

溶接されたボルトのスパッタ自動判別装置の開発

関東職業能力開発大学校 菅野 金一
 関東職業能力開発大学校 矢野 牧人
 関東職業能力開発大学校 中村 聡
 関東職業能力開発大学校 神足 昭男
 清国産業株式会社 大鷲 浩司

Development of a device that automatically discriminates spatter on welded bolts

KANNO Kinichi, YANO Makihito, NAKAMURA Satoru,
 KOUTARI Akio, OWASHI Kouji

要約 本内容は、企業依頼により当校において開発課題実習のテーマとして取組んだ、その成果に対する実践報告である。近年、自動車のEV化および軽量化のため高張力鋼材が多用されているが、その加工性は従来鋼材より低い。特に溶接性は製品へのスパッタ付着量の増加などの溶接欠陥により低下する。本装置は、高張力鋼板にM8ボルトが2カ所抵抗溶接された接合部のスパッタ付着の自動検査装置である。現行、検査は人手により1個のワークにつき検査時間30秒で処理している。夜間の人員確保や、コスト高が問題となり、自動でスパッタの有無を検査する装置が必要とされた。装置の主な仕様は以下である。(1)ワークの投入と取り出しは手動で行う。(2)画像処理部で大きなスパッタの有無を判定する。(3)検査用ナット着脱検査で、ボルトへ強固に付着したスパッタおよびボルト底部へ付着した0.5mm以上の大きさのスパッタの有無を検査する。(4)良品と不良品をピッキング装置により仕分ける。本報告で製作された装置はほとんどの要求仕様を満たした。しかしながら、実用機として使用するために以下の課題が明らかとなった。(1)「やけ」のあるスパッタは画像処理で判定できるが、「やけ」のないスパッタは誤判定となった。(2)ナット締め機構のコラム部が片持構造であるため、時間の経過とともにナットとボルト間に位置ずれが生じた。(3)ナット締め機構の位置調整に調整者の技量による必要時間のばらつきが生じた。

I はじめに

1 背景

環境問題の中で地球温暖化対策が最重要課題となっている。特にCO₂削減が大きな課題である。欧州連合(EU)全体では温暖化ガスの排出量を55%削減することが目標とされ、自動車分野では、欧州委員会(EC)が自動車の走行中に関する二酸化炭素(CO₂)排出量規制の強化にのりだした。電気自動車(EV)の普及を押し進めるため35年までにCO₂を100%削減し、事実上、エンジン車の販売を禁止する方針であるとみられる。自動車メーカーはEV化の加速が更に迫られている。

また、自動車は地球環境に配慮し、軽量化も推し進められており、マルチマテリアル化が進展する見通しである。自動車構造材は、これまで鉄鋼材料が主体であった。しかし、軽量化により非鉄金属であるアルミニウム合金やマグネシウム合金、チタン合金が多用されることとなり、非金属としては、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)などの複合材も軽量化素材として採用されている。

鉄鋼材料では従来使用していた冷間圧延鋼板(SPC材)から高張力鋼板(ハイテン材)が多用され始めている。その加工性は一般に従来の鋼材より低くなる。接合加工においても同様で自動車業界で多用される抵

抗溶接の溶接性も低下し、溶接欠陥が発生し大きな問題となっている。

スパッタの対策として、抵抗溶接の電流、通電時間、加圧力などの溶接条件の検討や治工具の改善が図られている。しかし、不良発生ゼロにはならないのが現状であり、その検査装置の開発が望まれている。

2 依頼内容

今回、取りあげられた自動車部品（ワーク）は、高張力鋼板にM8 ボルトが抵抗溶接された2種類である。現在、ワークの検査工程については、人手により全数確認を昼夜で行っており、夜間の人員確保が難しくコスト高になることが問題となっている。また、当ワークは今後増産が見込まれている。ワークと検査用治具を図1に、作業風景を図2に示す。

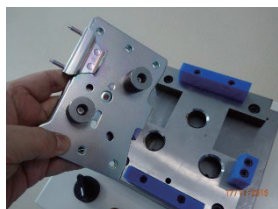
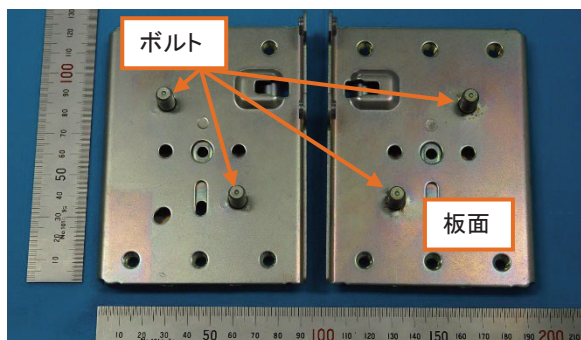


図1 ワークと検査用治具



図2 作業風景

ワーク検査の目的は付着したスパッタの確認である。その工程では、人手により検査用ナットを手締めした後、検査用治具に押し当て、2カ所のナットと板面の合計3カ所のリミットスイッチが押された場合、良品とし、それ以外を不良品と判定している。1個のワークにつき検査時間は30秒で処理している。ワークは図3に示される2種類である。



(a) ワーク A (b) ワーク B

図3 ワーク2種

また、図4にスパッタの画像を示す。

以上の様に、本報告の依頼内容と目的は2種類のワークのボルトおよびその接合部周辺に付着したスパッタ検査の自動化とその装置の開発である。



図4 スパッタ

II 全体概要および仕様

1 全体概要

製作した装置の全体構成を図5に示す。製作する装置の主な機能は画像処理機能、ナット締め検査機能および仕分け機能である。ワークの装置への投入および検査後の取り出しについては手動で行う。投入されたワークは、画像処理部で大きなスパッタの有無を判定される。ここで、スパッタが検出された場合には以降の検査工程を省略することも可能な装置とした。

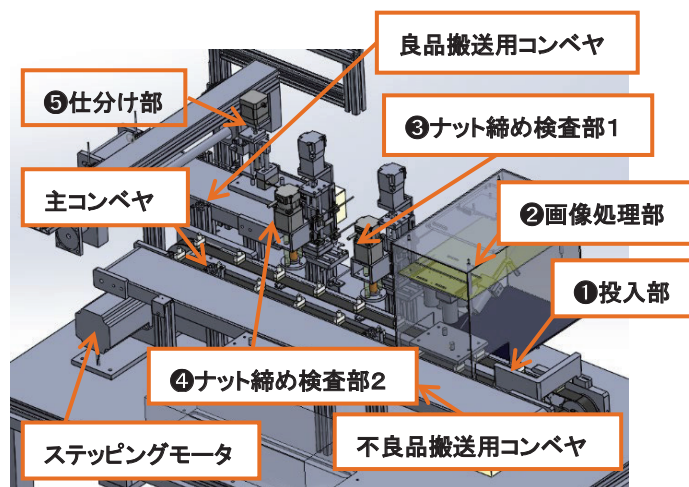


図5 装置の全体構成

次工程はナット締め検査部(図5の③および④)で、自動で検査用ナットをM8ボルトへ挿入および取出しを行い、ボルトへ強固に付着したスパッタおよびボルト底部へ付着した0.5mm以上の大きさのスパッタの有無を検査する。最終工程は仕分け部(図5の⑤)となり、良品と不良品をピッキング装置により選別し良品用と不良品用のコンベヤへ搬送する。1個のワークについては検査時間を15秒以内とした。以上の①投入部から⑤仕分け部までのワーク搬送は主コンベヤ⁽¹⁾(ステッピングモータ駆動)で行う。

2 装置仕様

装置の主な仕様を表1に示す。タクトタイムについては15秒/個に設定した。理由を以下に示す。依頼企業では現在人手により昼夜含めて2000個のワークを検査している。しかし、夜間に人が集まらず、昼(8時間)のみで同数を処理できる装置が必要との要望があったためである。装置サイズは設置する場所の周辺装置との兼ね合いより決定した。

表1 開発仕様

項目	開発仕様
装置サイズ	W1500 mm×D900 mm×H1200 mm
ワークの種類	指定のワーク2種が検査可能
画像処理	全ワークの画像(エビデンス)保存
	1 mmを超えるスパッタの検出
ナット締め検査	0.5 mm以上のスパッタを判別
	締め付けトルク 0.1~0.3 N・m
タクトタイム	15秒/個
成功率	100%

検査用ナットのボルトへの締め付けトルクの設定は、当初依頼企業より0.49~1.47 N・mであった。この値は製品としてM8ボルトにナットを締結する場合の値であり、検査のため一時的にナットを締結する場合とは異なる。予備実験を行った結果、0.1~0.3 N・mで十分であることが検証された。全ワークのエビデンス保存が必要なことから撮影したワークの画像は1カ月間全て保存する仕様とした。

また、スパッタ検出に関する企業の要求仕様は、ナット締め検査により、ボルトへ強固に付着したスパッタおよびボルト底部へ付着した0.5 mm以上のスパッタの有無を検出することである。それに対して開発仕様では、画像処理によるスパッタ検出の可能性を探る目的で、1 mmを超えるスパッタ検出を画像処理の仕

様として追加した。将来的にスパッタ検出の方法として画像処理が企業から認められた際には、ナット締め検査の前工程で1 mmを超える大きなスパッタを画像処理で検出し、ナット締め検査の工程を省いて不良品と判定することも可能な装置とした。

ワークの投入および排出は人手で行い装置内でのワークは自動搬送し、2種類のワーク(図3)に対応した検査装置の仕様とした。

III 画像処理機能

1 概要

画像処理部は、画像処理によるスパッタ有無の検査機能および検査対象である全てのワークの撮影・保存機能を有する。検査対象となるワークは、図3に示すようにボルト2本が対称的に配置された2種である。そこで、画像処理を使った検査のため、ワークの種類ごとに2台1組、合計4台のカメラをボルトの真上に配置し、ボルトの画像を撮影する。

画像処理部の構成を図6に示す。シングルボードコンピュータ(Raspberry Pi 3 B+)をメインコントローラとし、画像処理用FPGAボード(PINQ Z2)および周辺装置で構成する。シングルボードコンピュータの専用カメラ接続用ポートが1個のみであるため、専用の拡張ボードを使用し、4台のカメラを切替えて接続する。ワーク記録用撮影には、USB接続のカメラを使用する。また、画像や検査データの保存のため、USBメモリを接続する。さらに、オンラインストレージサービスにも短期間保存し、外部からデータの閲覧やダウンロードが可能である。

検査装置本体の制御に使用するPLCとの通信は専用のデータリンク機能⁽²⁾を使用する。ワークの種類、画像処理による合否データや検査用ナットによる合否データの受け渡しを行う。

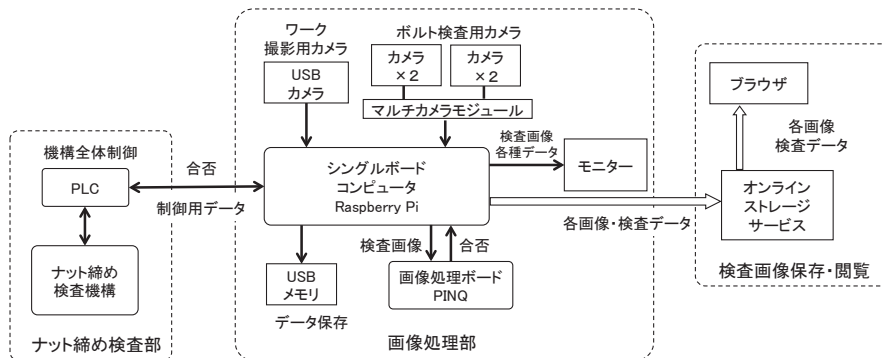


図6 画像処理部構成図

2 画像撮影

検査用カメラとして、シングルボードコンピュータ用インタフェースをもつ Arducam 8MP Sony IMX219 カメラモジュールを 4 台使用した。レンズは、焦点距離 25 mm である。シングルボードコンピュータとの接続には、専用のマルチカメラモジュールを使用した。

ワーク全体の撮影用カメラには、シングルボードコンピュータの USB ポートに接続可能な産業用カメラ DFK22BUC03 (The Imaging Source 社製) を使用した。ワークの対面に鏡を設置し、図 7 に示すようにワークのボルト周辺を 1 枚の画像に収めることができたようにした。

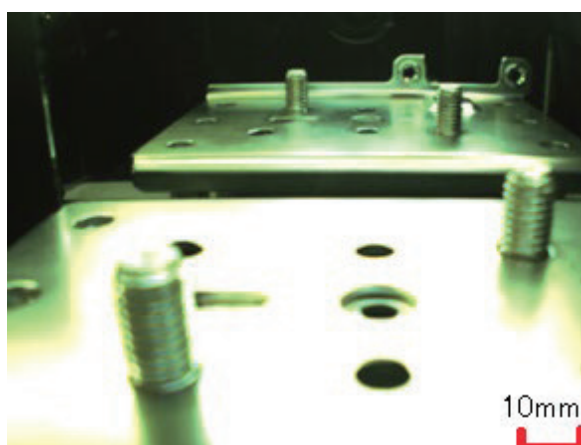


図 7 ワーク画像

暗箱内の照明は、バー型 LED を四方に配置し、ワーク全体に光が当たるようにした。また、乱反射を低減するために内面に黒色のラシヤ紙を貼り付けた。

3 画像処理による合否判定方法

スパッタが発生した際に、スパッタ近傍で「やけ」と呼ばれる黒い変色が生じる (図 4)。そこで、画像処理によりボルト周辺の黒い「やけ」を検出することでスパッタの有無を判定する方法を採用した。

ボルト周辺に黒いインクを付け、模擬的に「やけ」を発生させたワークの撮影画像を図 8 に示す。画像の中からボルト周辺の黒色を検出することで、図 9 のように「やけ」の部分を検出することができた。1 本のボルトでの検査時間は約 3 秒であり、要求されるタクトタイム以内で検査可能である。また、30 個の検査を行い、すべて正しく合否を判定できた。しかし、この方法では、「やけ」の無いスパッタは誤判定となる課題を残した。

本方法の他に、良品画像と検査品画像の差分をとる

ことでスパッタを検出する方法を検討した。この方法では、ワークの位置ずれの補正、光の反射やスパッタ以外の傷の影響を取り除くための処理が必要である。ボルト 1 本あたりの総処理時間が約 8 秒となり、本装置の画像処理ボードの処理能力では要求されるタクトタイム内に画像処理を完了することができない。また、機械学習による判定方法も検討したが、処理時間が約 40 秒、検出精度が約 70%であった。そのため、これらの方法は本装置には不適切と判断した。

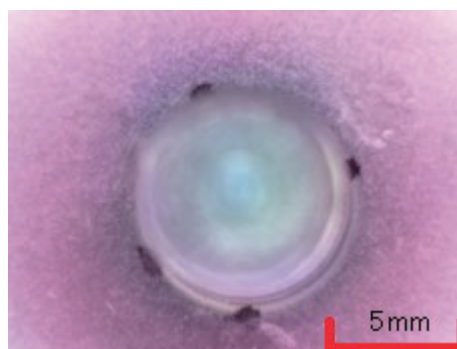


図 8 模擬的なやけ

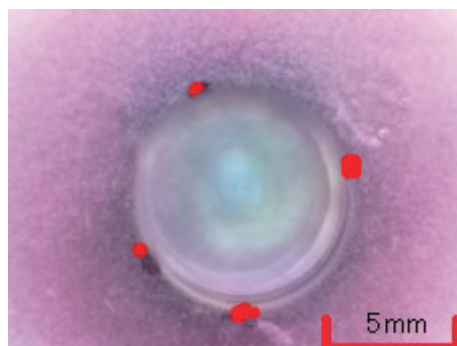


図 9 やけの検出結果

4 操作画面

検査プログラム起動画面を図 10 に示す。図 3 に示



図 10 検査プログラム起動画面

すように検査対象となるワークは2種類である。動作するワーク A とワーク B は混在することはない。ナット締め検査部と画像処理検査部は、検査開始時の設定に合わせて動作する。

図 11 に検査中のモニター画面表示例を示す。操作ボタンを左端と上端に配置する。ワークの撮影画像を中心に表示し、右側上下に2本のボルトの画像検査結果を表示する。また、検査総数、良品および不良品数を表示する。さらに、画面の切替えにより、検査履歴として過去1カ月間の良品、不良品数などをグラフ表示できる。

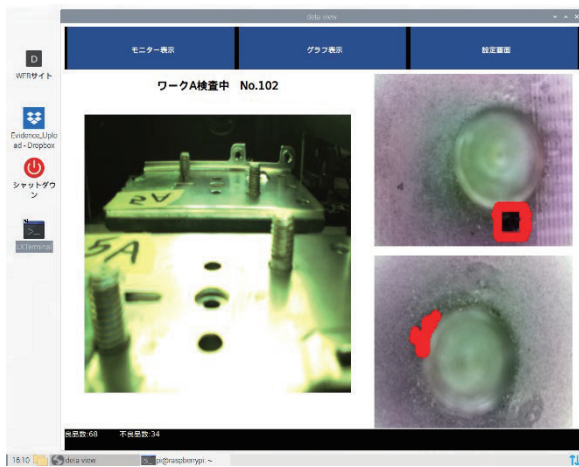


図 11 モニター画面

5 ワーク画像保存

適切に検査を行ったエビデンスとしてすべてのワークの画像を以下のように保存する。

- ① ワークのボルト周りをすべて撮影する。
- ② ローカルストレージへ1カ月間分の画像を保存する。
- ③ ネットワークストレージへの画像の保存とダウンロードができる。

ローカルストレージとして、容量 256 GB の USB メモリに1カ月間分の画像を保存する。1カ月が過ぎたデータは消去し、新しいデータを上書きする。また、ネットワークストレージサービスとして Dropbox を使用した。Dropbox の画像保存期間は3日間である。Dropbox からの画像ダウンロードのためにビジネスチャットツール Slack の機能を利用し、自動的にダウンロードする。

IV ナット締め検査機能

1 概要

ナット締め検査部では、2カ所の M8 ボルトに検査用ナットを自動で締めることにより、ワークの良否を判定する。開発した装置では、新たな検査法を探る目的で画像処理によるスパッタの検出を試みているが、現状ではナット締めによる全数検査が依頼企業からの要求仕様とされている検査方法のため、本機能が必要となる。

仕様のタクトタイム 15 秒/個を達成するため、ナット締め検査部はボルト1本ごとに2つの工程に分けた(図5)。図12はボルト1本分のナット締め検査部である。図3に示したように、ワークAとワークBはボルトの位置が異なるが、依頼企業の検査方法では2種類のワークは混在しない。そこで、ワークの切り替え時に、ナット締め検査部全体を図12のリニアガイドに沿って移動した後、専用治具で固定することにより、2種類のワークに対応した。専用治具は検査用ナットとワークのボルト位置が合うように設計・製作した。

2 機構

検査用ナットはワークのボルトを傷つけないよう真鍮製とし、ナット回転用にブラシレス DC モータ (BLDC モータ)、ナット送り用に AC サーボモータをそれぞれ用いた。これらのモータは PLC で制御している。

予備実験の結果、ナット回転用モータの軸と検査用ナットを剛体で接続した場合、ナットとボルト間のわ

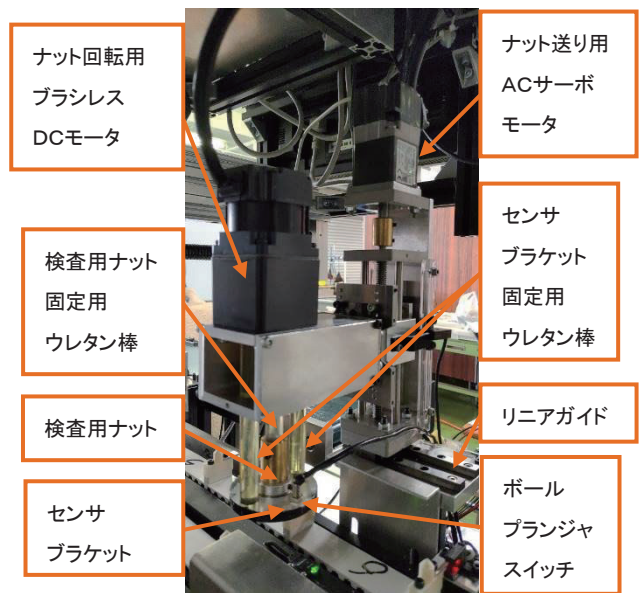


図 12 ナット締め検査部

ずかな位置ずれや傾きによりナットが正常に締まらないことがわかった。そこで、ナット回転用モータ軸と検査用ナットの接続部にウレタン材を利用したところ、ウレタン棒の柔軟な変形により、上記の位置ずれや傾きがあってもナットを着脱できる機構となった。

しかし、図 13 にみられるようにナット締め機構を支えるコラム部が片持構造のため、ナット締め検査を繰り返すと時間の経過とともにナット回転用モータの自重によりリニアガイドが傾く。その結果、検査用ナットとボルト間の位置ずれが大きくなり、ナットが正常に締まらなくなった。それを修正するためのリニアガイドの微妙な位置調整やウレタン棒の角度調整などはカン・コツで行っており、調整者はその技量を習得する必要がある。それ故、調整者によりメンテナンスの時間にバラツキが生じる問題を残した。

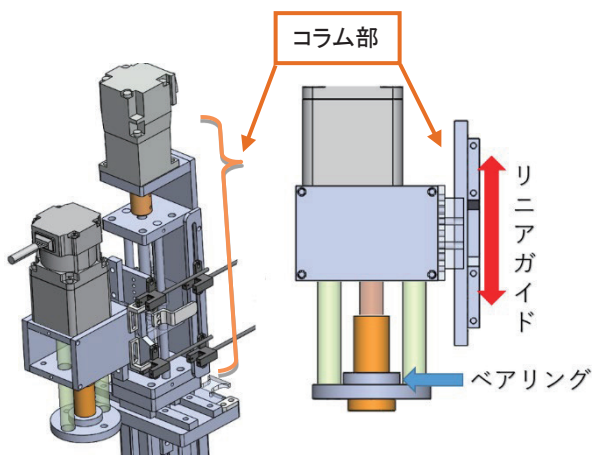


図 13 ナット締め機構 コラム部

図 14 のボールプランジャスイッチは、検査用ナットの底面とワーク板面の隙間 0.5 mm をしきい値として ON/OFF するように位置を調整した。

検査用ナットは回転可能な構造とするため、検査用ナットとセンサブラケットの間に軸受を設けた。一方、ボールプランジャスイッチは、回転しないが検査用ナットとともにボルトの位置に応じて柔軟に曲がる構造

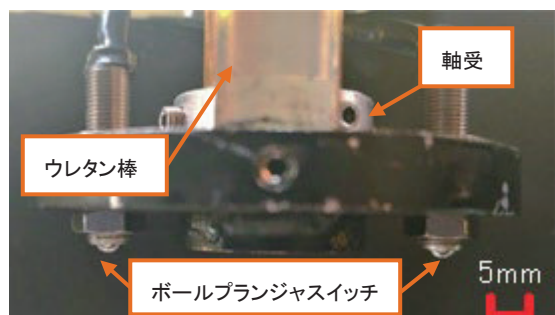


図 14 ボールプランジャスイッチ

とするため、センサブラケットを上部からウレタン棒で吊り下げた (図 12、図 14)。

3 検査手順

ナット締め検査のフローを図 15 に示す。ナット締め動作では、ナット 1 回転ごとに M8 ボルトのリード分だけナットを送る必要がある。開発した装置では、ナット送り用モータのパルス出力からナット回転用モータの回転数を算出している。

ナット回転用の BLDC モータとナット送り用の AC サーボモータはそれぞれトルク制限値を設定している。2 つのモータともにトルク制限値に達していない場合は、ナット締め動作を継続する。少なくともどちらか一方のモータがトルク制限値に達した場合は、下記のいずれかが考えられるため、ナット締め動作を停止し良否判定に移行する。

- ① 正常にナット締めが完了
- ② ナット締めの途中でスパッタ等の異物に接触または他の原因により正常にナットが締まらない。

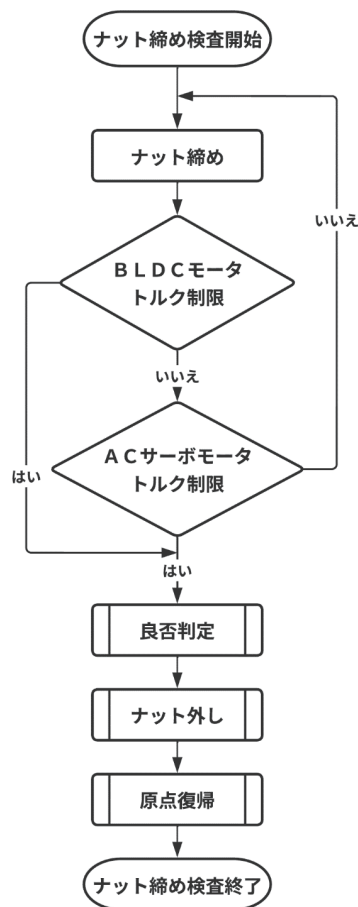


図 15 ナット締め検査のフロー

良否判定では、2つのボールプランジャスイッチがともにONの場合に良品と判定する。1つだけONの場合は、スパッタによりナットが傾いて停止した可能性があるため不良品と判定する。2つともOFFの場合は、上記②に該当するため不良品と判定する。良否判定後は、ナットを外し原点に復帰する。

V 仕分け機能

ナット締め検査部で検査されたワークを判定結果により仕分けるため、メインベルトコンベヤからワークを電磁石でピックアップし、良品と不良品のいずれかのコンベヤにプレースし選別する機能である。

仕分け機能は、ピックアップ部と選別部で構成されそれぞれについて詳細を説明する。

1 ピッキング部

ピックアップ部を図16に示す。メインベルトコンベヤ上のワークは電磁石で吸着され、ステッピングモータにより所定位置までリフトアップされる。

次に、リバーシブルモータ駆動で軸移動を行い、单相誘導モータで駆動する良品または不良品のベルトコンベヤ上までワークを移動する。この時、スムーズに軸移動させるためリニアガイドで支持する構造とした。その後、再びステッピングモータにより良品または不良品用のベルトコンベヤ上の所定の高さまでリフトダウンし、最終的に電磁石から脱着しワークをベルトコンベヤ上に置く。

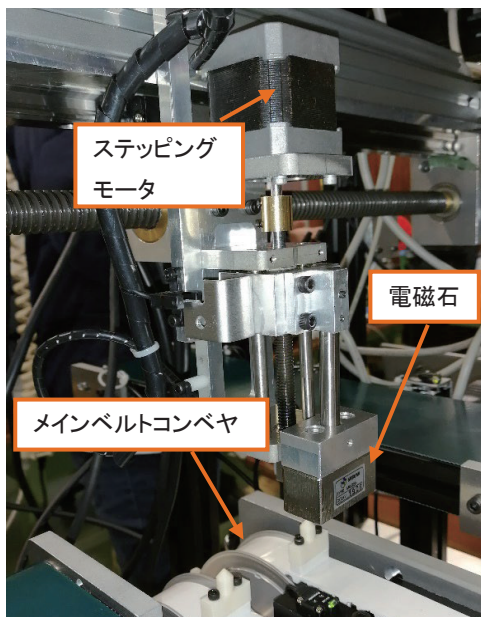


図16 ピッキング部

2 選別部

良品用および不良品用のベルトコンベヤを図17に示す。ワークはカウントされており、良品は3個、不良品は6個ベルトコンベヤ上に溜まった場合、装置の全動作は停止する。ワークのベルトコンベヤ上からの逸脱やワークの交差によるワークの傷等を防ぐためである。

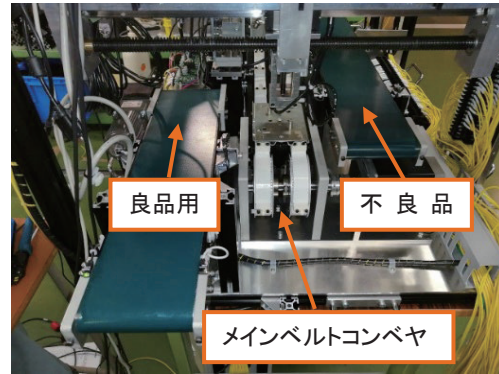


図17 良品・不良品用ベルトコンベヤ

VI 性能評価

製作した装置の開発仕様とその性能評価を表2に示す。表中の評価に示すように、装置サイズや2種類ワークへの対応など概ね仕様を満たした。

特に、依頼企業より要望の強かったボルトとワーク板面に付着した0.5mm以上のスパッタの検出とタクトタイム15秒以内を14.3秒に収めることで装置仕様を満たすことができた。

画像処理については、全ワークのエビデンス保存が可能となった。しかし、学生自ら課題設定した1mm以上のスパッタ検出については、スパッタを黒色の「やけ」として画像処理するため、「やけ」のないスパッタ検出については不可能であり今後の課題となった。

表2 性能評価

項目	開発仕様	評価
装置サイズ	W1500 mm×D900 mm×H1200 mm	○
ワークの種類	指定のワーク2種が検査可能	○
画像処理	全ワークの画像(エビデンス)保存	○
	1mmを超えるスパッタの検出	△
ナット締め検査	0.5mm以上のスパッタを判別	○
	締め付けトルク 0.1~0.3 N・m	○
タクトタイム	15秒/個	14.3
成功率	100%	98%

成功率は98%であった。その検査方法では、企業が1日に行っている検査数と同様にワーク A 1000 個、ワーク B 1000 個の計 2000 個の検査を行った。以下の3条件が満たされた時に成功と判定した。

- ① ナット締め検査が正常に作動する。
- ② 画像処理により異物を検知し不良とする。
- ③ 判定結果通りにワークを良品用、不良品用のコンベヤへピッキングする。

その判定により成功率を算出した。検査結果を表3に示す。誤判定の原因としては、①ナット締め検査で良品を不良品と判定したことである。これは、良品のナット締め検査中まれに、ナット回転用モータやナット送り用モータのトルク制限値に達し、不良品と判定されることがあったためである。逆に、不良品を良品と判定したことは2000個の検査中1度もなく、最も重要な企業の要求を満たした。

今後は上記3つの課題点を解決する装置を開発すると共に、依頼企業において実用機として使用して頂くことを切望する。

日本企業は、生産性向上を目指し自動機器の開発が必至となっている。この装置開発もその一端を担うことを願う。

【参考文献】

- (1) 倉西正嗣 監修、景山克三・菅野宗和・黒瀬元雄・勝田基嗣 著、大学課程 機械要素設計 (第2版)、オーム社、1984年、pp.163-171。
- (2) 三菱電機、FXシリーズマイクロシーケンサユーザーズマニュアル通信制御編、2019年5月、pp.D1-D99。

表3 検査結果

検査数	ワーク A 成功率[%]	ワーク B 成功率[%]
1~100	98	100
101~200	98	97
201~300	97	99
301~400	99	99
401~500	95	100
501~600	98	100
601~700	98	98
701~800	98	94
801~900	98	99
901~1000	100	96
全体	98	98

VII おわりに

開発した装置は企業の要求を概ね満たした。しかし、実用化に至るにはまだ課題が残る。その主な課題として以下3点が挙げられる。

- (1) 画像処理検査において、スパッタの判断を「やけ」として処理し、「やけ」のないスパッタは誤判定となった。
- (2) ナット締め機構のコラム部が片持構造であり、たわみによるナットとボルトの位置に変動が生じた。
- (3) ナット締め機構の位置調整に個々人の技量による必要時間のばらつきが生じた。