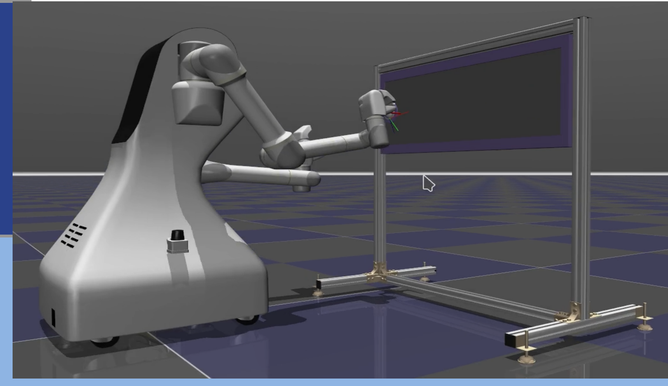
# ベイズ最適化を用いた移動マニピュレータによるドア開け動作の生成

## Generation of Door Opening Motion in a Simulated Mobile Manipulator by Bayesian Optimization


アルホニジャガルシア　フランシスコヘスス　（静岡大学）　　小林　祐一　（静岡大学）

Francisco Jesús ARJONILLA GARCÍA (Shizuoka University)　　Yuichi KOBAYASHI, (Shizuoka University)

## 諸言

- 生産現場の需要:
  - 多品種少量生産
  - 柔軟性（製品の変更に対する迅速な生産システムの調整）
- 協働ロボットに対する要求:
  - 新しいタスクに対する設置コスト（人による教示等の時間と作業量）
  - 追加タスクに対する変更コスト（人による教示等の時間と作業量）
- 関連アプローチとその問題:
  - 教師あり学習（深層学習）[2]: 人による教示コスト
  - 強化学習[?]: 試行錯誤の回数が膨大

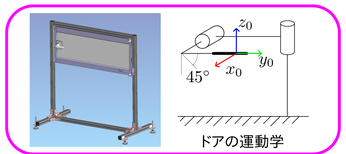

## Abstract

We propose a new method for solving the learning problem in the door opening task based on Bayesian optimization. The method is evaluated in a simulation of a door with rotating handle and an omnidirectional mobile robot with two 6-DoF manipulators. In this method, the objective function of Bayesian optimization runs a simulation where the robot attempts to open the door by moving the grip in a direction indicated by a five-dimension problem space. The value of the objective function is the time until the robot encounters forces or torques above a certain threshold. The results indicate that learning the sequence of movements necessary to open a door requires no more than 15 trials for each movement.

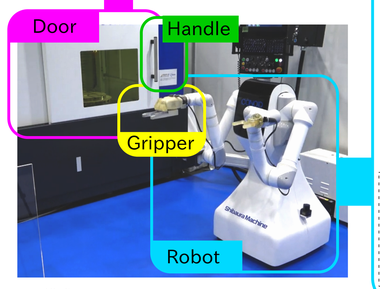

## 研究の目的

- ドア開け動作のような環境との拘束が発生する動作の自動生成
  - 明示的な教示なし（拘束のない運動方向の発見）
  - 教示者の補助なく，ロボットの再設置を迅速化
- 提案するアプローチ:
  - ロボット運動が環境に拘束される性質を利用
  - ベイズ最適化により「柔らかく動ける方向」を探索
- 検証タスク:ドアノブひねり+ドア開けを含む一連の動作の獲得

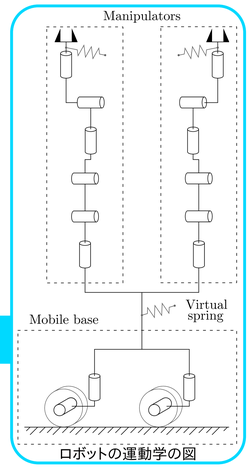
## 問題設定




ドアの運動学




（本研究はシミュレータのみ）　実機の実験

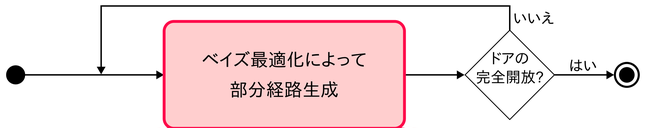


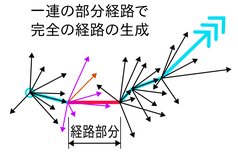

ロボットの運動学の図

- システム構成:
  - 6自由度アームを持つ全方向移動ロボット[4]
  - バネ付きドアノブと垂直ヒンジからなるドア
  - ドアのモデル・力学的相互作用は未知
  - 観測:手首における6自由度力覚センサ（拘束力）
- 条件・目的:
  - 初期状態:ドアノブをハンドにより把持（シミュレーション上では固定）
  - 目標:過大な拘束力を避け，初期状態から離れた位置・姿勢に到達

## 部分経路の連結による動作生成

- ベイズ最適化は確率的な探索を行うため，
  一定回数の探索では求める部分経路が得られない可能性がある
- 特に，ドア開け動作経路は細かい曲線から構成される
  - →部分経路の生成を繰り返すことで，曲線経路の生成が可能



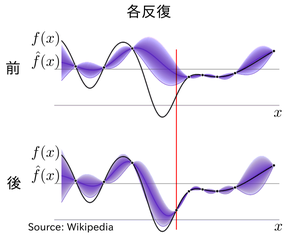




獲得された経路（全体）
獲得された部分経路
獲得関数に
基づいた探索

## ベイズ最適化を用いた部分経路の生成

### ベイズ最適化とは?

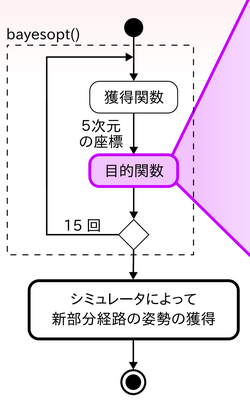
- あるブラックボックスとして実数値関数は目的関数と呼ばれる
- ベイズ最適化は目的関数の評価にコストが掛かる時に用いる
- 獲得関数は目的関数モデルの改善に基づいて次の反復の座標値を計算する
- ベイズ最適化は逐次的に目的関数の最大・最小の値を探索する $\min f(x)$?




- 獲得関数の値 $\arg\min_x f(x)$
- 目的関数の平均
- 目的関数の確率分布 $\hat{f}(x)$
- 目的関数の現実の値 $f(x)$
- 座標の標本の評価済み

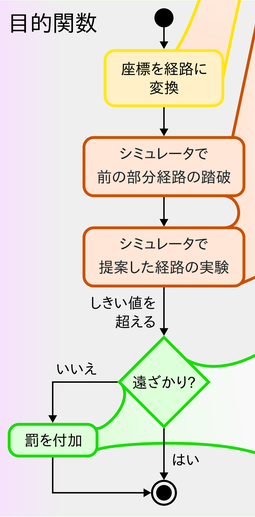
### 本研究の適用

- 目的関数はロボットの手先がどんな経路を追尾したらドアが開けるかという評価する
- MATLABの「bayesopt()」[7] というライブラリーを用いる




最後に手先の位置と姿勢を取得のために

## 目的関数

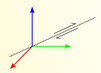



## 座標を経路に変換

3次元の空間において位置と姿勢の直線: 5自由度 ⇒ ベイズ最適化の問題空間は5自由度で -1 から +1 まで 5つの変数である:

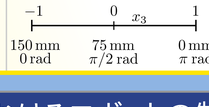
$$\vec{x} = (x_1, \ldots, x_5) \in [-1, 1]^5$$

$(x_1, x_2)$: 並進の軸の定義



最大並進: 150 mm

$(x_3)$: 並進と回転の比率

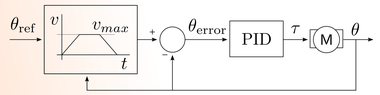



$(x_4, x_5)$: 回転の軸の定義

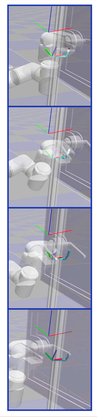
最大回転: π rad

## シミュレータにおけるロボットの制御

- シミュレータは剛体間のソフトコンタクトによる静的・動的摩擦のモデリングに基づくMuJoCo物理エンジン [8] を用いる
- 全ロボットの逆運動学は「Inverse kinematics with prioritized multiple targets」[6]に基づく
- 重力補償・台形のプロファイル速度とPID制御を用いてマニピュレータの制御を行う




- 手先は獲得関数により導出される経路に沿った運動を試行する
- ロボットの手先はドアの把持により拘束される
- 手先運動中，力覚センサの力・トルクが設定したしきい値を超えた時に運動を中止する（最大4秒）




## 目的関数の定義

- 目的関数の値は提案した部分経路の動作開始位置・姿勢からセンサーの値がしきい値を超えるときまで期間である

$$0\,\mathrm{s} < t < 4\,\mathrm{s}$$

- センサーの値がしきい値を超えるときに動作開始位置・姿勢から離れなければ、目的関数に罰を追加する
- 距離は剛体変換関数をSO(4)の回転[1]に変更し，SO(4)における角度により評価する

$$t_b = \begin{cases} 0\,\mathrm{s} & \text{離れたとき} \\ 5\,\mathrm{s} & \text{近づいたとき} \end{cases}$$

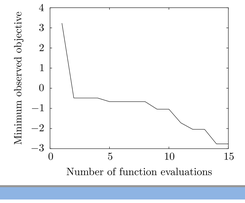
- したがって、目的関数（コスト関数）は右式で定義される:

$$f(\vec{x}) = -t + t_b$$

## シミュレーションによる評価実験の結果

- ドアを開けるタスクが成功された
- ベイズ最適化の反復は15回に十分された
- ドアノブの回転: 2つの部分経路により獲得された
- ドアの回転:3-6個の部分経路により獲得された
- したがって、この研究の問題設定なら約6つの部分経路を求められた

部分経路生成における
目的関数値の遷移




## 結言

- 本研究では，ベイズ最適化により行う方法を提案した
- ドア開け作業を例に取り，未知環境におけるロボットの拘束運動生成
- 物理シミュレーションにおいてもアクチュエータやセンサのノイズ・外乱を考慮することが可能であり，不確実性を反映させた検証を通じて，実機での検証を行う
- 今後の課題として，実機ロボットを用いた実装・検証があげられる
- ドア開け作業以外の環境との拘束を有する運動として，バルブの回転，スライドドアの開閉などの動作における検証も行う

## 参考文献


[1] K. R. Etzel, J. M. McCarthy, "A metric for spatial displacements using biquaternions on SO(4),", *Proc. of International Conference on Robotics and Automation*, (1996).

[2] H. Ito, K. Yamamoto, *et al.*, "Efficient multitask learning with an embodied predictive model for door opening and entry with whole-body control," *Science Robotics*, vol.7, no.65, (2022).

[3] R. Garnett, "Bayesian optimization," *Cambridge University Press*, (2023).

[4] H. Kitagawa, T. Ohno, *et al.*, "Development of differential-drive steering system for omnidirectional mobile robot," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol.27, no.3, pp.343–349, (2009).

[5] M. Nishimura, H. Shimizu, *et al.*, "Door opening with mobile manipulator using force estimation," *Proceedings of the JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics*, 1A1-A07, (2022).

[6] M. Sekiguchi, N. Takesue, "Fast and robust numerical method for inverse kinematics with prioritized multiple targets for redundant robots," *Advanced Robotics*, vol.34, no.16, pp.1068–1078, (2020).

[7] https://mathworks.com/help/stats/bayesopt.html

[8] E. Todorov, T. Erez, *et al.*, "MuJoCo: A physics engine for model-based control," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.5026-5033, (2012).


## 謝辞


この成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP18002)2の結果得られたものである．
また，提案手法の構想にあたり助言をいただいた芝浦機械株式会社の中村陽一郎氏と東洋大学の山田和明氏に謝意を示す．