

Simultankalibrierung digitaler Luftbildkameras

ERWIN KRUCK¹

Zusammenfassung: Großflächige digitale Luftbildkameras wie DMC und Ultra-CamD sind derzeit wegen begrenzter Größe verfügbarer Flächensensoren darauf angewiesen, das Bild einer Aufnahme jeweils aus mehreren Einzelbildern zusammenzusetzen. Im praktischen Einsatz dieser Kameras zeigen sich trotz guter Laborkalibrierungen systematische Restfehler in der Bildgeometrie, die deutlich die einzelnen Sensorflächen erkennen lassen. Wie von herkömmlichen Filmkameras bekannt, ist eine Nachkalibrierung erforderlich, weil die Verhältnisse im Flugzeugeinsatz anders sind als im Labor.

In das Softwarepaket BINGO sind Methoden integriert, die eine genaue Analyse solcher systematischen Restfehler erlauben. Aufgrund dieser Analysen wurden Algorithmen zur Beseitigung dieser systematischen Effekte entwickelt und in BINGO integriert. Nach simultaner Kalibrierung konnten bei allen bisher durchgeführten Projekten alle systematischen Effekte beseitigt werden. In einem der Testprojekte konnte die Genauigkeit am Boden nachweislich um den Faktor Zwei gesteigert werden. Der Nachweis dieser Genauigkeitsverbesserung erfolgte mit unabhängigen Kontrollpunkten. Die einmal gewonnenen Kalibrierdaten sind als Korrekturdaten für weitere Projekte verwendbar.

1. Einführung

Dieser Beitrag berührt nicht die Fabrik-Kalibrierung digitaler Kameras, die bekanntlich neben der geometrischen Kalibrierung auch die Radiometrie der Sensoren überprüft und anpasst und jedes einzelne Pixel der Sensoren bewertet. Hier werden weiter entwickelte Algorithmen zur weithin eingeführten Selbstkalibrierung vorgestellt, die an die besondere Geometrie digitaler Luftbildkameras angepasst sind. Diese Kameras setzen jeweils ein Gesamtbild aus einer Anzahl von einzelnen Bildern zusammen.

Bei der DMC von Z/I sind es zwei mal zwei Sensoren. Jeder Sensor hat eine eigene Optik. Durch Schrägstellung der gegenseitigen Aufnahmerichtungen der Kameras bleibt die Überdeckung gering und es wird ein großer Bereich am Boden erfasst. Alle vier Kameras werden synchron ausgelöst.

Bei der UltraCamD von Vexcel gibt es auch vier Optiken für schwarz-weiß Aufnahmen. Hinter jeder Optik befinden sich ein, zwei oder vier CCD-Sensoren. Die Kameras sind in Reihe angeordnet. Die Auslösungen erfolgen leicht zeitversetzt, um jeden Sensor in der gleichen Position zu belichten (syntopisch). Der so genannte Master-Cone hat vier CCD-Elemente in den Bildecken angeordnet. Die Sensoren in den weiteren Kameras sind so positioniert, dass alle Lücken aufgefüllt werden. Alle Kameras blicken senkrecht nach unten.

Die genaue gegenseitige Zuordnung der Bilder der einzelnen Sensoren spielt bei diesem Zusammensetzen natürlich eine zentrale Rolle und ist am Ende für die geometrische Qualität der Bilder von ausschlaggebender Bedeutung. Selbstverständlich erfolgt diese Zuordnung bereits

¹ Dr. Erwin J. Kruck, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering, Tännichweg 3, D-73430 Aalen. Telefon +49-7361-931434, Fax +49-7361-931435, e-mail: info@gip-aalen.de, <http://www.gip-aalen.de>

durch die Software der Kamera. Im praktischen Einsatz wurden jedoch kleine Restfehler festgestellt, die bei hohen Genauigkeitsanforderungen unbedingt zu berücksichtigen sind. Daher wurde ein neuer zusätzlicher Kalibrieransatz in die Bündelausgleichungssoftware BINGO integriert und praktisch an mehreren Projekten erprobt. Die hiermit erzielten Kalibrierergebnisse sind ausgezeichnet. Damit ist diese Methode als Grundlage für weitere Überlegungen zur Entwicklung von normierten Verfahren zur Kamerakalibrierung geeignet.

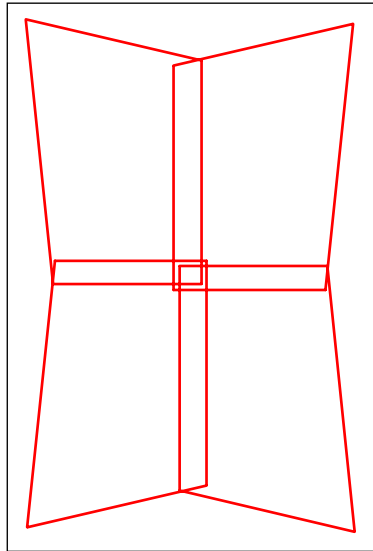


Abb.1 Teilbilder einer DMC

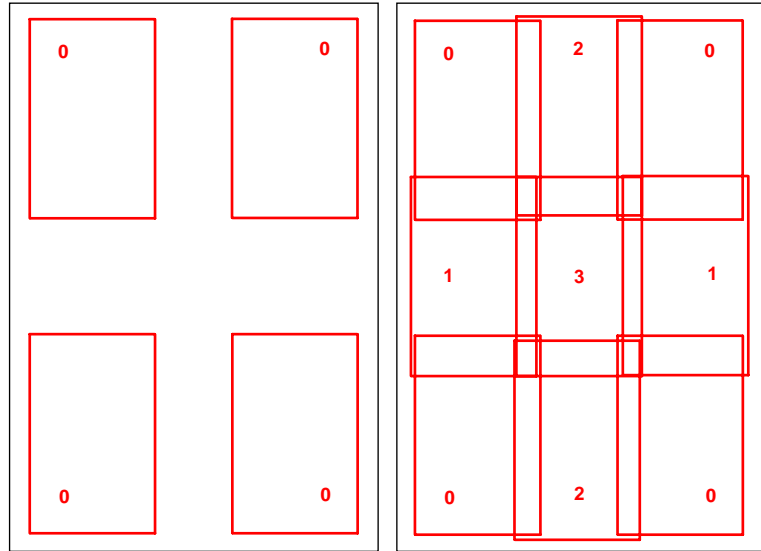


Abb.2 Master-Cone und Teilbilder einer UltraCamD

2. Kalibrieransatz

Zur Entwicklung eines Kalibrieransatzes ist zunächst der Bedarf festzustellen, d.h., es ist zu prüfen ob die bisher verwendeten Parameter der Selbstkalibrierung noch zutreffend und hinreichend sind. Da alle Kameras vor Auslieferung im Labor kalibriert worden sind, scheint eine Überprüfung der Kalibrierung im Labor wenig sinnvoll. Außerdem ist durch die Erfahrung mit Film-Luftbildkameras bekannt, dass im praktischen Einsatz selbst bei bester und gerade durchgeführter Laborkalibrierung Effekte auftreten, die eine Selbstkalibrierung erforderlich machen. Diese Effekte sind bei Film-Kameras auf diverse Einflüsse zurückzuführen wie Temperatur-Gradienten in der Kamera und in der Luft, unterschiedliche Filmmagazine, Filmentwicklung, Erdkrümmung, Kartenprojektion usw. Bei den neuen digitalen Luftbildkameras sind andere Effekte möglich.

Die Ergebnisse einer Bündelblockausgleichung bieten eine ideale Basis zur Bestimmung systematischer Effekte, wenn ein genügend großer Datensatz mit hoher Überbestimmung ausgewertet wird. Dazu ist eine große Anzahl von Bildern mit vielen Verknüpfungspunkten und hohen Überdeckungen notwendig. Ansonsten ist es nicht möglich zuverlässige, signifikante Aussagen zu treffen. Liegen solche Datensätze vor, ist durch Betrachtung und Bewertung aller Residuen der Bildmessungen eine eventuelle systematische Verfälschung der Bildgeometrie bestimmbar.

Bringt man die Residuen der Bildmessungen aller Bilder in einem einzigen Bild grafisch zur Darstellung dürfen sich keine systematischen Effekte zeigen. Allerdings versagt diese Methode, wenn wirklich wie gefordert viele Messungen vorliegen, weil nichts mehr zu erkennen ist. Daher ist es sinnvoll kleine Bereiche zu bilden, und nur das Mittel der Residuen pro Be-

reich darzustellen. Diese Auswertung könnte natürlich auch rechnerisch durch Bestimmung der Korrelation benachbarter Residuen geschehen. Man erhielte allerdings keine Aussage über die Form notwendiger geometrischer Verbesserungen.

An mehreren Beispieldatensätzen wurden die systematischen Bildfehler auf diese Weise ermittelt. Nachfolgend sind zwei für die jeweilige Kamera typische Resultate gezeigt. Während bei der DMC leichte Rotationen der einzelnen Sensoren vorliegen (Abb. 3), zeigt die Ultra-CamD leicht unterschiedliche Maßstäbe in den einzelnen Sensoren (Abb. 4).

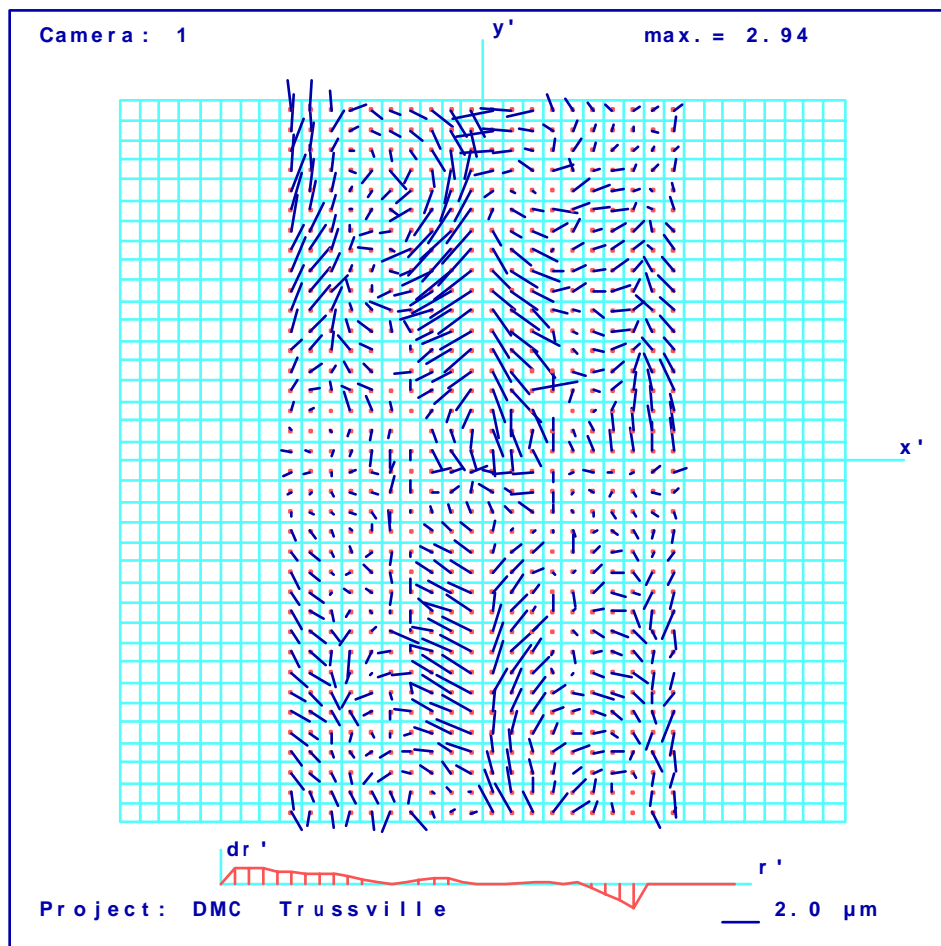


Abb.3 Systematische Bild-Restfehler im DMC Projekt "Trussville"

Es wird deutlich, dass eine Nachkalibrierung pro Sensor erforderlich ist. Die CCD-Arrays müssen z.B. rechnerisch gedreht, verschoben oder gedehnt werden. Dazu ist es notwendig, in der Bündelausgleichung genau die Sensorgrenzen zu kennen. Eine neue Klasse "Sensortyp" in BINGO erlaubt die Einbeziehung dieser Information.

Praktischen Tests haben gezeigt, dass für die Kameratypen UltraCamD und DMC unterschiedlichen Effekte auftreten, die individuelle Kalibrieransätze erfordern. Für die Ultra-CamD können zusätzlich zu den üblichen globalen Parametern der Selbstkalibrierung pro Sensorfläche fünf neue Kalibrierparameter für Rotationen, Translationen und Maßstäbe in x' und y' angesetzt werden. Scherungseffekte waren in keinem Fall zu beobachten. Daher müssten diese zusätzlichen fünf Parameter alle systematischen Effekte vollständig beseitigen. Für die DMC waren diese Ansätze nicht ausreichend, sodass neue angepasste zusätzliche Parameter entwickelt wurden.

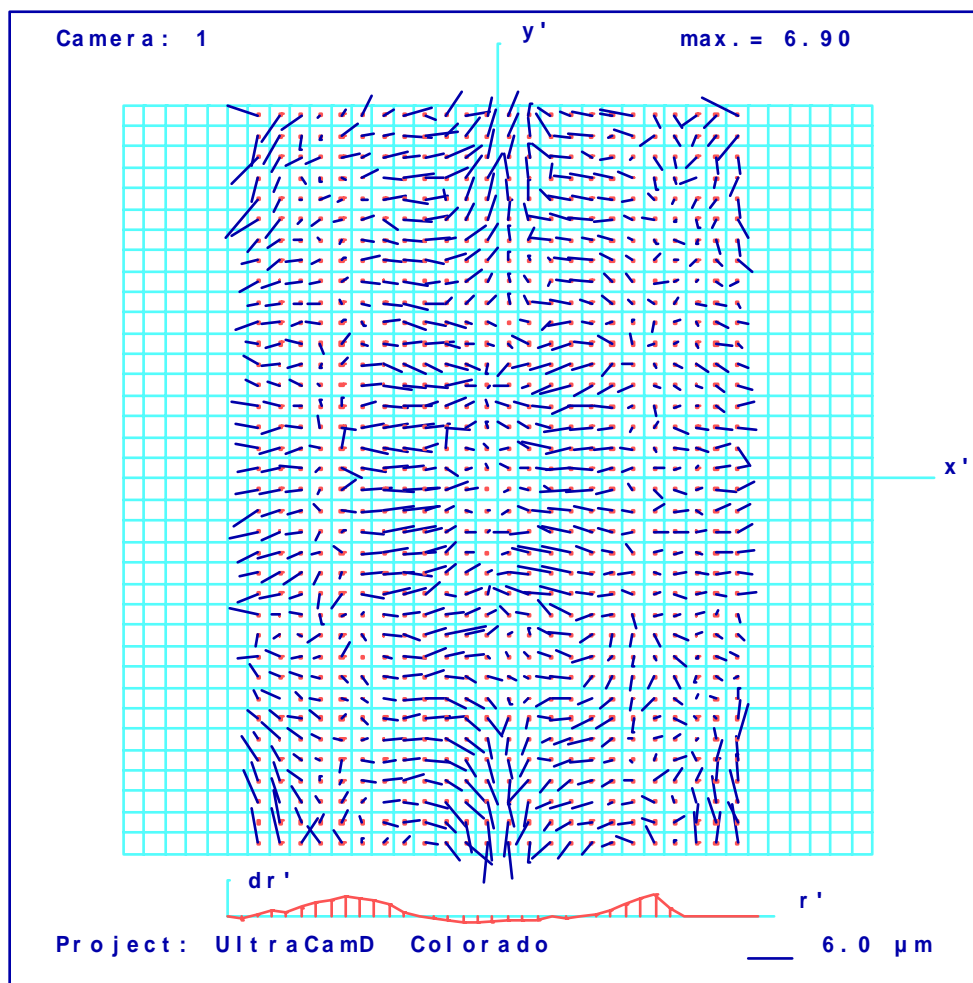


Abb.4 Systematische Bild-Restfehler im UltraCamD Projekt "Colorado"

3. Praktisch Ergebnisse

Tatsächlich sind diese neuen Parameter in allen untersuchten UltraCamD-Beispielen ausreichend. Nach der Bündelausgleichung mit dieser erweiterten Selbstkalibrierung sind bei allen getesteten UltraCamD-Datensätzen alle systematischen Effekte verschwunden. Weiter ist die Frage von Bedeutung, wie sich die Genauigkeit durch diese neue Selbstkalibrierung verändert. Leider lagen nur für einen einzigen Datensatz "Colorado" unabhängige Vergleichspunkte vor. An diesem Beispiel zeigt sich eine Genauigkeitssteigerung um den Faktor zwei (Tabelle 1). In Tabelle 2 sind die Daten für die Blöcke "Colorado" und "Trussville" zusammengestellt.

| Tab. 1 Ergebnisse der Bündelausgleichung im Block "Colorado" | | | | |
|--|------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| | σ_0 [μm] | RMS Abweichungen in den Prüfpunkten | | |
| | | in X [feet] | in Y [feet] | in Z [feet] |
| Ohne Kalibrierung | 3.0 | 0.18 | 0.22 | 0.29 |
| Neue Kalibrierung | 1.7 | 0.09 | 0.13 | 0.14 |

| Tab 2. Daten der Blöcke "Colorado" und "Trussville" | | |
|---|---------------------|---------------------|
| Photos | 276 | 1037 |
| Ausgleichungspunkte | 2212 | 12934 |
| Punkte pro Bild | 36 – 89, Mittel 53 | 11 – 53, Mittel 44 |
| Flugstreifen | 7 mit je 29 Photos | 18 |
| Querstreifen | 2 | |
| Überlappung | längs 80%, quer 30% | längs 60%, quer 25% |
| Passpunkte | 20 am Blockrand | 36 |
| GPS/IMU Daten | | für alle Bilder |
| Prüfpunkte | 81 | |
| Flughöhe | 1400 feet | 4500 feet |
| Höhenunterschiede | 148 feet | 1000 feet |

Dieses erfreuliche Ergebnis bestätigt die durch visuelle Beurteilung getroffene Feststellung, dass eine deutliche Verbesserung erreicht werden kann. Abb. 5 zeigt die systematischen Restfehler in den Bildmessungen nach erfolgter Selbstkalibrierung.

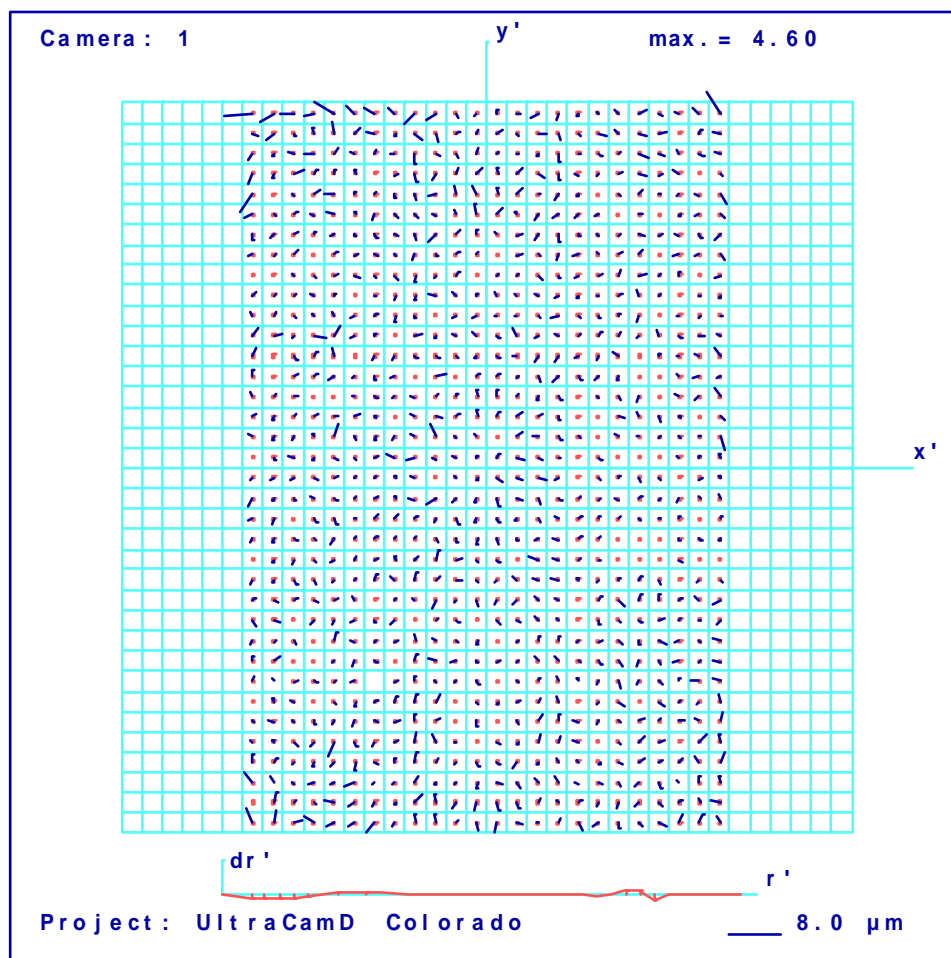


Abb.5 Systematische Bild-Restfehler nach neuer Selbstkalibrierung

Abb. 6 zeigt den Block in 3D-Darstellung mit Konfidenzellipsoiden. Die grüne Farbe ist für Punkte verwendet, die in wenigstens zwei Flugstreifen gemessen wurde, die Punkte in Magenta sind nur innerhalb eines Streifens gemessen. Die Geometrie dieses Blockes mit der hohen Überdeckung und den Querstreifen ist ausgezeichnet zur Kamerakalibrierung geeignet. Man kann erwarten, dass wirklich alle Effekte aufgedeckt werden. Abb. 7 zeigt die Verteilung von Passpunkten und Prüfpunkten. Die schwarzen Punkte mit den Nummern sind die Passpunkte, die Magenta Punkte mit den Vektoren die Prüfpunkte.

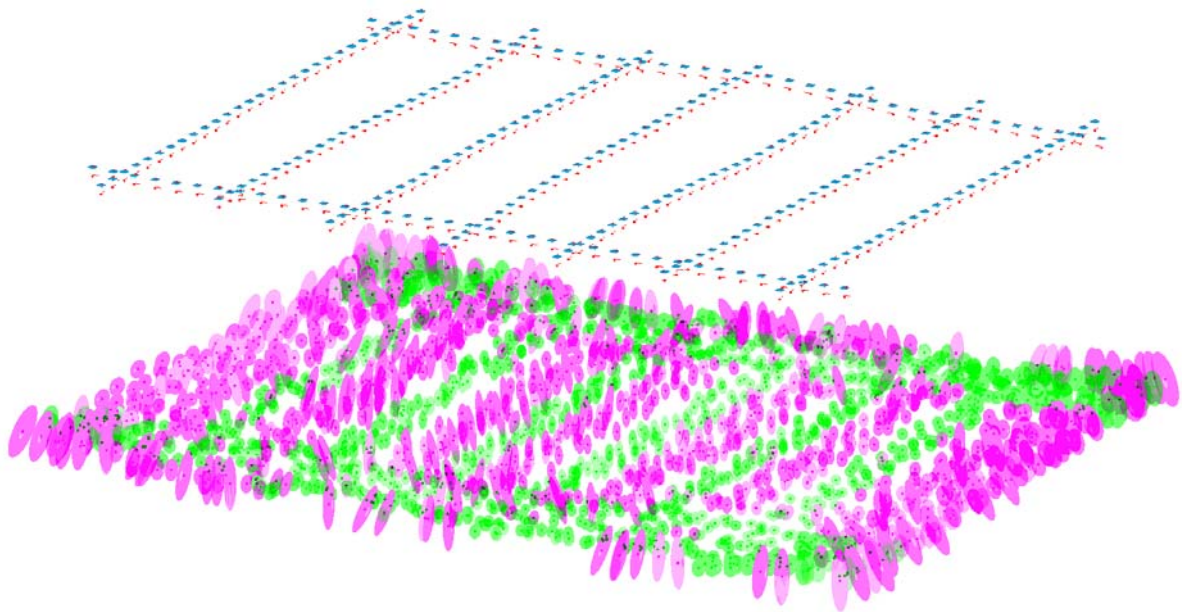


Abb.6 Block "Colorado" in 3D Darstellung mit Konfidenzellipsoiden

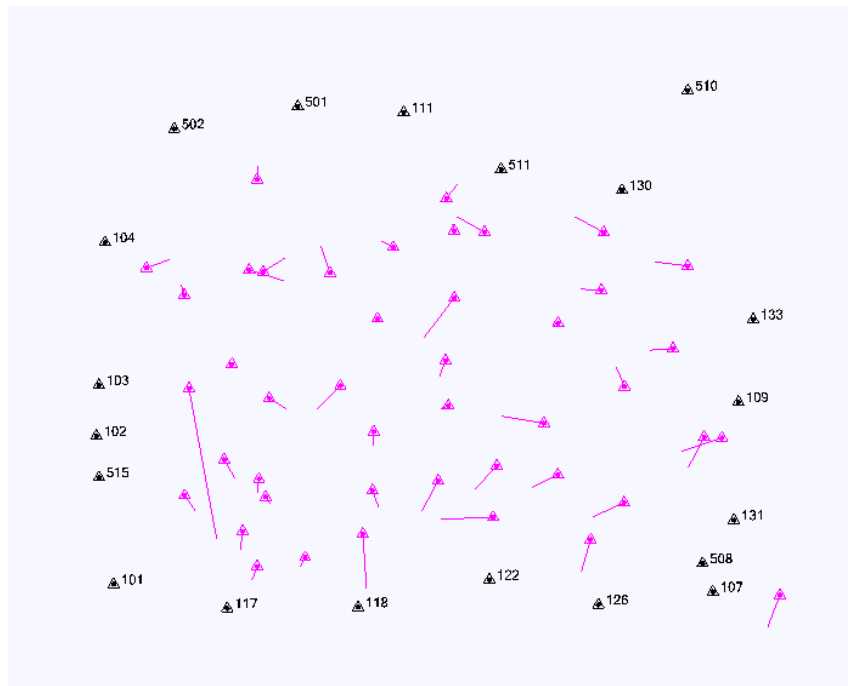


Abb.7 Passpunkte und Prüfpunkte in Block "Colorado"

Abb. 8 zeigt das Layout vom Block "Trussville". Auch hier verschwanden mit dem neuen Kalibrieransatz alle systematischen Effekte. Sigma Null ging von 2.1 auf 1.8 μm zurück. Dabei kamen 15 zusätzliche Parameter zur Anwendung. Die Wirkung dieser Parameter auf die Bildgeometrie ist in Abb. 9 gezeigt.

Für beide Kameras wurde je ein Mustersatz von zusätzlichen Parametern zusammengestellt, der hinreichend ist, die systematischen Effekte (nahezu) vollständig zu eliminieren. Für die DMC besteht dieser Mustersatz aus 22 Parametern, für die UltraCamD sind es 35. Die unterschiedliche Anzahl ist durch die unterschiedliche Anzahl von CCD-Sensoren begründet. Die Bündelausgleichung testet diese Parameteransätze und eliminiert diejenigen Parameter, die für das spezielle Projekt nicht erforderlich sind.

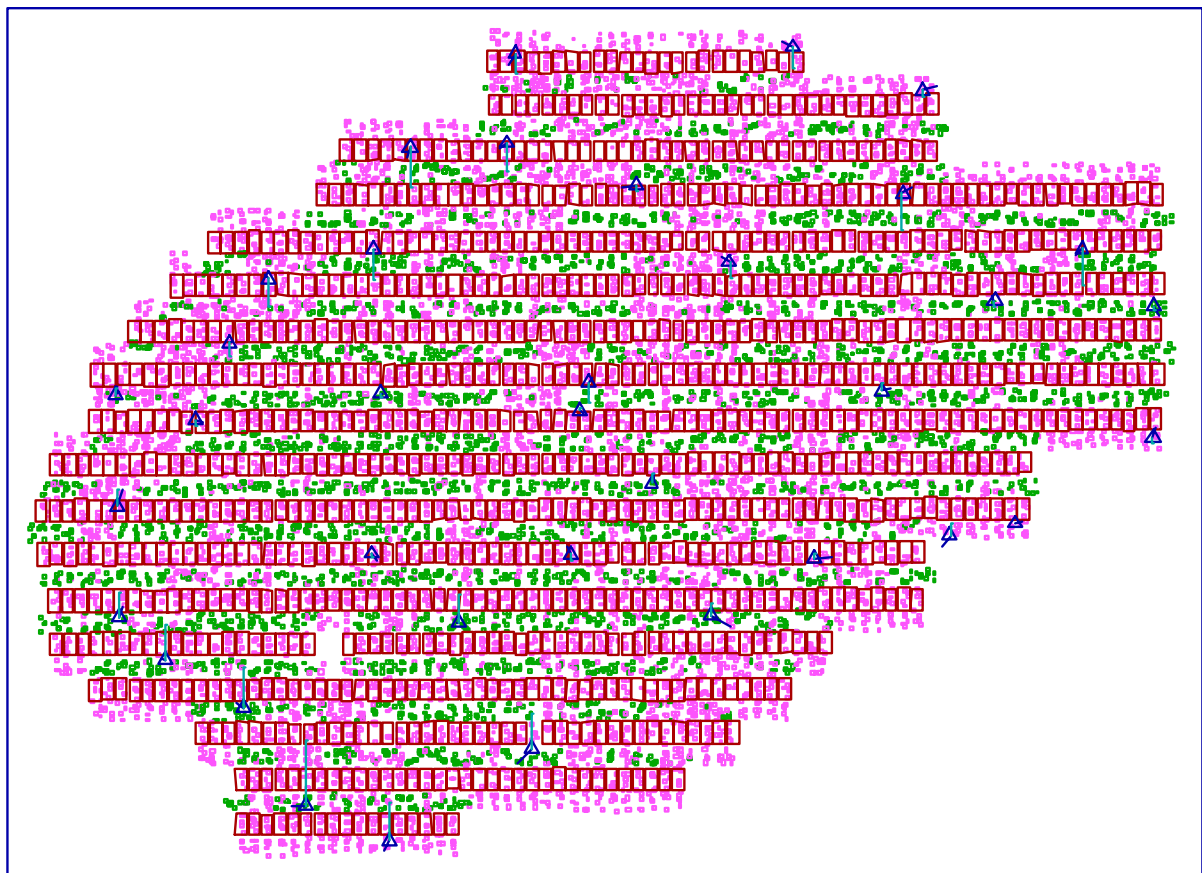


Abb.8 Layout Block "Trussville"

Wie bereits oben ist die grüne Farbe ist für Punkte verwendet, die in wenigstens zwei Flugstreifen gemessen wurde, die Punkte in Magenta sind nur innerhalb eines Streifens gemessen. Die Footprints der Bilder (rot) sind zur besseren Übersicht auf 1/3 ihrer tatsächlichen Größe reduziert. Die Passpunkte sind in blau dargestellt.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese kleine Untersuchung zeigt dass bei digitalen Luftbildkameras Restfehler der Kalibrierung vorhanden sind. Sie können mit BINGO aufgedeckt und auch eliminiert werden. Um nun die gewonnenen Korrekturen in digitale Auswertesysteme einfließen zu lassen, sind prinzipiell zwei unterschiedliche Wege möglich:

- Die Korrekturen werden in Form einer Look-Up-Tabelle eingespeist und bei allen weiteren Operationen berücksichtigt.
- Die Korrekturen werden als Verbesserungen der Kalibrierwerte der Bildgeometrie in die Software integriert, die die Bilder aus den einzelnen Teilbildern zusammensetzt. Das Resampling für das aktuelle Projekt ist dann zu wiederholen. Da man davon ausgeht, dass die Geometrie über einen gewissen Zeitraum stabil bleibt, ist eine solche Vorgehensweise durchaus sinnvoll. Bei einem Projekt wurden mit diesem Prinzip bereits positive Erfahrungen gesammelt.

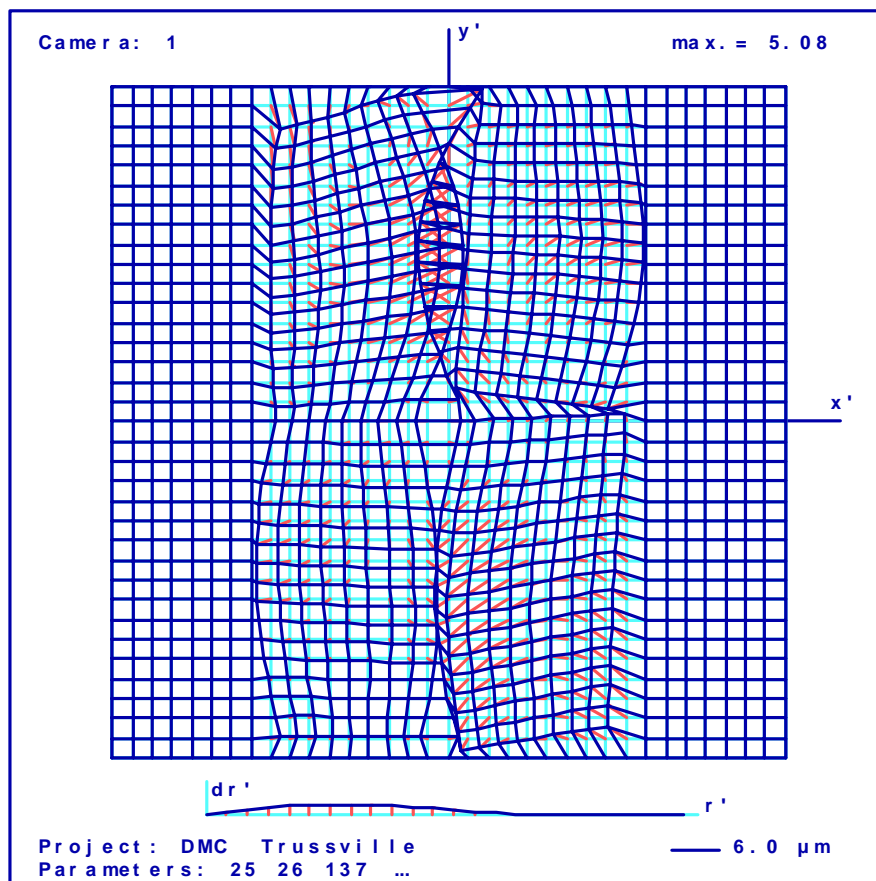


Abb.9 Korrekturmuster zur Bildgeometrie im Block "Trussville"

An dieser Stelle erlaube ich mir darauf hinzuweisen, dass nicht nur digitale Luftbildkameras auf ihre korrekte Geometrie zu überprüfen sind. Bei Luftbildscannern namhafter Firmen wurde zum Teil auch erheblicher Kalibrierbedarf festgestellt. Leider lassen sich die Fehler der Scanner nicht auf einfache Weise durch zusätzliche Parameter eliminieren.

5. Literatur

Literatur zu den beiden beispielhaft benutzten Kameras ist in den letzten Jahren so reichlich veröffentlicht worden, dass hier lediglich auf eine Quelle hingewiesen werden soll, in der nachzulesen ist, dass die UltraCamD regelmäßig mit BINGO kalibriert wird.

KRÖPFL, K., KRUCK, E., GRUBER, M., 2004: Geometric calibration of the digital large format aerial camera UltraCamD, ISPRS Symposium Istanbul Comm. I, WG I/2.