

УДК 621:681.93.932

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМООПИСАНИЯ  
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ****Ю.В. ПОЛОЗКОВ***(Витебский государственный технологический университет)*

*Рассматривается проблема автоматизации формоописания поверхности объектов, имеющих пространственно сложную (нерегулярную) форму. Предложен компактный программно-технический комплекс оцифровки нерегулярных объектов, созданный на базе стандартной цифровой фото-, видео-техники. Описывается реализуемый для оцифровки метод фотограмметрии, основанный на освещении поверхности объекта структурированным светом. Излагается методика расчета параметров, определяющих условия проведения фотограмметрической съемки, позволяющая обеспечить взаимосвязь процессов проецирования слайда и фотограмметрической съемки, повышающая точность и мобильность разработанного комплекса цифровой фотограмметрии.*

Интегрированная информационная модель составляет основу информационной поддержки и управления жизненным циклом изделия. Значительную часть электронного описания изделия занимают данные, описывающие геометрическую конфигурацию поверхности, степень сложности которой во многом определяется требованиями к функциональности продукции. Адекватность геометрической модели, определяющая качество преобразований объектов виртуальной и физической реальности, происходящих на протяжении всего жизненного цикла изделия, в частности, играет ключевую роль в информационном обеспечении производственного цикла.

Однако, несмотря на значительные возможности современных пакетов трехмерной компьютерной графики, процесс математического формоописания поверхностей объектов, имеющих пространственно сложную форму, по-прежнему трудоемок. В связи с этим в настоящее время интенсивно развиваются методы и средства цифрового формоописания (оцифровки) поверхности физического объекта, цель которого заключается в построении цифровой модели, копирующей с наперед заданной точностью геометрическое строение (форму) поверхности оригинала в виде, удобном для решения производственных задач.

Необходимым условием практического применения системы оцифровки в производственной сфере является решение следующих *основных задач*:

- ввод полученной информации в компьютер;
- числовое описание геометрии поверхности объекта;
- возможность управления точностью при формировании цифровой модели объекта;
- представление измерительной информации в форме, удовлетворяющей стандартам, обеспечивающим экспорт/импорт цифровых моделей с возможностью их модификаций в пакетах компьютерного геометрического моделирования и вывод на периферийные устройства;

а также *дополнительных*:

- управление данными, в том числе промежуточными;
- визуализация результатов оцифровки;
- обеспечение хранения и поиска геометрической информации.

Наибольшая эффективность внедрения систем оцифровки обеспечивается при соответствии ряду технико-экономических показателей качества, основными из которых являются [1, 2]:

- невысокая стоимость;
- достаточная точность измерений;
- неизбыточная плотность измерений;
- высокая степень автоматизации и производительность (количество измерений, выполняемых за единицу времени) измерений;
- возможность бесконтактных измерений;
- мобильность и компактность системы.

В наибольшей степени комплексу функционально-стоимостных требований потенциально отвечают фотограмметрические системы. Различными техническими исполнениями фотограмметрических систем реализуются методы, основанные на обработке одиночных снимков (плоскостная фотограмметрия) и методы, использующие стереоскопическое зрение, в которых обрабатываются два и более снимков (стереофотограмметрия) [3].

Сдерживающими факторами широкого применения представленных на рынке фотограмметрических систем являются:

- повышенная стоимость, обусловленная применением специального оборудования;
- сложность технической эксплуатации;
- трудоемкость реконструкции аппарата проецирования.

Специальные прецизионные фотограмметрические камеры, различные специальные метрические устройства (дальномеры, угломеры, теодолиты, фототрансформаторы и т. п.) традиционно необходимы в системах фотограмметрии для определения параметров пространственного положения элементов, характеризующих трехмерную сцену.

Для повышения эффективности и универсальности процесса оцифровки был разработан программно-технический комплекс цифровой фотограмметрии [4, 5]. Техническая часть этого комплекса представляет собой систему подвижных горизонтальных и вертикальных направляющих, на которых устанавливается цифровая камера с возможностью перемещения по направляющей и поворота ее в плоскости главного вертикала, а также горизонтально устанавливается проектор. Объект устанавливается на поворотный стол (рис. 1).

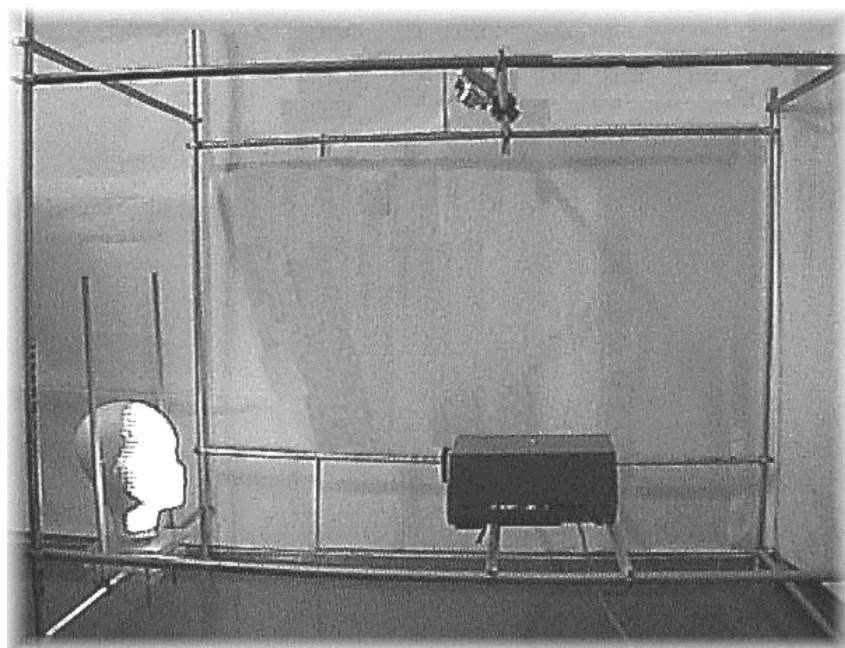


Рис. 1. Оборудование для цифровой фотограмметрии

Процесс цифровой фотограмметрии заключается в съемке установленной наклонно к горизонтальной плоскости камерой объекта, на который проецируются световые полосы слайда, вставленного в горизонтально расположенный проектор. Соответственно, формоописание нерегулярной поверхности предусматривает фотограмметрическую обработку одиночного снимка, основанную на специально разработанной математической модели координатных преобразований в пространстве, связывающей пространственные положения точек поверхности анализируемого объекта и положения их проекций в плоской системе координат изображения [6]:

$$\bar{R}_{ij} = f(x_{ij}^{\prime\prime}, y_{ij}^{\prime\prime}, \varepsilon, t, R, \omega, \alpha, \chi, x_s, y_s, z_s),$$

где  $\bar{R}_{ij} = (X_{ij}; Y_{ij}; Z_{ij})^T$  – вектор, определяющий положение некоторой  $i$ -й точки  $j$ -го уровня поверхности объекта в пространственной системе координат  $AXYZ$ ;  $x_{ij}^{\prime\prime}, y_{ij}^{\prime\prime}$  – координаты  $i$ -й точки  $j$ -го уровня поверхности объекта в системе координат изображения;  $\varepsilon, t, R$  – параметры, определяющие пространственное положение передней узловой точки регистрирующей камеры;  $\omega, \alpha, \chi$  – параметры углового ориентирования системы координат изображения относительно системы координат объекта (углы Эйлера);  $x_s, y_s, z_s$  – координаты главной точки изображения в системе координат регистрирующей камеры.

На основе математической модели координатных преобразований реализовано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс цифровой фотограмметрии для формоописания поверхностей нерегулярных объектов [4].

Программная реализация оцифровки включает пять подсистем:

- обработку изображений;
- определение параметров настройки фотограмметрической системы;
- формирование цифровой модели поверхности;
- управление базой данных;
- подсистему служебных функций.

Этими модулями обеспечиваются функции ввода информации, обработки изображений, фотограмметрической обработки, построения цифровой модели объекта, анализа и коррекции точности, а также связи с системными функциями визуализации, экспорта моделей в пакеты компьютерной графики и ввода-вывода данных на периферийные устройства.

Точность результатов фотограмметрических измерений во многом определяется точностью элементов ориентирования регистрирующей камеры и изображения. Элементы ориентирования задают аппарат проецирования, т.е. взаимное расположение предметной плоскости, плоскости изображения (картины), центра проекции и направление главного проектирующего луча и тем самым определяют относительное расположение предметной, картинной, вспомогательных систем координат [7, 8]. Нахождение проективной связи, существовавшей в момент фотографирования между множествами точек пространства и снимка, позволяет восстановить трехмерную сцену.

Традиционно параметры внешнего ориентирования определяются на аппаратном уровне, что приводит к повышению стоимости фотограмметрических систем. С определенными сложностями взаимного приведения предметной и картинной координатных систем связано и задание предметной ортонормированной системы координат с помощью взаимно перпендикулярных единичных векторов, обычно применяющейся при выводе и исследовании фотограмметрических зависимостей [8]. Возникающие при этом погрешности приводят к существенным потерям в точности измерительных данных, полученных в результате решения систем, составленных из уравнений проективных преобразований традиционной фотограмметрии. В таких случаях погрешность компенсируется в основном увеличением числа пространственных измерений и усреднением полученных результатов (например, по методу наименьших квадратов), а также введением различных поправочных коэффициентов, что значительно повышает вычислительную сложность фотограмметрической обработки [9 – 11].

С метрологической точки зрения интерес представляет не столько пространственное положение, сколько именно пространственные соотношения между элементами трехмерной сцены, в качестве которой в данном случае выступает поверхность объекта. Это обстоятельство позволяет воспользоваться длинами отрезков, оперирование которыми на практике является наиболее целесообразным и удобным для пользователя, не владеющего специальными знаниями и навыками.

Такой подход был использован при разработке специальной методики автоматизации калибровки камеры по снимкам, представляющим собой растровые изображения, основанной на теории центрального проектирования и проективных преобразований. Посредством этой методики упрощается проведение процесса оцифровки и обеспечивается использование стандартной цифровой фото- или видеокамеры в представленном программно-техническом комплексе цифровой фотограмметрии, что существенно снижает его стоимость. Особенность разработанной методики заключается в определении элементов внешнего ориентирования на основе проекционных преобразований, выполняемых с привлечением точек схода параллельных прямых, построенных по проекциям опорных точек изображения. Это при использовании данных EXIF файла, создаваемого при съемке цифровой камерой и параметров снимка, позволяет избежать прецизионных измерений.

Таким образом, задача калибровки сводится к аналитическому определению параметров углового ориентирования снимка:

- продольного угла наклона снимка  $\alpha$ ;
  - поперечного угла наклона снимка  $\omega$ ;
  - угла разворота снимка относительно главной вертикали  $\chi$ ;
- а также параметров пространственного ориентирования центра проекций:
- угла наклона камеры  $\epsilon$ ; угла линии направления съемки  $t$ ;
  - модуля вектора направления съемки  $R$ .

В разработанной фотограмметрической модели изображение рассматривается как результат центрального проецирования точек поверхности объекта прямыми лучами, проходящими через центр проекции и падающими на плоскость снимка (рис. 2).



Рис. 2. Фотограмметрическое изображение трехмерной сцены (номераи отмечены опорные точки)

Неоднозначность реконструкции трехмерной сцены по ее одиночному плоскому изображению устраняется нахождением перспективного соответствия плоскостей пространства и снимка как частного случая проективного соответствия.

Плоскость пространства задается двумя вертикальными прямыми, на которых располагаются четыре опорные точки, образующие прямоугольник. Технически опорными точками являются отображенные на вертикалях световые проекции маркеров, изображенных на слайде.

Исходные данные для реализации процесса калибровки представлены в таблице.

Исходные данные для калибровки снимков в процессе цифровой фотограмметрии

Наименование параметра	Единица измерения
Координаты (x, y) четырех точек в системе координат изображения с началом в главной точке	мм
Расстояние в пространственной системе координат между опорными точками 1 – 2	мм
Расстояние в пространственной системе координат между опорными точками 2 – 3	мм
Расстояние в пространственной системе координат между опорными точками 3 – 4	мм
Расстояние в пространственной системе координат между опорными точками 1 – 4	мм
Размер сенсора камеры	мм × мм
Фокусное расстояние цифровой камеры	мм
Размер слайда	мм × мм
Количество линий на изображении слайда	шт.
Диаметр линзы проектора	мм

Прямоугольник, образованный опорными точками в пространстве, на перспективе представляет собой неправильную трапецию (рис. 3) [12].

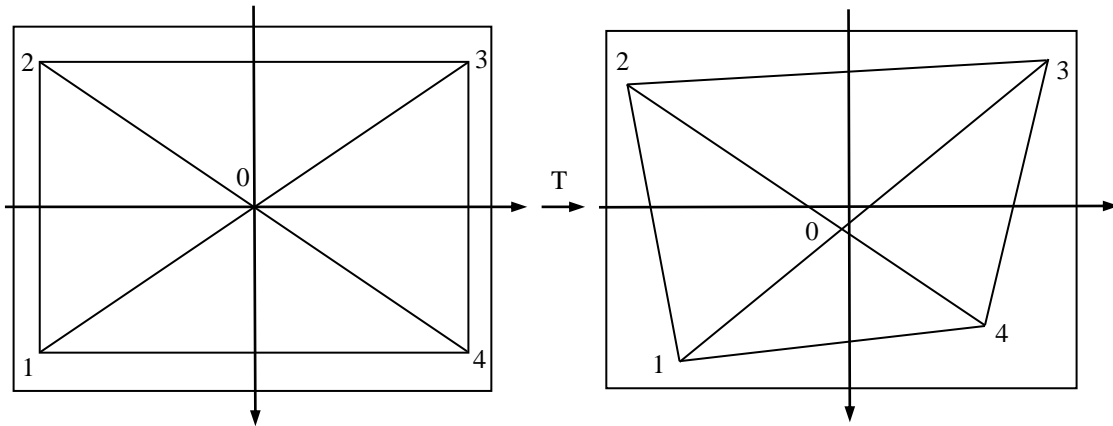


Рис. 3. Действие проективного преобразования на пять точек плоскости

Параллельные линии, заданные в пространстве опорными точками, пересекаются в бесконечности, образуя в перспективе точки схода [13]. Точка схода в плоскости снимка оказывается конечной и может быть найдена как точка пересечения прямых, полученных продолжением противоположных оснований трапеции (рис. 4), проективно соответствующей прямоугольнику, заданному в пространстве объекта.

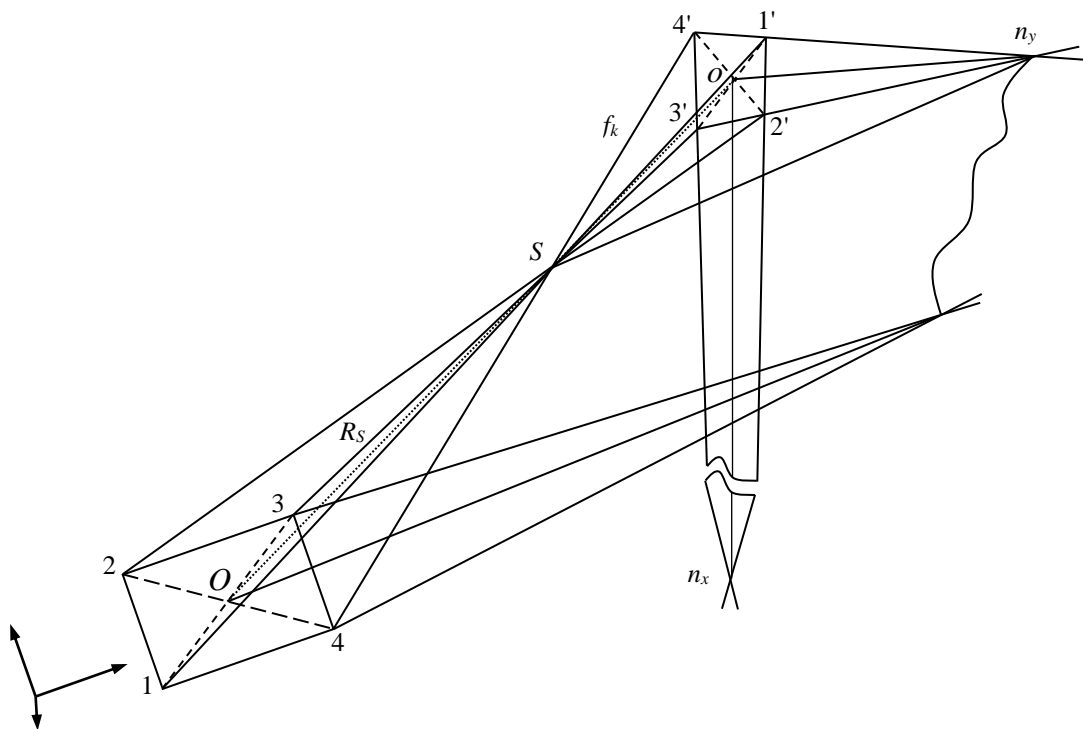


Рис. 4. Схема перспективных построений

Полагая, что главная точка перспективы совпадает с центром фотоснимка, вектором  $\vec{S} = (0, 0, -f_k)$  определяется положение центра перспективы  $S$  относительно картинной плоскости. Тогда после параллельного переноса центра снимка в точку пересечения диагоналей трапеции из треугольника  $So_n_y$  находится поперечный угол наклона снимка  $\omega$ :

$$\text{tg } \omega = on_y / f_k,$$

где  $on_y$  – расстояние от главной точки снимка до точки схода в направлении оси  $y$  системы координат изображения.

Повернув систему координат исходного снимка в плоскости  $zy$  базиса пространства снимка вокруг его оси  $x$  на угол  $\omega$

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ f_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ f_k \end{pmatrix},$$

где  $x_i, y_i, x'_i, y'_i$  – соответственно исходные и преобразованные координаты точек при переходе от старого базиса к новому, получаем классический наклонный снимок [7], развернутый на угол  $\chi$ , лежащий в плоскости снимка на пересечении поперечной оси снимка (оси  $x$ ) и линии направления съемки, проходящей через точку надира снимка (рис. 5).

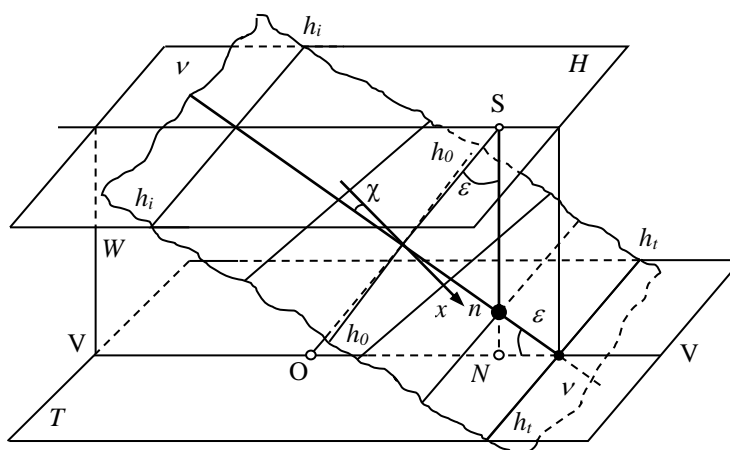


Рис. 5. Основные элементы центральной проекции

Разворот снимка на угол  $\chi$  позволяет выполнить его пространственную ориентацию в системе координат объекта:

$$\begin{pmatrix} x''_i \\ y''_i \\ f_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ f_k \end{pmatrix}$$

Из треугольника  $SON$  (см. рис. 5) находится продольный угол наклона снимка  $\alpha$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = on/f_k,$$

где  $ON$  – расстояние от центра снимка до точки надира.

Соответственно из треугольника  $SON$ , расположенного в пространственной системе координат, в котором вершина  $N$  является точкой надира пространства объекта, находится угол наклона камеры

$$\varepsilon = 90^\circ - \alpha.$$

Примем за начало системы координат объекта точку  $O$ , являющуюся вершиной треугольника  $SON$ , лежащего в плоскости главного вертикала. Тогда из положения о том, что главный луч перспективы проходит через центр перспективы и главную точку изображения, совпадающую после параллельного переноса с точкой пересечения диагоналей трапеции, и точку  $O$ , следует, что угол линии направления съемки  $t$  будет равен нулю. Таким образом, найдены параметры углового ориентирования центра проекций и снимка.

Для выявления информации о расстоянии от точки, принятой за начало системы координат объекта, до центра проекций необходимо воспользоваться свойством перспективного проектирования, заключающемся в том, что все вертикальные прямые на снимке изображаются не в виде точек, а в виде отрезков, сходящихся в точке надира  $N$ , за исключением вертикальной прямой, проходящей через проективный полюс (точку надира), проективное отображение которой на снимке соответствует точке. При этом

применением формул связи координат наклонного и горизонтального снимков производится трансформирование наклонного снимка [14]:

$$x_2 = \frac{f \sin \alpha + x_n \cos \alpha}{\cos \alpha - x_n \sin \alpha / f}, \quad y_2 = \frac{y_n}{\cos \alpha - x_n \sin \alpha / f},$$

где  $x_2$  и  $y_2$  – координаты точки на горизонтальном фотоснимке;  $x_n$  и  $y_n$  – координаты точки наклонного фотоснимка.

Ортогонально проецируя вершины трапеции снимке на горизонталь, проходящую через точку надир, получаем отрезки  $l_1, l_2, l_3, l_4$ .

Величина, равная разности  $\delta_{1,2} = l_1 - l_2$  и  $\delta_{3,4} = l_3 - l_4$ , характеризует смещение проекций точек на снимке, обусловленное изменением высоты точек в пространстве объекта. Причем знак величины  $\delta_{ij}$  отражает направление (высоту или глубину) изменений точек в пространстве (рис. 6) [7].

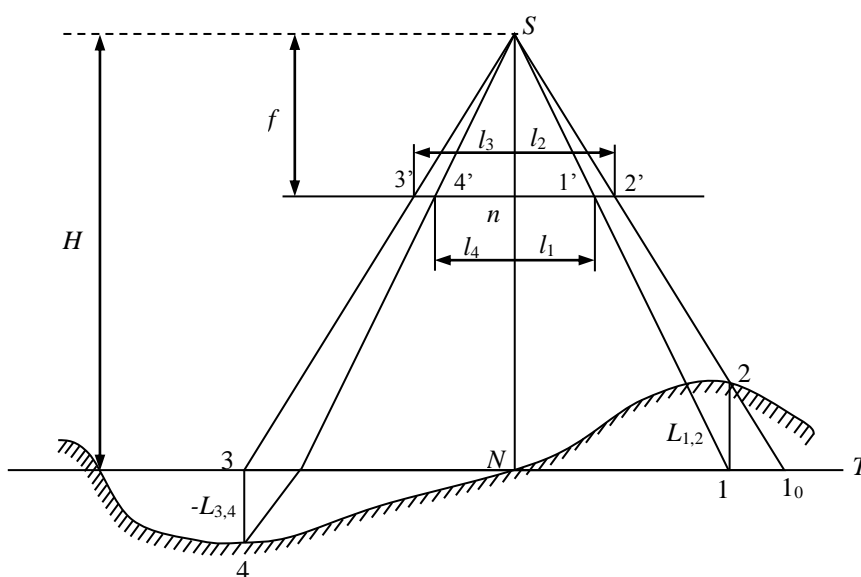


Рис. 6. Схема смещений проекций точек на снимке от изменения высоты точек в пространстве объекта

Тогда, используя соотношение

$$\frac{\delta_{1,2}}{l_2} = \frac{L_{1,2}}{H},$$

рассчитывается высота фотографирования  $H$ :

$$H = \frac{L_{1,2} l_2}{\delta_{1,2}},$$

где  $L_{1,2}$  – размер стороны прямоугольника, отмеченной точками 1, 2 в пространстве.

Расстояние от начала пространственной системы координат до передней узловой точки камеры ( $R = ON$ ) находится следующим образом:

$$R = H \operatorname{tg} \varepsilon.$$

Величина горизонтально направленного вектора  $R_x$ , используемого в разработанной фотограмметрической модели, определяется по формуле:

$$R_x = H \cos(\varepsilon).$$

Разработанный фотограмметрический метод оцифровки нерегулярных поверхностей большой кривизны с помощью структурированного света предполагает выявление информации о глубине сцены на основе взаимосвязи процессов получения перспективной проекции (снимка), отображающей результаты проецирования изображения слайда на поверхность объекта. Поэтому помимо условий съемки требуется также знать параметры проецирования слайда. К последним относятся параметры слайда: вертикальный и горизонтальный размер слайда; количество линий сетки, изображенной на слайде  $n_s$ ; фокусное расстояние проектора  $f_p$  и расстояние от передней узловой точки проектора до картинной плоскости  $H_p$ . Размер слайда и параметр  $n_s$  являются исходными данными и вводятся оператором в компьютер вручную или автоматически в случае использования мультимедийного проектора.

Измеренное значение  $H_p$  позволяет найти величину фокусного расстояния проектора  $f_p$ :

$$f_p = H_p l / L,$$

где  $l$  и  $L$  – размеры отрезка линии на слайде и ее проекции, отображенной на поверхности объекта при проецировании соответственно. Данный отрезок может быть ограничен, например, реперными точками.

Разработанная методика расчета параметров, определяющих условия проведения фотограмметрической съемки, позволяет обеспечить взаимосвязь процессов проецирования слайда и фотограмметрической съемки, тем самым повысить точность и мобильность разработанной компактной системы цифровой фотограмметрии.

Таким образом, новый метод настройки устраняет необходимость жесткой привязки проектора к регистрирующей камерой, что существенно упрощает процесс фотограмметрии и расширяет его возможности, в частности может проводиться оцифровка крупно габаритных объектов без существенного увеличения габаритных размеров системы цифровой фотограмметрии.

Необходимость проведения ручных измерений для реконструкции трехмерной сцены по ее одиночному изображению компенсируется исключением трудоемких процедур взаимного ориентирования изображений и поиска совмещенных точек, что является преимуществом по отношению к методам, основанным на использовании эффекта стереоскопического зрения. Кроме того возможность использования стандартной (неметрической) фото-, видеотехники обеспечивает наибольшую эффективность представленного программно-технического комплекса цифровой фотограмметрии, автоматизированный режим оцифровки нерегулярных объектов и доступность его использования на малых и средних отечественных предприятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Князь В.А., Желтов С.Ю. Анализ состояния разработок видеометрических технологий оперативной подготовки данных для CAD/CAM систем // CAD/CAM/PDM-2004: Материалы конф. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lab18.ipu.rssi.ru/projects/conf/2004/3/009> Доклад (Князь, Желтов).htm.
2. Полозков Ю.В., Свирский Д.Н. Квалиметрический анализ современных систем оцифровки нерегулярных объектов // Метрологическое обеспечение качества 2000: Материалы междунар. науч. конф. – Мн.: БГПА, 2000. – С. 108 – 111.
3. Смирнов С.А. Измерительная фотография // Измерительная техника. – 1996. – № 5. – С. 28 – 32.
4. Полозков Ю.В. Программно-технический комплекс фотограмметрии нерегулярных поверхностей промышленных объектов // Вестник ВГТУ. – 2006. – № 10. – С. 31 – 35.
5. Polozkov Y., Masilevich A., Svirsky D. Irregular surface reconstruction for 3D objects recursive creation // PRIP'2003: Proceedings of Seventh International Conference. – 2003. – Vol. II. – P. 269 – 273.
6. Завацкий Ю.А., Полозков Ю.В., Свирский Д.Н. Математическое моделирование процесса оцифровки пространственных объектов // Веснік ВДУ. – 1999. – № 3. – С. 49 – 53.
7. Фотограмметрия / Л.Н. Келль, Ю.Н. Корнилов, Е.В. Пономарев, И.А. Черкасов. – М.: Недра, 1989. – 319 с.
8. Русинов М.М. Инженерная фотограмметрия. – М.: Недра, 1966.
9. Гонин Г.Б. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. – Л.: Наука, 1967. – 167 с.
10. Дуда П.И. Об изменении линейных элементов внешнего ориентирования сканерного аэрофотоснимка // Аэрофототопография. – 1999. – № 1. – С. 45 – 47.
11. Шульман В.А. Данилов В.А. Анализ точности и надежности геодезического ориентирования сканированных аэрофотоснимков // Аэрофототопография. – 2000. – № 9. – С. 27 – 35.
12. Спектр. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / И.С. Грузман, В.П. Киричук, Г.И. Косых, А.А. Перетягин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
13. Глаголев Н.А. Проективная геометрия. – 2-е изд. испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1963. – 457 с.
14. Фельдман М.И., Фостиков А.А. Фотограмметрия: Учеб. для техникумов. – М.: Недра, 1993. – 150 с.