
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 535.135

В.М. БОРОВИЦЬКИЙ, В.А. АНТОНЕНКО

КЛАСИФІКАЦІЯ ФАСЕТНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» 03056, пр-т. Перемоги 37, м. Київ, Україна, E-mail: yborovytsky@gmail.com*

Анотація. У статті запропоновано класифікацію фасетних систем технічного зору. Згідно цієї класифікації усі системи розділяються на групи в залежності від типу оптичної системи, яка може бути представлена як комбінація мікролінз, оптичних волокон та об'єктива, та типу фотоприймачів – матричний, лінійний або одноелементний фотоприймач. Розглянуто побудову фасетних систем, виконаний аналіз їх переваг та недоліків, сформульовані рекомендації щодо вибору фасетної системи технічного зору.

Ключові слова: фасетна система, технічний зір, біологічно-подібний зір, оптична система, фотоприймач, обробка сигналів, автономні транспортні засоби.

Анотация. В статье предложена классификация фасетных систем технического зрения. Согласно этой классификации, все системы разделяются на группы в зависимости от типа оптической системы, которая может быть представлена как комбинация микролинз, оптических волокон и объектива, и типа фотоприемников – матричный, линейный или одноэлементный фотоприемник. Рассмотрены построение фасетных систем, выполнен анализ их преимуществ и недостатков, сформулированы рекомендации по выбору фасетной системы технического зрения.

Ключевые слова: фасетная система, техническое зрение, биологически-видное зрение, оптическая система, фотоприемник, обработка сигналов, автономные транспортные средства.

Abstract. The article proposes a classification of facet systems of technical vision. According to this classification, all systems are divided into groups depending on the type of optical system, which can be represented as a combination of microlenses, optical fibers and an objective, and the type of photoreceptors - matrix, linear or single-element photoreceptor. The construction of facet systems was considered, an analysis of their advantages and disadvantages was performed, recommendations were formulated regarding the choice of a facet system of technical vision.

Key words: facet system, technical vision, biologically similar vision, optical system, photoreceptor, signal processing, autonomous vehicles.

DOI:10.31649/1681-7893-2021-42-2-21-32

ВСТУП

В наш час, безпілотні літальні апарати (БПЛА) та автономні транспортні засоби (АТЗ) стають все більш поширеними в різних сферах людського життя. Їх застосовують для доставки товарів, транспортуванні без участі оператора, або у військовій розвідці для спостереження чи виявлення необхідних цілей, тощо [1, 2]. Для керування такими засобами зазвичай використовують системи технічного зору, які здатні швидко і точно оцінити розташування навколишніх об'єктів у просторі та задавати нову траєкторію руху для уникнення зіткнень з завадами на своєму шляху. Серед таких систем можна навести цифрові камери так камери реєстрації подій (event-based cameras) [3, 4]. Сучасні цифрові камери складаються з об'єктива, що формує зображення в площині матричного фотоприймального пристрою та під'єданого до нього цифрового сигнального процесору, який оброблює отримані зображення. Головним недоліком таких камер є послідовне зчитування сигналу з матричного фотоприймача, що збільшує час зчитування та обробки сигналів, а також обмежене поле зору.

Альтернативою сучасним цифровим камерам вважають фасетні системи технічного зору (ФСТЗ), які мають побудову схожу на фасетні органи зору безхребетних істот [9-13]. Відомо, що фасетні органи зору складаються з великої кількості однакових елементів (фасеток), які розміщені на деякій напівсферичній поверхні і працюють незалежно один від одного [5-7]. Кожна фасетка містить в собі оптичний, фотоприймальний та обчислювальний блок, з'єднаний з центральною нервовою системою комахи, що отримує інформацію про рух оптичного потоку від об'єктів у полі зору. Використання такого підходу надає перевагу у незалежному зчитуванні та обробці сигналів з фотоприймачів у кожній фасетці за короткий проміжок часу [8-10]. Її висока просторова роздільна здатність та велике поле зору дозволяє уникнути обертань та переміщень системи в різних напрямках, що спрощує будову та габарити [11-13].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Також фасетні елементи можуть покривати вигнуту поверхню різної форми і мати фотоприймачі, що чутливі до поляризації світла. Надійність роботи досягається за рахунок незалежного зчитування та обробки сигналів кожного елемента, тому система буде працювати навіть, якщо деякі фасетки будуть пошкоджені. Виходячи з таких особливостей, можна сказати, що даний підхід є досить перспективним для використання у системах БПЛА та АТЗ [12,13].

1. БІОЛОГІЧНІ ФАСЕТНІ СИСТЕМИ ЗОРУ

Для подальшої класифікації, необхідно розглянути будову фасетних систем зору живих істот в природі. Відомо, що органи зору безхребетних, в наслідок еволюції та місця проживання поділилися на денні та нічні [14, 15]. Комахи, які ведуть денний спосіб життя мають апозиційну будову фасетного ока (Рисунок 1). В ній кожна фасетка (оматидій) збирає паралельний, щодо оптичної осі, пучок променів на декілька фоторецепторів, які називаються рабдомами, в результаті чого формується масив зображень. Решта променів, що йдуть під деяким кутом до оптичної осі, поглинаються пігментом, який знаходиться між сусідніми клітинами. Далі кожен рабдом в омадидії з'єднується з одним відростком нервової клітини (аксоном), за яким йдуть електричні імпульси через нервовий шар, де збираються інші аксони.

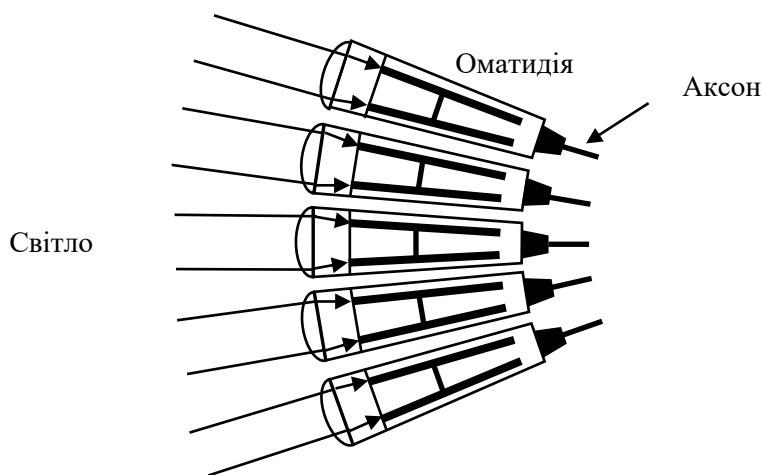


Рисунок 1 – Апозиційна схема будови фасетного ока

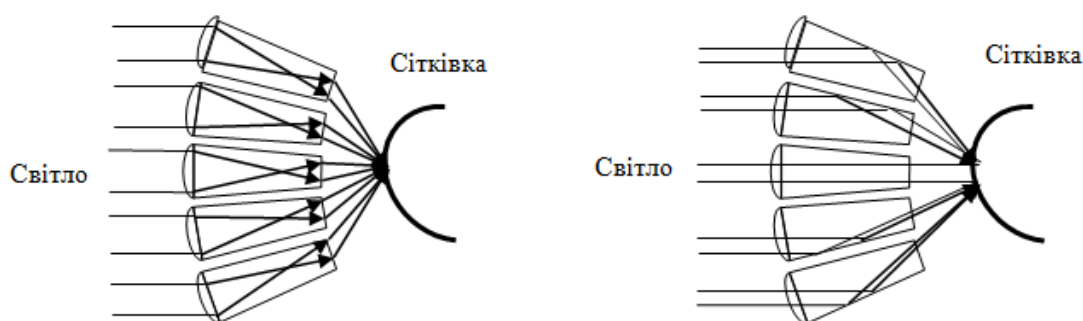


Рисунок 2 – Суперпозиційна схема з застосуванням заломлення (ліворуч)
та віддзеркалення (праворуч).

Суперпозиційний вид фасетного ока характерний для нічних або сутінкових комах і багатьох ракоподібних (

Рисунок 2). Пігмент між сусідніми омадидіями може змінювати свою прозорість і при нестачі світла промені накладаються один на одного. Залежно від оптичної схеми розрізняють заломлюючий та віддзеркалюючий принцип роботи омадидію. В заломлюючій схемі промені на кожному омадидії переломлюються таким чином, що на виході з лінзи він виходить під тим же кутом і потрапляє на рабдом. Омадидій досягає цього, діючи як двох лінзовий телескоп, має циліндричну лінзу з градієнтним

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

показником заломлення. Так як заломлюючі лінзи не можуть бути використані під водою, де набагато більший коефіцієнт заломлення, своє застосування знаходить схема апозиційного ока з дзеркальними поверхнями. Світло, що потрапляє в кожен оматидій відбивається від поверхні і потрапляє на рецепторну частину. Такі системи бачення мають деякі підводні істоти (омари, краби).

Також окрім апозиційної та суперапозиційної будови існує нейросуперапозиційна схема, в якій кожен рабдом з'єднується з іншим в сусідній фасетці, що в свою чергу збільшує яскравість зображення в сім разів. Це дозволяє комахам орієнтуватись в умовах дуже низької освітленості.

2. КЛАСИФІКАЦІЯ ФАСЕТНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Аналіз біологічних фасетних систем зору дозволяє виділити такі їх особливості:

- фасетні системи складаються з певної, а іноді достатньо великої кількості однакових фасетних елементів;
- кожний фасетний елемент містить оптичну систему, невелику кількість фоторецепторів та нервові клітинки, які виконують попередню обробку сигналів;
- усі фасетні елементи формують та виконують первину обробку сигналів паралельно та незалежно один від другого;
- фасетні елементи можуть розташовуватися на сферичній поверхні чим забезпечується велике поле зору.

Для побудови ФСТЗ інженери мають у своєму розпорядженні певні оптичні системи та певні типи фотоприймачів. Перелік оптичних систем включає набір або масив мікролінз, об'єктив для формування зображень, набір оптичних волокон та різні комбінації таких оптичних елементів. Самі розповсюджені фотоприймачі – це матричні фотоприймачі, лінійні фотоприймачі та одно елементні фотоприймачі. Для того щоб отримати повну класифікацію ФСТЗ треба розглянути усі можливі комбінації оптичних систем та фотоприймачів (Таблиця 1). Будь яка ФСТЗ буде підпадати під запропоновану класифікацію, бо обов'язково буде мати набір мікролінзи або оптичні волокна разом з певним фотоприймачем чи набором фотоприймачів [16÷47].

Таблиця 1

Запропонована класифікація ФСТЗ

Оптичні системи Фотоприймачі	Набір мікролінз	Об'єктив, + набір мікролінз	Оптичне волокно + набір мікролінз + об'єктив	Оптичне волокно + об'єктив	Оптичне волокно
Матричний фотоприймач	[16, 17]	Набір мікролінз перед об'єктивом [18, 19, 20, 21, 22]	[23]	[47]	
Набір лінійних приймачів	[24, 25, 26]				-
Матриця окремих фотоприймачів	[27, 28]		-		
Набір груп фотоприймачів	[29-31]				

Слід зазначити, що запропонована класифікація не включає системи технічного зору у вигляді масивів цифрових камер, які розташовані лінійно в ряд, по колу чи у вигляді кулі [37÷40]. Цифрові камери не можна розглядати як фасетні елементи. Крім того масиви цифрових камер мають високу вартість, великі розміри та габарити, а також велике енергоспоживання та потребують потужних комп'ютерів для обробки зображень. Саме тому масиви цифрових камер мають обмежене застосування у АТЗ та БПЛА.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

3. ФАСЕТНІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ З МАТРИЧНИМИ ТА ЛІНІЙНИМИ ФОТОПРИЙМАЧАМИ

Розглянемо можливі варіанти побудови ФСТЗ з набором мікролінз. У більшості випадків цей набір представляє собою двомірну періодичну структуру з ортогональним або гексагональним розташуванням мікролінз або мікропризм (Рисунок 3). Цей набір може бути плоским та встановлюватися на чи перед площиною матричного фотоприймача (Рисунок 3а) або бути гнучким та накладатися на циліндричну або сферичну поверхню. У випадку плоскої та циліндричної поверхні набір мікролінз може встановлюватися перед набором лінійних фотоприймачів (Рисунок 3б).

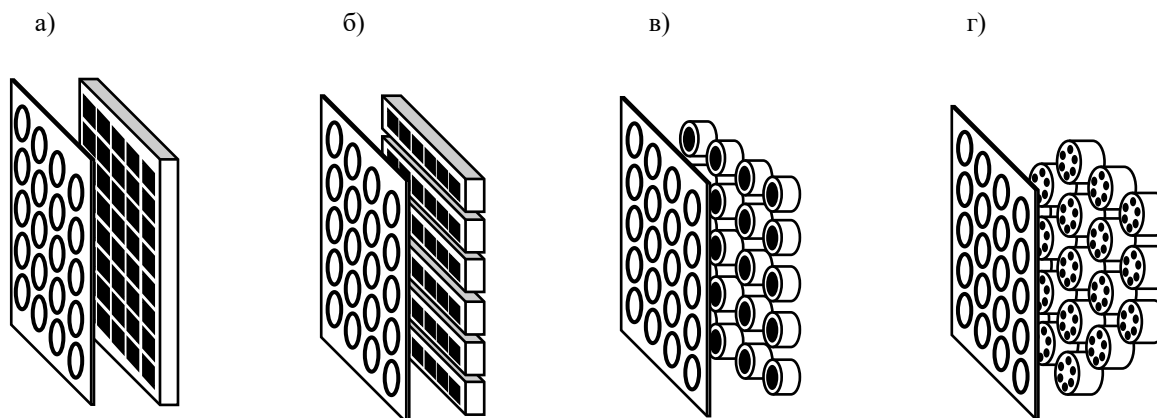


Рисунок 3 – Розташування набору мікролінз у ФСТЗ:

- а) перед матричним фотоприймачем; б) перед лінійними фотоприймачами;
- в) перед одноелементними фотоприймачами; г) перед групами одноелементних фотоприймачів.

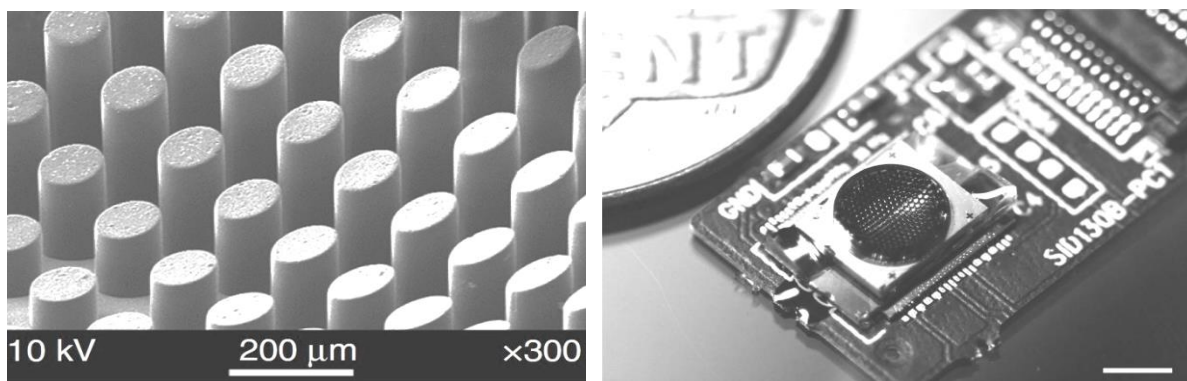


Рисунок 4 – Цифрова камера Xenos рескії eye: збільшене зображення мікропризм (ліворуч) та зовнішній вигляд цифрової камери (праворуч) [16].

Відомою ФСТЗ з набором мікропризм є Xenos рескії eye [16] (Рисунок 3а, 4). Це ультратонка цифрова камера з матричним фотоприймачем, у якій роль об'єктиву виконує двомірна періодична структура мікропризм. Кожна мікропризма направляє певний промінь на групу фоточутливих елементів матричного фотоприймача. Після складання шару з мікропризмами та матричного фотоприймача загальна товщина такої ФСТЗ становить лише 1.4 мм, що відкриває широкі можливості застосування такої системи у роботах та БПЛА.

ФСТЗ можуть використовувати двошаровий набір мікролінз, які розділені сумою їх фокусних відстаней, відомий як суперлінзи Габора (англ. Gabor superlens) [17] (Рисунок 5). Кожна пара лінз утворює мікротелескоп з нахиленою оптичною віссю, що дозволяє за допомогою плоского шару мікролінз забезпечувати певне поле зору. Але самим розповсюдженою ФСТЗ є комбінація двовимірної періодичної структури мікролінз, яка виготовлена з пластику та притиснута до матричного фотоприймача [11, 12].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

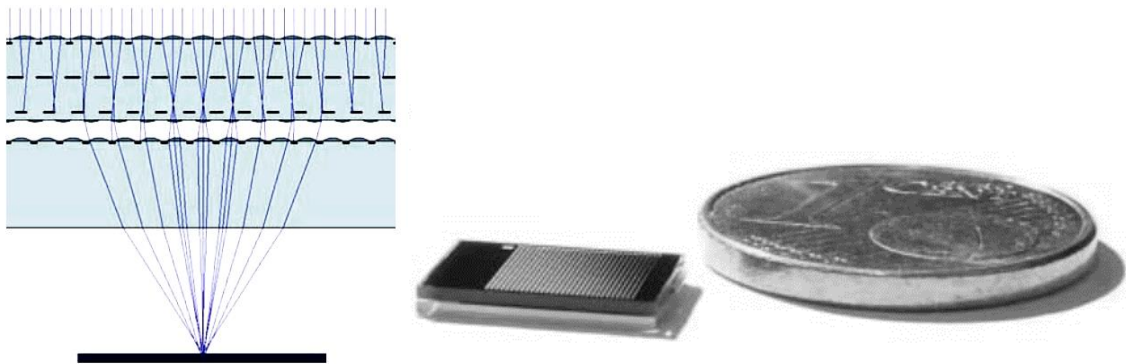


Рисунок 5 – Схема проходження променів в Gabor superlens (ліворуч) та дослідний зв'язок такого набору мікролінз для ФСТЗ (праворуч) [17].

ФСТЗ CurveACE використовує набір лінійних фотоприймачів, який встановлений на гнучкій платі та покритий пластиковим шаром з мікролінзами [24÷26, 42] (Рисунок 63б, 6). Зчитування та обробку сигналів з лінійних фотоприймачів здійснює мікроконтролер. Таке рішення дозволило створити мініатюрну ФСТЗ з великим полем зору тому що плата закріплена на циліндричній поверхні та має лінійні розміри у декілька сантиметрів. Це дозволило успішно інтегрувати її у різні макети АТЗ.

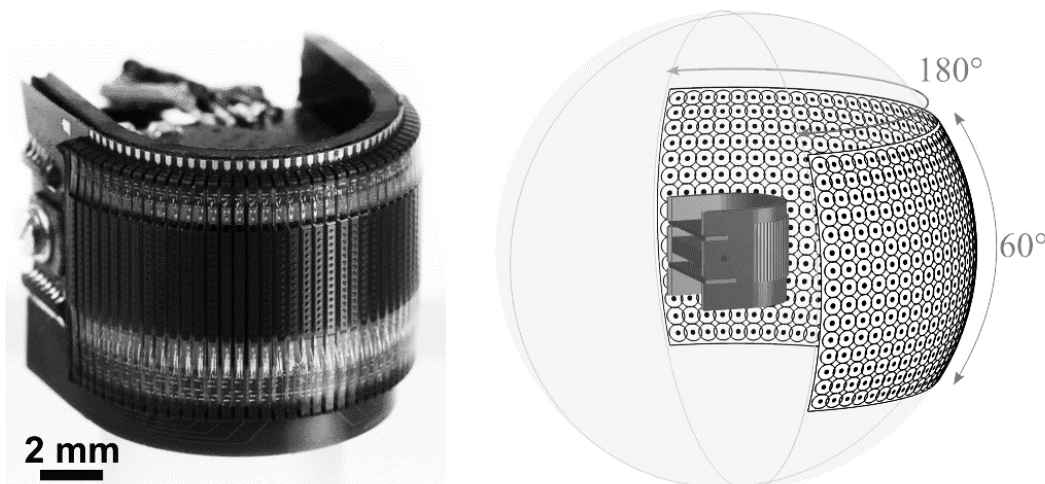


Рисунок 6 - ФСТЗ CurveACE: зовнішній вигляд (ліворуч) та її поле зору (праворуч) [24]

Набір мікролінз може поєднуватися з застосуванням об'єктиву, який формує зображення у площині матричного фотоприймача (Рисунок 7) [18,19]. Для спрощення конструкції набір мікролінз частіше накладається на передню оптичну поверхню об'єктива або встановлюється перед об'єктивом (Рисунок 7а). Таке конструктивне рішення дозволяє перетворити звичайну цифрову камеру у ФСТЗ. Прикладом такої ФСТЗ є SCECam (Рисунок 8) [18]. ФСТЗ SCECam містить напівсферичну двомірну періодичну структуру мікролінз, яка закріплена на сферичному скляному оптичному меніску, а цей меніск встановлений перед цифровою камерою, що містить об'єктив та матричний фотоприймач. Така конструкція SCECam перетворює звичайну цифрову камеру у ФСТЗ з великим полем зору 122.4°, яке розподілене між 4400 фасетними елементами.

Головною перевагою цієї групи ФСТЗ є простота конструкції: набір мікролінз накладається на один матричний фотоприймач або на набір лінійних фотоприймачів та отримується мініатюрна система з великим полем зору. Інший варіант, коли набір мікролінз встановлюється перед або на цифровій камері дозволяє швидко та з малими витратами перетворити будь-яку цифрову камеру у ФСТЗ та проводити її дослідження.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

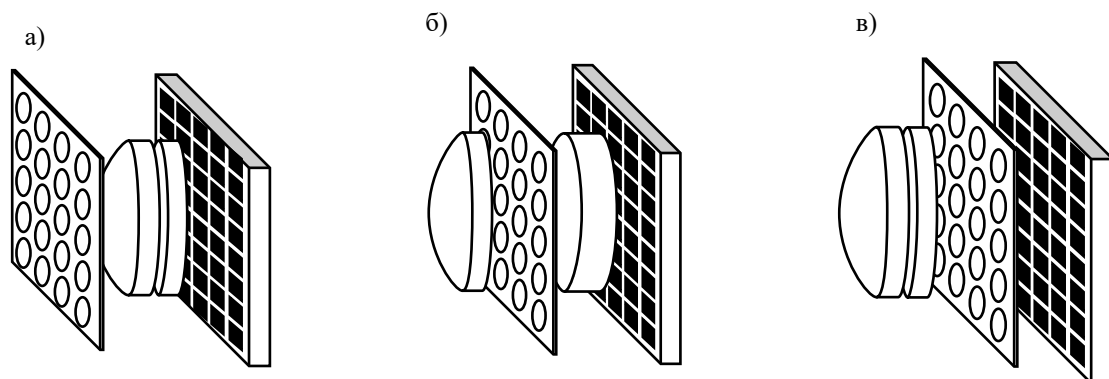


Рисунок 7 – ФСТЗ з набором мікролінз та матричним фотоприймачем, яка використовує об’єктив для формування зображення: набір мікролінз розташований перед об’єктивом (а), в середині об’єктиву (б) та після об’єктиву (с).

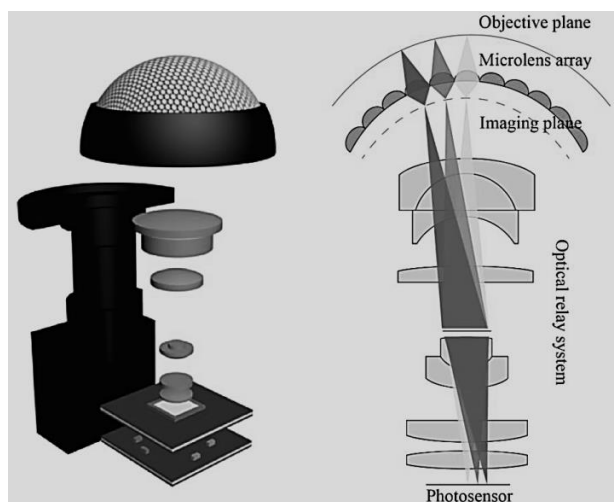


Рисунок 8 – Побудова ФСТЗ SCECam (ліворуч) та хід променів у її оптичній системі (праворуч) [18].

Але усі такі конструкції ФСТЗ мають принциповий недолік – кількість каналів зчитування сигналів та кількість процесорів для обробки сигналів, яка лежить у діапазоні від 1 до декілька десятків, є суттєво меншим ніж кількість фоточутливих елементів у матричних або лінійних фотоприймачах, яка знаходиться у діапазоні від декількох тисяч до декількох мільйонів. Це приводить до необхідності послідовного зчитування та послідовної обробки сигналів. У результаті такі ФСТЗ мають обмежену швидкість обробки зображень, виявлення рухомих об’єктів у полі зору та слідкування за ними. Також недоліком таких систем є те, що вони не містять окремих повнофункціональних фасетних елементів, як біологічні фасетні системи зору. Вони містять лише один елемент фасетного елементу – мікролінзу, а усе інше принципово відрізняється від біологічних систем. Тому ФСТЗ з матричними та лінійними фотоприймачами принципово не дозволяють реалізувати швидку паралельну обробку сигналів.

4. ФАСЕТНІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ З НАБОРОМ ОДНОЕЛЕМЕНТНИХ ФОТОПРИЙМАЧІВ

Найбільш цікавою ФСТЗ є система з набором гнучких мікролінз під якими закріплені одноелементні фотоприймачі (Рисунки 3с, 9) [27, 28]. Зовнішній вигляд такої ФСТЗ дуже схожий на око членистоногих (Рисунок 9). ФСТЗ складається з двох шарів: зовнішній шар – двовірний періодична структура розміром 16 x 16 мікролінз діаметром 0.5 мм, а внутрішній шар містить тонкі фотоприймачі та їх електричне з’єднання з схемою зчитування та обробки сигналів. Кожний фотоприймач розміщується у

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

фокусі відповідної мікролінзи. Цікавою особливістю такої конструкції є можливість пружної деформації ФСТЗ шляхом збільшення тиску під нижнім шаром, що дозволяє змінювати кривизну шарів і тим самим змінювати поле зору системи. Зчитування сигналів здійснюється послідовно – кожний фотоприймач послідовно підключається через набір ортогональних провідників на внутрішньому шарі до підсилювача та аналого-цифрового перетворювача. Тобто реалізується той самий принцип зчитування сигналів як у матричному фотоприймачі з усіма його перевагами та недоліками.

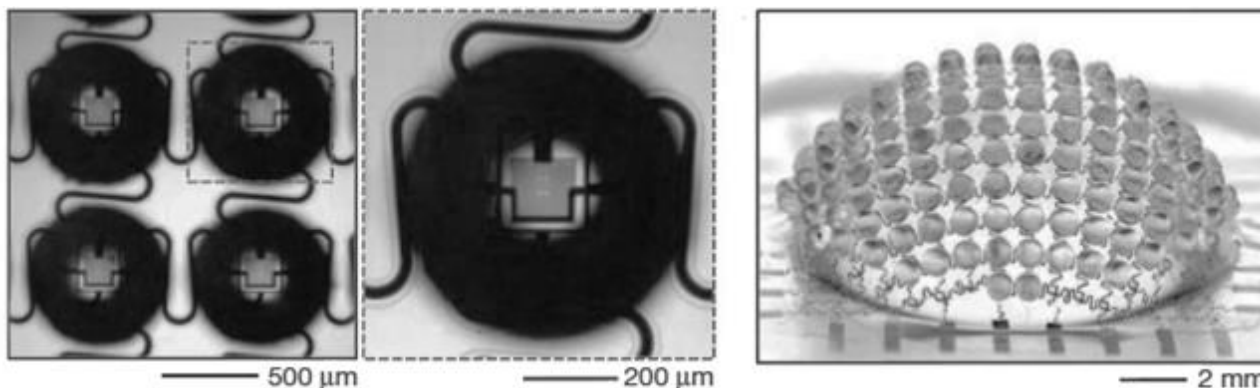


Рисунок 9 – ФСТЗ яка містить гнучку поверхню з мікролінзами під якими закріплені одноелементні фотоприймачі: розташування мікролінз та фотоприймачів під ними (ліворуч) та зовнішній вигляд ФСТЗ (праворуч) [27].

5. ФАСЕТНІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ З ОПТИЧНИМИ ВОЛОКНАМИ

Формально ФСТЗ можуть мати комбінацію оптичних волокон з будь-якими фотоприймачами (Рисунок 10). Але на практиці використовуються комбінації оптичних волокон з матричними фотоприймачами (Рисунок 10а).

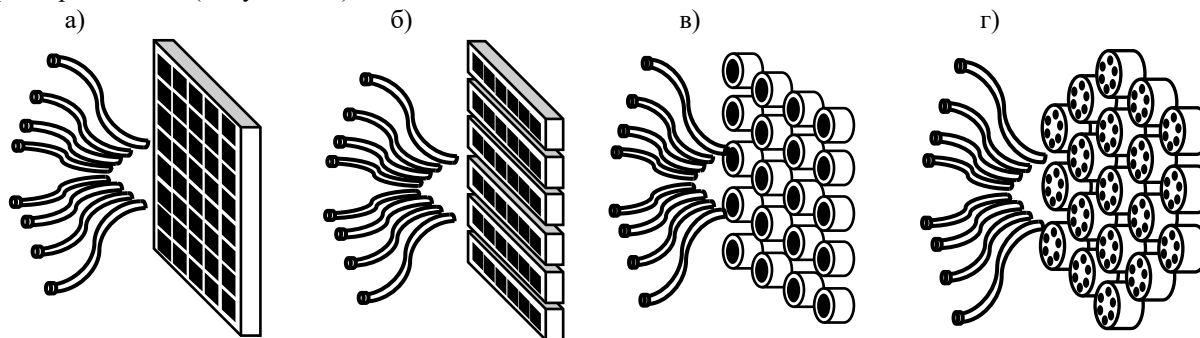


Рисунок 10 – Схеми ФСТЗ з оптичними волокнами, які використовують матричний фотоприймач (а), лінійний фотоприймач (б), набір одноелементних фотоприймачів (в) та набір груп одноелементних фотоприймачів (г).

Типовим представником такої ФСТЗ є DragonflyEye, який містить групи оптичних волокон з мікролінзами, які закріплені на матричному фотоприймачі [23] (Рисунок 11). Завдяки нахилу груп оптичних волокон можна забезпечити велике поле зору. Інший варіант такої ФСТЗ представляє собою комбінацію цифрової камери та оптичного компонента, який розширює поле зору за допомогою оптичних волокон, які з однієї сторони закріплені на сферичній поверхні, а з іншої – на плоскій поверхні, що розташована у площині предмета цифрової камери [47] (Рисунок 12). Такі системи мають такі самі переваги та недоліки як будь-які ФСТЗ з матричними фотоприймачами, а оптичні волокна у них використовуються лише для розширення поля зору.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

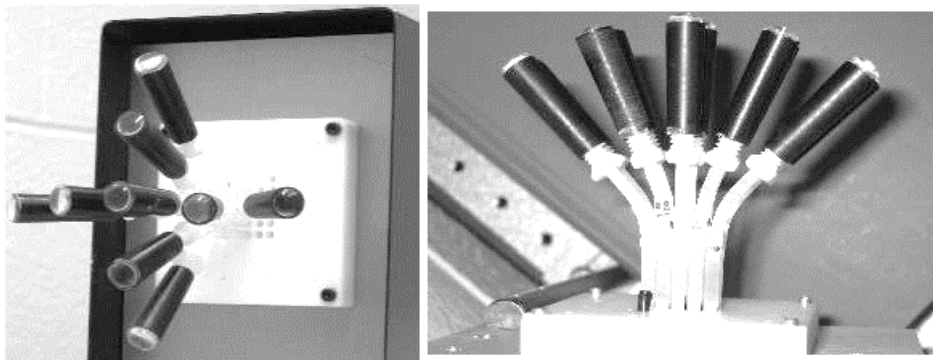


Рисунок 11 – ФСТЗ DragonflyEye: вигляд зверху (ліворуч) та вигляд з боку (праворуч) [23]

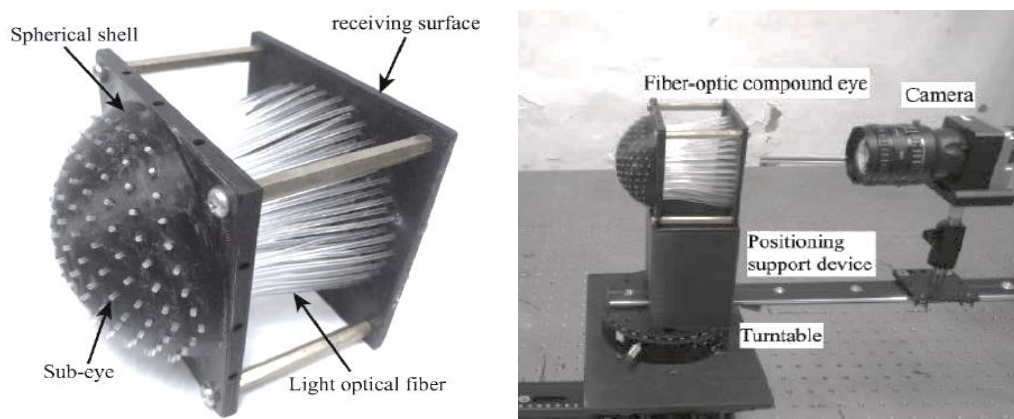


Рисунок 7 - ФСТЗ з оптичними волокнами та цифровою камерою:
блок оптичних волокон (ліворуч) та фасетна система у зборі (праворуч) [47]

6. ФАСЕТНІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ З НАБОРОМ ГРУП ОДНОЕЛЕМЕНТНИХ ФОТОПРИЙМАЧІВ

Крім ФСТЗ інтерес представляє аналіз побудови відомих фасетних елементів, які містять об'єктив-мікролінзу, декілька одноелементних фотоприймачів та систему обробки сигналів з застосуваннями цифрових мікроконтролерів, схем програмованої логіки або аналогових схем обробки сигналів [32÷35, 43÷45]. Прикладом мініатюрного фасетного елемента є ОСТАВЕ, який здійснює фільтрацію сигналів з метою визначення кутової швидкості об'єктів у полі зору (Рисунок 13). Як показали експерименти з макетом міні-квадрокоптера, навіть невелика кількість фасетних елементів можуть забезпечувати вимірювання відстані БПЛА до поверхні та уникнення зіткнення з іншими об'єктами під час польоту.

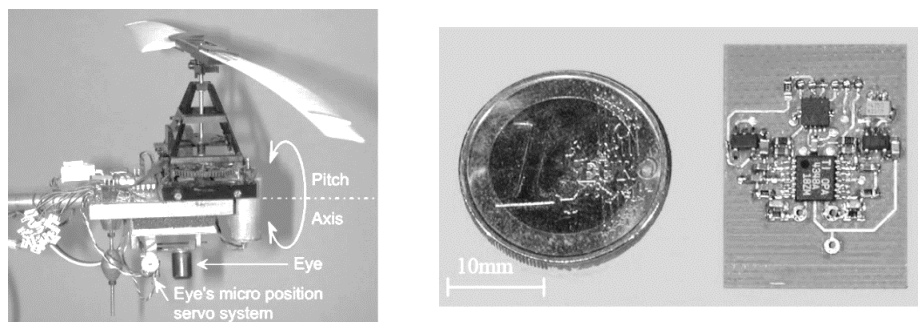


Рисунок 13 – Фасетний елемент ОСТАВЕ встановлений на макеті мінідрона (ліворуч) та його плата обробки сигналу (праворуч) [32]

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

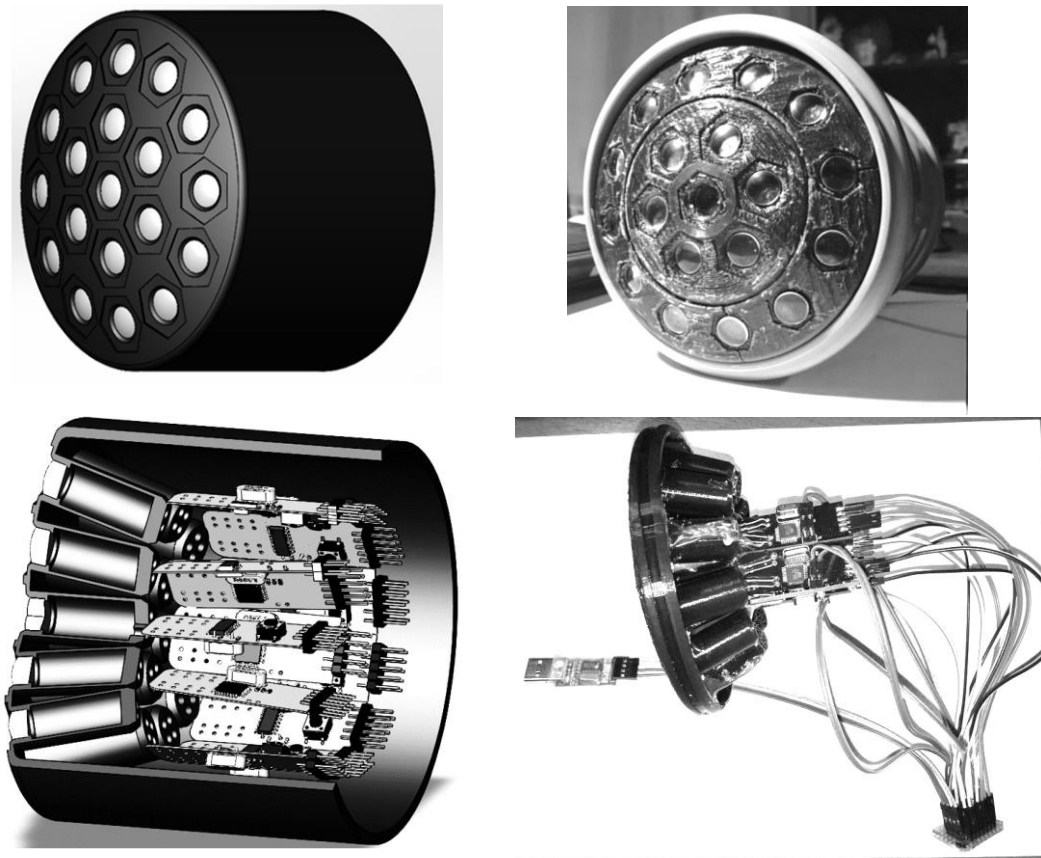


Рисунок 14 – Запропонована ФСТЗ яка складається з окремих фасетних елементів: побудова ФСТЗ (ліворуч) та зовнішній її вигляд у зібраному та розібраному вигляді (праворуч).

Наведені вище ФСТЗ мають один спільний недолік – послідовне зчитування сигналів з матричного фотоприймача, набору лінійних фотоприймачів або набору одноелементних фотоприймачів (Рисунки 1 – 12). Тобто ці ФСТЗ не містять фасетних елементів, які працюють паралельно та незалежно один від іншого. Але розроблені окремі фасетні елементи, у яких формування та обробка сигналів наближена до біологічних фасетних елементів. Саме це спонукало авторів створити ФСТЗ яка за побудовою наближається до біологічних фасетних систем [29-31]. Ця система складається з однакових фасетних елементів, кожний з яких містить оптичну систему, 4 або 6 одноелементних фотоприймачів та електронний блок обробки сигналів з мікроконтролером (Рисунок 14). Така ФСТЗ відноситься до систем з набором мікролінз, кожна з яких встановлена перед групою фотоприймачів (Рисунок 3г). Усі фасетні елементи працюють одночасно, паралельно та незалежно один від іншого [36].

Авторами були створені декілька працюючих прототипів такої ФСТЗ з 19 та 35 фасетними елементами. Корпус ФСТЗ такої системи складається з надрукованого на 3D принтері корпусу у якому розміщуються фасетні елементи з лінзами діаметром 10 мм і фокусною відстанню 25 мм та електронними платами з фотоприймачами, попереднім підсилювачем та мікроконтролером. На електронній платі встановлені чотири фотодіоди SFH 229, багатоканальний програмований підсилювач Microchip MCP6S28 та 32-х бітний мікроконтролер STM32F103C8T6, який працює на частоті 72 МГц. Кожен фасетний модуль може передавати по швидкісному послідовному інтерфейсу дані про швидкість, контраст або зміну контрасту в керуючий комп'ютер, мікроконтролер або нейронний чип, які здійснюють керування АТЗ або БПЛА. Проведені дослідження довели, що запропонована ФСТЗ є роботоздатною та дозволяє отримати інформацію про кутові переміщення об'єктів у полі зору.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВИСНОВКИ

1. У статті запропоновано класифікацію ФСТЗ. Згідно цієї класифікації усі ФСТЗ розділяються на групи в залежності від типу оптичної системи – мікролінзи, мікролінзи + об'єктив, оптичні волокна, оптичні волокна + мікролінзи, мікролінзи + оптичні волокна + об'єктив та типу фотоприймачів – матричний фотоприймач, набір лінійний фотоприймачів, набір одноелементних фотоприймачів та набір одноелементних фотоприймачів, які об'єднані у групи. Доведено, що відомі ФСТЗ добре підпадають під запропоновану класифікацію.

2. Більшість відомих ФСТЗ можуть бути розділені на чотири групи:

- Найбільш розповсюдженою групою є системи, які є комбінацією матричного фотоприймача та двовимірною масиву мікролінз. Такі системи мають малі габарити та можуть використовувати як сенсор зображень у АТЗ, включаючи мініатюрні БПЛА. У таких системах окремі фасетні елементи відсутні, але цифрова обробка зображень з матричного фотоприймача дозволяє змітувати роботу фасетних елементів.

- Наступна група – ФСТЗ з набором лінійних фотоприймачів з гнучким двовірним шаром мікролінз перед ними. За рахунок вигнутої плати з лінійними фотоприймачами та гнучкому двовірному масиву мікролінз така система може мати велике поле зору, але у одній площині. Це робить можливим застосування таких систем у АТЗ, які рухаються по поверхні.

- Третя група об'єднує ФСТЗ, ознакою яких є двовірний масив мікролінз на сферичній поверхні, де під кожною мікролінзою розміщено одноелементний фотоприймач. Головною перевагою таких систем є велике поле зору та зовнішня схожість з біологічними фасетними системами зору. Недоліком таких систем є послідовне зчитування сигналів з фотоприймачів. Треба підкреслити, що такі системи можна розглядати як аналоги ФСТЗ першої групи у яких мікролінзи та фоточутливі елементи розміщені на сферичній поверхні а не в площині матричного фотоприймача.

- Четверта група включає невелику кількість ФСТЗ, які використовують оптичні волокна для отримання великого поля зору. Ці оптичні волокна можуть бути розташовані на різних сферичних поверхнях і тим самим можуть забезпечувати надзвичайно велике поле зору.

3. ФСТЗ перерахованих вище чотирьох груп мають принциповий недолік – послідовне зчитування сигналів з фоточутливих елементів матричного фотоприймача, набору лінійних або одноелементних фотоприймачів. Тобто кількість каналів зчитування та блоків обробки сигналів у таких системах є суттєво меншою ніж кількість фоточутливих елементів. У результаті цього такі ФСТЗ не можуть забезпечити швидку обробку двовірних сигналів, бо більшість відліків сигналів зчитується та обробляється послідовно.

4. На думку авторів перспективними є ФСТЗ, які складаються з однакових фасетних елементів, кожний з яких зчитує та здійснює попередню обробку сигналів самостійно та незалежно від інших елементів. Так як кожний фасетний елемент має свою мікролінзу та групу одноелементних фотоприймачів, то така ФСТЗ підпадає під класифікацію як комбінація набір мікролінз + набір груп фотоприймачів (Таблиця 1, Рисунок 3г). Такі системи забезпечують максимальну швидкість обробки сигналів завдяки паралельній роботі фасетних елементів, велике поле зору за рахунок можливості розміщення фасетних елементів на сферичних поверхнях та найкращу узгодженість з сучасними нейрочипами та нейрокомпютерами з паралельним зчитуванням сигналів, які застосовуються для керування АТЗ та БПЛА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] B. Custers, *The Future of Drone Use*, Hague: TMC Asser Press, 2016.
- [2] R. D'Andrea, «Guest Editorial Can Drones Deliver?», *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, т. 11, pp. 647-648, 2014.
- [3] G. Gallego, T. Delbruck, G. Orchard, C. Bartolozzi, B. Taba, A. Censi, S. Leutenegger, A. Davison, J. Conradt, K. Daniilidis та D. Scaramuzza, «Event-based Vision: A Survey», *arXiv*, pp. 1-25, 2019.
- [4] J. Barrios-Avilés, T. Iakymchuk, J. Samaniego, L. D. Medus та A. Rosado-Muñoz, «Movement Detection with Event-Based Cameras: Comparison with Frame-Based Cameras in Robot Object Tracking Using Powerlink Communication», *Electronics*, т. 7 (11), p. 304, 2018.
- [5] M. F. Land та D.-E. Nilsson, *Animal Eyes*, Oxford: Oxford Press, 2012, p. 271.
- [6] B. Schoenemann, H. Pärnaste та E. N. K. Clarkson, «Structure and function of a compound eye, more than half a billion years old», *Proc. of NAS*, т. 114 (51), pp. 13489-13494, 2017.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- [7] D. G. Stavenga та R. Clayton Hardie, *Facets of Vision*, Heidelberg: Springer Berlin, 1989, pp. 454, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74082-4>.
- [8] V. Benno Meyer-Rochow, «Compound eyes of insects and crustaceans: Some examples that show there is still a lot of work left to be done,» *Insect Science*, т. 22, pp. 461-481, <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12117>, 2015.
- [9] «Compound eye,» [Онлайновий]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Compound_eye.
- [10] «Insect Senses,» 2009. [Онлайновий]. Available: https://cals.arizona.edu/classes/ento415/LECTURES/ENTO415_Senses09.pdf.
- [11] C. Yang, J. Cao, Y. Zhang та Q. Hao, «Review of state-of-the-art artificial compound eye imaging systems,» *Bioinspir. Biomim.*, т. 14, pp. 44, <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaffb5>, 2019.
- [12] S. Jun Park, *Bio-Inspired Optic Flow Sensors for Artificial Compound Eyes*, Michigan: The University of Michigan, 2014.
- [13] N. H. Franceschini, «Small Brains, Smart Machines: From Fly Vision to Robot Vision and Back Again,» *Proceedings of the IEEE*, т. 102, pp. 751-781, DOI: 10.1109/JPROC.2014.2312916, 2014.
- [14] «The Amazing Housefly Part 2: Coolest Eye Ever,» 11 November 2009. [Онлайновий]. Available: <http://watchingtheworldwakeup.blogspot.com/2009/11/amazing-housefly-part-2-coolest-eye.html>.
- [15] M. F. Land, «The optical structures of animal eyes,» *Current Biology*, т. 15, pp. 319-323, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.04.041>, 2005.
- [16] D. Keum, K.-W. Jang, D. S. Jeon, C. S. H. Hwang, E. K. Buschbeck, M. H. Kim та K.-H. Jeong, «Xenos peckii vision inspires an ultrathin digital camera,» *Light: Science & Applications*, т. 7, p. 80, 2018.
- [17] K. Stollberg, A. Brückner, J. Duparré, P. Dannberg, A. Bräuer та A. Tünnermann, «The Gabor superlens as an alternative waferlevel camera approach inspired by superposition compound eyes of nocturnal insects,» *Optics Express*, т. 17, pp. 15747-15759, 2009.
- [18] C. Shi, Y. Wang, C. Liu, T. Wang, H. Zhang, W. Liao, Z. Xu та W. Yu, «SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view,» *Optic Express*, т. 25, pp. 32333-32345, 2017.
- [19] Z. Deng, F. Chen, Q. Yang, H. Bian, G. Du, J. Yong, C. Shan та X. Hou, «Dragonfly-Eye-Inspired Artificial Compound Eyes with Sophisticated Imaging,» *Advanced Functional Materials*, т. 26, pp. 1995-2001, doi: 10.1002/adfm.201504941, 2016.
- [20] F. M. Reininger, «Fiber Coupled Artificial Compound Eye». USA Патент US7376314B2, 20 05 2008.
- [21] F. M. Reininger, «Multihybrid artificial compound eye with varied ommatidia». USA Патент US 2012/0026592 A1, 2 02 2012.
- [22] D. Bo, D. Zhang та S. Zhuang, «Fabrication of large micro-structured high-numerical-aperture optofluidic compound eyes with tunable angle of view,» *Optic Express*, т. 26, pp. 33356-33365, DOI: 10.1364/OE.26.033356, 2018.
- [23] R. Hornsey, P. Thomas, W. Wong, S. Pepic, K. Yip та R. Krishnasamy, «Electronic Compound-Eye Image Sensor: Construction and Calibration,» *Proc. SPIE*, т. 5301, pp. 13-24, 2004.
- [24] R. Leitel, A. Brückner, W. Buß, S. Viollet, R. Pericet-Camara, H. Mallot, A. Bräuer, «Curved artificial compound-eyes for autonomous navigation,» *Proceedings of SPIE*, т. 9130, p. 11, 2014.
- [25] F. Colonnier, A. Manecy, R. Juston, H. Mallot, R. Leitel, D. Floreano, S. Viollet, «A small-scale hyperacute compound eye featuring active eye tremor: application to visual stabilization, target tracking, and short-range odometry,» *IOP Publishing Ltd*, т. 10, pp. 19, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-3190/10/2/026002>, 2015.
- [26] S. Viollet, F. Ruffier, «Method for fabricating an artificial compound eye». DE Патент EP2306230B1, 21 12 2011.
- [27] Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, R.-H. Kim, R. Li, K. B. Crozier, Y. Huang та J. A. Rogers, «Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye,» *Nature*, т. 497, pp. 95-99, 2013.
- [29] V. Borovytsky та V. Antonenko, «Biologically inspired compound eye,» *Proc. of SPIE*, т. 11369, 2019.
- [30] V. Borovytsky та V. Antonenko, «Image sensor with parallel signal processing for motion detection,» *Proc. of SPIE*, т. 11351, 2020.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- [31] V. Borovytsky та V. Antonenko, «Speed measurement sensor for an unmanned aerial vehicle». Ukraine Патент u2019 07417, 2019.
- [32] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic та N. Franceschini, «Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of Micro-Air Vehicles,» *Proceedings of the 2003 International Symposium on*, т. 3, pp. 846, DOI:10.1109, 2003.
- [33] S. Viollet, «Vibrating makes for better seeing: from the fly's micro-eye movements to hyperacute visual sensors,» *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, pp. 8, <https://doi.org/10.3389/fbioe.2014.00009>, 2014.
- [34] R. Juston та S. Viollet, «A miniature bio-inspired position sensing device for the control of micro-aerial robots,» *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1118-1124, doi: 10.1109/IROS.2012.6385937, 2012.
- [35] F. Wippermann, J.-C. Zufferey, D. Floreano, N. Franceschini, S. Viollet та F. Ruffier, «Artificial compound eye and method for fabrication thereof». DE Патент EP2306230A1, 06 04 2011.
- [36] В. Боровицький та В. Антоненко, «Датчик швидкості для безпілотного літального апарату». Україна Патент u 2019 07417, 03 07 2019.
- [37] D. L. Marks, H. S. Son, J. Kim та D. J. Brady, «Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera,» *Optical Engineering*, т. 51, p. 13, 2012.
- [38] Y. Wang, B. Cai, Y. Lu, X. Chen та K. Wang, «Optical system design of artificial compound eye based on field stitching,» *Microwave and Optical Technology Letters*, т. 59, pp. 1277-1279, 2017.
- [39] D. R. Golish, E. M. Vera, K. J. Kelly, Q. Gong, P. A. Jansen, J. M. Hughes, D. S. Kittle, D. J. Brady та M. E. Gehm, «Development of a scalable image formation pipeline for multiscale gigapixel photography,» *Optics Express*, т. 20, pp. 22048-22062, 2012.
- [40] Q. Hao, Z. Wang, J. Cao та F. Zhang, «A Hybrid Bionic Image Sensor Achieving FOV Extension and Foveated Imaging,» *Sensors*, т. 18, p. 14, 2018.
- [41] Z. Wang, J. Cao, Q. Hao та F. Zhang, «Combining compound eyes and human eye: a hybrid bionic imaging method for FOV extension and foveated vision,» *SPIE Proceedings*, т. 11053, pp. 10, <https://doi.org/10.1117/12.2511336>, 2019.
- [42] J.-C. Zufferey, A. Beyeler та D. Floreano, «Visual autopilot for near-obstacle flight». CH Патент WO 2009/127907 A1, 22 10 2009.
- [43] S. Viollet, F. Ruffier, A. Manecy та J. Dipieri, «System for detecting a contrasted target». FR Патент WO 2016/177781 A1, 10 11 2016.
- [44] F. Ruffier та F. Expert, «Motion sensor assembly for determining the angular velocity of a moving contrast in its field of view with a high accuracy». FR Патент WO 2014/063989 A1, 01 05 2014.
- [45] L. Kerhuel, F. Ruffier та S. Viollet, «Method and device for measuring the angular velocity of a luminance transition zone and steering aid system for fixation and tracking a target comprising at least one such luminance transition zone». FR Патент WO 2011/073085 A1, 07 06 2011.
- [46] J.-C. Zufferey, Bio-inspired vision-based flying robots, THÈSE NO 3194 (2005) ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES Lausanne, 2005, 202 p., <https://infoscience.epfl.ch/record/33663>.
- [47] M. Ma, H. Li, X. Gao, W. Si, H. Deng, J. Zhang, X. Zhong, K. Wang, «Target orientation detection based on a neural network with a bionic bee-like compound eye,» *Opt. Express* 28, 10794-10805 (2020)

БОРОВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ – д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем приладобудівного факультету НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, тел.: +380-44-204-94-77, [e-mail: vborovytsky@yahoo.com](mailto:vborovytsky@yahoo.com)

АНТОНЕНКО ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем приладобудівного факультету НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, [e-mail: taikatalvi13@gmail.com](mailto:taikatalvi13@gmail.com)