触覚を用いたまきつき把持の制御†

和田 充雄*・久場 康良*

Control of Winding Grasp Used Tactile Information

Mitsuo WADA* and Yasuyoshi KUBA*

1. はじめに

人の手指などは節状の多節構造をもった動作体であり、つかむ、にぎるなどの多様な動作を相手物体に応じて巧みに行っている。本研究は、これらを触覚を有する多節状アームで工学的に模擬することを目標に、まずまきつき把持を対象として触覚情報を利用した動作制御を試みたものである。この結果、物体がずれた場合でもそれに自律的に応じるなど柔軟な把持動作を実現することができ、多関節形のつかみ機構の制御に有用と考えられるので報告する。

2. 把持動作の柔軟性と自律性

手指による把持形態で、小口径ロッドのにぎりなどはまきつき形のものといわれる¹⁾。このとき容易に観察できるように、手の掌に近い根元部分から順次指関節が屈曲し、物体に合せて関節角を定めていくと同時に、物体がずれた場合でも全体として均一に力が加わるようににぎり直しするなど動作の柔軟性、自律性を有している。

柔軟な動作の発現は触覚によって各節間に力制御が働いた協調運動の結果とみなせよう。これに関し広瀬ら²⁾は、ヘビを模擬した索状能動体の運動制御の研究において、触覚情報を用いた側抑制形の制御法を提出し、これによって迷路侵入、からみつきなど多リンク系の協調が高度に要求される動作を実現している。本研究の多節状アームの場合、以下に述べるよう節数が4で極端に少ない関節数であり、かつ把持動作を対象

としているが、ここでも側抑制形の制御は動作の柔軟性を高める有効な方法であると考えられる。

つぎに物体の把持動作の発現について考えてみる。本研究では、これは全体として均一な力が各節に加わるなどの一種の安定な状態にもっていくよう触覚を含む制御力学系が構成されるとき、この制御によって生ずる動作と考えている。これによれば、にぎり直しなどは系が安定な状態にむかう過渡的運動として理解でき、把持の自律的動作ということができる。以下、この立場で得た解析の結果と、まきつき把持の制御力学系を構成する制御アルゴリズムを提出する。ちなみに、この制御は触覚情報を用いた並列的な制御力学系として実現すること³⁾をねらっている。

3. 触覚を有する多節状アーム

まきつき把持動作を対象とした多節状アームの全体を Fig. 1 にて示す。基本的な動作の検討を行う立場から4節よりなる簡単な多リンク機構としている。一般性をもたせるため節数を N で表わし、 i で節番号を表わす。

各節 (J_i) にはモータが配され、鉛直面内で回転屈

Fig. 1 View of the multi-joint arm and the block diagram of control system for experiment

† 第3回バイオメカニズム学術講演会で発表 (昭57-10)
第22回計測自動制御学会学術講演会で一部発表 (昭58-7)

* 製品科学研究所 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1-4

* Industrial Products Research Institute, Tsukubagun, Ibaraki
(Received March 29, 1984)
(Revised June 2, 1984)

Key Words: hand, finger, tactile sensor, gripper, winding grasp

曲する。モータはパルスモータを用い、 θ_i で回転角、 $\dot{\theta}_i$ で回転角速度、またはここではモータが駆動されるパルス率を表わす。アームが直線状にあるとき $\theta_i=0$ とし、CW 方向回転を正、CCW 方向を負にとる。各節は等長リンク (L_i) で連結され、各リンクプレートに上下両面に 4 個のマイクロスイッチが触覚としておかれている。それぞれの面上でマイクロスイッチは wired OR され分布的に考え、触覚の状態値として M_i をわりあてた。この値は Fig. 1 に示したように 1, 0, -1 をとるが、物体の接触時マイクロスイッチのバネ成分のため、状態値は把持のさい必要な力情報を 2 段階で検出したものとみなすことができる。

アームは根元部分が固定されている。また、狭い空間内に侵入する場合の制御を考え、 M_i は 3 値をあてたが、把持動作では 0, 1 の二つの状態ですむ。本研究ではこの場合に限定して考える。

4. 側抑制形の制御動作

多節状アームに対し物体を押しつけ、 M_i のリンク上で接触したものとしよう。このとき $M_i=1$ の情報が節でそして $i+1, i-1$ のモータに影響を及ぼすものとして、 $\dot{\theta}_i \propto M_i$ 、 $\dot{\theta}_{i+1} \propto -M_i$ 、 $\dot{\theta}_{i-1} \propto -M_i$ と制御するなら、全体として物体をつみ込むようにアームを屈曲させる²⁾ (Fig. 2(b))。これを $i=1, N$ の各節に対して

$$\dot{\theta}_i = K_i(M_i - aM_{i+1} - bM_{i-1}), \quad i=1, N-1 \quad (1)$$

$$a+b=1, \quad a>0, b>0 \quad (2)$$

で制御される運動へ拡張する。ここに $K_i(>0)$ は各節モータの速度係数を与える定数、 a, b は両隣りに及ぼす抑制の効果を表わす。ただし、 $i=N$ では M_{N+1} は存在しないので

$$\dot{\theta}_N = K_N(M_N - cM_{N-1}), \quad c>0 \quad (3)$$

とおく。

側抑制形の制御力学系(1)、(3)式から、物体との関係でアームの運動を調べてみる。 M_i が各節で 1 と 0 のいずれをとるかは対象とする物体の形状、位置そ

Fig. 2 Basic deformation of the multi-joint arm by eqs. (1) and (7)

してアームの姿勢 ($\theta_1 \sim \theta_N$) によって定まる。そこで、物体の形状などに関するパラメータを φ で与えて、 M_i は

$$M_i = M_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N; \varphi)$$

と θ_i の関数とみなすことができる。よって、(1)、(3)式で与えられた系は θ_i に関する連立微分方程式となり、すでに考察したようにこの系の力学的平衡状態、すなわち $\dot{\theta}_i=0$ においてえられるアームの状態を調べることにより生ずる動作を解析できる。

$\dot{\theta}_i=0$ ($i=1, N$) において、まず(3)式より $M_{N-1}=M_N/c$ 、そして(1)式より

$$M_i = (1 - ac - acb - \dots - acb^{N-2-i})M_N/b^{N-1-i}c \quad (4)$$

を $i=0, N-2$ に対して得る。ここで $c=1$ の場合上式は

$$M_i = M_N, \quad i=1, N-1 \quad (5)$$

となる。 M_N は 0 か 1 だから、(5)式からアームはすべての触覚の状態が 0 となるか 1 となる二つの平衡状態を有し、この状態が安定なら系は双安定で、アームはいずれかに向って運動することとなる。事実広瀬ら²⁾ は物体を索状能動体におしつけるとこの物体にならって変形を繰返すが、ある程度つみ込む動作が進行すると逆にその物体にからみつく動作が出現することを報告している。これは本研究の双安定の状態と対応しよう。ただし本研究では根元が固定されているので M_N が把持状態を決定するスイッチの役目を果すと思われる。さらに $0 < c < 1$ の場合(4)式などが成立するのは $M_i=0$ ($i=0, N$) のときのみであって、このときは物体に対し常に回避し続けることになる。ただし、 M_i がアナログ量で連続的な値として力検出できる触覚の状態値を表わすなら、(4)式からこれは先端ほどより強くしめつける系の状態に向うことになり、つかみ動作を考えると興味深い。

5. まきつき把持の動作制御

多節状アームの側抑制形の制御では、物体の押しつけに対して生じる受動的動作であった。これに対しまきつき把持は能動的な動作であるから、なんらかの外部から物体のある方向を指示するなど指令入力が必要となる。この最も簡単な制御は、アームの各節を

$$\dot{\theta}_i = K_i(M_s - M_{i-1}), \quad i=1, N \quad (6)$$

と制御することである。ここに M_s は 1 または 0 をとり、制御系の外からの指令入力とする。(6)式から直ちにわかるように、すべての i について $M_i = M_s$ となるとアームの制御動作は停止し、 $M_s=1$ を与えたとき把持の完了を、0 のときは開放を指令している

ことがわかる。しかしながらこの制御系では各節間の協調を保証していないので、根元関節部分のほうから順次物体に接触していく場合のみ $M_i=1$ ($i=0, N$) を達成する。これ以外、たとえば物体がずれるなど途中で非接触のアームの状態があると、物体に対し接近しようとすることから不要に締めつける結果となってしまう。

すでにみたように、側抑制形の制御は物体に対し節間の協調を働かせる柔軟な制御動作を有している。よって、(6)式の能動的なまきつき把持制御を保存し、かつ側抑制形の制御を加えてみる。このとき、まきついた物体の把持位置を保つように工夫した一つの制御形として、

$$\dot{\theta}_i = K_i(M_s - M_{i-1}) + L_i(M_i - M_{i-1}) \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} K_i = K_0 (>0) \\ L_i = 2(N-i)K_0, \quad i=1, N \end{array} \right\} \quad (8)$$

をまきつき把持の制御アルゴリズムとして提出する。第2項が(1), (2)式に基づく側抑制形の制御として付加したものである。ただし、より先端のほうは根元部分が固定されこの回転に対し影響を大きく受けるので、これを補償するため係数 L_i を増加列として与えた。この制御アルゴリズムによる力学系の平衡状態は、 $\dot{\theta}_i=0$ より

$$M_i = M_{i-1} = M_s, \quad i=1, N. \quad (9)$$

となる。これから、アームはすべての節が M_s と一致するよう屈曲を繰返し、 $M_s=1$ のとき、(5)式でみたように柔軟にまきつき把持に至ることがわかる。このことは、側抑制形の制御による双安定の状態のうちいずれをとるかが M_s で指令される形となっていることからわかる。こうして、(6)式での M_s で把持がコントロールされる性質とうまく結合されているといえよう。

多節状アームで構成した(7), (8)式による制御力学系の基本動作を Fig. 2(c) で示した。また、まきつき途中で非接触の節がある場合を同(d)で示した。物体をつつみ込むよう柔軟に回避しながら把持の修正を行っていることを示す。

実際に制御系を構成し実験を行った。Photo. 1 にてこれを示すが、途中で物体がずれてもあたかも物体に追いつくようにまき込み、適宜修正を繰返しながらか安定な把持に至るようすがわかる。

最後に物体把持の安定性について触れておく。いくつかの実験の結果、凸状でかつすべての触覚が1となりうるなめらかな形状をした物体であれば Photo. 1

Photo. 1 Experimental results of winding grasp

のようなステップで常に安定な把持を実現することがわかった。この意味で(9)式そして(5)式の力学的平衡状態は安定であると考えられる。

6. おわりに

物体の把持に関しては、これまでメカニカルな方法が多く扱われてきたが、本研究では解覚を有する多節状アームによるまきつき把持を対象に一つの制御アルゴリズムを提出した。これにより把持動作を並列的な触覚情報を含む制御力学系の運動発現として解析し、かつ実験により制御の有効性を確かめた。

まきつき把持の制御アルゴリズムは簡単な回路で構成できるので、本研究の結果は2本指等多指関節形ハンドによる柔軟なつかみ動作の制御に十分応用可能である。今後、触覚センサの改善と同時に拡張を検討していきたい。

参考文献

- 1) 伊藤英世：掴み手の動作機能解析、バイオメカニズム 3, 145/154, 東大出版会 (1975)
- 2) 広瀬, 梅谷：触覚を有する索状能動体の運動制御, 計測自動制御学会論文集, 12-5, 543/547 (1976)
- 3) 久場, 和田：多関節動作体の協調動作のための並列制御系の構成, 第22回 SICE 学術講演会予稿集, 127/128 (1983)