１４．１　概　説

この章では阪神大震災調査委員会に設置された２つの部会「災害情報のディジタルファイル化」及び「ディジタル写真測量による災害調査」の活動をまとめて報告する。　この２つの部会は測量、写真測量に関係が深く、共通の研究者が調査活動を実施したため事実上１つの部会となった。　両部会は１つのワーキンググループを設置し、主としてワーキンググループで活動を行ない、平成７年４月２０日より平成７年１１月２０日までに７回の打ち合わせ会を持った。　両部会の活動内容を分類すると以下の通りである。

●「ディジタル写真測量による災害調査部会」

この部会の活動内容は当初次の３点とした。

（１）震災直後の小縮尺航空写真（写真縮尺１：２５，０００程度）からディジタル正射投影画像（ディジタルオルソ画像）を作成し、数値地形モデル（ＤＴＭ）などと重ね合わせて種々の地盤工学的調査を広域で実施する。　ディジタルオルソ画像は写真画像を正射投影変換したもので、写真の持つ情報量と地図の持つ位置精度を合わせ持ち、今後地図の代用として広く利用されると思われる。

（２）震災前後の大縮尺航空写真（写真縮尺１：４，０００程度）を使って、地盤・構造物の変位、変形を３次元的に計測する。　目標精度は１０ｃｍとする。

（３）震災等による災害調査に関する画像解析システムを構築し、そのマニュアル化を行なう。

活動状況としては、解析や作業に許される時間、利用できる解析機材、人手など多くの現実的制約のため、現時点においてはすべての成果を公表できる段階に至っていない。　そこで、この報告書では、理論的側面、解析手法の解説に重点を置き、同時に得られている成果の１部を公表する。　さらに、これまでに得られた成果についても、紙面上の制約もあって詳しい計測データ等を記載できないので、多くの資料とともに資料編で報告する予定である。　以下はこの部会のこれまでの活動内容の概要である。

（１）ディジタルオルソ画像を作成するには、地形標高を自動的に計測するいわゆるステレオマッチングが必要になり、どのソフトを使うかが問題となったが、世界的に最も優れた製品であるＭＡＴＣＨ－Ｔ（ＩＮＰＨＯ社製）を利用した。

（２）阪神大震災における地盤変状を写真測量を利用して１０ｃｍ以内の精度で計測するには、空中三角測量を地図作成の基準で実施できないことが予想された。　そこで、シミュレーションで地上基準点配置、増設基準点配置等に検討を加え、この結果を踏まえて実際の航空写真による空中三角測量を実施した。

（３）解析対象地域としては芦屋市を選んが、芦屋市には震災３年前の空中写真があり、かつ比較的信頼性の高い地上基準点が得られていたためである。　また、この地域周辺には阪神高速道路倒壊現場があり、地盤工学的にも関心が高い地域であった。　地盤変状解析は主として解析図化機により実施したが、同時に現在急速に研究開発が進んでいるディジタル写真測量を利用することも検討した。　結果として、ディジタル方式は現在のところ画質の面でフィルム方式には及ばないが、多くの優れた点があることが実証でき、今後の展望を開くことができた。

●「災害情報のディジタルファイル化部会」

この部会は「ディジタル写真測量による災害調査部会」及び「災害情報データベース化の技術動向部会」のための資料収集を目標としており、活動内容は次の４点である。

（１）災害地域に関する代表的な地形図、土地利用図、地質図、震災現況図等を収集して、ディジタルファイル化し、検索を可能にする。

（２）震災前後の撮影された空中写真の所在を調査し、ＣＡＤとデータベースを利用して写真データを収集、整理する。　ＣＡＤは写真の標定図をまとめるために使用する。

（３）震災前後の地上基準点測量、水準測量の資料を収集し、データベースに格納する。

（４）阪神地域に関する既存の３次元数値地形モデルを収集し、ＣＡＤ上のプラットフォームとする。

資料の収集は比較的問題なく実施することができた。　そして、震災後の空中写真は多くの航測会社や公共団体で撮影されており、阪神地域全域に亘って種々の自治体が震災前後の地盤変状を計測していることがわかった。　また、地上基準点等の資料については各方面から御好意により多量収集することができた。

収集した資料については大半はこの報告書に載せることができないので、資料編に廻すことにし、ここでは資料収集の活動報告、及び収集した資料に関する留意点等を記述する。

「災害情報のディジタルファイル化」および
「ディジタル写真測量による災害調査」ワーキンググループ名簿

岡本 厚（主査：京都大学工学部）
長谷川 博幸（主査：株式会社パスコ）

伊東 太作（奈良国立文化財研究所）
大谷 仁志（株式会社トプコン）
小野 徹（京都大学工学部）
小林 俊一（京都大学工学部）
高浜 洋治（株式会社トプコン）
服部 進（福山大学工学部）
松村 正一（国土地理院）
森 伸一郎（飛島建設）
吉田 望（佐藤工業）
内田 修（アジア航測株式会社）
沖村 孝（神戸大学工学部）
木村 亮（京都大学工学部）
関口 秀雄（京都大学工学部）
西村 明（国際航業株式会社）
牧野 定夫（株式会社パスコ）
三村 衛（京都大学防災研究所）
安田 岩夫（株式会社八州）

14.2 空中写真の収集と撮影標定図のデータベース化

はじめに

平成７(1995)年１月１７日未明阪神・淡路地域に大地震が発生した後、航測各社、国土地理院は直ちに、マスコミの実況放送に遅れじと空中写真撮影航空機を被災地上空に向かわせた。そして地上から立ち上る煙の中で、都市計画図図化にも利用可能な1:7000、1:10、000等の写真縮尺の、連続重複した空中写真を撮影し、それ以後ほぼ連日現地の気象・航空管制状況が許す限り、さらに大縮尺の空中写真を取り続けた。このような初動段階のマッピング業界の大縮尺の空中写真撮影を始めとする救助支援活動は、長年培われた、業界の使命感に支えられて始まった。さらに震災直後から調査活動を組織した地盤工学会「阪神大震災調査委員会」においても、空中写真の持つ資料価値が早くから認識され、地図データの収集と空中写真による３次元計測の効果を地盤工学的解析調査と連動させる活動が始まった。併せて　阪神・淡路大震災は各種災害情報のインテグレーションにディジタルマップデータが重要であることを示したので、当部会は災害から一か年経った今日、標題の目標に照らして、今までの経過と現在航空写真測量各機関が持っているポテンシャルを検討し、災害情報のディジタルファイル化、地図情報化を目指すことになった。この部会は、航空測量会社の震災前後の空中写真の撮影状況をデータベース化する資料準備の部会として、「ディジタル写真測量による災害調査」部会と「災害情報データベース化の技術動向」部会に関連する成果を集積した。

震災前後の「空中写真の収集と撮影標定図のデータベース化」は国土地理院と航空測量会社の、重複連続して撮影され写真３次元モデルを形成して地図作成に使用可能な、空中写真(データ)を撮影標定図と呼ばれる1/５万地形図上の撮影カメラ位置を示した地図からＣＡＤ・データベースの環境に移し変えるものであった。震災後の撮影標定図は、空中写真の密着印画紙のカメラ中心位置を、目視比較によって、地図上に印して作成されたものである。また震災前の空中写真の標定図は、国土地理院近畿地方測量部の公共測量届の計画図をコピーしたものである。これらの震災前後の標定図は、国土地理院作成の震災現況図(1/１万地形図）等のラスタ入力した地図を背景にして、MS-ACCESS等の外部データベースを用いてデータ検索が可能である。この震災前後の「空中写真の収集と撮影標定図のデータベース化」の部会の調査活動は、地盤工学会「阪神大震災調査委員会」に向けて「空中写真データベース」を作成・移管し、災害情報の３次元空間情報データベースの一部をパソコン（ＰＣ）システム上に構築することであった。

14.2.1 当部会による空中写真の収集、３次元モデル計測及びデータベース化

１）　航空測量各社の震災直後の空中写真の撮影

航空測量会社の撮影体制は、従来の火山災害・台風災害等と異なる予兆のない災害に対しても遅れることなく機能し、震災発生後に航空管制の許可を待って、午前１０時頃には、現場上空に達し、以降、上空視界・航空管制の条件が許す限りほぼ２週間連続して空中写真の撮影を続けた。震災直後の撮影は、通常の東西方向の撮影コースとは異なり簡便に撮影計画図を作成して現地の状況に合わせて、報道関係の航空機の間を縫って行った。撮影記録も撮影高度、撮影方向、気流の状態との対応、連続したコース・ブロックの形成等について、操縦士、撮影士の通常と異なる対応を窺わせるものもある。

またこのときは、当時開発中であったＧＰＳ航法装置の支援はなく、地上の煙・雲影・航空管制との対応等緊急時の対応になれている操縦士、撮影士の技術が撮影した空中写真の品質確保の鍵であった。

震災直後の各社の被災地での空中写真の撮影経過をまとめたのが次の表である。

表　14.2.1　震災直後空中写真撮影経過表

撮影会社名	撮影期間	撮影縮尺	撮影コース数	撮影枚数	主な撮影地区
朝日航洋	95/1/17-1/21	1:5,000-1:10,000	37	1710	阪神大震災地域全域
アジア航測	95/1/17-2/11	1:4,000-1:20,000	160	4979	阪神大震災地域全域
エア・グラフ	95/1/17	1:10,000	2	109	大阪北部、西宮市、神戸市
かんこう	95/1/17-2/19	1:4,000-1:15,000	13	900	阪神間市街地
国際航業	95/1/17-1/21	1:4,000-1:20,000	48	1678	六甲、ポートアイランド、神戸市
国土地理院	95/1/17-2/11	1:7,000-1:20,000	33	2616	阪神大震災地域全域
東亜建設工業	95/1/28	1:25,000	2	36	阪神間、関西空港
中日本航空	95/1/17-1/21	1:4,000-1:20,000	37	1183	神戸市内、西宮市街地
パスコ	95/1/18-2/28	1:1,300-1:10,000	122	4178	阪神大震災地域全域、淡路島
八州	95/1/18-1/21	1:8,000-1:14,000	26	664	阪神地区

2）　空中写真撮影標定図の収集

震災直後に作成された撮影標定図は通常の空中写真と異なり不特定多数のユーザーを想定して１週間程度で作成され、国土地理院では震災後数日で、撮影標定図、販売元を示した資料を、国の機関を中心に配布し、(注14.2.1)民間航空測量会社は、地方自治体、研究機関、建設業界、不動産業界等に空中写真を販売した。当部会はワーキンググループの結成と併せて、このような撮影標定図（コピー）を早くから収集し終えた。

3）　震災後の３次元モデル計測、空間データの整備

震災後の写真３次元モデル計測の要請は、工場の法規制に基づく被害調査、道路の緊急復旧に伴う地形図作成、地滑りと２次災害対策、震災直後の状況把握を目的とした学術調査等で先ず起こった。（注14.2.2）次いで、都市計画図などの大幅な改変に伴い、数カ月後から１年後の今日まで、自治体を計画機関とした地形図の図化作業が行われている。このような例が阪神高速道路現況図作成、神戸港護岸変状計測、淡路島野島断層地形調査、兵庫県地滑り調査等である。また、この震災を契機に建設省を中心に空間データ基盤整備の全国展開の気運が高まり、1/2,500地形図、1/10,000数値地図等の２次元電子地図データ化も進んでいる。

4）　空中写真モザイクの作成、空中写真画像ＣＤ－ＲＯＭの作成

今回の震災時の調査でも、空中写真アルバムが調査・対策担当者に提供された他、全域をカバーする空中写真を貼り合わせたモザイクも国土地理院、航空測量会社で作成され、調査基礎図面と併せて用いられた。他にも、空中写真をラスタ画像として取得し、新たな媒体としてＣＤ－ＲＯＭを用いて地名・公的機関等のデータベースと併せて、ＰＣ上で表示・検索が可能にするシステム・データも販売された。(注14.2.3)

5）　当部会での３次元計測とデータベース化の方針

調査委員会の中で、特に空中写真を対象とするディジタルファイルを作成してディジタル写真測量の技術により震災地域の対象物の３次元変状計測をめざした、当部会では撮影後の空中写真の持つ３次元記録性に当初から注目してそのデータベース化を行うこととした。さらに震災の様々な現象について地盤工学の分野の解析調査に用いる３次元計測データを、主として写真測量によって取得し、以下の目的を遂げようとした。

（１）阪神地域全域にわたる空中（写真）三角測量に基づく、写真３次元モデルの形成

（２）地形図作成仕様以上の高精度の写真モデル３次元計測

（３）地図データをベースにした空中写真撮影標定図作成法の新たなシステム化

（４）３次元地形モデルをプラットフォームとした、三角点、基準点、水準点及び３次元写真モデル内変状計測点の震災前後の変位計測による、地盤変状の表現

14.2.2 震災直後の空中写真の特長と利用法

1)　初動体制、救助活動への貢献

報道機関のビデオ映像、震災建物・延焼中の家屋の空中斜め写真等の初期の災害対策に役立てられた写真の他に、倒壊橋脚の現場写真等の調査・復興に向けた専門性の高い写真が全域で数多くとられ、今までの緊急報告書などの主要な資料となっている。一方で、空中写真も全域を均一・広範囲に撮影していることから、震災直後から直ちに行政機関・建設業界・不動産業界・保険業界・ライフライン関連の諸機関などで購入され、初期・中期の復興対策・救助活動に地図と並び、必需品として用いられた。

2)　撮影体制の運用状況、撮影時の特徴

震災時は、他の災害の場合と比べても一層緊急性の高い対応を求めているが、建設省等を除いては事前に、空中写真の撮影を準備している機関はなく、民間航空測量会社の自発的な撮影が期待されているのみである。このような環境では、撮影業務も撮影担当会社の当番撮影士・操縦士の技術と経験によって撮影計画がなされ、現地に向かう航空機との交信の中で概略の追加指示が行われた。また、現像所の配備も課題であった。撮影中の撮影コースと撮影主点の指示は、小縮尺の地形図と上空での撮影士の目視による確認で行われる。また、通常の撮影では認められない雲影・火災の煙等も撮し込まれている一方で対空標識がなく画質も同一撮影コース内で大幅に異なる等、迫真性と対極となる、写真測量を用いる際の不利な条件も存在する。

3)　震災復興と現地の迅速な変化に対する空中写真の記録性・３次元計測資料としての価値

震災復興のために計画して撮られる空中写真では予め設置された対空標識と呼ばれる測量標が撮し込まれる。震災直後の空中写真では、代わって、駐車場の白線、道路の路面表示等が臨時の対空標識として３次元空中写真モデルを形成するのに用いられる。このような３次元空中写真モデルは、空中三角測量として重複連続した空中写真を同時に平均計算することによって、高精度に３次元地上座標を取得する対象となる。

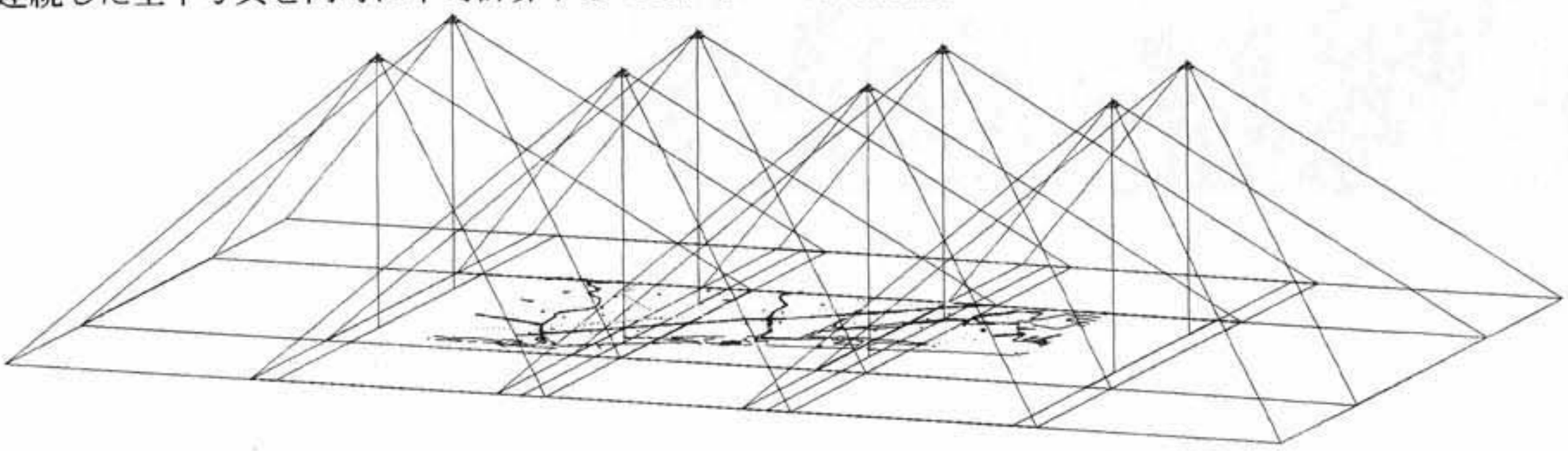


図　14.2.1　　空中写真撮影と写真３次元モデル形成

一般に空中写真測量の精度は、撮影高度の1/10,000位であるから1/5,000の写真縮尺（撮影高度750m）の場合約８cm程度となる。併せて復興時の急速な変化を広範囲、1/5,000の写真縮尺で１写真モデル当たり約500m×1,000m、で記録することができ、その後、数年あるいは数十年後の任意の時点で３次元計測が可能となる。このためには撮影範囲内での基準点（標定点）と空中三角測量の工程が準備されることが必要である。空中写真撮影航空カメラは本来その光学的・幾何学的厳密性から、撮影の際に地上で対応している基準点を持つことによって、３次元計測機器として地上測量機械（トランシット）に匹敵する精度を持つ。また、空中写真を用い完全な平面の平行ガラス板面に圧定して座標測定分解能１μm、測定精度２～２０μmで計測できる写真測量３次元座標測定機（写真測量では３次元地形図を作製する機械であることから解析図化機と呼ぶ）によって高精度の写真３次元モデルを形成する。このプロセスは、単一の写真３次元モデルについては、標定、複数の場合は空中三角測量と呼ばれる。ここで、厳密解法の空中三角測量平均計算プログラムによって、地上基準点精度、空中写真の観測精度に対応する高精度の点位置座標を与える。(写真　14.2.3　参照)

4)　福井大震災直後・戦後復興期（１９４８）の神戸市域の空中写真

阪神・淡路大震災と類似の都市直下型の地震として知られる福井大震災（1948年）では、当時極東米軍地図局で進んでいた日本全国の空中写真撮影計画は直ちに対応し翌日の撮影を行っている。ここでの空中写真は、当時の秘密性・空中写真測量の技術レベル（特に計測用機材と空中三角測量技術）から現在に写真の記録を残すのみであり、３次元写真モデル（地上３次元座標）を復元することができない状態である。このような写真の記録性の例としては国土地理院の空中写真ライブラリの他に、奈良国立文化財研究所所収の民間撮影空中写真の航空写真検索システムがあって、多くの未発見の写真資料を後世に伝えるものとなっている。

上記の１９４８年当時の極東米軍地図局の全国空中写真の中には、戦後復興期の阪神地域の1/20,000の縮尺の写真資料が含まれている。このような写真資料を今回の空中写真データベースでは、住吉川流域をサンプルとして収録している。次の写真に数値地図10000とAutoCADの環境で重ね合わせた1948年当時の米軍写真に写った海岸線の状況を示し資料の対比方法の例と併せて写真測量３次元計測機（解析図化機）を示した。

写真　14.2.1　１９４８年当時の神戸市住吉川河口部のディジタル画像データと解析図化機

5)　空中写真のアルバム利用・モザイク利用・簡易コピー利用と撮影標定図の収集

空中写真は、撮影コースに沿って連続・重複してとられるので、撮影標定図を索引にしてアルバムを作成して利用する。このような空中写真アルバム、写真のプリント及び標定図の作成は市内の写真ラボと比較して、震災時には処理に時間がかかった。写真現像機は最近では飛行場内に設置され、印画紙の作成は写真ﾛｰﾙﾌｨﾙﾑ(25cm×60m)・引伸写真が特殊サイズなので専用の写真ラボで行われる。また撮影標定図は1/25,000あるいは1/50,000地形図上に、手仕事で印画紙上の写真主点を目視で確認し、転記して作成される。これが、最近のＧＰＳ航法機器のデータで置き換えられつつある時期に、今回の阪神大震災は起こったのである。

震災発生時のコミュニケーションの共通の情報源として求められるモザイクは、東西約50km×25kmの震災地域全体を見渡そうとすると、1/25,000で２ｍ×１ｍ、1/10,000で５ｍ×2.5mとなり、現在は手作業でつくられている。空中写真のモザイクに代わって、各方面の調査団が利用したのが、原寸大・密着印画紙（カラー）の簡易型コピー機による拡大縮小・貼り合わせであった。最近のカラーコピー機の普及によって良好な画質で複製された空中写真は、全域・対象地域を把握する有力なツールであった。

また索引図としての性質上、撮影標定図は、撮影直後直ちに作成され・配布されることが望ましいが、撮影が航空測量会社の自発的な活動として行われるので、当部会では、震災直後から進んで各社の撮影標定図を収集し、データベースの作成を模索した。

6)　空中写真３次元モデルの形成法（空中三角測量と標定）

重複・連続した撮影された空中写真は、その重なり合う部分において、写真３次元モデルを形成する。

２枚の写真画面に写った対応（同一）点が航空カメラのレンズ中心位置を原点とする座標系から、地上座標系に射影変換され地上座標系で交点の３次元座標値を持つことになる。震災後に1/10,000から1/5,000の写真縮尺で、ほぼ阪神大震災地域域をカバーして撮影された写真枚数は、各社でそれぞれ1､000枚位になる。このような枚数の写真から全域の３次元写真モデルを空中三角測量で形成するには、相当な基準点（標定点）と水準点の数が必要とされる。このような基準点と精度の関係は、空中三角測量の計算プログラムの開発に併せて、シミュレーションと実験地区の実証試験でデータの集積がなされてきた。地形測量の実務においては、建設省国土地理院「公共測量作業規程」の定めるところにより、地形図作成を目的としてガイドラインが定められている。ちなみに１０コース１００枚の１大ブロックを考えると、基準点数60点、水準点数200点となる。当部会では、このような基準点を、ＧＰＳ測量で取得して、震災後撮影された写真から全域の３次元写真モデルを形成するため高精度の空中三角測量を計画・実施した。

14.2.3 撮影標定図のデータベース化と今後の緊急時の空中写真撮影システム

1)　震災後の空中写真撮影標定図の作成と利用

当部会は前節で述べた震災後の空中写真の撮影標定図の収集の経過を受けて、災害情報のディジタルファイル化の視点から、緊急時の撮影システムを考察するため、撮影標定図のデータベースの設計を始めた。

2)　標定図（背景地形図）のラスタ化と震災後の撮影標定図のディジタイズ

震災後直ちに収集された撮影標定図は図形記号、属性データコードなどを規定して、地形図上に目視で転記された写真主点位置がディジタイザ上でベクタ図形データとして取り込まれた。

また背景となる1/25,000、1/50,000地形図が中解像度(500dpi)のスキャナでラスタデータとして取得された。

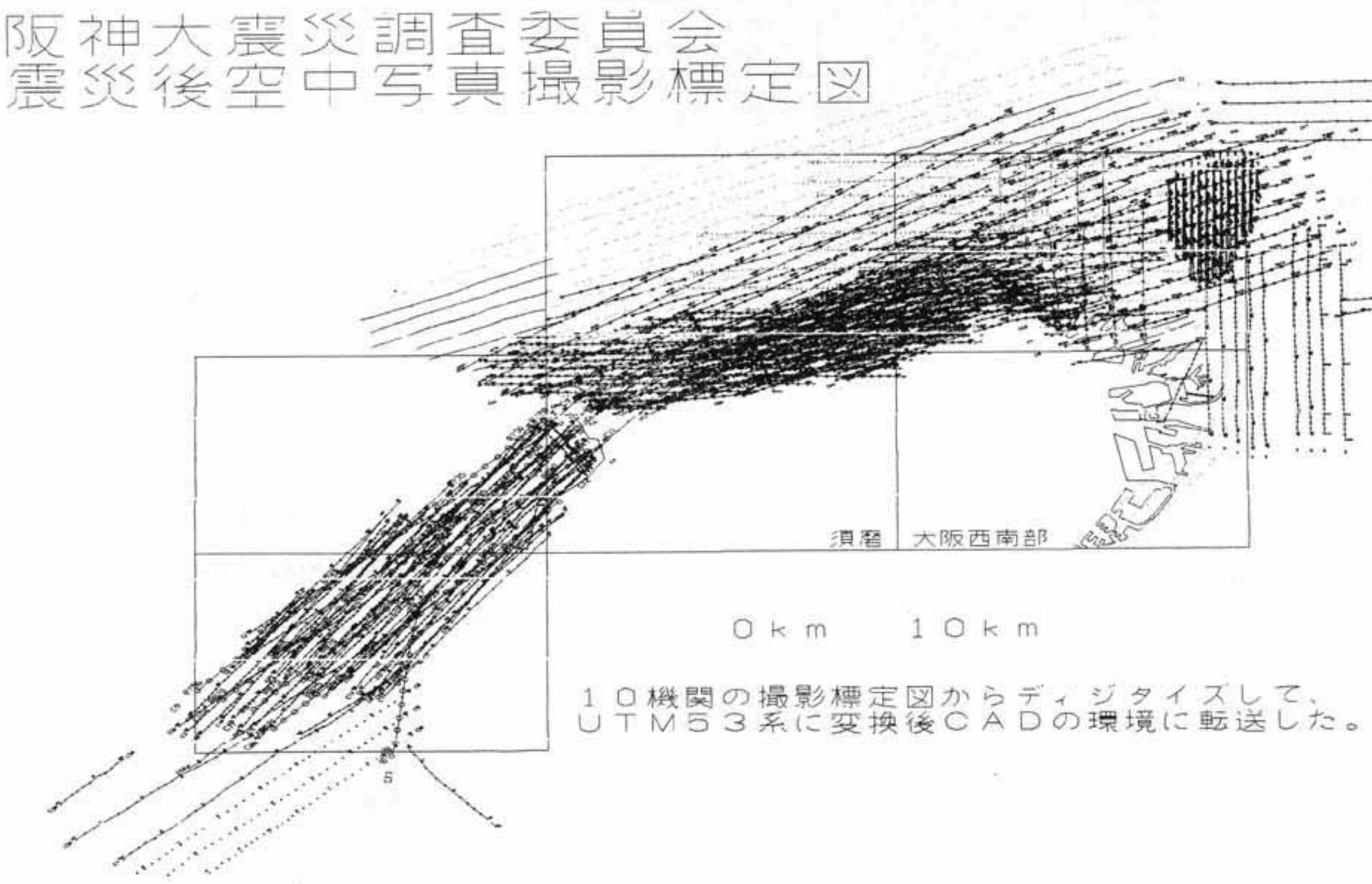


図　14.2.2 ディジタイズされた　各機関の震災後の空中写真撮影標定図

3)　ラスタ地形図とディジタル撮影コース・写真主点の重ね合わせ

撮影標定図から得られた撮影コース・写真主点位置のベクタ（ディジタル）図形データを、1/50,000, 1/100,000等のラスタ地形図を背景として、ラスタ・ベクタの重ね合わせができるＣＡＤ環境で結合した。このようなＣＡＤの環境では、ラスタ地形図とベクタ図形データの位置合わせは、ラスタの画素のサイズとベクタ図形位置計測精度に対応して行われ、地形図作成の精度に準じて精度管理がなされる。

4)　震災後の撮影標定図のデータベースの設計・構築

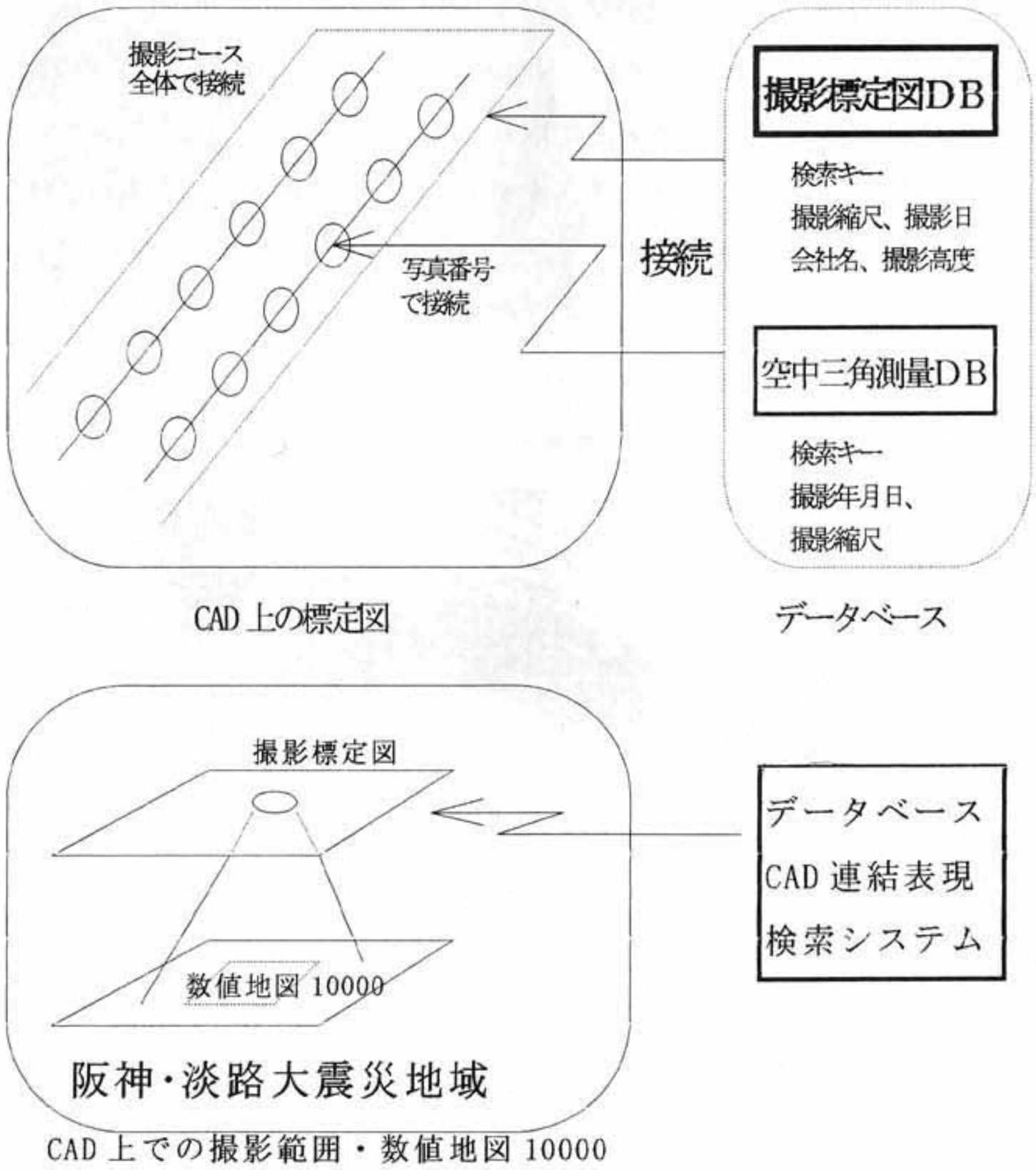
撮影された空中写真の持つ各階層・各種の属性は市販のリレーショナルデータベースソフトの環境の中で、データベース、テーブル、フィールドなどの設計がなされた後、各個のデータレコードが収集・登録された。このようなデータレコードに対して、各種の検索方法を想定して、検索パターンのメニューが作られた。

空中写真撮影標定図データベース名：GEOTECH　テーブル名：hyotei 等　フィールド名：撮影会社等

運用環境システム：MS-Windows 3.1＋AutoCAD R12J＋AutoCAD Data Extension（ＡＤＥ）＋MS-ACCESS

例：　テーブル名：hyoteiのフィールド属性

テーブル名：hyotei	ﾌｨｰﾙﾄﾞ名:会社名	ﾌｨｰﾙﾄﾞ名:標定図名	ﾌｨｰﾙﾄﾞ名: 撮影高度	ﾌｨｰﾙﾄﾞ名:撮影年月日
データ型	テキスト型	テキスト型	数値型	日付/時刻型
フィールドサイズ	255	255	倍精度浮動小数点型	
小数点以下桁数			自動	
書式			#､##0	数値



標定図とデータベース接続概念図

撮影標定図データベース（ＤＢ）を利用すると、会社名、撮影高度、撮影縮尺、撮影日を検索キーにしてＣＡＤ上の標定図が検索出来る。又、空中三角測量データベースを利用すると、撮影年月日、撮影縮尺を検索キーにしてＣＡＤ上の標定図を検索出来る。

検索された結果からはカメラ主点位置（外部標定要素）情報（ｘ、ｙ、ｚ、ω、φ、κ）が取得できる。

ＣＡＤでの撮影範囲の検索

撮影標定図と国土地理院の数値地図10000の地図ＣＡＤデータはＵＴＭ53座標系で連結されているので、標定図、または写真主点位置から地上の対象撮影範囲を特定できる。

図　14.2.3 撮影標定図データベースの構成

5)　撮影標定図データベースの利用法

ＰＣをベースにした撮影標定図データベースは、災害情報のディジタル化のテーマに沿った記録保存用のシステム(「阪神大震災検索システム」)として、阪神大震災調査委員会あるいはその後続機関に存置される。このシステム構成を次の図に示した。

ハードウェア：
Pentium 120mHz 型ＰＣ
CPU ; Pentium 120mHz
ﾒﾓﾘ ; 64MB HDD ; 3.6GB
MO ; 230MB
CRT ; 21" 150Hz (垂直)

ソフトウェア：
OS ; MS-DOS 6.2V
Windows 3.1
CAD; AutoCAD R12J
AutoCAD Data Extention
DB ; MS-ACCESS V2.0
Image Overlay ; ColorView
Animation ; 3D-Studio

アプリケーション：
阪神大震災空中写真標定図・
基準点・
数値地形モデル・
画像地図・
アニメーション・
地盤変状計測データ・
資料地図
検索システム

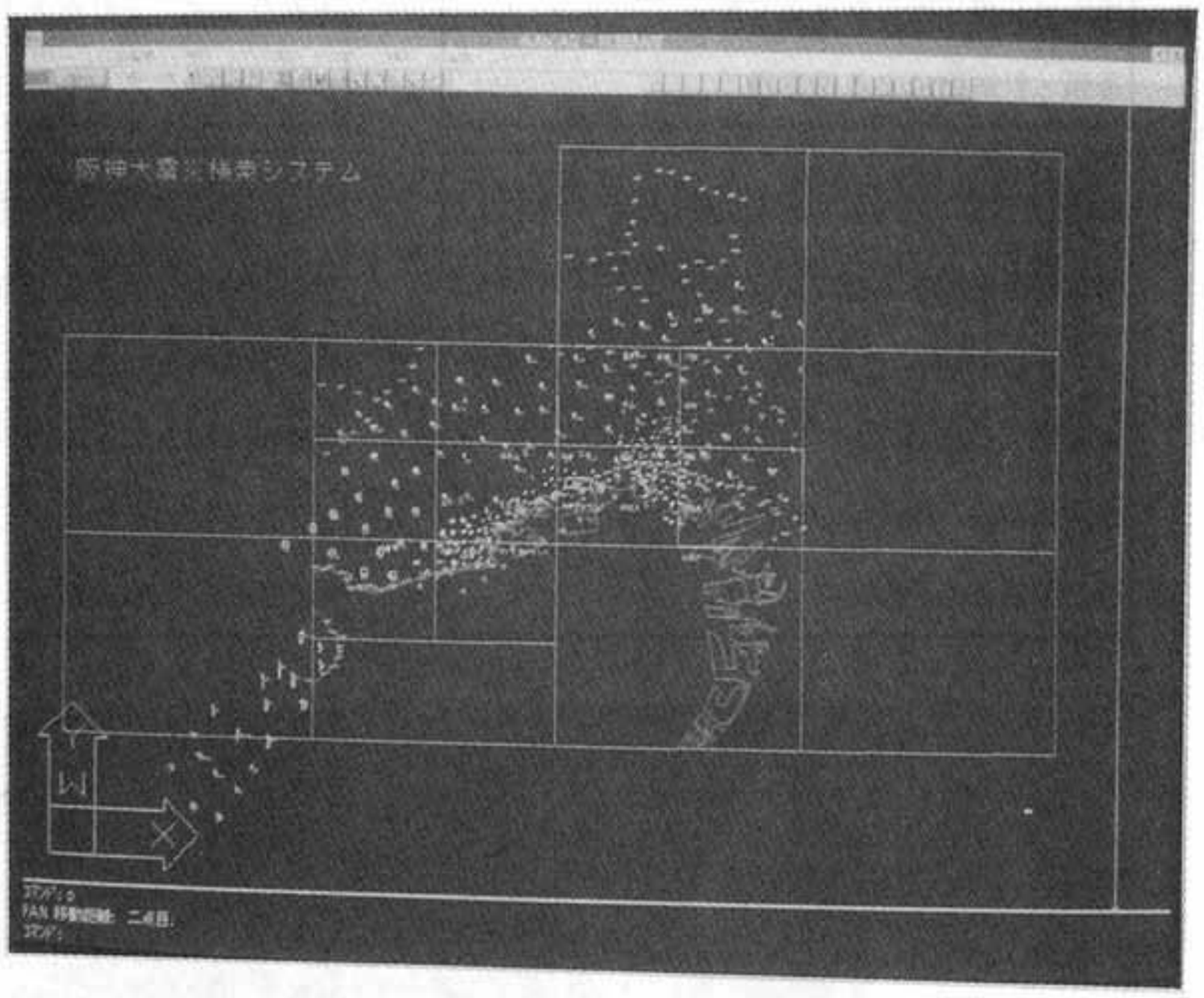


図　14.2.4　「阪神大震災検索システム」の構成

6)　撮影計画と撮影航法支援ＧＰＳ（汎地球測位システム）データの利用の現状

撮影標定図は1/25,000地形図上に手書きで作成されてきた。一方最近では、撮影標定図の主要なデータである写真主点の位置は、ＧＰＳ撮影航法支援システムの開発と併せて、より高精度に効率よくディジタルデータとして、撮影後直ちにＣＡＤの互換ファイルとして収集する開発が行われてきていた。

このようなＣＡＤ化の動向を現状、震災時、開発段階及び将来の目標について次の図14.2.5に示した。また次の写真に従来の撮影時の状況と開発中のＧＰＳ撮影支援システムの構成を示した。

撮影計画：（現状・震災時）

地形図での手描き計画図

撮影計画テンプレットによるコース・主点記入

撮影航空機に撮影計画図を配達

書類・計画図による撮影指示

撮影計画：（開発段階・将来）

ＣＡＤ環境での撮影コースの計画＞既撮空中写真画像での計画

ＣＡＤ画面でのコース・主点位置の計算表示

撮影計画図（＞計画画像データ）の電送

コンピュータネットワークによる撮影指示

撮影飛行＞現像・標定図作成（現状）

緊急時撮影指示系統は未整備

ＧＰＳ撮影（主点位置記録、ｺｰｽ確認）方式整備中

現像所（空港内）とプリント所の分離

標定図作成（印画紙からの主点位置･番号転記）

標定図陽画の配布

撮影飛行＞現像・標定図作成（開発段階・将来）

緊急時撮影指示系統の整備と予算化

ＧＰＳ制御撮影の主点位置・ｺｰｽ確認精度向上

現像所とプリント所の近接と画像化

標定図作成の自動化・ＣＡＤ化

標定図画像ﾌｧｲﾙの電送システムの完備・ネットワーク化

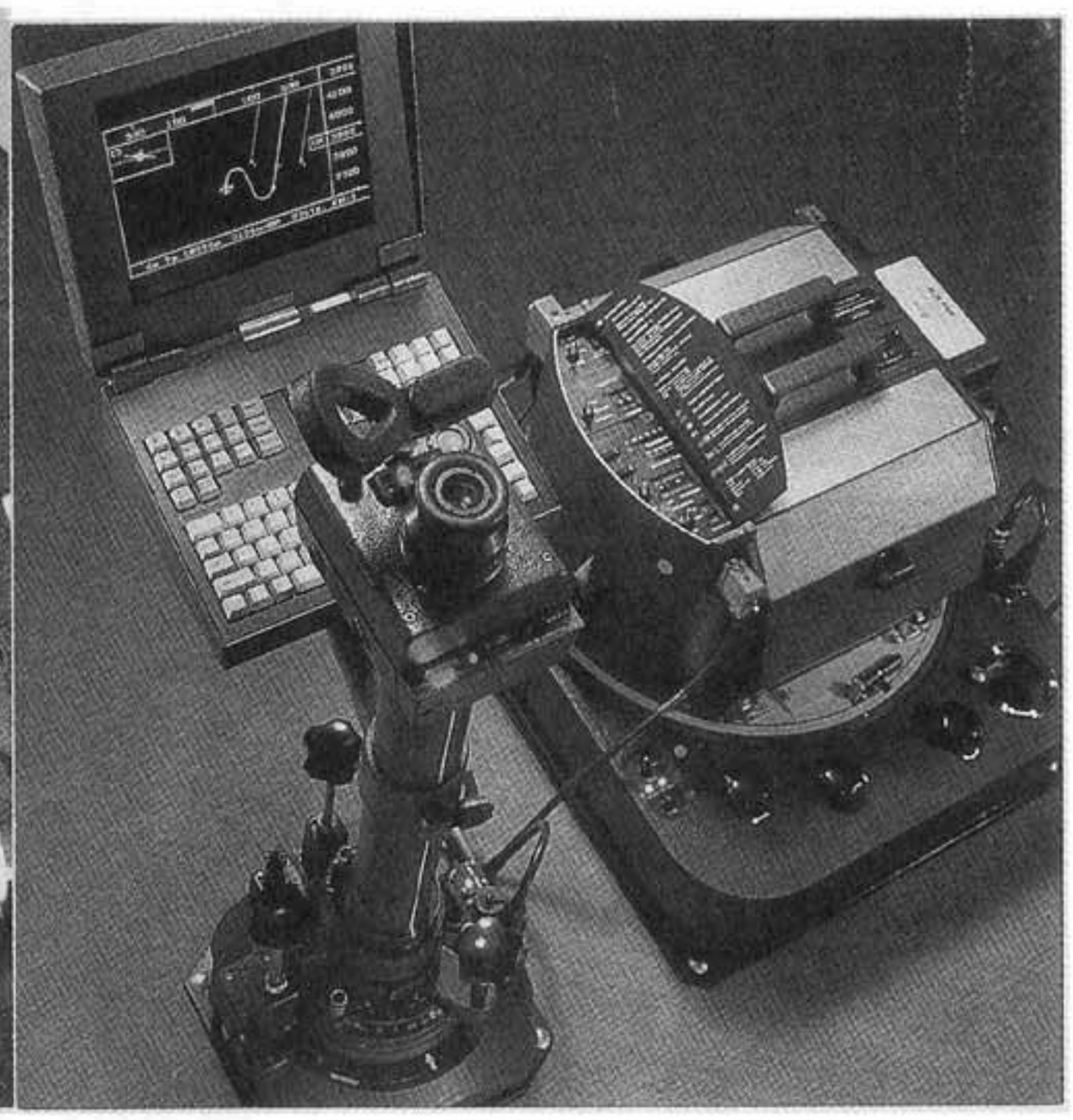


図　14.2.5　撮影標定図の作成工程のＣＡＤ化（現状、震災時、開発段階、将来）

7)　今後の緊急時の空中写真撮影システムの提案

撮影標定図データベースの構築と各種の調査、「ディジタル写真測量による震災調査」等、の知見に基づき、今後の緊急時の空中写真撮影システムのあり方と調査方法を提案した。（14.7　災害調査マニュアル参照）

14.2 参考文献：

(注14.2.1)　国土地理院時報(1995､83)「阪神・淡路大震災に伴う緊急撮影及び地形図緊急修正作業」

(注14.2.2)　(財)地震予知総合研究振興会　濱田政則、磯山龍二、若松加寿江　：

「1995年兵庫県南部地震　液状化、地盤変位及び地盤条件」

The 1995 Hyogoken-Nanbu(Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area.

(注14.2.3)　朝日航洋（株）:阪神大震災被災地CD-ROM航空写真集　全12枚　Windows版　'95.1.17～21撮影

14.3 地上測量データの収集とデータベース化

はじめに

震災後、直ちに調査結果を報じたのは、測量の分野では国土地理院のＧＰＳの固定点（電子基準点と呼ばれる）観測グループである。この観測結果が、震災直前に完成された全国観点網と観測システムの有効性と共に、新聞紙上等を通して広く知られた。さらに「臨時電子基準点」も阪神大震災地域に設置された。
また、ＧＰＳ測量機を導入・普及していた測量業界は日本測量協会を事務局とする「震災復興測量協議会」を結成して、阪神地域のＧＰＳ測量の観測体制を整え、各自治体などの復興対策・計画に対応した地上測量を行って、ＧＰＳ観測網の再観測計算あるいは水準測量計算の成果を計画機関に提出した。
このような地上測量データを調査委員会の当部会（ディジタル写真測量による震災調査）が建設省国土地理院近畿地方測量部特別委員を通じて、複製入手し、データベース化した経過を記述する。

14.3.1 震災前後の基準点成果

1)　実用成果（阪神地域）の震災後の改測結果

震災後直ちに始まり、'95.5には公開された、国土地理院の1/50,000図幅「神戸」「大阪西北部」「須磨」「大阪西南部」に含まれる阪神地域の、基準点・水準点の改測後の成果簿・配点図を取得した後、成果簿をＰＣ版のデータベースに、配点図をＰＣ版のＣＡＤに移して、地盤工学分野の各種の調査の準備をした。

2)　震災前後の各自治体の公共基準点測量・地盤沈下調査水準測量

震災前後の各自治体の公共基準点測量・地盤沈下調査水準測量の実施状況をＧＰＳ測量を中心に次の表に示した。各自治体の地盤沈下調査のための水準測量は暦年の１月１日を基準に行われ、それぞれの市域で地盤の面的な変動を把握するのに役立てられている。

表　14.3.1　震災時の基準点測量・水準点測量

実施測量名	実施時期	計画機関	作業機関	水準測量方式	等級	実施地域
地盤沈下測定	平成6.10 ～7.3	兵庫県尼崎港管理事務所	朝日航洋	直接水準測量	一級	伊丹市、西宮市、尼崎市、池田市
地盤沈下測定	平成6.12 ～7.2	大阪府 土木技術事務所	大阪測量他	直接水準測量	一級	大阪市を除く府下一円
地盤沈下測定	平成7.1 ～7.2	尼崎市 土木局	朝日航洋	直接水準測量	一級	尼崎市全域
震災点検	平成7.1 ～7.3	吹田市	パスコ	GPS基準点測量	一級	吹田市
震災点検	平成7.2 ～7.3	豊中市	パスコ	GPS基準点測量	一級	豊中市全域
都市計画	平成7.4 ～7.5	神戸市 土木局	パスコ	GPS基準点測量	一級	神戸市市街地
地盤沈下測定	平成7.5 ～7.6	西宮市	パスコ	直接水準測量	一級	西宮市
宅地造成	平成7.5 ～8.3	神戸市 開発局	国際航業	GPS基準点測量	一級	神戸市

3)　調査委員会当部会での大縮尺空中写真撮影・空中三角測量成果の収集

当「災害情報のディジタルファイル化」「ディジタル写真測量による震災調査」部会では基礎資料の１つとして、発足時の平成７年４月頃から建設省国土地理院近畿地方測量部において前述の基準点成果の収集を始め、調査委員会特別委員の協力を得て、震災後の国土地理院管轄のＧＰＳ測量の成果を包括的に入手した。このほか、公共測量届に記載されている各種測量作業のうち、大縮尺写真撮影（写真縮尺1/5,000）の作業の空中写真撮影計画図の複製を得た。このような作業のいくつかを次の表に示した。

表　14.3.2　震災前後の大縮尺空中写真撮影・図化作業

実施測量名	実施時期	計画機関	作業機関	測量種類	撮影縮尺	実施地域
道路台帳	'91.7 ～'92.3	豊中市 土木部	パスコ	1/500地形図 作成	1/4000	豊中市
道路計画	'93.2 ～'93.3	近畿地方建設局 阪神国道工事事務所	関西航測	1/500地形図 作成	1/4000	神戸市内
砂防計画	'93.11 ～'94.3	近畿地方建設局 六甲砂防工事事務所	アジア航測	1/500地形図 作成	1/4000	六甲山系
道路計画	'94.3 ～'94.5	近畿地方建設局 大阪国道工事事務所	中日本航空	1/500地形図 作成	1/4000	大阪市他15市
道路台帳	平成6.12 ～7.3	大阪市 港湾局	国際航業	1/500地形図 作成	1/4000	大阪市臨港部全域
総合計画	平成6.9 ～7.7	豊中市 土木部	パスコ	1/500地形図 作成	1/3000	豊中市全域

このような基準点成果と撮影計画図は、今までに述べたデータベースシステムに入力され、検索可能なデータソースとなっている。

14.3.2 震災直後の当部会関連のＧＰＳ基準点測量・水準測量

1)　小縮尺空中写真(写真縮尺1/25,000：地盤工学会保有)正射写真画像作成用ＧＰＳ基準点測量

当部会は、震災１０日後に撮影された阪神地域の大部分を範囲とする、小縮尺空中写真30枚を入手した。これを用いて正射写真画像データと正射写真図を作成するために、当部会でＧＰＳ基準点測量を実施した。ＧＰＳ測量用３次元網平均計算用ソフトはＴＯＰＣＯＮ社の３次元網平均計算計算プログラムである。

(1)　基準点測量計画・実施図

(2)　実施年月日　　平成７年６月２１日（観測・計算）

(3)　測定点数　　標定点１０点、臨時電子基準点５点

(4)　測量成果　　ＧＰＳ測量成果簿　　一式

(5)　利用目的　　正射写真画像・図作成用空中三角測量基準点

2)　パイロット地域（芦屋地域）用ＧＰＳ基準点測量・水準測量

当部会では平成７年９月に地盤変状計測解析調査のパイロット地域として芦屋市の六甲山頂部付近から、沿岸埋め立て地区までの範囲を選んだ。

このパイロット地域の主な実施内容は,次節14.4に詳述されるが、次のような項目であった。

表　14.3.3　パイロット地域の震災前後の基準点測量・空中三角測量

	実施内容	震災前	震災後
(1)	基準点（標定点）測量 水準測量	平成３年度芦屋市下水道台帳図化作業	当部会調査用標定点測量・水準測量
	実施年月	平成３年　月　日 （観測・計算）	平成７年９月２０日～９月２６日 （観測・計算）
	測定点数	標定点１３点、 水準点２３点	標定点１３点、 臨時電子基準点等既知基準点５点、 水準点５７点
	測量成果	３級基準点成果簿	ＧＰＳ測量成果簿 精度管理表(三次元ベクトル閉合差、重複基線差)　一式
	利用目的	1/500下水道台帳用現況平面図作成 地形測量（空中写真測量）	高精度３次元写真モデル計測用 空中三角測量基準点
(2)	写真撮影	平成３年　月　日、　月　日	平成７年１月18日、１月20日
	撮影コース、写真枚数	４コース、５１枚	６コース、４５枚
	撮影縮尺（撮影高度）	1/4,000(600m)	1/5,000(800m)
(3)	空中三角測量	平成３年　月、平成７年８月	平成７年10月
	平均計算法	独立モデル法(PAT-M) バンドル法　(ALBANY)	バンドル法　(ALBANY)
(4)	３次元写真モデル計測	アナログ図化機による 1/500下水道台帳用現況平面図作成	解析・ディジタル図化機による 地盤変状計測 （マンホール点、地盤変状計測点）

3)　ＧＰＳ測量用３次元網平均計算用ソフトとジオイド（標高）・地図投影面の検討

震災後のパイロット地域でのＧＰＳ測量用３次元網平均計算用ソフトは Trimble社の　Trimnet　である。なお、ジオイドモデルと水準測量（標高測定）データの取り扱いについては、共通の観測データを用いる、いくつかのＧＰＳ測量用３次元網平均計算用ソフトの検討を継続中である。

14.3.3 地上測量データのＣＡＤ環境でのデータベース化

1)　国家基準点・公共基準点の収集とデータベースへの入力

前節で述べた、経過と成果に基づいて、国家基準点・公共測量基準点の震災前後の座標値と関連資料を収集し、ＰＣ版リレーショナルデータベースソフトMS-ACCESSの環境にデータレコードを入力した。

2)　基準点のＣＡＤ画面表示、震災前後の基準点データの変化及びデータベースでの検索／ＣＡＤ図形表示

基準点の３次元データは３次元ＣＡＤの環境で地図記号として表示した。このような表示のプラットフォームとしては、数値地図　10000等の地形平面図、標高データ(３次元地形格子点網、三角面網)がある。

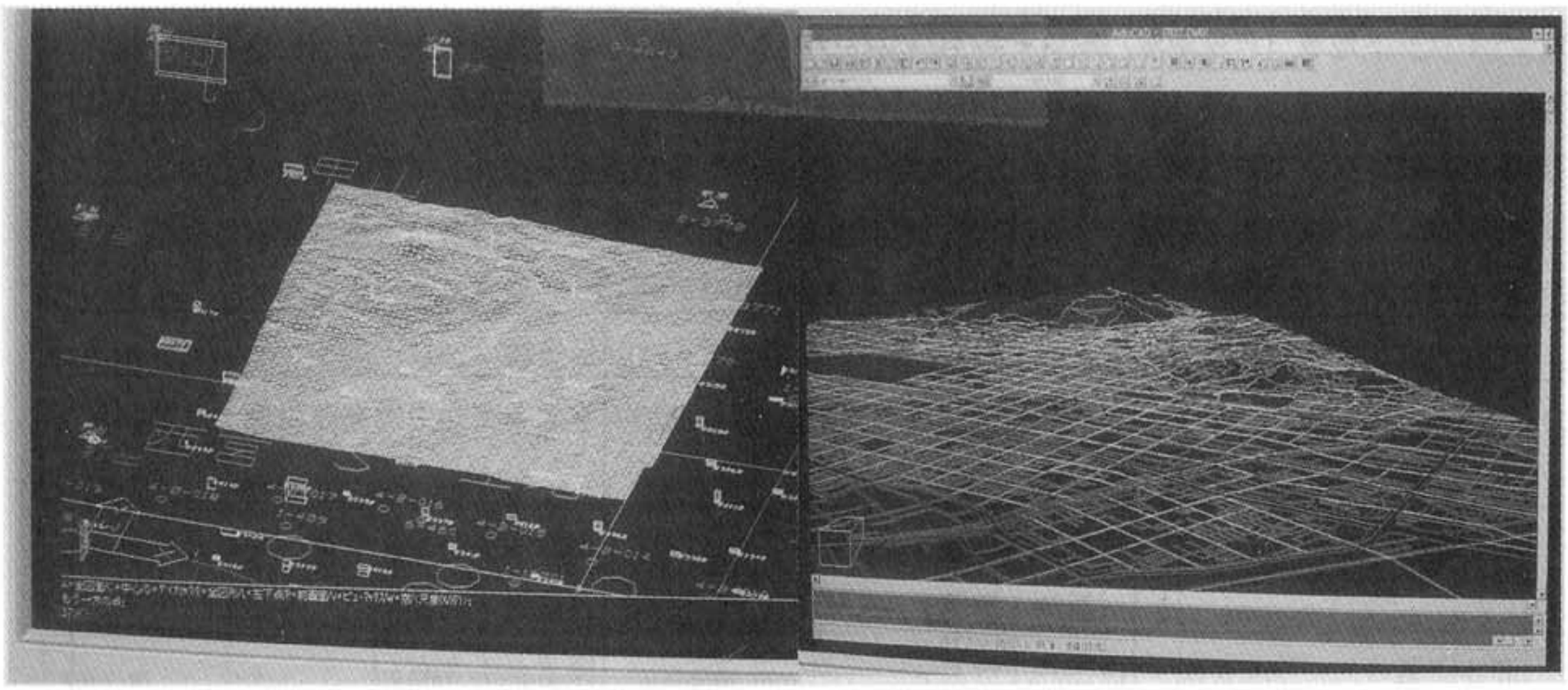


写真　14.3.1　阪神大震災地域の数値地形モデルとその表面に投影した数値地図10000

震災前後の基準点の位置の変化は、その標石の状態についての基準点成果簿の記載を確認した後、その座標差をＸ軸、Ｙ軸、Ｚ軸方向の各成分からなる直方体で縮尺強調表現を用いて表した。基準点の変動を地形の特徴と併せて理解するために、平面地図の上で表した「座標差の直方体」をさらに、３次元の数値地形モデルのワイヤフレーム構造の上に表すこともできる。また地質図、震災現況図、正射写真画像の３次元プラットフォームの表面にさらに「座標座直方体」を重ね合わせる。(写真14.3.2　参照)

3)　基準点・水準点を用いた全域の挙動と内挿点処理法の検討

基準点・水準点は全域からすると非常にまばらな分布をしているので、全域の地質構造、活断層の挙動などとの関連を議論するには、他の多くの補完データが必要である。さらに、必要な点数、分布を検討するには、内挿点処理法を理論的な基礎としなければならないという課題がある。

4)　基準点・水準点データベースの利用法

国家基準点（三角点）から始まった基準点成果の収集は公共機関・自治体などの公共基準点、水準点の成果を導入することを想定したデータベースの構築を促した。当部会の収集・集積された文書資料は、市販の３次元ＣＡＤとリレーショナルデータベースソフトで検索可能なデータベースとして構築されPentiumクラスと呼ばれるパソコン（ＰＣ）上で図　14.2.4 の「阪神大震災検索システム」と併せて作動している。

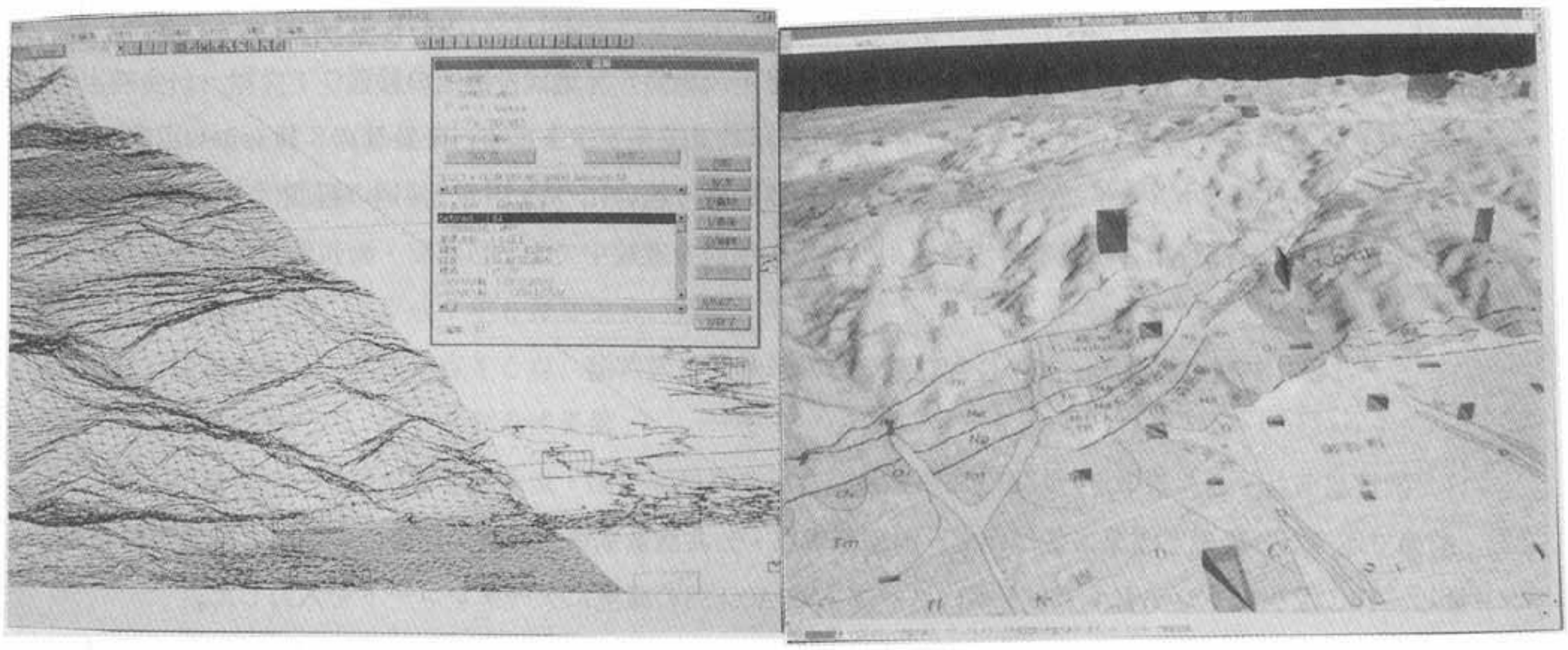


写真　14.3.2　基準点の変動量のデータベース検索

（３次元ワイヤフレーム、数値地図及び地質図の上の「座標差直方体」）

14.3.4　災害時の地図データベースの役割

1)　各種関連資料の収集

災害時には、地形図、都市計画図を始め道路マップまで各種の地図が利用され、ＴＶ報道番組ではスタジオ内の大きな模型が、現地中継・録画ビデオと並んで震災地域の状況説明に用いられた。また、阪神地域では、「応急修正版」が数カ月後に刊行された。都市計画図も印刷図からディジタルマップの様式に移り変わりつつあり、ディジタルデータによる復興事業への対応がいち早く期待された。しかしながら、緊急時の地図資料の管理・地図データの運用は「災害情報のディジタルファイル化」のテーマの潜在的な課題である。

2)　調査資料・資料地図の体系

阪神地域で、今回の当部会で利用した調査資料・資料地図の体系を次の表に示した。

表　14.3.4　調査資料・資料地図一覧表

	調査資料種類	調査資料分類	保管形態	利用方法	利用ｼｽﾃﾑ名	利用ｼｽﾃﾑﾀｲﾌﾟ
1	資料地図	資料地図	印刷図：ＭＯ： ＣＤ：出力図等	CAD-ATLAS （ＣＡＤ地図帳）	ColorView;	(CADのﾗｽﾀ/ﾍﾞｸﾀ 図形ﾃﾞｰﾀ処理)
2	空中写真	地盤変状計測 資料データ	アルバム 画像データ ＣＤ，ＭＯ	「標定図 データベース」	ＡＤＥ Spatial Analyst AdCADD DTM	(CADとDBの結合) (空間解析) (DTM図形処理)
3	基準点 水準点 ＤＴＭ・地盤高	地盤変状計測 基礎データ	ＦＤ，ＭＯ 陽画､ﾃﾞｨｼﾞﾀｲｽﾞﾃﾞｰﾀ	「基準点・水準点・ ＤＴＭ・地盤高 データベース」	AdCADD DTM 座標差図ソフト SpatialExplorer	(直方体表現) (立体地質図作成)
4	空中三角測量成果 正射写真画像ﾃﾞｰﾀ	地盤変状計測 調査データ	ＦＤ，ＭＯ	「空中三角測量・正射 写真画像ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ」	Albany Match-T	(3次元平均計算) (ｽﾃﾚｵﾏｯﾁﾝｸﾞ)
5	地質図・柱状図 土質試験データ	地盤変状計測 解析データ				
6	阪神大震災報告書	他部・学会資料	文献資料			

資料地図 地図縮尺	地図種類 （全数）	地図 投影法	地図 枚数	地図名称 地図番号	保管形態	関連地図 備考
1:1､000､000	日本全図　（３面）	Lambert	1	日本全図Ⅱ	印刷図，ＭＯ	第４紀学会　地図
1:500､000	地方図　（８面）	Lambert	1	Ｅ中部近畿	印刷図	日本の活断層　地図
1:200､000	地勢図　（１３０面）	UTM	4	京都及大阪　等	印刷図	地質図
1:50､000	地形図　（１２９１面）	UTM	25	神戸等	印刷図	地質図
1:25､000	地形図　（４３８３面）	UTM	50	神戸首部等	印刷図	土地利用図
1:10､000	地形図　/応急修正版	UTM	20	震災現況図	印刷図、　ＭＯ	震災前、震災後
	数値地図10000	平直5/6系	20		ＦＤ	震災前、震災後調査用
1:2､500	都市計画図(国土基本図)	平直5/6系			印刷図、ＦＤ	ﾃﾞｨｼﾞﾀﾙﾏｯﾋﾟﾝｸﾞ(DM)
1:1､000	平面図、縦断図、横断図	平直5/6系			印刷図	道路詳細設計図
1:500	現況平面図	平直5/6系				(施設図)
1:200	地形図、実測横断図	直角座標系				構造物設計図

3)　数値地図10000の位置付け

阪神・淡路大震災の全域を都市部を中心に阪神地域をカバーしていた1/10,000地形図及びそれに対応する数値地図10000は、震災調査の当初から基礎図として、調査現場と研究室をつなぐ役割を果たした。
また、国土地理院では、２版に及ぶ震災現況図をこの1/10,000地形図を用いて作成した。
この1/10,000地形図は1/25,000等の地形図の地図投影法（ＵＴＭ５３系）と1/2,500国土基本図・都市計画図（平面直角５、６系）をつなぐ役割をしているものである。なお、数値地図10000は平面直角６系の座標値を持っているので、地図投影変換のソフトを用いて阪神大震災地域を含む平面直角５系座標に変換した。そしてこの地図データはその付属の表示検索ソフトによって利用されたほか、他のＣＡＤシステムに、フォーマット変換されて各方面での調査の背景地図データとして用いられた。

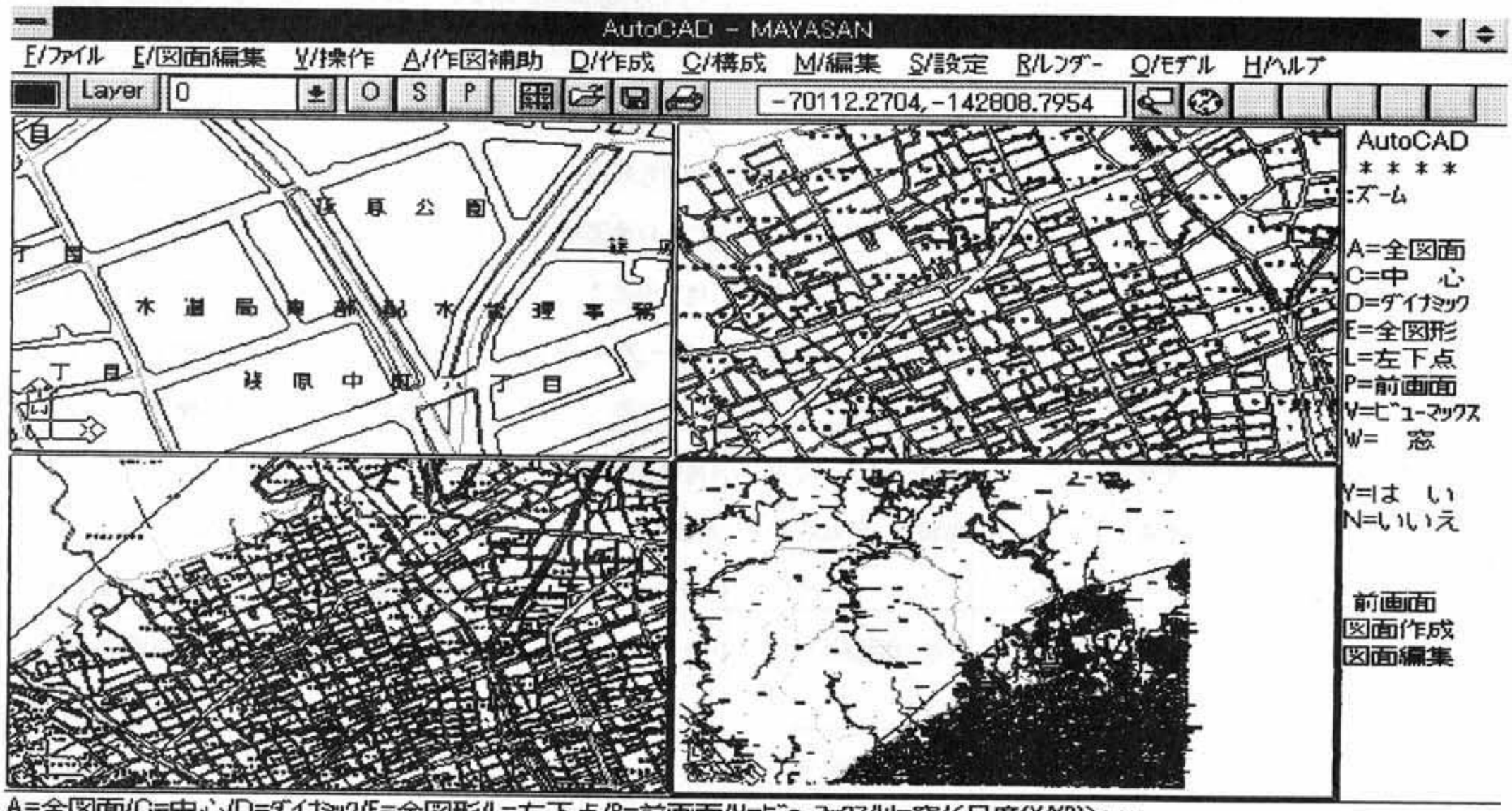


図　14.3.1　数値地図10000のＣＡＤ画面での表示

4)　地図投影法の扱いかた（平面直角５系（神戸）、平面直角６系（大阪），ＵＴＭ５３系）

調査基礎図としての1/10,000地形図は阪神地域はＵＴＭ５３系に地図投影されて、１枚の図面が縦2'30"×横3'45"の範囲を持ち、1/25,000の緯度・経度の範囲を２等分している。この図面範囲でUTM53系と平面直角5(6)系とを対角線長で比較してみると2m程度となり、1/10,000の縮尺のこの図面範囲内で図形形状測定する場合はUTM53系と平面直角5(6)系の線分誤差を無視できる。しかし座標系原点と縮尺係数の異なる２つの地図を取り扱うには地図図形データ全体をＣＡＤ環境で変換できる機能(地図投影法ソフト）が求められる。

5)　都市計画図(地図縮尺1/2,500)のディジタルデータ

現行公共測量作業規程（1986年施行）には都市計画図等のディジタルマップを取得する規定はなく、「ディジタルマッピング作業要領・同補則（案）」（1988年制定）に準拠して、神戸市、尼崎市、西宮市等で都市計画図(地図縮尺1/2,500)のディジタルマッピングが行われた。ここでは約１５０の地図記号のデータが、真位置データフォーマット（84バイトのレコード長）で取得され、6250BPIの記録密度の磁気テープ媒体で保管される。ただし、他のＧＩＳ、ＣＡＤシステムとの互換性は各機関固有の転送ソフトで行う。

6)　既存都市計画図のラスタデータの大容量処理と震災現況図のラスタ地図化

都市計画図(地図縮尺1/2,500)はＡ０版（840㎜×1188㎜　33"×47")の原図寸法を持つことから、600dpiで２値のラスタデータを取得しても、１図面当たり560MBのラスタ（画像）データとなる。このような大量のデータはデータ取得媒体、転送装置、保管媒体あるいは圧縮方法、転送速度等ハード装置システムの現状に制限を受けている。また、ラスタ／ベクタ変換、図形データ編集法、図形属性データ対応法などソフトウエアの処理機能の現状も実用的でない。総じて、今回の調査に対しては、ラスタの都市計画図データは、背景データ（プラットフォーム）として、利用する環境になり得なかった。一方で、震災直後の国土地理院の現地調査を基にした1/10,000震災現況図（21面）は、当部会で400dpiでＣＭＹＫのカラーデータとしてＭＯ（光磁気ディスク）ファイルで格納され、報告会のＯＨＰフィルムに出力された。震災現況図の主な用途は、研究機関の調査基礎図であった他に、行政機関の復興対策事業に活用された。

7)　災害状況の３次元地形表現と災害情報データベースの３次元プラットフォームの提案

震災直後の上空からの報道ビデオ等は、震災地域の概要を景観的に表現した。このような空間イメージの把握は、調査法に多くの示唆を与える。当部会は、震災現況図・地質図・土地利用図・正射写真画像をラスタ画像データに加工し、同一地域の数値地形モデル(ＤＴＭ)データと併せてラスタ景観モデル・アニメーションを作成した（写真　14.3.3　参照）。進んで 国土地理院の1/25,000地形図を基にした50mメッシュの標高データあるいは当部会保有の1/25,000空中写真から、正射写真画像データを取得する際にステレオマッチング(自動標高抽出)により得られる２m程度の標高精度の１０m間隔メッシュの標高データを用いて３次元のワイヤフレームで表す３次元数値地形モデルを作成し、標高０mの平面に地図投影された数値地図10000データと３次元ＣＡＤの環境で結合し災害情報の３次元プラットフォームを作成した(写真　14.3.1　参照）。

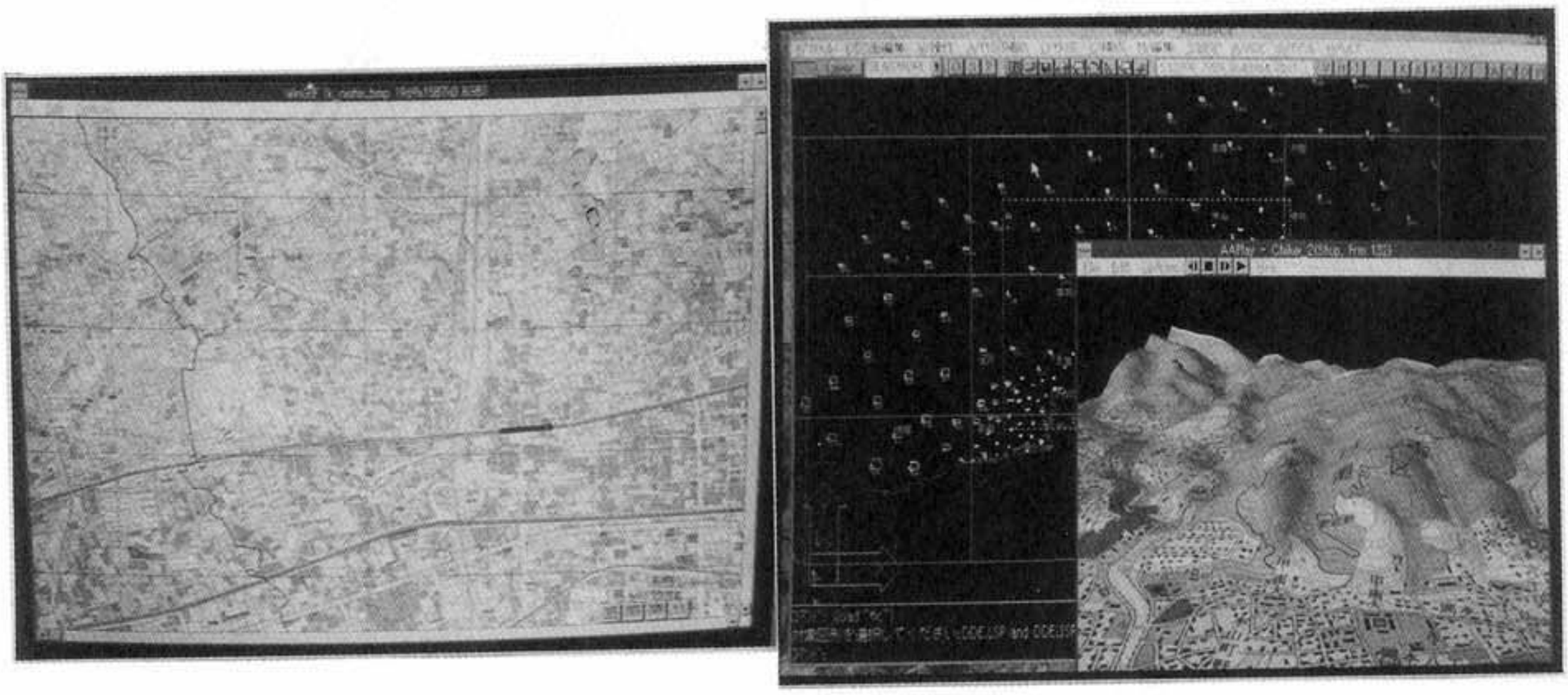


写真　14.3.3　震災現況図･地質図を用いた景観モデル・アニメーション

加えて当部会でも諸外国の災害時のＧＩＳ（地理情報システム）の利用にならって災害情報をディジタルファイル化した。さらに地図データベース・ＧＩＳシステムの環境の中に統合出来る、今後の調査研究・行政業務に対応した、検索・運用方式を部会内に集積された基準点データ・空中写真データを用いて検討した。地図データベース・ＧＩＳでの災害情報は図形情報としては、主に点・線・面空間モデル形態で取り扱うことができる。このような空間モデルを３次元の環境（プラットフォーム）で取り扱うための検討を行い、前述の撮影標定図データベースと結合し、既に14.2.3で述べた「阪神大震災検索システム」を拡充した。

１４．４　空中三角測量

１４．４．１　空中三角測量の概説

通常、ステレオ写真を用いて地上点の３次元計測を行う場合、地上で定められた基準座標系に関して位置の与えられているいくつかの点の情報（平面位置、標高等）が必要となる。　これらの点の情報をステレオ写真の図化領域ごとに地上測量（３角測量、トラバース測量、水準測量、ＧＰＳ測量）で取得することは可能であるが、図化対象域が広大で撮影写真枚数が多くなると、多大の労力、経費、時間を要し得策とはいえない。　そこで、重複写真の持つ幾何学的潜在力を利用して、わずかの地上測量成果をもとに各ステレオ写真の解析・図化に必要な地上点の情報を計算で求めようという作業が空中三角測量であり、写真測量における位置付けは次の通りである。

撮影計画 → 地上基準点測量 → 空中三角測量 → ステレオ写真の図化

図化対象地域が広い場合、空中写真の撮影は図１４．４．１のように多コースに渡って実施される。　そしてこのように撮影された多数の空中写真を用いて空中三角測量を行なうことをブロック調整というが、ここではそのブロック調整による空中三角測量について説明する。　ただし、写真解析の基礎である写真の投影関係（共線条件式）、ステレオ写真の相互標定理論（ステレオモデル形成）、対地標定理論（ステレオモデル変換）、及び各ステレオモデルの接続理論の理解なしには空中三角測量の説明が不可能なので、最初に写真解析理論について簡単に解説する。

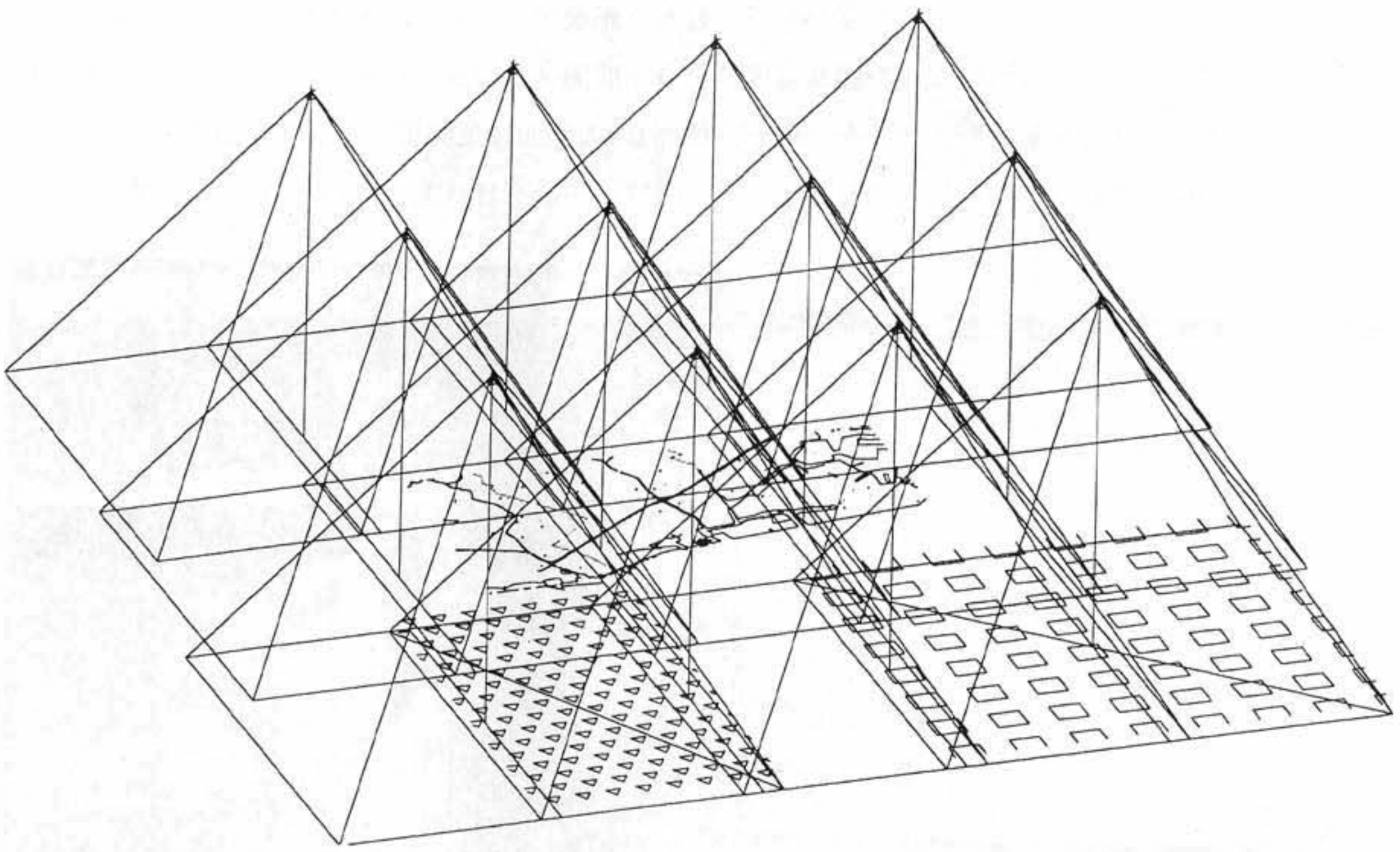


図１４．４．１　重複写真の多コース撮影

１４．４．２　共線条件式

写真はカメラを使用して撮影された中心投影２次元画像であり、写真画像と被写体空間との幾何学的関係は次のように誘導できる（図１４．４．２参照）。　いま、写真画面上で写真主点Ｈを原点とする写真座標系（ｘ，ｙ）、被写体空間内で基準座標系（Ｘ，Ｙ，Ｚ）を選ぶ。　写真の撮影状態は基準座標系の３軸の

廻りの回転量（ω，ϕ，κ）、写真の投影中心位置（X_0，Y_0，Z_0）で表すことができ、これら６個の要素を写真の外部標定要素と呼ぶ。 被写体上の一点Ｐ（Ｘ，Ｙ，Ｚ）とその写真像ｐ（ｘ，ｙ）との関係は３次元座標変換の知識を利用すれば容易に考察でき、次式で与えられる。

$$x = -c\frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)}$$

$$y = -c\frac{a_{21}(X-X_0)+a_{22}(Y-Y_0)+a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)} \qquad (6-1)$$

ここに、係数a_{ij}(i=1,2,3;j=1,2,3)は写真の３個の回転量（ω，ϕ，κ）に関する回転行列をD_ω，D_ϕ，D_κ とすれば、

$$(D_\phi D_\omega D_\kappa)^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

で表され、さらに ｃ は写真の画面距離（ほぼカメラの焦点距離）である。

上式は被写体上の点Ｐ、その写真像ｐ及び写真の投影中心O_Aが一直線上になければならないという条件式であり、写真測量では共線条件式と呼ばれる。 そして、カメラの内的幾何学を表す要素である写真の画面距離、主点位置が既知の場合（測定用カメラで撮影された写真の場合）、被写体空間内に座標既知の点が３点以上あれば、上式を写真の外部標定要素（ω，ϕ，κ，X_0，Y_0，Z_0）について直接解くことにより写真の撮影状態を再現することができる。 写真測量で最も重要な重複写真の解析問題を理解するためには次節に示すステレオ写真の標定問題の幾何学的特性を把握する必要がある。

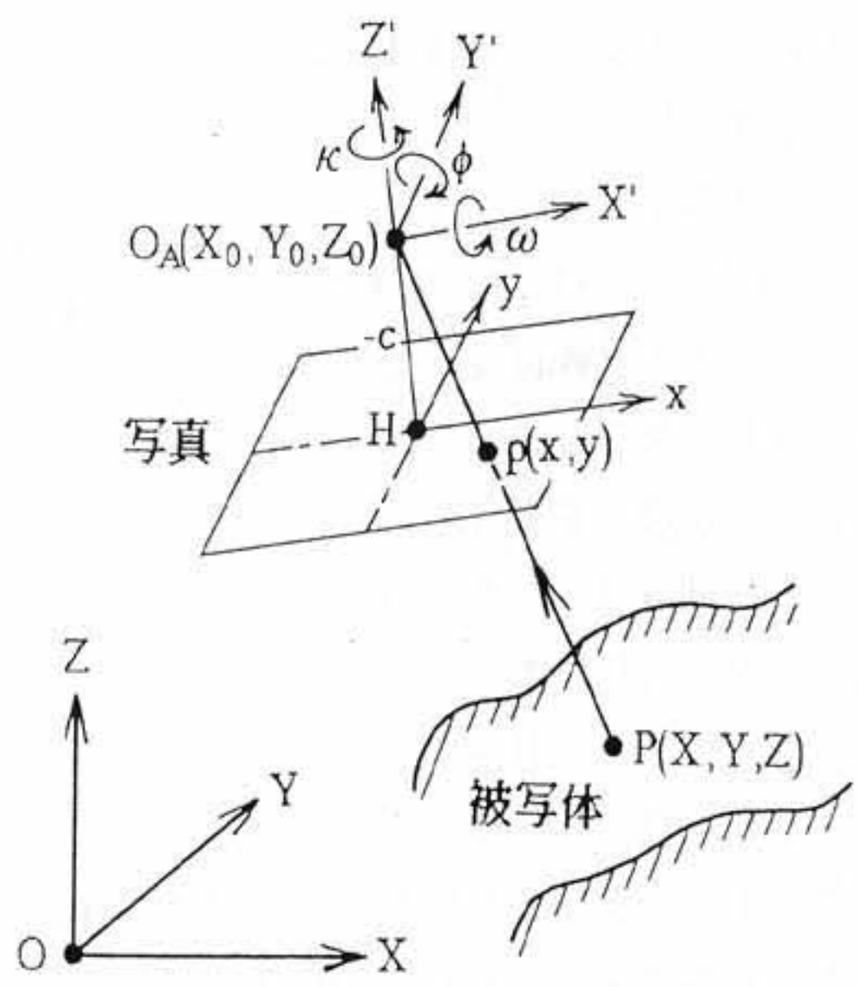


図１４．４．２　写真と被写体の幾何学的関係

１４．４．３　ステレオ写真の標定問題

この節では写真測量の基礎理論であるステレオ写真の標定理論について述べるが、数式の誘導は省略し、その幾何学的性質のみを論じる。また、カメラの内的幾何学を表す要素（写真の内部標定要素）が未知の場合（アマチュアカメラで撮影した写真を使用する場合）は議論が非常に複雑になるので測定用カメラで撮影された写真に限定して議論を進めることにする。

ステレオ写真は異なる２点から同一被写体を撮影した２枚の写真を指す。 そして、これら２枚の写真の撮影状態を再現すれば、対応する２本の光線（被写体上の同一点より出て左右画像の投影中心に向かう２本の光線）を追跡する

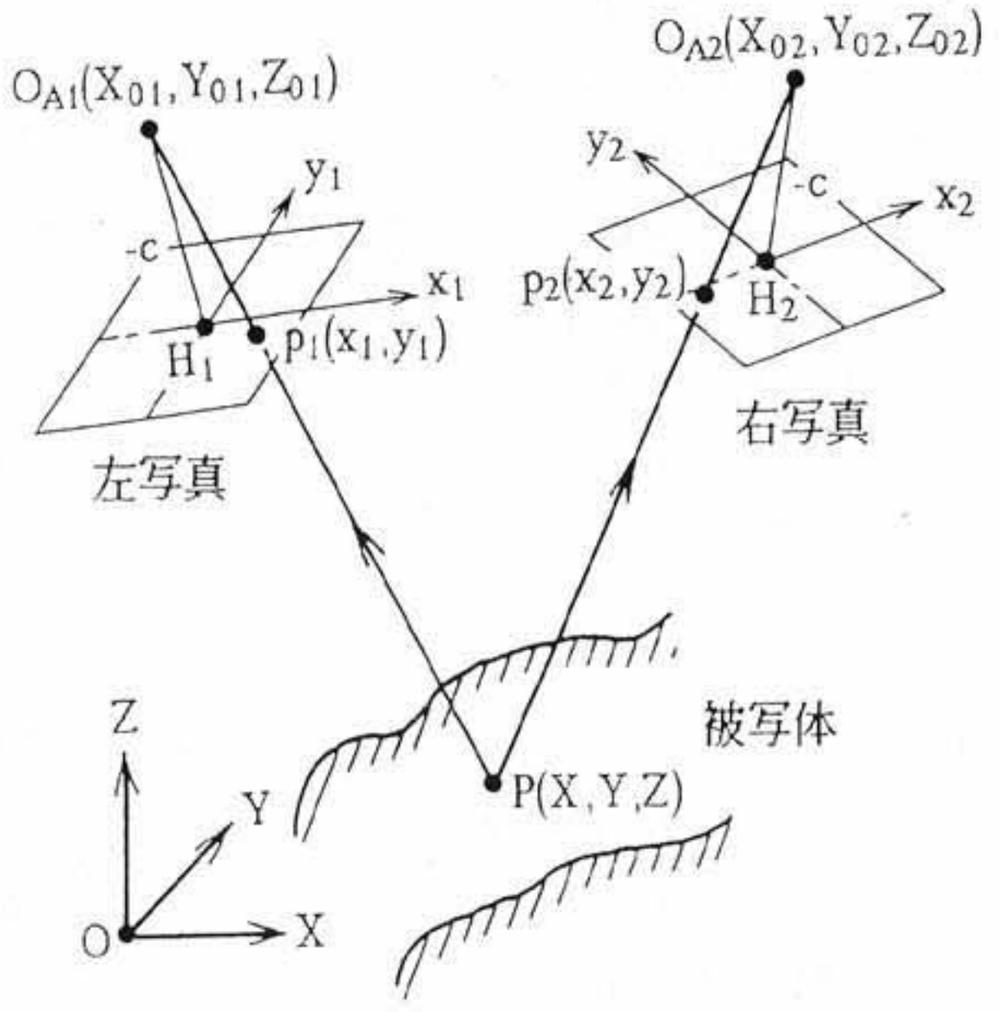


図１４．４．３　ステレオ写真の撮影状態

ことができるので、左右画像上の写真像の位置を測定することにより被写体上の点の３次元座標を求めることが可能となる。 ステレオ写真の撮影状態は前節の共線条件式を使用せず、次のようにして再現することができる（図１４．４．３、図１４．４．４参照）。

まず、左右写真の外部標定要素を左写真：ω_1，ϕ_1，κ_1，X_{O1}，Y_{O1}，Z_{O1}、右写真：ω_2，ϕ_2，κ_2，X_{O2}，Y_{O2}，Z_{O2}とする。 図１４．４．３には左右写真の撮影時の状態が示されているが、これら左右写真の相互関係を保ったまま、３個の剛体回転：Ω，Φ，Κ、３個の剛体移動：X_{OG}，Y_{OG}，Z_{OG} を左右写真に加えても対応する２本の光線は交会しており、さらにステレオ写真の投影中心O_{A1}、O_{A2}を結ぶ方向に右写真を移動させても左右写真の相互関係は維持されている。

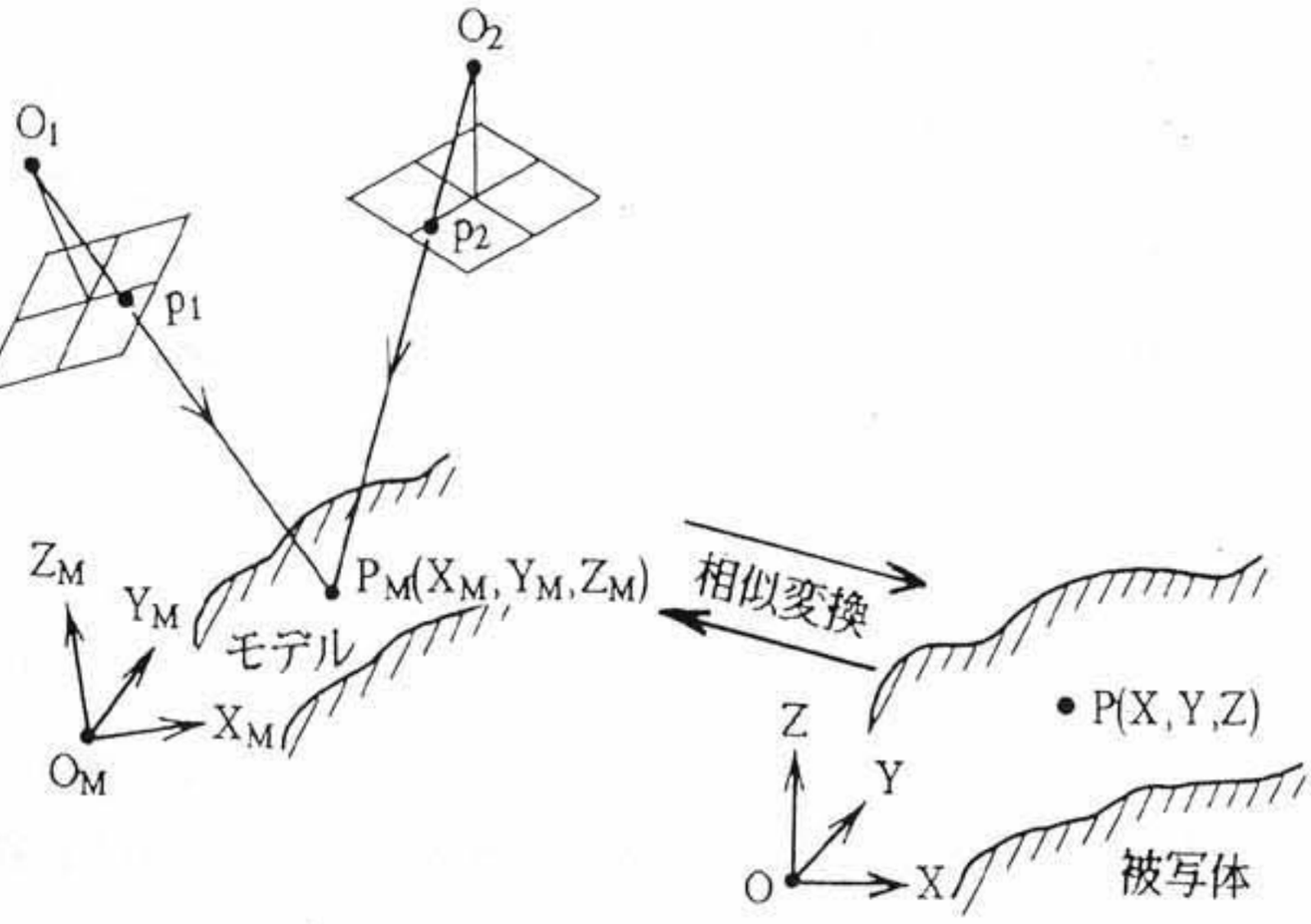


図１４．４．４　ステレオ写真の標定問題

したがって、この状態で左右写真の投影中心に光源を置き光を当てると、対応する２本の光線はすべて交会し、これら交会点の集合は１つの空間を形成する（図－１４．４．４参照）。 このようにして形成された空間はモデル空間と呼ばれ、左右画像の撮影時の相互関係が保たれているので被写体と相似の空間となる。また、右写真を左右写真の投影中心を結ぶ方向へ移動させることによりモデルの縮尺を変えることができるのでこの量はモデル縮尺と呼ばれ、ｓで表される。 以上のことからステレオ写真の標定問題の幾何学的性質を次のように整理することができる。

・ステレオ写真の相互標定（モデル形成）

ステレオ写真の撮影状態を再現するためには１２個の外部標定要素を決定する必要があるが、それらの中７個の要素を任意に与えても左右写真の撮影時の相互関係を保持することができる。 したがって、ステレオ写真の相互関係を決定し、対応する２本の光線を交会させるためには５個の要素を決めればよい。そして、形成されたモデルは被写体と相似である。

・ステレオ写真の対地標定（モデルと被写体との１：１対応）

ステレオ写真の相互標定により形成されたモデルは被写体と相似であるので、モデルは３次元相似変換により被写体に写像できる。 また、３次元相似変換には７個の要素（３個の剛体回転、３個の剛体移動、縮尺）が含まれるので、被写体空間内に２個の３次元座標既知点と１個の標高既知の点があればこれら７個の要素を決定できる。 そして、このように被写体空間内で座標既知の点は基準点と呼ばれる。

１４・４・４　モデル接続

いま、図１４．４．５に示されるような３枚の連続撮影された写真について考える。 第１写真と第２写真、第２写真と第３写真がそれぞれ６０パーセントずつ重複して撮影されているとすると、第１写真と第３写真の重複率は２０パーセントになる。 第１写真と第２写真、第２写真と第３写真をそれぞれ別個に相互標定し、２種類のモデル（第１ステレオモデルと第２ステレオモデル）を形成してその幾何学的性質について考察しよう（図１４．４．６）。 第１モデル、第２モデルはそれぞれ被写体と相似であるので３次元相似変換を利用して被写体に写像でき、さらに第１モデルと第２モデルとは２０パーセントだけ重複している

ので、この重複部分について考えれば両者は相似である。したがって、３次元相似変換を利用すれば第２モデルを第１モデルに接続して統一モデルを形成することができ、この統一モデルは３次元相似変換を使って被写体に写像できる。 同様にして、６０パーセントずつ重複して連続撮影されたｎ枚の写真を考えれば、最初にステレオ写真ごとに相互標定を施し（ｎ－１）個のモデルを形成する。 そして、これらのモデルを３次元相似変換を利用して次々と接続すれば１つの大きな統一モデルが形成される。 この統一モデルはｎ枚の写真全体に撮影されている被写体と相似であるので、３次元相似変換を利用すればその被写体に写像できる。この統一モデル変換を行うのに必要な基準点は統一モデル全体について２個の３次元座標既知点と１個の標高既知点だけであり、個々のステレオモデルごとに存在しなくてよい。 さらに、連続撮影された重複写真が単一コースではなく、数コースに亘っている場合（図１４．４．１）、まず上記の方法でコースごとにモデル接続を実施し、次に各コースごとに形成された統一モデルを３次元相似変換を利用して接続する。 ただし、写真はコース間で約２０パーセント重複撮影されているものとする。 この操作により撮影地域全域に関する統一モデルが形成され、このモデルは被写体全体と相似であるから、３次元相似変換を使って実物に変換できる。 数学的に必要な基準点は撮影地域全域について２個の３次元座標既知点と１個の標高既知点のみである。 以上が重複写真の持つ幾何学的性質の説明であるが、この幾何学的性質が空中三角測量で利用され、地上測量で与えられた地上基準点が少数個あれば、各ステレオ写真解析に必要な基準点が計算で増設できるわけである。

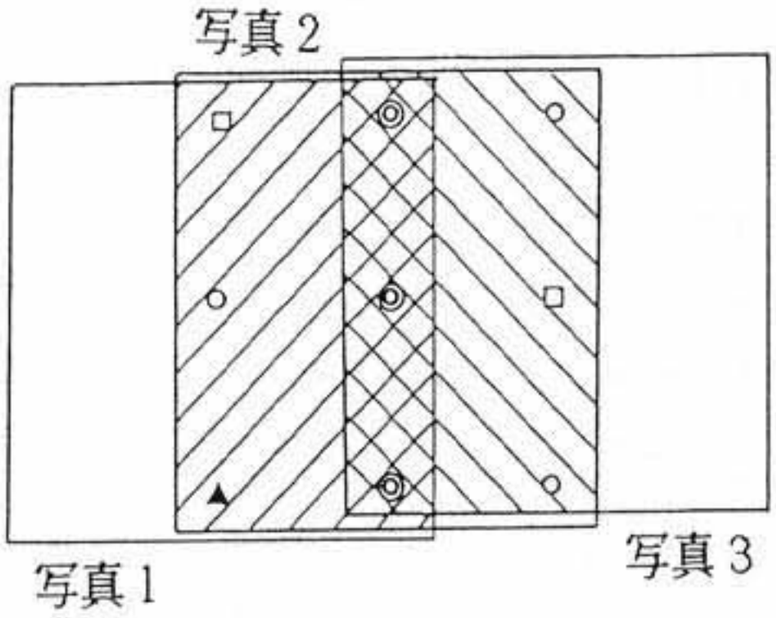


図１４．４．５　３枚の重複写真

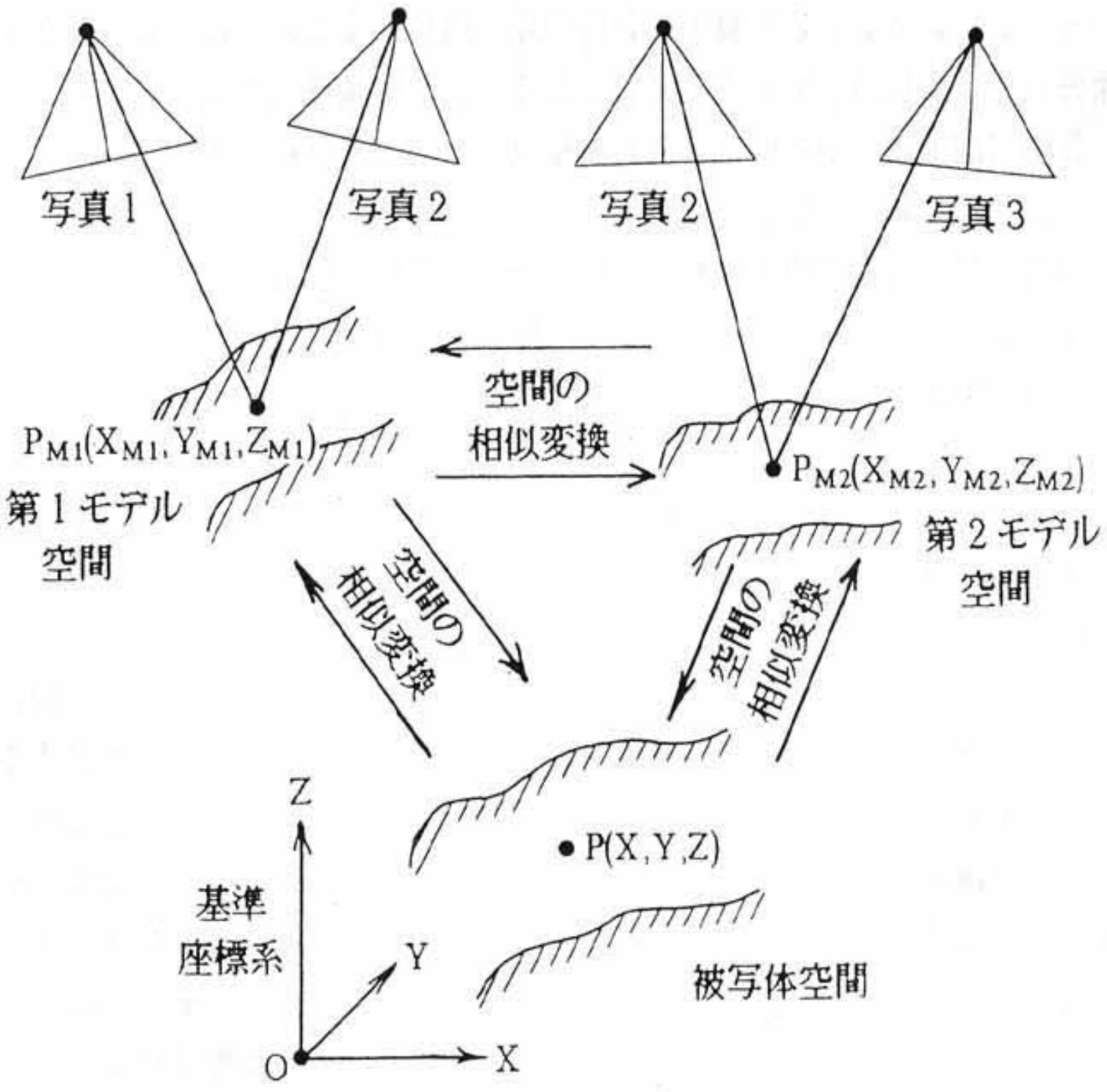


図１４．４．６　３枚の重複写真の幾何学的潜在力

１４．４．５　バンドル調整法による空中三角測量

前節では重複写真の持つ幾何学的潜在力について述べたが、実際の空中三角測量は上記の通り行われるわけでない。　近年利用されている空中三角測量手法は独立モデル法による方法とバンドル調整法による方法に大別される。　独立モデル法による方法について概説すると、まず個々のステレオモデルが独立に形成され、原理的にはそれらが別々に被写体に変換される。　しかしながら、実際に個々のステレオモデルを別々に被写体に変換するためには各モデルごとに地上基準点が必要になるので、重複写真の幾何学的潜在力を利用するために全ステレオモデルの変換を同時に行う。　この全ステレオモデルの同時変換は数学的にはモデル接続の概念を含むので、結果として少数の地上基準点しか与えられていない場合でも地上点の決定が可能になる。　個々のステレオ写真の解析に必要な地上基準点は基本的にはコース内のステレオモデルの重複部分（パスポイント）とコース間のステレオモデルの重複部分（タイポイント）に選ばれ、空中三角測量計算ではモデル接続点としての役割を果たしているが、それ以外の部分にも点を配置しておくこともできる。ただし、パスポイント、タイポイント以外の点は付加的に与えられるだけで、写真の幾何学的潜在力とは無関係である。　実際の計算では最小２乗法が適用され、さらに座標測定誤差に起因するモデル歪を除去するため付加パラメターが導入されることが多い。　しかしながら、この方法は写真座標を測定してステレオモデルを解析的に構成する場合、モデル座標が統計的に独立でなくなるので厳密とはいえない。　一方、バンドル調整法による方法では１４・４・２で述べた共線条件式が基礎方程式となる。　つまり、独立モデル法による方法では各ステレオモデルと被写体の関係（３次元相似変換式）が基礎方程式となるのに対し、バンドル調整法による方法では各写真と被写体の投影関係が基本となる。　そして、全撮影写真について共線条件式を同時に立て、最小２乗法を適用して各写真の外部標定要素、各ステレオ写真の解析に必要な地上点（増設基準点）の座標を計算する。　バンドル調整法による空中三角測量法の幾何学的説明は次の通りである。

まず、ステレオ写真上にのみ撮影されている点について考えると、共線条件は１枚の写真に対して２個の式で表されるから、被写体上の１点につき全部で４個の式が成立する。　そして、これら４個の式を幾何学的に分類するとその点の地上座標を計算するための３個の式と対応する２本の光線の交会条件を表す１個の式になる。　したがって、そのステレオ写真上で５個の点を選び（全ての対応する光線を交会させモデルを形成するには交会条件式を５点に対して立てる必要がある）、共線条件式を立てると全部で２０個の式が得られる。　さらに、５個の地上点の中２個は３次元座標既知の地上基準点、１個は標高既知の水準点とすると、地上点座標値（５点の１５個の座標値）の中未知のものは８個である。　そこで、２０個の式を２０個の未知量（２枚の写真の１２個の外部標定要素＋８個の未知座標値）について解けばステレオ写真の撮影状態が再現される。　次に、図１４．４．５で示される３枚の重複写真について考える。　第１写真と第２写真の重複部分、第２写真と第３写真の重複部分にそれぞれ５点ずつ選んで共線条件式を立てる。　このように選ばれた点の中、１点は３枚の写真の重複部分に存在すると仮定すると、その点に対しては共線条件式が６個成立する。　そして、これら６個の式は幾何学的にその点の地上点座標を決定するための３個の式、２種類のステレオ写真（第１写真と第２写真、第２写真と第３写真）に対する２個の交会条件式、及び２種類のステレオモデルを接続するための１個のモデル結合条件式を含んでいる。　したがって、解析の対象となる点の数は９個であり、これら９個の地上点に対して成立する共線条件式の総数は３８個となる。　また、これら９点の中、２点は３次元座標既知の地上基準点、１点は標高既知の水準点と仮定すると未知量の総数は３８個（３枚の写真の１８個の外部標定要素＋２０個の未知座標値）となる。　したがって、この３枚の重複写真の解析問題では２種類のステレオモデルを構成するのに必要な１０個の交会条件式、それらを接続するのに必要な１個のモデル結合条件式が使われているので解が得られることとなり、３８個の式を３８個の未知量について同時に解けば３枚の写真の撮影状態が再現できる（注：独立モデル法による方法では２種類のモデルを接続するためパスポイントが３点必要であったが、バンドル調整法による方法では１つの統一座標系で解析しているため座標変換が不必要となり、パスポイントは原理的に１点でよい）。

実際のバンドル調整法による空中三角測量では多コースに亘って撮影された全写真が同時に解析され、さらに写真座標測定の誤差に起因する解の不安定性を除去するためパスポイント、タイポイントを多数選択する。　バンドル調整法に基づく空中三角測量法の特長としては

1)共線条件式を基礎方程式としているので、最小２乗法の計算では統計独立な写真座標の測定量を観測量として取り扱うことができ、解法の厳密性を保つことができる。

2)カメラの内部標定要素（写真主点位置、画面距離等）が未知であっても容易に未知量として取り扱うことが可能である。　つまり、カメラのセルフキャリブレーション手法（重複写真の幾何学的潜在力を利用したカメラの内部標定要素の決定法）の導入が容易である。

3)取り扱う未知量の数が膨大であるため計算容量、計算時間の軽減を図るため解法に工夫が必要である（縮約正規方程式、バンドマトリックスの性質を利用した解法等）。

4)写真座標測定の際生じた異常値の自動除去、解析精度向上を図るためのフリーネット理論の導入が容易である。

等が挙げられる。

１４．４．６　芦屋市を対象とした空中三角測量

当部会は阪神大震災における地盤変状を航空写真を利用して精密に測定することを主目的としているが、解析精度を決定する最も重要な要素は空中三角測量である。　そこで、まず解析対象地域として選んだ芦屋市を震災前後に撮影した空中写真（約５０枚、写真縮尺１／４，０００）に対してシミュレーションモデルを作成し、バンドル調整法に基づく空中三角測量の解析特性を調査した。　そして、実際の空中三角測量では上記の調査結果を参考にして、できるだけ安定解が得られるようにパスポイント、タイポイントを選択した。　この解析プログラムは独自に作成したが、その特長としては

・撮影カメラのセルフキャリブレーションが可能である。

・空中三角測量結果（地上点座標（各ステレオ写真解析の際の増設基準点））の最確値の標準誤差の計算が可能である。

が挙げられる。　増設基準点座標の標準誤差は空中三角測量結果の信頼性を議論する上で非常に重要であるが、計算に手間が掛かるため通常の空中三角測量プログラムではこの過程が省略されている。　しかしながら、解析結果の中どの部分が幾何学的に弱く、解析精度が劣化しているかを把握しておくことが精密写真測量には重要であるため計算容量、計算時間を多少犠牲にしてプログラム作成を試みた。　実際の解析計算は３種類のプログラム（当部会で作成したプログラム、独立モデル法による解析プログラム（ＰＡＴ－Ｍ（ＩＮＰＨＯ社製）、バンドル調整法による解析プログラムＡＬＢＡＮＹ（ＥＲＩＯ社製））を利用して行い、３種類の解析結果の差が理論的に考えられる誤差の範囲内に収まるかどうか検証した。　詳しい解析結果の報告は１４・６に譲ることにする。

１４．５　写真解析用図化システム

１４．５．１　概説

地盤変動の分布を知るためには、震災前後の写真で大量の対応点の座標を計測しなければならない。計測に使用した震災前後の写真には３年もの時間の経過があり、撮影方向も90°ことなっている。実際この間の神戸地域の経年変化は激しくかつ複雑である。このため同一点の認識は容易でない。われわれは地盤変動の計測方法について２つの可能性を議論した。

1つは２台の解析図化機を使い、交互に観測して慎重に点の対応を確認することで計測を行なう方法であった。解析図化機は現在の写真測量システムの中心であってすでにその性能は多くの実例で実証されている。

もう１つの可能性は、現在世界中で開発が急速に進んでいるディジタル写真測量システム(DPS)で計測することであった。ディジタル写真測量はアナログの写真の代わりにこれをディジタル化した画像、ないしはＣＣＤカメラなどで撮影したディジタル画像を使って、精密位置計測を行なう写真測量である。ディジタル写真測量システム(DPS)は従来の精密機械のすべてまたは一部を計算機の画像処理で実現する。

今後計算機の高速化・大容量化に伴い、DPSのコストが低下して工業計測・地図作成を問わず従来の写真測量システムはDPSにとって変わっていくことが確実と見られている。とくにこのような精密３次元計測には多くの特殊な要求がある。複数の画像を同時に観測したり、測定点を画像上に残すというようなことはDPSの方が柔軟に目的に対処できる。また計算機はすでに充分普及しているので、研究者が測量会社に依頼せずに、自分で地盤変動の計測を行なうことができる。しかしながら、ディジタル画像での観測性能は現在のところフィルムに及ばない。すなわちフィルムに匹敵するだけの高いディテイルの再現性をディスプレーに期待できないこと、また画素の大きさもフィルムの解像力まで小さくすることは現実的でないなどの問題がある。このため解析図化機の計測精度と操作性は実現できないであろうと思われた。

これらのことから地盤変動の計測は解析図化機を中心とする従来のシステムで行なった。そしてこれとともにディジタル写真測量で一部地域の計測を行ない、解析図化機での計測結果と比較して、ディジタル写真測量の有効性と将来性を明らかにしようとした。著者らは通常のワークステーションを使って、DPS「ごくう」を作成した。「ごくう」は特殊なハードウェアを使わず、標準のキーボード、マウスを画像の制御に使い必要最小限の計測機能を搭載した。「ごくう」は今後改良を進めると共に一般に公開して、研究者の便宜に供することにしている。

ディジタル写真測量の大きな利点として計算機による自動計測（ステレオマッチング）がある。ステレオマッチングはステレオ画像上の多くの対応点を自動で見いだすもので、数値地形モデル(DTM)の作成およびディジタルオルソ画像の作成を目的にしている。オルソ画像は中心投影の写真画像を正射投影の画像に変換したもので地図の代用と見なしてよい。この委員会では、現在もっとも進んだ自動計測技術を使って被災地のディジタルオルソ画像を作成して、他の研究者の便宜に供することになった。

この章では解析に使ったシステムを解説する。しかしAPSに関する資料はすでに豊富に見いだされるので、従来の図化機などの説明は簡略にし、「ごくう」の構造、用いた変換式を詳しく説明して、「ごくう」を今後使う人のための資料にする。１４．５．２でAPSでの精密機械について概略を述べ、さらにDPSとの比較を行なった。１４．５．３で「ごくう」の構造を示した。１４．５．４では被災地のディジタルオルソを作るのに使ったソフトウェア　MATCH-Tの技術を中心に、ステレオマッチングおよびオルソ画像の作成法を解説する。

１４．５．２　アナログ写真測量システム(APS)とディジタル写真測量システム(DPS)

表５．１　写真測量システムの図化の流れ

機能	アナログ写真測量システム（解析図化機での計測）	ディジタル写真測量システム
業務管理	手作業	CAD+データベース
画像点座標計測	点刻機＋コンパレータ	ソフトウェア（コンパレータモード）
空中三角測量	独立したソフトウェア	独立したソフトウェア
１モデルの標定	計算処理のみ	計算処理＋画像上の表示
偏位修正	なし	おおむね含む
図化と編集	CAD+図化機	CAD+図化機モード

APS（とくに解析図化機）とDPSでの計測・図化の流れを表１４．５．１に示す。「業務管理」は撮影の標定図の作成を含む図化の業務管理である。「画像点座標計測」は空中写真測量のための増設基準点（パスポイント）の画像座標を計測する。「空中三角測量」のプログラムはシステムに入っているものもあるが、本質的には独立した一つの製品である。「１モデルの標定」は増設基準点を使って、各ステレオモデルを相互、絶対標定する。アナログまたは解析図化機では標定が終わった１対の画像を立体視して図化する。これに対してディジタル図化機では図化の前に、撮影軸の回転から起こる縦視差を全画面から取り除く処理を行なう。これをここでは「偏位修正」と呼んだ。偏位修正は時間がかかるが、大きな画面全体を立体視することができ、地上点の観測と計測を容易にする。

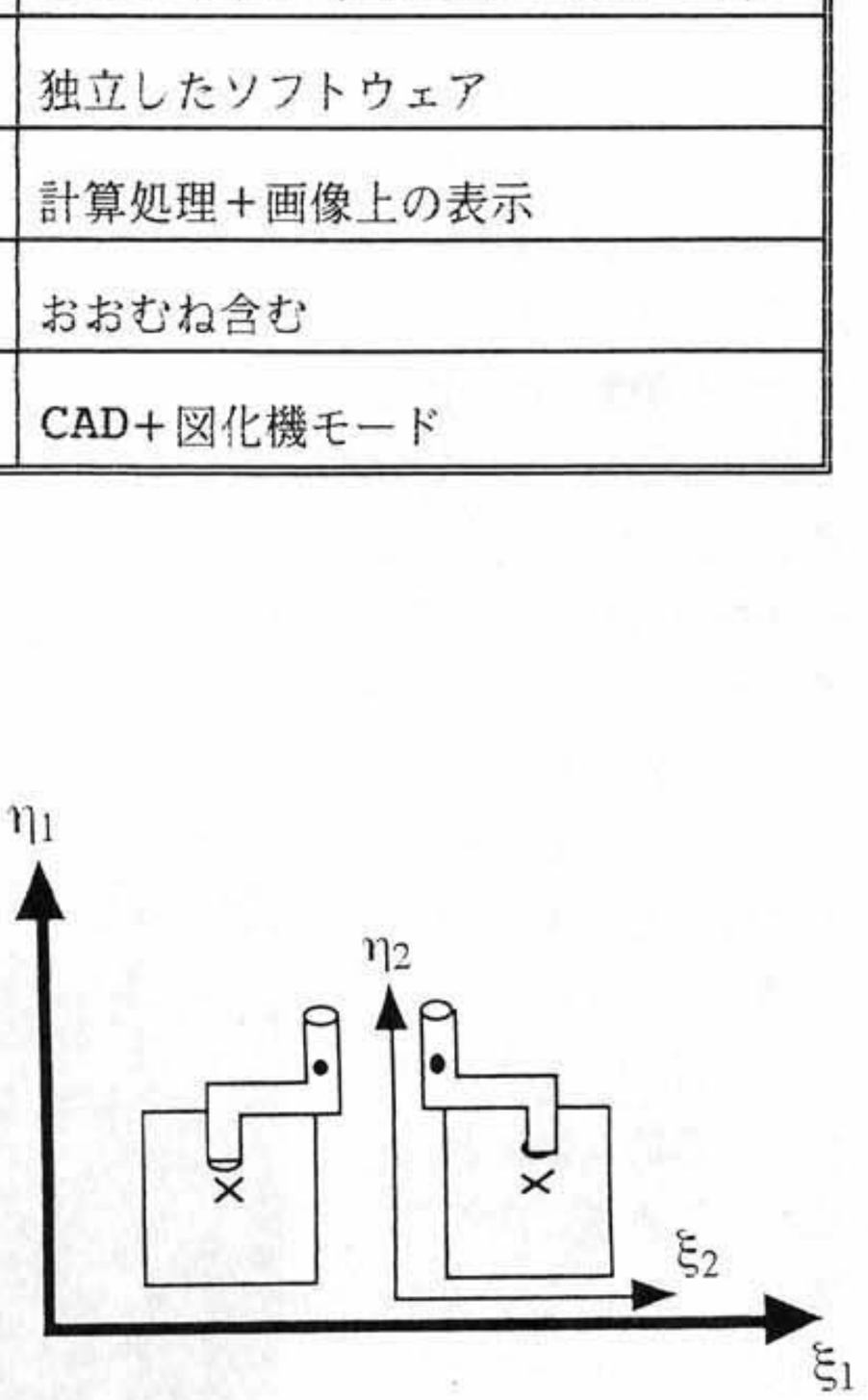


図１４．５．１　ステレオコンパレータの構造

伝統的なAPSは、つぎの独立した精密機械でできている。

○写真点座標を精密に計測する精密座標測機（ステレオコンパレータ）

○特定の写真点に正確に小さな丸い穴（直径40μm)をあける点刻機

○空中三角測量の成果を使って１モデルの図化ないし地上点の座標計測をおこなう図化機（プロッタ）。図化機には精密機械と光学系でできているアナログ図化機と計算機の制御のもとで計測する解析図化機がある。現在の主流は解析図化機である。なおDPSはAPSの２つの機械、コンパレータ、図化機を画像処理でシミュレートし、１つの計算機システムの上で有機的に結合したものと言える。このため従来は独立していたいくつかの処理を業務管理から図面作成まで連結して一つの計算機上で行なうことができる。

コンパレータの一般構造は図１４．５．１に示すようである。ξ_1, η_1方向に動く架台に左写真が乗り、さらにその架台の上に、ξ_2, η_2方向に動く右写真用の架台を載せている。オペレータは画像を立

体視しながら１μmまでの写真座標（正確にはエンコーダが示す機械座標）を計測する。測定点は観測視野の中央に置いた小さなマーク（メスマーク）を画像と同時に立体視して対応点を合わせることで、高精度の計測を実現している。画像を回転させる機能はないので、画像に相対的な回転が入っていて立体視が困難な場合は観測系の光路をダブプリズムで回転してこれを除去する。

従来の図化機には光学式図化機、機械式図化機などのアナログ図化機と計算機制御の解析図化機がある。アナログ図化機は写真と被写体の投影関係を物理的に再現するものである。図１４．５．２に機械式のアナログ図化機Wild A8の構造の模式図を示す。相互・絶対標定で写真の投影関係を再現すると、実空間に相似の空間が図化機に作られこれをモデルと呼ぶ。オペレータはこのモデルを観測し、モデル上の点をメスマークで指摘するとその地上座標がロッドを通してアナログで計算される。図１４．５．２の２本のロッドが光線の方向を示している。等高線はZを一定にしてメスマークを地表に沿って走らせることで得られる。アナログ図化機は現在も使われているがほとんど生産されていない。

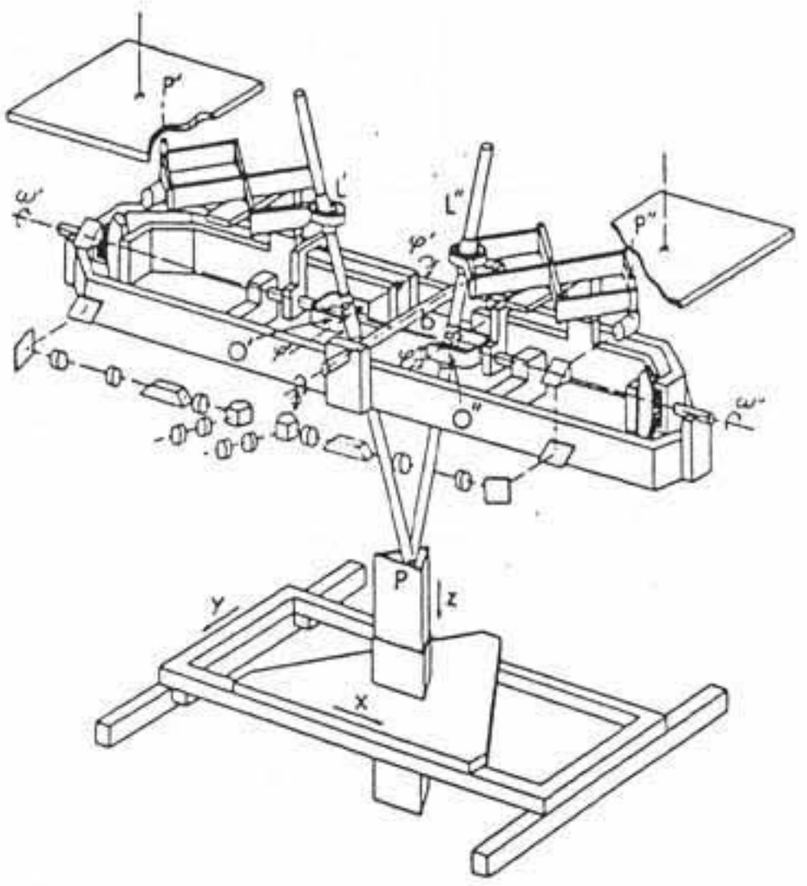


図１４．５．２　機械式アナログ図化機の構造

解析図化機として地盤変動計測に使った　Wild BC1を図１４．５．３に示す。解析図化機はコンパレータと構造的にはほとんど同じものである。画像と被写体の投影関係をすべて計算で再現し、実際の物理モデルを空間に作るわけではない。オペレータは写真を顕微鏡で観測し頭の中で立体を認識している。１モデルの標定を行ない地上座標系と写真座標系（さらには機械座標系）との関係が決定できたあとでは、左右画像の縦視差を常に除去するように写真架台をx,y方向に動かす。架台の移動量は計算機が制御する。

図１４．５．３　解析図化機 Wild BC1

計測点の制御は３つのホイールで行なう。図１４．５．３の右手、左手、足の位置にあるホイールはそれぞれモデルのX,Y,Z座標の制御のためのホイールである。このほかに手元だけで３次元制御する特殊なデバイスを使うものもある。オペレータがモデル上の点をメスマークで指摘すればその座標が計算機を通して出力される。描画した図形はCADに送り編集を行なう。この意味で図化機はCADの３次元ディジタイザと考えるべきである。

将来APSはDPSに代わっていくと見られているが、将来を含めディジタル写真測量の利点と欠点を

挙げておくと以下のようである。
(1)DPSでは将来対応点の自動探索技術が進んで標定と計測の自動化が期待できる。
(2)DPSでは標定点に点刻がいらなくなるので標定精度の向上が期待できる（現在は点刻の大きさは40μmφであるが立体視することで5μm以上の計測精度が得られる）。
(3)将来はDPSの方が保守、改良などの点で低コストになる。
(4)DPSはさまざまな投影方式の画像計測に対処できる。
(5)DPSは複数の画像を表示したり、画像にコメントを残すのが容易である。逆に、光学系で簡単にできる画像の拡大、回転などには時間がかかる。
(6)DPSは写真測量の知識以外に計算機の知識がないと管理ができない。
(7)DPSは空中写真測量ではフィルムのディジタイジングにスキャナが必要である。現在のところでは一般にAPSの方が計測の能率が高い。
(8)現在のところディスプレーの濃度分解能はフィルムに及ばずフィルムの方が観測が容易である。

１４．５．３　ディジタル写真測量システム「ごくう」の構造

１）概要

この委員会の計測のため、われわれは通常のワークステーションを使ったDPS「ごくう」を開発した。この節ではコンパレータ、偏位修正機、図化機のそれぞれのモードの構造と制御法を説明する。

「ごくう」での計測のようすを図１４．５．４に示す。「ごくう」は通常のワークステーションと基本ソフトウェアのみを使って開発した。立体視には簡単な反射実体鏡を使う。「ごくう」のハードウェア、ソフトウェア構成を表１４．５．２に示した。描画したグラフィクスはCADを使って、地形図に編集する。このCADとしては測定データの利用の汎用性を考え市販品（Autodesk社AutoCAD）を使った。以下にそれぞれの機能と使用した数式を述べる。なお表１４．５．１の最初の「業務管理」は説明を省略する。

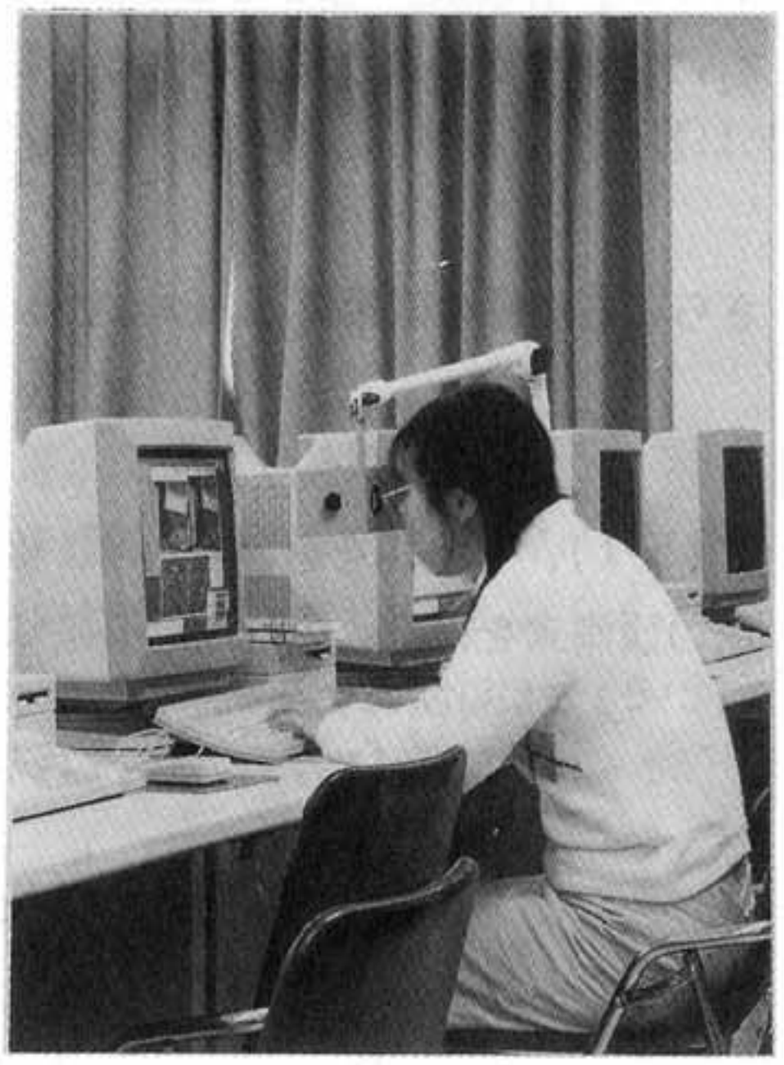


図１４．５．４「ごくう」での計測のようす

表１４．５．２　「ごくう」の基本ハードウェア・ソフトウェア構成

CPU	SUN sparc1+(64MB),
OS	UNIX(Sun solalis 2.2)
ウィンドウシステム	X-ウィンドウ
立体視	画面分割方式
ハードディスク	3GB
付属機器	マウス、DAT
編集用CAD	Autodesk社　AutoCAD rel.12

2）コンパレータモード

指標、標定点、GCPの画像座標を精密に計測する機能である。フィルムの解像度は3μm程度であるが、ディジタル画像の画素幅は実用上10μm程度になるので、必要な標定精度を得るには、標定点の数を多く取って標定パラメータを統計的に安定させるか、あるいはサブピクセルまでの対応を推定する方法が必要になる。しかし自動の計測は誤りが許されないという理由で当面実現できそうにない。これに対してDPSではつねにオペレータが画像を観測できるので、半自動の計測でサブピクセルまで読み取る方法が有利である。「ごくう」には4倍拡大の画像でマニュアル計測するモードと最小2乗相関法を使った半自動計測のモードを組み込んだ。実験の結果、空中写真の場合計測精度はマニュアル、半自動とも1/3画素であった。以下は最小2乗相関法の概要である。

オペレータが標定点を計測するときには、画像を立体視して、平坦地の弱いテクスチャのある場所に選定する。これに対し最小2乗相関法ではエッジやブロッブなどの特徴点を積極的に利用するのが便利である。最小2乗相関法は左右画像に局所的なアフィンひずみが入っていると仮定して、最小2乗法で左右画像を一致させる変換係数を求める方法である。左画像の座標系x_1, y_1に対し右画像の座標x_2, y_2がつぎのように表わせると仮定する。

$$x_2=s_{11}x_1+s_{12}y_1+s_{13},\quad y_2=s_{21}x_1+s_{22}y_1+s_{23} \quad (5-1)$$

さらに右画像の画素値 $I_2(x_2, y_2)$が左画像の画素値$I_1(x_1, y_1)$と線形関係にあると仮定する。

$$I_1(x_1, y_1)=t_1 I_2(x_2, y_2)+t_2 \quad (5-2)$$

式(5-1)、(5-2)を組み合わせ、線形化すると未知パラメータの補正量（Δを付けて表す）に関する次の観測式を得る。係数は近似値で評価する。

$$v=t_1 I_2(x_2, y_2)+t_2+I_2(x_2, y_2)\Delta t_1+\Delta t_2+t_1\left(\frac{\partial I_2}{\partial x_2}\right)(x_1\Delta s_{11}+y_1\Delta s_{12}+\Delta s_{13})$$
$$+t_1\left(\frac{\partial I_2}{\partial y_2}\right)(x_1\Delta s_{21}+y_1\Delta s_{22}+\Delta s_{23})-I_1(x_1, y_1) \quad (5-3)$$

これを最小2乗法で解いて、未知係数を決定する。

図14．5．5はコンパレータモードの画面である。画面下の3つのウィンドウは縮小した全体画像（300*300画素）を表示するインデックスである。3枚の連続した重複画像上で対応点を取れるようにするためウィンドウは3つある。画面上の大きなウィンドウ（1200*1200画素、表示は400*400画素）は計測のためのステレオウィンドウである。入力画像の画素レベルは256段階(8bit)を標準にしたが、表示の濃度レベルは各ステレオウィンドウで64色づつとった。これは使用したワークステーションが256色表示であるためである。予備的な実験では64段階以上の表示では識別精度に差はなかった。ただし左右画像の明るさは一般に異なるときが多いので、カラーテーブルを切り替えて明るさを調節するためのインディケータを備えた。

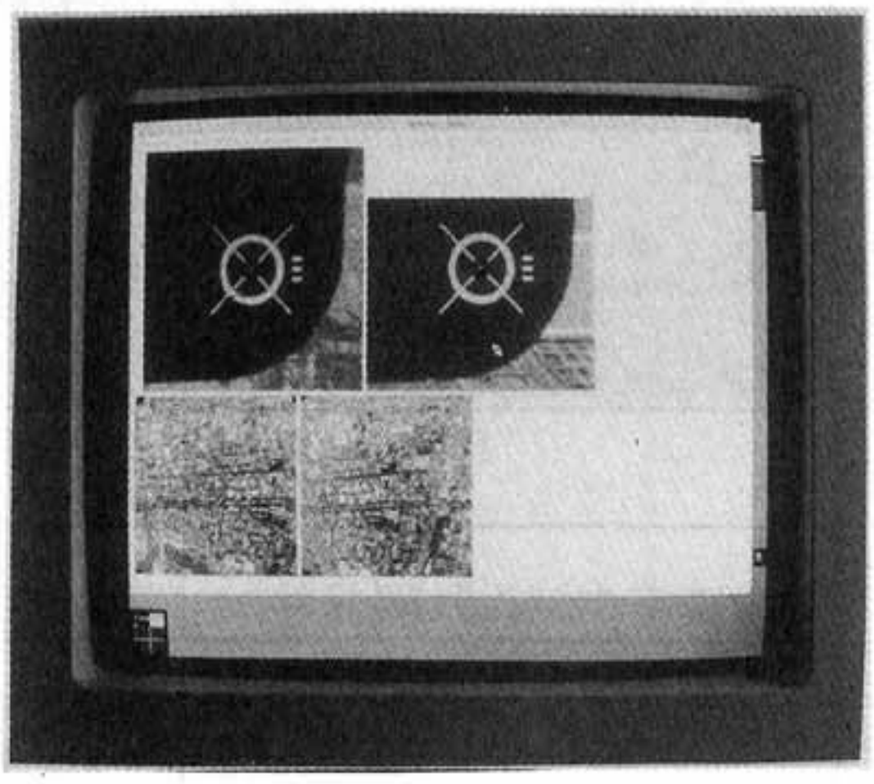


図14．5．5　コンパレータモードの画面

画像点の座標計測は立体視して行なう。「ごくう」は立体視の方法として、２つのウィンドウに左右画像を表示する画面分割方式をとった。しかし現在では画面切り替え方式（２つのウィンドウを交互に表示し、表示と同期する液晶シャッタ眼鏡で観測する）が安価になってきたので将来は変更すべきであろう。画面切り替え方式では大画面の立体視ができ、目の疲れが少ない。

オペレータはインデックス画面で領域を選択し、ステレオウィンドウに切り出す。左右の画像を別々にローミングして、ウィンドウ中央のメスマークに測定点を合わせ座標を計測する。計測した位置は画像に表示するとともに、画像点座標ファイルに書き込む。

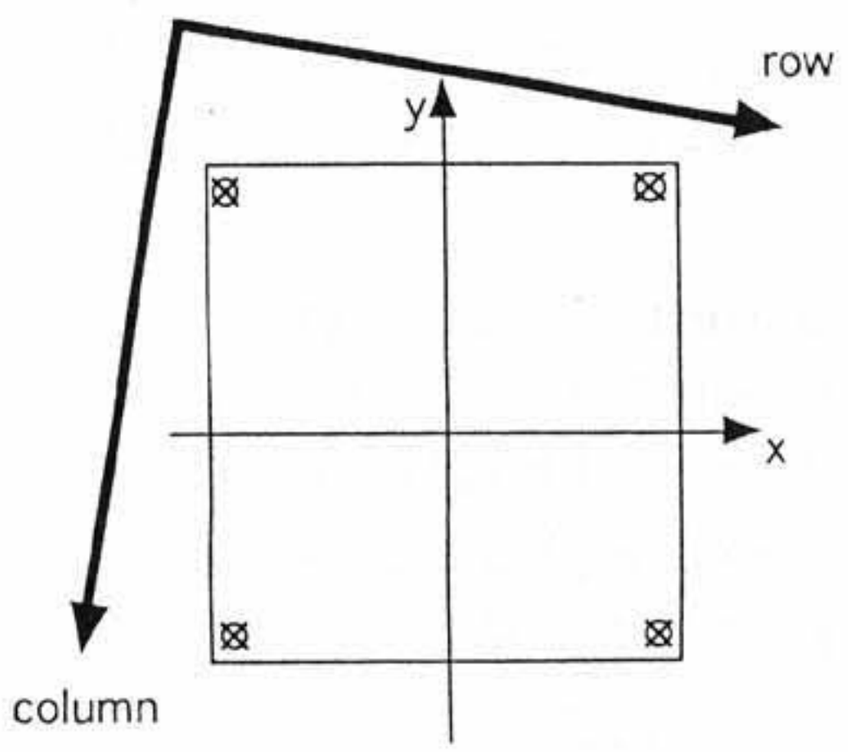


図１４．５．６　画像座標系と写真座標系

３）１モデルの内部・相互・絶対標定

内部標定は画像の写真座標系(x,y)と画像座標系(row,column)を関係付ける作業で、両者は次のアフィン式で対応づける（図１４．５．６参照）。

$$x=a_{11}row+a_{12}column+a_{13},\ y=a_{21}row+a_{22}column+a_{23} \quad (5\text{-}4)$$

係数a_{ij}は4つの指標のキャリブレーションされた座標を使って最小２乗法で決める。

外部標定は相互標定と絶対標定に分けて行なっている。左画像の撮影点を通るモデル座標系(X_M,Y_M,Z_M)、左右画像の主点を通る画像座標系(x_1,y_1),(x_2,y_2)、地上座標系P(X_G,Y_G,Z_G)を図１４．５．７のように定義する。画像点P_1(x_1,y_1),P_2(x_2,y_2)とそれらのモデル座標系での関係は式(5-5)で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\begin{bmatrix}X_{M1}\\Y_{M1}\\Z_{M1}\end{bmatrix}&=\begin{bmatrix}m_{11}&m_{12}&m_{13}\\m_{21}&m_{22}&m_{23}\\m_{31}&m_{32}&m_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\y_1\\-c\end{bmatrix}=D_m\begin{bmatrix}x_1\\y_1\\-c\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}X_{M2}\\Y_{M2}\\Z_{M2}\end{bmatrix}&=\begin{bmatrix}n_{11}&n_{12}&n_{13}\\n_{21}&n_{22}&n_{23}\\n_{31}&n_{32}&n_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_2\\y_2\\-c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\0\\0\end{bmatrix}\\ &=D_n\begin{bmatrix}x_2\\y_2\\-c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\0\\0\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}5)$$

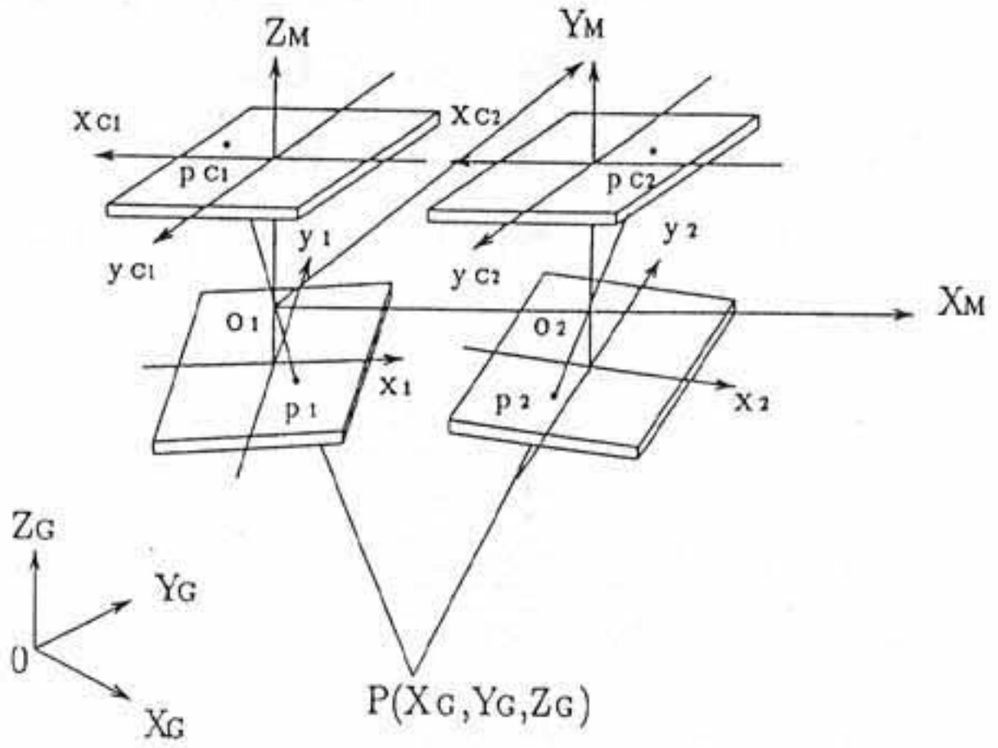


図１４．５．７　写真座標系、モデル座標系、地上座標系の関係

Bは撮影点間の距離（通常B=１）であり、D_m=(m_{ij}),D_n=(n_{ij})は左右画像のモデル座標系に関する回転行列である。相互標定の結果回転行列の成分が決定され、それからP_1,P_2の交点のモデル座標　P_M(X_M,Y_M,Z_M)を計算する。

次に絶対標定を行なう。ある点のモデル座標P_M(X_M,Y_M,Z_M)とその地上座標P(X_G,Y_G,Z_G)の関係は式(5-6)で与える。

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = scale \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = scale\ A\ M \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}6)$$

scaleはスケール、M=(M_{ij})は回転行列である。行列Aは座標系の右手、左手系を変換するためのものである。モデル座標系は右手系、地上座標系は多くの場合北をX_G、東をY_Gにとる左手系である。右手->右手の変換であればAは単位行列、右手->左手の変換であれば

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}7)$$

になる。

外部標定を相互標定、絶対標定に分ける必要は必ずしもなく、バンドル調整で標定できる。しかし「ごくう」は専門の測量技術者でないものが利用することを考えている。そのため入力の誤りを発見しやすいように相互・絶対を分けて行なっている。

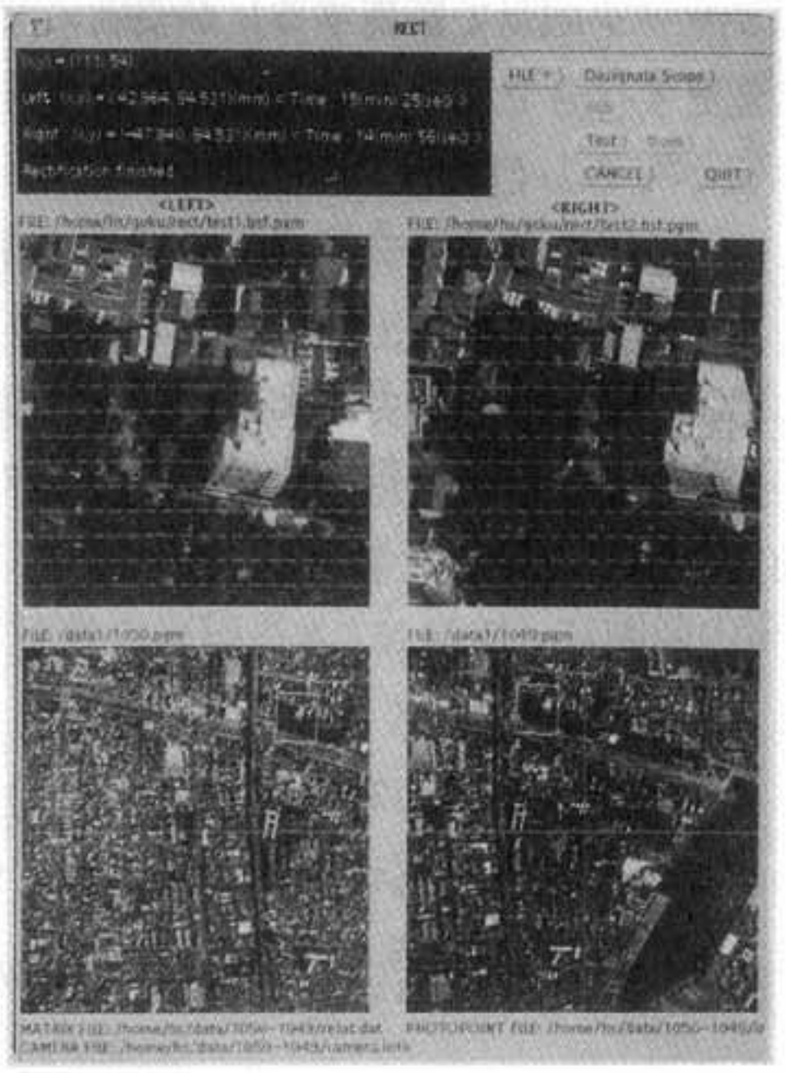


図１４．５．８　偏位修正モードの画面

４）偏位修正モード

偏位修正は幾何学的には撮影基線に平行な平面に画像を再投影することと同義である（図１４．５．７参照）。偏位修正モードの画面を図１４．５．８に示した。画面下の２つのウィンドウに偏位修正前の画像対を表示する(300*300画素)。この上で修正したい領域をマウスで指摘する。修正された画像は上のウィンドウに表示される。縦視差が正しく取れているかを見るため、画像の任意の位置の小部分を指摘すると１倍の拡大率で修正した画像が再び下のウィンドウに表示される。縦視差のチェックがしやすいよう横線を入れてある。

もとの写真座標$p_1(x_1, y_1)$、$p_2(x_2, y_2)$　と偏位修正した写真座標$p_{c1}(x_{c1}, y_c)$,$p_{c2}(x_{c2}, y_c)$とは式(5-8)の関係がある。

$$\left.\begin{aligned} x_1+\Delta x_1 &= \frac{m_{11}x_{c1}+m_{21}y_c+m_{31}(-c)}{m_{13}x_{c1}+m_{23}y_c+m_{33}(-c)}(-c) \\ y_1+\Delta y_1 &= \frac{m_{12}x_{c1}+m_{22}y_c+m_{32}(-c)}{m_{13}x_{c1}+m_{23}y_c+m_{33}(-c)}(-c) \\ x_2+\Delta x_2 &= \frac{n_{11}x_{c2}+n_{21}y_c+n_{31}(-c)}{n_{13}x_{c2}+n_{23}y_c+n_{33}(-c)}(-c) \\ y_2+\Delta y_2 &= \frac{n_{12}x_{c2}+n_{22}y_c+n_{32}(-c)}{n_{13}x_{c2}+n_{23}y_c+n_{33}(-c)}(-c) \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}8)$$

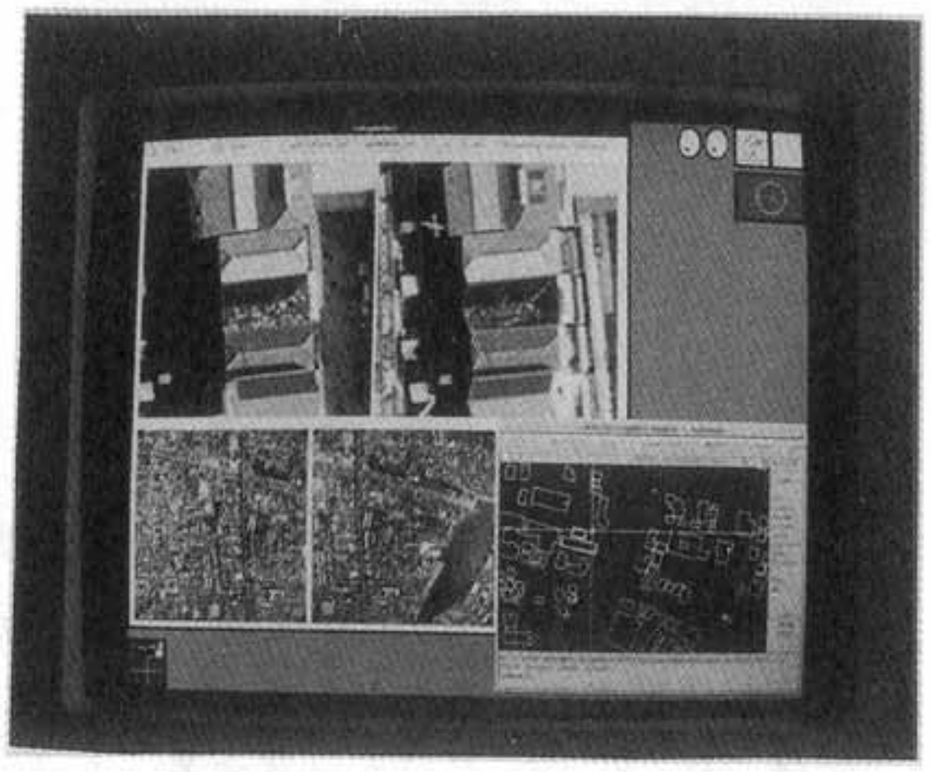


図１４．５．９　図化機モードの画面

Δx_1、Δy_1、Δx_2、Δy_2は画像の非線形ひずみの項である。さらに写真座標$p_1(x_1, y_2)$,$p_2(x_2, y_2)$を内部標定のアフィン式（式(5-4)）を使って式(5-9)で画

像座標(row,column)に変換する（係数は左右画像で異なる）。修正画像の画素値はバイリニア法で内挿して求めている。

$$\begin{bmatrix} row \\ column \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x-a_{13} \\ y-a_{23} \end{bmatrix} \quad (5\text{-}9)$$

5）図化機モード

図１４．５．９に図化機モードの画面を示した。ディジタル図化機の機能は本質的には解析図化機と同じであるが、画像処理を援用したいくつかの機能を付けている。計測のための画像の制御には解析図化機と同様、ハンドホイール、フットホイールを使うのが能率的であるが、「ごくう」は汎用性を重視して計算機に標準のマウスとキーボードだけを使っている。このため、使いがっては専用入力装置を付けたものに及ばない。そのかわり最小の訂正でどのUNIX機でも動作する。

「ごくう」には図化機を実現するために次の機能を付けた。

(1)画面の立体視

(2)計測のための画像の動きの制御

(3)計測したグラフィクスを画像に重ね合わせる機能(super-imposition)

(4)CADと連動してグラフィクスの編集を行なう機能

(1)の機能はコンパレータモードと共通である。(3)は解析図化機では不可能であったが、ディジタル図化機では容易である。これによってグラフィクスが正しく取れているか、あるいは書き漏らしはないかを画面で直接確認できる。上記以外に(5)地形の自動計測機能　が今後必要である。この委員会では、国際的に定評のあるINFO社MATCH-Tを使い、ステレオマッチング、DTMの作成、さらにオルソ画像の作成を行なった。これについては次節で解説する。以下は(2)、(4)について説明する。

(2)計測のための画像の動きの制御

計測点を制御するのに、画像を固定しておいてメスマークを動かすこともできるが、画面上でx視差が大きく変化するので目はつかれる。「ごくう」は解析図化機と同様メスマークを固定して、画像を動かす方式とした。この場合広域のローミングはメモリが少ないとむつかしいので、画像を一部分ずつ切り取ってくる「タイリング」方式を用いている。「タイリング」方式はオーバヘッドが大きい。すでに計算機が高速になり、大メモリ（例えば128KB以上）が容易に実現できるようになったため、連続した「シームレス」のローミングが困難でなくなっている。今後はこれを導入する必要があろう。

「ごくう」の制御法は次のようである。画像をローミングして計測ウィンドウ中央に固定したメスマークで計測する。地上座標(X_G, Y_G, Z_G)を指摘すると、対応する写真点の画素(x_{c1}, y_c), (x_{c2}, y_c)がメスマーク中央にくるよう画像を動かす。X_G, Y_Gはマウス（高速）とキーボードのテンキー（低速）で、Z_Gの制御はキーボードで行なった（xキーが上（高速）、zキーが下（高速）、shift-xが上（低速）、shift-zが下（低速））。ローミング速度の制御はプルダウンメニューで与えた。画像の表示は通常1倍であるが、読み取りを容易にするため必要に応じて３倍にして観測する。

図化には偏位修正した画像を使うことを標準とするが、偏位修正の時間が掛かるため、また現在では撮影軸の回転

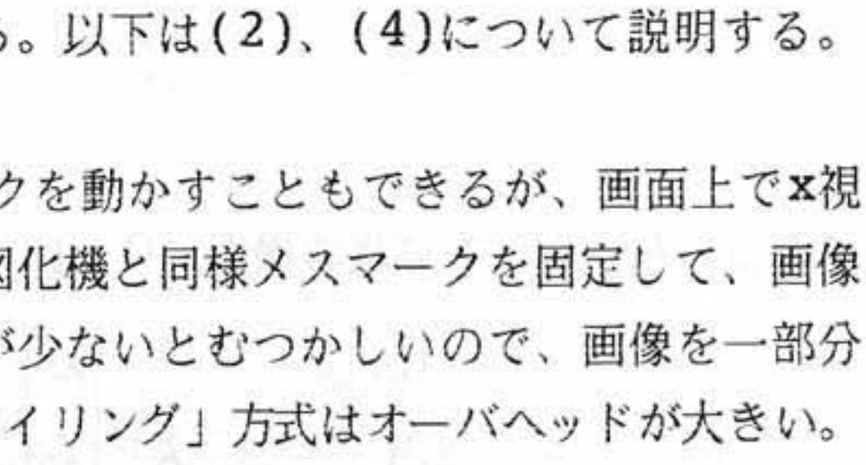


図１４．５．１０　図化の制御のための地上座標系(ξ, η)の定義

がほとんど無い撮影を行なっているため、偏位修正を施さず通常の解析図化機と同じように画面の制御をするモードも備えた。この時には図１４．５．９の下の画面には元の画像を表示する。どちらの場合も制御法はほとんど同じであって、地上点$P(X_G, Y_G, Z_G)$を与えて、それに対応する左右の画像座標が計測ウィンドウのメスマークの位置に来るようにする。しかし一般に地上座標系はモデル座標系と平行でないので、地上座標系をいったん制御用の新しい地上座標系に移して制御する。新しい地上座標系(ξ, η, ζ)をξ, ηがそれぞれX_M, Y_Mに平行になるよう取る（図１４．５．１０参照）。モデル座標系の回転行列 M（式(5-6)参照）を式(5-10)のように分解する。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos K & -\sin K & 0 \\ \sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi\Omega_{11} & \Phi\Omega_{12} & \Phi\Omega_{13} \\ \Phi\Omega_{21} & \Phi\Omega_{22} & \Phi\Omega_{23} \\ \Phi\Omega_{31} & \Phi\Omega_{32} & \Phi\Omega_{33} \end{bmatrix} = D_K D_{\Phi\Omega} \quad (5\text{-}10)$$

これを使って式(5-6)を書き直すと次式を得る。

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = A D_K \{ scale\ D_{\Phi\Omega} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + D_K^{-1} A^{-1} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \} \quad (5\text{-}11)$$

ここで新しい地上座標系(ξ, η, ζ)とモデル座標系(X_M, Y_M, Z_M)の関係を

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = scale\ D_{\Phi\Omega} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \zeta_1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}12)$$

に取る。左写真、右写真の撮影点$O_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$, $O_2(\xi_2, \eta_2, \zeta_2)$は次の式で計算できる。

$$9\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \zeta_1 \end{bmatrix} = D_K^{-1} A^{-1} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} = scale\ D_{\Phi\Omega} \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \zeta_1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}13)$$

これらを使って新しい地上座標と写真座標の関係は次の式になる。

$$\begin{bmatrix} \xi - \xi_1 \\ \eta - \eta_1 \\ \zeta - \zeta_1 \end{bmatrix} = scale\ D_{\Phi\Omega} D_m \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \xi - \xi_2 \\ \eta - \eta_2 \\ \zeta - \zeta_2 \end{bmatrix} = scale\ D_{\Phi\Omega} D_n \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{bmatrix} \quad (5\text{-}14)$$

偏位修正した画像を使うときには式(5-14)のDm,Dnは単位行列である。式(5-14)から共線条件式(5-15)を導き、$P(\xi, \eta, \zeta)$ $(Z_G = \zeta)$ の値を与えて、これに対応する$P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$を計算する。同時に式(5-11)から地上座標(X_G, Y_G, Z_G)を計算して表示する。行列$D_{\Phi\Omega} D_m$、$D_{\Phi\Omega} D_n$をそれぞれ $\{\Phi\Omega m_{ij}\}$ 、 $\{\Phi\Omega n_{ij}\}$ で表わすと式(5-15)は次の式になる。

$$\left.\begin{aligned}
x_1 &= \frac{\Phi\Omega m_{11}(\xi-\xi_1)+\Phi\Omega m_{21}(\eta-\eta_1)+\Phi\Omega m_{31}(\zeta-\zeta_1)}{\Phi\Omega m_{13}(\xi-\xi_1)+\Phi\Omega m_{23}(\eta-\eta_1)+\Phi\Omega m_{33}(\zeta-\zeta_1)}(-c)\\
y_1 &= \frac{\Phi\Omega m_{12}(\xi-\xi_1)+\Phi\Omega m_{22}(\eta-\eta_1)+\Phi\Omega m_{32}(\zeta-\zeta_1)}{\Phi\Omega m_{13}(\xi-\xi_1)+\Phi\Omega m_{23}(\eta-\eta_1)+\Phi\Omega m_{33}(\zeta-\zeta_1)}(-c)\\
x_2 &= \frac{\Phi\Omega n_{11}(\xi-\xi_2)+\Phi\Omega n_{21}(\eta-\eta_2)+\Phi\Omega n_{31}(\zeta-\zeta_2)}{\Phi\Omega n_{13}(\xi-\xi_2)+\Phi\Omega n_{23}(\eta-\eta_2)+\Phi\Omega n_{33}(\zeta-\zeta_2)}(-c)\\
y_2 &= \frac{\Phi\Omega n_{12}(\xi-\xi_2)+\Phi\Omega n_{22}(\eta-\eta_2)+\Phi\Omega n_{32}(\zeta-\zeta_2)}{\Phi\Omega n_{13}(\xi-\xi_2)+\Phi\Omega n_{23}(\eta-\eta_2)+\Phi\Omega n_{33}(\zeta-\zeta_2)}(-c)
\end{aligned}\right\}(5\text{-}15)$$

(4)CADと連動してグラフィクスの編集を行なう機能

「ごくう」自身も描画したグラフィクスの編集機能を持っているが、これとは別に地形図の編集用CADとして市販のCAD（Autodesk社AutoCAD　r12）を接続した（図１４．５．８の右下に表示）。「ごくう」とAutoCADはプロセス間通信の共有メモリシステムとセマフォーを使ってデータのやり取りをしている。しかし「ごくう」は編集用のCADなしでも実行できる様に設計してあり、そのときは計測、描画の際に「ごくう」側でCADのレイヤーを指定するようにしている。地盤変動計測では主として地上点のみが問題であってCADへの転送はオフラインで充分であるのでここでは機能の説明を割愛する。

１４．５．４　ステレオマッチングとオルソ画像の作成

１）概説

ディジタル画像上での対応点の座標を自動的に求めることをステレオマッチングと呼んでいて、ディジタル写真測量の大きなテーマである。とくに空中写真測量では次の２つの目的のために期待されている。

○空中写真の標定ないし空中三角測量の自動化

○DTM（数値地形モデル）の自動作成およびオルソ画像の自動作成

標定点の座標計測は２次元の対応点の探索問題であり、きわめて困難で、また誤り（gross error）が許されないという問題がある。今のところまだ全自動化のできる方法はない。

人間の立体視能力を計算機でシミュレートする基本的な研究はいくつか期待できる成果が得られるようになっているが、極端な計算量を必要としていて、実用には至っていない。これに対して写真測量はごく実際的な分野であるので、理論的なものより簡単な工夫の積み重ねで実現しているものがある。以下に震災地のオルソ画像を作るに使ったMATCH-T（INPHO社）のマッチング方法を中心にマッチングの技術、ならびにオルソ画像の作成法を紹介する。

２）マッチング技術の概要

マッチングの方法は要素が絡み合うので分類することが困難であるが、１つの分類法は次のようになろう。

(1)面積相関法

(2)特徴のマッチング

(3)正則化法によるマッチング（全域的な最適化）

(1),(2)は(3)の簡略版と見なせる。オルソ画像を作るに使ったMATCH-Tは(2)に分類されるが、(3)の要素も強い。ここではまず(3)を説明しながら、(1),(2)の意味を述べる。

正則化法はエネルギー最小法とも呼ばれる。画像全体で定義された汎関数を最大又は最小にするよ

うなマッチングが正しい結果を与えると考える。左右画像関数を同じ座標系で$I_1(x,y)$, $I_1(x,y)$と表わし、視差を$D(x,y)$で示すと、T.Poggioは最小化する汎関数を次の式で定義した。

$$E=E_1+\lambda E_2 \rightarrow \min \qquad (5\text{-}16(1))$$

$$E_1 = \int (\nabla^2 G(I_1(x,y)-I_2(x+D(x,y),y))^2 dxdy \qquad (5\text{-}16(2))$$

$$E_2 = \int ((\frac{\partial D(x,y)}{\partial x})^2+(\frac{\partial D(x,y)}{\partial y})^2)\, dxdy \qquad (5\text{-}16(3))$$

$\nabla^2 G(x,y)$はいわゆるLaplacial of Gaussian(LoG) フィルタであるがよく省略される。

E_1を最小にするのは、左右画像関数の値がなるべく一致するように視差$D(x,y)$を決めることになる。E_2は視差の作る面がなるべく平坦であることを意味している。λはE_1とE_2のバランスを取るためのパラメータである。

○E_1のみを最小化する方法

E_1のみを最小にするように考慮したものが面積相関法である。面積相関法では本質的に隠蔽(occlusion、一方の画像のみに地物が写っている現象)の処理に対処できない。また解は一意に定まらない。隠蔽があると左画像点に対応する右画像点がなくなってしまうので、見かけ上$D(x,y)$が連続になるように左右画像に視差を半分ずつ配分した次の式も使われる。

$$E_1 = \int (I_1(x-\frac{1}{2}D(x,y),y)-I_2(x+\frac{1}{2}D(x,y),y))^2 dxdy \qquad (5\text{-}17)$$

○E_1, E_2を同時に最小化する方法

E_1, E_2 を同時に最小化する方法は極端な組み合わせ最適化問題になる。これを解く方法としては、次の2つの方法が提案されている。

●決定論的方法－－各画素のx視差を未知数として、エネルギー関数を差分式で表わし連立方程式を解く。

●確率論的方法－－画素の数が多いため、視差分布を確率場として扱い、エントロピー一定のもとでの平均エネルギー最小の問題と考えても構わない。エネルギーを最小にする視差分布をマルコフ連鎖の枠組みで実現する。いまのところ

（1）熱浴で金属を解かし、次第に冷やしてエネルギーの基底状態に達するアニーリングの方法

（2）拡散式（ブラウン運動のモデル）を使ってエネルギー最小の状態に到達する方法

がある。またマルコフ連鎖の収束が遅いため、遺伝アルゴリズムを取り入れて収束を速める工夫も見られる。

○MATCH-Tの方法

E_1, E_2を同時にマッチングする代わり、画像からから特徴点ないしエッジを拾いだして、この中からE_2を最小化するものを見つけようとする方法がある。MATCH-Tはこれに分類できる。MATCH-Tのアルゴリズムは解析的に導かれたものではなく、経験的、実験的な要素の強い、実用アルゴリズムである。このマッチング法を要約すると次のようになる。

(1)Coarse-to-fine法を使う。空中写真全体を30*30画素で覆うまで、2倍ごとのスケールで画像を縮小する。通常7-8段階の画像を作成する。画像の縮小のための画素の平均化にはガウス関数で重みづけをする。

(2)各段階でFoerstner演算子と呼ぶ微分演算子を使って特徴点を抽出する。各段階で特徴点のリストを作る。

(3)各段階で次の要素を参照して特徴点間の対応を付ける。対応は左画像から右画像への一方向である。この対応には多くの誤りを含んでいる。

・エピポーラ幾何(偏位修正した画像の行方向の１次元探索)
・x視差の限界値
・画像微分値の勾配の方向一致度
・特徴量の強さの類似度
・相関係数の大きさ

(4)次のように局所ごとに格子点に地形標高を内挿する。

各格子点の標高、曲率、捩率を周囲のマッチング点の標高から線形式で内挿する。このとき標高、曲率、捩率に関するそれぞれの観測方程式を立て、誤差の重み付き２乗和を最小にするよう線形式の係数を決定する。曲率、捩率を調整計算の観測式に入れることで、DTMのローパス、ハイパスフィルタリングを実現している。まず１回目の内挿計算の結果、あてはめの悪い点の重みを小さくして再度内挿計算を行ない誤りを除去する。

報告によれば、MATCH-Tの計測誤差は縮尺1:7000（平坦地）から1:30,000（山岳地）までのさまざまな画像に対して15μmの画素幅で計測を行ない、飛行高度に対し0.004%-0.005%の値を得ている。

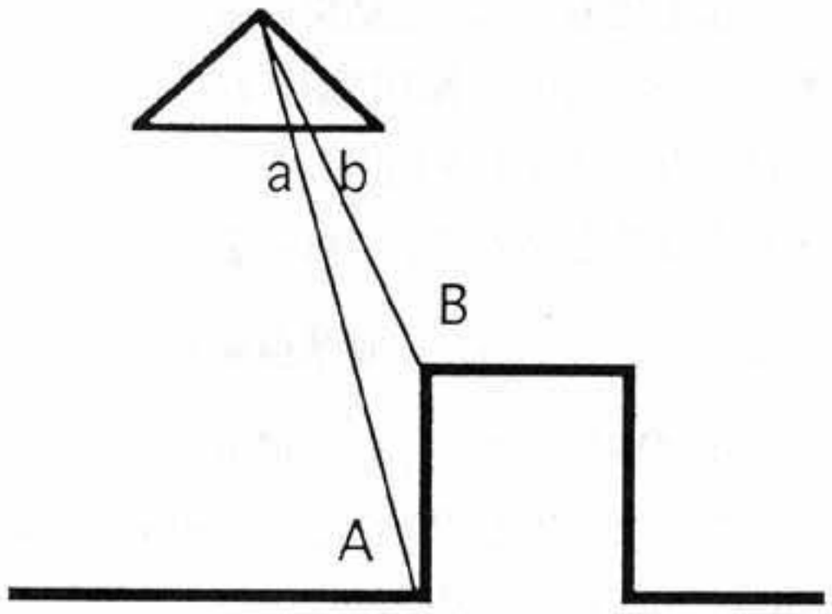


図１４．５．１１　オルソ画像の作成原理

３）ディジタルオルソ画像の作成法

図１４．５．１１は中心投影画像を正射投影のオルソ画像に変換する原理図である。中心投影では地形標高のために画像にひずみが入る。正射投影図はこれを除去したもので、図１４．５．１１の地上点A、Bに対する画像点 a、bはともに同じa点の位置に移動させる処理を行なう。画像の標定要素とDTMが与えられているときこの処理は容易であるので式は省略する。地図の代用としてオルソ画像に等高線をかぶせて焼き付けることが多い。

隠蔽（建物の右）部分では対応する画像は存在しない。今のところこの部分の適切な処理ができず、画像は黒く潰れる。またマッチング自体もまだ不完全であるので、オルソ画像を使って精密計測をすることは難しい段階である。

１４．６　写真測量による災害調査結果

１４．６．１　概説

当部会では、阪神大震災による地盤変状をできるだけ広範囲にかつ高精度で計測することを目的とし、計測手法として写真測量を利用することにした。　しかしながら、そのために必要な航空写真の収集、地上基準点測量、及び写真解析をすべて当部会で実施することは無理であったので、まず写真解析地域を芦屋市に限定し、震災前後に撮影された大縮尺空中写真を利用してできる限り精密に地盤変状計測を実施することにした。　そして、他の地域については、国土地理院、神戸市、西宮市等の計測結果を利用させて頂くとともに、当部会においても独自の写真計測を継続することにした。　各公共機関がこれまでに実施した地盤変状計測結果はすべてＧＰＳ測量等による精密地上測量手法によるものである。　その結果、現時点の阪神大震災による地盤変状計測結果の報告については、当部会が収集した地上測量によるものと当部会が実際に写真測定した芦屋市のものに限られる。　また、ディジタル正射投影画像を用いた災害調査については、現時点では既存のソフトを利用してディジタル正射投影画像を作成した段階であるので、資料編に画像のサンプルを紹介するとともに、これらを利用した災害調査研究を継続することにする。

１４．６．２　ＧＰＳ基準点測量等による地盤変状計測結果

国土地理院、神戸市、西宮市等が震災後実施したＧＰＳ測量により阪神地域で約３００点の基準点が改測されが、震災前と同一の標石を測定した結果はそのまま地盤の３次元的変状を表す座標差となった。　これらの地盤変状計測結果の誤差は写真測量に比べてかなり小さいと推測されるが、阪神地域における多くの活断層の挙動を探索するには計測密度が十分とはいえない。　このような視点からすると、現在阪神地域の各自治体で行われている高密度基準点設置・改測測量の結果が待たれるところである。　当部会が収集した地盤変状計測結果を座標差直方体で示したものが図１４．６．１である。

１４．６．３　水準測量による地盤変状計測結果

従来から各自治体は地盤沈下の状況を把握するため暦年１月１日を基準に１級水準測量を実施してきた。これらのデータに震災後の成果を加えることにより震災による地盤変状をより詳細に把握することが可能となる。　震災後の水準測量についてはやはり各自治体が現在実施中であり、当部会は１部のデータを入手した段階である。　当部会としては阪神地域全域に亘ってできる限り詳細に水準測量結果を収集し、データベースを構築して今後の地盤変状解析の基礎資料とする予定である。　１例として、西宮市が実施した水準測量による地盤変状計測結果を図１４．６．２に紹介する。　ただし、図１４．６．２にはＧＰＳ測量等によって計測した３次元変位量も併せて図示している。

１４．６．４　写真測量による地盤変状計測結果

阪神大震災調査委員会における当部会の最大の役割は震災前後における地盤変状の状態を写真測量を利用して３次元的に高精度で計測することであった。　そこで、変位量の測定誤差を１０ｃｍ以内とし、精密写真測量では通常高さ方向で１万分の１程度の精度が得られることから、飛行高度が約８００ｍで撮影された空中写真（使用カメラ：測定用カメラ、写真縮尺：４千分の１程度）を利用すれば目的が達せられると考えた。　そして、震災前後において撮影された大縮尺空中写真の調査を試みた結果、芦屋市の写真（震災前５１枚、震災後４５枚）が比較的容易に入手可能なことがわかった。　そこで、芦屋市を第１解析対象地域とし、他の地域については航空写真の調査を継続をすることにした。　写真解析を実施するに当たって、まず、空中三角測量の基礎となる地上測量データについては、震災前のものは新規に測定することは不可能なので、芦屋市から入手し、震災後のものはＧＰＳ測量、水準測量によって得た。　地上測量データの測定誤差は震災前で平面位置３ｃｍ、高さ１ｃｍ、震災後でも平面位置３ｃｍ、高さ１ｃｍと推定された。　震災前後における基準点、水準点の配置を空中写真の標定図と重ね合わせて示したものが図１４．６．３、図１４．６

・４である。 写真解析結果については、空中三角測量、震災前後におけるマンホール天端高の変位量測定、震災前後の空中写真を利用した地盤変状の３次元計測に分類して報告する。

１）空中三角測量

空中三角測量結果については、まず、当部会作成のプログラムで実施した結果を写真枚数、地上基準点数（平面位置、標高）、増設基準点数（後のステレオ写真の対地標定に利用）、写真座標測定誤差の推定量、増設基準点座標の標準誤差（平均値）に分けて表１４．６．１に示す。

表１４．６．１： 震災前後における解析的空中三角測量結果（撮影地域；芦屋市）

	震 災 前	震 災 後
使用写真枚数	５１枚	４５枚
写真縮尺	１／４，０００	１／５，０００
地上基準点数	１１点、 ２２点 （平面位置） （標高）	１１点、 ４０点 （平面位置） （標高）
増設基準点数	３１１点	２１２点
写真座標の測定誤差	７．１μｍ	７．５μｍ
増設基準点の標準誤差	４．５ｃｍ、 ８．６ｃｍ （平面位置） （標高）	５．４ｃｍ、 １３．９ｃｍ （平面位置） （標高）

また、全く同様の地上基準点データ及び地上基準点、増設基準点の写真座標測定データを使って、２種類の既存の空中三角測量ソフト（ＰＡＴ－Ｍ（ＩＮＰＨＯ社製）、ＡＬＢＡＮＹ（ＥＲＩＯ社製））により実施した結果については、それぞれについて得られた増設基準点座標を当部会の計算値と比較した。 その結果３つの計算例の座標差が５ｃｍ以内で非常に小さいことが確認できた。 そこで、表１４．６．１に基づき震災前後の空中三角測量結果の精度について検討する。 まず、地上基準点、増設基準点の写真座標の測定誤差を推定すると約７μｍとなった。 写真を使った精密計測としては写真座標の測定誤差が３μｍ程度が望ましいのではあるが、対空標識を使用していないこと、特に震災後の写真の鮮明度に問題があったこと等を考えるとこの値はまずまずの結果といえる。 この写真座標の測定誤差の推定量から増設基準点座標の理論誤差を推定すると平面位置で約３．５ｃｍ、標高で７ｃｍとなる。 得られた増設基準点の平面位置の標準誤差は震災前後とも約５ｃｍであったので、ほぼ満足すべき結果が得られたといえる。 増設基準点の標高精度は震災前については８．６ｃｍで理論誤差に近いが、震災後のものは約１４ｃｍとかなり劣化している。 この原因としては、図１４．６．４より明かなように、震災後の飛行コースが東西方向となっているので海岸沿いのコースでは不完全ステレオモデルが生じて解が不安定になること、及び震災後では特にタイポイントの選択数が少なく重複写真の幾何学的潜在力を十分利用できなかったこと等が挙げられる。 この欠点を補うため、震災後の空中三角測量では水準点の数を震災前の約２倍とした。 この結果、海岸沿いのコース以外では増設基準点の標高誤差は平均で１０ｃｍ以内となった。 ちなみに、震災後の地上基準点はＧＰＳ測量で測定されたものであり、標高も既知であったのでこれら３次元座標が既知の地上基準点のみを拘束し、他の４０点の水準点を検証点としてこの空中三角測量の標高決定精度の検証を行った結果、水準測量結果と計算値との差が平均で約１０ｃｍであった。 したがって、これらの水準点をも拘束して行った空中三角測量結果については標高誤差が海岸部以外で１０ｃｍ以内であったと結論して差し支えなかろう。

２）震災前後のおけるマンホール天端の標高変位計測

芦屋市では震災直後の平成７年２月、市の平野部ほぼ全域でマンホール天端の標高測定を水準測量を使って実施した。 測定点数は全部で１２，０００点に上ったが、当部会ではこの測定データをお借りし、震災前後におけるマンホール天端の標高変位を計測することにした。 写真測量による震災前のマンホール天端の標高計測の概要は次の通りである。 まず、芦屋市全域を撮影した５１枚の航空写真より平坦地形撮影写真４２枚を選び、空中三角測量については前述の結果をそのまま利用することにした。 そして、解析図化機（プラニコンプＰ－３（Ｚｅｉｓｓ社製））を用いて各ステレオ写真上で識別可能なマンホールを特定して３次元位置の計測を行った。 測定したマンホール点数は約８００点で、震災前の写真測量で得られた標高値と震災後の水準測量による測定結果を比較することにより、震災時におけるマンホールの天端の隆起・沈下の傾向を精密に把握することができる。 マンホール天端の隆起・沈下量を計算し、図示したものが図１４．６．５であり、全体としては市の西部で沈下、東部でわずかに隆起の傾向を示した。 また、最大沈下量は６９ｃｍであった。 この測定結果の精度について検討すると、震災後の値は水準測量で得られたものであるので、測定誤差はほぼ１ｃｍ程度と推定され、非常に信頼性が高い。 震災前の写真測量による結果については、空中三角測量結果が良好であったので全体として１０ｃｍ以内の誤差範囲に収まっていると考えられるが、解析対象地域の北西部（図１４．６．３の左上隅）は空中三角測量において地上基準点、水準点拘束の外側になっているので、増設基準点（ステレオ写真解析に用いた地上基準点）の標高決定精度が劣化している。 個々の増設基準点の標高決定誤差の最大値はこの地域で現れ、２０ｃｍに達した。 したがって、市街地北西部におけるマンホール天端の沈下量については測定誤差が２０ｃｍ近くなっていると思われる。

３）写真測量による震災前後の地盤変状計測

写真測量による震災前後の地盤変状計測は、当初、航空写真をスキャナーを使ってディジタル化し、ディジタルプロッターを利用して実施する予定であった。 これは、震災前後の写真画面上で同一点を特定する作業を２台のディジタルプロッターを使用し観測者が互いに確認し合いながら行えること、及び将来この作業を自動化する予定であるので実際の計測で種々の経験を得ておきたかったからである。 しかしながら、ディジタルプロッターの設計・製作のプログラム開発に多大の労力と時間を要し、かつ２２ｃｍ×２２ｃｍの測定用カメラ画像のディジタル化にかなり手間取ったこともあって、ディジタルプロッターによる測定作業を開始できたのは報告書提出日に近い平成７年１１月初旬であった。 そこで、測定作業の迅速化を図るため解析図化機を利用した写真計測も並行して実施することに計画を変更し、１１月の後半からは測定作業の主体を解析図化機に移した。 そして、１２月の中旬にようやく芦屋市のほぼ全域で約７００点について震災前後の３次元変位量の測定を完了することができた。 当部会が計測に使用した解析図化機（ＢＣ－１（ウィルド社製））は株式会社ＡＤＩからお借りし、空中写真のディジタル化には建設省国土地理院所有のスキャナー（ＰＨＯＴＯ　ＳＣＡＮ（ＩＮＴＥＲＧＲＡＰＨ社製；１５μｍ、７．５μｍ））、株式会社パスコ所有のスキャナー（ＶＸ３０００ＰＬＵＳ（ＶＥＸＣＥＬ　ＩＭＡＧＩＮＧ社製；１０μｍ）を利用させて頂いた。

ステレオ写真を利用した震災前後の同一点の変位量計測は次のような手順で実施した。 まず、震災前後の航空写真を２倍に拡大し、両者を比較しながら同一点の識別が可能な個所を選んでマークをつけた。 その際、地盤変状を忠実に表していると思われる点として道路の交差点、駐車場等の白線の角、及びマンホールの蓋を選んだが、マンホール位置は震災後の写真の鮮明度が低かった関係から識別が困難な場合が多かった。 次にこれらの点に番号付けを行い、その個所のスケッチを描いて震災前後のステレオ写真観測の際の識別ミスをなくす工夫をした。 ステレオ写真の標定は解析図化機、ディジタルプロッターとも内部標定、相互標定、対地標定の順に実施する方法を採用し（注：ステレオ写真の相互標定、対地標定を同時に実施する方法もある）、相互標定の残存縦視差が１０μｍ、対地標定の基準点残差が１０ｃｍを越える点があれば

原則として再測を実施した。 各ステレオ写真の対地標定で使用した地上基準点数は１０～１５点であった。

ステレオ写真の標定完了後、前述のスケッチを参照しながら震災前後の同一点の計測を実施したが、ディジタルプロッターによる観測では２台同時に使用したので識別は容易であった。 しかし、解析図化機による観測では震災前後の写真を別々に観測したので観測点のスケッチが非常に役立った。 観測したステレオ写真対の数は解析図化機では全部であるが、ディジタルプロッターでは震災前で１対、震災後で２対であった。

震災前後の地盤変状の３次元計測結果については解析図化機により実施したものを水平変位量と鉛直変位量とに分けて図１４．６．６、図１４．６．７に示す。 これらより、地盤変状の傾向を概観すると、まず、水平方向については、市の西部で西側に、東部で南側に変位している傾向が見られる。 しかしながら、局所的には複雑な傾向を示し、埋め立て地では海側に向かってかなり大きな変位（最大２．４４m）を示すが、旧堤防周辺では逆に内側に地盤が移動する現象が現れる。 次に、地盤の鉛直変位については、全体としての傾向はマンホール天端の鉛直変位量（図１４．６．５）と同様であるが、局所的には興味深い食い違いも現れている。

観測結果の精度は空中三角測量の精度に依存する。 そこで、前述の空中三角測量の信頼性を基礎として写真測量による地盤変状計測結果の精度について考察する。 まず、地盤の水平変位量の測定精度については空中三角測量による増設基準点の平面位置決定誤差が震災前後とも約５ｃｍであったので、個々のステレオ写真解析で得られた観測点の測定精度は平均５ｃｍ程度と考えてよかろう。 したがって、震災前後のステレオ写真による同一点の観測結果より水平変位量を計算した場合の誤差は約８ｃｍと考えられ、この結果地盤の水平変位量計測に関しては目標精度が達せられたと結論できる。 地盤の鉛直変位量測定に関しては震災後の空中三角測量結果の標準誤差が約１４ｃｍであったので、市の全域については目標精度の達成が困難である。 しかしながら、この誤差の主因は海岸沿いコースに不完全ステレオモデルが生じて、幾何学的に弱くなっているためであり、他の５本のコースについては水準点を多量に配置してあるので増設基準点の標高決定誤差は１０ｃｍ程度となっている。 したがって、海岸沿い以外では震災前後のステレオ写真解析による地盤の鉛直変位量測定精度が１５ｃｍ程度と推定され、海岸沿いでは２０ｃｍを越えていると思われる。 さらに、細部について検討すると、図１４．６．３（震災前）、図１４．６．４（震災後）に見られるように市の西部でステレオ写真の解析区域が地上基準点配置の外側に位置している個所がいくつかある。特に、市の西北部と西南部では震災前後とも解析区域が基準点配置の外側となっている。 空中三角測量結果よりこの地域に配置した増設基準点の標高決定誤差を算出すると、震災前後とも１５～２０ｃｍとかなり大きかった。 したがって、これらの区域における地盤変状計測結果（鉛直方向）については最大変位量が４０ｃｍ程度と小さいため、隆起・沈下が場合によっては逆になる恐れもあって図１４．６．７では省いた。

最後にディジタル写真測量による震災前後の地盤変状計測結果については、観測モデルが震災前１モデル、震災後２モデルと少なかったため図示しなかったが、解析図化機の場合と同一点を観測したので両者を比較することができた。 写真画像のディジタル化には前述の２種類のスキャナーを利用したが、計測精度は解析図化機の結果を基準にすると平面位置、標高とも１０～１５ｃｍであった。 両者（解析図化機の観測結果とディジタルプロッターの観測結果）のずれの量としては高さ方向が水平方向に比べてかなり大きくなると予想されたが、結果は高さ方向のずれが小さかった。 この原因として、ディジタル画像の鮮明度が原画像に比べてかなり劣化していたので増設基準点の画像座標の計測誤差が大きくなるが、ステレオ写真の対地標定で十数点の地上基準点を利用すると画像座標測定誤差が高さの精度にあまり影響しなかったことが挙げられる。 また、スキャナーの相違による結果のずれは特に見られなかった。 ディジタル写真測量を利用した変位計測の自動化を研究は今後の課題として継続する予定である。

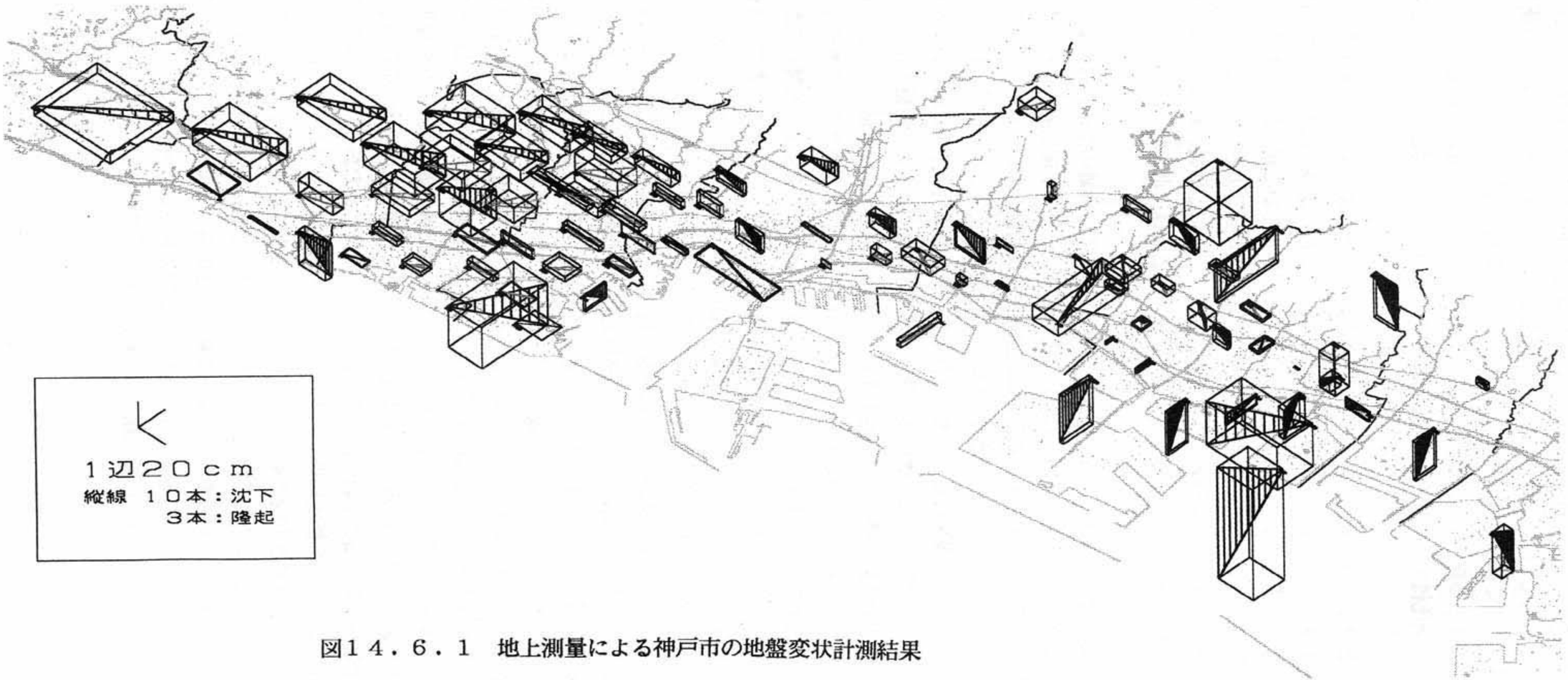


図１４．６．１　地上測量による神戸市の地盤変状計測結果

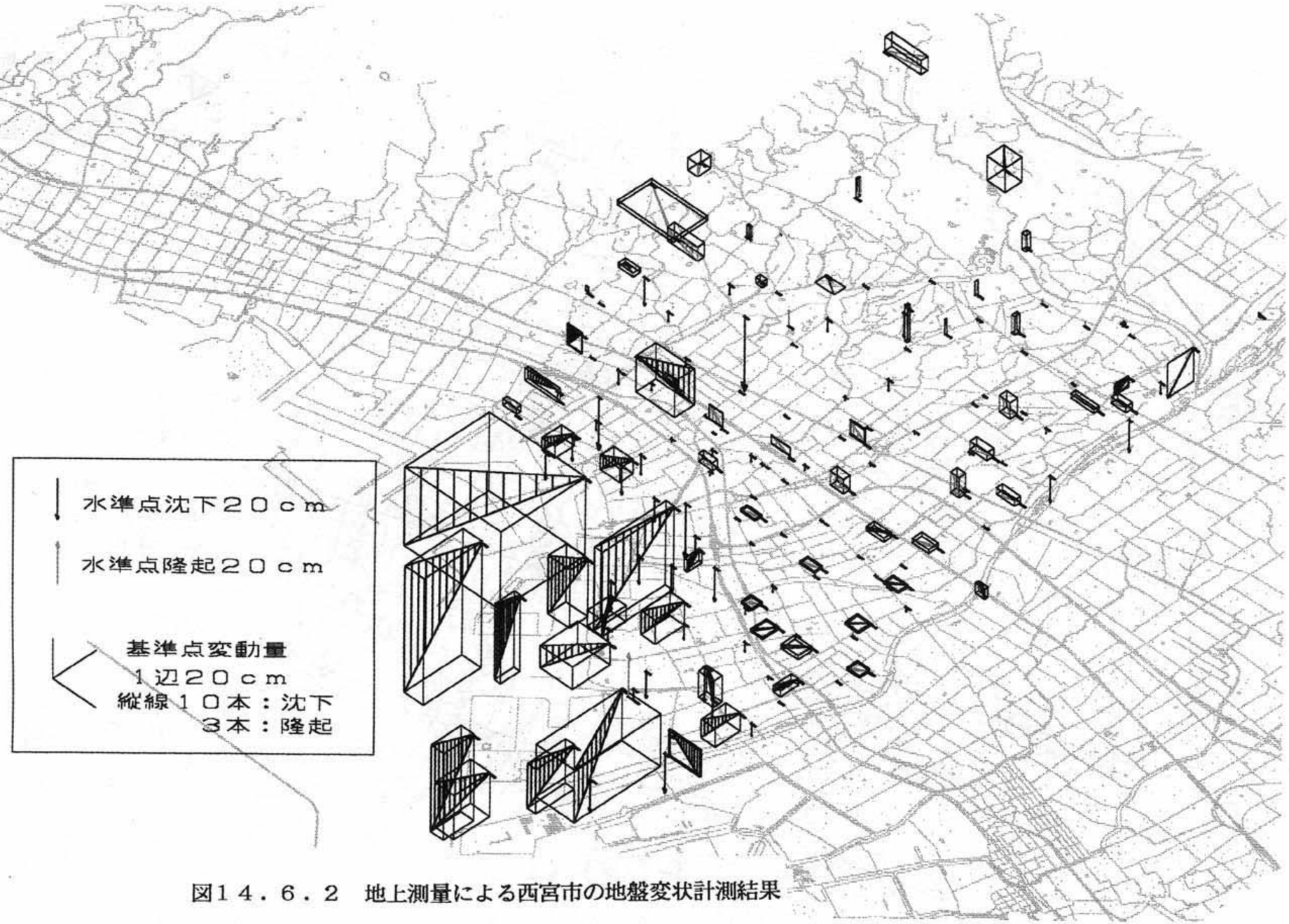


図１４．６．２　地上測量による西宮市の地盤変状計測結果

図１４．６．３　空中写真標定図と地上基準点配置（震災前）

図１４．６．４　空中写真標定図と地上基準点配置（震災後）

図１４．６．５　マンホール天端高さ変位図（芦屋市、1/20,000 数値地図）

図１４．６．６　地盤変状計測結果（水平方向）（芦屋市、１／２０，０００数値地図）
(グラビア参照)

図１４．６．７　地盤変状計測結果（鉛直方向）（芦屋市、1/20,000 数値地図）
(グラビア参照)

14.7 写真測量による構造物、地盤の災害調査マニュアル

14.7.1 震災時の空中写真撮影・空中写真３次元モデル計測の経過と特徴

1)　震災以降の空中写真撮影

震災後の各社の空中写真撮影標定図等の資料から得られた撮影状況は前章の表14.2.1,14.3.2に示した。このような震災被害の甚大な地域を中心に大縮尺空中写真が撮られた今回の撮影の特徴は次のようにまとめることが出来る。

表　14.7.1　震災時の空中写真撮影の特徴

特徴項目	撮影予算	指揮系統	撮影計画	撮影運航	現像・印画紙作成	高精度写真モデル計測準備	地上基準点測量	正射写真画像の利用	時期別撮影プランの整備
震災時の実態	自主撮影	運航所主導	標定図配布方式	撮影士・操縦士依存方式	現像と印画紙・ポジプリント分離	震災前の大縮尺図化３点セットの収集	震災前後のGPS測量１カ月後から１年後まで	空中写真の簡易コピー・正射写真作成実験中	緊急撮影>各機関独自の目的別局地的撮影
将来計画	契約ﾍﾞｰｽ	緊急時撮影マニュアル整備	GPS航法ﾃﾞｰﾀ電送ﾈｯﾄﾜｰｸ	空中三角測量・正射写真対応	写真処理工程のスピード化	空中写真標定図のデータベース化	基準点データベースとGPS測量の結合	緊急時供給体制の整備	緊急>早期>中期>長期撮影計画のガイドライン化

2)　震災後のＧＰＳ測量の計画・実施・評価

震災後のＧＰＳ測量は三角点・公共基準点の３次元座標成果を用いて直接基準点の標石の３次元変位を、高精度かつ迅速に計測・比較するという目的を持っている。またＧＰＳ測量の観測値、特に基線解析の成果、は地殻変動(地殻歪み)測量網計算に用いられる。このような各機関の取り組みを表14.3.1に示した。今後は「高密度基準点」といわれる三角点・基準点網が広域の地盤変動をモニターすることになる。

3)　震災後のパイロット地域での空中三角測量・モデル計測の成果と課題

震災後のパイロット地域（芦屋市域）での空中三角測量の精度とそれに伴う理論的・方法的考察は、14.4になされている。震災直後の空中写真を用いた３次元写真モデルの形成は、基準点がその後変動していないことを前提としている。阪神大震災では、全域約１０００モデルの空中三角測量が完了するまでには約１カ年を要している。空中写真が地上測量に劣らない精度で、広域を均一に３次元計測に用いられるために、災害後に、基準点が更に変動しない内に、基準点をどのように配置するかといる課題を見て取ることが出来た。

4) 今後の緊急時の空中写真撮影・空中写真３次元モデル計測の提案

各種の災害（緊急）時の空中写真撮影の要請・空中写真３次元モデル計測の対応の模式図を図　14.7.1　に示した。この要因図（模式図）のうち特に今回の震災に関連して、重要度の高い要因を取り上げてそれに対する空中写真測量の役割と検討課題を述べた。これは次節で「災害調査マニュアル」の目的、構成と概要として詳述・提案されている。

災害発生：
予測可能型（台風水害）
突発型　（火山噴火）
（地震）
（火災）

既存資料の所在確認：
空中写真標定図
基準点資料・配点図

撮影計画図作成：
計画要因（計画条件）
撮影範囲
撮影縮尺

撮影：
ＧＰＳ撮影主点データ
ＧＰＳ空中三角測量用データ

撮影標定図作成：
標定図画像・図形データ作成
撮影標定図簡易出力図作成

撮影印画紙・ポジフィルム作成：
調査用印画紙の作成
簡易コピー印画紙の作成
計測用ポジフィルムの作成

災害時撮影マニュアル

空中写真画像ファイルのデータベース作成：
撮影印画紙のスキャンニングによる
単位画像データの集積
検索・保管・利用システムの形成
ネットワークデータへの移管

３次元計測と災害前後の比較：
災害後の計測
災害後の基準点・水準点測量
空中三角測量
３次元計測
３次元地形モデルでの表現
災害前のデータの集積
地形図などのディジタルデータ作成
ディジタルデータの活用
災害前の空中写真３点セットの活用
災害前後のデータ取得
（変状計測仕様書）
地盤工学的調査
都市工学的調査
比較データの利活用

空中写真（画像）データベース作成マニュアル

地盤図作成写真測量マニュアル：
（災害対策３次元計測／地盤図作成仕様書）
（災害時３次元変状計測／変状計測仕様書）
（計測データ作成・検索／データベース仕様書）
＞ **「写真測量を用いる災害調査マニュアル」**

災害情報データベースの構築と利用：
３次元計測データベースの構築と利用方法
他の災害情報データベースとの関連
リアルタイムＧＩＳとの連結

図　14.7.1 緊急時の空中写真撮影・空中写真３次元モデル計測
－写真測量を用いる災害調査マニュアル（案）のための要因図－

14.7.2 災害調査マニュアルの目的、構成と概要

1) 写真測量を用いる災害調査マニュアル（案）

災害調査マニュアルは、地盤工学的見地から災害時における地盤変状を計測する事を目的としたものである。変状の計測にあたっては、目的、対象範囲、精度等により様々な手法が採られる事が考えられている。

土質調査の指針としては、道路土工を主対象として、道路土工「土質調査指針」が、また道路震災対策としては、「道路震災対策便覧（震災対策編・震災復旧編）」も刊行されている。震災時（緊急時）における調査業務はその迅速性が求められる。地盤工学会は多くの基礎・応用研究分野を含みながら、地盤という広域にもミクロにも捉えられる対象を扱っている。写真測量による変状計測の主な利点は、広域な範囲を均一な精度で迅速に３次元モデル化でき解析処理を実施できる事、写真画像上で記録性の高い、豊富な情報を得る事ができること等が挙げられ、土質調査に有効なプラットフォームを与える技術である。

このような視点から、主として写真測量を用いる災害調査マニュアルの提案を以下に行う。

2) 災害調査マニュアル（案）のユーザーと目的・利用方法

「写真測量を用いる災害調査マニュアル（案）」（以下「マニュアル（案）」という。）の主なユーザーは、災害時における緊急撮影から３次元モデル形成、データ取得作業を担当する写真測量技術者と地盤工学的調査・解析を行う技術者である。そこでは、建設工事や地盤構造の調査に際して構造物基礎形式の選定と地盤調査計画を立案する資料が必要であり、このような目的に適う地盤図が両分野をつなぐ成果である。このような成果を得るため地形測量と数値地形モデリングを行うための工程を確立することが本「マニュアル（案）」の基本的な目的である。このような基本的な要請を受けて、本「マニュアル（案）」は災害時において写真測量を適用する基本的な作業工程を示し、その工程毎の手法についてそれぞれの指針を記述する。

3) 「マニュアル（案）」の構成と概要

「マニュアル（案）」の構成とその概要は以下の通りである。

(1) 写真測量による変状計測の概要

地形図作成と区別される地盤図作成のための地形計測法の特徴とデータ管理法・地形表現法を述べる。

(2) 変状計測の精度基準

写真測量あるいはその各構成工程が持つ精度とその確保の基準を述べる。

(3) 変状計測の概要

土質調査、特に物理探査、サウンディング、ボーリングに必要とされる地形・地盤情報と他の地形計測方法（地上測量）との関連と比較を行う。

(4) 変状計測の工程

写真測量による、地形図作成のための地形測量と異なるいわば地盤図作成のための写真モデル形成法と３次元計測法について述べる。

(5) 変状計測の内容

地形図の地図記号とは異なる、地盤図のための地図記号を規定するほか、３次元地形・地盤表現法についても指針を述べる。

(6) システム化とデータベースの整備

緊急時（災害時）の要請を考慮した、迅速な運用が可能な地盤データの整備と検索運用が可能となる、データベースの特性を把握して、システムを構築するための指針を述べる。

１４．８　ま　と　め

この章では阪神大震災調査委員会に設置された２つの部会「災害情報のディジタルファイル化」及び「ディジタル写真測量による災害調査」のこれまでの活動の反省点、今後この調査研究を継続していくに当たっての留意点等をまとめてみたい。　両部会がこの調査研究を開始した際達成目標として掲げたのは次の４点であった。

（１）画像を使った災害調査を実施する際必要な航空写真、地上基準点データの収集検索システムを構築する。

（２）震災前後の大縮尺航空写真（写真縮尺１：４，０００程度）を使って、阪神地域全域に亘り地盤・構造物の変位、変形を３次元的に計測する。　目標精度は１０ｃｍとする。

（３）震災直後の小縮尺航空写真（写真縮尺１：２５，０００程度）からディジタル正射投影画像（ディジタルオルソ画像）を作成し、数値地形モデル（ＤＴＭ）などと重ね合わせて種々の地盤工学的調査を阪神地域全域で実施する。

（４）震災等による災害調査に関する画像解析システムを構築し、そのマニュアル化を行なう。

また、画像の計測調査に関しては近年急速に発達しているディジタル写真測量を利用する計画を立てた。

航空写真、地上測量データの調査は建設省近畿地方建設局大阪国道工事事務所、国土地理院、阪神地域の各自治体を訪問して資料を閲覧させて頂いたり、各航測会社にアンケート調査用紙を送付して御回答頂いたりして情報をかなり密に収集でき、これらの情報を地域ごとに分類して検索できるシステムを構築した。したがって、（１）については目的をほぼ達成できたといえる。

写真測量を利用した構造物・地盤の変位、変形計測の目標精度を設定するに当たって地震による地盤変位は１ｍに達していないと思われたので、その１／１０の１０ｃｍ以内とした。　そして、この目標を達成するための基本となる空中三角測量に種々の検討を加えたが、プログラム開発にかなり手間取った。　また、写真解析機器としてはディジタルプロッターを設計・製作し、計測作業の自動化を図ったが、プログラム開発、写真画像のディジタル化等も機材の不足、人的、時間的制約等で予定通り進行できなかった。　そこで、ステレオ写真の解析作業を解析図化機を利用して実施することに計画を変更し、ディジタル写真測量による写真解析は１部を試験的に実施して種々の知見を得ることにした。　また、阪神地域全域の写真解析を限られた時間内に行なうことは無理であったので、航空写真、地上測量データが揃っていた芦屋市（航空写真：震災前５１枚、震災後４５枚）を第１解析地域として震災における構造物・地盤の変状計測を開始し、７００～８００点の地点について震災前後の計測結果から水平変位量、鉛直変位量を算出した。　その結果、芦屋市では阪神大震災による地盤変形が複雑ではあるが、系統的に生じていることがわかった。　変位量の最大値は埋め立て地部分で見られ、水平方向で約２．５ｍ、鉛直方向で１．８ｍに達した。　計測結果の精度については、水平変位観測では目標精度を達成できたが、鉛直変位観測では部分的に誤差が１０ｃｍを越えていることが空中三角測量の誤差解析によって明らかにされた。　この報告書では、芦屋市に関する計測結果を図的表示し掲載した（変位観測点の座標、標高及び変位量測定値については資料編に掲載する予定である）。　さらに、ディジタル写真測量を利用した場合解析図化機の結果よりやや精度は劣化するが、これはディジタル化された画像の鮮明度の問題であり、それ以外では多くの利点があることがわかったので、今後ディジタル画像計測システムの研究開発に重点を置いていく予定である。　芦屋市以外の地域の地盤変状計測については、上記の知見を基に今後継続して実施することにした。

ディジタルオルソ画像データを利用した災害調査に関しては、今後この利用が急速に進行すると思われるので、研究開発を継続することになったが、現時点では既存の解析ソフト（ＭＡＴＣＨ－Ｔ（ＩＮＰＨＯ社製））により実例を作成しただけなので、資料編に掲載する予定である。

最後に、災害調査に関する画像解析システムのマニュアル化では（１）必要資料の検索収集システム、（２）画像解析システム、（３）ディジタルオルソ画像作成システムを結合して災害調査の迅速化、自動化

を図る１案を１４．７に示したが、詳細については今後の検討課題となった。
　この写真測量を利用した阪神大震災災害調査研究を遂行するに当たって多くの方々から御援助、御協力を頂いたが、とりわけ航空写真、地上測量データの調査収集に際し御援助頂いた建設省近畿地方建設局大阪国道工事事務所、建設省国土地理院、神戸市、芦屋市、西宮市に深甚なる謝意を表する次第である。　また、阪神大震災に関する航空写真のアンケート調査に御協力頂いた国際航業株式会社、アジア航測株式会社、株式会社パスコ、株式会社かんこう、朝日航洋株式会社、株式会社写測エンジニアリング、株式会社内外エンジニアリング、地盤変状計測を解析図化機で実施することに計画を変更した時点で精密解析図化機ＢＣ－１（ウィルド社製）を当部会に御貸与下さった株式会社ＡＤＩ、測定用カメラ画像のディジタル化に際し御協力頂いた建設省国土地理院、株式会社パスコに対し深謝の意を表する次第である。　さらに、株式会社八州の安田岩夫氏（当ワーキンググループ委員）にはこれまでの写真測量による地震災害調査の経験を通して貴重な御意見を賜り、株式会社パスコの吉永新一郎氏、橘菊生氏、北川育夫氏には航空写真の標定図のディジタル化、データベース作成、地盤変状計測、計測結果の表示、地上測量データ収集に際し絶大な御協力を頂いた。　ここに、深謝の意を表する次第である。　最後に、ワーキンググループ学生委員の京都大学工学研究科土木工学専攻西本浩司君、同研究科環境地球工学専攻有馬敬育君、京都大学工学部交通土木工学科冨久直哉君には地上基準点測量、資料収集、写真計測、解析結果の整理等で連日頑張って頂いた。　ここに、深謝の意を表する次第である。

「災害情報のディジタルファイル化」及び「ディジタル写真測量による災害調査」
ワーキンググループ委員名簿

西村 明	国際航業株式会社関西技術所 計測調査1部 測量調査グループ 主任技師	〒560 尼崎市西長洲町1－1－15 TEL: 06-487-1111　FAX: 06-487-1301
牧野 定夫	株式会社パスコ大阪支社 計測技術2部 部長	〒550 大阪市西区西本町1－12－17 TEL: 06-538-0031　FAX: 06-538-0019
内田 修	アジア航測株式会社大阪支店 地理情報部 情報デザイン課 課長	〒564 吹田市江坂町2丁目1－11 江坂山甚ビル2階 TEL: 06-338-0061　FAX: 06-338-1687
伊東 太作	奈良国立文化財研究所 埋蔵文化財センター 情報資料室 室長	〒630 奈良市二条町2－9－1 TEL: 0742-34-3931　FAX: 0742-35-1358
高浜 洋治	株式会社トプコン大阪営業所 測量システム担当	〒550 大阪市西区新町1－5－7 四ツ橋ビル4階 TEL: 06-541-8467　FAX: 06-541-8461
長谷川 博幸	株式会社パスコ 技術開発室 主任技師	〒153 東京都目黒区東山1－1－2 東山ビル3階 TEL: 03-3715-4011　FAX: 03-3715-6612
安田 岩夫	株式会社八州 技術センター	〒151 渋谷区笹塚 3－26－5 TEL: 03-3377-0351　FAX: 03-3377-0258
森 伸一郎	飛島建設 技術研究所	〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472 TEL: 0471-98-7553　FAX:0471-98-7585
大谷 仁志	株式会社トプコン 研究所 研究グループ	〒174 東京都板橋区蓮沼町75－1 TEL: 03-3558-2561　FAX:03-3966-5054
吉田 望	佐藤工業 中央技術研究所	〒103 東京都中央区日本橋4－12－20 TEL: 03-3661-2298　FAX: 03-3668-9481
霜上 民生	近畿地建 大阪国道工事事務所 所長	〒536 大阪市城東区今福西2の12の35 TEL: 06-932-1421　FAX: 06-932-2827
松村 正一	国土地理院近畿地方測量部 次長	〒540 大阪市中央区大手前4丁目1番76号 TEL: 06-941-4507　FAX: 06-941-4427
沖村 孝	神戸大学工学部 土地造成工学研究施設 助教授	〒657 神戸市灘区六甲台1－1 TEL: 078-803-1231　FAX: 078-803-1234
服部 進	福山大学工学部 情報処理工学科 助教授	〒729 福山市東村町字三蔵 985 TEL: 0849-36-2111　FAX: 0849-36-2459
岡本 厚	京都大学工学部 環境地球工学教室 助教授	〒606-1 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5109　FAX: 075-761-0646
関口 秀雄	京都大学工学部 土木工学教室 助教授	〒606-1 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5085　FAX: 075-753-0646
木村 亮	京都大学工学部 土木工学教室 助教授	〒606-1 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5128　FAX: 075-761-0646
三村 衛	京都大学防災研究所 地盤災害部門 助教授	〒611 宇治市五ヶ庄 TEL: 0774-32-3111(代表) FAX: 0774-33-3521
小林 俊一	京都大学工学部 土木工学教室 助手	〒606-1 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-5086　FAX: 075-753-0646
小野 徹	京都大学工学部 環境地球工学教室 助手	〒606-1 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-4872　FAX: 075-761-0646