© 2013 一般社団法人映像情報メディア学会

論 文

マニピュレータに搭載したレーザレンジファインダを用いた透明容器中の液中物体の3次元形状計測

Three Dimensional Measurement of Submerged Objects in Transparent Vessels Using a Manipulator-mounted Laser Range Finder

学生会員 伊部公紀†，正会員 山下 淳††，正会員 金子 透†††，小林祐一†††

Hirotoshi Ibe†, Atsushi Yamashita††, Toru Kaneko††† and Yuichi Kobayashi†††

Abstract An important need exists to digitally archive 3D models of objects, such as specimens of rare underwater creatures. These objects are sometimes preserved in liquid contained in transparent vessels. When measuring submerged objects, light refraction should be considered. Refraction can be considered with ray tracing, but the 3D coordinates of the vessel are necessary to use this method. In this paper, we propose a method that takes advantage of transparent vessels not being completely transparent to measure both a vessel's surface and a submerged object using a laser range finder mounted on a manipulator. The method uses a camera to detect reflections from the vessel surface and the submerged object. A captured image may have multiple reflections from various paths, so it is necessary to identify the correct reflections. The proposed method identifies the reflections from the vessel on the basis of epipolar constraints related to the position of the laser range finder and identifies the reflections from the object by ray tracing. Experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

キーワード：液中画像計測，レーザレンジファインダ，3 次元計測，エピポーラ拘束，光線追跡

1. まえがき

遺跡や彫像などの歴史的資料を3次元計測することによりディジタルアーカイブ化する試みが進んでいる[1)2)]．貴重な資料のアーカイブ化により情報媒体での保存やインターネット上での閲覧などが可能となる．

従来，アーカイブ化の対象として計測される資料は，主として空気中に置かれているが，貴重な深海魚の液浸標本など液体環境下に保存されているものにもアーカイブ化の対象になりうるものが存在する．そこで，液中物体をディジタルアーカイブ化するために，その計測技術が求められる．

一般に液浸標本などの液中物体は，液体で満たされた透明容器内に保存されており，液中物体を容器越しに非接触で計測できる手法として画像計測が有効であると考えられる．しかし，光が液体と容器および空気へと屈折率の異なる媒質へ進む際に，光が屈折し撮影される画像に歪みが生じるため，屈折を考慮しなければ正しい計測が行えない．そこで，屈折画像からカメラに入射する光を逆側に光線追跡し，屈折方向をスネルの法則により求めることで，屈折の影響を除去する方法が提案されている[3)4)]．

これにより，液体環境下で撮影した屈折画像を用いた計測が可能となり，ステレオカメラによる手法[5)6)]や光投影法による手法[7)]など様々な手法が提案され，水中ロボットへの応用などが進められている[8)]．

ここで，スネルの法則により光線の屈折方向を求めるためには，光線と屈折が生じる屈折境界面である容器表面（空気と容器とが接する面）と裏面（容器と液体とが接する面）との交点における面の法線情報が必要となる．このため，画像計測により液体で満たされた透明容器内の液中物体を計測するためには，容器の位置形状情報が求められる．

2011 年 10 月メディア工学研究会で発表
2013年4月25日受付，2013年7月30日再受付，2013年9月18日採録
† 静岡大学 創造科学技術大学院自然科学系教育部 情報科学専攻
（〒 432–8561 静岡県浜松市中区城北 3–5–1，TEL 053-478-1604）
†† 東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻
（〒 113–8656 東京都文京区本郷 7–3–1，TEL 03-5841-6457）
††† 静岡大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
（〒 432–8561 静岡県浜松市中区城北 3–5–1，TEL 053-478-1070）
† Department of Information Science and Technology, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
(3–5–1, Johoku, Naka–ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432–8561 Japan)
†† Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
(7–3–1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113–8656 Japan)
††† Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University
(3–5–1, Johoku, Naka–ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432–8561 Japan)

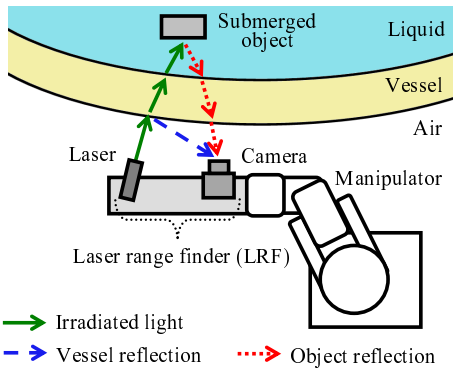


図 1　レーザレンジファインダ
Laser range finder.

Li ら[9]は既知形状物体を液中に配置し，撮影した屈折画像から光線追跡を行った結果と物体形状とが一致するように屈折境界面を推定する方法を提案している．しかし，この方法は，液浸標本のように既に容器内に液中物体が保存されている場合では，既知形状物体を設置することが困難であるため適用できない．また，液中物体を計測する前に容器表面にマーカや非透明体を貼付けて容器の位置形状を取得する手法[10]などは，容器表面に接触した際に，傷や汚れが生じ容器の透明度を損ねる可能性がある．このため，透明容器と液中物体の両方を非接触で計測できることが望ましい．

そこで，Yamashita ら[11]は，透明容器においてわずかに拡散反射光が生じることに着目し，カメラとスポットレーザを組合せたレーザレンジファインダ（LRF）をマニピュレータに搭載し，レーザからの照射光が容器表面と液中物体で反射した光（以降，容器反射光および物体反射光と呼ぶ）をカメラにより撮影することで，容器の位置形状を計測するとともに，液中物体を計測する手法を提案している（**図 1**）．これにより容器と液中物体の両方を非接触に計測することが可能となる．しかし，Yamashita らの手法では，撮影画像中に容器反射光と物体反射光以外の反射光が存在する場合，誤計測することがある．

円柱容器内の液中物体に赤色レーザを照射した際の反射画像を**図 2** に示す．レーザ光は容器と物体間で複雑に反射し，様々な経路によりカメラ画像に映り込む．これらの反射光は，同じレーザ光源に由来するため色特性などにより識別することは困難である．

そこで本論文では，カメラとレーザの位置姿勢関係により決まるエピポーラ拘束と LRF の姿勢変化を用いて容器反射光を識別し[12]，光線追跡により物体反射光を識別する方法を提案する．これにより，撮影画像中に複数の反射光が存在する場合の誤計測を減らし，より正確な容器および容器内の液中物体の 3 次元計測を実現する．

2. 計　測　手　順

本研究では，Yamashita ら[11]と同様に図 1 のマニピュレータに搭載された LRF を用いて透明容器と液中物体を計測する．提案手法の計測手順を**図 3** に示す．

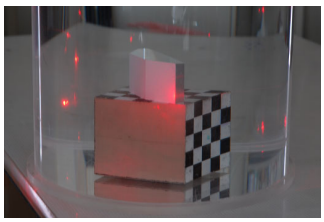


図 2　様々な経路からのレーザ反射光
Reflections from various paths.

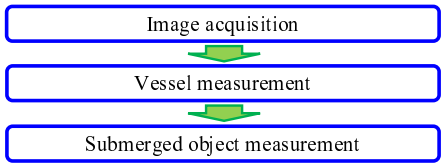


図 3　計測手順
Procedure flow.

まず，マニピュレータにより計測を行う計測位置に LRF を移動させ，レーザ光を透明容器に照射した際の反射光をカメラにより撮影する．撮影画像中からレーザ反射光の候補点を抽出し，容器反射光を識別する．これをあらかじめ設定したすべての計測位置で行う．

次に，撮影された画像のそれぞれについて得られた容器反射光から容器表面を 3 次元計測する．また，容器表面の計測点群から容器表面の位置形状を表す容器モデルのパラメータを推定する．容器モデルには平面モデル，2 次曲面モデル[12]または円柱モデルなどが考えられる．なお，容器裏面は容器表面と同じ形状であるとし，容器の厚みを一定かつ既知として推定された容器表面のモデルから容器裏面のモデルを求める．

最後に，各撮影画像において抽出された容器反射光を除く候補点の中から光線追跡を用いて物体反射光を識別し，液中物体の 3 次元位置を計測する．

3. 計　測　原　理

3.1　反射光の候補点抽出

図 2 に示すように，透明容器にレーザを照射した際の反射光を撮影すると容器反射光や物体反射光以外にも様々な経路により反射光が映り込む．そこで本研究では，輝度画像中の局所的ピークを検出し，このピーク位置を容器反射光と物体反射光の候補点として抽出する．

取得した反射光の RGB カラー画像をグレースケール化により輝度画像に変換する．輝度のノイズによりピーク位置がずれることを防ぐために，輝度画像の平滑化を行う．

着目画素の輝度値が近傍画素の中で最大であるか調べ，最大であるならピーク画素とし，そうでないなら非ピーク画素として，2 値のピーク画像を生成する．この際，ピーク位置において輝度が飽和している場合は，同じ輝度値が複数の画素に跨ることになる．そこで，このような場合に

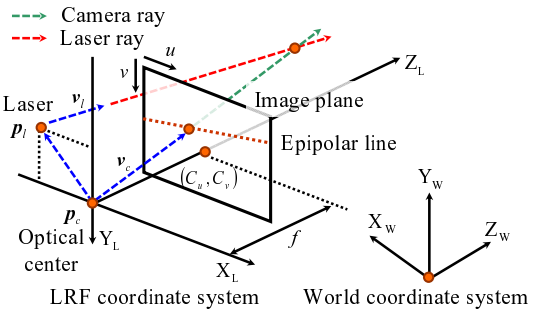


図 4　計測モデル
Measurement model of LRF.

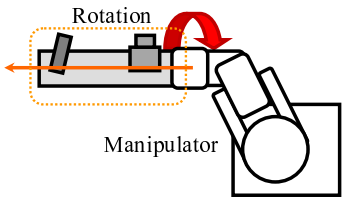


図 5　LRF の姿勢変化
Posture of LRF.

対処するためにラベリングによりピーク画素を連結し，その幾何学重心の位置を候補点の位置として抽出する．

候補点の位置はピクセル単位で抽出し，容器反射光と物体反射光の識別後にそれぞれサブピクセル化を行う．

3.2　透明容器計測

LRF の計測モデルを**図 4** に示す．LRF 座標系として，カメラの光学中心を原点とし，撮像面と平行に $\mathrm{X_L}$ 軸，$\mathrm{Y_L}$ 軸を配置し，$\mathrm{Z_L}$ 軸を光軸に一致させた座標系を設ける．カメラを透視投影モデルで表し，光学中心と撮像面との間の像距離を f とする．画像上の画素の位置は撮像面左上を原点とした画像座標系 (u, v) で表す．また，光軸と撮像面との交点である画像中心の画像座標位置を (C_u, C_v) とする．

画素 $(u,\ v)$ を通り光学中心に入射する光線をカメラ光線ベクトルと呼び，位置ベクトル $\mathbf{p}_c = (0,0,0)^{\mathrm{T}}$ と方向ベクトル $\mathbf{v}_c$ で表される．カメラ光線の方向ベクトルは次式により求められる．

$$\mathbf{v}_c = \left((u - C_u)/f_u, (v - C_v)/f_v, 1\right)^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式 (1) における f_u および f_v は，像距離 f を水平方向の画素ピッチ幅 δ_u と垂直方向の画素ピッチ幅 δ_v により pixel 単位で表したものであり，$f_u = f/\delta_u$ および $f_v = f/\delta_v$ である．また，レーザから照射される光線をレーザ光線ベクトルと呼び，位置ベクトル $\mathbf{p}_l = (x_l, y_l, 0)^{\mathrm{T}}$ と方向ベクトル $\mathbf{v}_l = (\alpha, \beta, 1)^{\mathrm{T}}$ により表される．レーザ光線ベクトルは LRF 座標系に固定され既知とする．

LRF 座標系はマニピュレータにより移動する移動座標系である．容器を LRF 座標系で計測し，それらの計測点群を空間中に固定されたワールド座標系に変換することで統合する．なお，マニピュレータの位置姿勢を既知とする．

画像中から容器反射光の位置を取得するために，従来研究[11] ではエピポーラ拘束を用いている．エピポーラ拘束は，レーザ光線ベクトルとカメラ光線ベクトル（図および計算上ではカメラ側から逆向きにしている）が 1 点で交差するための制約である．これは $\mathbf{v}_l$，$\mathbf{p}_l$ および $\mathbf{v}_c$ が同一平面にあることを意味し，次式により表される．

$$(\mathbf{v}_l \times \mathbf{p}_l) \cdot \mathbf{v}_c = 0 \tag{2}$$

式 (2) を満たす画像上の点は図 4 のように直線で表され，エピポーラ線と呼ばれる．なお，エピポーラ線は以下の式で求められる．

$$v = a_e u + b_e \tag{3}$$

$$a_e = \frac{f_v y_l}{f_u x_l} \tag{4}$$

$$b_e = \frac{C_v f_u x_l - C_u f_v y_l - f_u f_v (\alpha y_l - \beta x_l)}{f_u x_l} \tag{5}$$

図 4 のようにレーザをカメラの左側に配置した場合，従来研究ではエピポーラ線上の最も左側に位置する候補点を容器反射光としている（レーザを右側に配置した場合ではエピポーラ線上の最も右側に位置する候補点を選択する）．しかし，他の反射光がエピポーラ線上で容器反射光よりも左側に映り込んだ場合には，この反射光を誤って容器反射光として誤抽出してしまう．

そこで本研究では，エピポーラ拘束だけでなく LRF の姿勢変化を用いることで，容器反射光を識別する方法を提案する．LRF の姿勢を**図 5** に示すように回転させることで変化させると反射光と LRF との位置姿勢関係が変化し，画像上の反射光の位置が移動する．このとき，容器反射光のみエピポーラ拘束を満たすと仮定すると，容器反射光はエピポーラ線に沿って移動するのに対し，他の反射光はエピポーラ線から離れて移動する．これにより，LRF の姿勢を変化させた際の画像上の反射光の挙動を調べることで容器反射光を識別できると考えられる．

なお，物体反射光などの容器を通過した反射光は，光の屈折の影響を受けるため，一般にエピポーラ拘束を満たさないが，LRF と容器との位置姿勢関係や容器形状によっては，エピポーラ拘束を満たす反射光が存在する可能性がある．このため，LRF の姿勢を一方向のみに変化させただけでは不充分であり，複数方向に姿勢を変化させる必要がある．

容器反射光の識別は画像取得と合わせて，**図 6** の手順で行う．まず，マニピュレータにより最初の計測位置へ LRF を移動させ，レーザ反射光の画像を取得する．撮影画像からレーザ反射光の候補点を抽出し，そしてマニピュレータにより LRF の姿勢を変化させることで，抽出した反射光候補点の中から容器反射光を識別する．

姿勢変化による識別は，マニピュレータの駆動を伴うため処理時間が掛かる．このため，各計測位置で姿勢変化により容器反射光を識別すると，膨大な処理時間を要し非効

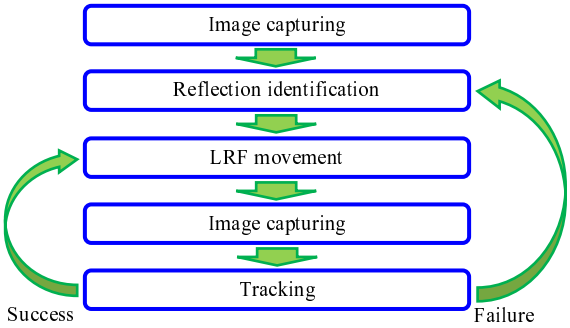


図 6　画像取得と容器反射光の識別
Image acquisition and identification.

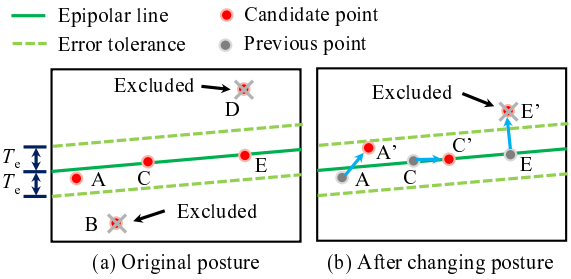


図 7　容器反射光の識別
Identification.

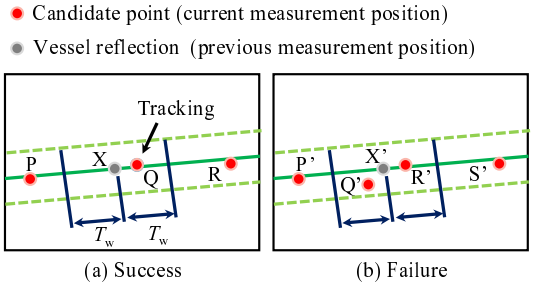


図 8　容器反射光のトラッキング
Tracking.

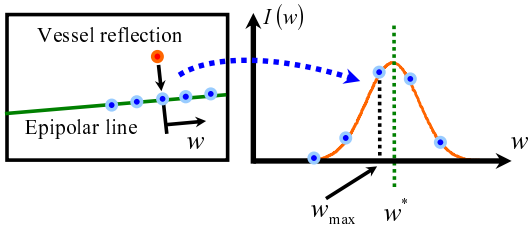


図 9　エピポーラ線上の輝度プロファイル
Intensity profile.

率である．そこで，直前の計測位置において容器反射光が識別されている場合，画像上の容器反射光の移動が微小であると仮定して，現在の計測位置における容器反射光を直前の計測位置で得られている容器反射光から追跡することで，姿勢変化を行わずに容器反射光を取得する．本論文では，この追跡処理をトラッキングと呼ぶことにする．なお，トラッキングが困難な状態になった場合は，改めて姿勢変化により容器反射光を識別する．

姿勢変化により画像上の候補点の挙動を調べることで容器反射光を識別する概要を**図 7** に示す．図 7(a) は姿勢変化前における撮影画像を模式化したもので中段の実線はエピポーラ線を示す．ノイズの影響により反射光のピーク位置がエピポーラ線からわずかにずれる可能性を考慮し，エピポーラ線から画像の上下方向に T_e だけ離れた破線までの範囲をエピポーラ線の領域とする．この例では，撮影画像中に 5 つの候補点（点 A，B，C，D および E）が存在する．容器反射光はエピポーラ線の領域内に存在するため，領域外の点 B および点 D を容器反射光の候補から除外する．このとき，領域内には点 A，C および E の複数の候補点が存在するため姿勢変化による識別を行う．

図 7(b) は，マニピュレータにより LRF の姿勢を変化させて撮影した画像を表す．姿勢を変化させることで，LRF と反射点との位置姿勢関係が変わり，画像上の反射光候補点は移動する．姿勢の変化量が微小であれば，画像上の候補点の移動量も微小であると考えられ，姿勢変化前の候補点のそれぞれについて，変化後の画像全体から抽出された候補点の中から最も近い点を対応付ける．図 7(b) において変化前の候補点は点 A，C および E であり，変化後の候補点 A’，C’ および E’ にそれぞれ対応付けられる．ここで，点 E’ はエピポーラ線の領域外に移動しているため，容器反射光の候補点から除外する．領域内の候補点が 1 つになるまで姿勢変化と対応付けを繰返し，その候補点を容器反射光として識別する．なお，識別終了時には LRF の姿勢を元に戻し次の計測位置へ移動する．

容器反射光のトラッキングの様子を**図 8** に示す．図 8(a) はトラッキングが成功した場合，図 8(b) は失敗した場合である．図 8(a) のエピポーラ線の領域内には候補点 P，Q および R の 3 つが存在する．1 つ前の計測位置において容器反射光が点 X として得られている場合，計測位置間の距離が短く容器形状が滑らかであるならば，現在の計測位置における容器反射光は点 X の近傍にあると仮定できる．そこで，エピポーラ線の領域内で点 X を中心に T_w の範囲の局所領域を調べ，局所領域内に候補点が 1 つのみ存在している場合，これを容器反射光としてトラッキングする．図 8(a) の局所領域内の候補点は点 Q だけであるのでこれをトラッキングする．

図 8(b) の場合では，エピポーラ線の領域内に候補点 P’，Q’，R’ および S’ が存在し，前の計測位置における容器反射光を点 X’ とする．このとき，点 X’ 近傍の局所領域内には候補点 Q’ と R’ の 2 つが存在する．このように，局所領域内に複数の候補点が存在する場合はトラッキングを中断し，姿勢変化による識別を行う．

取得された容器反射光の画像座標は，ノイズなどの影響によりエピポーラ線からわずかにずれることがある．そこで，エピポーラ線上の輝度プロファイルに着目する方法[13]を用いることにより，エピポーラ線とのずれを補正する（**図 9**）．なお，反射光の輝度分布はエピポーラ線と交わっており，輝度分布のピーク位置（容器反射光の画像座標）とエ

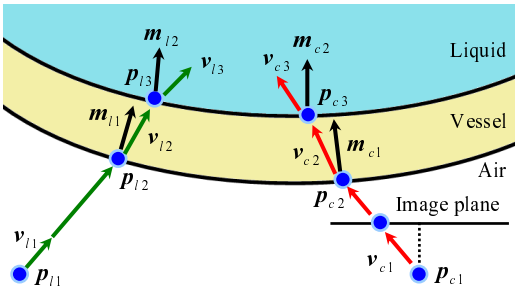


図 10　光線追跡
Ray tracing.

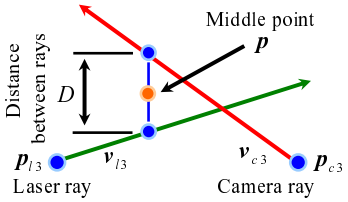


図 11　光線間距離
Distance of rays.

ピポーラ線とのずれは微小であると仮定する．

まず，容器反射光の位置をエピポーラ線上へ垂直に投影し，その位置を原点としたエピポーラ線上の座標を w とする．原点近傍のエピポーラ線上の輝度 $I(w)$ を，バイリニア補間により 1 ピクセル単位で求めてエピポーラ線上の輝度プロファイルを得る．輝度プロファイル上の最大輝度の座標を $w_{\max}$ としたとき，ピークのサブピクセル位置 w^* をガウス近似[14]により以下の式を用いて推定する．

$$w^* = w_{\max} + \xi \tag{6}$$

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{\rho(w_{\max}-1)-\rho(w_{\max}+1)}{\rho(w_{\max}-1)-2\rho(w_{\max})+\rho(w_{\max}+1)} \tag{7}$$

ただし，$\rho(w)$ は対数輝度を表し，

$$\rho(w) = \ln(I(w)) \tag{8}$$

である．

推定されたエピポーラ線上の座標をサブピクセル単位で画像座標に変換し，得られた座標からカメラ光線の方向ベクトルを算出する．レーザ光線ベクトルとカメラ光線ベクトルの交点を容器表面上のレーザ反射位置として求め，容器表面の 3 次元計測を行う．

3.3　液中物体計測

空気中から液中への光線追跡の経路を**図 10** に示す．屈折率は既知とする．光線の屈折はスネルの法則により計算でき，屈折境界面（容器表面，容器裏面）への単位入射ベクトルを $\mathbf{v}_1 = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^{\mathrm{T}}$ とし，境界面上の屈折点における面の単位法線ベクトルを $\mathbf{m} = (\lambda, \mu, \nu)^{\mathrm{T}}$ とすると屈折後の単位屈折ベクトル $\mathbf{v}_2 = (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^{\mathrm{T}}$ は以下の式により求められる[9]．

$$\begin{pmatrix}\alpha_2\\ \beta_2\\ \gamma_2\end{pmatrix} = \frac{n_{\mathrm{i}}}{n_{\mathrm{o}}}\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \beta_1\\ \gamma_1\end{pmatrix} + \kappa\begin{pmatrix}\lambda\\ \mu\\ \nu\end{pmatrix} \tag{9}$$

$$\kappa = \left[\sqrt{1-\sin^2\theta\left(\frac{n_{\mathrm{i}}}{n_{\mathrm{o}}}\right)^2} - \cos\theta\left(\frac{n_{\mathrm{i}}}{n_{\mathrm{o}}}\right)\right] \tag{10}$$

ただし，n_{i} は入射側の屈折率，n_{o} は屈折側の屈折率である．また，式 (10) 中の θ は入射角を表し $\cos\theta = \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{m}$ である．

光線と容器との交点位置および交点における容器の法線方向を求めるために，本研究では容器の位置形状を表す容器モデルのパラメータを容器表面の計測点群から推定する．実験で用いる容器モデルについては 4.2 節で述べる．

液中物体を計測するために，撮影画像中から抽出された容器反射光を除いた候補点の中から物体反射光を識別する必要がある．物体反射光は容器反射光と異なり，光の屈折の影響により式 (2) で表されるエピポーラ拘束に従わない．そこで，図 10 に示すようにレーザ光線とカメラ光線を液中まで光線追跡し，液中におけるレーザ光線とカメラ光線との距離が最小となる場所における光線間距離（**図 11**）が極小となる画像座標を求め，これを液中におけるエピポーラ拘束とみなす方法を用いる．

まず，レーザ光線について光線追跡する．空気中におけるレーザ光線の位置ベクトル $\mathbf{p}_{l1}$ と単位方向ベクトル $\mathbf{v}_{l1}$ をマニピュレータの位置姿勢を既知として，LRF 座標系からワールド座標に変換することで取得する．レーザ光線と容器表面との交点 $\mathbf{p}_{l2}$ および単位法線ベクトル $\mathbf{m}_{l1}$ は，容器モデルからそれぞれ求める．また，容器内における単位方向ベクトル $\mathbf{v}_{l2}$ を式 (9) および式 (10) を用いて求める．容器裏面では，表と同様に容器モデルから交点 $\mathbf{p}_{l3}$ と法線 $\mathbf{m}_{l2}$ を求め，液体中へのレーザ光線の方向ベクトル $\mathbf{v}_{l3}$ を屈折計算により求める．

次に，画像中の各候補点について光線追跡を行う．空気中におけるカメラ光線の位置ベクトル $\mathbf{p}_{c1}$ をワールド座標系で求め，候補点の画像座標から式 (1) により求めた方向ベクトルをワールド座標系に変換することで，光線の方向ベクトル $\mathbf{v}_{c1}$ を求める．レーザ光線と同様に液体中まで屈折計算を行い，液中におけるカメラ光線の位置ベクトル $\mathbf{p}_{c3}$ および方向ベクトル $\mathbf{v}_{c3}$ を求める．

求められた液中におけるレーザ光線とカメラ光線により，光線間距離 D を次式により求める．

$$D = \left\| (\tau_c \mathbf{v}_{c3} + \mathbf{p}_{c3}) - (\tau_l \mathbf{v}_{l3} + \mathbf{p}_{l3}) \right\| \tag{11}$$

ただし，

$$\tau_l = -\frac{q_e - q_c + q_a(q_b - q_d)}{1 - q_a^2} \tag{12}$$

$$\tau_c = \tau_l q_a + q_d - q_b \tag{13}$$

である．なお，q_a，q_b，q_c，q_d および q_e は位置ベクトル

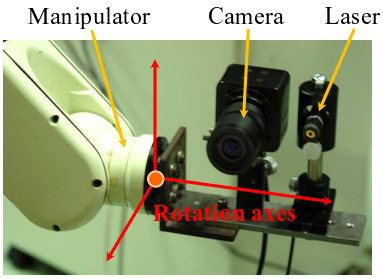


図 12　実験装置
Measurement system.

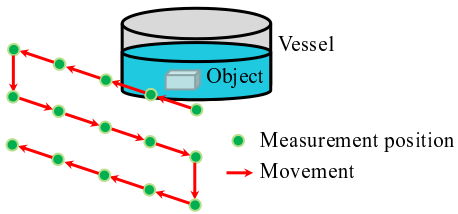


図 13　ジグザグスキャン
Zigzag scaning.

表 1　実験パラメータ
Experimental parameter.

エピポーラ線誤差許容範囲 T_e [pixel]	8
トラッキング局所範囲 T_w [pixel]	30
距離閾値 T_D [mm]	1.5
輝度閾値 T_L	80

と方向ベクトルの内積であり，それぞれ $q_a = \mathbf{v}_{c3} \cdot \mathbf{v}_{l3}$，$q_b = \mathbf{p}_{c3} \cdot \mathbf{v}_{c3}$，$q_c = \mathbf{p}_{c3} \cdot \mathbf{v}_{l3}$，$q_d = \mathbf{p}_{l3} \cdot \mathbf{v}_{c3}$ および $q_e = \mathbf{p}_{l3} \cdot \mathbf{v}_{l3}$ である．

各候補点の画像座標から求められた光線間距離に対して，あらかじめ指定した距離閾値 T_D 未満となる候補点を物体反射光の候補として絞り込む．物体反射光は容器反射光を含めた他の反射光に比べ，物体からの反射であるため輝度の強度が強く安定しているため，光線間距離で絞られた候補点の中から，最も輝度の強い候補点を物体反射光として識別する．ただし，光線間距離が距離閾値 T_D 未満で，輝度閾値 T_L 以上の輝度を持つ候補点が 1 つも存在しない場合は物体反射光が存在しないと判断する．

識別された物体反射光から算出された液中におけるカメラ光線から液中物体の 3 次元位置 $\mathbf{p}$ をレーザ光線とカメラ光線の中点として次式により求める．

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2}\left[(\tau_c \mathbf{v}_{c3} + \mathbf{p}_{c3}) + (\tau_l \mathbf{v}_{l3} + \mathbf{p}_{l3})\right] \tag{14}$$

なお，候補点の画像座標を (u, v) としたとき，そのサブピクセル位置 (u^*, v^*) を水平方向および垂直方向のガウス近似[14]を用いて次の式により推定する．

$$u^* = u + \xi_u \tag{15}$$

$$v^* = v + \xi_v \tag{16}$$

$$\xi_u = \frac{1}{2}\frac{\rho(u-1,v) - \rho(u+1,v)}{\rho(u-1,v) - 2\rho(u,v) + \rho(u+1,v)} \tag{17}$$

$$\xi_v = \frac{1}{2}\frac{\rho(u,v-1) - \rho(u,v+1)}{\rho(u,v-1) - 2\rho(u,v) + \rho(u,v+1)} \tag{18}$$

ただし，$\rho(u,v)$ は式 (8) と同様に画像座標における対数輝度である．

4. 実　験

実験に用いた計測装置を**図 12** に示す．マニピュレータには 6 軸のロボットアームを用い，マニピュレータの手先にスポット光源の赤色レーザ（波長 635 nm）と RGB カラーカメラにより構成した LRF を取り付けた．

マニピュレータ手先の繰り返し位置決め精度は ±0.03 mm である．また，カメラの解像度は 1024×768 pixel であり，カメラの歪曲収差のパラメータおよび内部パラメータは Zhang の方法[15]により推定した．推定された式 (1) のパラメータは，それぞれ $f_u = 852.0$ pixel，$f_v = 859.8$ pixel，$C_u = 462.9$ pixel および $C_v = 228.7$ pixel となった．なお，カメラの水平画角は 62deg，垂直画角は 48deg である．

レーザの位置ベクトル $\mathbf{p}_l$ および方向ベクトル $\mathbf{v}_l$ は，未知パラメータが 4 つ（x_l，y_l，α および β）であることから，LRF 座標系におけるレーザ光線上の 2 点以上の座標を取得することで推定することができる．キャリブレーションパターンを $\mathrm{Z_L}$ 軸方向に移動させ，レーザ反射画像を複数枚撮影して推定した結果，$x_l = -78.5$ mm，$y_l = 1.39$ mm，$\alpha = 0.0626$ および $\beta = -0.00344$ となった．

容器反射光を姿勢変化により識別する際には，マニピュレータの手先を原点に図 12 に示すように 3 軸を回転軸とした．姿勢変化ではそれぞれの軸周りについて 1deg ずつ −10deg から +10deg の範囲に回転させた．LRF はマニピュレータにより 1 mm 間隔で平行移動させ，容器に沿って**図 13** に示すように，ジグザグスキャンによりレーザの照射と反射光の画像を撮影した．なお，実験は暗室環境下で行った．

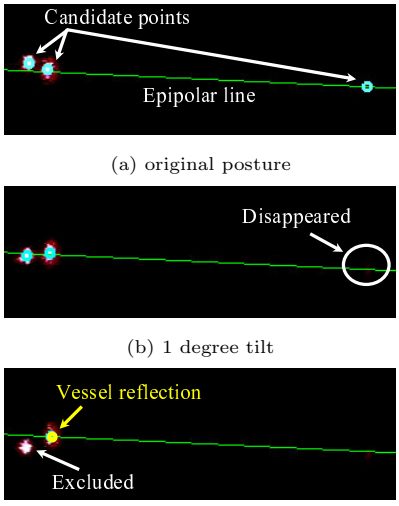
実験に用いたパラメータを**表 1** に示す．計測領域を LRF から $\mathrm{Z_L}$ 方向に距離 200 mm 以上とした．LRF から距離 200 mm の位置に設置した白色版にレーザ光を照射し，撮影した画像上のレーザ反射光の直径を T_e の値として用いた．T_w については，値を小さく設定するとノイズの影響などにより容器反射光が T_w の範囲を超え，容器反射光の抽出に失敗する可能性が増大する．一方で，T_w を大きくすると反射光の候補点が入り込む可能性が増え，姿勢変化処理の頻度が高くなり計測効率が低下する．また，T_D の値は光線追跡における誤差の範囲を考慮する必要があり，T_L の値は物体反射光と他の反射光の輝度の分布を考慮する必要がある．そこで，上記のことを考慮し予備実験の結果から T_w，T_D および T_L の値を決定した．

4.1 透明容器の 3 次元計測

容器反射光の識別性能を評価するために**図 14** に示すガラス製の金魚鉢を計測した．計測位置は水平方向に 100 点，垂直方向に 40 点の計 4000 点とした．



図 14　ガラス製容器（金魚鉢）
Glass vessel.

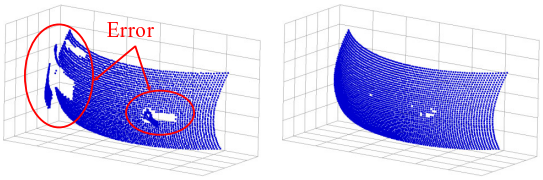


(a) original posture

(b) 1 degree tilt

(c) 2 degree tilt

図 15　姿勢変化による容器反射光の識別
Process of vessel reflection identification.



(a) Conventional method　　(b) Proposed method

図 16　ガラス容器計測結果
Measurement of glass vessel.

姿勢変化による容器反射光の識別の様子を**図 15** に示す．図 15(a) は初期姿勢における撮影画像の一部を拡大したもので，エピポーラ線上に 3 つの候補点が存在している．図 15(b) は LRF をマニピュレータによりティルト方向に 1deg 回転させたときの撮影画像で，右の候補点は輝度がカメラの感度を下回ることで消失し候補点から除外された．図 15(c) はさらにティルト方向に 1deg 回転させたときの撮影画像であり，左の候補点がエピポーラ線の領域から離れ候補点から除外された．これにより，エピポーラ線の領域に残った中央の点が容器反射光として識別された．

従来手法[11]では，エピポーラ線上の最も左側にある候補点を容器反射光として抽出するため，図 15 の場合では左側の候補点を容器反射光として抽出し誤計測する．

撮影画像群から得られた容器反射光から容器表面を 3 次元計測しワールド座標系に統合した結果を**図 16** に示す．図 16(a) は従来手法[11]により容器反射光を抽出して計測したものの，図 16(b) は提案手法による結果である．

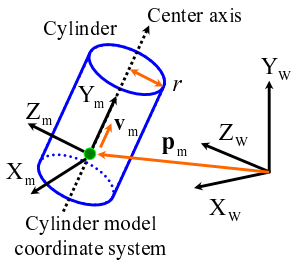


図 17　円柱モデル
Cylinder model.

従来手法では，誤抽出により容器形状の一部が崩れているが，提案手法では誤抽出なく容器形状を計測できたことが確認できる．

4.2　円柱モデル

4.3 節および 4.4 節で示す実験では円柱形状の容器を用いる．Yamashita ら[10]は，ターンテーブルの回転中心軸の位置と円柱容器の中心軸の位置を推定することで，ターンテーブル上に置かれた円柱容器内の液中物体を計測する手法を提案している．Yamashita らの手法では，ターンテーブルの回転中心軸と円柱容器の中心軸が同一方向になるように設置し，軸方向が既知である必要がある．

本研究では，円柱容器の中心軸の位置・方向および容器の半径（外径）が未知である容器に対応するために，以下で述べる円柱モデルを容器モデルに用いた．

円柱モデルは**図 17** に示す円柱の中心軸を表す位置ベクトル $\mathbf{p}_m = (\lambda_m, 0, \nu_m)^{\mathrm{T}}$ と方向ベクトル $\mathbf{v}_m = (\alpha_m, \beta_m, \gamma_m)^{\mathrm{T}}$ および円柱の半径 r により記述される．なお，$||\mathbf{v}_{\mathrm{m}}|| = 1$ とし，$\beta_m > 0$ とする．これにより，$\gamma_m = \sqrt{1-(\alpha_m^2+\beta_m^2)}$ と表されるため，求めるべき円柱モデルのパラメータは λ_m，ν_m，α_m，β_m および r の 5 つとなる．

計測された容器表面の計測点を $\mathbf{x}_{\mathrm{i}} = (x_{\mathrm{i}}, y_{\mathrm{i}}, z_{\mathrm{i}})^{\mathrm{T}}, i = 1, \cdots, N$ とするとこれらのパラメータは次式を最小化することで求められる．

$$F(\mathbf{p}_{\mathrm{m}}, \mathbf{v}_{\mathrm{m}}, r) = \sum_{i=1}^{N} \left[r - R(\mathbf{p}_{\mathrm{m}}, \mathbf{v}_{\mathrm{m}}, \mathbf{x}_i) \right]^2 \qquad (19)$$

ただし，$R(\mathbf{p}_{\mathrm{m}}, \mathbf{v}_{\mathrm{m}}, \mathbf{x}_i)$ は計測点と円柱の中心軸との垂直距離を示す関数であり，以下の式で表される．

$$R(\mathbf{p}_{\mathrm{m}}, \mathbf{v}_{\mathrm{m}}, \mathbf{x}_i) = ||\rho \mathbf{v}_{\mathrm{m}} + \mathbf{p}_{\mathrm{m}} - \mathbf{x}_i|| \qquad (20)$$

$$\rho = \alpha_m (x_i - \lambda_m) + \beta_m y_i + \gamma_m (z_i - \nu_m) \qquad (21)$$

円柱は軸方向から見れば簡単な円で表すことができる．そこで，$\mathbf{p}_{\mathrm{m}}$ の位置を原点とした直交座標により表される円柱モデル座標系を図 17 のようにとり，ワールド座標系から円柱モデル座標系へ変換する．なお，Y_m 軸は円柱の中心軸に一致させる．これにより，円柱上の点 (x, y, z) は次式の円の方程式で表される．

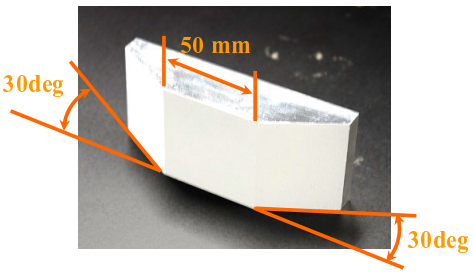


図 18 多角形柱
Polygonal pillar.



図 19 アクリル製円柱容器
Cylindrical vessel.

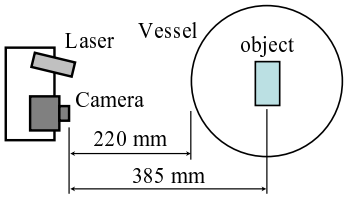


図 20 精度評価実験の配置
Arrangement of evaluation experiment.

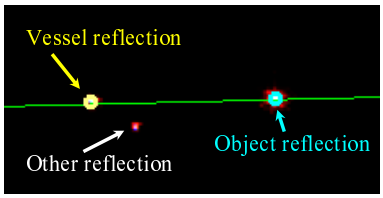


図 21 物体反射光の識別結果
Result of object reflection identification.

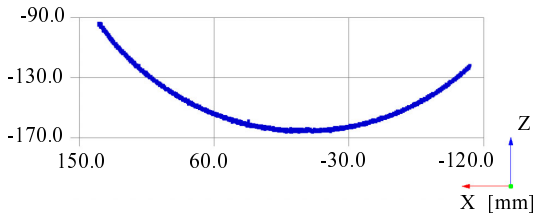


図 22 円柱容器計測結果
Measurement result of cylindrical vessel.

$$z^2 + x^2 = r^2 \tag{22}$$

(22) 式を用いて光線追跡における光線との交点および法線方向を算出する.

4.3 精度評価

提案手法の計測精度を評価するために**図 18** に示す多角形柱を水で満たした**図 19** に示すアクリル製円柱容器内に置き，多角形柱の 3 つの面を計測した．**図 20** に計測における LRF と円柱容器の配置関係を示す．LRF と円柱容器は最短で約 220 mm の距離になるように設置し，多角形柱は円柱容器内の中央部分に置き，LRF から多角形柱までの距離は約 385 mm である.

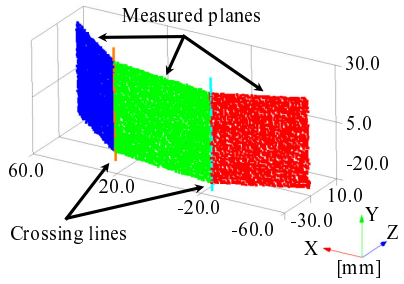


図 23 多角形柱計測結果
Evaluation of measurement result.

表 2 円柱モデルパラメータの推定値
Estimated value of cylinder model.

中心軸位置ベクトル	λ_m [mm]	186.6
	ν_m [mm]	-275.5
中心軸方向ベクトル	α_m	-0.0138
	β_m	0.999
半径	r [mm]	165.5

多角形柱の中央の面の幅は 50.0 mm であり，左右の面と中央の面との角度は 30.0deg である．計測位置は水平方向に 250 点，垂直方向に 40 点の計 10000 点とした．また，屈折率は空気 1.00，アクリル 1.49 および水 1.33 とした．なお，円柱容器の外周半径は 165.5 mm であり，厚みは 5.0 mm である.

物体反射光を識別した際の画像を拡大したものを**図 21** に示す．画像にはトラッキングにより抽出された容器反射光以外に 2 つの反射光が存在する．それぞれの反射光について光線追跡を行い，液中における光線間距離 D (図 11) を求めた．中央の反射光から求められた光線間距離は 15 mm，右の反射光から求められた光線間距離は 0.17 mm となり，右の反射光が物体反射光として識別された.

円柱容器表面の計測結果を**図 22** に示す．また，得られた容器表面の計測点群から円柱モデルのパラメータを推定した結果を**表 2** に示す．推定された円柱の半径は 165.5 mm となり有効桁の範囲内で一致した.

得られた円柱モデルを用い，光線追跡により多角形柱を計測した結果を**図 23** に示す．計測点群を 3 つの面について分割し，それぞれの面の点群に最小 2 乗平面を当てはめた．中央の面と左右の面とが交わる交線を算出し，中央の面の幅の長さを与える値として交線間の距離を求め，また，面と面との成す角度をそれぞれ求めた．さらに，左右の交線が互いに成す角度も求めた．得られた評価結果を**表 3** に示す．結果から長さは 1 mm 以内の誤差，角度は 1deg 以内の誤差で計測できていることを確認した.

4.4 液中物体計測実験

液浸標本の代わりとして**図 24** に示すイルカの模型を液中物体として，その計測実験を行った．容器や液体などの条

表 3　精度評価
Evaluation result of trapezoid object.

	計測値	真値
交線間の距離 [mm]	49.5	50.0
交線間の角度 [deg]	0.4	0.0
中央の面と右面との角度 [deg]	29.8	30.0
中央の面と左面との角度 [deg]	30.5	30.0



図 24　イルカの模型
Model of dolphin.

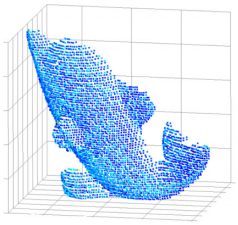


図 25　液中物体の 3 次元再構成
Measurement result.

件は 4.3 節の実験と同じものを用いた．また，計測位置は水平方向に 250 点，垂直方向に 70 点の計 17500 点とした．

計測結果を**図 25** に示す．イルカの尾びれや背びれなどの形状を誤計測なく再現できていることが確認できる．この実験では，一方向だけの計測であるためイルカの背面が計測されていない．このため，イルカの全周囲の形状を再構成するには複数方向からの計測が必要となる．

5. むすび

カメラとレーザからなる LRF を用いて，容器反射光と物体反射光を識別することで，透明容器中の液中物体の形状を計測する手法を提案した．実験により，従来手法では反射光を誤抽出する場合でも提案手法は容器反射光と物体反射光を正しく識別し，容器と液中物体の両方を高精度に計測できることを確認した．

今後の課題として，任意の形状の容器に対応できるような容器モデルを構築することや，液中物体を複数方向から計測し統合することで全周囲の 3 次元アーカイブを生成することなどが考えられる．

本研究の一部は，科研費若手研究 (A)22680017，および財団法人旭硝子財団の援助を受けた．

〔文　献〕

1) A. Banno, T. Masuda, T. Oishi and K. Ikeuchi: “Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project”, International Journal of Computer Vision, **78**, 2-3, pp.207-222 (Jul. 2008)
2) Y. Okamoto, T. Oishi and K.Ikeuchi: “Image-Based Network Rendering of Large Meshes for Cloud Computing”, International Journal of Computer Vision, **94**, Issue 1, pp.12-22 (Aug. 2011)
3) H. Murase: “Surface Shape Reconstruction of a Nonrigid Transport Object Using Refraction and Motion”, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **14**, 10, pp.1045-1052 (Oct. 1992)
4) R. Li, C. Tao and W. Zou: “An Underwater Digital Photogrammetric System for Fishery Geomatics”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **XXXI**, Part B5, pp.319-323 (Jul. 1996)
5) A. K. Chong and P. Stanford: “Underwater Digital Stereo-Observation Technique for Red Hydrocoral Study”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **68**, 7, pp.745-751 (Jul. 2002)
6) A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Koketsu, T. Kaneko and H. Asama: “Underwater Sensing with Omni-Directional Stereo Camera”, Proceedings of the 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras (OMNIVIS2011), pp.304-311 (Nov. 2011)
7) R. Kawai, A. Yamashita and T. Kaneko: “Three-Dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding Method”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009), pp.2830-2835 (May 2009)
8) T. Maki, H. Mizushima, T. Ura, T. Sakamaki and M. Yanagisawa: “AUV Navigation Around Jacket Structures I: Relative Localization Based on Multi-Sensor Fusion”, Journal of Marine Science and Technology, **17**, pp.330-339 (Mar. 2012)
9) R. Li, H. Li, W. Zou, R. G. Smith and T. A. Curran: “Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, **22**, 2, pp.364-375 (Apr. 1997)
10) A. Yamashita, E. Hayashimoto, T. Kaneko and Y. Kawata: “3-D Measurement of Objects in a Cylindrical Glass Water Tank with a Laser Range Finder”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp.1578-1583 (Oct. 2003)
11) A. Yamashita, S. Ikeda and T. Kaneko: “3-D Measurement of Objects in Unknown Aquatic Environments with a Laser Range Finder”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp.3923-3928 (Apr. 2005)
12) 伊部公紀，山下淳，金子透：“マニピュレータ搭載の LRF による水槽面と水中物体の 3 次元形状計測”，映像情報メディア学会技術報告，**35**, 39, pp.21-24 (Oct. 2011)
13) A. Prokos, G. Karras and E. Petsa: “Automatic 3D Surface Reconstruction by Combining Stereovision of the International Archives of Photogrammetry”, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **XXXVIII**, 5, pp.505-509 (Jun. 2010)
14) R. B. Fisher and D. K. Naidu: “A Comparative Analysis of Algorithms for Determining the Peak Position of a Stripe to Subpixel Accuracy”, Proceedings of the 1991 British Machine Vision Conference, pp.217-225 (Sep. 1991)
15) Z. Zhang: “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11, pp.1330-1334 (Nov. 2000)



伊部　公紀（いべ　ひろとし）2005 年，静岡理工科大学理工学部卒業．2007 年，静岡理工科大学大学院工学研究科修了．現在，静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部博士課程在学中．2012 年，映像情報メディア学会優秀研究発表賞受賞．液中環境下における画像計測の研究に従事．学生会員．



山下　淳（やました　あつし）1996 年，東京大学工学部卒業，1998 年，東京大学大学院工学系研究科修士課程修了，2001 年，同博士課程修了．2001 年，静岡大学工学部機械工学科助手，2008 年，静岡大学工学部機械工学科准教授，2011 年，東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻准教授，現在に至る．この間，2006 年〜2007 年，カリフォルニア工科大学客員研究員．2004 年，映像情報メディア学会研究奨励賞など受賞．博士 (工学)．画像処理，コンピュータビジョン，ロボットの知能化などの研究に従事．正会員．



金子　透（かねこ　とおる）1972 年，東京大学工学部卒業，1974 年，東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．1974 年，日本電信電話公社（現 NTT）入社．1997 年，静岡大学工学部機械工学科教授．現在，同大学大学院工学研究科教授．工学博士．画像処理，コンピュータビジョンの研究に従事．正会員．フェロー．



小林　祐一（こばやし　ゆういち）1997 年，東京大学工学部卒業，1999 年，東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修了，2002 年，同博士課程修了．2002 年，理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター研究員．2007 年，東京農工大学共生科学技術院特任准教授．2012 年，静岡大学工学部機械工学科准教授．現在，同大学大学院工学研究科准教授．博士 (工学)．ロボット学習と自律分散システムの研究に従事．