肥育豚舎洗浄ロボットのための環境センシング

前山 祥一

香川大学(〒 761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

Environmental Sensing for a Cleaning Robot of Fattening Piggery

Shoichi MAEYAMA

Kagawa University, 2217-20 Hayashi-Cho, Takamatsu, Kagawa 761-0396

(Received June 24, 2019)

This paper describes environmental sensing for a cleaning robot of a fattening piggery. Its environmental conditions include a long, narrow corridor, various types of fences, and a light mist for cleaning. We focus on the development of a fence recognition system using a SOKUIKI sensor (LiDAR) and discuss our experimental results from a real fattening piggery.

Key Words: SOKUIKI sensor (LiDAR), Cleaning robot, Fence recognition, Fattening piggery

1. はじめに

食の安全・安定供給のため、日本の養豚場では、厳重な衛生管理が求められる。豚舎の洗浄は重労働であり、とくに豚房の床の水洗い洗浄は、激務であるため、ロボットによる自動化が期待される¹⁾。

豚舎洗浄ロボットは、柵に沿って通路を走行しながら長尺アームの先端に取り付けた高压洗浄ノズルから水を撒くことで床を洗浄する。ロボットのバランスとしては、移動ベースの底面積を大きくして転倒を防止したい。一方で通路は狭いため、通路幅の下限に対して、ロボット本体のサイズがギリギリの設計となってしまう。そのため、柵と接触しないように高精度で安全に柵沿い走行させる技術が必要となる。

本稿では、豚舎洗浄ロボットの柵沿い走行において求められる環境センシングについて述べ、豚房の柵の計測

に焦点を当てる。単に豚房の柵と言っても、Fig. 1 に示すように、コンクリートの壁面状の柵から金属縦棒の柵まで多様である。また、水洗い洗浄するため、汚れた水が飛び散ること、撒いた水が霧になることが問題である。そこで、このような豚舎洗浄特有の環境条件の中で柵沿い自律走行を実現する高精度の隔柵の計測について取り上げる。

そして、その目的のために、LiDAR (Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging) の一つである測域センサを適用した例について紹介する。

2. 隔柵の計測とその難しさ

2.1 多様な隔柵を計測可能なセンサの選定

豚舎の隔柵には、様々な仕様の柵があり、これら多様な柵に対応できる必要がある。柵は、壁状になっている

Fig. 1 Example of environmental conditions of fattening piggery.

と考えて、それに沿って走行することを原則とする。地面と垂直に立つ隙間のない壁の場合は比較的容易と考えられるが、金属の細い縦棒で仕切っている場合も多く必ずしも柵の計測は容易ではない。Fig. 1の写真にある従来のロボットでは、車輪を横向けに押し当てることで柵に沿って走行しているが、柵から一旦離れる方向に移動し始めると対応できないため、非接触で柵までの相対位置計測が行えることが望ましい。

移動ロボット用の環境計測センサとしては、近年、レーザーで距離を計測するセンサが、高精度で角度分解能も良いため、非常によく用いられる。そこで、本研究でも、このような走査式レーザー距離センサを用いることとした。一般には、LiDAR、もしくは、測域センサと呼ばれるセンサであり、計測距離の1%程度の誤差で高精度の距離計測が行え、計測方位も $0.125^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$ 刻みの高分解能が得られる。それ以外の室内を移動するロボットによく使われるセンサとしては、画像処理、超音波等を用いたセンサが挙げられるが、以下に示すとおり、多様な柵を計測するセンサとしては十分な性能を得ることが難しい。

超音波距離センサ

指向性が広いため、隔柵や障害物がどの方向にあるかが正確にはわからない。

画像処理センサ

高度な処理装置が必要で、高精度で計測できる範囲が狭い。柵の種類毎に異なる認識アルゴリズムが必要となる。

接触式センサ

柵が傷む可能性がある。接触状態が維持できなくなると計測できない。

そこで、具体的なセンサとして、北陽電機製の測域センサ UXM-30LXH-EWA を採用した。このセンサを用いた理由は、寒冷地での使用も可能で、最大80 mまでの計測が可能であり、マルチエコー機能により、軽度の霧への対応も期待できるためである。角度分解能も 0.125° と十分である。

2.2 金属縦棒の柵の計測

レーザーを含む光学式の距離センサでは、一般的に、光沢のある金属、とくに、細い金属棒は苦手な計測対象の一つである。そこで、まず、実際に使われる隔柵の中で比較的苦手と思われるタイプのものを入手して、計測実験を行った。このタイプの隔柵が計測できれば、他の隔柵に対しても容易に対応できると考えられる。そこで、本研究では、この金属縦棒の柵を研究対象として取り上げることとした。

Fig. 2(b)は、Fig. 2(a)の隔柵の計測結果を表している。左横の隔柵の手前の方と正面の隔柵の左側に、それぞれ柵の奥に大きなノイズが計測されていることが確認できる。これは柵の後ろの比較的近い距離に柵板等の物体が

Fig. 2 Measurements of the fence bars for pig bed.

あり、そこからの反射波と柵の棒からの反射が分離されず、一つの反射波として検出された距離が算出されたためと考えられる。

左横の隔柵のセンサから遠い部分では、奥の柵板の面と柵の距離は手前と同じだが、センサの計測方向が浅い角度となるため、その方向においては、柵から離れた位置に障害物があることになり、その影響が軽減されている。なお、計測可能な距離が長いセンサ(=投光強度が強い)ほど、背後の障害物による影響が大きい傾向が見受けられた。

2.3 霧の影響

洗浄作業では、自來水を撒くため、その周辺には水の粒が飛び散るため、温度や湿度の関係によっては、その付近は霧状になる。特に、冬場の洗浄作業においては、温水による洗浄になるため霧が発生しやすい。そこで、柵の計測において、霧の発生がどのような影響を与えるかについて調査した。

霧は、ホットプレートを用いて湯気を発生させる方法で発生させた。具体的には、水を敷き詰めた直径36 cmの円形の鉄板を 240°C まで熱して沸騰させることで湯気を発生させる。霧は、微小な水の液体の粒であり、湯気とはほぼ同じ状態であるため、計測に及ぼす影響は同じであると考えられる。

その結果、霧からの反射波は距離が近くても受光強度が弱いことが確認できた。また、霧は、わずかな風などにより霧の位置が揺らぐのも特徴的であった。

次に、Fig. 3のように柵の近傍で霧が発生する状況を模擬した基礎実験の結果を示す。柵に近いところの霧だと、柵の後ろの障害物と同じ現象が発生する。柵からはみ出して、手前にくると除去が困難になると予測される。実験結果においても、本来の柵の計測点が手前や後方にずれて計測されている部分が見受けられる。これは、霧と柵の反射波が一つの反射波として認識され、距離が本来の柵までの距離よりも短く、もしくは長く算出されたためであり、柵の後方に障害物がある場合と同様の現象である。

Fig. 3 Effect of steam near fence bars on measurements.

3. 隔柵の計測手法について

3.1 前処理

前章で述べたように、単純な壁とは異なり隙間がある柵は背後の障害物や霧の影響を受けやすい。そのため、測域センサを用いて、隔柵を線分として検出するためには、柵特有の後方障害物からの計測ノイズや霧の発生に起因するノイズの両方に対応する必要がある。霧からの反射波は、柵よりも顕著に受光強度が弱い。したがって、受光強度を基準にして、霧からの反射波かどうかある程度推測可能であると考えられる。また、測域センサがマルチエコーの機能（同一計測方向に対して複数の反射波を受信できる機能）を持つ場合、受光強度がより強い計測点を柵の計測点候補として用いるとよいと考えられる。

そこで、第一波目の反射波による計測点を候補とした場合と最大受光強度を持つ反射波による計測点を候補としてみた場合を比較してみた。その結果を、Fig. 4に示す。Fig. 4(a)は、第一波目の反射波からの計測点を示しており、図の中心やや左下辺りに霧による計測点が存在するが、Fig. 4(b)の最大受光強度を持つ反射波による計測点の図においては、その付近の霧による計測点は、除去されている。したがって、マルチエコー機能を用いて、各方向において、受光強度が最も強いエコーからの距離を採用すると霧をかなり除去できる可能性がある。

3.2 隔柵線分の検出

前処理を行った計測データに、区間最小値フィルタ²⁾とハフ変換³⁾を組み合わせる手法で、隔柵線分の検出を行う方法を開発した⁴⁾。

Fig. 4 Elimination of steam effect by most intense echo.

霧からの反射波は、最大受光強度の反射波を用いても、柵からの反射波と混ざる場合は除去できずにノイズとなる。これは、柵の背後の障害物が引き起こす現象と同じであるが、柵よりも前に霧が出る場合には、区間最小値フィルタだけでは、ノイズを除去できない。そのため、フィルタを通過した全計測点を用いる従来法⁵⁾の固有値計算に基づく最小二乗法⁶⁾による線分パラメータの計算方法では、外れ点の影響により十分な精度が得られない。

ここでは、全体的に霧で覆われている状況ではないものとする。実際、洗浄した場所周辺に一時的に発生するものと想定し、時間経過とともに霧が晴れていくと仮定すると、霧によるノイズは、全体の中では一部分となる。Fig. 5の例では、枠部分が霧に影響されたノイズ部分であるが、柵の一部がオクルージョンによって計測できなくなった状況に類似している。つまり、2.3節に述べた現象により、柵の近傍の霧があたかも柵のすぐ前にある障害物のようにになっている。そこで、線分パラメータの算出の際、ハフ変換を適用することとした。一般に、精度だけを考えると、従来法で用いた固有値計算に基づく最小二乗法の方が良いと考えられるが、柵の位置がある程度予測できる場合、ハフ変換でパラメータ空間に投票する範囲は、かなり限定することが可能で、その分、分解能を細かくして精度を維持することが可能となる。

3.3 汚れや水滴の軽減

畜産業や農業で利用するセンサは汚れとの闘いでもある。センサの開口面が濡れたり汚れたりしないようにカバーを設置することが重要である。カバーがうまく機能しなければ、どのような高度な処理を行うセンサであっ

Fig. 5 Detection of line segment from fence bars.

ても、実用には結びつかない。そこで、洗浄水による水しぶきや汚染水の跳ね返りによるセンサ表面の汚れを軽減するセンサカバーも開発した。

Fig. 6は、第1次試作した3種類のセンサ・カバーの写真A~Cと、これらのカバーが柵の根元の床洗浄により発生する水しぶき等をどの程度防げるかを検証した結果である。下側の紙は、センサの位置に貼っておいたので、その濡れ具合により効果を検証した。その結果、センサの下側のカバーが長く前に出ている方が効果が高いことが分かった。そこで、ロボットには、タイプAを実装することとした。

4. 試験豚房での計測実験

4.1 実験の概要

開発したセンサシステムをロボットに実装し、どの程度、実用可能かを検証するため、千葉畜産総合研究センターの肥育豚舎において実証試験を行った⁷⁾。実際の豚舎において、洗浄水による水しぶきや軽度の霧が発生した環境下においても、柵沿い自律走行が可能であることを検証することが目的である。

具体的には、1)柵内洗浄姿勢での往復移動、2)豚部屋の柵沿い移動の精度検証、3)通路を洗浄している状況を模擬した水を撒きながらの柵沿い自律走行である。1)の実験の様子がFig. 7(a)であるが、豚房一区画分に相当する約5mの柵をこの姿勢を維持しながら、柵に沿って往復走行することについては、問題なく可能であった。また、2)についても、豚房間約15mの柵沿い走行についても霧のない環境で問題なく走行できた。3)の霧がある場合については、次節に詳細を述べる。なお、ロボットは、計測された柵との相対的な距離と方位に基づき、フィードバック制御により、柵との距離が指定した距離に、方位が柵と平行となるように左右のクローラの回転量を制御することで走行する。ロボットの位置姿勢は、エンコーダによるクローラの回転量の計測とジャイロによる方位計測および柵との相対的な方位から計算する。

Fig. 6 Testing three different sensor covers.

Fig. 7 Fence following by the proposed method.

4.2 通路を洗浄しながらの柵沿い走行

洗浄水による霧や水しぶきの影響を検証するため、通路を洗浄している状況を模擬した通路に水を撒きながらの柵沿い自律走行の実験を行った。Fig. 7(b)は、その実験の様子を示したものである。ロボット前方すぐ手前の床を水洗いしている状況を模擬しており、最も厳しい条件といえる。但し、直接柵に水をかけることはしておらず、あくまで床を掃除する状況を想定している。

実験の結果、今回の通路幅(ロボットの中心が柵から50cmを走行)の条件では柵沿い自律走行自体は可能であった。しかしながら、霧や水しぶきがある場合は、計測値の分散は大きくなり、柵の長さもより長く必要となった。これは、霧による外れ点の除去等のため、より長い柵が利用できる必要があるためである。これについては、センサ自体の向きを制御し、既にとおり過ぎた柵を利用することや反対側にも柵がある場合はそれらの柵を利用することで対応可能である。今回の実験ではセンサの設置スペースの都合上、センサ本体の向きを変えるパンチルト台は設置されていないため、検証できていない。また、試験豚房での実験の方が、湯気による基礎実験の場合よりも、最大受光強度による除去が有効だった可能性がある。詳細は未確認であるが、水の粒の大きさの影響があるかもしれない。つまり、湯気、霧、水しぶき、雨などでは、それぞれ影響の度合いが異なる可能性もあり、今後調査が必要である。

5. まとめとレーザー計測技術への期待

豚舎の床の洗浄ロボットのための環境センシング、とくに、豚房の柵に沿うためのレーザー式距離センサを用いた柵の検出方法について述べた。そして、レーザーによる距離計測においては苦手とされる金属の細い縦棒の柵でも適用可能であることが確認できた。また、ロボット自身が撒いた洗浄水による霧や水しぶきがある環境下でも柵沿い走行が可能であることが分かった。

今後の豚舎での利用を考えた場合に、レーザー距離センサに期待することは、1)霧とそれ以外の計測対象との分別能力、2)ケースの汚れに対する頑強性等が挙げられる。畜産や農業の分野では、純粋な計測精度よりも環境条件に対する頑強性がより重要である。1)については、FOGモードを持つセンサもあるが通常時の計測精度が

大幅に悪くなるのが一般的である。2)については、システムが採用されるかどうかに関わる問題で、高機能のセンサがなかなか採用されない理由の一つとなっている。少なくとも汚れ等により通常の計測が可能ではない状況をセンサ自身で検出できる能力が期待される。また、価格も重要であり、状況によっては、静音性も期待される場合もある。

謝 辞

本研究は、農研機構・生研支援センターの地域戦略プロジェクトの支援を受けて実施した。ロボットは、トピー工業、福島高専の豊島先生他と共同で研究開発しているものであり、センサカバーの試作については香川大学前山研の学生に尽力頂き、実験に際しては、農研機構の志藤様、松野様、千葉畜産総合研究センターに大変ご協

力頂いた。また、従来型ロボットと実際の豚舎の写真は中嶋製作所からご提供頂いた。ここに感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 松野 更和：機械化農業 **3188** (2019) 4.
- 2) 前山 祥一、渡辺 圭吾：ロボティクス・メカトロニクス講演会 '17 講演論文集 (2017) 4.
- 3) 松山 隆司、久野 義徳、井宮 淳 編：コンピュータビジョン：技術評論と将来展望 (新技術コミュニケーションズ, 1999) p. 268.
- 4) 前山 祥一、上田 尚輝、渡辺 圭吾：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予稿集 (2017) 4.
- 5) S. Maeyama, Y. Takahashi, and K. Watanabe: *Advanced Robotics* **29** (2015) 13.
- 6) 金谷 健一：これなら分かる最適化数学 基礎原理から計算手法まで (共立出版株式会社, 2005) p. 249.
- 7) 前山 祥一、高濱 希：ロボティクス・メカトロニクス講演会 '19 講演論文集 (2019) 2.

レーザーワード

洗浄ロボット (cleaning robot/washing robot)

近年、家庭向けの床を掃除するロボットが普及してきているが、洗浄ロボットも掃除ロボットの一つである。但し、洗浄ロボットの場合は、個人の家庭というよりは、ビルや工場、農場 (畜産も含む) 等、産業用途が主である。ビルの窓やソーラパネル、養豚場の床の水洗い等が既にいくつか実用化されているが、コスト面や利便性等の今

後の改良・研究開発も期待されている。水洗いで汚れを除去する場合、ロボットにも水しぶきや汚れがかかる。そのため、洗浄ロボットに搭載されるセンサについては、精度よりも、汚れや霧などを含む耐環境性能が重要となるのが特徴である。
(前山 祥一)