Построение трехмерной модели объекта по результатам стереосъемки

А.В. Никитин

Институт космических исследований РАН Москва 1179977, Россия E-mail: andvnik935@yandex.ru

В настоящее время предлагается достаточно широкий спектр вариантов для решения задачи построения цифровой модели объекта. С целью построения цифровой модели объекта наземной съёмки предлагается использовать стереофотограмметрический способ (съёмка объекта с фиксированного базиса), широко применявшийся ранее в фототеодолитной съёмке. Для автоматизации указанного метода широко применяются различные преобразования изображений и корреляционные алгоритмы с целью выделения контурных точек и их отождествления на паре изображений. Однако при этом необходимо иметь достаточное количество контрастных объектов на снимаемой поверхности.

В работе рассматривается алгоритм построения цифровой модели снимаемого объекта, основанный на стереофотограмметрическом способе с лазерной подсветкой. Для построения цифровой модели была проведена синхронная съёмка камерами с фиксированного базиса с использованием лазерной подсветки, обеспечивающей проектирование светящейся сетки на объект.

Метод состоит из следующих этапов: предварительная калибровка камер по звездам и на стенде динамических испытаний, установка времени экспонирования, определение элементов внешнего ориентирования по результатам съёмки тест-объекта, в случае отсутствия тест-объекта определение элементов взаимного ориентирования по уравнениям компланарности, включение лазерной подсветки, отождествление соответственных узлов и определение их пространственных координат. Набор пространственных координат образуют цифровую модель снимаемого объекта.

Приведён пример работы программного обеспечения, реализованного согласно представленному алгоритму.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, элементы внутреннего ориентирования камеры, элементы внешнего ориентирования камер, тест-объект, лазерная подсветка.

Введение

В проекте «Луна-Глоб» установлены стереокамеры для проведения съёмки с лунного модуля после посадки и формирования цифровой модели подстилающей поверхности, которая позволит определить пространственные координаты целей манипулятора.

В настоящее время предлагается достаточно широкий спектр вариантов для решения задачи построения цифровой модели объекта. Для создания 3D-модели объекта существует много способов, основанных на лазерном сканировании (измерении дальностей до объекта). Недостатком данного способа является необходимость точного углового позиционирования лазера при сканировании, что ведёт к значительному удорожанию подобных устройств.

С целью построения цифровой модели объекта наземной съёмки предлагается использовать стереофотограмметрический способ (съёмка объекта с фиксированного базиса), широко применявшийся ранее в фототеодолитной съёмке.

Недостаток метода – необходимость трудоёмких камеральных работ на цифровых фотограмметрических станциях. При этом каждая точка поверхности рассматривается стереоскопически и обрисовывается в ручном режиме.

Для автоматизации указанного метода широко применяются различные преобразования изображений и корреляционные алгоритмы с целью выделения контурных точек и их отождествления на паре изображений. Однако при этом необходимо иметь достаточное количество контрастных объектов на снимаемой поверхности.

В настоящей работе для построения цифровой модели поверхности предлагается использовать стереофотограмметрический способ с лазерной подсветкой, суть которого состоит в синхронной съёмке поверхности, располагающейся перед двумя камерами, и построение её трёхмерного образа, то есть вычисление пространственных координат точек в базисной системе координат, определяемой элементами взаимного ориентирования двух камер (*puc. 1*).



Рис. 1. Схема проведения съёмки объекта

Таким образом, необходимо вычислить координаты точек, принадлежащих объекту съёмки, измеряя их соответственные изображения на стереопаре снимков. В качестве точек поверхности предлагается использовать отражения от снимаемой поверхности светового пучка, формируемого лазерной установкой. При этом не требуется определять расстояния до объекта съёмки – достаточно их ярко подсветить.

На изображении получается сетка с примерно равномерным шагом, которая выглядит ярче снимаемой поверхности. Тогда задача сводится к методу порогового детектирования связанных областей на обоих изображениях и их отождествлению. Далее, используя формулы стереофотограмметрии и считая элементы внешнего ориентирования камер известными, определяем пространственные координаты точек по двум точкам, измеренным на снимках в автоматическом режиме.

Для точного вычисления пространственных координат необходимо выполнить калибровку системы из двух камер. Для этого производится съёмка регулярной сетки с целью измерения поля дисторсии и съёмка тест-объекта с точно известными размерами, по которому определяются элементы внешнего ориентирования камер.

Основные этапы построения цифровой модели объекта

Цифровая модель объекта строится в несколько этапов:

- определение элементов внутреннего ориентирования камер по результатам съёмки звёзд;
- определение элементов внешнего ориентирования по результатам съёмки тестобъекта;
- формирование группы точек путём их проецирования лазерной указкой на объекте;
- проведение съёмки объектов двумя камерами и локализация их изображений;
- отождествление пар соответственных точек;
- определение координат модели для каждой соответственной точки методом прямой фотограмметрической засечки в системе координат объекта;
- преобразование левого изображения с целью исправления дисторсии при помощи средств OpenGL;
- трансформирование исправленного изображения в проекцию заданной цифровой модели при помощи средств OpenGL;

• формирование различных ракурсов просмотра реалистичной цифровой модели. Рассмотрим каждый из этапов более подробно.

Определение элементов внутреннего ориентирования по результатам съёмки звёзд

Элементы внутреннего ориентирования камеры – фокусное расстояние и координата главной точки, а также поле дисторсии – могут быть определены по результатам съёмки ночного звёздного неба при больших значениях времени накопления (*puc. 2*).



Рис. 2. Схема определения элементов внутреннего ориентирования камеры

Координаты центров звёзд x, y на ПЗС-матрице связаны с направляющими косинусами l, m, n звёзд через уравнения коллинеарности:

$$\begin{cases} x = x_0 - f \frac{a_{11}l + a_{12}m + a_{13}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} + dx, \\ y = y_0 - f \frac{a_{21}l + a_{22}m + a_{23}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} + dy, \\ dx = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n k_x(i, j) \cdot x^i y^j, \\ dy = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n k_y(i, j) \cdot x^i y^j, \end{cases}$$
(1)

где f – фокусное расстояние; x_0 , y_0 — координата главной точки; dx, dy – поправки на дисторсию; a_{ij} – элементы матрицы перехода A от второй экваториальной системы координат к внутренней системе координат камеры; $k_x(i, j)$, $k_y(i, j)$ – коэффициенты полинома дисторсии.

Для всех звёзд на изображении составляется и решается система уравнений коллинеарности (1) относительно трёх углов, определяющих матрицу направляющих косинусов А и фокусное расстояние.

Для вычисления поправок на дисторсию используется свойство постоянства угловой скорости суточного вращения Земли. При этом все матрицы *A* в процессе наблюдения связаны между собой через проекцию оси вращения Земли, время и модуль угловой скорости.

При решении выполняется линеаризация, и искомые параметры вычисляются методом последовательных приближений по способу наименьших квадратов.

Если камер несколько, то для их калибровки может быть использован принцип эталонной камеры, откалиброванной по звёздам. Выполнив съёмку узлов контрольной сетки эталонной и съёмочной камерами, можно уточнить элементы внутреннего ориентирования и полиномы дисторсии съёмочной камеры. В качестве контрольной сетки могут выступать монитор с выведенной регулярной сеткой и коллиматор.

Определение элементов внешнего ориентирования по результатам съёмки тест-объекта

К элементам внешнего ориентирования относятся матрица *A* и координаты центра съёмки каждой камеры. Для их определения может быть использован тест-объект, с предварительно измеренными координатами точек 1–8 (*puc. 3*).



Рис. 3. Схематическое изображение тест-объекта

Координаты тест-объекта связаны с координатами их изображений следующими соотношениями:

$$x = x_{0} - f \frac{a_{11}(X - X_{S}) + a_{12}(Y - Y_{S}) + a_{13}(Z - Z_{S})}{a_{31}(X - X_{S}) + a_{32}(Y - Y_{S}) + a_{33}(Z - Z_{S})} + dx,$$

$$y = y_{0} - f \frac{a_{21}(X - X_{S}) + a_{22}(Y - Y_{S}) + a_{23}(Z - Z_{S})}{a_{31}(X - X_{S}) + a_{32}(Y - Y_{S}) + a_{33}(Z - Z_{S})} + dy,$$
(2)

где X, Y, Z – координаты точки тест-объекта; a_{ij} — элементы матрицы перехода от системы координат камеры к системе координат тест-объекта (A); X_S , Y_S , Z_S — координата центра съёмки в системе координат тест-объекта.

Для восьми точек тест-объекта составляется и решается система, содержащая 32 уравнения с двенадцатью неизвестными элементами внешнего ориентирования для каждой камеры. Эта система уравнений решается по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений.

Формирование группы точек путём их проецирования лазерной указкой на объект съёмки

Съёмка выполняется двумя камерами синхронно после проецирования лазерной установки на объект (*puc. 4*).



Рис. 4. Получение стереопары изображений регулярной сетки

Изображения считываются на персональный компьютер по интерфейсу USB. С помощью программного обеспечения выполняется предварительная обработка, выбирается порог отсечки, вычисляемый по формуле

$$T = M + 3\sigma, \tag{3}$$

где *M* – среднее значение яркости фона; σ — среднеквадратическое значение флуктуаций фона относительно средней яркости.

Все связные объекты, превышающие порог, образуют области, соответствующие изображениям узлов светящейся сетки, проецируемой на объект съёмки.

В итоге получается набор координат центров изображений узлов на каждом изображении.

При перекрытии между изображениями, превышающем 80%, определение пары соответственных изображений узлов может быть достигнуто минимизацией расстояния, вычисленного по евклидовой метрике между узлом первого изображения и всеми узлами второго изображения:

$$R_{i} = \min \sqrt{(x_{1i} - x_{2j})^{2} + (y_{1i} - y_{2j})^{2}}; \quad i = 1, ..., n; \ j = 1, ..., m,$$
(4)

где:

*x*_{1*i*}, *y*_{1*i*} – координаты центра изображения узла сетки на снимке первой камеры;

*x*_{2*j*}, *y*_{2*j*} – координаты центра изображения узла сетки на снимке второй камеры;

Следует отметить, что координаты узла второго изображения, имеющие минимальное расстояние R с координатами узла первого изображения, принимаются в качестве соответствующих координатам узла первого изображения только при условии сходства определенного набора расстояний с соседними узлами. Набор расстояний L_{j1} до ближайших узлов на втором изображении к выбранному должен соответствовать такому же набору расстояний L_{i2} на первом изображении с заданным допуском (*puc. 5*).



Рис. 5. Схема определения соответственного узла

Так, для всех узлов сетки составляется таблица соответствия координат их изображений, полученных первой и второй камерами. При перекрытии между изображениями от 50 до 80% необходимо осуществлять определение соответствия путем определения общего параллактического смещения точек поверхности.

Для этого используется следующий алгоритм:

 Определяются все возможные смещения координат между точками первого и второго изображений: Дхіј и Дуіј.

2. Для заданных размеров интервала и смещений Δxij и Δyij , выбирается смещение по Δx_{ont} и Δy_{ont} , в интервалы которого попадает максимальное количество смещений Δxij и Δyij . При точности взаимной выставки порядка 1 градуса Δy_{ont} принимаем равным 0.

Тогда при выборе в качестве кандидата в соответственный узел второго изображения выбирается тот, к которому ближе всех смещение Δx_{ont} и нулевое смещение Δy_{ont} .

Для контроля необходимо также сравнивать несколько ближайших расстояний на первом и на втором изображениях Li₁ и Li₂.

Определение координат модели для каждой соответственной точки методом прямой фотограмметрической засечки в системе координат объекта

Для изображения каждого узла сетки на двух снимках из таблицы соответствия получим две координаты: x_1 , y_1 и x_2 , y_2 . Направляющие косинусы векторов на изображение узлов сетки с двух камер в их внутренних системах координат r_1 и r_2 (*puc.* 6) могут быть определены по формулам:

$$l_{i} = \frac{x_{i} - x_{0}}{\|\mathbf{r}_{i}\|}, \quad m_{i} = \frac{y_{i} - y_{0}}{\|\mathbf{r}_{i}\|}, \quad n_{i} = \frac{-f_{i}}{\|\mathbf{r}_{i}\|}.$$
(5)



Рис. 6. Схема построения цифровой модели объекта

Длина векторов направления на изображения представляется как

$$\|\mathbf{r}_i\| = \sqrt{(x_i - x_{0i})^2 + (y_i - y_{0i})^2 + f_i^2}, \quad i = 1, 2.$$

Перейдём к направляющим косинусам векторов из задних узловых точек объективов камер S_1 и S_2 на узлы сетки P во внешней системе координат объекта.

$$\begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix}_{\text{of}} = A_i \begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix}_{\text{BH}} ,$$
 (6)

где A_i — матрица направляющих косинусов внутренней системы координат во внешней системе координат.

Точка пересечения двух направлений *P* во внешней системе координат даёт пространственное положение узлов цифровой модели объекта, подсвеченного сеткой лазера. Координаты точек цифровой модели объекта могут быть рассчитаны по формулам:

$$Z_{P} = \frac{X_{S_{2}} - X_{S_{1}} - \frac{l_{1}}{n_{1}} Z_{S_{1}} + \frac{l_{2}}{n_{2}} Z_{S_{2}}}{\frac{l_{2}}{n_{2}} - \frac{l_{1}}{n_{1}}},$$

$$X_{P} = X_{S_{1}} + \frac{l_{1}}{n_{1}} (Z_{P} - Z_{S_{1}}),$$

$$Y_{P} = Y_{S_{1}} + \frac{m_{1}}{n_{1}} (Z_{P} - Z_{S_{1}}),$$

$$(7)$$

где X_{S_i} , Y_{S_i} , Z_{S_i} — координаты центров съёмки в системе координат тест-объекта (i = 1, 2); X_P , Y_P , Z_P — пространственные координаты точек поверхности объекта, отражающей узлы точек лазерного проектора; l_i , m_i , n_i — направляющие косинусы векторов на изображения узлов в системе координат тест-объекта.

Для визуализации цифровой модели объекта можно воспользоваться средствами системы OpenGL, в которой задаются различные ракурсы отображения пространства.

Пространство отображается в заданном масштабе по координатам *X*, *Y*, *Z*, вычисленным при обработке.

При отображении цифровой модели используется регулярная сетка, построенная в плоскости *XY*. Высота *Z* может быть получена путём билинейной интерполяции четырёх ближайших узлов сетки.

Пример построенной цифровой модели объекта съёмки представлен на рис. 7.

Существует также возможность искажать изображение с учётом рельефа поверхности. Плоское изображение в системе координат *XY* разбивается на квадратные области, в которых при отображении задаётся координата *Z*, интерполированная по точкам поверхности. Таким образом, получается фотореалистичная цифровая модель поверхности.

Далее проиллюстрируем основные этапы работы программного обеспечения.



Рис. 7. Цифровая модель объекта съёмки

Внешний вид установки с двумя камерами, используемой для отработки программного обеспечения представлен на *рис*. 8.

Интерфейс программного обеспечения при построении цифровой модели поверхности объекта представлен на *рис.* 9.

Калибровка камеры проводится с использованием стенда динамических испытаний приборов звездной ориентации (*puc. 10*). Регулярная сетка, отображенная на цифровом мониторе стенда динамических испытаний, представлена на *puc. 11*. Изображение регулярной сетки в поле зрения камеры представлено на *puc. 12*. Инвертированное изображение контрольной сетки, нанесенной на лист бумаги с равными промежутками между ее узлами, в поле зрения камеры представлено на *puc. 13*.

Исправленное за влияние дисторсии и трансформированное изображение объекта, подсвеченного светодиодами, показано на *рис.* 14.

Визуализация фотореалистичной цифровой модели и объекта при помощи средств OpenGL представлена на *puc. 14* и *15*.



Рис. 8. Цифровые камеры «ВИДЕОСКАН» с USB интерфейсом и фиксированным базисом, используемые для построения пространственной модели объекта



Рис. 9. Интерфейс программного обеспечения по построению цифрой модели поверхности и отображения объекта



Рис. 10. Стенд динамических испытаний с установленным эталонным прибором при определении фокусного расстояния коллиматора



Рис. 11. Регулярная сетка, отображенная на цифровом мониторе стенда динамических испытаний



Рис. 12. Изображение регулярной сетки в поле зрения камеры



Рис. 13. Изображение контрольной сетки в поле зрения камеры



Рис. 14. Исправленное за влияние дисторсии и трансформированное изображение объекта, подсвеченного светодиодами



Рис. 15. Визуализация фотореалистичной цифровой модели и объекта при помощи средств OpenGL. Точка визуализации находится в начале базисной системы координат камер



Рис. 16. Визуализация фотореалистичной цифровой модели и объекта при помощи средств OpenGL. Точка визуализации находится на поверхности цифровой модели

Заключение

Рассмотрена стереоскопическая технология трехмерной реконструкции объекта с использованием лазерной подсветки, и проведено программное макетирование, показывающее принципиальную применимость этой технологии

Программное обеспечение позволяет:

- выполнять локализацию, отождествлять соответственные точки на двух изображениях;
- выполнять взаимное и внешнее ориентирование 2-х камер
- определять координаты точек модели по известным элементам внешнего и внутреннего ориентирования;
- исправлять дисторсию; формировать преобразованное изображение каждой камеры;
- трансформировать изображения, полученные камерами, с учетом элементов их взаимного ориентирования;
- обеспечить стереоскопический просмотр двух снимков и наведение марки на поверхность;
- отображать пространственные координаты точек поверхности;

- вычислять расстояния между выбранными точками;
- просматривать цифровую модель в различных ракурсах.
- отслеживать и отображать на цифровой модели и на изображениях объект, подсвеченный, по крайней мере, 3-мя светодиодами.

Представленный метод и программно алгоритмическое обеспечение позволяют выполнить построение трехмерной цифровой модели лунного рельефа в проекте «Луна-Глоб».

Точность определения пространственных координат при базисе 250 мм и отстоянии 2 м по осям X, Y составляет 1 мм, а по оси Z 15 мм.

Фокусное расстояние камер 9 мм при размере элемента 6,8 мкм.

Construction of a three-dimensional model of an object based on stereo imagery

A.V. Nikitin

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences Moscow 117997, Russia E-mail: andvnik935@yandex.ru

At present, there is a wide range of ways to solve the task of building a digital model. With the aim of building a digital model of a ground survey object, the stereo photogrammetric method (shooting from fixed basis), widely used in the past in phototheodolite surveying, is proposed. In order to automate this method, different image conversion and correlation algorithms are used to select contour points and identify them on a pair of images. However, it is necessary to have a sufficient number of contrasting objects on the surface being surveyed.

In the paper, a digital model construction algorithm based on the stereo photogrammetric method with laser illumination is discussed. To build a digital model, simultaneous surveying was carried out by cameras with fixed basis and laser illumination providing projection of a glowing grid on the object.

The method consists in the following stages: preliminary cameras calibration by stars surveying and by dynamic test bench, setting the exposure time, defining external orientation elements by surveying the test object and, in the absence of it, analytical definition of relative orientation elements, switching laser illumination on, identification of the corresponding sites and definition of their spatial coordinates. The set of the spatial coordinates form the digital model of the object.

An example of software implementation according to the proposed algorithm is suggested.

Keywords: digital elevation model, elements of internal orientation of the camera, elements of external orientation of the camera, test-object, laser illumination.