

ホモグラフィに着目した画像特徴点に基づく
位置・姿勢のマーカレス計測に関する研究

水地良明

2016年9月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	画像に基づく対象物との位置・姿勢の計測	2
1.1.2	本研究の位置付けと方針	3
1.2	本論文の構成	6
第 2 章	単眼カメラによる手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測	8
2.1	背景	8
2.2	関連研究	10
2.3	表示オブジェクトの付加的操作を可能とするパームトップ AR インタ フェース	11
2.3.1	手領域の抽出	13
2.3.2	手の特徴点検出	13
2.3.3	手の特徴点の計測	15
2.3.4	特徴点に基づく手のひらの位置・姿勢推定	17
2.3.5	手のシルエットの正規化	18
2.4	指の間隔の変化を含む状況下における本インタフェースの評価	20

2.4.1	オブジェクトの描画における本インタフェースの精度評価 . . .	20
2.4.2	本インタフェースの処理時間の評価	24
2.5	本インタフェースを用いた応用実験	25
2.5.1	指の動きを利用した表示オブジェクトの切り替え	25
2.5.2	指の動きを利用したパラメータの変更	30
2.6	本章のまとめ	34
第 3 章	船位保持のためのカメラとランドマークを用いた位置・姿勢の計測	35
3.1	背景	36
3.2	計測システムの概要	38
3.3	カメラとランドマーク間の距離と方向の計測	39
3.4	位置・姿勢の計測	42
3.5	計測誤差の補正	43
3.5.1	距離誤差の補正	43
3.5.2	カメラユニットの設置誤差の補正	45
3.6	本システムの性能評価	46
3.6.1	本システムの計測精度の評価	46
3.6.2	本システムの処理時間の評価	50
3.7	水上における本システムの有用性の評価	51
3.8	本章のまとめ	57
第 4 章	相対船位保持のための画像に基づく位置・姿勢のマーカレス計測	58
4.1	背景	59
4.2	マーカレス計測におけるシステムの構成	61

4.3	指定点の追跡	62
4.4	距離の計測	64
4.5	本システムの性能評価	66
4.5.1	計測精度の評価	66
4.5.2	処理時間の評価	70
4.6	本章のまとめ	72
第 5 章	結論	73
	謝辞	76
	参考文献	78
	著者文献及び発表目録	84

目次

1.1	Estimation methods for the position and orientation of an object: (a) model-based estimation, and (b) triangulation-based estimation.	2
2.1	Procedure of the proposed AR interface.	11
2.2	Hand segmentation procedure. (a) a captured RGB image, (b) the probability image of skin-color for the captured image, (c) the extracted hand region, and (d) the hand region excluding low brightness region.	12
2.3	Overview of feature-points detection.	14
2.4	Distances for concave-points detection.	16
2.5	Calibration of feature-points. (a) an input image with detected feature-points and a pasted AR marker, and (b) an obtained hand- model.	16
2.6	Normalization of a hand silhouette. (a) captured hand images, (b) projected their silhouettes, and (c) normalized hand silhouettes. .	19

2.7	Qualitative comparison between displayed objects based on the postures of the AR marker and the palm. (a) captured images, (b) displayed objects based on the posture of the AR marker, and (c) displayed objects based on the posture of the palm.	21
2.8	Computation procedure of projection error based on the AR marker and the palm: (a) estimated coordinate systems, (b) projected points based on the postures of the AR marker and the palm, and (c) enlarged image that combined the shadowed square regions in (b).	22
2.9	RMS errors of the projected points based on the AR marker and the palm.	23
2.10	Template images to identify hand shape.	25
2.11	Displayed objects corresponding to each template image in Fig 2.10.	26
2.12	Results of the experiment using an example application for switching displayed objects.	28
2.13	Results of the experiment using an example application for changing the transparency of a displayed object	32
3.1	Configuration of the camera-unit and the landmark.	39
3.2	Parameters for calculating the angle when measuring the distance.	40
3.3	Geometry for measuring the distance.	41
3.4	Geometry for measuring the position and heading.	42
3.5	Simulated distance errors, given the error ϵ_R of the angle φ_R in a case where $L_C = 300$ mm and $f = 16$ mm.	44

3.6	Geometry for the correction of the camera-unit directions.	45
3.7	Conditions for accuracy evaluation of position measurement: (a) without translation of x and rotation, (b) with 2.0 m translation of x , (c) with 2.0 m translation of x and 20° rotation, and (d) with both 2.0 m translation of x and 20° rotation.	48
3.8	Results of the position measurement.	49
3.9	Condition of the experiment on a towing tank.	51
3.10	Angular velocities of the model vessel in condition without waves: (a) angular velocity of roll motion, and (b) angular velocity of pitch motion.	52
3.11	Angular velocities of the model vessel in condition with 2 cm waves: (a) angular velocity of roll motion, and (b) angular velocity of pitch motion.	53
3.12	Measured position and heading in the condition without waves: (a) displacement of x position, (b) displacement of y position, and (c) displacement of heading.	55
3.13	Measured position and heading in the condition with waves: (a) displacement of x position, (b) displacement of y position, and (c) displacement of heading.	56
4.1	Configuration of the proposed measurement system.	61
4.2	Estimation of displacement between two image frames.	63

4.3	Calculation of the direction angle to the designated point: (a) projected position of the designated point in an input image, and (b) geometry for calculating the angle between optical axis and the designated point.	64
4.4	Illustration of distance measurement based on the homography between two measurement cameras: (a) angle calculation between the optical axis and center point of another camera image, and (b) distance calculation between the designated point and the camera unit.	65
4.5	Experimental conditions in water.	67
4.6	Measured x positions of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.	68
4.7	Measured y positions of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.	68
4.8	Measured headings θ of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.	69

表目次

2.1	Average processing time	24
2.2	Recognition rate of each hand shape	29
2.3	Recognition rate of each hand shape	33
3.1	Configuration parameters of the prototype measurement system for the evaluation of measurement accuracy	47
3.2	Maximum errors in the measurements.	50
3.3	Processing time of the proposed system.	50
3.4	Processing time of the proposed system.	54
4.1	Configuration parameters of the prototype marker-less measure- ment system	67
4.2	Average errors, maximum errors, and standard deviation of the measured positions and headings under the condition without roll motion of the model vessel.	69
4.3	Average errors, maximum errors, and standard deviation of the measured positions and headings under the condition with roll motion of the model vessel.	70

4.4	Processing time of the marker-less measurements.	71
-----	--	----

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

ロボットによる工業部品のピックアップ [1], 現実空間上に仮想情報を重畳表示する拡張現実感 (Augmented Reality : AR) [2] など, 対象との位置・姿勢の実時間計測を要する応用が多岐の分野にわたって展開されている. 計測対象に人工的なマーカや送受信機などのデバイスを付与し, 計測器と計測対象との相対的な位置・姿勢を計測する手法 [2-4] は, 計測精度や頑健性の面で比較的容易に信頼性の高い計測を実現可能である. その一方で, 計測対象に送受信機やマーカを付与することは, 利便性や計測手法の適用範囲を大きく制限する要因ともなりうる. これに対し, 人工マーカ等の付与やインフラの設置が困難な応用場面では, 画像センサを用いたマーカレス計測は有用な方法の一つである.

画像に基づくマーカレス計測では, 事前に用意した三次元モデルと入力画像, もしくは異なる位置で撮影された画像間の共通する特徴を検出し, それらの対応から位置・姿勢を計算する方法が一般的である. 画像特徴点を用いた位置・姿勢の推定は, 照合に多くの繰り返し計算を要する領域やエッジに基づく方法に比べ, 計算コストを低減

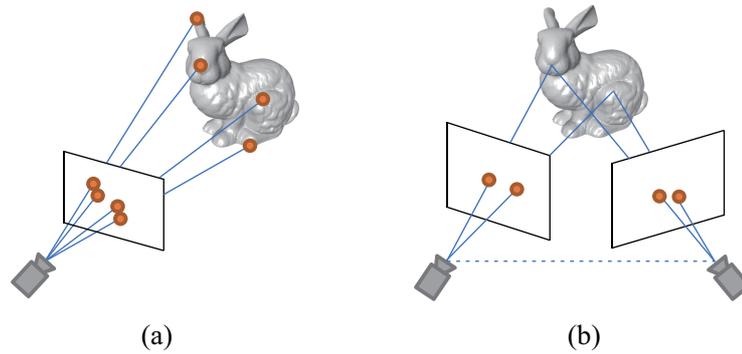


Fig. 1.1 Estimation methods for the position and orientation of an object:
(a) model-based estimation, and (b) triangulation-based estimation.

しやすいため、実時間での計測に適している方法と言える。一方で、解を得るために位置関係の変化しない複数の対応点が必要であるため、誤対応の影響を受けやすいことが特徴として挙げられる。そのため、実用場面においては、対象物が明瞭なテクスチャを持たない場合や形状変化を含む場合、エッジや冗長的な特徴を多く含む場合などには適用が困難となる。

そこで本研究では、これらの影響を低減する方法の一つとして、対象を平面とみなすよう制約を設け、ホモグラフィ（平面射影変換）に着目して対象物との位置・姿勢を推定するアプローチを試みる。

以下では、まず、背景となる画像に基づく位置・姿勢の計測手法とマーカレス計測における課題について述べる。次に、本研究の位置付けと方針について述べる。

1.1.1 画像に基づく対象物との位置・姿勢の計測

画像に基づく位置・姿勢の計測方法は、Fig. 1.1 のような三次元モデルを利用した方法と三角測量に基づく方法の2つに大別できる。三次元モデルを利用した方法では、一般的に、計測対象上の三次元点と画像上の点の n 組の対応から PnP (Perspective-n-Point) 問題を解くことにより位置・姿勢を推定する。この方法は、事前に何らかの

方法により三次元のモデルを獲得する必要があるものの、単眼での推定が可能である。三角測量に基づく方法では、位置関係が既知である異なる視点で撮影した画像間における点の対応から計測対象上の複数の三次元点を計測し、位置・姿勢を推定する。この方法は、カメラ間の位置関係を知っておく必要があるものの、対象物の三次元モデルを事前に獲得することが難しい場面においても適用が可能である。対象物との位置・姿勢の計測は、画像から得られる特徴点の対応に基づき、上記のいずれかの方法により対象上の複数の三次元点の位置を推定することで実現される。

一方で、特徴点に基づくマーカレス計測における課題として、明瞭な形状やテクスチャを持たない対象に対して正しい対応点の検出や選択が困難であることが挙げられる。また、冗長的な特徴を多く含む対象との計測も、多数の誤対応により正しい計測の実現が困難となる。

1.1.2 本研究の位置付けと方針

前述した課題の影響を軽減する方法として、本研究ではホモグラフィに着目して位置・姿勢を計測するアプローチを試みる。ホモグラフィは、ある平面を別の平面に写像する射影変換を表す。ある平面上の点 $(x, y, 1)^T$ と異なる平面上の点 $(x', y', 1)^T$ はホモグラフィ行列 \mathbf{H} を用いて、次式のように表すことができる。

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

ここで、 s はスケールを表す係数である。ホモグラフィ行列は8自由度であるため、同一平面上の4点以上の対応から推定が可能であり、幾何学的な拘束条件により数値解

析的に解を安定させやすい特徴がある。そのため、対象を平面とみなせる場合もしくは平面とみなせるような制約を設けることが可能な場合においては、ホモグラフィに着目することで、より少数の特徴点に基づく推定や三次元モデルの獲得が容易となること、外れ値処理の効果が得られやすくなることが期待される。これにより、計測対象の形状変化やテクスチャの乏しさ、多数の誤対応などを原因として従来困難となっていた位置・姿勢のマーカレス計測の実現が期待される。

そこで、本研究では、対象を平面とみなすよう制約を設け、ホモグラフィに着目して対象との位置・姿勢を推定するアプローチを提案する。また、従来困難であった位置・姿勢のマーカレス計測への応用から、対象を平面とみなし、ホモグラフィ着目する本アプローチの有用性を示すことを目的とする。そのため、本研究では、三次元モデルに基づく単眼カメラによる位置・姿勢計測とステレオカメラを用いた三角測量に基づく位置・姿勢計測について、それぞれ、特に計測が困難であると考えられる対象への応用を検討する。また、中でも膨大な計算コストを要する逐次的な処理による課題解決が困難な実時間での計測を必要とする応用に言及する。ホモグラフィに基づく位置・姿勢の推定は、マーカを利用した位置・姿勢計測 [2] などでは一般的に利用されているアプローチであるが、厳密には平面ではない対象物に対しても近似的に平面とみなすよう抽象化して捉えることで、従来困難であった位置・姿勢計測を実現可能であることを示すことに本研究の意義があると考えられる。

まず、課題の一つである明瞭な形状やテクスチャを持たない対象との計測に関する応用として、単眼カメラを用いて形状変化を伴う手のひらの位置・姿勢をマーカレス計測について述べる。三次元形状に基づく単眼カメラを用いた計測では、形状変化によって位置関係が変化しない特徴点を選択するなどの工夫が必要となる。しかしながら、テクスチャの少なさや位置関係の変化しない特徴点を選択することにより、十分

な対応点が確保できず，位置・姿勢計測が困難になる課題が生じる．そのため，明瞭なテクスチャを持たず，形状変化を伴う人間の手の計測は，三次元モデルに基づく単眼カメラを利用した位置・姿勢のマーカレス計測が難しい例の一つと言える．シルエットやエッジに基づいて逐次的に手の形状と位置・姿勢を推定する方法 [5,6] も提案されているが，計算コストが膨大であるため，実時間での計測に応用することは難しい．また，単眼カメラを用いた位置・姿勢の計測では計測対象の三次元モデルが必要となるため，利用者毎に異なる手の三次元モデルを簡便に獲得する方法の実現も課題となる．そこで，手の形状変化に関わる指の動作を平面的に限定することで，形状変化を伴う手のひらの三次元モデルの獲得および位置・姿勢のマーカレス計測を実現する．これにより，処理能力の乏しいウェアラブルデバイスを利用した AR における，仮想情報とのインタラクションを実現するためのインタフェースとしての応用を可能とする．

次に，冗長的な特徴が多く含まれる構造物を対象とする応用として，相対船位保持のための船舶の位置・姿勢のマーカレス計測について述べる．船舶のような大型対象の位置・姿勢の計測を局所領域のみから高精度に計測することは難しいため，複数の観測点を設け，各観測点に対応する計測器間の基線長を十分に確保することが望ましい．また，移動する船体の位置・姿勢を得るためには，各計測器を用いて計測対象となる計測点を常に追従しながら，計測点との距離と方向を計測する必要がある．このような計測点の追従や距離・方向の計測を実現するためには，複数のカメラから得られる画像間の対応点を検出し，視差を得る必要がある．しかしながら，埠頭や浮体プラットフォーム，船舶など，実環境で想定される対象は冗長的な特徴を多く含むため，多数の特徴の誤対応により，船位保持に要求される精度で距離・方向の計測を実現するための視差を得ることは難しい．そのため，冗長的な特徴を多く含むこれらの対象の計測は，三角測量に基づく位置・姿勢のマーカレス計測が難しい例の一つと言える．そこ

で、提案システムでは、計測対象を平面的に捉え、画像間のホモグラフィから視差を推定することにより、任意に指定した計測点の追従と、平行等位ステレオの原理に基づく距離・方向の算出を可能とする。これにより、マーカレスでの船位計測を実現する。

本論文では、上記2つの応用とそれらの評価実験の結果から、ホモグラフィに着目した画像特徴点に基づく位置・姿勢のマーカレス計測の応用における有用性について明らかにする。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。1章では、本研究の背景および、その目的と意義について述べた。まず、2章では、手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測手法について述べる。同章では、位置・姿勢の推定に利用する特徴点となる指の凹部および中指先の検出方法、オフライン処理にて実行する三次元モデルの計測の方法、特徴点の対応に基づく手のひらの位置・姿勢の推定方法について順に述べる。さらに、従来から利用されているARマーカとの定性的、定量的な比較により、提案手法の指の曲げや開閉に対する頑健性に関する評価を行う。次に、船舶の位置・姿勢を計測するシステムについて述べる。本研究で提案するマーカレス計測システムは、複数のカメラと電動雲台で構成されたカメラユニットを利用しており、その物理的な構成も計測の実現における重要な要素となっている。そこで、3章では、提案するマーカレス計測に先駆けて、先行研究として取り組んだ、カメラユニットとランドマークを用いた船舶の位置・姿勢計測について述べる。同章では、計測システムの構成および計測の原理、計測誤差を補正する手法について述べる。さらに、プロトタイプシステムを用いた実験により、高い計測周期と計測精度を要する船舶の位置・姿勢計測における提案システムの有用性を示す。4章では、先行研究で構築したシステムを応用した船舶の位置・

姿勢のマーカレス計測について述べる。同章では、まず、提案するマーカレス計測の概要と位置・姿勢計測の計測手法について述べる。さらに、モデル船とプロトタイプシステムを用いた実験により、提案システムを用いたマーカレス計測の計測精度と実環境で想定される船体の揺れに対する頑健性を評価する。最後に、5章にて本研究を総括する。

第2章

単眼カメラによる手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測

明瞭なテクスチャを持たず、形状変化を伴う人間の手は、特徴点に基づく位置・姿勢のマーカレス計測が難しい対象の一つである。本章では、手のひら平面のホモグラフィに着目したウェアラブルデバイスを用いた拡張現実感（AR）におけるインタフェースへの応用を目的とした手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測について述べる。

2.1 背景

ハードウェア技術の発展に伴い、Google Glass [7] や MoverioBT-200 [8] に代表される小型軽量な計算機とカメラ、シースルー型ヘッドマウントディスプレイを組み合わせたウェアラブルデバイスが現実のものとなっている。これらのウェアラブルデバ

イスに関する研究として、仮想情報を実空間に重畳表示する拡張現実感 (AR) 技術を用いて、歩行者に対する注釈情報の提示 [9] やメンテナンス作業の支援 [10] を実現する研究が報告されている。さらに、AR による注釈情報等の重畳表示のみにとどまらず、AR マーカを取り付けたグローブをユーザインタフェースとして利用することで、表示された仮想情報との三次元的なインタラクションを可能とする方法も提案されている [11,12].

従来、ウェアラブルデバイスにおける AR 技術に基づく仮想情報とのインタラクションを実現する方法として、カードボード状の AR マーカの位置・姿勢を単眼カメラの画像から推定する方法 [2,3] が利用されてきた。この方法は単眼カメラを入力に利用し、計算コストの低い推定を実現しているため、センサや演算装置、電源に大きな制約のあるウェアラブルデバイスでの利用に適している。AR マーカは、環境や実物体に貼付することで容易にタンジブルな AR を実現することができる利点がある。しかしながら、ユーザインタフェースとして利用する場合には持ち運びや装着が必要となるため、ウェアラブルデバイスの利便性を低下させてしまう課題がある。

そこで、上記課題の解決方法の一つとして、マーカレスで推定した手のひら平面上に仮想オブジェクトを重畳表示する AR インタフェースを実現する。本インタフェースでは、仮想情報の重畳表示のみならず、指の動きに伴う手形状の変化を利用して重畳表示した仮想情報の切替操作を実現する。一方で、処理能力の乏しいウェアラブルデバイス上で形状変化を伴う手全体の形状を推定し、その位置・姿勢をリアルタイムに計測することは難しい。そこで、手の形状変化に関わる指の動作を平面的に限定することで、単眼カメラによる形状変化を伴う手のひらの位置・姿勢のマーカレスな実時間計測を実現する。また、重畳表示に必要となる手のひら平面の位置・姿勢を推定するために、指の間隔の変化に影響されない手の特徴点を利用する。これにより可能

となる五本の指の動きによって生じる手のシルエットの違いを推定することで、表示オブジェクトへの付加的操作を実現する。

2.2 関連研究

マーカを用いずに手のひらの位置・姿勢を推定する方法の一つに、Lee らが提案している HandyAR [13] が挙げられる。HandyAR では、入力画像から色情報に基づいて得られた手領域輪郭から曲率の高い点を抽出し、それらを楕円近似することで、各指の指先 5 点を検出している。また、チェスボード状の平面パターンを用いて指先位置を事前に計測することで、手のモデルを得ている。この手のモデルの指先位置と入力画像から得られる指先位置の対応に基づいて、モデルの指先位置を画像平面に投影する尤もらしいホモグラフィを計算することにより、手のひらとカメラの相対的な位置・姿勢を推定している。類似手法として、肌色抽出により得られた手領域とその包含矩形を用いて検出した指先位置に基づいて手のひらの位置・姿勢を推定する方法 [14] も提案されている。しかしながら、これら推定手法ではモデルの指先の位置関係と入力画像中の指先の位置関係が一致していることが前提となる。つまり、入力画像中の手の形状がモデルを取得したときと異なり、指先同士の位置関係が一致しない場合には、正しい位置・姿勢を推定することができない。

加藤らは、ホモグラフィの計算に揃えた指の間の線分を利用することで手のひらの位置・姿勢の推定を実現している [15]。この手法では、エッジ検出と Hough 変換によって得られた線分に対し、長さ、色、平行性、近傍色の均一性に閾値を設定することで指の境界線を抽出している。それら境界線の端点を接続して得られた 4 本の線分から、最小二乗法によりホモグラフィを推定している。この方法では、線分を利用することで、視野の狭いスマートフォンで懸念される指先のフレームアウトを考慮した手

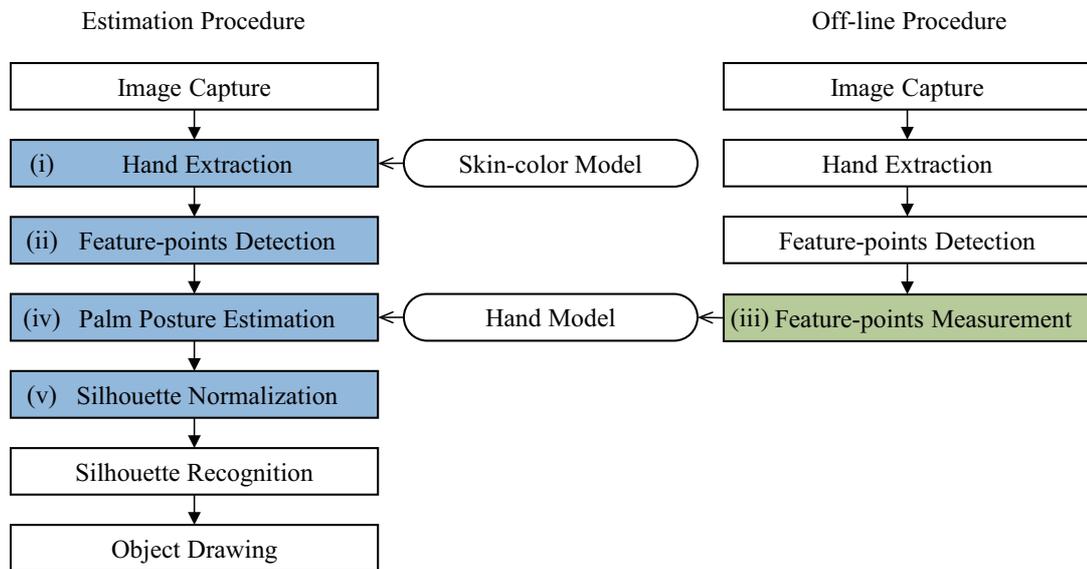


Fig. 2.1 Procedure of the proposed AR interface.

のひらの位置・姿勢推定を実現している。一方で、線分を検出するためには指を揃えていることが前提となるため、前述の指先位置を利用した方法と同様に、指同士の間隔を変化させた手から手のひらの位置・姿勢を推定することは難しい。そのため、提案手法で実現しようとしているような、指の動きを利用した表示オブジェクトへの付加的操作を従来手法により実現することは難しい。

2.3 表示オブジェクトの付加的操作を可能とするパーム

トップ AR インタフェース

Fig. 2.1 に本インタフェースの処理の流れを示す。本インタフェースでは、まず、処理 (i) において入力画像から色情報に基づいて手領域を抽出する。次に、処理 (ii) では、抽出された手領域から得られた輪郭の形状に基づいて特徴点を検出する。また、処理 (iii) では、オフラインでユーザ毎に一度のみ手の特徴点を計測することで、手のモデルを取得する。処理 (iv) では、予め取得された手のモデルと入力画像中の手の特

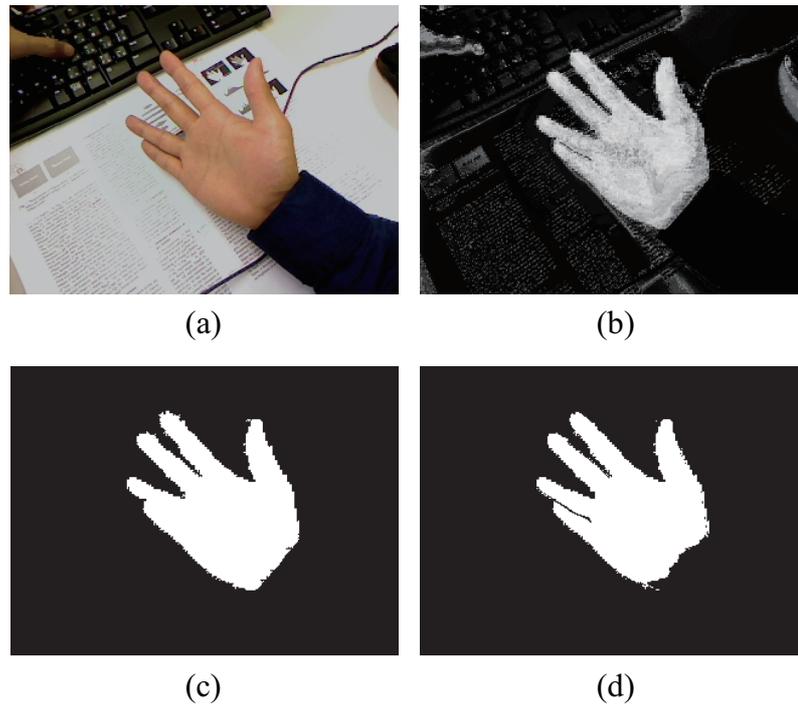


Fig. 2.2 Hand segmentation procedure. (a) a captured RGB image, (b) the probability image of skin-color for the captured image, (c) the extracted hand region, and (d) the hand region excluding low brightness region.

微点の対応を利用することで手のひらの位置・姿勢を推定する。さらに、処理 (v) では、得られた手のひらの位置・姿勢に基づいて手領域を射影変換することで、位置・姿勢に依存しない正規化したシルエットを生成する。これにより、手のひらの位置・姿勢と指の間隔の変化に伴う手のシルエットの形状変化を独立して得ることができる。また、得られた手のシルエットに対して形状判別等の処理を行うことで、手のひらの位置・姿勢に加えて、指の動きを用いた付加的操作が可能となる。以降では、本インタフェースの根幹となる処理 (i)~(v) についてそれぞれ詳述する。

2.3.1 手領域の抽出

本インタフェースでは、手の姿勢やスケールに依存せず手領域を抽出するため、色情報を利用して入力画像から手領域を抽出する。ここでは、表色系変換などによる処理コストの増加を軽減するため、RGB表色系の統計的な肌色モデル [16] を利用した。Fig.2.2 に手領域抽出の処理過程を示す。まず、Fig.2.2(a) の入力画像から Fig.2.2(b) の肌色の確率画像を取得する。次に、得られた確率画像に固定の閾値を設定することで、Fig.2.2(c) に示す手領域を抽出する。このとき、得られた手領域画像では Fig.2.2(c) の小指部分のように隣接する指が接触していることにより、指の境界部分が抽出されない場合がある。そこで、手領域内の相対的に輝度の低い領域を除外することで、Fig.2.2(d) に示すように各指が分離された手領域を抽出する。

2.3.2 手の特徴点検出

得られた手領域から輪郭を抽出し、Fig.2.3 のような手の特徴点 A~E を検出する。本インタフェースでは、指の動きに依存しない隣接する指の間の凹部の4点 A~D に加え、指の間隔を変化させる動作に対して比較的影響を受けにくい中指先の点 E を手の特徴点とした。

まず、手領域内における最大空円の中心を手のひらの中心 (x_c, y_c) として検出する。Fig.2.3 の手領域内の影付き部分のように、一定の角度範囲において、得られた手のひらの中心から最近傍の手領域輪郭画素までの距離を算出していく。このとき、手の向きに依存せず、特徴点を抽出するため、次式を用いて得られる基準角 θ を計算する。

$$\theta = \frac{180}{\pi} \operatorname{atan2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} (y_i - y_m), \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - x_m) \right) \quad (2.1)$$

ここで、 N は手領域輪郭の画素数、 x_i, y_i は各手領域輪郭画素の座標値、 x_m, y_m は

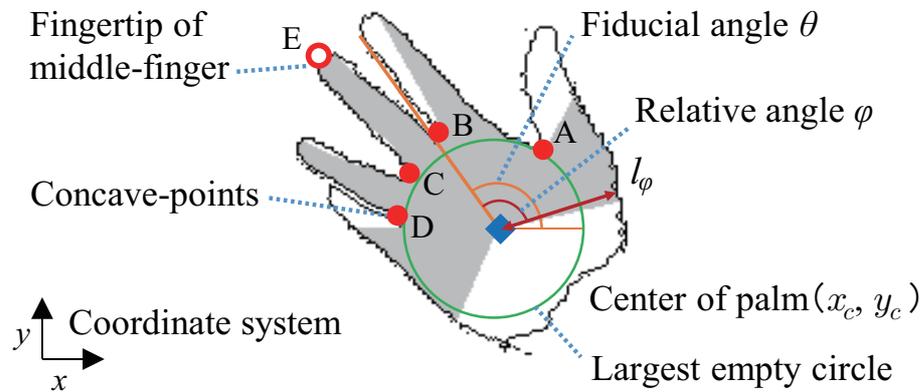


Fig. 2.3 Overview of feature-points detection.

手領域輪郭画素の重心位置を表している．続いて，得られた基準角 θ からの相対角度 φ を次式により得る．

$$\varphi = \text{atan2}(y_i - y_m, x_i - x_m) - \theta \quad (2.2)$$

ただし，相対角度 φ は小数点以下を切り捨て，整数値としている．この相対角度 φ が -110° から $+110^\circ$ となる範囲において，角度ごとの手の中心から最近傍の輪郭点までのユークリッド距離 l_φ を次式により計算する．

$$l_\varphi = \min \left(l_\varphi, \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2} \right) \quad (2.3)$$

ここでは， $l_\varphi = \infty$ を初期値としている．

Fig.2.4 の実線が得られた 1° ごとの距離 l_φ をグラフ化したものである．ここで，横軸は基準角 θ に対する相対角度 φ ，縦軸は手の中心から輪郭点までのユークリッド距離である．この得られた距離 l_φ から特徴点 A~D を検出する．得られた距離 l_φ は局所的に微小な変化を含むため，指の凹部を直接検出することが難しい．そのため，Fig. 2.4 の点線 l_φ^s のように，得られた距離 l_φ を平滑化し，特徴点 A~D の相対角度 $\varphi_A \sim \varphi_D$ を推定する．ここでは，移動平均法を用いて次式のように得られた距離 l_φ を

平滑化している.

$$l_{\varphi}^s = \frac{1}{2b+1} \sum_{i=\varphi-b}^{\varphi+b} l_i \quad (2.4)$$

ここで, b は平均を求める範囲を定義するパラメータであり, 本インタフェースでは, 事前の実験から経験的に $b = 5$ に設定した. 平滑化された距離 l_{φ}^s から極小点を検出し, $\varphi = -110^{\circ}$ 側から見て 2 番目から 4 番目の極小点の相対角度を特徴点 B~D の相対角度 $\varphi_B \sim \varphi_D$ とする. 特徴点 A については, Fig. 2.4 の $\varphi = -50^{\circ}$ 付近のように, 特徴点 A から正の方向に距離が滑らかに変化するため, 極小点の位置が安定しない. 一方で, $\varphi = -110^{\circ}$ 側から特徴点 A にかけて親指と人差指間の凹部を境に距離が急激に変化する特徴がある. そこで, 親指と人差指間の凹部よりもわずかに負側に現れる, $\varphi = -110^{\circ}$ から見て最初の極大点を A の暫定的な角度 $\varphi_{A'}$ とする. この角度 $\varphi_{A'}$ を基準に $\varphi_{A'} + 30^{\circ}$ までの範囲において急激に距離が減少した点を探索することで, 親指と人差指間の凹部が存在する相対角度 φ_A を決定する. 得られた相対角度 $\varphi_A \sim \varphi_D$ と, その角度における算出された距離 l_{φ} から特徴点 A~D の位置を決定する. さらに, 特徴点 B, C 間に存在する輪郭画素において, 最も距離の大きい画素を特徴点 E として検出する. これにより, 単純な処理によって指の間隔の変化に影響を受けない特徴点 A~E の 5 点を検出することができる.

2.3.3 手の特徴点の計測

単眼カメラを用いて三次元的な位置・姿勢を推定するためには, 特徴点の位置関係が既知である必要がある. また, 人によって手の形やサイズが異なるため, 利用者ごとに簡便な方法で手の特徴点を計測することが望ましい. そこで, 本インタフェースでは, AR マーカを用いた簡易的な方法により, 特徴点の位置関係を手のモデルとして計測する. この手の特徴点の計測は, 手のひらの位置・姿勢の推定とは別に, オフ

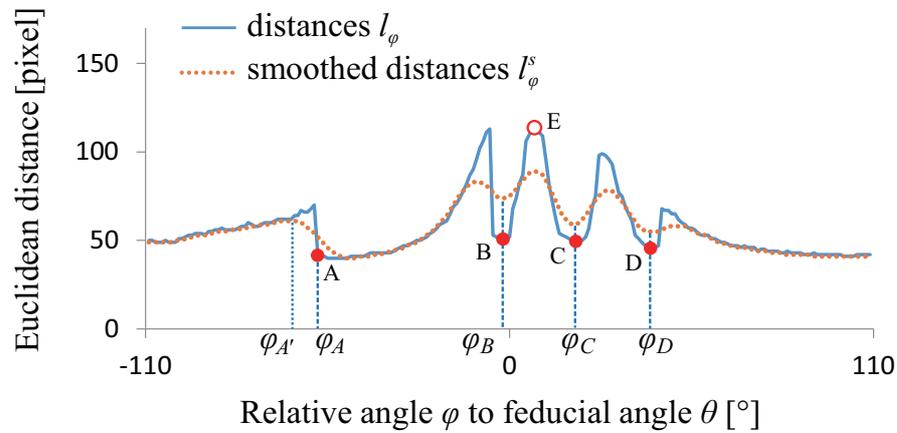


Fig. 2.4 Distances for concave-points detection.

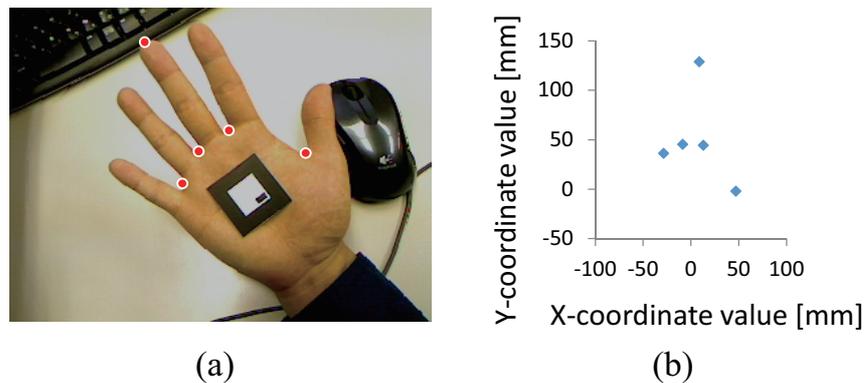


Fig. 2.5 Calibration of feature-points. (a) an input image with detected feature-points and a pasted AR marker, and (b) an obtained hand-model.

ラインで一度のみ実行される処理である。

この処理では、まず、Fig. 2.5(a) のように手のひらの中央にカード上の AR マーカを載せ、手全体が画角内に収まるように画像を取得する。次に、取得された入力画像から、AR マーカの三次元平面を推定する [2]。AR マーカは手のひら平面上に乗せられているため、手の特徴点は AR マーカの三次元平面上に存在するとみなすことができる。これにより、カメラの焦点・手の特徴点間を結ぶ直線とマーカ平面の交点を算出することで、Fig. 2.5(b) のような手の特徴点が計測される。カメラ座標系における画像平面上の特徴点の三次元座標を (p_x, p_y, p_z) 、マーカの原点を (m_x, m_y, m_z) 、マー

カの法線ベクトルを (n_x, n_y, n_z) , マーカ・カメラ間の座標変換行列を \mathbf{W} とすると, 手のひら平面における特徴点の座標 \mathbf{p}_f は次式から得られる.

$$\mathbf{p}_f = \mathbf{W}^{-1} \left(\frac{n_x m_x + n_y m_y + n_z m_z}{n_x p_x + n_y p_y + n_z p_z} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \right) \quad (2.5)$$

5つの特徴点について, それぞれ座標 \mathbf{p}_f を計算することにより, 手のモデルを取得する. また, 計測時のマーカの座標系をそのまま利用することにより, 手のひらの座標系を定義している.

2.3.4 特徴点に基づく手のひらの位置・姿勢推定

手のモデルを用いて入力画像中の特徴点から手のひらの位置・姿勢を推定する. 手の特徴点は手のひら平面上に存在し, 常に $Z = 0$ となるため, 画像中の手のひらの座標系 $[x, y, 1]^T$ とモデルの手のひらの座標系 $[X, Y, Z, 1]^T$ の関係は次のように表現される.

$$\begin{aligned} s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} &= \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで, s は任意のスケール係数, \mathbf{A} はカメラの内部パラメータ行列である. 本インタフェースでは, カメラの内部パラメータはキャリブレーション [17] によって既知になっているものとする. ホモグラフィ行列 \mathbf{H} は自由度が8となるため, 4組以上の対応点から計算することが可能である. 本インタフェースでは, 手のモデルの特徴点と入力画像中の特徴点の5点の対応から Levenberg-Marquardt 法 [18] に基づいて投影

誤差が最小となるホモグラフィ行列 \mathbf{H} を算出している。推定されたホモグラフィ行列を $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3]$ とすると、手のひらの位置 \mathbf{T} および姿勢 $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3]$ は次式から計算される。

$$\mathbf{r}_1 = \mu \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (2.7)$$

$$\mathbf{r}_2 = \mu \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (2.8)$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \quad (2.9)$$

$$\mathbf{T} = \mu \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (2.10)$$

$$\mu = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\| = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\| \quad (2.11)$$

2.3.5 手のシルエットの正規化

指の間隔の変化を推定するため、任意の位置・姿勢で画像に投影された手のシルエットを正規化する。Fig. 2.6(a) のように同じ指の動きであっても手の位置・姿勢に依存して Fig. 2.6(b) のように手のシルエットは変形してしまう。そこで、推定された手のひらの位置・姿勢を用いて任意の三次元平面上に透視投影することで、Fig. 2.6(c) のように手のシルエットを正規化する。ここでは、この任意の三次元平面を正規化平面と呼ぶこととする。

正規化平面上の点、手のひら平面上の点はそれぞれ以下のように画像平面上に投影される。

$$\mathbf{q}_n = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \cong \mathbf{A} \begin{bmatrix} U \\ V \\ d \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{q}_h = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} \cong \mathbf{A} \left(\mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{T} \right) \quad (2.13)$$

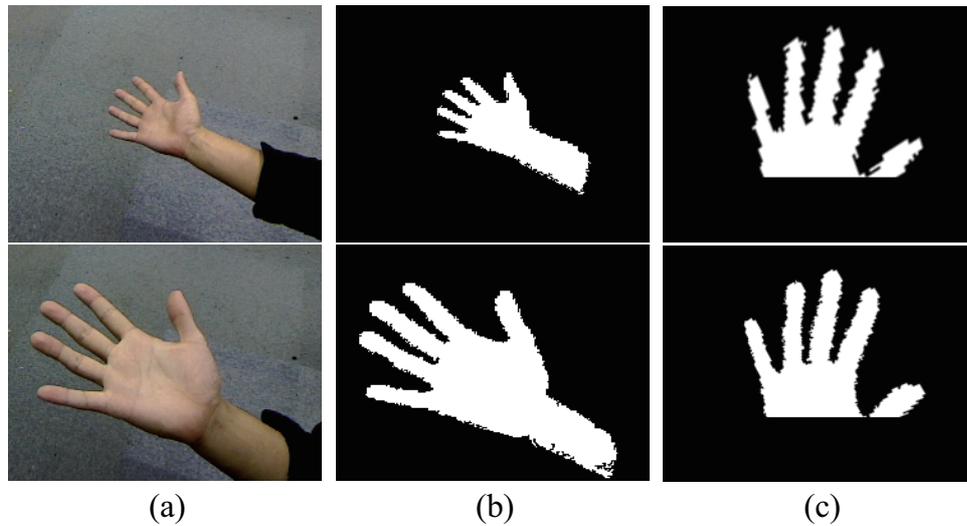


Fig. 2.6 Normalization of a hand silhouette. (a) captured hand images, (b) projected their silhouettes, and (c) normalized hand silhouettes.

ここで、 \cong は低数倍を許して等しいことを表し、 \mathbf{q}_n 、 \mathbf{q}_h は画像平面に投影された正規化平面上の点と手のひら平面上の点をそれぞれ表す。 U 、 V は正規化平面上と手のひら平面上の共通する座標値を持つ任意点の座標である。本インタフェースでは、カメラから一定の距離 d の位置に画像平面と平行する正規化平面を設定し、手のシルエットを正規化する。手のひら平面から正規化平面への透視投影変換は \mathbf{q}_n 、 \mathbf{q}_h を用いて以下のように表現される。

$$\mathbf{q}_n \cong \mathbf{M} \mathbf{q}_h \quad (2.14)$$

この透視投影行列 \mathbf{M} は、8 自由度であるため、4 組の \mathbf{q}_n 、 \mathbf{q}_h の対応から得られる連立方程式を解くことにより、求められる。これにより得られた透視投影行列 \mathbf{M} を用い、手のシルエットを透視投影変換することで、位置・姿勢に依存しない手のシルエットを生成する。

さらに、指の動きに関する領域のみを用いてシルエットの形状変化を推定するため、得られたシルエットにおいて、親指と人差し指間の凹部より手首側の領域を削除

することで、Fig. 2.6(c) のようなシルエット画像を生成する。この正規化された手のシルエットを利用することで、手の位置や姿勢に依存することなく、指の間隔の変化に伴うシルエットの形状変化を識別することが可能となる。

2.4 指の間隔の変化を含む状況下における本インタフェースの評価

2.4.1 オブジェクトの描画における本インタフェースの精度評価

手の位置・姿勢および指の間隔の変化を含む状況下における、本インタフェースによるオブジェクト描画の精度を評価する実験を行った。実験では、まず、手の位置・姿勢および指の間隔の変化を含む手の入力画像列を準備し、提案手法による手のひらの位置・姿勢の推定を行った。次に、手のひらに貼付された AR マーカの位置・姿勢を ARToolKit [2] を利用して推定した。最後に、両手法により推定された位置・姿勢に基づいて三次元オブジェクトを描画し、その見かけの差から、オブジェクトの描画における本インタフェースの精度を評価した。

まず、両手法に基づいて描画されたオブジェクトから定性的な評価を行う。Fig. 2.7 が両手法によって推定された位置・姿勢に基づいて三次元オブジェクトを描画した実験の結果である。Fig. 2.7(a) が実際に実験で使用した入力画像列の一部である。これらの入力画像は、USB カメラ (Webcam C500, Logicoool 社製) を用いて、 320×240 [pixel] の解像度で、 $t = 0.0$ から $t = 30.0$ まで 30 秒間取得されたものである。このとき、手全体が常にカメラの視野内に収まる範囲で、隣接する指の間隔を広げたり、狭めたりしながら、手の位置・姿勢を変化させた。実験は、夜間に屋内環境において蛍光灯の照明条件下で実施した。このとき、カメラに付属のソフトウェアを用いて、蛍光灯の

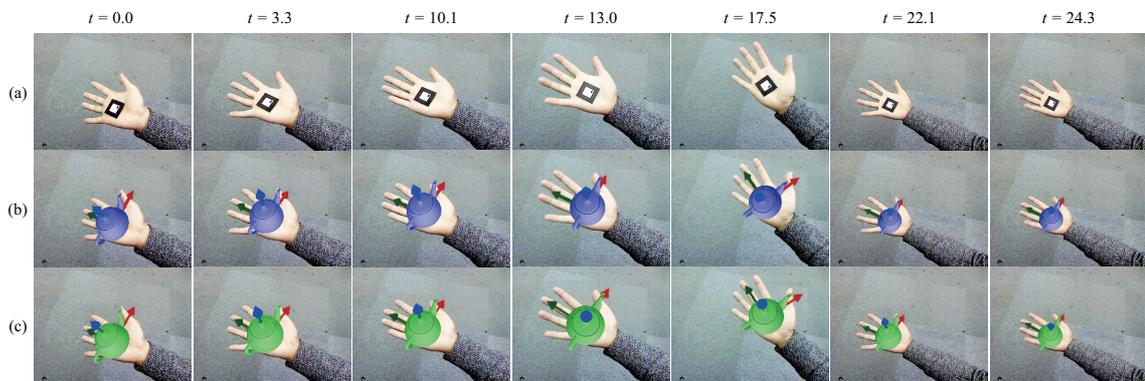


Fig. 2.7 Qualitative comparison between displayed objects based on the postures of the AR marker and the palm. (a) captured images, (b) displayed objects based on the posture of the AR marker, and (c) displayed objects based on the posture of the palm.

フリッカーにより生じる輝度の揺らぎを低減している。人の手のひら上に貼付した一辺 40 mm の AR マーカから推定された位置・姿勢に基づいて、三次元オブジェクトを表示したものが、Fig. 2.7(b) である。同図では、オブジェクトとして位置・姿勢を判別しやすい座標軸とティーポットを描画している。また、本インタフェースにより推定された手のひらの位置・姿勢に基づいて三次元オブジェクトを表示した結果が、Fig. 2.7(c) である。

$t = 0.0$ と $t = 3.3$, $t = 13.0$ と $t = 17.5$ の結果では、ほぼ同じ指の動きを伴う手に対して、手の姿勢のみが変化している。また、 $t = 22.1$ および $t = 24.3$ の結果では、他の結果に比べて比較的カメラから離れた位置に手のひらが位置している。これらの結果では、手の位置および姿勢が変化しているが、いずれの結果においても手のひらに基づいて AR マーカとほぼ同じ位置・姿勢でオブジェクトを描画できている。 $t = 3.3$ と $t = 10.1$ の結果では、手の位置・姿勢はほぼ同じであるが、指の間隔が異なっている。同様に、 $t = 22.1$ と $t = 24.3$ の結果についても、指の間隔が異なっている。これらの結果においても、AR マーカと手のひらに基づいて描画されたオブジェクトの位

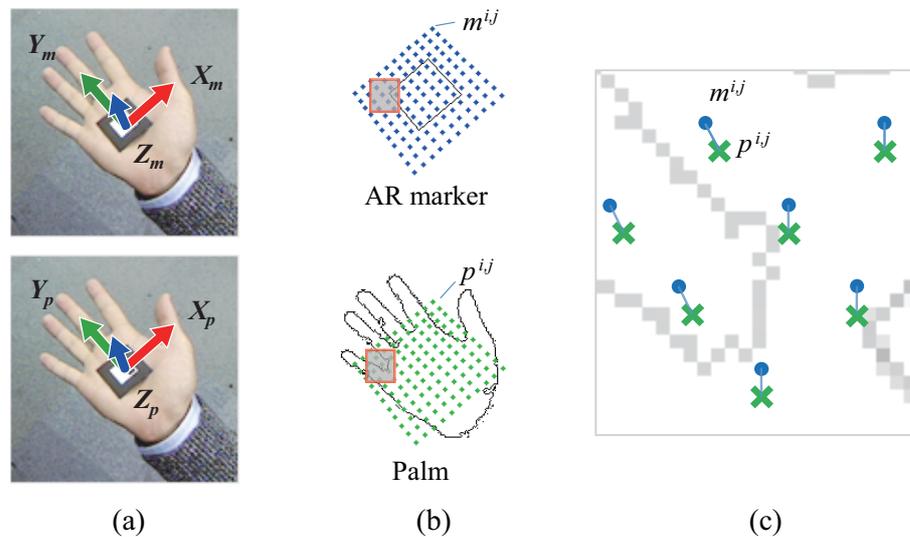


Fig. 2.8 Computation procedure of projection error based on the AR marker and the palm: (a) estimated coordinate systems, (b) projected points based on the postures of the AR marker and the palm, and (c) enlarged image that combined the shadowed square regions in (b).

置・姿勢に大きな差は見られない。以上の結果から、指の動きに依存することなく、手のひらの位置・姿勢に基づいてオブジェクトが描画されていることがわかる。

次に、描画されるオブジェクトの見かけのずれを定量的に評価するため、両手法により描画されるオブジェクトの投影誤差を計算した。Fig. 2.8 に、投影誤差の算出手順を示す。Fig. 2.8(a) のように、入力画像から位置・姿勢を推定することで AR マーカの座標系 (X_m, Y_m, Z_m) 、手のひらの座標系 (X_p, Y_p, Z_p) がそれぞれ得られる。Fig. 2.8(b) のように、推定された座標系の XY 平面上に原点を中心とし、 X 軸、 Y 軸に沿ってそれぞれ 10.0 mm 間隔で 11×11 点の点群をプロットし、画像平面上に投影したものが $m^{i,j}$ 、 $p^{i,j}$ である。Fig. 2.8(b) における影付きの矩形領域を拡大し、重ね合わせて表示したものが Fig. 2.8(c) である。点 $m^{i,j}$ 、点 $p^{i,j}$ は、推定された AR マーカ、手のひらの位置・姿勢の差異に応じて、それぞれ異なる位置に投影される。この AR マーカに基づいて投影された点 $m^{i,j}$ と手のひらに基づいて投影された点 $p^{i,j}$ から、投影

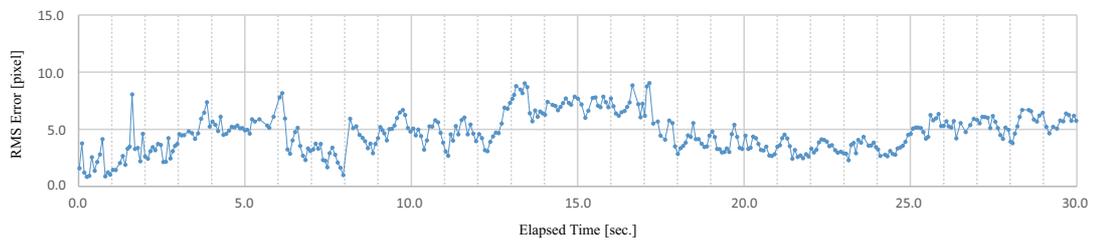


Fig. 2.9 RMS errors of the projected points based on the AR marker and the palm.

誤差として、二乗平均平方根 (RMS) 誤差 E_{rms} を次式から計算する。

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left\{ \left(p_x^{i,j} - m_x^{i,j} \right)^2 + \left(p_y^{i,j} - m_y^{i,j} \right)^2 \right\}} \quad (2.15)$$

ここで、 $p_x^{i,j}$, $p_y^{i,j}$ は手のひら、 $m_x^{i,j}$, $m_y^{i,j}$ は AR マーカの位置・姿勢に基づいて投影された点の画像上の座標値を表す。また、 N は i および j の要素数である。

実験によって得られたフレームごとの RMS 誤差を Fig. 2.9 に示す。ここで、横軸は Fig. 2.7 中の t と一致する経過時間、縦軸は RMS 誤差である。Fig. 2.7 の結果と照らし合わせると、ほぼ同じ指の動きを伴う手に対して、手の姿勢のみが変化している 0.0 秒、3.3 秒における RMS 誤差は、それぞれ 1.61[pixel]、4.83[pixel] となっている。同様に、13.0 秒、17.5 秒では、それぞれ 7.32[pixel]、4.46[pixel] となっている。また、手が比較的カメラから離れたところに位置している 22.1 秒、24.3 秒における RMS 誤差は、それぞれ 2.99[pixel]、2.66[pixel] となっている。このことから、手のひらの位置および姿勢が変化した場合においても、大きな誤差を生じることなくオブジェクトを描画できていることがわかる。指の間隔が異なっている 3.3 秒、10.1 秒における RMS 誤差は、それぞれ 4.83[pixel]、5.08[pixel] となっている。22.1 秒、24.3 秒についても、誤差は 2.99[pixel]、2.66[pixel] であることから、指の間隔が変化した場合においても大きな誤差を生じることなくオブジェクトを描画できていることがわかる。これらの結果は、定性的な評価実験の結果とも一致している。0.0 秒から 30.0 秒まで

Table 2.1 Average processing time

Process	Time (ms)
Hand extraction	1.89
Feature detection	0.92
Pose estimation	0.27
Silhouette normalization	2.43
Total	5.52

の RMS 誤差全体を通して見ても、手の位置・姿勢および指の間隔が変化しているにもかかわらず、大きな誤差を生じることなく平均誤差 4.76[pixel] でオブジェクトを描画できている。以上の実験結果は、本インタフェースにより、手の位置・姿勢の変化のみならず、指の間隔の変化に対しても安定したオブジェクトの三次元表示が可能であることを示している。

2.4.2 本インタフェースの処理時間の評価

本インタフェースがウェアラブルデバイスの持つ計算能力の低い計算機で利用可能であるかを検証するため、手のひらの位置・姿勢推定における処理時間を評価する。本実験では、手のひらの位置・姿勢および指の間隔を変化させながら、 320×240 [pixel] の解像度で入力画像を取得した。また、処理装置にはハイエンドなウェアラブルデバイスとほぼ同等の処理能力を持った Intel(R) Core(TM) i7-4500U @1.80GHz を搭載したモバイル PC を利用した。

入力画像 400 フレームの各処理における平均処理時間を Table 2.1 に示す。処理結果を見ると、手領域の抽出から手のシルエットを正規化するまでの合計した処理時間

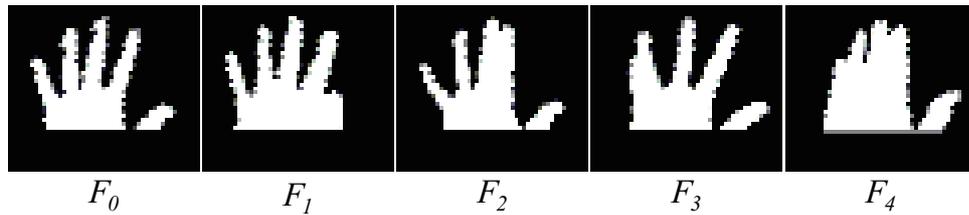


Fig. 2.10 Template images to identify hand shape.

が平均 5.52ms となっており，非常に高速で手のひらの推定が実現できていることがわかる．この結果は，動画像処理において一般的にリアルタイムと言われる 30fps を超える処理の実現性を有している．これは，処理能力の低いウェアラブルデバイスに適用した場合にも，仮想情報の重畳表示における時間的整合性を十分に満たすことが可能であることを示している．

2.5 本インタフェースを用いた応用実験

2.5.1 指の動きを利用した表示オブジェクトの切り替え

本インタフェースを用いたアプリケーションの一例として，指の動きを利用した表示オブジェクトの切り替え操作を示す．本アプリケーションでは，2.3.5 の手順により得られた手のシルエットを幾つかの手形状パターンと照合し，シルエットの形状を識別することで，表示オブジェクトの切り替えを実現する．実験では，Fig.2.10 のような $F_0 \sim F_4$ の 5 枚の事前に記憶した手のシルエットをテンプレート画像として利用し，単純な形状マッチングにより手形状を識別した．ここでは，入力画像 I に対する各テンプレート画像 F_i ($0 \leq i \leq 4$) との類似度 S_i を算出し，類似度が最大となるテンプレート画像 F_k を次式で求める．

$$k = \arg \max_{0 \leq i \leq 4} S_i \quad (2.16)$$

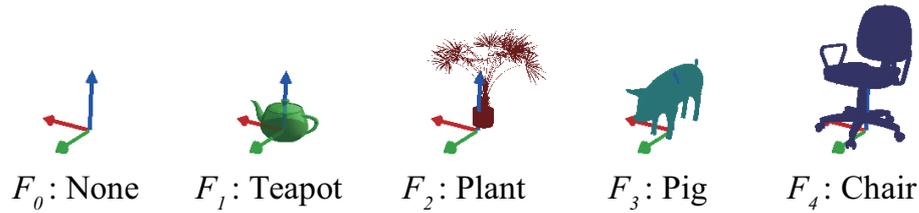


Fig. 2.11 Displayed objects corresponding to each template image in Fig 2.10.

ここで, S_i は次式により得られる.

$$S_i = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} d_i(x, y) \quad (2.17)$$

ここで, N , M は画像の縦横のピクセル数を表す. また, $d_i(x, y)$ は次式で定義される値である.

$$d_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) = F_i(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.18)$$

ここで, $I(x, y)$, $F_i(x, y)$ は入力画像, テンプレート画像の座標 (x, y) における画素値である. これにより識別された形状に対応して仮想オブジェクトを切り替え, それを座標軸と合わせて手のひらの位置・姿勢に基づいて三次元的に表示した. このとき, 手形状に対応して表示するオブジェクトは, Fig. 2.11 の None, Teapot, Plant, Pig, Chair である. 本実験は, 4章の実験と同じく, 夜間に屋内環境において蛍光灯の照明条件下で実施した. 蛍光灯のフリッカーによって生じる輝度の揺らぎも同様に, カメラに付属のソフトウェアにより低減させている.

Fig. 2.12 に本アプリケーションを用いたオブジェクトの描画結果を示す. 各結果画像において, 左列の入力画像に基づいて中央列のような手のシルエットが生成され, テンプレート画像との照合により, 右列のようにシルエットの形状に対応するオブジェクトが表示されている. また, (a)~(e) はそれぞれ同一の指の動きに対して, 異なる手のひらの位置・姿勢における表示オブジェクトの描画結果を示したものである. 例えば, (a1) と (a2) の結果画像を比較すると, 異なる手のひら位置・姿勢からほぼ同

じ形状のシルエットが得られている。また、得られたシルエットから対応するテンプレート F_0 を参照し、座標軸のみがオブジェクトとして手のひらの位置・姿勢に基づいて表示されている。同様に、(b)～(e)についても、異なる2パターン手のひらの位置・姿勢から得られた手のシルエットに基づいて対応するテンプレートを参照し、オブジェクトが切り替わって表示されている。

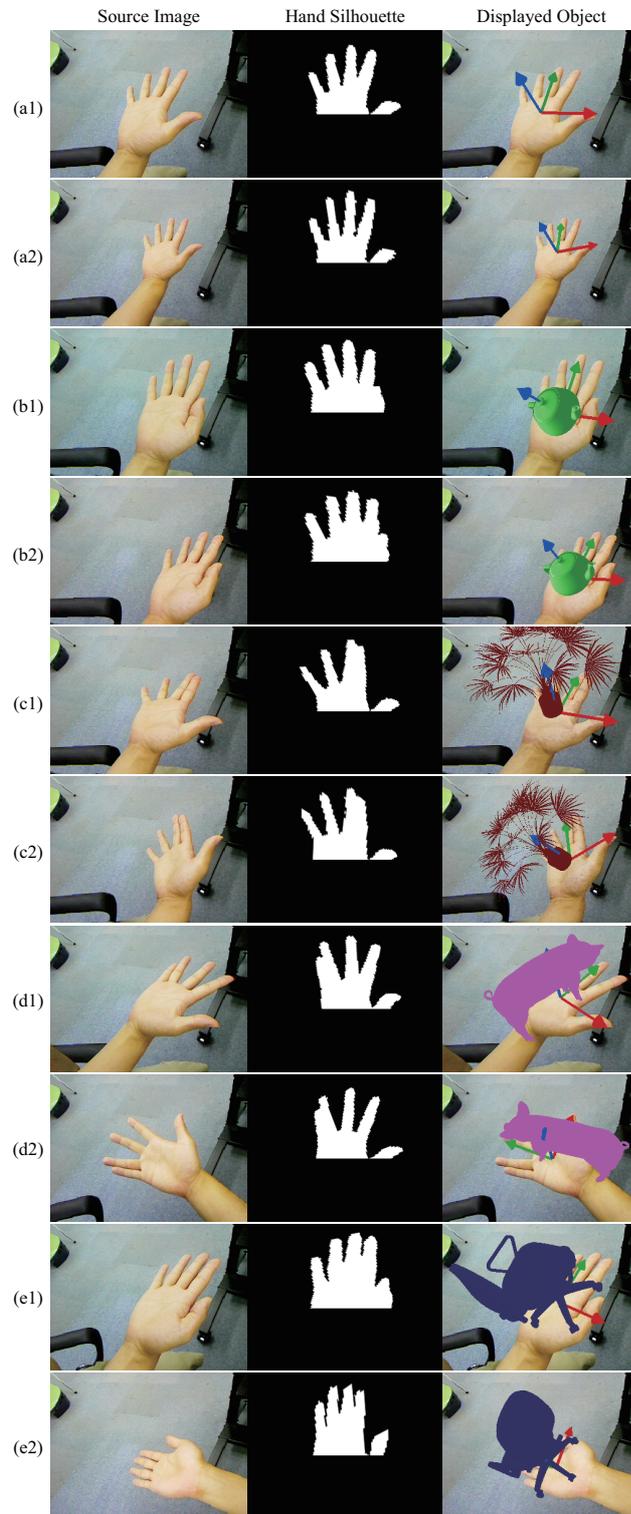


Fig. 2.12 Results of the experiment using an example application for switching displayed objects.

Table 2.2 Recognition rate of each hand shape

Hand Shape	Rate (%)
F_0	97.1
F_1	98.9
F_2	99.7
F_3	98.0
F_4	98.5

定量的な評価のために、手形状ごとに位置・姿勢を変化させた時の本アプリケーションによる手形状の認識率を評価した。ここでは、 F_0 から F_4 の各手形状について、10通りの異なる位置・姿勢ごとに連続 100 フレームの間、オブジェクトを描画した。オブジェクトの描画中は、手の位置・姿勢および手形状は固定している。手形状ごとに合計 1000 フレームの中で手形状に対応する正しいオブジェクトが描画された割合をそれぞれの認識率とした。

Table 2.2 に手形状ごとの認識率を示す。本実験では、手形状ごとに 97.1% から 99.7% の認識率で正しい手形状を識別し、手形状に対応する正しいオブジェクトを描画できた。本実験の結果では、最も認識率の低い手形状 F_0 において 2.9% の誤認識があった。これは、推定された姿勢の変化や手のひらの厚みによって生じるシルエットの微小な歪みの影響を大きく受け、類似度が変化してしまうことが要因となっている。本アプリケーションでは、簡単のために単純な形状マッチングにより手形状を識別しているが、シルエットの歪みに影響を受けにくい、より適切な形状判別手法を適用することで、これらの誤認識は減らすことが可能であると考えられる。

これらの実験結果により、本インターフェースを用いることで、手のひらを用いたオ

オブジェクトの三次元表示に加えて指の動きを用いた表示オブジェクトの切り替え操作が可能であることを示した。

2.5.2 指の動きを利用したパラメータの変更

指の動きを利用したパラメータの調整操作を可能とするアプリケーションを示す。本アプリケーションでは、指の開き具合をパラメータとして利用し、表示オブジェクトの透過度を変化させる。実験では、次式を用いて手のシルエットとその凸包の面積から比を算出し、透過度のパラメータとしている。

$$d = s_c - s_h \quad (2.19)$$

$$r = \frac{d - d_{narrow}}{d_{wide} - d_{narrow}} \quad (2.20)$$

ここで、 s_c はシルエットの凸包の面積、 s_h は手のシルエットの面積であり、 r は得られたパラメータ値である。パラメータ r は、予め計測した指同士を完全に隣接させたときの手のシルエットとシルエットの凸包の面積差を d_{narrow} 、指同士の間隔をあけて手を広げたときの面積差を d_{wide} とし、手の広げた度合いを正規化したものである。また、パラメータ r の上限値は 1、下限値は 0 とした。

実験では、推定された手のひらの位置・姿勢に基づいて座標軸とティーポットを表示させ、得られたパラメータ r により、表示されたティーポットの透過度を変化させた。また、手のひらの位置・姿勢を変化させながら計測を行い、手を広げた状態から段階的に指同士の間隔を狭めていき、指同士を接触させた状態まで変化させている。手のひらの位置・姿勢が異なる場合においてもパラメータの推定が可能であるか確認するために、指の間隔を変える毎に 2 パターンの異なる位置・姿勢で入力画像を取得した。本実験の環境条件は、5.1 節と同じである。

Fig. 2.13 に実験の結果を示す。同図では、左列が入力画像、中央列が正規化された

手のシルエットとその凸包領域，右列が表示オブジェクトの画像を表している．中央列の r の値は式 (2.20) を用いて得られたそれぞれの結果である．例えば，(a) のように手を大きく広げた場合には $r = 1.000$ となり，ティーポットが鮮明に描画されている．(b)～(d) を順に見ると，指同士の間隔を狭めるにつれて r の値が小さくなり，徐々にティーポットの透過度が増している．(e) のように指同士を接触させた状態では $r = 0.000$ という値が得られ，ティーポットが完全に透過し，座標軸のみが描画されている．また，(a1) と (a2) を比較すると，異なる手のひらの位置・姿勢から得られたシルエットに基づいて同一の値が得られている．同様に，(b)～(e) についても同じ指の動きから得られた手のシルエットに基づいてほぼ同じ値が得られており，手の位置・姿勢に依存することなく，表示オブジェクトの透過度が変化している．

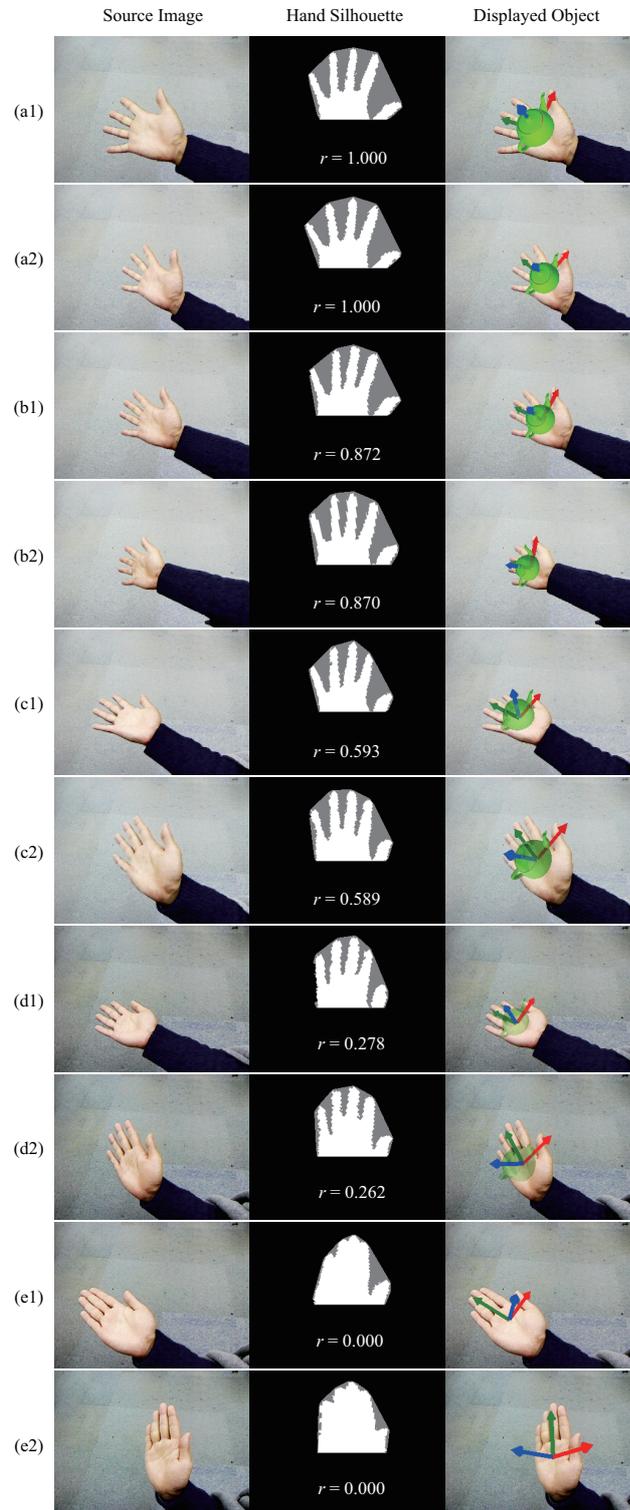


Fig. 2.13 Results of the experiment using an example application for changing the transparency of a displayed object

Table 2.3 Recognition rate of each hand shape

Target value	Average	Standard deviation
1.00	1.000	0.011
0.75	0.753	0.030
0.50	0.519	0.039
0.25	0.245	0.044
0.00	0.001	0.023

また、本アプリケーションによるパラメータ調整について、推定されたパラメータの平均と標準偏差から定量的な評価を行った。実験では、1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0.00の5パターンの目標値を設定し、パラメータの調整を行った。各目標値につき、10通りの異なる位置・姿勢において、目標とする値が得られるように指の間隔を調節し、連続100フレームの間、パラメータを取得した。パラメータの取得中は、位置・姿勢および指の間隔は固定している。

目標値ごとの得られたパラメータの平均および標準偏差を Table 2.3 に示す。結果から、目標値と平均値の差は最大で 0.019 となっており、全ての目標値において小さいことがわかる。また、標準偏差についても最大で 0.044 となっていることから、手のひらの位置・姿勢に依存せず、安定したパラメータが得られていることがわかる。目標値が 1.00, 0.00 の場合においては、パラメータに上限または下限が設定されているため、他の結果に比べて、より安定した結果が得られている。

これらの結果により、指の動作に伴う手のシルエット変化を利用することで表示オブジェクトに対するパラメータの変更操作が可能であることを示した。この操作は、表示オブジェクトに対してアナログ的なパラメータの変更を行うといった音声等によ

る入力が難しい操作に有用であると考えられる。

2.6 本章のまとめ

本章では、単眼カメラによる手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測について述べた。また、その応用として、手のひらの位置・姿勢に基づいたオブジェクトの表示と、指の動きを用いた付加的操作を可能とする AR インタフェースについて述べた。本インタフェースでは、指の間隔の変化によるシルエットの変化に影響しない手の特徴点を用いた手のひら平面の位置・姿勢の推定方法を実現した。これにより可能となる五本の指の動きによって生じるシルエットの違いを推定することで、従来では困難であった付加的操作を可能とした。実験では、指の間隔の変化を含む状況下における本インタフェースのオブジェクト描画の精度を定性的、定量的に評価することにより、手の位置・姿勢の変化のみならず、指の動きに対しても安定してオブジェクトの三次元表示が可能であることを示した。また、本インタフェースの処理時間の評価実験から、処理能力の低いウェアラブルデバイスにおいて仮想情報を重畳表示するための時間的整合性を十分に満たしていることを明らかにした。さらに、本インタフェースを用いた応用実験により、指の動きを利用した表示オブジェクトの切り替えおよび表示パラメータの変更が可能であることを示した。これらの結果により、形状変化を伴うテクスチャの乏しい対象に対する単眼カメラを利用した位置・姿勢の計測においてホモグラフィに着目したアプローチの有用性が示された。

第3章

船位保持のためのカメラとランド マークを用いた位置・姿勢の計測

揺動に伴う相対位置の変化や計測規模の大きさなどを要因として、船舶は位置・姿勢の計測が難しい対象の一つである。大型対象の位置・姿勢の計測を局所領域のみから船位保持などで要求される十分な精度で計測することは難しいため、複数の観測点を設け、各観測点に対応する計測器間の基線長を十分に確保することが望ましい。このような計測の実現のため、本研究では複数のカメラと電動雲台で構成されたカメラユニットを利用した計測システムを構築する。

本計測システムの開発は、韓国の国立釜慶大学校との共同研究により進められたものである。同大学は、水産科学、海洋の専門分野において実績がある有数の大学であり、船舶の運動制御に関する応用研究も進められている。本計測システムは、船舶の制御において課題となっている近距離での相対船位計測に着想を得たものである。また、本システムの成果の一部

は、延べ数ヶ月に渡る同大学への滞在中における開発およびモデル船や試験水槽を利用した実験により得られたものである。

本章では、マーカレス計測に先駆け、その根幹となるカメラユニットとランドマークを用いた船舶の位置・姿勢計測システムについて述べる。

3.1 背景

積み降ろしを目的とした港湾や浮体式プラントへの接岸などの近距離における船位保持では、船体の衝突の危険性が大きく増加する。また、船体の衝突のうち約89～96%は何らかの形で人的なミスによって引き起こされていることが報告されている [19]。人的なミスを減らす一つの解決方法が、船位保持の自動化である。特に、衝突の危険性が高い近距離での自動化は一つの課題となっている。一方で、近距離における船位保持の自動化を実現するためには、高精度かつ高速な船体の位置・姿勢計測が必要となる。

GPSは、洋上において船位を計測する方法の一つである。しかしながら、一般的なGPSは約3～5mの位置精度しか持たないため、近距離における位置保持には適していない。そのため、近距離での位置保持では、数cm精度での計測が可能なRTK GPSなどの、より高精度な手法を利用する必要がある。Ueno [4]は、接岸制御のために、GPSを応用し、十分な精度で船位計測を可能とするシステムを提案している。このシステムでは、誤差を補正するための情報を送信する固定局を陸上に設置することで、高精度な船位計測を実現している。また、複数の受信機を利用することで、船体の位置のみでなく姿勢の計測も実現している。しかしながら、近距離での位置保持に

において、GPSを用いた方法は、クレーンや櫓などの構造物による遮蔽により、安定した計測が困難になる恐れがある。

もう一つの方法として、船体と対象上の定点間の距離と角度を複数組計測し、それらから相対的な船位および姿勢を計算する方法が考えられる。この方法を実現する有力なセンサの一つとして、レーダ [20] が障害物の検出や船舶の誘導のために利用されている。洋上で利用されるレーダの計測距離は 100m から 3~5km である。短距離の計測は困難であるため、近距離での船位保持には適していない。自動車のオートクルーズ制御では利用されている短距離の計測を可能とするレーダも利用されている [21] が、照射パターンが非常に狭いため、揺れなどを伴う洋上での応用は難しい。もう一つのセンサとして、十分な計測距離、優れた計測精度を持つレーザが洋上で利用されている [22]。しかしながら、位置関係の変化する対象との計測では、機械的なスキヤニングを要するため、距離の取得間隔が制限される課題がある。近距離での位置・姿勢の計測に有用なセンサとして、広い計測範囲、高い角度分解能を持つカメラを利用することが考えられる。カメラは、対象との距離や角度を得るために機械的なスキヤニングを必要としないため、レーザなどと比較して、高い計測周期を実現できる可能性がある。

これまで、船舶の自動航行を目的として、カメラを用いたシステムが幾つか提案されている [23,24]。しかしながら、これらのシステムでは効率的に障害物の検出や回避を実現しているものの、対象物に対する船体の相対的な位置・姿勢の計測については実現されていない。動作解析を目的として、カメラを用いてモデル船の 6 自由度の動きを計測する手法 [25,26] も報告されている。これらの研究では、カメラ画像からモデル船に貼付したカード状のマーカから特徴点を検出し、船体の位置・姿勢の高精度な計測を実現している。しかしながら、計測範囲の狭さや特徴点検出の頑健性の観

点から、実環境での適用は困難であると考えられる。

そこで、高速かつ高精度な計測を実現するために、カメラを用いて相対的な位置・姿勢を計測するシステムを提案する。本システムは、2つのカメラユニットおよび、それらと対になる2つのランドマークから構成される。各カメラユニットからそれぞれ計測したランドマークとの距離と向きに基いて、計測対象との相対的な船体の位置・姿勢を得る。また、カメラユニットは電動雲台を用いてランドマークを追跡し、継続的な距離と角度の計測を可能とする。これらの根幹となるランドマークの検出において輝度勾配に基づいたテンプレート照合手法 [27-29] を応用することで、高速な時間応答性を持つ計測を実現する。さらに、カメラやカメラユニットの設置誤差に依存する計測精度の誤差を補正する方法についても提案する。本システムが近距離における船位保持の自動化に応用可能であることを示すため、計測精度および計測時間の評価を行った。また、波を発生させることのできる試験水槽において、本システムを用いてモデル船の位置・姿勢を計測する実験を行った。その実験の結果から、船体に揺れを伴う水上においても、本システムを用いて高精度な位置・姿勢の計測が可能であることを示す。

3.2 計測システムの概要

船舶の位置・姿勢は、Fig. 3.1 に示すカメラユニットとランドマークで構成されたシステムを用いて計測する。本システムは、船舶側に設置されたカメラユニットと対象側に設置されたランドマークで構成される。カメラユニットは1つの追跡用カメラ、2つの計測用カメラ、電動雲台で構成されている。追跡用カメラは電動雲台のパン軸上に設置されており、広い画角を持っている。計測用カメラは、光軸が平行になるように電動雲台パン軸から等間隔で左右に設置されている。ランドマークは、距離の変化

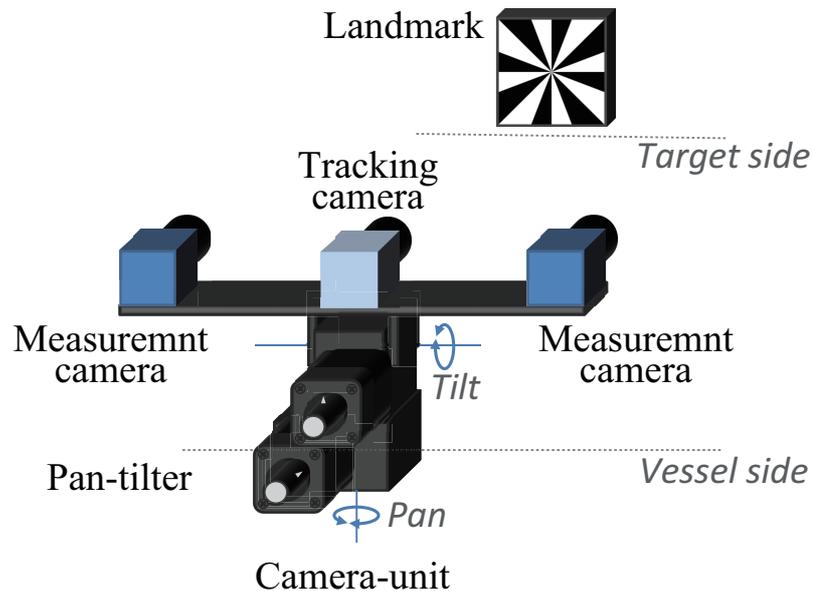


Fig. 3.1 Configuration of the camera-unit and the landmark.

に依存しない放射状の白黒パターンを持つ。このパターンの中心を対象点として、パターン照合により検出する。各カメラにより検出された対象点に基づいて、カメラユニットからランドマークまでの距離と方向を計測する。また、追跡用のカメラにより検出された対象点に基づいて、電動雲台を制御することにより、ランドマークを補足しながら、連続した計測を可能としている。2対のカメラユニットとランドマークにより得られた距離と角度、予め設定したランドマーク間の距離から船体の位置・姿勢を計測する。

3.3 カメラとランドマーク間の距離と方向の計測

本システムでは、VCC(Vectoor Code Correlation, ベクトル符号相関)を用いたテンプレート照合 [28, 29] により対象点を検出する。既存研究により、VCCは屋外での照明変化や天候の変化に対する頑健性を持つことが示されている。この方法は、画像中の輝度勾配の符号を組み合わせた単純な特徴を用いており、非常に高速な画像領域

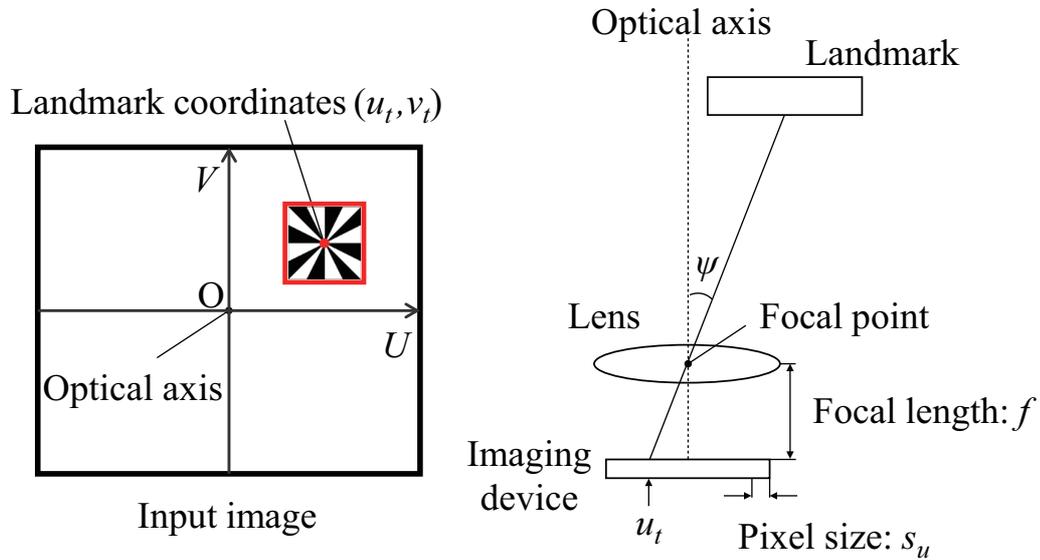


Fig. 3.2 Parameters for calculating the angle when measuring the distance.

の照合が可能である。

Fig. 3.2 に距離を得るために必要となる角度を画像から得る際のパラメータを示す。座標 (u_t, v_t) が画像から検出されたランドマークの中心点である。この座標は、カメラの光軸と画像平面の交点からの相対座標として与えられる。この座標から、カメラの光軸とランドマークのなす角度 ψ を次式により計算する。

$$\psi = \tan^{-1} \frac{u_t s_u}{f}, \quad (3.1)$$

ここで、 s_u はピクセルのサイズ、 f はカメラの焦点距離を表す。

Fig. 3.3 に計測用カメラと得られる距離の幾何学的関係を示す。ここで、 ψ_l と ψ_r は、左右の計測用カメラから、式 (3.1) を用いて得られた角度である。角度 ψ_l と ψ_r を用いて、次式により、カメラのベースラインとランドマークとの距離 h を得る。

$$h = \frac{L_C}{\tan \psi_l - \tan \psi_r}, \quad (3.2)$$

ここで、 L_C は計測用カメラ間のベースラインの長さを表す。得られた距離 h を用い

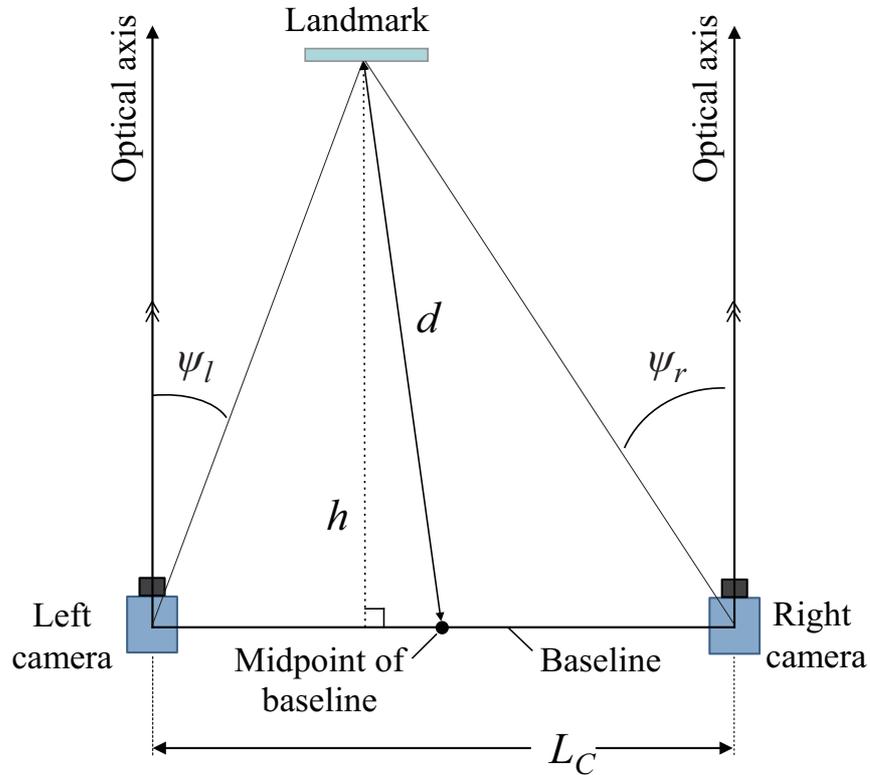


Fig. 3.3 Geometry for measuring the distance.

て、ベースラインの中心からランドマークまでの距離 d は以下のように得られる。

$$d = \sqrt{\frac{1}{2}h (\tan^2 \psi_l + \tan^2 \psi_r + 2) - \frac{L_C^2}{4}}, \quad (3.3)$$

本システムでは、この距離 d をカメラユニットからランドマークまでの距離とみなす。

カメラユニットのパン角 φ は、追跡用カメラから得られた角度 ψ_c と電動雲台のパン角 ξ_{pan} から次のように決定される。

$$\varphi = \psi_c + \xi_{pan}. \quad (3.4)$$

カメラの光軸とランドマーク間の垂直方向の角度についても、水平方向の角度 ψ と同様の手順により、式 (3.1) から得ることができる。追跡用カメラから得られた水平方向、垂直方向の角度が小さくなるように、電動雲台を制御することでランドマークを補足し続ける。

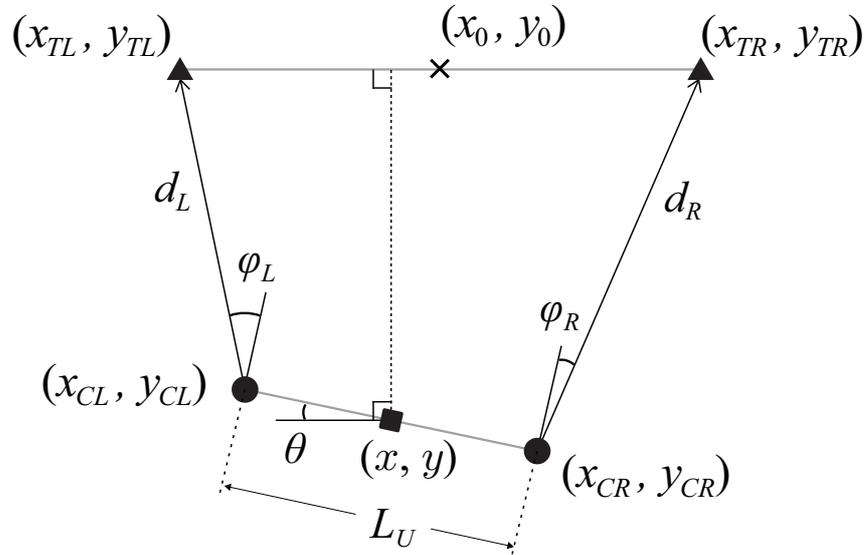


Fig. 3.4 Geometry for measuring the position and heading.

3.4 位置・姿勢の計測

Fig. 3.4 にランドマークとカメラユニットの幾何学的関係と位置・姿勢を得るためのパラメータを示す。船体の位置方向は、左右のカメラユニットから得られた距離 d_L , d_R , 角度 φ_L , φ_R から計算する。本システムでは、2つのランドマークの中点 (x_0, y_0) を船体の位置の基準点とする。各ランドマークの設置位置 (x_{TL}, y_{TL}) , (x_{TR}, y_{TR}) は次のようになる。

$$x_{TL} = -\frac{L_U}{2} + d_L \sin \varphi_L, \quad y_{TL} = d_L \cos \varphi_L \quad (3.5)$$

$$x_{TR} = \frac{L_U}{2} + d_R \sin \varphi_R, \quad y_{TR} = d_R \cos \varphi_R \quad (3.6)$$

ここで、 L_U はカメラユニット間の長さを表す。また、この L_U はカメラユニットの設置時に得られるものとしている。船体の向き θ は、得られたランドマークの位置に基づいて次のように決定される。

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{y_{TR} - y_{TL}}{x_{TR} - x_{TL}} \right) \quad (3.7)$$

また、基準点 (x_0, y_0) は次のように決定される.

$$x_0 = \frac{x_{TL} + x_{TR}}{2}, \quad y_0 = \frac{y_{TL} + y_{TR}}{2} \quad (3.8)$$

本システムでは、2つのランドマークの midpoint を船体の位置の基準点としている。これらの船体の向き θ および基準点 (x_0, y_0) に基づいて、カメラユニットの位置 (x_{CL}, y_{CL}) , (x_{CR}, y_{CR}) を次のように得る.

$$x_{CL} = \left(-\frac{L_U}{2} - x_0\right) \cos \theta + y_0 \sin \theta \quad (3.9)$$

$$y_{CL} = \left(-\frac{L_U}{2} - x_0\right) \sin \theta - y_0 \cos \theta \quad (3.10)$$

$$x_{CR} = \left(\frac{L_U}{2} - x_0\right) \cos \theta + y_0 \sin \theta \quad (3.11)$$

$$y_{CR} = \left(\frac{L_U}{2} - x_0\right) \sin \theta - y_0 \cos \theta \quad (3.12)$$

得られたカメラユニットの位置に基づいて、船体の位置 (x, y) を次式を用いて計算する.

$$x = \frac{x_{CL} + x_{CR}}{2}, \quad y = \frac{y_{CL} + y_{CR}}{2} \quad (3.13)$$

3.5 計測誤差の補正

3.5.1 距離誤差の補正

本システムにおける距離計測手法は、2つの計測用カメラの光軸が平行であることが前提となっている。しかしながら、それらを完全に平行に設置することは不可能である。この光軸のずれは、距離計測の誤差を引き起こす。例として、計測用カメラ間の長さが 300mm、カメラの焦点距離が 16mm である構成において、右側のカメラユニットから得られた角度 φ_R が ϵ_R の誤差を持つ場合の距離計測のシミュレーション結果を Fig. 3.5 に示す。同図では、横軸が実際の距離、縦軸が計測される距離を表し

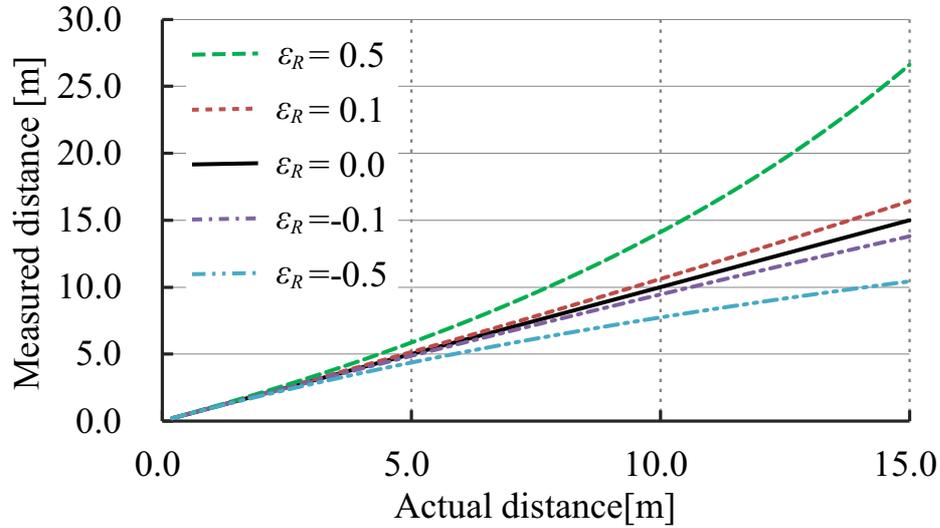


Fig. 3.5 Simulated distance errors, given the error ϵ_R of the angle φ_R in a case where $L_C = 300$ mm and $f = 16$ mm.

ている．例えば， ϵ_R が $+0.5^\circ$ である場合において，15.0m の距離を計測すると，10m 以上の誤差が生じることがわかる．また，計測距離に応じて，二次曲線的に誤差が増えている．そこで，事前の計測した距離と実際の距離の対応から補正式を導出することにより，この計測誤差を軽減する．

まず，以下の様に \mathbf{a} ， \mathbf{b} をおく．

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 & a_0 & a_0^2 \\ 1 & a_1 & a_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & a_i & a_i^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} a_0 - m_0 \\ a_1 - m_1 \\ \dots \\ a_i - m_i \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

ここで， a_i ， m_i はそれぞれ i 番目の計測における実際の距離および本システムにより計測された距離を表す．補正值 $\mathbf{c} = [c_0, c_1, c_2]^T$ は次式により得られる．

$$\mathbf{c} = (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^T \mathbf{b}, \quad (3.15)$$

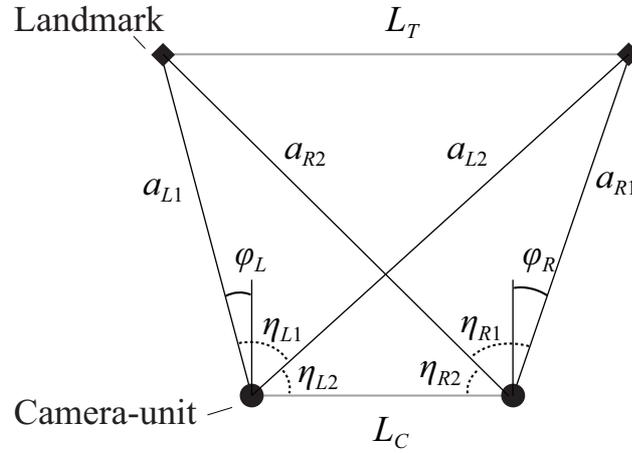


Fig. 3.6 Geometry for the correction of the camera-unit directions.

得られた補正值 \mathbf{c} に基づいて、以下の式から補正した距離 d_c を得る.

$$d_c = \begin{cases} \frac{-(1+c_1) + \sqrt{\beta}}{2c_2} & (c_2 > 0) \\ \frac{-(1+c_1) - \sqrt{\beta}}{2c_2} & (c_2 < 0) \end{cases}, \quad (3.16)$$

ここで、 β は次のように決定される変数である.

$$\beta = (1+c_1)^2 - 4c_2(c_0 - m). \quad (3.17)$$

この処理では、 $\beta \geq 0$ かつ $c_2 \neq 0$ ことを前提としている.

3.5.2 カメラユニットの設置誤差の補正

計測される距離と同様に、位置・姿勢の計測結果もカメラユニットの設置される向きに応じて誤差を生じる. そこで、各カメラユニット、ランドマーク間の距離に基づいて、設置後のカメラユニットの向きの誤差を事前に推定し、補正する.

Fig. 3.6 にカメラユニットの方向の誤差を補正するための幾何学的関係を示す. $a_{L1}, a_{L2}, a_{R1}, a_{R2}$ はそれぞれ各カメラユニット、ランドマーク間の実際の距離を表す. 角度 $\eta_{L1}, \eta_{L2}, \eta_{R1}, \eta_{R2}$ は、ランドマーク間の距離 L_T およびカメ

ラユニット間の距離 L_C に基づいて、次のように決定される。

$$\eta_{L1} = \cos^{-1} \left(\frac{a_{L1}^2 + a_{L2}^2 - L_T^2}{2a_{L1}a_{L2}} \right), \quad (3.18)$$

$$\eta_{L2} = \cos^{-1} \left(\frac{a_{L2}^2 + L_C^2 - a_{R1}^2}{2a_{L2}L_C} \right), \quad (3.19)$$

$$\eta_{R1} = \cos^{-1} \left(\frac{a_{R1}^2 + a_{R2}^2 - L_T^2}{2a_{R1}a_{R2}} \right), \quad (3.20)$$

$$\eta_{R2} = \cos^{-1} \left(\frac{a_{R2}^2 + L_C^2 - a_{L1}^2}{2a_{R2}L_C} \right). \quad (3.21)$$

また、得られた角度 η_{L1} , η_{L2} , η_{R1} , η_{R2} および各カメラユニットにおいて画像から得られたパン角 φ_L , φ_R に基づいて、カメラユニットの向きの誤差 ϵ_L , ϵ_R は次のように得られる。

$$\epsilon_L = \frac{\pi}{2} - (\eta_{L1} + \eta_{L2}) - \varphi_L, \quad (3.22)$$

$$\epsilon_R = \frac{\pi}{2} - (\eta_{R1} + \eta_{R2}) - \varphi_R. \quad (3.23)$$

式 (3.5) および式 (3.6) において、得られた誤差に基づいて φ_L を $\varphi_L + \epsilon_L$, φ_R を $\varphi_R + \epsilon_R$ と置き換えることで船体の位置・姿勢を正確に得ることができる。

3.6 本システムの性能評価

3.6.1 本システムの計測精度の評価

本システムの計測精度を評価するため、プロトタイプシステムを用いた実験を行った。Table 3.1 に実験で用いたシステムの構成を示す。各カメラユニットにおいて、計測用カメラの距離は 300mm である。追跡用カメラの焦点距離は 8mm, 計測用カメラの焦点距離は 16mm である。各カメラのピクセルサイズは $7.5\mu\text{m}$, 解像度は 640×480 ピクセルである。実験では、船体の代わりに可動式の机に 860mm の間隔でカメラユ

Table 3.1 Configuration parameters of the prototype measurement system for the evaluation of measurement accuracy

Parameter	Value
Baseline length of cameras	300 [mm]
Focal length of measurement camera	16 [mm]
Focal length of tracking camera	8 [mm]
Pixel size	7.5 [μm]
Image resolution	640 \times 480 [pixel]
Baseline length of camera-units	860 [mm]
Length between landmarks	2400 [mm]

ユニットを設置し、壁に貼付したランドマークに対する位置・姿勢を計測した。ランドマーク間の距離は 2400mm である。

実験では、Fig. 3.7 の 4 つの条件で計測を行った。同図において、菱形はランドマークの位置、線で連結した円はカメラユニットの位置を表している。Fig. 3.7(a) は、 x 軸方向の並進ずれ、回転を含まないの条件である。Fig. 3.7(b) は $x = 2.0\text{m}$ の並進ずれ、Fig. 3.7(b) は $\theta = 20^\circ$ の回転、Fig. 3.7(b) は $x = 2.0\text{m}$ の並進ずれと $\theta = 20^\circ$ の回転の両方を含む条件である。各条件では、 $y = 3.0\text{m}$ から $y = 10.0\text{m}$ まで 1m 毎に計測点を設定した。各計測点では、連続 100 回の計測を行った。

Fig. 3.8 に条件ごとに得られた計測の平均誤差を示す。各図において、丸が x 軸方向のずれ、回転を含まない条件の平均誤差を表している。同様に、菱形が $x = 2.0\text{m}$ のずれを含む条件、三角が $\theta = 20.0^\circ$ の回転を含む条件、四角が $x = 2.0\text{m}$ と $\theta = 20.0^\circ$ の両方を含む条件での平均誤差を表している。Fig. 3.8(a), Fig. 3.8(b) の結果から、 x および y 軸方向の平均誤差は全て $\pm 100\text{m}$ 以下であることがわかる。また、Fig. 3.8(c)

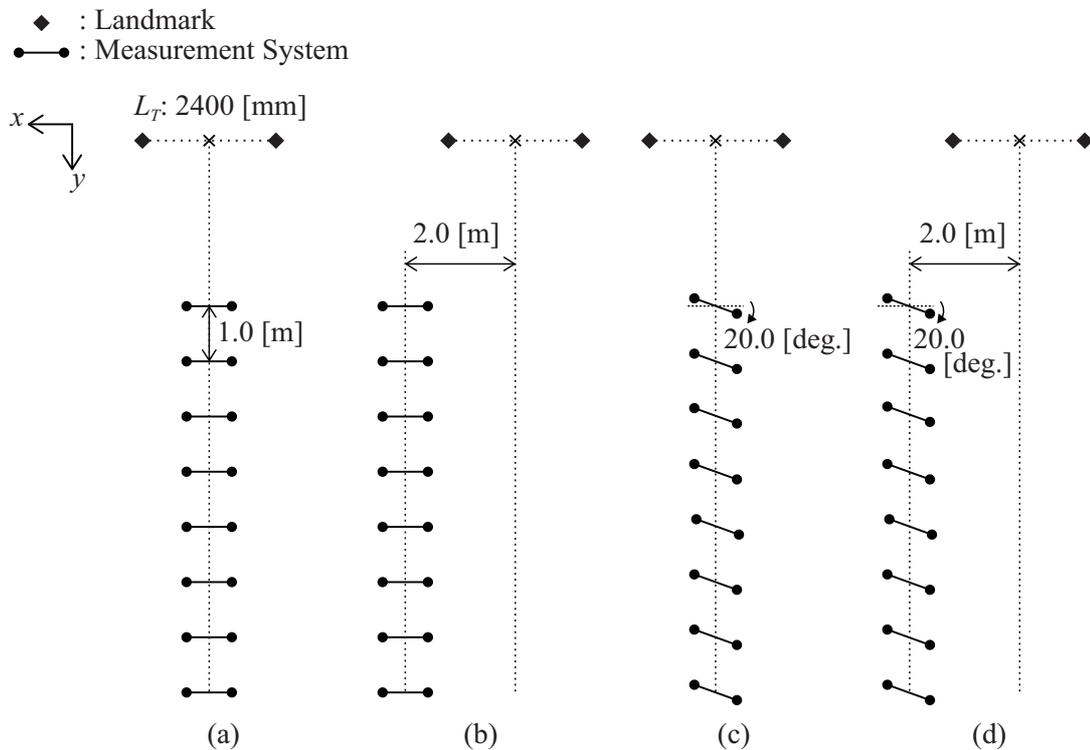
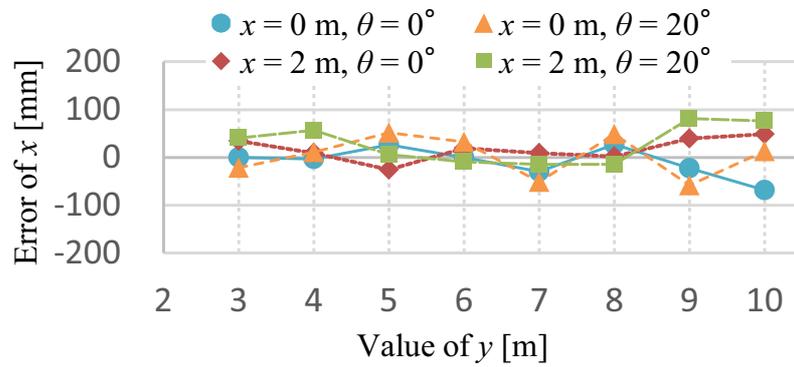
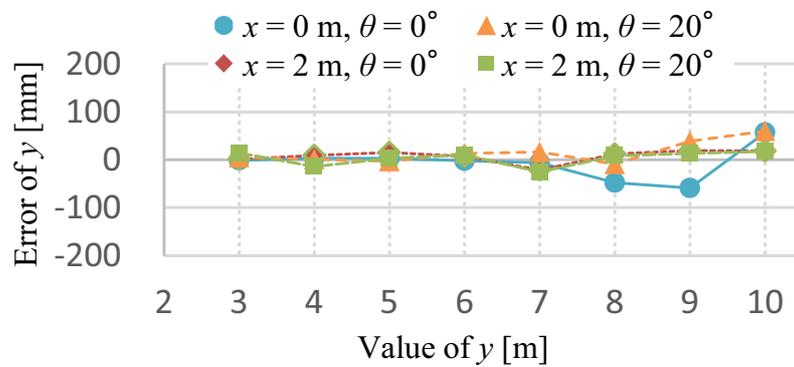


Fig. 3.7 Conditions for accuracy evaluation of position measurement: (a) without translation of x and rotation, (b) with 2.0 m translation of x , (c) with 2.0 m translation of x and 20° rotation, and (d) with both 2.0 m translation of x and 20° rotation.

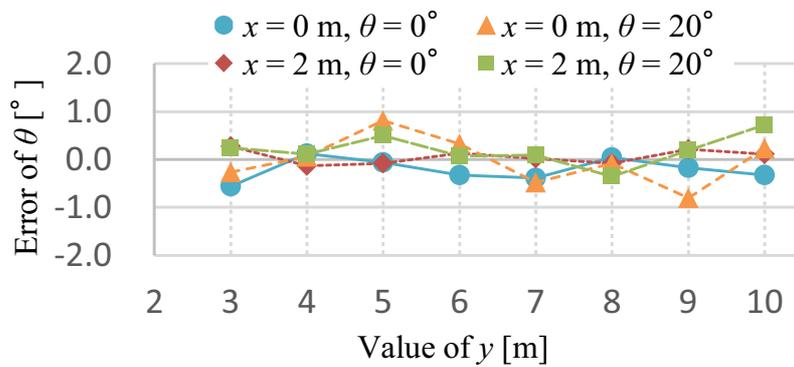
の結果から、姿勢 θ の平均誤差は 1.0° 以下であることがわかる。Table 3.2 に x , y , θ それぞれの最大誤差を示す。 x 軸の最大誤差は、 $x = 2.0\text{m}$, $y = 10.0\text{m}$, $\theta = 20.0^\circ$ の場所において 195.6mm であった。 y 軸の最大誤差は、 $x = 0.0\text{m}$, $y = 9.0\text{m}$, $\theta = 0.0^\circ$ の場所において 67.2mm , θ の最大誤差は、 $x = 2.0\text{m}$, $y = 10.0\text{m}$, $\theta = 20.0^\circ$ の場所において 1.4° であった。本実験で使用したシステムでは、計測用カメラ間の基線長は 300mm と短いものになっている。そのため、より長い基線長を設定することにより、計測精度はさらに向上すると考えられる。加えて、カメラユニット間の距離も 0.86m の非常に短いものとなっている。実際の船上では、この距離は数十倍となるため、計測によって得られる x , θ の精度は飛躍的に向上することが考えられる。これらの理由



(a) Average errors for x



(b) Average errors for y



(c) Average errors for θ

Fig. 3.8 Results of the position measurement.

により、本実験の結果から、本システムにより、近距離での船位保持に必要な高精度な船体の位置・姿勢の計測が可能であることが示された。

Table 3.2 Maximum errors in the measurements.

Maximum error for x	195.6 mm
Maximum error for y	67.2 mm
Maximum error for θ	1.4°

Table 3.3 Processing time of the proposed system.

Process	Time [ms]
Landmark detection	3.44
Estimation of distance and direction	< 0.01
Estimation of position and heading	< 0.01
Total	3.45

3.6.2 本システムの処理時間の評価

本システムが十分に速い応答性を持つか検証するため、処理時間の評価を行った。実験では、Intel(R) Core(TM) i7-3770 @3.40GHz の CPU を搭載した、デスクトップ PC を利用した。

Table 3.3 に位置・姿勢の計測における各処理の時間を示す。これらの結果は、1000 回の計測における平均の処理時間である。各カメラユニットがランドマークの検出に要した時間は 3.44ms であった。距離の推定、位置・姿勢の推定については、それぞれ 0.01ms 未満であった。一回の計測における合計の処理時間が 3.45ms であることから、本システムは 1 秒間に 200 回を超える計測周期の実現の可能を有している。実験の結果から、本システムにより、近距離での船位保持に適用可能な十分な応答性を有していることが示された。

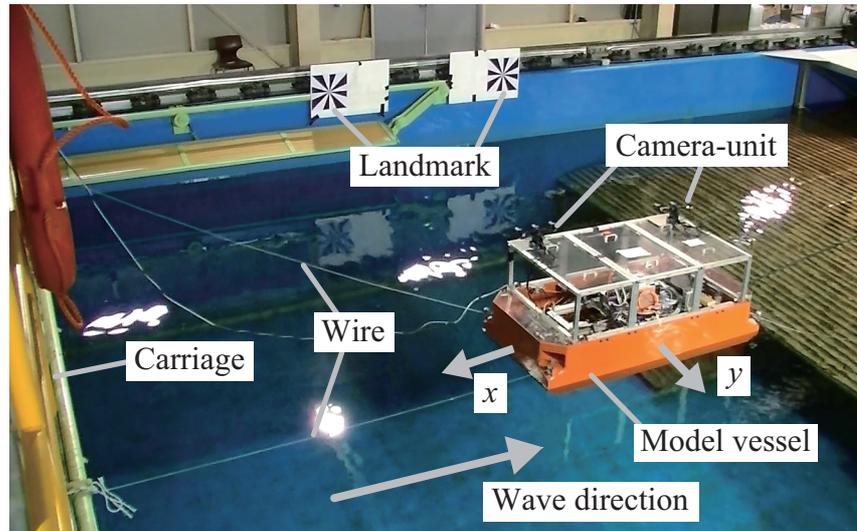


Fig. 3.9 Condition of the experiment on a towing tank.

3.7 水上における本システムの有用性の評価

波による船体の揺れがある環境における、本システムの有用性を評価するため、韓国国立水産科学院にある試験水槽で本システムを用いた計測実験を行った。試験水槽は、長さ 85m、幅 10m、深さ 3.5m の大きさを持ち、波を発生させることができる。

Fig. 3.9 に実験の構成を示す。実験では、長さ 2000mm、幅 1000mm のモデル船を利用した。モデル船の 4 隅は、壁および可動式の橋にワイヤにより係留されている。水上におけるモデル船の喫水は約 100mm であった。カメラユニットは、モデル船上の船底から 850mm の高さに 1316mm の間隔で設置されている。2 つランドマークを 2138mm の間隔で壁に貼付されている。カメラの焦点距離などのその他のパラメータについては、精度評価に関する実験と同じとした。波による船体の揺れがある場合においても、正確に船体の位置・姿勢が計測できるか検証するため、波がない場合と波がある場合の 2 つの条件において計測を行った。実験において、発生させた波は波高 2cm、周期 2 秒である。実験では、船体の動きが安定した後、60 秒間、船体の位置お

よび向きを計測した。

Figs. 3.10, Fig 3.11 に、慣性センサ (MTi-10, Xsens 社製) を用いて観測された計測時のロールおよびピッチの角速度を示す。観測に用いた慣性センサの精度は $0.1^\circ/s$ である。波がない条件では、ロールの最大角速度が約 $1.1^\circ/s$ 、ピッチの最大角速度が約 $1.0^\circ/s$ であった。一方、2cm の波がある条件では、ロールの振幅が $\pm 1.2^\circ/s$ 、ピッチの振幅が $\pm 2.0^\circ/s$ であった。同条件におけるロールの最大角速度は約 $3.4^\circ/s$ 、ピッチの最大角速度は約 $2.7^\circ/s$ であった。

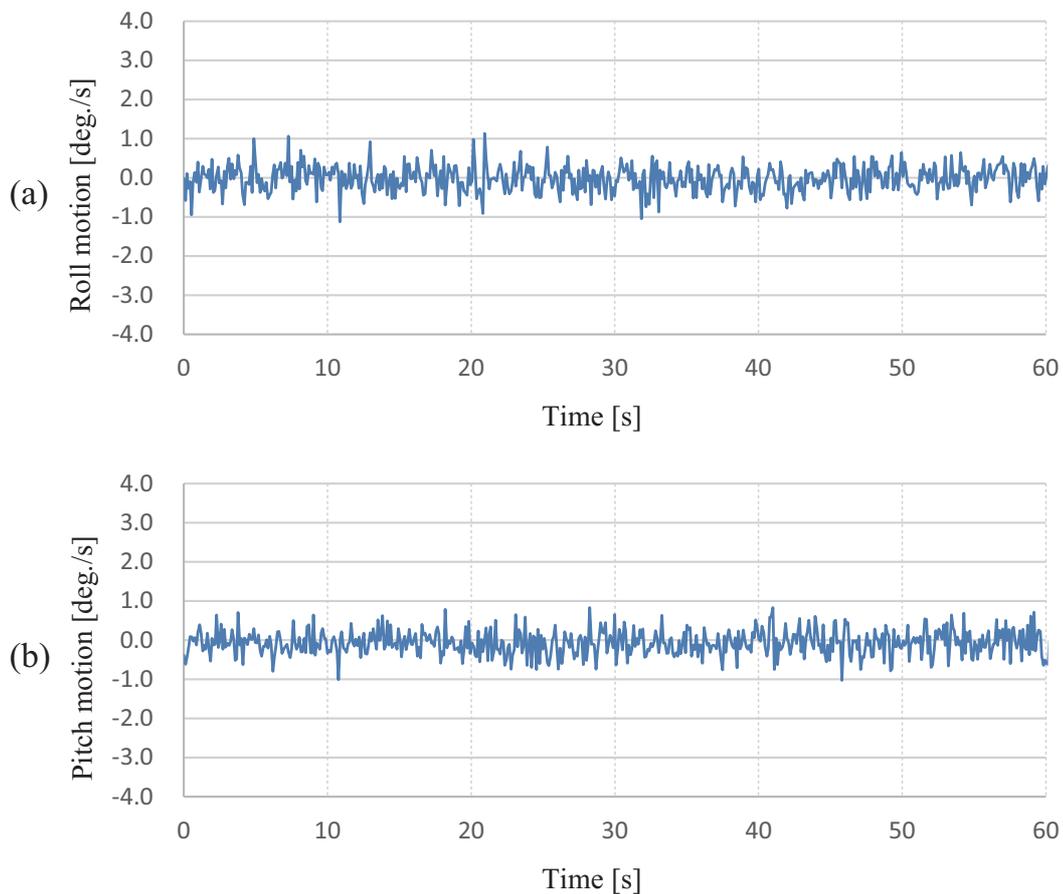


Fig. 3.10 Angular velocities of the model vessel in condition without waves:
(a) angular velocity of roll motion, and (b) angular velocity of pitch motion.

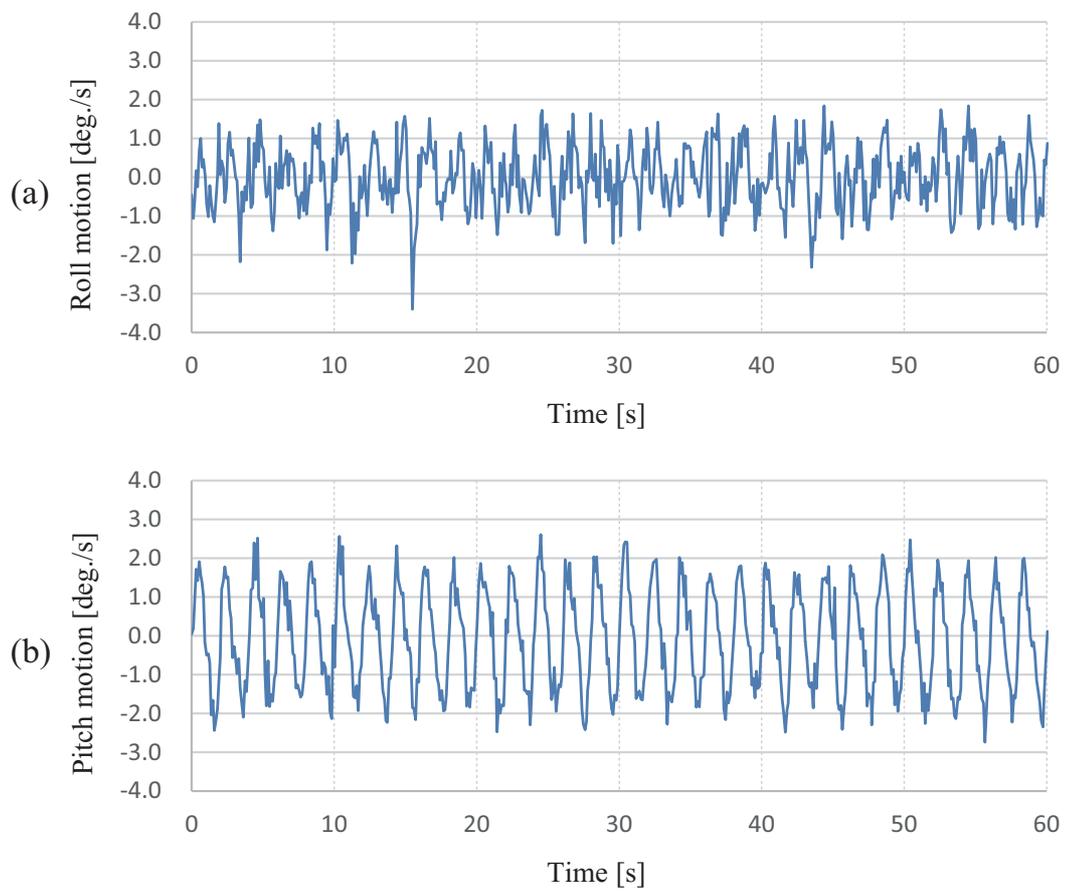


Fig. 3.11 Angular velocities of the model vessel in condition with 2 cm waves:
(a) angular velocity of roll motion, and (b) angular velocity of pitch motion.

Table 3.4 Processing time of the proposed system.

Condition	Parameter	Standard deviation
Without waves	x	10.4 mm
	y	3.1 mm
	θ	0.1°
With waves	x	16.9 mm
	y	5.6 mm
	θ	0.2°

Figs. 3.12, Fig 3.13 に、計測によって得られた、船体の位置 x , y , 向き θ を示す。Figs. 3.12 が波のない条件における計測結果、Fig 3.13 が波のある条件における計測結果である。結果から、波の有無にかかわらず、 x , y とともに 50mm 以下の誤差で計測できていることがわかる。また、各条件において計測された位置 x , y , 姿勢 θ の標準偏差をまとめたものが Table 3.4 である。波のない条件における x の標準偏差は 10.4mm であった。 y の標準偏差は 3.1mm, θ の標準偏差は 0.1° であった。2cm の波がある条件における x の標準偏差は 16.9mm, y の標準偏差は 5.6mm, θ の標準偏差は 0.2° であった。両条件における標準偏差から、波がある条件においても、大きな誤差を生じることなく、近い精度で計測できていることがわかる。波のない条件に比べて波のある条件での計測結果の方が僅かに計測値の変動が大きくなっているが、これは船体の揺れに伴ってカメラユニット自体が前後に移動していることが要因と考えられる。これらの結果から、波がある場合においても本システムを用いた位置・姿勢の計測における有用性が示された。

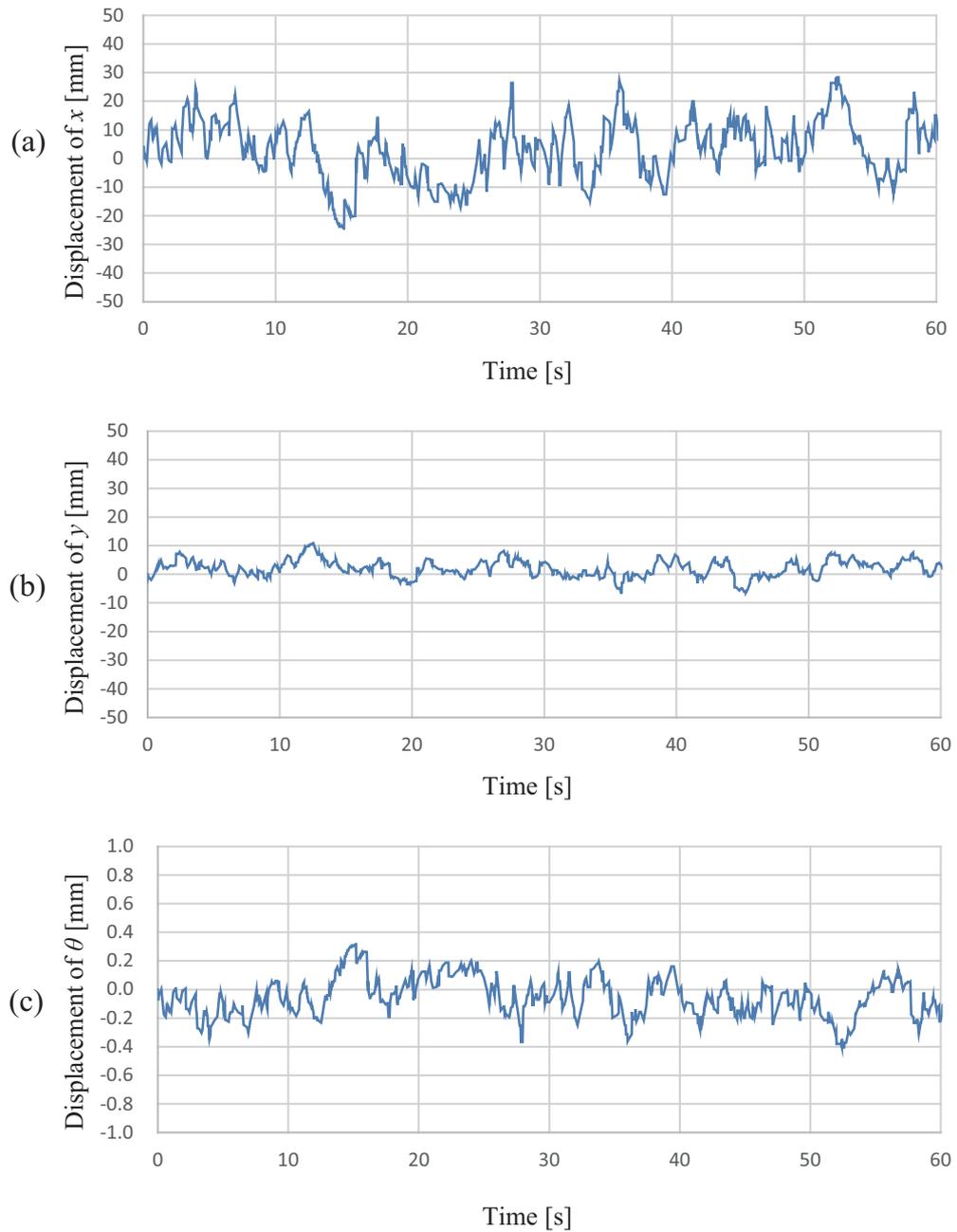


Fig. 3.12 Measured position and heading in the condition without waves: (a) displacement of x position, (b) displacement of y position, and (c) displacement of heading.

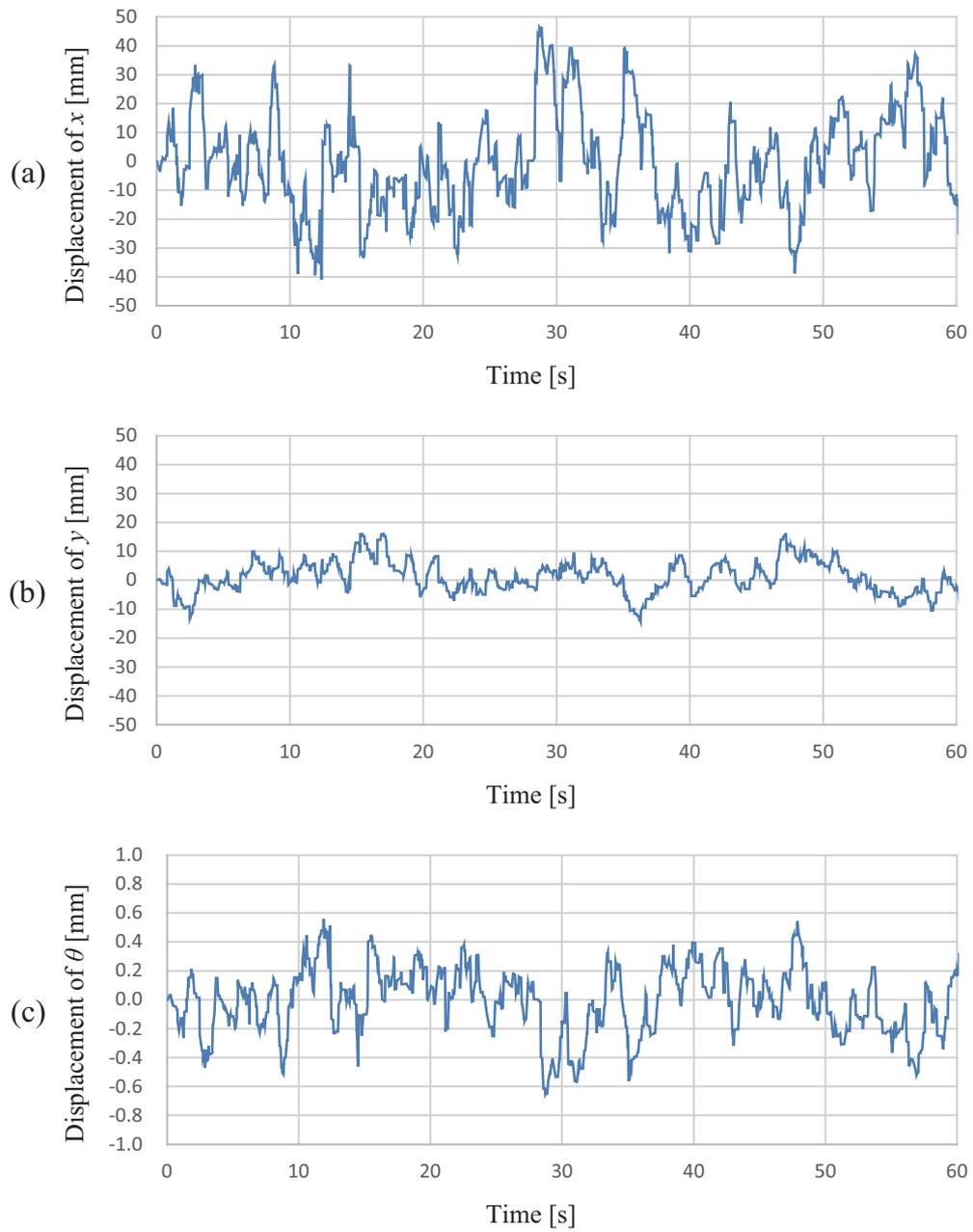


Fig. 3.13 Measured position and heading in the condition with waves: (a) displacement of x position, (b) displacement of y position, and (c) displacement of heading.

3.8 本章のまとめ

本章では、近距離での船位保持に必要なとなる船体の高精度かつ高速な位置・姿勢の実現のために、カメラを用いた位置・姿勢の計測システムを提案した。提案システムでは、2組のカメラユニットを用いて得られた、対象側に設置されたランドマークに対する距離と角度に基づいて船体の位置と向きの計測を実現した。輝度勾配の符号に基づく単純かつ頑健なテンプレートマッチング手法を採用することにより、高速な計測を実現した。さらに、カメラの設置誤差に依存する距離計測の誤差、カメラユニットの設置誤差に依存する位置・姿勢の計測誤差を補正する手法についても、それぞれ提案した。本システムによる船体の位置・姿勢の計測精度を評価実験を行った。その実験結果から、本システムにより、近距離での船位保持に適用可能な精度で位置・姿勢の計測が可能であることを示した。位置・姿勢の計測における処理時間の評価により、速い応答性を要する近距離での船位保での利用に十分な高速な計測が可能であることを示した。また、実環境で想定される波による計測への影響を明らかにするため、人工的に波を発生させた試験水槽において、モデル船の位置・姿勢を計測した。その実験結果から、波のある水上でも、船体の揺れに依存することなく、十分な精度で位置・姿勢の計測が可能であることを示した。これらの成果により、衝突等の危機回避のために高い計測精度および高速な時間応答性を要する近距離における船位保持の自動化に対する、本章において提案したカメラを用いた計測システムの応用の可能性が示されたと言える。

第4章

相対船位保持のための画像に基づく 位置・姿勢のマーカレス計測

本章では，3章で述べたシステムを応用した船舶の位置・姿勢のマーカレス計測について述べる．実環境で想定される埠頭や浮体プラント，船舶などの計測対象はエッジや冗長的な特徴を多く含むため，多数の特徴の誤対応により，任意の計測点に対する距離，方向を実スケールで計測することは難しい．そこで，計測対象を平面的に捉え，画像間のホモグラフィを推定することにより，任意に指定した計測点の追従と距離・方向の算出を可能とし，船舶の位置・姿勢のマーカレス計測を実現する．

4.1 背景

積み降ろしを目的とした港湾や浮体式プラントへの接岸などの船位保持において、操船者は長時間に渡る集中を強いられる。それに伴う操船者の疲労は、人的な作業効率や安全性の低下を招く要因の一つとなっている。特に、近距離における操船では、衝突事故などの危険性が増大する。このような危険性を低減するため、接触の危険を知らせる警報や自動操船による安全かつ効率的な船位保持のための相対的な船舶の位置・姿勢の計測が求められている。

GPS (Global Positioning System) は、洋上において船位を計測する方法の一つである。前章で述べたように、GPS を応用した十分な精度で船位計測を可能とするシステム [4] も提案されている。しかしながら、近距離での位置保持において、GPS を用いた方法は、クレーンや櫓などの構造物による遮蔽により、安定した計測が困難になる恐れがある。加えて、遮蔽のない箇所に受信機を設置する必要性を考えると、近距離における衝突の危険性を低減するために重要な情報となる船体の縁と対象物との相対的な位置関係を正確に得るには課題があると言える。

レーダ [20] の利用は、船位計測におけるもう一つの有力な手段である。近年では、船位保持のためのレーダを用いたシステム [30] も実用化されている。このシステムは、船体に設置された送信器と対象側に設置された複数の反応器から構成される。これらにより得られる送信器と反応器間の距離と方位に基いて船体の位置・姿勢を計測している。もう一つの有力な計測手段として、レーザセンサに基づくシステムが挙げられる。既に実用化されているレーザセンサに基づくシステム [31, 32] は、レーダによる手法と同様に、船体に設置したレーザセンサと対象物に設置した複数の反射板から得られる距離に基いて位置・姿勢を計測している。これらのシステムは、頑健で実

用的な位置・姿勢計測を実現している。一方で、反応器や反射板が設置されている特定の場所における対象の計測に適用場面が限定されてしまう課題がある。

船舶に関連する従来研究として、自動航行のための画像計測システム [23, 24] が報告されている。これらのシステムでは、効果的な障害物検出と衝突回避を実現しているものの、位置・姿勢の計測の実現については言及されていない。著者らは、これまで、ステレオビジョンに基づく船舶の位置・姿勢計測システム [33] を開発してきた。しかしながら、高い計測精度と計測時間を達成している一方で、船舶と対象間の距離を計測するために特殊なランドマーク [27-29, 34] の設置を要するものとなっている。

そこで、計測対象側への設置を必要としない、位置・姿勢のマーカレス計測を可能とするシステムを提案する。本システムでは、3章で述べた構成と同様に、2つのカメラユニットを用いてそれぞれ計測した距離と角度から計測対象と船体の位置・姿勢を推定する。本章で提案する計測では、人工のランドマークの代わりに、計測の開始時に計測対象上の任意の観測点を指定し、位置・姿勢のマーカレス計測を実現する。しかしながら、実環境では、外乱に起因する誤対応によりブロック照合や特徴点照合に基づいて正確な距離を算出するための視差を得ることは難しい。そこで、2つのカメラ画像中の特徴点群を用いて推定したホモグラフィから視差を算出し、任意観測点の追従と距離の計測を可能とする。これにより、計測対象側への設置を必要としない、船舶の位置・姿勢のマーカレス計測を実現する。プロトタイプ of 計測システムとモデル船を用いた実験から、提案システムの計測精度を評価する。また、実環境を想定し、船体に揺れを与えた場合の計測精度についても検証する。

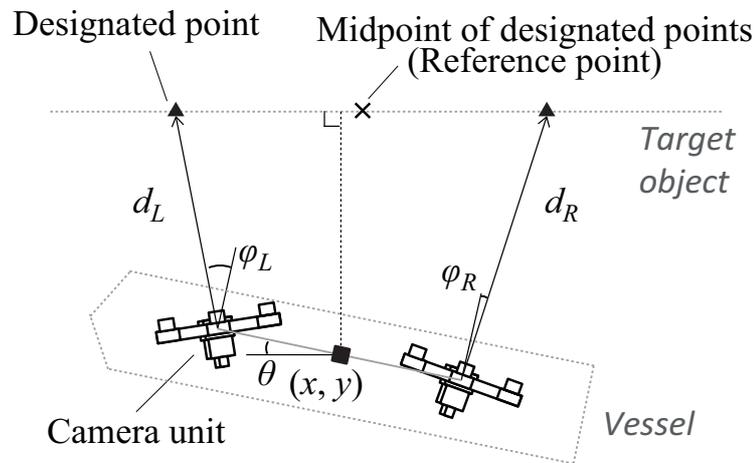


Fig. 4.1 Configuration of the proposed measurement system.

4.2 マーカレス計測におけるシステムの構成

Fig. 4.1 に提案システムの構成を示す。提案システムは、船舶上に設置された2つのカメラユニットから構成される。船舶のような大型対象の位置・姿勢の計測を局所領域のみから高精度に計測することは難しいため、複数の計測点を設け、十分な計測器間の基線長を確保することが望ましい。そこで、提案システムでは、3章にて述べた2つのカメラユニットを用いてそれぞれ計測した指定点までの距離と角度から、計測対象と船体の位置・姿勢を推定する。計測の開始時に、各カメラユニットで任意の観測点を指定し、規範画像を取得する。この規範画像の中心を指定点として、カメラユニットが追跡しながら距離 d_L , d_R と角度 φ_L , φ_R を計測する。これらの距離と角度から、2つの観測点の midpoint を基準とする船位 (x, y) と姿勢 θ を得る。

4.3 指定点の追跡

提案システムでは、船体の位置・姿勢を計測するため、カメラユニット毎に計測対象上の任意の観測点を指定し、その指定点を追跡し続ける必要がある。指定点を追跡するために、規範画像と現在画像の位置ずれを画像特徴点に基づいて算出する。近年では、多くの特徴点の検出・記述手法 [35–39] が提案されている。これらの手法の中でも FAST [35] や BRIEF [37] など高速であるものの、SIFT [38] や SURF [39] に比べ、検出や照合における頑健性が低いとされている。一方で、SIFT は計算コストが高く、リアルタイム性が要求される計測での利用は適さない。本システムでは、照合における比較的高い頑健性と高速な処理の両立が可能な、GPU を用いた SURF (GPU-SURF) による特徴点の検出と照合を採用する。

Fig. 4.2(a) が規範画像から GPU-SURF により検出された特徴点、Fig. 4.2(b) が少し異なる視点で取得された画像から検出された特徴点である。また、図中の三角が指定点である。得られた特徴点を照合することで、Fig. 4.2(c) のような対応点が得られる。ここでは、各線分が 2 画像間の特徴点を対応を表している。しかしながら、得られた対応点には、冗長的な特徴の存在などにより、多くの誤対応が含まれている。そこで、画像上における対応点同士のユークリッド距離を投票処理することで、Fig. 4.2(d) のように誤対応を除去する。さらに、得られた対応点を用いて 2 画像間のホモグラフィを算出する。この時、RANSAC [40] を適用することで、外れ値を除外してホモグラフィを算出し、Fig. 4.2(d) 中の矢印のような画像のずれを指定点の並進量として得る。

前述の処理により得られた指定点は、Fig. 4.3(a) のように、画像上の座標 (u, v) に投影される。画像内の指定点の座標 (u, v) に基づいて、カメラの光軸と指定点のなす

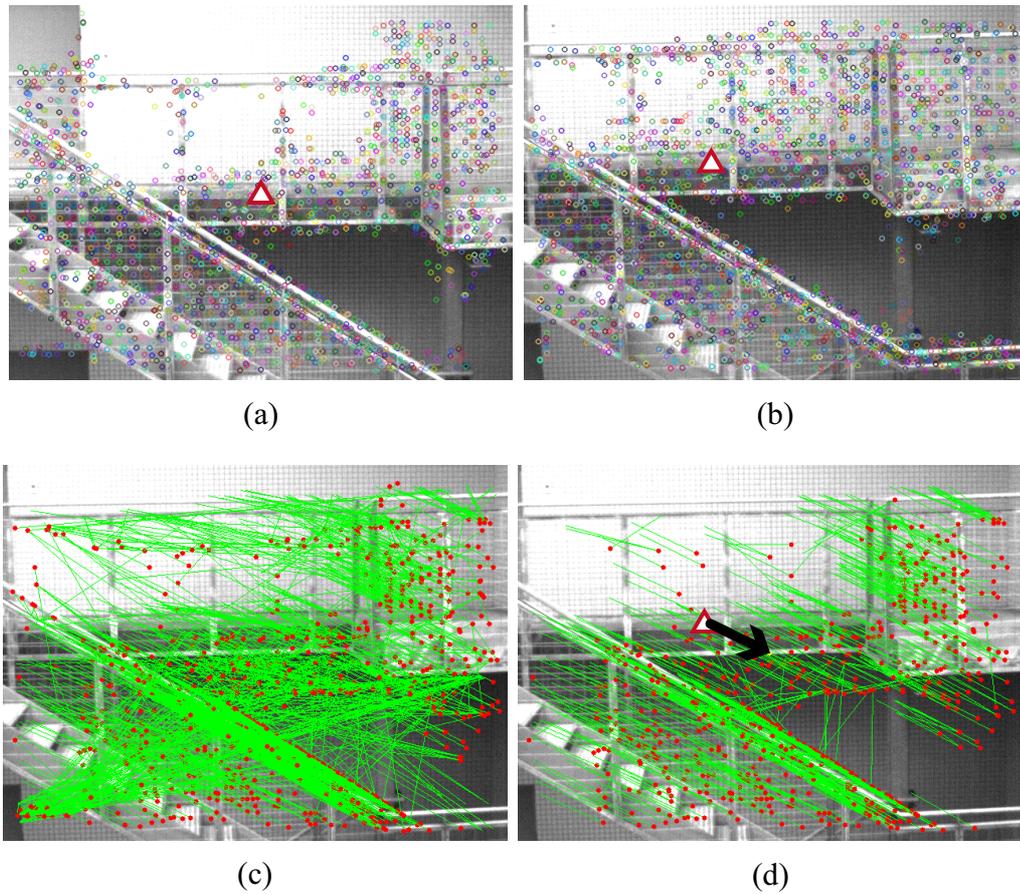


Fig. 4.2 Estimation of displacement between two image frames.

水平角 ψ_{cx} を次式により計算する.

$$\psi_{cx} = \tan^{-1} \frac{us_u}{f} \quad (4.1)$$

ここで、 f はレンズの焦点距離、 s_u は水平方向のピクセルサイズを表す. 垂直角 ψ_{cy} についても、水平角 ψ_{cx} と同様の手順により算出することができる. 得られた水平角 ψ_{cx} および垂直角 ψ_{cy} を最小化するように、電動雲台のパン軸とチルト軸を回転制御することで、常に指定点が画像内に収まるように追従させる.

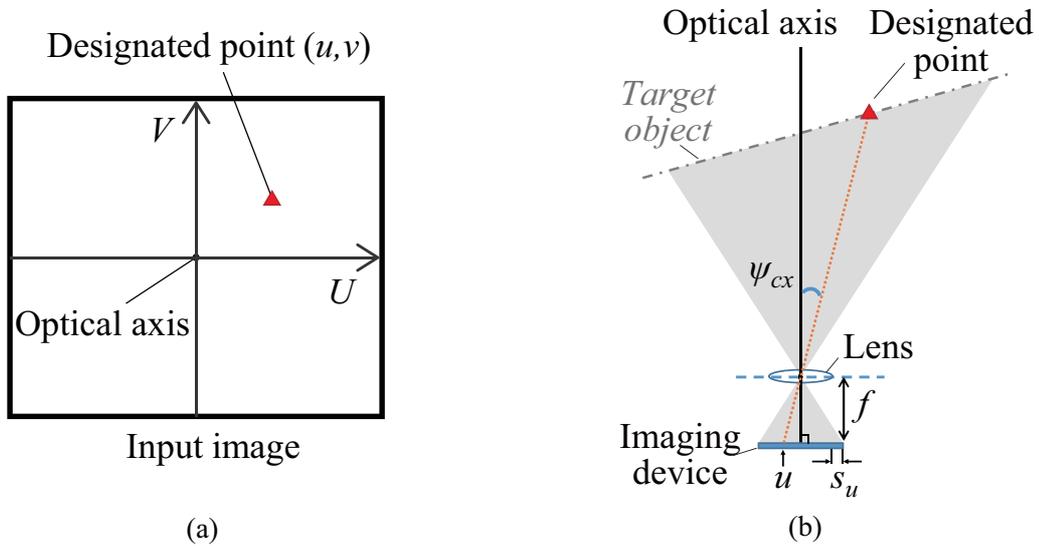


Fig. 4.3 Calculation of the direction angle to the designated point: (a) projected position of the designated point in an input image, and (b) geometry for calculating the angle between optical axis and the designated point.

4.4 距離の計測

前節と同じ手法を用いて、左右の計測用カメラ画像の特徴点の対応から、2画像間のホモグラフィを推定する。これにより得られたホモグラフィに基づいて、カメラユニットから対象物までの距離を計算する。Fig. 4.4 に距離計測の概要を示す。Fig. 4.4(a)中の \times 印は対象物ともう一方のカメラの光軸との交点を表す。左計測用カメラ画像に投影された右計測用カメラの光軸と対象物の交点座標 $\mathbf{p}_l = (p_{lu}, p_{lv}, 1)^T$ は、右計測用カメラ画像の中心座標 $\mathbf{c}_r = (c_{ru}, c_{rv}, 1)^T$ と右計測用カメラから左計測用カメラへのホモグラフィを表す行列 \mathbf{H} を用いて、次のように定義される。

$$s\mathbf{p}_l = \mathbf{H}\mathbf{c}_r \quad (4.2)$$

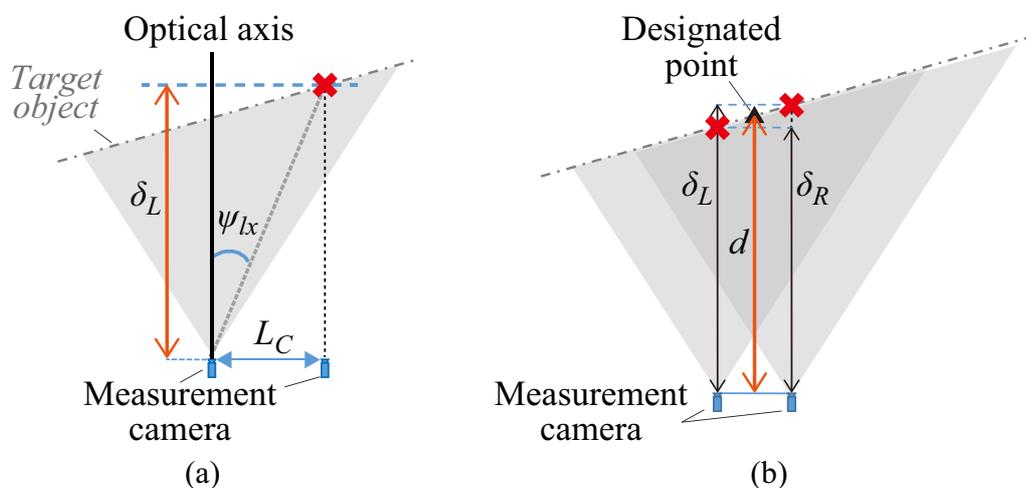


Fig. 4.4 Illustration of distance measurement based on the homography between two measurement cameras: (a) angle calculation between the optical axis and center point of another camera image, and (b) distance calculation between the designated point and the camera unit.

ここで、 s はスケール係数である。右計測用カメラ画像中の交点座標 \mathbf{p}_r も同様に、左計測用カメラ画像の中心座標 \mathbf{c}_l を用いて次式で定義される。

$$s\mathbf{p}_r = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{c}_l \quad (4.3)$$

これにより得られた交点座標から、各カメラの光軸と交点のなす角 ψ_{lx} , ψ_{ry} を以下の式を用いて計算する。

$$\psi_{lx} = \tan^{-1} \frac{p_{lu}s_u}{f}, \quad (4.4)$$

$$\psi_{ry} = \tan^{-1} \frac{p_{ru}s_u}{f}, \quad (4.5)$$

ここで、 s_u および f は前節と同様に、それぞれ水平方向のピクセルサイズと焦点距離である。

得られた角度 ψ_{lx} を用いて、カメラユニットから交点までの距離 δ_L , δ_R を算出する。

$$\delta_L = \frac{L_C}{\tan \psi_{lx}} \quad (4.6)$$

$$\delta_R = \frac{L_C}{\tan \psi_{rx}} \quad (4.7)$$

ここで、 L_C は計測用カメラ間の基線長を表す。これらの距離に基づいて、カメラユニットから指定点までの距離 d を次式により得る。

$$d = \frac{\delta_L + \delta_R}{2} \quad (4.8)$$

カメラユニットの水平角 φ は、追跡用カメラから得られた水平角 ψ_{cx} と電動雲台のパン角 ξ_{pan} から次のように決定される。

$$\varphi = \psi_{cx} + \xi_{pan} \quad (4.9)$$

カメラユニットの垂直角についても、水平角 ψ と同様の手順により得ることができる。

これらにより各カメラユニットから得られる指定点に対する距離と方向に基づいて、3.4 で述べた方法により、船体の位置・姿勢を算出する。

4.5 本システムの性能評価

4.5.1 計測精度の評価

本システムが船位保持に応用可能な精度を持つか検証するため、モデル船とプロトタイプとなる計測システムを構築し、計測精度を評価した。Fig. 4.5 に評価実験の条件を示す。実験では、全長 2m、幅 1m のモデル船上にカメラユニットを 1316mm 間隔で設置し、計測を行った。モデル船の喫水（船底から水面までの深さ）は約 0.15m であった。Table 4.1 に実験に使用したプロトタイプシステムの構成パラメータを示す。カメラユニットには、 $7.5 \mu\text{m}$ のピクセルサイズ、 640×480 ピクセルの解像度を持つカメラを利用した。また、計測用カメラには 16mm、追跡用カメラには 8mm の焦点距離を持つレンズを利用した。計測用カメラの間隔は 300mm とした。プロトタイ

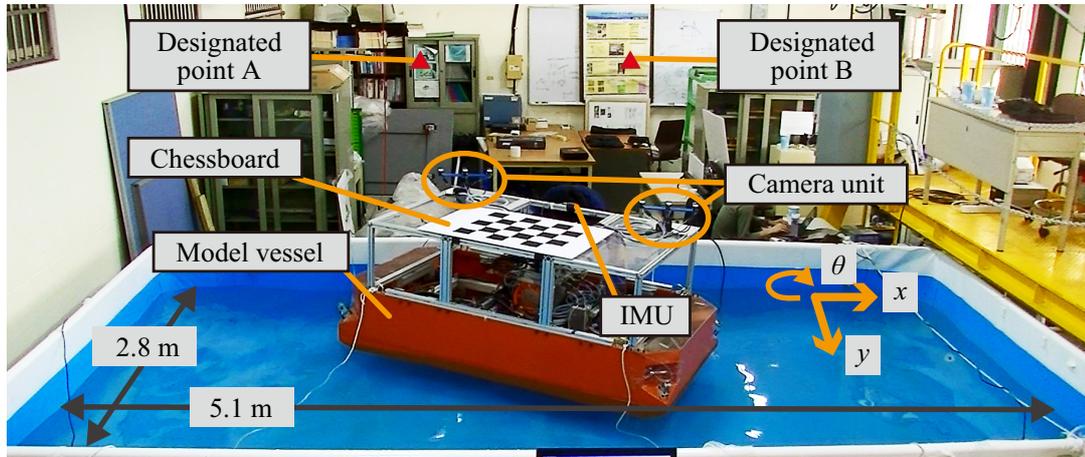


Fig. 4.5 Experimental conditions in water.

Table 4.1 Configuration parameters of the prototype marker-less measurement system

Parameter	Value
Baseline length of camera units (L_U)	1316 mm
Baseline length between measurement cameras (L_C)	300 mm
Focal length of measurement cameras	16 mm
Focal length of tracking cameras	8 mm
Pixel size	7.5 μm
Image resolution	640 \times 480 pixel

システムは、船底から 850mm の高さに設置した。計測の開始時には、約 7m の距離にある壁面上の点 A, B を指定した。さらに、船体の実際の動作を得るため、チェスボードパターンと慣性センサ (Xsens MTi-10) をモデル船上に設置した。また、天井に設置したカメラを用いてモデル船上に貼付したチェスボードパターンから 6 自由度の動作を計測 [17] し、評価の基準とした。

本実験では、Fig. 4.5 中に示す x 方向の並進、 y 方向の並進、水平方向の回転 θ をそれぞれ与えた 3 つの条件で計測を行った。また、波による船体の揺れに対する影響を

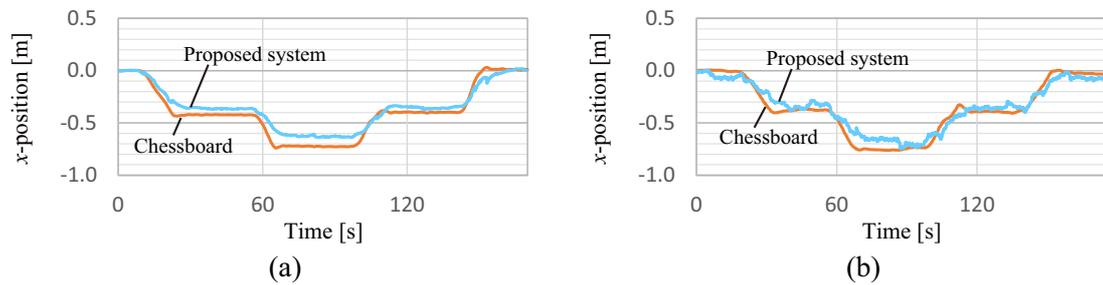


Fig. 4.6 Measured x positions of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.

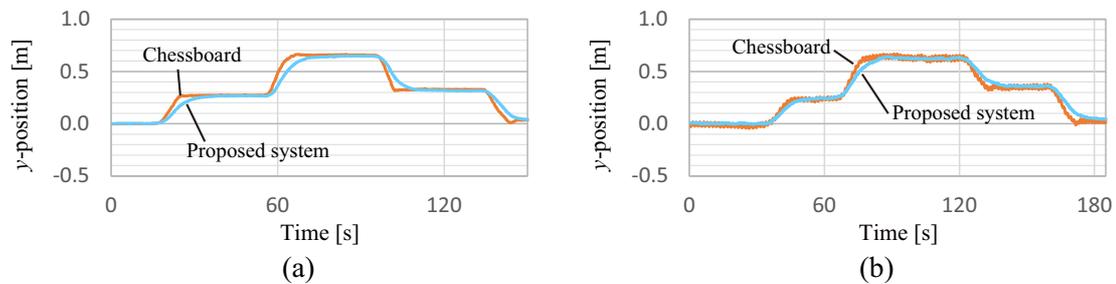


Fig. 4.7 Measured y positions of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.

評価するため、各条件において全長方向を軸とするロール回転を船体に加えた場合と加えない場合でそれぞれ計測を行った。ロール回転を加えた時に慣性センサにより計測された船体の揺れは、 x 方向への並進時が $\pm 2.7^\circ$ 、 y 方向への並進時が $\pm 2.5^\circ$ 、水平方向への回転時が $\pm 2.2^\circ$ であった。また、それぞれの周期は、 x 方向への並進時が 1.50-1.72 秒、 y 方向への並進時が 1.38-1.67 秒、水平方向への回転時が 1.43-1.54 秒であった。

Figs. 4.6–4.8 に、 x 方向への並進時、 y 方向への並進時、水平方向への回転時におけるそれぞれの計測の結果を示す。各図において、(a) は波がない場合、(b) は波がある

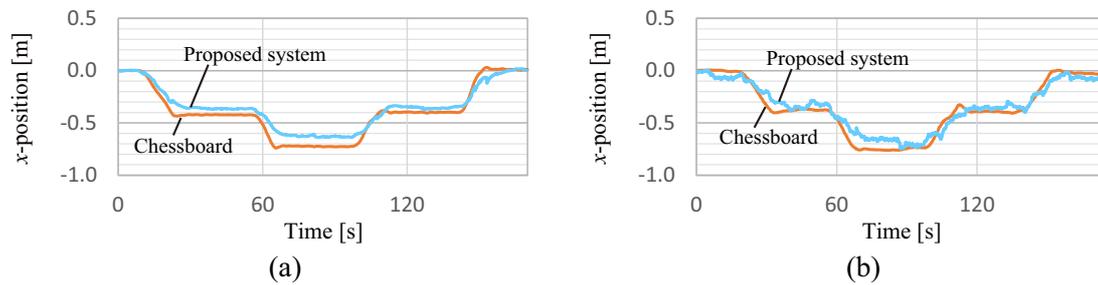


Fig. 4.8 Measured headings θ of the model vessel: (a) results under the condition without roll motion of the model vessel, and (b) results under the condition with roll motion of the model vessel.

Table 4.2 Average errors, maximum errors, and standard deviation of the measured positions and headings under the condition without roll motion of the model vessel.

Parameter	Average error	Maximum error	Standard deviation
x	0.059 m	0.169 m	0.037 m
y	0.029 m	0.132 m	0.033 m
θ	0.66°	3.15°	0.53°

場合の結果をそれぞれ示す。図中の位置および姿勢は、0.0秒時の位置・姿勢を基準とした相対的な位置・姿勢である。実際の船体の動作に対応して、提案システムにより計測された位置・姿勢が変化している。これらから、 x 方向への並進、 y 方向への並進、水平方向への回転がある場合においても、指定点を追従し、継続的に位置・姿勢を計測できていることがわかる。

Table 4.2 と Table 4.3 に各条件における、位置・姿勢の平均誤差と絶対誤差、標準偏差を示す。 x 方向および y 方向の平均誤差はいずれも、最も精度の要求される接岸作業における船位計測に必要なとされる0.1mを十分に下回っている。各標準偏差についても、0.05m未満となっており、安定した計測結果が得られていることがわかる。

Table 4.3 Average errors, maximum errors, and standard deviation of the measured positions and headings under the condition with roll motion of the model vessel.

Parameter	Average error	Maximum error	Standard deviation
x	0.053 m	0.198 m	0.036 m
y	0.027 m	0.112 m	0.024 m
θ	0.58°	2.23°	0.39°

接岸作業では、計測される姿勢の誤差は 0.1° 以下であることが望ましいが、実験結果では 0.66° 、 0.58° となった。これは、カメラユニット間の基線長は1.3mと極端に短いものとなっていることが主な要因である。実用場面では、船舶の全長に応じてカメラユニット間の基線長は数十mになるため、その長さに応じて姿勢の誤差は大幅に小さくなることが予想される。つまり、提案システムは、姿勢計測においても接岸作業など高い精度が求められる利用場面においても要求精度を十分に満たすことが可能であると言える。また、船体のロール回転の有無にかかわらず、同程度の平均誤差、最大誤差、標準偏差で位置・姿勢を計測できている。これらの結果から、波などによる船体の回転がある場合においても、提案システムが十分な精度で船体の位置・姿勢を計測可能であることが示された。

4.5.2 処理時間の評価

本システムが十分な処理速度を持つか検証するため、処理時間の評価を行った。実験では、CPUとしてIntel(R) Core(TM) i7-4710MQ, GPUとしてGeForce GTX860 Mを搭載した、ノートPCを利用した。

Table 4.4 に位置・姿勢の計測における各処理の時間を示す。これらの結果は、300

Table 4.4 Processing time of the marker-less measurements.

Process	Time [ms]
Feature-points detection and matching for distance measurement	47.85
Homography estimation for distance measurement	1.10
Distance and angle calculation	0.02
Feature-points detection and matching for tracking	39.36
Displacement calculation	1.08
Position and orientation estimation	0.05

回の計測における平均の処理時間である。両計測用カメラによる SURF 特徴点の検出および照合に要した時間は 47.85 ms であった。ホモグラフィに基づく視差の算出に要した時間は 1.10 ms, 距離と方向 ψ の算出に要した時間は 0.02 ms であった。また, 追跡用カメラによる SURF 特徴点の検出および照合に要した時間は 39.36 ms, ホモグラフィの推定および位置ずれの算出に要した時間は 1.08 ms であった。両カメラユニットから得られた距離と方向に基づく位置・姿勢の算出に要した時間は, 0.05 ms であった。つまり, 両計測用カメラによる距離の算出, 追跡用カメラによる方向ずれの算出, 位置・姿勢の算出は, それぞれ並列に実行される処理であるため, 20 Hz 以上の計測が可能であることわかる。一般に利用されている GPS や Radar が数 Hz 周期であることを考えると, 本システムは十分な処理速度を持つと言える。加えて, 本実験では, プロトタイプとして可動性を確保するために処理能力の低いノート PC を利用しているが, 実際に船上に実装する場合には, 処理能力の高いデスクトップ PC 等を利用することで大幅に処理速度を向上できることから, 本システムは十分な処理速度を有していると言える。

4.6 本章のまとめ

本章では、大型船舶の位置・姿勢をマーカレス計測するシステムについて述べた。提案システムでは、計測開始時に計測対象上の任意の計測点を指定することで、追跡用カメラを用いて規範画像を取得する。この規範画像と現在の画像中の画像特徴点からホモグラフィを推定することで、カメラユニットによる指定した計測点の追従を可能とした。また、カメラユニットの左右に設置された計測用カメラから得られる特徴点の対応からホモグラフィを推定することで指定された計測点の視差を算出し、平行等位ステレオの原理に基づいて距離と方向の計測を可能とした。これらにより、得られた2組の距離と角度に基づく船体の位置・姿勢の計測を実現した。モデル船とプロトタイプとなる計測システムを用いた計測精度の評価実験では、船体の揺れの有無にかかわらず、船位保持に応用可能な十分な計測精度を持つことを明らかにした。これらの成果により、冗長的な特徴を持つ任意の計測点に基づくステレオカメラを利用した位置・姿勢の計測における、ホモグラフィに着目したアプローチの有用性が示された。

第5章

結論

本論文では，画像特徴点に基づく位置・姿勢のマーカレス計測のアプローチとして，ホモグラフィに着目した2つの応用について述べてきた。

まず，明瞭なテクスチャを持たず，形状変化を伴う計測対象として手の位置・姿勢に着目し，ウェアラブルデバイスを用いたARにおけるインタフェースを目的とした単眼カメラによる手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測手法について述べた。提案手法では，手の形状変化に関わる指の動作を平面的に限定し，事前に獲得した手のひらの三次元モデルと入力画像中の特徴点の対応からホモグラフィを算出することで，指の動きによる形状変化を伴う手のひらの位置・姿勢のマーカレス計測を可能とした。提案手法とカード状の人工マーカを用いて重畳表示した仮想情報の定性的，定量的な比較による描画性能の評価実験では，従来から広く利用されている人工マーカと比べて大きな誤差を生じることなく仮想情報の重畳表示が可能であることを明らかにした。また，処理時間の評価実験から，処理能力の乏しいウェアラブルデバイスにおいて仮想情報を重畳表示するための時間的整合性を十分に満たしていることを明らかにした。さらに，提案手法を用いた応用実験により，指の動きを利用した表示オブジェ

クトの切り替えおよび表示パラメータの変更が可能であることを示した。

次に、近距離での相対船位保持を目的とした船舶の位置・姿勢の計測システムについて述べた。3章では、マーカレスでの計測に先駆け、カメラユニットと人工ランドマークを利用した船舶の位置・姿勢計測について述べ、その根幹となるシステムの構成と計測の原理について示した。同システムを用いた計測精度の評価実験と処理時間の評価実験により、提案システムにより近距離での船位保持に有用な位置・姿勢の計測が可能であることを示した。また、モデル船を用いた波のある水上環境における実験により、船体に揺れがある場合における本システムを用いた計測の有効性を示した。4章では、構築したシステムを応用した船舶の位置・姿勢のマーカレス計測について述べた。本マーカレス計測では、計測の開始時に取得した規範画像と現在の画像から抽出した画像特徴点の対応に基づいてホモグラフィを推定することで、カメラユニットによる指定した計測点の追従を可能とした。さらに、カメラユニットの左右に設置された計測用カメラ間のホモグラフィから得られる視差に基づいて、冗長的な特徴により誤対応が多く含まれる任意の計測点に対する距離と方向を計測を可能とした。これにより得られる2組の距離と方向、カメラユニット間の基線長に基づく船体の位置・姿勢のマーカレス計測を実現した。実験では、モデル船に実装したプロトタイプシステムを用いて、提案システムの計測精度を評価し、提案システムが船位保持に応用しうる十分な位置・姿勢の計測精度を持つことを示した。また、同実験では、船体のロール回転を加えた条件においても位置・姿勢を計測し、実環境で想定される船体の揺れに対して、十分な頑健性を持つことを示した。さらに、処理時間の評価実験から、船位の制御に応用可能な十分な周期で計測が可能であることを示した。

これらの応用では、計測対象を平面的にみなすよう制約を設け、ホモグラフィを推定することで、画像特徴点に基づく位置・姿勢計測における形状変化を伴う対象の効

率的な計測や誤対応を多く含む対象に対する高精度な計測の課題解決を実現しており、画像特徴点に基づくホモグラフィに着目したアプローチの有用性を明らかにしている。また、これらの成果は、単眼カメラを用いたモデルベースの位置・姿勢計測およびステレオビジョンに基づく位置・姿勢計測における本アプローチに基づく位置・姿勢のマーカレス計測の応用の可能性を示している。

謝辞

本研究は、創価大学大学院工学研究科 崔龍雲教授の御指導のもとに行われたものであります。崔教授は、博士後期課程において同研究室への配属を承諾して下さり、以来現在に至るまで、学会発表、論文執筆の指導を通して、教育者、研究者としてのあり方を熱意あふれる御言葉で御教示下さいました。崔教授には、学部生時代からの長きにわたり、公私の区別なく様々な御指導、御鞭撻を賜りました。熱意あふれる御指導のもとで学ばせて頂いた事に感謝すると共に、心から厚く御礼申し上げます。

本論文は、副査として渡辺一弘教授、伊与田健敏准教授の両先生に御指導を賜り、書き上げられたものであります。心より深く感謝申し上げます。

また、国立釜慶大学校の金英福教授には、本研究における貴重なアイデアおよび専門分野における多くの知識を御教授賜るとともに、同大学における実験環境、機材の提供、実験や学会発表における滞在中の補助に至るまで多くの支援を賜りました。金教授ならびに、ご支援頂いた同研究室の所属メンバーの方々に心から厚く御礼と感謝を申し上げます。

立命館大学の萩原良信助教には、本研究を含め、研究の方向性の指導や多くの貴重なアイデアを賜りました。同助教には、学部生時代からの長きにわたり、公私の区別なく様々な御指導、御鞭撻を賜りました。ここに心から厚く御礼と感謝を申し上げます。

リサーチアシスタントとしてお世話になりました国立情報学研究所/総合研究大学

院大学の稲邑哲也准教授を始め、実行委員の一員として携わらせて頂いたロボカップジャパンオープンの先生方ならび学術研究機関の皆さまには、専門分野における多くの知識と研究を進めるにあたっての多くの刺激を頂きました。ここに心から厚く御礼と感謝を申し上げます。

加えて、本研究を進めるにあたり、多くの協力を頂いた崔研究室のメンバーならびに同研究室の所属する研究グループの先生方、所属メンバー、同グループに所属していた先輩の皆さまに心より感謝と御礼を申し上げます。

経済的に厳しいにも関わらず、大学院への進学を認め、応援し続けて下さった、両親、弟に心から御礼と深謝申し上げます。

最後に本学の創立者である池田大作先生に心より御礼と感謝を申し上げます。池田先生より頂戴した御恩に報いるために、創価教育の発展と一研究者として研究・教育分野の発展に貢献できるよう成長する事を御誓い申し上げ、私の謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 秋月秀一, 橋本学: “特徴的 3-D ベクトルペアを用いたばら積み部品の高速度位置姿勢認識”, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.9, pp.1853–1854, 2013.
- [2] H. Kato and M. Billinghurst: “Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System,” *Proc. of the International Workshop on Augmented Reality*, pp.85–94, 1999.
- [3] M. Fiala: “Artag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques,” *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 590–596 (2005)
- [4] M. Ueno: “A GPS-based System for Precise Shipping Guidance and Control,” *Journal of marine science and technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 9–15, 2000.
- [5] M. de La Gorce and N. Paragios: “A Variational Approach to Monocular Hand-pose Estimation,” *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.114, No. 3, pp. 363–372, 2010.
- [6] M. de La Gorce, D. J. Fleet, and N. Paragios: “Model-based 3D Hand Pose Estimation from Monocular Video,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 33, No. 9, pp. 1793–1805, 2011.
- [7] Google Glass Project: <http://g.co/projectglass>, 2014.

- [8] Moverio BT-200: <http://www.epson.jp/products/moverio/bt200/>, 2014.
- [9] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和: “ウェアラブル拡張現実感システムのための注目オブジェクトへの直感的な注釈提示手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 305-311, 2005.
- [10] S. Henderson and S. Feiner: “Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 10, pp. 1355–1368, 2011.
- [11] V. Buchmann, S. Violich, M. Billinghurst, and A. Cockburn: “FingARtips: Gesture Based Direct Manipulation in Augmented Reality,” *Proc. of the 2nd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 212–221, 2004.
- [12] B. H. Thomas, and W. Piekarski: “Glove Based User Interaction Techniques for Augmented Reality in an Outdoor Environment,” *Virtual Reality*, Vol. 6, No. 3, pp. 167–180, 2002.
- [13] T. Lee and T. Höllerer: “Handy AR: Markerless Inspection of Augmented Reality Objects Using Fingertip Tracking,” *Proc. of the IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 83–90, 2007.
- [14] H. Kato and T. Kato: “A Marker-Less Augmented Reality Based on Fast Fingertip Detection for Smart Phone,” *The Technical Report on the Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 35, No. 7 pp. 23–24, 2011.
- [15] H. Kato and A. Yoneyama: “A Line-based Palm-top Detector for Mobile Augmented Reality,” *Proc. of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp. 208–211, 2012.

- [16] M. J. Jones and J. M. Rehg: “Statistical Color Models with Application to Skin Detection,” *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1274–1280, 1999.
- [17] Z. Y. Zhang: “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [18] J. J. Moré: “The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory,” *Numerical Analysis Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 630, pp. 105–116, 1978.
- [19] A. M. Rothblum: “Human Error and Marine Safety,” *In National Safety Council Congress and Expo*, 2000.
- [20] M. I. Skolnik: “Introduction to Radar Systems,” *McGraw-hill*, 1962.
- [21] R. Abou-Jaoude: “ACC Radar Sensor Technology, Test Requirements, and Test Solution,” *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 155–122, 2003.
- [22] A. R. Jiménez, and F. Seco: “A Short-range Ship Navigation System based on Ladar Imaging and Target Tracking for Improved Safety and Efficiency,” *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 186–197, 2009.
- [23] F. D. Snyder, D. D. Morris, P. H. Haley, R. T. Collons, and A. M. Okerholm: “Autonomous River Navigation,” *Proc. of International Society for Optics and Photonics, Mobile Robotics XVII*, Vol. 5609, pp. 221–232, 2004.
- [24] T. Huntsberger, H. Aghazarian, A. Haward, D. C. Trotz: “Stereo Vision-

- based Navigation for Autonomous Surface Vessels,” *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, Iss. 1, pp. 3–18, 2011.
- [25] A. Benetazzo: “Accurate Measurement of Six Degree Of Freedom Small-scale Ship Motion through Analysis of One Camera Images,” *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 16, pp. 1755–1762, 2011.
- [26] P. Malheiros, P. Rosa-Santos, J. Goncalves, P. Costa, A. P. Moreira, F. Velso-Gomes, and F. Taveira-Pinto: “Robust and Real-time Motion Capture of Rigid Bodies Based on Stereoscopic Vision” *In Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing System*, pp. 749–760, 2013.
- [27] H. Kawai, Y. Choi, Y. B. Kim, Y. Kubota: “Position Measurement of Container Crane Spreader Using an Image Sensor System for Anti-sway Controllers,” *Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 683–686, 2008.
- [28] H. Kawai, Y. B. Kim, and Y. Choi: “Measurement of a Container Crane Spreader Under Bad Weather Conditions by Image Restoration,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 1, pp. 35–42, 2012.
- [29] H. Kawai, Y. B. Kim, and Y. Choi: “Anti-sway System with Image Sensor for Container Cranes,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 10, pp. 2757–2765, 2009.
- [30] RADius, Kongsberg,
<http://www.km.kongsberg.com/>, 2015.
- [31] Bridge Mate CyScan, Marine Technologies, LLC,

- <http://www.marine-technologies.com/>, 2015.
- [32] Fanbeam, Renishaw PLC,
<http://www.renishaw.com/>, 2015.
- [33] Y. Mizuchi, T. Ogura, Y. B. Kim, Y. Hagiwara, Y. Choi: “Accuracy evaluation of camera-based position and heading measurement system for vessel positioning at a very close distance,” *Proc. of 15th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 747–751, 2015.
- [34] Y. Mizuchi, T. Ogura, Y. Hagiwara, A. Suzuki, Y. B. Kim, Y. Choi: “Distance Measurement System using a Stereo Camera and Radial Pattern Target for Automatic Berthing Control,” *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 121–127, 2013.
- [35] E. Rosten, T. Drummond: “Machine Learning for High-speed Corner Detection,” *Proc. of the 2006 European Conference on Computer Vision*, pp. 430–443, 2006
- [36] E. Mair, G. D. Hager, D. Burschka, M. Suppa, G. Hirzinger: “Adaptive and Generic Corner Detection Based on the Accelerated Segment Test,” *Proc. of the 2010 European Conference on Computer Vision*, pp. 183–196, 2010.
- [37] M. Calonder, V. Lepetit, C. Strecha, P. Fua: “BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features,” *Proc. of the 2010 European Conference on Computer Vision*, pp. 778–792, 2010.
- [38] D. G. Lowe: “Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints,” *International journal of computer vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, 2004.
- [39] H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool: “SURF: Speeded-up Robust Features,”

-
- Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359, 2008.
- [40] M. A. Fischler, R. C. Bolles: “Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.

著者文献及び発表目録

(A) 著書への掲載

なし

(B) 論文誌への掲載

- 1) Yoshiaki MIZUCHI, Tadashi OGURA, Young-Bok KIM, and Yongwoon CHOI.

Distance Measurement System Using a Stereo Camera and Radial Pattern Target for Automatic Berthing Control.

Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 15, pp. 121–127, 2013.

- 2) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, and Yongwoon CHOI.

Accuracy Improvement of Stereo-Based Distance Measurement for Close Range Vessel Positioning.

Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 27–32, 2015.

- 3) 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

指の動きによる表示オブジェクトの付加的操作を可能とするパームトップ AR
インタフェース.

電気学会論文誌 C, Vol. 135, No. 12, pp. 27–32, 2015.

- 4) Yoshiaki MIZUCHI, Tadashi OGURA, Yong-Bok KIM, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI

Vision-based Markerless Measurement System for Relative Vessel Positioning.

Journal of IET Science, Measurement & Technology, Vol. 10, Iss. 6, pp. 653–658, 2016.

(C) 学会発表 (国内・国外)

- 1) Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, Hideki KAWAI, Hiroki IMAMURA, Yongwoon CHOI, and Taketoshi IYOTA.

Hand-Shape Recognition of a Rock-Scissors-Paper Game for Robots Using Color and Shape.

2009 International Symposium on Smart Sensing System (ISSS'09). 2009 年 8 月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'09. pp. 71–74.

- 2) 水地良明, 川井秀樹, 萩原良信, 今村弘樹, 伊与田健敏.

指間部に基づく指の曲げや開閉に頑健な単眼 WEB カメラによる手の 3 次元位置および姿勢の推定.

第 42 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会. 2010 年 1 月. 北海道. 同学

会講演論文集, pp. 109–110.

- 3) Yoshiaki MIZUCHI, Hideki KAWAI, Yoshinobu HAGIWARA, Hiroki IMAMURA, and Yongwoon CHOI

Estimation for Position and Orientation of a Hand Robust to Finger Motions Using a Web Camera.

2010 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'10). 2010年8月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'10. Session B Sensing and Actuator System 2.

- 4) 島岡弘正, 水地良明, 萩原良信, 今村弘樹.

全方位カメラの色相情報を用いた LRF によるロボットの自己位置推定の拡張.

2 2011 International Image Sensor Workshop (IISW) 関連およびイメージセンサー一般. 2011年11月. 東京. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 35, No. 47, pp. 13–16.

- 5) Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, Akimasa SUZUKI, and Yongwoon CHOI.

3D Palm Posture Estimation Robust against Finger Motion Using Monocular Camera.

2013 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'13). 2013年8月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'13, pp. 29–34, 2013.

- 6) Toshihide UEHARA, Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI.

State Recognition for a Specified Object Correlated to Tactile-Pressure

Information Using Robot Hand.

2013 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'13). 2013年8月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'13, pp.4-7, 2013.

- 7) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, Yongwoon CHOI, and Kazuhiro Watanabe.

Distance Measurement System using Stereo Camera.

2013 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'13). 2013年8月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'13, pp.13-17, 2013.

- 8) 伴さゆり, 野澤満明, 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

View-based Navigation を応用したテレプレゼンスロボットの自律移動.

第56回自動制御連合講演会. 2013年11月新潟. 同学会講演論文集, pp.807-809.

- 9) 島岡弘正, 水地良明, 萩原良信, 鈴木彰真, 今村弘樹.

人混みにおける全方位カメラを用いたロボットの見え方に基づく位置推定.

第56回自動制御連合講演会. 2013年11月新潟. 講演論文集, pp.810-813.

- 10) 上原俊英, 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

ロボットハンドの触圧に相関のある特定物体の状態認識.

第56回自動制御連合講演会. 2013年11月新潟. 講演論文集, pp.831-833.

- 11) 藤原智, 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

サービスロボットによる物体探索のための特定物体の色相情報を用いた候補位置推定.

- 第 31 回日本ロボット学会学術講演会. 2013 年 9 月 東京. 同学会講演論文集 (CD-ROM), AC1 I3-02, 2013.
- 12) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, Young-Bok KIM, Akimasa Suzuki, Yongwoon CHOI, and Kazuhiro Watanabe.
Distance Measurement System using Stereo Camera for Automatic Ship Control.
2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS2013). 2013 年 10 月. Gwangju (Korea). The Proceedings of ICCAS'2013, pp.1020–1024.
- 13) Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, Akimasa SUZUKI, Hiroki IMAMURA, and Yongwoon CHOI.
Monocular 3D Palm Posture Estimation Based on Feature-Points Robust against Finger Motion.
2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS'13). 2013 年 10 月. Gwangju (Korea). The Proceedings of ICCAS'13, pp.1014–1019.
- 14) Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI.
Monocular Palm Pose Estimation Robust against Finger Motion for Variable AR Marker.
2014 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'14). 2014 年 8 月. Busan (Korea). The Proceedings of ISSS'14, pp.1–5.
- 15) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, and Yongwoon

CHOI.

Vessel Position Measurement using Multiple Cameras and Pan-tilt Units.

2014 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'14). 2014年8月. Busan (Korea), The Proceedings of ISSS'14, pp.6–10.

- 16) Hideyuki WADA, Yoshinobu HAGIWARA, Yoshiaki MIZUCHI, and Yongwoon CHOI.

Efficient Data Collection of Human Behavior in VR Space for the Acquisition of a Greeting Protocol by a Robot.

2014 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'14). 2014年8月. Busan (Korea), The Proceedings of ISSS'14, pp.11–14.

- 17) Shiori YOKOTA, Yoshinobu HAGIWARA, Yoshiaki MIZUCHI, and Yongwoon CHOI.

Collection of Object Concepts by a Robot in VR for the Recognition of Ordered Objects by Human.

2014 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'14). 2014年8月. Busan (Korea), The Proceedings of ISSS'14, pp.15–18.

- 18) 西牧正曜, 水地良明, 小椋忠志, 崔龍雲.

船位計測のための画像内の一部を追跡対象とした距離計測.

第57回自動制御連合講演会. 2014年11月 軽井沢. 同学会講演概要集, pp.314–315.

- 19) 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

手のひらの位置姿勢と指の動きを用いた表示オブジェクトを切り替え可能な
AR インタフェースの開発.

計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014). 2014 年 11
月 岡山. 同学会講演概要集, pp.171–174.

- 20) 和田秀幸, 萩原良信, 水地良明, 崔龍雲, 稲邑哲也.

ロボットのための挨拶プロトコルの獲得を目的としたクラウド型 VR システム
における効率的な言動データの収集.

計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014). 2014 年 11
月 岡山. 同学会講演概要集, pp.418–421.

- 21) 横田栞, 萩原良信, 水地良明, 崔龍雲, 稲邑哲也.

没入型インタフェースを用いたクラウド型 VR システムによる人のマルチモー
ダルな物体概念の収集.

計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014). 2014 年 11
月 岡山. 同学会講演概要集, pp.422–426.

- 22) Yoshinobu HAGIWARA, Yoshiaki MIZUCHI, Yongwoon CHOI, and
Tetsunari INAMURA.

Cloud VR System with Immersive Interfaces to Collect Human Gaze-
Controls and Interpersonal-Behaviors.

2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration
(SII2014). 2014 年 12 月 東京. The Proceedings of SII2014, pp.169–174.

- 23) 萩原良信, 水地良明, 崔龍雲, 稲邑哲也.

人間の身体的注視行動・対人行動の収集を可能とする没入型インタフェースを

伴うクラウド仮想現実システム.

計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014). 2014 年 12 月 東京. 同学会講演論文集, pp. 1706–1708.

- 24) Yoshinobu HAGIWARA, Yoshiaki MIZUCHI, Yongwoon CHOI, and Tetsumari INAMURA.

Cloud VR System with Immersive Interfaces to Collect Humans Gaze and Body Behaviors.

10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2015). 2015 年 3 月 Portland (USA), pp. 175–176, 2015.

- 25) 萩原良信, 水地良明, 崔龍雲, 稲邑哲也.

三次元空間における人間の注意・判断行動の収集を可能とする没入型インタフェースを伴うクラウド型 VR システム.

第 20 回ロボティクスシンポジウム. 2015 年 3 月 長野. 同学会講演論文集, pp. 145–150.

- 26) Makoto MATSUMOTO, Yoshiaki MIZUCHI, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI.

Path and Location Learning from Various Teachers Using View-based Navigation.

2015 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'15). 2015 年 8 月. Hakone (Japan), The Proceedings of ISSS'15, pp. 18–21.

- 27) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, and Yongwoon CHOI.

Accuracy Improvement of Stereo-based Measuring and Tracking System for Precise Vessel Control.

2015 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'15). 2015年8月. Hakone (Japan), The Proceedings of ISSS'15, pp.30–35.

- 28) Yoshiaki MIZUCHI, Tadashi OGURA, Young-Bok KIM, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI.

Accuracy Evaluation of Camera-based Position and Heading Measurement System for Vessel Positioning at a Close Distance.

2015 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'15). 2015年8月. Hakone (Japan), The Proceedings of ISSS'15, pp.40–44.

- 29) Jihoon JANG, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, and Yongwoon CHOI.

Accurate Measurement of Displacement and Angle to a Guideline Considering Camera Pose for Automatic RTGC Navigation.

2015 International Symposium on Smart Sensing and Actuator System (ISSS'15). 2015年8月. Hakone (Japan), The Proceedings of ISSS'15, pp.60–62.

- 30) 横田栞, 萩原良信, 水地良明, 崔龍雲.

対話的な物体の同定のための視線と身体動作を考慮した属性値の大規模な収集を可能とするシステムの構築.

第33回日本ロボット学会学術講演会. 2015年9月 東京. 同学会講演論文集 (CD-ROM), 3F2-02.

- 31) 松本誠, 水地良明, 萩原良信, 崔龍雲.

View-based Navigation に基づく複数の教示者からの経路と場所の名前の学習.
第 33 回日本ロボット学会学術講演会. 2015 年 9 月 東京. 同学会講演論文集
(CD-ROM), 3F2-03.

- 32) Yoshiaki MIZUCHI, Tadashi OGURA, Young-Bok KIM, Yoshinobu HAGIWARA, and Yongwoon CHOI.

Accuracy Evaluation of Camera-based Position and Heading Measurement
System for Vessel Positioning at a Very Close Distance.

2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems
(ICCAS'15). 2015 年 10 月 Pusan (Korea), The proceedings of ICCAS'2015,
pp 747–751.

- 33) Tadashi OGURA, Yoshiaki MIZUCHI, Young-Bok KIM, and Yongwoon CHOI.

Highly Accurate Stereo-based Measuring and Tracking System for Vessel
Control.

2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems
(ICCAS'15). 2015 年 10 月 Pusan (Korea), The proceedings of ICCAS'2015,
pp. 763–768. (Student best paper award)