

# 柔軟指先と把持物体のポテンシャルを用いた 把持安定条件の導出

○馬場恒星 (九州大学) 辻徳生 (九州大学) 田原健二 (九州大学)  
原田研介 (産業技術総合研究所) 諸岡健一 (九州大学) 倉爪亮 (九州大学)

## 1. 諸言

人々の生活を支援するサービスロボットにとって、物体の運搬は重要なタスクの一つである。この実現には、ロボットハンドで物体を安定に把持する技術が必要である。物体を安定に把持するために、把持計画の際、不適切な把持姿勢の除外や、より安定な把持姿勢の選択を行う。そのために、把持が不安定ではないか、どのくらい安定に把持しているか、といった把持安定性を評価する必要がある。

把持が安定しているかを判定する手法として、force closure[1]がある。また、force closureに基づく把持安定性の定量的な評価手法として、Ferrariらの手法[2]がある。しかし、force closureは剛体同士の接触を仮定し、柔軟な指先で物体を把持する場合、その弾性変形による力の変化を考慮していない。柔軟な指先を利用することは安定把持の実現に有効[3][4]であるため、それに対応した把持安定性の評価手法が必要である。加えて、force closureは摩擦円錐内の任意の指先力を発生できると仮定している点など、実際の把持条件を反映していない部分がある。

本研究では、柔軟な指先で物体を把持するときの把持安定性を定量的に評価する手法を提案する。柔軟指先の弾性ポテンシャルおよび把持物体の重力ポテンシャルを考え、物体が指先から離れるか滑り始めるために必要な最小のエネルギー量を評価する。本手法は、把持物体の位置・姿勢に対する実際の指先力を反映して評価できる。さらに、force closureは静的な条件下でしか評価できないのに対し、本手法はエネルギーを評価指標に用いるため、把持物体が運動エネルギーをもつ場合など、動的な条件下の安定性評価へ拡張が可能である。本稿では提案手法の概要と評価手順について述べ、把持の安定条件および評価指標を定式化する。さらに、柔軟指先のモデルとして線形ばねモデルを適用し、把持安定性の評価例を示す。

## 2. 関連研究

force closure[1]は、把持安定性の評価指標として広く利用されている。Ferrariら[2]は、指先力や摩擦力が生成する合レンチ空間の境界と原点の距離により把持安定性を評価している。つまり、指先力を上回る可能性がある最小の外力・外モーメントにより評価を行っている。また、物体に加わる重力を考慮した手法[5]や、静止摩擦トルクを考慮した手法[6]などの拡張がなされている。force closureは接触点の位置を与えることにより幾何問題として数値計算が可能であるが、実際の把持状態での接触力などは考慮されておらず、また、柔軟指先の弾性力の変化など実際の把持の条件を組み

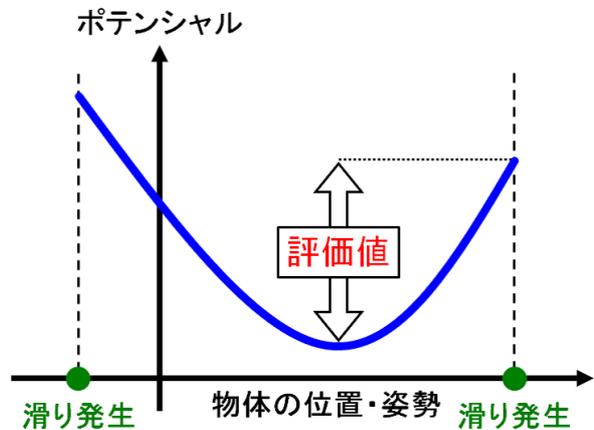


図1 ポテンシャル場

込むことが困難である。加えて、力とモーメントは次元が異なるにも関わらず一つの評価値が計算されているため、その数値の物理的な意味が必ずしも明確ではない。このように、把持姿勢を事前に選別する際には有効な指標であるが、実際の把持の安定性を必ずしも保証するものではない。

井上ら[4]は、柔軟指先の弾性ポテンシャルについて解析を行い、柔軟指先による物体把持・操作のダイナミクスを定式化している。山田ら[7]は、指先を直交仮想ばねモデルに置き換え、弾性ポテンシャルの極小点における曲率により把持安定性を評価している。つまり、把持物体の変位に伴うポテンシャルの増加量を評価しているが、指先が滑らないという条件を満たすか、安定性を維持できる外力の範囲はどのくらいか、などの評価はなされていない。田原ら[8]は、柔軟指先や関節の粘性により、平衡点の近傍でシステム全体が受動性を満たすことを示した。受動性に加えて提案手法の把持安定条件を満たせば、動的な把持安定性が保証できる。

## 3. 提案手法

### 3.1 概要

柔軟な指先で物体を把持しているときの把持安定性を定量的に評価する。まず、指先の弾性ポテンシャルおよび把持物体の重力ポテンシャルの和によるポテンシャル場を構築する。ポテンシャル場は、把持物体の位置・姿勢を座標軸とし、各位置・姿勢でのポテンシャルの値を示している。次に、物体が指先から離れるか滑り始める物体の位置・姿勢を境界とする、ポテンシ

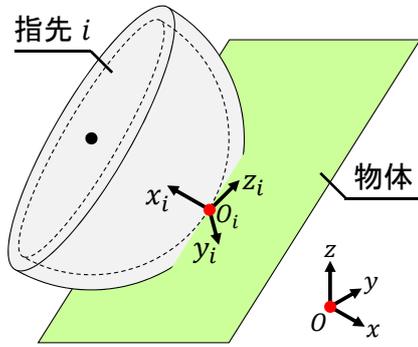


図2 指先座標系

ル場の領域を求める。領域内におけるポテンシャルの最小値と境界上におけるポテンシャルの差が、平衡状態から滑りなどが発生する状態に移るために必要なエネルギー量である。そこで、領域内におけるポテンシャルの最小値と、境界上におけるポテンシャルの最小値との差分を、把持安定性の評価値とする(図1)。この評価値は、滑りなどが発生するために必要な最小のエネルギー量である。領域内におけるポテンシャルの最小値が境界上に存在する場合は、滑りが発生したり拘束ができていない状態を示しており、評価値を0とする。

本研究では、把持物体は剛体であり、指先との接触面は平面であるとする。指先は半球形状であり、弾性方向だけでなくせん断方向にも変形し、せん断力が最大静止摩擦力よりも小さい場合は滑らないものとする。また、物体を把持している間、関節は固定されていて指先は動かないものとする。

### 3.2 評価手順

以下の手順に従い、把持安定性の評価を行う。

1. 次節で述べる手法により、ポテンシャル場を構築する。
2. ポテンシャル場の中で、物体が滑らずに指先に接触している領域およびその境界を求める。
3. 領域内および各境界上におけるポテンシャルの最小値を求める。
4. 領域内におけるポテンシャルの最小値と、境界上におけるポテンシャルの最小値との差分を、把持安定性の評価値とする。

### 3.3 ポテンシャル場の構築手法

#### 3.3.1 概要

計算を容易にするために、各指先についてローカル座標系を定義する。この座標系を指先座標系と呼ぶこととする。以下の手順に従い、ポテンシャル場を構築する。

1. 把持物体の位置・姿勢の変位から、指先と物体の接触点の変位を指先座標系で求める。
2. 接触点の変位から、指先の弾性ポテンシャルの変化量を指先座標系で求める。
3. すべての指先について同様に計算し、弾性ポテンシャルの変化量の和を求める。

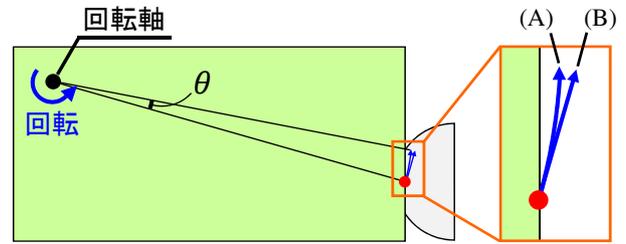


図3 物体の姿勢変位の近似：(A)は物体の回転による接触点の変位，(B)は(A)の近似

4. 把持物体の重力ポテンシャルの変化量、および指先の初期弾性ポテンシャルを加え、ポテンシャル場を構築する。

次節以降で、各手順の詳細を述べる。なお、重力ポテンシャルは、物体の初期位置を基準とする。また、記号  $i$  は指先番号を表す。

#### 3.3.2 指先座標系の定義

図2のように、指先と物体の接触点を原点  $O_i$  とする指先座標系  $\Sigma_i$  を定義する。指先座標系  $\Sigma_i$  の座標軸を  $x_i, y_i, z_i$  軸とする。点  $O_i$  から指先中心に向かう方向を  $x_i$  軸の正方向と定義する。

$x_i, y_i, z_i$  軸の単位ベクトルを  $\mathbf{e}_{1i}, \mathbf{e}_{2i}, \mathbf{e}_{3i} \in \mathbb{R}^3$  とする。慣性座標系の  $x, y, z$  軸の単位ベクトルを  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 \in \mathbb{R}^3$  とする。回転軸が  $\mathbf{e}_{1i} \times \mathbf{e}_1$ 、回転角が  $\cos^{-1}(\mathbf{e}_{1i}^T \mathbf{e}_1)$  の回転行列を  $\mathbf{R}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  とする。指先座標系  $\Sigma_i$  を、 $[\mathbf{e}_{1i} \ \mathbf{e}_{2i} \ \mathbf{e}_{3i}] = \mathbf{R}_i^{-1}$  と定義する。

指先と物体の接触点の位置ベクトル、つまり  $\overrightarrow{OO_i}$  を  $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3$  とする。慣性座標系から指先座標系  $\Sigma_i$  への座標変換は  ${}^i\mathbf{x} = \mathbf{R}_i(\mathbf{x} - \mathbf{p}_i)$  で表される。

#### 3.3.3 接触点の変位の算出

物体の回転は、回転量が微小かつ回転軸と接触点との距離が一定以上あれば、物体と指先の相対位置の変位として近似できる(図3)。そのため、物体の姿勢変位を、接触点付近の物体の位置変位として近似計算する。

物体の位置変位を  $\mathbf{p}_{trans} \in \mathbb{R}^3$ 、物体の姿勢変位を  $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  で表す。次式により、指先座標系  $\Sigma_i$  における接触点の位置変位  $\Delta^i \mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3$  を求める。

$$\Delta^i \mathbf{p}_i = \mathbf{R}_i(\mathbf{p}_i''' - \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_{trans}) \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i''' &= \theta_{yaw} \mathbf{e}_3 \times \mathbf{p}_i'' + \mathbf{p}_i'' \\ \mathbf{p}_i'' &= \theta_{pitch} \mathbf{e}_2 \times \mathbf{p}_i' + \mathbf{p}_i' \\ \mathbf{p}_i' &= \theta_{roll} \mathbf{e}_1 \times \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_i \end{aligned}$$

$\mathbf{p}_i', \mathbf{p}_i'', \mathbf{p}_i'''$  は、姿勢変位  $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  を位置変位に近似した後の接触点の位置である。

#### 3.3.4 弾性ポテンシャルの変化量の算出

指先の弾性方向の変形を  $\mathbf{d}_{ei}$ 、せん断方向の変形を  $\mathbf{d}_{si}$  で表す。弾性力  $\mathbf{f}_{ei}$ 、せん断力  $\mathbf{f}_{si}$  は、関数  $F_e, F_s$  を用いて次式で表されるものとする。

$$\mathbf{f}_{ei} = F_e(\mathbf{d}_{ei}), \quad \mathbf{f}_{si} = F_s(\mathbf{d}_{si}) \quad (2)$$

接触点の位置変位  $\Delta^i \mathbf{p}_i$  から、指先の弾性ポテンシャルの変化量  $\Delta E_i$  を次式で計算する。

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \int_C -({}^i \mathbf{f}_e + {}^i \mathbf{f}_s)^T ds \\ &= \int_0^1 -\{F_e({}^i \mathbf{d}_{ei0} + s\Delta^i \mathbf{p}_i^T {}^i \mathbf{e}_{1i} {}^i \mathbf{e}_{1i}) \\ &\quad + F_s(s\Delta^i \mathbf{p}_i^T {}^i \mathbf{e}_{2i} {}^i \mathbf{e}_{2i})\}^T \Delta^i \mathbf{p}_i ds \quad (3) \end{aligned}$$

$\mathbf{d}_{ei0}$  は弾性方向の初期変形である。

$\Delta E_i$  の計算を、点  $O_i$  を始点として  $\Delta^i \mathbf{p}_i$  を辿る経路を積分路  $C$  とする線積分として表現した。また、微小変位ベクトル  $ds = ds\Delta^i \mathbf{p}_i$  とした。

### 3.3.5 ポテンシャル場の定式化

次式によりポテンシャル  $E$  を計算し、ポテンシャル場を構築する。

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta E_i + mg e_3^T \mathbf{p}_{trans} + \sum_{i=1}^n E_{i0} \quad (4)$$

$n$  は接触点の数、 $m$  は把持物体の質量、 $g$  は重力加速度、 $E_{i0}$  は指先の初期弾性ポテンシャルである。右辺第2項が把持物体の重力ポテンシャルの変化量である。

### 3.3.6 ポテンシャル場の境界条件と把持の安定条件

ポテンシャル場の境界は、物体が指先から離れるか滑り始める物体の位置・姿勢である。よって、ポテンシャル場の境界条件は次式となる。

$${}^i \mathbf{d}_{ei}^T {}^i \mathbf{e}_{1i} = 0, \quad \mu \|{}^i \mathbf{f}_{ei}\| = \|{}^i \mathbf{f}_{si}\| \quad (5)$$

$\mu$  は指先と物体の間の最大静止摩擦係数である。把持の安定条件式は、上式の等号を不等号“ $>$ ”に変更した不等式がすべて成立することである。

## 3.4 線形ばねモデルの適用

柔軟指先の弾性方向の変位と弾性力の関係、およびせん断方向の変位とせん断力の関係を表すモデルとして、線形ばねモデルを適用する。すなわち、式(2)で示した関数  $F_e, F_s$  は次式であるとする。

$$F_e(\mathbf{d}_{ei}) = -k_e \mathbf{d}_{ei}, \quad F_s(\mathbf{d}_{si}) = -k_s \mathbf{d}_{si} \quad (6)$$

$k_e, k_s$  は、ばね定数である。

物体の位置変位  $\mathbf{p}_{trans} = (x, y, z)^T$  とする。指先座標系  $\Sigma_i$  における接触点の位置変位  $\Delta^i \mathbf{p}_i$  を、次式のように新たな記号  $d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}$  で表す。

$$\Delta^i \mathbf{p}_i \equiv (d_{ix}, d_{iy}, d_{iz})^T \quad (7)$$

$d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}$  は、物体の位置・姿勢を表す変数、つまりポテンシャル場における独立変数  $x, y, z, \theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  に関する3次式となる。

式(3),(4)より、弾性ポテンシャルの変化量  $\Delta E_i$  およびポテンシャル  $E$  は次式となる。

$$\Delta E_i = \frac{1}{2} \{k_e d_{ix}^2 + k_s (d_{iy}^2 + d_{iz}^2)\} + k_e \Delta r_i d_{ix} \quad (8)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta E_i + mgz + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k_e \Delta r_i^2 \quad (9)$$

$\Delta r_i$  は指先の初期変形量である。ポテンシャル  $E$  は  $x, y, z, \theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  に関する6次式となる。

式(5)より、ポテンシャル場の境界条件は次式となる。

$$\Delta r_i + d_{ix} = 0 \quad (10)$$

$$\mu k_e (\Delta r_i + d_{ix}) = k_s \sqrt{d_{iy}^2 + d_{iz}^2} \quad (11)$$

## 4. シミュレーション

柔軟な指先で立方体および正四面体を把持する場合について、把持安定性の評価を行った。次節以降で結果を示す。

式(9)で示したようにポテンシャル場は非線形であるため、その領域内および境界上におけるポテンシャルの最小値を求めるためには、非線形計画問題を解く必要がある。その計算には、IPOPT[9]を利用した。評価値を算出するまでの計算時間は場合によって異なり、最短で170 [ms]、最長で1080 [ms]であった。

### 4.1 立方体の把持

図4(a)のように、3つの指先で立方体を把持しているときの把持安定性を評価する。立方体の面は慣性座標系の座標平面と平行である。図中に示した接触点  $\mathbf{p}_i$  は、立方体の面の重心点である。 $\Delta r_i = 5$  [mm],  $k_e = 2000$  [N/m],  $k_s = 1000$  [N/m],  $\mu = 0.5$  とする。

物体の質量  $m$  を0 [kg] および0.5 [kg] としたときの評価結果を表1に示す。ポテンシャルの変化量、つまりポテンシャル場の境界に達するために必要なエネルギー量が最も小さいのは、どちらの場合も指先1と物体との間に滑りが生じるときである。把持安定性の評価値はそのエネルギー量、つまり  $m = 0$  [kg] のとき2.50 [mJ],  $m = 0.5$  [kg] のとき0.651 [mJ] である。 $m = 0.5$  [kg] とすると、 $m = 0$  [kg] のときに比べ、把持物体が  $z$  軸の負方向に変位した状態でポテンシャルが最小となる。そのため、指先1が物体に加える弾性力が小さく、ゆえに滑りが生じやすくなり、評価値が低くなる。

$m = 1.5$  [kg] として評価を行ったところ、ポテンシャル場の領域内における最小値が境界上に存在した。具体的には、物体が指先1から離れる境界上でポテンシャルが最小となった。すなわち、評価値は0である。

### 4.2 正四面体の把持

図4(b),4(c)のように、3つの指先で正四面体を把持しているときの把持安定性を評価する。指先が接していない正四面体の面は慣性座標系の  $xy$  平面と平行である。また、正四面体の1つの辺は慣性座標系の  $x$  軸と平行である。図中に示した接触点  $\mathbf{p}_i$  は、正四面体の面の重心点である。 $\Delta r_i = 5$  [mm],  $k_e = 2000$  [N/m],  $k_s = 1000$  [N/m],  $\mu = 0.5$  とする。

把持パターン1(図4(b))について、 $m = 0$  [kg] および  $m = 1.0$  [kg] としたときの評価結果を表2に示す。把持パターン2(図4(c))について、 $m = 0$  [kg] および  $m = 0.1$  [kg] としたときの評価結果を表3に示す。物体形状および接触点位置の対称性から、指先を区別する必要がないため、表2,3では指先番号を省略している。立方体の把持と同様に考えると、把持パターン1の評価値は、 $m = 0$  [kg] のとき0.466 [mJ],  $m = 1.0$  [kg] のとき15.2 [mJ] であり、把持パターン2の評価値は、 $m =$

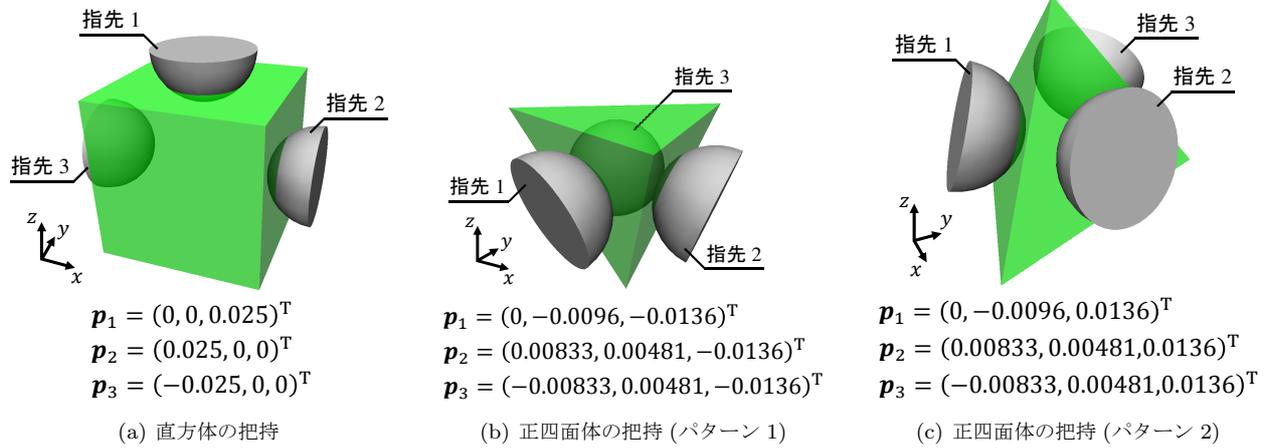


図 4 把持安定性の評価対象

0 [kg] のとき 0.466 [mJ],  $m = 0.1$  [kg] のとき 0.219 [mJ] である。

表 2,3 より,  $m = 0$  のとき, 把持パターン 1,2 は等価であることが分かる。  $m > 0$  のとき, 把持パターン 1 は把持を安定にする方向に重力がはたらき, 把持パターン 2 は把持を不安定にする方向に重力がはたらく。そのため把持パターン 1 は評価値が高くなり, 把持パターン 2 は評価値が低くなる。

把持パターン 2 について,  $m = 0.5$  [kg] として評価を行ったところ, ポテンシャル場の領域内における最小値が境界上に存在した。具体的には, いずれかの指先と物体との間に滑りが生じる点でポテンシャルが最小となった。すなわち, 評価値は 0 である。

## 5. 結言

柔軟指先と把持物体のポテンシャルエネルギーを用いた把持安定性の評価手法を提案した。ポテンシャル場を構築し, 把持の安定条件および評価指標を定式化した。提案手法に基づく把持安定性の評価例を示し, その妥当性を確認した。

今後は, 接触面の曲率の影響や転がりにおけるポテンシャルの変化を定式化する予定である。さらに, 関節の剛性や制御力も含めてポテンシャル場を構築し, より汎用性のある評価指標を目指す。

## 参考文献

- [1] V. Nguyen, “Constructing force closure grasps”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.7, No.3, pp.3-16, 1988.
- [2] C. Ferrari, and J. Canny, “Planning optimal grasps”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2290-2295, 1992.
- [3] H. Hanafusa and H. Asada, “Stable prehension by a robot hand with elastic fingers”, 7th International Symposium on Industrial Robots, pp.361-368, 1977.
- [4] 井上, 平井, “柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.951-959, 2007.
- [5] K. Harada, T. Tsuji, S. Uto, N. Yamanobe, K. Nagata and K. Kitagaki, “Stability of Soft-Finger Grasp under Gravity”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.883-888, 2014.
- [6] M. Ciocarlie, C. Lackner, and P. Allen, “Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks”, *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2007.
- [7] 山田, 小石, 水野, 三村, 舟橋, “三次元多指ロボットハンド把握系の安定性解析”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.679, pp.683-690, 2003.
- [8] 田原, 有本, 吉田, “柔軟 3 指ハンドによる仮想フレームを用いた把持物体の外界センサレス位置・姿勢制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.1, pp.89-98, 2011.
- [9] Ipopt : <https://projects.coin-or.org/Ipopt>

表 1 立方体の把持安定性

境界条件	指先番号	ポテンシャルの変化量 [mJ]	
		$m = 0$ [kg]	$m = 0.5$ [kg]
物体が離れる	1	12.5	3.25
	2,3	75.0	90.3
滑りが生じる	1	2.50	0.651
	2,3	3.24	0.845

表 2 正四面体の把持安定性 (パターン 1)

境界条件	ポテンシャルの変化量 [mJ]	
	$m = 0$ [kg]	$m = 1.0$ [kg]
物体が離れる	46.7	51.5
滑りが生じる	0.466	15.2

表 3 正四面体の把持安定性 (パターン 2)

境界条件	ポテンシャルの変化量 [mJ]	
	$m = 0$ [kg]	$m = 0.1$ [kg]
物体が離れる	46.7	46.8
滑りが生じる	0.466	0.219