УДК 532.595
DOI: http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771362018147279

Б. О. Козлов[1]

СИСТЕМА ЗЧИСЛЕННЯ ШЛЯХУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОЇ КАМЕРИ

En The trajectory calculation system based on optical camera calculates the current coordinates of the aircraft position, analyzing the video information by comparing the sequence of images. In this system, the «KAZE» detector and descriptor algorithm is used to determine the feature points of the image. The «KAZE» algorithm is invariant to scale and rotation, which is a required condition for aircraft.

The motion estimation of the camera is determined using the "2D-to-2D" method. The essence of this method consists in the definition of the rotation matrix and the translation vector of the camera between two camera positions. The matching of the particular points in the two pictures, that needed to determine the essential matrix, is the necessary data for the system operation. From the essential matrix, the rotation matrix and the translation vector are determined by using the feature points triangulation.

By using the feature points triangulating from its two projections, the coordinates of this point in the three-dimensional space are determined. Triangulation is performed using the SVD of matrix.

Ru В работе рассматриваются система счисления пути на основе оптической камеры, которая вычисляет поточные координаты местоположения воздушного судна, анализируя видеоинформацию, путем сравнения последовательности изображений. Основное внимание уделено триангуляции точки, оценке движения камеры, с помощью метода «2D-to-2D», и алгоритму определения особых точек .

Вступ

Однією із основних умов виконання літальними апаратами (ЛА) поставлених задач є наявність навігаційної системи, яка відповідає необхідним критеріям. ЛА у складі свого навігаційного комплексу мають приймачі супутникових навігаційних систем, безплатформні інерціальні навігаційні системи. Оскільки у інерціальних навігаційних систем присутній недолік – необмежене зростання похибок визначення навігаційних параметрів у часі. А у позиційних систем недоліком є схильність до зовнішніх перешкод, можлива недостовірність сигналів, низька частота вироблення навігаційних параметрів; втрата сигналів супутників, тому доцільно використовувати системи числення шляху об’єкта на основі оптичної камери, як альтернативне джерело навігаційної інформації.

---
[1] *Україна*

Постановка задачі

Розглянемо систему визначення координат об'єкта на площині в опорній системі координат, що базується на сучасному алгоритмі визначення особливих точок зображення, використовуючи інформацію з оптичної камери, що працює у видимому спектрі випромінювання.

Визначення особливих точок зображення

Для визначення особливих точок зображення застосовується алгоритм детектора та дескриптора «*KAZE*», що описаний у [1]. Детектор це алгоритм виявлення особливої характеристики зображення, тобто вибору регіону зображення, що має унікальний контент (точки, лінії, кути, круги, плями). Дескриптори на основі обробки зображень трансформують локальні сусідні пікселі у компактне векторне представлення. Даний алгоритм є інваріантним до зміни масштабу та до повороту. Алгоритм *KAZE* визначає та описує двовимірні особливі точки зображення у нелінійному масштабному просторі, шляхом нелінійної дифузної фільтрації. Таким чином цей алгоритм може зробити згладжування локально адаптивним до даних зображення, зменшуючи шум, але зберігаючи границі об'єктів, отримуючи хорошу точність локалізації та чіткість особливих точок. Нелінійний масштабний простір будується використовуючи ефективний метод адитивного розкладу операторів.

Оцінка руху камери за допомогою алгоритму 2*D-to*-2*D*

Оцінка руху камери із двох послідовних кадрів полягає у оцінці руху камери між поточним і минулим зображеннями та об'єднанні всіх цих рухів, що призводить до отримання траєкторії камери. Розглянемо як перетворення T_k між двома зображеннями I_{k-1} та I_k може бути визначено із двох наборів відповідностей особливих точок зображень у декартових координатах $\tilde{\mathbf{x}}_{k-1}^i = (x_{k-1}^i \;\; y_{k-1}^i)^T$ та $\tilde{\mathbf{x}}_k^i = (x_k^i \;\; y_k^i)^T$, що відповідають моментам часу $k-1$ та k відповідно Розглянемо 2*D-to*-2*D* метод визначення руху використовуючи відповідності особливостей двовимірних зображень $\mathbf{x}_{k-1}^i \leftrightarrow \mathbf{x}_k^i$. Геометрична залежність між двома зображеннями I_{k-1} та I_k каліброваної камери описана за допомогою основної матриці E, яка містить параметри руху камери, але із невідомим масштабним коефіцієнтом у векторі переміщення (t_z) у наступній формі:

$$E_k \cong \hat{t}_k R_k ,$$

де $t_k = [t_x, t_y, t_z]^T$ та $\hat{t}_k = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$.

Основана матриця E_k визначається із двовимірної відповідності 2*D*-to-2*D* особливостей зображення, а матриця повороту R_k і вектор прямолінійного руху t_k об'єкта визначається безпосередньо із основної матриці E_k. Головна властивість оцінки руху, що базується на методі 2*D*-to-2*D* є епіполярне обмеження, котре визначає лінію, на якій відповідна особлива точка $\mathbf{x}_{k-1}^i$ лежить в іншому зображенні, відповідно точка $\mathbf{x}_k^i$. Це обмеження може бути сформульоване за допомогою рівняння:

$$\mathbf{x}_k^{i\,T} \cdot E_k \cdot \mathbf{x}_{k-1}^i = 0,$$

де $\mathbf{x}_k^i$ – особлива точка із координатами, що відповідають поточному зображенню (тобто, I_k);

$\mathbf{x}_{k-1}^i$ – особлива точка із координатами, що відповідають попередньому зображенню (тобто, I_{k-1}).

$\mathbf{x}_{k-1}^i$ та $\mathbf{x}_k^i$ – це нормалізовані координати зображення, у вигляді $\mathbf{x}_{k-1}^i = (x_{k-1}^i \quad y_{k-1}^i \quad 1)^T$ та $\mathbf{x}_k^i = (x_k^i \quad y_k^i \quad 1)^T$ (за припущення, що $\omega_{k-1}^i = \omega_k^i = 1$). Просте рішення для $n \geq 8$ некомпланарних точок є алгоритм, що оснований на восьми точках [2, 3]. Із оцінки $\bar{E}$ виділяються матриця повороту та вектор прямолінійного переміщення. Загалом, існує 4 різних розв'язки для *R* і *t* для однієї основної матриці, які мають вигляд: $R_{1,2} = U\left(\pm W^T\right)V^T$, $\hat{t}_{1,2} = U\left(\pm W\right)SU^T$, де

$$W^T = \begin{bmatrix} 0 & \pm 1 & 0 \\ \mp 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Шляхом тріангуляції однієї точки **X**, може бути визначена коректна пара *R* та *t*. Пара *R* та *t* є коректною, якщо тріангульована точка знаходиться попереду обох камер. Знак координати *Z* тріангульованої точки **X** у системі координат камери визначає розташування точки відносно камери, тобто точка **X** знаходиться попереду камери із параметрами (*t*, *R*) якщо виконується умова:

$$r_3\left(X - t\right) > 0,$$

де $\boldsymbol{r}_3$ це третій рядок матриці *R*. Не всі тріангульовані точки задовольняють цій умові, оскільки присутній шум вимірювання. Найкраща конфігурація параметрів камери, (t, R, $\mathbf{X}$) є такою, що призводить до максимальної кількості точок, що задовольняють умові [2, 3].

Тріангуляція

У задачах комп'ютерного зору тріангуляція це процес визначення точки у тривимірному просторі за даними її проекціями на двох або більше зображеннях. Для вирішення цієї задачі необхідно знати параметри функції проекції камери із тривимірного простору у двовимірний, що представлена матрицею камери. Тріангульовані тривимірні точки визначаються перетином зворотно спроектованих променів із мінімум двох двовимірних зображень. Маючи дві матриці камер $\left(\mathrm{P},\ \mathrm{P}^{/}\right)$ та пари відповідностей точок зображення $\mathbf{x}_{\mathrm{i}} \leftrightarrow \mathbf{x}_{\mathrm{i}}^{/}$, необхідно знайти точку в тривимірному просторі $\mathbf{X}_{\mathbf{i}}$, що проектує дані точки зображення [2, 3].

Розглянемо метод лінійної тріангуляції, це випадок, де фундаментальна матриця F є відома апріорно, тобто передбачається, що матриці камери $\left(\mathrm{P},\ \mathrm{P}^{/}\right)$ є у наявності. Має бути визначена точка у тривимірному просторі $\mathbf{X}$**,** на перетині двох променів зворотно спроектованих із $\mathbf{x}$ та $\mathbf{x}^{/}$.

У кожному зображенні ми маємо вимірювання $\mathbf{x} = \mathrm{P}\mathbf{X},\ \mathbf{x}^{/} = \mathrm{P}^{/}\mathbf{X}$. Ці рівняння можуть бути об'єднані у систему:

$$\mathrm{A}\mathbf{X} = 0.$$

Ця система є системою рівнянь із лінійними невідомими $\mathbf{X}$. Векторний добуток двох паралельних векторів = 0, отже отримаємо:

$$[\mathbf{x}]_{\times}\mathrm{P}\mathbf{X} = 0$$

$$[\mathbf{x}^{/}]_{\times}\mathrm{P}^{/}\mathbf{X} = 0,$$

де $[\mathbf{x}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & y \\ 1 & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$, $[\mathbf{x}^{/}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & y^{/} \\ 1 & 0 & -x^{/} \\ -y^{/} & x^{/} & 0 \end{bmatrix}$,

$\mathrm{P},\ \mathrm{P}^{/}$ це 3 на 4 матриці камери,

$\mathbf{X}^{T} = [X\,Y\,Z\,1]$ – це точка у тривимірному просторі в однорідних координатах.

Спочатку однорідний масштабний коефіцієнт вилучається векторним добутком, щоб дати 3 рівняння для кожної точки зображення, із яких два є лінійно незалежні. Наприклад, для першого зображення $\mathbf{x} \times \left(\mathrm{P}\mathbf{X}\right) = 0$, запис цього результату має вигляд:

$$x(\mathbf{p}^{3\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^{1\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) = 0$$
$$y(\mathbf{p}^{3\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^{2\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) = 0$$
$$x(\mathbf{p}^{2\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) - y(\mathbf{p}^{1\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) = 0,$$

де, $\mathbf{p}^{i\mathrm{T}}$ є i-тий рядок матриці камери P. Ці рівняння є лінійними у компонентах $\mathbf{X}$. Аналогічно отримаємо рівняння для другого зображення $\mathbf{x}^{/} \times (\mathrm{P}^{/}\mathbf{X}) = 0$:

$$x^{/}\left(\mathbf{p}^{/3\mathrm{T}}\,\mathbf{X}\right) - \left(\mathbf{p}^{/1\mathrm{T}}\,\mathbf{X}\right) = 0$$
$$y^{/}(\mathbf{p}^{/3\mathrm{T}}\,\mathbf{X}) - \left(\mathbf{p}^{/2\mathrm{T}}\,\mathbf{X}\right) = 0$$
$$x^{/}\left(\mathbf{p}^{/2\mathrm{T}}\,\mathbf{X}\right) - y^{/}\left(\mathbf{p}^{/1\mathrm{T}}\,\mathbf{X}\right) = 0.$$

Рівняння форми $\mathrm{A}\,\mathbf{X} = 0$ компонується, включаючи два лінійно незалежних рівняння із кожного зображення, даючи 4 рівняння із чотирма однорідними невідомими, де

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} [\mathbf{x}]_{\times}\,\mathrm{P} \\ [\mathbf{x}^{/}]_{\times}\,\mathrm{P}^{/} \end{bmatrix},$$

або

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} x\mathbf{p}^{3\mathrm{T}} - \mathbf{p}^{1\mathrm{T}} \\ y\mathbf{p}^{3\mathrm{T}} - \mathbf{p}^{2\mathrm{T}} \\ x^{/}\mathbf{p}^{/3\mathrm{T}} - \mathbf{p}^{/1\mathrm{T}} \\ y^{/}\mathbf{p}^{/3\mathrm{T}} - \mathbf{p}^{/2\mathrm{T}} \end{bmatrix}.$$

Матриця **А** це матриця 3 на 4, до якої включені два рівняння із кожного зображення, даючи 4 рівняння із чотирма однорідними невідомими.

Для визначення тривимірної точки **X** у однорідних координатах необхідно виконати *SVD* розклад матриці **А**, та отримати складові u,d,v відповідно до $udv^{T} = A$. Із складових *SVD* розкладу матриці **А**, тобто u,d,v тривимірна токи **X** у однорідних координатах знаходиться наступним чином:

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{v}_{4col} / v_{4,4} = [X\,Y\,Z\,1],$$

де, $\boldsymbol{v}_{4col}$ – четвертий стовпчик матриці v, $v_{4,4}$ – елемент матриці v, що відповідає 4 рядку та 4 стовпчику.

Висновки

Запропонована система числення шляху безпілотного апарату за допомогою оптичної камери, що обчислює поточні координати місцезнаходження повітряного судна, аналізує відеоінформацію шляхом порівняння послідовності зображень. У даній системі застосовуються тріангуляція точки, оцінка руху камери за допомогою методу «2*D*-*to*-2*D*», та алгоритм визначення особливих точок «*KAZE*».

Список використаної літератури

1. *Alcantarilla P. F.* KAZE Features / P. F. Alcantarilla, A. Bartoli, A. J. Davison // Computer Vision – ECCV 2012. — P. 1-14.
2. *Scaramuzza D.* Visual odometry / D. Scaramuzza, F. Fraundorfer // • IEEE Robotics & automation magazine 2012. — P. 1 — 13.
3. *Hartley R.* Multiple view geometry in computer vision. Second edition / R. Hartley, A. Zisserman. — Cambridge: Press-2, 2003. — 655 p.