Kalibracji kamery w urządzeniach mobilnych

1. Wstęp i znaczenie strategiczne kalibracji w geomatyce mobilnej

Współczesna geomatyka przechodzi transformację, w której urządzenia mobilne ewoluują z prostych narzędzi komunikacji w zaawansowane instrumenty metrologiczne. Integracja wysokorozdzielczych sensorów obrazu, systemów GNSS oraz inercyjnych jednostek pomiarowych (IMU) w ramach jednej platformy otwiera nowe horyzonty w fotogrametrii bliskiego zasięgu. Jednakże dynamiczny wzrost rozdzielczości matryc – osiągający obecnie pułap 64 MP – stawia przed inżynierami nowe wyzwania. Miniaturyzacja układów optycznych oraz powszechne stosowanie obiektywów szerokokątnych nieuchronnie wprowadza znaczne dystorsje, które muszą zostać precyzyjnie wyeliminowane w drodze certyfikacji parametrów wewnętrznych.

Proces ten, definiowany w fotogrametrii jako wyznaczenie **orientacji wewnętrznej**, pełni krytyczną rolę w przywracaniu geometrii pęku promieni świetlnych. Jego celem jest odtworzenie drogi promienia łączącego punkt w przestrzeni obiektowej z jego obrazem na sensorze, w konfiguracji identycznej z momentem ekspozycji. Ze względu na fizyczne ograniczenia małych sensorów, konieczne jest zastosowanie rygorystycznych modeli matematycznych, które pozwolą na transformację surowego obrazu w wiarygodny materiał pomiarowy.

2. Model matematyczny kamery i składowe dystorsji obiektywu

Fundamentem matematycznym procedury kalibracyjnej jest model kamery otworkowej (*pinhole model*). W rzeczywistych systemach optycznych idealny rzut środkowy jest zaburzany przez dystorsję, którą dekomponujemy na składową radialną i tangencjalną.

Fizyczną przyczyną dystorsji radialnej jest sferyczny kształt soczewek, co opisujemy współczynnikami k_1, k_2, k_3. Dystorsja tangencjalna (p_1, p_2) wynika natomiast z niedoskonałości montażowych – decentracji oraz braku ortogonalności soczewek względem osi optycznej. Relację między współrzędnymi idealnymi (x, y) a zniekształconymi (x_{distorted}, y_{distorted}) definiują równania:

Dystorsja radialna:

$$x_{\{distorted\}} = x(1 + k_{1r}^2 + k_{2r}^4 + k_{3r}^6)\,,\; y_{\{distorted\}} = y(1 + k_{1r}^2 + k_{2r}^4 + k_{3r}^6)$$

Dystorsja tangencjalna:

$$x_{\{distorted\}} = x + \left[2p_{1xy} + p_{2(r^2 + 2x^2)}\right], y_{\{distorted\}} = y + \left[p_{1(r^2 + 2y^2)} + 2p_{2xy}\right]$$

Gdzie r to odległość radialna od punktu głównego. Jako ekspert podkreślam kluczowy detal implementacyjny: o ile standard OpenCV operuje na powyższych relacjach, o tyle w zaawansowanej metodzie wyrównania wiązek (Bundle Adjustment), dla zachowania spójności z projektowaniem równań kolinearności, wartości zniekształcone są wprowadzane po prawej stronie równań. Parametry te są estymowane w drodze wyrównania statystycznego, co stanowi bazę do dalszej korekcji metrycznej.

3. Procedury przetwarzania obrazów o wysokiej rozdzielczości (powyżej 20 MP)

Współczesne sensory 64 MP generują bariery technologiczne dla standardowych algorytmów wizji komputerowej. Powszechnie stosowana funkcja `findChessboardCorners()` w bibliotece OpenCV wykazuje brak stabilności przy tak dużych zbiorach danych – problemem nie jest sama rozdzielczość, lecz fakt, że funkcja przestaje zwracać przybliżone współrzędne narożników, co uniemożliwia poprawne działanie procedury `cornerSubPix()`.

W celu obejścia tego ograniczenia zaimplementowano mechanizm dynamicznego skalowania obrazu. Kluczowym elementem jest obliczenie współczynnika skalowania (*scale factor*) zgodnie z zależnością: \text{scale factor} = \text{round}(\frac{\text{image size in MP}}{20 \text{ MP}} + 0.5)

Procedura generowania współrzędnych i detekcji:

1. Redukcja rozdzielczości obrazu przy użyciu wyznaczonego współczynnika.
2. Lokalizacja przybliżonych narożników wzorca na obrazie o mniejszej skali.
3. Rekonstrukcja współrzędnych na obrazie oryginalnym poprzez przemnożenie wyników przez *scale factor*.
4. Wyznaczenie współrzędnych obiektowych wzorca (Algorithm 1) poprzez iterację:
    - Dla każdego rzędu (j) i kolumny (i):
    - $x = i \times \{step\}$
    - $y = (\{rows\} - 1 - j) \times \{step\}$
    - z = 0
5. Finalne uściślenie pozycji z dokładnością subpikselową.

4. Porównanie metod: OpenCV vs. wyrównanie wiązek (Bundle Adjustment)

W analizie zestawiono dwa podejścia: algorytm Zhanga (standard OpenCV) oraz fotogrametryczne wyrównanie wiązek z dodatkowymi parametrami. Metoda wyrównania wiązek opiera się na równaniach kolinearności, wymagając spełnienia warunku nadmiarowości obserwacji: \text{Liczba obserwacji} > \text{Obrazy} \times 6 + \text{Punkty kontrolne} \times 3 + 8 \text{ (dodatkowe parametry)}

Cecha	Metoda OpenCV (Zhang)	Wyrównanie Wiązek (BA)
Główna metryka błędu	Total Re-projection Error	Sigma (\sigma) oraz niepewność parametrów
Metrologia błędów	Wynik zbiorczy dla zestawu	Estymacja niepewności parametrów (Standard Deviation)
Weryfikacja punktowa	Brak	RMSE punktów kontrolnych
Charakterystyka	Szybka kalibracja systemowa	Precyzyjne projekty inżynieryjne

5. Nowatorska metodologia oceny wyników: Wskaźnik „Rect”

Standardowy błąd re-projekcji często maskuje lokalne niedokładności modelu. Wprowadzono zatem autorski wskaźnik „Rect”, bazujący na rektyfikacji pojedynczego obrazu kontrolnego. Wykorzystuje on parametry rzutu środkowego do transformacji współrzędnych obrazowych na obiektowe (w mm): $X = \frac{a_1x + b_1y + d_1}{a_3x + b_3y + 1}, \quad Y = \frac{a_2x + b_2y + d_2}{a_3x + b_3y + 1}$

Wskaźnik „Rect” (wyrażony w %) definiuje zysk dokładności po kalibracji: $\text{Rect} = 100 \times \frac{ac_{Distorted} - ac_{UnDistorted}}{ac_{Distorted}}$

Interpretacja wizualizacji gradientowej pozwala na precyzyjną diagnostykę:

- **diff > 0.3 mm (kolor czerwony):** Krytyczne błędy modelu, zwykle w narożnikach.
- **0.1–0.2 mm (żółty/pomarańczowy):** Akceptowalne odchylenia, bliskie granicy precyzji wydruku wzorca.
- **Wartości ujemne:** Wadliwa kalibracja pogarszająca geometrię obrazu.

6. Analiza wydajności w zależności od konfiguracji zestawu zdjęć

Eksperymenty dowiodły, że geometria zdjęć ma nadrzędne znaczenie nad ich liczbą.

- **Zestaw Optymalny (Set 2):** Zaledwie 5 zdjęć uwzględniających nachylenia i głębię pola. Wyniki: $\sigma = 3.883$, dokładność wyznaczenia ogniskowej (f) = 1.556 px, wskaźnik „Rect” = +48.2%.
- **Zestaw Niedopuszczalny (Set 3):** 9 zdjęć wykonanych niemal równolegle do wzorca (osie optyczne bliskie równoległości). Skutkowało to drastycznym spadkiem dokładności (f error = 85.709 px) i ujemnym wskaźnikiem „Rect” (-21.2%). Z punktu widzenia certyfikacji metrycznej, taka konfiguracja jest bezużyteczna.
- **Nadmiarowość (Set 5 i 6):** 30 zdjęć poprawiło błędy standardowe parametrów (np. f error = 0.722 px dla Set 6), ale nie przełożyło się na istotny wzrost wskaźnika „Rect” względem Set 2, generując jedynie zbędny koszt obliczeniowy.

7. Wnioski i rekomendacje dla profesjonalnych zastosowań fotogrametrycznych

Opracowana procedura stanowi kompletny protokół certyfikacji urządzeń mobilnych dla potrzeb metrologii cyfrowej. Główne konkluzje techniczne prezentują się następująco:

1. **Rekomendacja operacyjna:** Standardem pozyskiwania danych kalibracyjnych staje się konfiguracja oparta na **Photo Set 2**. Wykonanie 5 zdjęć pod zróżnicowanymi kątami zapewnia najwyższą stabilność parametrów przy minimalnym nakładzie pracy.
2. **Przewaga wskaźnika „Rect”:** Wskaźnik ten wykazuje znacznie wyższą czułość na błędy geometrii niż błąd re-projekcji. Pozwala on na walidację wyników w jednostkach rzeczywistych (mm), co jest kluczowe dla inżynierii pomiarowej.
3. **Automatyzacja:** Wdrożenie dynamicznego skalowania jest obligatoryjne dla procesów automatycznych operujących na zdjęciach powyżej 20 MP, eliminując ryzyko błędów detekcji wzorca.

Zastosowanie przedstawionej metodologii pozwala na uzyskanie dokładności rzędu 0.1–0.2 mm na obiekcie, co w pełni predysponuje nowoczesne smartfony do roli pełnoprawnych sensorów w profesjonalnych systemach fotogrametrycznych. Dokument ten potwierdza gotowość technologii do wdrożenia w rygorystycznych projektach inżynieryjnych.