

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700182
 研究課題名（和文） 「見えていない」ことの認識が可能な知能ロボットに関する研究
 研究課題名（英文） Intelligent Robot Which Can Recognize Occurrence of Occlusion
 研究代表者
 今井 順一（IMAI JUN-ICHI）
 電気通信大学・大学院電気通信学研究科・助教
 研究者番号：30401623

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ロボットと人間との知的なインタラクションをオクルージョン（手前の物体で隠されて奥の物体が見えない状態）が頻繁に起こり得る環境において実現することを目指し、その要素技術としてオクルージョン下での頑健な物体追跡手法、高精度な周囲環境認識手法、及び音源が見えない場合の音源位置推定手法を開発した。また、ロボットの振舞いが人間に与える印象について評価を行い、開発したロボットが人間に対して「親近感」をはじめとする好印象を与えることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to achieve intelligent human-robot interactions in environments where visual occlusion will often occurs, we have developed the occlusion-robust tracking method, the method for estimating the surrounding environments accurately, and the method for locating the sound sources which are occluded by other objects. Furthermore, experimental results of impression evaluation of robot's behaviors show that the developed robot which uses above techniques can give more familiar and pleasant impressions to humans.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：知能ロボティクス

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：知能ロボット、インタラクション、オクルージョン、主観印象評価

1. 研究開始当初の背景

近年、人間と共存し、その活動をサポートすることを目指した自律ロボットの研究や開発が盛んに進められている。こうした人間共存型ロボットは、その性質上、オフィスや家庭、病院といった人間が通常の生活を営む

空間に入り込んで活動することが期待される。しかし、一般に人間の生活空間には雑多な物が溢れ、それらが互いにオクルージョン（手前の物体によって奥の物体が隠され、視覚的に観測できない状態）を引き起こすため、ロボットや人間の視覚的な情報収集はしば

しば妨げられる。このような環境では、例えば相手の人間の位置からは見えるオブジェクトがロボットからは遮蔽物に隠されて見えない、あるいはその逆といった状況が頻繁に起こり得る。このとき、ロボットには「相手には見えているが自分からは見えない」あるいは「自分からは見えているが相手からは見えない」ことを認識し、相手と自分とで状況認識が異なることを理解した上で、その違い（「認識のズレ」）に配慮しながら適切に対処することが求められる。

オクルージョン自体については、物体認識や追跡等、主に画像処理の分野でこれまでに幅広く研究されている。これらは主に「部分的」「一時的」なオクルージョンに対する頑健性向上を目的としていた。しかし、「(自分が)まったく見えていないこと」の認識や「相手の人間が見えているか否か」の認識、「見えていない物や場所」の推定を取り扱った研究は、これまでほとんど見られなかった。本研究課題はこうした能力を持つロボットの実現を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究課題は、人間共存型ロボットと人間との知的なインタラクションを、オクルージョンが頻繁に起こり得る人間の生活空間において実現することを目的とする。具体的には、以下のサブテーマの実現を目指す。

(1) オクルージョンが起こり得る環境下において人間・ロボット・オブジェクトの三者からなる標準的なインタラクションを実現しようとする場合、人間からは見えているオブジェクトがロボットからはまったく見えない（あるいはその逆）、初めは見えていた人間／オブジェクトが他の物体の陰に入り見えなくなる、見る方向によってオブジェクトの特徴が異なる（オブジェクト自体による自己オクルージョンを含む）、等の問題が生じる可能性がある。本研究課題では、こうした諸問題に人間の生活空間内においても頑健に対処できるよう、既存技術の改良並びに新規技術の開発を行う。そして「見えていない」ことをロボットに頑健に認識させ、オクルージョンの起こり得る環境での円滑な人間・ロボット間インタラクションを実現する。

(2) オクルージョンの起こり得る環境下での全方位音源位置推定を実現する。ここで特に音源として想定するのはロボットに声をかける人間である。音源位置推定後、その方向を振り向いても声をかけたはずの人間が見当たらない場合に、ロボットがオクルージョンによって見えない可能性を認識できるようにする。また、必要に応じて音源（人間）が視界に入る適切な位置まで移動する等、ロボット側からの能動的な行動による適切な

対処を可能にする。

(3) 開発した技術を統合して一つのシステムとする。ユーザと実際にインタラクションを行う検証実験を行い、システムの総合的な評価を行う。また、その結果を基にロボットの効果的な（高次の）振舞いの在り方について検討する。

3. 研究の方法

前述の目的を実現するため、本研究課題では以下の4項目を実施する。

(1) 追跡すべき対象が他の物体に隠され見えなくなった際に、追跡対象を「本来追跡すべき対象」から「それを隠した遮蔽物」に自律的に切替えることで、間接的に追跡を続行する技術を確認する（図1）。これにより、オクルージョンが発生しても注目物体の位置を頑健に認識し続けることが可能となる。また、見る方向による見え方の変化を認識し、どの方向からでもオブジェクトの認識・追跡が行えるようにする。

追跡技術の基本的な枠組みは既に開発済みであるが、実際に人間の生活空間で頑健に追跡を行うには次のような問題点があった。追跡対象を自律的に切替えるためには、オクルージョンを引き起こした物体を特定し、そのモデルを動的に作成する必要がある。従来手法ではこのモデル化を色情報のみで行っていたが、これはモデルとしては単純過ぎ、複雑な背景の下での誤追跡の原因となっていた。そこで本研究課題では、SIFT等の画像の局所的特徴に基づく動的モデル作成手法を開発し、頑健性の向上を図る。

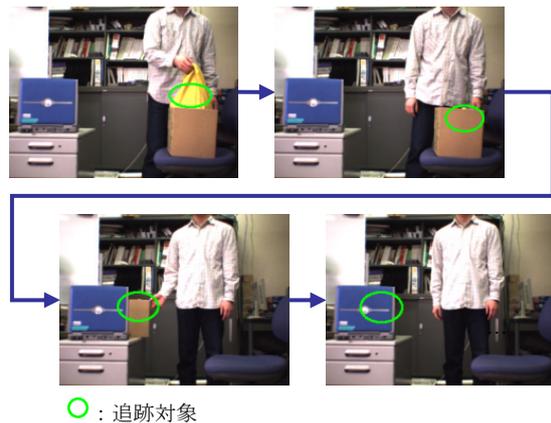


図1 追跡対象の自律的切替え

(2) どこがロボット自身または相手の人間の視界・死角領域なのかを知るためには、まず周囲環境の構造を精度よく推定する必要がある。そこで、距離情報を取得可能なステレオカメラからロボットを取り巻く環境の3次元構造を高精度で推定する手法を開発する。これを既に開発済みの技術で推定した

相手の人間の位置、姿勢の情報と組み合わせることで、相手の人間及びロボット自身が見ることができ、逆に何を見ることができないのかをロボットに認識させることが可能となる(図2)。

周囲環境の推定にはステレオカメラにより取得する距離情報が重要となる。しかし、テクスチャの乏しい平面等では視差を計算できず、必ずしも正確な距離情報を取得できない可能性がある。そこで本研究課題では、視差を計算できない部分の構造を周囲の構造から推定することによる高精度な周囲環境推定の実現を目指す。

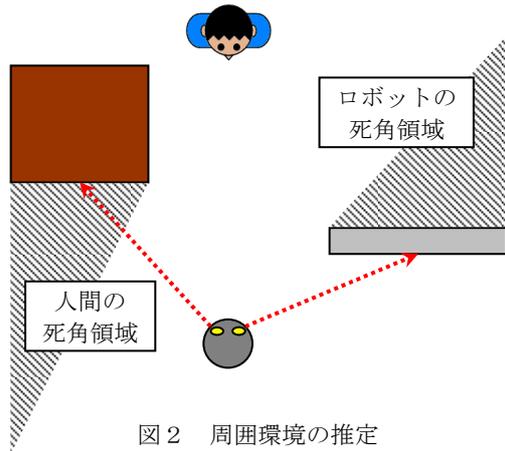


図2 周囲環境の推定

(3) オクルージョンの起こり得る環境下での全方向の音源位置推定技術を、視覚情報と聴覚情報を統合することで確立する。推定した位置に音源(主に人間)が見つからない場合にオクルージョンが発生していることを認識し、必要に応じて音源を視覚的に認識できる適切な位置へ自律的に移動できるようにする。

全方向音源位置推定の基本的な枠組みは既に開発済みである。これによる聴覚情報と、上述の環境推定による視覚情報とを効果的に組み合わせ、オクルージョンの起こり得る環境下での音源位置推定を実現する。遮蔽物の向こう側から発せられた音に対して音源位置推定を試みる場合、音の回折現象により、遮蔽物の端を音源位置として検出すると予想される。その結果をロボット周囲環境推定と組み合わせ、音の到来方向を正しく推測できるようにする。

(4) 開発した技術を統合し、一つのシステムとする。最後に、ユーザと実際にインタラクションを行う検証実験を行い、システムの総合的な評価を行う。

4. 研究成果

前述の方法に沿って研究を行い、以下の成果を得た。

(1) 複数の色分布及び SIFT 特徴点による物体モデル、及び Graph Cuts を利用したオンラインでのモデル作成・更新手法を提案し、オクルージョンが起こり得る環境下でのより頑健な物体追跡を実現した。

SIFT 特徴点の利用により、物体の局所的なテクスチャ情報を扱えるようになり、追跡の頑健性を向上させた。また、これと複数の色分布とを組み合わせることで物体モデルを構成し、オンラインでモデル作成・更新を行うことで、方向により見え方が変わる物体に対しても頑健に認識・追跡を行えるようになった。

提案手法による追跡例を図3に示す。図中の楕円が追跡対象を表す。この例ではノートPCの背後に置かれた紙袋が追跡対象である(Frame #1)。まず、姿勢により色分布が変化しても、紙袋を同一物体として認識し続けている(#84, 117)。次に、紙袋を元の状態に戻し(#192)、カメラを移動させた。それに伴い、紙袋が隠され遮蔽物であるPCに追跡対象が切り替わった(#206, 229)。赤い楕円はオクルージョンにより追跡精度が一時的に悪化したことを表す。ここで、PCの背後にある紙袋の向きを変え(#254)、カメラを元の位置へ戻した(#291)。紙袋の外見が最後に観察した状態(#192, 206)と変わっているにも関わらず、本来の追跡対象として認識できている。

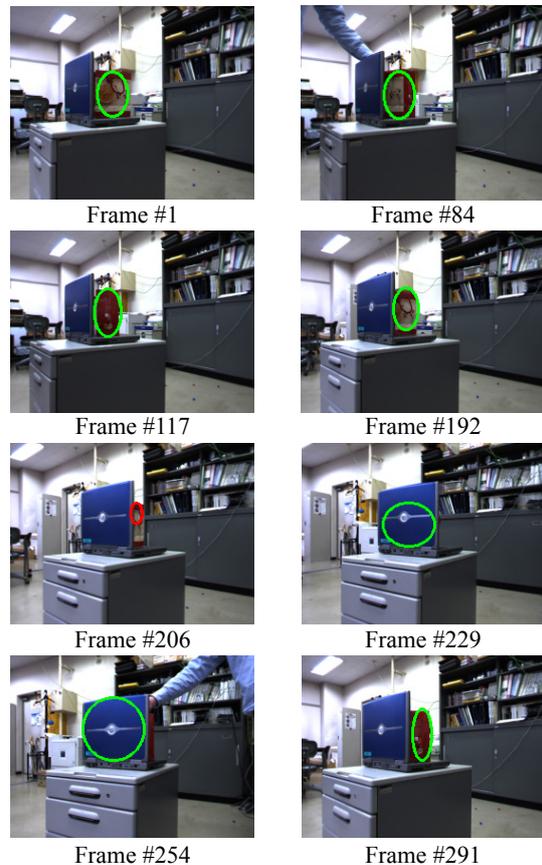


図3 物体追跡の例

(2) Hough 変換を利用した平面検出手法を考案し、周囲環境の推定を従来よりも高速かつ高精度に行えるようにした。従来は Plane Segment Finder と呼ばれる手法を用いて周囲環境内の平面領域を認識していたが、計算量が多く処理に時間がかかるという問題点があった。今回開発した手法では抽出する平面を水平面及び垂直面に限定し、Hough 変換による直線検出を応用して平面検出を実現した。これにより従来手法よりも高速かつ高精度な周囲環境推定を実現した。

図4に平面検出による周囲環境推定の例を示す。図4(a)が原画像である。まず、ステレオカメラから得た各画素の3次元位置情報を離散化した $x-z$ 平面に射影する(図4(b))。これは真上から見た俯瞰画像に相当する。次に、閾値処理により一定以上の頻度でプロットされたピクセルのみを残した2値化画像を作成する(図4(c))。最後に、その画像から Hough 変換を用いて線分を検出する。この結果、床面に対する垂直面を抽出することができる。図4(d)が平面検出結果画像(真上から見た俯瞰画像)を表す。図4から、パネルや本棚、ホワイトボード等、環境中に存在する垂直面の位置を正しく認識できていることがわかる。

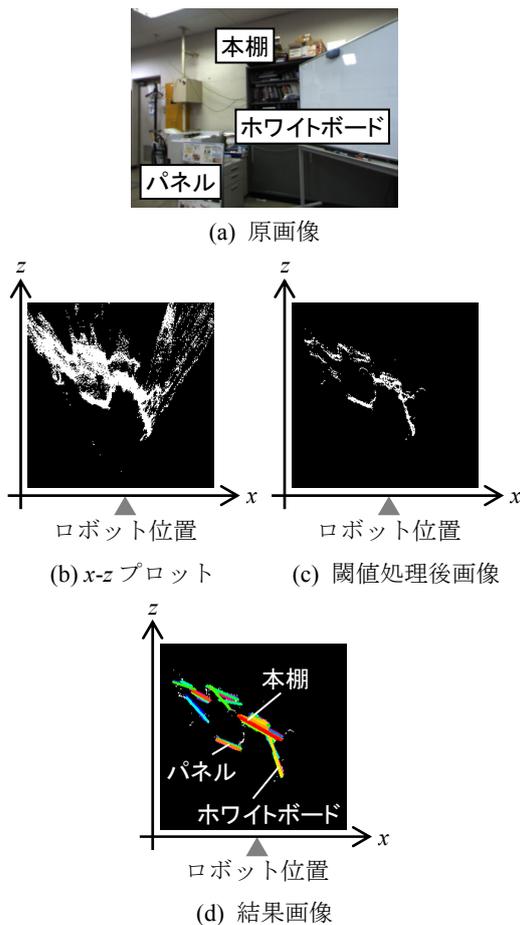


図4 環境認識の例

推定した周囲環境の構造及び自分自身との位置関係から、ロボットが見ることのできる視界領域、及び見ることのできない死角領域を推定できる。また、ユーザの頭部向きを推定することで、同様にユーザの視界・死角領域を推定できる。

図5に視界推定の例を示す。図5(a)の原画像に対し、(b)、(c)がそれぞれロボットとユーザの推定視界(真上から見た俯瞰画像)を表す。図5(b)、(c)には、ユーザの位置及び頭部向き、ユーザの視線の高さにおける周囲環境の構造も示してある。図5(b)、(c)の白及び灰色の領域が視界を表す。ただし、灰色の領域は、ロボットからは確認できないが、ユーザの視界に入っている可能性が高い領域を表している。図5から、周囲環境の構造やユーザが向かって左を向いていることを正確に認識できていることがわかる。また、パネルの向こう側をロボットは見えていないことや、逆にパネルのロボット側の領域がユーザにとって死角であること等についてもロボットは認識できている。

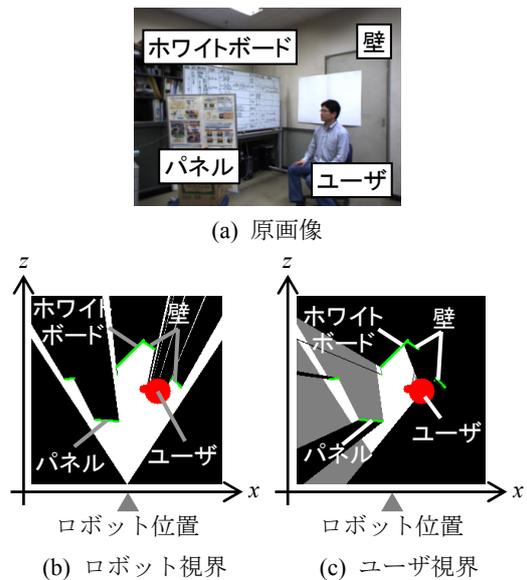


図5 視界推定の例

(3) 従来の音源位置推定手法では、音源が遮蔽物に隠されて見えない場合、その位置を精度良く推定することは困難であった。本研究課題では、推定結果を時間方向に加算するという処理を従来手法に加えることによって誤推定を減らすとともに、前述(2)の環境認識手法と組み合わせることで音源が存在する可能性のある場所を絞り込み、集中的に推定を行うことで頑健な音源位置推定を可能にした。

図6に推定結果の例を示す。図6(a)のように、屋内の廊下に遮蔽物を置き、その背後に音源を配置した環境に対して推定を行った。その推定結果を図6(b)に示す。従来手法の

場合、音源の存在を表す高いCSP係数の値が真の音源方向以外の方向にまで現れてしまうが、提案手法による推定ではオクルージョン環境下においても正しい方向に音源があると推定できていることがわかる。これにより、ロボットは音源がオクルージョンされていることとその正確な位置を知ることができ、必要に応じてその音源を視覚的に観測できる適切な位置まで移動することが可能となる。

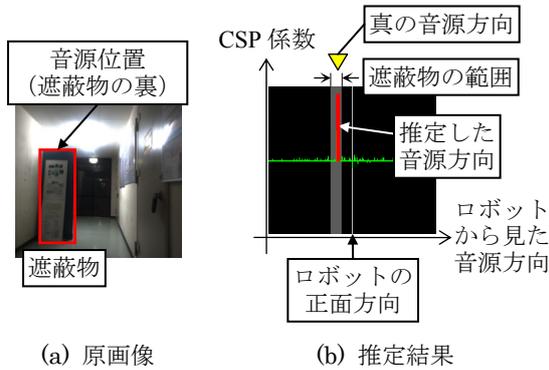


図6 音源位置推定の例

(4) 開発した要素技術をロボットに実装した。また、ユーザと実際にインタラクションを行っている様子をビデオに撮影して被験者に観察させ、その動作が与える印象について主観評価実験を行った。

実験でロボットと人間が行うインタラクションのタスクを3種類設定し、各タスクにおけるロボットの振舞いとして条件A～Cの3種類を設定した。条件Aは「ユーザの状態とは関係なく行動するロボット」、条件Bは「ユーザの状態に応じた行動を取るが、視界推定をしないロボット」、条件Cは「視界推定を行ってユーザとの『認識のズレ』を理解し、相手に配慮した行動を取るロボット」に対応する。

印象評価実験には20代から50代までの男女20名が参加した。被験者はビデオを視聴し、インタラクションを行ったロボットの振舞いに対して7段階28対の形容詞対からなるSD法を用いた印象評価の質問用紙に答えた。各形容詞対についての7段階尺度（非常に・かなり・やや・どちらでもない・やや・かなり・非常に）の評定をポジティブな形容詞側が高くなるように1から7まで数値化して比較を行った。

形容詞対による印象評価の分析結果から、ロボット自身及びユーザの視界・死角領域を推定し「認識のズレ」を理解して相手に配慮した行動を取るロボットは、「賢い」「思いやりのある」「良い」「感じの良い」「近寄りやすい」等の形容詞に対する負荷が高い因子の得点が他の条件のロボットと比べて有意に高いという結果が得られた。これらの形容詞

はロボットに対する「親近性」として解釈することができる。図7にあるタスクについての結果の一例を示す。図7の***は $p < 0.001$ で有意差があることを示す。これらの結果から、本研究課題で開発したロボットは、人間に対して「親近感」をはじめとする好印象を与えることが明らかとなった。

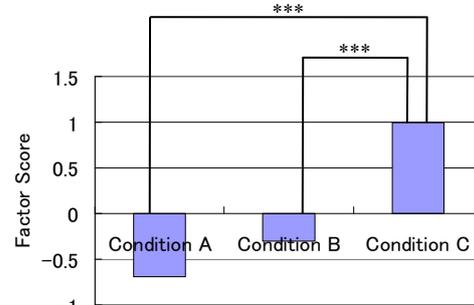


図7 「親近性」得点の平均値の一例

以上、本研究課題ではオクルージョンが頻繁に起こり得る人間の生活空間においてロボットと人間が知的インタラクションを行うために必要な要素技術の開発を行った。また、それらを実装したロボットの、人間とのインタラクションにおける動作に対する印象を評価し、人間に対して親近感をはじめとする好印象を与えることを明らかにした。これは開発した技術の有効性を示すものであるとともに、人間・ロボット間インタラクションの設計における一つの指針となる新たな知見である。

本研究課題で得られた結果は、自分自身とユーザとの間で周囲環境の捉え方に違いがあることを認識し、相手の立場に配慮したインタラクションを行うことが可能な知能ロボットの実現に向けた基礎的な技術及び知見になると期待される。

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)

[学会発表] (計7件)

- ① Jun-ichi Imai, Kansei Evaluation of Behaviors of Robot which Recognizes Difference between User's and Its Own Fields of View, 2010年3月2日, Arts et Métiers ParisTech (フランス・パリ).
- ② Jun-ichi Imai, Online Object Modeling Method for Occlusion-Robust Tracking, 2009年9月29日, 富山国際会議場.
- ③ 今井順一, 視界推定に基づいた「認識のズレ」を理解可能なロボットの開発とその振舞いに対する主観的印象評価, 第11回日本感性工学会大会, 2009年9月10日, 芝浦工業大学.

- ④ 今井順一, オンライン物体モデリングを用いた遮蔽環境下での視覚追跡, 2009年映像情報メディア学会年次大会, 2009年8月27日, 工学院大学.
- ⑤ 今井順一, ユーザ及び自身の視界を推定可能なロボットの振舞が与える印象の主観的評価, 第5回人間共生システム研究会, 2009年7月17日, 筑波大学.
- ⑥ Jun-ichi Imai, Human-Robot Interaction with View Estimation in Occlusion Environments, SCIS & ISIS 2008, 2008年9月20日, 名古屋大学.
- ⑦ 今井順一, 「気の利いた」インタラクシオンで人間をサポートする知能システム/ロボット, 第10回日本感性工学会大会, 2008年9月8日, 大妻女子大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 順一 (IMAI JUN-ICHI)
電気通信大学・大学院電気通信学研究科・
助教
研究者番号：30401623

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし