کاربرد عملی و نتایج تجربی مثلث‌بندی هوایی اتوماتیک

نویسنده: VASSILIOS TSINGAS, Stuttgart
برگردان: سید وحید تقوی

چکیده:
مثلث‌بندی هوایی تنها شاخه اصلی فتوگرامتری نیست بلکه کلیه راحل تهیه و تبدیل عکسهای هوایی به نقشه به وسیله فتوگرامتری انجام می‌شود. بنابراین روش مثلث‌بندی عموماً برای سایر عملکردهای فتوگرامتری نیز مورد نیاز می‌باشد. در نهایت کنترل و هدایت سیستم مثلث‌بندی هوایی به کمک تکنیکهای هوایی به سطح عملی و کاربردی رسیده است. این مقاله یک سیستم نرم‌افزاری برای مثلث‌بندی هوایی توماتیک را تشریح می‌نماید.
پروژه‌های Pilot از بلوک فتوگرامتری متعارف و تصویربرداری جیتالی از دوربینهای 3-Line CCD نیز با این نرم‌افزار پردازش شده‌اند

۱) پیشگفتار

مثلث‌بندی هوایی معمولاً شامل دو مرحله می‌باشد:

الف – مرحله اندازه گیری (شامل آماده‌سازی ترانسفر نقاط مورد نیاز).

ب – مرحله تطابق بلوک – در حالی که تطابق بلوک از سالها قبل تا حد زیادی یک فرآیند اتوماتیک بوده، کنترل و هدایت خودکاری مرحله اندازه گیری تنها به وسیله توسعه دیجیتالی فتوگرامتری ممکن گردیده است. تصویر دیجیتالی که با تکنیکهایی قابل انطباق می‌باشد، امکانات جدیدی را برای ترانسفر اتوماتیک نقاط و اندازه گیری و در نهایت مثلث‌بندی هوایی فراهم می‌آورد.

در حال حاضر دو خط مشی و استراتژی در کاربرد عملی وجود دارد که می‌تواند در مثلث‌بندی هوایی دیجیتالی به کار گرفته شود.

اولین استراتژی، استفاده از روشهای نیمه اتوماتیک می‌باشد که به روش متعارف فتوگرامتری تحلیلی نزدیک است. شخص عامل به طور متقابل یک یا چند نقطه اتصال در یک تصویر را انتخاب کرده و مکان تقریبی نقاط متقارن (متجانس) در تصویر متناظرش تعیین می‌کند. (سپس نقطه تصویر به طور اتوماتیکی توسط تطبیق تصویر انتقال می‌یابد). (تطبیق کمترین مربعات به طور مشترک). این روش، راه حلی را برای ترانسفر نقاط در یک ایستگاه کاری دیجیتالی ارایه می‌دهد ولی امکانات فتوگرامتری دیجیتالی را تکمیل نمی‌کند.

دومین روشی که در این‌جا به کار گرفته شده است، این است که قدمی جلوتر رفته و برای دستیابی به مرحله‌ای کاملاً اتوماتیک در انتخاب انتقال (تطبیق) و اندازه گیری نقاط اتصال [1] تلاش می‌کند. در این مرحله نه تنها نقاط اتصال به طور خودکار انجام می‌شود بلکه تقریبها نیز به همین طریق به دست می‌آیند. عامل، لازم است که تقریبهای اولیه (شکل بلوک، پوشش طولی و عرضی) را ارایه داشته و همچنین نتایج را کنترل کند. راهنمایی متقابل و دخالت تنها در موارد حساس ضروری می‌باشد. در این رابطه سیستم مثلث‌بندی هوایی اتوماتیک در دانشگاه اشتوتگارت در حال توسعه بوده است (سال ۱۹۹۲ میلادی – Tsingas). تکمیل و توسعه بعدی، سیستم را برای کاربرد عملی آماده ساخته است. از سال گذشته نسخهٔ ویژه‌ای برای برنامه پردازش تصاویر دیجیتالی دوربینهای 3-Line CCD وجود داشته است. (Momso2, DPA) و (Fritsch 1995).

۲) مفهوم کلی روش مثلث‌بندی هوایی اتوماتیک

مشخصات اصلی، مفهوم سیستم اتوماتیک و دقت Subpixel می‌باشند. قرار است این سیستم فقط با تقریبهای اولیه متقاطع کار کند. این تقریبها، ساختارهای بلوک (استریپ، تصاویر) و پوششهای طولی و عرضی می‌باشد. برای انتخاب و ترانسفر نقاط، ارزشهای تقریبی به طور اتوماتیک و با استفاده از یک هرم تصویری به دست آیند.

در مثلث‌بندی هوایی تحلیلی، برای دست‌یابی به سطح دقت لازم، مختصات تصاویر باید نسبت به دقت Subpixel ارزیابی شوند. این روش باید به اندازه کافی سریع باشد تا با نقاط اتصال زیادی به عنوان روشهای مرسوم (معمولاً بیش از ۱۰۰ نقطه در هر تصویر) ارتباط برقرار کند. چنین نقاط اتصالی محکم (و با توجه به مراقبت از اشتباهات کوچک) و با دقت بالای پارامترهای توجیه دلالت دارند. لذا این سیستم مطابق با مقیاس برنامه‌ریزی شده به راحتی قابل توسعه و گسترش است. این سیستم شامل روشی اتوماتیک برای انتخاب و ترانسفر نقاط اتصال می‌باشد. برای مثال تصویری که با این روش قابل انطباق باشد، از یک استراتژی اتوماتیک ساختار عمودی هرم تصویر و ساختار پوشش طولی و عرضی بلوک فتوگرامتری پیروی می‌کند.

روش اتوماتیک ترانسفر نقاط باید مسئله پوشش متعدد و گوناگونی را که با بلوکهای فتوگرامتری ظاهر می‌شوند، حل کند. هنگامی‌که سیستم قدیمی فتوگرامتری، نمای تصویری ساده یا سه بعدی و تعیین نقاط را به یک یا دو عکس محدود می‌سازد، استفاده از روشهای دیجیتالی و پردازش تمامی عکسهایی که دارای پوشش به طور هم‌زمان هستند، میسر می‌باشد.

بنابراین تطابق چند تصویر، روشی عمومی برای تعیین نقاط در فتوگرامتری دیجیتالی است. روشهای مبتنی بر تطبیق تصاویر نواحی به طور بالقوه از دو جنبه دارای دقت بالایی هستند اما آنها نیازمند مقادیر تقریبی قابل قبولی می‌باشند. از سوی دیگر تطبیق مبتنی بر عوارض نسبت به تطبیق مبتنی بر نواحی دارای دقت کمتری می‌باشد، لیکن دقت Subpixel آن برای بسیاری از کاربردها کافی می‌باشد. تطبیق مبتنی بر عارضه، تنها به مقادیر تخمینی اولیه معمولی (ناصاف) نیاز دارد و برای پردازش اتوماتیک بسیار سریع و مناسب می‌باشد. بنابراین روش تطبیق تصاویر عارضه‌ای چند بعدی گسترش داده شده که مبتنی بر یک مدل تئوریکی تصویری می‌باشد (سال ۱۹۹۴ میلادی - Tsingas). این روش، مختصات پیکسلی نقاط اتصال متعدد را که به طور اتوماتیک انتخاب و تطبیق شده‌اند، فراهم می‌کند. این روش، با تعداد زیادی از نقاط اتصال که به طور سنتی در مثلث‌بندی هوایی به‌کار برده می‌شوند، عمل می‌نماید. اگر دقت بهتری مورد نیاز باشد، مختصات پیکسل نقاط تصویر مشابه، می‌توانند به عنوان مقادیر تقریبی برای تطبیق کمترین مربعات به کار برده شوند. روش مقدماتی فوق با تصاویری که دارای پوششی هستند، عمل خواهد کرد. مشکل اساسی در تطابق تصاویر، تدارک تقریب‌های به اندازه کافی نزدیک می‌باشد. به منظور حل مسئله، سیستم به طور اتوماتیک و گام به گام از میان هرمی متشکل از تصاویر عبور خواهد کرد.

۳) مراحل عملی

۳ - ۱) تهیه و آماده‌سازی داده‌ها

هنگامی که سنجنده‌های دیجیتالی (برای مثال دوربینهای CCD 3-Line) مستقیماً داده‌های دیجیتالی را تهیه می‌کنند، تصاویر باید با اندازه یک پیکسل Pixel از (۳۰ - ۱۰) میکرومتر در مورد بلوکهای فتوگرامتری، دیجیتالی رقومی شوند. وقتی تصاویر به شکل دیجیتالی هستند باید هرم تصویری تشکیل شود. ذخیره داده‌ها و احتمالاً انتقال داده‌ها، در حال حاضر به خاطر مقدار داده‌ها، هزینه ذخیره‌سازی و دیجیتالی کردن و زمانی که اشغال خواهند کرد دارای اهمیت می‌باشند و به علت پیشرفت در زمینه تکنولوژی سنجنده، نگهداری آنها بسیار سریع می‌باشد (ارتقاء عملکرد و ظرفیت ذخیره‌سازی با کاهش قیمتها).

۳ - ۲) اندازه‌گیری علایم حاشیه‌ای و نقاط کنترل

مختصات پیکسل (Pixel) به علایم حاشیه‌ای نیازمندند، تا مختصات پیکسل نقاط تصویر را به سیستم مختصات تصویر تبدیل نمایند. برای این منظور یک مدل نرم‌افزار به کار برده شده است که اجازه استقرار تصویری را (این تصویر شامل هرم تصویر خودش می‌باشد) با دقت Subpixel و به صورت علامت اندازه گیری (دایره یا ضربدر) تهیه شده توسط مکان‌نما را بر روی صفحه نمایشگر نشان می‌دهد نگاره(۱).

همان مدل جهت اندازه‌گیری نقاط کنترل به کار برده می‌شود. سیستم تصاویر را از زاویه بالا نشان می‌هد - (پنجره چپ در نگاره (۱)). و ناحیه تصویر مورد نظر، در دو قدرت تفکیک متفاوت (سطح پایین و وسط هرم). بعد از آن که نقاط با دقت Subpixel اندازه‌گیری شدند (پنجره بالا سمت راست - نگاره (۱). در این حالت اپراتور به طور تخمینی می‌تواند نقاط کنترل را با سه نشانهٔ مکان‌نما تثبیت کند. این روش دارای دقت کافی بوده و بسیار سریع می‌باشد (کمتر از ۱ دقیقه در نقطه با علامت حاشیه‌ای).

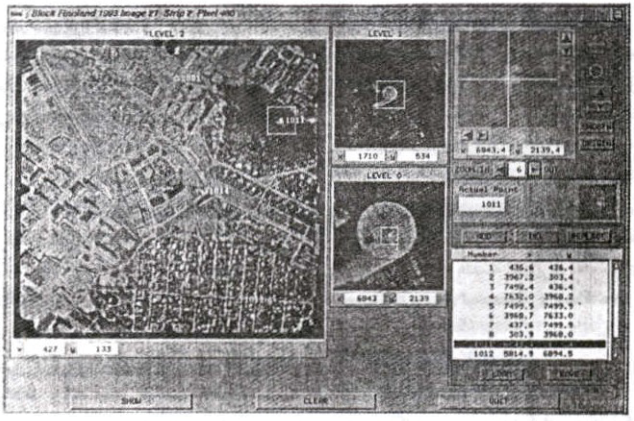
تطبیق تعدادی از بلوک FORSSA و با استفاده از نقاط اتصال علامت زده شده، که‌بااین روش اندازه‌گیری شده بودند، نتایج مشابهی (σ_o=3.9μm) در ارتباط با اندازه‌گیری تحلیلی بر روی دستگاه سنجش zeissPk1 به بار آوردند (σ_o=3.5μm) لذا برای بهره گرفتن از این عمل این طور برنامه‌ریزی شده تا مدل تطبیق دستگاه سنجش فوق‌الذکر در آینده تکمیل شود.

در مرحله بعد و برای تعیین ساختار بلوک، اندازه‌گیری نقاط کنترل پیش از اندازه‌گیری نقاط انتقال مفید به نظر می‌رسد.

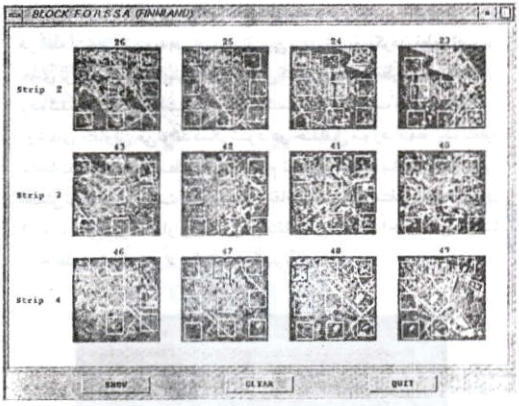
۳ - ۳) تعیین مقادیر تقریبی اولیه

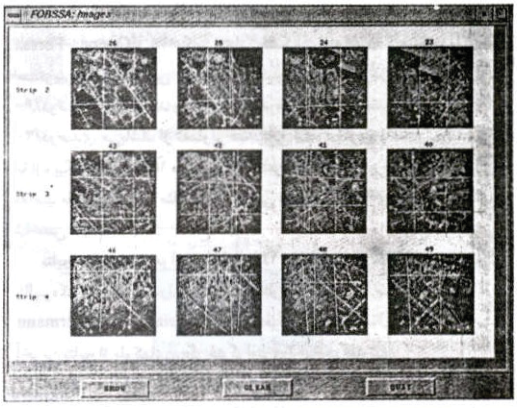
بلوکهای فتوگرامتری برنامه فقط به ساختار بلوک به عنوان یک پیش اطلاعات (استریپها) و توالی تصاویر، پوشش طولی و عرضی به درصد نیاز دارد. یک سطح ناصاف از هرم تصویری (Pixel 980μm) برای تعیین اتوماتیک پوشش طولی و عرضی به کار برده شده است (تخمینی). پوشش هرزوج تصویری که به طور ناگهانی در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند (برای مثال دو تصویر (i,i+1) و (i+1,i+2)) در مرحله تطبیق و با دقت بیشتر تعیین شده است (۱mm). در این روش اگر پوشش بیش از ٪۳۰ درصد باشد خوب کار می‌کند والا در شرایط حساس یک راهنمای دارای اثر متقابل مورد نیاز خواهد بود. پوشش طولی جفت تصاویر به هم مزدوج شده دیگر (i,i+2) به کمک پوشش عرضی تعیین شده از جفت تصاویر بالایی، محاسبه شده است. نگاره (۲) بلوک Forssa را از زاویه بالا نشان می‌دهد.

خطوطی که بر روی هریک از تصاویر وجود دارد مرز (حد) تغییر شکل یافته از تصاویر مجاور هم را نشان می‌دهد.



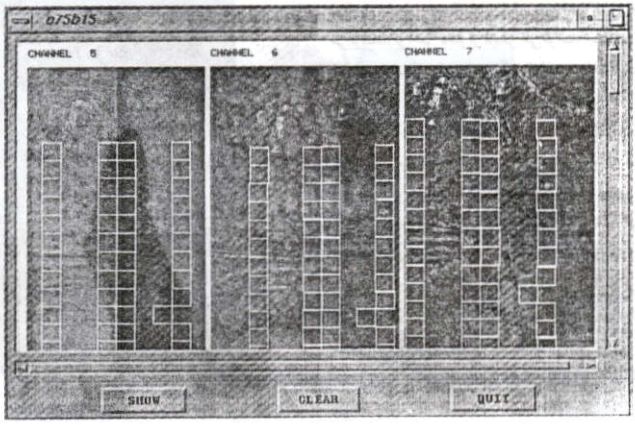
نگاره (۱)





نگاره (۲)

نگاره (۳)



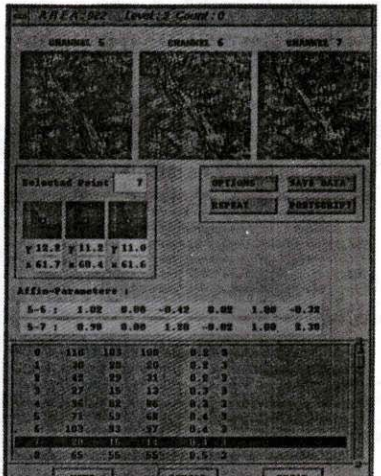
نگاره (۴)

بنابراین بلوک در نواحی با پوشش گوناگون به اجزاء کوچکتر تقسیم می‌شود. قطعات تصاویر اولیه در این نواحی قرار گرفته‌اند. در مورد مثلث‌بندی هوایی سنتی، قطعات تصویری اولیه به صورت ۹ موقعیت استاندارد شده و به طور طبیعی در داخل یک تصویر و در محل نقاط اتصال قرار گرفته‌اند نگاره (۳) (ونیز بردن قاعده پوششها می‌توانند مناسب باشند).

برای تصاویر با هندسه سه محوری، نقاط اتصال بیشتری مورد نیاز می‌باشد، که باید در مناطق مرکزی و حاشیه‌ای تصویر قرار گیرند. بنابراین قطعات اولیه به ترتیب قرار گرفته‌اند نگاره (۴).

۳ - ۴) انتقال نقطه دیجیتال

برای فراهم کردن تقاریب نزدیک، تصویری از یک هرم سه وجهی که توسط عامل و به مقیاس تقریبی ۴ یا ۵ جدا شده‌اند، کافی است. هنگامی که قطعات تصاویر مشابه تعیین شدند، فرآیند واقعی انتخاب نقاط تصویر و تطبیق چندگانه نقاط اتصال بر روی رأس هرم تصویر آغاز خواهد شد. این فرآیند به طور متوالی توسط دوسطح باقی‌مانده هرم تصویر تکرار می‌شود. هر نقطه انتخاب شده به عنوان یک تقریبی برای تعریف کردن قطعه تصویر بعدی بر روی سطح پایینی بعدی، جایی که روش مورد نظر دوباره به کار برده شده قابل استفاده است. باتوجه به شماره نقاط انتخاب شده، هر قطعه با روشهای متفاوتی می‌تواند دنبال شود. در حداقل مورد، فقط یک نقطه انتخاب شده، و به سطح پایینتر هرم تصویر انتقال یافته است. روش مطمئن‌تر دیگر این است که دو نقطه یا نقاط بیشتری را منتقل کنیم. (جدول ۱، روش هرم) برنامه دارای یک روش متقابل می‌باشد که اجازه می‌دهد تا نتایج تطبیق را برای هر مرحله تجسم کنیم نگاره (۵).



نگاره (۵)

۳ - ۵) کاهش داده‌ها و تطبیق دسته‌ای

هنگامی که اندازه‌گیریها خاتمه یافت، مختصات پیکسل نقاط اتصال و کنترل باید به سیستم مختصات تصویر، تغییر شکل دهند. بعد از آنکه مختصات تصویر، برای برنامهٔ تطبیق دسته‌ای به کار برده شدند، با انتقال نقطه دیجیتالی و اندازه‌گیری آن و مثلث‌بندی هوایی کامل، بر روی یک رایانه واقع می‌شوند و هیچ گونه سخت‌افزار خاصی مورد نیاز نمی‌باشد.

بنابراین تطبیق دسته‌ای می‌تواند در طول مرحله اندازه‌گیری جهت تعیین کردن خطاهای بزرگ به کار برده شود و مقادیر تقریبی را بهبود بخشد. این گزینه در مورد هندسه تصویری سه محوری مفیدتر است جایی که هر ردیف تصویر، یک توجیه ظاهری جداگانه دارد.

۴ - نتایج عملی (تجربی)

۴ - ۱) تست Oeepe بلوک Forssa

سال گذشته مؤسسه فتوگرامتری دانشگاه اشتوتگارت در آزمایش Oeepe (روش دیجیتالی در مثلث‌بندی هوایی) شرکت کرد. بلوک Forssa Oeepe از ۲۸ عکس هوایی تشکیل یافته است. که یک بلوک ۴ استریپی را در مقیاس ۱ : ۴۰۰۰ تشکیل می‌دهد و در پوشش طولی ۶۰٪درصد تا ۷۰٪درصد و در پوشش عرضی دارای پوشش ۱۵٪درصد تا ۴۰٪درصدی می‌باشد. از تصاویر دیجیتالی شده دوگروه داده به ترتیب با اندازه پیکسلهای ۱۵μm میکرومتر و ۳۰μm میکرومتر وجود داشتند. برای مقاصد مقایسه‌ای، یک مثلث‌بندی هوایی تحلیلی قراردادی با نقاط اتصال شاخص انجام شد.

نتایج مثلث‌بندی هوایی و تطبیق (۱۴ نقاط کنترل XYZ بدون خود کالیبره کردن) در جدول (۱) نشان داده شده‌اند و با جزییات کامل در Ackermann و Tsingas مورد بحث قرار گرفته‌اند (سال ۱۹۹۴ میلادی). آخرین نتایج از بلوکهای دیگر فتوگرامتری ارایه خواهد شد.

حمایت متقابل از فرآیند اتوماتیک، در ۶٪ درصد همه قطعات تصویر مورد نیاز بود و به تهیه و تدارک متقابل مقادیر تخمین زده محدود می‌شد. نواحی دشوار عمدتاً با پوشش عرضی بین استریپها (نوارها) مربوط می‌باشند. نواحی دشوار دیگر می‌توانند جنگلها و یا نواحی ساختمان سازی شده در تصاویر هوایی بزرگ مقیاس و با انحرافات چشمی بزرگ باشند. تعداد نقاط اتصال صادر شده زیاد و بالغ بر ۲۷۲ نقاط اتصال در هر تصویر (۱۵μm داده) بود. در تطبیق نهایی، ۶٪درصد نقاط تصویر به عنوان بخشهای کوچک و مجزا کنار گذاشته شدند. این مقدار خطا کاملاً قابل قبول به نظر می‌رسید، از آن‌رو که فراوانی بالا باز یابی (ظهور) کامل مطمئنی را اجازه می‌داد. با داده‌های ۳۰μm میزان بخشهای مجزا با ۱۳۱ نقطه در هر تصویر ۰/۷٪درصد کاهش یافته است. برنامه به ۳۱min (۱/۱min در هر تصویر) بر روی یک کارگاه گرافیک سیلیکونی نیاز دارد (پردازشگر R4400 /200MHZ) که به ۷۶۴۳ نقطه اتصال و استراتژی Patch مطمئن‌تر بر می‌گردد. با استفاده از این روش حداقل Patch (داده‌های ۳۰μm میکرومتر) زمان پردازش به ۱۱ دقیقه کاهش می‌یابد. (۰/۴ دقیقه در هر تصویر)

DIGITAL AERIAL TRIANGULATION - OEEPE TEST BLOCK FORSSA			
	Analytical	Digital - Automatic	
Pixel size	-	15 µm	30 µm
Pyramid strategy	-	safe	minimal
Overlap areas Interactive support (approx. values)	- -	780 6%	234 6%
Points per patch	-	10 best	20 best
Image points (per image) Terrain points Outliers in adj.	492 (17) 151 -	7623 (272) 3401 6%	3686 (131) 1526 0.7%
processing time per image	(6 min)	1.1 min	0.4 min
σ_0 [µm] ([pixel])	3.5 (-)	6.2 (0.41)	10.6 (0.35)
Empirical Accuracy (RMS) resulting from 81 XY and 71 Z check points			
μ_X [cm]	2.4	3.6	4.3
μ_Y [cm]	2.7	3.9	5.1
μ_Z [cm]	4.9	5.3	8.1
Theoretical Accuracy of orientation parameters (RMS)			
σ_ω [mgon]	4.1	3.3	6.6
σ_ϕ [mgon]	4.1	2.7	5.7
σ_κ [mgon]	1.5	1.0	2.1
σ_{X_0} [cm]	4.4	3.0	6.2
σ_{Y_0} [cm]	4.7	3.7	7.3
σ_{Z_0} [cm]	2.6	2.5	4.4

جدول (۱)

با نگاه به نتایج دقت، مسئله اصلی مورد توجه به σ_0 مربوط می‌شود. در مثال اول این امر به تطبیق و حصول صحت عوارض ارتباط دارد. به بیان دیگر، آن صحت مختصات تصویر از مرحله دیجیتالی اتوماتیک را توصیف و تشریح می‌کند و می‌تواند با مقادیر قراردادی به دست آمده به ترتیب توسط علامت گذاری نقطه‌ای سنتی و انتقال نقطه مقایسه شود، همان طور که به خوبی با صحت نقاط مثلث‌بندی مشخص شده مقایسه می‌شود. σ_0 از مثلث‌بندی هوایی دیجیتالی برای داده‌های ۱۵µm میکرومتر و ۱۰/۶µm (۰/۳۵ پیکسل) و برای داده ۳۰µm بالغ بر ۶/۲µm (۰/۴ پیکسل) می‌شود. این نتیجه به صحت نظری حصول عوارض (۰/۳ پیکسل) نزدیک است.

دقت تئوریکی پارامترهای توجیه ظاهری به وضوح نسبت به دقت به دست آمده با مثلث‌بندی بلوک تحلیلی قراردادی با فراوانی زیاد، بهتر بود.

۴ - ۲) انتقال نقطه اتوماتیک با تصویربرداری ۳ محوری (MOMS-02/D2)

از سال گذشته روش فوق برای انتقال نقاط اتوماتیک داده‌های تصویری MOMS-02 به کار برده شده است. برای آنکه هندسه ۳ محوری در حدود ۱۲۰۰۰ نقطه اتصال در هر تصویر (۲۹۰۰×۳۲۰۰۰ پیکسل) برای تعیین توجیه سنجندهٔ قابل اطمینان، مورد نیاز می‌باشد. سه مدار (لیبی ۷۵، استرالیا ۷۵b و اندزبولیویا ۱۱۵) با برنامه اصلاح شده، پردازش شده بودند. (سال ۱۹۹۴ میلادی - Tsingas و Schneider و Fritsch). زمان پردازش خالص برای مرحله تطبیق (پنجره تصویر ۳ لایه با پیکسل ۸۰×۸۰) ۰/۲ ثانیه است. در این زمان بیش از ۵۰ نقطه به تصاویر دیگر منتقل شده‌اند. در نگاره (۳) تجسم گرافیکی تطبیق نتایج نشان داده شده است.

برای پردازش یک دوره مرحله مقدماتی باید ۲۰۵۰ مرتبه انجام شود که مجموعاً زمانی به مدت ۷ دقیقه را اشغال خواهد کرد. تطبیق دسته‌ای، درستی مختصات یک تصویر را (σ_0) از ۰/۶ تا ۰/۷ پیکسل با یک نرخ مجزای ۱٪درصد نشان می‌دهد. این نتایج نسبت به بافت تصویر و صفحه زمین (صحرای لیبی و کوهها در استرالیا و جنگل در بولیوی) بسیار نویدبخش هستند.

۵) نتیجه

به طور عمومی می‌توان نتیجه گیری کرد که مثلث‌بندی هوایی دیجیتالی نتایج دقیق بسیار خوبی را ارایه می‌دهد که روش مثلث‌بندی را به عنوان مثلث‌بندی هوایی با دقت بالا توصیف می‌کند. با خلاصه کردن آزمایشات تجربی می‌توان این گونه عنوان کرد که نتایج در هر ملاحظه بی‌نهایت امیدبخش هستند. سیستم نرم‌افزاری بالا به یک سطح عملی رسیده که انتقال نقطه با سرعت و دقت بالا با داده‌های بلوکهای فتوگرامتری قراردادی و تصویربرداری ۳ محوری را امکان پذیر می‌کند. توسعه در آینده، افزایش اطمینان سیستم را مورد هدف قرارداده است و همچنین حمایت متقابل و تکمیل کردن مدلهای نرم‌افزاری برای تطبیق دسته‌ای و تطبیق کمترین مربعات را، به حداقل رسانده است. در مقایسه مثلث‌بندی هوایی دیجیتالی اتوماتیک و مثلث‌بندی هوایی سنتی، اولی نه‌تنها دقیق‌تر بلکه بسیار سریع‌تر و کم هزینه‌تر نیز می‌باشد. □

پاورقی:

1) tie-Point