

УДК 621.369.962

А.С. КРАВЧУК

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

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЕКТОРОВ ДВИЖЕНИЯ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ

*Проанализированы современные требования, предъявляемые к работе оптических систем. Рассмотрена математическая модель оптического приемника. Проведен анализ функциональных зависимостей векторов движения на изображении от параметров движения и ориентации приёмника изображения относительно сцены. Проведен подробный анализ векторов движения на изображении при изолированных движениях оптического приёмника. Предложены рекомендации по использованию полученных зависимостей, что позволяет решать задачи оценки параметров ориентации и движения камеры бесприкосовыми методами, имеющими высокое быстродействие.*

**Ключевые слова:** оптическая камера, пространственные деформации, вектора движения, ориентация, перспективная проекция.

### Введение

Стремительное развитие технологий производства полупроводниковых схем высокой степени интеграции сделало доступными и широко используемыми оптические приемники высокого разрешения. Такие сложные оптические системы стали неотъемлемой частью мобильных телефонов, ноутбуков и другого широко распространенного оборудования. В то же время активно исследуются такие направления применения оптических систем как компьютерное зрение, навигация и другие сферы, требующие не только формирования и визуализации изображений, но и получения информации об объектах сцены, взаимном расположении сцены и камеры, параметрах движения и пространственной ориентации камеры и т.д. [1, 2].

### Постановка задачи исследования

В общем случае изображения представляют собой случайные поля [3,4], и для выделения небольшого объема необходимой информации требуется применение вычислительно сложных методов. В статическом варианте проблема выделения информации, например, о положении камеры, является достаточно сложной задачей, а в некоторых случаях может вообще не иметь решения. Использование оптических систем, позволяющих выделять заданную информацию из случайного поля изображения, требует применения высокопроизводительных вычислительных платформ и эффективных методов обработки изображения. В то же время, при наличии движения камеры или сцены, можно перейти к рас-

смотрению не самих точек изображения, а неких векторов движения (ВД), определяемых как смещения участков изображения от кадра к кадру. Вектора движения, в отличие от элементов изображения, имеют функциональные зависимости от параметров движения и ориентации приёмника изображения относительно сцены.

Целью данной работы является анализ функциональных зависимостей вектора движения от параметров движения и ориентации приёмника изображения относительно сцены.

### Математическая модель оптического приёмника

Достаточно точной и несложной моделью оптического приемника является математическая модель перспективной проекции соответствующая идеальной камере обскура [3], позволяющая определить проекцию произвольной точки М в 3D пространстве на плоскость изображения произвольно расположенной камеры:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = PM = K \cdot I \cdot C^{-1} \cdot M, \quad (1)$$

где P – матрица проекции;

K – матрица внутренней калибровки;

C – матрица внешней калибровки;

I – матрица центральной проекции;

X, Y, Z, – координаты точки М ;

u, v – координаты точки М на изображении.

Внешние параметры камеры, содержащиеся в матрице  $C$  определяют пространственное положение камеры относительно системы координат сцены. Их изменение, т.е. движение камеры, приводят к появлению геометрических искажений в последовательности изображений, которые в свою очередь могут служить для оценки параметров движения и ориентации камеры. В результате пространственных деформаций (ПД) изображений, одни и те же элементы сцены на разных кадрах имеют различные координаты. Геометрически эту ситуацию можно описать движением сетки отсчетов в пространстве при неподвижной сцене или движением элементов сцены.

Используя уравнение (1) для камеры расположенной на высоте  $dz$  относительно сцены, получим уравнения связывающие координаты точек сцены  $(X, Y, Z)$  и их проекции  $(u, v)$  (рис. 1.). В уравнении (2) представленном этом рисунке  $\psi, \theta, \gamma$  - углы ориентации камеры относительно сцены;  $f$  - фокусное расстояние объектива.

Для перехода к ВД на изображении необходимо задать линейное и угловое движение камеры относительно сцены. Линейное движение будем задавать равномерным движением сцены  $(X = X_0 + V_x t, Y = Y_0 + V_y t, Z = Z_0 + V_z \cdot t)$ , а угловое движение вращением камеры относительно сцены  $(\theta = \theta_0 + \omega \theta t, \gamma = \gamma_0 + \omega \gamma t, \psi = \omega \psi t)$ .

Дифференцируя по времени уравнения (2) и принимая во внимание то, что углы ориентации камеры зависят от времени, получим уравнения для скоростей движения на изображении. Поскольку полученные выражения достаточно громоздки, ограничимся в данной работе анализом изолированных линейных и угловых движений.

### Анализ ВД при изолированных движениях

*Вектор движения в центральной точке изображения.* Пусть точки сцены двигаются с постоянной линейной скоростью, угловые скорости отсутствуют.

Тогда для точки изображения с координатами  $(u = 0, v = 0)$  получим:

$$\frac{du}{dt} = \frac{f \cos \theta \cos \gamma (-V_z \sin \theta + V_x \cos \theta)}{V_z t + h}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{fX \cos \psi \cos \theta + fY \sin \psi \cos \theta - fZ \sin \theta + fdz \sin \theta}{X(\sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \sin \theta \cos \gamma) + Y(-\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma) + Z \cos \theta \cos \gamma - dz \cos \theta \cos \gamma} \\ \frac{fX(-\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \theta \sin \gamma) + fY(\cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \sin \gamma) + fZ \cos \theta \sin \gamma - fdz \cos \theta \sin \gamma}{X(\sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \sin \theta \cos \gamma) + Y(-\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \gamma) + Z \cos \theta \cos \gamma - dz \cos \theta \cos \gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Рис. 1. Уравнение связывающие координаты точек сцены  $(X, Y, Z)$  и их проекции  $(u, v)$

$$\frac{dv}{dt} = f \cos \theta \cos \gamma \times \frac{(\cos \gamma V_y + V_z \cos \theta \sin \gamma + V_x \sin \theta \sin \gamma)}{V_z t + h}. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) видно, что при параллельном расположении плоскости проекции камеры и сцены скорости проецируются на изображение с масштабным коэффициентом  $f/h$ . В случае появления наклонов камеры относительно сцены происходит изменение масштабного коэффициента в следствии увеличения дальности до элементов сцены  $h' = h / \cos \theta \cos \gamma$ . Следует также отметить, что при нулевых углах ориентации, т.е. при параллельном расположении плоскостей камеры и сцены, проекции линейной скорости сцены проецируются на соответствующие проекции изображения.

*Распределение ВД на изображении при линейном движении.* Рассмотрим влияние углов ориентации камеры на распределение ВД в плоскости приёмника изображения вызванных линейным движением. Уравнения (5) и (6) определяют зависимости ВД в плоскости изображения от угла  $\theta$  при  $\psi = V_z = \gamma = \omega \theta t = \omega \gamma t = \omega \psi t = 0$ , а выражения (7) и (8) от угла  $\gamma$  при  $\psi = V_z = \theta = \omega \theta t = \omega \gamma t = \omega \psi t = 0$ .

$$\frac{du}{dt} = \frac{V_x h f^3 \cos^2 \theta}{2hfXu \sin \theta + h^2 f^2 + Xu^2 - Xu^2 \cos^2 \theta}, \quad (5)$$

$$\frac{dv}{dt} = f^2 \cos \theta \times$$

$$\times \frac{(-YuV_x \cos \theta \sin \theta + Vy(hf + Xu \sin \theta))}{2hfXu \sin \theta + h^2 f^2 + Xu^2 - Xu^2 \cos^2 \theta}, \quad (6)$$

$$\frac{du}{dt} = \left( XuV_y \cos \gamma \sin \gamma + f^2 V_x \cos \gamma (-Yu \sin \gamma + hf) \right) \times \frac{1}{-2hfYu \sin \gamma + h^2 f^2 + Yu^2 - Yu^2 \cos^2 \gamma}, \quad (7)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Vy f^3 h \cos^2 \gamma}{-2hfYu \sin \gamma + h^2 f^2 + Yu^2 - Yu^2 \cos^2 \gamma}, \quad (8)$$

где  $Xu, Yu$  – координаты точки на изображении для которой проводится анализ.

Графически эти зависимости представлены на рис. 2 и 3 соответственно, причём на рис. 2 приведена проекция ВД на ось  $Y$  при угле  $\theta = 30^\circ$ , а на рис. 3 на ось  $X$  при угле  $\gamma = 30^\circ$ .

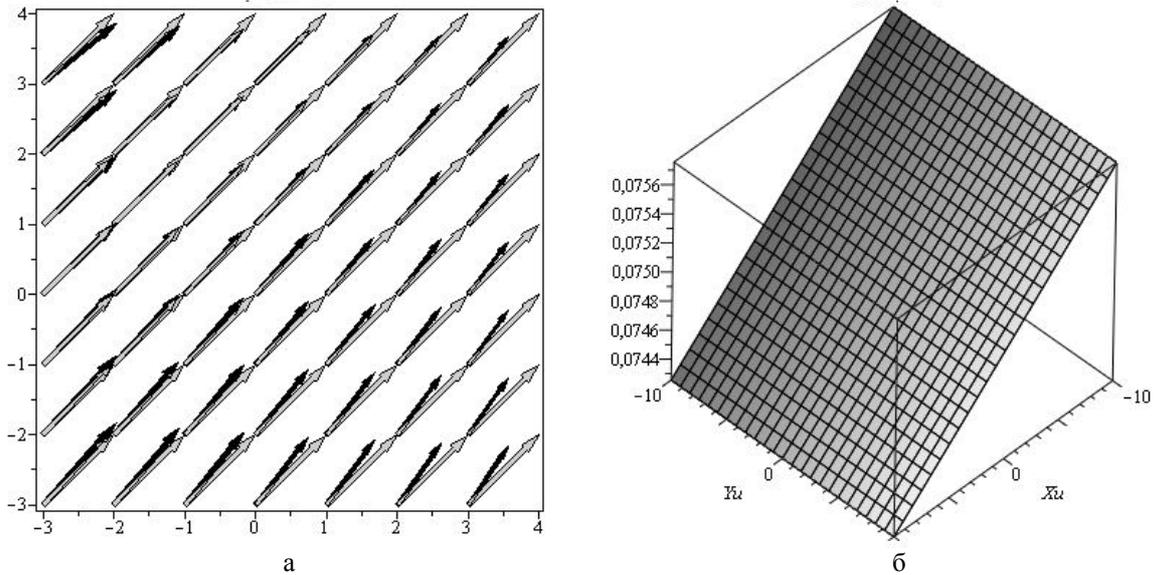


Рис. 2. Распределение при угле  $\theta = 30^\circ$  :  
а – ВД на изображении; б – амплитуды проекции ВД на ось  $u$

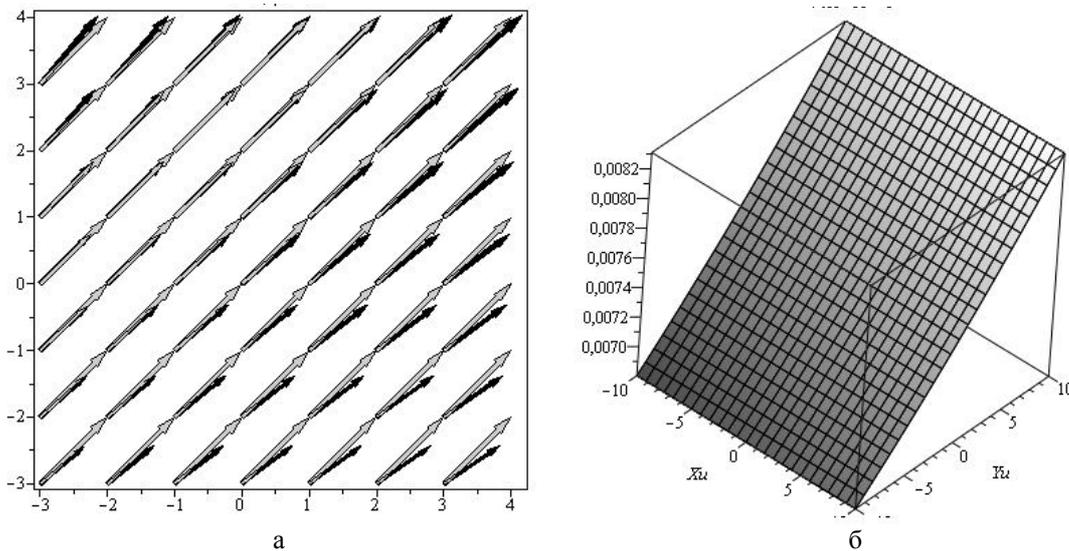


Рис. 3. Распределение при угле  $\theta = 30^\circ$  :  
а – векторов движения на изображении; б – амплитуды проекции ВД на ось  $v$

Для этих проекций характерны практически линейные зависимости амплитуды ВД вдоль осей  $u$  и  $v$  камеры соответственно.

*Распределение ВД на изображении при угловом движении камеры.* Для анализа влияния угловой динамики зададим линейные скорости движения сцены равными нулю и последовательно рассмотрим влияние каждой из угловых скоростей камеры на ВД изображения.

$$\frac{du}{dt} = \omega \psi Y u, \quad (9)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\omega \psi X u. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) определяют ВД на изображении вызванные вращением плоскости камеры вокруг оси проекции рис 4. Для ВД, вызванных таким вращением характерно увеличение амплитуды по мере удаления от центра вращения и их симметрия относительно него.

Для ВД вызванных вращением вокруг осей параллельных плоскости проекции камеры характерно практически параллельное расположение всех векторов и близкие значения амплитуды, отличающиеся в 4-5 порядке. Выражения (11) и (12) описывают ВД вызванные вращением вокруг оси  $v$ , а (13) и (14) вокруг оси  $u$ . Соответствующие графические зависимости представлены на рис. 5.

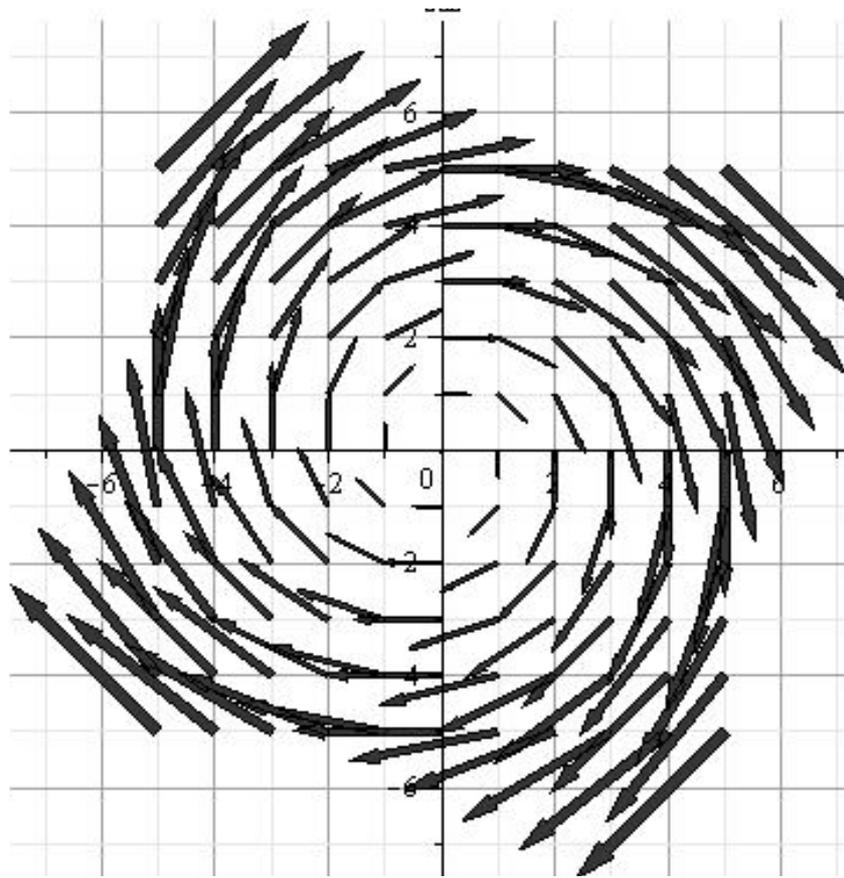


Рис. 4. ВД на изображении вызванные вращением плоскости камеры вокруг оси проекции

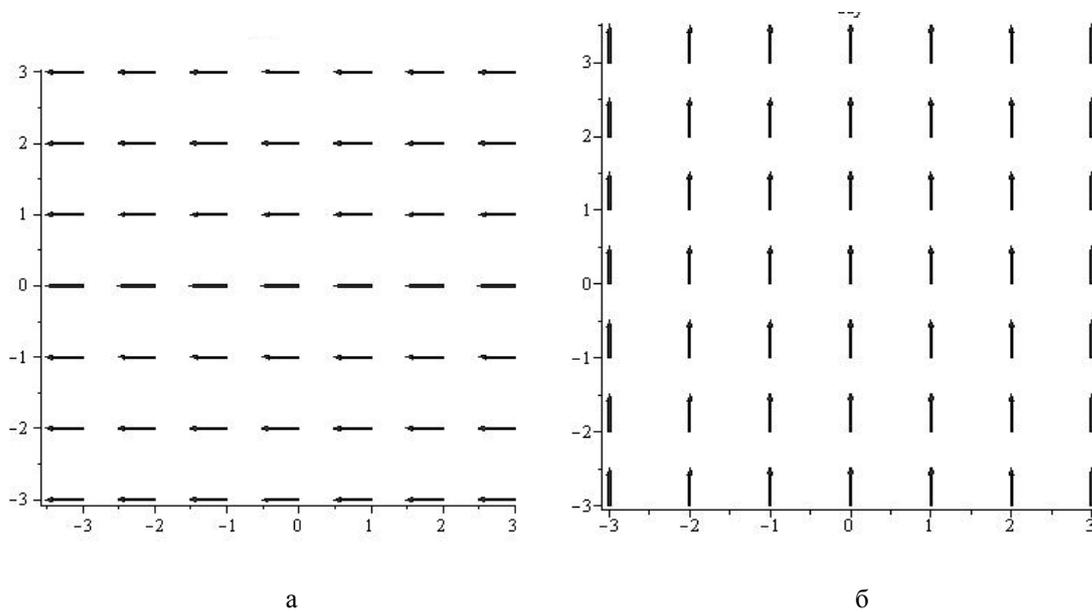


Рис. 5. Распределение векторов движения, на изображении вызванных вращением:  
а – вокруг оси  $u$ ; б – вокруг оси  $v$

$$\frac{du}{dt} = -f\omega\theta - \frac{Xu^2\omega\theta}{fh^2} \approx -f\omega\theta, \quad (11)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{YuXu\omega\theta}{fh^2} \approx 0, \quad (12)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{XuYu\omega\gamma}{fh^2} \approx 0, \quad (13)$$

$$\frac{dv}{dt} = \omega\gamma f + \frac{Yu^2\omega\gamma}{fh^2} \approx \omega\gamma f. \quad (14)$$

Еще одной характерной особенностью ВД вызванных вращением вокруг осей параллельных плоскости проекции камеры является практически полное отсутствие зависимости от высоты, а амплитуда таких векторов пропорциональна угловой скорости и фокусному расстоянию.

### Заключение

Проведенный в работе анализ показывает наличие функциональных зависимостей между распределением векторов движения на изображении и параметрами взаимной ориентации камеры и сцены. Важным результатом является то, что при работе с ВД имеется возможность выделять вклады от различных параметров ориентации и движения камеры. Использование полученных зависимостей позволяет решать задачи оценки параметров ориентации и движения камеры беспроигрышными методами, имеющими высокое быстродействие.

### Литература

1. *Integrated mini INS/GPS/Optical camera for UAV control [Text]* / V. Kortunov, I. Dybska, G. Proskura, A. Kravchuk // *Symposium gyro technology 2008, September, 16-17, 2008.* - P.12.1 - 12.8.

2. *Методы оценки параметров пространственных деформаций изображений в задачах дистанционного зондирования Земли [Текст]* / В.И. Кортунов, А.С. Кравчук, В.В. Бондарь, А.А. Акулиничев // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи.* - 2010. - №1(42). - С. 60 - 66.

3. *Ташлинский, А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений [Текст]* / А.Г. Ташлинский. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 240 с.

4. *Francisco, Bonin-Font. Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey [Text]* / Bonin-Font Francisco, Alberto Ortiz, Gabriel Oliver // *J Intell Robot Syst.* - 2008. - № 53. - P. 263 - 296.

Поступила в редакцию 10.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов» А.В. Тоцкий, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЕКТОРІВ РУХУ У ВІДЕОПОСЛІДОВНОСТІ

*О.С. Кравчук*

Проаналізовано сучасні вимоги до роботи оптичних систем. Розглянуто математичну модель оптичного приймача. Проведено аналіз функціональних залежностей векторів руху на зображенні від параметрів руху і орієнтації приймача зображення щодо сцени. Проведено детальний аналіз векторів руху на зображенні при ізольованих рухах оптичного приймача. Запропоновано рекомендації щодо використання отриманих залежностей, що дозволяє вирішувати завдання оцінки параметрів орієнтації і руху камери безпошуковими методами, що мають високу швидкодію.

**Ключові слова:** оптична камера, просторові деформації, вектори руху, орієнтація, перспективна реакція.

## ANALYSIS OF FUNCTIONAL DEPENDENCE OF MOTION VECTORS IN A VIDEO SEQUENCE

*A.S. Kravchuk*

The current requirements for optical systems is analyzed. The mathematical model of the optical receiver is considered. The analysis of the functional relationships of motion vectors in the image of the motion parameters and the orientation of the receiver relative to the image scene is performed. A detailed analysis of the motion vectors in the image with isolated movements of the optical receiver is performed. Recommendations on the use of the obtained dependences, that allows to solve the problem of estimating the parameters of orientation and movement of the camera direct methods that have a high speed is proposed.

**Keywords:** optical camera, spatial deformation, motion vectors, orientation, perspective projection.

**Кравчук Александр Сергеевич** – ст. преп. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: as\_kravchuk@mail.ru.