
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 535.135

В.А. АНТОНЕНКО, В.М. БОРОВИЦЬКИЙ

ОБРОБКА СИГНАЛІВ У ФАСЕТНИХ СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

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

Анотація. У статті виконано огляд датчиків руху для фасетних систем технічного зору – кореляційного детектора Рейхарда, моделі Хорріджа та Нгуєна та запропоновано універсальний датчик. Цей датчик містить мікроконтролер, який швидко розраховує кореляційну функцію та її максимальне значення для визначення напрямку та швидкості руху у полі зору. Розглянуті принципи їх роботи, переваги, недоліки та можливості застосування таких датчиків.

Ключові слова: датчик руху, кореляційний метод, кореляційна функція, фасетна система, система технічного зору, обробка сигналів.

Аннотация. В статье выполнен обзор датчиков движения для фасетных систем технического зрения – корреляционного детектора Рейхарда, модели Хорриджа и Нгуэна и предложен универсальный датчик. Этот датчик содержит микроконтроллер, который быстро рассчитывает корреляционную функцию и ее максимальное значение для определения направления и скорости движения в поле зрения. Рассмотрены принципы их работы, преимущества, недостатки и возможности применения таких датчиков.

Ключевые слова: датчик движения, корреляционный метод, корреляционная функция, фасетная система, система технического зрения, обработка сигналов.

Abstract. The article presents an overview of bio-similar motion sensors facet systems of technical vision – the Reichard correlation detector, the Horridge and Nguyen model, and it proposed the universal motion detection sensor. This sensor contains a microcontroller that quickly calculates the correlation function and its maximum value to find the direction and speed of movement in the field of view. The principles of their operation, advantages, disadvantages, and possibilities of application are considered.

Keywords: motion detector sensor, correlation method, correlation function, facet system, technical vision system, signal processing.

DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-38-43

ВСТУП

В наш час фасетні системи технічного зору, будова яких подібна до фасетних органів зору живих істот, можуть використовуватися як альтернатива цифровим камерам, в сферах навігації автономних транспортних засобів, пошуку або стеженню за об'єктами чи усуненню зіткнень з перешкодами. Їх велике поле зору досягається за рахунок використання однакових елементів (оматидій), що мають просту будову та функціонують незалежно один від одного (Land, 2005). За рахунок високої швидкості обрахунку сигналів з кожної омаїдії, з'являється можливість під'єднання таких систем до безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та інших безпілотних транспортних засобів. Однак використання фасетних систем технічного зору потребує розробки надійного та швидкого алгоритму для розрахунку кутової швидкості переміщення об'єктів в полі зору для виявлення можливих перешкод на шляху. Для цього необхідно розглянути основні варіанти схем детекторів руху, на яких заснована на робота фасетних систем технічного зору. Відомо, що комахи сприймають зображення навколишнього середовища, як вектори швидкостей та напрямків руху (Антоненко, 2018; А. Arbib, 2003). У комах, що швидко рухаються в польоті зазвичай виникають три ситуацій:

- відхилення від заданого курсу веде до послідовного переміщення всього візуального середовища в протилежному напрямку;

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- наближення до перешкоди призводить до (Bagheri, Wiederman, Cazzolato, Grainger, & O'Carroll, 2017) розширення зображення на сітківці, тобто всі елементи в зображенні переміщуються від центру точки до якої комаха рухається;
- під час проходження близько розташованих об'єктів перед віддаленим фоном, зображення об'єктів та фону мають різну швидкість.

Перетворення візуальної інформації, яка надходить в рухову активність залежить від біофізичних особливостей нервових клітин, а також від схеми їх з'єднання між собою. Були проведені експерименти з вивчення реакції прив'язаних комах на рухи, з різною швидкістю та в різних напрямках, великих і маленьких об'єктів. Такі ж стимулюючі умови були впроваджені для вивчення реалізації механізму приземлення. Розширення лапок у комах є шаблонною дією і характеризується початковою фазою реагування на посадку.

1. КОРЕЛЯЦІЙНИЙ ДЕТЕКТОР РЕЙХАРДТА

На основі фасетного ока комахи *Drosophila* була розроблена модель елементарного детектору руху (ЕДР) - кореляційний детектор Рейхардта (Рисунок 1) (Zhu, 2021; Quelin, 2011; A. Arbib, 2003). Він є найпростішим випадком роботи двох фоторецепторів і дозволяє спроектувати систему машинного бачення на базі систем бачення комах. Він містить два фоторецептора R1 і R2, які трансформують вхідний світловий потік в електричні сигнали. Далі ці сигнали надходять на фільтри ICD, які перетворюють зміну яскравості в імпульсний сигнал на виході. Після цього на виході одного з фільтрів відбувається часова затримка τ . Той канал, в якому стоїть затримка визначає напрямок зміни яскравості.

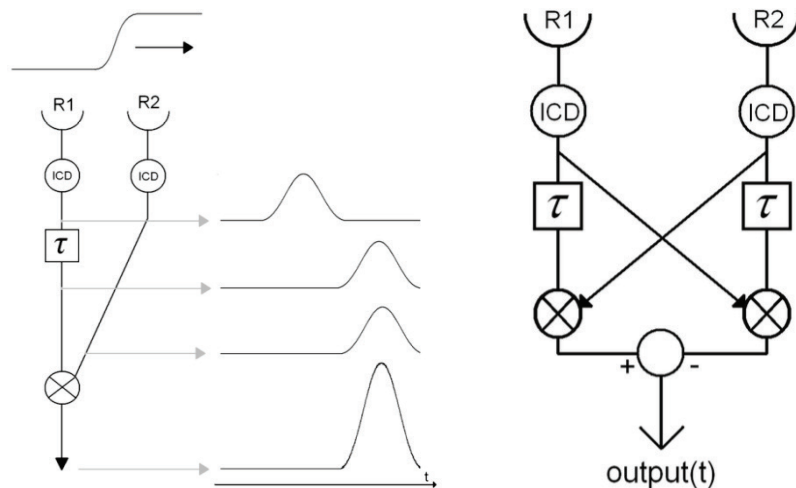


Рисунок 1 – Модель кореляційного детектору переміщення Рейхардта:

- а) відповідь моделі на перехід інтенсивності зліва направо
- б) дзеркально відображений детектор

Якщо об'єкт рухається зі швидкістю, що відповідає часовій затримці τ , то на виході отримується максимальний сигнал, а напрямок руху визначається знаком.

Але така модель не може давати точну інформацію про переміщення в реальних умовах, де вхідні сигнали є складними по формі. Також не виконується адаптація до різних рівнів контрасту. Для вирішення цієї проблеми необхідно мати тимчасову інформацію про вхідний сигнал. Найбільш поширеним рішенням є впровадження компонента для попередньої обробки порогової чутливості. Смуговий або високочастотний фільтри можуть спростити відгук на загальний поріг. Альтернативний шлях лежить в логарифмічному перетворенні, яке може підсилити малий контраст і зменшити чутливість до зміни світлових умов. Переваги таких технік роблять детектор більш стійким до широкого діапазону вхідних сигналів і забезпечують більш точним відгук. Недоліком є те, що фільтрація вхідних сигналів зазвичай вимагає велику кількість операцій. Іншим, ще більш вимогливим до обчислювальної потужності, підходом є налаштування затримки для отримання максимальної чутливості детектора. В якості аналога існує рішення на основі біофізичного механізму, яке полягає у використанні третього фоторецептору в структурі детектору, що дозволяє отримувати спрощений відгук і не вимагає складної попередньої обробки.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

2. ШАБЛОНА МОДЕЛЬ ХОРРІДЖА ТА НГУЕНА

На основі моделі Рейхардта була спроектована нова модель, що підходить для цифрової обробки. Представлена шаблонна модель Хорріджа і Нгуена (Рисунок 2) схожа на попередню тим, що вона виявляє рух з напрямком через вимір інтенсивності над двома суміжними рецепторами з затримкою (Антоненко, 2018; Bagheri, Wiederman, Cazzolato, Grainger, & O'Carroll, 2017). Однак вона не дає прямої інформації про швидкість. У певному сенсі така схема виглядає, як цифрова версія кореляційного детектора. У ній вхідні сигнали проходять через фільтр і на виході мають три різних стани, щоб виявити збільшення, зменшення або сталість інтенсивності у вхідному сигналі.

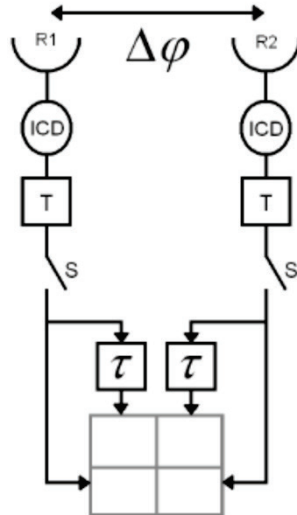


Рисунок 2 – Шаблонна модель Хорріджа и Нгуена

Стани зміни інтенсивності над двома суміжними фоторецепторами в два послідовні моменти вибірки, що приводять до побудови матриці 2x2 (Таблиця 1). З 81-ї можливої комбінації, тільки 8 є вирішальними для виявлення руху. Цей процес робить реалізацію даної моделі швидкою і простою. Однак вона має аналогічну проблему, що і попередня кореляційна модель, яка потребує адаптації для вхідного сигналу.

Таблиця 1

Матриця кодів для шаблонної моделі

Полярність	Рух вправо		Рух вліво			
	Код	Шаблон	Код	Шаблон		
Від темного до яскравого	A	+1	0	E	0	+1
		+1	+1		+1	+1
	B	+1	+1	F	+1	+1
		0	+1		+1	0
Від яскравого до темного	C	-1	0	G	0	-1
		-1	-1		-1	-1
	D	-1	-1	H	-1	-1
		0	-1		-1	0

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Так як вибірка реалізована в часовій області, вибір порога зменшує надійність всієї системи. Також неможливо сказати, де рух триває, а де він почався з дискретного стрибка. Проблеми визначення значення швидкості, повністю відрізняються від моделі Рейхардта. Дійсно, сигнал на виході з детектора не має сили або амплітуди, але може забезпечити 81-у кількість різних комбінацій, які дають інформацію про напрямок переміщення, полярність переходу і старт або кінець переходу. Проблема розрахунку швидкості може бути вирішена шляхом відстеження різних шаблонів в часі та просторі, використовуючи серію шаблонних детекторів в рядку. Такий спосіб дуже зручний для реалізації, але вимагає пам'яті для зберігання шаблонних позицій.

3. УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДЕТЕКТОР РУХУ

Запропонована фасетна система технічного зору складається з однакових фасетних елементів – універсальних детекторів руху. Кожний детектор руху містить оптичну систему 1, 4 – 8 фотоприймачів 2 та електронний блок 3 з багатоканальним підсилювачем та мікроконтролером (МК) (Рис. 3) (Quelin, 2011; Zhao, Hu, Zhang, Wang, & Yue, 2018; Borovytsky & Antonenko, Biologically inspired compound eye, 2019; Borovytsky & Antonenko, Image sensor with parallel signal processing for motion detection, 2020; Україна Патент №u2019 07417, 2019; Україна Патент №u 2019 07417, 2019).

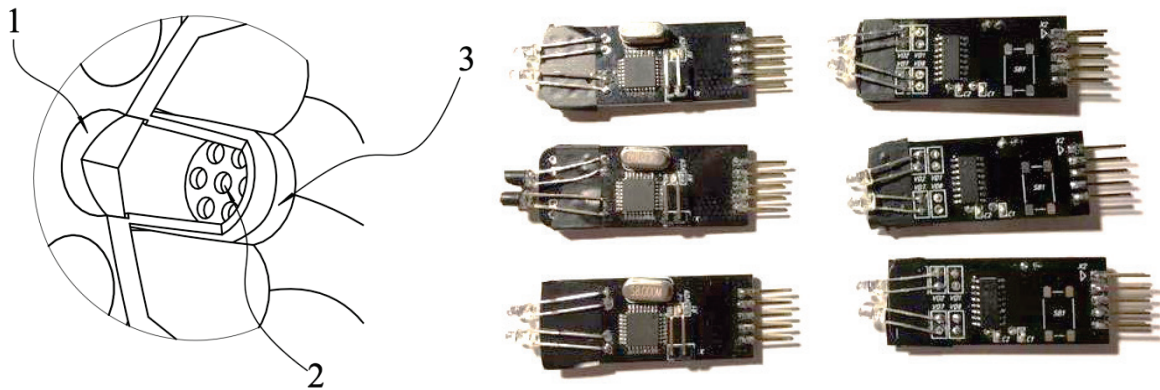


Рисунок 3 – Запропонований датчик руху (ліворуч) та фото електронних блоків датчиків руху з фотоприймачами (праворуч)

Вхідний оптичний сигнал перетворюється в електричний сигнал у кожному фотоприймачі. Далі після підсилення у багатоканальному підсилювачі ці сигнали подаються на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера, де вони переводяться у цифрову форму та у вигляді циклічних масивів цілих чисел записуються в оперативну пам'ять мікроконтролера. Програма, що зберігається у постійній пам'яті МК, забезпечує зчитування та перетворення у цифрову форму сигналів з усіх фотоприймачів шляхом подачі сигналів управління на програмований підсилювач та АЦП. Головним призначенням цієї програми є визначення напрямку та значення кутової швидкості переміщення об'єктів у полі зору.

У запропонованому датчику використовується метод багатоканального дзеркально відображеного кореляційного детектору переміщення Рейхардта: МК розраховує кореляційну функцію значень, які зберігаються у циклічних масивах та одночасно обчислює значення та положення її максимуму без зберігання значень самої кореляційної функції в оперативній пам'яті. Знаючи положення цього максимуму, період зчитування сигналів з фотоприймачів та геометричні параметри датчика МК може розрахувати напрямок та значення кутової швидкості. Враховуючи, що тактова частота МК становить 72 МГц, МК має високопродуктивну архітектуру ARM, то цей датчик може виконати більше ніж 1000 обчислень кутової швидкості у секунду. При цьому він може адаптуватися до зміни кутових швидкостей шляхом вибору найкращого періоду зчитування сигналів з фотоприймачів. Також цей датчик може використовувати методи кореляційного детектору переміщення Рейхардта та шаблонну модель Хорріджа і Нгуена (Рис. 1, 2).

Розраховані дані про кутову швидкість МК датчика передає у центральний комп'ютер, де розраховується траєкторія руху робота, безпілотної автомобіля або БПЛА. Застосування масиву таких фасетних елементів дозволяє побудувати біологічно подібну фасетну систему технічного зору з широким полем зору та паралельною обробку сигналів для вирішення задач навігації, орієнтації та автоматичного обминання перешкод.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто біологічно-подібні детектори руху – кореляційний детектор Рейхарда та модель Хорріджа та Нгуена – які найчастіше використовуються у апаратних реалізаціях фасетних систем технічного зору. Доведено, що детектори руху застосовують спрощений кореляційний метод виявлення руху. На основі виконаного аналізу запропоновано універсальний детектор руху, який може застосовувати кореляційні методи різного рівня складності. Цей датчик має програму, що здійснює обробку сигналів, як у багатоканальному дзеркально відображеному кореляційному детекторі Рейхарда з обчислення значення та положення максимуму кореляційної функції. Цей універсальний, швидкий та економічний датчик містить мінімальну кількість елементів – оптичну систему, 4 – 8 фотоприймачів та електронний блок з попереднім підсилювачем та МК. Він може бути застосований для вирішення задач навігації, орієнтації та уникнення зіткнень з нерухомими та рухомими об'єктами. Висока швидкість обчислень кутової швидкості – більше ніж 1000 вимірювань/секунду при малій собівартості датчиків відкриває перспективи для їх застосування у БПЛА, у тому числі для забезпечення його повністю автономного польоту серед перешкод.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Arbib, M. (2003). *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Second Edition*. London, England: The MIT press.
2. Z. Bagheri, S. Wiederman, B. Cazzolato, S. Grainger, & D. O'Carroll. (2017). Performance of an Insect-Inspired Target Tracker in Natural Conditions. *Bioinspiration & Biomimetics*, 12, 18, DOI: 10.1088/1748-3190/aa5b48.
3. V. Borovytsky, & V. Antonenko. (2019). Biologically inspired compound eye. *Proc. of SPIE*, 11369. doi:https://doi.org/10.1117/12.2553678
4. V. Borovytsky, & V. Antonenko. (2019). *Україна Патент №u2019 07417*.
5. V. Borovytsky & V. Antonenko. (2020). Image sensor with parallel signal processing for motion detection. *Proc. of SPIE*, 11351. doi:doi: 10.1117/12.2555386
6. M. Land. (2005). The optical structures of animal eyes. *Current Biology*, 15, 319-323, DOI:https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.04.041.
7. M. Quelin. (2011). Optical flow estimation using insect vision based parallel processing, Master by Research thesis. *University of Wollongong*, 136, https://ro.uow.edu.au/theses/3410/.
8. J. Zhao, C. Hu, C. Zhang, Z. Wang, & S. Yue. (2018). A Bio-inspired Collision Detector for Small Quadcopter. *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 7, DOI: 10.1109/IJCNN.2018.8489298.
9. H. Zhu. (2021). Analysis and Optimization of Computer Trajectory Based on Compound Eye Vision System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1744, doi:10.1088/1742-6596/1744/2/022035.
10. В. Антоненко. (2018). *Система технічного зору : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка*. Київ.
11. В. Боровицький, & В. Антоненко. (03 07 2019 р.). *Україна Патент №u 2019 07417*.

REFERENCES

1. A. Arbib, M. (2003). *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, Second Edition*. London, England: The MIT press.
2. Z. Bagheri, S. Wiederman, B. Cazzolato, S. Grainger, & D. O'Carroll. (2017). Performance of an Insect-Inspired Target Tracker in Natural Conditions. *Bioinspiration & Biomimetics*, 12, 18, DOI: 10.1088/1748-3190/aa5b48.
3. V. Borovytsky, & V. Antonenko. (2019). Biologically inspired compound eye. *Proc. of SPIE*, 11369. doi:https://doi.org/10.1117/12.2553678
4. V. Borovytsky, & V. Antonenko. (2019). *Україна Патент №u2019 07417*.

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ
З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ**

5. V.Borovytsky & V.Antonenko. (2020). Image sensor with parallel signal processing for motion detection. *Proc. of SPIE*, 11351. doi:doi: 10.1117/12.2555386
6. M.Land. (2005). The optical structures of animal eyes. *Current Biology*, 15, 319-323, DOI:https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.04.041.
7. M.Quelin. (2011). Optical flow estimation using insect vision based parallel processing, Master by Research thesis. *University of Wollongong*, 136, https://ro.uow.edu.au/theses/3410/.
8. J. Zhao, C. Hu, C. Zhang, Z.Wang, & S.Yue. (2018). A Bio-inspired Collision Detector for Small Quadcopter. *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 7, DOI: 10.1109/IJCNN.2018.8489298.
9. H.Zhu. (2021). Analysis and Optimization of Computer Trajectory Based on Compound Eye Vision System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1744, doi:10.1088/1742-6596/1744/2/022035.
10. V. Antonenko. (2018). System of technical vision: master's thesis. : 152 Metrology and information-measuring technology. Kyiv.
11. V. Borovytskyi, & V.Antonenko. (03 07 2019 p.). Ukraine Patent No. u 2019 07417.

Надійшла до редакції 10.07.2022р.

АНТОНЕНКО ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, **[e-mail: taikatalvi13@gmail.com](mailto:taikatalvi13@gmail.com)**

БОРОВИЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ – д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, **[e-mail: vborovytsky@gmail.com](mailto:vborovytsky@gmail.com)**