

相互関係を含んだ家庭用品操作データセットを用いた ホームロボットの動作計画システム

Motion Planning System Using Dataset of Household Objects
Including Those Interrelationships for a Home Robot

徳永 夏帆 (都市大) 学 栗島 直弘 (都市大) 正 佐藤 大祐 (都市大)

Natsuho TOKUNAGA, Tokyo City University, tokunaga@rls.mse.tcu.ac.jp

Naohiro KURISHIMA, Tokyo City University, kurishima@rls.mse.tcu.ac.jp

Daisuke SATO, Tokyo City University, sato@rls.mse.tcu.ac.jp

In order for a home robot to manipulate household objects such as furniture and home appliances, it is necessary to know the internal state of the target object and the interrelationship with other related objects of its manipulation. In this paper, a data set is proposed to describe information necessary for such household objects manipulation. In addition, a ROS-based motion planning system is constructed to implement from object recognition to motion generation using the data set. A housework simulation is performed for tidying up a chair to a table with a mobile manipulator.

Key Words: Home robot, Object manipulation, Affordance, ROS

1 緒言

近年、ホームロボットによって複数の家庭内作業を実現するために家庭内環境に存在する家電や家庭用品を操作する研究が盛んに行われている。我々は、これまでに日用品の形状や扱い方を機能の観点から体系的に記述した知識モデルを構築し、作業に応じた日用品の把持や操作を実現してきた [1]。しかしこの知識モデルは主に卓上に置かれる容器を想定しており、なおかつ適応対象は、幾何学的形状に近似できる単一の日用品に限られていた。

そこで、本研究は、家庭内に存在する複数の物品の操作による家事の実現を目標とする。

本論文では、日用品だけでなく、知識モデルでは扱うことができなかった家具や家電、内装など複数の家庭内の物品の操作に対応するために新たに家庭用品操作モデルのデータセットを提案し、その内容と構成を示す。これにより、従来のモデルでは考慮していなかった物品間の相互関係に関する情報を付与することにより、複数の家事に利用できるようにモデルを拡張する。また、モデルの拡張に際して近年ロボット工学の物品操作に関する研究で注目されているアフォーダンスの概念も導入する [2]。さらに、提案するデータセットを用いてホームロボットが家庭内作業を実現するための動作計画システムを ROS によって構築し、相互関係情報を用いた椅子の片付け作業の動作計画とシミュレーションすることで、その有用性を示す。

2 家庭用品操作モデル

2.1 構成

先行研究の知識モデルは、XML 記法を用いて、構造と使い方に関するデータを階層構造で表現していた。提案する家庭用品操作モデルは、従来の知識モデルとの互換を持たせるために構造と使い方に関する記述を持つと共に、新たに適応範囲を拡張するにあたって、物品をその物品が属する上位概念であるクラスとある特定の物品を表現する下位概念であるインスタンスの二種類の概念を用いて表現する。なお、物品のクラスとインスタンスの関係については、英単語の概念辞書である WordNet [3] の同義語グループである synset における上位語と下位語の分類や、WordNet の階層に基づいてさらに追加のサブグループを追加している 3D モデルのデータセットである ShapeNet [4] における分類を参考に設定するものとする。

クラス情報では、物体クラス間で共通するパーツ構成や操作方法を記述し、インスタンス情報では、数値や概形情報も含めた具体的な操作方法を記述する。例えば、Fig. 1 のような椅子を例に上げるとクラス間で共通する主要なパーツとして椅子は必ず座面

を必ず持ち、インスタンスは、それに脚や背もたれ、肘掛けキャスターが接続されて構成されている。

また、知識モデルにおいては、物体の扱い方に関する情報は、主に操作方法に応じた把持禁止領域やアプローチ方向として与えられていた。この物品の扱い方に関する記述を拡張するために新たにアフォーダンスを獲得する三つの段階の分類 [5] に則り、物を掴む、押す、回転させるという原始的なアフォーダンスに基づいた行動とそれを組み合わせた適応的なアフォーダンスによる行動によって家庭用品を操作するような行動が実現されるのものとモデルの扱い方の情報を記述する。

さらに、扱い方の情報として物品間の相互関係に関する情報も含める。これによって例えば本を片付ける作業を行う際には、本棚に収納する領域や収納時の本の姿勢などの情報をあらかじめデータセットに含めることが可能となる。

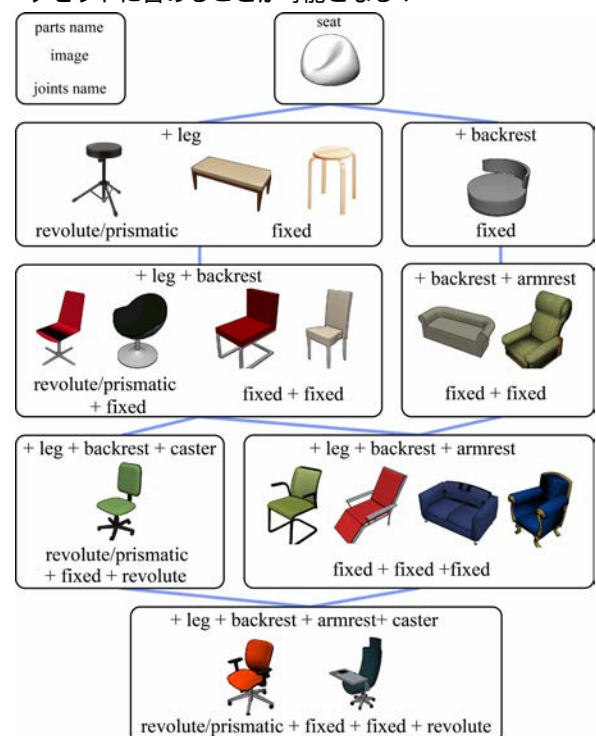


Fig.1 Conceptual diagram of the chair's handling model.

2.1.1 クラス情報

以下に家庭用品操作モデルのクラスに関する階層構造のイメージを示す．

- class : 物品クラス
 - structure : クラス間で共通する構造
 - type : 日用品, 家具, 家電, 内装の何に属するか
 - part : その物品が持ちうるパーツ
 - main_parts_name : メインパーツ
 - sub_parts_name : 従属するパーツ
 - joint : パーツ同士の接続関係
 - name : 接続関係の名前
 - type : 接続方法の種類
 - parent : 親パーツ名
 - child : 子パーツ名
 - usage : 物体クラス間で共通する操作方法
 - action_name : 行動名
 - primitive_motion : 原始的なアフォーダンスに基づいた動作
 - inclusion : 有するパーツやジョイント名
 - graspable : 把持可能なパーツ
 - operation_switch : 特定パーツの有無による動作の切り替え
 - interaction_class : 相互関係の存在する他の物品クラス

クラスに関する要素は, 物品のクラスによってインスタンスに関係なく共通しているものを表す．

このうち structure は, その家庭用品の最低限の機能を実現させるパーツと接続情報(自由度情報)を定義する．part のうち main_parts は, いくつもあるインスタンスの物品においても必ず持っているパーツを一つだけ設定する．sub_parts は, インスタンスの物品が持ちうるパーツを複数設定する．joint は, 上記の part で設定したパーツすべてに対して設定され, インスタンスによってパーツの接続が異なる場合も記述する．type は, 対象の物品が何を表すのかを示し, 日用品は机上で移動可能, 家具・家電の場合は拘束条件次第では移動可能, 内装の場合は移動不可能な物体として処理する．

usage は, 取り扱い方を記述する部分であり, action で指定した行動を原始的なアフォーダンスに基づいた単純な動作である primitive_motion の組み合わせで表現する．このとき primitive_motion で表される動作は, 保有するパーツによる動作の違いや他の物品クラスに依存関係がある場合にその物品も記述する．

2.1.2 インスタンス情報

以下に家庭用品操作モデルのインスタンスに関する階層構造のイメージを示す．

- instance : 物品インスタンス
 - name : 物品インスタンス固有の名前
 - structure : インスタンス固有の構造
 - shape_type : プリミティブ形状で表現可能か否か
 - description_path : 構造の記述された SDF ファイルへのパス
 - hash : 点の特徴量のハッシュ値
 - usage : インスタンス固有の操作に関する情報
 - grasps_area : 把持可能領域
 - recommended_area : 把持推奨領域 (オプション)
 - designated_area : 把持指定領域 (オプション)
 - approach : ロボット手先のアプローチ方向
 - direction : 環境との拘束方向
 - movable : 運動方向
 - prismatic : 直動方向の軸
 - rotation : 回転方向の軸
 - constraint : 運動拘束方向
 - prismatic : 直動方向の軸
 - rotation : 回転方向の軸
 - interaction_class : 相互関係の存在する他の物品クラス

- constraint : 物品同士の拘束条件
- area : 相互関係の存在する領域
- approach : 他の物品に対するアプローチ方向
- orientation : アプローチ姿勢

インスタンスに関する要素は, 家庭用品のインスタンス毎に固有のパラメータである．

structure の shape には, プリミティブ形状に代替できる家庭用品の場合は, 形状の種類, 非プリミティブ形状の場合は, 後述する物体認識手法で使用する三次元モデルのデータへのパスが示されている．インスタンスの持つパーツの構成は, 後述するシステムでの利用を考慮して動力学シミュレータである Gazebo で利用される SDF 形式で記述する．description_path には, 対応する SDF 形式のファイルへのパスが記述されており, SDF 形式のファイルには, インスタンスのパーツであるリンクやリンク間の繋がりにあるジョイントのような構造に関する情報と各リンクの質量や摩擦のような物性値が含まれる．なお, このとき含まれるパーツの命名規則は, 前述したクラスの structure で与えられたものに準拠するものとする．

usage は, 前述したクラスの usage で示した action を実現するために必要な具体的なインスタンス毎の設定があり, 把持計画に使用する 3D モデルや拘束条件などを記述する．grasp_area は, 把持可能領域を表し, この下の階層でオプションとして把持推奨領域や把持指定領域を設定する．

direction は, 家庭用品と環境間の拘束条件を表し, 物品が慣性座標系に対して運動が可能な方向と運動が拘束されている方向の二種類で表現される．拘束条件はクラスの part で定義したメインパーツの持つ物体座標系に対して設定する．

interaction_class は, 物品間の相互関係を示す．相互関係の情報は, 物品のパーツやその物品に関連した空間の領域情報とその領域に対してどのようにアプローチするのかという物品が物品に作用するような行動をする際の拘束条件を記述する．

3 家庭用品操作モデルに基づいた作業動作計画システム

3.1 システム構成

家庭用品操作モデルを用いた作業動作計画は, 大きく分けて家庭内の物体を検出および認識し, 家庭用品操作モデルを当てはめる認識段階とユーザが指定した家事内容に合わせて認識済みの家庭用品操作モデルをもつ情報を基にロボットの作業動作を計画する段階の二つに分かれる．この家庭用品操作モデルを用いた作業動作計画の流れを以下に示す．

1. 室内の物品の状態を取得

- i). 既知の環境地図を用いて室内を探索
- ii). 物体認識
- iii). 認識した物体のインスタンスを家庭用品操作モデルを検索
- iv). 対象物体のインスタンスが家庭用品操作モデルに含まれる場合, 家庭用品操作モデルを対象物体に当てはめ操作可能な物体リストに追加

2. ユーザが家事内容と操作物体を設定

3. 操作物体の家庭用品操作モデルよりロボットが対象の家事が実行可能か判断

4. 実行可能であれば, 家庭用品操作モデルに含まれる行動を作業終了まで実行

5. 家庭用品操作モデルを用いて作業を計画

6. 作業計画に基づいてロボットの動作を生成

このような作業動作計画を実現するために構築したシステムを Fig. 2 に示す．なお, 図中の番号は上記の作業動作計画の流れと対応している．本システムはロボットに実装するにあたって家庭内作業の動作計画とその実現を円滑に進めるため, ロボット用のミドルウェアである ROS をフレームワークとして構築する．

システムは, ROS で構成された Application layer とロボットに組み込まれたコンピュータ上の Real robot layer に分かれる．

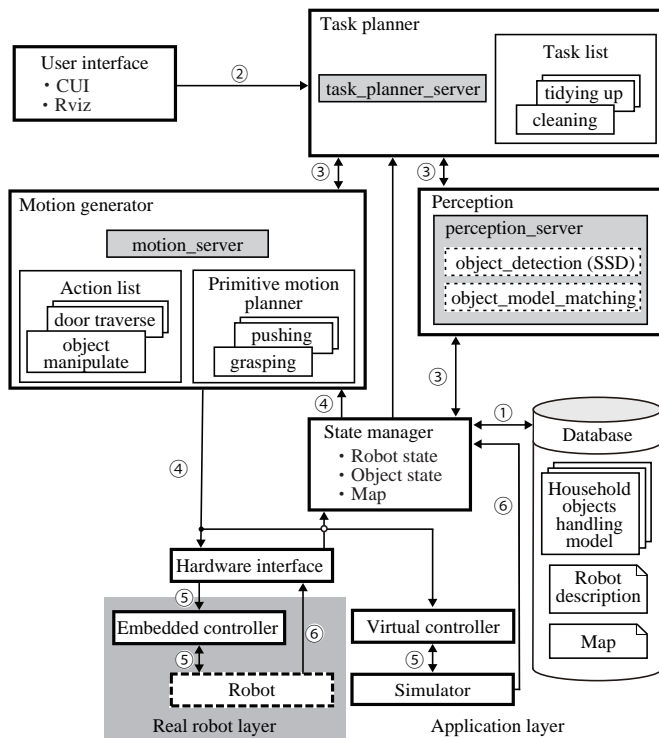


Fig.2 The configuration of the software system based on ROS.

まず、①では、Database のデータを State manager が読み込み外部のノードで参照できるようにする．このとき、Robot description は、ロボットの構成などを含めた情報を示し、Motion generator や Hardware interface が参照するロボットの状態量は、このロボットの構成に応じて変更される．また、操作対象である物体は、後述する物体認識システムを有する Perception によって物品名と位置/姿勢の推定値を State manager に登録し、その際に Database から読み込んだ Household objects handling model を呼び出して対応付ける．

②では、ユーザが User interface を用いて家事内容と物体を操作する場合は、操作対象のインスタンス名（読み込む家庭用品操作モデル名）と動作達成目標を指定し、Task planner 内にある作業計画用サーバに送信する。

Task planner は、家事に応じて実行しなければいけない行動の順番を記述した Task list を保持しており、指示された 家事を実行するために③で Motion generator に動作生成を依頼する。このとき、ユーザの指定した家事が State manager に登録されている家庭用系操作モデルに関する情報のみで実現できない場合は、再度 Perception によって物体を認識する。

Motion generator は、Task planner から要求された行動内容に応じて動作生成する。④で State manager に登録されたロボットの状態と操作対象の状態（位置/姿勢、家庭用品操作モデル）を取得する。このときロボットの状態量は、Robot description で設定されたロボットの構成に依存し、例えば手先に力覚センサを装着したマニピュレータを有したロボットであれば関節角度/角速度、手先の位置/姿勢/レンチ情報を Motion generator は取得し、手先の経由点や目標の軌道補間方法を目標値とする。また、移動ロボットであれば自己位置推定によって取得したロボットの現在値と移動目標地点により目標移動速度を算出する。算出された目標値は、ロボットのコントローラに送信される。

Embedded/Virtual controller は、⑤で Motion generator から受け取った目標値から指令値を算出しロボットに送信する．

指令値を受けてロボットの状態が更新された結果は、⑥でエンコーダやシミュレータから返送され、State manager を更新する。この更新された値を利用して動作生成やフィードバック制御が行われ、以降作業終了まで②～⑥が繰り返される。

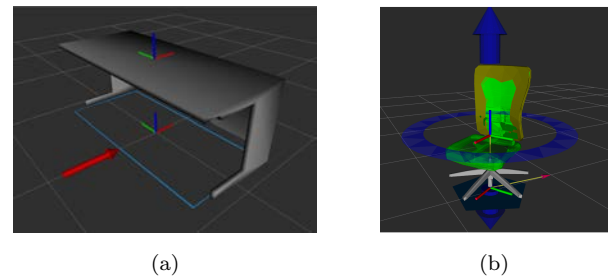


Fig.3 Mapping household objects handling models: (a) office chair model and (b) desk model.

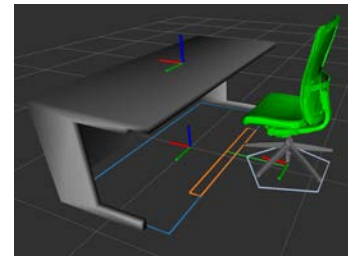


Fig.4 Calculation result of target storage area considering mutual relationship using household objects handling model. Orange frame represents the storage area of the chair.

3.2 家庭用品操作モデルを用いた物体認識システム

家庭用品操作モデルを実際の物体に適應するためには，まず Perception によって対象となる物体のインスタンス名とその物体の位置/姿勢を推定する必要がある．そのために画像を用いた物体検出手法である Convolutional Neural Network の一つである Single Shot MultiBox Detector (SSD) と 3D のモデルデータのマッチング手法である Surface Matching の二つの手法を組み合わせた物体認識システムを用いる [6]．

物体認識は、画像から物体のインスタンスを検出と認識対象の家庭用品操作モデルの情報から対象の位置/姿勢を推定する二つの段階がある。まず対象のインスタンスを検出する段階においては、RGB-D センサから得られた RGB 画像データを SSD により物品の種類とその物品が画像内の存在範囲を取得する。その際に物体のインスタンス名が取得できたら対象となる物体の家庭用品操作モデルを読み込む。そして、その後対象の物体がプリミティブ形状で置き換えられるか否かで三次元の位置推定手法を切り替え、置き換えられる場合は、先行研究の手法 [1] を用い、置き換えられない場合は、Surface Matching を用いた [6] の手法を利用して姿勢推定をする。

3.3 作業動作計画手法

作業動作は、複数の原始的な動作の組み合わせで実現される。本章では、例として片付け作業を挙げ、それを実現するために必要な原始的な動作である物品の把持と把持した物品の移動を計画する手法についてそれぞれ述べる。

3.3.1 把持計畫手法

把持計画は、物体に対するグリッパの把持位置/姿勢、およびそこまでのアプローチ経路を求めることで実現される。把持計画には、家庭用品操作モデルのインスタンス情報である把持推奨領域を利用する。

家庭用品操作モデルに付与されている把持推奨領域に対して、ロボットハンドの把持計画シミュレータである GraspIt に標準で搭載されている把持品質の最適化を用いた把持手法である EigenGrasp Planner によって物体の把持目標位置/姿勢を算出する。

3.3.2 物品の相互関係を考慮した移動計画手法

把持した物品をロボットが操作するためにはその物品をどのように移動させるかを計画する必要がある。物品の移動するためには、移動目標である座標点を設定する必要がある。このとき移動

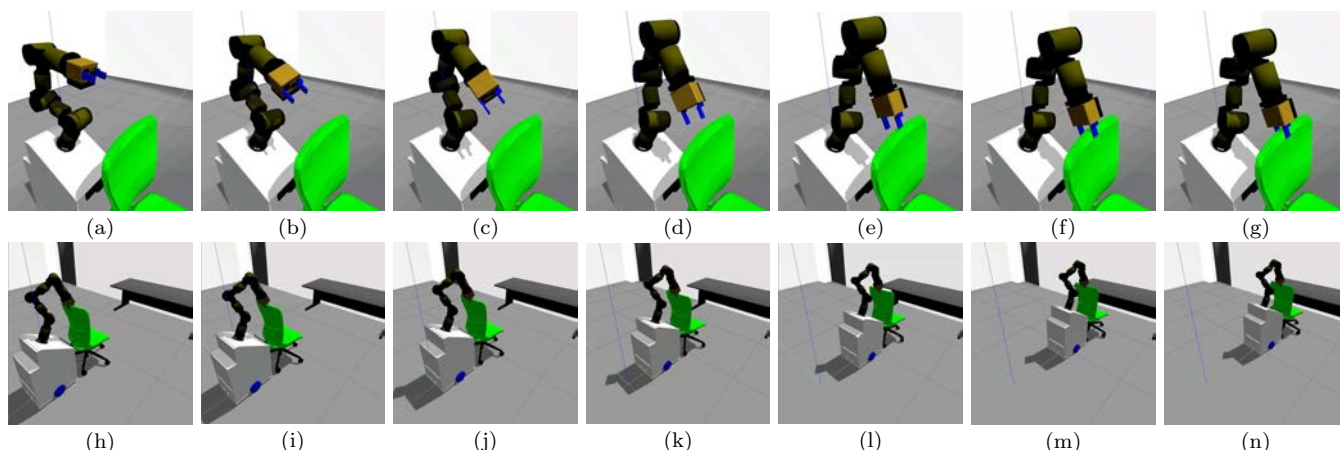


Fig.5 Simulation result of tidying-up task of a chair using household objects handling model. This task is accomplished with a combination of two primitive motions that grasping and carrying objects. Grasping motion is planned according to the graspable area of the household objects handling model. And, carrying motion is planned by the mutual relationship among objects.

目標は、作業内容によって決定する。そして、片付けなどの作業においては、移動目標が机の上や棚の中など別の物品上であることがほとんどである。そのため、その移動目標となる物品の家庭用品操作モデルも利用し、移動対象の物品とそれを移動して収納する対象である物品同士の相互関係を考慮することで、ユーザが具体的な移動目標となる座標点を設定しなくても物品の移動計画を行うことができるようになる。

このような物品間の相互関係の考慮が必要な作業動作の例として椅子を机に片付ける動作を考える。Fig. 3 に設定した椅子および机の座標系および付与した家庭用品操作モデルの情報を可視化したものを示す。図中の机と椅子は、地面に相互関係が存在する領域が投影されている。また、机の場合は他の物品がその領域に対してアプローチ可能な方向が赤い矢印で示されており、椅子の場合は、把持推奨領域が青もたれにあることと上下方向に直動、脚の車軸回りに回転の自由度があることが示されている。このような家庭用品操作モデルの相互関係情報に基づいて生成された椅子の収納可能領域および片付けるための移動経路を Fig. 4 に示す。なお、図中のオレンジ色の領域が椅子と机の相互関係を考慮して算出された収納可能領域であり、緑色の線が移動経路を表す。

4 作業動作計画に基づいた動作生成

前章の家庭用品操作モデルに基づいた作業計画によって物体の操作に関する計画が完了した後、実際にロボットがその計画に基づいて物体を操作する（作業動作を生成する）ことで初めて作業が実現される。

本章では、例として椅子を机の下に移動させることを椅子の片付け動作とした時に着目した作業動作計画に基づいた動作生成手法を述べる。

4.1 把持計画に基づいた家庭用品の把持動作生成手法

物体把持の動作生成は、ロボットの手先の経路点を任意数与え、それらを追従するようロボットの手先を制御することで把持動作を生成する。物体の把持点は、3.3.1 章の手法を用いることで算出する。その後、把持目標位置/姿勢に対するアプローチ用の経路点を設定する。把持目標直前の経路点は、グリッパの姿勢はそのまま、位置はグリッパの指の長さを考慮することでプリシェイピングのためのアプローチ点が一意に決定される。

4.2 家庭用品の移動計画に基づいた操作

家庭用品把持後の操作は、物品の移動計画と合わせてさらに家庭用品操作モデルから物品の拘束条件や自由度情報を取得することによって行う。3.3.2 章の手法により物品の移動させる際の幾何的な経路が求められているとする。そして 4.1 章の手法により、ロボットが物体を把持したとすれば、椅子の基準座標系とロボットの手先の位置関係が決まっているため、物品の移動経路によりロボットの手先の軌道を生成することができる。ただし、このときには、家庭用品操作モデルの usage の constraint を基に手先

の運動にも拘束条件を付与する。例えば、キャスタ付きの椅子においては、常に地面に対して拘束された状態を維持することとなる。そのため、椅子を操作するロボットもその拘束方向に対しては、物体を移動させないようにする。

4.3 シミュレーション

作業動作計画に基づいた動作生成の例として、前章で計画した椅子の片付け作業をシミュレーション上で確認した。

シミュレーション環境は、動力学シミュレータである Gazebo を使用する。対象のロボットは、7 自由度のマニピュレータとモバイルベースを組み合わせたモバイルマニピュレータ型のロボットを想定する。片付け動作は、椅子の把持と椅子の移動の二つのフェイズに分かれ、それぞれの動作を連続して行う。

Fig. 5 に椅子の把持および移動動作のシミュレーション中の連続写真を示す。シミュレーション結果より、椅子の把持推奨領域に対して目標の把持点およびプリシェイピング用の経路点が算出され、かつそれらの点を手先が追従し、椅子の把持が実現されていることが確認できた。また移動に関しては、算出された移動目標点から誤差が生じたものの、収納可能領域内に収まっていることから片付け作業自体は達成されたということが確認できる。

5 結言

本稿では、相互関係を含んだ家庭用品操作モデルのデータセットについて述べた。また、そのデータセットを利用した動作計画システムを構築し、ホームロボットによる椅子の片付け動作のシミュレーションにより、先行研究では困難であった複数の物品間の相互関係を考慮する必要がある家事のためにシステムが利用できることを確認した。

参考文献

- [1] 永田, 新良貴, 原田, 山野辺, 中村, 佐藤, 金宮, “知識モデルを用いた日用品のセマンティック把持”, 日本機械学会論文集, vol. 81, no. 829, pp. 15–00227, 2015.
- [2] N. Yamanobe, W. Wab, I. G. R. Alpizar, D. Petit, T. Tsuji, S. Akizuki, M. Hashimoto, K. Nagata, and K. Harada, “A brief review of affordance in robotic manipulation research,” *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 19, pp. 1086–1101, Oct., 2017.
- [3] (2019, Mar. 6) WordNet — A Lexical Database for English [Online]. Available: <https://wordnet.princeton.edu/>
- [4] (2019, Mar. 6) ShapeNet [Online]. Available: <https://www.shapenet.org/>
- [5] H. Min, C. Yi, R. Luo, J. Zhu, S. Bi, “Affordance research in developmental robotics: a survey,” *IEEE. Trans. Cognit. Develop. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 237–254, Dec., 2016.
- [6] 仙石, 栗島, 徳永, 佐藤, 金宮, “家庭用品の把持領域や自由度の情報を含む 3D モデルデータを用いたホームロボットの物体認識手法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, No. 18–2, 2P1–C18, 2018.