解説

手指の筋骨格と巧みさの源泉

Musculoskeletal System of Maniphalanx and Origin of Dexterity

有本 卓^{*1} 田原 健二^{*2} 吉田 守夫^{*3} ^{*1}立命館大学 ^{*2}九州大学 ^{*3}理研 RTC

Suguru Arimoto^{*1}, Kenji Tahara^{*2} and Morio Yoshida^{*3} ^{*1}Ritsumeikan University ^{*2}Kyushu University ^{*3}RTC, RIKEN

1. はじめに

人類が他の類人猿に比して, “Intelligent” になり得たきっかけは三つある. 第一は2足歩行, 第二は音声言語の使用, 第三は道具造り (Tool-making) である. 偉大な人類学者であり, 医者でもあった John Napier は, その著書 [1] の中で, 人間が他の類人猿と峻別できるもう一つの要因に, 拇指が他の指と対向できるようになったこと, すなわち, “Fingers-thumb opposability” を挙げている. Napier は, 著書 [1] の p.51 で Isaac Newton の名前をもち出し, 拇指の偉大さ, 力強さ, 巧みさに神を見る, と告げている. 人類の拇指は太く, 長く, 鞍関節のおかげで動きはスムーズである上に, 力が強い. それは道具造りに決定的に寄与した. 手は, 触ることで, 第五の感覚器にもなると言われる. 手話や踊りは典型例であるが, 手は対話し, 音声では表せない心象や意図を表現する器官にもなる. しかし, ここでは, 手指の筋骨格系と運動の自由度との関係を論じつつ, 手指の機能的側面を主として見て行きたい. 以下では, 感覚的側面を掘り下げることしないで, ロボットハンドの果たすべき機能が何であるか, 手の巧みさはどこから来るか, それは計算可能でコンピュータに実装できるか, 追及してみたい.

2. 手指の筋骨格系と自由度問題

霊長類の手は, 左右対称であり, それぞれが五本の指を持つ. 食べ物を手で口に運ぶ動作は霊長類を特徴づける行動様式である. リスやラッコもそうするが, 霊長類は片手で運ぶ. それゆえか, 感覚野や運動野では手指と口のニューロン群の局在は近接している.

2.1 筋骨格構造

人間の手先を構築する筋骨格系は非常に複雑である. 手首から先だけを見ても, 39の筋肉と27の骨で構築され, それらが互いに絡み合い, 協調しながら, 巧みな動作を生み出す.

拇指以外の四つの指 (示指, 中指, 薬指, 小指) は, 指の根元部分から MP 関節 (中手指節関節), PIP 関節 (近位指節間関節), DIP 関節 (遠位指節間関節) をそれぞれ有しており, MP 関節が2自由度関節であるので, 合計で一つの指につき四つの自由度を有している. 一方拇指は, 根元から ST 関節 (舟状大菱形関節), TM 関節 (大菱形中手関節), MP 関節 (中手指節関節), IP 関節 (指節間関節) を有しているが, ST 関節の可動範囲は他の関節と比較してわずかであり, また, TM 関節および IP 関節がそれぞれ2自由度を有しているため, 全体として5自由度として表現される場合が多い.

これら手指の運動にかかわる筋肉は, 前腕部に起点を持つ外在筋群 (Extrinsic muscles) と, 掌で完結している内在筋群 (Intrinsic muscles) に大別できる. 拇指以外の4本の指の DIP 関節, PIP 関節の屈曲や伸展など, 比較的大きな力を必要とする動作は, 浅指屈筋や深指屈筋, 総指伸筋などの外在筋群によって行われる. 図1に代表的な外在筋を示す. 外在筋は, 指先に付着した腱と結合しており,

図1 Several extrinsic muscles at the forearm

原稿受付 2010年4月9日

キーワード: Musculoskeletal System, Degrees-of-Freedom, Fingers-thumb Opposability, Precision Grip

^{*1}〒525-8577 草津市野路東1-1-1

^{*2}〒819-0395 福岡市西区元岡744

^{*3}〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞2271-130

^{*1}Kusatsu-shi, Shiga

^{*2}Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

^{*3}Moriyama-ku, Nagoya-shi, Aichi

図2 Flexion tendon configuration of the index finger; A1 to A5 pulleys are on each phalange

指先内で複雑に交差しながら骨に癒着している。各腱は指関節から離れず指に沿う形で運動するように、指骨にプーリーのような役割をする骨線維性トンネルが別途癒着しており、他の関節と異なる指先独特の駆動構造が見られる [2]。図2に示指の腱構造の概略を示す。

一方、内在筋群に含まれる背側骨間筋や掌側骨間筋などは、主に指の側方運動に用いられる。中様筋は、人体で唯一、起点が他の腱（深指屈筋腱）の途中から始まる特殊な筋肉であり、MP関節の屈曲に貢献しているが、筋力としては弱く、筋紡錘が多く含まれていることなどから、深指屈筋や総指伸筋の緊張を測定するセンサとしての役割があるのではとされている。また、浅指屈筋や深指屈筋、総指伸筋など、拇指以外のすべての指に付着した筋は、一見すると一つの筋であるが、実際にはモータポイント（運動点）が複数存在し、各指を独立して駆動するために、いくつかのパートに分かれている。しかし、これらの区分は厳密ではなく、お互いの指の運動に干渉が生ずる。

また、指全体の駆動構造としてパラレルリンク機構となっており、遠位の関節を駆動するための腱は、それ以前に存在する近位の関節すべてを通過して末端へ力を伝達するため、各指節関節間（例えばDIP関節とPIP関節）で干渉が生ずる。

2.1.1 拇指

冒頭でも述べたように、拇指は特に他の指と比較して独自の位置と機能を有しており、その最たるものとして“Fingers-thumb opposability”（拇指対向性）が挙げられる。拇指対向性は、実際は人だけでなく、ニホンザルなどいくつかの高等なサルも有した機能であるが、人間のその可動域は、それらと比較して抜きん出ている。

前節で紹介した外在筋群（浅指屈筋、深指屈筋、総指伸筋など）は、拇指以外の四つの指の運動にかかわっているが、これらの指とは独立して、拇指単独で機能する筋肉がいくつかある。外在筋では、長拇指屈筋、長拇指伸筋などがあり、内在筋では短拇指屈筋や拇指内転筋などがある。

2.1.2 大菱形中手関節（鞍関節）

拇指は、手が有する機能のほぼすべてにおいて重要な役

図3 Saddle-shaped TM joint at the thumb

図4 Saddle joint driven by two pairs of antagonistic muscles; The position of $\mathbf{x}$ and the rotational matrix $\mathbf{R}$ should be determined when each muscle length $l_1 \sim l_4$ is fixed

割を担っているが、その可動域の広さはTM関節（大菱形中手関節）と呼ばれる鞍状の関節で実現されている。これは、図3に示すように、大菱形骨と第一中手骨がそれぞれ鞍状の形をしており、それらの関節面が互い違いに合わさって実現されている、拇指特有の関節である。

この鞍関節構造の特徴として、図3より、関節 q_1 および q_2 が同軸上に存在し、その順序関係が存在しないことが分かる。すなわち、関節変数 q_1, q_2 と、手先位置 $\mathbf{x} = [x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ および姿勢 $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ の関係が運動経路に依存することになり、非ホロノミックな構造を持つ。しかし、今、この鞍関節が、例えば図4に示すような2組の

拮抗筋群で駆動されるとすると、上述したように、関節角度からみた手先位置・姿勢は非ホロノミックな拘束に支配されるが、筋長 $l_1 \sim l_4$ と関節角度 q_1, q_2 の間に定義されるホロノミック拘束を満たす範囲で各筋長を決定すると、手先の位置・姿勢が一意に決まってしまう。すなわち、筋長からみた手先位置・姿勢は、それぞれ $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3, l_4]^T \in \mathbb{R}^4$ の関数 $\mathbf{x}(\mathbf{l}), \mathbf{R}(\mathbf{l})$ として表され、鞍関節の各変数 q_1, q_2 の可動域が $-\pi < q_1, q_2 < \pi$ と仮定すると、筋長間の二つのホロノミック拘束のもとに、これら間で1対1の写像が可能となり、非ホロノミック拘束が陽に現れないことになる。

2.2 把持形態

手指を用いて物体を把持する際、ほぼ2種類の把持に大別されることが知られている。一つは掌全体を使ってものを把握する、ロボットハンドの分野ではいわゆる“Power grasp”や“Envelop grasp”と呼ばれる把握形態である。もう一つは、拇指対向性を用いた指先による“つまみ動作 (Prehension)”で、生理学では Precision grip (or prehension) などと呼ばれる。掌全体を用いた把握は、生まれたばかりの赤子が、掌を刺激された際に反射的に行う運動の一つであり、人間が本能的に有している動作であろう。一方、つまみ動作は、成長しある程度の知能を獲得した上で可能となる運動である。すなわち、生後、脳と指先の間で生成される何らかの運動知能が、環境との相互作用を通じた学習により徐々に獲得され、それによって可能となる運動であると考えられる。これら2種類の把持形態は、Cutkosky [3] や Kamakura ら [4] により、タスク別による分類が行われているが、タスクだけでなく、生理学上においても機能的・解剖学的に大きく異なっており、実際、各筋肉の動作戦略は両者でまったく異なることが示されている [5]。

3. 関節冗長性と動的安定把持

筋骨格系の詳細をざっと見て来たが、これらの特質が手の巧みさにどのように反映するか、明らかにするのは容易ではない。指の形とメカニズムに加え、筋骨格を詳細に模擬した人工の指が造られているが [6]、それがどのような作業に具体的に寄与するかは別の問題になる。ここでは、指の自由度構成が複数指同士の協調作業にどのように効果を発揮するか、今までの研究で判明できた結果を総括してみよう。具体的には、拇指と示指の一对を模した二次元ロボット指が Precision grip (ここではピンチングと呼ぶ) を行うにはどのような制御が可能か (図5参照)、その際の問題点を明らかにする。特に、自由度と巧みさの関係の本質的な特徴を考えやすくするために、またロボット指の設計指針を得るために、指先は凸形の任意形状とし、皮膚の柔軟性は考慮せずに、指先は剛体 (形状は変動しない) であると仮定する。図5では、左側の3関節を持つロボット指

図5 Precision prehension by means of the fingers-thumb opposability

を示指、右側の2関節を持つロボット指を拇指に対応させている。ここでは、拇指の鞍関節は固定させている、と想定している。つまり、図3の z 軸に沿う根元リンクが図5の紙面 (xy 平面) に固定され、拇指のIP関節とMP関節が図5の右側の指ロボットに対応する、と考える。そして、拇指の関節は独立に制御できるが、先端のDIP関節はPIP関節と強く干渉し、連動する。しかし、中指と比較して、示指DIPの回転 (伸展あるいは屈曲) モーメントは、PIPに対してかなり独立させて制御可能である。この連動成分はロボット制御による巧みさの生成につながるのだろうか。ここで、人の拇指と示指の最低限の自由度を保持し、基本的メカニズムを持たせた指ロボットで、輪郭線が滑らかな任意の凸状物体を安定把持できるかどうかの基本問題となることに気づく。そのとき、筋紡錘によって筋長がセンシングできることに対応させて、ロボット指では各関節の回転角とその角速度はセンシングできると仮定しよう (図6参照)。物体の形状や重心位置については、何らセンシングせずに、一对の指の先端を適当に物体に近接させ、両端を物体に接触させたとして、それから安定把持状態にもっていくにはどのような制御入力を関節に加えたらいのだろうか。なお、接触は剛体同士で起こるとするので、転がり接触とみなされねばならない。そのとき、そもそも安定把持の状態をどのように定義したらよいのだろうか。実は、Precision prehensionの巧みさは動的安定把持にあると思われるが、それは静的な安定把持とみなされる力/トルク閉包 (Force/torque closure) や不動化性 (Immobilizability) とどう異なるのだろうか。一般に、二つのそれぞれが滑らかな曲面をもつ剛体が点接触の状態で静止していると

図6 Precision prehension under arbitrary geometries of the fingerends and object

き、接触点における法線方向に力が働き、逆向きに反力があると考え、接線方向には力は作用していないと考えるのが静力学の常識である。しかし、接触点が動いているとき、すなわち、転がり運動しているときはどう考えるべきか。

4. 転がり拘束と安定把持

図6のような任意形状物体を扱う前に、平行平面をもつ物体把持に相当する二次元ピンチングを考えてみる(図7参照)。ロボット指の先端は半球状で物体が長方形形状であるとき、安定把持の問題は簡単になる。すでに文献[7]で述べているように、両指がともに1自由度であるとき安定把持が可能になる。物体の重心位置や物体幅が未知であっても、半球の中心位置 $O_i (i = 1, 2)$ は指の運動学から既知であると仮定できるので、 O_1 と O_2 を結ぶ直線方向に互いに押し付けると、指先半球は物体の輪郭線上を転がり、 $\overline{O_1O_2}$ の長さが極小になる姿勢で安定状態に到達する。実際、半球の中心を結ぶ直線上に接触点 P_1, P_2 が載っているとき、すなわち、 O_1, P_1, P_2, O_2 が一直線に並ぶとき、 O_1 と O_2 を結ぶ距離は最小になる。逆に $\overline{O_1O_2}$ の長さが極小に向かって転がり運動が進むように、関節制御入力を設計すればよい[8]。

ところが、指先の形状を半球ではなくもっと一般的な凸形状とした場合、どのような幾何学的条件下で $\overline{O_1O_2}$ が極小になるだろうか(図8参照)。この問題の解を見い出すには長い年月を要しており、2010年の現在になってしばらく二次元問題についておおむね解決するに到っている[9]。二次元物体を長方形に限ると問題は少しは簡単になるが、結論は、直線 $\overline{P_1P_2}$ と直線 $\overline{O_1O_2}$ が平行となるときに動的な安定状態となるような制御入力が設計可能である。そのとき、直線 $\overline{O_1O_2}$ の長さが極小になるのではなく(図9参照)、接触点 P_1 と P_2 において物体に加わる接線力および法線力の四つの分力が、物体の力/トルク閉包を満たす方向へ収束し、究極は合力と合トルクがゼロとなる極値状態

図7 Pinching by a pair of hemispherical fingerends

図8 Pinching by a pair of non-hemispherical fingerends

図9 Optimization of $P(\mathbf{X}, s_1, s_2)$ arises when $\overline{O_1O_2}$ is parallel to $\overline{P_1P_2}$ in the case of a rectangular object

にできるだけ近道で到達すること、として動的安定性が定義できる。そのとき、任意の接触位置から転がり運動を続けてこの極小状態に到達できることが要請されねばならない。言い換えると、両指先がその極小状態から少しずれた位置から転がり運動が始まっても、目標の極小状態にすぐに到達できる必要がある。そのためには、指がそれぞれ単一の関節しか持たないとき(自由度が1のとき)、長方形物体に限っても、指の根元が固定され、その固定点廻りの回転が回転関節として制御される1自由度ロボットの1対では、転がり運動だけで $\overline{P_1P_2}$ と $\overline{O_1O_2}$ が平行になる状態に推移させることは一般には不可能である。つまり、少なくともどちらかの指に2自由度が必要なのである。さら

図 10 Optimization of $P(\mathbf{X}, s_1, s_2)$ arises when $\overline{O_1O_2}$ is parallel to $\overline{P_1P_2}$ in the case of an arbitrary shaped object

に後述するように、動的な安定把持には両指とも 2 自由度が必要になる。図 6 の指一对では、示指に相当する右側のロボットは見かけ上 3 自由度を持たせているが、人の示指では PIP と DIP が連動して運動する。したがって回転角 q_{11} と $p_1 = q_{11} + q_{12} + q_{13}$ が独立に制御できると考えれば、図 6 の左側の指の自由度は 2 となる。

近年における非常に重要な発見は、図 6 に示すように、把持物体の輪郭が任意幾何形状であっても（ただし、当面は凸形状とする）、二つの指先接触点を結ぶ直線 $\overline{P_1P_2}$ が $\overline{O_1O_2}$ と平行になるとき（図 10 参照）、ある汎関数（人工ポテンシャル）が極小状態になるような、協調制御入力（Coordinated control）が構成できたことである [9]。その意味をもっと明確に説明するには、図 6 の精密把持を支配する運動方程式を導いておく必要がある。

5. ピンチングの運動方程式

図 6 に基づいて、各指先中心 O_i を原点とした局所座標系 $O_i - X_i Y_i$ を導入し、指の輪郭形状を表す曲線を $\gamma_{0i}(s_i) \in \mathbb{R}^2$ とすると、二次元水平面内ピンチング動作の運動方程式は次のように表される [10] [11]。

$$M\ddot{\mathbf{x}} - f_1 \bar{\mathbf{n}}_{01} - f_2 \bar{\mathbf{n}}_{02} - \lambda_1 \bar{\mathbf{b}}_{01} - \lambda_2 \bar{\mathbf{b}}_{02} = 0, \quad (1)$$

$$I\ddot{\theta} - f_1 \left(\mathbf{b}_{01}^T \gamma_{01} \right) + f_2 \left(\mathbf{b}_{02}^T \gamma_{02} \right) + \lambda_1 \left(\mathbf{n}_{01}^T \gamma_{01} \right) - \lambda_2 \left(\mathbf{n}_{02}^T \gamma_{02} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{G}_i(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{G}}_i(\mathbf{q}_i) + \mathbf{S}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \right\} \\ & + f_i \left\{ \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i) \bar{\mathbf{n}}_{0i} - (-1)^i \left(\mathbf{b}_{0i}^T \gamma_{0i} \right) \mathbf{e}_i \right\} \\ & + \lambda_i \left\{ \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i) \bar{\mathbf{b}}_{0i} - (-1)^i \left(\mathbf{n}_{0i}^T \gamma_{0i} \right) \mathbf{e}_i \right\} = \mathbf{u}_i, \\ & i = 1, 2. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで物体の質量中心 O_m は、慣性座標系 $O - xy$ に基づいてベクトル $\mathbf{x} = [x, y]^T \in \mathbb{R}^2$ で表し、物体の姿勢角を

$\theta \in \mathbb{R}^1$ としている。また、 $\mathbf{q}_1 = [q_{11}, q_{12}, q_{13}]^T \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{q}_2 = [q_{21}, q_{22}]^T \in \mathbb{R}^2$, $\mathbf{e}_1 = [1, 1, 1]^T \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{e}_2 = [1, 1]^T \in \mathbb{R}^2$ である。 $M \in \mathbb{R}^1$, $I \in \mathbb{R}^1$ はおのおの物体の質量および質量中心周りの慣性モーメントであり、 $\mathbf{G}_i(\mathbf{q}_i)$ は指 i の慣性行列、 $\mathbf{S}_i$ は歪対称行列、 $f_i \in \mathbb{R}^1$, $\lambda_i \in \mathbb{R}^1$ はそれぞれ物体に働く法線方向および接線方向の分力の大きさを表す。また、 $\bar{\mathbf{n}}_{0i} \in \mathbb{R}^2$, $\bar{\mathbf{b}}_{0i} \in \mathbb{R}^2$ は、おのおの物体と指の接触点における物体表面上の単位法線、および単位接線ベクトルであり、上付きのバーが付随したベクトル ($\bar{\mathbf{n}}$ および $\bar{\mathbf{b}}$) は慣性座標系 $O - xy$ に基づくベクトル表記を表す。その他の記号の詳細は文献 [11] に譲るが、式 (1), (2) がそれぞれ物体の並進運動および回転運動を表し、 f_i と λ_i に掛かる四つのベクトル

$$\begin{cases} \mathbf{w}_{f_1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{n}}_{01} \\ \mathbf{b}_{01}^T \gamma_{01} \end{bmatrix} & \mathbf{w}_{f_2} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{n}}_{02} \\ \mathbf{b}_{02}^T \gamma_{02} \end{bmatrix} \\ \mathbf{w}_{\lambda_1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{b}}_{01} \\ -\mathbf{n}_{01}^T \gamma_{01} \end{bmatrix} & \mathbf{w}_{\lambda_2} = \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{b}}_{02} \\ \mathbf{n}_{02}^T \gamma_{02} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

は、二次元のレンチベクトル (Wrench vector) とみなされる。ここで $\mathbf{n}_{0i}$, $\mathbf{b}_{0i}$ は、それぞれ物体の局所座標で表した指先接触点における単位法線、単位接線ベクトルであり、 γ_{0i} は同じく輪郭曲線を表す。式 (4) の四つのレンチベクトルが、図 6 のような任意形状物体においても物体を両端から挟むような接触位置にあると、力/トルク閉包を構成することが検証できる。実際、このことは物体が平行面をもつ二次元ピンチングの場合、 $f_1 = f_2 = f_d$ かつ $\lambda_1 = -\lambda_2 = \lambda_d$ として、平衡状態が得られることが容易に確かめられよう。また、物体に重力が働く場合は、それを補償しつつ平衡状態に到達する f_i , λ_i ($i = 1, 2$) が選べることも理解できよう。一般に指先が転がらないとき、物体との間に働く拘束力は物体面の法線方向のみにある。そのとき、これを “Frictionless finger” と呼ぶ。よく知られているように、三角形物体に対しては指先が三角形の最大内接円との接触点にあるとき、三つの法線力が作るレンチベクトルの全体が力/トルク閉包を構成する（図 11 参照）。この三つの無摩擦指は、同時に不動化の条件を満足する。不動化 (Immobilizability) とは、物体をどのような方向に移動し、またどのように回転させても、固定した指先が物体のどこかの内点にめり込むこと (Penetrate) が必然になる、つまり、指先が物体にめり込むことなしには物体は動けないことをいう。図 11 の三角形は真に 3 本の無摩擦指に対して不動化の状態にある。しかし、物体そのものが内接円であるとき、その円は中心 O_m まわりにめり込むことなしに回転できるので、不動化の状態にはないが、力/トルク閉包は構成している。

一般に二次元物体では、平行四辺形の物体を除くと 3 本

図 11 Immobilizability of a 2-D triangular object by means of three frictionless fingers

の無摩擦指で力／トルク閉包や不動化が構成でき、“Power grasp”が実現できる。しかし、不動化の状態では物体が環境と接触する場合、転がりを許容しない限り、“めり込み (penetration)”を起こそうとする力が働く。つまり、転がりの許容は、物体や環境を損傷する方向へ力が加わらないようにする働きがあるのである。手先の巧みさや器用さは、転がりを許すときに創発できると言っても過言ではない。当然であるが、指先が柔軟材で被覆されることは、安全性をより高めることになる。しかし、柔軟材の動的モデルを式 (1) から (3) の中にどのように組み込むべきか、相当に綿密な議論が必要となる。まだ十分には解析できていないが、柔軟性は収束域 (Attractor) を広げているに違いない。

6. 制御入力と停留作用の原理

図 9 や図 10 のように、力／トルク閉包を満たし、かつ動的安定な状態に収束させるための制御入力は次のように構成可能である。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i = & -\mathbf{c}_i \dot{\mathbf{q}}_i + (-1)^i \beta \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i) (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \\ & - \beta \alpha_i \{p_i(t) - p_i(0)\} \mathbf{e}_i, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに右辺第 1 項は指関節に加えるダンピング ($[\text{N/m}]$)、 $\mathbf{r}_i$ は指先中心 O_i の位置ベクトル、 $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i)$ は $\mathbf{r}_i$ の $\mathbf{q}_i$ に関するヤコビ行列であり、 β は物理単位を $[\text{N/m}]$ とする制御ゲイン、 α_i は $[\text{m}^2]$ を単位とする制御ゲインである。また、 $p_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}$ ($i = 1, 2$) であり、 n は各指の関節数である。この制御信号は物体情報に依存せず、指側の関節角度と角速度の測定値 (感覚) のみによって構成できる。しかも、右辺第 2 項は各関節角度の値ではなく、示指については DIP と PIP を連動させて運動させることを示唆している。第 2 項のゲイン β は、拇指と示指に共通させて等しく設定することが肝要であり、これがピンチング動作の協調 (Coordination) を創発する。言い換えれば、共通のゲイン β を用いることで拇指と示指の動きを共鳴 (Synchronization) させているのである。そのとき、制御入力

$\mathbf{u}_i$ は、人工ポテンシャル

$$\begin{aligned} P(\mathbf{X}, s_1, s_2) = & \frac{\beta}{2} \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2\|^2 \\ & + \frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^2 \alpha_i \{p_i(t) - p_i(0)\}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

が極小値へ向かうように働くことが示されている [11]。つまり、式 (5) を式 (3) に代入して得られた閉ループダイナミクスは、式 (6) をポテンシャルとしてもつようなラグランジュの運動方程式として見るができる。そこには、物体や指先形状が関係しており、また、転がりの幾何学的拘束条件が課せられてはいるが、運動がポテンシャルの極小値に向かうという停留作用の原理が働くのである [11]。なお、 $\mathbf{X} = [\mathbf{q}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \mathbf{x}^T, \theta]^T$ としている。式 (5) と (6) を並べて吟味すれば、式 (5) の第 2 項が式 (6) の第 1 項と対応することが分かる。つまり、指先中心 O_i は角度 p_i をもつ軸上のどこにあっても良いのであって、図 9 や図 10 に示すように、安定把持は式 (5) の制御信号によって、 $\overline{O_1 O_2}$ と $\overline{P_1 P_2}$ が平行になるように働くのである。

7. おわりに

人の拇指と示指の一对について、筋骨格系と自由度構成の観点から、動的安定把持 (Precision prehension) を中心にした論点を概説した。すでに人の手を模した 5 本指ハンドは作られている [12]。ごく最近の研究では [13]、各指に 1 個のアクチュエータのみを搭載し、“Tendon driven”のみで関節を連動させる研究も見られるが、そこでは“Power grasp”に焦点が絞られており、動的な観点は配慮されていない。動的安定把持は、その後の物体操作 (例えば物体を棚に置く、重ねる、挿入する、ずらす、等々) を滑らかにする準備動作であり、基本動作である。これらが組み合わせられて巧みさが生まれる。

二次元ピンチングに限っても、上述したように動的安定把持の解析は困難を窮めていた。その困難な道程は Bichi [14] がすでに予測していた。現在、二次元に限ってではあるが、任意物体のピンチングの数値シミュレーション法が提案されている [15]。しかし、三次元ピンチングのモデル化や安定把持の制御問題はわずかな研究しか試みられていない [16]。ロボットハンドが日常生活に活動の場を広げるためには、想定されるあらゆる幾何学条件のもとで相互作用を計算可能にするモデル化 (三次元モデル) は、欠かすことができないのである。また、動的安定把持の研究は筋電義手の開発の拠り所とならねばならない。

参考文献

- [1] J. Napier: Hands. Princeton University Press, 1993.
- [2] I. Kapandji (訳 塩田悦仁): カバンディ 関節の生理学 I 上肢. 医

歯業出版, 2006.

- [3] M.R. Cutkosky: "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.5, no.3, pp.269-279, 1989.
- [4] N. Kamakura, M. Matsuo, H. Ishii, F. Mitsuboshi and Y. Miura: "Patterns of static prehension in normal hands," American J. Occupational Therapy, vol.34, no.7, pp.437-445, 1980.
- [5] A.M. Wing, P. Haggard and J.R. Flanagan: "Hand and Brain—The Neurophysiology and Psychology of Hand Movements—," Academic Press Inc., 1996.
- [6] M.V. Weghe, M. Rogers, M. Weissert and Y. Matsuoka: "The ACT hand: Design of the skeletal structure," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.3375-3379, 2004.
- [7] 田原健二, 山口光治, 有本卓: "最小自由度をもつ柔軟 2 本指ロボットによる安定把持および姿勢制御のためのセンソリーフィードバック", 日本ロボット学会誌, vol.21, no.7, pp.763-769, 2003.
- [8] S. Arimoto: "Intelligent control of multi-fingered hands," Annual Review in Control, vol.28, no.1, pp.75-85, 2004.
- [9] S. Arimoto: "Dirichlet-Lagrange stability for redundant mechanical systems under constraints II: 2-D grasping with rolling contacts under arbitrary geometry," submitted to SICE J. of Control, Measurement, and Systems Integration, 2010.
- [10] S. Arimoto, M. Sekimoto, M. Yoshida and K. Tahara: "Modeling and control of 2-D grasping of an object with arbitrary shape under rolling contact," SICE J. of Control, Measurement, and System Integration, vol.2, no.6, pp.379-386, 2009.
- [11] S. Arimoto and M. Yoshida: "Modeling and control of 2-D grasping under rolling contact constraints between arbitrary shapes: A Riemannian-geometry approach," J. Robotics, vol.2010, Article ID: 926579, 2010.
- [12] H. Kawasaki, T. Komatsu and K. Uchiyama: "Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand II," IEEE/ASME Trans. Mech., vol.7, no.3, pp.296-303, 2002.
- [13] S.A. Dalley, T.E. Wiste, T.J. Withrow and M. Goldfarb: "Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation," IEEE/ASME Trans. Mech., vol.14, no.6, pp.699-706, 2009.
- [14] A. Bicchi: "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road towards simplicity," IEEE Trans. Robot. Automat., vol.16, no.6, pp.652-662, 2000.
- [15] 吉田守夫, 有本卓, 田原健二: "点補間法を用いた任意形状輪郭モデルの物体把持数値シミュレーション", 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.1367-1370, 2009.
- [16] K. Tahara, S. Arimoto and M. Yoshida: "Dynamic force/torque equilibrium for stable grasping by a triple robotic fingers system," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots, Syst., pp.2257-2263, 2009.

有本 卓 (Suguru Arimoto)

1959 年京都大学理学部数学科卒業。同年沖電気工業(株), 1962 年東京大学工学部助手, 1967 年同講師, 1968 年大阪大学基礎工学部助教授, 1973 年同教授, 1988 年東京大学工学部計数工学科教授, 1997 年立命館大学理工学部ロボティクス学科教授, 2007 年より立命館大学総合理工学研究機構客員教授, 現在に至る。2008 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター客員研究員。大阪大学名誉教授。制御理論, 情報理論, ロボティクス, 機械知能の研究に従事。1983 年 IEEE Fellow, 2000 年 IEICE Fellow, 2002 年本学会フェロー, 2005 年日本機械学会フェロー, 2006 年計測自動制御学会フェロー, 同年情報理論とその応用学会名誉会員。2000 年紫綬褒章受章, 同年 IEEE Third Millennium Medal 受賞, 2006 年 IEEE RAS Pioneer Award 受賞, 2007 年 ASME Rufus Oldenburger Medal 受賞。1995-97 年本学会会長, 2008 年本学会名誉会長。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, システム制御情報学会等の会員, 工学博士。(日本ロボット学会名誉会員)

田原健二 (Kenji Tahara)

2003 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所 BMC 研究センター研究員, 2007 年九州大学高等研究機構 SSP 学術研究員, 2009 年より九州大学高等研究院特別准教授, 現在に至る。2007 年より九州大学大学院システム情報科学研究院特任准教授(兼任)。2009 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター客員研究員。多指ハンドによる動的物体操作, 筋骨格系による運動モデリング, 冗長・列駆動系の制御などの研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, システム制御情報学会等の会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

吉田守夫 (Morio Yoshida)

2007 年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年理化学研究所 BMC 研究センター研究員, 2008 年より理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター研究員, 現在に至る。多指ハンドによる物体把持に関する研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会等の会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)