

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：14701
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23700235
 研究課題名（和文） 視覚とハンドを併用した能動センシングに基づく物体操作の獲得法
 研究課題名（英文） Learning object manipulation skills by active sensing
 研究代表者
 小川原 光一（OGAWARA KOICHI）
 和歌山大学・システム工学部・准教授
 研究者番号：70452810

研究成果の概要（和文）：

動的に変化する環境におけるロボットによる自律的な行動獲得研究の一環として、ロボットハンドによる能動的な物体移動と運動からの形状計測法を併用した未知物体の3次元形状計測法を開発した。また、物体の操作法を人による教示から獲得するために、ステレオ計測と位置推定を統合した高精度な3次元剛体運動追跡法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Toward autonomous learning of robot behavior in dynamically changing environment, we developed a method of measuring 3D geometry of an unknown object by combining active manipulation with robot hands and structure from motion technique. We also developed an accurate 3D rigid object tracking method by integrating multi-baseline stereo and pose estimation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：ロボティクス・コンピュータビジョン

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：人間行動理解・3次元形状計測・ロボットハンド・ステレオ計測・位置推定

1. 研究開始当初の背景

生活空間にロボット技術を導入し、生活支援の手段として活用していくことを目的とした研究開発が盛んに行われている。生活支援の例として、指示された物を取ってくる、飲み物を注ぐ、片付けるなど、物体操作を伴う日常の軽作業を人間に代わって実行するタスクが考えられる。しかし、扱う対象物や要求される動作はユーザや環境によって千差万別であるため、ロボット非専門家である一般の人間がロボットに対して簡便な方法で作業の教示を行い、これに基づいてロボットが逐次的に新規の作業を獲得できる仕組み

みを持つことが望ましい。

ロボットによる物体操作を実現するためには、物体の形状や見えなど物体の同定に必要な情報と、物体の把持方法や軌跡など操作に必要な情報が必要になる。

(1) 物体の形状や見えに関する情報の獲得法

通常、物体の形状を計測するには、レーザ計測器などを用いて多方向から距離計測を行いこれらを統合する必要があるため、自動化には大掛かりな機材が必要となり、また時間もかかる。そのため、従来の研究では物体

の形状や見えについては既知とし、ハンドによる操作方法や物体の運動軌跡のみを画像解析によって推定する方法が一般的であった。

物体の形状と見えを簡便に計測する方法として、教示者が行う物体操作をカメラ1台を用いて撮影し、因子分解法に基づいて動画から対象物の形状と運動を同時に推定する運動からの形状計測方法が提案されている。しかし、各画像で対象物以外の領域から特徴点が誤抽出される場合や、一部の画像で観測できない特徴点がある場合には、因子分解法の推定結果は不安定になることが知られている。

一方、対象物を動かさずに、その回りをカメラが1周して対象物を撮影し、隣接する画像組から局所的に対象物の形状復元を行いこれらを統合する方法も提案されているが、ロボットの移動範囲の制約や他の物体による隠蔽などによって必ずしも物体全体を計測できるとは限らない。

また、ロボットが対象物を能動的に動かすことによって、画像における対象物と背景の分離問題を簡単にし、対象物の形状の取得や関節構造の推定を行った研究があるが、これらはいずれも対象の形状や運動を2次元平面に限定しており3次元形状は扱っていない。

(2) 物体操作に関する情報の獲得法

従来の研究では、教示者が物体操作の開始時刻と終了時刻をロボットに明示的に指示し、その間の物体の運動軌跡を計測することが一般的であった。これに対して応募者は、明示的な教示が無い場合でも獲得すべき動作の候補をロボットが知ることができるように、高頻度パターンを動作の候補とみなし、長時間の計測データから少ない計算時間で効率よく高頻度パターンを抽出する手法を開発している。

2. 研究の目的

本研究では、ユーザがロボットに対して明示的に教示を行わない場合でも、ロボットが能動的に環境やユーザをセンシングすることによって必要とされる動作を自律的に獲得していくための方法を開発する。このとき、ユーザの明示的な関与が無い場合、物体の形状や見えに関する情報と物体操作に関する情報をロボットが主体的に獲得する必要がある。

物体モデル、つまり物体の形状や見えに関する情報の獲得については、運動からの形状計測法をカメラが固定され対象物が動く状況で使用できるように拡張することによって実現し、同時にロボットハンドを使用した対象物への能動的な作用を形状計測に利用する。

物体操作に関する情報の獲得については、ユーザによって高頻度で実行される物体操作をロボットが獲得すべき動作の候補であるとみなし、上で得られた物体形状を利用してカメラ画像から物体の3次元運動軌跡を高精度で計測する方法を開発する。

すなわち、本研究では以下の2点を目標とする。

- (1) 視覚とハンドを併用した能動センシングに基づく物体形状モデル獲得法の開発
- (2) 物体形状モデルを用いた高精度な物体運動軌跡計測法の開発

3. 研究の方法

- (1) 視覚とハンドを併用した能動センシングに基づく物体形状モデル獲得法の開発

本研究では、1台のカメラと2本のロボットアームを搭載したロボットを想定し、ロボットの前に置かれた形状が未知の物体の全周3次元形状を自動計測する方法を開発する。ただし、未知物体はロボットハンドで掴める程度の大きさで変形しない小物体であるとする。

計測法の大まかな手順は次のとおりである。まず、ロボットハンドで未知の物体を把持し、その未知物体をカメラの前に移動して回転させ、その様子を撮影した連続画像を記録する。次に、もう一方のロボットハンドへ物体の持ち替えを行い、ロボットハンドによって隠蔽されていた箇所を撮影する。最後に、撮影した全画像を用いて運動からの形状推定法に基づき3次元形状を推定する。

① ロボットハンドの動作計画法

未知物体のおおまかな3次元位置は既知とする。固定されたカメラから未知物体の全周をくまなく撮影した連続画像列を得るために、まず片方のロボットアームで物体を把持し、カメラの前で回転させ、ハンドによって隠蔽されている箇所以外の領域の連続画像を得る。次に、もう片方のロボットアームに持ち替え、同様の方法でハンドによって隠蔽されていた領域の連続画像を得る。

②連続画像からの3次元復元法

①の方法によって得られた連続画像を元に、次の2段階の手順で3次元復元を行う。まず、連続する2画像間で特徴点の対応付けを行い、得られた基礎行列から2画像間での対象物の相対的な位置・姿勢を計算する。この処理を全画像対に対して行い、最後にバンドル調整によって物体の運動軌跡を得る。次に、Furukawa らによって提案されたパッチベースの3次元形状復元法を適用し、物体の運動軌跡から物体の密な3次元形状を得る。

(2) 物体形状モデルを用いた高精度な物体運動軌跡計測法の開発

これまでに、ステレオ計測に基づいて対象物体の3次元計測を行い、この計測結果に物体のCADモデルを位置合わせすることによって物体の運動を追跡する方法が提案されてきた。しかし、従来法では3次元計測と位置推定が独立した処理になっているため、前段の3次元計測における誤差が後段の位置推定に悪影響を与えるという問題があった。この影響は、特に対象物の表面が一様で模様が少ない場合に顕著である。本研究では、ステレオ計測と位置推定を統合し、位置推定の結果を事前知識としてステレオ計測に利用することによって、3次元計測と位置推定の誤差を同時に最小化して運動追跡の精度を向上させる手法を提案する。

ステレオ計測における視差の決定問題を、尤度項と平滑化項で構成されるマルコフ確率場の最小化問題として定式化する。Felzenszwalb らは、平滑化項を視差の差に対して線形な関数として定義することによって、確率伝播法を使い線形時間でメッセージを計算する高速解法を提案した。しかし、線形な平滑化項は、模様が少ない領域において画像と平行な面を生成する傾向がある。この場合、後段の位置推定では誤った3次元データに対してモデルを位置合わせすることになり位置推定の精度が低下する。

そこで本研究では、位置推定結果を事前知識として平滑化項に組み込み、ステレオ計測と位置推定を繰り返し最適化することによって、両誤差を同時に最小化する方法を提案する。具体的には、CADモデルを視差画像に投影し、隣接画素におけるカメラ中心から投影面までの距離の差を視差に変換した値を計算する。そして、隣接画素の視差の差がこの値と等しい場合に最小値をとるように平滑化項を設計する。こうすることによって、画像と並行ではなく、CADモデルの表面形状に沿った視差画像が生成される。提案した平

滑化項も確率伝播法を使って線形時間で計算することが可能である。また、平滑化制約にのみ影響を与え、尤度には影響しないため、距離データがモデルに引き寄せられるといった問題は生じない。

4. 研究成果

(1) 視覚とハンドを併用した能動センシングに基づく物体形状モデル獲得法の開発

動力学シミュレータを利用した仮想環境において提案手法の評価を行った。評価では、代表的な6つの形状を設定し、それぞれについて提案手法によって3次元復元を行い、復元率によって評価を行った。図1は設定した6つの形状、図2は提案手法によって3次元復元された結果、表1は復元率を表す。

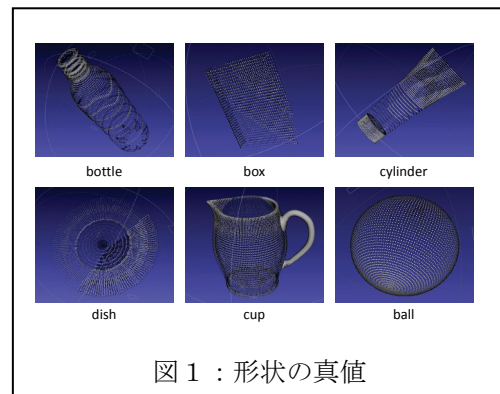


図1：形状の真値

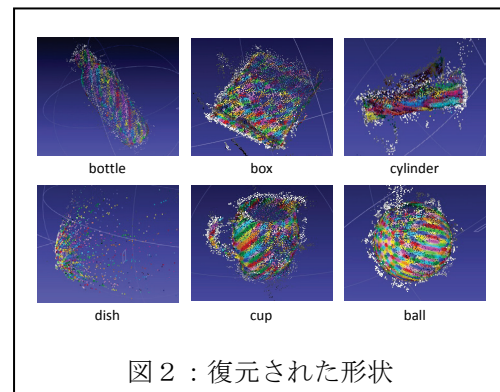


図2：復元された形状

表1：復元率

Object	Recovered Ratio [%]
Bottle	86.8
Box	75.6
Cylinder	21.8
Dish	7.8
Cup	41.3
Ball	83.3

Bottle, Box, Ball の復元結果は良好であったが、Cylinder, Dish は物体の幅が狭いため特徴点の追跡に失敗してしまい大部分の領域で復元が不十分であった。解決法とし

て、ロボットアームの軌跡は既知であるため、これを利用して物体の相対位置・姿勢を補償することが考えられる。

(2) 物体形状モデルを用いた高精度な物体運動軌跡計測法の開発

仮想空間にカメラと物体を配置し、並進・回転運動する物体をカメラ4台から見た連続画像を用いて提案手法の評価を行った。物体は円柱と長方体で構成される剛体とし、全く模様がない状態でレンダリングを行った。物体の外形寸法は $400 \times 400 \times 300\text{mm}$ 、並進移動量は 75mm 、回転移動量は 10 度、連続画像数は 8 とした。

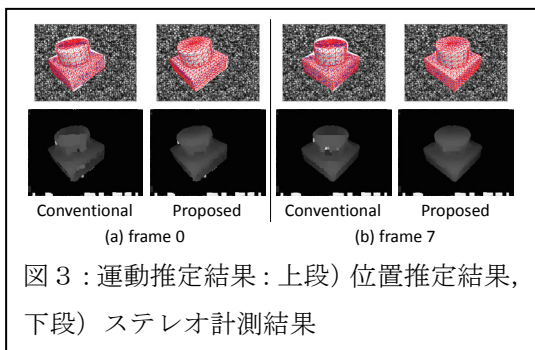


図 3 : 運動推定結果 : 上段) 位置推定結果, 下段) ステレオ計測結果

図 3 に実験結果を示す。図 3 (a) に最初のフレームにおける推定結果, 図 3 (b) に最後のフレームにおける推定結果を示す。Conventional が位置推定結果による事前知識を使わない従来法, Proposed が提案手法を表す。

この実験で使用した物体は模様がないため、一意に視差が推定できるのは物体の稜線や角の近傍のみである。それ以外の領域については確率伝播法によって視差が推定されるが、図 3 の Conventional のステレオ計測結果に見られるように画像と平行な面が生成される傾向があることが分かる。一方提案手法では、図 3 の Proposed のステレオ計測結果に見られるようにモデルの形状に沿った視差が計算されていることが分かる。

図 4 と図 5 は、適当な初期値を与えて最初のフレームから連続的に運動推定をしたときの、フレームごとの位置の誤差を並進と回転のそれぞれについて表示したものである。提案手法 (赤) の方が従来法 (青) と比べて、距離データが正しく生成されるため位置推定における推定位置の誤差が小さくなっていることが分かる。

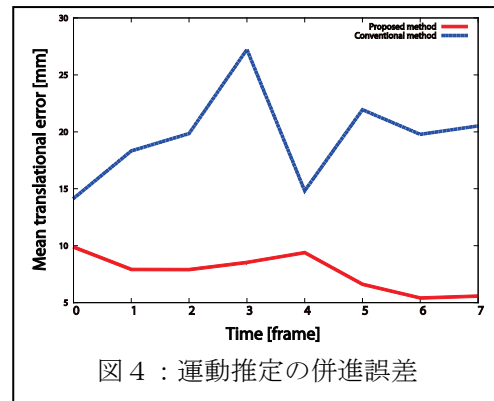


図 4 : 運動推定の並進誤差

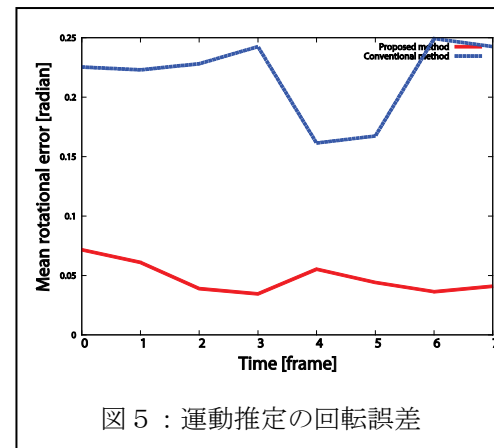


図 5 : 運動推定の回転誤差

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川原 光一 (OGAWARA KOICHI)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号 : 7 0 4 5 2 8 1 0