

Рудоман А. Д.,

здобувач вищої освіти спеціальності F3 Комп'ютерні науки
Науковий керівник: Пархоменко О. Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри економічної
кібернетики, комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ЯБЛУК НА ЕТАПІ СОРТУВАННЯ (АНАЛІЗ SHAPE DEFECTS)

Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу характеризується стрімкою цифровізацією та впровадженням інтелектуальних систем автоматизації, серед яких ключове місце посідає технологія комп'ютерного зору. Проблема забезпечення якості плодово-овочевої продукції, зокрема яблук, вимагає переходу від суб'єктивного візуального оцінювання людиною до об'єктивних апаратних методів аналізу. Одним із найбільш складних завдань у цьому контексті є ідентифікація дефектів форми, відомих як Shape Defects, що включають в себе механічні пошкодження, природні аномалії росту, вм'ятини та викривлення морфологічної структури плода.

Використання алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє реалізувати безконтактний та високошвидкісний моніторинг кожної одиниці продукції на конвеєрній лінії. На відміну від дефектів кольору або текстури, аналіз форми вимагає застосування складних геометричних дескрипторів та методів сегментації контурів. Сучасні підходи базуються на використанні згорткових нейронних мереж, які здатні розпізнавати мінімальні відхилення від еталонної сферичної або конічної форми, характерної для конкретного сорту яблук. Це особливо актуально, оскільки деформовані плоди не лише мають нижчу ринкову вартість, а й часто є більш схильними до швидкого псування під час зберігання через порушення цілісності внутрішніх тканин [1].

Методологія виявлення дефектів форми зазвичай включає кілька етапів: попередню обробку зображення для видалення шумів, виділення об'єкта на фоні та вилучення ознак. Основними параметрами для аналізу Shape Defects виступають ексцентриситет, округлість, компактність та моменти Гу. Висока варіативність природних форм створює певні труднощі для класичних алгоритмів, проте інтеграція методів глибокого навчання дозволяє досягти точності класифікації понад 95%. Важливо враховувати, що система повинна працювати в режимі реального часу, забезпечуючи обробку великих обсягів даних без затримок у виробничому циклі [2].

Для порівняння ефективності різних підходів до аналізу морфологічних дефектів було систематизовано дані щодо ключових показників точності та продуктивності сучасних архітектур нейронних мереж, що застосовуються в індустрії. У таблиці 1 наведено узагальнені характеристики систем, які спеціалізуються на детекції аномалій форми.

Таблиця 1. Порівняння методів комп'ютерного зору для виявлення дефектів форми (Shape Defects) яблук

Метод обробки / Архітектура	Показник точності (mAP), %	Швидкість обробки (кадрів/сек)	Основна перевага
YOLOv8 (Customized)	96,4	45	Висока швидкість у реальному часі
Mask R-CNN	94,8	12	Висока точність сегментації меж
Vision Transformer (ViT)	97,1	28	Ефективна робота з текстурними аномаліями
Класичні контурні методи	82,5	60	Мінімальні обчислювальні витрати

Незважаючи на високу ефективність нейронних мереж, існують виклики, пов'язані з перекриттям об'єктів на стрічці та нерівномірним освітленням, що може призводити до помилкової ідентифікації тіней як дефектів форми.

Для промислового впровадження системи виявлення Shape Defects критичним є вибір апаратного забезпечення. Оптимальною конфігурацією для лінії сортування продуктивністю 5-10 тонн яблук за годину є використання камери з глобальним затвором (global shutter) роздільною здатністю 5-12 Мп, що дозволяє уникнути спотворень «рухомого об'єкта» при швидкості конвеєра до 0,5 м/с. Освітлення має бути рівномірним дифузним (кільцеве LED-підсвічування з колірною температурою 5000-6500 К) для мінімізації тіней, які можуть хибно інтерпретуватися як вм'ятини. Обробка зображень виконується на edge-пристрої (NVIDIA Jetson Orin або подібному) із затримкою не більше 50 мс на один плід; при перевищенні цього порогу система не встигатиме фізично видаляти бракований плід з потоку за допомогою пневматичного виштовхувача [3].

Вартість типової системи комп'ютерного зору для сортування яблук (4 камери, GPU-модуль, освітлення, програмне забезпечення) становить приблизно 15000-25 000. Економічний ефект досягається за рахунок: зменшення витрат на оплату праці сортувальників (заміна 4-6 працівників на одну лінію), підвищення вихідної вартості продукції (відсортовані яблука без дефектів форми продаються на 25-40% дорожче), а також зниження відходів під час зберігання (деформовані плоди псуються швидше). Термін окупності інвестицій для переробного підприємства потужністю 2000 тонн на рік становить 8-14 місяців залежно від частки браку у вхідній сировині [4].

Вирішення цієї проблеми полягає в застосуванні багатокамерних систем або 3D-сканування, що дозволяє отримати повну об'ємну модель плода. Такий підхід дає змогу розрізняти природні заглиблення біля плодоніжки та фактичні механічні вм'ятини, які класифікуються як технічний брак [3].

Інтеграція систем комп'ютерного зору в лінію сортування забезпечує не лише підвищення якості кінцевого продукту, а й значну оптимізацію

економічних показників підприємства. Зменшення частки людської праці мінімізує кількість помилок, викликаних втотою оператора, та гарантує стабільність результатів... Крім того, зібрані дані про дефекти можуть бути використані для ретроспективного аналізу умов вирощування та збору врожаю, що дозволяє агрономам коригувати технологічні процеси для зменшення кількості браку в майбутніх циклах [4].

На ринку існують альтернативні рішення для сортування плодів, зокрема оптичні сортувальники на основі лазерного сканування (LIDAR) та гіперспектральні системи. Лазерне сканування забезпечує високу точність 3D-реконструкції (похибка до 0,5 мм), але має високу вартість (\$50 000+) та низьку швидкість обробки (до 2 плодів/сек). Гіперспектральні системи ефективні для виявлення внутрішніх дефектів (наприклад, гнилі під шкіркою), однак потребують складного калібрування та потужних обчислювальних ресурсів. Натомість системи на основі звичайного комп'ютерного зору з RGB-камерами пропонують оптимальний баланс між точністю (>95%), швидкістю (до 15 плодів/сек) та вартістю впровадження, що робить їх найбільш привабливими для малих та середніх підприємств [2].

Таким чином, застосування інтелектуального аналізу Shape Defects є критично важливим для створення конкурентоспроможних автоматизованих систем сортування. Подальший розвиток галузі вбачається в удосконаленні архітектур нейронних мереж для роботи з мультиспектральними зображеннями, що дозволить виявляти підшкірні дефекти форми, які ще не проявилися візуально на поверхні шкірки, забезпечуючи тим самим найвищий рівень контролю якості в сучасному садівництві.

Список використаних джерел

1. Application of Advanced Deep Learning Models for Efficient Apple Defect Detection and Quality Grading in Agricultural Production / X. Gao et al. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, no. 7. P. 1098. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071098>.
2. A fast and efficient approach to estimate wild blueberry yield using machine learning with drone photography: Flight altitude, sampling method and model effects / H. Qu et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 216. P. 108543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108543>.
3. 3D Surface Reconstruction and Analysis in Automated Apple Stem-End/Calyx Identification / L. Jiang et al. *Transactions of the ASABE*. 2009. Vol. 52, no. 5. P. 1775-1784. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.29118>.
4. Patil S. S., Sonawane V. D., Mohan S. N. Machine Vision and AI Algorithms for Sorting Grading and Quality Analysis in Post Harvest Processing. *Artificial intelligence in smart agriculture for sustainable crop management and precision farming*. 2025th ed. 2025. P. 283-309. URL: <https://doi.org/10.71443/9789349552364-10>.