摩擦無し２次元２物体把握系の安定性解析

山田貴孝（名工大）　○山本智哉（名工大）　三村宣治（新潟大）　舟橋康行（中京大）

Grasp Stability Analysis of Two Objects with Frictionless Contact in Two Dimensions

Takayoshi YAMADA, Nagoya Institute of Technology, *Tomoya YAMAMOTO, Nagoya Institute of Technology,
Nobuharu MIMURA, Niigata University, Yasuyuki FUNAHASHI, Chukyo University

This paper analyzes grasp stability of two objects with frictionless contact in two dimensions. In case of frictionless contact, sliding parameters at contact are required, and contact force is restricted to the direction of contact normal. Hence, the analysis is more complicated than that of frictional contact. Position displacement of two objects is expressed by five parameters, and then position displacement of finger is derived. The relation between displacement of finger position and reaction force is replaced with a two-dimensional linear spring model. The constraint of contact force is obtained from the minimization of the potential energy of each finger. The hessian of the potential energy stored in the grasp system is derived. The grasp stability is evaluated by the eigenvalues of the hessian. From a numerical example, the region of curvature of contact point between the objects, contact force are obtained for stabilization of the grasp.

Key Words: Grasp stability, Multiple objects, Frictionless contact, Planar grasp, Multifingered robot hand

1.　はじめに

ロボットで様々な形状の物体を器用に把握し操るためには，人間の手のような多関節型多指ロボットハンドが有効と考えられる．多指ロボットハンドで物体を把握する場合，把握系の安定性が問題となる．すなわち，物体に外乱が加わり力学的平衡状態から変位しても，再び元の位置に戻るかどうかが問題となる．このため文献[1]では 3 次元単一物体把握系の安定性を解析した．作業の効率化を考えた場合，複数物体の把握が必要となる[2]．そこで、文献[3]では複数物体の中で最も簡単な 2 次元 2 物体把握系の安定性を解析した．これは接触点で摩擦が有る場合を扱った．しかし，氷や石鹸などの摩擦の小さい物体を把握する場合には，摩擦無しとして解析する必要がある．また，予め摩擦の有無が分からない場合には，摩擦なしと仮定して把握系を設計し安定性を保証することが考えられる．

そこで，本論文では文献[3]と同様の問題を，摩擦が無い場合について解析する．摩擦が無い場合は，有る場合に比べ接触の拘束が少なく，滑りを表すパラメータが必要となる.また，指先力が常に法線方向を向くという条件が必要となる.このため，摩擦が無い場合は，有る場合に比べて問題が複雑になる．２物体の変位のパラメータ数は６であるが，接触の拘束条件のために減少する．これを，物体同士の接触点座標系で生じる微小変位で表わし，指先位置の微小変位を導出する．そして，ポテンシャルエネルギの観点から解析する．

2.　問題の設定

2.1　仮定

Fig. 1 に示すように，二次元平面内で多指ロボットハンドにより 2 つの物体を把握しているとする．以下の仮定のもとで解析を行う．

(A1) 物体および指先は剛体である.
(A2) 指先と物体，物体と物体はそれぞれ 1 点で接触をする.
(A3) 接触点位置，接触点での法線，接触点近傍の曲率は既知である.
(A4) 初期把握状態は力学的平衡状態にある.
(A5) 接触点には摩擦がなく，滑り接触をする.
(A6) 外乱による物体の位置・姿勢変位は微小である.
(A7) 指先の姿勢変位は生じない.
(A8) 指先の位置変位と反力との関係は二次元の直交仮想バネで置き換えられる.

仮定(A7)は指先の回転バネの効果が並進バネの効果に比べ十分小さいこと，指先の回転変位は並進変位に比べ微小であり無視できることを意味している．この場合，接触点とバネモデルの位置オフセットは安定性に影響しない．具体的には，(i)各指の自由度が十分に多いハンドを用いて指先が回転しないように制御した場合，(ii)各指が直交の 2 自由度を有するハンドを用いた場合がある．指先が回転する一般的な場合については今後の研究課題とする．本論文と文献[3]との違いは仮定(A5)のみである．

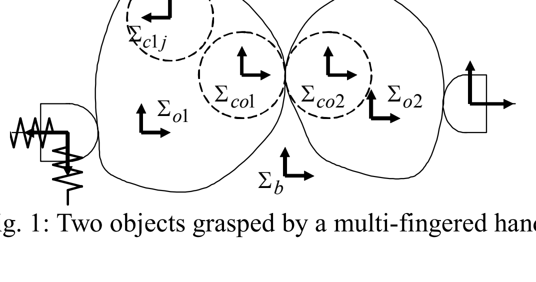


Fig. 1: Two objects grasped by a multi-fingered hand

2.2　記号

Fig. 1 に示すように，把握系に以下の座標系を設定する．

Σ_b：基準座標系．

Σ_{oi}：物体 i の基準座標系．

Σ_c：物体同士の接触点に設定した座標系．

Σ_{coi}：物体同士の接触における物体 i 側の接触点座標系．

Σ_{cij}：物体 i と指 j との接触における物体側接触点座標系．

Σ_{fij}：物体 i に接触している指 j の指先座標系．

接触点位置，その法線および曲率を次のように表わす．

${}^{oi}\boldsymbol{c}_{coi}$：$\Sigma_{oi}$ から見た物体同士の接触点位置．

${}^{oi}\boldsymbol{c}_{cij}$：$\Sigma_{oi}$ から見た指との物体同士の接触点位置．

${}^{oi}\boldsymbol{n}_{coi}$：$\Sigma_{oi}$ で見た物体同士の接触点の外向き法線．

${}^{oi}\boldsymbol{n}_{cij}$：$\Sigma_{oi}$ で見た指との接触点の外向き法線．

κ_{coi}：物体同士の接触点における，物体 i 側の曲率．

κ_{cij}：物体 i と指 j の接触点における，物体 i 側の曲率．

κ_{fij}：物体 i に接触する指 j の指先の曲率．

初期把握状態における各座標系の位置・姿勢の関係を同次変換行列を用いて表わす．

$$
{}^{oi}T_{coi}=\left[\begin{array}{c|c}{}^{oi}R_{coi} & {}^{oi}\boldsymbol{p}_{coi}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right],\quad {}^{oi}T_{cij}=\left[\begin{array}{c|c}{}^{oi}R_{cij} & {}^{oi}\boldsymbol{p}_{cij}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right],
$$

$$
{}^{cij}T_{fij}=\left[\begin{array}{c|c}I_2 & \begin{matrix}\kappa_{cij}^{-1}\\ 0\end{matrix}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right]. \tag{1}
$$

ただし，位置ベクトル $\boldsymbol{p}$ と回転行列 R は，仮定(A3)の接触点位置，法線，曲率を用いて次の式で計算できる．

$$
{}^{oi}\boldsymbol{p}_{cij}={}^{oi}\boldsymbol{c}_{cij}-\kappa_{cij}^{-1}\{{}^{oi}\boldsymbol{n}_{cij}\},\quad {}^{oi}\boldsymbol{p}_{coi}={}^{oi}\boldsymbol{c}_{coi}-\kappa_{coi}^{-1}\{{}^{oi}\boldsymbol{n}_{coi}\}
$$

$$
{}^{oi}R_{coi}=[{}^{oi}\boldsymbol{n}_{coi},{}^{oi}\boldsymbol{t}_{coi}],\quad {}^{oi}\boldsymbol{t}_{coi}=\mathrm{Rot}(\pi/2)\{{}^{oi}\boldsymbol{n}_{coi}\}. \tag{2}
$$

各座標系に生じる微小変位を次のように表記する．

$\boldsymbol{\varepsilon}_{oi}=[x_{oi},y_{oi},\zeta_{oi}]^T$：初期の Σ_{oi} から見た，Σ_{oi} 自身の変位量（並進，回転）．

$\boldsymbol{\varepsilon}_{coi}=[x_{coi},y_{coi},\zeta_{coi}]^T$：初期の Σ_{coi} から見た，Σ_{coi} 自身の変位量（並進，回転）．

$\boldsymbol{\varepsilon}_{cij}=[x_{cij},y_{cij},\zeta_{cij}]^T$：初期の Σ_{cij} から見た，Σ_{cij} 自身の変位量（並進，回転）．

$\boldsymbol{\varepsilon}_{fij}=[x_{fij},y_{fij}]^T$：初期の Σ_{fij} から見た，Σ_{fij} 自身の並進量．

この微小変位に対応する同次変換行列を，二次元平面内の回転を表わす行列

$$
\mathrm{Rot}(\bullet)=\begin{bmatrix}\cos(\bullet) & -\sin(\bullet)\\ \sin(\bullet) & \cos(\bullet)\end{bmatrix} \tag{3}
$$

を用いて，次のように表記する．

$$
{}^{oi}T_{oi'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{oi})=\left[\begin{array}{c|c}\mathrm{Rot}(\zeta_{oi}) & \begin{matrix}x_{oi}\\ y_{oi}\end{matrix}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right],
$$

$$
{}^{coi}T_{coi'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{coi})=\left[\begin{array}{c|c}\mathrm{Rot}(\zeta_{coi}) & \begin{matrix}x_{coi}\\ y_{coi}\end{matrix}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right],
$$

$$
{}^{cij}T_{cij'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{cij})=\left[\begin{array}{c|c}\mathrm{Rot}(\zeta_{cij}) & \begin{matrix}x_{cij}\\ y_{cij}\end{matrix}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right],\quad {}^{fij}T_{fij'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{cij})=\left[\begin{array}{c|c}I_2 & \begin{matrix}x_{fij}\\ y_{fij}\end{matrix}\\ \hline 0 & 1\end{array}\right].
$$

. (4)

ここで，プライムは微小変位後を意味する．物体が剛体であるという仮定(A1)より，${}^{oi'}T_{coi'}={}^{oi}T_{coi}$，${}^{oi'}T_{cij'}={}^{oi}T_{cij}$ である．

仮定(A8)の仮想バネの剛性を $K_{ij}=\mathrm{diag}[k_{xij},k_{yij}]$ と表記し，指先座標系 Σ_{fij} に沿って設定する．ただし，$k_{xij}>0, k_{yij}>0$ である．初期把握状態において圧縮されており，仮定(A4)の初期指先力 $\boldsymbol{f}_{ij}$ を生じているとする．その圧縮量を $\boldsymbol{\varepsilon}_{fij0}=[x_{fij0},y_{fij0}]^T$ と表記すると

$$
\boldsymbol{f}_{ij}=K_i\boldsymbol{\varepsilon}_{fij0} \tag{5}
$$

の関係がある．ただし，仮定(A5)より指先力の接線成分は生じないため $y_{fij0}=0$ である．

3.　定式化

2 物体のそれぞれに任意の微小変位が生じると，パラメータは物体変位を表す $\boldsymbol{\varepsilon}_{o1},\boldsymbol{\varepsilon}_{o2}$ の計 6 となる．しかし，接触の維持のために 2 物体の変位は互いに拘束を受ける．このため，独立なパラメータの表現方法が問題となる．本研究では，その方法の一つとして，物体同士の接触点座標系 Σ_{coi} の微小変位を用いて表わす．そして，物体と指先の接触点における各種条件を基に指先の変位を導出する．そして，把握系に蓄えられるポテンシャルエネルギおよびその 2 階微分であるヘッシアンを導出する．

3.1　物体同士の接触点座標系 Σ_{coi} の変位

物体同士の接触点座標系 Σ_{coi} で生じる微小変位を考える．摩擦が無い場合，物体間の拘束条件は離れないことである．このため 2 物体の微小変位は，Fig2 に示す並進、回転、滑りの 5 種類で表現できる．それらを，$\boldsymbol{\varepsilon}=[\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3,\varepsilon_4,\varepsilon_5]^T$ と表記する．　$\varepsilon_1,\varepsilon_2$ は接触点座標系 Σ_c の並進量，ε_3 は Σ_c の回転量である．これらは，2 物体が一体となって変位することを意味し，1 物体の場合と同じパラメータである．$\varepsilon_4,\varepsilon_5$ はそれぞれ物体 1,2 の滑りの弧長を表わし摩擦無しの特徴を表す．したがって，Σ_{coi}, (i=1,2)の変位量 $\boldsymbol{\varepsilon}_{coi}$ は次の式で表わすことができる（Fig. 3）．

$$
\begin{bmatrix}x_{coi}\\ y_{coi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\end{bmatrix}+\gamma_i\kappa_{coi}^{-1}\begin{bmatrix}1-\cos\varepsilon_3\\ -\sin\varepsilon_3\end{bmatrix}, \tag{6.a}
$$

$$
\zeta_{coi}=\varepsilon_3+\kappa_{coi}\left(\frac{1+\gamma_i}{2}\varepsilon_4+\frac{1-\gamma_i}{2}\varepsilon_5\right). \tag{6.b}
$$

ただし，2 つの物体の変位を 1 つの式で表すために $\gamma_1=1,\gamma_2=-1$ としている．式(6.b)の分数式は，ε_4 あるいは ε_5 を選択するための係数であり，0 あるいは 1 になる．

3.2　物体座標系 Σ_{oi}，Σ_{cij} の変位

物体間に変位 $\boldsymbol{\varepsilon}_{coi}$ が生じたとき，指先との接触点座標系 Σ_{cij} に生じる微小変位 $\boldsymbol{\varepsilon}_{cij}$ は

$$
{}^{oi}T_{oi'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{oi})=\{{}^{oi}T_{coi}\}\{{}^{coi}T_{coi'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{coi})\}\{{}^{oi'}T_{coi'}\}^{-1} \tag{7}
$$

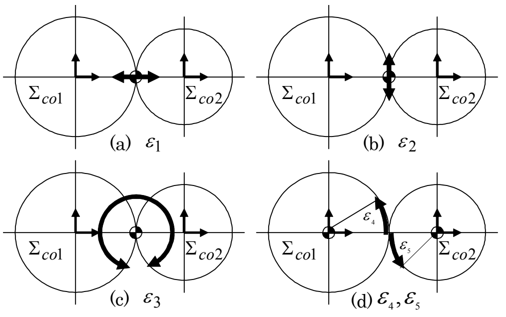
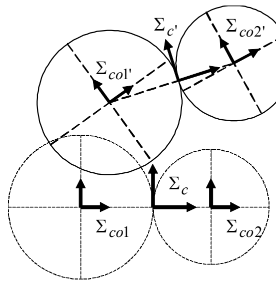


Fig. 2: Five types of object motion



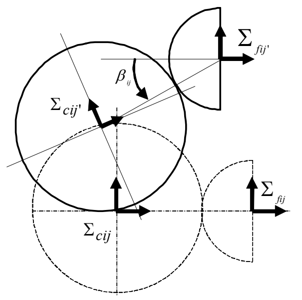


Fig. 3: Displacement of Σ_{coi}　Fig. 4: Displacement of Σ_{fij}

および，

$$ {}^{cij}T_{cij'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{cij}) = \{{}^{oi}T_{cij}\}^{-1}\{{}^{oi}T_{oi'}(\boldsymbol{\varepsilon}_{oi})\}\{{}^{oi'}T_{cij'}\} \tag{8} $$

より求められる．

3.3　指先座標系 Σ_{fij} の変位

指先の位置変位が並進のみであるという仮定(A7)から，座標系 Σ_{cij} が変位すると指先座標系 Σ_{fij} は Fig. 4 に示すように変位する．ここで， β_{ij} は滑りに関するパラメータであり，各指で独立である．この Σ_{fij} の微小変位 $\boldsymbol{\varepsilon}_{fij}$ は次の式で与えられる．

$$ \begin{bmatrix} x_{fij} \\ y_{fij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{cij} \\ y_{cij} \end{bmatrix} + (\kappa_{cij}^{-1} + \kappa_{fij}^{-1}) \begin{bmatrix} \cos(\beta_{ij}) - 1 \\ \sin(\beta_{ij}) \end{bmatrix} \tag{9} $$

式(7),(8),(9)より，物体 i に接触する第 j 番目の指先の並進量 $\boldsymbol{\varepsilon}_{fij}$ は，

$$ \boldsymbol{\varepsilon}_{fij} = \{{}^{cij}R_{coi}\} \begin{bmatrix} x_{coi} \\ y_{coi} \end{bmatrix} + \tilde{\kappa}_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\beta_{ij}) - 1 \\ \sin(\beta_{ij}) \end{bmatrix} + \{I_2 - \mathrm{Rot}(\zeta_{coi})\}\{{}^{cij}\boldsymbol{p}_{coi}\} \tag{10} $$

で与えられる．ただし，表記を簡略化するために

$$ {}^{cij}\boldsymbol{p}_{coi} := \{{}^{cij}R_{oi}\}\{{}^{oi}\boldsymbol{p}_{coi} - {}^{oi}\boldsymbol{p}_{cij}\}, \tag{11.a} $$

$$ \tilde{\kappa}_{ij} := \frac{\kappa_{cij}\kappa_{fij}}{\kappa_{cij} + \kappa_{fij}}. \tag{11.b} $$

とおいている．

3.4　指のポテンシャルエネルギ

物体 i に接触する第 j 番目の指先の仮想バネに蓄えられるポテンシャルエネルギ U_{ij} は次の式で与えられる．

$$ U_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}, \beta_{ij}) = \frac{1}{2}\{\boldsymbol{\varepsilon}_{fij}(\boldsymbol{\varepsilon}, \beta_{ij}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{fij0}\}^T K_{ij}\{\boldsymbol{\varepsilon}_{fij}(\boldsymbol{\varepsilon}, \beta_{ij}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{fij0}\} \tag{12} $$

式(12)にはパラメータ β_{ij} が含まれている．把握系が安定であるためには，各指ごとに任意の微小変位に対して常に安定であることを必要とする．また，摩擦がない場合には，指先力は常に法線方向を向く．これらの条件は、ポテンシャルエネルギ U_{ij} がに関して局所最小であれば良い．すなわち

$$ \partial U_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}, \beta_{ij}) / \partial \beta_{ij} = 0, \tag{13.a} $$

$$ \partial^2 U_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}, \beta_{ij}) / \partial \beta_{ij}^2 > 0 \tag{13.b} $$

である．

3.5　把握系のポテンシャルエネルギとヘッシアン

式(13.a)は非線形であるが，形式的に $\beta_{ij} = h_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon})$ と書くと，把握系全体のポテンシャルエネルギ U は，

$$ U(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sum_{i,j} U_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon}, h_{ij}(\boldsymbol{\varepsilon})) \tag{14} $$

となり，Fig.2 の 5 つのパラメータの関数として求まる．$\nabla = \partial / \partial\boldsymbol{\varepsilon} = [\partial/\partial\varepsilon_1, \partial/\partial\varepsilon_2, \partial/\partial\varepsilon_3, \partial/\partial\varepsilon_4, \partial/\partial\varepsilon_5]^T$ とおくと，ヘッシアン H は

$$ H = \sum_{i,j} H_{ij} \in \Re^{5\times5} \tag{15} $$

となる．ただし

$$ H_{ij} = \nabla\nabla^T U_{ij}|_0 \tag{16} $$

である．計算すると

$$ H_{ij} = s_{aij}\boldsymbol{v}_{ai}\boldsymbol{v}_{ai}^T + s_{bij}\boldsymbol{v}_b\boldsymbol{v}_b^T + E_{coi}W_{ij}K'_{ij}W_{ij}^T E_{coi}^T \tag{17} $$

となる．ただし

$$ s_{aij} := \boldsymbol{f}_{ij}^T[\frac{1}{\kappa_{cij} + \kappa_{fij}}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \{{}^{cij}R_{coi}\}\{{}^{oi}\boldsymbol{c}_{cij} - {}^{oi}\boldsymbol{p}_{coi}\}], $$

$$ s_{bij} := \gamma_i\kappa_{coi}^{-1}\boldsymbol{f}_{ij}^T\{{}^{cij}R_{coi}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}\}, $$

$$ \boldsymbol{v}_{ai} := E_{coi}[0,0,1]^T,\ \boldsymbol{v}_b := [0,0,1,0,0]^T, $$

$$ E_{coi} := \nabla\boldsymbol{\varepsilon}_{coi}^T|_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\gamma_i\kappa_{coi}^{-1} & 1 \\ 0 & 0 & \kappa_{coi}(1+\gamma_i)/2 \\ 0 & 0 & \kappa_{coi}(1-\gamma_i)/2 \end{bmatrix} \in \Re^{5\times3}, $$

$$ K'_{ij} := \mathrm{diag}[k_{xij}, -\frac{\tilde{\kappa}_{ij}f_{xij}k_{yij}}{k_{yij} - \tilde{\kappa}_{ij}f_{xij}}] \tag{18} $$

である．また，式(13.b)から拘束条件

$$ k_{yij} - \tilde{\kappa}_{ij}f_{xij} > 0 \tag{19} $$

を得る．

式(17)の $s_{aij}, s_{bij}, E_{coi}, W_{ij}$ には複数物体の特徴である $\kappa_{coi}, {}^{oi}\boldsymbol{p}_{coi}$ が含まれている．式(17)の右辺の各項は対称である．第 1 項および第 2 項は初期指先力に依存し，第 3 項はバネ剛性と初期把握力に依存する．把握系の安定性は，このヘッシアン H の正定性により評価することができる．したがって，s_{aij}, s_{bij} を正に大きく設定すると把握系の安定性は高くなる．また，摩擦無しの場合，バネ剛性の接線成分と初期把握力の間に式(19)の拘束が生じる．そのため，各指ごとに k_{yij}, f_{xij} を式(19)の範囲で設定する必要がある．

4.　数値例

把握の安定性に対する物体間の影響を第 3 章で導出

したヘッシアンを用いて数値例により評価する．本導出において物体の数は 2 に限定しているが指の数に制限はない．そこで，簡単な例として Fig.5 に示すような 2 物体を 4 本指ハンドで把握する場合を考える．

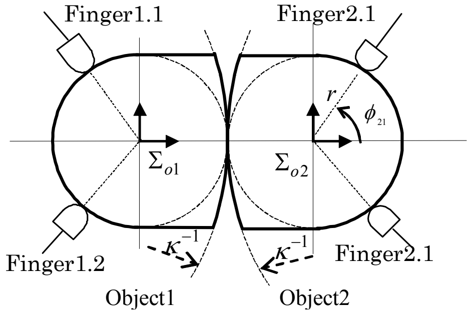


Fig. 5: Numerical Example

物体 1,2 は同一形状とし，Fig.5 の太線で示すような形状とする．指先位置は物体同士の接触点に対して点対称となるように設定をする．物体の形状を指と接触する部分は半径r の円とし，物体 i の中心に座標系Σ_{oi} を設定する．また，物体同士は曲率κ で接触する．Σ_{o1} およびΣ_{o2}から見た物体同士の接触点位置をそれぞれ次の位置に設定する．

$$ {}^{o1}\boldsymbol{c}_{co1} = [r, 0]^T,\ {}^{o2}\boldsymbol{c}_{co2} = [-r, 0]^T . \quad (20) $$

物体 i の j 番目の指との接触点位置を，パラメータϕ_{ij} を用いて

$$ {}^{oi}\boldsymbol{c}_{cij} = [r\cos\phi_{ij}, r\sin\phi_{ij}]^T \quad (21) $$

に設定する．各指先の曲率を同一とし，$\kappa_{fij} = \kappa_f$ と表記する．初期把握力は仮定(A5)を満足しているので，仮定(A4)の力学的平衡状態を満たすように

$$ \boldsymbol{f}_{ij} = [f, 0]^T \quad (22) $$

と設定する．f は内力の大きさを表し内向き法線方向である．バネ剛性の法線成分と接線成分を同じ値 $k_{xij} = k_{yij} = k$ に設定する．ここで各設定において式(19)の拘束条件を満たすように設定する必要がある．

形状等を具体的に次の値に設定し，指先位置，指先力，バネ剛性の効果を調べる．

$r = 0.02[\mathrm{m}]$, $\phi = \pi/3[\mathrm{rad}]$, $\kappa_f = 10[\mathrm{m}^{-1}]$, $\kappa = 20[\mathrm{m}^{-1}]$,
$k = 100[\mathrm{N/m}]$, $f = 0.1[\mathrm{N}]$.

設定 1：物体間の接触点近傍の曲率の効果

曲率κ をパラメータとし，把握の安定性に対する効果として固有値を Fig. 6 に示す．図(a)には 3 つの固有値を見ることができる．残りの 2 つは小さいため，縦軸を零近傍で拡大し図(b)に示している．この数値例の場合には，物体形状が真円となる$\kappa = r^{-1}$のときの値が安定と不安定の境界となっている．固有値がすべて正となる $0 < \kappa < 50[\mathrm{m}^{-1}]$ の範囲の場合には把握系が安定となることが図(a)から分かる．

設定 2：指先力の効果

指先力 f の効果を Fig. 7 に示す．図(b)には安定性が一旦上昇し，減少するという摩擦なしの特徴が表れている．式(19)は，$f < 12[\mathrm{N}]$ となる．図(b)から $f < 2.75[\mathrm{N}]$ の範囲に設定すれば，固有値は全て正になり把握系は安定である．

5. おわりに

本論文では，摩擦がない場合について 2 次元 2 物体把握系の安定性を扱った．そして以下の成果を得た．

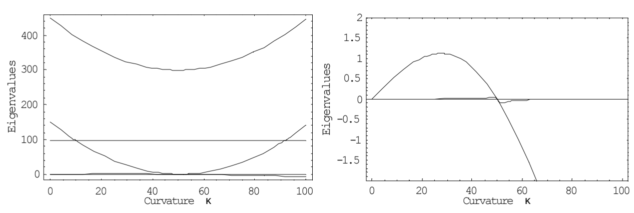
- 物体同士の接触点座標系を用いて，2 物体の変位を 5 つのパラメータで表した
- 滑りのパラメータを用いて指先位置の変位を導出した．
- 各指のポテンシャルエネルギが局所最小となることから，滑りのパラメータの拘束条件を導いた．
- 把握系の安定性を表すヘッシアンを導出し，接触点の曲率，接触点位置，バネ剛性，初期把握力の効果を明確にした．このヘッシアンの正定性を用いて把握系の安定性を評価できる．
- 摩擦なしの場合，バネの接線成分と初期把握力の間に式(19)の拘束が生じることを明らかにした．
- 数値例で物体間の影響を，曲率をパラメータとし示した．また，安定に把握できる指先力の範囲を示した．

参考文献

[1] 山田・小石倉・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, 69-679, pp. 683-690, 2003

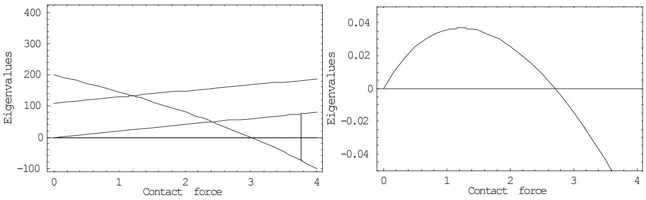
[2] 原田・中野・金子・辻：複数対象物の操り，日本ロボット学会誌，18-2, pp. 236-243, 2000

[3]山田・大場・三村・舟橋：転がり接触を考慮した 2 次元 2 物体把握系の安定性解析，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04，名城大学 2004 年 6 月



(a) (b)

Fig. 6: Effect of curvature κ



(a) (b)

Fig. 7: Effect of grasp force f