

拡張現実感用広域トラッキングシステムの開発

石井 裕剛^{*1} 藤野 秀則^{*1} 卞 志強^{*1} 関山 友輝^{*1} 中井 俊憲^{*1} 下田 宏^{*1}

Development of a Wide Area Tracking System for Augmented Reality

Hirotake Ishii,^{*1} Hidenori Fujino,^{*1} Zhiqiang Bian,^{*1} Tomoki Sekiyama,^{*1} Toshinori Nakai^{*1} and Hiroshi Shimoda^{*1}

Abstract – In this study, two types of marker-based tracking system for Augmented Reality have been developed. One is a tracking system which employs line-shaped markers and the other employs circular-shaped markers. The line-shaped markers are suitable for complicated rooms and the circular-shaped markers are suitable for outdoors. Some laboratory experiments have been conducted in order to evaluate the performance of the developed systems. The result shows that the covering area and accuracy can be greatly improved compared to the legacy marker-based tracking systems.

Keywords : augmented reality, marker-based tracking, line-shaped marker, circular-shaped marker

1. はじめに

拡張現実感を実現するためには、ユーザの位置と方向をリアルタイムに計測できるトラッキング手法が必要不可欠である。これまでに多種多様なトラッキング手法が開発され、それらを用いた様々なアプリケーションが開発されてきた。しかし現状では、狭い範囲をトラッキングすることは比較的容易であるが、広い範囲をトラッキングすることは難しく、設備費用が非常に高くなったり、ユーザが大きくて重い機器を装着しなければならない等の問題がある。

本研究では、人工マーカとカメラを用いたトラッキング手法に注目し、拡張現実感を実現する環境の特性に合わせたマーカを考案することにより、広い範囲で高性能なトラッキングを実現することを目指す。具体的には、配管の表面等の細長い領域に貼ることが可能な線形状のマーカと、カメラとの距離が非常に長くても高い計測精度が期待できる円形状のマーカを新たに考案した。そして、それらを用いた拡張現実感用のトラッキングシステムを開発し、その性能を評価した。

2. トラッキングの性能を表す指標

拡張現実感の機能を備えたシステム(拡張現実感システム)を開発する場合、採用するトラッキング手法は、最低限、システムが要求する計測精度を満たす必要があるが、その開発が、拡張現実感システムの単なる試作に終わらない様にするためには、さらにトラッキング手法の経済性やユーザへの負担等、様々な指標を考慮する必要がある。トラッキング手法の性能を表す指標としては、以下の12種類の指標が挙げられる。

- 計測精度：ユーザの位置や方向をどの程度正確に計測できるか。
- 計測速度：単位時間あたりに計測可能な回数。
- 応答速度：ユーザが移動してからその影響が出力に反映されるまでの時間。
- 可動範囲：1システムで計測可能な領域の範囲。
- 拡張性：計測可能な領域の範囲をどの程度自由に変更できるか。トラッキング手法によっては、干渉のため、システムを空間的に複数並べて計測可能な範囲を広げることが困難な場合もある。
- 可用性：使用の可否に影響を与える要因の多さ。屋外に使用が限定される、金属の影響を受ける、照明の変化に弱い等。
- 連続性：時間的・空間的にどの程度連続して使用できるか。計測可能な領域が空間的に分散している場合や、時間の経過によってトラッキングが途切れる場合もある。
- 携帯性：手法の採用によりユーザの行動をどの程度制限するか。ユーザが装着する必要がある機器の重量や、ケーブル等による動作の制限等。
- 併用性：他のトラッキング手法との組み合わせの容易さ。
- 初期コスト：トラッキング手法を初めて使用する際に必要な費用や労力。機器の購入費用、設置労力、キャリブレーション労力等。
- 維持コスト：トラッキング手法を使い続ける為に必要な費用や労力。機器の動作に必要な電力費、機器の故障修理や、バッテリーの交換労力等。
- 専門性：トラッキング手法を使用するのに必要な専門知識の量。

^{*1}: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

^{*1}: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

実際には、各指標は必ずしも独立しておらず、同じトラッキング手法であっても、一部の指標を低下させれば、他の指標を向上させることが可能な場合が多い。

3. 既存のトラッキングシステムとその問題点

拡張現実感で使用可能なトラッキング手法としては、GPS や超音波センサに代表される信号到達時間差法^{[1],[2]}、交流磁界センサを用いた磁気センサ法^[3]、ジャイロセンサや加速度センサを用いた自律センサ法^[4]、模様付きマーカとカメラを用いた人工マーカ法^[5]、周囲環境の特徴をマーカとする自然特徴点法^[6]等が提案されている。

これらの手法を用いることにより、狭い範囲であれば(可動範囲、拡張性、可用性を考えないのであれば)、高性能なトラッキングを行うことが可能であるが、広い範囲をトラッキングする場合には、様々な問題が発生する。例えば、RTK-GPS では、計測精度が高く、可動範囲も非常に大きい、機器が高価(初期コストが高い)、機器が大きい(携帯性が低い)、屋内では使用できない(可用性が低い)等の問題がある。超音波センサや磁気センサは最近では携帯性も高くなっているが、可動範囲が狭いため、広い範囲で使用するためには複数のシステムを併用する必要がある、初期コスト・維持コスト共に高くなる。自律センサ法は携帯性・可用性は高いが、時間経過によって精度が下がる(連続性が低い)。自然特徴点法は、屋内・屋外を問わず使用できるが、カメラに動く物が写ると不安定になる(可用性が低い)、広い範囲を動くとき精度が下がる(可動範囲が狭い)。また最近ではRFID タグをトラッキングに用いるシステム等も開発され、それらは、可動範囲および携帯性は高いが、計測精度や計測速度は低い。

一方、人工マーカ法を用いて広域トラッキングを実現する試みも多数なされている。人工マーカを用いた手法は、最近のコンピュータの性能向上・小型化により計測速度・応答速度共に速くなり、携帯性も向上してきている。また、機器を購入するためのコストも比較的安く、使用するマーカの数を増やすことにより、可動範囲も広くでき、拡張性も高い。しかし、人工マーカ法は、カメラにマーカが写っていない時にはトラッキングができず、また、これまでの ARToolKit の様な正方形マーカを用いた手法ではマーカとカメラの間の距離が長い場合には、カメラでマーカ自体を認識することが困難になり、認識できた場合でも計測精度が非常に低いという問題がある。これらの問題を解決するために、マーカの数非常に多くしたり、マーカのサイズを大きくする方法も考えられるが、その場合、マーカ設置の労力が大きくなる、大きいマーカを貼り付ける場所の確保が難しい等の問題が新たに生じる。

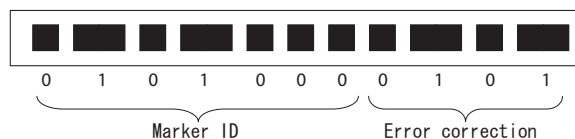


図1 ラインコードマーカのデザイン
Fig. 1 Design of Line Code Marker.

4. 広域トラッキングシステムの開発

4.1 開発の基本方針

以上に述べたように、既存の手法では、そのままでは広域で高性能なトラッキングを実現することは困難である。一方、人工マーカ法、特に正方形マーカを用いた手法を広域でのトラッキングに適用する場合に生じる問題点は、(1) 正方形を構成する4直線は、遠方から撮影した場合、ジャギーの影響で正確に認識することが困難である、(2) マーカの特徴点(正方形マーカの場合、正方形の4頂点)間の距離が、カメラとマーカ間の距離に比べて短い、の2点に起因している。そこで、(1) 遠方から撮影しても概形が劣化しにくい、もしくは概形が劣化してもその影響が小さい形状のマーカを使用する、(2) 複数のマーカから特徴点を抽出することにより、トラッキングに用いる特徴点間の距離を長くする、ことを考慮して、新しいデザインのマーカを考案することにした。また、(1) 物が数多く置かれた屋内は、正方形に近い形の広い領域は少ないが、細長い領域は比較的多くある、(2) 円形は、遠方から撮影しても概形の劣化が少なく、遠方から認識する形状として適している、(3) 屋外は屋内よりもさらにマーカとカメラの間の距離が長くなるため、全ての特徴点間の距離が長い方が望ましい点を考慮し、屋内で使用するマーカとして線形状のマーカ、屋外で使用するマーカとして円形状のマーカを考案することにした。

4.2 ラインマーカを用いたトラッキング

図1に本研究で考案した線形状のマーカ(ラインマーカ)のデザインを示す。1個のラインマーカは黒い正方形と長方形(面積は正方形の2倍)を直線状に11個並べた形状をしており、正方形を0、長方形を1とすることにより、複数ビットの符号を表現する。7ビットでマーカの種類を表現(最大128種類)し、残りの4ビットでハミング符号により、任意の1ビットの誤りを訂正できるようにした。また、ラインマーカの周囲には、マーカの認識を容易にするための余白を設けた。

トラッキングを行う際の処理を以下に示す。

(1) トラッキングを実行するには、HMD などにとりつけたカメラでマーカを撮影し、得られた画像をあらかじめ設定した閾値により二値化する。そして画像全域に対してラベリング処理を施し、連結領域を得

る。さらに、得られた連結領域のうち、面積が予め設定された範囲内に入らないものを除外する。また、連結領域のアスペクト比を調べ、著しく細長い形状のものを除外する。

(2) (1) で選択された連結領域のうち、一定の角度以内で直線上に 10～12 個並んでいるものをラインマーカーである可能性があるものとして抽出する。

(3) 直線状にならんだ連結領域の面積の中央値を求め、各領域が求めた中央値より大きければ 1、そうでなければ 0 と判断する。

(4) あらかじめ登録されている各マーカーの位置情報と照合して、そのマーカーの 3 次元座標を確定する。なお、連結領域が 10bit しか連続していなかった場合は 1bit ずつずらしながら照合していき、10bit が一致した時点で確定する。連結領域が 12bit 連続していた場合は、両端どちらかを無視して 11bit 分についてのみ照合を行う。また、11bit の照合の前にはハミング符号によってチェック及び訂正を行う。こうすることで、ノイズや隠蔽によってコードの読み取りに過不足がある場合や符号が誤認識された場合でも、ロバストに識別が行える。

以上の処理によって 2 つ以上の画像中のマーカーについて 3 次元位置が求められたら、マーカーの両端の 3 次元座標を求め、ARToolKit と同様の方法で P4P 問題を解くことで、マーカーとカメラの間の相対的な位置と姿勢を求める。

4.3 円形マーカーを用いたトラッキング

図 2 に本研究で考案した円形マーカーのデザインを示す。この円形マーカーは、マーカーの半径を $10u$ とした場合、最も外側に半径 $10u$ 太さ $3u$ の黒色の円（最外領域）、最も内側に半径 $3u$ の白色の円（最内領域）を配置し、残りの領域（半径 $7u$ 、太さ $4u$ の円）をコード領域として同じ形の扇形に分割し、個々の扇形毎に白色もしくは黒色とする。以後、個々の扇形をビット要素と呼ぶ。このビット要素の総数はマーカーを使用する状況によって変更できる。なお、最外領域はマーカーの位置と姿勢を計測する際に用い、コード領域を解析する際の黒色の基準としても用いる。また最内領域はコード領域を解析する際の白色の基準として用いる。このマーカーを使った場合、位置基準領域が無い場合、例えば図 2 に示した 3 つのマーカーの内、中央と右側のマーカーは同じマーカーとして扱う必要がある。したがって、コード領域の分割数を 8 とした場合、マーカーの種類は 30 個、9 とした場合は 56 個、10 とした場合は 99 個となる。

トラッキングを行う際の処理を以下に示す。ただし、以下ではマーカーのビット要素の数（コード領域の分割数）を N_{bit} とする。

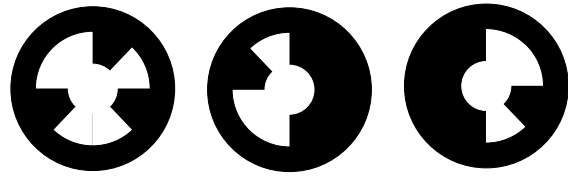


図 2 円形マーカーのデザイン
Fig. 2 Design of Circular Marker.

(1) HMD などにとりつけたカメラでマーカーを撮影し、得られた画像をあらかじめ設定した閾値により二値化する。そして画像全域に対してラベリング処理を施し、連結領域を得る。さらに、得られた連結領域のうち、面積が予め設定された範囲内に入らないものを除外する。また、画像の境界線に隣接する連結領域も除外する。

(2) 残された各連結領域に対して輪郭線追跡を行い、輪郭線上の画素位置を記憶する。その際、処理の開始位置から順番に輪郭線上の点に番号を付ける。

(3) (2) で発見された輪郭線上の点の重心座標を求めて楕円の中心とする。

(4) 輪郭線上の点から (2) で付された番号が等間隔になるように 3 点を抽出し、この 3 点を通る楕円を求める。これを K 回繰り返し、得られた K 個の楕円の長軸半径、短軸半径、回転角度の平均を求める。

(5) (4) で求めた長軸半径の短軸半径に対する比を求め、閾値よりも大きい楕円をマーカーの候補から外す。

(6) 残された楕円に対して (2) で求めた輪郭線上の点と (4) で求めた楕円との最小距離の二乗平均を求め、閾値よりも大きい楕円をマーカーの候補から外す。この処理により一部が欠けた楕円はマーカーの候補から除外される。

(7) 楕円の長軸半径と短軸半径の比を用いて、楕円を図 3 に示す円に正規化する。すなわち、マーカーの最外領域は半径方向に 5 分割、円弧方向に 20 分割し、コード領域は個々のビット要素毎に円弧方向に 10 分割する。以下、このコード領域において円弧方向に分割された個々の領域をコード要素と呼ぶ。また個々のコード要素は半径方向に 10 分割する。最内領域は半径方向に 5 分割、円弧方向に 20 分割する。

(8) 最外領域の画素値の平均 a_{out} と分散 v_{out} 、最内領域の画素値の平均 a_{in} と分散 v_{in} を求める。分散 v_{out} 及び分散 v_{in} が閾値以上の場合、この楕円をマーカーの候補から外す。また、 a_{out} と a_{in} の平均を求め、コード領域を解析する際の閾値 th とする。

(9) 各コード要素毎に (8) で求めた閾値 th よりも大きい画素値を持つ画素の総数 s_w 及び小さい画素値を持つ画素の総数 s_b を求める。

(10) 図 3 に示した基準線（Base line）から反時

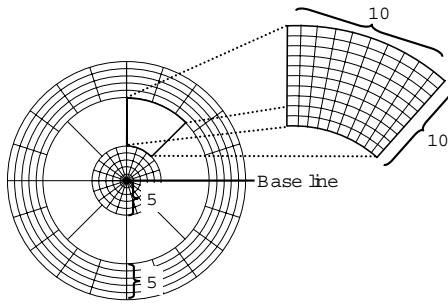


図3 マーカの正規化
Fig.3 Normalize of marker.

計回りにコード要素を走査し、初めて $s_w > s_b$ から $s_w < s_b$ となるコード要素を求め、このコード要素の位置をコード領域を解析する際の基準位置とする。また基準線から基準位置までに走査したコード要素の数を N_{scn} として記録しておく。求められた基準位置はビット要素間の境界の内の1つと考えられる。

(11) (10) で求めた基準位置からビット要素毎に $s_w > s_b$ となるコード要素の総数 S_w と $s_w < s_b$ となるコード要素の総数 S_b を調べる。

(12) S_w と S_b の差が S_w と S_b の合計の半分よりも小さいビット要素を持つ楕円をマーカの候補から外す。

(13) $S_w > S_b$ となるビット要素を1、 $S_w < S_b$ となるビット要素を0とすることにより N_{bit} 個のビット列を得る。

(14) (13) で得られたビット列を1ビットずつループシフトし、2進数として最も小さくなる値を最終的なマーカの番号とする。この時、最終的なマーカの番号を得た時のシフト回数を N_{sft} として記録しておく。

以上に述べた楕円認識処理及びマーカ認識処理により、マーカの入力画像中での位置と種類を得ることができる。マーカの入力画像中での位置と種類を得た後は、同時に認識できたマーカの数に応じてP3PやP4Pの手法を用いて、マーカとカメラの間の相対的な位置と姿勢を求める。

なお、(4)における繰り返し回数 K は、少ない方が処理が軽くなるが、少な過ぎると結果が安定しない。本研究では円形マーカが直径約30pixelで写っている静止画像に対して繰り返し楕円認識処理を施し、その際に得られる長軸半径と短軸半径の標準偏差が共に0.5pixel以内に収まる K を実験的に調べ、その結果から K を150回とした。

5. 開発したトラッキングシステムの性能評価

5.1 最大認識距離の評価

開発した2種類のマーカの最大認識距離(マーカの種類認識が可能でマーカとカメラの間の最大距離)を実験により評価した。実験は、PointGrayResearch

表1 使用したカメラとパソコンの主要な性能
Table 1 Hardware spec. of camera and PC.

PC	CPU	Pentium4 3.2GHz
	Memory	512MB
Camera	Model	Dragonfly Color XGA
	Interface	IEEE1394a
	Resolution	512x384(Half of original)
	Frame rate	15fps
	Focal length	6.37mm

社のCCDカメラ(Dragonfly Color XGA; 焦点距離6.37mm)を用い、壁に紙上に印刷した円形マーカ(直径10cm、コード領域の分割数10)およびラインマーカ(幅3cm、長さ50cm)を貼り付け、マーカの種類を20回以上連続して間違いなく認識できる最大の距離を求めた。実験環境の照明は約1000Luxであった。

実験の結果、円形マーカの場合、約3.5m、ラインマーカの場合、約10mまで安定して認識できることを確認した。最大認識距離は、同時に使用可能なマーカの総数や照明条件、レンズの歪みの大きさ等、様々な条件に依存するため、既存の正方形マーカを用いた手法との正確な比較は困難であるが、幅10cmの正方形マーカをARToolKitで認識した場合、同じカメラで約3mまでは安定して認識できることから、円形マーカを用いることにより、最大認識距離は15%程度向上できたとと言える。

5.2 計測精度の評価

開発したトラッキングシステムの性能のうち、計測精度を調べるために、実験室環境内にラインマーカを貼り付け、トラッキングを行い、別途計測したカメラの位置・姿勢と比較する実験を行った。表1に実験に使用したPCとカメラの主要な性能を示す。トラッキングの精度は(1)マーカ間の距離(1)、(2)マーカとカメラの間の距離(d)、(3)マーカを撮影する角度(水平面内の角度 θ 、垂直面内での角度 ϕ)、(4)同時に撮影されるマーカの総数(m)に依存すると予想される(図4)。しかし、全ての条件を変化させて精度評価を行うのは組み合わせの数が膨大になるため困難である。そこで今回は、 $m=2$ 個(マーカ長50cm)、 $l=1.0$ m、 $\phi=0^\circ$ と固定した条件において、その他のパラメータを、 $d=2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ m、 $\theta=0, 15, 30, 45, 60^\circ$ に変化させた場合のトラッキングの精度と処理速度を評価した。なお、実験システムの開発はMicrosoft Visual C++ Ver.6を用い、Intel C++ Compiler Ver.8.0を用いてコンパイルした。カメラのレンズのキャリブレーションは、ARToolKitに付属のレンズキャリブレーションソフトウェアを使用した。

実験の結果を図5に示す。位置の計測精度は、 d (カメラとマーカ間の距離)が大きくなるにつれて悪くなっ

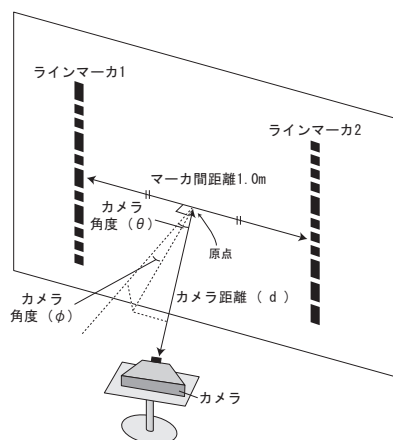


図4 実験環境の変数定義
Fig. 4 Variable definitions of the experimental setup.

ている。これは d が大きくなるにつれて画像内のラインマーカの大きさが小さくなり、カメラの量子化誤差の影響が大きくなるためである。また、 ϕ (垂直面内での角度) より θ (水平面内での角度) の方が、計測精度が高い。これは、2 個のラインマーカから抽出される 4 個の特徴点間の距離が、垂直方向よりも水平方向の方が長い為である (垂直方向間距離: 約 50cm、水平方向間距離: 約 2m)。また、角度の計測精度は、全体的に θ が小さい時 ($\theta = 0^\circ$) の方が、 θ が大きい時 ($\theta = 60^\circ$) よりも計測精度が悪い。これは、4 個の特徴点を含む平面を正面から撮影する方が、斜めから撮影するよりも角度の精度精度が悪くなるという四角形マーカを用いたトラッキングの場合と同様の傾向である。距離の計測に関しては、全体的に実際よりも短い方向に誤差が出る傾向にあるが、これはレンズのキャリブレーションが不十分であることが原因である可能性が高い。

今回の実験では、ラインマーカを用いた際の計測精度を評価したが、トラッキングの精度は、特徴点の総数と互いの位置関係に依存する。従って、円形マーカの場合でも、4 個の円形マーカを、その中心が 2 個のラインマーカの特徴点の位置 (両マーカの両端) に重なるように配置すれば、ラインマーカの場合とほぼ同じ計測精度が得られると考えられる。一方、同様の計測精度を正方形マーカを用いて実現するためには幅約 2m のマーカを作成し、環境に貼り付ける必要があり現実的ではない。

6. 開発したトラッキングシステムの応用例

本研究で開発した 2 種類のトラッキングシステムが、実際に拡張現実感用のトラッキング手法として利用可能であることを確認するために、応用アプリケーションを開発・試用した。

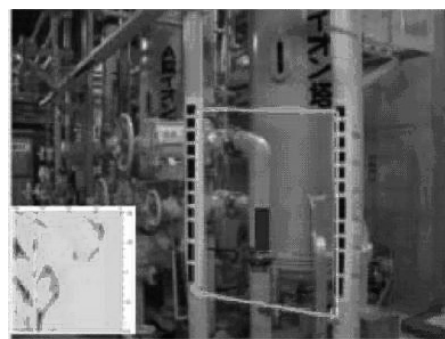


図6 ラインマーカの使用例
Fig. 6 Example use of line-code markers.

6.1 ラインマーカの屋内トラッキングへの応用

複雑な機器が多数設置された屋内環境でのラインマーカを用いたトラッキングシステムの使用例として、日本原子力研究開発機構のふげん発電所の純水装置室内に実際にラインマーカを貼り付け、簡単な情報を配管上に重畳表示させるシステムを開発して試用した。システムの画面例を図 6 に示す。この試用では、多数の機器が設置された約 9m 四方の部屋に長さ 70cm~82cm の 15 本のラインマーカを貼り付けてトラッキングを行った。その結果、マーカのデザインを考案する際に想定した通り、線形状のマーカは、四角形のマーカに比べて、複雑な機器が配置された部屋に貼り付けることが容易であり、ラインマーカを用いることにより、遠距離からでも十分違和感無く、トラッキングおよび情報提示ができることを確認できた。一方、今回は、全てのラインマーカのサイズをほぼ同じにしたが、細長い形状のマーカは、マーカとカメラの距離が短くなった際に、マーカの一部がカメラの視野から外れてしまい、トラッキングが途切れてしまう問題が発生した。今後は、近距離の場合は小さいサイズのマーカを使い、遠距離の場合は大きいサイズのマーカを使う等の工夫が必要であると考えられる。

6.2 円形マーカの屋外トラッキングへの応用

円形マーカを用いたトラッキングシステムの、屋外での広域トラッキング手法としての使用例として、建物を新築・改築した場合に、景観がどのように変化するかを実際に屋外で拡張現実感を用いて確認できるシステムを開発した。システムの画面例を図 7 に示す。この試用では、既存の建物の壁や柵に半径約 22cm の 25 個の円形マーカを貼り付けてトラッキングを行った。その結果、ユーザが広範囲を移動する場合や、建物 (マーカ) とユーザの間の距離が 20m を越える場合でも、既存の建物と仮定の建物の境目のズレが視認できないほど安定・高精度にトラッキングを行うことができることを確認した。建物を新築・改築する場合、完成予想図として絵に描いたイメージ図を作成するこ

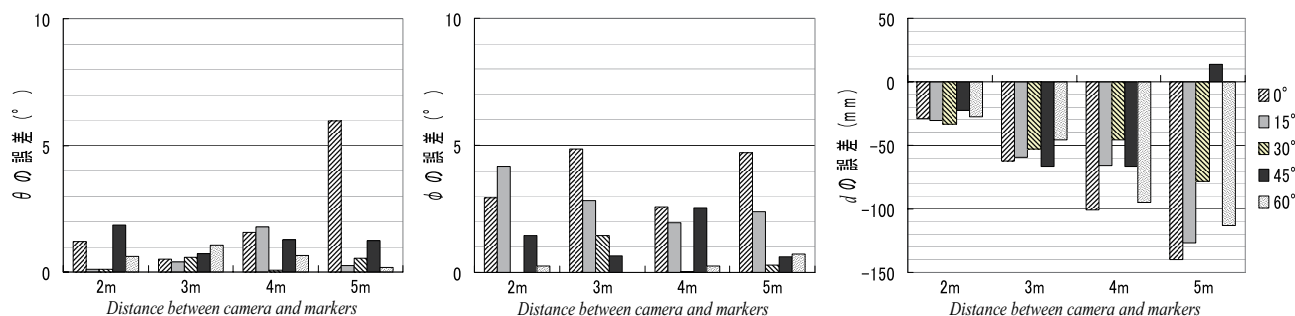


図5 実験結果
Fig. 5 Result of the experiment.

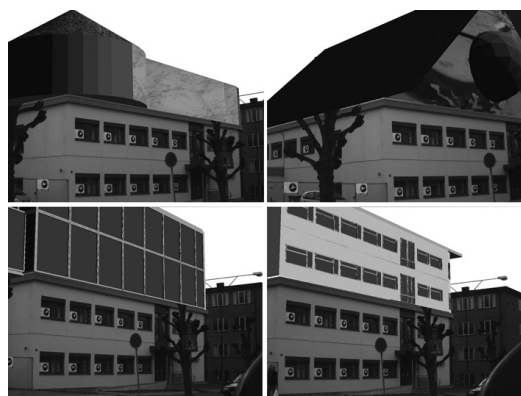


図7 円形マーカーの使用例
Fig. 7 Example use of circular markers.

とは頻繁に行われるが、このような静止画としてのイメージ図では、景観がどのように変化するかは正確に想像することは難しい。しかし、拡張現実感を用いることにより、建物の周りを歩き回りながら様々な角度から景観を確認できるため、誰にでも容易に景観がどのように変化するかを正確に想像できるようになると期待できる。また、拡張現実感を用いる場合は、モデルを変更することにより、様々な種類の建物を比較検討することも容易にできる。

なお、この建物の新築・改築による景観の変化を拡張現実感で確認するシステムは、ノルウェー王国のオスロにある Maridalen と呼ばれる教会を改築することにより、景観がどのように変化するかを確かめる手法の1つとして採用されている^[7]。

7. まとめ

本研究では、広域で高速かつ高精度な拡張現実感用トラッキングを実現するために、屋内での使用に適した線形状のマーカーと屋外での使用に適した円形状のマーカーを用いた2種類のトラッキングシステムを開発し、その性能を評価した。また、実際に発電プラント内部において拡張現実感を用いて情報提示を行うシステムおよび、屋外において建物の新築・改築を行った

場合の景観の変化を確認できるシステムを開発し、開発したトラッキングシステムの有効性を確認した。

本研究で開発したマーカーを用いることにより、マーカーとカメラの間の距離が長い場合でも高性能にトラッキングが行えるようになったが、より実用性を高めるためには、環境に貼り付ける必要があるマーカーの数を減らすことや、ユーザが見回し動作を行ってもトラッキングが継続できるようにする必要がある。また、現時点では、拡張現実感を利用する為にはユーザがパソコンを背負う必要があり、必ずしも一般に受け入れられやすいシステムにはなっていない。今後は、複数カメラを用いることにより環境に貼り付ける必要があるマーカーの総数を減らす試みや、ユーザが装着する機器の総重量をより少なくするための試みを進めていく必要がある。

参考文献

- [1] B. Thomas et. al.: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, Proc. of 2nd Int. Symp. on Wearable Computers, pp.166-167(1998).
- [2] J. Newman et. al.: Augmented Reality in a Wide Area Sentient Environment, Proc. of ISAR2001, pp.77-86(2001).
- [3] A. State et. al.: Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking, Proc. of SIGGRAPH 96, pp.429-438(1996).
- [4] E. Foxlin: Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter, Proc. of VRAIS '96, pp.185-194(1996).
- [5] H. Kato et. al.: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94(1999).
- [6] A. Comport et. al.: A Real-Time Tracker for Markerless Augmented Reality, Proc. of ISMAR2003, pp.36-45(2003).
- [7] ノルウェー国営放送 NRK: 景観変化可視化システムの紹介 (ノルウェー語), <http://www.nrk.no/nyheter/distrikt/ostfold/1.341817>(2006年7月31日現在).