

# 拡張自己姿勢変形動作の提案と把握動作への応用

○白井 達也 (広島大学) 金子 真 (広島大学)  
原田 研介 (広島大学) 辻 敏夫 (広島大学)

## Proposal of Extended Self-Posture Changing Motion and Application to Grasping Motion

\*Tatsuya SHIRAI Makoto KANEKO Kensuke HARADA and Toshio TSUJI : Hiroshima University

**Abstract**— Human can lift up a small cylindrical object through the change of his (or her) finger posture from upright to crooked ones after all fingers make contact with it. This motion is termed as the *Detaching Assist Motion (DAM)*. Based on this human grasping motion, we propose the *Extended Self-Posture Changing Motion (Ex-SPCM)* which can be achieved by combining with one compliant joint and one position controlled joint. We also implement it into the grasping procedure of a three-fingered robot hand and confirm that the *Ex-SPCM* is effective especially for handling a small size of object.

**Key Words:** Extended Self-Posture Changing Motion, Multi-fingered Robot Hand, Compliant Motion

### 1. はじめに

ロボットハンドによる把握戦略を考える際に、ヒトの把握動作が参考になることが多い<sup>1)–3)</sup>。Fig.1のようにテーブル上に置かれた円柱物体をヒトが把握する際の挙動を観察したところ、興味深い現象が発見された。Fig.1(a)のような大きさの場合は、左右から指先を押し込むだけの簡単な動作で滑りを利用してテーブルから引き離すことができる。これがいわゆるくさび効果<sup>3)</sup>を利用した引き離し動作である。しかし対象物の表面摩擦が大きい、または対象物のサイズが小さい場合、Fig.1(b)のように指先力が対象物内部で平衡してしまい対象物をテーブルから引き離すことが困難になる。この場合、ヒトはFig.1(c)のように指姿勢を立てた状態から(d)のように姿勢を変えることで、対象物をテーブルから容易に引き離すことができる。この指の動きを *Detaching Assist Motion (DAM)* と名付ける。本研究では *DAM* をヒントに、ロボットハンドで同様の効果を期待できる把握動作として、拡張自己姿勢変形動作 (*Extended Self-Posture Changing Motion: Ex-SPCM*) を提案し、この動作によって対象物を持ち上げるための十分条件について考察する。

### 2. 拡張自己姿勢変形動作

ロボットハンドはFig.2(a)のような自由度配置を有する  $m$  関節のシリアルリンクで構成された  $n$  本指ロボットハンドとする。第  $p$  関節を位置制御関節、第  $s$  関節をコンプライアント関節、それ以外の関節は位置制御により相対角度を一定に保った固定関節とする。ここで第  $p$  関節に角度変位  $\Delta\theta_{pi}$  を与えると、リンク系は対象物との接触を維持したまま姿勢が変化していく。このとき指  $i$  は自己姿勢変形性を持つという。このときの一連のリンク動作は自己姿勢変形動作 (*Self-Posture Changing Motion: SPCM*)<sup>4)–5)</sup> と呼ばれている。これまでの *SPCM* は、対象物は動かないことを前提としていたが、ここでは対象物が動く場合にまで拡張し、これを拡張自己姿勢変形動作 (*Extended SPCM: Ex-SPCM*) と呼ぶことにする。

### 3. 対象物持ち上げの十分条件

第  $p$  関節に微小変位  $\Delta\theta_{pi}$  を与えた結果、Fig.2(b)のように第  $s$  関節が回転して  $\Delta\theta_{si}$  変化したとしよう。ただし変形前は第  $s$  関節のトルク  $\tau_{si} = 0$  とする。第  $s$  関節のコンプライアンスを  $C_{si}$  とすると、 $\tau_{si} = \Delta\theta_{si}/C_{si}$  が第  $s$  関節に発生する。一方、 $\tau_{si}$  と接触力  $\mathbf{f}_{ci}$  との間には、

$$\tau_{si} = \mathbf{J}_i^t \mathbf{f}_{ci} \quad (1)$$

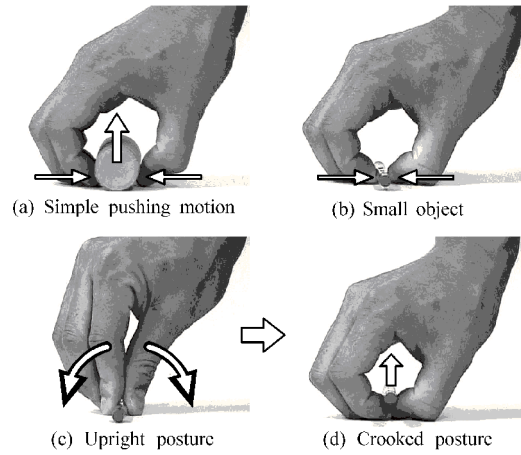


Fig.1 Grasping motion for cylindrical objects

の関係が成り立つ。ただし  $\mathbf{J}_i^t \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$  は  $\mathbf{f}_{ci}$  を  $\tau_{si}$  に変換するヤコビ行列である。ここで摩擦円錐を  $L$  面錐で近似する。Fig.2(b)のように摩擦円錐が内接する  $L$  面錐に近似して得られる合力空間  $\mathcal{V}_1$  は、近似しないて得られる合力空間  $\mathcal{V}_2$  を内包する。  $L$  面錐の単位稜線ベクトルを寄せ集めた行列  $\mathbf{V}_i = [\mathbf{v}_i^1, \dots, \mathbf{v}_i^t]$  および稜線ベクトルに掛かる係数ベクトル  $\boldsymbol{\lambda}_i = [\lambda_i^1, \dots, \lambda_i^t]^t$  を用いると、 $\mathbf{f}_{ci}$  は、

$$\mathbf{f}_{ci} = \mathbf{V}_i \boldsymbol{\lambda}_i \quad (2)$$

と表すことができる。したがって式(1)は、

$$\tau_{si} = \mathbf{J}_i^t \mathbf{V}_i \boldsymbol{\lambda}_i \quad (3)$$

となる。これを  $\boldsymbol{\lambda}_i$  について解くと、

$$\boldsymbol{\lambda}_i = (\mathbf{J}_i^t \mathbf{V}_i)^\# \tau_{si} + \mathbf{N}_i \boldsymbol{\Phi}_i \quad (4)$$

となる。ただし  $\mathbf{N}_i$  は  $\mathbf{J}_i^t \mathbf{V}_i \mathbf{N}_i = \mathbf{o}$  を満たす行列である。特別な場合を除き、合力空間の各頂点は  $\mathbf{f}_{ci}$  がどこかの稜線ベクトルに張り付いているときに対応する。たとえば  $\mathbf{v}_i^1$  に張り付いているとき、 $\mathbf{e}_{i1} = [1, 0, \dots, 0]$  とすると  $\mathbf{e}_{i1} \boldsymbol{\lambda}_i \geq 0$ 、それ以外の稜線方向成分は大きさがゼロになるので  $\boldsymbol{\Gamma}_{i1} = [\mathbf{e}_{i2}, \dots, \mathbf{e}_{it}]^t$  とすると、 $\boldsymbol{\Gamma}_{i1} \boldsymbol{\lambda}_i = \mathbf{o}$  となる。 $\mathbf{f}_{ci}$  の張り付く稜線を  $k$  とすると、2つの条件式が得られる。

$$\mathbf{e}_{ik} \boldsymbol{\lambda}_i \geq 0 \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_{ik} \boldsymbol{\lambda}_i = \mathbf{o} \quad (6)$$

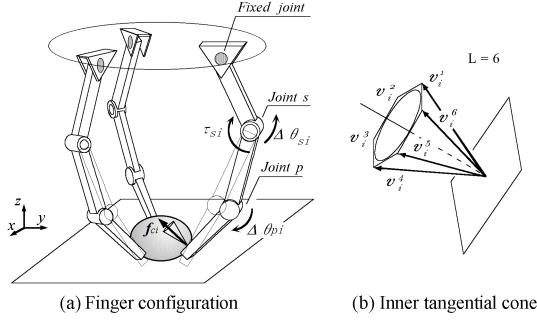


Fig.2 Robot hand system and finger configuration

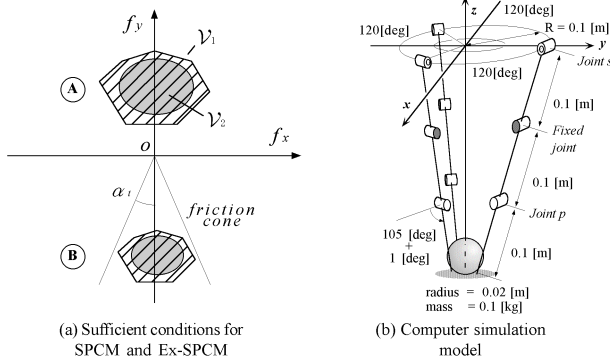


Fig.3 Total force set and simulation model

式(6)に式(4)を代入して $\Phi_i$ について解くと、

$$\Phi_i = -(\mathbf{G}_{ik} \mathbf{N}_i)^{-1} \mathbf{G}_{ik} (\mathbf{J}_i^t \mathbf{V}_i)^{\#} \tau_{si} \quad (7)$$

を得る。これを式(2), 式(4)に代入し、

$$\mathbf{f}_{ci} = \mathbf{V}_i \{ \mathbf{I} - \mathbf{N}_i (\mathbf{G}_{ik} \mathbf{N}_i)^{-1} \mathbf{G}_{ik} \} (\mathbf{J}_i^t \mathbf{V}_i)^{\#} \tau_{si} \quad (8)$$

を得る。全ての指の接触力と対象物重量を加えた合力 $\mathbf{f}_{act}$ は、テーブルからの反力を除いた対象物に作用する合力であるから、 $\mathbf{f}_{act} = \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_{ci} + m\mathbf{g}$ となる。ただし $m, \mathbf{g}$ は、対象物質量、重力加速度ベクトルである。 $\mathbf{e}_{ik}$ を $\mathbf{e}_{i1}$ から $\mathbf{e}_{iL}$ まで変化させることで、一指あたり $L$ 個の接触力 $\mathbf{f}_{ci}$ が求まる。指本数は $n$ 本なので合計 $L^n$ 個の合力 $\mathbf{f}_{act}^q (q = 1, \dots, L^n)$ が求まる。各 $\mathbf{f}_{act}^q$ によって形成される凸空間が対象物に作用する合力空間となる。全ての $\mathbf{f}_{act}^q$ がFig.3(a)中のBのようにテーブルとの摩擦円錐内に向かっているならば、テーブルから対象物に向けて $-\mathbf{f}_{act}^q$ の反力が自動的に発生するため対象物は動かない。この状態が従来のSPCMに相当し、リンクの姿勢変化から近似的な接触点が求まる。一方、Fig.3(a)中のAのように $\mathbf{f}_{act}^q$ の全ての $z$ 方向成分が正ならば、対象物はテーブルから持ち上がる。これがEx-SPCM分に相当する。これをまとめたのが式(9), 式(10)であり、それぞれ微小変位 $\Delta\theta_{pi}$ に対して対象物が動かないことを表す十分条件、対象物がテーブルから持ち上がることを表す十分条件である。

$$\frac{\mathbf{g}^t \mathbf{f}_{act}^q}{\|\mathbf{g}\| \|\mathbf{f}_{act}^q\|} > \cos \alpha_t \quad |_{q=1, \dots, L^n} \quad (9)$$

$$\mathbf{g}^t \mathbf{f}_{act}^q < 0 \quad |_{q=1, \dots, L^n} \quad (10)$$

ただし $\alpha_t$ は対象物とテーブルとの間の摩擦角である。

#### 4. シミュレーション

Fig.4はFig.3(b)のような三本指三関節ハンドによる数値例である。位置制御関節に $105[\text{deg}]$ から $\Delta\theta_{pi} = 1[\text{deg}]$ の微

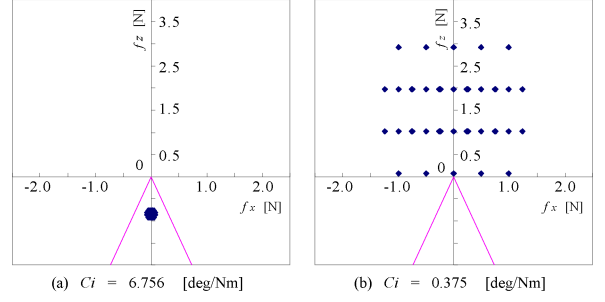


Fig.4 Resultant force sets of  $\mathbf{f}_{act}$

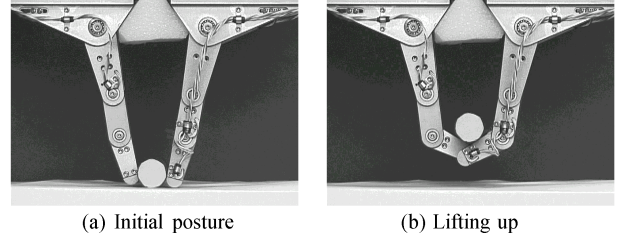


Fig.5 An experimental result by using the Ex-SPCM

小角度変位を与えた。対象物とリンク、テーブルとの間の摩擦角は、それぞれ $10[\text{deg}]$ ,  $20[\text{deg}]$ である。摩擦円錐は四面錐に近似している。Fig.4(a)は $\mathbf{f}_{act}^q$ が全てテーブルとの摩擦円錐内に含まれており、十分条件式(9)を満たしているため対象物は動かない。Fig.4(b)は $\mathbf{f}_{act}^q$ の $z$ 成分が全て正であり、十分条件式(10)を満たしているため対象物は持ち上がる。

#### 5. 実験結果

Fig.5は三本指三関節ロボットハンドによるEx-SPCMの例である。第一から第三関節をそれぞれコンプライアンス制御、固定、位置制御している。Fig.5(a)の初期姿勢から、第三リンクを $50[\text{deg}]$ 回転させるとEx-SPCMが発生し、Fig.5(b)のように対象物がテーブルから持ち上がることが確認できた。

#### 6. まとめ

ヒトの把握動作の観察を通して、細い対象物や表面摩擦の大きな対象物を持ち上げるのに適した把握動作DAMを発見した。ロボットハンドにて同様の効果を生む制御則として、拡張自己姿勢変形動作(Ex-SPCM)を提案し、対象物が動かないための十分条件および対象物を持ち上げるための十分条件を求めた。

#### 参考文献

- 1) M. Cutkosky: "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, JUNE, pp. 269-279, 1989.
- 2) G.A. Bekey, H. Liu, R. Tomovic, and W. Karplus: "Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 6, DECEMBER, pp. 709-722, 1993.
- 3) 白井, 金子, 辻: "スケール依存型把握", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp.111-120, 1999.
- 4) 金子, 谷江: "自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出," 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6, pp.12-21, 1990.
- 5) M.Kaneko and K.Tanie: "Contact Point Detection for Grasping an Unknown Object Using Self-Posture Changeability," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.10, No.3, pp.355-367, 1994.