

О.М. Гончерюк, асп.кафедри інженерної геодезії
Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ НЕМЕТРИЧНИХ КАМЕР ЗА ПЛОЩИННИМИ ТЕСТОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ

У роботі виконано детальний аналіз і практичні експериментальні дослідження програмних засобів для калібрування цифрових неметричних камер. Запропоновано класифікацію програмних засобів, в основу якої покладено критерії вартості, моделі врахування дисторсії об'єктива, стабільності і точності обчислювального алгоритму. Оскільки цифрові неметричні камери використовують переважно для вирішення прикладних локальних завдань, найбільш ефективним є використання недорогого спеціалізованого програмного забезпечення. В роботі досліджено умовно дорогі програми *Australis* (Австралія), *PhotoScan Pro* (Ізраїль), *PhotoModeler* (США) та *3D Image Master* (Японія). Кожна з цих програм має певні переваги і недоліки, найефективнішою виявилася програма *PhotoModeler*. Найбільш цікаві результати були отримані в процесі дослідження дешевих програмних засобів: *XSIGNO Photogrammetry* (Японія), *GML Camera Calibration* (Росія), *Camera Calibration Tools* (Великобританія), *CameraCalibrator* (фірма *Photometrix*, розробник *iWitness* и *Australis*), *Image Master Calib* (фірма *TOPCON*), *Agisoft Lens* (фірма *Agisoft*, розробник *PhotoScan Pro*), *Fauncal Matlab*, *Matlab Camera Calibration TOOLBOX*. Загальний аналіз результатів засвідчив, що у калібруванні перевагу слід віддати програмам типу *PhotoModeler*, а за фінансових обмежень – програмам типу *Fauncal* для *Matlab*.

Ключові слова: цифрова фотограмметрія, неметрична камера, калібрування, параметри дисторсії, тестовий об'єкт.

Вступ. Сучасна інженерна геодезія є галуззю знань, в якій знаходять застосування останні досягнення як із суміжних з нею напрямів, таких як вища геодезія, навігація, глобальні навігаційні супутникові системи, фотограмметрія та ін., так і з сучасних технологій в інших галузях – цифрового оброблення зображень і сигналів, комп'ютерного і геометричного моделювання, будівництва та експлуатації будівель і споруд та ін. Результатом такого симбіозу стало виникнення нового напрямку досліджень, який можна назвати *інженерною цифровою фотограмметрією*.

Завданням інженерної цифрової фотограмметрії є вирішення завдань інженерної геодезії засобами фотограмметрії на основі цифрових технологій. На відміну від класичної інженерної (прикладної) фотограмметрії в інженерній цифровій фотограмметрії засобами отримання інформації є не аналогові фототеодоліти або плівкові камери, а цифрові камери будь-якого класу (від цифрових камер мобільних телефонів до професійних цифрових камер вищого класу) або фототахеометри.

Від часу появи цифрових технологій їх застосування значно розширило можливості фотограмметрії [5; 7; 8; 10]. З'явилась можливість в режимі реального часу контролювати якість отриманих фотографічних матеріалів, відпала потреба у фотохімічному процесі, а оперативність оброблення даних зросла в кілька разів. Цифрові технології зумовили появу цілком нових типів вихідної продукції, таких як цифрові ортофотоплани, цифрові тривимірні моделі об'єктів та тривимірні моделі об'єктів з реальною текстурою. Зайве нагадувати, що всі ці типи продукції без проблем безпосередньо інтегруються в системи автоматизованого проектування та геоінформаційні системи для подальшого оброблення, проектування та створення комплексної інформаційної продукції більш високого рівня.

Особливістю сучасної інженерної цифрової фотограмметрії є дуже висока порівнянно з звичайною фотограмметрією, яку часто називають фототопографією, точність визначення координат точок об'єктів. Фактично точність інженерної цифрової фотограмметрії відповідає точності, якої потребують завдання інженерної геодезії: інженерно-геодезичне проектування, виконавчі знімання, спостереження за деформаціями та переміщеннями.

Окремо слід сказати, що сфера застосування інженерної фотограмметрії не обмежується проблематикою, пов'язаною із завданнями будівництва й експлуатації інженерних споруд. Фактично сфера інженерної фотограмметрії розпочинається з об'єктів мікросвіту – це завдання медицини, біології, атомної енергетики, дослідження ґрунтів, поступово переходячи до об'єктів машинобудування, виготовлення окремих деталей машин, літаків, суден і закінчується великими інженерними та промисловими об'єктами, такими як просторові оболонки покриттів, мости, літаки, судна, архітектурні пам'ятки. До кожного з названих типів об'єктів дослідження інженерної цифрової фотограмметрії змінюється відповідно до їх розміру: 0,0005 мм – 5 мм; 0,01 м – 5 м; 5 м – 100 м. За таких умов змінюється точність отримання координат точок об'єктів від 0,00001 до 50 мм. Варто зауважити, що жодна з технологій не працює в такому широкому діапазоні відстаней і точності.

Досягнення такої точності є вельми складним і комплексним завданням, яке потребує врахування величезної кількості факторів, що впливають на кінцеву точність визначення координат окремої точки за допомогою методів інженерної цифрової фотограмметрії. Одним з найбільш суттєвих й одночасно таким, який важко врахувати, є фактор точного визначення внутрішньої геометрії цифрової фотокамери. Технологія визначення параметрів внутрішньої геометрії фотокамери дістала назву калібрування. Внутрішня геометрія камери визначається її елементами внутрішнього орієнтування та моделлю врахування дисторсії об'єктива. Пошук та дослідження оптимального методу визначення внутрішньої геометрії фотокамери залишається одним з основних завдань фотограмметрії.

Нині застосовують чимало програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер. Класифікація та дослідження такого програмного забезпечення є актуальним завданням фотограмметрії.

Аналіз досліджень і публікацій. Безпосередньо питання дослідження програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер ані у вітчизняній, ані у закордонній літературі не досліджено. Варто відмітити, що більшість робіт з калібрування спрямована на пошук моделей врахування дисторсії об'єктива. Такі дослідження наведено у багатьох роботах, зокрема [12; 15; 16]. Цей перелік є скоріше прикладом виконаних досліджень, ніж їх аналізом. Сучасне програмне забезпечення для калібрування ґрунтується не тільки на моделях дисторсії, іншими важливими складовими є алгоритми автоматичного розпізнавання марок, автоматичного орієнтування знімків, стабільність обчислювального алгоритму. З другого боку, результати калібрування залежать від типу тестового об'єкта, який використано для певного типу програмного забезпечення – плоский або просторовий; кодові марки або сітка точок з фіксованим кроком. Таким чином, актуальність роботи не викликає сумнівів, оскільки подібні дослідження, з огляду на викладене, є вкрай потрібними.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз і дослідження програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер за результатами калібрування площинних тестових об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Широке впровадження у сферу фотограмметрії та інженерної фотограмметрії цифрових фотокамер сприяло виникненню та розробленню принципово нових методик та технологій фотограмметричних робіт. Якщо для цифрових аерофотознімальних комплексів або геометрія фотокамери є відомою, або параметри геометрії є достатньо стабільними в часі, то для інженерної цифрової фотограмметрії характерним є використання цифрових неметричних камер. Вартість цифрових аерофотознімальних комплексів та обсяги виконуваних ними робіт дають виробникам змогу використовувати складні багатокомпонентні об'єктиви, високоякісні ПЗЗ-матриці або ПЗЗ-лінійки та високоякісні корпуси для аерофотокамер. У вирішенні прикладних інженерних завдань вартість знімального обладнання дуже часто є одним з вагомих факторів, що дає можливість зменшити вартість робіт, тому для знімання у переважній більшості випадків використовують тільки цифрові неметричні камери або фототахеометри, камери яких також є неметричними. У таких випадках на перше місце виходить завдання з калібрування цифрових неметричних камер.

На теперішній час розроблено величезну кількість варіантів калібрування цифрових фотокамер. Ці варіанти відрізняються за методом калібрування (лабораторне або польове калібрування; самокалібрування), виглядом тестового об'єкта (плоский, просторовий), методом калібрування (метод зон, метод зв'язок, метод прямого лінійного перетворення), типом математичної моделі врахування дисторсії (алгебраїчна або фізична модель) та ін. Отже, актуальним є завдання вибору оптимального програмного забезпечення для калібрування. Спершу спробуємо класифікувати програмне забезпечення.

За своїм призначенням програмні засоби для калібрування можна поділити на три групи.

Перша група. Потужні фотограмметричні програмні комплекси, призначені для вирішення більшості фотограмметричних завдань, зокрема

калібрування. Найбільш відомими є ERDAS Imagine (США / Швейцарія), INPHO (США / Німеччина), PCI (Канада), PHOTOMOD (Росія).

Цей клас програмного забезпечення здебільшого орієнтований на оброблення даних аерофотознімання та космічного знімання. Хоча процедура калібрування передбачена в цих продуктах, проте орієнтовані вони на використання саме метричної знімальної апаратури. Важливим є той факт, що у вирішенні інженерних завдань співвідношення вартості програмного забезпечення до загальної вартості робіт є не на користь першого.

Друга група. Цю групу утворюють три типи програмних засобів, перші призначені для вирішення інженерних завдань в більшості випадків шляхом наземного знімання DigiCad 3D (Іспанія), PHIDIAS (Австрія), iWitness (Австралія), Australis (Австралія), PhotoScan Pro (Ізраїль), Elcovision (Німеччина), PhotoModeler (США). До цієї групи належить програмне забезпечення, розроблене для високоточних фотограмметричних вимірювальних комплексів, таких як V-STARS та AICON, а також програмне забезпечення фірм-виробників фототахеометрів, наприклад 3D Image Master фірми TOPCON. Порівняно з першою групою вартість таких програм є достатньо прийнятною. Орієнтовані вони насамперед на використання цифрових неметричних камер, отже, механізм калібрування в цих програмах є дуже розвиненим.

Третя група. Програмні продукти призначені тільки для калібрування. Ця група поділяється на три підгрупи.

1. Портативні програми, розроблені тільки для калібрування цифрових неметричних камер, типовими прикладами таких програм є Image Iron (Німеччина), XSIGNO Photogrammetry (Японія), GML Camera Calibration (Росія), Camera Calibration Tools (Великобританія) та ін.

2. Програми, розроблені окремо представниками фірм другої групи, наприклад CameraCalibrator (фірма Photometrix, розробник iWitness і Australis), Image Master Calib (фірма TOPCON), Agisoft Lens (фірма Agisoft, розробник PhotoScan Pro).

3. Програми власної розробки, дуже популярні завдяки безоплатному поширенню. Найчастіше такі програми, написані відомими мовами програмування, потребують певних знань користувача. Найбільшого поширення набули програми, написані мовою програмування Matlab, це такі відомі програми, як Faussal та Camera Calibration TOOLBOX. Особливо слід зауважити, що програми третьої групи максимально автоматизовані і калібрування в них складається з 4-5 простих операцій.

У нашій роботі виконано дослідження програм другої групи – Australis (Австралія) [15], PhotoModeler (США) [8] та 3D Image Master (Японія) і програм третьої групи – Agisoft Lens, Faussal та Camera Calibration TOOLBOX.

Як тестові для програм другої групи нами були обрані площинні зображення з п'ятьма опорними марками (рис. 1).

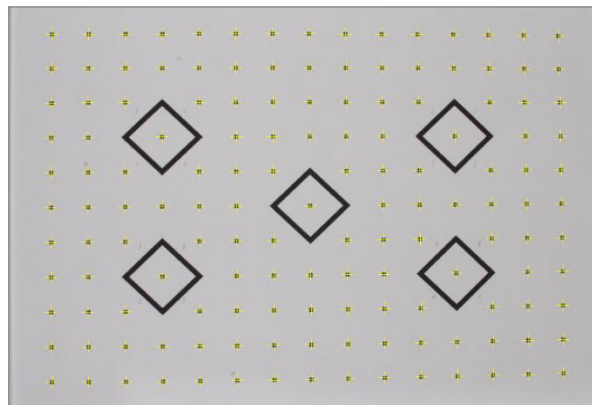


Рис. 1. Тестове зображення

Спочатку калібрування було виконане за допомогою програми 3D Image Master (Японія). Результати калібрування наведено на рис. 2.

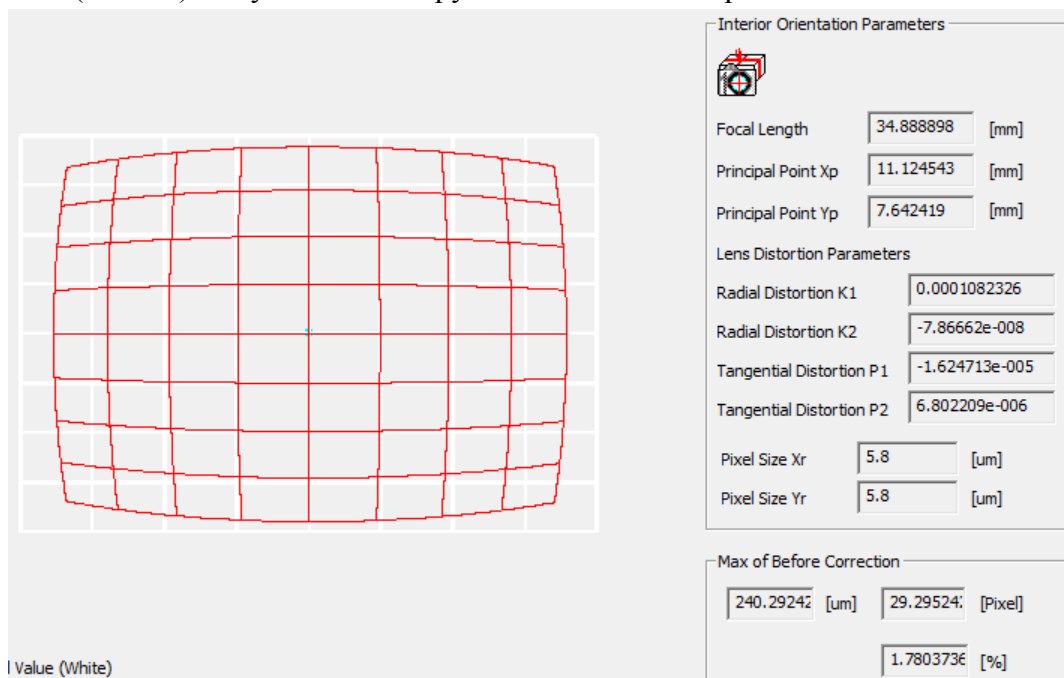


Рис. 2. Параметри калібрування для камери Nikon D200 в програмі 3D Image Master

Розмір тестового зображення – 80x60 см. Кількість калібрувальних точок – 160. Фотографування тестового об’єкта виконано цифровою камерою Nikon D200 з фокусною відстанню 35 мм та розміром матриці 22,4 x 15,0 мм.

У програмі використано модель:

$$\Delta x = \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y};$$

$$\Delta y = \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2).$$

Параметри цієї моделі представлені на рис. 2.

Для вказаних вихідних даних виконаємо калібрування в програмі Australis [13]. Математична модель калібрування програми є такою:

$$\Delta x = \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} + A\bar{y};$$

$$\Delta y = \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + B\bar{x}.$$

У такому разі програма дає змогу побудувати більш розширену модель калібрування. У дослідженні моделей калібрування розглянуто 16 комбінацій різних параметрів. Найбільш цікаві результати отримано для наступних моделей.

Повна модель з урахуванням всіх параметрів, а також результати калібрування наведено на рис. 3, а графіки радіальної та тангенціальної дисторсії – на рис. 4 та 5 відповідно.

METRIC CALIBRATION PARAMETERS

Resolution = 3872 x 2592 pixels

Pixel width = 0.0058mm, Pixel height = 0.0058mm

	VALUE	STANDARD ERROR
Principal distance	c = 34.8877mm	0.002mm
Principal point offset in x-image coordinate	x _p = -0.1045mm	0.010mm
Principal point offset in y-image coordinate	y _p = -0.2494mm	0.020mm
3rd-order term of radial distortion correction	K1 = 1.07626e-004	8.9371e-007
5th-order term of radial distortion correction	K2 = -6.40778e-008	1.1867e-008
7th-order term of radial distortion correction	K3 = -5.33013e-011	4.9939e-011
Coefficient of decentering distortion	P1 = -1.3245e-005	3.263e-006
Coefficient of decentering distortion	P2 = -4.5675e-006	1.416e-006
No significant differential scaling present	B1 = 0.0000e+000	8.261e-011
No significant non-orthogonality present	B2 = 0.0000e+000	8.261e-011

Рис. 3. Результати повного калібрування камери Nikon D200 в програмі Australis

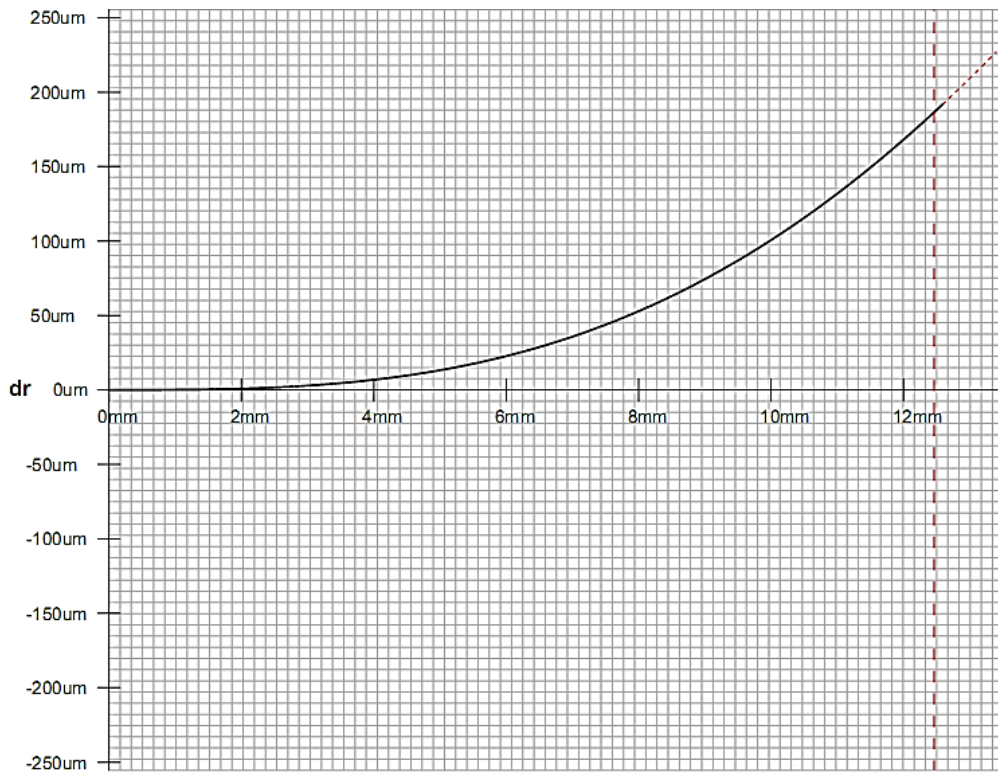


Рис. 4. Графік радіальної дисторсії після калібрування в Australis

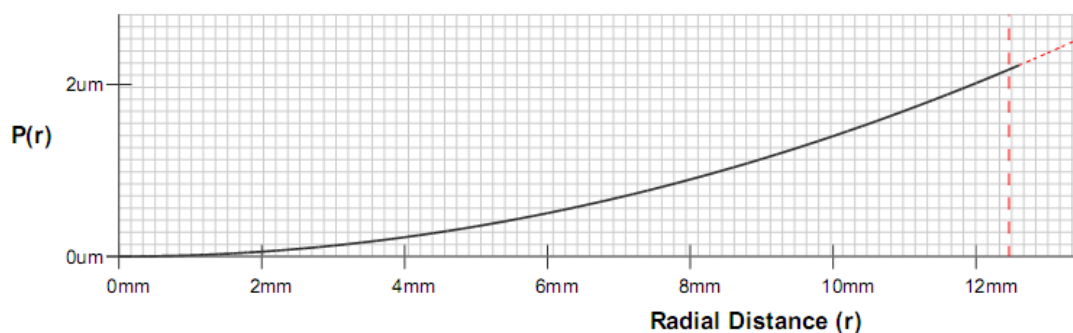


Рис. 5. Графік тангенціальної дисторсії після калібрування в Australis

Результати та графіки свідчать про те, що є певна розбіжність між параметрами внутрішнього орієнтування і коефіцієнтами дисторсії та результатами Australis і 3D Image Master. При цьому в програмі Australis наведено не тільки визначені параметри, а й оцінку точності їх визначення. За цими оцінками можна дійти висновку щодо надійності визначення фокусної відстані та перших двох коефіцієнтів дисторсії.

Виконаємо визначення елементів внутрішнього орієнтування та параметрів дисторсії без тангенціальної складової. Результати калібрування наведено на рис. 6.

	VALUE	STANDARD ERROR
Principal distance	c = 34.9057mm	0.002mm
Principal point offset in x-image coordinate	x _p = -0.0979mm	0.003mm
Principal point offset in y-image coordinate	y _p = -0.2674mm	0.020mm
3rd-order term of radial distortion correction	K1 = 1.08164e-004	9.1683e-007
5th-order term of radial distortion correction	K2 = -6.60624e-008	1.2251e-008
7th-order term of radial distortion correction	K3 = -5.75835e-011	5.1794e-011
Coefficient of decentering distortion	P1 = 0.0000e+000	8.502e-011
Coefficient of decentering distortion	P2 = 0.0000e+000	8.502e-011

Рис. 6. Результати повного калібрування камери Nikon D200 в програмі Australis без тангенціальної дисторсії

Результати свідчать, що точність визначення параметрів практично не погіршилась. Ненадійно, як і раніше, визначається третій коефіцієнт радіальної дисторсії.

Наостанок виконаємо визначення тільки двох коефіцієнтів радіальної дисторсії (рис. 7).

METRIC CALIBRATION PARAMETERS

Resolution = 3872 x 2592 pixels
 Pixel width = 0.0058mm, Pixel height = 0.0058mm

	VALUE	STANDARD ERROR
Principal distance	c = 34.9057mm	0.002mm
Principal point offset in x-image coordinate	x _p = -0.0979mm	0.003mm
Principal point offset in y-image coordinate	y _p = -0.2674mm	0.020mm
3rd-order term of radial distortion correction	K1 = 1.08164e-004	4.2981e-007
5th-order term of radial distortion correction	K2 = -6.60624e-008	2.5999e-009

Рис. 7. Результати повного калібрування камери Nikon D200 в програмі Australis з двома коефіцієнтами радіальної дисторсії

Отримана точність визначення дисторсії за спрощеною моделлю є цілком достатньою.

Для останнього порівняння виконаємо калібрування тієї ж камери в програмі PhotoModeler.

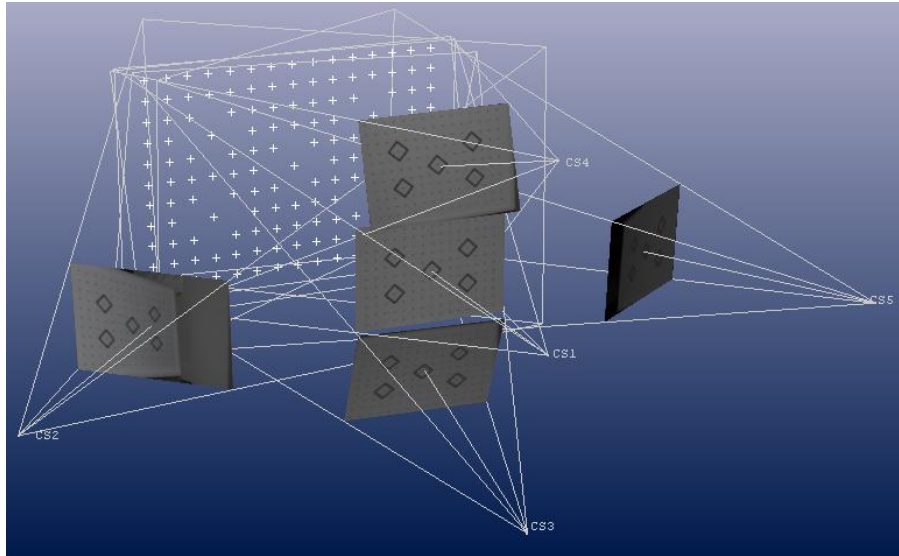


Рис. 8. Тривимірні зображення калібрувального стенду в програмі PhotoModeler

Як і раніше, спочатку виконаємо калібрування для повної моделі.

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: Nikon D200

Focal Length Value: 34.831836 mm Deviation: Focal: 0.002 mm

Xp - principal point x Value: 11.115493 mm Deviation: Xp: 0.004 mm

Yp - principal point y Value: 7.740705 mm Deviation: Yp: 0.008 mm

Fw - format width Value: 22.417610 mm Deviation: Fw: 0.001 mm

Fh - format height Value: 15.000000 mm

K1 - radial distortion 1 Value: 1.090e-004 Deviation: K1: 3.8e-007

K2 - radial distortion 2 Value: -7.760e-008 Deviation: K2: 5.0e-009

Correlations over 95.0%: K3:-97.5%

K3 - radial distortion 3 Value: -2.873e-011 Deviation: K3: 2.1e-011

Correlations over 95.0%: K2:-97.5%

P1 - decentering distortion 1 Value: -1.824e-005 Deviation: P1: 1.0e-006

P2 - decentering distortion 2 Value: -4.980e-006 Deviation: P2: 8.6e-007

Отримані результати дозволяють зробити важливі висновки. Ця програма має ряд переваг: можливість оцінити формат кадру фотокамери, наводяться значення коефіцієнтів кореляції між параметрами, точність оцінювання параметрів є вищою порівнянно з іншими програмами.

Виконаємо оцінку параметрів дисторсії за спрощеною моделлю.

Camera Calibration Standard Deviations

Focal Length Value: 34.831836 mm Deviation: Focal: 0.002 mm

Xp - principal point x Value: 11.115493 mm Deviation: Xp: 0.002 mm

Yp - principal point y Value: 7.740705 mm Deviation: Yp: 0.005 mm

Fw - format width Value: 22.417610 mm Deviation: Fw: 0.001 mm

Fh - format height Value: 15.000000 mm

K1 - radial distortion 1 Value: 1.090e-004 Deviation: K1: 1.8e-007

K2 - radial distortion 2 Value: -7.760e-008 Deviation: K2: 1.1e-009

Вказані раніше переваги стосуються також спрощеної моделі калібрування.

Для формулювання остаточних висновків виконаємо калібрування знімків з використанням програм власного розроблення, популярних завдяки безкоштовному поширенню: Agisoft Lens, Fausscal та Camera Calibration TOOLBOX.

Для калібрування використано тестові зображення, отримані камерою Canon PowerShot SX100 IS 3264x2448 з фокусними відстанями 6 і 7 мм.

Результати калібрування камери Canon PowerShot SX100 IS з фокусною відстанню 6 мм в програмі Agisoft Lens представлено на рис. 9, графік радіальної дисторсії – на рис. 10, тангенціальної дисторсії – на рис. 11.

Параметр	Значение	Погрешность
Image width	3264	
Image height	2448	
Focal length (x)	3432.54	2.96838
Focal length (y)	3432.45	2.94171
Principal point (x)	1603.62	1.47161
Principal point (y)	1239.75	1.22747
Skew	0	0
Radial K1	-0.227966	0.00151543
Radial K2	0.249547	0.00419263
Radial K3	0	0
Tangential P1	0.000284942	8.58056e-05
Tangential P2	-0.00101089	0.000101463

Рис. 9. Результати калібрування в програмі Agisoft Lens

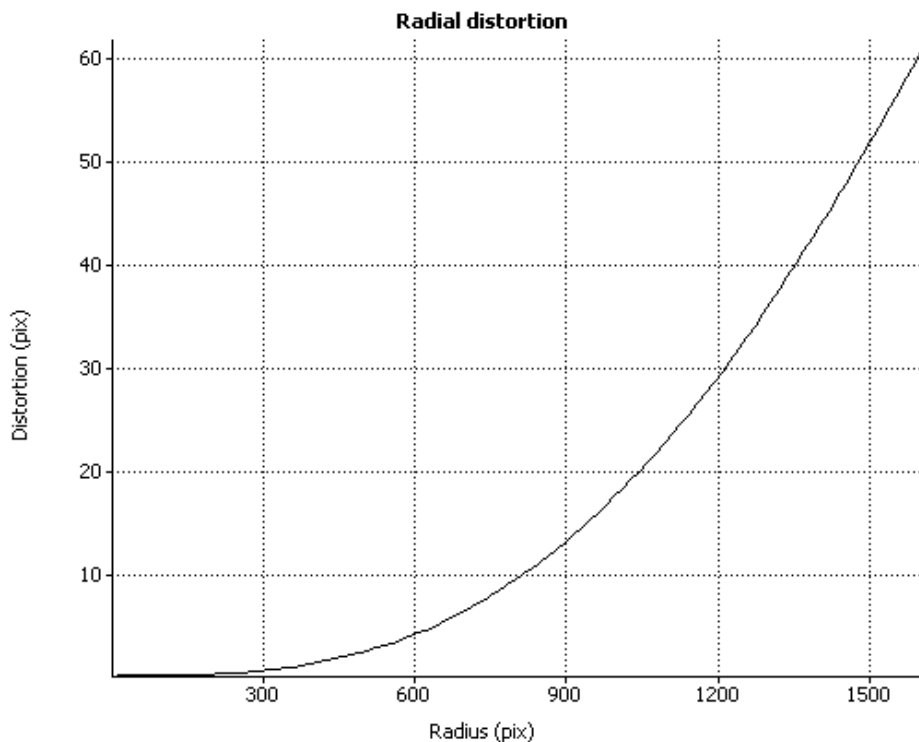


Рис. 10. Графік радіальної дисторсії в програмі Agisoft Lens

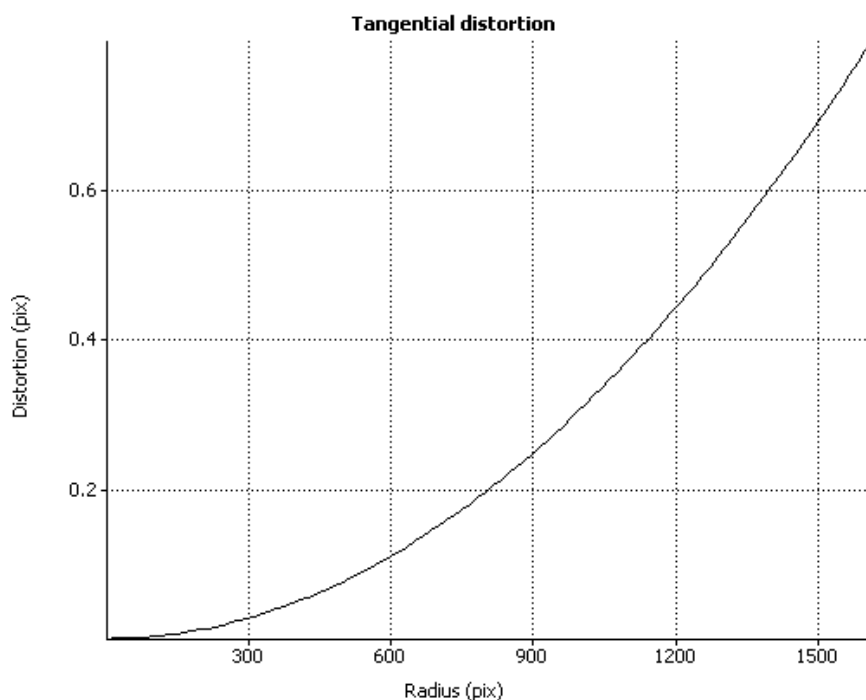


Рис. 11. Графік тангенціальної дисторсії в програмі Agisoft Lens

Відмітимо одразу особливість калібрування в цих програмах: вимірювання виконується тільки автоматично, а всі результати представлено у піксельному форматі. Якість калібрування, визначена в міліметрах, є досить невисокою, це пояснюється не недосконалістю моделі калібрування, а неякісним алгоритмом розпізнавання тестового об'єкта.

Виконаємо калібрування за спрощеною моделлю. Результати представлено на рис. 12.

Параметр	Значення	Погрешність
Image width	3264	
Image height	2448	
Focal length (x)	3429.97	2.93882
Focal length (y)	3429.97	2.91424
Principal point (x)	1613.46	1.07902
Principal point (y)	1238.52	1.15885
Skew	0	0
Radial K1	-0.227663	0.0015215
Radial K2	0.248776	0.00421311

Рис. 12. Результати калібрування в програмі Agisoft Lens радіальної дисторсії

Як і в попередньому випадку, точність визначення фокусної відстані є гіршою. Краще визначається оцінка головної точки знімка. Слід звернути увагу на те, що немає оцінки перекосу пікселів (skew).

Тепер виконаємо калібрування камери за фокусної відстані 7 мм (рис. 13-16).

Параметр	Значение	Погрешность
Image width	3264	
Image height	2448	
Focal length (x)	4172.19	3.06261
Focal length (y)	4172.69	3.19509
Principal point (x)	1591.53	2.17326
Principal point (y)	1224.22	1.71917
Skew	0	0
Radial K1	-0.204202	0.00221807
Radial K2	0.305151	0.00913421
Radial K3	0	0
Tangential P1	-0.00106532	0.000106987
Tangential P2	-0.00146706	0.000128395

Рис. 13. Результати калібрування в програмі Agisoft Lens

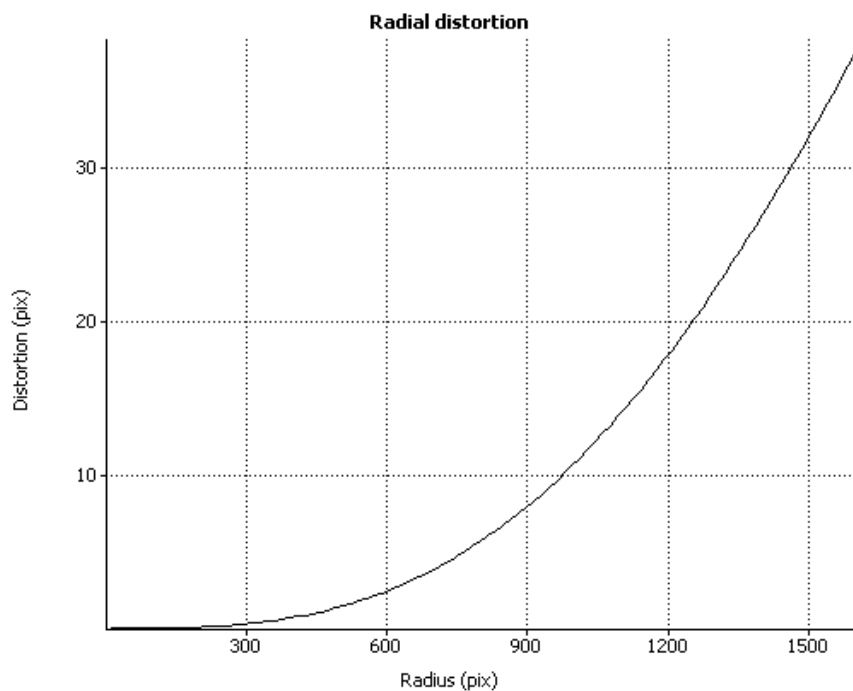


Рис. 14. Графік радіальної дисторсії в програмі Agisoft Lens

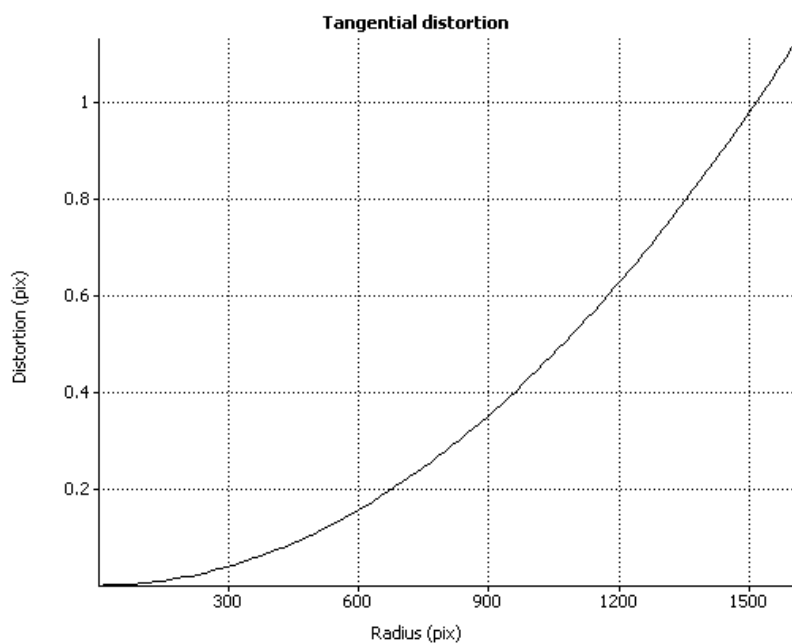


Рис. 15. Графік тангенціальної дисторсії в програмі Agisoft Lens

Параметр	Значення	Погрешність
Image width	3264	
Image height	2448	
Focal length (x)	4168.87	3.04218
Focal length (y)	4169.38	3.17533
Principal point (x)	1611.93	1.24749
Principal point (y)	1233.97	1.44256
Skew	0	0
Radial K1	-0.204545	0.00226016
Radial K2	0.306681	0.00935854

Рис. 16. Результати калібрування в програмі Agisoft Lens радіальної дисторсії

Програма Agisoft Lens є дуже зручною у користуванні, однак її точність в деяких випадках викликає певні сумніви.

Остання підгрупа програм, про які велася мова, – це програми, написані мовою програмування Matlab окремими програмістами. Спочатку виконаємо тестування відомої програми Camera Calibration TOOLBOX, що з'явилась понад 10 років тому (рис. 17) [1].

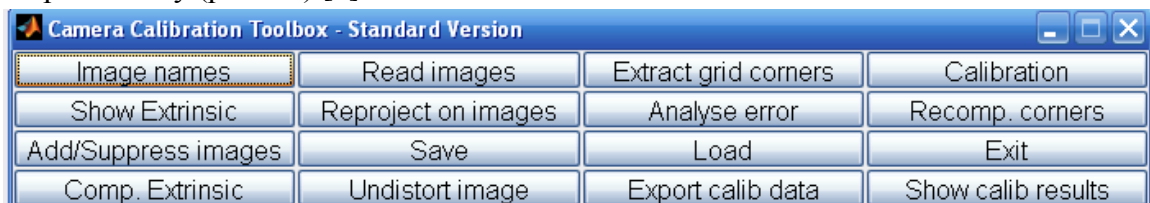


Рис. 17. Графічне меню програми Camera Calibration TOOLBOX

У програмі використано поліноміальну модель незбалансованої радіальної дисторсії, яка може бути перетворена у модель, досліджену в попередніх програмах до збалансованої радіальної дисторсії. Ці математичні моделі еквівалентні, з математичного погляду збалансована модель видається більш «елегантною» і справляє враження меншого впливу дисторсії.

Незбалансована радіальна дисторсія: $\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5$.

Збалансована радіальна дисторсія: $\Delta r = A_1 r (r^2 - r_0^2) + A_2 r (r^4 - r_0^4) = (-A_1 r_0^2 - A_2 r_0^4) r + A_1 r^3 + A_2 r^5$,

де: $A_1 = K_1(1 - K_0)$, $A_2 = K_2(1 - K_0)$, $K_0 = -A_1 r_0^2 - A_2 r_0^4$.

Для перетворення незбалансованої дисторсії в збалансовану:

$c_k = c (1 - K_0)$, $A_1 = K_1 (1 - K_0)$, $A_2 = K_2 (1 - K_0)$,

зворотнє перетворення:

$c = c_k / (1 - K_0)$, $K_1 = A_1 / (1 - K_0)$, $K_2 = A_2 / (1 - K_0)$.

Після калібрування були отримані такі результати:

Focal Length: $fc = [3465.44211 \ 3465.26109] \pm [30.27195 \ 29.91719]$;

Principal point: $cc = [1601.60104 \ 1257.90839] \pm [19.24849 \ 15.93666]$;

Skew: $\alpha_c = [0.00000] \pm [0.00000] \Rightarrow$ angle of pixel axes = 90.00000 ± 0.00000 degrees;

Distortion: $kc = [-0.01184 \ 0.06432 \ -0.00129 \ 0.00193 \ 0.00000] \pm [0.02660 \ 0.13784 \ 0.00168 \ 0.00203 \ 0.00000]$;

Pixel error: $err = [1.83901 \ 1.88648]$.

Як бачимо, точність калібрування є досить посередньою. Особливість цієї програми полягає у дуже доброму графічному інтерфейсі для аналізу результатів калібрування.

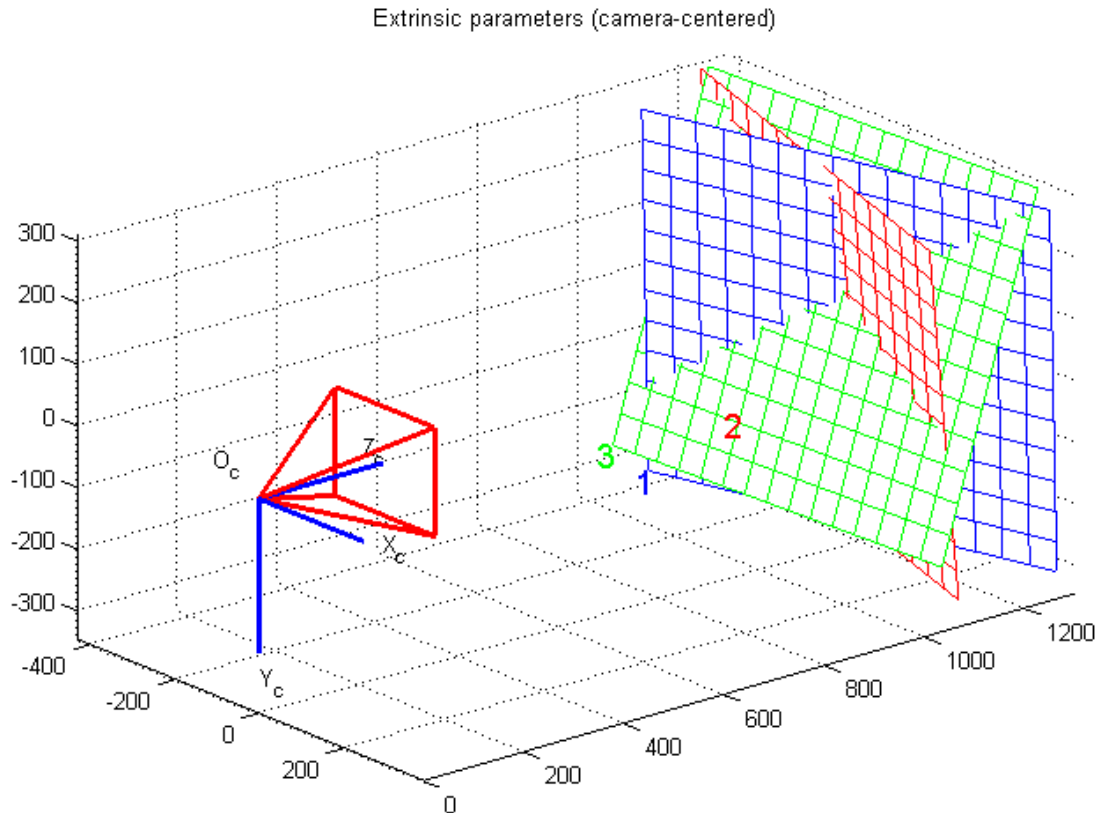


Рис. 18. Тривимірне зображення суміщених площин тестового зображення

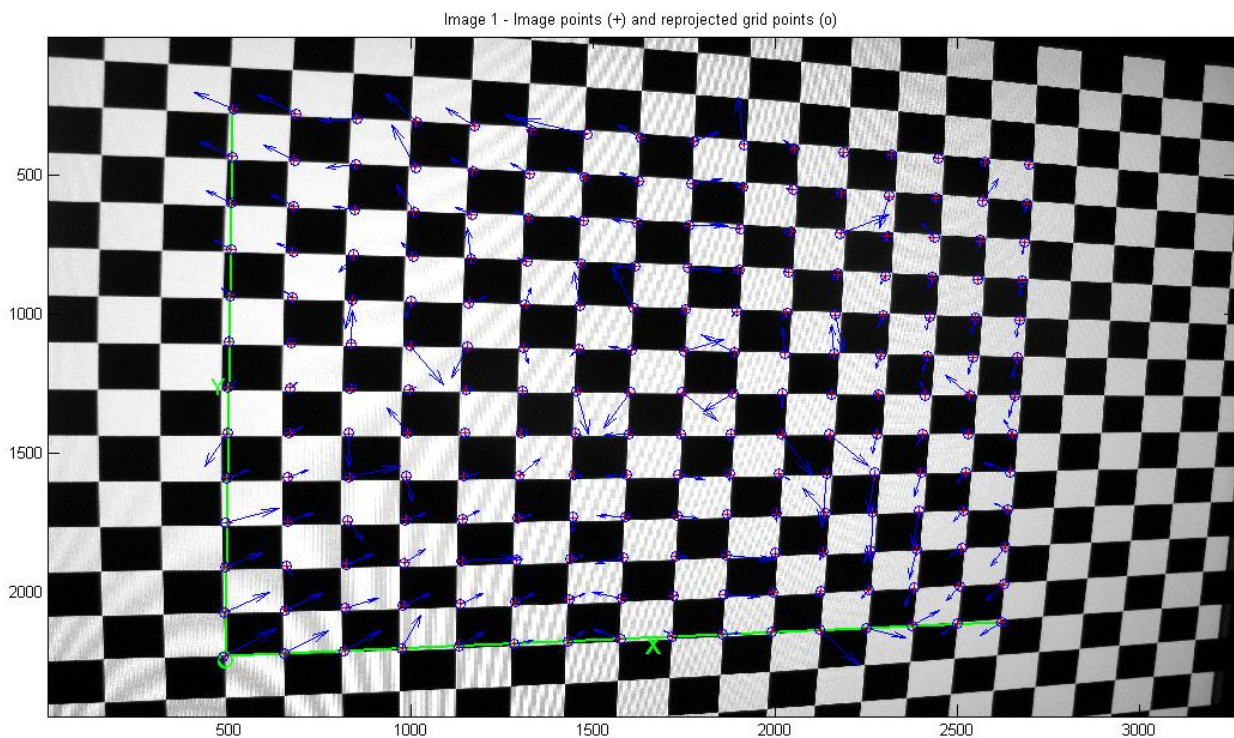


Рис. 19. Тестове зображення з векторами переміщень, викликаними впливом дисторсії (знімок 1)

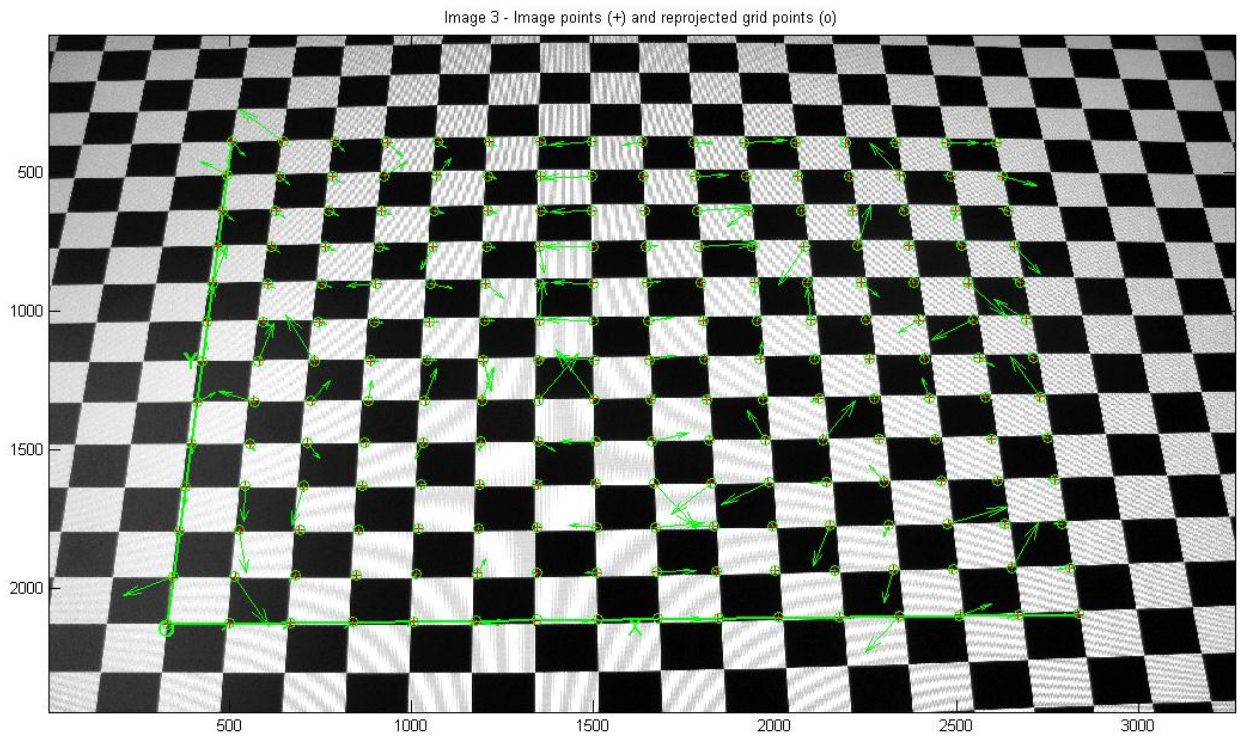


Рис. 20. Тестове зображення з векторами переміщень, викликаними впливом дисторсії (знімок 2)

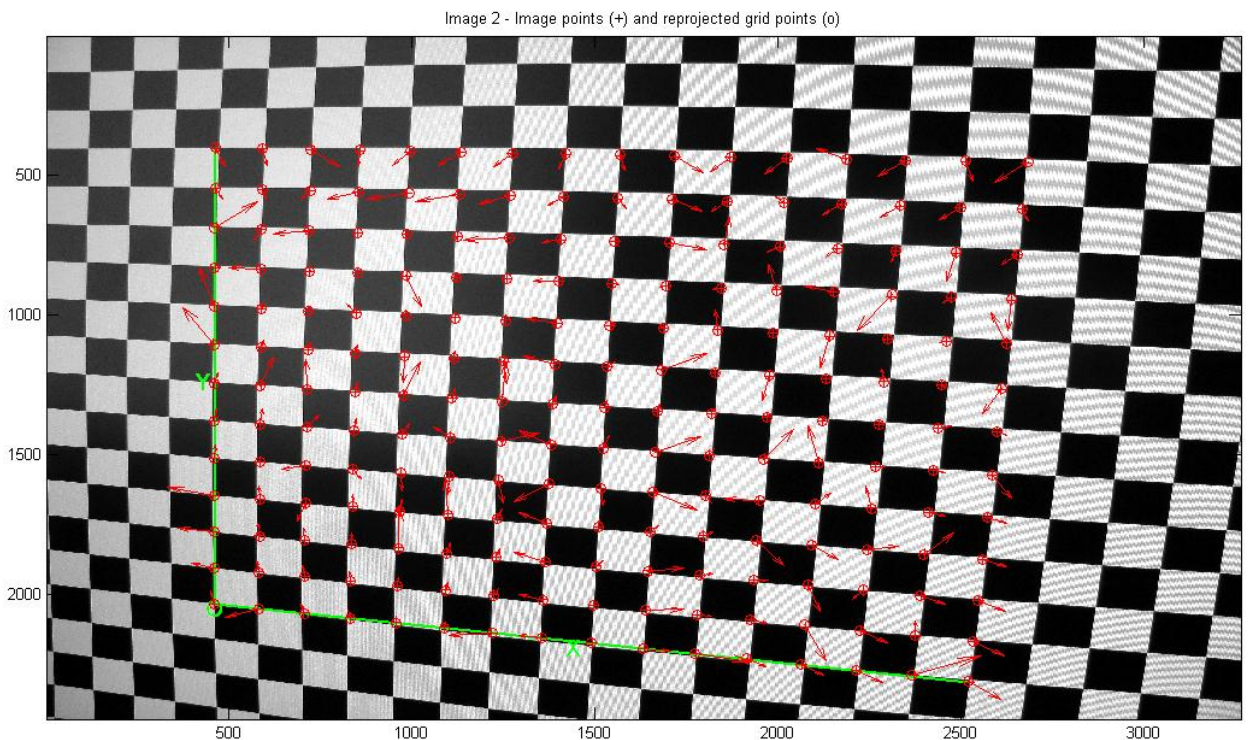


Рис. 21. Тестове зображення з векторами переміщень, викликаними впливом дисторсії (знімок 3)

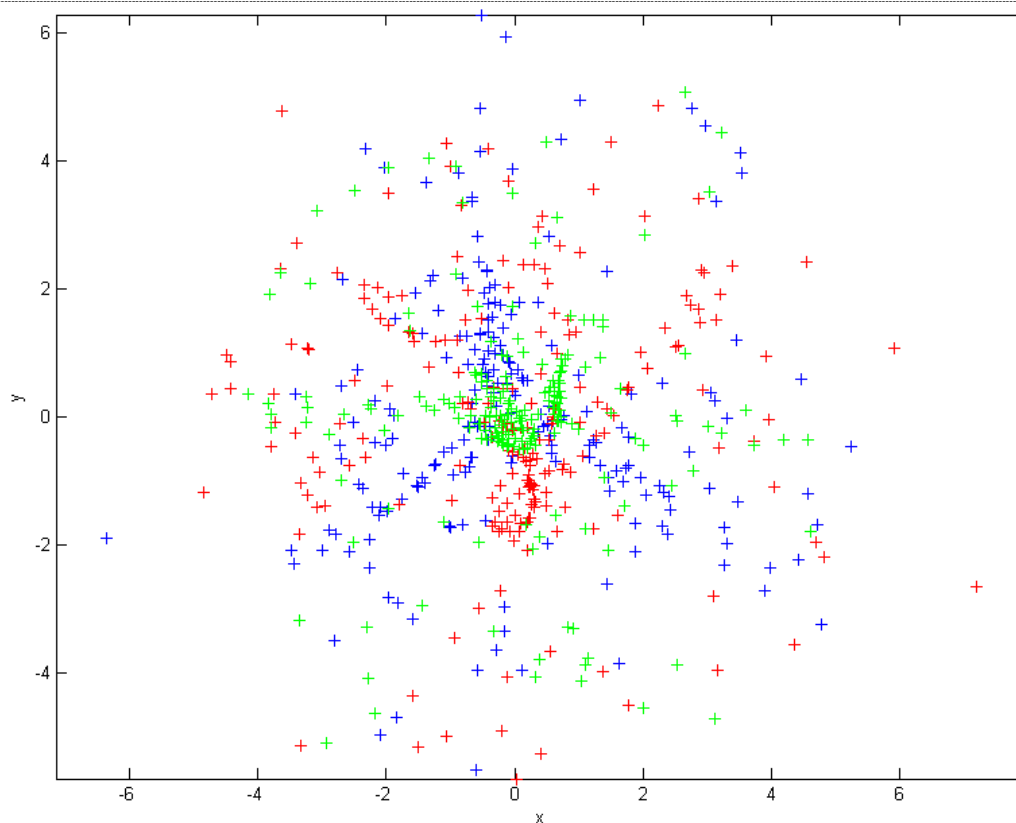


Рис. 22. Графік розподілу поправок після калібрування

Під час калібрування зображення з фокусом 7,3 мм ітераційний процес не зійшовся, що свідчить про нестабільність в алгоритмі роботи програми.

Остання з протестованих програм Faucsal для Matlab з'явилася порівняно недавно [2-4; 6; 9; 11].

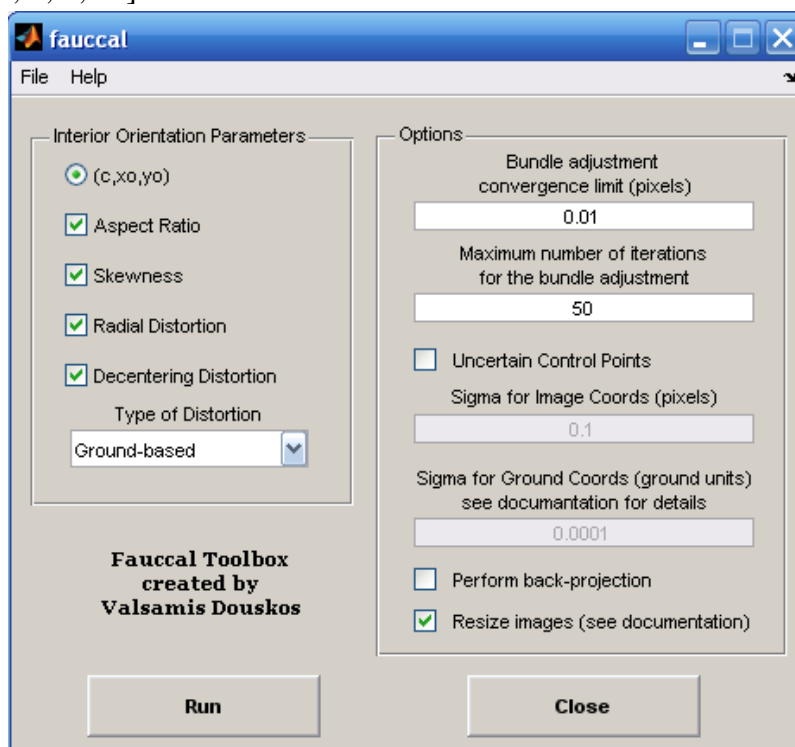


Рис. 23. Робоче меню програми Faucsal для Matlab

Ця програма також повністю автоматично розпізнає тестове зображення на знімку. В програмі є можливість вибору повної або часткової моделі калібрування. Важливим з геодезичного погляду є можливість вказати точність нанесення тестового об'єкта, тобто визначення параметрів калібрування в програмі Faussal для Matlab виконується з врахуванням похибок вихідних даних. Без коментарів наведемо результати калібрування для повної та часткової моделі калібрування для зображень з фокусом 6 і 7,3 мм (рис. 24-31).

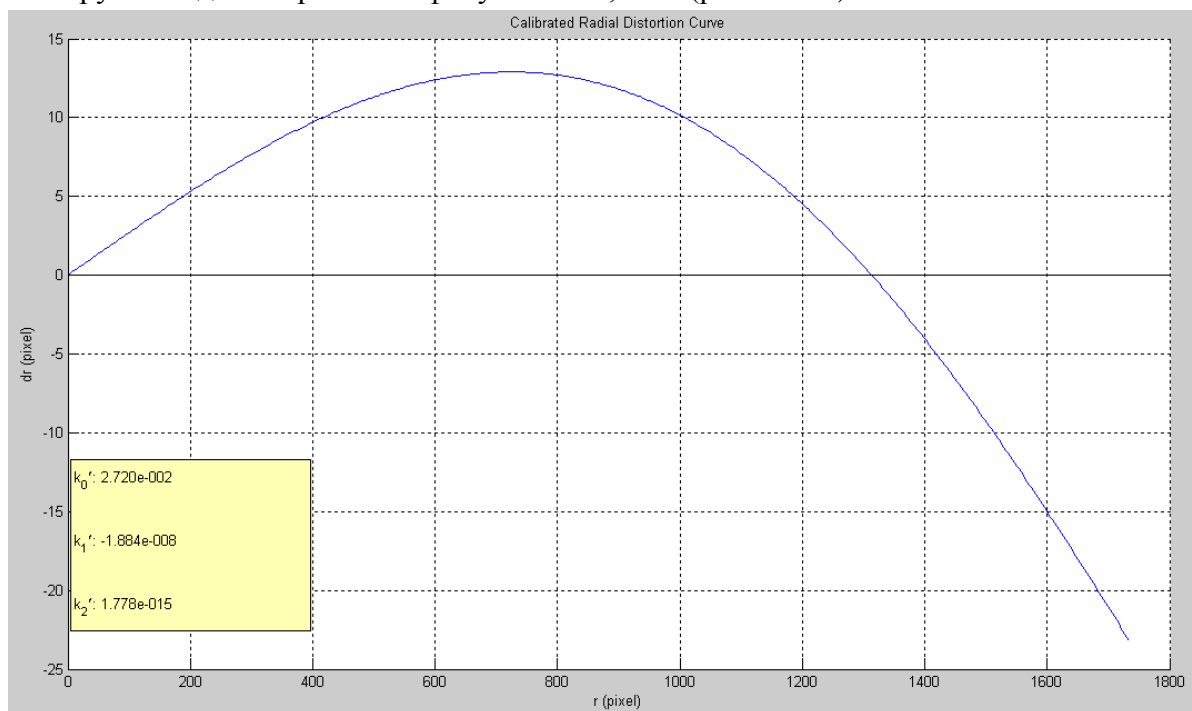


Рис. 24. Графік дисторсії об'єктива для повної моделі калібрування зображення з фокусом 6 мм

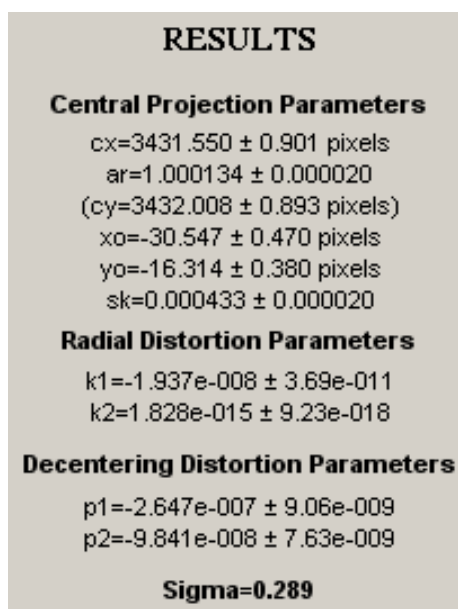


Рис. 25. Результати калібрування дисторсії об'єктива для повної моделі калібрування зображення з фокусом 6 мм

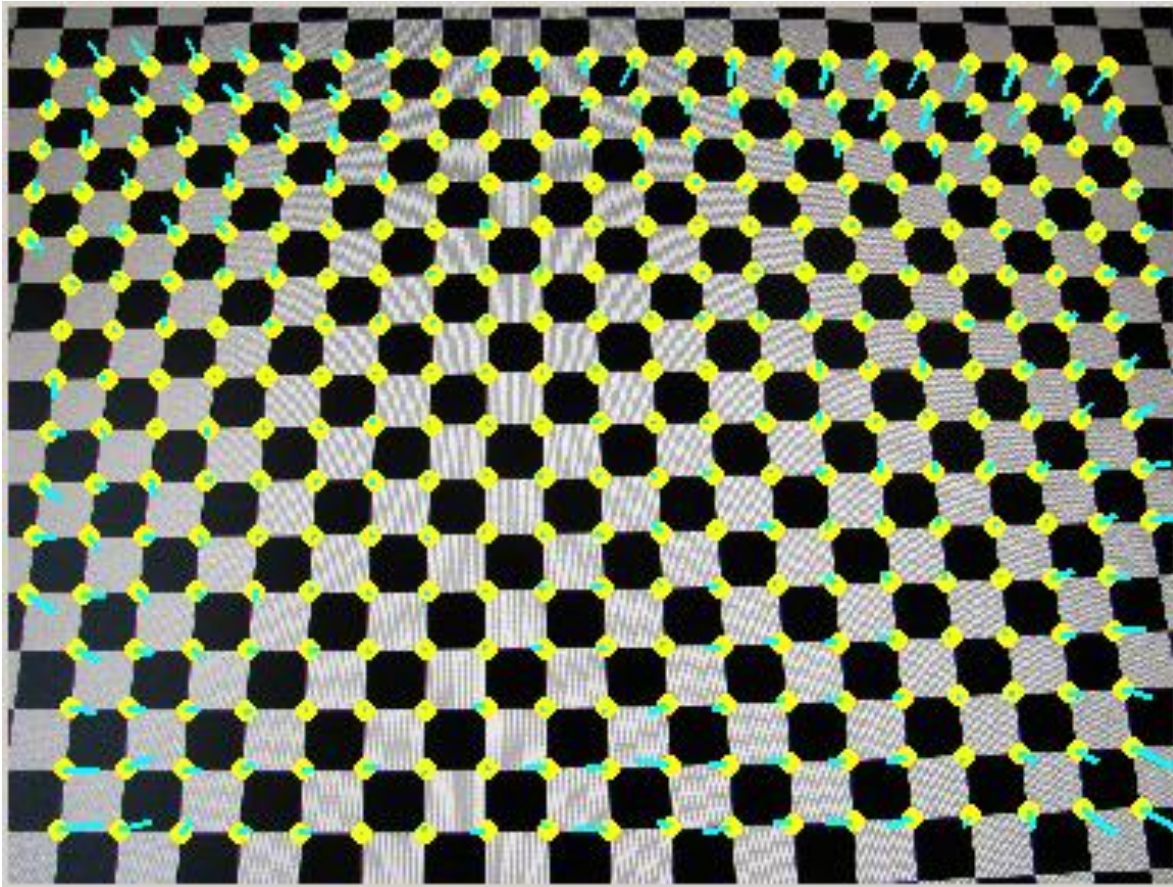


Рис. 26. Тестове зображення з векторами переміщень, зумовлених впливом дисторсії (знімок 3)

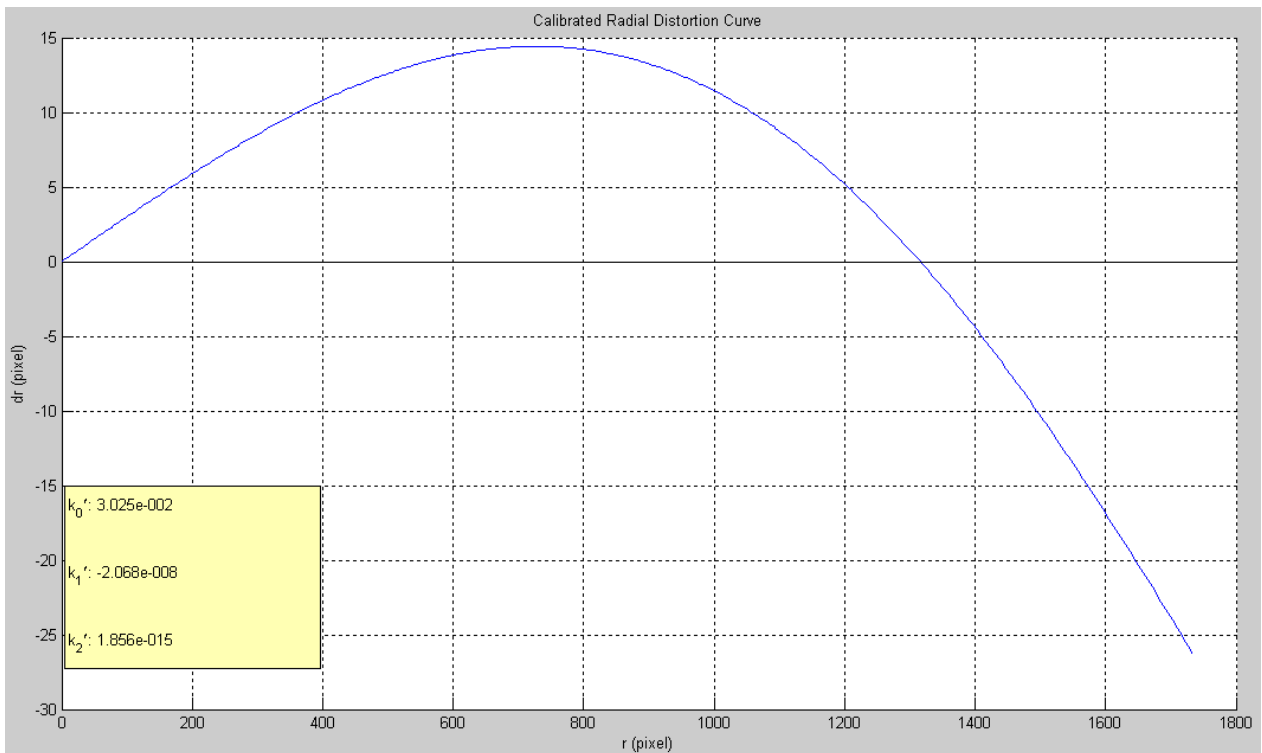


Рис. 27. Графік дисторсії об'єктива для часткової моделі калібрування зображення з фокусом 6 мм

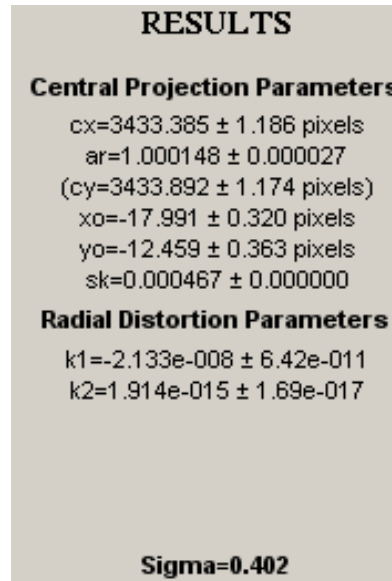


Рис. 28. Результати калібрування дисторсії об'єктива для часткової моделі калібрування зображення з фокусом 6 мм

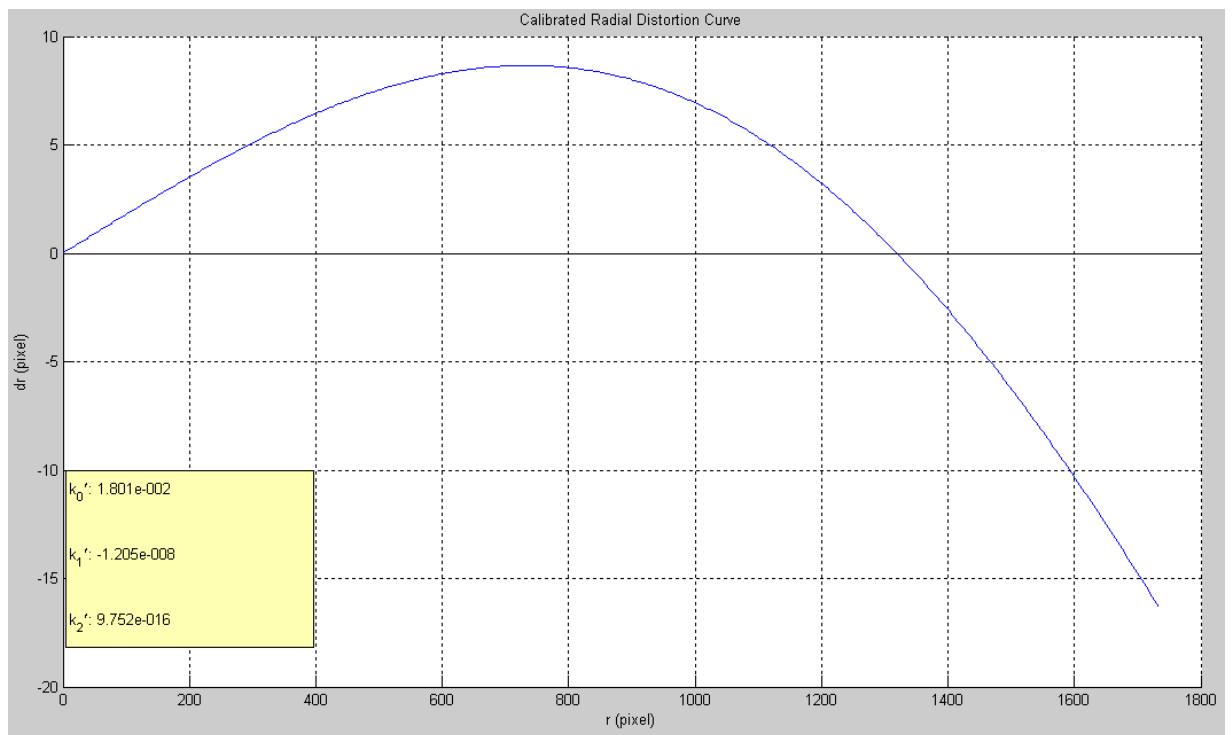


Рис. 29. Графік дисторсії об'єктива для повної моделі калібрування зображення з фокусом 7,3 мм

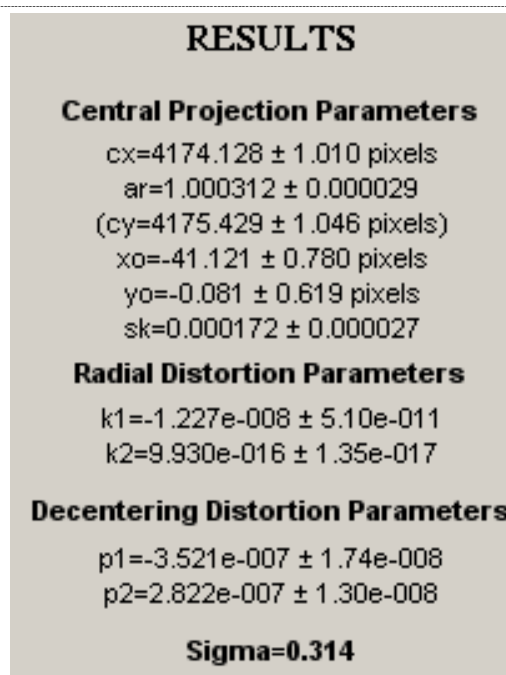


Рис. 30. Результати калібрування дисторсії об'єктива для повної моделі калібрування зображення з фокусом 7,3 мм

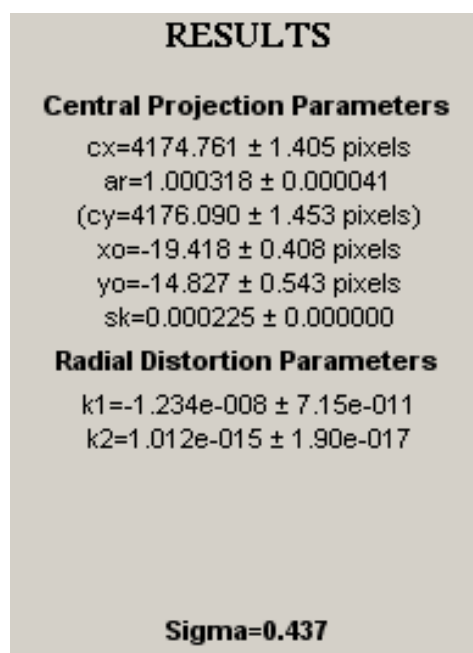


Рис. 31. Результати калібрування дисторсії об'єктива для повної моделі калібрування зображення з фокусом 7,3 мм

Таким чином, програма Faussal для Matlab серед інших програм цього класу забезпечує найкращу точність та якість калібрування.

Загалом варто відмітити, що у калібруванні слід віддавати перевагу програмам типу PhotoModeler, а за фінансових обмежень – програмам типу Faussal для Matlab.

Висновок. Сучасна інженерна фотограмметрія є багатогранною науково-прикладною дисципліною. Впровадження цифрових технологій дало можливість значно розширити сфери застосування інженерної фотограмметрії. В роботі

систематизовано та проаналізовано підходи до калібрування цифрових неметричних камер та на підставі результатів аналізу скласти класифікації методів та методик калібрування, що може бути використане для вибору моделей калібрування камер з різною дисторсією. Виконано аналіз та дослідження програмного забезпечення для калібрування цифрових неметричних камер. Всі програмні засоби поділено на три групи з окремими підгрупами. Виявлено, що для завдань інженерної цифрової фотограмметрії доцільно використовувати програми другої або третьої групи, при цьому в результаті дослідження виокремлено програми, які дають змогу надійно, з потрібною точністю визначати елементи внутрішнього орієнтування та параметри дисторсії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bouguet, J.-Y.* Camera Calibration Toolbox for Matlab: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
2. *Douskos, V., Grammatikopoulos, L., Kalisperakis, I., Karras, G., Petsa, E.* FAUCCAL: An Open Source Toolbox for Fully Automatic Camera Calibration // XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage, October 11-15, 2009, Kyoto.
3. *Douskos, V., Kalisperakis, I., Karras, G.* Automatic calibration of digital cameras using planar chess-board patterns // Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Wichman, vol. 1, 2007, pp.132-140.
4. *Douskos, V., Kalisperakis, I., Karras, G., Petsa, E.* Fully automatic camera calibration using regular planar patterns // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences, vol. 37(5), 2008, pp. 21-26
5. *El-Sheimy, N.* The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications [Text]: A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy / N. El-Sheimy. – Calgary, 1996. - 198 p.
6. *FAUCCAL* (2009):<http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/photo/staff/gkarras/fauccal.html>
7. *Goudard, R., C., Lasseur, Mergelkuhl, D.* Digital Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors. FIG Working Week, Paris, France, April 13-17, 2003, 13 p. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_22/TS22_4_Goudard_et_al.pdf
8. *Gruen, A., Akca, D.* Metric Accuracy Testing with Mobile Phone Cameras // ISPRS Archives – Volume XXXVII Part B5, 2008 XXIst ISPRS Congress Technical Commission V July 3-11, 2008 Beijing, China, pp. 729-736.
9. *Kalisperakis, I., Grammatikopoulos, L., Petsa, E., Karras, G.* An open-source educational software for basic photogrammetric tasks // Proceedings of the FIG-ISPRS-ICA International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, Sofia, 09 – 10 November, 2006, pp. 581-586.
10. *Pappa, R.S., Giersch, L.R., Quagliaroli, J.M.* Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna With Consumer Digital Cameras. 2000. 11 p. <http://www.photomodeler.com/applications/documents/NASA.pdf>
11. *Prokos, A., Kalisperakis, I., Petsa, E., Karras, G.* Automatic calibration of stereo-cameras using ordinary chess-board patterns // International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVIII, Part 5, 2012, pp. 45-49.

12. *Pullivelli, A.* Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis and Applications [Text]: A Thesis for the Degree of Master of Science / A. Pullivelli. – Calgary, 2005. – 170 p.

13. *Camera Calibrator User Manual* Photometrix Pty Ltd, Australia, Version 2.0, May 2016
http://www.photometrix.com.au/downloads/calibrator/CameraCalibrator_V2_User_Manual.pdf

14. *Walford, A.* One Part in 300,000. Precision and Accuracy Discussion. Eos Systems Inc. <https://www.photomodeler.com/applications/documents/Precision.pdf>

15. *Гельман Р.Н., Дуниця А.Л.* Лабораторная калибровка цифровых камер с большой дисторсией // Геодезия и картография. 2002. №7. С. 23-31.

16. *Юрченко В.И.* Исследование моделей учета систематических искажений неметрических снимков с самокалибровкой // Геодезия и картография. 2002. №8. С. 32-37.

REFERENCES

1. *Bouguet, J.-Y.* Camera Calibration Toolbox for Matlab:
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

2. *Douskos, V., Grammatikopoulos, L., Kalisperakis, I., Karras, G., Petsa, E.* FAUCCAL: An Open Source Toolbox for Fully Automatic Camera Calibration // XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage, October 11-15, 2009, Kyoto.

3. *Douskos, V., Kalisperakis, I., Karras, G.* Automatic calibration of digital cameras using planar chess-board patterns // Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Wichman, vol. 1, 2007, pp.132-140.

4. *Douskos, V., Kalisperakis, I., Karras, G., Petsa, E.* (2008) Fully automatic camera calibration using regular planar patterns // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Information Sciences, vol. 37(5), pp. 21-26

5. *El-Sheimy, N.* (1996) The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications [The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications]. Calgary, 198.

6. *FAUCCAL* (2009):
<http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/photo/staff/gkarras/fauccal.html>

7. *Goudard, R., C., Lasseur, Mergelkuhl, D.* Digital Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors. FIG Working Week, Paris, France, April 13-17, 2003, 13 p.
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig_2003/TS_22/TS22_4_Goudard_et_al.pdf

8. *Gruen, A., Akca, D.* Metric Accuracy Testing with Mobile Phone Cameras // ISPRS Archives – Volume XXXVII Part B5, 2008 XXIst ISPRS Congress Technical Commission V July 3-11, 2008 Beijing, China, pp. 729-736.

9. *Kalisperakis, I., Grammatikopoulos, L., Petsa, E., Karras, G.* An open-source educational software for basic photogrammetric tasks // Proceedings of the FIG-ISPRS-ICA

International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, Sofia, 09 – 10 November, 2006, pp. 581-586.

10. Pappa, R.S., Giersch, L.R., Quagliaroli, J.M. Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna With Consumer Digital Cameras. 2000. 11 p. <http://www.photodeler.com/applications/documents/NASA.pdf>

11. Prokos, A., Kalisperakis, I., Petsa, E., Karras, G. Automatic calibration of stereo-cameras using ordinary chess-board patterns // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVIII, Part 5, 2012, pp. 45-49.

12. Pullivelli, A. (2005) Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis and Applications [Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis and Applications]. Calgary, 170.

13. Camera Calibrator User Manual Photometrix Pty Ltd, Australia, Version 2.0, May 2016 http://www.photometrix.com.au/downloads/calibrator/CameraCalibrator_V2_User_Manual.pdf

14. Walford, A. One Part in 300,000. Precision and Accuracy Discussion. Eos Systems Inc. <https://www.photodeler.com/applications/documents/Precision.pdf>

15. Gel'man, R.N., Dunc, A.L. (2002) *Laboratornaja kalibrovka cifrovyh kamer s bol'shoj distorsiej* [Laboratory calibration of digital cameras with a large distortion]. Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]. №7, pp. 23-31.

16. Jurchenko, V.I. (2002) *Issledovanie modelej ucheta sistematicheskikh iskazhenij nemetricheskikh snimkov s samokalibrovkoj* [The study models accounting systematic distortion non-metric images with the self-calibration]. Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]. №8, pp. 32-37.

О.М. Гончарюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ЦИФРОВЫХ НЕМЕТРИЧЕСКИХ
КАМЕР ПО ПЛОСКОСТНЫМ ТЕСТОВЫМ ОБЪЕКТАМ**

В работе выполнен детальный анализ и практические экспериментальные исследования программных средств для калибровки цифровых неметрических камер. Предложена классификация программных средств, в основу которой положены критерии стоимости, модели учета дисторсии объектива, стабильности и точности вычислительного алгоритма. Поскольку цифровые неметрические камеры используются преимущественно для решения прикладных локальных задач, наиболее эффективным является использование недорого специализированного программного обеспечения. В работе исследованы условно дорогие программы Australis (Австралия), PhotoScan Pro (Израиль), PhotoModeler (США) и 3D Image Master (Япония). Каждая из этих программ обладает определенными преимуществами и недостатками, но в среднем наиболее эффективной оказалась программа PhotoModeler (США). Наиболее интересные результаты были получены при исследовании дешевых программных средств: XSIGNO Photogrammetry (Япония), GML Camera

Calibration (Россия), Camera Calibration Tools (Великобритания), Camera Calibrator (фирма Photometrix, разработчик iWitness и Australis), Image Master Calib (фирма TOPCON), Agisoft Lens (фирма Agisoft, разработчик PhotoScan Pro), Faucal Matlab, Matlab Camera Calibration TOOLBOX. Общій анализ результатов показал, что при калибровке преимущество следует отдать программам типа PhotoModeler, а при финансовых ограничениях – программам типа Faucal для Matlab.

Ключевые слова: *цифровая фотограмметрия, неметрическая камера, калибровка, параметры дисторсии, тестовый объект.*

O.M. Honcheruk

STUDY OF SOFTWARE AND MODELS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF NON-METRIC DIGITAL CAMERAS BY THE PLANE TEST OBJECTS

This paper presents the a detailed analysis and practical experimental researches of software tools for the calibration of non-metric digital cameras. The classification of software which is based on value criteria, lens distortion model, the stability and accuracy of the computational algorithm was offered. Since the non-metric digital cameras are mainly used for solving applied local problems the most effective utilization is inexpensive specialized software. We have studied conditionally expensive software: Australis (Australia), PhotoScan Pro (Israel), PhotoModeler (USA) and 3D Image Master (Japan). Each of these programs has certain advantages and disadvantages, but the average PhotoModeler (USA) was the most effective software. The most interesting results were obtained in studies of low-cost software: XSIGNO Photogrammetry (Japan), GML Camera Calibration (Russia), Camera Calibration Tools (GB), CameraCalibrator (Photometrix, Australia), Image Master Calib (TOPCON), Agisoft Lens (Agisoft), Faucal Matlab, Matlab Camera Calibration TOOLBOX. Common analysis of the results showed that the advantage should be given PhotoModeler type programs and under financial constraints Faucal type program for Matlab.

Keywords: *digital photogrammetry, non-metric camera, calibration, parameters of the distortion, the test object.*

Надійшла в редакцію

01.06.2017