シールをめくるロボットの機構と制御に関する基礎的研究*

(シールをめくる作業の分析とロボットの設計および動作実験)

福田 敏男^{*1}, 木下 克彦^{*2}, 新井 史人^{*1}
松浦 英雄^{*2}, 小菅 一弘^{*1}

Basic Study on Mechanism and Control of Seal-Peeling Robot

(Analysis of Seal Peeling Task and Design & Control of Robot)

Toshio FUKUDA, Katsuhiko KINOSHITA, Fumihito ARAI,
Hideo MATSUURA and Kazuhiro KOSUGE

With the rigid requirements of the automation of the handling of flexible limp seal materials in the industry in mind, this paper deals with a mechanism and control method of a seal-peeling robot. In this paper, we consider the method by which a man peels a seal, and based on this analysis, we make and test a seal-peeling robot. First of all, we analyze a man's seal-peeling task and determine how many and what kinds of basic motions are included in it, and also check how they appear while the task is being carried out. Then we construct a mechanism of the robot based on this analysis. Secondly, we propose a control method for it. We next model the mechanism of glue destruction and analyze how we should control the robot peeling the seal effectively. Finally, we produce a robot based on these analyses and test it to show that it works as expected.

Key Words: Robotics, Mechanism, Seal-peeling Task, Task Analysis, Computer Control, Design Methodology

1. はじめに

近年、機械が取扱う対象物は広範囲に及ぶようになってきた。最近では、板金⁽¹⁾⁽²⁾、紙⁽³⁾、布、ひも、ゴムなどに代表される柔軟材のハンドリングを、ロボットマニピュレータを用いて自動化することへの期待が大きい。柔軟材のハンドリングでは、非柔軟材を扱う場合と異なり、以下のような固有の問題が存在する。

- (1) 操作中对象物の形状が大きく変化する
- (2) ひもなどの対象物は、複数が絡まることがある
- (3) 力のかけ具合が難しい

以上は扱う物の種類を限定すればロボットの制御上、さほど問題とはならないが、より一般的に製造システムの柔軟性を増すためには、上記項目を積極的に検討する必要がある。現在、経済的に重要な産業、例えば、服飾・靴等の製造業、航空宇宙、自動車産業においては、これら柔軟材のハンドリング作業の自動化に関し鋭意研究が進められており、2Dから3Dビジョンを用いたハンドリング制御へと発達してきている⁽⁴⁾。

従来のハンドリング対象物は単なる柔軟材であり、上記3項目のみを考慮すればよかった。ところが、近年の多様な製造工程の中では、シール状の柔軟パーツ(粘着面を有する)のハンドリング作業の自動化までも要求されており、

(4) シールを台紙からいかにはがすか
まで考慮する必要がでてきている。しかし、項目(4)まで含めたハンドリング制御の研究は著者らの知るところでは報告されていないのが現状である。

本研究では、このようにシール状の対象物のハンドリング作業の自動化が強く望まれていることを考慮し、フレキシブルなシールを台紙からめくる作業を行うロボットの機構と制御方法について報告する。ただし、本論文で扱うシールおよび台紙はともに弾性体と近似でき、特にシールの大きさが台紙の大きさより小さい場合を考える。シールをめくる作業は特殊であるため、ロボットの機構および制御方法は人間の動作分析をもとに決定する。

2. シールをめくる作業の動作分析

2.1 基本作業分類 本論文では、台紙付きシールのハンドリング作業を前提とする。人間が台紙からシールをめくる作業は、大きく分けて以下の三つの作

* 原稿受付 平成3年5月8日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1)。

^{*2} 名古屋大学工学部。

業に分割できる。ただし、以下においてはシールをめくる作業の中に、シールを平面上に貼る作業まで含めて考えることとする。

- (1) 置いてある台紙付きシールを持ち上げる作業
- (2) シールを台紙からはがす作業
- (3) シールを貼る作業

上記各作業の具体例として、人間が両手を用いて作業を行う場合の代表例を紹介し、これに基づいて設計の検討を行う。

2・2 台紙付きシールを持ち上げる作業 机などの平らな面から台紙付きシールを持ち上げる動作を考えると、以下の①～③に分割できる。

- ① 手(#1)が真上から台紙付きシールを押さえ、指を閉じて台紙付きシールをたわませる(図1)。
- ② 手(#2)がたわんで開いたすきまに指を挿入する(図2)。
- ③ 手(#2)の人差し指と親指で台紙付きシールを挟み、持ち上げる(図3)。

2・3 シールを台紙からはがす作業 一方の手で台紙を支え、別の手でこの原理により台紙からシールをはがす。その手順は、以下の①～⑤に分割できる。

- ① 手(#2)で台紙を持つ(人差し指で下から支え、親指で上から押さえる)(図4)。
- ② 手(#1)の人差し指を立て、シールを台紙ごと押してたわませることにより、シールを台紙からはく離させる(図5)。
- ③ シールのはがれた部分に手(#1)の親指を挿入する(図6)。
- ④ 手(#1)の人差し指と親指でシールを挟む(図7)。
- ⑤ 手(#1)でシールを台紙からはがす(図8)。

2・4 シールを貼る作業 単純に平面上にシールを貼る手順は、以下の①～④に分割できる。

- ① シールの両端を手(#1)、手(#2)で持つ(図9)。
- ② シールを反らせる(図10)。

図2 指が開いたすきまに入る様子

図3 手がシールを挟んで持ち上げている様子

図4 シールを持ち上げている様子

図1 手がシールをたわませている様子

図5 シールを押して台紙からはく離させる様子

図 6 指が開いたすき間に入る様子

図 7 シールを挟む様子

図 8 シールをはがす様子

図 9 シールを両手で持った様子

③ 反ったシールの腹を対象物に押しあてる (図 11).

④ シールを対象物に貼る (シールを押さえて一面に平にのばす) (図 12).

2・5 タスクの組立 一般に、人間の動作は関節の単純な回転および伸縮などの動きの組合せによるものと考えられる。この最小単位の動きをここでは特に「述語 (Basic Motion)」と呼ぶことにする。一つの作業 (Task) は、いくつかの段階や、細かい作業 (Sub Task) に分けられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この Sub Task がさらに基本となる動作 (Functional Motion) に細かく分けられ、最終的には述語 (Basic Motion) の単位にまで分割される。

シールをめくる作業を例にとると以下のような

図 10 シールを反らす様子

図 11 シールを対象物に押しあてる様子

図 12 シールを貼った様子

る。

Task

「シールをめくる作業」

Sub Tasks & Functional Motion

(1) 台紙付きシールを持ち上げる作業

- ・台紙付きシールをつかんでたわませる [手 (#1)]
- ・台紙付きシールを挟んで持ち上げる [手 (#2)]

(2) シールを台紙からはがす作業

- ・台紙を挟んで持つ [手 (#2)]
- ・シールは台紙ごと押してはく離させる [手 (#1)]
- ・シールを挟み台紙からはがす [手 (#1)]

(3) シールを貼る作業

- ・シールを挟んで持つ (両手)
- ・シールを反らせ、対象物に押しあてる (両手)
- ・シールを対象物に貼る (両手)

2.6 述語の抽出 前節の Functional Motion から、人間がシールをめくる作業をする上で、手先に必要かつ十分な述語を以下に示す。

Basic Motion

(1) シールを持ち上げる作業

- ・手 (#1)-つかむ (Pinch)
- ・手 (#2)-挟む (Clip)

(2) シールを台紙からはがす作業

- ・手 (#2)-挟む (Clip)
- ・手 (#1)-押す (Push), 挟む (Clip)

(3) シールを貼る作業

- ・両手-挟む (Clip), する (Rub)

ただし、(3)で「シールを反らせ、対象物に押しあてる」動作は、ロボットアームによる単純移動により実行可能である。ここでは手先について考えているためこの動作は考慮しない。

シールをめくる作業において、以上の述語が実際にどのように用いられるのかを調べるために、実際に人間がシールをめくる様子をビデオカメラで撮影した。各述語がそれぞれの手において、どのような時間区分でなされているかをまとめた結果を表1、図13に示す。これからもわかるように、このような作業を双腕のロボットアームで実行するためには、各エンドエフェクタは必ずしも左右同形でなくてもかまわないが、少なくともそれぞれに挟む機能が必要となる。

3. エンドエフェクタの機構の決定と

シールをめくる作業アルゴリズム

2章の作業を双腕のロボットアームで実行するためにエンドエフェクタに必要な指は、人間でいうと人差し指、親指の2本である。また、必要な述語は貼る

動作まで含めると(1)つかむ (Pinch), (2)挟む (Clip), (3)押す (Push), (4)する (Rub) の四つである。これに基づいてエンドエフェクタの機構を決定する。製作するエンドエフェクタは、簡便のため左右同形とする。

四つの述語の内、“Pinch”, “Clip”については、2本の指の開閉機構により実現できる。ここでは両エンドエフェクタの各指に垂直平行移動機構を持たせることにより実現する。また、“Push”は、一方のエンドエフェクタの指に伸縮機構を持たせることにより実現する。これにより、めくれ上がったシールを挟む量を制御しやすくなる。また、他方のエンドエフェクタの指

表1 作業内容と時間経過の対応表

(seconds)

			Repetition Number					Avr.
			1st	2nd	3rd	4th	5th	
Functional Motion	Picking	Pinch	2.41	2.37	2.40	2.42	2.40	2.40
		Clip	7.75	7.73	7.73	7.74	7.74	7.74
	Peeling	Push	2.14	2.18	2.15	2.19	2.12	2.16
		Clip	6.85	6.86	6.85	6.91	6.91	6.88
	Sticking	Clip	2.27	2.33	2.30	2.34	2.30	2.31
		Rub	1.45	1.43	1.45	1.45	1.43	1.44
	Total		15.17	15.14	15.17	15.25	15.14	15.17

図13 作業内容と平均時間経過のグラフ

図14 エンドエフェクタ機構図

にも同様に伸縮機構を持たせる。これにより、シールをめくる際に、挟むエンドエフェクタの指先をてこの支点として制御できるため、任意のシールをめくる際に都合がよい。最後の“Rub”はロボットアーム自体の動作により実現できるので、このための機構は設けない。以上より各エンドエフェクタは2自由度とし、

図 15 シールをめくる作業のフローチャート

図 16 シールを持ち上げる作業でのフローチャート

図 17 シールをはく離する作業でのフローチャート

その機構を図 14 に示す。ここでは、モータによりボールねじを回転し、各指の並進運動に変換伝達する機構をとった。

また、図 15～18 にシールをめくる作業のフローチャートを示す。

4. シールはく離のモデル化とめくりやすさの解析

4.1 はりによるシールはく離原理のモデル化
両手でシールをはく離する様子を図に表すと図 19(a) のようになる。次にこれを単純化したモデルを図 19(b) に示す。このように突出端に集中荷重を加えたとき、図 19(c) のようにシーソの要領でシールがめくれ上がる。

ここで、以下に上記モデルの解析を進めていくにあたり、以下の仮定を設ける。

- (1) はりは弾性体とする。
- (2) 粘着材はフック弾性体とする（はく離速度に依存しないものとする）。
- (3) はりのたわみは微小である。
- (4) はりの曲げ剛性、密度、断面等は全長にわたって一定である。
- (5) 粘着材の固体表面は一樣であり、粘着力は一定である。

図 18 シールを貼る作業におけるフローチャート

図 19 はりによるモデル

4.2 シールはく離とめくりやすさの解析

シーラの指着剤はく離の様子をより詳しくみるため、はり
を支点の部分（点 B）を境に二つに分けて考えること
にする（図 20）。

まず、図の支点 B から荷重作用点方向の部分を考え
る。はく離に必要な最小荷重 W を加えることにより
発生するモーメントと接着剤の引張力 $\sigma(x)$ によるモ
ーメントの関係は、以下の式で表される。

$$W \cdot L_R = \int_0^{L_L} \sigma(x) dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

これより、粘着材のはく離に必要なモーメントが一
定であるとする、明らかに L_R が大きいほど W は
小さくてすむ。

次に図 20 の固定端から支点 B までの部分を考えて
みる。この部分の様子をさらに簡略化したモデルとし
て図 21 を考える。ただし、図 21 は他端固定としたた
め、厳密には一致しない。

パラメータを図 21 のようにとると、弾性論によれ
ば以下の方程式が成り立つ⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$E_S I_S \frac{d^4 y_S}{dx^4} = \kappa (y_M - y_S) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\kappa = \frac{E_A}{t_A}$$

ここで、簡単のため、以下において

$$a = L_M = L_S = L$$

$$\sum EI = E_M I_M + E_A I_A + E_S I_S$$

$$y_M = \frac{R(L-x)^2}{6 \sum EI} (2L+x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

図 20 解析するモデル

図 21 接着剤のはく離モデル

とする。

境界条件は、固定端でのたわみ量、たわみ角が零なの
で、

$$|y_S|_{x=L} = 0, \left| \frac{dy_S}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

自由端での曲げモーメントが零なので、

$$\left| \frac{d^2 y_S}{dx^2} \right|_{x=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

固定端でのせん断力が、接着剤による引張力を積分し
たものなので、

$$E_S I_S \left| \frac{d^3 y_S}{dx^3} \right|_{x=L} = \int_0^L \sigma(x) dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$\sigma(x) = \frac{y_M - y_S}{t_A} E_A = \kappa (y_M - y_S)$$

となる。式(2)の基本解 $Y(x)$ は以下の式で与えられ
る。

$$Y(x) = e^{-nx} (A \cos nx + B \sin nx) + e^{nx} (C \cos nx + D \sin nx) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$n^4 = \frac{\kappa}{E_S I_S} \quad \dots\dots\dots (8)$$

境界条件により、積分定数を計算すると、式(3)より

$$C = D = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(5), (9)より

$$B = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(5), (9), (10)より

$$A = \frac{R}{n^3 (\sum EI)} \left\{ \frac{3}{2} e^{-nL} (\sin nL - \cos nL) + \frac{1}{2} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。また、式(2)の特殊解 $\eta(x)$ は

$$\eta(x) = y_M(x) \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。以上から式(2)の一般解は次のようになる。

$$y_S(x) = \frac{R}{\sum EI} \left[\frac{e^{-nx} \cos nx}{n^3 \left\{ \frac{3}{2} e^{-nL} (\sin nL - \cos nL) + \frac{1}{2} \right\}} + \frac{(2L+x)(L-x)^2}{6} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

次に、接着剤の破壊が生じる最小の荷重（はく離力
に相当）を P とすると、このときの積分定数 $A (= A_P)$
は、

$$A_P = \frac{P}{n^3 (\sum EI)} \left\{ \frac{3}{2} e^{-nL} (\sin nL - \cos nL) + \frac{1}{2} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。粘着材の引張強さを f とすると、 $x=0$ で

$$f = \frac{A_P E_A}{t_A} = \kappa A_P \quad \dots\dots\dots (15)$$

図 22 実験装置の写真

図 23 システム図

図 24 エンドエフェクタ制御のシステム図

図 25 ロボットがシールを台紙からはく離する様子

となることから、式(8), (14), (15)より、 P は

$$P = \frac{(\sum EI) \left\{ \frac{3}{2} e^{-nL} (\sin nL - \cos nL) + \frac{1}{2} \right\}}{n E s I_s} f \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。ここで、

$$\frac{dP}{dL} = \frac{3 e^{-nL} \cos nL \sum EI}{E s I_s} f \quad \dots\dots\dots (17)$$

(A) End Effector #2, Horizontal Finger

(B) End Effector #2, Vertical Finger

(C) End Effector #1, Vertical Finger

(D) End Effector #1, Horizontal Finger

図 26 各指の動き

より, L を有限長とすると $n \rightarrow 0$ ならば $nL \rightarrow 0$ ゆえ,

$$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{dP}{dL} = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{3e^{-nL} \cos nL \sum EI}{EsI_s} f = \frac{3 \sum EI}{EsI_s} f > 0$$

……………(18)

となる。よって式(18)より, n が十分小さければ $P-L$ は単純増加の関係にあると近似的に考えることができる。したがって, はりが短ければそれだけひずみが小さい分, より小さい力でシールをはく離できることがわかる。ただし, 以上は上述の仮定のもとに成立する。

5. 実験装置の試作と実験結果

5.1 実験装置の概要 実験装置(図22)の概要を以下に示す。製作したエンドエフェクタ2個を2台のロボットアームに装着して2本の腕に相当する環境を整えた。コンピュータ2台を使用し, 一方のコンピュータには2本のロボットアームを, もう一方のコンピュータには2個のエンドエフェクタを制御させる。コンピュータからの通信は, ロボットアームとはドライバユニットを介して, エンドエフェクタとはD/Aボード・A/Dボードを介して行った。またコンピュータ同士はRS 232Cケーブルを用いて通信させた(図23, 24)。

5.2 実験結果 4章の「シールのめくりやすさ」を考慮にいれながら, 3章のアルゴリズムに従い, プレイバックにより双腕ロボットにティーチングを行った結果, 比較的良好にフレキシブルなシールをはく離する作業を達成できた(図25)。シールをはく離する際, 各指の動きの様子を図26に示す。図26において, エンドエフェクタ(#1)は, シールをはく離する側, エンドエフェクタ(#2)は, シールを持つ側である。シールはく離の途中の模様を以下に説明する。

(A) エンドエフェクタ(#2)の横指の状態: シールを指で挟んで保持している。

(B) エンドエフェクタ(#2)の縦指の動き: 指先をこの支点とするために縦指が途中で短くなった。

(C) エンドエフェクタ(#1)の縦指の動き: シールをはく離してできた台紙との間のすき間に指を挿入している(指が伸びている)。

(D) エンドエフェクタ(#1)の横指の動き: 台紙

よりはく離したシールを挟んでいる(両指が閉じている)。

この後, ロボットアームの動作によりシールは台紙からはく離する。

6. 結 論

人間によるシールめくり作業の動作分析に基づいて, 作業に必要な指の働きからエンドエフェクタの機構を決定し, 左右同形のエンドエフェクタを製作した。また, シールめくりのアルゴリズムを提案し, シールはく離のモデル化よりめくりやすさの解析を行った。製作されたエンドエフェクタは初期の目的どおり機能することが確かめられ, 与えられた作業を実行できることを示した。人間がなげなく行っている特殊な動作をロボットに実行させる場合, エンドエフェクタとして万能な手を用意することはコスト的にも現実的にも困難である。本論文で示したように, 人間の作業分析に基づき, その作業に適した必要最小限の機能を持ったエンドエフェクタを設計するというアプローチ手法は, これからの自動化社会のニーズを一つ一つ解決していくなかで, 今後重要と考えられる。

試作したシステムは, 今後は視覚システム等をつけ加え, 人間のスキルを模倣した制御システムに改善する必要がある。

文 献

- (1) 新井・福田, 柔軟構造物のフレキシビリティ制御(第3報, 柔軟構造物ハンドリングのための物理パラメータ同定), 機論, 56-532, C (1990), 3279-3286.
- (2) 新井・福田, 柔軟構造物のフレキシビリティ制御(第4報, ロボット・マニピュレータによる柔軟構造物の保証制御と実験結果), 機論, 57-538, C (1991), 1936-1943.
- (3) 西村, 紙のハンドリング技術, 精密工学会誌, 55-7 (1989), 1169-1172.
- (4) Taylor, P. M., *Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials*, NATO ASI Series, Vol. F64, (1990), 127-136, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- (5) 福田・新井・中川, 知能ロボットによる分解及び組立作業に関する研究, 日本ロボット学会予稿集, (1990), 97-98.
- (6) 福田・中川・新井・松浦・水川, 知能ロボットによる分解及び組立作業に関する研究, 機論, 57-537, C (1991), 1667-1673.
- (7) 高分子学会編, 接着-理論と応用, (1965), 273-276.
- (8) 日本接着協会編, 接着ハンドブック, (1961), 169-181.