

食器洗浄作業自動化のための画像計測システム

Visual measurement system for automated dishwashing

○ 林悠, 鏡慎吾, 橋本浩一

○ Yu Hayashi, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード： 三次元計測 (3-D measurement), 画像処理 (Image Processing), 物体識別 (Object Recognition)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 情報科学研究科 橋本・岩谷研究室/鏡研究室,
TEL 022-795-7021, FAX 022-795-4090, E-mail: hayashi(at)ic.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

病院, 福祉施設などでは日々, 大量の食器洗浄作業が行われている. 食器洗浄作業には下膳されてきた食器を一つ一つ取りあげて食器洗浄機の所定の位置に置くという作業, 洗浄後の食器を収納するといった作業が含まれ, 機械化の遅れたものとなっている. 現在, 少子高齢化による労働力不足, 人件費削減が大きな問題となっている. そのため, この作業が自動化されれば労働力, 時間を削減することができ, 高効率化が期待できる. また, 100 床が最も市場規模として大きいため, その領域をターゲットとすることが効果的と考えられる.

食器洗浄機で食器の汚れを確実に落とすためには食器を一枚ずつラックにセットする必要がある. ロボットアームは複雑な作業にも対応可能であり, 現在工場の生産ラインでも使用されている. そのため, 我々はロボット

アームと食器洗浄機を組み合わせた食器洗浄作業自動化システムの研究を進めている.

2. システム全体概要

まず, 食器は人の手により Fig. 1 に示すように台に積まれる.



Fig. 1 食器の積まれた様子

その後の自動化システム全体図を Fig. 2 に示す. 作業工程は以下の二つに分けられる.

- [a] 下膳後の食器の種類判別, 位置計測し, ロボットアームによる食器の把持をし, ラックに食器をセットする

- [b] 洗浄後のラックの引き出し、食器位置計測し、ロボットアームによる食器の把持をし、食器を収納する

その内、本論文ではハンドリングに必要な食器の種類判別、位置姿勢の計測の問題を扱う。二つの作業を本論文では入口側、出口側と呼ぶ。

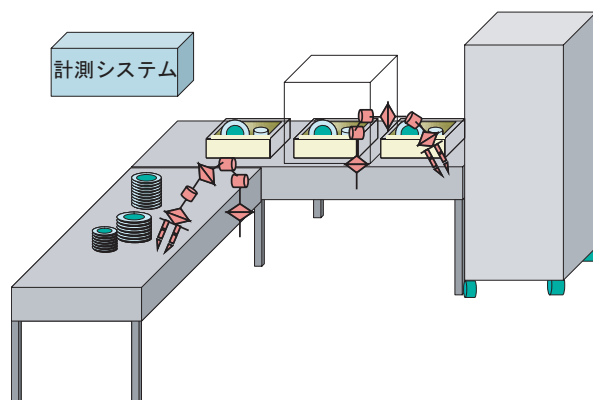


Fig. 2 システム全体図

3. 入口側

3.1 要求分析

入口側の計測システムに対する要求を分析し、以下のように目標を定めた。

- [a] 計測精度が高さ方向誤差 $\pm$ 約 1 mm 以内である。
- [b] 計測時間が約 2 秒以内である。
- [c] 安価なシステムである。
- [d] 設置面積の少ないシステムである。
- [e] ロボット及び人の妨げにならない配置である。

[a] はロボットアームが重なった食器を把持するための精度である。ロボットアームはハンドのフック部を Fig. 3 の 1 ~ 6 の順序で食器と食器のすきまに入れて把持する^{1, 2)}。そ

のため、計測精度は $\pm$ 約 1 mm 以内と見積もった。[b] は導入先を考えた時間である。食事と食事の間に洗浄作業を終わらせておく必要があるため、導入を考えている施設の規模などから約 2 秒以内と見積もった。[c], [d], [e] は自動化システムをより実用化しやすくするために必要な事柄である。

本研究では、画像から重なった食器の種類判別、把持点の抽出を行い、三次元画像計測³⁾によって把持点の位置を計測することを試みる。また、得られた情報をロボットアームへ伝達し、食器の把持を試みる。三次元計測方法には簡単さ、確実性を考慮して、カメラとスリットレーザを用いた光切断法を採用する。

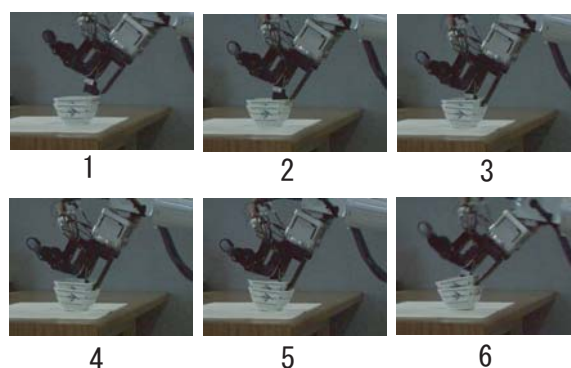


Fig. 3 ハンドが食器を把持する様子^{1, 2)}

3.2 種類判別

画像処理により種類判別を行う。種類判別方法には食器の形状情報から必要な特徴情報を抽出し、あらかじめ構築されたデータベース内の情報と照合する。以下に種類判別方法の詳細を述べる。

まず、Fig. 4 に示すように食器と判別されたものに番号付けを行う。番号付けはハンドリングのしやすさから画像内で左上から順に小さい番号を付ける。最も小さい番号が付けられた食器から種類判別を行う。

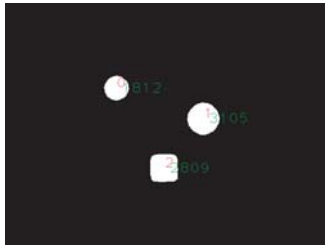


Fig. 4 ラベリング画像

ラベリングされた食器のうち最も数字の小さいものの輪郭抽出を行う．Fig. 5 に輪郭抽出画像を示す．輪郭抽出方法には8近傍追跡法を用いる．

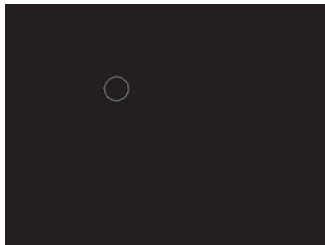


Fig. 5 輪郭抽出画像

輪郭抽出によって輪郭が得られた．これを食器の固有情報と見ることができる．我々は輪郭から食器の判別を行う方法を提案している⁴⁾．

一方，本論文で扱う食器は輪郭が円形と長方形のみのため，より簡単に円形度と面積から種類判別を行う．面積はラベリングをする際に同時に求める．また，輪郭から円形度を求める．円形度 D は面積 S と周囲長 L を用いて

$$D = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (1)$$

で求まる．

円形度は輪郭が円形にどれ程近いかを表すものである．そのため閾値を設定し，食器が円形か四角形かを求める．最後に食器の面積と種類を対応させたデータベースから最も面積が近い値を選択し，種類判別を行う．

3.3 把持点の三次元計測

まずシステム構成について述べる．次に提案する三次元位置計測手法を述べる．最後にキャリブレーションについて述べる．

3.3.1 システム構成

本研究で用いた実験システムの概念図を Fig. 6 に示す．

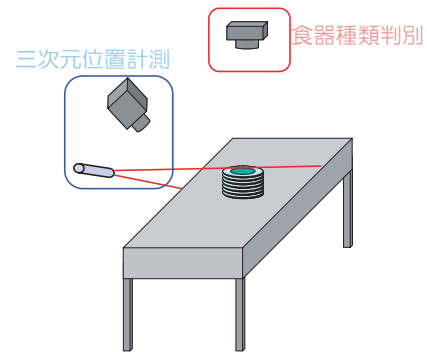


Fig. 6 システム概要図

食器の上方下向きに設置されたカメラで食器にレーザが照射された様子を撮像した時，食器のふちにレーザが照射された様子が画像で得られないという問題が生じた．本研究で扱う食器の多くはふちの傾斜が急になっている．そのため，レーザが食器のふちに照射されて反射した光がカメラに入りにくい角度になっていると考えられる．

そこで，レーザとカメラを食器を置く台に対して斜めに設置した．その結果，全ての食器で置く場所に関わらずふちにレーザが照射された様子が得られた．そのため，本研究では2台のカメラを用い，Fig. 6 に示すように種類判別に用いるカメラは食器の上方下向きに設置し，別に三次元位置計測に用いるレーザとカメラを食器に対して斜めに設置することとした．

3.3.2 三次元位置計測手法

光切断法により食器全体の形状を計測するためには時間を要する．本研究ではより計測時間を短縮するため，把持点付近の複数点の三次元位置の計測結果から把持点の三次元位置を求める．

まず，ロボットアームの把持に適した点を画像上で抽出する．本研究では抽出方法を食器の輪郭が円形のものと四角形のものの2通りに分ける．

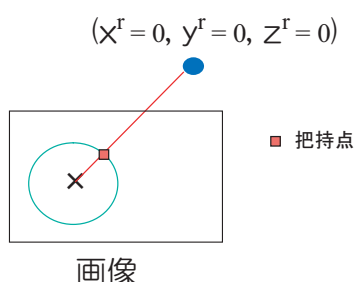


Fig. 7 円形の食器の把持点抽出

円形の場合，Fig. 7のように食器の輪郭と，ロボット座標の原点 $(x^r, y^r, z^r) = (0, 0, 0)$ と食器の中心を結ぶ直線の交点を画像上の把持点とする．四角形の場合，Fig. 8のように口

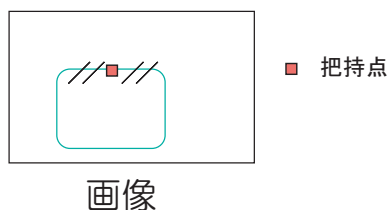


Fig. 8 四角形の食器の把持点抽出

ボットに最も近い辺の中心を画像上の把持点とする．

求めた把持点にレーザを照射し，光切断法により三次元位置計測を行う．しかし，斜めに設置されたカメラでは画像上のどこに食器があるかといった情報がない．また，上方に設置されたカメラではレーザが食器内（特に食器のふち）に照射されているかの判定は困

難である．そこで以下のような二つのカメラの情報を含めた照射判定方法を用いる．

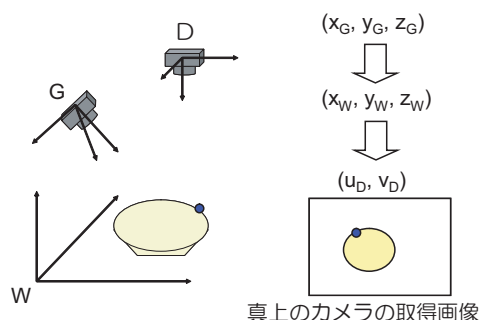


Fig. 9 レーザの食器内への照射判定方法

三次元位置は斜めに設置されたカメラで得られる．例として Fig. 9 に示すように三次元位置 (x_G, y_G, z_G) が得られたとする．位置計測用のカメラと種類判別用のカメラの相対位置はキャリブレーションにより既知である．得られた三次元位置をキャリブレーション結果を用いてワールド座標での三次元位置 (x_W, y_W, z_W) へ変換する．次に，三次元位置を真上のカメラで食器を撮像した画像 (u_D, v_D) へ投影する．最後に投影された点が食器と判別された領域内に入っているかをみる．Fig. 9（右下）のように食器と判別された領域内に点が投影された場合はレーザは食器内に照射されたと判定される．

食器の場所は真上のカメラの画像によりおおまかな位置は分かっている．また，あらかじめレーザをある照射角度で照射し，画像上の照射された位置を見るといった作業を照射角度を複数回変えて行っておく．これにより，食器の画像上の位置をもとにレーザを食器に照射するための照射角度はおおまかに分かる．

そこではじめに，レーザを食器のありそうな場所へ照射し，食器内にレーザが照射されているかを判定する．照射されていない場合は照射角度を等角度ずつ変化させ，その度レーザの照射判定を行う．

食器内にレーザが照射されたと判定されたら，食器のふちの三次元位置 (x_f, y_f, z_f) を求める．ここで食器のふちとは種類判別の時に求めた食器の境界線とする．把持点の三次元位置を (x_h, y_h, z_h) として，把持点とレーザの照射された食器のふちは高さが同じ $(z_h = z_f)$ という仮定をおく．仮の把持点へレーザを照射するための照射角度を決定する．ここで仮の把持点とは把持点とレーザの照射された食器のふちは高さが同じという仮定から求める把持点のこととする．ここで，把持点の画像上の位置と仮の把持点の高さより仮の把持点の三次元位置が求まる．

今，レーザはカメラの y 軸に平行に照射されているという仮定をおいている．そのためレーザ出射位置 (x_l, z_l) と仮の把持点 (x_h, y_h, z_h) とを結ぶ直線は

$$z = \frac{z_l - z_h}{x_l - x_h}(x - x_l) + z_l \quad (2)$$

と表せ，照射角度 θ_h は

$$\theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{x_l - x_h}{z_l - z_h}\right) \quad (3)$$

と求まる．

レーザ照射角度を少しずつ変化させ把持点周りにレーザを照射し，ふちの三次元位置を得る．把持点周りの複数点の三次元位置の平均を把持点の三次元位置とする．本研究では把持点まわり 5 点を計測した．Fig. 10 のよう

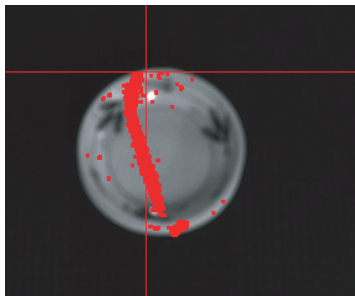


Fig. 10 食器にレーザを照射した様子（ノイズ含む）

にまれに直接レーザが照射された場所ではないところを照射されたと判定することがある．この現象は食器の内側に照射されたレーザが反射した光や実験装置まわりの照明状況が実験中に変化するために生じる．そこでこのようなノイズが把持点周りの三次元位置を求める際，経験上起こる可能性は 5 回中，1 回以内と考えて除去する．

照射角度は把持点周りで 5 回変化させ，各点の高さは z_i ($i=1, \dots, 5$)とする．ある 1 点を除いた他 4 点の平均値をそれぞれ m_i ($i=1, \dots, 5$)とする．例えば，除いた点が $i=1$ の場合，他 4 点の平均値は m_1 となる． i を除いた分散は

$$F_i = \sum_{j=1}^5 (z_j - m_i)^2 \quad (4)$$

のように求める． F_i ($i=1, \dots, 5$)のなかで最も値の大きかったものをノイズとして除去し，残りの 4 点の平均を把持点の三次元位置とする．

3.3.3 キャリブレーション

本研究では大きく分けてカメラ同士，カメラとレーザ，カメラとロボットの相対位置を並進・回転で求めるキャリブレーションを行った．

Fig. 11に示すようにカメラ同士，カメラとレーザの相対位置はチェッカーボードを用いたZhang の手法⁵⁾を使って求めた．計測システムのキャリブレーションが完了した後，それとは独立してカメラとロボットの相対位置，ロボットにマーカーを持たせてキャリブレーションをした．本研究ではロボットの位置決め絶対精度の問題で，カメラとロボットの相対位置は両座標系同士の相対的並進・回転として求めることはできなかった．そのため，計測された結果に手動でオフセットをつけ，補正を行った．

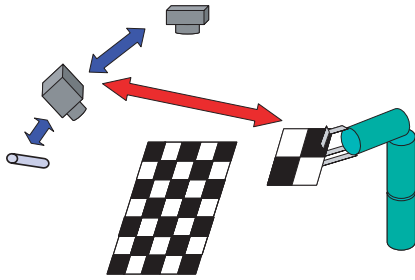


Fig. 11 キャリブレーション

3.4 実験

本章ではまず実験システムについて述べる．次に提案する計測手法を用いた実験結果を示す．

3.4.1 実験システム

レーザ, ガルバノメータスキャナは Fig. 12 に示すように一枚の板に取り付けられた．

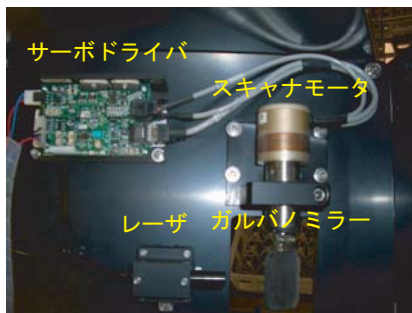


Fig. 12 レーザユニット

実験システムは Fig. 13 に示す．

種類判別をはじめてから食器のふちの三次元位置計測が終わるまでの計測時間は約 1800 ms であり, 計測システムに対する要求の計測時間(約 2 秒以内)を満たすことができた．内訳としては種類判別に約 300 ms, 三次元位置計測に約 1500 ms を要した．三次元位置計測の内訳としてはレーザを食器の任意の場所に照射するために約 600 ms, 把持点周りのふちの三次元位置計測に約 900 ms を要した．

食器を置く台に対して真上に設置したビジョンセンサには Fig. 14 に示す Point Grey Re-



Fig. 13 実験システム(入口側)

search 社の Dragonfly Express を用いる．最大フレーム速度は 200 [fps], 解像度は 640×480 である．レンズは PENTAX 社の H61 2A を使用した．焦点距離 6 mm, 最大口径比は 1.2 である．



Fig. 14 Dragonfly Express

食器を置く台に対して斜めに設置したビジョンセンサには Fig. 15 に示す Point Grey Research 社の Grasshopper-20S4M/C を用いる．最大フレーム速度は 30 [fps], 解像度は 1600×1200 である．レンズは PENTAX 社の H61 2A を使用した．焦点距離 6 mm, 最大口径比は 1.2 である．

高フレームレートでは露光時間が少ないためレーザの照射された画像を二値化した画像から重心位置を求める際にレーザ位置が検出されない場合が考えられる．そこで本研究では



Fig. 15 Grasshopper-20S4M/C

位置計測用カメラのフレームレートは 15 Hz で実験を行った。また、種類判別用カメラもフレームレートは 15 Hz で撮像した。

レーザはキコー技研社の MLX-D12-635-3 を使用した。最大出力 0.81 mW , 発振波長 635 nm である。ガルバノメータスキャナは GSI Lumonics 社の M2 を使用した。走査角度は ± 15 度である。サーボドライバは GSI Lumonics 社の MiniSAX を使用した。入力電圧範囲は ± 3 V である。D/A ボードは GSI Lumonics 社の SC2000 を使用した。入力電圧範囲は ± 3 V, 分解能は 12 bit である。

全ての計算、制御は OS が Windows XP professional SP3 , CPU が Intel Pentium 4 CPU 3.0 [GHz] , RAM 容量が 1 [GB] の PC を用いた。プログラムの開発環境には Microsoft Visual Studio 2005 を用い、プログラム言語には C++ を用いた。

3.4.2 実験結果

Fig. 16 , Fig. 17 に示すような 7 種類の食器 (円形の食器が 4 個 , 四角形の食器が 3 個) の種類判別を行った。食器には以下のように番号付けをした。

全食器を上から見た画像を Fig. 18 に示す。台の上に 1 枚置いた状態から 5 枚重なった状態まで場所を変えながら各食器について行った。

7 種類中 5 種類の食器の判別に成功し、2 種



Fig. 16 判別を行った食器 (四角形)



Fig. 17 判別を行った食器 (円形)



Fig. 18 全食器を上から見た画像

類の食器(食器番号 4 と 6)は判別できない時があった． Table 1 に各食器の形状と面積を示す．

Table 1 食器の形状と面積

形状	種類	面積
四角形	1	6327
	2	2772
	3	3235
円形	4	2162
	5	3396
	6	1984
	7	7189

食器をある場所に置いて同じ実験を 30 回繰り返した．各食器の標準偏差と最大値 - 最小値は Table 3.6 に示すようになった．

計測システムに求められる高さ方向誤差は $\pm$ 約 1 mm 以内のため本研究の提案手法のくり返し精度は要求をほぼ満たしている．

次に本研究の提案手法を用いた計測結果を使ってロボットが把持する実験を行った．計測した食器の種類，三次元位置の情報をロボットアームへ伝達する．本研究では TCP/IP 通信によって情報の伝達を行った．計測側が TCP サーバとして動作し，ロボットアーム側からの要求に対して計測，応答するシステムとした．ロボットアームは伝達された情報から食

器の把持を行う．

食器を重ねてある場所に置き，計測し，計測結果からロボットが食器を把持し，食器を違う場所へと置き同様の作業を行った．例を Fig. 19 に示す．ただし，種類判別の困難な 2 種類の食器(食器番号 4 と 6)は種類は既知とし，種類判別は行わず，三次元位置計測のみを行った．その結果，場所や食器の枚数を変えても食器を把持することができた．

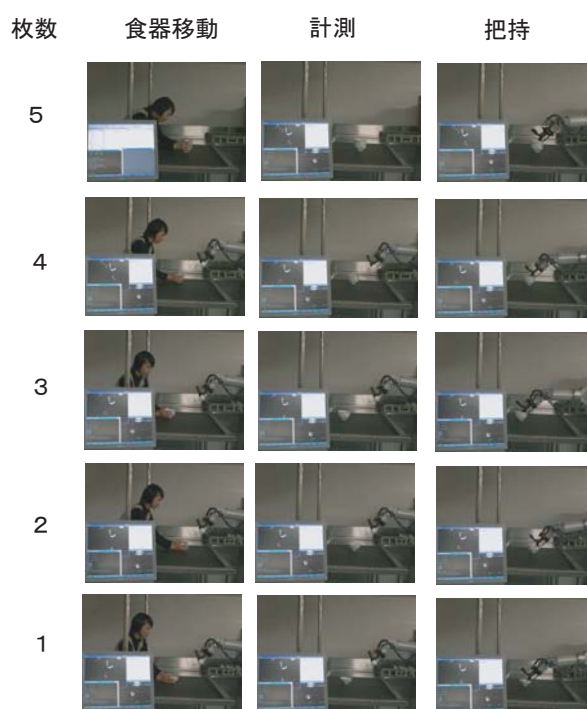


Fig. 19 入口側におけるロボットアームとの結合実験(お碗の把持)

Table 2 食器の標準偏差，最大値 - 最小値

種類	標準偏差(mm)	最大値 - 最小値(mm)
1	0.8760	3.281
2	0.6452	2.599
3	0.6356	2.140
4	0.8316	2.779
5	0.7750	2.943
6	0.6267	2.162
7	0.4654	1.682

4. 出口側

4.1 要求分析

出口側の計測システムには以下のような前提と要求がある．

- [a] 食器の種類とおおよその位置・姿勢は既知である．
- [b] 洗浄機内でずれた食器の位置補正が必要である．

[c] 入口側程の計測精度は必要ない．

[a]は入口側でラックにセットした際の情報から既知である．[b]は洗浄の際に食器がずれ，入口側の情報のみでは把持ができないためである．[c]に関して，Fig. 20に示すように食器はラックにセットされているため，食器間の隙間は入口側に比べて広い．そのため，計測精度は低くても把持できると考えられる．

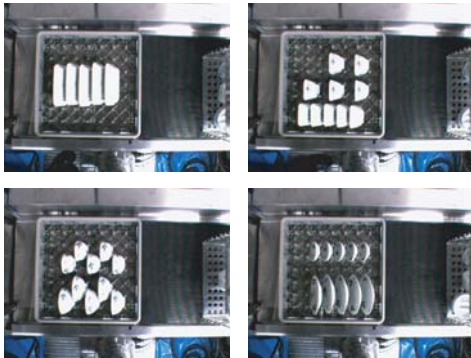


Fig. 20 ラックに食器がセットされた様子を上方から撮影した例

4.2 システム構成

要求分析より，計測精度は入口側に比べて低くて良いと考えられる．そこで，出口側の計測システムでは Fig. 21に示すようにラックの上方下向きにカメラを取り付け，画像のみから把持点の計測を行った．ビジョンセンサには入口側の種類判別用カメラと同様にPoint Grey Research 社のDragonfly Express を用いる．

4.3 把持点の位置計測

食器のラックからの取り出しは，各食器群について，Fig. 20上で最も左側にある食器から順次行う．各食器の同図上で上下方向のほぼ中心，左右方向の最左端の点を把持位置とする．



Fig. 21 実験システム（出口側）

Fig. 22に実験の様子を示す．照明条件を適切に設定した上で画像を2値化することで，食器の側面部を前景として安定して抽出することができた．把持対象の食器の予想される位置・姿勢から画像上での把持点座標を求め，その点を中心とする小区画内に存在する前景画素を抽出する．これらの画素と連結している領域を抽出し，その領域の上下方向の中心に位置する画素のうち左右方向の最左点を求める．ただし，隣接する食器の側面領域が画像上で連結して見える場合があるため，連結領域抽出は適切な境界を定めた上で行う．

把持点が画像上でずれるということは，一般には高さ方向の位置も，もともとの予想される高さからずれていることを意味する．しかし要求される精度に対してそのずれは十分に小さいと考え，画像上で検出された把持点を通る視線上で，予想された把持点高さに存在する点を3次元位置計測結果とした．

4.4 実験

ラックにセットされた食器をカメラの真下に置き，計測し，計測結果からロボットアームが食器を把持する実験を全ての食器で行っ



Fig. 22 出口側の把持実験の様子

た．その結果，全ての食器を把持することができた．

5. まとめ

本研究では，食器洗浄作業を自動化するための要求を満たす計測システムの開発を行った．また，食器の種類判別方法，把持点の三次元位置計測方法を提案し，実験により検証した．実験システムの配置は実用化を考慮した配置とした．食器の枚数や場所を変えても把持の成功が確認できたことから提案手法の有効性を示した．

6. 謝辞

本研究は，独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト，片付け作業用マニピュレーションRT システム (サービスロボット分野)「食器洗浄・収納パートナーロボットの研究開発」の一環として実施された．共同で研究を進めた東北大学大学院工学研究科 小菅・菅原研究室 / 平田研究室，セイコーエプソン株式会社，野村ユニソン株式会社，株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ，ホシザキ電機株式会社の関係各位に感謝します．

参考文献

- 1) 李，一ノ瀬，小菅，平田．“側面把持に基づく扁平物体の把持メカニズム,” 第26回日本ロボット学会学術講演会，2008．
- 2) K. Kosuge, J. Lee, J. Ichinose and Y. Hirata．“A novel grasping Mechanism for Flat-shaped Objects Inspired by Lateral Grasp”, Proceedings of the Second IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008.
- 3) 井口，佐藤．三次元画像計測，昭晃堂，1990.
- 4) 野村，林，鏡，橋本．“画像上の輪郭特徴量を用いた食器認識システム,” 計測自動制御学会東北支部第236回研究集会, 236-12, 2007.
- 5) Z. Zhang. “A flexible new technique for camera calibration,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000.