第2010-11号

D-GPSを利用した建築・都市スケールでの拡張現実感システムの開発

千葉大学大学院　工学研究科
准教授　平沢　岳人

平成23年11月

目次

1. 序論 2
1.1. 研究背景 2
1.2. 研究目的 2
1.3. 研究計画概要 3
1.4. 報告書の構成 3
2. GPS とセンサによる AR/MR システムの開発 5
2.1. 概要 5
2.2. 開発した AR/MR システムの概要 5
2.3. カメラ位置 7
2.4. カメラ姿勢 11
2.5. 実時間処理 18
3. リアリティの追求 19
3.1. 概要 19
3.2. 解決方策 19
3.3. 予備実験 20
3.4. 屋外空間への適用 25
3.5. 立体視表現 25
4. 装備デバイス類の検討 26
5. 実地試験 29
5.1. 伝統的な街並みモデルのシミュレーション 29
5.2. エラスムス橋モデルのシミュレーション 32
6. まとめ 35
6.1. 考察 35
6.2. まとめ 37

1. 序論

1.1. 研究背景

計算機技術の向上により、より自由度の高い建築設計が可能となるなかで、プレゼンテーションや景観シミュレーションを効果的に行うことができる手法が求められている。このような機運が高まる中で、従来から用いられていた模型やモンタージュ画像による表現に代わり、三次元 CAD で作成された 3D モデルを用いた仮想現実感(Virtual Reality: VR)による表現が広く利用されるようになった。VR を用いた表現では、一度 3D モデルを作成してしまえば自由な視点から3Dモデルを見たりウォークスルーアニメーションを作成できるため、効率的にシミュレーションを行うことが可能である。一方で、検討対象となる敷地の周辺建造物や自然形状を 3D モデルとして作り込むことが難しいという問題もある。そこで本研究では、拡張現実感(Augmented Reality: AR)もしくは複合現実感(Mixed Reality: MR)などと称される表現技術に着目した。

AR/MR とは、コンピュータで生成した情報を実世界に重ねることで、人間の感覚の拡張・強化するための技術である。VR が全てを CG により表現する手法であるのに対し、視覚を対象とした AR/MR は、カメラから得た現実空間の映像を背景に CG を重畳することで表現される手法であるため、設計対象の 3D モデリングをするだけでリアリティのあるシミュレーションが可能である。また、表現の自由度や、マウス操作などで視点変更を行える手軽さは VR 表現の特徴ではあるが、オペレータの技術が必要となりなかなか意図したような動画像を得ることは難しい。対して、AR/MR 表現では一般的にオペレータの複雑な操作を必要とせず、ユーザの動きがそのまま視点移動につながるなど、直感的な操作が可能である。このため、検討対象となる敷地において歩行者の目線でシミュレーションを行うことも容易である。

以上のような背景から、建築分野において AR/MR の様々な利用方法が期待されている。しかしながら、この技術を建築分野で実用化するには、未だいくつかの課題の解決が必要であり、屋外の広域な空間での利用を想定した実用的な AR/MR システムは見られない。

1.2. 研究目的

本研究は、屋外の広域な空間において AR/MR を実現し、建築分野へ応用することを目的とする。これまでに提案されてきた AR/MR の多くが屋内での利用を想定されたものであり、建築・土木構造物規模の仮想物を取り扱うことを想定した応用提案は少ない。提案されるシステムとして、AR/MR の普及のきっかけとなったマーカトラッキングをはじめとした、画像解析によりカメラ位置・姿勢を推定するビジョンベースのシステムが多く見られるが、これはカメラのみで AR/MR を実現できる手軽な手法ではあるが、屋外での利用に適していない。AR/MR の実現のためには、現実空間のカメラ位置・姿勢情報を正確に取得する必要

があるが、屋外空間を対象とした場合、広域な空間を取り扱う必要がある上、画像内に草木のように複雑かつ類似・連続したパターンが多く見られるため、特徴点などからカメラ位置・姿勢を正確に推定することが難しいことがその要因である。

本研究では屋外空間に適した AR/MR システムを実現するため、GPS と複合センサ(以下、センサ)を用いたロケーションベースの AR システムの開発を試みた。建築・土木構造物規模の仮想物を扱うことが可能な精度と、光学的整合性の表現などによるリアリティのある仮想物表示を目標とした。

1.3. 研究計画概要

建築分野で実用的な AR/MR を実現するためには、3 つの整合性を実現する必要がある。これらは、現実空間と仮想空間との位置合わせ意味する幾何学的整合性と、現実空間内と仮想空間内での見え方の整合性を意味する光学的整合性と、現実空間内での動きと仮想空間重畳処理の時間同期を意味する時間的整合性である。これらの実現に加え、システムの可搬性も重要な問題となるため、本研究では以下の 3 つに大別されるテーマについてそれぞれ取り組むこととした。

1) GPS とセンサによる AR/MR システムの開発

AR/MR を実現するためには、現実空間内におけるカメラ位置・姿勢情報を正確に取得する必要がある。本研究では GPS やセンサに加え、画像解析などによる補正機能をシステムに実装することで、広域な屋外空間においてより正確にカメラ位置・姿勢情報を取得できる手法を模索する。

2) リアリティの追求

AR/MR 表現のリアリティを高めるためには、現実空間の物体と仮想空間の物体との前後関係の問題であるオクルージョン問題の解決と、仮想物が現実空間に落とす影などの表現が必要である。また、立体視を可能とすることでもリアリティの向上が望める。本研究では、三次元 CAD で作成した 3D モデルを用いることで、これらの表現に取り組む。

3) 装備デバイスの検討

カメラ移動が AR/MR システムの基本的な操作方法であるため、装備デバイスの可搬性についても考慮が必要である。本研究では、ユーザが利用する際に自由な移動を妨げないようなパッケージングを目標とし、装備デバイスの検討を行う。

1.4. 報告書の構成

本報告書は、第 1 章の序論を含め、全 6 章で構成されている。以降、第 2 章では AR/MR システムの根幹部分であるカメラ位置・姿勢の取得手法について述べる。第 3 章では、仮

想物表現のリアリティを高めるために、影・前後関係表現手法について述べる。第 4 章では装備デバイス類に関して検討を行う。第 5 章では、本研究の中で行った実験について報告する。最後に第 6 章において、本稿のまとめと今後の展望について述べる。

2. GPS とセンサによる AR/MR システムの開発

2.1. 概要

本章では、開発した AR/MR システムの概要と、システムの基幹部分であるカメラ位置・姿勢情報の取得に関する取り組みついて報告する。また、カメラ姿勢情報を補正するために実装したいくつかの補正機能についても詳説する。

2.2. 開発した AR/MR システムの概要

本研究では、カメラ位置・姿勢情報の取得に GPS とセンサを用い、プログラミング言語として C++を用いてシステムを開発した。3D モデルの作成には Graphisoft 社の ArchiCAD を用い、ArchiCAD から出力した VRML(Virtual Reality Modeling Language)ファイルを OpenGL に変換するパーサを作成することで、CAD からシステムへの 3D モデルのスムーズな受け渡しを実現した(図 1)。また、光学的整合性の表現には OpenGL のシェーディング言語(OpenGL Shading Language: GLSL)を、画像解析の一部にオープンソースのコンピュータビジョン用ライブラリである OpenCV を用いている。

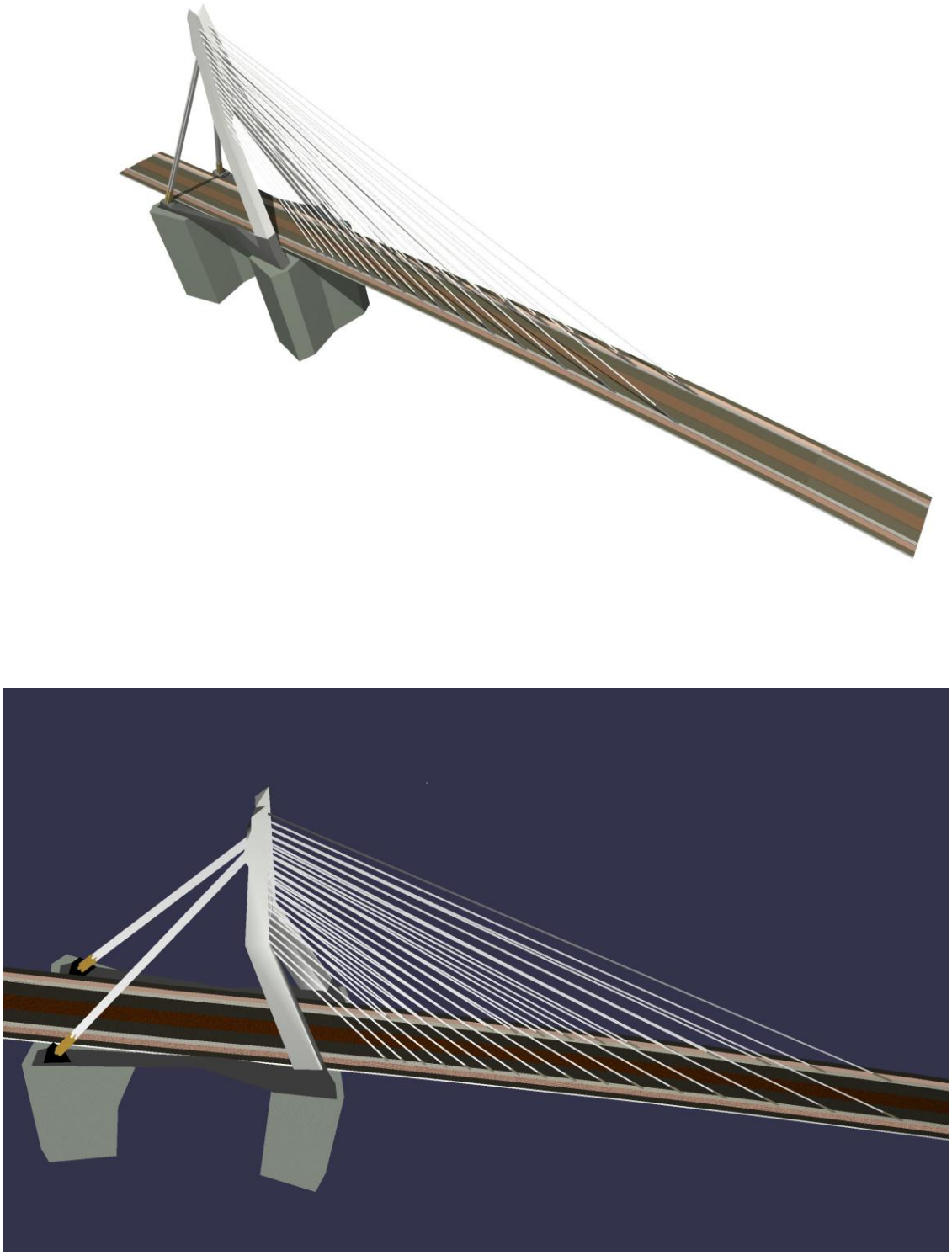


図 1 ArchiCAD 上の 3D モデル(上)、VRML として OpenGL に読み込んだ 3D モデル(下)

2.3. カメラ位置

本システムでは、高精度にカメラ位置検出するために RTK-GPS(Real Time Kinematic GPS)を用いた。RTK-GPS とは、基地点からの補正観測情報を利用することで、リアルタイムに高精度な位置検出を可能にした GPS である。研究の計画段階においては、D-GPS(Differential GPS)を用いることを想定していたが、1m 程度の位置検出誤差が見られたため、建築分野での用途には適していないと判断し、より高精度な RTK-GPS を用いた。図 2, 3 は D-GPS、RTK-GPS のデータを静止状態で 100 秒間毎秒 1 回プロットしたグラフであり、どちらもメートル単位である。このグラフからも、RTK-GPS を用いることで大幅な精度向上が図れることが確認できる。HemisphereGPS 社の A100 スマートアンテナを 2 機用い、基地局とする 1 機を基準点に固定し、SENA 社の Parani-SD1000 を利用して移動局とする GPS に補正情報を送受信することで広範囲な利用を可能とした(図 4)。本機の最大位置検出精度は 2cm であり、データ取得周期は 20Hz である。また、Parani-SD1000 にオプションのアンテナを取り付け、最大通信距離 200m という広範囲での RTK-GPS の運用を可能とした。

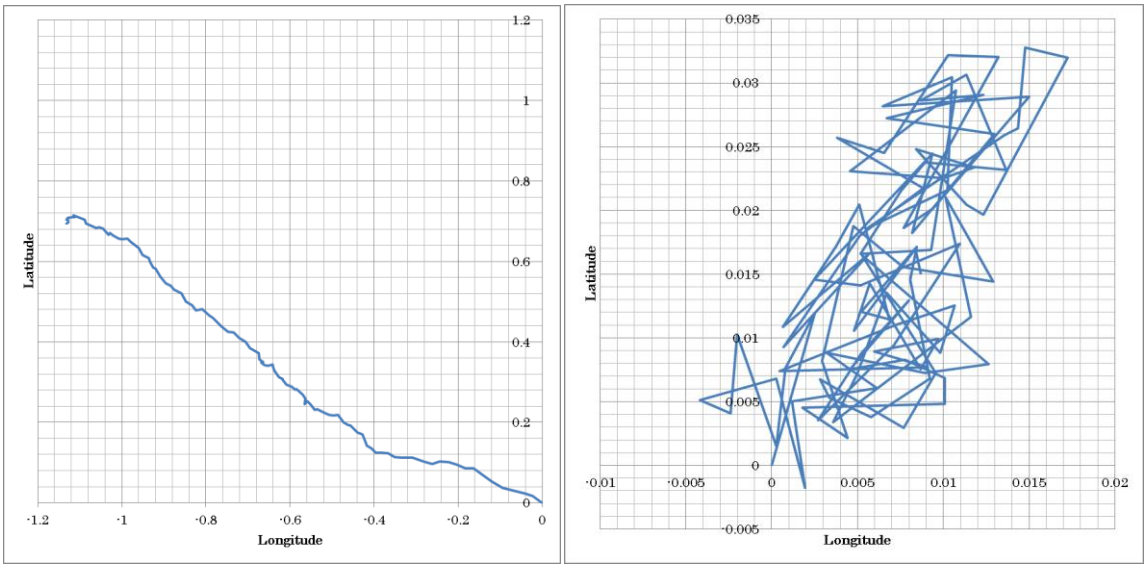
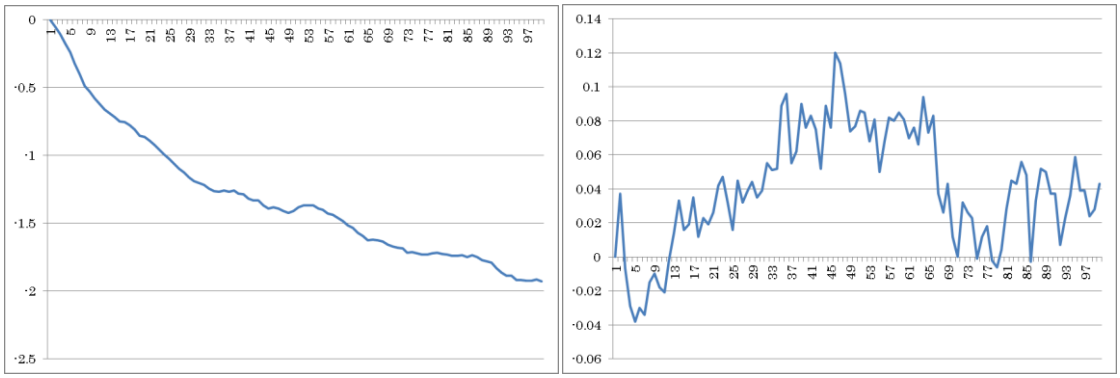


図 2 緯度経度のプロット結果 (左:D-GPS、



右：RTK-GPS)

図 3 高度グラフのプロット結果(左：D-GPS、右：RTK-GPS)

図 4 本システムに用いた GPS

図 5 に示した千葉大学工学研究科創造工学センター屋上で、淵をなぞるように GPS を移動させ、その精度を検証する簡易な実験を行った。図 6 は屋上の図面上に得られた GPS の軌跡を赤線でプロットしたものである。大きなブレもなくほぼ正確に移動の軌跡が得られていることが確認できる。

図 5 千葉大学工学研究科創造工学センター屋上

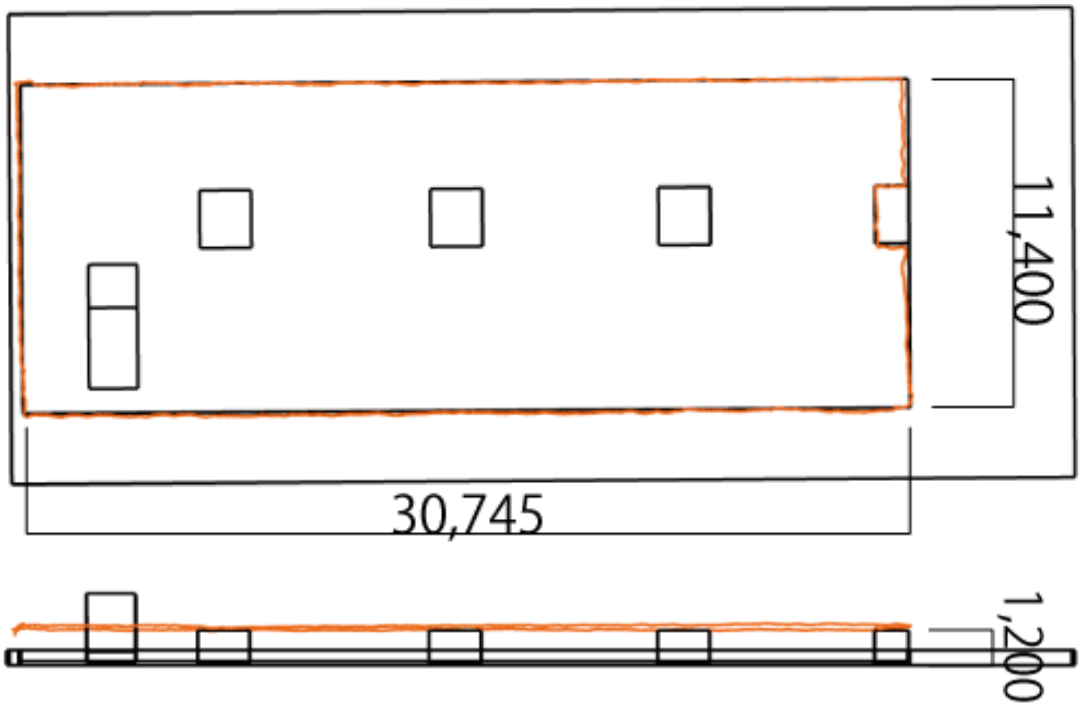


図 6 RTK-GPS の簡易実験（上：平面図、下：立面図）

また、GPS から得られる位置情報には、図 2, 3 に見られるように、静止時であっても 1 フレームごとに微小なずれが生じる。本システムで用いた GPS のデータ取得周期の早さから、この微小ずれが AR/MR の没入感の妨げになり得ると考え、加速度センサから得られる加速度ベクトルの大きさが閾値を超えない場合には、GPS データの反映を停止する処理を施すことで、静止時のぶれを抑える機能を実装した。

2.4. カメラ姿勢

カメラ姿勢を検出するセンサには Trivisio 社の Colibri を用いた(図 7)。これは加速度・磁気・角速度を図れる複合センサであり、動作周期は 100Hz、Yaw 角が最大 1 度、Pitch・Roll 角が最大 0.5 度のオリエンテーション精度で、三軸の角度情報として姿勢を得ることが可能である。しかしながら、センサの値は環境による影響を受けやすく、補正が必要なシーンも見られたため、様々な補正機能を実装した。以下にこれらの機能を詳説する。

図 7 本システムで用いたセンサ

1）重力加速度を利用した Pitch・Roll 角の補正システム

センサから得られる重力加速度を利用した補正システムを実装した。センサの Z 軸の回転角である Yaw 角については、重力加速度方向と直交する方位角を表すため、重力加速度から算出することはできないが、センサの X 軸・Y 軸の回転角である Pitch・Roll 角は重力加速度から算出できるため、この値を真値として補正値を算出することが可能である。センサの X 軸・Y 軸・Z 軸の加速度をそれぞれ A_x・A_y・A_z として、Pitch 角 θ_{pitch}・Roll 角 θ_{Roll} は以下の①②式により算出できる。

$$\theta_{pitch} = Tan^{-1}\left(\frac{-A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \quad \cdots①$$

$$\theta_{Roll} = Tan^{-1}\left(\frac{-A_x}{A_z}\right) \quad \cdots②$$

なお、誤った補正値の算出を防ぐため、センサの値の 1 フレーム毎の微小な誤差を 100 フレームの平均値を用いることで緩和し、この加速度ベクトルの大きさが重力加速度の大きさとほぼ等しい場合(≒9.81m/)に限り、補正値を算出することとした。

2) GPS の位置情報による Yaw 角の補正システム

GPS から得られる位置情報から進行方向を算出し、Yaw 角を補正するシステムを実装した。センサから得られる Yaw 角は、真北方向を 0 度とした 360 度までで表される方位角であり、ある時刻 t_0 のカメラ位置 P_{t_0} と一定時間が経過した t でのカメラ位置 P_t を結ぶベクトル A と、 P_{t_0} から真北方向上のある点 P_N を結ぶベクトル N とがなす角を算出することで、進行方向の方位角 θ_A を得る。ベクトル A と P_t からセンサの Y 軸の正方向（本システムではカメラの視線方向）に向かうベクトル Y がなす角 θ_C が既知であれば、カメラが現在向いている Yaw 角 θ_{Yaw} が得られる。本システムでは、この補正を行う際にはカメラを正確に進行方向に向けることで、進行方向とカメラ視線方向とを一致させた。

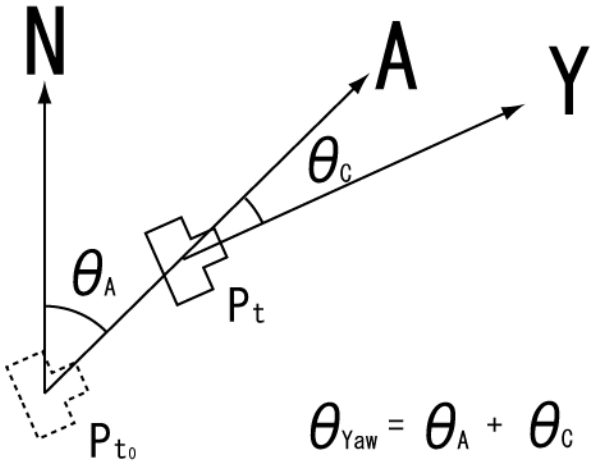


図 8 進行方向による Yaw 角の算出

なお、誤った補正値の算出を防ぐため、GPS の位置検出誤差による進行方向のずれが無視できる程度（1 度未満）に小さくなるような距離を閾値に設定し、一定時間内の移動量が閾値を超えた場合のみ補正を算出することとした。

3) テンプレートマッチングによる Yaw・Pitch 角の補正システム

以上に挙げた 2 つの補正機能により、全ての角の補正が可能ではあるが、基本的に重力加速度による補正は静止状態のみ、進行方向による補正は直進状態のみでの利用に限定される。そこで、カメラ移動時においてもセンサの値の補正を可能とするため、テンプレートマッチングによる補正機能の実装も試みた。補正値を算出する具体的な手順は、以下のとおりである。

1. 静止状態で重力加速度による補正を行い、Pitch 角の真値とする値θ'_{Pitch}を取得し、同時にテンプレートマッチングを行い、開始時刻t_0の映像上のテンプレート座標値C_{t_0}を記録する。なお、センサから得られる Roll の値θ_{Roll}を利用し探索するテンプレートを回転させ、テンプレートマッチングを行う(図 9)。

図 9 テンプレートマッチング

2. テンプレート座標値C_t、カメラの光軸座標$C_{principal}$とセンサから得られる Roll 角θ_{Roll}を利用して、θ_{Roll} = 0 である時のテンプレート座標値C'_{t_0}を得る(図 10)。

図 10 Roll の影響を排除したテンプレート座標の算出

3. ある時刻 t における GPS から得られるカメラ位置P_tとテンプレート位置P_{templ}を結ぶベクトル T と、P_tから真北向きのベクトル N がなす角度θ_{templ}を算出する。

4. センサから得られる Roll の値θ_{Roll}を利用し探索するテンプレートを回転させ、テンプレートマッチングを行い、カメラ映像内のテンプレート座標値C_tを得る。

5. テンプレート座標値C_t、カメラの光軸座標$C_{principal}$とセンサから得られる Roll 角θ_{Roll}を利用して、θ_{Roll} = 0 である時のテンプレート座標値C'_tを得る。

6. カメラの内部パラメータ(カメラ光軸座標$C_{principal}$・カメラ解像度 R・カメラ視野角θ_{fov})を用いて、テンプレートが座標値C'_tに見えるときの角θ_{image}を算出する。

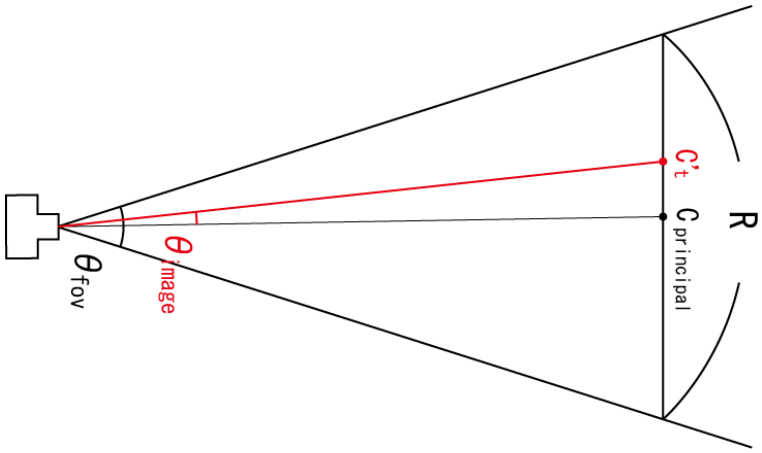


図 11 カメラの内部パラメータなどを利用した角度算出

7. これまでに算出した角θ_{templ}と角θ_{image}とを足し合わせることで、Pitch 角θ_{Pitch}と Yaw 角θ_{Yaw}を算出する。なお、Pitch 角はカメラ位置とテンプレートの高度データがあれば真値を得ることが可能であるが、テンプレートの高度を正確に求めることは難しいため、テンプレートが座標値 にあるときの Pitch 角θ'_{Pitch}を真値とし、相対的な角度を算出することとした。

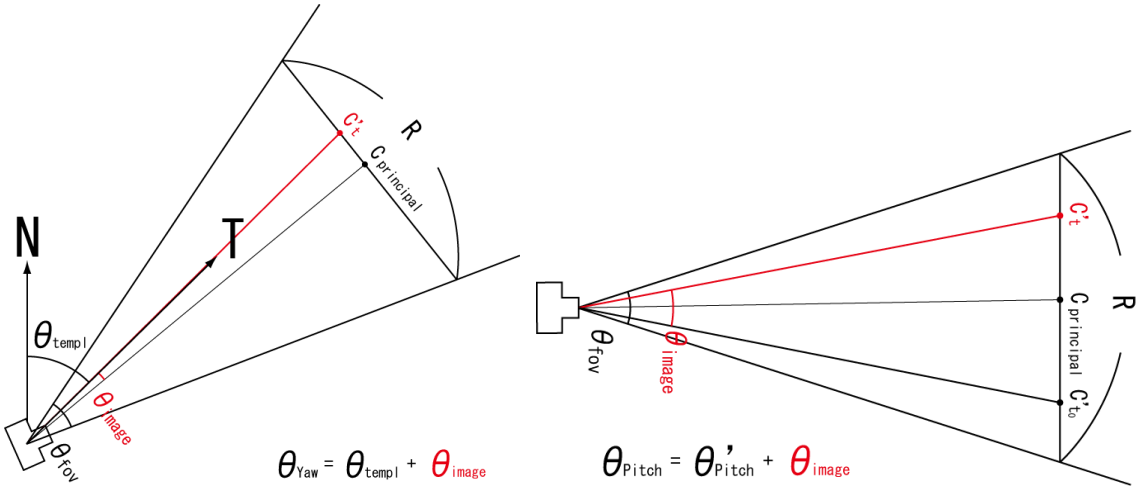


図 12 テンプレートマッチングによる Yaw 角・Pitch 角の算出

一定時間ごとに 2～7 に挙げた処理を繰り返すことで、テンプレートがカメラ映像に収まる範囲内においては Yaw・Pitch 角を算出し、この値を真値として補正値を得ることが可能である。なお、本報告の実験においては、テンプレートの位置情報を GoogleMap から得ることとしたが、ここから得られるデータと同一地点における GPS データには若干の誤差が見られた。GPS データと GoogleMap から得られるデータを比較し、簡単な補正を行ったが、地図上からテンプレート位置をピックアップする際の誤差なども存在するうえ、GPS データそのものにも微小な誤差が含まれるため、カメラ位置から数 100m 以上離れている物体をテンプレートに設定することで誤差の影響を緩和することとした。

また、テンプレートマッチングの処理負荷は大きく、カメラの全範囲を対象としてある程度の大きさのテンプレートを探す場合には、テンプレートマッチングのフレームレートが著しく小さくなってしまうことがわかった。そこで本システムでは、図 13 に示したフローチャートように画像内に ROI（Region Of Interest）を設定し、探索範囲を限定することでテンプレートマッチングの高速化を図った。

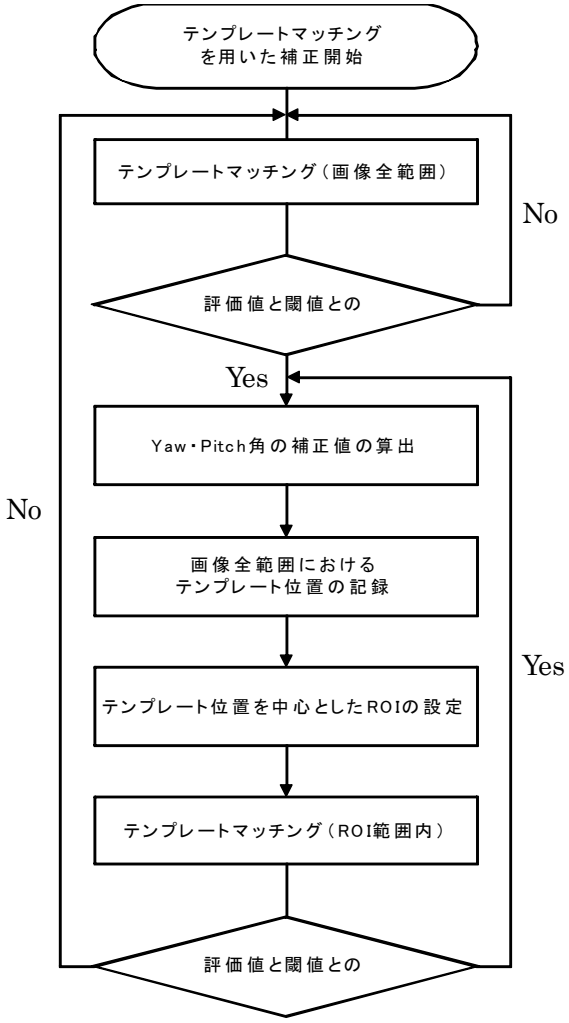


図 13 ROI を利用したテンプレートマッチングの高速化フローチャート

以上の 3 つの補正機能により、静止時・移動時ともにカメラ姿勢を補正し続けることが可能である。なお、補正値の急激な変化による CG のブレを軽減するため、補正値の反映には③の計算式により適用されるフィルタを用い、滑らかな補正を試みた。ある時刻 t で反映される補正値をC_t、ある時刻より一定時間前に適用された補正値をC_{t_0}、フィルタがかかっていない補正値を C とし、反映しやすさを r $(0 \leq r < 1.0)$とすると、

$$C_t = rC_{t_0} + (1-r)C \quad \cdots③$$

から、ある時刻 t で反映される補正値C_tを算出することができる。

また、センサから得られる姿勢情報にも GPS と同様、1 フレームごとに微小なずれが生じる。本システムで用いたセンサのデータ取得周期の早さから、この微小ずれが AR/MR の没入感の妨げになり得ると考え、角速度の大きさが閾値を超えない場合には、センサデータの反映を停止する処理を施すことで、静止時のぶれを抑える機能を実装した。

以下に示す図 14～16 は、本システムのプロトタイプで予備実験を行った例である。高精度な GPS とセンサを用いることで、屋外の広い空間で建築物の実寸規模での AR/MR の利用が可能になった。この実験を含む研究報告は、「大規模空間において実寸大表現が可能な拡張現実感システムの開発」という題目で日本建築学会計画系論文集の第 76 巻・第 667 号に掲載された。

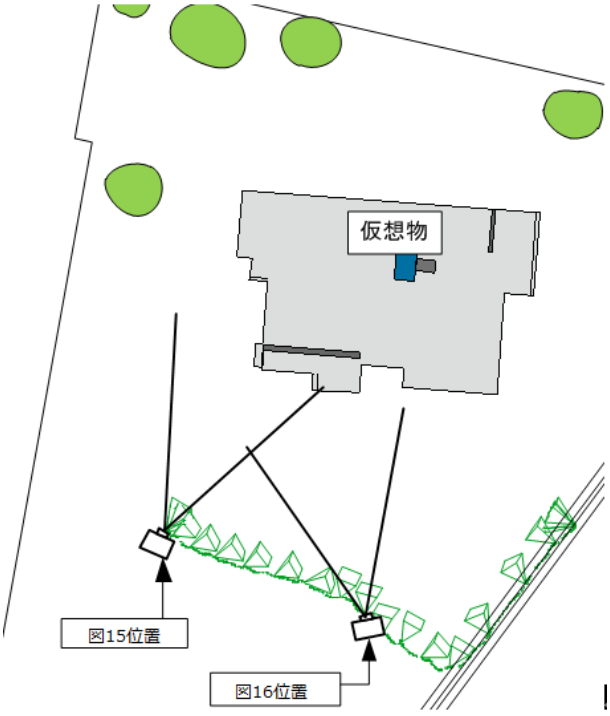


図 14 予備実験平面図

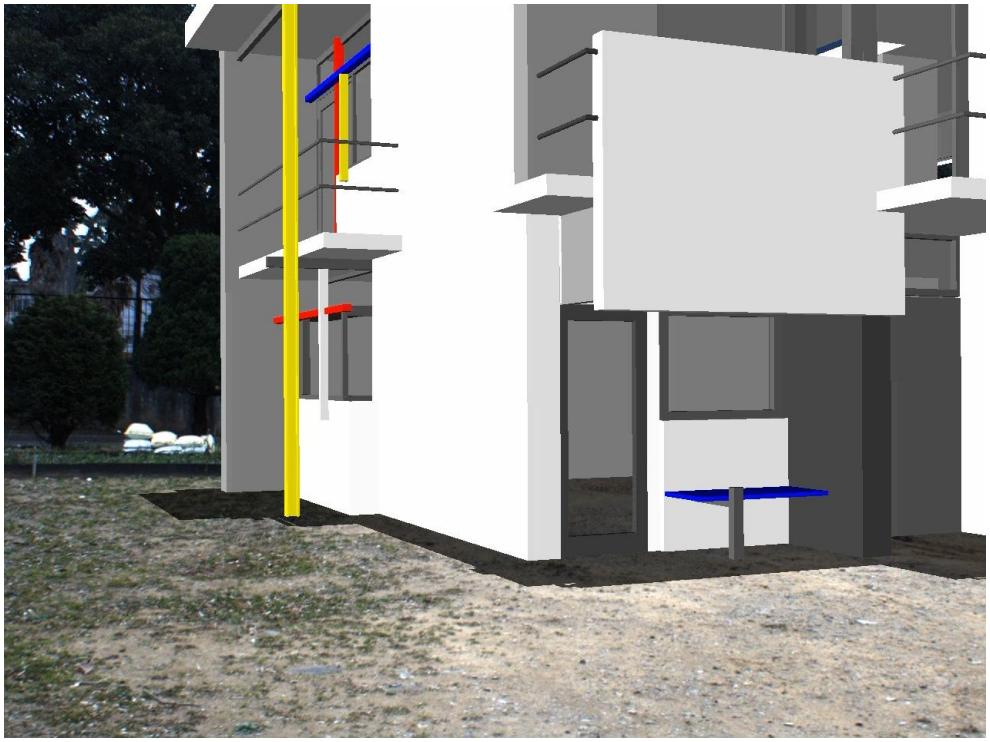


図 15　予備実験で得られた合成シーン 1

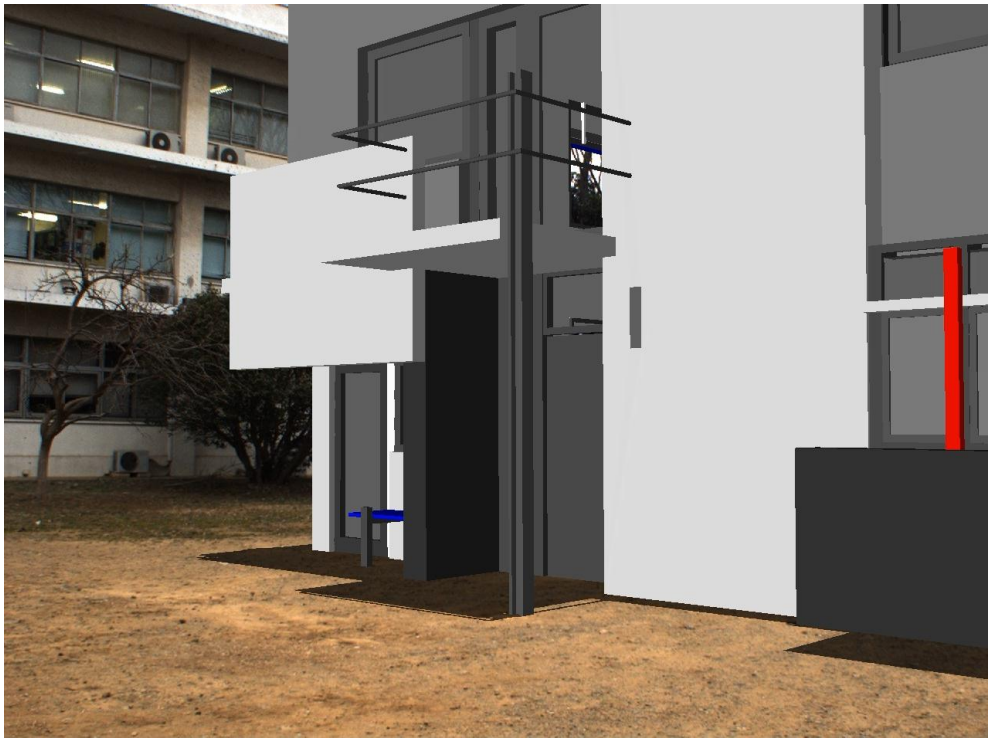


図 16　予備実験で得られた合成シーン 2

2.5. 実時間処理

カメラ映像のキャプチャ、映像上への CG の描画、カメラ位置・姿勢情報の取得は AR/MR 表現をするために最低限必要な基本的処理である。本システムでは、この他にセンサの補正処理の処理負荷も小さくないため、全てを直列処理した場合には、システムの実時間性が著しく損なわれることが判明した。この問題を解決し、時間的整合性を実現するため、本システムでは複数のスレッドに処理を振り分ける並列処理に対応した。具体的には、キャプチャ処理・CG 描画処理・GPS データの取得処理・センサデータの取得処理・テンプレートマッチング処理をそれぞれ別スレッドに振り分けることとすることで、それぞれの機材を最大動作周期で利用することを可能とした。

3. リアリティの追求

3.1. 概要

AR/MR におけるリアリティの表現は、仮想物が現実空間に落とす影や、現実空間の物体が仮想物に落とす影を表現するなどといった、現実空間と仮想物との光環境の共有を意味する光学的整合性の表現と、現実空間の物体と仮想物との前後関係の表現を意味するオクルージョン表現により実現される。

先行研究から、これらの表現には現実空間の三次元形状を得る必要があることが分かっている。しかしながら、複雑な三次元形状が散在する広域な屋外空間においてその三次元形状を正確に取得することは難しい。そのため、本研究ではまずマーカトラッキングによる AR システムを用い、AR/MR の適用範囲を模型上に限定し、模型の 3D データを三次元 CAD により作成することでこれらの表現を試みた。

また、立体視を可能とすることでも、AR/MR の合成シーンのリアリティを向上することができるだろう。本研究では、2 機のカメラと立体視ヘッドマウントディスプレイを用いることでこの表現を可能とした。本章では、これらの詳細な処理の流れと、これを屋外で用いる場合の課題などについて述べる。

3.2. 解決方策

本研究では、AR/MR のリアリティを向上するため、オクルージョン問題と光学的整合性問題の解決に取り組んだ。以下にそれぞれの解決方策を述べる。

1) オクルージョン問題

オクルージョン問題とは、常に仮想空間の物体が現実空間の物体に対して手前側に描かれてしまう問題である。AR/MR を用いて映像内に二次元画像として描かれたインフォメーションを重畳するようなシステムにおいては、前後関係の破綻の問題は必ずしも重要ではないが、本研究の目的とするところである景観シミュレーションのような仮想の三次元物体を映像内に重畳することを目的としたシステムでは、この問題が著しいリアリティの損失につながる。

この問題の解決には現実空間の三次元形状を得る必要があるため、本研究で三次元 CAD である ArchiCAD14 により 3Dデータを予め作成しシステムに読み込ませることとした。この処理には、本研究で開発した ArchiCAD から書きだした VRML ファイルをシステムに読み込むパーサを利用した。予め三次元 CAD で作成した模型の 3D データを参照し、マーカトラッキングによりこの 3D データを模型に重ねる形で配置し、カメラから取得した映像を 3D データ上に投影マッピングすることでオクルージョンを表現した。

2) 光学的整合性問題

光学的整合性は、現実空間の光環境を取得し、この光環境において仮想物が現実空間の物体に落とす影、現実空間の物体が仮想物に落とす影、仮想物が自身に落とす影の表現により実現される。現実空間に仮想物を重ねあわせて表現をする AR/MR において、オクルージョン問題と同様、仮想の三次元物体を映像内に重畳するシステムでは、光学的整合性の破綻もまたリアリティの損失につながる要因となり得る。

この問題の解決にもオクルージョン問題の解決と同様、現実空間の三次元形状を得る必要があるため、同様の手法で作成した 3D データを参照することとした。3D データと与えられた光源から算出されたデプスマップをもとにして、オクルージョン表現で投影するカメラ映像のテクスチャ上に影を書きこむことで、オクルージョンと光学的整合性を同時に表現することができる。また、PCF(Percentage Closer Filtering)を用いて、擬似的ではあるが輪郭の目立たない自然な影を表現した。なお、本研究では現実空間の光環境の取得は行わず、任意に光源位置を指定することとした。現実空間の光環境の取得には、魚眼レンズなどのデバイスを使用する手法なども考えられるが、屋外空間での利用においては、光源は太陽にほぼ限定することができ、その時の天候により光源の指向性などが決定されるため、光環境を取得するための特殊なデバイスを用いず、位置・時間などの情報から光環境を推定することも可能だと考えられる。これらの実装は、今後の研究課題としたい。

以上に挙げた手法により、それぞれの表現を同時に実現することが可能である。

3.3. 予備実験

屋内空間の模型上の狭い空間を対象として、オクルージョン・光学的整合性の表現を可能としたシステムを試作し、架空の敷地模型用 3D モデル・設計案 3D モデルを 3 次元 CAD で作成し予備実験を行った(図 17)。試作したシステムにおいて、オクルージョン・光学的整合性問題の解決方策は以下のように適用される。

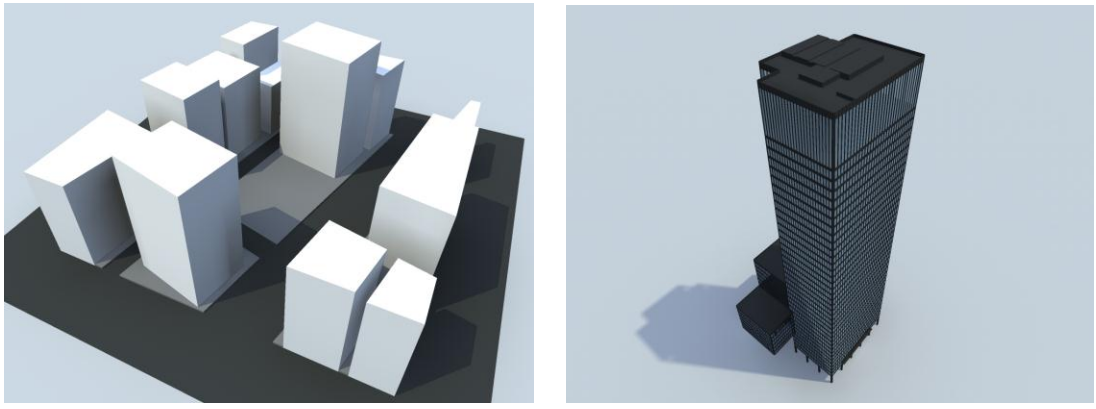


図 17 敷地模型用 3D モデル(左)、設計案 3D モデル(右)

1. 模型の 3D データを三次元 CAD から書き出し、AR/MR システムに模型 3D データを読み込ませる。
2. マーカトラッキングにより 3D モデル描画位置を得る(図 18)。
3. 設計用 3D モデルを描画し、任意の位置に配置した光源からの深度値を影計算用テクスチャに格納する(図 19)。
4. 影計算用テクスチャへの描画設定から通常の描画設定に戻す。
5. カメラ視点から視錐台の 4 頂点へ伸びるベクトルとマーカ平面との交点を求める(図 20)。(視錐台は、レンズ歪曲補正に用いるパラメータから算出する。)
6. 床面 3D モデル、設計用 3D モデルを描画する。この際に、カメラから取得した画像上に手順 3 で得た影計算用テクスチャから影を計算・描画し、テクスチャとしてカメラ視点位置から模型 3D モデル・床面 3D モデルのカメラ画像範囲内の部分に投影マッピングする(図 21)。(カメラ映像範囲の算出にも手順 5 でレンズ歪曲補正に用いたパラメータを利用する。)
7. 設計用 3D モデルを描画する。手順 6 と同様、影計算用テクスチャを元に検討用 3D モデルのテクスチャに影を描画する。
8. 手順 2～手順 7 を映像のフレーム毎に繰り返す。

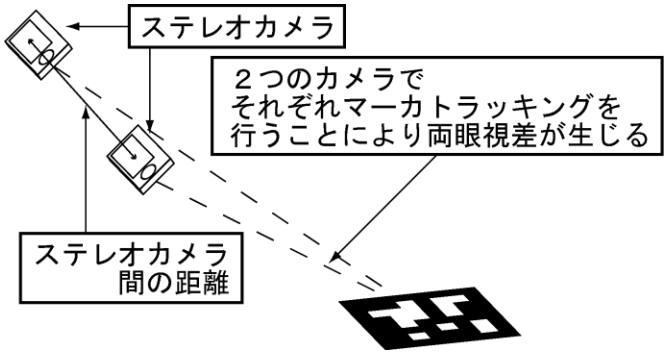


図 18 手順 2: ステレオカメラマーカトラッキングによる立体視映像

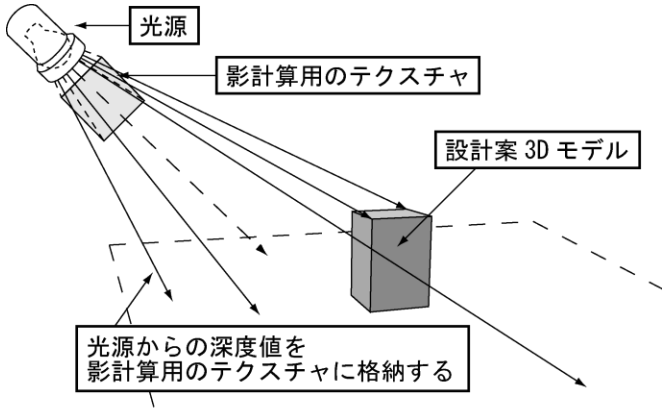


図 19 手順 3: 深度値の取得

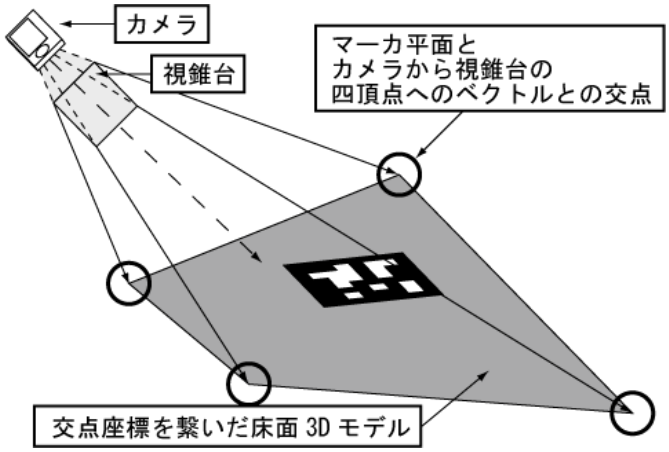


図 20 手順 5: 床面のモデリング

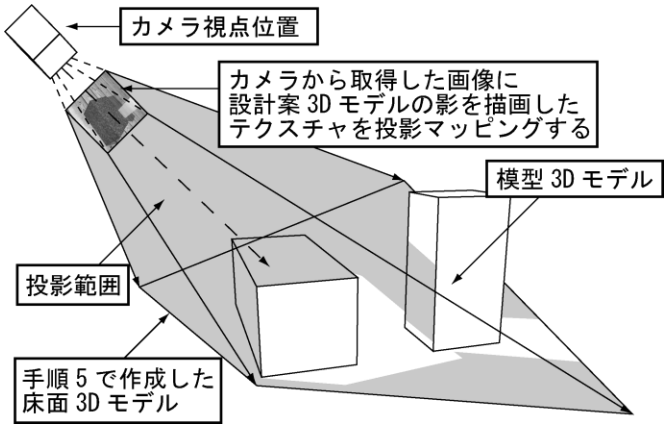


図 21 手順 6: 投影マッピング

以上の手順を踏むことで、模型と設計用 3D モデルとのオクルージョンと、設計用 3D モデルが模型に落とす影を同時に表現することが可能である。なお、予備実験では設計案 3D モデルが自身に落とす影と、模型から設計案 3D モデルに落ちる影の表現は行なっていないが、表現する影にあわせて影計算用テクスチャを作成することにより、これらの表現も可能である。

作成した模型 3D データを元に、500mm 四方の敷地模型を作成し、700mm 四方の模型台に 80mm マーカを計 8 枚設置した(図 22)。

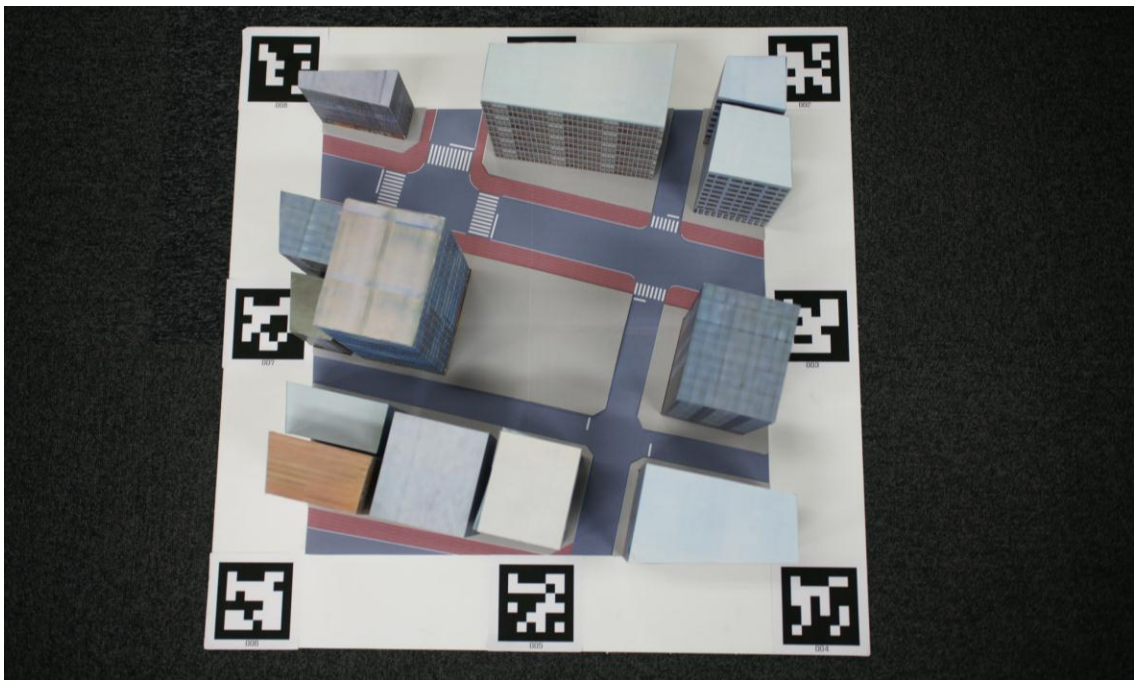


図 22　予備実験で作成した敷地模型

本実験の結果、図 23, 24 のような映像を得ることができた。カメラ視点の変化に伴う自然なオクルージョンと、設計案 3D モデルが敷地模型・床面に落とす影とをそれぞれ表現できていることが確認できる。オクルージョン・光学的整合性の表現を行わなかった場合、設計案 3D モデルが浮いて見えるなど、模型上の任意の地点に正しく設置されているということがわかりづらく、没入感が妨げられるシーンも多かったが、これらの表現を行うことにより、模型上に設計案 3D モデルが配置されているということが認識しやすくなり、リアリティが向上したといえる。

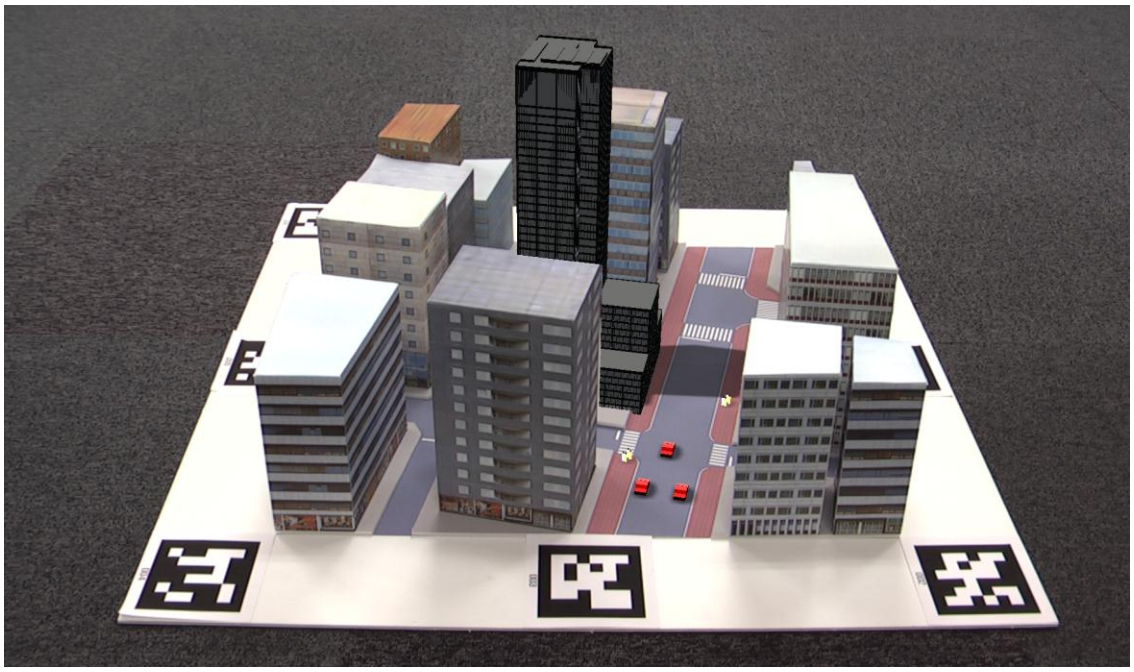


図 23 予備実験により得られた合成シーン(鳥瞰)
(中央のビル・車・人物が仮想物である)

図 24 予備実験により得られた合成シーン(アイレベル)
(中央の大きく隠蔽されたビル・車・人物が仮想物である)

3.4. 屋外空間への適用

これまでに述べてきた手法は屋外空間でも利用可能な手法であるが、三次元形状が既知な模型などを用いる場合や、屋内空間のように比較的に三次元形状が得やすい単純な物体が多い狭い空間と異なり、屋外空間の三次元形状は非常に複雑であり、また広域にわたり物体が点在するようなシーンが多い。そのため、現実空間の三次元形状を知ることは容易ではなく、これまでの研究で採用した三次元 CAD により三次元データを予め作成することは難しい。屋外空間においては、広域での利用が可能なレーザースキャナや、ステレオ写真測量技術を応用することで三次元形状を取得することが可能であると考えられる。この点については今度の更なる研究が必要であるため、今後の課題とし、AR/MR システムに適した三次元形状取得手法を模索していきたい。

現段階では、屋外での利用を想定した AR/MR システムにおいては、センサの値と視点高さから地面を推定することができるため、地平面に仮想物が落とす影と、仮想物が自身に落とす影を表現することが可能である。

3.5. 立体視表現

以上に挙げたオクルージョン・光学的整合性の表現に加え、AR/MR により得られた合成シーンを立体視映像として表現することでも AR/MR のリアリティの向上が見込める。図 25 に示したように、ステレオカメラを用いステレオ映像を取得することでこの実現が可能である。本研究で開発したシステムでは、立体視ヘッドマウントディスプレイの使用にも対応し、立体視による AR/MR 表現を可能とした。図 25 は交差法であるが、ヘッドマウントディスプレイを用いたシミュレーションでは、平行法で左右のディスプレイに表示する。

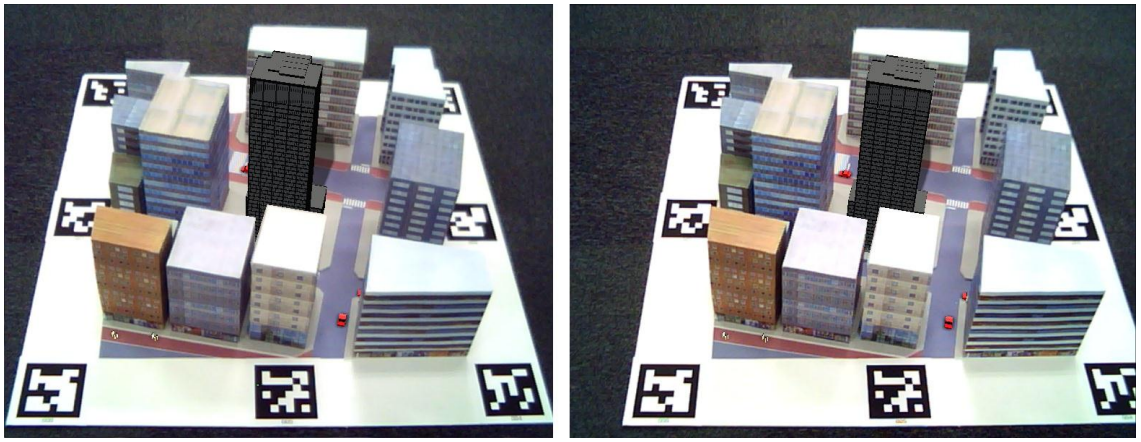


図 25 ステレオカメラによるマーカトラッキングにより得られた立体視画像(交差法)

4. 装備デバイス類の検討

テーマ 3 に関して、研究計画に記載したデバイスの小型化に関しては未着手である。ウエアラブルな機材構成での高品質なシミュレーションの実現を構想していたが、テーマ 1、テーマ 2 でこれまでに構築されたソフトウエアの運用によるシステム負荷が想定以上に過大であり、ウエアラブルシステムとするに十分に小型なコンピュータでは必要な性能が得られないことが判明したからである。図 26 のようにノート PC を用いたポータブルなシステムでの実験も数回行ったが、実時間性が損なわれ、AR/MR の没入感が妨げられることが多かった。よって、処理能力の高い PC につないだケーブルやデバイス類を、出来るだけ軽快に引き回せるようにすることで疑似ウエアラブルシステムとして構築する方向に方針を改めた。

システム利用時の可搬性が必要となる機材は、デスクトップ PC・ディスプレイ・GPS などである。本研究では、非舗装路面でも安定してこれらを持ち運ぶことができるような専用の台車を設計し、デバイスパッケージのあり方を検討した(図 27)。デバイス類の可搬性を高めることで、ヘッドマウントディスプレイを利用する場合などにおいても、利用者がほとんど移動に制約を感じることなくシステムを運用することを可能とした。また、システムの安定を図るために図 28, 29 に示したようなカメラ・センサ・GPS などの複合マウントの設計・試作・評価も行った。

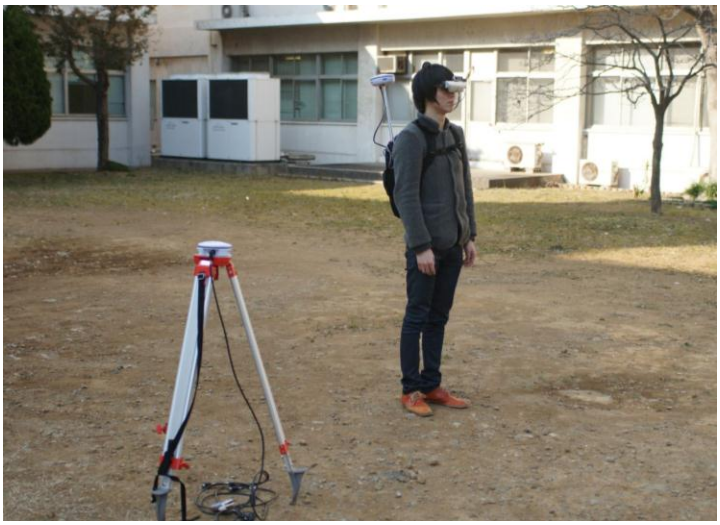


図 26 ノート PC を用いた場合の実験風景

図 27 実験に用いたデバイスパッケージ

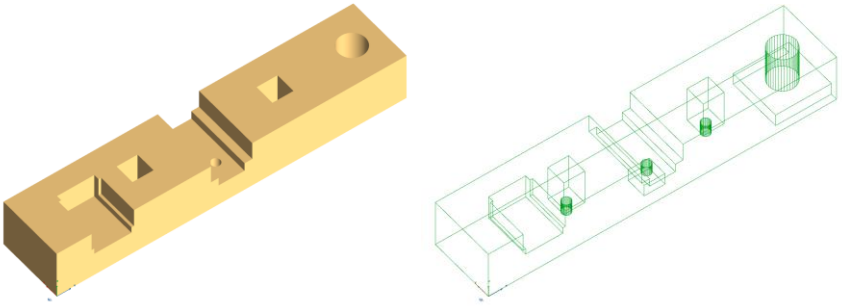


図 28 試作したカメラ・センサ・GPS を複合するマウント

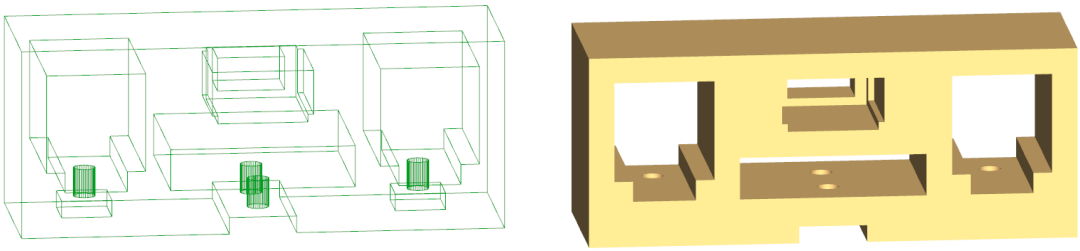


図 29 試作したステレオカメラ・センサを複合するマウント(上)
ステレオカメラと立体視 HMD の装着イメージ(下)

5. 実地試験

5.1. 伝統的な街並みモデルのシミュレーション

東京都江戸川区の江戸川河川敷において、実寸大の街並みモデルを用いて、景観シミュレーション実験を行った。図 30 のような伝統的木造住宅の街並みを模した簡単な 3D モデル作成し、江戸川河川敷のグラウンド上に重畳する実験を行った。

図 30 シミュレーションに用いた街並みモデル

本実験で用いた機材は以下のとおりである。この他、電源がない環境での実験であったため、発電機(EU9iGB：HONDA 社)を用いた(図 31)。

図 31 実験に用いたデバイスパッケージ(左)
発電機と基準局 GPS(右)

・PC　(CPU: Intel Core i7-2600 CPU @ 3.40GHz
　　GPU: NVIDIA Quadro 2000
　　RAM: 8GB)
・ディスプレイ：ST2220T (Dell 社)
・カメラ：FLEA2 (Point Grey Research 社)
・センサ：Colibri (Trivisio 社)
・GPS　2 台：A100 (HemisphereGPS 社)
・補正情報送受信機　2 台：Parani-SD1000 (SENA 社)

実験の際のシステムの初期化手順は以下のとおりである。なお、本実験ではセンサの補正機能として挙げたもののうち、重力加速度による Pitch・Roll 角の補正と、進行方向による Yaw 角の補正を利用した。また、仮想物の表示位置は予め GoogleMap から緯度・経度を取得し、システムに設定している(図 32)。

1) 補正情報を受信するベース GPS を初期化する。この処理には 15 分程度必要である。
2) センサのキャリブレーションを行う。
3) 基準局 GPS に現在の地点情報を入力する。
4) 実験者が装備した GPS が補正情報を受信し、RTK-GPS モードになったことを確認する。RTK モードに切り替わるまでに最短で 5 分程度必要である。
5) AR/MR システムを起動する。
6) センサの補正を行う。

このような処理を行った後、カメラを自由に移動させ、仮想物が正しく表示されているかを確認した(図 33, 34)。

図 32 設定した仮想物位置

図 33 街並みを河川敷に重畳した例 1

図 34 街並みを河川敷に重畳した例 2

5.2. エラスムス橋モデルのシミュレーション

図 35 のようなエラスムス橋を模した 3D モデルを作成し、千葉県浦安市市街地で境川に橋梁を重畳する実験を行った。本実験で用いた機材、実験手順は前回と同様であるが、今回の実験では図 36 のようなテンプレートを用い、テンプレートマッチングによる Yaw・Pitch 角の補正機能も利用した。仮想物の表示位置を図 37 のように設定し実験を行った結果、図 38 , 39 のような映像が得られた。また、立体視での表現も試み、図 40 のような立体視映像での AR/MR を実現することができた。

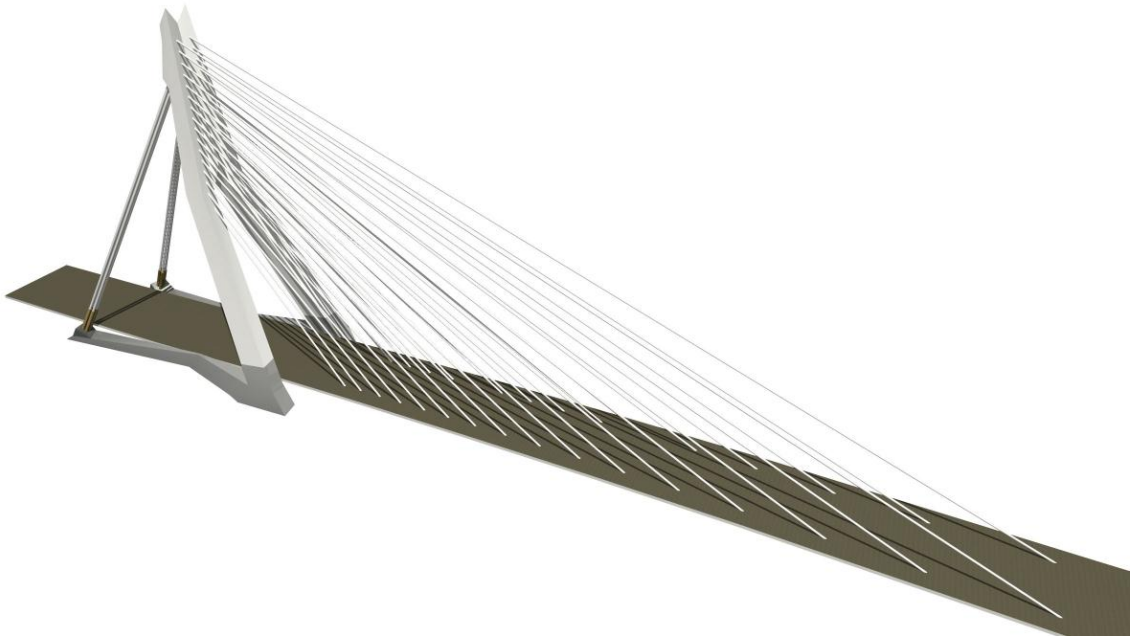


図 35 エラスムス橋を模した 3D モデル

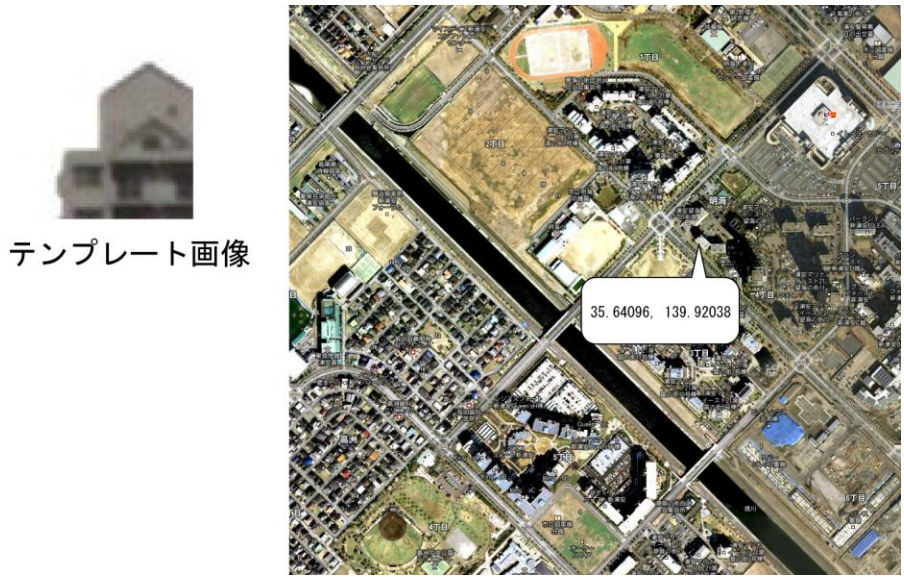


図 36 用いたテンプレートとテンプレート位置

図 37 設定した仮想物位置

図 38 境川での橋梁 3D モデルを用いた AR/MR 景観シミュレーション 1

図 49 境川での橋梁 3D モデルを用いた AR/MR 景観シミュレーション 2

図 40 立体視表現による AR/MR 景観シミュレーション(交差法)

6. まとめ

6.1. 考察

実験により、屋外の広域な空間において意図した位置に 3D モデルを重畳できたことが確認できた。街並みや橋梁の 3D モデルなどのような、大規模な仮想物を AR/MR を利用しながら自由に見て回れるという点は、本システム独自の特徴である。また、屋外での利用を想定したシステムにおいて、影表現などを行うことで AR/MR のリアリティの向上を図っている点も本システムの特徴である。屋内空間において模型上を対象とした狭い範囲への AR/MR と異なり、表現できる影は仮想物が地平面に落とす影と、仮想物が仮想物に落とす影の表現のみに現段階では限定されるが、この程度の表現でも仮想物が環境に溶け込み、リアリティの高い映像を得ることができた。また、システムに実装したいくつかの補正機能により、AR/MR の没入感を妨げるような仮想物の不自然なずれやぶれが生じることがなくなったと感じた。しかしながら、実験を通していくつかの課題も得られた。

まず、加速度や角速度を利用したカメラの静止判定の閾値は、今後の研究でより最適な値を調査する必要があると感じた。現状では、完全な静止状態と移動状態の切り替えは実現しておらず、実際には静止状態であっても仮想物がセンサや GPS の値を反映してぶれて見えるシーンが見られた。また、センサから得られるカメラ姿勢の補正機能の強化も必要であろう。センサは非常に利用環境の影響を受け易く、AR/MR の没入感の妨げの要因になりやすく、本研究では、いくつかの補正機能を実装したが、このどれもが限定的な状況でしか利用できず、センサの値を補正しきれない場面も見られた。そのため、今以上のカメラ姿勢取得の精度を実現するためには、自由度の高い補正機能の実装や、カメラ姿勢推定システムの更なる改良が必要だろう。

次に、橋梁の 3D モデルを用いたシミュレーションの際には、近くにある茂みの映像上に茂みより遠くにあるはずの橋脚が描画されるなど、オクルージョン表現が実現されていないため、遠近感を喪失し没入感を妨げるシーンも見られた。この問題については、屋外空間の三次元形状を正確に取得することで解決できるため、今後の研究で屋外空間に適した三次元形状取得手法を模索する必要がある。

また、デバイス類の小型化は今回達成できなかった課題であり、実用を考えた場合には重要な課題であろう。本稿で述べた実験では、台車にカメラなどのデバイス類を設置した状態での景観シミュレーションを行ったため、非舗装路面でのシミュレーションの場合には望ましくないぶれが見られた。この改善のためにも、ウエアラブルな装備でシステムを構成する必要があると強く感じた。今後の研究ではノート PC などを用いるポータブルなデバイスでの運用を可能とするため、重い処理の分散・軽量化や、モデルを不自然にならない範囲で簡略化する機能などを試みたい。

他方、AR/MR の精度などから評価される AR/MR システムの実用性の評価指標を定める

ことも今後の大きな課題であろう。本稿では、簡易ではあるが、GPS の精度実験などにより、精度などをできるかぎり定量化するよう心がけたが、これを実際にどれだけの没入感が得られるかの指標とするには難しい。例えば、GPS やセンサから得られたカメラ位置・姿勢情報と、レーザースキャナなどの測量機材から得られたカメラ位置・姿勢情報との比較による定量化なども考えられる。しかしながら、AR/MR のシステムの評価は、カメラ位置・姿勢情報の精度だけでなく、実時間性や仮想物表現のリアリティやデバイス類の取り回しなど、複雑な要因からなり、一部の物理属性をグラフ化したものだけで実用性を測ることは不可能である。以上から、AR/MR システムの評価には不特定多数の評価者によるアンケートやヒアリングが最も信頼できる評価手法の一つであると考えられるため、これも今後の課題としたい。

6.2. まとめ

本研究では、屋外空間に適した AR/MR システムを実現するため、GPS とセンサを用いたロケーションベースの AR システムの開発を試みた。結果として、仮想物が現実空間に落とす影・仮想物が自身に落とす影を表現し、建築・土木構造物規模の仮想物を扱うことが可能な AR/MR システムが実現した。本システムを用いることで、屋外の大規模空間において、実寸大の建築・土木構造物を AR/MR を利用し歩きながら自由に見渡すことができる。これにより、景観検討や設計検討などといった建築分野固有の問題に対してのシミュレーションが可能となるだろう。

今後は AR/MR の没入感の更なる向上や、デバイスのウエアラブル化など実験をとおして得られた課題解決に取り組み、より実用的なシステムの開発を試みたい。

なお、本研究の成果は「大規模空間において実寸大表現が可能な拡張現実感システムの開発」という題目で日本建築学会計画系論文集の第 76 巻・第 667 号・pp.1753-1759 に掲載済である。

様式－３－３

DEVELOPMENT OF AUGMENTED REALITY SISYTEM WHICH CAN SHOW FULL SCALE VIRTUAL MODELS IN OUTDOOR

Gakuhito, Hirasawa.
Chiba University

While current advanced information technologies have been introduced in architectural design and building construction, the more effective simulation method is required. The conventional simulation methods, such as montage picture and Virtual Reality, are not enough to perform a realistic simulation in outdoor space.

With Augmented Reality (AR) technology we can freely move the camera position and borrow the real scene backdrop into a simulation. However, AR systems intended to use in outdoor space are scarce. In this research, we propose the AR system which can handle virtual buildings and civil engineering structures at real scale in outdoor space.

System Architecture

We use a Real Time Kinematic-GPS (RTK-GPS) and a 3DOF inertial measurement unit (Sensor) to get camera's position and posture. In addition, we employ a 3D-Head Mounted Display and two cameras to realize stereoscopic view for more realistic simulation. We pack these various devices into a compact form not to neglect the portability required in outdoor experiment.

Software

We implemented the following functions because the devices' small errors interrupt a sense of reality.

1) Ignores Sensor’s outputs when angular velocity is less than the threshold.
2) Ignores GPS’s outputs when acceleration is less than the threshold.
3) Corrects Sensor’s outputs by using gravity acceleration.
4) Corrects Sensor’s outputs by using a series of locations previously acquired from GPS’s values.
5) Corrects Sensor’s outputs by template matching technology employing the previously captured landscape image.

Function 1) and 2) resolves the problem that virtual buildings slightly shake if a camera is state of rest, and function 3), 4), and 5) improves the precision of computing camera’s posture.

On the other hand, high quality rendering is required in architectural design simulation. We realize realistic rendering by rendering shadows of virtual buildings. Furthermore, in order to preserve real-time performance, we built the system as a multi-threaded program to make those functions concurrently and smoothly run.

In this research, the AR system which can handle the complicated virtual building at real scale in outdoor space was developed. By implementation of the functions which improve camera’s position and posture computation and cast shadows, landscape simulation with huge virtual buildings in field site became possible.

KEYWORDS**:** *Augmented Reality , Outdoor Space, Real Scale, 3DOF inertial measurement unit, Real Time Kinematic – GPS, 3D Head Mounted Display*

様式－３－２

研　究　成　果　の　要　約

助成番号	助　成　研　究　名	研 究 者・所 属
第2010-11号	D-GPSを利用した建築・都市スケールでの 拡張現実感システムの開発	平沢 岳人 千葉大学大学院工学研究科

1. 研究目的

これまでに提案されてきたAR/MRシステムの多くは屋内等の狭い範囲での利用を想定したものであり、建築・土木構造物規模の仮想物を前提とした応用提案は少ない。

本研究では、屋外空間に適したAR/MRシステムを実現し建築・土木分野へAR/MRを応用することを目的として、GPSと三軸角度センサ(以下、センサ)を用いたロケーションベースのAR/MRシステムの開発を試みた。建築・土木構造物規模の仮想物を扱うことが可能な精度と、仮想物の影の表現などによるリアリティのある仮想物表示を目標とした。

2. 各研究テーマへの取り組み

2.1. D-GPSと高精度3Dセンサによる AR/MRの開発

観察者（カメラ）位置検出はRTK-GPS(Real Time Kinematic GPS)を用いた。計画段階においてはD-GPS(Differential GPS)を予定していたが、実験により1m程度の誤差が見られたため、より高精度なRTK-GPSを採用した。

また、観察者視線方向（カメラ姿勢）検出にはセンサを用いた。センサからRoll・Pitch・Yaw角が得られ、これらからカメラ姿勢を計算することができる。しかしながら、実験においてセンサの返す値は環境による影響を受けやすく重畳の質に悪影響を及ぼすことが判明した。これを補正するため、重力加速度やテンプレートマッチングを利用した補正機能を実装し、重畳精度を高めた。

2.2. リアリティの追求

AR/MR表現のリアリティを高めるため、仮想物が現実空間に落とす影や、現実空間の物体と仮想物との前後関係（オクルージョン）の表現、立体視ヘッドマウントディスプレイを用いた立体視表現を試みた。影や前後関係の表現には、現実空間の三次元形状を得る必要がある。実験は屋内の建築模型エリア内という狭い空間に限定し行った。三次元CADによる模型の3Dデータを現実空間の三次元形状と見なし、これをシステムに入力した。

この技術は影と前後関係を同時に表現することができ、屋外空間でのAR/MRシステムにおいても有効と考えられるが、屋外の複雑かつ広域な空間を対象とする場合には三次元形状を取得する精度の高い新たな技術が必要である。そのため、本研究ではセンサの値と視点高さから地平面を推定することで、地平面に仮想物が落とす影と、仮想物が自身に落とす影の表現の実装に留めた。この程度でも仮想物が環境に溶け込み、リアリティの高い映像が得られた。

2.3. 装備デバイス類の検討

研究計画段階においてはポータブルな装備での実装を構想していたが、前節までに述べた様々な機能を組み込んだAR/MRシステムを実時間性を損なわず運用しうるだけの性能は小型PCではまかなえないものであった。よって、本実験ではパッケージの小型化はあきらめ、性能を犠牲にしないで可搬性を高める工夫をした。システムを構成する機材の可搬性をできるだけ高め、擬似ウェアラブルシステムとして構築した。非舗装路面でも安定してデバイス類を持ち運ぶことができるような専用の台車の設計と、カメラ・センサ・GPSをまとめる複合マウントの設計などを行い、デバイスパッケージのあり方を検討した。

3. まとめ

屋外の空間において建築・土木構造物規模の3Dモデルを扱えるAR/MRシステムが実現したことを本実験で確認した。本システムによれば、街並みや橋梁の3Dモデルのような大規模な仮想物を、AR/MRを利用し歩きながら自由に見渡すことができる。また、屋外での利用を想定したシステムにおいて、地平面に落ちる影の表現などによりAR/MRのリアリティを向上している点も本システムの特徴である。

今後は、屋外における現実空間の三次元形状の取得技術の開発や、重い処理を分散・軽量化するなどしてポータブルな装備でも実行できるよう改良を目指す。