

XY-Z 分離計測による薄型食品の高速ばら積みピッキング

○小山 佳祐（大阪大/株式会社 Thinker） 中野 基輝（株式会社 Thinker） 原田 研介（大阪大）

This paper proposes a robot system for high-speed suction picking of thin rice crackers using a web camera and a proximity sensor. The camera is used to measure the object position in the XY plane, and the proximity sensor is used to rapidly adjust the arm tip position in the Z direction. In the experiments, we confirmed that the proposed system is capable of 3D bin-picking of thin rice crackers, and that the total time for image capturing and processing is 0.35 seconds. The system could pick up thin rice crackers at high speed without breaking them.

1. はじめに

3D デプスカメラレスで薄型食品（米菓）のばら積みピッキングが可能なシステムを提案する（図 1）。ロボット上部には WEB カメラと LED 照明が配置されており、XY 平面内での米菓のばら積み位置を計測する。そして、エンドエフェクタに搭載した近接覚センサを用いて Z 高さ方向を高速に位置調整し、最終的に吸着パッドにより米菓をピックアップする。XY 平面内での位置計測と Z 方向の高さ計測の手法を分離することで二つのメリットがある。一つ目は 3D デプスカメラを利用する場合と比べて画像撮像・処理時間の高速化が可能であり、タクトタイムを短縮できる点である。二つ目は、近接覚センサにより、ダイレクトに食品との距離やその有無を検知することで、脆い食品を割らずに、かつ、確実に高速搬送できる点である。

食品製造ラインにおいては、不定形で脆い食品を破損させずに高速搬送することが求められる。具体例としては、薄型の米菓のばら積みピッキングが挙げられる。ランダムにばら積みされた約 3 ミリ厚の米菓を割らずにピックアップし、1 個当たり約 1 秒以内にコンベア上に移動させる作業である。米菓を破損させずにエンドエフェクタを精密位置決めするためには、高精度な 3D デプスカメラを使用する必要がある。しかし、撮像時間と点群の処理時間を合わせると約 1-2 秒程度要するため、計測時間だけでタクトタイムをオーバーする問題がある。また、高精度な 3D デプスカメラを用いると、ロボットシステム全体で 1 千万円を超える場合が多く、食品製造現場では導入が難しいという点も実用面では問題である。

本研究では、XY 平面内と Z 方向の位置調整を 2D WEB カメラと近接覚センサで役割分担することにより、薄型食品を割らずに高速搬送するシステムを提案する。論文のコントリビューションとしては以下の 3 点である¹。

- (1) 近接覚センサを用いたリアルタイム軌道計算の提案：対象物の積み上げ高さに応じて滑らかにアーム手先を減速するための軌道計算式を提案する
- (2) 画像撮像・処理時間の高速化：XY・Z 位置の分離計測システムにより、フレームレート 30fps の安価な WEB カメラで撮像・画像処理時間 0.35 秒を

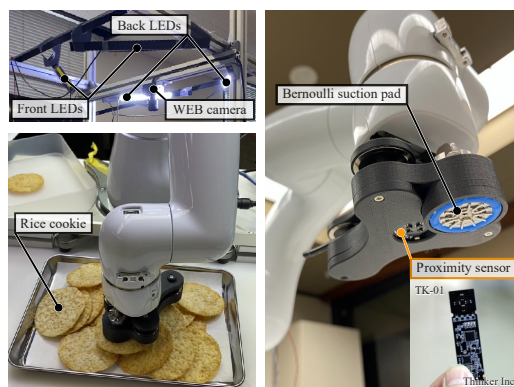


図 1 Bin-picking system for thin rice crackers with 2D camera and proximity sensor.

実現する

- (3) 近接覚センサフィードバックにより、米菓の高速・確実な搬送を実現する

2. 予備実験

食品のばら積みピッキングでは、フライドチキンなどを代表に一部はすでに取り組みられている [1]。しかし、上方からばら積み状態を俯瞰した際に食品間に隙間が生じやすいケースが多く、デプスカメラで計測が容易な食品であることがほとんどである。

これに対し、薄型米菓はばら積み状態では隙間が生じづらく、また、個体間の高低差は約 3 ミリ程度と小さい。従来の食品のばら積みピッキングと比べると対象物の特徴が異なる。

まず、薄型米菓のピッキング時の困難さを明確にするために、1) RGB-D カメラによる奥行計測実験と、2) 2 種類の吸着パッドの動作試験を行った。

2.1 米菓の奥行計測と考察

一般的な RGB-D カメラの一つである D435 を用いて、ランダムにばら積みされた米菓を撮影した際の画像を図 2 に示す。同図の左がデプス画像であり、右が RGB カラー画像である。デプス画像は全体的に輪郭が不鮮明であり、米菓の重なり部分で本来生じるはずの奥行距離の変化が捉えられていない問題がある。また、斜めに傾いた米菓の輪郭は一部が消失している箇所もあり、このデプス画像からは最上部にある米菓を検出することは困難である。

¹食品製造総合展 FOOMA2024 でデモ機を公開したが、画像処理の詳細フローおよび計算時間や、近接覚センサベースドな軌道制御に関してはこれまで未公開であり、本原稿が初出である。

D435 よりも高精度なデプスカメラを使用すれば輪郭は鮮明に計測できると考えられる。しかし、撮像時間と物体認識の処理時間を含めると 1-2 秒程度の処理時間を要するため、タクトタイムが増加する問題が生じる。また、高精度なデプスカメラは一般的にロボットアームと同等かそれ以上に高価であり、実応用ではコスト面で問題が生じる。

また、この他、一見するとばら積みの最上部に位置する米菓であっても端部でわずかに別個体が重なるケースがある。デプス情報のみでは、米菓の重なりと表面の凹凸との違いを 100% 確実に判定することは難しいと考えられる。ピックアップする際に、折り重なった米菓のうち、下方の個体を選んだ場合、ピックアップを妨げられ、吸着パッドから対象が引きはがされる問題が生じる。

2.2 米菓の吸着テストと考察

吸引式とベルヌーイ式の 2 種類の吸着パッドにより、米菓の吸着テストを行った。米菓表面の凹凸の影響により、吸引式の吸着パッドでは押し付け力が十分でない場合、ピックアップに失敗するケースがあった。これに対し、ベルヌーイ吸着パッドを使用した場合、米菓から 15mm 程度離れた非接触状態でも吸着し、ピックアップすることに成功した。ベルヌーイ吸着パッドは圧縮空気をパッドの周囲に吐出することで、パッド中心と対象物の間に負圧を生み出すことから、吸引力に優れている。また、食品屑を吸い込まないため、衛生面においても有利である。以上の結果から本稿ではベルヌーイ吸着パッドを使用することにした。

3. 提案システムと制御

予備実験から、ロボットシステムは 1) XY 平面内で米菓の輪郭を鮮明に捉え、最上部の個体位置を検出することと、2) Z 方向位置に関しては、米菓と吸着パッド間の距離を 15mm 以内に高速調整することが必要である。本稿では、輪郭を明瞭に捉えることが難しい点は WEB カメラとアクティブ照明により解消し、Z 方向高さの高速調整には近接覚センサフィードバックベースのリアルタイム軌道生成を用いる。また、米菓の端部が重なった個体をピックアップした際に生じる失敗例に関しては、近接覚センサで対象物のはがれを検出し、リトライを行うことで失敗をリカバリする。

把持戦略は、まず、1) WEB カメラで XY 平面内の米菓の位置を計測し、エンドエフェクタを米菓の上方にアプローチする。次に 2) Z 方向の高さ位置を近接覚センサのフィードバック制御を利用して調整を行う。そして、3) 吸着時のピックアップ成功判定を近接覚セ

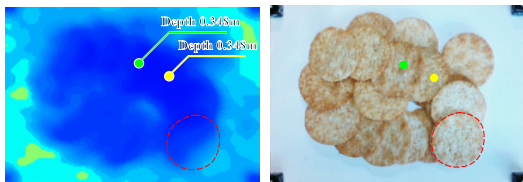


図 2 Depth image (left) and color image (right) taken with the D435 RGB-D camera

ンサの計測値から行い、失敗時は 2) から再調整を行う流れである。

以降では、まず、WEB カメラの撮像手順・画像処理を述べ、次に、近接覚センサによる Z 方向の位置決め制御について説明する。

3.1 WEB カメラによる XY 平面内での位置計測

画像処理のおおまかな手順としては、まず、2 系統の LED 照明を順番に点灯・消灯させ、米菓の輪郭周辺に生じる影画像を抽出する。影画像に対して円検出後に、重なり度合スコアを計算することで最上部に位置する米菓の位置を算出する。

図 3 に具体的な画像処理のフローと処理画像を示す。ロボット上部・手前側の LED 照明で米菓を照らした際の画像が (a) であり、ロボット上部・奥側の LED 照明で照らした際の画像が (b) である。これらの画像に対しノイズ除去を行った後に、canny 法で輪郭抽出すると (c), (d) の輪郭画像が得られる。これらの画像を合成することで (e) の輪郭画像を計算する。次に、(e) に対して Hough 変換により円をフィッティングし、米菓のピックアップ候補を複数抽出する。そして、検出円内ごとに白ピクセル数（影輪郭箇所）をカウントし、検出円当たりの白ピクセル数を重なり度合スコアとして計算する。重なり度合スコアが小さい順にピックアップ候補をソートし、ロボットはスコアが小さい順から順番にアプローチする。なお、重なり度合いスコア r_{score} は式 (1) で計算する。

$$r_{\text{score}} = \frac{W_{\text{pixel-num}}}{C_{\text{pixel-num}}} \quad (1)$$

ここで、 $C_{\text{pixel-num}}$ は Hough 変換により検出した単一円内のピクセル数の合計値であり、 $W_{\text{pixel-num}}$ は単一円内の白ピクセル数の合計値である。

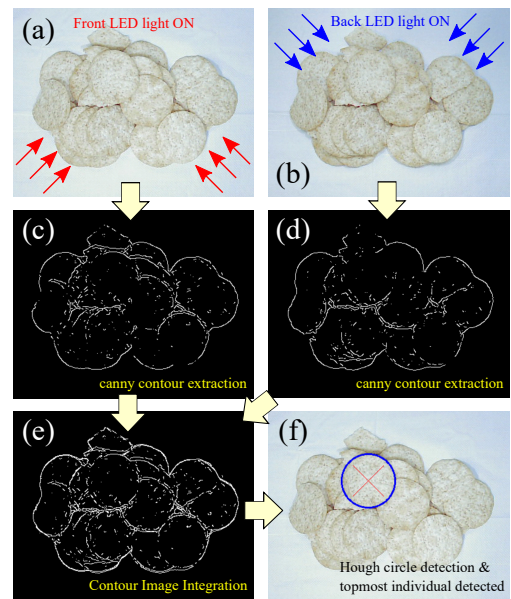


図 3 Detection of rice cracker position in XY plane: image processing flow of web camera

3.2 近接覚センサを用いた Z 方向高さの適応的な高速調整

米菓のばら積み高さの変化に応じた手先軌道を計算するために、最小加速度規範に基づく最適接近軌道の計算式を応用する。

文献 [2] で、移動物体に対して滑らかな軌道でアーム手先をアプローチさせるためのリアルタイム軌道計算が提案されている (式 (2))。

$$a_m = \frac{4}{t_f - t} \dot{x} + \frac{6}{(t_f - t)^2} x \quad (2)$$

ここで、 a_m はアーム手先の加速度指令値である。文献 [2] では 3 次元ベクトルであるが、本稿では Z 方向の軌道生成のみに利用するため a_m は Z 成分のみのスカラー値とする。また、 x は、 $x = x_p - x_m$ であり、アーム手先位置 x_m と対象物位置 x_p との相対位置である。本稿では、Z 方向位置のみのスカラー値とする。 t_f は X がゼロに到達するまでの目標時間であり、 t は軌道生成開始からの経過時間である。

式 (2) は x_p をセンサ情報などを基に更新することでリアルタイムに軌道修正が可能であり、高速周期で計測が可能な近接覚センサとの相性が良いと考えられる。しかし、相対位置 x は微分値も利用することから、 x は連続値という制約がある。近接覚センサが物体を検出し始める距離は数十ミリメートルであることから、この検出範囲外の位置から軌道生成を開始した場合、物体の検出前後で不連続な距離値が発生し、式 (2) を計算できない問題がある。

そこで本稿では、相対位置 x と相対速度 $\dot{x}$ の項に対し、近接覚センサの距離ベースゲイン G_d を導入することでこの問題を解決する (式 (3)・(4))。

$$a_{m-d} = \frac{4}{t_f - t} G_d \dot{x} + \frac{6}{(t_f - t)^2} G_d x \quad (3)$$

ここで、 G_d は近接覚センサの距離値をベースとする最大値 1 のゲインであり、以下の式で計算する。

$$G_d = \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (4)$$

$d_{\max}$ は使用する近接覚センサの最大検出距離であり、 $d_{\min}$ は最小検出距離である。

G_d によって偏差 x に変化を生じさせるため、 $x_p = 0$ とし、固定値 (米菓を入れる番重の底面高さ) とする。

ロボットアームの手先指令値は一般的に位置指令であるため、式 (4) で計算した加速度指令値を式 (5) に示す通り、二回数値積分して位置指令を計算する。

$$x_{\text{ref}} = \iint_0^{t_f} a_{m-d} dx \quad (5)$$

そして、ロボットの制御周期毎に位置指令を送信することでリアルタイムで軌道生成を行う。なお、軌道生成の過程で指令速度がゼロ以下となった場合は、アーム手先速度を十分に減速したと判断し、軌道生成を終了する。

本制御式は計算コストが極めて低いため、マイコンやラズベリーパイなどのオンボードコンピュータボードでも高速計算が可能である。

4. 実験

4.1 米菓の測距・測角精度

米菓表面を近接覚センサで計測し、距離計測の誤差を実験で評価した。実験では、X ステージ上に米菓を配置し、一定距離毎に位置決めを行った後に、近接覚センサで一回だけ距離を計測した。近接覚センサは、TK-01 (株式会社 Thinker) を使用した。TK-01 は、計測周期 5ms であり、距離計測範囲が 1.5-20mm、距離分解能は 0.1mm である。

図 4 に測定結果を示す。各グラフは横軸が X ステージ位置から算出した実距離であり、縦軸は TK-01 の距離値である。また、同図左は生値であり、右図は校正後の距離値である。米菓は表面の凹凸が比較的大きいため、距離計測値は生値 (左グラフ) では最大で 3mm 程度の距離誤差が生じる。ただし、計測値の線形性は比較的良好であるため、左グラフ中に示した線形変換を適用することで、右グラフに校正が可能である。校正後は距離計測の誤差は最大 1mm 程度であり、ベルヌーイ吸着パッドを用いて米菓をピックアップする際に十分な位置決め精度で距離調整が可能である。

4.2 Z 方向位置決め軌跡の検証

米菓に衝突せずに高さ調整が可能な範囲を実験により検証した。実験では、米菓の積み上げ高さを 10~45mm まで変化させ、近接覚センサの距離計測値を基に式 (3) で軌道生成し、位置制御を行った。

Z 方向の手先軌道を図 5 に示す。縦軸はアーム手先

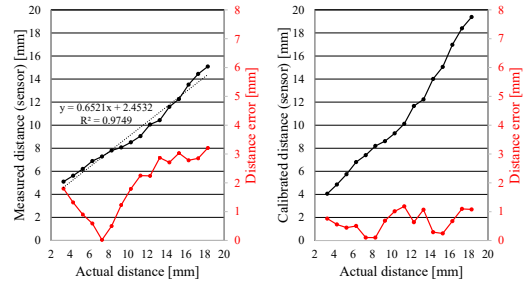


図 4 (left) distance value and error when rice crackers are measured by proximity sensor, (right) distance measurement and error after linear calibration

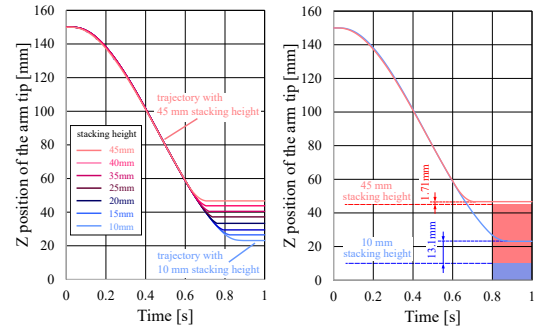


図 5 Arm tip trajectory during height adjustment in Z direction (real-time trajectory generation using proximity sensor)

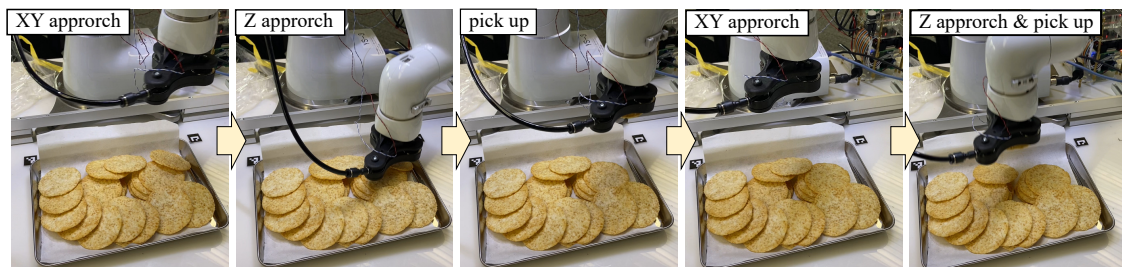


図6 Bin-picking experiment of rice crackers

(ベルヌーイ吸着パッド先端基準)であり、横軸は制御開始からの経過時間である。同図左グラフは積み上げ高さに応じた手先軌道の変化を示しており、右グラフは積み上げ高さが10mmと45mmにおける手先軌道と米菓の高さ関係を示している。

左グラフより、アーム手先は米菓の積み上げ高さに応じて適応的に変化しており、急停止することなく米菓表面に向かって接近している。ただし、右グラフより、米菓と手先間の収束距離は積み上げ高さに応じて変化している。式(3)では明示的に収束距離を設定できないためである。積み上げ高さが45mmを超えると吸着パッドと米菓が接触するケースが生じたため、対応可能な積み上げ高さは10mmから45mmである。収束距離を明示的に設定する手法の提案が今後の課題である。ただし、今回は、ベルヌーイ吸着パッドを用いて米菓を吸い上げることから、相対距離15mm以内に高さ調整できていればピックアップが可能であり、本手法は有効である。

4.3 ばら積みピッキング実験

4.3.1 ロボットシステム

小型卓上協働ロボット(Cobotta, 株式会社デンソーウェーブ)の手先にベルヌーイ吸着パッド(ZNC20STS-CV, 株式会社SMC)と近接覚センサ(TK-01, 株式会社Thinker)を備えたエンドエフェクタを搭載した。WEBカメラは1万円以下で入手可能なELP-USBFHD06H-BFV(ELP Inc.)を採用し、画像処理速度を速めるために画像サイズは400×600とした。

また、コンパクトな制御システムとするために、リアルタイム性が必要なロボット制御はRaspberryPi4Bで実行し、WEBカメラの画像処理はノートパソコン(core-i7)で実行した。事前に計算時間を計測した結果、撮像から米菓のXY位置計算が終了するまでの処理時間は約0.35秒であり、安価なWEBカメラで比較的、高速に位置計測が可能であることを確認した。

画像処理により計算された米菓のXY位置はイーサネットTCP/IP経由でRaspberry Pi 4Bに送信される。Raspberry Pi 4BとCobotta間もTCP/IP接続で接続され、Cobotta内、RC8コントローラのslave moveモードを利用して8msでアーム手先のリアルタイム位置制御を実行する。また、Raspberry Pi 4Bはカメラ照明LEDの点灯制御も担っており、IOポート経由で点灯タイミングを制御する。

4.3.2 実験結果

図6に米菓のばら積みピッキングの様子を示す。実験では20枚の米菓をランダムに配置した。ロボットは最上部の米菓に向かってアプローチし、1枚ずつピックアップすることに成功した。

表に3セット(1セット当たり20枚)を実行した際のピックアップ動作の試行回数を示す。20枚のうち、17～19枚は1回目のアプローチでピックアップに成功した。1～2回ほど1回目のアプローチで吸着ができなかったケースも生じたが、2回目以降の再アプローチでピックアップに成功したため、最終的に各セットにおいて、20個全ての米菓を搬送することに成功した。

表1 Table of number of pickup try

	trial 1	trial 2	trial 3
Pick up in 1st. try	18	19	17
Pick up in 2nd. try	1	1	2
Pick up in 3rd. try	1	0	1
Total pick up	20 / 20	20 / 20	20 / 20

5. おわりに

本稿では、3Dデプスカメラレスで薄型米菓を高速に吸着搬送するためのシステムを提案した。XY平面内での位置計測とZ方向の手先位置の高速調整をWEBカメラと近接覚センサで役割分担する構成により、画像処理時間を0.35秒まで高速化し、作業の効率化を実現した。また、近接覚センサを用いたリアルタイムでのZ方向軌道生成により、薄型米菓と吸着パッドとの間の距離を適応的、かつ、高速に15mm以内に調整することを実現した。WEBカメラは1万円以下の製品を使用しており、制御器もRaspberryPi4Bとノートパソコンで構成されることから、安価・コンパクトであり、実用面で優れている。

今後は、ロボットアームを産業用の高速タイプに置き換えることで現場のタクトタイムをクリアすることや、Z方向の軌道生成手法の改良を行う予定である。

参考文献

- [1] Avinash Ummadisingu, Kuniyuki Takahashi, Naoki Fukaya: "Cluttered Food Grasping with Adaptive Fingers and Synthetic-Data Trained Object Detection", International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 8290–8297, 2022.
- [2] 植之原, 飯倉, 小松, 三浦, 下: "運動物体追跡のためのロボットの実時間軌道生成法", 日本ロボット学会誌, vol. 12, No. 6, pp. 879–885, 1994.