

ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ ФОКУСНОЇ ВІДДАЛІ ЦИФРОВИХ НЕМЕТРИЧНИХ ЗНІМАЛЬНИХ КАМЕР

© Глотов В., Пащетник О., 2009

В статье приводятся особенности определения и анализ необходимой точности фокусного расстояния цифровых съемочных камер. Делаются соответствующие выводы с целью повышения точности координат точек объектов, которые исследуются.

The peculiarities of determination of the digital surveying cameras focal distances and its necessary accuracy is shown. The proper conclusions that are made are aimed at increasing of objects points accuracy, which are under research.

Постановка проблеми. Процес впровадження цифрових неметричних камер у наземне цифрове знімання набув на сьогодні достатнього широкого розповсюдження. Однак, їх поява виявила не тільки багато спрощень у всіх видах робіт, але і немало проблем, що вимагають розв'язання. Однією з таких проблем є визначення точності фокусної віддалі знімальних камер, так як її значення суттєво впливає на точність визначення координат точок об'єктів, що підлягають зніманню [1, 3].

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Вирішення проблеми точності та метричності цифрових знімальних систем, які застосовують для короткобазисного знімання дасть змогу значно розширити діапазон застосування стереофотограмметричного методу у різних галузях науки і техніки (військовій справі, архітектурних обмірах, медицині тощо).

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми. Питання дослідження та аналізу впливу похибок елементів внутрішнього орієнтування при короткобазисному зніманні висвітлені авторами у ряді праць [4, 5].

Крім того, сьогодні у сучасній фаховій літературі також достатньо велику увагу приділяють питанням калібрування і дослідження неметричних та високоточних знімальних систем. Так, наприклад, в матеріалах Пекінського світового конгресу фотограмметристів, який відбувся у 2008 році, були опубліковані роботи з цієї тематики. Розглянемо деякі з них. В публікації [9] здійснено роботу щодо перевірки точності шести високоякісних цифрових знімальних камер: Nikon D80, D200, D2X і D3 з 24мм об'єктивами Nikon, Canon EOS 5D з стабілізуючими 35мм об'єктивами Canon та Alpha 12 WA зі спеціальною фіксацією цифрової камери. Всі камери досліджувались за допомогою спецтесту, що був спроектований та розроблений авторами відповідно VDI/VDE 2634 (Німецького стандарту для оцінки оптичних 3-D вимірювальних систем). Дослідження проводились з метою здійснення оцінки похибки вимірювання довжин (LME), виявлення та встановлення апіорної точності вимірювання знімальних камер. В результаті, після калібрування, встановили, що найменша LME не перевищує 0,047мм (для електронної оптичної системи Canon EOS 5D).

Новий метод калібрування цифрових знімальних камер, оснований на рідкому кристалічному дисплеї (LCD - Liquid Crystal Display), представлений в роботі [10]. Для розрахунку елементів орієнтування камер (Kodak DC290; Kodak DCS Pro SLR/n) автори застосували 2D пряме лінійне перетворення (2D-DLT - Direct Linear Transformation).

Використовуючи стандартні методи калібрування, в праці [8] досліджувалась та оцінювалась цифрова неметрична знімальна камера Olympus E-510 SLR. Описано процес моделювання з ANNs, визначено елементи орієнтування камери та якісно проаналізовано результати досліджень при різних значеннях фокусних віддалей ($f = 14\text{мм}$ і 42мм).

Невирішені частини загальної проблеми. Актуальною залишається проблема підвищення точності визначення координат точок об'єктів при зніманні неметричними цифровими камерами.

Постановка завдання. Визначити необхідну точність фокусної віддалі для цифрових неметричних знімальних камер та провести аналіз отриманих значень.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення точності визначення координат точок об'єктів при зніманні неметричними цифровими камерами, постає питання визначення точності фокусної віддалі. З цією метою розглянемо загальний випадок знімання без будь-яких спрощень, скориставшись формулами [6].

Визначивши з формул f , маємо:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{X_{\phi}(b_1x + b_3z) - Y_{\phi}(a_1x + a_3z)}{Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2}, \\ f(z) &= \frac{Z_{\phi}(b_1x + b_3z) - Y_{\phi}(c_1x + c_3z)}{Y_{\phi}c_2 - Z_{\phi}b_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де Y_{ϕ} - відстань до об'єкту знімання ($Y_{\phi}=1\text{м}; 1.5\text{м}; 2\text{м}; 2.5\text{м}; 3\text{м}$); X_{ϕ} , Z_{ϕ} - значення координат знімка (визначаються за формулами [5]); x, z - абсциса та апліката цифрової камери; f - фокусна віддаль (в нашому випадку $f=18\text{мм}, 35\text{мм}$ та 53мм для камери Canon EOS 350D з розміром ПЗЗ-матриці $22,2 \times 14,8\text{мм}$; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ - напрямні косинуси [7].

Для отримання формули середньоквадратичної похибки величини знайдемо часткові похідні:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial X_{\phi}} &= \frac{Y_{\phi}a_2(b_1x + b_3z) - Y_{\phi}b_2(a_1x + a_3z)}{(Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2)^2}, \\ \frac{\partial f}{\partial Y_{\phi}} &= \frac{X_{\phi}b_2(a_1x + a_3z) - X_{\phi}a_2(b_1x + b_3z)}{(Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2)^2}, \\ \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{X_{\phi}b_1 - Y_{\phi}a_1}{Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2}, \\ \frac{\partial f}{\partial z} &= \frac{X_{\phi}b_3 - Y_{\phi}a_3}{Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2}, \\ \frac{\partial f}{\partial \alpha} &= \frac{(X_{\phi}^2 + Y_{\phi}^2)[x(b_2a_1 - a_2b_1) + z(a_3b_2 - a_2b_3)]}{(Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2)^2}, \\ \frac{\partial f}{\partial \omega} &= \frac{(Y_{\phi} \sin \alpha - X_{\phi} \cos \alpha)[(xc_1 + zc_3)(Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2) + c_2(X_{\phi}(b_1x + b_3z) - Y_{\phi}(a_1x + a_3z))]}{Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2}, \\ \frac{\partial f}{\partial \chi} &= \frac{X_{\phi}(xb_3 - zb_1) - Y_{\phi}(xa_3 - za_1)}{Y_{\phi}a_2 - X_{\phi}b_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Враховуючи значення похідних, отримаємо

$$\begin{aligned}
m_{f(x)} = & \left(\left(\frac{Y_{\phi} a_2 (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} b_2 (a_1 x + a_3 z)}{(Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{x_{\phi}}^2 + \left(\frac{X_{\phi} b_2 (a_1 x + a_3 z) - X_{\phi} a_2 (b_1 x + b_3 z)}{(Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{y_{\phi}}^2 + \right. \\
& + \left(\frac{X_{\phi} b_1 - Y_{\phi} a_1}{Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{X_{\phi} b_3 - Y_{\phi} a_3}{Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2} \right)^2 m_z^2 + \left(\frac{(X_{\phi}^2 + Y_{\phi}^2)[x(b_2 a_1 - a_2 b_1) + z(a_3 b_2 - a_2 b_3)]}{(Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{\alpha}^2 + \\
& + \left(\frac{(Y_{\phi} \sin \alpha - X_{\phi} \cos \alpha)[(x c_1 + z c_3)(Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2) + c_2 (X_{\phi} (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} (a_1 x + a_3 z))]}{Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2} \right)^2 m_{\omega}^2 + \\
& \left. + \left(\frac{X_{\phi} (x b_3 - z b_1) - Y_{\phi} (x a_3 - z a_1)}{Y_{\phi} a_2 - X_{\phi} b_2} \right)^2 m_{\chi}^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \tag{3}
\end{aligned}$$

Перейдемо тепер до визначення m_f через друге рівняння формул (1).

$$f(z) = \frac{Z_{\phi} (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} (c_1 x + c_3 z)}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2} \tag{4}$$

По аналогії з попереднім ходом рішення знайдемо часткові похідні

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial Y_{\phi}} &= \frac{Y_{\phi} b_2 (c_1 x + c_3 z) - Z_{\phi} c_2 (b_1 x + b_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2}, \\
\frac{\partial f}{\partial Z_{\phi}} &= \frac{Y_{\phi} c_2 (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} b_2 (c_1 x + c_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2}, \\
\frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{Z_{\phi} b_1 - Y_{\phi} c_1}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2}, \\
\frac{\partial f}{\partial z} &= \frac{Z_{\phi} b_3 - Y_{\phi} c_3}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2}, \\
\frac{\partial f}{\partial \alpha} &= \frac{-Z_{\phi} (a_1 x + a_3 z)(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2) - Z_{\phi}^2 a_2 (b_1 x + b_3 z) + Y_{\phi} Z_{\phi} (c_1 x + c_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2}, \\
\frac{\partial f}{\partial \omega} &= \frac{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2 (x \sin \chi + z \cos \chi) - (Y_{\phi} \cos \omega + Z_{\phi} c_2 \cos \alpha)(Z_{\phi} (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} (c_1 x + c_3 z))}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2}, \\
\frac{\partial f}{\partial \chi} &= \frac{Z_{\phi} (x b_3 - z b_1) + Y_{\phi} (z c_1 - x c_3)}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Враховуючи значення похідних отримаємо:

$$\begin{aligned}
m_{f(z)} = & \left(\left(\frac{Y_{\phi} b_2 (c_1 x + c_3 z) - Z_{\phi} c_2 (b_1 x + b_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{Y_{\phi}}^2 + \left(\frac{Y_{\phi} c_2 (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} b_2 (c_1 x + c_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{Z_{\phi}}^2 + \right. \\
& + \left(\frac{Z_{\phi} b_1 - Y_{\phi} c_1}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2} \right)^2 m_x^2 + \left(\frac{Z_{\phi} b_3 - Y_{\phi} c_3}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2} \right)^2 m_z^2 + \left(\frac{Y_{\phi} Z_{\phi} (c_1 x + c_3 z) - Z_{\phi} (a_1 x + a_3 z) (Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2) -}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2} \right. \\
& \left. \left. - \frac{Z_{\phi}^2 a_2 (b_1 x + b_3 z)}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2} \right)^2 m_{\alpha}^2 + \left(\frac{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2 (x \sin \chi + z \cos \chi) - (Y_{\phi} \cos \omega + Z_{\phi} c_2 \cos \alpha) \times}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)^2} \right. \right. \\
& \left. \left. \times \frac{(Z_{\phi} (b_1 x + b_3 z) - Y_{\phi} (c_1 x + c_3 z))}{(Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2)} \right)^2 m_{\omega}^2 + \left(\frac{Z_{\phi} (x b_3 - z b_1) + Y_{\phi} (z c_1 - x c_3)}{Y_{\phi} c_2 - Z_{\phi} b_2} \right)^2 m_{\chi}^2 \right)^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \quad (6)$$

Підрахуємо за формулами (3), (6) значення середньої квадратичної похибки $m_{f(x)}$ і $m_{f(z)}$ при різних значеннях координат X_{ϕ} , Z_{ϕ} , для $x_0 = z_0 = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 \text{ мм}$, відстані до об'єкту знімання Y_{ϕ} та різних значеннях фокусної віддалі f . Середні квадратичні похибки кутових елементів зовнішнього орієнтування складають $3''$ [2, 3]; $x_{\max} = 10 \text{ мм}$, $z_{\max} = 7 \text{ мм}$ (відповідно розміру ПЗЗ-матриці), $m_{x_1} = m_{z_1} = 0,005 \text{ мм}$ (точність виміру координат на ЦФС).

Розрахунок середніх квадратичних похибок елементів внутрішнього орієнтування знімальних камер для нормального випадку знімання та для планового (знімання «з руки») наведено в таблицях 1-6; в чисельнику при $\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$, а в знаменнику відповідно при $\alpha = \omega = \chi = 3^\circ$.

В зв'язку з обмеженням викладення отриманих результатів дослідження в матеріалах збірника, на рисунку представлені відповідні графічні залежності вищезазначених величин лише для максимальних та мінімальних середньоквадратичних похибок різних значень фокусних віддалей.

Таблиця 1
Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(x)}$ при $f = 18 \text{ мм}$
(Значення дано в мм)

$\begin{matrix} x_0 (\text{мм}) \\ Y_{\phi} (\text{м}) \end{matrix}$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	0,076	0,079	0,082	0,085	0,088
	3	0,073	0,076	0,079	0,082	0,085
1,5	0	0,051	0,053	0,055	0,057	0,059
	3	0,049	0,051	0,053	0,055	0,057
2	0	0,039	0,040	0,042	0,043	0,045
	3	0,037	0,039	0,040	0,042	0,043
2,5	0	0,032	0,033	0,034	0,035	0,036
	3	0,030	0,032	0,033	0,034	0,035
3	0	0,027	0,028	0,029	0,030	0,031
	3	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030

Таблиця 2
Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(x)}$ при $f = 35\text{мм}$
(Значення дано в мм)

$x_0(\text{мм})$ $Y_\phi(\text{м})$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	0,260	0,271	0,283	0,295	0,306
	3	0,259	0,270	0,282	0,294	0,305
1,5	0	0,174	0,181	0,189	0,197	0,205
	3	0,174	0,181	0,189	0,197	0,205
2	0	0,131	0,136	0,142	0,148	0,154
	3	0,131	0,136	0,142	0,148	0,154
2,5	0	0,105	0,110	0,114	0,119	0,124
	3	0,105	0,110	0,114	0,119	0,124
3	0	0,088	0,092	0,096	0,100	0,104
	3	0,088	0,092	0,096	0,100	0,104

Таблиця 3
Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(x)}$ при $f = 53\text{мм}$
(Значення дано в мм)

$x_0(\text{мм})$ $Y_\phi(\text{м})$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	0,582	0,608	0,635	0,664	0,695
	3	0,590	0,616	0,643	0,673	0,705
1,5	0	0,390	0,407	0,422	0,441	0,462
	3	0,394	0,411	0,429	0,449	0,470
2	0	0,294	0,305	0,318	0,331	0,346
	3	0,296	0,309	0,323	0,337	0,351
2,5	0	0,236	0,245	0,255	0,266	0,277
	3	0,237	0,248	0,259	0,271	0,283
3	0	0,196	0,204	0,212	0,222	0,231
	3	0,199	0,207	0,216	0,225	0,236

Таблиця 4
Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(z)}$ при $f = 18\text{мм}$
(Значення дано в мм)

$x_0(\text{мм})$ $Y_\phi(\text{м})$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	0,136	0,144	0,153	0,162	0,173
	3	0,113	0,120	0,128	0,136	0,145
1,5	0	0,091	0,096	0,102	0,109	0,116
	3	0,076	0,081	0,086	0,091	0,097
2	0	0,069	0,073	0,077	0,082	0,087
	3	0,058	0,061	0,065	0,069	0,074
2,5	0	0,055	0,059	0,062	0,066	0,071
	3	0,047	0,049	0,052	0,056	0,059
3	0	0,047	0,049	0,053	0,056	0,059
	3	0,039	0,042	0,044	0,047	0,050

Таблиця 5

Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(z)}$ при $f = 35\text{мм}$
(Значення дано в мм)

$x_0 (мм) \backslash Y_\phi (м)$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	0,511	0,543	0,573	0,612	0,655
	3	0,448	0,474	0,506	0,537	0,571
1,5	0	0,340	0,362	0,382	0,408	0,437
	3	0,300	0,317	0,338	0,359	0,384
2	0	0,256	0,271	0,289	0,307	0,326
	3	0,225	0,239	0,253	0,270	0,288
2,5	0	0,205	0,217	0,231	0,246	0,262
	3	0,181	0,192	0,203	0,216	0,231
3	0	0,172	0,182	0,193	0,206	0,219
	3	0,151	0,160	0,170	0,181	0,193

Таблиця 6

Розрахунок точності фокусних віддалей $m_{f(z)}$ при $f = 53\text{мм}$
(Значення дано в мм)

$x_0 (мм) \backslash Y_\phi (м)$	$\alpha = \omega = \chi = 0^\circ$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0	1,172	1,248	1,309	1,399	1,498
	3	1,052	1,114	1,181	1,254	1,335
1,5	0	0,782	0,824	0,878	0,938	0,993
	3	0,699	0,739	0,784	0,832	0,895
2	0	0,587	0,620	0,661	0,700	0,750
	3	0,523	0,554	0,591	0,628	0,668
2,5	0	0,470	0,497	0,527	0,563	0,598
	3	0,421	0,445	0,472	0,501	0,537
3	0	0,390	0,415	0,440	0,468	0,501
	3	0,351	0,371	0,395	0,420	0,447

Висновки.

1. Точності визначення фокусних віддалей цифрових неметричних камер, які застосовуються у короткобазисній фотограмметрії, дало можливість встановити відповідні допуски та вимоги щодо подальшої можливості впровадження знімальної апаратури у наземне цифрове знімання та опрацювання цифрових зображень.

2. Похибки у фокусній віддалі в першу чергу залежать від точності визначення координат точок об'єктів, що підлягають зніманню. Однак, як видно з таблиць 1, 2 і 3 для короткофокусних камер ($f = 18\text{мм}$; 35мм ; 53мм) при розрахунку середньої квадратичної похибки $m_{f(x)}$ у випадку нормального та для планового знімання похибки фокусних віддалей мають постійні значення.

3. Вплив кутів нахилу (α, ω, χ) однозначно впливають на m_f від значення координати X_ϕ . В той же час, у випадку залежності m_f від Z_ϕ картина значно змінюється: вимоги до точності визначення фокусної віддалі при нормальному та плановому випадку знімання в 2-2,5 рази вища. Як видно з таблиць 4-6 при розрахунку середньої квадратичної похибки $m_{f(z)}$ точність в 1,5 - 2 рази вища.

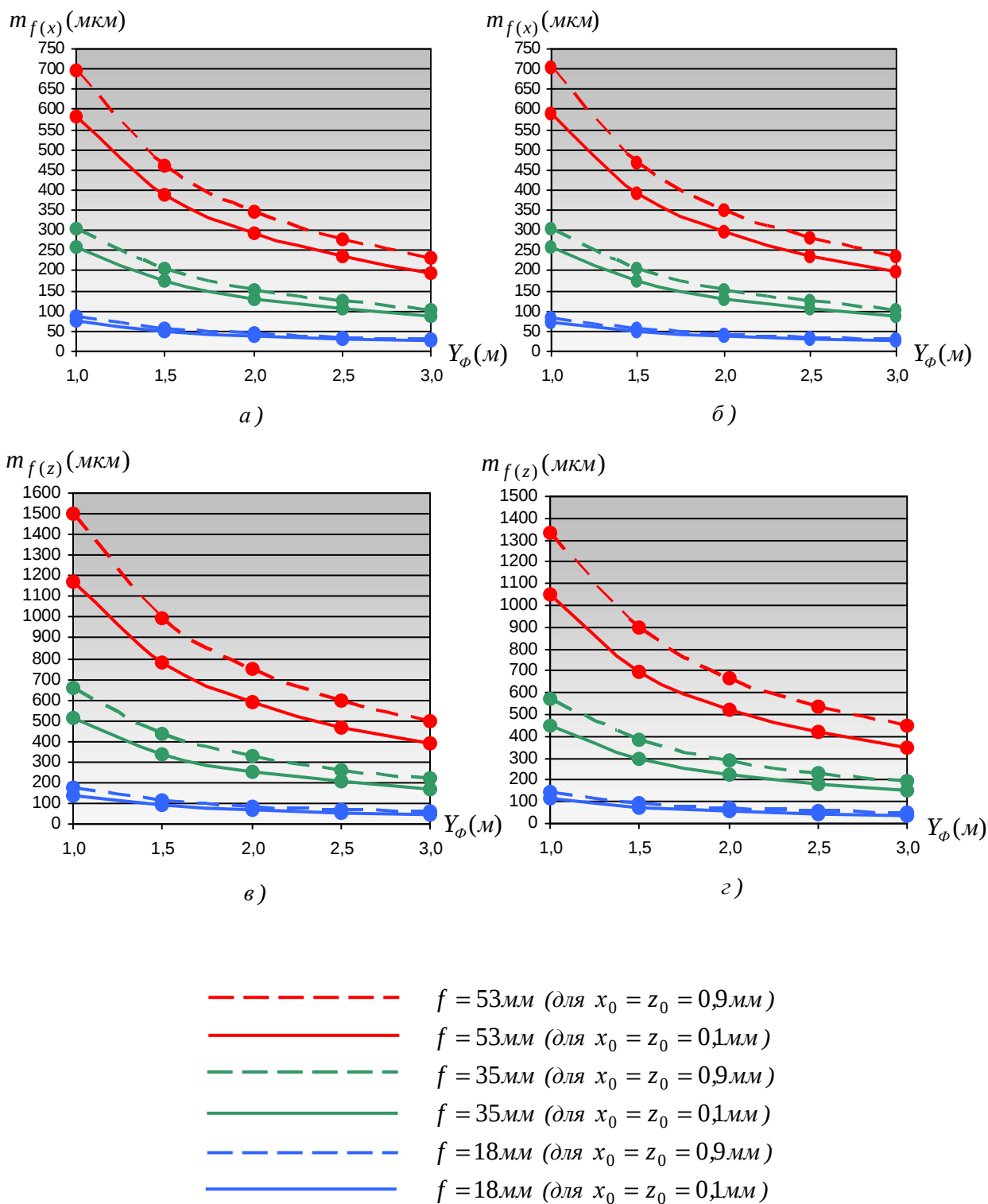


Рис. Графіки значень середніх квадратичних похибок фокусних віддалей:

(а) – при $m_{f(x)}(\alpha = \omega = \chi = 0^\circ)$; (б) – при $m_{f(x)}(\alpha = \omega = \chi = 3^\circ)$;

(в) – при $m_{f(z)}(\alpha = \omega = \chi = 0^\circ)$; (з) – при $m_{f(z)}(\alpha = \omega = \chi = 3^\circ)$

4. Зі збільшенням відстані від об'єкту точність визначення фокусної віддалі повинна зростати.

5. У подальшому планується, на підставі цих досліджень, розробити способи визначення елементів внутрішнього орієнтування для цифрових неметричних знімальних систем.

1. Глотов В. Особливості визначення фокусної відстані цифрових фототеодолітних камер // Міжвідомч. наук. – техн. збірник «Геодезія, картографія і аерофотознімання».- 2003. - №63. – С. 112–127. 2. Глотов В. М., Майоров Г. Є. Аналіз метричних властивостей цифрових знімальних систем // Міжвідомч. наук. – техн. збірник «Геодезія картографія і аерофотознімання» - Л. – 2000. - №60.- С. 102–106. 3. Глотов В. М., Майоров Г. Є. Метод калібрування цифрових камер// Матеріали 2-ї Міжнародної наук.-практ. Конференції «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика –сучасні технології та перспективи розвитку, Львів-Краків, -2000. С.163-169. 4. Глотов В., Пацетник О. Аналіз впливу похибок елементів внутрішнього орієнтування при короткобазисному стереофотограмметричному зніманні // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва: Зб. наук. пр. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2008.– Випуск II (16). – С. 117–122. 5. Глотов В., Пацетник О. Визначення апіорної точності планових елементів внутрішнього орієнтування цифрової камери Canon EOS 350D. // Збірн.наук. праць «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». - Л. – 2009, - 1-й вип. – С. 217-221. 6. Лобанов А.Н. Фототопография. Наземная стереофотограмметрическая съемка. – М.: Недра, 1968. – 268 с. 7. Рапасов П. Н. Составление карт методом комбинированной наземной и воздушной стереофотограмметрической съемки // М., Геодезиздат, 1958. – С. 26–100. 8. Kavzoglu T., Karsli F. Calibraton of a digital single lens reflex (SLR) camera using artificial neural networks // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing 2008. – С. 27–32. 9. Rieke-Zapp D. H.,Tecklenburg W., Peipe J., Hastedt H., Luhmann T. Performance evaluation of several high-quality digital cameras // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008. – С. 7–12. 10.Zongqian ZHAN Camera calibration based on liquid crystal display (LCD) // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing 2008. – С. 15–20.