

УТКІНА Т. Ю.

Черкаський державний технологічний університет

ORCID ID: 0000-0002-6614-4133

e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua

РЯБЦЕВ В. Г.

ООО "ДП СВ "Альтера", м. Черкаси

ORCID ID: 0000-0002-0592-2413

МОНІТОРИНГ РОЗВИТКУ КУРЯЧИХ ЯЄЦЬ НА БАЗІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНУ ЕМБРІОНІВ

У роботі наведено результати досліджень штучної нейронної мережі для моніторингу розвитку курячих яєць з розпізнаванням стану ембріонів, що дозволяє уникнути недоцільного використання інкубатора й відібрати життєздатні ембріони для виведення пташенят. Застосування засобів штучного інтелекту розширює можливості виявлення дефектних яєць, підвищує точність та швидкість візуального контролю під час виконання автоматизованого овоскопування.

Ключові слова: інкубація, штучна нейронна мережа, овоскопування, технічний зір, ембріон.

TETYANA UTKINA

Cherkasy State Technological University

VLADIMIR RYABTSEV

"LLC DP SV "Altera", Cherkasy

MONITORING THE CHICKEN EGGS DEVELOPMENT ON THE BASIS OF THE NEURAL NETWORK FOR RECOGNITION OF THE EMBRYOS STATE

Currently, a lot of human resources are required to get rid on poultry farms from viruses and determining the fertility of chicken embryos with three states: live, dead and weak, and then take measures to increase hatching. The article discusses an artificial neural network (ANN) structure to automate the monitoring of the chicken eggs development with identifying viable embryos. A technique for separating the chicken eggs area to sectors to automate the ovoscopying process has been developed. The structural scheme of the artificial neural network contains a set of synapses, each of which is characterized by its weight. Synapses input signals are multiplied by weight and folded by adder. When adding, a threshold is also taken into account, which has a negative value. To generate a signal at the network output, the activation function of a single jump is applied. A VHDL model of neural network is developed, consisting of an adder of the input signal elements and subtractor vector, discharge grid output signal of which is the output signal of the network. The model of an adder of the input signals vector is designed in VHDL. The modeling of recognition of various states of chicken embryos is performed. When perform the ovoscopying, the light sector of the egg area corresponds to a signal equal to 0, and the dark sector to signal 1. Total, the state of 6 sectors of area of the poultry egg in the model is analyzed. During the simulation, when a live embryo is fixed, the signal at the output of the network is 1, and when a dead egg is detected, this signal is 0. Verification of the VHDL model against test sets is confirmed the diagnostic properties of the ANN model. By including artificial intelligence in the FH vision system, visual control of the chicken embryos development is automated using an autonomous, easily integrated solution, as opposed to executing solutions that require special programming tools and runtime environments. This vision system also does not require artificial intelligence expertise to set up in poultry farms.

Keywords: incubation, artificial neural network, ovoscopying, technical vision, embryo.

Постановка проблеми

Моніторинг розвитку курячих ембріонів є важливою частиною процесу вилуплення, що дозволяє визначити, коли яйце не розвивається, а також коли яйце близьке до вилуплення. Можливість встановити, що яйце більше не розвивається, дозволяє видаляти мертві яйця з інкубатора, щоб запобігти марному витрачання часу та енергії на інкубацію яєць, які не є фертильними, й запобігти поширенню бактеріальної інфекції від яєць, які більше не розвиваються через інфекцію. Можливість уважніше стежити за розвитком ембріона дозволяє визначити оптимальний час для зміни параметрів інкубації, таких як вологість, для створення найкращих умов вилуплення яєць, що веде до більш ефективного виробництва курчат [1, 2]. Також є можливість використовувати різні світлові та температурні умови для впливу на час вилуплення курчат, що дозволить прискорити процес інкубації та вивести здорових курчат за короткий період часу.

Аналіз останніх джерел

Проведені численні дослідження виявили вплив різної температури та дію світла на розвиток курячих ембріонів [3, 4]. Відомі методи моніторингу розвитку ембріонів з використанням різних засобів візуалізації, включаючи ультразвук, мікроскопію, томографію, магнітно-резонансну томографію та інфрачервону візуалізацію [5].

При придбанні партії інкубаційних яєць достовірно відомо, що не всі 100 % яєць запліднені або матимуть життєздатний зародок, готовий розвиватися. Завжди деякий відсоток яєць у кожній партії є непридатним для виведення курчат. Для уникнення недоцільного використання інкубатора й підвищення вивідності птиці до максимуму виконують овоскопування, що дозволяє виявити можливі дефекти яєць у період інкубації [6, 7]. Овоскопування яєць виконують шляхом просвічування за допомогою овоскопу. Також можна виміряти висоту та діаметр повітряної камери яйця.

Овоскопування є основним прийомом біологічного контролю яєць під час інкубації. Просвічування яєць за допомогою овоскопу виконують у різні вікові періоди:

- курячі яйця – на 7, 11, 19 добу;
- індиківі та качині яйця – на 8, 13, 24–25 добу;
- гусячі – на 9,5; 14–15; 28 добу.

При овоскопуванні яєць досліджують умови розвитку життєздатного зародка: будову яйця; однорідність його шкаралупи; розташування невеликого розміру повітряної камери на тупому кінці яйця; знаходження жовтка у центральній частині яйця; при провертанні яйця обертання жовтка має бути повільніше, за саме яйце; відсутність сторонніх включень [7].

При першому перегляді яєць виділяють незапліднені яйця та яйця з кров'яними кільцями («кров-кільце»). Незапліднене яйце – ембріон не просвічується, видно лише жовток у центрі яйця у вигляді великої жовтої плями.

При другому перегляді основним критерієм розвитку ембріонів є швидкість замикання алантоїсу в гострому кінці яйця. Виявляється сильне відставання у розвитку: ембріон розташований у центрі яйця, але його розміри невеликі, судини алантоїса погано наповнені кров'ю, гострий кінець яйця просвічується.

При третьому перегляді встановлюють ступінь розвитку самого ембріона та виділяють яйця із загиблими ембріонами – «замерлими ембріонами».

На птахофабриках та в домашніх курниках для виконання овоскопування в більшості випадків застосовують молоточковий овоскоп, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 1.

Під час проведення огляду вміст яйця повинен з однаковою швидкістю переміщатися з одного краю до іншого і представляти собою деяку однорідну масу. При цьому утримуючі жовток крупинки повинні залишатися на своєму місці. За умови виявлення обірваної крупинки, а це відбувається у випадку, якщо ембріон не повернувся на вихідну позицію після повороту, то зародок видаляється. Звісно ж, після овоскопування. В принципі, як і тоді, коли ембріон знаходиться надто близько у шкаралупі.

Овоскопування здійснюють у теплому приміщенні, при цьому його тривалість не повинна перевищувати 5 хв. Однак часу на виконання ручного овоскопування за допомогою молоточкового овоскопа замало, відтак можна переохолодити яйця та ембріони замруть. Крім того, проведення ручного овоскопування є більш складним завданням, коли необхідно провести дослідження вмісту яєць із темною шкаралупою, однотонних коричневих чи плямистих, оскільки процедура виконується за таким же способом, як і для яєць зі світлою шкаралупою. Більше того, через втому персоналу або за інших причин легко допустити неправильну оцінку та недогляд. Особливо важко розрізнити слабкий ембріон, що призводить до неправильної оцінки і може спричинити витрати ресурсів.

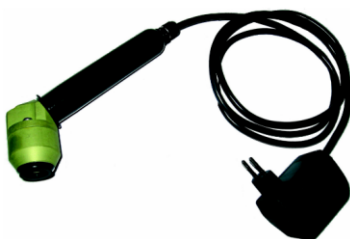


Рис. 1. Овоскоп молоточковий

У фермерських інкубаторіях та птахівницьких господарствах використовують міражні столи, на яких підсвічується весь лоток яєць. Зовнішній вигляд міражного столу наведено на рис. 2.

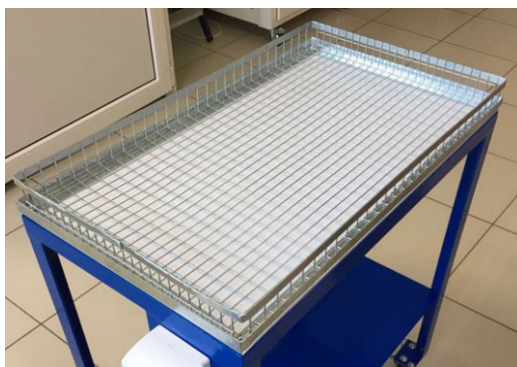


Рис. 2. Міражний стіл

Проте контроль розвитку зародків пташенят навіть за допомогою міражного столу залишається стомлюючою процедурою й особливо страждають органи зору оператора.

Метою роботи є автоматизація моніторингу розвитку курячих ембріонів за рахунок застосування штучної нейронної мережі та системи технічного зору. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити структуру штучної нейронної мережі, що адекватно відображає процес розвитку курячого ембріону;
- вибрати технічні засоби системи технічного зору;
- виконати моделювання штучної нейронної мережі, що відображає процес моніторингу стану розвитку курячого яйця з розпізнаванням стану ембріонів.

Виклад основного матеріалу

Для розробки структури штучної нейронної мережі, що відображає процес розвитку ембріона пташеня курки, площа яйця розділена на 8 секторів S_1-S_8 , як показано на рис. 3, а. У хорошому яйці, представленому на рис. 3, б, доцільно аналізувати стан секторів S_2-S_7 , оскільки яйце при овоскопуванні може бути перевернутим. Стан секторів яйця, де немає ембріона, наведено на рис. 3, в такому яйці особливо виділяються сектори S_6-S_8 . У яйці з померлим ембріоном, вид секторів якого показано на рис. 3, г, особливо ретельно необхідно аналізувати стан секторів S_5-S_7 . Запропонований метод поділу площі курячого яйця дозволяє вибрати структуру штучної нейронної мережі (ШНМ) для моніторингу розвитку ембріона пташеня [8].

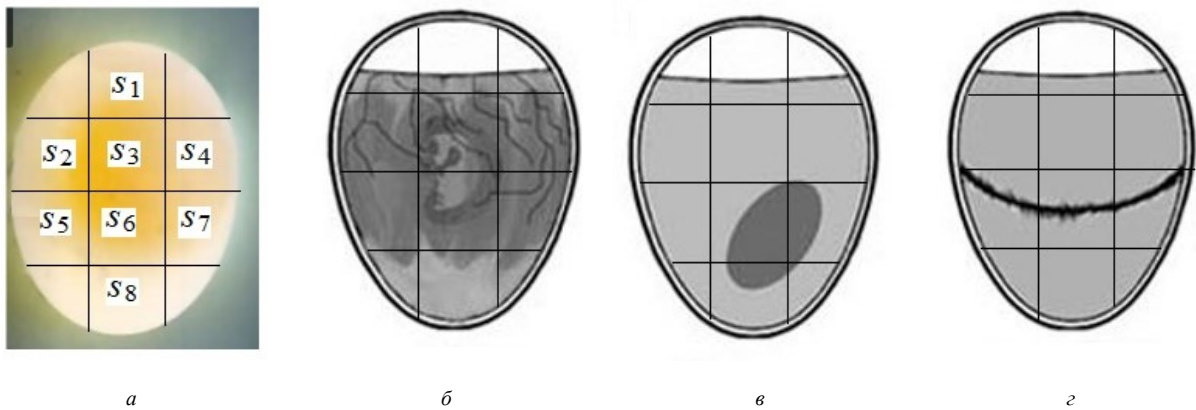


Рис. 3. Сектор курячого яйця на різних стадіях розвитку ембріона:
а) сектори площі курячого яйця;
б) сектор живого ембріону; в) у яйці немає ембріона; г) ембріон помер

Запропонована структурна схема ШНМ для моніторингу розвитку курячих ембріонів представлена на рис. 4 та містить набір синапсів або зв'язків, кожен з яких характеризується своєю вагою або силою. Сигнал x_j на вході синапсу j множиться на вагу W_{kj} . Синаптична вага штучного нейрона може мати як позитивні, так і негативні значення. Суматор складається з вхідних сигналів, зважених щодо відповідних синапсів нейрона. Модель нейрона містить пороговий елемент, який позначений символом b_k . Ця величина відображає збільшення або зменшення вхідного сигналу, що подається на активацію [9].

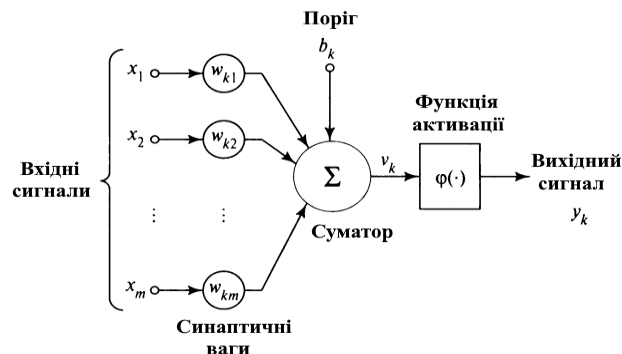


Рис. 4. Структура ШНМ для моніторингу розвитку курячих ембріонів

У математичному представленні функціонування нейрона k можна описати наступною парою рівнянь:

$$v_k = \sum_{j=1}^m W_{kj} \cdot x_j + b_k ;$$

$$y_k = \varphi(v_k),$$

де x_1, x_2, \dots, x_m – вхідні сигнали;
 $W_{k_1}, W_{k_2}, \dots, W_{k_m}$ – синаптичні ваги нейрона;
 b_k – поріг;
 $\varphi(\cdot)$ – функція активації;
 y_k – вихідний сигнал нейрона.

З урахуванням обраної структури секторів площі яйця вибираємо ШНМ з 6 синапсами, тому що через різне положення повітряної камери (вгорі або внизу) стану секторів S_1 і S_8 можна не аналізувати, при цьому встановлюємо величину порога $b_k = -5$. При дослідженні живого ембріона один сектор курячого яйця може бути розпізнаний неправильно. Світлий сектор відповідає сигналу, що дорівнює 0, а темний сектор – сигналу 1.

Для активації нейрона вибираємо функцію одиничного стрибка, подану у формулі:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_k \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } v_k < 0, \end{cases}$$

де v_k – це індуковане локальне поле нейрона.

ШНМ спроектована таким чином, щоб при виявленні живого ембріона сигнал на виході мережі дорівнював 1, а при фіксуванні мертвого ембріона даний сигнал дорівнював 0. Для розпізнавання стадій розвитку ембріона система технічного зору повинна подавати на входи ШНМ сигнали, значення яких наведені в таблиці 1. Для живого ембріона може бути отримано два набори даних, оскільки яйце може містити повітряну камеру або внизу, або вгорі.

Таблиця 1

Вихідні сигнали системи технічного зору

Ембріон	Номер сектору							
	S_8	S_7	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1
Живий	1	1	1	1	1	1	1	0
	0	1	1	1	1	1	1	1
Немає ембріона	1	1	1	0	0	0	0	0
Мертвий	0	1	1	1	0	0	0	0
«Бовтун»	0	0	0	0	0	0	0	0

Для овоscopyвання яєць застосовуємо смарт-камеру FHV7, що дозволяє автоматизувати прецизійний технічний візуальний контроль розвитку ембріонів, який наведений на рис. 5. Смарт-камера FHV7 поєднує в собі підсвічування та розширений функціонал машинного візуального контролю [10]. Завдяки різнокольоровому підсвічуванню та роздільній здатності у 12 мегапікселів, стало можливим за допомогою смарт-камери FHV7 вирішувати завдання прецизійного технічного візуального контролю розвитку ембріонів пташенят. Смарт-камера FHV7 включає комунікаційні інтерфейси для сумісності із широким спектром мережевих протоколів, що використовуються на виробничих майданчиках. Це допомагає скоротити необхідні проектні роботи для передачі даних між камерою та системою технічного зору.



Рис. 5. Смарт-камера FHV7

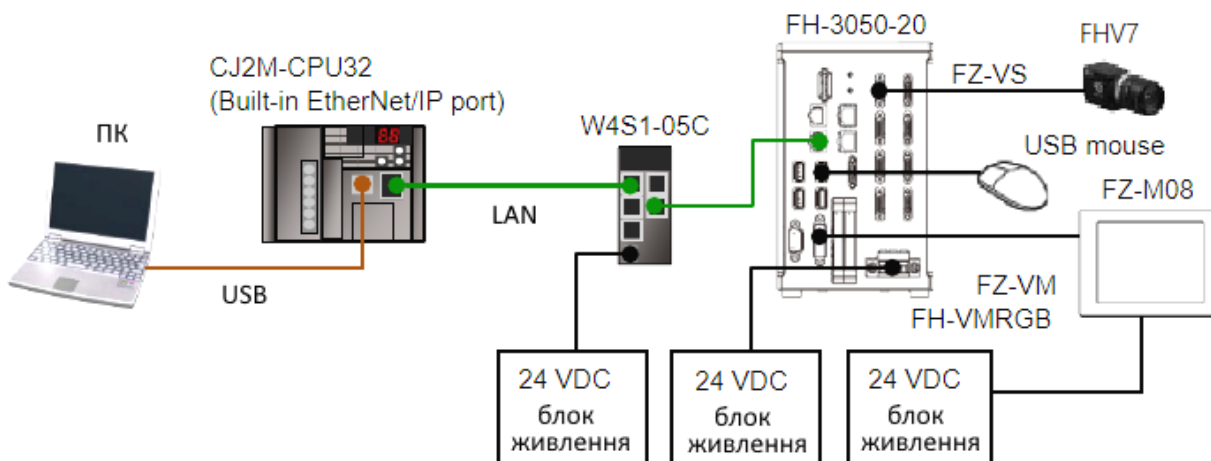


Рис. 6. Структура системи технічного зору

Автоматизоване овоскопування яєць можна реалізувати системою технічного зору FH фірми Omron з функцією виявлення дефектів на основі штучного інтелекту. Серія FH Vision System з технологіями штучного інтелекту відтворює людську чутливість та методи кваліфікованих інспекторів [11]. Вона надійно виявляє дефекти, які раніше було важко виявити, автоматизуючи візуальний огляд, не поступаючись людському зору.

Компоненти системи технічного зору наведено на рис. 6, яка містить контролер технічного зору FH-3050-20, смарт-камеру, панель оператора FH-VMRGB, комутатор Ethernet W4S1-05C, модуль цифрового друкуючого пристрою (ЦДП) з вбудованим портом Ethernet, персональний комп'ютер (ПК) і джерела електроживлення. До контролера можна підключити до 4 камер та вибірково керувати кожною. Нова технологія підсвічування здатна змінювати кут і колір освітлення відповідно до завдання інспекції для об'єкта, що досліджується [12]. Це означає, що система може виявляти дефекти з незначними відмінностями кольору. Раніше це було підвладне лише людському оку.

В системі Active-HDL розроблено модель ШНМ, що містить 6 синапсів [12]. Для спрощення моделі всі синаптичні ваги прийняті рівними 1. Модель ШНМ, представлена на рис. 7, містить суматор Fub1 вектору вхідних сигналів $a_1 - a_6$, віднімач ADSU4 з функції y_k порогу b_k . Модель нейрона починає функціонувати при подачі на вхід сигналу рівного 1. Вихідний сигнал нейрона формується на виході CO віднімача ADSU4 [13].

Модель суматора вектору вхідних сигналів, розроблена мовою VHDL, наведена нижче.

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;
use Ieee.std_logic_unsigned.all;
entity Fub1 is
    port(
        a : in STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0);
        en : in STD_LOGIC;
        sum :out STD_LOGIC_VECTOR(5 downto 0)
    );
end Fub1;
architecture Fub1 of Fub1 is
    signal tmp: std_logic_vector(5 downto 0);
    begin
        tmp <= (("00000"&a(0)) + ("00000"&a(1)) + ("00000"&a(2)) + ("00000"&a(3)) +
("00000"&a(4)) + ("00000"&a(5)))
        when en = '1' else "000000";
        sum <= tmp;
    end Fub1;

```

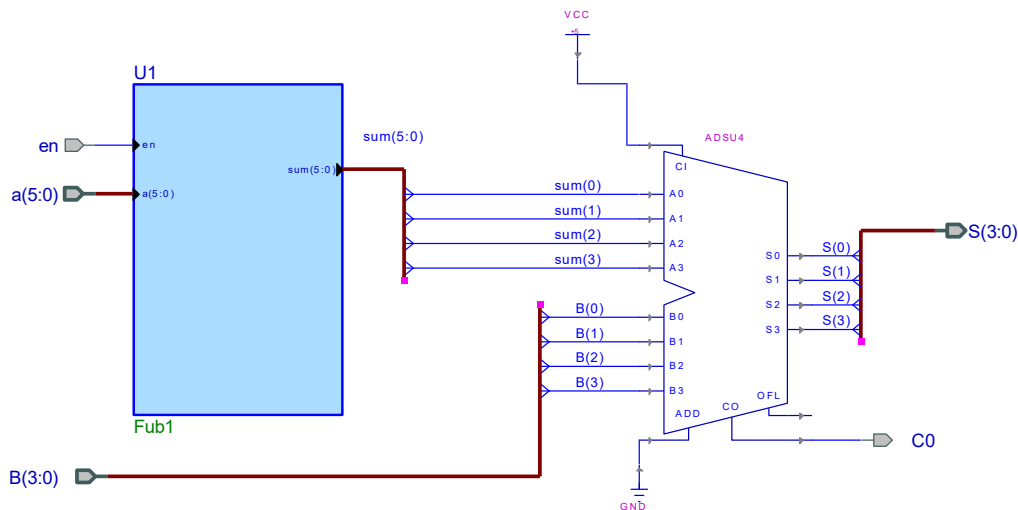


Рис. 7. Структура моделі ШНМ

Таблиця 2

Тестові набори для верифікації моделі ШНМ

Ембріон	Вхідні сигнали					
	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1
Живий	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1
Мертвий	1	0	1	1	1	0

В моделі суматора в результаті операції конкатенації до нульового вектора, число розрядів якого на одиницю менше числа розрядів вектора вхідних даних додаються по черзі значення розрядів вектора

вхідного сигналу. Сформовані коди додаються та утворюють суму вхідних сигналів. Від суми вектора вхідних сигналів sum(3:0) віднімається значення порогу B(3:0) віднімачем ADSU4. Виконано верифікацію моделі ШНМ при різних значеннях вектору a(5:0), наведених у таблиці 2.

Результати моделювання ШНМ показано на рис. 8.

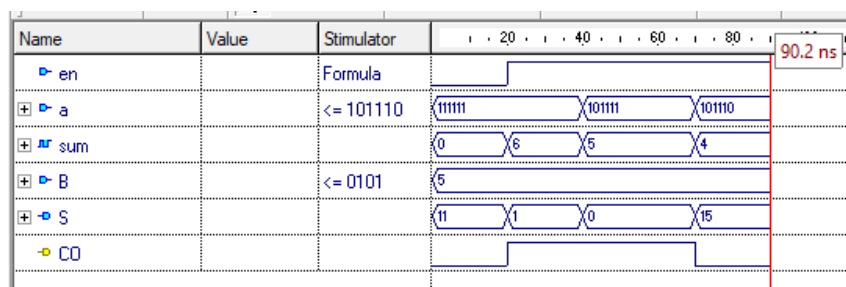


Рис. 8. Результати моделювання ШНМ

При сумі вектору вхідних сигналів sum(3:0) більше і рівній значенню порога сигнал на виході CO дорівнює 1, що відповідає розпізнанню живого ембріона в яйці. При ситуації, коли сума на виході суматора дорівнює 4, а значення порога дорівнює 5, ШНМ розпізнає неживий ембріон, тому сигнал CO на виході моделі нейрона дорівнює 0. Таким чином, в даній моделі ШНМ немає потреби у додатковому елементі для формування функції активізації.

Смарт-камера FHV7 встановлюється на кронштейнах, що переміщуються, таким же чином, як бормашина. Оператор переміщає смарт-камеру вздовж лотка з яйцями та на панелі індикації отримує повідомлення про якість процесу інкубаційного розвитку пташенят курей. При цьому підвищується продуктивність овоскопування та знижується стомлюваність очей оператора. Модель ШНМ розроблена для 11-го дня інкубації курячих яєць. У разі подальшого продовження інкубації значення порогу B(3:0) потрібно збільшити. Для ранніх термінів інкубації значення порога слід зменшити. Для з'ясування причин загибелі ембріонів колірні образи яєць можна запам'ятати в пам'яті ПК або надрукувати на ЦДП.

Автоматизований візуальний контроль здатний зробити новий крок у дії на причину виникнення відхилень у розвитку ембріонів птиці. Аналіз за допомогою технічного зору дає можливість зробити детальні та кількісні вимірювання відхилень. І що, також важливо, робити це безперервно, накопичуючи статистику. Технічний зір може зберігати результати аналізу й безпосередньо зображення яєць, що інспектуються. Іноді аналіз таких даних дає можливість зрозуміти причину відхилень та дослідити якість впливу коригуючих впливів. Результатом може бути створення найкращих умов вилуплення яєць.

Система ФН може визначати припустимі відхилення за допомогою інструменту AI Fine Matching, який навчається на даних зображень справних продуктів, щоб швидко придбати "знання", які інспектори набувають на основі досвіду [14, 15]. Це знижує витрати та підвищує продуктивність й узгодженість без додавання складних вимог до програмування. Ефективність штучного інтелекту серії ФН також знижує надмірну стомлюваність операторів й унеможливає помилкове бракування хороших яєць. Систему технічного зору можна доповнити колаборативним роботом, який витягатиме з піддону яйця, непридатні для подальшої інкубації.

Висновки

Додавання засобів штучного інтелекту до системи технічного зору ФН дозволяє розширити можливості виявлення дефектних яєць при виконанні автоматизованого овоскопування. При цьому підвищується точність та швидкість візуального контролю розвитку курячих ембріонів.

З метою підвищення точності моніторингу розвитку курячих ембріонів можна ускладнити ШНМ за рахунок збільшення числа сегментів площі яйця, наприклад до 16, а також ввести різні значення ваг синапсів, що дозволить розрізнити більше відтінків кольорів при виконанні овоскопування яєць. При практичному впровадженні результатів дослідження необхідно використовувати макроси системи ФН для обробки попередньо запакованих елементів та створення цифрових результатів. Комбінація елементів обробки називається сценою. Сцени можна легко створювати за допомогою об'єднання елементів обробки, які підходять для мети вимірювання зі списку наданих елементів обробки. Це дозволить реалізувати оригінальні процеси вимірювання, обробки відображення даних введення та виведення, а також діалогові вікна налаштувань, адаптовані до процесу овоскопування яєць.

Література

1. Fasenko G. M. Egg Storage and the Embryo / G. M. Fasenko // Poultry Science. – 2007. – Vol. 86. – P. 1020–1024.
2. Гречанов О. П. Ефективні режими освітлення у пташнику / О. П. Гречанов // Сучасне птахівництво. – 2005. – № 7. – С. 16–18.
3. Morris T. R. Effect of Age at Starting Biomittent Lighting on Performance of Laying Hens / T. R. Morris, M. Midgley, E. A. Butler // British Poultry Science. – 1990. – Vol. 31, No. 3. – P. 447–455.

4. Hulet R. M. Symposium: Managing the Embryo for Performance Managing Incubation: Where Are We and Why? / R. M. Hulet // *Poultry Science*. – 2007. – Vol. 86, Is. 5. – P. 1017–1019.
5. Surface Imaging Microscopy, an Automated Method for Visualizing Whole Embryo Samples in Three Dimensions at High Resolution / A. Ewald, H. McBride, M. Reddington, S. Fraser, R. Kerschmann // *Developmental Dynamics*. – 2002. – No. 225. – P. 369–375.
6. Dechow D. Machine Vision Systems Integration: Deep Learning / D. Dechow. – URL : <https://www.qualitymag.com/articles/96663-machine-vision-systems-integration-deep-learning>
7. West P. C. Machine Vision Systems Design: The Basics / P. C. West, D. Dechow. – URL : <https://www.qualitymag.com/articles/96209-machine-vision-systems-design-the-basics>
8. Yu H. Chicken Embryo Fertility Detection Based on PPG and Convolutional Neural Network / H. Yu, G. Wang, Z. Zhao, H. Wang, Z. Wang // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 1350–4495. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103075>
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М. : ООО “И.Д. Вильямс”, 2006. – 1104 с.
10. Kits S. FHV7 – Smart Camera / S. Kits. – URL : https://www.appliedautomation.co.uk/X-STK/OMRON/downloads/FHV7%20Starter%20Pack%20Offer_X-STK.pdf
11. Haefner N. Artificial Intelligence and Innovation Management: A Review, Framework, and Research Agenda / N. Haefner, J. Wincent, V. Paridac, O. Gassmann // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2021. – Vol. 162. – P. 0040–1625. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
12. Семенец В. В. Проектування цифрових систем з використанням мови VHDL : навч. посібник / В. В. Семенец, І. В. Хаханова, В. І. Хаханов. – Харків : ХНУРЕ, 2003. – 492 с.
13. Xilinx Libraries Guide. – URL : <http://www.cs.columbia.edu/~sedwards/classes/2005/4840/lib.pdf>
14. Das K. Detecting Fertility of Hatching Eggs using Machine Vision II: Neural Network Classifiers. / K. Das, M. D. Evans // *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. – 1992. – Vol. 35, Is. 6. – P. 2035–2041.
15. Omron’s FH Series Vision System Expands Automated Inspections Capabilities with AI-Based Defect Detection Technology. – URL : <https://finance.yahoo.com/news/omrons-fh-series-vision-system-134000799.html>

References

1. Fasenko G. M. Egg Storage and the Embryo / G. M. Fasenko // *Poultry Science*. – 2007. – Vol. 86. – P. 1020–1024.
2. Hrechunov O. P. Efektyvni rezhymy osvittlenia u ptashnyku / O. P. Hrechunov // *Suchasne ptakhivnytstvo*. – 2005. – № 7. – S. 16–18.
3. Morris T. R. Effect of Age at Starting Biomittent Lighting on Performance of Laying Hens / T. R. Morris, M. Midgley, E. A. Butler // *British Poultry Science*. – 1990. – Vol. 31, No. 3. – P. 447–455.
4. Hulet R. M. Symposium: Managing the Embryo for Performance Managing Incubation: Where Are We and Why? / R. M. Hulet // *Poultry Science*. – 2007. – Vol. 86, Is. 5. – P. 1017–1019.
5. Surface Imaging Microscopy, an Automated Method for Visualizing Whole Embryo Samples in Three Dimensions at High Resolution / A. Ewald, H. McBride, M. Reddington, S. Fraser, R. Kerschmann // *Developmental Dynamics*. – 2002. – No. 225. – P. 369–375.
6. Dechow D. Machine Vision Systems Integration: Deep Learning / D. Dechow. – URL : <https://www.qualitymag.com/articles/96663-machine-vision-systems-integration-deep-learning>
7. West P. C. Machine Vision Systems Design: The Basics / P. C. West, D. Dechow. – URL : <https://www.qualitymag.com/articles/96209-machine-vision-systems-design-the-basics>
8. Yu H. Chicken Embryo Fertility Detection Based on PPG and Convolutional Neural Network / H. Yu, G. Wang, Z. Zhao, H. Wang, Z. Wang // *Infrared Physics & Technology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 1350–4495. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103075>
9. Hajkin S. Neironnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin ; per. s angl. – 2-e izd., ispr. – M. : ООО “I.D. Vilyams”, 2006. – 1104 s.
10. Kits S. FHV7 – Smart Camera / S. Kits. – URL : https://www.appliedautomation.co.uk/X-STK/OMRON/downloads/FHV7%20Starter%20Pack%20Offer_X-STK.pdf
11. Haefner N. Artificial Intelligence and Innovation Management: A Review, Framework, and Research Agenda / N. Haefner, J. Wincent, V. Paridac, O. Gassmann // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2021. – Vol. 162. – P. 0040–1625. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
12. Semenets V. V. Proektuvannia tsyfrovyykh system z vykorystanniam movy VHDL : navch. posibnyk / V. V. Semenets, I. V. Khakhanova, V. I. Khakhanov. – Kharkiv : KhNURE, 2003. – 492 s.
13. Xilinx Libraries Guide. – URL : <http://www.cs.columbia.edu/~sedwards/classes/2005/4840/lib.pdf>
14. Das K. Detecting Fertility of Hatching Eggs using Machine Vision II: Neural Network Classifiers. / K. Das, M. D. Evans // *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. – 1992. – Vol. 35, Is. 6. – P. 2035–2041.
15. Omrons FH Series Vision System Expands Automated Inspections Capabilities with AI-Based Defect Detection Technology. – URL : <https://finance.yahoo.com/news/omrons-fh-series-vision-system-134000799.html>

Рецензія/Peer review : 09.11.2021

Надрукована/Printed : 30.12.2021