

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО 2D СКАНУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МІНІСЕНСОРА

В.О. Троїцький, М.М. Карманов, С.Р. Михайлов, В.О. Шаласєв

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: krm.paton@ukr.net

Для неруйнівного контролю об'єктів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України створено недорогий рентгенівський 2D сканер на основі цифрового мінісенсора. Сканер дозволяє багаторазово збільшити робочу зону контролю. Отримані при скануванні фрагменти рентгенівських зображень програмно зшиваються в повноформатне цифрове зображення. Досліджуються алгоритми зшивання зображень, що дозволяють підвищити точність сканування до 20 мкм. Це набагато вище, ніж точність сканера з електромеханічним приводом. Бібліогр. 6, рис. 7.

Ключові слова: неруйнівний контроль, зшивання зображень, цифрова рентгенівська візуалізація, 2D рентгенівський сканер

Вступ. Рентгенівські плоскопанельні детектори, що широко використовуються в неруйнівному контролі для заміни плівкової радіографії, дозволяють отримувати цифрові зображення безпосередньо при просвічуванні контрольованого виробу. Їх розміри можна порівняти з розмірами рентгенівської плівки. Основний недолік таких панелей – висока вартість і відносно низька роздільна здатність (близько 80...120 мкм), що стримує їх застосування в Україні.

Одним із нових напрямків цифрової радіографії, пропонованих Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, є створення детекторів на основі недорогих високочутливих рентгенівських мінісенсорів [1–3]. Роздільну здатність сенсора можна порівняти з роздільною здатністю рентгенівської плівки (в межах 20 мкм). Проте такі сенсори мають невелике робоче поле (в межах 24×34 мм) [2], що у багатьох випадках значно менше від розмірів досліджуваного виробу. Для збільшення контрольованої зони пропонується виконувати електромеханічне сканування виробів мінісенсором.

Конструкторські особливості електромеханічного сканування. Цей метод широко використовується в комп'ютерних сканерах, які дозволяють переводити в цифровий формат будь-які тексти та зображення, які згодом можуть корегуватися, пересилатися поштою або зберігатися в архівах. У таких пристроях точність електромеханічного сканування узгоджена з роздільною здатністю цифрових фотолінійок, що використовуються для зчитування зображень. У цьому випадку жодних проблем із точністю сканування зображень не виникає. Однак створення прецизійних електромеханічних сканерів (точність ~20 мкм) без висококваліфікованих конструкторів, за відсутності експериментального виробництва, в умовах обмеженого фінансування є досить про-

блематичним. Нами раніше було запропоновано програмні методи підвищення точності сканування рентгенівських зображень [4–5]. Було розроблено недорогий прецизійний рентгенівський однопрохідний (вздовж осі X) сканер для контролю протяжних об'єктів на основі мінісенсора S10811-11 (Hamamatsu Photonics). Фрагменти рентгенівських зображень (рис. 1, *a*), які зчитуються з перекриттям в межах точності електромеханічного сканування, аналізуються на точну відповідність (збіг) їх меж кореляційним методом, який широко використовується при побудові панорамних фотознімків з окремих його фрагментів. Результат зшивання 10-ти зображень наведено на рис. 1, *б*. Максимальна ширина рентгенівського знімка – 34 мм, довжина – до 500 мм.

Для збільшення ширини зони контролю пропонується виконувати сканування за двома координатами X і Y , тобто 2D сканування (рис. 2). За цією тематикою отримано патент [6].

Об'єкт дослідження – технічні та програмні засоби отримання повноформатних зображень при рентгенотелевізійному неруйнівному контролі з використанням мінісенсорів.

Предмет дослідження – детерміновані та кореляційні методи підвищення точності рентгенівського 2D сканування з використанням мінісенсорів.

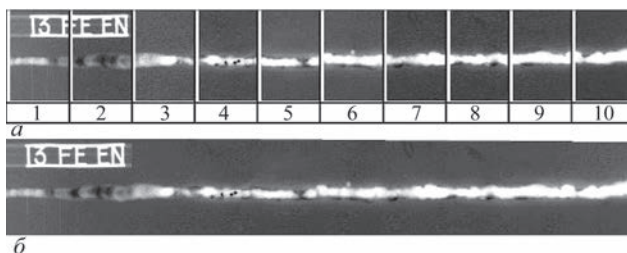


Рис. 1. Цифрові рентгенівські знімки зварного з'єднання: *a* – вихідні фрагменти рентгенівських знімків; *б* – результат зшивання 10-ти зображень

Мета дослідження – розробка алгоритмів прецизійного програмного зшивання цифрових зображень і вибір відповідних електронних та електромеханічних елементів технічної реалізації 2D сканування, що забезпечує високу чутливість і роздільну здатність контролю.

Методи дослідження та апаратура. Дослідження проводилися з використанням мікроконтролерів ARDUINO та відповідних програмних засобів. В якості електропривода сканера використовується кроковий двигун з ремінним приводом (трансмісією), яким рухається мінісенсор.

Конструкція 2D сканера. Для стандартних конструкторських наборів 2D сканерів вартістю до 200 доларів США зазвичай використовуються гвинтові або ремінні приводи. Точність гвинтового сканера – в межах 0,1 мм (залежить від класу точ-

ності гвинта), розмір області сканування – 180×300 мм, вага – до 10 кг; для ремінної передачі: точність – у межах 0,2 мм, область сканування – 300×400 мм, вага – до 5 кг. В обох випадках точність сканування нижча від точності мінісенсора (0,02 мм). Точність гвинтового сканера та його область сканування можна підвищити, але при цьому різко підвищується ціна та вага сканера. З точки зору ергономіки (вага, область сканування) сканер з ремінною передачею кращий. Дослідження впливу похибки механіки такого сканера на точність зшивання цифрових зображень є актуальним (рис. 2).

Приклади застосування рентгенівського скануючого детектора. Дослідження проводили на рентгенівському апараті безперервної дії РАП-150/300 (рис. 3, а). Було використано зразок точкового зварного з'єднання трьох сталевих ли-

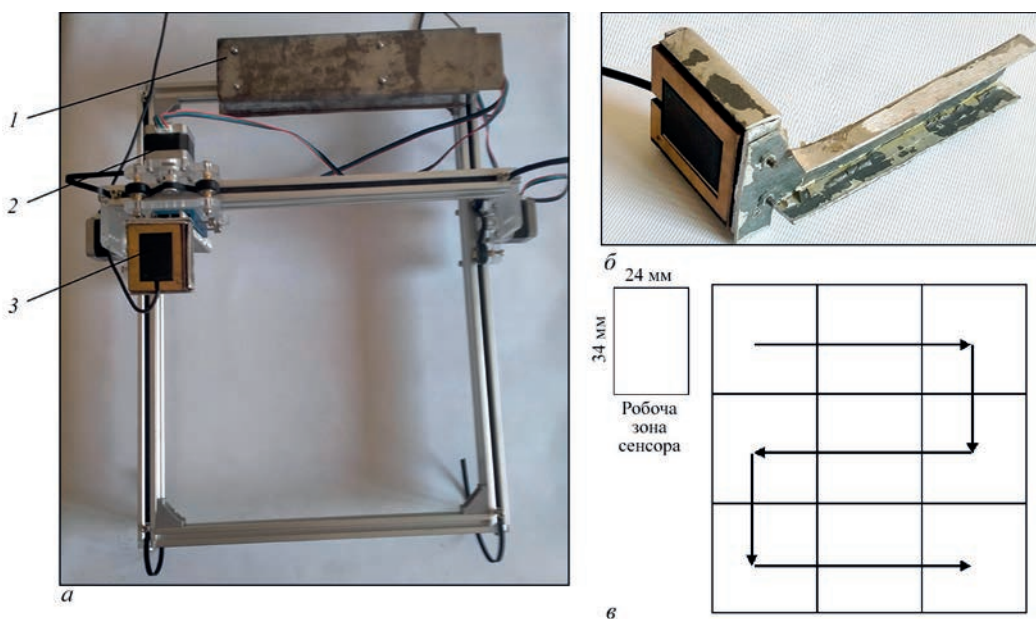


Рис. 2. 2D сканування: конструкція сканера (а): 1 – контролер, 2 – кроковий двигун, 3 – мінісенсор; кріплення сенсора (б); схема сканування 4×3 кадри (в)

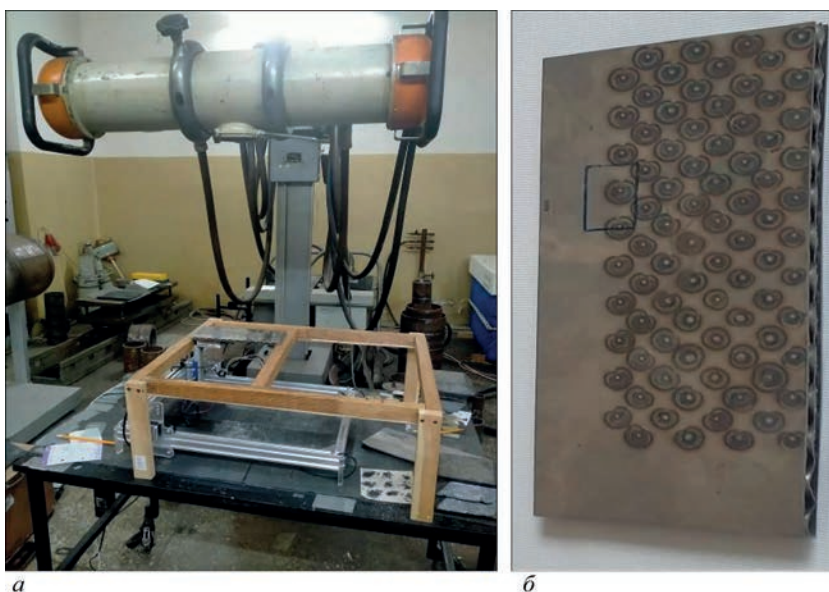


Рис. 3. Процес 2D сканування зразка (а), зразок точкового зварного з'єднання трьох сталевих листів (б)

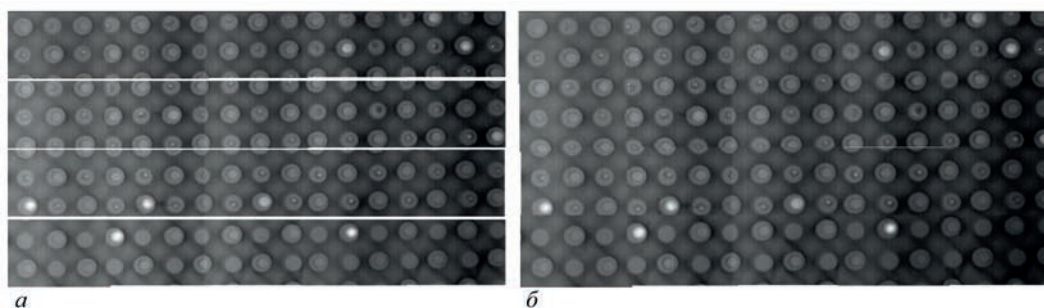


Рис. 4. Суміжні смуги зображень як результат зшивання 5-ти зображень вздовж кожної смуги (а), результат зшивання 4-х зображень смуг (б)

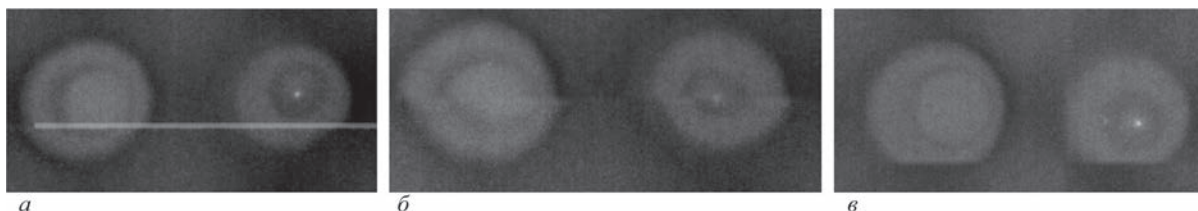


Рис. 5. Неточності зшивання фрагментів зображень за вертикаллю: а – розбіжність елементів зображень; б – смуга; в – обрізаний нижній край зображення

стів 110×240 мм завтовшки 0,5 мм кожен (стілнкова конструкція, рис. 3, б). Напруга на трубці: $U = 50$ кВ, анодний струм: $I = 9$ мА, час формування (накопичення) зображення: $t = 10$ с, фокусна відстань – 700 мм, схема сканування – 5×4 кадри.

Керування 2D сканером виконувалося за допомогою комп'ютера. Спочатку зшивалися цифрові фрагменти зображень кожного окремого ряду (рис. 4, а). Суміжні фрагменти зображення перекриваються в межах точності сканера (0,2 мм). Навколо цієї зони межі зшивання цифрових зображень уточнюються із застосуванням кореляційного аналізу з точністю до 0,02 мм. Потім аналогічним чином зшиваються чотири смуги (рис. 4, б). І тут виникають проблеми (рис. 5).

Виявлені недоліки зшивання за вертикаллю (рис. 5) пов'язані з неточністю позиціонування міні-сенсора та його перекосом. Це викликає зсув кожного наступного фрагмента зображення (рис. 6).

У цьому випадку кореляційні методи не забезпечують наступного точного вертикального зшивання «ступінчастих» смуг зображень. Зсув фрагментів зображень можна усунути за рахунок підвищення точності електромеханічного привода сканера з 100 до 20 мкм. Проте вартість такого сканера різко зростає. Було запропоновано програмну корекцію зміщення фрагментів зображень. Для цього виконується попереднє калібрування сканера. Обчислюються зсуви зображення (систематична похибка), викликані похибкою електромеханіки сканера (до 200 мкм) і можливим перекосом сенсора. Отримані величини зсувів визначають мінімальну зону перекриття суміжних фрагментів зображень. У межах цієї зони виконується кореляційний аналіз, після чого фрагменти зображень зшиваються. Попередні дослідження

показують, що в цьому випадку точність зшивання зображень може бути підвищена до 20 мкм, що на порядок вище, ніж точність привода електро-

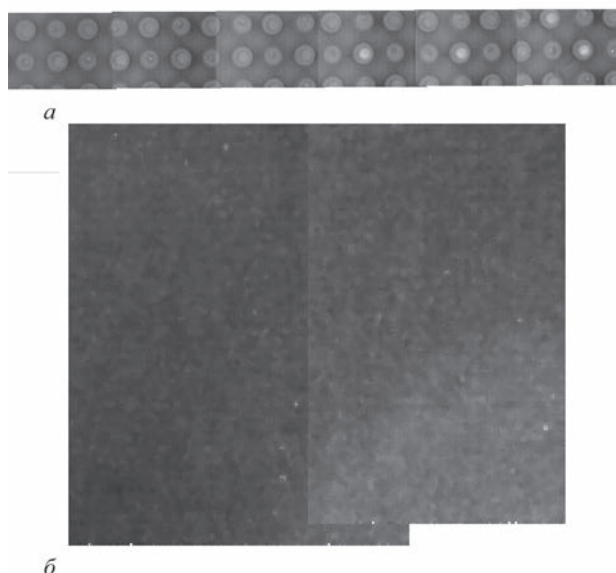


Рис. 6. Зміщення фрагментів зображень при горизонтальному зшиванні (а), збільшений фрагмент зображення зони зшивання (б)

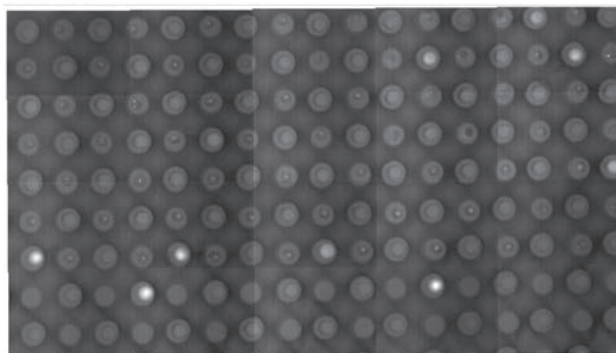


Рис. 7. Зшивання фрагментів зображення кореляційно-детермінованим методом

механічного сканування (200 мкм) (рис. 7). Зміщення зображень, що зшиваються, відсутні.

Висновки

1. Висвітлено проблему прецизійного рентгівського 2D сканування, коли точність мінісенсора на порядок вища, ніж точність електромеханічного привода сканера.

2. Для компенсації помилок привода електромеханічного сканування цифрового зшивання запропоновано алгоритм обчислення систематичної похибки електромеханічного привода на етапі попереднього калібрування сканера.

3. Експериментальні дослідження підтвердили, що запропонований алгоритм попереднього калібрування сканера забезпечує точність цифрового зшивання зображень 0,02 мм при точності електромеханічного сканування 0,2 мм.

4. Запропонований алгоритм попереднього калібрування сканера дозволяє використовувати для сканування сканери з низькою точністю електромеханічного привода сканування.

Список літератури

1. Ковецкая Е.Е. (2007) Возможности использования современных дигитальных технологий рентгенодиагностики в стоматологии. *Современная стоматология*, **1**, 39–42.
2. CCD area image sensor S10811-11 – Hamamatsu Photonics. www.hamamatsu.com.

3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT. www.duerr-ndt.de.
4. Троїцький В.О., Карманов М.М., Михайлов С.Р. та ін. (2020) Скануючі рентгенівські системи на основі мініатюрних твердотільних перетворювачів. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **3**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
5. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R. et al. (2023) Scanning X-ray detector for non-destructive testing. *Materials Evaluation*, **81**(5), 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
6. Троїцький В., Шалаєв В., Карманов М., Пастовенський Р. (2024). *Портативна система рентгентелевізійного контролю небезпечних об'єктів та зварних з'єднань*. Патент України № 154276. Опубл. 12.10.2023.

References

1. Kovetskaya, E.E. (2007) Possibilities of using modern digital technologies of X-ray diagnostics in dentistry., *Sovrem. Stomatologiya*, **1**, 39–42 [in Russian].
2. CCD area image sensor S10811-11, Hamamatsu Photonics. www.hamamatsu.com.
3. DR 7 NDT Installation and Operating Instruction. DÜRR NDT. www.duerr-ndt.de.
4. Troitskiy, V.O., Karmanov, M.M., Mikhailov, S.R., Shalaev, V.O., Pastovenskiy, R.O. (2020) Scanning X-ray system based on miniature solid-state transducers. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 43–47 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.03.06>
5. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Mikhailov, S.R., Pastovenskiy, R.O., Shalaev, V.A. (2023) Scanning X-ray detector for non-destructive testing. *Materials Evaluation*, **81**(5), 22–29. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04290>
6. Troitskiy, V.A., Karmanov, M.N., Pastovenskiy, R.O., Shalaev, V.A. (2024) *The portable X-ray TV system for non-destructive testing of hazardous objects and welded joints*. Patent 154276 UA, Publ. 12.10.2023 [in Ukrainian].

INCREASING THE ACCURACY OF 2D X-RAY SCANNING USING A MINI SENSOR

V.A. Troitskiy, M.N. Karmanov, S.R. Mikhailov, V.A. Shalaev

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: krm.paton@ukr.net

For non-destructive testing of objects, an inexpensive 2D X-ray scanner has been created at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, which is based on a digital mini sensor. Scanning with such a sensor allows multiplying the working testing area. The fragments of digital X-ray images obtained during scanning are stitched into a full-format digital image by software. Image stitching algorithms are being studied, which allow increasing the scanning accuracy to 20 microns. This scanning accuracy is much higher than that of a scanner with an electromechanical drive. 6 Ref., 7 Fig.

Keywords: non-destructive testing, stitching images, X-ray digital imaging, portable 2D X-ray scanner

Отримано 08.10.2024

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2024

Прийнято 09.12.2024

НОВА СЕРІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРІВ



PATON.UA

