

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20374

研究課題名（和文）生活支援ロボットのための見え隠れ状況を活用する視覚観察学習法

研究課題名（英文）Observational Learning Method Utilizing the Visibility of Objects for Daily Assistive Robots

研究代表者

長濱 虎太郎（Nagahama, Kotaro）

信州大学・工学部・研究員

研究者番号：10736698

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、生活支援ロボットが道具や不定形物の操作法を人から学ぶための視覚観察学習システムの研究開発をおこなった。特に、人間の視覚に備わっている、物の永続性に関する概念やトンネル効果等の性質を参考にし、観察対象が見え隠れする際の遮蔽情報を視覚特徴として用いることで、上下・包含関係の変化によって観察対象が見えなくなるような作業をも獲得できる、視覚観察学習システムの一実現法を明らかにした。本手法により、物体を物体に重ねたり、物体を物体に入れて運んだりするような作業の視覚観察学習や、不定形物の機能的な形状特徴の推定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題で実現法を明らかにした視覚観察学習システムは、従来手法における課題であった、観察対象が見えなくなる際の状況推定や学習を克服する一手法であり、主に複数の物体や不定形物を用いる作業を対象とした観察学習研究の発展へ貢献するものだと考えられる。また、提案システムが実現する視覚観察学習は、ロボットに関する専門知識を持たないユーザが生活支援ロボットへ、各家庭内で必要となる作業を自然な形で教示できるようにするための枠組みである。少子高齢化が進み、労働人口が減って要介護者の増えてくる社会を支えるため、人の傍らで人の作業を手助けする生活支援ロボットを実現していく際の鍵技術となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a novel visual learning from demonstration (LfD) system for a daily assistive robot to learn the manipulation of tools and deformable objects from humans. Drawing inspiration from concepts such as the object permanence and the tunnel effect of human vision, the system utilizes occlusion information as visual features when the observed object is occluded. This approach allows the system to acquire tasks involving changes in hierarchical or inclusion relationships, even when the observed objects become invisible. As a result, a robot with the proposed system became capable of observing and learning tasks such as stacking objects or placing an object inside another object, as well as estimating functional shape features of deformable objects.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：観察学習 ロボットビジョン 生活支援ロボット 遮蔽

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 少子高齢化が進み、労働人口が減って要介護者の増えてくる社会において、人の傍らにいて人の作業を手助けする生活支援ロボットの実現が望まれている。このようなロボットを普及させるためには、各家庭に応じた多様な作業に従事できるようにする仕組みが必要だと考えられる。専門知識を持たないユーザがロボットへ作業を教示できるようにするための枠組みとしては、作業の実演教示 (Learning from Demonstration, LfD) 研究がおこなわれてきた。その中でも、実演している作業をロボット自身の視覚で観察させ再現させる視覚観察学習法は、人間が子どもなどへ作業を教示するのと同様の枠組みであるため、ユーザにとって自然な方法だと考えられる。しかしながら従来のシステムでは、観察対象が見えない際の状況推定および学習が困難であった。一方で、肩代わりさせたい作業のうち、道具を使う作業や、物が物に重なったり入り込んだりするような片付け作業では、観察対象が見えなくなる状況が頻発してしまう。そこで、観察対象が見えない場合にも生活支援ロボットが観察学習できる手法が必要だと考えた。

(2) 一方で人間は、物が見え隠れすることをも活用し、重なったり入り込んだりする状況を認識できていると考えられる。例えば発達心理学の分野で研究が進められてきた、物の永続性に関する概念があることから、人は移動する物体が隠れても、その物体が消失したとは思わず、物の後ろ側や内側に入り込んだと理解することができる。また、運動する物体が一時的に見えなくなり再度見えるようになったとき、他の物体の後ろを通り抜けたように知覚される現象は、トンネル効果として知られている。人間のこのような、観察対象が見えない時区間があっても、見え隠れしていることをも活用して観察対象の状況を認識しているであろう知見は、生活支援ロボットが道具利用法や片付け作業法を観察学習できるシステムの実現へ役立つと考えた。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、生活支援ロボットが物体の操作法を人から学ぶための視覚観察学習システムの構成法を実験的に明らかにすることである。本課題では特に、物体を別の物体に入れたり、物体を物体へ重ねたり、物体を道具によって運んだりするような、作業中に観察対象が見え隠れする作業の視覚観察学習を可能とするシステムを、計算機を用いて実現する手法を明らかにしていく。研究開発においては、観察対象が見え隠れすること自体を視覚特徴として活用し、人間の認知機能に備わっていると考えられている、物の永続性に関する概念やトンネル効果等を観察学習器へ備えながら進める。そして、開発した視覚観察学習システムを、生活支援ロボットによる視覚観察学習実験で評価する。

(2) さらに、上記(1)で研究開発をおこなう、観察対象が見え隠れすること自体を視覚特徴として活用する視覚観察学習システムを、観察対象が不定形物である場合にも活用できるように拡張し、観察している作業の目的や、不定形物の機能的な形状特徴を推定できるシステムを実現するための手法を研究開発する。特に、不定形物体を追跡しつつ、どの部分が相手を隠している領域 (遮蔽領域) であり、どの部分が相手に隠されている領域 (被遮蔽領域) かを分類して上記(1)の観察学習器へと情報を与える画像処理の構成法について明らかにしていく。

### 3. 研究の方法

(1) 本課題ではまず、人間の視覚に備わる、物の永続性に関する概念やトンネル効果等の性質を参考に、観察対象が見え隠れする際の遮蔽情報をも視覚特徴として用いることで、上下・包含関係の変化を含む作業を獲得できる観察学習器 Hi-Fes (Hierarchy-based Function Estimator) の研究開発をおこなった。そして研究期間前半では対象を剛体に限定し、見えるか否かが二値で表される画像処理器を用い、片付け作業を観察学習の対象とした。提案する Hi-Fes を用いた視覚観察学習システム全体図を図 1 に示す。Hi-Fes は、どの時刻にどの対象がどこに見えたかという画像処理器からの出力データを入力とし、生活支援ロボットがおこなうべき作業目標と、その目標を達成するために人が観察対象をどのように使っているかという物体の使用法の性質の双方を出力する仕様とした。

(2) 次に、上記(1)で提案し実装する観察学習器 Hi-Fes を、生活支援ロボットシステムへ統合し、図 1 の視覚観察学習システムを実現した。生活支援ロボットとしては、研究代表者らが開発している等身大人型ロボット Aero (Seed-

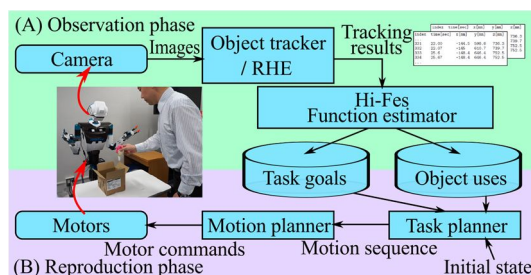


図 1. 提案する観察学習器 Hi-Fes を用いた視覚観察学習システム

roid)を用いている。Hi-Fes が出力した、作業目標と物体の使用法を入力とするタスク計画器は、Planning Domain Definition Language (PDDL) を用いて実装し、PDDL で記述されるアクションごとに動作プリミティブを準備した。各動作プリミティブは動作計画器によって幾何学的に適切な動作へと改められ、最終的にロボット実機を動作させる構成とした[引用文献 ]。本システムによる片付け作業の再現実験によって、提案システムの有効性を明らかにした。

(3) ただし、獲得した作業目的や物体の使用法からタスク計画と動作計画によって導き出された動作は、効率の悪い軌道を通るものとなったり、精度面の課題により目的を果たせなくなったりする可能性がある。そのような場合には、傍にいる人がその場で動作の軌道修正を指示できる手法があると有用であると考えられる。そこで、研究代表者らが研究を進めてきた、人が物を別の物に見立てて表現する見立て表現の技法を用いた動作修正法により、どの程度の軌道修正が可能かを、作業の修正教示実験により検証した。

(4) さらに研究期間後半には、Hi-Fes が不定形物を扱えるよう、視覚観察学習システムを拡張した。拡張にあたっては、複数の不定形物の領域を追跡すると同時に、領域同士の接触関係や、遮蔽領域・被遮蔽領域を推定する画像処理器 RHE (Region-based Hierarchy Estimator) を考案して用いた。RHE は、観察対象の色などの視覚特徴を用いて、見えている観察対象の領域を計算した後、それらの領域の接触関係と距離、そして各領域の凸包が他の領域を囲んでいるかといった特徴から、遮蔽領域・非遮蔽領域を計算し、上下・包含関係を推定するように設計されている。研究期間前半に使用した画像処理器と比べ、RHE は不定形物を扱えるというだけでなく、物体の大きさも考慮に入れて上下・包含関係を計算することができるという特徴がある。この RHE の出力結果を Hi-Fes へ入力可能にしつつ、さらに Hi-Fes から不定形物の機能的な形状特徴を出力できるよう拡張をおこなった。

#### 4. 研究成果

(1) 観察学習器 Hi-Fes は、物体追跡器から得られた観察対象の追跡結果から、作業目標と物体の使用法を導き出す。その実現にあたっては、観察対象の視認性や観察対象同士の重畳関係といった視覚特徴と、運動の有無や運動の随伴性といった運動特徴を併用する手法が有用であることが分かった。ただし、視覚特徴のうち重畳関係と、運動特徴は、観察対象が見えない場合に直接計算することができない。この課題の克服にあたっては、人間にとっても常識と考えられる知識を用い、各特徴量を相互に補間し合う仕組みを計算機上で実現した。例えば「観察対象 A が観察対象 B に隠れており、A が見えないまま B が移動したとき、A も B と共に移動したとする」という知識は、物体の永続性に関連する知識であり、観察対象の視認性と重畳関係から運動特徴を補間するものである。このようにして補間した視覚特徴と運動特徴の時系列データを、予め設計しておいた状態変化テンプレートとマッチングさせることにより、観察対象が移動する状態変化だけでなく、他の対象に重なる、入り込む、重なった状態で運ばれる、入った状態で運ばれるといった各状態変化を推定することができた。図 2 に、Hi-Fes の入出力の例を示す。Exp. 1 と Exp. 2 は各々、皿を重ねて運ぶ、ぬいぐるみを箱に入れて運ぶ作業を観察させた際のデータを示している。最上段が入力画像であり、中段は Hi-Fes が補間した後の視覚特徴および運動特徴の時系列データである。データからは、重ねられて見えなくなった皿や、箱に入れられて見えなくなったぬいぐるみが、別の皿や箱と随伴運動をしていることが正しく推定されていると分かる。さらに下段左には観察した作業の状態変化を書き下した結果、右には物体の使用法と作業目標が正しく出力されている[引用文献 ]。なお研究期間前半の Hi-Fes では、初期時刻に観察対象が全て見えている必要があったが、改良型 Hi-Fes では知識を追加することにより、観察対象

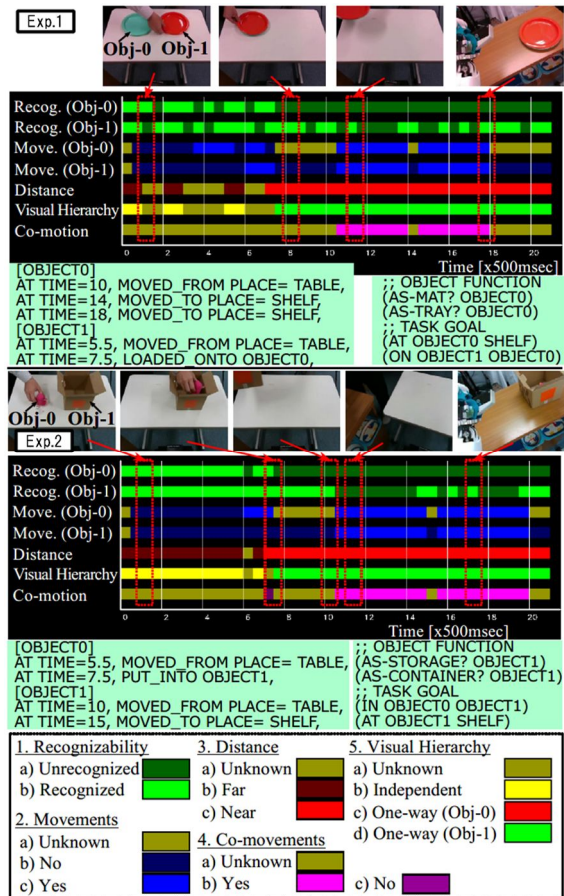


図 2. 視覚観察学習システムの入力画像、Hi-Fes で計算される視覚特徴・運動特徴の時系列データと、出力される状態変化・物体の使用法および作業目標 ([引用文献 ]の図を再編)

となり得る物体を登録さえしておけば、初期時刻に見えなくとも、作業中の状態変化、物体の使用法および作業目標の推定が可能となった。

(2) 次に、Hi-Fes を生活支援ロボットシステムへ統合し、上記 (1) で Hi-Fes から出力された物体の使用法と作業目標が、実際のロボットによる作業再現において有効であることを確認した。図 3 に示すのは、図 2 の Exp. 2 で視覚観察学習の結果を示した、ぬいぐるみを箱に入れて運び片付けるという作業の (A) 作業観察状況、(B) 作業再現状況と、(C) 作業再現時のタスク計画結果である。ロボットは、実演教示された際の、ぬいぐるみは箱に入れて動かすことができるという物体使用法を活用しながら、ぬいぐるみを箱に入れた状態で棚の上に置くという作業目標を達成することができた。さらに、複数の皿を棚の上へ片付ける作業も正しく再現できることが分かり、提案する Hi-Fes を用いた視覚観察学習システムの有効性が確認された [引用文献]。以上により、観察対象が見えなくなる際の状況推定や学習の課題を克服する視覚観察学習システムの一実現法が明らかとなった。

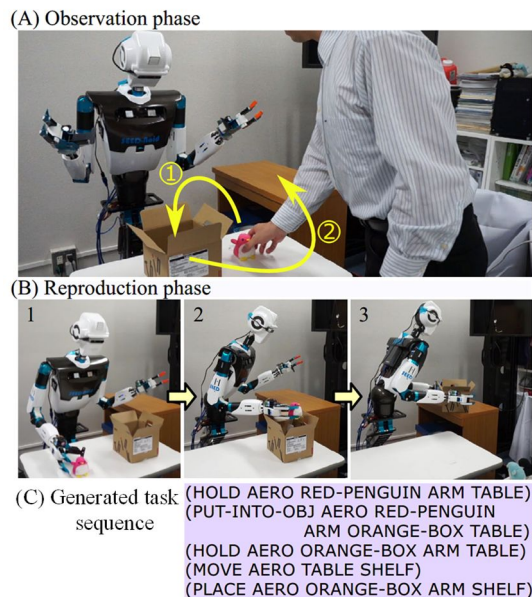


図 3. 提案システムを用いた、(A) 作業観察状況、(B) 作業再現状況、(C) 作業再現時のタスク計画結果 ([引用文献] の図を再編)

(3) 見立てを用いた直感的な視覚教示がおこなえるロボットシステムでは、教示者とロボットの手元の道具を様々に変化させても、ロボット自身が教示者の手元の動きから自らの手元の動きの変換を推定し利用することで、台拭き作業等における動作軌道の修正教示を受け入れることができた。また、提案手法における見立ての解釈では、速さのスケールリングを行うことで、教示者の動く範囲を大幅に変えることなく、ロボットに細やかな動きや大きな動きを伝えることが可能であった。これは幅広いユーザや環境での視覚教示に有用な手法であると考えられる [引用文献]。

(4) 研究の方法 (4) で述べた RHE を計算機上に実装し、不定形物の領域を追跡しながら上下・包含関係を推定させた実験結果を図 4 に示す。不定形の観察対象が全て見えている場合だけでなく、片方が下に入り込んだり中に入り込んだりして完全に見えなくなる場合にも、適切な重畳関係を推定できていることが分かる。この結果を Hi-Fes へ入力したところ、研究成果 (1) で剛体を扱った際の実験結果と同様に、正しい時系列の状態変化および作業目標を出力できることが分かった。さらに、「blue\_cloth は、袋や箱のように、中に red\_penguin を入れることができる」などと、部分的ではあるものの、不定形物の機能的な形状特徴を言語情報として出力できることが明らかとなった。これらの出力は、計算機上での形状表現やタスク計画の難しい不定形物を、ロボットが活用していくための一助となると考えられる。

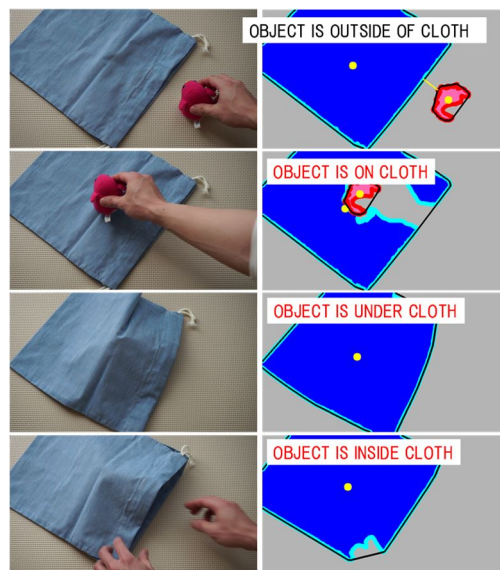


図 4. RHE を用いた不定形物の領域追跡および重畳関係推定の結果

#### < 引用文献 >

- Kotaro Nagahama and Kimitoshi Yamazaki, "Learning from Demonstration Based on a Mechanism to Utilize Object's Invisibility," in Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 6120-6127, 2019.
- 藤原俊史, 藤波香絵, 長濱虎太郎, 山崎公俊, 「食器の重ね置きを伴う下膳作業のための認識行動システム」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 予稿集, 講演番号 1P1-D04, 2021.
- 長濱虎太郎, 出村聡規, 山崎公俊, 「見立て表現を用いた視覚教示によるロボットの道具操作法学習」, 第 25 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 234-235, 2020.
- Kotaro Nagahama, Satonori Demura and Kimitoshi Yamazaki, "Robot learning of tool manipulation based on visual teaching with mitate expression," Advanced Robotics, Vol. 35, Issue 12, pp. 741-755, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kotaro Nagahama, Satonori Demura and Kimitoshi Yamazaki	4. 巻 35
2. 論文標題 Robot learning of tool manipulation based on visual teaching with mitate expression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 741-755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2021.1914724	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤原俊史，藤波香絵，長濱虎太郎，山崎公俊
2. 発表標題 食器の重ね置きを伴う下膳作業のための認識行動システム
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kotaro Nagahama and Kimitoshi Yamazaki
2. 発表標題 Learning from Demonstration Based on a Mechanism to Utilize an Object's Invisibility
3. 学会等名 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長濱虎太郎，出村聡規，山崎公俊
2. 発表標題 見立て表現を用いた視覚教示によるロボットの道具操作法学習
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 出村聡規, 長濱虎太郎, 山崎公俊
2. 発表標題 見立て表現の解釈に基づく道具操作の観察学習
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------