

## 可食ミラー機構

○ 恩田一生 西城直人, 劔持優人,  
高根英里, 渡辺将広

多田隈 建二郎, 昆陽 雅司, 田所 諭 (東北大学)

## Edible Mirror Mechanisms

○Issei ONDA<sup>(1)</sup>, Naoto SAIKI<sup>(1)</sup>,

Yuto KEMMOTSU<sup>(1)</sup>, Eri TAKANE<sup>(1)</sup>, Masahiro WATANABE<sup>(1)</sup>,

Kenjiro Tadakuma<sup>(1)</sup>, Masashi Konyo<sup>(1)</sup>, Satoshi Tadokoro<sup>(1)</sup>, Tohoku University

キーワード

機構 (Mechanism), 可食メカニズム, 光学素子, 反射

連絡先 〒980 - 8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学大学院情報科学研究科 応用情報科学専攻 恩田一生

Tel : 022-795-7025 Fax : 022-795-7023 E-mail : onda.issei@rm.is.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

#### 1.1 研究背景

可食ロボティクスとは, ロボットを柔軟材料で構築するソフトロボティクスから派生した比較的新しい学問分野である. 可食材料でソフトロボットを置換することで, ソフトロボティクス特有の制御の簡潔さや靱性の高さに加えて, 生体適合性・生分解性・低環境負荷性をロボットに与えることが期待されている. また, 医療や生体モニタリングにおけるロボットの新たな適用可能性を開拓することを目的に, ロボット[1], アクチュエータ[2][3][6], センサ[4][5][7]の可食化が進んでいる.

#### 1.2 可食要素の検討

当研究チームにおいても, 2015 年の段階からまずはゼラチンを用いた空気圧アクチュエータの製作に取り組み, 次に寒天フィルム, 羊腸を用いたバルーンアクチュエータ[3]やセンサ[7]を実現し 2016 年から学術発表をしてきた. また, 可食硬質材料によるロボット要素の構成に着目し, 材料および加工方法を

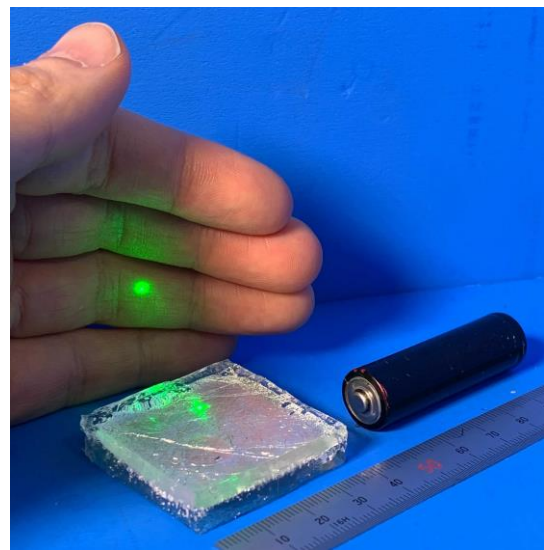


Fig. 1 : 可食ミラー機構試作機によるレーザー光反射の様子.

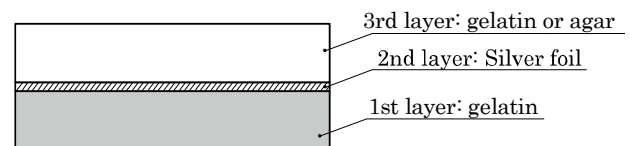


Fig. 2 : 実機の内部 3 層構造.

様々に検討している. 型に入れて構成するカゼインや, 切削が行える可食硬質材料として海綿状のキセロゲル的一种である高野豆腐[9]などを用

いて実機を具現化してきた。

今回、我々は光学素子の中の1つの鏡(ミラー)に着目した。食べられる光学素子に関しては、奥らが再帰性反射材、AR マーカーやレンズなどの研究開発に取り組んでいる(例えば[10][11])。プロジェクションマッピングの技術と組み合わせ、非常に価値のあり高い技術力を持った取り組みであると考えている。

鏡に着目した場合、前述した再帰性反射材などの全反射を用いた反射機能は実現されている。一方、可食要素において、金属を用いて反射機能を実現する研究開発は我々の知る限りではない。そのため、我々はこの度、金属の中でも、反射率の高い銀箔を用いた方式の構造を考案・実機具現化したので報告する。

## 2. 可食ミラー機構の基本原則

今回、我々は光の反射機能を実現するにあたり、食用銀箔を用いることを考えた。反射率を光の色で表すと、銀では赤が98%、緑98%、青97%全ての波長で反射率が高いためである。

センサのときに使用した金箔と同様、銀箔も可食性のある素材である。この銀箔をベースに貼り付けて2層目の構造とし、そこで反射機能をもたせるということを第一の基本構造とした。次に、3層目は可能な限り透明性の高い可食材を用いる必要がある。

また、この可食ミラー機構自体が柔軟な素材で構成されているという特徴を活かし、柔軟変形可能な光素子としての観点からも新規の要素となることを考えている。高い柔軟性を考えた際の2層目の形状は微小に波を打たせた構造など様々考えられるが、第一次試作においては後述するように、平面状の構造を設定した。

## 3. 実機具現化

考案した原理に基づいた実機の基本構造を図2に示す。全体として3層構造となっており、1層目にベース、2層目に反射部、3層目に透明性の高いカバーという構成となっている。3層構造の実機を構成するにあたり、まず1番底面に当たる1層目は40mm四方で5mm厚のゼラチン製のベースを、を重さの比率でゼラチン粉体10g、精製水100gの割合で混ぜて温めて溶液としたものを型に流し込み製作した。その後、銀箔を1層目のベースの上表面の粘着性を活用して塗布し、2層目とした。3層目においては、実機としての透明度の比較のため、ゼラチン、アガーの2種類での構成を試みた。

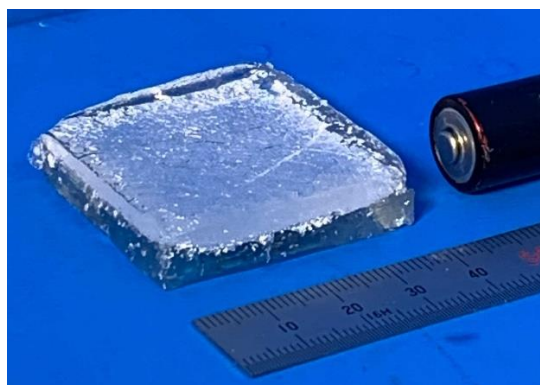


Fig. 3: 可食ミラー機構の試作機外観(1薄膜版・表面コートにアガーを使用)。



Fig. 4: 3層目にゼラチンを使用した方式の製作時の銀箔の剥離の様子。

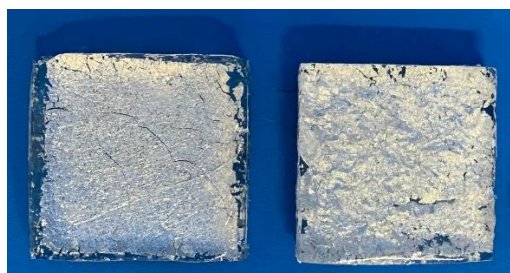


Fig. 5: 可食ミラー機構の試作機外観(1薄膜版・表面コートにアガーを使用)。



Fig. 6 : 銀粉スプレーにより2層目を構成した試作機の外観.

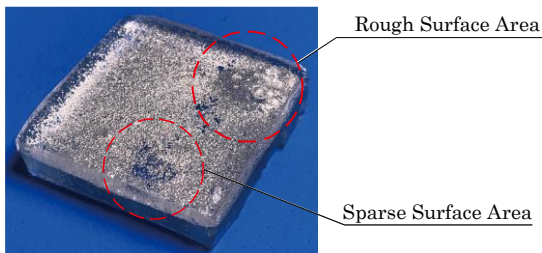


Fig. 7 : 3層目の溶液流し込み時に発生する凹凸の様子（銀粉スプレー方式における製作過程時の問題点）.

今回、可食食材として注目したアガーとは、スギノリ・ツノマタなどの海藻から抽出物する食物繊維(カラギーナン)や、マメ科の種子から抽出する多糖類(ローカストビーンガム)である[13]. ゼラチンと違って常温で固まり、夏場でも常温で溶け出さず、また食感は寒天とゼラチンの間のような弾力性があることに加え、透明度が高いというのが最も特徴的な点である.

2層目の反射部の構成方法においては、a)銀箔1枚、b)食品添加物銀箔製剤(複数の大小様々な銀箔)、c)銀箔スプレーの3種類でそれぞれ試作した. 1枚の銀箔を用いての試作は手作業では銀箔に皺を作らないようにするために非常に難易度が高く、筆者らが研究開発を行った細胞シートヘラ機構[12]を用いてハンドリングしながら取り付け作業を実施した. 試作機の外観を図6に示す.

まず、上述(a)にあたる試作機(3層目はアガーを使用)の外観を図3に示す. 2層目貼り付けの際に、側面にも銀箔が細かく碎けて塗布されるということが起こるため、側面において付着が好ま

しくない場合は、事前にマスキングするなどの工夫が必要となる. また、(a)および(b)において、3層目にゼラチンを用いた場合の製作過程において説明しておく. 溶液上にしたゼラチンを2層目まで構成された状態で型内に置かれたものに流し込んでいくわけであるが、その際に、(a)、(b)、どちらの方式においても1層目と2層目の間にゼラチンが入り込み、結果として銀箔が3層目よりも表面に浮き上がってくるという現象が確認された(図4).

これは1層目と2層目の僅かな隙間に粘性が低い状態のゼラチンが入り込み、銀箔が細かい皺で保持する空気が入り込んだためだと考えられる. 一方で、3層目にアガーを使用したものにおいては、その粘性の高さのためか、前述した1層目と2層目の剥離現象は見受けられなかった. 以上のことから、製作過程だけに限定されず、肉眼で視認した透明度の高さからもアガーの方がカバーとしての第3層目の素材として適していると考えられる. 1層目と2層目の剥離現象においては、材質によるものか、粘性によるものなのかの吟味はされに進めていくが、仮に粘性が重要だとした場合は、比較的粘性の高いペクチンなどを加えるというのも方法だと考えられる. また、光を反射させる素材として、今回は銀箔・銀粉を用いたが、太刀魚などの革表面なども使用可能であるとみて検討を進めている.

さらに、銀箔スプレーを用いて2層目を構成した試作機の外観を図6に示す. 3層目を流し込む際に、図7に示す泡のような凸状態の構造が生成してしまうという現象が確認された. これは最初の流し込みの際の溶液との接触点において発生頻度が高く、過負荷を受けた2層目1層目の剥離が起こった場所だと考え、可能な限り2層目近傍から3層目の素材を流し込む流路を有する型により解決することを考えている.

また、今回は透明な可食材料として、新たにアガーを用いたが、氷を素材とするレンズやプリズム

などの光学素子もちろん構成可能であり、分解性可能な有機材料などの利点が注目される中、meltable robotics としての位置付けでの可溶解性なロボット機構も考えられる。可食性の機構としては、柔軟スポンジ状多孔質構造をもたせることで可食ソフト緩衝機構としてはもちろん、可食吸液・排出要素として、機能させることもでき、吸収する液体の種類によりその特性を変化させることも可能になると考えている。また、可食メカトロニクスに限らず柔らかい構造の応用先の1つとして、変形するゴムボートが考えられ、従来までだと水難者救助も含め積荷作業の際に重心が偏り転覆する可能性が高まるという状況がないように、一部をU字型に変形し、なおかつ淵部の剛性を高めることにより、本作業時に積荷による重心変化域を極力中央部に留めることが可能となる。ゴムボートの保護として、柔剛兼備のウロコ状機構をもたせ、その内部の液体により放射線保護機能をもたせるなどの特性設定を行い、一部を可食材としても構成することで延命措置としても機能しうるものと考えられる。

我々は歯車や車輪関連の機構の新規な機構を生み出すことに重み付けをしており、交差型歯車機構の派生版としてのクロスヘリカルスクリューなども続けるが、ソフトロボット関連の技術も発展させるために、1次元ジャミングを拡張し、面状構造を実現する2次元ジャミングとして構成や、能動可変テクスチャを含めた変容変能自在なロボット機構の創出を行う位置付けの1つである。

#### 4. 実機実験

前述の設計・試作した実機を用いて反射と変形に関する基礎的な実験を実施した。その様子を図1、図8、図9および添付した動画にて示す。図1において、実機に自重以外の力学的負荷をかけない状態において、レーザーポインタにて光を試作機に照射したところ、2層目の銀箔にて光が反

射されることを確認した。しかしながら、図8 (a)に示すように、2層目が(a)方式の1枚の銀箔のものは、引張変形させた際に、銀膜に亀裂が入り、金属反射が不可能な箇所が発生してしまった。一方、(b)方式、(c)方式に示すものは、図8 (b)、(c)にそれぞれ示すように、引張動作を与えても2層目の銀箔の層自体がさらに細かく複層構造化しているためか光の反射機能を維持することが分かった。

また、引張変形だけでなく湾曲変形においても、図9に示すように、(b)、(c)方式のものは光の反射機能を維持できることが分かった。今後は、これらの反射強度の定量的な評価、および変形度などの程度までであれば、反射機能を維持可能であるかの限度の測定を行う。

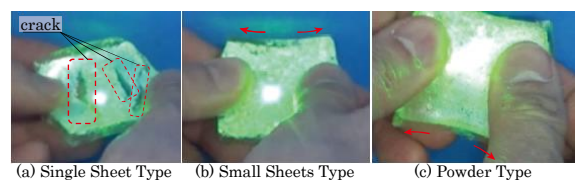


Fig. 8 : 柔軟ミラー機構としての各3方式における反射および変形の様子。(左から、1薄膜版.)



Fig. 9 : 試作機 (c)方式)による湾曲状態での光反射の様子。

#### 6. まとめと今後の予定

本研究では、我々が取り組んでいる可食ロボティクスの研究開発において、可食ミラー機構に関して考案し、実機を試作してその基本特性を実機実験により確認した。今後は、可食ミラー機構の応用構造の具現化例を多数創出し、可食ロボティクスのさらなる発展を目指す。

## 謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費，新学術領域研究「ソフトロボット学」18H05471 の助成を受けて行われました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] S. Miyashita, S. Guitron, K. Yoshida, Shuguang Li, D. D. Damian, and D. Rus, “Ingestible, controllable, and degradable origami robot for patching stomach wounds,” in 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, pp. 909–916.
- [2] J. C. Breger et al., “Self-Folding Thermo-Magnetically Responsive Soft Microgrippers,” ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 7, no. 5, pp. 3398–3405, Feb. 2015.
- [3] 小松洋音, 高根英里, 藤田政宏, 野村陽人, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “可食アクチュエータ -消化可能な柔軟駆動体-”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 1X1-01, Sep. 2016.
- [4] H. Tao et al., “Silk-Based Conformal, Adhesive, Edible Food Sensors,” Adv. Mater., vol. 24, no. 8, pp. 1067–1072, Feb. 2012.
- [5] H. Hafezi, T. L. Robertson, G. D. Moon, K.-Y. Au-Yeung, M. J. Zdeblick, and G. M. Savage, “An Ingestible Sensor for Measuring Medication Adherence,” IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 62, no. 1, pp. 99–109, Jan. 2015.
- [6] J. Shintake, H. Sonar, E. Piskarev, J. Paik, and D. Floreano, “Soft Pneumatic Gelatin Actuator for Edible Robotics,” Mar. 2017.
- [7] 小松洋音, 藤田政宏, 藤本敏彰, 鉄井光, 西村礼貴, 野村陽人, 高根英里, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “可食センサ -力・変位センシング機能を有する可食メカニズム-”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 1J2-04, Sep. 2017.
- [8] 小松洋音, 藤田政宏, 藤本敏彰, 鉄井光, 西村礼貴, 野村陽人, 高根英里, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭, “可食硬質メカニズム要素”, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2A4-11, Dec. 2017.
- [9] 田村正紀, “凍豆腐,” 日本調理科学会誌, vol. 28, no. 2, pp. 114–122, May 1995.
- [10] 宇治貴大, 奥寛雅 : 食べられる再帰性反射材の提案と試作, 第 21 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム インタラクシオン 2017 (明治大学中野キャンパス, 東京, 2017.3.2) / インタラクシオン 2017 論文集, 論文 ID 1-503-17, pp.166-169
- [11] 張依婷, 奥寛雅 : 食べられる再帰性反射材による食べられる AR マーカーの提案と試作, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (VRSJ2017) (徳島大学常三島キャンパス, 徳島, 2017.9.29) / 論文集, 3E1-06
- [12] 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 野村亮太, 田中信行, 原口裕次, 大和雅之, 岡野光夫, 東森充, 金子真, “細胞シート用ヘラ機構, — 基本概念の提案と第一次試作機の開発 —”, 2E2-3, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 17–20 日.
- [13] cotta, 「アガー・ゼラチン・寒天・ペクチン」の違いとは?  
[https://www.cotta.jp/special/ingredients/gyoukozai.php?gclid=Cj0KCQiAaGCBhCwARIsAHD15x\\_uUysrPjw06KYwio7EKbZY\\_x62CiZ6vVDC9Gmuznk7hpC3NIGVK94aA10aEALw\\_wcB#utm\\_source=google&utm\\_medium=pc&utm\\_campaign=hishimei\\_dsa](https://www.cotta.jp/special/ingredients/gyoukozai.php?gclid=Cj0KCQiAaGCBhCwARIsAHD15x_uUysrPjw06KYwio7EKbZY_x62CiZ6vVDC9Gmuznk7hpC3NIGVK94aA10aEALw_wcB#utm_source=google&utm_medium=pc&utm_campaign=hishimei_dsa) (2021 年 3 月 3 日参照)