

Метод предварительной калибровки фотограмметрических параметров для расчёта трёхмерных координат точек изображения по матричным координатам

Рихтер А.А.^(а,б,г), Чуклин С.И.^(а, в)

^(а) Акционерное общество «Тазмар АйТи-солюшнз», г. Санкт-Петербург

^(б) Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", г. Москва

^(в) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

^(г) Государственный университет по землеустройству, Москва, РФ

urfin17@yandex.ru

Постановка задачи

- Существует большое количество фотограмметрических методов, описывающих структурные и геометрические характеристики изображённых объектов по их изображениям. Они имеют широкий спектр применимости в задачах компьютерного зрения.
- Один из методов описывает стандартное преобразование координат из систем координат стереопары (левого и правого снимка) в систему координат объекта. Применение «напрямую» фотограмметрической модели преобразования координат изображения в координаты объекта нецелесообразно, ввиду того, что параметры внешнего и внутреннего ориентирования снимков не откалиброваны. В литературе встречаются методики калибровки фотограмметрических параметров [7-8]. Многие из них сложны в описании и технической реализации. Методы фотограмметрии, в том числе методы калибровки, описанные в соответствующей литературе, часто понятны специалистам по фотограмметрии, но не исследователям, для которых поставлена задача, связанная с геометрической интерпретацией изображённых объектов.
- Предлагается алгоритм калибровки фотограмметрических параметров для практических расчётов трёхмерных координат изображённых объектов по их матричным координатам (в матрице изображения).

Общая схема алгоритма



Входные данные

Входными данными является набор обучаемых образцов:

- $\{[I^i, P^i], i = 1..l\}$,

где l – число образцов, i – номер образца, I^i – i -е эталонное изображение, P^i – соответствующий i -й эталонный полигон (полигон соответствующего изображения, покрывающий изображённую территорию).

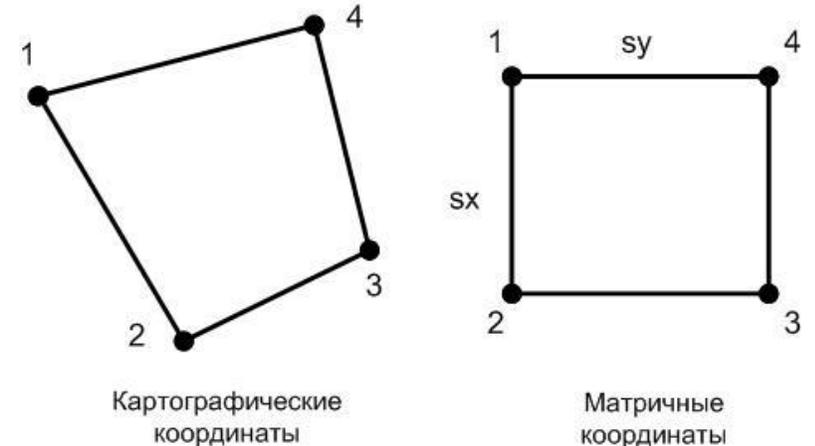
Эталонные изображения в составе набора получены съёмкой земной поверхности с одной камеры с постоянными техническими условиями съёмки.

Эталонный полигон задаётся в виде (рисунок 2):

- $P^i \xrightarrow{M} \{\Lambda_j^i\}, \Lambda_j^i = (\varphi_j^i, \lambda_j^i)$,
- $P^i \xrightarrow{И} \{\bar{r}_j^i\}, \bar{r}_j^i = (x_j^i, y_j^i), j = 1..4, i = 1..l$,

$\bar{\Lambda}_j^i, j = 1..4$ – географические координаты j -го угла i -го обучаемого изображения (j -й вершины полигона); \bar{r}_j^i – матричные координаты соответствующих точек (номер строки, номер столбца).

Γ
« $G \rightarrow \Lambda_G$ » - обозначение географических координат Λ_G геометрического объекта G ,
« $G \rightarrow R_G$ » - картографических координат R_G (в проекции UTM), « $G \rightarrow r_G$ » - матричных координат r_G .



Из рисунка 2: $j = 1$ – верхний левый угол, $x_1^i = 1, y_1^i = 1$; $j = 2$ – нижний левый угол, $x_2^i = s_x^i, y_2^i = 1$; $j = 3$ – нижний правый угол, $x_3^i = s_x^i, y_3^i = s_y^i$; $j = 4$ – верхний правый угол, $x_4^i = 1, y_4^i = s_y^i$. Параметры s_x^i и s_y^i – размеры изображения I^i в пикселях.

Географические и картографические координаты

Обозначим преобразование географических координат $(\varphi_j^i, \lambda_j^i)$ точки земной поверхности в картографические координаты (X_j^i, Y_j^i) , которое считается общеизвестным:

$$(X_j^i, Y_j^i), n_3, n_{EPSG} = K(\varphi_j^i, \lambda_j^i),$$

где n_3 – номер зоны, n_{EPSG} – код EPSG (для географических координат код EPSG равен 4326). Аппликата Z_j^i в точке (X_j^i, Y_j^i) определяется, исходя из модели цифровой рельефа (ЦМР, местности (ЦММ) или поверхности (ЦМП), либо считается постоянной в окрестности точки фотографирования S^i и прописывается в метаданных (см. далее параметр D^i).

Обратное преобразование можно получить по формуле:

$$(\varphi_j^i, \lambda_j^i) = K^{-1}(X_j^i, Y_j^i, n_3).$$

Первичный набор метаданных и базис изображения

№	Названия [единица измерения]	Обозначения	Примеры ключей
1	Высота [пк]	s_x	«image», «height»
2	Ширина [пк]	s_y	«image», «width»
3	Реальное (истинное) фокусное расстояние камеры [м]	f	«focal», «length»
4	Фокусное расстояние в полнокадровом эквиваленте [м]	f_m	«35», «mm»
5	Широта положения камеры [рад]	φ_S	«gps», «latitude»
6	Долгота положения камеры [рад]	λ_S	«gps», «longitude»
7	Абсолютная высота над уровнем моря точки фотографирования [м]	Z_S	«abs», «altitude»
8	Высота относительно поверхности Земли точки фотографирования [м]	Z'_S	«rel», «altitude»
9	Угол рыскания положения камеры [рад]	γ	«yaw», «degree»
10	Угол тангажа положения камеры [рад]	ϑ	«pitch», «degree»
11	Угол крена положения камеры [рад]	ψ	«roll», «degree»

Первичный набор метаданных



№	Название параметра	Обозначение
1	Матричные координаты главной точки [пк]	x_0, y_0
2	Размеры изображения [пк]	s_x, s_y
3	Географические координаты точки фотографирования [рад]	φ_S, λ_S
4	Картографические координаты точки фотографирования [м]	X_S, Y_S, Z_S
5	Относительная высота точки фотографирования [м]	Z'_S
6	Фокусное расстояние [м]	f
7	Углы Эйлера положения камеры [рад]	γ, ϑ, ψ
8	Полные углы обзора [рад]	t_x, t_y
9	Матрица поворота	A
10	Зона координатной проекции	n_3
0		

Первичный базис изображения

Блок-схемы основных процедур алгоритма

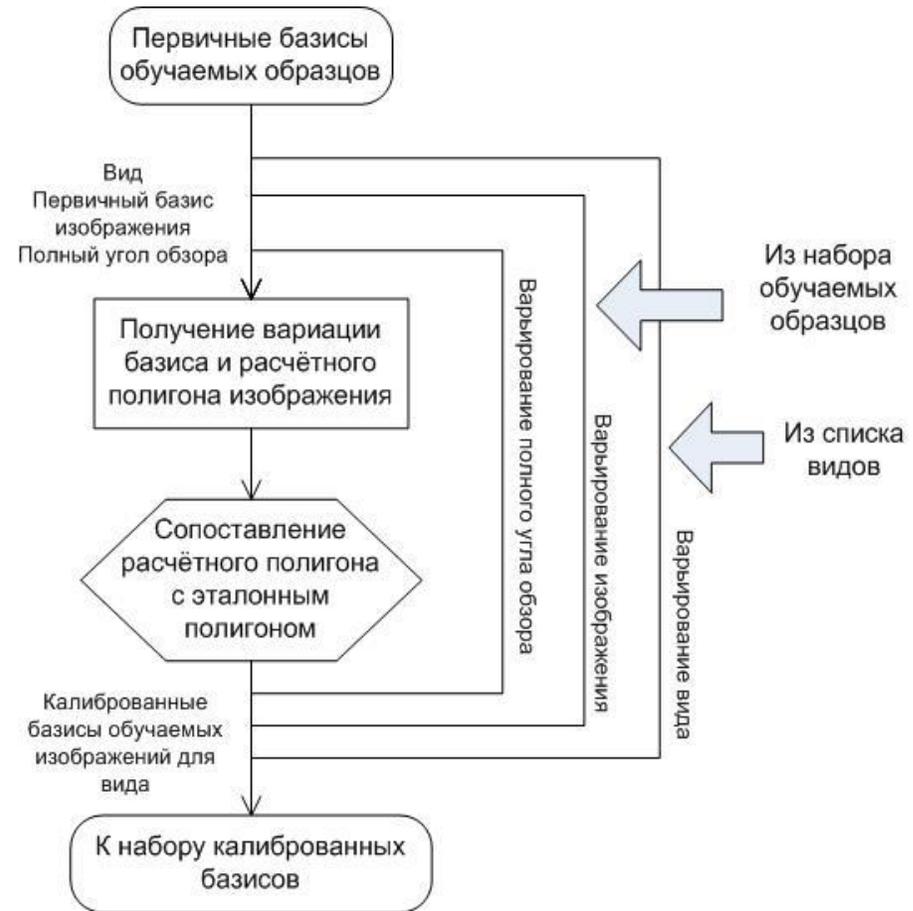
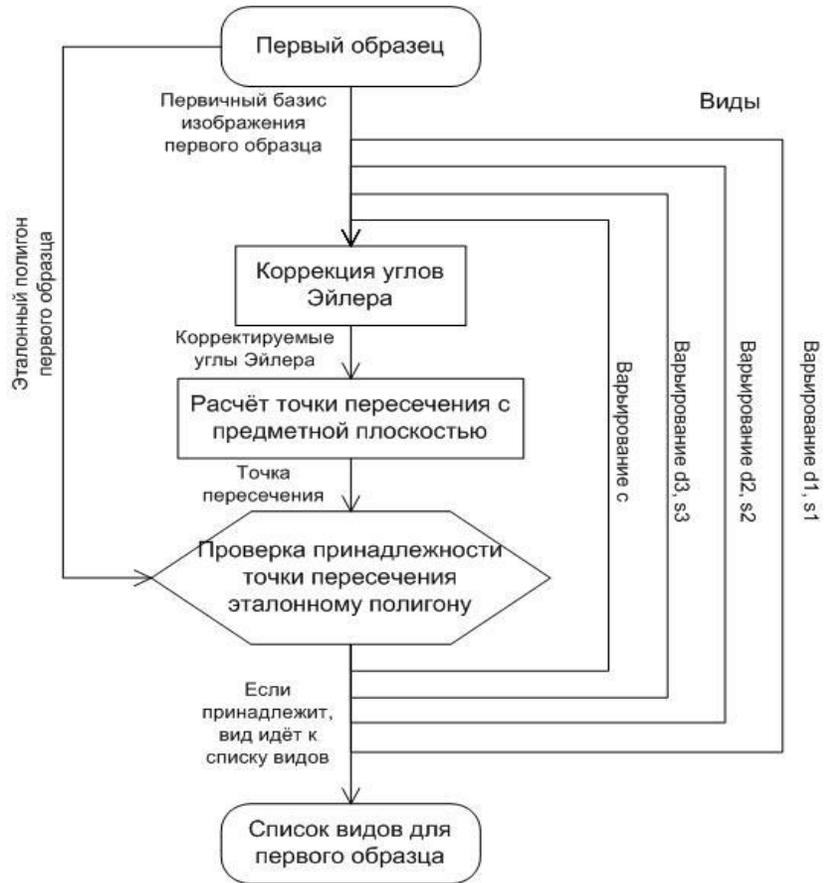


Схема получения видов по первичным базисам для первого образца

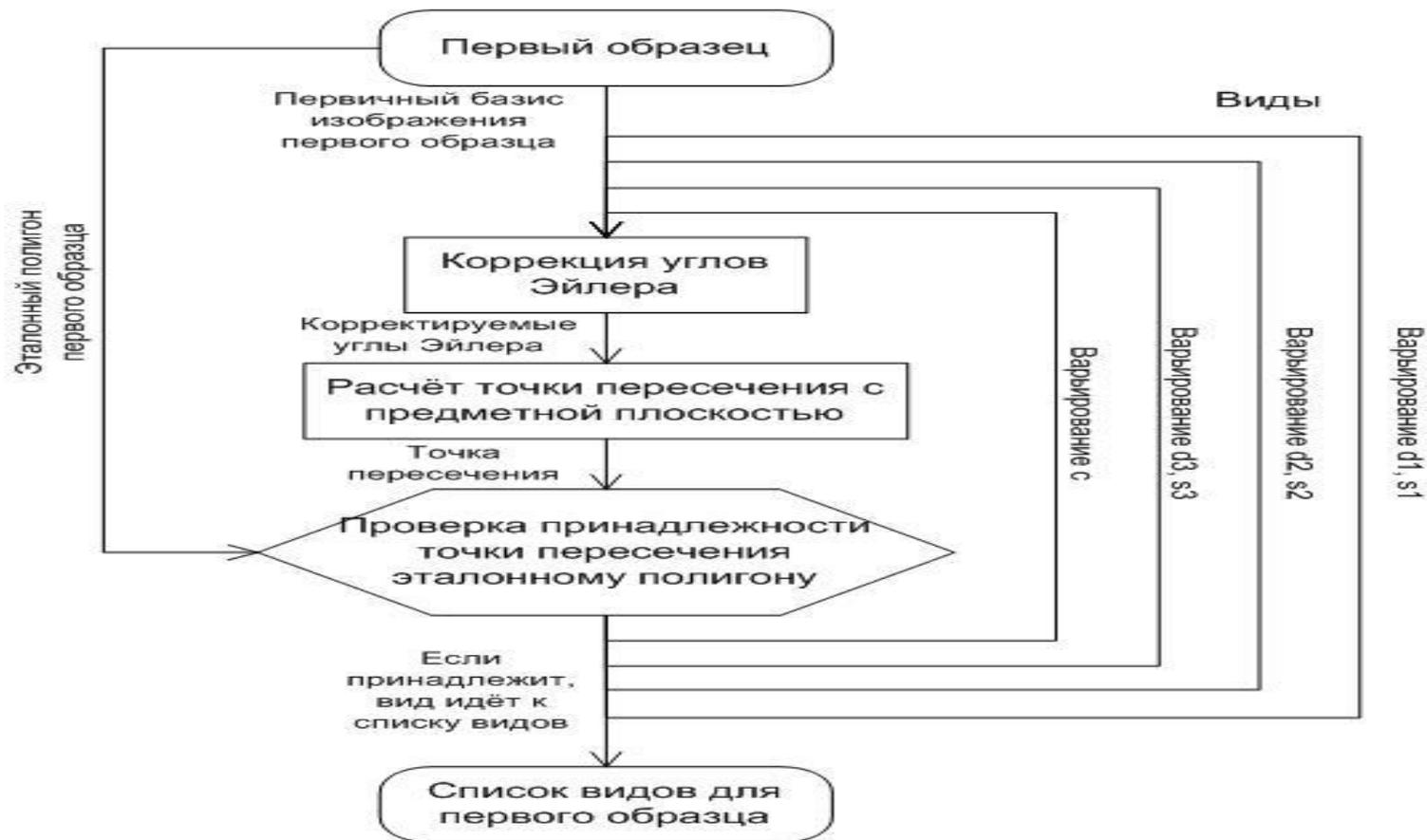


Схема получения видов по первичным базисам для остальных образцов

$$v = \{d, s, c\} \quad v \in V$$

V – список видов

d – вектор смещений на

«прямые» углы углов Эйлера

$$d_k \in \left\{ -2\pi, -\frac{3\pi}{2}, -\pi, -\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, 2\pi \right\}, k = 1..3$$

s – вектор направлений смещений углов

$$s_k \in \{-1, 1\}, k = 1..3$$

c – вектор порядков углов

$$c_k \in \{1, 2, 3\}, c_1 \neq c_2 \neq c_3 \neq c_1.$$

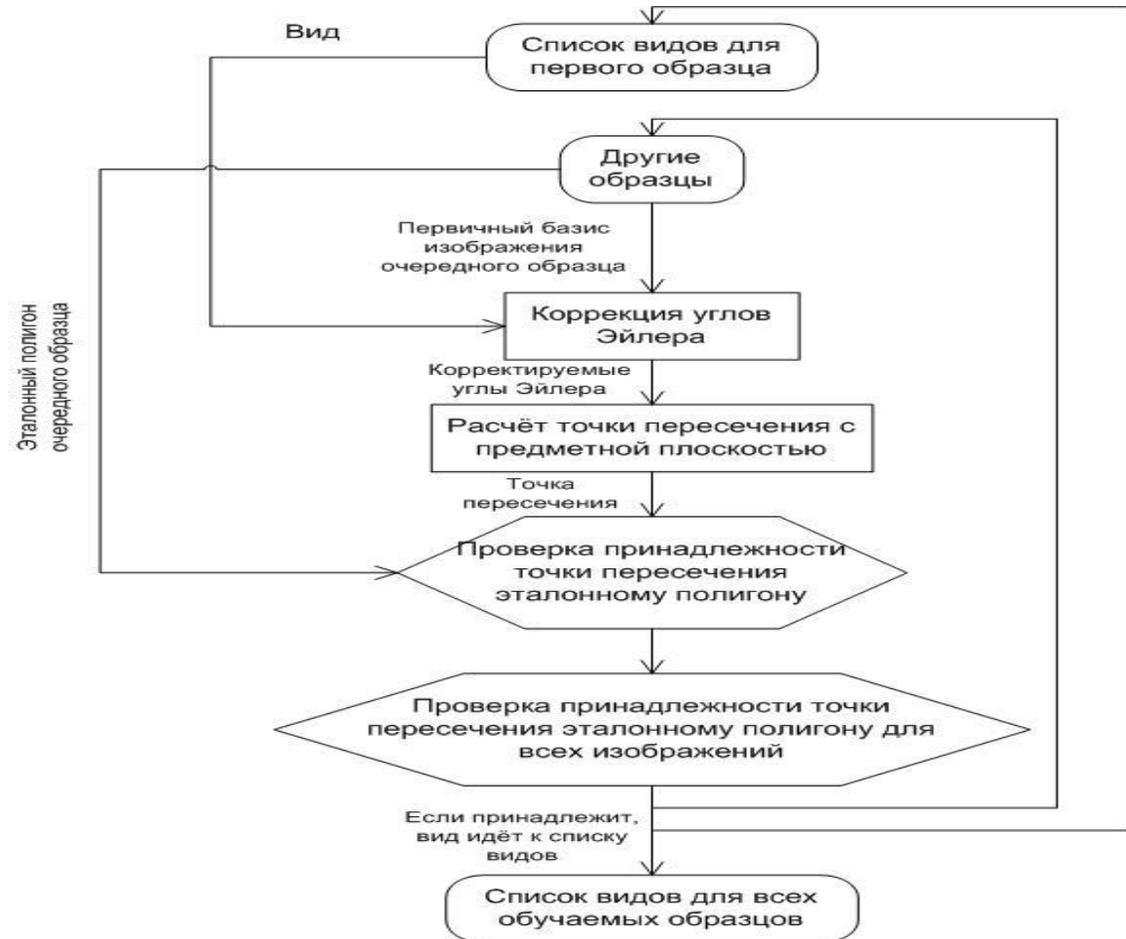
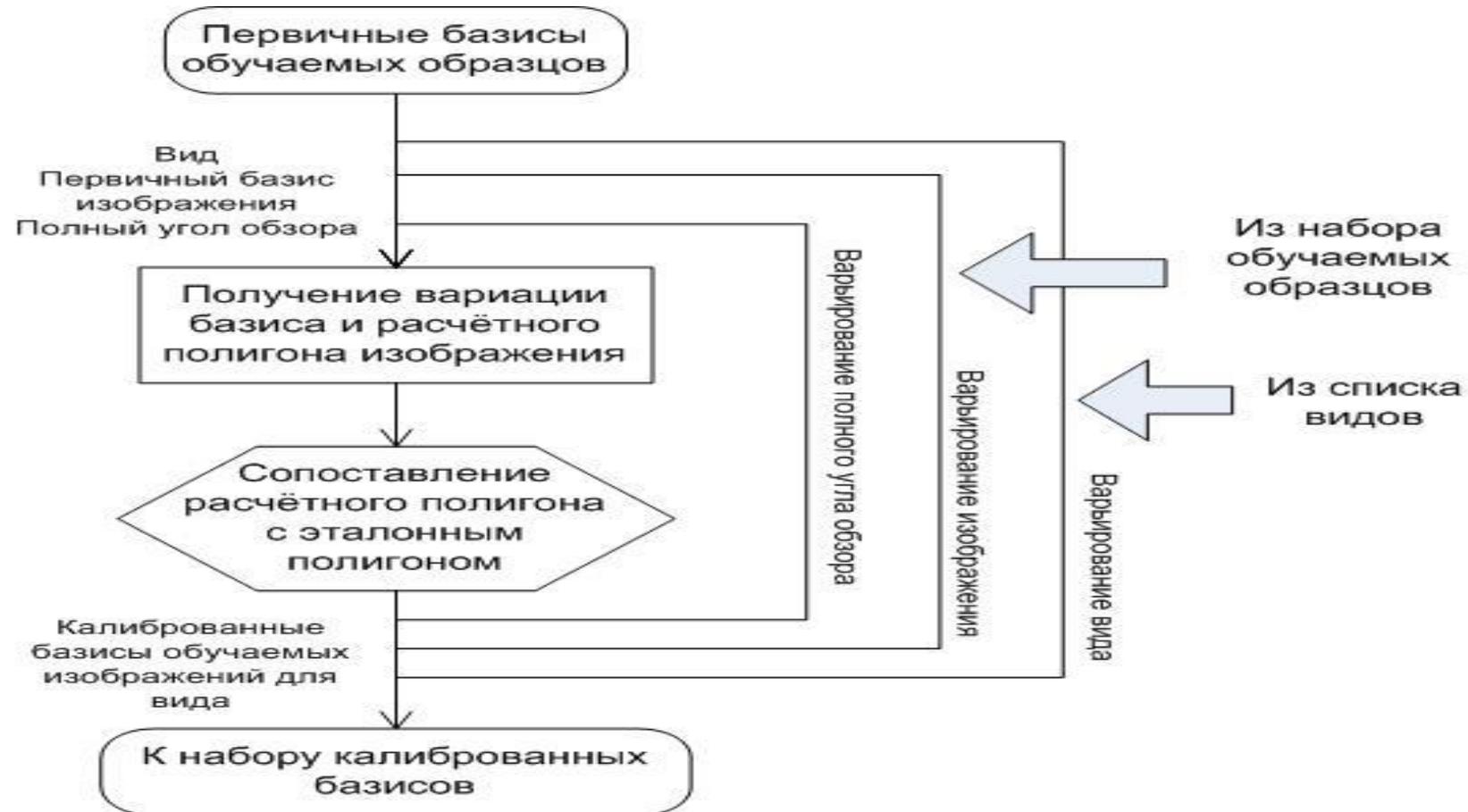
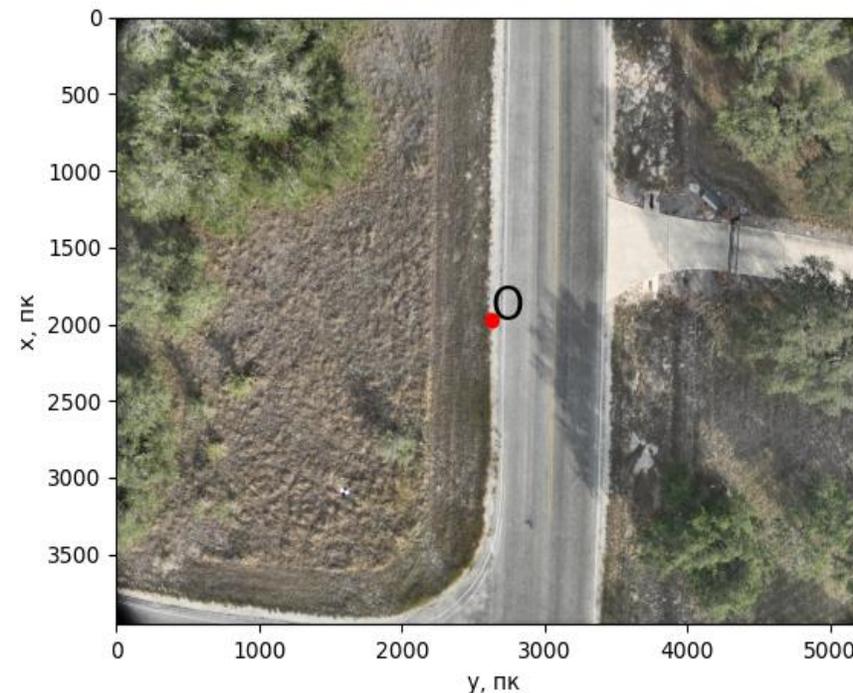


Схема расчёта калибровочных базисов обучаемых изображений по первичным базисам и видам



Набор обучаемых образцов

i	ID изображения I^i	$\varphi_1^i, \varphi_2^i, \varphi_3^i, \varphi_4^i$	$\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i, \lambda_4^i$
1	DJI_20221115144137_0005_V	29.88868967	98.54838399
		29.88828351	98.54838175
		29.88828546	98.54791568
		29.88869161	98.54791791
2	DJI_20221115144142_0008_V	29.88868595	98.54808601
		29.88827971	98.54808459
		29.88828095	98.54761843
		29.88868719	98.54761985
3	DJI_20221115144145_0010_V	29.88868208	98.54788869
		29.88827587	98.54788645
		29.88827817	98.54742073
		29.88868367	98.54742296



Изображение 1-го обучаемого образца

<https://support.virtual-surveyor.com/support/solutions/articles/1000310553-download-sample-datasets>

Первичный набор метаданных

№	Обозначения	Значения	Ter
1	s_x	3956 пк	ExifImageHeight
2	s_y	5280 пк	ExifImageWidth
3	f	12.29 мм	FocalLength
4	f_m	24 мм	FocalLengthIn35mmFilm
5	φ_S	[29.0, 53.0, 18.5551] град	GPSLatitude
6	λ_S	[98.0, 32.0, 53.3392] град	GPSLongitude
7	Z_S	394.429 м	AbsoluteAltitude
8	Z'_S	45.015 м	RelativeAltitude
9	γ	-89.5 град	GimbalYawDegree
10	ϑ	-90.0 град	GimbalPitchDegree
11	ψ	180.0 град	GimbalRollDegree

*Первичный набор метаданных
(для 1-го обучаемого образца)*



№	B^1	B^2	B^3
1	0, 0	0, 0	0, 0
2	3956, 5280	3956, 5280	3956, 5280
3	29.888487527777777 98.54814977777778	29.888483416666666 98.54785216666666	29.888479916666665 98.54765394444445
4	456371.22165586567 3306514.7000242453 394.429	456342.483470789 3306514.3574492577 394.434	456323.34222900425 3306514.044904919 394.381
5	45.015	45.023	44.981
6	0.01229	0.01229	0.01229
7	-1.562069680534925 -1.5707963267948966 3.141592653589793	-1.5638150097869192 -1.5707963267948966 3.141592653589793	1.5795229730548683 -1.5690509975429023 0.0
8	0.4636476090008061 0.6435011087932844	0.4636476090008061 0.6435011087932844	0.4636476090008061 0.6435011087932844
9	[[1.2192567064669045e-16, -6.229870079406139e-17, -1.0], [0.9999619230641713, -0.008726535498373897, 1.2246467991473532e-16], [-0.008726535498373897, -0.9999619230641713, 6.123233995736766e-17]]	[[1.2203421663297608e-16, -6.20858055762272e-17, -1.0], [0.9999756307053947, -0.006981260297961624, 1.2246467991473532e-16], [-0.006981260297961624, -0.9999756307053947, 6.123233995736766e-17]]	[[[-1.523066994133026e-05, -0.0017452619091420732, 0.9999984769132877], [0.9999619230641713, -0.008726535498373997, 0.0], [0.008726522207103736, 0.9999604000354535, 0.0017453283658982615]]
10	47	47	47

Первичные базисы обучаемых образцов

Расчёт видов и калибровочных базисов

Номер вида	d	s	c
1	$-\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}$	-1, -1, -1	0, 1, 2
2	$-\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}$	-1, -1, -1	1, 0, 2
3	$-\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}, 0$	-1, -1, -1	0, 2, 1
4	$-\frac{\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}, -\frac{3\pi}{2}$	-1, -1, -1	1, 0, 2

Виды, рассчитанные по обучаемым образцам

№	B^1	B^2	B^3
1	1978.0, 2628.480534115393	1978.0, 2630.784511712388	1977.9774044399742, 2628.480551626346
6	1	1	1
7	6.283185307179586, 3.1328660073298216, 1.5707963267948966	6.283185307179586, 3.134611336581816, 1.5707963267948966	6.281439977927592, -0.008726646259971771, 4.71238898038469
8	0.4636476090008061 0.6435011087932844	0.4636476090008061 0.6435011087932844	0.4636476090008061 0.6435011087932844
9	[[1.8369935141198218e-16, -1.0, -5.343461882864711e- 19], [-0.9999619230641713, -1.8368769371258616e-16, - 0.008726535498373959], [0.008726535498373959, 2.1373847531458845e-18, - 0.9999619230641713]]	[[1.8369851206103478e-16, -1.0, -4.2747890389566373e-19], [-0.9999756307053947, -1.8369105111637583e-16, -0.006981260297961684], [0.006981260297961684, 1.7099156155826549e-18, -0.9999756307053947]]	[[[-0.0017453283658986289, 0.9999984769132877, - 1.6030385648594314e-18], [-0.9999604000354535, - 0.0017452619091424405, - 0.008726535498374058], [- 0.008726522207103796, - 1.5230669941331968e-05, 0.9999619230641713]]

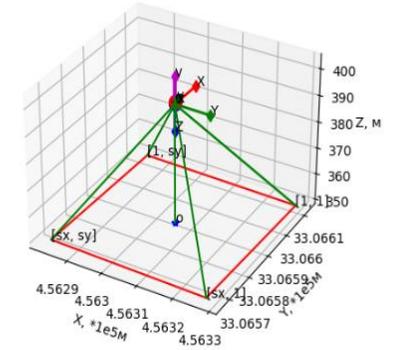
Калибровочные базисы обучаемых образцов для вида 4

Расчёт калибровочного базиса для тестового образца

№	Обозначение	Значение
1	x_0, y_0	1975.4108014024496, 2640.0000001910935
2	s_x, s_y	3956, 5280
3	φ_S, λ_S	29.88916363888889, 98.54746502777778
4	X_S, Y_S, Z_S	[456305.3992197406, 3306589.8785657454, 394.384
5	Z'_S	44.996
6	f	0.01229
7	γ, ϑ, ψ	4.71238898038469, 3.139847324337799, 3.115412714809878
8	t_x, t_y	0.4636476090008061, 0.6435011087932844
9	A	[[0.02617694830787324, 0.9996558024107687, 0.001744730285457878], [0.9996573249755573, -0.0261769084381111, 4.5687370414385584e-05], [-3.206116195137692e-19, 0.0017453283658983227, -0.9999984769132877]]
10	n_3	47



Изображение и главная точка



Ракурс съёмки

На примере тестового образца ID DJI_20221115144415_0107_V, для вида 4

Расчёт картографических и географических координат по матричным координатам

$$x_A = 2142 \text{ пк}, y_A = 2216 \text{ пк}; x_B = 2222 \text{ пк}, y_B = 3113 \text{ пк}$$

$$Z_A = Z_B = Z_S - Z'_S = 349.388 \text{ м}$$



$$X_A = 456302.853 \text{ м}, Y_A = 3306594.19 \text{ м}; X_B = 456292.643 \text{ м}, Y_B = 3306593.774 \text{ м}.$$

$$(\varphi_A, \lambda_A) = K^{-1}(X_A, Y_A, n_3) = (29.8892025 \text{ гр}, 98.5474385 \text{ гр}.)$$

$$(\varphi_B, \lambda_B) = K^{-1}(X_B, Y_B, n_3) = (29.8891983 \text{ гр}, 98.5473328 \text{ гр}.)$$

Выводы

- В работе представлен алгоритм калибровки фотограмметрических параметров для возможности практического применения фотограмметрической модели преобразования двухмерных координат точек снимка в трёхмерные координаты точек объекта. Условно введены понятия базиса изображения (набор необходимых фотограмметрических параметров изображения для расчёта трёхмерных координат) и вида (корректирование направления на изображаемую поверхность, заданного углами Эйлера).
- Алгоритм включает следующие процедуры: извлечение первичного набора метаданных для обучаемых образцов; расчёт первичных базисов; расчёт видов по первичным базисам; на базе полученных видов расчёт калибровочных базисов образцов. Далее по тестовому изображению с теми же техническими характеристиками съёмочного оборудования рассчитывается калибровочный базис, по которому уже рассчитываются трёхмерные координаты по координатам матрицы изображения.