

AI活用の裾野を広げるための現場対応型検査技術の開発

多様な現場での異常検知を実現するための検知器構成方法および情報収集方法の検討

大坪 立サミュエル^{*}、平野 真^{*}、野上 雅彦^{**}

OTSUBO Ritsusamuel, HIRANO Makoto and NOGAMI Masahiko

要旨 本研究は、中小企業の製造現場における異常検知・外観検査の自動化を目的とし、AI活用の裾野を広げるための現場対応型検査技術を提案する。主な課題として、多品種少量生産に伴う「学習用データの少なさ」、対象表面の「曖昧さ」、既存環境の「外乱」、および「検査負荷の低減」がある。これらの課題に対し、工業製品の不変性や数理モデルの活用、確率論を用いた曖昧さの表現、確率制御理論による入力設計といった数学的アプローチを提案した。

1 はじめに

製造業の現場では、工業製品の外観検査や異常検知タスクは精神的・肉体的負荷の大きさ[1]や高齢化による熟練技術者の減少[2]などの要因から自動化が求められている。以上の課題に対処するため、熟練技術者の持つ技能を学習し、自動化することを考える。

製造現場における異常検知・外観検査の自動化を実現するためには、以下の4つの主要な技術的課題を解決する必要がある。第一に、多品種少量生産の現場で顕著となる「学習用データの少なさ」への対応である。第二に、製品表面の微細なムラや粗さといった「曖昧さをどう表現するのか」という定義の問題である。第三に、既存の生産ラインに後付けでシステムを導入する際に不可避な「外乱の影響の除去」である。そして第四に、検査にかかる人的負担や試験対象そのものへの物理的ダメージを抑えるための「負荷を低減する検査用入力的设计」である。本稿では、これらの課題に対し、数学的・確率論的なアプローチを用いた解決策を提案する。

2節では、学習用データの少なさへの対応として、工業製品が持つ「対称性」や「不変性」といった性質や数理モデル利用するアプローチを提案する。3節では、製品そのものの曖昧さに対する「確率」を用いた表現方法を述べる。4節では、検査環境における外乱の影響の除去を目的とした「確率過程」の適用について述べる。5節では、試験対象への負荷を低減する検査用入力的设计について、「確率制御理論」を適用する。6節で結論と展開を述べる。

2 学習用データの少なさへの対応

一般的な機械学習を用いた検知器の作成には大量の学習用データが必要となるが、製造業、特に多品種少量生産の現場においては、異常品のサンプルを含めた大量のデータを収集することは極めて困難である。この課題に対し本研究では、大量のデータの代わりに、対象が本来持っている性質である「工業製品の不変性」および物理的な挙動を示す「数理モデル」の2種類の情報を活用することで、少ないデータでも高精度に機能する異常検知器の

構成を目指す。

2.1 工業製品の「不変性」を利用したアプローチ

多くの工業製品は、設計上の「対称性」や、回転・並進操作に対する「不変性(一様性)」という強い性質を持っている。例えば、ボルトやワッシャーといった部品は中心軸に対して対称であり、金属板の表面はどの部位においても「一様な」状態を保っている(図1)。異常部分では、この「対称性」や「不変性」が破れていると考える。これにより、正常な状態の性質さえ定義できれば、未知の異常パターンに対しても、その不変性の破れを指標として検知することが可能となる[4]。



図1 工業製品の対称性、不変性、一様性

2.2 数理モデルを用いたアプローチ

対象の挙動が物理的に記述可能な場合、「数理モデル」を利用して異常を判定する(図2)。具体的には、入出力の関係を微分方程式などの数理モデルで表現する。入出力に関する時系列データからシステムパラメータ θ を推定し正常範囲(帰無仮説 H_0)に属するか、あるいは、異常状態(対立仮説 H_1)に属するかを統計的に判定する。この手法は、物理法則に基づいているため、学習データが不足している状況でも高い信頼性を持った検知が可能である。

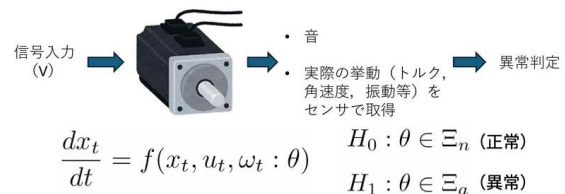


図2 数理モデルを用いたアプローチ(モーターの場合)

3 曖昧さの表現

製造現場における検査対象には、対象そのものが持つ微細なムラや粗さ由来の「曖昧さ」が存在する。本研究では、これらを一律に排除するのではなく、確率論の知見を用いることで「曖昧さ」を適切にモデル化し、適切に対処す

^{*} 電子システム係

^{**} 食品・プロダクトデザイン係

ることを目指す。

3.1 PSDを用いた曖昧さの一様性の表現

製品表面の微細な「ムラ」や「粗さ」は、正常品であっても個体ごとに異なるが、統計的には一定の「一様性（均一性）」を保っていることが多い。この「曖昧さの一様性」を表現するため、本手法では定常確率過程の性質を記述する際に用いられるパワースペクトル密度 (PSD) を導入する。具体的には、検査対象を小さな矩形領域で走査し、各領域におけるPSDを計算する。時間領域（空間領域）のデータそのものでは距離が大きく異なる場合でも、周波数領域におけるPSDの類似度を評価することで、統計的に一様な「ムラ」の中に存在する、明らかに性質の異なる異常（傷など）を高い信頼性で判別することが可能となる（図3）。

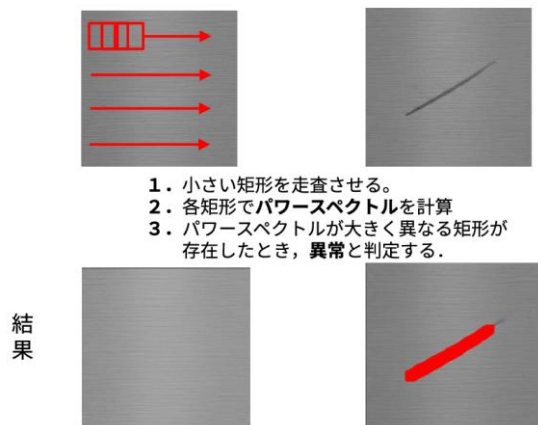


図3 表面上の傷探知のアルゴリズム

3.2 確率微分を用いた数理モデルの表現

物理システムに基づく検査においては、製品そのものが持つ動的な曖昧さや状態の不確実性を、確率微分を用いて数理モデル内に表現する。例えば、回転機械の軸に生じる摩耗において、システムの状態方程式に確率項を導入する（図4）。確定的な物理法則を示す項に、曖昧さに対応する確率微分を加えたモデルを構成することで、対象が持つ一様な曖昧さでは説明できない挙動を捉え、異常を検知するシステムを設計することができる（図5）。

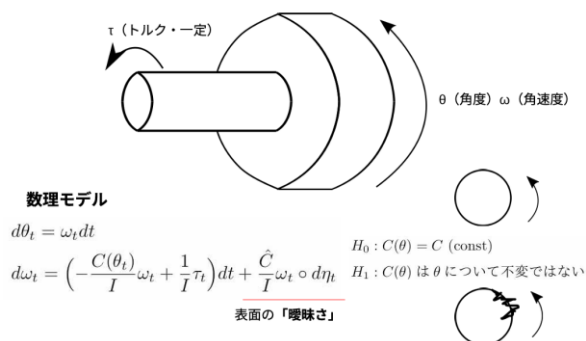


図4 確率システムの例(回転機械)

4 外乱の影響の除去

既存の生産ラインに検査システムを後付けて導入する

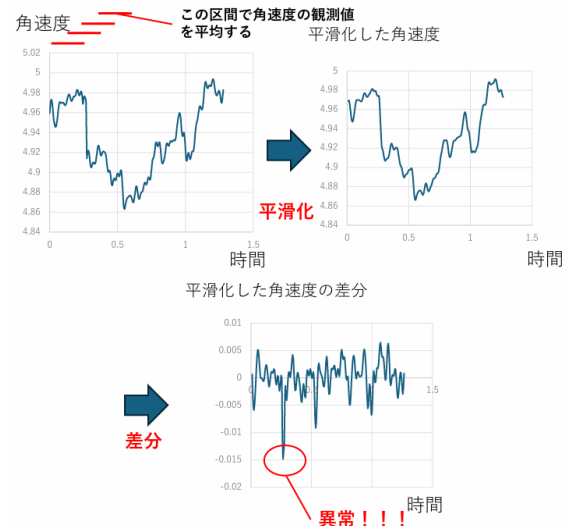


図5 回転機械の摩耗検知(横軸:時間 縦軸:角速度)

場合、機械の振動、電気的なノイズといった「外乱」への対応が必須となる。本節では、これらの不確実な変動を確率過程としてモデル化、システムパラメータを推定し、異常検知を行う方法について述べる。

4.1 確率過程を用いた数理モデルの利用

検査対象をモデル化する際、制御入力 u_t や観測値 x_t に加え、外部からの予期せぬ変動を外乱 ω_t として数理モデルに組み込む。例えば、モーターの異常検知において、以下の状態方程式を用いてモデル化する（図6）。

$$x_{t+1} = x_t + (u_t - \theta x_t) + \omega_t, \quad \omega_t \sim N(0, \sigma)$$

ここで、 ω_t は平均0、分散 σ の正規分布に従い、 σ は未知とする。このように外乱を確率的な性質を持つ項として扱う。

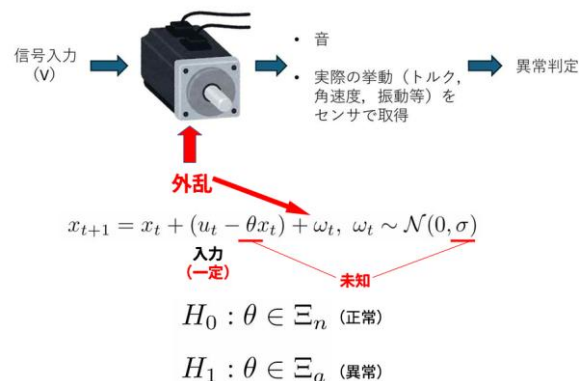


図6 外乱に対してロバストなモーターに対する異常検知

4.2 ベイズ推定を用いた異常検知

外乱の影響下で、対象が正常状態（帰無仮説 H_0 ）にあるか異常状態（対立仮説 H_1 ）にあるかを判定するために、ベイズ推定を用いる。ベイズ推定では、得られる状態遷移データに基づき、未知パラメータ θ と外乱の分散 σ に対する「信念（確率分布）」を逐次更新する。推定を繰り返すことで真のパラメータ θ 付近の確率（信念）が大きくなり、鋭いピークを持つ分布へと収束していく。この手法の利点は、未知の外乱に対しても、統計的な確信度を持って異常を判定できる点にある。これにより、環境における多様な外乱の下で、所望の検査精度を満たすことが可能となる。

5 外乱の影響の除去

検査業務は、作業員への人的負担が大きだけでなく、試験対象に対して物理的な刺激(振動、電圧、トルクなど)を加える場合、対象そのものへの物理的ダメージ(負荷)が蓄積されるという課題がある。したがって、自動検査システムには、必要な検知精度を維持しつつ、これらの検査に伴う負荷を最小化する設計が強く求められる。

この負荷最小化の要求を数学的に扱うため、「確率制御理論」を適用する。検査タスクを、異常の有無に関する誤検知の確率を所望のレベルに抑えたうえで、検査による総コストを最小化する「タスク失敗確率に関する制約を考慮した確率的最適制御問題」として定式化する。具体的には、期待総コストを定義し、タスクの失敗確率を一定以下に抑えるという制約条件の下で、パラメータの推定状況に応じて動的に検査用入力を設計・変更するアプローチをとる。以上の詳細について、タスク失敗確率に関する制約を考慮した確率的最適制御問題の定式と解法は文献[4]、[5]、[6]に、検査タスクへの応用は文献[7]に記されている。

6 結論と展開

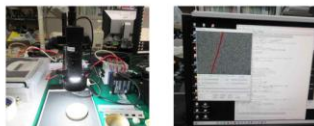
製造現場における自動化に対して以下の知見を得た。まず、学習用データの少なさに対しては、工業製品が本来持つ「不変性」や物理法則に基づく「数理モデル」を情報として補う手法が極めて有用である。また、検査対象の表面が持つ曖昧さや外部からの不規則な変動に対しては、定常確率過程や確率微分方程式を用いることで、有効な判定が可能となる。最後に、検査に伴う負荷の低減については、確率制御理論を適用し、推定状況に応じた動的な入力を設計することで、精度を維持しつつコストを大幅に抑制できることを示した。本研究で得た結果を用いた具体的な開発事例を以下に記す。

(a)「曖昧さ」を克服するPSDを用いた傷探知システム:

PSDを用いた傷探知(3.1節)と株式会社レイマック製の証明システムを組み合わせ、金属フタや金属板の表面上の傷や打痕を検出することに成功している(図7)。

(b)AI画像認識によるイチゴの個数カウント技術: 日照変化や葉の重なりといった既存環境特有の外乱の影響を除去するため、AI画像認識技術(YOLO等)を用いたシステムを構築した。花から完熟に至る各成長段階のイチゴをタブレット上で識別・カウントすることが可能となった(図8)。

・金属フタの傷



・金属板の傷

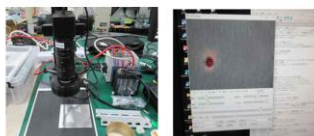


図7 PSD傷探知システム



図8 AI画像認識によるイチゴの個数カウント技術

参考文献

1. 中井 淳一、浅野 憲治: 正常多様性を考慮した外観検査自動化のための異常検知手法、2021年度人工知能学会全国大会論文集(2021)
2. 中嶋 良介: 高度な技能を要する外観検査作業における作業改善・作業設計・自動化の研究と課題に関する一考察、2022年度精密工学会学術講演会講演論文集(2022)
3. 大坪 立サミュエル: 不変量を考慮した異常検知についての検討、2023年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム講演論文集(2024)
4. R. Otsubo: Stochastic Shortest Path Problem on Borel Space Considering Dead-ends and Undesired Terminal States, Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications, vol. 2024, pp. 10–19 (2024)
5. 大坪 立サミュエル: 望まない終端状態を考慮した部分観測確率的最短経路問題、第67回自動制御連合講演会(2024)
6. R. Otsubo: POSSP Problem with Task Failure Probability, Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications, vol. 2025, pp. 60–65 (2026)
7. 大坪 立サミュエル: ノイズを伴う動的システムに対する異常検知の検討、第68回自動制御連合講演会(2025)