

# 遠隔ハンドリング補助システム ——三次元画像処理技術の強化——

富塚 千昭 (とみづか ちあき)

神坐 圭介 (じんざ けいすけ)

高橋 浩 (たかはし ひろし)

特集 1

## 1 まえがき

原子力分野の放射線環境におけるハンドリング作業では、人が作業環境に立ち入ることができないため遠隔ハンドリング機器を使用する。富士電機では、形状認識技術を応用してハンドリング対象（ターゲット）の位置、姿勢を特定してバーチャル化する遠隔ハンドリング補助システムを開発した。オペレーターはバーチャル画面を見たい方向に合わせて、マニプレータなどのハンドリング装置を容易に操作できるようになった。本稿では、本システムの概要および開発内容を紹介する。

## 2 開発の背景

従来の遠隔ハンドリング機器の代表である燃料取扱設備では、取扱対象の核燃料が厳密な位置、方位に配置されており、遠隔操作上厳しい環境下で精密で高度な動きを要求されるものの、定められた軌道を一定量動いたら止まり、次に別の動作に移るといったあらかじめ計画された作業を行うものが主であった。

ところが近年、位置、姿勢が不特定なターゲットを取り扱う場合が増えてきている。このような場合には多関節マ

ニプレータを手動操作している。廃止措置における原子炉解体作業<sup>(1)</sup>や、セル内の遠隔作業では、多関節マニプレータ、カメラを作業環境内に設置し、オペレーターは操作室でカメラの映像を見ながら手動操作することになる。図1は原子炉遠隔解体試験装置の例である。この装置を使用して床にあるターゲットをマニプレータでつかみ上げる遠隔操作試験<sup>(2)</sup>（図2）では、カメラの台数を変えて作業効率（作業時間）への影響を調べた。カメラ映像では奥行き感がつかみにくかったり、手前にある物に遮られてターゲットの映像が十分に得られない場合がある。これを補うためにカメラの台数を増やすと、作業効率はよくなる。一方、多くの映像を調整し、見比べながら長時間作業を行うと、オペレーターへの負担が増え、作業効率が落ちることも考えられる。さらに、どのような場面でも最良の位置にカメラが設置できるとは限らない。

ターゲットやその近傍に付けたマークやガイドを目安にして操作する工夫もよく行われている。図3はツールの先

図1 解体作業におけるカメラ映像の例

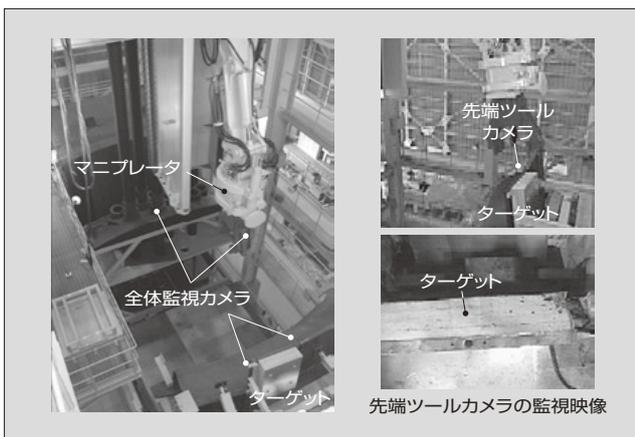


図2 監視映像の例



図3 マークによる位置合わせの例



富塚 千昭

原子力発電プラント機器の設計およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社発電プラント事業本部原子力統括部技術部主任。



神坐 圭介

原子力発電プラント機器の設計およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社発電プラント事業本部原子力統括部技術部グループマネージャー。



高橋 浩

原子力発電プラント機器の設計およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社発電プラント事業本部原子力統括部技術部長。

端をターゲットの穴に挿入するために、ツールに付けたレーザポインタからターゲットにレーザスポットを照射し、カメラ映像を見ながら位置合わせを行う例である。しかし、いずれの工夫をしてもターゲット以外の物が隣接する複雑な作業環境になるほど、多くのカメラ映像が必要になる。多くのカメラ映像の中からどのカメラを使い、どのように画像（方位、画角）調整して作業を行えばよいか、位置合わせのマークはどのように活用すればよいかなどの判断はオペレーターの経験に依存するため、オペレーターの熟練度が作業効率、作業内容の質に影響してくる。

そのため、熟練度の違いによらず均質な作業が行えるように技量をカバーするシステムが望まれている。

### ③ 遠隔ハンドリング補助システム の概念

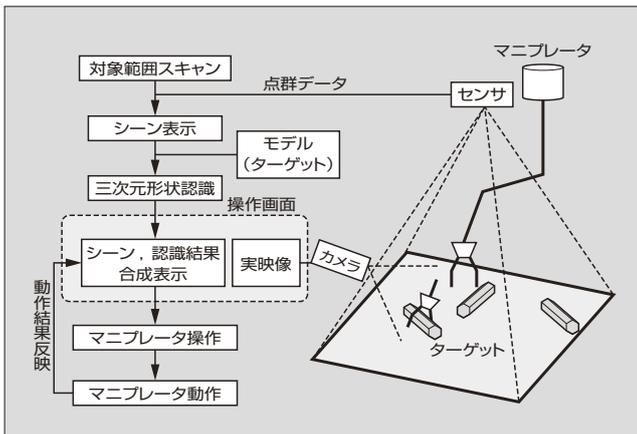
このような背景から開発を行っている遠隔ハンドリング補助システム の概念を **図4** に示す。

本システムは、ターゲットの位置、姿勢を遠隔操作時に見る操作画面に表示し、マニプレータの手動操作に必須の画像、距離情報を提供する遠隔ハンドリング補助システム である。操作画面にはカメラの実映像のほか、作業環境（シーン）をバーチャルに表現した監視画像を表示する。シーンは作業環境に設置する距離センサでターゲットを含む領域をスキャンすることによって点群データとして得られる。この点群データに基づき対象物のコンピュータグラフィックス（CG）を重ねて表現したものであり、以下の特徴を持つ。

- (a) シーンは三次元情報（空間の三次元座標）を持った点群で表現される。
- (b) シーンの中にあるターゲットの輪郭およびマニプレータの外形を表示する。
- (c) シーンを見る視線は任意に移動させることができる。
- (d) マニプレータ先端とターゲットなど、距離を知りたい任意の2点間を監視画像上でポインティングすることにより、その距離を得ることができる。

オペレーターは、現場に設置するカメラの実映像と、上記の監視画像の両方が表示された操作画面を見て操作する。

図4 遠隔ハンドリング補助システム



操作画面のイメージを **図5** に示す。**図5** (a) に示す操作画面はカメラの実映像である。**図5** (b) は本システムにて作成したバーチャル画像である。

バーチャル画像の最大の特徴は、ターゲットの一部しかセンサでとらえていなくても、見えている部分の形状の特徴から三次元形状認識技術を応用して、シーンの中からターゲットを探し出し、その全体像をCGで合成表示することである。さらにこのバーチャル画像は、マニプレータの外形も合成表示するので、視線を見たい方向に自由に変えられる画像になっている。オペレーターはバーチャル画像を見ることによって、ターゲットとマニプレータとの位置関係を眺め回している感覚が得られる。**図5** では、実映像は固定カメラの特定方向だけの映像であり距離感がつかないが、真上、真横から見たバーチャル画像を併用することによって、マニプレータとターゲットとの水平、垂直距離感がとらえやすくなり、画面に表示される距離も併せると、**図5** に示すシーンから、あとどれくらい、どのようにマニプレータを動かせばよいか分かる。

マニプレータを操作すると、バーチャル画像中のマニプレータも実物と同じようにリアルタイムで動作する。マニプレータの操作中、その状況を監視することによって目的の作業が遂行できる。

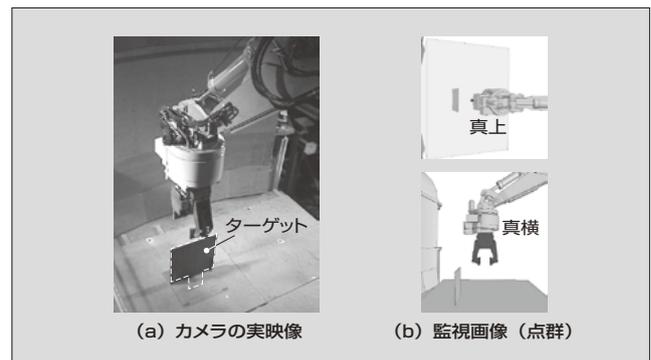
本システムは点群で表現された複数のターゲットの形状モデルを辞書として持っており、ハンドリング対象として選択したターゲットと、スキャンしたシーン（点群データ）とを照合し、ターゲットの一部しか見えない状況でも位置、姿勢を特定することを第一目標として、三次元形状認識技術を中心に、開発に取り組んできた。

### ④ 三次元形状認識技術と遠隔ハンドリング補助システム

コンピュータによる視覚認識技術は、人間の認識・判断を伴う業務を自動化するうえで必須である。人間の認識・判断のプロセスは解明されつつあり、汎用的な認識アルゴリズムも研究途上にあるが、適用の場面では、自動化すべき業務ごとに専用の認識アルゴリズムを開発し対応することが多い。

カメラ映像など二次元画像を用いた視覚認識・判断を自

図5 操作画面（イメージ）



動化する技術は、産業用の検査・認識装置や、バイオメトリクス認証装置などにおいて普及している。これらは、対象物を見る視点が固定された環境を想定しているため、マネージャによる遠隔操作のように、さまざまな視点が必要となる環境においては、十分に要求に応えることは難しい。

このような課題を解決するためには、三次元認識技術が有効である。三次元のデータ処理は、二次元のデータ処理と比較して膨大なデータを扱う必要があるが、コンピュータの急激な発展により高速処理ができるようになった。また、三次元測定技術においても、レーザ方式、ステレオビジョン方式ともに距離センサの低価格化が進み、広く利用されるようになった。こうした状況から、三次元認識技術の研究が加速されているが、いまだ確立した手法がないのが現状である。

三次元の物体を二次元として観測するには、ある視点からの二次元画像として扱うことになるが、同一物体であっても、視点が異なればその画像は異なる。人間は、物体の形状を経験的に理解しているため、視点が異なる画像からも物体を認識することができる。しかし、コンピュータは経験的な知識を持っていないため、同様の認識を行うためには、あらゆる視点からの二次元画像を保持し二次元認識アルゴリズムを適用するか、視点到に依存しない三次元認識アルゴリズムを適用する必要がある。前者は既存技術を適用できる利点はあるが、距離により対象物の大きさが変化するように遠近感に対応することが難しい。

本システムでの研究課題は、以下の2点である。

- あらかじめ想定した対象物（モデル）が任意の位置に任意の姿勢で含まれるシーンを距離センサで点群として測定し、三次元形状認識技術を用いてモデルの種類および姿勢を認識する。
- 非熟練者が、認識結果をCG表現した画面を操作して見やすい視点からの映像を確認することにより、マネージャを容易に遠隔操作できる補助システムを構築する。

#### 4.1 三次元形状認識の原理と適用、評価結果

画像のように認識対象のデータ量が大きい場合、認識アルゴリズムでは、データをそのまま扱うのではなく、情報ロスの少ない低次元の量（特徴量と呼ばれる）に変換して扱うことが一般的である。視点や対象物の姿勢、対象物までの距離に依存しない認識を実現するためには、視点や姿勢、距離に依存しない特徴量を用いることが必要である。本システムでは、以下に示す特徴量を用いて三次元認識を行った。

- 視点方向および対象物の姿勢への依存度が低い。
- 視点からの距離への依存度が低い。
- 近傍に位置する他物体の影響を受けにくい。これは、近傍の障害物に妨げられ、対象物の一部のみ計測可能な場合を想定している（一部欠損）。

次に、この特徴量を利用した認識原理について記す。ま

ず、事前に認識対象（モデル）の点群を用意し、一定間隔でサンプリングした点ごとに、特徴量を計算しておく。各特徴量は、モデル上の点の三次元座標と対応付けられている。このような「特徴量、モデル種類、対応する点の三次元座標」の三つの情報の組合せを要素とする辞書を、あらかじめ作成しておく。

次に、認識処理時には、認識対象を含むシーンの点群を測定後、任意にサンプリングした点に対して、特徴量を計算する。この特徴量を、パターン認識の手法を用いて辞書内の特徴量と比較し、類似している特徴量を選び出す。その結果、シーンからサンプリングされた点が特徴量を介して、モデルの種類とモデル内の三次元座標に対応付けられる。こうして得られた複数の対応関係に基づいて、シーン内に存在するモデルの種類と位置・姿勢を求める。

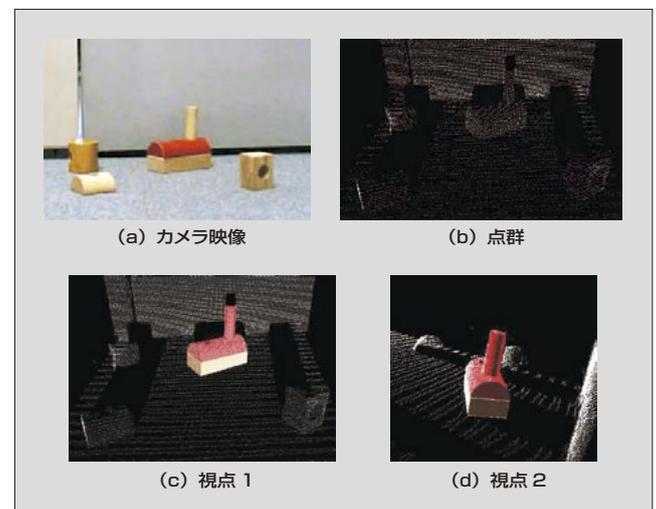
以上の原理を適用するに当たっては、上記の原理に加えて、以下の諸要素技術を開発・応用した。

- 複数の対象物が混在する場合に、指定した対象物を切り出すアルゴリズム（セグメンテーション）
- 三次元認識原理では認識困難な、回転対象体を認識するアルゴリズム（円柱型など）
- 精度向上のため、上記認識結果を初期値として、辞書データと測定データを繰返し法により合致させるアルゴリズム（一般的ICP法の応用）

開発した三次元認識アルゴリズムの評価結果を記す。図6の認識結果例では、(a)カメラ映像に対して、(b)三次元距離センサの測定データ（点群）、(c)認識結果をCGモデルで表示し別視点から見た仮想的映像、(d)対象物に近づいた視点からの仮想的映像を示している。

対象物の三次元的特徴（凹凸などの特徴のある部分）が測定される場合や、立体の3面が測定できる場合は、高い認識性能を得ることができた。しかし、こうした三次元的な特徴が測定できない場合（真横、真上からの計測など）では、測定データが三次元的な特徴を持っていないため、認識が困難であった。対応としては、三次元的な特徴が計測できる視点から再計測することが必要である。評価用の

図6 カメラによる映像と点群および認識結果例



約 10 種類の対象物において、三次元的な特徴が計測されている場合、ほぼ正しく認識できた。

#### 4.2 遠隔ハンドリング補助システム

三次元形状認識結果を適用した遠隔ハンドリング補助システムについて記す。

図 7 はシステム構成であり、制御用パソコン、画面制御用三次元マウス、レーザスキャナ、ロボット、ロボット制御端末、映像確認用カメラにより構成される。レーザスキャナにより測定された対象物は、パソコンにより認識され、結果の CG 表現、マニプレータの CG 表現および測定点群が表示される。オペレーターは、三次元マウスにより視点変更して見やすい視点からの画面を表示し、ロボット制御端末によりロボットを操作する。ロボットとレーザスキャナの座標系は、開発したキャリブレーションツールを用いて事前に合わせておく。

モデルを形状認識し、結果を CG 表現することの利点は以下の 2 点である。

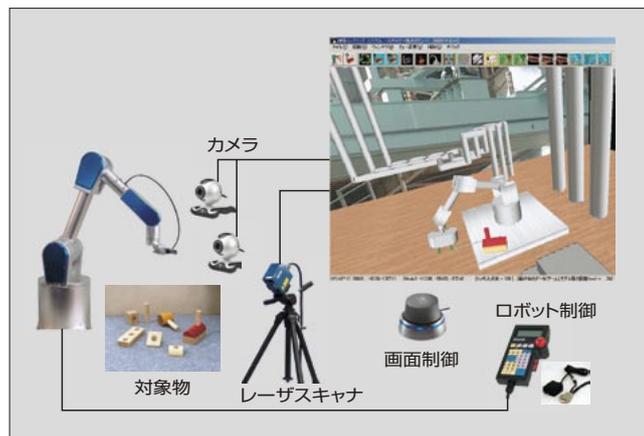
- (a) ターゲット全面の輪郭表示が出る。簡単なマウス操作により任意の視点へ移動し、実際には観測することのできない視点からの映像や、測定されていない領域の映像を表示することができ、視覚的に適確な情報を得ることができる。特に、アーム先端のハンドからの視点はハンドリング補助に有効である。
- (b) 測定データと認識結果において、それぞれ任意の点を指定することにより、両者間の距離算出ができ、距離感を得るための情報として有効である。

マニプレータ動作時は、各軸の情報（エンコーダの値）をリアルタイムに読み取ることにより、CG 表現されたマニプレータを、実際の動作と同一動作させている。

こうして、図 8 のようにシーンの測定データとしての点群、認識したモデルの CG 表現、マニプレータの CG 表現を重ね合わせて拡張現実感（Augmented Reality）を表現する。図 8 (a) では、対象物がハンド部に遮られて見えない状態であるが、(b) のように視点を変えることにより対象物の状態を確認することができる。

視点の移動によるハンドリング補助の例を示す。図 9 (a)

図 7 システム構成



は測定機方向を視点とする映像であり、マニプレータが対象物を把持できる位置に操作されているか不明である。マウス操作により映像の視点を変更すると、図 9 (b) および (d) のように把持できない位置であるか、図 9 (c) および (e) のように把持できる状態であるかが判断できる。

以上のように、本システムでは、把持対象物の三次元形状認識結果に基づいて CG 表現する。実際には観測できない側面の表示や、マニプレータの CG 表現により任意の視点からの観測ができる。また、複数の視点を指定し、複数の観測映像を常時表示することも可能である。その結果、距離感のつかみやすい方向から対象物を確認することや、対象物を遮っている物体を避けた視点から見ることができ、熟練度の高くないオペレーターのハンドリング操作を適切に補助することができる。

オペレーターの遠隔ハンドリングを補助するための機能として、以下を開発した。

- (a) ハンド視点からの映像：対象物をハンドにより把持する作業を行うためには、ハンド位置を視点とした映像が有効である（図 9 (d)(e)）。
- (b) 自動視点変更：手動操作では、ハンドと把持対象物の相対関係が見やすい視点の映像を手動操作により表示するが、見やすい視点を自動的に算出して映像を映し出すことができる。

図 8 マニプレータとモデルの CG 表現

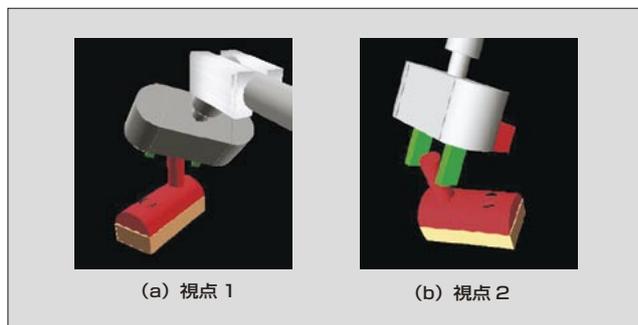


図 9 視点移動によるハンドリングの例

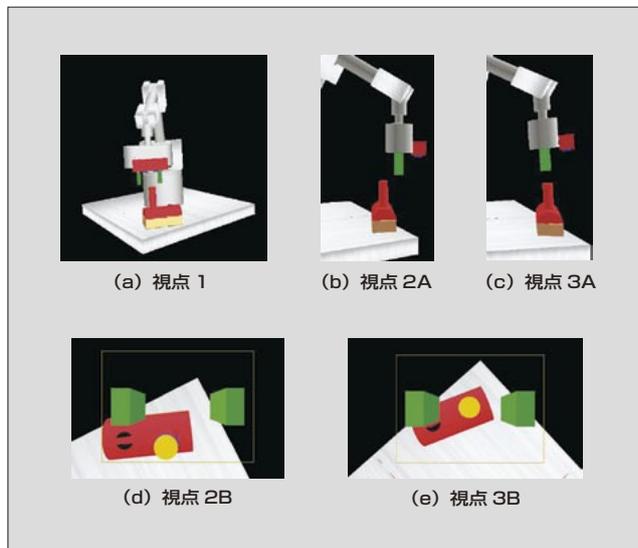


図10 卓上ロボット操作システム



(c) 環境構築機能：ハンド上にステレオカメラを搭載させ、ハンド近傍の三次元情報を随時取得し、レーザスキャナにより取得した三次元情報と合わせて、周辺環境の三次元情報を構築した。これにより、マニプレータと障害物との衝突を回避できる。

これらの要素技術を組み合わせたプロトタイプとして、任意の位置へ配置された対象物を自動認識し、自動作業する卓上ロボット操作システムを作製した（図10）。

#### 4.3 実用化へ向けての課題

実用化へ向けての課題を以下に記す。

- (a) 三次元認識機能の向上：認識率および認識精度とも、要素技術としての研究・実験段階のレベルである。実用化に向けては、認識率、認識精度および認識速度の向上が必要である。
- (b) 金属体の認識：金属体の三次元計測は非常に困難な課題である。計測を行う手段、または計測を行わなくても姿勢を認識する手法を検討する必要がある。
- (c) 非剛体・柔軟物：ロープやケーブルなどは、非剛体・柔軟物であるばかりでなく、形状が変化する可能

性がある。動きをとらえるためには、レーザスキャナのように測定時間を要する測定器は向いていない。高速測定可能なステレオビジョン方式により、動きを追跡する処理の検討が必要である。

- (d) 耐放射線性カメラ：レーザスキャナは放射線環境で使用することができない。放射線環境で三次元情報を得る手段としては、耐放射線性カメラを複数使用したステレオビジョン方式が適していると考えられる。

#### 5 あとがき

遠隔ハンドリング補助システムでは形状認識技術を中心に開発してきたものであり、シーンの中からターゲットを特定するという当初の目標を達成した段階にある。今後は、より現実的な作業環境を想定して、簡易で使いやすいヒューマンマシンインタフェースを発展していく予定である。また、今回は手動操作の補助システムとして開発を行っているが、任意の位置、姿勢の取扱物を対象とした自動運転の位置測定機能として応用することも考えられ、将来は自動運転も組み合わせたシステムに発展させることができる。

遠隔ハンドリング機器が活躍する場面は、原子力分野に限らない。危険物の取扱いや、大型重量物のクレーンによる取扱いもまた、遠隔操作による技量を要する作業である。本システムを適用することにより効率がアップするだけでなく、熟練者でなくても作業が行えることのメリットは大きいと考えられる。遠隔ハンドリング補助システムが原子力以外の分野でも活用されていくことを期待している。

#### 参考文献

- (1) 見玉健光ほか．原子炉遠隔解体装置の開発．FAPIG誌．159, 2001, p.30-36.
- (2) 富塚千昭ほか．商業用原子力発電所の遠隔解体確証試験（その22）．日本原子力学会 2004 春の大会．2004, IV-411.



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。