解説

動的安定把持に基づくマニピュレーション

Object Manipulation based on the Dynamic Stability

田原 健二* *九州大学

Kenji Tahara* *Kyushu Univ.

1. はじめに

多指ロボットハンドで物体を把持・操作する際、物体操作中に物を落とさないよう、安定に把持することは必須である。これまで物体の安定把持と言え、静的に把持力がつり合った状態を指す場合が多く、その指標として、Form closure や Force/Torque closure といった幾何学的・静力学的な安定把持条件が一般的に知られている [1] [2]。しかし、これらの条件は“安定把持可能な指先接触位置・力の存在”のみを与え、それらによって要求された把持位置・姿勢を、多指ハンドが実現可能かどうかについては、何ら見解を与えない。よって、これらの指標により安定把持の実現が保証されるわけではなく、一般的には、別途用意した何らかの把持計画手法内において、把持力最適化の指標や、安定把持の可否判断等に利用される [3]。

一方、筆者らは、上述した静的な安定把持条件に基づく物体把持ではなく、動力学的要素を考慮した物体把持手法をこれまで提案している [4]~[6]。これらの研究では、物体-指先間の転がりによる拘束力を陽に含んだ運動方程式を導出し、制御入力まで含めた系全体のダイナミクスについて、受動性を基にした安定解析を行うことにより、動的な意味での物体の安定把持を実現している。提案手法では、Form closure や Force/Torque closure といった既存の幾何学的・静力学的な安定把持条件は用いておらず、例えば何らかの外力が作用した際など、厳密にそれらの条件を満たさない瞬間が存在する。しかし、指先の転がりと各関節の逆可動性によって外力を柔軟に受け流すことにより、各指先および把持物体ともに動きながらも、把持物体を落とすことなく安定把持を保つことができる。

本稿では、Form closure や Force/Torque closure といった従来の安定把持指標について解説し、それらとは異なる筆者らの提案する動的安定把持手法について、前者との類似点・相違点を見ていくことにする。そして、受動性を基

にした安定性解析により、動的な安定把持を保証する一つの手法を紹介する。

2. Form closure と Force/Torque closure

Form closure は、物体を静的に安定把持するための幾何学的な条件である。基本的には、摩擦なし点接触 (Frictionless point contact) による物体把持において、何本の指をどう配置すれば物体を安定把持できるかを表す。例えば図 1 のように、二次元平面内の長方形を幾何学的に安定把持するには、合計で 4 本の Frictionless finger が必要である。直感的には、二次元物体の自由度は、二つの位置変数と姿勢角 $[x, y, \theta]$ の 3 自由度であるため、三つの指による接触点 (ホロノミック拘束条件) で安定把持が実現できそうであるが、現実には、各指が物体から離れないようにする条件がもう一つ必要なため、二次元物体の安定把持には接触点が四つ必要である [7]。同様の理由で、三次元物体の安定把持には七つの接触点が必要とされている [8]。

Form closure は摩擦なし点接触を仮定しているが、Force/Torque closure は接触点の摩擦を考慮した場合への拡張と捉えられることが可能であり、これら二つの指標は本質的に等価である [2]。ある指先接触力によって物体に発生する力・トルクの組を表すベクトルをレンチベクトル (wrench vector) と言うが、すべてのレンチベクトルの合

図 1 摩擦なし点接触による物体把持：接触点での摩擦を考慮しないため、接触力は接平面に対して垂直方向となる

原稿受付 2013 年 2 月 18 日

キーワード: Stable Grasping, Force/Torque Closure, Dynamic Force/Torque Equilibrium

*〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

*Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka

計がゼロになれば、見かけ上、把持物体に加わる外力がゼロとなり、物体はもはや加速度を持たないことになる。すなわち、指先から物体に印加可能な力・トルクを表すすべてのレンチベクトルによって張られる集合（これを凸包（Convex hull）と呼ぶ）が、原点を内点として含めば、Force/Torque closure の条件を満たし、物体を安定に把持することができる。前述した安定把持のために自由度+1の接触点（二次元物体では四つ、三次元物体では七つ）が必要な理由は、指先接触力は負になることが許されない（ゼロ以下になった時点で指先は物体表面から離脱してしまう）ので、これを正に保つためである。今、図1のモデルにおいて、紙面を裏から表に貫く方向を正とした z 軸を設定し、各指先から物体に加えられる力を $\mathbf{f}_i \in \mathbb{R}^3$, ($i = 1 \sim 4$)、各指先の接触点位置から物体の質量中心位置 $O_{c.m.}$ までの距離を $\mathbf{r}_i \in \mathbb{R}^3$, ($i = 1 \sim 4$) とすると、各指先接触点から物体に加えられる力・トルクのレンチベクトル $\mathbf{w}_i \in \mathbb{R}^6$, ($i = 1 \sim 4$) は、以下のように表される。

$$\mathbf{w}_i = [\mathbf{f}_i^T, (\mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i)^T]^T \in \mathbb{R}^6, \quad i = 1 \sim 4. \quad (1)$$

物体把持において、Form closure や Force/Torque closure を満たす条件は、あらゆる外力（レンチベクトル） $\mathbf{w}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^6$ に対して、それに対抗し得る各指先からのレンチベクトルが生成可能であるとされており、以下のように定義される。

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i \mathbf{w}_i + \mathbf{w}_{\text{ext}} = \mathbf{0}. \quad (2)$$

ここで α_i は、 $\alpha_i > 0$ を満たすパラメータである。Form closure では摩擦を考慮しないため、レンチベクトルは指先接触面に対して垂直方向となる。一方、Force/Torque closure は静止摩擦力を考慮するため、指先が滑らないようなレンチベクトルが取り得る領域は、静止摩擦係数によって定義される円すい形状となり、これを摩擦円すい（Friction cone）と呼ぶ（図2参照）。Form closure では各レンチベクトルは物体接触面に対して必ず垂直であったが、Force/Torque closure では円すい領域に拡張されることにより、Form closure よりも広範囲で安定把持領域を持つことになる。さらに柔軟指のように、面接触を許容して物体接触面に垂直な軸回りの回転摩擦（捻り摩擦）を定義すれば、Force/Torque closure を満たす領域はより広くなる。物体把持モデルにおいてよく利用される、1) 摩擦なし点接触モデル、2) 剛体指モデル、3) 柔軟指モデルをそれぞれ図3に示す。

三次元空間での物体把持では、各指のレンチベクトルが六次元であり、それによって張られる凸包を視覚化することが難しい。例えば接触力3自由度と、モーメント3自由度をそれぞれ分けて視覚化する方法もあるが、力とモーメントは独立ではないため、厳密には正しくない。しかし、二

図2 摩擦円すいを考慮した物体把持：指先からの把持力は、指先接触面に対して垂直方向の成分だけでなく、水平方向成分も含まれる

図3 基本的な指先接触モデル

図4 4点の摩擦なし点接触把持のレンチベクトルで張られる凸包

次元に限れば、物体の質量中心に加わる $[x, y]$ 方向力、および θ 方向のモーメントの三次元ベクトルとして表すことができるため、視覚化可能である。図4に、二次元物体を摩擦なし点接触による4本指で把持した場合の凸包の例を示す。この凸包が原点 O を含んでいれば、物体質量中心に加わる力・モーメントをゼロにできる指先接触力の組み合わせが存在し、これを Form closure もしくは Force/Torque closure と呼ぶ。凸包の表面が原点から遠い程、外力に対する許容量があり、また、原点を中心として均一な形状（例

図7 物体座標系で表された接触面中心位置

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{q1} = (r_1 - \Delta r_1) \mathbf{r}_Z^T \mathbf{J}_{\Omega 1} + \mathbf{r}_X^T \mathbf{J}_1, \\ \mathbf{X}_{x1} = -\mathbf{r}_X^T, \quad \mathbf{X}_{\omega 1} = [0, -Z_1, Y_1]^T \\ \mathbf{Z}_{q1} = -(r_1 - \Delta r_1) \mathbf{r}_X^T \mathbf{J}_{\Omega 1} + \mathbf{r}_Z^T \mathbf{J}_1, \\ \mathbf{Z}_{x1} = -\mathbf{r}_Z^T, \quad \mathbf{Z}_{\omega 1} = [-Y_1, X_1, 0]^T \end{cases} \quad (6)$$

であり、 $\mathbf{J}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ は各指の関節角度と指先半球中心位置に関するヤコビ行列を表す。

一方、捻り方向の力は、散逸関数による粘性摩擦としてモデル化を試みる。例えば指1の捻り粘性は、以下のように表される。

$$T_1 = \eta_1 \|\mathbf{r}_Y^T (\mathbf{R}\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\Omega}_1)\|^2 \quad (7)$$

ここで $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_X, \mathbf{r}_Y, \mathbf{r}_Z] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は把持物体の姿勢を表す回転行列であり、 η_i は物性に依存する粘性係数である。

3.2 運動方程式

前節で導入した転がり拘束や捻り粘性を考慮すると、3本指による直方体の把持について、例えば指1のダイナミクスは入力トルクを $\mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^4$ とすると、以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 \ddot{\mathbf{q}}_1 + \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{H}}_1 + \mathbf{S}_1 \right\} \dot{\mathbf{q}}_1 + \frac{\partial T_1}{\partial \dot{\mathbf{q}}_1} \\ + \left[\mathbf{X}_{q1}^T, \mathbf{J}_1^T \mathbf{r}_Y, \mathbf{Z}_{q1}^T \right] \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{X1} \\ -f_1 \\ \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_1} = \mathbf{u}_1 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで $\mathbf{H}_i$ は指の慣性行列、 $\mathbf{S}_i$ は歪対称行列、 $\mathbf{f}_i$ は接触面法線方向の把持力、 λ_{X_i} 、 λ_{Y_i} 、 λ_{Z_i} は転がりによって発生する接触面方向の拘束力を表している。一方、物体のダイナミクスは以下のように表される。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{R} \left(\underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{X1} \\ -f_1 \\ \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_{X2} \\ f_2 \\ \lambda_{Z2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_2} + \underbrace{\begin{bmatrix} -f_3 \\ \lambda_{Y3} \\ \lambda_{Z3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_3} \right) = \mathbf{0} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial T_i}{\partial \boldsymbol{\omega}} \\ - \underbrace{\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_{X1} \\ -f_1 \\ \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{f}_1} - \underbrace{\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_{X2} \\ f_2 \\ \lambda_{Z2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_2 \times \mathbf{f}_2} - \underbrace{\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -f_3 \\ \lambda_{Y3} \\ \lambda_{Z3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_3 \times \mathbf{f}_3} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで $\mathbf{M}$ は物体質量、 $\mathbf{I}$ は慣性主軸で表された物体の慣性モーメントを表す。式(9)、(10)から分かるように、指先から物体に伝えられるレンチベクトル $\mathbf{w}_i$ は、転がりによって発生する拘束力を考慮した形で表現可能であり、物体座標系で表された各レンチベクトル $\mathbf{w}_i$ は、式(2)と同様に以下のように表される。

$$\mathbf{w}_i = \left[\mathbf{f}_i^T, (\mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i)^T \right]^T \in \mathbb{R}^6, \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

しかし式(9)、(10)には、明らかにレンチベクトル以外の項(慣性項やコリオリ力・遠心力等の非線形項)があり、また、各接触点位置ベクトル $\mathbf{r}_i$ は、式(4)に示すように転がりによって変動するため、一般的な Force/Torque closure による安定把持の議論はできない。さらに、接触力 $\mathbf{f}_i$ は、指先の柔軟変形およびロボット側のダイナミクスを通して関節的に与えられるため、当然ながらロボット自身のダイナミクスの影響を受け変動するため、安定把持を行うためには、適切なロボット側の制御入力と、それを含めた閉ループ系全体の非線形な微分方程式の収束性を示す必要がある。しかし逆に言えば、接触点の変動するおかげで、初期接触位置において Force/Torque closure が満たされてなかったとしても、ロボット側の制御入力により、安定把持領域まで遷移できる可能性がある。

4. 安定把持制御入力

安定把持を実現するために、ロボットにどのような制御入力を与えればよいだろうか？ ここは様々な手法が考えられるが、物体の詳細な事前知識(質量や形状等)を陽に利用することは現実的に難しい。そこで、ここでは有本ら[4]によって提案された対向指把持制御を、3本指に拡張した方法を紹介する[5][6]。具体的には以下のような制御入力である。

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{si} + \mathbf{u}_{ci} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{si} = -\frac{f_d}{\sum_{i=1}^3 r_i} \mathbf{J}_i^T (\mathbf{x}_{0i} - \mathbf{x}_M) - \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i \\ \mathbf{u}_{ci} = -\frac{r_i f_d}{3 \sum_{i=1}^3 r_i} \mathbf{J}_{\Omega i}^T \dot{\mathbf{N}}_i \end{cases} \quad (13)$$

ここで f_d はノミナルな目標把持力であり、 $\mathbf{C}_i$ は粘性係

数を表す正定対角行列である。また、 $\mathbf{x}_M = 1/3 \sum_{i=1}^3 \mathbf{x}_{0i}$ であり、すなわち $\mathbf{u}_{si}$ は、各指先半球中心位置によって作られる三角形の幾何中心 $\mathbf{x}_M$ に向けて各指を押し付ける入力となる。 $\mathbf{u}_{ci}$ は物体から指先が受けるモーメントを補償する適応項であり、以下の更新則に従って実時間で更新される。

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{N}}_i = \frac{r_i f_d}{3 \sum_{i=1}^3 r_i} \mathbf{\Gamma}_i^{-1} \mathbf{J}_{\Omega_i} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (14)$$

ここで $\mathbf{\Gamma}_i^{-1}$ は正定対角行列であり、適応補償ゲインを表す。式 (12) を各指への入力トルクとして、閉ループダイナミクスを導出すると、例えば指 1 は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 \ddot{\mathbf{q}}_1 + \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{H}}_1 + \mathbf{S}_1 + \mathbf{C}_1 \right\} \dot{\mathbf{q}}_1 - \frac{r_1 f_d}{3 \sum_{i=1}^3 r_i} \Delta \mathbf{N}_1 \\ + \frac{\partial T_1^T}{\partial \dot{\mathbf{q}}_1} + \left[\mathbf{Y}_{q1}^T, \mathbf{J}_1^T \mathbf{r}_Y, \mathbf{Z}_{q1}^T \right] \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{X1} \\ -\Delta f_1 \\ \Delta \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{f}_1} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで $\Delta \mathbf{N}_i = \mathbf{J}_{\Omega_i}^T (\hat{\mathbf{N}}_i - \mathbf{N}_i)$ であり、 $\mathbf{N}_i$ は各指先半球中心に加わる反モーメントの値、 $\hat{\mathbf{N}}_i$ は適応項による推定値である。同様に、 Δf_i 、 $\Delta \lambda_{X_i}$ 、 $\Delta \lambda_{Z_i}$ は、力・トルクの平衡状態に対する誤差の値を示しており、これらがゼロに収束すれば、それはすべての外力がゼロとなることを意味する。一方、物体側の閉ループダイナミクスは以下のように表される。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{R} \left(\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{X1} \\ -\Delta f_1 \\ \Delta \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{f}_1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \lambda_{X2} \\ \Delta f_2 \\ \Delta \lambda_{Z2} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{f}_2} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\Delta f_3 \\ \Delta \lambda_{Y3} \\ \Delta \lambda_{Z3} \end{bmatrix}}_{\Delta \mathbf{f}_3} \right) = \mathbf{0} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial T_i^T}{\partial \boldsymbol{\omega}} - \underbrace{\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{X1} \\ -\Delta f_1 \\ \Delta \lambda_{Z1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_1 \times \Delta \mathbf{f}_1} \\ - \underbrace{\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{X2} \\ \Delta f_2 \\ \Delta \lambda_{Z2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_2 \times \Delta \mathbf{f}_2} - \underbrace{\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\Delta f_3 \\ \Delta \lambda_{Y3} \\ \Delta \lambda_{Z3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{r}_3 \times \Delta \mathbf{f}_3} + \mathbf{N}_{\Omega} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) 左辺最後の項 $\mathbf{N}_{\Omega}$ は、各指先接触点から加わるモーメントの残りの成分であり、指先接触面中心位置で表したモーメント成分 $\sum_{i=1}^3 \mathbf{N}_i$ の反力に等しい。よって、各

指に含まれる $\Delta \mathbf{N}_i$ がゼロとなることによって、この項もゼロとなる。

5. 受動性を基にした安定性解析

多指ハンドによる動的物体把持は、システム全体が大自由度系となり、かつ非ホロノミック拘束を含んでいるため、系全体の安定性の厳密な解析は困難である。しかし、受動性の概念を用いることで、平衡多様体近傍の局所的な安定性について示すことができる [5] [9]。

式 (15) ~ (17) で導出した閉ループダイナミクスと、対応する各速度ベクトルとの内積を取り、それぞれを加えると、以下のようなスカラー関数を得ることができる。

$$\frac{d}{dt} E = - \sum_{i=1}^3 (\dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i + T_i) \leq 0 \quad (18)$$

$$E = K + \Delta P + V \geq 0 \quad (19)$$

ここで K は全システムの運動エネルギー、 ΔP は指先の柔軟性によって蓄積される弾性ポテンシャルを表しており、指先が物体に接触している限り $\Delta P \geq 0$ である。また、 V は以下に表す非負定のスカラー関数である。

$$\begin{aligned} V = \frac{f_d}{6 \sum_{i=1}^3 r_i} \left\{ (X_1 - X_2)^2 + (X_2 - X_3')^2 \right. \\ + (X_3' - X_1)^2 + (Y_1' - Y_2')^2 + (Y_2' - Y_3)^2 \\ + (Y_3 - Y_1')^2 + (Z_1 - Z_2)^2 + (Z_2 - Z_3)^2 \\ \left. + (Z_3 - Z_1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \hat{\mathbf{N}}_i^T \mathbf{\Gamma}_i \hat{\mathbf{N}}_i \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

ここで

$$\begin{cases} X_i' = X_i + (r_i - \Delta r_i) \\ Y_i' = Y_i + (r_i - \Delta r_i) \end{cases} \quad (21)$$

である。式 (20) で表されたスカラー関数 $V \geq 0$ は、適応補償ゲイン $\mathbf{\Gamma}_i^{-1}$ を適切に選ぶことによって、ある初期状態の近傍において最小値 $V_{\min}$ を持つことが言える。一方、式 (19) で表されたスカラー関数 $E \geq 0$ もまた、 K および ΔP が非負であるため、 V と同様に初期状態近傍において最小値 $E_{\min} (\geq V_{\min})$ を持つことが以下のように言える。

$$E = K + \Delta P + V \geq V_{\min} \geq 0 \quad (22)$$

$$\therefore E_{\min} = K + \Delta P + V - V_{\min} \geq 0 \quad (23)$$

よって式 (18)、(23) より、以下の式を得る。

$$\int_0^\infty \sum_{i=1}^3 (\dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i + T_i) dt \leq E_{\min}(0) - E_{\min}(t) \leq E_{\min}(0) \quad (24)$$

式 (24) は、関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}_i(t)$ が時間 $t \in (0, \infty)$ において 2 乗可積分となることを示しており、これは $\dot{\mathbf{q}}_i(t) \in L^2(0, \infty)$ となることを表している。また、式 (3) で表される転がり拘束を考慮することにより、物体の並進速度および姿勢角速度も $\dot{\mathbf{x}} \in L^2(0, \infty)$, $\dot{\boldsymbol{\omega}} \in L^2(0, \infty)$ となることが言える。よって、すべての速度ベクトルが時間 t について一様連続となり、 $t \rightarrow \infty$ の時、すべての速度ベクトルがゼロに収束することが言える [11]。これは

$$\{\Delta \mathbf{f}_i, \Delta \mathbf{N}_i\} \rightarrow \mathbf{0} \text{ as } t \rightarrow \infty, \quad i = 1, 2, 3 \quad (25)$$

を意味しており、すなわち動的力・トルク平衡 (Dynamic force/torque equilibrium) の状態であることを表している。これにより、物体および各指先に加わる外力が見かけ上ゼロとなり、全システムの運動は静止する。以上のように、転がり拘束を含んだ物体把持システムにおいて、平衡多様体近傍ではあるが、制御入力まで含めた全システムの収束性を示すことができる。ここで全システムは冗長・劣駆動系であり、非ホロノミック拘束を含んでいるため、式 (19), (20) で表されたスカラー関数 V や E は、Lyapunov 関数とはならないことに注意されたい。また、式 (23) は、あくまで最小値の存在のみを主張しており、 V の最小値がどのような値を取っているかについては、現在のところ明らかになっていない。今後、より詳細な解析を行うことで、平衡多様体上でゼロとなるようなスカラー関数を新たに定義し、より明確に平衡状態を示す必要がある。

6. お わ り に

本論文では、Form closure および Force/Torque closure の概念と、筆者らが提案している動的物体把持手法について、レンチベクトルの類似点、およびダイナミクスにおける相違点について解説し、転がり拘束を含んだ冗長・劣駆動システムにおいて、受動性の観点から局所安定性が議論可能であることを解説した。

多指ハンドによる物体操作は、同じ冗長・劣駆動系であることから、2 足歩行とのアナロジーが指摘される。2 足歩行では、操作量として ZMP (ゼロモーメントポイント) が利用されており [12] [13], ZMP を両足支持多角形の内点とする歩行計画により、ロバストな歩行が実現可能とされる。一方で、例えば実際の ZMP が瞬間的に両足支持多角形の縁にあったとしても、即座に転倒という訳ではなく、転倒する前に脚を踏み出せば転倒を防ぐことができる。ZMP は重心加速度に由来する情報であり、厳密に Force/Torque closure とアナロジーが成立するわけではないが、物体把持において Force/Torque closure が満たされない瞬間があっ

たとしても、即座に物体把持が破綻する訳ではない。もっと言えば、物体把持においてあらゆる状態で静的に安定であることは必須ではなく、過度な安定性を保証するために運動が制約され、器用さという観点からはむしろ障害となる場合が多い。運動中、静的な意味で不安定状態になったとしても、最終的に力・トルク平衡状態へ遷移可能であればよく、それを実現する入力をどう構築するかが重要課題であるが、実際そのようなアプローチによる研究はまだ多くない。Force/Torque closure を利用した把持計画手法は、今後動的な方向へ拡張される可能性も十分あるが、どちらにしろ、特に多指ハンドの実用化という悲願達成には、更なる動的安定把持の議論が必須であろう。

参 考 文 献

- [1] B. Mishra, J. T. Schwartz and M. Sharir: "On the existence and synthesis of multifinger positive grips," *Algorithmica, Special Issue: Robotics*, vol.2, no.4, pp.541–558, 1987.
- [2] V.D. Nguyen: "Constructing force closure grasps," *Int. J. Robot. Res.*, vol.7, no.3, pp.3–16, 1988.
- [3] C. Ferrari and J.F. Canny: "Planning optimal grasps," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp.2290–2295, 1992.
- [4] S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi, P.T.A. Nguyen and H.Y. Han: "Principle of superposition for controlling pinch motions by means of robot fingers with soft tips," *Robotica*, vol.19, no.1, pp.21–28, 2001.
- [5] 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.
- [6] 田原ら: "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.
- [7] F. Reuleaux: *Kinematics of machinery*. Dover, 1875.
- [8] K. Lakshminarayana: "Mechanics of form closure," *ASME, Paper 78-DET-32*, 1978.
- [9] S. Arimoto: *Control theory of multi-fingered hands*. Springer-Verlag, 2007.
- [10] R. M. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: *Mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, 1994.
- [11] S. Arimoto: *Control theory of non-linear mechanical systems*. Oxford Univ. Press, 1996.
- [12] 水戸部ら: "ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御", *日本ロボット学会誌*, vol.18, no.3, pp.359–365, 2000.
- [13] 杉原, 中村: "重心モデルと台車型倒立振り子モデルのアナロジーによるヒューマノイドロボットの高機動制御", *日本ロボット学会誌*, vol.24, no.1, pp.74–83, 2006.

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。2003 年理化学研究所 BMC 研究センター研究員、2007 年九州大学大学院システム情報科学研究院特任准教授、2011 年より九州大学大学院工学研究院機械工学部門准教授、現在に至る。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, SICE 等の会員、博士 (工学)。

(日本ロボット学会正会員)