

# 日常物理学への挑戦

有本 卓

立命館大学 ロボティクス学科

## Challenging toward Everyday Physics

S. Arimoto

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

**Abstract** - It is said that ordinary tasks human encounters in his everyday life are the most difficult for robots to execute in replacement of human beings. The purpose of this short article is to seek for the reason and point out what kinds of robotics research are lacking and what kinds of research problems must be challenged in the next century. As one of such challenging research subjects a synthesis problem of dynamic stable grasping and dexterous manipulation by means of multi-fingered hands with soft-tips is discussed.

**Keywords** : Everyday physics, Robotics research, Multi-fingered hands, Dynamic stable grasping, Dexterous manipulation

### 1. はじめに

日常生活において人間ならごく普通に行う作業ほどロボットに代行させ難いといわれる。その原因をつきとめ、これを克服するために何を研究すべきか、ロボットの学問体系で何が不足しているか、を議論し、提言を試みる。また、そのような代表的な例として、柔軟指による物体把持と器用な操作への挑戦的取組みを述べる。

### 2. 常識的物理学への挑戦

日常の生活の中で、人間なら何気なく遂行できる作業ほど、ロボットに代行させることは困難である。たとえば、人間の手に似せて精巧に作られたハンドは今や枚挙にいとまないが（例えば、Shimoga[1] が歴代の研究者達が設計した沢山の例を挙げている）、人間の手がこなす作業をそのようなハンドにやらせようとすると、途端に、途方に暮れるが、逆にそこにどんな技術が不足しているかに気がつくことになる。実際、ロボットハンドについては、そのメカニズムの研究は多く、また、物体把持のためのプランニング、そのために必要な視覚についての研究は多いが、作ったハンドを様々な作業に適用し、器用に動かして対象を操作し、望み通りに作業させるにはどうすべきかについての研究は少ない。それは、メカニズム、センシング、プランニング、制御の研究がばらばらに行われ、これらを融合させ、統一的な観点から広く深い考察をしてこなかったからである。たとえば、対象物体を柔らかい指先をもつ多指ハンドで操作させようとするならば、それらの動作の全体像をダイナミックモデルで表現し、その構造を探り、その中に物理的原理を見つけることが先決であるにもかかわらず、そのような方向は看過されてきた。これらの動作を記述するダイナミクスすら導かれてはいなかった（例えば Shimoga[1] や Murray et al. [2] を参照。rigid contact をもつ動的モデルしか導出されていない）。ここでは、そのような研究方向への第一ステップとして、柔軟ハンドによる物体把持と操作に関する研究の七不

思議を取り上げ、次いで何を研究すべきか、その一例を議論する。

### 3. ロボットの手の研究に関する七不思議

- 1) 手先と物体との接触は rigid contact, 点接触としている（柔らかく、フレンドリーな接触と操作が必要といいながら）。
- 2) 安定把持は静的（static）にしか解析しない（物体操作と把持は動的に行われ、互いに関係している）。
- 3) 安定把持と物体操作はすべて open-loop 制御、従って planning にだけ研究が集中（人間は眼や触覚でセンシングし、フィードバックしているのに）。
- 4) 人間の手指を真似たメカニズムにどうして固執するのだろうか（作業によってはもっと簡明なメカニズムの方が有効かもしれないのに）。
- 5) 視覚についても、指先と物体との相対的な位置関係の測定を行う最小限だが高速のイメージ処理を何故やらないのか（モーメントの総和をゼロにするにはサーボサイクル内にこれらの測定ができさえすればいいのに）。
- 6) 人間の指先のように、形状変化にもなじむ分解能の高い触覚は何故作れないのか（ubiquitous sensing の重要性）。
- 7) 柔らかい材料をインターフェースしたとき、剛体と柔軟材と対象物を合体したトータルなダイナミクスモデルを何故導出しないのだろうか（人間介護にはヒューマンフレンドリーネスが必要だと言いながら）。

### 4. ダイナミクスの導出

図1のように平面内のみに動きを限定した2自由度の指2本が長方形対象物を操作するときのシステム全体

のダイナミクスは次のようになる。但し、ここでは指先は柔軟材で覆われ、形状は半球とした。また、この指先の変形による復元力は柔軟材の質量移動が小さいとし、“massless spring”が充填しているとして集中定数化することにより（接触面に起る圧力を総和して、接触中心  $(x_i, y_i)$  から曲率中心  $(x_{0i}, y_{0i})$  に向う復元力  $f_i(\Delta x_i)$  で表す）、14次元の幾何拘束つき非線形微分方程式が導出できた。

$$\begin{aligned} & \left\{ H_i(q_i) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} \dot{H}_i(q_i) \right\} \dot{q}_i + S_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i \\ & + (-1)^{i-1} J_{0i}^T \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} f_i \\ + \lambda_i & \left\{ r_i \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - J_{0i}^T \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \right\} = u_i, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H\ddot{z} + \sum_{i=1,2} (-1)^i \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \\ Y_i \end{pmatrix} f_i(\Delta x_i) \\ + \sum_{i=1,2} \lambda_i \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \\ (-1)^i (\Delta x_i - \frac{1}{2}l) \end{pmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $z = (x, y, \theta)^T$ ,  $H = \text{diag}(M, M, I)$ 。この方程式は一見複雑であり、拘束力が入り、非線形の上に、対象物は制御入力、によって直接制御できず、指の関節入力から間接的にしか制御せざるを得ない。しかし、入力と指の関節速度ベクトルの対  $\{\dot{q}_1, \dot{q}_2\}$  の間には“passivity”が成立する。

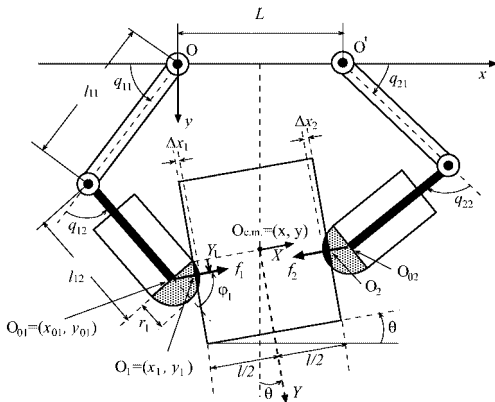


Figure 1: A setup of dual fingers with soft tips pinching a rigid object

## 5. 物理的原理の導出

前節では複雑な微分方程式を導出したが、もし、視覚か触覚によって面接触の中心  $Y_i$  の相対差  $Y_1 - Y_2$  が実時間測定できるなら、動的安定把持を実現できるフィードバック入力  $u_{fi}$  が見つかる [3][4]。更に、動的安定把持の上に対象物体の回転角を調節できる入力  $u_{\theta i}$  が見つかる。更に、図1の双対的な指を用いるとき、対象物体の質量中心の位置  $(x, y)$  の  $x$  座標を制御する入力  $u_{xi}$  あるいは  $y$  座標を制御する  $u_{yi}$  が見つかる [5]。人

間の親指と人差指に対応する2自由度と3自由度の指2本を用いるなら、上述のフィードバック制御入力が全部見つかれば、これらはそれぞれが関節角速度ベクトル  $(\dot{q}_1, \dot{q}_2)$  と“conjugate power pair”を作れるように選ぶことができる。このとき、制御入力は重ね合せの原理（principle of superposition）で設計できることになる（図2参照）。ダイナミクスが拘束条件つきの非線形微分方程式であるにもかかわらず、重ね合せの原理が適用できる稀な物理的原理が成立するのである。このことは、人間の脳内の神経ネットワークや記憶、情報処理に深く関係していると思えてならない [6]。

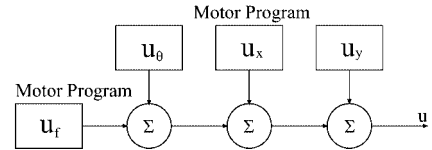


Figure 2: The principle of Superpostion

## 6. おわりに

日常物理学の課題と関連して、人間が日常的にやる知的作業のエッセンスが、簡単な動作といえども複雑な物理的モデルになってしまうが、しかし、確かに取り出せることの一例を見た。これはピンチング動作であったが、運動は2次元面に限った。3次元運動では同じようなことが成立するだろうか。指先の柔軟材の形状は一般化できるだろうか。実は、このようにダイナミクスを導出してみると、新たな原理が浮かび上る一方、挑戦すべき課題が沢山あることにも気づく。今後の研究を待ちたい。

## 参考文献

- [1] K. B. Shimoga: “Robot grasp synthesis algorithms: A survey”, Int. J. of Robotics Research, vol. 15, no. 3, pp. 230-266, 1996.
- [2] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry: Robotic Manipulation, CRC Press, Tokyo, 1994.
- [3] S. Arimoto, P. T. A. Nguyen, H. -Y. Han, and Z. Doulergi: “Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips”, Robotica, vol. 18, no. 1, pp. 71-80, 2000.
- [4] P. T. A. Nguyen and S. Arimoto: “Computer simulation of dynamics of dual fingers with soft-tips grasping an object”, Proc. of the 2000 Japan-USA Symp. on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan, July 2000.
- [5] 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”, to be published in Robotica, vol. 18, 2000.
- [6] 有本 卓: ロボットにかける夢, 岩波科学ライブラリー, 岩波書店, 2000.