А.М. Кривоножко¹, Є.А. Толкаченко², П.В. Опенько³

¹ Повітряне командування "Центр", Васильків

² Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

³ Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОСТУПАЛЬНОГО Й ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ОПТИЧНОГО ДЖЕРЕЛА РЕЄСТРАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

В статті розглядається метод визначення параметрів поступального й обертального руху оптичного джерела реєстрації безпілотного літального апарата (БПЛА), заснованого на аналізі потоку, отриманого від оптичного датчика, що знаходиться на борту БПЛА, з наступним використанням отриманих даних для уточнення навігаційної інформації та у якості автономного джерела даних для навігації апарату на місцевості. Автономне управління польотом є відкритою науковою проблемою, особливо там, де немає можливості застосувати зовнішні системи позиціонування. Головним завданням, що необхідно вирішити в рамках даної проблеми, є складність якісного позиціонування з використанням лише вбудованих сенсорів. В роботі проведено аналіз працездатності методу на чистих і на зашумлених зображеннях поверхні землі. Проаналізована залежність визначення позиції, та повороту апарата в залежності від характеру поверхні та відстані до неї оптичного датчику. Отримані результати дозволяють використовувати запропонований метод для уточнення даних щодо траєкторії руху апарата отриманих з інших джерел так і для автономної навігації БПЛА.

Ключові слова: оптичний потік, навігація, безпілотний літальний апарат, комп'ютерний зір.

Вступ

Постановка проблеми. Під час використання БПЛА постає питання навігації апарата під час автономного польоту. Також часто необхідна допомога оператору БПЛА в навігації апаратом в невідомій місцевості, а також повернення його при втраті сигналу керування. На сьогоднішній день для подібних задач використовують супутникові системи позиціонування, наприклад GPS.

Ефективне автономне управління польотом є відкритою науковою проблемою, особливо там, де неможливо застосувати зовнішні системи позиціонування, такі як GPS. Головним завданням, що становить дану проблему, є складність якісного позиціонування з використанням лише вбудованих сенсорів.

Проте при використанні даних GPS на малих апаратах типу квадрокоптера, виникає проблема недостатньої точності позиціонування в порівнянні з масштабом траєкторій руху, постійним дрейфом координат і неможливістю повернення апарату у відправну точку при втраті керування. Подібні помилки в навігації при невеликих висотах та дистанціях руху можуть закінчитися втратою апарату при зіткненні з будівлями та іншими предметами на місцевості. Виходом на сьогоднішній день є введення

додаткових систем позиціонування та навігації під час руху. Зазвичай для уточнення координат використовують інерціальну систему навігації, побудовану на датчиках лінійних прискорень та дешевих гіроскопах у сполученні з модулем магнітного компаса [1–5]. Проте практичне застосування такого підходу при втраті сигналу супутникової навігації не дає можливості точно визначати своє положення через деякий час. Тому задача щодо розробки методу визначення параметрів руху безпілотного літального апарату є досить актуальною. Одним з перспективних напрямів є визначення положення апарату на основі даних, отриманих від оптичних датчиків.

Метою статті є розробка методу визначення параметрів поступального й обертального руху оптичного джерела реєстрації безпілотного літального апарата на основі аналізу оптичного потоку.

Виклад основного матеріалу

Для визначення параметрів поступального руху оптичного датчика БПЛА необхідно встановити його властивості.

Розкладемо рух твердого тіла поступальну і – обертальну складові навколо вісі, що проходять через початок координат, [6–7]. Швидкість точки дорівнює

$$V_{total} = -T - \vec{\omega} \times r, \quad (1)$$

де $T = (T_x, T_y, T_z)^T$ – параметри поступального руху;

$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – параметри обертального руху. Нехай оптична система рухається тільки поступально зі швидкістю $T = (T_x, T_y, T_z)^T$. Тоді координати точок змінюються в часі і враховують лише поступальну складову руху:

$$u_t = (-T_x + xT_z)/Z; \quad v_t = (-T_y + yT_z)/Z. \quad (2)$$

Доведено, що якщо рухи джерела виключно поступальні і два потоки генерують той самий оптичний потік, то дві поверхні подібні і два рухи камери є аналогічними [8]. Прийmemo, що Z_1 і Z_2 – дві поверхні, а швидкості $T_1 = (T_x^1, T_y^1, T_z^1)^T$ і $T_2 = (T_x^2, T_y^2, T_z^2)^T$ визначають два різні рухи камери. Нехай відповідні пари Z_1 і T_1 та Z_2 і T_2 генерують той самий оптичний потік. Тоді

$$u_t = (-T_x^1 + xT_z^1)/Z; \quad v_t = (-T_y^1 + yT_z^1)/Z; \quad (3)$$

$$u_t = (-T_x^2 + xT_z^2)/Z; \quad v_t = (-T_y^2 + yT_z^2)/Z. \quad (4)$$

Спростимо (3) і (4). Тоді маємо

$$\frac{-T_x^1 + xT_z^1}{-T_y^1 + yT_z^1} = \frac{-T_x^2 + xT_z^2}{-T_y^2 + yT_z^2}. \quad (5)$$

Звідси

$$\begin{aligned} T_x^1 T_y^2 - x T_y^2 T_z^1 - y T_x^1 T_z^2 + x y T_z^1 T_z^2 = \\ = T_x^2 T_y^1 - x T_y^1 T_z^2 - y T_x^2 T_z^1 + x y T_z^2 T_z^1. \end{aligned} \quad (6)$$

Пари Z_1 і T_1 та Z_2 і T_2 генерують однаковий оптичний потік. Тому рівняння (6) застосовується для всіх x і y та представляється як

$$\begin{aligned} T_x^1 T_y^2 - x T_y^2 T_z^1 - y T_x^1 T_z^2 + x y T_z^1 T_z^2 = \\ = T_x^2 T_y^1 - x T_y^1 T_z^2 - y T_x^2 T_z^1 + x y T_z^2 T_z^1. \end{aligned} \quad (7)$$

Запишемо рівняння (7) у такому вигляді

$$T_x^1 : T_y^1 : T_z^1 = T_x^2 : T_y^2 : T_z^2. \quad (8)$$

Аналіз виразів (7) і (8) свідчить про неможливість визначення масштабувального множника між Z_1 і Z_2 (або між T_1 і T_2) з оптичного потоку. Z_2 – це подібне перетворення від Z_1 . Причому кількість точок, на якій цей потік відомий, не допомагає вирішити завдання. Визначення руху оптичного потоку з точністю до постійного масштабуючого множника однозначно свідчить про рух камери.

Оцінимо параметри поступального руху БПЛА. Отже, для однозначного визначення руху камери необхідно дослідити напрямки оптичного потоку в двох точках площини зображення. Нажаль, цього недостатньо через певний вплив шуму на вимірюваний оптичний потік. Для врахування шуму в оптичному потоці при визначенні параметрів руху застосований метод найменших квадратів [9–10]. У загальному випадку даний метод максимально відповідає умовам щодо деякої норми.

Зображення може мати будь-яку форму. Для спрощення розрахунків вважатимемо, що площина зображення є прямокутником зі сторонами $x \in [-w, w]$ і $y \in [-h, h]$.

Нехай у навколишньому середовищі знаходяться об'єкти, які можуть переміщатися один відносно одного. Для обчислення інтегралів також припустимо, що $1/Z$ – це обмежена функція, і множина точок, де $1/Z$ неперервна, має міру нуль. Необхідно розв'язати оптимізаційне рівняння

$$\hat{T} = \min_{T_x, T_y, i, j \in B} \sum_{n \times m} w_{ij} \left[\left(u_{ij} - \frac{-T_x f + T_z i}{Z} \right)^2 + \left(v_{ij} - \frac{-T_y f + T_z j}{Z} \right)^2 \right]; \quad (9)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) < 100, \\ 0, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) \geq 100. \end{cases}$$

Якщо відстань від камери до поверхні в кожній точці зображення відома, використаємо метод найменших квадратів (норми) [11]:

$$\|f(x, y)\| = \int_{-h}^h \int_{-w}^w [f(x, y)]^2 dx dy. \quad (10)$$

Процедура розв'язання полягає у такому.

1. Визначення загального виразу для значень T_x, T_y , які мінімізують рівняння (9). Вводимо скорочення

$$\alpha = -T_x + iT_z; \quad \beta = -T_y + jT_z. \quad (11)$$

Тоді очікуваний потік дорівнює

$$\bar{u} = \alpha / Z, \quad \bar{v} = \beta / Z. \quad (12)$$

Зрештою співвідношення (10) перетворюється на зручніше

$$\hat{T} = \min_{T_x, T_y, i, j \in B} \sum_{n \times m} w_{ij} \left[\left(u_{ij} - \frac{\alpha}{Z} \right)^2 + \left(v_{ij} - \frac{\beta}{Z} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Продиференціюємо підінтегральний вираз (10) по Z і прирівняємо отриманий результат до нуля

$$T_x = \frac{T_z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} i - Z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} u}{(w \cdot h)}, \quad (14)$$

$$T_y = \frac{T_z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} j + Z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} v}{(w \cdot h)}.$$

2. Нехай $T_z = 0$, тобто поступальний рух по осі Z відсутній. Тоді параметри поступального руху дорівнюють

$$T_x = \frac{-Z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} u}{(w \cdot h)}, \quad (15)$$

$$T_y = \frac{Z \sum_{i,j \in B}^{n \times m} v}{(w \cdot h)}.$$

3. Нехай величина Z невідома. Розглянемо умову, при якій треба визначити параметри руху T_x, T_y, T_z . Пряме застосування методу найменших квадратів до виразу (9) неможливе через нелінійність результуючих рівнянь щодо T_x, T_y, T_z . Для відображення розв'язань для параметрів руху у замкнутій формі удосконалимо метод найменших квадратів. З цією метою помножимо вираз (9) $\alpha^2 + \beta^2$:

$$\hat{T} = \min_{T_x, T_y, T_z} \sum_{i,j \in B}^{n \times m} w_{ij} \left[\left(u_{ij} - \frac{-T_x f + T_z i}{Z} \right)^2 + \left(v_{ij} - \frac{-T_y f + T_z j}{Z} \right)^2 \right] (\alpha^2 + \beta^2);$$

$$\alpha = -T_x + T_z i, \quad (16)$$

$$\beta = -T_y + T_z j,$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) < 100, \\ 0, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) \geq 100. \end{cases}$$

Застосування того ж самого методу найменших квадратів до модифікованого виразу (16) свідчить про таке. Параметри не спотвореного шумом вимірюваного оптичного потоку, а разом з цим і вирази (16), (15) дорівнюють нулю, заміщаючи правильні параметри руху. Тобто ми отримали однакові розв'язання для параметрів руху (16) або (9). Мінімізація вимірюваного оптичного потоку за методом найменших квадратів надає найкращу відповідність відносно іншої норми, яка визначається виразом [12]:

$$\|f(x, y)\|_{\alpha\beta} = \int_{-h-w}^h \int_{-h-w}^w [f(x, y)]^2 (\alpha^2 + \beta^2) dx dy. \quad (17)$$

Розглянемо випадок з різними значеннями оптичної швидкості потоку, особливо, коли внесок у похибку зважений. Саме тоді, коли перевага надається точкам з більшою оптичною швидкістю, вимір великих швидкостей яких є більш точним. Але ж результати (і норми) залежать від властивостей шуму у вимірюваному оптичному потоці. Якщо шум у вимірах і величини оптичного потоку незалежні, використовують норму (10). У такій постановці задачі (незалежність шуму і величини оптичного потоку) отримані значення можуть розглядатися як початкові у чисельній мінімізації за нормою (16) [13].

Визначимо норму (16) шляхом диференціювання (17) по Z і результат дорівнюємо до нуля

$$\left(u - \frac{\alpha}{Z} \right) \frac{\alpha}{Z^2} + \left(v - \frac{\beta}{Z} \right) \frac{\beta}{Z^2} = 0. \quad (18)$$

Опустивши низку перетворень, маємо

$$Z = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{u\alpha + v\beta}. \quad (19)$$

Застосуємо метод найменших квадратів для оцінки параметрів поступального руху для норми (15) і (16):

$$\hat{T} = \min_{T_x, T_y, T_z} \sum_{i,j \in B}^{n \times m} (u_{ij}\beta - v_{ij}\alpha)^2 = g(T_x, T_y, T_z). \quad (20)$$

Оскільки (див. (18)):

$$u\beta - v\alpha = (vT_x - uT_y) - (iv - ju)T_z, \quad (21)$$

маємо

$$g(T_x, T_y, T_z) = aT_x^2 + bT_y^2 + cT_z^2 + 2dT_xT_y + 2eT_yT_z + 2fT_zT_x, \quad (22)$$

де

$$a = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} v^2,$$

$$b = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} u^2,$$

$$c = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [(iv - ju)^2],$$

$$d = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [(ju - iv)^2], \quad (23)$$

$$e = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [u(iv - ju)^2],$$

$$f = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [v(iv - ju)^2].$$

Значення $g(T_x, T_y, T_z) = 0$ при $T_x = T_y = T_z = 0$; в інших випадках є позитивним. Тобто для знаходження мінімуму застосовується перевірка, але це не гарантує єдиного розв'язання. Швидкість поступального руху камери методом найменших квадратів визначається шляхом розв'язання однорідної системи рівнянь (фактично трьох рівнянь) відносно w :

$$Gw = 0, \quad (24)$$

де $G = \begin{pmatrix} a & d & f \\ d & b & e \\ f & e & c \end{pmatrix}$ – матриця коефіцієнтів.

Необхідною і достатньою умовою розв'язання рівняння (23), відмінного від нуля, є рівність $G = 0$. У цьому випадку складові (23) є лінійно залежними, а w визначається до постійного коефіцієнта. Але ж це є ідеальним випадком, оскільки відеодані не піддалися впливові шуму. Спотворені шумом дані означають, що $g \neq 0$ при ненульовій поступальній швидкості. Це означає, що єдиним розв'язанням для (23) є $w = (0, 0, 0)^T$.

Визначивши власний вектор, що відповідає власному значенню λ_1 , маємо

$$\begin{aligned} T_x &= \begin{pmatrix} (b - \lambda_1)(c - \lambda_1) - f(b - \lambda_1) - \\ -d(c - \lambda_1) + e(f + d - e) \end{pmatrix}, \\ T_y &= \begin{pmatrix} (c - \lambda_1)(a - \lambda_1) - d(c - \lambda_1) - \\ -e(a - \lambda_1) + f(d + e - f) \end{pmatrix}, \\ T_z &= \begin{pmatrix} (a - \lambda_1)(b - \lambda_1) - e(a - \lambda_1) - \\ -f(b - \lambda_1) + d(e + f - d) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (25)$$

При хороших даних λ_1 є дуже малим. Тому знаходження точного розв'язання є недоцільним. Достатньо знайти приблизне розв'язання (25), досягається вибором одного w з множини можливих розв'язань, такого, що буде відповідати додатним значенням Z у рівнянні (24).

Оцінимо параметри руху БПЛА під час обертання датчика навколо оптичної осі, тобто розглянемо тільки обертальний рух камери. Для визначення обертального руху методом найменших квадратів [14] з нормою (10) використаємо дані про оптичний потік:

$$\begin{aligned} u_r &= \omega_x xy - \omega_y(x^2 + 1) + \omega_z y; \\ v_r &= \omega_x(y^2 + 1) - \omega_y xy - \omega_z x. \end{aligned} \quad (26)$$

Спираючись на попередні міркування, очевидно, що два різних обертання $\vec{\omega}_1 = (\omega_x^1, \omega_y^1, \omega_z^1)^T$

та $\vec{\omega}_2 = (\omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2)^T$ не можуть генерувати однаковий оптичний потік. Але ж припустимо зворотне, що згенеровані оптичні потоки для різних обертань однакові:

$$\begin{aligned} \omega_x^1 xy - \omega_y^1(x^2 + 1) + \omega_z^1 y &= \\ = \omega_x^2 xy - \omega_y^2(x^2 + 1) + \omega_z^2 y; \\ \omega_x^1(y^2 + 1) - \omega_y^1 xy - \omega_z^1 x &= \\ = \omega_x^2(y^2 + 1) - \omega_y^2 xy - \omega_z^2 x. \end{aligned} \quad (27)$$

Очевидно, що й обертання співпадають: $\vec{\omega}_1 = \vec{\omega}_2$.

Розглянемо прямолінійний горизонтальний з деяким креном $\gamma \neq 0$ рух камери БПЛА. У процесі руху здійснюється зйомка підстильної поверхні. Розглянемо відео послідовність з виділеними на попередньому (I_{n-1}) і поточному (I_n) кадрах блоками 1 і 2 (рис. 1).

Рис. 1. Виділені фрагменти зображень у відеопослідовності

Через крен виділені ідентичні блоки зображень зміщені на різну відстань, яка дозволяє розрахувати величину крену γ .

У загальному випадку рух камери в чистому обертанні однозначно визначають напрямком оптичного потоку у двох точках і його величиною в одній точці [15]. Для оцінки параметрів обертального руху обрано критерій

$$\hat{\omega} = \min_{\omega_x, \omega_y, \omega_z} \sum_{i,j \in B}^{n \times m} w_{ij} \left[\left(u_{ij} - \frac{\omega_x j + \omega_y (i + f^2)}{f} - \omega_z j \right)^2 + \left(v_{ij} - \frac{\omega_x (j + f^2) + \omega_y i}{f} + \omega_z i \right)^2 \right];$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) < 100, \\ 0, & \text{if } \text{cond}(G_{ij}) \geq 100. \end{cases} \quad (28)$$

При чисто обертовому русі відеоджерела оптичний потік не залежить від відстані до поверхні. За цієї причини диференціюємо (28) відносно ω_x , ω_y та ω_z і отримані вирази дорівнюємо нулю

$$\sum_{i,j \in B}^{n \times m} \left[(u - u_r)ij + (v - v_r)(j^2 + 1) \right] = 0,$$

$$\sum_{i,j \in B}^{n \times m} \left[(u - u_r)(i^2 + 1) + (v - v_r)ij \right] = 0, \quad (29)$$

$$\sum_{i,j \in B}^{n \times m} \left[(u - u_r)j - (v - v_r)i \right] = 0.$$

Перетворимо дану систему (28) до такого вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{a}\omega_x + \bar{d}\omega_y + \bar{f}\omega_z &= \bar{k}, \\ \bar{d}\omega_x + \bar{b}\omega_y + \bar{e}\omega_z &= \bar{l}, \\ \bar{f}\omega_x + \bar{e}\omega_y + \bar{c}\omega_z &= \bar{m}. \end{aligned} \quad (30)$$

де

$$\bar{a} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} \left[i^2 j^2 + (j^2 + 1)^2 \right], \quad (31)$$

$$\bar{b} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} \left[(i^2 + 1)^2 + i^2 j^2 \right], \quad (32)$$

$$\bar{c} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [i^2 + j^2], \quad (33)$$

$$\bar{d} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [ij(i^2 + j^2 + 2)], \quad (34)$$

$$\bar{e} = - \sum_{i,j \in B}^{n \times m} j, \quad (35)$$

$$\bar{f} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} i, \quad (36)$$

$$\bar{k} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [uij + v(j^2 + 1)], \quad (37)$$

$$\bar{l} = - \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [u(i^2 + 1) + vij], \quad (38)$$

$$\bar{m} = \sum_{i,j \in B}^{n \times m} [uj - vi]. \quad (39)$$

Введемо у вираз (30) позначення M – матриця коефіцієнтів, n – вектор правих частин:

$$M = \begin{pmatrix} \bar{a} & \bar{d} & \bar{f} \\ \bar{d} & \bar{b} & \bar{e} \\ \bar{f} & \bar{e} & \bar{c} \end{pmatrix}, \quad n = \begin{pmatrix} \bar{k} \\ \bar{l} \\ \bar{m} \end{pmatrix}. \quad (40)$$

Тоді $M\bar{\omega} = n$. Для невинеродженої матриці M обертання дорівнює $\bar{\omega} = M^{-1}n$.

Прямокутна площа зображення, симетрична відносно осей x та y , представляється діагональною матрицею, яку зручно обчислювати її інверсією. Матриця M стає слабко обумовленою, тобто неточності в трьох інтегралах (k, l і m вектори), обчислені зі спостережуваного потоку, значно збільшені, хоча протяжність площини зображення зменшується. Точне визначення компонент обертання навколо оптичної вісі можна очікувати, якщо спостереження обмежуються малим конусом, спрямованим навколо оптичної вісі.

Висновки

Розроблено метод визначення параметрів поступального й обертового руху оптичного джерела реєстрації безпілотного літального апарата, в якому, на відміну від відомих, оцінюються динамічні параметри руху в процесі обробки інформації оптичного потоку відеокамери, що дозволяє будувати поле векторів руху зі зважуванням вимірювань для блоків зображень та аналізувати текстурованість поверхні для підвищення точності формування траєкторії руху.

Метод може бути використано для самостійного визначення параметрів руху БПЛА в районах зі слабким або відсутнім сигналом GNSS. Запропонований метод може скласти основу технології коригування даних супутникової та інерційної систем навігації.

Список літератури

1. McCulloch J.C. Novel methods of measuring the similarity and distance between complex fuzzy sets / J.C. McCulloch. – University of Nottingham, 2016. – 267 p.
2. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений / А.П. Рыжов. – М.: МГУ, 2003. – 81 с.
3. Bailer C. Flow fields: Dense correspondence fields for highly accurate large displacement optical flow estimation / C. Bailer, B. Taetz, D. Stricker // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2015. – P. 4015-4023.

4. Highly accurate optic flow computation with theoretically justified warping / N. Papenberg, A. Bruhn, T. Brox, S. Didas, J. Weickert // International Journal of Computer Vision. – 2006. – Vol. 67. – No. 2. – P. 141-158.
5. Deformable convolutional networks / J. Dai, H. Qi, Y. Xiong, Y. Li, G. Zhang, H. Hu, Y. Wei // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 764-773.
6. Hui T.W. LiteflowNet: A lightweight convolutional neural network for optical flow estimation / T.W. Hui, X. Tang, C.C. Loy // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2018. – P. 8981-8989.
7. Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond / C. Rhemann, A. Hosni, M. Bleyer, C. Rother, M. Gelautz // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 35. – No. 2. – P. 504-511.
8. Wagner C. Toward general type-2 fuzzy logic systems based on zSlices / C. Wagner, H. Hagras // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2010. – Vol. 18. – No. 4. – P. 637-660.
9. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping / T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg, J. Weickert // European conference on computer vision. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 25-36.
10. Zimmer H. Optic flow in harmony / H. Zimmer, A. Bruhn, J. Weickert // International Journal of Computer Vision. – 2011. – Vol. 93. – No. 3. – P. 368-388.
11. Yin Z. Hierarchical discrete distribution decomposition for match density estimation / Z. Yin, T. Darrell, F. Yu // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2019. – P. 6044-6053.
12. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г.Э. Яхьяева. – М.: Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ", 2016. – 187 с.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.: ил.
14. Roth S. On the spatial statistics of optical flow / S. Roth, M.J. Black // International Journal of Computer Vision. – 2007. – Vol. 74. – No. 1. – P. 33-50.
15. Von Mises R. Theory of flight / R. Von Mises. – Courier Corporation, 1959.

Надійшла до редколегії 07.09.2020

Схвалена до друку 13.10.2020

Відомості про авторів:

Кривоножко Анатолій Миколайович
командир Повітряного командування "Центр",
Васильків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1470-7301>

Толкаченко Євгеній Анатолійович
викладач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3736-2606>

Опенько Павло Вікторович
кандидат технічних наук
начальник науково-дослідного відділу
Інституту авіації та протиповітряної оборони
Національного університету оборони України
ім. І. Черняховського,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

Information about the authors:

Anatolij Kryvonozhko
Head of Air Command "Center",
Vasylkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1470-7301>

Yevhenij Tolkachenko
Instructor
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3736-2606>

Pavlo Open'ko
Candidate of Technical Sciences
Head of the Scientific Research Department
of the Aviation and Air Defense Institute
of Ivan Chernyakhovsky National Defense
University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА РЕГИСТРАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.Н. Кривоножко, Е.А. Толкаченко, П.В. Опенько

В статье рассматривается метод определения параметров поступательного и вращательного движения оптического источника регистрации беспилотного летательного аппарата (БПЛА), основанного на анализе потока полученного от оптического датчика, находящегося на борту БПЛА с последующим использованием полученных данных для уточнения навигационной информации и в качестве автономного источника данных для навигации аппарата на местности. Автономное управление полетом остается открытой научной проблемой, особенно там, где нет возможности применить внешние системы позиционирования. Главной задачей, которую необходимо решить в рамках данной проблемы, является сложность качественного позиционирования с использованием только встроенных сенсоров. В работе проведен анализ работоспособности метода на чистых и на зашумленных изображениях поверхности земли. Рассмотр-

рена зависимость определения позиции, и поворота аппарата в зависимости от характера поверхности и расстояния до нее оптического датчика. Результаты позволяют использовать предложенный метод для уточнения данных по траектории движения аппарата полученных из других источников для автономной навигации БПЛА.

Ключевые слова: оптический поток, навигация, беспилотный летательный аппарат, компьютерное зрение.

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETERS OF PROPULATIVE AND ROTARY MOVEMENT OF THE OPTICAL SOURCE OF REGISTRATION OF THE UNPRODUCED AIRCRAFT

A. Kryvonozhko, Ye. Tolkachenko, P. Open'ko

The article considers the method of determining the parameters of translational and rotational motion of the optical source of registration of an unmanned aerial vehicle based on the analysis of the flow received from the optical sensor on board the unmanned aerial vehicle with subsequent use of the obtained data. on the ground. Autonomous flight control is an open scientific problem, especially where it is not possible to use external positioning systems. The main task that needs to be solved in this problem is the complexity of high-quality positioning using only built-in sensors. The use of GPS data on small devices such as quad copters, creates a problem of insufficient positioning accuracy in comparison with the scale of trajectories, constant coordinate drift and the inability to return the device to the starting point in case of loss of control. Such errors in navigation at low altitudes and distances may result in the loss of the device in collision with buildings and other objects on the ground. It can also be dangerous to others. The way out today is the introduction of additional positioning and navigation systems while driving. The analysis of the efficiency of the proposed method on clean and noisy images of the earth 's surface is carried out in the work. The dependence of position determination and rotation of the device depending on the nature of the surface and the distance to it of the optical sensor is analyzed. The obtained results allow to use the proposed method to refine the data on the trajectory of the aircraft obtained from other sources and for autonomous navigation of the unmanned aerial vehicle. The method works correctly on different types of input data, including distorted ones. And also with different type of earth surface.

Keywords: optical flow, navigation, unmanned aerial vehicle, computer vision.