

considered here provides the magnification 4-16^x and the angular field of view in the object space from 5.15° to 1.32°. It has the entrance pupil diameter of 42 mm, the exit pupil distance within 85...90 mm, and the maximum system length of 325 mm. The riflescope contains 14 lenses in 9 components made of glasses from the CDGM catalog. In all zoom configurations of the optical system, any ray vignetting is absent. To achieve the high image quality, the parametric synthesis of the riflescope has been carried out simultaneously for five intermediate configurations, corresponding to magnifications 16^x, 13^x, 10^x, 7^x and 4^x. By using the developed specialized software, an experimental examination of the operability of this approach has been performed on the example of automated design of the optical system having the parameters similar those found in commercially available samples. The performed simulation showed that the time interval required for direct automated design of the riflescope's optical system is about 25 hours. The total number of unknown parameters (variables) was up to 90. The root-mean-square values of the angular aberrations of the axial beams in all (five) configurations of the synthesized zoom system do not exceed 1 arc minute in the whole spectral range. The obtained results indicate that the design algorithm implemented in the computer program can be considered an effective tool capable to perform automated parametric synthesis of complex zoom optical systems with high image quality. The algorithm enables to establish the prescription data of optical systems, taking into account the technical requirements and restrictions specified by the designer.

Keywords: automated optical design; zoom optical system; riflescope; global optimization; aberrations; parametric synthesis.

Надійшла до редакції
14 січня 2022 року

Рецензовано
18 лютого 2022 року

УДК 621:681.7

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ДИСТОРСІЇ ВІДЕОРЕЄСТРАТОРА ПРИ ВИЯВЛЕННІ ДОРОЖНИХ ЗНАКІВ

Стаднічук В. С., Колобродов В. Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: v.stadnichuk@kpi.ua

Проблематика. Аналіз статистичних даних показує, що з року в рік автомобілів на дорогах загального користування становиться все більше, і, відповідно, збільшується кількість ДТП та підвищується ризик для кожного учасника дорожнього руху. Задля забезпечення безпеки дорожнього руху автовиробниками впроваджуються системи допомоги водієві та автомобілі з елементами автономного керування. Такі системи здатні аналізувати навколишнє середовище та у випадку небезпеки коректувати дії водія або брати керування транспортним засобом на себе. Зазвичай такі системи працюють за допомогою телевізійних систем, однією з вимог до яких є широкий кут поля зору. Однак основним недоліком ширококутних систем є велика дисторсія, тобто геометричне спотворення подоби між об'єктом та його зображенням.

Мета дослідження: розробити простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери.

Методика реалізації. Експериментальне дослідження телевізійної системи керування автомобілем та її калібрування.

Результати дослідження. Розроблено простий метод зменшення дисторсії відеореєстратора при виявленні дорожніх знаків внаслідок використання цифрового калібрування камери. Проведено експериментальне порівняння дисторсії ширококутної та звичайної телевізійної систем, виконано калібрування кожної та проведено аналіз знаходження дорожніх знаків кожною системою.

Висновки. Запропоновано простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери. Доведено, що для цілей керування автомобілем можливе використання ширококутних телевізійних систем із подальшим їх калібруванням задля позбавлення геометричного спотворення між об'єктом та його зображенням.

Ключові слова: телевізійна система керування автомобілем; кут поля зору; дисторсія; калібрування; ADAS; IoU.

Вступ

Наразі автоматизація досягла значних успіхів застосування в усіх сферах нашого життя. Так, в автомобільній промисловості з початку 21 століття відбулася цифрова революція: автомобілі стали обладнуватися бортовими комп'ютерами, що дозволило більш гнучко налаштувати двигун, а із розвитком мобільних технологій автівки комплектуються різноманітними допоміжними системами.

Електронні системи допомоги водію (ADAS – Advanced Driver Assistant System) за своєю концепцією лише «консультують» водія та в критичних випадках корегують напрям руху автомобіля [1]. Загалом ці системи базуються на різноманітних датчиках, серед яких телевізійні системи (камери), LIDAR, інфрачервоні сенсори, радари та ультразвукові датчики. Найчастіше автовиробники суміщають ці датчики у єдину систему, адже кожен із датчиків має свої переваги та недоліки. Але без телевізійних систем керування не обходиться жодна сучасна автівка, адже такі системи дають широкий спектр корисної інформації: від наявності перешкоди перед автомобілем до розмірів перешкоди та траєкторії її руху. Безумовно, камери мають і недоліки, такі як непрацездатність при тумані та зниження дальності розпізнавання за умов обмеженої видимості, але ці недоліки є несуттєвими, та за необхідності камери замінюються іншими сенсорами, наприклад, тепловізорами.

В останніх дослідженнях [2, 3] телевізійних систем калібрування проводиться в автоматичному режимі або не проводиться взагалі. Без проведення калібрування порушується геометрична подoba між об'єктом та його зображенням, як наслідок, алгоритми керування автомобілем працюють з похибкою [4, 5]. В іншому випадку, при автоматичному калібруванні, можливим є неправильне визначення параметрів камери та такий підхід є доволі складним [6, 7]. Тому в цій статті пропонується простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового статичного калібрування камери.

Також слід зазначити, що до подібних камер висувуються окремі вимоги щодо якості зображення [8 - 10], а саме: висока роздільна здатність, широкий кут поля зору, мінімальна дисторсія при максимальному куті поля зору. Якщо значення дисторсії буде занадто великим, то калібрування може взагалі не покращити результат [11]. Тому значну увагу слід приділяти саме вибору камери, адже від цього буде залежати кінцевий результат.

Постановка задачі

Мета дослідження полягає в тому, щоб розробити простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери.

Вимоги до камер в автомобільній промисловості доволі специфічні: вони повинні мати широкий кут поля зору та, при цьому, не порушувати геометричну подobу між об'єктом та його зображенням, мати високу роздільну здатність та високий динамічний діапазон. Для забезпечення широкого кута поля зору в камеру спеціально вводиться дисторсія.

Застосування дисторсії

Дисторсія – це аберация оптичних систем, при якій лінійне збільшення змінюється по полю зору, порушуючи подібність між об'єктом та його зображенням [1].

«Подушкоподібна» дисторсія виникає у випадку, коли лінійне збільшення зростає з віддаленням елементів зображення від оптичної осі. Якщо лінійне збільшення зменшується з віддаленням елементів зображення від оптичної осі, то виникає «бочкоподібна» дисторсія [1].

Дисторсія виправляється підбором лінз та інших елементів оптичної системи при її розробці, у цифровому зображенні може бути виправлена програмно [1].

Деякі камери вносять значну дисторсію в зображення, а в камери автомобіля вона залишається значною спеціально задля збільшення кута поля зору. Двома основними видами дисторсії є радіальна та тангенціальна.

Радіальна дисторсія призводить до того, що прямі лінії виглядають викривленими. Радіальна дисторсія стає більшою, чим далі від центру зображення розташовані точки. Наприклад, на рисунку 1 можна побачити, що лінії будівлі відхиляються від прямого напрямку. Червоними лініями вказано прямий напрям ліній у реальному просторі [2].



Рис. 1. Приклад радіальної дисторсії на камері відеореєстратора

Радіальна дисторсія може бути представлена наступним виразом [2]:

$$\begin{aligned}x_{\text{distorted}} &= x(1+k_1r_2+k_2r_4+k_3r_6); \\y_{\text{distorted}} &= y(1+k_1r_2+k_2r_4+k_3r_6).\end{aligned}\quad (1)$$

Аналогічно, тангенціальна дисторсія виникає через те, що об'єкти, який формує зображення, не розташований ідеально паралельно площині зображення. Тому деякі ділянки зображення можуть виглядати ближчими, ніж очікувалося. Математично тангенціальна дисторсія може бути представлена як [2]:

$$\begin{aligned}x_{\text{distorted}} &= x + [2p_1 \cdot xy + p_2(r_2+2x_2)]; \\y_{\text{distorted}} &= y + [p_1 \cdot (r_2+2y_2) + 2p_2 \cdot 2xy].\end{aligned}\quad (2)$$

Отже, загалом для калібрування необхідно знайти п'ять параметрів, відомих як коефіцієнти дисторсії [2]:

$$\text{Distortioncoefficients} = (k_1, k_2, p_1, p_2, k_3).\quad (3)$$

Визначення кута поля зору

Як зазначалося раніше, автомобільні камери розробляються з великим кутом поля зору, але при цьому спотворюється геометрична подoba між предметами та їх зображеннями. Слід зазначити, що для автомобілів досить важливий кут поля зору, адже від того що «бачить» камера залежить безпека на дорозі. Ідея цієї статті полягає у використанні ширококутної камери для знаходження дорожніх знаків, але із використанням калібрування для підвищення точності їх знаходження. Для цього порівнюємо точність детектування із звичайною камерою мобільного телефону OnePlus 6t, який використовує модуль Sony IMX519 [3]. В якості ширококутної камери використовуємо відеореєстратор Aspiring Proof 1 із приймачем випромінювання GC2363 [4].

Для початку визначимо кут поля зору кожної камери за допомогою роздрукованих мір кутів [5]. Вимірювання показали, що камера телефону має кут поля зору по горизонталі близько 60°(рис. 2).

Далі були проведені аналогічні вимірювання із ширококутною камерою відеореєстратора. Для неї кут поля зору по горизонталі складає приблизно 150°. Слід зазначити, що абсолютно кожне із зображень не піддавалося жодній обробці.

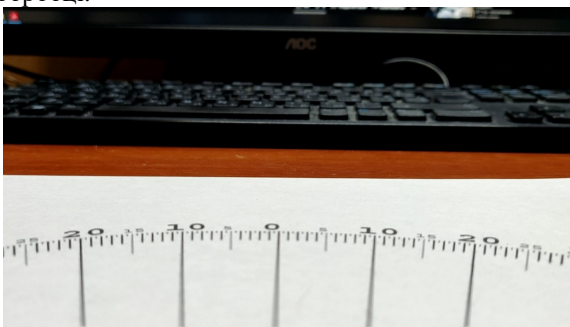


Рис. 2. Визначення кута поля зору цифрової камери мобільного телефону

Калібрування камери

Потрібні щонайменше 10 тестових шаблонів для калібрування камери. Важливими даними, необхідними для калібрування камери, є набір тривимірних точок реального світу та відповідні двовимірні координати цих точок на зображенні [1].

Візерунки шахової дошки чіткі, їх легко виявити на зображенні. Кути квадратів на шаховій дошці ідеально підходять для їх локалізації, оскільки мають різкі градієнти в двох напрямках. Крім того, ці кути пов'язані ще й тим, що вони знаходяться на перетині шахових ліній. Всі ці факти використовуються для надійного розташування кутів квадратів у шаховому порядку [2]. Приклад шаблону зображено на рис. 3.

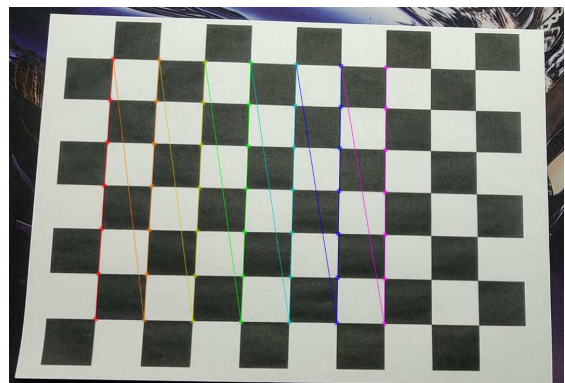


Рис. 3. Приклад калібрування камери [2]

На кожен з пристроїв виконуємо декілька фото шахової дошки, після цього комп'ютерний алгоритм на основі бібліотеки OpenCV [1] визначає положення опорних точок на зображенні та їх викривлення згідно шаблону. Далі на основі цієї інформації обраховується так звана «матриця камери» та застосовується до вихідного зображення. Після цих маніпуляцій отримуємо скоректоване від дисторсії зображення. Калібрування за допомогою шахової дошки виконується тільки один раз для визначення матриці камери, далі зображення автоматично перебудовується відповідно до цієї матриці. Процес калібрування камери реєстратора показаний на рисунку 4.



Рис. 4. Процес калібрування ширококутної камери відеореєстратора

На цьому етапі застосовується перерахунок спотвореного зображення за допомогою алгоритму OpenCV. Після перерахунку отримуємо нове виправлене зображення.

Застосуємо калібрування до зображень з камери відеореєстратора. На рис. 5 наведені зображення з камери відеореєстратора до та після калібрування.



а)



б)

Рис. 5. Зображення з камери відеореєстратора до та після калібрування [4]

На цих зображеннях можна побачити, що дисторсія дійсно стала меншою. На краях поля зору зображення досі викривлене. Це пов'язано з особливостями конкретної моделі камери.

Були проведені вимірювання дисторсії цифрової камери відеореєстратора згідно стандарту «ISO 9039-2008». Результати вимірювань показали, що дисторсія камери до калібрування становила 10 %, а після калібрування – 2 %.

Локалізація дорожніх знаків

Тепер можна порівняти ефективність детектування дорожніх знаків на відкаліброваних камерах. Для цього скористаємося підходом до знаходження дорожніх знаків, який розглянуто в статті [5]. Ефективність знаходження знаків дорожнього руху оцінюватимемо за допомогою метрики IoU - Intersection over Union (перетин над сполученням) [6]. Метрика повертає значення в діапазоні [0..1] та характеризує точність локалізації об'єкта на зображенні. Чим вищий IoU, тим точніше знайдено об'єкт.

Застосуємо алгоритм знаходження дорожніх знаків до двох типів камер після їх калібрування [7].

Алгоритм побудований на основі згорткової нейронної мережі, яку необхідно навчати за допомогою датасету (набору зображень). Для цього навчання даної мережі був використаний датасет LISA Traffic Sign Dataset [8 - 12]. Результати досліджень представлені на рисунках 6 і 7.

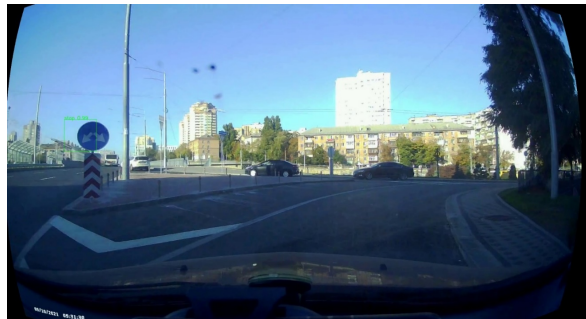


Рис. 6 Знайдений дорожній знак за допомогою камери мобільного телефону (IoU = 0.98)

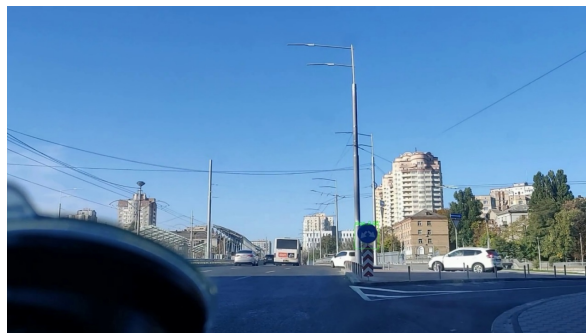


Рис. 7 Знайдений дорожній знак за допомогою камери відеореєстратора (IoU = 0.99)

Як можна побачити із наведених фотографій, дорожній знак був знайдений навіть на краю поля зору камери відеореєстратора після калібрування. Камера телефону вже давно «не бачить» цей знак у такому положенні автомобіля через обмежений кут поля зору по горизонталі.

IoU знайденого знаку за допомогою камери складає 0,98, а для камери відеореєстратора IoU дорівнює 0,99.

Висновки

Розроблено простий метод зменшення дисторсії в автомобільному відеореєстраторі з великим кутовим полем зору за допомогою цифрового калібрування камери. Дослідження цього методу з використанням цифрової камери мобільного телефону і відеореєстратора показало, що

1. Для підвищення ефективності керування автомобілем доцільно використання ширококутних камер з дисторсією без втрати точності та геометричної подоби між зображенням та об'єктом. Після калібрування цифрової камери відеореєстратора дисторсія зменшилась з 10 % до 2 %.

2. Можливе використання ширококутних телевізійних систем керування автомобілем з великим значенням дисторсії після її калібрування. Дослідження показали, що при цьому метрика IoU на ширококутній камері майже така сама, як і на звичайній камері, а дорожній знак був знайдений навіть на краю поля зору.

3. Застосування при експериментах розробленого методу калібрування ширококутних камер зберігає геометричну подібність між об'єктом та його зображенням при значно більшому куті поля зору в такій камері. Час обробки зображення незначний, оскільки сучасний рівень потужності обчислювальної техніки дозволяє опрацьовувати такі операції в режимі реального часу.

4. Дослідження в цьому напрямку є надзвичайно актуальними, адже автомобілів стає все більше та надалі необхідно покращувати якість детектування таких критичних елементів дорожньої інфраструктури, як дорожні знаки та дорожня розмітка. Все це є основою для створення повністю автопілотованого автомобіля.

Література

- [1] Camera Calibration. [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4.15/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- [2] G. K. Tummala, *Automatic Camera Calibration Techniques for Collaborative Vehicular Applications*. The Ohio State University, 2019.
- [3] O. D. Faugeras, Q. T. Luong, S. J. Maybank, "Camera self-calibration: Theory and experiments", In: Sandini, G. (eds) *Computer Vision – ECCV'92. ECCV 1992. Lecture Notes in Computer Science*, vol 588. Springer, Berlin, Heidelberg, 1992. DOI:10.1007/3-540-55426-2_37
- [4] В. С. Стаднічук, В. Г. Колобродов, "Калібрування ширококутної автомобільної камери", на XXI Між нар. Наук.-техн. Конф. ПРИБАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, Київ, 2022, с. 32-33.
- [5] K. Campbell, "The SHRP2 Naturalistic Driving Study", *TR News* 282, pp. 30-35, 2012.
- [6] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration. Pattern Analysis and Machine Intelligence," *IEEE Transactions*, 22(11), 1330–1334, 2000. doi: 10.1109/34.888718
- [7] S. Houben, "Towards the intrinsic self-calibration of a vehicle-mounted omnidirectional radially symmetric camera," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV '14)*, pp. 878–883, 2014. doi: 10.1109/IVS.2014.6856497.
- [8] J. H. Brito, R. Angst, K. Köser and M. Pollefeys, "Radial Distortion Self-Calibration," in *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 1368-1375. doi: 10.1109/CVPR.2013.180.
- [9] B. Ranft and C. Stiller, "The Role of Machine Vision for Intelligent Vehicles," in *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 8-19, March 2016. doi: 10.1109/TIV.2016.2551553.
- [10] W. Zhang and M. J. Wolski. "Self calibration of extrinsic camera parameters for a vehicle camera," U.S. Patent No. 8,373,763 (12 Feb. 2013).
- [11] R. P. D. Vivacqua, M. Bertozzi, P. Cerri, F. N. Martins and R. F. Vassallo, "Self-Localization Based on Visual Lane Marking Maps: An Accurate Low-Cost Approach for Autonomous Driving," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 582-597, Feb. 2018. doi: 10.1109/TITS.2017.2752461.
- [12] H. Zhou, and H. Wang, "Vision-based lane detection and tracking for driver assistance systems: A survey," in *2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, IEEE (2017). doi: 10.1109/ICCIS.2017.8274856

V. S. Stadnichuk, V. G. Kolobrodov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
IMPROVING THE TRAFFIC SIGNS ACCURACY DETECTION WITH DIGITAL CALIBRATION OF WIDE-ANGLE CAMERA

Problems. The analysis of statistical data shows that from year to year there are more and more vehicles on public roads, as result, the number of accidents increases and the risk for each road user increases. To ensure road safety, automakers are implementing driver assistance systems and cars with autonomous control elements. Such systems are capable of analyzing the environment and in the dangerous situations can correct the driver's actions or taking control of the vehicle. Typically, such systems work with the television systems help, one of the requirements for which is a wide angle of view. However, the main disadvantage of wide-angle systems is the large distortion, ie the geometric distortion of the similarity between the object and its image.

Objective. Develop an approach and algorithm for calibration of wide-angle cameras for autonomous driving.

Methods. Analysis and modeling of television car control system and its calibration.

Results. A comparison of wide-angle and conventional television systems was performed, each was calibrated and the analysis of the location of road signs of each of the systems was performed.

Conclusions. It has been shown that for the purposes of driving a car, it is possible to use wide-angle television systems with their subsequent calibration to eliminate geometric distortion between the object and its image. It is possible to use wide-angle television car control systems with a large value of distortion after its calibration. Studies have shown that the IoU metric on a wide-angle camera is almost the same as on a conventional camera, and the road sign was found even at the edge of the field of view.

The application of the developed method of calibration of wide-angle cameras in experiments preserves the geometric similarity between the object and its image at a much larger angle of view in such a camera. Image processing time is insignificant, because the current level of computer power allows you to process such operations in real time.

Keywords: television car control system; camera; distortion; calibration; camera; ADAS; field of view angle; IoU.

*Надійшла до редакції
23 січня 2022 року*

*Рецензовано
22 лютого 2022 року*