



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
 ноябрь–декабрь 2018 Том 18 № 6 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/
 SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
 November–December 2018 Vol. 18 No 6 ISSN 2226-1494 http://ntv.ifmo.ru/en



УДК 528.721

ВЕКТОРНО-МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ТОЧКИ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ СТЕРЕОСЪЕМКИ

М.В. Самойленко^а

^а Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация
 Адрес для переписки: Samoi.Mar@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.09.18, принята к печати 29.09.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Самойленко М.В. Векторно-матричный метод восстановления пространственных координат точки в общем случае стереосъемки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 954–960. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960

Аннотация

Представлено решение задачи восстановления пространственных координат точки в трехмерной базовой системе координат по стереоизображениям, полученным камерами при независимых их положениях и ориентациях в пространстве; параметры камер могут быть различными. В аналитической фотограмметрии такая задача называется прямой фотограмметрической засечкой в общем случае съемки. Представленное решение основано на подходе, отличающемся от принятого в аналитической фотограмметрии. Методологически этот подход основан на векторно-матричном аппарате, примененном от постановки задачи и до получения окончательного решения. Такой подход обеспечивает равнозначность камер, которые в одинаковой степени влияют на конечный результат; в решении не используются преобразования подобия – оно получается сразу в базовой системе координат; число используемых стереокамер может быть легко увеличено без изменения алгоритма решения. Этим решение отличается от прямой фотограмметрической засечки, в которой одна из камер, обычно левая, является как бы основной, в ее центр проецирования помещается центр модельной системы координат со специальным направлением осей. При расчетах неоднократно выполняется преобразование подобия с переходом из одной системы координат в другую, прежде чем будет получен результат в базовой системе координат. Предложенный метод по сравнению с прямой фотограмметрической засечкой обладает большей средней точностью при наличии ошибок определения координат соответственных точек на изображениях. Выигрыш в точности определения пространственных координат точек в проведенных экспериментах составил более 20 %.

Ключевые слова

аналитическая фотограмметрия, стереоизображения, восстановление пространственных координат, прямая фотограмметрическая засечка, векторно-матричный аппарат

VECTOR-MATRIX METHOD FOR RESTORATION OF POINT SPATIAL COORDINATES IN STEREO PHOTOGRAPHY GENERAL CASE

M.V. Samoilenko^a

^aMoscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation

Corresponding author: Samoi.Mar@mail.ru

Article info

Received 05.09.18, accepted 29.09.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960

Article in Russian

For citation: Samoilenko M.V. Vector-matrix method for restoration of point spatial coordinates in stereo photography general case. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 954–960 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-954-960

Abstract

The paper presents a solution for the problem of the point spatial coordinates restoration in three-dimensional basic system of coordinates by its stereo images obtained by cameras with independent locations and orientations in space; the cameras settings can be different. In analytical photogrammetry such a problem is called direct photogrammetric intersection for the general photographing case. The solution presented in the paper is based on the approach different from that one adopted in analytical photogrammetry. Methodologically, this approach is based on a vector-matrix apparatus applied from the formulation of the problem up to the final

solution. Structurally, the result presented in the paper provides the equivalence of the cameras, which equally produce an effect on the final result. Similarity transformations are not used in the solution, the result is obtained just in the base coordinate system. The number of stereo cameras can be easily increased without changing the decision algorithm. These facts distinguish the solution presented in the paper from the direct photogrammetric intersection, in which one of the cameras (usually the left one) is the main camera and the center of the model coordinate system with a special direction of the axes is placed in its projection center. Similarity transforms should be used repeatedly in calculations to move from one coordinate system to another before the result in the base coordinate system is obtained. The method presented in the paper has greater average accuracy in the presence of errors in determining the coordinates of the corresponding points on the images than the direct photogrammetric intersection. This advantage in the accuracy of determining the spatial coordinates of points in the performed experiments occurred to be more than 20 %.

Keywords

analytical photogrammetry, stereo images, spatial coordinates restoration, direct photogrammetric intersection, vector-matrix apparatus

Введение

Базовой задачей стереоскопической фотограмметрии является восстановление пространственных координат точки по ее стереоизображениям, полученным с помощью двух или большего числа камер. Ее традиционное решение основано на преобразованиях подобия, уравнениях коллинеарности, описанных в большом числе работ, как современных [1–7], так и ставших уже классическими [8–10]. Математическая основа алгоритмов обработки стереоизображений в рассматриваемой задаче, по сути, представляет собой результат анализа подобных треугольников, которые образуют лучи при центральном проецировании. При этом роль стереокамер не одинакова: одна из них является как бы основной, а вторая используется для определения коэффициентов масштабирования. Решение сопровождается преобразованиями подобия систем координат. Такой подход выработан достаточно давно, новые разработки посвящены множеству других важных вопросов, таких как анализ снимков [11–13]. Базовый математический алгоритм определения по снимкам пространственных координат, именуемый прямой фотограмметрической засечкой, остается при этом неизменным.

В настоящей работе представлен математический аппарат, разработанный в 1993 г. д.т.н., профессором Виталием Ивановичем Самойленко (материалы взяты из рабочей тетради В.И. Самойленко; они разрабатывались им при создании системы стереоскопического зрения марсохода [14]). Этот математический аппарат позволил иначе реализовать обработку стереоизображений с целью восстановления по ним пространственных координат точек, причем как в общем случае, так и при специальной геометрии задачи. В статье рассматривается общий случай фотограмметрических наблюдений, при котором положения камер, их ориентации в пространстве и параметры произвольны. Представлен математический аппарат для восстановления трехмерных координат точки по стереоизображениям, полученным при различных условиях фотограмметрических измерений. Результаты компьютерного моделирования позволяют сравнить разработанное В.И. Самойленко решение с решением методом классической прямой фотограмметрической засечки.

Постановка задачи

Конфигурация задачи показана на рис. 1. В базовой системе координат XYZ координаты центров проецирования камер обозначены координатными векторами \mathbf{r}_{K1} и \mathbf{r}_{K2} ; \mathbf{r}_{O1} и \mathbf{r}_{O2} – векторы осей, определяемые параметрами камер: направление каждого из них совпадает с направлением оптической оси камеры, длина равна расстоянию от центра проецирования до плоскости изображения. Плоскости изображений Q_1 и Q_2 ортогональны векторам осей камер. Вектором \mathbf{r}_P обозначены пространственные координаты точки-оригинала P . Изображения точки-оригинала в центральных проекциях, регистрируемые камерами, – это соответственные точки Π_1 и Π_2 . Координаты соответственных точек в системах координат снимков обозначены двумерными векторами $\rho_{\Pi1}$ и $\rho_{\Pi2}$.

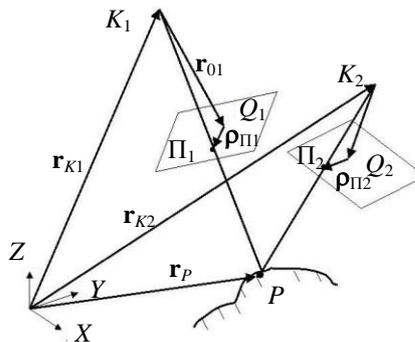


Рис. 1. Конфигурация задачи

Ставится задача по известным положениям камер, их параметрам и измеренным координатам соответственных точек в системах координат снимков восстановить пространственные координаты точки-оригинала \mathbf{r}_P .

Решение

Центральное проектирование. Рассмотрим одну камеру (рис. 2) и формируемое ею по принципу центрального проектирования изображение точки-оригинала P .

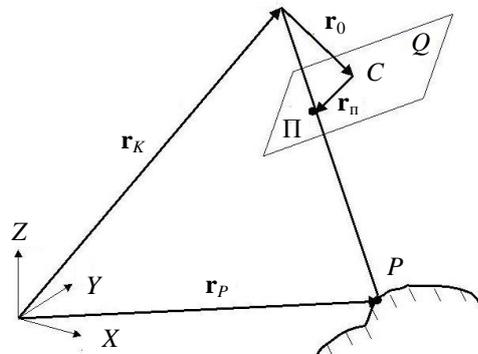


Рис. 2. Центральное проектирование точки-оригинала P на плоскость изображения Q

Как видно на рис. 2, плоскость Q проходит через точку с координатами $\mathbf{r}_K + \mathbf{r}_0$ и ортогональна вектору \mathbf{r}_0 . Уравнение этой плоскости имеет вид

$$\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r} - \mathbf{r}_K - \mathbf{r}_0) = 0, \tag{1}$$

где T означает транспонирование.

Уравнение прямой PK имеет вид

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_K + \xi(\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K), \tag{2}$$

где ξ – скалярный коэффициент, определяющий положение точки на прямой.

Подставив (2) в (1), найдем коэффициент ξ , соответствующий Π – точке пересечения прямой (2) с плоскостью (1):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0^T [\mathbf{r}_K + \xi(\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K) - \mathbf{r}_K - \mathbf{r}_0] &= 0, \\ \xi &= \frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K)}. \end{aligned} \tag{3}$$

В соответствии с рис. 2 и с учетом равенств (2), (3) получаем

$$\mathbf{r}_K + \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_\Pi = \mathbf{r}_K + \frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K)} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K),$$

откуда находим

$$\mathbf{r}_\Pi = \frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K)} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K) - \mathbf{r}_0. \tag{4}$$

Выражение (4) определяет трехмерный вектор координат точки Π на плоскости Q , выраженный в базовой системе координат. Измеряемыми являются плоские координаты этой точки в двумерной системе координат снимка. Центр системы координат снимка находится в точке C (рис. 2), ее орты лежат в плоскости Q (на рисунке не показаны). Представим эти орты в базовой системе координат трехмерными векторами \mathbf{i} и \mathbf{j} .

Введем в рассмотрение (2×3) -матрицу ортов $\mathbf{M} = [\mathbf{i} \ \mathbf{j}]^T$. Координаты точки Π в системе координат снимка определяются двумерным координатным вектором

$$\boldsymbol{\rho}_\Pi = \mathbf{M} \mathbf{r}_\Pi = \mathbf{M} \left[\frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K)} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K) - \mathbf{r}_0 \right]. \tag{5}$$

Поскольку вектор оси камеры \mathbf{r}_0 ортогонален плоскости Q , т.е. $\mathbf{M} \mathbf{r}_0 = \mathbf{0}$, упростим выражение (5):

$$\boldsymbol{\rho}_\Pi = \mathbf{M} \frac{\mathbf{r}_0^T \mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_0^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K)} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_K). \tag{6}$$

Полученное выражение (6) является основой для решения задачи восстановления пространственных координат точки-оригинала P по ее стереоизображениям.

Восстановление пространственных координат точки-оригинала. Рассмотрим два стереоизображения точки P , полученные двумя камерами с координатами центров проецирования \mathbf{r}_{K1} и \mathbf{r}_{K2} и векторами осей \mathbf{r}_{01} и \mathbf{r}_{02} (рис. 1). Согласно (6), двумерные координаты соответственных точек Π_1 и Π_2 определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\Pi_1} &= \mathbf{M}_1 \frac{\mathbf{r}_{01}^T \mathbf{r}_{01}}{\mathbf{r}_{01}^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_{K1})} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_{K1}), \\ \rho_{\Pi_2} &= \mathbf{M}_2 \frac{\mathbf{r}_{02}^T \mathbf{r}_{02}}{\mathbf{r}_{02}^T (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_{K2})} (\mathbf{r}_P - \mathbf{r}_{K2}), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $\mathbf{M}_1 = [\mathbf{i}_1 \ \mathbf{j}_1]^T$, $\mathbf{M}_2 = [\mathbf{i}_2 \ \mathbf{j}_2]^T$ – матрицы ортов; $\mathbf{i}_1, \mathbf{j}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{j}_2$ – орты систем координат первого и второго снимков.

Проведя несложные преобразования выражений (7), получим

$$\left. \begin{aligned} (\rho_{\Pi_1} \mathbf{r}_{01}^T - \mathbf{M}_1 \mathbf{r}_{01}^T \mathbf{r}_{01}) \mathbf{r}_P &= (\rho_{\Pi_1} \mathbf{r}_{01}^T - \mathbf{M}_1 \mathbf{r}_{01}^T \mathbf{r}_{01}) \mathbf{r}_{K1}, \\ (\rho_{\Pi_2} \mathbf{r}_{02}^T - \mathbf{M}_2 \mathbf{r}_{02}^T \mathbf{r}_{02}) \mathbf{r}_P &= (\rho_{\Pi_2} \mathbf{r}_{02}^T - \mathbf{M}_2 \mathbf{r}_{02}^T \mathbf{r}_{02}) \mathbf{r}_{K2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Систему векторно-матричных уравнений (8) перепишем в виде

$$\mathbf{H} \mathbf{r}_P = \mathbf{g}, \quad (9)$$

где

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho_{\Pi_1} \mathbf{r}_{01}^T - \mathbf{M}_1 \mathbf{r}_{01}^T \mathbf{r}_{01} \\ \rho_{\Pi_2} \mathbf{r}_{02}^T - \mathbf{M}_2 \mathbf{r}_{02}^T \mathbf{r}_{02} \end{bmatrix} - (4 \times 3)\text{-матрица}, \quad (10)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} (\rho_{\Pi_1} \mathbf{r}_{01}^T - \mathbf{M}_1 \mathbf{r}_{01}^T \mathbf{r}_{01}) \mathbf{r}_{K1} \\ (\rho_{\Pi_2} \mathbf{r}_{02}^T - \mathbf{M}_2 \mathbf{r}_{02}^T \mathbf{r}_{02}) \mathbf{r}_{K2} \end{bmatrix} - (4 \times 1)\text{-вектор}. \quad (11)$$

Выражение (9) приводит задачу к виду, характерному для томографического подхода, изложенного в [15]. В терминах этого подхода \mathbf{r}_P – искомый вектор-оригинал, \mathbf{g} – вектор-отображение, \mathbf{H} – матрица отображения. Решив (9) относительно вектора-оригинала \mathbf{r}_P , восстановим по стереоизображениям координаты точки в пространстве. Сделать это можно, например, методом псевдообращения:

$$\mathbf{r}_{P \text{ вос}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} = \mathbf{H}^+ \mathbf{g}, \quad (12)$$

где индекс + обозначает операцию псевдообращения матрицы [16].

Выражение (12) является решением задачи, которое назовем векторно-матричным методом восстановления пространственных координат точки по ее стереоизображениям. Это решение отличается от принятого в классической фотограмметрии. Во-первых, оно позволяет легко перейти к большему числу стереоснимков: для этого достаточно дополнить матрицу (10) и вектор (11) блоками, отвечающими параметрам дополнительных камер. Во-вторых, в решении (12) все камеры равноценны, их роль в получении результата одинакова. Наконец, решение (12) не использует преобразований подобия, все расчеты изначально привязаны к базовой системе координат.

Для сравнительного анализа векторно-матричного метода и классического метода прямой фотограмметрической засечки далее представлены результаты компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование

Условия экспериментов для решения (12) и для решения методом прямой фотограмметрической засечки [1] одинаковы, однако описываются по-разному.

Для решения методом фотограмметрии условия экспериментов описываются следующими величинами. Параметры внешнего ориентирования задаются для первой камеры координатами ее центра проецирования $X_{K1} = -50$ мм, $Y_{K1} = 50$ мм, $Z_{K1} = 1000$ мм и угловыми параметрами внешнего ориентирования $\omega_{K1} = -15^\circ$, $\phi_{K1} = 0^\circ$, $\kappa_{K1} = 0^\circ$. Соответствующие параметры второй камеры определяются величинами $X_{K2} = 50$ мм, $Y_{K2} = -50$ мм, $Z_{K2} = 1050$ мм и $\omega_{K2} = 10^\circ$, $\phi_{K2} = 10^\circ$, $\kappa_{K2} = 10^\circ$. Расстояние от центра проецирования до плоскости изображения первой камеры 24 мм, а второй – 30 мм.

Для решения векторно-матричным методом используются следующие параметры эксперимента. Координатные векторы положений центров проецирования камер $\mathbf{r}_{K1} = [-50 \ 50 \ 1000]^T$ (мм),

$\mathbf{r}_{K2} = [50 \ -50 \ 1050]^T$ (мм); вектор оси первой камеры $\mathbf{r}_{01} = [0 \ -6,2117 \ -23,1822]^T$ (мм), второй камеры – $\mathbf{r}_{02} = [-5,2094 \ 5,1303 \ -29,0954]^T$ (мм).

Моделировалось восстановление пространственных координат $P1, P2$ и $P3$: $X_{P1} = 400, Y_{P1} = -480, Z_{P1} = 20$; $X_{P2} = 100, Y_{P2} = -300, Z_{P2} = 250$; $X_{P3} = -150, Y_{P3} = 260, Z_{P3} = 100$ мм.

Анализировалось восстановление пространственных координат точек для трех случаев: в отсутствие ошибок измерений положений точек на изображениях и при наличии аддитивных гауссовых ошибок с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением σ_n , имеющим значения в одном случае 0,1, в другом – 0,3 мм.

На рис. 3 показаны изображения точек, полученные камерами. По этим изображениям восстанавливаются пространственные координаты точек двумя методами.

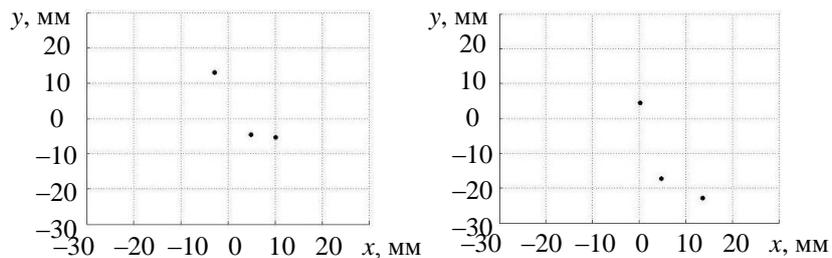


Рис. 3. Изображения точек, полученные первой (а) и второй (б) камерами

Метод прямой фотограмметрической засечки включает следующие операции. Трехмерные координаты изображения точки, измеренные в системе координат каждой камеры, преобразуются в систему координат с осями, параллельными объектной системе координат и имеющей начало в центре проецирования камеры. Делается это с использованием (3×3) -матриц вращения, которые вычисляются через тригонометрические функции угловых параметров внешнего ориентирования камер. Вычисляются коэффициенты масштабирования каждой камеры и координаты точки в модельной системе координат с центром в центре проецирования первой (левой) камеры. Полученные координаты пересчитываются в базовую систему координат.

Векторно-матричный метод, основанный на формулах (10)–(12), включает измерение двумерных координат изображения точки на каждом изображении и формирование матрицы (10) и вектора (11). Для этого используются (2×3) -матрицы ортов. Координаты точки в базовой системе координат вычисляются по формуле (12).

Ошибка восстановления пространственных координат точек оценивалась по расстоянию между истинным положением точки и ее восстановленным положением:

$$\delta = \sqrt{(X_P - X_{P_{\text{вос}}})^2 + (Y_P - Y_{P_{\text{вос}}})^2 + (Z_P - Z_{P_{\text{вос}}})^2},$$

где X_P, Y_P, Z_P – истинные, а $X_{P_{\text{вос}}}, Y_{P_{\text{вос}}}, Z_{P_{\text{вос}}}$ – восстановленные координаты точки P . Распределения ошибок восстановления по 100 реализациям при $\sigma_n = 0,1$ мм приведены на рис. 4.

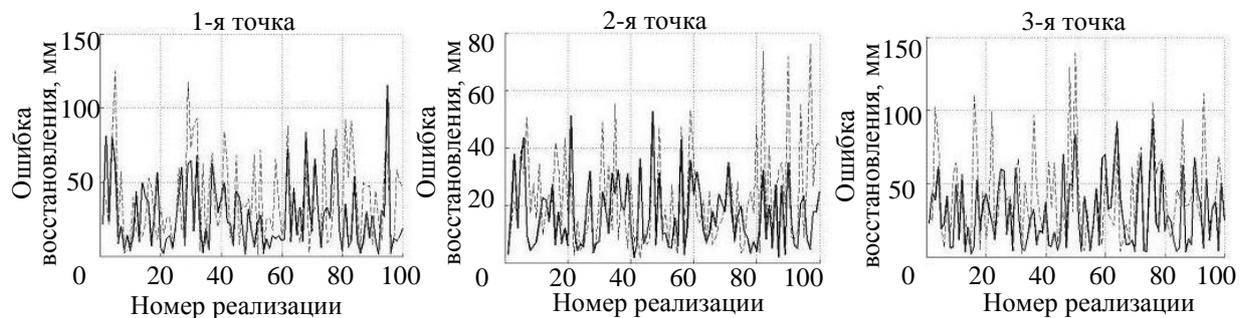


Рис. 4. Ошибки восстановления пространственных координат точек: сплошная кривая – ошибки восстановления векторно-матричным методом, пунктир – ошибки прямой фотограмметрической засечки

В экспериментах было проведено усреднение по $N=100$ реализациям: $\delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{N}$. Результаты представлены в таблице, где обозначено: $\delta_{\text{срФ}}$ – средняя ошибка определения координат методом прямой фотограмметрической засечки, $\delta_{\text{срС}}$ – средняя ошибка восстановления пространственных координат точки векторно-матричным методом.

Как видно из таблицы, при точном определении положений точек на изображениях ($\sigma_n = 0$) решение (12) уступает прямой фотограмметрической засечке. Однако оба решения представляются очень точными: ошибка определения пространственных координат точек колеблется от 0 до $\sim 10^{-12}$ мм.

σ_n , мм	Точка					
	1		2		3	
	$\delta_{\text{срФ}}$, мм	$\delta_{\text{срС}}$, мм	$\delta_{\text{срФ}}$, мм	$\delta_{\text{срС}}$, мм	$\delta_{\text{срФ}}$, мм	$\delta_{\text{срС}}$, мм
0	$2,3989 \cdot 10^{-12}$	$6,0841 \cdot 10^{-12}$	$3,6398 \cdot 10^{-13}$	$5,0893 \cdot 10^{-12}$	0	$2,0097 \cdot 10^{-12}$
0,1	38,0365	27,1060	22,5122	16,6435	41,6091	29,5377
0,3	120,8263	83,9863	72,8646	52,2169	112,5191	30,4900

Таблица. Усредненные ошибки определения пространственных координат точки фотограмметрическим и векторно-матричным методами

Если же присутствуют ошибки определения положения точек на изображениях, то решение (12) в среднем имеет преимущество по точности определения пространственных координат во всех случаях. Преимущество это составляет для первой точки 28 % по сравнению с точностью прямой фотограмметрической засечки при $\sigma_n = 0,1$ мм и 30 % при 0,3, для второй соответственно 26 и 28, для третьей – 29 и 24.

Заключение

Представленный в статье подход к решению задачи восстановления пространственных координат точки по стереоизображениям, разработанный В.И. Самойленко, позволил использовать единый векторно-матричный аппарат начиная от постановки задачи и до математической формулировки решения в виде векторно-матричного уравнения. Полученное решение отличается от принятого в классической фотограмметрии равноценностью используемых камер и носит самый общий характер: оно применимо при произвольных, независимых положениях камер, их ориентациях и параметрах. Это решение позволяет легко наращивать число камер, используемых для получения стереоизображений, без изменения вычислительного алгоритма. В отличие от классического метода прямой фотограмметрической засечки, это решение не использует преобразований подобия для перехода из одной системы координат в другую – результат сразу рассчитывается в базовой системе координат.

Проведенное компьютерное моделирование продемонстрировало преимущество представленного в статье решения перед прямой фотограмметрической засечкой по точности определения пространственных координат точки при наличии ошибок определения координат соответственных точек на изображениях. При усреднении по 100 реализациям преимущество это в проведенных экспериментах превысило 20 %. Результат получен при восстановлении методом псевдообращения матрицы отображения. Возможны и другие варианты решения, которые могут улучшить преимущество представленного в статье векторно-матричного метода, например, в случае использования винеровского оценивания [17] при наличии априорной информации о статистических свойствах ошибок измерений или метода регуляризации Тихонова–Арсенина [18] при удачном выборе параметра регуляризации.

Литература

1. Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Бом Я. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение. М.: ЛЕНАНД, 2018. 704 с.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия. 2-е изд. Минск: Тетра Системс, 2010, 400 с.
3. Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. М.: Академический проект, 2016. 297 с.
4. Гук П.Д., Прудников В.В., Быченко В.А. Фототопография. Новосибирск: СГГА, 2008. 78 с.
5. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. М.: МИИГАиК, 2008. 160 с.

References

1. Luhmann T., Robson S., Kyle S. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 2nd ed. De Gruyter, 2014, 684 p.
2. Nazarov A.S. *Photogrammetry*. Minsk, TetraSistems Publ., 2010, 400 p. (in Russian)
3. Limonov A.N., Gavrilova L.A. *Photogrammetry and Remote Sensing*. Moscow, Akademicheskii Proekt Publ., 2016, 297 p. (in Russian)
4. Guk P.D., Prudnikov V.V., Bychenok V.A. *Phototopography*. Novosibirsk, SSGA Publ., 2008, 78 p. (in Russian)
5. Krasnopetsev B.V. *Photogrammetry*. Moscow, MIIGAiK Publ., 2008, 160 p. (in Russian)

6. Хрущ Р.М., Гринь А.Н., Соловьев А.В. О построении геометрической модели местности по стереопаре аэрокосмических снимков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 2. С. 32–36.
7. Хрущ Р.М. Фотограмметрия. СПб: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2011. 542 с.
8. Бобир Н.Я., Лобанов А.Н., Федорук Г.Д. Фотограмметрия. М.: Недра, 1974.
9. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. М: Недра, 1984. 552 с.
10. Ильинский Н.Д., Обиралов А.Н., Фостиков А.А. Фотограмметрия и дешифрирование снимков. М.: Недра, 1986. 375 с.
11. Корнилов Ю.Н., Боголюбова А.А. О точности измерений цифровых снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. 2016. № 2. С. 17–21.
12. Орлов В.П., Шариков Е. Алгоритм нахождения и классификации особых точек объекта на основе детектора Харриса // Наноиндустрия. 2017. № 5 (74). С. 171–178.
13. Книжников Ю.Ф. Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых снимков // Геодезия и картография. 2003. № 4. С. 32–41.
14. Буслаев С.П. Разработка бортовой системы автономного технического зрения марсохода // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 1 (17). С. 24–28.
15. Самойленко М.В. Обработка сигналов в задачах локационных измерений и оценивания. М.: Спектр, 2016. 260 с.
16. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 552 с.
17. Самойленко В.И., Пузырев В.А., Грубрин И.В. Техническая кибернетика. М.: МАИ, 1994. 280 с.
18. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
6. Khrusch R.M., Grin A.N., Soloviev A.V. About creation of geometrical model districts on the stereo pair of space pictures. *High Tech in Earth Space Research*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 32–36. (in Russian)
7. Khrusch R.M. *Photogrammetry*. St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 2011, 542 p. (in Russian)
8. Bobir N.Ya., Lobanov A.N., Fedoruk G.D. *Photogrammetry*. Moscow, Nedra Publ., 1974. (in Russian)
9. Lobanov A.N. *Photogrammetry*. Moscow, Nedra Publ., 1984, 552 p. (in Russian)
10. Il'inskii N.D., Obiralov A.N., Fostikov A.A. *Photogrammetry and Image Decoding*. Moscow, Nedra Publ., 1986, 375 p. (in Russian)
11. Kornilov Yu.N., Bogolyubova A.A. On accuracy of digital photos measurement. *Izvestiya Vuzov "Geodesy and aerophotography"*, 2016, no. 2, pp. 17–21. (in Russian)
12. Orlov V.P., Sharikov E.N. Algorithm of finding and classifying special points of object on the basis of Harris's detector. *Nanoindustry*, 2017, no. 5, pp. 171–174. (in Russian)
13. Knizhnikov Yu.F. Dependence of the stereoscopic measurements accuracy on the pixel size of digital images. *Geodeziya i Kartografiya*, 2003, no. 4, pp. 32–41. (in Russian)
14. Buslaev S.P. Development of onboard system of automous machine vision of "Marsokhod". *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2013, no. 1, pp. 24–28. (in Russian)
15. Samoilenko M.V. *Signal Processing in Problems of Location Measurements and Estimation*. Moscow, Spectr Publ., 2016, 260 p. (in Russian)
16. Gantmakher F.R. *Matrix Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1988, 552 p. (in Russian)
17. Samoilenko V.I., Puzyrev V.A., Grubrin I.V. *Technical Cybernetics*. Moscow, MAI Publ., 1994, 280 p. (in Russian)
18. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Solutions of Ill-Posed Problems*. New York, Wiley, 1977.

Автор

Самойленко Марина Витальевна – кандидат технических наук, доцент, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, 125080, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4798-2414, Samoi.Mar@mail.ru

Author

Marina V. Samoilenko – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4798-2414, Samoi.Mar@mail.ru