

学位論文

非接触センシングによる人手作業支援技術開発

岩手大学大学院工学研究科

機械・社会環境システム工学専攻

浅石 健太

目次

第1章 序章.....	1
1.1 社会的背景	1
1.2 システムインテグレーション	2
1.3 非接触センシング	3
1.4 研究の目的	5
1.5 本論文の構成	7
第2章 イカ切断作業支援.....	9
2.1 背景	9
2.2 イカ定重量切断作業内容	11
2.3 類似事例・既存研究	13
2.4 目的	15
2.5 システム構築の流れ	16
2.6 定面積切断作業支援システム	17
2.6.1 システム構成.....	17
2.6.2 定面積切断位置決定アルゴリズム.....	19
2.6.3 プロジェクションマッピング.....	22
2.6.4 定面積切断作業手順.....	23
2.7 定面積切断実験	24
2.7.1 目的.....	24
2.7.2 方法.....	25
2.7.3 実験結果・考察.....	27
2.8 定重量切断作業支援システム	37
2.8.1 システム構成.....	37
2.8.2 高さ測定手法.....	39
2.8.3 定重量切断位置決定アルゴリズム.....	42
2.8.4 定重量切断作業手順.....	46

2.9 定重量切断実験	47
2.9.1 目的.....	47
2.9.2 実験方法.....	47
2.8.3 実験結果・考察.....	48
2.10 結言	53
第3章 ラック装填作業支援.....	54
3.1 背景・目的	54
3.2 ラック装填作業工程とそのモデル化	56
3.3 オンライン非接触センシング式微細ワーク用ラック装填作業 支援ロボットシステム	58
3.3.1 RLRS システム構成.....	58
3.3.2 RLRS によるラック装填ワークフロー.....	60
3.3.3 PSD によるピン位置・姿勢計測原理.....	62
3.3.4 ロボットアームの運動計画アルゴリズム.....	70
3.4 ラック装填達成度評価実験	74
3.4.1 目的.....	74
3.4.2 方法.....	74
3.4.3 結果と考察.....	75
3.5 結言	82
第4章 総括論議.....	83
第5章 結論.....	84
参考文献.....	86
発表論文・特許.....	90
謝辞.....	91

第 1 章 序章

1.1 社会的背景

人は 3 万年以上昔から道具や食品など様々なものを生産・製造・加工するなどして、便利で豊かな生活を営んできた[1]. 古くはすべて人手に頼って生産・製造・加工を行ってきた[2]が、牛や馬といった家畜を動力として利用した農業や輸送の省力化[3]から始まり、水車や風車といった自然エネルギー[4-5]や、蒸気機関[6-7]、内燃機関[8]、電動モータ[9]など様々な動力を使用した自動化によって、より短時間、少人数、低コストで生産・製造・加工する方法を確立してきた。特に近年では自動車・半導体分野においては、高度な機械化による自動製造がおこなわれており[10-14]、高品質の製品の大量生産を確立している。しかし、生産・製造・加工する対象が不定形（柔軟、変形しやすい、不揃い）なものの場合、未だに作業員による手作業で生産・製造・加工されていることがほとんどである。

一方で、日本の現状を見てみると少子高齢化によって 1995 年から生産年齢人口の減少が進んでいるのに加え[15]、2008 年以降総人口の減少も続いており、様々な産業で人手不足の状況が発生している[16]。特に多くの作業員を集めて行っている作業、つまり自動化が進んでいない産業においては作業員の確保が難しくなっている[17]。さらに、現在雇用している作業員の高齢化も進んでいることから新たな作業員の確保と技能の習得・継承が課題となってきた[18]。

この対策として近年では、海外から働き手を募集して作業員数を確保しようとしている[19]が、世界的な COVID-19 の流行に伴い、人員の移動が制限され、作業員不足の状況はいまだに解決されていない。

このような状況の解決策として省力化や省人化、自動化に貢献する各種作業支援システムの導入が多種多様な業界で進められている。

1.2 システムインテグレーション

省力化や省人化，自動化に貢献する各種作業支援システムなどを構築する際には，センサやアクチュエータ，通信機器，記録装置，情報処理装置，情報処理・制御アルゴリズム，ユーザインタフェースなど様々な要素を達成すべき目的や機能に応じて適切に組み合わせる必要がある．これら様々な要素を組み合わせ，ある目的を達成するように，またはある機能を発揮するようにシステムを構築することはシステムインテグレーションと呼ばれ[20]，小規模な物から大規模な物まで様々なシステムが構築されている．システムインテグレーションは，製造業の省力化・自動化[21-22]だけでなく，情報通信分野[23]やエネルギー分野[24]など様々な分野で行われており，これによって構築されたシステムは便利で豊かな生活を送るうえで欠かせないものとなっている．

これら構築したシステムが目的とした作業や機能を達成するために，数多くのセンサが組み込まれている．センサは，様々な現象を数値的にとらえるために用いられるが，システムが目的や機能を達成するためには，この数値データの中から適切な情報を抽出する必要がある．このため，センサによって取得した数値データに対し，適切なアルゴリズムによる処理を行うことで，システムは目的や機能を達成するために必要な情報を抽出しており，これをセンシングと言う[25]．システムは様々なセンサを多数搭載することで，システム内部の状況や作業対象となるワークの状態，周辺環境など様々な情報をデータ化するとともに，センシングによって抽出した情報を用いて制御することにより，安定して目的作業や機能の達成を実現している．システムを構築する上で，様々な要素を組み合わせるシステムインテグレーションは非常に重要なポイントである．

1.3 非接触センシング

これまで自動化が進んでいない柔軟物を取扱う作業や不揃いな物に対する精密作業では、使用している機材や工程の変更を最小限もしくは現在のものをそのままに作業支援システムを導入したいというニーズが存在する。現在使用している機材をそのまま、もしくは使用している機材に改造を施すなどして作業支援システムを導入しようとした場合、作業対象となる素材や使用する機材の状況をセンシングする必要がある。一方で、自動化が進んでいない柔軟物を取扱う作業や不揃いな物に対する精密作業では、作業対象となる機材の変形、損傷及び汚損を忌避する場合が多い。

非接触センシングとは、計測対象物に触れることなく必要な情報を取得し数値化する方法であり、近年カメラなど光学系を使用したものが多く活用されている[26-28]。これらは、半導体や精密部品などセンサが対象物に接触した際に汚損・損傷が生じる恐れのある分野において位置決めや検査などに多く使用されている。また、ロボットによる自動化が難しかったばら積みピッキングと呼ばれる、1つのケース内に乱雑に積み重ねられた物品のピックアップ作業を3次元カメラによる非接触センシングとロボットを組み合わせることによって自動化を達成している[29-30]。

非接触センシングは、計測対象物へ触れることなく情報を取得する特性から、接触による変形・破損が発生しにくい物体から接触による変形・破損が発生しやすい物体まで多様な対象物の測定が可能であり、測定の方法や測定したデータの取扱いによって、様々な作業の自動化に役立つ素養を持っている。

非接触センシングを使用した、自動化の難しい作業の自動化に関する研究はすでにいくつか事例が報告されている[31-32]。三好ら[31]は、3次元計測機でサンマの焼成切身の3次元形状測定を行うことで、腹部と尾部の部位判別に加え

重量推定を実施し、缶詰を定量充填するための腹部と尾部の組み合わせを決定するアルゴリズムとこれを実装したロボットシステムを構築することで、身崩れしやすく人手に頼ることで達成していたサンマ蒲焼缶詰製造工程のロボットシステム化を可能とした。Misimi ら[32]は加工中の鶏肉を 3D ビジョンで 3 次元形状を取得することで、鶏肉の特徴点の判別を行いロボットアームの把持点を決定するアルゴリズムを構築し、ロボットアームを使用したササミ肉の取出し作業をロボットシステムによって自動化可能とした。

これらはいずれも作業や対象物に合わせた測定手法（非接触センシング）を選択し、測定を行うだけでなくこの測定したデータから目的作業を達成するために必要な情報を抽出・加工する処理アルゴリズムの構築、さらにはロボットシステムへの実装を行っている。これら統合的な開発・構築作業はシステムインテグレーションと呼ばれており、様々な課題に対しそれぞれ適した組み合わせでシステムを構築している。

柔軟物を取扱う作業や不揃いな物に対する精密作業など、自動化が進んでいない分野において、非接触センシングを用いたシステムインテグレーションは、自動化を達成するために必要な要素であるといえる。

1.4 研究の目的

新たな作業者の確保や技能の習得・継承の問題を解決するため、本研究では、非接触センシングを用いたシステムインテグレーションを行う。このことによって、非接触による対象物の情報取得と処理アルゴリズムによる必要情報の生成を行い、これまで人手に頼りきりであった不定形なものや変形を伴う微細なものを対象にした加工・製造作業の作業支援を行う技術の開発を行う。

作業支援を行う技術開発に取り組む際、対象とする作業に応じて様々な作業支援の形が考えられる。よって本論文では、作業支援を次の2つと定義し、これらに対し、非接触センシングを用いたシステムインテグレーションに取り組む。

(1) 技能が未熟な作業者の作業効率向上による従事可能者数の増加

⇒ 非接触センシングを用いた作業アシスト

(2) 繰り返し作業からの作業者の解放による必要作業者数の低減

⇒ 非接触センシングを用いた作業自動化

(1) の作業アシストでは、熟練作業者による判断が必要とされる作業に対し、非接触センシングと処理アルゴリズムを用いたシステムインテグレーションによって未熟な作業者の作業効率を向上させる、作業アシストシステムを構築する。作業アシストシステムによって、これまで熟練作業者以外が携わることが難しかった作業へ経験の少ない未熟な作業者が従事可能となるため、作業に従事可能な作業者数を増加させることができ、熟練作業者の負担軽減に繋がる。

(2) の作業自動化では、多くの作業者による繰り返しによって達成されてきた作業に対し、非接触センシングと処理アルゴリズム、加えてロボットシステムを用いたシステムインテグレーションによって繰り返し作業の自動化を行う。作業自動化システムによって繰り返し作業から作業者を解放し、作業に必要な

作業者数を低減することで、作業者の負担軽減と少ない作業者での作業達成を可能とする。

本研究によって、技能が未熟な作業者による作業効率の向上や繰り返し作業からの作業者の解放を可能とすることで、加工・製造業が抱える人手不足の解消に貢献できるものとする。

1.5 本論文の構成

本論文では、現在作業に従事している熟練作業者の高齢化と新たな担い手の確保に苦慮している水産加工工場におけるイカ切断作業と、自動化が進められている自動車・半導体製造業の中で未だに作業者による繰り返しの手作業で実施されている微細部品のめっき工程におけるラック装填作業に取り組む。いずれの作業も既存の研究・装置では要求に従った省力化・自動化が困難であり、対象物や使用機材が変形・損傷しやすいことから非接触センシングを使用したシステムインテグレーションが必要となる。

イカ切断作業では、非接触センシングを使用した作業アシストシステムを構築することで、熟練作業者に頼っていた作業を熟練作業者以外も従事可能とすることで、熟練作業者の負担軽減と作業への従事可能者数の増加を目指す。

ラック装填作業では、非接触センシングを使用した作業自動化システムを構築することで、繰り返しの手作業から作業者を解放し、作業者の負担軽減と必要作業者数の削減を目指す。

イカ切断作業とラック装填作業の 2 つの作業支援について研究を行っていくが、他にも様々な作業において作業支援システムの導入が考えられる。作業内容や環境によって適切な作業支援の内容は変わるものの、使い方の工夫や改造によって既存の作業支援システムが展開可能な作業も存在する。このことから、展開可能な作業に対しては既存の作業支援システムを適用し、適用が困難な作業に対して新たな作業支援システムの構築を行うことで、さらに多くの作業において作業支援システムの導入を推進することが可能となる。このことから、本論文で今回対象としたイカ切断作業とラック装填作業について、異なる作業への展開の可能性を提示することで、非接触センシングを用いた省力化・自動化が進んでいない作業への作業支援システムの展開につなげる。

以上を踏まえ、本論文は下記の様に構成されている。

第 1 章では、本論文の背景として、人手不足の現状や非接触センシングを用いた作業支援に関する先行研究について述べ、本論文の目的と本論文の全体構成について示す。

第 2 章では、非接触センシングを用いた作業アシストの事例として取り組んだイカ切断作業支援について、イカ切断作業に取り組んだ背景と目的及び達成手法について述べたのち、構築したシステムとシステムの動作実験結果・考察を示す。

第 3 章では、非接触センシングを用いた作業自動化の事例として取り組んだラック装填作業支援について、ラック装填作業に取り組んだ背景と目的及び達成手法について述べたのち、構築したシステムとシステムの動作実験結果・考察を示す。

第 4 章では、総括論議として第 2 章と第 3 章でそれぞれ構築したイカ切断作業の作業アシストシステムとラック装填作業の作業自動化システムについて、今回対象とした作業と異なる対象作業への展開の可能性を提示することで、非接触センシングを用いた省力化・自動化が進んでいない作業への作業支援システムの展開可能性を示す。

第 5 章では、本論文のまとめを行う。

第2章 イカ切断作業支援

2.1 背景

食品加工業では、一定重量毎に物体を分ける作業（以降、計量作業）が多く存在する。これは、食品業界では重量を基準に取引されている物が多いことや、一定の品質（味、栄養成分など）を保つためには正確な重量の測定が必須なためである。

イカは日本で古くから食されている食材の一つであり、スルメイカやアオリイカ、ケンサキイカなど日本近海で漁獲されるイカ以外に近年では、遠洋で漁獲されるアカイカやアルゼンチンマツイカ、アメリカオオアカイカなどのイカも多く食されている[33]。外套長が 60cm を超える大型のイカ類は、開きのサイズが大きく家庭や飲食店などで調理する際に多くの手間を要するため、水産加工工場で下処理と用途別にラインナップされた製品サイズに切断してから、加工食品として流通させている。この時、開きを様々な製品サイズに切断するが、同じ製品として出荷するものについては、品質管理のため切断後のサイズや重量をそろえる必要がある。特に製品 1 枚当たりのサイズおよび重量が大きいイカステーキ用の切り身を切断する場合は、製品単価が高いことから原料となる 1 枚のイカ開きからなるべく多くのイカステーキ用切り身を切断することが求められる。一方でイカの個体によって身の厚さは異なることから、同一製品内での切り身の重量を揃えるため、イカの切断を行う作業者は切断するイカの形状や厚さに合わせて切断位置や切断サイズを調整する必要がある、この作業には熟練した技術が要求される。さらに、現在の作業工程では切り身を切断する作業者と別には、はかりによって製品 1 枚ずつの重量を確認した上で、製品重量に合わせた仕分け作業と重量調整作業（重い切り身を規定重量になる様に切断し調整）を行う作業者を配置し作業を行っている（以降この一連作業を定重量切断作業

とする) ことから、多くの熟練作業者が必要な作業となっている。

しかしながら、このような水産加工業の工場の内およそ 9 割は沿海市町村に立地しており[34]、所在している地域の生産年齢人口の減少に加え、低温室内での長時間作業や水産物のにおいが付くなどの 3K 環境であることから担い手になる人材が少なく、人手不足が深刻化している[19]。さらには、作業従事者の高齢化率も増加している[19]ことから、熟練作業者の技能継承が難しくなっている。

2.2 イカ定重量切断作業内容

水産加工工場で行われるイカ定重量切断作業の中で，特に製品 1 枚当たりのサイズおよび重量が大きいイカステーキ用の切り身を製造に使用する原料のイカ開きの大きさは 400mm×260mm，厚さは 12mm 程度であり，1 枚ごとに大きさや厚さ，形状が異なる．この原料を完全解凍した後，事前に決定された製品重量の-5%～+10%の範囲に収まる様に矩形型に製品の切断作業を行う．この時の製品サイズは長辺と短辺の比率がおおよそ 4：3 の矩形となる様に切断する．現在，水産加工工場ではこのイカステーキの定重量切断作業を次の手順（図 2-1）で行っている．

- (1) まな板へ広げた原料から外形に合わせ柵※を切り出す（図 2-1B）

※柵：本論文では短冊形状に切断した原料を指す

- (2) 柵を厚さに合わせて矩形状（製品形状）に切断（図 2-1C）
- (3) はかりで計量し近い製品重量になる様に切断し調整（図 2-1D）
- (4) 製品重量毎に仕分け

上記の作業手順（1），（2）を作業者が行う際，設定された製品重量を満たすように，切断位置を決定することはもちろんだが，1 枚の原料から最大数の製品を切り出すように，切断開始位置を検討しながら熟練作業者は定重量切断作業を行っており，現在は 5 割程度の歩留まり（＝製品重量/原料重量）で作業を実施している．

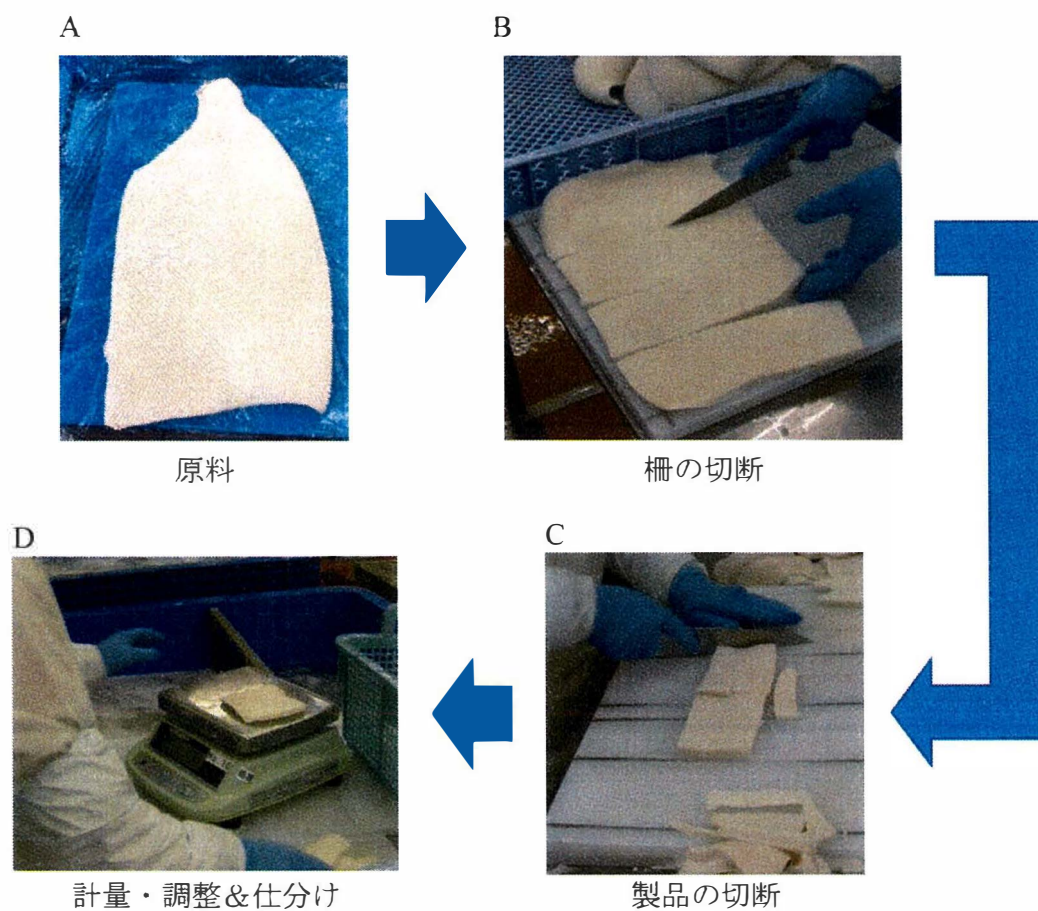


図 2-1 定重量切断作業手順.

原材料 (A) から柵を切断した後 (B), 製品形状を切断し (C), 最後にはかりを使用して製品重量の計量・調整と仕分け (D) を行う.

2.3 類似事例・既存研究

イカ定重量切断作業と類似の作業に、1つの不定形なブロック形状の食材（肉や魚介のブロック）の定重量切断作業がある。例として小売店で行われているブロック肉を厚切り肉（ステーキ用、とんかつ用など）に加工する作業や魚フィレ（3枚おろしの片身のもの）を柵や刺身に加工する作業がこれにあたる。従来はこの作業も熟練作業者が手作業で一定の重量となるように切断する必要があった。しかし、近年では治具によって一定厚さに切断する丸刃スライサー[35-36]や食材の送りとスライサーによる切断作業を自動化した定量スライサー、さらにはこれに体積計測を追加することで送り量の自動調節を行う3次元定量スライサー[37-38]が登場し、作業者の負荷軽減や必要人数の削減に加え製品重量の均一化が進んできている。ブロック形状の食材の定重量切断作業において、自動化が進んだ理由として製品を切断する際に制御すべき情報が製品厚さの1パラメータのみであることが挙げられる。ブロック形状食材の定重量切断作業を行う場合、密度が均一で長軸に対する断面積のみ変化すると仮定した上で、3次元での形状計測を行い、切断後の体積が一定となる様に切断位置を決定及び制御することで、設定した重量通りの製品を自動で製造している。この技術のイカ定重量切断作業への適用を考えた場合、シート形状の食材から同一重量の柵を切断することは可能だが、製品の形状やサイズ制限（長辺と短辺の比率がおおよそ4:3の矩形）を満たしながら製品を切断することや原料のイカの形状に合わせて最大数の製品を取り出す（製品に満たない端材を最小とする）切断位置の決定などは困難である。よって、既存の3次元定量スライサーのイカ定重量切断作業への適用は不適といえる。

一方で原料のイカの形状から最大数の製品を取り出す（端材を最小とする）点のみで考えると、類似の問題として道路や壁等の面領域に対しタイルなどの配

置を検討する問題があり，平面充填，タイリングあるいはテセレーション（tessellation）等と呼ばれ，多数の研究が行われている[39-40]．花原ら[39]は，単純な閉曲線で囲われた領域（面）に対し，矩形パターンを配置する問題の定式化と最適化計算（3種類のパラメータについて24通りの計算，計13,824通り）を行うことで，任意形状の面に対し同一の矩形パターンを最大数配置した．この手法を用いることで，1枚の原料から最大数の製品（矩形）を取り出す切断位置の決定を行うことは可能である．しかし，原料となるイカの厚さは均一ではないため，同一の矩形パターンによる切断では，厚さ変化に伴う重量の変化へ対応は困難である．よって，製品を一定重量とする必要があるイカ定重量切断作業への適用は不適といえる．

2.4 目的

生産年齢人口や新たな担い手の減少によって深刻化している熟練作業者の不足による負担を軽減するため、熟練作業でなくてもイカ定重量切断作業へ従事することを可能とする、切断位置決定アルゴリズムとこの切断位置を作業員へ提示する作業支援システムが必要となる。

本研究では、非接触センシングを用いた作業アシストシステムを構築し、切断位置決定アルゴリズムによって決定した切断位置を作業員へ提示することで、熟練作業でなくても高い歩留まりでイカ定重量切断作業を達成可能とする。これによって、イカ定重量切断作業へ従事可能な作業員数を増やすとともに、製品重量の計量や重量調整、仕分け作業に必要な人員を削減することで、熟練作業員の負担軽減と人手不足の解消に寄与する。

2.5 システム構築の流れ

イカ定重量切断作業に使用する原料は、生物学的変動に起因し、部位によって厚さと重量が変化することを経験的に認識しているが、1枚の原料内で部位の違いによる厚さの変化がどの程度存在するか不明である。また、今回構築する作業アシストシステムでは、作業者がシステムによって提示された切断位置を狙って切断するため、作業者が切断する際に発生する切断位置の誤差や重量変化がどの程度発生するか確認を行う必要がある。そのため、まずは原料の形状に合わせて一定面積の製品を切断するための切断位置を提示する定面積切断支援システムを構築し、確認実験を行うことで、原料内で部位の違いによる厚みの変化量を確認するとともに、作業者が指示された切断位置を狙って切断した際に発生する製品サイズの誤差とこれらによる重量変化量を確認する。確認した情報を反映し、3次元形状計測を含む定重量切断作業支援システムを構築し確認実験を行うことで非接触センシングを用いたイカ切断作業の作業アシストシステムによる作業支援を達成する。

2.6 定面積切断作業支援システム

2.6.1 システム構成

本システムでは，原料の形状に合わせて一定面積の製品を切断する切断位置の決定と作業者に対する切断位置の提示を行うため，カメラ画像を用いた非接触センシングによる原料形状の取得とともに，取得した原料の形状情報から定面積切断位置決定アルゴリズムによる切断位置の決定および，プロジェクションマッピングを用いた作業者に対する切断位置の提示を行う．構築したシステムを図 2-2 に示す．

カメラ（acA2040-35gc ， Basler AG）とレンズ（CCTVLENS 2/3” 8mm 1:1.4C）を作業台の上方に設置し，これらを使用して原料のイカ開きの形状を取得する．また，定面積切断位置決定アルゴリズムによって決定した切断位置を同じく作業台上方に設置したプロジェクタ（EB-U42，エプソン株式会社）から原料上に切断線を投影するプロジェクションマッピングを行うことで作業者へ切断位置を提示する．作業台には黒色のまな板（500mm×250mm）を 2 枚設置し 500mm×500mm の作業領域を確保しており，この上に原料を設置し計測と切断位置の提示を行うとともに，提示された切断位置に従ってこの作業台上で作業者が切断作業を行う．

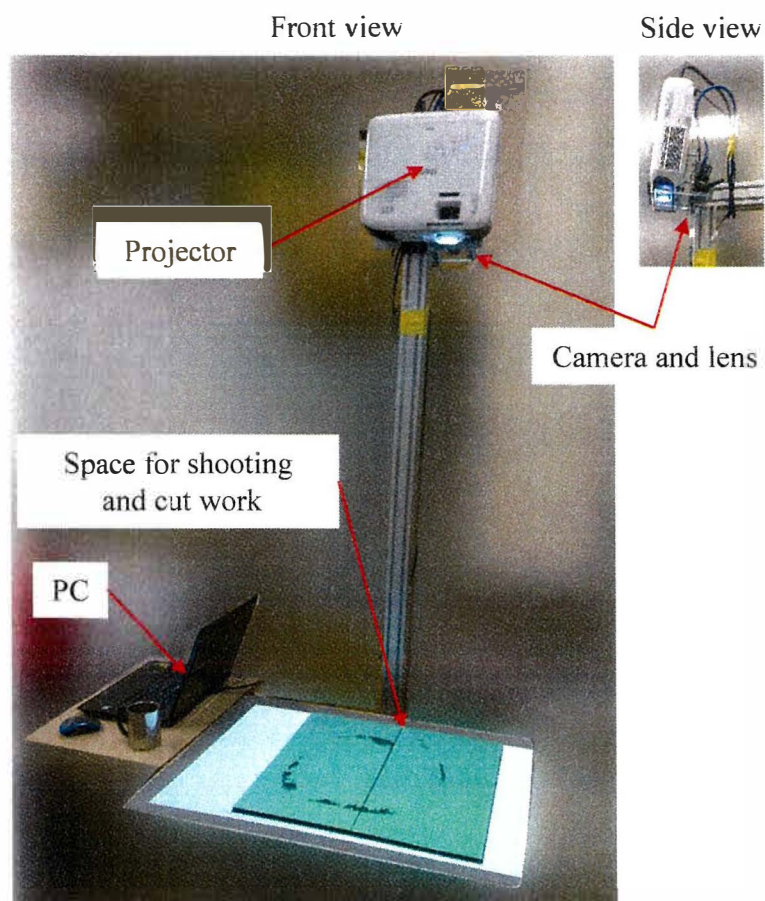


図 2-2 定面積切断作業支援システム

2.6.2 定面積切断位置決定アルゴリズム

任意の形状から最大数の製品を切り出すために、花原らの最適化手法を用いる場合、大規模な計算が必要となる。また、本研究で構築するシステムではアルゴリズムによって決定した切断位置を作業員へ提示し、切断作業は作業員が行うことを想定している。よって複雑な組み合わせパターンを提示した場合、作業員が切断するための労力が増加する。このため、現状のイカ定重量切断作業工程で作業員が行っているように、柵の切り出しを行った後に、製品形状の切断が可能な切断位置を提示することとする（ランダムな配置で製品形状を切り取ることはしない）。

製品サイズの縦を dh 、横を dw として下記の手順（図 2-3）で切断位置の決定を行う。

- (1) カメラから取得した原料（図 2-3A）の 2 次元形状に対し外接四角形をフィッティングし、高さ H と幅 W を取得する（図 2-3B の赤枠）。
- (2) フィッティングした四角形の幅 W を最も無駄なく分割する dh と dw の組み合わせを式（2-1）により算出する。

$$a \times dh + b \times dw \leq W \quad (2-1)$$

ただし、 $a \geq 0$ 、 $b \geq 0$ とし、 a は dh の個数、 b は dw の個数をそれぞれ表す。

- (3) 幅 W から余り部分が左右の端に均等に割り降られるように、柵の切り出し位置を決定するため、式（2-2）によって、分割する中心位置 W_c （図 2-3C の緑線）を算出する。

$$W_c = W_s + \left(\frac{W - a \times dh + b \times dw}{2} \right) + dh \times \text{fix}\left(\frac{a}{2}\right) + dw \times \text{fix}\left(\frac{b}{2}\right) \quad (2-2)$$

ここで W_s は外接四角形の開始位置を表し、 $\text{fix}(x)$ は小数点以下の切り捨て処理を行う関数を意味する。

- (4) 中心位置 W_c に近い位置へ幅 dh の柵、遠い位置に幅 dw の柵がそれぞれ

式 (2-1) で導出した個数配置されるように柵の切断位置を決定する (図 2-3D の緑線と赤破線)。これによって、幅 W を分割しきれなかった余りは両端の領域に配置される。

(5) 柵を切断するラインと原料形状の外形線との交点を検出する (図 2-3E の緑点)。

(6) 1 つの柵で外形上側交点 2 か所と下側交点 2 か所の左右の高さを比較し、差が小さい側を製品形状の切断開始位置とする (図 2-3E の左端柵は下側が切断開始位置)。

(7) 切断開始位置から外形線を越えるまで dh (柵の幅が dh の場合は dw) 間隔で切断位置を決定する (図 2-3E の青枠)。

(8) 手順 (6) ~ (7) を式 (2-1) で算出した柵の個数分 ($a + b$ 回) 繰り返すことで、原料 1 枚の切断位置決定を行う (図 2-3F)。

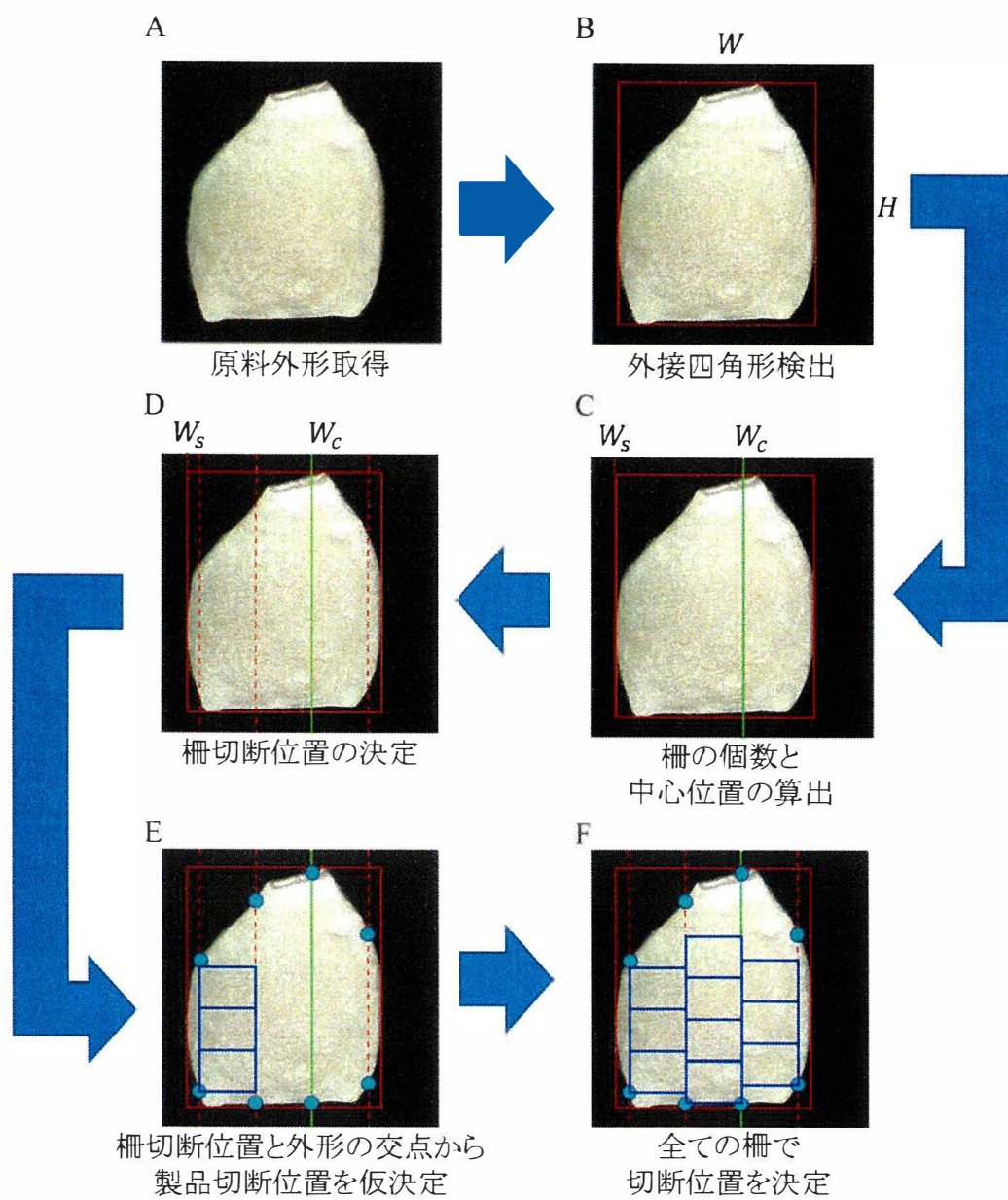


図 2-3 定面積切断位置決定アルゴリズムにおける切断位置決定手順.

2.6.3 プロジェクションマッピング

定面積切断位置決定アルゴリズムで決定した切断位置を作業員へ提示する方法として、今回はプロジェクションマッピングを用いる。

プロジェクションマッピングとは、実物<リアル>と映像<バーチャル>をシンクロさせる映像手法であり、エンターテインメント業界で多く使われてきている[41-43]。また、近年ではプロジェクションマッピングを使用した作業支援システムも提案されており、ピッキング作業の支援[44]や、組立作業の手順指示に使用された事例[45-46]が存在する。

今回、切断位置の提示にプロジェクションマッピングを用いる理由として、水産加工現場は食品を扱う関係上、清潔な状態を保つ必要があり、最低でも食材に触れる部分は水洗い洗浄に対応することが求められる。さらに、食品加工対応の材料を使用し、万が一遺物として一部が混入した場合でもすぐに判別可能な材料を使用することが求められる。本システムでは、プロジェクションマッピングを用いることで、現在使用している作業台やまな板をそのまま使用しつつ、原料上に直接切断位置を提示することが可能である。

2.6.4 定面積切断作業手順

構築したアルゴリズム実装したシステムを使用し，切断作業を行う際は下記の手順で作業を行う．

- (1) 作業台への原料設置
- (2) カメラで原料を撮影（外形形状取得用画像）
- (3) 取得画像に対し，作業台上のまな板を基準に射影変換を実施
- (4) 射影変換後の画像をグレースケール化
- (5) グレースケール画像を閾値により二値化
- (6) 二値化画像の穴埋め処理を実施
- (7) 穴埋め処理された画像を使用し，アルゴリズムによる切断位置算出
- (8) プロジェクタを使用して算出した切断位置を原料に投影
- (9) 投影された切断位置に従い，原料から全ての柵を切断
- (10) 投影された切断位置に従い，手順（9）で切断した柵から全ての製品形状を切断

上記手順の（2）～（8）までは自動化されており，作業者は作業台へ原料を設置した後，プログラムを開始するだけで，切断位置の投影まで行われるシステムとなっている．

2.7 定面積切断実験

2.7.1 目的

構築した定面積切断作業支援システムを使用して定面積切断実験を行うことで、構築したアルゴリズムとシステムの動作確認を行うとともに、本システムによって作業者が切断を行った際、切断後のサイズが定面積となっているか評価を行う。また、原料 1 枚に対し部位の違いによる厚さの変化がどの程度存在するか、この厚さ変化によって、切断した製品重量の変化がどの程度発生するかも合わせて確認を行った。

2.7.2 方法

目標製品サイズを縦 (dh) 78mm, 横 (dw) 55mm として, 構築した定面積切断位置決定アルゴリズムによる切断位置の提示を行い, 提示された切断位置に従って作業者が切断することで, 製品の切り出しを行う. このサイズを測定することで, アルゴリズムによる定面積での切断を達成しているか評価を行う. 合わせて, 切り出した製品の厚さと重量を測定することで, 原料の部位による厚さと重量の変化がどの程度生じるか確認を行う.

本実験では, 定重量切断作業への合計従事時間が 10 時間未満の作業者が, 完全解凍されたイカステーキ用原料 4 枚に対し, 定面積切断作業支援システムを使用した定面積切断作業を実施する.

切断後の製品サイズは, 2 次元レーザプロファイラ (LJ-V7200, 株式会社キーエンス) によってサンプリング周波数 2kHz で記録を行いつつ, レーザプロファイラのセンサヘッドを電動シリンダ (LEFS25A-400, SMC 株式会社) によって 200mm/s で移動させることによって 3 次元形状測定を行い計測する. 今回の測定環境を図 2-4, 測定条件を表 2-1 に示す. 測定エリアに何も乗っていない状態で一度測定を行い, これを基準にして測定データの分析を行う. 切断後のサイズは測定された高さデータの内閾値 (0.4mm) を超えたエリアを基に判定することとし, 縦と横の長さは, 測定データの Y 軸と X 軸上でそれぞれ閾値を超えた区間の平均値, 厚さは閾値を超えたエリア全体の平均値としてそれぞれ算出する. 重量については切断後, 電子天秤 (KD-173, 株式会社タニタ) で測定する.

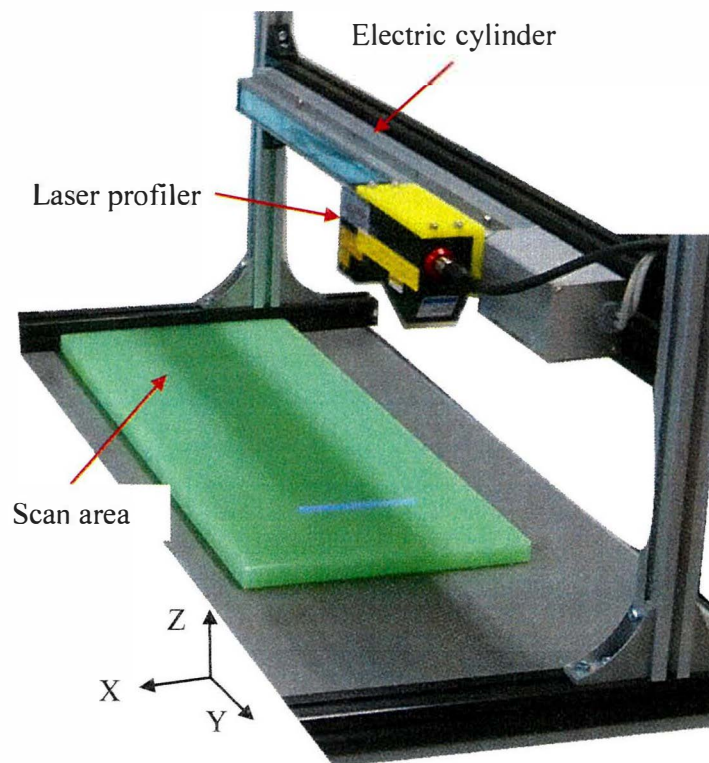


図 2-4 定面積切断製品の 3 次元形状測定環境

表 2-1 三次元形状測定仕様

Measurement range (Max.)	X-axis (width)	73 mm
	Y-axis (width)	400 mm
	Z-axis (width)	± 48 mm
Profile data interval	X-axis (width)	100 μ m
	Y-axis (width)	100 μ m
	Z-axis (width)	1 μ m

2.7.3 実験結果・考察

実験に利用した原料画像に切断位置を重ねた画像と，それに従い切断した画像，及び切断後に計測した製品形状 3 次元計測データを基に作成した高さ画像を図 2-5～図 2-8 に示す．

また，図 2-5～図 2-8 の B に示した製品の番号に応じた縦，横，厚さの各サイズ及び測定重量を表 2-2～表 2-5，全体の平均を算出したものを表 2-6 にそれぞれ示す．

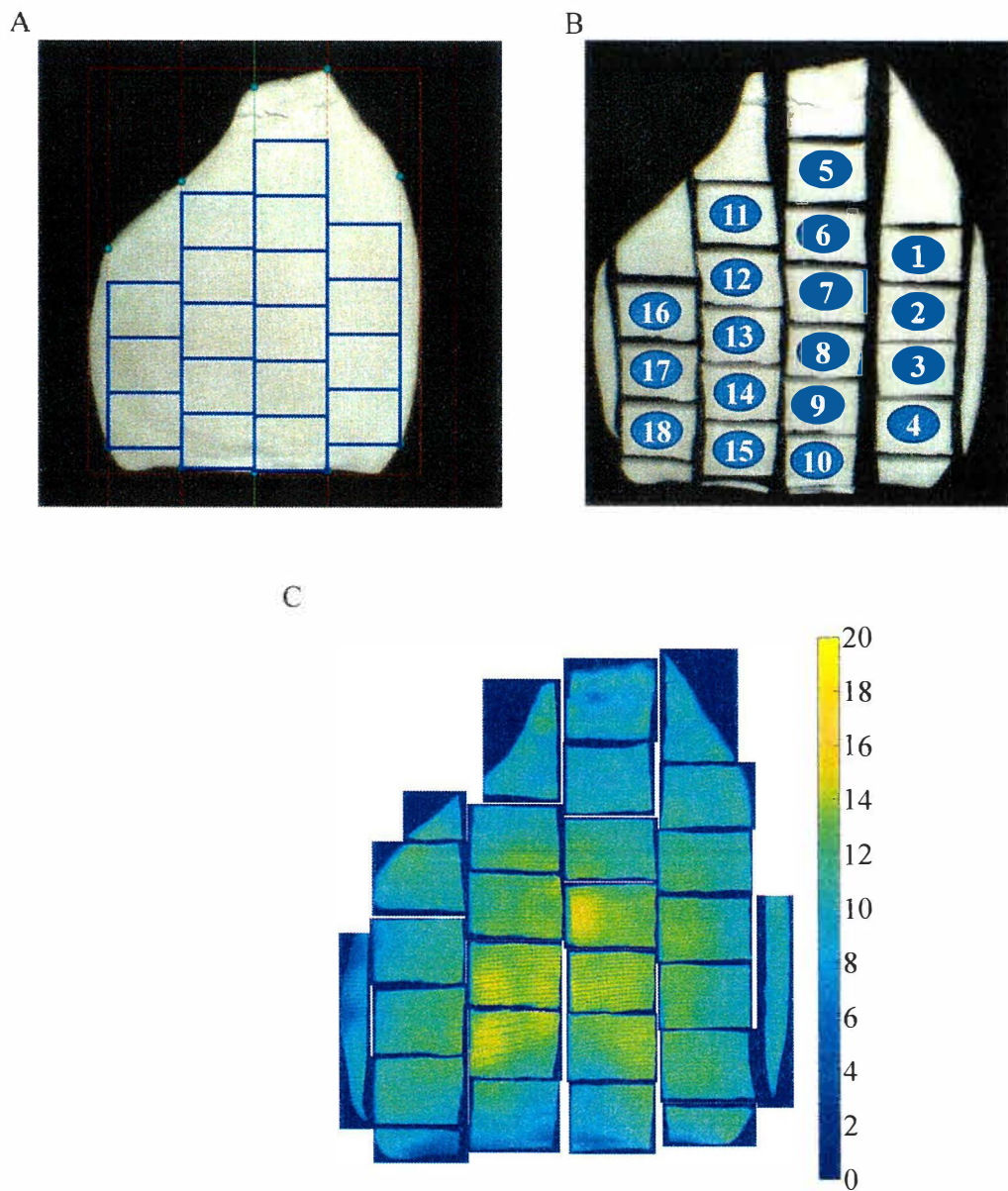


図 2-5 定面積切断実験サンプル 1.

(A) 原料・切断位置画像, (B) 切断作業後画像, (C) 切断後高さ画像

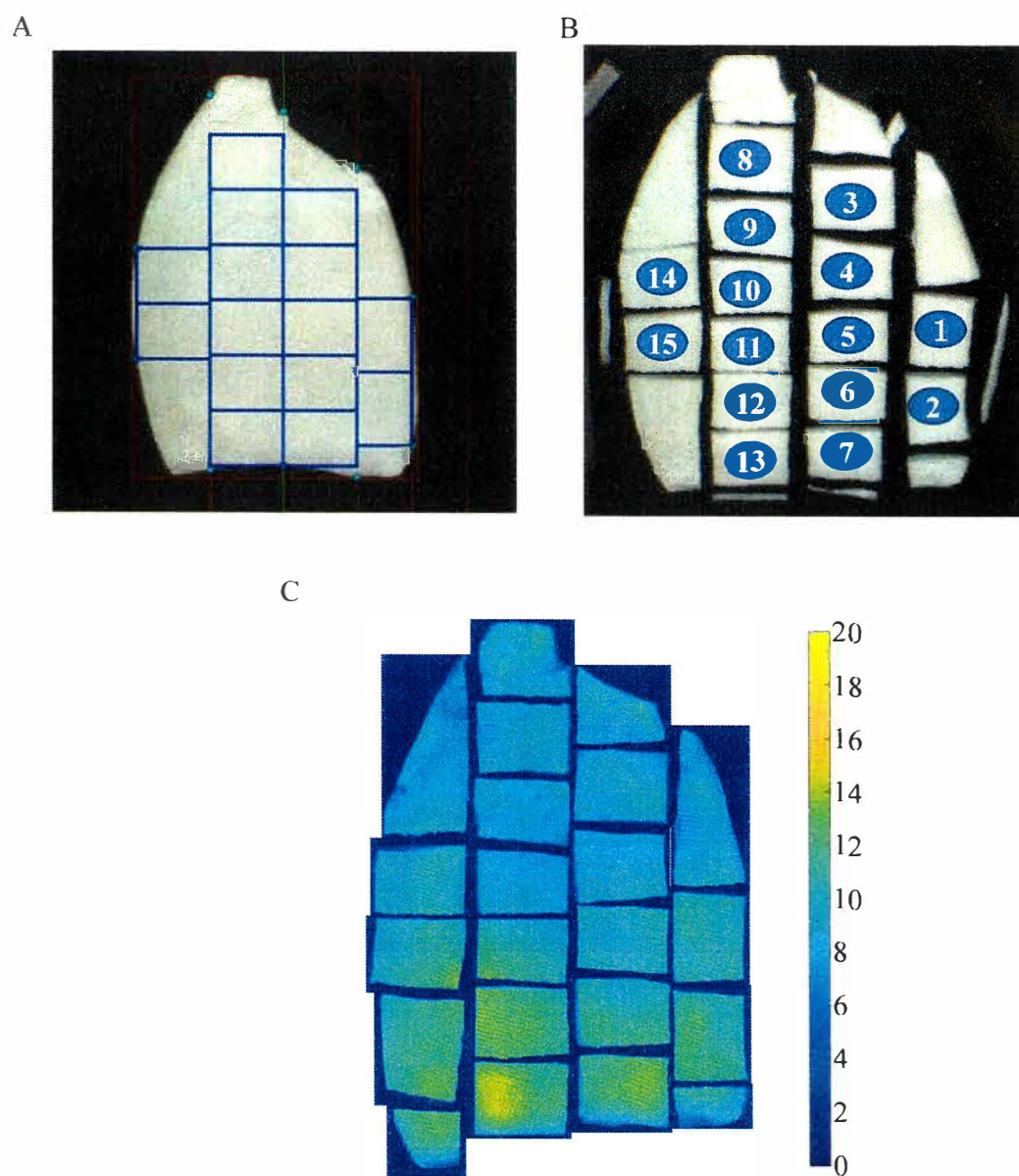


図 2-6 定面積切断実験サンプル 2

(A) 原料・切断位置画像, (B) 切断作業後画像, (C) 切断後高さ画像

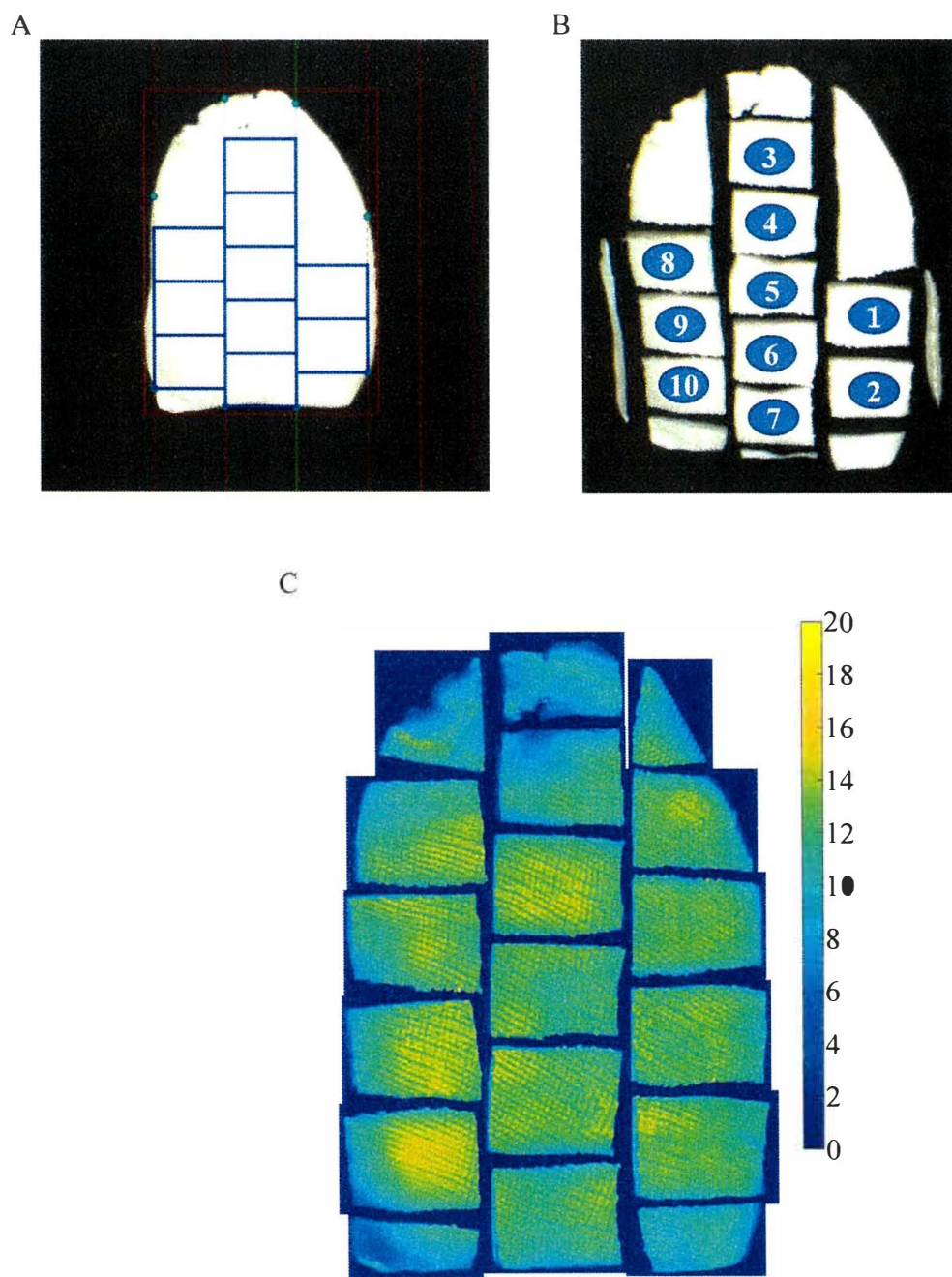


図 2-7 定面積切断実験サンプル 3

(A) 原料・切断位置画像, (B) 切断作業後画像, (C) 切断後高さ画像

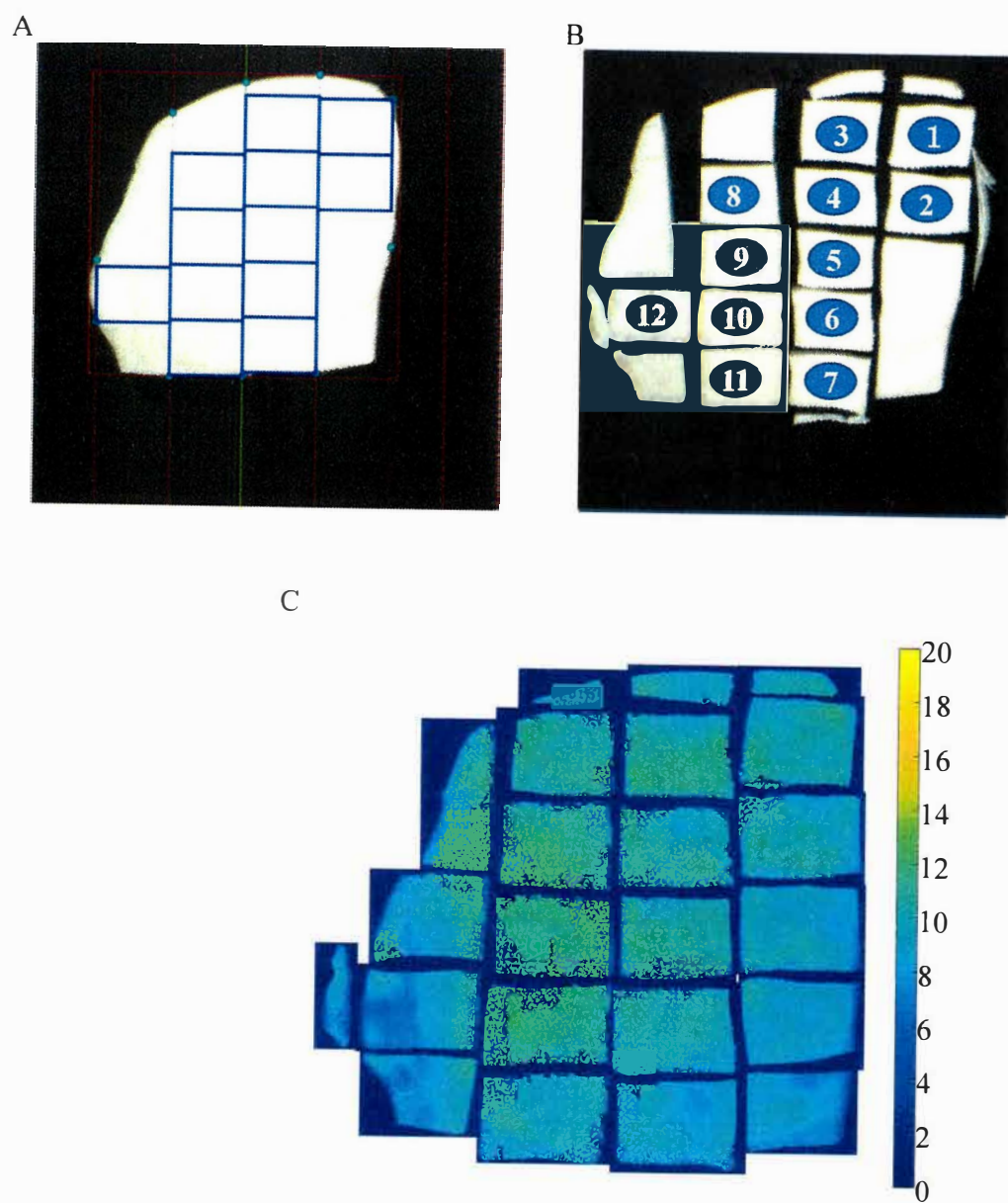


図 2-8 定面積切断実験サンプル 4

(A) 原料・切断位置画像, (B) 切断作業後画像, (C) 切断後高さ画像

表 2-2 定面積切断実験サンプル 1 における製品サイズ及び重量.

Target error は設定した目標値と平均値の誤差を表す.

No.	Height [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
1	82.7	51.0	10.7	48
2	81.2	53.1	11.2	54
3	80.7	53.8	10.8	52
4	81.5	55.8	10.6	54
5	75.8	56.6	9.3	41
6	82.4	51.1	10.9	47
7	79.8	52.6	12.6	57
8	78.0	51.8	12.9	54
9	77.6	56.0	11.8	56
10	73.8	56.7	9.1	40
11	78.5	55.7	10.3	49
12	80.3	54.6	12.0	57
13	79.7	54.3	13.0	61
14	81.5	56.5	12.5	61
15	76.4	57.5	8.6	42
16	81.9	54.8	9.8	47
17	79.0	55.5	10.8	51
18	79.3	57.7	10.3	49
Mean	79.4	54.7	11.0	51.1
S.D.	2.36	2.05	1.27	6.13
Target error	1.4	-0.3		
Max.	82.7	57.7	13.0	61.0
Min.	73.8	51.0	8.6	40.0

表 2-3 定面積切断実験サンプル 2 における製品サイズ及び重量.

Target error は設定した目標値と平均値の誤差を表す.

No.	Height [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
1	75.5	58.0	9.6	46
2	74.5	57.4	10.4	49
3	77.9	60.4	8.2	42
4	73.0	54.9	8.2	38
5	75.7	53.9	9.2	42
6	77.8	54.9	10.2	48
7	73.8	57.9	10.8	51
8	80.1	59.0	8.2	40
9	74.0	51.5	7.9	35
10	74.9	51.3	8.0	34
11	76.3	51.1	9.9	43
12	77.0	57.9	11.5	56
13	82.8	57.7	11.3	59
14	79.7	56.1	8.6	42
15	75.7	52.6	9.5	47
Mean	76.6	55.6	9.4	44.8
S.D.	2.6	2.9	1.2	6.9
Target error	-1.4	0.6		
Max.	82.8	60.4	11.5	59.0
Min.	73.0	51.1	7.9	34.0

表 2-4 定面積切断実験サンプル 3 における製品サイズ及び重量.

Target error は設定した目標値と平均値の誤差を表す.

No.	Height [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
1	83.0	57.5	11.4	58
2	81.1	58.6	9.7	59
3	76.4	57.0	12.0	42
4	78.2	58.6	11.5	59
5	80.6	53.8	11.8	55
6	81.3	63.1	10.8	65
7	78.0	61.5	11.4	54
8	75.4	55.2	11.6	53
9	75.1	54.9	11.8	57
10	76.6	58.2	11.5	56
Mean	78.6	57.8	11.3	55.8
S.D.	2.6	2.7	0.6	5.6
Target error	0.6	2.8		
Max.	83.0	63.1	12.0	65.0
Min.	75.1	53.8	9.7	42.0

表 2-5 定面積切断実験サンプル 4 における製品サイズ及び重量.

Target error は設定した目標値と平均値の誤差を表す.

No.	Height [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
1	76.0	57.3	9.5	44
2	82.7	55.2	9.4	46
3	77.1	55.3	10.3	45
4	79.0	52.0	10.0	43
5	77.8	53.4	10.2	45
6	84.4	56.4	9.7	50
7	79.3	58.1	8.4	42
8	76.7	56.7	10.9	51
9	84.3	54.3	11.1	51
10	87.1	54.1	10.8	55
11	87.1	57.9	9.3	50
12	83.2	54.1	7.9	37
Mean	81.2	55.4	9.8	46.6
S.D.	3.9	1.8	0.9	4.8
Target error	3.2	0.4		
Max.	87.1	58.1	11.1	55.0
Min.	76.0	52.0	7.9	37.0

表 2-6 定面積切断実験における全サンプルの製品サイズ及び重量の平均.

Target error は設定した目標値と平均値の誤差を表す.

No.	Height [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	Weight [g]
Mean	78.9	55.7	10.4	49.3
S.D.	3.3	2.6	1.3	7.2
Target error	0.9	0.7		
Max.	87.1	63.1	13.0	65.0
Min.	73.0	51.0	7.9	34.0

図 2-5～2-8 の A に示すように、本システムは任意の原料形状に合わせて定面積切断位置の提示を可能なことを確認した。

また、システムによって提示された切断位置に従って作業者が切断した結果を確認したところ、設定したサイズ（縦 78mm、横 55mm）に対する誤差は全体の平均値でそれぞれ縦 0.9mm、横 0.7mm となった。今回プロジェクトによって原料に投影した切断位置を示す線は視認性を上げるため、太さを約 3mm（±1.5mm）としており、縦横共に誤差がこの範囲内であることから、システムによって提示された切断位置通りに作業者が切断出来ているといえる。一部 5mm 以上のサイズ誤差を持つ製品が生じた。これは、原料を作業台に広げた際、元の外套の癖によって歪曲していたものが、切断により周りと切り離されたことによって広がることや、製品は柔軟な状態のため少しの移動でも伸び縮みすることなどが原因として考えられる。

重量について見てみると、全体平均で 49.3g、最大 65g、最小 34g となっており大きくばらついている。この平均重量を製品の目標重量と考えた場合、製品重量の許容範囲（-5%～+10%）に収まる製品は 45.5%（ $\div 25/55$ ）であった。ここで、厚さについて見てみると、全体平均で 10.4mm、最大 13.0mm、最小 7.9mm となっており、原料の個体や部位によって厚さが 4mm 以上変化することが判明した。この厚さの変化によって製品重量の変化が生じたと考えられる。

以上の結果から、作業者が定面積切断作業支援システムによって提示された切断位置に従って切断作業を行うことで、同一サイズの製品の製造が可能であることを確認した。しかし、原料の個体や部位の違いによって厚さが増減するため、外形形状だけでなく厚さも加味した切断位置決定アルゴリズムが必要であることが分かった。

2.8 定重量切断作業支援システム

2.8.1 システム構成

事前に構築した，定面積切断支援システムをベースに開発を行った．本システムでは，定面積切断支援システムで取得していた原料画像に加え，原料の高さ情報も取得する．システムの外観を図 2-9 に示す．

カメラ（acA2040-35gc，Basler AG）とレンズ（CCTVLENS 2/3” 8mm 1:1.4C）およびプロジェクタ（EB-U42，エプソン株式会社）を作業台上方に設置し，これらを使用してイカの形状を取得する．作業台には 500mm×500mm の白色まな板が固定されており，この上で原料の計測，切断位置の提示を行い，提示された切断位置に従って作業者が切断作業を行う．

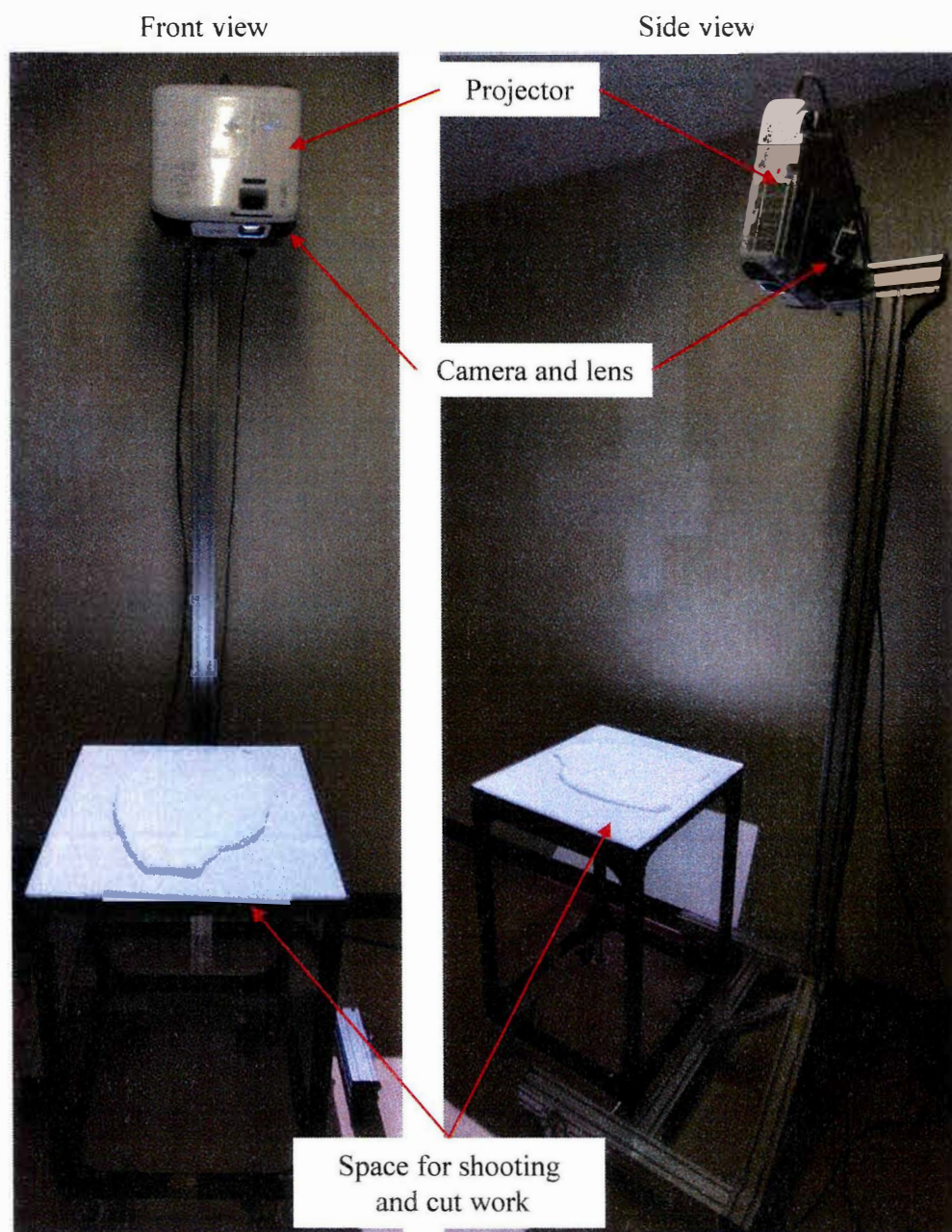


図 2-9 定重量切断作業支援システム

2.8.2 高さ測定手法

3次元形状を非接触で取得する方法には、様々な手法が存在する。例えば、前節で切断後の3次元形状計測に使用したレーザプロファイラのようにシート状のレーザを対象物へ照射しこれをカメラで撮影する光切断法[47]や2台以上のカメラから得られる視差を基に形状の測定を行うステレオ法[48]、光の位相差または対象物までの往復時間を使用して対象物までの距離を測定するTime Of Flight (TOF) 法[49]、正弦波縞パターンの位相をずらして3枚以上画像を撮影することで3次元形状の復元を行う位相シフト法[50]などがある。

2.7.3 項の図 2-5～図 2-8 の C に示す高さ画像を見てみると原料の厚さ変化は徐々に生じており、ピンポイントでの急激な変化は見られなかった。このことから、空間分解能が低い（計測点数が少ない）3次元計測手法であっても、イカ定重量切断作業に必要な厚さ情報の計測は可能であるといえる。

先に開発した定面積切断作業支援システムには、原料の形状を測定するための2次元カメラと切断位置を提示するためのプロジェクタがすでに組み込まれている。よって、この2つを使用することで、非接触の3次元形状取得を行うこととした。

本研究では、高さ変化が比較的少ない広い面積の3次元形状の取得を行うため、パターン光投影法と呼ばれる手法[51]を用いる。パターン光投影法では、あらかじめ設定した光学パターンを対象物に投影した物をカメラで撮影し、光学パターンの移動量から3次元形状を測定する手法である。この手法は、光学パターンが投影されている部分のみ高さ情報を取得可能であるため、空間分解能が低いですが、広い面積の高さ情報を1度に取得することが可能である。

パターン光投影法による高さ測定は、専用ソフトウェア（イカ計測アプリケーション、アキュイティ株式会社）を介して行う。原料の厚さを計測するため作

業前にキャリブレーション作業を行う必要がある。図 2-10 の様に作業台の代わりにキャリブレータを設置しキャリブレーション作業を行う。

キャリブレータは、電動スライダ（SPF86B10-3PM, オリエンタルモータ株式会社）とリニアモーションドライバ（LDK114W-M, オリエンタルモータ株式会社）、モータ制御ボード（PMC-M2C-U, 株式会社ワイツー）によって構成されており、イカ計測アプリケーションを介して制御される。キャリブレーション作業では、キャリブレータに設置された 500mm×500mm の白色ボードにプロジェクタから非対称ドットパターン（ $17 \times 31 = 527$ 点）を投影し作業台高さ（760mm）から+30mm までの区間を 3 分割（760mm, 770mm, 780mm）し、各高さで白色ボード上の非対称ドットパターンを撮影する。この撮影された非対称ドットパターンを用いてキャリブレーションを行うことで、原料の厚さ測定時に 527 点の高さデータが取得可能となった。キャリブレーション完了後はキャリブレータを作業台に置き換え、作業台上で原料の測定と切断位置の提示、および切断作業を行う。

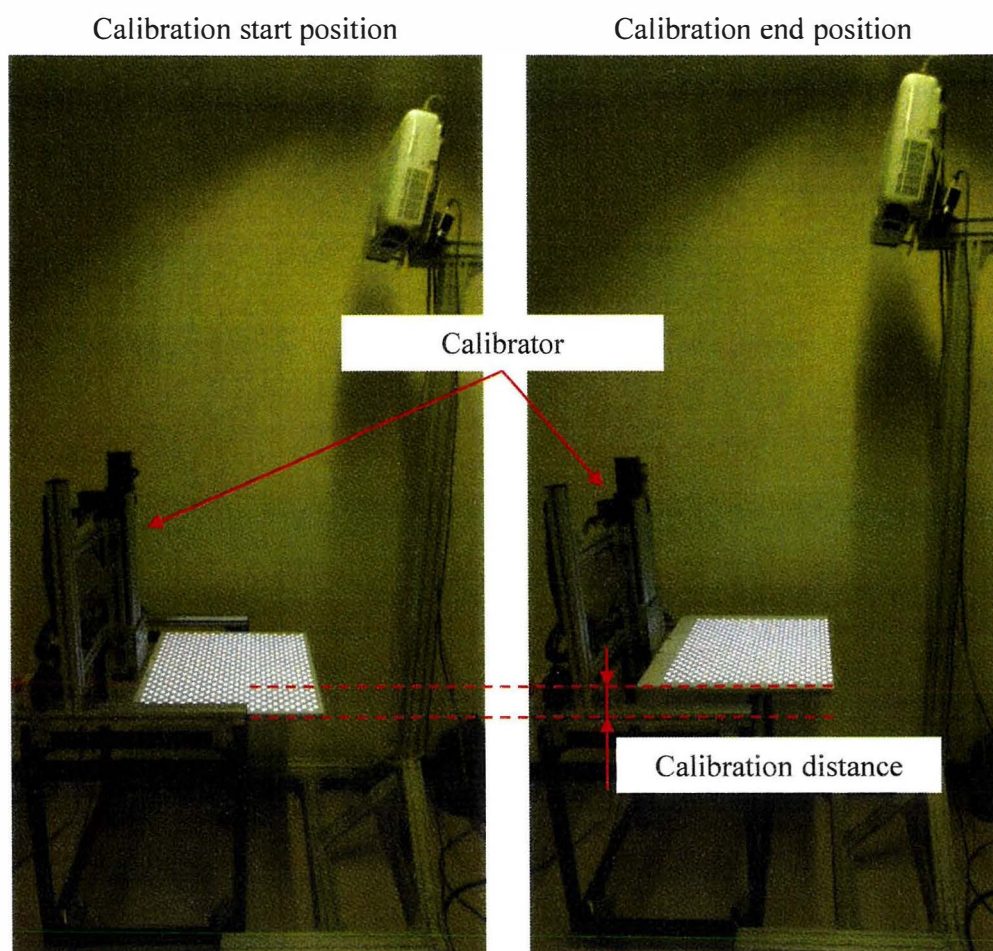


図 2-10 定重量切断作業支援システムのキャリブレーション作業

2.8.3 定重量切断位置決定アルゴリズム

定重量切断位置決定アルゴリズムは、2.6.2 項で説明した定面積切断位置決定アルゴリズムをベースにしている。そのため、現状作業者が行っているように、柵の切り出しを行った後に、製品形状の切断が可能な切断位置を提示することとする（ランダムな配置で製品形状を切り取ることはしない）。

製品サイズの縦を dh 、横を dw 、目標重量を M 、原料の密度 ρ として下記の手順（図 2-11）で切断位置の決定を行う。

- (1) 設定された製品のサイズと設定重量、原料密度から式 (2-3) を用いて基準となる厚さ δ_{ref} を算出する。

$$\delta_{ref} = \frac{M}{dh \times dw \times \rho} \quad (2-3)$$

- (2) 取得した高さデータ（527 点）を画像データのサイズに合わせアップスケーリングを行う。この際、高さデータ間に空白が生じるがこの段階では 0 として処理する。

- (3) カメラから取得した原料の 2 次元形状（図 2-11A）に対し外接四角形（赤枠）をフィッティングし、高さ H と幅 W を取得する（図 2-11C）。

- (4) フィッティングした四角形の幅 W を最も無駄なく分割する dh と dw の組み合わせを式 (2-4) により算出する。

$$a \times dh + b \times dw \leq W \quad (2-4)$$

ただし、 $a \geq 0$ 、 $b \geq 0$ とし、 a は dh の個数、 b は dw の個数をそれぞれ表す。

- (5) 幅 W から余り部分が左右の端に均等に割り降られるように、柵の切り出し位置を決定するため、式 (2-5) によって、分割する中心位置 W_c （図 2-11C の緑線）を算出する。

$$W_c = W_s + \left(\frac{W - a \times dh + b \times dw}{2} \right) + dh \times \text{fix} \left(\frac{a}{2} \right) + dw \times \text{fix} \left(\frac{b}{2} \right) \quad (2-5)$$

ここで W_s は外接四角形の開始位置、 $\text{fix}(x)$ は小数点以下の切り捨て処理を行

う関数を意味する.

- (6) 中心位置 W_s に近い位置へ幅 dh の柵, 遠い位置に幅 dw の柵がそれぞれ式 (2-5) で導出した個数配置されるように柵の切断位置を決定する (図 2-11D の緑線と赤破線). これによって, 幅 W を分割しきれなかった余りは両端の領域に配置される.
- (7) 柵を切断するラインと原料形状の外形線との交点を検出する (図 2-11E の緑点)
- (8) 1 つの柵で外形上側交点 2 か所と下側交点 2 か所の左右の高さを比較し, 差が小さい側を製品形状の切断開始位置とする (図 2-11E の左端柵は下側が切断開始位置).
- (9) 切断開始位置から外接線を超えるまで dh (柵の幅が dh の場合は dw) 間隔で切断位置を仮決定する (図 2-11E の青枠).
- (10) 仮決定した切断位置を使用し, 手順 (1) で作成した高さデータの切断位置内の平均高さ δ_{ave} を算出する. この時, 手順 (1) でアップスケーリングによって生じた空白による 0 は平均高さの算出には使用しない.
- (11) 式 (2-3) で算出した基準高さ δ_{ref} を平均高さ δ_{ave} で割った値を dh (柵の幅が dh の場合は dw) に積算し, 切断長さ ΔL を式 (2-6) により算出する.
- $$\Delta L = \frac{\delta_{ref}}{\delta_{ave}} \times dh \quad \text{または} \quad \Delta L = \frac{\delta_{ref}}{\delta_{ave}} \times dw \quad (2-6)$$
- ただし, 極端ないびつ形状やサイズ違いを防ぐため, 式 (2-7) のように変化量を制限する.
- $$0.5 \leq \frac{\delta_{ref}}{\delta_{ave}} \leq 1.5 \quad (2-7)$$
- (12) 切断開始位置から切断長さ ΔL の位置を切断位置に決定する.
- (13) 手順 (9) ~ (12) を切断位置が原料の外形線を超えるまで繰り返すこ

とで、柵 1 つ分の切断位置決定を行う（図 2-11F の青枠）。

- (14) 1 つ目の柵の切断位置決定が終了した後、隣の柵に対して手順 (8) ～ (13) までを式 (2-4) で算出した柵の個数分 ($a + b$ 回) 繰り返すことで、原料 1 枚の厚さを考慮した切断位置の決定を行う（図 2-11G の青枠）。

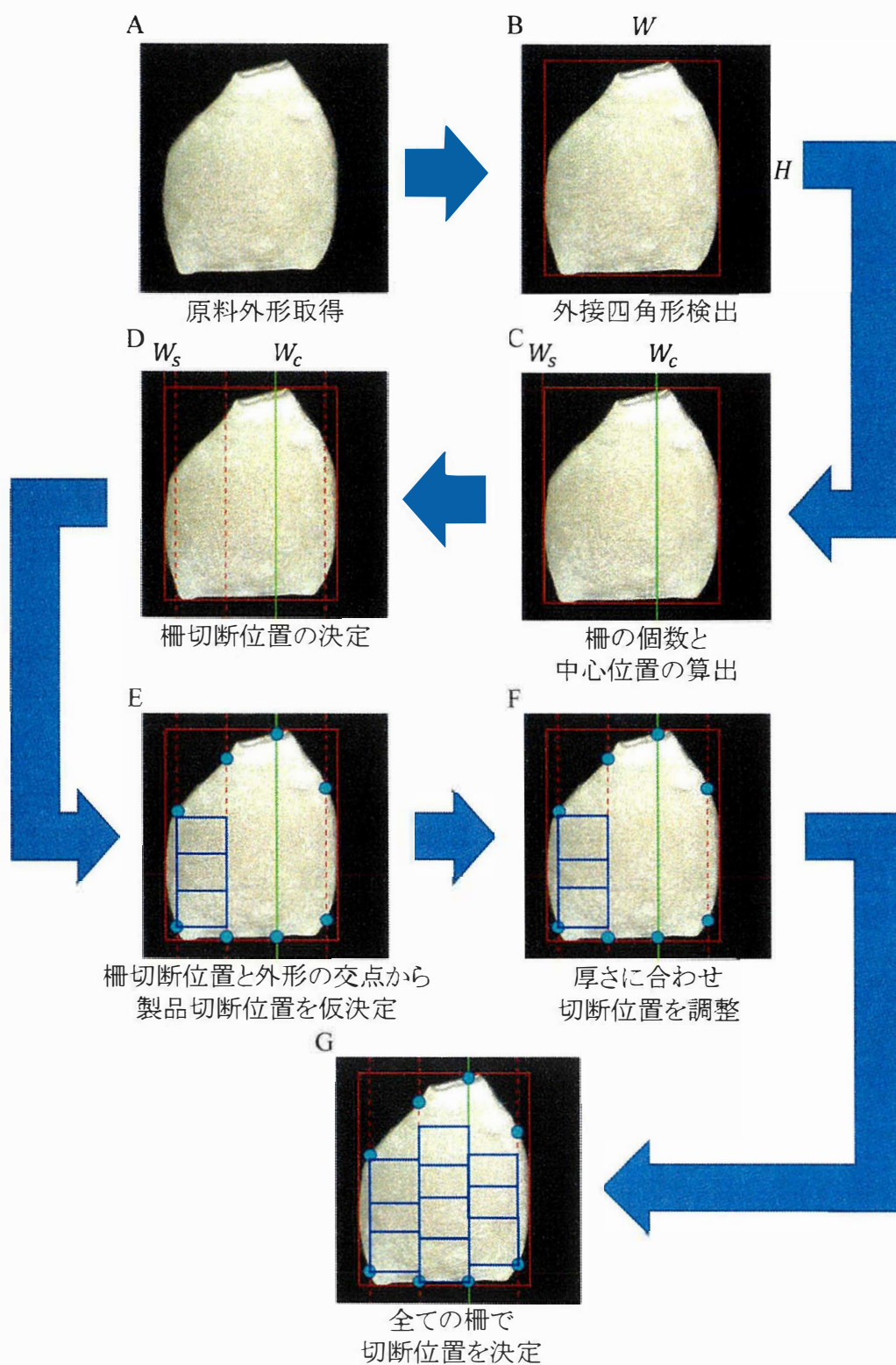


図 2-11 定重量切断位置決定アルゴリズムにおける切断位置の決定手順決

2.8.4 定重量切断作業手順

構築したアルゴリズム実装したシステムを使用し、切断作業を行う際は下記の手順で作業を行う（高さ測定のためのキャリブレーションは完了しているものとする）。

- (1) 作業台への原料設置
- (2) プロジェクタで非対称ドットパターンを投影し、カメラで原料厚さ測定用画像を撮影
- (3) 原料厚さ測定用画像から各点（527 点）の厚さを取得
- (4) プロジェクタから単色（白）を投影し、外形形状取得用画像を撮影
- (5) 作業台上のまな板を基準に取得した画像（原料厚さ測定用画像と外形形状取得用画像の両方）に対し射影変換を実施
- (6) 射影変換後の原料厚さ測定用画像を基に、厚さ測定点の画像上座標を修正
- (7) 外形形状取得用画像のグレースケール化
- (8) グレースケール画像の閾値による二値化
- (9) 二値化画像の穴埋め処理
- (10) アルゴリズムによる定重量切断位置の算出
- (11) プロジェクタを使用して算出した切断位置を原料に投影
- (12) 投影された切断位置に従い、原料から全ての柵を切断
- (13) 投影された切断位置に従い、手順（12）で切断した柵から全ての製品形状を切断

上記の手順（2）～（11）までは自動化されており、作業者は作業台へ原料を設置した後、プログラムを開始するだけで、切断位置の投影まで行われるシステムとなっている。

2.9 定重量切断実験

2.9.1 目的

構築した定重量切断作業支援システムを使用したイカ切断実験を行うことで、構築したアルゴリズムとシステムの動作確認を行うとともに、本システムによって作業者が切断を行った際、切断後の製品重量が目標とした重量となるか確認を行った。

2.9.2 実験方法

今回イカの密度を $9.9 \times 10^{-4} g/mm^3$ と仮定し、目標切断サイズを縦 (dh) 90mm, 横 (dw) 70mm, 目標重量 70g として、構築した定重量切断位置決定アルゴリズムによる切断位置の決定とプロジェクションマッピングによる切断位置の提示を行い、提示された切断位置に従って作業者が切断を行った際の重量誤差を確認する。切断を担当する作業者は、定重量切断作業への合計従事時間が 10 時間未満である。

完全解凍したイカステーキ用の原料 1 枚に対し、定重量切断作業支援システムを使用した定重量切断を行う。

切断後の重量は、電子天秤 (KD-173, 株式会社タニタ) で測定し記録する。

2.8.3 実験結果・考察

定重量切断実験を行っている様子を図 2-12 に示す。

実験に利用した原料画像に切断位置を重ねた画像と，それに従い切断した製品の画像を図 2-13 に示す。また，図に示した製品番号毎の測定重量とシステムにより推定した重量を表 2-7 に示す。

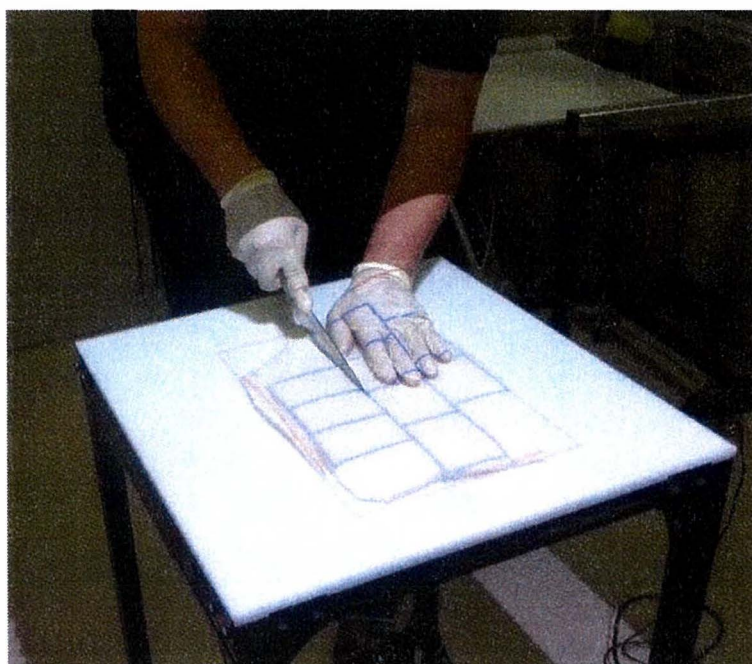
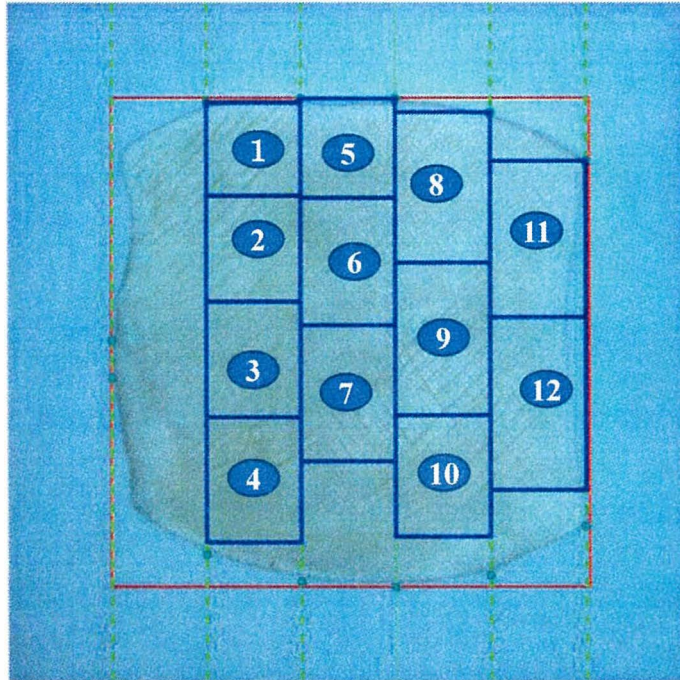


图 2-12 定重量切断实验实施風景

A



B

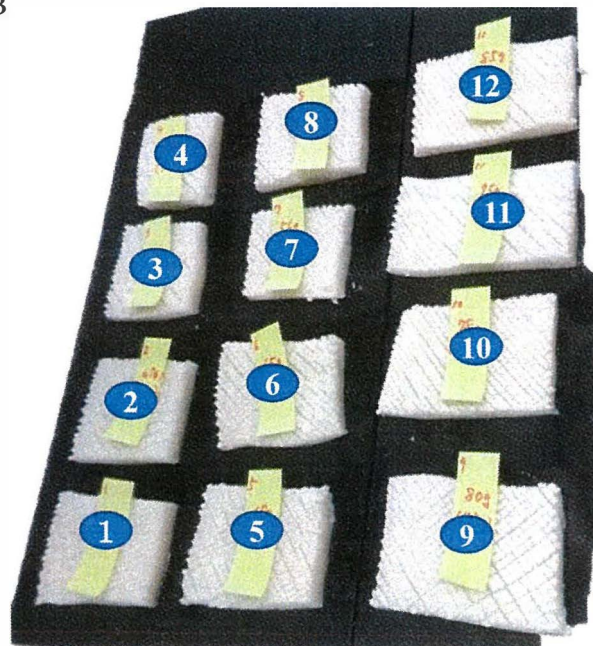


図 2-13 定重量切断実験サンプル

(A) 原料・切断位置画像, (B) 切断作業後画像

表 2-7 定重量切断実験における測定重量及びシステム推定重量

No.	Measured weight [g]	Estimated weight [g]
1	76	70.9
2	67	70.6
3	62	70
4	58	70
5	69	72.9
6	65	70
7	56	70
8	76	70.4
9	80	73.2
10	78	68.8
11	95	66.8
12	85	75.4
Mean	72.3	70.8
S.D.	11.0	2.1
Target error	2.25	0.75
Max.	95	75.4
Min.	56	66.8

図 2-13 に示す実験結果から、厚さに応じて製品の縦（もしくは横）の長さを変更することで重量調節を行いつつ、切断位置の提示を行えていることを確認した。システムによる推定値では、目標重量の許容範囲（-5%~+10%）に収まる結果を示している。切断後の実測重量は、推定値と異なっており、目標重量の許容範囲（-5%~+10%）から一部逸脱しているものの、平均値として許容範囲内に収まっており、厚さに応じて切断位置を調節するアルゴリズムが正常に機能していると考えられる。厚さに応じて切断位置を調節することから、原料の部位における厚さの違いだけでなく、厚さの異なる別の原料においても本手法は有効であると考ええる。

また、今回切断した製品重量の合計は 867g、製品とできなかった部分の重量の合計は 389g であり、作業の歩留まりは 69.0%（ $=867 / (867+389)$ ）となった。これは現在熟練作業者が定重量切断作業を行っている際の歩留まり 5 割を超えていることから、定重量切断作業支援システムを使用することで、未熟な作業者であってもイカ定重量切断作業に従事可能となったといえる。

2.10 結言

本研究では、イカ切断作業支援という課題に対し、非接触センシングとプロジェクションマッピングを組み合わせることで、イカの 3 次元形状から切断位置を自動で決定するアルゴリズムと、決定した切断位置を作業者に対して提示する定重量切断作業支援システムを構築した。構築したシステムによって、熟練作業者でなくても、イカ定重量切断作業へ従事可能とする作業支援システムを構築できた。あくまで本システムはプロトタイプであるため、現場へ導入するためには防水や洗浄を考えた設計に変更することが必要となる。

今回開発したアルゴリズムは、イカの定重量切断作業支援だけでなく、肉や魚、野菜などの食材の定重量切断作業や、木材や石材などを作業者が一定形状に加工する際の加工位置指示など幅広い範囲に展開可能な技術である。

第3章 ラック装填作業支援

3.1 背景・目的

電気めっきのうち、ラック法では複数のワークを一つずつ1台の治具（ラック）へ装填し、装填されたラックをめっき槽へ投入する[52-53]。ラック装填作業はワークの形状やサイズによって装填方法が異なるが、ラックに設置されたピンにワークの穴を通すことが多い。ラック装填作業の自動化方法として、Bürgermeister[54]はオフラインティーチングを使用したロボットアームによるラック装填作業を提案した。オフラインティーチングは使用する機材すべてをシミュレーション空間上に再現し、実機を用いず事前に動作プログラムを作成する手法を指す。反対に、実機を使用して動作プログラムを作成する手法がオンラインティーチングである。いずれの手法であっても事前に作成した動作プログラムに従ってロボットアームが動作するため、作業環境（ワークやラックの位置・姿勢、ロボットアームの配置・運動）の再現性が作業成功率に影響する。しかしながら作業環境の再現性として、めっき槽への出し入れ時に溶液からピンが受けるわずかな外力の影響や、ラックの繰り返し使用によるラックやピンの変形は考慮されていない。このため、ラックの形状やピンの姿勢といった作業環境の予測不能な変化が想定される。したがって、微細なワークを取扱うめっき工程にて作業環境の変化に対応するフィードバックループを持たないオンライン及びオフラインティーチングはラック装填作業の自動化に不適と言える。

ワークとピンの関係性が反対ではあるが、ラック装填作業はロボットアーム制御の基本的な作業の1つである自律的なペグインホール作業と仮定することができる。ロボットアームによるペグインホール作業の自動化は、能動的、受動的な差はあるがワークとピンの接触情報を用いた力覚フィードバック制御によってプログラム作成時との環境変化へ対応しているものが多い[55-56]。しかし

ながら、ワークが柔らかい金属、またワークの穴やラックピンが小径の場合、ピンとワークの接触情報を用いた力覚フィードバック制御ではワークやピンが変形または損傷するため、微細で柔らかい金属ワークのラック装填作業の自動化には力覚フィードバック制御は不適な方法となる。

以上から、ロボットアーム制御によるラック装填作業の自動化は、次の 3 点が解決される必要がある。

- (1) オンライン非接触センシングによるラック上のピンの位置と姿勢の取得
- (2) ピンとワークの相対的な位置・姿勢の取得
- (3) 相対的な位置・姿勢に基づくロボットアームの運動計画とその実行

そこで本研究では、レーザセンサを用いたオンライン非接触センシングによってラックのピン位置及び姿勢を計測し、その計測情報に基づいたロボットアームの運動計画を策定するアルゴリズムの構築を行う。また、構築したアルゴリズムを実装したオンライン非接触センシング式微細ワーク用ラック装填作業支援ロボットシステム（以下、ラック装填ロボットシステム Rack Loading Robot System, RLRS）のプロトタイプを開発し、微細ワークで本システムの実験的検証とその評価を行うことを目的とする。

3.2 ラック装填作業工程とそのモデル化

本研究が対象とするラック装填作業工程は作業者が行う場合，以下の 4 工程に大別される．

- (1) ラックとワークの入ったトレイを作業場所へ移動・設置
- (2) ラックの片面内に 48 本存在する直径 0.8mm のピンの位置及び姿勢を 1 つずつ視認
- (3) トレイからワークをピックアップ
- (4) 直径 1.1mm の穴を有するワークを視認したピンへ装填
(ピンとワークは 1 対 1)，

本研究では，対象とするワーク及びラックの簡易モデルを作成し，これを用いてラック装填作業の自動化に向けたアルゴリズム構築とその検証を実施する．

図 3-1A はワークの簡易モデルであり，縦 24mm，横 20mm，高さ 8mm，板厚 0.3mm，穴径 1.1mm とした．図 3-1B はラックの簡易モデルであり，ラックには直径 0.8mm のピンが 1 段につき 3 本，これを 3 段構成にした．ピンはラック上段右側を起点とし，上段右側のピンを $P(1,1)$ ，下段左側のピンを $P(3,3)$ とするワークを装填するピンの本数は異なるが，ピンの直径や上下左右の間隔及び角度は実際に使用されているラックに基づき，各ピンは左右に 50mm，上下に 45mm ずつ間隔をあけて固定し，各ピンの水平面からの角度は 50 度とした．図 3-1C は製作したラック簡易モデルの外観である．

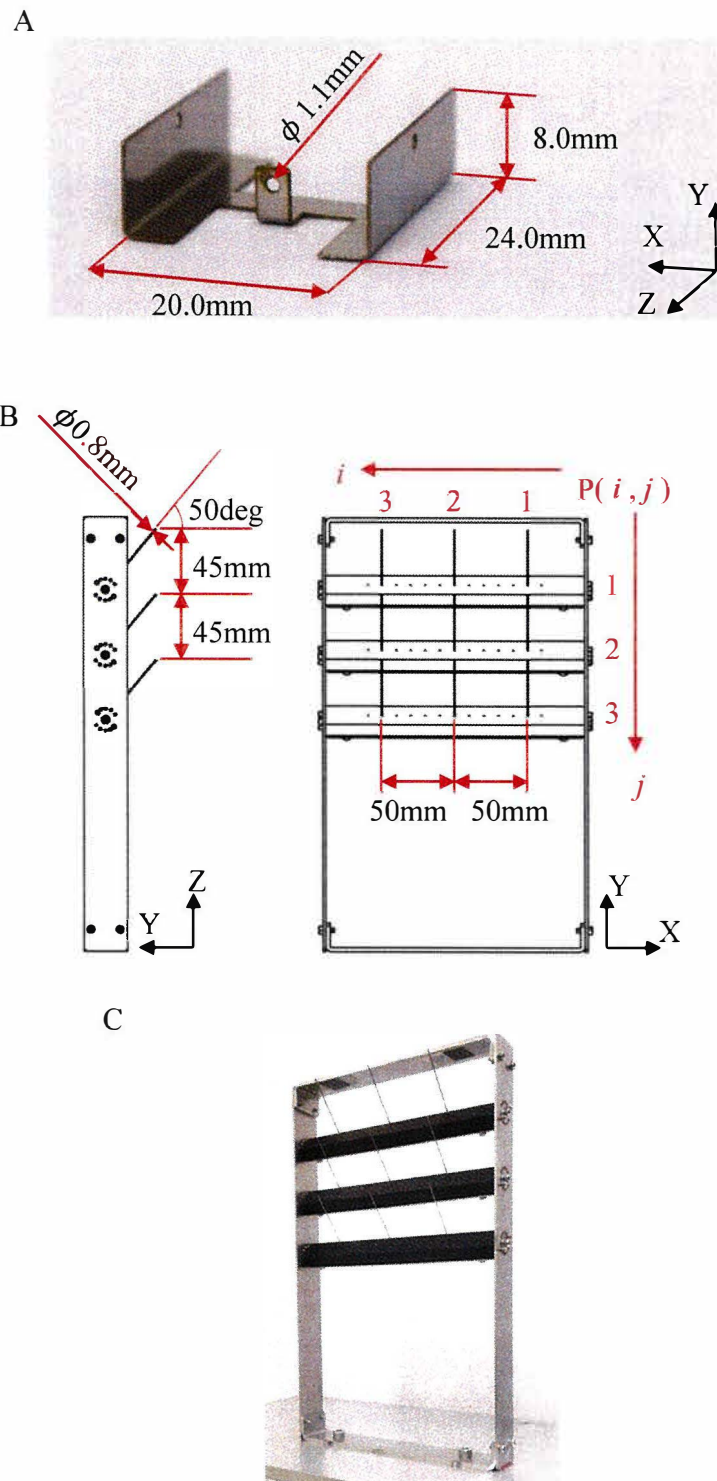


図 3-1 本研究用に制作した簡易ワークとラック。
 (A) 簡易ワークの外観と寸法, (B) 簡易ラックの寸法,
 (C) 簡易ラックの外観

3.3 オンライン非接触センシング式微細ワーク用ラック装填作業支援ロボットシステム

3.3.1 RLRS システム構成

RLRS は、作業者によるラック装填作業工程を踏襲し、ワーク簡易モデルをトレイからピックアップし、ラック簡易モデルの所定のピンに装填するまでの工程を自律的に達成可能なシステムとする。

図 3-2 は RLRS のプロトタイプの外観であり、6 軸シリアルロボットアーム (RS005L, 川崎重工業株式会社, 詳細仕様を表 3-1 に示す), オンライン非接触センシングを用いたピン位置・姿勢計測装置 (Pin Sensing Device, PSD), 穴座標補正用のロボットビジョン (PV260, パナソニック株式会社) 及び制御 PC から構成される。ロボットアームのエンドエフェクタはツールホルダに格納されており、ラックのピン位置・姿勢を計測する際は PSD センサヘッドを、またラック装填を行う際は吸着パッド型ハンドをそれぞれツールチェンジャ (SWR0070, 株式会社コスメック) によって装着し使い分ける。

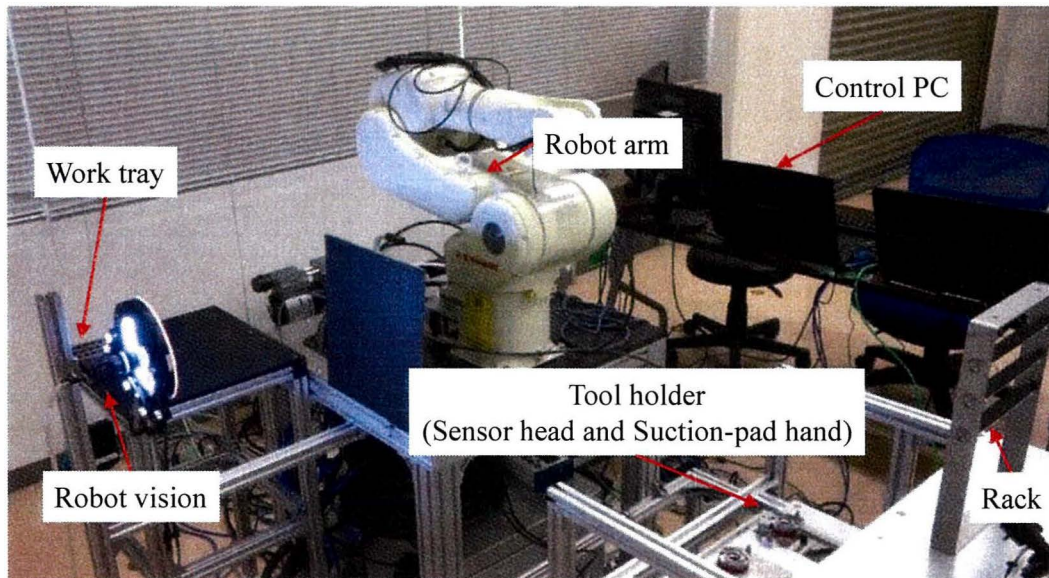


図 3-2 本研究で開発した RLRS の外観

表 3-1 本研究で使用するロボットアームの仕様

Maker	Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
Model	RS005L-A001
Type	Articulated robot
Degree of freedom	6 axes
Max. payload	5kg
Max. reach	903mm
Position repeatability	±0.03mm (wrist flange surface)
Solenoid valve	Double solenoid valve (One unit)
Controller	E74F-A001
General-purpose I/O signals	GPIO board (Input 32/Output 32), NPN(Sink) type
External interface	Ethernet(100BASE-TX/10BASE-T), USB, RS-232C

3. 3. 2RLRS によるラック装填ワークフロー

本システムは自動教示機能を使用せず、本研究で構築するセンシングシステムとアルゴリズムにより算出した結果によって、事前にオフライン環境で作成したロボットアーム動作プログラム上のラック装填動作の目標位置・姿勢を更新する事でピンの状態をフィードバックし、ラック装填を達成する。ラック装填動作の目標位置・姿勢以外は、事前にプログラム上で設定した位置・姿勢を使用するため、本研究で構築するセンシングシステムと運動計画策定アルゴリズムへ影響を与えることはない。RLRS の処理の流れを示した模式図を図 3- 3 に示す。はじめに、PSD センサヘッド部がラックピンの位置を測定し、次にツールチェンジャにより PSD から吸着パッド型ハンドへ換装する。吸着パッド型ハンドはトレイ内に整列されたワークをあらかじめ決められた順に 1 つずつ把持・搬送し、ロボットビジョンにてワーク搬送時の穴位置誤差修正量を測定する。ロボットビジョンによって得た穴位置誤差修正量に基づいて PSD で算出したピン位置を補正し、最終的なロボットアームの運動計画後これを実行する。

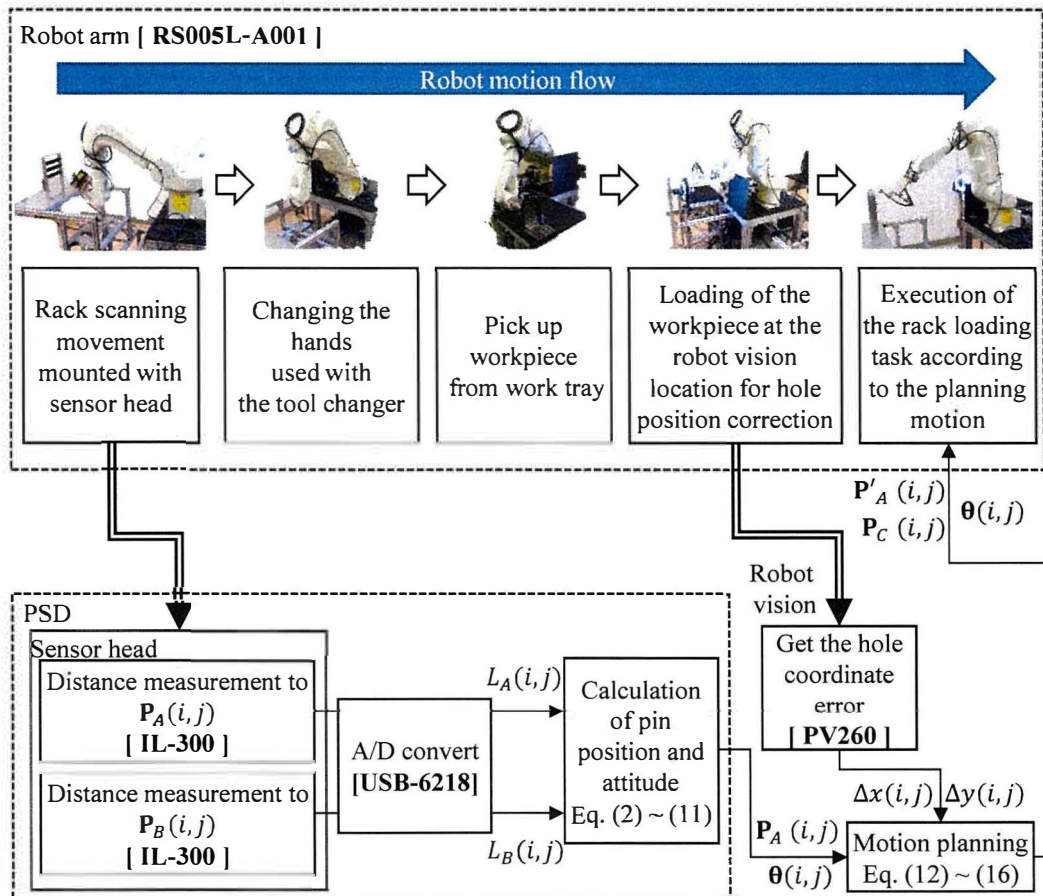


図 3-3 RLRS によるラック装填作業のワークフロー。

ロボットアームは、1.PSD のセンサヘッドによるラックピンの測定、
 2.PSD のセンサヘッドから吸着パッド型ハンドへのツール交換、
 3.ワークのピックアップと搬送、4.ロボットビジョンによるワーク穴位置補正エリアへの移動、の順でタスクを実行する。最後に、ロボットアームは、
 本研究のアルゴリズムによって設定された動作計画に従って、
 ラック装填作業を達成する。

3.3.3 PSD によるピン位置・姿勢計測原理

非接触センシングによるロボットアームを用いたペグインホール作業として、2次元カメラを使用したシステムがある[57]。この研究では穴直径 14mm とピン直径 10mm までは成功したが、成功率は 85%程度、かつカメラの測定範囲内に存在する 1 組のみの穴とピンを用いたペグインホール作業であった。これに対し、本研究では図 3-1C に示すように 1 台のラックに複数のピンが配置され、すべてのピンに連続的にワークを装填する。このため複数のピンが計測空間内に存在する中、各ピンの位置と姿勢を計測する必要がある。実際に使用されるラックのピン形状が直線状であり、経年使用によるピンの姿勢変化は取り付け基部で発生し、先端付近は直線形状が維持される。そこで本研究で使用する簡易モデルのピンは直線形状とした(図 3-1B, 3-1C)。ピンの姿勢は図 3-4 に示すように、ピン上の 2 点の位置を測定することによって算出する。また、ピンに変形が生じた場合であっても、ピン上 2 点の位置測定を行うことで、ピンの位置及び姿勢の変化として PSD で測定可能となる。

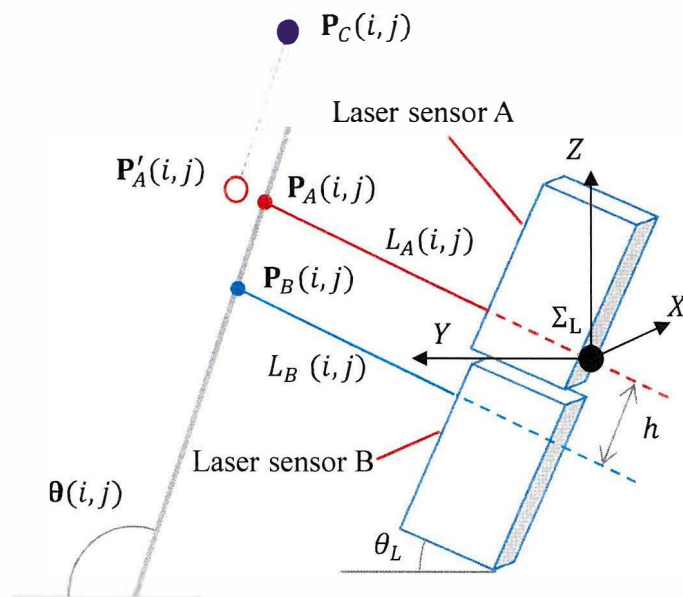


図 3-4 PSD によるピン検出手法の模式図

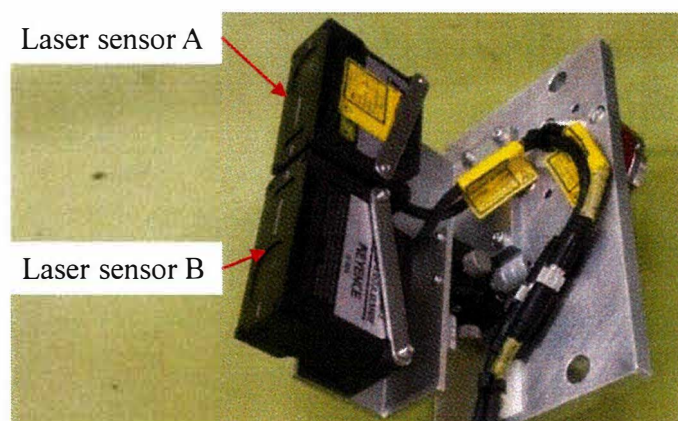
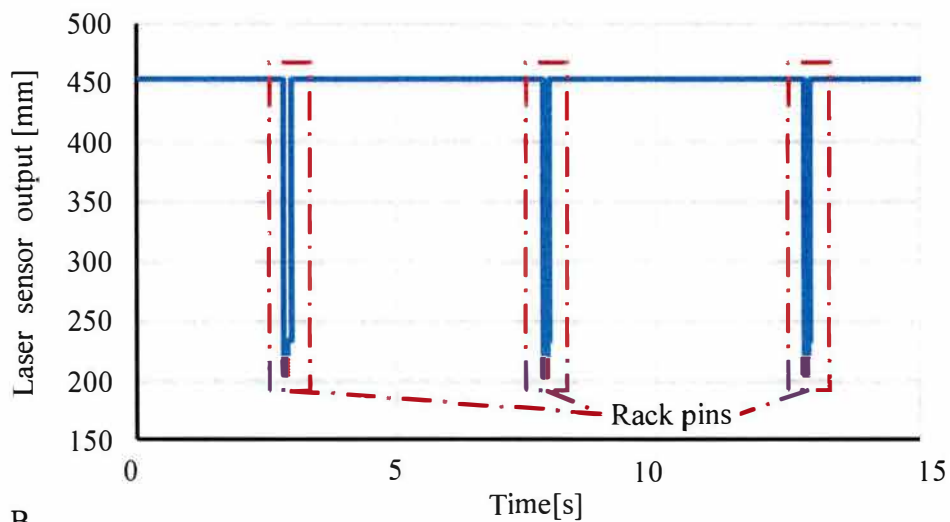


図 3-5 レーザセンサを 2 つ搭載した PSD のセンサヘッド

PSD はレーザ式変位センサ (IL-300, 株式会社キーエンス, 以降レーザセンサとする) を 2 個平行に配置したセンサヘッド (図 3-5) を有し, レーザセンサからアナログ電圧として出力される距離情報を AD 変換機 (USB-6218, NATIONAL INSTRUMENTS) を介してサンプリング周波数 4kHz にて記録し, ピンの位置と姿勢を算出する. PSD によるピンの測定及び位置・姿勢の算出は, 1.センサヘッドをピン計測開始位置へ移動, 2.センサヘッドを X 軸方向へ 10mm/s で走査し, レーザセンサの出力をアナログ電圧で記録, 3.アナログ電圧データを距離データへ変換, 4.閾値によるピン検出時間とピン検出距離の判別, 5.ピン検出時間を用いたレーザセンサ A・B による同一ピン測定データのグループ化, 6. ピン座標・姿勢の算出, の手順で行う. PSD ではセンサヘッドをロボットアームのエンドエフェクタとして搭載し, 事前にラック各段のピンそれぞれの先端から 5mm 程度の位置をレーザセンサ A が測定するように高さ $P_{sz}(j)$ ($j=1, 2, 3$) を設定し, 計測開始位置 $\mathbf{P}_s(j) = [P_{sx} \ P_{sy} \ P_{sz}(j)]^T$ から X 軸方向に 10mm/s の速さで走査する. これにより, ラックの同一段にある複数のピンの計測と位置及び姿勢の算出を行う. この工程を設定段数分行うことでラック全体のピンを計測する. ピンの検出は, $\mathbf{P}_s(j)$ をセンサヘッドが通過してから 15 秒間記録したアナログ電圧を距離データへ変換したのち行う. レーザセンサは測定物 (ピン) までの距離を測定しており, 1 回 15 秒間分のレーザセンサ A で測定した距離データの典型例を図 3-6A に示す. 距離データは図 3-6A に示すようにピンの存在する区間で値が小さくなることからこの変化をピンとして検出する. しかし, 図 3-6B に示すように計測したい段に位置するピンに加え, 背後に存在する異なる段のピンにもレーザセンサは反応し距離データが変化する場合がある. ラックには上下左右に複数のピンがあり, ピンの取り付け基部や外周にはフレームがある. 加えて, 本論文で対象としたラック簡易モデルでは, 表面 (ロボット側) の片側にのみピ

ンを配置したが、実際のラックではラック裏面（ロボットと反対側）にもピンがある。このため、ピン上の2点を計測しようとした際、どの方向から測定してもいずれかのピンやラックのフレームが重なって測定される。図 3-6B に示すように重複して測定されるデータの内、計測対象ピンに対して最も近傍に現れるデータは X 座標が近い位置に存在する 1 つ上段のピンである。センサヘッドが上向きに角度 ($\theta_L = 40$ 度) を持つことから、計測対象ピンと 1 つ上段のピンの距離は $45\cos((90-40)*\pi/180) \div 28.9\text{ mm}$ となり、測定対象ピンと当該ピン計測時のレーザセンサとの距離は 200mm となるようにラックとロボットアームを配置したため、閾値を 220mm と設定した。設定した閾値を下回った部分をピン検出区間とし、この区間の中心をピン中心検出時間、区間内の距離の平均をピン検出距離としてピン位置と姿勢の算出に利用する。レーザセンサ A, B の両方に対して同様の処理を行うことで測定データからピンの検出を行い、2 つのレーザセンサのピン中心検出時間が ± 1.5 秒内となったピンを同一のピンとする。レーザセンサを使用し、閾値を設定することによって、計測空間内に複数のピンが存在する条件であっても、設定した高さに存在するピンのみの検出を可能とした。

A



B

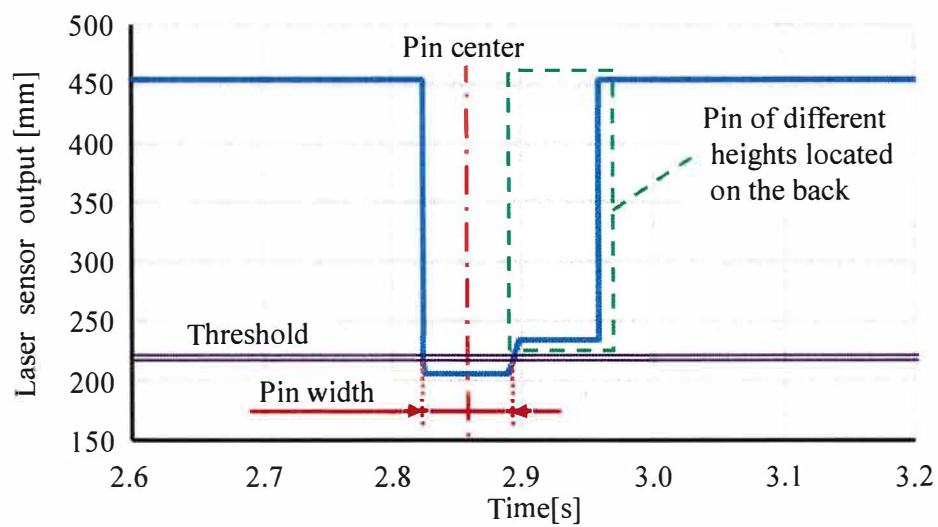


図6 レーザセンサによる測定距離データの典型例.

- (A) レーザセンサ A から 1 回の測定で取得する距離測定データ,
 (B) レーザセンサ A から取得したピン 1 本分の距離測定データ

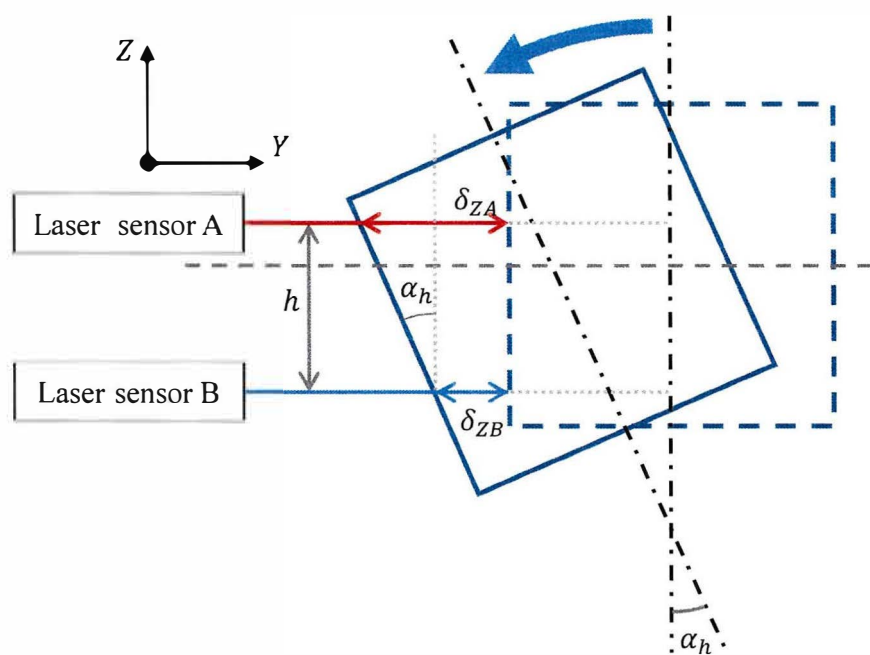


図 3-7 レーザセンサの光軸間距離キャリブレーション.
 青い四角形は校正用のブロックを示しており、青い点線は傾ける前の初期状態、青い実線は既知の確度 (α_h)傾けた状態を示す

ピンの位置と姿勢を算出するために、まずレーザセンサ A とレーザセンサ B の光軸間距離 (h) を求める。 h は設計値であるが、ピンの位置及び姿勢を算出するための重要なパラメータであることから、組付け時などに発生する誤差を補正するために周ら[58]の手法を参考とし、図 3- 7 に示す算出モデル、および式 (3- 1) を用いてブロックを既知の角度 (α_h) 傾ける前後での各レーザセンサ測定値の変化量からキャリブレーションを行う。

$$h = \frac{\delta_{zA} - \delta_{zB}}{\tan \alpha_h} \quad (3-1)$$

ここで δ_{zA} , δ_{zB} はブロックを傾ける前後における 2 つのレーザセンサ A, B それぞれの測定距離変化量を表す。

次に図 3- 4 に示すモデルからピンの位置及び姿勢を算出する。RLRS はロボットアームの座標原点を基準に動作するため、PSD やロボットビジョンで取得したデータはロボットアーム座標系に変換する必要がある。ピンのロボットアーム座標系における位置 $\mathbf{P}_A(i, j) = [A_x(i, j) \ A_y(i, j) \ A_z(i, j)]^T (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3)$ は式 (3- 2) ~ (3- 4) のようにして算出することができる。

$$A_x(i, j) = P_{sx} + VT_A(i, j) \quad (3- 2)$$

$$A_y(i, j) = P_{sy} + L_A(i, j) \cos \theta_L \quad (3- 3)$$

$$A_z(i, j) = P_{sz}(j) + L_A(i, j) \sin \theta_L \quad (3- 4)$$

ここで V はロボットアームに装着したセンサヘッドの移動速度、 $T_A(i, j)$ はレーザセンサ A のピン中心検出時間、 $L_A(i, j)$ はレーザセンサ A によるピン検出距離、 θ_L はセンサヘッドの YZ 平面に対する X 軸回りの傾きをそれぞれ表す。同様に、レーザセンサ B から取得できるピンのロボットアーム座標系における位置 $\mathbf{P}_B(i, j) = [B_x(i, j) \ B_y(i, j) \ B_z(i, j)]^T$ は、レーザセンサ B によるピン検出距離 $L_B(i, j)$ とピン中心検出時間 $T_B(i, j)$ を用いて以下のように表される。

$$B_x(i, j) = P_{sx} + VT_B(i, j) \quad (3-5)$$

$$B_Y(i, j) = P_{SY} + L_B(i, j) \cos \theta_L + h \sin \theta_L \quad (3-6)$$

$$B_Z(i, j) = P_{SZ}(j) + L_B(i, j) \sin \theta_L - h \cos \theta_L \quad (3-7)$$

また、ピンの姿勢 $\theta(i, j) = [\theta_x(i, j) \ \theta_y(i, j) \ \theta_z(i, j)]^T$ は、2点 $\mathbf{P}_A(i, j)$, $\mathbf{P}_B(i, j)$ から水平面及び垂直面とのなす角度として算出することができる。

$$\theta_x(i, j) = \text{atan2}(A_z(i, j) - B_z(i, j), A_y(i, j) - B_y(i, j)) \quad (3-8)$$

$$\theta_y(i, j) = \text{atan2}(A_z(i, j) - B_z(i, j), A_x(i, j) - B_x(i, j)) \quad (3-9)$$

$$\theta_z(i, j) = \text{atan2}(A_y(i, j) - B_y(i, j), A_x(i, j) - B_x(i, j)) \quad (3-10)$$

ただし、 $\text{atan2}(y, x)$ は式 (3-11) の様な条件を設定し計算する。

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{if } x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \text{ and } y = 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

3.3.4 ロボットアームの運動計画アルゴリズム

ロボットアームはピン計測後ツールチェンジャでエンドエフェクタを吸着パッド型ハンドに変更し，格子状に区切られたワークトレイ（図 3-8）に整列されているワークをトレイ端からあらかじめ定めた順番にワークをピックアップする．吸着パッド型ハンドは直径 0.8mm の吸着パッド（ZP2-T08ANGN-A5，SMC 株式会社）2 個を使用し，コンプレッサ（TG-2ACP，株式会社高儀）から供給される 0.5MPa の圧縮空気を電磁弁（VQZ115-5L1-C6-PR，SMC 株式会社）を介してロボットアームより制御し，真空発生器（VUH05-66A，株式会社日本ピスコ）によって吸着力を発生させている．ここで，トレイとワークの間はクリアランスを持つため，ワークの穴の座標はエンドエフェクタによるピックアップのタイミングで必ず誤差を持つ．このため，ワークをピックアップした後にロボットビジョンによって穴位置誤差の修正量を検出し，ラック装填時の誤差修正量としてシステムへフィードバックする．図 3-8 で示したワーク配置に対し，吸着パッド型ハンドは図 3-1A で示すワークの XZ 平面へアプローチし吸着する．このときトレイは水平に設置することにより，X 軸周り及び Z 軸周りの回転は生じない．ワーク穴位置は図 1A の XY 平面に存在することから，X 方向，Y 方向の誤差 ($\Delta x(i,j)$, $\Delta y(i,j)$)，及び Y 軸周りの回転に伴う姿勢変化が誤差として生じる．ここで Y 軸周りの回転によって生じる姿勢変化は，回転後のワーク穴を XY 平面へ射影した際の径変化量となり，ラックピン径 0.8mm，ワーク穴径 1.1mm とから $\cos^{-1}(0.8/1.1) \div 43$ 度以内であれば ($\Delta x(i,j)$, $\Delta y(i,j)$) に含める．図 3-8 で示すようにワークとトレイ間のクリアランスは 43 度の回転が許容されないことから，本研究では 2 次元ロボットビジョンシステムによって $\Delta x(i,j)$, $\Delta y(i,j)$ の穴位置補正を行う．

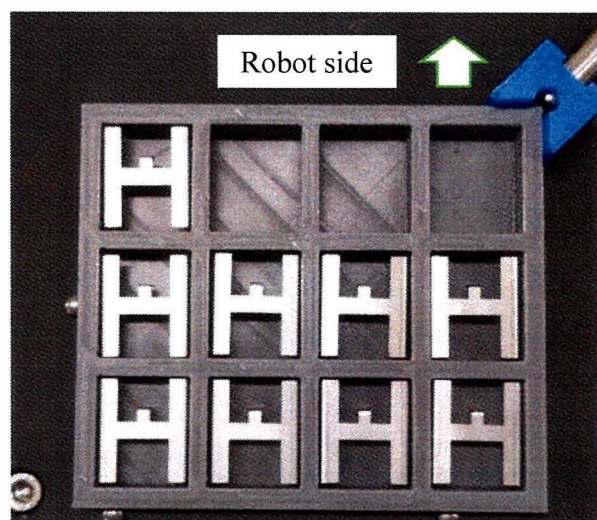


図 3-8 本研究で使用したワークトレイとワーク。
ワークは上下逆向きに設置されており，吸着パッドはワークの X-Z 平面に
対しアプローチする

ピン装填時の穴座標誤差の補正は、 $\mathbf{P}_A(i, j)$, $\boldsymbol{\theta}(i, j)$ 及び誤差 $(\Delta x(i, j), \Delta y(i, j))$ を用い、穴座標補正後のロボットアーム座標系におけるピン位置 $\mathbf{P}'_A(i, j)$ を式 (3-12) により算出する.

$$\mathbf{P}'_A(i, j) = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} \Delta x(i, j) \\ \Delta y(i, j) \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{P}_A(i, j) \quad (3-12)$$

ただし、 $\mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y, \mathbf{R}_Z$ は式 (3-13) ~ (3-15) の様に表される.

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_X(i, j) & -\sin \theta_X(i, j) \\ 0 & \sin \theta_X(i, j) & \cos \theta_X(i, j) \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$\mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta_Y(i, j) & 0 & \sin \theta_Y(i, j) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_Y(i, j) & 0 & \cos \theta_Y(i, j) \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

$$\mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \theta_Z(i, j) & -\sin \theta_Z(i, j) & 0 \\ \sin \theta_Z(i, j) & \cos \theta_Z(i, j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

算出した $\mathbf{P}'_A(i, j)$ と $\boldsymbol{\theta}(i, j)$ を使用してRLRSはロボットアームの運動を計画する. ピン先端は直線形状であるとし、ピンの軸線上で $\mathbf{P}_A(i, j)$ を挟み、 $\mathbf{P}_B(i, j)$ とは反対方向にピンの先端が存在し、さらに離れた地点から $\mathbf{P}_A(i, j)$ へアプローチすることによってワークの装填が可能となる. ワーク穴位置補正を含んだ $\mathbf{P}'_A(i, j)$ へアプローチするため、図 3-4 に示すように $\mathbf{P}_A(i, j)$, $\mathbf{P}_B(i, j)$ を結ぶ線分に並行であり、 $\mathbf{P}'_A(i, j)$ を起点とし $\mathbf{P}_B(i, j)$ とは逆方向へ30mm離れた点 $\mathbf{P}_C(i, j)$ を $\mathbf{P}'_A(i, j)$, $\boldsymbol{\theta}(i, j)$ から式 (3-16) の様に導出する.

$$\mathbf{P}_C(i, j) = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \end{bmatrix} + \mathbf{P}'_A(i, j) \quad (3-16)$$

吸着パッド型ハンドが $\boldsymbol{\theta}(i, j)$ の姿勢で、導出した $\mathbf{P}_C(i, j)$ を通り $\mathbf{P}'_A(i, j)$ を目標位置とするロボットアームの運動を計画するアルゴリズムを構築した. なお、RLRS のロボットアームは、ロボットアームとラックの位置関係から、第 3 軸

(第3リンクと第4リンクの間, 可動範囲: -172~+118度), 及び第5軸(第5リンクと第6リンクの間, 可動範囲: -145~+145度)がプラス(第3軸>0度, 第5軸>0度)となるように動作制限を設定したコントローラ(E74F-A001)によって逆運動学を解くことで, 一意な姿勢を取る. また, ラック装填動作時に特異点を通過する場合は, コントローラの機能を利用することで通過を可能とし, ラック装填作業を達成する. ロボットアームの動作制限処理は, 対象とするラックやワークの形状やサイズ, 配置に応じて調節することで汎化性を持つ.

3.4 ラック装填達成度評価実験

3.4.1 目的

RLRS のプロトタイプについて図 3-1 で示したワークとラックを使用し、ラック装填達成度の評価実験を行う。ここでは PSD によって取得したピンの検出確度、ピンの位置・姿勢の精度、および RLRS によるラック装填の成功率を確認することで構築したシステムの評価を行う。

3.4.2 方法

PSD によって検出したすべてのピンに対して、ワークを 1 つずつ装填する。ラックは図 1C に示すように、3 段構成で合計 9 本のピンが存在するが、1 段ずつ 3 回に分けて測定と装填を行う。この一連の作業を 20 試行繰り返す。ピンの検出確度は 20 試行の内、 $P_A(i,j)$ 、 $P_B(i,j)$ 両方の座標を取得できた回数から算出する。ピンの位置検出精度は $P_A(i,j)$ の座標、姿勢検出精度は $\theta(i,j)$ を用いて、事前に測定した各ピンの位置及び姿勢データとの誤差を算出する。ラック装填の成功率は 20 試行の内、各ピンにワークの装填が達成された回数から算出する。

3.4.3 結果と考察

はじめに, X 軸方向へ設定速度 10mm/s で走査させた際のロボットアーム動作をモーションキャプチャシステム (OptiTrack V120: Duo, NaturalPoint Inc.) にてサンプリング周波数 120Hz で計測した. その結果, 加速・減速のフェーズを除いた連続する 5 秒間の平均速度は 10.00 mm/s となり, ロボットアームは正確に 10mm/s の移動速度にて PSD の走査を行っているとは判断した.

図 3-9 に RLRS によってラック装填が実施される様子を示す. PSD とロボットビジョンから取得した情報を基にしてロボットアームによるラック装填が自動で達成されたことから, 本アルゴリズムは有用であると判断できる.

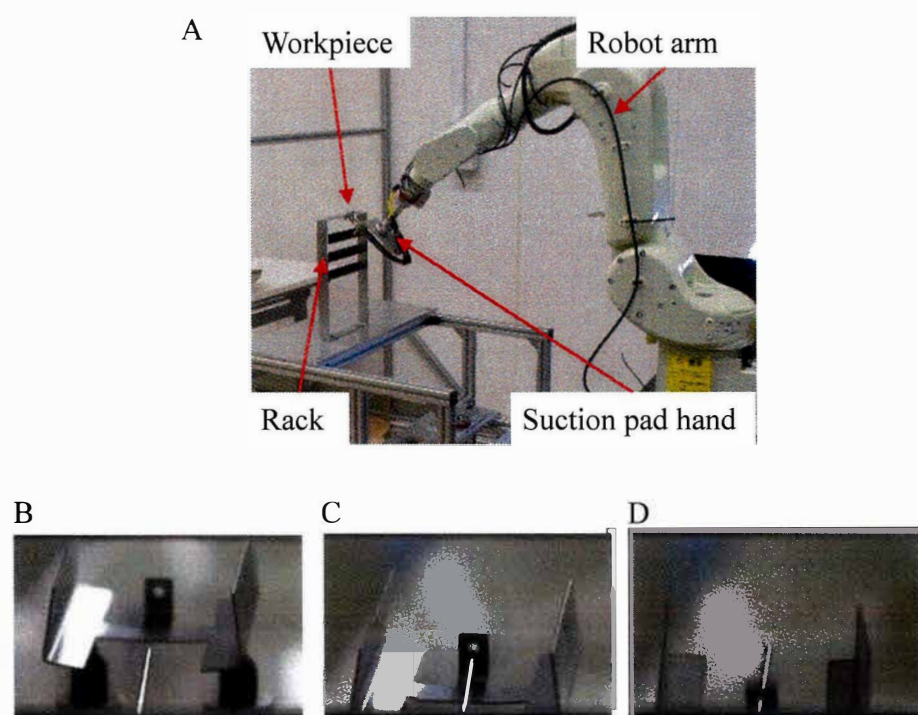


図 3-9 RLRS によるラック装填の様子. A はラック装填の全体像を示す.
 (B) ～ (D) はそれぞれ, (B) アプローチ開始直後, (C) 装填中,
 (D) 装填完了時をそれぞれ示す.

PSD によるラックピンの位置・姿勢計測の妥当性を評価するため、ロボットアームを使用してラック上のピンの位置及び姿勢の計測を事前に行う。ロボットアーム先端にラックのピンと同じ直径 0.8mm のピンを固定し、ピンの先端をロボットアームのツール座標原点に設定する。その後、ロボットアームに固定したピンの先端をラックピン位置 ($P_A(i,j)$) に目視で合わせる。ラック側からロボットアーム側の視点で見ると、両ピンの位置・姿勢にずれがなければラック側のピンにロボットアーム先端ピンが隠れ、ロボットアーム先端ピンは視認されない。この状況になるようロボットアーム先端ピンとラックピンの位置・姿勢を目視によって調整し、ロボットアーム座標系のラックピン位置・姿勢として計測する。この計測値を基準とし、PSD を使用して計測したピンの位置・角度との誤差、およびピンの検出率とワーク装填の成功率を表 3-2 に示す。ラックのピン検出確度は、9 本ピンすべてを全試行で検出した。このことからレーザセンサから取得した距離データから閾値 (220mm) を設定することでピンの検出を行った手法は安定しており、閾値の値も妥当であったといえる。

ピン位置の検出精度はピンが直径 0.8mm で、ワークの穴径が 1.1mm であることから、 $\pm 0.15\text{mm}$ の誤差まで許容可能である。実験結果では、全てのピンで誤差の平均値が許容誤差内であった。これらの検出結果を使用したラック装填の結果を見てみると成功率は最も成功率の低いピン P(2,1) 及び P(1,3) で 85%、全体で 93.3% という結果となった。

表3-2 RLRSによるラック装填の結果

Pin Position	Detection rate of rack pin	X error (\pm SD)	Y error (\pm SD)	Z error (\pm SD)	θ_x error (\pm SD)	θ_y error (\pm SD)	θ_z error (\pm SD)	Success rate of rack loading
P(1,1)	100%	-0.013 (± 0.033)	0.086 (± 0.042)	0.073 (± 0.035)	0.027 (± 0.043)	0.237 (± 0.096)	0.018 (± 0.042)	95%
P(2,1)	100%	-0.033 (± 0.063)	-0.039 (± 0.157)	0.046 (± 0.132)	0.042 (± 0.086)	-0.171 (± 0.519)	0.045 (± 0.082)	85%
P(3,1)	100%	-0.022 (± 0.030)	0.067 (± 0.272)	0.057 (± 0.229)	0.058 (± 0.051)	0.382 (± 1.175)	0.034 (± 0.052)	95%
P(1,2)	100%	0.005 (± 0.032)	-0.024 (± 0.030)	-0.020 (± 0.025)	0.013 (± 0.032)	-0.205 (± 0.131)	0.025 (± 0.024)	100%
P(2,2)	100%	-0.105 (± 0.059)	-0.040 (± 0.117)	0.016 (± 0.098)	0.032 (± 0.131)	0.223 (± 0.323)	0.032 (± 0.110)	100%
P(3,2)	100%	-0.007 (± 0.039)	0.052 (± 0.124)	-0.041 (± 0.104)	0.018 (± 0.046)	-0.062 (± 0.573)	0.023 (± 0.034)	95%
P(1,3)	100%	0.013 (± 0.037)	-0.046 (± 0.104)	0.062 (± 0.087)	-0.097 (± 0.130)	-0.102 (± 0.281)	-0.064 (± 0.091)	85%
P(2,3)	100%	-0.014 (± 0.124)	-0.068 (± 0.215)	-0.057 (± 0.180)	-0.200 (± 0.361)	-0.345 (± 0.707)	-0.136 (± 0.293)	90%
P(3,3)	100%	-0.014 (± 0.030)	0.079 (± 0.116)	0.056 (± 0.097)	0.034 (± 0.047)	0.128 (± 0.340)	0.034 (± 0.031)	95%
Total	100%	-0.021 (± 0.050)	0.008 (± 0.131)	0.021 (± 0.110)	-0.008 (± 0.103)	0.009 (± 0.461)	0.001 (± 0.084)	93.3%

すべてのピンの検出に成功したにも関わらず、ラック装填の成功率が全体で 100%にならなかった要因の一つとしてピン位置の検出誤差がある。ラック装填の成功率が 100%となっている P(1,2), P(2,2)とその他のピン位置の検出精度を比較すると Z 軸成分において、2~4 倍誤差の値が異なっている。図 3-10 のように、装填成功のためにピンが計測されるべき円柱状のエリア（水色）と PSD から得られた点 $P_A(i,j)$ （赤）をプロットする。図 3-10A, 3-10B に示すラック装填が 100%成功した P(1,2)では円柱エリア内にプロットした点すべてが収まっているのに加え、狭い範囲に検出した点が密集している。一方、図 3-10C, 3-10D に示す P(2,1)の様に一部装填に失敗しているピンについては円柱エリアから大きく逸脱した点は無いのものの、検出した点が分散していた。これを図 3-10D に示す様に $Y=0$ の位置における X-Z 断面で確認すると、Z 軸成分の誤差によるプロットの上下方向のばらつきが確認できる。これは装填の成功率が 100%とならなかった他のピンにおいても同様の傾向を示した。オフラインティーチングにおける動作精度は、システムを構成するセンサの分解能やロボットアームの動作精度に依存する。そこで、Bürgermeister のラック装填事例をオフラインティーチングでの要求動作精度と仮定すると、1mm 程度の位置決めが要求精度となる [54]。これに対し、本研究では対象とするワークの穴径が 1.1mm、ラックのピン径が 0.8mm のため、許容される誤差は $\pm 0.15\text{mm}$ とさらに高い精度が要求される。構成するロボットアームの位置繰り返し精度は $\pm 0.03\text{mm}$ であり、許容誤差範囲に占める位置繰り返し精度の比率は 20% ($=0.03/0.15$) であるため動作精度は十分に高いと言える。一方、ピン径 0.8mm に対し使用したレーザセンサのスポット径は 0.5mm であり、ピン径に占めるスポット径の比率は 62.5% ($=0.5/0.8$) であるため精度が十分に高いとは言えない。このため、レーザセンサの動作周波数を 3kHz, A/D コンバータのサンプリング周波数を 4kHz (使用機器の限界)、ロボッ

トアームの動作速度を 10mm/s とすることで計測点数によって補完している。したがって各ピン位置の検出精度は設定した許容誤差 $\pm 0.15\text{mm}$ 内に収まっている状況であっても, RLRS の各要素の誤差が累積することによってラック装填に失敗した可能性が示唆される。成功率をさらに向上させるためには, 各要素が持つ誤差を一層小さく抑えるためのアルゴリズムなどを追加していく必要がある。

本論文では 1 種類のラック形状をモデル化し評価試験を実施したが, 非接触センシングによるピン(棒形状の物体)の認識手法, およびピンに穴を通す運動計画策定アルゴリズムは応用展開が可能である。特に機種依存性について, 本対象作業あるいは類似作業においてピン径とホール径の大きさの差異が $\pm 0.15\text{mm}$ 以上, かつこの差異を検出可能な非接触センシング機器への代替, また当該差異よりも繰り返し動作における誤差量が小さいロボットアームによる構成であれば他機種への代替が可能と示唆される。

最後に RLRS の実用化の展望について, 本システム構成ではロボットアームがツールを交換する工程で 25 秒, ラックを走査する工程 (10mm/s, 15 秒/3 本, 5 秒/本), ワーク 1 つをピンに装填する工程が 15 秒, ピン座標や姿勢の算出に要する時間が 5 秒とから, ラック片面が 48 ピン構成のときタクトは 990 秒となる。これに対し我々の観察結果では, 実際の作業者がラック 1 面あたりに要する時間が約 240 秒であることを鑑み, 本システムを 4 式用いて 2 台のラック両面 (4 面) に対しラック装填作業を実施することにより, ラック片面当たり 247.5 ($=990/4$) 秒となり実用的なレベルでの動作が期待できる。

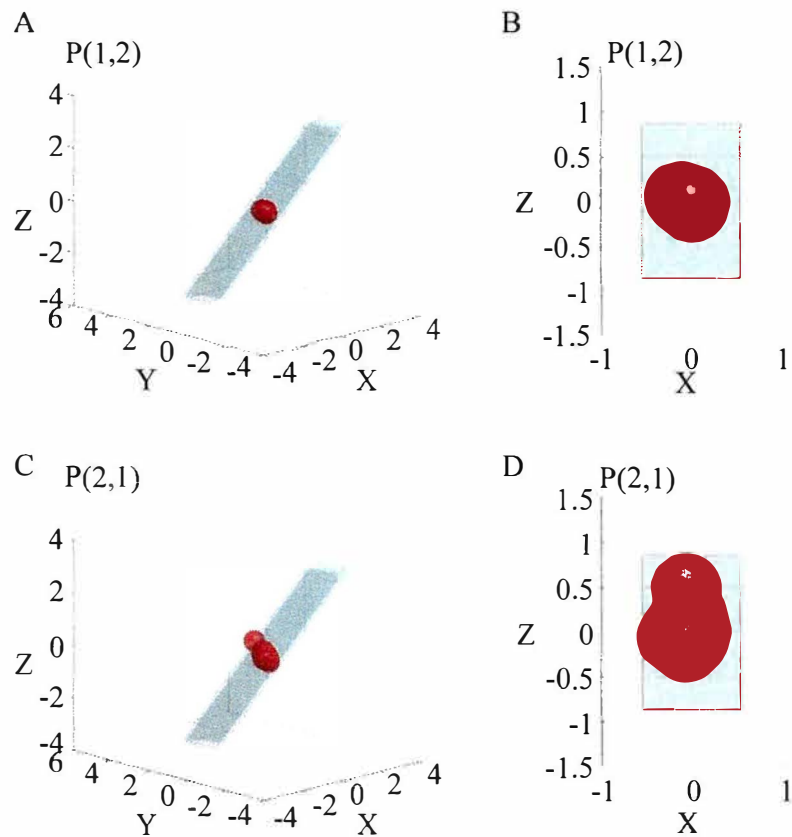


図 3-10 ピンの測定位置誤差を可視化した典型例.

赤点は PSD による $P_A(i,j)$ の測定結果であり、赤点の直径はピンの直径、赤点の位置は誤差の量を表す。また、水色はラック装填を成功させるためにピンが測定されるべき領域を表している。(A) (C) は俯瞰図、(B) (D) は $Y=0$ 時の X-Z 断面図を示す。

3.5 結言

本研究では，レーザセンサを用いたオンライン非接触センシングによってラックのピン位置及び姿勢を計測し，その計測データに基づいたロボットアームの運動計画策定アルゴリズムの構築を行った．さらに，このアルゴリズムを実装したオンライン非接触センシング式微細ワーク用ラック装填作業支援ロボットシステムのプロトタイプを開発し，微細ワークを使用した実験的検証を行った結果，構築したアルゴリズムを実装したロボットシステムによって微細ワークのラック装填作業を自動で達成可能なことを確認できた．

第4章 総括論議

本論文では、非接触センシングを用いて作業者に頼っている様々な作業支援技術を構築するため、第2章でイカ定重量切断作業支援システム、第3章でラック装填作業支援システムの研究・開発をそれぞれ実施した。

イカ定重量切断作業支援システムは、対象の3次元形状を非接触センシングによって測定し、一定重量となる切断位置を作業者へ提示するシステムである。このことから、魚・肉・野菜などイカ以外の食品を対象とした定重量切断作業にも展開が可能である。さらに、外形上に合わせて一定形状の製品を最大数切り出す切断位置の提示も可能なことから、食材だけでなく布・皮・木・石など様々な物体を対象とした切断作業の作業アシストが可能である。

ラック装填作業支援システムは、ピンの位置・姿勢とワークの穴位置を非接触センシングによって測定し、ロボットアームの運動計画を自動で更新することで、ピンにワークの有する穴を通す作業を自動化で達成するシステムである。このことから、小売店などで良く見られる釣り下げ型陳列棚への商品補充作業の自動化にも展開可能である。留意点として、商品種別や店舗規則によって陳列商品の順序入れ替えが必要とされる場合は、すでに陳列された商品を一度回収する手法を追加で構築する必要がある。

以上の様に、対象とした作業と異なる作業についても、非接触センシングを用いた作業支援システムは展開可能である。また、構築したシステムをベースとして再度システムインテグレーションを行うことも可能であり、対象作業に合わせた改修・改造作業を繰り返すことで、より多くの省力化・自動化が進んでいない作業に対して、作業支援システムの導入を促進することが可能である。

第5章 結論

本論文では、作業者による手作業で行われている様々な作業を非接触センシングを使用することによって作業者の負担軽減や作業に必要とされる技能レベルを低くするための技術開発を行った。

第2章では、イカ切断作業支援という課題に対し、非接触センシングとプロジェクションマッピングを組み合わせることで、イカの3次元形状から切断位置を自動で決定するアルゴリズムと、決定した切断位置を作業者に対して提示する定重量切断作業支援システムを構築した。構築したシステムによって、熟練作業者でなくても、イカ定重量切断作業へ従事可能とする下地を構築できた。

第3章では、レーザセンサを用いたオンライン非接触センシングによってラックのピン位置及び姿勢を計測し、その計測データに基づいたロボットアームの運動計画策定アルゴリズムの構築を行った。さらに、このアルゴリズムを実装したオンライン非接触センシング式微細ワーク用ラック装填作業支援ロボットシステムのプロトタイプを開発し、微細ワークを使用した実験的検証を行った結果、構築したアルゴリズムを実装したロボットシステムによって作業者に頼らずに微細ワークのラック装填作業を自動で達成可能なことを確認できた。

第4章では、第2章、第3章で構築した作業支援システムについて、対象とした作業と異なる作業への展開と、このことによる省力化・自動化が進んでいない分野での作業支援システム導入の可能性を示した。

以上のことから、非接触センシングを活用したシステムを構築することによって、人手不足などが深刻化している製造現場などにおいて、熟練作業者に頼らざるを得なかった困難な作業に対し、技能が未熟な作業者でも従事できる環境を整えることができるのに加え、負担の大きい繰り返し作業からの作業者解

放に役立てることで、加工・製造業が抱える人手不足の解消に貢献できるもの
と考える。

参考文献

- [1] 堤 隆, “後期旧石器時代の石器群と寒冷環境への適応戦略”, 第四紀研究, 42, 3 (2003), 205-218
- [2] 鹿田 洋, “穿孔技術の史的変遷 (キーノートスピーチ)”, 精密工学会学術講演会講演論文集 (2017 年度精密工学会春季大会), 2017S, (2017), 723-724
- [3] 木本 恭司, 青木 繁, 平井 三友, 藤原 徳一, 丸茂 榮佑, 久保井 徳洋, 三田 純義, 阪部 俊也, 成沢 哲也, “機械工学概論”, コロナ社 (2002)
- [4] 三輪 茂雄, “石臼の歴史を訪ねて”, 粉体工学研究会誌, 11, 10 (1974), 581-591
- [5] 緒方 正則, “古代世界の技術 : エジプト・オリエント・ギリシャ・ローマ”, 日本機械学会誌, 109, 1050 (2006), 407-410
- [6] 高田 博, “産業革命と技術ロードマップ”, 交通・物流部門大会講演論文集, 2016.25, (2016), CL2-
- [7] 示村 悦二郎, “自動制御の源流”, 計測と制御, 24, 8 (1985), 739-748
- [8] 三箇山 正雄, “農用ディーゼル機関の動向と今後の課題”, 農業機械学会誌, 39, 4 (1977-1978), 539-543
- [9] 高田 芳治, 長江 昭充, “近代工作機械の 200 年とこれから”, 精密工学会学術講演会講演論文集 (2020 年度精密工学会春季大会), 2020S, (2020), 814-815
- [10] 山中 正, 谷川 静男, “自動車部品工業における自動組立の歩み”, 精密機械, 39, 459 (1973), 362-367
- [11] 吉田 英一, “第 3 章 車体溶接工場における自動化”, 電気學會雑誌, 104, 5 (1984), 405-409
- [12] 内山 勝, “自動車生産ラインにおける柔軟物取り付け作業の自動化”, 日本ロボット学会誌, 27, 10 (2009), 1086
- [13] 大泉 淳, “電子工業における自動組立の歩み”, 精密機械, 39, 459 (1973), 347-355
- [14] 貴志 奈央子, “半導体製造工程の標準化と差別化”, 赤門マネジメント・レビュー, 6, 6 (2007), 203-216
- [15] 内閣府, “令和 3 年版高齢社会白書”, <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2021/html/zenbun/index.html>
- [16] 総務省, “平成 30 年版情報通信白書”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/pdf/index.html>
- [17] 厚生労働省, “令和元年版 労働経済の分析—人手不足の下での「働き方」をめぐる課題について—”, <https://www.mhlw.go.jp/stf/wp/hakusyo/roudou/19/19-1.html>

- [18] 加藤秀雄, “中小製造業における製造現場の変化と技能継承の課題—小企業の技能継承の手がかりを求めて—”, 国民生活金融公庫総合研究所, 調査季報, 86 (2008), 43-66
- [19] 佐々木貴文, “水産業における外国人労働力の導入実態と今後の展望”, 水産振興, 54, 6 (2020), 4-45
- [20] 小菅 一弘, “システムインテグレーションの最前線 第1回: システムインテグレーションとは”, 計測と制御, 43, 11 (2004), 903-907
- [21] 野田 哲男, “生産分野に向けた作業知能: 産業用ロボットを進化させる知能化技術”, 日本ロボット学会誌, 31, 1 (2013), 10-13
- [22] Nasser Jazdi, Behrang Ashtari Talkhestani, Benjamin Maschler, Michael Weyrich, “Realization of AI-enhanced industrial automation systems using intelligent Digital Twins”, Procedia CIRP, 97(2021), 396-400
- [23] Anna Motienko, “Integration of information and communication system for public health data collection and intelligent transportation system in large city”, Transportation Research Procedia, 50(2020), 466-472
- [24] Hatice Sozer, Fatih Tuysuz, “Dynamic evaluation method to increase the effect of the automation system on the building energy performance”, Journal of Cleaner Production, 253(2020), 119811,1-13
- [25] 森村 正直, “センシング技術[I]”, 計測と制御, 24, 11 (1985), 1034-1041
- [26] 梅田 和昇, 寺林 賢司, “アクティブステレオ法による距離画像センサー (実応用が進む三次元空間計測・認識技術)”, 応用物理学会分科会日本光学会, 41, 5 (2012), 275-280
- [27] 森本 吉春, 松井 徹, 藤垣 元治, “光干渉縞や投影格子の位相を三次元形状・変形計測”, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 47, 5(2006), 10-19
- [28] 井上 学, 和田 俊和, “信念伝搬型位相シフト法による三次元形状計測”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011)論文集, (2011), 1279-1285
- [29] 千葉 直也, 橋本 浩一, “LTM スパース推定による三次元計測の白飛び対応とばら積みピッキングロボットへの応用”, 精密工学会誌, 86, 1 (2020), 106-112
- [30] 高須 瑞輝, 原田 研介, 万 偉偉, 小山 佳祐, “複数種類の物質が含まれる絡みやすい物体のばら積みピッキング”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2021), 1P1-J08
- [31] 三好扶, 佐藤秀太, 佐々木誠, 明石卓也, 小笠原正勝, 津田保之, “缶詰製造工程の定量充填作業に資するロボットシステム (試作モデル) 開発”, 日本食品工学会誌, 19, 3 (2018), 173-184

- [32] Ekrem Misimi, Elling Ruud Øye, Aleksander Eilertsen, John Reidar Mathiassen, Olav Berg Åsebø, Tone Gjerstad, Jan, “GRIBBOT - Robotic 3D vision-guided harvesting of chicken fillets”, Computers and Electronics in Agriculture, 121 (2016), 84-100
- [33] 全国いか加工業協同組合, “イカ学 Q&A”, <http://www.zen-ika.com/>
- [34] 石川 武彦, “水産加工業の現状と課題— 水産加工資金法改正案をめぐる論議 —, 立法と調査 (参議院事務局企画調整室編集・発行), 343(2013), 47-68
- [35] 株式会社なんつね, “スペシャルフードスライサー”, <https://www.nantsune.co.jp/products/pdf/HBC-2.pdf>
- [36] 株式会社千葉工業所, “フードスライサー EN-250”, <https://www.chiba-ind.co.jp/product/food-slicer-en-250/>
- [37] 株式会社なんつね, “3D 定量スライサー NTD-300”, https://satr.jp/files/download/0c026e68571743cf/NTD-300_202011.pdf
- [38] 株式会社ニッコー, “3D インテリジェンス ポーションカッター Type M”, <https://www.k-nikko.com/product/type-m/>
- [39] 花原和之, 多田 幸生, “工学的最適パターン配置問題の取扱い; 子問題を単純に定式化してみる”, 平成 28 年電気学会電子・情報システム部門大会講演論文集, (2016), 906-910
- [40] 斉藤一哉, 野島 武敏, “平面/空間充填形に基づく新しい軽量高剛性コアパネルのモデル化”, 日本機械学会論文集 A 編, 73, 735 (2007), 1302-1308
- [41] 一般財団法人 プロジェクションマッピング協会, “プロジェクションマッピングについて”, https://projection-mapping.jp/?page_id=948
- [42] 渡邊 敏之, “プロジェクションマッピング”, 映像情報メディア学会誌, 67, 2 (2013), 166-168
- [43] 橋本 直己, 櫻井 淳一, “インタラクティブなプロジェクションマッピングの実現”, 映像情報メディア学会誌, 67, 2 (2013), J60-J63
- [44] 沖電気工業株式会社, “組立ライン連携 IoT ソリューション”, <https://www.oki.com/jp/esc/pas/>
- [45] アクイティ株式会社, “マニュアルなしでネジ締め作業をミスゼロに改善”, <https://www.acuity-inc.co.jp/pickups/cases/applications/20210324/>
- [46] 水流添 弘人, 重野 寛, 岡田 謙一, “MR 組立作業支援システムにおけるアナモルフォーズとプロジェクションマッピングの利用”, 情報処理学会論文誌, 6, 1 (2018), 8-16
- [47] 土井 康弘, 河辺 峻, “レーザ光切断法による 3D 物体の認識”, 計測自動制御学会論文集, 9, 1 (1973), 16-21

- [48] 高 志鵬, 西田 大, 水谷 彰夫, 菊田 久雄, “3 台のカメラを用いたステレオカメラ法による精密ステージの高精度位置・姿勢計測”, 精密工学会学術講演会講演論文集 (2017 年度精密工学会秋季大会), 2017A, 207-208
- [49] 今井 一宏, 興梠 元伸, “飛行時間(TOF)計測の性能を飛躍的に向上させる光コム干渉技術”, 計測と制御, 50, 2 (2011) 112-117
- [50] 野坂 健一郎, 荒木 秀和, 中原 智治, “位相シフト法インライン 3 次元外観検査システム (特集 生産技術)”, パナソニック電工技報, 57, 3 (2009), 29-34
- [51] 伊勢居 良仁, 加藤 朋也, 大杉 正洋, 太田 武, “LED ドットパターン投影法による熱延鋼板平坦度計の開発”, 鉄と鋼, 105, 1 (2019), 20-29
- [52] Advanced Plating Technologies, “THE DIFFERENCES BETWEEN BARREL AND RACK PLATING”, <https://www.sharrettsplating.com/blog/the-differences-between-barrel-and-rack-plating>
- [53] 小林善秋, “引っ掛け (ラック) めっきと装置”, 表面技術, 68, 11 (2017) 582-585
- [54] Daniel Bürgermeister, “Automated Loading of Plating Racks”, International Surface Technology, 12, 2 (2019), 40-41
- [55] T. Nishimura, Y. Suzuki, T. Tsuji, and T. Watanabe, “Peg-in-hole under state uncertainties via a passive wrist joint with push-activate-rotation function”, 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), (2017), 67-74
- [56] Jingzhou Song, Qingle Chen, Zhendong Li, “A peg-in-hole robot assembly system based on Gauss mixture model”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 67, (2021) 101996
- [57] Shouren Huang, Kenichi Murakami, Yuji Yamakawa, Taku Senoo, Masatoshi Ishikawa, “Fast Peg-and-Hole Alignment Using Visual Compliance”, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2013), 286-292
- [58] 周桑完, 前田 浩一, “レーザ式変位センサを用いたロボットマニピュレータの手先微小変位測定装置の開発とその精度検定”, 日本ロボット学会誌, 13, 3 (1995), 383-389

発表論文・特許

本論文の一部内容は以下の雑誌に掲載予定である。

浅石健太，三浦修平，千葉裕，三好扶，“めっき工程における微細ワークのラック装填作業自動化アルゴリズム構築”，精密工学会誌, XX, XX (XXXX), XXX-XXX.

(2021/11/7：初回投稿，2022/2/15：掲載決定)

本論文の一部内容は以下の学会において発表されている。

Kenta Asaishi, Syuhei Miura, Hiroshi Chiba, and Tasuku Miyoshi, "Development of Rack Loading System for Plating Process", Proceedings of 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2021)

本論文の一部内容は以下の特許に出願済みである。

佐藤眞平，三好扶，浅石健太，小濱健，米澤伸；加工支援装置及びプログラム，特開 2021-109248（公開日：令和 3 年 8 月 2 日，アキュイティ株式会社，国立大学法人岩手大学，サンコー食品株式会社）

謝辞

大学入学から修士までの6年間の指導だけでなく、社会人博士として再度大学で研究を行うきっかけを与えていただき、さらに4年間に渡り懇切丁寧に指導いただいた岩手大学理工学部 三好扶教授に特別の感謝を申し上げます。

併せて、お忙しい中副査をお引き受けいただいた岩手大学理工学部 萩原義裕教授、同 西村文仁教授、同 佐々木誠准教授にも感謝申し上げます。

働きながら大学へ通うことをご許可いただきました、公益財団法人いわて産業振興センターの皆様や、シー・アンド・シー株式会社の皆様に深く御礼申し上げます。

加えて、本論文で取り上げたテーマに取り組ませていただきましたサンコー食品株式会社 代表 小濱健様、米澤伸様、株式会社東亜電化専務取締役 三浦修平様、第二製造部（兼）開発技術部 部長 千葉裕様には、貴重な機会を頂けましたこと大変感謝しております。

本研究を進めるにあたり、ご協力いただいたアキュイティ株式会社 代表取締役 佐藤眞平様、和田悟様に深く感謝申し上げます。

本研究の推進に当たりご協力いただいた、三好研究室の皆様にも感謝しております。

最後に、働きながら社会人博士として大学へ行くことを後押ししていただいた、父母をはじめとした家族に深く感謝いたします。