

画像処理技術を応用した超伝導空洞内面検査システムの高度化 IMPROVEMENT OF INNER SURFACE INSPECTION SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES APPLYING IMAGE PROCESSING TECHNIQUE

栗山靖敏^{*A)}、岩下芳久^{B)}、広田克也^{C)}、早野仁司^{D)}、不破康裕^{E)}

Yasutoshi Kuriyama^{*A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Katsuya Hirota^{C)}, Hitoshi Hayano^{D)}, Yasuhiro Fuwa^{E)}

^{A)}Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KUNRS)

^{B)}Kyoto University Institute for Chemical Research

^{C)}Nagoya University

^{D)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{E)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

Research and development of high accelerating electric field of superconducting radio frequency cavity is carried out by accelerator research institute in the world. It is clear from the previous research that the defect generated on the surface inside cavity becomes a factor to inhibit high accelerating electric field. Therefore, development of “Inner surface inspection system for superconducting cavity” that optically visualizes the state of the inner surface of the superconducting cavity has been carried out, and good results have been obtained. In this research, we apply image processing technology that has developed remarkably in recent years to the inner surface inspection system, and advanced the defect detection method.

1. はじめに

超伝導高周波加速空洞の高加速電界化の研究開発が世界の加速器研究機関で行われているが、空洞内表面に発生する欠陥が高加速電界化を阻害する要因となることが先行研究より明らかとなっている [1]。

そのため、超伝導空洞内表面の状態を光学的に検出する「超伝導加速空洞の内面検査システム（以下、検査システムとする）」の開発が行われ成果を挙げている [2]。当初、胃カメラ等の内視鏡システムの使用が検討されたが、照明方法と空洞内表面への傷に対する安全性の面から使用が断念された経緯があり、空洞内表面に生じるサブミリメートル程度の大きさの欠陥箇所の検出を目標に本検査システムが開発された。

本検査システムによって始めて欠陥箇所が可視化できるようになり、楕円型超伝導空洞の歩留まりの向上に大きく貢献している。本報告では、検査システムについて説明したのちに、検査システムの高度化のために、適用を検討した画像処理技術についての報告を行う。

2. 超伝導空洞内面検査システム

検査システムは、大きく次の機能群より構成されている。

- 高分解能固定焦点カメラ
- 分割点灯式照明機構
- 損傷箇所研磨（グラインダー）
- カメラ焦点調節および移動機構

- グラインダー移動機構
- 空洞保持および回転機構

Figure 1 に本検査システムの写真を示す。Figure 1 に

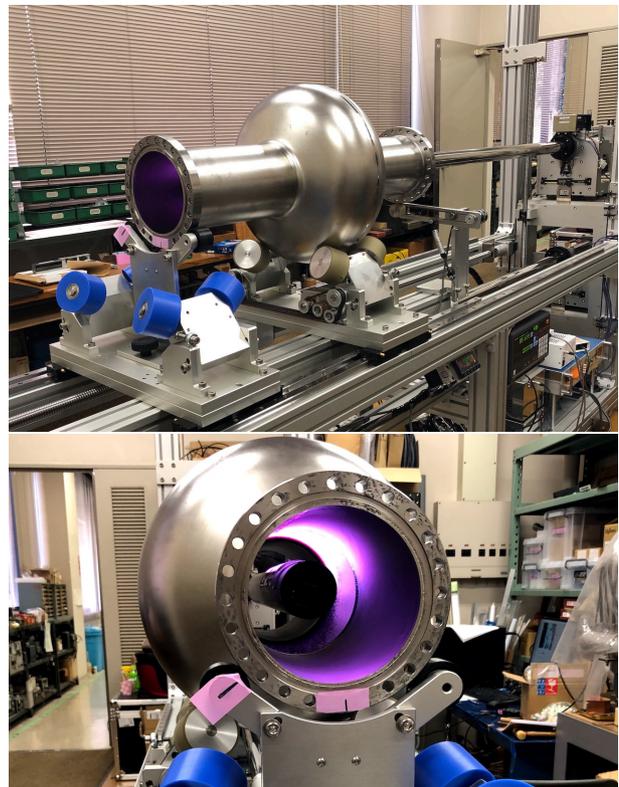


Figure 1: Inner surface inspection system for superconducting cavity.

* kuriyama@rri.kyoto-u.ac.jp

おいて上の写真は検査システムの全体像を、下の写真はカメラおよび照明がマウントされている部分を撮影したものである。

Figure 2 に、本検査システムにおいて撮影された空洞内面写真を示す。Figure 2 において、赤マルで囲まれた領域で欠陥箇所が示されている。赤点線で囲まれた四角領域は、欠陥箇所を拡大したものとなっており、猫目状の欠陥が空洞内表面に存在していることを示している。



Figure 2: Inner surface photograph of superconducting cavity including defect area taken by inner surface inspection system.

3. 検査システムの課題

超伝導空洞の歩留まり向上に大きな成功を取めている本検査システムであるが、早急に改善を要する事柄が存在している。現状の撮影スキームは、

1. カメラ焦点を調節、
2. 超伝導空洞を指定回転角回転、
3. 高分解能撮影を実施、
4. 上述の1.~3. を全周(360度)に渡り実施、
5. カメラを次の撮影ポイントまで移動

の繰り返しとなっている。高分解能撮影時に精密制御が必要であるが、微細な表面状態を効率よく高拡大率で観測するために被写界深度が浅くなり、焦点がズレることがあるため、焦点調節を手動で行っている。また、カメラおよび空洞を所定の位置に移動させ焦点の調節を終了させたのちに振動収束待機が必要であり、これらが撮影時間の増加に繋がっている。

また、現状は人力で撮影画像から欠陥箇所の検出を行っているが、微小領域を撮影する必要があるため撮影枚数が多く、Lバンドの超伝導空洞1台の内面の赤道部を撮影すると、現状のシステムで1,440枚程度の撮影画像となり、大変な労力となっている。さらに、アイリス部分についての観測の必要性も高まっているため、検査に必要な撮影枚数が増加する可能性がある。

ILC250の計画[3,4]では、超伝導空洞を約8,000台製作予定であり、大量の空洞の内面を検査することを念頭におくと、人力での欠陥箇所の検出に代わる技術の開発が急務である。

そこで、現状の検査システムの課題である

- 高分解能撮影時の焦点問題、
- 欠陥箇所確認作業の労力

への対処のために、被写界深度合成ならびに画像局所特微量と呼ばれる画像処理技術の本検査システムへの適用を検証した。セクション4および5において詳細を報告する。

4. 被写界深度合成

同一被写体に対して焦点距離の違う複数の写真を撮影し、それぞれの写真から焦点の合致している領域を選択し、前景から後景まで全域に渡って焦点が合致している1枚の合成画像を作成することを被写界深度合成や深度合成と呼び、カメラ製造メーカーや画像処理ソフトウェア等が技術の発展に力を入れている。

本技術を適用することで、超伝導空洞内表面のうねりや凹凸傾きなどに起因する焦点問題に対応できることが期待される。また、空洞形成時に発生する形状の不均一性からの焦点距離の違いの影響についても低減されることになり、より鮮明な画像を取得可能となることが期待できる。

4.1 被写界深度合成の空洞内面画像への適用

検査システムを用いて、ごく微小に焦点距離の異なる6枚の画像を取得し、6枚それぞれについて焦点の合致している領域を抜き出した。それらを合成することで1枚の被写界深度合成写真を作成した。Figure 3 に、焦点の合致している領域を抜き出したものを、Fig. 4 に Fig. 3 の各画像を合成することで作成された被写界深度合成写真を示す。Figure 3 において、1番の画像から6番の画

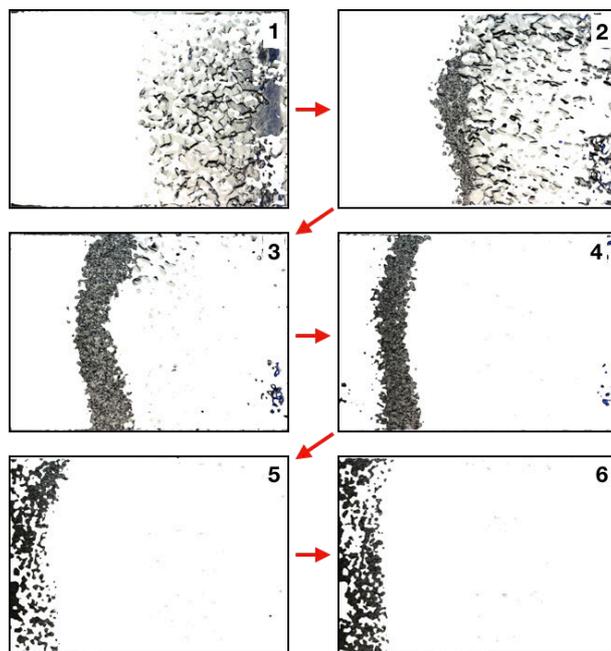


Figure 3: Extracted focus-areas of inner surface of superconducting cavity.

Table 1: Result of Automatic Detection

| Group | #Pict. | Pict. size [Pix.] | File size [KB/枚] | #Suspicious Pict. (%) | Calc. time [sec/枚] |
|------------------------------|--------|-------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| 20120410_KEK00_after_1st_VT | 3,810 | 3,488 x 2,616 | ~450 | 141 (3.7) | 1.07 |
| 20140522_KEK#01_after_1st_VT | 3,335 | 3,488 x 2,616 | ~450 | 124 (3.7) | 1.68 |
| 20170522_TB9MHI#01_AfterEP1 | 3,335 | 1,920 x 1,376 | ~150 | 93 (2.8) | 0.52 |
| 20190329_UJI_Equator06(Up) | 301 | 3,840 x 2,752 | ~500 | 6 (2.0) | 1.60 |



Figure 4: Compositing photo of inner side of superconducting cavity using focus stacking.

像に向けて、焦点距離を変化させている。

Figure 4 で示されているように、被写界深度合成は全域にわたり焦点の合致している鮮明な画像を得るための有用な手段であるため、早急に検査システムの撮影アルゴリズムの見直しを行い、撮影画像の品質向上を今後進めていくことを予定している。また、十分に被写界深度が浅い必要があるが、本技術により空洞内表面の凹凸の高さ方向の情報が得られることも期待されるため、本技術のさらなる検証を進めていくことを予定している。

5. 画像局所特徴量

監視カメラ画像からの人物特定や自動車等の自動運転のための障害物検知、X線撮影画像等からの腫瘍などの検出等、近年、画像情報からの特定物体の検出技術が大きく向上している。これらは、画像局所特徴量と呼ばれる、検出対象に特有のパターンをもとに認識を行なっていることが多い。コンピューター性能の向上に伴い、これまで以上に大量のデータを取り扱えるようになったことで、機械学習と局所画像特徴量（以下、特徴量とする）が結びつき、特定物体の自動検出技術が近年著しく向上している。

本技術を欠陥箇所 の推定に利用することで、数千から数万枚の空洞内表面画像から欠陥箇所を見つけるという大変な作業が大幅に省力化されることが期待される。

5.1 画像局所特徴量 SURF による欠陥箇所自動検出

欠陥箇所 の自動検出のために、SURF (= Speeded-Up Robust Features) [5] と呼ばれる、対象となる物体が回転

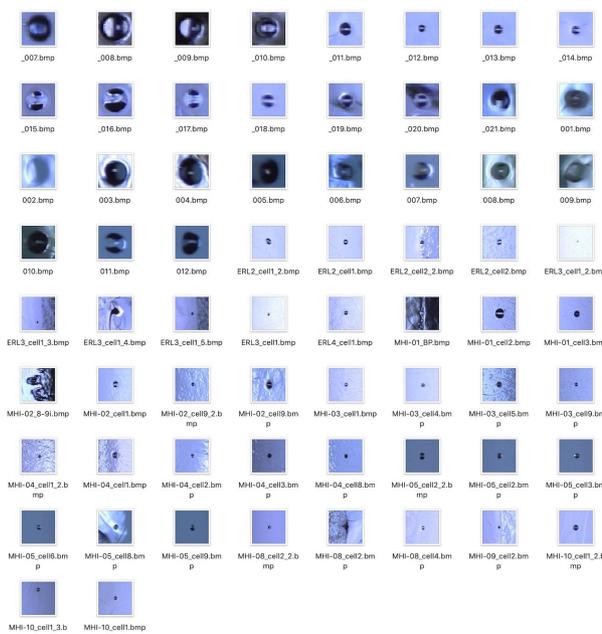


Figure 5: Template of defects for the automatic detection.

や伸縮している場合でも検出可能な頑強な特徴量を使用し、過去に検査システムで撮影された空洞内面写真約 1 万枚を対象として、欠陥箇所 の自動検出の検証を実施した。検出のためのリファレンスとなる画像には既知の 66 枚の欠陥箇所画像を使用し、検出の対象となる画像 1 枚ずつを欠陥箇所 1 枚ずつと付き合わせる方法を用いた。Figure 5 に検出に使用した 66 枚の欠陥画像を、Figure 6 に SURF による欠陥箇所自動検出で発見された欠陥箇所 の例を示す。Figure 6 では、リファレンスである欠陥箇所画像を左上に、検出対象である画像を右側に配置し、特徴量が一致した箇所について、線で結んでいる。Figure 6 において、赤点線で示した四角形の領域は、SURF 特徴量を用いて自動検出された欠陥箇所を拡大したものとなっている。Table 1 に、各画像集団毎に欠陥箇所 の自動検出の結果をまとめたものを示す。

対象とする画像の種類・ファイル容量に依存するが、嫌疑画像の書き出し処理を含めて、1 枚の画像について 1~2 秒程度の処理時間¹ となっているため、計算速度については現実的であると言えるが、欠陥の無い画像を検出する誤検出が多いため、欠陥検出アルゴリズムの改良が必須である。また未検出の欠陥の有無について、定量

¹ MacOS 10.14 (Macbook Pro 2016, 2.9GHz, 4cores) 上で OpenCV4 を Python3 より使用した場合の実行結果

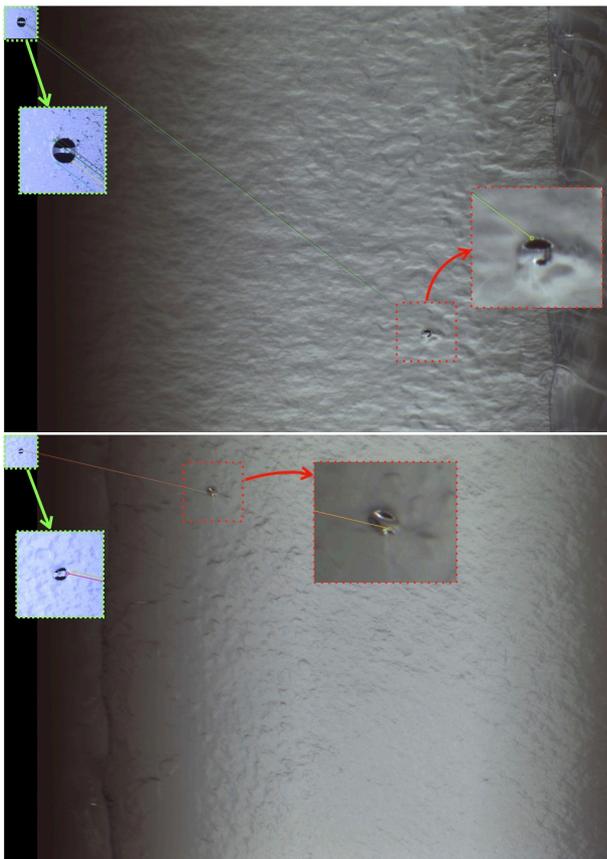


Figure 6: Examples of defect found by automatic detection using SURF.

的に評価することが必要である。

6. まとめ

超伝導空洞内面検査システムの高度化に向けた画像処理技術の適用について、検討を行った。被写界深度合成について、焦点問題への対処として撮影画像の鮮明化が期待できることが示された。また、画像局所特徴量について、膨大な労力と熟練を必要としてきた欠陥箇所の検出について大幅に省力化できる可能性が示されたが、誤検出の低減および検出の網羅性向上のために、機械学習を利用した欠陥画像データベースによる自動検出を検証することを予定している。また、現在開発中の検査システムに対して、これらの画像処理技術を適用し、実機において効果確認を行うことを予定している。

参考文献

- [1] M. S. Champion *et al.*, “Quench-Limited SRF Cavities: Failure at the Heat-Affected Zone”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., JUNE 2009 19-3, 1384-6 (2009).
- [2] Y. Iwashita, Y. Tajima, H. Hayano, “Development of High Resolution Camera for Observations of Superconducting Cavities”, Physical Review ST Accelerators and Beams, 11, [093501-1]-[093501-6] (2008).
- [3] “ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory”; <https://icfa.fnal.gov/>

- wp-content/uploads/ICFA-Statement-Nov2017.pdf
- [4] H. Aihara *et al.*, “The International Linear Collider A Global Project”; https://ilchome.web.cern.ch/sites/ilchome.web.cern.ch/files/ILC_Global_Project_Final.pdf
 - [5] Herbert Bay *et al.*, “SURF: Speeded Up Robust Features”; <https://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/eccv06.pdf>