

# 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	泉 正憲	Masanori IZUMI	
日本原子力研究開発機構	兼平 宜紀	Yoshiki KANEHIRA	
日本原子力研究開発機構	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 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 から CBM 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。

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 次元的位置を、より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

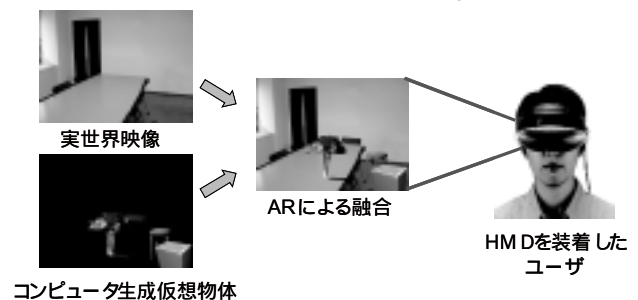


Fig. 1 Example of Augmented Reality.

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、電話: 0774-38-4403、e-mail: hirotake@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

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[2]。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 が 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、実際の発電プラント内部にラインマーカを貼付し、貼付したマーカの総数と、トラッキングできる領域の関係を実験により調べた。

## 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[3,4]、交流磁界センサを用いた磁気センサ法[5]、ジャイロセンサや加速度センサを用いた自律センサ法[6]、模様付きマーカとカメラを用いた人工マーカ法[7]、周囲環境の特徴をマーカとする自然特徴点法[8]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、プラント内部での使用に特化したマーカを考案し、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[9]。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。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く、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[2]。

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 ビットで誤りを訂正する)。トラッキングを実行する際には、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[10]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。

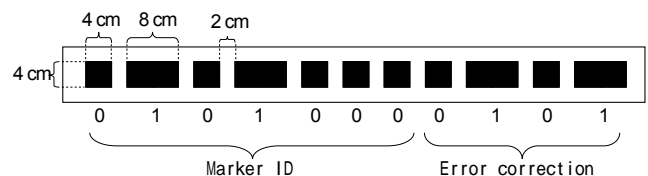


Fig. 2 Example of line marker.

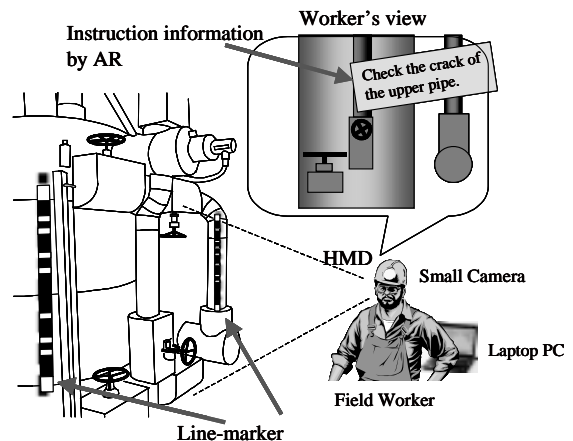


Fig. 3 Concept image of line marker tracking.

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 [2]。しかし、ラインマーカはその性質上、1つのマーカから3個以上の特徴点を抽出することが難しい。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、4個以上の特徴点がカメラに同時に写る必要がある。そのため、ラインマーカを使用する場合は、2個以上のマーカが同時にカメラに写らない場合は、トラッキングを実行できず、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マーカを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貼付する必要があるマーカの総数を低減させる試みを行った。

### 3．必要なマーカの総数を低減させる試み

#### 3.1 マルチカメラを用いたトラッキング

環境内に貼付する必要があるマーカの総数を低減させるには、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 台を角度(約 40°)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た。

この方法では、特殊なカメラやレンズを用いる必要がなく、視野が広いながらも歪みの少ない画像を得ることができるが、1台のカメラだけを用いた従来のトラッキングアルゴリズム(マーカの3次元位置とカメラに写ったマーカの位置からマーカとカメラの相対的な位置と姿勢を求めるアルゴリズム)は、そのままでは利用できない。そこで本研究では、マーカは空間的に互いに平行になるよう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マーカの映像を仮想的な1台のカメラの映像に変換し、その後、既存のトラッキングアルゴリズムを用いてトラッキングする手法を開発した。なお、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、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。

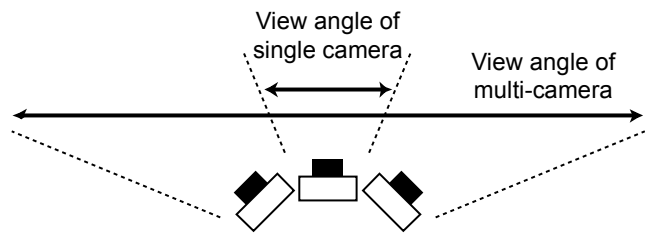


Fig. 4 Concept image of multi-camera unit.

#### 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を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、比較的小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 InertiaCube3 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 InertiaCube3 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検出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 InertiaCube3 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(InertiaCube3 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。

Table1 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、垂直面内での角度)、(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

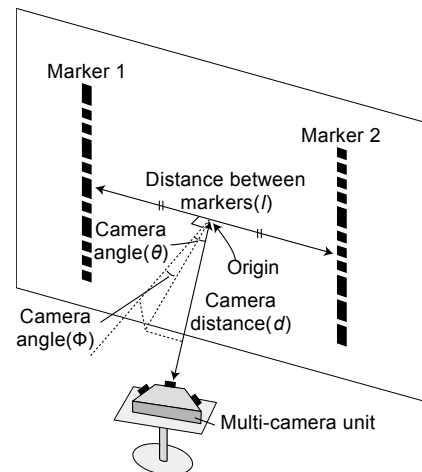


Fig. 5 Variable definitions of the experimental setup.

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するため困難である。そこで今回は、 $m=2$  個、 $c=2$  台、 $=0^\circ$  と固定した条件において、その他のパラメータを、 $l=0.5, 1.0\text{m}$ 、 $d=2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{m}$ 、 $=0, 15, 30, 45, 60^\circ$  に変化させた場合(実験 1)と、 $c=2$  台、 $l=1.0\text{m}$ 、 $=0^\circ$ 、 $=0^\circ$  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。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。

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ってい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。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。
2.  $=0^\circ$  付近では精度が悪い。これは四角形マーカを用いたトラッキングと同様である[9]。

Table 1 Hardware spec. of the experimental system

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



Fig.6 Marker layout for the experiment 2.

	使用するマーカ
配置A	Marker1, 2のみ
配置B	Marker1,2,3のみ
配置C	Marker1,2,4のみ
配置D	Marker1,2,3,4

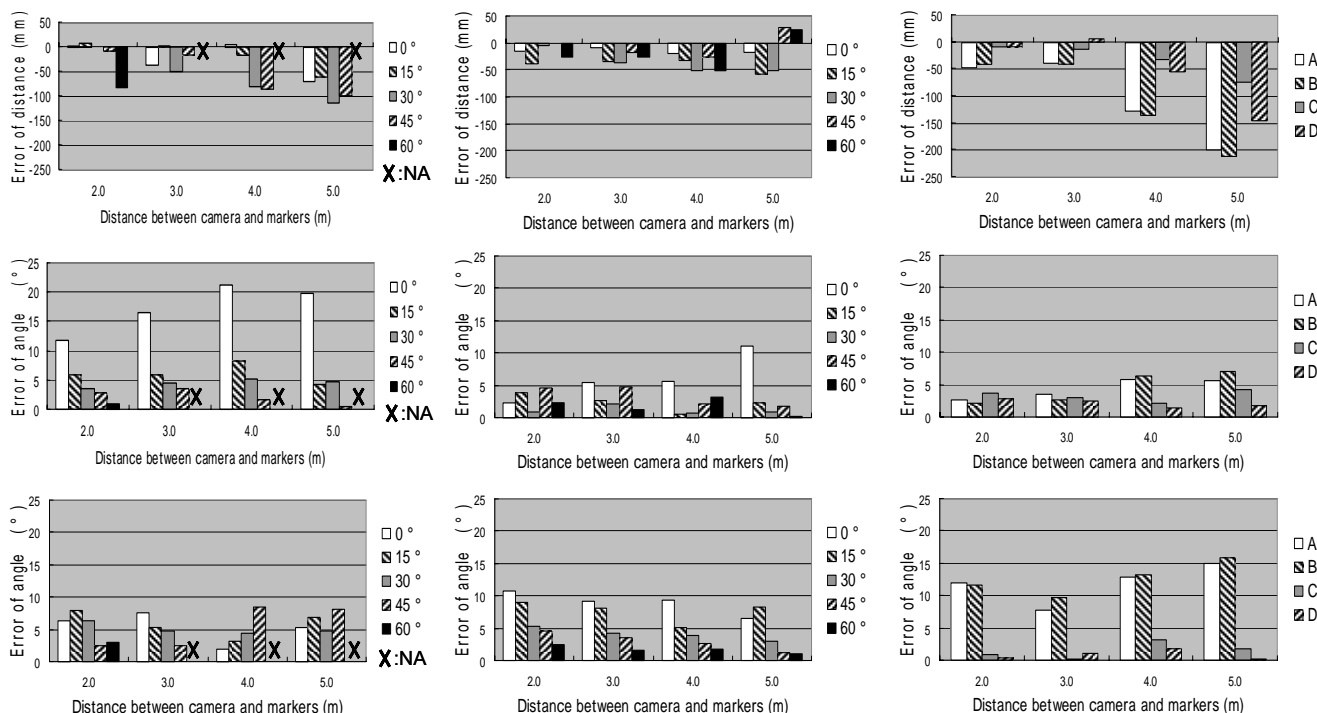


Fig.7 Result of experiment1 ( $l=0.5m$ ).

Fig.8 Result of experiment1 ( $l=1.0m$ ).

Fig.9 Result of experiment2.

3.  $l$  が大きいほど精度が良くなる。
  4.  $l$  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、例え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考えられる。

## 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発電プラント内の一室を利用して、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関係を実験により評価した。

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。

その結果、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、通常動作時よりもフレームレートは低く、平均で約 5fps であった。Fig.11 および Fig.12 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



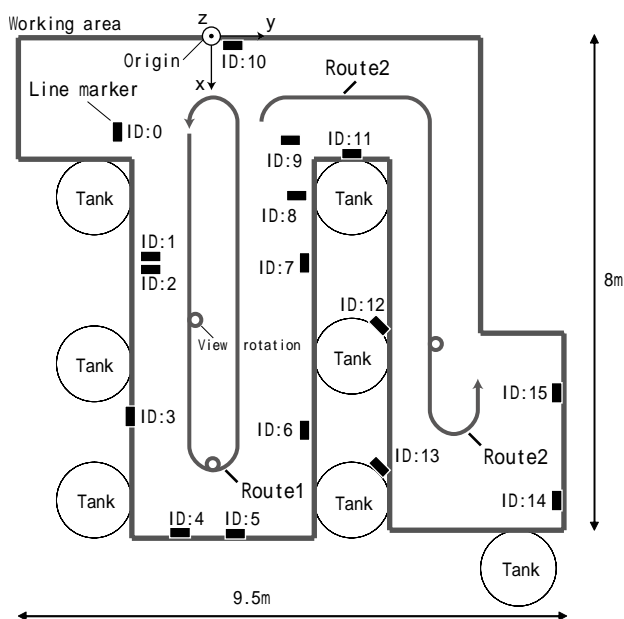


Fig. 10 Layout of experimental room.

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。

Fig.11 および Fig.12 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。

## 5. まとめ

本研究では、ラインマーカを用いたトラッキングを利用する際に環境に貼付する必要があるマーカの総数を低減させるために、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。

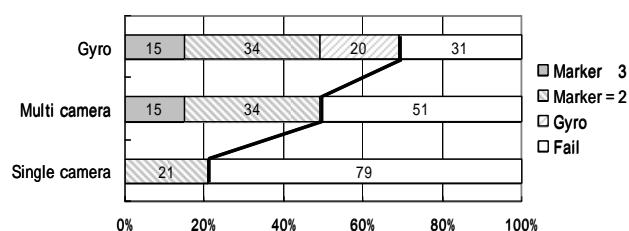


Fig. 11 Percentage of frames where the tracking is available. (Route1).

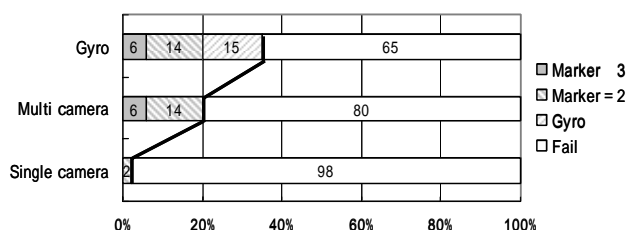


Fig. 12 Percentage of frames where the tracking is available. (Route2).

## 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] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Newman et. al., "Augmented Reality in a Wide Area Sentient Environment", Proc. of ISAR2001, pp.77-86.
- [5] A. State et. al., "Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking", Proc. of SIGGRAPH 96, pp.429-438.
- [6] E. Foxlin, "Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter", Proc. of VRAIS '96, pp.185-194.
- [7] 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.
- [8] A. Comport et. al., "A Real-Time Tracker for Markerless Augmented Reality", Proc. of ISMAR2003, pp.36-45.
- [9] 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.
- [10] 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.