

# 携帯端末による TV 画面の位置と姿勢の推定方法

川喜田裕之<sup>†1†2</sup> 中川俊夫<sup>†1</sup> 佐藤誠<sup>†2</sup>

我々は、テレビの映像を画面外に拡張するサービス“Augmented TV”の研究を行っており、これまでに TV 映像に AR (Augmented Reality) の技術を適用したシステムを提案してきた。提案システムでは、携帯端末のカメラを通してテレビを見ることで、携帯端末のカメラから取り込んだ画像に 3DCG アニメーションをオーバーレイ表示することにより、テレビ画面内のキャラクターがテレビ画面の外に飛び出してくるように見える演出が可能である。このような演出を実現するためには、携帯端末で TV 画面の位置と姿勢を常時高精度に推定することが必要であり、我々はこれまでにカメラとジャイロセンサーをハイブリッドに用いる推定方法を提案してきた。今回、方式の詳細について議論するとともに、市販のタブレット等に実装して処理速度の評価を行い、方式の実用性を確認したので報告する。

## Estimation of TV Screen Position and Rotation Using Mobile Device

HIROYUKI KAWAKITA<sup>†1†2</sup> TOSHIO NAKAGAWA<sup>†1</sup>  
MAKOTO SATO<sup>†2</sup>

We have studied on a new TV service, named "augmented TV", which is able to augment representation of TV programs beyond the TV screen. We have proposed a system in which animated 3DCG content interlocked with TV programs is overlaid on live video from the mobile device camera in the mobile device screen by augmented reality techniques. In the system, the representation of having a TV character coming out of the screen can be provided. To achieve such a representation, it is needed always accurately to estimate position and rotation of the TV in the mobile device. We have proposed an estimation method using the camera and the gyro sensor. This paper shows the details of our method and that it is effective by experiments using the demo content.

### 1. はじめに

約 60 年前に TV 放送が開始されてからこれまでにカラー化、高精細化、ワイド (アスペクト比 16:9) 化、2 眼式の立体テレビ化等が進められてきた。これらの映像技術の進歩における主な目的の一つはあたかも目の前にカメラで捕らえた空間が広がっているかのような感覚としての「臨場感」の向上である。我々は、さらに一步広げて、画面内のカメラで捉えた世界が画面手前のリアルな世界と繋がっているかのように見せることをゴールとする“Augmented TV”を提唱してきた[1-3]。このゴールに対して我々は、一般の視聴者が Augmented TV のサービスを利用できるようにコンシューマデバイスを用いて構成を試みるアプローチを採用している。コンシューマデバイスは、近年センサー類の搭載など顕著に多機能化しており、そうした既存の機能を活用することで Augmented TV の可能性を探求する。

我々は、Augmented TV の一形態として、TV 映像に対して AR (Augmented Reality: 拡張現実感) の技術 ([4]など) を適用することにより、映像を画面外に拡張するシステムを提案している (図 1)。提案システムでは、TV 画面をスマートフォンやタブレットなどの携帯端末 (以下、携帯端末) に内蔵されたカメラで映して見ることで、カメラで取り込んだ TV 映像に対して 3DCG アニメーションを重

ね合わせることで TV 画面内のキャラクターなどが画面外に飛び出してくるといった演出が可能である。このような視聴者が予想できないような状況を演出することにより、驚きやキャラクターの实在感を伴うコンテンツを放送と通信が連携したマスメディアサービスとして提供することが期待できる。

提案システムでは、図 1 のように TV 画面に表示される映像は放送コンテンツで、3DCG アニメーションは通信経由で予め携帯端末にダウンロードしてあることを想定している。キャラクターの实在感を実現するためには、キャラクターが画面の内と外を違和感なく出入りしているように見せる 3DCG 描画の時刻や位置が重要となる。携帯端末において、カメラで取り込んだ TV 映像と 3DCG アニメーションとの時刻同期や TV 画面の位置 (併進成分)・姿勢 (回転成分) を正しく推定する必要がある。

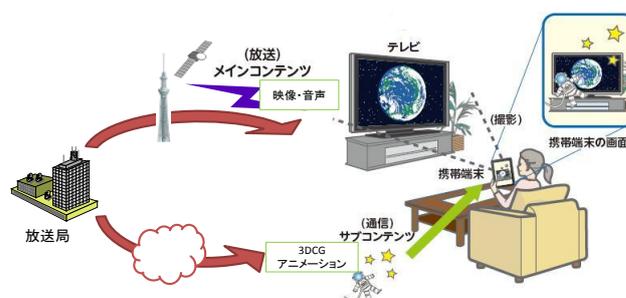


図 1 Augmented TV のサービスモデル  
Figure 1 Service model of augmented TV

†1 NHK 放送技術研究所  
NHK Science & Technology Research Laboratories  
†2 東京工業大学  
Tokyo Institute of Technology



(a) マーカー式 (b) 白黒「枠」式

図 2 TV 画面を検出するための手がかり

Figure 2 Cue to detect TV screen

Augmented TV と同様のサービスを想定した研究の一つに、時刻を同期するために電子透かしを用いた研究[5]があるが、キャラクターが違和感なく出入りするように見えるほど同期精度が十分とは言えない。我々は、出入りのスムーズさを重要視し、より高精度に時刻同期する方式[1]を開発するとともに、カメラとジャイロセンサーを用いた TV 画面の位置・姿勢の推定方式[2,3]などを開発してきた。今回は、これまでの研究成果を踏まえ、位置・姿勢の推定方式について新しいアルゴリズムも加えて詳細に議論することでカメラとジャイロセンサーをハイブリッドに用いることの有効性を明らかにし、実験等により検証する。

## 2. TV 画面の位置・姿勢の推定方式の要求条件

### 2.1 従来方式の制約

我々は、文献[2]においては、TV 画面の位置・姿勢を推定するために、Augmented TV の視聴環境に制約を設けていた。TV 画面を検出するための手がかりとするために TV 画面の四隅に常にマーカーを表示し、携帯端末のカメラで常にマーカーを捉えて、マーカーの位置と向きを画像処理により検出して推定する方式[4]であった（図 2(a)）。したがって、携帯端末のカメラで TV 画面を捕らえていない場合は推定することができない。

この制約は、TV 画面のすぐ近辺でしか演出に使用できないことを意味している。例えば TV 画面から出てきたキャラクターが自由に部屋の中を大きく飛び回るといった演出は困難である。また、視聴者が常に携帯端末のカメラで TV 画面を捕らえ続けなければいけないという条件を負担に感じる可能性もある。そこでこの制約を解消し、携帯端末のカメラで TV 画面を捉えていない場合であっても TV 画面の位置・姿勢を推定できる方式が望まれる。

また、TV 画面にマーカーを常に表示するというのも演出上の大きな制約である。文献[1]では実用的なマーカーのサイズについては議論したが、マーカーのデザインパターンの演出に対する影響については触れていない。マーカーは、その位置を一意に特定するという目的から固有のデザインパターンであるがゆえに、演出意図に反して目立ってしまう可能性がある。TV 画面の検出の手がかりは、演出を阻害しない程度のシンプルなデザインが望ましい。

### 2.2 要求条件

推定方式は 2.1 節で述べた制約を低減するだけでなく、今後の技術開発の進展を想定した有用性の高い方式とすることが望ましい。近年、携帯端末に搭載されるカメラも“2K”から“4K”（水平画素数の概数を示す）へと高精細化してきており、フレームレートも 30fps から 60fps へと高速化が図られている。提案システムでは携帯端末を手で把持して動かすため、速い動きにも対応するには高フレームレートが望ましい。その一方で、AR 分野などでは“ウェアラブル機器”といった小型で軽量ゆえに従来の PC などと比べて計算資源が乏しい機器が用いられることも多い。以上から、高精細化・高フレームレートの映像に対して計算資源に乏しい機器でも対応できる処理方式が望まれている。

提案システムでは、携帯端末においてカメラ取込み画像のごとフレームに対して 3DCG のレンダリングを行うため、フレームレートに合わせてリアルタイムに推定処理を行う必要がある。

また、マスメディアサービスとしての実用性を考慮すると、デバイスだけでなく照明やインテリア等の視聴環境の多様性も考慮に入れる必要がある。今回、TV 画面や携帯端末に対して機能や構成を変更せずにコンシューマデバイスをそのまま用いることを前提とする。

2.1 節、2.2 節をまとめて、推定方式の要求条件を次のように定義する。

- カメラが TV 画面を捕らえていない時も推定が可能であること
- TV に表示する TV 画面の検出の手がかりは演出を阻害しないほどシンプルなデザインであること
- 計算資源の乏しい携帯端末でもリアルタイムに処理ができるように処理負荷が小さいこと
- TV 画面以外の環境には影響を受けにくいこと

## 3. 提案する推定方式

### 3.1 アプローチ

携帯端末のカメラで一度認識した TV 画面がフレームアウトした場合に、TV 画面の位置・姿勢を推定するためには、携帯端末に搭載されたセンサーにより自身の位置・姿勢を推定して求める方法と、画像処理によって TV 画面以外の家具や壁の外見の特徴量を抽出して推定する方法[6]がある。前章で述べた通り、今回は TV 画面以外の環境には影響を受けない方式を目指し、カメラが画面を捉えていない場合は前者の方法によりジャイロセンサーによって推定する方式を考案した。

ジャイロセンサーは、近年多くの携帯端末に搭載されてきたが、携帯端末の角速度を計るセンサーであり、この値を積算すれば積算開始からの携帯端末の姿勢が分かる。Augmented TV では主に座りながら携帯端末を動かして見ることが想定されるが、その場合などに携帯端末を回転さ

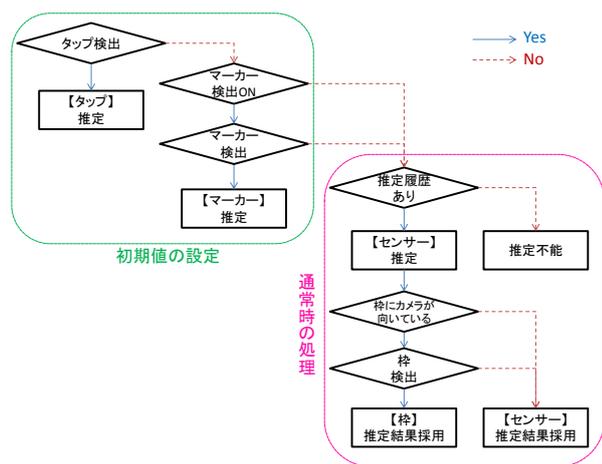


図 3 全体フロー

Figure 3 Flow chart of the estimation

表 1 推定方法

Table 1 Estimation method

【タップ】	タップした位置から上下左右に探索を開始する【枠】推定
【マーカ】	マーカ検出による推定(従来方式)
【センサー】	直近の推定結果にジャイロセンサーの回転量を反映させた推定(3.5節)
【枠】	枠を画像処理により探索する推定(3.6節)

せて利用する限りはジャイロセンサーを用いて TV 画面の位置と姿勢を推定できる。ただし、角速度を積算することから、ジャイロセンサーのみを利用した場合は推定結果に測定誤差や計算誤差が蓄積するため、時々キャリブレーションを行わないと次第に推定が誤ってしまう。そこで、推定方式としては、ジャイロセンサーによる推定結果をベースにしつつも、TV 画面をカメラで捕らえた場合には画像処理による推定を優先する方式を考案した。

さらに、ジャイロセンサーによる推定でおおまかな位置が分かるため、画像処理による TV 画面の探索範囲を限定することができる。その結果、TV 画面の検出の手がかりとして従来のマーカ方式(図 2(a))のような目立つものにする必要がなくなり、シンプルなデザインにすることが可能である。今回、TV 画面に図 2(b)に示すような白黒の枠(以下、枠)を表示させて認識することとした。2色用いることで、白と黒の境界線を認識すれば、表示する映像や TV のベゼル(外枠)のデザインや材質に依存しない枠線を確認することができる。

### 3.2 「推定」の幾何学的な意味

提案するアルゴリズムを説明する前に「TV 画面の位置・姿勢を推定すること」の幾何学的な意味について述べる。TV 画面の位置は、TV 画面を基準とする 3 次元座標系(以下、TV 座標系)において固定値であり、TV 座標系から携帯端末の画面の 2 次元座標系(以下、スクリーン座標系)に変換する行列を求めることができれば、携帯端末の画面

において TV 画面がどこにあるのかが分かる。この変換は、TV 座標系から携帯端末のカメラを基準とする 3 次元座標系にビュー変換し、さらにスクリーン座標系に射影変換することに相当する。幾何学的には、それぞれの変換を行列で扱い、ビュー変換行列と射影変換行列と定義する。TV 画面と携帯端末の相対的な位置・姿勢関係を示すのはビュー変換行列であり、推定することはこのビュー変換行列を求めることに相当する。

ビュー変換行列を 3 次元座標系とスクリーン座標系との対応関係から求める問題は、Perspective-n-Point (PnP) 問題として知られ、解を特定するためには少なくとも 4 点の対応が必要となる。今回は枠の白黒の境界線で表される矩形の 4 頂点をこの対応点とし、実際にビュー変換行列を求めるために OpenCV[7]の `cv::solvePnp()`関数を用いた。

### 3.3 全体フロー

図 3 と表 1 に、提案する推定方式の全体フローを示す。カメラから入力されるフレームごとにこのフローが実行される。本方式では、ジャイロセンサーによる推定のために必要な TV 画面の初期位置・姿勢を得た後、ジャイロセンサーによる推定を起点としてカメラからの画像を処理して枠を認識する。

### 3.4 初期位置・姿勢の取得

ジャイロセンサーによる推定を行うためには、TV 画面の位置・姿勢の初期値が必要である。初期値を得るために、タップ(携帯端末のタッチパネルを指で軽くたたく動作)による視聴者の能動的な指示による推定と文献[1]と同様のマーカによる自動認識による推定を用意した。

タップによる推定は、初期値の設定だけでなく、ジャイロセンサーの積算値に大きな誤差が蓄積してしまった時などに、画像処理によって枠が認識できない場合に視聴者が明示的に位置・姿勢のキャリブレーションを行う方法としても利用することができる。

マーカによる推定は、放送局などのコンテンツ提供側の意志で表示切り替えができるため、コンテンツ開始時に強制的に初期設定することに利用できる。また、データ放送などを利用して TV リモコンによる操作でマーカの表示の ON/OFF を切り替えれば、タップによる推定と同様に、視聴者によるキャリブレーションに利用できる。

### 3.5 ジャイロセンサーによる推定

ジャイロセンサーによる推定の手順を示す。まず、ジャイロセンサーの値を取得する。ここで、ジャイロセンサーは直交する 3 軸のものを想定しており、独立した各軸回りの角速度が得られる。次に、各値に前回推定時刻からの差分時間に乗じることで、各軸の携帯端末の姿勢の変位角を求める。各変位角に対する回転変換行列を求め、任意の順序で前回の推定結果のビュー変換行列に乗じることで、今回の推定結果としてビュー変換行列を求めることができる。

### 3.6 枠認識

3.5 節で求めたビュー変換行列を用いるとスクリーン座標系において TV 画面の位置を推定することができる。その位置を基点として画像処理により白黒の枠を発見し、枠の頂点を見つける枠認識アルゴリズムについて述べる。

#### 3.6.1 関連研究とアプローチ

枠を認識するためには枠の画像特徴により探索を行うが、ある線分上をヒューリスティックにたどりながら探す方法と、カメラで取り込んだ画像上をくまなく探す方法に大別され、一般的に計算量と認識率とのトレードオフの関係にある。特にその計算量は、1 辺のサイズを  $N$  とすれば、前者は  $O(N)$  であり、後者は  $O(N^2)$  となる。前者の方式の関連研究として、画像の縁を探索するアルゴリズム[5,8-10]がある。文献[8]には、後者の方式に分類されるハフ変換やパターンマッチングに比べて 1/100 以下の処理時間で探索できることが示されている。しかし、これらの関連研究は、すべて電子透かしの検出を目的としているためにカメラフレーム内に対象の画像が収まっていることやカメラフレームの中央に画像が配置されることなどを前提としており、今回のように枠の位置が不定のケースには適用できない。また、文献[8]と[9]は静止画を対象としており、枠を設けない方式である。そのため、文献[9]によれば画像領域の検出成功率はそれぞれ 61%と 93%であり、動画に適用して安定したビュー変換行列を得る程度には、画像と画像以外の区別が十分であるとは言えない。

以上を踏まえ、今回は次の 3 つの点を考慮してヒューリスティックにたどりながら枠を探す方式を採用し、動画を対象とした文献[5,10]と同様に、枠を設ける方式とした。

- 計算資源の乏しい携帯端末でも処理時間が短いこと
- ジャイロセンサーにより探索範囲を限定できること
- TV 画面に枠を表示することにより照明などの環境に依存しない検出の手がかりを利用できること

特に今回は高精度に推定するために、カメラで TV 画面を一部分捕らえた場合であっても画像処理による推定を優先する方式を考案した。

#### 3.6.2 枠認識アルゴリズム

図 4 に、画像処理により枠を認識する提案方式の探索経路の例を示す。探索アルゴリズムは以下の通りである。

- (1) スクリーン座標系において、3.3 で得られたビュー変換行列を利用して枠の推定位置 (図では破線) と枠の幅 (白枠と黒枠の合計) の推定値を求める。さらに、推定される枠の各辺の midpoint から携帯端末の画面の中心までの距離を求め、距離が最も短い辺を最初の探索辺とする。
- (2) 探索辺の midpoint を垂直に横切る直線上を、枠外から枠の中心に向けて辺長の長さ分だけたどる。このとき、枠の幅の半分だけ進行方向に離れた画素との輝度値の差を記録し、閾値を超えたものを枠候補として記

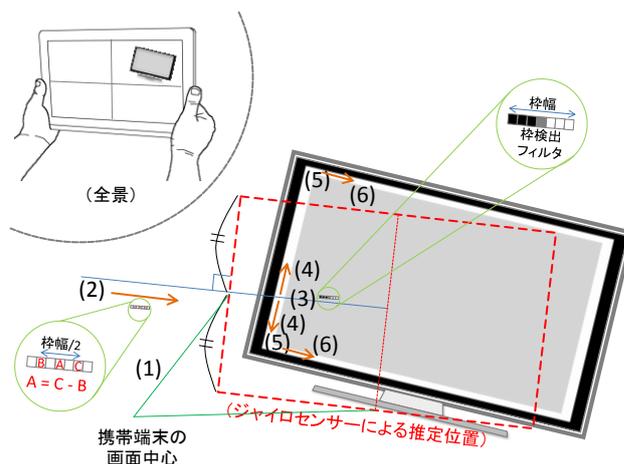


図 4 枠の探索経路

Figure 4 Search path of TV frame

録する。枠候補がなければ(7)へ。

- (3) (2)の候補について、枠の幅のサイズの「枠検出フィルタ」により閾値を超えたものを枠候補として選択する。枠候補がなければ(7)へ。
- (4) (3)の地点から、(3)と同じフィルタを用いて黒白の境界線を両側とも探索する。探索の初めに境界線が伸びている方向を 8 方位のうちから隣接する 2 候補を決定し、その方向にのみ探索を行う。
- (5) (4)の探索が途切れたときに(3)の地点から一定長 (枠の幅の定数倍) にわたって探索ができていれば辺として有効とする。その地点から直角に、(4)と同様に次の辺が想定される向きに探索を行う。
- (6) 片側の探索ごとに、探索が途切れるか、3 つの辺を探索した時点で探索を終了する。(3)の地点以外の辺と辺の接続点を頂点とする。2 頂点以上検出できていれば終了し (頂点数が 2 や 3 の場合の推定方法は 3.5.3 項で述べる)、そうでなければ(4)に戻り、次の枠候補にての探索を行う。次の枠候補がなければ(7)へ。
- (7) (1)で次に距離が短い辺を探索辺として(2)へ。探索辺がなければ枠認識できないことを出力して終了する。

#### 3.6.3 TV 画面の一部分を捕らえた場合の推定

3.5.2 項のアルゴリズムでは探索で 4 頂点検出できれば TV 画面の位置・姿勢が推定できるが、カメラが枠の一部分を捕らえたことにより検出した頂点数が 2 や 3 の場合であっても、捕らえた部分的な枠を活かした推定を行う方式を考える。今回は、図 5 のように頂点検出数で分類し、3 頂点あるいは隣接する 2 頂点を検出した場合の推定方法を検討した。

##### 3.6.3.1. 3 頂点を検出した場合の推定

3 頂点のみを検出した場合は、単純にスクリーン座標系において、3.5.2 項のアルゴリズムでの探索が途切れた 2 つの線分を延長し、それらの交点を残りの頂点位置とする (図

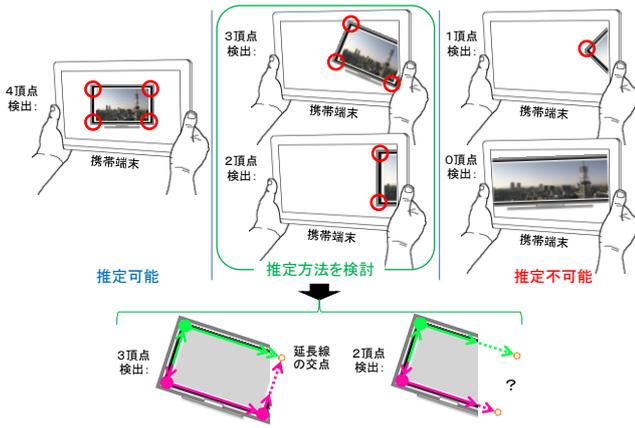


図 5 枠を部分的に捕らえた場合の分類

Figure 5 Classification of captures of TV frame

5の左下)。以降は4頂点検出と同様な推定が可能である。

### 3.6.3.2. 2頂点を検出した場合の推定

隣接する2頂点のみを検出した場合は、3頂点の場合のように画像処理のみによる方法で残りの頂点位置を推定することは原理的に不可能である。そこで、検出した2頂点の位置を活用してジャイロセンサーの推定結果を補正する方法を検討した。

ジャイロセンサーのみによる推定を続けているとその結果には、次の誤差が発生する。

- A) 携帯端末は回転させるだけで併進運動を伴わない場合に、ジャイロセンサーによる推定の過程で累積していく携帯端末の姿勢の誤差
- B) 携帯端末が併進運動を伴う場合に、運動した分の位置の誤差と運動によりTV画面との方位関係が変化する分の姿勢の誤差

上記Aの誤差を補正するためには、最終的な推定結果がカメラで捕らえた部分的な枠に合うように、携帯端末の姿勢推定を補正することで対応が可能である。

図6に、スクリーン座標系における提案する補正方法を示す。まず、視聴者が座っているなど、位置を動かさなく携帯端末を回転させるケースを想定し、誤差Aに対する

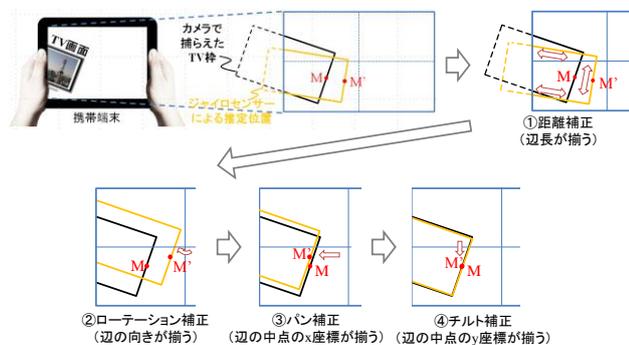


図 6 2頂点検出時の補正

Figure 6 Rotation correction at detection of 2 vertices

表 2 機器の仕様などの実験環境

Table 2 Specification and parameters of implementation

項目	値	
OS	Windows8	
CPU	Intel Core i3 1.8GHz (2コア)	
システムメモリ	4 GB	
イメージセンサ解像度	1920 x 1080 px	
カメラ解像度設定	640 x 480 px	
カメラフレームレート	30 fps	
カメラ水平画角	50.4度 (外付レンズ有)	
ジャイロセンサー	3軸	
外形	295 x 191 x 11 mm	
重量	955 g	
有効画面	886 x 498 mm (40型)	
TV	白黒の枠幅	上下辺 白:13 mm 黒:12 mm 左右辺 白:18 mm 黒:28 mm
	TV-タブレット間距離	約130 cm
コンパイラ	Visual C++ 2012	

補正について説明する。上記のように、携帯端末の姿勢を補正するために、カメラが捕らえた部分的な枠のうち、2頂点間の辺の向きと中点(M)位置を合わせるように、携帯端末の姿勢推定を②ローテーション、③パン、④チルトの順で補正する。実際には、補正の角度を算出して回転行列を作り、②～④の順にビュー変換行列に乗じる。これにより、Aの誤差については正確に補正することができる。

続いて、Bの誤差については正確に推定を行うのは不可能であるが、運動方向を限定し、Aの補正との関係性も考慮しながら推定結果がカメラで捕らえた部分的な枠に合うように併進成分をある程度補正することが可能である。

Bの誤差を補正が必要となりそうな場面を想定すると、2頂点のみの検出を連続的に継続しながら併進運動を行うことになる。そのような動きは、例えばカメラでTV画面の左辺を捕らえながら、その場所に表示された3DCGをもっと良く見るために前後に移動するか、または別の角度から見するためにTV画面を中心として左右に回り込んで見るように移動するケースが想定される。前者の場合は、TV画面と携帯端末が離れている場合はTV画面と携帯端末を結んだ方向の移動と近似できる。図6では、カメラが捕らえた2頂点の辺長に合うように、Aの誤差の補正の前にTV画面と携帯端末間の①距離補正を行う。実際には、辺長の比率をもとにビュー変換行列の併進成分を定数倍する。なお、AとBの誤差の補正により、2つの頂点の座標は一致する。また、後者の場合は、自ずと携帯端末の姿勢を回転させることになり、Aの補正により回り込んだ見え方になり、また距離もBの補正により近い値になるため前述の想定したケースに補正される。

## 4. 実装評価

提案する推定方式を検証するために、市販のTVとタブレットを用いて実装評価を行った。表2に、評価に用いた機器の仕様などの実験環境を示す。

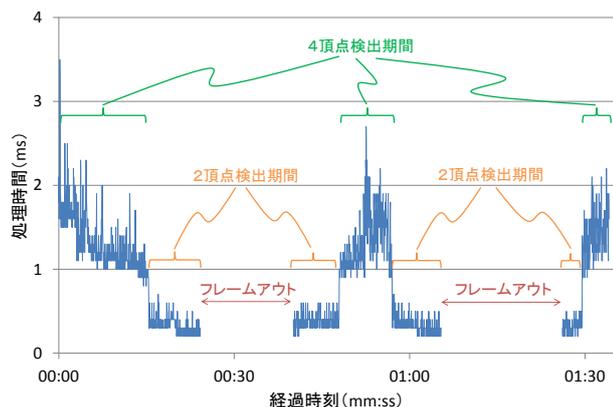


図 7 枠認識の処理時間

Figure 7 Processing time of the frame recognition

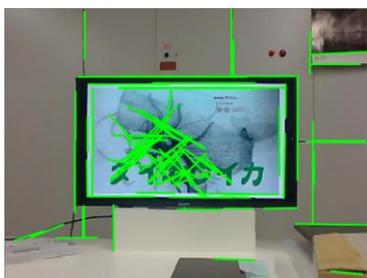


図 8 ハフ変換の実行結果例

Figure 8 Example of the results of Hough transformation

#### 4.1 処理時間

3.6 節で示した枠認識アルゴリズムは、その計算量が推定全体の処理に対して支配的であるので、各フレームにおけるその処理時間を計測した。図 7 に、タブレットを左右に回転させた時の処理時間の推移例のグラフを示す。実際の利用環境を想定し、CG のレンダリングを含めて Augmented TV を実現するすべての機能を実行した上で枠認識処理の前後でシステム時刻を出力し、その差分を処理時間として測定した。そのため、今回の処理時間とは当該処理の CPU 使用時間の上限に相当する。また、処理時間が計測単位である 1ms 前後と短かったため、より正確に計測するために対象処理を 10 回ループさせて後処理で 1 回当たりの平均処理時間を求めた。

提案方式の枠認識の優位性を検証するために、比較実験として、同様の実験環境において直線検出手法であるハフ変換 (OpenCV の `cv::HoughLinesP()`) を行った。図 8 に、処理結果を示す。ハフ変換の処理時間は、前処理であるエッジ抽出 (OpenCV の `cv::Canny()`) の 6.8ms を含めると 30.2ms (10 回の平均値) であった。ハフ変換の処理時間は対象画像やパラメータにも依存するが、枠の線分をすべて検出するためには同程度の時間が必要である。また、ハフ変換の場合はこの後に検出された線分を評価して枠を認識する処理が必要であり、さらに処理時間がかかる。

表 2 に示したように今回の環境はフレームレートが

30fps であるため、1 フレームの画像処理は 33ms 以下に抑える必要がある。提案するアルゴリズムは 1~2ms 程度とまったく問題ない値であり、ハフ変換と比べてもより実用的であることが分かった。

#### 4.2 枠認識

数分間の試作コンテンツを用いていくつかの視聴環境にて枠認識のテストを行ったところ、ほとんど途切れることなく正しい頂点が検出されることを確認できた。特に 2 頂点検出できている場合は、ジャイロセンサーのみで推定を行うよりも少なくとも 2 頂点間の辺付近は高精度に位置・姿勢が推定できた。ただし、まれに TV 画面以外の照明等あるいは TV 画面内の映像におけるコントラストの強い部分を枠として誤認識することがあった。この問題については、5.2 節にて考察し、改善を図る。

また、実装を通じてジャイロセンサーのみによる推定は、強く振った場合に特にその回転方向に誤差が蓄積されるという特徴が見られた。そこで今回、携帯端末を小刻みに強く振ることにより意図的にジャイロセンサーに誤差を与えて、枠認識の可否を調べる実験を行った。その結果、ジャイロセンサーのみによる推定においては大きく推定位置が外れてしまい、再び TV 画面をフレームインさせても枠を再認識しない場合があったが、画像処理による頂点検出数が 2~4 である場合には、いくら強く振っても枠を認識できなくなることはなかった。

### 5. 考察

#### 5.1 処理時間

提案する枠認識アルゴリズムが高精細かつ高フレームレートのカメラ映像において利用可能であるか検証するために、処理時間の理論値を算出する。3.5.1 項で述べたとおり、今回のアルゴリズムは計算量が  $O(N)$  となるように構成されており、画素数が“2K”、“4K”の映像では、640x480px を使用した今回の実験からそれぞれ 3 倍、6 倍の処理時間がかかるものと考えられる。今回の実験では概ね 2ms 以下で処理が完了していたため、それぞれの処理時間は 6ms、12ms となる。これらの値は 60fps の映像のフレーム間の 16ms 以下に抑えられていることから、実験で使用した端末は高精細・高フレームレートの映像に対しても利用できるのではないかと考えられる。

#### 5.2 枠の誤認識

4.2 節で述べた通り、枠認識はほとんどの場合において問題なく動作することが確かめられたが、まれに枠を誤検出してしまう問題があった。この問題を詳しく調べると、今回 3 頂点検出時の補完等の部分的な枠認識を採用したことが一因であることが分かった。この問題に対する改善を行うために、枠を誤検出した場合にそれまでとはビュー変換行列が大きく変化することに着目し、以下の工夫により対処した。文献[10]では、スクリーン座標系において「矩

形の形状を表す四辺の長さの比」と「矩形の大きさを表す周囲長」の連続性を評価することでそれまでの「矩形」と同一か判定を試みている。今回扱うケースでは、カメラから TV 画面を部分的に扱ったりフレームイン/アウトする時における連続性も問われているため、スクリーン座標系での判定を設けるのが難しい。そこで、TV と携帯端末間の距離に注目し、前フレーム推定時の距離と今回推定時の距離との比率の範囲を限定すること（例えば 0.5~2.0）により枠認識の成否を判定することとした。この判定により、枠の誤検出は低減され、大きな改善が見られた。

また、4.2 節で述べたジャイロセンサーのみによる推定が続いた場合に大きな誤差が蓄積し、再び枠を認識できなくなる問題について簡単に考察する。この問題は、特にタブレットを強く振ったときに起きたことから、加速度センサーを用いて対処ができることを示唆している。例えば、重力加速度以外の加速度を各軸ごとに積算し、その値によってジャイロセンサーのみによる推定の信頼度を回転軸ごとに算出する。この信頼度に基づき枠の探索範囲を決定するといった対策が考えられる。

ジャイロセンサーのみによる推定時において誤差が蓄積する問題や併進運動に伴う推定ズレについては、コンテンツ制作時の工夫により対処する方法がある。例えば、画面から大きく外れた場所を演出上の注視点とするような場合には携帯端末をゆっくり動かしてもらうように演出することで、誤差の蓄積を軽減することができる。また、演出上高精度に推定すべき場面においては、視聴者に携帯端末のカメラを TV 画面に向けてもらうように促し、枠認識により推定のキャリブレーションを行う。また、その時点で枠認識できない場合は TV 画面が映っている領域のタップを促すことによりキャリブレーションに繋げることもできる。



図 9 NHK サイエンススタジアムの様子  
Figure 9 State of "NHK Science Stadium"

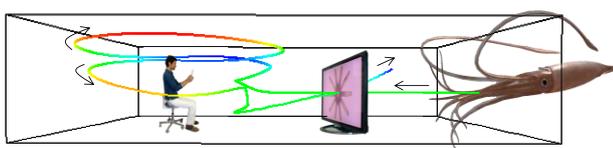


図 10 デモに用いたコンテンツのイメージ  
Figure 10 Schematic diagram of the demo content

## 6. 体験デモ展示

提案する方式が一般の視聴者にとって実際のコンテンツを用いた場合にも十分な精度であるかを検証する必要がある。そこで、一般の視聴者の主観的な評価を収集することも兼ねて、科学系イベントである「NHK サイエンススタジアム」[9]にて 2 日間にわたり体験デモ展示を行った(図 7)。コンテンツのメインパートでは、図 10 のように、テレビからダイオウイカが飛び出し、体験者の周りを 1 周 16 秒間かけて 2 周回り、TV 画面の前で一旦静止し、5 秒間ほどかけて TV 画面へ突入する姿勢になり、再び TV 画面の中に入って行く。この間、体験者にはダイオウイカが泳ぐ姿を観察しやすいようにキャスターを固定した回転椅子に座ってもらった。来場者は親子連れが多く、子供が体験している様子を後ろから親が見ているというケースが大半であり、両日でおおよそ 150 組の方が体験した。また、デモの環境は表 2 と同様である。

体験デモの結果、ダイオウイカが 2 周して戻ってきた時に TV 画面にカメラを向けていれば、ほとんどの場合において TV 画面を再認識することができた。これは今回のコンテンツでは、ジャイロセンサーによる推定誤差が、提案するアルゴリズムで TV 画面を再認識できなくなるほど蓄積せず、TV 画面にダイオウイカが突入する前に TV 画面を再補足できたことを示している。また、デモの反応は、子供はダイオウイカが飛び出してくる様に驚いて目を見開いたり、終わってから「すごい！」と感動を表現する方が大半であった。このことから、ほとんどの体験者にとっては、ダイオウイカの遊泳や TV 画面の出入りに関して、その技術的な精度に満足していたと考えられる。体験デモを通じて、提案する方式が驚きや実在感を与えることに成功したことを示している。

## 7. おわりに

Augmented TV において、携帯端末のカメラとジャイロセンサーを用いて TV 画面の位置・姿勢を高速に推定する方式を開発した。推定はジャイロセンサーをベースとするが、カメラで TV 画面の一部分を捕らえた場合でも画像処理による認識を活かし、高精度に推定することができる。また、実装評価により処理速度を評価し処理負荷の軽い方式であることを示すとともに、体験デモにより主観的な評価を通じて演出面においても実用的な方式であることを示した。今後は TV 画面の一部分を捕らえた場合における定量的な推定精度の評価を行う。

Augmented TV は、TV 画面の「枠」を文字通り越えて視聴者に驚きや実在感を伴うコンテンツを提供する新しいメディアである。将来的に TV 画面は、単に人が直接視聴するためのものに留まらず、ウェアラブル機器なども含めた携帯端末を介することで、豊かな表現のための「アイコン」となるように研究・開発を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 川喜田, 中川, 佐藤: Augmented TV: 携帯端末内蔵カメラを用いて TV の映像を画面外へ拡張するシステム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19, No.3, pp.319-328 (2014)
- 2) 川喜田, 中川, 佐藤: カメラとジャイロセンサーを用いた TV 画面の位置と姿勢の推定方法, 2014 年映情学年次大, 13-1 (2014)
- 3) 川喜田, 中川, 佐藤: カメラで一部分を捕えた TV 画面の位置と姿勢の推定方法, 2014 年映情学冬季大, 4-12 (2014)
- 4) 加藤: 拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発, 信学技報, Vol.101, No.652, pp.79-86 (2002)
- 5) 山本, 安藤, 筒口, 片山, 谷口: モバイル動画透かし技術で実現する映像同期型 AR: Visual SyncAR, 第 41 回画像電子学会年次大会, R6-2 (2013)
- 6) G. Klein and D. Murray: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.1-10 (2007)
- 7) OpenCV ver2.4.10  
<http://opencv.jp>
- 8) 片山, 中村, 山室, 曾根原: 電子透かし読取りのための i アプリ高速コーナ検出アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J88, No.6, pp.1035-1046 (2005)
- 9) 北原, 片山, 中村: 辺と隅の幾何学的特徴を用いた高速矩形領域抽出手法, FIT2005, J-027 (2005)
- 10) 北原, 中村, 片山, 安野: 携帯端末上における幾何補正のためのリアルタイム矩形追跡手法, 信学技報, Vol.106, No.351, pp.1-6 (2006)
- 11) NHK サイエンススタジアム  
<http://www.nhk-p.co.jp/event/detail.php?id=423>