近接覚・触覚によるなぞり形状推定に基づく 多種食器操作キッチンアシストシステムの実現

水内 郁夫^{*1} 藤本 純也^{*2} 袖山 慶直^{*2}
山本 邦彦^{*2} 岡田 慧^{*2} 稲葉 雅幸^{*2}

A Kitchen Assistant Manipulation System of a Variety of Dishes based on Shape Estimation with Tracing Dish Surfaces by Sensing Proximity and Touch Information

Ikuo Mizuuchi^{*1}, Junya Fujimoto^{*2}, Yoshinao Sodeyama^{*2},
Kunihiko Yamamoto^{*2}, Kei Okada^{*2} and Masayuki Inaba^{*2}

We have developed a kitchen in which a robot arm with a hand is incorporated. The robot was made for assisting with our work in kitchen. Manipulation of a variety of dishes is the main problem for the purpose. For realizing the manipulation, we developed a one-DOF hand equipped with multiple sensors. In this paper, we present the robot system estimating approximate position and shape of dishes using these sensors based on sensor-based tracing. We also present a method of manipulating dishes graspslessly to deal with difficult setting of dishes. In the following experiment, we demonstrate the robot clears away basic three types of dishes by picking them off a tray and placing them into a dish washer.

Key Words: Kitchen Assistant Robot, Proximity Sensor, Sensor-Based Motion, Graspsless Manipulation, Sensor-Embedded Hand

1. 序 論

ロボットに生活の場での活躍が期待されて久しいが、実用化へ向けた困難な点の一つに、扱う対象物が多様であるという点がある。本研究ではキッチンにおける食器の取り扱いの自動化を目的とし、多種センサと自分自身の動きにより [1] 食器の局所形状を推定し、それに基づき多種の食器を適応的にマニピュレートするシステムを実現した。多種食器の形状を 3 種類に分類し、それぞれのマニピュレーション戦略に基づき、ハンドに埋め込まれた近接覚センサ・圧覚センサ・触覚センサ・力センサを用いたハンドのなぞり動作により把持に必要な局所形状情報を推定し、推定した局所形状情報に基づき多種食器のマニピュレーションを行う。提案する方式に基づくマニピュレーションシステムに、概況を把握する上空ビジョンセンサに基づくビジョン処理や、並列モニタリングに基づく行動管理システムを統合

Fig. 1 Appearance of the kitchen assistant robot KAR

し、キッチン組み込み型のロボットによりキッチンに置かれた多種の食器の片付けを行うシステムを実現した (Fig. 1)。食器を食器洗浄機へ配置する工程を自動化することができれば、高齢者世帯や共働き世帯等の家事負担軽減への貢献が期待できる。

食器の操作に関する研究は、フック構造を有するハンドを利用して食器の縁を引っ掛けるようにして把持する手法 [2] や、固定カメラを用いて 2 種類の把持方法を選択し指先 6 軸力センサを利用し食器を片づける手法 [3] 等があるが、未知形状の食器

原稿受付 2011 年 6 月 27 日

^{*1} 東京大学 (現在は、東京農工大学大学院工学研究院)

^{*2} 東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*1} The University of Tokyo (Currently at Tokyo University of Agriculture and Technology, Graduate School of Engineering)

^{*2} The University of Tokyo, Graduate School of Information Science and Technology

■ 本論文は有用性で評価されました。

の取り扱い等の課題がある。本稿では多種センサを埋め込んだハンドによる未知形状の食器へ適応的な対応方法を提案する。STAIR プロジェクトでは、三つの指に埋め込んだ赤外線近接センサを用いて未知物体の適応的の把持の実現を目指し、複数の近接覚センサにより冗長に得られた 3D 形状を確率的に表現し、センサベースな反射的な動作の組み合わせにより適応的な把持を実現している [4] [5]。我々のアプローチは急峻なエッジ形状（食器の縁）を発見することで食器把持に必要な情報を得るというもので、薄さという食器の特徴に関する知識を含めたモデルである。

センサを手先・指先に搭載するアプローチは、複数の近接覚センサを用いた平面物体の局所的なエッジ抽出に基づき物体の外周をトレースすることによる平面物体の形状復元 [6] や、空間上に設定した各グリッド点の位置から一定の方向に指を動かし接触点と接触方向を検出することによる物体の局所的な形状の復元 [7] 等がある。また、把持中の物体の詳細形状を分布型触覚センサの触覚像から得る方法 [8] や、多指ハンドによる物体の操りや把持を行っていない指を利用して指先の接触位置を変えることで物体の新たな表面情報を得る方法 [9] がある。本研究では、原理的に絶対精度の低い近接覚センサ群を接触力のセンサとともにハンドに組み込み、センサベースな動作を通して、最小限の接触で食器の把持に必要な情報を収集することができる手法を提案する。

2. 近接覚センサ情報に基づく対象物のなぞり動作

2.1 なぞり動作

Fig. 6 のように食器の表面とハンド面の方向を合わせながら、食器の表面形状に沿って任意の方向にハンドを動かす動作を、なぞり動作と呼ぶことにする。なぞり動作を行うことにより、

- ハンド面を食器の面を挟んで把持するのに適した向きに調整
- 食器面の曲率半径を推定することにより食器の半径を推定
- 食器面の曲率が急峻に変化する部位（食器の縁）の発見等が可能になる。

なぞり動作を実現するために、本研究では、ハンド表面に 5 点の近接覚センサを埋め込んだロボットハンドを開発した (5.1 節, Fig. 15)。近接覚センサは赤外線の発光・受光素子を一体化したセンサで、物体表面からの反射光の強度を受光素子で計測する。ハンドの同一平面上に二次元的に分布している近接覚センサ群の信号強度が均等かつ一定になるように保つことで、食器の表面と近接覚センサが分布しているセンサ面の方向を合わせながら一定の距離を保つことができる。

本研究では、近接覚センサ群を用いたなぞり動作を次の三つの動作により実現する。

- (1) 食器表面とセンサ面の向きを一致させる動作
- (2) 食器表面との間隔を調整する動作
- (3) センサ面と平行に移動する動作

(1) の動作は信号強度が弱いセンサ（食器から遠いセンサ）を食器に近づけるようにハンドの向き調整することで実現でき、(2) の動作はある瞬間の信号強度を記憶しておき、現在の信号強度がこれに近づくようにハンドを動かすことで実現できる。

Fig. 2 Illustration of symbols describing tracing

2.2 近接覚センサに基づくハンド目標速度の計算法

次に上述の (1) から (3) を同時に行うようなハンドの速度と角速度の目標を求める方法について示す。以降で用いる記号の意味をイメージしやすいように Fig. 2 に図示している。

法線ベクトルが $\mathbf{n}$ で表されるハンド表面の平面上に N 個の近接覚センサが法線方向を計測方向として分布している。ハンド座標系における各センサの位置を $\mathbf{p}_i$ 、センサの信号強度を s_i で表す ($i = 1, 2, \dots, N$)。このときハンド座標系におけるセンサ位置の重心 $\mathbf{p}_C$ およびセンサの信号強度の重心 $\mathbf{p}_{SG}$ が次式で表される。

$$\mathbf{p}_C = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i}{N}, \quad \mathbf{p}_{SG} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^N s_i} \quad (1)$$

センサ情報 s_i に基づき、物体表面のなぞり動作を行うためのセンサ位置の重心 $\mathbf{p}_C$ の目標速度 $\mathbf{v}_C$ と目標角速度 ω_C を、次のようにして決定する。

$$\mathbf{v}_C = \mathbf{v}_{trace} + \mathbf{v}_{normal} \quad (2)$$

$\mathbf{v}_{trace}$ は食器面に沿うために、ハンド表面に平行な方向にハンドが動く速度の指令値として与える。 $\mathbf{v}_{normal}$ は食器面とハンド表面の距離を一定に保つための速度であり、センサ信号の最大値 s_{max} と目標信号強度 s_{target} の差に係数 k_v を乗じて次のように決定する。

$$s_{max} = \max_i s_i \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_{normal} = k_v (s_{target} - s_{max}) \mathbf{n} \quad (4)$$

s_{target} は食器面とハンド表面との距離の目標値に相当するが、食器面の赤外線反射特性によって距離と信号強度の関係が異なるので、食器ごとに適切な値が異なる。そこで、最初に食器に軽く触れてから一定距離遠ざかった時点でのセンサ信号強度から s_{target} を決定するようにした（詳細は 2.3 節参照）。

ω_C は食器面とセンサ面を平行にするための回転速度であり、

$$\omega_C = k_\omega \mathbf{n} \times (\mathbf{p}_{SG} - \mathbf{p}_C) \quad (5)$$

により決定する。 $\mathbf{p}_{SG} - \mathbf{p}_C$ は $\mathbf{p}_C$ から $\mathbf{p}_{SG}$ に向かうハンド表面内のベクトルであり、 $\mathbf{n} \times (\mathbf{p}_{SG} - \mathbf{p}_C)$ はそれに直交なハンド表面内のベクトルになるので、センサ重心位置 $\mathbf{p}_C$ を中心としてハンドに $\mathbf{n} \times (\mathbf{p}_{SG} - \mathbf{p}_C)$ 方向の回転をさせると $\mathbf{p}_{SG}$ が食器から遠ざかる方向にハンドが回転し、その結果 $\mathbf{p}_{SG}$ が

Fig. 3 Proximity sensor responses of a rice bowl (left) and a glass (right)

p_C に近づくことが期待される。 k_ω は係数である。

v_C , ω_C はハンドに固定された点 p_C の目標速度、目標角速度なので、逆運動学により各関節の目標速度を計算し、各関節を制御する。なぞり動作開始位置への移動に関しては第6章に述べる。ヤコビ行列を用いた逆運動学計算の際にハンドのセンサ面の法線方向まわりの回転自由度は拘束されないので、6自由度以上のマニピュレータを用いる場合、この拘束されない自由度を巧みに利用することが将来複雑な環境に対応するときに重要になると考えられる。アームの自由度とこの自由度をパラメータとする最適化問題を設定することで活用が可能である [10] [11]。

2.3 近接覚センサの絶対精度の不足への対応

近接覚センサの信号強度は、対象物の赤外線反射特性に依存するため、絶対的な距離精度は低い。隣接して配置した近接覚センサからの信号強度の相対的な比較は可能であり、信号強度の重心 p_{SG} に基づく面の向きのずれの推定は、絶対精度の低さの影響をあまり受けないと考えられる。

Fig. 3 は、白い茶碗と透明なグラスに、それぞれ直線運動で接触し遠ざかることを3回ずつ繰り返した際の、近接覚センサ (Avago Technologies, HSDL-9100) の反応である。背景には何も置かずに実験した。縦軸はAD変換値 (最大1023) であり、反応が強い (物体に近い) ほど値が大きい。センサによってピーク強度が異なるのは食器の中心軸に対してずらした位置に向かって直線運動を行ったためである。茶碗とグラスで差はあるものの、同じ食器に対する各センサ値の相対的な差に基づく手法は有効であると考えられる。

本研究では、まず最初に食器に軽く触れ、その位置から一定距離 [5[mm] 程度) 食器から遠ざかった位置におけるセンサの信号強度 s_i から、

$$s_{target} = \max_i s_i \quad (6)$$

により基準の信号強度 s_{target} を決定している。これにより、未知の反射特性の食器に対しても食器からの距離がばらつきにくくすることができる。食器とハンドの接触の検知には、手首の6軸力センサと手の平表面の力センサ (FSR) を用いた。Fig. 4 のように、食器方向にハンドを動かしながら接触力を監視し、一定力以上になったことを検出することで、接触を検知する。接触した位置をベースに食器との距離を定め、近接覚センサにより面方向と調整することで、カメラやアームたわみや関節ガタなどによる手先位置の不確かさに対する許容度が大幅に増すと考えられる。

Fig. 4 Confirming the position by slight touch

Fig. 5 Estimation of center of curvature

3. なぞり動作を利用した対象物情報の推定

3.1 対象物の曲率半径と曲率中心位置の推定

なぞり動作の結果センサ位置重心 p_C が辿った軌跡の曲率半径を推定することにより、対象食器の半径を推定することができる。なぞり動作のある時点における曲率半径の推定値 r を過去 M 点 ($j = 1, \dots, M$) における、近接覚センサ位置重心の推移 $p_{C,j}$ と、センサ面の法線ベクトルの推移 n_j から次のようにして計算する。

まず、 $p_{C,j}$ を通り n_j に平行な直線 l_j を考え、曲率中心 p_o と各直線 l_j の距離の二乗和が最小になるような p_o を求めることにする。 l_j と p_o の距離の二乗和を p_o に関して微分すると、 p_o から l_j に下ろした垂線のベクトルの和がゼロベクトルになるときに最小になることが分かる。 p_o から l_j に下ろした垂線と同じ方向の単位法線ベクトル m_j を用いて下の式 (7) で表現でき、 p_o の成分に関する連立一次方程式になるため、これを解いて p_o を求めることができる。 Fig. 5 は、なぞり動作を行った際のハンドの軌跡 ($p_{C,j}$ および n_j) と曲率中心 p_o の関係を示した図である。

$$\sum_{j=1}^M m_j \cdot (p_{C,j} - p_o) m_j = 0 \quad (7)$$

次に p_o を中心とした円弧を考え $p_{C,j}$ との距離の二乗和がなるべく小さくなるような半径 r を計算する。これは p_o と $p_{C,j}$

Fig. 6 Tracing side face of a rice bowl

Fig. 7 Estimated radius by tracing a rice bowl horizontally

Fig. 8 Tracing side face of a glass

の距離の平均となる (式 (8)). このようにして曲率半径を推定する.

$$r = \frac{\sum_{j=1}^M \|p_o - p_{C,j}\|}{M} \quad (8)$$

Fig. 6 はなぞり速度 v_{trace} を水平方向に指定して茶碗のなぞり動作を行う様子を示す. v_{trace} の大きさは 15 [mm/s] 程度である. 図から茶碗の側面に沿って動いていることが分かる. Fig. 7 はなぞり動作を行った際に, 曲率半径の推定値の推移を示したものである. p_C および n はアームの関節角度から順運動学に基づいて算出した. 茶碗の一番上の部分の半径が約 73 [mm] で, その 5~10 [mm] ほど外側をなぞっていることから, 誤差が 0~35 [mm] 程度以内で推定できている. 推定された曲率半径は, センサノイズやハンド面の動きの影響, アームたわみや関節ガタの影響を受けているため, 把持方法の選択 (6.3 節) の閾値を設定する際にこれらの影響を考慮しておく必要がある. Fig. 8 はなぞり速度 v_{trace} を水平方向に指定してグラスの側面のなぞり動作を行う様子である. 透明なグラスも同様になぞり動作を行うことができた.

3.2 鉛直方向のなぞり動作による食器の縁の検出

v_{trace} として鉛直上向きななぞり速度を指令した場合は食器の縁を探すことができる. Fig. 9 は鉛直上向きの v_{trace} を与えた場合のなぞり動作の過程を示す. Fig. 9 (1) では指先側のほうが食器の表面に近く, センサの信号強度も強いいため, 白丸で示

Fig. 9 Vertically tracing of a rice bowl

したセンサの信号強度の重心 p_{SG} はセンサ位置の重心 p_C に対して指先側にずれる. このため, 式 (5) から計算される角速度目標 ω_C により, 指先が食器から離れるような回転運動が生成される. その結果 Fig. 9 (2) のように, 食器の表面とセンサ面の方向が合っている状況になると p_{SG} と p_C は一致し, 角速度目標 ω_C はゼロ, つまり並進運動のみとなる. さらに食器をなぞっていき, Fig. 9 (3) のように食器の縁に差し掛かると, 手首側のセンサの信号が急激に弱くなる. このため, Fig. 9 (1) と同方向の回転運動が生成されるが, 計算される角速度目標 ω_C が大きな値となる. これに従って動作を行うと Fig. 9 (4) のような姿勢になる. そこで, 角速度目標 ω_C に閾値 ω_{thr} を設け, 各ステップごとに

$$\omega_C > \omega_{thr} \quad (9)$$

を満たすかどうかを確認し, 式 (9) を満たした場合にはなぞり動作を停止するようにすることで, 食器の縁を検出することができる. ω_{thr} は実験的に 8.0 [deg] に設定した.

3.3 重なった茶碗のなぞり実験

本提案手法の食器情報収集可能性を検証するために, 複雑な状態に置かれた食器で同じアルゴリズムでなぞり動作の実験を行った. Fig. 10 は積み重なった四つの茶碗の側面に対してなぞり動作を上方に向かって行い, 茶碗の縁を検出する様子を表している. 最初にセンサ面と茶碗側面がずれているのを調整する動作が生成され, その後まっすぐに側面を上方になぞっていき, 縁付近に差し掛かるとセンサ面が下方を向くように急な回転運動が生じる. センサ面の法線ベクトルである n の鉛直方向に関する変化を監視することで茶碗の縁を検出した. Fig. 11 はこのときのハンドの動きとなぞり動作の軌道情報を三次元幾何モデルを用いて描画したものである. なぞり動作の p_C の軌跡の中から 10 点をそれぞれの時点の n の方向を示す円すいで表示した.

Fig. 12 は積み重ねた茶碗の個数を変化させて, 同じ方法により茶碗の縁の発見を行ったときの発見時の状態を示したものである. 積み重ねた茶碗の個数によらず一番上の茶碗の縁をとらえていることが見て取れる. 検出した縁の位置を基準にする

Fig. 10 Tracing stacked rice bowls

Fig. 11 Oriented points acquired by tracing stacked bowls

Fig. 12 Finding edge of stacked rice bowls

ことで、重ねた茶碗の個数によらず一番上の茶碗に対する操作行動を生成することが可能になる。4.1 節でこの縁の検出を利用して、重なった茶碗を1枚ずつずらして把持する操作について述べる。

4. グラスプレスな食器の操作

重なった茶碗や背の低い皿などへの対応は困難な点が多いが、本研究では同じ茶碗が重なって置かれている場合と、単独の背の低い皿が置かれている場合の2種類の状況に関し、グラスプレスな操作方法を試行した。なお、これらの方法はセンサ情報に基づく適応的な操作という段階まで至っていないが、将来はせん断力の計測が可能な多軸触覚センサ [12] や分布触覚等を用いることにより適応的な操作に発展させることができると考えられる。

4.1 重なった茶碗のずらし操作

Fig. 10 のように積み重ねられた茶碗を1枚ずつ取り出す際には、重ねられた茶碗を分離する必要がある。個々の茶碗についてみると内側もしくは外側の面が他の茶碗で隠されているため、安定した把持を行うことができない。このため茶碗を分離して取り出すことが難しい。このような状況であっても、食器の隠れていない面に指を押し当て、ずらすように動かすことで隠れ

Fig. 13 Picking up stacked rice bowls

Fig. 14 Inserting hand between a plate and a tray by pivoting

ていた面にアプローチできることがある。

一番上の茶碗の隠れていない内側の面に指を押し当て、下の茶碗に沿ってずらすことで、隠れていた外側の面を上方に動かす操作を実現した (Fig. 13 の (1), (2)). 上方に出てきた面をはさむことで、広い把握面を確保し、摩擦やモーメントの点で安定した把持を行うことが可能になった (Fig. 13 の (3), (4)). これらの操作を繰り返すことで積み重なった茶碗を上から順に1枚ずつ移動させることができる。

4.2 皿の下への指の差し込み操作

背の低い皿が台の上に置かれている状況では皿の底面と台の上面の間のスペースが小さい。そのため把持を行う際に縁の部分をつまむことしかできず、安定した把持を行うことができない。指を皿の隠れている底面に差し込もうとすると、押し込むかたちになり皿が台の上を滑ってしまいうまくいかない。

皿を押し込まないようにするためには、皿を持ち上げながら指を差し込めばよい。自由度の少ないハンドであっても、Fig. 14 に示す手順により、このような操作を実現した。まず、皿の縁の下に指を当て (Fig. 14 の (1))、縁を持ち上げることで皿の底面と台の上面の間にスペースをつくる (Fig. 14 の (2)). 指を少し傾けて指の側方の点と皿の底面が接触するようにする (Fig. 14 の (3)). 接触点を中心に指を旋回させて、指の接触していない側を皿の下に差し込む (Fig. 14 の (4)). この後、指を深く差し込んだ状態で皿の上面と底面をはさむことで、安定した把持を行うことができた。

この方法では指の上でピボット操作 [13] を行い、接触点を中心とした回転運動により皿と指の位置関係を変えている。このため摩擦により皿を押すことなく指を差し込むことができる。なお、Fig. 14 では皿の反対側がトレイの縁に接触しているが、皿とトレイの間の摩擦を増やす、あるいは皿に横方向の力を加えないようにハンドの制御を工夫する等により、トレイの中央でも同様の動作が可能であると考えられる。

5. キッチンにおける食器取り扱いシステムの実現

5.1 近接覚センサ埋め込み型ロボットハンド

提案手法の実証実験のために、多種センサを埋め込んだ1自

Fig. 15 Multisensory 1-DOF robot hand

由度ロボットハンドを開発した (Fig. 15). 5 点の近接覚センサ (Avago Technologies, HSDL-9100), 接触力の大きさと中心を計測可能な接触力センサ (Interlink, FSR) 8 個, 手首部に 6 軸力センサ (ATI, Mini40) 1 個, 把持した際の握力を計測可能な 3 軸力センサ (ニッタ, PFS) を指の付け根に 2 個を埋め込んである.

なぞり動作 (第 2 章) のための近接覚センサは同一平面上に配置し, 19 [mm] 間隔で正方形の頂点の位置に 4 点とそれらの中心に 1 点の, 計 5 点を配置した. 手首の 6 軸力センサを用いることで食器や環境との接触が検知でき, 2.3 節に述べたような, 接触による食器の検知を行うアプローチ動作が可能になる. 親指付け根の 3 軸力センサは, 並進力と回転力から接触力の大きさと中心位置が推定できると考えた.

指の把握面にはシリコンゴムを貼って食器との接触面積を大きくし, 摩擦力を得るようにしている. さらに手の平側の把握面は透明なアクリル板でカバーし, 内側の赤外線近接覚センサの光が透過するようにしている. このアクリル板は手先側と付け根側の二つに分かれていて, それぞれ四つの FSR の上に貼り付けてある. またアクリル板は手先側に少しはみ出すように取り付けることで爪としての機能を持たせ, 重なった皿の間など, 狭いすきまに差し込めるようにしている. アクリル板表面は手先側の爪部と近接覚センサの上部を除いて, ゴムシートを貼り摩擦力が得られるようにしている.

5.2 システムの全体構成

本稿における実験は, このハンドをキッチン一体型アームの先端に取り付けたキッチンアシスタントロボット KAR (Kitchen Assistant Robot) [14] により行った (Fig. 1). アームは, ベースの水平 1 自由度のスライダを含め 7 自由度である. アームがキッチンに固定されていることから, キッチン環境を身体の一部として事前知識により利用することが可能である. ハンドを除くアーム部の質量は約 7 [kg] で, ハンドを含めた手先の可搬重量は約 2 [kg] である. 約 1 [kg] のハンドを取り付けても, 大皿 1 枚の重さは約 0.5 [kg] であるため, 十分に食器の操作が可能である.

キッチン上部にはカメラを設置し, キッチンに置かれた食器の概況を把握することができる. キッチン背面下部には PC, モー

Fig. 16 The control system of KAR

タドライバ, 6 軸力センサ用の基板が設置されている. 多種センサ埋め込みハンドには 48 チャンネルの AD 変換が可能なマイコン基板が埋め込まれ, USB でキッチン背面の PC と通信する. PC は RT-Linux によりモータ制御を行い, ロボットの行動プログラムは非 RT プロセスの EusLisp [15] 上で実行される.

5.3 並列モニタリングに基づく行動管理システム

本ロボットの行動システムの構成図を Fig. 16 に示す. キッチンにおける作業ではその進行状況によって, 注目している物体や作業の失敗を引き起こす要因が変化する. そこでタスク管理部 (Task Manager) が状況の変化があったときに, 注意すべきセンサ情報を並列に監視するためのスレッド (Sensor Monitoring/Abnormality Monitoring/Motion Monitoring) を生成し [16], 各スレッドからのメッセージを受けることで情報を集める. 集めた情報に基づき PC 内のロボット幾何モデルや作業環境の状態モデルを更新する. これらの情報からタスク管理部は判断のための計算を行い, 必要があれば制御目標を切り替える割り込み命令をいつでも下すことができる.

このようなシステムの構成により記憶内の情報に基づいた高次の計画が必要な動作から, 単純で素早い応答が求められる低次の反射的な動作までを集中的に管理することができる. また, センサ情報の監視のための記述をスレッドとして分離する一方で, ロボットの行動 (例えば Fig. 17) はタスク管理部にまとめて記述するため, 状態遷移型の行動システムと比較して, 作業行動のような手順のある行動の記述を行いやすいというメリットがある.

具体的にはこの行動システムでは次のような流れでセンサフィードバックを実現している.

- (1) タスク管理部がプログラムされたタイミングで特定のセンサ状態や環境状態, 動作状態を監視するための並列モニタリングスレッドを生成する.
- (2) 実時間動作制御部に動作指令を送る.
- (3) 各並列モニタリングスレッドはセンサ情報管理部からセンサ情報を受け取り, 監視している状態を検知するとリングバッファにメッセージを送る.
- (4) タスク管理部は並列モニタリングスレッドからリングバッ

Fig. 17 Flowchart of the experiment clearing away three dishes

ファに送られてくるメッセージに応じて新しい動作目標を決定する。

(5) 必要のなくなった並列モニタリングスレッドを解放する。

6. 実環境における食器片付け実験

実環境でキッチン上のトレイに置かれた食器を食器洗浄機に入れ、食器洗浄機をスタートする実験を行った (Fig. 18)。食器は食器洗浄機の容量を示すのに用いられる標準食器と呼ばれている茶碗、グラス、皿の三種類を使用した。すべての食器は倒さずに上向きにトレイの上に置かれているものとし、茶碗に関しては同じ種類の茶碗であれば重なっていてもよいものとした。

6.1 全体のタスク管理

プログラムの手順を Fig. 17 に示す。まず、キッチン上方のカメラでトレイの上を観察し、置かれた食器の種類と位置を大まかに推測する。次に、先に片付ける食器を選択する。片付け

る順番は食器の高さや把持を行う際に指を差し込むスペースを考慮して決める (Fig. 18 の 1)。片付ける食器へのアプローチ方向もトレイ上のスペースを考慮して決定し、接触検知 (2.3 節) を利用して食器との距離を一定にする。その後、食器の側面をなぞる (第 2 章) ことで食器の径を調べて、茶碗かグラスの場合は、食器面を挟むような把持方法と側方から円筒を握るような把持方法のどちらか適切な方法を選択する (Fig. 18 の 2~13)。皿を片付ける際には、接触検知を利用したアプローチ後に、グラスプレスな操作 (第 4 章) で皿の下にハンドを深く差し込み、しっかりと把持している (Fig. 18 の 14~18)。トレイ上の食器をすべて運んだあと、食器洗浄機の扉を閉め、スタートボタンを押すことで食器洗浄機を動作開始させる。この際も手首の 6 軸力センサを利用して扉やボタンを押す力を調整している (Fig. 18 の 19, 20)。

6.2 上空カメラによる概況把握とアプローチ戦略

上空に固定設置したカメラ (オプト, NM30) による食器の

Fig. 18 Fully autonomously clearing away three types of dishes into the dish washer and starting it

認識は、食器形状モデルに基づく複数の特徴量から認識する手法 [17] により食器モデルとマッチングを行い概略位置を推定した。食器のモデルは標準食器三種類とし、横に倒れたグラスのモデルも含めた。探索領域はトレイ上のみとし、画像認識処理は常時実行されている。一回の認識に要する時間は数秒である。画像からの食器位置認識の誤差は最大で 40 [mm] 程度である。キッチンロボットのタスク管理部は、見えている食器の種類と位置の推定結果を問い合わせる (Fig. 17 参照)。カメラとキッ

チン天板の位置関係は既知としている。

食器が見つかった場合は、どの食器のどの方向からアプローチすると他の食器や環境に邪魔されずにアプローチできるかを考慮して、最初に片付ける食器を選択する [18]。具体的には、見つかった各食器の周囲に 15° 間隔で、ハンドが動く範囲を想定した長方形を描く。長方形の幅はハンドの幅 (100 [mm]) で、長さはハンドが食器に近づく動作に必要な長さ (150 [mm]) である。アームの可動範囲や自由度配置の面からアプローチしに

Fig. 19 Planning of approaching direction to the dishes

く方向には描かない。次に、各食器の周囲に描いた長方形のうち、他の食器と重ならないものの中でトレイと重なる面積が最大のものを選ぶ。これはトレイの縁とハンドとの干渉の危険が少ないという観点である。複数の候補があった場合は、可動範囲の面でアプローチしやすい方向に最も近いものを選択する。さらに、選択した長方形に対し、アプローチ動作（長方形の食器から遠い辺の上方にハンドの位置姿勢を移動し、そこから真下に移動し、食器方向に移動する）の逆運動学が解けるかを確認する。アプローチ動作が可能でない場合は次の選択肢を検証する。Fig. 19 は、異なる食器配置の際の各食器へのアプローチ方向として選択された四角形を示している。各食器の最適な長方形が決定した後に、茶碗とグラスの中で最もトレイと重なる面積が大きい長方形が描かれている食器を、最初に片付ける食器として選定する。皿は背が低いため、茶碗とグラスがなくなってから片付ける。今回は、皿は茶碗とグラスよりだいぶ径が大きいものを用いたので、大きさにより皿とそれ以外の判別を行った。三次元距離測定カメラを用いることで[18] 側面のなぞり動作が可能か否かの判別をすることができ、小さな皿への対応も可能になると考えられる。

6.3 センサベースな動作による確認と並列モニタリング

アプローチ動作が決定したあとには、実際にアプローチ動作を行う。上空からトレイ付近までハンドが移動する際には、力センサ（6 軸力センサと FSR）をモニタしながらトレイに触れたら停止し、そこから 10 [mm] 上昇する。その後長方形に沿って食器方向にハンドをゆっくり移動し、食器に軽く触れた所で停止し、そこから 10 [mm] 戻り、なぞり動作を開始する。 v_{trace} を水平方向とし一定ループ回数だけなぞり動作を行い、推定された曲率半径（3.1 節）に基づき、横から把持する（グラス）か斜めから縁を把持する（茶碗）かを決定する。曲率半径が大きいと横からの把持が困難になるが、推定誤差も考慮して閾値は小さめの半径とした。縁を把持する場合は、 v_{trace} を上方向としたなぞり動作により縁を発見し把持動作を行う。横から把持する場合はハンドを横向きにし、力センサに基づく位置合わせをして把持動作を行う。

茶碗が重なっている場合には、縁を見つけるなぞり動作により高さが閾値より高い場合には、4.1 節のずらし操作を行ってから把持を行う。その場合、その下の段の茶碗が上空カメラの画像処理により検出される。

食器を把持したら真上に持ち上げて、定型動作によりシンクですすいで、食器洗浄機に設置する。設置の際は、把持した食器が触れると静止するという力センサに基づく確認を駆使した定型手順によりカゴに設置する。食器洗浄機のカゴの構造や各食器を設置すべき場所は既知とし、これまでに設置した食器の

種類と数はカウントしておき、同じ食器が複数来た場合には隙間を空けて設置する。

すべての過程において、環境との接触（モデルおよび 6 軸力センサ）の監視、異常関節力の監視のモニタリングは実行され、触れると停止するタイプの動作の際には、別途 6 軸力センサと FSR を監視するモニタリングスレッドを起動する。また、食器把持後食器洗浄機に設置するまでの間は、握力をモニタリングするスレッドを起動し、握力を維持する。

Fig. 18 は 3 種類 3 個の食器がトレイ上に置かれた状態から、すべての食器を片づけて食器洗浄機のスタートボタンを押すまでの時間は約 5 分 30 秒であった。時間的な面でも改善の余地は大きい。家事作業を行うロボットは、人間や産業用ロボットに比べて時間がかかっても、完全自動でタスクを行うということに価値がある。自動掃除機ロボットや洗濯機は人間が行う方が時間は短くてすむが、就寝中・外出中や別の作業中に作業をしておいてくれるところに価値がある。

7. 結 論

本研究は、キッチンにおける食器の取り扱いの自動化を目指し、近接覚センサと接触覚センサを埋め込んだハンドがセンサベースとなぞり動作を通して未知の食器の把持に必要な情報を獲得し、それに基づき把持方法と位置姿勢を選択して把持する方法を提案した。キッチン一体型ロボット KAR に多種センサ埋め込みハンドを取り付け、茶碗・グラス・皿を食器洗浄機へ運搬する実験を実際のキッチン環境で行い、提案した手法の有効性を示した。

背の低い皿や重なった皿を取り扱う際に、自由度の少ないハンドしか利用できない場合もグラスプレスな操作により皿の隠れている面に対してアプローチすることで、操作が可能であることを示した。複雑な作業を行うロボットのハードウェアをシンプルで低コストなものにするために、このような巧みなマニピュレーション技術が重要である。

今後、機構的な工夫[2]と組み合わせることや、ハンドへのカメラの搭載、せん断力の計測が可能な多軸触覚センサ[12]等を用いた接触力の方向制御等により、より、食器操作の汎用性・頑健性を向上していくことが期待できる。

謝 辞 本研究は、文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：少子高齢社会と人を支える IRT 基盤の創出」の支援を受け、パナソニック株式会社との共同研究により行われた。関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- [1] 石川正俊：“アクティブセンシングとロボットハンド”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.7，pp.938-942，1993.
- [2] K. Kosuge, et al.: “Development of an automatic dishwashing robot system,” Proceedings of The 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.43-48, 2009.
- [3] 中村信吾，永田一将，杉山正治，小枝正直，吉川恒夫：“ロボットアームによる食器洗浄機への食器片付け動作の実現”，第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM，RSJ2009AC3G2-04，2009.
- [4] A. Saxena, L. Wong and A.Y. Ng: “Learning Grasp Strategies with Partial Shape Information,” Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence, pp.1491-1494, 2008.

- [5] K. Hsiao, P. Nangeroni, M. Huber, A. Saxena and A.Y. Ng: "Reactive Grasping using Optical Proximity Sensors," Proceedings of The 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2098-2105, 2009.
- [6] 石川正俊: "並列処理を用いた能動的センサシステム", 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.8, pp.88-94, 1988.
- [7] H. Maekawa, K. Tanie, K. Komoriya and M. Kaneko: "Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch," Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 1992), pp.1327-1334, 1992.
- [8] 木下源一郎, 栗本雄仁, 大隅久, 多田興平: "把持物体の動的触覚像取得とその処理", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.5, pp.550-556, 2002.
- [9] K. Nagata, T. Keino and T. Omata: "Acquisition of an Object Model by Manipulation with a Multifingered Hand," Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.34, no.10, pp.1487-1493, 1998.
- [10] K. Yamane and Y. Nakamura: "Synergetic CG Choreography through Constraining and Deconstraining at Will," Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002), pp.855-862, 2002.
- [11] 藤本純也, 岡田慧, 稲葉雅幸: "微分逆運動学計算の空間拡張によるヒューマノイドの把持探索と立ち位置探索の実現", 第24回ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 1H12, 2006.
- [12] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto and I. Shimoyama: "A Shear Stress Sensor for Tactile Sensing with the Piezoresistive Cantilever Standing in Elastic Material," Sensors and Actuators A, vol.127, no.2, pp.295-301, 2006.
- [13] 相山康道, 稲葉雅幸, 井上博允: "ガラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.114-121, 1996.
- [14] 水内郁夫, 藤本純也, 山本邦彦, 袖山慶直, 村松直矢, 太田茂樹, 本郷一生, 廣瀬俊典, 稲葉雅幸: "キッチンアシスタントロボット KAR による基本食器三種の手探り片付け行動の実現", 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, RSJ2009AC2E2-06, 2009.
- [15] T. Matsui and M. Inaba: "Euslisp: an object-based implementation of lisp," Journal of Information Processing, vol.13, no.3, pp.327-338, 1990.
- [16] 吉海智晃, 林摩梨花, 水内郁夫, 稲葉雅幸: "並列監視評価構造を備えたヒューマノイドの自律行動統合システム", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.1, pp.85-94, 2010.
- [17] K. Okada, M. Kojima, S. Tokutsu, T. Maki, Y. Mori and M. Inaba: "Multi-cue 3D object recognition in knowledge-based vision-guided humanoid robot system," Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3217-3222, 2007.
- [18] 藤本純也, 伊藤司, 水内郁夫, 岡田慧, 稲葉雅幸: "食器の重なりに対応したアプローチ計画と局所手探り探索に基づく食器のピッキング", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 講演論文集, 2P1-C22, 2010.

水内郁夫 (Ikuo Mizuuchi)

東京農工大学准教授。博士 (工学)。1995 年 3 月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。2001 年 12 月東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻博士課程退学。2002 年 1 月東京大学大学院情報理工学系研究科科学技術振興特任教員。2006 年 4 月東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻講師。2009 年 3 月より現職。人間のシステム (身体構造・知能・自律発達機構等) から示唆を得たロボットの構成法等を研究。

(日本ロボット学会正会員)

袖山慶直 (Yoshinao Sodeyama)

2009 年東京大学大学院博士課程修了。博士 (学際情報学)。筋骨格型ヒューマノイド、生活支援ロボットのデザイン研究に従事。2009 年より (株) 本田技術研究所基礎技術研究センター所属。

(日本ロボット学会正会員)

岡田 慧 (Kei Okada)

2002 年東京大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。2006 年より東京大学特任講師。2009 年より同准教授。日常生活支援ヒューマノイド、ロボットシステムの研究教育に従事。1999 年ロボティクスシンポジウム優秀論文賞。2006 年 ICHR 最優秀論文賞。2008 年 IROS RoboCup 最優秀論文賞受賞。

(日本ロボット学会正会員)

藤本純也 (Junya Fujimoto)

2010 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻博士課程修了。博士 (情報理工学)。2010 年 (株) 富士通研究所入社。現在、コンテキストセンシングの研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

山本邦彦 (Kunihiko Yamamoto)

2006 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻博士前期課程修了。修士 (情報理工学)。2008 年同専攻博士後期課程進学。現在は総務省情報通信国際戦略局技術政策課研究推進室に勤務。在学時は知能ロボットの研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1981 年東京大学工学部機械工学科卒業。1986 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専門課程修了 (工学博士)。1986 年東京大学講師。1989 年同助教授。2000 年同教授。現在東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻所属。知能ロボット、ヒューマノイドの研究教育に従事。

(日本ロボット学会正会員)