解 説

作業のためのロボットビジョン技術

Robot Vision for Performing Various Tasks

松日楽 信 人* 西 山 学* 田 崎 豪*

Nobuto Matsuhira*, Manabu Nishiyama* and Tsuyoshi Tasaki* * (株) 東芝 研究開発センター

1. は じ め に

ロボットは自動化はもちろん、少子高齢社会においても重要な技術となってきた。より広い応用範囲で期待されているが、まず、動作の基本となるのは、対象物や周囲環境の認識である。例えば、ロボットが物をつかんでどこかに運ぶには、対象物の位置や姿勢、ロボット自身の位置や姿勢などの情報を把握しておかなくてはならない。人間が周囲の情報の多くを視覚から得ているのと同様、ロボットが周囲の状況を把握する場合も、画像情報およびロボットビジョン技術が利用される例は数多い。ここでは、東芝が開発した画像情報を用いて周囲の物体との位置関係や状態を把握する技術について紹介する。

2. 作業とロボットビジョン

ロボットで行わせたい作業はいくつもあるが、基本的にはロボット自身の移動と物体の操作（ハンドリング）に大別できる。移動の目的は目的地へ行くことであり、そのためには自分がどこにいるか（自己位置推定）、周囲に何があるか、目的地はどこか、といった情報を把握する必要がある。また、ハンドリングを実現するには、どこに対象物があるか、対象物は何か、どうやって把持するか、どこへどのように置くか、といった情報が必要である。さらに、両者ともにダイナミックに情報が必要になることもある。

2.1 移動とロボットビジョン

障害物回避や自己位置推定には、多くの情報を利用できるビジョン技術が有効である。例えば、画像情報からは、特徴点からの距離や輪郭、動き、色といった情報が活用できる。画像情報は環境条件に左右されやすいが、最近では、SIFT [1] や SURF [2] といった、画像の回転変化やスケール変化に対してロバストな認識手法がある。実際に応用する際には、距離に応じて、近接センサも活用するのが一般的である。特に最近ではレーザーレンジファインダ（LRF）

図 1 館内案内ロボット

との組み合わせがよく研究されている。また、RFID タグを利用した情報取得技術、環境に配置されたカメラとの併用による位置計測技術がある [3]。

図 1 は、館内を案内移動するサービスロボットの開発例である [4] [5]。近くの情報は近接センサを用い、大局的な情報取得には画像情報を用いている。ここでは、自己位置を推定するロボットビジョンと、動的障害物を検出して回避するロボットビジョンが必要とされている。自己位置に関しては、目標となる物体（以下ランドマーク）を認識することで自己位置を推定する。あるいは、全方位カメラや LRF により、ローカルに地図とマッチングさせ自己位置を推定することも可能である。

2.2 ハンドリングとロボットビジョン

対象物のハンドリングでは、対象物の検出、位置や姿勢の計測、対象物の認識、置き換え、組み立てなど所望の作業に必要な位置計測が必要とされる。図 2 は食器、容器などのハンドリングをするロボットの開発例である [6]。楕円検出により食器の位置や姿勢を計測し、ロボットアームで把持するものである。

あらかじめ登録した食器情報とマッチングすることで、食器の認識をする。さらに、食器情報に把持するためのアプローチ方法や把持位置も登録しておくことで、食器ごとに異なるハンドリングが可能となる。ただし、把持できているかの確認のために、把持力、把持指の位置情報、触覚

原稿受付 2009 年 4 月 20 日

キーワード: Robot Vision, Stereo Vision, Decision Tree, Omnidirectional Camera, Localization

*〒 212-8582 川崎市幸区小向東芝町 1

*Kawasaki-shi, Kanagawa

図2 ロボットによる食器のハンドリング

センサなどからの情報で確認することは必須である。また、RFID タグを対象物に付けることも、認識性の向上に役立つ。しかし、実際にハンドリングする際には、対象物や作業内容によっては運動制御、ハンドの機構などの問題で実現できないこともあり、対象物の認識や把持の難易度、作業内容の簡素化なども十分に検討する必要がある。こういった点では、持ちやすさを工夫するなどユニバーサルデザインのコンセプトをうまく活用することも有用である [7]。

3. 開発したロボットビジョン技術とその実証

本章では移動とハンドリングに関して開発したロボットビジョン技術を紹介する。

3.1 決定木を用いた平面ランドマークの認識技術

移動ロボットの自己位置推定のためのランドマークには、次の点が求められる。

- ・距離や向きが変化しても検出可能
- ・見え方の変化から距離や向きが推定可能

従来は、四角の枠など定型の図形が利用されてきたが、オフィスや家庭内にあるカレンダーやポスターなど特徴的な図柄をそのままランドマークとして利用できれば、ロボットのための環境整備の必要がなくなる [8]。このようなランドマークを用いて主に施設内の案内作業を実現するために、ステレオ視と決定木を用いた検出および位置姿勢の把握技術を開発した [4]。

(1) ランドマークの検出

ランドマークには図3のように平面で模様（テクスチャ）が特徴的な図形を利用する。ランドマークは、この図中にプロットした点で表される特徴点を中心とする小さな部分画像の集合として学習する。ランドマークを検出するときは、次の手順で行う。

- ①入力画像から特徴点を抽出
- ②特徴点周辺の部分画像を切り出して、ランドマーク中のどの特徴点に対応するかを判定
- ③ランドマークと対応した部分画像の位置関係から、検

図3 ランドマークの例（館内にある展示パネル、白点が特徴点である）

出の成否の判定および距離や姿勢を推定

このなかの②の判定を行うため、部分画像を入力として、対応するランドマーク中の特徴点を出力する識別器を作成する。識別器には決定木による手法を用いた。決定木中のそれぞれのノード（節点）には、二つの点の座標値が記録され、部分画像中のこの二つの画素の輝度の大小関係に応じて、下の二つのノードのどちらに遷移するかを決定する。終端の葉ノードには、どの特徴点に対応するかを表すスコアが記録され、複数の木を用意しておき、それぞれを合計したスコアで特徴点の対応を判定する。

(2) 距離変動に伴う見え方の変化への対処

以上のような決定木を利用すると、距離や方向、明るさの変動に対してロボストにランドマークを検出できる。しかし、対処できる変動にも限度があり、特に距離に反比例して見かけの大きさが変化するため、距離変動にはあまり強くない。そこで、特徴点を抽出した後、ステレオ画像処理を行って特徴点までの距離を計測するようにした。一方、ランドマークまでの距離に応じた決定木を作成し、ステレオ画像処理で得た距離から、どの決定木を用いるか選択するようにした。ステレオ画像処理は、距離計測の確実性が高く、決定木を使った処理は、距離の変動が小さければ性能が高い。二つを組み合わせることで、距離の大幅な変動があっても検出できるようになった。ランドマーク検出の処理結果例を図4に示す。用いた決定木は距離に応じて4段階を切り替えるようになっており、各段階が20本、高さ15の木で構成されている。ロボットの移動中に1.4~4.0[m]の距離でのランドマークの検出と、距離および姿勢の計測が可能であることを確認した。

3.2 全周囲風景を利用した自己位置推定技術

(1) 全方位カメラ画像を用いた自己位置の推定

自己位置推定を行う手法として、全方位カメラを用いた手法もある [9]。全周囲にわたる二次元情報を使用するので情報量が多く、物体配置などの環境変動に強い耐性を持たせることができる。一方で、ロボットの移動により画像中に撮

図4 ランドマーク検出結果（上はランドマーク，下は入力画像であり，対応点を直線で結んだ）

像される周囲風景の回転変化，スケール変化が激しいため，SIFT や SURF など得られる回転スケール不変（Local Invariant Feature: LIF）特徴点・特徴量を用いてランドマークを表現する。LIF 特徴点は，歪んだ全方位カメラ画像を用いた場合でも自己位置を知るためのランドマークとしてロボストに働くが，計算コストが高く，他モジュールと同期しながらの実時間自己位置推定は難しいという欠点もある。そこで全方位カメラを用いて検出するトラッキング可能 LIF 特徴点を新たに定義し，自己位置推定を高速に行う手法を開発した。

(2) トラッキング可能 LIF 特徴点での自己位置推定

ここでは，LIF 特徴点の検出と特徴量比較にかかる計算時間を軽減するため，歪んだ画像中でも高速に処理を行うことができるトラッキングに着目した。得られた LIF 特徴点がすべてトラッキングに適しているわけではない。そこで，回転スケール変化にも強く，トラッキングも可能である点をランドマークとして用いる。検出したランドマークと実際の地図位置との対応を取り，自己位置を推定した様子を図5に示す。図の右側で得られている全方位画像中の直線の右端点がトラッキング可能 LIF 特徴点である。

(3) 実環境移動時の自己位置推定結果

開発手法の性能を確認するため，常に SURF だけを使う従来手法とトラッキングを用いる開発手法の自己位置推定精度と，計算時間の比較を行った。10[m]×10[m]の部屋内で，QVGA 画像を用いて，従来手法と開発手法それぞれ

図5 全方位カメラによる自己位置推定結果（左は環境地図と推定位置，右は全方位カメラの入力画像であり，対応点を直線で結んだ）

を用いて自己位置を推定する。開発手法の推定位置は，正解位置からの平均ずれ 0.38[m]，計算時間は画像1枚あたり 16.4[ms] であり，従来手法よりそれぞれ，位置誤差が 76.4%減少し，計算速度が 2.9 倍になった。さらに，LRF を用いることで，数 cm の位置推定誤差に収まることを確認している。

3.3 楕円当てはめを用いた食器検出技術

図2のハンドリング作業時には，食器類の位置と姿勢を把握して，アームやハンドを正しく制御することが必要となる。ここでも，対象物の位置や姿勢，照明条件の変化などに対応する必要がある。さらに，テクスチャの少ない食器類の検出を実現しなくてはならない。そこで，エッジ情報を使って楕円抽出とステレオ処理を行うことで食器の三次元位置を検出し，その楕円の形状から食器の姿勢を推定する技術を開発した。

(1) 画像中のエッジを用いた楕円物体検出

楕円の方程式は2変数の二次式で表され，パラメータ空間は五次元となる。多数のデータから方程式のパラメータを求める場合，Hough 変換[10]のような多数決に基づく手法が有効である。しかし，求めるパラメータが多く，ロボット作業にとって現実的な時間で処理するのは難しい。そこで，求めた楕円上の複数の点から最近傍エッジまでの距離を測定し，この距離の総計が小さいほど適合度は高いと評価する。この評価値に基づいて楕円パラメータを評価し，しきい値よりも小さければ，楕円が検出されたと判断する。

(2) 楕円からの位置姿勢推定

円形の縁は姿勢に関係なく画像上で楕円形として投影されるため，円形の縁を持った食器であれば姿勢や距離に関係なく検出できる。さらに検出された楕円から，三次元の位置や姿勢の情報を推定する。食器の三次元位置はステレオ画像処理を利用して算出するが，よく用いられる画素値ベースのステレオ画像処理では，テクスチャの少ない食器の場合，対応点の探索は成功率が低い。そのため，もう一方のエッジ画像でも前述の適合度が最良となる位置を求めることで対応点の探索を実現した。姿勢の推定は楕円形の扁平率と軸の傾きから姿勢のパラメータを逆算して求めた。

図6 連続した動作での食器検出結果（物体の姿勢の変化や複数の物体の検出ができる）

以上で述べた処理結果の例を図6に示す。画像中の直方体の枠は推定された食器の姿勢を表している。奥行き方向の位置精度は約10[mm]、姿勢の精度は約5[deg]で、毎秒20フレームの処理を実現している。ステレオ画像処理により食器の実サイズを取得できるため、大きさに応じてロボットハンドでの把持方法を変えることが可能になっている。

4. お わ り に

ロボットで作業を行うにはロボットビジョンは大変重要な技術である。本稿では、位置や姿勢などの変動に伴う対象物の見え方の変化に対応できるロボットビジョン技術として、移動やハンドリングにおいて東芝で開発した技術を紹介した。今後はより制約の少ない対象に適用できるように技術を発展させていく。また、ロボットは実環境への動作

を伴うものであり、ロボットビジョンだけでなく、対象物とのインタラクションも常に考えておく必要がある。

なお、この研究の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の次世代ロボット共通基盤開発プロジェクトおよび戦略先端的ロボット要素技術開発プロジェクトの支援により行われた。また、別の一部は、文部科学省の科学技術振興調整費により実施されたものである。

参 考 文 献

- [1] D.G. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.
- [2] H. Bay, T. Tuytelaars and L. Van Gool: "Surf: Speed up robust features," The ninth European Conference on Computer Vision 2006, pp.404-417, 2006.
- [3] 佐藤, 松日楽, 大山: "次世代ロボット共通プラットフォーム技術の進展", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.5, pp.394-398, 2008.
- [4] 十倉, 西山, 園浦: "画像処理 RTC と移動制御 RTC を用いた案内ロボット", 日本機械学会 ROBOMECH2008, 1P1-E17, 2008.
- [5] 園浦, 十倉, 田崎: "周囲環境に適応するロバストなロボット移動技術", 東芝レビュー, vol.64, no.1, pp.19-23, 2009.
- [6] 西山: "対象物把握のためのロボットビジョン技術", 東芝レビュー, vol.64, no.1, pp.40-43, 2009.
- [7] 廣川, 松日楽, 小川, 和田: "ユニバーサルデザイン・ウイズ・ロボットのコンセプト提案", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.476-484, 2008.
- [8] V. Lepetit and P. Fua: "Keypoint Recognition Using Randomized Trees," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.28 no.9, pp.1465-1479, 2006.
- [9] A.C. Murillo, J.J. Guerrero and C. Saguet: "SURF features for efficient robot localization with omnidirectional images," 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3901-3907, 2007.
- [10] R.O. Duda and P.E. Hart: "Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures," Comm. ACM, vol.15, no.1, pp.11-15, 1972.

松日楽信人 (Nobuto Matsuhira)

1982年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。現在、東芝研究開発センター技監。原子力、宇宙、医療、家庭用など各種ロボットシステムの研究開発に従事。工学博士。日本機械学会フェロー、計測自動制御学会 SI 部門部門長。

(日本ロボット学会正会員)

西山 学 (Manabu Nishiyama)

2004年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。研究開発センターにてロボットビジョン、画像認識技術の研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

田崎 豪 (Tsuyoshi Tasaki)

2006年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。研究開発センターにてロボットビジョンなどを用いたロボット周囲環境認識の研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)