

Шорнікова С.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ОПТИЧНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ: ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Досліджено принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Запропоновано структуру оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами, яка складається з однієї або декількох камер, які можуть бути як цифровими, так і аналоговими, з установленою на них відповідною оптикою для отримання зображень, а також до структури входить засіб для підсвічування та об'єкт, відстань до якого/від якого вимірюється, устаткування введення/виведення або канали зв'язку для виведення отриманих результатів. Розроблено алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою. Схематично представлений алгоритм обґрунтовано математичними виразами та підкріплено описом процесу налаштування оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Наголошено, що алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами включає рішення трьох основних завдань: визначення фокусних відстаней відеокамер, кутових відхилень відеокамер і лінійних відхилень відеокамер. Підкреслено, що допоміжними операціями під час визначення є попередня обробка зображення, вибір калібрувального об'єкта для калібрування кутових відхилень і фокусних відстаней та вибір калібрувального об'єкта для калібрування лінійних відхилень. Схематично зображено принципи встановлення відеокамер оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Зазначено, що представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітора, а введення графічної інформації виконується за таким алгоритмом: пошук зображення на камері, виокремлення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передання цифрового опису елементів зображення на персональний комп'ютер для подальшої обробки.

Ключові слова: оптична система, відеокамера, реалізація, об'єкт, вимірювання, відстань, калібрування.

Постановка проблеми. Завдання вимірювання відстані між двома об'єктами було актуальним завжди, проте нині його значущість у техніці особливо зросла, що зумовлено необхідністю високо-точного позиціонування об'єктів у будівництві, геодезії, військовій справі, навігації тощо. Саме таке завдання вирішують оптичні системи вимірювання відстані між об'єктами. Вони можуть бути різними і включають питання розпізнавання об'єктів, визначення фізичних параметрів середовища. Одним із найважливіших є визначення відстані до об'єктів. Наявність оптичної системи в складі сучасного виробничого пристрою дозволяє оцінювати стан навколишнього простору. Це особливо важливо для рухомих технічних пристроїв, оскільки гарантує безпеку і дозволяє ухвалювати рішення про найбільш вигідний спосіб виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових надбань за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

В.М. Сокурєнко та І.О. Смажко [1] запропонували здійснювати автоматизований розрахунок

оптичної системи об'єктива для короткохвильового інфрачервоного діапазону (short-waveinfrared, SWIR) за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації – адаптивного методу диференційної еволюції Коші.

У [2] запропоновано просту за конструкцією схему сенсора для безконтактних стаціонарних лінійних вимірювань з оптичними волокнами як світловодами. Схема цього сенсора дає змогу також конструктивно зробити головку сенсора у вигляді вимірювального зонда з оптичного волокна, що забезпечить проведення експресконтролю положення контрольованого об'єкта у просторі. Авторами І.О. Брагинєць та Ю.О. Масюренко проведено світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми вказаного сенсора з урахуванням параметрів його оптичних елементів та оцінено співвідношення «сигнал – шум» на виході фотоприймача. Обрано та обґрунтовано для запропонованої схеми сенсора застосування частотного фазового методу обробки сигналів на виході фотоприймача для вимірювання відстані до

контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі.

Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков, Ю.А. Петрушко [3] провели дослідження багатокомпонентної оптичної системи для світлолазерної терапії. У роботі представлено один із методів розрахунку двокомпонентної оптичної системи, а саме матричний метод. Розглянуто різноманітні варіації розташування оптичних елементів: опромінюваний об'єкт розташований у нескінченності, джерело світла розташоване в передній фокальній площині освітлювальної системи, оптична система проектує джерело світла безпосередньо на освітлювальний об'єкт, освітлювальна система утворює зображення джерела в площині вхідної зіниці оптичної системи.

Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин розкрив А.С. Дуднік [4]. Автором удосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників, та вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем із метою підвищення точності під час передання даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

Із зарубіжних праць варто вказати на роботи таких авторів: Van Trees Harry L. Detection [5], Udd Eric, Spillman William [6], G. Judd, P. Steenkiste [7], P. Poulichet, F. Costa, E. Laboure [8], M. A. Redfern, S. C. Terry, F. V. P. Robinson, Z. Q. Bo [9], T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An [10], Choi Tae Jong, C. W. Ahn [11], M. C. Gardner [12], H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger [13], A. Eiben, J. Smith [14], R. Haupt, S. Haupt [15] та ін.

Ураховуючи описані наукові напрацювання з теми, питання реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Мета статті – дослідити принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Структура оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами складається з однієї або декількох камер, які можуть бути як цифровими, так і аналоговими, з установленою на них відповідною оптикою для отримання зображень, а також до структури входить засіб для підсвічування та об'єкт, відстань до якого/від якого вимірюється (рис. 1), устаткування введення/виведення або канали зв'язку для виведення отриманих результатів.



Рис. 1. Структура оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами

* Власна розробка автора на основі [10; 12; 15]

Суть алгоритму вимірювання відстані між об'єктами пояснюється на рис. 2, де наведено алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою.

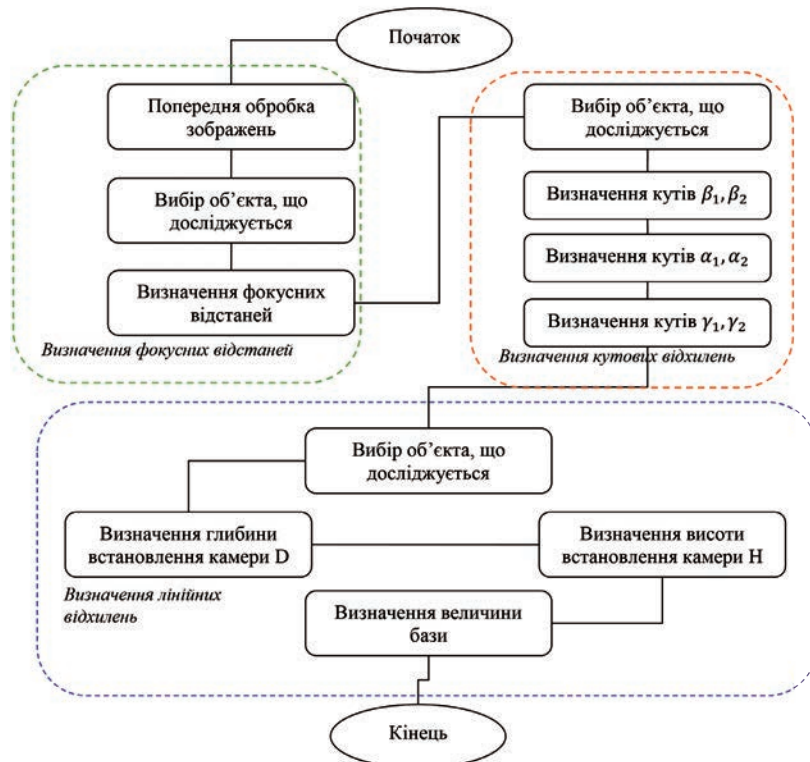


Рис. 2. Алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами

* Власна розробка автора на основі [8; 11]

Пропонований алгоритм дозволяє оцінювати такі параметри оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами:

- кути відхилення $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$ (рис. 3), що визначають взаємозв'язок головних оптичних осей відеокамер, що входять до складу оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами;
- відношення \mathcal{F} фокусних відстаней об'єктивів першої та другої відеокамер;
- різниця глибин D установалення відеокамер (рис. 3);
- різниця висот H установалення відеокамер (рис. 3);
- відстань по горизонталі (величина бази) L між відеокамерами (рис. 3).

Алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами (рис. 2) включає рішення трьох основних завдань: визначення фокусних відстаней відеокамер – приведення значення параметра \mathcal{F} до одиничного, визначення кутових відхилень відеокамер – приведення значень параметрів $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ до нульових значень, визначення лінійних відхилень відеокамер – приведення значень параметрів D, H до нульових значень, L до заданого ненульового значення L' .

Допоміжними операціями під час визначення є попередня обробка зображення, вибір калібрувального об'єкта для калібрування кутових відхилень і фокусних відстаней та вибір калібрувального об'єкта для калібрування лінійних відхилень.

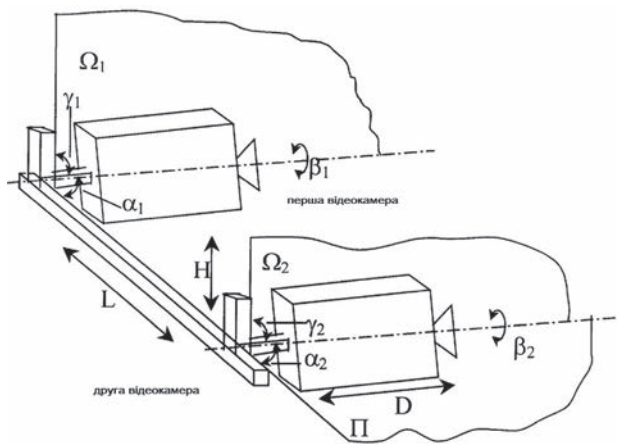


Рис. 3. Визначення параметрів оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами

Попередня обробка зображень (блок 1, рис. 2) полягає у фільтрації зображень за необхідності (як-от методом медіанної фільтрації) і виокремленні контурів.

Виокремлення контурів проводять градієнтним методом, згідно з яким оператор $B(x, y)$

визначення контуру в точці з координатами (x, y) дорівнює

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } G(x, y) > L_p \\ 0, & \text{при } G(x, y) < L_p \end{cases}$$

де L_p – поріг виокремлення контуру, який дорівнює середньому значенню між максимальною і мінімальною яскравістю пікселів зображення;

$$G(x, y) = |I(x+1, y) + I(x-1, y) + I(x, y+1) + I(x, y-1) - 4I(x, y)|,$$

де $I(x, y)$ – яскравість точки з координатами (x, y) .

У блоці 2 (рис. 2) проводиться вибір калібрувального об'єкта. Для вибору калібрувального об'єкта, що становить один або кілька контурів, із безлічі виокремлених контурів об'єктів на парі зображень із різних відеокамер міститься контур, чітко помітний на обох зображеннях, що має достатню довжину, розташований у центрі кадру і незмінний у часі. Вибір калібрувального об'єкта проводиться на основі розрахунку значень функцій належності α_i лінгвістичної змінної «калібрувальний об'єкт» за максимальним значенням α_f

$$\mu_f = \mu_g \wedge \mu_p \wedge \mu_c \wedge \mu_t,$$

де α_g – функція належності терма «чіткий», α_p – функція належності терма «довгий периметр», α_c – функція належності терма «центр кадру», α_t – функція належності терма «незмінний».

Функція належності α_g терма «чіткий контур» визначається на основі розрахунку першої похідної зображення об'єкта і дорівнює

$$\mu_g = 1 + (a \cdot (b - \bar{g})^c)^{-1}, \text{ при } a = 2, b = 1, c = 5$$

$$\bar{g} = \frac{1}{N_{kl}} \sum_{i=1}^{N_{kl}} G(x_i, y_i),$$

де \bar{g} – середнє значення перепадів яскравості на всіх точках контуру, N_{kl} – кількість складників контурних точок.

Функція належності α_p терма «довгий периметр» дозволяє вибирати контури за довжиною периметра

$$\mu_p = 1 + (a \cdot (b \cdot P)^c)^{-1}, \text{ при } a = 0,03, b = 100, c = 3$$

де P – довжина контуру в точках.

Функція належності α_c терма «центр кадру» дозволяє вибрати об'єкти, розташовані близько до центру кадру

$$\mu_c = 1 + (0,5 \cdot (5 - d_c)^c)^{-1}, \text{ при } a = 0,5, b = 5, c = 4$$

де d_c – віддалення центру контуру від центру кадру.

Функція належності α_t терма «незмінний» дозволяє відокремити контури нерухомих об'єктів

від контурів об'єктів, що змінюються в часі, як-от рухомий маніпулятор робота:

$$\mu_t = 1 + \left(a \cdot (\Delta Kb)^c \right)^{-1}, \text{ при } a = 0,5, b = 1, c = 2,5,$$

де \mathcal{OK} – кількість незбіжних точок контуру через фіксований проміжок часу.

Наступним кроком калібрування є досягнення рівності фокусних відстаней першої та другої відеокамер (блок 3, рис. 2).

Для цього вимірюється периметр калібрувального об'єкта на обох зображеннях. Довжина контуру реального об'єкта на його зображенні прямо пропорційна фокусній відстані, тому справедлива формула визначення ставлення фокусних відстаней на ділянці зображення одного і того ж об'єкта на двох кадрах:

$$\Delta f = \frac{P_1}{P_2}$$

де P_1, P_2 – периметр контуру на першому і другому зображеннях відповідно.

Відбувається ітераційний процес зміни фокусних відстаней першої та другої відеокамер, поки відношення фокусних відстаней не стане рівним одиниці з деякою заданою точністю δ_f .

Для калібрування кутових відхилень головних оптичних осей відеокамер знову необхідно провести вибір калібрувального об'єкта на зображеннях.

Калібрувальний об'єкт повинен володіти такими властивостями: достатнім віддаленням від оптичної системи (потрібно для ослаблення ефекту впливу оптичної системи), чіткістю, центральним положенням у кадрі, оптимальним розміром.

Вибір калібрувального об'єкта (блок 4, рис. 2) проводиться на основі розрахунку значень функцій належності μ_{kp} об'єктів, що перебувають у кадрі, і вибору об'єкта з максимальним значенням μ_{kp}

$$\mu_{kp} = \mu_g \wedge \mu_p \wedge \mu_c \wedge \mu_\delta,$$

де μ_δ – функція належності, визначальне видалення об'єкта щодо площ об'єктів δ_s на зображеннях із різних відеокамер, що дорівнює

$$\mu_\delta = 1 + \left(5 \cdot (1,0 - \delta_s)^2 \right)^{-1}$$

Після вибору калібрувального об'єкта проводиться калібрування кутових відхилень $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$.

Необхідною є паралельність осей координат першої та другої відеокамер, що відповідають за висоту (блок 5, рис. 2). Обертанням першої та другої відеокамерами навколо своєї осі змінюємо кути β_1, β_2 у сторони, спрямовані на зменшення цих кутів.

Калібрування кутів α_1, α_2 проводиться аналогічно (блок 6, рис. 2): на основі аналізу двох кадрів, коли вертикальні осі координат зображень паралельні, але об'єкт займає різні положення на кадрах зображення, здійснюємо поворот першої і другої відеокамер у площині П (рис. 3), домагаючись збігу відповідних координат x_i , безлічі точок, складників калібрувального об'єкта.

У блоці 7 (рис. 2), повертаючи першу і другу відеокамери в площинах $|_1, |_2$ відповідно, змінюємо кути γ_1, γ_2 і отримуємо збіг координат відповідних точок об'єкта на обох зображеннях.

Проведене калібрування кутових параметрів $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$ визначають напрями головних оптичних осей відеокамер, у результаті якої головні оптичні осі відеокамер оптичної системи паралельні.

Для визначення лінійних параметрів H, D, L необхідно розмістити калібрувальний об'єкт так, щоб він був на зображенні обох відеокамер (калібрувальний об'єкт новий і не збігається з калібрувальним об'єктом для калібрування кутових відхилень). Розміщення калібрувального об'єкта може здійснюватися автоматично маніпулятором або вручну. Калібрувальний об'єкт на зображенні вибирається оператором або автоматично за відомих геометричних особливостей калібрувального об'єкта (блок 8, рис. 2).

Першим етапом калібрування є визначення різниці глибин установлення відеокамер D і приведення її до нульового значення (блок 9, рис. 2).

Цей етап калібрування заснований на тому, що різниця глибин встановлення відеокамер дорівнює нулю за виконання двох умов:

1) розмір зображення калібрувального об'єкта по горизонталі однаковий на обох зображеннях (рис. 4, $r_{01} = r_{02}$);

2) центри зображень калібрувального об'єкта розташовані на рівній відстані від суміжних країв кадрів (рис. 4, $x_{01} = x_{02}$).

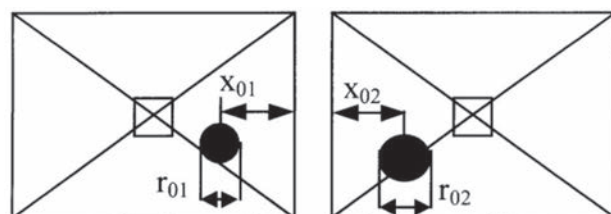


Рис. 4. Визначення положення об'єкта в межах обох камер

Перша умова заснована на тому, що за однакових фокусних відстаней відеокамер (фокусні відстані відкалібровані раніше) розміри зображень

об'єкта на різних зображеннях будуть однаковими за умов рівних відстаней до об'єкта.

Для доказу першої умови розглянемо трикутники OFx_1 і OFx_2 (рис. 5) і зазначимо, що точки p_{11}, p_1, p_{22} та p_{12}, p_2, p_{21} відповідно збігаються (це припущення істотно полегшує доказ, але при цьому не впливає на його суть):

$$tg v_1 = \frac{x_1}{f} = \frac{p_1}{d_1 + f}$$

$$tg v_2 = \frac{x_2}{f} = \frac{p_2}{d_1 + f}$$

Таким чином, під час калібрування різниці глибин установа відеокамер D ітераційно проводиться переміщення тієї відеокамери назад для її видалення від калібрувального об'єкта. Критерієм зупинки ітераційного процесу є досягнення рівностей $x_{01} = x_{02}$ і $\Delta x_1 = \Delta x_2$ із заданими точностями.

Наступною з лінійних параметрів калібрується різниця висот установки відеокамер H (блок 10, рис. 2).

На рисунку 5а показана геометрична модель відеокамер із передніми площинами зображення, яка пояснює процес калібрування різниці висот установки відеокамер H .

Таким чином, висота калібрувального об'єкта на зображенні верхньої відеокамери буде менше за висоту калібрувального об'єкта на зображенні

нижньої відеокамери. Висоти зображень об'єкта будуть збігатися за $H=0$, для чого проводиться підйом тієї відеокамери, висота калібрувального об'єкта на зображенні якої менше, доки висоти зображень об'єкта не збігатимуться.

Останнім із лінійних параметрів калібрується величина бази L .

Метою калібрування параметра L , що визначає відстань по горизонталі між відеокамерами, є приведення цього параметра до заданого значення для забезпечення стереоскопічного сприйняття із заданими параметрами.

На відміну від раніше відкаліброваних параметрів калібрування базової відстані може проводитися тільки за умов відомої відстані d від калібрувального об'єкта до оптичної системи.

Формула для визначення величини бази L залежно від координат x_1, x_2 калібрувального об'єкта на зображеннях і відстані d до нього:

$$L = (x_1 + x_2) \frac{X_{mm}}{X_{max}} \cdot \left(1 + \frac{d}{f}\right),$$

де X_{mm} – половина довжин прийомних матриць відеокамер у метрах, що визначаються за паспортом відеокамер, f – фокусна відстань відеокамер у метрах, X_{max} – половина розмірів прийомних матриць відеокамер у точках.

Калібрування величини бази проводиться шляхом розрахунку значення L за наведеною форму-

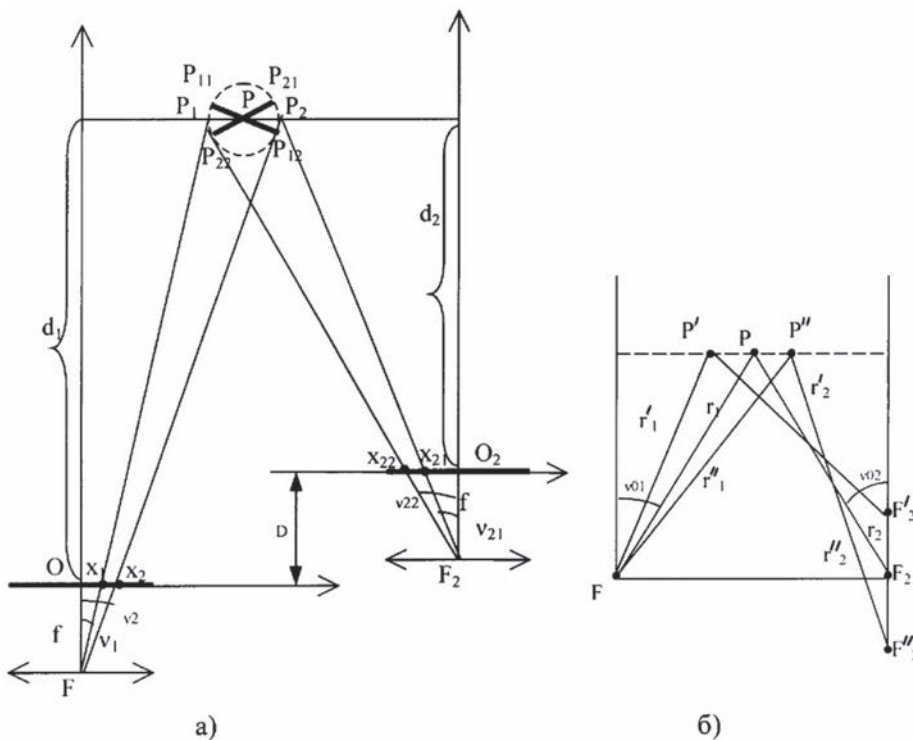


Рис. 5. Координати встановлення відеокамер

лою і зміщення другої відеокамери щодо першої відеокамери праворуч на величину $\varnothing L$.

Висновки. У роботі досліджено принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Наведено алгоритм роботи та налаштування оптичної системи з детальним описом послідовності дій. Представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітора. Уведення графічної інформації

виконується за таким алгоритмом: пошук зображення на камері, виокремлення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передання цифрового опису елементів зображення на ЕОМ для подальшої обробки.

Перспективи подільних досліджень ґрунтуються на вдосконаленні алгоритму зчитування відстані від/до об'єктів із подальшою автоматизацією калібрування.

Список літератури:

1. Сокурєнко В.М., Смажко І.О. Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об'єктива. *Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки*. Хмельницький. 2019. № 6. С. 202–205.
2. Bragynets, I. O., Masjurenko Yu. O. Fiber optical sensor for linear measurements. *Technical Electrodynamics*. 2019. No 6. P. 81–87.
3. Трембовецька Р.В., Тичков В.В., Петрушко Ю.А. Дослідження багатокомпонентної оптичної системи для світло-лазерної терапії. *Вісник ЧДТУ*, 2018. Вип. 1. С. 122–129.
4. Дуднік А.С. Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин : дис. ... д-ра техн. наук. : 05.11.01. Київ, 2019. 276 с.
5. Van Trees Harry L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 690 p. doi: <https://doi.org/10.1002/0471221090>
6. Udd Eric, Spillman William. Fiber optic sensors an Introduction for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 506 p. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118014103>
7. Judd G., Steenkiste P. Design and implementation of an RF front end for physical layer wireless network emulation. *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring*. IEEE, 2007. P. 974–979.
8. Poulichet P., Costa F., Laboure E. High-Frequency Modeling of a Current Transformer by Finite-Element Simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 39(2). P. 998–1007.
9. Redfer M. A., Terry S. C., Robinson F. V. P., Bo Z. Q. Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection. *International Conference on Power Systems Transients. IPST 2003 in New Orleans, USA*.
10. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013. 12 p. doi: 10.1155/2013/969734
11. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. *Journal of Computers*. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139–2145. doi: 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
12. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2016. Vol. 9987. P. 99870C.
13. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
14. Eiben A., Smith J. Introduction to Evolutionary Computing; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
15. Haupt R., Haupt S. Practical Genetic Algorithms. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.

Shornikova S.V. OPTICAL SYSTEM MEASURING OF DISTANCES BETWEEN OBJECTS: PRINCIPLES OF REALIZATION

A study of the principles of implementation of the optical system for measuring the distance between objects. The structure of an optical system for measuring the distance between objects, which consists of one or more cameras, which can be both digital and analog, with the appropriate optics for image acquisition, is also proposed, the structure also includes a means for illumination and the object distance to which / from which it is measured, input / output equipment or communication channels for output of the obtained results. An algorithm for estimating the distance and linear dimensions of linear objects by an optical system has been developed. The schematically presented algorithm is substantiated by mathematical expressions and supported by a description of the process of setting up an optical system for measuring the distance between objects. It is emphasized that the algorithm for estimating the distance and linear dimensions of linear objects with an

optical system for measuring the distance between objects includes solving three main tasks: determining the focal lengths of video cameras, determining the angular deviations of video cameras and determining linear deviations of video cameras. It is emphasized that the auxiliary operations in the determination are image pre-processing, selection of a calibration object for calibration of angular deviations and focal lengths, and selection of a calibration object for calibration of linear deviations. The principles of installation of video cameras of optical system of measurement of distance between objects are schematically represented. It is noted that the representation of the obtained dimensions by the optical system for measuring the distance between objects is directly from the cameras on the monitor screen, and the input of graphic information is performed according to the following algorithm: search for images on the camera, selection of image elements to be encoded. digital form and transfer of the digital description of the image elements to a personal computer for further processing.

Key words: *optical system, video camera, implementation, object, measurement, distance, calibration.*