

広範囲精密近接覚センサによる精密把持と検証に基づく 極薄物体把持・ファイリングの実現

Realization of Ultra-thin Object Grasping and Filing with Precise Grasping and Verification
using Wide-Range Precise Proximity Sensors

○正 長谷川 峻 (東大) 学 山口 直也 (東大) 岡田 慧 (東大) 正 稲葉 雅幸 (東大)

Shun HASEGAWA, The University of Tokyo, hasegawa@jsk.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Naoya YAMAGUCHI, The University of Tokyo

Kei OKADA, The University of Tokyo

Masayuki INABA, The University of Tokyo

This paper presents a precise grasping system and a grasp verification system which can detect an ultra-thin object (e.g., a sheet of paper). In contrast, conventional robotic paper manipulation does not include grasping with the sensory feedback and cannot detect the object loss during grasping. Both systems use the wide-range precise proximity sensor modules which we previously developed. The grasp verification system uses the object-dependent parameters acquired by our module, in order to verify whether the object is grasped by distinguishing the object from a transparent fingertip surface. The precise grasping system uses the precise distance output generated from the intensity sensor output by our module. Real robot experiments confirmed that our verification system and grasping system work against 12 colored sheets of paper and 12 colored paper boxes respectively. Finally, we realized paper filing with our systems in which interference from a person was detected and dealt with.

Key Words: Proximity Sensor, Ultra-thin Object, Filing

1 はじめに

本研究では、筆者らが開発した広範囲精密近接覚センサモジュール [1] の精密距離出力を用いて紙のような極薄物体でも検知して優しく把持できる精密把持器と、モジュールから得られる対象物体依存パラメータを用いてそのような物体でも把持したかどうかを検証できる把持検証器を開発し、紙の把持やファイリング支援を実現する。対象物体依存パラメータは対象物体の赤外線反射特性を反映していると考えられ、把持検証器では、モジュールに対向する指の透明な表面と不透明な紙との特性に基づいた識別が行われていると言える。

紙のような極薄物体のロボットによる操作は、専用機械の開発 [2] や物体のモデリング手法の構築 [3] を主眼として取り組まれてきた。その中で、モデリングへの視覚フィードバックや作業平面に物体を押し付けるための触覚フィードバックも行われてきた [3] が、極薄物体の把持についてはオープンループであり、把持動作中に物体が指の間から抜けてしまった場合などに対応することができなかった。そこで本研究では、ロボットハンド指先に搭載したセンサを用いることで極薄物体の検知を把持中に確実に、把持結果に反映する精密把持器・把持検証器を導入する。

2 極薄物体に対応した精密把持器・把持検証器の構成法

指先センサによる把持物体検知は、これまで主に接触センサにより行われてきた [4-6]。センサの種類としては、静電容量式センサ [4]、ピエゾ抵抗式センサ [5]、カメラ内蔵式センサ [6] などが用いられてきた。物体を把持した状態では、これらの接触センサの情報だけでなく、指の関節角や指間距離などの深部感覚も変化することが多いため、これらの情報も用いられている [4]。しかし、以上の手法が有効なのは、厚みのある物体のみである。紙のような極薄物体に対しては、以下の二点の理由により有効でない。

- 指先接触センサは、把持中の接触を検知した時に、極薄物体が接触しているのか、それとも物体が存在せずに対向する指先が接触しているのかを判別できないという点。これは、把持された極薄物体が、指先同士の接触面の形に馴染んでしまい、指先の変形状態を変化させないからである。
- 把持後の指間距離は極薄物体の有無でほとんど変わらないため、深部感覚も変化しないという点。

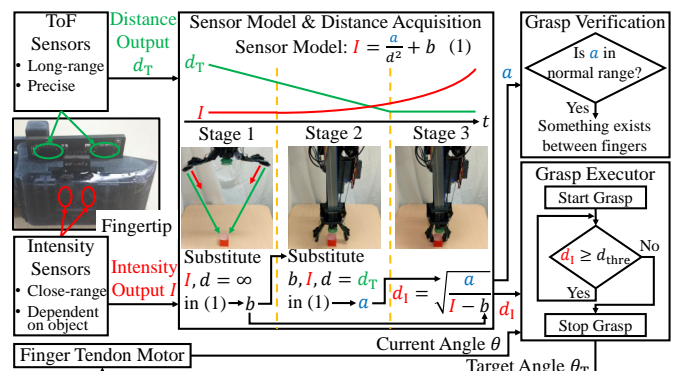


Fig.1: Overview of the sensor model acquisition, grasping, and verification.

そこで本研究では、指先の変形状態を検出するのではなく、対向する指先と極薄物体を赤外線反射特性の違いに基づいて識別する。指先は透明なゴムで覆われている [1] ため、不透明な物体とは赤外線反射特性が大きく異なると考えられる。この識別を行うのが把持検証器である。

一方、精密把持器は、指先が柔軟なロボットハンドで極薄物体を把持する場合に有効である。柔軟な指先は把持力を高めると大変形しやすく、それに追従した極薄物体に皺が入って元に戻らなくなることがある。本研究で用いるハンドの親指は吸着パッドとなっており、ここに物体を押し付けた場合に皺が入る危険がある。これを防ぐために、指から物体までの距離の精密計測結果を利用して低把持力で把持を行う精密把持器を導入する。

以上の把持検証器・精密把持器はどちらも、広範囲精密近接覚センサモジュール [1] の出力を用いることで実現でき、そのモジュールの応用先となる。モジュール・把持検証器・精密把持器で構成されるシステムの概要を図 1 に示し、この内容について以下で詳細に説明する。

3 精密把持器・把持検証器に利用可能な 広範囲精密近接覚センサモジュール

本研究で用いる広範囲精密近接覚センサモジュール [1] は、赤外線反射光強度センサと赤外線レーザー ToF センサを兼ね備え

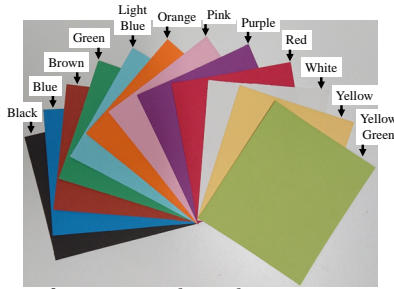


Fig.2: Sheets of paper used in the experiments of distance measuring (§3.1) and grasp verification (§4.1). All 12 sheets have different colors and each of them has the same color on both sides. Their thickness is 0.19 mm.

たものである。前者のセンサは後者と違って至近距離 (10 mm 以下) まで測定できるが、後者に比べて対象物体の赤外線反射特性に強く依存しており、対象物体に低依存な測定を行うためには、把持前にその特性を取得しておく [7]、あるいは時間をかけて推定する [8] 必要があった。そこで本モジュールでは、その特性獲得を把持中にオンラインで行うため、二種類のセンサの検知範囲が一部重なっていることに着目する。その重複領域において、対象物体低依存な ToF センサの出力距離を用いて、強度センサの出力 (I) を距離 (d) に変換する以下のセンサモデルの対象物体依存パラメータ (a) を獲得する。

$$I = \frac{a}{d^2} + b \quad (1)$$

オフセットパラメータ b には、強度センサが検知できないほど物体が遠くにある把持動作初期での強度センサ出力 I を設定する。対象物体依存パラメータ a には赤外線反射特性が含まれていると考えられ、これが把持検証器の入力となる。また、このモデルは把持の度に物体に応じて獲得されるため、これを用いると強度センサ出力を以下のように変換し、至近距離でも対象物体低依存で精密な距離出力 d_1 を得ることができる。

$$d_1 = \sqrt{\frac{a}{I - b}} \quad (2)$$

この精密距離出力 d_1 が精密把持器の入力となる。

なお、先行研究 [1] において問題となっていた ToF センサの不安定性を緩和するため、20 Hz で出力される ToF センサ生値に対して、強度センサに適用していたものと同じ、以下のローパスフィルタを適用する。

$$F[T] = 0.3f[T] + 0.7F[T - 1] \quad (3)$$

ここで、 T は現在時刻ステップ、 $f[T]$ は現在のセンサ生値、 $F[T - 1]$ は前ステップのフィルタ出力である。このようにして得られたフィルタ出力を用いることで、対象物体依存パラメータ a の獲得の際に行っていた ToF センサ生値の 10 回平均が必要なくなり、生じる遅延も 10 回平均に比べて抑えられた。

また、先行研究では掌のモジュールを用いていたが、本研究では指先のモジュールを用いる。掌では強度センサと ToF センサが同一平面上に配置されていたのに対し、指先では強度センサ平面的裏側に ToF センサ平面があり、物体から強度センサまでの距離よりも ToF センサまでの距離の方が 6 mm 長い。式 (1) の距離 d は物体から強度センサまでの距離を表すので、ここに代入するためには、ToF センサ生値をフィルタリングしたものから 6 mm 差し引かねばならない。本研究では、6 mm 差し引いた後の値を ToF センサ出力距離とする。

3.1 指先モジュールの動作検証のための距離計測実験

本研究で用いる指先モジュールの動作を検証するため、図 2 に示す 12 種類の色紙に対して距離を計測できるか確認する実験を行った。それぞれの色紙に対し、9 種類の距離の測定を 10 回ずつ、紙に平行にした指先の一組の強度センサと ToF センサを用いて行った。指先において、強度センサからゴム表面までの距離は 5.4 mm であったため、これを測定対象距離の下限に設定した。この距離から 85.4 mm までを、10 mm 刻みで測定対象距離とし

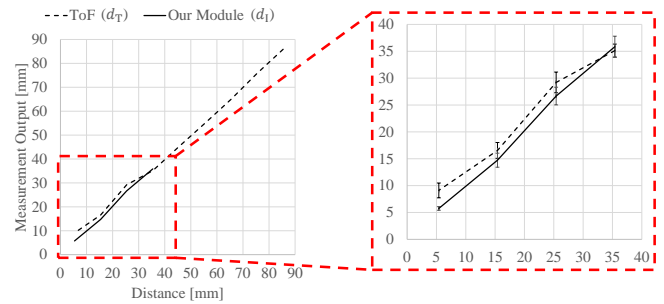


Fig.3: Distance output of our sensor module. The solid black line shows the distance output generated from the intensity sensor (d_1). The broken black line shows the ToF sensor output (d_T). All lines are created with linear interpolation between the means of 120 measurements (10×12 colors). The right graph is the enlarged view of the left graph. Each of the error bars in the right graph represents one standard deviation of 120 measurements.

Table 1: Table of distance output of our sensor module.

Distance [mm]	d_T		d_1	
	MEAN	STD	MEAN	STD
85.4	85.9	1.3	N/A	N/A
75.4	75.8	1.3	N/A	N/A
65.4	64.9	1.3	N/A	N/A
55.4	55.0	1.4	N/A	N/A
45.4	45.2	1.1	N/A	N/A
35.4	35.1	1.2	35.9	2.0
25.4	29.2	1.9	26.7	1.6
15.4	16.6	1.5	14.7	1.3
5.4	9.1	1.4	5.7	0.3

MEAN and STD respectively represent the mean and the standard deviation of 120 measurements. N/A means sensor models are not fully acquired against at least one color.

た。実験中の動作としては、強度センサ出力 I の最小値をオフセットパラメータ b として設定する必要があるため、まず指先と紙を 285.4 mm 離れた状態で I を計測して b とし、その後指先を近づけて距離を 85.4 mm としてから、計測と 10 mm ずつの接点を繰り返した。

図 3 と表 1 に実験結果を示す。35.4–5.4 mm の間で、強度センサ出力から変換された精密距離出力 d_1 が想定通りに得られていることがわかり、指先モジュールが正しく動作することが実証された。この出力の標準偏差や平均値と真値の誤差は、35.4 mm の場合を除いて、ToF センサ出力のものよりも小さく、物体色に依存しにくく精度の高い計測が行えていることがわかる。

4 透明な指表面と不透明物体の識別に基づく把持検証器

把持検証器では、3 節で述べた対象物体依存パラメータ a を用いる。物体が指の間でない状態で把持を行った場合、センサが検出するのは対向する指先の透明な表面であり、この表面の赤外線反射特性に対応するパラメータが獲得される。これは、指の間に不透明な極薄物体があつてこれを検出した場合のパラメータと大きく異なると考えられる。そこで、把持検証器では、把持中に両指で獲得された対象物体依存パラメータ a を入力とし、その全てがヒューリスティックに定めたパラメータ範囲に収まっている場合、指の間に物体が存在すると認識する。

4.1 把持検証器のパラメータ範囲決定のための色紙把持実験

上述した把持検証器のパラメータ範囲を決定するため、多様な色の極薄物体 (図 2) を把持して対象物体依存パラメータ a を獲得させる実験を行った。図 4 に、実験中のロボット動作を示す。紙は机中央の治具にセットされて垂直となっており、これに対してロボットハンドを下ろし、把持する。この把持動作の間に、各指先の先端に近い強度センサと ToF センサの組を用いて獲得された対象物体依存パラメータ a を記録する。この動作を、12 種類の紙それぞれに対して 5 回ずつ行った。また、治具に紙をセットしない状態に対しても 5 回行い、紙を把持した場合と何も把持しなかった場合とを識別できるか確認する。

図 5 に、実験中に獲得された対象物体依存パラメータ a をプロットしたものを示す。紙を把持した場合のパラメータのほとんど、何も把持しなかった場合のパラメータには差があり、識別

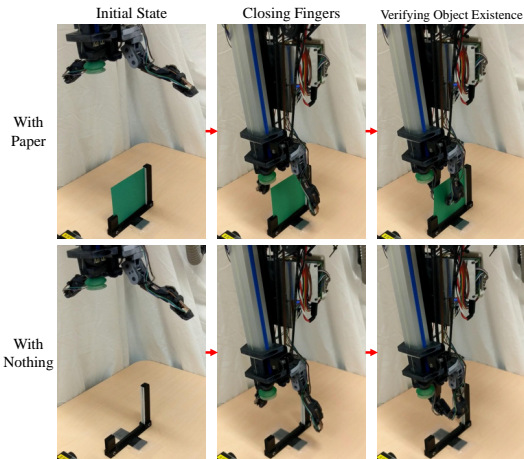


Fig.4: Sequence of grasping paper. Our grasp verification system tried to distinguish the upper case (“With Paper”) from the lower case (“With Nothing”). In the upper case, one of the sheets of paper (Fig.2) was inserted into the slit of the jig on the table. At the initial state, the offset parameters b were acquired. While the fingers were being closed, the object-dependent parameters a were acquired.

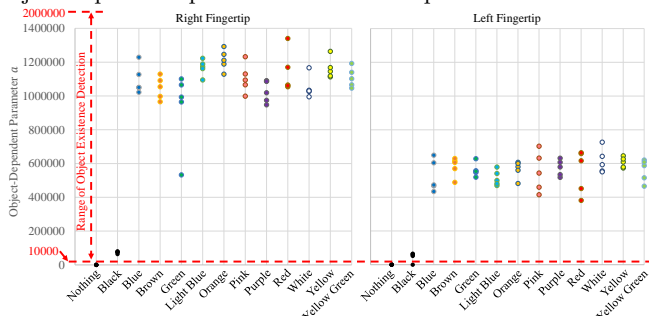


Fig.5: Object-dependent parameters a output from our sensor modules in grasping paper. Each dot denotes one parameter a acquired in one grasping trial. As two parameters are acquired in a grasping trial (by the left fingertip and the right fingertip), there are 130 dots in the graph ($2 \times 5 \times 13$ cases (colors + nothing)).

が可能であることが確かめられた。本実験を踏まえ、使用する全てのセンサ組において $10000 \leq a < 2000000$ が満たされる場合、指の間に物体が存在すると認識するように設定する。右指先と左指先でパラメータが大きく異なるのは、パラメータが対象物体に依存するだけでなく、強度センサが埋まっている透明ゴム内の光損失にも影響されるからである。ゴム内気泡密度やゴム表面粗さなどは不均一なため、センサ正面のゴム状態はセンサごとに異なり、光損失も異なってくる。しかし、本実験の結果から、物体存在認識で用いるパラメータ範囲なら共有しても問題ないことがわかったため、一つの範囲のみを用いる。紙を把持していたにも関わらず、どちらかの指先のパラメータがこの範囲から外れてしまったのは、黒い紙に対する一試行のみである。一試行のみの失敗ではあるが、赤外線反射率の低い黒色物体の扱いが難しいことが表れていると言える。また、何も把持しなかった場合、パラメータは常時0となった。しかし、0はパラメータの初期値であるため、パラメータの獲得に失敗していることが示されている。これは、対向する指先を検出した時の強度センサ出力 I が、物体を検出した時に比べて違いすぎ、センサモデル獲得が動作する条件を満たさなかったからだと考えられる。センサモデル獲得に失敗するほどの赤外線反射特性の違いを検出できたと言え、指先と紙の識別においては問題ないが、指先と似た特性を持つ物体(透明な層で不透明な物を覆った物体)に対してセンサモデル獲得が失敗し、距離が出力できないことが予想される。

5 センサモジュールの精密距離出力に基づく精密把持器

精密把持器は、過剰な把持力をかけずに物体を把持するためのものであり、強度センサ出力から変換された精密距離出力 d_1 と、

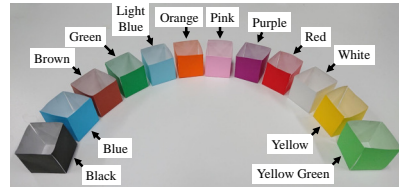


Fig.6: Paper boxes used in §5.1. They are made from sheets of folding paper and their wall thickness is 0.07 mm. Their size is 35 mm × 35 mm × 35 mm.

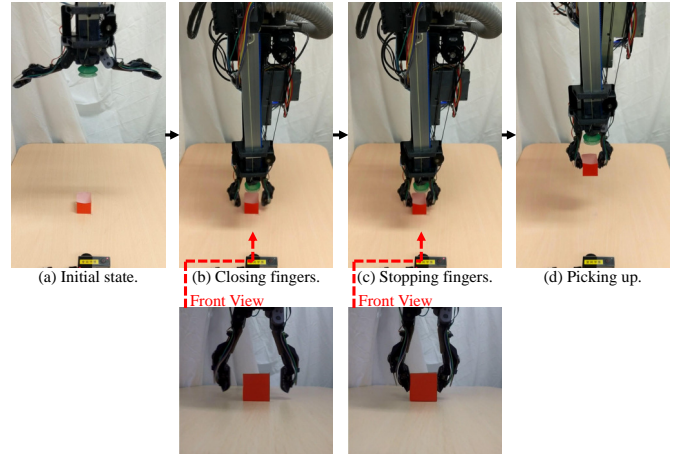


Fig.7: Sequence of picking up paper boxes. At (a), the offset parameters b were acquired. At (c), the fingers were stopped by our precise grasping system. At (d), the robot executed the picking up motion to check if the object was firmly grasped.

Table 2: Deformations caused by grasping motions.

	Our Method (with d_1)	Intensity Only (with I)	Pressure Sensor
Least Deformed		 Fingers did not touch box Picking up failed	
Most Deformed			

We selected pictures of the least deformed object and the most deformed object in all trials of each method.

指の腱を牽引するモータの現在角度 θ を入力とし、そのモータの目標角度 θ_T を出力とする。まず、指を閉じきる目標角度を出力し、指を閉じている最中 ($\theta < \theta_T$) に、両指から送られてくる精密距離出力 d_1 を監視し続ける。全ての出力 d_1 がヒューリスティックに定めた閾値 d_{thre} を下回ったら ($d_1 < d_{thre}$)、モータに停止を指令する ($\theta_T = \theta$)。ソフトウェア上位層から停止指令を出してから、指が実際に停止するまでには遅延があるため、この遅延後に指が物体に接触しているような閾値を設定する。接触センサと異なり、指が物体に接触していない状態のセンサ値を閾値に設定できるため、たとえ遅延が大きくても、柔らかい接触状態で指を停止させることが容易である。また、距離出力が対象物体低依存であるため、異なる赤外線反射特性を持つ物体に対して同一の閾値を使用できる。

5.1 極薄物体の構造物の把持を通じた精密把持器の検証実験

上述した精密把持器が過剰な把持力をかけないか確認するため、極薄物体でできた箱(図6)を把持する実験を行った。箱の壁は 0.07 mm と薄く、過剰な把持力が働くと大きく歪むことから、把持後の箱の歪みを観測することで把持力が適切かを確認できる。本実験では 4.1 項と同じセンサ組を用い、精密把持器の閾

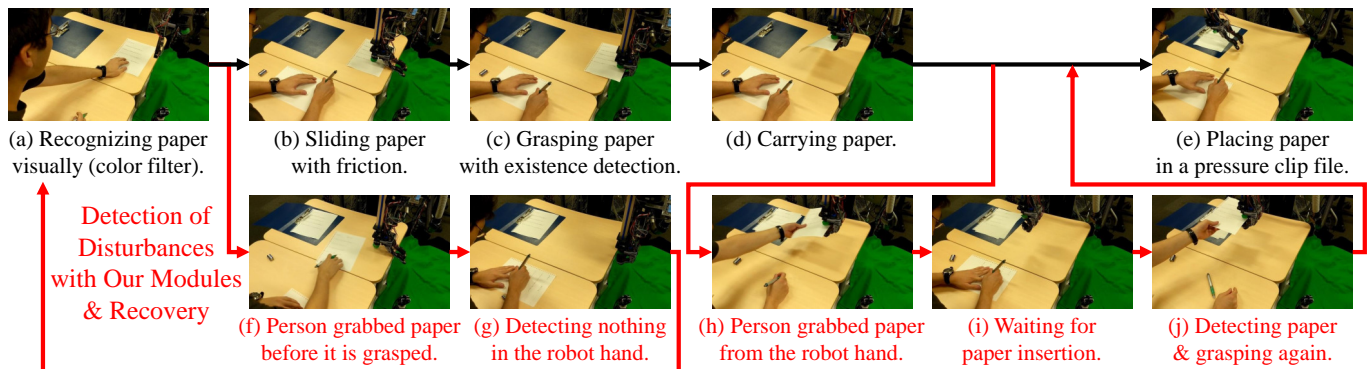


Fig.8: Sequence of paper filing with interference from a person. Loose leaves whose thickness is 0.10 mm were used.

Table 3: Critical failure rates of picking up paper boxes.

	Our Method	Intensity Only	Pressure Sensor
Crushing the box	0/60	5/10	2/5
Dropping the box	0/60	4/10	N/A

“Crushing the box” is defined as the case that one wall of the box touches the opposed wall. “Dropping the box” is defined as the case that the box drops before it is lifted by 110 mm. N/A exists because we found large deformation in all trials with the pressure sensors and skipped lifting. Picking only with the intensity sensors always crushed the black box and mostly dropped the pink box.

値 d_{thre} を 25 mm とした上で、12 色の箱に対して 5 回ずつ把持試行を行った。図 7 に、実験中のロボット動作を示す。把持後に図 7d の持ち上げ動作を行うことで、箱を持ち上げられる程度の最低限の把持力がかかっているかを確認できる。また、比較のため、強度センサのみを用いた把持・持ち上げを黒色の箱とピンク色の箱に対して、接触センサを用いた把持を赤色の箱に対して行った。前者の実験では、前述した精密把持器の実験で用いたセンサ組の強度センサのみを用い、各強度センサ固有の閾値（左指先は 336, 右指先は 840）を全てのセンサがそれぞれ下回った時に指を停止させた。後者の実験では、Willow Garage 社の PR2 の指先圧力センサを用い、PR2 標準のグリップセンサコントローラを先行研究 [9] と同じ閾値で用いた。

表 2 と表 3 に実験結果を示す。表 2 に示されたように、精密把持器により生じる箱の歪みは他手法に比べて小さく、過剰な把持力をかけにくいことが実証された。また、表 3 を見ると、強度センサのみを用いた場合は色によって結果が変わった一方、精密把持器は異なる色の物体を同様に扱えていることがわかる。

6 人からの干渉を考慮した紙ファイリング支援実験

本稿で提案した精密把持器と把持検証器を用いて、人からの干渉に対応しながら紙のファイリングを代行する実験を行った。把持検証器と精密把持器の設定は、4.1 項と 5.1 項のものを引き継ぐ（各指先の先端に近い強度センサと ToF センサの組を用い、把持検証器のパラメータ範囲を $10000 \leq a \leq 2000000$ 、精密把持器の閾値 d_{thre} を 25 mm とする）。図 8 に実験の様子を示す。この実験では、0.10 mm 厚のルーズリーフを用いた。文書を書いている人が書き終わった紙をロボット前に置き、ロボットはその紙を滑らせ、机からはみ出した部分を三本指で把持し、レバーフェイルまで運搬する。ここで使用したハンドは空気吸着可能であるが、紙に対して空気吸着を行うと皺が入ってしまうため、空気吸着は行わなかった。把持検証器は図 8c, g において用いた。何も把持できていないことを検出する（図 8g）ことで、人が書き直しのために紙を取り返してしまった場合（図 8f）に対応し、視覚認識待ちの状態（図 8a）へと戻ることができた。精密把持器は図 8c, g, j において用いた。使用したハンドでは、親指が吸着パッドとなっていて柔軟性が高いため、精密把持をせず高把持力で紙を把持すると、吸着パッドが大変形して紙もそれに追従し、皺が入ってしまうが、それを防ぐことができた。図 8i では、精密距離出力 d_i を別の用途に用いた。運搬中の紙を人が書き直しのために取り返した場合、その紙に対して最適化されていた距離出力は大きく変動した。この変動を検出することで、書き直した紙を人が指に挿入してくれるまで待機する状態に移行できた。挿

入された際も、距離出力が以前の状態に戻ったことを検出することで挿入を検知することができ、再び把持を行って運搬に戻ることができた。

7 結論

本研究では、紙のような極薄物体の把持にセンサフィードバックを導入し、把持動作中に物体が指の間から抜けてしまった場合などに対応するため、筆者らが先行研究で提案した広範囲精密近接覚センサモジュールを用いた精密把持器と把持検証器を開発した。把持検証器は、モジュールが物体把持中に獲得する対象物体依存パラメータを用いて、指の間に物体があるかどうかを検証するものであり、モジュールに対向する指の透明な表面と不透明な物体との赤外線反射特性の違いを利用したものである。これが 12 色の紙を検知できることを実験的に確認した。一方、精密把持器は、モジュールの精密距離出力を用いて低把持力で把持を行うものであり、柔軟な指先で極薄物体を操作する際に皺が入るのを防止することができる。これが 12 色の紙箱に対して低把持力を維持できることを実験的に確認した。以上の把持検証器と精密把持器を組み合わせ、紙のファイリング支援を実現した。ファイリング動作中に人が紙を取り返すという干渉を行っても、それを検知して対応動作に遷移できた。

参考文献

- [1] 長谷川峻, 山口直也, 岡田慧, 稲葉雅幸, “ToF センサによる反射光強度センサ補正に基づく反射率低依存な広範囲近接覚検出”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, pp. 2P1-H08, 2019.
- [2] Balkcom, D. J. and Mason, M. T., “Robotic origami folding”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27-5, pp. 613-627, 2008.
- [3] Elbrechter, C., Haschke, R., and Ritter, H., “Folding paper with anthropomorphic robot hands using real-time physics-based modeling”, In *Humanoids 2012*, pp. 210-215, Nov 2012.
- [4] Kwiatkowski, J., Cockburn, D., and Duchaine, V., “Grasp stability assessment through the fusion of proprioception and tactile signals using convolutional neural networks”, In *IROS 2017*, pp. 286-292, Sept. 2017.
- [5] Xu, J., Bhardwaj, A., Sun, G., Aykut, T., Alt, N., Karimi, M., and Steinbach, E., “Learning-Based Modular Task-Oriented Grasp Stability Assessment”, In *IROS 2018*, pp. 3468-3475, Oct. 2018.
- [6] Calandra, R., Owens, A., Jayaraman, D., Lin, J., Yuan, W., Malik, J., Adelson, E. H., and Levine, S., “More Than a Feeling: Learning to Grasp and Regrasp Using Vision and Touch”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3-4, pp. 3300-3307, 2018.
- [7] Konstantinova, J., Stilli, A., Faragasso, A., and Althoefer, K., “Fingertip proximity sensor with realtime visual-based calibration”, In *IROS 2016*, pp. 170-175, Oct 2016.
- [8] Hsiao, K., Nangeroni, P., Huber, M., Saxena, A., and Ng, A. Y., “Reactive grasping using optical proximity sensors”, In *ICRA 2009*, pp. 2098-2105, May 2009.
- [9] Jiang, L.-T. and Smith, J. R., “Seashell effect pretouch sensing for robotic grasping”, In *ICRA 2012*, pp. 2851-2858, May 2012.