

# 特異点適合法を用いたモジュラーホームロボットによる 扉開閉作業の実現

山本 明弘, 関戸 佐知, 佐藤 大祐, 金宮 好和 (東京都市大学)

## Door Opening and Closing Motions With a Modular Home Robot Based on the Singularity-Consistent Method

Akihiro Yamamoto, Sachi Sekido, Daisuke Sato, and Yoshikazu Kanamiya (Tokyo City University)

**Abstract:** Home robots have to be able to open and close doors and go through doorways because they have to change the location to do housework. While opening/closing doors, the robot manipulator may easily arrive within the vicinity of a kinematic singularity. In this paper, we show that this problem can be alleviated via the Singularity-Consistent method. As a result, our modular home robot can make use of its full workspace while opening and closing doors. Also, the respective motions of the robot can be generated autonomously.

### 1 緒言

ホームロボットが家事を行う場合、部屋の移動や家具を操作するために扉を自律的に開閉することが必要であり、その作業においては、周囲の環境、操作対象物の扱い方、ロボットの有する機構など、さまざまな条件を考慮した動作が生成されなければならない。このような条件下においては、マニピュレータの特異点やその付近に近づく運動が必要とされる場合が多くなることが容易に予想できるが、その場合においても、関節速度が発散しロボットが暴走することは防がなければならない。

本稿では、特異点に対して関節速度を発散させずに動作経路を追従することが可能な特異点適合法を用いたモジュラーホームロボットによって、扉の開閉作業を実現することを目的とし、ロボットによる自律的な扉の開閉を実現するために扉の開閉動作を解析、分割し、必要となる運動条件を考慮しながら動作生成を実現することについて述べる。

### 2 先行研究

ロボットによる扉の開閉についての研究例は複数あるが、扉そのものを開く動作に注目したものと、扉を開いて出入口を抜け移動することに注目したものの二つに大きく分けられる。前者では、力・トルクセンサを使用してコンプライアンス制御を行い、モデル誤差などに起因して発生する手先の過負荷を防ぎながら、扉の動作方向を推定し、扉を開く動作を実現する研究例が多い [1][2]。後者では、オムニホイールなどを利用した全方向移動ベースを有するロボットが、扉にドアクローザが備わっていない開き戸を操作して出入口を通り抜ける研究 [3] や、手先に加わる負荷に応じて 2 足歩行の周期が変化する手法を用いて、人型ロボットがドアクローザの付いた扉を押し開いて通り抜ける研究が行われてきた [4]。しかし、ロボットが扉を開閉する動作を獲得するためには、ドアクローザの有無や周囲の環境に起因する動作制約、ロボットの有する移動機構の違いを考慮することなど、さまざまな課題を解決する必要がある。

我々は、Fig. 1(a) に示すモジュラーロボットシステムを採用したホームロボットによって家庭内作業の実現

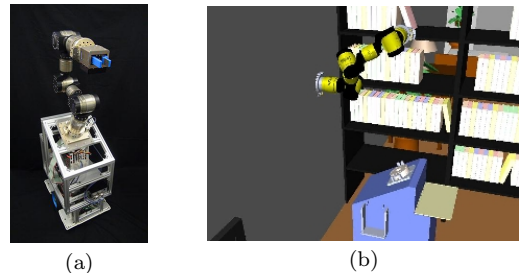


Fig. 1 Modular home robot; (a) mobile manipulator and (b) task example for a single-manipulator robot.

を目指している [5]。Fig. 1(b) のように、機構が対称構造となっているマニピュレータが、モバイルベースから壁などに取り付けられたフィクスチャに乗り移って独立に動作する特徴を持っており、マニピュレータのベース部と手先部を切り替えて制御すること、また、この切り替えと、周囲の環境状態や操作する対象物などを考慮した柔軟な動作生成を実現することが必要である。そのため運動生成には、マニピュレータの特異点問題を考慮しやすい特異点適合法 [6] を用い、マニピュレータ可動領域を十分に利用した動作生成を実現する。本稿では、このモジュラーホームロボットによる扉の開閉作業の実現が研究課題である。

### 3 特異点適合法によるマニピュレータの逆運動学計算

マニピュレータの動作を生成する際には、手先の位置・姿勢の空間で軌道を決定し、逆運動学を解くことによって関節空間の動作を生成する。しかし、その計算において特異点の問題が存在し、速度が発散するためマニピュレータの動作範囲を有効に使うことはできない。そのため、速度を発散させずに特異点を通過することができる逆運動学解法である特異点適合法を用いて動作を生成する。

特異点適合法とはマニピュレータの手先を特異方向の運動と非特異方向の運動に分解して別々に特異点適合法を適用する手法である。Fig. 2 に示すように、仮想直動関節と球面関節による等価なモデルを導入する。

手首の速度を表現する関節速度  $\dot{q}_p$ 、手首速度の大きさを決定する値  $b_z$ 、仮想直動関節による運動を取り除

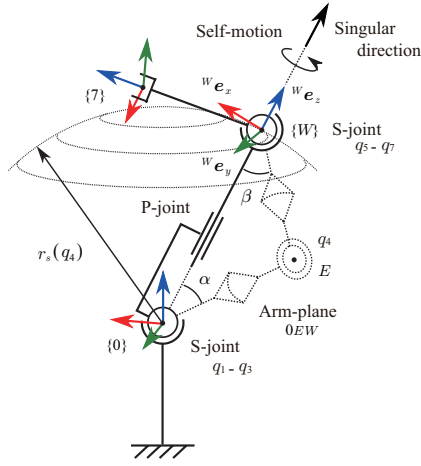


Fig. 2 Manipulator model of singularity-consistent method.

いたヤコビ行列  $\bar{J}_v^{mod}$ 、手首の  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向の速度をそれぞれ  ${}^W\dot{p}_x$ 、 ${}^W\dot{p}_y$ 、 ${}^W\dot{p}_z$ 、特異方向の運動を与えるベクトルを  ${}^W\mathbf{n}_z$ 、冗長運動を表す関節速度ベクトルを  $\mathbf{n}_{sm}$ 、冗長運動の大きさを表す定数を  $b_{sm}$  とすると手首の速度を表す逆運動学は以下の式で表される。

$$\dot{\mathbf{q}}_p = b_z \left( [\bar{J}_v^{mod}]^+ \begin{bmatrix} {}^W\dot{p}_x \\ {}^W\dot{p}_y \end{bmatrix} + {}^W\mathbf{n}_z {}^W\dot{p}_z \right) + b_{sm} \mathbf{n}_{sm} \quad (1)$$

${}^W\mathbf{n}_z$  は分母に  $\sin q_4$  を含んでおり、手首速度を決定する値  $b_z$  に対して特異点付近において  $\sin q_4$  を含めることによって、分母の  $\sin q_4$  を打ち消すことができ、特異点において速度が発散しなくなる。また、 $b_z$  は以下のように与えることによって特異点領域の境界においてなめらかに補間することができる。

$$b_z = \begin{cases} \sin 2^n q_4 & q_4 < \epsilon \\ \text{sgn}(\sin q_4) & q_4 \geq \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $\epsilon$  は特異点領域を表す閾値である。

手先の姿勢に関しては姿勢運動を表現する関節速度を  $\dot{\mathbf{q}}_w$ 、手先角速度と関節の角速度の関係を表すヤコビ行列を  $\bar{A}_w^{mod}$ 、手先姿勢の角速度を  ${}^W\boldsymbol{\omega}_7 = [{}^W\omega_{a,x}, {}^W\omega_{a,y}, {}^W\omega_{a,z}]^T$  とすると、手先の角速度を表現する逆運動学は以下の式で表される。

$$\dot{\mathbf{q}}_w = (\bar{A}_w^{mod})^+ {}^W\boldsymbol{\omega}_7 \quad (3)$$

これらの式を用いることによって特異点やその近傍においても速度が発散することなく、運動の方向に正確に追従することができる。

#### 4 扉の開閉および通り抜け

部屋の出入口のドアクローザのついた戻り力のある開き戸をモデルとし、扉は引き開ける方向に動作することを前提とした。また、ドアクローザの機能により、一定角度以上扉を開くと決められた角度で扉が静止する。

ドアクローザの機能で静止する角度まで扉を開かない場合、扉が自動的に閉じるため、開閉および通り抜け動作中は手先やモバイルベースを用いて押さえる必要があ

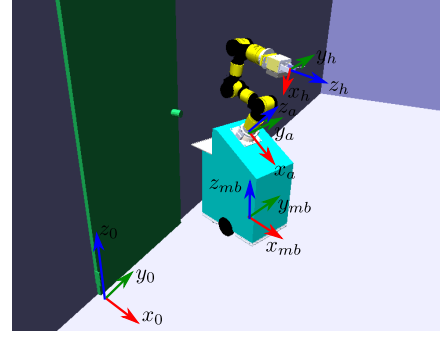


Fig. 3 Coordinate systems of the home robot.

る。双腕の場合は片手で扉を開き、もう一方の手で扉を押さえながら抜けるといったことを行うことができるが、単腕のロボットを使用する場合、2 本目の腕の代わりにモバイルベースを利用して扉を押さえることが必要となる。

#### 4.1 モバイルベースとマニピュレータの速度指令値の決定

Fig. 3 に動作を生成する際に使用するモバイルベースの座標系  $F_{mb}$  およびマニピュレータの座標系  $F_a$  を示す。モバイルベースとマニピュレータを連動させて動作させる場合、前節で示した式をマニピュレータのみに対して適用すると、特異点付近では手先が目標軌道に追従しない。基準座標系  $F_0$  から見た手先速度を  $\boldsymbol{\nu}_{ref} = [\dot{p}_x, \dot{p}_y, \dot{p}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 、モバイルベースの動作により発生する手先の速度を  $\boldsymbol{\nu}_{mb} = [\dot{p}_x, \dot{p}_y, 0, 0, 0, \omega_z]^T$ 、マニピュレータの動作により発生する手首の速度を  ${}^W\boldsymbol{\nu}_a = [{}^W\dot{p}_x, {}^W\dot{p}_y, {}^W\dot{p}_z, {}^W\omega_{a,x}, {}^W\omega_{a,y}, {}^W\omega_{a,z}]^T$ 、基準座標系から手首の座標系までの回転行列を  ${}^0_W\mathbf{R}$  としたときに、モバイルベースとマニピュレータの速度は特異点を通らない場合は、比率  $\mathbf{K}_p = \text{diag}[k_{px}, k_{py}, 0, 0, 0, k_{rz}]$  を用いて以下の式となる。

$$\boldsymbol{\nu}_{mb} = \mathbf{K} \boldsymbol{\nu}_{ref} \quad (4)$$

$${}^W\boldsymbol{\nu}_a = {}^0_W\mathbf{R}(\boldsymbol{\nu}_{ref} - \boldsymbol{\nu}_{mb}) \quad (5)$$

ただし、扉をマニピュレータで押さえながらモバイルベースを動作させる場合、(4) を使用せずに直接  $\boldsymbol{\nu}_{mb}$  に速度指令を与え、(5) を用いてマニピュレータの動作を決定する。このとき手先の速度は  $\boldsymbol{\nu}_{ref} = 0$  となる。

#### 4.2 扉の開閉および通り抜けシミュレーション

Fig. 4 にホームロボットによる扉の開閉および通り抜けの一連の動作を示す。

このシミュレーション内では、扉に戻る力があることを考慮しているため、扉のドアノブを把持した状態で、モバイルベースを扉の裏に回り込ませる動作や扉をモバイルベースから離れた状態で静止させモバイルベースの位置・姿勢を変える動作が必要となる。その際に、前章で示した条件式を用いることによって扉を静止させた状態でモバイルベースの動作を実現した。

#### 4.3 特異点におけるマニピュレータの動作

扉を開いた際にドアクローザの機能で扉が静止するところまで開いてしまったような場合、ドアノブを放して

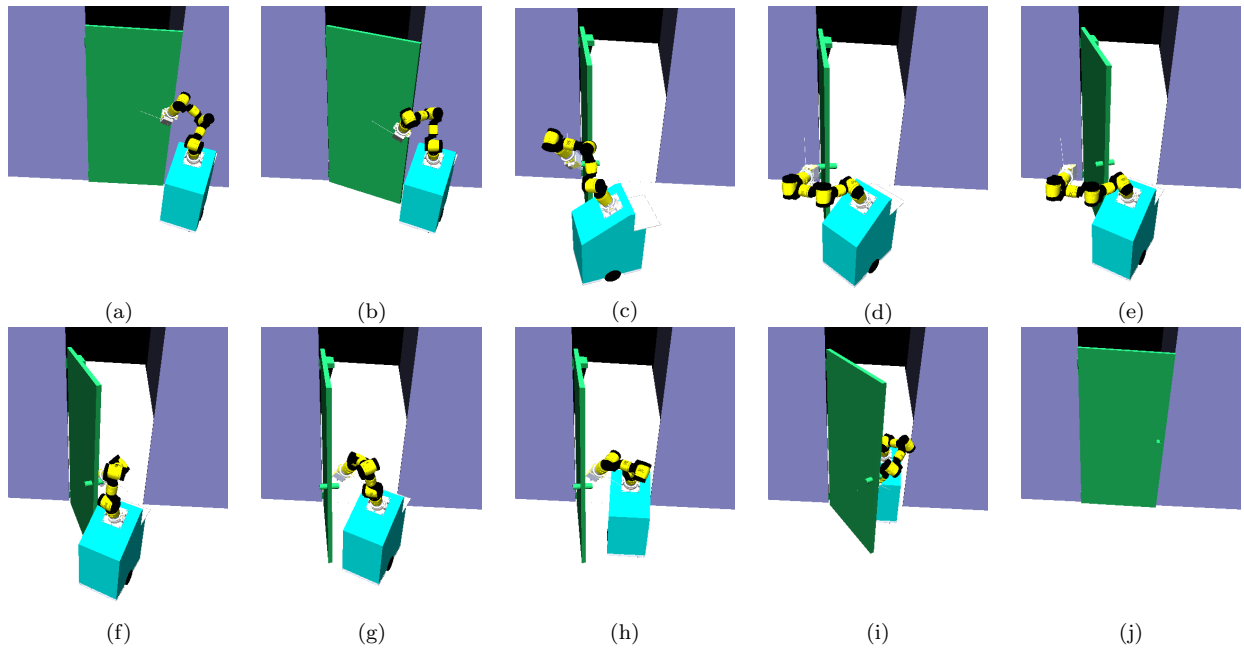


Fig. 4 Simulation of opening and going through the door by the home robot; (a) the home robot grasps the door knob, (b) opens the door a little, (c) opens the door to be able to go through the doorway, (d) changes orientation by the rotation mechanism of the door knob, (e) releases the door knob and keeps the position of the door with the mobile base, (f) holds the door with the manipulator, (g) the mobile base moves as the door is held by the manipulator and (h) the robot goes through the doorway.

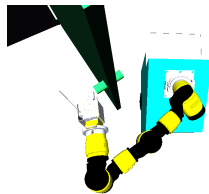


Fig. 5 Example of a singularity configuration when the home robot opens the door.

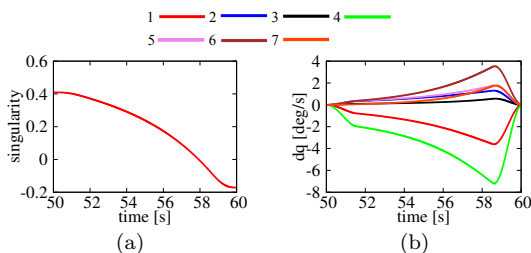


Fig. 6 Manipulator motion when the home robot opens the door; (a)  $\sin q_4$ , (b) joint angular velocities.

も扉が静止したままとなる．次の動作に移るために手先をドアノブから離す必要があるが，その際に Fig. 5 に示すように特異点に入る可能性がある．しかし，適用した特異点適合法により，Fig. 6 に示したようにマニピュレータは速度が発散することなく動作する．

#### 4.4 考察

マニピュレータのみの動作において特異点適合法を用いることによって特異点付近における動作が可能となっている．しかし，モバイルベースとマニピュレータの協調動作中においても特異点に入る可能性があるため，モ

バイルベースの動作まで含めた逆運動学モデルに拡張する必要がある．また，ロボットが自律的に扉の開閉動作を実現するため，扉の開閉動作手順をモデル化して，作業動作を生成するシステムを構築する必要がある．

#### 5 結言

特異点適合法を用いることによってマニピュレータの可動範囲を有効に使用し，扉の開閉を行うための各手順における条件を示し，その条件に基づいた立式を行うことで扉の開閉および通り抜け動作の生成を行った．

#### 参考文献

- [1] A. Jain and C. C. Kemp, "Pulling Open Doors and Drawers Coordinating an Omni-directional Base and a Compliant Arm with Equilibrium Point Control," *2010 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2010, pp. 1807–1814.
- [2] Y. Karayiannidis, C. Smith, F. E. Vina, P. Ogren, and D. Kragic, "Model-free robot manipulation of doors and drawers by means of fixed-grasps," *2013 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2013, pp. 4485–4492.
- [3] S. Chitta, B. Cohen, M. Likhachev "Planning for Autonomous Door Opening with a Mobile Manipulator," *2010 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2010, pp. 1799–1806.
- [4] 梶田, 阪口, 森澤, 中岡, 吉安, 金子, 金広, 横井, "負荷感応適応歩容を用いたヒューマノイドの押しドア通過", 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, AC1B3-04, 2014.
- [5] 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. Advanced Intelligent Mechatronics*, 2013, pp. 280–285.
- [6] 滝, 金宮, "特異点適合法に基づく S-R-S マニピュレータの逆運動学解法", 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, AC2I1-02, 2013.