

拡張現実を用いた道路整備作業支援システムの基礎検討

牧田 孝嗣[†] 張 慶椿[†] 一刈 良介[†] 大隈 隆史[†] 蔵田 武志^{†‡}

[†] (独) 産業技術総合研究所サービス工学研究センター

[‡] 筑波大学

E-mail: [†] {k.makita, keishun-chou, r.ichikari, takashi-okuma, t.kurata}@aist.go.jp

あらまし 社会資本整備の効率化を見据え、拡張現実 (AR) を用いて道路整備作業を支援するシステムの基礎検討を行う。本稿では、俯瞰カメラとハンドヘルド端末を用いて、主観視点、及び鳥瞰視点から道路の劣化状況の可視化を行う AR システムを試作した結果について報告し、今後の展望について述べる。

キーワード 情報可視化, メンテナンス支援, 拡張現実感

A fundamental study of an augmented reality system for road maintenance

Koji MAKITA[†] Ching-Tzun CHANG[†] Ryosuke ICHIKARI[†] Takeshi OKUMA[†] and
Takeshi KURATA^{†‡}

[†] AIST 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568 Japan

[‡] University of Tsukuba 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577 Japan

E-mail: [†] {k.makita, keishun-chou, r.ichikari, takashi-okuma, t.kurata}@aist.go.jp

Abstract In this paper, a fundamental study of an augmented reality system for supporting road maintenance is described. For realizing efficient road maintenance, we implemented a prototype augmented reality system using a camera fixed in the environment and a hand held device to visualize degenerate parts of the roads.

Keywords Information visualization, Maintenance support, Augmented reality

1. はじめに

道路やトンネルなどを始めとした社会インフラは、その整備や維持管理が非常に重要であるが、その作業は人手に依存する部分が多い。日本は今後、社会インフラが一斉に老朽化する時期を迎えようとしているが、その一方で、維持管理を担う人材が今後減少することも見込まれており、人材育成や、情報技術の応用による対応が期待されている[7]。そこで本研究では、社会インフラの整備作業の効率化を目指し、拡張現実 (AR) を用いて道路整備作業を支援するシステムの基礎検討を行う。以下、2 節では関連研究について、3 節では、提案システムの概要についてそれぞれ述べる。4 節では、今回実装したプロトタイプシステムについて、5 節では、プロトタイプシステムを利用した実験についてそれぞれ述べる。6 節では実験結果を示し、7 節では議論を行う。8 節では今後の課題について述べ、最後に 9 節でまとめを行う。

2. 関連研究

関連研究として、AR を用いて屋外での工事メンテ

ナンス作業を支援する手法が挙げられる[1][2]。これらの研究では、作業者が作業現場に立ち、ハンドヘルド型の端末等でメンテナンス対象の工事情報や地下配管の図面等を確認できる。

また、AR の画像生成手法に関する研究として、Milgram らは、AR 提示手法の分類を提案している[5][6]。AR 画像を生成する際には、計算機が実環境と仮想環境を取得し、合成する必要がある。彼らは「AR は一種の表現空間」と考え、実環境を取得するデバイスの位置・姿勢と、ユーザの位置・姿勢の関係性を基に、AR を以下の 4 つのタイプに分類している。

Egocentric: 実環境を取得するデバイスの位置・姿勢と、ユーザの位置・姿勢が一致するタイプ。

Egomotion: 実環境を取得するデバイスの位置・姿勢とユーザの位置・姿勢が一致はしていないが、着目する領域や、動き方にある程度相関があるタイプ。

Exocentric: 実環境を取得するデバイスの位置・姿勢と、ユーザの位置・姿勢に相関が無く、それぞれが独立しているタイプ

Ego-impression : 実環境を取得するデバイスの位置・姿勢と、ユーザの位置・姿勢に相関が無く、それぞれが独立しているが、ユーザが実環境を取得するデバイスの位置・姿勢を制御可能であるタイプ。

Gerhard らの研究[1][2]では、道路地下の配管構造をハンドヘルド型端末のカメラ映像に重ねるモバイル AR システムが提案されている。作業者はハンドヘルド型端末を持ち、そのカメラを作業エリアに向けると、地下配管の立体 CG が道路映像に重なり、作業者は配管の構造とメンテナンス情報（損害、安全、要修理箇所）を確認できる。なお、システムの測位と作業者の姿勢推定は GPS と方位センサーを用い、測位ずれを補正するために、ジョイスティックを用いて位置・方位の微調整を行う。

Gerhard らの手法では、マーカー、環境の画像認識に依存せず GPS 測位と方位センサーを用いて AR 表示を行っているが、GPS 測位の精度と場所の制限（ビル街、トンネル内等での測位が困難）は課題になっているため、利用者は手動で 3DCG を道路に合わせる必要がある。また、Milgram らの分類[5]から Ego-impression タイプの方法でしか画像を提供できないため、利用者は作業範囲の全体を把握することが難しい。

これに対し、本稿では、GPS 等の衛星測位に依存せず、屋内屋外を問わず利用可能であり、Egocentric、Egomotion、Exocentric の特性を利用して、複数のタイプの AR を用いた作業支援システムを検討する。

3. AR を用いた道路整備作業支援システム

道路の維持管理作業では主に、劣化箇所を調べるための「点検」作業と、点検作業によって見つかった劣化箇所の「舗装・修復」作業が行われている[8]。そこで本稿では、点検作業によって見つかった劣化箇所を作業者に AR で提示するシステムを提案する。AR を用いて、作業者が道路の修復必要箇所を確認する為の作業時間を短縮させ、さらに、より直感的な視覚提示手法を用いることで専門知識のない作業者も短時間で作業の内容と状況を把握できることを目指す。

作業者はタブレット端末、もしくはヘッドマウントディスプレイ（HMD）を通して AR 画像を確認することを想定し、作業者が AR 画像を通して修復必要箇所の位置を直感的に把握する（図 1）。さらに、任意の時刻（昼、夜）と場所（屋外、室内、トンネル内等）で修復必要箇所を直感的に確認できるシステムを目指す。



図 1 : システムの利用シーン

3.1. あらゆる作業環境に対応する AR システム

従来の屋外 AR システムでは、環境の特徴点認識、マーカー認識および GPS 等の測位システムが使われている。しかし、カメラの画像認識を用いる AR システムでは、暗い環境やスポット光源のある環境に弱い。また、作業箇所位置等の推定は GPS、QZSS 等を利用したシステムもあるが、位置情報精度の不足と利用時間帯の制限、屋内、トンネル内等の作業環境で利用できない等の課題が残されている。

一方、マーカーを用いた位置推定はカメラにマーカーが写されることを前提としているため、AR 視点の可視角度範囲はマーカーの分布範囲に左右される。また、工事と作業内容によってマーカーを設置しにくい場面もある。

このような背景の中で、本研究はあらゆる作業環境にも使えるシステムを目指し、画像認識、マーカー検出及び衛星測位に依存しない設計方針を取った。

本研究では、カメラ、作業者の位置と作業エリアの位置関係を用いた「相対的な位置推定手法」を提案する。提案手法では、作業エリアの後方に定点カメラを設置し、定点カメラの設置位置、向きと、作業者の足元位置、作業者が保持する機器の方位センサーを用いて、Egocentric タイプの AR 画像を生成する。また、定点カメラの画像を利用して Exocentric タイプの AR 画像を作業者に提供することで、作業者が作業環境の全体像を把握することを支援する。

提案システムは、画像認識とマーカー検出に依存しないため、作業者は位置関係のパラメータを手動で入力する必要がある。そのために、作業者がハンドヘルド装置のタッチスクリーンを用いて自分の足元位置を指定する手法を導入する。しかし、タッチによる位置指定は作業者の熟練さを問われ、また、標的の写る範囲が小さい場合には、本作業が誤差を生む原因となり

うる。こうしたタッチ入力による誤差を抑制するため、タッチで位置を指定する際に、画像の部分拡大機能と、画像の更新を一時停止する機能を導入する。作業者はタッチスクリーンで位置を手動指定する際に、位置指定用の画面（例えば、カメラ映像）を部分拡大してからタッチすることで、より精密な位置指定を行うことができる。なお、カメラ画像を部分拡大するため、俯瞰カメラには、高解像度の物を用いる。

また、画面にリアルタイムのカメラ映像が映し出されている場合には、通信状況の悪化によりノイズが含まれる可能性があるため、作業者はカメラ画像の更新を一時停止してから標的をタッチする機能を導入する。

3.2. インタフェースデザイン

本研究のアプローチとして、作業道路の修復必要箇所の種類と壊れ具合のデータをヒートマップで表現し、さらに、そのヒートマップをリアルタイムの道路映像に重ねて AR 画面を生成する手法を提案する（図 2）。作業者は AR 画面を見て修復必要箇所の位置、範囲、を把握できる。

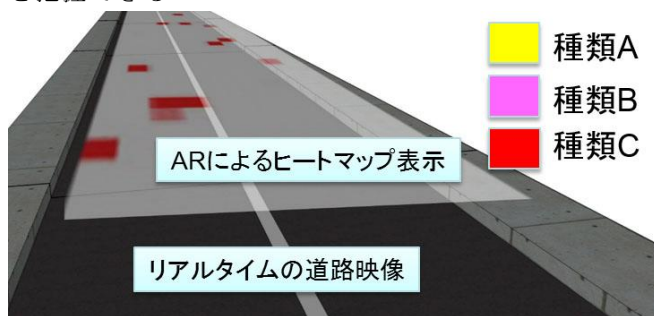


図 2: 修復必要箇所の重畳表示

Milgram らの分類 [5] を参考に、Egocentric, Ego-impression, Exocentric を併用して複数パターンの AR を作業者に提供する。作業者は作業内容に適したモードを選択し、利用場面に応じて切り替えることができる。

3.2.1 Egocentric, Ego-impression

ユーザの位置姿勢を用いて、作業者は修復必要箇所の位置を直感的に把握できる。しかし、外部視点と比べて視野は狭く、全体の状況を把握にくい傾向がある。

HMD (Egocentric) :

作業者は HMD を装着し、修復必要箇所を確認する。装置を持つ必要がなく、ハンズフリーであるため、作業の妨げがないという利点がある。

タブレット PC (Ego-impression) :

作業者はタブレットのスクリーンに介して周囲の状況を確認する。AR 画像はタブレット内蔵のカメラ映像に重ねられ、作業者は任意の角度と方向から周囲の状況を見渡せる（図 3）。作業者は手でタブレットを持つ必要があるが他の作業者に見せやすいメリットがある。



図 3: タブレット視点の AR

3.2.2 Exocentric

Exocentric タイプでは、定点カメラから撮った道路映像を用いて情報を作業者に提供する。作業者は自分の立ち位置を AR 映像から特定し、周囲の状況を把握する。

定点カメラ :

設置された定点カメラの映像を AR 映像と組み合わせた作業範囲の全域を映した映像。作業者は作業現場の全貌を把握できる。

疑似俯瞰カメラ :

従来の修復作業では作業図面が使われると想定し、俯瞰カメラ視点では、こうした図面と類似している俯瞰 AR 映像を提供する。リアルタイムの定点カメラ映像を使うため作業者の位置も AR 映像に表示される。俯瞰カメラ視点 AR は定点カメラから立体プロジェクションの手法を用いて変形し、その上に修復必要箇所の目印を重ねる。

3.2.3 AV モード

AV モードでは、道路の映像を 3D モデル化し、上記の定点カメラと俯瞰カメラ視点に囚われず、仮想空間内で任意の視点、位置から修復必要箇所を確認できる。作業内容の事前説明と事後検討などの場面に有用と考えられる。

4. プロトタイプシステム

研究のアプローチの実現に向け、プロトタイプシステムを設計、実装した。システムはタブレット側とサーバー側に分けられ(図 4)、道路作業現場に、無線 LAN 環境、サーバーと定点カメラを設置し、作業者はタブレット端末のディスプレイを通して修復必要箇所の位置を確認する。

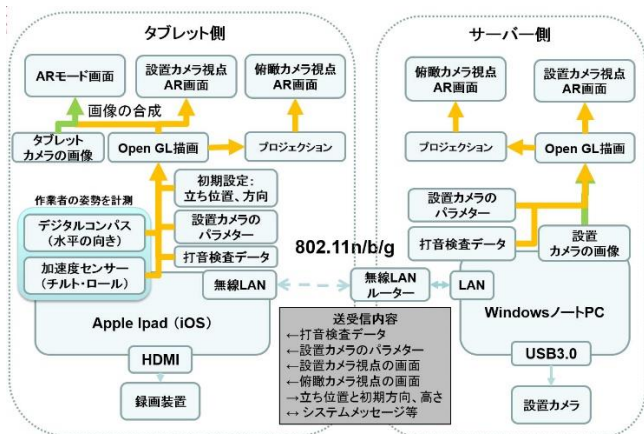


図 4： システムの構成

4.1. インタフェースと機能

プロトタイプシステムでは端末のカメラと定点カメラを用いて、以下の3種のモードで作業者に情報を提示する。

- タブレット視点 (図 5 左) :
- 定点カメラ視点 (図 5 中) :
- 疑似俯瞰視点 (図 5 右) :

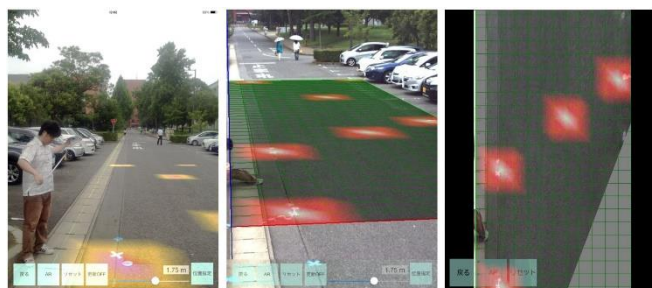


図 5： 作業者に提供する AR 画像の例

4.2. システムの設置と初期設定

プロトタイプシステムは位置姿勢が既知な定点カメラとタブレットとの幾何的な関係を用いた初期位置・初期方位の設定を行う。従って、システムを設置する際には、作業範囲の四角（作業原点から測量）に目視調整用の目印（マーカー）を置き、その後原点の後方に定点カメラを所定位置に設置し、最後に、サーバーと無線LAN環境を設置する（図6）。



図 6： システムの利用手順

システムを利用するためには、サーバーとタブレット端末の初期設定を行う。サーバーでは定点カメラの位置、高さ、下向き角度、横向き角度をパラメータとして入力する。作業者はパラメータの入力を完了すると、作業範囲の四角に置かれた目印がAR表示とマッチングしているかを確認し、必要に応じてパラメータを微調整する（図7左）。

タブレット端末の初期設定は、作業者が立ち位置が変わる度に行う必要があり、作業者はタブレット画面に映された定点カメラの映像から自分の足元位置をタッチする。この際、標的が小さくて確認しにくい場合には、定点カメラ映像の部分拡大と一時停止ができる。次に、端末カメラの映像の中心点（十字のガイドラインが表示される）を定点カメラの設置位置に照準する（図7右、図8）。

これらの作業により、作業者とカメラの位置関係は確定され、幾何関係とカメラ視角投影計算でタブレット視点のAR画像が生成される。作業者は立ち位置から移動しない限り、タブレットを用いて任意の角度で周囲を見渡すことが可能である。

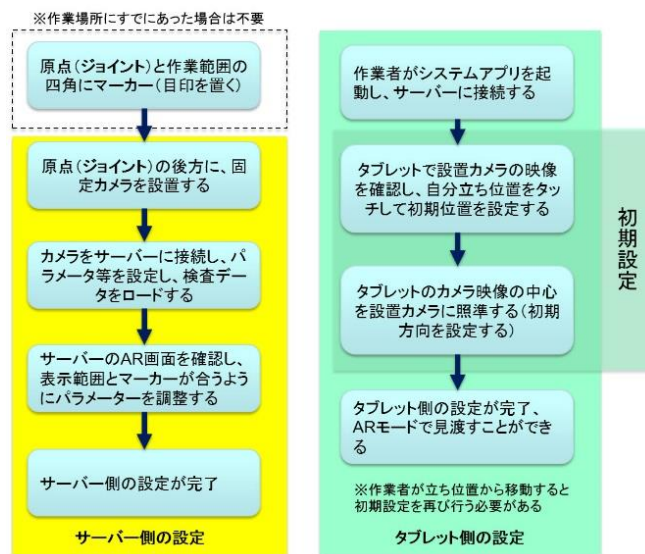


図 7： システム利用の流れ



図 8： タブレットの初期設定

5. 実験

試作したプロトタイプシステムに対し、各モードの表示精度及び設置に要する時間を調査した。実験は以下項目についての検証を行う。

- タブレット視点 AR, 及び俯瞰視点 AR の表示精度
- 装置設置所要時間の記録
- タブレット側の初期設定の所要時間の記録

5.1. 実験方法

- 実施者の人数と実施回数：2 人（4 回）
- 場所と日程：産業技術総合研究所構内の道路，2014 年 8 月下旬

5.1.1 実験用器材の設置

実験用器材の設置では、事前に実験用の道路に合わせて模擬の道路劣化箇所データの作成し、次に 4.2 節の手順に従ってシステムを設置する。次に、模擬の問題箇所に、精度調査用のマーカーと作業者立ち位置のマーカーを設置する（図 9）

実施者が問題箇所 A の立ち位置に移動し、タブレット視点 AR を用いて問題箇所 A、B の位置と AR での提示位置の誤差等を確認し、もう一人の補助者がその誤差を記録する。次に、問題箇所 B の立ち位置に移動し同じ要領で実施する。

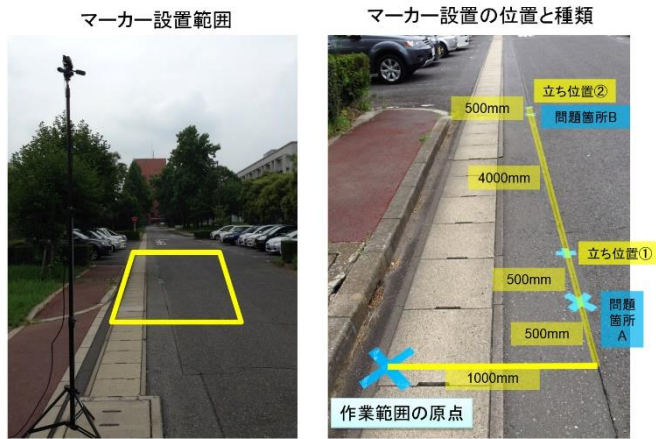


図 9:精度調査用のマーカーの設置

6. 実験結果

システムの設置等の所要時間を表 1 に、タブレット視点 AR の表示精度を表 2 に、俯瞰カメラ視点 AR の表示精度を図 10 にそれぞれ示す。

表 1:設置等の所要時間

作業の内容	所要時間
サーバー、定点俯瞰カメラ等のセットアップ	約 17 分
クライアント (iPad) における位置姿勢の初期化	約 18 秒

表 2:タブレット AR モードでの提示誤差

一回目： 高解像度	立ち位置 1		立ち位置 2	
	箇所 A	箇所 B	箇所 A	箇所 B
作業者 A	18.5cm	38cm	84cm	14cm
作業者 B	4.5cm	17cm	27cm	4cm
二回目： 低解像度	立ち位置 1		立ち位置 2	
	箇所 A	箇所 B	箇所 A	箇所 B
作業者 A	29cm	27cm	55cm	3cm
作業者 B	2cm	34cm	13cm	12cm

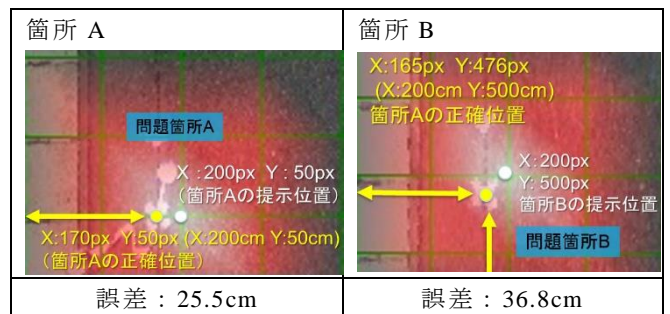


図 10：俯瞰カメラモードでの提示誤差

システムの設置時間に関しては、環境設置およびタブレット端末の初期設定の所要時間を含め、現場作業に対し妥当な結果になっていると考えられる。

タブレット視点 AR, 俯瞰カメラ視点 AR の表示精度に関しては、実験結果により、プロトタイプシステムでは概ね数十 cm 以下の表示精度を実現していることが分かった。

一方で、作業者による個人差があり、概ね作業者 B の方が提示誤差が小さかった。これは、タブレット端末における初期位置・方位設定の正確さが提示精度に影響した可能性が高い。

設置カメラ視点モードと疑似俯瞰モードでは、カメラと位置関係のパラメータが正確に設定されれば表示精度が高くなるが、今回の実験では 25~35cm 程度の誤差があった。また、パラメータの数値がずれると、原点から離れるほど誤差が大きい傾向があった。さらに、タブレットの AR モードも同じく作業者が設置カメラから離れるほど表示精度が落ちる傾向があったため、パラメータの正確さは AR モードで表示精度もある程度の影響をもたらす可能性があると考えられる。

7. 議論

7.1. 表示精度の課題

評価実験の結果により、やや良好な表示精度を得ているが、俯瞰カメラ視点では、作業者が定点カメラから離れるほど表示精度が落ちる課題があった。また、

タブレット AR 視点も作業者に近い問題箇所より、離れた問題箇所の誤差が大きいと見られた。可能な原因として、1「サーバー側のパラメータ誤差が含まれること」と、2「タブレット側の初期設定で足元位置と定点カメラを指定（タッチ）に誤差が含まれること」が考えられる。今後、サーバー側のパラメータ調整では、正確にマッチングできる為に確認用の映像を拡大する等の改良が考えられる。

なお、表示精度に影響する要因の一覧を表3に示す。

表3:表示精度誤差の要因

作業範囲の目印（マーカー）等の設置誤差
幾何関係パラメータの設定誤差
タブレット側の初期設定で発生する誤差
タブレット側センサー由来の測定誤差

8. 今後の課題

ここでは、今後システムの実用化に向けた課題とその対策に関する展望を述べる。

8.1. 作業者の足元位置の自動検出

プロトタイプシステムでは、作業者が立ち位置を変更する度にタブレット端末で初期設定を行う必要がある。こうした作業は、作業者の負担になるだけでなく、作業環境が暗い場合など、初期設定を作業しづらい場合がある。今後は、作業者の靴に発光型のマーカーをとり付け、画像処理による足元位置の自動検出を試みる。こうした手法は、複数の発光パターンを使い分けることで、他の通行者、作業者等を誤認識する可能性は低い。また、実時間で足元位置の自動検出を行うことで、作業者が移動しながら AR システムを利用できると考えられる。

8.2. 視点遷移のアニメーション

プロトタイプシステムでは、定点カメラの映像を用いて定点カメラ視点 AR と俯瞰カメラ視点 AR を作業者に提供しているが、作業者がモードを切り替えて表示する際に、モード間での位置関係が把握しにくくなる。そこで今後は、モード間の遷移をアニメーションの形式で作業者に提示し、遷移時に位置関係が把握しやすいシステムを目指す。

8.3. 他のアプローチの実装と手法の改良

8.3.1. カメラパラメータの手動微調整

Egocentric タイプ, Egomotion タイプの AR において、劣化箇所と道路の映像がうまくマッチングされていない場合に、カメラ画像の更新を一時的に静止させ、作業者がカメラパラメータを微調整する方法、を今後検証する（例えば、AR で道路のワイヤフレームを表示し、作業者がワイヤフレームを道路に合わせる等）。

8.3.2. 修復必要箇所の文字情報提示手法

修復必要箇所の検査が行われた際に、修復必要箇所の座標と劣化度合の他、劣化箇所に対してコメントを記入することがある。そこで今後、こうしたコメントを修復必要箇所の AR 表示を妨げない形で表示する手法を試案する。例として、タブレット端末を利用する場合、箇所の AR 表示部分をタッチするとコメントが表示される、等のインタラクション手法が考えられる。

9. まとめ

本稿では、拡張現実を用いた道路整備作業支援システムの基礎検討を行った。提案機能の検証と実用化に向けてプロトタイプシステムを試作し、道路劣化箇所の表示に関する精度評価を行った。今後は、システムの改良を実施するとともに、実際の整備作業に従事する作業者による被験者実験を行い、作業支援の効果に関する調査を行う。

文 献

- [1] Gerhard S, Erick M and Dieter S, Virtual redlining for civil engineering in real environments. Proc. of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR08), pp.95-98, 2008.
- [2] Gerhard S, Stefanie Z and Gerhard R, Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure, Personal and Ubiquitous Computing, Vol. 17, Issue 7, pp 1533-1549, 2013.
- [3] Höllerer T, Feiner S, Terauchi T, Rashid G and Hallaway D, Exploring MARS: developing indoor and outdoor user interfaces to a mobile augmented reality system, Computer & Graphics, 23(6), pp.779-785, 1999.
- [4] Klein G and Murray D, Parallel tracking and mapping on a camera phone, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.83-86, 2009.
- [5] Milgram P, Colquhoun H. A taxonomy of real and virtual world display integration. In: Mixed reality – merging real and virtual worlds, pp. 1–16, 1999.
- [6] Tonnis M, Plecher D. A, and Klinder G, Representing information - classifying the augmented reality presentation space, Computers & Graphics, Vol.37(8), pp.997-1011, 2013.
- [7] <http://www.nikkei.com/article/DGXMZO75089460R00C14A8000000/> (最終閲覧日：2014年9月8日)
- [8] <http://www.qsr.mlit.go.jp/nagasaki/pdf/douroiji6.pdf> (最終閲覧日：2014年9月8日)