ポテンシャル場における許容エネルギーに基づく 柔軟指先のための把持安定性評価

馬場 恒星 ^{*1}, 辻 徳生 ^{*1}, 田原 健二 ^{*1}, 原田 研介 ^{*2}, 諸岡 健一 ^{*1}, 倉爪 亮 ^{*1}

Grasp Stability Evaluation for Elastic Fingertips

based on Energy Tolerance in Potential Field

Kosei BABA^{*1}, Tokuo TSUJI^{*1}, Kenji TAHARA^{*1} Kensuke HARADA^{*2}, Ken'ichi MOROOKA^{*1} and Ryo KURAZUME^{*1}

*1 Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 819-0395, Japan
 *2 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-8568, Japan

We propose an evaluation method of grasp stability based on potential energy for a multi-fingered hand with elastic fingertips. By considering the elastic potential energy of fingertips and the gravitational potential energy of a grasped object, our method evaluates the minimum energy which causes slippage of a fingertip on a surface of a grasped object. Unlike conventional evaluation methods of grasp stability, our method explicitly considers the contact forces by the deformation of fingertips during grasping. Hence, as a difference between conventional methods, our method can evaluate grasp stability with considering the internal force. The effectiveness of our method is verified through several numerical examples.

Key Words : Potential Energy, Grasping, Multi-fingered Hands

1. 緒 言

多指ハンドにより物体を把持する際,物体の落下を防 ぐために,把持安定性を評価する必要がある.Ferrariら は,force closure⁽²⁾に基づく把持安定性の評価手法⁽³⁾を 提案した.この手法は,ねじり摩擦を考慮した Ciocarlie らの手法⁽⁴⁾や,接触領域の形状を考慮した Harada ら の手法⁽⁵⁾など,多くの拡張がなされた.これら一連の 評価手法は,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.

本稿では、柔軟指先を有する多指ハンドを対象とし、 指先の弾性を考慮した把持安定性の評価手法を提案す る.提案手法は、指先の弾性ポテンシャルエネルギー と把持物体の重力ポテンシャルエネルギーを考え、指 先が接触面上を滑りだすために必要な最小のエネル ギーを評価値とする.すなわち、force closure は力・ モーメントの観点から把持安定性を評価するのに対し、 エネルギーの観点から把持安定性を評価する.

提案手法は従来手法に対し、相補的な役割を果たす

こともできる. force closure は,把持物体に外力・外 モーメントが加えられたとき,各指の関節トルクによ り平衡状態となることを前提としている.一方,提案 手法は,把持物体に外力・外モーメントが加えられた とき,各指先の弾性変形により平衡状態となる条件を 評価する.このように,柔軟指先を有する多指ハンド による物体把持において,force closure と提案手法は 相補的な関係にある.

提案手法の特徴として,以下に述べる点が挙げられ る. force closure は、各指先が摩擦円錐内の任意の接 触力を物体に加えられると仮定している.しかし、多 指ハンドが物体を把持しているときの接触力は任意で はなく、関節・指先の剛性や制御則により外力・外モー メントに対応して値が決まる.そのため、force closure は指先の配置を決定するためには利用できるが、関節・ 指先の剛性や制御則が与えられた際の評価値を計算す るためには利用できない.一方,提案手法は、柔軟指 先の弾性変形による接触力を考慮し、評価値を計算す ることができる.例えば、設定した内力の大きさの違 いを考慮して把持安定性を評価することが可能である.

我々は、文献⁽¹⁾において評価手法の基本部分を提案 した.本稿では指先の接触モデルを点接触から面接触 に拡張し、指先の弾性ポテンシャルエネルギーを位置・

^{*1} 九州大学(〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744) baba@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp, {tsuji, morooka, kurazume} @ait.kyushu-u.ac.jp, tahara@mech.kyushu-u.ac.jp

^{*2} 産業技術総合研究所(〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1) kensuke.harada@aist.go.jp

姿勢の6自由度に対する量として定式化する.この際, Ciocarlie らの摩擦条件⁽⁴⁾を利用し,接触力と接触モー メントの関係を考慮する.拡張したモデルを用いた把 持安定性の評価例を示し,その有効性を確認する.ま た,ランダムに生成した把持姿勢に対し,force closure に基づく従来手法の評価値と提案手法の評価値を比較 する.さらに,従来手法では評価することができない, 内力の大きさを考慮した把持安定性の評価結果を示す.

2. 関連研究

Yamada ら⁽⁶⁾は,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した.しかし,接触力 が摩擦円錐内に収まることは保証されておらず,また, 耐えうる外力・外モーメントの大きさは評価されてい ない. Inoue ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は,物体の把持・操作を目的とし て,柔軟指先の弾性力およびポテンシャルエネルギー について解析した. Hanafusa ら⁽⁹⁾は,把握系のポテン シャルエネルギーが極小値をとるとき把持が安定であ ることを示した. Tahara ら⁽¹⁰⁾は,柔軟指先や関節の粘 性により把握系が受動性を満たすことを示した.これ らの知見を踏まえ,本稿では把握系のポテンシャルエ ネルギーから把持安定性を定量的に評価する手法を提 案する.

3. 提案手法の概要

3.1 仮定 把持対象物は剛体であり,指先との 接触面は平面である.指先は半球形状であり,物体を 把持している間,その位置は固定されている.指先は 接触面の法線方向および接線方向に弾性変形する.初 期把持状態において,指先は接触面の法線方向にのみ 変形している.

3.2 提案手法 柔軟指先の弾性ポテンシャルエネ ルギーおよび把持物体の重力ポテンシャルエネルギー の和をとり、ポテンシャル場を構築する.ポテンシャ ル場は、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.物体の位置・姿勢 は6変数で表されるため、ポテンシャルエネルギーは 6変数関数となる.ここで、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"と呼ぶことにす る.いずれかの指先が滑りだす物体の位置・姿勢が, 平衡領域の境界となる.物体の位置・姿勢が平衡領域 内にあるとき、安定把持が保たれる.

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.物体の位置・姿勢はこの点に収束する.平衡 領域の i 番目の境界上の最小ポテンシャルエネルギー を min{ U_i } とする.ここで,次式のとおり,min{U}



 $: \min\{U_2\}, \min\{U_3\}, \min\{U_4\} > \min\{U_1\} > \min\{U\}$



と $min{U_i}$ の間の最小の差分値を ΔU_{min} とする:

$$\Delta U_{min} = \min\{\min\{U_i\} - \min\{U\}, i = 1, \cdots, n_b\}.$$
 (1)

ただし, nb は境界の数である.

ΔU_{min}のエネルギーが物体に与えられたとき,物体 の位置・姿勢が平衡領域の境界上に達して指先が滑り だす可能性がある.そこで,図1のように,ΔU_{min}を 把持安定性の評価値とする.平衡領域内の最小ポテン シャルエネルギーが境界上に存在するとき,評価値は 0となる.この場合,物体にエネルギーを与えること なく指先が滑りだす.

3.3 運動エネルギーを含めた評価 提案手法は エネルギーの観点から把持安定性を評価するため,把 持物体が運動エネルギーを有する場合も適用可能であ る. 机に置かれた物体を把持して持ち上げる場合や, 使用する指の本数を把持中に変える場合,平衡点が変 化し,物体が動きだすとともに運動エネルギーが発生 する. また,多指ハンドにより物体を把持して運搬す る場合,多指ハンドの移動により物体に慣性力がはた らき,運動エネルギーが発生する. 運動エネルギーを 含めた評価を行うことにより,物体を安定に運搬する, といった作業計画へ応用することができる.

多指ハンドを基準とした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.次式が 満たされるとき,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



Fig. 2 Coordinate systems.

れる:

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

すなわち,式(2)は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 より物体の運動エネルギーが消散し,物体は平衡点で 静止する.

4. ポテンシャル場の構築

4.1 概要 初期把持状態における物体の位置・姿勢をポテンシャル場の原点とする.指先の弾性変形量を物体の位置・姿勢変位から求め,指先の弾性ポテンシャルエネルギーを求める.さらに,物体の位置変位から物体の重力ポテンシャルエネルギーを求める.これらの和をとり,把握系のポテンシャルエネルギーを求める.

4.2 ローカル座標系の定義 図 2 のように、物体と各指先にローカル座標系を定義する.物体座標系 を Σ_o 、*i* 番目の指先座標系を Σ_i とする.物体の質量 中心を Σ_o の原点とする.指先と物体の接触領域の中 心を接触点と定義し、*i* 番目の接触点を Σ_i の原点とする.*i* 番目の接触面の法線方向を Σ_i の x 軸の正方向と する.慣性座標系で表した Σ_o の位置・姿勢を $p_o \in \mathbb{R}^3$ および $R_o \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 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 $p_i \in \mathbb{R}^3$ および $o R_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする. 左上の添え字は座標系を示す.

4.3 指先変形量の計算 慣性座標系で表した物 体の位置・姿勢変位を $\Delta p \in \mathbb{R}^3$ および $\Delta R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ とする.これより、変位後の物体の位置・姿勢は $p_o + \Delta p$ および ΔRR_o となる.指先座標系 Σ_i で表した物体の 位置変位 ${}^i \Delta p_i \in \mathbb{R}^3$ および姿勢変位 ${}^i \Delta R_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は、次式で与えられる:

$${}^{i}\Delta\boldsymbol{p}_{i} = (\boldsymbol{R}_{o}{}^{o}\boldsymbol{R}_{i})^{\mathrm{T}} \left\{ (\Delta\boldsymbol{R} - \boldsymbol{I}) \left(\boldsymbol{R}_{o}{}^{o}\boldsymbol{p}_{i} + \boldsymbol{p}_{o} \right) + \Delta\boldsymbol{p} \right\}; \quad (3)$$

$${}^{\iota}\Delta \boldsymbol{R}_{i} = (\boldsymbol{R}_{o}{}^{o}\boldsymbol{R}_{i}){}^{1}\Delta \boldsymbol{R}(\boldsymbol{R}_{o}{}^{o}\boldsymbol{R}_{i}).$$

$$\tag{4}$$



Fig. 3 Resolution of vectors.



Fig. 4 The amount of deformation of a fingertip.

^{*i*} Δp_i および ^{*i*} ΔR_i から指先の変形量を求める.はじめに、回転行列 ^{*i*} ΔR_i を回転ベクトル ^{*i*} $\Delta \theta_i \in \mathbb{R}^3$ に変換する. $\widehat{i\Delta \theta_i}$ は等価回転軸を表し、||^{*i*} $\Delta \theta_i$ || は等価回転角を表す.次に、 ^{*i*} Δp_i および ^{*i*} $\Delta \theta_i$ を図3のように接触面の法線方向および接線方向に分解する.法線方向に分解されたベクトルを ^{*i*} Δp_{ni} および ^{*i*} $\Delta \theta_{ni}$ とし、接線方向に分解されたベクトルを ^{*i*} Δp_{ti} および ^{*i*} $\Delta \theta_{ti}$ とする.これらは、次式で与えられる:

$${}^{i}\Delta \boldsymbol{p}_{ni} = \boldsymbol{D}_{1}{}^{i}\Delta \boldsymbol{p}_{i}; \qquad {}^{i}\Delta \boldsymbol{p}_{ti} = \boldsymbol{D}_{23}{}^{i}\Delta \boldsymbol{p}_{i};$$
$${}^{i}\Delta \boldsymbol{\theta}_{ni} = \boldsymbol{D}_{1}{}^{i}\Delta \boldsymbol{\theta}_{i}; \qquad {}^{i}\Delta \boldsymbol{\theta}_{ti} = \boldsymbol{D}_{23}{}^{i}\Delta \boldsymbol{\theta}_{i}.$$
(5)

ただし、 $D_1 = \text{diag}(1,0,0), D_{23} = \text{diag}(0,1,1)$ である. 式(5)の^{*i*} $\Delta \theta_{ni}$ は指先座標系 $\Sigma_i \circ x$ 軸を回転軸とす る物体の回転を表す.指先捻転角度 θ_{ni} を,次式によ り求める:

$$\boldsymbol{\theta}_{ni} = \|^{i} \Delta \boldsymbol{\theta}_{ni}\|. \tag{6}$$

式(5)の^{*i*}Δ**p**_{*ti*} は接触面の接線方向への接触点の変位 を表す.接触面の接線方向への指先変形量 *d*_{*ti*} を,次 式により求める:

$$d_{ti} = \|^i \Delta \boldsymbol{p}_{ti}\|. \tag{7}$$

接触点の変位および物体の回転の両方を考慮し,接触面の法線方向への指先変形量 d_{ni} を求める. d'_{ni} および d''_{ni} を,接触点の変位および物体の回転に対応する指先変形量とする. $3\cdot1$ 章で述べたように,初期把持状態において指先は接触面の法線方向にのみ変形しているという仮定を踏まえ, d_{ni} を次式により求める:

$$d_{ni} = d'_{ni} + d''_{ni} + \Delta r_i \,. \tag{8}$$

ただし、Δri は初期把持状態における指先変形量である.

式 (8) の d'_{ni} および d''_{ni} を,以下のように求める.式 (5) の ${}^{i}\Delta p_{ni}$ は接触面の法線方向への接触点の変位を表す. d'_{ni} を次式により求める:

$$d'_{ni} = {}^{i} \Delta \boldsymbol{p}_{ni}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{e}_{1}. \tag{9}$$

ただし, $e_1 = (1,0,0)^T$ である. d_{ti} は非負であるのに 対し d'_{ni} は負になりうるため,式(7)と定義が異なっ ている.式(5)の $^i \Delta \theta_{ti}$ は接触面の接線ベクトルを回 転軸とする物体の回転を表す.図4のように、物体の 回転角が ϕ ,指先中心と接触点との距離が r_c であると き、物体の回転に対応する指先変形量は $r_c(1 - \cos\phi)$ となる.これを考慮して、 d''_{ti} を次式により求める:

$$d_{ni}^{\prime\prime} = (r_i - \Delta r_i) \left\{ 1 - \cos\left(\left\| {}^i \Delta \boldsymbol{\theta}_{ti} \right\| \right) \right\}.$$
(10)

ただし、 r_i は指先半径である.

4.4 接触力およびポテンシャルエネルギーの計算 本稿では、柔軟指先のモデルとして平行分布モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾ を利用する.ただし、指先の底面と接触面が平行であ ると仮定する.以下の定式化の詳細は付録で述べる.

接触面の法線方向への接触力 *f_{ni}* および接線方向への接触力 *f_{ti}* は,それぞれ次式で与えられる:

$$f_{ni} = \pi E d_{ni}^2; \tag{11}$$

$$f_{ti} = 2\pi E \Delta r_i d_{ti} \,. \tag{12}$$

ただし, E は指先材料のヤング率である.指先座標系 Σ_i のx軸まわりの接触モーメント τ_{ni} は,次式で与え られる:

$$\tau_{ni} = 2\pi E \Delta r_i^2 \left(r_i - \frac{1}{3} \Delta r_i \right) \theta_{ni} \,. \tag{13}$$

*i*番目の指先の弾性ポテンシャルエネルギー*U*_{ei}は,次 式で与えられる:

$$U_{ei} = \pi E \left\{ \frac{1}{3} d_{ni}^3 + \Delta r_i d_{ii}^2 + \Delta r_i^2 \left(r_i - \frac{1}{3} \Delta r_i \right) \theta_{ni}^2 \right\}.$$
 (14)

重力ポテンシャルエネルギーの基準を初期把持状態と すると,把持物体の重力ポテンシャルエネルギー Ug は次式で与えられる:

$$U_g = mg\Delta \boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_3. \tag{15}$$

ただし, *m* は物体の質量, *g* は重力加速度, *e*₃ = $(0,0,1)^{T}$ である. 把握系のポテンシャルエネルギー*U* は, $U_{ei} \ge U_{g}$ の和として, 次式で与えられる:

$$U = \sum_{i=1}^{n} U_{ei} + U_g.$$
 (16)

ただし, n は指先の数である. 式 (16) により, ポテン シャル場を構築する. **4.5 平衡領域の境界条件** 本稿では,柔軟指先の摩擦条件として Ciocarlie らの式⁽⁴⁾を利用する.次式 が満たされるとき,*i* 番目の指先が滑りだす:

$$f_{ti}^2 + \frac{\tau_{ni}^2}{e_{ni}^2} = \mu^2 f_{ni}^2.$$
(17)

ただし, μ は摩擦係数, $e_{ni} = \frac{8}{15} \mu \sqrt{r_i^2 - (r_i - \Delta r_i)^2}$ である. 3·2 節で述べたように, ポテンシャル場の平衡領域の境界は, いずれかの指先が滑りだす物体の位置・姿勢である. したがって, 式(17)が平衡領域の境界条件となる.

指先が物体に大きな力を加えると、ロボットハンド が壊れる可能性がある.それを防ぐために接触力の上 限値を決めるべきであり、次式も平衡領域の境界条件 とする:

$$f_{ni} = f_{max} \,. \tag{18}$$

ただし, *f_{max}* は接触面の法線方向への接触力の上限値 である.

5. 最小ポテンシャルエネルギーの計算

5.1 平衡領域内 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は,次の非線形 計画問題を解くことにより求められる:

minimize U
subject to
$$0 \le d_{ni} \le \sqrt{\frac{f_{max}}{\pi E}}$$
 $(i = 1, \dots, n)$
 $f_{ti}^2 + \frac{\tau_{ni}^2}{e_{ni}^2} \le \mu^2 f_{ni}^2$ $(i = 1, \dots, n).$

最初の制約条件は、物体と指先の接触が保たれ、かつ 接触面の法線方向への接触力がその上限値を下回るこ 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.

5.2 平衡領域の境界上 *j*番目の指先に対応する 境界上の最小ポテンシャルエネルギーは,次のように 求める.境界が式(17)で表される場合は,*i*=*j*とし て式(17)を制約条件に加える.同様に,境界が式(18) で表される場合は,*i*=*j*として式(18)を制約条件に 加える.なお,初期把持状態における指先変形量が小 さい場合,前節の制約条件を満たしつつ式(18)を満た すことができず,解が存在しないこともある.

6. 数 值 例

数値計算の結果より,提案手法の有効性を示す. $p_o = 0$, $R_o = I$ とし,初期把持状態において物体座標系は 慣性座標系に一致しているとする.また, $r_i = 15$ mm, $E = 1.0 \times 10^5$ Pa, $\mu = 0.5$, $f_{max} = 10$ N とする.



Fig. 5 Grasp of a cube.

Table 1 Evaluation values (cube).

| | m = 0.0kg | m = 0.1kg | m = 0.5kg |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Grasp posture 1 | 0.63mJ | 0.62mJ | 0.26mJ |
| Grasp posture 2 | 0.21mJ | 0.11mJ | 0.00mJ |

本稿では、非線形計画問題を解くために Ipopt⁽¹¹⁾お よび ADOL-C⁽¹²⁾を利用した. Intel Core i7 3.30GHz の PC を用いて計算を行った結果、1 つの把持姿勢に対し 評価値を算出するまでの時間は 300ms から 700ms 程 度であった.

6・1 立方体の把持 図5のように、2つあるいは 3 つの指先により立方体が把持されているとする. 図 5(a)を把持姿勢1,図5(b)を把持姿勢2とする. 立方 体の辺長は50mm,接触点は接触面の重心点である. 初期把持状態における指先変形量 $\Delta r_i = 5$ mmとする.

m = 0.0kg, 0.1kg, 0.5kg とした場合の評価値を表 1 に示す. 把持姿勢 1,2 のどちらも,物体の質量が大 きくなるにつれ評価値が下がっている. 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 2 は,指先を追加したにも関わらず,把 持姿勢 1 より評価値が下がっている. これは,追加さ れた指先が物体を鉛直方向へ変位させてしまうため, より少ないエネルギーの入力で滑りが発生しやすくな ることを示している. 指先が滑っても把持が破綻する とは限らないが,把持姿勢 2 の方が接触点位置などの 状態が変化しやすいということは言える.

6.2 正四面体の把持 図6のように、3つの指先 により正四面体が把持されているとする.図6(a)を把 持姿勢3,図6(b)を把持姿勢4とする.正四面体の辺長 は50mm,接触点は接触面の重心点である.Δ*r_i* = 5mm とする.

m = 0.0kg, 0.1kg, 0.5 kg とした場合の評価値を表 2 に示す. m = 0.0kg のとき, 把持姿勢 3,4 で評価値が 等しくなっている. これは, 把持姿勢 3 を水平面に対 し反転させたものが把持姿勢 4 であるため, 重力がは たらかないとき, 把持姿勢 3,4 は等価であると理解で きる. 物体の質量が大きくなるにつれ, 把持姿勢 3 で



Fig. 6 Grasp of a tetrahedron.

| T 11 A | F 1 / | 1 | (1 1 1) |
|---------|------------|--------|---------------|
| Table 2 | Evaluation | values | (tetrahedron) |

| | | ```` | , |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | m = 0.0kg | m = 0.1kg | m = 0.5kg |
| Grasp posture 3 | 0.09mJ | 0.22mJ | 0.79mJ |
| Grasp posture 4 | 0.09mJ | 0.02mJ | 0.00mJ |

は評価値が上がり,把持姿勢4では評価値が下がって いる.これは,重力の影響により,把持姿勢3では平 衡状態における指先変形量が大きくなり,把持姿勢4 では小さくなるためである.

6.3 従来手法との比較 force closure に基づく 従来手法⁽⁴⁾の評価値と提案手法の評価値を比較する. $\Delta r_i = 5$ mm, m = 0.0kg とする. 従来手法の評価値を e_{conv} , 提案手法の評価値を e_{our} で表す. なお, 従来手法を適用する際, 摩擦円錐を六角錐で近似した.

(1) 2 本指による把持:物体が 2 つの指先により把持 されているとする.接触点の位置を ${}^{o}p_{1} = (0.025, 0, 0)^{T}$ [m] および ${}^{o}p_{2} = (-0.025, 0, 0)^{T}$ [m] とし,接触面の法 線ベクトルをランダムに定める.従来手法の評価値お よび提案手法の評価値を,図 7(a) に示す. $e_{conv} = 0$ の とき, e_{our} も0となっている. $e_{conv} > 0.8 \times 10^{-3}$ のと き, e_{conv} と e_{our} はおよそ比例しており,相関係数は 0.85 である.

(2)3本指による把持:物体が3つの指先により把持 されているとする. 接触点の位置および接触面の法線 ベクトルをランダムに定める. 従来手法の評価値およ び提案手法の評価値を,図7(b)に示す. e_{conv}=0のと き, e_{our} も0となっている. e_{conv} > 0.6のとき, e_{conv} と e_{our} はおよそ比例しており,相関係数は0.72 である.

どちらの場合も、従来手法の評価値と提案手法の評価値に高い相関があり、従来手法と同等の結果が得られている.また、従来手法の評価値が正であるにも関わらず、提案手法の評価値がほぼ0となっている場合がある.これは、たとえ force closure が満たされていても、物体を安定に把持するためには接触力の決定に注意する必要があることを示している.

6.4 内力の影響 図 5(a) のように、2 つの指先 により立方体が把持されているとする. *m* = 0.0kg,



Fig. 7 Evaluation values of grasp stability.

 $\Delta r_1 = \Delta r_2$ とする.この場合,初期把持状態が平衡状態となる.

 Δr_i と評価値の関係を図 8 に示す. $\Delta r_i \leq 5.17$ mm の とき、 Δr_i が大きくなるにつれ式 (17) を満たすために 必要なエネルギーが増加し、評価値が上がる. しかし、 $\Delta r_i > 5.17$ mm のとき、 Δr_i が大きくなるにつれ式 (18) を満たすために必要なエネルギーが減少し、評価値が 下がる. $\Delta r_i = \sqrt{f_{max}/(\pi E)} = 5.64$ mm のとき、平衡状 態において式 (18) が満たされ、評価値が 0 となる.

提案手法を用いると,接触点の位置および接触面の 法線ベクトルが同じであっても, Δr_i によって評価値が 変わる.また,必ずしも Δr_i が大きくなれば評価値も 上がるとは限らない.このように,提案手法は内力の 大きさを考慮して把持安定性を評価することができる.

7. 結 言

本稿では、エネルギーの観点から、指先弾性を考慮 した把持安定性の評価手法を提案した.柔軟指先の弾 性ポテンシャルエネルギーおよび把持物体の重力ポテ ンシャルエネルギーの和として、ポテンシャル場を定 式化した.指先が接触面上を滑りだすために必要な最



Fig. 8 The relationship between Δr_i and evaluation value.

小エネルギーをポテンシャル場から求め,把持安定性の評価値とした.数値例により提案手法の有効性を示し,さらに,内力の大きさを考慮して把持安定性を評価できることを示した.

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.把持の破綻に対する頑健性の評価は, 接触状態が変化した際にポテンシャル場を再構築する ことで実現できる.大局的なポテンシャル場について も今後検討する.

硬い指先による物体把持においても,指先の微小な 変形を考えることで同様に把持安定性を評価できる. 対応できる硬さの範囲について今後検討する.

提案手法の利点として,包み込み把持に対する適用 性が挙げられる.多指ハンドによる包み込み把持にお いて接触力は不静定となるため,force closure は適用 できない.一方,提案手法は,各接触点の弾性変形を 考慮することにより接触力の配分を計算し,把持安定 性を評価できる.今後,包み込み把持に対しても提案 手法を適用し検証する.

参考文献

- 馬場,辻,田原,原田,諸岡,倉爪,"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",第 32回日本ロボット学会学術講演会,1P2-01,2014.
- (2) V. Nguyen, "Constructing force closure grasps", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 3-16, 1988.
- (3) C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps", *IEEE International Conference 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*

Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 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) T. Yamada, T. Koishikura, Y. Mizuno, N. Miura and Y. Funahashi, "Stability Analysis of 3D Grasps by A Multifingered Hand", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2466-2473, 2001.
- (7) T. Inoue and S. Hirai, "Experimental Investigation of Mechanics in Soft-fingered Grasping and Manipulation", *10th International Symposium on Experimental Robotics*, pp. 13-22, 2006.
- (8) T. Inoue and S. Hirai, "Parallel-distributed Model in Three-dimensional Soft-fingered Grasping and Manipulation", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2092-2097, 2009.
- (9) H. Hanafusa and H. Asada, "Stable prehension by a robot hand with elastic fingers", 7th International Symposium on Industrial Robots, pp. 361-368, 1977.
- (10) K. Tahara, S. Arimoto and M. Yoshida, "Dynamic Force/Torque Equilibrium for Stable Grasping by a Triple Robotic Fingers System", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2257-2263, 2009.
- (11) A. Wächter and L. T. Biegler, "On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming", *Mathematical programming*, Vol. 106(1), pp. 25-57, 2006.
- (12) A. Walther and A. Griewank, "Getting started with ADOL-C", *Combinatorial Scientific Computing*, pp. 181-202, 2012.

付録 柔軟指先の平行分布モデル

平行分布モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾では,線形仮想ばねを指先内部 に垂直に配置し,モデル化を行う.指先が接触面の法 線方向および接線方向に弾性変形したときの弾性力お よびポテンシャルエネルギーは定式化されている.指 先の底面と接触面が平行であると仮定すると,式(11) および式(12)が得られる.指先の捻転による接触モー メントおよびポテンシャルエネルギーは定式化されて いないため,本稿で定式化を行う.

指先中心からrの距離にある線形仮想ばねを考える. ばね定数 k_iは,次式で与えられる:

$$k_i = \frac{EdS}{\sqrt{r_i^2 - r^2}}.$$
(20)

ただし, *dS* は線形仮想ばねの断面積である. 接触モー メント τ_{ni} は次式で与えられる:

$$\tau_{ni} = \iint_{cr} rk_i s_{\tau i} \,. \tag{21}$$

ただし、 $s_{\tau i}$ は指先の捻転による線形仮想ばねの変形 量であり、 $s_{\tau i} = r\theta_{n i}$ である.また、crは指先と物体の 接触領域を表す.接触領域は円であるため、この積分 は次式で計算できる:

$$\iint_{cr} dS = \int_0^{\sqrt{r_i^2 - (r_i - \Delta r_i)^2}} \int_0^{2\pi} r d\theta dr.$$
 (22)

式(21)の積分を実行すると、式(13)が得られる.

指先の捻転による弾性ポテンシャルエネルギー $U_{\tau i}$ は,次式で与えられる:

$$U_{\tau i} = \iint_{cr} \frac{1}{2} k_i s_{\tau i}^2 = \pi E \Delta r_i^2 \left(r_i - \frac{1}{3} \Delta r_i \right) \theta_{ni}^2.$$
(23)

指先の底面と接触面が平行であると仮定し,指先が接 触面の法線方向および接線方向に弾性変形したときの 弾性ポテンシャルエネルギーと U_{ti}の和をとると,式 (14)が得られる.