

УДК 004.932.2

А.А. МОЛЧАНОВ, В.И. КОРТУНОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ

В статье рассмотрены методы формирования оптического потока, использующиеся в задачах обработки изображений. Формирование оптического потока состоит в определении величины и направления смещений отдельных точек изображений на двух кадрах, выбираемых из принимаемой видеопоследовательности. Движение объектов может быть оценено по камере, используя данные оптического потока, поэтому в настоящее время проявляется интерес к методам обработки этого потока. Проанализированы методы расчета относительного движения камеры для частных случаев поступательного и вращательного движения камеры.

Ключевые слова: *оптический поток, поле движения, метод сопоставления блоков, поступательное и вращательное движения, метод наименьших квадратов.*

Введение

Из изображений, изменяющихся во времени, можно извлечь много полезной информации: движение объектов и блоков на сцене, а также параметры движения камеры. Движение яркостной картинка, наблюдаемое при движении камеры относительно изображаемых объектов, называется оптическим потоком и используется в различных приложениях [1].

Оптический поток является полезной информацией даже при условии деформации изображений наблюдаемых поверхностей, а в случае движения камеры, как твердого тела, оптический поток строго определен этим движением. Движение объектов перед камерой или движение камеры в неподвижной окружающей обстановке приводит к соответствующим изменениям на изображении, и это изменение можно использовать для восстановления относительного движения. В идеале оптический поток соответствует полю движения, при условии, что объекты не изменяют энергетическую освещенность на плоскости изображений в процессе движения в сцене, это позволит нам оценивать относительное движение, исходя из изменения изображения во времени [2].

Последовательности упорядоченных изображений в потоке позволяют оценивать движение либо как мгновенную скорость изображения, либо как дискретное смещение. Методы, основанные на оптическом потоке, вычисляют движение между двумя кадрами, взятыми в момент времени t и $t + \Delta t$, для каждого пикселя [3].

Исследования оптического потока широко ве-

дутся в областях сжатия видео и анализа движений. Алгоритмы оптического потока не только определяют поле, но и используют оптический поток при анализе трехмерной структуры сцены, а также 3D-движения объектов и наблюдателя относительно сцены [4].

Оптический поток используется в робототехнике при распознавании объектов, слежении за объектами, определении движения и при навигации робота [4, 5]. Кроме того, оптический поток используется для изучения структуры объектов [6, 7], поскольку определение движения и создание глубины сцены окружающей среды являются неотъемлемой частью человеческого зрения.

Методы определения оптического потока

Оптический поток можно определять следующими методами:

- а) фазовая корреляция (исследуется поведение разности фаз изображений, фаза изображения вычисляется через дискретное преобразование Фурье) [8];
- б) блочные методы с минимизацией суммы квадратов или суммы модулей разностей;
- в) дифференциальные методы оценки оптического потока, основанные на частных производных:
 - алгоритм Лукаса – Канаде (рассматриваются части изображения и аффинная модель движения) [9];
 - алгоритм Horn–Schunck (на основе минимизации функционала, описывающего отклонение от постоянства яркости и гладкость получаемого век-

торного поля) [10];

– алгоритм Buxton–Buxton (основан на моделі движения границ объектов в последовательности изображений) [11];

– общие вариационные методы (модификация метода Horn-Schunck), использующие ограничения на данные и другие ограничения на гладкость.

г) дискретные методы оптимизации, когда поисковое пространство квантуется, затем каждому пикселю изображения ставится в соответствие метка таким образом, чтобы расстояние между последовательными кадрами было минимальным [12].

Один из дифференциальных методов, получивший широкое распространение, исходит из основополагающего предположения, что общее изменение яркости в потоке изображения равно нулю, т.е., полная яркость изображения остается постоянной во времени [13, 14]. Тогда отношения между пространственно-временными градиентами потока изображения и параметрами этого потока могут быть определены из условия постоянной яркости:

$$\frac{dI}{dt} = 0,$$

или

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} I = 0,$$

$$I_x u + I_y v + I_t = 0,$$

$$I_t = -(I_x, I_y)(u, v)^T,$$

где $I = I(x, y, t)$ – значение яркости в точке изображения с координатами (x, y) ;

$I_x = \partial I / \partial x$; $I_y = \partial I / \partial y$; $I_t = \partial I / \partial t$ – значение пространственно-временных градиентов оптического потока в точке (x, y) ;

$u = dx / dt$; $v = dy / dt$ – скорости перемещения изображения в точке (x, y) .

Временной градиент I_t прямо пропорционален компонентам вектора скорости изображения $(u, v)^T$, совпадающими по направлению с пространственными градиентами I_x, I_y . Таким образом, полученное соотношение, которое выполняется для каждого пикселя, явным образом определяет вектор искомых параметров $(u, v)^T$, описывающих скорость движения изображения.

Из-за дискретной природы данных изображений, вычисление временно-пространственных градиентов требует дискретной аппроксимации операций дифференцирования. Для расчета временного градиента предлагается использовать разницу значений яркости на двух соседних кадрах

$$I_t \approx I_2 - I_1,$$

где I_t – матрица временного градиента размера $m \times n$;

I_2, I_1 – матрицы значений яркости последовательно поступивших кадров размера $m \times n$.

Для определения матриц пространственных градиентов I_x, I_y используется оператор Собеля [15], осуществляющий свертку изображений с помощью горизонтальной H и вертикальной V градиентных масок. Оператор Собеля имеет следующий вид:

$$I_x = (I_1 * H + I_2 * H) / 2;$$

$$I_y = (I_1 * V + I_2 * V) / 2,$$

где $H = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ и $V = H^T$.

Рассмотрим блочный метод определения оптического потока. Его основным преимуществом по сравнению с другими методами является относительно невысокая ресурсоемкость, возможность определения оптического потока по двум исходным кадрам и при относительно больших смещениях точек между кадрами.

Рассмотрим формирование оптического потока. Данная процедура состоит в определении величины и направления смещений отдельных точек изображений на двух кадрах, выбираемых из принимаемой видеопоследовательности. Для решения настоящей задачи могут быть использованы различные корреляционные алгоритмы [16, 17], позволяющие искать идентичные (похожие) фрагменты на различных изображениях. В качестве рабочей критериальной функции, устанавливающей степень “схожести”, предлагается функция среднего модуля разности в виде

$$K_k(di, dj) = M [|A_k(i, j) - I_{n-1}(i + di, j + dj)|],$$

где $A_k(i, j)$ – k -й блок на I_n -м изображении;

i, j – координаты пикселя внутри блока;

di, dj – координаты пикселя в области поиска на изображении I_{n-1} .

Для поиска положения фрагмента A_q изображения I_n на изображении I_{n-1} необходимо вычислить $N = di_{\max} dj_{\max}$ значений $K_k(di, dj)$ при $di = 1, \dots, di_{\max}$, $dj = 1, \dots, dj_{\max}$. Значения di, dj при которых $K(di, dj)$ минимальна, соответствуют координатам фрагмента A_q на изображении I_{n-1} .

Для упрощения расчетов предлагается использование оптического потока, формируемого на ос-

нове оценок смещений не точек, а отдельных блоков размером $n \times n$, на которые предварительно разбивается изображение. Относительные смещения блоков на двух кадрах видеопоследовательности характеризуются векторами поля движения, которые находятся на основании оценки положения соответствующих блоков на каждом кадре с помощью корреляционных функций.

Для уменьшения вычислительных затрат при определении оптического потока может использоваться подход “от грубого к точному” на основе пирамиды изображений. Алгоритм последовательно применяется к изображениям на разных масштабах, с использованием оптического потока, найденного на данном масштабном уровне, в качестве начального приближения на следующем уровне. Такой подход позволяет сильно сократить размеры областей поиска на уровнях с большим разрешением, что приводит к резкому сокращению объема вычислений.

Использование оптического потока для определения параметров движения камеры

Для вычисления относительного движения используется два основных понятия: оптический поток и поле движения. Поле движения определяется следующим образом: каждой точке изображения соответствует вектор скорости. Точка p соответствует точке P на поверхности Земли (рис. 1). Эти две точки связаны уравнениями проектирования. Важно то, что любой точке изображения можно приписать некоторый вектор. Эти векторы образуют поле движения. Соседние точки предмета имеют близкие скорости, поэтому поле движения также непрерывно на большей части изображения [8].

Предполагаем, что камера движется относительно неподвижной окружающей обстановки. В этом случае существует несколько способов расчета относительного движения камеры: дискретный, дифференциальный и метод наименьших квадратов.

При дискретном подходе используется информация от нескольких точек изображения. Поскольку сразу встает вопрос о выборе оптимального количества точек, при этом подходе требуется поиск особых точек на изображениях, полученных в разные моменты времени [18].

Дифференциальный подход сводится к вычислению движения камеры через первые и вторые пространственные частные производные оптического потока. Недостатком является увеличение шума в измерениях оптического потока за счет дифференцирования. При использовании дискретного и диф-

ференциального подходов делается допущение, что оптические данные не содержат ошибок [19].

Метод наименьших квадратов для вычисления относительного движения камеры использует все поле оптического потока. Этот метод учитывает расхождения в имеющихся данных и является достаточно устойчивым для численного решения [20].

Сложность использования дискретного и дифференциального подходов в реальных условиях состоит в их высокой чувствительности к шумам в принимаемой видеоинформации. Но в тоже время, использование метода наименьших квадратов требует больших вычислительных ресурсов.

Пусть камера движется в статической окружающей обстановке. Систему координат свяжем с камерой, так чтобы ось Z совпадала с оптической осью камеры. Обозначим r – вектор соединяющий точку O с точкой P . Движение твердого тела можно разложить на две составляющие: мгновенное поступательное движение (w) и мгновенное вращение ($\vec{\omega}$) вокруг оси, проходящей через начало координат. Текущие координаты точки P сцены $(X, Y, Z)^T$. Скорость точки P относительно системы координат XYZ будет иметь вид $V = -w - \vec{\omega} \times r$, где $w = (U, V, W)^T$ – мгновенное поступательное движение; $\vec{\omega} = (A, B, C)^T$ – мгновенное вращение. Точка P переходит в соответствующую точку p путем центральной проекции (рис. 1), где $x = X/Z$; $y = Y/Z$.

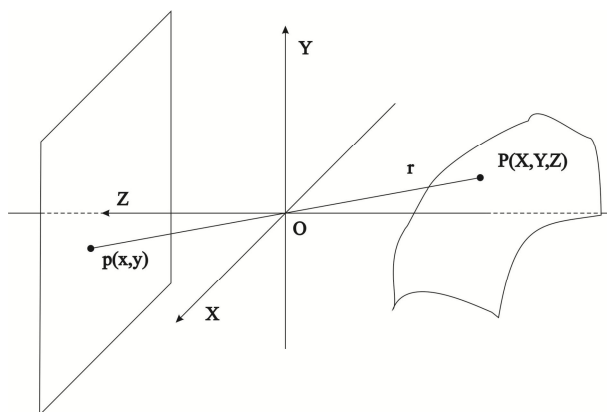


Рис. 1. Камера, которая дает изображение, являющейся центральной проекцией

Оптический поток в точке $p(x, y)$ обозначим через (u, v) , где $u = \dot{x}$ и $v = \dot{y}$. Если продифференцировать уравнения для x и y по времени и использовать выражения

$$\dot{X} = -U - BZ + CY;$$

$$\begin{aligned}\dot{Y} &= -V - CX + AZ; \\ \dot{Z} &= -W - AY + BX,\end{aligned}$$

получим следующие уравнения для оптического потока:

$$\begin{aligned}u &= \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} = \left(-\frac{U}{Z} - B + Cy\right) - x\left(-\frac{W}{Z} - Ay + Bx\right); \\ v &= \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} = \left(-\frac{V}{Z} - Cx + A\right) - y\left(-\frac{W}{Z} - Ay + Bx\right).\end{aligned}$$

Мы можем записать эти уравнения в виде $u = u_t + u_r$ и $v = v_t + v_r$. Оптический поток можно разбить на поступательную составляющую (u_t, v_t) и вращательную составляющую (u_r, v_r) оптического потока, т.е.

$$\begin{aligned}u_t &= (-U + xW) / Z; \\ u_r &= Axy - B(x^2 + 1) + Cy; \\ v_t &= (-V + yW) / Z; \\ v_r &= A(y^2 + 1) - Bxy - Cx.\end{aligned}$$

Если рассматривать чисто поступательное и чисто вращательное движение, имея измеритель угловых скоростей можно определить параметры поступательного движения и соответственно, измеряя угловые параметры можно определить поступательное движение камеры. Рассмотрим методы определения параметров движения камеры, предложенные в [21], когда движение камеры имеет чисто поступательный и вращательный характер.

Параметры поступательного движения

Используем метод наименьших квадратов для определения поверхности и параметров движения.

Метод наименьших квадратов состоит из следующих шагов: вначале мы определяем величину Z , которая минимизирует подынтегральное выражение в каждой точке (x, y) , а затем определяем величину U, V и W , которая минимизирует интеграл.

Выражение, которое мы хотим минимизировать, примет вид

$$\iint \left[\left(u - \frac{-U + xW}{Z} \right)^2 + \left(v - \frac{-V + yW}{Z} \right)^2 \right] (\alpha^2 + \beta^2) dx dy,$$

где $\alpha = -U + xW$; $\beta = -V + yW$.

Обозначим интеграл для минимизации через

$$g(U, V, W) = aU^2 + bV^2 + cW^2 + 2dUV + 2eVW + 2fWU,$$

где $a = \iint v^2 dx dy$, $b = \iint u^2 dx dy$,

$$c = \iint (xv - yu)^2 dx dy, \quad d = -\iint uv dx dy,$$

$$e = \iint u(xv - yu) dx dy, \quad f = -\iint v(xv - yu) dx dy.$$

Для определения скорости поступательного движения методом наименьших квадратов, необходимо решить следующую однородную систему относительно w : $Gw = 0$, где

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

В общем случае, поскольку данные содержат шум, функцию $g(U, V, W)$ нельзя сделать равной нулю для ненулевой поступательной скорости, и таким образом, $w = (0, 0, 0)^T$ будет единственным правильным решением. Определив собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_1 , получим:

$$\begin{aligned}U &= (b - \lambda_1)(c - \lambda_1) - f(b - \lambda_1) - d(c - \lambda_1) + e(f + d - e), \\ V &= (c - \lambda_1)(a - \lambda_1) - d(c - \lambda_1) - e(a - \lambda_1) + f(d + e - f), \\ W &= (a - \lambda_1)(b - \lambda_1) - e(a - \lambda_1) - f(b - \lambda_1) + d(e + f - d).\end{aligned}$$

Необходимо заметить, что значение λ_1 должно быть небольшим при хороших данных, и можно просто аппроксимировать точное решение, используя эти уравнения при $\lambda_1 = 0$.

Параметры вращательного движения

В общем случае направление оптического потока в двух точках и его величина в одной точке однозначно определяют чисто вращательное движение. Используя метод наименьших квадратов для определения параметров вращательного движения, минимизируем следующее выражение

$$\iint \left[(u - u_r)^2 + (v - v_r)^2 \right] dx dy.$$

Поскольку движение чисто вращательное, оптический поток не зависит от расстояния до поверхности, и поэтому мы можем пропустить первый шаг метода, используемого для поступательного движения. Таким образом, мы сразу дифференцируем интеграл по A, B, C и приравняем результирующее выражение к нулю:

$$\iint \left[(u - u_r)xy + (v - v_r)(y^2 + 1) \right] dx dy = 0,$$

$$\iint \left[(u - u_r)(x^2 + 1) + (v - v_r)xy \right] dx dy = 0,$$

$$\iint \left[(u - u_r)y - (v - v_r)x \right] dx dy = 0.$$

Перепишав выражения получим

$$\bar{a}A + \bar{d}B + \bar{f}C = \bar{k},$$

$$\bar{d}A + \bar{b}B + \bar{e}C = \bar{l}, \quad \bar{f}A + \bar{e}B + \bar{c}C = \bar{m},$$

$$\text{где } \bar{a} = \iint \left[x^2 y^2 + (y^2 + 1)^2 \right] dx dy,$$

$$\bar{b} = \iint \left[(x^2 + 1)^2 + x^2 y^2 \right] dx dy,$$

$$\bar{c} = \iint (x^2 + y^2) dx dy,$$

$$\bar{d} = \iint \left[xy(x^2 + y^2 + 2) \right] dx dy, \quad \bar{e} = -\iint y dx dy,$$

$$\bar{f} = -\iint x dx dy, \quad \bar{k} = \iint \left[uxy + v(y^2 + 1) \right] dx dy,$$

$$\bar{l} = -\iint \left[u(x^2 + 1) + vxy \right] dx dy,$$

$$\bar{m} = \iint (uy - vx) dx dy.$$

Обозначив матрицу коэффициентов через M , а вектор правых частей – через n

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

получим $M\bar{\omega} = n$. Таким образом, когда матрица M невырождена, можно вычислить вращение как $\bar{\omega} = M^{-1}n$.

Заключение

В данной статье были рассмотрены основные методы определения и формирования оптического потока, а также использование оптического потока в задаче определения параметров движения по оптическому потоку.

Для любого движения камеры и любой поверхности мы можем определить соответствующий оптический поток, и мы говорим, что поверхность и движение порождают оптический поток. Оптический поток зависит от шести параметров движения камеры и от поверхности, изображение которой анализируется. Определение движения камеры по оптическому потоку сильно упрощается, если рассматривать чисто поступательное или чисто вращательное движение.

Литература

1. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст]: пер. с англ. / Д. А. Форсайт, Понс Жан. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
2. Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений [Текст] / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008. – 192 с.

3. Yao, Wang. Motion Estimation for Video Coding Polytechnic [Text] / Wang Yao. – University Brooklyn. – 2003. – 43 p.

4. Jonghyuk, K. Dual Optic-flow Integrated Navigation for Small-scale Flying Robots [Text] / K. Jonghyuk, G. Brambley. – Department of Engineering, Australian National University Canberra, 2006. – 32 p.

5. MAV Navigation through Indoor Corridors Using Optical Flow [Text] / S. Zingg, D. Scaramuzza, S. Weiss, R. Siegwart. – Autonomous Systems Lab ETH Zurich, 2004. – 18 p.

6. Новейшие методы обработки изображений [Текст] / под ред. А. А. Попова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

7. Ташлинский, А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений [Текст] / А.Г. Ташлинский. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 123 с.

8. Stone, Harold S. A Fast Direct Fourier-Based Algorithm for Subpixel Registration of Images [Text] / Harold S. Stone // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – Oct. 2001. – V. 39, No. 10. – P. 2235 – 2242.

9. Солонина, А.М. Алгоритмы и процессоры для цифровой обработки сигналов [Текст] / А.М. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.

10. Horn, B.K.P. Determining optical flow [Text] / B.K.P. Horn, B.G. Schunck // Artificial Intelligence. – 1981. – Vol 17. – P. 185 – 203.

11. Humphreys, Glyn W. Visual Cognition: computational, experimental and neuropsychological perspectives [Text] / Glyn W. Humphreys, Bruce Vicki. – UK.: Lawrence Erlbaum Associates Ltd, 1995. – 339 p.

12. Image Registration through MRFs and Efficient Linear Programming [Text] / B. Glocker, N. Komodakis, G. Tziritas, N. Navab, N. Paragios // Medical Image Analysis Journal. – 2008. – 12(6). – P. 731–741.

13. Павлидис, Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений [Текст] / Т. Павлидис. – М.: Радио и Связь, 1986. – 396 с.

14. Назаров, А.С. Фотограмметрия [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов / А.С. Назаров. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.

15. Яне, Б. Цифровая обработка изображений [Текст] / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

16. Цифровая обработка изображений в информационном системах [Текст]: учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

17. Баклицкий, В.К. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации [Текст] / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкареев, М.П. Мусьякое; под общ. ред. В.К. Баклицкого. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.

18. Белоглазов, И.Н. Основы навигации по геофизическим полям [Текст] / И.Н. Белоглазов, Г.И. Джанджгава, Г.П. Чигин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. – 328 с.

19. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений [Текст] / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

20. Пытьев, Ю.П. Методы морфологического анализа изображений [Текст] / Ю.П. Пытьев, А.И. Чуличков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 336 с.

21. Хорн, Б.К.Н. Зрение роботов [Текст]: пер. с англ. / Б.К.Н. Хорн. – М.: Мир, 1989. – 487 с.

22. Родионов, С.А. Основы оптики: конспект лекций [Текст] / С.А. Родионов. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 167 с.

23. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий [Текст] / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.

24. Обзор блочных методов оценки движения в цифровых видеосигналах [Текст] / С.В. Гришин, Д.С. Ватолин, А.С. Лукин, С.Ю. Путилин, К.Н. Стрельников // Программные системы и инструменты. Изд-во факультета ВМиК МГУ – 2008. – № 9. – С. 50 – 62.

Поступила в редакцию 7.03.2013, рассмотрена на редколлегии 16.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. информатики В.А. Гороховатский, Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ПО ОПТИЧНОМУ ПОТОКУ

А.О. Молчанов, В.І. Кортунів

У статті розглянуто методи формування оптичного потоку, що використовуються в задачах обробки зображень. Формування оптичного потоку полягає у визначенні величини і напрямку зміщень окремих точок зображень на двох кадрах, обраних з прийнятої відео послідовності. Рух об'єктів може бути оцінений по камері, використовуючи дані оптичного потоку, тому в даний час проявляється інтерес до методів обробки цього потоку. Проаналізовано методи розрахунку відносного руху камери для приватних випадків поступального і обертового руху камери.

Ключові слова: оптичний потік, поле руху, блочний метод, поступовий та обертовий рухи, метод найменших квадратів.

REVIEW OF MOTION PARAMETERS ESTIMATION METHODS FROM OPTICAL FLOW

A.A. Molchanov, V.I. Kortunov

In this paper the methods of forming an optical flow using digital image processing are considered. Formation of optical flow is determine the magnitude and direction of displacements of individual points in two frames of images selected from the received video sequence. It is shown that movement of an object can be estimated from the chamber using an optical data stream. The methods of calculating the relative motion of the camera from the optical flow are described and analyzed.

Key words: optical flow, field motion, block matching algorithm, translational and rotational motions, least square method.

Молчанов Андрей Александрович – аспирант каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Кортунів Вячеслав Іванович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.