

AVTOMATIZIRAN POSTOPEK KALIBRACIJ KAMER SATELITA TRISAT-S

EMANUEL NIKL HUTINSKI

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor,
Slovenija
emanuel.hutinski@um.si

V prispevku predstavljamo metodologijo avtomatizirane kalibracije kamer, ki so nameščene na satelitu TRISAT-S. Sistem temelji na predhodnih izkušnjah z misijo TRISAT-R, kjer so bile miniaturne kamere uporabljene za tehnološko demonstracijo. Za zagotavljanje natančne rekonstrukcije slikovnih podatkov je bila razvita popolnoma avtomatizirana metoda kalibracije, ki vključuje robotsko roko za precizno nastavitvev položajev kamer in optimizacijske algoritme za korekcijo optičnih distorzij. Pri kalibraciji se uporabljajo Förstner-jev operater za detekcijo kalibracijskih vzorcev, Levenberg-Marquardt metoda za minimizacijo reprojekcijske napake in geometrijski model kamere na podlagi »pinhole« projekcije. Poleg kalibracije predstavljamo tudi koncept 360-stopinjske rekonstrukcije okolja, ki temelji na združevanju slik iz vseh šestih kamer, nameščenih na satelitu. Pri tem je ključnega pomena geometrijska poravnava slik, korekcija distorzije in združevanje podatkov v enotno panoramsko predstavitev. Rezultati kažejo, da je predlagan sistem robusten in ponovljiv, s čimer omogoča visoko natančnost in avtomatizirano obdelavo podatkov brez človeškega posredovanja. Nadaljnje raziskave bodo usmerjene v implementacijo metode na dejanskem satelitu in analizo učinkovitosti rekonstrukcije v realnih vesoljskih razmerah.

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.feri.2.2025.1](https://doi.org/10.18690/um.feri.2.2025.1)

ISBN
978-961-286-960-1

Ključne besede:
kalibracija kamere,
avtomatizirana kalibracija,
geometrijska poravnava
slike,
Förstnerjev operater,
optimizacija Levenberg-
Marquardt,
model »pinhole« kamere,
korekcija optičnega
popačenja



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.feri.2.2025.2](https://doi.org/10.18690/um.feri.2.2025.2)

ISBN
978-961-286-960-1

Keywords:

camera calibration,
automated calibration,
satellite imaging,
geometric image alignment,
Förstner operator,
Levenberg-Marquardt
optimization,
Pinhole camera model,
optical distortion correction

AUTOMATED CALIBRATION PROCESS FOR TRISAT-S SATELLITE CAMERAS

EMANUEL NIKL HUTINSKI

University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Institute
of Computer Science, Maribor, Slovenia
emanuel.hutinski@um.si

In this paper, we present the methodology for the automated calibration of cameras mounted on the Trisat-S satellite. The system builds upon previous experience from the TRISAT-R mission, where miniature cameras were used for a technological demonstration. To ensure accurate reconstruction of image data, a fully automated calibration method was developed, incorporating a robotic arm for precise camera positioning and optimization algorithms for optical distortion correction. The calibration process employs the Förstner operator for calibration pattern detection, the Levenberg-Marquardt method for minimizing reprojection error, and the geometric pinhole camera model. In addition to calibration, we introduce the concept of 360-degree environmental reconstruction, which is based on merging images from all six cameras mounted on the satellite. Key aspects of this process include geometric alignment of images, distortion correction, and data fusion into a unified panoramic representation. The results demonstrate that the proposed system is robust and repeatable, enabling high accuracy and fully automated data processing without human intervention. Future research will focus on implementing the method on the actual satellite and analyzing the effectiveness of the reconstruction in real space conditions.



1 Uvod

Na misiji TRISAT-R, ki je potekala v osrčju ionosfere in notranjega Van Allenovega sevalnega pasu, sta se testirali dve miniaturni kameri, ki sta služili kot tehnološka demonstracija uporabe visoko miniaturne tehnologije slikanja. Kameri sta bili del eksperimenta zajemanja »učinka črnega sonca«, dodatno pa sta posneli sliko planeta Zemlja z izjemno nizko ločljivostjo 320x320 slikovnih točk. Misija TRISAT-S bo uporabila enake kamere, ki bodo nameščene na vse stranice satelita, tako da bomo zajeli slike iz vseh zornih kotov. Postopek rekonstrukcije poteka v naslednjih korakih:

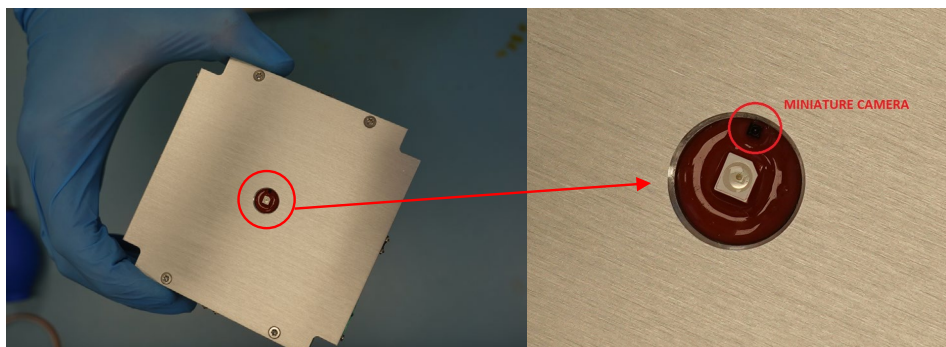
1. Zajem slike
2. Kalibracija sistema
3. Združevanje podatkov
4. Rekonstrukcija

V tem članku smo se osredotočili na kalibracijo sistema, ki je ključen postopek pri zagotavljanju natančnosti in zanesljivosti slikovnih podatkov v različnih aplikacijah, od industrijskih in znanstvenih sistemov do navigacije, daljinskega zaznavanja in računalniškega vida. Gre za sistematičen proces določanja in popravljanja optičnih in geometrijskih napak, ki nastanejo zaradi fizičnih lastnosti optičnih komponent in delovnih pogojev kamere. Geometrijska kalibracija identificira odnos med 3D svetom in 2D slikovnimi podatki, pri čemer se odpravljajo sistematične napake v preslikavi prostora. Ključni cilji geometrijske kalibracije so:

1. Določitev notranjih parametrov kamere (intrinzična kalibracija)
2. Določitev zunanjih parametrov (ekstrinzična kalibracija)

Ti parametri so bistveni pri aplikacijah, kot so 3D rekonstrukcija, robotski vid, navigacija avtonomnih sistemov in fotogrametrija.

Za doseganje najboljših rezultatov mora biti kalibracija izvedena v enakih pogojih za vse kamere, kar vključuje kote zajemanja, osvetlitev in druge vplivne dejavnike. Zaradi tega smo razvili popolnoma avtomatiziran sistem kalibracije kamer z uporabo robotske roke, ki omogoča natančno in ponovljivo nastavitve vsake kamere v sistemu.



Slika 1: Miniaturna kamere satelita TRISAT-R.

Vir: lasten.

2 Matematični model kamere

Standardni matematični model perspektivne projekcije temelji na »pinhole« modelu kamere (Sturm, 2014), ki opisuje transformacijo 3D točk v 2D slikovne koordinate. Ta model je osnovna oblika kamere brez leč, kjer svetloba prehaja skozi majhno luknjo in ustvari obrnjeno sliko na nasprotni strani. »Pinhole« model lahko opišemo z naslednjimi matematičnimi enačbami:

$$\text{Projekcijske enačbe: } x = f \cdot \frac{X}{Z} ; y = f \cdot \frac{Y}{Z}$$

$$\text{Homogene koordinate: } \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

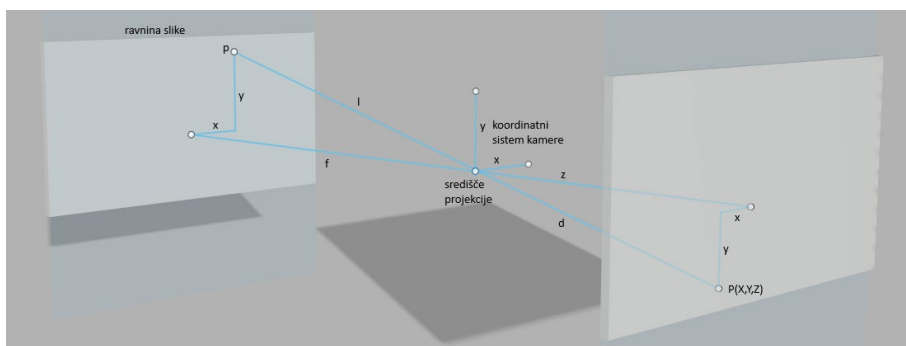
$$\text{Intrizični parametri: } K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ekstrinzični parametri: } \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

Kjer je f goriščna razdalja kamere, f_x in f_y pa goriščni razdalji v slikovnih enotah v smeri x in y . c_x in c_y sta koordinati središča slike v slikovnih koordinatah. Matrika R predstavlja rotacijsko transformacijo, translacijski vektor T pa premik med koordinatnim sistemom sveta in koordinatnim sistemom kamere. Skupaj opisujeta transformacijo iz 3D koordinat sveta v 3D koordinate kamere. V resničnih kamerah

so parametri premika slikovnega središča in razmerje stranic slikovnega elementa. Ti parametri se upoštevajo v intrinzični matriki kamere, zato lahko zapišemo enačbo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [R \quad T] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$



Slika 2: Preslikava slike z modelom »Pinhole« kamere

Vir: lasten

3 Korekcija distorzije

Realne kamere ne sledijo idealnemu »pinhole« modelu, saj optični sistemi povzročajo nelinearne popačitve slike. Najpogosteje se modelirata radialna in tangencialna distorzija.

Radialna distorzija povzroča ukrivljanje ravnih črt, ki je najbolj izrazito proti robovom slike. Popravlja se z modelom:

$$x_{popaceno} = x_{idealno} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

$$y_{popaceno} = y_{idealno} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

Tangencialna distorzija nastane zaradi nepopolne poravnave leč in tipala ter se modelira z izrazi:

$$x_{popaceno} = x_{idealno} \cdot 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2)$$

$$y_{popaceno} = y_{idealno} \cdot p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy$$

Pri čemer je » r « evklidska razdalja med točko popačene slike in središčem popačenja:

$$r^2 = x_{idealno}^2 + y_{idealno}^2$$

Koeficienti k_1 , k_2 in k_3 so koeficienti radialnega popačenja, koeficienta p_1 in p_2 pa koeficienta tangencialnega popačenja.

4 Algoritem kalibracije kamere

Za izračun kalibracijskih parametrov se uporabljajo različni numerični algoritmi, med katerimi sta najpogostejši metoda Zhang in metoda na podlagi ArUco markerjev.

Metoda Zhang uporablja šahovnico kot kalibracijsko tarčo. Metoda vključuje:

1. Detekcijo kotov na šahovnici (metoda s Forsterjevim operatorjem)
2. Izračun homografije med kalibracijsko tarčo in slikovno ravnino
3. Reševanje sistema enačb za določitev intrinzičnih in ekstrinzičnih parametrov
4. Nelinearno optimizacijo (npr. Levenberg-Marquardt) za zmanjšanje napake reprojeckije

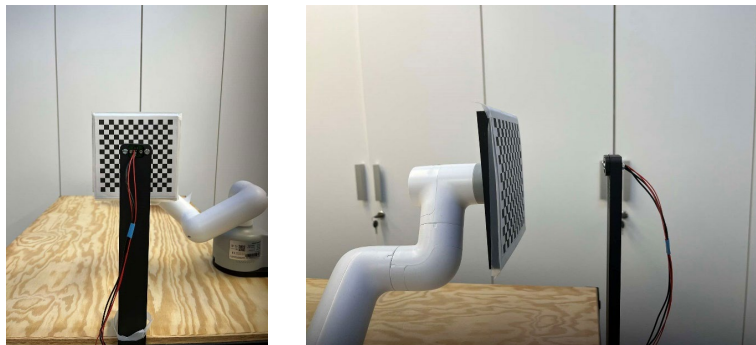
Alternativno je mogoče uporabiti ArUco markerje, ki zagotavljajo robustnejše zaznavanje v zahtevnih svetlobnih pogojih in omogočajo samodejno identifikacijo referenčnih točk. Vendar ta metoda ni bila primerna za obravnavani sistem, saj nizka ločljivost kamere ni omogočala zadostne natančnosti pri detekciji ArUco markerjev na kalibracijski tarči.

5 Metodologija avtomatizirane kalibracije

Avtomatizirana kalibracija kamer vključuje integracijo algoritmov v sistem, ki zmanjšuje potrebo po ročnem posredovanju. Ključni koraki vključujejo:

1. Samodejno spreminjanje položaja kalibracijske tarče

Uporablja se robotska roka MyCobot 280 (Oosterwyck, 2018). Ponovljivost gibanja je zagotovljena s CSV datoteko, v kateri so definirani položaji vseh sklepov za 27 različnih pozicij. Gibanje je povsem avtomatizirano.



Slika 3: Realni sistem

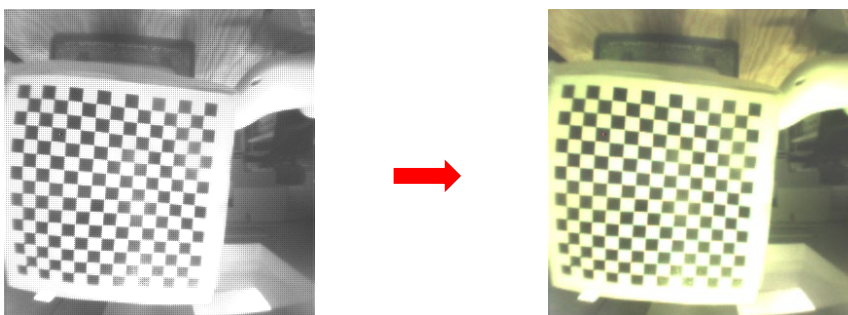
Vir: lasten.

2. Avtomatsko zajemanje slik s pomočjo programa

Kalibracijska tarča je osvetljena z reflektorjem, kar zagotavlja enako osvetlitev za vse kamere. Po premiku robotske roke se počaka na stabilizacijo, nato se zajame slika.

3. Obdelava vhodnih podatkov slik

Izvede se preslikava surove slike iz Bayerjevega formata BGGR v RGB z bilinearno interpolacijo, kar omogoča pravilno barvno predstavitev podatkov pred nadaljnjo analizo.

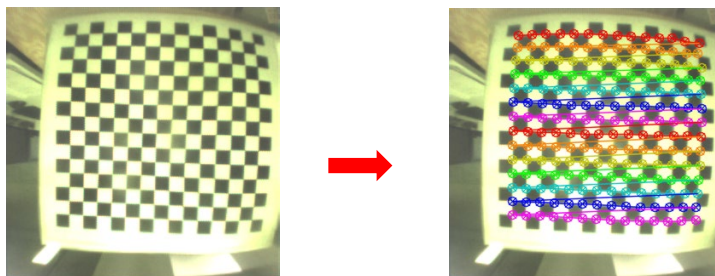


Slika 4: Preslikava surove slike v RGB

Vir: lasten.

4. Samodejno zaznavanje kalibracijske tarče s pomočjo računalniškega vida

Uporabljen je Förstner-jev operater (Forstner, 1987) za natančno detekcijo kotov šahovnice. Slike, pri katerih niso zaznani vsi koti kalibracijske tarče, se zavržejo.

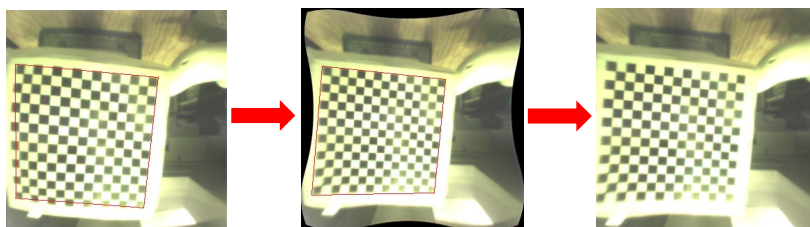


Slika 5: Detektirani koti šahovnice s Förstnerjevim operaterjem

Vir: lasten.

5. Optimizacija parametrov

Uporabljen je Levenberg-Marquardt (LM) (Gavin, 2019) algoritem za optimizacijo koeficientov tangencialne in radialne distorzije. Pri tem se minimizira napaka reprojekcije, kar pomeni, da se optimizirani parametri prilagajajo tako, da projekcija 3D točk na 2D slikovno ravnino najbolj ustreza dejansko zaznanim točkam na sliki.



Slika 6: Preslikava popačene slike v nepopačeno

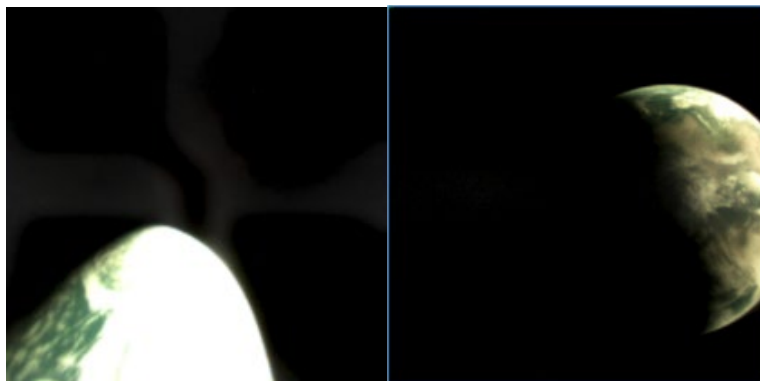
Vir: lasten.

$$\text{matrika kamere} = \begin{bmatrix} 248,15 & 0 & 156,97 \\ 0 & 245,30 & 153,91 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{koeficienti popačenja} = [0.45 \quad -2,45 \quad -0.01 \quad -0.01 \quad 2.22]$$

6. Validacija kalibracije

Validacija kalibracije se izvaja s kombinacijo avtomatizirane analize in človeškega pregleda. Python skripta izračuna reprojekcijsko napako, ki služi kot kvantitativni pokazatelj natančnosti kalibracije, medtem ko se vizualna potrditvena analiza uporablja za preverjanje pravilnosti poravnave in odprave optičnih distorzij.

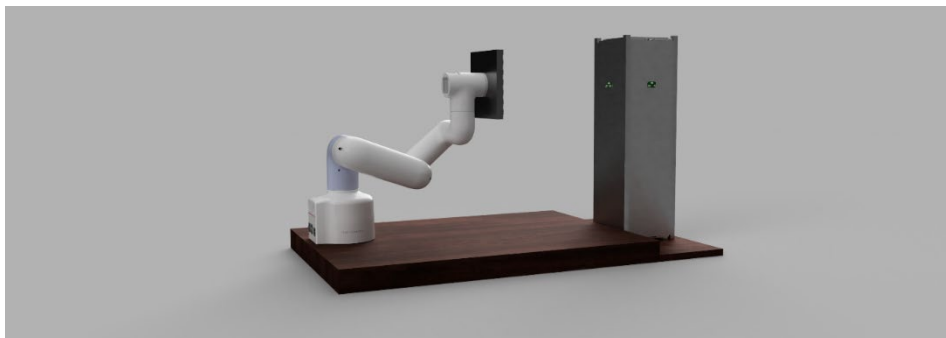


Slika 7: Zajeti sliki Zemlje z miniaturno kamero na satelitu TRISAT-R

Vir: lasten.

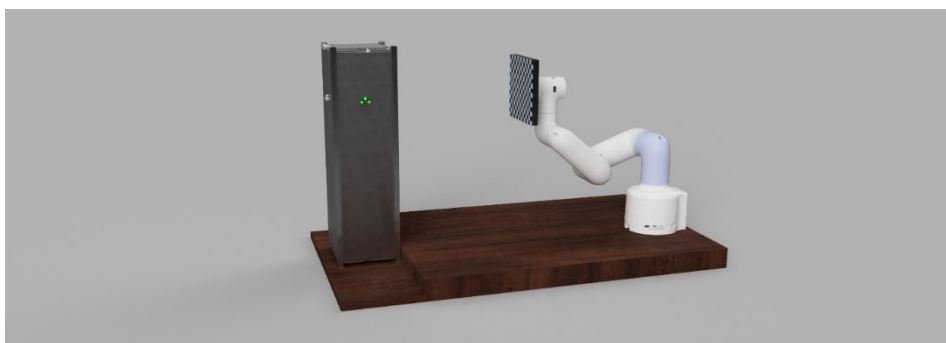
6 Koncept kalibracije satelitskih kamer in 360-stopinjske rekonstrukcije okolja

Primarni cilj satelitske misije TRISAT-S je tehnološka demonstracija varne radijske komunikacije med vesoljskim segmentom nanosatelita in zemeljsko postajo. Satelit pa bo imel na vsaki strani tudi integrirano miniaturno kamero. Kalibracija satelitskih kamer bo izvedena po zaključeni integraciji satelita, kar zahteva razvoj dodatnega sistema za rotacijo satelita okoli vseh treh osi. S tem bomo zagotovili enotne pogoje kalibracije za vse kamere ter omogočili popolnoma avtomatiziran proces kalibracije. V nadaljnjih raziskavah bomo analizirali možnost 360-stopinjske rekonstrukcije okolja z združevanjem slik, pridobljenih iz teh kamer. Cilj je razviti metodo za integracijo vidnih polj posameznih kamer v konsistentno panoramsko predstavitev prostora, pri čemer bo potrebno upoštevati geometrijsko poravnavo, popravke distorzije in združevanje slikovnih podatkov.



Slika 8: Računalniška upodobitev konceptne kalibracije kamer

Vir: lasten.



Slika 9: Računalniška upodobitev konceptne kalibracije kamer

Vir: lasten.

7 Zaključek

Kalibracija kamer je nepogrešljiv postopek v računalniškem vidu, saj omogoča korekcijo optičnih napak in zagotavlja natančnost rekonstrukcije 3D prostora. Avtomatizirani pristopi bistveno izboljšajo učinkovitost in ponovljivost kalibracije, zmanjšajo potrebo po človeškem posredovanju ter zagotavljajo visoko stopnjo natančnosti.

Prihodnje raziskave bodo osredotočene na rekonstrukcijo slik iz vseh zornih kotov v 360-stopinjski pogled. Sistem temelji na inženirskem modelu TRISAT-S satelita, ki bo opremljen s kamerami na vseh šestih straneh, kar omogoča zajem slik iz vseh smeri in njihovo natančno združevanje v celovito vizualno predstavitev.

Dodatne optimizacije kalibracijskega postopka s spremembami algoritmov ali pogojev niso načrtovane, saj trenutni sistem deluje odlično in dosega visoko stopnjo natančnosti. Nadaljnje raziskave bodo tako usmerjene predvsem v aplikacije obstoječega sistema in njegovo uporabo v kompleksnejših scenarijih računalniškega vida.

Viri in literatura

- Forstner, W. (1987). A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and center of circular features. In Proc. of the Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, str 281–305, 1987.
- Gavin, H.P. (2019). The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems, Department of Civil and Environmental Engineering Duke University.
- Oosterwyck, V. N. (2018). Real Time Human Robot Interactions and Speed Control of a Robotic Arm for Collaborative Operations, DOI: 10.13140/RG.2.2.28723.53286.
- Sturm, P. (2014). Pinhole Camera Model. V: Ikeuchi, K. (eds) Computer Vision. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6_472.
- Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration, Pattern Analysis and Machine Intelligence, (str. 1330–1334).

