

移動ロボットによるプラント内の巡回点検時の メータ自動読み取りのための可読性判定

○藤野裕太郎 †, PATHAK Sarthak †, MORO Alessandro †, 永谷圭司 †,
山下淳 †, 浅間一 †

○ Yutaro FUJINO †, Sarthak PATHAK †, Alessandro MORO †, Keiji NAGATANI †,
Atsushi YAMASHITA † and Hajime ASAMA †

†: 東京大学, fujino@robot.t.u-tokyo.ac.jp

＜要約＞ 移動ロボットによるプラント内の巡回点検のための、メータの自動読み取りと可読性判定手法を提案する。テンプレート画像と対象のメータ画像との差分を考慮することで、メータ読み取りを行うだけでなく、その読み取りがメータの針を認識して行われたかを判定することで、失敗の可能性を考慮した自動読み取りを行う。提案手法の有効性を実験により確認した。

＜キーワード＞メータ読み取り, 移動ロボット, 巡回点検

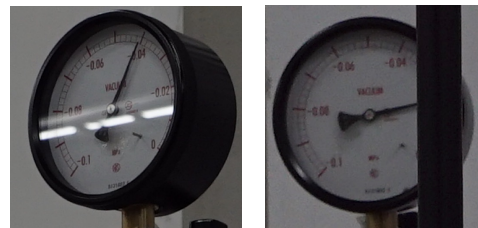
1 序論

電力施設や製造工場では、各設備に圧力計や温度計といった様々なセンサの値を示すメータが取り付けられている。施設や工場のメンテナンスのため、定期的にメータの値を読み取り、記録しておく必要がある。一般的には、点検員が定期的に巡回し、各メータに対し正面から値を読み取りデータを記録する。しかし人間による巡回点検、労力を要するとともに、読み取り・記録の際にミスが起こりうるという問題がある。そこで、固定カメラや通信機能付きのセンサ・メータを利用した自動読み取り・記録が行われている [1]。しかし、メータの個数が多いとカメラの設置や維持にコストがかかり、また、既存のプラント設備に新たなセンサ・メータを導入することは困難である場合が多い。そのため、近年では、カメラを搭載したアームをもつ移動ロボットを用いたプラント内の巡回点検の自動化のための研究開発が行われている [2][3]。

現在、コンピュータビジョンの技術を用いた、移動ロボットを用いたメータの自動検出・読み取りの様々な手法が提案されている。Convolutional Neural Network (CNN) に基づく物体検出技術の向上に伴い、Liu ら [3] は、Faster-RCNN [4] を利用し、He ら [5] は、Mask-RCNN [6] を利用することで、ともに高精度でのメータ

の自動検出に成功している。Yang ら [7] は、メータのテンプレート画像を利用し、ORB 特徴 [8] を用いた画像の位置合わせにより、針の検出を行っている。Song ら [9] は、画像中の円形のメータの輪郭を楕円として検出し、正面視点に変換し、読み取りを行っている。Gao ら [10] は、メータ画像を 2 値化し、針の傾きを算出するために細線化処理・ハフ変換を行っている。

しかし、現実のプラントにおいて、移動ロボットに搭載されたカメラが撮影する画像では、次のような条件が変化する。まず、毎回の読み取りにおいて、メータに対するカメラの位置姿勢が異なるため、画像内のメータの大きさや姿勢が異なる。また、太陽や照明の影響で、メータ表面に白飛びや映り込みが生じることがある (図 1(a))。さらに、プラント内のさまざまな設備が存在しているため、画像中に障害物が映り込む場



(a) メータ表面の反射 (b) 障害物

図 1 メータ読み取りに影響する条件

合がある (図 1(b)). これらの条件によっては, メータの向きや針が正しく認識できず, 自動読み取りが失敗する可能性がある. メータの自動読み取りが失敗すると, 人間がメータを確認しなければならないため, 非効率である. また, 設備故障の予兆を見逃す恐れがある. この問題を解決するため, 本研究はメータの自動読み取り手法及び読み取りの成功判定手法の構築を目的とする.

読み取り対象のメータ画像が, 自動読み取り可能か不可能かを表す可読性という指標を導入する. 本研究では, テンプレート画像と読み取り対象のメータ画像との差分を考慮した, 値の読み取りと可読性判定を行う手法を提案する. 移動ロボットにはアームを用いてカメラの視点を変更できるという利点がある. 移動ロボットによる自動読み取りを行なう際, 読み取り時に可読性判定を行う. 読み取り不可能と判定した場合, アームを用いてカメラを現在と異なる位置姿勢に移動し, 読み取り可能である場合に読み取りを行う. これにより, 現実のプラントにおいて移動ロボットによる, 失敗の可能性を考慮した自動読み取りを実現することができる.

2 提案手法

2.1 概要

本研究では, テンプレート画像と読み取り対象のメータ画像の差分を考慮して, 値の読み取り及び可読性判定を行う. 事前にメータを正面から撮影し, 反射や障害物が映っていない, 読み取りのための条件が良い状態であるテンプレート画像 (図 2) を用意しておく. また, 読み取り対象のメータ画像をテスト画像とする.

提案手法の手順を以下に示す.

1. メータの検出
2. 正面視点への射影変換
3. 差分画像の生成
4. 値の読み取り
5. 可読性判定

まず, 撮影された画像中でメータ領域を検出する. 次に, 検出したメータ領域をテンプレート画像と比較するため, 正面視点へ射影変換する. そして, テンプレート画像とメータ領域の差分を抽出する.



図 2 テンプレート画像

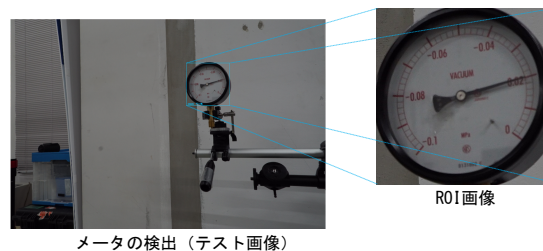


図 3 メータの検出

ここで, 値の読み取りを行う. 抽出される差分画像中の針領域の角度から指示値を算出する.

そして, テスト画像中に針領域が存在するか, その領域を検出して読み取りが行われたかを判定する. なお, 本研究では, 視点変換の成功/失敗, 反射や障害物を考慮した可読性判定を行う.

2.2 テンプレート画像の作成

テンプレート画像の作成について述べる. メータの正面から画像を撮影し, メータの文字盤部分以外の領域にマスク処理をする. 一般にテンプレート画像とテスト画像の針の角度は異なる. そこで, 針上の特徴点を用いず, 差分画像にも映らないようにするために, 針の部分を削除しておく (図 2).

2.3 メータの検出

テスト画像中で, メータ領域を検出する. 本研究では, 物体検出に有効な EfficientDet [11] を用いる.

テスト画像中のメータ領域のみを抽出し, ROI (Region Of Interest) 画像と呼ぶ (図 3).

2.4 正面視点への射影変換

一般に, 移動ロボットによって撮影された画像は, メータの正面視点であるとは限らない (図 4(a)). 正面視点から撮影されるテンプレート画像との差分を考慮するため, ROI 画像を正面視点へ射影変換する.

まず, テンプレート画像と ROI 画像中の対応点の位置情報を求め, それを用いて 2 画像内の同一平面上の

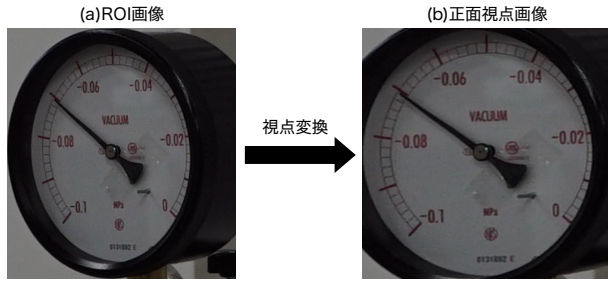


図 4 正面視点への変換

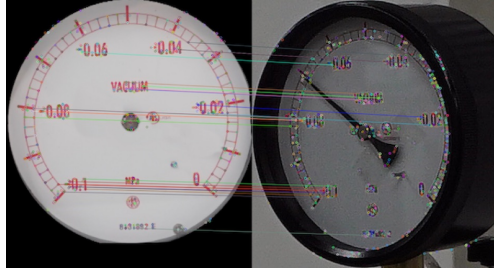


図 5 対応点マッチング

対応点の関係を表すホモグラフィ行列を算出し、正面視点への射影変換を行う。

2.4.1 特徴量に基づく対応点マッチング

テンプレート画像と ROI 画像のメータ領域を対応付けるため、特徴点を抽出し、対応点マッチングを行う。現実のプラント環境では、カメラの位置姿勢や日照条件が変化するため、スケールや回転、明るさにロバストな A-KAZE 特徴量 [12] を用いて、特徴点抽出を行う。

次に対応点のマッチングを行う。各特徴点について、他の全特徴点との特徴量のユークリッド距離を算出する。特徴点同士の、最も小さい距離と 2 番目に小さい距離の比が閾値以下であるとき、対応点とみなす。

2.4.2 ホモグラフィ行列の推定

2.4.1 項で求まる対応点の位置情報から、ROI 画像をテンプレート画像と同じ正面視点へ変換するためのホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ を算出する。ホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ を用いた 2 画像間の対応点の関係は、式 (1) で表される。

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ここで、 x_i, y_i と x'_i, y'_i はそれぞれ、テンプレート画像と ROI 画像の i 番目の対応点の座標である。誤対応点を除去するため、Random Sample Consensus (RANSAC) [13] を用い、インライアの再投影誤差を最小化して、テンプレート画像から ROI 画像へのホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ を算出する。

その逆行列 $\mathbf{H}^{-1}$ を用いて、ROI 画像をテンプレート画像と同じ正面視点に射影変換し、正面視点画像とする (図 4(b))。

2.5 差分画像の生成

テンプレート画像 (図 6(a)) と正面視点画像 (図 6(b)) の差分画像を生成する。

両画像の照明条件の差異による影響を軽減するため、両画像に対し、局所的に閾値を決定し 2 値化を行う、適応的 2 値化 [14] を施す (図 6 (c)(d))。

次に、差分画像を取得する。差分画像の座標 (u, v) の画素値 $\mathbf{I}_{\text{diff}}(u, v)$ は、テンプレート画像の座標 (u, v) の画素値 $\mathbf{I}_{\text{temp}}(u, v)$ と正面視点画像の座標 (u, v) の画素値 $\mathbf{I}_{\text{front}}(u, v)$ の排他的論理和とする。

$$\mathbf{I}_{\text{diff}}(u, v) = \mathbf{I}_{\text{temp}}(u, v) \oplus \mathbf{I}_{\text{front}}(u, v). \quad (2)$$

最後に、ノイズを除去するため、差分画像に対し、膨張・収縮処理を行う (図 6 (e))。

2.6 差分画像からの値の読み取り

2.5 節で生成される差分画像の中で、メータの針を検出し、その角度から指示値を推定する。

2.6.1 針角度の検出

針部分は幅を持つため、角度の検出が難しい。そこで、差分画像に対し、2 値画像を幅 1 ピクセルの線画像に変換する細線化処理 [15] を行う (図 6 (f))。次に、直線を検出するため、ハフ変換を用いて、針を検出する。差分画像において、針が細線化された部分は長い線分であると考えられる。そのため、検出される直線のうち、ハフ変換の投票数が最も多い直線を針とみなす (図 6 (g))。このとき図 7(a) のように画像内で針の回転軸を原点とした xy 平面を考え、検出される直線が y 軸正方向となす角を θ とする。

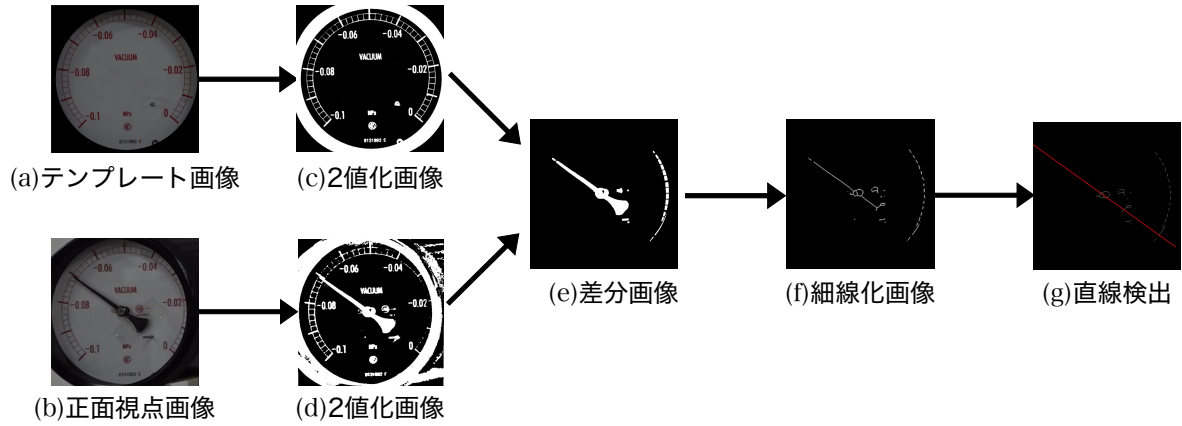


図 6 差分画像を用いた読み取りの流れ

指示値の計算のため、針の角度だけでなく、方向の推定も必要である。針の方向を推定するため、針の先端（図 7(a) の赤点）の座標を求める。まず、差分画像（図 6(e)）において、2.6.1 項で検出される直線上の点で白い画素が閾値以上の長さをもつ線分の集合を抽出する（図 7(b)）。その集合の全ての点の中で最も x 座標が小さい点と大きい点の 2 点を針の先端の候補点であるとする。そこで、 $x > 0$ の領域、 $x < 0$ の領域のうち、より多く集合内の点が含まれる領域に存在する候補点を、針の先端であるとする。

2.6.2 指示値の算出

正面視点画像、針を削除する前のテンプレート画像中の針の y 軸方向からの時計回りの角度をそれぞれ s_{front} , s_{temp} とする。これらは、 θ 及び検出される針の先端の x 座標 x_{tip} より、式 (3) のように表される。針領域を削除する前のテンプレート画像のメータの指示値を V_{temp} とする。また、メータの値の範囲（最大値 – 最小値）を M 、最小目盛りから最大目盛りまでの角度を A とする。このとき、正面視点画像のメータの指示値 V_{front} は、式 (4) のように算出される。

$$s_{\text{temp}}, s_{\text{front}} = \begin{cases} \theta & (x_{\text{tip}} \geq 0) \\ \theta - \pi & (x_{\text{tip}} < 0), \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{\text{front}} = V_{\text{temp}} + (s_{\text{front}} - s_{\text{temp}}) \times \frac{M}{A}. \quad (4)$$

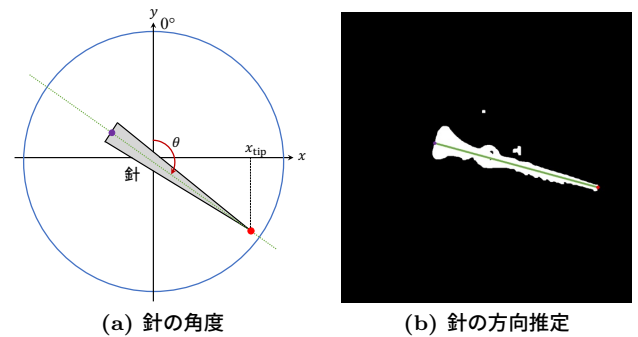


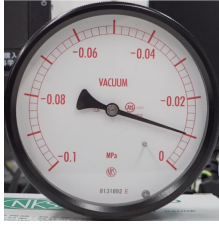
図 7 針の向きの推定

2.7 可読性判定

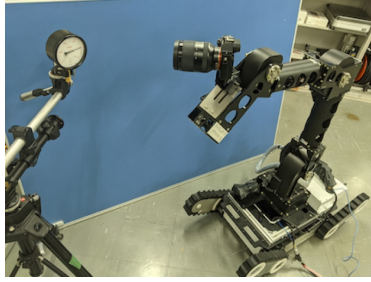
視点変換が成功しているか、反射や障害物の影響が小さいか、メータの針部分の直線を利用して読み取りが行われているかを判定するため、差分画像を用いた可読性 R の判定を行う。

まず、理想的には、テンプレート画像と正面視点画像の差分は針部分のみであると考えられる。しかし、正面視点画像中に反射や障害物が映り込んでいる場合、2画像の差分は大きく、差分画像中の白い画素が多いと考えられる。また、視点変換に失敗した場合、画像により、2画像の差分が極端に大きく、あるいは、小さくなる。そこで、差分画像中の白い画素の総数 n が、2つの閾値 $N_{\text{min}}, N_{\text{max}}$ 間の値であれば、視点変換が成功し、反射や障害物の影響も小さいとみなす。

また、2.6.1 項で読み取りのために検出される直線が針部分のものであるとは限らない。ここで、針はメータのおおよそ中心を通ることを利用する。検出される直線と正面視点画像の中心点との距離 d を計算し、閾値 D 以下であれば、直線は針部分のものであるとみなす。



(a) メータ（真空計）



(b) 移動ロボットを用いた実験の様子

図 8 実験設定

表 1 メータの概要

種類	真空計
直径	100mm
値の範囲	-0.1 MPa ~ 0 MPa
最小目盛	0.002 MPa

以上をまとめると、可読性 R の判定は以下の式 (5) で表される。

$$R = \begin{cases} \text{読み取り可能} & (d \leq D \wedge N_{\min} \leq n \leq N_{\max}) \\ \text{読み取り不可能} & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (5)$$

3 実験と結果

3.1 実験設定

本研究では、メータとして図 8(a) に示す真空計を使用した。メータの概要を表 1 に示す。カメラは、SONY の ILCE-7S を使用し、テスト画像、テンプレート画像のサイズはそれぞれ、 4240×2832 、 784×784 とした。

3.2 節、3.3 節の 2 つの実験を行った。カメラでメータを撮影する際の条件を以下の 2 つに分類する

- 良条件
反射や障害物のない位置姿勢
- 悪条件
反射や障害物が映る位置姿勢

2 つの実験において、良条件、悪条件ともに、テスト画像は、メータからの距離が $0.40\text{m} \sim 2\text{m}$ 、メータ表面の法線ベクトルとカメラの光軸のなす角度が $0^\circ \sim 40^\circ$ のカメラの位置姿勢から撮影した。

なお、可読性判定の真値は、読み取りの絶対誤差が最小目盛りの $1/2$ (0.001MPa) 以内なら読み取り可能、そうでなければ読み取り不可能とした。また、実験により設定した、可読性判定に用いた閾値を表 2 に示す。

表 2 可読性判定の閾値

D	25
$N_{\min}$	11000
$N_{\max}$	60000

3.2 自動読み取りと可読性判定

良条件で 175 枚、悪条件で 161 枚の画像を様々な位置姿勢から撮影し、値の読み取りと可読性判定を行った。良条件、悪条件での結果をそれぞれ表 3、表 4 に示す。なお、平均誤差は、読み取り可能と判定した画像について、読み取り誤差の絶対値の平均値である。

良条件では、多くのテスト画像において可読性判定に成功し、最小目盛りの $1/10$ 程度の平均誤差で読み取りが行えていることが分かる。

また、悪条件であっても、読み取り可能となったテスト画像のうち、多くの画像において可読性判定に成功している。さらに、反射や障害物の影響が小さければ、読み取り可能と判定し、読み取りを行うことができています。提案手法を用いることにより、自動読み取りとその読み取りが可能か不可能かを判定できることが分かった。

なお、実験では、メータが検出されない、また、対応点の組の個数がホモグラフィ推定の計算に足りないという理由で、プログラムが終了する場合があった。これは、読み取り不可能と判定したとみなした。

また、良条件において 1 枚、悪条件について 2 枚のテスト画像について、針の向き推定に失敗した。この場合、読み取りの誤差が大きいため、失敗とみなして除外した。

表 3 可読性判定と読み取りの結果（良条件）

可読性 R	読み取り可能	読み取り不可能
判定結果	161	13
真値	159	15
平均誤差 [MPa]	0.000212	
最大誤差 [MPa]	0.00244	

表 4 可読性判定と読み取りの結果（悪条件）

可読性 R	読み取り可能	読み取り不可能
判定結果	17	142
真値	15	144
平均誤差 [MPa]	0.000714	
最大誤差 [MPa]	0.00316	

表 5 移動ロボットを用いた各条件での可読性判定と読み取り結果

	悪条件		良条件	
	判定結果, 読み取り値 [MPa]		判定結果, 読み取り値 [MPa]	
(a) メータ真値 [MPa] -0.02	読み取り不可能, -0.01888		読み取り可能, -0.01994	
(b) メータ真値 [MPa] -0.02	読み取り不可能, -0.08665		読み取り可能, -0.02008	
(c) メータ真値 [MPa] -0.06	読み取り不可能, -0.03783		読み取り可能, -0.05997	
(d) メータ真値 [MPa] -0.09	読み取り不可能, -0.11665		読み取り可能, -0.08973	

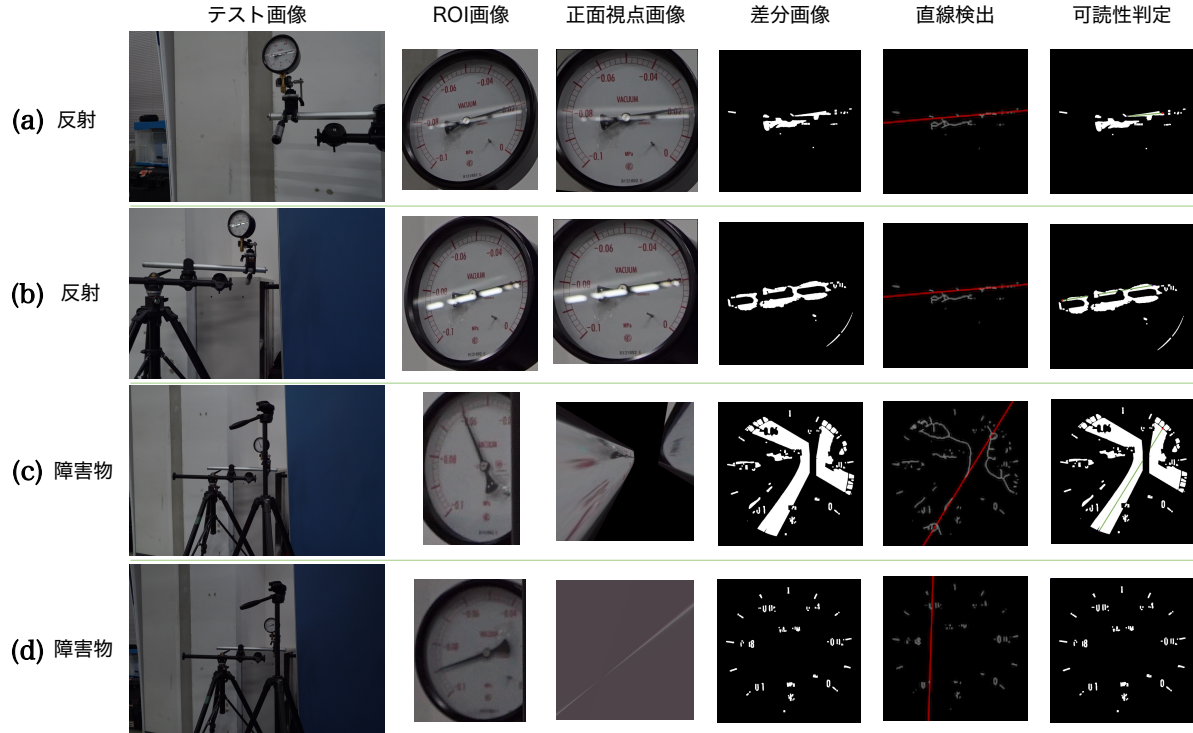


図 9 悪条件における値の読み取りと可読性判定の様子

3.3 移動ロボットを用いた自動読み取りと可読性判定

3.2節で用いたカメラを、アームを搭載したクローラ型ロボットに搭載して実験を行った(図8(b))．実験の手順を示す．

- i 悪条件でメータを撮影する．
- ii アームを手動で制御し、良条件にカメラを移動させ再びメータを撮影する．

この手順を4回行い、それぞれの手順で得られた2枚の画像について提案手法を用いて読み取りと可読性判定を行った結果が、表5である．また特に、悪条件における読み取りと可読性判定の流れを図9に示す．

(a)～(d)のいずれの場合においても、悪条件において、読み取り不可能と判定している．(a)、(b)ではメータ表面に反射が映っており、その影響で、差分画像において針部分が一部欠損している．この場合、検出される直線が元の針の位置からずれている．その結果、検出

される直線の正面視点画像中心からの距離が大きくなり、 $d > D$ となるため、読み取り不可能であると判定された．(c)、(d)では障害物が映っている影響でROI画像にメータの一部しか映っていない．そのため、特徴点が少なく、誤マッチングが発生し、正面視点への射影変換において失敗している．しかし、差分画像の白い画素の個数 n を考慮することで、(c)は $n > N_{\max}$ 、(d)は $n < N_{\min}$ という理由により、自動読み取り不可能であると判定することに成功している．そして、どの場合も、良条件に移動すると、最小目盛の1/10以下の誤差で読み取りに成功している．提案手法を用いることで、移動ロボットによる自動読み取りを行う際、悪条件での読み取りの失敗を判定できた．そして、読み取り可能な良条件にカメラを移動させると、高精度で読み取りを行えることが分かった．

4 結論

移動ロボットによるプラント内の巡回点検のための、メータ自動読み取りと可読性判定手法を提案した。テンプレート画像と対象のメータ画像の差分を考慮し、読み取りを行うだけでなく、その読み取りがメータの針を認識して行われたかを判定した。実験により、反射や障害物などが存在する悪条件においても、提案手法による読み取りと可読性判定が有効であることを確かめた。

今後の課題として、撮像段階における工夫が挙げられる。本研究では、メータ表面の反射の有無を差分画像から判定した。山口ら [16] の提案した、偏光カメラを利用したガラス判定手法を応用し、偏光の性質を考慮した反射の判定や除去も考えられる。

また、読み取り不可能であると判定した際、カメラを良条件に移動させるためアームをどのように制御するかについても検討する必要がある。

謝辞

本研究の成果の一部は ENEOS 株式会社との共同研究によるものである。

参考文献

- [1] Mao-Hsiung Hung and Chaur-Heh Hsieh: "Automatic Pointer Meter Reading Based on Machine Vision," *Proceedings of IEEE International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, pp. 32-35, 2019.
- [2] Javier Hilario, Christian Penaloza, David Hernandez-Carmona, Jose Balbuena, Diego Quiroz, Jorge Ramirez and Francisco Cuellar: "Development of a Mobile Robot for Inspection of Analog Gauges in Industrial Plants Using Computer Vision," *Proceedings of IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, pp.208-214, 2019.
- [3] Yang Liu, Jun Liu and Yichen Ke: "A Detection and Recognition System of Pointer Meters in Substations based on Computer Vision," *Measurement*, vol.152, pp.107333-107342, 2020.
- [4] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick and Jian Sun: "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 6, pp.1137-1149, 2017.
- [5] Peilin He, Lin Zuo, Changhua Zhang and Zhehan Zhang: "A Value Recognition Algorithm for Pointer Meter Based on Improved Mask-RCNN," *Proceedings of International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, pp.108-113, 2019.
- [6] Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollar and Ross Girshick: "Mask R-CNN," *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp.2980-2988, 2017.
- [7] Zhijuan Yang, Wennan Niu, Xiaojiang Peng, Yongqiang Gao, Yu Qiao and Yi Dai: "An Image-based Intelligent System for Pointer Instrument Reading," *Proceedings of IEEE International Conference on Information Science and Technology*, pp. 780-783, 2014.
- [8] Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige and Gary Bradski: "ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF," *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, pp.2564-2571, 2011.
- [9] Yunhai Song, Zhenzhen Zhou, Pengfei Xiang and Su Fang: "Instrument Recognition in Transformer Substation Based on Image Recognition Algorithm," *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, pp.7-11, 2020.
- [10] Jia-Wei Gao, Hai-Tian Xie, Lin Zuo and Chang-Hua Zhang: "A Robust Pointer Meter Reading Recognition Method for Substation Inspection Robot," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)*, pp.43-47, 2017.
- [11] Mingxing Tan, Ruoming Pang and Quoc V. Le: "EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection," *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.10781-10790, 2020.
- [12] Alcantarilla, Pablo F and Solutions, T: "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, no. 7, pp. 1281-1298, 2011.
- [13] Martin. A. Fischler and Robert C. Bolles: "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Communications of the Association Computing Machinery*, vol. 22, no. 6, pp. 381-395, 1981.
- [14] Derek Bradley and Gerhard Roth: "Adaptive Thresholding using the Integral Image," *Journal of Graphics Tools*, vol. 12, no. 2, pp. 13-21, 2007.
- [15] Louisa Lam, Seong-Wan Lee and Ching Y. Suen: "Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 9, pp. 869-885, 1992.
- [16] 山口 恵璃, 樋口 寛, 山下 淳, 浅間 一: "偏光カメラの偏光度と LRF の距離情報を用いたガラス環境対応 SLAM", 精密工学会誌, vol. 87, no. 1, pp. 114-119, 2021.