

柔軟指先と関節変位によるポテンシャル場の許容外力エネルギーに基づく把持安定性評価

○辻徳生 馬場恒星 田原健二 (九州大学) 原田研介 (産総研) 諸岡健一 倉爪亮 (九州大学)

1. 序論

ロボットの把持では、コンプライアンス制御の導入により、安定性が向上すると考えられている。また、サーボモータの制御において関節角度の現在値と目標値の差分にゲインをかけて目標トルクを計算する手法が用いられている。これらの制御では、指関節を仮想的な弾性体とみなすことができる。指関節が弾性を持つと、把持物体は弾性体で支持されている場合と等価である。そのため、外乱により把持物体の位置・姿勢が変化しても、外乱が小さければ元の位置・姿勢に戻る。しかし、大きな外乱が加わった場合は指先が滑ってしまい元の位置・姿勢に戻らず、把持が不安定になる可能性がある。そこで、関節の剛性を考慮して耐える外乱により把持安定性を評価する。

本研究では、指先の弾性および指関節の剛性を考慮した把持安定性の評価手法を提案する。ここで、指先の弾性ポテンシャルと指関節の人工ポテンシャルにおいて、指先が接触面上を滑りだすために必要な最小の外力エネルギーを評価値とする。指関節のポテンシャルは制御則により変更できる人工ポテンシャルであるが、関節のアクチュエータが行う仕事と等価である。把持物体の位置・姿勢から柔軟指先の弾性変形量および指関節の角度を求め、弾性変形に起因する接触力および指関節のトルクを考慮して評価値を計算する。この定式化により、指先だけに着目していた把持安定性の評価指標 [1] を、指関節の制御も含めた把持システム全体に拡張できる。

2. 従来研究

把持安定性の定量的な評価手法として、force closure[2]に基づくFerrariらの手法[3]が広く利用されている。この手法は、接触力の合力・合モーメント空間を考え、指先が接触面上を滑りだすために必要な最小の外力・外モーメントの大きさを評価値とする。このとき、指先と物体の接触状態は点接触とし、摩擦条件を摩擦円錐で表現している。Ciocarlieら[4]は摩擦条件にねじり摩擦を追加し、指先と物体の接触状態が面接触の場合にも適用できるように拡張した。Tsuji[5], Harada[6]は接触領域の形状を考慮し、面接触における摩擦条件を厳密なものにした。

柔軟な指先で物体を把持しているとき、指先の弾性および指関節の剛性により、外力・外モーメントとつり合うように接触力が決まる。しかし、force closureに基づく従来手法は、摩擦条件が満たされる範囲、すなわち指先が滑らない範囲で接触力を自由に設定できると仮定している。つまり、指先の弾性および指関節の剛性は考慮しておらず、実際の把持状態に即していない評価値が算出されてしまう。そのため、把持対象物

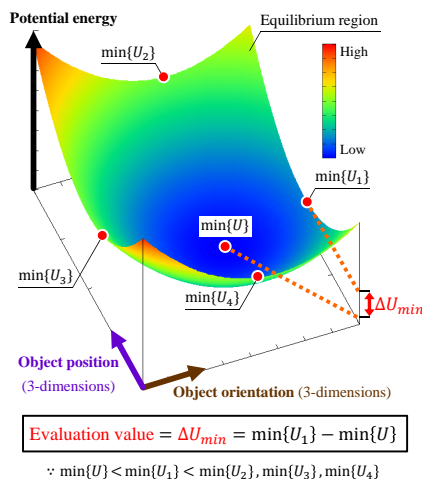


図 1: ポテンシャル場の概念図

に対して指先の配置を決定するための指標としては利用できるが、実際の把持の安定性を必ずしも保証するものではない。

把握系のポテンシャルエネルギーの曲率により把持安定性を評価する手法 [7]-[9] がある。この手法は、把持物体の位置・姿勢変化に伴い把握系のポテンシャルエネルギーが増加するならば、安定な把持姿勢であると判定する。Yamadaら[7]は、指関節の剛性を接触点における3軸の直交ばねに置き換えて解析を行った。Cutkoskyら[8], Maekawaら[9]は、指関節をバネとして解析を行った。しかし、滑りが発生する条件については考慮していない。

3. 把持安定性の評価

評価対象の把持姿勢に対し、ポテンシャル場を構築する。ポテンシャル場の概念図を図1に示す。ポテンシャル場は、把持物体の位置・姿勢と把握系のポテンシャルエネルギーの関係を表すものである。把持物体の位置・姿勢は6次元で表されるが、図1では便宜上2次元で表現している。

ポテンシャル場のうち、どの指先も滑らない領域を“平衡領域”と呼ぶ。すなわち、平衡領域の境界は、いずれかの指先が滑りだす把持物体の位置・姿勢である。ここで、平衡領域内の最小ポテンシャルエネルギーを $\min\{U\}$ とする。また、平衡領域の境界上の最小ポテンシャルエネルギーを $\min\{U_b\}$ とする。

次式のとおり、 $\min\{U\}$ と $\min\{U_b\}$ の間の最小の差分値を ΔU_{min} とする。

$$\Delta U_{min} = \min\{\min\{U_b\} - \min\{U\}\} \quad (1)$$

ΔU_{min} のエネルギーが物体に与えられたとき、物体の

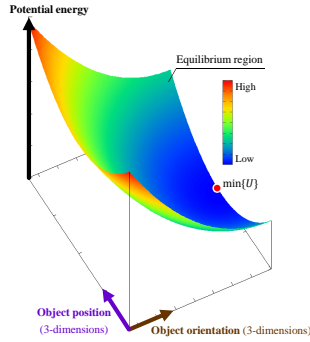


図2: 不安定な把持姿勢のポテンシャル場

位置・姿勢が平衡領域の境界上に達して指先が滑り出す可能性がある。そこで、本研究では ΔU_{min} を把持安定性の評価値とする。

図1のようなポテンシャル場の場合、把持安定性の評価値が正の値となる。この場合、把持物体にエネルギーを与えない限り指先は滑らないため、安定な把持姿勢であると判定できる。一方、ポテンシャル場が図2のような形の場合、平衡領域内の最小ポテンシャルエネルギー $\min\{U\}$ が境界上に存在する。すなわち評価値は0であり、不安定な把持姿勢であると判定できる。この場合、把持物体にエネルギーを与えることなく指先が滑り出す。

提案手法はエネルギーを評価指標に用いているため、把持物体が運動エネルギーを有する場合にも、把持安定条件を考えることができる。机に置かれた物体を持ち上げた際など接触状態が変化したり、物体把持したままハンドが移動した際、運動エネルギーが発生する。多指ハンドを基準とした把持物体の運動エネルギーを K 、把握系のポテンシャルエネルギーを U とする。式(2)が満たされるとき、把持物体の位置・姿勢は平衡領域の境界上に達しないため、指先は滑らず、安定把持が保証される。

$$U + K < \min\{U\} + \Delta U_{min} \quad (2)$$

すなわち、式(2)は把持物体の運動エネルギーを含めた把持安定条件である。時間が経つと、柔軟指先の粘性により運動エネルギーが消散し、把持物体は平衡点で静止する。

4. 指先弾性と関節剛性を考慮した評価値

提案手法では以下の仮定をおく。把持対象物は剛体であり、指先と物体の接触面は平面である。以降、 i 番目の指の自由度を N_i と表記する。

4.1 制御則

指関節の角度を目標値に近付けるP制御を行うとする。指関節の角度を $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{N_i}$ 、その目標値を $\mathbf{q}_{di} \in \mathbb{R}^{N_i}$ 、各関節のPゲインを並べた対角行列を $\mathbf{K}_{pi} \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ とすると、制御入力 $\mathbf{T}_i \in \mathbb{R}^{N_i}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{K}_{pi}(\mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i) \quad (3)$$

4.2 柔軟指先のモデル

柔軟指先のモデルとして、線形ばねモデルを利用する。このモデルでは、指先が6つの線形ばねで構成さ

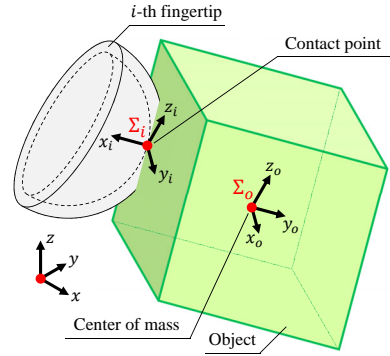


図3: ローカル座標系

れる。前章で述べた接触点座標系 Σ_i を考えたとき、接触点座標系 Σ_i の x, y, z 軸方向に線形直動ばねが配置され、 Σ_i の x, y, z 軸まわりに線形ねじりばねが配置される。ここで、各軸のばね定数を並べた対角行列を $\mathbf{K}_{fi} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ とする。また、各軸のばねの変形量を並べたベクトルを ${}^i \mathbf{d}_{fi} \in \mathbb{R}^6$ とする。直動ばねの変形量は指先変形量であり、ねじりばねの変形量は指先捻転角度である。

指先が弾性変形しているとき、指先が把持物体から受ける力 ${}^i \mathbf{F}_i \in \mathbb{R}^3$ およびモーメント ${}^i \mathbf{M}_i \in \mathbb{R}^3$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} {}^i \mathbf{F}_i \\ {}^i \mathbf{M}_i \end{bmatrix} = \mathbf{K}_{fi} {}^i \mathbf{d}_{fi} \quad (4)$$

4.3 ポテンシャル場の構築

初期把持状態における把持物体の位置・姿勢をポテンシャル場の原点とする。はじめに、把持物体の位置・姿勢から、力がつりあう指先の弾性変形量および指関節の角度を求める。次に、その状態でのポテンシャルエネルギーの和をとり、把持物体の位置・姿勢に対応するポテンシャルエネルギーを求める。さらに、指先の摩擦条件からポテンシャル場の境界を求める。

ポテンシャル場の構築では、図3のように、ローカル座標系 Σ_o および Σ_i を定義する。 Σ_o を物体座標系と呼び、把持物体の質量中心を原点とする。 Σ_i を接触点座標系と呼び、初期把持状態における接触領域の中心を原点とする。また、 Σ_i の x 軸の正方向は、接触面の法線方向とする。慣性座標系で表した Σ_o の位置・姿勢を、 $\mathbf{p}_o \in \mathbb{R}^3, \mathbf{R}_o \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする。同様に、物体座標系 Σ_o で表した Σ_i の位置・姿勢を、 ${}^o \mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^3, {}^o \mathbf{R}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする。

把握系のポテンシャルエネルギー U は、指先の弾性ポテンシャルエネルギー U_{ei} と把持物体の重力ポテンシャルエネルギー U_g と指関節の人工ポテンシャル U_{ai} の和として、次式で与えられる。

$$U = \sum_{i=1}^{N_f} (U_{ei} + U_{ai}) + U_g \quad (5)$$

指先の弾性ポテンシャルエネルギー U_{fi} は次式で与えられる。

$$U_{fi} = \frac{1}{2} {}^i \mathbf{d}_{fi}^T \mathbf{K}_{fi} {}^i \mathbf{d}_{fi} \quad (6)$$

指関節の人工ポテンシャル U_{ai} は、次式で与えられる。

$$U_{ai} = \frac{1}{2}(\mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i)^T \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i) \quad (7)$$

これは、指関節の角度 \mathbf{q}_i の関数である。把持物体の重力ポテンシャルエネルギー U_g は、物体重心位置の初期状態から相対高さで計算する。ポテンシャル場を定式化するために、次節では、把持物体の位置・姿勢から \mathbf{q}_i および ${}^i \mathbf{d}_{fi}$ を導出する計算の定式化を行う。

4.4 指先変形量および関節角度の計算

指の順運動学計算により、指関節の角度 \mathbf{q}_i から指先位置・姿勢 ${}^i \mathbf{p}_{fi} \in \mathbb{R}^3, {}^i \boldsymbol{\theta}_{fi} \in \mathbb{R}^3$ を求める。姿勢変位が微小であれば、初期把持状態を基準とした指先の位置・姿勢変位 ${}^i \Delta \mathbf{p}_{fi} \in \mathbb{R}^3, {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi} \in \mathbb{R}^3$ は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_{fi} \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i \mathbf{p}_{fi} \\ {}^i \boldsymbol{\theta}_{fi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^i \mathbf{p}_{fi0} \\ {}^i \boldsymbol{\theta}_{fi0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 ${}^i \mathbf{p}_{fi0} \in \mathbb{R}^3, {}^i \boldsymbol{\theta}_{fi0} \in \mathbb{R}^3$ は初期把持状態における指先の位置・姿勢である。

把持物体の位置・姿勢変位に伴う接触点座標系 Σ_i の位置・姿勢変位をそれぞれ ${}^i \Delta \mathbf{p}_i, {}^i \Delta \mathbf{R}_i$ とする。さらに、回転行列 ${}^i \Delta \mathbf{R}_i$ を回転ベクトル ${}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_i$ に変換する。姿勢変位が微小であれば、指先変形量は次式で与えられる。

$${}^i \mathbf{d}_{fi} = \begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_i \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_{fi} \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

指関節および指先が静止しているとき、指先が受ける力・モーメントと、それに対抗する関節トルクの関係は次式で与えられる。

$$\mathbf{T}_i = -\mathbf{J}_i^T \begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \mathbf{M}_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし、 $\mathbf{J}_i \in \mathbb{R}^{6 \times N_i}$ は指の基礎ヤコビ行列である。

本研究では、式 (3) に基づき指関節にトルクを与える。また、指先は把持対象物に接触して弾性変形し、把持物体から力・モーメントを受ける。したがって、指先が受ける力・モーメントに対抗する関節トルクが式 (3) の制御入力と等しくなるとき、指関節および指先が静止する。そこで、式 (10) に式 (3) および式 (4) を代入すると、次式を得る。

$$\mathbf{K}_p (\mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i) = -{}^i \mathbf{J}_i^T \mathbf{K}_f {}^i \mathbf{d}_{fi} \quad (11)$$

さらに式 (9) を代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i) \\ &= -{}^i \mathbf{J}_i^T \mathbf{K}_f \begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_i \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_i \end{bmatrix} + {}^i \mathbf{J}_i^T \mathbf{K}_f \begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_{fi} \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

指関節の角度 \mathbf{q} が式 (12) を満たすとき、指関節および指先が静止する。しかし、 ${}^i \mathbf{J}_i, {}^i \Delta \mathbf{p}_{fi}, {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi}$ は \mathbf{q} の関数であり、式 (12) は各関節角度の一次項と三角関数項を含むため、解析的に解くための近似する。

初期把持状態からの関節回転角度が微小であるとし、指先の位置・姿勢変位を次式で近似的に求める。

$$\begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_{fi} \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{fi} \end{bmatrix} \approx {}^i \mathbf{J}_{0i} (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_{0i}) \quad (13)$$

ただし、 ${}^i \mathbf{J}_{0i}$ は初期把持状態における基礎ヤコビ行列であり、 $\mathbf{q}_{0i} \in \mathbb{R}^{N_i}$ は初期把持状態における指関節の角度である。さらに、式 (12) の基礎ヤコビ行列 ${}^i \mathbf{J}_i$ が固定値 ${}^i \mathbf{J}_{0i}$ であると近似する。このとき、式 (13) を式 (12) に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i &= (\mathbf{K}_p + {}^i \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{K}_f {}^i \mathbf{J}_{0i})^{-1} \\ & \left(\mathbf{K}_p \mathbf{q}_{di} + {}^i \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{K}_f {}^i \mathbf{J}_{0i} \mathbf{q}_{0i} + {}^i \mathbf{J}_{0i}^T \mathbf{K}_f \begin{bmatrix} {}^i \Delta \mathbf{p}_i \\ {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_i \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) により、指関節および指先が静止する指関節の角度 \mathbf{q} を解析的に求めることができる。

4.5 最小ポテンシャルエネルギーの計算

指関節が出力可能なトルクは有限であるため、いずれかの関節トルクが上限値に達する状態も平衡領域の境界条件とする。式 (3) で与えられる関節トルクを $\mathbf{T}_i = (T_{i1}, \dots, T_{iN_i})^T$ とし、 T_{ijmax} は j 番目の関節トルクの上限値である。次の非線形計画問題を解くことにより、ポテンシャル場の平衡領域内における最小ポテンシャルエネルギーを求めることができる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } U \\ & \text{subject to } T_{ij}^2 \leq T_{ijmax}^2 \\ & f_{ti}^2 + \frac{\tau_{ni}^2}{e_{ni}^2} \leq \mu^2 f_{ni}^2 \\ & (i = 1, \dots, N_f) \quad (j = 1, \dots, N_i) \end{aligned}$$

最初の制約条件は、指関節のトルクがその上限値を超えないことを意味する。2番目の制約条件は、指先が滑らないことを意味する。この解が平衡領域の境界上に存在する場合、把持安定性の評価値は 0 となる。

さらに、各指先が滑りだす境界を制約条件として最小値を計算する。同様に、各関節トルクが上限値に達する境界を制約条件に加えて非線形計画問題を解く。

5. 数値計算による検証

数値計算の結果より、提案手法の有効性を示す。また、図 4 に示す 3 自由度の指を使用する。リンク 1 の長さは 25mm、リンク 2,3 の長さは 100mm、指先半径 $r_i = 25\text{mm}$ であり、摩擦係数 $\mu = 0.5$ 、関節トルクの最大値 $T_{ijmax} = 2.5\text{N}\cdot\text{m}$ とする。指先中心の目標位置は、接触点位置から法線方向に 25mm 物体重心側に設定し、その目標位置での関節角度を目標角度とする。辺長 100mm の立方体を、2本の指で把持するときの安定性評価を行う。

2つの把持姿勢を考える。図 5a は把持姿勢 1 の初期把持状態、図 5b は把持姿勢 2 の初期把持状態である。接触点は接触面の重心点であり、指先のばね定数

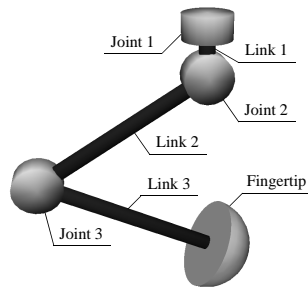


図 4: 3 自由度の指

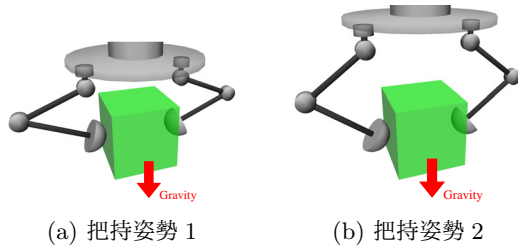


図 5: 初期把持状態

表 1: 立方体把持の評価値

[mJ]	$m = 0.0$	$m = 0.1$	$m = 0.2$
Grasp posture 1	1.01	0.79	0.53
Grasp posture 2	0.12	0.05	0.00

$\mathbf{K}_{fi} = \text{diag}(1000, 1000, 1000, 0.1, 0.1, 0.1)$, 指関節の P ゲイン $\mathbf{K}_{pi} = \text{diag}(2.0, 2.0, 2.0)$ とする. $m = 0.0\text{kg}$, 0.1kg , 0.2kg とした場合の評価値を, 表 1 に示す.

どちらの把持姿勢も, 把持物体の質量が大きくなるにつれ評価値が低くなる. これは, 重力の影響により滑りが発生しやすくなることを示している. 把持姿勢 1 より把持姿勢 2 の方が評価値が低くなっている. 表 2 および表 3 は, 各把持姿勢の指 1 について, 初期把持状態における関節角度 \mathbf{q}_{01} , 目標関節角度 \mathbf{q}_{d1} , および \mathbf{q}_{01} と \mathbf{q}_{d1} の差分を示している. 把持姿勢 2 の方が接触力が弱く, 滑りが発生しやすくなっている.

6. 結論

本研究では, ポテンシャルエネルギーの観点から, 指先の弾性および指関節の剛性を考慮した把持安定性の定量的な評価手法を提案した. 指先が接触面上を滑りだすために必要な最小エネルギーを把持安定性の評価値と定義し, その算出過程を定式化した. 数値例の結果より, 指先の弾性および指関節の剛性を考慮して把持安定性を評価できることを確認した.

提案手法は, 指先が接触面上を滑りだす条件, つまり接触状態が変化する条件を評価する. しかし, 指先が滑りだしたとしても, 必ずしも把持の破綻に繋がるとは限らない. 大局的なポテンシャル場について検討することが, 今後の課題である.

参考文献

[1] T. Tsuji, K. Baba, K. Tahara, K. Harada, K. Morooka and R. Kurazume, “Grasp Stability Analy-

表 2: 把持姿勢 1 の関節角度

[rad]	\mathbf{q}_{01}	\mathbf{q}_{d1}	$\mathbf{q}_{d1} - \mathbf{q}_{01}$
Joint 1	0.00	0.00	0.00
Joint 2	-1.18	-0.84	0.34
Joint 3	2.36	2.30	-0.06

表 3: 把持姿勢 2 の関節角度

[rad]	\mathbf{q}_{01}	\mathbf{q}_{d1}	$\mathbf{q}_{d1} - \mathbf{q}_{01}$
Joint 1	0.00	0.00	0.00
Joint 2	-0.92	-0.70	0.22
Joint 3	1.83	1.81	-0.02

sis for Elastic Fingertips by using Potential Energy”, *IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration*, pp.453-458, 2014.

- [2] V. Nguyen, “Constructing force closure grasps”, *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 3-16, 1988.
- [3] C. Ferrari, and J. Canny, “Planning optimal grasps”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2290-2295, 1992.
- [4] M. Ciocarlie, C. Lackner and P. Allen, “Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks”, *The Second Joint EuroHaptics Conf and Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2007.
- [5] T. Tsuji, S. Uto, K. Harada, R. Kurazume, T. Hasegawa, K. Morooka “Grasp Planning for Constricted Parts of Objects Approximated with Quadric Surfaces”, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2447-2453, 2014
- [6] K. Harada, T. Tsuji, S. Uto, N. Yamanobe, K. Nagata and K. Kitagaki, “Stability of Soft-Finger Grasp under Gravity”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 883-888, 2014.
- [7] T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno, N. Miura and Y. Funahashi, “Stability Analysis of 3D Grasps by A Multifingered Hand”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2466-2473, 2001.
- [8] M. R. Cutkosky and I. Kao, “Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand”, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 151-165, 1989.
- [9] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoriya, “Kinematics, Statics and Stiffness Effect of 3D Grasp by Multifingered Hand with Rolling Contact at the Fingertip”, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 78-85, 1997.