УДК 681.518.5:004.89

АДАПТИВНОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ВЫЯВЛЕНИИ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Клопов И.В.
Московский государственный технологический университет Станкин
г. Москва, Российская Федерация

Актуальность и предмет исследования. Повышение достоверности автоматизированного контроля сварных соединений является актуальной задачей вследствие роста требований к безопасности технических объектов и необходимости сокращения влияния субъективного экспертного фактора. Современные модели глубокого обучения демонстрируют высокие показатели распознавания дефектов сварки на изображениях и других диагностических данных: в частности, ансамблевые подходы применяются для выявления и классификации дефектов с использованием пространственных и частотных признаков [1]. Российские исследования также подтверждают применимость машинного зрения для обнаружения поверхностных дефектов сварных соединений при визуальном контроле [2]. Вместе с тем практическая диагностическая система редко ограничивается одним каналом: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, визуальный и тепловизионный источники формируют разнородные признаки, а многоветвевые схемы глубокого слияния уже показывают результативность при автоматическом контроле сварных швов [3].

Проблема деградации каналов. Проблема состоит в том, что качество отдельных каналов в производственных условиях является нестационарным. Канал может деградировать из-за рассинхронизации, ухудшения акустического контакта, загрязнения оптики, фонового шума или изменения режима съемки. Поэтому простое усреднение вероятностных выходов классификаторов не гарантирует устойчивого решения, а энтропийное взвешивание способно ошибочно усиливать уверенный, но уже отказавший источник. Для учета такого риска в работе рассматривается адаптивная схема агрегирования, в

которой вес канала определяется не только локальной уверенностью, но и накопленной надежностью источника, а также его расхождением с межканальным консенсусом. Теоретическая предпосылка такого подхода согласуется с исследованиями по слиянию многоканальных данных в условиях неопределенности и конфликтующих свидетельств [4].

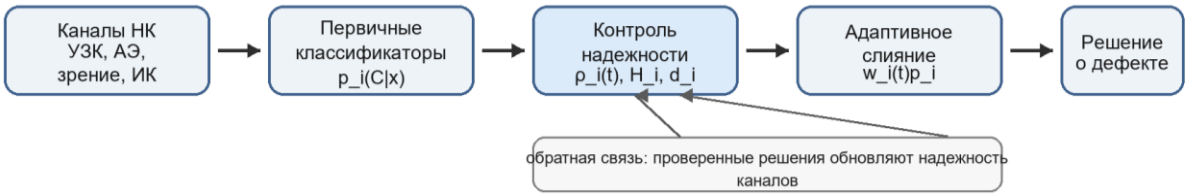


Рис. 1 - UML-подобная схема адаптивного агрегирования данных многоканального контроля сварных соединений

Методика эксперимента. Целью исследования является экспериментальная оценка целесообразности адаптивного взвешивания диагностических каналов при автоматизированном выявлении дефектов сварных соединений в условиях деградации части источников информации. Для проверки был проведен вычислительный эксперимент на имитационном потоке из 9000 сварных соединений с шестью классами состояния: без дефекта и пять типовых дефектных состояний. Моделировались четыре канала контроля. До момента t = 3300 все каналы имели сопоставимую точность, после чего каналы S1 и S3 переводились в режим систематически ухудшенного распознавания. Сравнивались три способа агрегирования: статическое усреднение вероятностей, энтропийное взвешивание и предложенное адаптивное взвешивание с экспоненциальным обновлением надежности канала.

Результаты моделирования. В серии из 30 повторов на постдеградационном участке статическое усреднение обеспечило вероятность обнаружения дефекта 96,15 ± 0,30%, долю пропусков 3,85 ± 0,30%, долю ложных срабатываний 19,25 ± 0,78% и общую точность 80,72 ± 0,43%. Энтропийное взвешивание показало сходную вероятность обнаружения дефекта 95,96 ± 0,32%, однако увеличило долю ложных срабатываний до 20,34 ± 0,79% и снизило общую точность до 79,67 ± 0,44%. Адаптивное взвешивание обеспечило вероятность обнаружения дефекта 96,82 ± 0,28%, долю пропусков

3,18 ± 0,28%, долю ложных срабатываний 15,87 ± 0,71% и общую точность 84,20 ± 0,39%. Средняя задержка обнаружения деградации составила 169 соединений для канала S1 и 306 соединений для канала S3 после начала отказа.

Выводы и практическая значимость. Полученные результаты показывают, что в задачах многоканальной технической диагностики локальная уверенность классификатора не должна отождествляться с надежностью источника. Наиболее устойчивым оказался подход, в котором вес канала является динамическим состоянием системы и корректируется по накопленной истории согласования с проверяемыми решениями. Практическая значимость результата состоит в возможности предварительного программного контроля работоспособности диагностических каналов без остановки общего контура распознавания. В дальнейшем предложенную схему целесообразно проверить на реальных архивах ультразвуковых, визуальных и тепловизионных данных сварных соединений, а также дополнить процедурой объяснения вклада каждого канала в итоговое диагностическое решение.

Список использованной литературы

1. Vasan V. Ensemble-based deep learning model for welding defect detection and classification / V. Vasan, N. Sridharan, R. Balasundaram, S. Vaithiyanathan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. - 2024. - Vol. 136. - Art. 108961. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108961.
2. Емельянова М.Г. Обнаружение поверхностных дефектов сварных соединений при визуальном контроле методами машинного зрения / М.Г. Емельянова, С.С. Смаилова, О.Е. Бакланова // Компьютерная оптика. - 2023. - Т. 47, № 1. - С. 112-117. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1137. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-poverhnostnyh-defektov-svarnyh-soedineniy-pri-vizualnom-kontrole-metodami-mashinnogo-zreniya.
3. Kim K. Multi-Branch Deep Fusion Network-Based Automatic Detection of Weld Defects Using Non-Destructive Ultrasonic Test / K. Kim, K.S. Kim, H.-J. Park // IEEE Access. - 2023. - Vol. 11. - P. 114489-114496. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3324717.
4. Zhang Q. Information fusion for large-scale multi-source data based on the Dempster-Shafer evidence theory / Q. Zhang, P. Zhang, T. Li // Information Fusion. - 2025. - Vol. 115. - Art. 102754. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102754.