

# 自己締め付け効果を利用した突き刺し把持

坂本直樹<sup>\*1</sup> 東森 充<sup>\*2</sup> 辻 敏夫<sup>\*3</sup> 金子 真<sup>\*2</sup>

## Piercing Based Grasping by using Self-Tightening Effect

Naoki Sakamoto<sup>\*1</sup>, Mitsuru Higashimori<sup>\*2</sup>, Toshio Tsuji<sup>\*3</sup> and Makoto Kaneko<sup>\*2</sup>

This paper proposes a piercing based grasping by using the self-tightening effect of objects with elasticity. We suppose a piercing hand with palm where the piercing motion by needle can be independently achieved irrespective of the palm motion. The palm first approaches and touches with the object, with a slight pushing motion. This motion produces an increase of potential energy of object. After the motion, needles pierce the object. When the object is lifted up, the accumulated potential energy is released and the object tries to recover the original shape under the piercing condition. We found a particular mechanical configuration between the object and the needle arrangement, under which the constraint of object is tightened due to the object deformation during the release of potential energy. In order to confirm the robustness of the proposed method, we have done a couple of experiments. The results show that the proposed method keeps an extremely high robustness compared with the other piercing methods.

**Key Words:** Food Handling, Self-Tightening Effect, Piercing Based Grasp

### 1. ま え が き

現在、コンビニエンスストアに並ぶ弁当の盛り付けは、ベルトコンベアの両側に立つ作業員によって行われているものの、作業員の多くはパートタイマーであるため、作業の熟練度にむらがあったり、1年を通じて安定した人材確保ができないといった問題をはらんでいる。さらに、近年関心の高まっている食の安心安全の観点から、可能な限り人手に接触する機会を減らすことも意識されるようになった。このような背景を踏まえ、近年、弁当の盛り付けを支援するロボットの開発プロジェクトが始まっている [1] [2]。さて、食品用ロボットハンドが、産業用ロボットハンドと決定的に違う点は、粘弾塑性、粘着性、非均一性といった取り扱う対象物の性質にある。この食品の性質を考慮したいろいろなハンドが提案されている中で、筆者らは、対象物の大きさの変化に対応しやすい、弁当箱の拘束に対応しやすい等の利点を踏まえ、針による突き刺し方式に着目した。この方法では、対象物表面に傷が生じるため、使用できる状況は限定されるが、ソースなどをかけることにより穴をふさぐことが

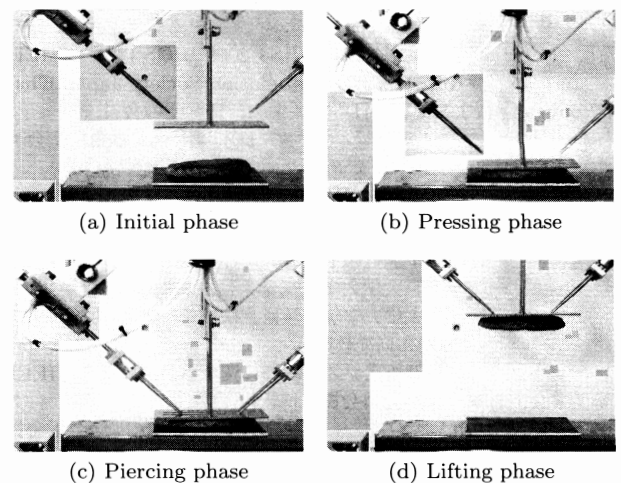


Fig. 1 A procedure for food handling by piercing hand

できるため、この問題は解消することができる。Fig. 1は突き刺し方式による粘弾性対象物の箱詰めの一例を示したものである。初期状態 (a) からロボットが対象物に接近し、パーム接触後、対象物を押し付ける (b)。この状態で針を対象物に突き刺し (c)、その後対象物を持ち上げる (d)。一連の動作の中でパームの役目は、対象物を押し付けることで密度を高め、持ち上げ時の落下を防ぐこと、さらに対象物解放時に、対象物を再度押し付けて、針を対象物から抜きやすくすることである。このような突き刺し方式を検討していく中で、食品の弾性によって針・

原稿受付 2007年8月31日

<sup>\*1</sup>株式会社前川製作所

<sup>\*2</sup>大阪大学大学院工学研究科

<sup>\*3</sup>広島大学大学院工学研究科

<sup>\*1</sup>MAYEKAWA MFG. CO., LTD.

<sup>\*2</sup>Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>\*3</sup>Graduate School of Engineering, Hiroshima University

■ 本論文は有用性で評価されました。

パーム間の内力が増大し、結果的に食品把持のロバスト性が格段に向上するという興味深い針の設置条件が存在することが分かった。具体的には、パームで対象物を押し付けると、対象物は薄く広がるように変形する。この状態で針を突き刺し、対象物を持ち上げようとする、対象物は元の形状へ復元していくが、この際、突き刺し位置・方向をうまく選ぶと、対象物の復元動作に伴い、対象物が針により深く突き刺さる方向に移動し、結果的に頑丈な把持が実現できる。本研究ではこのような現象を自己締め付け効果と呼び、その発生メカニズム、この効果を作り出す条件について考察した上で、実機実験を通じて、他の突き刺し方式に比べて良好な把持ロバスト性が実現できることを示す。

本論文の構成は以下の通りである。2章で従来研究について整理した後、3章で突き刺しハンドについて整理し、自己締め付け効果の発生メカニズム、この効果を作り出す針の幾何学的設置条件について示す。4章では、実機実験による把持ロバスト性について評価し、自己締め付け効果の有効性を示す。最後に、5章でまとめる。

## 2. 従来研究

食品には代表的な性質として、粘弾塑性、粘着性、不均一性がある。食品の変形モデルの研究として、徳本らは、粘弾塑性すなわちレオロジー特性に着目し、非線形粘性要素を用いた変形シミュレーションを行っている [3]。Zhou らは、食品の切断力制御を行うアルゴリズムの設計を目的とした、食品の切断モデルを提案している [4] [5]。また、食品を対象としたハンドリングに関する研究として、坂本らは、粘弾塑性を考慮し、対象物の粘弾性パラメータを推定することにより、最適なハンドリング設計を行っている [6]。Silsoe 社は上下動するベルトコンベア上のグリッパを使って、粘着性を有する対象物に対して、安定してリリースする方法を考案している [7]。Li らはビジョンを用いて不均一な形状を持つ対象物の把持位置を算出する方法を議論している [8]。具体的な食品の生産ラインを想定したハンドリング装置も開発されている。Masey らは、ベルトコンベア上を搬送されてくるシート状の pasta 生地をローラで巻き取り、所定の位置へハンドリングするロボットハンドを開発している [9]。Davis らは、サンドイッチ生産ラインの自動化を目的とした、食材の盛り付けおよびサンドイッチのハンドリングを行う設備を開発している [2]。突き刺し把持を用いた開発例として、Ting らは苗木などのハンドリングを行うため、突き刺しハンドを開発している [10]。左右対象に傾斜して配置した針を対象物の斜め上方向から鉢の土に突き刺す。このハンドはパームがない構造であり、2本の針によって対象物の重量を支えて運搬している。また、天ぶらの移載装置に使用された例がある [11]。この開発では、鉛直下向きに設置した針で、ベルトコンベア上のでんぶらを突き刺し、整列装置まで運搬する作業を実現している。また、ピザに具材を盛り付ける突き刺し装置も考案されている [12]。ここで用いられる突き刺しハンドは、鉛直下向きに伸びた多数の針とパームから構成されており、垂直に下降して具材を突き刺した後、ハンドが上昇し具材を持ち上げる。リリース動作においては、パームが停止した状態で針のみが上昇

することにより、具材がパームによって抜き取られ、ピザ生地に盛り付けられる。ただし、食品のレオロジー特性を積極的に利用した突き刺しハンドの設計は従来行われていない。

## 3. 自己締め付け効果に着目した突き刺し把持

突き刺しハンドは針の配置、パームの有無によって、Table 1 に示すように大きく4種類に分類できる。I, II はパームがないタイプで III, IV はパームがあるタイプである。Fig. 2 に突き刺しハンド・対象物系を示す。突き刺し角度、突き刺し長さ、左に固定されたアクチュエータで駆動される針の突き刺し開始位置、押し付け量、対象物の厚さ、押し付け後の対象物の長さ、針先端の直径、対象物表面における針の直径、および針のテーパ角度をそれぞれ  $q (0 < q < \pi [\text{rad}])$ ,  $d$ ,  $l (0 < l)$ ,  $s$ ,  $h (s < h)$ ,  $2L$ ,  $D$ ,  $D'$ , および  $p$  とする。ただし、I, II ではパームがないため  $s = 0$  となる。針の数や太さは対象物の損傷の大きさに影響するため、十分に注意する必要がある。このとき、I, III は  $0 < q < \pi/2 [\text{rad}]$ ,  $l - d \cos q > 0$ , II, IV は  $\pi/2 < q < \pi [\text{rad}]$  を満足する。1章で説明したように突き刺しハンドの場合、対象物へのアプローチ、離脱時にパームの効果は大きいため、ここではパームがある場合についてのみ考察する。

### 3.1 仮定およびロボットシステムの概要

- 仮定 1 対象物は弾性を有するものとする (弾性対象物)。
- 仮定 2 対象物は直方体とする (対象物形状の対称性)。
- 仮定 3 突き刺しハンドは3軸直交ロボットに固定され、ハンドのパーム面は絶えず水平が維持されているものとする。また対象物は水平テーブルに置かれているものとする (水平姿勢の維持)。
- 仮定 4 ロボットのパーム中心は、対象物の幾何学的中心に向かってアプローチするものとする (パーム接触時の対称性)

Table 1 Division of the piercing hand

	$0 < q < \pi/2, l - d \cos q > 0$	$\pi/2 < q < \pi$
Without palm	I 	II 
With palm	III 	IV 

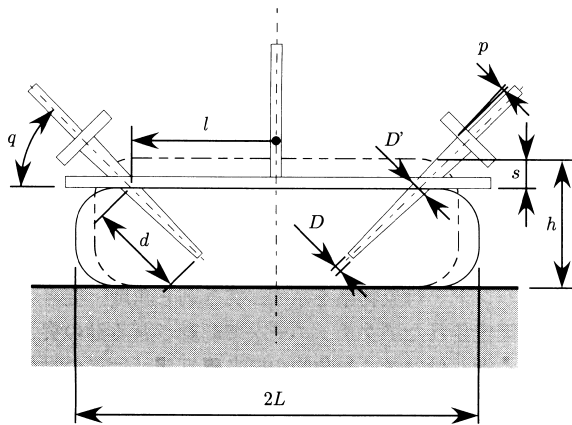


Fig. 2 Design parameters in piercing hand

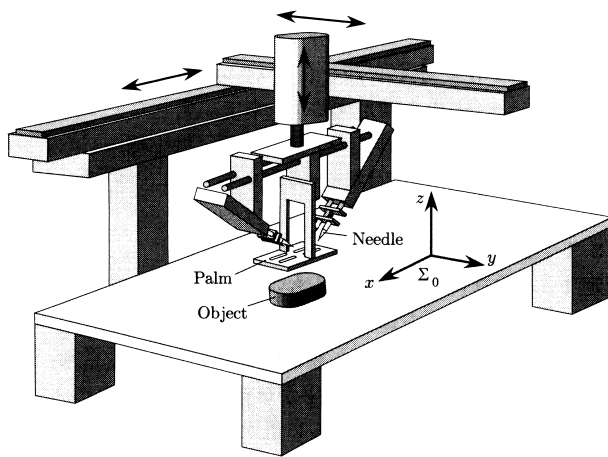


Fig. 3 An overview of the system

の維持)。

仮定 5 パームが対象物に接触した状態からパームをさらに対象物に  $s$  だけ押し込むものとする (弾性エネルギーを与えるため)。

仮定 6 対象物よりパームの方が大きいとする (一様な押し付け動作を実現するため)。

Fig. 3 にロボット・突き刺しハンドとテーブルを含めた系の全体図とその座標系を示す。

### 3.2 自己締め付け効果とは

Fig. 4 (a), (b) はそれぞれ III, IV の突き刺しハンドが対象物にアプローチしている様子を示したものである。パームによって対象物が押し付けられると (ii) のように対象物が薄く広がるように変形する。次にこの状態から (iii) のように針を突き刺し、対象物を持ち上げると、パームとテーブルとの間の拘束が一気に解放されて対象物が元の形状に復元しようとする。III のハンドの場合、対象物が元の形状に戻る運動は等価的に対象物が針から外れ落ちる方向と一致するが、IV のハンドの場合、元の形状に戻る運動は等価的に対象物が針に突き刺さる方向と一致す

† 対象物形状を円柱にすることによって、対象物を圧縮したときに、対象物が水平面上の全方向に等しく変形し、線形な解析が適用できる。

る。つまり IV のハンドでは、対象物の復元動作を阻害することにより発生する力をパーム・針間の拘束力を強める方向に利用することができる。この効果はあたかも対象物自身が蓄えられた復元力を使って対象物自身を強く締め付ける力を発生しようとしているように見なすこともできる。これが本論文で主張したい自己締め付け効果である。自己締め付け効果が期待できるのは、IV の突き刺しハンドに限定される。

### 3.3 対象物の持ち上げシミュレーション

対象物の持ち上げ動作時における変形の様子を確認するため、シミュレーションを行う。実験によりシミュレーションに使用する物性値を獲得する。対象物には市販のハンバーグを使用する。試験片 ( $20 \times 20 \times 17$  [mm]) を切り出し、圧縮試験を行う。応力ひずみ曲線および圧縮直後の対象物形状からそれぞれヤング率およびポアソン比を計算する。各 10 回測定した平均値はヤング率  $E = 2.2 \times 10^5$  [N/m<sup>2</sup>]、ポアソン比  $\nu = 0.42$  である。単純化のためシミュレーションの条件を以下のように限定する。

- 対象物を線形弾性体とする
- 対象物形状は円柱とする (対象物を水平面上の全方向に等しく変形させるため)<sup>†</sup>
- 対象物の破壊は考慮しない
- 静解析

Fig. 5 (a), (b) にそれぞれ III, IV のハンドにおけるシミュレーション結果を示す。解析には汎用有限要素法ソフト (COSMOSWorks) を使用する。対象物に針を挿入した後、対象物の形状を押し付け動作以前の形状へ変形する。Fig. 6 (a), (b) にそれぞれ Fig. 5 (a), (b) の点線部で示した領域の断面図を示す。Fig. 6 (a) より、III のハンドでは、対象物は局部的に針をすべり落ち、結果的にパームとの間にすきまが生じることが分かる。一方 Fig. 6 (b) より、IV のハンドでは、対象物の復元動作によって針を上るように対象物が変形し、結果的にパームとの接触が維持できている様子が分かる。

### 3.4 自己締め付け効果を作り出す条件

Fig. 2 のような突き刺しハンド・対象物系に対して、自己締め付け効果を作り出す条件について整理してみよう。

$$(l < L) \cap (\pi/2 < q < \pi[\text{rad}]) \quad (1)$$

の条件が満足される時、必ず自己締め付け効果が期待できる。さらに針先が対象物から出ないという条件は、

$$l - d \cos q < L \quad (2)$$

$$d \sin q < h - s \quad (3)$$

で与えられる。つまり針先が対象物から出ないでかつ自己締め付け効果が保証されるのは、式 (1)~(3) が満足されるときである。ただし、この条件が成り立つことと対象物の持ち上げを保証することとは別問題であることに注意されたい。例えば、 $L$  が極端に大きい対象物で  $l$  を  $L$  に近づけたり、 $l$  を極端に小さくすると、Fig. 7 (a), (b) のように自重で対象物が変形し、結果的に崩壊して落下してしまう可能性が考えられるが、本論文では対象物の破壊条件までは議論しないものとする。

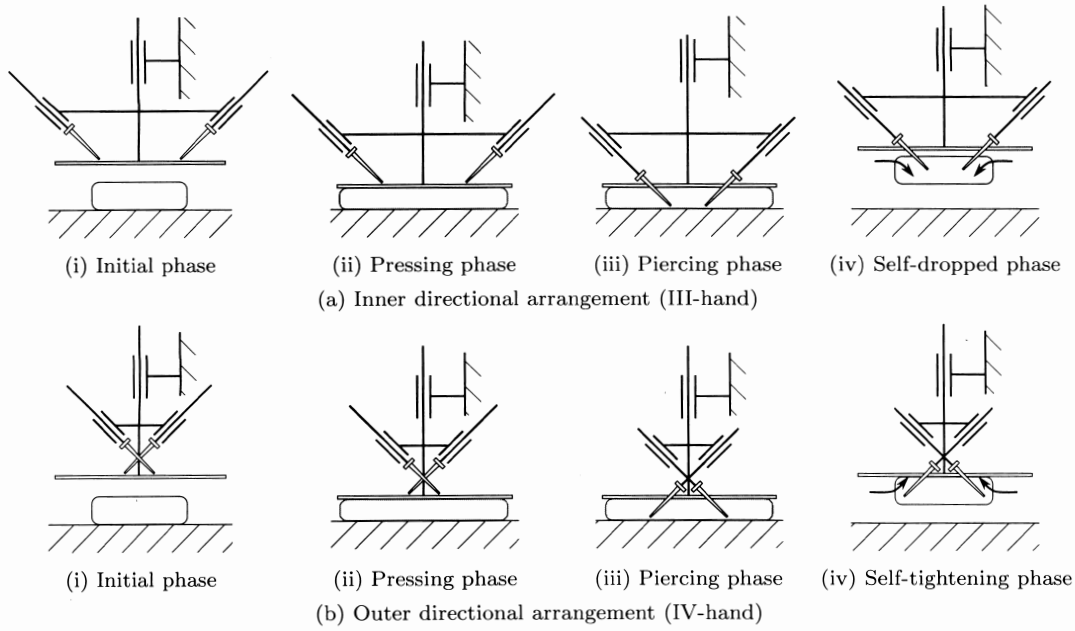
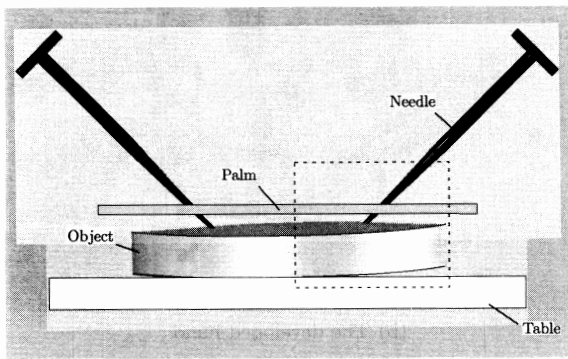
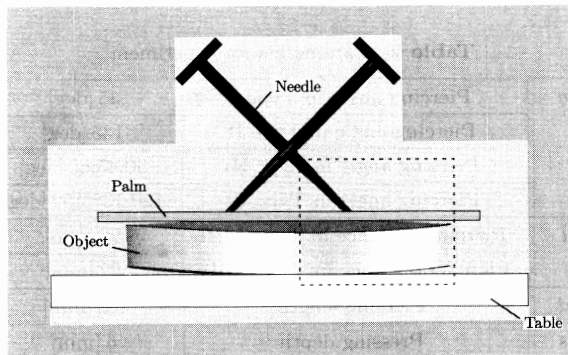


Fig. 4 Self-tightening effect

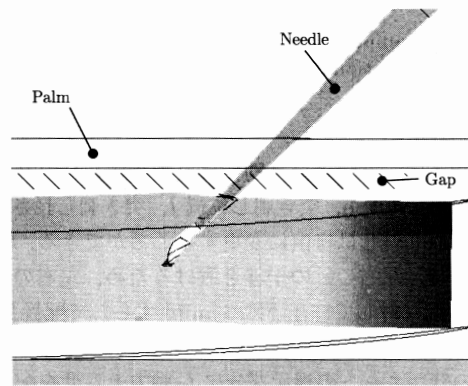


(a) III

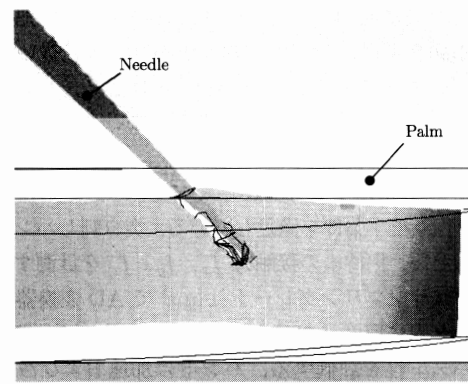


(b) IV

Fig. 5 Simulation results



(a) III



(b) IV

Fig. 6 Simulation results for the cross section  $y = -15$  [mm]

## 4. 実 験

本章では自己締め付け効果を実験的に確認するため、Table 1 のすべてのハンドに対して、針の根元部に6軸力センサを設置して針に作用する力を観察するとともに、加速度外乱を与えた場合のロバスト性評価実験を行う。

### 4.1 実験装置

Fig. 8 に実験装置の概観を示す。実験装置は直交型3軸ロボットとその先端部に取り付けられた突き刺しハンドから構成されている。突き刺しハンドは2本の針を24 [mm] 離して平

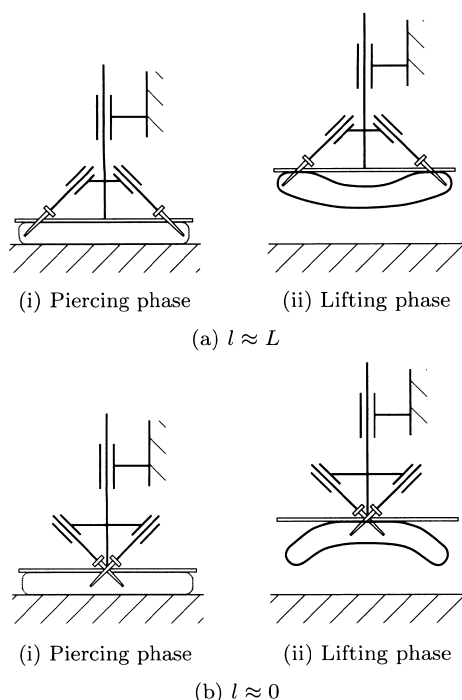
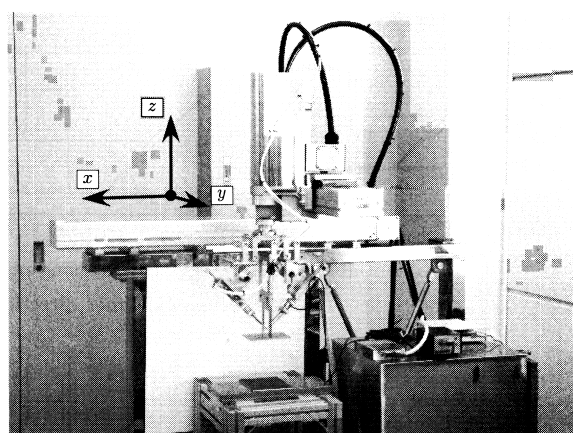


Fig. 7 Two examples where the object may be broken due to the gravitational force

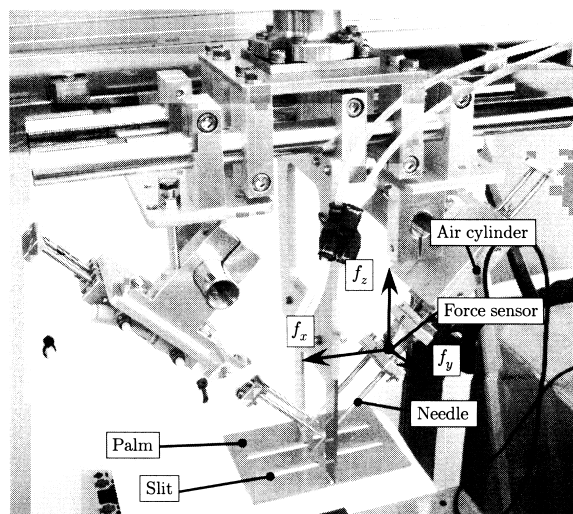
行に設置し針ユニットとし、それを左右に1組ずつ配置している。針の突き刺し、引き抜き動作は直動空圧シリンダによって行う。突き刺し角度  $q$ 、突き刺し位置  $l$ 、突き刺し長さ  $d$ 、およびパームの取り外しは自由に変更することができる。なお、突き刺し動作時、左右の針の干渉を避けるため、左右の針ユニットは  $y$  軸方向に対して、互いに3[mm]ずらして配置している。また、針に作用する力を測定するために、Fig. 8(b)に示すように、一つの針ユニットの根元部分に6軸力センサを配置している。ただし、力センサの各座標軸は  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  の方向とする。突き刺しハンドは天ぷら、魚フライ、唐揚げなどの把持が可能である。本論文では、形状に対称性があり、取り扱いやすい市販のハンバーグ(97×70×17[mm])を使用し、ハンバーグの長手方向が  $x$  軸に一致するように配置する。

#### 4.2 実験方法

実験条件を Table 2 に示す。ここでIVのハンドは自己締め付け効果を作り出す条件を満足している。突き刺しハンドで対象物を把持した後、把持中の接触力  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  を計測する。力センサの出力はサンプリングレート1[ms]でAD変換器を介してコンピュータ内に取り込む。また、ハンドに加速度外乱を与え、把持のロバスト性を評価する。ハンドの加速および減速をそれぞれ30[m/s<sup>2</sup>]で行い、100[mm]を往復させる。外乱の方向はそれぞれFig. 8(a)に示す  $x$ 、 $y$ 、 $z$  の三方向である。外乱の方向  $a$  および各方向での計測回数を  $n$  とし、対象物がハンドから落下するまでの往復動作回数  $N_{ai}(a = x, y, z)(i = 1, 2, \dots, n)$  を計測し、加速度外乱に対するロバスト性評価指標とする。ただし、一度の  $N_{ai}$  の計測に対する加速度外乱の印加は最大100往復とする。Table 1に示すすべてのハンドに対して  $n = 10$  とし、 $N_{ai}$  の計測を行う。



(a) Arm/band system



(b) The developed hand

Fig. 8 An overview of experiment system

Table 2 Parameters for experiment

$q$	Piercing angle in Type I	45 [deg]
	Piercing angle in Type II	135 [deg]
	Piercing angle in Type III	30,45,60 [deg]
	Piercing angle in Type IV	120,135,150 [deg]
$l$	Piercing distance in Type I, III	28 [mm]
	Piercing distance in Type II, IV	22 [mm]
$d$	Piercing length	8.5 [mm]
$s$	Pressing depth	6 [mm]
$p$	Taper angle	2.2 [deg]
$D$	Diameter of needle tips	1.0 [mm]
$D'$	Diameter at the intersection	1.7 [mm]
$a$	Acceleration of disturbance	30 [m/s <sup>2</sup> ]
$m$	Mass of object	0.078 [kg]
$h$	Thickness of object	17 [mm]
$2L_0$	Initial length of object	97 [mm]

4.3 実験結果

4.3.1 接触力計測結果

Fig.9~11 に、それぞれ突き刺し把持中に針が対象物に与える接触力  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  の測定結果を示す。突き刺し角度  $q$  は 45 [deg](I, III) および 135 [deg](II, IV) である。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ, I, II, III, IV のハンドにおける測定結果を示す。図中の 1 点は、1 回の実験における対象物の持ち上げ動作完了後の接触力を示し、ハンドごとに平均値と標準偏差を示す。ただし、対象物の持ち上げ完了前に落下したものについては結果に含めていない。Fig. 9 より、接触力  $f_x$  の平均値と標準偏差が、I では  $0.21 \pm 0.06$  [N], II では  $-0.32 \pm 0.09$  [N], III では  $0.13 \pm 0.09$  [N] であるのに対して、IV では  $-1.11 \pm 0.20$  [N] であり、それぞれの結果を絶対値で比較すると、IV のハンドは他のハンドの 3~8 倍の値を示している。このように IV のハンドでは予想通り、自己締め付け効果によって大きな力が発生していることが確認できる。Fig.10 より、 $f_y$  方向については接

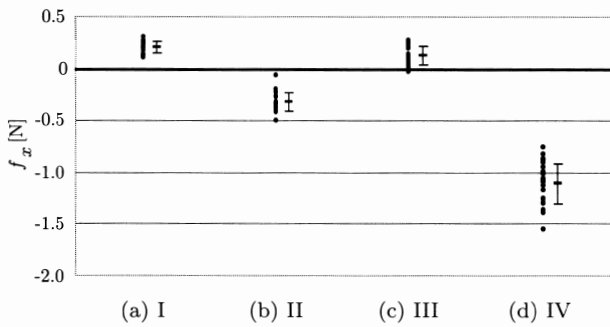


Fig. 9 x-directional force  $f_x$

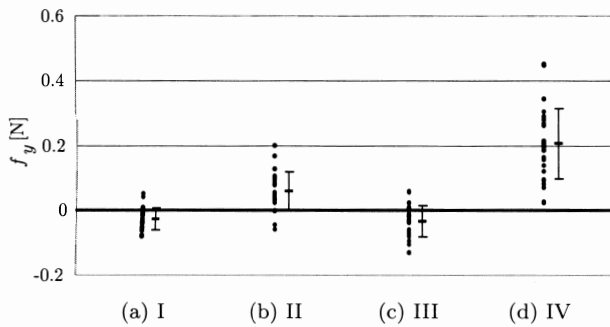


Fig. 10 y-directional force  $f_y$

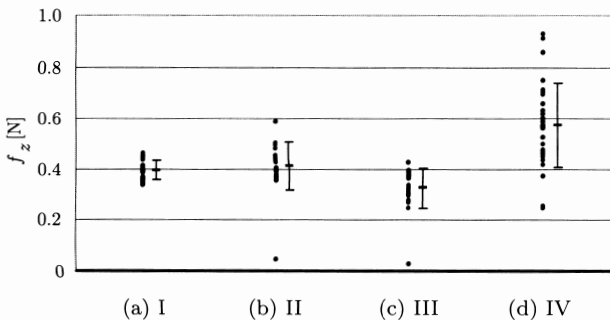


Fig. 11 z-directional force  $f_z$

触力の平均値と標準偏差が、I では  $-0.03 \pm 0.03$  [N], II では  $0.06 \pm 0.06$  [N], III では  $-0.03 \pm 0.05$  [N] であるのに対し、IV では  $0.21 \pm 0.11$  [N] と、それぞれの結果を絶対値で比較すると、IV のハンドが他のハンドの 3~7 倍の大きな値を示している。なお、接触力  $f_y$  の値が  $f_x$  に比較して、小さな値を示しているのは、パームによって押し付けられたときの突き刺し位置における対象物の変位が、 $x$  軸方向に比べて小さいことによると考えられる。Fig. 11 より、 $f_z$  方向については接触力の平均値と標準偏差が、I では  $0.40 \pm 0.04$  [N], II では  $0.41 \pm 0.09$  [N], III では  $0.33 \pm 0.08$  [N] であり、片側の針に対して対象物にかかる重力  $mg = 0.76$  [N] の約半分 ( $0.38$  [N]) に相当する接触力が発生している。これは、左右の針で対象物の重量を支えていることを示している。これに対し IV では、 $f_z$  の値は  $0.58 \pm 0.17$  [N] であり、対象物にかかる重力の半分の値 ( $0.38$  [N]) の約 1.5 倍の値を示している。これは自己締め付け効果によって、針とパームの間で大きな拘束力が発生していることを裏付ける結果と言える。このように IV のハンドでは、水平および垂直両方向に対して、自己締め付け効果に起因する大きな拘束力が発生していることが分かる。

4.3.2 加速度外乱に対するロバスト性評価

Fig. 12 に加速度外乱に対するロバスト性評価実験の結果を示す。突き刺し角度  $q$  は 45 [deg](I, III) および 135 [deg](II, IV) である。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ, I, II, III, IV のハンドに対応する。図中の  $x, y, z$  はそれぞれ加速度外乱の方向を示し、各方向におけるロバスト性評価指標  $N_{ai}$  の平均値  $\bar{N}_a = (\sum_{i=1}^n N_{ai})/n$  ( $a = x, y, z, n = 10$ ) および標準偏差を示す。また、ハンドごとの平均値  $\bar{N} = (\bar{N}_x + \bar{N}_y + \bar{N}_z)/3$  および標準偏差を求めると、I, II, III, IV について、それぞれ  $2.4 \pm 4.5, 9.4 \pm 19.1, 3.4 \pm 6.3, 88.7 \pm 27.6$  となる。IV のハンドの加速度外乱に対するロバスト性は他のハンドに対して高い評価値を示している。さらにいずれのハンドも加速度外乱の方向にはほとんど影響されない点も興味深い。Fig. 13 に III, IV のハンドに対して、針の角度を変更して行った評価実験の結果を示す。(a), (b), (c), (d) はそれぞれ, III ( $q = 30$  [deg]), III ( $q = 60$  [deg]), IV ( $q = 150$  [deg]), IV ( $q = 120$  [deg])

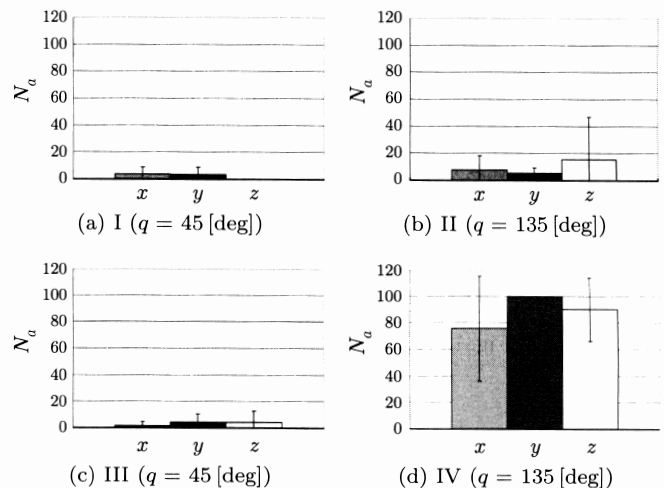


Fig. 12 Robustness index

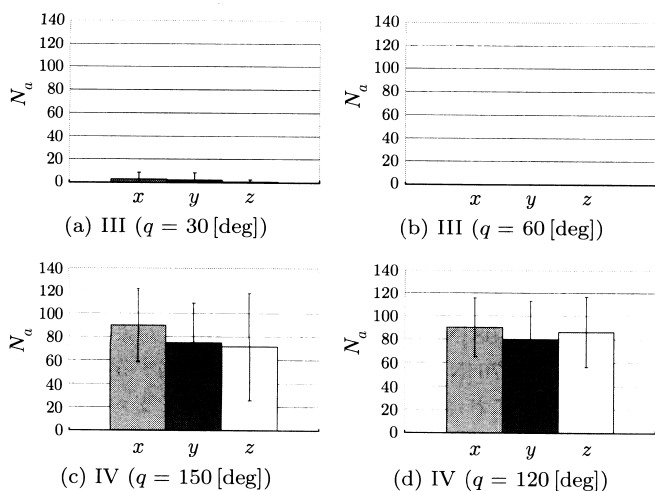


Fig. 13 Robustness index for two different piercing angle  $q$

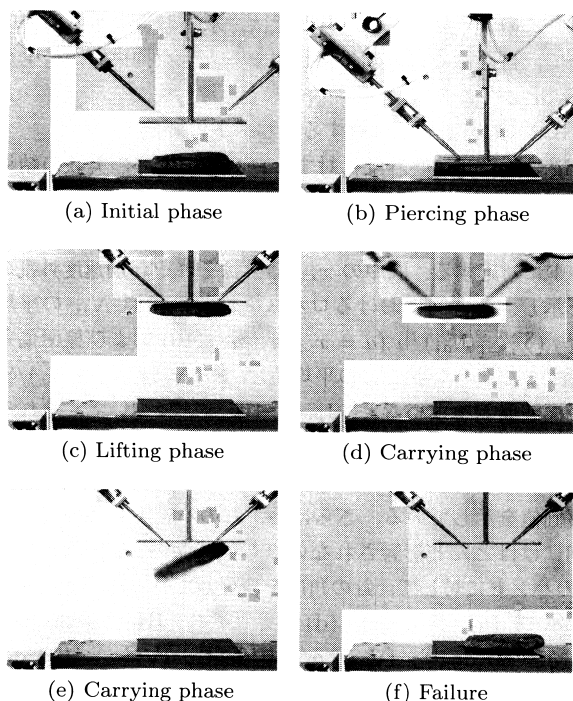


Fig. 14 An overview of test by using III ( $q = 45$  [deg]) hand

の結果を示している。Fig. 13より、IVのハンドにおいて突き刺し角度を120, 150 [deg]に変化させた場合でも、IIIのハンドに対して加速度外乱に対するロバスト性が高いことが確認できる。Fig. 14, Fig. 15にIII, IVのハンドに対して行った実験の様子を示す。Fig. 14, Fig. 15はそれぞれ自己締め付け効果が期待されない場合と期待される場合に対応している。Fig. 14では加速度外乱に対して耐え切れなくなり対象物を落としているのに対し、Fig. 15では対象物をしっかり把持していることが分かる。

## 5. ま と め

本論文では、突き刺し方式のハンドリング方法について考察し、以下の点を明らかにした。

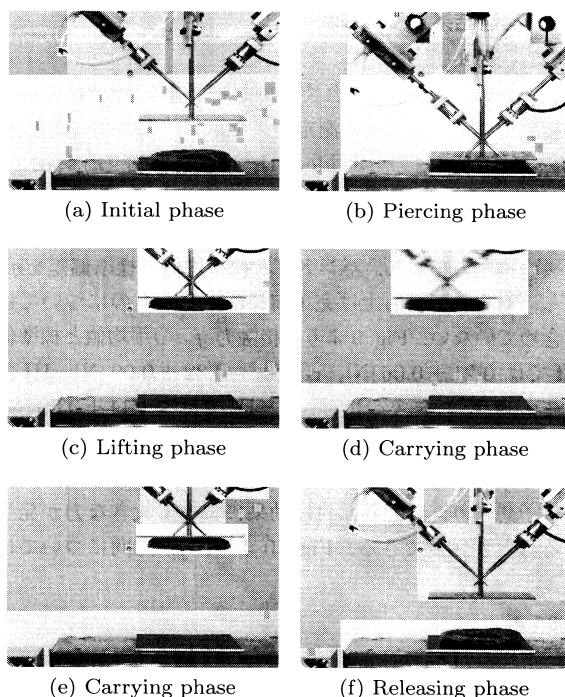


Fig. 15 An overview of test by using IV ( $q = 135$  [deg]) hand

- (1) 対象物が弾性を有する場合、パームで対象物を押し付けた際に、対象物が薄く広がるように弾性変形する。この状態で針を対象物に突き刺して持ち上げると、ハンドの幾何学的条件によって、対象物の復元動作により対象物が自分自身で針に突き刺さる方向に運動する効果（自己締め付け効果）が現れることを示した。
- (2) 自己締め付け効果を作り出す突き刺しハンドの幾何学的条件について明らかにした。
- (3) 4種類の突き刺しハンドに対して、加速度外乱に対するロバスト性評価実験を行った結果、自己締め付け効果を作り出す突き刺しハンドは他の突き刺しハンドに比べロバスト性が向上することを示した。

突き刺しハンドを設計する際は、食品の弾性による自己締め付け効果を考慮したい。今後は、突き刺しハンドの把握時における食品の破壊について議論したい。

謝辞 本研究は、(独)中小企業基盤整備機構の委託による「戦略的基盤技術力強化事業」の支援を受けました。

## 参 考 文 献

- [1] 中小企業基盤整備機構：食品ロボット用ハイブリッドアクチュエータの開発，平成15年度戦略的基盤技術力強化事業研究開発成果報告概要，2004。
- [2] S. Davis, M.G. King, J.W. Casson, J.O. Gray and D.G. Caldwell: "Automated Handling, Assembly and Packaging of Highly Variable Compliant Food Products—Making a Sandwich," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1213–1218, 2007.
- [3] 徳本，平井：“形状制御のためのレオロジー物体の変形モデリング”，日本ロボット学会誌，vol.18, no.8, pp.1141–1148, 2000.
- [4] D. Zhou, M.R. Claffee, K.-M. Lee and G.V. McMurray: "Cutting, 'by Pressing and Slicing,' Applied to Robotic Cutting Biomaterials, Part I: Modeling of Stress Distribution," Proc. IEEE

Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2896–2901, 2006.

[5] D. Zhou, M.R. Claffee, K.-M. Lee and G.V. McMurray: “Cutting, ‘by Pressing and Slicing,’ Applied to the Robotic Cut of Bio-materials, Part II: Force during Slicing and Pressing Cuts,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2256–2261, 2006.

[6] 坂本, 湯谷, 東森, 金子: “Maxwell モデルで近似できる粘弾性物体の最適ハンドリング”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.1, pp.166–172, 2007.

[7] SILSOE RESEARCH INSTITUTE: Gripping Apparatus with Two Fingers Covered by a Moveable Film, International Patent Application WO03011536, 2003.

[8] Y.F. Li and M.H. Lee: “Applying Vision Guidance in Robotic Food Handling,” IEEE Robotics and Automation Magazine, pp.4–12, 1996.

[9] R.J. Moreno Masey and D.G. Caldwell: “Design of an Automated Handling System for Limp, Flexible Sheet Lasagna Pasta,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1226–1231, 2007.

[10] K.-C. Ting, et al.: “Piercing element gripping apparatus,” US Pat. 5054831, 1991.

[11] 株式会社池内鉄工所: 天ぷら取り出し装置, 公開実用新案公報 実開平 4-93037, 1992.

[12] 明治乳業株式会社: 食品盛付方法, 公開特許公報 昭 59-159742, 1984.

付録 A. 押し付け量と自己締め付け効果の関係

押し付け量  $s$  の自己締め付け効果への影響を確認するため, IV のハンドにおいて対象物の押し付け量  $s$  を変更し実験を行った. 突き刺し角度  $q$  は 135 [deg] である. Fig.16 に押し付け量  $s$  が 6 [mm] および 3 [mm] における針が対象物に与える接触力 (a)  $f_x$ , (b)  $f_y$ , (c)  $f_z$  を示す. 押し付け量 3 [mm] における接触力  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  は, 押し付け量 6 [mm] の結果に対して, それぞれ 0.54, 0.53, 0.74 倍と減少している. Fig.17 に, ロバスト性評価実験の結果を示す. Fig.17 および Fig.12 (d) の結果を比

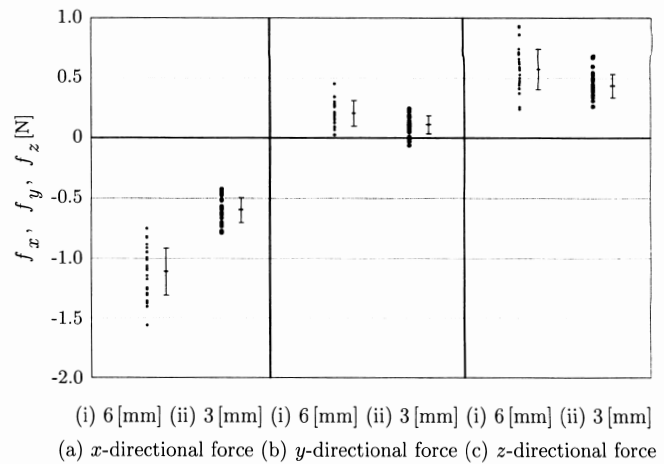


Fig. 16 Contact force under  $s = 3$  [mm]

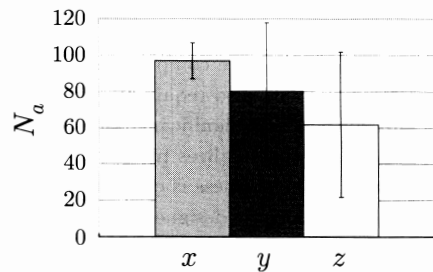


Fig. 17 Robustness index under  $s = 3$  [mm]

較すると加速度外乱に対するロバスト性も減少していることが確認できる. このことから, 押し付け量  $s$  は自己締め付け効果の大きさに影響するパラメータであると考えられる.



坂本直樹 (Naoki Sakamoto)

2000 年徳島大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年株式会社前川製作所入社. 食品機械の研究開発に従事. 2006 年 4 月より広島大学大学院工学研究科博士課程後期 (社会人) 在籍. 計測自動制御学会, 日本機械学会の会員.

(日本ロボット学会正会員)



東森 充 (Mitsuru Higashimori)

1998 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 同年株式会社東芝入社. 2002 年広島大学大学院工学研究科助手, 2006 年大阪大学大学院工学研究科助手, 2008 年同准教授, 現在に至る. 博士 (工学). ロボットハンド, アクティブセンシングの研究に従事. 日本機械学会, 日本生体医工学会, IEEE の会員.

(日本ロボット学会正会員)



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1985 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了. 広島大学助手, 助教授を経て, 2002 年より同大学教授, 工学博士. 人間と機械の運動制御, 生体信号解析とその医療福祉応用に関する研究に従事. 計測自動制御学会学術奨励賞 (1986), 論文賞 (2002, 2008), バイオメカニズム学会論文賞 (1990), 日本義肢装具学会論文賞 (2000), 日本医科器械学会論文賞 (2003, 2005, 2008), IEEE RAS King-Sun Fu Memorial Best Transactions Paper Award (2004), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞 (2004), グッドデザイン賞 (2006) などを受賞.

(日本ロボット学会正会員)



金子 真 (Makoto Kaneko)

1981 年東京大学工学系研究科博士課程修了. 工学博士. 通産省工業技術院機械技術研究所, 九州工業大学助教授, 広島大学教授を経て, 2006 年より大阪大学教授, 現在に至る. 医療診断システム, アクティブセンシング, ヒトの能力を超えたロボットの研究に興味をもつ. 日本機械学会奨励賞 (1983), 日本ロボット学会論文賞 (1994, 2007), 計測自動制御学会論文賞 (1996, 2002, 2008), 日本コンピュータ外科学会講演論文賞最優秀賞 (2004), IEEE RAS Best Tans. Paper Award (2003) などを受賞.

(日本ロボット学会正会員)