

DASAR-DASAR FOTOGRAMETRI



DISUSUN OLEH:
BAMBANG SYAEFUL HADI, M.SI

JURUSAN PENDIDIKAN GEOGRAFI
FAKULTAS ILMU SOSIAL DAN EKONOMI
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA

2007

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Pengertian Fotogrametri	1
B. Kegiatan-kegiata Fotogrametrik	2
C. Sejarah Fotogrametri	6
D. Klasifikasi Foto Udara	8
BAB II. SISTEM KOORDINAT FOTO UDARA	11
A. Sistem Koordinat	12
B. Tiga Pusat Foto Udara	15
C. Distorsi dan Pergeseran Letak	19
D. Pergeseran Topografi	23
BAB III. Foto Udara Tegak	25
A. Geometri Foto Udara Tegak	25
B. Skala Foto Udara Vertikal	27
C. Koordinat Medan	35
D. Perpindahan Letak Gambar karena relief	41
E. Tinggi Terbang Foto Udara Tegak	49
BAB IV. PENGUKURAN ARAH, JARAK, DAN LUAS	53
A. Jarak di Daratan	53
B. Pengukuran Arah	54
C. Pengukuran Sudut pada Foto Udara	58
D. Pengaruh Kemiringan dan Pergeseran Topografi terhadap Arah	62
E. Pengukuran Luas	65

BAB V. PARALAKS STEREOSKOPIK	72
A. Pengertian	72
B. Instrumen untuk Mengukur Paralaks	74
C. Kenampakan Stereoskopis	79
D. Pembengkakan ke Atas	72
E. Pengukuran Paralaks Stereoskopik.....	74
F. Kenampakan Stereoskopis	79
BAB VI. ORTOFOTOGRAFI	107
A. Pengertian	107
B. Keunggulan dan Kelemahan Ortofoto	108
C. Teknik Pembuatan Ortofoto	111
D. Ortofoto Digital	114
BAB VII. PERENCANAAN PROYEK DAN PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI.....	118
A. Pertimbangan Dalam Perencanaan Proyek	118
B. Pemanfaatan Fotogrametri	134
BAB VIII. FOTOGRAMETRI DIGITAL	138
A. Pendahuluan	138
B. Definisi Fotogrametri Digital	138
C. Peralatan Fotogrametri Digital.....	142
D. Alur Kerja Fotogramteri Digital	146
E. Keunggulan dan Kelemahan Fotogramteri Digital	152

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Orientasi kamera pada tiga macam posisi	9
2. Konfigurasi foto udara condong tinggi, condong rendah, tegak	10
3. Foto (a) dan (b) merupakan contoh foto udara condong tinggi, c) foto condong rendah, dan (d) foto udara vertikal	10
4. Pengaruh panjang fokus terhadap liputan medan	11
5. Pengaruh tinggi terbang terhadap liputan medan	12
6. a . Contoh-contoh Fiducial Mark	14
6. b. Sistem koordinat fotografi (1) tanda fidusial tepi (2) tanda fidusial sudut ..	14
7. Tiga Titik Pusat Pada Foto Udara	15
7a. Cara menentukan titik Tengah (<i>Principal Point</i>) foto udara	16
8. Contoh Posisi Tiga Titik Pusat Foto Udara	18
9. Berbagai jenis proyeksi penggambaran	19
10. Kemiringan x dan y yang disebabkan perubahan posisi kamera	22
11. Posisi Titik-titik Pusat Pada Foto Udara Condong	22
12. Ilustrasi kenampakan sebuah menara yang sama pada foto udara dengan posisi yang berbeda	24
13. Kenampakan dua dimensional foto udara tegak di atas medan datar	26
14. Geometri Foto Udara Tegak	26
15. Pengaruh topografi terhadap skala foto udara	35
16. Proyeksi Koordinat Medan Dari Foto Udara	36
17. Letak koordinat titik a pada foto udara	38
18. Geometri pergeseran topografi pada foto udara tegak	42
19. Ilustrasi Pergeseran letak karena relief pada foto udara	44
20. Contoh Pergeseran letak karena relief pada foto udara.....	44
21. Ilustrasi untuk perhitungan tinggi yang didasarkan pada pengukuran dari suatu foto udara tunggal sebagaimana contoh soal a	46

22. Penyebab panjang bayangan tidak benar	49
23. Multiple scale Templet	53
24. Contoh penggunaan multiple scale templet pada foto udara	54
25. Contoh-contoh jurusan	55
26. Contoh Azimut Beberapa Titik	56
27. Penggunaan garis-garis pemilikan lahan untuk mengukur arah	59
28. Penggunaan garis kompas yang diukur di lapangan untuk mengukur jurusan	60
29. Penggunaan peta dan foto untuk menentukan arah	62
30. Pemecahan secara grafis terhadap masalah pergeseran topografi apabila mengukur arah secara langsung dari foto udara.....	65
31. Pengukuran luas dengan metode strip	67
32. Pengukuran luas dengan jaring titik-titik	68
33. Planimeter digital.....	70
34. Paralaks absolute x dari sepasang foto stereo	73
35. Kerangka Stereoskop cermin Wheatstone.....	75
36. Paralaks tangga (a) dan paralaks batang (b)	75
37. Stereoskop saku untuk mengamati pasangan foto udara	76
38. Diagram skematik stereoskop saku	76
39. Stereoskop Zomm di atas meja.....	77
40. Interpretoskop	77
41. sketsa paralaks batang	78
32. Latihan sosis untuk mengembangkan kemampuan melihat secara stereo- skopis tanpa bantuan stereoskop	80
43. Uji pengamatan stereoskopik.....	80
44. Persepsi kedalaman dengan ukuran relatif dan objek tersembunyi	84
45. (a) Mekanika Pengamatan Stereoskopis (b) persepsi kedalaman stereoskopik sebagai fungsi sudut paralaktik.....	85
46. Azas noktah mengapung.....	87

48. Diagram sederhana untuk analisis perbesaran tegak	89
49. Nisbah Basis udara dan tinggi terbang (B/H)	91
50. Cara pengukuran lereng dengan slope estimator	94
51. Diagram skematik batang paralaks	97
52. Pengukuran paralaks pada pasangan foto stereo	98
53. Cara mengukur basis foto kiri dan kanan	99
54. Half mark dan fixed mark paralaks bar, menghubungkan titik O_1 dengan O_1'	100
55. Half mark dan fixed mark paralaks bar, menghubungkan titik O_2 dengan O_2'	100
56. Paralaks pada titik utama	101
57. Ortofotoskop T-64 dari USGS.....	112
57a. (1). Azas bekerja sebuah ortofotoskop (2). Tabir dua lembar yang dapat di- gerakkan dari ortofotoskop model T-64	113
58. Ortofoto yang telah ditumpang susun dengan garis-garis kontur	114
59. Tampilan depan, tampilan antara foto yang berurutan sepanjang jalur terbang.....	121
61. Tampilan samping, tampilan antara jalur terbang yang berurutan.....	122
62. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena kesen- dangan.	123
63. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena variasi tinggi terbang.....	124
64. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena variasi medan	130
65. Sudut paralaks bertambah besar dengan bertambah besarnya rasio B/H'..	126
66. Luas liputan model murni stereoskopik	97
67. Lembaran transparansi model murni untuk merencanakan pemo- tretan dari udara	134
68. Seperangkat komputer sebagai workstation untuk pemrosesan fotogrametri digital	143

69. Kelengkapan untuk bekerja dalam fotogrametri digital	144
70. Model elevasi digital (DEM) hitam putih	149
71. Model Elevasi digital berwarna	150
72. Meja untuk pembacaan citra digital	150
73. Model bangunan 3-D yang diturunkan dari citra stereo.....	151
74. Alur kerja fotogrametri digital	152

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 1. Gambar 1. Bagian-bagian Sistem Pemotretan
- Gambar 2. Konfigurasi foto udara tegak, condong rendah, dan condong tinggi
- Gambar 3. Contoh-contoh Fiducial Mark
- Gambar 4. Tiga Titik Pusat Pada Foto Udara
- Gambar 5. Titik Tengah (Principal Point) Foto Udara
- Gambar 6. Contoh Posisi Tiga Titik Pusat Foto Udara
- Gambar 7. Berbagai jenis proyeksi penggambaran
- Gambar 8. Kemiringan x dan y yang disebabkan perubahan posisi kamera
- Gambar. 9. Posisi Titik-titik Pusat Pada Foto Udara Condong
- Gambar 10. Kenampakan sebuah menara pada foto udara dengan posisi yang berbeda
- Gambar 11. Kenampakan dua dimensional foto udara tegak di atas medan datar
- Gambar 12. Geometri Foto Udara Tegak
- Gambar 13. Pengaruh topografi terhadap skala foto udara
- Gambar 14. Proyeksi Koordinat Medan Dari Foto Udara
- Gambar 15. Letak koordinat titik a pada foto udara
- Gambar 16. Geometri pergeseran topografi pada foto udara tegak
- Gambar 17. Ilustrasi Pergeseran letak karena relief pada foto udara
- Gambar 18. Contoh Pergeseran letak karena relief pada foto udara
- Gambar 19. Penyebab panjang bayangan tidak benar
- Gambar 20. Multiple scale Templet
- Gambar 21. Contoh penggunaan multiple scale templet pada foto udara
- Gambar 22. Contoh-contoh jurusan 49
- Gambar 23. Contoh Azimut Beberapa Titik
- Gambar 24. Penggunaan garis-garis pemilikan lahan untuk mengukur arah
- Gambar 25. Penggunaan garis kompas yang diukur di lapangan untuk mengukur jurusan
- Gambar 26. Penggunaan peta dan foto untuk menentukan arah

Gambar 27. Pemecahan secara grafis terhadap masalah pergeseran topografi apabila mengukur arah secara langsung dari foto udara

BAB I

PENDAHULUAN

A. Pengertian Fotogrametri

Sebagaimana disiplin ilmu lain, untuk keperluan menunjukkan jati diri sebagai suatu disiplin ilmu yang berbeda dari yang lain dan cakupan aspek yang dipelajarinya maka para ilmuwan fotogrametri mengajukan beberapa definisi fotogrametri. Definisi fotogrametri yang dikemukakan oleh beberapa ahli, diantaranya adalah :

1. Fotogrametri adalah seni atau ilmu untuk memperoleh keterangan kuantitatif yang dapat dipercaya dari foto udara (ASP dalam Paine, 1987)
2. Fotogrametri adalah ilmu, seni, dan teknologi untuk memperoleh ukuran terpercaya dan peta dari foto (Lillesand and Kiefer, 1994)
3. Fotogrametri adalah seni, ilmu, dan teknologi untuk memperoleh informasi terpercaya tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, dan interpretasi gambaran fotografik dan pola radiasi energi elektromagnetik yang terekam (Wolf, 1989).
4. Fotogrametri adalah suatu kegiatan dimana aspek-aspek geometrik dari foto udara, seperti sudut, jarak, koordinat, dan sebagainya merupakan faktor utama (Ligterink, 1991).
5. Fotogrametri didefinisikan sebagai proses pemerolehan informasi metric mengenai suatu objek melalui pengukuran pada foto (Tao, 2002).

Dari beberapa pengertian tersebut, terdapat dua aspek penting, yakni ukuran objek (kuantitatif) dan jenis objek (kualitatif). Kedua aspek tersebut yang kemudian berkembang menjadi cabang fotogramteri, yakni fotogrametri metrik dan fotogrametri interpretatif.

1. Fotogrametri Metrik

Fotogrametri Metrik mempelajari pengukuran cermat berdasarkan foto dan sumber informasi lain yang pada umumnya digunakan untuk menentukan lokasi relatif titik-titik (sehingga dapat diperoleh ukuran jarak, sudut, luas, volume, elevasi, ukuran, dan bentuk objek). Pemanfaatan fotogrametri metrik yang paling banyak digunakan adalah untuk menyusun peta planimetrik dan

peta topografi, disamping untuk pemetaan geologi, kehutanan, pertanian, keteknikan, pertanahan, dan lain-lain.

2. Fotogrametri Interpretatif

Fotogrametri interpretatif terutama mempelajari pengenalan dan identifikasi objek serta menilai arti pentingnya objek tersebut melalui suatu analisa sistematis dan cermat. Fotogrametri interpretatif meliputi cabang ilmu interpretasi foto udara dan penginderaan jauh.

Dalam perkembangannya seiring dengan perkembangan teknologi pencitraan (*imaging*) dan komputer, fotogrametri juga dibedakan menjadi dua, yakni fotogrametri analitik dan fotogrametri digital. Perbedaan keduanya terletak pada jenis data foto yang digunakan. Fotogrametri analitik menggunakan foto udara analog dengan analisis manual, sementara fotogrametri digital memanfaatkan foto digital sebagai sumber datanya dan pengukuran-pengukuran objek pada foto dilakukan secara digital dengan bantuan komputer.

Tujuan mendasar dari fotogrametri adalah membangun secara sungguh-sungguh hubungan geometrik antara suatu objek dan sebuah citra dan menurunkan informasi tentang objek secara teliti dari citra. Untuk dapat melakukan pekerjaan perlu pemahaman terhadap azas fotogrametri. Azas fotogrametri merupakan hal penting bagi penafsir foto, karena ia merupakan dasar untuk penghitungan kenampakan medan hasil interpretasi dalam kaitannya dengan lokasi dan bentangannya. Proses kuantifikasi ini penting karena perhatian penafsir pada apa yang terdapat pada citra hampir selalu disertai dengan memperhatikan dimana kedudukan objek objek yang diamati tersebut di lapangan dan bagaimana bentangan arealnya (Lillesand, Kiefer, dan Chiepmann, 2006). Analisis fotogrametrik meliputi aspek yang paling sederhana dengan pengukuran yang kurang teliti dengan memanfaatkan konsep-konsep geometrik sederhana dan menghasilkan peta sampai dengan pengukuran rumit dan dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi dengan menggunakan peralatan yang canggih.

Sebagai sebuah ilmu dan seni, maka untuk memanfaatkan fotogrametri diperlukan seperangkat pengetahuan mengenai karakteristik foto udara, pengetahuan interpretasi, matematika dasar, dan ilmu sesuai bidang yang

ditekuninya. Bagi para peminat geomorfologi, geologi, planologi, kehutanan dan sebagainya, interpretasi tingkat dasar merupakan pengetahuan yang menyeluruh tentang bidangnya tersebut. Dengan demikian, fotogrametri tanpa pengetahuan dasar dalam bidang lain tersebut tidak bermakna apa-apa bagi masing-masing bidang. Foto udara juga hanya berupa kombinasi dari warna yang menggambarkan objek dan nilai digital tertentu yang mungkin tidak dapat digunakan tanpa pengetahuan dasar interpretasi.

B. Kegiatan-kegiatan Fotogrametri

Menurut Lillesand and Kiefer (1994), aspek yang paling mendasar di dalam fotogrametri adalah meliputi langkah atau kegiatan sebagai berikut :

1. *Menentukan jarak medan mendatar dan besarnya sudut berdasarkan pengukuran yang dilakukan pada foto udara tegak.*

Foto udara merupakan hasil perekaman dengan menggunakan kamera yang proyeksinya center, sehingga di daerah yang mempunyai kondisi relief yang relatif kasar (bevariasi ketinggiannya) terjadi pergeseran letak elief (*relief displacement*). Adanya fenomena *relief displacement* ini berdampak pada kurang akuratnya pengukuran jarak mendatar dan ukuran sudut, oleh karena agar diperoleh ukuran yang akurat diperlukan teknik-teknik fotogrametri.

2. *Menentukan tinggi objek dari pengukuran pergeseran letak oleh relief*

Dalam perspektif foto udara yang menggunakan proyeksi center, titik yang tidak mengalami penyimpangan adalah objek yang terletak persis di atas titik pusat foto. Semakin jauh letak objek dari titik pusat foto, semakin banyak mengalami penyimpangan atau pergeseran letak secara radial, objek yang tinggi (misalnya menara, gedung-gedung bertingkat, cerobong dan lain-lain) akan tampak condong. Di satu sisi gejala pergeseran letak ini seringkali menyulitkan para penafsir foto udara, tetapi di sisi lain pergeseran bermanfaat untuk mengukur ketinggian objek-objek tersebut. Besarnya pergeseran letak oleh relief tergantung pada tinggi objek dilapangan, tinggi terbang, jarak antar titik utama foto (titik tengah foto) ke objek tertentu, dan sudut kamera saat

pengambilan objek tersebut. Karena faktor geometrik tersebut saling berkaitan, maka pergeseran letak objek oleh relief dan posisi radialnya pada foto udara dapat diukur untuk menentukan tinggi suatu objek. Hanya saja, tingkat ketelitian pengukuran secara monoskopik ini masih terbatas (Lillesand & Kiefer, 1994).

3. Menentukan tinggi objek dan ketinggian medan dengan pengukuran paralaks citra.

Pengukuran tinggi objek pada foto udara disamping dapat dilakukan secara monoskopik (satu foto) dapat pula dilakukan secara stereoskopik atau pasangan foto udara. Suatu objek dapat tergambar pada sepasang foto udara. Objek tersebut pada foto pertama posisinya dari kamera kemungkinan berbeda dengan yang tergambar pada foto kedua. Posisi relatif suatu objek yang dekat kamera (pada elevasi lebih tinggi) akan mengalami perubahan lebih besar dari objek yang jauh dari kamera (pada elevasi rendah). Selisih jarak relatif tersebut dinamakan paralaks. Besarnya paralaks pada daerah tampalan dapat digunakan untuk mengukur ketinggian objek dan ketinggian medan.

4. Penggunaan titik kontrol medan

Titik kontrol medan adalah titik di medan yang dapat diletakkan secara tepat pada foto udara, dimana informasi koordinat medan dan/atau ketinggiannya diketahui. Informasi titik kontrol medan ini digunakan untuk acuan geometrik medan untuk melakukan kalibrasi pengukuran pada foto udara. Kontrol medan atau yang lazim disebut kontrol medan, menyajikan cara untuk mengorientasikan atau menghubungkan foto udara dengan medan. Menentukan kontrol medan yang baik merupakan hal penting dalam keseluruhan pekerjaan pemetaan fotogrametri.. Untuk keperluan penentuan titik kontrol medan memerlukan survey lapangan. Kegiatan survey dilakukan dalam dua tahap, yakni: (a). pengadaaan jaringan kontrol dasar di dalam wilayah kerja; dan (b) pengadaaan posisi keruangan objek bagi kontrol foto saat survey yang dimuali dari jaringan kontrol dasar. Pekerjaan penentuan kontrol medan ini menentukan kualitas peta yang dibuat. Begitu pentingnya

pekerjaan kontrol medan, sehingga pekerjaan ini harus direncanakan dan dilaksanakan secara teliti.

5. Membuat peta di dalam plotter stereo

Plotter stereo atau biasa disingkat plotter saja adalah sebuah alat yang dirancang untuk menghasilkan peta topografi yang bersumber dari foto udara stereo, alat ini dapat memindah informasi peta tanpa distorsi dari foto stereo. Dengan alat tersebut dapat digunakan untuk mengorientasikan foto udara secara tepat, sehingga dapat diperoleh model medan yang tepat pula. Dengan demikian foto tersebut dapat digunakan untuk membuat peta planimetrik tanpa distorsi dan ketinggian tempat dapat ditentukan secara tepat, sehingga foto udara tersebut dapat digunakan untuk membuat peta topografi. Pekerjaan ini meliputi dua tahap, yakni orientasi dalam (*interior orientation*) atau orientasi relative dan orientasi absolute.

6. Membuat ortofoto

Ortofoto pada dasarnya merupakan peta foto yang dihasilkan dari foto konvensional melalui proses raktifikasi diferensial, sehingga diperoleh ukuran yang benar. Ortofoto ini bila ditumpang susun dengan peta administrasi akan menjadi peta foto yang informatif. Informasi yang ditampilkan melebihi peta dalam hal jumlah dan kerincian. Suatu contoh lagi, peta yang menggambarkan ketinggian medan dapat diletakkan atau ditumpang susun pada ortofoto, sehingga dapat menjadi ortofoto topografi. Pekerjaan membuat ortofoto merupakan pekerjaan yang tidak kalah pentingnya dengan pekerjaan fotogrametri lainnya, karena bila pekerjaan ini berhasil maka pergeseran letak oleh kesendengan fotografik maupun oleh relief. Inti pekerjaan ini adalah merektifikasi foto udara, sehingga foto udara secara geometrik menjadi ekuivalen terhadap peta garis konvensional dan peta simbol planimetrik.

7. Menyiapkan rencana penerbangan untuk memperoleh foto udara

Rencana penerbangan diperlukan agar citra yang diinginkan terpenuhi (isi dan ukuran geometrik). Hal yang perlu diperhatikan antara lain, skala citra, lensa kamera, panjang fokus kamera, format foto, dan tampalan yang diinginkan. Perencanaan penerbangan harus menentukan faktor geometrik yang

sesuai dengan tujuan pemotretan, pertimbangan waktu, cuaca, dan anggaran yang tersedia.

C. Sejarah Fotogrametri

Ilmu Fotogrametri telah dikenal sejak lama pada tahun 350 Sebelum Masehi, jauh sebelum ditemukannya fotografi. Tokoh yang pertama memperkenalkan adalah Aristoteles, menurutnya fotogrametri merupakan proses untuk memproyeksikan gambaran objek secara optik. Pada awal abad 18 Dr. Brook Taylor mengemukakan pendapat tentang perspektif linier. Setelah itu J.H. Lambert menyatakan bahwa asas perspektif dapat dimanfaatkan untuk membuat peta.

Proses fotografi mulai berkembang sejak tahun 1839, yaitu pada saat Louis Daguerre menemukan proses fotografi udara dengan plat logam yang dibuat peka terhadap sinar. Pada tahun 1840 Arago memperagakan penggunaan fotogrametri untuk pemetaan topografi. Kemudian colonel Aime Laussedat (Korps Ahli Teknik Angkatan Darat Perancis) pada tahun 1849 membuat peta topografi dengan fotogrametri. Dari pengalaman tersebut pada tahun 1859 Laussedat berhasil menggunakan fotogrametri untuk pemetaan. Fotogrametri semakin pesat perkembangannya terbukti dengan dikembangkannya proses fotografi dengan menggunakan tiga warna pada tahun 1861 yang disempurnakan pada tahun 1891.

Pada tahun 1886 Kapten Deville (pimpinan surveyor Kanada) menggunakan fotogrametri untuk membuat peta topografi di Amerika Utara (Kanada). Ia menyatakan asas Laussedat baik untuk pemetaan daerah pegunungan Kanada barat yang bertopografi kasar. Dinas Survei Pantai dan Geodesi US menggunakan fotogrametri pada tahun 1894 untuk memetakan daerah perbatasan.

Tahun 1902 semua pekerjaan fotogrametri lebih terpusat pada terrestrial foto. Kemudian tahun 1909, Dr. Carl Pulfrich dari Jerman melakukan percobaan dengan foto stereo. Hasilnya menjadi landasan teknik pemetaan. Pertama digunakan pesawat udara pada tahun 1913. Pada saat perang dunia I foto udara digunakan secara luas. Perang dunia II, fotogrametri digunakan untuk pemetaan medan lawan. Sekarang fotogrametri telah mapan (akurat, efisien, dan

menguntungkan) sehingga sebagian besar pekerjaan pemetaan menggunakan fotogrametri. Dukungan ketersediaan teknologi pencitraan secara digital telah mendorong fotogrametri semakin banyak digunakan, karena kebutuhan peralatan fotogrametri yang mahal dapat dikurangi dengan perangkat lunak dan perangkat keras yang murah.

Pemanfaatan fotogrametri telah berkembang luas dalam berbagai bidang, dari desain keteknikan, inventarisasi sumberdaya alam dan lingkungan pemetaan arkeologi dan survey hidrografi. Menurut Tao (2002) sebagian besar peta-peta topografi yang ada saat ini dibuat dengan menggunakan fotogrametri, yang dibantu dengan pendekatan SIG (Sistem Informasi Geografis) terutama dalam pembaharuan dan pengumpulan basis data. Sesuai dengan perkembangan teknologi pencitraan, maka saat ini kecenderungannya bentuk data fotogrametri berupa citra digital, baik citra digital asli maupun tidak asli. Citra digital asli adalah citra yang perekamannya dilakukan dengan kamera digital, sedangkan citra digital tidak asli berasal dari digitasi data analog yang diubah menjadi data digital dengan cara penyiaman (*scanning*).

Peralatan untuk keperluan interpretasi, plotting, pengukuran, raktifikasi dan lain-lain juga telah mengalami banyak perubahan. Perubahan alat mengikuti jenis data, efisiensi dan kemutakhiran teknologinya. Data digital memungkinkan pengolahan citra dapat dilakukan dengan komputer yang memiliki berbagai perangkat lunak. Dengan pergeseran jenis data dan peralatan, dari peralatan yang rumit dan mahal menjadi peralatan yang lebih mudah dan murah berimplikasi pada makin banyaknya orang yang mempelajari dan mengaplikasikan fotogrametri, sehingga fotogrametri saat ini makin berkembang luas sebagai ilmu, aplikasi, peminat, piranti, dan sebagainya.

Fotogrametri sebagai sebuah ilmu memiliki keterkaitan yang erat dengan penginderaan jauh, bahkan seringkali orang yang baru belajar keduanya, dibingungkan oleh overlapnya kedua disiplin ilmu ini. Keterkaitan ini dapat ditunjukkan oleh fakta-fakta berikut:

1. Fotogrametri muncul dan berkembang lebih dahulu, lebih berorientasi pada metrik (kuantitatif)

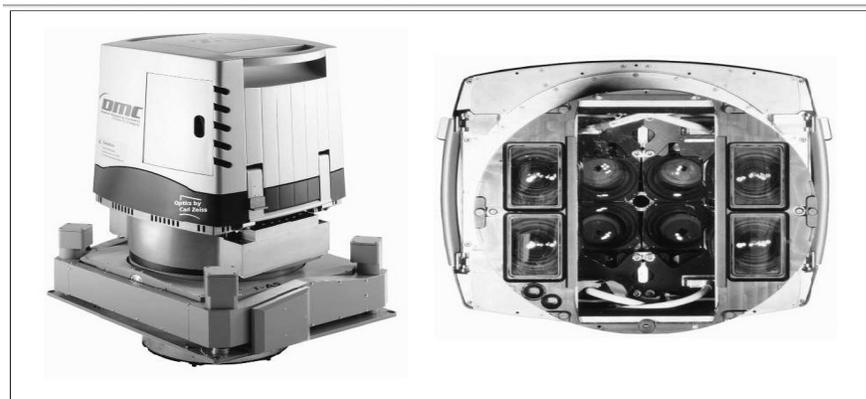
2.

D. Klasifikasi Foto Udara

Ada dua jenis foto yang digunakan dalam kegiatan fotogrametri, yakni foto terrestrial dan foto udara. Foto terrestrial diperoleh dengan cara memotret di permukaan daratan dimana informasi mengenai posisi dan orientasi, pada umumnya pengukuran dilakukan secara langsung. Foto udara merupakan bahan pokok dalam kajian Fotogrametri, oleh karena itu agar pemahaman seorang pembelajar tidak keliru dalam menginterpretasi dan mengukur suatu objek perlu dikenali lebih dahulu karakteristik foto udara. Pada umumnya foto udara dibedakan atas foto udara vertical dan foto udara condong/sendeng. Secara lebih detail foto udara dapat dibedakan atas beberapa dasar:

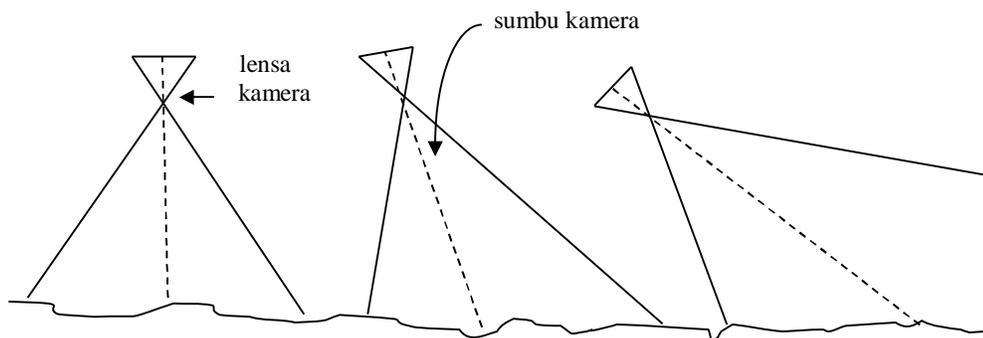
1. Spektrum elektromagnetik yang digunakan:
 - a. foto udara ultraviolet (UV dekat – 0,29 μm)
 - b. foto udara ortokromatik (biru – sebagian hijau/0,4 – 0,56 μm)
 - c. foto udara pankromatik (menggunakan seluruh gelombang visible)
 - d. foto udara inframerah true (0,9 – 1,2 μm)
 - e. foto udara inframerah modifikasi (IM dekat dan sebagian merah dan hijau).
2. Jenis kamera
 - a. foto udara tunggal
 - b. foto udara jamak (multispektral, dual kamera, kombinasi vertical condong)
3. Warna yang digunakan
 - a. black white (BW)
 - b. berwarna semu (*false color*)
 - c. berwarna asli (*true color*)
4. Sistem wahana
 - a. foto udara dari pesawat udara/balon
 - b. foto udara satelit/foto orbital
5. Sudut liputan
 - a. vertical (0 sampai 3°)
 - b. condong (lebih dari 3°)

- c. condong tinggi
- 6. Sumbu kamera
 - a. foto udara vertical, sumbu kamera tegak lurus permukaan bumi
 - b. foto condong/sendeng (*oblique/tilted*)
 - 1). Agak condong, tampak cakrawala
 - 2). Sangat condong, tidak tampak cakrawala
- 7. Bentuk data
 - a. Foto udara analog
 - b. foto udara digital (citra digital dapat berupa murni data digital dapat pula diperoleh dari penyiaman data analog sehingga menjadi data digital).



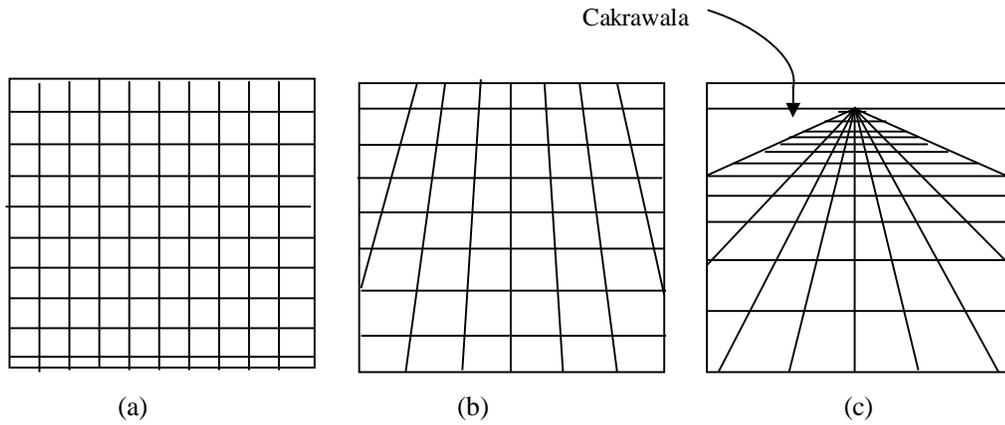
Gambar

Dalam kajian fotogrametri, klasifikasi foto udara berdasarkan sudut liputan dan sumbu kamera menempati porsi besar, oleh karena itu perhatikan gambar 1, 2, dan 3.



Vertikal Agak condong sangat condong

Gambar 1. Orientasi kamera pada tiga macam posisi kamera



Gambar 2. Konfigurasi foto udara condong tiinggi (a), condong rendah (b), tegak (c)



(a)



(b)



— (c) (d)

Gambar 3. Foto (a) dan (b) merupakan contoh foto udara condong tinggi; foto c adalah contoh foto condong rendah; dan (c) foto udara merupakan contoh vertikal

BAB II

SISTEM KOORDINAT FOTO UDARA

Ciri-ciri kamera udara yang paling penting disamping **kualitas lensa** adalah jarak titik api dan sudut liputan. Kualitas lensa mempengaruhi kerincian objek yang dapat direkam. Jarak titik api adalah jarak dari bidang fokus ke pusat lensa (titik belakang=*rear nodal point*). Panjang fokus menentukan skala foto udara dan sudut liputan. Semakin besar ukuran fokusnya, maka semakin besar skalanya. Panjang fokus kamera berbanding lurus dengan skala dan berbanding terbalik dengan luas liputan,. Semakin panjang suatu fokus, maka luas liputan semakin sempit, perhatikan gambar 4. Tinggi terbang berbanding lurus dengan luas liputan, dan berbanding terbalik dengan skala foto, artinya semakin tinggi pesawat saat melakukan pemotretan, maka semakin luas liputannya tetapi makin kecil skalan fotonya, perhatikan gambar 5. **Sudut liputan** adalah sudut kerucut berkas-berkas sinar yang datang dari daratan melewati lensa dan menyinari film.

Ambil dari LLilesand hal 104

Gambar 4. Pengaruh panjang fokus terhadap liputan medan (Lillesand and Kiefer, 1994)

Ambil dari Lilleasand hal 105

Gambar 5. Pengaruh tinggi terbang terhadap liputan medan (Lillesand and Kiefer, 1994)

A. Sistem Koordinat

Acuan dari sumbu-sumbu koordinat adalah tanda-tanda fidusial (*fiducial Marks*). *Fiducial mark* berupa garis silang, noktah, ujung panah, atau gambar-gambar geometrik lain yang diproyeksikan secara optik, yang terletak pada sisi-sisi foto (pada setiap lembar foto terdapat tanda ini dengan jumlah 4 atau 8, tergantung jenis kamera yang digunakan). *Fiducial mark* merupakan acuan sumbu-sumbu koordinat (sumbu x dan sumbu y) dan pusat geometri foto udara. Sumbu x adalah garis pada foto yang terletak antara tanda-tanda fiducial sisi yang berhadapan hampir sejajar dengan arah terbang. Sumbu y adalah garis pada foto antara tanda-tanda fiducial sisi yang berhadapan dan tegak lurus sumbu x , yang hampir tegak lurus garis/jalur terbang.

Pemberian tanda fiducial mark biasanya dilakukan dengan dua cara, yakni tanda fiducial tepi dan tanda fiducial sudut. System rujukan yang paling banyak digunakan untuk koordinat fotografik adalah system sumbu rektanguler yang ditentukan dengan cara menghubungkan tanda fiducial tepi yang berhadapan (lihat gambar 3a. Sumbu x merupakan garis yang menghubungkan fiducial tepi kanan dan kiri, pada umumnya sejajar jalur terbang. Sumbu y positif bersudut 90° terhadap jalur terbang dan mengarah berlawanan terhadap jarum jam. Titik perpotongan garis fiducial inilah yang menjadi dasar system koordinat. Titik ini disebut pusat kolimasi.

Bagi foto udara yang dilengkapi tanda fiducial pada sudut-sudutnya, sumbu acuan dapat ditentukan secara bebas, misalnya $x'y'$ sebagaimana ditunjukkan gambar 3b. Pada sistem ini maka positif x' diambil pada arah jalur terbang. Koordinat yang diukur pada system $x'y'$ diubah menjadi sistem xy agar lebih mudah dan berasal dari titik utama. Pengubahan ini dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$x_a = x_a' - x_o$$

$$y_a = y_a' - y_o$$

dimana

$$y_o = \frac{X_{B'} + X_{C'}}{4}$$

dan

$$y_o = \frac{X_{B'} + X_{C'}}{4}$$

Koordinat rektanguler merupakan cara pengukuran posisi pada foto udara yang paling dasar dan umum, karena dari koordinat itulah, jarak dan sudut antara titik-titik dapat dihitung berdasarkan geometri analitik sederhana. Sebagai contoh, jarak fotografik titik ab pada gambar 4 dapat dihitung dengan menggunakan koordinat rektanguler berdasarkan formula pitagoras sebagai berikut:

$$ab = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$$

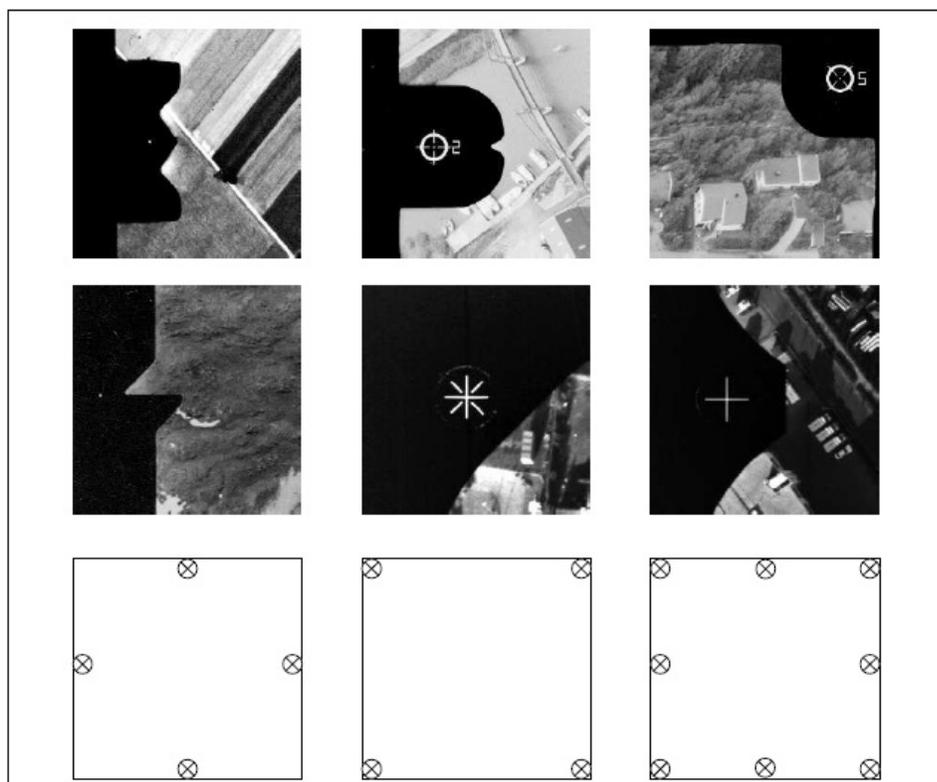
Sudut θ dan Φ pada gambar 4 dapat pula dihitung berdasarkan koordinat a dan b dengan cara berikut ini:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_a}{x_a} \right)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{y_b}{x_b} \right)$$

Sudut aob adalah jumlah sudut θ dan Φ

Sumbu-sumbu ini sangat penting untuk berbagai perhitungan geometri foto udara dan interpretasi kuantitatif, seperti ukuran dimensi, volume, ketinggian, kemiringan suatu objek, dan lain-lain. Cara penentuan titik tengah ini digunakan untuk geometri sederhana untuk foto udara tunggal, untuk foto udara stereoskopis ada cara tersendiri dalam penentuan pusat geometrinya. Bentuk-bentuk fidusial mark dan penentuan koordinat berdasarkan tanda fidusial dapat dilihat pada gambar 5 dan 6.



└───→ Fiducial mark

6a . Contoh-contoh Fiducial Mark

Ambil gambar dari wolf hal 111

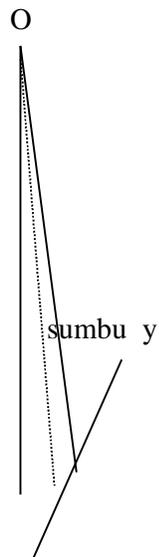
Gambar 6b. Sistem koordinat fotografi (a) tanda fidusial tepi (b) tanda fidusial sudut (Wolf, 1993)

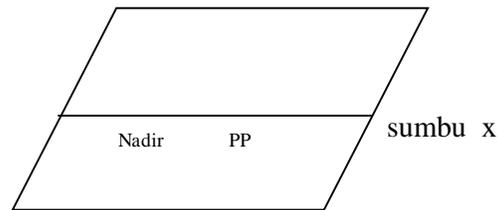
B. Tiga Pusat Foto Udara

Dalam sistem sumbu pemotretan udara dikenal 3 pusat foto udara yang dapat dipakai untuk mengetahui apakah sebuah foto udara benar-benar verikal, agak condong, atau condong. Tiga titik pusat tersebut adalah titik dasar, titik isosenter, dan titik nadir. Pengetahuan tentang ketiga pusat foto ini penting karena tipe distorsi dan pergeseran yang berbeda menyebar secara radial dari masing-masing titik ini. Berikut ini adalah penjelasan mengenai ketiga titik tersebut.

1. Titik dasar (*principal point*)

Titik dasar adalah titik dimana suatu garis tegak lurus yang diproyeksikan melalui pusat lensa memotong gambar foto.



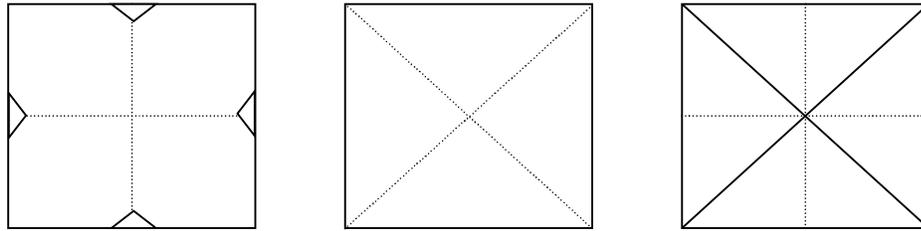


Gambar 7. Tiga Titik Pusat Pada Foto Udara

Principal point (titik tengah foto udara) merupakan pusat geometri dan dianggap berimpit dengan titik-titik pusat foto lainnya, ditunjukkan oleh perpotongan sumbu-sumbu x dan y. Cara menentukan titik tengah foto udara adalah dengan cara menghubungkan tanda-tanda fiducial (*fiducial mark*) yang tercetak pada sisi kanan-kiri, atas-bawah, dan/atau pada sudut-sudut foto udara dengan sebuah garis, titik perpotongan antar garis penghubung *fiducial mark* tersebut merupakan titik tengah foto udara. Distorsi lensa adalah menyebar menjari dari titik dasar ini.

Jumlah tanda fiducial ini pada foto udara tunggal paling tidak ada empat buah (dua dalam posisi atas-bawah dan dua kanan-kiri atau sebagai sumbu y dan x, atau dua di sudut kanan-kiri atas dan dua di kanan-kiri bawah), tetapi yang lengkap biasanya ada delapan. Titik dasar ini biasanya diberi simbol PP atau O, sehingga pada foto udara yang berurutan terdapat symbol PP_1, PP_2, PP_3 atau O_1, O_2, O_3 dan seterusnya. Ketepatan penentuan titik pusat foto ini sangat menentukan ketelitian perhitungan berbagai pengukuran objek pada foto udara. Beberapa aspek yang terkait dengan titik pusat ini, antara lain: penentuan koordinat titik, pengukuran garis basis foto, pergeseran radial suatu objek, dan lain-lain.

Untuk menghindari kerusakan foto udara, maka dalam penentuan titik dasar ini (termasuk untuk menentukan titik tengah pindahan dan titik-titik lain yang akan diukur), maka sebaiknya interpreter melapisi foto udara dengan plastic transparansi, sehingga penandaan lokasi titik-titik yang akan diukur tertera pada plastik.



Gambar 7a. Cara menentukan titik Tengah (*Principal Point*) foto udara

2. Nadir

Nadir adalah titik vertical dibawah pusat kamera pada saat pemotretan dimana suatu garis penyunting (*plumbline*) ditarik memanjang dari lensa kamera ke bidang dasar memotong gambar foto. Dari titik ini pergeseran topografi terjadi, dimana pergeseran tersebut bersifar radial (menjari) dari titik nadir.

Cara sederhana untuk mengetahui titik nadir adalah dengan menarik garis dari masing-masing objek yang tergambar condong menjari ke arah luar (menjauhi titik utama foto secara selaras), sehingga garis-garis searah objek dari masing-masing objek bertemu pada suatu titik potong. Titik potong masing-masing garis itulah merupakan letak titik nadir (lihat gambar 6). Cara ini dapat dilakukan bila pada foto udara tergambar objek-objek yang tinggi (gedung, gunung, atau pepohonan) dan foto berskala besar. Cara lain yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan peralatan yang mahal, seperti Map-O-Graph, Vertical sketchmaster, stereo countour plotter, dan lain-lain. Sebenarnya pada titik nadir inilah perhitungan-perhitungan sudut, jarak, luas maupun koordinat titik pada foto udara yang paling benar. Bila foto udara tidak benar-benar tegak, maka akan dijumpai perbedaan posisi titik nadir dari titik pusat foto. Pergeseran posisi titik nadir dari titik dasar menunjukkan adanya kemiringan (*tilt*) sumbu x dan y.

3. Isosenter

Isosenter adalah suatu titik pada foto yang terletak pada suatu garis dan berada di tengah-tengah antara titik dasar dan nadir. Isosenter merupakan titik darimana pergeseran karena kemiringan menyebar.. Dalam praktik, ketiga titik

ini sering dianggap berhimpit. Contoh letak ketiga titik pusat foto dapat dilihat pada gambar 8b.

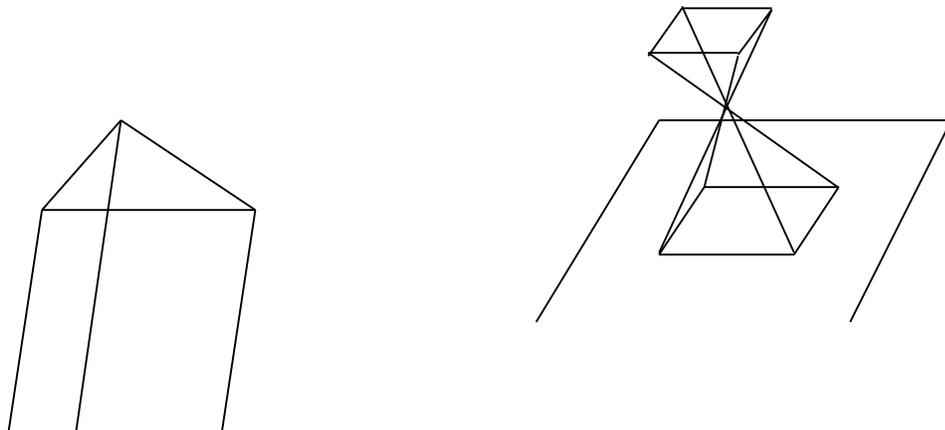
Untuk mengukur koordinat foto dapat dilakukan dengan beberapa cara. Cara yang biasa digunakan adalah dengan menggunakan skala sederhana, metode trilateratif, dengan alat Zoom Macroscop, dan monokomparator. Pengukuran dengan skala sederhana merupakan cara paling konvensional, yakni dengan menggunakan penggaris mikro, atau skala kaca. Penentuan titik pada objek dilakukan secara hati-hati dengan menggunakan jarum atau benda lain yang sangat runcing, sehingga ketepatan posisi dapat dipertahankan, setelah objek ditusuk kemudian diukur posisi x dan y. Pengukuran dengan metode trilateratif sebagaimana pada pengukuran dengan skala sederhana tetapi tidak memotong atau menggoreskan garis fidusial. Koordinat titik dapat dihubungkan langsung dari fidusial mark (lihat gambar 8a) dan dapat dihitung dengan menggunakan trigonometri. Pengukuran dengan zoom microscope, memiliki perbesaran sampai 30x sehingga memungkinkan untuk mengukur jarak pendek secara tepat, termasuk untuk mengukur luas objek. Pengukuran dengan monokomparator digunakan bila dikehendaki tingkat ketelitian sangat tinggi. Disebut komparator karena alat tersebut dapat dipakai untuk membandingkan posisi fotografik titik gambar terhadap skala pengukuran alat tersebut. Ada dua jenis komparator, yakni komparator mono dan komparator stereo.

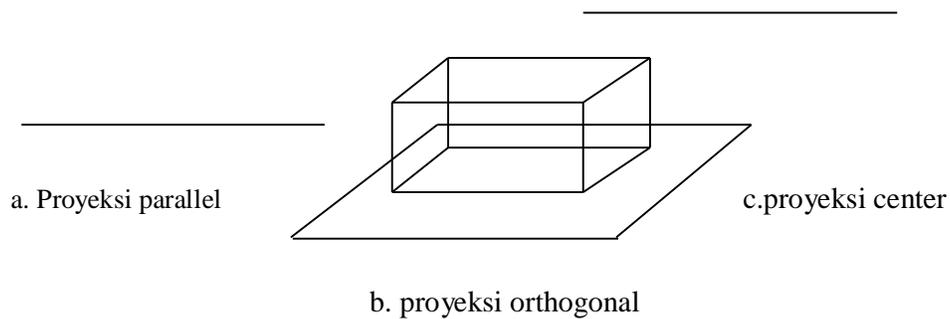
Gambar 8. Contoh Posisi Tiga Titik Pusat Foto Udara (sumber : Paine, 1993)

C. Distorsi dan Pergeseran Letak

Para pembelajar seringkali dibingungkan dengan konsep distorsi dan pergeseran (*displacement*). Kedua istilah tersebut tampaknya memang hampir sama, tetapi sesungguhnya berbeda sekali. Distorsi adalah suatu perubahan kedudukan suatu gambar pada suatu foto yang mengubah ciri-ciri perspektif gambar. Pergeseran adalah suatu perubahan kedudukan suatu gambar pada suatu foto yang tidak mengubah ciri-ciri perspektif foto.

Foto udara vertical berbeda dengan peta. Foto udara merupakan hasil dari proyeksi perspektif atau proyeksi center, sementara peta merupakan hasil dari proyeksi orthografi. Perlu diketahui bahwa tipe proyeksi meliputi proyeksi parallel, proyeksi orthogonal, dan proyeksi central. Ketiga jenis proyeksi ini dapat dipahami secara jelas dengan melihat gambar 9.





Gambar 9. Berbagai jenis proyeksi penggambaran (Sumber : Gunadi, 1996)

Mengapa terjadi pergeseran letak? Karena objek yang direkam dalam posisi dan jarak yang berbeda dari lensa kamera serta objek-objek tersebut digambar melalui proyeksi perspektif center, apa bedanya dengan peta? Perhatikanlah gambar 9 di atas.

Tabel 1. Tipe Distorsi dan Pergeseran

Tipe Distorsi	Tipe Pergeseran
1. pengerutan film dan gambar cetak	1. lengkungan bumi
2. pembiasan berkas cahaya dalam atmosfer	2. kemiringan sumbu kamera
3. gerakan gambar	3. bersifat topografis/relief
4. Distorsi lensa	

1. Distorsi Lensa

Distorsi lensa adalah perubahan letak gambar yang menyebar dari titik dasar, sehingga tampak lebih dekat atau lebih jauh dari titik dasar daripada kenyataannya. Distorsi ini posisinya lebih dekat dengan sisi-sisi foto. Dengan menggunakan kalibrasi lensa dapat diperoleh suatu kurva distorsi yang menunjukkan variasi distorsi yang beragam dengan jarak radial dari titik dasar. Dengan informasi kurva tersebut dapat dilakukan koreksi terhadap distorsi lensa jika diketahui kedudukan gambar pada foto terhadap titik dasar. Koreksi ini diperlukan hanya untuk proyek-proyek pemetaan yang sangat teliti karena lensa kamera udara mempunyai kualitas yang sangat tinggi, sehingga hampir tanpa distorsi yang berarti.

2. Pergeseran karena kemiringan (*tilt*)

Kondisi pesawat terbang ketika sedang melakukan pemotretan tidaklah stabil betul, tetapi kemungkinan terjadi getaran dan dorongan angin dari samping atau dari arah bawah yang dapat menyebabkan posisi pesawat mengalami perubahan posisi. Salah satu bentuk perubahan tersebut adalah *tilt*. *Tilt* disebabkan karena saat pesawat terbang yang sedang melakukan perekaman atau mimbar terbang yang lain tidak benar-benar horizontal. Perputaran kamera terhadap sumbu y (hidung pesawat udara naik turun) disebut *kemiringan y* , dan perputaran terhadap sumbu x disebut *kemiringan x* . Kedua kemiringan tersebut menyebar dari isosenter dan menyebabkan objek-objek yang tergambar pada foto tampak bergeser secara radial menuju isosenter pada sisi atas foto positif (bukan negatif) dan secara radial menjauhi isosenter (menuju kearah luar) pada sisi bawah. Pada gambar 8, titik a adalah gambar suatu objek di darat pada suatu foto udara yang mengalami kemiringan, titik a' merupakan gambar dari objek di daratan yang sama pada suatu foto udara vertical yang setara. Oleh karena itu kemiringan foto, titik a bergeser secara radial ke arah dalam atau menuju isosenter dengan panjang ba' .

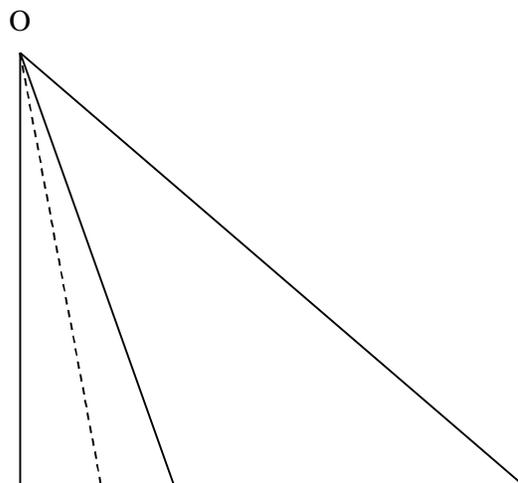
Karena objek pada pada sisi atas dan bawah tergeser pada arah yang berlawanan, kesalahan-kesalahan yang besar pada perhitungan skala rata-rata dapat dihindari dengan mengukur jarak antara dua titik yang mempunyai jarak yang sama dari pusat foto dan berhadapan secara diametric dari pusat. Oleh karena terdapat beberapa kesalahan tersebut, maka perlu dilakukan beberapa koreksi geometrik. Foto yang bebas kemiringan dapat dibuat dari negatif film yang mengalami kemiringan jika besar dan arah kemiringannya diketahui, langkah ini disebut raktifikasi.

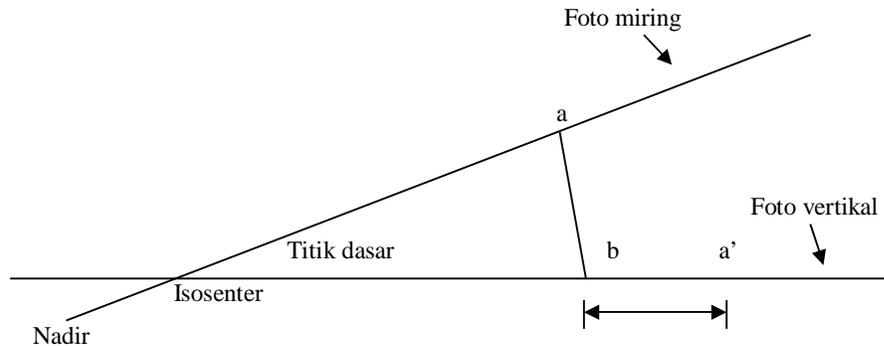
Raktifikasi dilakukan dengan menciptakan kembali kemiringan nisbi antara negatif film yang mengalami kemiringan dengan kertas pencetak. Rektifikasi dapat dilakukan dengan salah satu dari empat cara, yakni : (1) grafik; (2) analitik; (3) optik mekanik; (4) elektro optik. Cara pertama dan kedua memiliki kelemahan karena hanya dapat diterapkan pada titik-titik individual tertentu, yakni titik yang dapat diidentifikasi secara khusus sehingga lokasinya

pada foto dapat diukur. Foto hasil rektifikasi dengan metode ini tidak seluruhnya berupa foto karena fotonya tidak seluruhnya tersusun oleh gambar foto. Hasilnya lebih bersifat optik mekanik dan elektro optik yang menghasilkan gambaran rona foto berkesinambungan dimana gambar pada foto yang mengalami kemiringan telah diubah menjadi lokasi yang telah direktifikasi. Kelebihan dari dua cara ini adalah produknya dapat digunakan untuk membuat peta foto dan mozaik. Pada masing-masing metode tersebut, foto yang direktifikasi dapat disesuaikan skalanya, yakni skala rata-ratanya dapat diubah menjadi skala yang dikehendaki, sehingga sangat mungkin berbeda dari skala aslinya (Wolf, 1993).

Disamping itu foto-foto udara dapat sedikit diperkecil atau diperbesar untuk membetulkan dari perubahan-perubahan kecil dalam ketinggian terbang antara tempat-tempat pengambilan foto dan dari elevasi-elevasi daratan rata-rata yang berbeda. Langkah ini akan menghasilkan foto-foto yang diimbangkan (*rationed prints*) yang mempunyai skala rata-rata yang kurang lebih sama untuk suatu seri foto-foto. Cara ini jauh lebih murah daripada rektifikasi.

Gambar 10. Kemiringan x dan y yang disebabkan perubahan posisi kamera





Gambar 11. Posisi Titik-titik Pusat Pada Foto Udara Condong

Keterangan :

(a) pada foto udara miring telah digeser dengan jarak a' sampai ke arah isosenter pada setengah bagian atas foto positif.

D. Pergeseran Topografi

Pergeseran topografi/timbuluan (relief) adalah pergeseran posisi objek pada foto udara, karena adanya tinggi rendah permukaan bumi/objek yang menyebabkan jaraknya berbeda dari titik fokus kamera, sehingga semakin jauh posisi objek dari pusat kamera akan semakin besar pergeseran letaknya. Pergeseran topografi ini tampak secara jelas pada medan-medan yang bertopografi kasar, misalnya di daerah pegunungan. Hal ini terjadi bagian permukaan bumi yang tinggi (misal bagian puncak gunung) dengan bagian permukaan bumi yang rendah (misal kaki gunung) mempunyai jarak yang berbeda dengan lensa kamera dan sudut pengambilan yang berbeda, sehingga bagian puncak akan terekam lebih dahulu daripada bagian bawah. Kenyataan ini akan menimbulkan hasil rekaman yang menampilkan suatu objek yang tinggi tampak merebah.

Semakin jauh dari titik tengah foto udara, maka objek tersebut akan tergambar semakin merebah atau bertambah panjang. Sebaliknya objek yang mungkin mempunyai ketinggian yang sama tetapi terletak dekat titik tengah foto udara, maka akan tergambar lebih pendek. Contoh lain, misalnya menara atau

gedung bertingkat (lihat gambar 12), gambaran objek menara yang paling benar adalah gambar *a*, semestinya objek tampak sebagai suatu titik. Sementara menara pada gambar *b* yang terletak agak jauh dari titik tengah foto tampak memanjang dan menjadi miring/condong, dan gambar *c* tampak rebah dan jauh lebih panjang. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa semakin jauh jauh dari titik tengah akan tampak merebah dan berukuran semakin memanjang. Gejala lain yang perlu diperhatikan bahwa kecondongan gedung-gedung tersebut rebah tidak searah, melainkan mengikuti arah radial atau menjari.



Gambar 12. Ilustrasi kenampakan sebuah menara yang sama pada foto udara dengan posisi yang berbeda

Sifat pergeseran topografi yang menyebar dari nadir dapat dihilangkan dengan alat-alat pengeplot stereo atau dengan teknik-teknik triangulasi garis radial. Selanjutnya perhitungan terhadap pergeseran radial ini akan dibahas pada Bab II point E tentang Perpindahan Letak Gambar oleh Relief.

BAB III

FOTO UDARA TEGAK

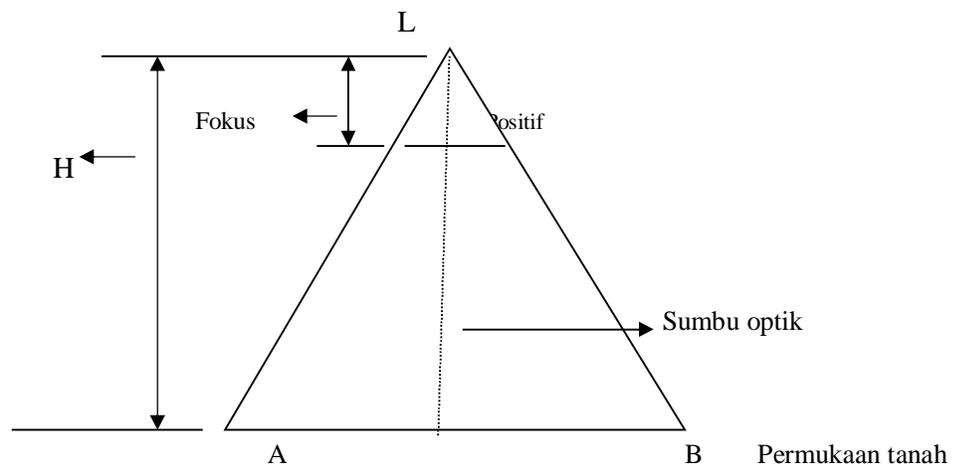
A. Geometri Foto Udara Tegak

Foto udara tegak adalah foto udara yang dibuat dari pesawat terbang dengan arah sumbu optik kamera tegak lurus atau mendekati tegak lurus. Idealnya sumbu optik kamera walaupun mengalami kemiringan tidak lebih dari 1° . Hanya saja dalam kenyataan pekerjaan pemotretan banyak mengalami gangguan (getaran pesawat dan dorongan angin) menyebabkan terjadinya perubahan posisi pesawat, bagian depan pesawat terdorong ke atas dan mengalami pergeseran ke arah sumbu Y sehingga foto udara yang benar-benar vertical tidak dapat diperoleh. Oleh karena itu masih terdapat toleransi terhadap kemiringan/kesendengan sumbu optik ini sampai dengan 3° , lebih dari angka ini foto udara dianggap sebagai foto udara condong (*tilted photograph*). Khusus untuk foto udara condong terdapat teknik dan formula untuk pengukuran tersendiri, yang berbeda dari formula yang digunakan pada foto udara tegak.

Beberapa formula persamaan yang biasa digunakan untuk menganalisis dan menghitung berbagai aspek pada fotogrametri mengasumsikan bahwa foto udara benar-benar tegak, meskipun kenyataannya mungkin tidak benar-benar tegak. Asumsi lainnya yang dipakai untuk menganalisis koordinat foto udara adalah bahwa sistem sumbu koordinat mempunyai titik asal pada titik utama (*principal point*) foto udara dan bahwa semua koordinat telah dikoreksi terhadap

penyusutan, distorsi lensa, distorsi pembiasan atmosfer, dan distorsi lengkungan permukaan bumi. Oleh karena itu dalam setiap pengukuran perlu kehati-hatian agar tidak keliru dalam menarik kesimpulan.

Perhatikan gambar 13 dan 14 yang melukiskan geometri sederhana sebuah foto udara vertikal yang dibuat dari suatu titik pemotretan L. *Negatif foto udara* yang merupakan kebalikan geometri objek yang dipotret, terletak pada jarak yang sama dengan panjang fokus (jarak o'L) di belakang titik pusat bagian belakang susunan lensa kamera. *Foto positifnya* dapat dibuat dengan cara cetak langsung (*contact printing*) emulsi-emulsi melalui lembar negatif foto.



Gambar 13. Kenampakan dua dimensional foto udara tegak di atas medan datar

Gambar 14. Geometri Foto Udara Tegak

B. Skala Foto Udara Vertikal

1. Jenis Skala

Skala peta atau foto adalah perbandingan antara jarak di dalam peta atau foto dan jarak yang bersangkutan di medan. Atau nisbah dari jarak-jarak antara titik-titik yang bersesuaian pada foto atau peta dan di daratan. Skala peta adalah seragam untuk semua tempat, skala foto udara adalah tidak seragam. Skala dapat dinyatakan dalam :

- a. unit setara (ES) $= 1 \text{ cm} : 1000 \text{ m}; 1 \text{ cm} : 10.000 \text{ m}$
- b. angka pecahan tanpa besaran(RF) $= 1 / 20.000; 1 / 50.000$
- c. perbandingan tanpa besaran (PSR) $= 1 : 20.000; 1 : 100.000$

Catatan : suatu angka penyebut skala yang besar di dalam pernyataan skala (Representatif fraction) menunjukkan skala kecil, dan sebaliknya angka penyebut skala yang kecil menunjukkan bahwa skala tersebut merupakan skala besar. Misal skala 1 : 10.000 lebih besar dari skala 1 : 30.000. Jadi semakin besar angka penyebut skala berarti semakin kecil skalanya.

2. Skala Foto Udara Vertikal

Skala pada foto udara tegak di atas medan datar merupakan perbandingan antara jarak pada foto ab dengan jarak sebenarnya di lapangan AB. Skala foto udara dapat pula dinyatakan sebagai perbandingan antara panjang jarak fokus kamera (f) yang digunakan untuk pemotretan tersebut dengan tinggi terbang di atas datum (H). Berdasarkan geometri dua segitiga sebangun LAB dan Lab pada gambar 6, skala foto udara dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$S = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H}$$

Bila rumus tersebut dipakai secara bersama-sama dapat digunakan untuk mencari salah satu variable yang belum diketahui, misalnya jarak ab , AB , dan f diketahui, maka rumus itu dapat digunakan untuk mencari tinggi terbang. Sebaliknya bila informasi panjang fokus tidak ada dapat diketahui berdasarkan informasi ketinggian terbang..

Contoh soal :

- 1). Sebuah objek yang tampak pada foto udara berukuran 1,5 cm, setelah dilakukan pengukuran di lapangan objek tersebut berukuran 300 m. Berapakah skala foto udara tersebut ?

Jawab :

Diketahui : $ab = 1,5 \text{ cm} = 150 \text{ mm}$

$AB = 300 \text{ m} = 300.000 \text{ mm}$

$$\text{Skala} = \frac{150 \text{ mm}}{300.000 \text{ mm}} = \frac{1}{20.000}$$

- 2). Sebuah foto udara diperoleh dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 150 mm, bila tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan adalah 1500 m, berapakah skala foto udara tersebut ?

Jawab :

Diketahui : $f = 150 \text{ mm}$

$H = 1500 \text{ m} = 1.500.000 \text{ mm}$

$$\text{Skala} = \frac{150 \text{ mm}}{1.500.000} = \frac{1}{10.000}$$

- 3). Sebuah foto udara berskala 1 : 12.000, foto udara tersebut diperoleh dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 150 mm, berapakah tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan ?

Jawab :

$$Skala = \frac{f}{H}$$

$$Skala = \frac{1}{12.000} = \frac{150 \text{ mm}}{H}$$

$$1H = 12.000 \times 150 \text{ mm}$$

$$1H = 1.800.000 \text{ mm} = 1.800 \text{ m}$$

Jadi tinggi pesawat terbang adalah 1800 m

3. Tipe Skala

Skala pada foto udara merupakan perbandingan antara panjang fokus dengan tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan. Kenyataannya, tinggi terbang antar titik-titik di medan berbeda-beda karena ketinggian tempat/medan yang berbeda-beda. Sebagai contoh daerah A memiliki ketinggian di atas permukaan air laut 100 m, sementara daerah B berketinggian 200 m di atas permukaan air laut, maka bila tinggi terbang pesawat 1500 m, maka tinggi terbang sesungguhnya di tempat B berbeda 100 m.

Skala pada foto udara dibedakan menjadi skala titik (local), skala global, dan skala rata-rata.

a. Skala global

Adalah skala pada foto udara yang merupakan skala secara umum, tanpa memperhatikan variasi ketinggian tempat (elevasi) masing-masing titik dan besarnya sudut terhadap fokus kamera . Skala ini hanya berasal dari informasi panjang fokus yang digunakan (f) dan tinggi terbang di atas permukaan air laut (H). Skala global ini kurang teliti, karena semua tempat dalam liputan foto dianggap sama ketinggian dan sudutnya terhadap kamera.

b. Skala local/titik (*local scale*)

Adalah skala yang memperhatikan variasi ketinggian medan setempat, dengan demikian skala ini lebih teliti karena mencerminkan kondisi medan yang sebenarnya. Skala local dapat dinyatakan sebagai :

$$S = \frac{f}{H - h}$$

h=ketinggian medan/objek setempat

Contoh :

Skala global foto udara 1:10.000, dengan asumsi bahwa ketinggian medan adalah 0 m di atas permukaan air laut, diperoleh dari pemotretan pada ketinggian 1500 m dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 150 mm. Sementara di bagian lain dari permukaan tanah di dalam liputan foto udara adalah terdapat variasi ketinggian medan, tempat A = 100 m dan B = 200 m, maka skala di titik A berbeda dengan skala di titik B, apalagi bila dibandingkan dengan skala global foto tersebut.

$$\begin{aligned} \text{Skala titik A} &= \frac{150 \text{ mm}}{1500 \text{ m} - 100 \text{ m}} \\ &= \frac{150 \text{ mm}}{1.400.000 \text{ mm}} \\ &= \frac{1}{9333} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Skala titik B} &= \frac{150 \text{ mm}}{1500 \text{ m} - 200 \text{ m}} \\ &= \frac{150 \text{ mm}}{1.300.000 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{8667}$$

Contoh tersebut membuktikan bahwa variasi ketinggian medan mempengaruhi variasi skala. Skala local mempunyai tingkat ketelitian yang paling tinggi daripada skala lainnya (skala rata-rata), hanya saja untuk pengukuran skala local ini akan memerlukan waktu yang lama, bila daerah liputan pemotretan luas dan medannya kasar.

c. Skala rata-rata (*Average scale*)

Skala rata-rata merupakan skala pada ketinggian rata-rata medan yang terliput oleh suatu foto udara tegak yang diambil di atas daerah kasar dan dinyatakan sebagai :

$$S_{rata-rata} = \frac{f}{H - h_{rata-rata}}$$

Skala rata-rata ini lebih disukai karena lebih mudah digunakan untuk keperluan yang bersifat umum, tetapi harus dimengerti bahwa skala rata-rata hanya tepat digunakan untuk titik-titik yang terletak pada ketinggian rata-rata saja, dan merupakan skala semu bagi seluruh daerah liputan foto udara. Skala ini dikatakan sebagai skala semu karena tidak memperhatikan perbedaan ketinggian tempat, dimana tempat yang lebih tinggi berarti lebih dekat dengan fokus kamera.

Contoh :

Misalkan suatu titik tertinggi di medan h_1 adalah 600 m dan titik-titik yang lebih rendah h_2 , h_3 , h_4 , masing-masing adalah 500 m, 350 m, 150 m.. Hitunglah skala terbesar, skala terkecil, dan skala rata-rata apabila tinggi terbang di atas permukaan air laut rata-rata adalah 3000 m dan panjang fokus kamera adalah 150 mm.

Jawab :

$$S_{maks} = \frac{f}{H - h_1} = \frac{150 \text{ mm}}{3000 \text{ m} - 600 \text{ m}}$$

$$= \frac{150 \text{ mm}}{2400000 \text{ mm}} = \frac{1}{16.000}$$

$$S_{min} = \frac{f}{H - h_3} = \frac{150 \text{ mm}}{3000 \text{ m} - 150 \text{ m}}$$

$$\frac{150 \text{ mm}}{2850000 \text{ mm}} = \frac{1}{19.000}$$

$$S_{rata-rata} = \frac{f}{H - h_{rata-rata}} = \frac{150 \text{ mm}}{3000 \text{ m} - 400 \text{ m}}$$

$$\frac{150 \text{ mm}}{2600000 \text{ mm}} = \frac{1}{17.333}$$

3. Cara lain untuk menentukan skala
 - a. Menggunakan peta daerah yang sama

Bila pada bagian tepi foto udara tidak terdapat informasi skala dan tidak ada pula objek yang lazimnya diketahui ukurannya maka diperlukan cara lain. Cara lain untuk menentukan skala foto udara adalah dengan memanfaatkan peta yang meliputi (mengcover) daerah yang sama. Pada metode ini perlu diukur objek yang sama yang telah ditetapkan secara pasti dan dikenali secara baik dan benar di atas foto udara maupun di atas peta. Selanjutnya skala di atas foto udara dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Skala = \frac{Jarak\ di\ atas\ foto}{Jarak\ di\ atas\ peta} \times skala\ peta$$

Contoh soal :

Dalam suatu foto udara vertical, ukuran panjang sebuah lapangan sepak bola sebesar 20 mm. Di atas suatu peta yang berskala 1 : 12.000, panjang lapangan sepakbola tersebut sebesar 14 mm. Berapakah skala foto udara tersebut ?

Jawab :

$$\begin{aligned} S &= \frac{20\ mm}{14\ mm} \times \frac{1}{12000} \\ &= \frac{20\ mm}{168.000\ mm} = \frac{1}{8.400} \end{aligned}$$

Jadi skala foto udara tersebut adalah 1 : 8.400.

b. Menggunakan objek-objek yang lazim diketahui ukurannya

Objek yang tampak pada foto udara kemungkinan berupa objek-objek yang sudah lazim diketahui ukurannya, seperti lapangan sepakbola, lapangan baseball, kolam renang, lebar jalan raya, dan lain-lain. Objek-objek tersebut dapat digunakan untuk menentukan skala foto udara, apabila foto udara tersebut belum ada skalanya. Selanjutnya skala foto udara dapat dihitung dengan membandingkan ukuran pada foto dengan objek-objek tersebut yang telah diketahui ukuran perkiraannya di atas tanah.

Contoh :

1. Berapakah besarnya skala sebuah foto udara vertical yang memuat sebuah objek lapangan sepak bola yang berukuran panjang 15 mm ?

$$S = \frac{15 \text{ mm}}{110 \text{ m}} = \frac{15 \text{ mm}}{110.000 \text{ mm}}$$

$$= \frac{1}{7.333 \text{ mm}}$$

atau ditulis dengan cara perbandingan yakni 1: 7333, tetapi penulisan skala biasanya dibulatkan, sehingga dapat ditulis 1 : 7500

2. Sebuah foto udara tidak diketahui skalanya, tetapi pada foto tersebut menggambarkan sebuah objek yang berupa jalan yang sedang dilewati oleh dua buah truck yang sedang berpapasan. Bila hasil pengukuran lebar truk pada foto udara adalah 0,3 cm dan badan nalan yang tidak dilewati truk 0,1 cm, berapakah kira-kira skala foto udara tersebut ?

Jawab :

Misal lebar sebuah truck kurang lebih adalah 1,75 m, bila ada dua truck yang bersimpangan berarti badan jalan yang diperlukan minimal 3,5 m dan jarak antara kedua truck 0,5 m, berarti lebar jalan tersebut kurang lebih 4 m. Selanjutnya dilakukan perbandingan lebar jalan pada foto udara dengan lebar jalan di lapangan berdasarkan hasil perkiraan (lebih baik lagi bila dilakukan pengukuran langsung lebar jalan di lapangan). Dengan demikian diperoleh perbandingan 0,4 cm : 4 m (untuk membuat perbandingan, maka satuan keduanya dirubah agar memiliki satuan yang sama, missal 4 mm : 4000 mm). Jadi skala foto udara tersebut adalah 1 : 1000.

Berdasarkan pembahasan mengenai tipe skala di atas dapat diketahui bahwa skala foto udara tidak tetap untuk seluruh bagian foto. Penyebab utama perbedaan skala tersebut adalah kemiringan dan perbedaan ketinggian terbang di atas medan yang disebabkan oleh perbedaan elevasi daratan (topografi). Perbedaan skala dapat pula terjadi karena terjadi perubahan ketinggian terbang pada daerah-daerah yang mempunyai elevasi sama. Fenomena ini dapat diilustrasikan oleh gambar 15.

Dari gambar 15 dapat diketahui bahwa dua tempat yang mempunyai panjang sama akan tergambar pada foto udara dengan ukuran panjang yang berbeda. Perekaman dua tempat tersebut menggunakan panjang fokus kamera dan ketinggian terbang yang sama, tetapi jarak kedua tempat terhadap kamera berbeda. Tempat A yang lebih tinggi lebih dekat ke kamera daripada titik B, sehingga skala titik A lebih besar dari titik A. Hal ini berarti objek di titik A yang berada pada ketinggian 300 meter akan tergambar lebih besar objek di titik B yang berada pada ketinggian 100 meter.

Ambil dari Paine hal 97

Gambar 15. Pengaruh topografi terhadap skala foto udara

C. Koordinat Medan

Untuk menunjukkan sebuah titik baik di dalam peta/foto maupun di lapangan diperlukan suatu sistem koordinat. Pada umumnya di setiap Negara ditentukan satu titik awal yang letaknya di tengah-tengah Negara tersebut atau di sebelah barat daya. Berdasarkan titik awal ini selanjutnya ditarik garis Utara-Selatan sebagai koordinat yang disebut sumbu Y (*Northings*) dan sumbu Barat-

Timur sebagai sumbu X (*Eastings*). Untuk keperluan pembuatan suatu peta diperlukan titik-titik pasti (*fixed points*), yakni titik-titik yang telah ditentukan terdahulu koordinatnya. Untuk keperluan penentuan koordinat yang benar pada peta yang akan dibuat, maka suatu petak yang terbentuk oleh *fixed point* harus ditusuk (*pricked*) agar tembus ke kertas yang akan digambari peta. Langkah ini dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah alat pembuat koordinat yang disebut koordinatograf. Bila tidak terdapat koordiantograf, dapat dilakukan dengan cara lain yakni dengan menggunakan grid-template. Grid atau petak bujur sangkar ditusuk dengan interval 100 mm dengan tingkat ketelitian 0,1 mm. Garis-garis dibuat dengan jarak Utara dan Timur yang sama. Garis-garis diberi nomor secara berurutan pada sisi-sisi kertas.

Posisi berbagai titik pada foto udara dapat dinyatakan dengan sistem koordinat medan. Salib sumbu X dan Y di lapangan terletak pada bidang yang sama dengan salib sumbu x dan y pada foto udara. Titik pangkal yang merupakan perpotongan sumbu tersebut (0,0) terletak pada titik utama datum, atau titik tengah foto yang berada tepat di bawah titik pemotretan (stasiun pemotretan).

Posisi objek *a* dan *b* pada foto udara dapat dinyatakan sebagai x_a, y_a, x_b, y_b . Sistem salib sumbu di medan adalah X_A, Y_A dan X_B, Y_B . Sistem koordinat lsecara jelas dapat dilihat pada gambar 16.

Gambar 16. Proyeksi Koordinat Medan Dari Foto Udara

Berdasarkan perbandingan beberapa segi tiga sebangun yang ada pada gambar 11, seperti $La'o$ dan $LA'A$ dapat diperoleh persamaan :

$$\frac{oa'}{AoA'} = \frac{f}{H - h_A} = \frac{xa}{XA}$$

Dari persamaan itu dapat diperoleh koordinat medan X_A

$$X_A = x_a \left(\frac{H - h_A}{f} \right)$$

Demikian pula dari segitiga sebangun $La''o$ dan $LA''Ao$, diperoleh persamaan :

$$\frac{Oa'}{AoA'} = \frac{f}{H - h_A} = \frac{ya}{YA}$$

Dari persamaan tersebut diperoleh persamaan koordinat medan Y_A

$$Y_A = y_a \left(\frac{H - h_A}{f} \right)$$

Dengan cara yang sama dapat diperoleh pula persamaan untuk koordinat medan untuk titik B, sebagai berikut :

$$X_B = x_b \left(\frac{H - h_B}{f} \right)$$

$$Y_B = y_b \left(\frac{H - h_B}{f} \right)$$

Dengan mengetahui koordinat medan kedua buah titik A dan B, yakni (E_A, N_A) dan (E_B, N_B) , maka panjang garis mendatar AB dapat dihitung dengan menggunakan teorema pythagoras sebagai berikut :

$$AB = \sqrt{(XB - XA)^2 + (YB - YA)^2}$$

Untuk dapat menggunakan rumus-rumus persamaan koordinat medan, diperlukan beberapa informasi seperti panjang fokus kamera, tinggi terbang di atas medan/datum, dan koordinat foto titik-titik yang dimaksud. Semua informasi tersebut dapat diketahui secara mudah, baik melalui informasi yang tercetak pada bagian tepi foto udara maupun bantuan informasi lain, seperti peta topografi untuk mengetahui ketinggian medan. Sebagai Catatan : letak koordinat titik-titik, misal a dan b pada foto udara dapat diukur dengan menggunakan penggaris biasa. Koordinat dapat terjadi dalam kondisi min (-) bila terletak pada quadran 3 dan 4.



Gambar 17. Letak koordinat titik a pada foto udara

Koordinat titik a pada contoh gambar 17 di atas adalah $xa = 6$ cm dari sumbu x, dan $ya=8$ cm dari sumbu y.

Contoh soal :

Sebuah foto udara tegak dibuat dengan kamera yang panjang fokusnya 152,4 mm, dari ketinggian terbang 1500 m di atas bidang datum. Gambar A dan B tampak pada foto udara sebagai titik a dan b, koordinat foto kedua titik tersebut adalah sebesar $x_a = -50,25$ mm, $y_a = -47,50$ mm, $x_b = 40,70$ mm, dan $y_b = 44,12$ mm. Tentukan koordinat lapangannya dan hitunglah panjang garis mendatar AB apabila ketinggian titik A dan B di atas datum masing-masing adalah 200 m dan 150 m ?

Jawab :

Diketahui :

$$H = 1500 \text{ m}, \quad f = 152,4 \text{ mm}$$

$$h_A = 200 \text{ m}, \quad h_B = 150 \text{ m}$$

$$X_A = -50,25 \text{ mm} \left(\frac{1500 \text{ m} - 200 \text{ m}}{152,4 \text{ mm}} \right)$$

Untuk memudahkan perhitungan, tanpa mengubah-ubah satuan, maka pembagi dapat dikelompokkan dengan bilangan yang akan dibagi tetapi dengan satuan yang sama. Sehingga persamaan tersebut dapat ditulis kembali menjadi :

$$X_A = \frac{-50,25 \text{ mm}}{152,4 \text{ mm}} (1500 \text{ m} - 200 \text{ m}) = -429 \text{ m (dibulatkan)}$$

Catatan : $-50,25$ mm dibagi $152,4$ mm = 0,33 tanpa satuan, karena angka bersatuan dibagi angka bersatuan dalam contoh ini adalah mm dibagi mm, maka hasilnya tanpa satuan

$$Y_A = -47,50 \text{ mm} \left(\frac{1500 \text{ m} - 200 \text{ m}}{152,4 \text{ mm}} \right) \text{ dapat ditulis kembali menjadi}$$

$$Y_A = \frac{-47,50 \text{ mm}}{152,4 \text{ mm}} (1500\text{m} - 200\text{m}) = 405 \text{ m (dibulatkan)}$$

$$X_B = 40,70 \text{ mm} \left(\frac{1500 \text{ m} - 200 \text{ m}}{152,4 \text{ mm}} \right) \text{ dapat ditulis kembali menjadi}$$

$$X_B = \frac{40,70 \text{ mm}}{152,4 \text{ mm}} (1500\text{m} - 200\text{m}) = 347 \text{ m (dibulatkan)}$$

$$Y_B = 44,12 \text{ mm} \left(\frac{1500 \text{ m} - 150 \text{ m}}{152,4 \text{ mm}} \right) \text{ dapat ditulis kembali menjadi}$$

$$Y_B = \frac{44,12 \text{ mm}}{152,4 \text{ mm}} (1500\text{m} - 150 \text{ m}) = 376 \text{ m (dibulatkan)}$$

Selanjutnya panjang garis horizontal AB di lapangan dapat dihitung dengan memasukkan nilai-nilai X_A , X_B , Y_A dan Y_B ke dalam teorema Phytagoras.

$$\begin{aligned} AB &= \sqrt{\{347 - (-429)\}^2 (376 + 429)^2} \\ &= \sqrt{(776)^2 (805)^2} = 1118 \text{ meter} \end{aligned}$$

APB sudut horizontal juga dapat dihitung dengan formula berikut:

$$\begin{aligned} APB &= 90^\circ + tg^{-1} \left(\frac{XB}{YB} \right) + tg^{-1} \left(\frac{YA}{XA} \right) \\ APB &= 90^\circ + tg^{-1} \left(\frac{347}{376} \right) + tg^{-1} \left(\frac{405}{-429} \right) \\ APB &= 90^\circ + tg^{-1} 0,92 + tg^{-1} - 0,94 \\ &= 90^\circ + 42,61^\circ + (-43,23^\circ) \\ &= 90^\circ - 0,62^\circ \\ &= 89,38^\circ \end{aligned}$$

D. Perpindahan Letak Gambar Karena Relief

Menurut Ligterink (1987) pergeseran relief adalah jarak antara posisi sebuah titik pada foto udara, jika titik tersebut berada di atas bidang referensi dengan posisi yang sebenarnya (pada saat ini) disebabkan oleh adanya relief. Perpindahan letak gambar oleh relief (*relief displacement*) merupakan pergeseran atau perpindahan letak suatu kedudukan gambar objek yang disebabkan oleh perbedaan relief permukaan bumi, yaitu karena letak ketinggiannya di atas atau di bawah datum yang dipakai. Dalam kaitannya dengan bidang datum, maka perpindahan letak karena relief ini mengarah ke luar bagi titik-titik yang ketinggiannya ada di atas datum, dan mengarah ke dalam bagi titik-titik yang ketinggiannya berada di bawah datum (Wolf, 1993). Jika objek tepat lurus dengan sumbu kamera, maka tidak terjadi perpindahan letak, hal ini hanya terjadi pada daerah yang berada di titik tengah foto. Objek-objek lain yang jauh dari titik tengah dalam posisi menyudut terhadap sumbu kamera, sehingga terjadi perpindahan letak.

Perpindahan letak gambar (tidak sesuai dengan posisi sebenarnya) dari satu sisi dapat menyulitkan para penafsir foto udara karena pergeseran tersebut berarti mengurangi ketelitian geometrik gambar. Namun, pergeseran letak ini karena terjadi secara sistemik yang disebabkan oleh proyeksi alat, ketinggian, dan sudut perekaman, maka pergeseran letak tersebut polanya dapat dianalisis dan dirumuskan menjadi formula. Formula ini dapat dimanfaatkan untuk mengukur ketinggian suatu objek secara monoskopik (mengukur ketinggian objek hanya dari satu foto), hanya saja perhitungan secara monoskopik ini hasilnya kurang teliti, karena hanya berdasarkan keadaan dari satu foto. Dengan demikian tidak ada koreksi dari foto lain yang berurutan. Untuk memahami fenomena pergeseran letak gambar pada foto udara ini akan lebih mudah dengan mencermati gambar 15.

Cari gambar di Paine halaman 46

Gambar 18. Geometri pergeseran topografi pada foto udara tegak (Sumber : Paine, 1993)

Berdasarkan geometri foto udara vertical, maka dapat diperoleh formula untuk mengukur ketinggian suatu objek dari foto udara tunggal, disamping dengan cara bayangan (cara bayangan sudut matahari dan cara perbandingan panjang bayangan).

1. Cara pergeseran topografi

Suatu persamaan untuk mengukur perpindahan letak karena relief ini dapat diperoleh dari hubungan segitiga sebangun Lao dan LAAo pada gambar 13 adalah sebagai berikut :

$$\frac{r}{R} = \frac{f}{H - h_A} \text{ atau } r (H - h_A) = fR$$

Juga dari segitiga sebangun La'o dan LA'P,

$$\frac{r'}{R} = \frac{f}{H} \text{ atau } r'H = fR$$

Dengan mempersamakan kedua persamaan tersebut, maka dapat diketahui bahwa $r(H - h_A) = r'H$ serta dengan mengganti $(r - r')$ dengan symbol d , maka diperoleh rumus d sebagai berikut:

$$d = \frac{rh}{H}$$

dimana

d =displacement, perpindahan letak karena relief

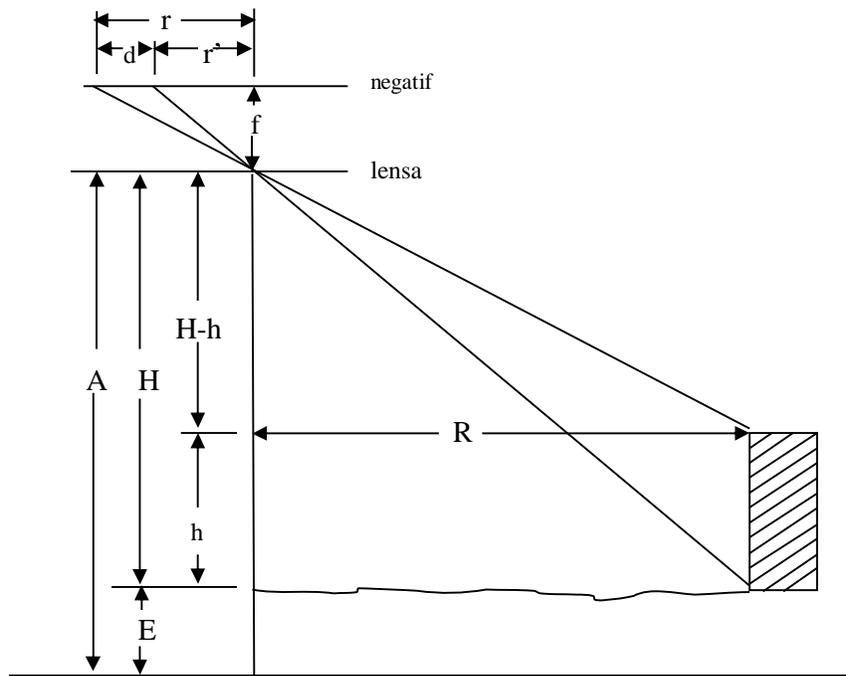
h =tinggi objek di atas datum, yang gambarnya mengalami perpindahan

r =jarak radial antara titik pusat foto ke gambar objek yang mengalami pergeseran letak
(satuan ukuran d dan r harus sama)

H =tinggi terbang di atas datum yang dipilih untuk pengukuran h .

Rumus pergeseran ini dapat digunakan secara mudah dan cepat untuk melakukan estimasi ketinggian suatu objek, besarnya pergeseran suatu objek, mengetahui tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan, asalkan komponen-komponen yang lainnya ada. Untuk mengetahui pemanfaatan rumus ini, berikut ini disajikan beberapa contoh soal dengan variasi tujuan, tetapi dengan tetap menggunakan satu rumus tersebut.

Untuk keperluan perhitungan, posisi pergeseran objek karena relief pada foto udara dapat diilustrasikan pada gambar 19 berikut ini:



Gambar 19. Ilustrasi Pergeseran letak karena relief pada foto udara (Paine, 1993)

Ambil dari Wolf hal 167

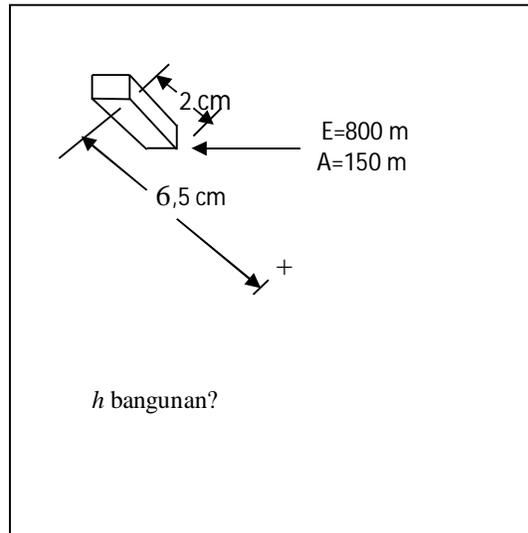
Gambar 20. Contoh Pergeseran letak karena relief pada foto udara (Wolf, 1993)

Menurut Paine (1981) cara mengukur ketinggian objek dengan rumus pergeseran pada foto tunggal berskala besar memerlukan syarat, yakni: (1) objek yang diukur harus vertical dari pangkal ke puncak, seperti sebuah menara, gedung atau pohon, yang tidak memerlukan selisih-selisih elevasi antara dua titik di daratan yang tidak berada secara langsung yang satu di atas yang lain; (2) jarak dari nadir harus cukup besar untuk menimbulkan pergeseran topografi yang cukup dapat diamati dan diukur; (3) skala foto harus cukup besar sehingga pergeseran letak objek pada foto dapat diukur; dan (4) puncak dan pangkal objek harus dapat diamati dan diukur pada satu foto atau foto yang sama. Karena kriteria-kriteria tersebut jarang terpenuhi oleh suatu foto, maka teknik ini jarang pula digunakan, hanya digunakan untuk penafisan sumberdaya alam.

Perpindahan letak karena relief seringkali menyebabkan objek-objek yang sebenarnya lurus, seperti jalan, jalur pagar, jalur listrik dan sebagainya di daerah bergelombang menjadi tampak melengkung. Objek-objek yang tinggi, seperti menara, cerobong pabrik, gedung-gedung bertingkat, pohon-pohon yang tinggi, tampak pada foto udara seperti merebah. Fenomena pergeseran letak ini tampak lebih nyata pada objek-objek yang tergambar di bagian tepi foto. Bila dicermati ternyata tingkat pergeseran objek ini, semakin ke tepi dari titik pusat foto udara akan semakin besar pergeserannya. Hal ini disebabkan sistem kamera dalam perekamannya menggunakan proyeksi senter, serta perbedaan jarak antara pangkal objek (datum) dengan puncaknya dari kamera (objek yang dekat dengan kamera akan terekam lebih dahulu daripada objek yang jauh dari kamera) dalam kasus ini misalnya puncak menara dengan base ground atau puncak gunung dengan kaki gunung.

Contoh soal :

- a. Sebuah foto udara diambil dari ketinggian 800 meter di atas permukaan air laut. Ketinggian tempat tepat pada dasar menara adalah 150 meter di atas permukaan air laut. Perpindahan letak menara oleh relief (d) terukur 2 cm, dan jarak radial ke puncak cerobong yang diukur dari pusat foto sebesar 6,5 cm. Berapakah tinggi cerobong tersebut ?



Gambar 21. Ilustrasi untuk perhitungan tinggi yang didasarkan pada pengukuran dari suatu foto udara tunggal sebagaimana contoh soal a

Jawab :

Berdasarkan rumus:

$$d = \frac{rh}{H}$$

$$rh = dH$$

$$h = \frac{dH}{r}$$

Diketahui :

$$H = A - E$$

$$H = 800 \text{ m} - 150 \text{ m} = 650 \text{ m}$$

$$d = 2 \text{ cm}$$

$$r = 6,5 \text{ cm}$$

$$h = \frac{2 \times 650 \text{ m}}{6,5} = 200 \text{ meter}$$

- b. Sebuah gedung bertingkat tergambar pada foto udara (dari dasar gedung ke puncak gedung berukuran tinggi 4,5 cm. Foto udara tersebut direkam dari ketinggian 900 m di atas permukaan air laut. Bila gedung tersebut ternyata ukuran tingginya 300 meter dan tinggi permukaan tanah di tempat tersebut 200 meter, berapakah besarnya pergeseran letak gedung tersebut pada foto udara ?

Jawab :

$$H = 900 \text{ m} - 200 \text{ m} = 700 \text{ m}$$

$$d = \frac{4,5 \text{ cm} \times (300 \text{ m})}{700 \text{ m}} = 1,93 \text{ cm}$$

- c. Pada sebuah foto udara sebuah gedung diduga berukuran tinggi 80 meter, bila gambar puncak gedung tersebut pada foto udara berjarak 9 cm dari titik tengah foto udara dan jarak radial dasar gedung adalah 8,2 cm. Berapakah tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan, bila tinggi tempat tersebut 200 m di atas permukaan air laut ?

Jawab :

Diketahui :

$$r = 9 \text{ cm}$$

$$h = 80 \text{ m}$$

$$d = 9 - 8,2 = 0,8 \text{ cm}$$

$$\text{Elevasi} = 200 \text{ m}$$

$$d = \frac{rh}{H}, \text{ maka } rh = dH \text{ dan } H = \frac{rh}{d}$$

$$H = \frac{9 \text{ cm} \times 80 \text{ m}}{0,8 \text{ cm}}$$

$$H = \frac{9 \text{ cm} \times 8000 \text{ cm}}{0,8 \text{ cm}} = 90.000 \text{ cm} = 900 \text{ meter}$$

Jadi tinggi terbang pesawat yang membawa sensor kamera yang menghasilkan foto tersebut adalah 900 m. Tinggi terbang pesawat di atas medan adalah 700 m (berasal dari ketinggian di atas permukaan air laut dikurangi ketinggian elevasi, yakni $900\text{ m} - 200\text{ m}$).

2. Cara bayangan sudut matahari

Cara pengukuran objek pada foto udara dengan cara mengukur panjang bayangannya memerlukan beberapa persyaratan. Persyaratan tersebut adalah (1) bayangan objek jatuh pada daerah yang benar-benar datar, bila bayangan objek jatuh di daerah yang miring maka yang terjadi bayangan menjadi lebih panjang bila lereng lebih rendah dari objek atau bayangan lebih pendek bila bayangan jatuh pada daerah yang lerengnya lebih tinggi. Kelemahan-kelemahan ini ditunjukkan oleh gambar 18; (2) objek yang akan diukur harus benar-benar tegak (vertikal); (3) objek harus mempunyai puncak yang lancip sehingga puncak objek dapat menimbulkan suatu titik bayangan yang jelas di daratan; dan sudut datang sinar matahari harus diketahui.

Kelemahan cara ini adalah mengetahui besarnya sudut datang sinar matahari yang berubah-ubah sesuai dengan kedudukannya pada permukaan bumi, waktu setiap harinya, musim di dalam setiap tahunnya, dan bahkan perubahan dari tahun ke tahun. Oleh karena itu informasi kapan perekaman dilakukan harus dicetak sebagai informasi tepi.

3. Cara perbandingan panjang bayangan

Cara ini memerlukan objek lain pada lembar foto yang sama yang diketahui ketinggian dan panjang bayangannya sebagai referensi. Sebagai contoh jika diketahui suatu objek yang diketahui ukuran tingginya adalah 48 meter menimbulkan bayangan yang panjangnya 0,4 cm. Berapa tinggi objek di lapangan yang memiliki bayangan 0,3 cm? Jawaban dapat diperoleh dengan cara perbandingan sederhana yaitu $0,3/0,4$ dari 48, sama dengan 36 meter.

Gambar diambil dari Paine, hal 193

Gambar 22. Penyebab panjang bayangan tidak benar (dikutip dari Paine, 1993)

E. Tinggi Terbang Foto Udara Tegak

Tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yakni tinggi terbang di atas permukaan air laut (d_{pal}) dan tinggi terbang di atas datum (ketinggian titik dasar lokasi setempat). Tinggi terbang merupakan aspek kuantitatif penting yang seringkali diperlukan untuk perhitungan berbagai persamaan dasar dalam fotogrametri. Sebagai contoh betapa pentingnya parameter ini adalah ketika hendak diketahui skala, koordinat medan, tinggi suatu objek, dan dalam persamaan pergeseran letak karena relief. Untuk perhitungan secara kasar, perhitungan tinggi terbang dapat digunakan hasil pembacaan

altimeter. Tinggi terbang dapat dicari dengan rumus untuk penentuan skala sebagaimana yang telah dikemukakan pada bagian depan, yakni :

$$S = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H}$$

Persamaan ini digunakan bila ada objek garis yang telah diketahui panjangnya. Cara tersebut menghasilkan data ketinggian terbang yang relatif tepat bagi foto udara vertical apabila kedua ujung garis dari objek tersebut terletak pada ketinggian yang sama. Secara umum, apabila antara kedua ujung garis tersebut semakin tinggi perbedaan ketinggiannya, maka tingkat kesalahannya semakin tinggi dalam memperhitungkan ketinggian. Oleh karena itu objek garis di atas tanah yang menjadi rujukan tersebut sebaiknya dicari pada lokasi yang medannya datar. Sebenarnya meski kedua ujung dari objek garis berada pada ketinggian yang berbeda, ketinggian terbang pesawat dapat dicari secara tepat apabila gambar ujung-ujung garis tersebut kurang lebih mempunyai jarak yang sama dari titik utama foto udara dan terletak pada garis yang melalui titik tersebut (Wolf, 1983).

Contoh :

Sepotong garis tergambar pada foto udara dengan ukuran 50 mm letak di atas medan yang relatif datar, bila foto udara tersebut direkam dengan kamera yang panjang fokusnya 150 mm. Berapakah tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan ?

Jawaban :

(dimisalkan panjang garis tersebut di lapangan adalah 300 m).

Dengan menggunakan persamaan di atas diperoleh :

$$S = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H}$$

$$\frac{75 \text{ mm}}{200 \text{ m}} = \frac{150 \text{ mm}}{H}$$

$$H \times 50 \text{ mm} = 150 \text{ mm} \times 200000 \text{ mm}$$

$$H = \frac{150 \text{ mm} \times 300000 \text{ mm}}{50 \text{ mm}}$$

$$H = \frac{45.000.000 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 900.000 \text{ mm} = 900 \text{ m}$$

Jadi tinggi terbang pesawat adalah 900 m di atas medan

Bila pada contoh di atas kedua ujung garis terletak pada ketinggian yang relatif sama, lalu bagaimana halnya bila kedua ujung objek garis tidak berada pada ketinggian yang relatif sama, apakah ketinggian terbang tidak dapat diketahui? Sebenarnya ketinggian terbang dapat diketahui secara teliti, meskipun kedua ujung garis tidak berada pada ketinggian yang berbeda. Cara ini memerlukan pengetahuan mengenai titik-titik ujung serta panjang objek garis tersebut. Sebagai contoh ada sebuah garis AB di permukaan tanah tergambar pada foto udara vertical dengan titik-titik ujung a dan b . Panjang garis AB di atas permukaan tanah dapat dinyatakan dalam pengertian satuan koordinat medan dengan teorema Pitagoras sebagai berikut :

$$(AB)^2 = (Xb - Xa)^2 + (Yb - Ya)^2$$

Dengan substitusi rumus-rumus koordinat di atas (point C) ke dalam persamaan Pitagoras tersebut menghasilkan :

$$(AB)^2 = \left\{ \frac{xb}{f}(H - hB) - \frac{xa}{f}(H - hB) \right\}^2 + \left\{ \frac{yb}{f}(H - hB) - \frac{ya}{f}(H - hA) \right\}^2$$

Semua komponen dalam rumus tersebut diketahui nilainya. Satu-satunya komponen yang belum diketahui nilainya adalah tinggi terbang H. Apabila semua

nilai yang diketahui dimasukkan ke dalam persamaan tersebut, maka bentuk kuadrat tersebut menjadi sederhana, $aH^2 + bH + c = 0$.

$$H = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Latihan soal

Sebuah foto udara tegak dibuat dengan kamera yang mempunyai panjang fokus sebesar 152,3 mm. Titik A dan titik B di medan masing-masing mempunyai ketinggian 438 m dan 446 m di atas permukaan air laut, serta jarak mendatar AB sebesar 585 m. Gambar titik A dan B tampak pada foto udara sebagai a dan b dan koordinat foto yang diukur ialah $x_a = 1,82$ cm, $y_a = -6,13$ cm, $x_b = 10,96$ cm, dan $y_b = -2,12$ cm. Hitunglah tinggi terbang pesawat saat melakukan pemotretan yang menghasilkan foto udara tersebut !

BAB IV

PENGUKURAN JARAK, ARAH, DAN LUAS

Berdasarkan kenyataan bahwa foto udara mempunyai skala yang beragam, pergeseran topografi, dan sejumlah deviasai lainnya, maka dalam pengukuran berbagai objek untuk suatu kepentingan tertentu diperlukan pemahaman yang cukup, agar hasilnya tidak terlalu menyimpang. Setelah suatu objek diketahui jarak dan luasnya, maka untuk menunjukkan letak objek yang mempunyai luasan dan jarak tertentu tersebut diperlukan arah dengan sudut tertentu..

A. Jarak di Daratan

Untuk mengetahui jarak di daratan/lapangan dari suatu foto udara, maka skala merupakan aspek yang paling penting. Jika kita mengetahui skala suatu foto udara, maka kita akan dengan sangat mudah menentukan jarak antar titik yang tergambar pada foto udara, yakni dengan berpedoman pada persamaan skala, yakni : *Jarak lapangan = Jarak pada foto x penyebut skala*. Misalnya, jarak antara titik A dan B pada suatu foto udara yang mempunyai penyebut skala 20.000 adalah 4 cm, maka jarak di daratan adalah :

$$\text{Jarak lapangan} = 4 \text{ cm} \times 20.000 = 80.000 \text{ cm}$$

Selain dengan menggunakan persamaan, suatu jarak di daratan dapat pula diketahui dengan cara lain yang lebih cepat tetapi kurang teliti, yakni dengan menggunakan templet skala ganda (*multiple scale templet*), lihat gambar 23 dan 24 berikut ini.

Gambar 23. Multiple scale Templet (Sumber Paino, 1993)

Gambar 24. Contoh penggunaan multiple scale templet pada foto udara

Pengukuran jarak pada foto udara disamping memperhitungkan skala harus pula memperhatikan kondisi topografi (ketinggian titik dan kemiringan lereng setempat), karena sebagaimana diuraikan pada bab skala, tempat-tempat yang tinggi akan tergambar lebih besar dari tempat-tempat yang rendah. Perbedaan ukuran ini disebabkan perbedaan jarak tempat-tempat yang berbeda ketinggiannya tersebut terhadap kamera.

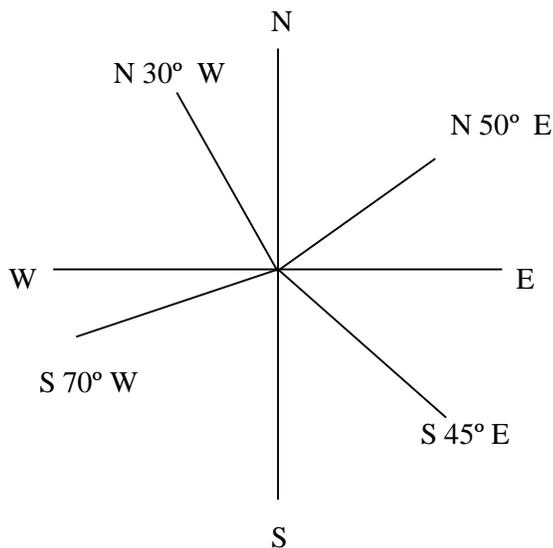
B. Pengukuran Arah

Dalam kehidupan keseharian orang seringkali menunjukkan letak suatu objek dengan arah utara, timur, selatan, dan barat. Arah-arrah tersebut merupakan arah-arah utama yang disebut arah cardinal. Jika diinginkan arah yang lebih detail, maka harus dibuat suatu sudut-sudut yang dimulai dari arah utara atau selatan. Ada dua cara yang lazim digunakan untuk menunjukkan arah, yakni jurusan (*bearings*) dan azimuth. Kapan salah satu dari keduanya digunakan tergantung tujuannya.

1. Jurusan

Jurusan adalah suatu sudut yang besarnya 90° atau kurang yang diukur baik dari utara ke timur/barat atau dari selatan menuju ke arah timur atau ke barat (boleh searah jarum jam dan boleh berlawanan dengan arah jarum jam. Oleh karena

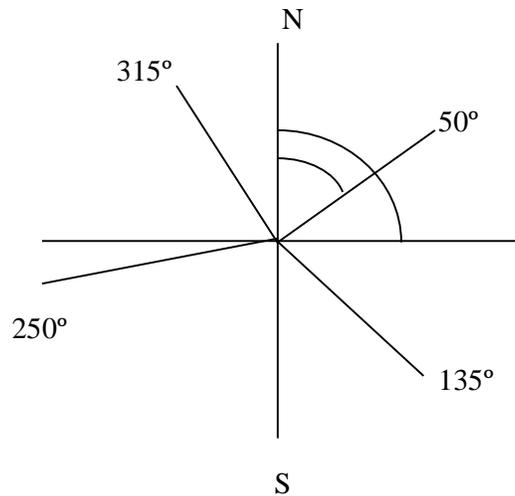
itu, dalam menyatakan jurusan selalu dimulai dengan symbol N (North) atau S (South), dan diakhiri dengan arah tujuan barat W (west) atau timur E (east), misalnya pada contoh gambar 22, terdapat jurusan N 50° E, N 30° W, S 45° E, dan S 70° W. Jurusan sudutnya tidak lebih dari 90° dan diukur dari utara atau selatan, bukan dari barat atau timur (lihat gambar 25). Perhatikan bahwa pada gambar jurusan tidak terdapat sudut yang besarnya lebih dari 90°.



Gambar 25. Contoh-contoh jurusan

2. Azimut

Azimut adalah sudut yang besarnya 0° sampai 360° yang diukur dari arah utara searah jarum jam. Azimut hanya dinyatakan dengan derajat tanpa diberi awalan arah atau akhiran arah, karena azimuth selalu dimulai dari utara (0°) dan menuju ke arah utara (360°). Contoh sudut azimuth: 30°, 50°, 70°, 120° dan lain-lain. Azimut dapat pula untuk mengganti sudut jurusan, misalnya S 45° E dapat dinyatakan dengan azimuth 135°, jurusan S 70° W dapat dinyatakan dengan azimuth 250°, jurusan N 30° W sama dengan azimuth 330°. Dalam praktiknya, adapula orang yang menyatakan sudut azimuth dengan akhiran arah, walaupun tidak lazim. Alasan digunakannya akhiran arah bagi para penggunanya adalah untuk memperjelas posisi, misalnya: N280°S, N110°SE.



Gambar 26. Contoh Azimut Beberapa Titik

3. Sudut Balik (*Back Angles*)

Sudut balik adalah sudut perubahan arah 180 atau kebalikan yang sempurna dari arah yang asli. Suatu jurusan balik mempunyai nilai angka yang sama besarnya dengan jurusan maju, tetapi dengan arah utama yang berkebalikan. Misalnya sebuah jurusan N 50° E sudut baliknya adalah S 50° W, jurusan S 70° W sudut baliknya adalah N 70° E, jurusan N 30° W sudut baliknya adalah S 30° E.

Sementara untuk memperoleh sudut balik dari suatu azimuth caranya adalah dengan menambahkan 180° untuk sudut azimuth yang kurang dari 180°, dan mengurangi 180° untuk sudut azimuth yang lebih dari 180° sampai 360°. Misalnya sudut azimuth 120°, maka sudut baliknya adalah 120° ditambah 180° sam dengan 300°, sudut azimuth 200° sudut baliknya adalah 200° dikurangi 180° atau sama dengan 20°.

Contoh soal :

1. Berapakah *back angel* dari sebuah titik yang terletak pada jurusan N40° E, N 60° E, S 50° E, S 55° W, dan S 70° W ?
2. Berapakah back angel dari titik-titik yang mempunyai azimuth sebesar 40°, 80°, 135°, 200°, dan 300° ?

Jawab :

1. Berdasarkan pengertian back angles yakni perubahan arah 180° atau kebalikan yang tepat dari arah asli, berarti back angles dari titik-titik tersebut adalah :

$$N 40^\circ E \rightarrow S 40^\circ W$$

$$N 60^\circ E \rightarrow S 60^\circ E$$

$$S 50^\circ E \rightarrow N 50^\circ W$$

$$S 55^\circ W \rightarrow N 55^\circ E$$

$$S 70^\circ W \rightarrow N 70^\circ E$$

2. Back angles dari suatu azimuth adalah ditambahkan 180° jika azimjut depan besarnya kurang dari 180° dan dikurangi 180° jika azimuth depan besarnya antara 180° dan 360° maka :

$$40^\circ \rightarrow 220^\circ \text{ (berasal dari sudut azimuth depan } 40^\circ \text{ ditambah } 180^\circ)$$

$$80^\circ \rightarrow 260^\circ \text{ (berasal dari sudut azimuth depan } 80^\circ \text{ ditambah } 180^\circ)$$

$$135^\circ \rightarrow 315^\circ \text{ (berasal dari sudut azimuth depan } 135^\circ \text{ ditambah } 180^\circ)$$

$$200^\circ \rightarrow 20^\circ \text{ (berasal dari sudut azimuth depan } 200^\circ \text{ dikurangi } 180^\circ)$$

$$300^\circ \rightarrow 120^\circ \text{ (berasal dari sudut azimuth depan } 300^\circ \text{ dikurangi } 180^\circ)$$

Penentuan sudut dengan jurusan, azimuth, dan *back angles* dimaksudkan agar posisi suatu objek dapat diketahui dengan jelas dan akurat. Dengan demikian apabila ada orang lain yang akan mengecek lokasi titik tersebut tidak akan mengalami kesulitan. Penentuan sudut ini juga dapat dipakai untuk interpolasi titik ke dalam suatu peta agar sesuai dengan kondisi di lapangan (ada kesesuaian posisi antara yang tergambar pada peta dengan lokasi aslinya sesuai dengan titik referensi). Penentuan sudut ini dalam kehidupan sehari-hari biasanya berguna untuk keperluan pemetaan, navigasi, eksplorasi sumberdaya alam, penelusuran, pencarian objek, dan lain-lain. Peralatan yang digunakan untuk pengukuran arah ini adalah kompas, theodolit, GPS (*Global Positioning System*).

C. Pengukuran Sudut Pada Foto Udara

Dalam beberapa kasus (ceking lapangan) sering dijumpai kesulitan dalam mencari suatu petak atau lokasi suatu lahan di lapangan yang lokasinya telah ditentukan pada foto udara. Untuk mengatasi hal ini maka cara yang dianggap paling baik adalah menetapkan suatu garis jarak-jurusan dari suatu titik acuan (yang dapat ditempatkan baik pada foto maupun di lapangan) terhadap titik yang ingin ditemukan. Jurusan dan jarak garis dapat diukur pada foto udara. Untuk menentukan arah perlu ditetapkan suatu garis basis pada foto yang azimuth dan jurusannya diketahui atau dapat ditentukan. Arah garis jarak-jurusan diperoleh dengan mengukur sudut di antara garis tersebut dan garis basis yang diketahui.

Biasanya kebanyakan foto udara direkam pada arah-arah utama, sehingga penafsir dapat menganggap bahwa pinggir-pinggir foto menentukan arah-arah utama. Untuk menentukan garis-garis basis ini paling tidak ada tiga cara, yakni: (1) menggunakan garis-garis pemilikan lahan pada foto udara; (2) menggunakan suatu garis kompas yang dibuat di lapangan, dan (3) menggunakan peta yang ada dari daerah yang sama.

1. Menggunakan Garis-garis Pemilikan Lahan

Suatu lahan biasanya berbentuk persegi panjang yang dibatasi oleh garis-garis yang memanjang. Bentuk-bentuk persegi panjang yang tampak pada foto udara salah satunya dapat dianggap sebagai suatu garis basis, jika ada alasan kuat yang dapat dipercaya bahwa garis-garis tersebut merupakan arah utama. Blok-blok kota, lading-ladang pertanian, jalan-jalan raya, dan batas-batas yang jelas seringkali mengikuti arah utama. Oleh karena tidak semua objek garis tersebut sesuai dengan arah utama, maka lebih baik jika dilakukan pencocokan anggapan-anggapan dengan suatu peta daerah tersebut (Paine, 1993). Informasi bentuk persil yang lazim di daerah yang tergambar pada foto udara sangat membantu dalam penentuan arah ini.

Suatu contoh pengukuran sudut dengan memanfaatkan garis pemilikan lahan dapat dilihat pada gambar 27.

Gambar 27. Penggunaan garis-garis pemilikan lahan untuk mengukur arah
(Sumber: Paine, 1993).

Caranya adalah tentukan petak mana yang akan diukur diantara petak-petak yang tergambar pada foto udara. Karena tidak memungkinkan untuk memperoleh pusat petak secara tepat di daratan hanya dengan melihat pada foto, maka harus ditetapkan suatu garis basis. Pada gambar 16 tampak beberapa garis batas dengan arah-arah utama yang berdekatan satu sama lain, tetapi tidak tepat sejajar dengan salah satu pinggir foto. Dengan membandingkan pada suatu peta diketahui bahwa batas dari A ke B berarah utara-selatan dan hal ini dapat dinyatakan sebagai garis basis. Langkahnya adalah pertama, tarik suatu garis pada foto dari titik A ke pusat petak 7. Kemudian letakkan pusat sebuah busur derajat di atas titik A dan orientasikan garis utara-selatan busur derajat dengan batas dari A ke B. Jurusan dari titik A ke pusat petak dapat dibaca secara langsung sebagai S 23°E. Langkah berikutnya adalah mengukur jarak pada foto dari titik A ke pusat petak, mengkonversikannya menjadi jarak di daratan/lapangan. Langkah terakhir adalah mengukur jarak ini di daratan dari titik A ke pusat petak.

2. Menggunakan Garis Kompas

Bila tidak terdapat garis-garis pemilikan lahan atau jalan yang menuju suatu arah tertentu yang diketahui dan tidak ada pula peta daerah tersebut, maka suatu garis basis harus ditetapkan di lapangan. Misalkan kita menggunakan petak 2 sebagai patokan, maka perlu diketahui pusat petak 2. Untuk membantu memperoleh pusat petak 2, dua persimpangan jalan pada A dan B harus ditetapkan pada foto udara dan di lapangan. Pada foto garis-garis ditarik antara A dan B, dari A ke pusat petak 2. Garis hanya ditarik dari A karena lebih dekat ke petak ukur daripada titik B. Kemudian ambillah suatu jurusan kompas dari A ke B dan terbaca jurusan S 53° E. Selanjutnya tempatkanlah pusat busur derajat di atas titik A dan mengukur letaknya sehingga terbaca S 53° E sebagai suatu jurusan dari titik pusat A ke pusat petak 2 adalah N 52° E.

Gambar 28. Penggunaan garis kompas yang diukur di lapangan untuk mengukur jurusan

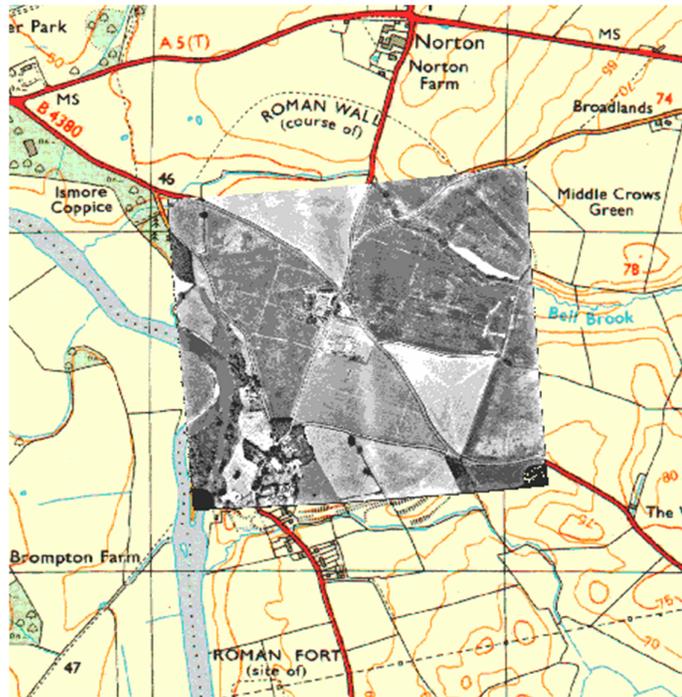
3. Menggunakan peta yang ada

Cara ketiga untuk mendapatkan garis basis dengan arah dan jarak yang diketahui adalah dengan menarik suatu garis antara dua titik yang sama pada foto dan peta. Lihatlah contoh pada gambar 18. Pada gambar tersebut terdapat dua ujung garis basis A dan C (titik B hanya ada pada peta). Titik B memperlihatkan tempat dimana suatu garis bagian memotong garis basis AC. Garis bagian ini dianggap terletak pada arah utara-selatan yang benar. Kemudian letakkan pusat busur derajat pada titik B pada peta sehingga letaknya tepat dengan garis bagian utara-selatan. Dari sini terbaca jurusan dari titik C ke B atau C ke A menjadi

N58°E. Kemudian karena titik C lebih dekat dengan tempat tujuan yakni petak 42, maka tempatkanlah pusat busur derajat di atas foto pada titik C dan mengatur letaknya untuk membaca N 58° E (jurusan belakang) dari C ke A. Jurusan dari C ke pusat petak dibaca sebagai S 13° W.

Selanjutnya berdasarkan peta yang ada dapat pula diketahui skala foto udara tersebut. Misalnya jarak AC pada peta adalah 4 cm dimana skala peta tersebut adalah 1 : 20.000. Sementara jarak AC pada foto udara 3 cm. Berapakah skala foto tersebut ?

Jawab : jarak AC di lapangan berdasarkan peta adalah $4 \text{ cm} \times 20.000 = 80.000 \text{ cm} = 800 \text{ m}$. Sementara jarak AC pada foto udara terukur 3 cm, yang berarti skalanya 3 cm:800 m atau 3 cm: 80.000 cm. Untuk memperoleh skala sederhana pembilang dan penyebut skala sama-sama dibagi 3, sehingga skalanya menjadi 1:26667.



Gambar 29. Penggunaan peta dan foto untuk menentukan arah

D. Pengaruh Kemiringan dan Pergeseran Topografi Terhadap Jurusan

Suatu masalah terjadi terhadap ketepatan jurusan akibat dari pengaruh kemiringan sudut optik kamera (tilt) dan pergeseran letak karena topografi. Kemiringan dapat diatasi dengan rektifikasi, tetapi karena rektifikasi memerlukan biaya yang tidak sedikit maka biasanya rektifikasi jarang dilakukan oleh para penafsir foto udara, kecuali untuk keperluan pemetaan yang membutuhkan ketelitian sangat tinggi.

Pengaruh kemiringan pada foto udara menyebar dari isosenter, dimana isosenter ini seharusnya terletak dekat dengan titik dasar. Oleh karena itu jurusan dari objek-objek yang terletak dekat dengan titik dasar tidak begitu banyak terpengaruh oleh kemiringan. Suatu masalah yang lebih serius mengenai kesalahan jurusan ini adalah pengaruh pergeseran topografi. Pergeseran topografi berbanding lurus dengan perbedaan elevasi dan jarak objek dari nadir dan berbanding terbalik dengan ketinggian terbang. Kesalahan jurusan akibat

pergeseran topografi ini dapat dikoreksi dengan menggunakan rumus pergeseran dan busur derajat. Prosedur koreksi kesalahannya dapat dipahami dengan mencermati contoh berikut ini.

Pada gambar 19 garis basis sebuah foto udara adalah dari A ke B. Titik A (elevasi 132 m) terletak 9,68 cm sebelah barat daya nadir dan titik B (elevasi 435 m) terletak 8,5 cm di sebelah selatan nadir (elevasi nadir 300 m). Jika pesawat terbang saat melakukan pemotretan berada pada ketinggian 1800 m di atas permukaan air laut, jarak fokus kamera sebesar 15 cm, dan jurusan A ke B yang telah ditentukan di lapangan adalah N 78° E. Selanjutnya dengan menggunakan rumus pergeseran topografi dapat dihitung besarnya pergeseran titik A dan B pada foto, sebagai berikut :

$$dA = \frac{rh}{A - E} = \frac{(9,68 \text{ cm}) (-168 \text{ cm})}{1800 \text{ m} - 300 \text{ m}} = -1,08$$

$$dB = \frac{(8,50 \text{ cm}) (+135 \text{ cm})}{1800 \text{ m} - 300 \text{ m}} = 0,76$$

Mendasarkan pada asumsi bahwa elevasi datum berada pada titik nadir maka lokasi yang sesungguhnya atau lokasi peta dari garis basis foto pada gambar 19 adalah A' ke B'. Cermatilah keadaan dimana titik A mengalami pergeseran ke arah nadir karena titik A mempunyai elevasi lebih rendah daripada nadir. Hal ini berarti bahwa kedudukan A yang benar adalah lebih jauh dari nadir pada A'. Titik B, yang terletak pada elevasi yang lebih tinggi daripada nadir, mengalami pergeseran menjauh dari nadir, hal ini berarti bahwa kedudukan yang benar dari B adalah mendekati nadir pada B'.

Selanjutnya gunakanlah busur derajat untuk mengukur kesalahan pada garis jurusan pada foto udara. Hasilnya adalah bahwa kesalahan yang terjadi sebesar 9° searah dengan jarum jam. Dengan demikian jurusan pada foto udara yang telah dikoreksi adalah sebesar 9° menurut arah yang berlawanan dengan

arah jarum jam. Fenomena ini merupakan kondisi yang ekstrim, tetapi kenyataan ini menggambarkan bahwa kesalahan jurusan dapat disebabkan oleh topografi.

Koreksi semacam ini apakah perlu dilakukan atau tidak pada setiap pemanfaatan foto udara, tergantung pada tingkat ketelitian yang diperlukan. Di dalam praktek yang sebenarnya koreksi-koreksi tidak dilakukan di lapangan untuk keperluan interpretasi berbagai aspek, tetapi suatu pemahaman yang mendalam mengenai masalah-masalah yang terkait memungkinkan penerapan beberapa kaidah umum yang harus diikuti untuk menetapkan garis-garis jurusan pada foto udara.

Berdasarkan atas kaidah-kaidah geometri foto udara vertical, kesalahan-kesalahan dalam jurusan yang disebabkan oleh pergeseran topografi tidak terjadi dalam kondisi berikut ini :

1. Garis jurusan melalui nadir (pergeseran topografi terjadi secara radial dari titik nadir).
2. Nadir dari kedua ujung garis jurusan (bearing line) berada pada elevasi yang sama
3. Kedua ujung garis berada pada elevasi yang sama dan mempunyai jarak yang sama dari nadir (garis jurusan dan nadir tidak berada pada elevasi yang sama).
4. Foto udara benar-benar vertical dan daerah yang direkam merupakan daerah datar.

Tiga pusat foto (nadir, isosenter, dan titik dasar) berada pada jarak yang sangat dekat, oleh karena itu dalam menetapkan garis-garis jurusan pada foto udara harus mengikuti aturan-aturan umum untuk meminimalkan pengaruh kemiringan dan pergeseran topografi. Menurut Paine (1993), ada beberapa aturan pokok yang perlu dicermati dalam menetapkan garis-garis jurusan adalah :

1. Tetapkan garis dekat titik dasar, sehingga meminimalkan jarak radial (r) di dalam perhitungan dengan persamaan pergeseran
- 2 Tetapkan kedua ujung garis kira-kira pada elevasi yang sama dengan elevasi titik dasar.

langsung dihitung secara keseluruhan, tetapi mengikuti bentuk-bentuknya, sehingga pada daerah tidak teratur pengukuran luas akan lebih lama karena perlu dilakukan penghitungan beberapa kali pada setiap bentuk yang ada. Pengukuran luas pada foto maupun peta berarti menghitung luasan bentuk-bentuk geometri yang sudah lazim, seperti bujur sangkar, empat persegi panjang, lingkaran-lingkaran, segitiga, dan lain-lain. Untuk melakukan pengukuran luas dapat dilakukan dengan beberapa teknik, antara lain: penggunaan planimeter, perbandingan berat, penghitungan noktah, transek, dan dengan rumus-rumus geometri sederhana. Teknik-teknik pengukuran luas ini memerlukan bantuan peralatan yang meliputi alat sederhana dan alat mekanik, maupun alat elektronik yang canggih.

1. Pengukuran luas dengan alat sederhana

Beberapa metode pengukuran luas dengan menggunakan alat sederhana paling tidak meliputi tiga metode, yakni: metode strip, metode bujur sangkar, dan metode jaringan titik

a. Metode Strip

Alat yang diperlukan untuk pengukuran luas dengan metode strip adalah lembaran tembus cahaya. Lembar tersebut ditumpangkan pada objek pada foto yang akan diukur luasnya, kemudian ditarik garis-garis sejajar dan berinterval sama besar, selanjutnya tariklah garis-garis tegak lurus pada batas objek sedemikian rupa sehingga bagian yang dihilangkan sama dengan bagian yang ditambahkan (lihat gambar 20). Garis-garis ini disebut *gave and take lines* atau ada yang menyebutnya garis keseimbangan. Setelah semua tepi objek dibatasi oleh garis-garis tersebut, panjang sisi atas masing-masing persegi panjang atau strip dijumlahkan dan dikalikan dengan intervalnya, sehingga diperoleh luas suatu objek dari foto udara (Sutanto, 1994). Misalnya dari gambar 20 luasnya adalah 30^2 cm dan skala foto udaranya adalah 1:40.000, maka luasnya di lapangan adalah $30 \text{ cm}^2 \times (40.000)^2 = 48.000.000.000 \text{ cm}^2 = 4.800.000 \text{ m}^2 = 480 \text{ ha}$

Gambar 31. Pengukuran luas dengan metode strip (sumber : Sutanto, 1994)

Cara ini hanya sesuai untuk medan yang bentuknya datar dan homogen, karena metode ini tidak membedakan variasi elevasi objek yang tergambar pada foto udara. Oleh karena itu sebelum menggunakan metode ini harus dilihat terlebih dahulu kondisi medannya. Bila ternyata medannya tidak datar, maka hasil perhitungannya akan menyesatkan.

b. Metode bujur sangkar

Penggunaan metode bujur sangkar untuk pengukuran luas memerlukan kertas millimeter yang tembus sinar. Kertas millimeter ini ditumpangkan di atas objek pada foto udara yang hendak diukur luasannya. Dalam pengukuran luas dengan bujur sangkar ini, dihitung jumlah bujur sangkar yang mengcover luasan objek yang akan diukur. Bila terdapat bujur sangkar yang terpotong pada bagian tepi/batas objek, ketentuan penghitungannya adalah bujur sangkar yang luasannya setengah atau lebih dibulatkan menjadi satu bujur sangkar dan yang kurang dari setengah dieliminasi. Misalnya luasan suatu objek pada foto udara adalah 25 bujur sangkar penuh dan 15 bujur sangkar hasil pembulatan, bila ukuran bujur sangkar yang ditetapkan 1 cm x 1 cm, maka luas objek tersebut adalah 40

cm². Jika skala foto udara tersebut 1:30.000, maka luas objek tersebut di lapangan adalah $48 \text{ cm}^2 \times 30.000^2 = 14.400.000.000 \text{ cm}^2 = 1.440.000 \text{ m}^2 = 144 \text{ ha}$.

c. Metode Jaringan Titik

Cara menaksir luas kawasan dengan menggunakan kisi-kisi noktah (*dot grids methode*) merupakan pengembangan lebih lanjut dari metode bujur sangkar. Metode ini mungkin paling banyak digunakan pada foto udara. Caranya adalah dengan menggunakan kisi noktah transparan yang diberi jaringan titik dan ditumpangkan di atas peta atau foto udara yang akan diukur luasnya. Jaringan titik-titik pada lembar transparansi tersebut berjarak sama. Titik-titik tersebut serupa dengan titik-titik yang dibuat pada tengah-tengah tiap bujur sangkar yang kemudian bujur sangkarnya dihapus (Sutanto, 1994). Masing-masing titik atau noktah dihitung berdasarkan klas tipe dimana noktah tersebut jatuh. Jumlah noktah/titik tersebut yang jatuh di dalam kawasan yang hendak dihitung luasnya kemudian didaftar. Luas bujur sangkarnya diukur dengan menarik garis dari empat titik yang berdekatan. Luas bujur sangkar satuan selanjutnya dijumlahkan.

Gambar 32. Pengukuran luas dengan jaring titik-titik

Dari ketiga cara pengukuran luas yang telah dibahas di atas dapat dikemukakan bahwa luas objek di medan dapat diketahui dengan formula sebagai berikut:

$$L = l \cdot p^2$$

Dimana L = luas objek di mdan

l = luas objek pada citra

p = penyebut skala

Luas objek berbanding liris terhadap jumlah titik pada tumpangan jaringan titik (*dot grid overlay*) yang termasuk dalam batas objek yang diukur luasnya. Oleh karena itu salah satu cara pengukuran luas objek pada citra dapat dilakukan dengan membandingkan jumlah titik terhadap objek yang diketahui luasnya (Lillesand and Kiefer, 1994).

2. Pengukuran luas dengan alat mekanik

a. Planimeter

Alat mekanik yang dimaksud dalam hal ini adalah planimeter. Saat ini tersedia planimeter manual dan planimeter digital. Planimeter yang digunakan secara luas adalah planimeter kutub. Alat ini menghitung secara mekanik luas objek bila ujung penelusur (*tracing point*) digerakkan menelusuri sepanjang garis batas objek serah jarum jam. Bila *tracing point* telah digerakkan dari titik A dan kembali ke titik A lagi berarti pengukuran telah selesai. Hasil pengukuran selanjutnya dikalikan dengan konstanta yang disesuaikan dengan skala foto udara/peta, sehingga diperoleh luas objek di medan. Pada planimeter digital (lihat gambar 33), pembacaan luas pada *dial* (skala pembacaan) diberikan secara langsung dalam inci persegi atau centimeter persegi yang harus diubah ke dalam luas medan. Cara ini sangat cocok digunakan untuk medan-medan yang memiliki bentuk tidak teratur tetapi dengan topografi yang relative teratur, sehingga pekerjaan menjadi agak rumit karena harus menelusur setiap objek dengan bentuk yang bervariasi.



Gambar 33. Planimeter digital

b. Perbandingan berat

Cara perbandingan berat memerlukan alat timbangan yang sangat peka. Caranya adalah suatu peta atau foto udara salinan dipotong secara teliti dan dikalsifikasikan menurut tipe-tipe secara individual. Kemudian masing-masing tipe ditimbang beratnya. Untuk memastikan bahwa jumlah bagian-bagiannya sama dengan keseluruhannya, maka timbanglah semua bagian-bagian tersebut. Jumlah luas di dalam satuan survey harus diketahui dari suatu sumber lain, kemudian dibagikan diantara bermacam-macam bagian/tipe tersebut sesuai dengan perbandingan berat masing-masing tipe. Setelah semua bagian ditimbang maka dapat diketahui bahwa daerah dengan timbangan lebih berat berarti daerah tersebut memiliki area yang lebih luas. Cara perbandingan berat ini agak merepotkan dan dipandang kurang praktis.

1. Penghitungan luas dengan alat elektronik

Luas objek dapat diukur secara cepat dengan piranti elektronik, antara lain dengan *electronic digitizer*, caranya dengan menelusur batas-batas objek yang ingin diketahui luasannya, biasanya dengan menggunakan alat semacam mouse dan meja digitizer. Dari peta analog setelah didigitasi dapat menjadi data elektronik digital yang dapat dianalisis secara digital. Proses digitasi ini dapat pula dilakukan tidak dengan meja digitizer, tetapi melalui proses

scanning. Pada proses scanning ini peta analog disiam, setelah diperoleh gambar hasil siaman selanjutnya didigitasi menggunakan mouse pada peta yang terdisplay pada monitor atau yang dikenal dengan istilah *digitized on screen*. Pengukuran luas dapat pula dilakukan dengan perangkat lunak sistem informasi geografis (SIG), yang software-nya kini berbedar luas. Seluruh perhitungan luas asal inputnya telah terbaca/diolah maka seluruh bagian peta/foto udara luasannya akan dapat diketahui secara rinci dan cepat.

BAB V

PARALAKS STEREOSKOPIK

A. Pengertian

Menurut Paine (1993) Stereoskopi adalah ilmu pengetahuan tentang stereoskop yang menguraikan penggunaan penglihatan binocular untuk mendapatkan efek tiga dimensi (3D). Penglihatan stereoskopi memungkinkan kita untuk melihat suatu objek secara simultan dari dua perspektif yang berbeda, seperti dua foto udara yang diambil dari kedudukan kamera yang berbeda, untuk memperoleh kesan mental suatu model tiga dimensi.

Perwujudan penglihatan stereoskopis meliputi azas-azas mekanis maupun fisiologis. Pandangan mata normal manusia sebenarnya secara alamiah dapat merekam objek secara stereoskopik. Hanya saja seringkali kita tidak memperhatikan kemampuan tersebut. Juga tidak semua manusia dapat melakukannya, terutama bagi mereka yang kemampuan matanya tidak seimbang. Cara sederhana untuk menguji kemampuan stereoskopik mata dapat dilakukan dengan melakukan eksperimen sederhana.

Eksperimen sederhana untuk menguji kemampuan stereoskopik mata dilakukan dengan menggunakan sebatang pensil. Caranya peganglah sebatang pensil yang telah diruncingkan, posisikan pensil lurus dengan ujung pensil di depan dekat mata dan pangkal pensil di belakang (ujung pensil kurang lebih 30 cm di depan mata), lihat gambar 19. Dengan melihat ujung dekat dengan mata dan pangkal jauh dari mata, akan terlihat bahwa ujung pensil mempunyai kesan kedalaman dan bentuk meruncing ke suatu titik. Sekarang tutup satu mata dan lihatlah langsung pada ujung pensil dengan mata terbuka sebelah. Ujung pensil akan tampak rata seolah-olah belum diruncingkan. Dengan melihat hanya dengan satu mata kita tidak akan merasakan kesan kedalaman. Prinsip ini berlaku pada penglihatan terhadap pasangan foto udara. Dua mata diperlukan agar dapat menangkap kesan stereoskopis dari foto udara yang bertamapalan, sehingga kesan kedalaman akan muncul dan dapat mengamati foto udara secara tiga dimensional.

Kesan kedalaman (*depth perception*) dalam stereoskopi terjadi karena titik-titik yang terletak pada elevasi-elevasi yang berbeda telah mengalami pergeseran secara tofografis dengan besaran dan arah yang berbeda pada foto-foto yang berurutan. Selisih di dalam pergeseran disebut paralaks mutlak. Paralaks mutlak suatu titik pada sepasang foto udara vertical yang bertampalan sama dengan koordinat x dari suatu titik yang diukur pada foto sebelah kiri dikurangi koordinat x dari titik yang diukur pada foto sebelah kanan. Batasan lengkap mengenai paralaks mutlak (paralaks x) dikemukakan oleh Paine (1993), menurutnya paralaks mutlak adalah selisih aljabar, diukur sejajar garis terbang (sumbu x) dari sumbu-sumbu y yang berkaitan untuk dua gambar dari suatu titik pada sepasang foto udara yang stereoskopis. Pengertian paralaks mutlak x dari suatu titik adalah penting untuk pengertian bagaimana melakukan pengukuran-pengukuran vertical pada sepasang foto udara vertical. Gambaran skematis paralaks mutlak dapat dipahami secara leboh jelas dengan mempelajari gambar 34.

Gambar 34. Paralaks absolute x dari sepasang foto stereo

Pada gambar 34, titik di daratan A digambar pada foto udara sebagai a dan a' berturut-turut pada foto kiri dan kanan. Koordinat x dari titik A pada foto sebelah kiri adalah xa dan koordinat x dari titik A pada foto sebelah kanan adalah xa' . Secara matematis, posisi koordinat xa adalah positif (ke arah kanan) dan xa' adalah negatif (ke arah kiri). Dengan demikian, berdasarkan batasan paralaks

mutlak di atas, paralaks mutlak x dari titik A adalah xa dikurangi xa' ($xa - (-xa)$) atau dapat ditulis $xa + xa' = 1,47 + 0,66$.

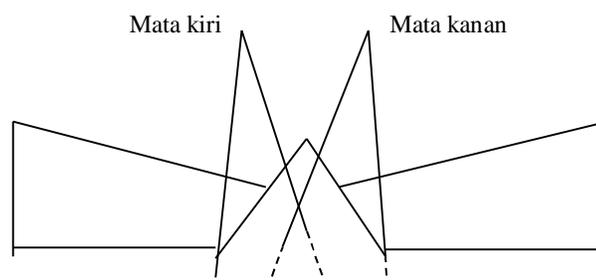
Untuk mengathui besarnya paralaks mutlak dapat dilakukan dengan meletakkan jalur terbang pada foto. Sumbu x dari suatu titik adalah sejajar dengan arah jalur terbang. Setiap jalur terbang menjadi titik tengah dari foto-foto yang dihasilkan. Karena tampalan depan fotoudara minimal 50 %, maka setiap titik tengah foto udara akan tergambar pada foto berikutnya sebagai titik pindahan. Dengan menarik suatu garis dari titik tengah foto ke titik tengah pindahan berarti jalur terbang telah ditetapkan.

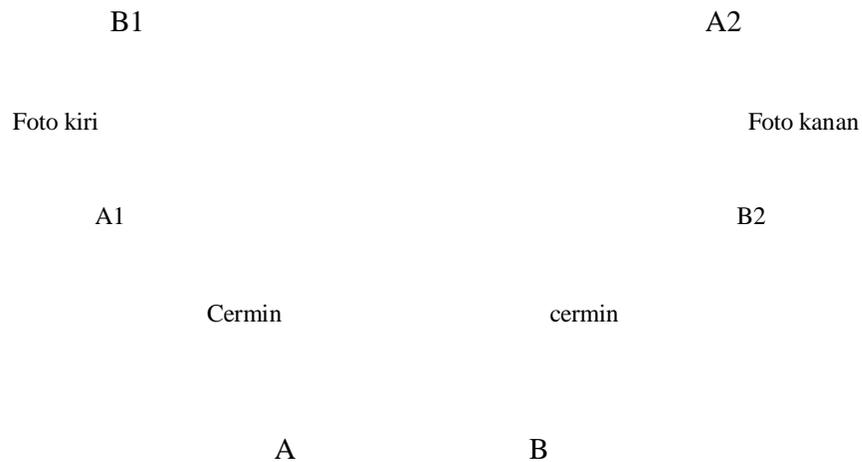
B. Instrumen untuk Mengukur Paralaks

Beberapa instrument yang dapat digunakan untuk melakukan pengukuran, baik untuk mengukur besarnya paralaks maupun untuk mengukur aspek-aspek geometris objek pada foto udara (baik tunggal maupun berpasangan) diantaranya adalah sebagai berikut:

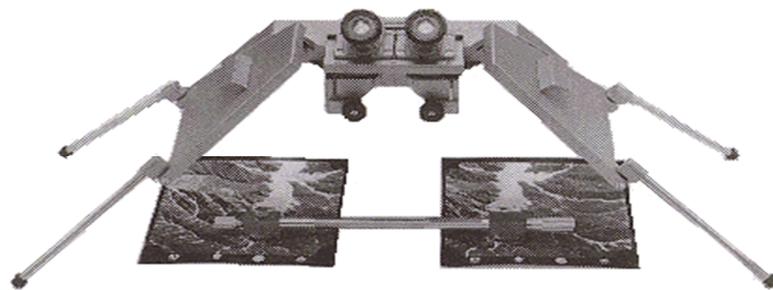
1. Stereoskop

Stereoskop merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk pengamatan tiga dimensional atas foto udara yang bertampalan depan (dengan syarat tampalan minimal 50 %). Alat ini merupakan alat yang sangat penting dalam interpretasi citra, terutama bagi foto udara atau citra tertentu yang daripadanya dapat ditimbulkan perwujudan tiga dimensional. Alat optik pertama yang menggunakan prinsip stereoskopik adalah alat yang dibuat oleh Robert Wheatstone pada tahun 1883. Pada dasarnya alat ini terdiri dari lensa atau kombinasi antara lensa, cermin, dan prisma. Secara sederhana, stereoskop ini dapat dilustrasikan oleh gambar 35.





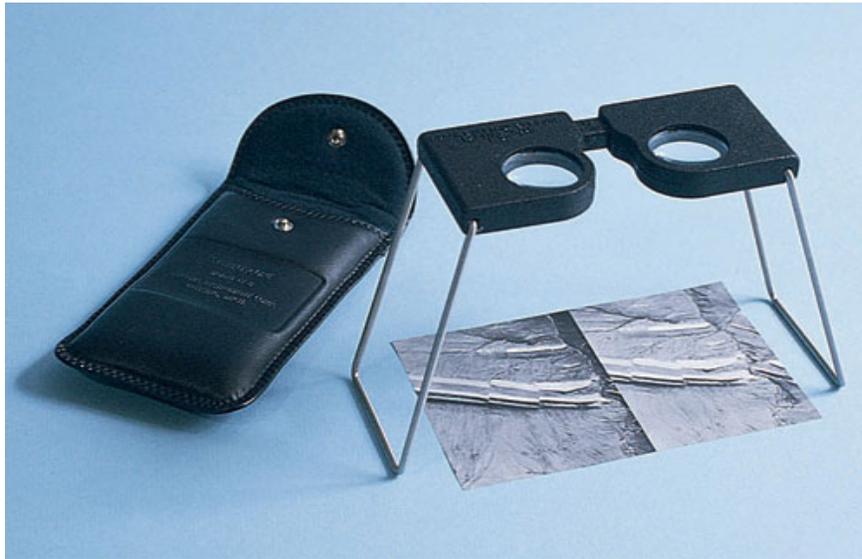
Gambar 35. Kerangka Stereoskop cermin Wheatstone



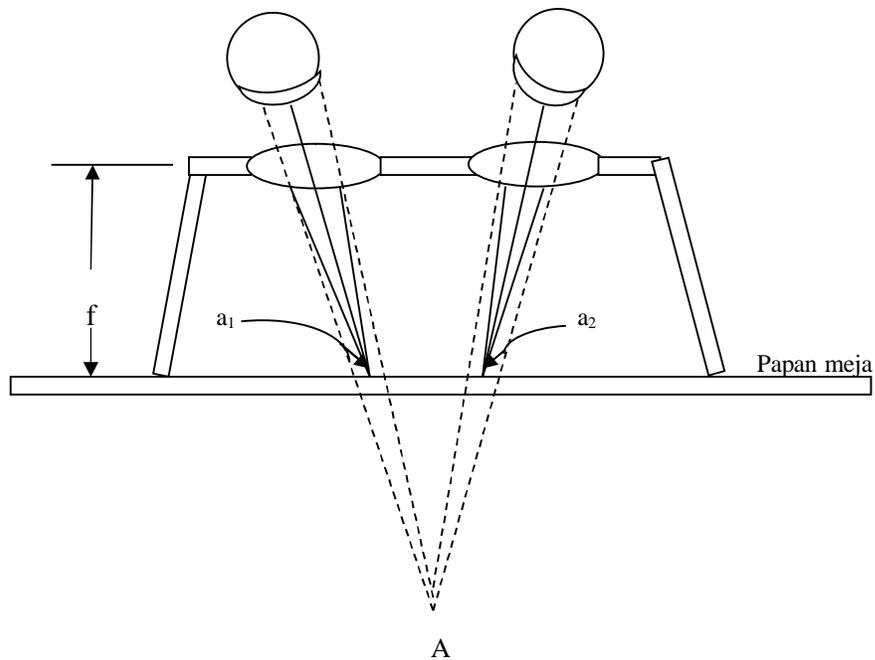
Gambar 36. Stereoskop cermin dengan sepasang foto udara dan paralaks bar

Meurut La Prade sebagaimana dikutip Sutanto (1994), Stereoskop Wheatstone terdiri dari dua cermin untuk mengamati pasangan foto stereo agar tampak tiga dimensional. Kemudian Sir David Brewster menciptakan stereoskop dengan sepasang lensa cembung yang terpisah sejauh 9,52 mm. Ia menciptakan alat ini pada tahun 1849. Kedua alat ini berkembang terus hingga saat ini sampai menyerupai bentuk seperti saat ini. Dalam perkembangannya stereoskop ini meliputi 3 jenis, yakni **stereoskop lensa** (ada yang menyebutnya stereoskop saku, karena mudahnya dimasukkan ke dalam saku sehingga mudah di bawa ke lapangan) lihat gambar xx, **stereoskop cermin** (ada yang menyebutnya setereoskop meja, karena hanya dapat digunakan di atas meja), dan **stereoskop mikroskopik** (disebut demikian karena pembesarannya yang sangat besar

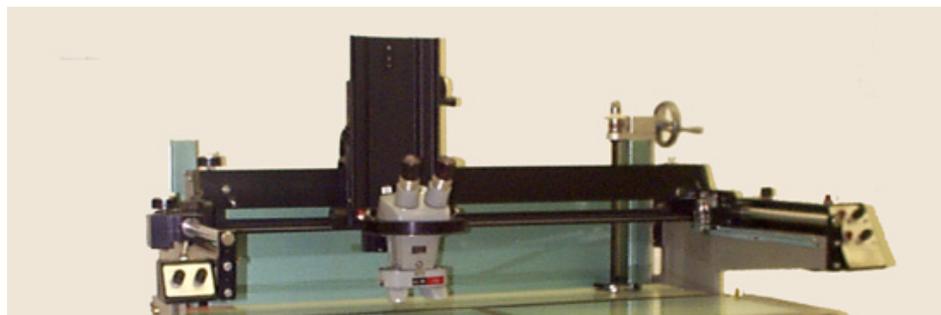
sehingga fungsinya mirip dengan mikroskop). Stereoskop mikroskop ini terdiri dari dua jenis mikroskop, yakni zoom stereoskop dan interpretoskop.



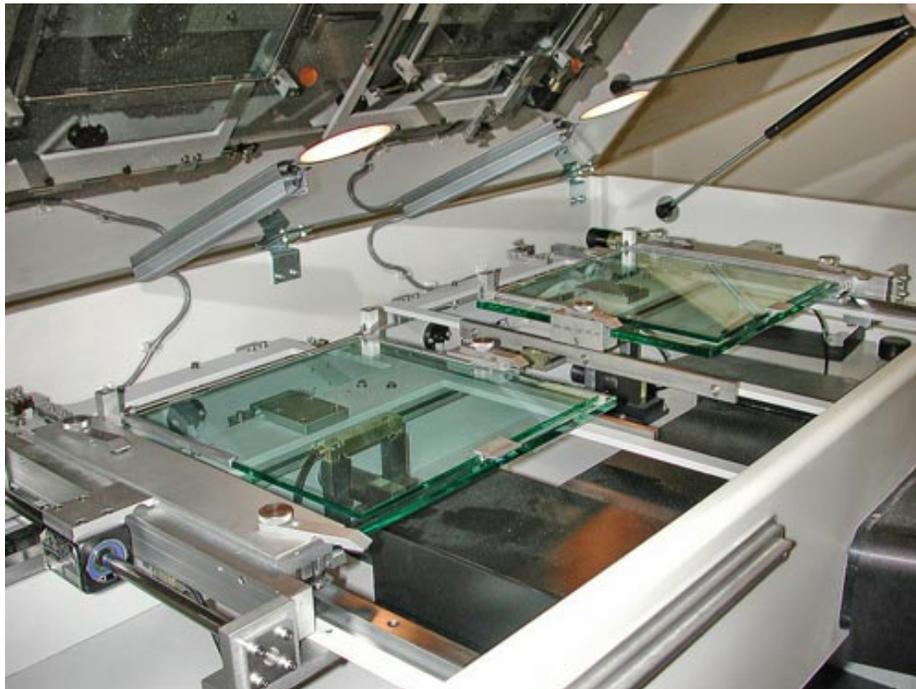
Gambar 37. Stereoskop saku untuk mengamati pasangan foto udara



Gambar 38. Diagram skematik stereoskop saku



Gambar 39. Stereoskop Zomm di atas meja



Gambar 40. Interpretoskop

2. Paralaks bar

Paralaks bar atau disebut pula paralaks batang, paralaks meter, stereometer. Alat ini terdiri dari sebuah batang yang pada kedua ujungnya terpasang masing-masing sebuah lensa. Pada kedua lensa tersebut terdapat tanda berupa titik, silang atau lingkaran kecil yang disebut tanda apung (*floating mark*). Tanda di lensa sebelah kiri disebut *fixed mark*, disebut demikian karena pada bagian batang terdapat pilihan titik merah dan hitam, dimana orang yang akan menggunakannya harus menentukan konstanta batang paralaks dengan memilih salah satu titik tersebut. Bila telah ditetapkan titik merah, maka selanjutnya lensa kiri ini tidak diubah-ubah lagi (*fixed*). Lensa sebelah kanan memiliki tanda juga yang disebut *half mark*. Titik ini dapat digerakkan sesuai dengan posisinya pada objek yang dikehendaki dengan cara memutar-mutar skrup micrometer.

Batang ini dapat diperpendek atau diperpanjang dengan menggunakan skrup micrometer. Pembacaan paralaks dapat dibuat semakin besar bila jarak kedua lensa semakin dekat atau sebaliknya. Pembacaan yang semakin besar bila kedua lensa semakin dekat disebut pembacaan ke depan karena hal ini sesuai dengan kenyataannya, yaitu semakin dekat jarak antara kedua titiknya berarti semakin besar paralaksnya. Pembacaan sebaliknya disebut pembacaan ke belakang (Wolf, 1983).

Paralaks batang digunakan untuk mengukur besarnya paralaks suatu titik. Paralaks titik biasanya diperlukan untuk mengukur ketinggian titik tersebut. Pengukuran tinggi ini dapat pula dilakukan dengan mistar, paralaks tangga, dan paralaks meter. Paralaks batang dan paralaks tangga dicontohkan pada gambar 41.



Gambar 41. sketsa paralaks batang

C. Kenampakan Stereoskopis

Kemampuan mata normal dan mata kanan-kiri mempunyai kekuatan yang sama dapat menangkap kenampakan stereoskopis. Sebagaimana telah dicontohkan pada eksperimen di atas mengenai kemampuan mata menangkap kesan kedalaman, terjadi karena terdapat proses penyesuaian (perubahan fokus mata terhadap jarak) dan pemusatan (*convergence*). Bila tatapan mata ditujukan pada objek-objek yang dekat, maka mata dapat memusat ke arah objek sehingga garis-garis penglihatan sepasang mata akan berpotongan pada objek, tetapi jika mata diarahkan pada objek tak terhingga, maka garis-garis

penglihatan akan sejajar. Salah satu aspek penting yang harus diperhatikan di dalam pengamatan foto secara stereoskopis adalah mempertahankan penglihatan sejajar sambil memfokuskan mata pada suatu jarak yang dekat. Intinya masing-masing mata (kanan dan kiri) melihat sendiri-sendiri, mata kanan melihat objek di kanan dan mata kiri melihat objek di sebelah kiri, sehingga tidak berpotongan pada suatu objek tertentu.

Sebenarnya kemampuan melihat secara stereoskopis ini dapat dikembangkan dengan latihan-latihan, sehingga tanpa alat sekalipun mata manusia normal dapat melihat secara stereoskopis. Kuncinya terletak pada kemampuan mempertahankan garis-garis penglihatan dari masing-masing mata agar tetap sejajar dan masih tetap mengusahakan gambar foto dalam keadaan pemfokusan yang tajam. Paine (1993) memberikan suatu cara untuk melatih kemampuan penglihatan stereoskopis ini dengan “latihan sosis” (lihat gambar 30). Caranya adalah fokuskan mata pada suatu objek yang terpisah satu sama lain, kemudian dekatkanlah telunjuk perlahan-lahan ke dalam area penglihatan. Apa yang terjadi ? Semakin jauh jari-jari telunjuk terpisah dan makin besar sosis yang terbentuk, semakin mendekati kesejajaran garis-garis penglihatan.

Paine halaman 69

Gambar 42. Latihan sosis untuk mengembangkan kemampuan melihat secara stereoskopis tanpa bantuan stereoskop (Sumber: Paine, 1993)

Lillesand and Kiefer (1994) memberikan pasangan gambar seperti ditunjukkan pada gambar 43 untuk uji kemampuan stereoskoipik. Bila gambar tersebut diamati melalui stereosop, lingkaran dan objek lainnya akan tampak dalam berbagai variasi jarak dari pengamat. Orang yang salah satu matanya lemah mungkin tidak dapat melihat secara stereoskopik

Gambar 43. Uji pengamatan stereoskopik (sumber: Lillesand dan Kiefer, 1994)

Tabel 2. Uji kenampakan stereoskopik berdasarkan gambar xx

BAGIAN I

Di dalam lingkaran yang ditandai angka 1 sampai 8 merupakan objek yang berbeda ketinggiannya. Objek bernomor 1 merupakan objek yang paling tinggi, selanjutnya tulsikan urutan kesan kedalaman objek yang ada di dalamnya. Terdapat kemungkinan beberapa objek mempunyai ketinggian yang sama, untuk itu tuliskan nomor yang sama untuk objek yang memiliki ketinggian yang sama.

Cincin 1

Bujur sangkar	(2)
Lingkaran pembatas	(1)
Segitiga	(3)
Titik	(4)

Cincin 6

lingkaran kiri bawah	()
lingkaran kanan bawah	()
lingkaran kanan atas	()
lingkaran kiri atas	()
cincin pembatas	()

Cincin 7

Bendera hitam dengan bola ()
 Lingkaran tipis ()
 Lingkaran hitam ()
 Anak panah ()
 Menara dan tanda silang ()
 Garis silang kembar ()
 Segitiga kembar ()
 Persegi empat hitam ()

Cincin 3

bujur sangkar ()
 cincin pembatas ()
 persilangan ()
 lingkaran kiri bawah ()
 lingkaran kiri atas ()

BAGIAN II

Tunjukkan ketinggian relative cincin 1 sampai 8

() () () () () () () ()
 Paling tinggi paling rendah

BAGIAN III

Gambarkan profil untuk mengenali ketinggian relative huruf-huruf dalam kata “Prüfungstafel” dan “stereoskopisches sehen”

PRÜFUNGSTAFEL

STEREOSKOPISCHES

SEHEN

Sumber: Lillesand dan Kiefer, 1994.

Jawaban uji stereoskopis tersebut ada di lampiran 1 pada bagian belakang buku ini.

Mengapa timbul kenampakan stereoskopis, sehingga pada foto udara stereo timbul kesan tiga dimensi? Ada beberapa hal yang secara simultan membentuk kesan tersebut, yakni :

1. Penyesuaian dan pemusatan

Penyesuaian yang berupa perubahan fokus mata terhadap jarak mempunyai hubungan yang penting dengan pemusatan (*convergence*) dalam penglihatan stereoskopis. Jika fokus mata tertuju pada objek yang dekat, maka mata akan mengumpul/memusat ke arah objek tersebut sehingga garis penglihatan dari dua mata berpotongan pada objek. Sebaliknya bila mata difokuskan pada objek jauh tak terhingga, maka garis-garis penglihatan mata akan sejajar/tidak berpotongan. Sementara pada pengamatan stereoskopis,

kedua belah mata harus mempertahankan garis-garis penglihatan agar tetap sejajar tetapi objek yang dilihat berjarak dekat. Pada beberapa pemula akan mengalami kesulitan untuk melakukan penglihatan stereoskopis, sehingga perlu banyak latihan. Pada tahap latihan ini beberapa kali mungkin akan terjadi kesalahan, tetapi dengan terus berlatih, maka mata kita akan terbiasa untuk melihat secara stereoskopis.

Latihan penglihatan stereoskopis sekaligus dapat digunakan untuk melatih mengorientasikan pasangan foto udara. Caranya pasangan foto udara yang bertampalan tersebut disusun secara benar arah jalur terbangnya. Setelah itu letakkan foto udara di bawah stereoskop. Tentukan sebuah objek yang mudah dikenali pada foto udara sebelah kanan dan kiri, misalnya perpotongan jalan, lekuk sungai, gedung, dan lain-lain. Letakkan ujung jari telunjuk kiri pada objek di foto kiri dan telunjuk kanan pada foto sebelah kanan. Gerakkan foto sebelah kanan sampai antara kedua ujung telunjuk melebur jadi satu. Setelah itu amatilah objek-objek lain di sekitarnya setelah kedua telunjuk di lepas dari pasangan foto udara tersebut. Objek-objek akan tampak tiga dimensional. Bila tetap saja tidak tampak tiga dimensional, kemungkinan terjadi kesalahan urutan foto udara atau posisi yang terbalik, atau kemungkinan terburuk adalah kedua mata tidak memiliki kekuatan penglihatan yang sama.

2. Persepsi kedalaman (*Depth perception*)

Sebenarnya manusia sering melakukan pengukuran dengan memanfaatkan persepsi kedalaman. Metode pendugaan kedalaman dapat dibedakan atas metode stereoskopik dan monoskopik. Orang yang pandangannya normal dikatakan memiliki pandangan binokuler, dan persepsi kedalaman melalui penglihatan binokuler disebut pengamatan dengan satu mata. Metode pendugaan jarak dengan satu mata disebut monoskopik. Jarak ke objek, atau kedalaman, dapat dilihat secara monoskopik berdasarkan atas; (1) ukuran relatif objek; (2) objek tersembunyi; (3) bayangan; dan (4) perbedaan dalam memfokuskan mata yang diperlukan untuk melihat objek yang jaraknya berbeda-beda (Wolf, 1993). Gambar 44 menggambarkan sebuah stadion yang menunjukkan bahwa gawang dari lapangan sepakbola

tampak berbeda ukurannya, gawang yang jauh tampak lebih kecil. Kenampakan lainnya adalah sebuah gedung yang tampak jauh karena berada di belakang stadion. Banyak contoh lain yang menunjukkan adanya persepsi kedalaman, misal bila kita memandang rel kereta api akan tampak bahwa antara dua rel yang terpisah pada bagaian rel yang jauh tampak menyempit atau bahkan menyatu.

Kelemahan dari metode monoskopik adalah penglihatan kedalaman hanya memungkinkan kesan kasar yang diperoleh tentang jarak ke objek. Sebaliknya, dengan metode stereoskopik diperoleh ketelitian yang lebih tinggi dalam penglihatan kedalaman yang diperoleh. Persepsi kedalaman merupakan aspek penting dalam fotogrametri, karena ia memungkinkan pembentukan model stereo tiga dimensional.

Gambar 45 menggambarkan secara skematis mengapa kesan kedalaman dapat timbul saat mata mengamati foto udara stereo. Gambar tersebut mengilustrasikan suatu objek menara yang direkam dari sudut pandang yang berbeda. Objek menara yang tergambar pada foto kiri diamati dengan mata kiri, objek menara yang sama tetapi tergambar pada foto sebelah kanan diamati dengan mata kanan. Konsentrasikan kedua mata agar benar-benar melihat secara terpisah, maka akan diperoleh kesan kedalaman sebagaimana bila melihat lukisan menara yang menampakkan puncak menara di titik P dan pangkal di D.

Kemampuan mata melihat secara binokuler, maka kalau mata difokuskan ke titik tertentu yang terjadi adalah sumbu optic dua mata memusat pada titik yang memotong sebuah sudut yang disebut sudut paralaktik (parallactic angle). Bila jarak objek dekat, maka sudut paralaktiknya besar, dan bila jarak objek lebih jauh sudut paralaktik menjadi semakin kecil (perhatikan gambar 45b). Pada gambar tersebut sumbu optic dua mata kanan dan kiri terpisah oleh jarak basis mata b_e (eye base). Untuk orang dewasa panjang basis mata adalah sekitar 65 mm – 69 mm. Bila mata difokuskan pada titik A maka sumbu optic memusat dan membentuk sudut paralaktik Φ_a , demikian pula bila memandang B akan terbentuk sudut paralaktik Φ_b . Kemudian otak kita secara otomatis

menghubungkan jarak D_A dan D_B dengan sudut paralaktik Φ_a dan Φ_b . Kedalaman antara A dan B sebesar $(D_B - D_A)s$ dari sini tampak perbedaan antara dua sudut paralaktik tersebut.

Hal 180 (Wolf)

Gambar 44. Persepsi kedalaman dengan ukuran relatif dan objek tersembunyi (Wolf, 1993)

(b)

Gambar ambil di Paine hal 74

(a)

Gambar 45. (a) Mekanika Pengamatan Stereoskopis (b) persepsi kedalaman stereoskopik sebagai fungsi sudut paralaktik (Paine, 1993)

Dengan penglihatan binokuler, kemudian mata difokuskan ke titik tertentu maka sumbu optik dua mata memusat pada titik yang memotong sebuah sudut yang disebut sudut paralaktik (*parralactic angle*). Semakin jauh suatu objek semakin kecil sudut paralaktiknya dan sebaliknya. Cermatilah gambar 32, sumbu optic dua mata Kanan dan Kiri terpisah oleh jarak mata kanan dan kiri yang disebut basis mata (*eyebase*). Jarak basis mata ini bervariasi antara masing-masing orang. Pada mata orang dewasa jarak basis mata ini berkisar antara 65 mm sampai 69 mm. Bila mata difokuskan pada titik A maka sumbu optic kedua mata memusat dan membentuk sudut paralaktik Φ_a . Disamping itu juga bila memandang objek B maka sumbu optic mata akan membentuk sudut Φ_b . Kemudian ada peran otak yang secara otomatis menghubungkan dari jarak titik A (J_A) dan jarak titik (J_B) dengan sudut paralaktik masing-masing titik Φ_a dan Φ_b . Kedalaman objek A dan B sebesar $J_B - J_A$ dan tampak sebagai perbedaan sudut paralaktik.

3. Noktah yang mengapung (*Floating dot*)

Noktah mengapung pada pengamatan pasangan foto udara stereo dengan menggunakan stereoskop terjadi karena adanya kerja otak. Gejala

noktah atau titik apung ini dapat diketahui dengan cara memberikan tanda/titik pada objek yang sama pada foto kanan dan kiri. Tutupkanlah transparansi pada foto udara stereo yang telah diorientasikan. Buatlah lingkaran kecil pada titik A yang terdapat pada foto udara sebelah kanan dan kiri. Selanjutnya amatilah titik A pada foto udara sebelah kiri dengan mata kiri dan titik A pada foto udara sebelah kanan dengan mata kanan. Kedua titik akan melebur menjadi satu di dalam otak. Akan terasa bahwa gambar lingkaran kecil pada titik A mengapung di atas daratan. Azas noktah mengapung ini dapat dipakai untuk memiondahkan titik dasar dari satu foto ke foto berikutnya dan untuk mengukur paralaks titik, dengan keuntungan berupa kecepatan dan ketepatan.

Dalam pengukuran paralaks dengan memanfaatkan azas apung, sebuah model stereo yang telah diorientasikan diamati dengan stereoskop, sementara dua tanda identik yang telah digoreskan pada kaca bening yang terpasang pada ujung paralaks bar yang disebut dengan tanda tengahan (half marks) diletakkan pada objek yang sama, satu di atas foto kanan dan satu di atas foto kiri. Bila dua tanda tengahan digerakkan saling mendekat, paralaks tanda tengahan akan makin membesar, dan sebaliknya. Keuntungan penggunaan tanda tengahan ini adalah bahwa tidak perlu objek referensi tertentu di sekitar titik tengah foto udara, karena titik tengahan dapat menempel langsung pada dasar suatu titik yang tergambar pada foto udara. Azas noktah mengapung ini dapat diilustrasikan oleh gambar 33.

Gambar lihat di Paine hal 86 atau lilesand & Kiefer hal 367

Gambar 46. Azas noktah mengapung (Sumber Paine,1993)

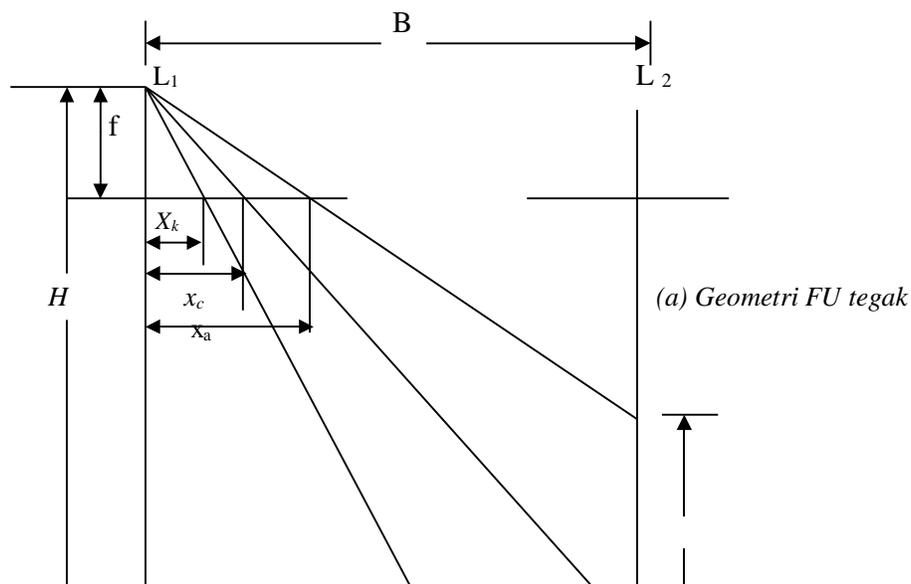
Pada gambar 46 di atas tampak bahwa lingkaran A dan A' dalam posisi lebih dekat satu sama lain daripada lingkaran B dan B'. Perbedaan posisi objek dari mata pengamat bila diamati secara stereoskopis, maka titik b sebagai peleburan titik B dan B' tampak mengapung di atas titik a (gambar hasil peleburan titik A dan A'). Bila diibaratkan titik a dan b sebagai gedung, maka titik a sebagai dasar gedung dan b sebagai puncak gedung. Sebagai uji coba, maka cobalah membuat dua buah lingkaran A dan B pada plastic transparansi. Titik A lebih dekat dengan titik pusat foto dan titik B agak jauh dari pusat foto. Buat juga lingkaran A' dan B' pada plastic transparan yang lain, kemudian orientasikan dan amati dengan stereoskop, apa yang terjadi?

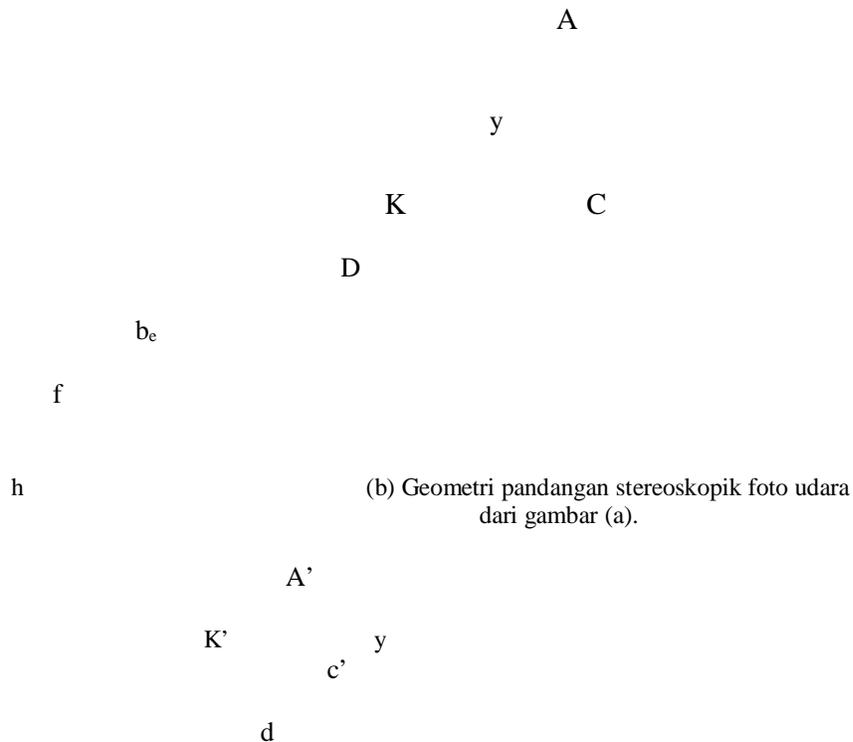
D. Pembengkakan Ke Atas (*Vertical Exaggeration*)

Salah satu gejala yang tampak dari penglihatan terhadap model stereo foto udara vertical adalah kesan pembengkakan ke atas dari objek-objek yang tinggi. Dalam kondisi normal memang skala tegak pada model stereo adalah skala tegak lebih besar dari skala mendatar. Sebuah gedung atau gunung akan tampak lebih tinggi daripada ukuran kenyataannya di medan. Adanya fenomena ini harus diperhitungkan oleh para penafsir foto udara agar tidak terjadi selisih yang besar antara hasil pengukuran di foto udara dengan kenyataan di lapangan, misalnya dalam perhitungan ketinggian, tingkat kemiringan lereng, dan lain-lain. Bahkan perbesaran tegak ini dapat mencapai 3 atau 4 kali lebih besar dari ukuran

sebenarnya. Adanya gejala ini sangat menguntungkan bagi seorang interpreter dalam bidang geomorfologi, karena kenampakan topografi menjadi sangat ekstrim, sehingga mudah dikenali.

Terjadinya perbesaran tegak ini terutama disebabkan oleh ketidakseimbangan antara nisbah fotografik antara **basis udara-tinggi terbang** (*photographic base-height ratio, B/H*) dan antara nisbah basis mata-tinggi pada pengamatan stereoskopis ($B_{e/h}$). B/H merupakan nisbah antara basis udara (*air base*) atau jarak antara dua stasiun pemotretan dengan tinggi terbang saat pemotretan, dan $B_{e/h}$ merupakan nisbah antara basis mata (*eye base*) atau jarak antara dua mata dengan jarak dari mata ke model stereo yang terlihat oleh mata. Untuk lebih jelas dalam memahami gambaran nisbah tersebut perhatikanlah gambar 48.





Gambar 48. Diagram sederhana untuk analisis perbesaran tegak

Gambar 48 (a) dan (b) masing-masing menggambarkan sebuah pemotretan sepasang foto udara tegak dan pandangan stereoskopis foto udara tersebut. Pada gambar 48 (a), B adalah basis udara, f adalah panjang fokus kamera, H adalah tinggi terbang di atas datum, Y adalah tinggi objek AC di medan dan D merupakan jarak KC di medan. Pada gambar 48 (b), i adalah jarak foto udara ke mata, b_e adalah basis mata, h adalah jarak dari mata ke model stereo yang terlihat, y adalah tinggi model stereo objek AC dan d adalah jarak horizontal model stereo KC.

Berdasarkan perbandingan segitiga sebangun pada gambar 48 (a) diperoleh formula untuk menghitung perbesaran vertical foto udara, yakni :

$$\frac{xa}{B} = \frac{f}{H - y}$$

Sehingga

$$xa = \frac{Bf}{H - y}$$

$$\frac{xc}{B} = \frac{f}{H}$$

$$xc = \frac{Bf}{H}$$

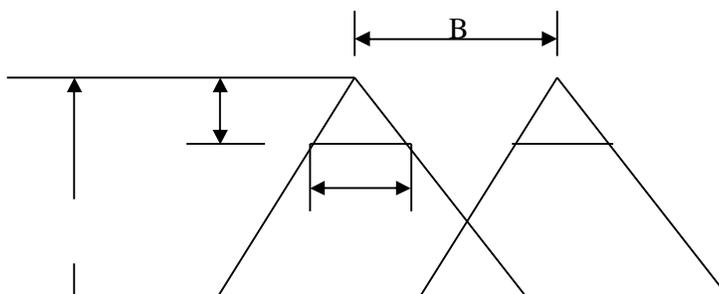
Dengan proses yang cukup panjang diperoleh suatu formula bahwa perbesaran tegak (V_e) merupakan nisbah basis udara dengan tinggi terbang dikalikan kebalikan dari nisbah basis mata dengan jarak pengamatan yang nyata atau secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$V_e = \frac{B}{H} \times \frac{h}{b}$$

Nisbah basis mata-tinggi pengamatan stereo (be/h) merupakan variable yang agak sulit diukur, dan sedikit berbeda-beda antara masing-masing orang. Uji yang dilakukan berulang-ulang menunjukkan bahwa nilainya sekitar 0,15.

Basis udara dan besarnya tampilan depan ($PE\%$) diperhitungkan dalam mengukur Vertical exaggeration (V_e). Oleh karena itu diperlukan data mengenai luas liputan foto di medan yang memiliki kaitan erat dengan basis udara. Basis udara sebagaimana diilustrasikan gambar 49 secara praktis untuk kemudahan pengukuran dapat didefinisikan sebagai sisa tampilan dikalikan dengan penyebut skala, tetapi secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$B = G - G \frac{PE}{100} = G \left(1 - \frac{PE}{100} \right)$$





Gambar 49. Nisbah Basis udara dan tinggi terbang (B/H)

$$\frac{H}{G} = \frac{f}{d}$$

Sehingga

$$H = \frac{fG}{d}$$

d = ukuran format foto

$$\frac{B}{H} = 1 - \left(\frac{PE}{100}\right) \frac{d}{f}$$

Contoh soal 1:

Sebuah foto udara vertical berformat 23 cm x 23 cm dibuat dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 154 mm. Jika tampalan depan foto udara tersebut 60 persen, berapakah kira-kira perbesaran tegaknya ?

Jawab :

$$\frac{B}{H} = 1 - \left(\frac{60}{100}\right) \times \frac{23 \text{ cm}}{154 \text{ mm}}$$

$$= 0,4 \times 1,49 = 0,60 \text{ (dibulatkan)}$$

$$V_e = 0,60 \times \frac{1}{0,15} = 4,0 \text{ kali}$$

Jika digunakan kamera dengan pajang fokus 300 mm, nisbah nisbah b/h sebesar 0,30 dan perbesaran tegaknya menyusut menjadi 2 kali.

Contoh soal 2:

Berdasarkan hasil pengukuran dari foto udara berskala 1: 20.000 yang diambil dari ketinggian 2.800 m, sebuah gedung tingginya 120 meter. Bila foto udara stereo tersebut memiliki tampalan 55 persen dan format 23 cm. Berapakah tinggi gedung sebenarnya ?

Jawab :

Diketahui :

Skala	= 1:20.000
H	= 2.800 meter
h	= 80 meter
PE	= 55 persen
d	= 23 cm

Catatan :

1. untuk mengetahui tinggi gedung sebenarnya diperlukan penghitungan besarnya V_e . Sementara pada soal tersebut tidak terpenuhi data panjang fokus, maka panjang fokus harus dicari terlebih dahulu.
2. Panjang fokus dapat dicari dari data tinggi terbang dan skala

$$\text{Panjang fokus } (f) = \frac{f}{H} = \frac{1}{20.000}$$

$$2000 f = H$$

$$2000 f = 2.800.000 \text{ mm}$$

$$f = \frac{2.800.000 \text{ mm}}{20.000}$$

$$f = 140 \text{ mm}$$

$$\frac{B}{H} = 1 - \left(\frac{65}{100}\right) \times \left(\frac{230 \text{ mm}}{140 \text{ mm}}\right)$$

$$= 0,35 \times 1,64 = 0,575$$

$$V_e = 0,575 \times \frac{1}{0,15} = 3,8 \text{ kali}$$

Bila gedung tersebut terukur 120 meter, maka tinggi sebenarnya gedung tersebut adalah 120 meter dibagi V_e atau $120/3,8$, yakni 31,6 meter.

Besarnya pembekakan ke atas dapat diubah lebih kecil dengan cara memperbesar persentase tampalan depan (ujung) atau ketinggian terbang atau kedua-duanya, tetapi dengan tetap mempertahankan skala yang sama. Misalnya pada contoh soal dua, seandainya tampalannya diganti menjadi 75 persen, maka akan diperoleh perbesaran tegak sebesar 2,7 kali. Lalu bagaimana halnya apabila tinggi terbangnya yang diubah? Perubahan tinggi terbang akan berpengaruh terhadap besarnya pembengkakan ke atas, makin tinggi pesawat akan semakin kecil pembengkakannya. Jadi untuk memperoleh foto udara yang tidak terlalu besar pembengkakan ke atasnya diperlukan penambahan tampalan depan dan ketinggian terbang.

Pada dua contoh di atas perbesaran tegak dapat digunakan untuk menentukan tinggi sebenarnya suatu objek, ini membuktikan bahwa penghitungan secara langsung ketinggian suatu objek dari foto udara tanpa memperhatikan perbesaran tegak akan menyesatkan. Oleh karena itu koreksi perbesaran tegak ini

dapat digunakan untuk mengetahui kemiringan sebenarnya suatu objek. Bila sebuah lereng terpengaruh oleh perbesaran tegak, berarti lereng sebenarnya lebih kecil dari kemiringan lereng yang tampak pada foto udara stereoskopis.

Untuk mengetahui derajat/persen kemiringan lereng pada pengamatan secara stereoskopis agak sulit. Miller sebagaimana dikutip Paine (1993) menggunakan suatu penaksir kemiringan lereng (slope estimator), alat ini terdiri atas sebuah engsel pangkal yang dieratkan pada persendian dengan pukulan palu (lihat gambar 50).

Gambar 50. Cara pengukuran lereng dengan slope estimator
(Sumber: Paine,1993)

Cara pengukurannya adalah slope estimator di letakkan di atas salah satu foto udara stereo yang sedang diamati, di bawah stereoskop. Setelah itu orientasikan dan setel alat tersebut sampai bidang lerengnya sejajar atau sebangun dengan lereng yang hendak diukur pada model stereo. Lihatlah objek pada model stereo dan slope estimator secara bergantian, aturlah lereng penaksir sampai betul-

betul mendekati bentuk dari model. Ukurlah jarak antar kaki slope estimator (alas) yang diberi symbol b (lihat gambar 38). Cara ini diulang beberapa kali dsampai diperoleh suatu harga rata-rata. Sementara sisi c ukurannya tetap. Penentuan lereng dilakukan dengan menggunakan rumus Miller, yakni :

$$\text{Lereng persen yang tampak} = \left(\sqrt{\left(\frac{4c^2}{b^2} - 1 \right)} \right) \times 100$$

Lereng persen yang benar adalah lereng yang tampak pada pengamatan stereoskopis dibagi dengan faktor pembengkokan vertical. Menurut hasil penelitian Miller sebagaimana dikutip Paine (1993) menyatakan bahwa berdasarkan data dari 22 penafsir yang terlatih, yang masing-masing mengukur 23 lereng yang berbeda diperoleh kesimpulan bahwa cara ini lebih cepat dan lebih mudah daripada dengan cara paralaks.

Contoh soal :

Sebuah model stereo yang direkam dengan menggunakan kamera yang memiliki panjang fokus 155 mm menggambarkan sebuah gunung setelah diukur dengan slope estimator panjang alasnya 4 cm dan kaki 3,5 cm. Bila model stereo tersebut mempunyai tampilan depan 65 persen dan format 23 cm. Berapakah kemiringan lereng gunung tersebut ?

Jawab :

1. Carilah terlebih dahulu V_e

a. Menentukan rasio B/H

$$\frac{B}{H} = 1 - \left(\frac{65}{100} \right) \times \left(\frac{230 \text{ mm}}{155 \text{ mm}} \right)$$

$$= 0,35 \times 1,48 = 0,52$$

b. Menghitung V_e

$$V_e = 0,52 \times \frac{1}{0,15} = 3,5 \text{ kali}$$

2. Hitunglah kemiringan lereng yang tampak pada stereo model

Diketahui $c = 3,5 \text{ cm}$

$b = 4,0 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \text{Lereng persen yang tampak} &= \left(\sqrt{\left(\frac{4(3)^2}{4^2} - 1 \right)} \right) \times 100 \\ &= 111,80 \text{ persen} \end{aligned}$$

3. Membagi lereng terukur dengan nilai perbesaran tegak

$$\frac{111,80}{3,5} = 32 \text{ persen (dibulatkan)}$$

Jadi lereng sebenarnya di medan adalah 32 persen.

Di satu sisi adanya perbesaran vertical ini dapat menyedatkan seorang penafsir foto udara, tetapi di sisi lain pembengkakan vertical ini berguna untuk memperjelas relief dan untuk membedakan objek-objek yang mempunyai ketinggian.

E. Pengukuran Paralaks Stereoskopis

Paralaks stereoskopik adalah perubahan kedudukan gambaran suatu titik pada foto udara yang bertampalan sehubungan dengan perubahan kedudukan kamera (Sutanto, 1994). Paralaks ini disebut paralaks absolute atau paralaks total. Pergeseran letak paralaks hanya terjadi sejajar dengan jalur terbang.

1. Pengukuran tinggi dengan paralaks

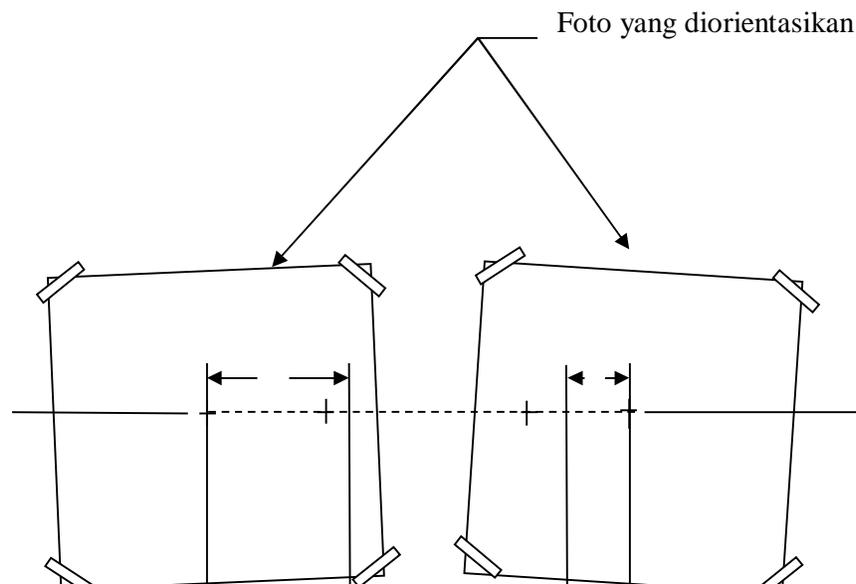
Paralaks adalah kenampakan perubahan (*displacement*) posisi suatu objek terhadap suatu kerangka rujukan, yang disebabkan oleh perpindahan posisi pengamat. Perbedaan paralaks antara satu objek dengan objek lainnya

terjadi karena perbedaan ketinggian objek antara kedua titik tersebut dan perbedaan posisi terhadap sensor.

Pengukuran tinggi berdasarkan paralaks objek pada foto udara berpasangan dapat diukur dengan paralaks bar (stereometer). Untuk mempermudah pemahaman terhadap konsep pengukuran paralaks perhatikan gambar 51. Cara pengukurannya, orientasikan pasangan foto udara sehingga tampak perwujudan tiga dimensi, tentukan titik tengah foto kanan dan kiri, titik tengah pindahan (conjugate principal point), ukurlah basis foto, kemudian carilah nilai rO_1 dan rO_2 pasangkan tanda fixed pada objek foto kiri dan half mark pada objek yang sama di foto sebelah kanan. Setelah proses tersebut maka akan diperoleh konstanta batang paralaks yang selanjutnya batang paralaks ini siap digunakan untuk mengukur titik manapun fi arah efektif.

Ambil dari Wolf hal 213

Gambar 51. Diagram skematik batang paralaks



A

A'

 d_b

D

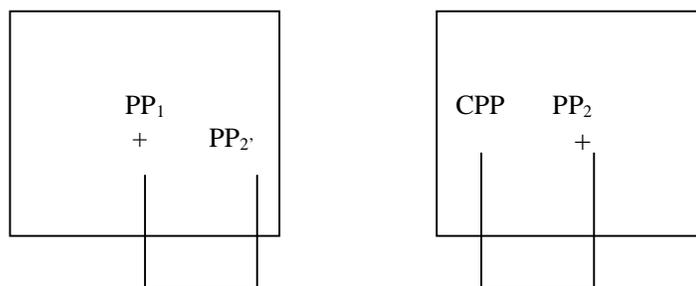
Gambar 52. Pengukuran paralaks pada pasangan foto stereo

Dari gambar 51, paralaks titik a dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$Pa = x_a - x_a' = D - (K - ra) = D - d = (D - K) + ra$$

Langkah-langkah kerja yang harus dilakukan secara berurutan untuk mengukur ketinggian objek dengan paralaks bar adalah sebagai berikut :

- a. Ukurlah basis foto kanan dan kiri (diberi simbol b)
 - 1) Basis foto kanan diketahui dengan cara mengukur (dengan menggunakan penggaris) jarak PP_2 ke CPP . Basis foto kanan diberi symbol b_2
 - 2) Basis foto kiri diketahui dengan cara mengukur jarak PP_1 ke PP_2 . Basis foto kiri diberi simbol b_1



Gambar 53. Cara mengukur basis foto kiri dan kanan

b. Menentukan konstanta batang paralaks (C)

- 1) Carilah konstanta batang paralaks untuk foto kiri (C_1), dengan menggunakan formula $C_1 = b_1 - r_{O_1}$

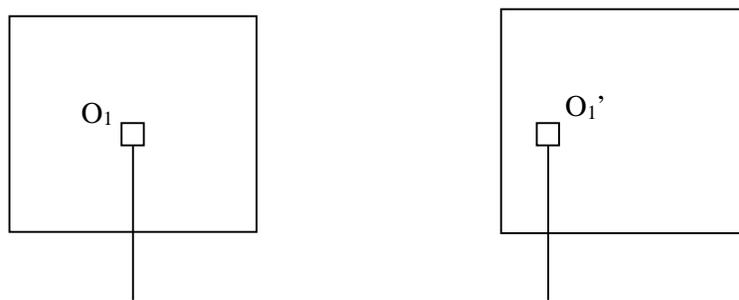
Nilai r_{O_1} diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan stereometer. Caranya adalah dengan menghubungkan noktah pada lensa batang paralaks sebelah kiri (berupa symbol titik atau plus) yang disebut titik fixed mark di O_1 atau foto sebelah kiri dan noktah dari lensa kanan di CPP.

- 2) Carilah konstanta batang paralaks untuk foto kanan (C_2) dengan menggunakan formula $C_2 = b_2 - r_{O_2}$

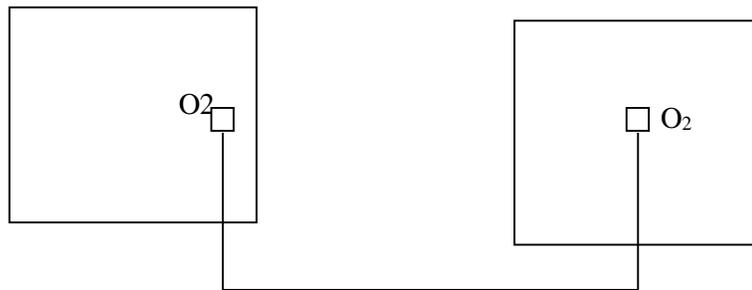
Konstanta batang paralaks yang digunakan untuk pengukuran adalah konstanta rata-rata foto kanan dan kiri ditentukan dengan formula $C = C_1 + C_2$

c. Menentukan nilai mikromikrometer r_{O_1} dan r_{O_2}

- 1) r_{O_1} diperoleh dengan dari angka yang tertera pada mikrometer batang yang telah disetel sedemikian rupa sehingga half mark dan fixed mark batang paralaks tepat berada di atas titik O_1 dengan O_1'
- 2) r_{O_2} diperoleh dari angka yang tertera pada mikrometer batang yang telah disetel sedemikian rupa sehingga half mark dan fixed mark batang paralaks tepat berada di atas titik O_2 dengan O_2' (lihat gambar 54 dan 55).

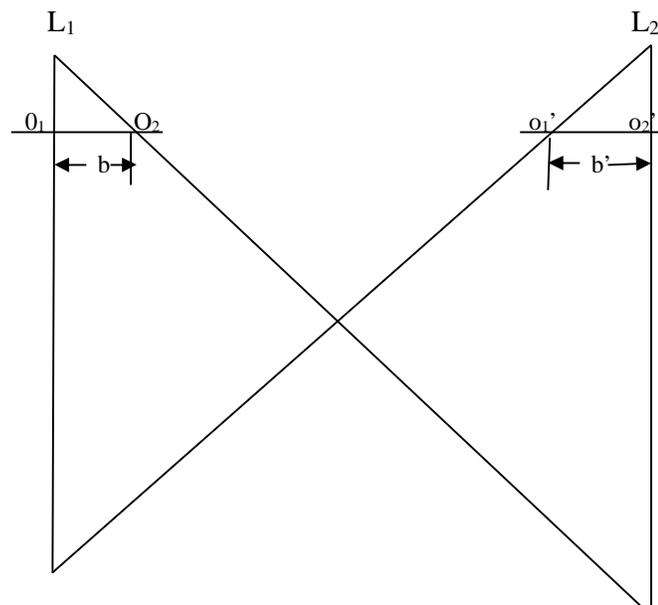


Gambar 54. Half mark dan fixed mark paralaks bar, menghubungkan titik O_1 dengan O_1'



Gambar 55. Half mark dan fixed mark paralaks bar, menghubungkan titik O_2 dengan O_2'

- d. Hubungkan titik O_1 dan O_1' (atau antara PP dengan CPP bagi pengukur yang menggunakan symbol PP untuk titik tengah foto dan CPP untuk O_1' dengan menggunakan batang paralaks, juga antara O_2 dengan O_2' . Catatlah nilai yang ada pada mikrometer.
- e. Tentukan paralaks titik dasar P_{O_1} dan P_{O_2} . Berdasarkan skema gambar 52 diperoleh paralaks foto sebelah kiri bagi titik tengah (*principal point*) atau O_1 adalah $P_{O_1} = x_{O_1} - (-x'_{O_1}) = O - (-b') = b'$. Paralaks O_2 ialah $P_{O_2} = x_{O_2} - x'_{O_2} = b - O = b$. Secara sederhana dapat dinyatakan bahwa paralaks titik utama medan foto sebelah kiri adalah basisi foto kiri b' yang diukur pada sebelah kanan dan paralaks titik utama medan sebelah kanan adalah basis foto b yang diukur pada foto sebelah kiri. Pembacaan nilai r_{O_1} dan r_{O_2} dengan paralaks bar digunakan untuk menentukan konstanta (C) penyetelan rata-ratanya.





Gambar 56. Paralaks pada titik utama

- f. Tentukan paralaks titik yang akan diukur, misal titik a dan b, maka titik tersebut diberi simbol P_a dan P_b

$$P_a = C + ra$$

$$P_b = C + rb$$

- g. Menentukan basis udara (B), jarak antar pemotretan di udara

Basis foto dapat diperoleh dengan cara mengukur sisa dari tampalan depan (searah jalur terbang) kemudian dikalikan dengan penyebut skala. Misalnya pada foto udara dengan format 23 cm x 23 cm daerah yang bertampalan 14 cm, yang berarti pasangan foto tersebut memiliki tampalan sebesar 61% (berasal dari 14 cm/23 cm), maka sisa tampalannya adalah 7 cm (berasal dari 23 cm–14 cm=7 cm). Bila skala foto udara tersebut adalah 1:30.000, maka basis udara foto udara adalah 7 cmx30.000=21.000 cm = 210 meter

- h. Menentukan fokus kamera yang digunakan (dapat diperoleh pada informasi tepi)

- i. Memasukkan data tersebut pada rumus berikut :

$$H_A = H - \frac{Bf}{P_a}$$

$$H_B = H - \frac{Bf}{P_b}$$

H (tinggi terbang) dan f (fokus) biasanya tertera pada informasi tepi foto udara. Diantara kedua informasi tersebut paling tidak salah satunya ada, karena

bila salah satunya ada maka satu yang lainnya dapat dicari dengan cara perbandingan dengan skala foto.

Contoh soal :

Sepsang foto udara yang bertampalan dibuat dari ketinggian 1230 meter di atas permukaan air laut, dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 152,4 mm. Basis udaranya sebesar 390 meter. Dengan foto yang diorientasikan secara tepat, pembacaan batang paralaks pada titik utama o_1 dan o_2 masing-masing adalah 12,57 mm dan 13,04 mm. Pada foto kiri basis foto terukur 93,60 mm, dan basis foto kanan terukur sebesar 93,20 mm. Sementara pembacaan batang paralaks pada titik A dan B sebesar 10,90 mm dan 15,25 mm. Hitunglah ketinggian dari titik A dan B !

Jawab :

Diketahui :

$$\begin{aligned} H_{dpal} &= 1230 \text{ m} \\ f &= 152,4 \text{ mm} \\ B &= 390 \text{ m} \\ b_1 &= 93,60 \text{ mm} \\ b_2 &= 93,20 \text{ mm} \\ ro_1 &= 12,57 \text{ mm} \\ ro_2 &= 13,04 \text{ mm} \\ ra &= 10,90 \text{ mm} \\ rb &= 15,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

a. Konstanta batang paralaks

$$C_1 = b_1 - ro_1 = 93,60 - 12,57 = 80,73 \text{ mm}$$

$$C_2 = b_2 - ro_2 = 93,73 - 13,04 = 80,69 \text{ mm}$$

$$C = \frac{80,73 \text{ mm} + 80,68 \text{ mm}}{2} = 80,71 \text{ mm}$$

b. Mencari paralaks titik a dan b

$$P_a = C + r_a = 80,71 + 10,96 = 91,67 \text{ mm}$$

$$P_b = C + r_b = 80,71 + 15,27 = 95,98 \text{ mm}$$

c. Tinggi tempat A (h_A)

$$h_A = H - \frac{Bf}{P_a} = 1230 \text{ m} - \frac{390 \text{ m} (152,4 \text{ mm})}{91,67 \text{ mm}} = 581 \text{ m}$$

$$h_B = H - \frac{Bf}{P_b} = 1230 \text{ m} - \frac{390 \text{ m} (152,4 \text{ mm})}{95,98 \text{ mm}} = 611 \text{ m}$$

Bila A sebagai dasar (datum) suatu gedung bertingkat dan B sebagai atap gedung, maka tinggi gedung tersebut adalah 30 m (berasal dari 611 m –581 m). Bila gedung tersebut masing-masing lantainya mempunyai ketinggian 5 meter, maka dapat diduga bahwa gedung tersebut mempunyai 6 lantai.

2. Pengukuran tinggi dengan kontrol medan

Pengukuran ketinggian objek-objek yang terekam pada foto udara akan menyita waktu lebih banyak bila harus dihitung per objek. Oleh karena diperlukan suatu cara agar perhitungan menjadi lebih cepat dengan tanpa meninggalkan ketelitian yang dapat diterima. Cara yang ditempuh dalam fotogramteri adalah dengan menggunakan rumus kontrol medan. Artinya, bila telah diketahui ketinggian salah satu dari objek yang terekam pada foto udara, maka seluruh ketinggian objek yang tergambar pada foto dapat dihitung ketinggiannya. Salah satu objek yang telah diketahui ketinggiannya inilah yang disebut dengan titik referensi atau titik kontrol medan. Suatu contoh kasus, perbukitan sewu di Gunung Kidul Provinsi DIY, perbukitan yang sedemikian banyak bila ingin diketahui ketinggian masing-masing bukit tersebut dapat dilakukan dengan hanya mengukur satu bukit saja yang tergambar pada foto udara. Perhitungan ketinggian tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan kaidah paralaks, yang diperlukan untuk titik-titik yang ingin diketahui

ketinggiannya adalah cukup dengan mengukur paralaks masing-masing titik tersebut.

Langkah-langkah mengukur ketinggian objek pada foto udara dengan menggunakan titik referensi adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui panjang fokus kamera yang digunakan saat pemotretan dan ketinggian terbang pesawat terbang saat melakukan pemotretan
2. Mengetahui ketinggian titik yang akan menjadi titik referensi (agar lebih mudah carilah titik yang ketinggiannya rendah)
2. Mengetahui konstanta batang paralaks
3. Mengukur nilai r dari masing-masing titik yang akan diukur dengan menggunakan paralaks bar
4. Menghitung paralaks titik-titik yang ingin diketahui ketinggiannya
5. Menghitung beda paralaks antar masing-masing titik

Contoh soal :

Sepasang foto udara diperoleh dari hasil perkaman kamera yang memiliki fokus 152,6 mm pada ketinggian terbang 2100 meter. Beberapa titik ingin diketahui ketinggiannya, misalnya titik A, B, C, dan D. Untuk mengetahui ketinggian titik-titik tersebut dilakukan pengukuran dengan paralaks bar yang telah distel dengan foto udara tersebut, sehingga diperoleh konstatanta batang paralaks sebesar 72,70 mm. Selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap titik-titik tersebut dengan paralaks bar, sehingga diperoleh nilai r masing-masing titik, yakni $r_A=20,22$ mm, $r_B=21,10$ mm, $r_C= 19,93$ mm, dan $r_D=20,17$ mm. Tempat yang paling rendah adalah titik C yang dijadikan sebagai referensi, yakni 100 m. Berapakah tinggi tempat titik A, B, dan D ?

Jawab :

Diketahui :

$$f = 152,6 \text{ mm}$$

$$A = 2100 \text{ m}$$

$$r_A = 20,22 \text{ mm}$$

$$r_C = 19,93 \text{ mm}$$

$$r_B = 21,10 \text{ mm}$$

$$r_D = 20,17 \text{ mm}$$

Konstanta (C) = 72,70 mm

$h_C = 100 \text{ m}$

$HC = 2100 \text{ m} - 100 \text{ m} = 2000 \text{ m}$

a. Menentukan nilai paralaks masing-masing titik

$$P = C + r_x$$

$$P_A = 72,70 \text{ mm} + 20,22 \text{ mm} = 92,92 \text{ mm}$$

$$P_B = 72,70 \text{ mm} + 21,10 \text{ mm} = 93,80 \text{ mm}$$

$$P_C = 72,70 \text{ mm} + 19,93 \text{ mm} = 92,63 \text{ mm}$$

$$P_D = 72,70 \text{ mm} + 20,17 \text{ mm} = 92,87 \text{ mm}$$

b. Mencari beda paralaks

Untuk mencari beda paralaks (ΔP) masing-masing titik, maka jadikanlah paralaks titik yang paling rendah sebagai pengurang. Pada pengukuran beda paralaks titik, maka jumlah komponen ΔP selalu berbeda satu dari jumlah titik yang diukur paralaksnya. Misalnya, ada 4 titik akan diperoleh 3 nilai beda paralaks, karena pada titik dengan paralaks terendah tidak ada beda paralaks atau bernilai nol.

$$\Delta P_1 = P_A - P_C = 0,29 \text{ mm}$$

$$\Delta P_2 = P_B - P_C = 1,17 \text{ mm}$$

$$\Delta P_3 = P_D - P_C = 0,24 \text{ mm}$$

Catatan : Jadikan paralaks terkecil dari suatu titik sebagai pengurang masing-masing nilai paralaks.

c. Memasukkan nilai-nilai ΔP tersebut ke dalam rumus untuk mencari ketinggian

$$h_A = h_C + \frac{\Delta P_1 (H - h_C)}{P_A} = 100 \text{ m} + \frac{0,29 \text{ mm} (2100 \text{ m} - 100 \text{ m})}{92,92} = 106 \text{ m}$$

$$h_B = h_C + \frac{\Delta P_2 (H - h_C)}{P_B} = 100 \text{ m} + \frac{1,17 \text{ mm} (2100 \text{ m} - 100 \text{ m})}{93,80 \text{ mm}} = 125 \text{ m}$$

$$h_C = h_C + \frac{0 (H - h_C)}{P_C} = 100 \text{ m} + \frac{0 \text{ mm} (2100 \text{ m} - 100 \text{ m})}{92,63 \text{ mm}} = 100 \text{ m}$$

$$h_D = h_C + \frac{\Delta P_3 (H - h_C)}{P_d} = 100 \text{ m} + \frac{0,24 \text{ mm} (2100 \text{ m} - 100 \text{ m})}{92,87 \text{ mm}} = 105 \text{ m}$$

Bila pada foto udara tersebut terdapat titik-titik yang ingin diketahui ketinggiannya, maka cukup diukur nilai paralaksnya, yang selanjutnya dapat dihitung sesuai dengan rumus di atas. Berapapun jumlah titik yang akan diukur, maka tidak perlu dilakukan pengukuran di lapangan, tetapi cukup diukur paralaksnya.

BAB VI

ORTOFOTOGRFI

A. Pengertian

Ortofoto merupakan suatu reproduksi foto yang telah dikoreksi beberapa penyimpangannya, seperti kemiringan (*tilt*), pergeseran topografi, dan terkadang sampai pada distorsi lensanya (Paine, 1993). Dengan kata lain Ortofoto adalah foto yang menyajikan gambaran objek pada posisi yang benar. Oleh karena itu ortofoto secara geometrik ekuivalen dengan peta garis konvensional dan peta simbol planimetrik yang tentu saja menyajikan objek ortografik. Beda utama

antara ortofoto dengan peta adalah bahwa ortofoto dibentuk oleh gambar kenampakan, sedangkan peta dibentuk dengan menggunakan garis dan symbol yang digambarkan sesuai dengan skala untuk merefleksikan kenampakan. Ortofoto dibuat dari pasangan-pasangan foto perspektif (biasanya foto udara) stereoskopis atau triplikat foto udara dengan suatu proses yang disebut *rektifikasi diferensial* sedemikian rupa sehingga gambar fotografis yang terjadi berada pada kedudukan ortografis yang benar. Ortofoto juga berbeda dengan suatu foto yang dibetulkan secara baku yakni dengan membetulkan foto udara dari kemiringan, sementara pada ortofoto yang dibetulkan tidak hanya kemiringan tetapi juga pergeseran topografinya.

Rektifikasi diferensial dapat meniadakan pergeseran letak gambar oleh kemiringan fotografik dan relief. Pergeseran letak oleh kemiringan sumbu optic kamera terjadi pada tiap foto udara yang pada saat perekaman bidang fotonya miring terhadap bidang datum. Rektifikasi dilakukan untuk menghapus efek kemiringan sumbu dan hasilnya ekuivalen dengan foto tegak. Di dalam proses peniadaan pergeseran letak oleh relief pada sembarang foto, variasi skala harus dihapus sehingga skala menjadi sama bagi seluruh foto. Pada akhirnya tingkat kebenaran ortofoto adalah sama dengan peta planimetrik. Meskipun demikian ada suatu keterbatasan ortofoto, yakni pergeseran oleh relief bagi permukaan tegak seperti batang pohon, tembok bangunan dan sebagainya yang tidak dapat diiadakan.

Rektifikasi diferensial jika digunakan untuk membuat ortofoto memerlukan pemotretan lagi foto yang asli yang tentu saja akan memakan biaya dan tidak praktis. Oleh karena itu pemotretan lagi bagi keseluruhan gambar sekaligus diganti dengan pemotretan potongan-potongan yang sangat kecil yang mungkin jumlahnya ribuan untuk satu foto udara yang berukuran 23 cm x 23 cm atau dengan serangkaian jalur-jalur yang sempit. Potongan-potongan atau jalur-jalur ini semuanya dibuat berskala sama dengan menjaga agar celah penyiaman secara terus-menerus kontak dengan suatu model medan berdimensi tiga. Ortofoto yang dihasilkan secara planimeteris betul, memungkinkan pengguna dapat

melakukan pengukuran secara teliti mengenai jarak, luas dan arah secara langsung pada ortofoto (Paine, 1993).

Menurut USGS perbedaan fotogrametri analog dengan fotogrametri digital secara pokok adalah:

1. Foto udara yang diperoleh dengan menggunakan perpektif konvensional mengandung displacement gambar yang disebabkan oleh kemiringan (tilt) kamera dan relief medan (topografi). Foto udara tidak memiliki skala yang seragam. Kita tidak dapat mengukur jarak pada foto udara sebagaimana yang dapat dilakukan pada peta, karena ia memang bukan peta.
2. Efek tilt dan relief dapat dihilangkan dari foto udara melalui proses rektifikasi untuk membuat
3. Ortofoto mempunyai skala yang seragam. Ortofoto merupakan sebuah peta foto.
4. Karena orthophoto mempunyai skala yang seragam maka memungkinkan untuk melakukan pengukuran secara langsung sebagaimana pada peta.
5. Ortofoto memungkinkan untuk dijadikan sebagai peta dasar bagi peta informasi lainnya melalui penumpang susunan (*overlay*).

B. Keunggulan dan Kelemahan Ortofoto

Ada beberapa keunggulan dan kerugian penggunaan ortofoto, meskipun secara konsep geometrikal ortofoto seakan sempurna karena telah mengalami berbagai koreksi dan reproduksi, tetapi tetap saja memiliki kelemahan. Berikut ini dikemukakan keunggulan dan kelemahan ortofoto adalah

1. Keunggulan ortofoto
 - a. Dibandingkan dengan peta, ortofoto mempunyai detail informasi yang melimpah. Dengan kata lain, ortofoto mempunyai kualitas piktorial foto udara yang luar biasa karena objek di medan yang jumlahnya tak terhingga dapat diidentifikasi dan dikenali
 - b. Ortofoto menampilkan informasi kenampakan bentang alami dan bentang budaya dengan gambar-gambar fotografis yang teliti dan dapat diekstrak secara mudah

- c. Ortofoto menyajikan secara potensial semua detail fotografis yang tampak pada foto udara yang asli.
- d. Dibandingkan dengan foto udara biasa, ortofoto lebih dapat menunjukkan lokasi semua fenomena yang tampak secara benar, sehingga memungkinkan pengukuran-pengukuran luas, jarak, dan jurusan secara tepat pula. Bahkan pengukuran-pengukuran tersebut dapat dilakukan secara langsung sebagaimana pengukuran terhadap peta.
- e. Ortofoto dapat dijadikan sebagai peta dasar bagi para surveyor dan peneliti, ahli-ahli sains untuk menggambarkan hasil pengamatan medan. Alasannya adalah karena ortofoto dapat dikorelasikan dengan objeknya di medan, bahkan ortofoto ini dapat dijadikan sebagai peta dasar untuk membuat peta jalur terbang.
- f. Ortofoto dapat dijadikan sebagai alat komunikasi yang mudah dalam pembahasan mengenai bagian dari permukaan bumi, karena ortofoto mudah dibaca oleh orang awam sekalipun. Misalnya seorang pemilik tanah yang hendak menjual tanahnya kepada orang lain, maka orang lain akan dengan sangat mudah mengenali tanah tersebut dalam kaitannya dengan tanah lain dan pemanfaatannya.
- g. Ortofoto dapat digunakan sebagai peta dasar (*base map*) planimetrik untuk menggambarkan garis tinggi (kontur), dan peta hasil yang diperoleh disebut peta foto orto topografik.
- h. Ortofoto dapat digunakan sebagai peta tanpa perlakuan kartografik, yang dapat lebih ditonjolkan dan dilengkapi dengan garis, simbol, nama, dan lain-lain. Dapat pula garis, simbol, nama, dan unsur-unsur peta lainnya diletakkan pada ortofoto dengan cara tumpang susun ortofoto dengan peta.
- i. Dibandingkan dengan peta garis yang dibuat melalui kompilasi stereoploter, peta ortofoto pada umumnya dapat dibuat lebih cepat dan murah (terutama bagi peta berskala kecil, misalnya wilayah kota atau peta daerah yang kenampakan fisik dan kulturalnya padat).
- j. Ortofoto memungkinkan pembuatan peta daerah yang tidak terpetakan, karena adanya kendala-kendala fisik, seperti medan sulit dijangkau, daerah

berbahaya, dan lain-lain dengan cara tersendiri, dan memungkinkan revisi peta dapat dilakukan sesering mungkin.

- k. Dari suatu ortofoto dapat diturunkan berbagai jenis peta tematik sesuai dengan keperluan

2. Kelemahan ortofoto

Beberapa kelemahan yang dimiliki oleh ortofoto, baik kelemahan yang berkaitan dengan karakteristiknya maupun yang berkaitan dengan teknik pengadaannya. Berikut ini kelemahan-kelemahan dari ortofoto :

- a. Ortofoto kurang optimal penggunaannya untuk penafsiran detail karena hilangnya resolusi
- b. Karena telah mengalami koreksi pergeseran, maka pada ortofoto tidak ada pergeseran, sehingga pengamatan secara etereoskopis sulit dilakukan, disamping itu perhitungan tinggi objek berdasarkan paralaks atau kemiringan tidak dapat dilakukan.
- c. Pembuatan ortofoto memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit disamping tingkat kerumitannya.
- d. Untuk pemetaan daerah yang luas dan relatif datar, pemanfaatan ortofoto kurang efektif.

C. Teknik Pembuatan Ortofoto

Untuk dapat membuat ortofoto diperlukan beberapa persyaratan khusus, diantaranya adalah pemilihan kedudukan geografis yang tepat untuk tempat pengambilan foto, sudut matahari yang betul, film yang mempunyai resolusi yang baik, jarak titik api yang tepat, ketinggian terbang yang seimbang dengan panjang fokus, tampalan ujung dan tepi yang memenuhi syarat. Dalam beberapa hal sebenarnya fotografi yang sudah ada dapat digunakan untuk menghasilkan suatu ortofoto, tetapi biasanya untuk keperluan tersebut perlu mengadakan misi penerbangan khusus agar diperoleh foto yang tidak banyak memiliki kesalahan..

Pembuatan ortofoto dapat dilakukan berdasarkan jenis alat yang digunakan. Alat pembuat ortofoto meliputi alat proyektor optic serentak (*online*),

proyektor optic secara terpisah (*offline*), elektronik dan digital (microdensitometer). Pembuatan ortofoto memerlukan perubahan fotografi konvensional dengan menggunakan sebuah ortofotoskop proyeksi ganda. Model ortofotoskop yang kini banyak digunakan adalah T-64 dari USGS (lihat gambar 57), Gigas-Zeiss Ortho Projektor GZ-1, Wileovioplan OR, Kelch K-320 Orthoscan. Sementara untuk ortofoto digital yang diolah dari citra digital memerlukan cara berbeda.

Dalam perkembangannya model ortofoto semakin canggih dan rumit, tetapi azas dasarnya adalah sama. Kebanyakan ortofoto dibuat dengan menggunakan diapositif dan sistem proyeksi optis yang langsung yang menggunakan azas anaglif. Di dalam sistem anaglif multipleks, pengamatan stereoskopis dilakukan dengan pengamatan model lewat kacamata merah dan biru (berguna sebagai filter), masing-masing mata dengan warna yang berbeda. Mata kiri hanya melihat satu foto dan mata kanan hanya melihat satu foto, secara simultan dengan tetap mempertahankan kesejajaran pandangan masing-masing mata. Apabila proyektor-proyektor diorientasikan secara benar, operator akan melihat model tiga dimensi yang benar di dalam daerah tampilan. Selain sistem anaglif dikembangkan pula sistem lainnya seperti sistem lempeng polarisasi dan sistem pemutus gambar stereo.



Gambar 57. Ortofotoskop T-64 dari USGS

Azas anaglif digunakan pula dalam pembuatan ortofoto, gambar 40 a dan 40b menggambarkan teori dasar ortografi proyeksi ganda dengan menggunakan azas anaglif. Sebuah anaglif terdiri atas dua buah gambar pada daerah tampalan sepasang foto udara stereoskopis yang di saling diimpitkan. Gambar yang diimpitkan ini merupakan gambar yang dihasilkan dari system optis proyeksi ganda ortofotoskop dengan menempatkan filter-filter merah dan biru di antara sumber cahaya dengan diapositif. Model tiga dimensi tersebut ketika diamati melalui kacamata berwarna diproyeksikan dengan ortofotoskop ke suatu meja film yang dapat dinaikturunkan. Meja tersebut membawa suatu film fotografis (bidang film) yang hanya peka terhadap sinar biru, bila divahayai dan dicuci, film akan menjadi ortofoto negatif. Beberapa ortofotoskop bekerja dengan cara kerja yang agak berbeda-beda.

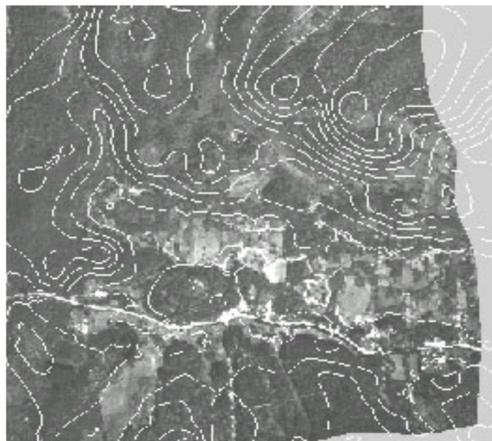
Mekanisme penyiaman dilakukan dengan mengamati film yang belum dikenai cahaya. Di atas film tersebut terdapat suatu tabir (2 lembar) berwarna gelap. Tabir mempunyai sebuah lubang kecil sebagai tempat cahaya menyinari film, sekeliling celah terdapat suatu piringan kecil, bulat dan berwarna putih yang disebut lempeng. Operator mengamati bagian dari model stereo yang diproyeksikan ke lempeng. Tabir dibuat sedemikian rupa sehingga celah penyiam dapat digerak-gerakkan pada arah x dan y untuk mengamati model secara keseluruhan.

(1)

(2)

Gambar 57a. (1). Azas bekerja sebuah ortofotoskop (2). Tabir dua lembar yang dapat digerakkan dari ortofotoskop model T-64

Ortofoto dapat dibuat secara cepat dan ekonomis dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Karena tingkat keketelitiannya tinggi, maka ortofoto dapat menggantikan peta-peta garis konvensional. Hanya saja kualitas gambar ortofoto biasanya lebih rendah dari fotografi baku. Masalah yang timbul dalam menjaga kualitas ortofoto adalah (1) sulitnya menjaga film agar tetap bersih dan bebas dari debu dan goresan selama tahap-tahap produksi; (2) kesulitan pencocokan rona antar jalur-jalur penyiaman, garis-garis siam yang tampak, gambar yang kabur, duplikasi citra, celah, gambar dan garis siam yang tidak seimbang; (3) penyiaman medan terjal atau yang mempunyai kemiringan lebih dari 40° dengan suatu ortofotoskop optis, pengkaburan gambar terjadi karena gerakan naik dan turun yang cepat dari bidang film; (4) resolusi citra akhir lebih kecil dari citra asli.



Gambar 58. Ortofoto yang telah ditumpangsusun dengan garis-garis kontur

D. Ortofoto Digital

Ortofoto digital merupakan fotografi udara digital yang benar skalanya. Foto udara konvensional memiliki keterbatasan dalam pemanfaatannya untuk keperluan pengukuran karena skalanya yang tidak benar. Ketika melihat objek di bagian tengah foto udara maka sama halnya dengan melihat objek sebenarnya dari pesawat udara, tetapi pandangan ke medan pada bagian tepi foto udara tidak benar-benar vertical, tetapi menyudut. Inilah yang disebut proyeksi perspektif central; skala dalam keadaan benar hanya pada bagian yang sangat dekat dengan pusat foto.

Dalam proses digital, pembuatan ortofoto harus melalui suatu proses yang disebut rektifikasi diferensial atau ortorektifikasi, dimana koreksi skala titik per titik dan pergeseran relief secara normal dari variasi dalam elevasi antara wahana dan topografi lewat jalur penerbangan. Proses ini membutuhkan suatu himpunan fotografi dan model medan digital TIN (*triangular irregular network*) atau *triangle file* dan file GRD (*grid raster digital*) sebagai input. Sebuah model TIN khususnya digunakan untuk merepresentasikan permukaan medan secara digital. Permukaan TIN digunakan untuk merektifikasi file citra raster yang disiam secara orthogonal. Dengan mengkombinasikan TIN dan citra raster, masing-masing pixel citra teratribut dengan suatu lokasi dan nilai intensitas yang diketahui. Dalam proses rektifikasi, nilai intensitas untuk masing-masing pixel disampel ulang dengan menggunakan suatu persamaan reseksi ruang, sekaligus menghilangkan displacement yang disebabkan oleh proyeksi perspektif central, kemiringan kamera, dan relief medan. Foto udara-foto udara tunggal kemudian diklip dan

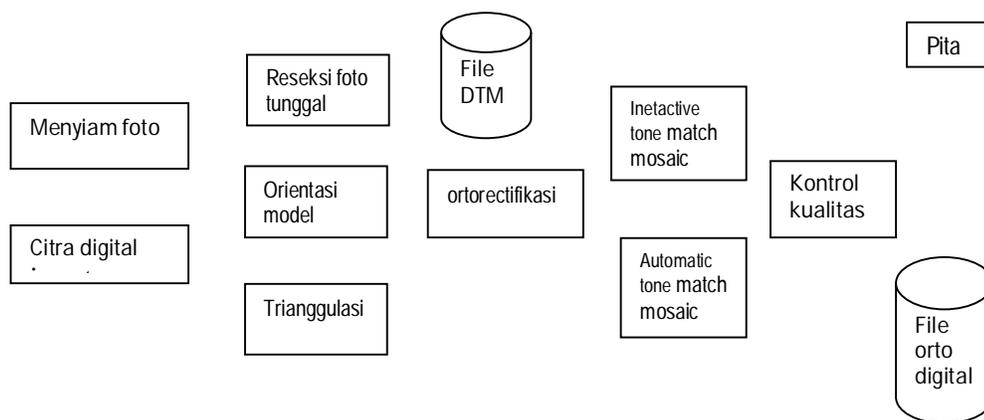
dirangkai sehingga mencakup seluruh area yang hendak dikaji. Hasilnya merupakan sebuah citra digital yang mengkombinasikan karakteristik citra fotografi dengan kualitas geometrik sebuah peta, sebuah peta fotografi yang benar skalanya.

Untuk keperluan pembuatan ortofoto pesawat udara diterbangkan pada ketinggian normal dengan menggunakan sebuah kamera bersudut lebar standar (*standard wide-angle camera*). Orthophotografi dibuat dengan suatu stereomodel medan, pendekatan yang sama diadopsi dalam peta garis konvensional from foto udara menggunakan mesin stereo-plotting. Proses tersebut menerapkan koreksi sebelum foto udara didigitasi, dimana foto yang discan bertujuan untuk memperoleh sebuah citra raster digital. Foto udara dapat dikonversi ortofoto digital dengan cara membagi area yang ada pada foto udara menjadi bagian-bagian kecil, sama dalam hal ukuran pixelnya. Koreksi geometrik foto udara memerlukan kalkulasi distorsi pada masing-masing titik, kemudian menempatkan citra pada lokasi yang tepat. Untuk menghasilkan sebuah ortofotografi, foto udara yang bertampalan perlu dirangkai menggunakan model stereo, dimana mesin plotter diganti oleh sebuah celah sempit, dimana hanya satu citra yang diperkenankan melewati filter untuk direkam pada lembar film. Sebagai pengganti fitur individual, seperti jalan raya, batas-batas lahan, sungai, seperti dilakukan *as done by a measuring mark*, celah dibuat untuk memotong stereomodel secara sistematis dalam suatu rangkaian potongan paralel, membentuk sebuah pola raster ke seluruh details yang ada pada model stereo yang direkam secara ortogonal pada film.

Fotografi digital teregister ketika masing-masing pixel ditempatkan pada posisi geografis yang tepat dengan sebuah program yang memasukkan pertimbangan lokasi kamera, orientasi platform kamera, dan ketinggian semua titik dalam grid area yang terpotret. Pada metode fotogrametri, ia “mengkombinasikan pengukuran survey lapangan dengan pengukuran yang dilakukan pada foto udara untuk memperoleh ketepatan, lokasi koordinat benar secara ortografik.” Proses ini membutuhkan pengukuran koordinat foto dan kombinasinya koordinat x , y , and z . Koordinat foto dapat diukur dengan

menggunakan penggaris atau jangka lengkur/busur, tetapi biasanya digunakan metode digital untuk pengukurannya. Displacemen kemudian dikalkulasi untuk masing-masing citra raster, dan distorsi dihilangkan untuk masing-masing sel raster.

Foto udara ganda dapat dianalisa, dikoreksi dan dibuat mosaik secara bersama-sama dalam satu kali proses yang disebut “bundle adjustment”, dimana interrelated seperangkat persamaan yang digunakan untuk menemukan a globally optimum set of koreksi melintang semua foto udara. Jika sebuah foto berjenis hitam putih, masing-masing piksel menentukan sebuah nilai numerik tunggal yang berkaitan dengan intensitas kecerahannya. Orthophoto berwarna diolah dalam suatu cara analogis dengan mentransformasi sebuah vektor intensitas kecerahan band-band yang berbeda warnanya. Setelah model disiam, film kemudian dibuat sebagai sebuah ortofoto negatif, dan biasanya akan disesuaikan dengan skala yang dikehendaki dengan cara mengatur stereo-model, dan dapat diperbesar atau direduksi oleh pengguna jika penskalaan tidak sesuai setelah disiam.



Ortofoto digital mempunyai banyak kegunaan diantaranya adalah:

1. Dapat digunakan sebagai suatu peta dasar SIG untuk berbagai keperluan, antara lain untuk perencanaan kota dan regional, revisi peta-peta topografi dan graf garis digital, membuat peta-peta tanah, dan studi drainase

2. Biaya lebih hemat dan penayangan fitur-fitur permukaan medan lebih tampak dan mudah dimengerti daripada peta-peta konvensional
3. Ketersediaan data lebih banyak yang dapat diperoleh melalui internet dengan proyeksi UTM

BAB VII

PERENCANAAN PROYEK DAN PEMANFAATAN FOTOGRAMETRI

A. Pertimbangan di dalam perencanaan proyek

Untuk pelaksanaan proyek fotogrametri secara berhasil, diperlukan perencanaan menyeluruh sebelum melakukan pekerjaan tersebut. Lebih dari pelaksanaan pekerjaan fotogrametri lainnya, perencanaan harus dilaksanakan oleh orang-orang yang berpengalaman dan berpengetahuan luas serta mengenal baik semua aspek perencanaan secara komprehensif. Oleh karena itu biasanya dalam sebuah proyek dilaksanakan oleh suatu tim yang terdiri orang-orang dengan berbagai keahlian.

Salah satu pertimbangan penting yang harus diperhatikan secara dini oleh pengguna dan fotogrametriwan meliputi kepastian tentang keluaran apa yang akan dihasilkan, termasuk skala dan ketelitiannya. Hal ini hanya dapat dilakukan apabila perencana mengetahui dengan baik apa yang dikehendaki oleh pengguna, sehingga dapat dicapai keluaran terbaik secara menyeluruh sesuai dengan yang diperlukan. Pengguna tentu saja akan mempertimbangkan biaya tiap jenis kegiatan serta usulan jadwal pelaksanaan dan penyerahan hasilnya. Oleh karena itu maka untuk perencanaan yang berhasil diperlukan beberapa pertemuan dengan pengguna memulai melaksanakan pekerjaan, dan sesuai dengan sifat dan besarnya

proyek mungkin diperlukan beberapa pertemuan lanjutan selagi pekerjaan berlangsung.

Berbagai keluaran dapat dikembangkan dalam suatu proyek fotogrametri tertentu, termasuk cetakan foto udara, peta foto, mosaic, peta planimetrik dan peta topografik, penampang melintang, model median digital, foto orto, peta kadaster, dan sebagainya. Disamping keluaran yang sangat beraneka dan dapat dikembangkan untuk suatu proyek tertentu, pada umumnya ada pertimbangan utama yang akan mempengaruhi cara kerja, biaya, dan jadwal kerja. Pertimbangan itu meliputi lokasi daerah proyek, laus, bentuk, topografi, tutupan vegetasi, dan ketersediaan titik kontrol medan, dan sebagainya. Itulah sebabnya maka tiap proyek membuahakan masalah unik yang harus diperhatikan di dalam tahap perencanaan.

Apabila keluaran yang harus dihasilkan telah disepakati bersama pengguna, rincian pekerjaan perencanaan proyek pada umumnya dapat ditampilkan ke dalam kategori berikut:

1. Perencanaan pemotretan dari udara
2. Perencanaan titik kontrol medan
3. Pemilihan instrument dan cara kerja yang diperlukan untuk memperoleh hasil yang diinginkan
4. Perkiraan biaya dan jadwal penyerahan hasil

Setelah selesai dengan perencanaan empat kategori pekerjaan ini, pada umumnya fotogrametriwan menyiapkan usulan rinci tentang rencana, spesifikasi, perkiraan biaya, dan jadwal penyerahan proyek. Usul ini sering merupakan dasar bagi persetujuan atau kontrak bagi pelaksanaan pekerjaan.

1. Perencanaan Penerbangan

Karena keberhasilan suatu proyek fotogrametri mungkin lebih dipengaruhi oleh foto yang kualitasnya baik daripada oleh pengaruh aspek lain, makaperencanaan pemotretan merupakan pertimbangan utama. Karena pemotretan harus memuaskan bagi tujuan tertentu, maka misi pemotretan harus direncanakan dengan cermat dan dilaksanakan secara seksama pula sesuai dengan *rencana penerbangan*. Pada umumnya rencana penerbangan terdiri dari dua hal,

yaitu: 1) *peta jalur terbang* yang menggambarkan daerah yang harus dipotret, dan 2) *spesifikasi* yang merupakan pedoman untuk melaksanakan pemotretan, termasuk permintaan khusus yang menyangkut kamera dan film, skala, tinggi terbang, tampalan samping, toleransi kesendengan (tilt) dan “crab”, dan sebagainya. Suatu rencana penerbangan yang membuahkan spesifikasi optimum bagi sebuah proyek hanya dapat dibuat setelah mempertimbangkan secara seksama semua variable yang mempengaruhi pemotretan dari udara.

Suatu misi pemotretan dari udara merupakan pekerjaan mahal yang melibatkan dua orang pelaksana atau lebih, ditambah pesawat terbang serta kelengkapannya yang mahal juga. Disamping itu, jangka waktu yang baik untuk pemotretan bagi banyak daerah sering terbatas oleh cuaca dan kondisi tutupan lahan yang berkaitan dengan musim. Kegagalan untuk membuat foto yang baik pada satu misi penerbangan tidak hanya memerlukan penerbangan ulang yang mahal, akan tetapi sering pula mengalami penundaan yang lama bagi perolehan foto yang dipesan. Penundaan demikian bersifat mahal pula. Oleh karena itu maka misi penerbangan merupakan salah satu pekerjaan terpenting dalam proyek fotogrametri secara menyeluruh. Bagian berikut menyajikan berbagai pertimbangan dalam perencanaan penerbangan.

2. Tampalan Depan dan Tampalan Samping Fotografik

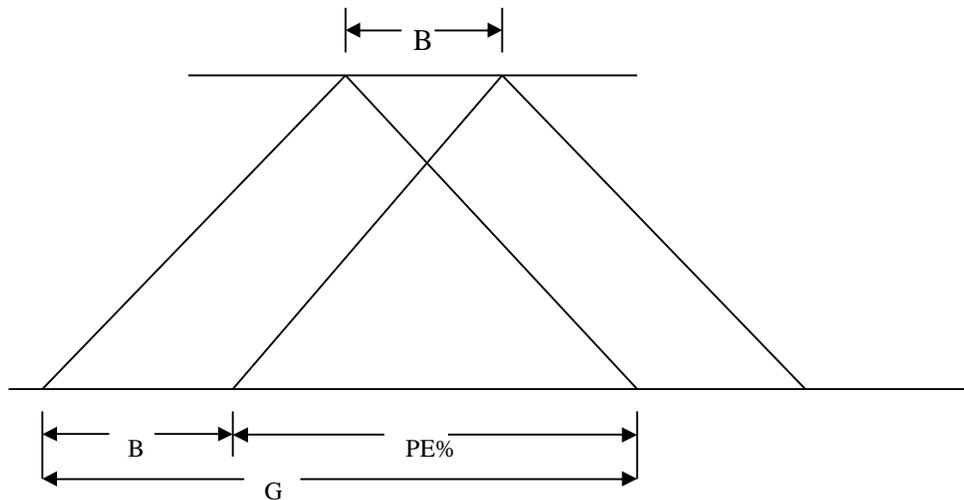
Sebelum membicarakan berbagai aspek yang diperhatikan di dalam merencanakan suatu misi pemotretan, sebaiknya ditegaskan kembali definisi istilah tampalan depan (*endlap*) dan tampalan samping (*sidelap*). Seperti yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, liputan foto tegak suatu daerah pada umumnya dibuat berupa rangkaian jalur terbang yang saling bertampalan. Seperti tercermin dalam gambar 59, *tampalan depan* adalah tampalan antara foto yang berurutan sepanjang sebuah jalur terbang. Gambar 61 menyajikan *tampalan samping*, yaitu tampalan antara jalur terbang yang berurutan.

Pada Gambar 59, G mencerminkan ukuran bujur sangkar medan yang terliput oleh sebuah foto tunggal (dengan asumsi medannya datar dan bidang fokal kamera berupa sebuah bujur sangkar), dan B ialah basis atau jarak antara stasiun pemotretan sebuah pasangan stereo. Besarnya tampalan depan sebuah pasangan

stereo pada umumnya dinyatakan dalam persen. Bila dinyatakan dengan G dan B , maka besarnya tampalan depan adalah:

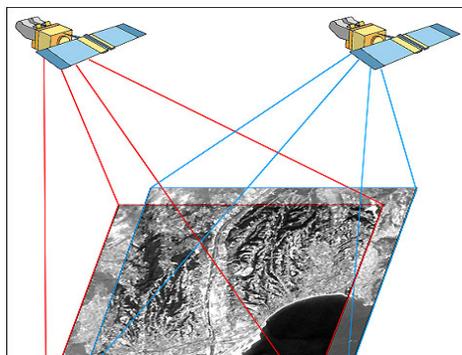
$$PE = \frac{G - W}{G} \times 100$$

Pada persamaan tersebut, PE ialah persentase tampalan depan. Apabila diinginkan liputan stereoskopik suatu daerah, tampalan depan absolut minimum sebesar 50 persen. Akan tetapi, untuk menghindari kesenjangan (gap) yang terjadi pada liputan stereoskopik oleh “*crab*”, kesendengan, variasi tinggi terbang, dan variasi medan, biasanya digunakan tampalan depan yang melebihi 50 persen.

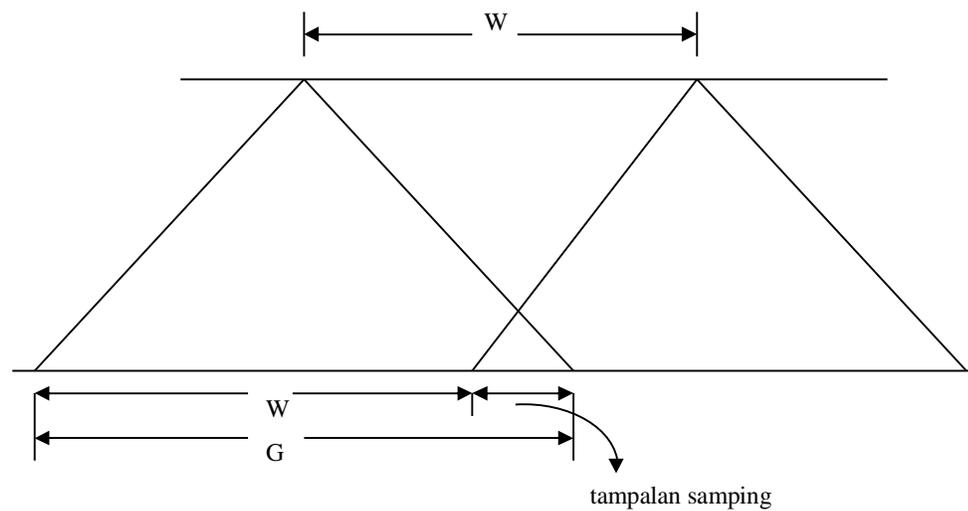


Gambar 59. Tampalan depan, tampalan antara foto yang berurutan sepanjang jalur terbang

Besarnya tampalan depan pada sebuah pasangan foto stereo dapat diketahui dengan cara mengukur lebar gambar yang sama antara foto kanan dan foto kiri dibagi lebar foto secara keseluruhan. Misalnya lebar gambar area yang menunjukkan gambar yang sama adalah 15 cm, sementara lebar foto udara adalah 23 cm berarti tampalan depannya adalah $15/23 \times 100\% = 65\%$. Secara sederhana dapat diilustrasikan dengan gambar 60 berikut ini.



Gambar 60. Tampalan depan pada pasangan foto udara stereoskopis



Gambar 61. Tampalan samping, tampalan antara jalur terbang yang berurutan

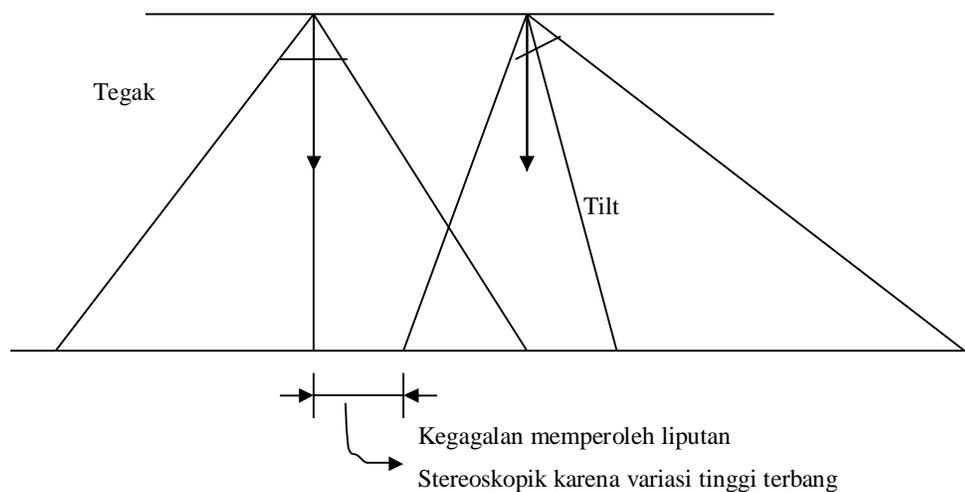
Apabila foto digunakan untuk perluasan titik kontrol fotogrametrik, maka gambaran beberapa titik harus tampak pada tiga foto yang berurutan, suatu kondisi yang juga memerlukan tampalan yang lebih dari 50 persen. Berdasarkan alasan ini maka pemotretan dari udara untuk maksud pemetaan biasanya dibuat dengan tampalan depan sekitar 60 persen, dengan plus minus 5 persen.

Tampalan samping diperlukan di dalam pemotretan untuk menghindari terjadinya ketidaksinambungan antara jalur terbang yang disebabkan oleh drift, crab, kesendangan, variasi tinggi terbang, dan variasi medan. Drift merupakan istilah yang digunakan bagi kegagalan penerbang untuk terbang di sepanjang jalur terbang yang direncanakan. Drift sering disebabkan oleh angin kencang. Drift yang berlebihan merupakan penyebab utama terjadinya ketidaksinambungan liputan foto. Bila hal ini terjadi, diperlukan penerbangan ulang.

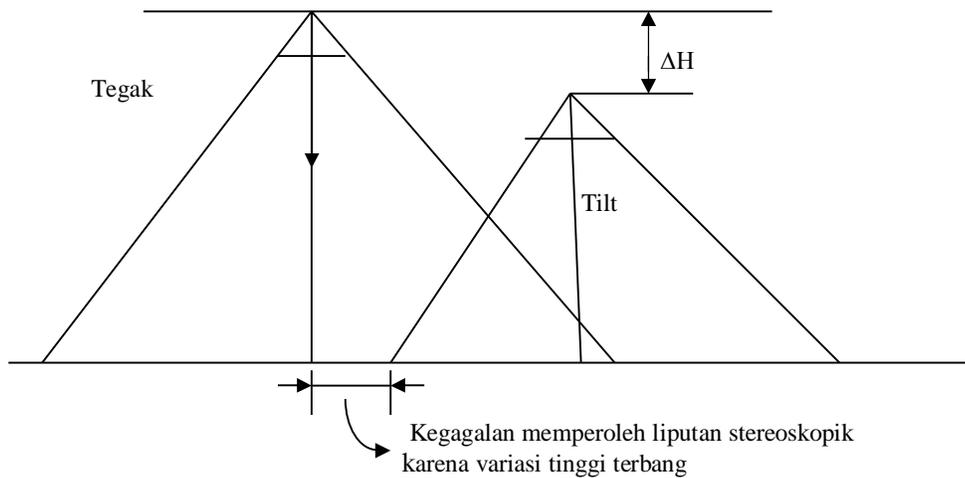
Pada Gambar 33, G mencerminkan ukuran liputan medan sebuah foto tunggal yang berbentuk bujur sangkar dan W merupakan jarak antara jalur terbang yang berurutan. Besarnya tampalan samping, PS, yang dinyatakan dalam persen adalah:

$$PS = \left(\frac{G - w}{G} \right) \times 100$$

Pemotretan untuk maksud pemetaan pada umumnya dilakukan dengan tampalan samping sebesar 30 persen. Keuntungan digunakannya tampalan samping yang besar ini ialah terhindarnya penggunaan bagian paling tepi foto, di mana kualitas fotonya biasanya kurang baik. Pemotretan untuk pembuatan mosaic kadang-kadang dibuat dengan tampalan samping lebih besar dari 30 persen karena hal ini memungkinkan pengurangan ukuran bagian tengah foto yang harus digunakan, sehingga akan dapat memperkecil distorsi gambar oleh kesendengandan relief. Di dalam beberapa hal, apabila pemotretan dari udara akan digunakan untuk perluasan titik kontrol fotogrametrik dengan ketelitian sangat tinggi, tampalan depan maupun tampalan samping dapat dibuat sebesar 60 persen.



Gambar 62. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena kesendengan.



Gambar 63. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena variasi tinggi terbang

Contoh1:

Basis udara sebuah pasangan foto stereo tegak sebesar 1380 meter dan tinggi terbang di atas permukaan lahan rata-rata sebesar 2400 meter. Panjang fokus kamera sebesar 152,4 mm dan format foto sebesar 23 cm. Berapa persenkah tampilkan depannya?

Jawaban:

$$(a) \text{ Skala foto rata-rata} = \frac{152,4 \text{ mm}}{2400 \text{ m}} = \frac{152,4 \text{ mm}}{2.400.000 \text{ mm}} = \frac{1}{15.750}$$

(b) Ukuran liputan medan rata-rata $G = 23 \text{ cm} \times 15.750 = 362250 \text{ cm} = 3622,50 \text{ m}$

(c) Menurut persamaan tampilkan, besarnya tampilkan depan adalah:

$$PE = \left(\frac{3622,50 \text{ m} - 1380 \text{ m}}{3622,50 \text{ m}} \right) \times 100 = 61,90 \%$$

Contoh 2:

Dalam contoh 1, misalkan jarak antara jalur terbang yang berurutan sebesar 2460 meter. Berapa persenkah tampalan sampingnya?

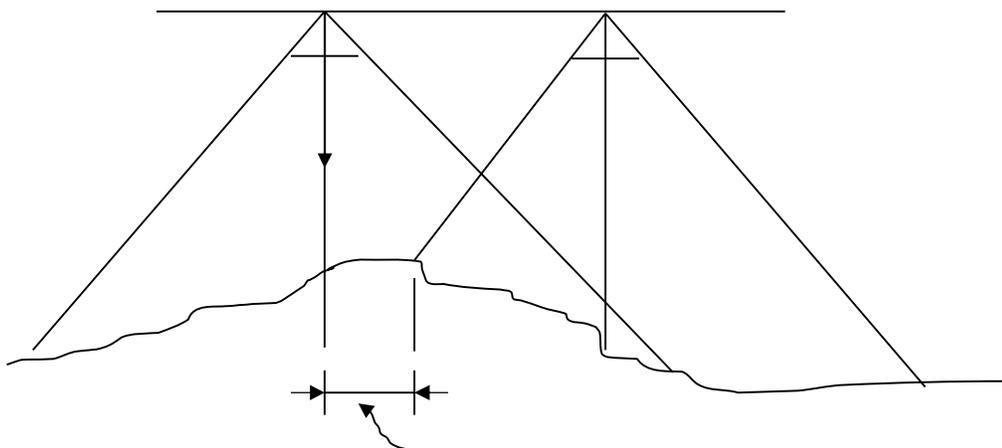
Jawaban

Berdasarkan persamaan tampalan samping, maka besarnya tampalan samping contoh 1 adalah :

$$PS = \left(\frac{3622,50 - 2460}{3622,50} \right) \times 100 = 32,09 \%$$

3. Maksud Pemotretan

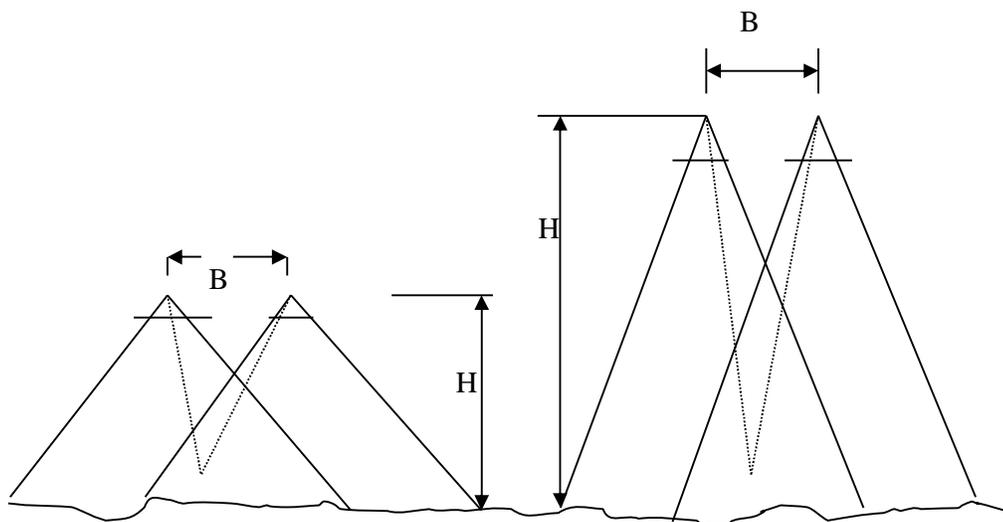
Di dalam merencanakan misi pemotretan dari udara, pertimbangan pertama dan yang paling penting adalah tujuan pemotretan. Cara kerja dan perlengkapan yang optimum hanya dapat dipilih apabila tujuan pemotretan telah ditentukan dengan jelas. Pada umumnya foto udara yang dikehendaki ialah yang kualitas *metrik* maupun kualitas *piktorialnya* baik. Foto yang kualitas metriknya baik diperlukan untuk pemetaan topografi atau tujuan lainnya yang menghendaki pengukuran fotogrametrik kuantitatif secara teliti. Kualitas pictorial yang baik dikehendaki untuk analisis kuantitatif seperti untuk interpretasi foto atau untuk menyusun peta foto dan mosaik foto udara.



Kegagalan memperoleh liputan
Stereoskopik karena variasi medan

Gambar 64. Kegagalan untuk memperoleh liputan stereoskopik karena variasi medan

Foto yang kualitas metriknya bagus diperoleh dengan kamera terkalibrasi dan film yang emulsinya berbulir halus dan resolusinya tinggi. Untuk pemetaan topografi, pemotretan sebaiknya dilakukan dengan kamera yang sudut pandangnya lebar atau sangat lebar (panjang fokusnya kecil) sehingga dapat diperoleh nisbah basis udara-- tinggi terbang (B/H) yang besar. Seperti yang telah diuraikan, nisbah B/H ialah perbandingan antara basis udara sebuah pasangan foto yang bertampalan terhadap tinggi terbang rata-rata di atas permukaan tanah. Semakin besar nisbah B/H , semakin besar pula sudut perpotongan atau sudut paralaks antara sinar yang berpotongan ke titik layak. Perhatikan sketsa gambar 37 yang mengilustrasikan perbedaan paralaks yang mungkin timbul akibat dari perubahan rasio basis udara dan tinggi terbang.



Gambar 65. Sudut paralaks bertambah besar dengan bertambah besarnya rasio B/H

Dapat dibuktikan bahwa kesalahan dalam posisi dan elevasi titik terhitung pada pasangan stereo bertambah besar dengan bertambah besarnya tinggi terbang

dan mengecil dengan bertambah besarnya paralaks x . Rasio B/H yang besar mengisyaratkan tinggi terbang yang rendah dan paralaks x yang besar, yaitu kondisi yang diinginkan untuk ketelitian yang lebih besar.

Pemotretan yang kualitas piktorialnya baik tidak memerlukan kamera terkalibrasi, tetapi kameranya harus memiliki lensa berkualitas baik. Di dalam banyak hal maka film yang cepat dan butir emulsinya besar menghasilkan efek yang diinginkan. Bagi pembuatan mosaik, pergeseran relief, pergeseran letak oleh kesendengan, dan variasi skala menyebabkan degradasi yang tidak dikehendaki bagi kualitas pictorial. Kesalahan-kesalahan tersebut dapat diminimalkan dengan memperbesar tinggi terbang yang berdampak pada pengecilan rasio basis udara-tinggi terbang. Tinggi terbang yang lebih tinggi berpengaruh pada skala foto udara yang dihasilkan, tetapi hal ini dapat diimbangi dengan penggunaan kamera yang mempunyai jarak fokus yang panjang. Suatu contoh sebuah foto udara direkam dari ketinggian 2550 m dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 150 mm diperoleh skala 1: 17.000. Bila diinginkan foto udara dengan pergeseran relief yang kecil, maka harus ditinggikan tinggi terbang pesawat. Jika pesawat tinggi terbangnya menjadi 3500 meter, untuk memperoleh skala foto udara yang sama, diperlukan kamera dengan panjang fokus sebesar 205,90 mm. Ini diperoleh dari persamaan skala, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Skala} = \frac{f}{H} = \frac{1}{17.000} \rightarrow \frac{f}{3.500 \text{ m}} = \frac{1}{17.000}$$

$$\rightarrow 17.000 f = 3.500.000 \text{ mm}$$

$$\rightarrow f = \frac{3.500.000 \text{ mm}}{17.000}$$

$$f = 205,90 \text{ mm}$$

4. Skala Foto

Skala foto udara, terutama skala rata-rata merupakan variable yang sangat penting yang harus dipertimbangkan dalam perneencanaan proyek. Skala biasanya

dipilih berdasarkan tujuan aplikasi foto udara tersebut. Bila untuk keperluan perencanaan detail kota misalnya, diperlukan foto udara dengan skala besar, tetapi bila sekedar untuk pemetaan penggunaan lahan pada tingkat dua cukup dengan foto dengan skala sedang. Untuk pembuatan peta topografi, biasanya ditentukan berdasarkan skala peta, interval garis tinggi yang dikehendaki, dan kemampuan alat yang tersedia untuk kompilasi peta.

Pertimbangan alat yang dimaksud misalnya stereo plotter. Alat tersebut memungkinkan rasio perbesarannya sampai 10, yang dilakukan umumnya hingga 8. Bagi sebagian besar plotter proyeksi rangkap dengan pengamatan langsung, rasio perbesaran optimumnya sebesar 5, dengan kemungkinan variasi yang kecil. Apabila digunakan salah satu dari jenis instrument ini dan bila skala petanya telah ditetapkan, skala foto yang optimum ditetapkan secara otomatis sebesar seperlima skala peta. Suatu contoh, diinginkan membuat peta dengan skala 1:10.000 dengan menggunakan sebuah plotter Kelsh yang rasio perbesaran optimumnya dari skala foto ke skala peta sebesar 5. Berapakah skala optimum foto udaranya ? Jawabnya adalah :

$$\text{Skala foto} = \frac{1}{10.000} \times \frac{1}{5} = \frac{1}{50.000}$$

Jadi untuk membuat peta dengan skala 1:10.000, foto udaranya maksimum berskala 1:50.000.

Dalam perencanaan dari udara, interval garis tinggi bagi suatu peta harus diperhatikan seperti halnya memperhatikan ketelitian planimetrik. Semakin besar ketelitian pemetaan tegak yang dikehendaki, maka tinggi terbangnya harus lebih rendah sehingga skala fotonya bertambah besar.

5. Tinggi Terbang

Penentuan tinggi terbang disesuaikan dengan skala yang diinginkan, panjang fokus kamera, dan toleransi besarnya relief displacement. Tinggi terbang di atas medan rata-rata dapat bervariasi mulai beberapa ratus sampai ribuan meter. Tinggi terbang rendah bila dikehendaki foto udara berskala besardan sebaliknya. Untuk keperluan pemetaan topografi biasanya tinggi terbang berkisar antara 500 –

9000 meter. Apabila sebagian dari daerah proyek terletak jauh lebih tinggi, maka diperlukan tinggi terbang di atas permukaan laut yang berbeda dengan maksud untuk memperoleh keseragamantinggi terbang di atas permukaan tanah.

Tinggi terbang juga berpengaruh terhadap luas liputan. Semakin rendah ketinggian terbang, maka makin sedikit liputannya. Oleh karena itu, ketinggian terbang harus dipertimbangkan disamping dengan tujuan pemotretan juga dengan dana yangtersedia. Karena perbedaan luas liputan ini berdampak pada jumlah foto yang diperoleh. Suatu daerah dengan luas yang sama akan berbeda biayanya, bila dalam pemotretannya berbeda ketinggian terbangnya. Daerah yang dipotret dari ketinggian terbang yang lebih tinggi akan memperoleh foto udara yang lebih sedikit, yang berarti biayanya juga lebih sedikit.

6. Liputan Medan

Bila telah ditentukan tampalan depan dan tampalan sampingny, maka selanjutnya dapat ditentukan pula luas lahan terliput oleh model murni (*neat model*) stereoskopik. Model murni adalah daerah streoskopik antara titik utama yang berdekatan dan membentang ke arah dua tepi foto hingga tengah-tengah tampalan samping (lihat gambar 66). Lebar model murni sebesar B dan luasnya sebesar W. Liputan modelurni penting karena mengindikasikan perkiraan luas daerah pemetaan bagi tiap pasangan foto stereo.

Gambar 66. Luas liputan model murni stereoskopik

Contoh :

Dengan menggunakan kamera yang panjang fokusnya 150 mm, suatu foto udara akan dibuat dari ketinggian 1800 meter di atas tanah rata-rata. Foto udara yang dikehendaki berformat 23 cm, tampalan depan akan dibuat 60 persen dan tampalan sampingnya 30 persen. Berapakah luas liputan satu foto tunggal dan luas model murninya ?

Jawab :

a. Skala foto udara $150 \text{ mm}/1800 \text{ m} = 150 \text{ mm}/1.800.000 \text{ mm}$
 $= 1:12.000$

b. Dimensi G dari bujur sangkar lahan yang terliput oleh satu lembar foto udara adalah :

$$G = 12.000 \times 23 \text{ cm} = 276.000 \text{ cm} = 2760 \text{ meter}$$

c. Luas liputan lahan satu lembar foto dalam acre adalah

$$A = \frac{(2760)^2}{4.046,9 \text{ m}^2/\text{acre}} = 1.882 \text{ acre}$$

d. Pada tampalan depan sebesar 60 persen, B adalah sebesar 0,4 G dan pada tampalan samping 30 persen W adalah sebesar 0,7 G. Oleh karena itu, dimensi model stereoskopiknya sebesar :

$$B = 0,4 (2.760) = 1104 \text{ cm}$$

$$W = 0,7 (2.760) = 1932 \text{ cm}$$

Luas model murninya adalah :

$$AN = \frac{1104 \times 1932}{4.046,9} = 527 \text{ acre}$$

7. Kondisi Cuaca

Cuaca pada hari-hari tertentu kadang tidak mendukung untuk melakukan pemotretan. Faktor cuaca sangat penting dalam penentuan waktu penerbangan. Hari-hari yang penuh dengan awan misalnya sangat tidak cocok untuk pemotretan, karena awan dapat menghalangi perekaman. Permukaan bumi yang hendak dipotere terhalang oleh awan. Hari yang ideal untuk pemotretan adalah dimana hari bebas dari awan. Hanya saja seringkali sulit untuk mencari hari ideal, karena itu kondisi cuaca dianggap dapat diterima bila tutupan awan leboih kecil dari 10 persen. Bagaimana halnya jika tutupan awan lebih dari 10 persen dan awan berada pada ketinggian yang tinggi sehingga berada di atas ketinggian pesawat. Hal ini tetap saja berakibat buruk bagi kualitas foto udara karena meskipun tidak menghalangi pemotretan tetapi awan yang luas dapat menimbulkan bayangan yang luas pada daerah pemotretan, yang akhirnya kualitas foto kurang baik karena keadaan gelap akibat bayangan awan tersebut.

8. Musim

Dalam proyek pemotretan dari udara, musim merupakan faktor pembatas karena musim mempengaruhi kondisi tutupan air di atas tanah dan ketinggian matahari. Misalnya untuk tujuan pemetaan topografi, maka pemotretan yang efektif dilakukan pada saat musim kemarau, karena pada musim kemarau pohon-pohon yang berdaun lebar sedang meranggas sehingga permukaan tanah tidak tertutup oleh dedaunan. Pada saat musim hujan juga sebagian besar tanah tertutup oleh limpasan air hujan, sehingga perbedaan rona/warna tanah tidak tampak jelas. Tetapi pemotretan untuk tujuan pemetaan kehutanan, biasanya diperlukan saat hutan dalam keadaan berdaun penuh, sehingga untuk keperluan tersebut saat yang paling cocok adalah di saat musim hujan. Pada daerah bersalju, saat pemotretan harus mencari waktu yang tepat. Salju yang tebal dapat menutupi permukaan tanah sehingga menyulitkan interpretasi foto udara, pada kasus tertentu tutupan salju tipis dapat berguna dalam interpretasi.

Disamping itu faktor ketinggian matahari merupakan aspek yang harus dipertimbangkan dalam kaitannya dengan musim. Sudut matahari yang rendah menyebabkan bayangan yang panjang yang mengganggu interpretasi karena bayangan dapat menyembunyikan detail. Sudut datang sinar matahari yang dapat diterima untuk pemotretan udara adalah 30° . Oleh karena itu pemotretan biasanya menunggu waktu agak siang dan tidak terlalu sore. Bagi daerah tertentu dimana sudut sinar matahari pada musim tertentu sangat rendah, maka kemungkinan pemotretan dapat dilakukan pada tengah hari. Bayangan sebenarnya dapat berguna untuk tujuan tertentu karena bersifat membantu dalam identifikasi objek. Misalnya bayangan dapat berguna untuk menentukan orientasi, tinggi gedung atau pohon, pada pohon tertentu bayangan dapat digubakab untuk mengenali spesiesnya. Bayangan dapat pula bermanfaat dalam menentukan lokasi gambaran yang dapat dikenali pada foto udara, seperti ujung pagar, pusat tenaga, dan lain-lain yang berfungsi sebagai titik kontrol foto udara.

9. Peta Jalur Terbang

Peta jalur terbang menggambarkan batas daerah proyek dan jalur terbang yang harus diikuti oleh penerbang dalam proses pemotretan untuk memperoleh liputan tertentu. Peta jalur terbang dibuat pada peta yang ada yang

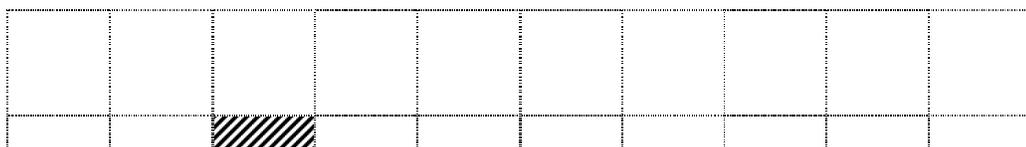
menggambarkan daerah proyek. Peta jalur terbang dapat pula dibuat pada foto udara skala kecil daerah yang bersangkutan bila telah ada pemotretan sebelumnya.

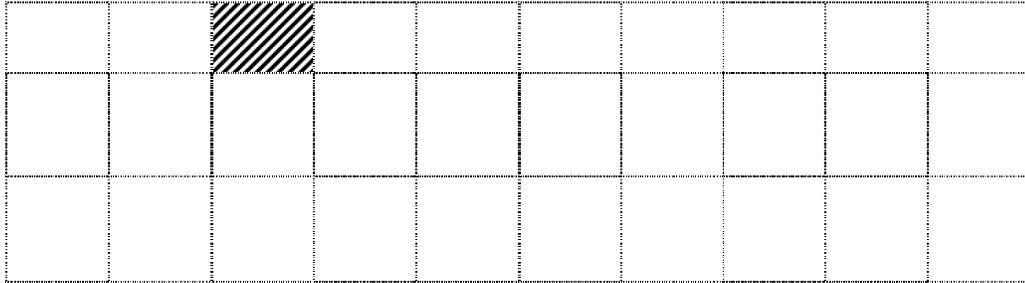
Rute penerbangan biasanya dibuat berdasarkan bentuk daerah yang hendak dipotret. Pada daerah proyek yang berbentuk rektanguler empat persegi panjang lebih mudah diliput dengan jalur terbang mengarah utara-selatan atau barat-timur. Bila daerah proyek berbentuk tidak menentu, apalagi daerahnya sempit, panjang, dan menceng dari arah kardinal maka jalur penerbangan dengan arah utara-selatan atau timur-barat tidak ekonomis. Dalam merencanakan daerah yang berbentuk demikian, yang paling ekonomis adalah menarik jalur terbang sejajar terhadap batas daerah proyek sesedikit mungkin.

Sebuah templet perencanaan penerbangan dapat berguna untuk menentukan liputan yang baik dan ekonomis, terutama bagi daerah sempit. Tempelt tersebut menggambarkan blok-blok model murni yang digambarkan di atas lembaran plastic transparan yang sesuai dengan skala peta dasar yang digunakan untuk menggambarkan peta jalur. Plastik ditumpangtindihkan dengan peta dan diorientasika sesuai dengan daerah proyek sehingga menghasilkan posisi yang efektif dan ekonomis.

Model murni

titik dasar/principal point





Gambar 67. Lembaran transparansi model murni untuk merencanakan pemotretan dari udara.

B. Pemanfaatan Fotogrametri

Sebagai sebuah ilmu, seni dan teknik, fotogrametri memiliki manfaat dan peran yang sangat besar baik untuk keperluan pengembangan teori maupun untuk keperluan aplikasi. Sumbangan utama fotogrametri adalah untuk pembuatan peta dengan tingkat akurasi dan informasi yang relatif detail.

Pengukuran beberapa objek ketinggian, seperti bukit atau gunung, gedung, pohon, dan lain-lain diperlukan untuk pemetaan potensi, perencanaan, pemantauan dan evaluasi. Misalnya untuk keperluan pendakian suatu gunung yang belum diketahui ketinggiannya pada peta, untuk keperluan evaluasi potensi longsor lahan, maka kemiringan dan ketinggian suatu bukit atau gunung merupakan variable penting yang diperlukan untuk perhitungan.

Perkembangan teknologi komputer telah membangkitkan pola baru dalam pemanfaatan fotogrametri. Fotogramteri semula hanya dimanfaatkan oleh perusahaan-perusahaan besar karena peralatan mekanik dan optic untuk keperluan pengukuran harganya sangat mahal. Saat ini ketika perangkat keras dan perangkat lunak komputer yang mampu membaca data fotogrametri digital berkembang pesat dengan harga terjangkau, maka pengukuran dan analisis data tidak perlu lagi menggunakan peralatan yang mahal dan langka itu. Sebuah desktop PC dengan kelengkapannya mampu menggantikan peran peralatan yang mahal-mahal itu. Untuk lebih memahami bagaimana pemanfaatan fotogramteri, pelajarilah bab VII.

1. Identifikasi, Pengukuran dan pemetaan fisiografis

a. Identifikasi objek

Suatu objek dapat diketahui atau dikenali jenisnya berdasarkan ukurannya. Ukuran objek dapat diketahui ukurannya (panjang, lebar, tinggi, atau volume) dari foto udara karena adanya kenampakan objek yang disertai dengan informasi skala yang ada di informasi tepi.

b. Pengukuran ketinggian tempat dan kemiringan lereng

c. Pemetaan dan revisi peta topografi

Sifat-sifat yang paling jelas dari suatu bentuk lahan adalah bentuk tiga dimensionalnya, yang dengan mudah dapat dianalisis dalam suatu model stereoskopis. Dengan demikian, penafsir citra dapat menentukan secara cepat apakah suatu lahan bertopografi relatif halus atau kasar, apakah berbukit-bukit bulat atau runcing, kemiringan lereng curam atau landai, dan sebagainya. Informasi yang sedemikian banyak dari foto udara dapat memberikan suatu data untuk membuat peta

d. Alat bantu studi geomorfologi dan geologi

Geomorfologi merupakan disiplin ilmu yang sangat banyak terbantu oleh fotogramteri. Kenampakan 3-D pada foto udara yang disertai dengan adanya vertical exaggeration semakin memudahkan para ahli geomorfologi untuk mempelajari kondisi lahan suatu tempat. Perkembangan perangkat lunak dalam fotogramteri digital semakin memperdalam analisis geomorfologi dan geologi. Pemodelan lahan yang dikenal dengan DEM dan TIN mempermudah ahli dan pembelajar geomorfologi dan geologi untuk membuat dan merepresentasikan, bahkan merekonstruksi gejala fisiografis melalui teknik-teknik dalam fotogrametri digital.

2. Pemetaan persil/pendaftaran tanah

Resolusi spasial citra saat ini sedemikian tinggi yakni sampai kurang dari 1 meter, sehingga perwujudan persil lahan lebih mudah untuk diukur dan dianalisis, bahkan dengan teknik manual sekalipun. Pembuatan peta persil biasanya membutuhkan foto udara berskala besar.

3. Perencanaan dan Evaluasi Pembangunan Fisik

Pembangunan sarana dan prasarana fisik secara procedural pasti didahului dengan perencanaan yang memerlukan dukungan data fisik lahan. Data fisik lahan yang paling umum digunakan adalah kemiringan lereng, bentuk lahan, posisi/orientasi, luas lahan, dan penggunaan lahan. Data seperti ini dapat diperoleh dengan mudah pada foto udara, sehingga dapat mengurangi biaya survey lapangan.

5. Perencanaan Jalan Raya

Perencanaan jalan raya memerlukan informasi mengenai bentuk lahan, ketinggian tempat, kemiringan lereng, arah/jurusan, jarak, volume material yang diperlukan untuk menambah bentuk lahan yang cekung atau memotong lahan yang terlalu tinggi serta informasi fisiografis lainnya dari suatu area yang akan dilewati oleh jalan. Informasi-informasi tersebut tentu membutuhkan survey dan pengukuran yang memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Untuk menghemat dan memberikan informasi yang teliti mengenai kondisi lahan dan ukuran-ukuran aspek yang diperlukan tersebut fotogramteri dapat memberikan solusinya yang berupa waktu pengukuran yang lebih cepat, ketelitian yang dapat dipertanggungjawabkan, efektif dan lebih hemat.

6. Perencanaan Pembuatan Waduk

Perencanaan pembuatan waduk membutuhkan data mengenai bentuk lahan, arah aliran inlet dan outlet, luas Daerah Aliran Sungai (DAS) yang akan mensuplai waduk, kontur lahan, kemiringan lereng area, volume air yang dapat dimuat oleh waduk berdasarkan kondisi cekungan dan lain-lain. Data tentang variable-variabel tersebut memerlukan perhitungan teliti yang dapat diperoleh dari foto udara melalui teknik fotogrametri.

7. Perencanaan jalan kereta api

Syarat kondisi lahan untuk jalan kereta api berbeda dengan jalan biasa. Kemiringan jalan kereta api tidak boleh lebih dari 15 persen. Kondisi lahan yang bentuknya tidak mendukung tetapi terpaksa harus dilewati karena tidak memungkinkan pula jika arah belokan kereta api harus tajam, maka dalam perencanaan jalan kereta api harus diperhitungkan berapa lahan yang harus dipotong dan berapa yang harus diurug. Berdasarkan informasi jurusan dan arah

dari foto udara dapat ditentukan belokan yang efektif, arah jalan kereta yang baik. Berdasarkan informasi kemiringan lereng dapat ditentukan daerah mana yang harus dipotong lahannya dan berapa volume tanah yang diperlukan untuk mengurug lahan-lahan yang cekung agar jalan kereta api dapat dipakai.

8. Perencanaan Lahan Permukiman

Perencanaan permukiman membutuhkan informasi kondisi fisik lahan permukiman. Diantara informasi yang diperlukan adalah informasi bentuk lahan, kemiringan lereng, arah/jurusan lokasi permukiman, aksesibilitas lokasi, jarak dari sumber-sumber bencana, kemungkinan banjir, system pengatusan/drainase, posisi lahan terhadap penggunaan lahan lainnya, system pembuangan kaitannya dengan kemiringan lereng dan lain-lain. Informasi-informasi tersebut dapat diekstrak dari foto udara yang cara perhitungannya tentu membutuhkan teknik fotogrametri. Masing-masing variable dapat diberi skor penilaian yang selanjutnya dapat diketahui kondisi kelayakannya untuk pendirian permukiman.

9. Kegunaan lainnya masih sangat banyak terutama untuk aspek-aspek pembangunan yang memerlukan informasi ukuran dari unsur fisik permukaan bumi.

BAB VII

FOTOGRAMETRI DIGITAL

A. Pendahuluan

Pada dekade terakhir ini, dunia pemetaan telah mengalami transisi dari pemetaan grafis konvensional ke numeric/digital, komputerisasi pemetaan. Fotogramteri yang semula memanfaatkan citra analog telah berkembang ke arah pemanfaatan citra digital. Perkembangan dipicu oleh perkembangan teknologi komputer beserta perangkat lunaknya, perkembangan teknologi pencitraan yang mendorong migrasi dari foto udara ke citra resolusi tinggi yang direkam dari ruang angkasa, semakin terjangkaunya harga peralatan digital untuk keperluan

analisis citra, mahalny peralatan optik dan mekanik untuk analisis citra analog, dan lain-lain. Fotogrametri telah berkembang dari fotogrametri analog menjadi fotogramteri analitik, dan saat ini berevolusi menjadi fotogramteri digital.

B. Definisi Fotogrametri Digital

Istilah Fotogrametri Digital muncul sejak fotogramteri mengadopsi citra digital sebagai objek kajian dan berbagai aplikasinya dalam berbagai bidang. Disamping istilah fotogramteri muncul pula istilah *Softcopy Photogrammetry*. Kedua istilah tersebut menunjuk pada hal yang sama. Istilah “*softcopy photogrammetry*” secara luas digunakan di Amerika Serikat, alasan penggunaan istilah tersebut adalah untuk tujuan historis, dimana citra yang dianalisis berupa file-file komputer yang biasa disebut *softcopy*. Di dunia internasional istilah yang digunakan adalah *digital photogrammetry*. Perbedaan utama antara fotogrametri digital dengan pendahulunya (analog dan analitik) adalah berkaitan dengan citra digital yang digunakan secara langsung daripada foto udara analog. Pada fotogramteri analog, instrument optik dan mekanik digunakan secara luas untuk mencari hubungan geometrik, sementara pada fotogramteri analitik, pemodelan geometrik lebih bersifat matematis. Keduanya berkaitan dengan fotografi analog yang analisisnya menggunakan plotter fotogramterik yang mahal harganya. Tetapi matematika untuk model pemrosesan data, seperti orientasi, triangulasi, dan lain-lain masih digunakan dalam fotogramteri digital secara mapan.

Menurut Dowman (1991) terdapat sejumlah factor penting yang menyebabkan fotogramteri digital berkembang sangat cepat, faktor-faktor tersebut antara lain:

1. Ketersediaan jumlah citra digital yang semakin meningkat dari sensor satelit, kamera CCD, dan penyiam
2. Ketersediaan komputer (DPW) dengan peripheral teknologi yang inovatif dan terpercaya, seperti ruang penyimpanan yang makin luas, monitor yang mampu menampilkan warna sebenarnya, transfer data yang cepat, dan teknik kompresi/dekompresi.

3. Integrasi semua tipe data dalam suatu system informasi komprehensif dan menyatu, misalnya SIG.
4. Aplikasi real-time, seperti robotic dan control kualitas
5. Desain berbantuan komputer (dalam bidang seni, arsitek bangunan seperti diperlihatkan oleh gambar 73, dan aplikasi industrial)
6. Kekurangan operator fotogramteri yang terlatih dan berpengalaman

Citra digital pada umumnya diperoleh dari hasil perekaman dengan menggunakan sensor non-kamera (scanner, radiometer, spektrometer) dan kamera yang detektornya tidak menggunakan film tetapi menggunakan detector elektronik. Citra digital tidak selalu merupakan data rekaman langsung, tetapi dapat pula hasil rekaman data non-digital, seperti gambar dari monitor, televisi, atau data fotografik yang telah dikonversi menjadi bentuk digital (konversi dari kontinum ke diskrit). Pengolahan citra digital yang berbentuk data diskrit ini dilakukan dengan bantuan komputer yang bekerja dengan angka-angka presisi terhingga

Dalam fotogrametri analog, instrument mekanik dan optic (plotter) digunakan untuk membangun relasi geometrik. Pada fotogrametri analitik, pemodelan geometrik bersifat matematis. Analisisnya memerlukan plotters fotogrametri yang harganya mahal. Dalam fotogrametri digital, semua jenis citra (aktif maupun pasif) yang diperoleh dari pesawat terbang, satelit, dan lain-lain) dapat diproses. Seluruh proses fotogrametri bersifat digital, dan banyak komponen-komponennya yang telah diotomatisasi.

C. Peralatan Pengolahan Cita Digital

Pada umumnya, suatu proyek fotogrametri meliputi dua tahap, yakni: 1) akuisisi citra data pendukungnya (misalnya informasi kontrol medan) dan 2) pemrosesan citra untuk menderivasi citra dan produk vector. Tahap pertama mencakup beberapa langkah seperti desain projek, perencanaan misi, perolehan data, control medan dan jaminan mutu. Tahap kedua, mencakup penggunaan stasiun kerja fotogrametri digital atau DPW (*digital photogrammetric workstation*) untuk kerja pemrosesan data.

Sebuah DPW mengkombinasikan perangkat keras dan perangkat lunak komputer menurut kerangka kerja fotogrametri untuk mengolah data citra digital. Sebagai gambaran workstation lihat gambar 68. Suatu DPW terdiri dari sebuah workstation grafis, dengan perangkat penampil stereo (sebagian besar menggunakan perangkat ini) dan mouse 3D. Untuk DPW modern, tidak ada persyaratan tersedianya komputer sebagai host. Untuk keperluan sebuah DPW paling tidak dibutuhkan desktop PC paling tidak RAM 256, monitor 19-21 inch dan kartu grafis (VGA Card) yang bagus.

Desain DPW ke depan harus memenuhi kelengkapan dasar yang diperlukan. Suatu system fotogrametri digital didefinisikan sebagai konfigurasi hardware/software yang menghasilkan produk fotogrametri dari citra digital dengan menggunakan teknik manual dan otomatis. Keluaran dari system tersebut berupa koordinat titik objek tiga dimensi, permukaan terstruktur, fitur-fitur terekstaraksi, dan ortofoto. Ada dua perbedaan utama antara DPW dan stereoplotter analitik. *Pertama*, input data yang digunakan, data digital untuk diolah DPW lebih bersifat dinamis. *Kedua*, perubahan yang dibawa oleh system fotogrametri digital yang berupa potensi untuk pengukuran otomatis, dan penyelarasan citra (*image matching*) yang sederhana tidak sebagaimana stereoplotter analitik. Pengukuran otomatis dan teknik penyelarasan citra merupakan dua hal yang memiliki nilai tambah teknologi digital baru yang sangat berarti bagi fotogrametri.

Peralatan yang diperlukan untuk kerja fotogramteri digital mencakup perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Perangkat kerasnya berupa unit computer beserta peralatan pendukungnya sebagai DPW dan perangkat lunaknya berupa program computer yang perlu disesuaikan dengan spesifikasi perangkat keras (*hardware compatibility*) dan tujuan penggunaannya.

1. Konfigurasi perangkat keras

Perkembangan computer pribadi (PC) bersama dengan system operasinya telah mendorong lahirnya berbagai system pengolah data digital 64 bit yang dapat bekerja optimal. Konfigurasi perangkat keras system pengolahan citra digital pada umumnya dapat diterapkan pada berbagai level computer. Computer generasi baru

dengan dukungan prosesor ganda mampu bekerja secara multi-task dan multi-user.

Konfigurasi system perangkat keras untuk pengolahan citra digital secara umum terdiri atas enam sub-sistem, yakni subsistem computer, subsistem input video, susbsistem output video, susbsistem control proses interaktif, susbsistem penyimpanan citra, dan subsistem perangkat khusus pengolah citra (Murni dalam Sri Hardiyati, 2001).

a. Subsistem computer

Subsistem computer merupakan perangkat dasar yang dilengkapi peralatan untuk memasukkan data dan penampil hasil pengolahan data. Peralatan yang termasuk dalam lingkup subsistem ini adalah alat pembaca dan penyimpan pita magnetic (CCT), alat penyimpan dan pembaca disk, printer, dan berbagai jenis terminal yang kompatibel untuk alat komunikasi data (port serial, USB port, infrared, Bluetooth, dan lainnya).

b. Subistem input video

Citra digital merupakan besaran numeric yang merupakan representasi dari tingkat keabuan atau warna suatu objek. Citra digital ini dapat berasal dari perekaman langsung secara digital atau hasil konversi dari data analog. Data tersebut oleh subsistem ini dimasukkan ke system sehingga dapat diolah.

c. Subsistem output video

Hasil proses pengolahan citra digital yang berupa cetak film, cetak gambar plotter, bentuk peragaan monitor dapat ditayangkan oleh subsistem ini. Perkembangan dalam teknologi video (VGA Card) berdefinisi tinggi karena kemampuan GPU (*graphics chip*) yang ada pada VGA Card lebih powerfull daripada prosesor computer (CPU) dalam penghitungan matematis. Dengan demikian hasil penolahan data dapat ditampilkan dalam tempo yang cepat, gerakan yang sesuai, resolusi tinggi, dan warna yang sangat baik.

d. Subsistem control interaktif

Subsistem ini meliputi peralatan yang digunakan untuk komunikasi data antara pengolah data dengan mesin. Alat umum yang paling sederhana adalah terminal, keyboard, dan mouse. Saat ini telah banyak dikembangkan

berbagai alat komunikasi data yang semakin memudahkan kerja pengolahan data. Media transfer data yang sangat mudah antara lain CD/DVD ROM/RW.

e. Subsistem penyimpanan file citra

Saat ini telah bermunculan perangkat storage dalam ukuran yang sangat besar. Harddisk telah hadir dalam ukuran terabyte (ribuan giga). Subsistem ini berfungsi sebagai penimpan memori tetap (virtual memory), dan untuk mempercepat proses pemindahan file dari disk ke memory digunakan penyimpan sementara, seperti flashdisk, blueray, DVD, dan lain-lain.

f. Subsistem perangkat keras khusus pengolah citra

Perangkat keras pengolah citra terdiri dari (1) video digital sebagai prosesor pengolah citra yang akan mengolah citra secara parallel terhadap pixel citra; (2) bagian memori citrayang terdiri dari beberapa susunan pixel, (3) bagian perangkat keras untuk pembesaran, penggulangan, dan sebagainya, (4) bagian control keluaran video, yang berfungsi untuk mengatur warna.



Gambar 68. Seperangkat komputer sebagai workstation untuk pemrosesan fotogrametri digital

Ada banyak cara untuk menyediakan stereo viewing, termasuk monitor yang dapat di-split menjadi stereoskop sederhana, anaglif (tampil merah/hijau), polarisasi dan metode CrystalEyes. Pemilihan kelengkapan perangkat pada umumnya disesuaikan dengan kebutuhan pekerjaan dan factor anggaran, diantara kelengkapan itu dapat dilihat pada gambar 69. Hal yang perlu diketahui bahwa banyak operasi fotogrametri digital tidak membutuhkan stereo viewing, kecuali untuk pengukuran koordinat 3-D, oleh karena itu banyak DPW tidak menyediakan. Untuk memaksimalkan efsisensi pemetaan, akurasi dan kenyamanan operator.



Gambar 69. Kelengkapan untuk bekerja dalam fotogrametri digital

2. Konfigurasi perangkat lunak

Konfigurasi perangkat lunak (software) pengolah citra digital secara garis besar dibagi menjadi 7 modul sebagai berikut:

a. Modul proses file masukan dan keluaran

Modul ini berfungsi untuk (1) memindah file citra dari penyimpanan lain ke disk memori computer atau sebaliknya; (2) memindah file antar memori internal; (3) memindah dan menyimpan data masukan berbentuk gambar ke memori citra; dan (4) mengatur proses penayangan citra secara detail.

b. Modul filtering dan koreksi radiometric

Modul ini berfungsi untuk meningkatkan kualitas citra. Termasuk dalam proses ini adalah filtering, enhancement, pengaturan symbol, dan lain-lain.

c. Modul proses registrasi citra dan koreksi geometric

Berfungsi untuk proses registrasi penggabungan dua citra atau lebih secara spasial (mosaicking). Registrasi dilakukan dengan cara interpolasi berdasarkan titik control yang diketahui koordinatnya melalui koreksi geometric.

d. Modul klasifikasi citra

Modul klasifikasi citra mencakup beberapa fasilitas yang berfungsi untuk (1) menyusun kunci interpretasi/pembentukan sel latihan (training sample); (2) mengelompokkan data; (3) menghitung statistic tiap kelas/pengelompokan pola dari objek yang sama; (4) menggambarkan diagram ruang; (5) memproses klasifikasi citra.

e. Modul perhitungan statistic

Proses pengolahan citra seringkali membutuhkan nilai-nilai statistic, seperti rata-rata, standar deviasi, varian dan kovarian matriks, histogram distribusi nilai pixel, pembuatan diagram (scatter diagram) dan lain-lain, oleh karena

itu modul ini diperlukan. Bahkan dalam beberapa kasus diperlukan garis regresi nilai pixel antar berbagai band.

- f. Modul proses pembuatan laporan dan peragaan secara grafis.

Modul operasi matematika meliputi segala operasi yang bersifat aritmatik dan bersifat logic (AND, OR, NOT, XOR). Misalnya analisis AND digunakan untuk menggabungkan dua criteria pada suatu area. Kalau criteria yang dipakai A, maka criteria yang lain sebagai NOT A. Disamping untuk keperluan operasi logika, modul ini berguna untuk (1) penggabungan citra secara spectral, misal analisis lebar (dengan zooming); (2) analisis interseksi untuk menangani klasifikasi citra diantara perpotongan kenampakan objek, seperti sungai dengan jalan, rel kereta dengan jalan; dan (3) analisis garis dan bidang untuk cropping citra dalam menentukan batas wilayah pada radius tertentu, seperti buffering dalam SIG.

D. Alur Kerja Fotogrametri Digital

Strynatika (2007) membagi alur kerja fotogramteri menjadi tiga periode, yakni: alur kerja tradisional, alur kerja digital, dan alur kerja masa depan. Alur kerja tradisional mencakup pekerjaan proses penyiaman (scanning), mengoreksi citra (*image dodging*), penyetelan proyek, informasi kamera, orientasi interior, triangulasi udara, generalisasi medan, pengeditan data medan, ekstraksi fitur, ortofoto dan pembuatan mosaik. Perbedaan alur kerja tersebut dengan alur kerja digital adalah penggunaan data digital secara langsung, penggunaan citra resolusi sangat tinggi dan semua jenis data citra dapat diolah (tidak terbatas pada foto udara), dan fotogramteri modern biasanya dipadukan dengan GPS (*global Positioning System*). Untuk mengetahui alur kerja fotogramteri mendatang, dapat dimulai dari melihat perkembangan alat bantu dalam kerja fotogrametri secara langsung, seperti perkembangan dalam perangkat keras komputer, teknologi sensor baru, dan solusi enterprise. Fotogramteri masa depan memungkinkan pengolahan data menjadi sangat cepat, pengguna tidak perlu lagi menyimpan data pada storage tapi dapat disimpan di komputer server, sehingga perlu metode yang berbeda untuk mengaksesnya.

Ada kecenderungan meningkatnya kebutuhan terhadap tools untuk mengolah dan mengarsip data. Banyak pengguna mulai mencoba mempublikasikan data yang tersimpan pada server dan pada web atau aplikasi klien seperti Google Earth. Teknologi sensor juga berkembang sangat cepat, sehingga kemungkinan diperoleh data medan dengan akurasi dan densitas yang sangat tinggi. Hal ini akan mempengaruhi alur kerja fotogramteri.

Produk primer dari kerja fotogrametri digital adalah model elevasi digital (*digital elevation model*=DEM), citra terektifikasi-orto atau citra orto (*ortho-images*) dan fitur-fitur terekstaksi (vektor). Produk yang paling populer adalah DEM. DEM adalah file digital yang berisi elevasi medan yang sesuai dengan posisinya di lapangan secara tetap menempati interval horizontal (USGS, 2001). DEM biasanya diperoleh dengan cara interpolasi peta kontur digital dengan menggunakan perangkat lunak tertentu berbasis raster. DEM digunakan untuk menampilkan gambar/peta 3-tiga dimensi yang berupa kemiringan lereng, aspect (arah kemiringan), dan profil-profil medan antara titik-titik terpilih. USGS menggunakan DEM yang merupakan kombinasi dari grafik raster digital, grafik garis digital, ortofoto digital persegi empat untuk mempertajam informasi visual bagi ekstraksi data dan keperluan revisi serta untuk membuat citra digital hybrid yang indah dan menarik. Aplikasi non-grafis seperti data gravitasi dan model medan untuk digunakan dalam pencarian sumberdaya energy, penghitungan volume waduk, membuat estimasi kemungkinan longsor lahan juga dapat dikembangkan.

Perangkat lunak yang biasanya digunakan untuk keperluan tersebut antara lain: ArcGIS, ILWIS, Idrisi, Autocadmap, dan lain-lain. Disamping istilah DEM terdapat pula istilah digital surface model atau digital terrain model (DTM). Disebut DTM karena terrain (medan atau bentuk fisis permukaan bumi) diwakili oleh suatu model tertentu yang terbentuk dari sekumpulan titik-titik yang diketahui koordinat ruangnya. Kumpulan titik tersebut dapat diperoleh dengan cara terestris, fotogrametris atau digitasi. Dengan bantuan komputer data tersebut disimpan dalam bentuk digital pada storage komputer (hard disc, blue ray, DVD, CD, flahdisk) dan dapat dipanggil kembali untuk berbagai keperluan dan diupdate

bila terdapat data baru. Produk sekunder diturunkan dari produk primer antara lain peta kontur (diturunkan dari DEM), peta-peta kontur citra (citra orto yang dioverlay dengan peta kontur) sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 58, peta garis citra (citra-orto dengan overlay vector) dan model-model kenampakan 3-D (DEM dengan paduan citra dan fitur 3-D).

1. Penyiaman citra

Penyiaman citra seringkali menjadi bagian dari kelengkapan fotogrametri digital. Kualitas geometrik dan resolusi penyiaman merupakan dua hal utama yang harus diperhatikan. Paling tidak resolusi penyiaman adalah 10-20 μm yang diperlukan untuk tujuan pemetaan. Banyak vendor menyediakan penyiaman yang layak untuk fotogrametri, tetapi biasanya harganya mahal. Banyak studi menunjukkan bahwa penyiaman desktop level bawah (murah) sampai level menengah dapat menyiam dengan hasil yang masuk akal dalam hal kualitas geometriknya jika dikalibrasikan secara teliti.

2. Perolehan citra digital

Harga sensor pencitra digital telah mengalami penurunan secara drastis pada akhir-akhir ini seiring dengan bertambahnya penetrasi pasar dan penerimaan pengguna. Banyak sensor pencitra baru (seperti sensor satelit, kamera digital yang dipasang pada pesawat udara, dan lain-lain) telah diciptakan. Sistem kamera digital pesawat udara saat ini banyak digunakan dalam proyek-proyek besar dan diharapkan tumbuh secara cepat dalam beberapa tahun ke depan. Sistem penginderaan jauh komersial seperti Space Imaging's IKONOS dan DigitalGlobe's QuickBird Satellite, Cartosat, ALOS dan lain-lain telah membangkitkan pasar perolehan citra. Karena orbital tinggi yang berulang-ulang, kemampuan multispectral dan stereo, dan harga perolehan data yang terjangkau dan stabil, citra satelit digital akan mempunyai dampak yang signifikan terhadap fotogrametri digital.

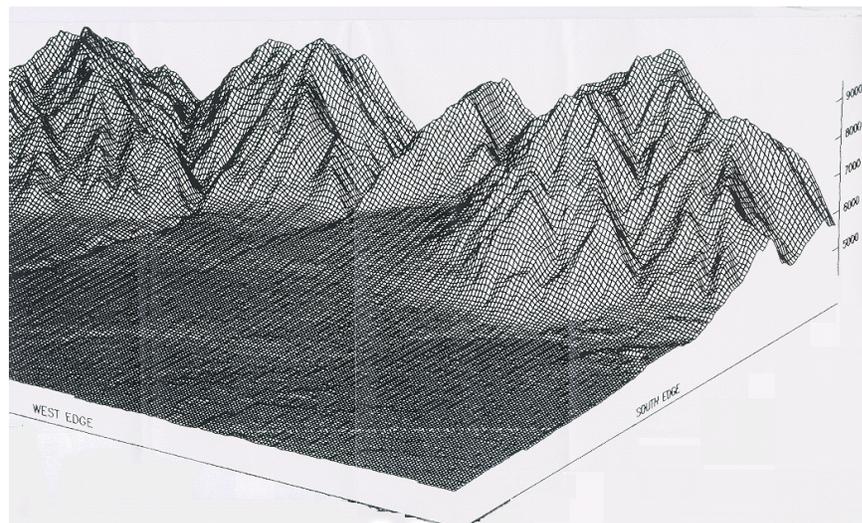
3. Orientasi dan triangulasi

Orientasi dan triangulasi merupakan langkah fundamental dalam fotogrametri. Orientasi digunakan untuk memperbaiki relasi geometrik antara suatu objek dan apa yang tertampil pada citra. Di dalamnya, orientasi

absolute dan relative merupakan modul dasar yang digunakan untuk menurunkan koordinata 3-D suatu objek dari citra

4. Pemerolehan DEM

Salah satu proses fundamental dalam fotogrametri adalah mengidentifikasi dan mengukur titik-titik yang berhubungan pada dua atau lebih citra/foto udara yang bertampalan. Pada DPW, pengguna dapat melakukan pekerjaan tersebut secara otomatis—sebuah proses yang disebut penyelerasan citra (*image matching*) suatu aspek yang menjadi salah satu topik penelitian yang populer dalam dekade lalu, suatu DEM dapat diperoleh secara otomatis. Biasanya, perolehan DEM manual (mengukur titik elevasi yang mengapung dalam mode pandang stereo), proses bekerja yang sangat intensif. Pada masa kini DPW berkemampuan tinggi mampu membuat DEM secara otomatis dan semi otomatis. Tetapi hasil image matching masih tidak tangguh (dengan bangunan yang padat), tubuh perairan, pegunungan berelief tinggi dan daerah dengan tekstur rendah. Pengeditan secara manual dan penjaminan kualitas biasanya diperlukan setelah pemrosesan otomatis.



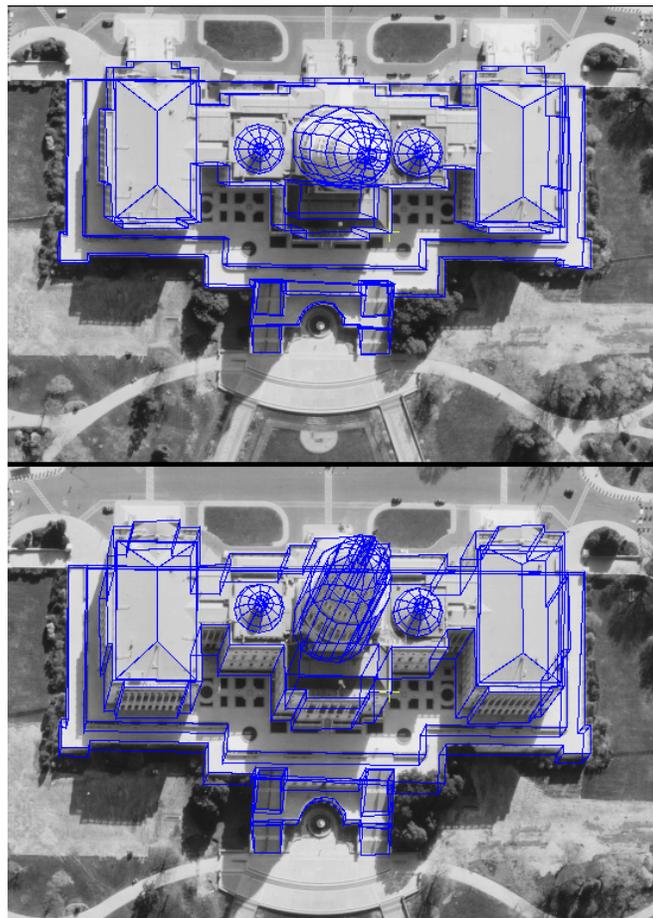
Gambar 70. Model elevasi digital (DEM) hitam putih



Gambar 71. Model Elevasi digital berwarna



Gambar 72. Meja untuk pembacaan citra digital

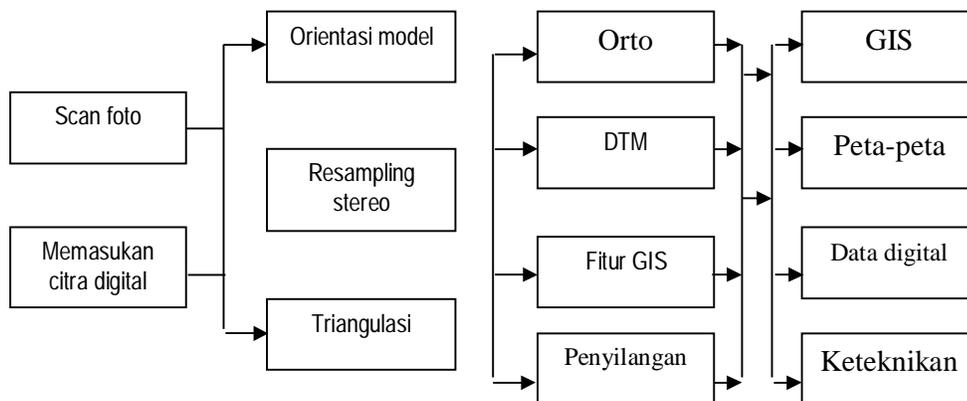


Gambar 73. Model bangunan 3-D yang diturunkan dari citra stereo

Madani (2006) mengemukakan alur kerja fotogrametri digital berdasarkan software sistem fotogrametri terpadu Intergraph (*Intergraph Digital Photogrammetry System Software*). Alur kerja tersebut dibagi menjadi dua, yakni pembuatan basisdata visual dan operasi eksploitasi basisdata visual. Pembuatan

basisdata visual berkaitan dengan penyiaman foto, pengukuran luas/isi (*mensuration*) dan pengaturan citra (oreintasi dan/atau bundle), dan pemerolehan citra epipolar. Eksploitasi basisdata visual berkaitan dengan fitur 3-D/kumpulan DTM (*Digital Terrain Model*), pemerolehan model CAD (*Computer-Aided Design*), dan pembuatan ortofoto.

Secara umum, alur kerja fotogrametri digital terdiri dari: 1) mensurasi dan triangulasi; 2) fitur 3-D dan ekstraksi DTM; dan 3) pemerolehan ortofoto. Untuk dapat memperoleh keluaran yang baik dan bermakna, maka fotogrametri digital dalam kerjanya tidak dapat dipisahkan dari Sistem Informasi Geografis (SIG). Perpaduan fotogramteri digital dengan SIG memungkinkan diperolehnya peta foto yang secara visual menarik, secara metric diperoleh ukuran yang tepat, dan secara kartografis sesuai dengan proyeksi penggambaran permukaan bumi di atas bidang datar. iAlur kerja fotogrameteri digital dengan system Intergraph adalah sebagaimana ditunjukkan gambar 74 berikut ini:



Gambar 74. Alur kerja fotogrametri digital

E. Keunggulan dan Kelamahan Fotogrametri Digital

1. Keunggulan Fotogrametri Digital

- a. Tidak membutuhkan peralatan optic dan mekanik yang harganya mahal dan sangat jarang ketersediannya

- b. Pekerjaan menjadi lebih praktis dan efisien, karena banyak diantara pekerjaan-pekerjaan fotogramteri dapat diotomatisasi
 - c. Data tersimpan dalam bentuk yang ringkas, tidak memerlukan tempat/ruang luas.
 - d. Data digital dapat dengan mudah dikombinasikan dengan data atribut lain, sehingga data citra dapat lebih informatif
 - e. Fotogramteri digital menyediakan fasilitas, yang memungkinkan kualitas citra dapat diatur sehingga satu jenis citra dapat digunakan dalam berbagai keperluan
 - f. Tidak memerlukan peralatan yang jumlah dan ukurannya besar-besar, seperti stereoplotter analitik, stereometograf, Zoom Transfer Scope, dan lain-lain.
 - g. Kompatibel terhadap semua jenis citra, tidak terbatas pada foto udara (hasil perkaman dengan kamera)
 - h. Prospektif, karena perkembangan fotogramteri berkorelasi positif dengan perkembangan teknologi perangkat keras dan perangkat lunak computer.
2. Kelemahan
- a. Problem ukuran citra digital yang sering kali sangat besar. Sebuah foto udara berformat 23 cm x 23 cm disiam pada resolusi 20 mikrometer, membutuhkan lebih dari 200 megabyte ruang penyimpanan Kesalahan dalam penanganan ukuran citra yang besar ini dapat menyebabkan alur kerja fotogramteri menjadi terganggu. Cara paling efisien untuk menangani data citra yang besar adalah dengan membuat format file yang ringkas dan teknik mengkompres citra.
 - b. Kegagalan fotogrametri digital sering terjadi karena kegagalan dalam input data. Saat dilakukan proses scanning
 - c. Langkah-langkah pemrosesan citra digital memerlukan tenaga yang benar-benar terlatih dan professional.

- d. Pada beberapa perangkat lunak kemampuan membaca file yang telah diolah dengan perangkat lunak lain tidak dapat dilakukan secara langsung, karena harus melalui prose konversi.

DAFTAR PUSTAKA

- Gunadi, 1996. *Lecture Note Guide on Fotogrammetry*. Yogyakarta: Gadjah Mada University-Bakosurtanal-TCDC Course Programme Integrated Use of Remote Sensing and GIS for Landuse Mapping.
- Kubik, D.L. and Greenwood, J.A. (2006). *Development of Photogrammetry of Stress Analysis and Quality Control*.
- Ligterink, G.H., 1987. *Dasar-dasar Fotogrametri Interpretasi Foto Udara*. Jakarta : Penerrbit Universitas Indonesia (UI Press).
- Lillesand, Thomas M. and Ralph W. Kiefer. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation Third Edition*. New York : John Wiley & Sons.
- Madani, Mostafa. 2006. *Integrph Integrated Digital Photogrammetry System*. Huntsville: Intergraph Corporation
- Paine, David P., 1993. *Fotografi Udara dan Penafsiran Citra Untuk Pengelolaan Sumberdaya Edisi ke-2*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press. Terjemahan Imam Abdurahman. Buku Asli : *Aerial Photography and Image Interpretation For Resource Managament*, John Wiley & Sons.
- Sri Hardiyanti, F. 2001. *Interpretasi Citra Digital*. Jakarta: Grasindo
- Strynatka, Ryan. 2007. *Photogrammetric Workflows: Traditional, Digital and the Future*. Diakses dari www.ebdb.net/details.aspx?id=ded11c11-6d7d-4c4f-9a87-d9b0f8d35380&r=short&refp=633&s=digital+photo-grammetry%3A+A+practical+course
- Sutanto, 1994. *Penginderaan Jauh Jilid 1. Cetakan ke-2*. Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.
- _____, 1994. *Penginderaan Jauh Jilid 2. Cetakan ke-2*. Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.

- Tao, C.V. (2002). Digital Photogrammetry The Future of Spatial Data Collection. <http://geoplace.com/gw/2002/0205/0205dp.asp>. diakses 10 Juni 2004
- Tate, Eric. 1998. Photogrammetry Application in Digital Terrain Modelling and Floodplain Mapping. Diakses dari www.usgs.gov/research/gis/title.html
- USGS, 2001. Digital Elevation Models. Dalam http://rockyweb.cr.usgs.gov/elevation/dpi_dem.html
- Wolf, Paul R., 1993. *Elemen Fotogrametri*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press. Terjemahan. Buku asli diterbitkan tahun 1983.