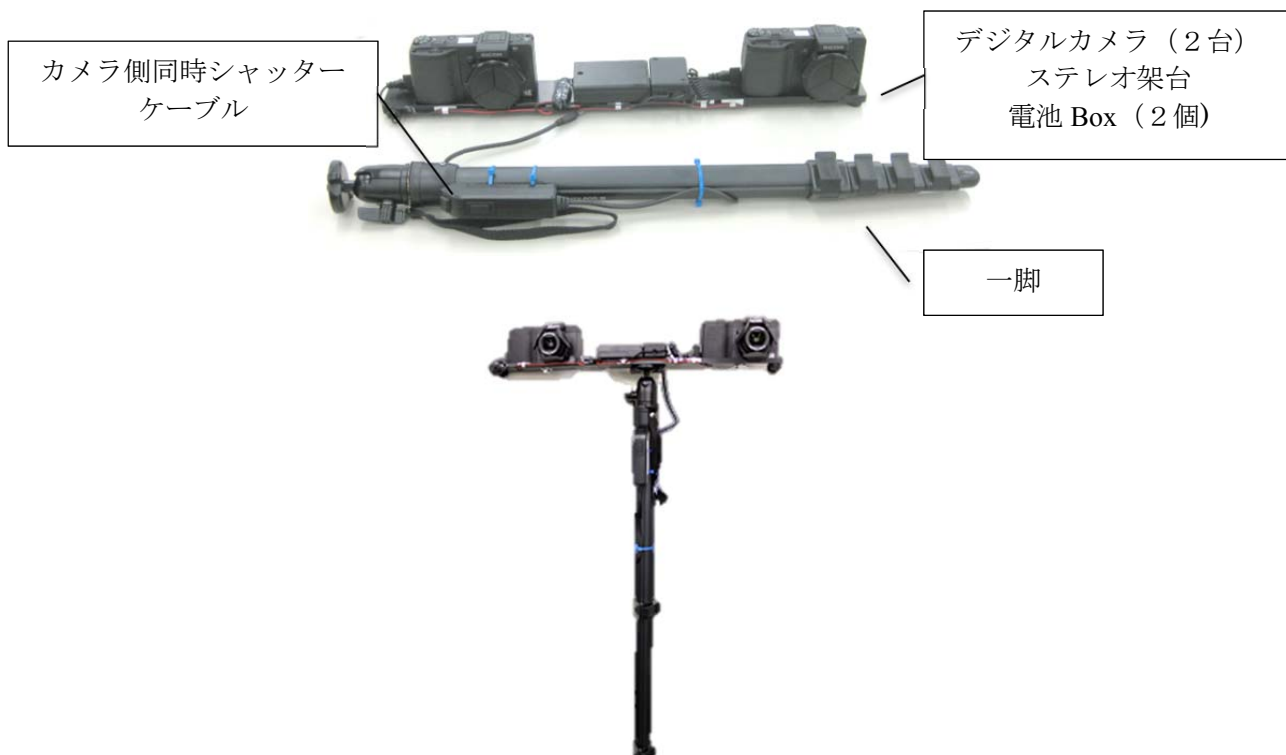


図 2. 2. 16 ステレオ計測装置

つぎにステレオ計測装置を用いた橋りょう各部位の簡便な寸法測定方法、さらに測定値から正確な橋りょう 3D モデルの構築方法などについて述べる。橋りょう構造の部位寸法測定は、図 2. 2. 17 に示す手順で撮影写真の表示、測定位置選定、寸法測定などの処理を行っている。

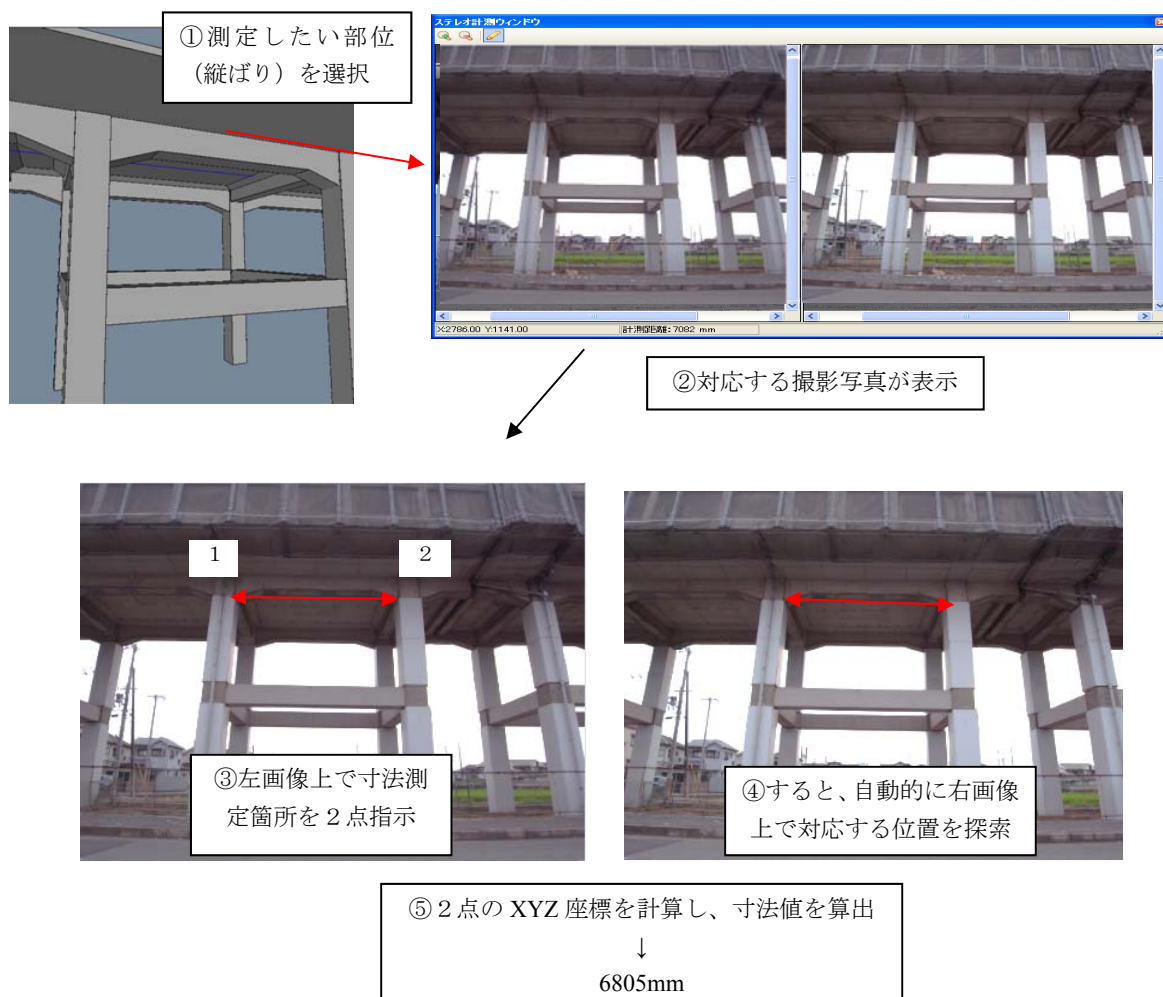


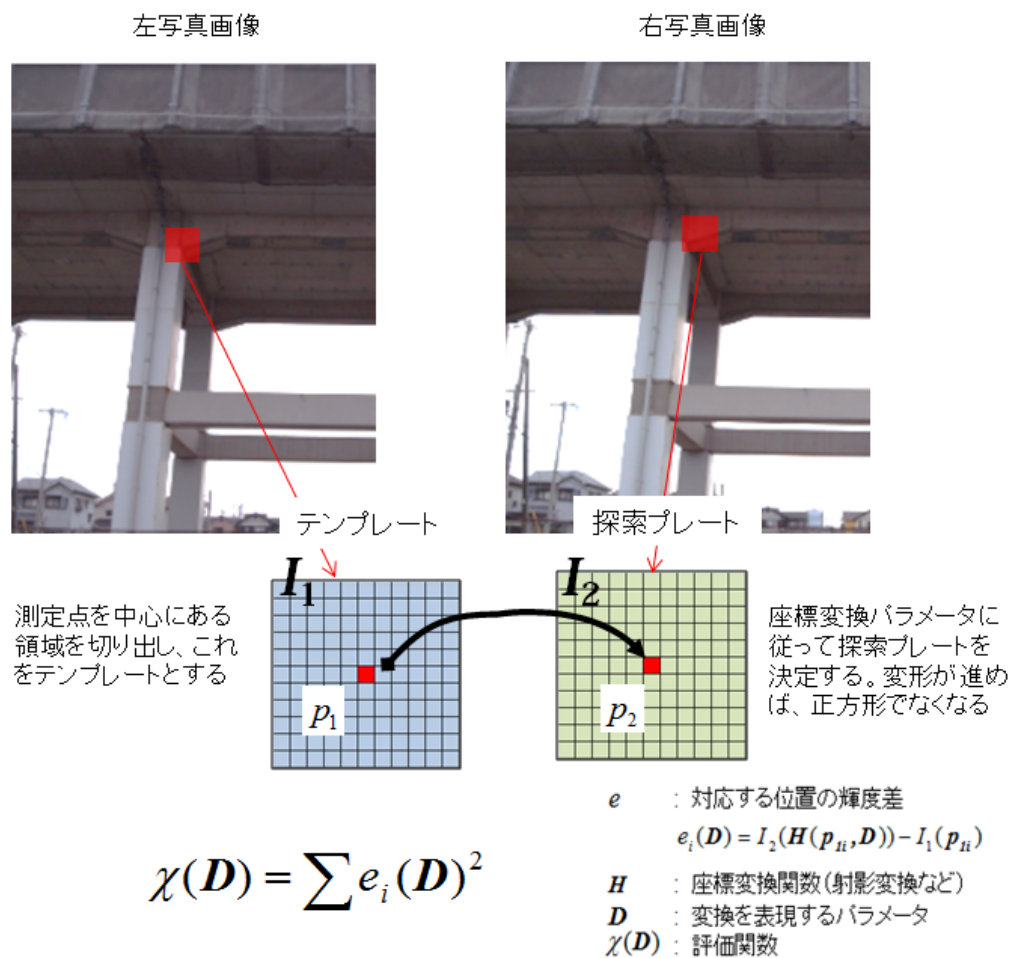
図 2. 2. 17 部位寸法測定の自動処理フロー

左画像上で選定した点 (1, 2) に対応する右画像上の点は、図 2. 2. 18 に示す最小 2 乗マッチング処理により決定される。処理手順はつぎのように行う。

- ① まず、座標変換パラメータの近似値を設定する。 $a=1$, $b=0$, $c=0$, $d=0$, $e=1$, $f=0$ とする。ここで、探索プレートの中心画素位置は、テンプレート中心画素位置と同じと考え、その位置からのズレ量を移動量 c , f とした。なお、ここでは、座標変換関数としてアフィン変換「 $x_2=a \cdot x_1+b \cdot y_1+c$ $y_2=d \cdot x_1+e \cdot y_1+f$ 」を考える。
- ② 座標変換パラメータに従って、探傷プレートの画像濃度値を求め、最小 2 乗法

により、 $x^{(D)}$ を最小にする座標変換パラメータの補正量を算出する。

- ③ 座標変換パラメータの値を $a=a+\Delta a$ のように修正し、そのパラメータによる探索プレート画像濃度値を求め、最小2乗法により②と同様の計算を繰り返し行う。
- ④ 補正量 Δa , Δb , ... の値が設定値より小さくなり、かつ $x^{(D)}$ の値がひとつ前の値との差が十分小さくなったとき、マッチングが最適化されたと考え、最小2乗法の繰り返し計算を終了する。
- ⑤ 変化量は、テンプレートの中心画素座標 (X_1, Y_1) に対する探索画像上の位置をアフィン変換パラメータにより計算し、 (X_2, Y_2) を求め、 (X_1, Y_1) と (X_2, Y_2) の差分をとることで変化量 $(\Delta x, \Delta y)$ を計算する。



上式の $\chi(D)$ を最小化するように D を最適化

図2. 2. 18 対応点抽出の最小2乗マッチング処理

上述した手法を用いてステレオ計測装置における計測精度の検証を行った。装置の測定精度は、3Dモデルを作成することを目的としていることから、mm単位の高精度ではなく、部材寸法の5%以内という測定精度を目標とし、装置の携帯性を重視した。本ステレオ撮影装置を用いて、精度検証を行った結果を図2. 2. 19に示す。図2. 2. 19のプロットは測定寸法L/実寸法Loの測定誤差率を示している。撮影距離25m以内（推奨20m）で測定対象に対して斜めから撮影±30度以内（推奨±15度）で撮影すれば、標準偏差は2.3%であり、目標精度5%を確保できることが確認できた。なお、この撮影条件は、構造物の寸法を計測する際に無理なく撮影できるものである。

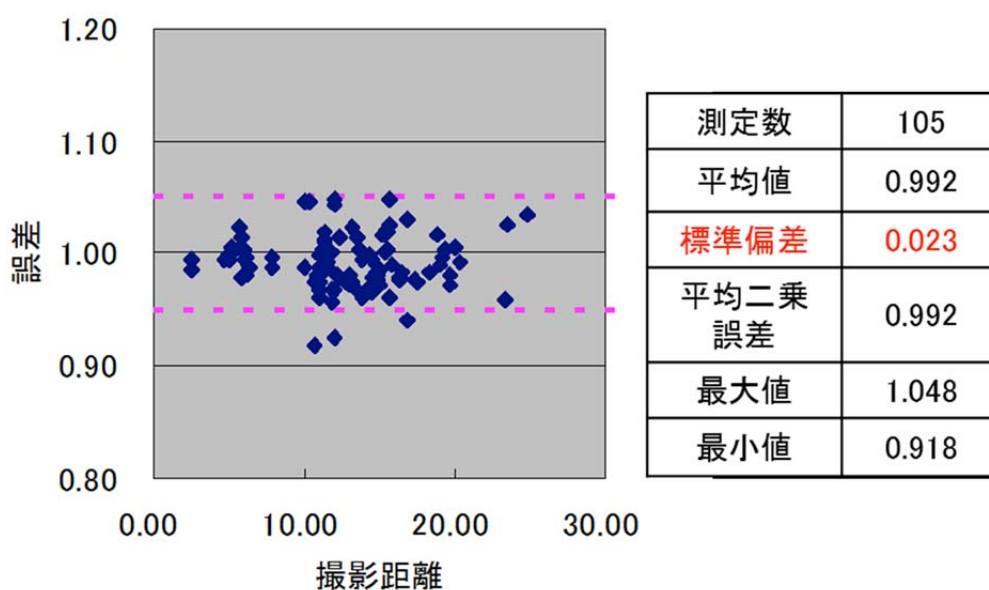


図2. 2. 19 ステレオ計測装置の計測結果

(3) バッチ処理による橋りょう3Dモデルの一括構築

さらに効率的に橋りょう3Dモデルを作成するためにバッチ処理によって一括で作成される仕組みを構築した(図2. 2. 20)。具体的には、複数橋りょうに対して構造パラメータ入力に必要な橋りょう諸元(橋りょう名、構造形式名、構造種別、柱本数や間隔、サイズおよび高さ、ゲルバー・背割・はね出しの端部種別と端部寸法など)が入力されたcsvファイルを読み込むことで(表2. 2. 2)、標準的な橋りょう3Dモデルを一括で作成することができる。本処理は、構造寸法がパターン化された橋りょう構造物に適用可能である。

橋梁名	橋梁コード	セット番号	路線名	起点方	終点方	距離	構造形式名	構造種別	詳細種別	柱本数	線路進行方向	線路直交方向	起点方	終点方	層数	柱サイズ	柱間隔	張り出し長さ	
吉方駅 高架橋BL_C1	11120920	1	山陽本線	橋部	鳥取	230	636 コンクリート 単1桁	13	230	7970									
吉方駅 高架橋BL_C2	11120920	2	山陽本線	橋部	鳥取	230	645 コンクリート 単1桁	13	230	8950									
吉方駅 高架橋BL_R1	11120920	3	山陽本線	橋部	鳥取	230	669 ラーメン高架橋	31	410	4	2	2	700	700	7000	8+8	3500	675	675
吉方駅 高架橋BL_C3	11120920	4	山陽本線	橋部	鳥取	230	677 コンクリート 単1桁	13	230	7980									
吉方駅 高架橋BL_C4	11120920	5	山陽本線	橋部	鳥取	230	693 ラーメン高架橋	31	410	3	2	2	700	700	3000	8+8	3500	675	675
吉方駅 高架橋BL_C4	11120920	6	山陽本線	橋部	鳥取	230	698 コンクリート 単1桁	13	230	4980									
吉方駅 高架橋BL_C5	11120920	7	山陽本線	橋部	鳥取	230	714 ラーメン高架橋	31	410	3	2	2	700	700	7000	8+8	3500	675	675
吉方駅 高架橋BL_C5	11120920	8	山陽本線	橋部	鳥取	230	718 コンクリート 単1桁	13	230	3080									
吉方駅 高架橋BL_R4	11120920	9	山陽本線	橋部	鳥取	230	726 ラーメン高架橋	31	410	2	2	2	700	700	7000		3500	675	675
立川駅 高架橋BL_C7	11120910	15	山陽本線	橋部	鳥取	229	541 ラーメン高架橋	31	410	4	2	2	700	700	7500	8+8	3500	600	600
立川駅 高架橋BL_C8	11120910	16	山陽本線	橋部	鳥取	230	565 コンクリート 単1桁	13	230	7980									
立川駅 高架橋BL_C8	11120910	17	山陽本線	橋部	鳥取	230	574 ラーメン高架橋	31	410	4	2	2	700	700	7500	8+8	3500	600	600
立川駅 高架橋BL_C10	11120910	18	山陽本線	橋部	鳥取	230	588 コンクリート 単1桁	13	230	7980									

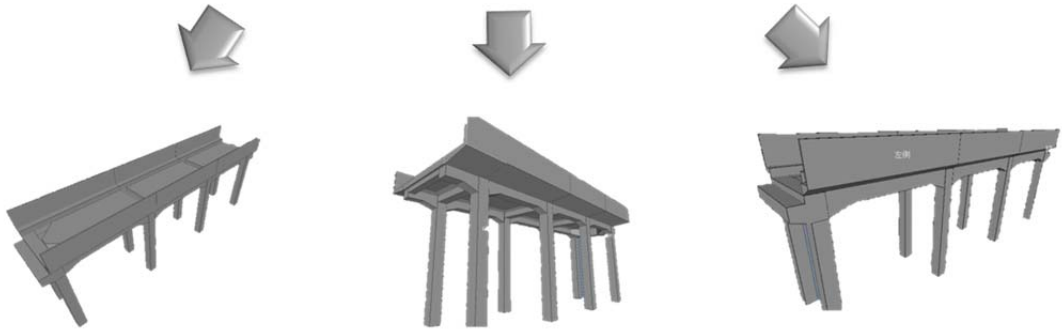


図 2. 2. 20 3D モデルの一括作成

表 2. 2. 2 CSV ファイルの入力項目

桁橋の場合		ラーメン高架橋の場合	
バッチ処理	条件	バッチ処理	条件
CSV項目		CSV項目	
調査年月日	※	調査年月日	※
調査者	※	調査者	※
橋梁名 ^{※1}	◎	橋梁名	◎
橋梁コード	◎	橋梁コード	◎
セット番号	◎	セット番号	◎
路線名	※	路線名	※
起点方駅名	◎	起点方駅名	◎
終点方駅名	◎	終点方駅名	◎
軒程 (km) ^{※4}	◎	軒程 (km)	◎
軒程 (m) ^{※4}	◎	軒程 (m)	◎
構造形式名	◎	構造形式名	◎
構造種別	◎	構造種別	◎
詳細種別	◎	詳細種別	◎
桁長	◎	線路方向柱数	※
面・主桁数 ^{※2} (片側)	※	線路直交方向柱数	※
角度 ^{※3}	※	起点方端部種別	※
		終点方端部種別	※
		中間ばり層数	※
		柱サイズ(W)	※
		柱サイズ(D)	※
		柱高さ	※
		柱間隔 (進行方向)	※
		柱間隔 (直交方向)	※
		張り出し長さ (左)	※
		張り出し長さ (右)	※

バッチ処理を用いることによる省力化の評価を行った（表2. 2. 3）。対話的に1橋梁（1連）ずつ橋りょう3Dモデルを作成した場合を100とした場合、バッチ処理による作業は、その内、最低でも70の作業を補うことができる。すなわち、これまで3Dモデル作成に100の作業が必要だったものが30の作業で3Dモデルを作成できることを示している（表2. 2. 3）。バッチ処理用の断面パラメータの充実を図ることですらなる効率化が可能になるものと考えている。

表2. 2. 3 バッチ処理による効果評価

構造種別	バッチ処理 基図作成	異なる点	BBMAPS 部材修正後
ラーメン高架橋	95%	・地上部(G.L.)からの柱高	100%
桁橋：コンクリート単T桁（ゲルバー桁）	100%	特になし	100%
桁橋：コンクリート単版桁（スラブ桁）	90%	・高欄高さ：1600mm ・中央ハンチ部寸法 ・左右非対称箇所	100%
桁橋：箱形桁	90%	・中央ハンチ部寸法 ・左右非対称箇所	100%
桁橋：T形桁	90%	・中央ハンチ部、横げた寸法とその位置 ・左右非対称箇所	100%
桁橋：I形桁	70%	・桁高 ・主げた断面形状の足部、横げた寸法とその位置 ・左右非対称箇所	100%

※標準設計図面に対しての完成度を%で記載

※異形構造（ラーメン高架橋：斜角・バチ型、桁橋：角度付き）などは、残部分から除外

※BBMAPS 部材修正は、設計図面や現地ステレオ撮影による寸法値変更を行うこと指す

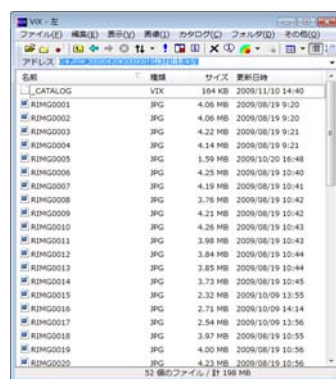
2. 2. 2 写真管理

維持管理業務では、図面管理と併せて現場で撮影した写真も管理することになる。一度、現場作業で膨大な写真を撮影するために撮影写真の管理が煩雑となってしまい、過去のデータを検索することが困難な状況になることも少なくない。構造物の測定や点検においては、撮影写真がどの部位をどの位置から撮影したものであるかを管理できなければその写真は効力を持たない。しかしながら、撮影した構造物の部位について撮影位置を対応づけて管理することは非常に面倒な作業であり、それぞれの撮影写真の位置関係を把握することはさらに困難となる。

そこで、本研究では、構造物と撮影写真の位置関係を視覚的に把握できるようにするため、3Dモデル空間上に撮影した写真が配置される仕組みを構築した。

(1) 従来法の写真画像管理

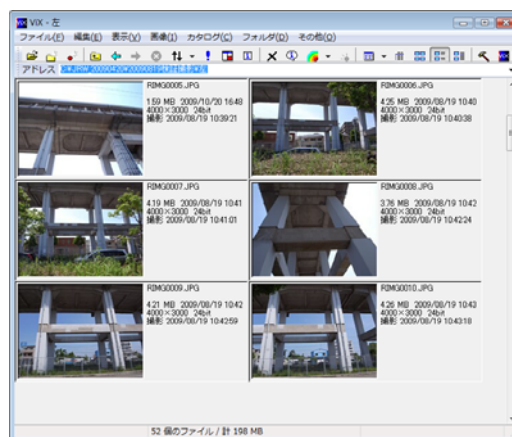
従来、撮影した写真画像を管理するソフトウェアは、図2. 2. 21に示すリスト形式、カタログ（あるいはサムネイル）形式などの画像管理方法が一般的である。



(a) リスト形式の一例



(b) カタログ形式の一例



(c) リスト・カタログ複合形式の一例

図2. 2. 21 画像管理の一例 (2. 11)

また、最近では図 2. 2. 22 に示すような方法で、撮影写真の位置や方向などを GIS に配置して管理する試みも行われている。

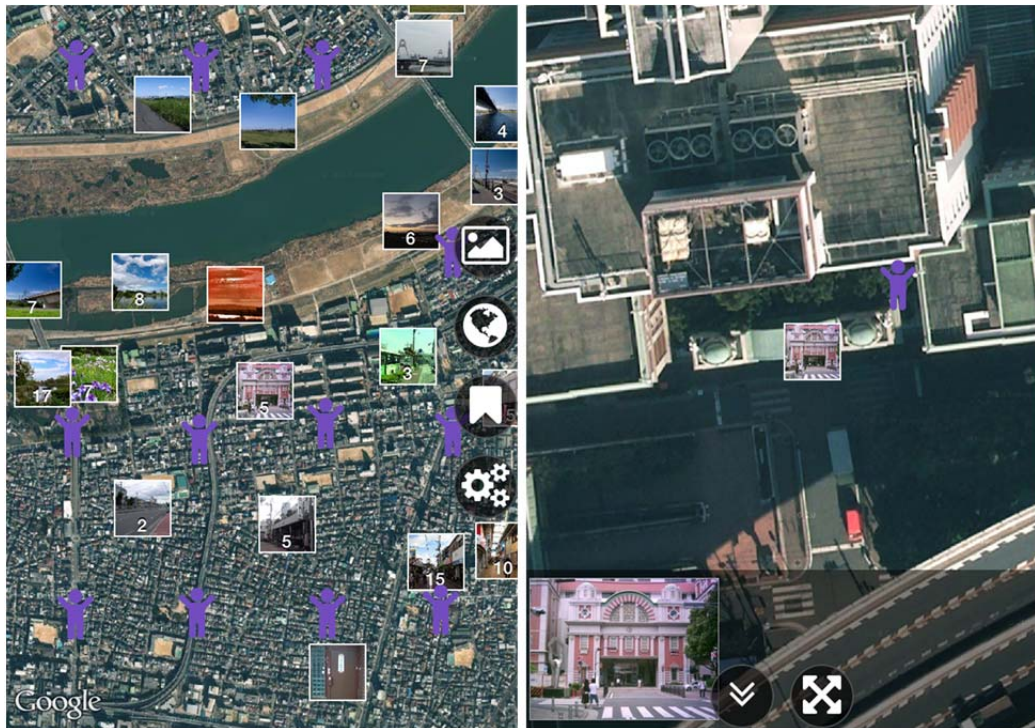


図 2. 2. 22 Google Earth を用いた写真管理 (2. 12)

(2) 提案画像管理方法

前述の画像管理方法には以下の課題がある。

リスト・カタログ管理形式では、

- ① 撮影箇所の空間的な位置関係が把握できない。
- ② 対象構造物からの画像検索ができない (ファイル名など属性情報の検索のみ)。
- ③ 撮影順の管理は可能であるが、対象構造物を撮影した時系列管理はできない。

また、GoogleEarth 管理形式では、

- ① 3次元空間的な配置は可能であるが、対象が地形であるため、上空から地盤面に向けた俯瞰的・鳥瞰的な視点での撮影画像の管理が中心であり、橋りょう構造物を下から上向きの仰瞰的な視点での撮影画像の管理が難しい。
- ② 画像ビューアが主目的であるため、各写真画像の管理であり、ステレオとしての (2枚1組とした) 画像管理はできない。

以上のようなこれまでの画像管理の課題を解決するため、本研究では新しい画像管理方法を提案した。

橋りょう構造物ごとに撮影された写真について、対象橋りょうを径間や柱間などの区間分割した箇所ドラッグ&ドロップすることで容易に3次元空間上に配置することを可能とした(図2.2.23)。しかしながら、この時点では、概略的な配置であるが、橋りょう3Dモデルと撮影画像の対応づけを行うことで正確な配置ができる。

具体的には、3Dモデルと撮影写真の両者に対して、部材端部など特徴的な点を最低4点(最高8点)指示することで、撮影したカメラ情報をもとに撮影位置と撮影方向が正確に求められ、3D空間上に正確に配置することができる。この際、レンズひずみなどを除去することにより、3Dモデルと撮影写真をマッチングさせることができる(図2.2.24)。

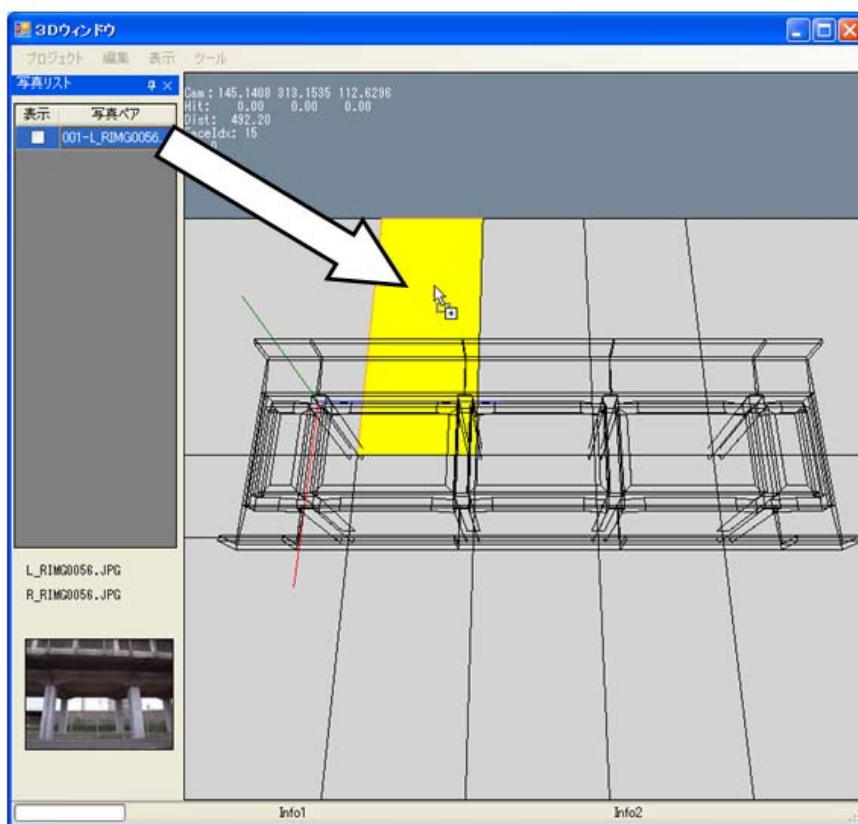


図2.2.23 3D空間方式画像管理方法

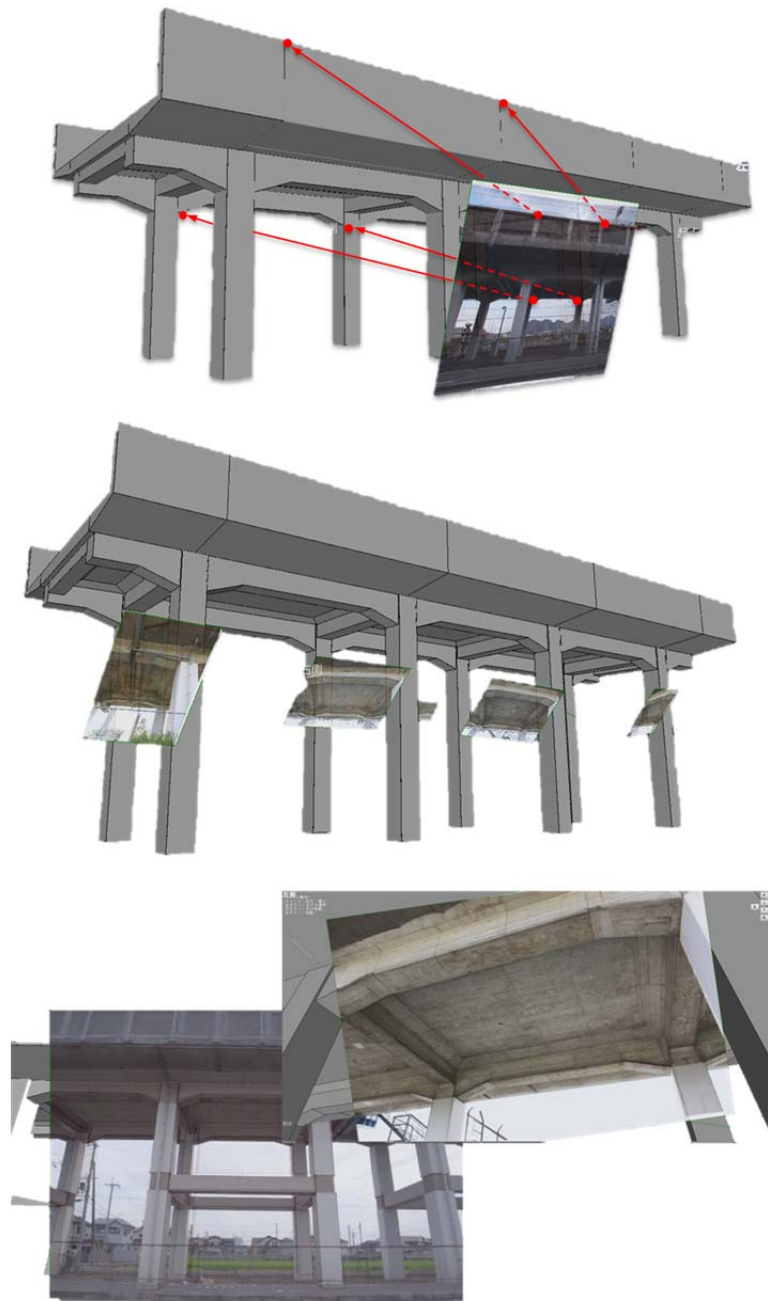


図2. 2. 24 3D空間上に配置された撮影画像

この3D空間の写真配置については、単写真標定という手法を用いている。単写真標定とは、1枚の写真の中に写された3点以上の基準点に成り立つ共線条件を用いて、写真を撮影したカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) およびカメラの傾き (ω, ϕ, κ) を求め (これを空間後方交会という)、写真座標系 xy と地上座標系 XYZ の間を確立するものである。空間後方交会によって投影中心から写真上の3点のそれぞれを結ぶ3本の線 (三脚のようなもの。線束という) が実物上の対応する3点を通るような線束の置き方 (位置と傾き) はただ1つしかないことがわかっている (図2. 2. 25)。この法則を用いれば、内部標定要素が既知の写真であれば、座標既知の3点が写真に写っ

ているとき、投影中心とそれらの点の像を結ぶ線（共線という）が既知点を通るようにすれば、写真の撮影したときの状態（位置、傾き）が再現できる。地上座標の3点またはそれ以上の座標既知点が写真上に写っていれば、それらの像の写真座標を測ることによって外部標定要素が決定できる。

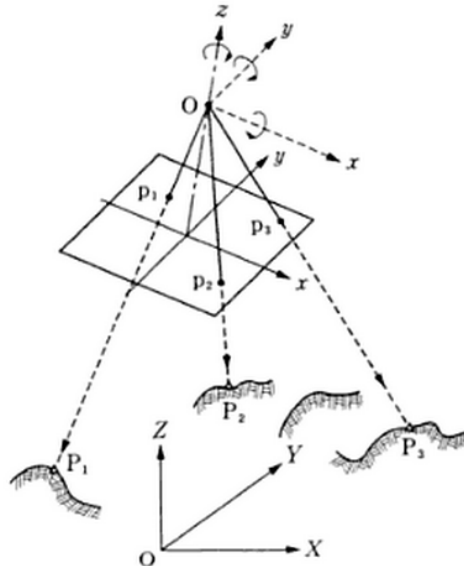


図 2. 2. 25 後方交会法と外部標定

既知点が3点以上必要である理論については以下に記載する。

また、共線条件式 (collinearity equations) は、つぎの2つの方法で求められる。

地上座標系で求める場合

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_1x + a_2y - a_3c}{a_7x + a_8y - a_9c} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_4x + a_5y - a_6c}{a_7x + a_8y - a_9c} \end{aligned} \right\} \text{式 2. 2. 9}$$

上式 2. 2. 9 は、被写体の3次元座標 (X, Y, Z) は、写真座標 (x, y) のみからは求められないことを示している。特殊な条件の時、たとえば Z が一定値（平野や水面など）の時か、Z が既知のとき、X、Y を求めることができる（式 2. 2. 10）。

カメラ座標系で求める場合

$$\left. \begin{aligned} x &= -c \frac{a_1(X - X_0) + a_4(Y - Y_0) + a_7(Z - Z_0)}{a_7(X - X_0) + a_8(Y - Y_0) + a_9(Z - Z_0)} \\ y &= -c \frac{a_2(X - X_0) + a_5(Y - Y_0) + a_8(Z - Z_0)}{a_7(X - X_0) + a_8(Y - Y_0) + a_9(Z - Z_0)} \end{aligned} \right\} \text{式 2. 2. 10}$$

ここで、

$$R = R_{\omega}^{-1} R_{\varphi}^{-1} R_{\kappa}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos \varphi \cos \kappa, & a_2 &= -\cos \varphi \sin \kappa, \\ a_4 &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa, & a_5 &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa, \\ a_7 &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa, & a_8 &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa, \\ a_3 &= \sin \varphi \\ a_6 &= -\sin \omega \cos \varphi \\ a_9 &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned} \quad (7.12)$$

式 2. 2. 11

単写真標定で与えられる条件は、上式 2. 2. 11 で表現される共線条件のみである。与件は、焦点距離 c 、3 点以上の基準点の地上座標 (X, Y, Z) および対応する写真座標 (x, y) である。未知変量は (X_0, Y_0, Z_0) 、 $(\omega, \varphi, \kappa)$ の 6 変量（外部標定要素）である。1 枚の写真内で n 個の基準点を観測したとする。未知数は外部標定要素（6 変数）となり、 $2n$ 個の独立した方程式が得られる。ここで $n \geq 3$ ならば外部標定要素を求めることができる。これを単写真標定の空間後方交会という。式 2. 2. 11 は未知数に対し非線形であるが、このような非線形の連立方程式から未知変量を求める場合には、未知変量の近似値（初期近似値）を与え、近似値のまわりにテーラー展開して線形化し、最小 2 乗法により補正量を求めて近似値を補正し、再び同様の操作を繰り返して収束解を求めることができる（逐次近似解法という）。上述したように理論上は、3 点の既知座標があれば収束解を求めることができるが、本研究では、収束解を安定させるために最低 4 点（8 点であればより高精度となる）の既知座標を用いることにしている。

新しい画像管理方法により、つぎのことが可能となった。

- ① 3次元空間上の自由な位置に撮影写真を配置できる。すなわち、橋りょう構造物を下から上向きに撮影した画像の管理が可能となる。
- ② ステレオとしての画像管理ができ、その写真を用いた測定（距離・角度・面積など）ができる。
- ③ 複数枚の撮影写真の空間的な位置関係が把握できる。
- ④ 対象構造物からの画像検索が可能となる。そのため、対象構造物を撮影した時系列管理ができる。

これにより、別日あるいは別の作業者が撮影した写真であっても写真同士の位置関係が容易に把握・管理できるようになった。また、現場で撮影してきた写真が一元的に管理できるだけでなく、撮影してきた写真を効率的に活用できる仕組みが構築できた。

2. 3 検査・工事履歴管理

「予防保全管理」を実現するためには、構造物の腐食や劣化などの経年変化をいち早く把握し、さらには、最も費用対効果の高い修繕計画を策定し、検査・工事の内容を時系列でわかりやすく把握しておく必要がある。また、優先的に修繕すべき箇所を把握するためには、その進行具合（健全度）を的確に評価する必要がある。そのためには、検査・工事箇所の位置や数量を正確に記録しなければならない。

そこで本研究では、前節で述べた3D空間上に配置させた撮影写真を活用した記録方法を検討した。前節の画像管理手法をベースに発展させると、対象橋りょうを撮影した複数枚の撮影画像を時系列で、かつ橋りょう構造部位で管理することにより変状箇所の経年変化管理が実現できるのではないかと考えた（図2. 3. 1）。

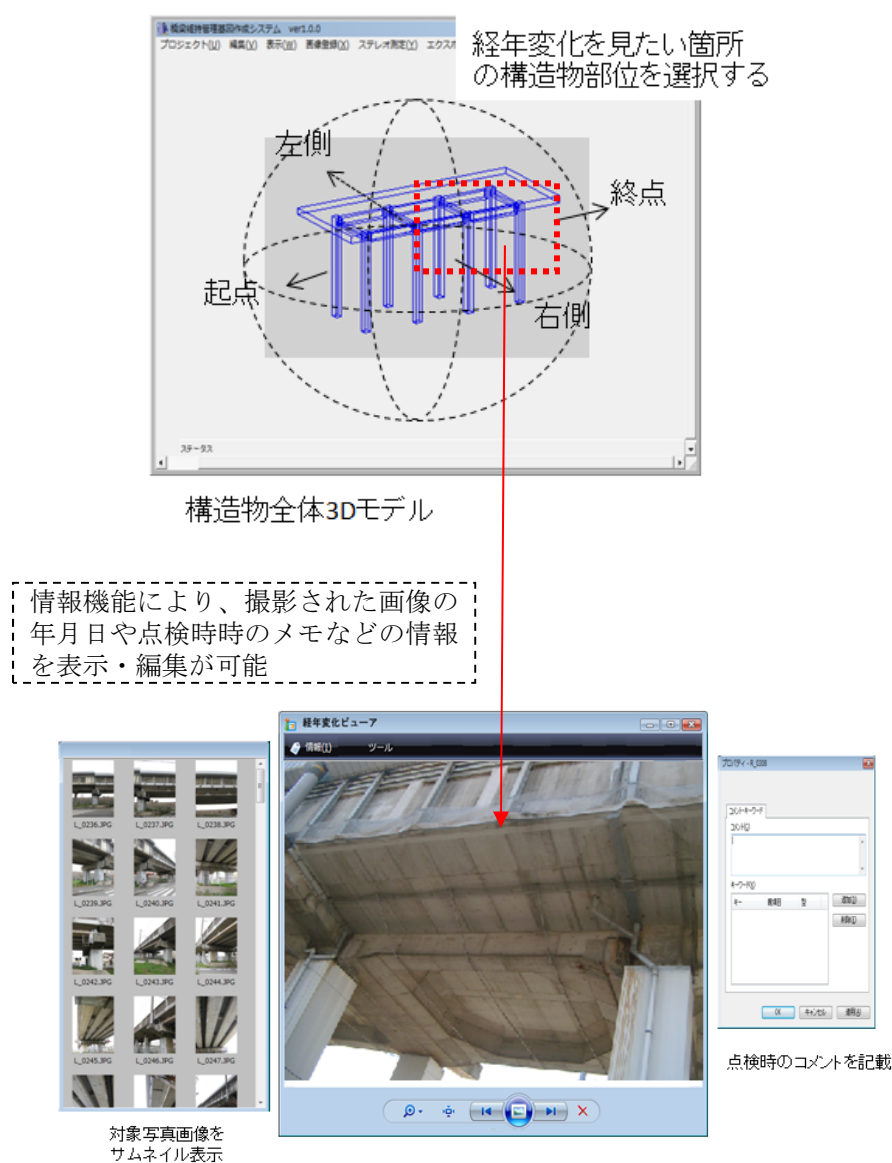


図2. 3. 1 経年変化履歴管理のイメージ

3Dモデルと撮影写真の両者に対して、部材端部など特徴的な点を最低4点（最高8点）指示することで、撮影したカメラ情報をもとに撮影位置と撮影方向が正確に求められ、3D空間上に配置されることは前節で説明した。その結果、写真上の点pが示す3D空間上の視線ベクトルが一義的に決定される。その視線ベクトルと橋りょう3Dモデルが交差する面上の点Pを計算することで、変状・補修図形のXYZ値が計算される（図2.3.2、図2.3.3）。その結果、橋りょう3Dモデルと撮影写真が一致した状態になる（図2.3.4）。言い換えれば、撮影写真に3Dモデルのもつ実寸法が与えられることになる。その結果、変状や補修箇所を単写真で撮影し、写真上の変状（目視調査であればチョーキング範囲）や補修箇所を図形でなぞることで、3Dモデルに正確な位置および形状や数量（長さや面積）が反映される（図2.3.5）。また、個別の検査・工事図形にIDを持たせることにより、経年的な変状の進行や工事時による修繕履歴も把握することが可能となった（図2.3.6）。

2D図面による構造物の腐食や劣化、あるいは修繕履歴などを管理していく場合、実物の橋りょう構造物の3D空間構成をイメージすることが難しいだけでなく、経年変化を把握しにくいという問題が発生していた。また、検査・工事箇所の位置および数量を正確かつ安全に測定することは容易でない。たとえば、検査箇所の位置および数量を測定するためには、高所作業車などにより対象箇所に接近し、スケールを用いて測定することとなる。しかし、このような測定方法は準備作業が多く作業負担が大きい。本手法を用いれば、3Dモデルを用いて検査・工事箇所が視覚的かつ容易に把握することができる。さらに、正確で安全な点検位置・数量（長さや面積）の測定が可能となる。

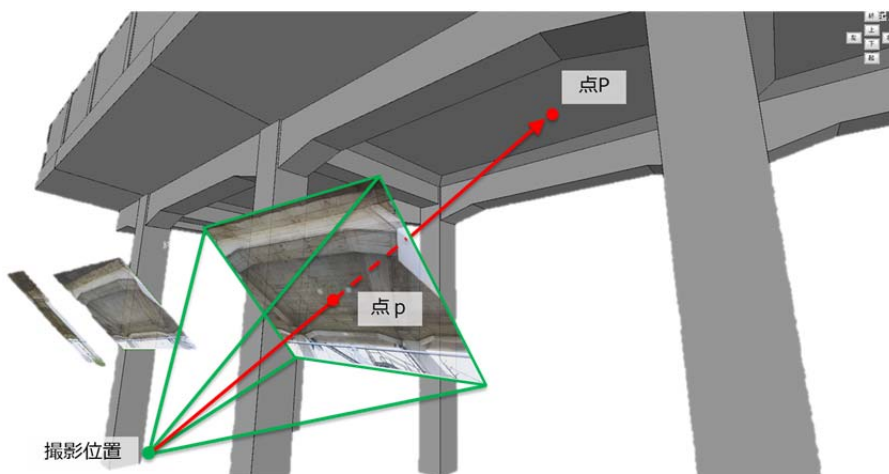
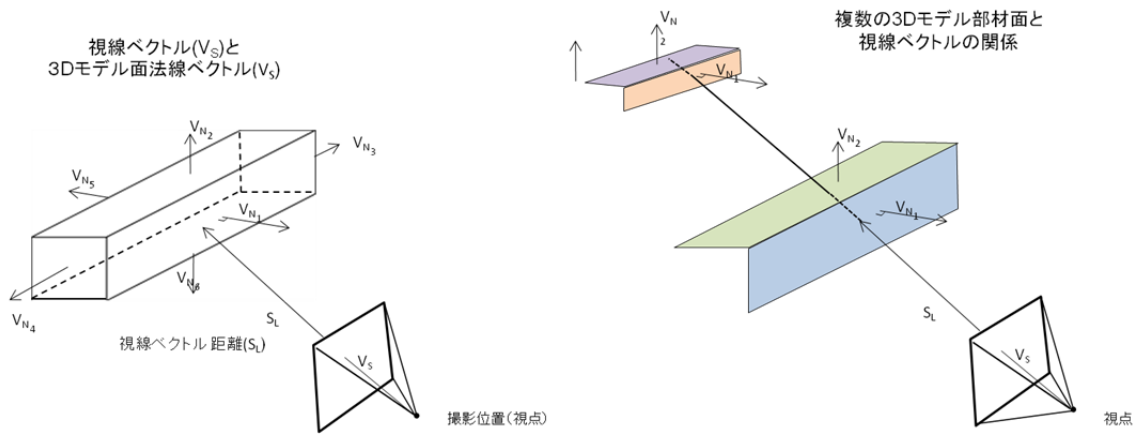
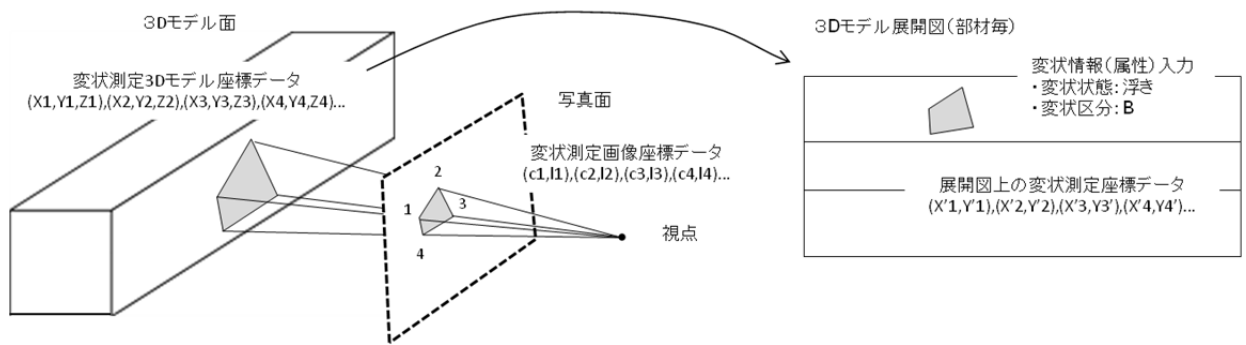


図2.3.2 撮影写真の3D空間配置（1）



(a)視線ベクトルと面法線ベクトルの関係



(b)画像座標から3Dモデル座標座標への変換

図 2. 3. 3 写真画像と3D橋りょうモデルとの対応関係



図 2. 3. 4 撮影写真の3D空間配置 (2)

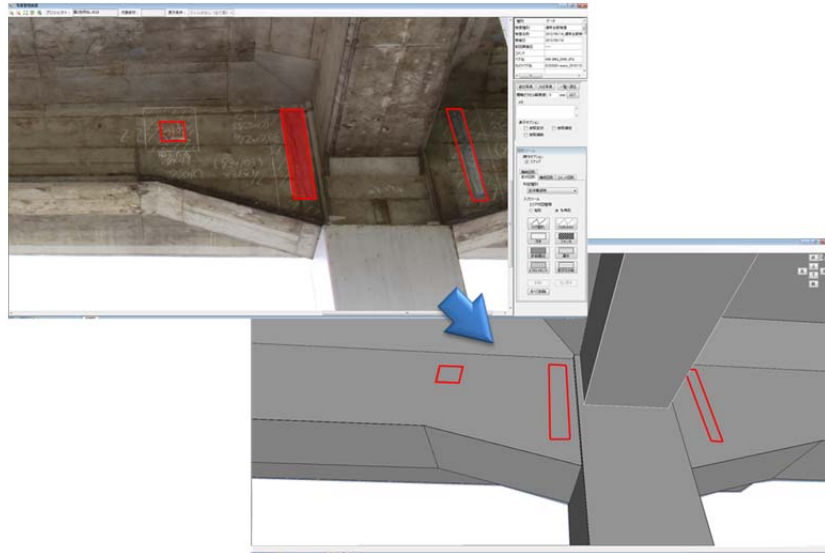


図 2. 3. 5 変状・補修図形の入力

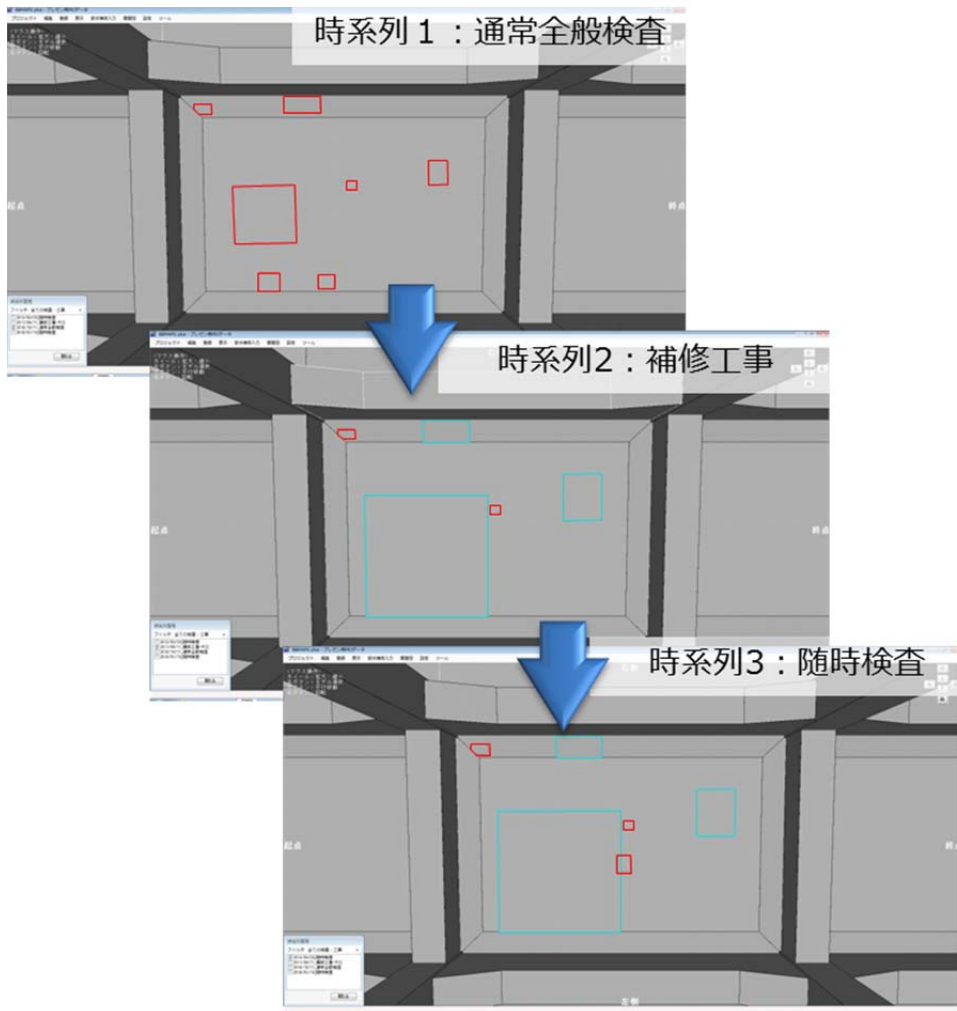


図 2. 3. 6 時系列管理

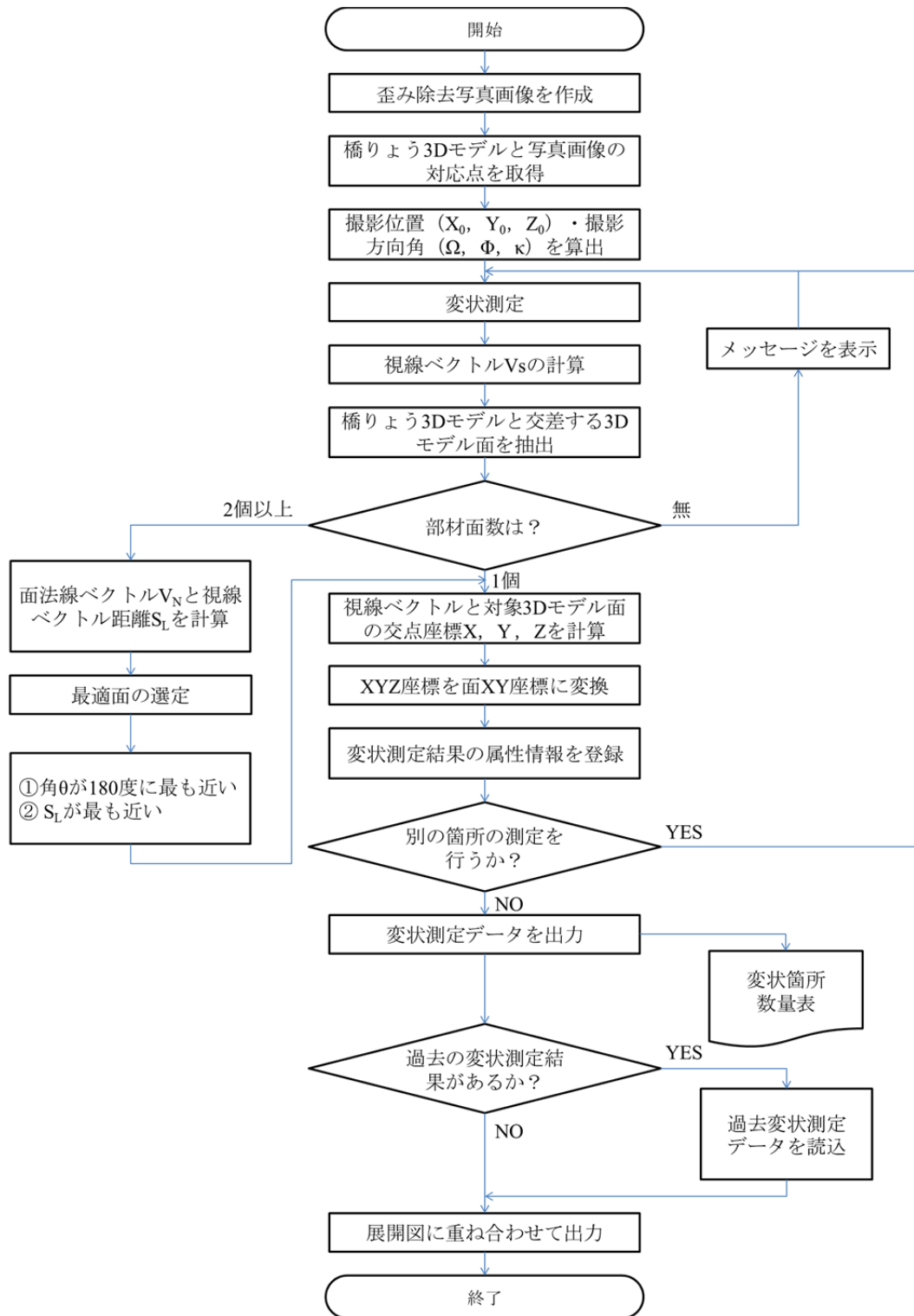


図 2. 3. 7 変状・補修管理フロー

2. 4 2D 図面の作成・出力

橋りょうのような構造物の場合、その構造が多種であり複雑なため、個々の構造物に対して展開図のような図面を作成することに多くの労力がかかっている。また、図面自体の精度についても十分に確保されていない場合もある。本研究で構築した3Dモデルを活用して2D図面（展開図）や数量が自動的に出力される手法を検討した。

先述したように橋りょう3DモデルはXファイルで管理している。とくにラーメン高架橋は、柱、縦梁、横梁、床版、張出しなどの各種部材から構成され橋りょう構造を形成している。そのため、橋りょう3Dモデルを構成する各部材の3Dモデルについてすべての面を展開するのではなく、他の部材と接している面（外部から見えない面）は展開しないよう考慮する必要があり、展開図を自動的に変換することができない。そこで、作成した3D橋りょうモデルデータには、各部位ごとに展開図として個々の部材の位置や隣接関係を考慮し、展開するときの順番や展開する面の属性を持たせることとした（図2. 4. 1）。展開図への出力フローを図2. 4. 2に示す。その結果、各部位個別に展開され、あらかじめ設定しておいた場所へ配置することが可能となった。

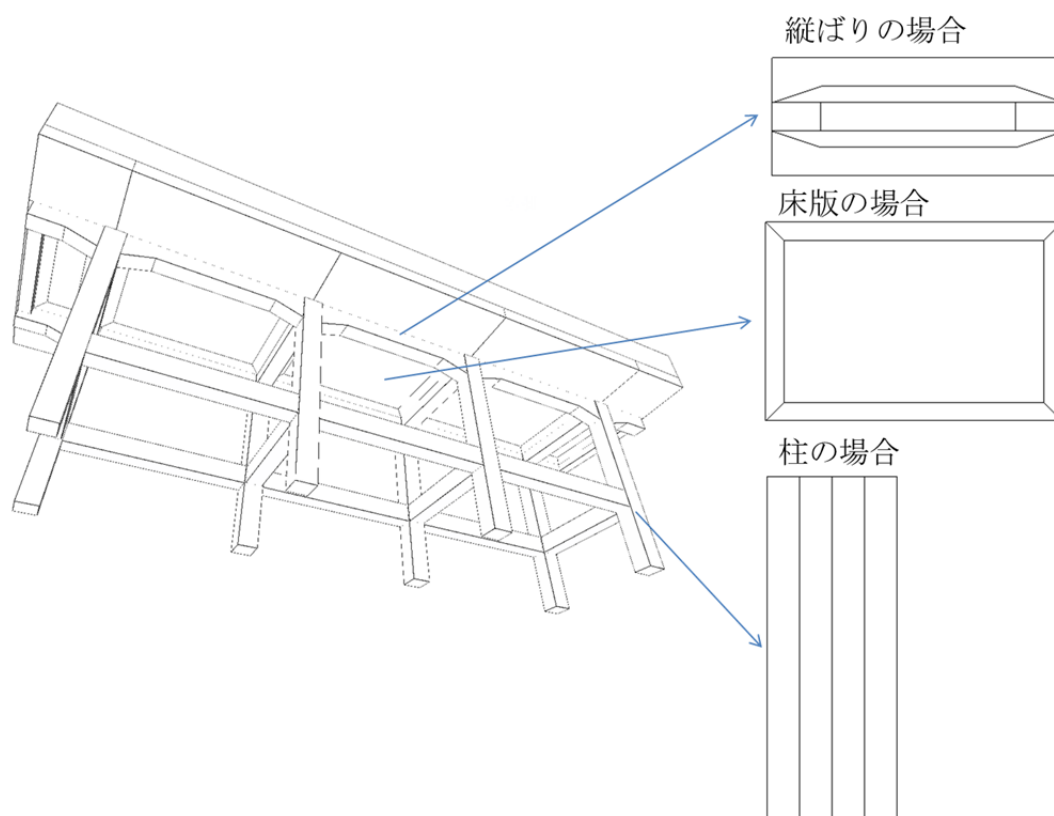


図2. 4. 1 3D橋りょうモデルから展開図出力

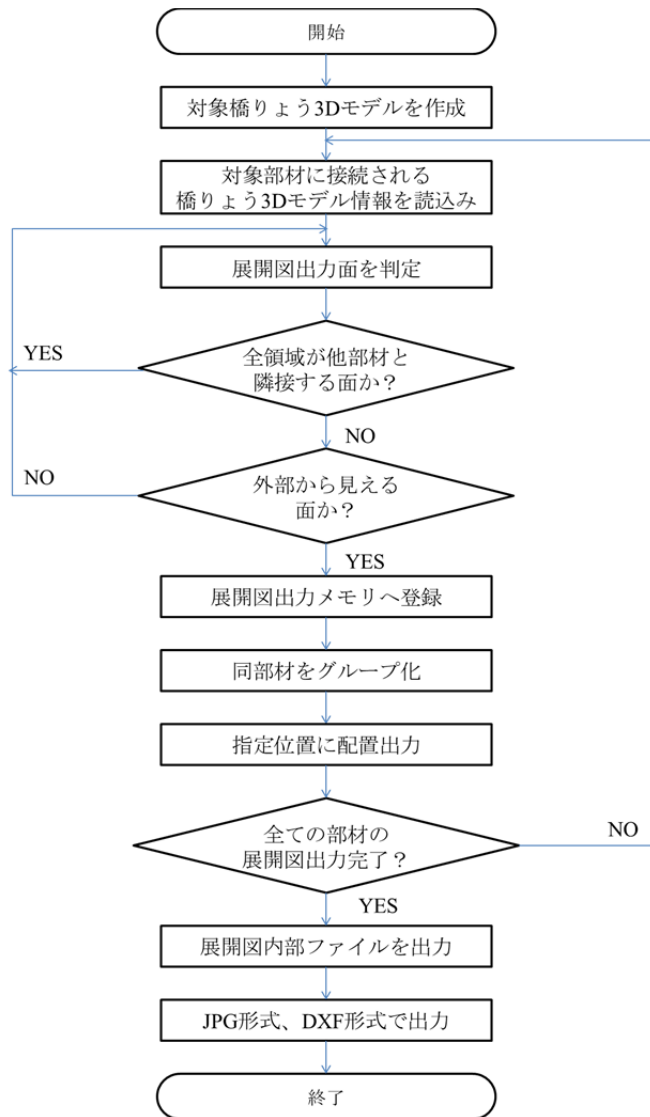


図2. 4. 2 展開図出力フロー

本手法を用いれば構造パラメータを変更するだけで3Dモデルが作成され、その形状を反映した2D図面（展開図）が自動的に出力できるため、どんな複雑な構造でも瞬時にかつ高精度に出力することが可能となる。さらには、構造の形状だけでなく、3Dモデルに表現されている点検・補修箇所についても位置および形状や数量も正確に出力することができる。

本来、3Dモデルさえあれば検査・工事の記録を参照するうえで十分である。しかしながら、ユーザの利便性を低下させないためにも、現状の管理の仕方をなるべく変えないことも考慮する必要があると考えている。そのため、すべて3Dモデルで管理することに置き換えてしまうよりも、見慣れた2D図面（展開図）に出力できるようにしておくことは、現時点では必要であると考えている。

2. 5 3Dモデルを活用した維持管理システム開発

先述したシステムを開発した。システムの構成、ER 図、テーブル・フィールド一覧を示す（図 2. 5. 1、図 2. 5. 2、図 2. 5. 3）。

橋りょう維持管理 DB は、記憶部に記憶されるデータベースであり、プロジェクト情報テーブルと、ステレオカメラ情報テーブルと、カメラ情報テーブルとを含んでいる。プロジェクト情報テーブルは「ID」、「プロジェクト名」、「予定入力者」などのプロジェクト情報を格納するためのテーブルである。ステレオカメラ情報テーブルは、「ID」、「カメラペア」、「撮影方式」などのステレオカメラ情報を格納するためのテーブルである。カメラ情報テーブルは「ID」、「カメラ名」、「焦点距離」などのカメラ情報を格納するためのテーブルである。プロジェクト情報テーブルのカメラペア ID は、ステレオカメラテーブルのカメラペア名に対応づけされており、ステレオカメラ情報テーブルの左カメラ ID および右カメラ ID は、カメラ情報テーブルのカメラ名に対応づけされている。

まず、プロジェクト情報ファイルにプロジェクトデータが設定されると、そのプロジェクトデータはプロジェクト情報テーブルにも格納される（更新時も同様）。プロジェクトデータに設定された橋りょう構造および構造パラメータは、橋りょう 3D モデル情報ファイルに記述される。3D モデルデータフォルダは、橋りょう 3D モデル情報ファイルに記述されている橋りょう 3D モデルを構成する各部材の 3D モデルデータ用のフォルダである。ステレオ計測装置や図面などによる部材寸法が修正されると、3D モデルデータフォルダ内の部材寸法値が更新される。展開図用内部ファイルは橋りょう 3D モデル情報に基づいて展開図出力用に作成される内部ファイルである。この内部ファイルに基づいて jpg 形式や dxf 形式などの展開図ファイルが出力される。ステレオ写真情報ファイルにはステレオ写真情報（たとえば、ステレオペア毎にペアの画像ファイル名、3D 空間に配置した時の対応点情報、撮影位置情報など）が記述される。写真画像は、左写真画像データフォルダ「L」と右写真画像データフォルダ「R」に格納される。

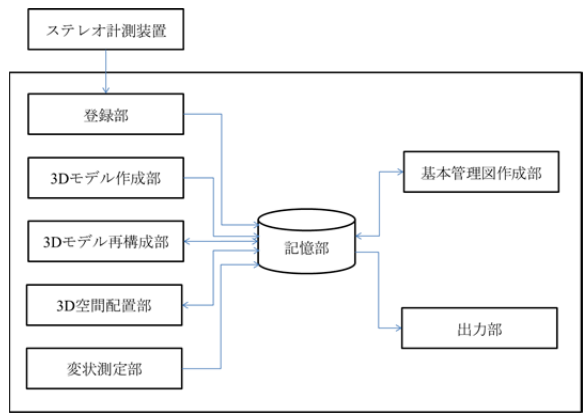


図 2. 5. 1 システム構成

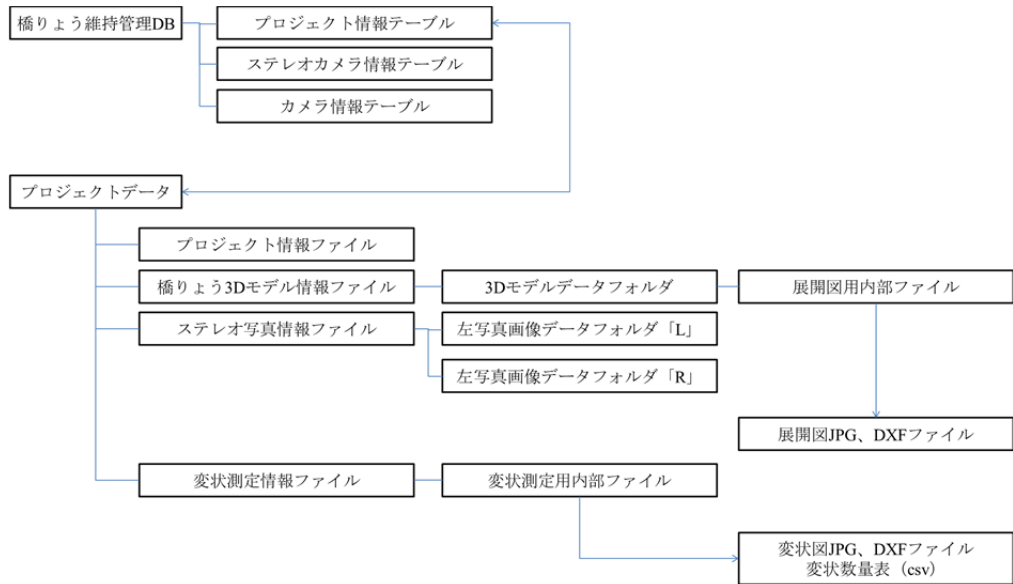


図 2. 5. 2 ER 図

プロジェクト情報テーブル	ステレオカメラ情報テーブル	カメラ情報テーブル
ID プロジェクト名 予定入力者 入力者 橋梁名 橋梁コード セットコード 撮影作業予定日 撮影作業日 キロ程KM キロ程M 構造タイプNo カメラペアID 起点端部タイプNo 終点端部タイプNo 登録日時 フォルダ名 状態 プロジェクトフォルダ 橋梁形式名 路線名 起点方駅名 終点方駅名 構造種別コード 詳細種別コード 径間数 総径間長	ID カメラペア名 撮影方式 左カメラID 右カメラID 基準パラメータ	ID カメラ名 シリアル番号 焦点距離 補正焦点距離 画像サイズW 画像サイズH CCD素子間隔 PPAX PPAY K1 K2 P1 P2

図 2. 5. 3 テーブル・フィールド一覧

2. 6 ICT を活用した橋りょう検査ツール

CIM を推進していくうえで3D データモデルの導入・活用にくわえ ICT を活用し、業務プロセスにおける各情報の一元化や業務改善による効率向上を図ることが重要である。前節までは主に内業（事務所作業）に重点をおいた研究・開発であるが、それに至る外業（検査業務のための現場作業）に着目する。具体的には、現地撮影および検査業務の外業を支援、ならびに現場作業から事務所作業までのスムーズなデータの引き渡しを目的として、ICT、とくにタブレット携帯端末を活用した外業作業支援について検討を行った。

2. 6. 1 現場作業に適した携帯機器に関する検討

携帯端末については、現場作業で支障なく使用できるよう、操作性、可搬性の良いタブレット端末とした。OS については、開発言語、配布(審査)、アプリケーションダウンロード数、国内外シェアの観点から Android とした（表 2. 6. 1）。

表 2. 6. 1 携帯端末の種類と比較

	Android	iOS	Windows	その他
開発マシン 開発言語 ^{※1}	Windows/MacOS X /Linux Eclipse/Java/Android SDK	MacOS X Xcode/Object-C/iOS SDK	Windows Visual Studio/C#/VB/Windows Phone SDK	
配布(審査)	GooglePlay (審査なし、フリー配布)	AppleStore (審査が厳格)	Windows Phone Store/Windows Marketplace	BlackBerry World Kindle store等
アプリケーション ダウンロード数 ^{※2}	約51% (約68億回)	約40% (約53億回)	数%	数%
世界タブレットシェア ^{※3}	56.5%	39.6%	3.7%	0.2%
国内タブレットシェア ^{※4}	46.0%	38.0%	15.7%	0.3%
端末選択肢	各社 ^{※5} より多種多様な機種 がある。	Appleに限定 (ipad)	機種は少ない	機種はほとんど少ない

※1：それぞれ公式の開発環境およびIDE、SDKを無料で提供。iOSはMacのみ、WindowsPhoneはWindowsのみ開発環境を限定提供している。

※2：Canalys調査(2013年4月時点)、全134億回

※3：米IDC調査(2013第1四半期)

※4：BCN調査(2014年1月～6月合計)

※5：Google、SONY、SAMSUNG、ASUS、FUJITSU、TOSHIBA、SHARP等多数

2. 6. 2 デジタルカメラからの写真画像無線転送に関する検討

タブレット端末内蔵のカメラで撮影する場合は、本検討の必要はない。ただし、タブレット端末内部のカメラは、検査時の要求性能（解像度、ズーム機能、フラッシュ機能など）を満たすことが難しいため、現状通りのデジタルカメラによる撮影も可能とする。その際には、デジタルカメラからタブレット端末に撮影写真を転送することが必要となるため、その転送方法について検討を行った（表2. 6. 2）。

検討の結果、ユーザの操作が不要で自動的にタブレットに転送され、流通しているデジタルカメラの種類も豊富に存在している「Eye-Fi方式」を採用した。

表2. 6. 2 無線通信方式による写真画像転送方式の種類

	Bluetooth通信	Wi-Fi通信 Eye-Fi方式	Wi-Fi通信 FlashAir方式
			
方式の特徴	Bluetooth通信搭載機器間で、SDメモリカードにWi-Fi機能を搭載したもので、「ダイレクトモード」機能により、携帯端末に直接写真を転送する。	SDメモリカードにWi-Fi機能を搭載したもので、「ダイレクトモード」機能により、携帯端末に直接写真を転送する。	SDメモリカードにWi-Fi機能を搭載したもので、webブラウザ経由により、写真にアクセスし、手動選択で写真を端末に転送する。
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ペアリング機器（タブレット、PC等）で確実な転送ができる。 ・空き容量を気にしなくて良い。 ・Android搭載デジタルカメラが利用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動的に転送されるユーザが操作する必要がない ・転送しながらの撮影も可能 ・空き容量を気にしなくて良い。 ・安価(1枚6,000円程度) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ブラウザを介して受信するため、内容を解析すれば開発するソフトウェアで転送することも可能 ・転送しながらの撮影も可能 ・撮影時にバッテリー消費が少ない(写真転送時のみONであればOK) ・安価(1枚6,000円程度)
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・転送が遅い(1Mbps程度) ・使用できるカメラが少ない ・手動による1枚ごとの転送 	<ul style="list-style-type: none"> ・パソコン等でのカウントを作成する必要があり、設定が面倒 ・カメラの長時間使用が困難(Eye-Fi対応カメラ以外では自動ON-OFF出来ないためバッテリー消費が激しい) 	<ul style="list-style-type: none"> ・手動による1枚ごとの転送 ・ブラウザ経由の転送方式 ・同時に複数のカメラで撮影できない(台数分必要) ・販売流通がEye-Fiに比べ小さい。
適用可能なデジタルカメラ	少ない	SDメモリカードを利用したデジタルカメラ全般、とくにEye-Fi対応機能を付加したものも多数あり	SDメモリカードを利用したデジタルカメラ全般
			調査時期：2013年3月時点

2. 6. 3 現場作業を支援するための機能設定

本研究では、タブレット端末を活用することで現地撮影および検査業務の外業を支援、ならびに現場作業から事務所作業までのスムーズなデータの引き渡しすることを目的としている。まず、必要となる要件を以下のように整理した。

- ① デジタルカメラの代用として利用することができる。
 - ・ 写真を撮影できる。
 - ・ コメントが記録できる。
 - ・ 撮影写真上にマーカーで点検箇所を記録できる。
- ② 維持管理システムとの連携により、効率的に作業が行える。
 - ・ 現地で撮影した写真の登録を簡単にできる。
 - ・ 現地で入力してきた点検記録を参照し、詳細な検査・補修記録が入力できる。

具体的には、つぎの機能を実装した。

- ① あらかじめ対象橋梁の3Dモデルを維持管理システムで作成し、橋りょう情報や展開図、過去の検査・補修情報などを属性情報として付与した状態でSDメモリーカードもしくはUSBケーブルにより、タブレット端末の本ツールに出力する。
- ② 上記①の情報が入力されたタブレット端末を現場に持参し、デジタルカメラにWi-Fi通信Eye-Fi方式のSDメモリーカードをセットし、点検箇所を撮影する。撮影した写真データは自動でタブレット端末に転送される(図2.6.1)。また、タブレット端末のカメラ機能を用いて写真を撮影することも可能としている。
- ③ 転送された写真の撮影位置については、取り込まれた画像をタッチで選択し、撮影点と撮影方向を撮影計画図上でドラッグすることにより記録される。維持管理システムに出力する際には、この情報がそのまま引き継がれ、簡易に写真が3D空間上に配置される(図2.6.2)。この作業を行うことで、現場での紙による撮影位置や撮影対象箇所の記録や事務所に持ち帰った後の確認・整理を行わなくてもよくなり、事務所作業の効率化につながる。
- ④ 選択した写真上で変状箇所を指でマーキングする。マーキングした図形には、変状部位、健全度判定などを入力することができる。維持管理システムに出力する際には、上記③の撮影位置と同様、情報が引き継がれ、メモ機能として登録される(図2.6.3)。この作業を行うことで、記録として写真のどの位置の、どのような点検箇所を撮影したかなどの確認作業を行わなくてもよくなり、点検箇所の漏れ防止や記載箇所の探索高速化により作業の効率化が図られる。



図 2. 6. 1 無線転送 (Eye-Fi) のイメージ

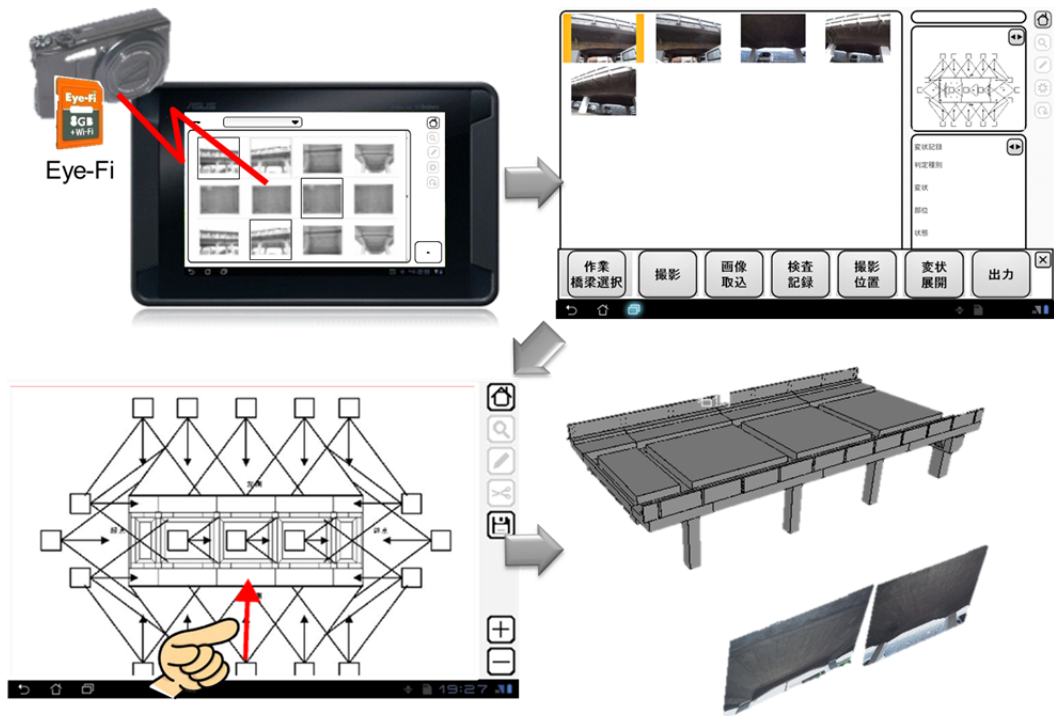


図 2. 6. 2 撮影位置記録



図 2. 6. 3 点検箇所メモ記録

2. 7 まとめ

本研究は、単に個別の業務で便利な情報モデルを作成すること（Construction Information Modeling）ではなく、多くの関係者間で3D情報モデルを通じて維持管理の仕組み自体を効率化・高度化すること（Construction Information Management）を目指している。本システムを利用することにより、3D情報モデルをプラットフォームとして関係者間での撮影位置や点検・工事履歴、図面などの共有化・一元管理が可能となった。従来の方法では、2D図面（展開図）以外にも写真整理、数量算出などデータ管理に多大な労力を要していたが、本システムを利用することにより、時間の短縮を図れる。また、点検・工事箇所の正確な位置関係や寸法が経年的に管理できるため、各関係者が連携して「予防保全管理」に向けたアセットマネジメントが実現可能であり、CIM（Construction Information Management）としての一定の成果が得られたものと考えている。

CIMの活用について関連技術、とくにセンシング技術との連携の重要性を指摘している（2.13、2.14）。この点について本研究では写真測量技術との連携というかたちで有意性を示すことができた。くわえて、ステレオ計測機器の開発では、CIM導入における重要な要素としている「維持管理を考慮した計測機器の組み込みなどによる高度化」、タブレット端末による現場支援ツール開発は「ICTを活用した業務の効率化」につながるものと考えている（2.15）。このようにCIMの活用が維持管理の場面でもさまざまな効果が得られた。

現状の課題として、3Dモデルと撮影写真の対応点を指示する「撮影写真の3D空間配置」の作業と写真をなぞることで描画される「点検・工事図形の入力」作業が手作業であるために事務所作業の大部分を占める作業となっている（図2.7.1）。これらの課題に対しては、3Dレーザスキャナーや画像処理によると特徴点や図形の自動抽出などを導入することによってさらなる「維持管理の効率化・高度化」を進めていくことができると考えている。

今後は、鉄道橋りょう以外にもトンネルや法面など他の土木構造物や施設、設備といった建築物への適用も可能となる汎用性の高いシステムを目指していくことでBIMが一体となったCIM（Civil Infrastructure Information Management/Method）を目指していきたいと考えている（図2.7.2）。

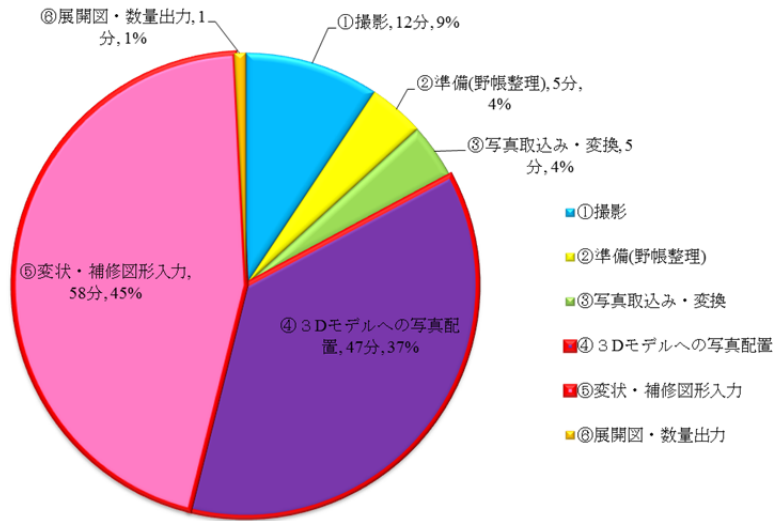
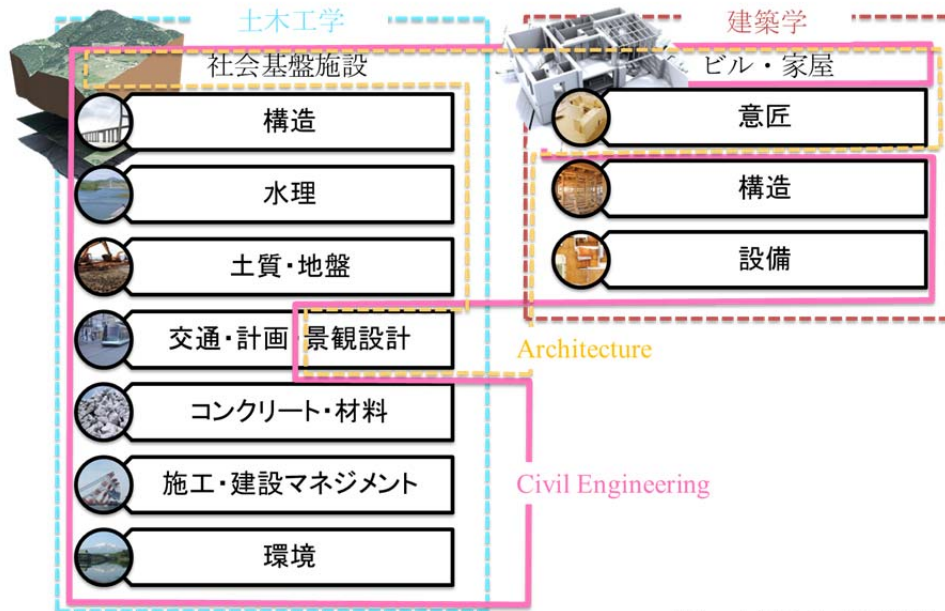


図2. 7. 1 維持管理システムを用いた所要時間



出典：土木学会土木情報学委員会

図2. 7. 2 CIM (Civil Infrastructure Information Management/Method)

2. 1) 国土交通省：平成 25 年度 国土交通白書, 2014, <<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/index.html>> (入手 2014.09.12).
2. 2) 国土交通省：鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証会議について, 2014, <<http://www.mlit.go.jp/common/000995186.pdf>> (入手 2014.09.12).
2. 3) 例えば財団法人 鉄道総合技術研究所：平成 19 年 1 月鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編 コンクリート構造物）, 丸善株式会社, 2007.
2. 4) 例えば国土交通省「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」, 2008, <<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/maintenance/>> (入手 2014.09.25).
2. 5) 後藤昭彦, 大澤誠司：橋梁マネジメントシステム(NEXCO-BMS)を活用した維持管理計画検討、土木学会第 66 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), VI-209, pp.417-418, 2011.
2. 6) 鈴木秀門、木村元哉、御崎哲一、中山忠雅：RC 高架橋のコンクリート劣化に対応した橋梁保守管理システムの構築、土木学会大 58 回年次学術講演会、IV-087、2003.
2. 7) 小林一郎, 池本大輔, 竹下史朗, 坂口将人：3D-CAD を基盤としたトータルデザインシステムの提案, 土木情報利用技術論文集, Vol.17, pp.171-182, 2008.
2. 8) 小林一郎, 島津卓郎, 増山晃太, 宮崎浩三：河川堤防設計における CIM の可能性, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol. 38, 2013.
2. 9) 井口征士、佐藤宏介：三次元画像計測, 昭晃堂, pp.2,14, 1990.
2. 10) 社団法人 日本写真測量学会：写真による三次元測定－応用写真測量－, 共立出版株式会社, pp.58, 1983.
2. 11) K_OKADA : フリーソフトウェア「vix」, <http://web.archive.org/web/20101221235110/http://www.katch.ne.jp/~k_okada/> (入手 2014.09.29).
2. 12) Google：フリーソフト「panoramio」, <<http://www.panoramio.com/>> (入手 2014.09.29).
2. 13) 国土交通省：CIM の導入検討について, 2012, <<http://www.mlit.go.jp/common/000221538.pdf>> (入手 2014.09.29)
2. 14) CIM 技術検討会：CIM 技術検討報告会 平成 25 年度報告, 2014, <http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/Contents/H25report_0519.pdf> (入手 2014.11.17).
2. 15) CIM 技術検討会：CIM 技術検討報告会 平成 24 年度報告, 2013, <http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/Contents/CIM_Report130430.pdf> (入手 2014.11.17).

第3章 鉄道空間（屋内）における測位手法の検討・開発

3. 1 序論

3. 1. 1 社会的背景

総務省の「平成 24 年度通信利用動向調査」によれば、スマートフォンの世帯普及率は、2011 年度末の 29.3%から 12 年度末には 49.5%と急拡大している（3. 1）。出荷台数をみてもフィーチャフォンとの割合を 2011 年時点で上回っている（図 3. 1. 1）。このようにスマートフォンは当たり前の道具になりつつある。また、スマートフォンユーザの 70%以上が位置情報サービスを利用している（3. 2）ことからスマートフォンユーザにとって日常的に利用するアプリケーションソフトの一つに、地図や GPS といった地理空間情報を用いたものがあり、日常生活の中で高度な位置情報サービスの提供が進んできている。

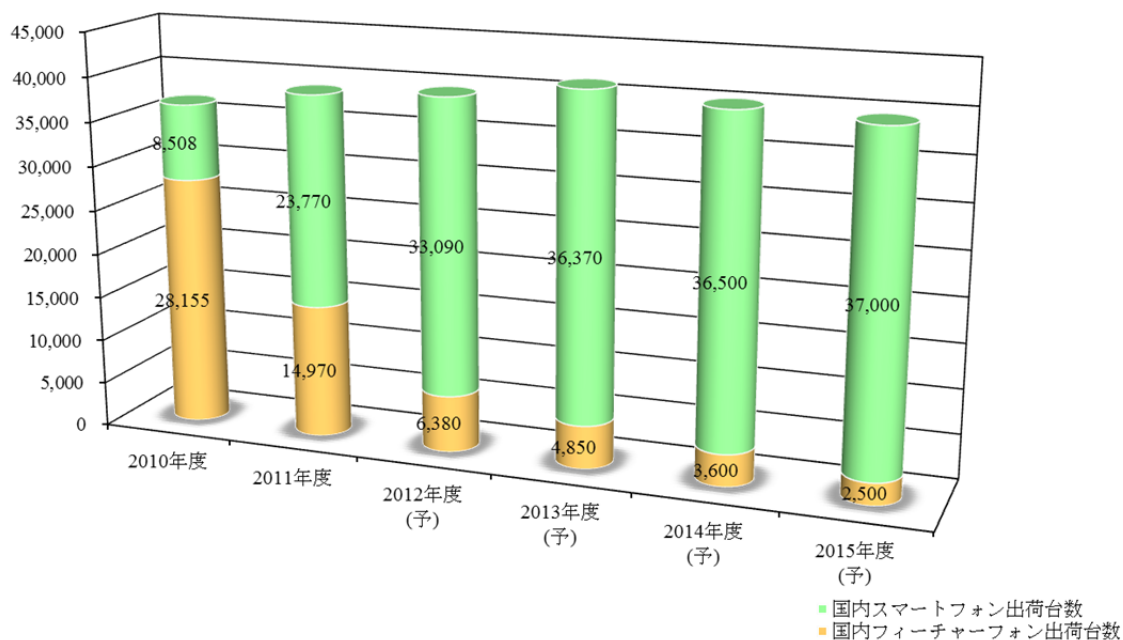


図 3. 1. 1 スマートフォン出荷台数実績・予測

多くのスマートフォンには、標準アプリとして地図がインストールされており、GPS の位置情報を用いて周辺の店舗検索や道案内、周辺駅の時刻表を参照するといった使い方は、今や日常生活の一コマであろう。また、2012 年に国土交通省が実施した調査によれば「iPhone（アイフォーン）」シリーズのユーザ 66.4%、その他スマートフォンユーザの 49.9%が地図や GPS の位置情報を用いたアプリケーションソフトを「生活になくてはならないものだと感じている」と回答している（3. 3）。また、iPhone 保有者の 75.5%、その他スマートフォン保有者の 68.8%が「以前（2～3年前）と比べ

て位置情報を用いたアプリケーションをよく利用するようになった」と回答している（3. 3）。このことからスマートフォンの普及が、G 空間情報を日常生活に深く浸透させている状況がうかがえる。このように G 空間情報を生成、利活用するうえで ICT の果たす役割が大きくなってきている。まず、位置情報を生成するうえで重要になってくるのが「測位」である。また、位置情報や位置情報に結びつけられた情報を管理、利活用するのが GIS であり、我が国の抱える課題を効果的・効率的に解決するにあたって非常に重要かつ有効な役割を果たすものである。

屋外における「測位」技術は、GPS や準天頂衛星システムなどの衛星測位がデファクトスタンダードになっているのに対して、屋内ではスタンダードとなる測位手法が未だ確立しておらず、近年では、衛星測位の利用が困難な屋内における位置情報の「測位」技術が重要視されている（3. 4）。具体例として、2020 年の東京オリンピックの開催に向けて、鉄道駅とくにターミナル駅に対してインバウンド、バリアフリー、災害時の避難誘導などさまざまなサービス・アプリケーションの開発のために屋内環境における測位技術の構築が推進されている（3. 5）。鉄道駅では、アメニティ性の向上や移動の円滑化などが求められていると同時に、高齢化に伴うユニバーサルデザイン化、人口減少社会にふさわしいコンパクトかつ機能性に優れた空間の創出などが求められていくようになった。そのような中で、近年、とくに大都市圏の鉄道駅において、商業施設や業務施設などの複合的な機能を備えたターミナルビル（駅ビル）の開発が進められ、その空間構造は複雑なものへと変化してきている。すなわち鉄道駅は、単なる交通結節「点」としてではなく、都市の顔として多様な利用者からより日常かつ多彩で複雑な「空間」へと変わってきたといえる。そのような複雑な「空間」の中で、平常時はもちろん災害などの非常時において、利用者が自分の位置を適切に把握し、適切な場所へ誘導を進めることは、極めて重要となる。このような複雑さを増しているだけでなく、公共性の高い鉄道駅という屋内環境において位置情報を正確に推定することは、利用者にとって安全でやさしい空間を創出していくために重要であり、利用者に与える効果は大きいと考える。そこで本研究では、複雑化する鉄道駅空間に着目した屋内測位技術手法について検討する。

3. 1. 2 屋内測位のための具体的技術と課題

屋内における測位手法としては、無線 LAN (Local Area Network)、UWB (Ultra Wide Band)、Blue tooth、RFID (Radio-Frequency Identification) などの無線通信技術を利用した測位手法や GPS と互換性のある信号を使って位置情報を送信する IMES (Indoor Messaging System) を利用した測位手法などがある。その他にも可視光通信、赤外線通信などの光通信技術や超音波通信技術などさまざまな屋内測位手法が提案されており、一部ではショッピングセンターや博物館などにおいても実証実験や実用化が進んでいる。しかしながら、現状では、専用端末 (受信機や送信機)、配線設備などの大規模なインフラ整備にかかる初期コストやメンテナンスコストが必要になる、または、精度高くないあるいは不安定である、さらには連続的な測位ができないなど各手法とも解決すべき課題が残されており、社会インフラと呼べるシステムは未だ実現していない。本項では屋内測位の現状の技術とその課題について説明する。

(1) 基地局測位

NTT docomo は、屋内の携帯電話基地局設備 (Inbuilding Mobile Communication System : IMCS) による位置情報を取得するシステムを構築している。IMCS を専用のアンテナに分配して電波の送受信をしている。そのアンテナからの電波の強度から位置を割り出している。NTTdocomo では、本技術を用いて大型ショッピングセンターにおける迷子探しサービスを提供している (3. 6)。IMCS は屋内でも携帯電話が使用できるよう大規模ショッピングセンターであれば基本的には導入する設備であり、それを応用しているため比較的 low コストで位置把握が可能となるが、測位精度が 30m と他の測位技術と比べると劣っている (3. 7)。

(2) RFID

RFID (Radio Frequency Identifier) は、IC と小型アンテナが組み込まれたタグやカード状の媒体から、無線通信によって情報を授受する非接触型の自動認識技術である。RFID は、電波を内蔵し、自ら電波を発信するアクティブ型と電波を持たずリーダーから発信される電波を電力に変換して機能するパッシブ型とに大別できる (図 3. 1. 2)。いずれの方式も RFID に位置情報 (基本的には座標 ID) が格納されている。RFID の設置位置を自己の位置とする方式であり、受信端末側で RFID の位置情報を受信することで自己の位置を特定する (3. 8)。電波到達距離は数 cm から 100m 程度であり、通信距離が短くあればなるほど、位置精度は高くなるものの、その反面、その場所を探し出して、端末を近づける必要がある。

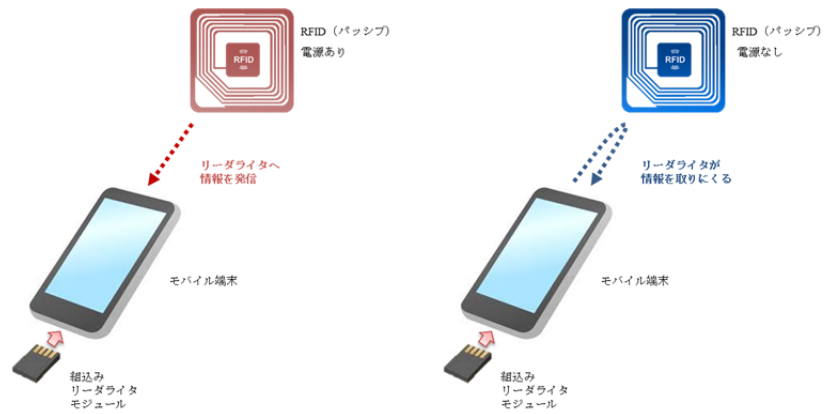


図3. 1. 2 RFIDの概要

(3) 無線通信

設置された Wi-Fi AP (Wireless Fidelity Access Point) の位置情報を軸に受信端末との物理位置を特定する方式がある (3. 9)。具体的には、無線 LAN による測位方式には、時刻同期された複数の無線 LAN アクセスポイントと端末との電波到達時間差による TDOA (Time Difference of Arrival) 方式と複数の無線 LAN アクセスポイントからの電波強度による RSSI (Received Signal Strength) 方式があり、いずれも三角測量方式により位置を特定することができる (図3. 1. 3)。また、無線 LAN アクセスポイント位置を自己位置とする AP 方式なども存在する。同様の原理で Bluetooth や UWB (Ultra Wide Band) を用いた測位方式もある。精度は、5 m~15m 程度であるものの、屋内にはノイズ発生源が多く、電波の回り込みや反射・吸収も起きやすい。群衆の密度や温度などの環境要因によって電波強度とパフォーマンスにばらつきが生じるなど、測位精度が不安定となる場合がある。また、Bluetooth Low Energy (BLE) 経由で固有の ID (位置情報) を電波により定期的に発信できるビーコンもある。

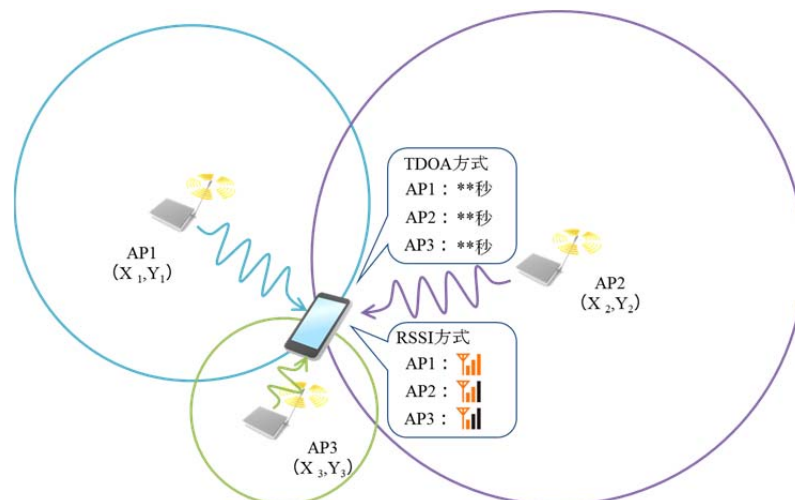


図3. 1. 3 Wi-Fi 測位の概要

(4) IMES

IMES (Indoor Messaging System) は、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA) と測位衛星技術が共同開発した技術で、GPS と互換性のある信号を小型の専用装置から発信する技術である (3. 10)。GPS の場合は、GPS 衛星の軌道情報と GPS 衛星から受信した時刻情報を元に位置を計算するが、IMES は、送信機の設置してある位置の情報 (緯度経度・フロア) を直接発信する専用の受信機が必要となる (図3. 1. 4)。GPS と同一信号を使用しているため、既存の GPS 受信機と親和性が高く、屋外・屋内をシームレスに測位することが可能である。



図3. 1. 4 IMES の概要

(5) 可視光通信

可視光通信は、専用送信基盤を取り付けた LED (Light Emitting Diode) 照明を利用して光を人の目では検知できないほど高速で点滅させることによってデジタルデータ (明暗信号) を送る通信方式であり、そのデジタル信号の中に位置情報を付与することで測位する仕組みである (3. 11)。IMES 同様、個々の照明から各々の位置情報を発信する方法や、Wi-Fi 測位同様、複数のデジタル信号から位置を推定する手法などがある。前者は、一部実用化が進んでいるが、後者については、複数の照明を撮影するため魚眼レンズなどを用いる必要があるため、ロボット制御などに活用されている。しかし、いずれも既存の照明を利用することができるため、電源の確保が容易である。また、光は指向性が高いため、電波に比べてより高精度な測位が可能となる。

(6) 非可聴音

非可聴音をスマートフォンなどに搭載されている内蔵マイクで受信するまでの時間を利用して位置を測位する手法である。音波は、電波に比べて速度が速いため、無線通信に比べ高い測位精度が実現できると期待されているものの非可聴音を発生させる信号源 (スピーカ) の設置が必要となる。

屋内測位技術における「位置測位」の特徴について整理する。まず、使い勝手の観点より図3. 1. 5にまとめる。

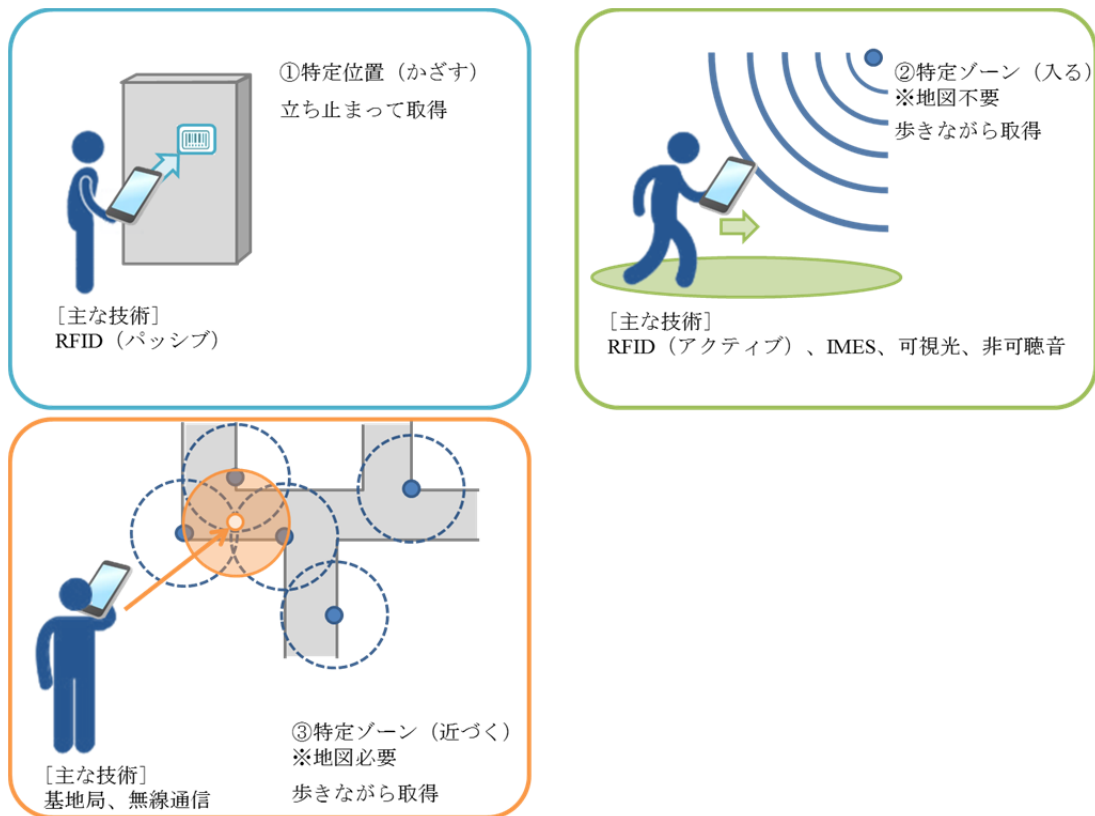


図3. 1. 5 屋内測位技術の特徴（1）

つぎに、位置情報インフラ（位置情報を発信する機器）からどのようにして位置情報が提供されるかをパッシブ型とアクティブ型に分類した（図3. 1. 6）。

[場所情報コードの提供方式（How）]

- ① パッシブ型：位置情報インフラから位置情報（ID や緯度・経度など場所情報コード）を能動的に発信することで位置測位ができる。
- ② アクティブ型：位置情報インフラに位置情報を格納し、歩行者が持つ受信機（携帯端末など）によって位置情報が引き出され、位置測位ができる。

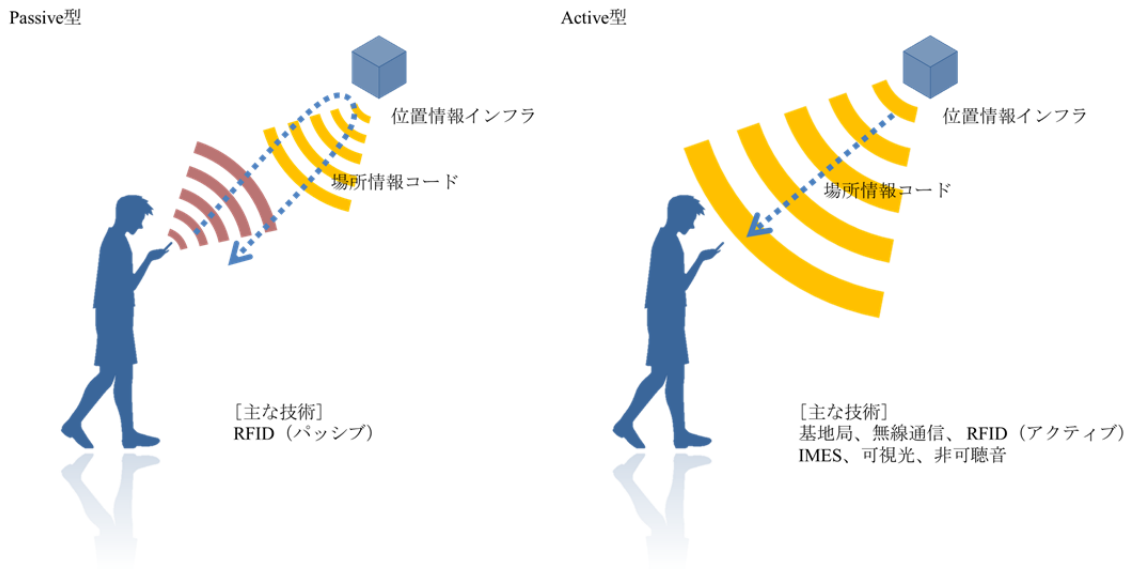


図3. 1. 6 屋内測位技術の特徴 (2)

また、位置情報取得のために、どの位置情報インフラから発信されているのかという観点でスタティック型とダイナミック型に分類した (図3. 1. 7)。

[場所情報コードの発信方式 (Which)]

- ① スタティック型：位置を特定する際の位置情報インフラが静的＝固定であること (位置情報を取得するための位置情報インフラが決まっている)。
- ② ダイナミック型：位置を特定するための位置情報インフラが動的であること (位置情報を取得するための位置情報インフラが決まっていない)。

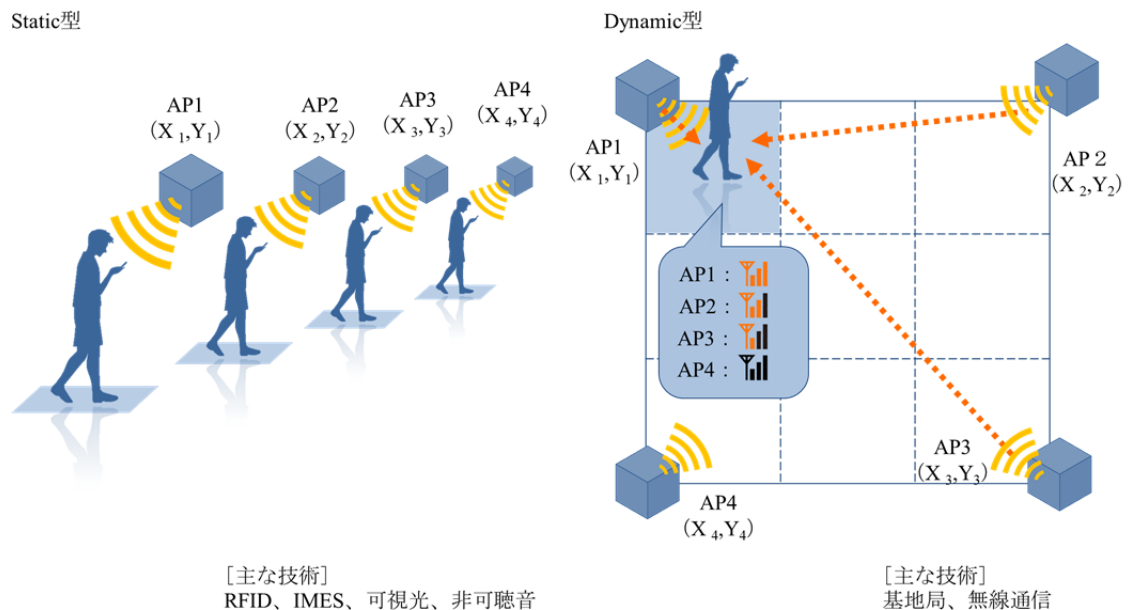
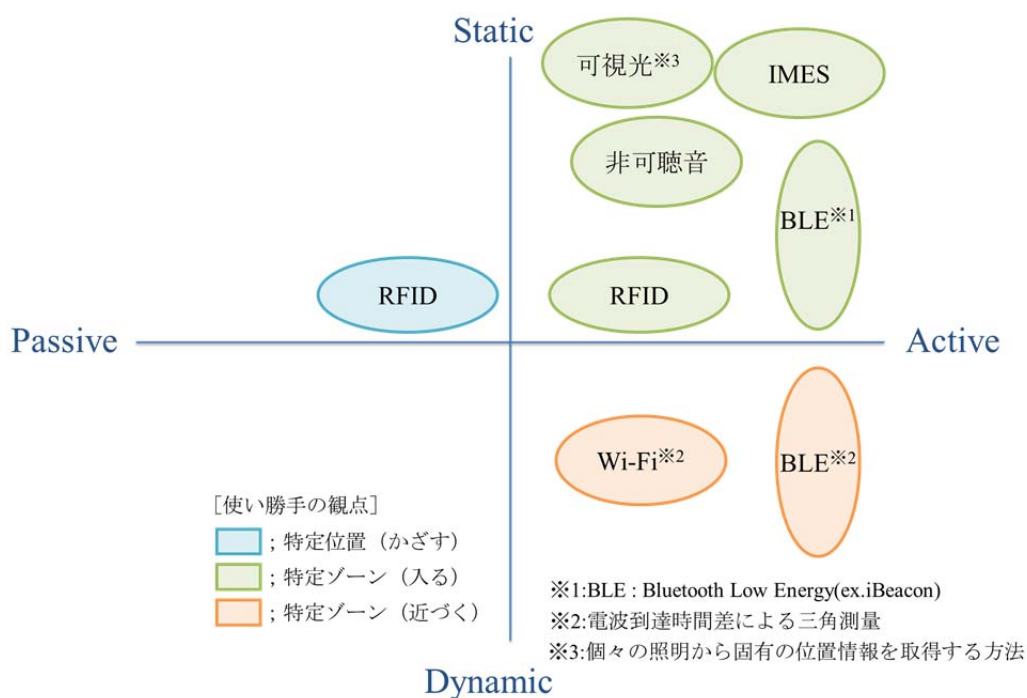


図3. 1. 7 屋内測位技術の特徴 (3)

以上の観点を踏まえ、おもな屋内測位技術を図3. 1. 8にまとめた。主な屋内測位技術は、アクティブ型の測位手法が多いことがわかる。

先述したように屋外における「測位」技術は、全地球測位システム (Global Positioning System : GPS) や準天頂衛星 (Quasi-Zenith Satellite System : QZSS) などの衛星測位システム (Global Navigation Satellite System : GNSS) がデファクトスタンダードな手法になっているのに対して、屋内での「測位」技術は、これまでもさまざまな仕組みが構築されてきたものの、各方式とも一長一短あり、いずれかに絞られる段階には至っていない。また今後も、屋内により位置測位は、場所や用途に応じてふさわしい方式を選択して使用することになっていくと考えている。そこで、本研究では鉄道空間にふさわしい屋内環境における測位システムの開発を試みる。屋内測位に関して、測位の簡便さや測位精度の向上などの技術面はもちろんのことインフラ設備などの設置面、メンテナンス面においても手ごろで使いやすい手法が必要であると考えている。また、すでに多様な測位手法が出現してきている中で、それら手法とうまく併用できる汎用的な手法も必要となると考えられる。一方、近年のスマートデバイスの急速な普及とスマートデバイスユーザの位置情報サービスに対する利用状況を鑑みれば、屋内測位技術を推進していくうえでもスマートデバイスは重要な役割を担っていると考えている。そこで本研究では、簡便かつ汎用的な屋内測位を目指すためにスマートデバイスとくにスマートフォンの使用を想定した測位方法が有効な手法と考えた、とくに標準機能となっているカメラで撮影された写真画像に着目した測位手法について検討する。



3. 2 サインを活用した屋内位置速手法の検討

鉄道空間の中で「空間上の位置関係」を示す重要な情報伝達手段として「サインシステム（以下、サイン）」がある。サインは、動線にそって適所に配置され、移動する利用者への誘導・案内といった情報提供を視覚的に行っている。鉄道空間、とくに屋内環境での位置を推定するためには、これらサインを活用することが有効ではないかと考えた。そこで本研究では、サインを活用した屋内位置推定手法について検討する。とくに、直感的な情報伝達に優れている「ピクトグラム」に着目した。

3. 2. 1 対象サインの選定

サインの機能種別について以下のように整理されている（3. 12）。

サインの種別

- ① 誘導サイン類：施設などの方向を指示するのに必要なサイン
- ② 位置サイン類：施設などの位置を告知するのに必要なサイン
- ③ 案内サイン類：乗降条件や位置関係などを案内するのに必要なサイン
- ④ 規制サイン類：利用者の行動を規則するのに必要なサイン

また、行動とサインの役割について整理すると上記の種別の中で空間的な要素（位置あるいはサイン同士の関係性）が強いサイン種別は「誘導サイン」、「位置サイン」、「案内サイン」であるといえる（「規制サイン」は、補助的な役割が強い）。そこで、本研究では、この3つの種別サインを対象とする（図3. 2. 1）。

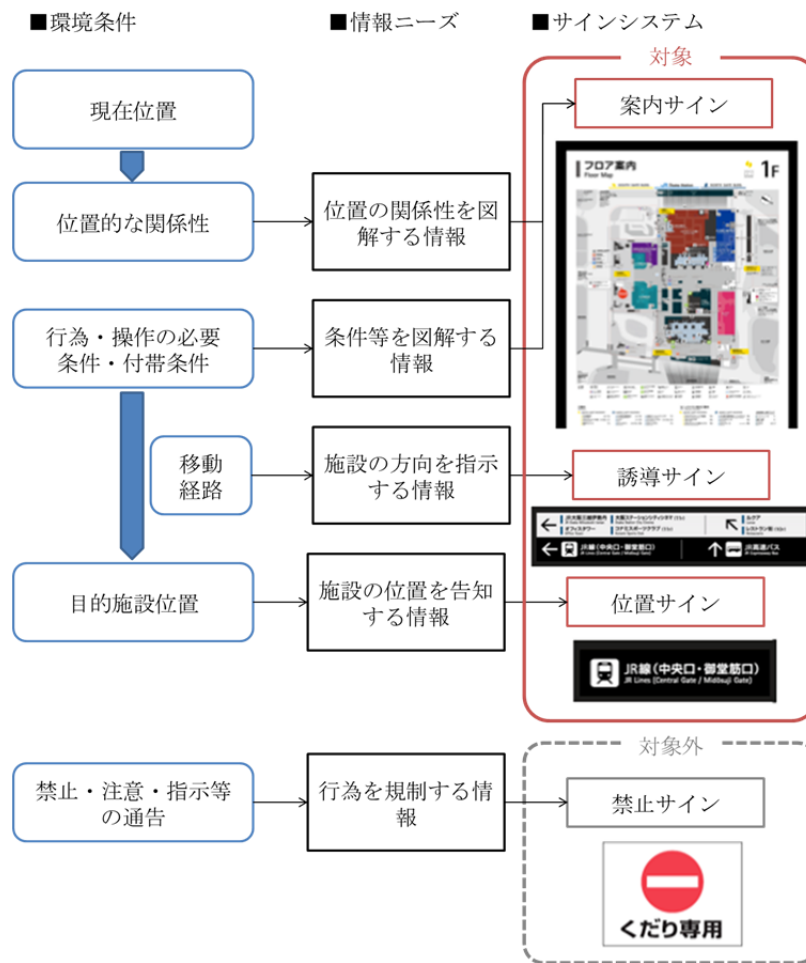


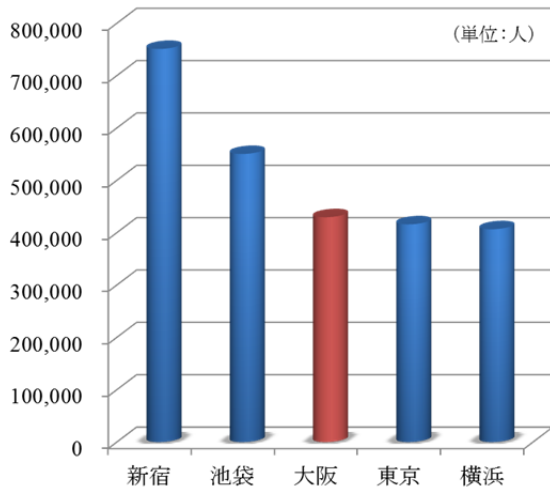
図3. 2. 1 行動とサインの役割 (3. 13)

3. 2. 2 ケーススタディ

ケーススタディとして JR 大阪駅を選定した。JR 大阪駅は、1日の平均乗車人数が約40万人を超える西日本最大級の駅であり(3. 14)、国内でも新宿、池袋につぐ有数の巨大ターミナルである(図3. 2. 2)。2011年に大阪ステーションシティとして再開発が行われ、北側に新たな超高層複合ビル(ノースゲートビルディング)を建設、南側の既存複合ビルを増床(サウスゲートビルディング)し、駅舎上に両ビルをつなぐ橋上通路が設置されるなど巨大化・立体化が進んだ(図3. 2. 3)。また、他私鉄や地下鉄、バスなどの公共交通機関との乗り換えも多数存在している。さらにノースゲートビルディングにおいては、2015年春には新しい商業施設としてリニューアルされることになっており、今もなお変化しつづけている空間である。このように JR 大阪駅は、「複雑さを増す鉄道駅」の典型例であり、その中で位置情報を正確に推定することは、利用者にとって安全でやさしい空間を創出していくために重要であり、利用者を与える効果は大きいと考える。

上位5駅の乗車人数(平成25年度1日平均)

(全国JR)



(JR西日本)

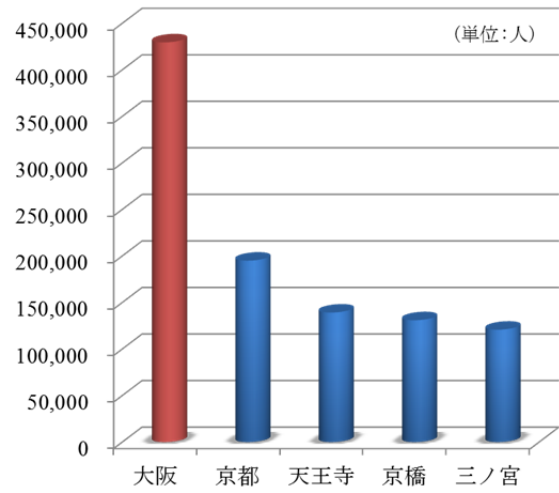


図3. 2. 2 乗車人数 (3. 14)



図3. 2. 3 大阪ステーションシティ

本研究では、屋内位置推定のために必要となる JR 大阪駅のフロアマップを構築した。さらに、対象サインの 3 次元データベースの構築を行った。具体的には、サインの平面位置 (x,y)、掲出高さ (z) といった 3 次元座標位置やサイズ (幅、高さ)、向きといったサイン属性情報とピクトグラムの種類とその数量、記載箇所の座標値といったピクト属性情報を現地調査にて撮影した写真を元に抽出し、データベースとして構築している (図 3. 2. 4)。本研究では、このサインデータベースを活用することで屋内位置を推定する手法の開発を試みている。作業の流れは図 3. 2. 5 に示す通りである。

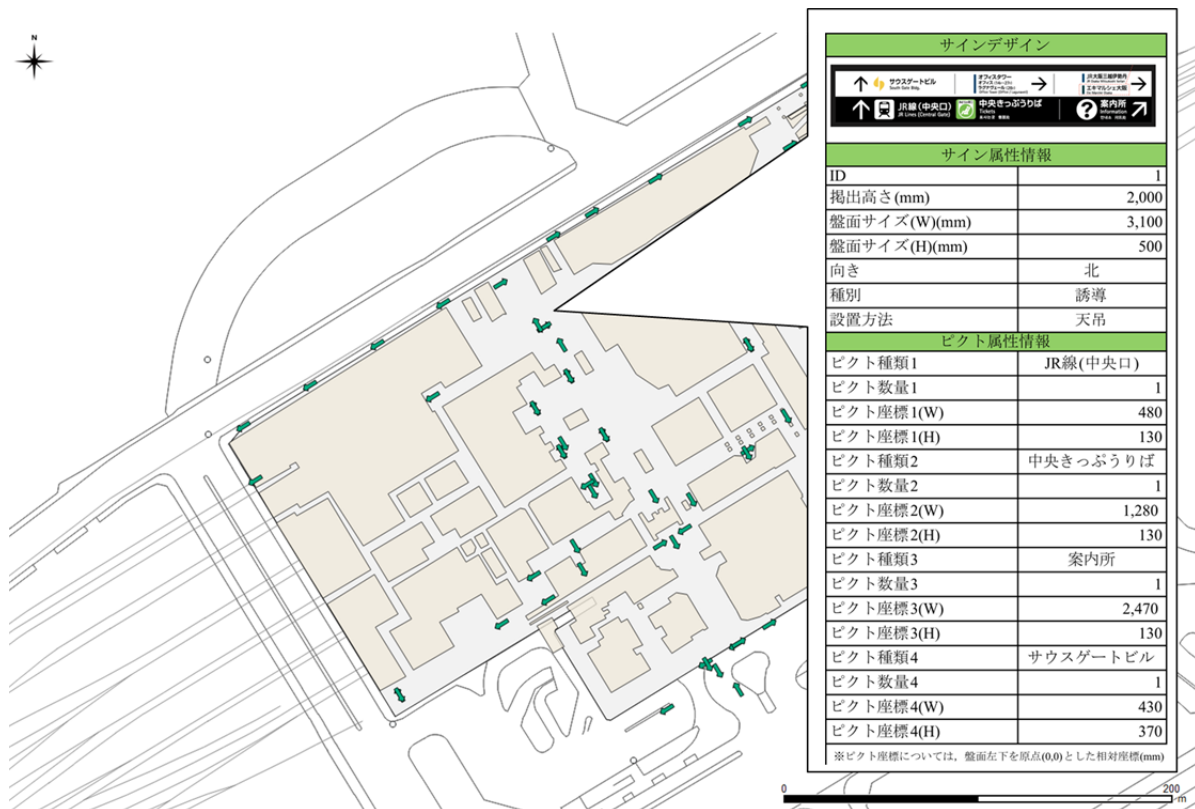


図 3. 2. 4 サインデータベースの構築

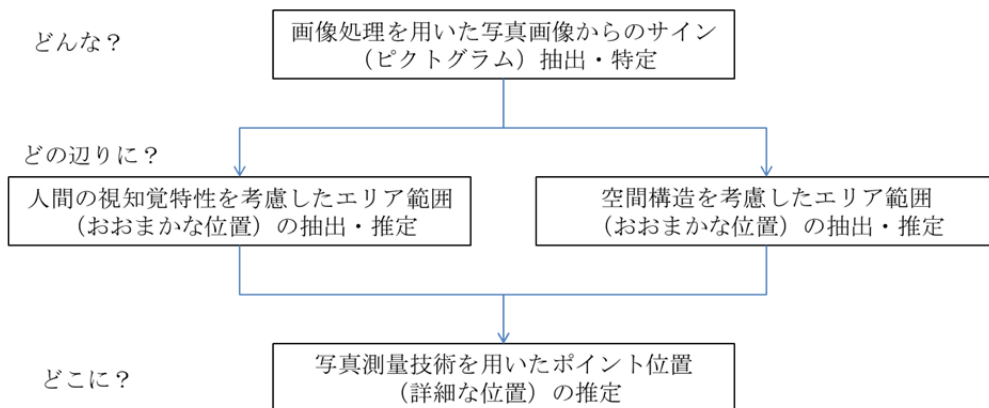


図 3. 2. 5 サインデータベースを活用した屋内位置測位手法フロー

3. 2. 3 画像処理を用いたサイン（ピクトグラム）の抽出

まず、撮影された写真から屋内位置を推定するためには、写真画像内からサインを抽出する必要がある。本研究では、Open CV（Open Source Computer Vision Library）と呼ばれる画像処理・認識ライブラリーを用いたオブジェクト検出を採用した（3.15）。

（1） オブジェクト検出

オブジェクト検出の仕組みについて図3. 2. 6に示す。オブジェクト検出は、「学習」と「認識」の2つのフェーズで構成されている。「学習」フェーズでは、まず画像に何らかの処理を施して、ピクセルのデータ列からより学習に適したデータ列（特徴量データ）へと変換する。つぎに、変換されたデータを機械学習と呼ばれるアプローチを用いてコンピュータに学習させる。機械学習を用いれば、入力データ群の中から共通のパターンや判別ルールなどを抽出することができ、これにより学習データ以外の未知のデータに対してもルールに基づいた何らかの判定が可能となる。

「認識」フェーズでは、学習フェーズで用いたものと同様の手法で入力画像を特徴量データへ変換する。また、変換されたデータを規格学習で抽出された判別ルールに基づいて、そのデータが何を表しているのかを判別することができる。

本研究では、特徴量抽出に「Haar-like」特徴量を用いている。また、機械学習については、「Adaboost」を採用した。詳細については、後述する。

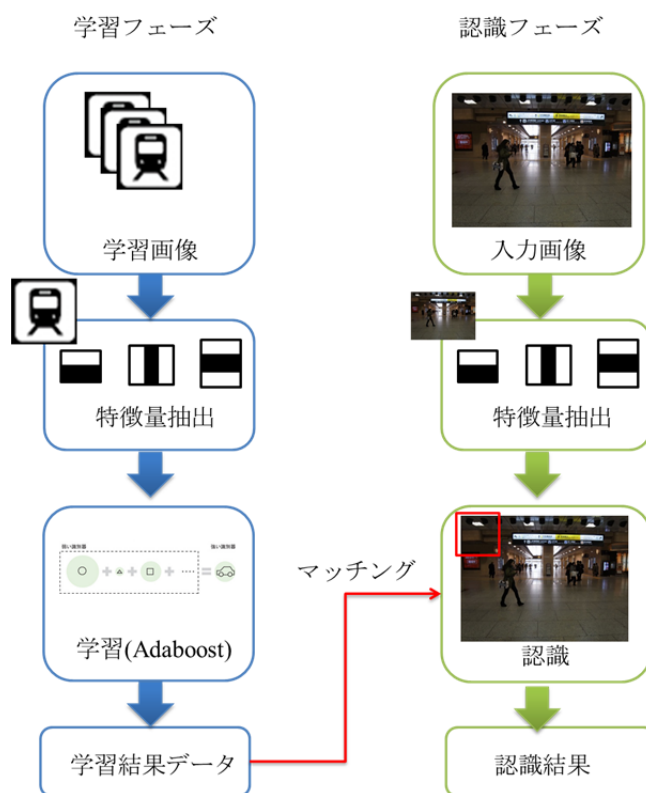


図3. 2. 6 オブジェクト検出

(2) Haar-like (ハールライク) 特徴 (3. 16)

Haar-like 特徴とは黒と白の2種類の矩形領域を組み合わせた局所領域の明度値を表す特徴量 (矩形特徴の黒領域の画素値の合計-矩形領域の白領域の画素値の合計) であり (図3. 2. 7)、顔や人体認識によく用いられている手法である (図3. 2. 8)。この矩形領域の白黒パターンは、複数のパターンが用意されている (図3. 2. 9)。検出窓内の矩形の位置とパターンの組み合わせによって約 12 万通りのオブジェクト検出特徴があるといわれており、この特徴パターンの一つ一つが Adaboost の弱識別器の役割を果たす。

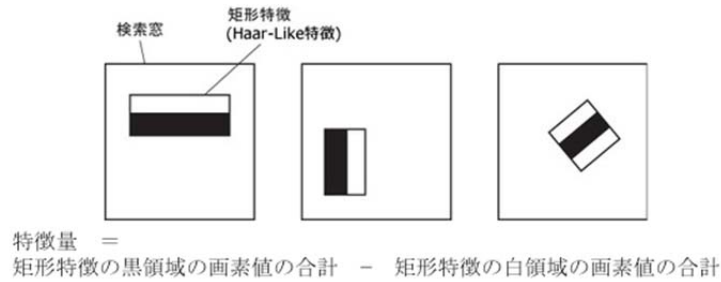


図3. 2. 7 オブジェクト検出特徴の例



通常の顔画像では、目の領域の画素は周辺よりも暗いと考えられるため、特徴量は高くなる (強い重みをつけられる) ことが予想される。

図3. 2. 8 オブジェクト検出 (Haar-like 特徴) を顔に適用した例

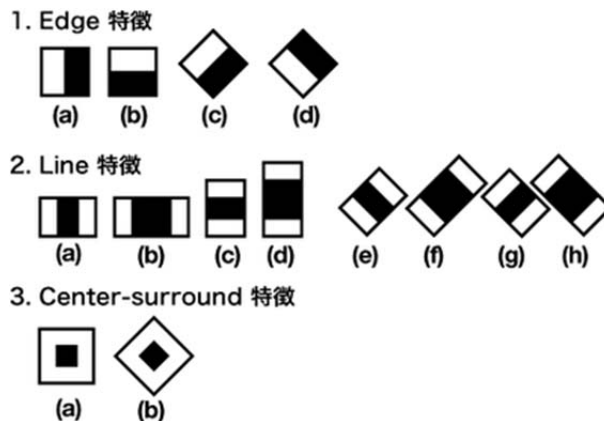
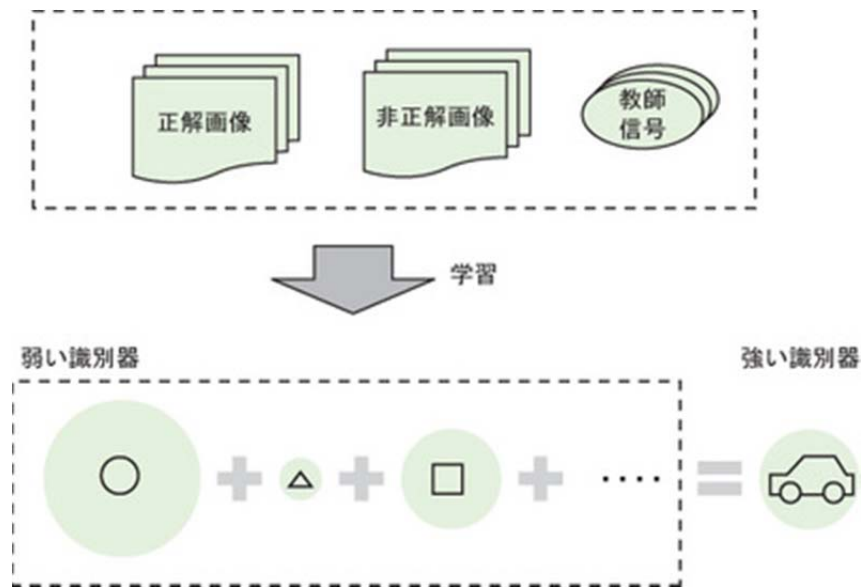


図3. 2. 9 矩形領域のパターン

(3) Adaboost (アダブースト)

Adaboost とは、マッチング手法の 1 つで検出力の弱い識別器 (分類器とも呼ぶ) を多く組み合わせることで全体として強い識別器を作成するという考え方の機械学習・判別アルゴリズムである。強い識別器は、弱い識別器をその重要度にあわせて重みをつけ組み合わせたものである。正解画像と非正解画像および教師信号 (画像が正解画像か不正解画像かを教える信号) を与えて学習させ、その画像の特徴量から重み付けを行う (図 3. 2. 10)。



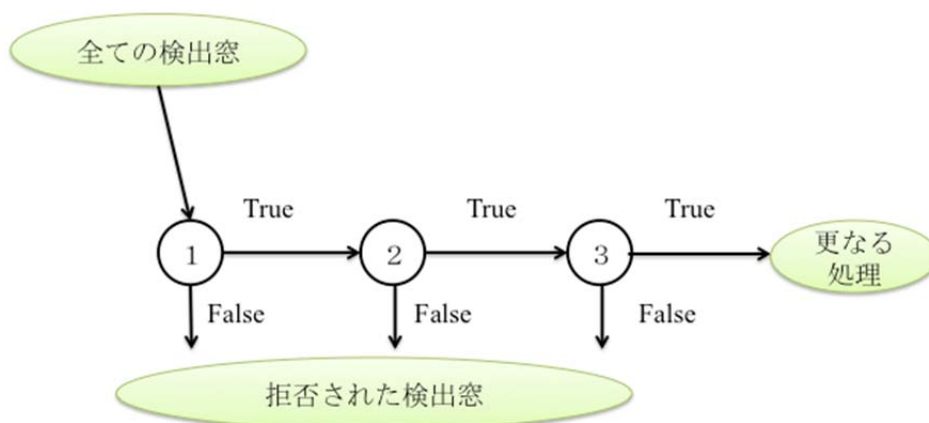
例えば、ある画像が車かどうかを判断する識別器を作りたいとする。そこで、車かどうかを判定させるために、画像中に丸があるかを判断する識別器や、三角があるかを判断する識別器、四角があるかどうかを判断する識別器など、単純な図形に反応する複数の識別器を用意したとする。

ここに車の画像 (正解画像) には、タイヤなどの丸が多く存在していたため、判定する識別器が強い出力を返すことになる。その場合、丸を判定する識別器は車かどうかを判定する上で重要となるため、重みを重くする。つぎに車以外の画像 (非正解画像) を入力 (例えばオニギリの画像) した際、三角の識別器が反応したとする。この場合は、非正解画像にも反応があるため、三角の識別器の重みは小さくする。このような処理を繰り返すことで、車を入力すると強く反応し、車以外を入力すると反応しない強い識別器を作成することができる。

図 3. 2. 10 Adaboost の概要

(4) Attentional Cascade (カスケード)

通常、検出窓で画像内をスキャンした場合、検出したいオブジェクトが見つかるよりもオブジェクト以外（非オブジェクト）が見つかる確率の方がはるかに高い。そのため、いかに非オブジェクトの検出を拒否するかというのが高速化するうえでは必要となる。OpenCV のオブジェクト検出では、強い識別器を複数連結（カスケード）することで、精度と速度を改善している。このように識別器を連結させたものを **Attentional Cascade** という（図 3. 2. 11）。画像内になる検出窓を設けた時、1つ目の識別器で非オブジェクトと判断されたものは、それ以上の処理は行わず終了する。もし1つ目でオブジェクトとして判断された場合は、2つ目の識別器へ渡される。このように上流の識別器では緩い判断基準（単純な特徴パターン）で次々と非オブジェクト画像を除外していき、下流に行くほどオブジェクトの判断基準が厳しくなるように調整されている。これらの識別器は、12万個の特徴パターンのうち、上流のわずかな数の特徴パターンのみを使用することになるため高速に非オブジェクトを除外することができる。



検出器の学習は、この1番目の強識別器から順番に進めていきます。各ステージ（強識別器の学習）には、目標とする認識率（正解画像を正解と判断した率）および許容できる誤認識率（非正解画像を正解と誤って判断した率）があり、それを達成するまで繰り返し矩形特徴（弱識別器）を追加しながら AdaBoost による学習を行っていきます。全体が目標とする認識率、および誤認識率を達成した時点で学習は終了です。

図 3. 2. 11 Attentional Cascade の概要

本研究で着目した、サイン（ピクトグラム）については、容易に識別できるようにするため図色と地色の明度差を確保することが推奨されている（図 3. 2. 12）。先述したように Haar-like 特徴は、黒と白の 2 種類の矩形領域を組み合わせた局所領域の明度値を表す特徴量であるため、単純な矩形で構成され、かつその明度差も大きく設計されているサインとくにピクトグラムへの適用は効果的ではないかと考えた。そこで本研究では、Haar-like 特徴を用いてピクトグラムの検出を試みた。また、本手法は顔・人体認識で広く手法であるが、本研究ではサインの抽出への応用として採用している。

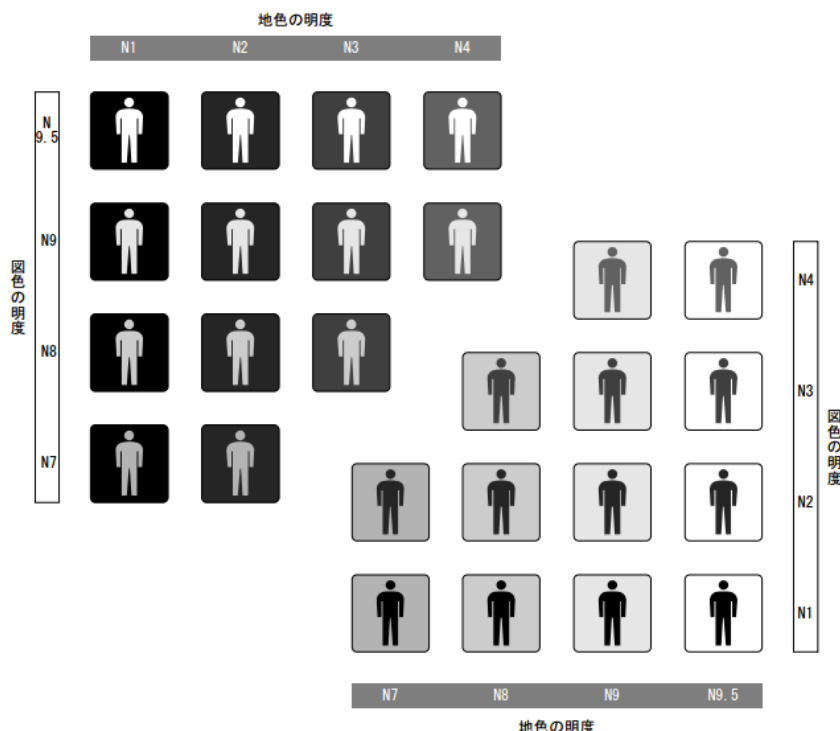


図 3. 2. 12 図色と地色の明度対比（3. 12）

具体的には、正解画像を現地調査で撮影してきた写真に写ったピクトグラムから抽出している。また、ピクトグラムとは全く関係のない画像（非正解画像）も用意し、その両者の画像の特徴量から教師信号（画像が正解画像か非正解画像かを教える信号）を与えて学習させることで検出器を作成することができ、その検出器を用いてオブジェクト検出が可能となる。詳細な手順については以下の通りである。

- ① 正解画像と非正解画像を用意する（図 3. 2. 13）。
- ② 用意した画像のリストファイルをそれぞれ作成する（図 3. 2. 14）。
 - 正解画像のファイルリストは「ファイル名、画像内の正解オブジェクト数、正解オブジェクトの X 座標、Y 座標、幅、高さ」を示している（図 3. 2. 15）。
 - 正解画像を増やすことによって精度が向上することを確認している（図 3.

2. 16)。

③ 学習用正解ファイルの作成

→Open CV の「create samples」 ツールを使用し、vec ファイルを作成

④ オブジェクトの学習

→Open CV の「haatraining」 ツールを使用し、xml ファイルの検出器を作成

⑤ オブジェクト検出

→Open CV の「Haar Detect Objects 関数」を使用し、オブジェクト（ピクトグラム）を検出（図 3. 2. 17）

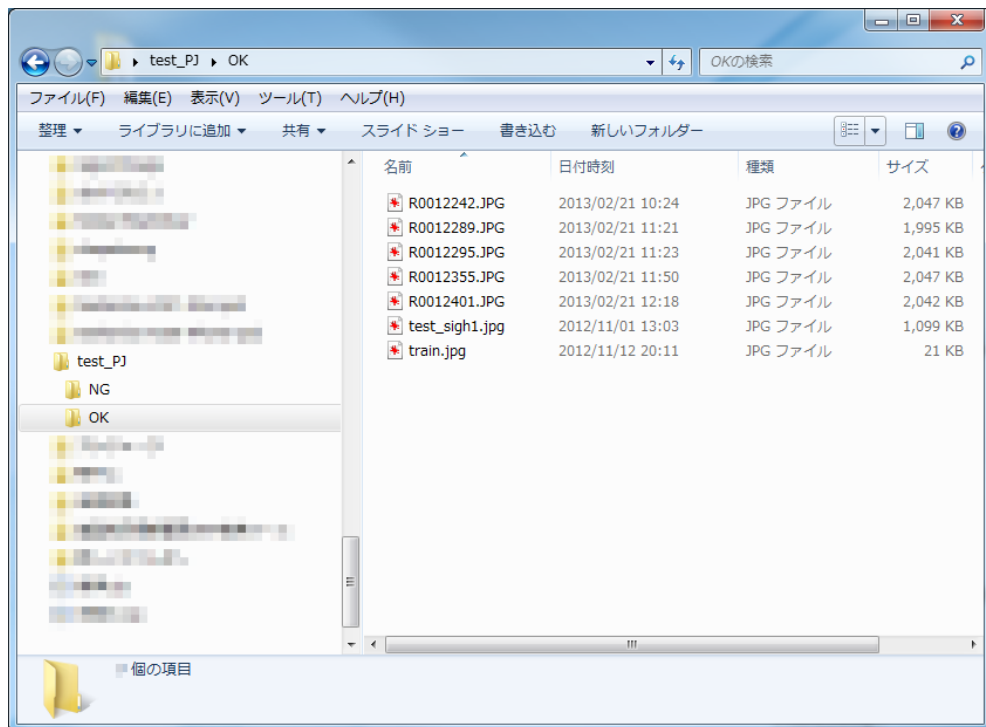


図 3. 2. 13 ディレクトリ構造例

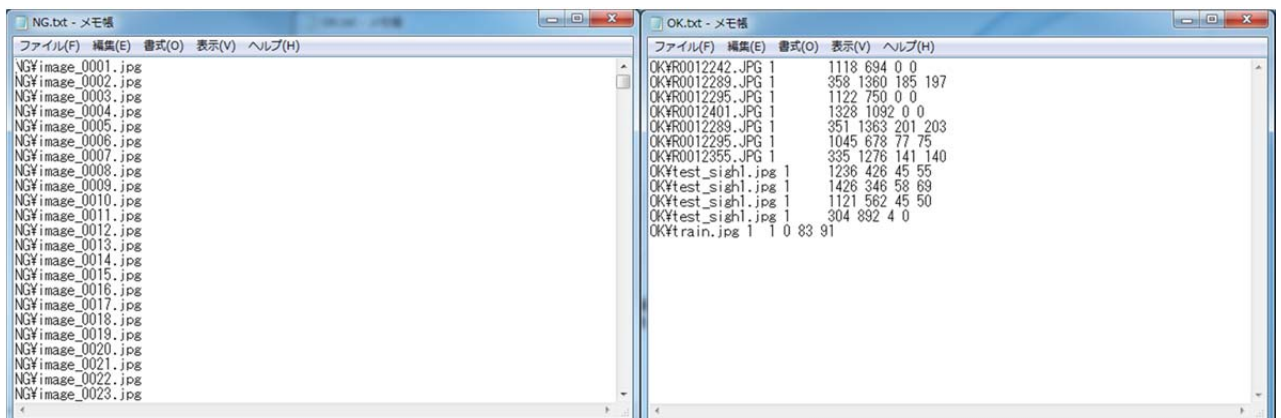


図 3. 2. 14 画像リストファイル例（左：非正解画像、右：正解画像）



図3. 2. 15 オブジェクトの座標値

検出器①

検出箇所数	9
サイン内	4
サイン外	5
対象ピクト数	3
対象ピクト検出数	3
誤検出率(全体)	67%
誤検出率(サイン内)	25%
対象ピクト検出率	100%

検出器②

箇所数	13
サイン内	3
サイン外	10
対象ピクト数	3
対象ピクト検出数	3
誤検出率(全体)	77%
誤検出率(サイン内)	0%
検出率	100%

検出器③

箇所数	測定不能
サイン内	測定不能
サイン外	測定不能
対象ピクト数	3
対象ピクト検出数	測定不能
誤検出率(全体)	測定不能
誤検出率(サイン内)	測定不能
検出率	測定不能

対象ピクトグラム：JRのりば

	正解画像	非正解画像
検出器①	12	1685
検出器②	62	1685
検出器③	3	1685

図3. 2. 16 検出器の違いによる検出結果

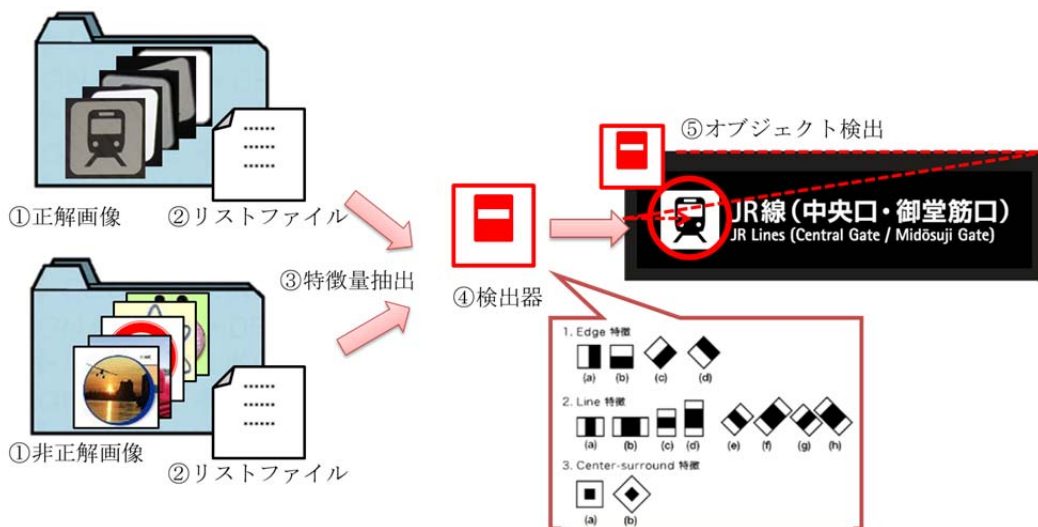


図3. 2. 17 オブジェクト検出

図3. 2. 16の精度検証には検出率(対象オブジェクトが正しく検出されているか)と誤検出率(どれくらい誤った位置に検出されているか)によって精度検証を行っている。その結果、正解画像を増やすことによって精度向上が見込まれるものの多くのノイズ(過大検出)を発生してしまうことがわかった(図3. 2. 18)。



図3. 2. 18 オブジェクト検出によるノイズ(過大検出)の発生

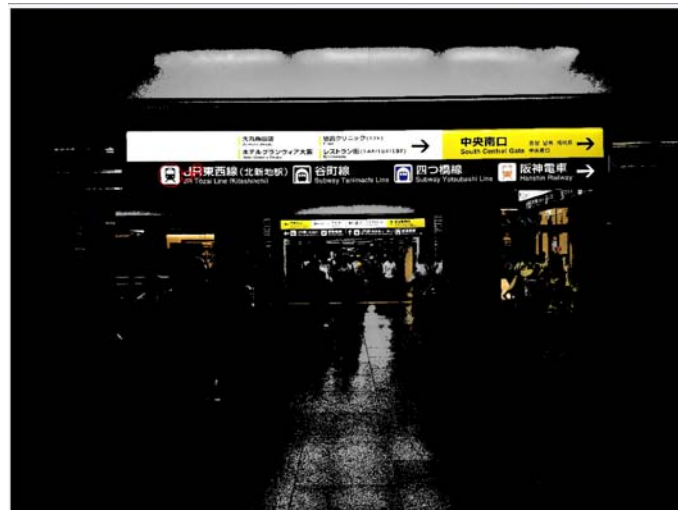
サインの図色と地色の明度の差を大きくすることにより容易にサインが識別できるものとされている。具体的には、使用する図色と地色の明度差5以上(10段階評価)を推奨している。さらに、サインの見やすさを保つためには、一定の表示面輝度を確保する必要がある、 $1,000\text{cd}/\text{m}^2$ までは大きいほど文字が見やすいとされている。このようにサイン計画において明度(輝度)が重要視されている特徴的な色彩を持っている。そこで本研究では、サインの色彩に着目することでノイズ(過大抽出)の除去を試みた。具体的には、サインの明度(輝度)を抽出するためにOpenCVを用いてHSV表色系に変換した。また、サイン抽出のために特徴色のみを抽出した。具体的には、全色相($0\sim 360^\circ$)、高彩度(50~100%)、高明度(60~100%)の画素値のみを抽出するように設定した。本処理によってサインのみに抽出されていることがわかる(図3. 2. 19)。さらに、本ノイズ処理によって通行者(服装などの色彩など)やその他設備の影響をなくすことができた。これは、サインを目立ちやすくするために彩度や明度を高くしているという特徴をノイズ処理の際に考慮して特徴色のみを抽出したことによって可能となったものと考えている。



(a) 処理前



(b) 処理後 (表色系変換・特徴色抽出)



(c) オブジェクト検出

図3. 2. 19 ノイズ除去処理結果 (1)

しかしながら、色彩を考慮したノイズ除去は、効果的な手法であるものの、完全な除去は難しい。そこで物体検出の閾値の設定をチューニングすることで精度向上を試みた。物体検出に用いる OpenCV の「Haar Detect Object」関数は以下の通りである。

```
cvHaarDetectObjects( const CvArr* image, CvHaarClassifierCascade* cascade,  
                    CvMemStorage* storage, double scale_factor,  
                    int min_neighbors, int flags,  
                    CvSize min_size=cvSize(0,0) );
```

Image⇒「対象画像」

この画像の中からオブジェクトを検出する。

Cascade⇒「分類器カスケード」

Haar 分類器カスケード の内部表現。

Storage⇒「計算用メモリ領域」

オブジェクト候補の矩形が得られた場合に、その矩形列を保存するメモリストレージ。

scale_factor⇒「Harr 特徴をマッピングさせる時の拡大縮小率」

スキャン毎に探索ウィンドウがスケールされる際のスケールファクタ。例えばこの値が 1.1 ならば、ウィンドウが 10% 大きくなる。探索ウィンドウが大きければ処理は早くなるが検索漏れを起こすなど精度は落ちる。分類器に使用した画像サイズならびに探索する画像サイズが明確になっていれば有効な引数だが、今回の場合のようにいずれも不一定的な場合は、むやみに利用するものではないと考え、“1.05” に設定した。

min_neighbors⇒「近傍集約」

近傍にある検出した領域をまとめる。最低でも n 個の領域が存在している箇所を対象とみる。(これから 1 を引いた値が) オブジェクトを構成する近傍矩形の最小数となる。min_neighbors-1 よりも少ない矩形しか含まないようなグループは全て棄却される。もし min_neighbors が 0 である場合、この関数はグループを一つも生成せず、候補となる矩形を全て返す。これはユーザがカスタマイズしたグループ化処理を適用したい場合に有用である。今回は“150” に設定した。

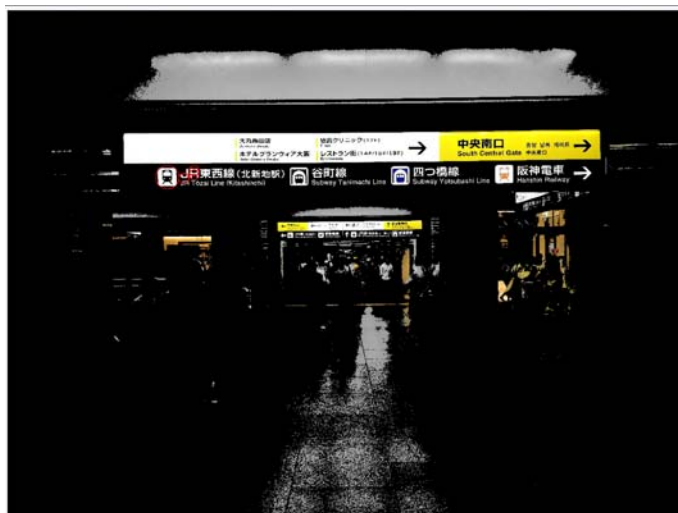
Flags⇒「未使用」

処理モード。現在は CV_HAAR_DO_CANNY_PRUNING だけが指定できる。これがセットされた場合、この関数は Canny のエッジ検出器を用いる。ある画像領域内にエッジが少なすぎる、あるいは多すぎる場合には、探索しているオブジェクトを含むことが出来ないため、このような領域を棄却するために用いられる。特定の閾値が顔検出用に調整されており、この場合、枝刈りによって処理速度が向上する。

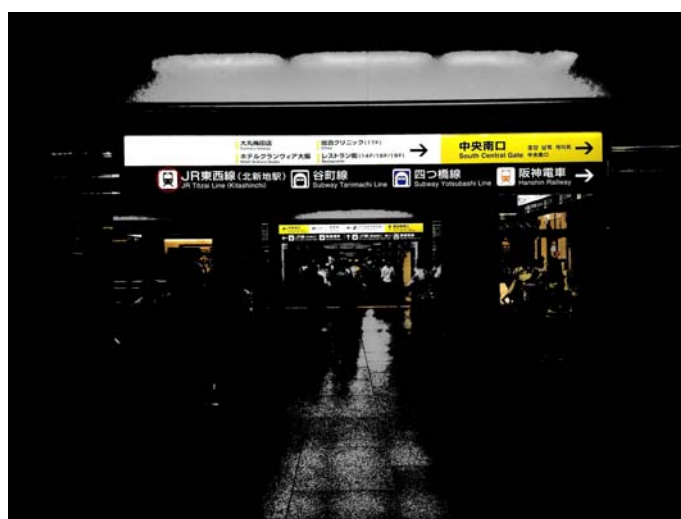
min_size⇒「探索窓の最小ウィンドウサイズ」

指定した値以下のサイズ (pixel) は探索しない。サイズを小さくしすぎてしまうと文字を誤検出してしまう可能性が高くなると考え、今回は(100,100)に設定した。

閾値を設定した結果を図 3. 2. 20 に示す。検出したいオブジェクト (JR のりばのピクトグラム) のみ抽出することができた。



(d) オブジェクト検出 (表色系変換・特徴色抽出)



(e) オブジェクト検出 (閾値設定)

図 3. 2. 20 ノイズ除去処理結果 (2)

ノイズ除去の効果を検証するために、サンプル写真（現地調査で撮影してきた写真の中で「JR のりば」のピクトグラムが写っていた写真）11枚を用いてノイズ数の推移を確認した。11枚の写真中に全1,626箇所の過大検出が発生していたが、「表色系変換・特徴色の抽出」の処理によって69箇所にまで過大検出が減少した。さらに、閾値設定の処置によって過大検出数が0箇所となった（図3. 2. 21）。以上の結果より検出精度が向上していることが確認できた。とくに「表色系変換・特徴色抽出」の処理が効果的であることがわかった。一方、「閾値設定」の処置によって未検出が5箇所に増加している。未検出については、システム化していくうえで再撮影をさせるなどの対処も考えられるため、過大検出に比べれば対処が比較的容易であると判断し、今回は、未検出よりも過大検出への対処を重要視している。しかしながら、引き続き未検出についても精度向上を図っていく必要があると考えている。この処理をピクトグラム単位で繰り返し行うことによって撮影されたサインの内容（ピクトグラムの種類と数量）が把握可能となる。撮影写真から抽出されたピクトグラムの種類と数量をどのようにして屋内測位のために利用するかについては後述する。

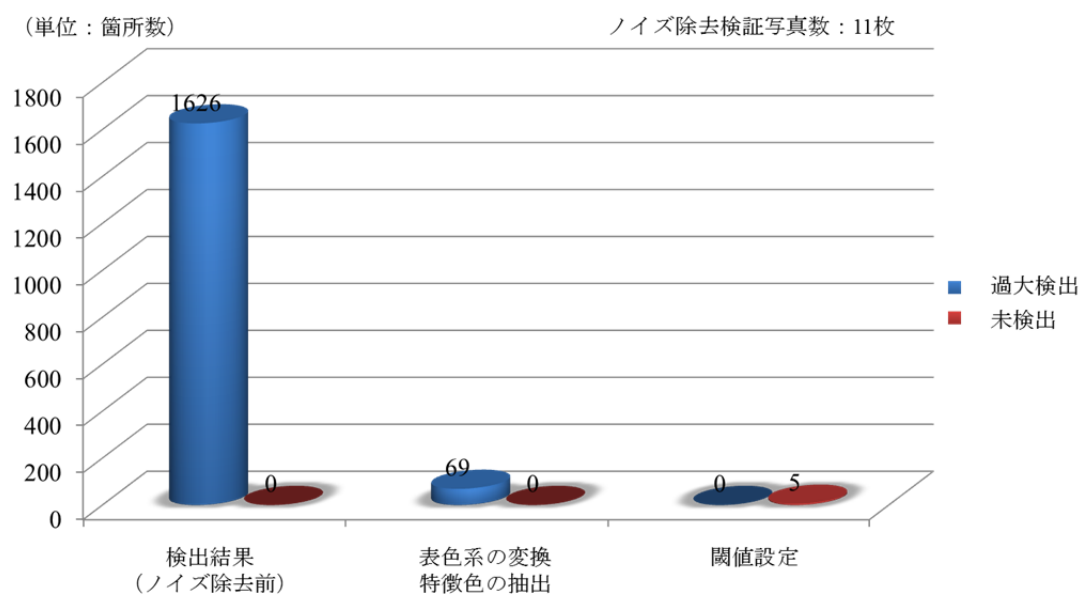


図3. 2. 21 ノイズ除去処理結果（3）

3. 2. 4 エリア範囲（おおまかな推定位置）の抽出・推定

前項によって抽出されたサインに対して「フロアマップ上のどのサインなのか」と「そのサインのどの辺りにいるのか」といった「空間上の位置」を把握するためには、抽出されたサインに対してエリア範囲を設定しておく必要がある。エリア範囲の抽出・推定については、「人間の視知覚特性を考慮したエリア範囲」と「サインの空間構造を考慮したエリア範囲」の2つの手法により試みている。

(1) 人間の視知覚特性を考慮したエリア範囲の抽出・推定

本研究では、スマートデバイスによって撮影された写真を利用することを想定している。歩行中にサインを撮影するという事は、歩行中にサインに気づいてはじめて成立する行為である。そこで、エリア範囲を設定するうえで「歩行中にサインの形状が視認できる、あるいはサイン内に記載されている内容が視認できる時に写真を撮影する」と仮定することで人間の視知覚特性を考慮したエリア範囲が設定できると考えた。具体的にはサインの形状ならびに内容（ピクトグラム）の有効視認範囲をエリア範囲として抽出・設定した。

① サインの形状

サイン形状の視認範囲については、サインの掲出高さを計画・設計する際に採用されている視認範囲の指標を用いて算出した（3. 13）。歩行している場合、一定の高さ以上にあるものは視野に入りにくい。一般には仰角（水平から見上げの角度） 10° より下が有向視野に入る範囲といわれている。また、旅客施設では、視認者の前方に視界を遮る他の歩行者がいると考えるべきで、その歩行者より上が遮断するものがなく見やすい範囲である。また、混雑時に前方5mの位置に他の歩行者がいると想定している（図3. 2. 22）。このようなサインの掲出高さに関して計画・設計の際に用いられている指標を参考に、サイン形状の視認範囲を対象サインごとに算出した。なお、本研究のサイン掲出高さについては、現地調査にて撮影した写真を元に抽出を行い、サインデータベースに格納した値を採用している。

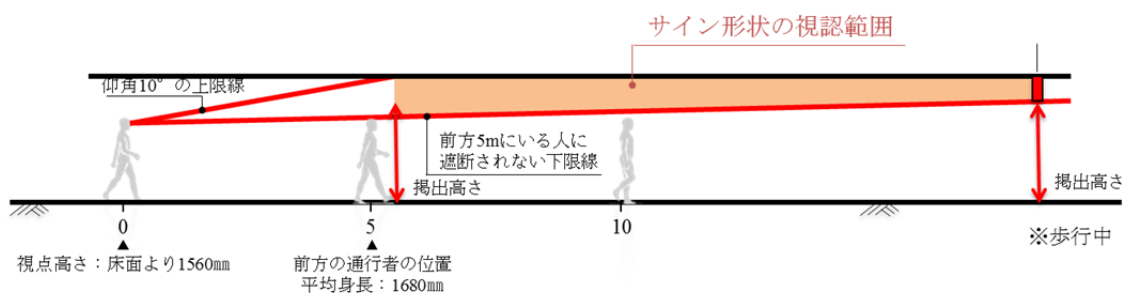


図3. 2. 22 サイン掲出高さの目安（3. 13）

② サインの内容

つぎに、サインの内容（ピクトグラム）の視認範囲については、ピクトグラムの大きさを設定する際に用いられている表3. 2. 1の指標を参考にした（3. 13）。表3. 2. 1のピクトグラムの大きさと視認距離の関係性から式3. 2. 1を導き出すことができる。式3. 2. 1を用いて対象サインごとの視距離を算出した（図3. 2. 23）。

表3. 2. 1 ピクトグラムの大きさ設定の目安

視距離(D)	基準枠寸法 (s)		
	和文文字高	英文文字高	ピクトグラム
1,000	9	7	35
5,000	20	15	60
10,000	40	30	120
20,000	80	60	240
30,000	120	90	360

視距離 (D) = 250/3 × 基準枠寸法 (s) 式3. 2. 1

※s ≥ 60(mm)

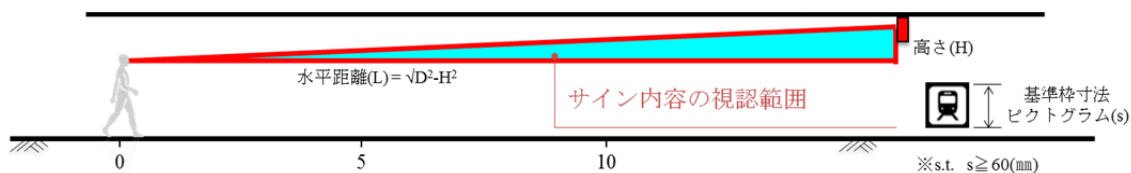


図3. 2. 23 ピクトグラムサイズの目安指標（3. 13）

算出したサイン形状ならびに内容（ピクトグラム）のそれぞれの視認距離を組み合わせ、視距離の近い範囲から「歩行中にサインが視認できるものの仰角が 10° 以上となってしまうためサイン形状を視認しにくい範囲」→「サインの形状が視認でき、かつ内容（ピクトグラム）も視認できる範囲」→「サインまでの距離が遠すぎて内容が視認しにくいものの形状は視認できる範囲」に分類した視距離をエリア範囲として設定した（図 3. 2. 24）。

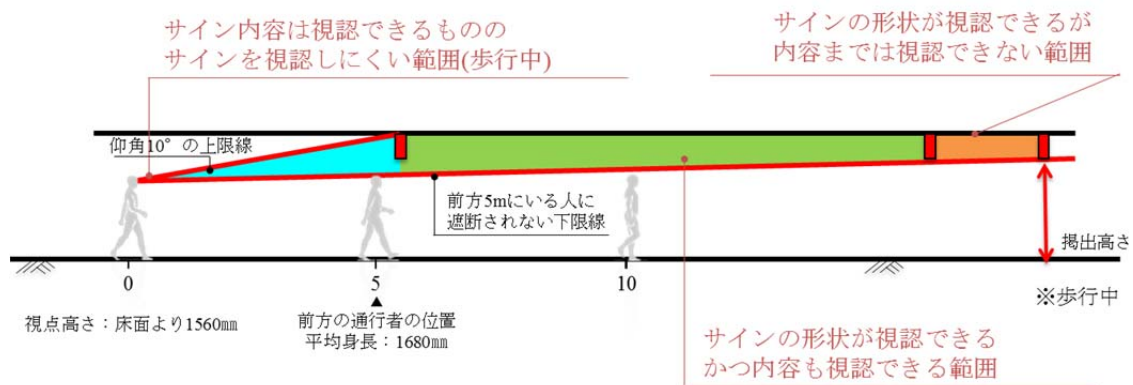


図 3. 2. 24 条件別視距離範囲

つぎに、対象サインごとのエリア範囲を GIS 上に表現した（図 3. 2. 25）。また、視認角度については構築したデータベースの属性情報である「サインの向き」を考慮し、サインの中心から 60° 以下の範囲とした。この図形情報を各サインで算出し、サインデータベースに格納しておく。

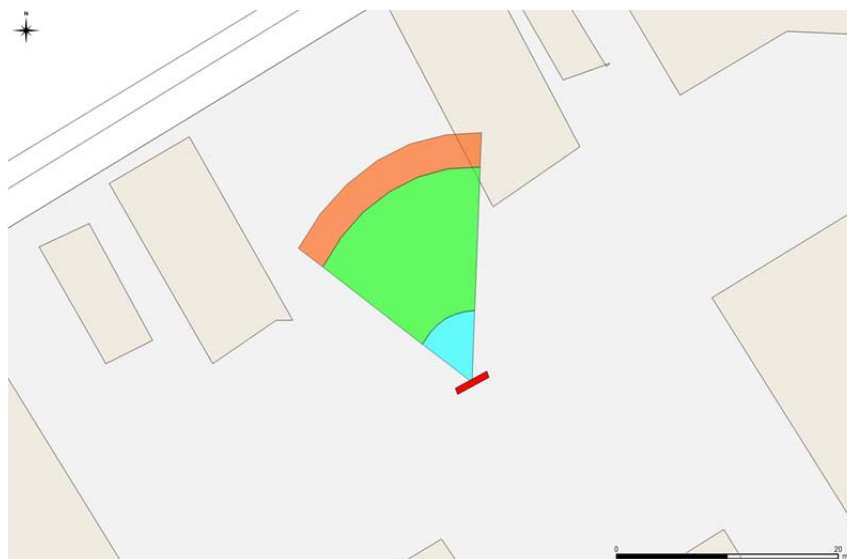


図 3. 2. 25 GIS 表現

設定した 60° については、静視野の概念で景観の分野において有効な指標として古くから用いられている「60° コーン」を採用している（図 3. 2. 26）。Gibson（ギブソン）が提示した視野のデータによれば、注視点（見ている中心点）を固定した場合の静視野（視点が静止している場合）では、同時に両眼で見ている範囲は、左右各々ほど 60° とされている（3. 17）。この「60° コーン」を各サインに設定するという事は、サインそのものに疑似的に視点を置いた際にサインから見える範囲と示している。言い換えればサインが見られる範囲に置き換えることができる。

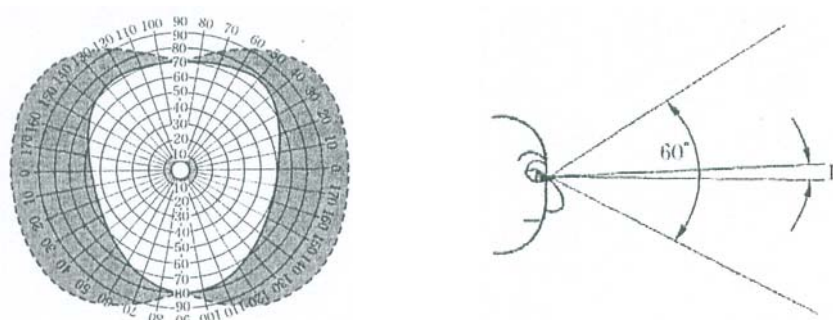


図 3. 2. 26 60° コーン（3. 17）

前項で画像処理によって抽出したピクトグラムの種類や数量と構築したサインデータベースに格納されている属性情報（サイン盤面に記載のあるピクトグラムの種類と数量）とマッチングさせることにより、どのサインが撮影されたのかが判別可能となる。さらに図形情報としてデータベース化された視距離範囲といったエリアが各サインで登録されているため、判定されたサイン付近のどの辺りに存在しているのかといったおおまかな位置を特定することができる（図 3. 2. 27）。



図 3. 2. 27 マッチング手法

(2) サインの空間構造を考慮したエリア範囲の抽出・推定

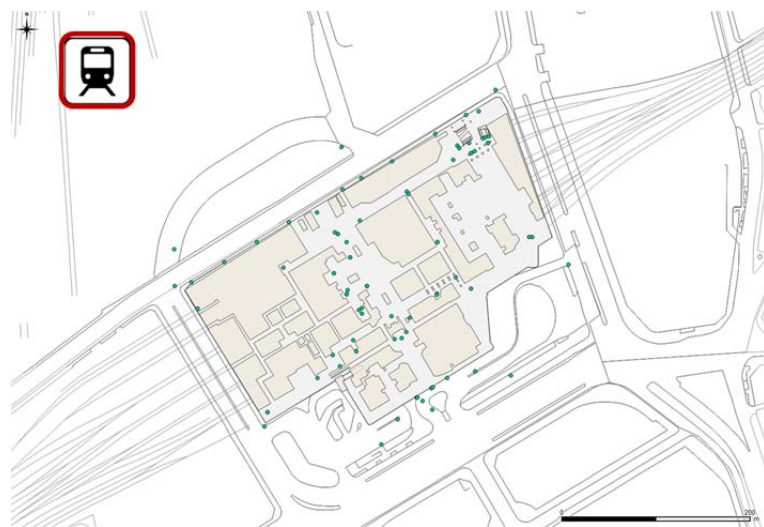
ここでは、サインの空間構造を考慮したエリア範囲の抽出・推定について述べる。具体的には、サインの空間構造からサイン（ピクトグラム）のつながりとサイン（ピクトグラム）の影響範囲を生成させることで屋内位置を推定することを試みている。

① サイン（ピクトグラム）のつながり

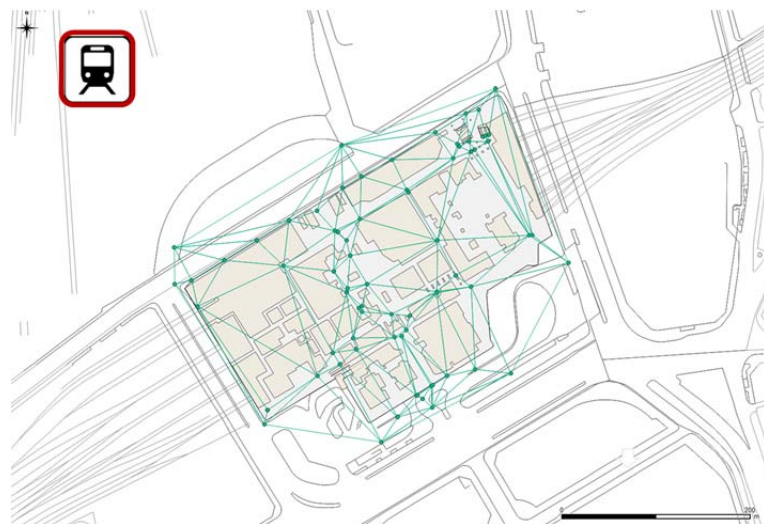
撮影された写真画像内から画像処理によってサインに記載されている建物名や施設名のピクトグラムが比較的高い精度で抽出可能であることを先述した。そこで、まず、画像処理によって抽出されたピクトグラムが記載されているサイン設置位置をあらかじめ構築しておいたサインデータベースを用いて抽出する。つぎに、抽出されたサイン設置位置を母点としてドロネー三角網を発生させた。図3. 2. 28は、「JRのりば」のピクトグラムが記載されているサインの設置位置を抽出し、ドロネー三角網を生成させたものである。



(a)サイン設置位置



(b)「JR のりば」が記載されているサインのみ抽出



(c) ドロネー三角網生成

図3. 2. 28 サイン位置の抽出とドロネー三角網の生成

単なるドローネー三角網を生成しただけでは、サインのつながりを十分に表現することができるとはいえない。単純なドローネー三角網では、ピクトグラム単位で抽出したサインの設置位置すべてにドローネー辺が生成させるため、視線方向とは反対側のサインについてもドローネー辺を生成させてしまっている（図3. 2. 29）。そこで、生成させたドローネー三角網を用いてより現実空間に沿ったネットワーク化（サインのつながり）を表現する必要がある。そこで「バックフェースカリング」に着目した。バックフェースカリングとは、面の法線と面上の点から視点へ向かう視点方向ベクトルとの関係を考慮し、ベクトルのなす角（鋭角もしくは鈍角）によって不可視となる面を除去するCGでよく用いられるレンダリング手法である（図3. 2. 30）。

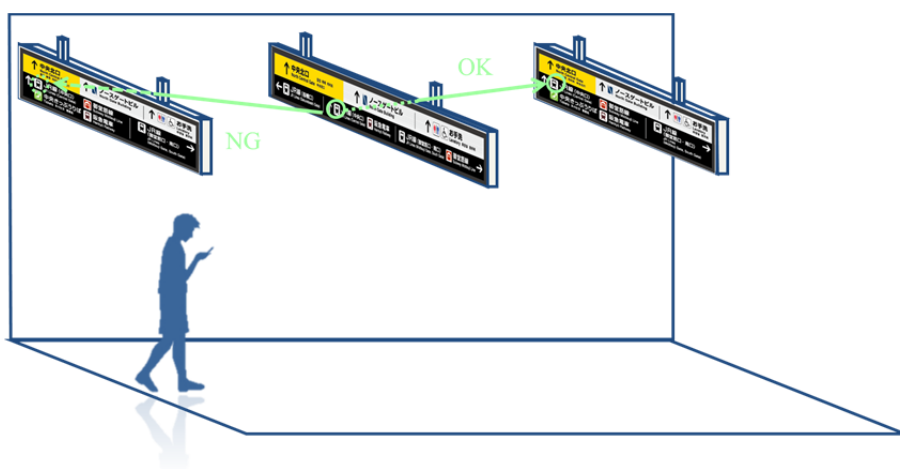


図3. 2. 29 現実空間に沿ったネットワーク化（つながりの表現）の検討

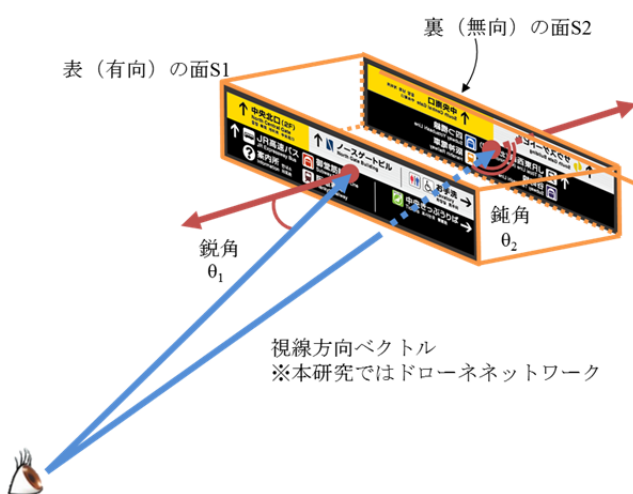


図3. 2. 30 バックフェースカリング（3. 18）

ネットワーク化の対象とするドローネー辺のみを抽出し、方向性を与えるために以下の条件を設定した。

(条件 I)

ドローネー辺とサイン盤面の向きとのなす角が鋭角であれば対象、鈍角であれば対象外とする (図 3. 2. 31)。これにより視線方向後方とのドローネー辺をネットワーク化から対象外とすることができる。

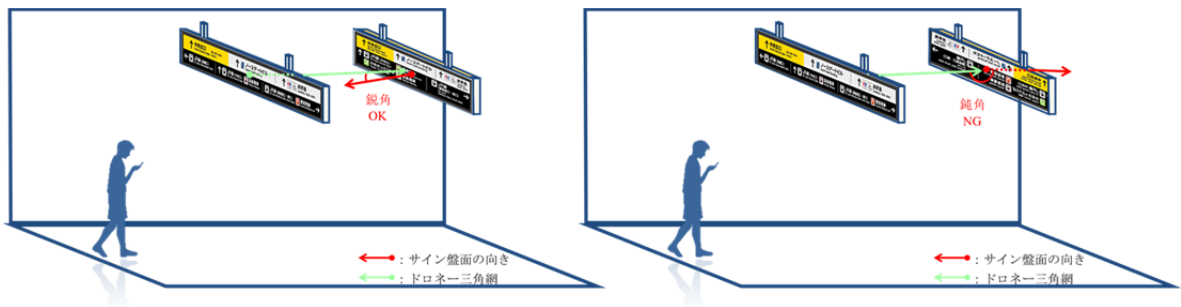


図 3. 2. 31 サイン盤面の向きを考慮したネットワーク化

サイン盤面の向きを考慮した方向性のみではネットワーク化するうえで不十分である。たとえば、サインに記載されている矢印と逆方向のドローネー辺はネットワーク化する必要がない。図 3. 2. 32 は「サウスゲートビル」のピクトグラムを対象とした盤面の向きを考慮したネットワークである。図中①のルートが対象ピクトグラム(今回でいう「サウスゲートビル」)までの最短経路でありネットワーク化を考慮すべき動線である。一方、サイン (b) については図中②のルートではなく③の動線を考慮して設置されたサインであるといえる。このようにサインの記載されている矢印の向きを考慮する必要がある。



図 3. 2. 32 「ノースゲートビル」を対象としたネットワーク化 (サイン盤面の向き)

(条件Ⅱ)

ドローネー辺とサインに記載されている対象ピクトグラムの矢印方向のなす角が鈍角であれば対象、鋭角であれば対象外とする (図3. 2. 33)。

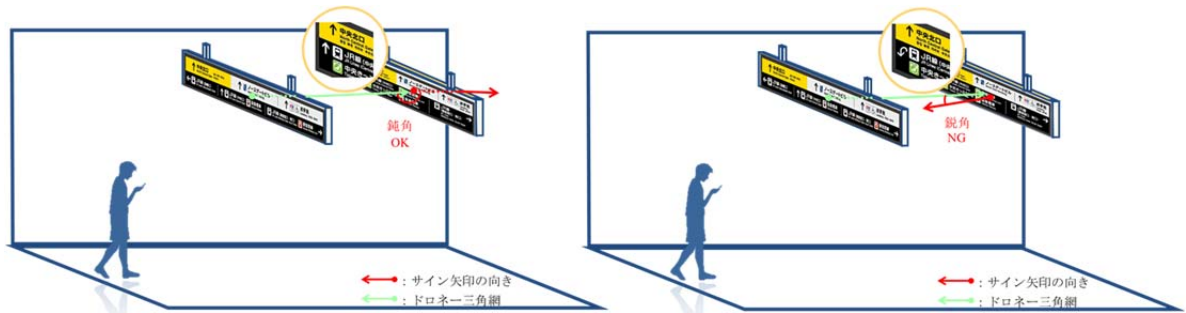


図3. 2. 33 サインに記載された矢印を考慮したネットワーク化

上記、条件Ⅰおよび条件Ⅱのいずれの条件も満たすドローネー辺に対してサインのつながり (ネットワーク化) を表現した (図3. 2. 34)。



図3. 2. 34 「JRのりば」のネットワーク化 (サインのつながり)

② サイン (ピクトグラム) の影響範囲

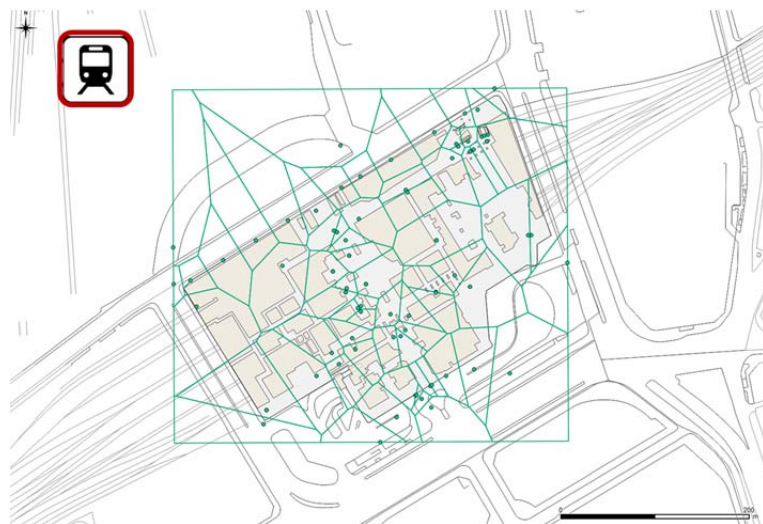
サイン (ピクトグラム) の影響範囲を表現するために、まず、先述した対象ピクトグラムのみサイン位置を抽出した。その抽出点を母点としてボロノイ分割を行った (図3. 2. 35)。



(a)サイン設置位置



(b)「JRのりば」が記載されているサインのみ抽出



(c)ボロノイ分割

図3. 2. 35 サイン位置の抽出とボロノイ分割

単純なボロノイ領域では、サイン背後も影響する範囲となるため、現実空間に沿った「サインが影響を与える範囲」を表現するには不十分である（図3. 2. 36）。具体的には、サインが影響する半空間と影響しない半空間に分割される（図3. 2. 37）。そこで、ボロノイ分割した領域を用いてサイン盤面の向きを考慮することで現実空間に沿った影響範囲を表現した（図3. 2. 38）。具体的には、サイン盤面の向き（法線ベクトル側）の半空間をサインが影響する範囲と定義した。また、本研究では、「正の半空間」と呼んでいる。一方、サイン盤面向きとは反対の半空間については、影響しない範囲とした。本研究では「負の半空間」と呼んでいる。



図3. 2. 36 現実空間におけるボロノイ領域（イメージ）

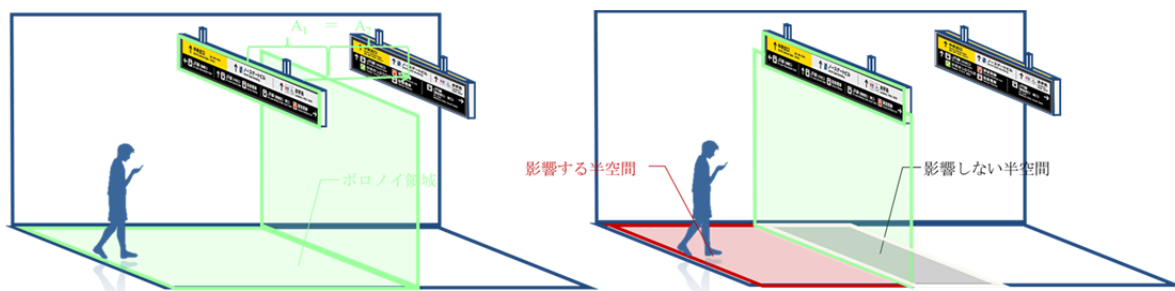


図3. 2. 37 現実空間に沿った影響範囲の検討（1）

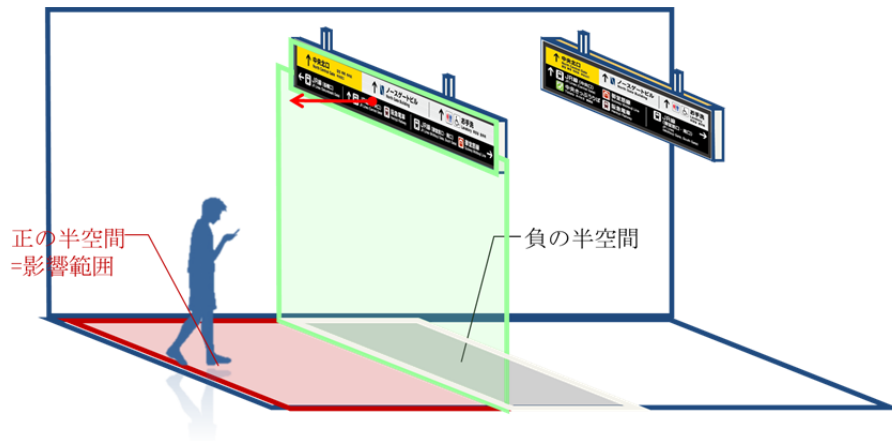


図 3. 2. 38 現実空間に沿った影響範囲の検討 (2)

分割には、ドロネー辺をサイン盤面の向きを考慮した新たな境界とし、下式により領域を設定した (図 3. 2. 39)。

(a) ボロノイ境界辺数 (=N) が奇数の場合 式 3. 2. 2
 $(N+2) / 2 + 2$

(b) ボロノイ境界辺数 (=N) が偶数の場合 式 3. 2. 3
 $(N+2) / 2 + 2 \pm 0.5$

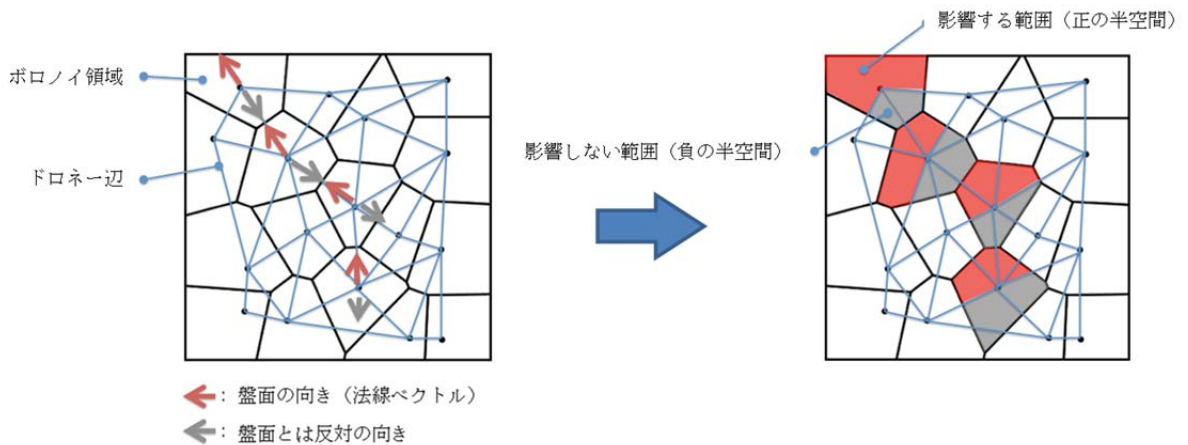


図 3. 2. 39 サイン盤面の向きを考慮した影響範囲の検討 (1)

また、サインの真下（もしくは通過直後）からでも視線方向（ネットワーク上）にあるつぎのサインは視認できるという仮説をたて、ドローネー辺から抽出されたネットワークで隣接する1つ前のサインの影響しない範囲（負の空間）を含めてサインの影響範囲とした（図3. 2. 40、図3. 2. 41）。

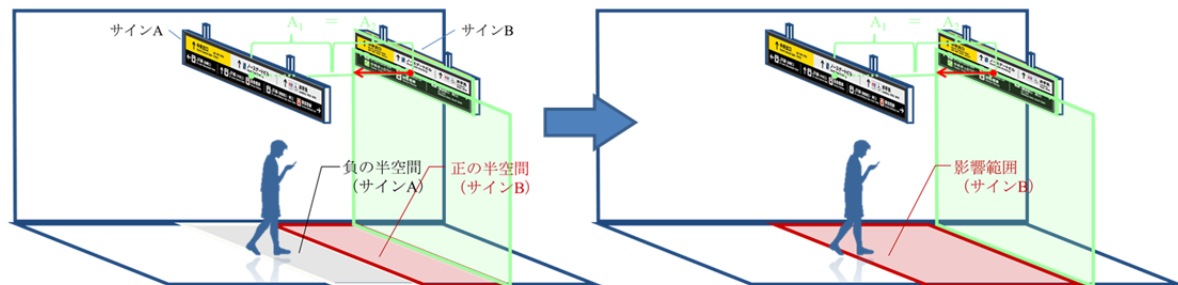


図3. 2. 40 サイン盤面の向きを考慮した影響範囲の検討（2）

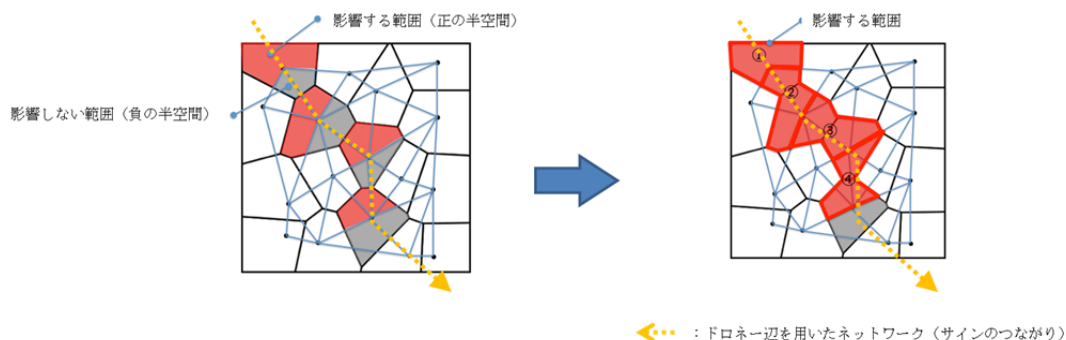
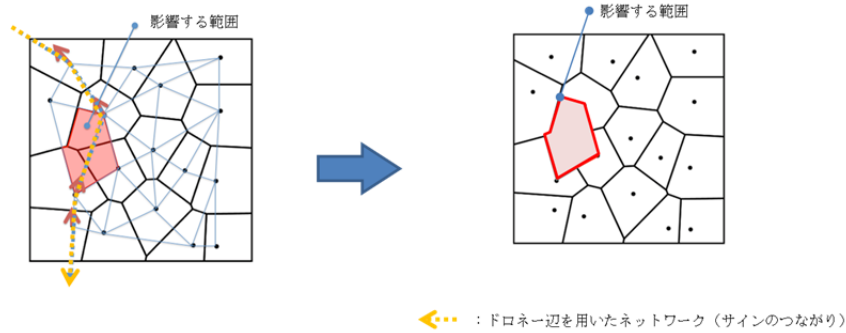


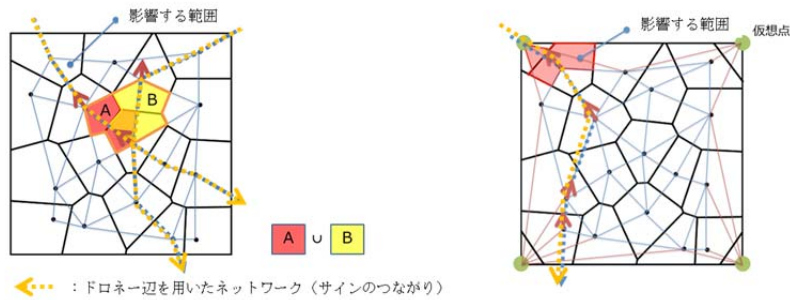
図3. 2. 41 サイン盤面の向きを考慮した影響範囲の検討（3）

その他、「サインの影響範囲」の抽出に必要な詳細な条件と以下のように設定した（図3. 2. 42）。

- (a) ネットワークが別のボロノイ図をまたぐ場合、そのボロノイ図についても正の半空間を影響範囲の対象とする。
- (b) 単一のエリアであっても複数のネットワークが同一ノードに集合する場合、その和集合を影響範囲とする。
- (c) 仮想点から生成されるボロノイ図、ドローネー三角網についてもネットワーク化、影響範囲の対象とする。



(a) ネットワークが中間のボロノイ図を跨ぐ場合



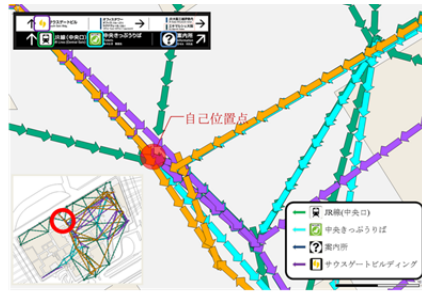
(b) 複数ネットワークが集中する場合

(c) 仮想点考慮

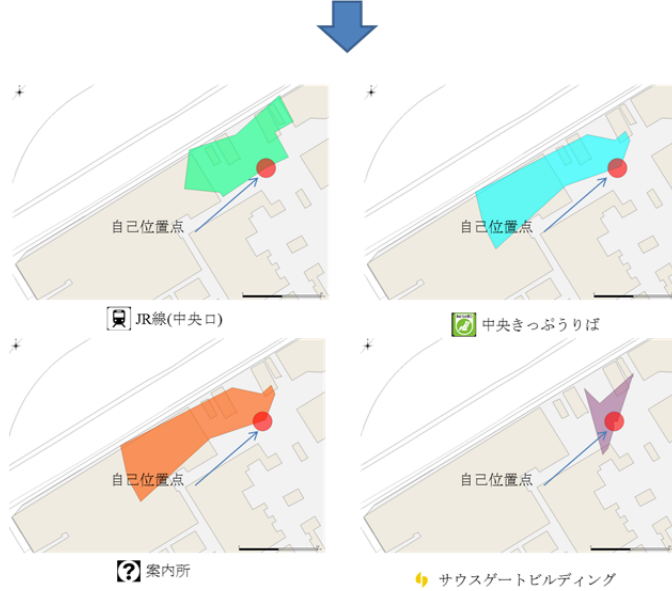
図 3. 2. 42 詳細設定

③ 空間分割分析を用いた自己位置推定

空間分割分析によって生成したドローネー三角網、ボロノイ領域を活用することで現実空間に沿った「サインのつながり（ネットワーク化）」、「サインの影響範囲」をピクトグラム単位で表現することができた。これを対象サインに記載されているピクトグラム単位で繰り返し生成することで自己位置を推定することができる。具体的には、まずサインに記載されているすべてのピクトグラムに対してサインのネットワークを各々生成させ、すべてのネットワークが集合するサイン位置（母点）を自己位置点として抽出する（図 3. 2. 42 の(a)）。つぎに、その自己位置点に対してサインの影響範囲（領域）を各ピクトグラムで生成させ（図 3. 2. 42 の(b)）、その積集合によりすべてのピクトグラムが影響する範囲を抽出する（図 3. 2. 42 の(c)）。さらに、抽出された領域に対する最小外接円を描画することによって推定エリアとして表現することができた（図 3. 2. 42 の(d)）。



(a)自己位置点抽出



(b)対象ピクトグラムの影響範囲を抽出 (点位置決定問題)



(c)積集合



(d)推定エリアの抽出

図 3. 2. 43 サインの空間構造モデルを用いた推定エリアの抽出

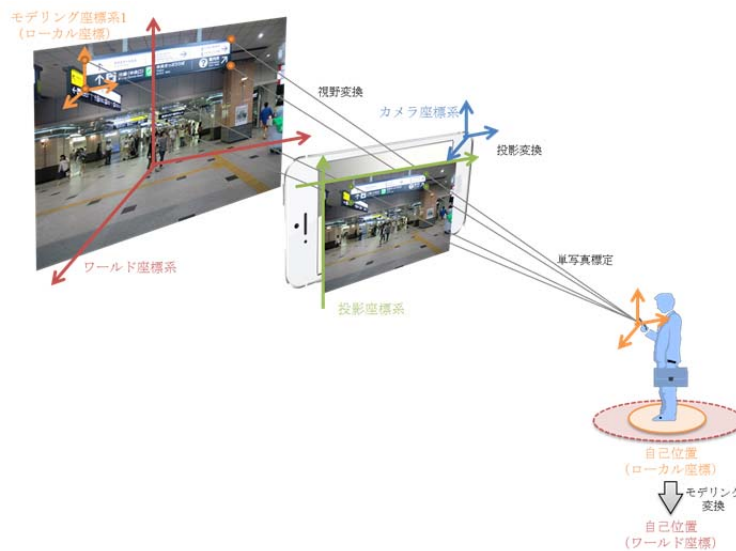
3. 2. 5 写真測量技術を用いたポイント位置の推定

さいごに、屋内での位置推定としてエリア付近の「どの位置にいるのか」といった詳細な位置の推定が必要となる。そこで、撮影した写真から詳細な位置を推定するために写真測量技術を活用した位置推定を行った。前項のエリア推定同様、歩行中に撮影した写真を用いることを想定している。

撮影された写真から現実空間の自己位置を推定するまで、さまざまな座標系の変換が行われることになる。座標系間の幾何学的変換(図形が定義されて、変換を受けて、最終的に表示されるまで)の一連の過程を「ビューイングパイプライン」とよぶ(3.18)。本研究におけるビューイングパイプラインを図3. 2. 44に示す。



(a)ビューイングパイプライン



(b)屋内測位までの座標変換

図3. 2. 44 本研究における座標変換

(1) 立体写真測量

立体写真測量は、人間の両眼視と同じ原理で、視点の異なる2枚の写真を用いて被写体内の同じ位置を対応点として捉え3次元計測を行う技術のことをいう。この技術を用いることによって撮影された写真の座標より、カメラの位置や姿勢を求めることができる。具体的には、2つの異なる位置から見た画像から3次元の奥行情報や画像間の位置関係など3次元空間を求める際に使用するステレオビジョンに関する幾何手法である「エピポーラ幾何」を用いることでカメラの位置や姿勢を求めることができる。詳細な理論については、前章の「ステレオ計測装置」にて記載している。ステレオ計測装置のように立体写真測量は、基本的には、被写体（対象）側のモデル生成や測定・解析などに用いられている。本研究では、本手法を撮影（視点）側の位置を推定する手法として応用したものである（図3. 2. 45）。まず、異なる視点（カメラ①とカメラ②）から撮影した2枚の写真から同一位置となる点を設定することで撮影位置座標（それぞれのカメラ位置）の抽出を行い（図3. 2. 46）、フロアマップ上にプロットした。理論上は、8点の対応点があれば計算可能となるが、実際には10点から12点程度の対応点があれば計算が安定する。本研究においても10点（既知点含む）の対応点を用いて2枚の写真画像間の相対的な位置関係を導いたのちに、既知点3点を用いて絶対座標（実際の3次元空間上の座標：ワールド座標）を算出した。本手法を適用させるためには、3点の既知点が必要であるが、サインデータベースに格納された「ピクトグラムを中心座標」の3次元座標を活用することで位置推定を行った。現地調査によって撮影してきた2枚の写真を用いて検証した結果、前項で抽出した視距離エリアならびに空間構造エリア内に撮影位置（推定位置）がプロットされていることを確認することができたことから詳細な位置を推定することができたと考えている（図3. 2. 47）。

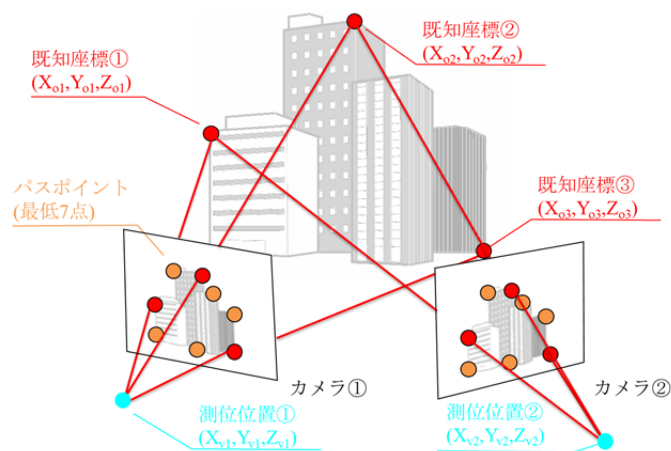
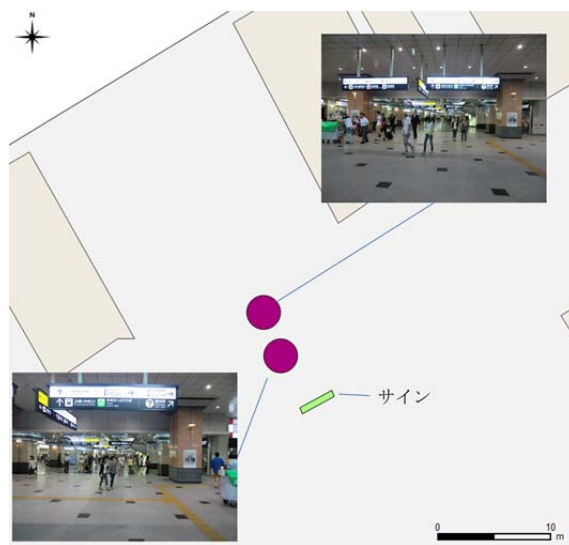


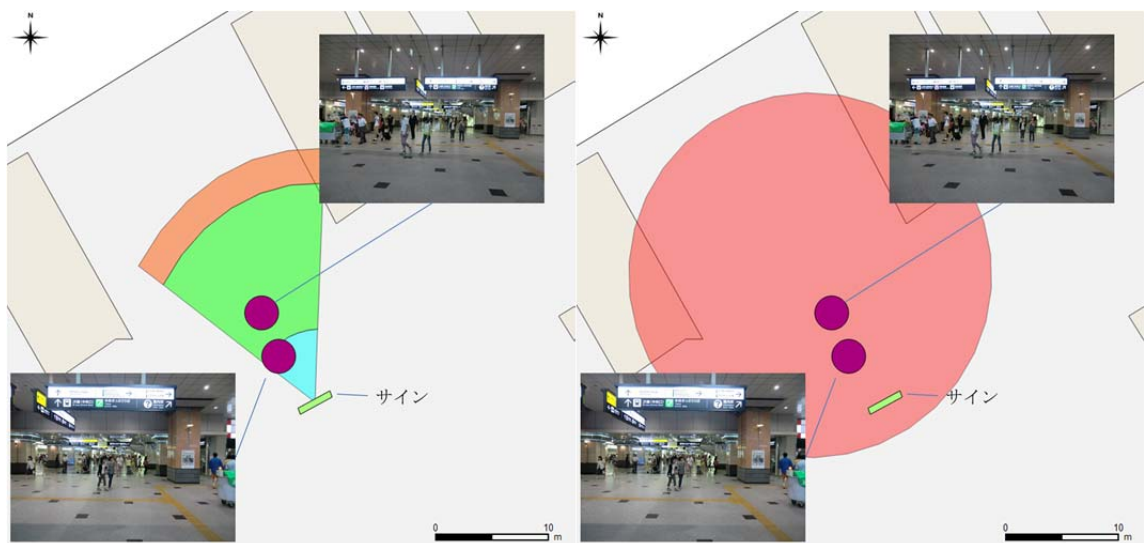
図3. 2. 45 立体写真測量を用いた自己位置推定 (1)



図3. 2. 46 立体写真測量を用いた自己位置推定 (2)



(a) 推定結果



(b) 視距離エリアとのオーバーレイ (c)構造モデルエリアとのオーバーレイ

図3. 2. 47 立体写真測量を用いた推定結果

(2) 単写真標定測量

立体写真測量は、3点のみの少ない既知座標であれば位置推定が可能であるものの、2枚以上の複数枚の写真が必要であること、さらには、それら複数の写真で既知座標以外にも対応点（7～9点）が必要であるなどの課題があり、位置推定に適用させるには労力を要する。簡便かつ汎用的な屋内測位を目指していくうえでさらなる省力化が必要となる。そこで1枚の写真でかつ対応させる点も少なくてすむ単写真標定測量の後方交会法を用いた位置特定を検討した。後方交会法とは、撮影画像の座標 (x,y) と被写体の座標 (X,Y,Z) の同一点となる箇所を最低4点（理論上は3点で収束解が求まるが収束解が安定させるため4点としている）対応づけることで撮影箇所の位置と姿勢が決定される（図3. 2. 47）。詳細な理論については、前章の「写真管理」に記載している。4点の既知点については、立体写真測量と同様にサインデータベースに格納された「ピクトグラムを中心座標」の3次元座標を活用することで位置推定を行った（図3. 2. 49）。

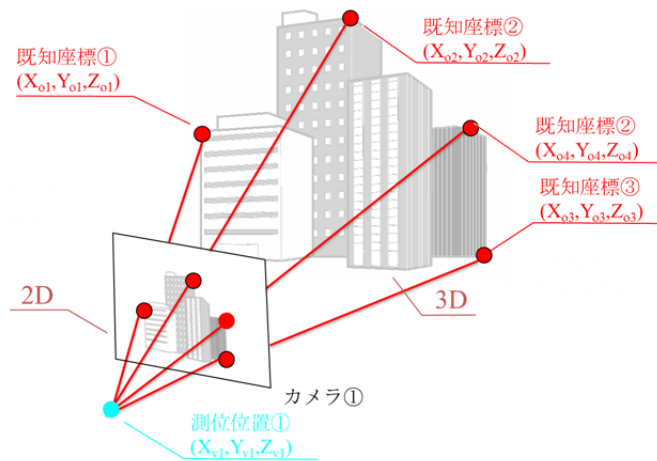
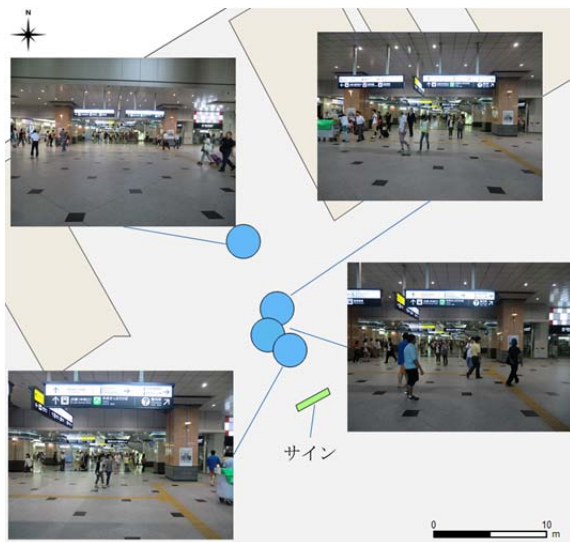


図3. 2. 48 単写真標定測量を用いた自己位置推定（1）

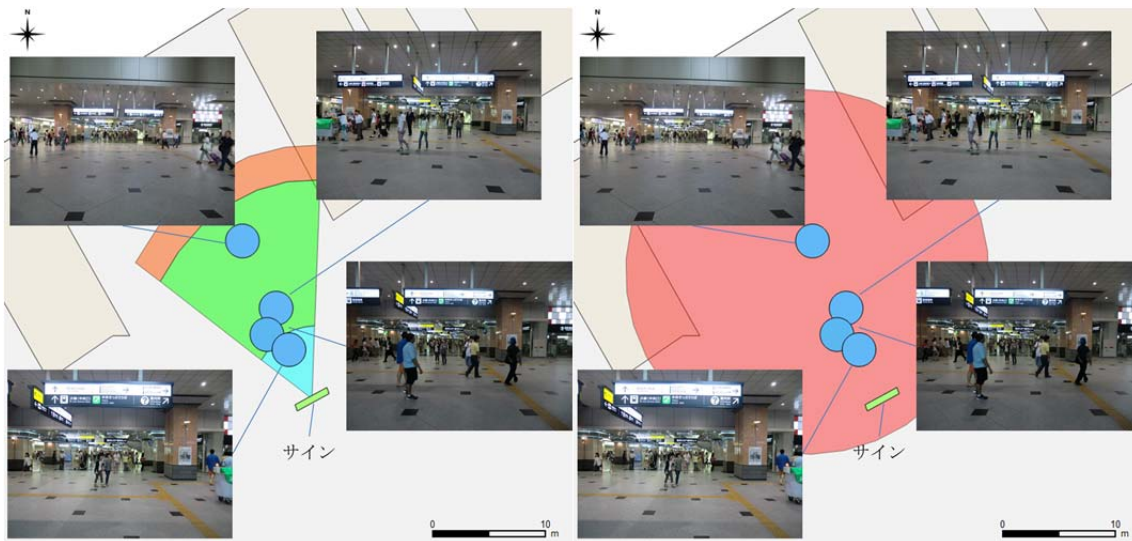


図3. 2. 49 単写真標定測量を用いた自己位置推定（2）

現地調査によって撮影してきた4枚の写真を用いて検証した結果、前項で抽出した視距離エリアならびに空間構造エリア内に撮影位置（推定位置）がプロットされていることを確認することができることから詳細なエリアを推定することができたと考えている（図3. 2. 50）。



(a) 推定結果



(a) 視距離エリアとのオーバーレイ (c)構造モデルエリアとのオーバーレイ

図3. 2. 50 単写真測量を用いた推定結果

(3) ポイント推定位置の検証

検証するにあたりカメラ諸元を考慮した相似関係から奥行方向、水平方向の距離を算出した。具体的には、カメラ画像のサインサイズと実寸サイズの相似関係からカメラ画像の焦点距離を用いることで実際の奥行距離を算出することができる。また、水平方向についても同様に焦点距離と実際の奥行距離の相似関係からカメラ画像のサイン原点（今回は左下に設定）から画像中心までの水平距離を用いることで算出することができる（図3. 2. 51）。

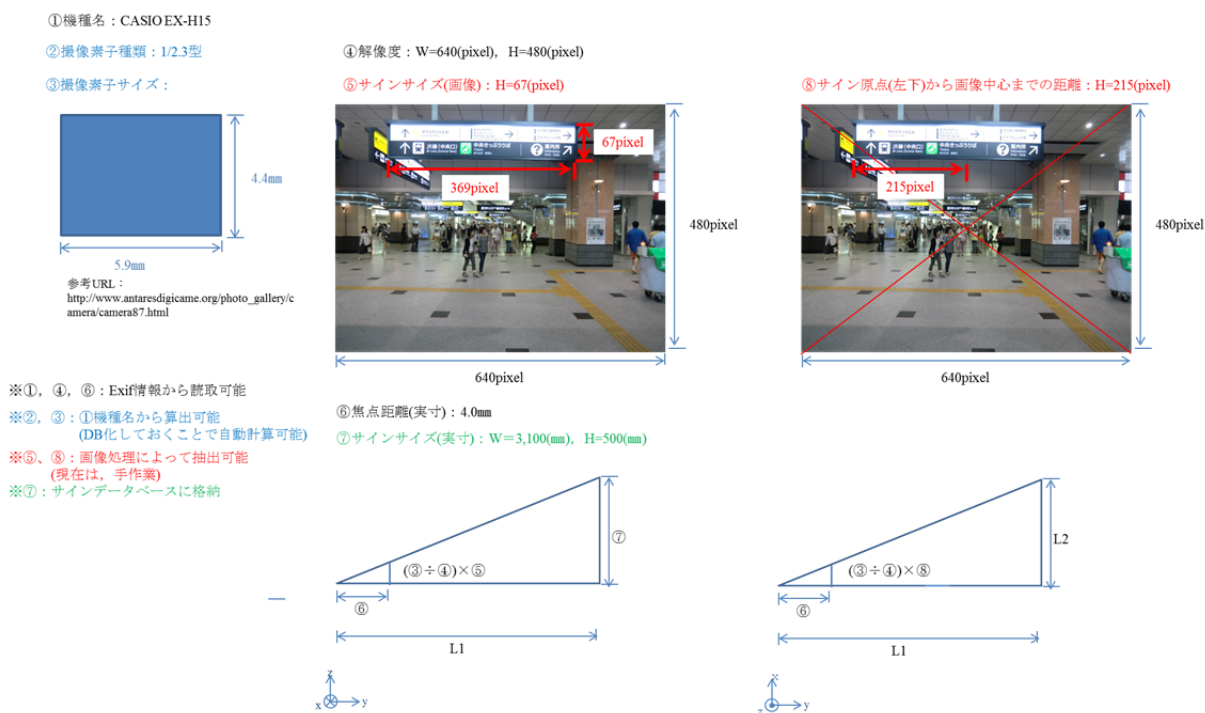


図3. 2. 51 奥行・水平距離の算出方法

算出結果からプロットした位置と立体写真測量および単写真標定測量によって推定された位置をオーバーレイした結果を図3. 2. 52に示す。それぞれのプロット結果を比較すると1～2mの範囲で集合していることから写真測量技術を用いた位置推定は有用であるといえる。

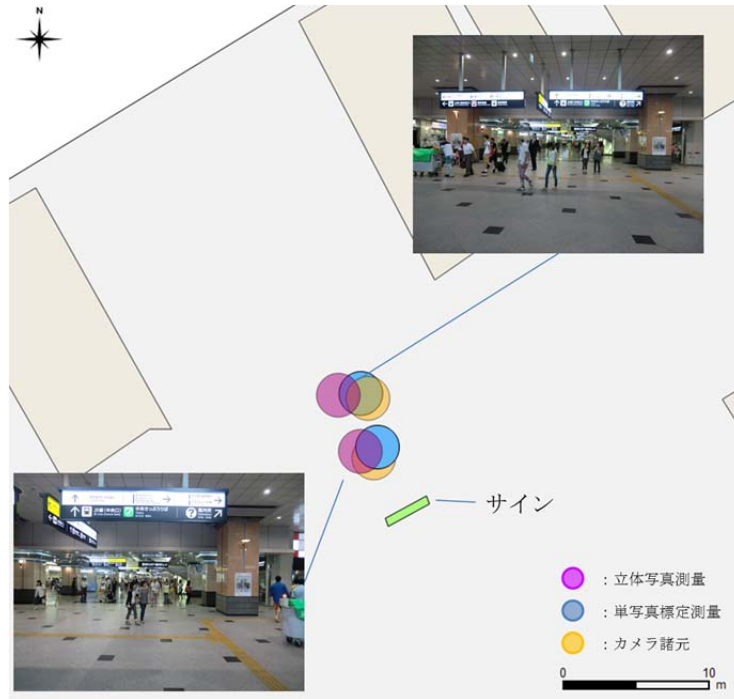


図 3. 2. 52 検証結果

3. 3 まとめ

本研究では、屋内位置の推定手法としてスマートデバイス、とくにスマートフォンから撮影された写真画像に着目して「撮影画像からサイン（ピクトグラム）抽出」を行えた。また、抽出したピクトグラムを用いて「エリア範囲（おおまかな位置）の推定」として視距離とサインの空間構造を考慮したエリアがデータベースを活用することで特定できることがわかった。さらに、その特定したエリアから「写真測量技術を活用したポイント位置（詳細な位置）の推定」を行うことで、より詳細な位置が推定できるといった屋内位置推定のための一連の流れが確認できた。画像処理を用いたオブジェクト（ピクトグラム）検出については、ノイズ除去処理によって高い精度での抽出を可能としたが、引き続き精度向上を進めていく必要がある。また、写真測量技術を活用した位置推定では、既知座標あるいは写真同士で対応する点（被写体の同一な点）を必要としているが、その指示が現在は手動で行っているため自動化が必要であると考えている。また、立体写真測量、単写真標定測量ともに屋内位置を特定するために効果的な手法であることがわかった。デフォルトでは、対応させる座標が少なくても単写真標定測量による位置特定とし、既知点が4点以上確認できない（3点しかわからない）場合には、立体写真測量による位置特定を行うなど、撮影状況に応じて使い分けなどの工夫が必要であると考えている。

本研究では、先述した各項の個別検討にとどまっている。一連の流れで屋内測位が可能となることは確認できたものの引き続き各手法の精度向上と自動化を進めていくと同時に各手法を統合させたシステムの構築を進めていくことで本手法による屋内測位技術を深度化・高度化していく必要がある。とくに ICT 技術を活用した汎用性の高いシステム化を目指していきたいと考えている。

本研究によってあらかじめデータベースを構築しておくことが屋内位置を推定するうえで有効であることが確認できた。具体的には、エリア範囲の推定では、「掲出高さ」、「ピクトグラムの種類、数量、寸法」を、ポイント位置推定では、「サイン躯体4隅の3次元座標」や「ピクトグラムの中心座標」を現地調査で撮影された写真を用いてあらかじめデータベースに格納し、活用することでそれぞれの推定が可能となった。したがって、撮影画像から必要な情報を効率的に抽出する方法や抽出された情報をデータベースとして効率的に格納していく方法などデータベース化の効率化についても検討を進める必要がある。

その中で、3次元地理空間情報データベースについては BIM モデルが屋内での位置を推定するうえで有効であることが確認できた。たとえばおおまかな位置を推定するためのエリアの設定としてサインの視認距離を設定しているが、現状では2次元の表現のみにとどまっている。BIM モデルを活用することによって3次元的な把握が可能となりさらに詳細なエリア設定ができるものと考えている。さらに、詳細な位置を推定

するための写真測量技術を活用するうえでも効果的であると考えている。現状の構築したデータベースでは、属性情報として3次元の情報を与えているにすぎない。今後は、前章の「3Dモデルを用いた橋梁維持管理システム」と同様に3Dのプロダクトモデルを構築し、フロアマップそのものを3D化あるいは、VR（仮想現実：Virtual Reality）を活用するなどさらなるデータベース化の拡充を目指していきたい。

さいごに、本手法をシステム化した際の屋内測位技術としての位置づけ・特徴を整理する（図3.3.1）。本手法はパッシブ型・スタティック型といえる。同様の手法としてパッシブ型のRFIDがあるが、RFIDは位置情報インフラに直接、接触して位置情報を取得するのに対して、本手法では非接触・遠隔からカメラをかざして位置情報を取得するといった特徴を持っている。また、他の手法は専用機器（受信機もしくは発信機（位置情報インフラ））の購入・設置・設定・メンテナンスなどのインシヤル、ランニング両方のコストがかかってしまう。しかし、本手法であれば既存のサインが位置情報インフラとなり、また受信機についてもカメラ撮影機能がついたスマートデバイスであれば位置を特定することが可能となる。このように汎用的かつ簡便な測位手法が実現できるものと考えている。

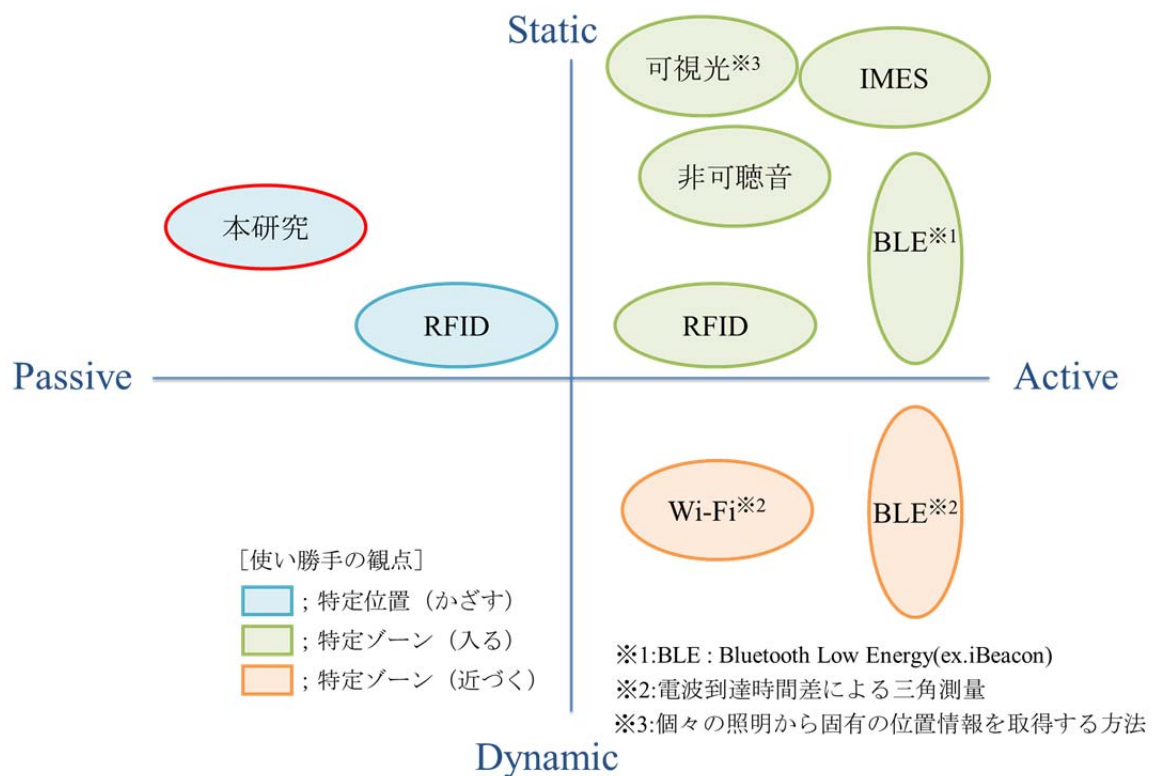


図3.3.1 本研究の位置づけ

3. 1) 総務省：平成 24 年通信利用動向調査の結果，2012，
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/130614_1.pdf>（入手 2014.10.20）.
3. 2) 総務省：平成 25 年度情報通信白書，2013，
<<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc111210.html>>（入手 2014.10.20）.
3. 3) 野村総合研究所：2020 年に向けた「G 空間」社会のあり方，知的資産創造，2013，
<<https://www.nri.com/~media/PDF/jp/opinion/teiki/chitekishisan/2013/cs20131102.pdf>>（入手 2014.11.17）.
3. 4) 国土地理院：地理空間情報活用推進基本計画，2012，
<<http://www.gsi.go.jp/common/000065943.pdf>>（入手 2014.11.17）.
3. 5) 国土交通省：国土のグランドデザイン「G 空間情報」の貢献，2013，
<<http://www.mlit.go.jp/common/001022893.pdf>>（入手 2014.10.06）.
3. 6) 株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ：“イオンレイクタウン「迷子探しサービス」を提供開始”（2009.1.26 付報道発表資料）
<https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/page/090126_00.html>（入手 2014.10.21）.
3. 7) 株式会社日立コンサルティング：平成 21 度 IT とサービスの融合による新市場創出促進事業（IT とサービス工学の連携促進関連調査事業）報告書，2010，<
https://unit.aist.go.jp/cfsr/it-services-fusion/H21_hokokusyo.pdf>（入手 2014.10.21）.
3. 8) 細川直史、高梨健一、滝澤修：電子タグによる屋内測位を利用した携帯電話からの通報システム，GIS－理論と応用，地理情報システム学会，Vol.18, No.1, pp.79-85，2010.
3. 9) 桜木伸也、峰野博史、神田準史朗、石渡要介、水野忠則：屋内環境向け無線 LAN ナビゲーションを想定した位置・方向推定に関する検討，研究報告，情報処理学会，2008-MBL-44，2008-UBI-17，pp.41-47，2008.
3. 10) 村田正秋・瀬川爾朗・鳥本秀幸：「IMES の技術動向 - シームレス三次元測位・航法の新技术-」，電子情報通信学会誌，Vol.95 No.2, pp.119-124，2012.
3. 11) 公益社団法人 日本測量協会：THE JOURNAL OF SURVEY 測量，vol.64，No.4，pp.16-19，2014.
3. 12) 国土交通省：公共交通機関の旅客施設に関する移動等円滑化整備ガイドライン，2007，
<<http://www.mlit.go.jp/barrierfree/public-transport-bf/guideline/guidelineshisetsu.pdf>>（入手 2014.10.21）.
3. 13) 交通エコロジー・モビリティ財団：公共交通機関旅客施設のサインシステムガイドブック，株式会社大成出版社，2007.

3. 14) 西日本旅客鉄道株式会社：「データでみる JR 西日本 2013」, https://www.westjr.co.jp/company/info/issue/data/pdf/data2014_11.pdf (入手 2014.11.05)
3. 15) 奈良先端科学技術大学院大学：「OpenCV プログラミングブック 第2版」, pp.329-331, 株式会社マイナビ,2007.
3. 16) Paul Viola and Michael J.Jones, 「Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features」, IEEE CVPR, 2001.
3. 17) 景観デザイン研究会 (著), 篠原修 (編)：景観用語辞典, 彰国社, 1999.
3. 18) 財団法人 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS 協会)：「コンピュータグラフィックス」, pp.41, 2006.

第4章 結論と課題

4. 1 結論

本論文は、「屋外」環境と「屋内」環境の両面から鉄道空間を捉え、鉄道空間全体として安全でやさしい空間を利用者あるいは関係者に提供するための支援方法や仕組みづくりについてまとめたものであり、位置情報を活用した支援システムの開発を具体的な目的とした。システムの開発にあたっては、GIS や CAD/CG をはじめとする空間情報技術の融合的利用により、実空間上に存在する鉄道空間に関するさまざまな地物の位置情報を活用した実証的研究を行いながら、その完成を図ることとした。

あらためて、本研究の成果を各章で要約すると以下ようになる。

まず、第1章では、社会的背景と空間情報技術の動向について述べた。さらに、「鉄道空間における空間情報技術と位置情報の活用」に関わる問題を提議し、鉄道空間における位置情報の活用を屋内外で捉えることの重要性を明らかにした。

第2章では、鉄道空間の屋外環境としてインフラ構造物に着目し、写真測量技術と3次元プロダクトモデル、いわゆる CIM (Construction Information Modeling/Management) を活用した維持管理手法を提案した。国土の脆弱性にくわえ、人口減少や厳しい財政制約など、社会インフラをとりまく環境がますます厳しいものになる中、インフラ構造物に対しては、効率的に維持管理していくことが重要となる。さらには、早期に修復が必要な箇所を発見することにより、構造物の長寿命化を測る「予防保全的管理」が、今後のアセットマネジメントに求められていく。これらを要件定義とし、本研究では、空間情報技術を活用した維持管理（アセットマネジメント）システムを開発した。記録として撮影した写真やその撮影位置、さらには、点検・工事履歴、図面などの維持管理に関するさまざまな情報を「位置情報」をキーとして連携させることによって一元的な管理が可能となり、効率的に管理する環境が構築できた。さらに、点検・工事箇所のなどの正確な位置関係や寸法が経年的にかつ高精度に捉えることが可能となったことで、インフラ構造物の状態を客観的に把握・評価し、将来の健全度を予測し、必要な補修・補強などの措置に対する最適な時期と方法を判定する仕組みが実現できた。すなわち、ストックされた社会インフラをより効率的かつ有効に活用できる仕組み、既存ストックを最大限に活用できる仕組みとしての3D空間情報プラットフォームの構築が実現できたものと考えている。

第3章では、衛星測位が困難な屋内環境において自己の位置情報を取得するために、サインデータベースをはじめとする空間情報技術と画像処理技術や写真測量技術を融合的に活用することによる鉄道空間にふさわしい屋内測位手法を提案した。具体的には、スマートデバイス、とくにスマートフォンから撮影された撮影画像を用いて「撮影画像から画像処理を用いてサイン（ピクトグラム）の抽出」、「人間の視知覚特性や

サインの空間構造によるエリア範囲（おおまかな位置）の推定」、「写真測量技術を活用したポイント位置（詳細な位置）の推定」の技術検討を行い、屋内位置推定のための一連の流れを検証し、屋内測位技術の手法として有効であることを立証することができた。本手法は、スマートフォンで撮影された写真画像を用いており、すでに多様な屋内測位手法が出現してきている中で、それら手法とうまく併用できる汎用的な手法となり、さらにパッシブ型・スタティック型といったこれまでの屋内測位技術にはない方式を提案できたものと考えている。また、本手法は、既存のサインを活用するため、専用の位置情報インフラ（送信機）が不要となるため手ごろな手法となり実用化が比較的容易であると考えている。

以上の成果から結論として導かれる主要な論点を要約すると以下のようなになる。

- ① 撮影された写真画像が持つ2次元座標や現実空間あるいは仮想空間上の3次元座標などさまざまな座標系が存在する中、GISやCAD/CGといった空間情報技術を活用することで「位置情報」をキーとした座標系間の幾何学的変換が可能となり、鉄道のインフラ構造物に対する維持管理（アセットマネジメント）や屋内環境における自己位置推定のために有効な方法であることを実際の支援システムに関する技術的検討や開発を通じて明らかにした。
- ② さらに、空間情報技術と位置情報を活用することにより、写真測量技術や画像処理技術といったこれまで特定の目的のために利用されていた技術を有機的に連携・融合させることで、新しい活用手段を見出すことができた。
- ③ これら空間情報技術と位置情報、あるいは写真測量技術や画像処理技術を活用すること（以降、「空間情報デザイン」と呼ぶ）は、限定的なニーズに応えるだけでなく、多種多様なニーズに対応でき、鉄道空間の抱えるさまざまな課題に対して解決できる可能性があることを「屋外」と「屋内」の両面から鉄道空間を捉えることで確認できた。
- ④ 「空間情報技術の高度活用」が求められる中で、本研究における「空間情報デザイン」が一つの解決策として示すことができた。

一方、鉄道空間全体を支援するという大きな目標からすれば、本研究によって開発されたシステムは、インフラ構造物の維持管理（アセットマネジメント）システムと駅空間における屋内測位システムといったごく一部だけを対象としたものであった。したがって得られた成果は、限定的なものにすぎない。

しなしながら少なくとも、鉄道空間において現時点で解決すべき重要な課題として代表的なものを取り上げて実証的に技術的な検討を行い、一応の知見を得たこと、また、それらすべての検討項目で空間情報技術と位置情報を活用したシステム開発が有効であることを立証できたことなどから当初の目的はひとまず達成できたと考える。

4. 2 課題と展望

先ずもって取り組むべき課題は、鉄道空間における屋内測位システムの実装である。現時点では、技術検討に留まっており、屋内位置測位のための一連の流れを検証し、屋内測位技術の手法として有効であることを立証できたもののシステムを実装するには至っていない。今後、屋内測位システムについても空間情報技術を融合的に活用したいと考えている。その中で、BIMやVRなどといった3Dプロダクトモデルを活用していくことが有効であると考えているため、維持管理（アセットマネジメント）システムで得られた知見を活かし、システム開発を目指したいと考えている。その他にも本研究の今後に残された課題は非常に多く、個々の課題については各章のくまどめ>の部分で述べてきた通りであるが、ここではもっぱら、先の個々の課題を総合したうえでの、本研究を通して得られる課題について考える。

主要な課題としては、以下の3つをあげることができる。

- ① 開発した空間情報技術を活用した位置情報システムについて、各々のさまざまなケースにおける運用を積み重ねることによって、効果の測定を行う必要がある。また、それぞれの効果をもたらすメカニズムを解明し、理論化を図る必要がある。
- ② そのうえで、本研究で対象とした鉄道のインフラ構造物に対する維持管理（アセットマネジメント）や屋内環境での測位以外の安全でやさしい鉄道空間とするための支援システムを開発することによって、「空間情報デザイン」が有効であることを実証していく必要がある。
- ③ さまざまな分野に適用できるアプリケーションやサービスを創出していくための「空間情報デザイン」のあり方などについてさらなる深度化を図る必要がある。

1つめの課題については、実際の運用の場面においてシステムの積極的な利用を図っていくことで解決していきたい。しかし、これについては長期的な検証が必要であると考えている。とくに2章でのインフラ構造物における維持管理（アセットマネジメント）システムの効果測定は、検査～計画～工事といったアセットマネジメントにおける一連のPDCAサイクルを通してはじめて評価できるものと考えている。さらに、3Dプロダクトモデルを活用することによる効果測定は、維持管理のみならず、調査・計画～設計～積算～施工といった建設プロセスを一体的に捉えて評価する必要があると考えおり、いずれも多大な時間を要する。とはいえ、ぜひとも解決しておかねばならない重要な課題であるため、まずは、積極的なシステムの利用を促進していくことに取り組んでいきたいと考えている。

2つめの課題については、鉄道空間における「空間情報デザイン」の適用場面を拡

充することによって恒常的に有効であることを示す必要がある。

とくに安全でやさしい鉄道空間の創出を目指していくうえで取り組むべき重要な課題としては、都市型災害における避難誘導における空間情報技術と位置情報を活用した支援システムの開発である。これについては、3章で述べた屋内測位システムの開発を進めることによって一定の知見を得られるものと考えている。しかしながら、自己位置を把握しただけでは不十分であり、自己位置から適切に避難箇所までの誘導を促すなど、迅速な判断を支援していく必要がある。そのためには、施設内の空間構造や災害による被害予測などさまざまな空間データが位置情報をキーとしてリンクすることによって、総合的な管理を可能とし、さらには、高度な分析や直感的に把握しやすく表示しておくことが必要となる。これはまさに空間情報技術の得意とするところであり、「空間情報デザイン」の有効性を評価するうえで重要な検討項目であると考えている。

さいごの課題については、さまざまな分野に適用できるアプリケーションやサービスを創出していくためには、「屋外」環境と「屋内」環境の両側面から引き続き捉えていく必要がある。「屋外」環境においては、準天頂衛星のさらなる打ち上げに伴い、また、「屋内」環境においてもさまざまな方式のさらなる技術進歩によって位置情報の取得環境は、今後ますます高精度かつ高品質になり、位置情報のさらなる利活用が進むことが期待できる。しかし、たとえ高精度・高品質な測位が実現できたとしても、その基盤となる電子地図や3Dプロダクトモデルの精度が悪くては、その効果は十分に発揮できない。すなわち、位置情報の取得環境の進化を活かすためには、それに対応した高精度な基盤の整備が今後ますます重要となり、その中で「空間情報デザイン」の果たすべき役割は非常に大きい。そこで、鉄道空間を3Dの立体空間として捉えた基盤を構築し、そのうえで、屋内外問わず鉄道空間全体に関わる人・モノ・情報のもつ「位置情報」をキーとして現実空間と融合する「3D鉄道空間情報プラットフォーム」を構想する。

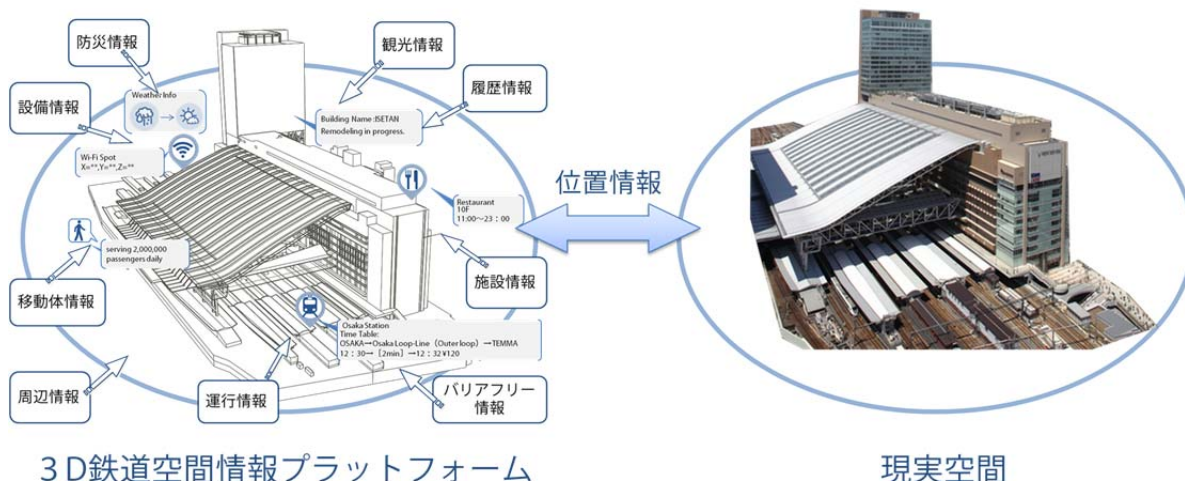


図4. 2. 1 3D 鉄道空間情報プラットフォーム

航空機 LiDAR や UAS (Unmanned Aircraft System : 無人航空機システム) / UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) レーザスキャナ、MMS (Mobile Mapping System : モバイル・マッピング・システム) などの 3D 座標を計測する技術を利用して、非常に精度の高い 3D 地図を作成する手法も広がり始めた。また、SfM (Structure from Motion) をはじめとする CV (Computer Vision) 技術を用いて連続画像や動画から 3D 地図を作成する手法も出現し始めている。さらに、地球観測衛星などによって撮影される地上の写真が高解像度化されるにつれ、現地測量なしに高解像度衛星画像から地図を作成する技術も発展・普及してきている。このように高精度な基盤の整備を効率的に行う技術も普及してきており、「3D 鉄道空間情報プラットフォーム」構築の実現は決して難しいものではないと考えている。

このような「3D 鉄道空間情報プラットフォーム」の構築、ひいては、鉄道空間に限らず、すべての人・モノ・情報に関わる情報が位置情報をキーとして現実空間と融合する「デジタルシティ」の構築こそが、環境デザイン/都市デザインの抱えるさまざまな課題を解決していくと確信している。

関連論文および発表論文

1. 審査論文

清水智弘, 吉川眞: 大規模複合施設における屋内測位技術に関する研究-ターミナル
鉄道駅のサインに着目して-, 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, No.37,
日本建築学会, 2014年12月.

清水智弘, 吉川眞: サインシステムに着目した屋内位置情報の測位技術に関する研究,
都市計画論文集, Vol.49, No.03, 日本都市計画学会, 2014年11月.

清水智弘, 吉川眞, 瀧浪秀元, 御崎哲一, 高橋康将, 中山忠雅, 内田修, 近藤健一:
3Dモデルを用いた橋梁維持管理システムの開発, 土木学会論文集F3(土木情報学),
Vol.69, No.03, 土木学会, 2014年03月.

清水智弘, 吉川眞, 瀧浪秀元, 中山忠雅: 3D情報モデルを活用した維持管理に関する
研究-JR西日本における鉄道橋への適用-, 情報・システム・利用・技術シンポジウ
ム論文集, No.36, 日本建築学会, 2013年12月.

Tomohiro Shimizu, Shin Yoshikawa, Hideyuki Takinami and Tadamasa Nakayama:
Development of Bridge Management System Using Three-Dimensional Models, Proceeding
of the 13th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management
(CUPUM 2013), 2013.07.

2. 口頭発表

清水智弘, 吉川眞: 鉄道駅に着目した視覚的関係性把握のための位置情報取得手法の
検討, 景観・デザイン研究講演集, Vol.10, 土木学会, 2014年12月.

清水智弘, 吉川眞: サインに着目した鉄道駅の空間構造モデルを用いた屋内測位手法
の検討, 地理情報システム学会講演論文集, Vol.23, 地理情報システム学会, 2014年
10月.

清水智弘, 吉川眞: 鉄道サインに着目した屋内測位手法の検討, Japan Geoscience Union
Meeting 2011 (JpGU2011), 日本地球惑星科学連合, 2014.04.

清水智弘，吉川眞：駅空間におけるサインに着目した屋内測位技術の検討，地理情報システム学会講演論文集，Vol.22，地理情報システム学会，2013年10月．

Tomohiro Shimizu, Shin Yoshikawa, Hideyuki Takinami and Tadamasa Nakayama : Development of bridge Maintenance System for asset management, Japan Geoscience Union Meeting 2011 (JpGU2011), Japan Geoscience Union (日本地球惑星科学連合), 2013.05.

清水智弘，吉川眞，瀧浪秀元，御崎哲一，高橋康将，中山忠雅，内田修，近藤健一：3Dモデルを用いた橋梁維持管理システムの開発，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.38，土木学会，2013年09月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：屋内環境における位置情報測位技術に関する基礎的検討，地理情報システム学会講演論文集，Vol.21，地理情報システム学会，2012年10月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：屋内広告物による視覚的影響の分析，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.63，IV，土木学会，2008年09月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：街路景観における屋内広告物の視覚的影響，景観・デザイン研究講演集，Vol.03，土木学会，2007年12月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：屋内広告物による視覚的影響の分析，地理情報システム学会講演論文集，Vol.16，地理情報システム学会，2007年10月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：屋外広告物に着目した街路景観の分析，景観・デザイン研究講演集，Vol.02，土木学会，2006年12月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：屋内広告物から見た街路空間の分析，地理情報システム学会講演論文集，Vol.15，地理情報システム学会，2006年10月．

清水智弘，吉川眞，田中一成：街路空間の分析～屋内広告物の観点から～，土木学会関西支部年次学術講演会概要集，Vol.48，IV，土木学会，2006年05月