

## Конструктивная калибровка цифровой камеры

### Аннотация

*В статье дано теоретическое обоснование метода конструктивной калибровки цифровой фотокамеры, позволяющее определять положения центра проекции снимка в наземной съемке. Положение центра проекции фиксируется с помощью отражающей марки, которая жестко закреплена на корпусе камеры. Эффективность метода обоснована экспериментально на тестовом калибровочном полигоне.*

### Анотація

*У статті дано теоретичне обґрунтування методу конструктивної калібровки цифрової фотокамери, який дозволяє визначити розташування центру проєкції знімка при наземній зйомці. Розташування центру фіксується за допомогою марки, що відбиває, яка стійко закріплена на корпусі камери. Ефективність методу підтверджена експериментально на тестовому калібровочному полігоні.*

### The summary

*In the article the possibility of accuracy increase of digital terrestrial stereophotogrammetric survey with taking into account the coordinates of photographing point is analyzed. The place of the photographing point is defined by the reflective mark which is rigidly fixed on a camera surface. Efficiency of the proposed method by the experimental investigation on the test-field is proved.*

Неспециализированные цифровые камеры практически вытеснили в наземной стереотопографической съемке аналоговые фотокамеры, например такие как Photeo-19/1319 или УМК-10/1318 фирмы Цейсс Иена, которые по технологичности и гибкости применения не могут конкурировать с новейшей съемочной аппаратурой [1,2]. Однако по геометрической точности результатов аналоговые камеры зачастую превосходят цифровые. Причиной этого можно считать два обстоятельства:

- сложность калибровки элементов внутреннего ориентирования цифровых камер;
- невозможность измерения элементов внешнего ориентирования снимков цифровой камеры.

Решению задачи калибровки камеры с целью получения и уточнения элементов внутреннего ориентирования посвящено большое количество работ [3-5,11,12]. Все эти способы используют косвенные методы измерений, но, хотя они уступают непосредственным методам калибровки аналоговых камер на гониометре, можно считать, что первая из указанных задач решена для практики удовлетворительно.

Что же касается второй задачи, то из литературы авторам неизвестно ее решение. Настоящая статья посвящена методу решения второй из указанных задач, хотя и в урезанном варианте.

Идея предлагаемого решения опирается на метод построения сетей аналитической фототриангуляции с использованием координат центров фотографирования, полученных методами спутниковой навигации [6,7]. Высокоточное определение координат точек фотографирования позволило бы значительно повысить точность результатов сгущения наземного съемочного обоснования и сократить объем полевых работ по геодезической привязке.

Использование в архитектурной цифровой стереофото съемке для этих целей спутниковых приемников практически невозможно. С одной стороны – это экономически невыгодно, а с другой – технически невозможно однозначно центрировать цифровую камеру над заданной точкой.

Если в аналоговой камере есть специальные устройства ориентирования снимка и можно определять в пространстве положение центра проекции, то в цифровых камерах таких возможностей нет и не видно технической перспективы их реализации. Однако современные электронные тахеометры с безотражательным измерением расстояний позволяют преодолеть данный недостаток.

Предлагается на корпусе цифровой фотокамеры закрепить небольшую съемную поворачивающуюся марку (рис.1). При фотографировании координаты марки, вектор  $\vec{R}_M$  в наземной системе  $OXYZ$ , определяются электронным тахеометром с высокой точностью.

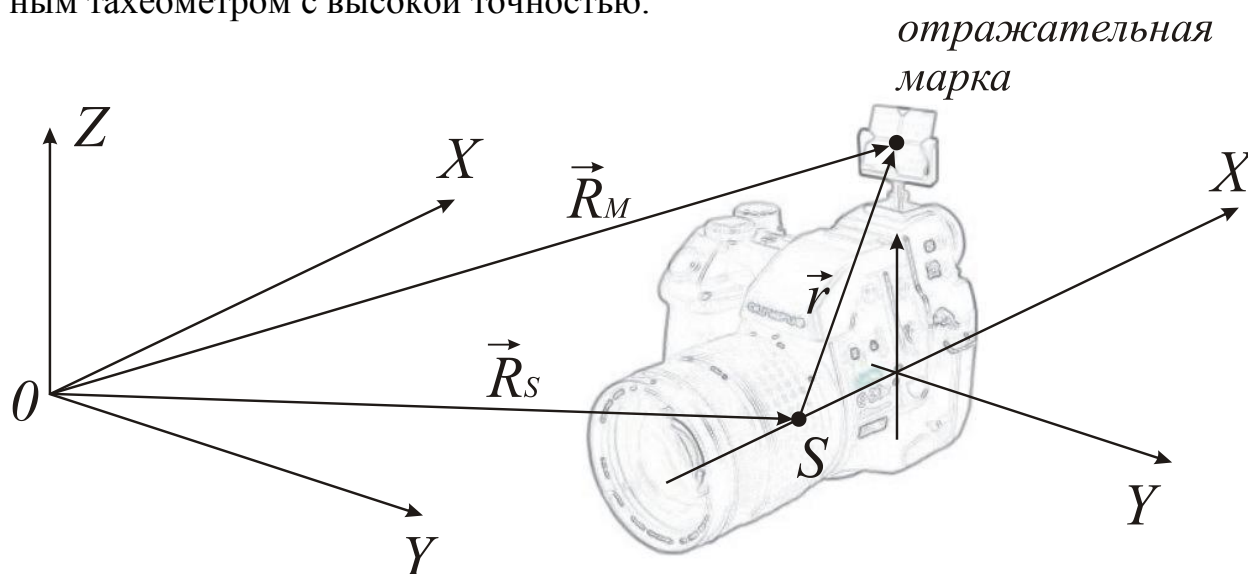


Рисунок 1 – Схема приведения центра марки к конструктивному центру проекций

Геометрическая схема взаимного положения элементов съемки приведена на рис.2. Положение точки  $m$  относительно системы  $Sxyz$  фотокамеры остается неизменным от снимка к снимку, поэтому зная вектор  $\vec{r}$ , можно вычислять координаты  $S$  центра проекции каждого снимка и таким образом повышать точность и эффективность наземной стереосъемки цифровыми камерами.

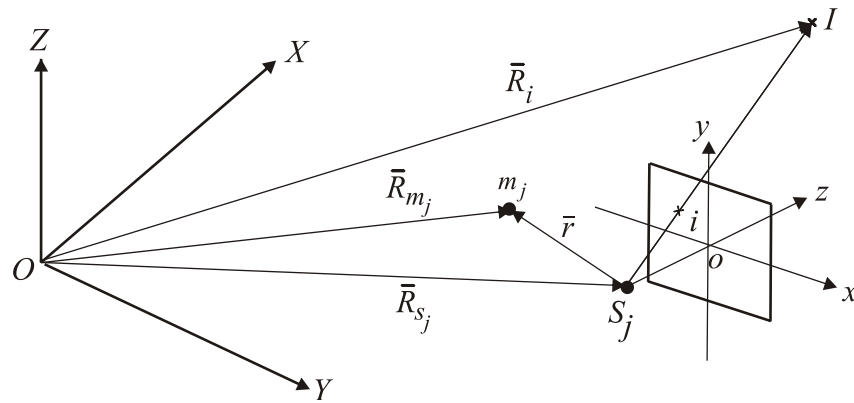


Рисунок 2. Схема к выводу параметрических уравнений

Теоретически вектор  $\vec{r}$  можно определять при уравнивании совокупности снимков конкретного объекта, так как это делается в аэрофототриангуляции [6.7], но, учитывая, как правило, небольшое число снимков и высокую точность определения координат точки  $m$  марки, рационально использовать вектор  $\vec{r}$  как параметр паспорта и включать его определение в калибровку фотокамеры.

Традиционно калибровка включает в себя задачи определения геометрических свойств изображения, построенного объективом. Включение в калибровку определения вектора  $\vec{r}$  расширяет задачи калибровки и распространяется на измерение конструктивных параметров камеры, поэтому можно говорить о так называемой *конструктивной калибровке цифровой фотокамеры*.

Математическая модель такой расширенной калибровки является частным случаем теории уравнивания пространственной фототриангуляции по связкам с самокалибровкой и навигационными измерениями центров фотографирования [6]

Рассмотрим вывод соответствующих параметрических уравнений для случая конструктивной калибровки цифровой камеры по тестовому полигону [8].

Для каждой точки фотографирования имеет место следующее векторное параметрическое уравнение (рис.2)

$$\vec{R}_{S_j} + A_j \vec{r} - \vec{R}_{m_j} = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{R}_{S_j}, \vec{R}_{m_j}$  – векторы, определяющие, соответственно, положение центра марки и центра фотографирования в системе тестового полигона;  $\vec{r}$  – вектор смещения центра марки относительно центра фотографирования в системе координат фотокамеры;  $A_j$  – матрица направляющих косинусов внешнего ориентирования снимка.

Поскольку измерения отягощены погрешностями, то для всех точек фотографирования уравнения (1) образуют систему параметрических уравнений поправок следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \vec{R}_{S_j} + A_j \vec{r} - \vec{R}_{m_j} &= \vec{\varepsilon}_j; \\ (j &= 1, 2, \dots, t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\vec{\varepsilon}_j$  – вектор поправок в измеренные координаты марки  $j$ -той точки фотографирования;  $t$  – число точек фотографирования.

При калибровке фотокамеры для измеренных координат изображений каждой точки тестового полигона имеют место уравнения коллинеарности

$$\left. \begin{aligned} f \cdot \frac{a^{j_1} \cdot (X_i - X_{S_j}) + b^{j_1} \cdot (Y_i - Y_{S_j}) + c^{j_1} \cdot (Z_i - Z_{S_j})}{a^{j_3} \cdot (X_i - X_{S_j}) + b^{j_3} \cdot (Y_i - Y_{S_j}) + c^{j_3} \cdot (Z_i - Z_{S_j})} - x_{i,j} + \varphi_x(\bar{\theta}_{x_{i,j}, y_{i,j}}) &= v^x_{i,j}; \\ f \cdot \frac{a^{j_2} \cdot (X_i - X_{S_j}) + b^{j_2} \cdot (Y_i - Y_{S_j}) + c^{j_2} \cdot (Z_i - Z_{S_j})}{a^{j_3} \cdot (X_i - X_{S_j}) + b^{j_3} \cdot (Y_i - Y_{S_j}) + c^{j_3} \cdot (Z_i - Z_{S_j})} - y_{i,j} + \varphi_y(\bar{\theta}_{x_{i,j}, y_{i,j}}) &= v^y_{i,j}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $x_{i,j}, y_{i,j}$  – измеренные координаты точки  $i$  тестового полигона на снимке  $j$ , а  $v^x_{i,j}, v^y_{i,j}$  поправки к ним;  $f$  – фокусное расстояние камеры;  $a_1^j, a_2^j, \dots, c_3^j$  – элементы матрицы направляющих косинусов  $A_j$ ;  $X_i, Y_i, Z_i$  и  $X_{S_j}, Y_{S_j}, Z_{S_j}$  – координаты, соответственно, точки  $I$  полигона и центра фотографирования  $j$ ;  $\varphi(\bar{\theta}), \varphi(\bar{\theta})$  – функции вектора  $\bar{\theta}$  параметров систематических искажений снимков. В практике чаще всего используются полиномы третьей степени

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x(\bar{\theta}_{x_{i,j}, y_{i,j}}) &= \theta_1 + \theta_2 x_{i,j} + \theta_3 y_{i,j} + \theta_4 x_{i,j}^2 + \theta_5 y_{i,j}^2 + \theta_6 x_{i,j} y_{i,j} + \dots + \theta_{10} y_{i,j}^3; \\ \varphi_y(\bar{\theta}_{x_{i,j}, y_{i,j}}) &= \theta_{11} + \theta_{12} x_{i,j} + \theta_{13} y_{i,j} + \theta_{14} x_{i,j}^2 + \theta_{15} y_{i,j}^2 + \theta_{16} x_{i,j} y_{i,j} + \dots + \theta_{20} y_{i,j}^3, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

в которых первые слагаемые учитывают координаты главной точки снимка, слагаемые линейные относительно координат на снимке – поправку в фокусное расстояние камеры, а остальные слагаемые отражают дисторсию объектива.

Поскольку системы уравнений (2) и (3) нелинейные, то разложением в ряд относительно приближенных значений неизвестных приведем их к линейному виду

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} \delta \Omega + \mathbf{B} \delta \mathbf{r} + \mathbf{L}_\varepsilon &= \mathbf{V}_\varepsilon; \\ \mathbf{C} \delta \Omega + \mathbf{D} \delta \theta + \mathbf{L}_v &= \mathbf{V}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\mathbf{A}, \mathbf{C}$  – матрицы частных производных от левых частей уравнений систем (2) и (3) по элементам  $\Omega$  вектора элементов внешнего ориентирования снимков;

$\mathbf{B}$  – матрица частных производных от левой части уравнений (2) по элементам вектора  $\mathbf{r}$ ;

$\mathbf{D}$  – матрица частных производных от левой части уравнений (2) по элементам вектора  $\bar{\theta}$ ;

$\delta \Omega, \delta \mathbf{r}, \delta \theta$  – векторы поправок в составляющие, соответственно, векторов  $\Omega, \mathbf{r}, \theta$ ;

$\mathbf{L}_\varepsilon, \mathbf{L}_v$  – векторы свободных членов, вычисленные по приближенным значениям неизвестных.

Решение системы уравнений (5) при выполнении условия

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P}_v \mathbf{V} + \mathbf{V}_\varepsilon^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{V}_\varepsilon = \min \quad (6)$$

приводит к следующей системе нормальных уравнений

$$\begin{vmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{A} + \mathbf{C}^T \mathbf{P}_v \mathbf{C} & \mathbf{A}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{B} & \mathbf{C}^T \mathbf{P}_v \mathbf{D} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{D}^T \mathbf{P}_v \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{D}^T \mathbf{P}_v \mathbf{D} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \delta \Omega \\ \delta \mathbf{r} \\ \delta \theta \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{L}_\varepsilon + \mathbf{C}^T \mathbf{P}_v \mathbf{L}_v \\ \mathbf{B}^T \mathbf{P}_\varepsilon \mathbf{L}_\varepsilon \\ \mathbf{D}^T \mathbf{P}_v \mathbf{L}_v \end{vmatrix} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{P}_\varepsilon, \mathbf{P}_v$  – матрицы весов соответствующих векторов поправок в измерения.

Поскольку тестовый полигон содержит большое число маркированных точек, координаты которых известны, то при решении системы уравнений (7) не возникает проблем в вычислении векторов  $\delta \Omega$  и  $\delta \mathbf{r}$ , однако определение всех поправок в векторе  $\delta \theta$  проблематично, так как в реальности матрица коэффициентов системы может оказаться сильно обусловленной. Методы решения этой системы рассмотрены в работе [10], где обоснован метод оптимального выбора параметров систематических ошибок.

Результаты конструктивной калибровки могут быть использованы при обработке стереопар наземной фотосъемки для включения координат центров фотографирования как опорных точек стереомодели. Поскольку вектор  $\mathbf{r}$  определяется в проекциях на оси фотокамеры, то для вычисления геодезических координат центра фотографирования необходимы угловые элементы внешнего ориентирования снимка. Поэтому решение задачи должно выполняться методом итераций, т.е. в начале вычисляются приближенные ЭВО снимка, по ним от координат марки по вектору  $\mathbf{r}$  координаты центра проекции, затем ЭВО уточняются. После нескольких итераций координаты центра проекции изменяться не будут и всю фотограмметрическую сеть можно уравнивать с учетом опорных центров фотографирования.

Программная реализация описанного математического аппарата и метода его использования представлена в комплексе аналитической фототриангуляции DonetskFoto [8].

Выполнена экспериментальная проверка предлагаемого метода конструктивной калибровки на тестовом полигоне [10], который состоит из 46 закрепленных на капитальной стене и маркированных точек. Взаимное положение точек в пространстве определено с точностью 0.1мм.

Испытываемой камерой полигон фотографируется с нескольких точек, при этом параллельно измеряется с помощью электронного тахеометра положение марки, закрепленной на фотокамере. Для приведения координат точек фотографирования в единую систему координат положение тахеометра определяется обратной линейно-угловой засеккой относительно нескольких точек тестового полигона. Все измерения по радиоканалу передаются на компьютер, где on-line обрабатываются с помощью программного комплекса ВИЗИР-3D [11]. Использование комплекса для обработки геодезических измерений в режиме on-line позволяет избежать грубых ошибок, которые обнаруживаются и отбраковываются, и непосредственно обеспечивать данными фотограмметрическую обработку снимков. Схема расположения оборудования в плане при съемке полигона показана на рис.3.

# Тестовый полигон

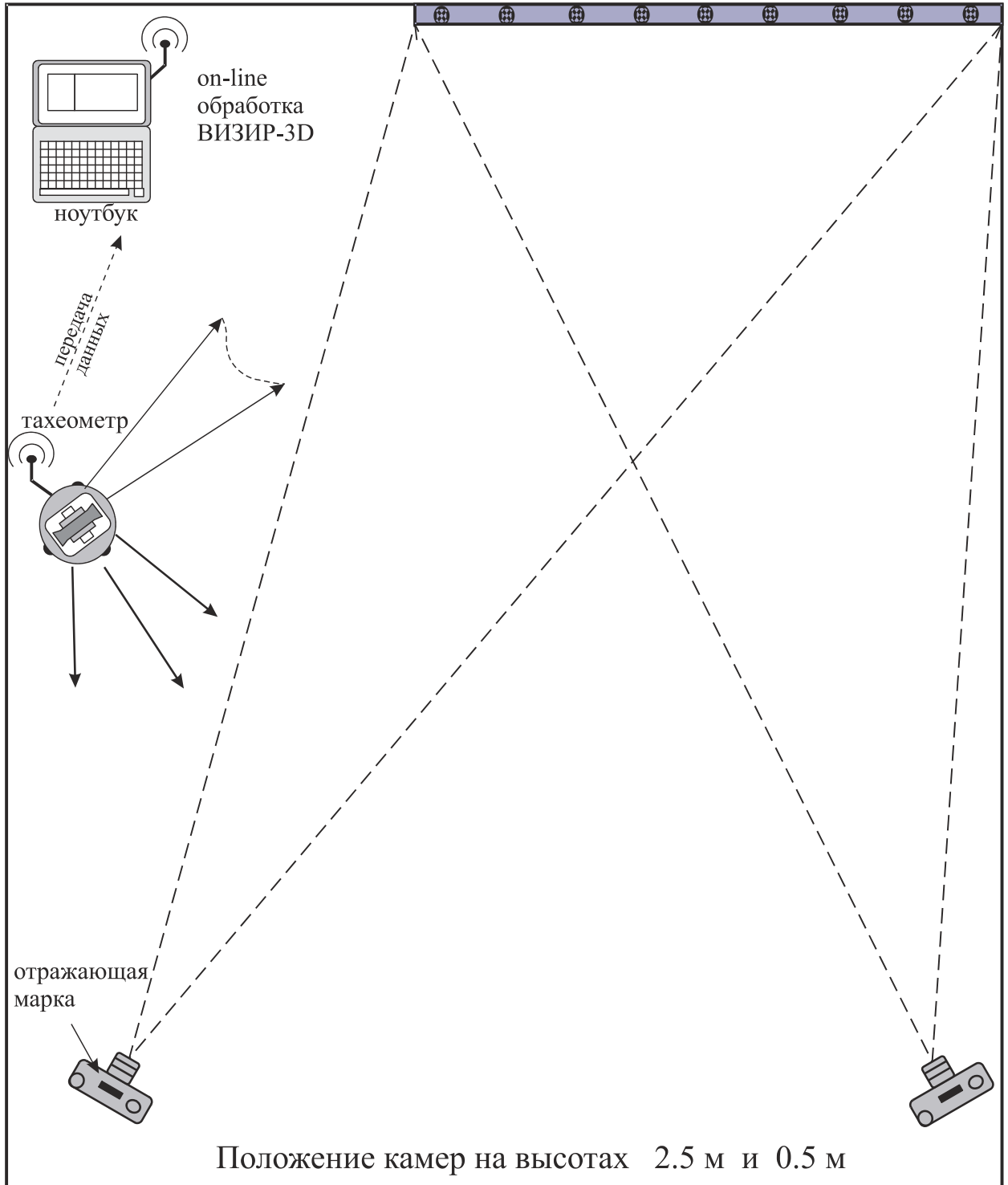
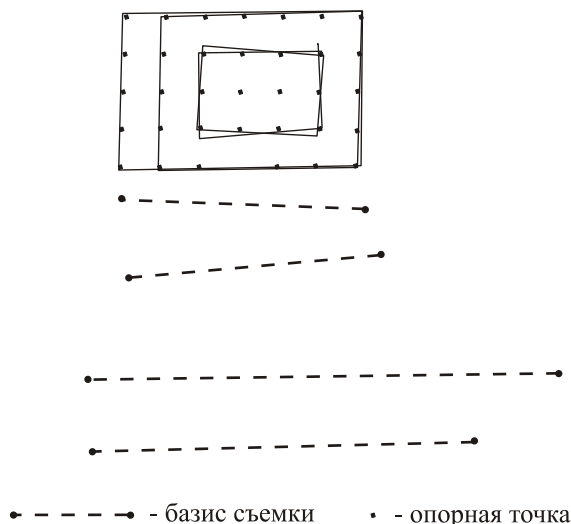


Рисунок 3 – План съемки тестового полигона

Выполнено фотографирование полигона фотокамерой Olympus E20P с четырех базисов, расположенных на расстоянии 5.5м и 11м, всего четыре стереопары(рис. 4). На рисунке контурами показаны границы стереомodelей на поверхности тестового полигона.



**Рисунок 4 - Схема фотограмметрической сети**

Измерения снимков произведено на цифровой фотограмметрической станции Дельта (НПО Геосистема, г. Винница).

Вычисления с помощью программного комплекса DonetskFoto с опцией нахождения параметров навигационной системы показали:

– математическая модель дает устойчивые решения и позволяет вычислить вектор конструктивной калибровки;

– проекции вектора  $\bar{r}$  на  $oxyz$  – оси фотокамеры (рис. 2) получились следующие:

$$r_x = 10.1\text{мм}; \quad r_y = 122.8\text{мм}; \quad r_z = -23.1\text{мм}.$$

Полученный результат (табл.1) показывает, что точка фотографирования размещена практически под разъемом вспышки камеры, а не на передней поверхности объектива.

Предлагаемая методика позволяет определить параметры вектора, связывающего перекрестье отражающей марки с конструктивным центром проектирования снимка. Обоснование оптимальных параметров съемки при конструктивной (расширенной) калибровке цифровых фотокамер является предметом дальнейших исследований авторов. На практике данное предложение позволит повысить точность выполнения наземных стереофотограмметрических работ без значительного усложнения имеющейся технологии ведения работ и дополнительного времени.

### **Литература**

1. Могильний С.Г., Луньов А.О. Теоретичні основи побудови цифрових квазізнімків. Вісник геодезії та картографії, 2007, №1, С. 27-31.
2. Могильний С.Г., Луньов А.О. Оцінка точності стереопари з квазізнімків. Вісник геодезії та картографії, 2007, №6, с. 21-24.
3. Луньов А.О. Выбор оптимальных параметров калибровки цифровой камеры. Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: гірничо-геологічна, 2006, випуск 111, Том 2., с. 30-37.

4. Купко В.С., Лукін І.В., Власов І.О. Атестація неметричних цифрових фотокамер на метрологічному стенді // Вісник геодезії та картографії.-2009. – №1. – С.24-27.

5. Гельман Р.Н., Дунц А.Л., Лабораторная калибровка камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. -2002. - № 7. С. 23-31.

6. Могильний С.Г. Навігаційні виміри у зрівнюванні аналітичної фото триангуляції, Вісник геодезії та картографії №1 (32), 2004 р.С.28-33.

7. Дорожинський О.Л. Про фіксацію координат центрів аерофотокамери за допомогою GPS-приймачів, Вісник геодезії та картографії №1 (16), 2000 р.С.27-29.

8. Шоломицкий А.А., Шатохин А.Л. Создание испытательного стенда для калибровки цифровых камер // Наукові праці Донецького Державного Технічного Університету, Серія: гірничо-геологічна, випуск 45. – Донецьк, 2002. – С.80 – 84.

9. Могильний С.Г., Шоломицкий А.А., Шморгун Є.І. Трьохкоординатний вимірювальний комплекс «ВИЗИР 3D». Наукові праці ДонНТУ, серія гірничо-геологічна, випуск 9(143), 2009. С.13-25.

10. Mogilny S. Choosing a Method of Adjusting Measurements Containing Systematic Errors. "Geodesy, Mapping and Photogrammetry", USA, Vol. 18, No. 2, 1977, 89-92

11. Wenjin Wang, Bingxuan Guo, Xin Lib, Jing Cao Influence factors evaluation on high-precision planar calibration of non-metric digital camera, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008, P. 1071-1075.

12. A. Habib, A. Jarvis, I. Detchev, G. Stensaas, D. Moe, J. Christopher-son Standards and specification for the calibration and stability of amateur digital cameras for close-range mapping applications, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008, P. 1059-1064.