

HMD キャリブレーションとオンサイト学習による ハンズフリー遠隔作業支援 AR システム

巻瀧 有哉^{1,a)} 小林 達也^{1,b)} 加藤 晴久^{1,c)} 柳原 広昌^{1,d)}

概要：現場作業者の支援を目的として，AR 技術を用いて作業内容を視覚的に提示するシステムが提案されている．しかしながら，ディスプレイに表示された作業内容を確認する際に実際の作業設備から視線を動かす必要があり，作業効率が損なわれるという課題がある．また，作業設備の認識に必要な特徴データベースを事前に構築する必要がある，事前準備が困難な非定常作業には利用できない．本稿では，HMD キャリブレーションによりハンズフリー・アイズフリーを実現し，かつ作業設備の特徴データベースをその場で構築（オンサイト学習）することで，事前情報のない作業設備に対して AR 指示が可能な遠隔作業支援システムを提案する．提案システムを社内展示会に出展した結果，通信設備の保守・運用業務の担当者から高い評価が得られた．

キーワード：遠隔作業支援システム，拡張現実感（AR），ヘッドマウントディスプレイ（HMD）

1. まえがき

近年，現場作業の多様化・複雑化に伴い，現場作業者を支援するための作業支援システムのニーズが高まっている．例えば，通信設備のメンテナンス作業においては，複雑な作業工程において誤ったケーブルの抜き差し等に伴う事故が発生しており，ヒューマンエラーを未然に防ぐ取り組みが急務となっている．特に非常時や海外での作業の場合，熟練者が現場に駆けつけられないケースがあり，不慣れた現場作業者が対応することがヒューマンエラーに繋がるケースが多い．そこで，作業者の習熟度によらず，正確かつ効率的に非定常作業を実施できる作業支援システムの実現が求められる．

拡張現実感（Augmented Reality：AR）とは，認識対象に対して適切な位置に仮想情報を提示する技術であり，AR 技術を活用した多くの作業支援システムが提案されている．具体的には，作業対象に貼られた専用のマーカー [1]，もしくは作業対象の特徴点 [2] を認識することで，事前に関連付けられた作業内容が表示される．作業設備の操作箇所を



図 1 HMD を用いた作業支援システム

部品単位で提示することができるため，ヒューマンエラーの削減や作業の効率化に有効である．専用のマーカーを利用する方式は，認識対象の識別が容易であるという特長を有する．一方で，特徴点を利用する方式は，作業設備に手を加える必要がないという特長がある．しかしながら，上記のいずれの方式も，作業設備を識別するための情報と表示する作業内容を事前に準備しておく必要があるため，利用用途がルーティンワークや組み立て作業に限定され，状況に応じた指示が必要な非定常作業には利用できない．

現場作業側側の表示端末としては，ハンズフリーの観点からヘッドマウントディスプレイ（Head Mounted Display：HMD）と呼ばれる頭部に装着するディスプレイを利用する場合が多い．HMD を用いた作業支援システムの利用シーンを図 1 に示す．タブレット端末を用いたシステム [3] では，ディスプレイと実際の作業設備とを見比べるために視

¹ 株式会社 KDDI 研究所
〒356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2-1-15
KDDI R&D Laboratories, Inc.,
2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502 Japan

a) na-makibuchi@kddilabs.jp

b) ts-kobayashi@kddilabs.jp

c) hkato@kddilabs.jp

d) yanap@kddilabs.jp

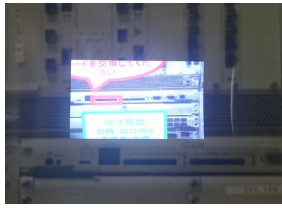


図 2 光学シースルー型 HMD 上で、ビデオシースルー型と同様の AR 表示方式を適用した場合の装着者の見え方

線を動かす必要があるほか、片手がふさがることによって複雑な作業が困難となる。また、装着者の視界を完全に覆うビデオシースルー型 HMD を用いたシステム [4] では、作業者の視線は固定されるものの、装着者の視野角がカメラの画角に制限され、かつ作業映像の表示遅延が存在するという課題がある。また、システムの故障時に装着者の視界が完全に失われるため、安全面に問題がある。一方、背景が透過する光学シースルー型 HMD [5] は、ビデオシースルー型に対して一般的に表示視野角の面で劣るものの、上述の課題がないという点で有効である。しかしながら、光学シースルー型 HMD のディスプレイ上で、タブレット端末やビデオシースルー型と同様の AR 表示方式を適用した場合、不都合が生じる。図 2 は、この場合の装着者の見え方を装着者の眼の位置に設置したカメラで撮影したものであり、透過ディスプレイを通して見える実環境と、それを撮影したプレビュー画像が二重に映るため、作業の妨げとなる。

本稿では、HMD キャリブレーションによりハンズフリー・アイズフリーを実現し、かつ事前情報のない作業設備に対して状況に応じた AR 指示が可能な遠隔作業支援システムを提案する。具体的には、両眼に対応する各々のディスプレイに対して、ディスプレイとカメラ間の位置関係に関するパラメータを事前に算出しておくことで、アイズフリーを特長とするステレオのシースルー AR 表示を可能とする。表示する作業指示に奥行き感を持たせることで、視認性の向上を実現する。また、現場作業の映像を遠隔指示者にリアルタイムに送信した上で、遠隔指示者が指定した際のフレームから特徴データベースをその場で構築（オンサイト学習）することで、事前情報なしに画像追跡を実現する。

以下、2. で関連研究について言及した後、3. で提案システムを構成する各機能の詳細について説明する。4. で社内展示会で得られた評価について述べ、5. をむすびとする。

2. 関連研究

非定常作業の場合、テレビ会議システムを用いて、現場の作業映像を共有しながら遠隔からリアルタイムに指示を送ることが可能である。音声通話による状況に応じた作業指示が実現できるほか、ダブルチェックによる確実な作業の実施が可能となる。しかしながら、部品単位で細かい指示を送る際に手間と時間を要する課題がある。具体的に

表 1 提案システムと従来システムの比較

	[7]	[8,9]	[5]	提案
事前準備（不要：○）	○	×	×	○
遠隔指示	○	○	×	○
ハンズフリー・アイズフリー	×	△	○	○
外部計算（不要：○）	×	△	△	○

は、「あれ、これ、それ」といった指示語で的確に作業箇所を伝えることが困難であるため、現場作業者の指差し確認を通して指示の伝達を行う必要がある。音声だけでなく、静止画やテキストを通して詳細な指示を可能とするシステム [6] が提案されているが、AR 表示機能による直感的な情報提示は実現できていない。

遠隔作業支援システムと AR 技術とを連携させることで、非定常作業の場合でも遠隔から状況に応じた AR 指示を送ることが可能となる。Fukayama らのシステム [7] は、特徴データベースをその場で構築するため、作業設備の情報が事前に不要という特長がある。但し、現場作業側でタブレット端末を使用しており、ハンズフリーに対応していない。一方、Bottecchia らは、視界の一部にディスプレイを表示する Google Glass 形状のビデオシースルー型 HMD を用いたシステムを提案している [8,9]。ハンズフリーで、かつディスプレイに表示するカメラのプレビュー画像を周辺環境に合わせて画像補正することで、擬似的にアイズフリーを実現する。しかしながら、作業映像の表示遅延の課題は解消できておらず、また、作業設備の情報が事前に必要という課題がある。

光学シースルー型 HMD を用いたアイズフリーシステムの実現のためには、ディスプレイとカメラ間の位置関係に関するパラメータを算出するための HMD キャリブレーションが不可欠である。本稿の目的は、特徴データベースのオンサイト学習による遠隔作業支援 AR システムにおいて、ハンズフリー・アイズフリーを HMD キャリブレーションにより実現することにある。また、[7] や [5,8,9] のように、AR 認識計算のために高性能の外部サーバーを用意する、もしくは現場作業者が小型 PC を背負うことなく、低スペックの HMD 単体で動作可能なシステムを提案する。提案システムと従来システムの比較を表 1 に示す。

3. ハンズフリー遠隔作業支援 AR システム

提案システムの構成を図 3 に示す。現場作業側側の表示端末として、EPSON MOVERIO BT-200 (Android 4.0.4, OMAP 4460 1.2GHz) を、遠隔指示者側の指示端末として、ASUS Nexus 7 2012 年モデル (Android 4.1.2, Tegra 3 1.3GHz) を用いる。BT-200 は、カメラを搭載した光学シースルー型 HMD であり、視野角が 23° で、解像度が 960 × 540 の両眼の透過ディスプレイを有する。Android

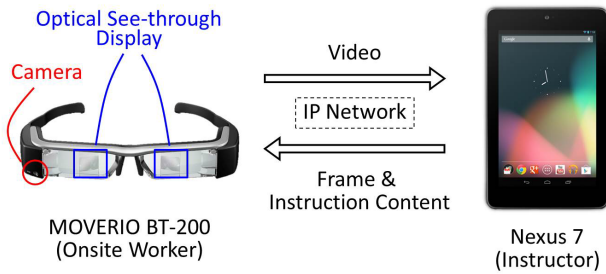


図 3 システム構成

を搭載しているため、外部の計算装置と接続する必要がなく、装着時に作業者の負担にならない。以下、これらを HMD、及びタブレットと表現する。

本システムは、以下の 4 種類の機能から構成される。

- (1) 映像伝送機能
- (2) 作業指示入力機能
- (3) 特徴データベース構築・追跡機能
- (4) シースルー AR 表示機能

以下、各機能の詳細について述べる。

3.1 映像伝送機能

遠隔指示者がリアルタイムに作業状況を確認するために、HMD のカメラで撮影した作業映像を IP ネットワークを通してタブレットに送信する。本稿では、光学シースルー型 HMD に対する遠隔指示機能の検証を目的とするため、映像伝送機能は簡易的に実装する。具体的には、HMD とタブレットが同一 LAN 内に存在するとして、ソケット通信により一定間隔で JPEG に圧縮したフレームデータを送信する。

3.2 作業指示入力機能

本機能で提供するタブレットの UI を図 4 に示す。遠隔指示者は、一定間隔で更新される作業映像をタブレット上で確認しながら、作業指示を送りたいタイミングで「Stop」ボタンを押す。その際、作業映像の更新処理が一時的に停止し、作業映像中の特定のフレームに対して作業指示内容を手書きで入力することが可能となる(図 4(a))。なお、後述の 3.3 において特徴データベースの構築を高速に実現するため、作業指示を入力する際のフレームは、作業対象中の平面形状の箇所を真上から平行に撮影したものとする。入力を始めからやり直す場合は「Delete」ボタンを、入力が完了した場合は「Save」ボタンを入力する。入力完了後、フレームの左上を原点として、入力箇所以外の領域を透過色に指定した透過 PNG を作業指示データとして得る。

[8,9] や [7] では、モードを切り替えながら、テキスト入力と、事前に用意された矢印や丸印のアイコンの貼り付けを行う。そのため、遠隔指示者はボタン配置等の UI を理解した上で、複数回の操作を要求されることとなる。現場

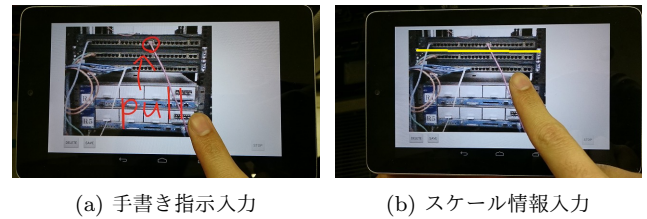


図 4 タブレットによる作業指示の入力画面

側の作業効率に加えて、遠隔側の作業指示効率を考慮した場合、提案システムのように直感的、かつシームレスに入力できることが望ましい。

続いて、フレームのスケール情報入力画面に移行する(図 4(b))。スケール情報は、ピクセルに対する実寸の比率を指し、入力された指示内容を光学式シースルー型 HMD 上で AR 表示する際に必要となる。詳細は 3.4 で述べる。提案システムでは、ルーター等の通信設備をマウントするラックの横幅が多くの場合に共通であり、既知とできることを利用する。遠隔指示者が横幅に相当する辺の始点と終点をフレーム内で指定することで、横幅のピクセル数を求め、実寸との比率を算出する。

以上により、作業指示対象のフレームデータと、それに合わせて重畳する作業指示データ、及びスケールの 3 種類のデータが得られ、これらを HMD に送信する。

3.3 特徴データベース構築・追跡機能

本機能では、姿勢検出と姿勢追跡を組み合わせたハイブリッド追跡のフレームワークを用いて、作業指示対象のフレームを追跡し、作業指示データを重畳表示する。筆者らのグループでは、モバイル端末上のリアルタイム処理に有効な特徴データベース構築手法 [10] と姿勢追跡手法 [11] を提案している。データベース構築では、ターゲットフレームを様々な幾何変換した学習画像から特徴点を検出し、データベースに登録することで頑健性を向上することが可能である。また、学習画像の数を最小限数に抑えることで、データベースの構築を高速に実現する。なお、特徴点には ORB [12] を用いた。姿勢追跡では、カメラの移動状態に応じて追跡処理を適応的に切り替えることで、高速化を実現する。

HMD は、フレームデータ、作業指示データ、及びスケールの 3 種類のデータを受信後、フレームデータと作業指示データを実寸スケールに変換し、上述の手法を用いて特徴データベースを構築する。特徴データベースの構築が完了した後、回転と並進のパラメータ R と t から構成される 6 自由度の姿勢パラメータ $W = (R|t)$ を式 (1) に従って求める。

$$sm_c = AWX \quad (1)$$

なお、 s はスケール係数、 A は事前に既知のカメラ内部パ

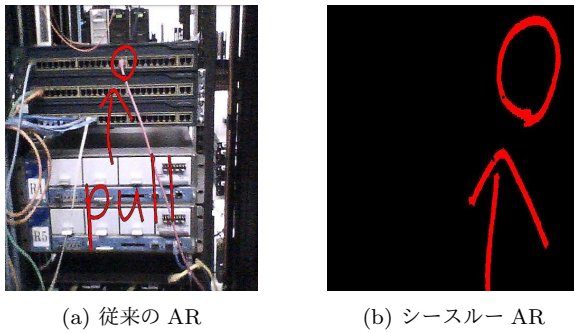


図 5 従来の AR とシースルー AR の比較 (1): 表示内容

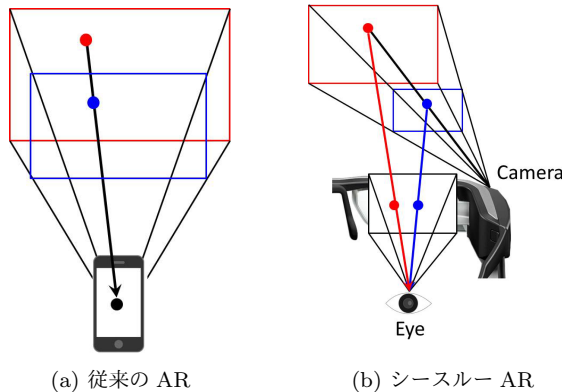


図 6 従来の AR とシースルー AR の比較 (2): 実寸情報

ラメータ, m_c と X はカメラのピクセル座標系, 及び認識対象の 3 次元座標系の同次座標表現である. 姿勢追跡モードに移行した後も, カメラの撮影位置及び角度に応じて姿勢パラメータを式 (1) に従って更新する.

3.4 シースルー AR 表示機能

本機能では, アイズフリーシステムの実現のために, 作業者の視野において作業対象箇所と重なる位置に作業指示データを描画する. 以下, この表示形態をシースルー AR と表現する. スマートフォンやビデオシースルー型 HMD 上で動作する従来の AR では, カメラのプレビュー画像を背景に描画し, その上に CG を重畳する. 一方, シースルー AR では, 背景を HMD の透過色である黒色で塗りつぶした上で, カメラのプレビュー画像を描画せずに CG のみを表示する. さらに, HMD キャリブレーションパラメータに従って CG の投影座標を算出するため, 従来の AR とは CG の表示位置が異なる. 両方式による表示内容の違いを図 5 に示す. 図 5(b) で CG の一部が表示されていない理由は, ディスプレイの表示領域が図の端までしか存在していないためである.

また, ほかの相違点として, シースルー AR では認識対象の実寸を必要とする点が挙げられる. 認識対象の実寸が未知の場合, 認識対象の奥行き位置が定まらない点は両方式に共通である. しかしながら, 従来の AR では認識系と表示系のフラスタムが一致しているため, 奥行きが不定で

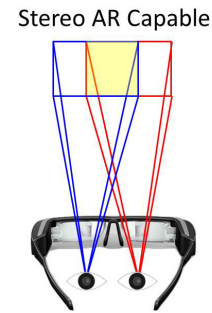


図 7 立体視可能領域

あってもカメラへの投影位置は一意に定まる. 図 6(a) 中の四角錐がフラスタムである. 一方, シースルー AR においては, 認識系と表示系のフラスタムがそれぞれカメラと HMD により定まるため, 認識対象の奥行き位置に応じてディスプレイへの投影位置が異なる. 図 6(b) に 2 種類のフラスタムを示す. そのため, 3.2 で述べたように, 作業指示入力機能では遠隔指示者にスケール情報の入力を要求する. 実寸を既知とすることで, 式 (1) に従って奥行き位置を特定できる. 具体的には, Z 座標を 0 とする対象平面上に実寸スケールで配置した際の X 座標及び Y 座標から構成される X と, プレビュー画像から検出した位置 m_c を入力として, 並進パラメータ t が実寸で求まる.

シースルー AR における投影式を式 (2) に示す.

$$sm_d = PWX \quad (2)$$

m_d は, ディスプレイのピクセル座標系の同次座標表現である. P は, HMD キャリブレーション・パラメータであり, カメラ座標系からピクセル座標系への投影関係として事前に算出する. P は, カメラとディスプレイの位置関係に依存するため, 左眼と右眼用にそれぞれ P_l と P_r を算出しておく必要がある. 両眼のキャリブレーションを事前に実施することで, 左眼と右眼に対応する表示画面が交差する図 7 に示す領域において立体視が可能となる. なお, 製造工程で生じる個体差にも大きく左右されるため, 同一の機種であってもほかの端末で算出したパラメータを使用することはできない. また, 装着者の身体的特徴によって装着時のディスプレイの位置が異なるため, 他の装着者のパラメータも利用できない. そのため, 装着者と使用する HMD を固定した上でキャリブレーションを行う必要がある. 但し, 事前に一回だけ実施すればよい.

HMD キャリブレーションを利用したシースルー AR システムは, マーカーと画像認識を利用する方式 [13, 14] のほかに, 磁気センサ [15, 16], 超音波センサ [17] 及び赤外線センサ [18, 19] を用いる方式が提案されている. センサを利用した方式は, 高速・高精度な頭部の姿勢追跡が可能であり, さらに作業者の手等によるオクルージョンに影響を受けないという特長がある. しかしながら, いずれの手法も世界座標系を定義するためのトランスミッタや IR カ

表 2 パラメータの設定値と計測値

		設定値または計測値
機能 (1)	取得フレームの解像度	VGA (640 × 480)
機能 (1)	フレームの送信間隔	1 fps
機能 (2)	作業指示の伝送時間	0.5 s
機能 (3)	特徴 DB の構築時間	3 s
機能 (3)	初期姿勢の検出時間	0.5 s
機能 (3)	追跡時の処理速度	25 fps

メラを環境側に設置する必要がある、非定常作業の作業支援用途では現実的でない。

マーカーを利用したキャリブレーションでは、ディスプレイの特定の位置に表示した点に対し、装着者の視野でその点とマーカーとが重なるように頭部を動かし、そのタイミングをシステムに通知する試行を繰り返す。BT-200では、タッチパネルを搭載したコントローラが付属しているため、タップにより通知を行う。一回の試行で、1組の点対応 (m_d, X) が得られる。式 (2) において、 W は既知であり、 P は 11 自由度であるため、最少 6 回の試行から DLT アルゴリズム [20] により P を算出できる。ディスプレイに表示する点群の配置が広い程高精度に算出できるため、ディスプレイ上の四隅に順番に表示した点に対して点対応を収集する。

4. 提案システムの評価

提案システムを社内展示会に出展し、各機能について得られた評価について述べる。来場者には通信設備の保守・運用の担当者も多く含む。なお、比較対象として、光学シースルー型 HMD に図 2 に示す従来の AR 表示を行うシステムを用意した。なお、本稿では光学シースルー型 HMD に対する遠隔作業指示機能のユーザー評価を目的としているため、(1) 映像伝送機能については評価の対象としていない。各機能におけるパラメータの設定値と計測値を表 2 に示す。

4.1 作業指示入力機能

タブレットによる作業指示では、作業指示内容を直感的に入力できる点が高く評価された。来場者の多くは AR 技術を知っており、システムの操作性を含む専門的な知識なしにはコンテンツの制作が困難という懸念を抱いていた。その点、提案システムでは、対象設備の撮影画像上に直接指示を書き込むという直感的な UI を通して、遠隔指示側の操作に伴う負担を軽減する。但し、スケール情報の入力については余計な手間となっているため、今後の課題としてスケールの自動測定機能の実現が求められる。

4.2 特徴データベース構築・追跡機能

筆者らのグループで提案した特徴データベース構築手

法 [10] と姿勢追跡手法 [11] は、提案システムにおいても有効であった。特徴データベースの構築処理と初期姿勢の検出処理に要した時間は、それぞれ約 3 s と約 0.5 s となった。ユーザーは遠隔からの指示を受けた後、伝送時間を含めて計 4 s で AR 表示された作業内容を確認できた。また、その後の追跡時の処理速度は 25 fps であり、外部サーバーや PC を用いることなく、HMD 単体でリアルタイム処理を実現できた。

また、認識対象が画角から外れた場合でも、再度画角に収まった際に高速に復帰できることを確認した。高速な復帰処理は、特徴データベースを様々な幾何変換した学習画像を用いたことに加えて、オンサイト学習による恩恵が大きい。特徴データベースを事前に構築するスタンドアロン型のシステム ([5] など) では、データベース構築時とシステム利用時との照明変化によって認識率が大きく低下する。一方でオンサイト学習では、システム利用時の照明状態を含めて特徴データベースを構築するため、上述の課題が存在しておらず、高速・高精度な認識が可能である。

4.3 シースルー AR 表示機能

来場者に対して従来の AR 表示とシースルー AR 表示を順に提示した。従来の AR 表示では、実環境とそれを撮影したプレビュー画像が二重に見えるために視認性が悪いという意見が大半を占めた。また、作業対象箇所の奥行き位置が把握しづらいという意見もあった。シースルー AR 表示では、実環境に対して作業指示の CG のみが重畳される見え方が直感的で分かりやすいとの意見が多く、アイズフリーの特長が受け入れられる結果となった。

一方、シースルー AR に特有の課題である CG の表示遅延に関する指摘が挙がった。従来の AR では、姿勢計算に用いたプレビュー画像と CG とを同時に描画するため、両者間の表示位置にずれは生じない。しかしながら、シースルー AR では、プレビュー画像を取得してから CG を描画するまでにカメラが移動した場合、CG の表示遅延が生じる。この課題に対しては、ジャイロセンサや加速度センサを用いてカメラ姿勢を外挿する手法 [21] が提案されており、提案システムへの実装を今後の課題とする。

また、HMD のハードウェア面の課題に対する指摘も多く、最も多かった意見は表示領域の狭さに関するものであった。一度に表示できる情報量が少ないため、作業指示内容の全てを同時に確認することが困難な場合がある。その際は、ユーザーは頭を動かしながら部分的に内容を読み取る必要がある。BT-200 は視野角が 23° と実利用には不十分であるため、ハードウェア性能の改善が待たれる。ほかには、HMD の焦点距離が固定であるため、作業対象箇所の奥行き位置によっては視認性が悪い、また、眼鏡の上からの装着の場合にピントが合わせづらいという声が挙がった。

5. まとめ

本稿では、HMD キャリブレーションと特徴データベースのオンサイト学習による遠隔作業支援 AR システムを提案した。提案システムは、現場作業側側の HMD と遠隔指示者側のタブレットのみから構成され、高性能の外部サーバーを用意する、もしくは現場作業側が小型 PC を背負う必要がない。HMD キャリブレーションでは、両眼に対応する各々のディスプレイに対して、ディスプレイとカメラ間の位置関係に関するパラメータを事前に算出することで、アイズフリーを特長とするステレオのシースルー AR 表示を可能とする。また、オンサイト学習では、現場作業の映像を遠隔指示者にリアルタイムに送信した上で、遠隔指示者が指定した際のフレームから特徴データベースをその場で構築することで、事前情報のない作業設備に対して AR 指示を可能とする。

提案システムを社内展示会に出展した結果、ハードウェア面に対する実利用上の課題が挙げられたものの、シースルー AR による遠隔作業支援のユースケースについては通信設備の保守・運用業務の担当者から高い評価が得られた。スケールの自動測定方式や低遅延のシースルー AR 表示方式の検討を今後の課題とする。

参考文献

- [1] Didier, J.-Y., Roussel, D., Mallem, M., Otmene, S., Naudet, S., Pham, Q.-C., Bourgeois, S., Mégard, C., Leroux, C., Hocquard, A. et al.: AMRA: augmented reality assistance for train maintenance tasks, *Proc. of the 4th ACM/IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (2005).
- [2] De Crescenzo, F., Fantini, M., Persiani, F., Di Stefano, L., Azzari, P. and Salti, S.: Augmented Reality for Aircraft Maintenance Training and Operations Support, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 31, No. 1, pp. 96–101 (2011).
- [3] Webel, S., Bockholt, U., Engelke, T., Gavish, N., Olbrich, M. and Preusche, C.: An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 4, pp. 398–403 (2013).
- [4] Henderson, S. and Feiner, S.: Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret, *Proc. of the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 135–144 (2009).
- [5] Zhu, Z., Branzoi, V., Wolverson, M., Murray, G., Vitovitch, N., Yarnall, L., Acharya, G., Samarasekera, S. and Kumar, R.: AR-mentor: Augmented reality based mentoring system, *Proc. of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 17–22 (2014).
- [6] Remote Guideware, (online), available from <http://www.kke.co.jp/solution/theme/remote-guideware.html> (accessed 2015.1.26).
- [7] Fukayama, A., Takamiya, S., Nakagawa, J., Muto, S. and Uchida, N.: Development of Remote Support Service by Augmented Reality Videophone, *EMERGING 2012, The Fourth International Conference on Emerging Network Intelligence*, pp. 74–77 (2012).
- [8] Bottecchia, S., Cieutat, J.-M., Merlo, C. and Jessel, J.-P.: A new AR interaction paradigm for collaborative teleassistance system: the POA, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Vol. 3, No. 1, pp. 35–40 (2009).
- [9] Bottecchia, S., Cieutat, J.-M. and Jessel, J.-P.: T.A.C: Augmented Reality System for Collaborative Teleassistance in the Field of Maintenance Through Internet, *Proc. of the 1st Augmented Human International Conference (AH '10)*, pp. 14:1–14:7 (2010).
- [10] Kobayashi, T., Kato, H. and Yanagihara, H.: Novel Key-point Registration for Fast and Robust Pose Detection on Mobile Phones, *Proc. of the IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, pp. 266–271 (2013).
- [11] Kobayashi, T., Kato, H. and Yanagihara, H.: Pose Tracking Using Motion State Estimation for Mobile Augmented Reality, *Proc. of the IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, USA, pp. 9–10 (2015).
- [12] Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K. and Bradski, G.: ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, *Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2564–2571 (2011).
- [13] Kato, H. and Billinghurst, M.: Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system, *Proc. of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR '99)*, pp. 85–94 (1999).
- [14] Makibuchi, N., Kato, H. and Yoneyama, A.: Vision-based robust calibration for optical see-through head-mounted displays, *Proc. of the 20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 2177–2181 (2013).
- [15] Tuceryan, M., Genc, Y. and Navab, N.: Single-Point active alignment method (SPAAM) for optical see-through HMD calibration for augmented reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 11, No. 3, pp. 259–276 (2002).
- [16] Genc, Y., Tuceryan, M. and Navab, N.: Practical solutions for calibration of optical see-through devices, *Proc. of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '02)*, pp. 169–175 (2002).
- [17] Owen, C., Zhou, J., Tang, A. and Xiao, F.: Display-relative calibration for optical see-through head-mounted displays, *Proc. of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '04)*, pp. 70–78 (2004).
- [18] Gilson, S., Fitzgibbon, A. and Glennerster, A.: Spatial calibration of an optical see-through head-mounted display, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 173, No. 1, pp. 140–146 (2008).
- [19] Kellner, F., Bolte, B., Bruder, G., Rautenberg, U., Steinicke, F., Lappe, M. and Koch, R.: Geometric calibration of head-mounted displays and its effects on distance estimation, *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 4, pp. 589–596 (2012).
- [20] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge university press (2003).
- [21] Oskiper, T., Chiu, H.-P., Zhu, Z., Samarasekera, S. and Kumar, R.: Stable vision-aided navigation for large-area augmented reality, *Proc. of the IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 63–70 (2011).