技術論文

遠近両用マーカを用いた拡張現実感用広域トラッキング手法の開発

Development of Wide Area Tracking Method for Augmented Reality using Multi-Range Fiducials

京都大学大学院エネルギー科学研究科	石井 裕剛	Hirotake ISHII	Member
京都大学大学院エネルギー科学研究科	藤野 秀則	Hidenori FUJINO	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	顔 偉達	Weida YAN	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	楊 首峰	Shoufeng YANG	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	下田 宏	Hiroshi SHIMODA	Member
JAEA 原子炉廃止措置研究開発ｾﾝﾀｰ	泉 正憲	Masanori IZUMI	

A new fiducial marker for augmented reality was designed along with a method that recognizes the markers captured by a camera and calculates the relative position and orientation between the markers and the camera. These markers can be used at both long and short distances without increasing the number of markers pasted in the environment. Results of the experimental evaluation show that the new marker can be used in a larger area than circular markers and more stably than square markers.

Keywords*:* Augmented Reality, Marker-based Tracking Method, Multi-Range Fiducials

１．緒言

拡張現実感(Augmented Reality)は、コンピュータで生成した仮想の物体や文字を、ユーザの視野に重畳して表示することにより、あたかも現実の世界に、これらの物体や文字が存在するかのように感じさせる技術である[1]。3 次元の位置や方向を直感的に示すことができるため、原子力発電プラント内部で使用できるようになれば、プラントで働く作業員に対する様々な支援が可能になる[2][3][4]。例えば、作業員の現在位置と方向に応じて次に進むべき方向を提示すれば、作業員を次の作業場所まで安全･確実に誘導できる(ナビゲーション機能)。また、作業員に危険箇所を直感的に示す機能(危険箇所提示機能)や、作業手順を直感的に示す機能(作業指示機能)等も実現できる。

拡張現実感を使用するためには、ユーザの位置と方向をリアルタイムに計測するトラッキング技術が必要である。しかし、GPS(Global Positioning System)・磁気センサ・超音波センサ・慣性センサ等の既存のトラッキング技術は、使用環境が屋外に限定される・金属機器が多い複雑な環境では使用できない・長時間使用すると精度が落ちる等が原因で、単体では原子力発電プラント内部では使用できない[1]。

そこで本研究では、カメラとマーカを用いたトラッキング手法[5][6][7][8][9][10]に注目する。カメラとマーカを用いたトラッキング手法は、作業環境内に複数のマーカを貼り付け、それらをカメラで撮影し、画像処理と幾何計算により、カメラとマーカの間の相対的な位置関係を求める手法である。この手法は、屋内でも使用可能・金属や騒音の影響を受けない・時間経過による精度や安定性の低下がない等の利点がある。しかし、これまでに拡張現実感用に開発されてきたマーカのうち、四角形マーカ[5][6][7]は、カメラとマーカの間の距離が数十 cm から 3m 程度までの短い時にのみ使用可能なマーカ（近距離用マーカ）であり、ラインマーカ[8][9]や円形マーカ[10]は、カメラとマーカの間の距離が 3m 程度以上の長い時にのみ使用可能なマーカ（遠距離用マーカ）である。従って、原子力発電プラントでの保修作業の様に、作業員が広い範囲を移動する状況で使用する為には、近距離用マーカと遠距離用マーカの両方のマーカを同時に作業環境に貼り付ける必要がある。しかし、原子力発電プラント内部では、多数のマーカを貼り付ける場所を確保することは難しく、また、マーカの数が多くなると、その貼付作業や破損時の修繕作業等の労力が大きくなる。

そこで本研究では、遠距離と近距離の両方で使用可能なマーカとそのマーカを用いたトラッキングアルゴ

連絡先 ： 石井裕剛、〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄、京都大学大学院エネルギー科学研究科、
E-mail:hirotake@energy.kyoto-u.ac.jp

リズムを開発し、その有効性を評価した。

なお、トラッキングに要求される精度は作業員に対する支援内容によって異なるが、本研究では、前述のナビゲーション機能や危険箇所提示機能、比較的大きな機器を操作する際の作業指示機能等を実現することを想定し、位置誤差は 30cm 以内(人の歩幅の約半分)、角度誤差は 10° 以内(18 方位)の精度の実現を目指す。

２．既存のカメラとマーカを用いたトラッキング手法とその問題点

カメラとマーカを用いたトラッキング手法（特に Inside-out 方式）では、通常、以下の方法によりカメラとマーカとの間の相対的な位置と方向を求める。

（トラッキング環境の準備）

1. 複数のマーカを作業環境内に貼り付ける(全てのマーカには固有の番号(ID)を付け、互いに識別可能なようにデザインの一部を変更する)
2. レーザ距離計測器等を用いて全てのマーカの 3 次元位置と方向を計測する

（トラッキングの実行）

3. ユーザが装着したカメラで作業環境を撮影する
4. 得られた画像を処理してマーカの番号とカメラ画像上の位置を認識する
5. マーカ上の特徴点(マーカ上に予め設定された、位置が既知で認識可能な点)を認識する
6. カメラ画像上の特徴点の位置(5 で取得)と、それらの作業環境内での 3 次元位置(2 で取得)を用いて PnP 問題(Perspective N-Point Problem)[11]を解き、カメラとマーカの間の位置と方向を求める

上記の方法によりカメラの位置と方向を一意に求める為には、最低 4 個の特徴点が同時に認識される必要がある[11]。1 つのマーカ上に複数の特徴点を設定する場合もあるが、全ての特徴点が直線状に分布する場合や、カメラとマーカの間の距離に対して特徴点間の距離が短い場合には、トラッキングの精度や安定性が低下する。その為、既存のマーカでは、特徴点を簡単・正確に認識できるようにすることも考慮して、四角形マーカの場合は四角形の頂点の 4 点、ラインマーカの場合はマーカの両端の 2 点、円形マーカの場合は円の中心の 1 点に特徴点が設定される。従って、四角形マーカを用いてトラッキングを行う場合は最低 1 個、ラインマーカの場合は最低 2 個、円形マーカの場合は最低 4 個のマーカが、同時にカメラに写る必要がある。

一方、画像処理によりマーカ上の特徴点や番号を安定して認識するためには、マーカが、そのデザイン等に応じて定まるサイズ以上の大きさでカメラに写る必要がある。四角形マーカの場合、特徴点を認識する際には、通常、四角形を構成する 4 線分を認識し、それらの交点を求めるが、線分を正確に認識するためには、マーカがカメラに比較的大きく写る必要がある。また、原子力発電プラント内部は、配管等、直線形状を持つ機器が多数あるため、マーカではないものから線分を認識してしまう場合が多発する。この誤認識した線分を元にマーカを誤認識することを避けるためには、マーカの番号を認識する段階（4 線分で囲まれた領域を解析する段階)で、マーカではないものを排除する必要がある。しかし、認識された 4 線分で囲まれた領域が小さい場合は、マーカとマーカではないものを識別することが難しい。その為、カメラに小さく写ったマーカの候補は全て破棄する必要があり、大きなマーカを貼ることが難しい原子力発電プラント内部では、四角形マーカはカメラとの間の距離が短い時にのみ使用可能である。これに対し、ラインマーカは、直線状に正方形や長方形が多数並んだ構造をしており、その方形の組み合わせでマーカの番号を表現している。その為、方形マーカの場合に比べて、マーカではないものがマーカの候補となる場合が少ない。また、方形の面積比によりマーカの番号を認識するため、マーカがカメラに小さく写っている場合でも認識可能である。従って、ラインマーカは、カメラとの間の距離が長い時でも使用できる。しかし、ラインマーカは、カメラとの間の距離が短い場合に、ラインマーカの一部がカメラの視野から外れることが多く、安定して特徴点や番号を認識することが難しい。その為、ラインマーカはカメラとの間の距離が長い時にのみ使用可能なマーカである。一方、原子力発電プラント内では円形状のものは直線形状のものに比べて少ない、円の中心は遠方からでも安定・正確に認識できる、異なるマーカから特徴点を得ることにより特徴点間の距離を長くできる等により、円形マーカは、カメラとの間の距離が長い場合でも利用できる。距離が短い場合でも、円形マーカは、ラインマーカに比べて、マーカの一部がカメラの視野から外れる場合が少ないが、トラッキングを実施するのに必要な数のマーカを同時に認識するためには、多数の

マーカを密に環境に貼り付ける必要があり、マーカを貼り付けることができる場所が少ない原子力発電プラント内部で使用することは難しい。

３．遠近両用マーカを用いたトラッキング

3.1 遠近両用マーカのデザイン

図１に、本研究で提案する遠近両用マーカの構造と、1番から4番のマーカのデザインを示す。本マーカは、マーカの中心に半径r_1の大円が１つ、大円の外側(大円の中心から距離dの位置)に半径r_2の小円が正方形状に 4 つ配置された構造になっており、大円の中心と 4 つの小円の中心の計 5 カ所を特徴点とする。大円の内部は 3 層構造になっており、一番外側の半径 0.7r_1から半径r_1の円環状領域（最外領域）は黒色、一番内側の半径 0.3r_1の円状領域（最内領域）は白色とする。大円内の残りの部分(半径0.4r_1から半径0.7r_1の円環状領域）をマーカの番号を表す領域（コード領域）として 10 個の扇形（2 本の半径がなす角度は 36 度）に分割し、個々の扇形毎に白色もしくは黒色とすることによりマーカの番号を表現する(白色を1、黒色を0とする)。ただし、実際にマーカに使用する扇形の白黒のパターン（1 と 0 のパターン）と、それに対応するマーカの番号は、以下の流れにより決定する。

1. 1 から 1022 を 10 ビットの 2 進数で表現する。(0 と 1023 は使用しない。)
2. 1.で得た2進数をそれぞれ1ビットずつ10回ループシフトし、2進数として最も値が小さいパターンを求める。例えば、0110110000 のパターンの場合、得られるパターンは、0000011011 となる。
3. 2.で求めた全てのパターンを 2 進数として小さい順に並べる。この時、同じパターンを一纏めにする。(99 種類のユニークなパターンが得られる。)
4. 3.で得たパターンに、2 進数として値の小さい順に 1 から 99 の番号を付ける。

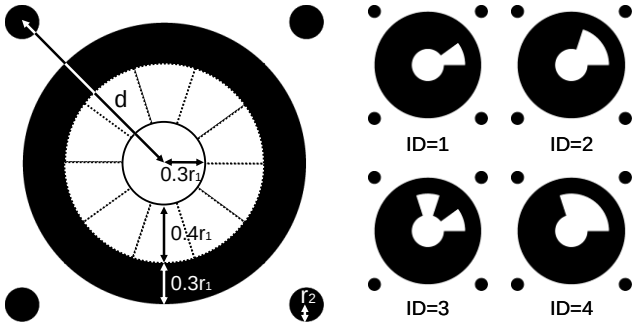


図１　遠近両用マーカの構造と１番から４番のマーカ

以後、個々の扇形をビット要素と呼ぶ。

この遠近両用マーカを原子力発電プラント内で使用する際には、壁や作業対象機器の周辺に複数貼り付け、事前にその 3 次元位置と方向を計測する。拡張現実感を使用する際のデバイスとして、HMD(Head Mounted Display)を用いる場合は、カメラを HMD の前面か、作業員のヘルメットの前部に固定し、PDA(Personal Digital Assistant)等の小型ディスプレイを用いる場合は、デバイス画面の裏側に固定する。ナビゲーション機能等を使用する際は、作業員は、壁や機器から 3m から 10m 程度離れた位置で情報を参照することが多くなるが、このとき、カメラには複数のマーカが（例えば、50pixel 程度に）小さく写ることになる。この場合、マーカの大円の中心は認識できるが、4 つの小円の中心は認識することが難しい。従って、1 つのマーカから 1 つの特徴点しか得ることができないが、複数のマーカの特徴点を同時に利用すれば、トラッキングに必要な数の特徴点の認識が可能になる。一方、機器の保修作業や点検作業等を行う際は、作業員は、壁や機器から数十 cm から 3m 程度離れた近い位置で情報を参照することが多くなるが、このとき、カメラには少数のマーカが（例えば、200pixel 程度に）大きく写ることになる。この場合、マーカ上の全ての特徴点を認識することが可能であり、1 つのマーカがカメラに写るだけで、トラッキングに必要な数の特徴点を認識できる。このように、図 1 に示したマーカは、1 つのマーカで近距離と遠距離の両方で使用可能であり、環境に貼り付けるマーカの数を増やすことなく、トラッキング可能な領域を広げることができる。

図 1 に示したマーカでは、遠方から（カメラ画像上でのマーカの大きさが小さい場合）でもマーカの番号を安定して認識可能にするために、コード領域を極力単純にすることを意図して、マーカの番号を 2 進数で表現した場合の最上位ビットの位置を示す領域は設けていない(コード領域を解析する際の位置基準を設けていない)。従って、例えば、図 2 に示す 2 つのマーカの番号は同じになり、同時に使用可能なマーカの個数は 99 個(ビット要素が全て 0 および 1 の場合も除く)

となる。その為、コード領域を解析する際の基準位置を設ける場合（$2^{10}=1024$個のマーカを同時使用可能）に比べて同時に使用可能なマーカの個数が非常に少なくなる。しかし、100 個程度のマーカが同時に使用できれば、トラッキングが必要な領域を 10m 四方程度の複数領域に分割し、LPS(Local Positioning System)等の、精度は低いが広域で利用可能なトラッキング技術で作業員がどの領域に居るかを判定した後に、本マーカを使って正確な位置と方向を求めることにより、広い領域でのトラッキングが可能になる。

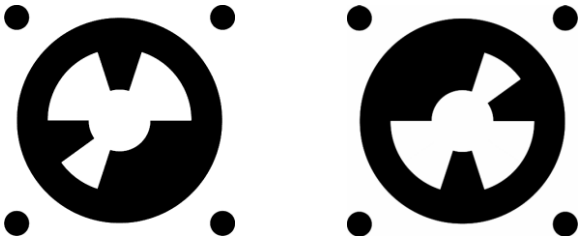


図 2　番号が同じマーカの例（回転すれば同じ）

3.2 遠近両用マーカの認識アルゴリズム

本節では遠近両用マーカの認識アルゴリズムについて述べる。遠近両用マーカは、白紙上に印刷したものを利用し、カメラからは各画素が 0 から 255 の輝度で表現された Gray Scale 画像が得られることを想定する。

1-1. カメラから画像を取得し、得られた画像の各画素 $I(x,y)$ を、式(1)および式(2)で変換する。(非常に暗い環境や明るい環境では、マーカの白い領域と黒い領域の差が小さくなるため、高輝度領域と低輝度領域の輝度の変化を強調する)

i）$0 \le I(x,y) \le 127$ の時

$$J(x,y)=\log_{10}(I(x,y)+1) \quad (1)$$

ii）$128 \le I(x,y) \le 255$ の時

$$J(x,y)=4.243-\log_{10}(266-I(x,y)) \quad (2)$$

1-2. 1-1. で得た各画素 $J(x,y)$ に対して 3×3 Sobel フィルタを適用し、その結果を予め設定した閾値(本研究の場合 0.8)により二値化する。

1-3. 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。得られた連結領域のうち、面積が予め設定された範囲内(本研究の場合 10pixel 以上、100,000pixel 以下)に入らないものを除外する。

1-4. 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。

1-5. 各輪郭線上の点から 1-4. 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 個の楕円の中心、長軸半径、短軸半径、回転角度(カメラ画像の水平方向と楕円の長軸のなす角度)の平均 (x_{ell}, y_{ell})、r_a、r_b、θ_{ell} を求める。本研究では、楕円を安定して認識できる最低限の繰り返し回数を実験的に調べ、$K=150$ とした。

1-6. 1-5. で求めた長軸半径が閾値(本研究の場合 10pixel)よりも小さい楕円をマーカの候補から外す。また、1-5. で求めた長軸半径の短軸半径に対する比を求め、閾値(本研究の場合 3.5)よりも大きい楕円をマーカの候補から外す。

1-7. 残された楕円に対して 1-4. で求めた輪郭線上の点と 1-5. で求めた楕円との最小距離の二乗平均を求め、閾値(本研究の場合 0.02)よりも大きい楕円をマーカの候補から外す。

以下の処理は1-7. までで認識された全ての楕円に対して行う。また、画像の輝度値を参照する場合は、1-1. の変換を行う前の画像から値を得る。

1-8. 楕円の長軸半径と短軸半径の比および θ_{ell} を用いて、楕円を図 3 に示す円に正規化する(長軸と基準線(Baseline)を合わせる)。すなわち、マーカの最外領域および最内領域は半径方向に 5 分割、円弧方向に 20 分割し、コード領域は円弧方向に 100 分割する。以下、この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。

1-9. 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

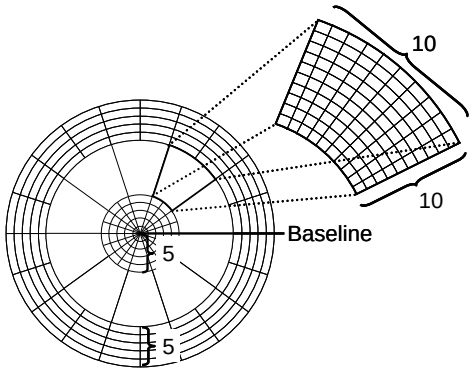


図 3　マーカの正規化

v_{out} 及び分散 v_{in} が閾値以上(本研究の場合 v_{out} が 5×10^7 以上、v_{in} が 5×10^8 以上)の場合は、この楕円をマーカの候補から外す。また、コード領域を解析する際の閾値を $th=(a_{out}+a_{in})/2$ とする。

1-10. コード要素毎に 1-9. 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。

1-11. 図 3 に示した基準線から反時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。

1-12. 1-11. 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。

1-13. $|S_w - S_b| < 3$ となるビット要素を持つ楕円をマーカの候補から外す。

1-14. $S_w > S_b$ 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 10 個のビット列を得る。

1-15. 1-14. 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い値をマーカの番号とする。マーカの番号を得た時のシフトの回数を N_{sft} とする。

1-16. 1-5. で認識された楕円の中心から 4 つの小円へのベクトル $(x_{cnr}(i), y_{cnr}(i))$ (i=0, 1, 2, 3) を以下の式で推測する。

$$
\begin{aligned}
x_{cnr}(i) &= x\cos(\theta_{ell}) - y\sin(\theta_{ell}) \\
y_{cnr}(i) &= x\sin(\theta_{ell}) + y\cos(\theta_{ell}) \\
x &= \cos(\theta_{ell})\sin(\alpha) + \sin(\theta_{ell})\cos(\alpha) \\
y &= \{\cos(\theta_{ell})\cos(\alpha) - \sin(\theta_{ell})\sin(\alpha)\} r_b / r_a \\
\alpha &= \theta_{ell} + 3.6N_{scn} + 36N_{sft} + 45 + 90i
\end{aligned}
\tag{3}
$$

1-17. 1-5. で認識された楕円の中心と、まだマーカとして認識されていない楕円の中心の距離 l を求め、$r_b < l < 1.7r_a$ となる楕円を求める。

1-18. 1-5. で認識された楕円の中心から 1-17. で求めた楕円の中心へのベクトルと、1-16. で求めたベクトルのなす角度が 60 度よりも小さい楕円のうち、1-5. で認識された楕円の中心に最も近い楕円をマーカの小円とする。

以上の処理により、最大 5 つの特徴点が認識される(1-17. および 1-18. で小円が 4 個認識できない場合には、小円の認識に失敗したものとする)。

3.3 遠近両用マーカを用いたトラッキング

3.2 節で述べた処理を行った後、認識した特徴点を用いてカメラとマーカの間の相対的な位置関係(位置 3 自由度、方向 3 自由度)を以下の処理により求める。

2-1. 3.2 節で述べた処理で認識されたマーカの数が 4 個以上の場合は、カメラ画像上で最も距離が離れた 2 個のマーカを選び、これら 2 個のマーカ上を通る直線から最も離れたマーカを 1 個選択し、マーカの大円の中心を特徴点として P3P 問題を解く。

2-2. 3.2 節で述べた処理で認識されたマーカの数が 3 個以下の場合は、4 つの小円の認識に成功したマーカを探す。4 つの小円の認識に成功したマーカが存在する場合には、4 つの小円のうちの 3 つの特徴点を利用して P3P 問題を解く。4 つの小円の認識に成功したマーカが存在しない場合は、トラッキングに失敗したものとする。

2-3. P3P 問題を解いた時点では、最大 4 個の解が求められる。そこで、各解の位置と方向にカメラがあるとした場合に、各特徴点がカメラ画像上のどの座標に写るかを計算し、その結果と、3.2 節で述べた処理で認識した特徴点の座標を比較し、その差(投影誤差)が最も小さい解を求める。

2-4. 得られた解を x 軸、y 軸、z 軸を中心に ±1.0 度、x 軸、y 軸、z 軸方向に ±100 ㎜ 変化させた解(計 12 個)を求め、投影誤差が最も小さい解を求める。変化させない解が最も投影誤差が小さくなった場合は、変化量を半分とする。

2-5. 変化量が ±0.01 度以下、±1.0 ㎜ 以下の際に変化させない解が最も投影誤差が小さくなるか、繰り返し回数が 50 回になるまで 2-4. を繰り返す。

4. 提案手法の評価

本章では、3 章で述べたトラッキング手法の各種性能を評価した結果について述べる。3 章で述べたトラッキング手法は、マーカの大円の半径 r_1、小円の半径 r_2、

小円の大円の中心からの距離dの値によって変化することが予想されるが、本研究では、一例として、$d=1.42r_1$および$r_2=0.12r_1$とし、$r_1=5$cmのマーカの性能を評価した。この場合、小円の輪郭と大円の輪郭の最小間隔は、大円の最外領域の幅と同じになり、小円の大きさは、個々のビット要素よりも少し小さくなる。小円の外側にも、大円の最外領域と同じ幅の余白を確保すると、マーカの幅は14.2cmになる。

評価に使用したパソコンとカメラの主な仕様を表 1に示す。評価用ソフトウエアはMicrosoft Windows XP Professional Edition上でMicrosoft Visual C++ 2005を用いて開発し、Intel C++ Compiler Ver. 10.0を用いてコンパイルした。カメラのシャッタースピードは約10msに固定し、カメラのゲインはハードウエアで自動的に調整するように設定した。

表 1　評価に用いたハードウエアの主な仕様

PC	CPU	Pentium Core2Duo 2.66GHz
	Memory	DDR2 800MHz 2GB
Camera	Vender	Point Grey Research
	Model	Dragonfly2 XGA Black&White
	Interface	IEEE1394a
	Resolution	1024 x 768
	Frame rate	30fps
	Focal length	8.00mm

4.1 マーカ認識可能距離

カメラ画像の中心とマーカの中心がほぼ一致するように、1 個のマーカをカメラの前に配置し、カメラとマーカの間の距離を変化させて、マーカの大円の特徴点と番号を連続して 1000 回以上認識可能な最大距離と最小距離、4 つの小円の特徴点を連続して1000回以上認識可能な最大距離と最小距離を調べた。マーカ上の照度は700LUXであった。結果を表2に示す。

表 2　マーカ認識可能距離の評価結果（単位:mm）

マーカの種類の認識		4 つの小円の認識	
最大距離	最小距離	最大距離	最小距離
5344	251	4980	289

4.2 照度変化に対する安定性

カメラ画像の中心とマーカの中心がほぼ一致するように、1個のマーカをカメラの前約1.5mの位置に配置し、照度を連続的に変化させることができる蛍光灯を用いてマーカ上の照度を変化させ、マーカの大円の特徴点と番号を連続して 1000 回以上認識可能な照度の範囲、4つの小円の特徴点を連続して1000回以上認識可能な照度の範囲を調べた。結果を表3に示す。この結果より、3.2 節で述べたマーカの認識アルゴリズムは、広い照度範囲でマーカを認識できることが分かる。

表 3　照度変化に対する安定性の評価結果(単位:lux)

輝度変換	マーカの番号の認識		4つの小円の認識	
	最高照度	最低照度	最高照度	最低照度
有り	3.90×10^3	6	3.88×10^3	6
無し	3.54×10^3	12	3.46×10^3	12

4.3 トラッキング処理速度

カメラ画像の中心とマーカの中心がほぼ一致するように、1個のマーカをカメラの前約1.5mの位置に配置し、この 1 個のマーカを用いてトラッキングを行う際に、3.2 節および 3.3 節で述べた各処理を実行するのに要する時間を計測した結果、および、9 個のマーカを3行3列の格子状に配置(縦横間隔0.5m)し、中央のマーカから約5mの位置にカメラを置き、9個のマーカを用いてトラッキングを行う際の各処理を実行するのに要する時間を計測した結果を表 4 に示す。マーカ 9 個を用いてトラッキングを行う場合でも、毎秒50回以上の処理が可能である。

表 4　各処理の所要時間(単位:ms)

処理内容	所要時間	
	マーカ 1 個	マーカ 9 個
1-1 から 1-2 まで	8.5	8.5
1-3 から 1-4 まで	2.9	3.4
1-5 から 1-18 まで	0.4	5.3
2-1 から 2-5 まで	0.6	1.0
合計	12.4	18.2

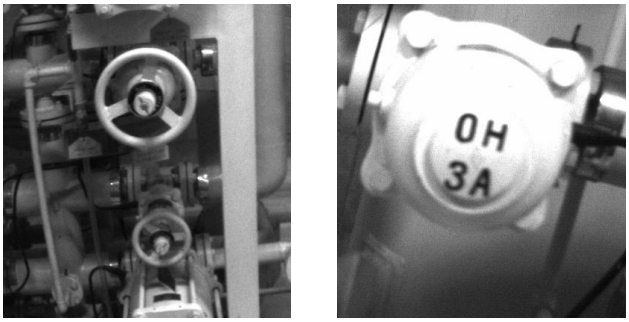
4.4 マーカの誤認識率

マーカを画像処理により認識する場合、以下の 3 種

類の誤認識が起こる可能性がある。

1. マーカではないものをマーカとして認識する
2. マーカが写っているのにマーカを認識しない
3. マーカの番号を間違って認識する

2と3に関しては、4.1節で調べたマーカ認識可能距離内にマーカがあり、4.2 節で調べた照度範囲内の環境であれば、マーカを正しく認識できることが分かっているが、1 に関しては、どのようなものをマーカと誤認識するかは不明である。そこで、原子力発電プラント内で遠近両用マーカを使用した際に、1 の誤認識がどの程度起こるかを調べるために、日本原子力研究開発機構の原子炉廃止措置研究開発センター内にある純水装置室の内部を撮影した画像に対して、3.2 節で述べた処理を適用した。画像は、純水装置室内で、バルブの状態や各種メータの値を確認する作業を想定して移動する人が表 1 に示したカメラを持って撮影した。その結果、撮影総数 19,742 枚に対して、121 枚(0.61%)の画像で誤認識が起こった。図 4 に誤認識を起こした画像の例を示す。図の左側は、バルブを開閉する際に操作するハンドルの中心をマーカの大円と誤認識した例であり、図の右側は、文字の「0」をマーカの大円として誤認識した例である。誤認識は、全て、マーカの大円がカメラに写ったとする誤認識であり、マーカの小円までカメラに写ったとする誤認識は起こらなかった。また、1 枚の画像で 2 個以上の誤認識は同時には起こらなかった。一方、誤認識の内、72 枚 (59.5%)は、マーカでは無いものを番号が 1 か 2 のマーカと誤認識していた。これは、番号が 1 や 2 のマーカは、コード領域が単純(ビット要素 1 個分もしくは連続した 2 個分が黒色で残りは白色)であった為、マーカに似た外見を持つ物がプラント内に多数存在する為であると考えられる。トラッキングの際、番号が 1 や 2 のマーカを使用しないことにすると、誤認識の割合は 0.25%となる。



(左)上のバルブのハンドルの中央をマーカと誤認識
(右)「0」の文字をマーカと誤認識

図 4　マーカを誤認識した例

一方、同じ画像を ARToolKit Ver.2.72[5]を用いて処理した結果、3,114 枚(15.77%)の画像で誤認識が起こった(8 個の長方形を組み合わせたパターンを内部に持つ 64 個のマーカを登録し、マーカとマーカでないものを識別する閾値は ARToolKit の標準である 0.70 を用いた)。このように、方形マーカを原子力発電プラント内部で使用すると、誤認識が多発することが分かる。

なお、原子力発電プラント内部で使用するためには、誤認識率は 0%であることが望ましい。今後は、(1) 画面の中央に突然現れるマーカを省く、(2) 2 フレーム以上連続して認識したマーカのみをトラッキングに利用する、(3) 小円が認識できるはずの大きさにマーカが写っているにもかかわらず、小円が認識できないマーカを省く等の対策を行う必要がある。

4.5 トラッキング可能範囲

トラッキングの精度は、利用する特徴点の 3 次元位置の配置やそのカメラへの写り方によって変化する。従って、4.1 節で求めた距離範囲内に、多くのマーカが存在したとしても、十分な精度でトラッキングが行えるとは限らない。そのため、十分な精度でトラッキングが行える範囲を調べるためには、実際にトラッキングを行い、精度を評価する必要がある。しかし、実空間で詳細な評価を行うことは、評価点の数が膨大になるため困難である。そこで本研究では、シミュレーションによりトラッキング可能範囲を評価した。

シミュレーション空間内の z=0.0m の平面上に、9 個のマーカを 3×3 の格子状($x = -0.5, 0.0, 0.5$ m; $y = -0.5, 0.0, 0.5$ m)に配置し、各マーカに 3.1 節で述べたマーカのデザインを 512×512pixel のテクスチャとして貼り付けた。表 1 に示したカメラの仕様に合わせて、焦点距離、垂直・水平画角、解像度を設定した仮想カメラを($-3.0 \le x \le 3.0$ m; $-0.5 \le y \le 0.5$ m; $0.0 \le z \le 6.0$ m)の領域内で 1cm 間隔で移動させ、その時のカメラに写る映像を OpenGL ライブラリを用いて描画した(方向は z 軸負の方向に固定した)。そして、マーカの最大認識可能距離が、4.1 節の結果と同等になるように、OpenGL で描画した結果に Gaussian フィル

タを適用した。その結果に対して 3.2 節および 3.3 節で述べたマーカの認識アルゴリズムとトラッキングアルゴリズムを適用し、結果の位置誤差が 30cm 以内かつ角度誤差が 10°以内となる点を調べた。評価した点の総数は、601×101×601 = 36,481,301 点となった。なお、トラッキングの際に使用するマーカの 3 次元位置情報には最大 4mm、方向には最大 3.0 度、小円の特徴点の認識結果には最大 0.1pixel を誤差としてランダムに付加した。

一方、実空間内にシミュレーションの場合と同じ配置で 9 個のマーカを壁に貼り付け、中心に配置されたカメラとマーカの間の距離を約 0.5m から 5.0m まで約 0.5m 間隔で変化させてトラッキングした結果の位置誤差と、シミュレーションによりトラッキングした結果の位置誤差を図 5 に示す(共にトラッキング 10 回の平均)。シミュレーションと実空間は、ほぼ同様の傾向を示しており、シミュレーションは、実空間でのトラッキングを完全には再現していないが、トラッキングの特徴を調べる参考にはできると考えられる。

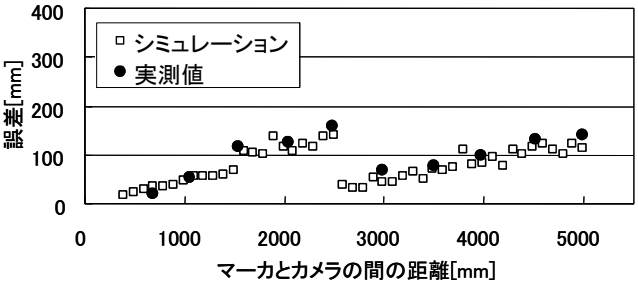


図 5　トラッキングの位置誤差の比較

図 6 に、カメラを y=0 の平面上で x 軸方向と z 軸方向の両方向に 1cm 間隔で格子状に移動させた際に、トラッキングの位置誤差が 30cm 以内かつ角度誤差が 10°以内となった点を示す。図中、黒色の領域は、マーカを全く認識できなかった、もしくは、トラッキングの結果が精度の条件を満たさなかった領域を表しており、灰色の領域は、4 個未満のマーカを使用してトラッキング(認識したマーカの総数が 4 個未満であり、1 つのマーカの 4 つの小円の特徴点を用いてトラッキング）を行い、かつ、トラッキングの結果が精度の条件を満たしていた領域を表す。また、白色の領域は、4 個以上のマーカを使用してトラッキング（認識したマーカの総数が 4 個以上であり、全てのマーカの大円の特徴点を用いてトラッキング）を行い、かつ、トラッキングの結果が精度の条件を満たしていた領域を表す。

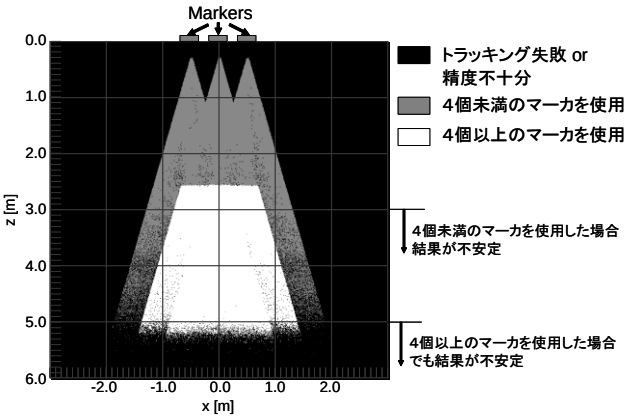


図 6　トラッキングが可能な領域（y=0 の場合）

これによると、カメラとマーカの間の距離が約 3m 以上の領域で、灰色の領域の中に黒色の領域が多く含まれており、1 つのマーカの 4 つの特徴点を使用したトラッキングでは、3m 以上の距離では十分な精度を安定して実現できないことが分かる。これは、特徴点間の距離（10cm）に比べて、特徴点とカメラの間の距離が長くなる（約 3m 以上になる）と、トラッキングの計算が不正確になる為であると考えられる。一方、カメラとマーカの間の距離が約 5m 以上の領域で、白色の領域の中にも黒色の領域が多く含まれており、複数のマーカを使用したトラッキングの場合でも、5m 以上の距離では十分な精度を安定して実現できないことが分かる。これは、マーカの大円の大きさ（半径 5cm）に比べて、カメラとマーカの間の距離が長くなる（約 5m 以上になる）と、マーカを安定して認識できなくなる為であると考えられる。

全評価点のうち、4 個以上のマーカを用いてトラッキングできた点は、カメラとマーカの間の距離が 3m から 5m の間の場合 a=4,221,422 点であり、5m よりも短い距離の場合 b=5,529,836 点であった。一方、3m よりも短い距離で 4 個未満のマーカを用いてトラッキングできた点は、c=4,155,956 点であった。従って、遠近両用マーカを用いた場合、トラッキング可能領域は、円形マーカを用いた場合(大円のみを用いる場合)と比べて(c-(b-a))/b×100=51.5%、方形マーカを単体で用いた場合の様に、1 つのマーカから全ての特徴点を得る場合と比べて a/c×100=101.6%広くできる。

一方、図 6 のカメラとマーカの間の距離が 0m から 1m の間の領域を見ると、マーカとマーカの間の領域でも、黒色の領域（トラッキングが行えていない領域）が存在する。これは、カメラがマーカに近づき過ぎた

為に、マーカの一部もしくは全部がカメラの視野から外れた為である。作業員が壁や機器から近い位置で作業を行う際に、常に拡張現実感を利用することを可能にするためには、これらの領域でも常にトラッキングを行う必要があり、その為には、さらに短い間隔（例えば 25cm 間隔）でマーカを貼り付ける必要がある。しかし、実際の原子力発電プラント内部では、このような密度でマーカを貼り付けることは困難であり、今後、環境に貼り付ける必要があるマーカの数をさらに少なくする必要がある。一方、4 個以上のマーカを使用してトラッキングを行う領域に関しては、マーカを貼り付ける密度は十分であるが、カメラとマーカの間の距離が 5m 以上の領域でトラッキングが行えておらず、これらの領域でもトラッキングを行えるようにするためには、より遠距離からでもマーカを認識可能にするために、より高解像度のカメラを用いる必要がある。

５．結言

本研究では、原子力発電プラント内部で使用することを想定した拡張現実感用トラッキング手法として、遠距離と近距離の両方で使用可能なマーカを用いたトラッキング手法を開発し、その各種性能を評価した。その結果、本研究で開発した手法は、従来の円形マーカを用いた手法と比べて、広い範囲でトラッキングが可能になること、四角形マーカよりも安定してトラッキングが可能であること等を確認した。

今後は、マーカの誤認識率をより低くするために、マーカの認識アルゴリズムやトラッキングのアルゴリズムを改良することや、環境に貼り付ける必要があるマーカの数をさらに少なくする為に、マーカと自然特徴点（環境に予め存在する直線や面、頂点等）を併用したトラッキング手法の開発等が必要である。

参考文献

[1] R. Azuma et al. : Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Nov./Dec., pp.34-47, 2001.

[2] 下田 宏 ほか: 拡張現実感と RFID を用いた原子力プラントの系統隔離作業支援システム, 保全学, Vol.3, No.2, pp.30-37, 2004.

[3] 石井 裕剛 ほか: 拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価, 日本 VR 学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.289-300, 2008.

[4] N. Navab : Developing Killer Apps for Industrial Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, May/June, pp.16-20, 2004.

[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] M. Appel et al. : Registration of technical drawings and calibrated images for industrial augmented reality, Proc. of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp.48-55, 2000.

[7] X. Zhang et al. : Taking AR into large scale industrial environments: Navigation and information access with mobile computers, Proc. of IEEE Int. Symp. on Augmented Reality, pp.179-180, 2001.

[8] Z. Bian et al. : Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to NPP Maintenance Work and its Experimental Evaluation, IEICE Trans. on Information and Systems, Vol.E90-D, No.6, pp.963-974, 2007.

[9] 石井 裕剛 ほか : 原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感用トラッキング手法の開発と評価, 保全学, Vol.5, No.4, pp. 59-68, 2007.

[10] L. Naimark et al. : Circular Data Matrix Fiducial System and Robust Image Processing for a Wearable Vision-inertial Self-tracker, Proc. of Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp.27-36, 2002.

[11] L. Quan et al. : Linear N-Point Camera Pose Determination, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, No.7, pp.774-780, 1999.

（平成 20 年 7 月 17 日）