

УДК 621:681.7

**АНАЛІЗ ПОХИБОК КАЛІБРУВАННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ  
КЕРУВАННЯ АВТОМОБІЛЕМ***Стаднічук В. С., Колобродов В. Г.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [v.stadnichuk@kpi.ua](mailto:v.stadnichuk@kpi.ua)*

Калібрування камери є критичним методом для додатків 3D вимірювання на основі 2D-зображень. Внутрішні параметри камери, такі як головна точка і головна відстань, визначаються в процесі калібрування. Головна точка є перетином оптичної осі камери і площини зображення, а головна відстань вимірюється від центра лінзи до головної точки.

В даній статті теоретично досліджено похибки калібрування камери в двох опорних площинах з урахуванням різних умов, наприклад, зміщення опорної площини та зміни головних відстаней. Для оцінки похибок використовувалися помилки визначення координат опорних точок на зображенні.

Похибка оцінки головної відстані і головної точки формулюється за допомогою аналітичних рівнянь, а результати порівнюються з результатами моделювання. Це дозволяє підтвердити ефективність запропонованих формул.

Дослідження показало, що в результаті зміщення опорної площини та змін головних відстаней виникають похибки калібрування. Отримані результати важливі для вдосконалення методів калібрування камери і поліпшення точності 3D вимірювань на основі 2D-зображень.

Ця стаття розширює розуміння похибок калібрування камери та надає нові теоретичні підходи до їх оцінки. Результати дослідження можуть бути корисними для науковців і практиків, які працюють у галузі комп'ютерного зору, обробки зображень та 3D-вимірювань. [1].

**Ключові слова:** калібрування камери; внутрішні параметри; головна точка; головна відстань; 3D вимірювання; 2D-зображення; опорні площини; похибки калібрування; трансляція опорної площини; аналітичні рівняння; ефективність формул; точність; обробка зображень; наукове дослідження.

**Вступ**

Положення цільового об'єкта на зображенні, що сформоване камерою, дає інформацію про напрямок візуальної лінії, що спостерігається камерою. Подібно до біокулярної трикутної зйомки, де кількість точок спостереження дорівнює двом, якщо отримано напрямки візуальних ліній від двох точок спостереження, тривимірне положення цільового об'єкта можна оцінити шляхом об'єднання цих напрямків. Щоб виконати цей процес з високою точністю, потрібен напрямок візуальної лінії з достатньою точністю. Щоб отримати напрямок візуальної лінії з високою точністю, необхідно відкалібрувати параметри камери, які використовуються для перетворення координат зображення в кут поля зору по відношенню до камери, при цьому необхідно виміряти координати зображення камери, характерні точки в цільовому об'єкті з достатньою точністю. Камери включають такі параметри, як координати зображення головної точки, яка є перетином оптичної осі камери та площини зображення, головна відстань, яка є відстанню між центром лінзи та головною точкою, розмір пікселя на площині зображення та коефіцієнти спотворення зображення, вони називаються внутрішніми параметрами. Таким чином, калібру-

вання камери є основною та практичною технікою в області 3-D вимірювань на основі візуальної інформації.

У цій статті визначається точність похибки щодо головної відстані та розмірів пікселя на площині зображення за таких репрезентативних умов на основі методу калібрування у 2 площинах: у двоплощинному методі калібрування [2] калібрувальна орієнтовна діаграма, на якій встановлено опорні точки, переміщується в напрямку глибини на один раз, а схема методу калібрування у двох площинах пояснюється в [2].

Умова 1. Ідентичні реперні точки беруться до і після переміщення реперної діаграми. (Тільки коли калібрувальна контрольна діаграма знаходиться близько до камери, площина зображення заповнюється опорними точками.)

Умова 2. Додаткові орієнтири беруться після переміщення калібрувальної орієнтовної діаграми [3].

Мета калібрування камери для автомобілів полягає в досягненні точної геометричної та радіометричної характеристики камери з метою забезпечення високоякісного сприйняття навколишнього середовища і надання відповідних візуальних даних для системи автоматичного водіння.

Калібрування включає в себе компенсацію похибок, які виникають з різних джерел, таких як неідеальне розташування камери, спотворення об'єктивом, шуми в електронній схемі і освітленні, а також деградацію камери з часом. Калібрування камери забезпечує відтворення кольорів, вимірювання відстані та орієнтації об'єктів з високою точністю, що є критичними факторами для безпеки й ефективності системи автоматичного водіння.

Недостатнє калібрування камери може призводити до появи різних похибок, які можуть негативно впливати на функціонування системи автоматичного водіння. Наприклад, геометричні похибки можуть призвести до неточності у визначенні відстаней і розташування об'єктів, що може спричинити неправильні рішення в системі автоматичного водіння. Радіометричні похибки можуть викликати неправильне відображення кольорів та контрасту, що може ускладнити аналіз візуальних даних і розпізнавання об'єктів.

Відповідне калібрування камери допомагає зменшити ці похибки і забезпечити високу точність вимірювання і сприйняття навколишнього середовища. Вона може включати в себе калібрування фокусної відстані, корекцію геометричних спотворень, вимірювання і компенсацію шумів, калібрування балансу білого та корекцію кольорових відхилень. Крім того, калібрування камери може виконуватися регулярно для компенсації змін у властивостях камери, які виникають з часом. Таким чином, належне калібрування камери є важливою процедурою для досягнення надійного та ефективного автоматичного водіння.

### Метод калібрування у двох площинах

На рис. 1 показано налаштування контрольної діаграми калібрування за допомогою системи калібрування з 2 площинами, а на рис. 2 – розташування контрольних точок калібрування на контрольній діаграмі калібрування.

#### 1. Налаштування опорних точок калібрування

Калібрувальна контрольна діаграма – це площина, на якій калібрувальні опорні точки розташовані через рівні інтервали  $l_c$  у горизонтальному та у вертикальному напрямках [4]. Осі координат  $x_w$ ,  $y_w$  тривимірної світової системи координат закріплені на цій площині, а вісь координат  $z_w$  перпендикулярна до калібрувальної орієнтовної діаграми. Для того, щоб зробити зміну в напрямку глибини, калібрувальна орієнтовна діаграма припускається переміщеною вздовж  $z_w$  з  $t_c$ . Надалі тривимірні світові координати опорних точок калібрування задаються, як

$${}^w r_i = \begin{bmatrix} {}^w x_i & {}^w y_i & {}^w z_i \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i l_c & -l_x / 2 & j l_c & -l_y / 2 & k t_c \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

де символи  $i$  та  $j$  позначають порядок точок калібрування для горизонтального та вертикального

напрямків, а  $k$  – число для руху калібрувальної контрольної діаграми, тобто

$$\left. \begin{aligned} k &= 0, 1, \\ i &= 0, 1, 2, \dots, I(k)-1 \text{ where } I(0) = I_{\text{near}}, I(1) = I_{\text{far}}, \\ j &= 0, 1, 2, \dots, J(k)-1 \text{ where } J(0) = J_{\text{near}}, J(1) = J_{\text{far}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$l_x$  і  $l_y$  – відстані між опорними точками на обох кінцях у горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно.

Тут, щоб спростити вираз, визначаємо

$$l = I + j I(k) + k I_{\text{near}} J_{\text{near}},$$

(якщо суму опорної точки виражають як  $L$ , її значення дорівнює 0, 1, ...,  $L-1$ ), як порядок об'єднання  $i, j$  і  $k$ .

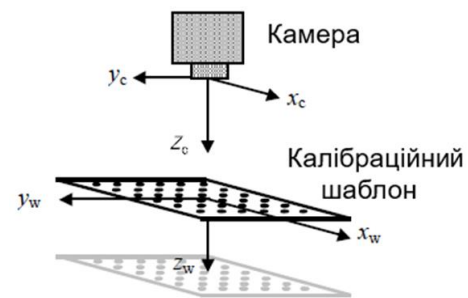


Рис. 1. Налаштування калібрувальних орієнтовних діаграм

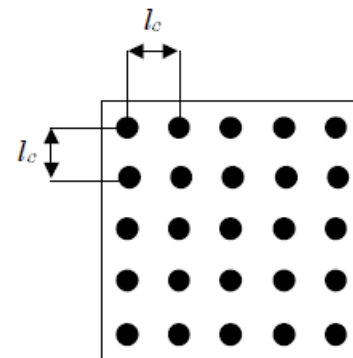


Рис. 2. Налаштування опорних точок калібрування

#### 2 Нормування

Нормування похибок калібрування відіграє важливу роль у забезпеченні точності та надійності системи керування автомобілем. Цей процес містить встановлення меж або стандартів для припустимих значень похибок, які можуть виникнути під час калібрування камер та інших датчиків, використовуваних у системі. Нормування допомагає встановити якісні показники, що мають бути досягнуті після процедури калібрування, а також визначити допустимі межі похибок для різних параметрів, таких як геометрія, радіометрія, кольоровість і точність вимірювання.

Ефективне нормування похибок калібрування сприяє досягненню високої точності та надійності системи керування автомобілем. Прийняття конкретних стандартів і встановлення меж похибок

дозволяє забезпечити відповідність вимогам безпеки й ефективності. Наприклад, для камери автомобіля можуть бути встановлені максимальні допустимі значення похибок, які враховують вимоги до точності вимірювання відстані, кута огляду та розпізнавання об'єктів. Інші параметри, такі як кольоровий баланс і контраст, також можуть бути нормовані для забезпечення правильного відображення візуальної інформації.

Нормування похибок калібрування допомагає уникнути недоліків та непередбачуваних помилок, які можуть виникнути внаслідок неправильного калібрування. Це сприяє зниженню ризику неправильних рішень, що можуть бути прийняті системою керування автомобілем, і покращує загальною безпеку на дорозі. Нормування похибок також спрямоване на забезпечення стабільної та надійної роботи системи в різних умовах, включаючи зміни освітлення, погодні умови та інші фактори, які можуть впливати на якість сприйняття та аналіз візуальних даних.

Координати зображення головної точки  $c=[c_u \ c_v]^T$ , і координати  $l$ -го зображення  $u_l=[u_l \ v_l]^T$ , нормалізовані за допомогою  $n_u$ , кількості пікселів у горизонтальному напрямку на площині зображення. Головна відстань  $f$  [5] нормалізується за допомогою  $s_u$ , висоти одного пікселя. Величина  $P$  позначає відношення горизонтальної до вертикальної довжини пікселів,  $s_u/s_v$ , тобто

$$\left. \begin{aligned} U_{c,l} &= [U_{c,l} \ V_{c,l}]^T = [u_l / (n_u / 2) \ v_l / (n_u / 2)]^T, \\ C &= [C_u \ C_v]^T = [c_u / (n_u / 2) \ c_v / (n_u / 2)]^T, \\ F &= (f / s_u) / (n_u / 2), \quad P = s_u / s_v. \end{aligned} \right\} (3)$$

В результаті нормалізації координати зображення можуть бути перетворені в значення  $0 \sim 2$ . Далі, світова координата і координата камери  $l$ -ї опорної точки  $w_{rl}=[w_{xl} \ w_{yl} \ w_{zl}]^T$  і  $c_{rl}=[x_l \ y_l \ z_l]^T$ , а також вектор перекладу світової системи координат в систему координат камери  $c_{lw}=[t_x \ t_y \ t_z]^T$  нормалізуються за допомогою  $l_c$ , що є відстанню між кожною точкою [6], тобто

$$\left. \begin{aligned} {}^w X_l &= {}^w x_l / l_c, \quad {}^w Y_l = {}^w y_l / l_c, \quad {}^w Z_l = {}^w z_l / l_c, \\ X_l &= x_l / l_c, \quad Y_l = y_l / l_c, \quad Z_l = z_l / l_c, \\ T &= [T_x \ T_y \ T_z]^T = [t_x / l_c \ t_y / l_c \ t_z / l_c]^T, \\ T_c &= t_c / l_c. \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

Таким чином,  $w_{xl}$ ,  $w_{yl}$  перетворюються на просте ціле число. Тут співвідношення глибини калібрувальної контрольної діаграми до і після руху визначається як  $M = (T_z + T_c) / T_z$  і називається коефіцієнтом глибини.

### 3 Метод калібрування

Змінні, що підлягають калібруванню, містять як внутрішні, так і зовнішні параметри. Визначимо їх як невідомий вектор параметрів:

$$x \equiv [x^{(in)T} \ x^{(ex)T}]^T = [C_u \ C_v \ FP] [T_x \ T_y \ T_z \ \phi \ \theta \ \phi]^T. (5)$$

$U_c, l$ , яке є розрахованим значенням для координати зображення  $l$ -ї опорної точки калібрування, виражається наступним рівнянням з використанням перспективного співвідношення [7], тобто

$$U_{c,l} = C + F [X_l / Z_l \ P Y_l / Z_l]^T. (6)$$

Тут  $X_l \ Y_l \ Z_l$  у наведеному вище рівнянні визначається як

$$[X_l \ Y_l \ Z_l]^T = {}^c R_w [{}^w X_l \ {}^w Y_l \ {}^w Z_l]^T + T, (7)$$

де  ${}^c R_w$  – матриця обертання системи координат камери відносно світової системи координат, а  $T$  – вектор трансляції системи координат камери від світової системи координат.

Спостережувані координати зображення збираються для всіх опорних точок у вектор  $U_c = [U_{c,0} \dots U_{c,l} \dots U_{c,L-1}]^T = [[U_{c,0} \ V_{c,0}] \dots [U_{c,l} \ V_{c,l}] \dots [U_{c,L-1} \ V_{c,L-1}]]^T$ .

Оскільки розраховані значення координат зображення для всіх опорних точок є функцією невідомих параметрів, виражаємо це як  $U_c(x) = [U_{c,0}(x) \dots U_{c,l}(x) \dots U_{c,L-1}(x)]^T$ . Вектор невідомих параметрів  $x$  можна відкалібрувати так, щоб  $U_c(x)$  якомога ближче відповідав  $U_c$ . Оскільки  $U_c(x)$  є нелінійною функцією, ми повинні оцінити  $x$  за допомогою ітераційної корекції. Отже,  $n$ -й порядок вектора корекції задається як:

$$\Delta \hat{x}^{(n)} = \left( A^{(n)T} \Sigma_{\bar{U}_c}^{-1} A^{(n)} \right)^{-1} A^{(n)T} \Sigma_{\bar{U}_c}^{-1} \Delta U^{(n)}, (8)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \Delta \hat{x}^{(n)} &\equiv \hat{x}^{(n+1)} - \hat{x}^{(n)}, \quad A^{(n)} \equiv \left[ \frac{\partial U_c(x)}{\partial x} \right]_{x=\hat{x}^{(n)}} \\ U_c(x) &= [U_{c,l}(x) \dots U_{c,l}(x) \dots U_{c,L}(x)]^T \\ \Delta U^{(n)} &\equiv [U_c - U_c(\hat{x}^{(n)})]. \end{aligned} \right\} (9)$$

Коваріаційна матриця оцінюваного вектора параметрів визначається як

$$\Sigma_{\hat{x}}(in) = \left( A^{(in)T} \Sigma_{U_c}^{-1} A^{(in)} \right)^{-1}$$

де

$$A^{(in)} \equiv \left[ \frac{\partial U_c(x)}{\partial x^{(in)}} \right]_{x^{(in)}=\hat{x}^{(in)}}. (10)$$

### Теоретичний аналіз щодо похибки оцінки головної точки та головної відстані

Проведемо теоретичний аналіз похибки оцінки  $F$  і  $P$ . Вирішальним моментом є те, що  $\sigma F$  2 і  $\sigma P$

2 практично залежать від якобіана  $U_c(x)$  зображення по відношенню до  $F$ ,  $P$  і  $T_z$ , тобто часткові похідні від  $U_c(x)$  за  $F$ ,  $P$  і  $T_z$ . Це означає, що ми не повинні враховувати інші параметри, такі як  $C_u$ ,  $C_v$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  [8]. Беручи часткові похідні  $U_c(x)$  рівняння (6) щодо  $F$ ,  $P$  і  $T_z$ , якобіан визначається як

$$\begin{bmatrix} \frac{dU}{dF} & \frac{dU}{dP} & \frac{dU}{dT_z} \\ \frac{dV}{dF} & \frac{dV}{dP} & \frac{dV}{dT_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & 0 & \frac{-FX}{Z^2} \\ \frac{PY}{Z} & \frac{FY}{Z} & \frac{-FPY}{Z^2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Укладаючи якобіан за рівнянням (11) для всіх опорних точок калібрування має бути сформований загальний якобіан для всіх опорних точок калібрування, який позначається як  $A'$ .

Далі елементи  $A'^T A'$  формулюються як

$$\begin{aligned} A'^T A' \Big|_{11} &= (R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{X, far} + (P^2 \cdot R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{Y, far} + \\ &+ (M^2 \cdot R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{X, near} + \\ &+ (M^2 \cdot P^2 \cdot R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{Y, near}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A'^T A' \Big|_{12} &= A'^T A' \Big|_{21} = (P \cdot R_{es}^2 / F) \cdot S_{Y, far} + \\ &+ (M^2 \cdot P \cdot R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{Y, near}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A'^T A' \Big|_{13} &= A'^T A' \Big|_{31} = -(R_{es}^3 / F^2) \cdot S_{X, far} - \\ &-(P^2 \cdot R_{es}^3 / F^2) \cdot S_{Y, far} - (M^3 \cdot R_{es}^3 / F^2) \cdot S_{X, near} - \\ &-(M^3 \cdot P^2 \cdot R_{es}^3 / F^2) \cdot S_{Y, near}; \end{aligned}$$

$$A'^T A' \Big|_{22} = (R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{X, far} + (M^2 \cdot R_{es}^2 / F^2) \cdot S_{Y, near};$$

$$\begin{aligned} A'^T A' \Big|_{23} &= A'^T A' \Big|_{32} = (P \cdot R_{es}^3 / F) \cdot S_{Y, far} + \\ &+ (M^3 \cdot P \cdot R_{es}^3 / F) \cdot S_{Y, near}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A'^T A' \Big|_{33} &= (R_{es}^4 / F^2) \cdot S_{X, far} + (P^2 \cdot R_{es}^4 / F^2) \cdot S_{Y, far} + \\ &+ (M^4 \cdot R_{es}^4 / F^2) \cdot S_{X, near} + (M^4 \cdot P^2 \cdot R_{es}^4 / F^2) \cdot S_{Y, near}; \end{aligned}$$

де, наприклад,  $A' \Big|_{23}$  позначає множник 2, 3 матриці  $A'$ . Нижні індекси «близько» («near») та «далеко» («far») означають, що положення калібрувальної орієнтовної діаграми знаходиться далеко від камери та близько до неї, відповідно, а  $S_{Xfar}$  та  $S_{Yfar}$  є квадратами сум горизонтальних та вертикальних індексних чисел усіх точок у дальній позиції, тоді як  $S_{Xnear}$  і  $S_{Ynear}$  є тими, що знаходяться в ближній позиції [9].

Вони змінюються залежно від умов отримання зображень на діаграмі та визначаються наступними рівняннями [10].

Умова 1:

$$S_{X, near} = S_{Y, near} = S_{X, far} = S_{Y, far} =$$

$$\begin{aligned} &= (2 \cdot (2 + M \cdot R_{es}) / M^4 \cdot R_{es}^4) \times \\ &\times (1/3 + M \cdot R_{es} / 2 + M^2 \cdot R_{es}^2 / 6). \end{aligned}$$

Умова 2:

$$\begin{aligned} S_{X, near} &= J_{near} \sum_{-(I_{near}-1)/2}^{(I_{near}-1)/2} X^2, \quad S_{Y, near} = \\ &= I_{near} \sum_{-(J_{near}-1)/2}^{(J_{near}-1)/2} Y^2, \quad S_{X, far} = \\ &= J_{far} \sum_{-(I_{far}-1)/2}^{(I_{far}-1)/2} X^2, \quad S_{Y, far} = I_{far} \sum_{-(J_{far}-1)/2}^{(J_{far}-1)/2} Y^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{X, near} &= S_{Y, near} = (2 \cdot (2 + M \cdot R_{es}) / M^4 \cdot R_{es}^4) \times \\ &\times (1/3 + M \cdot R_{es} / 2 + M^2 \cdot R_{es}^2 / 6); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{X, far} &= S_{Y, far} = (2 \cdot (2 + R_{es}) / R_{es}^4) \times \\ &\times (1/3 + R_{es} / 2 + R_{es}^2 / 6). \end{aligned}$$

Тоді  $\sigma_F^2$  та  $\sigma_{P^2}$  розв'язуються як

$$\sigma_F^2 = \left[ 11\text{-entry of } [A'^T A']^{-1} \right]; \dots \dots (13)$$

$$\sigma_{P^2} = \left[ 22\text{-entry of } [A'^T A']^{-1} \right]; \dots \dots (14)$$

#### Приклад застосування методу аналізу похибок

Одним з прикладів застосування методу аналізу похибок для калібрування камери автомобіля може бути оцінка та корекція геометричних спотворень. Геометричні спотворення впливають на точність розпізнавання та вимірювання об'єктів у відеозображенні.

Для аналізу похибок геометричних спотворень можна використати метод калібрування, оснований на вимірюванні точок на площині зображення та їх відповідних тривимірних координат. Зібравши велику кількість таких точок, можна побудувати математичну модель, яка описує геометричні спотворення камери.

Після отримання математичної моделі можна перевірити її ефективність вимірюванням нових точок і порівняння їх з прогнозованими координатами, отриманими з моделі. Розбіжності між виміряними та прогнозованими координатами вказують на похибки калібрування.

На основі цього аналізу можна встановити коригувальні параметри, які дозволять скоригувати геометричні спотворення камери. Ці параметри можуть бути використані для зміни налаштувань камери або для обчислення коригувальних перетворень над вихідними зображеннями.

Такий метод аналізу похибок калібрування для геометричних спотворень дозволяє досягти високої точності та якості відеозображення, що є

важливим для безпечного та ефективного функціонування систем автоматичного водіння.

### Висновки

Розглянувши метод калібрування камери у двох опорних площинах, теоретично досліджено похибки калібрування для різних умов, таких як трансляція опорної площини та головні відстані, де похибки виділення координат зображення вважалися джерелом похибок. Результати досліджень свідчать про таке:

1. Репрезентативною умовою налаштування є коефіцієнт глибини, а оптимальне співвідношення глибини було отримано як приблизно 1,6 для будь-якої камери.

2. Похибка оцінки  $F$  і  $P$  теоретично сформульована за допомогою аналітичних рівнянь, а ефективність формул підтверджується порівнянням значень теорії з значеннями моделювання.

В даній статті був проведений детальний аналіз похибок калібрування телевізійної системи керування автомобілем. Було виявлено, що калібрування є вирішальною процедурою для забезпечення точності, надійності та ефективності системи автоматичного водіння. Похибки, які можуть виникати під час калібрування, можуть негативно впливати на роботу системи та безпеку на дорозі.

Один з важливих аспектів аналізу похибок калібрування полягає в нормуванні цих похибок. Встановлення припустимих меж і стандартів допомагає забезпечити відповідність системи вимогам безпеки та ефективності. Це важливо для досягнення високої точності вимірювання, відображення візуальної інформації та розпізнавання об'єктів.

Дослідження також виявило, що нормування похибок калібрування допомагає уникнути недоліків та непередбачуваних помилок. Це сприяє покращенню безпеки на дорозі та зниженню ризику неправильних рішень, які може прийняти система керування автомобілем.

Загалом, розуміння похибок калібрування телевізійної системи керування автомобілем та їх аналіз є важливими кроками у досягненні надійної та безпечної системи автоматичного водіння.

Подальші дослідження в цій галузі можуть сприяти розвитку нових методів та підходів до калібрування, що покращуватимуть функціонування автомобільних систем та забезпечуватимуть високу точність та надійність у майбутньому.

### Література

- [1] R.Y. Tsai, "A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [2] J. Weng, P. Cohen, M. Hemirou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation", *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 10, pp. 965-980, October 1992.
- [3] R. Kumar and A. R. Hanson, "Sensitivity of the pose refinement Problem to Accurate Estimation of Camera Parameters", *Proc. International Conference on Computer Vision '90*, pp. 365-369, 1990.
- [4] Horst A. Boyer, "Accurate Calibration of CCD Cameras", *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition '92*, pp. 96-101, 1992.
- [5] Y. Nomura, M. Sagara, H. Naruse, and A. Ide, "Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera", *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no.11, pp. 1095-1099, Nov.1992.
- [6] D. Zhang, Y. Nomura, S.Fujii, "Error analysis and optimal setup on camera calibration", *Proc. Asian Conference on Computer Vision*, pp. II210-II214, 1995.
- [7] D. Zhang, Y. Nomura, S. Fujii, "Error Analysis and Optimal Fiducial Mark Setup on Camera Calibration Using Direct Nonlinear Minimization", *Transactions of the JSME (Series C)*, vol. 61, no. 586, pp. 252-259, 1995. (in Japanese)
- [8] D. Zhang, Y. Nomura, S. Fujii, "Optimization on Principal Distance Calibration of TV Camera", *IEICE D-II*, vol. J79-DII, no. 9, pp. 1643-1645, 1996.
- [9] Y. Nomura, T. Fujimoto, N. Kato, H. Matsui, D. Zhang, "Optimization of camera parameter calibration based on a new criterion with effective visual angle", *Proc. Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, vol. 4197, pp. 191-201, 2000.
- [10] G.Q.Wei, S.Dema, "Implicit and explicit camera calibration — theory and experiments", *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no.5, pp. 469-480, May 1994.
- [11] R. Swaminathan and S. K. Nayar, "Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras", *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no.10, pp. 1172-1178, Nov. 2000.
- [12] Z. Y. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no.11, pp.1330-1334, Nov 2000.
- [13] K. Kanatani, "Statistical analysis of focal length calibration using vanishing points", *IEEE Trans. Robotics Automation*, 8, pp. 767-775, 1992.
- [14] Sheng-Wen Shih, Yi-Ping Hung and Wei-Song Lin, "Accuracy Assessment on Camera Calibration Method Not Considering Lens distortion", *Proc. CVPR*, pp. 755-757, 1992.

UDC 621:681.7

**V. S. Stadnichuk, V. G. Kolobrodov***National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***ANALYSIS OF CALIBRATION ERRORS IN AUTOMOBILE CONTROL TELEVISION SYSTEM**

Camera calibration is a critical method for 3D measurement applications based on 2D images. During calibration, internal camera parameters such as principal point and focal length are determined. The principal point is the intersection of the camera's optical axis and the image plane, while the focal length is measured from the lens center to the principal point.

This article theoretically investigates calibration errors in two reference planes considering various conditions, such as shifts in the reference plane and changes in focal lengths. Errors in determining the coordinates of reference points in images were used to evaluate these calibration errors.

The error in estimating the focal length and principal point is formulated using analytical equations, and the results are compared with simulation outcomes to validate the effectiveness of the proposed formulas. The research reveals that calibration errors arise due to shifts in the reference plane and changes in focal lengths. The obtained results are crucial for enhancing camera calibration methods and improving the accuracy of 3D measurements based on 2D images.

This article extends the understanding of camera calibration errors and provides new theoretical approaches for their assessment. The research findings may be beneficial for scientists and practitioners working in the fields of computer vision, image processing, and 3D measurements.

Further research in this area may contribute to the development of new calibration methods and approaches that will improve the performance of automotive systems and ensure high accuracy and reliability in the future.

**Key words:** camera calibration; internal parameters; principal point; focal length; 3D measurement; 2D images; reference planes; calibration errors; translation of reference plane; analytical equations; formula efficiency; accuracy; image processing; scientific research.

*Надійшла до редакції  
27 червня 2023 року*

*Рецензовано  
20 липня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).