ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 001.891.7(045)

[1]М. П. Мухіна, канд. техн. наук, доц.,
[2]О. В. Кавун

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ОБ'ЄКТА ЗА ДВОВИМІРНОГО ТРЕКІНГА

Інститут аерокосмічних систем управління, НАУ, e-mail: [1]m_mukhina@inbox.ru, [2]olka_kavunchik@mail.ru

Розглянуто проблему прогнозування траєкторії руху об'єкта, за яким ведеться відеостеження, у разі зникнення його з поля зору. Проведено аналіз існуючих алгоритмів візуального стеження. Запропоновано алгоритм прогнозування, що базується на апроксимації траєкторії поліномами третього порядку за методом найменших квадратів.

Ключові слова: прогнозування, візуальне стеження.

Вступ. Системи відеоспостереження дедалі більше поширюються в різних сферах людської діяльності. Успішне вирішення складних і неоднозначних завдань оброблення (аналізу) зображень робить можливою автоматизацію безлічі процесів і операцій, які до цього керувалися і контролювалися тільки людиною.

Однією з найбільш складних і актуальних завдань оброблення відеозображень є проблема виділення і розпізнавання рухомих або нерухомих об'єктів і створення на цій основі систем автоматизованого моніторингу.

Автосупровід об'єкта – режим роботи різноманітних автоматизованих комплексів, за якого без участі людини-оператора, а тільки під її контролем забезпечується зміна орієнтації осі або напрямку руху деяких елементів комплексу слідом за змінами траєкторії і швидкості руху об'єкта. Автосупровід об'єкта може бути оснований на радіолокаційному , фотооптичному, інфрачервоному, квантооптичному, акустичному та інших принципах випромінювання і приймання сигналів.

Візуальне стеження (трекінг) – визначення положення рухомого об'єкта (або декількох об'єктів) у часі за допомогою камери. Візуальному автосупроводу об'єкта передують детектування і «захоплення » об'єкта. Основна проблема автосупроводу об'єкта – повна або часткова втрата об'єкта з поля зору внаслідок природних або штучних перешкод, наприклад таких як ліс, туман, погана видимість, інші об'єкти. Виникає потреба у прогнозуванні руху об'єкта, коли його втрачено з поля зору, щоб надалі, коли об'єкт буде видимий повністю, можна було провести повторне захоплення і продовжити трекінг об'єкта.

Аналіз досліджень і публікацій. Системи візуального стеження за декількома об'єктами використовують виявлення і візуальне стеження за об'єктом на основі створеної раніше математичної моделі. Крім того, для відстеження рухомих об'єктів також використовуються різні підходи, такі як підхід, оснований на пошуку в певній галузі, підхід, що ґрунтується на пошуку за певними характеристиками об'єкта, і комбінований, що охоплює два попередні підходи.

Наприклад, у праці [1] використовується кольорова інформація для сортування об'єктів за глибиною під час перекривання одного об'єкта іншим. Ця система візуального стеження ґрунтується на розпізнаванні за кольором і використовує адаптивне віднімання фону за такими параметрами як колір, градієнт і тіні для підвищення точності сегментації фону.

У праці [2] застосовується кольорова гістограма, основана на техніці розпізнавання кожного об'єкта та подальшої ідентифікації їх у разі перекривання. У праці був використаний алгоритм середнього зміщення для відстеження кількох об'єктів.

У праці [3] об'єднано декілька рівнів оброблення зображення: низький, середній та високий. Низький рівень включає найпростіші операції типу BLOB-аналізу, виділення країв та

інші, середній рівень ґрунтується на рекурсивному визначенні траєкторії у тривимірному просторі, тоді як високий рівень уже використовує розпізнавання дій об'єкта та їх прогнозування. У цій праці розширено низькорівневі методи для оброблення руху кількох об'єктів, також були використані явні моделі перекриття об'єктів і оцінено та виконано прогнозування траєкторій руху у тривимірному просторі.

Недоліком наведених праць є те, що алгоритм візуального стеження за об'єктами під час перекриття виконується завжди, незалежно від того, чи є перекриття чи немає, навіть якщо візуальне стеження проводиться для одного рухомого об'єкта. Це потребує більших затрат часу для розрахунків і досить складного алгоритму. Цю проблему було вирішено в праці [4]. Спочатку проводиться стеження за об'єктами у часовій області, і тільки в разі виникнення ситуації перекриття спрацьовує алгоритм стеження за об'єктами у просторовій області. Це значно спрощує алгоритм і підвищує продуктивність усієї системи в цілому. Хоча ця система візуального стеження має вагому перевагу перед усіма попередніми, але також має недоліки, які необхідно усунути. Одним із найбільш суттєвих є те, що в цій роботі не були явно сформульовані умови втрати об'єкта з поля зору за рахунок перекриття іншими.

Під час аналізу також розглянуто підхід до прогнозування руху гнучких об'єктів у режимі реального часу. Для вдалого розпізнавання і візуального стеження за гнучкими об'єктами використано активну модель форми, складність обчислень для якої робить неможливим її використання в реальному часі. В праці [5] запропоновано новий ієрархічний підхід, що зменшує затрати на підрахунки, а також підвищує точність. За запропонованим алгоритмом спочатку проводиться прогноз початкових контурів об'єкта за допомогою фільтра Калмана і групового порівняння двох послідовних кадрів, а потім підбираються моделі за допомогою ієрархічної активної моделі форми. Запропонований ієрархічний підхід дає змогу скоротити кількість ітерацій настільки, що стає можливим використання цієї системи в реальному часі, також він має найбільшу точність і швидкість серед усіх розглянутих у роботі. Хоча запропонований алгоритм значно зменшує кількість ітерацій, він однак потребує подальшого дослідження для можливості використання його для зображень з високою роздільною здатністю.

Постановка завдання. Прогнозування руху об'єкта у разі його зникнення з поля зору, тобто необхідно визначати залежність від часу таких основних параметрів руху, як швидкість і курс.

У загальному вигляді рух об'єкта та процес спостереження за об'єктом можна записати так:

$$\hat{X}(k+1/k) = A(k)\hat{X}(k/k) + u(k); \qquad \hat{Z}(k+1/k) = H(k+1)\hat{X}(k+1/k), \tag{1}$$

де $\hat{X}(k+1/k)$ – вектор стану в момент часу k+1; $A(k)$ – матриця коефіцієнтів об'єкта; $u(k)$ – білий шум; $\hat{Z}(k+1/k)$ – вектор вимірювань екранних координат об'єкта; $H(k+1)$ – матриця спостережень.

Задача формулюється таким чином: виконати прогноз параметрів об'єкта, що спостерігається, якщо він зник з поля зору, використовуючи дані, зібрані в ході нормального спостереження. Припустімо, що об'єкт, який спостерігається, задається оператором як одна з точок, яка належить об'єкту.

Характеристики об'єкта можна визначити за допомогою методу BLOB аналізу, зокрема такі геометричні характеристики об'єкта, як площа, центр мас, периметр, орієнтація зображення відносно осей і т. ін.

Відео має кадри розміром 320×240 пікселів, чорнобіле, частота 25 кадрів за секунду. Застосовуються такі обмеження:

– розміри об'єкта не перевищують 48×48 пікселів;

– розміри об'єкта не менші ніж 4×4 пікселів;

– контрастність об'єкта порівняно з фоном не менша за 5 %;

– максимальна швидкість переміщення центра об'єкта не більша ніж 8 пікселів за один кадр.

Досліджуваний об'єкт спостерігається протягом деякого періоду часу і для нього можливе обчислення екранних координат X_i, Y_i, де X, Y – масиви екранних координат об'єкта; i – номер кадру.

Для визначення координат об'єкта використовується метод BLOB аналізу. За його допомогою обчислюються координати X, Y, що відповідають координатам центра мас об'єкта.

У цій роботі формулюється задача прогнозування руху об'єкта в разі його зникнення з поля зору, тобто необхідно визначити залежність основних параметрів руху від часу. Будемо вважати, що рух об'єкта у загальному випадку описується такою системою рівнянь

$$\left\{\begin{array}{l} X_i = X_{i-1} + V_i \sin\psi_i; \\ Y_i = Y_{i-1} + V_i \cos\psi_i, \end{array}\right\} \tag{2}$$

де X, Y – координати центра мас спостережуваного об'єкта; V – швидкість спостережуваного об'єкта; ψ – курс спостережуваного об'єкта; i – індекс, що означає поточний кадр; i-1 – попередній; $V_i \sin\psi_i$ і $V_i \cos\psi_i$ – компоненти швидкості за x і y відповідно.

Курс спостережуваного об'єкта визначається як кут між вектором швидкості V та віссю ординат Oy (рис. 1) і розраховується за формулою $\psi_i = \tan^{-1}\dfrac{X_i - X_{i-1}}{Y_i - Y_{i-1}}$, що випливає із системи рівнянь (2). Відповідно і швидкість об'єкта можна розрахувати за формулою $V_i = \dfrac{X_i - X_{i-1}}{\sin\psi_i}$.

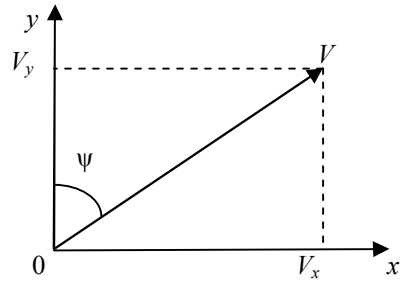


Рис. 1. Вектор швидкості та курс спостережуваного об'єкта

Очевидно, що для того, щоб отримати модель руху об'єкта, необхідно знайти такі основні параметри, як V, ψ. У загальному випадку пропонується описувати їх зміну в часі за допомогою поліноміальної функції третього порядку:

$$\psi = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \cdots; \tag{3}$$

$$V = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \cdots. \tag{4}$$

Можливі такі окремі випадки:

– об'єкт рухається з постійною швидкістю і змінним курсом $(V = \text{const}, \psi = \text{var})$;

– об'єкт рухається з постійним курсом і змінною швидкістю $(V = \text{var}, \psi = \text{const})$;

– об'єкт рухається зі змінним курсом і змінною швидкістю $(V = \text{var}, \psi = \text{var})$;

– об'єкт рухається з постійним курсом і постійною швидкістю $(V = \text{const}, \psi = \text{const})$.

Задача формулюється як знаходження таких коефіцієнтів поліномів, що забезпечують мінімум квадрата похибки $S_V = \sum_{i=1}^{n}\left(V_i - \hat{V}_i\right)^2$ та $S_\psi = \sum_{i=1}^{n}\left(\psi V_i - \hat{\psi}_i\right)^2$.

Для цього будемо використовувати метод найменших квадратів, що добре себе зарекомендував для розв'язання задач такого типу і є простим у реалізації.

Розроблення алгоритму. Модель є лінійною в коефіцієнтах і в матричній формі можна записати

$$\psi = TA;\ V = TB,$$

де ψ і V – $n\times 1$ – вектор значень курсу та швидкості відповідно на кожному з кадрів відео; n – кількість кадрів; A і B – $m\times 1$ – вектор коефіцієнтів поліномів, що описують модель курсу та швидкості руху об'єкта; m – вказує на порядок полінома; T – $n\times m$ – матриця степенів параметра полінома (це може бути час, номер кадру і т. ін.).

Використовуємо поліном третього порядку, тоді в матричній формі пропонована модель буде виглядати так:

$$\begin{bmatrix}\psi_1\\ \psi_2\\ \vdots\\ \psi_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & i_1 & i_1^2 & i_n^3\\ 1 & i_2 & i_2^2 & i_n^3\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & i_n & i_n^2 & i_n^3\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}a_0\\ a_1\\ a_2\\ a_3\end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix}V_1\\ V_2\\ \vdots\\ V_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & i_1 & i_1^2 & i_n^3\\ 1 & i_2 & i_2^2 & i_n^3\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & i_n & i_n^2 & i_n^3\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}b_0\\ b_1\\ b_2\\ b_3\end{bmatrix}. \tag{5}$$

Для того щоб обчислювати за формулами (5), необхідно розраховувати поточні значення курсу та швидкості об'єкта на кожному кроці.

Очевидно, що коефіцієнти полінома можна визначити так:

$$A=\left(T^TT\right)^{-1}T^T\psi;\qquad B=\left(T^TT\right)^{-1}T^TV.$$

Блок-схему алгоритму прогнозування траєкторії руху об'єкта показано на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм прогнозування траєкторії рухомого об'єкта

Оскільки наведений алгоритм був реалізований в програмному середовищі Matlab, для находження арктангенса використано функцію atan2. Оскільки вона на відміну від функції atan, область визначення якої обмежена проміжком $[-\pi/2,\ \pi/2]$, дозволяє знаходити арктангенс кута на всьому проміжку $[0, 2\pi]$.

Експериментальні результати. Алгоритм був реалізований в програмному середовищі Matlab 7,0. Для перевірки ефективності розробленого алгоритму траєкторія руху об'єкта моделювалася за формулами (3), (4), а потім відтворювалася додаванням випадкового шуму з нормальним розподіленням (рис. 3), а результати досліджень наведено у таблиці.

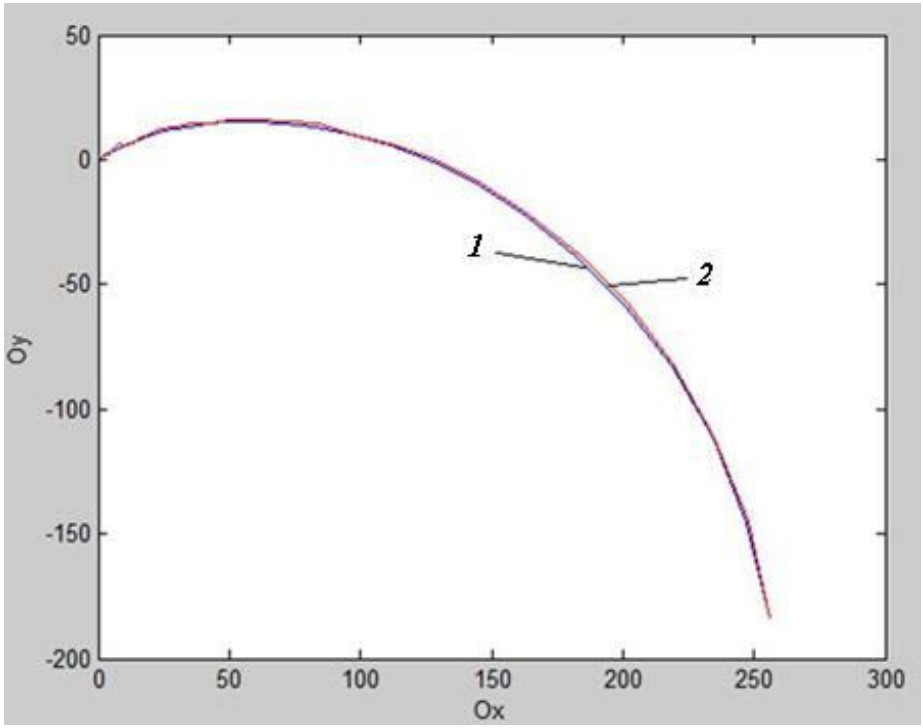


Рис. 3. Ідеальна (*1*) та спостережувана (*2*) траєкторії для коефіцієнтів полінома $a_0 = 1$, $a_1 = 0{,}001$, $a_2 = 0{,}0015$, $a_3 = 0{,}00002$; $b_0 = 1$; $b_1 = 0{,}03$; $b_2 = 0{,}009$; $b_3 = 0{,}0011$ з шумом, який моделюється за нормальним розподілом із математичним очікуванням 0 і дисперсією 0,095

Результати моделювання траєкторії руху об'єкта

Характер зміни параметрів руху об'єкта	Моделювання за допомогою полінома другого порядку		Моделювання за допомогою полінома третього порядку	
	$S_v = \sum_{i=1}^{n}(V_i - \hat{V}_i)^2$	$S_\psi = \sum_{i=1}^{n}(\psi_i - \hat{\psi}_i)^2$	$S_v = \sum_{i=1}^{n}(V_i - \hat{V}_i)^2$	$S_\psi = \sum_{i=1}^{n}(\psi_i - \hat{\psi}_i)^2$
V = const, ψ = var	3,7303e – 028	0,0014	3,8681e – 025	9,6586e – 025
V = var, ψ = const	4,3558	2,6408e – 028	3,8831e – 023	3,7728e – 025
V = var, ψ = var	4,3558	0,0014	3,9786e – 023	9,6414e – 025
V = const, ψ = const	2,0046e – 028	2,5339e – 028	3,8286e – 025	3,9093e – 025

Реалізовано також лістинг алгоритму і за 20 с імітовано зникнення об'єкта з поля зору. Інформації про координати об'єкта не було протягом 5 с. Далі об'єкт на 26 с знову з'являється в полі зору, тому ефективність алгоритму перевіряється як різниця між прогнозованими і дійсними координатами. Ця різниця склала по координаті X – 0,1691 пікселів і по координаті Y – 0,2072 пікселів, що за розмірами об'єкта буде становити не більше 2,5 %. Ефективність алгоритму можна визначити як середнє арифметичне суми відхилень прогнозованих значень від дійсних і дорівнює для швидкості 3,9786e – 023, а для курсу – 9,6414e – 025.

Було проведено дослідження роботи алгоритму для всіх можливих моделей руху об'єкта, а також дослідження величини похибки в разі неправильного підбору математичної моделі руху для прогнозування руху об'єкта.

Висновки. Запропонований алгоритм може бути використаний для задач автосупроводу і дозволяє спрогнозувати положення об'єкта в разі його втрати з точністю не менше 97,5 % за умови вибору правильного порядку полінома, що описує зміну таких параметрів, як швидкість і курс об'єкта. В разі вибору неправильного порядку полінома похибка значно зростає. Час, потрібний для оброблення цього алгоритму, становить 0,3432 с.

Список літератури

1. *McKenna S.* Tracking groups of people, Comput. Vis. Imag. Underst. 80 / S. McKenna and S. Jabri et al. // (2000). – P. 42 – 56.
2. *Lu W.* A color histogram based people tracking system / W. Lu and Y. P. Tan // IEEE Int. Symp. Circuits and Systems (IEEE Press, May 2001). – P. 137 – 140.
3. *Rosales R.* 3D trajectory recovery for tracking multiple objects and trajectory guided recognition of actions / R. Rosales and S. Sclaroff // IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE Press, June 1999).
4. *Lee Heungkyu* Prediction based occluded multitarget tracking using spatio-temporal attention / Heungkyu Lee and June Kim // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 20, No. 6 (2006). – 925 – 938 World Scientific Publishing Company.
5. *Lee S.-W.* Hierarchical active shape model with motion prediction for real-time tracking of non-rigid objects / S.-W. Lee, J. Kang, J. Shin and J. Paik. – Vol. 1. – (2007). – P. 17 – 24.

М. П. Мухина, О. В. Кавун

Исследование алгоритма прогнозирования траектории движения объекта при двухмерном трекинге

Рассмотрена проблема прогнозирования траектории движения объекта, по которому ведется видеонаблюдение, при исчезновении его из виду. Проведен анализ существующих алгоритмов визуального слежения. Предложен алгоритм прогнозирования, основанный на аппроксимации траектории полиномами третьего порядка по методу наименьших квадратов.

M. P. Mukhina, O.V. Kavun

Investigation of forecasting algorithm's trajectory in the two-dimensional object tracking

In this paper considers the problem of predicting the trajectory of the object, which is video surveillance, the disappearance of his sight. An analysis of existing algorithms for visual tracking. Proposed prediction algorithm, based on approximating the trajectory of the third order polynomial least-squares method.