

دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

دانشکده مهندسی نقشه برداری

مراحل و نکات انجام یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه

نگارش: امیرشاهرخ امینی

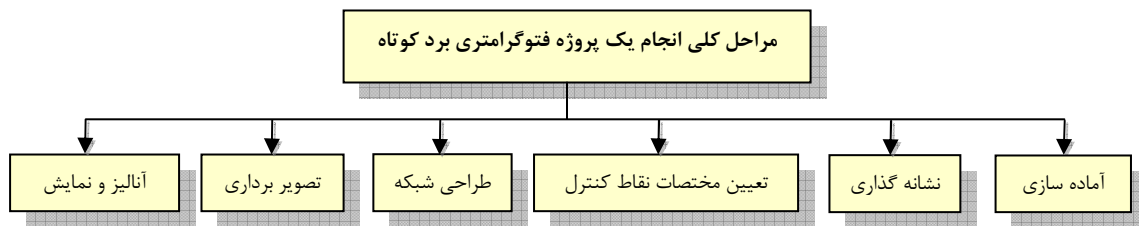
بهار ۱۳۸۵

۱- مقدمه

اصولا برای انجام یک پروژه فتوگرامتری ایده آل باید به نکات زیر توجه شود:

- تارگت ها از نوع بازتاباننده باشند تا با وضوح بیشتری قابل شناسایی باشند.
- اتوماسیون مراحل اندازه گیری در فضای تصویری الزامی است؛ زیرا در حالت اتوماتیک دقت اندازه گیری عکسی حدود $0/02$ تا $0/05$ ابعاد پیکسل است، درحالیکه در روشهای اندازه گیری دستی این مقدار حدود $0/5$ می باشد.
- جهت دستیابی به دقت بالا باید از روش سرشکنی آزاد^۱ استفاده شود.
- جهت اجتناب از انتشار خطای موجود در نقاط کنترل به نتایج فتوگرامتری باید پروژه مستقل از نقط کنترل انجام شود.

بطور کلی می توان مراحل انجام یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه را درغالب نمودار زیر بیان کرد:



نمودار ۱: مراحل انجام یک پروژه فتوگرامتری برد کوتاه

۲- آماده سازی

جهت عکسبرداری مناسب، باید محیط مناسبی را برای تصویربرداری انتخاب کرد و شرایط نوری آنرا تنظیم کرد. محیط مورد نظر باید به حد کافی فضا جهت ایجاد یک شبکه مناسب تصویربرداری داشته باشد.

۳- نشانه گذاری

مرحله تارگت گذاری قبل از عکسبرداری انجام می شود. با توجه به روش انتخابی برای برداشت شیء (*Off-line* یا *On-line*) و همچنین دقت مورد نیاز، تارگت گذاری انجام می شود. طراحی تارگت ها عامل مهمی در کاهش خطای نشانه روی در اندازه گیری مختصات عکسی می باشد.

¹ Free Adjustment

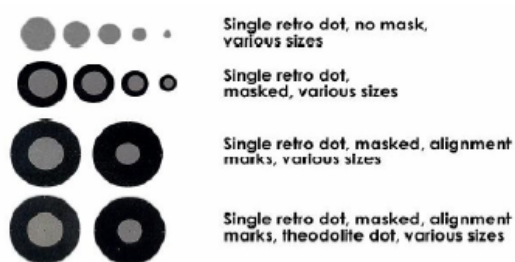
بدیهی است که سطوح اجسام مختلف دارای بازتاب نوری متفاوت می باشند و کیفیت ثبت این تارگتها روی عکس به شرایط نوری محیط و بازتابش نور از سطوح بستگی دارد. درانتخاب تارگت و تارگت گذاری نکات زیر باید مد نظر قرار بگیرند:

- تعداد تارگتهای مورد استفاده در شبکه به مواردی نظیر حداقل مورد نیاز برای باندا اجسمنت، ملاحظات هزینه، حداکثر تراکم تارگتها و محدودیتهای نرم افزاری بستگی دارد.
- درحالت سرشکنی همراه سلف کالیبراسیون، دقت اندازه گیری و برآورد پارامترهای سلف کالیبراسیون بستگی زیادی به تعداد و توزیع تارگت ها در فضای سه بعدی شیء ای و فضای دو بعدی تصویری دارد. بصورت تجربی تعداد حداقل ۲۵ تارگت بصورتی که درهر تصویر بطور متوسط حدود ۲۰ تارگت قرارگیرد، توصیه شده است.
- خصوصیات یک تارگت مناسب به جنس، دوام، قابلیت انعکاس، ابعاد، شکل، تقارن و کنتراست آن بستگی دارد.
- بهتر است در کنار برخی از نشانه ها یک شماره منحصر بفرد نوشته شود.

۳-۱- انواع تارگت ها

انواع تارگت های مورد استفاده در کارهای فتوگرامتری را می توان بصورت زیر بیان کرد:

- (۱) **تارگت های منعکس کننده:** این تارگت ها همان تارگت های معمولی می باشند که در اکثر کارهای فتوگرامتری برد کوتاه مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل ۱: انواع تارگت های منعکس کننده

- (۲) **تارگت های پروژکتوری^۲:** این تارگت ها از جنس پرتو های نوری هستند که با جهت و در راستای منظمی بسمت عارضه هدایت می شوند. این نوع تارگت ها بیشتر در مواقعی که ابعاد اجسام کوچک بوده یا انحناهای سطوح زیاد است، بکار می روند.

² Projector Targets

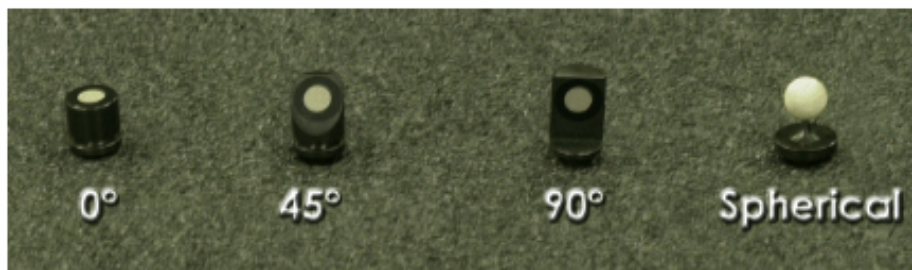
(۳) **تارگت های میله ای^۳**: این تارگتها بیشتر در سیستمهای *On-line* و در واقع در سیستم هایایی که توانایی اندازه گیری نقاط بدون استفاده از تارگت رادارند، استفاده می گردند.

(۴) **تارگت های کددار^۴**: این نوع تارگتها دارای شکل و طراحی ویژه ای هستند تا نرم افزار بتواند براحتی آنها را شناسایی کرده و عمل *matching* را انجام دهد. نمونه ای از این تارگتها در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲: نمونه ای از تارگت های کددار

(۵) **تارگت های فلزی**: این نوع تارگت ها از جنس فلز می باشند که روی یک شفت قرار گرفته اند. این تارگتها معمولا به سه شکل صاف، تارگتهای ۴۵ درجه و تارگتهای ۹۰ درجه ساخته می شوند. تارگتهای ۴۵ و ۹۰ درجه بسیار مفید هستند، زیرا وقتی از آنها استفاده می شود، می توانند بازتاب رابه سمت دوربین بدون از دست دادن دقت انجام دهند. نوع دیگری از این تارگت ها، تارگت های کروی می باشند. با اینکه این نوع تارگت ها دقت زیادی ارائه نمی کنند، اما استفاده از آنها به جای تارگتهای چرخشی می تواند مفید باشد. نمونه ای از این تارگتها در شکل (۳) آمده است.



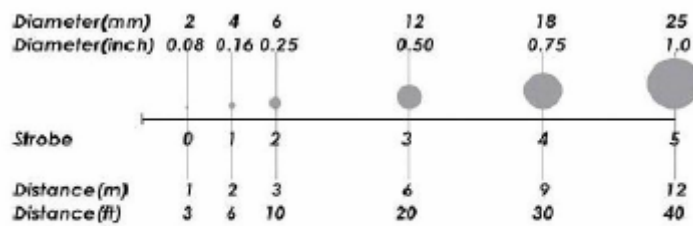
شکل ۳: انواع تارگتهای فلزی

³ Hand Probe Targets

⁴ Coded Targets

۲-۳- اندازه تارگت

در تعیین اندازه تارگت ها؛ هندسه عکس، فاصله شیء تا دوربین، قدرت تفکیک و قطر نشانه اندازه گیری باید مد نظر قرار گیرد. شکل (۴) بیانگر یک رابطه تجربی بین فاصله دوربین عکسبرداری و اندازه می باشد.



Relationship between target size and distance

شکل ۴: رابطه تجربی بین فاصله دوربین عکسبرداری و اندازه تارگت

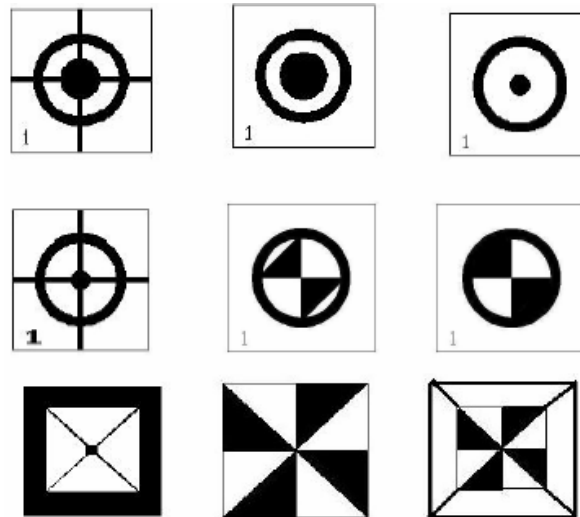
کمترین اندازه ممکن برای قطر تارگت از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$D_{\min} = d(s/f) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه D_{\min} کمترین اندازه ممکن قطر تارگت، d اندازه قطر نشانه اندازه گیری در دستگاه اندازه گیری، s فاصله شیء تا دوربین و f فاصله کانونی می باشد. به طور تجربی می توان گفت به ازای هر یک متر فاصله دوربین از شیء، ۲ میلی متر به ابعاد تارگت باید اضافه شود. مثلاً در عکس برداری از فاصله ۳ متری، قطر تارگت باید ۶ میلی متر باشد.

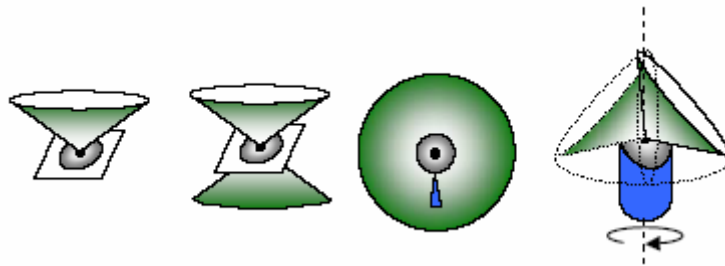
۲-۳- شکل تارگت

تارگت ها می توانند اشکال متنوعی مانند مربعی یا دایره ای داشته باشند و برای ایجاد کنتراست مناسب در آنها از رنگهای متضاد (سیاه و سفید) استفاده می شود. البته تارگتهای دایره ای بدلیل داشتن همگونی و مستقل بودن اندازه گیری از جهت امتداد و دید در این تارگتها، بهترین تارگت ها هستند. انواع تارگتهای دایره ای و مربعی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: انواع تارگتهای دایره ای و مربعی

در شکل (۶) انواع دیگری از شکل تارگت ها مشاهده می شود:



شکل ۶: تارگتهای صفحه ای، پشت به پشت، کروی و چرخنده (از چپ به راست)

۴- تعیین مقیاس

نقاط کنترل در پروژه های فتوگرامتری بعنوان نقاطی با مختصات معلوم و دقیق مورد استفاده قرار می گیرند. این نقاط باید دارای خصوصیات زیر باشند:

(۱) نقاط کنترل باید بطور تقریباً یکنواخت در فضای عکسی توزیع شده باشند. اگر پراکندگی نقاط یکنواخت نباشد، پارامترهای کالیبراسیون بدرستی بدست نمی آیند.

(۲) تعداد نقاط باید به اندازه ای باشند که حداقل مشاهدات مستقل برای حل مجهولات مدل ریاضی را تامین کنند و تعدادی نیز بعنوان نقاط *check* و کنترلی در نظر گرفته شوند.

(۳) نقاط در یک صفحه نباشند؛ زیرا در غیر اینصورت محاسبه فاصله اصلی دوربین بروش تحلیلی میسر نخواهد بود.

(۴) شکل نقاط کنترل بگونه ای باشد که بتوان بهترین نشانه روی و اندازه گیری را انجام داد.

مسئله مقیاس را می توان به دو طریق حل کرد:

۱) با استفاده از اندازه گیری دقیق طول بین چند نقطه ای که در مشاهدات اندازه گیری شرکت دارند. از آنجائیکه اندازه گیری فاصله بین دو نقطه نیاز به اندازه گیری مستقیم دارد و دقت ابزارهای اندازه گیری معمولاً محدود می باشد، لازم است قرائت طولها در این روش با انجام تکرارهای متعدد جهت افزایش دقت صورت گیرد.

۲) با قراردادن یکسری وسایل بنام *Scale-Bar* با طولهای کاملاً مشخص و دقیق در زمینه جسم و تصویربرداری از آنها. این ابزار دارای طول بسیار دقیق با دقت حدود یک میکرون بوده و معمولاً از موادی که در مقابل حرارت و عوامل محیطی دیگر مقاومت مناسبی دارند، ساخته می شوند. بسیاری از سیستم های اندازه گیری مختصات، یک سیستم مختصات محلی بر روی عکس اول به صورت اتوماتیک تعریف می کنند. البته می توان به صورت دستی نیز سیستم مختصات را تعریف کرد.

۵- انواع پیکربندی سیستم های فتوگرامتری صنعتی

بطور کلی سیستم های فتوگرامتری را از جهت نوع پیکربندی به دو دسته کلی می توان تقسیم بندی کرد: سیستم های *off-line* (غیرآنی) و *on-line* (سیستم های آنی). سیستم های *off-line* همان سیستم های صنعتی و اولیه فتوگرامتری صنعتی می باشند که در آنها فاز اندازه گیری و جمع آوری داده ها از فاز اندازه گیری های تصاویر و پردازش داده ها جدا می باشد، در حالی که در سیستم های *on-line*، خروجی و نتایج بدست آمده بصورت همزمان یا نزدیک به زمان جمع آوری داده ها است. همانطور که پیداست، سیستم های *on-line* از تصاویر رقومی و سیستم های *off-line* از فیلم استفاده می کنند.

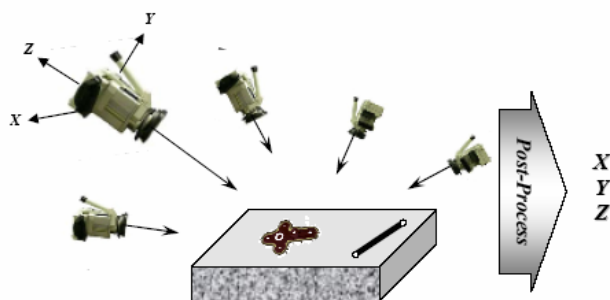
۵-۱- سیستم های غیرآنی

ساختار کلی سیستم های غیرآنی فتوگرامتری صنعتی دارای عناصر زیر می باشد:

- ابزار طراحی شبکه
- دوربین های متریک مبتنی بر فیلم متوسط یا بزرگ فرمت
- شبکه های همگرای چند ایستگاهی
- اندازه گیری نقاط عکس توسط منو کمپاراتورها
- توجیه خارجی عکسها از طریق باندا ل اجسمنت خود کالیبراسیون^۵

در شکل (۷)، پیکربندی کلی یک سیستم فتوگرامتری *off-line* نشان داده شده است.

⁵ *Self Calibration Bundle Adjustment*



شکل ۷: پیکربندی یک سیستم فتوگرامتری *off-line*

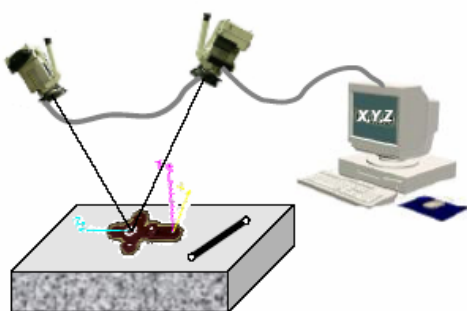
۲-۵- سیستم‌های آنی

همانطور که گفته شد، در سیستم‌های آنی، داده‌ها از شبکه چند دوربینی *CCD* اخذ می‌گردند. این ساختار هنگامی که با مثلث بندی فتوگرامتری بصورت همزمان تلفیق می‌گردد، قادر به تولید مختصات سه بعدی اشیاء بصورت *real-time* می‌باشد. به طور کلی سیستم های آنی فتوگرامتری دارای دو عملکرد می باشند (*Peterson, 1992*):

۱- ردیابی یک *Probe* از طریق اندازه گیری آنی تعدادی تارگت کالیبره شده روی آن

۲- کنترل آرایه ای محدود از تارگت ها

پیکربندی اول در بازرسی ابعاد، ردیابی و تعیین موقعیت آنی، کنترل آنی فرایندهای صنعتی و اندازه گیریهای سه بعدی بکار می رود. پیکربندی دوم در کاربردهایی نظیر هدایت رباتهای صنعتی، تعیین موقعیت و وضعیت اشیاء و کالیبراسیون آنها و تشخیص شیء حاصل از یک مدل *CAD* قابل استفاده است. در شکل (۸) ، پیکربندی یک سیستم فتوگرامتری *on-line* نشان داده شده است.

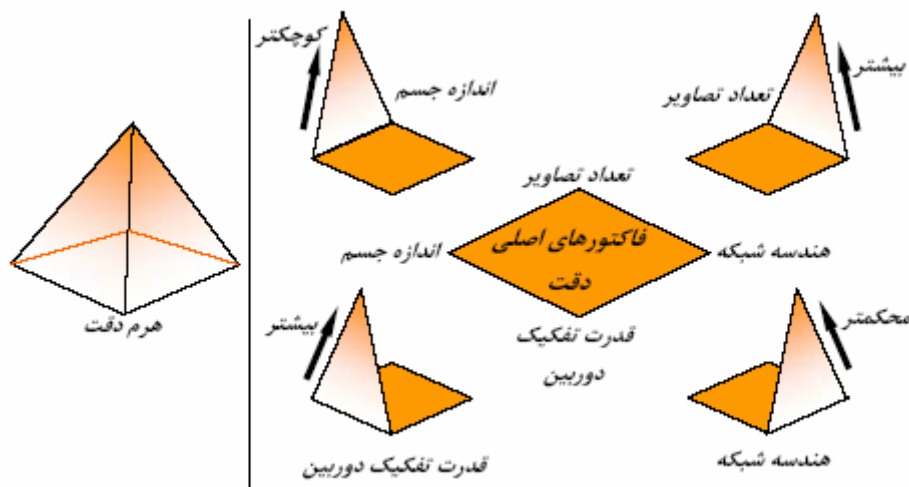


شکل ۸: پیکربندی یک سیستم فتوگرامتری *on-line*

۶- طراحی شبکه

به علت نیاز به دقت بالا در فتوگرامتری برد کوتاه، علاوه بر استفاده از دوربینهای متریک^۶، افزایش دقت اندازه گیری تصویری و اتوماسیون، توجه بیشتری به پیکربندی ایستگاهی دوربین یا هندسه شبکه نیاز است تا حصول به دقتهایی بیش از ۱:۱۰۰۰۰۰ امکانپذیر گردد. مباحثی نظیر انتخاب مشخصات دوربین تصویربرداری و تعداد ایستگاههای دوربین و تکرار تصویر و هندسه شبکه موضوعات اساسی در این زمینه تحت عنوان طراحی شبکه می باشد. هدف از طراحی شبکه های فتوگرامتری برد کوتاه، ارضای معیارهایی نظیر دقت، قابلیت اطمینان و هزینه می باشد. مبنای طراحی شبکه در اندازه گیری بروش فتوگرامتری برد کوتاه مبتنی بر مثلث بندی دسته اشعه می باشد که در آن مختصات سه بعدی نقاط شیء، موقعیت و وضعیت ایستگاههای دوربین و پارامترهای کالیبراسیون دوربین بصورت همزمان و دقیق بدست می آیند.

در حالت کلی، عوامل موثر بر دقت نهایی را می توان بصورت شکل (۹) زیر بیان کرد:



شکل ۹: عوامل موثر بر دقت نهایی (GSI 2000)

به این ترتیب اهمیت و نقش طراحی شبکه و لزوم رعایت الزامات حاصل از آن در روند دستیابی به دقت نهایی محاسبات مشخص می گردد. لذا جهت رسیدن به دقت مورد انتظار، اهمیت طراحی شبکه همواره باید در نظر گرفته شود.

اصولا با دو ساختار می توان محل ایستگاهها را طراحی نمود:

⁶ Metric Cameras

۱) تصویربرداری نواری که مرکز تصاویر در یک راستا با امتدادهایی موازی و پوشش مناسب تهیه می گردند که در این روش امکان برجسته بینی و کار با دستگاهها را فراهم می آورد، ولی محدودیتهایی در آن وجود دارد.

۲) تصویربرداری متقارب که تصاویر در فواصل مختلف از جسم با امتدادهای مختلف و پوشش کامل تهیه می گردند. این روش دقت بالایی خواهد داشت، اما محاسبات پیچیده ای دارد.

۱-۶- اصول طراحی شبکه در فتوگرامتری برد کوتاه

در سال ۱۹۷۴ اولین بار *Grafavend* برای طراحی شبکه های فتوگرامتری چهار فاز کاری به ترتیب زیر در نظر گرفت:

- **ZOD**: در مرحله اول یا فاز صفر (*Zero order design*) به انتخاب دیتوم یا سیستم مختصات مناسب می پردازیم که در بسیاری از کاربردهای فتوگرامتری برد کوتاه به این مرحله نیازی نیست، زیرا بصورت شبکه های آزاد^۷ انجام می شوند.

- **FOD**: در مرحله دوم یا فاز اول (*First order design*) باید هندسه تصویربرداری را تعیین کنیم در حقیقت تنظیمات عکسبرداری را انجام می دهیم که برای انجام این کار یکسری قیود داریم که این قیود باید ارضا شوند. در این فاز تعداد و محل دوربینها مشخص می شود و هدف آن بهبود q (فاکتور طراحی) و بالا بردن مقیاس است.

- **SOD**: در فاز دوم (*Second order design*) ماتریس وزن مشاهدات و دقت اندازه گیری مشاهدات را تعیین می کنیم.

- **TOD**: در مرحله آخر یا فاز سوم (*Third order design*) بررسی میشود که اگر دقت مورد نظر تامین نشود به تعیین تراکم و پراکندگی ایستگاهها می پردازیم که در فتوگرامتری برد کوتاه کاربرد کمی دارد.

رابطه کلی انتشار خطا را می توان بعنوان مبنایی برای طراحی شبکه های فتوگرامتری برد کوتاه بصورت زیر در نظر گرفت (*Fraser, 1984*):

$$\sigma_c = \frac{q.s.\sigma}{\sqrt{k}} = \frac{q.d.\sigma_a}{\sqrt{k}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

⁷ Free Net

در این رابطه σ_c متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شی ای، q فاکتور طراحی یا ضریب استحکام هندسی شبکه، k تعداد متوسط تصاویر اخذ شده در هر ایستگاه دوربین، s عدد مقیاس برابر با نسبت d فاصله متوسط دوربین تا شی به c فاصله اصلی دوربین و σ خطای متوسط مختصات xy نقاط عکسی و σ_a خطای متناظر زاویه ای برابر σ/c می باشد. لذا دقت اندازه گیری وابسته به سه پارامتر قدرت تفکیک زاویه ای دوربین، استحکام شبکه و مقیاس تصویربرداری است.

قدرت تفکیک زاویه ای دوربین: منظور از قدرت تفکیک زاویه ای دوربین، نسبت خطای استاندارد اندازه گیری مختصات عکس به فاصله کانونی دوربین می باشد. این پارامتر برای دوربین های آنالوگ وابسته به دقت اندازه گیری دیجیتالیزر یا اسکنر و نه خود دوربین می باشد، در حالیکه در دوربین های رقومی قدرت تفکیک اندازه گیری بستگی مستقیم به الگوریتم پردازش تصویر بکار رفته برای استخراج مختصات نقاط عکس داشته که خود تابعی از ابعاد پیکسل CCD دارد. در صورتیکه تصاویر پوشش کاملی از شی داشته باشند، رابطه (۲) را می توان بصورت زیر نوشت که در آن r ابعاد فرمت دوربین و $R=s.r$ فاصله متناظر شی ای آن یا ابعاد شی می باشد.

$$\frac{\sigma_c}{R} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{\sigma}{r} \quad (\text{رابطه ۳})$$

جدول ۱: مثالهایی از قدرت تفکیک زاویه و دقت نسبی دوربین های آنالوگ و رقومی (Fraser, 1997)

$\bar{\sigma}_c / R$	$\sigma_a (")$	میدان دید (درجه)	$f(\text{mm})$	$\sigma (\text{mm})$	دوربین متریک $r(\text{mm})$
۱:۳۳۰,۰۰۰	۰.۹	۵۰×۵۰	۲۴۰	۱ اتوماتیک	آنالوگ با فرمت بزرگ ۲۳۰×۲۳۰
۱:۱۱۰,۰۰۰	۱.۷	۸۸×۸۸	۱۲۰	دستی ۳	
۱:۸۰,۰۰۰	۲.۶	۵۰×۵۰	۲۴۰		
۱:۲۶,۰۰۰	۵.۲	۸۸×۸۸	۱۲۰	۱ اتوماتیک	آنالوگ با فرمت متوسط ۱۲۰×۱۲۰
۱:۱۷,۰۰۰	۱.۷	۵۲×۵۲	۱۲۰	دستی ۳	
۱:۱۷,۰۰۰	۳.۲	۸۵×۸۵	۶۵		
۱:۵۷,۰۰۰	۵.۲	۵۲×۵۲	۱۲۰	دستی ۳	آنالوگ با فرمت کوچک ۵۵×۵۵
۱:۵۷,۰۰۰	۹.۵	۸۵×۸۵	۶۵		
۱:۷۸,۰۰۰	۲.۶	۲۸×۲۸	۸۰	۱ اتوماتیک	فیلم ۷۰ میلیمتری
۱:۷۸,۰۰۰	۵.۲	۶۹×۶۹	۴۰	دستی ۵	
۱:۱۶,۰۰۰	۱۲	۲۸×۲۸	۸۰		
۱:۱۶,۰۰۰	۲.۶	۶۹×۶۹	۴۰	۰.۵ (٪۲) اتوماتیک	Q16 ۴۰۰۰×۴۰۰۰ یا ابعاد ۶۰×۶۰
۱:۸۸,۰۰۰	۱.۲	۴۲×۴۲	۸۰		
۱:۸۸,۰۰۰	۲.۶	۷۵×۷۵	۴۰		
۱:۱۸,۰۰۰	۱۲	۴۲×۴۲	۸۰		
۱:۱۸,۰۰۰	۲.۶	۷۵×۷۵	۴۰	۰.۳ (٪۲) اتوماتیک	۲۰۰۰×۲۰۰۰ CCD یا ابعاد ۱۸×۱۸
۱:۸۶,۰۰۰	۳.۴	۵۲×۵۲	۱۸		
۱:۶,۰۰۰	۵۲	۵۲×۵۲	۱۸	دستی ۴.۵ (٪۵۰)	still video CCD DCS420 ۱۵۰۰×۱۰۰۰ یا ابعاد ۱۴×۹
۱:۶۷,۰۰۰	۳.۱	۳۹×۲۵	۲۰	۰.۳ (٪۲) اتوماتیک	
۱:۲۰,۰۰۰	۱۰.۳	۳۹×۲۵	۲۰	دستی ۱ (٪۱۰)	
۱:۷,۰۰۰	۲۱	۳۹×۲۵	۲۰	دستی ۲ (٪۲۳)	standard CCD ۸۰۰×۵۰۰
۱:۲۱,۰۰۰	۱۴	۵۲×۴۲	۹	۰.۶ (٪۵) اتوماتیک	
۱:۳,۰۰۰	۵۱	۳۱×۲۵	۱۶	دستی ۴ (٪۲۳)	

سمت راست این معادله مبین دقت نسبی که نسبت خطای اندازه گیری به ابعاد شیء است می باشد. در جدول (۱)، نمونه هایی از قدرت تفکیک زاویه و دقت نسبی دوربین های آنالوگ و رقومی ارائه شده است.

۲-۶- هندسه شبکه

یکی از مهمترین خصوصیات فتوگرامتری برد کوتاه در مقایسه با فتوگرامتری هوایی بکارگیری شبکه های چند ایستگاهی همگرا در مقایسه با تصویربرداری استریو است. مزایای پیکربندی چند ایستگاهی همگرا در مقایسه با پیکربندی نرمال (استریوسکوپیک) عبارتست از:

- دقت مختصات شیء ای بالاتر
- تعداد عکس کمتر با حفظ دقت مورد نیاز
- قابلیت اطمینان داخلی بالاتر بعلافت افزونگی بالای مشاهدات عکسی
- توزیع همگونتر خطاها در سه جهت
- مناسب برای حذف خطای سیستماتیک از طریق خود کالیبراسیون
- وابستگی کمتر مشاهدات و در نتیجه افزایش صحت
- قابلیت انعطاف بالاتر در طراحی شبکه

بطور کلی باید بخاطر داشت که دقت اندازه گیری با شبکه چند ایستگاهی همگرا براحتی تا ۲۰ برابر دقت اندازه گیری با یک شبکه استریو فتوگرامتری می رسد. علت این امر در تغییر پارامتر q در رابطه اول می باشد. مقدار q برای یک شبکه با استحکام معمول بیشتر از ۰/۷ نبوده و در بهترین حالت مقدار آن از ۰/۴ کمتر نمی شود.

پارامتر دیگر مرتبط با هندسه شبکه در رابطه (۲-۳)، k می باشد. اخذ بیش از یک تصویر در هر ایستگاه دوربین با دوران ۹۰ درجه نه تنها مشکلات وابستگی پارامترهای خود کالیبراسیون را بر طرف می کند، بلکه موجب افزایش دقت اندازه گیری نیز می شود. در عمل افزایش ایستگاههای دوربین تا جایی که استحکام شبکه به حد مطلوب نرسیده، بخاطر کاهش q موجب بهبود دقت قابل توجهی شده و روی شکل و امتداد بیضوی های خطا اثر شدیدی دارد، اما بعد از ایجاد یک شبکه مستحکم افزایش بیشتر ایستگاههای دوربین در نزدیک ایستگاههای دوربین موجود، استحکام شبکه یا q را بهبود نداده و در رابطه (۳) افزایش پارامتر k را که رابطه ای غیر خطی با بهبود دقت دارد به دنبال خواهد داشت.

۳-۶- سیستم های طراحی شبکه

سیستم های طراحی شده برای عکسبرداری دوربین می تواند به شکل های زیر باشد:

۱- روی رئوس یک مستطیل با ۹۰ درجه زاویه همگرایی

۲- روی رئوس یک منشور با مقطع ۶ ضلعی با ۵۰ درجه زاویه همگرایی

۳- روی رئوس یک منشور با مقطع ۸ ضلعی با ۳۰ درجه زاویه همگرایی

۴- روی رئوس یک مربع یا آینه با ۴۵ درجه زاویه همگرایی

۵- روی رئوس یک خط یا آینه با ۹۰ درجه زاویه همگرایی

۶- روی یک کمان با ۳۰ درجه همگرایی محور دوربینها

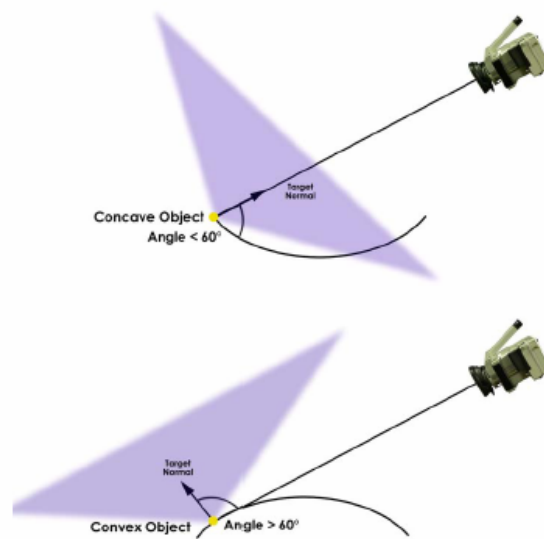
مهمترین نکات در طراحی بهینه جهت پوشش مناسب عبارتند از:

(۱) باید سعی شود که همه تارگت ها از چهار موقعیت یا بیشتر دیده شوند.

(۲) زوایای تقاطع بین دوربین ها باید بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه باشند.

(۳) باید زوایای دید تارگت ها جهت دید مناسب آنها کمتر از ۶۰ درجه باشد.

همچنین شکل شیء مورد نظر روی موقعیت دوربین ها تاثیر گذار است. تاثیر سطوح محدب و مقعر در تصاویر زیر نشان داده شده است. مثلا اگر سطح مورد نظر مقعر باشد، جهت دقت بیشتر باید زاویه تقاطع دوربین بیشتر شود و اگر سطح مورد نظر محدب باشد، باید زاویه تقاطع دوربین کمتر شود تا تارگتهای منعکس کننده در لبه شیء قابل شناسایی شوند. این تاثیر در شکل (۱۰) دیده می شود.



شکل ۱۰: تاثیر شکل شیء مورد تصویر برداری روی موقعیت دوربین

۴-۶- قیود طراحی شبکه

قیود متعدد بهم وابسته که پیش شرط تشکیل تصویر مناسب بوده و فرایند طراحی شبکه را مقید می سازند، اثر قابل توجهی روی پیکربندی ایستگاههای دوربین گذاشته و موجب پیچیدگی طراحی می شوند. از طرف دیگر معیارهای کیفیت نظیر دقت، قابلیت اعتماد و هزینه، طراحی شبکه را امری پیچیده می سازد. قیود طراحی را به سه دسته می توان تقسیم بندی کرد:

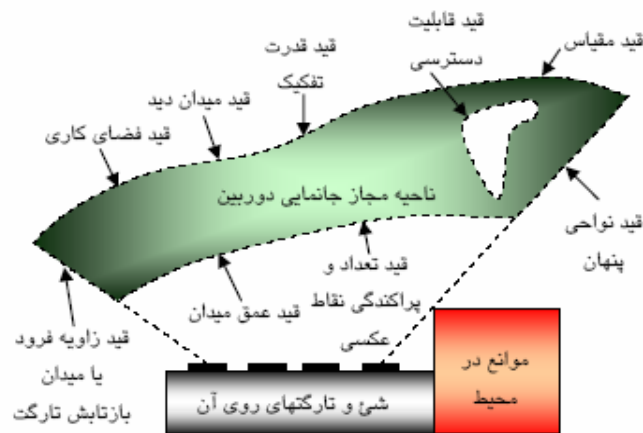
(۱) قیود مرتبط با فاصله دوربین - شیء

- قید عمق میدان دید و قید تعداد و پراکندگی نقاط برای حد پایین فاصله
 - قید قدرت تفکیک، قید مقیاس، قید میدان دید و فضای کاری برای حد بالای فاصله
- (۲) قیود مرتبط با قابلیت دید تارگت: قابلیت دید یک نقطه شیء ای به کیفیت تصویر و قیود هندسی بستگی دارد.

- کیفیت تصویر به شرایط نوری، تنظیمات دوربین و کیفیت *CDD* بستگی دارد.
- قیود هندسی عبارتند از: قید میدان بازتابش تارگت، نواحی پنهان و قید میدان دید دوربین.

(۳) قیود مرتبط با قابلیت دسترسی دوربین

در شکل (۱۱) شمای قیود مرتبط با طراحی شبکه مشاهده می شود:



شکل ۱۱: قیود دید در جانمایی دوربین

۴-۶-۱- قیود مرتبط با فاصله دوربین - شیء

- **قید عمق میدان:** قید عمق میدان محدوده ای از عمق شیء است که برای یک فاصله مشخص بین دوربین و شیء، تصویر حاصل شارپ و واضح باشد. این قید علاوه بر فاصله، بستگی به پارامترهای

داخلی دوربین شامل f -stop، فاصله کانونی و ابعاد پیکسل CCD دارد که معمولاً در فتوگرامتری برد کوتاه مقادیری ثابت در نظر گرفته می شوند (رابطه ۴). (Slama, 1980)

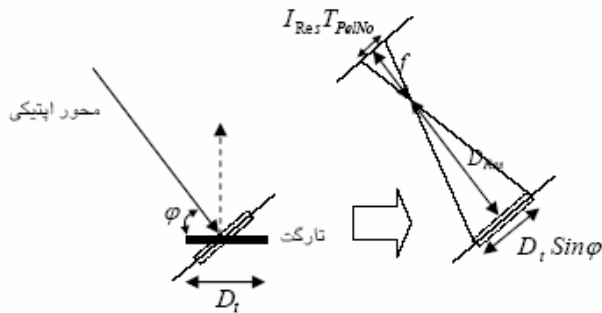
$$d_{near} = \frac{d}{1 + \frac{d-f}{D_{HF}}} \quad D_{HF} = \frac{f^2}{F_{stop} \delta} \quad \delta = \frac{f}{1720} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$d_{far} = \frac{d}{1 - \frac{d-f}{D_{HF}}} \quad \{if \ d > (D_{HF} + f) \ then \ d_{far} = \infty\}$$

در رابطه فوق d_{near} و d_{far} به ترتیب دورترین و نزدیکترین عمق از شیء است که در آن برای دوربین به فاصله d از شیء، تصویر مربوطه واضح می باشد و با خارج شدن از این محدوده، تصویر بتدریج تار می گردد. در این رابطه f فاصله کانونی، f -stop پارامتر مربوط به دریچه دیافراگم دوربین و δ قطر دایره ابهام است.

- **قید قدرت تفکیک:** قید قدرت تفکیک به قابلیت شناسایی و آشکارسازی تارگتها در تصویر اشاره داشته و باید بحدی باشد که اندازه گیری تصویری به دقت σ برسد. این امر هم روی طراحی تارگت هنگام استفاده از تارگتهای مصنوعی و هم روی انتخاب مقیاس تصویر اثر می گذارد. می توان در عمل این قید را معادل با حداقل تعداد پیکسل تصویر تارگت در نظر گرفت که بین ۱۰-۵ پیکسل می باشد که با انتخاب مناسب ابعاد تارگت (عموماً ۱:۱۰۰۰ ابعاد شیء) این قید ارضا می شود. در رابطه (۵)، حداکثر فاصله دوربین از شیء که ناشی از محدودیت قدرت تفکیک است، نشان داده شده است که در این رابطه φ زاویه برخورد امتداد اپتیکی دوربین با صفحه تارگتها، D_r ابعاد تارگت به میلیمتر، T حداقل تعداد پیکسل های تصویر تارگتها و I_{Res} قدرت تفکیک تصویر (ابعاد پیکسل به میلیمتر) است.

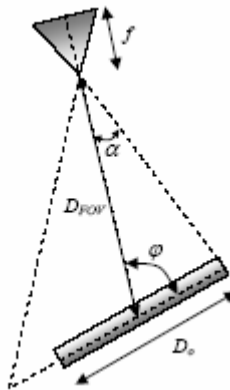
$$D_{Res}^{max} = \frac{f D_t \sin \varphi}{I_{Res} T_{PolNo}} \quad (\text{رابطه ۵})$$



شکل ۱۲: تعیین حداکثر فاصله ناشی از قید قدرت تفکیک

- **قید میدان دید دوربین:** قید میدان دید علاوه بر حداکثر فاصله مجاز، بر قابلیت دید هم موثر است. در اینجا منظور از ارضای قید میدان دید دوربین این است که دوربین در فاصله ای از جسم قرار گیرد که تمامی یا بخشی از شیء مورد تصویربرداری، فضای تصویر را پوشش دهد. لذا می توان برای هر امتداد مرکزی دوربین نسبت به یک شیء یک حد بالای فاصله را محاسبه نمود که بیش از آن تصویر کل شیء از ابعاد عکس کوچکتر می شود. رابطه زیر بیانگر قید مذکور خواهد بود.

$$D_{Fov}^{min} = \frac{D_o \sin(\alpha + \varphi)}{2 \sin(\alpha)} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{0.9d_o}{2f} \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$



شکل ۱۳: تعیین حداقل فاصله ناشی از قید میدان دید دوربین

در این رابطه پارامترهای α ، φ ، D_o ، d_o و f به ترتیب نصف زاویه رأس هرم دوربین، زاویه امتداد دید دوربین با امتداد بزرگترین قطر شیء، طول بزرگترین قطر شیء، حداقل ابعاد فریم دوربین و فاصله کانونی است.

- **قید مقیاس تصویر:** قید مقیاس عکس مبین حدی از فاصله متوسط بین ایستگاههای دوربین و شیء است که بیش از آن دقت نقاط ارضا نمی گردد. حداکثر فاصله (حداقل مقیاس) بصورت رابطه (۷) قابل محاسبه خواهد بود:

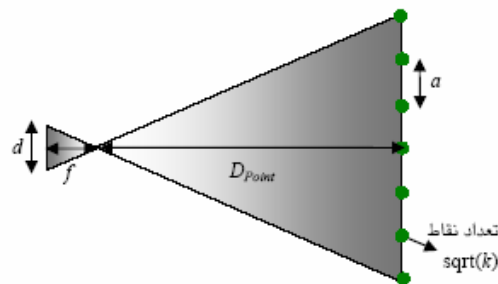
$$D_{Scale}^{max} = \frac{D_o f \sqrt{k}}{q S_p \sigma_i} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه f فاصله کانونی، k تعداد تکرار عکسها، S_p عدد خطای نسبی اندازه گیری، D_o حداکثر قطرشیء، σ_i خطای اندازه گیری مختصات عکس و q استحکام هندسی شبکه می باشد.

- **قید تعداد و پراکندگی نقاط عکسی:** این قید علاوه بر فاصله، با تغییر امتداد دوربین هم تغییر می کند. هر چه دوربین در فاصله دورتری قرار گیرد، تعداد نقاط بیشتر شده، اما پراکندگی نقاط ممکن است کمتر شود. حداقل تعداد ۱۲ تا ۲۰ نقطه که به شکل مناسبی در سطح تصویر پراکنده شده اند، بعنوان شاخصی مناسب برای این قید و حل مجهولات مربوط به توجیه خارجی و پارامترهای کالیبراسیون نیاز است.

برای حداقل فاصله دوربین از شیء برای ظاهر شدن تعداد مناسب نقاط عکسی k می توان رابطه (۸) را بدست آورد که در آن f و d بترتیب فاصله کانونی و ابعاد فریم عکس می باشد:

$$D_{Point}^{min} = \frac{af \sqrt{k}}{d} \quad \text{رابطه (۸)}$$



شکل ۱۴: تعیین تقریبی حداقل فاصله ناشی از قید تعداد نقاط عکسی

- **قید فضای کاری:** قید فضای کاری عموماً محدوده عمل مجاز اپراتور جهت عکسبرداری از شیء می باشد که بواسطه کارفرما یا موانع طبیعی مشخص می شود. یک راه موجود برای ارضای این قید در

محیط های کاری با فضای محدود، بکارگیری عدسیهایی با زاویه بازتر و یا تصویربرداری پوششی از بخشهای مختلف شیء از هر ایستگاه دوربین می باشد.

به این ترتیب می توان گفت حداکثر فاصله مجاز دوربین تا شیء برابر با حداقل فواصل محاسباتی از دو قید میدان دید و مقیاس و حداقل فاصله مجاز دوربین تا شیء برابر با حداکثر فواصل محاسباتی از دو قید عمق میدان و تعداد نقاط تصویری است.

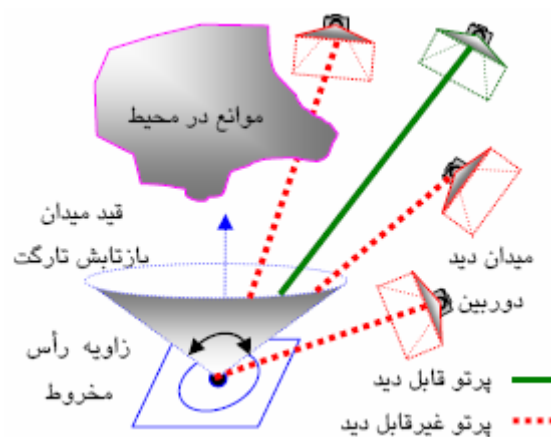
$$D_{\min} = \max(D_{DOF}^{\min}, D_{Point}^{\min})$$

$$D_{\max} = \min(D_{Scale}^{\max}, D_{Res}^{\max}, D_{Work}^{\max}, D_{FOV}^{\max}) \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$Range = D_{\max} - D_{\min}$$

۲-۴-۶- قیود مرتبط با قابلیت دید تارگت

قابلیت دید یک نقطه شیء از یک ایستگاه دوربین، موضوعی است که به کیفیت تصویر و قیود هندسی بستگی دارد. کیفیت تصویر به شرایط درونی، تنظیمات دوربین و کیفیت *CCD* بستگی دارد (Fraser, 1976). در فتوگرامتری برد کوتاه تارگتها با کنتراست بالا در نظر گرفته شده (تارگتهای بازتابنده) و با استفاده از فلاشرهای حلقه ای با سرعت بسیار بالا و قدرت کم در یک محیط کم نور، تصویری با کنتراست بسیار بالا در حد تصویر باینری تولید می شود که در آن تارگتها قابل شناسایی اند. عدم قابلیت دید تارگتها در تصاویر موجب کم شدن تعداد و تخریب پراکندگی پرتوهای مربوط به تارگت مورد نظر شده و در حالات مرزی از استحکام شبکه می کاهد.



شکل ۱۵: قیود هندسی موثر بر قابلیت دید

- **قید میدان بازتابش تارگت:** قید زاویه فرود یا میدان بازتابش تارگت بخشی از فضا است که در آن پرتوهای تلاقی کننده با تارگت قابل بازتابند. این امر در تارگتهای بازتاباننده که پرتو ورودی روی خودش بازتاب می شود، برای زوایای فرود کمتر از ۳۰ درجه امکانپذیر نمی باشد. همچنین در تارگتهای عادی که پرتو ورودی بازتاب روی خودش ندارد نیز پدیده روی هم افتادگی تصویر محدود کننده زاویه فرود است. البته شکل، جنس و نوع تارگت در مقدار این زاویه مجاز که محدود کننده مخروط میدان بازتابش است، موثر می باشد. برای مثال تارگتهای کروی محدودیت قید زاویه فرود را ندارند.

- **قید میدان دید دوربین:** قید میدان دید دوربین مبین بخشی هرمی شکل از فضا است که توسط دوربین دیده می شود که شکل، وضعیت و موقعیت آن بستگی به ابعاد قاب دوربین، فاصله اصلی، امتداد محور اپتیکی و محل ایستگاه دوربین دارد. این قیود همانند یک فیلتر عمل نموده و تنها نقاط داخل فضای دید باید مدنظر قرار گیرند.

۳-۴-۶- قیود مرتبط با قابلیت دسترسی دوربین

این قیود عموماً مستقیماً بوسیله کاربر در نظر گرفته نمی شوند و درحین عکسبرداری با توجه به امکانات موجود دسترسی مانند نردبان یا بالابر بطور ضمنی ارضا می شوند. قابلیت دسترسی ایستگاه دوربین به پارامترهایی نظیر فضای کاری، موانع، خود شیء و تجهیزات دسترسی بستگی دارد، علاوه بر قابلیت مکانی، قابلیت دسترسی زمانی مانند محدودیت در زمان عکسبرداری یا ناشی از طبیعت اندازه گیری نیز یک پارامتر مهم می باشد.

۴-۴-۶- قیود مرتبط با معیارهای کیفیت

معیارهای کیفیت در طراحی شبکه را می توان به دو دسته کلی معیارهای صحت و هزینه دسته بندی نمود. معیار صحت مبتنی بر دو عامل دقت و اعتماد است. از آنجائیکه این دو عامل به ماتریسهای کواریانس \hat{C}_x و \hat{C}_y وابسته اند و ترم δ_0^2 مبتنی بر برآورد باقیمانده مشاهدات است، معیار صحت بعد از انجام مشاهدات قابل تعیین است. در صورتیکه فرض شود $\hat{\delta}_0^2 = \delta_0^2$ ، آنگاه می توان قبل از انجام مشاهدات به کمک Q_x و Q_y معیارهای صحت را برآورد نمود، بشرطی که فرض فوق در آزمونهای آماری رد نشود.

- **دقت:** روشهای معمول معیار دقت عبارتند از: واریانس هر پارامتر، حداکثر یا متوسط واریانسهای هر مختصه X, Y, Z یا همه مختصات نقاط شیء ای و بیضوی های خطا. واریانس تابعی از مختصات نقاط شیء ای، مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس \hat{C}_x و ماتریسهای معیار می باشد.

- **قابلیت اعتماد:** این معیار در قالب دو مفهوم قابلیت اعتماد داخلی و خارجی قابل بررسی است. منظور از قابلیت اعتماد داخلی توانایی آشکارسازی و کشف خطاهای مشاهداتی نسبتاً بزرگ در یک شبکه فتوگرامتری است، در حالیکه قابلیت اعتماد خارجی به اندازه گیری اثر این خطاهای باقیمانده کشف نشده روی مقادیر پارامترهای برآورد شده نهایی مانند مختصات شیء ای می پردازد. بطور کلی می توان گفت دقت بهینه همراه قابلیت اعتماد داخلی بالا منجر به قابلیت اعتماد خارجی بهینه خواهد شد.

۷- سنجنده مورد استفاده و تصویربرداری

یکی از مهمترین ابزارهای یک کار فتوگرامتری صنعتی، دوربین تصویربرداری می باشد. دلیل اهمیت این وسیله، نقش موثر و تعیین کننده آن در مراحل مختلف فتوگرامتری صنعتی است و پارامترهای مهمی از جمله دقت تحت تاثیر عواملی از سنجنده مانند قدرت تفکیک، میدان دید، فاصله کانونی، ابعاد تصویر و عواملی نظیر آنهاست. در تصویربرداری باید موارد زیر مد نظر قرار گیرند:

- نورپردازی مناسب

- دوربین مناسب

- استفاده از فیلتر

- تنظیمات و کالیبراسیون دوربین

دوربین ها از جهت دقت به سه دسته متریک، نیمه متریک و غیر متریک تقسیم می شوند. دوربینی که متریک نباشد و خصوصیات خاص دوربینهای متریک را نداشته باشد (مثل فیدوشال مارکها و...) را دوربین غیر متریک می نامند. دوربین های متریک، دوربین هایی هستند که دارای هندسه داخلی مشخص و یا قابل تعیین می باشند که در طول زمان استحکام هندسی خود را حفظ می کنند. در این دوربین ها پارامترهای کالیبراسیون معلوم می باشند (*Known Interior Geometry*)، پارامترهای کالیبراسیون بدون تغییر می مانند (*Stable Interior Geometry*) و در هر پروژه قابل تکرار هستند. دوربین نیمه متریک دوربینی است که برخی از خصوصیات دوربینهای متریک و یا غیرمتریک را همزمان دارد. این دوربین ها که اغلب فاقد فیدوشال مارک هستند، دارای یک شبکه *reseue* بوده و ابعادی کوچکتر از دوربینهای متریک دارند. برای یک تصویربرداری مناسب باید نکات زیر را در نظر گرفت:

۱) انتخاب سنجنده: درانتخاب سنجنده نکات زیر می باید مد نظر قرار بگیرد:

- درحالت بکارگیری چند دوربین بطور همزمان، بهتراست تمامی آنها از یک مارک با مشخصات یکسان باشند.
- دراندازه گیری های بسیار دقیق باید از دوربین آنالوگ استفاده شود.
- میدان دید سنجنده پارامتر مهمی در طراحی شبکه است. میدان دید بزرگتر، تعداد عکس کمتری را بدنبال خواهد داشت و لذا هزینه کاهش می یابد.
- ملاحظاتی نظیر فضای ذخیره سازی تصاویر، وزن و ابعاد دوربین در محیط های کاری پیچیده و محدودیت های فضای کاری بایستی درانتخاب سنجنده در نظر گرفته شوند.
- در تصویربرداری بهتراست از فلاشرهای حلقه ای استفاده شود تا زاویه بین امتداد دید و منبع روشنایی صفرشود.

۲) **تعداد تصاویر مورد نیاز:** از نظر تئوری، با دو تصویر می توان اندازه گیری ها را انجام داد، اما توصیه می شود که حداقل از ۴ تا ۶ تصویر استفاده گردد. با ۴ یا ۶ تصویر می توان سلف کالیبراسیون دوربین را در حین اندازه گیری مختصات انجام داد.

۳) **تعداد نقاط مورد نیاز در هر تصویر:** جهت رسیدن به دقت موردنیاز و مناسب، پیشنهاد می شود که حداقل ۱۲ نقطه در هر عکس دیده شوند. روشن است که هر چه تعداد نقاط بیشتر باشد، اندازه گیری ها دقیق تر خواهد بود. البته باید توجه داشت که اندازه گیری بیش از ۴۰ نقطه در هر عکس، تاثیر زیادی در افزایش دقت نخواهد داشت.

۴) **قدرت تفکیک و ابعاد تصویر:** علاوه بر طراحی شبکه، ابعاد تصویر و قدرت تفکیک سیستم تصویر برداری روی دقت سیستم فتوگرامتری تاثیرگذار می باشد. باتوجه به اینکه دقت های مورد نیاز در فتوگرامتری صنعتی بالای ۱:۱۰۰۰۰۰ می باشد، نیاز به دوربین هایی با قدرت تفکیک بالا می باشد.

۷-۱- تقسیم بندی دوربین ها از جهت دقت

دوربین ها از جهت دقت به سه دسته متریک، نیمه متریک و غیر متریک تقسیم می شوند.

الف) دوربین های غیر متریک^۸: دوربینی که متریک نباشد و خصوصیات خاص دوربینهای

متریک را نداشته باشد (مثل فیدوشال مارکها و...) را دوربین غیر متریک می نامند.

⁸ Non metric Cameras

در زیر خصوصیات این دور بین ها اشاره می شود:

- پارامترهای توجیه داخلی کاملاً و یا تا حدودی برای ما ناشناخته است.
- فاقد ابزار اندازه گیری المانهای هندسه داخلی هستند.
- تغییر فاصله کانونی براحتی انجام شده، ولی از مقدار آن اطلاعی نداریم.
- هرگونه تغییر در فاصله کانونی سبب تغییر اعوجاجات عدسی می شود.
- در پروژه های کم دقت و یا دقیق (نه خیلی دقیق) کاربرد دارند (دقت در حد میلیمتر و بیشتر)
- این دوربین ها دارای استحکام هندسی خوبی نیستند.
- تمامی این دوربین ها فاقد فیدوشال مارک هستند.
- این دوربین ها ارزان قیمت بوده و به راحتی قابل خریداری هستند (*Off The Shelf*). رنج های مختلف از فاصله کانونی را ارائه می دهند و دسترسی عموم به آن آسان است.
- المانهای توجیه داخلی ممکن است از یک پروژه به پروژه دیگر و حتی از یک عکس به عکس دیگر تغییر کنند.

دوربین های غیر متریک خود از نظر نحوه عکس برداری و ثبت تصویر، به دو دسته آنالوگ و رقومی تقسیم بندی می شوند. دوربین های فیلم پایه تنها در اندازه گیری های *Off-line* می توانند مورد استفاده قرار گیرند. در جداول (۲) و (۳) تعدادی از دوربین های فیلم پایه و دوربین های دیجیتال و خصوصیات آنها آمده است.

جدول ۲: تعدادی از دوربین های فیلم پایه و خصوصیات آنها

Manufacturer	Type	Image Size [mm] x [mm]	Réseau [mm]	Mechanical Flattening
Leica	R5	24 x 36	5	no
Rollei	35	24 x 36	5.5	no
Rollei	3003	24 x 36	5.5	no
Rollei	6006	55 x 55	5	no
Rollei	6008	55 x 55	2	no
Pentax	PAMS 645P	45 x 69	20/25	no
Hasselblad	MK 70	50 x 50	10	no
Wild	P32	90 x 65	-	no
GSI Inc.	CRC-3	60 x 90	30	no
Linhof	METRIKA 45	95 x 120	10	yes
Linhof/Rollei	R_METRIKA	95 x 120	2	yes
GSI Inc.	CRC-2	115 x 115	25	yes
Zeiss	UMK 1318	130 x 180	-	yes
GSI Inc.	CRC-1	230 x 230	50	yes
Rollei	LFC	230 x 230	2	no

جدول ۳: تعدادی از دوربین های دیجیتال و خصوصیات آنها

Manufacturer	Type	Image size [mm] x [mm]	Sensor elements
Toshiba	TC 1500	35.0 x 0.007	5000 x 1
Pulnix	TM-560	8.8 x 6.6	500 x 592
Valvo	NXA 1011	6.0 x 4.5	604 x 576
Sony	XC-77 CE	8.8 x 6.6	756 x 581
Cidtec	2710	8.8 x 6.6	776 x 512
EEV	CCD05-10	22.5 x 22.5	298 x 1152
Videk	Megaplus	9.0 x 7.0	1320 x 1035
VDS	CCD-1000	13.9 x 7.8	1260 x 1152
DALSA Inc.	IA-D2	10.0 x 10.0	1024 x 1024
Hamamatsu	C 4742	12.0 x 12.2	1000 x 1018
Thomson-CSF	TH7896A	19.0 x 19.0	1024 x 1024
Tektronix	TK1024M	24.6 x 24.6	1024 x 1024
Kodak	KAF-4200	9.0 x 9.0	2048 x 2048
Ford Aerospace		30.7 x 30.7	4096 x 4096 (*)
DALSA Inc.	MEGASENSOR	12.0 x 12.0	5120 x 5120 (**)

ب) **دوربین های متریک**^۹: دوربین های متریک، دوربین هایی هستند که دارای هندسه داخلی مشخص و یا قابل تعیین می باشند که در طول زمان استحکام هندسی خود را حفظ می کنند. در این دوربین ها پارامترهای کالیبراسیون معلوم می باشند (*Known Interior Geometry*)، پارامترهای کالیبراسیون بدون تغییر می مانند (*Stable Interior Geometry*) و در هر پروژه قابل تکرار هستند (*Repeatable Interior Geometry*). در زیر به خصوصیات این دوربین ها اشاره می شود:

- تصاویر این دوربین ها دارای فیدوشال مارک است.
- دارای لنزهای ثابت و یا ابزاری برای اندازه گیری فاصله کانونی با دقت بالا
- دارای لوازم جانبی کم
- طراحی و تولید در انحصار کمپانی های خاص می باشد.
- دارای حساسیت زیاد و استحکام هندسی بالا می باشد.
- هدف از استفاده این دوربین ها رسیدن به دقت های زیر میلیمتر است. بنابراین تنها در پروژه های خاص مورد استفاده قرار می گیرند.
- در طول زمان استفاده (*Session*)، پارامترهای دوربین تغییر نمی کند.
- هزینه خرید این دوربین ها در مقایسه با دوربین های غیرمتریک بسیار سنگین است.

ج) **دوربین های نیمه متریک**^{۱۰}: دوربین نیمه متریک دوربینی است که برخی از خصوصیات دوربینهای متریک و یا غیرمتریک را همزمان دارد. این دوربین ها که اغلب فاقد فیدوشال مارک هستند، دارای یک شبکه *reseue* بوده و ابعادی کوچکتر از دوربینهای متریک دارند.

⁹ Metric Cameras

¹⁰ Semi metric Cameras

۸- کالیبراسیون

هدف اصلی در کالیبراسیون دوربین در حقیقت به دست آوردن المان های داخلی دوربین شامل α_p ، γ_p ، c و خطاهای مربوط به عدسی می باشد. اکثر روش های کالیبراسیون، المان های توجیه خارجی دوربین را نیز به دست می آورند. می توان گفت که حالت کلی معادلات مورد استفاده در کالیبراسیون در روشهای سنتی، همان معادلات شرط هم خطی توسعه یافته می باشد که بصورت رابطه زیر مطرح می شود:

$$\begin{aligned}x - x_0 + \Delta x &= -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + (m_{13}(Z - Z_0))}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\y - y_0 + \Delta y &= -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + (m_{23}(Z - Z_0))}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}\end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

بطور کلی پارامترهای کالیبراسیون یک دوربین (بجز توجیه داخلی) عبارتند از: پارامترهای اعوجاج شعاعی، پارامترهای اعوجاج مماسی و پارامترهای افاین. به مجموع این پارامترها، پارامترهای اضافی^{۱۱} می گویند.

بطور کلی می توان روش های کالیبراسیون دوربین های عکاسی را به صورت زیر تقسیم بندی نمود: غیر دقیق، نسبتاً دقیق، خیلی دقیق.

۸-۱- کالیبراسیون غیر دقیق

این روش کالیبراسیون روشی کاملاً تقریبی می باشد و در پروژه هایی که دقت بالا مد نظر نمی باشند استفاده می شود. در این روش، یکسری المان ها ثابت فرض می شوند و یا مکان مختصات ها رابه صورت تقریبی آنجایی که هستند در نظر می گیرند.

۸-۲- کالیبراسیون نسبتاً دقیق (استفاده از معادلات DLT)

یکی از روشهای کالیبراسیون دوربین ها روش ترانسفورماسیون مستقیم خطی (DLT) می باشد که این روش توسط عبدال عزیز و کارارا توسعه داده شد. مدل DLT که نوع خاصی از معادلات $Projective$ می باشد، ۱۱ پارامتر دارد که نگاشت خطی بین دو سیستم مختصات زمینی و سیستم مختصات

¹¹ Additional Parameters

تصویری ایجاد می کند. این ۱۱ پارامتر مستقیماً با استفاده از روش کمترین مربعات به دست می آیند. این روش، روشی ساده می باشد. در مدل DLT توجهی به خطای اعوجاج دوربین نشده است. خطای اعوجاج که یکی از منابع خطا بوده و از عوامل تأثیر گذار بر روی دقت اندازه گیری ها می باشد، همچنان باقی خواهد ماند. مدل ریاضی معادلات DLT بصورت زیر می باشد:

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

در روابط فوق؛ x, y مختصات نقاط عکسی در سیستم مختصات کمپراتور، X, Y, Z مختصات نقاط کنترل در فضای شی و L_1 تا L_{11} پارامترهای DLT می باشند.

۳-۸ - کالیبراسیون کاملاً دقیق:

اگر در دوربین ها پارامترهای توجیه داخلی مشخص باشند و آن ها را با استفاده از روش های مختلف کالیبراسیون به دست آورده باشند، دیگر نیازی به محاسبه آنها در حین انجام سرشکنی نخواهد بود. اما اگر این دوربین ها کالیبره نشده باشند، در این صورت لازم است پارامترهای توجیه داخلی را در حین سرشکنی و به همراه عوامل مجهول دیگر (پارامترهای توجیه داخلی، مختصات زمینی نقاط کنترل و گرهی) به دست آورد. به طور کلی سرشکنی و کالیبراسیون در محاسبات فتوگرامتری برد کوتاه دو نوع می باشد:

الف) کالیبراسیون قبل از عکس برداری^{۱۲}: در صورتیکه دوربین را قبل از عکس برداری و محاسبات در آزمایشگاه به روش های مختلف کالیبره کنند، به این عمل پیش کالیبراسیون گفته می شود. در این صورت بعد از عکس برداری دیگر نیازی به تعیین عوامل توجیه داخلی نخواهد بود.

ب) کالیبراسیون همزمان با سرشکنی^{۱۳}: اگر با دوربین مورد نظر عکس برداری کنیم و عوامل کالیبراسیون را همزمان با مجهولات دیگر در محاسبات سرشکنی به دست آوریم، در این صورت به این عمل خود کالیبره کردن گفته می شود. نظر به اینکه در این عمل این پارامترها با توجه به نقاط کنترل زمینی و عکسی معلوم و دقیق تعریف می شوند، لذا نسبت به روش پیش کالیبراسیون، این روش بهتر می باشد؛ ولی به لحاظ عکسبرداری اضافی و نیاز به مختصات زمینی معلوم و به کاربردن هزینه های

¹² Pre Calibration

¹³ Self Calibration

اضافی روش مذکور از لحاظ اقتصادی تا حدودی مقرون به صرفه نیست. روابط مورد استفاده در این روش سرشکنی، معادلات شرط هم خطی می باشد که با اضافه نمودن ترم ریاضی به این معادلات می توان همزمان با محاسبه مختصات زمینی نقاط کنترل، خطاها و اعوجاجات موجود در تصویر را نیز مدوله نمود و آنها را به صورت ریاضی حذف نمود. در صورتیکه از این معادلات شرط هم خطی جهت سرشکنی دسته اشعه استفاده شود، در اینصورت کالیبراسیون دوربین عکسبرداری مورد استفاده را می توان با دقت مناسب محاسبه نمود که در عمل به این روش سلف کالیبراسیون گفته می شود. فرمول ریاضی سلف کالیبراسیون به صورت رابطه (۱۲) می باشد:

$$x_o - x_p + \Delta x = -c_x \left(\frac{m_{11}(X_j - Xc_i) + m_{12}(Y_j - Yc_i) + m_{13}(Z_j - Zc_i)}{m_{31}(X_j - Xc_i) + m_{32}(Y_j - Yc_i) + m_{33}(Z_j - Zc_i)} \right)$$

$$y_o - y_p + \Delta y = -c_y \left(\frac{m_{21}(X_j - Xc_i) + m_{22}(Y_j - Yc_i) + m_{23}(Z_j - Zc_i)}{m_{31}(X_j - Xc_i) + m_{32}(Y_j - Yc_i) + m_{33}(Z_j - Zc_i)} \right)$$

(رابطه ۱۲)

$$\Delta x = \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y}$$

$$\Delta y = \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} + a_1 \bar{x} + a_2 \bar{y}$$

$$\bar{x} = x - x_p, \bar{y} = y - y_p$$

در رابطه فوق؛ c مرکز پرسپکتیو، i شماره عکس، j شماره نقطه شی، c_x, c_y فواصل اصلی، k_1, k_2, \dots ضرایب اعوجاج شعاعی و p_1, p_2 ضرایب اعوجاج مماسی می باشند.

در روش سلف کالیبراسیون، باید به این نکته توجه داشت که اصولاً نیازی به مختصات زمینی نقاط تارگت نمی باشد. آنچه که باعث افزایش دقت در مختصات زمینی نقاط کنترل و پارامترهای کالیبراسیون می شود، در اصل چینش هندسی ایستگاه های تصویربرداری، زوایای تقاطع مابین اشعه های ساع شده از جسم به هر یک از تصاویر، تعداد تارگت های قابل مشاهده از هر ایستگاه و در آخر پراکندگی نقاط تارگت ها در محدوده هر یک از تصاویر می باشد.

کالیبراسیون در حین کار^{۱۴}: این عبارت به روشی اطلاق می شود که در حین انجام عملیات

فتوگرامتری واقعی که برای به دست آوردن مختصات نهایی نقاط کنترل جسم است، پارامترهای کالیبراسیون دوربین و عدسی نیز محاسبه می شود. این روش وقتی امکان پذیر است که ابعاد جسم مورد بررسی زیاد بزرگ نبوده و به طور مثال، حداکثر به بزرگی ابعاد موتور یک اتوموبیل سواری باشد

¹⁴ On The Job Calibration

(Atkinson, 1998). در این شرایط با فراهم آوردن یک تست فیلد مناسب که جسم را احاطه کند، می توان در حین انجام عملیات فتوگرامتری دوربین را نیز کالیبره نمود. مزیت عمده استفاده از این روش، توانایی استفاده مناسب از دوربین های غیر متریک می باشد که در آن ها ممکن است در هر مرحله از کار و یا حتی در هر تصویر که اخذ می شود، تنظیمات دوربین تغییر پیدا کند. در واقع به دلیل موجود بودن نقاط کنترل در هر عکس می توان سرشکنی را جداگانه برای هر عکس انجام داد و پارامتر های کالیبراسیون را برای هر عکس محاسبه کرد.

۹- محاسبات و آنالیز

مهمترین مدل های محاسباتی در فتوگرامتری برد کوتاه عبارتند از:

۹-۱- محاسبات تک عکس

برای رسیدن از مختصات عکسی به مختصات زمینی مراحل زیر باید طی شود:

- تعیین مدل خطا برای کالیبراسیون دوربین
 - توجیه خارجی به منظور ارتباط بین فضای عکسی و شیء ای
 - کالیبراسیون دوربین برای انجام توجیه داخلی و تصحیح خطاهای آن روی مشاهده عکسی
- **مدل های خطا در کالیبراسیون دوربین های غیر متریک:** بطور کلی خطاهای زیر هنگام کار با

یک دوربین غیر متریک وجود دارند:

- کشیدگی فیلم
- اعوجاج شعاعی و مماسی
- عدم انطباق کامل فیلم در صفحه کانونی عدسی
- خروج از مرکز عدسی
- تاثیر عوامل محیطی مانند انکسار
- خطاهای اندازه گیری
- خطای ناشی از تغییرات فاصله اصلی دوربین

- **توجیه خارجی یا ترفیع فضایی تک عکس:** برای ایجاد ارتباط میان فضای شیء ای و عکسی

در تک عکس نیاز به حداقل سه نقطه کنترل می باشد. برای محاسبه سه پارامتر دورانی و سه پارامتر انتقالی مرکز عکس، می توان از روشهای زیر بهره جست:

• روش مستقیم استفاده از معادلات شرط هم خطی

• روش *Church*

• روش *DLT*

• روش استفاده از پارامترهای دورانی ریاضی بجای فیزیکی

در روش شرط هم خطی که مبنای کلیه روشهای دیگر می باشد، از شرط در یک راستا بودن نقاط عکسی، مرکز تصویر و نقاط متناظر زمینی استفاده می شود که بصورت رابطه زیر بیان می شود:

$$x - x_0 = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + (m_{13}(Z - Z_0))}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$
$$y - y_0 = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + (m_{23}(Z - Z_0))}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

در این میان روش *Church* این مزیت را دارد که پارامترهای دورانی و انتقالی را مستقل از هم محاسبه می کند و معادلات آن براساس تساوی زوایای متقارب پرتوها در فضای عکسی و زمینی نوشته می شوند. در روش *DLT* ارتباط مستقیم میان سیستم مختصات دلخواه عکس و زمین بدون نیاز به توجیه داخلی فراهم می شود.

- **سلف کالیبراسیون:** در این روش برای تعیین پارامترهای توجیه داخلی و خارجی می توان معادلات ترکیبی را نوشته و همزمان به حل آنها پرداخت که معادلات مربوط به آن همان معادلات رابطه (۳) می باشد.

۲-۹- محاسبات زوج عکس

منظور از زوج عکس، دو عکس پوشش دار می باشد.

- **عکسبرداری همگرا (Convergent):** برای تعیین مختصات زمینی روی شیء مراحل زیر پیشنهاد

می گردد:

- تعیین عناصر توجیه داخلی
- تعیین عناصر توجیه خارجی
- تقاطع پرتوهای نظیر روی زوج عکس

- **سرشکنی ترکیبی:** در این روش، سرشکنی همزمان عناصر توجیه داخلی و خارجی انجام می شود. مزیت این روش این است که برای انجام سلف کالیبراسیون دیگر نیازی به نقاط کنترل زمینی فراوان نمی باشد.

- **مثلث بندی چند تصویره:** در مثلث بندی با تقاطع دسته اشعه ها، پارامترهای توجیه شبکه و مختصات نقاط شیء ای بدست می آیند. جهت دستیابی به مختصات نهایی تمام نقاط، نیاز به باندل اجسمنت می باشد. برای این منظور؛ باید مثلث بندی نقاط تارگت، ترفیع عکس ها و سلف کالیبراسیون دوربین انجام گردد. در واقع باندل اجسمنت این سه عمل را بطور همزمان انجام می دهد.

منابع:

1. Atkinson K.; "Close Range Photogrammetry And Machine Vision", whittles publishing, 1996.
2. Fraser, 1999, "Automated Vision Metrology for Precise 3D Engineering and Industrial Surveying", the Department of Geomatics the University of Melbourn Parkville VIC 3052, March.
3. Fraser, 1999, "Automated Vision Metrology: A Technology for Industrial Inspection and Engineering Surveys " The Department of Geomatics the University of Melbourn Parkville VIC 3052, March.
4. Halim Setan & Mohd Sharuddin Ibrahim, 2003, "Precise measurement and 3D modeling for industrial applications", Department of Geomatic Engineering Faculty of Geoinformation Science and Engineering Universiti Teknologi Malaysia(UTM).
5. Slama Theurer, Henriksen, 1980, "Manual of photogrammetry", American society of photogrammetry.

۶. رضا داوری مجد، "بررسی روشهای کالیبراسیون دوربین رقومی با تاکید بر کاربردهای فتوگرامتری رقومی"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی خواجه نصیر.

۷. محمد سعادت سرشت، ۱۳۸۳ "اصول طراحی شبکه در فتوگرامتری برد کوتاه"، رساله دکترا دانشگاه تهران.

۸. محمد سعادت سرشت، شهرام معافی پور، ۱۳۷۸، "کاربرد فتوگرامتری صنعتی در تعیین تغییرشکل سازه های بارگذاری شده و ارزیابی تطبیقی آن با روشهای موجود در تکنیک اجزاء محدود"، دانشگاه تهران.

۹. نیکروز مستوفی، ۱۳۸۴، "مدل سازی ریاضی سنجنده CMOS در فتوگرامتری برد کوتاه برای تعیین میزان مطابقت شکل قطعات صنعتی با مدل مینا"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران.