

学術論文

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

Development and Evaluation of Tracking Method for Augmented Reality System for
Nuclear Power Plant Maintenance Support

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	卞 志強	Zhiqiang BIAN	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	関山 友輝	Tomoki SEKIYAMA	
京都大学大学院エネルギー科学研究科	下田 宏	Hiroshi SHIMODA	Member
京都大学大学院エネルギー科学研究科	吉川 榮和	Hidekazu YOSHIKAWA	Member
日本原子力研究開発機構ふげん発電所	泉 正憲	Masanori IZUMI	
日本原子力研究開発機構ふげん発電所	兼平 宜紀	Yoshiki KANEHIRA	
日本原子力研究開発機構ふげん発電所	森下 喜嗣	Yoshitsugu MORISHITA	

This study aims at developing an augmented reality system to support maintenance work of nuclear power plants. An accurate and wide-range tracking method is required as a key technology in order to realize the system. In this study, a new tracking method using multi-camera and gyro sensor has been developed in order to enlarge the area where the tracking is available with limited number of markers. Experimental evaluation result shows that the area where the developed method can cover is about 3 times larger than the method using only single camera.

Keywords: Plant Maintenance Support, Augmented Reality, Marker-based Tracking, Multi-Camera

1. 緒言

近年の電力自由化により、原子力発電に伴うコストの削減が強く要求されている。また、熟練作業員の減少が進んでおり、如何に保守技術レベルを維持・向上させるかが問題となっている。その一方で、発電設備の高経年化や保守形態のTBM(Time Based Maintenance：点検周期を重視した時間基準保全)からCBM(Condition Based Maintenance：設備の状態を把握して必要最小限の投資を行う状態基準保全)への移行によって、ますます保守作業のありかたは複雑になってきており、保守作業支援の高度化が望まれている。

◆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
Tel: 0774-38-4403
E-mail: hirotake@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

そこで、拡張現実感(Augmented Reality; AR)技術を利用して保守作業を支援することにより、効率的かつ安全、確実に作業を行うことを可能にする研究が進められている^[1]。ARとは、コンピュータで生成した仮想の物体や情報を、あたかも現実の世界に存在するかのように見せることで、現実の世界を拡張する技術である。例えば、Fig.1 に示すように、ARの機能を付加したHMD(Head Mounted Display)を装着したユーザは、周囲

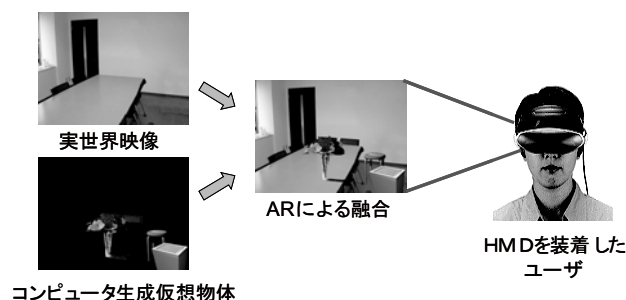


Fig. 1 Example of Augmented Reality.

の外界（実世界映像）だけでなく、重畳表示された仮想の物体や情報を同時に見ることができる。ここで重要なのは、ARでは、ユーザの位置や向いている方向に応じて仮想の物体や情報の表示位置を調整することで、どの位置や方向から見ても、その仮想の物体や情報が、現実の世界のある定まった位置に存在するように見えることである。これにより、現実の世界に重畳された仮想の物体や情報の存在感が増すだけでなく、現実の世界の3次元的な位置を、より直感的に示すことが可能になり、保守作業の手順や危険箇所を直感的に示すことが可能になる。

ARを保守の現場に導入するためには、まず、高い精度と安定性を備えたトラッキング技術（ユーザの位置と方向をリアルタイムで計測する技術）を確立する必要がある。これまでのARに関する研究開発では、様々なトラッキング技術が提案・開発されてきた^[2]が、原子力発電プラント内という特殊な環境に適した方法はあまり研究されていなかった。そこで筆者らは、原子力発電プラント内での使用を前提としたトラッキング手法として、配管類に貼付して使用できるラインマーカを利用した手法を開発してきた^[3]。発電プラント内で行われる作業としては、数mmレベルの精密さが要求される作業から、バルブや弁等、比較的大きな機器を探し出す、数十cmレベルの精密さが要求される作業等、様々なものがあるが、本研究では、特にARを用いた作業支援の初期目標として、(1)移動ナビゲーション(作業員が移動する際の最適経路の指示、作業対象機器の存在場所の指示等)、(2)遠方から眺めた場合の危険箇所の表示(放射線が強い、温度が高い等の為に近づくべきではない箇所の指示等)、(3)比較的大きな機器の現在状態の表示(大口径のパイプ内を流れる液体の現在の流量や温度の表示等)を行うことを想定している。そのため、トラッキングの性能としては、位置と方向の6自由度を計測可能、精度は位置に関しては20cm程度(人間の歩幅の半分以下程度)、角度に関しては20°程度(16方位を提示可能)、更新速度は毎秒10フレーム程度(人の目が映像の動きをなめらかであると感じる最低限の速度)を目標として研究を進めてきた。特に原子力発電プラント内は、(1)広い屋内である、(2)複雑な形状の機器が多数配置されているために大きなマーカを貼る事ができる広い平面が少ない、(3)金属製の機器が多く配置されている、(4)ユーザ(作業員)が長時間使用する必要がある、(5)環境内に置かれた機器の位置が頻繁に変

化する、という、これまでARが適用されてきた環境と比べて特殊な環境であるが、ラインマーカを用いた手法は、(1)マーカの数を増やすことにより広い屋内でも使用できる、(2)細長い形状であるために広い平面が少ない場合でも利用できる、(3)金属の影響を受けない、(4)時間経過によって誤差が蓄積しないために長時間利用できる、(5)予め固定された機器上にマーカを貼り付けることにより、他の頻繁に移動する機器の影響を受けにくいという利点があり、また、マーカ自身は非常に安価に作成できる等の特徴もあることから、既存のこれまでのトラッキング手法と比べて、原子力発電プラント内での使用に適している。しかし、これまでのラインマーカを用いた手法は、同時に2個以上のマーカをカメラで撮影できなければトラッキングができないという制約条件があり、広い範囲でトラッキングを行うためには、多数のマーカを環境に貼付する必要があった。そこで本研究では、複数のカメラを同時に使用することにより撮影する映像の視野を広げ、また、ジャイロセンサを併用することにより撮影されたマーカの数1個以下の場合でも、トラッキングが継続できるようにした。そして新しく開発した手法の性能を評価するために、実験室環境においてトラッキングの精度を評価し、また、実際の発電プラント内部にラインマーカを貼付し、トラッキング可能な領域を調べた。

2. ラインマーカを用いたトラッキング手法

2.1 既存のトラッキング手法とその問題点

AR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^[4,5]、交流磁界センサを用いた磁気センサ法^[6]、ジャイロセンサや加速度センサを用いた自律センサ法^[7]、模様付きマーカとカメラを用いた人工マーカ法^[8]、周囲環境の特徴をマーカとする自然特徴点法^[9]等が提案されている。しかし、プラント構内は、屋内であるためにGPSが使えない、複雑な形状の機器が多数あるため超音波センサが使えない、金属製の機器が多いため磁気センサが使えない、長時間使用する必要があるため誤差が蓄積する自律センサ単体では精度が維持できない、機器の位置が頻繁に変わるために自然特徴点法では安定しない等の問題がある。そこで本研究では人工マーカ法に注目し、従来の人工マーカ法と比べてプラント内部で使用しやすいマーカを考案し、AR用のトラッキングに

用いることにした。

人工マーカ法としては、四角形マーカを用いたトラッキング手法が多用されている^[10]。四角形マーカを用いた手法は、1 個のマーカだけで位置と方向の両方を得ることができ、ARに精通していない人でも容易に利用できる利点があるが、高い精度が要求される場合や、マーカとカメラとの間の距離を長くする必要がある場合は、非常に高解像度のカメラや非常に大きなサイズのマーカを用いる必要がある。しかし、コストや処理速度の問題から使用可能なカメラの解像度には上限があり、また、発電プラント内は、多数の機器が配置されており、広い平面はそれほど多くは無いため、大きなサイズのマーカを多数貼付することは実際上難しい。そのため、四角形マーカを用いた手法は、そのままでは発電プラント内部では使用できない。

2.2 ラインマーカの概要と問題点

そこで本研究では、発電プラント内には配管が多数存在するため、細い形状の物は長くても比較的貼り付けやすいという点に注目し、線形状のマーカ（ラインマーカ）を新たに考案し、予めその3次元位置が既知のラインマーカを複数同時にカメラで撮影することにより、マーカとカメラの間の相対的な位置と方向をリアルタイムで計測できる手法を開発した^[3]。

Fig.2に本研究で考案したラインマーカのデザインを、Fig.3にラインマーカを用いてトラッキングを行う手法の概念図を示す。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し、残りの4ビットでハミング符号により誤りを訂正する)。トラッキングを実行するには、ユーザのヘルメットに固定したカメラで環境内に貼付した複数のマーカを撮影し、それらのマーカの3次元位置とカメラ画像上のマーカの位置から、P4P法^[11]により、カメラとマーカの間の相対的な位置と方向を求める。

以上に述べた方法により、カメラに十分な数のマーカが写っている場合は、従来の四角形マーカを使用した場合と比べて、高精度で安定したトラッキングが行えることを確認した^[3]。しかし、ラインマーカは細長い形状をしているために、1 個のマーカから3 個以上の特徴点(カメラとマーカの間の相対的な位置と方向

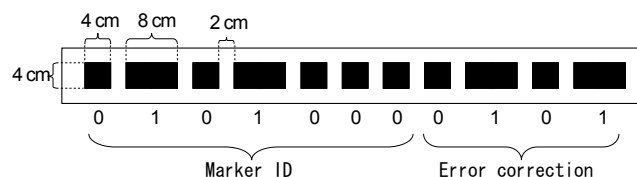


Fig. 2 Example of line marker.

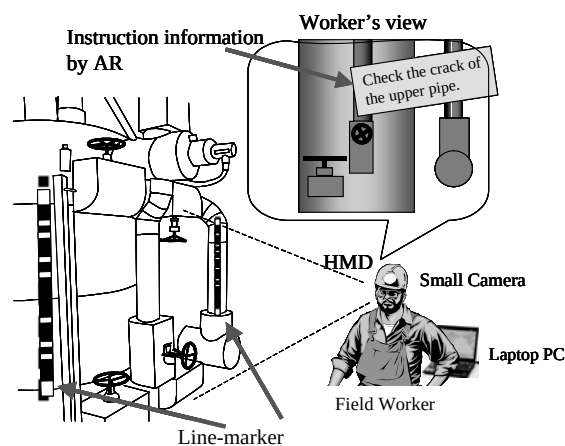


Fig. 3 Concept image of line marker tracking.

を計算するために用いるマーカ上の基準点)を抽出した場合、それらはほぼ直線状に並ぶことになり、高い精度が期待できない。すなわち、特徴点が直線状に並んでいる場合、直線から一定の距離だけ離れた箇所から特徴点を撮影すると、どの角度からでも同じ配置でカメラ画像上に特徴点が写るためにそれらの区別ができず、トラッキングの精度が低下する。カメラ画像上のマーカの位置から、カメラとマーカの間の相対的な位置と方向を一意に求めるためには、一般に直線状に無い4 個以上の特徴点がカメラに同時に写る必要がある^[11]。そのため、ラインマーカを使用する場合、2 個以上のマーカが同時にカメラに写らない場合は、トラッキングが行えず、常にトラッキングを継続して行うためには環境内に多数のラインマーカを貼付する必要がある。そこで本研究では、複数のカメラを同時に使用することにより撮影する映像の視野を広げ、また、ジャイロセンサの併用により、環境に貼付するマーカの総数を増やすことなく、トラッキング可能な領域を広げる試みを行った。

3. トラッキング可能な領域を広げる試み

3.1 マルチカメラを用いたトラッキング

環境に貼付するマーカの総数を増やすことなく、トラッキング可能な領域を広げるには、より広い範囲の画像を同時に取得できるようにする方法が有効である。広い範囲の画像を取得する方法としては、広角レンズを使用する方法も考えられるが、その場合、画像の歪みが大きくなり、また、画像の周辺部の解像度が低くなるために、トラッキングに使用する画像としては適さない。そこで本研究ではFig.4に示すように、視野角約40°のカメラ3台を約40°の角度を付けて並べたマルチカメラユニットを作成し、トラッキングに用いることにした。しかし、従来のトラッキングアルゴリズムを利用するためには1枚の映像に2個以上のラインマーカが同時に写っている必要があり、複数のカメラに分散してラインマーカが写っている場合(2台のカメラにラインマーカが1個ずつ写っている場合等)には、トラッキングができない。そこで本研究では、より広い範囲でトラッキングが行えるようにするために、複数のカメラに分散してラインマーカが写っている場合にもトラッキングができるアルゴリズムを開発することにした。複数のカメラで撮影されたマーカの映像を用いてトラッキングを行う方法としては、何らかの方法で求めた低精度の推測値を元にマーカの各カメラに写る位置を求め、その位置と実際にカメラに写ったマーカの位置の差を最小にする様に推測値を変化させることにより最終的な値を求める方法が開発されている^[12]が、この方法はトラッキングの対象が高速に移動する場合等に結果が不安定になるため、見回し動作等、ユーザ(作業員)が高速に動く可能性があるプラントでのトラッキングには適用が困難である。また、制限なく自由な方向に貼付された複数のラインマーカを撮影した複数の映像から、解析的にトラッキングする方法は、処理が複雑になる。そこで本研究では、発電プラント内には多数の配管がほぼ平行に配置されているため、ラインマーカを空間的に平行に貼付することは大きな制約にはならないと考え、「ラインマーカは空間的に互

いに平行に貼付する」という条件を付加することにより、3台のカメラに写ったラインマーカの特徴点を1台のカメラ上に変換するアルゴリズムを開発した。以下に、そのアルゴリズムを示す。

環境に貼り付けられたラインマーカの3次元位置および3台のカメラ間の相対的な位置と方向、カメラの内部パラメータは予め計測されているものとし、カメラ1からカメラjへの同次変換行列を $\mathbf{T}_j$ ($j=1,2,3$)、カメラの透視変換行列を $\mathbf{P}$ (全カメラで共通)とする。この場合、カメラ1の座標系で表された点 $\mathbf{x} = (x, y, z, 1)^T$ をカメラjのスクリーン座標系に変換する式は以下で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}\mathbf{T}_j\mathbf{x} = \begin{pmatrix} t_{j11} & t_{j12} & t_{j13} & t_{j14} \\ t_{j21} & t_{j22} & t_{j23} & t_{j24} \\ t_{j31} & t_{j32} & t_{j33} & t_{j34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \cdots (1)$$

1. 3台のカメラでラインマーカを撮影し、ラインマーカを認識する。認識されたラインマーカのうち、3次元位置が最も離れた2個のラインマーカを選択する。ここで選択した2つのラインマーカが同じカメラで撮影されている場合は、従来のトラッキングアルゴリズムを適用する。異なるカメラで撮影されている場合、ラインマーカの1つはカメラjで撮影され、もう一方のラインマーカはカメラkで撮影されたとする。
2. カメラjに撮影されたラインマーカの端点を f_1 と f_2 、カメラkに撮影されたラインマーカの端点を f_3 と f_4 とする。ただし、 f_1 と f_3 を同じ側の端点とする。
3. f_1 と f_2 を通る直線と f_3 と f_4 を通る直線を求め、それぞれのラインマーカを撮影したカメラのスクリーン座標系で表す。それらを式(2)とする。

$$a_1u + b_1v + c_1 = 0, a_2u + b_2v + c_2 = 0 \quad \cdots (2)$$

4. 式(1)から求められる u および v を式(2)に代入し、 x, y, z に関する項を纏めると式(3)になる。ただし、 A および B は定数とする。

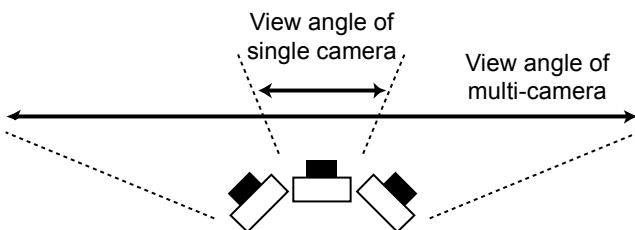


Fig. 4 Concept image of multi-camera unit.

$$\begin{aligned} (a_1 t_{j11} + b_1 t_{j21})x + (a_1 t_{k11} + b_1 t_{k21})x + \\ (a_1 t_{j12} + b_1 t_{j22})y + (a_1 t_{k12} + b_1 t_{k22})y + \cdots (3) \\ (a_1 t_{j13} + b_1 t_{j23})z = A \quad (a_1 t_{k13} + b_1 t_{k23})z = B \end{aligned}$$

5. 式(3)はカメラ 1 座標系における 2 つの平面と見なすことができ、各面はラインマーカを含んでいる。2 個のラインマーカは互いに平行であるので、この各面の法線ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ の外積を正規化した $\mathbf{d}$ は、カメラ 1 座標系におけるラインマーカの方向ベクトルとなる。

$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2|} \quad \cdots (4)$$

6. カメラ j に写ったラインマーカの長さを l 、同次行列 $\mathbf{T}_j$ のうちの回転成分のみを $\mathbf{R}_j$ とすると、カメラ j 座標系で表されたラインマーカの一方の端点から他方の端点へのベクトル $\mathbf{m}_j$ は式(5)で表される。

$$\mathbf{m}_j = \mathbf{R}_j \mathbf{d} l = (m_{j1}, m_{j2}, m_{j3})^T \quad \cdots (5)$$

7. カメラ j に写ったラインマーカの 2 つの端点のスクリーン座標系での座標を (u_{f1}, v_{f1}) および (u_{f2}, v_{f2}) とすると、 α, β を媒介変数として、ラインマーカの 2 つの端点の 3 次元座標は $(\alpha u_{f1}, \alpha v_{f1}, \alpha)^T$ および $(\beta u_{f2}, \beta v_{f2}, \beta)^T$ と表すことができ、式(6)が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} \alpha u_{f1} \\ \alpha v_{f1} \\ \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{j1} \\ m_{j2} \\ m_{j3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta u_{f2} \\ \beta v_{f2} \\ \beta \end{pmatrix} \quad \cdots (6)$$

8. 式(6)を α および β について解くことによりカメラ j 座標系で表したラインマーカの 2 つの端点の 3 次元座標を求める。この結果を式(7)に代入することにより、カメラ 1 のスクリーン座標系でのラインマーカの 2 つの端点の座標 $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ を求める。

$$\mathbf{f}_1 = (\mathbf{PT}_j)^{-1} \begin{pmatrix} \alpha u_{f1} \\ \alpha v_{f1} \\ \alpha \end{pmatrix} \quad \mathbf{f}_2 = (\mathbf{PT}_j)^{-1} \begin{pmatrix} \beta u_{f2} \\ \beta v_{f2} \\ \beta \end{pmatrix} \quad \cdots (7)$$

9. カメラ k に関しても 6,7,8 を行うことにより、カメラ k に写ったラインマーカの 2 つの端点のカメラ 1 のスクリーン座標系での座標 $\mathbf{f}_3, \mathbf{f}_4$ を求める。

以上により、3 台のカメラに写った 2 個のラインマ

ーカの合計 4 個の端点の位置をカメラ 1 のスクリーン座標系に変換できる。以降は、従来の 1 台のカメラを用いたトラッキングアルゴリズムが適用できる。

なお、本研究で提案するラインマーカを実際に環境に貼り付けて利用する場合、どの程度厳密に平行に貼り付ける必要があるかは、トラッキング手法の実用性に関する重要な指標である。今回のアルゴリズムの場合、環境に貼り付けられたラインマーカが互いに平行ではない場合、トラッキング自体は実行されるが、計測精度が低下する。実際にラインマーカを壁に貼り付け、ラインマーカの設置誤差とトラッキング結果への影響を計測したところ、約 70cm のラインマーカを 1m 離して貼り付け、マーカの正面約 2m の距離からトラッキングを行う場合、一方のラインマーカが他方のラインマーカに対して約 2°傾いている場合(マーカの片方の端が約 2.4cm ずれている場合)は約 15cm、約 1°傾いている場合(マーカの片方の端が約 1.2cm ずれている場合)は約 7cm、トラッキングの結果が変化することを確認した。この大きさは、4.1 節で述べるマーカを平行に貼り付けた場合の計測誤差と同等かそれ以上であるが、実際にラインマーカを貼り付ける場合には、レーザ計測器等を使用することによりマーカの貼り付け位置誤差を 1cm 以内に押さえることが可能であるため、マーカの貼り付け位置誤差のトラッキング結果に対する影響は最大 7cm 程度(マーカとカメラの間の距離が 2m 程度の場合)であると考えられる。

3.2 ジャイロセンサを併用したトラッキング

3.1 節で述べた手法により、環境に貼付する必要があるマーカの総数ある程度は低減できると期待される。しかし、カメラの映像にブラー(カメラの動きに対してシャッタースピードが大き過ぎるために生じる画像のぶれ・ぼやけ)が生じる程にユーザが位置や姿勢を急激に変化させた場合や、マーカがユーザの体の一部や工具によって隠蔽された場合には、トラッキングが一時的に行えなくなる。そこで本研究では、環境に新たに機器を設置する必要がなく、比較的高精度に計測ができるジャイロセンサ(InterSense 社 InertiaCube3)とラインマーカを併用したトラッキング手法を開発した。InertiaCube3 は Yaw/Pitch/Roll の 3 自由度の角度値を 180Hz で計測できる小型センサであり、比較的ドリフト誤差が少ないセンサである。本研究では、この InertiaCube3 を 3.1 節で述べたマルチカメラユニットに

固定して用いた。ラインマーカと InetiaCube3 を併用する際の処理は、カメラで撮影されたマーカの総数に応じて以下の3種類に分けられる。

1. 2個以上のマーカを認識できた場合
2. マーカを全く認識できなかった場合
3. 1個のマーカを認識できた場合

以下、それぞれの場合の処理を説明する。

2個以上のマーカを認識できた場合

まず、マルチカメラによるトラッキング結果が1フレーム得られる度に InetiaCube3 から回転角度情報を得る。このとき、マルチカメラによるトラッキングの誤差（推定されたカメラ位置・姿勢から求めたカメラ画面上のマーカの位置と、実際にカメラ画像から認識されたマーカの位置の差）を計算する。この誤差がある一定値よりも大きい場合は、マルチカメラによる結果の回転成分と InetiaCube3 による結果にそれぞれの計測結果の誤差の自乗の逆数を重みとして重み付き平均を計算し、その結果を最終的なトラッキングの結果の回転成分とする(InetiaCube3 の時間あたりの誤差は常に一定とし、その値は予め実験により得た)。平行移動成分は、マルチカメラによる結果をそのまま利用する。一方、マルチカメラによるトラッキングの誤差がある一定値よりも小さい場合は、マルチカメラからの結果を用いて InetiaCube3 の蓄積誤差を補正する。すなわち、マルチカメラから得た結果と InetiaCube3 から得た結果の差分を計算し、この差分にマルチカメラから得た結果の誤差の自乗の逆数を重みとして乗算した後、InetiaCube3 の現在値に乗算して新しい現在値とする。

マーカを全く認識できなかった場合

マルチカメラでマーカを全く撮影できなかった場合は、回転成分は InetiaCube3 による結果を用いる。平行移動成分は前フレームの結果を用いる。従って、この場合、カメラが平行移動していた場合は、その平行移動分だけトラッキング結果に誤差が含まれることになる。

1個のマーカを認識できた場合

まず推定位置・姿勢の初期値として、位置を直前のフレームのトラッキング結果と同じ位置、姿勢をジャイロセンサで得た姿勢とする。それらの位置と姿勢を用いて認識された1個のマーカのカメラ画像上での位

置を計算する。その結果と実際に認識されたマーカのカメラ画像上での位置を比較する。その差が最小になるように位置と姿勢の推定値を繰り返し計算により非線形に最適化する。

4. トラッキング手法の評価

4.1 実験室環境における精度・速度評価

マルチカメラを用いたトラッキング手法の精度と処理速度を評価するために、実験室環境内にラインマー

Table 1 Hardware spec. of the experimental system

PC	CPU	Pentium4 3.2GHz
	Memory	512MB
Camera	Interface	IEEE1394a
	Resolution	512 × 384 (Half of original)
	Frame rate	15fps
	Focal length	6.37mm
	Size	63.5 × 50.8 × 13.2mm
	Model	Dragonfly Color

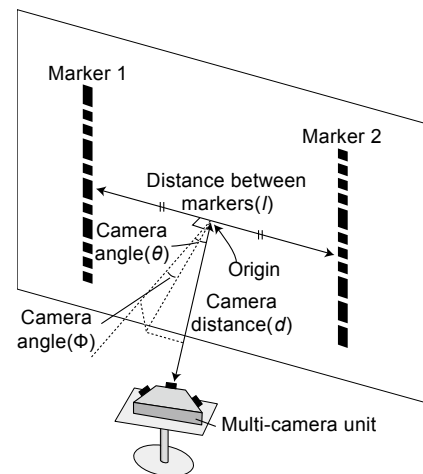


Fig. 5 Variable definitions of the experimental setup.

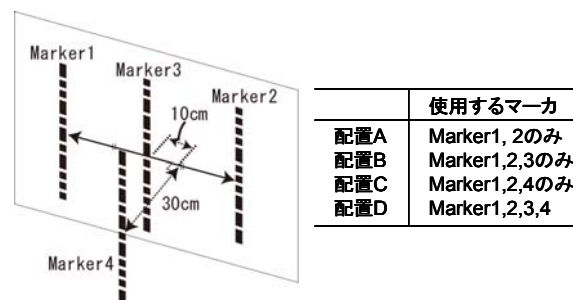


Fig.6 Marker layout for the experiment 2.

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。

Table 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(l)、(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)マーカを撮影するカメラの台数(c)、(5)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(Fig.5)。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増大になるため困難である。そこで今回は、 $m=2$ 個、 $c=2$ 台、 $\phi=0^\circ$ と固定した条件において、その他のパラメータを、 $l=0.5, 1.0\text{m}$ 、 $d=2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{m}$ 、 $\theta=0, 15, 30, 45, 60^\circ$ に変化させた場合(実験 1)と、 $c=2$ 台、 $l=1.0\text{m}$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $\phi=0^\circ$ と固定した条件において、その他のパラメータを、 $m=2, 3, 4$ 個(配置 A~D、Fig.6 参照)、 $d=2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{m}$ に変化させた場合(実験 2)のトラッキングの精度と処理速度を評価した。ここでカメラの台数を 2 台($c=2$)としたのは、3 台のカメラに同時にラインマーカが認識されたとしても、3.1 節で述べた様に、互いに 3 次元位置が最も離れた 2 個のラインマーカを用いてトラッキングを行うため、同時に使用するカメラの最大台数は常に 2 台となるためである。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。

実験 1 の結果を Fig.7($l=0.5\text{m}$ の場合)および Fig.8($l=1.0\text{m}$ の場合)に、実験 2 の結果を Fig.9 に示す。実験 1 において、2 台のカメラに 2 個のラインマーカが同時に写らない配置があった。その場合を図中、NA で示した。

各条件の結果で、全体的に誤差のばらつきが大きい。これはカメラに写るマーカの画面上での位置が一定でなく、キャリブレーションによって除去しきれないカメラのレンズの歪みの影響を受けたためであると考えられる。

トラッキングの精度は、マーカ間の距離が 1.0m の場合、 d の誤差が最大で 5cm 程度、 θ, ϕ の誤差が最大 10° 程度であることが分かる。これにより、3.1 節で述べたラインマーカの設置誤差の影響を考慮に入れても、本研究の目標である、6 自由度を計測可能、位置精度 20cm 程度、角度精度 20° 程度が達成できていることが分かる。

その他、全体的に以下の傾向が見られる。

1. d が大きくなるにつれて、 d の精度が悪化する。これは、 d が大きくなると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

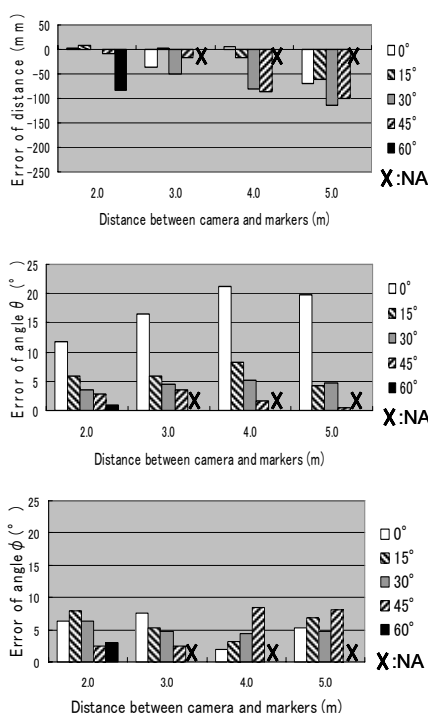


Fig.7 Result of experiment1 ($l=0.5\text{m}$).

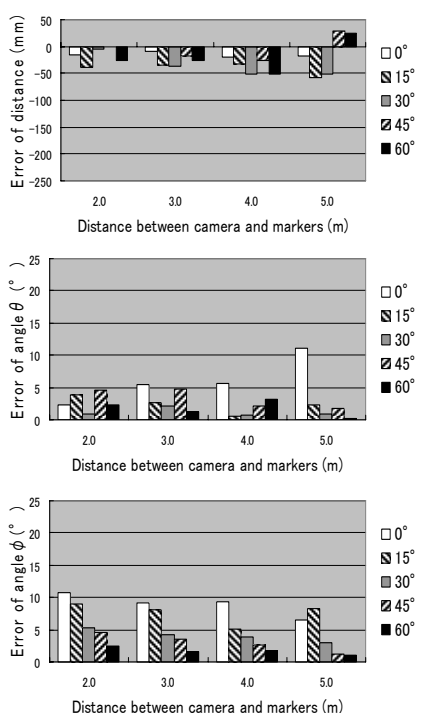


Fig.8 Result of experiment1 ($l=1.0\text{m}$).

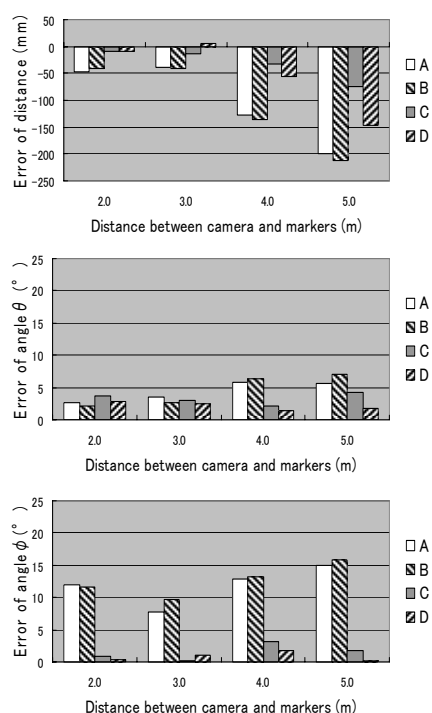


Fig.9 Result of experiment2.

きくなるためである。

2. θ, ϕ 共に $\theta=0^\circ$ 付近では精度が悪い。これは、 $\theta=0^\circ$ 付近では、 θ, ϕ の変化によるラインマーカの特徴点の写り方の変化が小さい為であり、四角形マーカを用いたトラッキングの計測精度と同様の傾向である^[10]。
3. θ は l が大きいほど精度が良くなる。
4. ϕ は l が変化しても精度に大きな変化はない。

また、使用するマーカの総数が精度に与える影響に関しては、Fig.9 より、以下のことが分かる。

1. マーカが同一平面上にある場合、同時に撮影するマーカが増えても、精度はあまり向上しない。
2. 同一平面上に無い 3 個以上のマーカをトラッキングに利用できる場合は、精度が高い。

また、処理速度に関しては、簡単な情報の重畳表示を含めて 1 フレーム当たり平均 52ms(19.2fps)であった(10 フレーム平均、3 台のカメラ合計)。今後も PC の性能が向上していくことを考慮すると、より複雑な情報をユーザに提示する場合でも、十分違和感無く、開発したトラッキング手法が利用できると思われる。

4.2 プラント内部における可動範囲の評価

4.1 節で述べた実験は、実験室内にマーカを貼付した場合の評価であったが、実際には発電プラント内には多数の複雑な形状をした機器が配置されており、必ずしも理想的な位置にマーカを貼付できるとは限らない。また、貼付したマーカが環境内に配置された機器に隠蔽される場合もあり得る。そこで、実際に配管や機器が多数配置されている日本原子力研究開発機構のふげん発電所の純水装置室を利用して、部屋内に貼り付けたマーカの総数と、トラッキングを実行できる領域の大きさの関係を調べた。

Fig. 10 に実験に使用した部屋のレイアウトを示す。室内は蛍光灯照明で、200-500Lux 程度の明るさがあり、

容易にラインマーカを視認できた。実験の手順は以下の通りである。まず、パイプやタンクなどの機器もしくは壁に適当な密度で、15 個のラインマーカ(長さは 70cm~82cm)を貼付した。そして、各マーカの位置をレーザ計測機器(Leica 社 DISTO Pro4a)によって計測し、トラッキングシステムに登録した。その後、ジャイロセンサを取り付けた状態のマルチカメラユニットを実験者が頭の上に手で持ち、システムを動作させながら Fig. 10 に示す 2 つのルート(Route1, Route2)を歩いた。このときに撮影された画像、認識されたマーカの ID とそのスクリーン座標、ジャイロセンサの出力を記録した。そしてオフラインでトラッキングを実施した。Fig.11 に実験の際に撮影された映像の例を示す。

実験の結果、撮影したフレーム総数は、Route1 の場合で 411、Route2 の場合で 330 となった。画像データは、通常動作では保存しないが、今回は解析を詳細に行うためにハードディスクに保存したため、通常動作

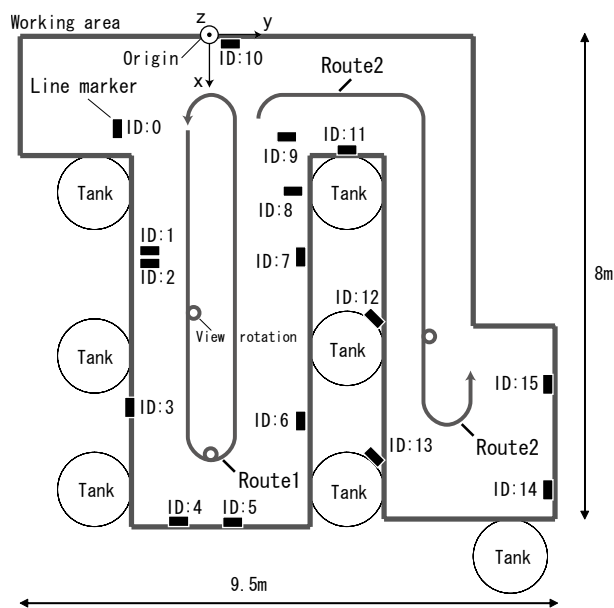


Fig. 10 Layout of experimental room.

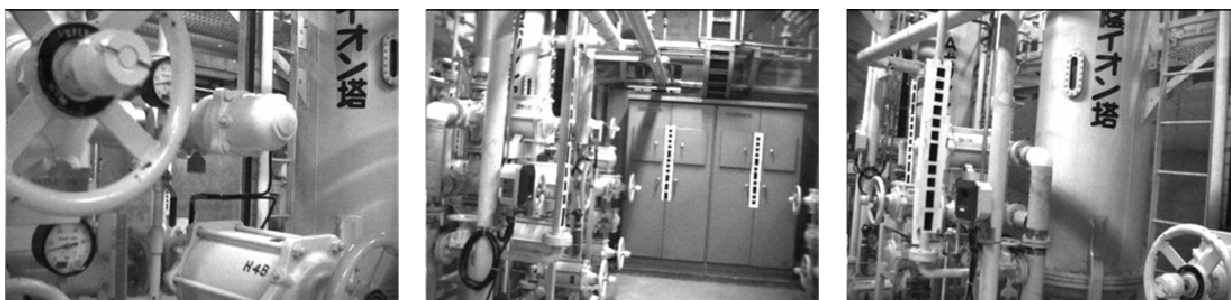


Fig. 11 Example images captured by 3 cameras in Fugen plant.

時よりもフレームレートは低く、平均で約 5fps であった。Fig.12 および Fig.13 に、カメラ 1 台を用いた場合、マルチカメラユニットを用いた場合、ジャイロセンサを併用した場合の Route 1 と Route 2 でのトラッキングが可能であったフレームの割合を示す。ただし、ジャイロセンサを併用した場合では、マルチカメラによるトラッキングが行えている状態から、マーカが認識できなくなった後、500ms 以内であればトラッキングが継続できると仮定した。この場合、最も誤差が大きくなるのは、ラインマーカが全く認識できなくなった直後から 500ms の間、作業員が一直線上を移動する場合であり、作業員が時速 3km の速度で移動すると仮定すると約 41cm の最大誤差が生じる。しかし、実際にプラント内部を歩き回り、AR を用いて情報参照を行う場合に、誤差が最大どの程度になるのかは、作業員の移動の仕方、すなわち、移動方向・移動速度・回転方向・回転速度、およびそれらの 500ms の間の変化の仕方に依存するため、定量的に評価することは困難である。そこで本研究では、ラインマーカが認識できなくなった後、500ms 以内の間はジャイロセンサから得られる値を元に情報提示を行うという設定のもとで、実際にユーザに作業対象として設定したパイプの位置を示す情報提示を行った。その結果、ユーザの移動に伴いマーカの認識に失敗し、ジャイロセンサの結果のみを用いて情報提示を行っても、提示される情報の位置に違和感はなく、ユーザが場所を間違えて認識するということが起こらないことを確認した。

Fig.12 および Fig.13 より、同じマーカ配置でも、マルチカメラを用いることでマーカの認識数が増加していることが分かる。ジャイロセンサを併用した場合と併用しない場合を比較すると、Route1、Route2 共に 20% 程度、トラッキング可能な範囲が増加している。保存した画像を解析した結果、カメラが比較的速く回転した際に画像に一時的にブラーが生じ、その影響でマーカを用いたトラッキングができなかった場合にジャイロセンサが有効に利用できていることが確認された。カメラ 1 台だけを使用した場合と、マルチカメラとジャイロセンサを併用した場合を比べると、Route1 ではトラッキング可能な領域が約 3 倍、Route 2 では約 17 倍になっていることが分かる。これにより本研究で開発したマルチカメラとジャイロセンサを併用した手法を用いることにより、環境に貼り付けるマーカの個数を増やすことなく、トラッキング可能な領域を広げる

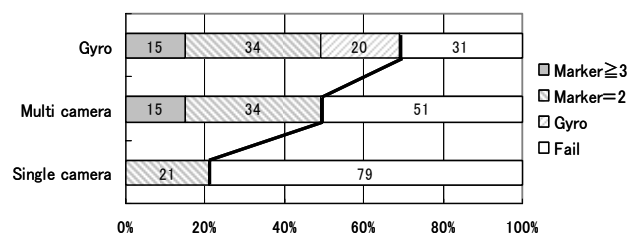


Fig. 12 Percentage of frames where the tracking is available (Route1).

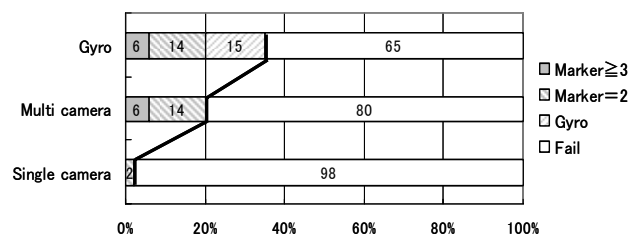


Fig. 13 Percentage of frames where the tracking is available (Route2).

ことができることが確認できた。

なお、今回の実験では、マルチカメラとジャイロを併用することによる効果を確認できるようにするために、純水装置室内に貼り付けるラインマーカの総数を意図的に少なくした。そのため、特に Route2 の場合のトラッキング可能な範囲が、本研究での提案手法を用いた場合でも 35% と低い値になっている。この割合は、貼り付けるラインマーカの数を増やすことにより上げることができるが、今回の実験では、純水装置室内のラインマーカを貼り付けることができる場所(細長い平面領域)の内、5 分の 1 程度の場所にのみラインマーカを貼り付けたことから、残りの場所にラインマーカを貼り付けることにより、純水装置室の様な環境の場合は、トラッキング可能な領域を 100% 近くにすることが可能であると予想される。ただし、実際に AR を用いて作業指示をする場合に、どの程度の割合でトラッキングができる必要があるかは、AR をどのような作業支援に用いるかによって変化すると考えられる。例えば、作業現場まで作業員を誘導するナビゲーションに AR を利用する場合には、分岐点でのみトラッキングが可能であれば十分であると考えられるが、危険箇所を作業員に知らせるような用途の場合には、危険箇所からある程度近い領域において 100% の割合でトラッキングができる必要があると考えられる。従って、本研究で提案する手法を用いる場合、常に 100% の領

域でトラッキングを可能にすることを目指すのではなく、用途に応じて適切な割合にトラッキング可能な領域を制限することにより、環境に貼り付けるラインマーカの数を制限し、ARを用いたシステム自体のメンテナンスコストの低減を図ることも重要である。

5. まとめ

本研究では、環境に貼り付けるラインマーカの総数を増やすことなく、トラッキング可能な領域を広げるために、マルチカメラとジャイロセンサを併用したトラッキング手法を開発し、実験室環境およびプラント内部の部屋を用いて評価実験を行った。その結果、従来のカメラ 1 台だけを用いてトラッキングする場合と比べて約3倍から約17倍の領域でトラッキングが可能になることを確認した。

今回の実験では、実験室内で精度と処理速度を、プラント内部でトラッキングが可能な領域を評価したが、実用化のためには、プラントを模擬した環境において、開発したトラッキング手法を用いて実際に作業支援を行い、有効性の評価や問題点の抽出を行う必要がある。また、本研究では、プラント内部で使用するトラッキング手法の開発に注目したが、実際にプラント内部で拡張現実感を利用するためには、ユーザ(作業員)の作業を阻害しないハードウェアも必要であり、それらの開発も今後の課題である。

参考文献

- [1] A. Drøivoldsmo et. al., "Using wearable equipment for an augmented presentation of radiation", EPRI Wireless Conference, 2002, pp.19-21.
- [2] R. Azuma et. al., "Recent Advances in Augmented Reality". IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, 2001, pp.34-47.
- [3] 関山友輝ら, "プラント保守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", 保全学会第2回学術講演会, 2005, pp.123-126.
- [4] B. Thomas et. al., "A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation", Proc. of 2nd Int. Symp. on Wearable Computers, 1998, pp.166-167.
- [5] J. Newman et. al., "Augmented Reality in a Wide Area Sentient Environment", Proc. of ISAR2001, pp.77-86.
- [6] A. State et. al., "Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking", Proc. of SIGGRAPH 96, pp.429-438.
- [7] E. Foxlin, "Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter", Proc. of VRAIS '96, pp.185-194.
- [8] 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, 1999, pp.85-94.
- [9] A. Comport et. al., "A Real-Time Tracker for Markerless Augmented Reality", Proc. of ISMAR2003, pp.36-45.
- [10] 加藤博一, "拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No. 652, 2002, pp.79-86.
- [11] 出口光一郎, "センシング／認識シリーズ 第5巻 画像と空間 コンピュータビジョンの幾何学", 昭晃堂, 1997, pp.128-142.
- [12] K. Satoh et. al., "Robust vision-based registration utilizing bird's-eye view with user's view", Proc. Of 2nd IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 03), 2003, pp. 46-55.

(平成 18 年 7 月 21 日)