

水産物加工向け全周 3 次元形状計測システム

河井良浩† 高瀬竜一† 西卓郎†
吉見隆† 富田文明 菊野博昭††

魚フィレをベルトコンベヤで搬送しながら、その全周囲形状を計測するステレオビジョンシステムを開発した。このシステムは、計測された形状データを基に対象物を一定の大きさに切りそろえるための加工データを生成できる。対象となる魚フィレは、凍結状態や水のぬれ具合によって表面に光沢を生じ、光を正反射させる。一方で背側ではうろこの黒い部分は光を反射しにくく、ステレオ画像処理の妨げとなる。そこで陰影が濃くなるように光源の配置を工夫したうえで、明るさの分布情報を活用し、さらに物体表面の連続性を仮定することで、手掛かりが少ない黒色部分でも安定して計測できるステレオ画像処理のアルゴリズムを開発した。本発表では、ステレオビジョンシステムの機構とアルゴリズムについて述べる。

A Three-dimensional Whole Shape Measurement System for Processing of Marine Products

YOSHIHIRO KAWAI† RYUICHI TAKASE† TAKAO NISHI†
TAKASHI YOSHIMI† FUMIAKI TOMITA HIROAKI KIKUNO††

We developed the stereo vision system that is capable of measuring the three-dimensional whole shape of fish fillets, as carried on belt conveyors. Based on the measured shape data, the system can generate processing data for cutting each product into equal-sized pieces. Fish fillets may become shiny and can cause specular reflection, depending on frozen or wet conditions, whereas black scale areas on the backside do not reflect light well. These features disturb the three-dimensional shape measurement. Therefore, we devised the light source positions to make shades darker and reduce the influence of specular reflection. We also utilized the brightness distribution information and assumed the continuity of the object's surface. We thus developed an algorithm for stereo image processing, which enables stable measurement even for those black areas with few clues. We present the mechanism and algorithms of stereo vision system.

1. はじめに

近年の食品加工は高品質化・ロボット化が進み、均一な原料を大量に処理するだけでなく、原料の変動に対応できる装置の研究開発が不可欠となっている¹⁾。水産物もまた大きさや重さが均一ではなく、高品質の加工には個別の対応が必要となる。我々は魚フィレ（三枚におろした魚の片身）を一定の大きさ・重さに切りそろえる切り身加工装置のために、従来製品より高精度にフィレの形状を計測できる全周 3 次元計測システムの研究開発を行った。

食品加工機械は、作業単位ごとに汎用装置として開発され、いくつかの装置を組み合わせでシステム化することが多い。既存の切り身加工装置では形状計測、重量計測、カットによる切断がそれぞれ機械化されている。切り身加工装置は、ベルトコンベヤによる搬送と組み合わせられる。

コンベヤで搬送される物体を形状計測するとき、どのように物体の下部を計測するかが課題となる。実用化されたシステムの一つはフィレの上部のみをレーザー光による光切断法で計測し、求めた形状から体積を計算する²⁾。計測で

きないフィレの下部については、平面であると仮定する。この方式は冷凍前の柔らかいフィレではよく機能する。しかし鮮度を保つために冷凍されたフィレでは、内臓を抜いた空間や身の反り返りによって前提が崩れ、計測精度が大幅に低下することがある。

またフィレの断面をカメラで撮影し、断面形状をもとに均等な体積になるよう切断位置を求めるシステムも実用化されている³⁾。しかし切る前の断面の形状は未知なので、急激に断面積が変化すると誤差が生じる問題がある。

本稿では上記の問題を解決するため我々が開発した、フィレの 3 次元形状を全周囲から計測するシステムについて述べる。また実際のフィレを形状計測および切断加工した結果から、提案システムの有効性を示す。

2. 計測対象物

計測対象物の例を図 1 に示す。全長 400~500mm、幅 150mm 前後のサケの切り身（以下フィレと呼ぶ）である。全長と幅は個体によって変動する。またフィレの柔軟性や

† (独)産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

†† (株)ニッコー
Nikko Corp.

表面の状態が、解凍の進行状況によって変動する。芯まで凍結したフィレは加工機械の刃を損傷させるため、加工できる程度に解凍する必要がある。その結果、計測すべきフィレは解けた氷と結露によってぬれた状態となり、うろこの表面に鏡面反射を生じる。

魚のからだは流線型なので、フィレの形状はうろこのある側が凸になる。それに対し、赤身となる半身背骨側は内臓が抜き取られているため凹凸ができる。その高低差は個体によって異なり、解凍が進むほどわずかな力で容易に凹凸が変化する。

フィレを計測結果に基づいて、均等な体積になるよう切断され、切り身に加工される。

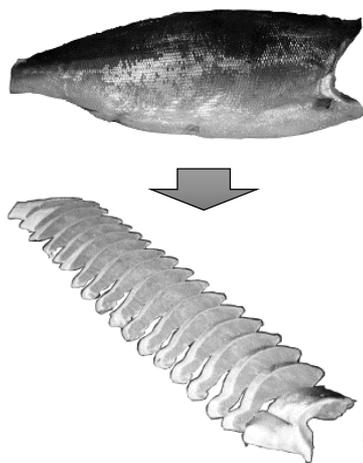


図 1 フィレの加工前と加工後

3. 計測方法

フィレは必ずしも剛体ではないため、裏返しにすると変形してしまう。そのため全周囲の形状を計測するには、フィレの下部が見えるようコンベヤに隙間が必要となる。この隙間が狭いほど計測が困難になり、逆に広いほど搬送が困難になる。

光切断法⁴⁾によってフィレを下から計測するには、図 2-a)のように平面状のレーザー光をコンベヤの進行方向に対して垂直に照射しなければならない。想定される計測環境は、カメラからフィレまでの距離が 800mm、コンベヤの厚みが 30mm、フィレの最大高さが 65mm までとなる。長さ方向と奥行き方向の精度が等しくなるよう光源とカメラを配置すると、レーザー光とカメラの光軸がなす角度は 45° となり、コンベヤ間の隙間を 80mm 以上開ける必要が生じる。すると隙間が広すぎるため、柔らかいフィレは落下してしまう。また凍結したフィレも、乗り継ぎの衝撃で滑ってしまう問題が生じる。

そこで本研究ではステレオカメラを採用した。ステレオカメラの基線を図 2-b)のようにコンベヤの進行方向に対

して垂直に並べれば、コンベヤの厚みによってカメラの視線が遮られることがなく、隙間の間隔を狭くできる。またステレオカメラの基線が隙間と平行になるよう配置した。これによって長方形の、注目領域もしくは Region Of Interest (以下 ROI と呼ぶ) をコンベヤの隙間に整列させ、隙間から見えるフィレの像を無駄なく画像処理に用いることができる⁵⁾。図 3 はエピソード線が平行になるよう変換したステレオ画像である。本システムのカメラ配置では、画像変換後、コンベヤと隙間との境界線がほぼ水平になる。

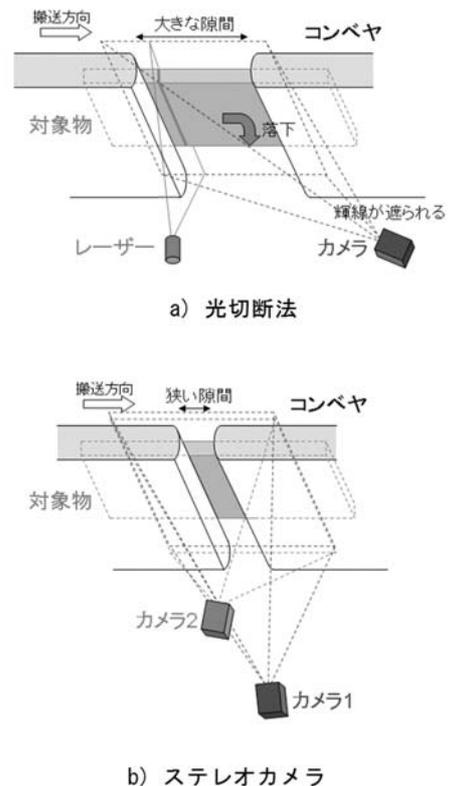


図 2 計測方法の比較

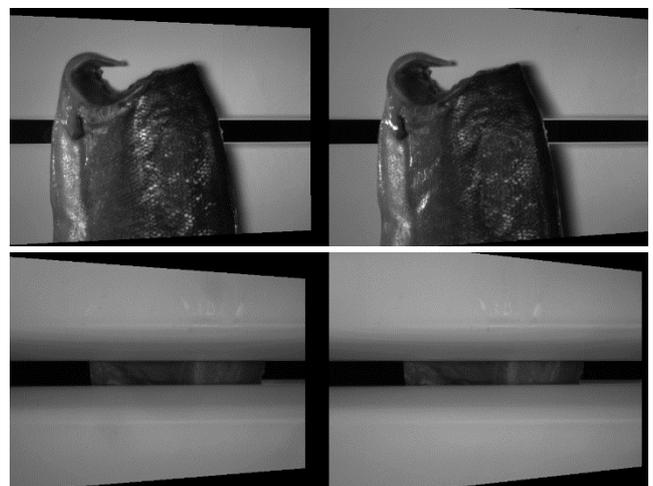


図 3 フィレ上部・下部のステレオ画像

4. 計測システムの構成

4.1 ベルトコンベヤ

開発した全周3次元形状計測システムの概要を図4に示す。このシステムは主にベルトコンベヤとステレオカメラから構成され、加工機械の前工程に導入して用いる。

前後の2台のコンベヤは直列に並び、フィレを同じ方向に搬送する。コンベヤの間には計測用に設けられた隙間があり、フィレはこの隙間を乗り越えて移動する。このときフィレの下部の、隙間を横断中の部分が露出する。

コンベヤは、フィレがスムーズに隙間を横断できるように、ローラ部分が台形でベルトがシャープに折り返す「ナイフエッジ」⁶⁾を採用した。2本のコンベヤはロータリーエンコーダにより搬送速度がモニタリングされており、コンベヤの回転とカメラのシャッタを同期させるようにした。投入から一定の距離だけフィレが搬送されると撮影が始まり、確実にフィレの先端から計測が開始される。フィレの終端は計測結果から検出される。

ベルトコンベヤの搬送速度は8.3m/minであり、これは競合製品の処理能力をもとに定めた仕様である。全長440mmの典型的なフィレなら、搬送も含めて1体当たり6秒未満で計測処理が完了する。

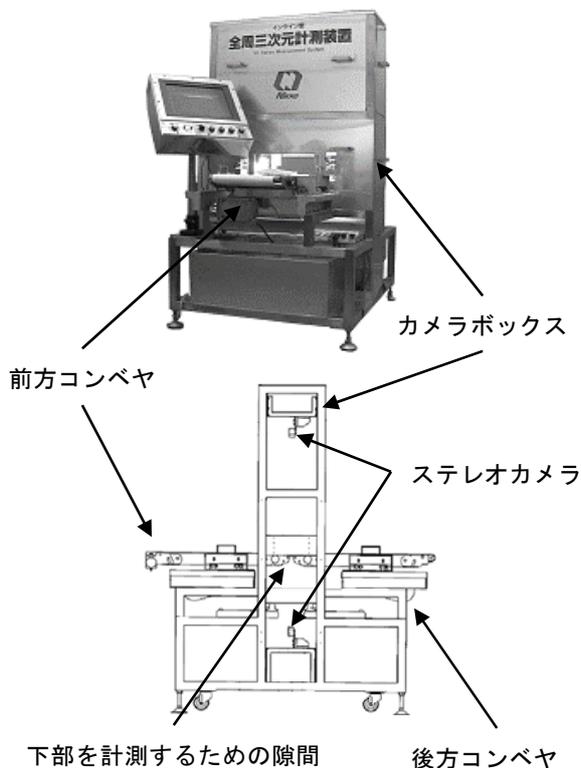


図4 システムの概要

4.2 ステレオカメラ

カメラは全部で8台あり、それぞれ2台1組でステレオカメラを構成する。ステレオカメラはコンベヤの隙間の上方に2組、下方に2組が配置され、フィレを全周囲から同時に撮影できる。実験ではカメラに同期撮影の容易なPointGrey社のカメラFlea2を用いた。なお、下方のステレオカメラは前述の隙間の露出のみ撮影できるが、フィレをコンベヤで搬送しながら連続して撮影することで、フィレ全体のデータを得ることができる。

隙間の真下は水分やごみが落下するためカメラを配置できない。またコンベヤの中央真上にカメラを置くとフィレの側面がカメラの視界から隠れやすくなる。そこで図5のように、カメラを中央から離して、視線がコンベヤの中央を向くよう斜めに配置した。

システムの運用において、フィレは必ず赤身を下側とし、頭を前に向けるようにベルトコンベヤに投入される。下側のステレオカメラは、必ず隙間から赤身部分を計測することになる。

本研究ではフィレによる予備実験の結果から、コンベヤの隙間を15mmとし、それに合わせて解像度が640×480のグレースケールカメラを用い、1枚の画像におけるROIのサイズを約300×20画素とした。

ROIは下方のカメラだけでなく、上方のカメラに対しても設定する。これはデータ量を削減するだけでなく、体積計算を簡便にする意図がある。すなわち、フィレの下面と上面の高さの差を積分して体積を求めるので、もしコンベヤを乗り継ぐときにフィレが跳ねても、隙間ごとの上面下面のデータが平行移動していれば体積計算の誤差が少ないという利点がある。

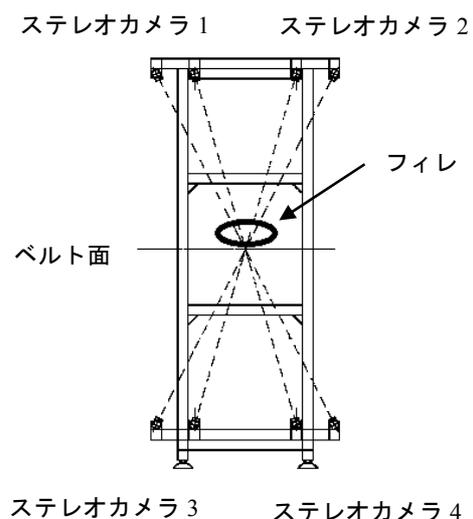


図5 正面から見たカメラの配置

5. フィレの形状計測

5.1 輝度の事前正規化

フィレの表面はうろこや水分によって、しばしば鏡面反射を生じる。対応点探索の評価値によく用いられる SAD (Sum of Absolute Difference) は計算が高速である反面、対象物に対して拡散反射を想定するため、鏡面反射が3次元情報のノイズや欠損を引き起こす原因となる。同様によく用いられる正規化相互相関は鏡面反射に頑健であるが計算コストが高く、フィレの加工時間を圧迫する。我々は SAD を計算する前に標準化係数フィルタ⁷⁾⁸⁾を画像に適用することで、鏡面反射に頑健で高速なステレオマッチングを実現した。

標準化係数フィルタは、画像中の輝度 $I(u,v)$ を式(1)で表される値 $z(u,v)$ に置き換える。 (u,v) は注目点の2次元座標である。画像の輝度が正規分布に従うとき、 $z(u,v)$ は注目点の輝度が標準偏差 σ を単位として、平均値 μ からどれだけ離れているかを表す z 値 (標準化係数) に相当する。この値は、注目点周辺の平均輝度の変動や輝度の分散の差に左右されにくい性質がある。

$$z(u,v) = \frac{I(u,v) - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

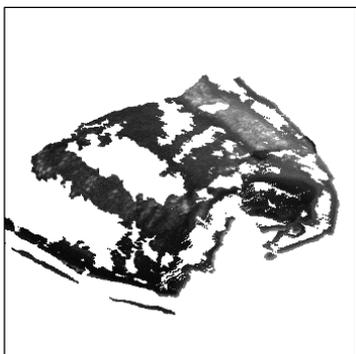


図 6 SAD によるフィレの3次元復元

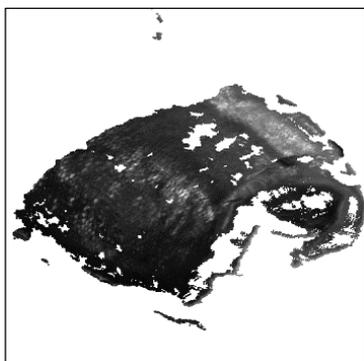


図 7 標準化係数フィルタを用いた3次元復元

図 6 と図 7 はそれぞれ、前掲のステレオ画像 (図 3) を輝度の SAD のみで3次元復元した結果と標準化係数フィルタを用いて3次元復元した結果である。標準化係数フィルタの適用によって、うろこの鏡面反射によるデータの欠落を大幅に削減することが可能になった。

5.2 連続性を考慮した対応点探索

フィレは自然物のため表面のテクスチャは一様ではなく、無地に近い部分も存在する。そのような領域に標準化係数フィルタを用いても、やはり画像上の特徴が乏しく、正しいステレオ対応点を求めることが難しい。そこで対応点探索に何らかの拘束を加えて、対応精度を向上させる必要がある。ここでは次の二つの仮定を設ける。

一般に物体の表面は連続している。これはフィレの場合にもあてはまる。奥行き情報の連続性に基づく対応点の評価はさまざまな方法が提案されている⁹⁾。代表的な手法の一つとして Semi Global Matching が知られている¹⁰⁾。この手法は、放射線状に8ないし16のまばらな方向の連続性を注目点に反映する。今回のような横に細長いステレオ画像ではスキャンライン方向の連続性が強く反映され、他の方向から得る情報量が少ないので、スキャンライン間の奥行き情報の整合性が十分に保たれない。しかし大域的な対応コストの計算法としては、比較的高速に誤対応を減らすことができる。

また計測されるフィレの表面には順序の拘束¹¹⁾が保たれる。システムの運用上、同時に複数のフィレがカメラに写ることはないため、スキャンライン内で対応点の順番が入れ替わることはない。すなわち、左カメラに写る像の左右は、右カメラでも同じ順序で写るという制約が、本研究のフィレについても期待できる。順序を拘束する手法として有力な方法の一つは動的計画法¹²⁾である。この手法単独ではスキャンライン間の奥行き情報の整合性は保てないが、連続性と同時に順序を拘束することが可能である。この手法は、スキャンライン内の3次元情報が滑らかになるよう、対応点探索を強く拘束することができる。

そこで我々は Kim ら¹³⁾と同様に対応点の評価値を2段階で求め、2段階目に順序拘束を加えることで、スキャンライン方向に細長い画像に適した対応点探索法を開発した。これは注目点に対して画像中の全ての画素からスキャンラインと垂直な方向に奥行き情報の連続性が反映され、かつスキャンライン方向に連続性と順序の拘束が反映される。

最初に、局所的な対応コスト (対応点の非類似性を表す指標) として $C(u,v,d)$ を求める。これは基準画像の座標 (u,v) 、視差 d 、ウィンドウ辺の長さ w のとき式(2)で表される z 値の SAD である。 $z_L(u_L, v_L)$ と $z_R(u_R, v_R)$ はそれぞれ、ステレオカメラの基準画像と参照画像の z 値を表す。

$$C(u, v, d) = \sum_{i=-w/2}^{w/2} \sum_{j=-w/2}^{w/2} |z_L(u+i, v+j) - z_R(u-d+i, v+j)| \quad (2)$$

次に第一の大局的な対応コスト $G(u, v, d)$ を求める。これにスキャンライン間の奥行き連続性を反映させる。まず式(3)のように、画像に対して垂直な v 方向へ SAD 値を再帰的に合計する。 k は注目点から隣接点への位置の変位を表す。注目点の SAD 値は、隣接点の合計値の中で視差 $d-m$ から $d+m$ における最小のものに加算される。これを繰り返すと、視差の変化に対して $G_k(u, v, d)$ が描く非類似性の曲線は平滑化され、注目点から遠い点ほど与える影響は小さくなる。

$$G_k(u, v, d) = C(u, v, d) + \min_{d' \in [d-m, d+m]} (G_k(u, v, k, d') + t(d, d')) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \text{ただし } m > 0 \wedge k \in \{-1, 1\} \\ & v+k \text{ が画像の外なら } G_k(u, v, d) = C(u, v, d) \end{aligned}$$

$t(d, d')$ は奥行きの変化に対するペナルティ関数であり、式 4 で表される。 T_{smooth} は対応コストをどれだけ増大させるかのしきい値である。

$$t(d, d') = \begin{cases} d = d' & : 0 \\ d \neq d' & : T_{smooth} \end{cases} \quad (4)$$

$G_k(u, v, d)$ は上下の方向に二つあるのでそれらを式 5 のように合計する。 $C(u, v, d)$ は 2 度加算されているので一つ減じて $G(u, v, d)$ とする。

$$G(u, v, d) = \left(\sum_{k \in \{-1, 1\}} G_k(u, v, d) \right) - C(u, v, d) \quad (5)$$

ある画素について、図 8 は局所的な対応コストが、図 9 は大局的なコストが描いた曲線である。後者は谷底のピークが明確になるが、曲線自体は滑らかになることが分かる。

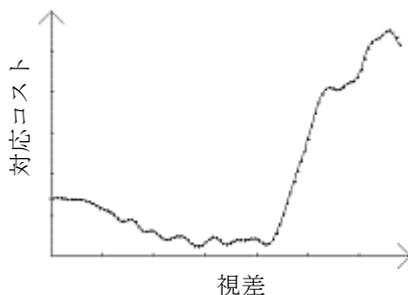


図 8 局所的な対応コストの曲線

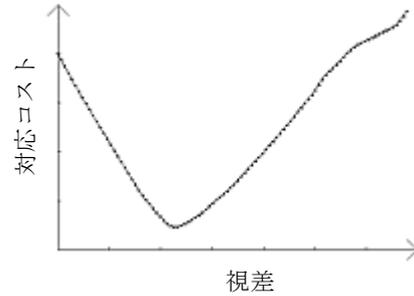


図 9 第一の大局的な対応コストの曲線

最後に第二の大局的な対応コスト $S(u, v, d)$ を求め、対応点を決定する。これにスキャンライン内の奥行き連続性と順序の拘束を反映させる。これは式(6)のように、第一の大局的な対応コストを N について再帰的に加算して求める。

$$S(u, v, d) = G(u, v, d) + \min_{(a,b) \in N} (S(u+a, v, d+b) + p(a, b)) \quad (6)$$

$$\text{ただし } N = \{(-1, 0), (-1, -1), (0, 1)\}$$

$u+a$ または $u+a-(d+b)$ が画像の外なら

$$S(u, v, d) = G(u, v, d)$$

N は濃度が 3 の集合であり、その要素は基準画像のスキャンライン方向の座標 u と視差 d の変位の組である。それらの三つはステレオ対応した時に、注目点を両目で見える／参照カメラから隠れる／基準カメラから隠れる状態にする点への変位を表し、対応点の順序が逆転しない組に限定されている。

また $p(a, b)$ は隠れに対するペナルティ関数であり、式 7 で表される。 T_{occ} は対応コストをどれだけ増大させるかを示すしきい値である。

$$p(a, b) = \begin{cases} a = -1 \wedge b = 0 & : 0 \\ a = -1 \wedge b = -1 & : T_{occ} \\ a = 0 \wedge b = 1 & : T_{occ} \end{cases} \quad (7)$$

加算の繰り返しが基準画像の幅 L を横断し終えたら、 $L-1$ における視差の探索範囲 D から最小の対応コストを求め、求めた点から N についてバックトラックし、対応点の集合 M^*_{L-1} を得る (式 8)。

$$M^*_{L-1} = \arg \min_{d \in D} (S(L-1, v, d)) \quad (8)$$

ただし L は基準画像の幅、 D は視差の探索範囲

$u-d$ 平面上の対応点の探索を集合 N に限ること、および隠れにペナルティを加えることで、スキャンライン方向の奥行きが可能な限り滑らかに連続するよう選ばれる。同時にその計算が第一の大局的なコストに基づくことで、スキャンライン間の奥行きも連続するよう、周囲から密に情報が反映される¹⁴⁾。

これによって3次元復元した結果が図10である。標準化係数フィルタだけでは正しくステレオ対応できなかった無地に近いほど暗い部分、および鏡面反射によって輝度が白く飽和していた部分が3次元復元されている。

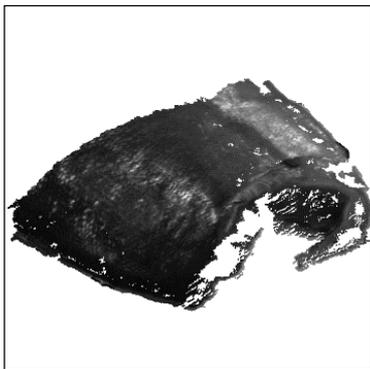


図10 提案手法による3次元復元

6. 切り身加工実験

本研究では図11のように形状計測に本システムを、重量計測と切り身加工に既製品を個別に用いて実験を行った。本来、形状計測から切り身加工まで一連のコンベヤで運ばれるが、本実験では人の手でフィレを加工機械にセットした。

対象物として実際のサケの半身を用いた。本研究では魚の比重が一定であるとみなし、切り身の重量にばらつきが少ないほど加工精度が高いものとして評価した。これは既製品の誤差を下回るように、重量のばらつき5%以内を目標とした。

実験の手順として、まず本システムの計測結果からフィレの体積を求めた。次にあらかじめ測定しておいた重量から比重を求め、一定の重量の切り身を作る切断位置を算出した。最後に切り身加工機械でフィレを切断し、各切り身の重量誤差を計測した。なお、この実験における切り身の目標重量は100gとした。

サンプリングした9体のフィレについて図12と表1に実験結果を示す。切り身の番号はフィレの頭側から昇順とする。先頭の1枚は一般に「かま」と呼ばれる魚のエラに接する胴体の先端部分である。表中のMAEは平均絶対誤差 (Mean Absolute Error) を、RMSEは二乗平均平方根誤差

(Root Mean Square Error) を表す。

実験に用いたフィレは頭部が取り外されており、露出した胴体の断面は大きく傾斜している。そのため、かまの計測はオクルージョンによる3次元情報の欠落が発生しやすく、他の部分より重くなる傾向が見られる。

実験結果より目標重量100gに対する切り身の平均絶対誤差は6.21g、二乗平均平方根誤差は3.63と目標より大きい。しかし1枚目の切り身を除けば、それぞれ2.31gと2.96である。初回の切断位置を厳密に位置決めできるならば、本システムで誤差±5g以内を実現できる可能性が十分にあり、提案手法の優位性が認められた。



図11 実験装置の全景

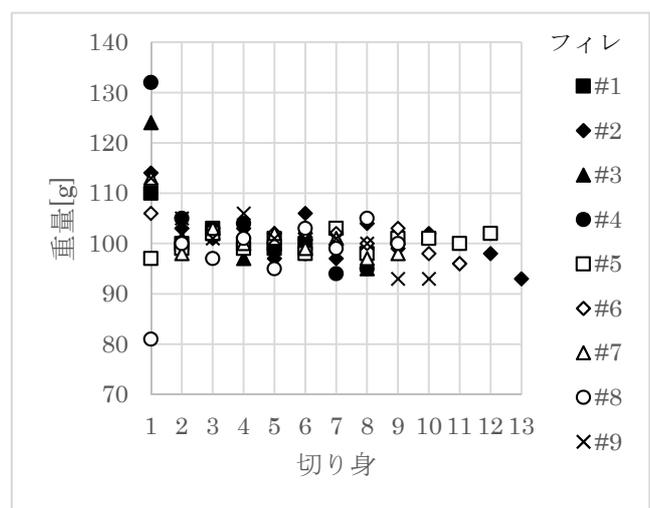


図12 切り身の重量

切り身	MAE [g]	RMSE	度数
#1	14.89	17.13	9
#2	1.89	2.69	9
#3	2.22	2.36	9
#4	2.11	2.85	9
#5	1.78	2.26	9
#6	2.11	2.65	9
#7	2.25	2.78	8
#8	3.00	3.61	8
#9	2.33	3.27	6
#10	3.00	3.81	4
#11	2.67	3.27	3
#12	2.00	2.00	2
#13	7.00	7.00	1
全体	6.21	3.63	86
#2以降	2.31	2.96	77

表 1 切り身ごとの平均絶対誤差

7. まとめ

ベルトコンベヤで搬送しながら魚フィレの全周囲形状を計測するシステムに対し、ステレオビジョンを応用する事例について報告した。光切断法の制約を解消し、長時間解凍したフィレであっても下部を計測可能にしたことで、上部のみ計測していた場合より高い精度での切り身加工が実現できた。

本研究では特に魚フィレの加工精度の向上を目標にしたが、肉類など凹凸と柔軟性のある他の食材についても展開したい。

謝辞 本研究は、経済産業省 中小企業産業技術研究開発事業「中小・ベンチャー企業の検査・計測機器等の調達に向けた実証研究事業（平成 19～21 年度）」による補助によってなされた。日頃から有益なご助言、ご協力をいただいた株式会社ニッコー（釧路）、産総研北海道センターおよびタスクビジョン研究グループの諸兄に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大谷敏郎: これからの農業技術 近未来の食品加工技術, 日本農学図書館協議会誌, No.171, pp.6-12, (2013).
- 2) 佐藤厚: 切断装置, 特許 4090284 号 (2008).
- 3) 吉泉産業株式会社: 材料のスライス方法及びスライス装置, 特開 2009-178809 (2009).
- 4) Kanade, T.: Three-Dimensional Machine Vision, Springer (1987).
- 5) 産業技術総合研究所: ステレオカメラの配置方法とそのシステム, 特開 2012-211833 (2012).
- 6) Illinois Tool Works Inc.: Dual knife edge transfer conveyor, U.S.Patent 5605222 A1. (1997).

7) 西卓郎, 高瀬竜一, 吉見隆, 河井良浩, 富田文明: 領域ベースのステレオ対応点探索のための局所的輝度変動に頑強な「標準化係数フィルタ」, 計測自動制御学会第 90 回パターン計測部会研究会資料 (2013).

8) 産業技術総合研究所: 画像処理方法、画像処理プログラム、これを記憶したコンピュータ読み取り可能な記憶媒体、及び画像処理装置, 特開 2012-103815 (2012).

9) Scharstein, D. and Szeliski, R.: A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms, International Journal of Computer Vision, Vol.47, pp.7-42 (2002).

10) Hirschmuller, H.: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp.807-814 (2005).

11) 藤井実, 松山泰男: 動的計画法を用いたステレオマッチングにおける順序逆転問題の一解法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J79-D- II, No. 5, pp.775-784 (1996)

12) Bobick, A.F. and Intille, S.S.: Large Occlusion Stereo, International Journal of Computer Vision, Vol.33, No.3, p.1-20 (1999).

13) Kim, J.C., Lee, K.M., Choi, B.T., Lee, S.U.: A Dense Stereo Matching Using Two-Pass Dynamic Programming with Generalized Ground Control Points, Proc. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp.1075-1082 (2005).

14) 産業技術総合研究所: ステレオ画像処理装置及びステレオ画像処理方法, 特開 2012-181142 (2012).