

動的感度解析に基づくロボスト投擲運動設計

– 平面3リンクマニピュレータによる実験検証 –

Robust Throwing based on Dynamic Sensitivity Analysis

-Experimental Evaluation using Three-link Manipulator-

正 岡田昌史 (東工大) 非 大庭翔太 (東工大)

正 土方 亘 (東工大)

Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology

Shota ONIWA, Tokyo Institute of Technology

Wataru HIJIKATA, Tokyo Institute of Technology

Throwing an object by a powered robot system is an effective way for object manipulation in long distance. The focus of the throwing is on the accuracy of the landing point with respect to model uncertainties or disturbances. So far, we have proposed a sensitivity analysis method of throwing with a feed-forward controlled manipulator, while feed-forward/back controlled one is considered in this paper. The dynamic sensitivity analysis method is developed based on the conventional method and its evaluation is executed by using a prototyped three-link manipulator. The effectiveness of the proposed method is evaluated and a robust throwing with low sensitivity is obtained that realizes small variance of the landing point.

Key Words: Robust trajectory design, Sensitivity analysis

1 はじめに

ロボットによる投擲は、それを行うロボット大きさに比べて物体を動かすことのできる範囲が広く、遠方への物体操作に関して有効な手段である。Tsukagoshi ら [1] は災害地での情報収集のためのセンサシステムを投げ込む方法を提案し、Fagiolini ら [2] は惑星探査などにおいてグリッパを投げることにより遠くの物体を取得する方法を提案している。これらの投擲において、投げられた物体の着地点の精度は重要な課題となる。

投擲物の着地点がずれる要因として、ロボットのモデル化誤差、動作時の外乱、初期姿勢の零点誤差による影響が考えられる。加藤ら [3] は、ロボットを目標の軌道に追従させる制御法の提案を行っており、有隅ら [4] はひもを取り付けた物体を投擲し、ひもの張力制御によって物体の軌道を修正して目標点に到達させる手法を提案している。しかし、モデル化誤差に対するロボスト安定性と外乱に対するロボスト制御性能はトレードオフの関係にあることから、フィードバック制御だけでは適切な運動が得られないことが多い。また、ロボットの初期姿勢の設定はエンコーダなどのセンサの零点位置の調整を含み、これはフィードバック制御で補正が困難であるにも関わらず、動的な投擲運動ではこれが運動の再現性、すなわち、着地点の精度に大きく影響する場が多い。これに対処するために、治具を用いた零点調整、エンコーダのZ相の利用、アブソリュートエンコーダの利用などが考えられるが、いずれの場合も初期段階でセンサの位置・向きに合わせた零点調整が必要である。これらに対し、我々は投擲の仕方によ

差により A' の投擲となってしまう、その影響で着地点がずれる様子を表している。一方、(b) では B の投擲を試み B' となってしまうにも関わらず、着地点のずれは極めて小さい様子を表している。このように投擲の仕方を変えることで着地点の精度を変化させることが可能であり、これは着地点の零点誤差に関する感度が小さい投げ方であることを意味している。

本研究では、参考文献 [5] の手法を実験によって検証することを目的とする。特に、従来はフィードフォワード制御を仮定した感度解析手法であったが、本研究では安全性のためフィードバック制御も併用し、そのためにフィードバック制御を導入した動的感度解析手法へと拡張する。また、平面3リンクマニピュレータを用いた実験を通して、機械的な誤差の影響を元にとつきを統計的に解析し、感度解析に基づいた投擲により着地点の精度が向上することを示す。

2 マニピュレータの投擲軌道設計

ロボット手先の初期位置 $x(0)$ 、初期速度 $\dot{x}(0)$ 、および投擲運動に要する時間 t_r 、手先位置 $x(t_r)$ 、速度 $\dot{x}(t_r)$ が

$$x(0) = [x_0 \quad y_0]^T, \quad \dot{x}(0) = 0 \quad (1)$$

$$x(t_r) = [x_r \quad y_r]^T, \quad \dot{x}(t_r) = [\dot{x}_r \quad \dot{y}_r]^T \quad (2)$$

で与えられているとする。投擲点での手先速度は投擲された物体が描く放物線が着地目標点を通ることと与えられる。また、投擲点が物体をリリースする点であることから $\ddot{x}(t_r)$ が決まり、さらに、Fig.2 のように、投擲動作中に物体は手先から垂直方向の力

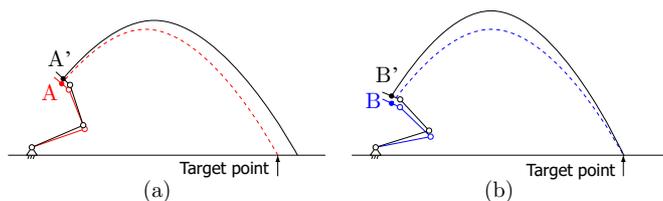


Fig.1 Locus of objects with joint error

て運動のロボスト性を確保する方法を提案してきた [5]。例えば、Fig.1(a) では図の A の投擲を試みたがロボットの関節の零点誤

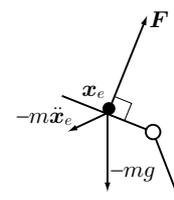


Fig.2 Orientation of end-effector through the throwing

F のみを得ること、マニピュレータが滑らかに動き出して物体を投擲することを条件とすると、

$$\ddot{x}(0) = \dot{x}^{(3)}(0) = \dot{x}^{(4)}(0) = 0, \quad \ddot{x}(t_r) = [0 \quad -g]^T \quad (3)$$

が得られる。そこで、物体を投擲するまでの手先の位置 $x(t)$ を時間の 7 次多項式で表し、境界条件から一意に定める。

3 投擲の動的感度解析

3.1 フィードフォワード制御における感度解析

まず、参考文献 [5] で提案されている感度解析手法について述べる。ロボットの運動方程式が以下の状態方程式で表されているとする。

$$\dot{q} = f(q) + g(q)\tau, \quad q = [\theta^T \quad \dot{\theta}^T]^T \quad (4)$$

なお、 θ は各関節の角度である。マニピュレータの手先軌道と逆動力学解析により得られる駆動トルク τ を用いて運動方程式を軌道上の点 q_i 周りで線形化し、

$$\dot{q} = A_i q + B_i \tau + C_i \quad (5)$$

さらに離散化し、

$$q_{k+1} = A_k^d q_k + B_k^d \tau_k + C_k^d \quad (6)$$

再帰計算 (積分に相当) することで投擲時の状態 q_N は初期状態 q_1 と各時刻での入力トルク τ_k を用いて

$$q_N = A q_1 + B [\tau_1^T \quad \dots \quad \tau_N^T]^T + C \quad (7)$$

と表される。これより、 q_N の q_1 に関する感度は

$$S_1 = \frac{\partial q_N}{\partial q_1} = A \quad (8)$$

で得られる。さらに、投擲点における手先位置・姿勢 $x \cdot \phi$ 、速度 $\dot{x} \cdot \dot{\phi}$ の状態 q に関する感度 S_2 、および、投擲物の着地点 L の $x, \phi, \dot{x}, \dot{\phi}$ に関する感度 S_3 から、 L の q_1 に関する感度 S は

$$S = \frac{\partial L}{\partial q_1} = \frac{\partial L}{\partial x_N} \frac{\partial x_N}{\partial q_N} \frac{\partial q_N}{\partial q_1} = S_3 S_2 S_1 \quad (9)$$

によって得られる [5]。ただし、 S_2 はロボットの関節角と手先位置の運動学の関係、 S_3 は物体の軌道が放物線になることから容易に得られる。

3.2 フィードバック/フォワード制御における感度解析

いま、ロボットの各関節がトルクのフィードフォワード制御に加え関節目標軌道 q^{ref} に対して

$$\tau = K(q^{ref} - q) \quad (10)$$

のように PD 制御されているとする。このとき、式 (7) は

$$q_N = A' q_1 + B' \begin{bmatrix} \tau_1 + K q_1^{ref} \\ \vdots \\ \tau_N + K q_N^{ref} \end{bmatrix} + C' \quad (11)$$

と変形される。ここで、関節角度 $\theta(0)$ にセンサの零点調整誤差 Δq があるとすると、Fig.3 に表されるように q^{ref} も変化する。さらに、式 (5) の A_i, B_i, C_i は q^{ref} の周りでの線形化によって得られるのでこれらも変化する。これらをまとめ、フィードバック制御を行う場合の q_N の q_1 に関する感度は、

$$S_1 = \frac{\partial q_N}{\partial q_1} = A' + \frac{\partial A'}{\partial q_1} q_1^{ref} + B' \begin{bmatrix} K \\ \vdots \\ K \end{bmatrix} + \frac{\partial B'}{\partial q_1} \begin{bmatrix} \tau_1 + K q_1^{ref} \\ \vdots \\ \tau_N + K q_N^{ref} \end{bmatrix} + \frac{\partial C'}{\partial q_1} \quad (12)$$

として求められる。なお、ここでは関節角度の零点誤差のみを考慮し、 $\partial q^{ref} / \partial q_1 = 1$ を用いた。

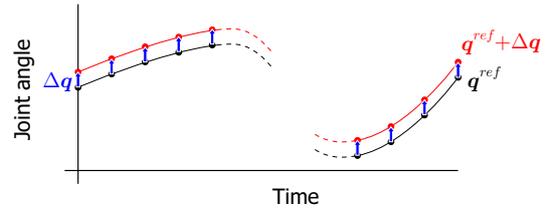


Fig.3 Change of trajectory with respect to zero error

3.3 感度解析結果

Fig.4 にある状況を設定し、2 つの投擲軌道 A, B を設定した。高さ 0.46m の台に固定された 3 リンクマニピュレータが 0.8m 離

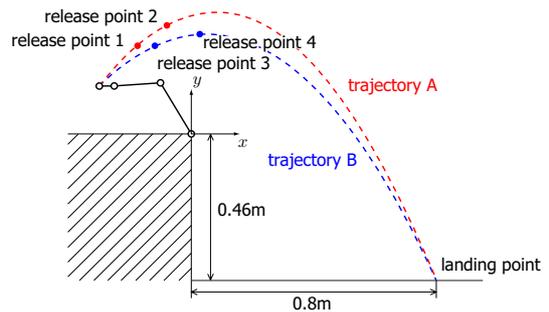


Fig.4 Configuration of throwing

れた点を着地目標点として物体を投擲する。それぞれの軌道上の点を投擲点とした場合の感度を Fig.5 に示す。なお、零点誤差は各関節に同様に存在するとし、感度はベクトルで得られるためそのノルムを I_{init} としたとした。また、マニピュレータの物理パラメータは次章にある実験装置の値を使用し、4 つの投擲点 1~4 は実験で用いる投擲点を表している。さらに、投擲可能領域は、実験装置の最大トルク・最大関節角速度に基づいて算出したもの (安全率 2) である。この結果から、投擲の仕方を変えることで感度が変化することが分かる。

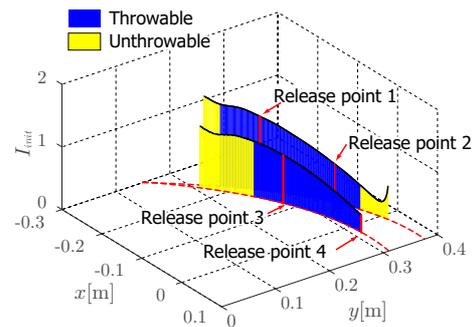


Fig.5 Sensitivity analysis

4 実験による感度の検証

4.1 平面 3 リンクマニピュレータ

Fig.6 に示す平面 3 リンクマニピュレータを用いて実験検証を行った。零点誤差により物体が転がることを防ぐために手先には小さな穴が空いておりそこに球を置いて投げる。各リンクは 60WDC モータ、ハーモニックギア (速比 50:1) により駆動され、モータのエンコーダにより回転角度が計測される。これにより、最大トルク 40Nm、最大回転数 240rpm でリンクが駆動され、エンコーダは 1000 パルス/周の分解能を持つものを 4 倍して用いており、 1.8×10^{-3} deg の精度で計測可能である。サンプリング

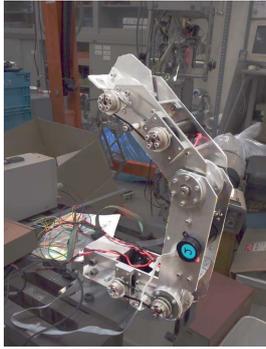


Fig.6 Prototype of three-link manipulator

ゲタイム $100\mu\text{sec}$ で、関節角度のPD フィードバック制御(トルク制御)とトルクのフィードフォワード制御を行った。はじめに治具を用いてエンコーダの零点調整を行った後、投擲運動を行う。

4.2 物体の着地点

Fig.4 の2つの放物線軌道 A, B 上のそれぞれ2つの点(投擲点1~4)を投擲点とした。まず、各投擲点で誤差を加えないで50回ずつ、その後、治具で零点調整を行った後に平均0, 分散 $(\pi/180)^2$ の正規分布に従うランダムな誤差をマニピュレータの零点誤差として加えて100回ずつの投擲を行った。物体の着地点はカーボン紙を用いて計測した。

Fig.7 に投擲点2で投擲を行ったときの様子を示す。(1)から(4)までが物体が手先を離れる前の様子であり、(5)から(9)は物体が飛ぶ様子を表している。なお、投擲は(1)から(4)までを約

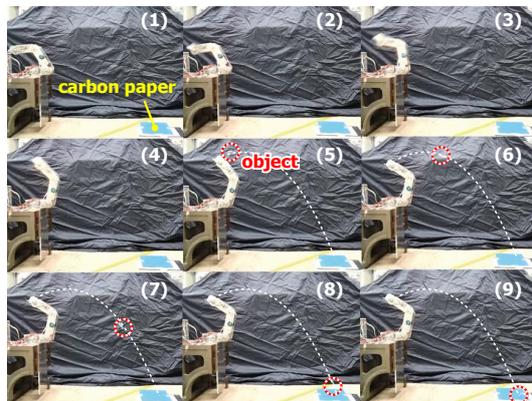


Fig.7 Snapshot of throwing

0.5秒程度で行われる(投擲点によって異なる)。

Fig.8 に、投擲物の着地点のばらつきを示す。左の2つ(a), (b)は投擲点1で投擲を行った場合、右の2つ(c), (d)は投擲点4で投擲を行った場合の結果である。赤(a), (c)は零点誤差がない場合、青(b), (d)は誤差を加えた場合を示す。いずれも着地点の目標点は $x = 0.8, z = 0$ である。なお、 z 方向のばらつきは x 方向の飛距離に比べ十分小さいとしこれを無視する。(a), (c)の結果から零点誤差を加えなくても着地点にはバイアスと小さなばらつきがあることが分かる。これは、治具を用いても小さな零点誤差があることを確認しており[6]、また、フィードフォワード制御におけるロボットのモデル化誤差、トルク制御(電流制御)におけるモータドライバの性能が原因と考えられる。これらは実験装置の特性によるばらつきと言える。Fig.5の結果から投擲点1よりも投擲点4における感度の方が小さい。この結果は(b)と(d)の比較において、(d)のばらつきが小さいことと整合性がとれる。

Fig.9 に投擲点1における着地点のヒストグラムを表す。すなわち、Fig.8-(a), (b)の x 方向のばらつきをヒストグラムで表し

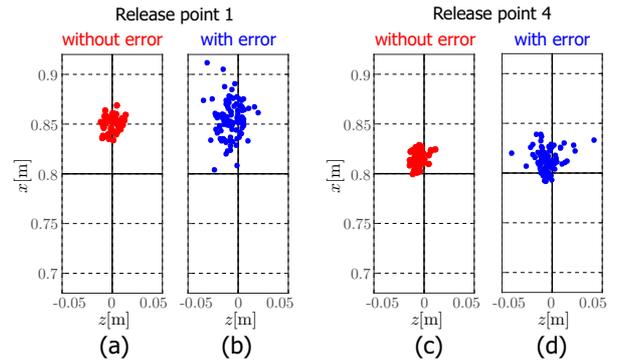


Fig.8 Landing points in experiments

たものである。なお、縦軸は投擲回数に合わせてスケールングを行った。同様に、Fig.10 は投擲点4における着地点のヒストグラム(Fig.8-(c), (d))を表す。それぞれ(a), (b)を比較し、零

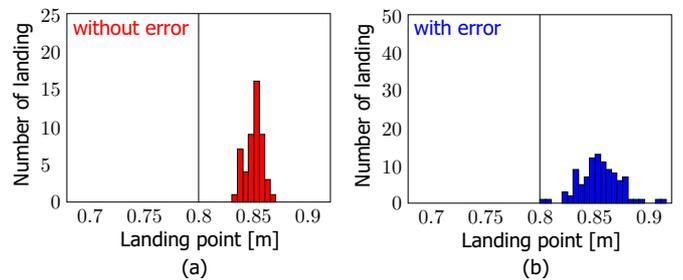


Fig.9 Histogram of the landing point on release point 1

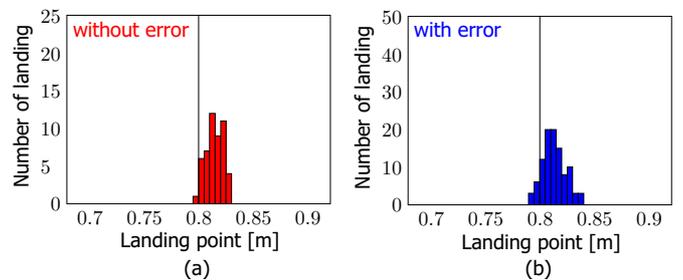


Fig.10 Histogram of the landing point on release point 4

点誤差があることで着地点のばらつきが大きくなるのが理解できると共に、Fig.9-(b)とFig.10-(b)を比較して、感度の小さなFig.10-(b)のばらつきが小さいことが分かる。

各投擲点での感度や着地点の標準偏差SDをTable 1にまとめる。SD₁, SD₂はそれぞれ零点誤差がない場合、零点誤差を加えた場合の実験における標準偏差である。一方、SD₂^{est}は実験装置の特性による着地点のばらつきと零点誤差による着地点のばらつきが共に独立な正規分布であるとした場合にこれらから見積もられるSD₂の推定値である。これはSD₁と感度 I_{init} を用いて

$$SD_2^{est} = \sqrt{(SD_1)^2 + \left(\frac{\pi}{180} I_{init}\right)^2} \quad (13)$$

として表される。Fig.11は各投擲点での感度 I_{init} と標準偏差の関係を表示したものである。実験装置の特性による誤差がなければ全ての点が鎖線上にある。四角点は式(13)により求めた標準偏差(SD₂^{est})であり、丸点は零点誤差を加えて実験したときの標準偏差SD₂を表す。エラーバーは各母標準偏差の99%信頼区間、すなわち、ばらつきのばらつきにおける信頼区間を表している。

Table 1 Experimental result of each release point

No. of release point	1	2	3	4
I_{init}	1.10	0.585	0.723	0.269
SD_1 [mm]	7.86	6.88	5.15	7.61
SD_2 [mm]	18.4	14.9	15.6	10.2
SD_2^{est} [mm]	20.8	12.3	13.6	8.95

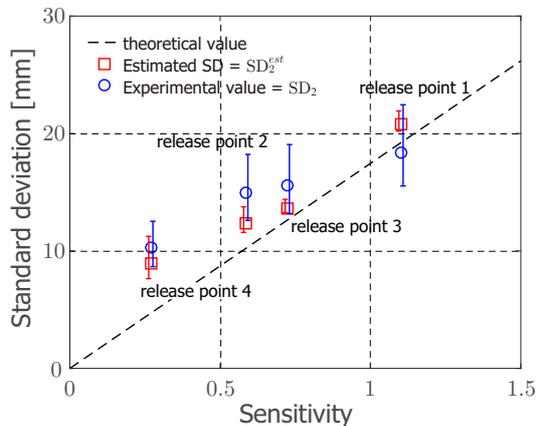


Fig.11 Correlation between sensitivity and SD

なお、ばらつきのばらつきであることからエラーバーは上が長くなる。SD₂の信頼区間がSD₂^{est}の信頼区間と共通部分を持つため、実験装置において零点誤差を加えなくてもある程度着地点がばらつくことを考慮すれば、実験結果と理論値はおおよそ一致していると考えられる。これより、求めた感度 I_{init} が小さい投擲点では着地点のばらつきを小さくできていることが理解できる。

そこで、投擲可能な点全てにおける感度解析を行うことで、Fig.12の結果を得た。図の赤丸の点で感度 $I_{init} = 0.0746$ が最小値をとる。投擲点1と求めた感度最小投擲点での投擲運動を

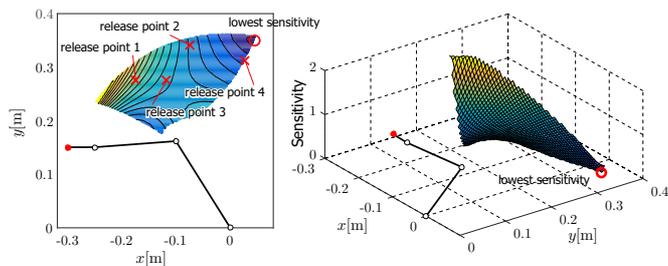


Fig.12 Sensitivity of each release point

Fig.13に示す。

感度最小投擲点においてこれまでと同様の実験を行った。x方向の着地点のヒストグラムに示す。着地点の標準偏差は零点誤差を加えないときは8.15mm、加えたときは8.75mmとなり、零点誤差を加えても着地点のばらつきはおおよそ変化しない結果となった。これより感度が小さい投げ方をしたことによって零点誤差が着地点のばらつきに及ぼす影響が非常に小さくなったことがわかる。すなわち、本研究の手法で感度の小さい投擲運動を設計すれば投擲の精度を上げることができ、その有効性が示される。

5 おわりに

本研究では、感度解析に基づいて零点調整の誤差があっても物体を目標の位置に投げられるような投擲運動を設計できることを

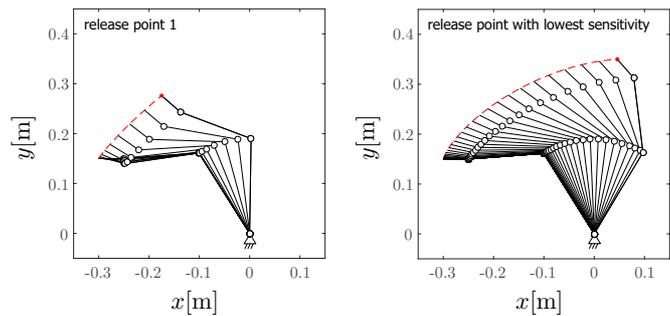


Fig.13 Throwing motion

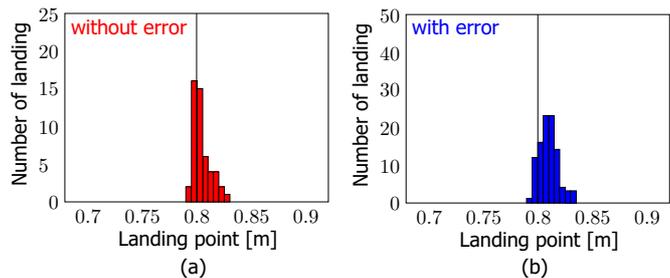


Fig.14 Histogram of the landing point on lowest sensitivity

実験により示した。また、その結果から感度が小さくなる運動を求めた。以下に本研究で得られた成果を示す。

1. フィードフォワード制御が前提であった従来の感度解析手法を拡張し、フィードバック制御も取り入れた感度解析手法を提案した。
2. 零点誤差を持たせた場合と持たせない場合の比較により、感度の小さい投擲が着地点のばらつきを小さくすることを示した。
3. 感度が最も小さくなる投擲運動を求め、実験により着地点のばらつきが極めて小さくなること、すなわち、物体の着地点の精度が向上することを示した。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤C)「運動の誤差感度解析に基づく投擲の最適化と教示」の支援を受けた。

参考文献

- [1] H.Tsukagoshi, E.Watari, K.Fuchigami and A.Kitagawa, Casting Device for Search and Rescue Aiming Higher and Faster Access in Disaster Site, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4348-4353, 2012
- [2] A.Fagiolini, H.Arisumi and A.Bicchi, Casting Robotic End-effectors To Reach Faraway Moving Objects, Computing Research Repository (CoRR), Vol. abs/1101.2268, 2011
- [3] 加藤, 中村, 2自由度ロボットによる投球動作制御に関する研究(適応制御とオンライン放出時刻修正), 日本機械学会論文集C編, Vol.63, No.614, pp.3571-3576, 1997
- [4] 有隅, 小森谷, キャスティングマニピュレーションに関する研究(第3報, 撃力に対するひもの粘弾性解析とグリッパの空中軌道制御), 日本機械学会論文集C編, Vol.68, No.665, pp.139-146, 2002
- [5] M.Okada, A.Pekarovskiy and M.Buss, Robust Trajectory Design for Object Throwing based on Sensitivity for Model Uncertainties, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015), pp.3089-3094, 2015
- [6] ジン, 岡田, ロバスト軌道設計のための人の誤差解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(Robomec2015), 2P1-N06, 2015