

モジュラーホームロボットにおける作業の遷移に応じた 動作の再構成が可能な作業計画システムの開発

Development of a Task Planning System Rebuildable About a Motion
Corresponding to Transition of Houseworks for a Modular Home Robot

根井 学 (都市大) 井手口 雄也 (都市大)
正 佐藤 大祐 (都市大) 正 金宮 好和 (都市大)

Manabu NEI, Tokyo City University
Ideguchi YUYA, Tokyo City University
Daisuke SATO, Tokyo City University, sato@rls.mse.tcu.ac.jp
Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

A customer wants a home robot to work a number of chores. In the previous study, a robot achieved chores by executing sequentially. If chores have a job of a home appliance, a robot must wait to finish it. This wait is repeated when a robot executes the chores sequentially. As a result, a behavior of a robot become inefficient. A robot must work efficiently by executing chores parallel. Therefore, we develop a software system to rebuild the chores to one of a new chore. The system can shorten working time of our supposing chores.

Key Words: Planning, Modular home robot, State machine, Motion rebuildable algorithm

1 緒言

近年，少子高齢化などの社会問題からロボットによる生活支援として家事の代行が望まれている．そこで我々はMMM コンセプトに基づいてモジュラーホームロボットを開発している [1]．このコンセプトではユーザの様々な作業要求に応えるためにロボットを複数の異なるモジュールから構成している．これにより，ユーザの様々な作業ニーズに応じてモジュールの構成を変えることでロボットは様々な作業を達成する．

過去に我々は環境音から状況を判断することで効率的に複数の料理を提供する朝食準備作業を実現した [2]．しかし，その際は，オペレータが事前に家庭内作業の作業解析を行い，作業達成するための計画を作成することで実現していた．ロボットが一般家庭に導入されるためには要求された複数の家庭内作業に応じて，ロボットが自律的にそれらを一つの作業として再構成する必要がある．さらにその作業は効率的な作業内容であることが重要である．

先行研究では，橋口 [3] らはユーザから要求された作業についてデータベースから作業情報を読み込み，ロボットの動作を生成している．このとき，作業は移動，握るなどの要素動作から構成されており，これらの抽象的な動作の引数はデータベースと連携し，補充しながら作業要求を解析し生成される．鎌田 [4] らはPR-2のような双腕，頭，センサ部など様々な運動機能を持つロボットのための動作計画を行っている．この研究では作業を構成する一つ一つの動作で求められる認識結果の精度に応じてロボットの動作を分類している．これにより，右腕でセンシングをしつつ，左腕で環境に影響しない動作をすることが可能となる．しかし，前者においてはユーザの要求に対して作業を逐次実行しており，後者はロボットが持つ複数の運動機能を有効利用している

が一つの家庭内作業を目的としており，ホームロボットが複数の家庭内作業を効率的に実行することは考慮されていなかった．

これに対して，ロボットではなく人が効率的に作業を達成するために松島 [5] らは作業手順の生成，提示方法について提案している．これらの研究では忙しい人の手料理支援を目的としたシステムを開発している．これらのアプリケーションでは組み合わせ最適化問題を用いており，システムはある条件に沿った効率的な調理手順を人へ提示する．しかし，この手順は「野菜を切る」などの抽象的な動作の指示であるため，ロボットがこれに従い作業を実施することは困難である．

そこで我々は，ロボットがユーザから要求された複数の家庭内作業を一つの作業として再構成するためのソフトウェアシステムを開発する．ロボットのために家庭内作業の動作を再構成するためには，ロボットの持つ機能や運動特性を考慮して作業を解析し，再構成可能な細分化された動作単位に分解する必要がある．そこでまず，ロボットのための家庭内作業の作業解析方法を提案し，それを用いて作業動作を細分化することで本システムに必要なデータ構造を決定する．そして，細分化された作業の間を状態機械を用いて適切に遷移させることで作業全体の時間を短縮する．また，システムが再構成する作業の計画が妥当であるか検証する．

2 家庭内作業計画システムの基本構想

複数の作業を効率的に実行するためには作業を並列で実行することが必要不可欠である．そのために，まず作業を細分化し，それを作業計画システムで用いるためのデータ構造体として定義する．

2.1 作業解析によるモジュール構成の決定

モジューラホームロボットが複数の家庭内作業を実現するためには各作業を実現するために必要な機能（モジュール）を明らかにする必要がある。このためには、各作業の実行手順を考え、各手順ごとにロボットが行うべき動作、実行の際に必要な情報、扱う道具などを明らかにしなくてはならない。そのために、我々は Work Design 技法^{*1}を参考に、ある家庭内作業がどのように作業が行われるかを明確にするための作業の分類項目を定めた。このとき、作業が持つ動作のための分類の指標として International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)^{*2}を基にしつつ、ロボットに必要不可欠な条件を付加することによって、ホームロボット専用の作業動作の分類項目を定めた。これらの指標を基に作業を解析することによって、家庭内作業がどのような手順で構成されているか、それに必要な道具、作業環境などがわかり、必要なモジュールが明らかになる。

2.2 家庭内作業の細分化および階層構造化

作業解析を行うことで作業を再構成、作業の並列実行が可能となる。また、作業間で共通の動作、道具の操作を見つけ出すことで動作を再利用することが可能である。本稿では作業解析に基づき家庭内作業を以下の階層構造からなるデータ構造体として再定義する。

2.2.1 ハウスワーク

掃除、洗濯、炊事などの日常生活のための家事である家庭内作業を日用品や家電製品などの物体を扱う一連の作業であると考え、これをハウスワークと定義する。そして、ホームロボットがハウスワークを達成した結果、ユーザが何らかの利益を得ることとし、これを扱うためのデータ構造体をハウスワーク構造体と定義する。

2.2.2 ベーシックタスク（b-タスク）

b-タスクとは、ある対象をどのように操作するかを記述したデータ構造体であり、ハウスワークはこれにより構成される。例えば扉を開ける、スイッチを押すなどのような動作が b-タスクである。このとき、扉は冷蔵庫の扉、棚の扉などの具体的な対象を省略されており、扉を開けるという一つの b-タスクは様々なハウスワークで使うことが可能である。つまり、b-タスクで扱うものを可能な限り抽象化し、その扱い方を記述することで複数のハウスワークで同じ b-タスクを共有することで b-タスクの再利用性を向上させる。

2.2.3 要素動作

先に b-タスクを用いて物体の操作について扱うと述べた。しかし、b-タスクには様々なロボットの運動が内在しており、ロボットの動作を生成するためには b-タスクをさらに細分化する必要がある。例えば、食器棚などの扉を開けるためには以下の手順を取る必要がある。

1. 手先を扉の取っ手に伸ばす

^{*1} Gerald Nadler が発表した Industrial Engineering 技法の一つで、問題解決を図る際に効果的に改善・改革するための方法論 [6]

^{*2} 2001 年 5 月の世界保健機関総会において採択された人間の生活機能と障害の分類法 [7]

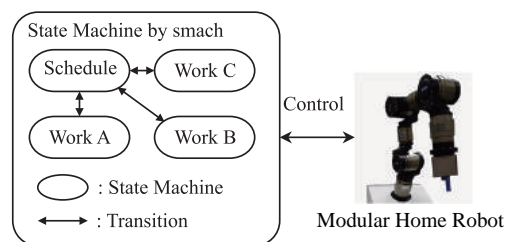


Fig. 1: The architecture of task planning system.

2. 取っ手をつかむ
3. ヒンジ中心に扉を回転させる
4. 手を離す

このように物体を操作するためには腕や手を複合的に動かさなければならない。また、部屋間の扉であれば自身が移動することも必要になる。

そこでモジュールごとの動作を生成するために要素動作を定義する。これは先の二つと比べ工程を持たない。

2.3 状態機械による家庭内作業の再構成

本システムではハウスワークを適切に切り替えることで家庭内作業を並列実行する。そのために State machine (smach) [8] を用いて状態機械を構築し、ハウスワーク間を適切に遷移させることで作業を並列実行する。smach とは、タスクレベルで記述されたロボットによるサービスを状態遷移の形で実行できる python のライブラリである。smach の特徴の一つとして状態機械を階層構造状にすることが可能である。そこで、ハウスワークの間の遷移を制御するスケジューラの状態機械と、ハウスワークの状態機械を一つの状態機械として構築、実行する（図 1）。そして、スケジューラが適切にハウスワーク間を遷移させることによって作業を再構成する。

3 ハウスワーク間の遷移について

本システムでは、スケジューラが複数のハウスワーク間を下記の遷移条件に基づくアルゴリズムに従って遷移させることで家庭内作業を再構成する。

3.1 遷移発生条件

我々はあるハウスワークから別のハウスワークへの遷移する条件はハウスワークの実行、続行が不可能な状態であるときの条件だと考え、以下の条件を定めた。

- ハウスワークが道具を占有しようとしたとき
- 家電製品の稼働によるハウスワークの占有開始時

あるハウスワークから遷移が発生したとき、以下のアルゴリズムによって遷移先が決定する。

3.2 貪欲法を用いた遷移先の決定

ハウスワークから遷移が発生した際に各ハウスワークへ遷移するときのコストを評価し、最も良い評価値のハウスワークへ遷移する。これをハウスワーク間の遷移ごとに行うことで最終的に解を得る。これは貪欲法 [9] とよばれ、近似アルゴリズムの基本的な考え方の一つである。

あるハウスワーク 0 からハウスワーク 1 へ遷移しようと

したときの評価式を以下に示す．

$$e_{0 \rightarrow 1} = a_t \hat{t}_{s1} + a_n \hat{n}_1 - a_l \hat{l}_{0 \rightarrow 1} \quad (1)$$

$$\hat{t}_{s1} = \frac{t_{s1}}{\sum_{i=0}^N t_{si}}, \quad \hat{n}_1 = \frac{n_1}{\sum_{i=0}^N n_i}, \quad \hat{l}_{0 \rightarrow 1} = \frac{l_{0 \rightarrow 1}}{\sum_{i=0}^N l_{0 \rightarrow i}}$$

ここで， $e_{(o) \rightarrow (o)}$ はあるハウスワーク間の評価値， $t_{s(o)}$ は家電製品などによる休止時間， $n_{(o)}$ はハウスワーク内で道具を使用する回数， $l_{(o) \rightarrow (o)}$ はハウスワーク間の遷移によって生じる移動距離， N は実行可能なハウスワークの合計数， $a_{(o)}$ は各パラメータに対する重みである．本稿において対象とした家庭内作業である朝食準備作業では，各パラメータの重みを $a_t = 1.0$ ， $a_n = 2.0$ ， $a_l = 1.5$ とした．

4 朝食準備作業のシミュレーション

本稿では家庭内作業計画システムの実用例として朝食準備作業に着手する．この朝食準備作業は目玉焼き，コーヒー，温野菜，パンの複数の調理から構成される．このとき，ユーザはコの字型のシステムキッチンに所有しており，ロボットはキッチンで作業する．本章ではモジュラーホームロボットが作業するときの作業条件について述べる．

4.1 モジュール構成

ユーザの要望を反映した朝食準備作業を達成するためには以下に示す機能が必要となる．

- システムキッチンの中の局所的な移動
- 扉を開ける，スイッチを押すなどの家具の簡単な操作
- 軽い調理対象物の搬送

この条件を満たすモジュール構成のモジュラーホームロボットを図2に示す．

4.2 想定するハウスワーク

本稿で朝食準備作業はコーヒー淹れ，パン焼き，温野菜調理，目玉焼き調理の四つのハウスワークから構成される（表

Table 1: Assuming houseworks.

Housework	Cooking time [min]	Working time [min]
Coffee	5	6.6
Toast	2.5	5.3
Egg	2	8.6
Vegetable	2	8.6

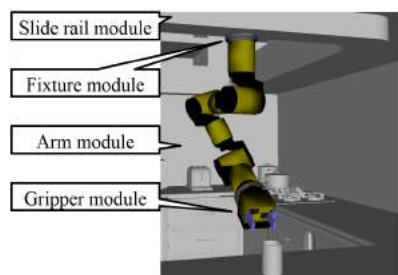


Fig. 2: The modular home robot to work chores in the kitchen.

1)．ただし，これらのハウスワークはコーヒーマカ，トースタ，電子レンジを用いて調理する．

本稿において朝食準備作業の最終目標は以上の調理を終えることとする．また，一般的な家庭を想定するため，電子レンジなどのような家電製品が1台しかないと仮定し，温野菜，目玉焼きの調理は並列に実行することができない．

4.3 シミュレーション結果

図3にシミュレーション結果として各時刻におけるハウスワークの占有遷移図を示す．このとき，縦軸は各ハウスワークがどの家電製品に占有されているかを表す．ただし，Noneのみ家電製品に占有されておらず，作業が進行していない状態である．また，図4にロボットが朝食を準備している様子を示し図5にロボットが各シーンでキッチンのどこで作業しているか，キッチン上面から見た図を示す．

5 総当り計算との比較検証

本システムが再構成した作業の計画が妥当であるか分からないため，ハウスワークの組み合わせを総当り計算することで最も作業時間の短い組み合わせパターンを求める．そして，本システムが再構成した作業の作業時間とを比較検証する．

5.1 総当り計算方法

今回想定した四つのハウスワークから構成される朝食準備作業においては，ロボットによるハウスワークの占有が二度行われ，家電製品によるハウスワークの占有は一度目のロボットによる占有に依存して一度のみ行われる．そこで，朝食準備作業全体を家電製品の占有の終了時を境目に二分割し，それらすべてのハウスワークの組み合わせパターンを算出して最も作業時間が短い組み合わせパターンを導く．

このときの組み合わせは $(4 \times 2)!$ となるが，組み合わせパターンの中には実行できないパターンが存在するため，それらは除外する．

5.2 計算結果

総当り計算の結果，40320の中から840通りのパターンが抽出できた．図3(a)に本システムにおいて再構成した作業の遷移結果を示し，図3(b)に総当たり計算により導出した作業の遷移結果の中で最も作業時間が短かった組み合わせパターンを示す．図3(a)が作業時間は18.2 minであり，図3(b)の作業時間は18.1 minであった．

両作業時間の差が十分小さいことから，本アルゴリズム

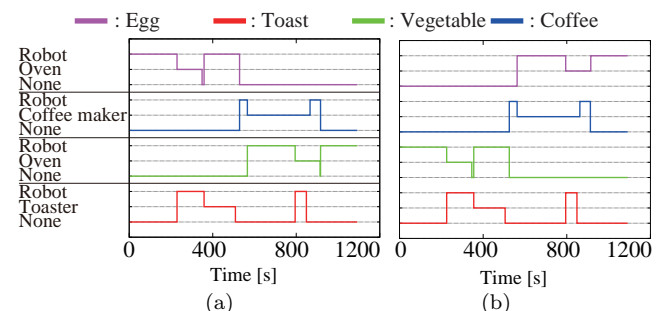


Fig. 3: The transition results: (a) by our algorithm and (b) by brute force calculation.

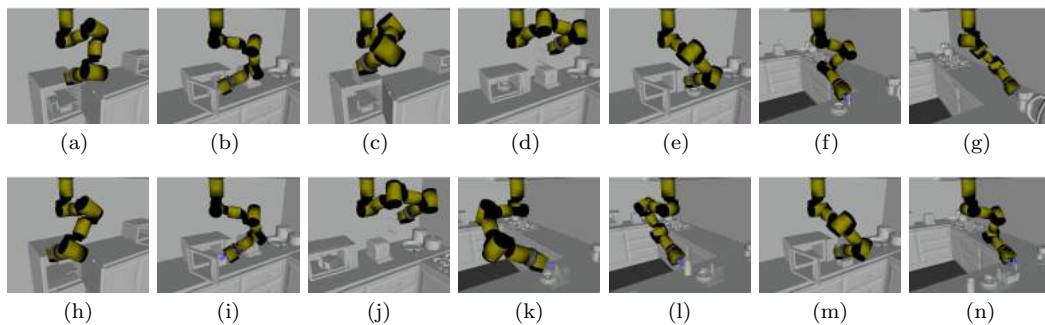


Fig. 4: Simulation: (a), (b), (e) and (f) working an egg, (c), (d), (j) and (k) working a toast, (h), (i), (m) and (n) working a vegetable, (g) and (l) working a coffee.

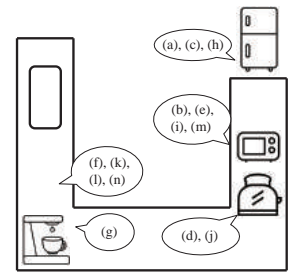


Fig. 5: The kitchen.

によって精度の高い近似解が得られた。また、本アルゴリズムによって再構成された組み合わせパターンは、すべての組み合わせの中で2番目に作業時間の短いパターンであり、最も作業時間の短いパターンとの違いは、目玉焼きと温野菜の実行順番が入れ替わっていることであった。そして、四つの作業を逐次実行した場合には、29 minの作業時間がかかった。

以上により本稿で提案した評価式とアルゴリズムが想定した家庭内作業を作業効率の高い状態で再構成できることがわかった。

5.3 考察

本ソフトウェアでは、家電製品の休止時間、道具の使用頻度、遷移によって生じる移動距離の三つを重み付け評価する。したがって、これらのアルゴリズム、評価式は、どのハウスワークを作業することが優位となるのかを基準として基準に遷移を判断している。

このことから本手法では作業全体を俯瞰して計画できないため、全体の作業時間だけでなく、ロボットの総移動距離も短くできないという問題が存在する。例えば、あるハウスワークをロボットが占有し、移動したとする。このとき、ロボットがどのハウスワークの作業開始場所から遠くなり、すべてのハウスワークの評価値が過大になる可能性がある。もし、移動速度が遅い移動ロボットがこれを繰り返した場合、移動時間が増加してしまう。つまり、本手法ではハウスワーク内の移動に関して評価を行っていないため、ハウスワークが長距離の物体を搬送するb-タスクを持っていた場合、今回のシミュレーションのように作業効率の高い作業を再構成できない可能性がある。しかし、今回の朝食準備作業ではキッチンだけの局所的な移動、スライドレールモジュールの想定最高速度が0.5 m/sであったことからこの影響を受けなかった。

6 結言と今後の課題

複数の家庭内作業を再構成するための家庭内作業計画システムを開発した。そのために、我々は家庭内作業を細分化し、状態機械として実行できるようにデータ構造化した。それを評価式に基づいてデータ間を遷移することで作業の再構成を可能にした。本稿では四つの料理から構成される朝食準備作業を再構成し、遷移結果について比較検証した。その結果、作業時間が作業を逐次実行したときより11 min

短縮され、その遷移結果が妥当であることがわかった。

今後の課題としては考察で述べたアルゴリズム、評価式の改善と、生成された作業計画の最適化が挙げられる。後者においては、例えば、目玉焼き、温野菜、トーストを調理する際、それぞれが冷蔵庫のドアの開閉のためのb-タスクを持っており、人であれば冷蔵庫を開けた後、一度に調理対象物を別の場所に置いた後で、作業を進めることが考えられる。しかし、本システムでは、それぞれのハウスワークが冷蔵庫のドアを開閉するというb-タスクを持つため、何度もドアを開閉することになるため、これらは省略されることが望ましい。

文 献

- [1] T. Tsuchiya, Y. Shiraki, S. Sekido, A. Yamamoto, D. Sato, and D. N. Nenchev, "Modular Home Robot System Based on the MMM Concept—Design Instance with Detachable Symmetric Arm Module," in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatron.*, 2013, pp. 280–285.
- [2] 関戸 佐知, 黒山 佑太, 新良貴 陽平, 佐藤 大祐, 金宮 好和, "モジュラーホームロボットによる環境音を利用した動作計画に基づく朝食準備作業", 日本ロボット学会学術講演会, 1N1-04, 2014.
- [3] Y. Pyo, K. Nakashima, S. Kuwahata, R. Kurazume, T. Tsuji, K. Morooka and T. Hasegawa, "Service robot system with an informationally structured environment," *Robotics and Autonomous Syst.*, vol. 74, pp. 148 – 165, Dec., 2015.
- [4] 鎌田 一史, 古田 悠貴, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸, "日常生活支援ロボットにおける認識信頼度に応じた動作の遷移による動作並列化システムの研究", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P2-T10, 2015.
- [5] 岡田 朋也, 松島 由紀子, 船曳 信生, 中西 透, 渡邊 寛, "手作り料理支援システムの調理ガイダンス機能のためのAndroidアプリケーション", 電子情報通信学会, vol. 112, no. 379, pp. 91–96, 2013.
- [6] (2015, Dec. 12) サイバーワークデザイン研究所 [Online]. Available: <http://homepage1.nifty.com/matufuji/index.html>
- [7] (2015, Dec. 12) ICF Browser [Online]. Available: <http://apps.who.int/classifications/icfbrowser/>
- [8] J. Bohren, S. Cousins, "The SMACH High-Level Executive," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 17, no. 4, pp. 18–20, Dec., 2010.
- [9] 久保 幹雄, "組合せ最適化とアルゴリズム", 共立出版株式会社, 2000, pp. 14–15.