

В.Р. ЛЮБЧИК

Хмельницький національний університет

А.В. КЛЕПІКОВСЬКИЙ

Буковинський державний медичний університет, Чернівці

В.О. КОВАЛЕВ

НДВ ОНДІТТ, НПК «Курс», Одеса

## МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ КОМПЛЕКСІВ ОПТИКО-ТЕЛЕВІЗІЙНОГО НАВЕДЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СТЕРЕОСКОПІЧНИХ ОПТОСИСТЕМ

*В статті розглянуто підходи до аналізу виміральної інформації системи оптико-телевізійного наведення, що встановлюється на літальних апаратах та безпілотних літальних апаратах. Розглянуто алгоритми функціонування системи, визначені шляхи подальшого удосконалення системи.*

*Ключові слова: системи оптико-телевізійного наведення, стабілізація зображення, детектування яскравості меж об'єктів, оптична система.*

V.R. LIUBCHYK

Khmelnyskyi National University

A.V. KLEPIKOVSKYI

Bukovyna State Medical University, Chernivtsi

V.O. KOVALEV

Research and production complex "Course", Odesa

## DESIGN METHODS OF OPTICAL TV GUIDANCE COMPLEXES WITH STEREOSCOPIC OPTOSYSTEMS

*In the article the approaches to the analysis of measurement data systems optical TV guidance, installed on aircraft and unmanned aerial vehicles. The algorithms of the system identified ways to further improve the system.*

*Further image processing can be done in different ways (Hough transform, Radon transform, etc.) may also add motion detection system (in this case, to apply the morphological transformation of erosion and dilation to highlight the deliberately static objects, and then compare Centres masses of smaller circuits centred weight basis).*

*Keywords: system optical TV guidance, image stabilization, brightness detection limits objects optical system.*

**Вступ** До недавнього часу алгоритми роботи систем оптичного наведення базувалися на детектування контрастних об'єктів на тлі однорідної поверхні методом алгебри згортки зображення, що істотно обмежувало можливість їх застосування в умовах складного рельєфу, ускладнювало процес розпізнавання об'єктів а також вимагало підсвічування цілі для здійснення вимірювання дальності.

На сьогоднішній день обчислювальні потужності дозволяють перейти до використання систем стереозору, що багато в чому полегшує завдання, що стоять перед комплексами оптико-електронного наведення (далі ОЕН).

Однак, при проектуванні ОЕН виникає ряд конструкторських і програмних завдань, від якості вирішення яких залежить подальша працездатність комплексу:

1. Максимальна стабілізація зображення;
2. Юстирування і синхронізація камер;
3. Адаптивна бінаризація зображення;
4. Фільтрація шумів на зображенні;
5. Детектування контурів і їх порівняння з масками.

Рішення першої з поставлених завдань – стабілізації зображення – традиційно здійснюється зміцненням камери на рухомій гіроплатформі, однак за такого підходу істотно погіршуються масогабаритні показники системи, що веде до обмеження її використання на малорозмірних літальних апаратах (далі ЛА) і БПЛА.

**Постановка задачі** Для поліпшення характеристик оптичної системи доцільно використовувати гібридний підхід: для великих кутових відхилень з малими кутовими швидкостями застосовувати електромеханічну стабілізацію платформи, для коливань з малими амплітудами і великими кутовими швидкостями – програмну стабілізацію зображення. Особливо ефективний такий підхід за великого оптичного збільшення, коли вібрації ЛА вносять істотний спотворення в відеопотік. Як датчики кутових прискорень можуть бути застосовані розташовані безпосередньо на платформі тривісеві МЕМС-гіроскопи, дані яких використовуються як в процесі стабілізації зображення, так і в подальших обчисленнях. На рис.1 представлена узагальнена компоновочна схема оптичного вузла:

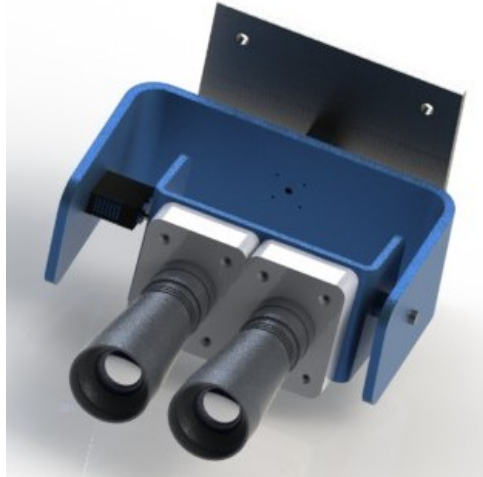


Рис. 1. Можлива компоновка оптичної платформи

**Основна частина** Алгоритм роботи блоку стабілізації при такому варіанті реалізації оптичної системи спирається на співвідношення (1).

$$F_x = \left\{ \begin{array}{l} f(\alpha), \frac{\partial \alpha}{\partial t} < \omega_{\max}, \Delta y_{ROI} = 0 \\ const, \frac{d\alpha}{dt} > \omega_{\max}, \Delta y_{ROI} = f(\omega_\alpha) \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$F_y = \left\{ \begin{array}{l} f(\beta), \frac{\partial \beta}{\partial t} < \omega_{\max}, \Delta \beta_{ROI} = 0 \\ const, \frac{d\beta}{dt} > \omega_{\max}, \Delta \beta_{ROI} = f(\omega_\beta) \end{array} \right\}$$

Як видно, критерієм вибору способу стабілізації є кутова швидкість обертання ЛА по крену і тангажу ( $\omega_\alpha, \omega_\beta$  відповідно). Порогові величини швидкостей ( $\omega_{\max}$ ) визначаються типами використовуваних сервоприводів (наприклад, для використаних в експериментальних дослідженнях сервоприводів Hitec HS-7950TS цей параметр складає  $0,78c^{-1}$  при  $U_{\text{вих}}=7.4$  В).

Як вихідні параметри виступають частоти меандрів керування сервоприводами  $F_x, F_y$ , а також величини  $\Delta y_{ROI}, \Delta \beta_{ROI}$ , що показують зміщення центру ROI (Region of interest – цікавої області зображення, рис. 2) по вертикальній осі, а також повороті області відносно центральної точки.

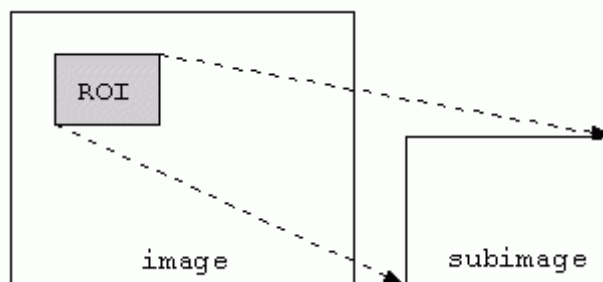


Рис. 2. Отримання субповерхності області ROI

У разі зміщення залежність носить лінійний характер і визначається роздільною здатністю камер, для повороту використовується матриця повороту  $M(\beta)$ , обумовлена виразом (2).

$$M(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Слід зазначити, що розрахунок тригонометричних функцій в режимі реального часу вимагає істотних обчислювальних витрат, тому доцільно використовувати заздалегідь розраховані таблиці значень матриці. Також при програмуванні системи слід врахувати, що співвідношення сторін субповерхності, що

виділяється для стабілізації до сторонам субповерхності, використовуваної в подальших обчисленнях повинна перевищувати значення  $\sqrt{2}$ , інакше в умовах різких еволюцій при повороті ROI неминуче будуть виникати крайові «сірі області», що може призвести до втрати системою працездатності.

Вибір розмірів області оброблюваного зображення багато в чому визначається характеристиками ЛА, камер, сервоприводів, а отже є індивідуальним для кожної системи, що розробляється.

На рис. 3 представлений можливий алгоритм роботи блоку стабілізації зображення по тангажу (канал управління по крену діє аналогічно):

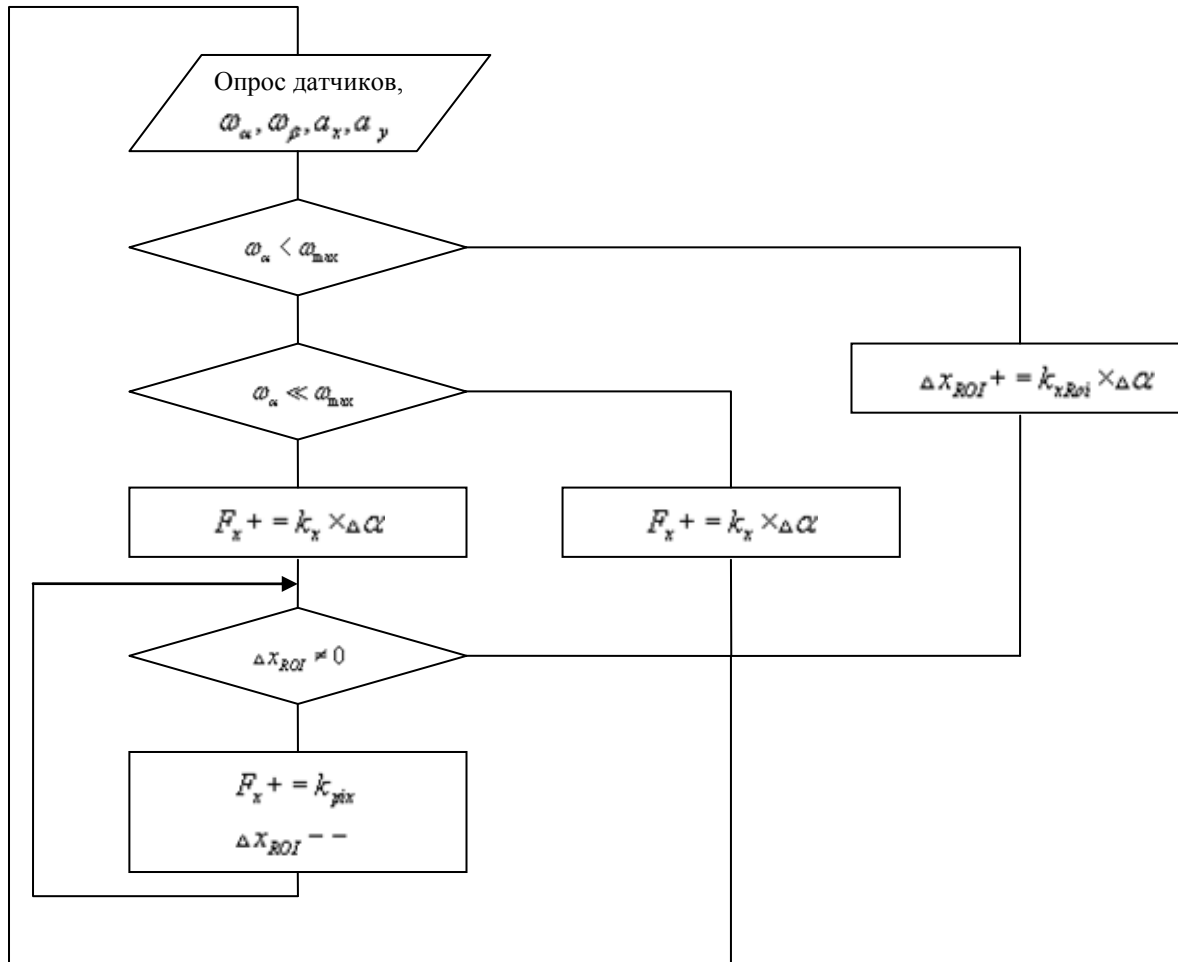


Рис. 3. Алгоритм стабілізації зображення по каналу тангажу

Наступним найважливішим завданням обробки зображення є його бінаризація з метою розвантаження обчислювального пристрою.

Бінаризація зображення в кілька етапів:

1. Перетворення в градації сірого;
2. Згладжування;
3. Знаходження локальних порогів бінаризації;
4. Безпосередньо бінаризація.

Перший етап – перетворення зображення в градації сірого служить для радикального зменшення кількості інформації і дозволяє виробляти подальшу обробку в режимі реального часу. Математично, для кожного пікселя зображення результат даної операції описаний співвідношенням [3]:

$$I = 0,2125 \times R + 0,7154 \times G + 0,0721 \times B \tag{3}$$

де  $I$  – результуюче значення яскравості;  $R, G, B$  – значення яскравості основних кольорів. У співвідношенні представлені стандартні вагові коефіцієнти, проте експерименти показують, що їх зміна відповідно до умов місцевості і пори року може істотно підвищити селективність детектора контурів.

Згладжування зображення є в загальному випадку необов'язковою процедурою, крім того при його реалізації слід враховувати висоту польоту, кратність збільшення оптичної системи, а також рівень освітленості фону. Виходячи з вищевказаних параметром згладжування може не проводитись взагалі, або ж проводиться з декількома ітераціями. Математично, оператор являє собою фільтр, наближений до першої похідної Гауссіана  $\sigma = 1,4$  (4):

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * A \quad (4)$$

де  $A$  – масив елементів зображення в градаціях сірого.

Відмінною особливістю бінаризації зображень, отриманих зйомкою з повітря, є неможливість використання фіксованого порога бінаризації внаслідок неоднорідності освітленості поверхні і низького контрасту.

На сьогоднішній день найбільш вдалі результати дають методи Ніблек, Крістіана і Бредлі-Рота. Універсального підходу до вирішення завдання в рамках розробки ЗЕК не існує, так як всі вище вказані способи мають свої переваги і недоліки. Наприклад, метод Ніблек забезпечує максимальну швидкість обробки, але при цьому погано працює з низькою контрастністю нерівностями фону; метод Крістіана менш чутливий до шумів, але часто вносить сильно спотворені; метод Бредлі-Рота заснований на отриманні інтегральних зображень з локальними порогами бінаризації і дає найбільш точні результати, але використовує велику кількість системних ресурсів.

Експерименти показують, що для ОЕН найбільш прийнятним може вважатися модифікований метод Крістіана. Метод реалізує функцію, описану в співвідношенні (5):

$$T = (1 - k) \times m + k \times M + k \times \frac{S}{R} \times (m - M) \quad (5)$$

де  $T$  – локальний поріг перетворення,  $M$  – мінімальне значення пікселя зображення,  $R$  – динамічний рівень дев'яти в градаціях сірого,  $m$  – локальне середнє значення,  $S$  – відхилення значень, обчислених в околиці пікселя. У класичному методі,  $k$  є фіксованою константою, в модифікації методу цей параметр береться з зведеної таблиці і залежить від освітленості, метеоумов і висоти польоту.

Наступним кроком обробки зображення є знаходження контурів, їх порівняння в кадрах камер, Афіний перетворення і розпізнавання об'єктів згідно маскам.

У загальному випадку, знаходження контурів зводиться до функції (6):

$$f(x) = \frac{I_r - I_l}{2} \left( \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{2}\sigma} \right) + 1 \right) + I_l$$

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t^2} dx \quad (6)$$

$$I_l = \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$$

$$I_r = \lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$$

де  $I_l, I_r$  – яскравості зліва і праворуч від кордонів відповідно. На практиці використовується виділення кордонів методом обчислення градієнта яскравості зображення – оператор Собеля (7) з наступним округленням кута напрямку вектора градієнта, придушенням немаксимумів, подвійний порогової фільтрацією і трасуванням області неоднозначності.

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A$$

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 3 \end{bmatrix} * A \quad (7)$$

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{G_y}{G_x} \right)$$

Найбільш достовірні результати при детектуванні контурів отримані застосуванням оператора Кенні, що реалізує вище вказану послідовність обчислень.

Отримані таким чином контури в зображеннях з обох камер зручно порівнювати через їх моменти. Момент контуру визначається формулою (8):

$$m(p, q) = \sum_{i=1}^n I(x, y) x^p y^q \quad (8)$$

де  $n$  – число пікселів контуру,  $p, q$  – порядок зведення в ступінь відповідного параметра при підсумовуванні.

Такий підхід дозволяє знаходити на зображеннях контури з співпадаючими моментами і координатами по осі ординат, що дозволяє по різниці абсцис між центрами мас визначати відстань до об'єктів і їх реальні розміри.

Наступний етап обробки зображення – Афінне перетворення. Його застосування обумовлене необхідністю порівняння отриманих контурів з масками цілей. Суть операції зводиться до застосування матриці переходу, отриманої за допомогою попередніх обчислень. Функція перетворення в загальному вигляді описується виразом (9):

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (9)$$

$$f(x) = M \cdot x + v$$

де  $M$  – неспецифічний афінор, що враховує кутові і перспективні спотворення зображення.

**Висновки** Подальша обробка зображення може бути виконана різними способами (перетворення Хафа, перетворення Радону і т.д.), можливо також доповнення системи детекторами руху (в такому випадку слід застосовувати морфологічні перетворення ерозії і дилатації для виділення свідомо статичних об'єктів, а потім порівнювати центри мас більш дрібних контурів з центром мас бази).

### Література

1. Мышко С.В. Определение кратчайших путей на множестве атомарных элементов в системах автоматического опознавания изображений / С.В. Мышко, Д.В. Шевцов // Вісник Донецького університету, серія А: Природничі науки. – 2001. – Вип. 2.
2. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University press, 2004.
3. Распопов В.Я. Микросистемная авионика : учебное пособие / В.Я. Распопов. – Т. : Гриф и К, 2010.
4. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах / О.А. Бабич. – М. : Машиностроение, 1991.
5. Szeliski R. Computer vision: Algorithms and applications. University of Washington, 2008.
6. Pilu M. Pollard S. A light-weight text image processing method for handheld embedded cameras. Hewlett-Packard Laboratories, Bristol, England, March, 2002.
7. Trier O.D. Taxt T. Evaluation of binarization methods for document images. IEEE Trans. Machine Intell., vol. 17, no. 3, p. 315, March 1995.
8. Sauvola J. Pitikainen M. Adaptive image binarization Patt. Recogn., vol. 33, pp. 225–236, 2000.
9. Matsushita Y. Ofek E. Ge W. Tang X. Shum H.-Y. Full-frame video stabilization with motion inpainting. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 28, July 2006. 225, 231.

Рецензія/Peer review : 15.11.2016 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2016 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.