建築分野の複合現実感*

Mixed Reality in AEC Industry

平沢 岳人**

Gakuhito HIRASAWA

Key words

Augmented/Mixed Reality (AR/MR), Architecture, Engineering and Construction (AEC), SfM, SLAM, Building Information Modeling (BIM)

1. はじめに

私の研究室では、拡張現実感が話題になり始めた初期の頃から建築学における応用研究を行ってきた。最も古い口頭発表が2006年の建築学会大会のもので、研究そのものに着手したのはその数年前なので、かれこれ一回りの年数をかけて建築での実用を目的に適用範囲を徐々に広げてきた。いまではやや陳腐に思えるものも含まれるが、建築での応用事例を幅広く紹介するのが本稿の努めであるので、古くさを承知の上で紹介したい。

2. 室内（インテリア）で拡張現実感

初期の研究では、インテリア（家具）のシミュレーションに取り組んだ。住宅展示場をお借りして撮影し、希少性の高いデザイナーチェアの3Dモデルを重畳して、シミュレーションとしての複合現実感の有用性を確かめた（図1）。

インテリア・シミュレーションの場合、撮影位置の選択に融通が利くことが多く、比較的容易にリアリティを向上させることができた。インテリア・シミュレータで特に問題となったのは光学的な整合性で、写真が撮影された環境に置かれたように仮想物をレンダリングして配置すれば、良いシミュレーション結果が得られた。図2左は丸いテ

ーブル、右はロングチェアがそれぞれ仮想物である。仮想物は実寸でモデリングされており、その大きさが正しく再現されるように重畳しているので、実際にその家具を自宅に置いたらどのような雰囲気になるのか、説得力のあるイメージを得ることができた。このシミュレータを、およそ100点のデザイナーチェアの実大3Dモデルを用意してWEBアプリとして一般公開しアンケート調査を行ったところ、実用性に関しても良好な分析結果が得られた。

同じころ、幾何学的な整合性を維持して仮想物を重畳できるなら、写真に写った実物の大きさをかなりの精度で計算できることに気付いた。文化財の修復現場では、コンベックスを当てて採寸した数値をスケッチと共に野帳に残すが、野帳に記録を残すことそのものにかなりの人手と時間がかかり、また、丁寧さが欠ければ記録の不整合に後日悩まされることが多々ある。拡張現実感に用いられるマーカを写真に写し込んでおけば、採寸は研究室に戻ってからでよい。当時のデジタルカメラで±0.5%程度の精度が得られていたので、コンベックスの目盛りを読むのと変わらず十分実用的であった。さらに、スケッチを描く必要もないので、作業の効率が飛躍的に向上した。改修事中だった法華経寺五重塔（千葉県市川市）に一日だけ時間をいただいて、写真測量を行った。この時、三次元モデルをCADで入力する作業を並行して実施中であったので、伝統木造建築の部材間の複雑な継手仕口の整合性をCADモデルで検証するのに大いに役立った。図3に測量の様子を示す。図4は、この時得られた正確な3Dデータを多軸加工機に

図1 リートフェルト Red & Blue で AR/MR

図2 インテリア・シミュレータ

*原稿受付 平成 29 年 3 月 17 日

**千葉大学大学院工学研究院（千葉市稲毛区弥生町 1-33）

図3 複合現実感を応用した採寸

図4 伝統木造建築の屋根隅部 1/5 スケール模型

入力することで作成した 1/5 スケールの模型（木製）である。伝統木造建築の屋根隅部は最も複雑な部材の取り合いとなり、宮大工の一番の腕の見せ所であるが、図4の精緻なスケール模型を見るかぎり、この時の写真測量が実用的な水準に達していることが分かる。

3. 屋外空間での拡張現実感

室内で一定の成果が得られたので、次の段階は必然的に屋外になる。建築学で屋外といえば、街並みのシミュレーションがまず思い浮かぶ。これを実施するに際し最も問題となったのは、実物と仮想物の前後関係の整合性である。インテリアの場合は、カメラ位置（視点）の選択に融通性があるが、屋外となると必ずしも都合の良い視点を選択できない。視点から見て実物が仮想物の手前にあり、仮想物の一部を遮蔽するケースが多くなる。欠けて見えない部分がきちんと見えないようにレンダリングしてから重畳しないと、オクルージョンが破綻する。これを解決するために、プロジェクションマッピングを用いることで、オクルージョンを維持した。図5は、模型での検証例であるが、中央部の黒いビルが仮想物で、手前のビル（実物）に遮蔽された部分は描かれず、また、仮想物が落とす影を奥側のビル（実物）のファサード（壁面）と街路に正しく描画して

図5 街並み模型での複合現実感

図6 SfMによるポイントクラウドデータ

いる。

これで屋外での拡張現実感の実施に一応のめどがついたわけだが、図5の例では、実物の3次元モデルは模型作成時に既に手元にあったので、プロジェクションマッピングを直ちに実行できた。実現場でのシミュレーションでは、周囲の環境の3Dモデルを得ることがまず必要となり、これが大変難しかった。当時話題になりつつあった、Structure from Motion (SfM) を用いることで、写真群からポイントクラウドデータを得、そのデータをアルファシェイプ法でサーフィス化したものを用いた。ただし、この方法で得られたサーフィスのデータは細かい凹凸があり、また、ノイズも多いので、オクルージョン／キャストシャドウに適した形式にダウンサンプリングし領域抽出フィルタを通してからようやく実用的な周辺環境3Dモデルが得られた。図6はポイントクラウドデータ、図7はアルファシェイプ法によるサーフィス化の例、図8が一連の処理プロセスを示したものである。一瞥しただけではその意味が分からない図8に示す一連の工夫は、レンダリング時間をできるだけ短くして動画でも違和感のない重畳を可能にするために不可欠な前処理だった。

ここまでの準備をした上で、ようやく図9の複合現実感イメージを得ることができた。手前のタイル張り外壁の建物が実物で、奥のコンクリート打放しの建物が仮想物で

図7 アルファシェイプ法によるサーフィス化

図8 周辺環境 3D モデルの構築手順

図9 屋外の複合現実感によるシミュレーション

ある。実物に仮想物がきちんと遮蔽されているだけでなく、目を凝らすと実建築の右隅に付属する灰色のフレームの隙間から仮想建築のファサード面の一部が透けて見える。

建築実務者が納得するシミュレーションとしては、オクルージョンの維持は極めて重要で、これの整合性を保つのにこれだけの手間がかかることが、建築での複合現実感の

図10 運河に橋を架けるシミュレーション

図11 屋外での拡張現実感の必要装備

活用の障壁の一つになっていると思われる。

もう一つの障壁は、図1, 3に写り込んでいる2次元バーコードのようなビジュアルマーカが、屋外ではたいていの場合使えないことである。マーカを使わないで、カメラ位置・方向を推定しなければならない。この問題を解決するにはいくつかの方法があり、現代ではもう少し洗練された方法もあり得るが、センサ類にほぼすべてを頼る直感的な方法から試みた。

カメラ位置(緯度、経度、高度)を正確に知るためには、Real Time Kinematic-GPS (RTK-GPS)を使うことで数センチの誤差で位置を得ることができる。次に、カメラのレンズが向かっている方向や傾きに関しては、いわゆる姿勢センサ(3DOF Inertial Measurement Unit)から得ることにした。二つのセンサから複合現実感の実行に必要なカメラ位置・向きを得ることができた。簡単な例だが、図10に運河に橋を架けた事例を示す。このように、土木的なスケールのものを対象にしても拡張現実感を屋外で応用することに成功した。

複合現実感が屋外で可能になったことは良いのだが、RTK-GPSでは基地局と移動局の二つを同時に運用しなければならないことや、センサ類のケーブルがかさばることなど、とても軽装備とはいえない風体になってしまった。図11は、ヘッドマウントディスプレイを装着していないからまだおとなしいぐらいで、これでは複合現実感を屋外

図 12 屋外拡張現実感実験の装置群 (2012 年ごろ)

で積極的に活用しようという気持ちにはなれないと思われる。

大げさな装備のほかにも、この方法での複合現実感の実行には技術的な問題があって、センサ類のジッター、磁気など試験環境からの影響、長時間の使用によるドリフト誤差の蓄積など、何も対応策をとらないと、シミュレータとしての完成度が著しく損なわれてしまうことが分かった。単純にカメラ位置・向きを求めただけでは不足であり、センサ値の変動傾向を監視して静止状態の判定、重力加速度による姿勢の補正、テンプレートマッチングによる方位の補正、ローパスフィルタによるセンサ値変動の平滑化など、多くの処理を組み込んでようやく観賞に堪える複合現実感による建築シミュレーションが実現した。当時のノート PC では能力が足りず、デスクトップ PC が必要となったため、現場に発電機を持ち込んでの実験になってしまった。現代においては、当時と同程度のシミュレーションに図 12 ほどの装備は不要と思われるが、要求される解像度もいまや 4K となっているので、高詳細な滑らかさを優先するなら、現代でも似たような構成になってしまうのではなかろうか。

4. 建築実務的な拡張現実感の活用

筆者の専門は建築構法とあって、他分野の方には分かりにくいですが、やや乱暴な説明をすると、建築物を部位・部材に分割してその総体として建築を考える、そういう研究分野である。意匠設計などに比べものづくりの現場に近く、施工現場に関わる研究も行う。「2. 室内での拡張現実感」で紹介した写真測量もそういった研究の一環である。

施工管理では、設計(図面)どおりに施工されているかどうかの確認が重要な仕事の一つであり、土木分野では「出来形検査」と固有の名称が与えられている。3D スキャナや先述の SfM を応用したソフトウェアで点群を得て、

設計時の 3D データを重畳する ↓

図 13 複合現実感による設備配管の検査

これを CAD 内部で設計の 3D モデルと重ね合わせて確認する手法が用いられ始めている。マーカを設置できる場合には、比較的簡単に 3D モデルを工事の現況に重畳して、検査業務に応用できる。図 13 はモノクロではやや見にくくなるが、オフィスの天井裏の設備配管に関して実際の施工と設計時の 3D モデルを重ねて検査しているところである。部分部分を目で追いながら図面と順に照合していくのに比べ、ひとまとめに効率よく検査できる。

マーカの有無で複合現実感の実行難易度が大きく違うことは先述のとおりであるが、施工現場を想定すると、多数のマーカの設置を管理業務に含めることは、理屈の上では可能でも、管理コストの増大を招いてまで採用されることはないだろう。マーカなしでも品質管理に使える画像を容易に取得できるなら図 13 の検査も実用化し得る。

建築では、近頃 Building Information Modeling (BIM) と呼ばれる運動が推進されている。BIM とは、施工に取り掛かる前に建物の精緻な 3D モデルを用意して、設計と施工の品質を向上させようとするコンセプトである。仮に BIM のコンセプトが忠実に運用されるような環境が整えば、複合現実感を応用した高度な施工管理が採用されることもあり得る。カメラの位置と向きを得るために Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を用いる場合、ランドマークの取捨選択が重要になるが、BIM の 3D モデルと施工の進捗管理データを照合すれば望ましい分離が実現するはずである。図 14 はこの発想で作成したデモ動画のカットで、画像に写っている建築部位と仕上

図 14 SLAM と BIM の複合現実感デモ

げ種別を、吹き出しの形で重畳している。このデモでは、SLAM の実行はあらかじめ済ませて動画の各フレームにカメラ情報を付加してあり、動画の再生時に BIM データを照合してカメラの視体積内にある部材・部品の情報を選択的に得ている。視線方向の深さ情報を利用することで、壁の向こうの設備配管をレントゲン写真のように見せることも可能である。

現状では、これら二つの処理をリアルタイムで同期的に実行するには至っていないが、これらの統合そのものにはさほど手間はかからないだろう。一方で、管理業務に使えるような精度の良い SLAM の実行に不可欠な BIM コンセプトの運用そのものが難しいため、このデモに示すような検査手法は当面実用化しない。建築施工で設計変更は付き

物であるが、現場対応で施工してしまった変更を BIM データに戻って反映させることは、もちろん本来はすべきではあるが、しないからである。この検査方法のほかにも多数の有益な管理手法が具体化し認知されれば、BIM コンセプトの忠実な実行のインセンティブにもなり得るが、鶏と卵の関係にもあり、機が熟すまでにはもう少し時間が必要である。

5. お わ り に

当研究室での研究活動を振り返りながら、建築分野における複合現実感の利用に関して包括的に紹介した。

マーカありからマーカなしへと複合現実感の実装方法も多様になってきているが、実務的な利活用を到達点にするならば、トラッキングのアルゴリズムだけでは解決できず、運用時の約束事の徹底がソリューションとなることもある。BIM コンセプトの普遍化も、その一つである。付加価値の高い応用を提案することで、複合現実感の実務利用を推し進めたい。

参 考 文 献

- 1) 研究室 HP : <http://www.hlab-arch.jp/>

平沢 岳人

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程修了。博士（工学）。千葉大学大学院工学研究院教授。専門は建築構法。著書に『3D 図解による建築構法』など。