

複合現実感技術のセカンド・マン ～MR 第 2 四半世紀での大きな跳躍に向けて

The Second Man in Mixed Reality Technology - Toward Another Giant Leap in Coming Quarter-Century

立命館大学 情報理工学部 柴田 史久

Fumihisa Shibata

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

Abstract A quarter century has passed since the word “Mixed Reality” was born. Being influenced by the VR boom nowadays, augmented reality and mixed reality have attracted much attention. However, there are still a lot of technical issues, and it is said that MR technology will widely flourish in earnest in coming quarter-century. This article gives an overview of the history of mixed reality, and lists the research issues to be solved and applications to be expected toward another giant leap.

1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) [1]は、現実の世界と計算機で生成した仮想世界を継ぎ目なく融合する技術であり、バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) を超える技術として期待されてきた。「現実と仮想の融合」と聞くと、最近の大作映画で頻繁に見かける実写映像とコンピュータグラフィックス (CG) の合成と同じと思うかも知れない。これは VFX (Visual Effects, 視覚効果) といい、撮影後の映像に CG を重畳する後処理である。一方、VR の発展形である MR では、実写と CG の重畳合成を任意視点から実時間処理で行うことを前提としている。

「複合現実感」は、1997 年から始まった国策研究「複合現実感システムに関する試験研究」(通称 MR プロジェクト) で初めて使われた言葉である [2]。ただし「Mixed Reality」という概念はさらにその 3 年前の 1994 年に、トロント大学の Paul Milgram によって提唱されており [3]、MR の概念が登場してから既に四半世紀が経過したことになる。

Milgram は、計算機内に構築される仮想世界を現実世界の情報で強化するという概念を仮想化現実 (Augmented Virtuality; AV) と呼び、現実世界を電子的に増強・拡張する拡張現実感 (Augmented Reality; AR) に対置した上で、両者を包含する形で

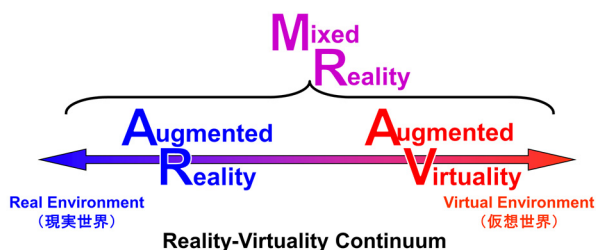


図 1 現実世界と仮想世界の間をつなぐ概念が複合現実感 (MR) であり、AR と AV を包含する。

MR を定義した [4]。Milgram は、現実世界と仮想世界の間を連続体として捉え、MR をその間のすべてを含んでいるものとした (図 1)。近年では、MR が AR とほぼ同義語として使われ始め、まとめて AR/MR と記すことも増えている。折からの VR ブームの影響から、AR/MR にも再び注目が集まりつつある。

2019 年 2 月に日本で公開された映画『ファースト・マン』は、半世紀前、人類史上初めて月面に降り立ったニール・アームストロング船長の物語である。では、MR 分野における「ファースト・マン」はと言えば、単数ではなく、MR の黎明期から成長期の四半世紀を支えて来られた先輩研究者達だと考えている。であるならば、次の四半世紀の MR 分野を担う第 2 世代は、ファースト・マンらの薫陶を受け、「セカンド・マン」(正確には、メン) としての矜持をもって、AR/MR 分野をさらに発展・充実させて行くべきである。

このような観点から、本稿では、複合現実感研究の歴史を概観した上で、次の四半世紀における大きな飛躍のために、解決すべき研究課題や期待される用途を挙げ、その研究開発事例を紹介する。

2. 複合現実感の歴史と研究分野

2.1. 黎明期

黎明期の MR 研究としては、ボーイング社の D. Mizell 博士らの研究が挙げられる [5]。これは製造や組立の支援にシースルー型の頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) による情報提示を活用しようという研究であり、AR という呼称が用いられている。同じ頃、S. Feiner らは KARMA という名称の AR システムを試作している [6]。こちらは HMD によってレーザープリンタの保守情報を重畳描画するというものである。いずれも応用を見据えたものとなっており、初期の研究から応用分野を意識しているという点は特筆すべきことである。

その後、日本では前述した MR プロジェクトが開始された。同プロジェクトでは MR を実現する上での課題の整理がなされ、後に続く EU などでの MR プロジェクトに多大な影響を与えた。MR プロジェクトの成果概要については、文献[7]を参照されたい。

2.2. 解決すべき課題

MR を実現するためには、何らかの形で仮想世界を映像として体験者に提示する必要がある。当初より想定されていた提示用ハードウェアは、先に述べた HMD である。HMD は映像の提示方法によって図 2 に示す 2 種類に分けられる。

- 光学シースルー方式
 ハーフミラーなどの光学系を通して、現実世界の光景に仮想物体を重畳する方式で、現実と仮想の融合は体験者の網膜上で行われる。近年では、自動車のフロントガラスに映像を投影するヘッドアップディスプレイ (Head Up Display; HUD) などが出てきているが、HUD も光学シースルー方式と捉えることができる。
- ビデオシースルー方式
 現実世界の光景を、カメラを利用して撮像し、計算機の中でカメラ画像上に仮想物体を重畳描画する方式で、体験者には合成された画像が提示される。最近はやりのスマートフォンなどでの AR/MR 表示はビデオシースルー方式の一形態と捉えられる。

HMD も MR を実現する上での重要な技術であり、様々な研究がなされているが、詳細については文献[8]や文献[9]の第 2 章 1 節を参照されたい。

HMD などのハードウェアを用いて現実世界と仮想

世界を継ぎ目なく融合するためには、一般に次のような課題を解決する必要がある[2]。

- 空間的ずれの解消 (幾何学的整合性)
 現実世界と仮想世界の座標系を一致させ、現実世界を観測する体験者の位置・姿勢に合わせて仮想世界の描画する。位置合わせ問題と呼ばれることもある。
- 画質的ずれの解消 (光学的整合性)
 現実世界の光景に見た目の違和感が生じないように仮想世界を重畳描画・合成する。
- 時間的ずれの軽減 (時間的整合性)
 体験者の位置・姿勢の変化や現実世界の動きに対して、そのセンシングや仮想世界の描画時間分だけ遅延が生じるため、これを極力軽減する。

これらの課題に対して、この四半世紀の間、数多くの研究がなされてきた。すべてを網羅することは難しいため、本稿では代表的なものをいくつかピックアップして紹介する。

2.3. 幾何学的整合性に関する取り組み

幾何学的整合性を実現する手法としては、大きく磁気センサや超音波センサなどのセンサを利用する手法 (センサベース) とカメラ画像を利用する手法 (画像ベース) に分けられる。さらに、両者を組み合わせた手法などもあり、2010 年代になってからは Microsoft 社の Kinect のような距離センサを用いた手法なども発表されている。

特に画像ベースの手法は、長きに渡って様々な手法が提案されてきた。これは大きく人工マーカを使った手法と自然特徴を使った手法に分けられる[10, 11]。

前者の基本的な考え方は、カメラで撮影したマーカが映り込んだ画像から、二値化処理などを施してマーカ領域を抽出し、そのマーカの識別番号とマーカ・カメラ間の相対的な位置・姿勢を推定するというものである。その代表例としては加藤らによる ARToolKit がある[12, 13]。ARToolKit は、PC でプログラムするための C 言語のソースが公開されていたこともあり、研究開発者だけでなく一般ユーザも利用して手軽に AR 環境を構築し、その成果を動画共有サイトで公開するなど、その後の AR/MR ブームに大きな役割を果たした。一方、マーカ方式には、安定性が悪い場合がある、隠蔽に弱い、美観を損ねる、などの問題があり、これらを解決するような研究もなされている。例えば、二値化処理のしきい値を適応的に変化させてマーカ認識の安定性を向上させた ARToolKitPlus[14]やマーカの一部が隠蔽される状態に対応した ARTag[15]、目立たなくするためにマーカに再帰性反射材を用いた不可視マーカ[16]、ポスタをマーカとすることで人間にマーカと悟らせない[17]などがこれに該当する。スマートフォンが普及し始めてからは、これをターゲットにマーカを目立たないように工夫した研究[18]なども発表されている。

自然特徴を利用した位置合わせ手法についても数

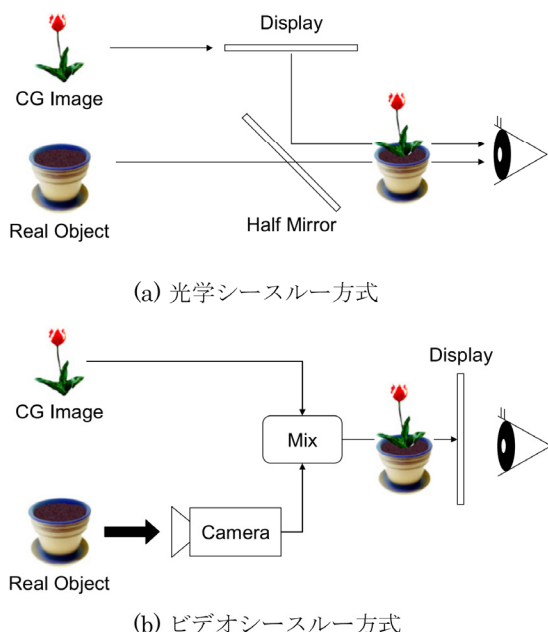


図 2 光学シースルー方式とビデオシースルー方式

多くの研究がなされている。これは大きく、事前知識を用いる手法と用いない手法に分けられる。

前者は、シーン中に存在する実物体について、何らかの形で 3 次元位置が既知である点を事前知識として与え、これをカメラで撮影した画像中から見つけ出して対応付けることにより、予め決めた座標系に対するカメラの位置・姿勢を推定する。例えば、文献[19]では、3次元モデルと数枚のキーフレーム画像を事前知識として、キーフレームから抽出される自然特徴点とカメラ画像中の自然特徴点を対応付けることで位置・姿勢を推定する手法が提案されている。Reitmayrらは事前に作成した建物のテクスチャ付き 3次元モデルを利用して、屋外環境においてカメラ位置・姿勢を推定する手法を提案している[20]。また、3次元モデルではなく複数の自然特徴点の 3次元位置を事前に登録しておく手法[21]などもある。

事前知識を用いない手法は、連続する画像列において抽出した自然特徴点の動きから、カメラの位置・姿勢と対象シーンの 3次元構造を並行して推定するもので、visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれることもある。初期の頃は画像中に平面が存在することを仮定した研究[22]などがあったが、後に任意のシーンで実行できる手法がいくつも提案されている。とりわけ、Kleinらによる PTAM (Parallel Tracking and Mapping) [23]は、シーンの 3次元構造 (マップ) の更新とカメラ位置・姿勢の追跡を別のスレッドで実行するもので、MRにおける時間的整合性を意識した実装であった。

これら以外にも多数の位置合わせの手法が提案されており[24, 25]、2010年前後からはスマートフォンでの実行を意識した手法[26-28]や奥行き情報を利用した手法[29, 30]などが出現している。さらに詳しい情報は文献[9]の第1章を参照されたい。

2.4. 光学的整合性に関する取り組み

光学的整合性を達成するためには、現実世界に仮想物体を重畳描画する際に、照明条件などを一致させる必要がある。具体的なものとしては、現実物体に対する仮想物体によって生じる陰影や物体の表面反射特性などが挙げられる。

光学的整合性に関しては、光学シースルー方式は本質的な問題を抱えている[2]。一例としては、光学シースルー方式はその原理上、基本的には光を加算することしかできないため、現実の光景の光を減衰させないといけない影の表現は難しいことなどが挙げられる。

そのため、光学的整合性については、主にビデオシースルー方式を対象とした研究が行われてきた。

例えば、影に関しては、形状が既知の物体を利用して現実空間の光源を推定し、その結果を使って仮想物体が現実空間に落とす影を再現する手法[31]が提案されている。その他には、鏡面球を使って光源環境を推定する研究[32]などもあり、影だけを取り上げても枚挙にいとまがない。

MRにおいて光学的整合性を実現するには、現実環境の様々な光学的特性を推定した上で、それを仮想物体の描画などに反映する必要がある。光学的特性の推定は、昔からコンピュータグラフィックス (CG) やコンピュータビジョン (CV) の研究分野で活発な研究がなされている課題であり、MRではそれを実時間で達成するという制約のもとで実現する必要がある。例えば、CGのレンダリングでは、シーン全体の光の分布や物体間の相互作用を考慮するグローバルイルミネーション法と呼ばれる手法が存在する。有名な手法としては、ラジオシティ法などがあるが、これ自体は非常に計算量が多く、現在の計算機で実時間処理することは難しい。そこで、実時間性を担保するために事前に計算したグローバルイルミネーションの結果を利用するような手法[33]などが提案されている。

また関連する研究としては、通常の光学的整合性と逆に実空間側の照明条件を変更する Relighting という考え方もある。実際の照明条件とは異なるが、仮想と現実の整合性がとれた映像を作り出すことができ、映画的な演出を実現できる[34]。さらに詳しく知りたい読者は、文献[9]の第3章2節を参照されたい。

2.5. 時間的整合性に関する取り組み

MRを実現するためには、常に体験者の位置・姿勢の変化や現実環境の状況変化にあわせて幾何学的整合性と光学的整合性を達成する必要がある。すなわち、テレビ映像と同程度の描画速度 (1秒間に約30フレーム) を実現するためには、仮想物体の描画は、1フレームあたり約33ms以内に完了させる必要がある。しかしながら、どのような推定手法を用いたとしても、位置・姿勢の推定には一定の時間がかかり、仮想物体の描画についても時間遅延は免れない。ビデオシースルー方式において画像ベースの位置合わせ手法を採用した場合には、カメラで撮像した映像を位置合わせの計算にあわせて意図的に遅延させることで同期をとることが可能であるが、体験者の動きからは遅れるためVR酔いの原因となりやすい[2]。一方、光学シースルー方式の場合、体験者に見える現実の光景には遅延が発生しないため、時間的ずれを完全に解消することは難しい。

これまでに研究されてきた MRにおける幾何学的整合性や光学的整合性の達成を目標とした研究では、PTAM[23]のところでも述べたように、時間的制約の中で如何にして各整合性を達成するのかという点を追究したものとなっている。

3. これからの展開：セカンド・マンの役割

MRに関する幾何学的整合性や光学的整合性に関する基礎技術は、着実な進歩を重ねてきた。MR技術の応用先は、黎明期のものから既に具体的な応用分野が想定されており、今後はますます我々の生活や産業分野全般において必要不可欠なものとなっていくことが予想される。計算機やゲーム機の急速な発展にとも

なってCGのレンダリング技術も飛躍的に向上しており、CGだけをみれば現実の物体と区別がつかないくらいのレベルに到達している。一方、一般消費者向けの動向としては、2016年にリリースされたポケモンGOが世界中で爆発的なヒットとなり、AR技術の知名度を一気に引き上げた。Microsoft社はHoloLensという頭部装着型のHMDを発売し、近々、HoloLens2もリリースされることが発表されている。Apple社のARKit 2やGoogle社のARCoreなど、世界のメジャープレーヤがこぞってAR/MR分野に注力しており、これらの成功が今後の普及の鍵となると考えられる。

このような状況のもとで、MR研究・開発にたずさわるセカンド・マンがどのような研究・開発に取り組むべきかの私見を述べたい。

(1) 屋内外における位置合わせ

屋内外における位置合わせ手法については、今後も引き続き精度や利便性の向上が必要である。例えば、屋外であれば準天頂衛星システム(みちびき)[37]を利用して高精度に測位することなども考えられるが、必要な機材の価格面や、姿勢の推定をどのように解決するのか、など検討が必要であろう。あらゆる場面で利用できる万能な位置合わせ手法の実現は難しいと考えられるため、応用する分野、MRを利用するシーンなど状況に応じて様々なセンサや手法を組み合わせることが肝要となる。

(2) 表現力のさらなる向上

MRにおける表現力の向上も重要な課題だと考えている。究極のMR空間は、如何にして現実の物体と区別がつかないような仮想物体を寸分の狂いもなく描画するような世界と考えられる。これを実現するには、上で述べた幾何学的な整合性のみならず光学的な整合性についても高度なレベルで実現する必要がある。表現力の向上という観点では、著者らもその一環として、現実存在する物体を視覚的に隠蔽・消去する隠消現実感(Diminished Reality; DR)という技術の実現に取り組んでいる[38]。当然、実在する物体を物理的に消去することはできないため、MR技術によって消去対象の上に、その後ろ側の背景を上書きすることによって、あたかも消えたかのように見せる技術である。例えば、景観シミュレーションなどの応用において、今ある建物を消した上で新たに建設する建物を描画するなど、表現力の幅が大きく広がると考えている。この技術は応用分野が非常に幅広く、一例として我々は、自動運転車開発などで利用されている周辺環境を実時間で把握できる距離センサLiDAR(Laser Imaging Detection and Ranging)と車両前方方向を向いたカメラ映像から前方車両による不可視部分を透過する研究にも取り組んでいる(図3)[39, 40]。

また、表現力の向上を目指す別の研究として、光学シースルー方式のHMDにおける陰影表現にも取り組んでいる。光学シースルー方式のHMDでは、その

原理上、黒い仮想物体を描画することはできない。そこで、人間の錯覚を利用して影があるかのように知覚させる手法[42]を検討している(図4)。

(3) 小型・軽量・高性能なHMD

スマートフォンによるMRは、利用する立場からすると手軽で使い勝手がよく思えるが、あくまでも画面を通してMR空間を見ているだけであり、本格的な作業を行いたければ両手を自由に使えることは必須の条件であろう。そうであるならば、小型・軽量・高性能で装着するのに不自由のないHMDの実現が必要となる。HoloLensのような計算機としての機能までを内蔵してケーブルレスで利用できるようなデバイスの開発が望ましく、広視野化も必要であろう。

(4) 完成度の高い応用例

MRは当初からその応用分野が具体的に想定されており、研究レベルでは、様々なアプリケーションが実現されてきた。例えば、作業支援という方面では、先に述べたMizell博士らによる研究[5]は飛行機の配線作業を支援するというものであるし、医療分野での応用例としては、R. Kikinis博士らの手による頭部への脳画像重畳描画によるAR手術ナビゲーションシステ

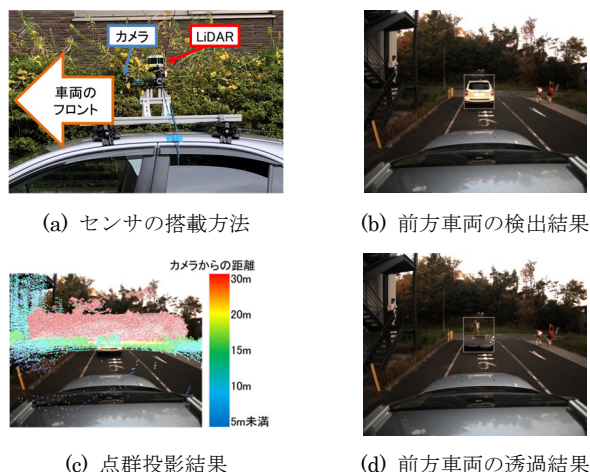


図3 隠消現実感技術で前方車両を透過する事例。(a) 車両に搭載されたセンサ、(b) 前方車両を検出した結果、(c) LiDARから得られた3次元点群を投影した結果、(d) 前方車両を透過した結果。

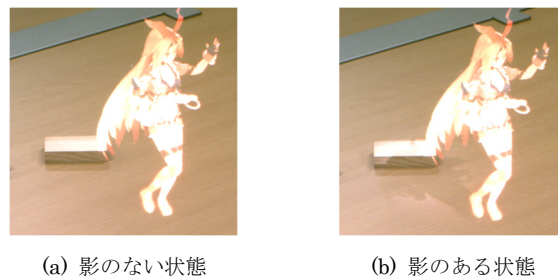


図4 光学シースルー方式における錯視を利用した影の表現方法。(a)と比較して(b)では、バーチャルキャラクターの影が机の上に落ちているように感じる。

ム[41]などが知られている。作業支援に関しては、産業機器の保守手順の提示や、壁の裏側などの不可視部分の情報の可視化など、アイデア自体は古くから存在し、昨今の位置・姿勢推定精度であれば、十分実用に耐えうるものが実現できると思われる。一方、医療分野への応用については、手術の支援など、人の命にかかわるような場合もあるため、狭い範囲でもいいがロバストかつ極めて高い精度の位置・姿勢推定手法が必要であり、さらなる取り組みが必要だと考えている。

屋内外における歩行者のナビゲーションも古くから考えられてきた応用である。これについては、センチメートルレベルの位置合わせは必要ないため、スマートフォンなどを用いたナビゲーションやAR型の観光案内なども徐々に使われるようになってきている。提示されるコンテンツのリアリティが増せば、今後、さらに普及することが期待される。

エンタテインメントやアミューズメント分野も応用分野として非常に期待が持てる。2005年に開催された愛知万博（愛・地球博）では日立グループ館においてMR技術が採用され、170万人以上の観客を魅了した。近年では、VRの大型アトラクションを複数準備した施設などもオープンし、人気を博しているの、その延長としてMR型のアトラクションの出現も期待される。また、ゲーム機の追加周辺機器としてMR向けのHMDが登場すれば、例えば、部屋中をフィールドにしたポケモンGOなど、いくらでも人気ゲームが登場し、爆発的に普及するのではないだろうか。

4. おわりに

本稿では、四半世紀にわたるMR研究を概観した上で、次の四半世紀においてファースト・マンらの薫陶を受けたセカンド・マンが取り組むべき課題について述べた。技術的な課題も山積しており、MR技術が本格的に花開くのはこれからだと考えている。だからこそ、日々の努力で着実に研究成果をあげ、一般消費者からMR技術が幻滅されないように、その完成度を高めていく必要があると感じている。

参考文献

- [1] Y.Ohta and H. Tamura (eds.): *Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds*, Ohmsha and Springer-Verlag (1993)
- [2] 田村秀行, 大田友一: 複合現実感; 映像情報メディア学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 266 – 272 (1998)
- [3] P. Milgram and F. Kishino: A taxonomy of mixed reality visual display; *IEICE Trans. Information & Systems*, Vol. E77-D, No. 12, pp. 1321 – 1329 (1994)
- [4] 横矢直和: 現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術-I 複合現実感とは; *システム/制御/情報*, Vol. 49, No. 12, pp. 489 – 494 (2005)
- [5] T. P. Caudell and D. W. Mizell: Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes; *Proc. 25th Hawaii Int'l Conf. on System Sciences*, Vol. 2, pp. 659 – 669 (1992)
- [6] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann: Knowledge-based augmented reality; *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 53 – 62 (1993)
- [7] 田村秀行: 複合現実感研究プロジェクト; 計測と制御, Vol. 41, No. 9, pp. 645 – 648 (2002)
- [8] 清川清: 展望 1: ARのハードウェアAR用ヘッドマウントディスプレイ技術の動向と展望; *情報処理*, Vol. 51, No. 4, pp. 414 – 418 (2010)
- [9] 蔵田武志, 清川清 (監修), 大隈隆史 (編集): *AR (拡張現実) 技術の基礎・発展・実践*, 科学情報出版 (2015)
- [10] 加藤博一: AR/MRにおける幾何位置合わせ手法の現状 – 人工マーカを使った手法の研究動向と課題; 第14回日本VR学会大会論文集, 3C2-1 (2009)
- [11] 佐藤智和, 横矢直和: AR/MRにおける幾何位置合わせ手法の現状 – 自然特徴を使った手法の研究動向と課題; 同上, 3C2-2 (2009)
- [12] H. Kato and M. Billinghurst: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system; *Proc. Int'l Works. on Augmented Reality (IWAR99)*, pp. 85 – 94 (1999)
- [13] 加藤博一, Mark Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション; *日本VR学会論文誌*, Vol. 4, No. 4, pp. 607 – 616 (1999)
- [14] D. Wagner and D. Schmalstieg: ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices; *Proc. 12th Computer Vision Winter Workshop 2007 (CVWW 2007)*, pp. 139 – 146 (2007)
- [15] M. Fiala: ARTag, a fiducial marker system using digital techniques; *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005)*, Vol. 2, pp. 590 – 596 (2005)
- [16] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和: ウェアラブル拡張現実感のための不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定; *日本VR学会論文誌*, Vol. 10, No. 3, pp. 295 – 304 (2005)
- [17] 天目隆平, 西上彰人, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: ポスタを利用した複合現実感用幾何位置合わせ; *日本VR学会論文誌*, Vol. 14, No. 3, pp. 351 – 360 (2009)
- [18] D. Wagner, T. Langlotz, and D. Schmalstieg: Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones; *Proc. IEEE/ACM Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2008)*, pp. 121 – 124 (2008)
- [19] L. Vacchetti, V. Lepetit and P. Fua: Stable real-time 3D tracking using online and offline

- information; IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, Vol. 26, Issue 10, pp. 1385 – 1391 (2004)
- [20] G. Reitmayr and T. Drummond: Going out: Robust model-based tracking for outdoor augmented reality; Proc. IEEE/ACM Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2006), pp. 109 – 118 (2006)
- [21] 大江統子, 佐藤智和, 横矢直和: 幾何学的位置合わせのための自然特徴点ランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定; 日本 VR 学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 285 – 294 (2005)
- [22] G. Simon, A. W. Fitzgibbon and A. Zisserman: Markerless tracking using planar structures in the scene; Proc. IEEE/ACM Int'l Symp. on Augmented Reality (ISAR 2000), pp. 120 – 128 (2000)
- [23] G. Klein and D. Murray: Parallel tracking and mapping for small AR workspaces; Proc. IEEE/ACM Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007), pp. 1 – 10 (2007)
- [24] S. Gauglitz, C. Sweeney, J. Ventura, M. Turk and Tobias Höllerer: Live tracking and mapping from both general and rotation-only camera motion; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2012), pp. 13 – 22 (2011)
- [25] C. Pirschheim, D. Schmalstieg and G. Reitmayr: Handling pure camera rotation in keyframe-based SLAM; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2013), pp. 229 – 238 (2013)
- [26] G. Klein and D. Murray: Parallel tracking and mapping on a camera phone; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2009), pp. 83 – 86 (2009)
- [27] C. Pirschheim and G. Reitmayr: Homography-based planar mapping and tracking for mobile phones; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2011), pp. 27 – 36 (2011)
- [28] C. Arth, M. Klopschitz, G. Reitmayr and D. Schmalstieg: Real-time self-localization from panoramic images on mobile devices; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2011), pp. 37 – 46 (2011)
- [29] R. A. Newcombe, S. J. Lovegrove and A. J. Davison: DTAM: Dense tracking and mapping in real-time; Proc. Int'l Conf. on Computer Vision (ICCV '11), pp. 2320 – 2327 (2011)
- [30] R. A. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. J. Davison, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges and A. Fitzgibbon: KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking; Proc. IEEE Int'l Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2011), pp. 127 – 136 (2011)
- [31] I. Sato, Y. Sato and K. Ikeuchi: Illumination from shadows; IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, Vol. 25, Issue 3, pp. 290 – 300 (2003)
- [32] M. Kanbara and N. Yokoya: Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality; Proc. 17th Int'l Conf. on Pattern Recognition (ICPR 2004), pp. 911 – 914 (2004)
- [33] 佐藤いまり, 林田守広, 甲斐郁代, 佐藤洋一, 池内克史: 実光源環境下での画像生成: 基礎画像の線形和による高速レンダリング手法; 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 8, pp. 1864 – 1872 (2001)
- [34] 一刈良介, 西沢孝浩, 大島登志一, 柴田史久, 田村秀行: 再照明付与による複合現実空間のルック変更の試み -MR-PreViz 映像への映画的照明演出を例として-, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 15, No. 2, pp. 213 – 220 (2010)
- [35] ARKit 2: <https://developer.apple.com/jp/arkit/> (2019年3月時点)
- [36] ARCore: <https://developers.google.com/ar/?hl=ja> (2019年3月時点)
- [37] みちびき (準天頂衛星システム) : <http://qzss.go.jp/> (2019年3月時点)
- [38] 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: 隠消現実感の技術的枠組と諸問題 ~現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について~, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 239 – 250 (2011)
- [39] 竹村岩朗, 池田聖, 木村朝子, 柴田史久: 自動運転ソフトウェアを活用した死角領域の半隠消表示, 第 23 回日本 VR 学会大会論文集, 14D-1 (2018)
- [40] 有富友紀, 竹村岩朗, 池田聖, 木村朝子, 柴田史久: 自動運転ソフトウェアを活用した周辺車両の半隠消表示 -物体検出モジュールによる半隠消候補領域の抽出; 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, 6R-04 (2019)
- [41] W. E. L. Grimson, G. J. Ettinger, S. J. White, T. Lozano-Pérez, W. M. Wells III, and R. Kikinis: An automatic registration method for frameless stereotaxy, image guided surgery, and enhanced reality visualization; IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 15, No. 2, 129 – 140 (1996)
- [42] S. Manabe, S. Ikeda, A. Kimura and F. Shibata: Casting virtual shadows based on brightness induction for optical see-through displays; Proc. 25th IEEE Conf. on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2018), pp. 627 – 628 (2018)