

崩落に向かう地すべり体の挙動把握に関する共同研究

共同研究報告書

平成24年1月

独立行政法人土木研究所
倉敷紡績株式会社
株式会社パスコ
中日本航空株式会社
川崎地質株式会社
株式会社大興計測技術
株式会社ビジュアル・システムズ

崩落に向かう地すべり体の挙動把握に関する共同研究
共同研究報告書 執筆者名簿

藤澤和範	(独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員
石田孝司	(独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム主任研究員
小原嬢子	(独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム研究員
坂本孝之	(独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
田中 尚*1	元(独) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
二村孝房	倉敷紡績(株) 技術研究所主任研究員
永井 亮	倉敷紡績(株) 技術研究所研究員
山本 実	倉敷紡績(株) エレクトロニクス事業部画像情報システム課課長
土田 亘	倉敷紡績(株) エレクトロニクス事業部画像情報システム課
島村秀樹	(株) パスコ研究開発センターセンター長
橘 菊生	(株) パスコ研究開発センター課長
朱 林	(株) パスコ研究開発センター専門課長
下村博之	(株) パスココンサルタント事業部防災技術部 部長
柴田 拓	中日本航空(株) 調査測量事業本部取締役副本部長
外山康彦	中日本航空(株) 調査測量事業本部技術部 プロジェクト推進統括プロジェクトグループリーダー
中舎 哉	中日本航空(株) 調査測量事業本部技術部 空間計測統括第1グループリーダー
鵜飼尚弘	中日本航空(株) 調査測量事業本部技術部 プロジェクト推進統括プロジェクトグループ 主任
中田文雄	川崎地質(株) 企画管理部情報企画管理室室長
坂上敏彦	川崎地質(株) 西日本支社 支社長
室山拓生	川崎地質(株) 事業本部防災・設計部主任
塚本将康	川崎地質(株) 中部支社技術部技術グループ 主任
小川孝之	(株) 大興計測技術空港研究所所長
長尾浩正	(株) 大興計測技術空間技術部リーダー
山村茂正	(株) ビジュアル・システムズ代表取締役
村瀬幸太	(株) ビジュアル・システムズ 地理情報部 課長
森 豊勝	(株) ビジュアル・システムズ メディアコンサル事業部 係長

(平成 21 年 8 月現在)

【要 旨】

本報告書は、土木研究所地すべりチームと民間6社が、平成19年度から平成20年度にかけて実施した共同研究「崩落に向かう地すべり体の挙動把握に関する共同研究」について、その成果をとりまとめたものである。

本共同研究では、崩落に向かう地すべり体の3次元的な滑動状態を定量的に把握するための自動データ取得・処理システムを開発するため、複数のデジタルカメラを用いたステレオ画像の連続撮影を行い、地すべり体の3次元モデルを作成するシステムを構築した。また、地すべり体の挙動を正確に再現するために、生成される3次元モデルを用いた3次元CG動画の技術の検討を行い、データ取得・処理システムに連動するようなシステム開発を検討した。あわせて、地すべり体の挙動を、連続撮影したステレオ画像を用いた動画像解析手法での把握の可能性を検討した。

キーワード：地すべり、ステレオ連続撮影、画像解析、3次元モデル、システム開発

*1： 現、日特建設株式会社 技術本部技術開発グループ

崩落に向かう地すべり体の挙動把握に関する共同研究 目次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 目的	2
1.3 開発するシステムの概要	3
1.3.1 連続ステレオ写真撮影手法	3
1.3.2 3次元モデル化手法	3
1.3.3 3次元モデルデータの活用	4
1.4 研究実施フロー	7
参考文献	8
用語解説	9
2. 連続ステレオ写真撮影手法の検討	10
2.1 同期撮影システムの概要と開発目標	10
2.1.1 既往の同期撮影システム	10
2.1.2 既往同期撮影システムの性能評価と改良ポイント	13
2.1.3 開発する同期撮影システムに対する要求性能	14
2.1.4 開発する同期撮影システム	17
2.2 デジタル一眼レフカメラの選定	21
2.2.1 選定時の留意点	21
2.2.2 カメラの比較検討	21
2.2.3 選定結果	21
2.3 既往システムの撮影性能の検証	25
2.3.1 既往同期撮影システムの連続撮影性能及びデータ転送性能	25
2.3.2 ワイヤレスコントローラーの検証	31
2.4 カメラコントロールソフトの改良 (CamCtrl ver.2)	39
2.4.1 改良ポイントの抽出	39
2.4.2 改良型カメラコントロールソフトの概要	40
2.4.3 改良ソフトの性能評価	43
2.5 開発した同期撮影システムの撮影性能の検証	49
2.5.1 有線撮影システム(Type②)の検証結果	49
2.5.2 無線撮影システム(Type③)の検証結果	60
2.5.3 有線・無線併用撮影システム(Type④)の検証結果	88
2.6 カメラコントロールソフトの再改良 (CamCtrl ver.3)	96
2.6.1 再改良ポイントの抽出	96
2.6.2 再改良したカメラコントロールソフトの概要	96
2.6.3 再改良したソフトの性能評価	97
2.7 今後の課題	107
参考文献	107
用語解説	107
3. 3次元モデル化手法の検討	109
3.1 3次元ステレオ計測	109
3.1.1 ステレオ写真解析ツールの検討	109
3.1.2 滝沢ダムにおける実験	113
3.1.3 画像解析結果の精度比較	132

3.1.4	精度検証	135
3.1.5	画像解析結果のまとめ	177
3.1.6	3次元モデル化ソフトウェアのまとめ	178
3.2	撮影条件による解析精度の検証	183
3.2.1	試験走路における撮影実験	183
3.2.2	異なるパラメータによる解析結果	197
3.2.3	気象条件の異なる撮影による画像解析について	209
3.3	マッチング率の検証（筑波国際CCの実験結果）	214
3.3.1	実験概要	214
3.3.2	写真撮影	216
3.3.3	検証測量	219
3.3.4	筑波CC露頭部におけるKuraves解析精度の検証	220
3.3.5	筑波CC採石部におけるKuraves解析精度の検証	239
3.4	今後の課題	247
4.	取得データの活用方法	248
4.1	地すべり体の挙動把握の検討	248
4.2	スライム撮影実験	248
4.3	3次元CGモデル作成アプリケーションの検討・開発	263
4.4	取得画像による地すべり体の挙動解析	276
4.4.1	2次元動画像により地すべり体の挙動解析	276
4.4.2	連続ステレオ写真による地すべり体の挙動解析	310
4.4.3	今後の課題	336
4.5	今後の課題	337
5.	まとめ	338

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、滑落のおそれのある地すべり地において、危険回避のために CCTV カメラなどの監視カメラ現場に設置される場合が見られる。平成 16 年に奈良県大塔村宇井地区で発生した地すべり¹⁾は、地すべり地周辺に形成された亀裂や、周囲に設置された地盤伸縮計のデータから地すべりの滑落が予測され、監視カメラが設置された。その結果、地すべりが滑落する際の映像が撮影され、テレビなどで報道されるなど、地すべり現象を広く人々が知る機会となった。また、平成 18 年に岐阜県揖斐川町東横山地区で発生した地すべりでも、監視カメラが地すべり地周辺に設置され、地すべりが滑落する映像が撮影された。この映像をもとに、地すべりの滑動履歴が把握されるとともに、地すべり滑落時の斜面の変形状況から地すべり内部の応力状態なども推測されている²⁾。

このように、地すべりが滑落する映像は地すべり現象の理解を促し、地すべりの画像を詳細に解析することで、地すべりの挙動を把握することが出来る。

しかし、地すべりの滑動が 3 次クリープに到達するような崩落に向かう地すべり体（以下、「崩落に向かう地すべり体」と呼ぶ）は、その移動速度が大きく、上述した奈良県大塔村の地すべりではおよそ 2~3m/秒、岐阜県揖斐川町の地すべりではおよそ 8~10m/秒の速さで崩落したと推定されている^{1) 2)}。このように移動速度が大きい場合、光波測距儀や 3D レーザースキャナを用いて、時々刻々と変化する地表面の移動形態を測定することは困難である。そこで、ある時刻の地表面の状態を写真画像として記録するとともに、複数の写真画像を使うことによって測量が可能となる写真測量³⁾が、地すべりの動態観測手法として有効であると考えられる。

近年、低コスト化と高画素化の進展が著しいデジタルカメラを使った写真計測は、これまで大型工業製品などの精密形状計測法として利用されてきたが、土木分野でも情報化施工や構造物の維持・管理⁴⁾、岩盤崩落のメカニズム解明⁵⁾、浅海域地形の測量⁶⁾などを目的とした活用が検討されている。また、地すべりの現場においても、地すべり体を撮影し、取得した画像データから 3次元座標を求めて変位量を算出することなどが行われている^{6) 7)}。

一方、地すべり対策工の設計は、地すべり縦断面形状から 2次元解析に基づいた設計を行い、それを 3次元に展開する手法が主に行われている。しかし近年、対策工のコスト縮減や最適な対策工の配置などを目的に、地すべりの 3次元解析による解析・設計手法が実用化されつつある。3次元解析によって対策工を設計する場合、2次元解析のように対策工の配置位置を断面上で決定するのではなく、地すべり地形の 3次元形状や地すべりの活動状況を考慮して適切に計画することが求められる⁸⁾。そのため、地すべりの 3次元的な滑動状態から地すべり機構を解明することが重要であり、一つの方法として、地表面変位ベクトルから 3次元的なすべり面形状を推定することで、合理的な 3次元の設計が可能になると考える。

1.2 目的

本研究は、崩落に向かう地すべり体の 3 次元的な滑動状態を定量的に把握するための自動データ取得・処理システムの開発をめざし、複数のデジタルカメラを用いてステレオ画像の連続撮影を行い、地すべり体の 3 次元モデルを作成するシステムを構築した。また、地すべり体の挙動を正確に再現するために、本システムにより生成される 3 次元モデルを用いた 3 次元 CG 動画の技術の検討を行い、データ取得・処理システムに連動するようなシステムを検討した。あわせて、地すべり体の挙動を、連続撮影したステレオ画像を用いた動画解析手法での把握の可能性も検討する。

1.3 開発システムの概要

地すべりの移動体を遠隔地より連続ステレオ撮影し、その画像から写真測量を利用して移動体の3次元地形モデルを作成する。この3次元地形モデルデータを用いて、変位量の差分をとるなどのデータ処理・解析をすることで、3次元CGアニメーションの作成や動態観測による警戒避難システムの構築、3次元すべり面形状の推定、数値解析手法の高度化に活用する。



図 1.1 システムの概要

1.3.1 連続ステレオ写真撮影手法

崩落に向かう地すべりの移動体を複数方向（最低2方向）から連続ステレオ撮影を行う。複数台のカメラから同時に撮影するために、複数台のカメラのシャッタータイミングをコントロールすることができる同期撮影システムを構築し、連続ステレオ撮影が可能なシステムとした。

撮影された画像は、撮影直後にカメラの内蔵メモリからパソコンへ、画像を取り込むことができるソフトを使って取り込み、ある速さで連写を続けることができるシステムとした。

1.3.2 3次元モデル化手法

連続ステレオ撮影により取得した画像から、同時刻に撮影した1組（ペア、またはそれ以上）の画像を用いて、写真測量にて3次元モデルデータを作成する。それを同時刻毎に行い、同時刻毎の3次元モデルデータを作成する。それらをモデリングする際には、3次元CGアニメーションの作成や地表面変位ベクトル、変位の差分の抽出などに活用できるような座標点の抽出方法により行う。

1.3.3 3次元モデルデータの活用

(1) 地すべり体の挙動把握

土砂災害の発生による被害の軽減を図るためには、土砂災害に対する地域住民の認識向上や防災意識に関する啓蒙・普及活動が重要である。このとき、3次元CG技術は土砂災害の危険性や現象がどのようなものであるかを視覚的に表現することができ、有効なツールである⁹⁾。

本共同研究では、地すべり滑動を3次元CG動画にすることで、あらゆる方向から地すべり現象を観察できるようにすることを検討する。その結果、地すべり現象把握の高度化や、新たな研究の切り口が見出されることが期待される。

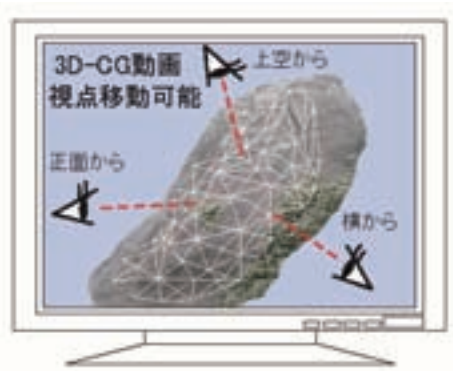


図 1.2 3D-CG 動画化のイメージ

また、地すべり体の挙動把握では、連続撮影したステレオ画像を用いた動画画像解析手法の適用が考えられ、その実用化の可能性は少なくはない。

本共同研究では、画像間の差分に基づく方法と速度ベクトルの検出方法等の動画画像の画像解析を行い、崩壊の発生から終了に至る一連の運動を面的に把握することを検討する。

(2) 動態観測による警戒避難システム

崩落の可能性がある斜面を適切に管理し、周辺への影響を最小限にするためには、斜面のモニタリングが重要である。しかし、地すべりが活発に滑動している最中や、地すべりが崩落した後も斜面の安全性を確認できないなどの斜面に立ち入ることが危険な場合、地盤伸縮計などを取り付けて斜面をモニタリングすることは困難である。また、光波測距儀や3Dレーザースキャナを用いて、広範囲な斜面の面的な挙動を連続でモニタリングすることは、多大な人的および時間的コストが必要となる¹⁰⁾。そのため、広範囲におよぶ斜面防災のモニタリング方法として、デジタル画像計測を用いることを提案し、実斜面における実験から、斜面の挙動を把握できることが実証されている¹¹⁾。

本共同研究では、2時刻の地すべりの地表面形状を写真測量により捉え、それらを比較することで、地すべり全体の地表面変位量を求めることを検討する。地すべりの変位量を面的に把握することで、現場の安全管理や警戒避難システムに活用することが期待される。

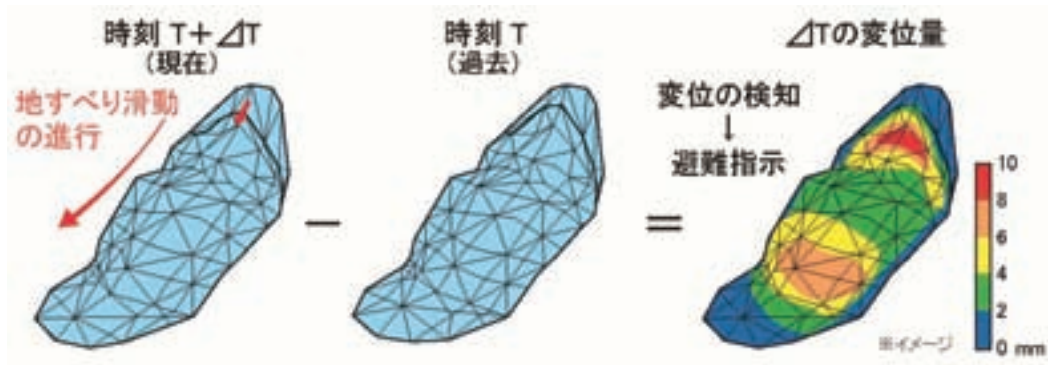


図 1.3 地すべり変位量の表現

(3) 3次元すべり面形状の推定

地すべり体内のマーカー（構造物、目立つ岩など）の移動時間と移動状態を追跡し測量することで、地表面の変位ベクトルが求められる。その地表面変位ベクトルを幾何学的に解析することにより、すべり面の位置と形状を推定することが可能である^{12),13)}。秋田県澄川地すべりでは、地すべり発生前後の空中写真から地表面変位ベクトルをもとめて、すべり面形状の推定が行なわれている¹⁴⁾。これと同様に、異なる時間に撮影されたステレオ写真を解析することで、地表面変位ベクトルをもとめて、すべり面形状を推定することができる。

ステレオ写真によって面的に取得した地表面変位ベクトルをもとにすべり面形状を推定することにより、3次元での斜面の安定解析や地すべり土塊量の算出が可能になる。これにより、地すべりが活動的で斜面への立ち入りが困難な場合などに、応急対策を早期に、また安全に実施することができる。また、2次元の断面形状をもとに施工計画されている対策工が、3次元のすべり面形状を把握することにより、合理的に対策工計画を立案することができるようになるものとする。

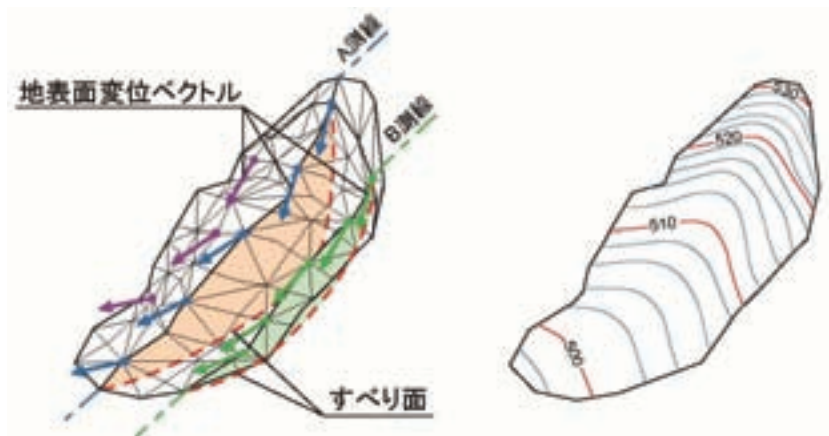


図 1.4 3次元すべり面形状の把握

(4) 数値解析手法の高度化

本システムにより、地すべりが滑落する際の地すべり土塊の移動形態を捉えることができるため、地すべりの3次元数値解析に用いられる有限要素法や個別要素法などの解析結果に対して、実際の地すべり現象との適合性を判断するチェックデータとして活用することができ、数値解析手法の高度化を図ることができる。また、地すべりの実現象により近い地すべりモデルを構築することで、地すべり土塊の到達予測が高度化し、また地すべり対策においてはより合理的な設計手法の検討にもつながると考える。

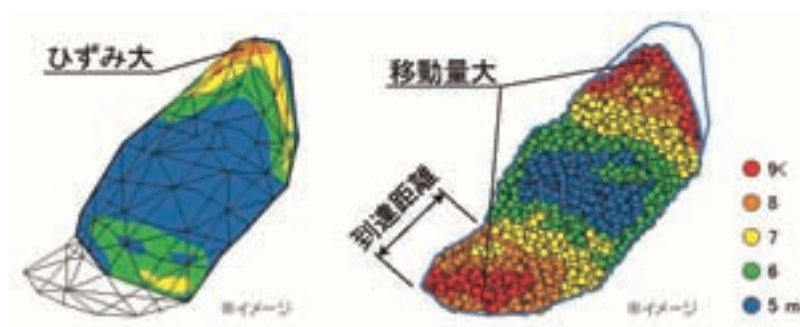


図 1.5 3次元数値解析への活用

1.4 研究実施フロー

本研究は、平成19年4月1日～平成21年3月31日の2年間実施した。この間の研究実施フローを図1.6に示す。

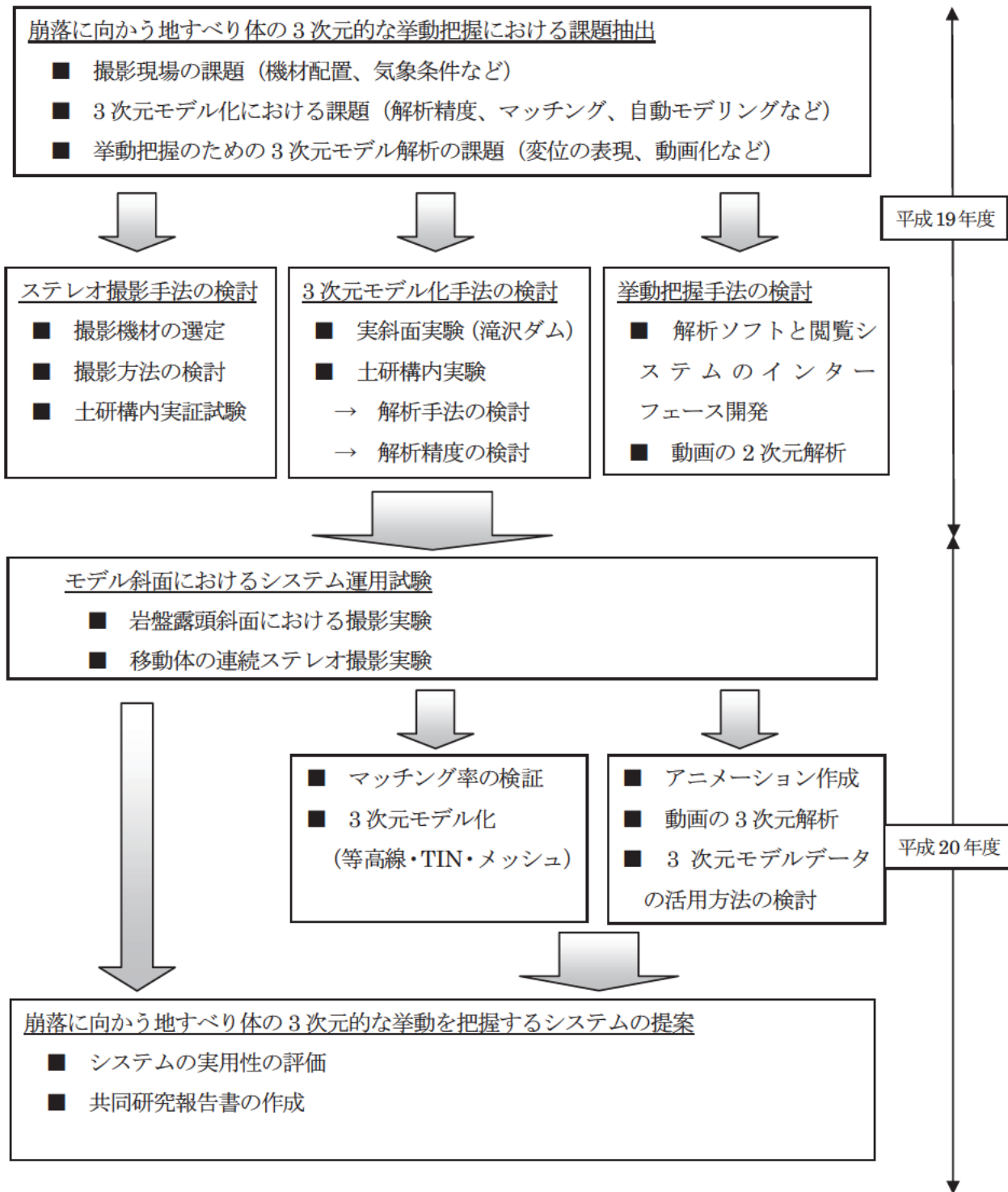


図1.6 研究フロー

[参考文献]

- 1) 野村康裕・藤澤和範：地すべりの運動特性を考慮したリスクマネジメントに関する一考察—奈良県大塔村で発生した地すべり道路災害を例として，地すべり，Vol.42，No.6，pp.11 18，2006
- 2) 藤澤和範・小原嬢子：画像解析からみた東横山地すべりの活動履歴，地すべり研究（第 51 集），2007
- 3) 三浦悟・黒沼出・今井道男：デジタル写真測量による構造物の変位・変形計測，電力土木，No.322，pp.99 103，2006
- 4) 龍明治・中井卓巳・大西有三・西山哲・伊東佳彦・日外勝仁・小俣新重郎・岩佐卓実・小山田昌樹：岩盤崩落のメカニズム解明を目的としたデジタル画像計測に関する研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム論文集，pp.19 22，2007
- 5) 田中龍児・西隆一郎・幸哲也・二ツ町悟：民生用デジタルカメラを用いた浅海域地形の写真測量法の開発について，海洋開発論文集，Vol.22，pp.911 916，2006
- 6) 吉澤孝和・西澤茂高・三澤敏雄・根岸六郎：地すべりの挙動解析における写真測量の応用，写真測量とリモートセンシング，Vol.30，NO.6，1991
- 7) 岡田康彦・末峯章・石川直秀・二村孝房：写真測量による地すべり変位検出について，第 42 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.343 346，2003
- 8) 藤平大・藤澤和範・田中尚・上野雄一・倉岡千郎・河合政岐：3 次元 FEM 解析による地すべり滑動に伴うアンカー緊張力増加の再現解析，第 46 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.269 272，2007
- 9) 福田克之：3 次元コンピュータグラフィクスによる土砂移動・火山噴火現象，写真測量とリモートセンシング，Vol.41，No.4，2002
- 10) 大西有三・西山哲・矢野隆夫・緒方建治・松山裕幸：精密写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究，土木学会論文集，No.771/III 68，pp.187 197，2004
- 11) 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・龍明治・李徳河：デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステムへの応用に関する研究，応用地質，Vol.44，No.6，pp.331 340，2004
- 12) 吉澤孝和：時間差測量による地下すべり面の推定解析法（その 1）四次元測量の地すべり解析への応用，地すべり技術，Vol.28，No.2，pp.12 22，2001
- 13) 小嶋伸一・藤澤和範・田中尚・武石朗：すべり面推定プログラムの適用性の検討，第 46 回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp.323 326，2007
- 14) 小野塚良三：林冠ギャップに着目した写真判読とデジタル写真測量システムによる八幡平澄川地すべり土塊の変位量計測，地すべり，Vol.35，No.2，pp.69 76，1998

【用語解説】

※1 写真測量：写真を利用した計測技術である。写真からもとの対象物の位置を求める 3 次元計測技術（立体計測）と、写真からもとの対象物が何であったかを読み取る写真判読技術の 2 つの技術から成り立つ。立体計測は、求める点の写真上の座標値を精密に計測し、撮影されたときのカメラ、フィルムと対象物との幾何学的位置関係からもとの空間を計算で再現して、もとの空間における求める点の位置を求める。一方、写真判読は、写真に写った対象物の形や色、立体視による 3 次元形状などをもとに判別を行う。

2. 連続ステレオ写真撮影手法の検討

2.1 同期撮影システムの概要と開発目標

同期撮影システムによる連続ステレオ写真撮影の目的は、移動体（地すべり）を遠隔地より連続ステレオ撮影し、その画像から写真測量を利用して3次元地形モデルを作成することである。

本共同研究においては、移動体の移動速度は静止状態～4m/秒（最大10m/秒）程度を想定し、それを撮影間隔2コマ/秒～1コマ/秒で撮影することを目標とする。撮影のタイミング、撮影間隔、撮影画像の取り込みなどについては、パソコン(以下、「PC」)でコントロールする仕様とする。

2.1.1 既往の同期撮影システム

本共同研究では（株）クラボウが保有する同期撮影システムをベースとして同期撮影システムを検討した。以下に、既往の同期撮影システムの概要を記す。

（株）クラボウ社製の同期撮影システムを写真2.1.1及び図2.1.1に示す。（株）クラボウ社製の同期撮影システムでは、動体物の一瞬を2台以上のカメラで同時に撮影し、写真測量の原理を利用して三次元モデル化することを目的としている。たとえば、ゆっくり動いている岩盤の変位計測や灼熱し溶融した金属の形状を計測することを目的としたものである。



写真 2.1.1 クラボウ社製同期撮影システム

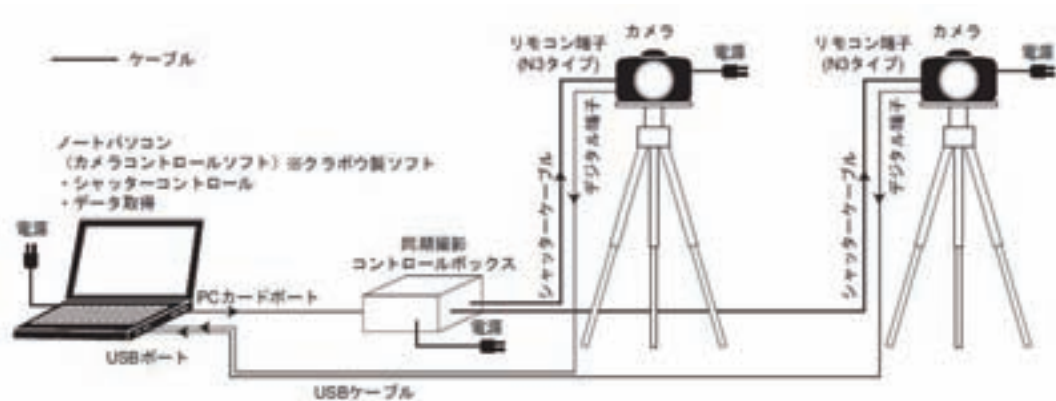


図 2.1.1 クラボウ社製同期撮影システムの構成

表 2.1.1 クラボウ社製同期撮影システム構成機材※

機材名	数量
一眼レフタイプデジタルカメラ Canon Eos 5D (ボディキャップ付き)	2 台
コンパクトフラッシュ (以下、CF と略す。256MB、128MB)	各 1 枚
コンパクトフラッシュアダプタ	1 枚
デジタルカメラ用電池	2 個
バッテリーチャージャー	2 個
Canon Eos 5D 取扱説明書	1 部
カメラレンズ 28mm (レンズフード 1 個、レンズキャップ 2 個付き)	2 台
カメラレンズ 100mm (レンズフード 1 個、レンズキャップ 2 個付き)	2 台
アダプタ KIT (ACK E2)	2 個
カメラコントロール BOX (電源ケーブル、I/F ケーブル付き)	1 台
カメラコントロール用 PCMCIA カード	1 枚
USB ケーブル (3m)	2 本
USB ハブ (電源ケーブル付き)	1 個
シャッター用リモートケーブル (5m、カメラ コントロールボックス間接続)	2 本

※共同研究で使用した時の機材

(1) システム構成

本システムは、図 2.1.1 に示すようにカメラ、コントロールボックス、PC から構成される。撮影は PC 上のアプリケーションにより、マニュアル操作で行われ、撮影を実行するとコントロールボックスを介して複数台のカメラにシャッター信号が同時に送られ撮影される。撮影された画像は USB を介して PC に取り込まれるようになっている。

(2) カメラ部

カメラは一眼レフカメラを採用している(写真 2.1.2)。このシステムではカメラのメーカーを限定することはないが、性能・コストの面で Canon 社製の EOS 5D を採用している。このカメラは 1,200 万画素であり、フルサイズの CMOS を採用しているため、高画質・高精細である。

また、撮影待機中に電池切れが生じないように AC 電源から直接電源を取り込み、撮影された画像は、一旦 CF メモリに蓄える構成にしている。

(3) カメラコントロール部

コントロールボックスはカメラに対して同時にシャッター信号を送るためのコントローラである(写真 2.1.3)。PC から送られたシャッター信号を複数台のカメラに振り分け、送信できるようになっている。一度にコントロールできるカメラの台数は最大 8 台である。

(4) データ記録部

撮影後、画像データは一旦 CF メモリに蓄えられる。CF メモリに蓄えられたデータは、USB 接続を通して PC に送られ保存される。なお、CF メモリに蓄えられたデータは、PC 保存後に削除され、メモリが一杯にならないようになっている。

(5) 特徴

このシステムの特徴は、様々な機種のカメラに対応できるという点にある。撮影は、大半の一眼レフカメラについているシャッター機能を使い、リモートでコントロールできるようになっている(写真 2.1.4)。また撮影された画像は、USB により PC に転送するため、Windows 標準の API^{*1}を利用できる。このため、メーカー特有の API を使用せず、汎用性を保つことが出来る。

昨今、デジタルカメラの進歩は著しく高性能・低価格化が進んでいる。このため、今後市販されるカメラにも即座に対応できるような構成が重要と考え、前述のような構成となっている。



写真 2.1.2 クラボウ社製同期撮影システム (カメラ部)



写真 2.1.3 コントロールボックス



写真 2.1.4 リモートコントローラー

2.1.2 既往同期撮影システムの性能評価と改良ポイント

クラボウ社製の既往同期撮影システムを試用し、その性能の評価と本共同研究の目的に応じた改良ポイントを抽出した。

(1) 遠隔操作によるカメラコントロール性能

クラボウ社製の既往同期撮影システムでは、2 台のカメラを PC でコントロールしている。その性能を簡易的な検証実験にて評価した。

【性能評価】

- ・ PC のソフトウェアから同期撮影をコントロールする場合、1 回の撮影と画像取込みに約 10 秒を要する。現状システムでは、1 コマ/秒程度の連写は不可能である。
- ・ 連写コントロールコマンドはなく、撮影したいタイミングで撮影ボタンをクリックする必要がある。

【改良ポイント】

- ・ カメラコントロールソフトを改良し、連続撮影ができるようにする。
- ・ メーカー (Canon 社) 製のカメラコントロールソフトの適用を考える。

(2) 同期撮影タイミングの精度検証

PC からのシャッター信号によってカメラが撮影した時の、2 台のカメラの同期撮影タイミングの検証を行った。実験は、スケールを置いた前で検証物を落下させ、落下中の検証物を撮影することでその位置を指標として同期撮影タイミングを判断した。

実験の結果を、写真 2.1.5 に示す。その結果、左右のカメラで撮影された検証物は、ほぼ同じ位置に映っている。このことから、2 台のカメラはほぼ同じタイミングで撮影されていると判断される。

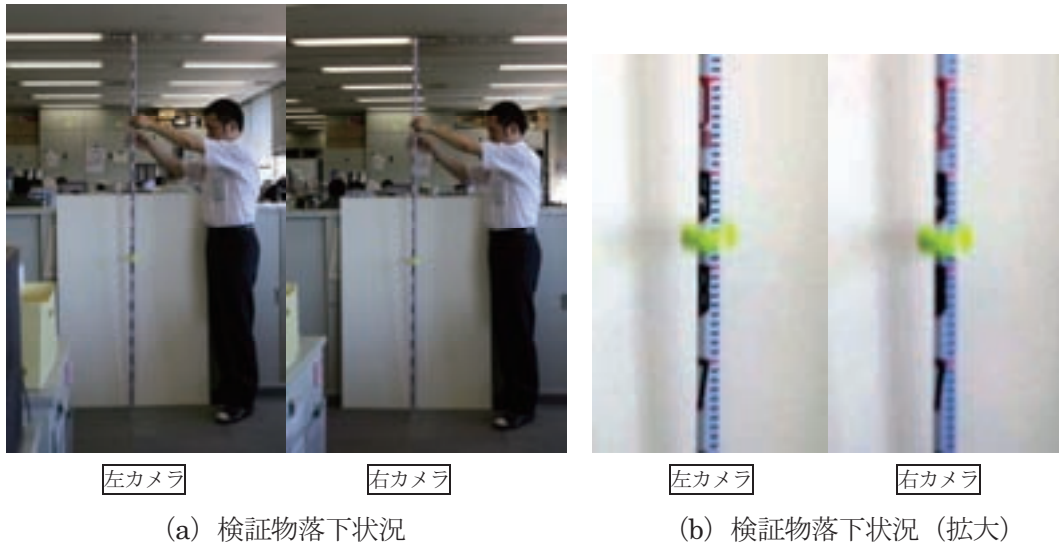


写真 2.1.5 同期撮影タイミングの検証

(3) カメラの性能評価

クラボウ社製同期撮影システムで使用されている一眼レフデジタルカメラ (Canon EOS 5D) について、カメラの性能の確認を行った。

【性能評価】

- ・連続撮影については、約 1.3～2 秒に 1 枚の速度であれば CF メモリが一杯になるまで撮影が可能であった。ただし、この時の画像データは、カメラをクラボウ社製同期撮影システムの PC に接続しておいても、自動では PC へ転送されない。
- ・Canon EOS 5D では、カメラに連写モードが備わっており、3 コマ/秒の撮影が可能である。ただし、連写モードを使って撮影した場合、CF メモリが一杯になる前に撮影不能となる。これは、連写モードでは、撮影された画像データを直接 CF メモリに記録するのではなく、別の記録媒体 (バッファメモリ) に書き込むため、バッファメモリの容量が一杯になるためである。

2.1.3 開発する同期撮影システムに対する要求性能

崩落に向かう地すべりをステレオ写真で連続撮影し、その写真をステレオ解析して地表面形状をモデル化することを考えると、表 2.1.2 に示す性能が要求される。各部位における要求性能について、以下に述べる。

(1) カメラ部

カメラは、動体を撮影する部位であり、良い画像が撮影できるか否かは、その写真を使ったステレオ解析の精度に影響する。具体的には、カメラの画素数、連写速度などのスペックが重要となる。

カメラで撮影される画像は、一般的には画素数が大きいほど撮影された被写体の細部が表現できる高解像度のものとされる。すなわち、画素数が大きいほど、地上の小さなものまでを鮮明に表現できるということであり、ステレオ解析においては、解析精度を向上させるための必要条件である。ただし、これは被写体までの距離に応じて変化するものであり、単純に必要な画素数を求めることはできない。なお、カメラのスペックとして画素数が大きいものの方が、あらゆる撮影をした場合において高画質の画像を得ることに對しては有利になることは言うまでもない。

そこで、カメラの画素数(有効画素数)に対する要求は、市販品のハイスぺックレベルとし、1,000 万画素以上を求める。また、カメラの連写速度については、ここでは、岐阜県東横山で発生した地すべりの滑落状況¹⁾から判断して、表 2.1.2 に示すような連写性能を求める。

その他、カメラには、商用電源からの電源確保ができることを求める。すなわち、長時間にわたって地すべりを撮影するため、その間も十分にカメラが作動できる電源を確保する必要がある。

(2) カメラコントロール部

カメラコントロールについては、複数のカメラを同期させてシャッターを切る必要があるため、それぞれのカメラを手動でシャッターを切ることはできない。そこで、システムチックに同期撮影を行い、さらに一定のタイミングでシャッターを切る指示を出すコントロール部が必要となる。具体的には、カメラを PC からコントロールするソフトウェアと、そのソフトからのシャッター信号を複数のカメラに伝送する同期コントロール部が必要である。

(3) データ記録部

本共同研究での写真ステレオ解析は、デジタル写真画像を用いて行うことから、カメラもデジタル一眼レフカメラを用いる。一般的に、画像データの保存は、カメラにセットされる記憶媒体に収められるが、本システムでは非常に多くの写真を撮ることが想定されるため、外部の記憶媒体へ転送して画像を保存する必要がある。また、長時間の連続撮影によって得られる画像データ量が膨大になる。そこで、データ記録部については、カメラで撮影された画像データを PC へ転送し、PC のハードディスクに記録することが必要と考える。PC のハードディスク容量については、近年の PC スペックの著しい向上により特に問題はないと考える。

画像データの伝送方法は、有線方式と無線方式があるが、連写を行って大量のデータを短時間で伝送することを考えると、通信速度が速い有線方式が推奨される。ただし、比較的連写速度が遅い場合には、無線通信でもデータ伝送が十分可能であると考えられる。このため、地すべりの運動速度特性やカメラコントロール PC とカメラの距離などを考慮して選定できるようなシステムにすることが望ましい。

表 2.1.2 同期撮影システムの要求性能

部 位	項 目	性 能
カメラ部	有効画素数	デジカメの画素数は 1,000 万以上
	連写速度	最高速連写：2 コマ/秒で 30 秒間以上 高速連写：1 コマ/秒で 5 分間以上 通常連写：1 コマ/10 秒で 1 時間以上
	電源	デジカメの電源は商用電源からとれる
カメラコントロール部	カメラコントロール	PC からデジカメをコントロールできるソフトウェアが必要
	同期コントロール	PC から同期撮影のシャッターコントロール（有線、無線）が必要
データ記録部	画像転送速度	最大 2 コマ/秒程度の連写をし、それを PC に滞りなく取り込む

2.1.4 開発する同期撮影システム

前述した要求性能を満たすシステムとして、既存の同期撮影システムを発展させた図 2.1.2～図 2.1.6 に示すようなシステム構成が考えられる。

(1)Type① クラボウ社製システム(高速処理化)

図 2.1.2 に示す Type①は、カメラはカメラコントロール部からのシャッター信号によりシャッターを切るタイプである。カメラは、一般的に使用されているデジタル一眼レフカメラを用いる。カメラコントロールは、要求される設定速度に応じてシャッターを切る必要があるため、そのコントロールを PC にインストールしたソフトウェアより行う。

基本はクラボウシステムであるが、コントロールソフトの改良を行い、連写機能の付加とデータ転送速度の向上を図る。

(2)Type② 改良型システム(高速処理化、有線コントロール)

図 2.1.3 に示す Type②は、カメラコントロール部は Type①と同じであるが、撮影されたデータの取込み方式を変更したタイプである。Type①では、カメラコントロールとデータ取込みを 1 つの PC で行い、そのコントロールはクラボウ社製のソフトウェアを使用しているが、Type②では、それぞれを分離して高速処理化を狙ったものである。具体的には、データ取込みは、Canon 社製の EOS Utility (2.3.1 項にて概要説明) というソフトウェアを使う。

(3)Type③(③ 1・③ 2) 改良型システム(高速処理化、無線コントロール)

Type②までは、カメラコントロールを有線で行っていたが、撮影地の条件によってはカメラコントロール PC とカメラの距離が遠くなる場合があり、有線では対応できない場合が想定される。そこで Type③では、Type②のコントロールボックスとカメラ間の有線を無線化することにより、遠隔地からカメラをコントロールすることを狙ったものである。具体的には、受信機側のカメラ 2 台を 1 台のコントローラーで操作する Type③ 1(図 2.1.4)と、受信機側のカメラ 2 台をそれぞれ 2 台のコントローラーで操作する Type③ 2(図 2.1.5)に分けられる。

(4)Type④ 改良型システム(高速処理化、有線・無線併用コントロール化)

Type③までは、有線と無線とを分けたカメラコントロールシステムであるが、図 2.1.6 に示す Type④は、これら有線(Type②)・無線(Type③)システムを併用したものである。具体的には、片方のカメラを有線でコントロールし、もう片方のカメラは無線でコントロールする方式である。

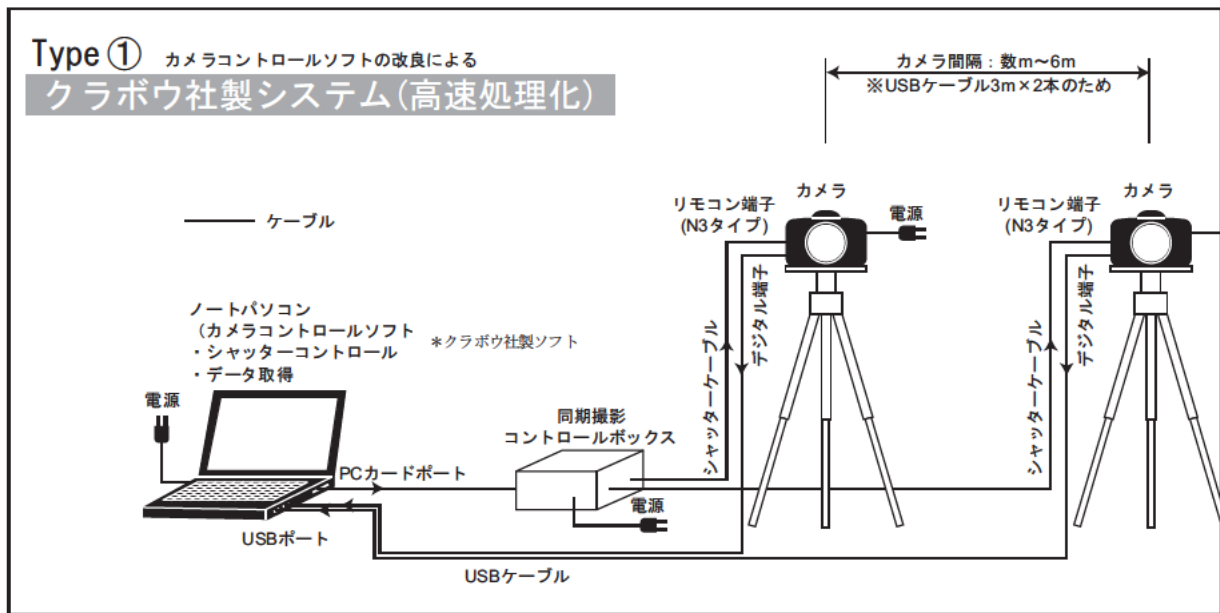


図 2.1.2 Type① クラボウ社製システム (高速処理化)

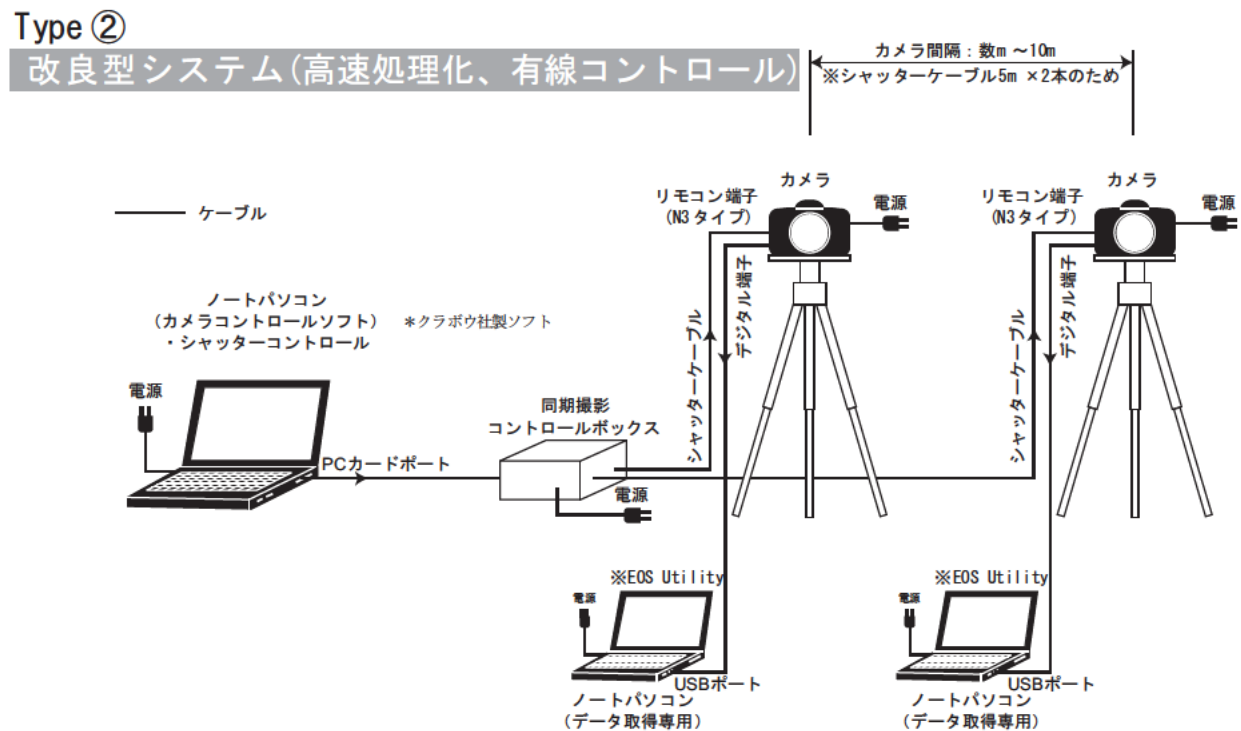


図 2.1.3 Type② 改良型システム (高速処理化、有線コントロール)

TYPE③-1

改良型システム (無線通信化)

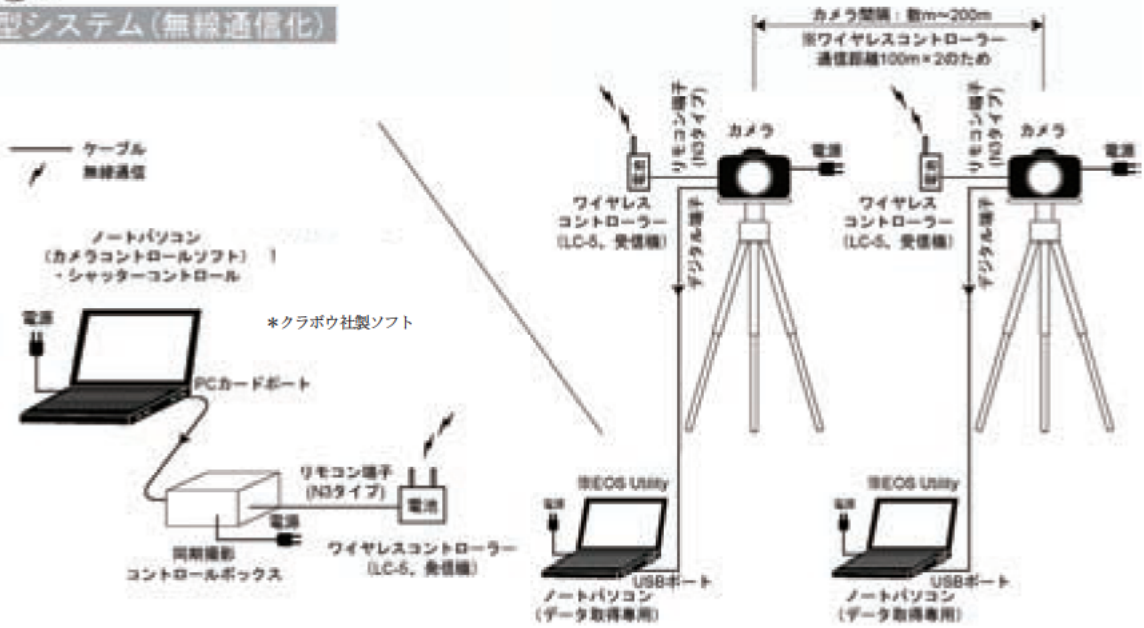


図 2.1.4 Type③-1 改良型システム (無線通信化: 発信機側のコントローラーは1台)

TYPE③-2

改良型システム (無線通信化)

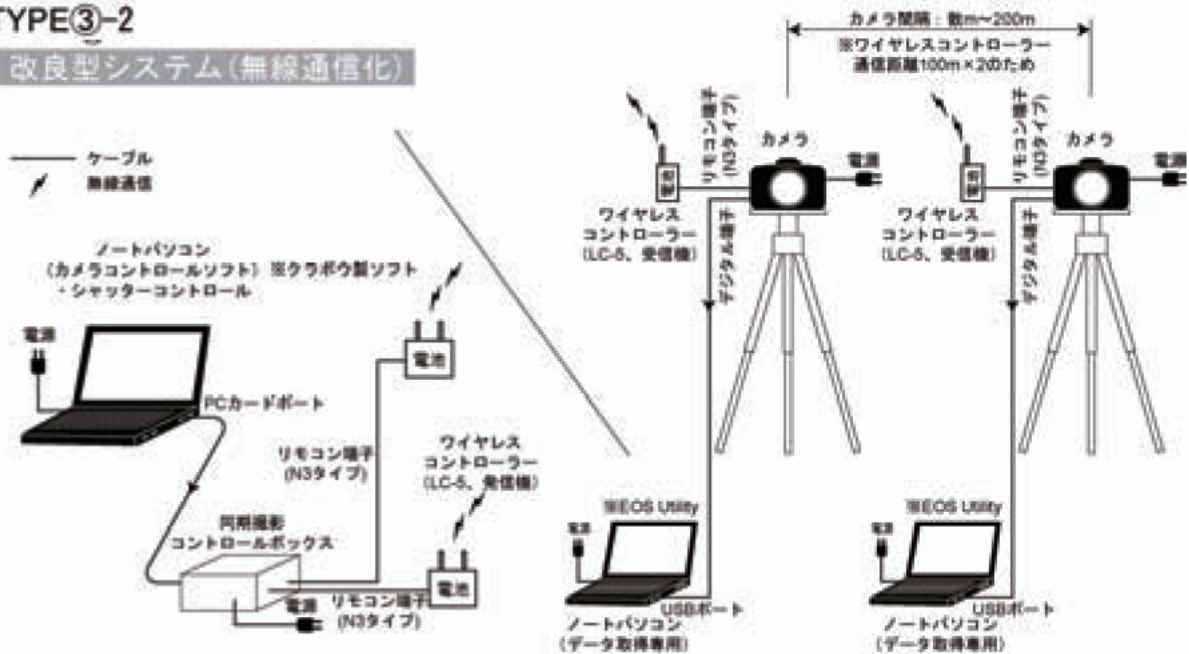


図 2.1.5 Type③-1 改良型システム (無線通信化: 発信機側のコントローラーは2台)

Type④

改良型システム(有線・無線コントロール)

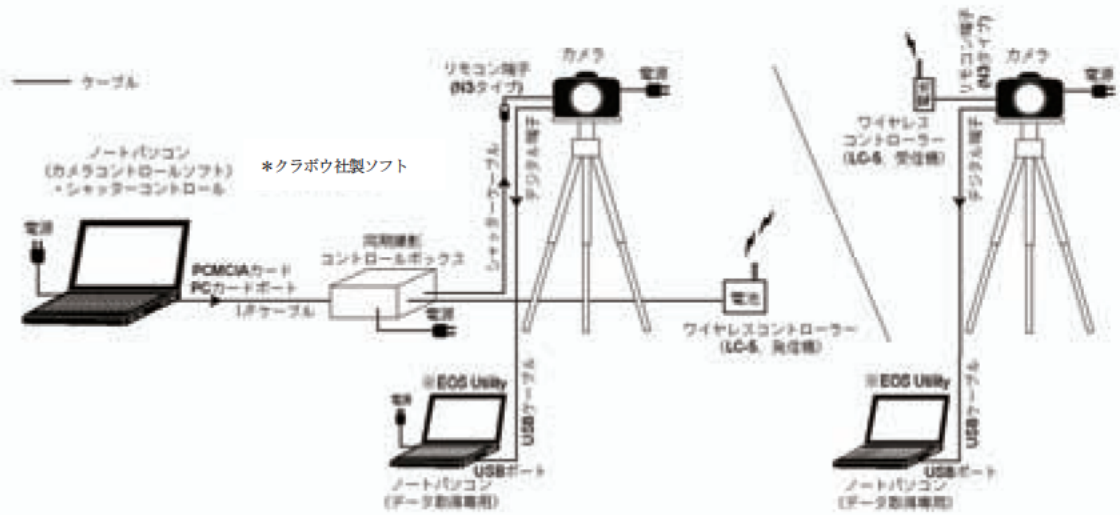


図 2.1.6 Type④ 改良型システム (有線・無線併用コントロール化)

2.2 デジタル一眼レフカメラの選定

2.2.1 選定時の留意点

本共同研究で検討しているステレオ写真解析では、数 10m～数 100m 離れた場所から地すべりを撮影し、その画像をもとに解析をする。そのため、精度良い解析を行うためには画質の良い画像を撮影する必要があり、その画像を撮影できるデジタル一眼レフカメラが必要となる。

デジタル一眼レフカメラによって撮影される画像の質は、一般的に有効画素数^{*2} が大きいほど、また撮像素子^{*3} サイズ・受光素子^{*4} サイズ・画素^{*5} サイズが大きいほど、より高解像度で鮮明な画像が得られる。しかしながら、単純にそれらが大きいハイスペックなカメラを選定しても、その価格は高価であり、ユーザーが少ないのが現状である。ユーザーが少ないということは、共同研究で検討しているシステムの普及に対してはマイナスの側面となってしまう。

そこで、得られる画像の質と価格のバランスを考えたカメラの選定が必要である。また、同期撮影システム上、常に電源を供給できる AC 電源キットがあることも条件となる。

なお、受光素子サイズが大きき以外にも受光素子のセンサーとしての性能の善し悪しも画像の質を左右する要素である。しかしながら、各社の性能を一律に比較することが困難なため、ここではこの要素については言及しない。

2.2.2 カメラの比較検討

表 2.2.1 に調査したデジタル一眼レフカメラを示す。調査は、2008 年 1 月現在において生産・販売されている有効画素数 1,000 万画素以上のモデルを対象に行い、カタログに示してある仕様をまとめた。

まず、有効画素数のスペックを概観すると、大まかには 1,000 万画素代、1,200 万画素代、1,500 万画素前後、2,000 万画素以上にランク分けできる。有効画素数 1,200 万画素代までは多くのメーカーから販売されているが、それを超えるとメーカーが限られてしまう。そこで、比較的シェアがあり、一般的なスペックといえる有効画素数 1,200 万画素代までのカメラを選定することとし、このうち、上位スペックとなる有効画素数 1,200 万画素代のカメラに絞り込む。

次に、その中から受光素子サイズ（撮像素子^{*4} サイズを総画素数で除した値。面積で表現）を見ると、「Canon EOS 5D」と「Nikon D3」が大きいため、この 2 機種に絞り込む。

最後に価格を比較すると、「Canon EOS 5D」は 288,000 円、「Nikon D3」は 568,000 円であり、前者のほうがコストパフォーマンスが良い。

2.2.3 選定結果

以上の検討により、画像の質と価格のバランスから本共同研究では「Canon EOS 5D」を採用する。

なお、より高精度な画像や機能を求める場合には、高価ではあるが高性能な機種を選定しても良い。

表 2.2.1 デジタル一眼レフカメラ一覧表 (1/3)

メーカー	機種	価格 ^{※1} (円)	有効画素数 (万画素)	総画素数 (万画素)	撮像素子		受光素子サイズ ^{※2} (μm^2)
					センサータイプ	サイズ(mm×mm)	
Canon	EOS Kiss デジタルX	69,000	1,010	1,050	CMOS	22.2×14.8	31.29
	EOS 40D	127,000	1,010	1,050	CMOS	22.2×14.8	31.29
	EOS 5D	288,900	1,280	1,330	CMOS	35.8×23.9	64.33
	EOS-1Ds Mark II	728,700	1,670	1,720	CMOS	36.0×24.0	50.23
	EOS-1D Mark III	438,000	1,010	1,070	CMOS	28.1×18.7	49.11
	EOS-1Ds Mark III	860,000	2,110	2,190	CMOS	36.0×24.0	39.45
FUJIFILM	FinePix S3 Pro	170,000	1,234	1,290	CCD	23.0×15.5	27.64
	FinePix S5 Pro	200,000	1,234	1,284	CCD	23.0×15.5	28.89
MAMIYA	Mamiya ZD	1,285,000	2,150	2,180	CCD	48.0×36.0	79.27
Nikon	40Dx	65,000	1,020	1,075	CCD	23.6×15.8	34.69
	D80	94,000	1,020	1,075	CCD	23.6×15.8	34.69
	D200	152,000	1,020	1,092	CCD	23.6×15.8	34.15
	D2Xs	477,000	1,240	1,284	CMOS	23.7×15.7	28.98
OLYMPUS	D2X	480,000	1,240	1,284	CMOS	23.7×15.7	28.98
	D3	568,000	1,210	1,287	CMOS	36.0×23.9	66.85
	D300	196,000	1,230	1,310	CMOS	23.6×15.8	28.46
	E-410	75,000	1,000	—	LiveMOS	17.3×13.0(4/3型)	22.49
PANASONIC	E-510	89,000	1,000	—	LiveMOS	17.3×13.0(4/3型)	22.49
	E-3	176,000	1,010	1,180	LiveMOS	17.3×13.0(4/3型)	19.06
	LUMIX DMC-L10	86,000	1,010	1,176	LiveMOS	17.3×13.0(4/3型)	19.12
PENTAX	K10D	97,500	1,020	1,075	CCD	23.5×15.7	34.32
SIGMA	SD14	170,000	1,406	—	FOVEONX3	20.7×13.8	20.32
	α 100 DSLR-A100	70,000	1,020	1,080	CCD	23.6×15.8	34.53
SONY	α 700 DSLR-A700	155,000	1,220	1,310	CMOS	23.5×15.6	27.98

※1：各社オープン価格のため、2008年1月調査時の市場平均価格にて表示（調査：価格.com）

※2：総画素数が不明な機種は、有効画素数にて計算

表 2.2.1 デジタル一眼レフカメラ一覧表 (2/3)

メーカー	機種	連写性能 (コマ/秒)	記録メディア※3	記録フォーマット	シャッタースピード (秒)	感度 (ISO)
Canon	EOS Kiss デジタルX	3	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
	EOS 40D	6.5	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/8000	100~3200
	EOS 5D	3	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/8000	100~1600
	EOS-1Ds Mark II	4	CF, MD, SD	JPEG/RAW	30~1/8000	100~1600
	EOS-1D Mark III	10	CF, MD, SDHC, SD	JPEG/RAW	30~1/8000	50~6400
	EOS-1Ds Mark III	5	CF, MD, SDHC, SD	JPEG/RAW	30~1/8000	50~3200
FUJIFILM	FinePix S3 Pro	3	MD, xDPC	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
	FinePix S5 Pro	—	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/8000	100~3200
MAMIYA	Mamiya ZD	1.2	CF, MD, SD	JPEG/RAW	30~1/4000	50~400
Nikon	40Dx	3	SDHC, SD	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
	D80	3	SDHC, SD	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
	D200	5	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/8000	100~1600
	D2Xs	5	CF, MD	JPEG/RAW/TIFF	30~1/8000	100~800
	D2X	5	CF, MD	JPEG/RAW/TIFF	30~1/8000	100~800
	D3	9	CF, MD	JPEG/RAW/TIFF	30~1/8000	200~6400
	D300	6	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/8000	200~3200
OLYMPUS	E-410	3	CF, MD, xDPC	JPEG/RAW	60~1/4000	100~1600
	E-510	3	CF, MD, xDPC	JPEG/RAW	60~1/4000	100~1600
	E-3	5	CF, MD, xDPC	JPEG/RAW	60~1/8000	100~3200
PANASONIC	LUMIX DMC-L10	3	CF, MD, MMC	JPEG/RAW	60~1/4000	100~1600
PENTAX	K10D	3	SDHC, SD	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
SIGMA	SD14	3	CF, MD	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
SONY	α100 DSLR-A100	3	CF, MD, MS	JPEG/RAW	30~1/4000	100~1600
	α700 DSLR-A700	5	CF, MD, MS	JPEG/RAW	30~1/8000	100~3200

※3: CF=コンパクトフラッシュ/MC=マイクロドローイング/SDHC=SDカード/SD=SDカード, xDPC=xD ピクチャーカード/MMC=マルチ

メディアカード/MS=メモリースティック

表 2.2.1 デジタル一眼レフカメラ一覧表 (3/3)

メーカー	機種	重量 (g)	手ぶれ補正	AC電源	インターフェイス	発売年月
Canon	EOS Kiss デジタルX	510	×	○	USB2.0, AV出力	2006年9月
	EOS 40D	740	×	○	USB2.0, AV出力, 拡張システム端子	2007年8月
	EOS 5D	810	×	○	USB2.0, AV出力	2005年9月
	EOS-1Ds Mark II	1215	×	○	USB, IEEE1394, AV出力	2004年11月
	EOS-1D Mark III	1155	×	○	USB2.0, AV出力	2007年5月
	EOS-1Ds Mark III	1210	×	○	USB2.0, AV出力, 拡張システム端子	2007年11月
FUJIFILM	FinePix S3 Pro	835	×	○	USB2.0, IEEE1394, AV出力, DC入力	2004年11月
	FinePix S5 Pro	830	×	○	USB2.0, AV出力, DC入力	2007年1月
MAMIYA	Mamiya ZD	1200	×	○	IEEE1394	—
Nikon	40Dx	495	×	○	USB2.0, AV出力	2007年3月
	D80	585	×	○	USB2.0, AV出力	2006年9月
	D200	830	×	○	USB2.0, AV出力	2005年12月
	D2Xs	1070	×	○	USB2.0, AV出力	2006年6月
	D2X	1070	×	○	USB2.0	2005年2月
	D3	1240	×	○	USB2.0, AV出力, HDMI	2007年11月
	D300	825	×	○	USB2.0, AV出力, HDMI	2007年11月
	E-410	375	×	×	USB2.0, 専用マルチコネクタ	2007年4月
OLYMPUS	E-510	510	○	×	USB2.0, 専用マルチコネクタ	2007年6月
	E-3	810	○	○	USB2.0, AV出力	2007年11月
PANASONIC	LUMIX DMC-L10	480	×	○	USB2.0, AV出力	2007年11月
PENTAX	K10D	710	○	○	USB2.0, AV出力, DC入力	2006年11月
SIGMA	SD14	700	×	○	USB2.0, AV出力	2007年3月
	α100 DSLR-A100	545	○	○	USB2.0, AV出力	2007年11月
SONY	α700 DSLR-A700	690	○	○	USB2.0, AV出力, HDMI	2006年7月

2.3 既往システムの撮影性能の検証

連続した同期撮影を可能とするシステムを構築するため、各部位について新しい機材やソフトなどの適用を考え、それらの検証を行った。なお、カメラは前節で選定した Canon EOS 5D を使った。

2.3.1 既往同期撮影システムの連続撮影性能及びデータ転送性能

既往同期撮影システムでは、クラボウ社が開発したカメラコントロールソフトを使用していた。そのソフトは連写機能がなく、また1回の撮影が数秒～10秒程度要するため、本研究で要求する性能を満たしていない。

そこで、Canon社製のカメラコントロールソフト EOS Utility (以下「EU」という)を使い、その性能の確認を行った。また、参考にCanon社製の上位機種であるEOS 1D Mark IIIの検証も行った。なお、本検証では、クラボウ社製のカメラコントロールソフトは使用していない。

(1) 検証方法

検証は、カメラとシャッターコントロール部、データ取込み部を以下のように組合せながら、連写速度やデータ転送速度などを確認した。図 2.3.1 に検証時のシステム構成を示し、上からシステム構成 A、システム構成 B、システム構成 C とする。

なお、以下に、検証を行ったカメラコントロールソフト EU の概要を解説する。また、EU のほかにも、LAN を使ってカメラをコントロールする WFT Utility がある。これについても概要を解説する。

■EU の概要

EU は、Canon 社が作成したカメラコントロールソフトである。PC にインストールし、PC からカメラのシャッターコントロール、絞りやシャッタースピードなどのコントロール、撮影画像の取り込みなどができる。コントロール及びデータ取り込みは、PC から1本の USB ケーブルによって行われる。

EU の機能の概要は以下の通りである。

- ・タイマー撮影の設定が可能。1秒単位で、0秒～99分59秒の範囲。
- ・インターバルタイマー撮影が可能。1秒単位で、5秒～99分59秒の範囲。
- ・撮影した画像は、直接PCのフォルダに保存。PCと同時にCFにも保存設定可能。ただし、CFだけに保存する設定はできない。
- ・ファイル名は、IMG 0000の通し番号。プロパティの撮影日は、年月日時分まで。
- ・ファインダー画像をPCで表示できる(カメラが見ている画像をPCに表示可能。1D Mark IIIのみ)

■WFT Utility の概要

WFT Utility は、PC から LAN 経由でカメラをコントロールするソフトであり、無線 LAN を使えばワイヤレスコントロールが可能となる。しかしながら、無線となると画像データの取り込みが遅くなるため、今回はその適用性については検討しなかった。

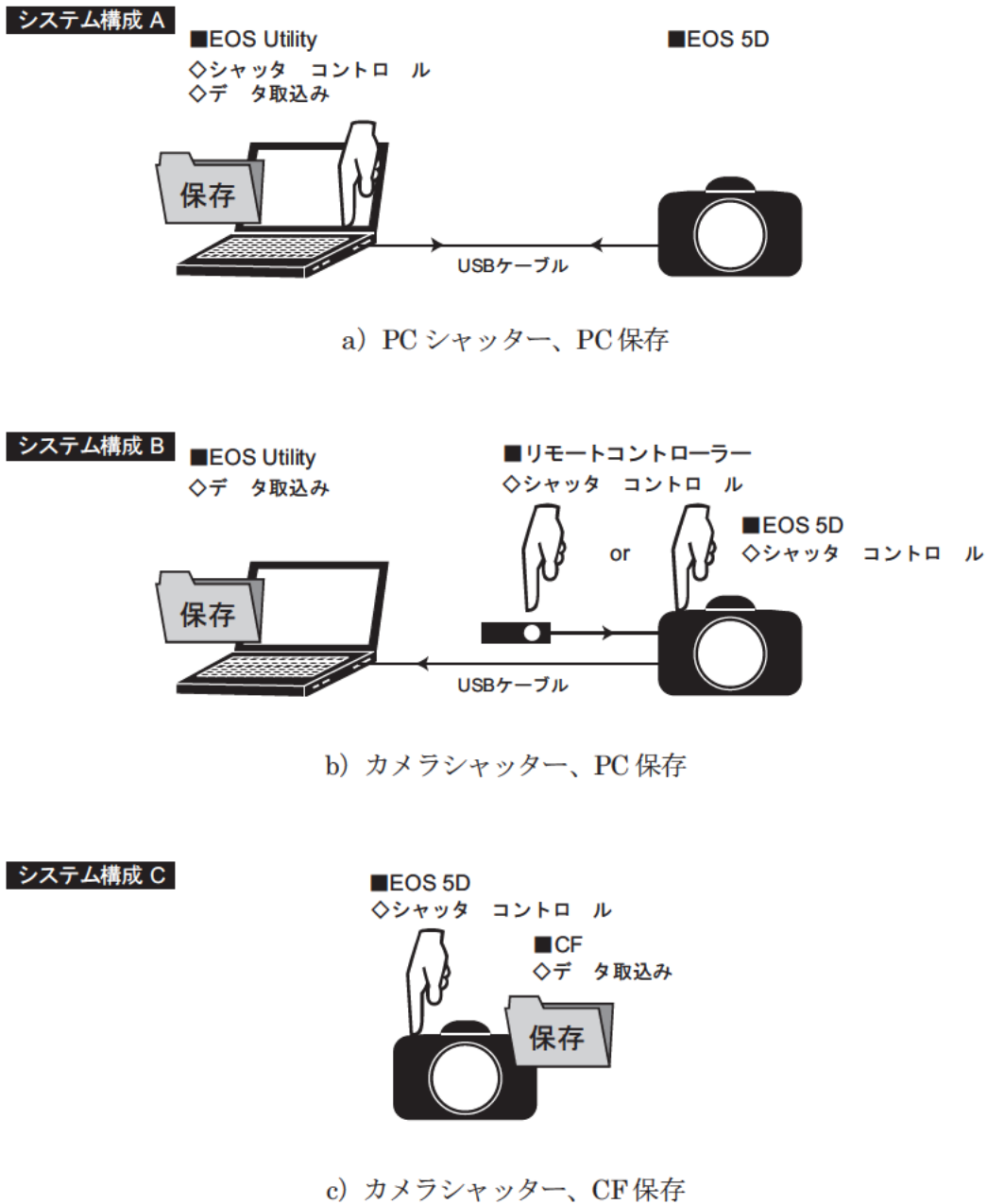


図 2.3.1 連続撮影性能及びデータ転送性能検証時のシステム構成

(2) 検証結果

検証結果を表 2.3.1 に示す。また、個々の検証結果を表 2.3.2 及び表 2.3.3 に示す。

なお、ここではカメラの選定結果で選ばれた EOS 5D の評価に言及するが、同時に検証した上位機種¹⁾の 1D Mark III は、連写性能やデータ転送速度が EOS 5D よりも速い結果となった。

① 連写性能に対する評価

- ・EOS 5D の連写性能は、システム構成 B (図 2.3.1 b)) において 1 コマ/秒×5 分以上を満たすことが確認できた。また、2 コマ/秒×30 秒以上の連写性能についても満たすこと

が確認できた。ただし、連写持続時間が要求性能を満たしたものの、30秒強で撮影がストップしてしまう状態のため今後の検討が必要と考えられる。

- ・シャッターコントロールを EU で行うシステム構成 A (図 2.3.1 a)) は、画像転送中に EU のシャッターボタンを押せないため、早いタイミングで連写することができないことが判明した。

表 2.3.1 要求する連写性能に対する検証結果

連写速度	EOS 5D	1D MarkIII
2コマ/秒：30秒間以上 JPEG (最高解像度撮影可能)	△	○
1コマ/秒：5分間以上 JPEG (最高解像度撮影可能)	○	○
1コマ/10秒：1時間以上 JPEG (最高解像度撮影可能)	○	○

※：△は、要求性能は満たすが、撮影の永続性がない (busy で撮影ストップ)

②カメラコントロールソフトとしての EU の評価

- ・EU からカメラの ISO や絞りなどを変更できるが、単写撮影モードと連写撮影モードの変更はできない。単写撮影モードでの連続撮影を行うのであれば、カメラの設定を変更できる EU は便利である。
- ・EU は PC1 台に対してカメラ 1 台のコントロール (+データ取込み) しかできないため、複数のカメラをコントロールする同期撮影システムでは、その使い方を検討する必要がある。

③データ取込みソフトとしての EU の評価

- ・システム構成 B において、直接カメラのシャッターボタンを押したり、リモートコントローラー (有線) でシャッターを切っても、EU ソフトを使って PC へデータが転送されることを確認した。すなわち、EU はデータ取込み専用のソフトとしても使えるということを確認した。
- ・シャッターボタンを押す間隔 (連写間隔) は、EU ソフトの間隔よりも早くできる。

④その他

- ・Canon 社製カメラをコントロールするソフトを、Canon からコントロールソースコード (一部の機能をカスタマイズ可能な「SDK」というもの) を教えてもらい、開発することは可能である。しかし、その際には、別途「使用許諾契約書」の締結が使用の前提条件となる。保証/サポートはないが、無償提供を行っている。
- ・データ転送速度については、メーカー非公開であり、カメラ→CF (CF メモリのスペックに左右される)、カメラ→USB→PC (PC のスペックに左右される) などは実験で検証する必要がある。
- ・大容量 CF メモリ (Canon 社外品) の適用が考えられるが、Canon 社推奨/動作保証等の

CF メモリはない。それぞれの CF メモリについては、メーカーの保証/動作確認内容を確認する必要がある。

(3) 検証結果の総括

①検証結果の総括

- ・連続撮影に関する要求性能に対しては、一応満たすことを確認した。
- ・EU はデータ取込みソフトとして利用が可能である。

②改良版同期撮影システムの構成（案）

- ・リモートコントローラーを使ってシャッターを同期させて押す（既往クラボウ社製システム）ことができれば、同期撮影が可能なシステムが開発可能と思われる。リモートコントローラー（コントローラー有線ケーブル、または無線コントローラー）から PC へのシャッター指示、カメラから PC への EU（USB ケーブル）を使ったデータ転送という流れのシステムが考えられる。
- ・クラボウ社製のカメラコントロールソフトは、同期シャッター指示とデータの取込みを行っているが、同期シャッター指示だけに機能を絞ったものに改良すれば、EU との組合せで同期撮影システムができると考えられる。

表 2.3.2 Canon Eos 5D の連写性能

判定	システム構成	フォーカス類	保存先	シャッター	連写速度 毎秒	撮影枚数	連続撮影 時間 秒	全データ 量 MB	1枚あたり のデータ 量 MB	使用CF サイズ MB	備考
△	A	マニュアル	PC	EUソフト	0.5枚	155	300	656	4.23	128	EUソフト上でデータ転送中はシャッターボタンが押せない。一定のタイミングでボタンが押せない。
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	1枚	302	300	1250	4.14	256	撮影しながらPCへ伝送している。シャッターも一定で押せる。これ以上も続けられそう。
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	1.5枚	185	120	625	3.38	256	撮影しながらPCへ伝送している。シャッターも一定で押せる。これ以上も続けられそう。
×	C	マニュアル	CF	カメラ	1.5枚	68	34	256	3.76	256	busyでストップ
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	1.66枚	201	120	753	3.75	なし	120秒までは問題なく撮影可能。それ以上は検証していない。
△	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	1.75枚	91	51	341	3.75	なし	busyでストップ
△	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	1.83枚	77	43	288	3.74	なし	busyでストップ
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	2枚	65	33	276	4.25	256	busyでストップ。ただし、33秒間撮影できたため、要求性能を満たす。
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	2枚	67	35	284	4.24	512	busyでストップ。ただし、33秒間撮影できたため、要求性能を満たす。CF容量関係なし。
×	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	連写(3枚)	72	24	244	3.39	256	連射モードで撮影。busyでストップ

※撮影画質は、全て最高画質(画質L、4368×2912、1,272万画素)で実験

表 2.3.3 Canon Eos 1D Mark IIIの連写性能

判定	システム構成	フォーカス類	保存先	シャッター	連写速度 毎秒	撮影枚数	連続撮影 時間 秒	全データ 量 MB	1枚あたり データ MB	使用CF サイズ MB	備考
△	A	オート	PC	EUソフト	1枚	300	300	990	3.30	128	撮影間隔がやや不安定になる
○	A	マニュアル	PC	EUソフト	1枚	300	300	1075	3.58	128	撮影と同時に PC への書き込み完了。カメラバッファへの負担なし。
○	B	マニュアル	PC	カメラ	1枚	300	300	1220	4.07	128	撮影と同時に PC への書き込み完了。カメラバッファへの負担なし。
△	A	マニュアル	PC	EUソフト	2枚	242	120	797	3.29	128	撮影間隔がやや不安定になる
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	2枚	241	120	795	3.30	128	撮影と同時に PC への書き込み完了。カメラバッファへの負担なし。
○	B	マニュアル	PC	リモート (有線)	3枚	280	94	924	3.30	128	busy でストップ
×	B	マニュアル	PC	カメラ	連写 H (10枚)	116	12	383	3.30	128	busy でストップ。カメラにバッファ後、PC へ転送(若干撮影時にも転送している)。EU 起動時でもマニュアルシャッターなら連写可能
×	C	マニュアル	CF	カメラ	連写 H (10枚)	35	4	115	3.29	128	busy でストップ
×	C	マニュアル	CF	カメラ	連写 H (10枚)	55	6	180	3.27	512	busy でストップ。CF 容量に関係あり
×	B	マニュアル	PC	カメラ	連写 L(3 枚)	200	67	833	4.17	128	busy でストップ。連写中に PC へ転送。
×	C	マニュアル	CF	カメラ	連写 L(3 枚)	184	61	790	4.29	128	busy でストップ。

※撮影画質は、全て最高画質(画質 L、3888×2592、1,008 万画素、クオリティ10)で実験

2.3.2 ワイヤレスコントローラーの検証

無線コントロールによる同期撮影システム(Type③)を構築するため、Canon 社製のワイヤレスコントローラーの通信性能に関する検証を行った。

(1) ワイヤレスコントローラー (LC 5) の概要

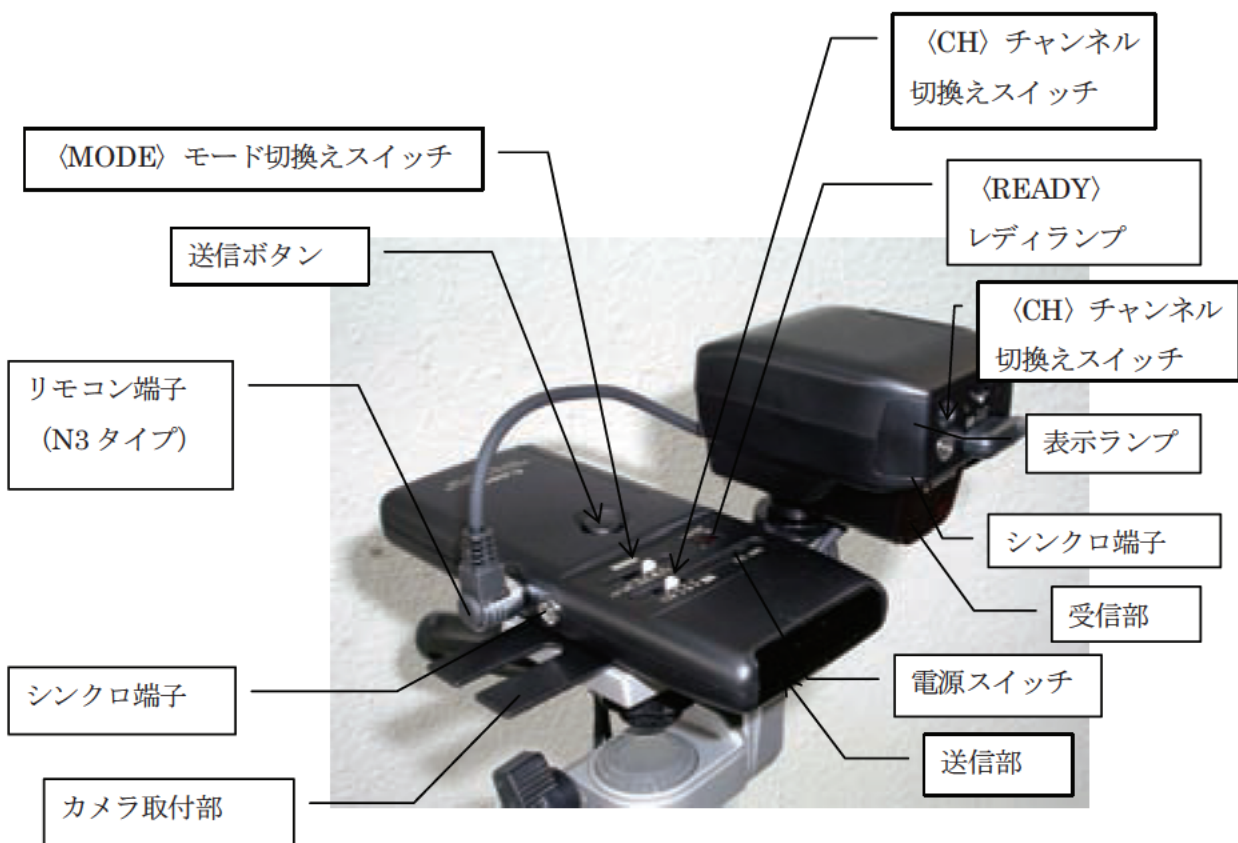
ワイヤレスコントローラー (LC 5) は、カメラのシャッターをワイヤレス (赤外線通信) でコントロールするもので、Canon 社純正オプションとして市販されている。詳細は、表 2.3.4、写真 2.3.1、図 2.3.2 を参照。

表 2.3.4 ワイヤレスコントローラー (LC-5) の諸元 (使用説明書スペック)

項目	仕様		備考
	送信機 (LC 5L)	受信機 (LC 5R)	
大きさ	幅 69×高さ 163×奥行 22mm	幅 64×高さ 75×奥行 93mm	
電源	単 3 形電池×4 本	単 3 形電池×4 本	アルカリ乾電池、ニッケル水素電池、リチウム電池
電源寿命	送信約 4,500 回分	約 100 時間 (連続待機時間)	
チャンネル	A, B, C, ALL	A, B, C	
モード	シングル、連写、TEST、 DELEY	ON, 1SR	1SR は半押し不要モード (高速反应用)
通信距離	受送信器間 100m		送受信機の向き、天候、大気の状態などの影響によって到達距離が短くなる場合がある。 室内では壁面反射のために多少ラフな配置でも作動する。
入力端子	リモコン端子 (N3 タイプ) シンクロ端子	シンクロ端子 赤外パルス変調光受信部	
出力端子	赤外パルス変調光 (約 800 ~1000nm)	リモコン端子 (N3 タイプ)	
その他		受信機は 360° 回転可能	



写真 2.3.1 ワイヤレスコントローラー (LC-5)



※別売りのリモートスイッチ RS-80N3、またはタイマーリモートコントローラー TC-80N3 を接続することができる。

図 2.3.2 ワイヤレスコントローラー 各部の名称

(2) 撮影可能距離の検証

ワイヤレスコントローラーとカメラの距離を変化させて、通信が行える撮影可能範囲を求める。

検証は、1コマ/2秒×5回の撮影を行い、5回とも撮影ができた場合を撮影可能と判断した。

【通信条件】

- ①標準使用ケース（図 2.3.3）見通しの良い場合
- ②林間ケース（写真 2.3.2）：通信の障害となり得る林の中の場合
- ③中継コントローラー設置ケース（図 2.3.4）：通信距離を伸ばすために中継コントローラーを設置する場合

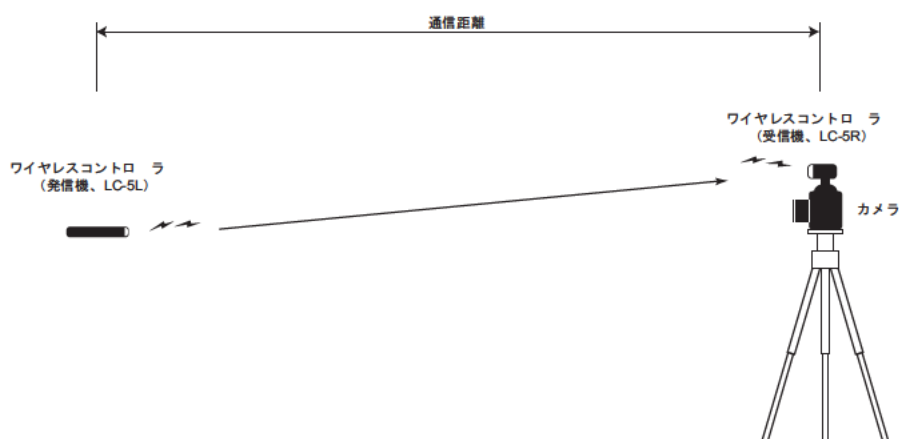


図 2.3.3 ①標準使用ケースの機材配置



写真 2.3.2 ②林間ケースの状況

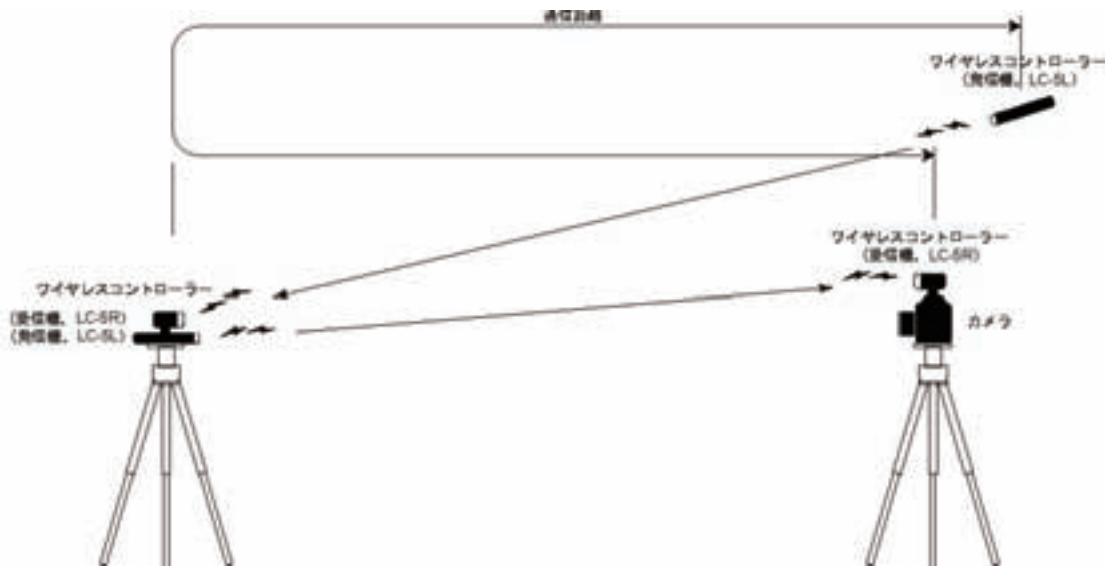


図 2.3.4 ③中継コントローラー設置ケースの機材配置

【検証結果】

- ・①標準使用ケースにおいて、メーカーの使用説明書スペック（100m）よりも長距離（200m）の通信が可能であることを確認した。通信距離については、試験地の関係でそれ以上の距離は確認していない。
- ・②林間ケースでは、送信部と受信部の間に木があると通信できなくなり、それは距離には関係なく発生した。その逆に、送信部から受信部が見えていれば、林間であっても通信距離を離すことができた。
- ・③中継コントローラー設置ケースでは、標準使用ケースの2倍の距離を通信できた。

なお、本実験時の天候は晴天であり、モヤなどが発生していない非常に見通しの良い撮影環境であった。

表 2.3.5 撮影可能距離の実験結果

ケース	通信距離 (m)						備考
	50	100	150	200	300	400	
①標準使用ケース	○	○	○	○			
②林間ケース	×～○						見通しがあれば OK
③中継コントローラー設置ケース		○		○	○	○	中間地点に中継コントローラー設置

(3) 連写性能の検証

ワイヤレスコントローラーで様々な連写速度での連続撮影を行い、最高連写速度を求めた。その際のシステム構成を図 2.3.5 に、また機材のセッティング状況を写真 2.3.3 及び写真 2.3.4 に示す。

なお、データ転送（保存）は、CF の場合と PC の場合を確認し、PC へ保存する場合のデータ取り込みソフトは、EU を使用した。

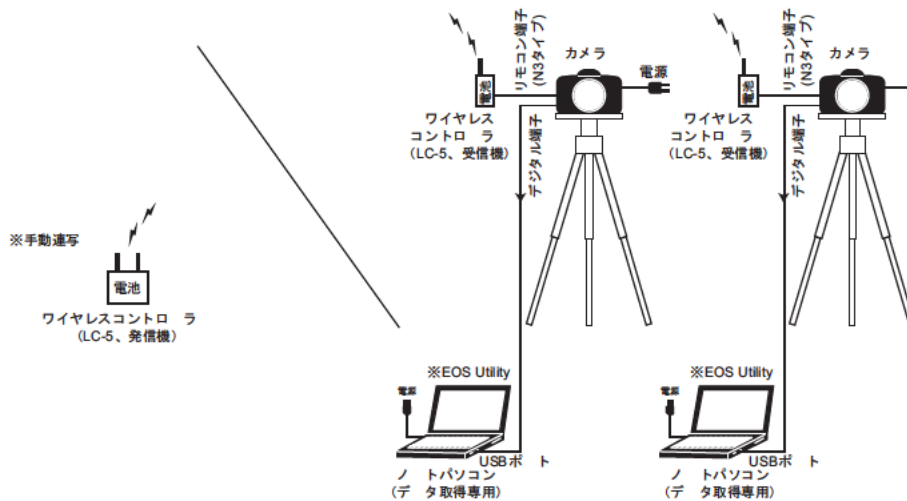


図 2.3.5 連写性能検証時のシステム構成 (PC 保存のケース)



写真 2.3.3 連写性能検証時のシステム構成 (PC 保存のケース)



写真 2.3.4 ワイヤレスコントローラー（受信部）とカメラのセッティング

【検証結果】

- ・表 2.3.6 に、連写性能の検証結果を示す。
- ・本システム構成で撮影可能であることを確認した。
- ・撮影間隔の最高速度は、1コマ/秒であった。
- ・ワイヤレスコントローラーでの連続撮影は、有線のリモートコントローラーや手動でシャッターを切る間隔（1.66コマ/秒）よりも遅い結果となった。

表 2.9 Canon Eos 5D の連写性能

判定	シャッターコントロール	受信機モード	撮影間隔 ms*1	データ取込み	保存先	撮影枚数 枚	連続撮影 時間 秒	全データ 量 MB	1枚あたり MB	使用CFサイズ MB	備考
○	ワイヤレスコントロール	-	2,000	EU	A-PC	120	240	436	3.63	A: 1GB B: 512MB	ゆとりの撮影&データ転送
					B-PC	120		418	3.48		
○	ワイヤレスコントロール	1SR	1,500	EU	A-PC	81	120	292	3.60	A: 1GB B: 512MB	シャッター間隔内でデータ転送が完了。シャッタータイミングがずれることもなかった。
					B-PC	81		282	3.48		
○	ワイヤレスコントロール	1SR	1,000	EU	A-PC	180	180	657	3.65	A: 1GB B: 512MB	時々、シャッタータイミングがずれる時がある。ただし、半押しを早めにしてシャッターを切ると、タイミングがずれることなく撮影できた。また、シャッターのレスポンスが良かった。
					B-PC	180		625	3.47		
△	ワイヤレスコントロール	ON	1,000	EU	A-PC	179	180	651	3.64	A: 1GB B: 512MB	時々、シャッタータイミングがずれる時がある。1枚の差がでた。どこかで同期撮影ができていなかった。
					B-PC	180		622	3.46		
△	ワイヤレスコントロール	1SR	800	EU	A-PC	225	180	813	3.61	A: 1GB B: 512MB	シャッター間隔内でのデータ転送をしているが、シャッタータイミングがズレることが多く、また一定のシャッター間隔で切りづらい。
					B-PC	224		772	3.45		
×	ワイヤレスコントロール	1SR	600	EU	A-PC	46	30	166	3.61	A: 1GB B: 512MB	途中で busy となりシャッターが切れなくなつた。
					B-PC	46		158	3.43		

撮影画質は、最高画質（画質 L、4368×2912、1,272 万画素）で実施。フォーカス類は、フルマニュアル。

A-PC : WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 900MHz 248MB RAM USB2.0 ポート

B-PC : WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 1.10GHz 248MB RAM USB2.0 ポート

*1 : ms=ミリ秒。

(4) 同期撮影タイミングの検証

1 台の無線リモートコントローラーで 2 台のカメラをコントロールし、その時の 2 台のカメラのシャッタータイミングを確認した。タイミングの確認方法は、シャッター音のタイミングを人が聞いて判断した。

【検証した通信距離】

- ①50m
- ②100m
- ③150m
- ④200m

【検証結果】

- ・表 2.3.6 に、同期撮影タイミングの検証結果を示す。
- ・撮影間隔が 1 コマ/秒 (1,000ms) 以上の場合、ほぼ同期撮影ができていると判断される。
- ・ただし、撮影間隔が 1 コマ/秒 (1,000ms) 以下になると、時々タイミングがズレる時がある。これは、データの書込み速度の影響が考えられる。
- ・中継コントローラーを使用した際 (200m+200m)、ワイヤレスコントローラーを押すタイミングと、カメラが反応するタイミングはほぼ同時であり、カメラの反応にタイムラグは感じられなかった。ワイヤレスコントローラーとカメラの距離差がある場合の検証は行っていないが、カメラの反応にタイムラグがないことを考えると、ほとんど影響はないことが考えられる。

(5) その他

- ・受信機の受信部と送信器の送信部が向い合う角度は、1m 以上離れる場合には片側 90° まで、1m 以内であれば少し背面まで通信可能である。実際のシステムでは、受信部と送信部が向い合うようにセットすることが望ましい。

(6) 検証結果の総括

- ・送信部と受信部の見通しが確保できれば 200m 程度までの遠隔コントロールが可能であり、同期撮影システムとして構築することができる。
- ・有線コントロールに比べるとやや撮影性能が落ちることが予想されるが、有線では対応できない撮影環境下においては有効である。

2.4 カメラコントロールソフトの改良 (CamCtrl ver.2)

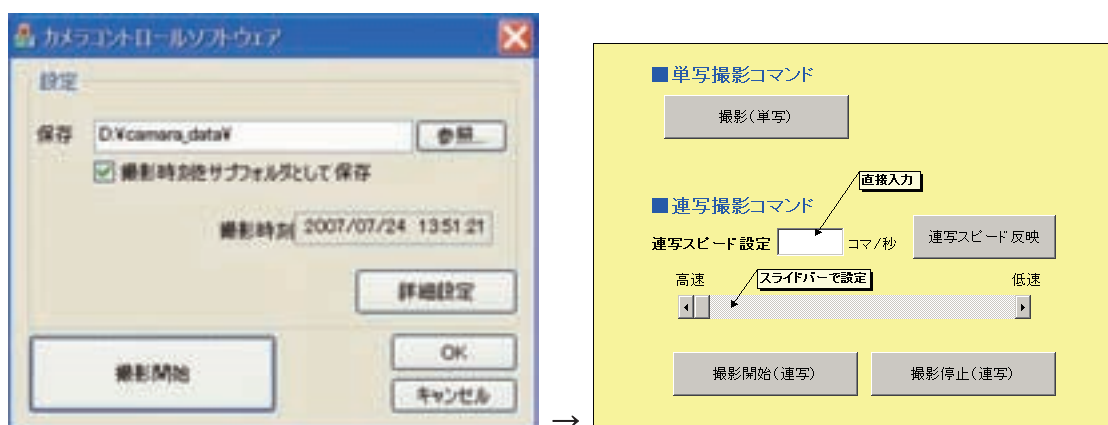
2.4.1 改良ポイントの抽出

クラボウ社製の既往カメラコントロールソフト（以下、「CamCtrl ver.1」という）について、その操作性を検証し、本共同研究の目的に適合したソフトへの改良ポイントを抽出した。

その結果、表 2.4.1 に示す改良が必要と判断された。代表的な改良ポイントとしては、CamCtrl ver.1 は連続撮影ができるようなものではなかったため、任意のタイミングで連続撮影ができるようにする必要がある。改良のイメージを図 2.4.1 に示す。

表 2.4.1 カメラコントロールソフト (CamCtrl_ver.1) の改良ポイント

改良ポイント	内容
①連写機能	①連写撮影開始・停止ボタン ②連写スピードの任意設定コマンド （数値入力、スライドバーなど） ③連写スピード変更ボタン ※地すべりの移動速度に応じて連写スピードを変更する
②データ保存媒体の選択	データ保存媒体の選択コマンド 選択肢：①PC、②CF
③データ取込み（処理）速度の高速化	①カメラ→PCの時 ②カメラ→CFの時
④撮影情報の作成	撮影時刻とファイルネームを関連付けするファイルを書き出す
⑤ファイルネームの付け方	撮影時刻（秒まで）をファイルネームにできないか



a) 既往ソフト (CamCtrl ver.1)

b) 改良イメージ

図 2.4.1 カメラコントロールソフトの改良イメージ

2.4.2 改良型カメラコントロールソフトの概要

前項の改良ポイントをもとに、カメラコントロールソフトを改良した。その改良実施ポイントを表 2.4.2 にまとめる。

改良したカメラコントロールソフト（以下、「CamCtrl ver.2」という）では、連続撮影について3つのモードから選択できるように改良した(表 2.4.3)。それぞれ、連続撮影の開始ボタン、停止ボタンでコントロールできる。

表 2.4.2 カメラコントロールソフト (CamCtrl_ver.2) の改良実施ポイント

改良ポイント	内 容
①連写機能	①連写撮影開始・停止ボタン ②連写スピードの任意設定コマンド (数値入力、スライドバーなど) ③転送モードの追加 <ul style="list-style-type: none"> ・ 撮影のみでデータ転送がないモード ・ 撮影を繰り返し、撮影停止後、データ転送するモード ・ 撮影毎にデータ転送するモード
②ファイルネームの付け方	撮影時刻 (秒まで) + カメラ番号でファイル名をつける

表 2.4.3 CamCtrl ver2 の連続撮影モード

モード	概 要			
	撮影間隔	データ保存場所	データ転送 タイミング	備 考
①撮影のみ	シャッター間隔 ※シャッター間隔 設定時間	CF	なし	データは EU(Canon社製 EOS Utility) を使い、別の PC へ転送
②撮影停止後 データ転送	シャッター間隔 ※シャッター間隔 設定時間	CF (撮影時) PC (撮影後に転送)	連続撮影停止後	
③撮影毎に画像転送	データ転送完了からのシャッター時間 ※シャッター間隔 データ転送時間+設定時間	PC ※撮影後の一瞬、CF に保存	撮影 1 回ごと	

【モード①「撮影のみ」】

カメラコントロールを CamCtrl ver.2 で行い、データは EU を使って別の PC へ転送させる。この方式では、連続撮影の速度を速めることができる。図 2.4.2 にソフトの画面を示す。

【モード②「撮影停止後データ転送」】

カメラコントロールを CamCtrl ver.2 で行い、データも同じ PC へ転送する。ただし、データ転送は、連続撮影が一式終了してからまとめて行う。データを CF へ保存することから、比較的速い連続撮影に対応できると考えられる。図 2.4.3 及び図 2.4.4 にソフトの画面を示す。

【モード③「撮影毎に画像転送」】

カメラコントロールを CamCtrl ver.2 で行い、データも同じ PC へ転送する。撮影毎にデータ転送と設定に時間を要するため、高速の連続撮影が難しい。図 2.4.5 にソフトの画面を示す。

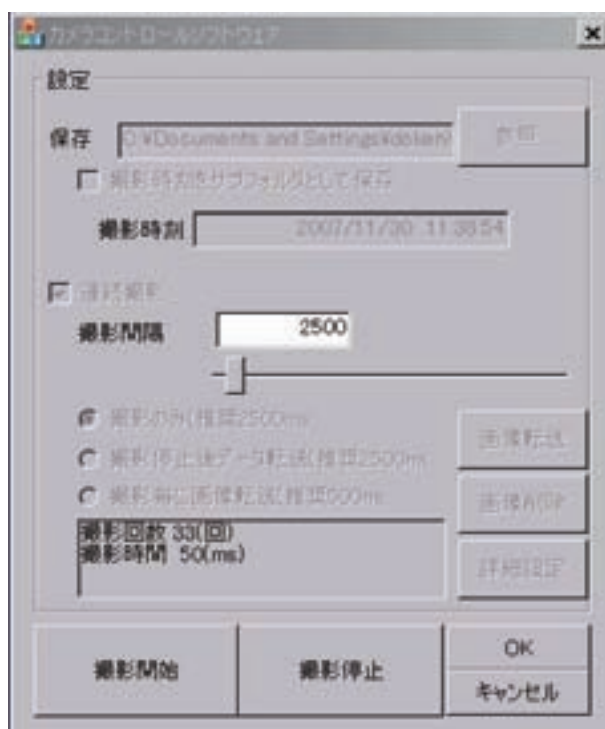


図 2.4.2 モード①のコントロール画面

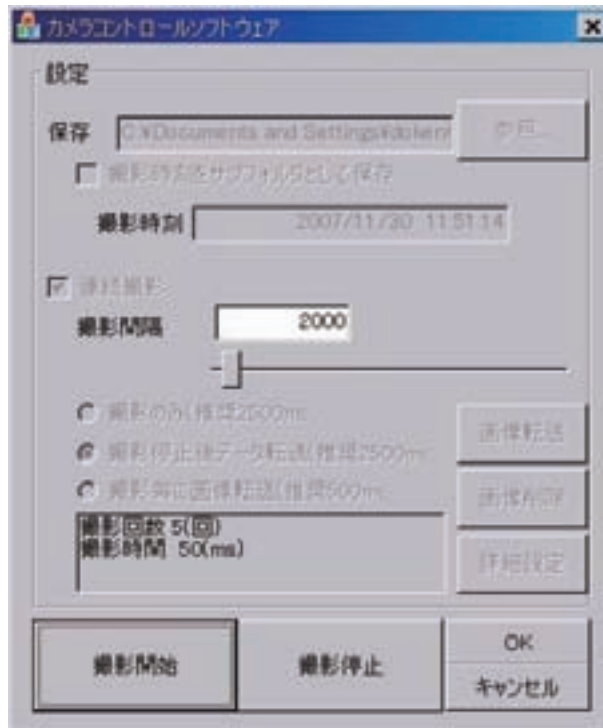


図 2.4.3 モード②のコントロール画面（撮影中）

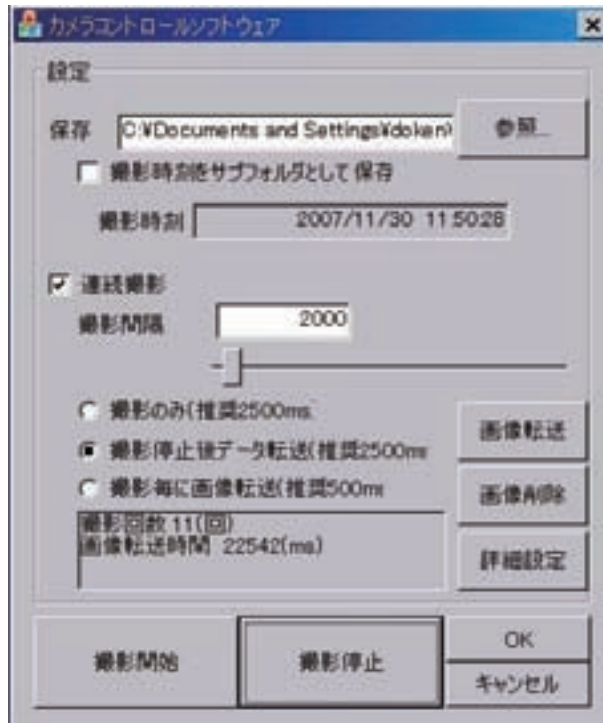


図 2.4.4 モード②のコントロール画面（データ転送後）

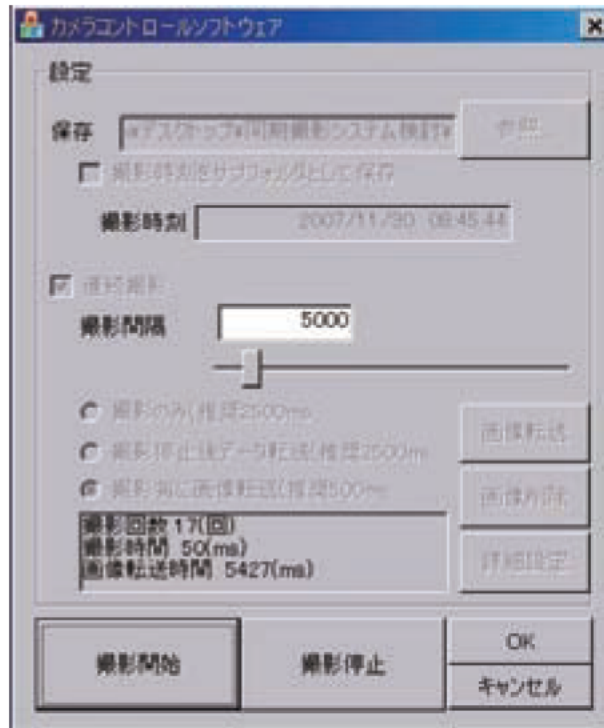


図 2.4.5 モード③のコントロール画面

2.4.3 改良ソフトの性能評価

同期撮影システムを CamCtrl ver.2 でコントロールして、その操作性を確認した。

(1) 検証方法

確認時のシステム構成は、図 2.4.6 及び図 2.4.7 に示す通りである。なお、図 2.4.7 に示すモード①時のシステム構成は、データ取得ソフト (EU) が PC1 台分しか確保できなかったため、カメラ 1 台での実験を行った。

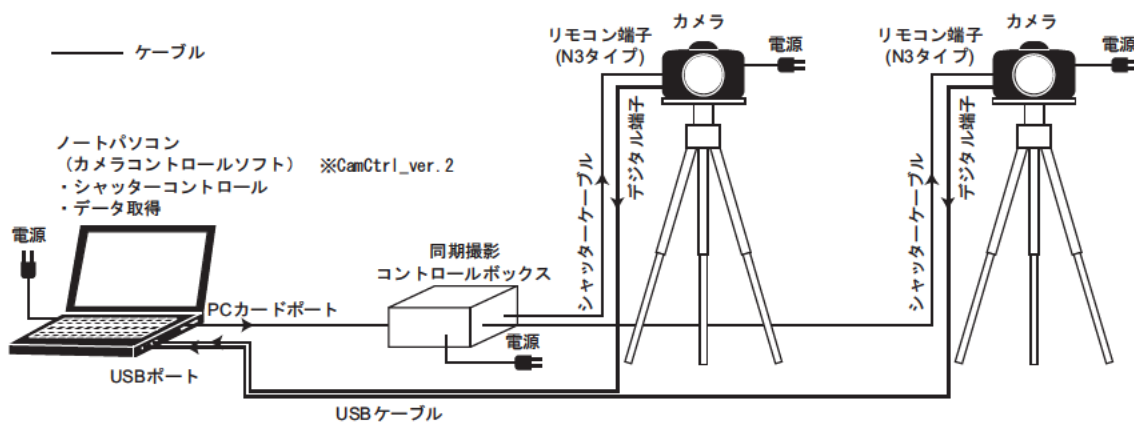


図 2.4.6 同期撮影システムの構成 (モード②、③)

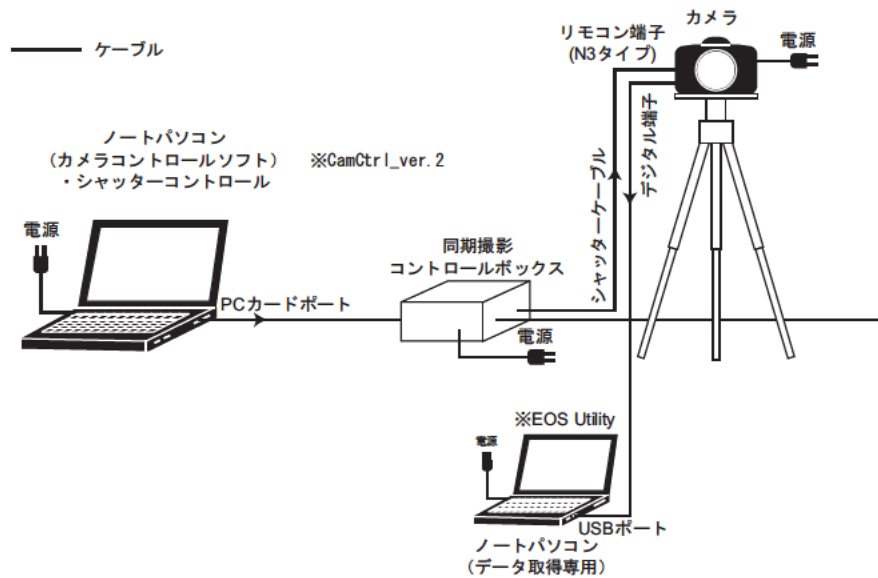


図 2.4.7 同期撮影システムの構成 (モード①)

(2) 検証結果

各モードで連続撮影の実験をした結果を表 2.4.4 及び表 2.4.5 に示す。なお、ここでは撮影間隔をミリ秒 (ms) で表記する。

【モード①「撮影のみ」】

- ・撮影間隔 2,500ms 以上であれば、連続した撮影が可能であった。
- ・600ms 以下では、連続した撮影が不可能であった。
- ・700ms～2,000ms の間では、撮影できる間隔もあれば、撮影できない間隔もあった。
- ・1,500ms では撮影できるが、2,000ms では撮影できない現象が発生した。
- ・連続撮影ができない現象として、2つの状態がカメラに起きていた。1つは撮影間隔 1,000ms や 2,000ms の場合で、撮影指示のタイミングとカメラのシャッタータイミングが合わないかのように、カメラが撮影指示タイミングに反応できずに連続撮影が中断されてしまう状態。もう 1つは、600ms 以下の高速撮影指示の場合で、これはカメラが連続して撮影した画像データの処理が追いつかなくなって busy 状態となり、撮影指示タイミングに反応できなくなってしまう状態である。これらの原因を追究し、対処方法を検討する必要がある。

【モード②「撮影停止後データ転送」】

- ・撮影間隔 2,000ms 以上であれば、連続した撮影が可能であった。
- ・ただし、カメラに搭載する CF の容量が小さいものや伝送速度が遅いものでは、2,000ms でも撮影ができなかった。
- ・モード②の撮影間隔は、CF の容量や伝送速度に左右されると考えられる。
- ・したがって、このモードで長い高速の連続撮影をする場合には、より大容量で高性能な CF を搭載する必要がある。

- ・連続撮影画像を CF に保存して撮影終了後に PC へ転送するため、PC への転送時間が長い。
転送中に地すべり滑動が進展してしまうと、すぐに撮影が再開できずに移動状態を撮影できない。

【モード「③撮影毎に画像転送」】

- ・設定できる撮影間隔は、画像データをカメラから PC へ転送し終わってからの時間である。
そのため、500ms などと設定しても連続した撮影が可能であった。
- ・実験での画像伝送時間は約 4,500ms であったが、この時間は撮影画像の色構成などで変化することが考えられる。そのため、地すべりが滑落して撮影風景が変わった場合、連続撮影の間隔も変化してしまうことが考えられ、撮影間隔の設定方法として課題があると考えられる。

表 2.4.4 Canon Eos 5D+CamCtrl_ver.2 の連写性能 (1/2)

判定	シャッターコントロール	コントロールモード	撮影間隔 ms	データ取込み	保存先	連写速度 毎秒	撮影枚数 枚	連続撮影 時間 秒	全データ 量 MB	1枚あたり MB	画像転送 時間 ms	使用CFサイズ MB	備考
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	5,000	EU	PC		25	120	76.4	3.06	—	No.3 : 1000	
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	3,000	EU	PC		40	120	133	3.33	—	No.3 : 1000	
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	2,500	EU	PC		48	120	159	3.31	—	No.3 : 1000	
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	2,000	EU	PC						—	No.3 : 1000	23 回目でタイミングNG
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	1,500	EU	PC		78	120	261	3.35	—	No.3 : 1000	
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	1,000	EU	PC		37	39	113		—	No.3 : 1000	9 回目でタイミングNG
×	CamCtrl_ver.2	手動 (有線リモート)	1,000	EU	PC		89	90	273		—	No.3 : 128	微妙に押せないタイミングがある。1 秒というのは魔のタイミング？
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	950	EU	PC		18	18	55		—	No.3 : 128	なにが原因？Busy 状態でストップ。タイミングが悪い？
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	800	EU	PC		142	120	471	3.32	—	No.3 : 1000	撮影間隔でデータ転送完了
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	700	EU	PC		242	180	730	3.02	—	No.4 : 256	撮影間隔でデータ転送完了
○	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	700	EU	PC		241	180	724	3.00	—	No.3 : 1000	撮影間隔でデータ転送完了
△	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	600	EU	PC		170	112	513	3.02	—	No.4 : 256	busy でストップ
△	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	600	EU	PC		164	136	541	3.30	—	No.3 : 1000	busy でストップ
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	500	EU	PC		99	56	298	3.01	—	No.4 : 256	busy でストップ
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	500	EU	PC		112	61	352	3.14	—	No.3 : 128	busy でストップ
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	400	EU	PC		89	40	271	3.04	—	No.3 : 128	busy でストップ
×	CamCtrl_ver.2	①撮影のみ	300	EU	PC						—		撮影間隔通りにシャッターが切れない

表 2.4.5 Canon Eos 5D+CamCtrl_ver.2 の連写性能 (2/2)

判定	シャッターコントロール	コントロールモード	撮影間隔 ms	データ取り込み	保存先	連写速度 毎秒	撮影枚数	連続撮影時間 秒	全データ量 MB	1枚あたり MB	画像転送時間 ms	使用CFサイズ MB	備考
○	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	5,000	CamCtrl_ver.2	CF	1枚/5.0秒	45*2	225	294	3.27	撮影後転送 179,528	No.3:1000 No.4:512	CF への書き込み時間あり
○	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	4,000	CamCtrl_ver.2	CF	1枚/4.0秒	45*2	180	297	3.30	撮影後転送 186,268	No.3:1000 No.4:512	CF への書き込み時間あり
○	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	3,000	CamCtrl_ver.2	CF	1枚/3.1秒	90*2	275	588	3.27	撮影後転送 396,110	No.3:1000 No.4:512	CF への書き込み時間あり
○	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	3,000	CamCtrl_ver.2	CF	1枚/3.0秒	45*2	135	294	3.27	撮影後転送 194,600	No.3:1000 No.4:256	CF への書き込み時間ギリギリな感じ
○	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	2,000	CamCtrl_ver.2	CF	1枚/2.0秒	45*2	92	296	3.29	撮影後転送 195,235	No.3:1000 No.4:512	CF への書き込み時間あり
×	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	2,000	CamCtrl_ver.2	CF							No.3:1000 No.4:256	2枚目でNo.4が*
×	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	1,000	CamCtrl_ver.2	CF							No.3:1000 No.4:512	3枚目でNo.4が*
×	CamCtrl_ver.2	②撮影停止後データ転送	700	CamCtrl_ver.2	CF							No.3:1000 No.4:512	4枚目でNo.4が*。
○	CamCtrl_ver.2	③撮影毎に画像転送	5,000	CamCtrl_ver.2	CF→ PC	1枚/10秒	18*2	180	118	3.28	5,400	No.3:1000 No.4:512	
○	CamCtrl_ver.2	③撮影毎に画像転送	1,000	CamCtrl_ver.2	CF→ PC	1枚/6.7秒	27*2	180	177	3.28	5,450	No.3:1000 No.4:512	
○	CamCtrl_ver.2	③撮影毎に画像転送	1,000	CamCtrl_ver.2	CF→ PC	1枚/4.0秒	45*2	180	56.2	0.61	2,950	No.3:1000 No.4:512	画質をS
○	CamCtrl_ver.2	③撮影毎に画像転送	500	CamCtrl_ver.2	CF→ PC	1枚/6.0秒	30*2	180	197	3.28	5,500	No.3:1000 No.4:512	

最高画質:画質 L (4368×2912: 1,272 万画素)、フォーカス類:マニュアル

(3) 検証結果の総括

CamCtrl ver.1 は同期撮影システムの連続撮影実験を行うためのカメラコントロールソフトとしては完成している。このソフトを用いて、実際の連続撮影をする実験に取り掛かって差し支えないと考える。

以下にこれまでの結果及び課題を整理する。

- CamCtrl ver.2 は、連続撮影中でも撮影間隔の変更ができる。
- EU のデータ転送タイミングが、撮影間隔 1,000ms 以上だとゆっくり転送するのに対し、1,000ms 以下の間隔では転送が速い。
- 撮影データの転送は、カメラ→EU のほうが、カメラ→CF への転送よりも速い。

2.5 開発した同期撮影システムの撮影性能の検証

2.5.1 有線撮影システム (Type②) の検証結果

実際の地すべり現場では、複数のカメラの撮影タイミングにズレ(以下「同期ズレ」という)を生じることなく長時間の撮影が求められる。ここでは、開発した同期撮影システムを用いて、連写性能及び同期性能に関する実験を行った。

【開発目標】

- ・ 連写性能：撮影間隔 1 コマ/秒で撮影
- ・ 同期性能：2 台のカメラを同時に撮影(同期ズレなく撮影)

(1) システム構成

クラボウ社製の既往同期撮影システムでは、カメラコントロールとデータ取込みを1つのPCで行い、そのコントロールはクラボウ作成のソフトウェアであったが、Type②(図 2.5.1)では、それぞれを分離して高速処理化を狙ったものである。

具体的には、カメラコントロールはクラボウ社製の既往同期撮影システム、データ取込みは EU(2.3.1 項参照) にて行う。

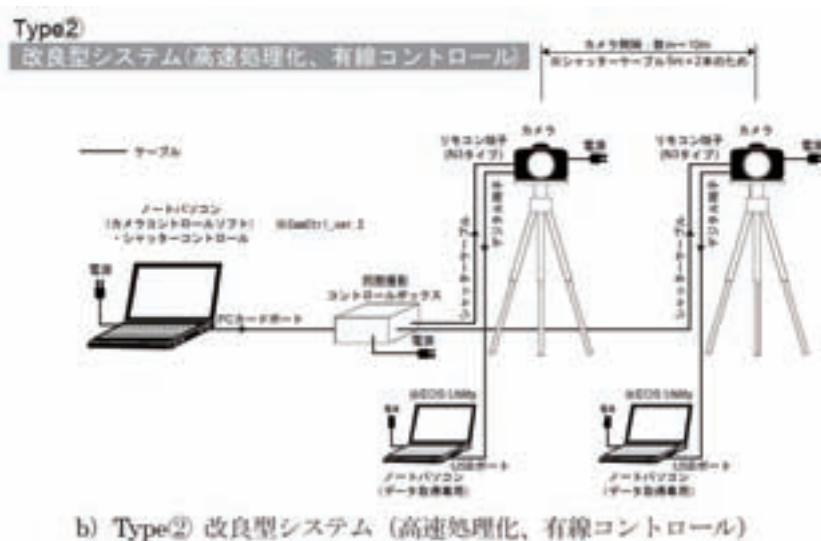


図 2.5.1 システム構成

(2) 実験方針及び手順

■ 実験方針

- ・ 長時間の使用を想定して 20 分以上の連写を行う。
- ・ 同期性能の状況を詳細に確認するため、高速回転する扇風機を撮影対象とする。

実験手順

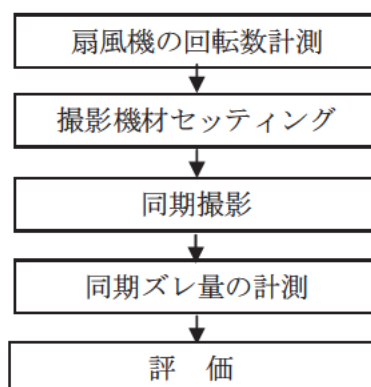
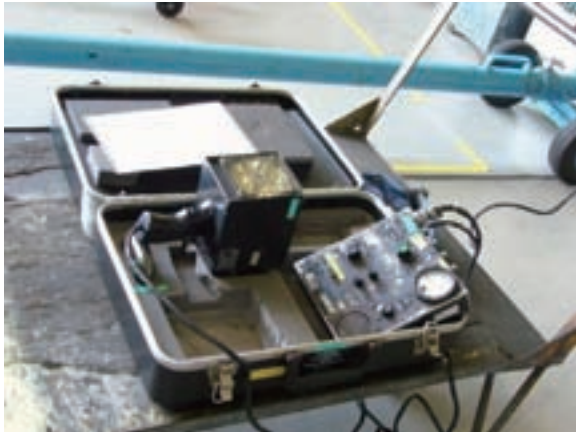


図 2.5.2 作業フロー

(3) ストロブスコープによる回転数の計測

本実験では、高速に回転する扇風機の羽根に印を付け、その印が 2 台のカメラで同期撮影した場合の同期ズレを計測した。

扇風機の回転数は製品仕様書に記載されているが概略の値でしかない。そのため、同期ズレ量を正確に計測するためストロボスコープを用いて回転数の計測を実施した。ストロボスコープとは、規則的に点滅する光を回転体や振動体に照射し、その運動の様子や周期を、観測または撮影する装置であり、照射の周期と一致すると、運動体が静止したように見えることを利用し、非接触で移動量、回転数を計測するものである。今回の実験では、照射間隔から回転数 (rpm) を求めた (写真 2.5.1)。



ストロボスコープ概観



観測風景



同期した状態



同期していない状態

写真 2.5.1 同期の有無に応じた見え方の違い

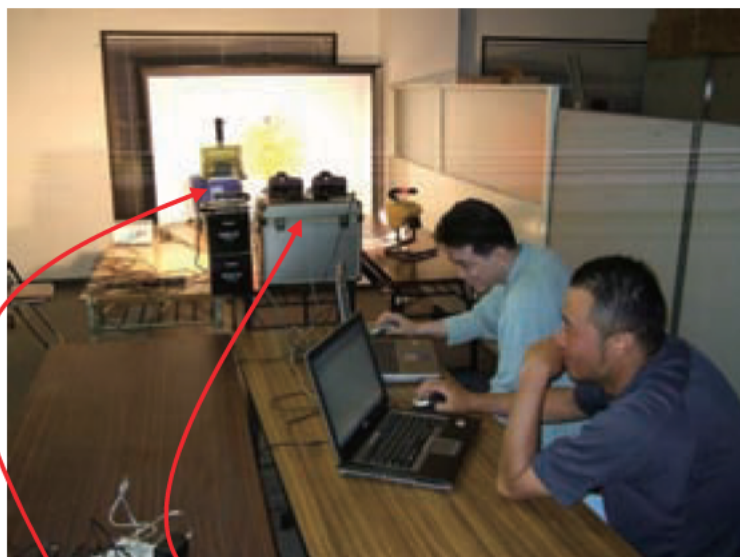
3段階の風量について計測した結果を表 2.5.1 に示す。

表 2.5.1 扇風機の回転数

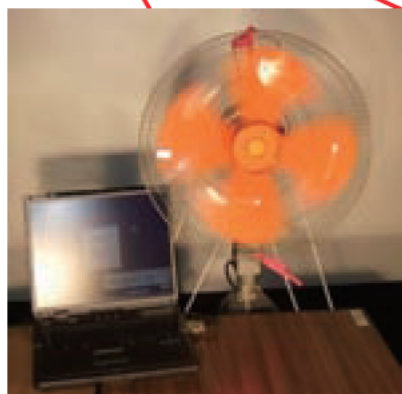
風量	回転数 (rpm)
強	1,730
中	1,570
弱	1,300

(4) 撮影実験

撮影は室内で実施し、写真 2.5.2 に示す通り扇風機に正対するよう 2 台のカメラを設置し、改良型同期撮影システム Type②の構成でセッティングした。



現場風景



扇風機と 1/100 秒時計



カメラ (2 台)

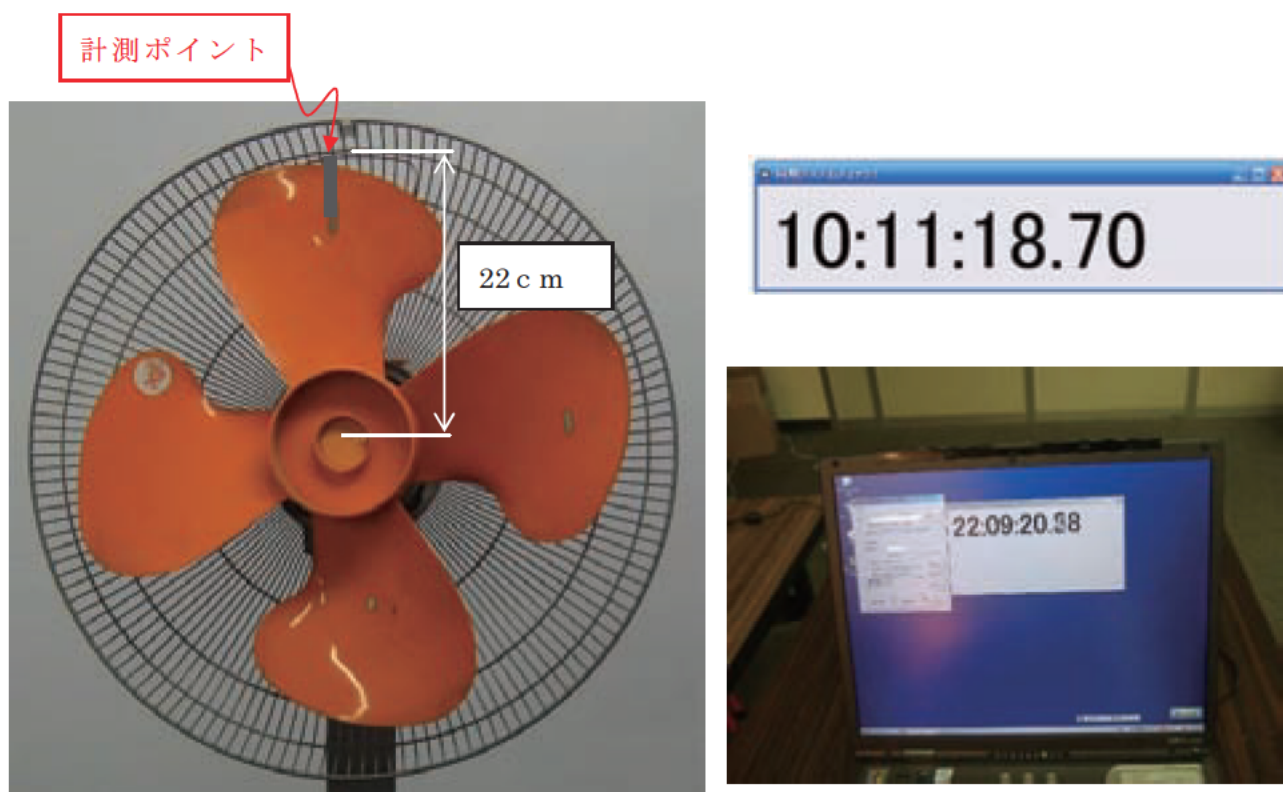
写真 2.5.2 セッティング状況

■ 1/100 秒時計

同期ブレ量を正確に計測するため、周回遅れによるブレと混同しないよう
1/100 秒のデジタル時計も同時に撮影するものとした（写真 2.5.3）。

■ 扇風機の回転数

1300rpm（弱）を採用とした。



扇風機

1/100 秒時計

写真 2.5.3 撮影対象の詳細

① 撮影諸元

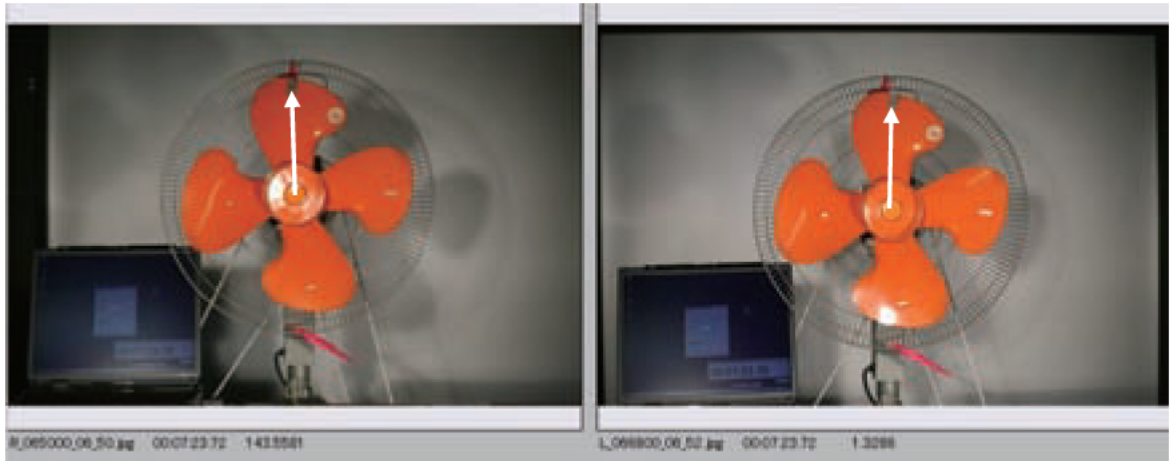
表 2.5.2 撮影諸元

	項目	採用値等
カメラ	焦点距離(mm)	50
	撮影モード	MF
	シャッター速度(秒)*	1/8000
撮影制御	コントロールソフト	CamCtrl ver.2
	連写ケース	1コマ/秒⇒25分間
	PCへのデータ転送	CUにて撮影毎

※) 高速回転する扇風機を鮮明に撮影するため、シャッター速度は最速値を採用

② 撮影結果

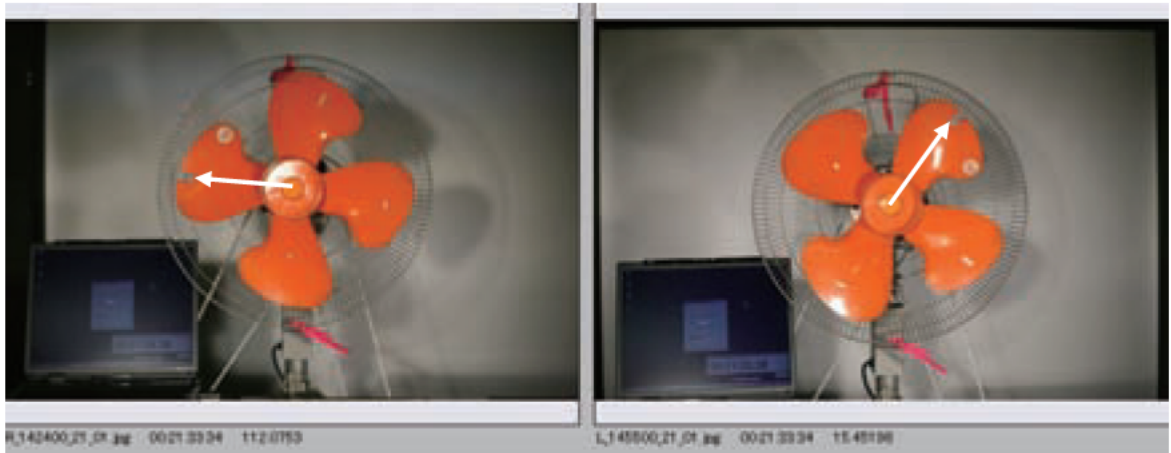
■ 1/8000 秒シャッター速度の撮影により、写真 2.5.4 に示す通り扇風機の印と 1/100 秒時計の表示値が鮮明に写っている様子を確認した。



左側

右側

同期ズレの小さい場合



左側

右側

同期ズレの大きい場合

写真 2.5.4 撮影結果

(5) 同期性能の検証

同期性能の検証は、図 2.5.3 の手順で行った。

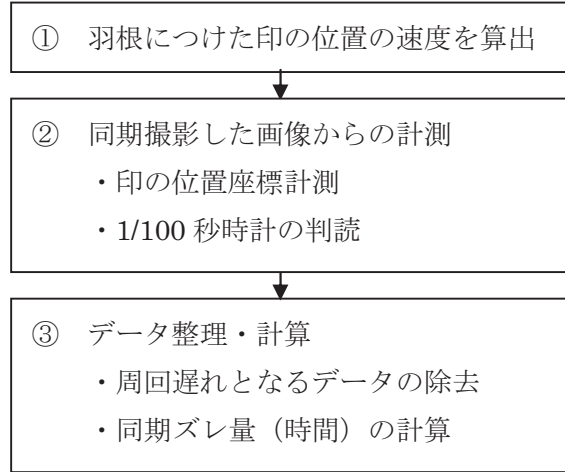


図 2.5.3 検証フロー

① 印の位置の移動速度 (V) の算出

扇風機の回転数より

$$1300 \text{ 回転/分} \Rightarrow 21.66 \text{ 回転/秒}$$

同期ズレを確認する羽根の印は、半径 22 c m の位置にある。

その位置における速度は

$$V = 22 \text{ c m} \times 2 \times \pi \times 21.66 \text{ 回/秒} = \underline{29.925 \text{ m/秒}} \quad (107.7 \text{ km/時間})$$

となる。

② 同期撮影した画像からの計測

同期撮影したすべての画像を対象に、以下の作業を実施した（図 2.5.4）。

- ・印をつけた位置の座標（写真上におけるピクセル座標）を計測
- ・1/100 秒時計の値を判読

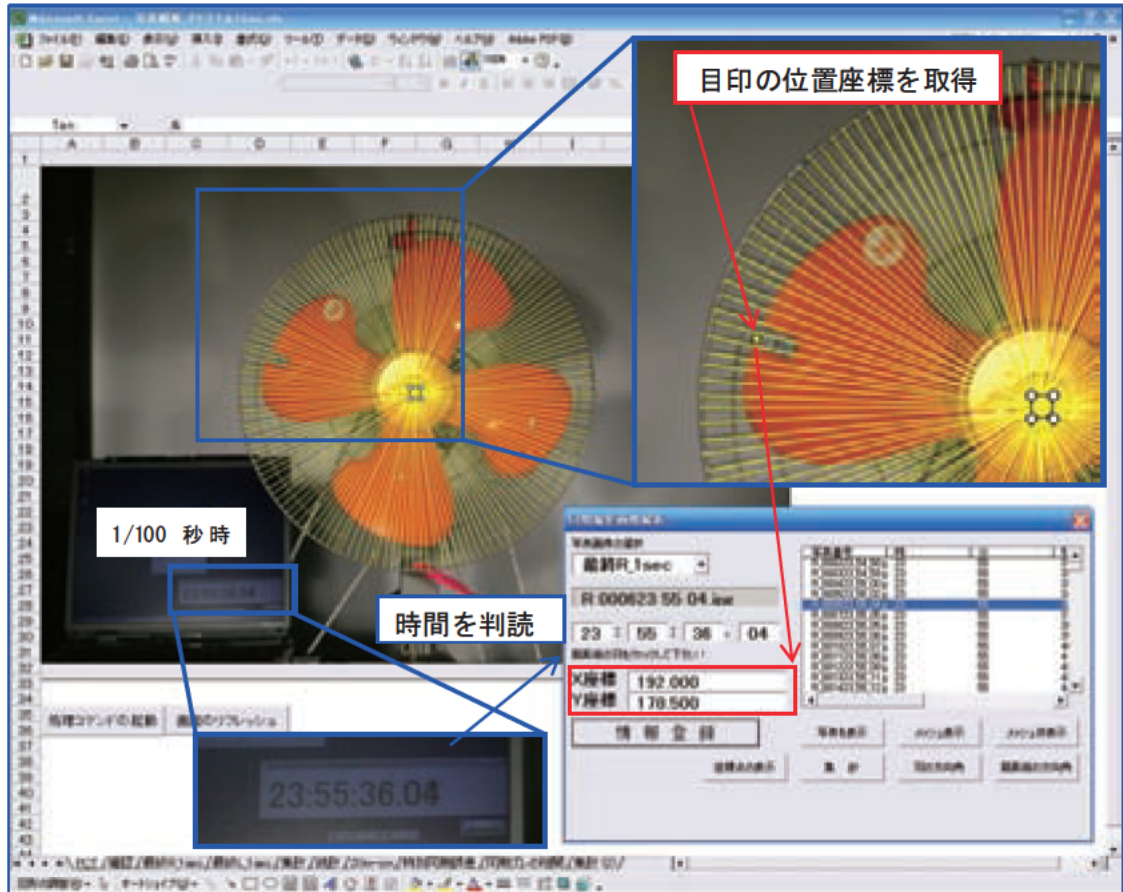


図 2.5.4 画像からの判読イメージ

同期ズレ量の算出を正確に行うため、目印は扇風機外輪を基準とした同一面上に設置し、カメラも撮影基準面に正対するよう設置した(図 2.5.5)。

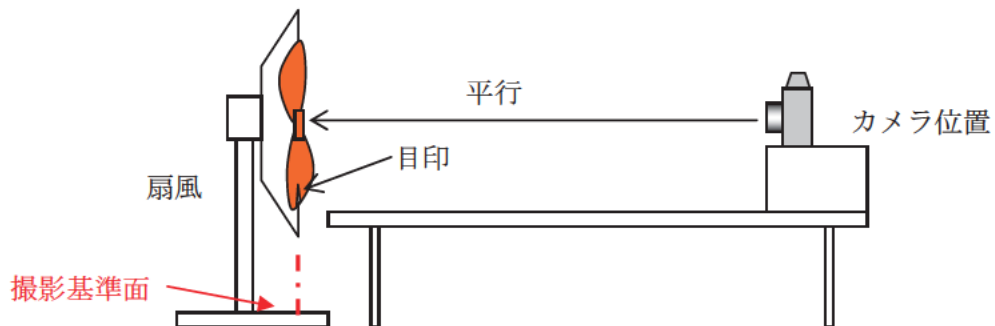


図 2.5.5 機材等セッティング時の注意事項

③ 同期ズレ時間の算出

同期ズレ時間は、座標計測した印が扇風機のカバーに準じて設定した象限の何処に位置しているかを判定して、同期撮影したペア間の象限差を基準に算出を行った（写真 2.5.5）。

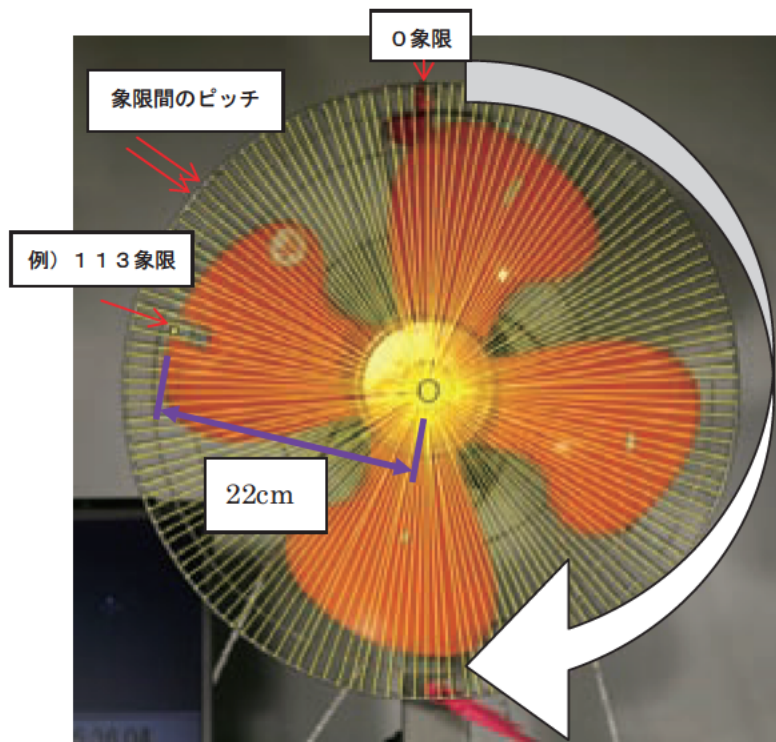


写真 2.5.5 象限の確認イメージ

象限は全部で 143 に区分され、中心から 22 c m の位置を基準にすることから、1 象限あたりの移動時間は、以下となる

$$\frac{0.0096 \text{ m}}{29.6 \text{ m/s} \times \frac{3}{10000}} \quad (\text{秒})$$

(象限間) (扇風機秒速)

この関係を利用して 25 分間の同期撮影画像より同期ズレの集計を行った（表 2.5.3）。

表 2.5.3 撮影結果

撮影時間	23 : 55 : 31 ~ 0 : 23 : 59	
撮影間隔 (同期システムによる設定値)	1.00 秒	
設定値に伴う撮影される枚数	1709 枚	
カメラ	右側カメラ	左側カメラ
全体数 (枚)	1,709	1,709
撮影枚数 (枚)	1,472	1,485
欠落 (枚)	237	224
平均撮影間隔 (秒)	1.049	1.044

(6) 連写に関する検証結果

① 同期ズレ時間

全体の撮影時間中における同期ズレの出現タイミングに傾向はないものの、検証データ全体における、同期ズレ量(秒)の出現傾向を確認した結果、同期ズレ0秒付近に集中する正規分布が確認された(図2.5.6)。

全データの標準偏差は0.003秒となった。

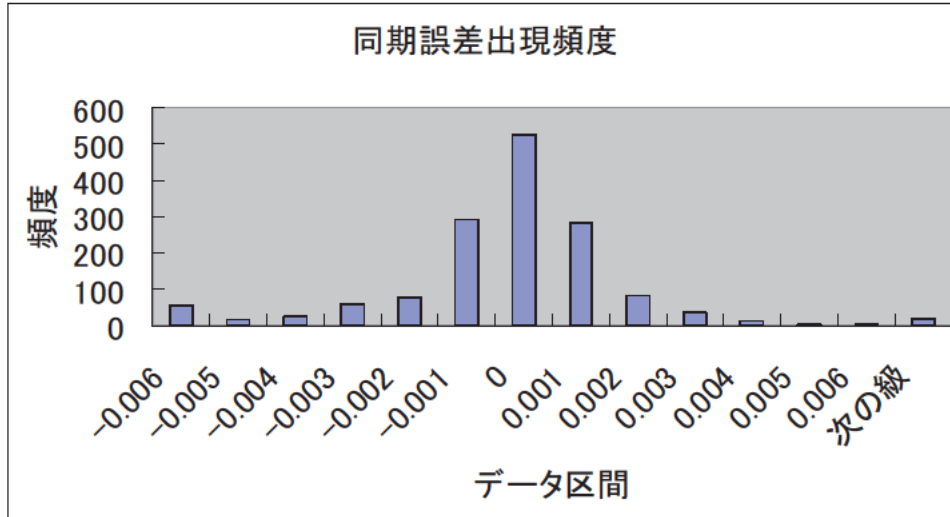


図 2.5.6 同期ズレ時間の頻度

②欠撮(コマ飛び)

今回の実験では、同期ズレの他にコマ飛び(以下「欠撮」という)についても確認した。図2.5.7より、左側のカメラで欠撮が多く発生していることがわかる。右側カメラでは、欠撮は少ないが不規則に発生していることが分かる。今回の検証では、左右のカメラに接続しているデータロギングパソコンのスペックが異なっていたため、影響が出たものと推察する。

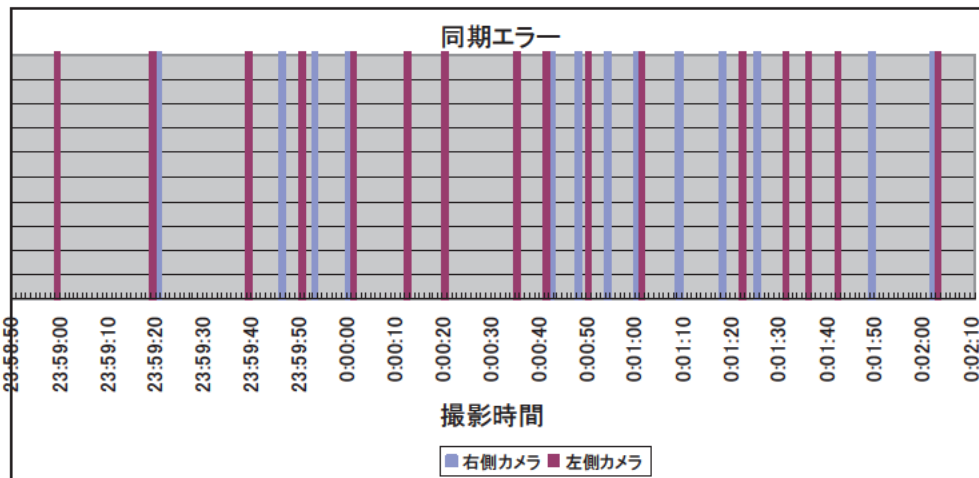


図 2.5.7 欠撮の出現状況

(7) 考察

実験の結果から、欠撮は生じるものの同期ズレは標準偏差 0.003 秒と小さく、出現頻度もきれいな正規分布を呈してしていることから、1 コマ/秒の同期撮影においては実用上問題のないものと判断する。

■ 参考

今回の検証で得られた同期ズレ量（標準偏差）について「撮影距離に応じたピクセル解像度と同期ズレによる物体の移動量との撮影関係」を表 2.5.4 にまとめた。

表 2.5.4 撮影距離と焦点距離に応じた適応表（案）

秒速5m		撮影距離					
		50m	100m	150m	200m	250m	300m
レ ン ズ	28mm	0.015	0.029	0.044	0.059	0.073	0.088
	55mm	0.007	0.014	0.022	0.029	0.037	0.044
	100mm	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.024
5m/s × 3/1000 = 0.015m							
秒速10m		撮影距離					
		50m	100m	150m	200m	250m	300m
レ ン ズ	28mm	0.015	0.029	0.044	0.059	0.073	0.088
	55mm	0.007	0.014	0.022	0.029	0.037	0.044
	100mm	0.004	0.008	0.012	0.016	0.02	0.024
10m/s × 3/1000 = 0.030m							
秒速20m		撮影距離					
		50m	100m	150m	200m	250m	300m
レ ン ズ	28mm	0.015	0.029	0.044	0.059	0.073	0.088
	55mm	0.007	0.014	0.022	0.029	0.037	0.044
	100mm	0.004	0.008	0.012	0.016	0.02	0.024
20m/s × 3/1000 = 0.060m							
* 物体の移動量 = 物体のスピード × 同期誤差量							
* 黒字 : 物体の移動量が同期誤差量より小さい(撮影可能)							
* 赤字 : 物体の移動量が同期誤差量より大きい(撮影不向)							

2.5.2 無線撮影システム (Type③) の検証結果

前項 2.3.2 の検証により、ワイヤレスコントローラーを用いたカメラの遠隔コントロールが可能であり、無線コントロールによる同期撮影システム構築の見通しが得られた。

そこで、連写性能を改良したクラボウ社製のカメラコントロールソフト (CamCtrl ver.2) と Canon 社製のワイヤレスコントローラーとを組合せた Type③ 1 と Type③ 2 のシステム (図 2.5.9) を用いて、PC のシャッターコントロール (図 2.5.8 の左) からデータ取得 (図 2.5.8 の右) までの一連の動作とその性能に関する検証実験 (表 2.5.5) を行った。

【開発目標】

- ・ 連写性能：撮影間隔 1 コマ/秒で撮影
- ・ 同期性能：2 台のカメラを同時に撮影 (同期ズレなく撮影)
- ・ 通信距離：100～200m 遠隔地点からの無線コントロールが可能

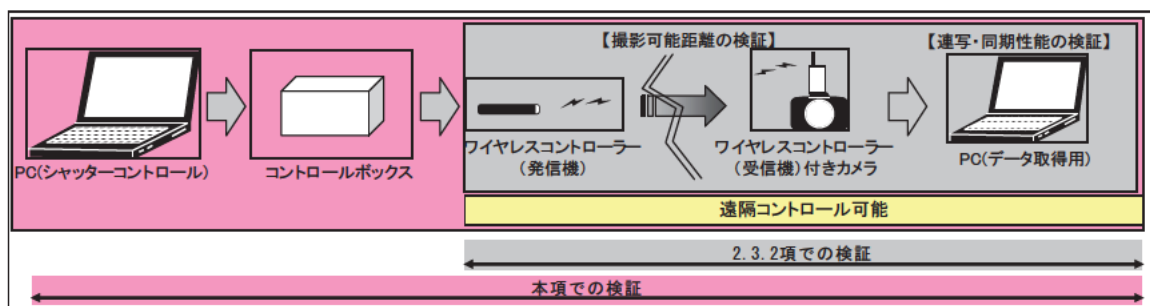


図 2.5.8 無線コントロールシステムの検討内容の概要

表 2.5.5 検証実験の目的

実験パターン			目的
実験名	Type	撮影条件	
実験A	③-1	100m 新CF	100m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験B		200m 新CF	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験C	③-2	100m 新CF	100m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験D		200m 新CF	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験E	③-1	200m 旧CF	C F 転送速度の違いによる影響 (実験BのCFだけ交換)
実験F	③-2	200m 新CF	同一条件下で再度連続撮影実験を行った場合の同期ズレと連写速度 (実験Dと同条件)
実験G	③-1	—	1台のコントローラーで光パルスの混信が生じない範囲 (角度) の限界
実験H	③-2	—	2台のコントローラーで光パルスの混信が生じない範囲 (角度) の限界

【システム構成】

撮影地の条件によってはカメラコントロールPCとカメラの距離が遠くなる場合があります、有線では対応できない場合があることが考えられる。そこで Type③では、Type②のコントロールボックスとカメラ間の有線を無線化することにより、遠隔地からカメラをコントロールすることを狙ったものである。

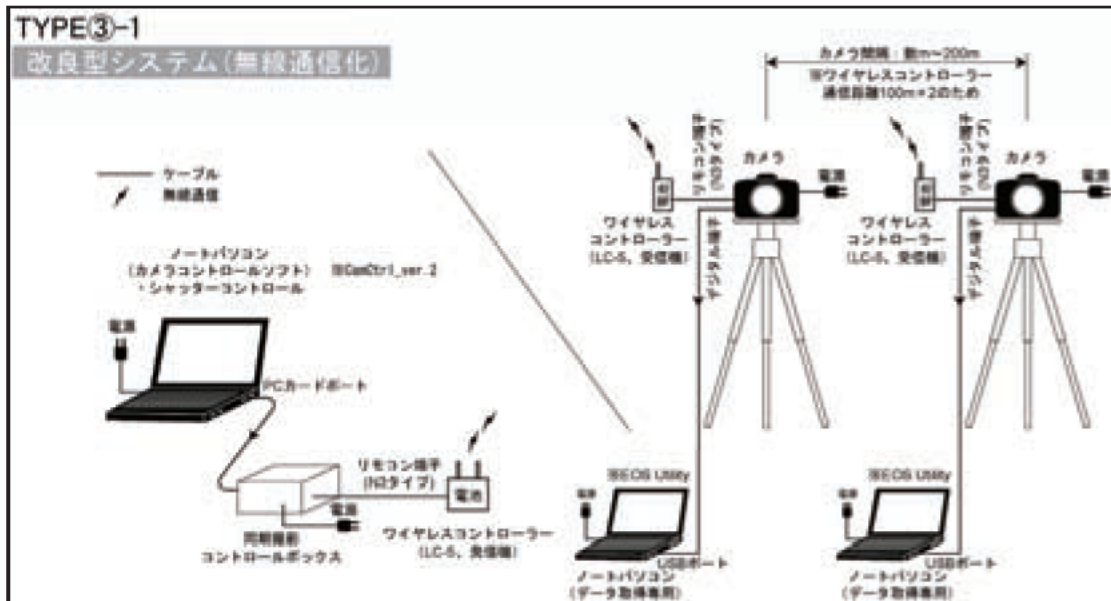
具体的には、受信機側のカメラ2台を1台のコントローラーで操作する Type③ 1と、受信機側のカメラ2台をそれぞれ2台のコントローラーで操作する Type③ 2に分けられる。

検証実験で用いる PC・CF の性能などの一覧を表 2.5.6 に示す。また、無線コントロールシステム Type③ 1 と Type③ 2 の構成を図 2.5.9 に示す。

表 2.5.6. カメラ・CF・PCの基本構成

使用カメラ	カメラL (撮影対象物に向かって左側)	カメラR (撮影対象物に向かって右側)
新CF	製品	SanDisk Extreme
	容量	8GB
	転送速度	45MB/sec
	書込速度	45MB/sec
旧CF	製品	Sandisk Ultra II
	容量	1GB
	転送速度	10MB/sec
	書込速度	9MB/sec
受信機モード	1SR	1SR
撮影間隔 (ms)	1,000	1,000
データ取込み	EU	EU
PCスペック	【CF R2】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 900MHz 248MB RAM USB2.0ポート	【CF R3】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 1.10GHz 248MB RAM USB2.0ポート

【Type③-1】：受信機側のカメラ2台に対して、発信機側のコントローラーは1台で構成



【Type③-2】：受信機側のカメラ2台に対して、発信機側のコントローラーも2台で構成

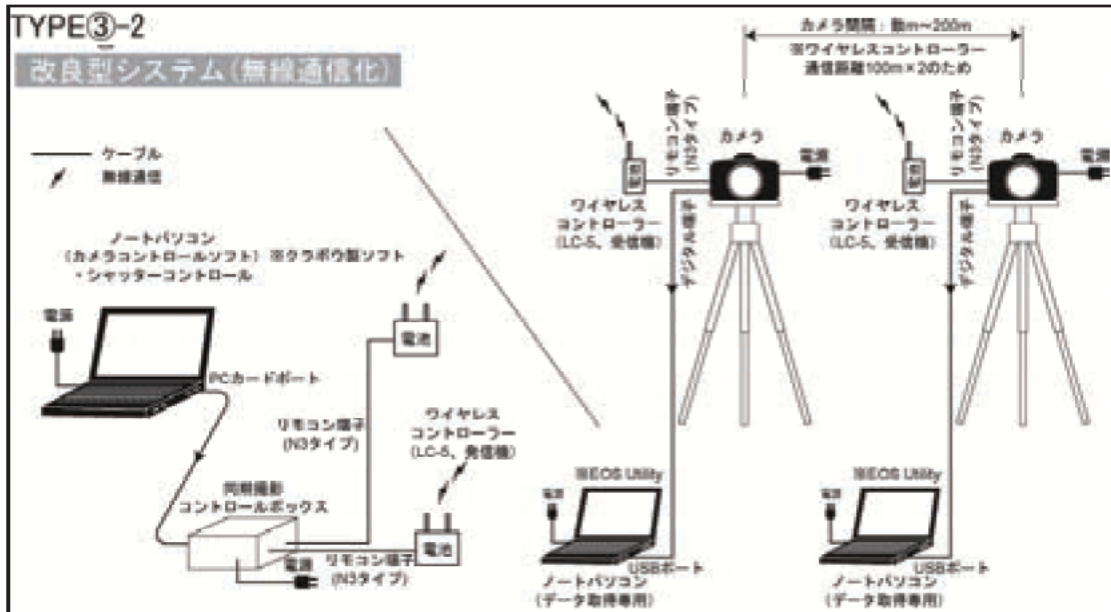


図 2. 5. 9 Type③無線コントロールシステムの構成(再掲)

(1) 連写性能と同期性能の検証

Type③ 1 と Type③ 2 システムを用いて、100m・200m 離れた条件下での撮影実験を行い、連写性能と同期性能を検証した。

表 2.5.7 に実験パターンと目的を整理し、図 2.5.10～図 2.5.11 に実験状況を示す。

表 2.5.7 実験パターンと目的

実験パターン			目的
実験名	Type	撮影条件	
実験A	③-1	100mの遠隔コントロール (障害物がない条件)	100m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験B		200mの遠隔コントロール (障害物がない条件)	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験C*	③-2	100mの遠隔コントロール (障害物がない条件)	100m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験D		200mの遠隔コントロール (障害物がない条件)	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度

*実験 C の撮影結果について

実験 C の結果、片方のカメラが作動しなかった。この原因は、2 台の送信機の配置と 2 台のカメラの配置にある。ワイヤレスコントローラーは光パルスを用いて通信していることから、送信機 2 台のチャンネルを別々に設定した場合でも、送信機を近づけて同一方向に同時送信すると、送信機 2 台の光パルスが混ざり合い、うまく作動しないことがある。このため、本システムの運用に際しては、混信しないような機材配置にする必要がある。

なお、本項で後述する実験結果については、実験 C の結果を除外して整理する。また、通信可能範囲については、後述の(4)項にて検証する。

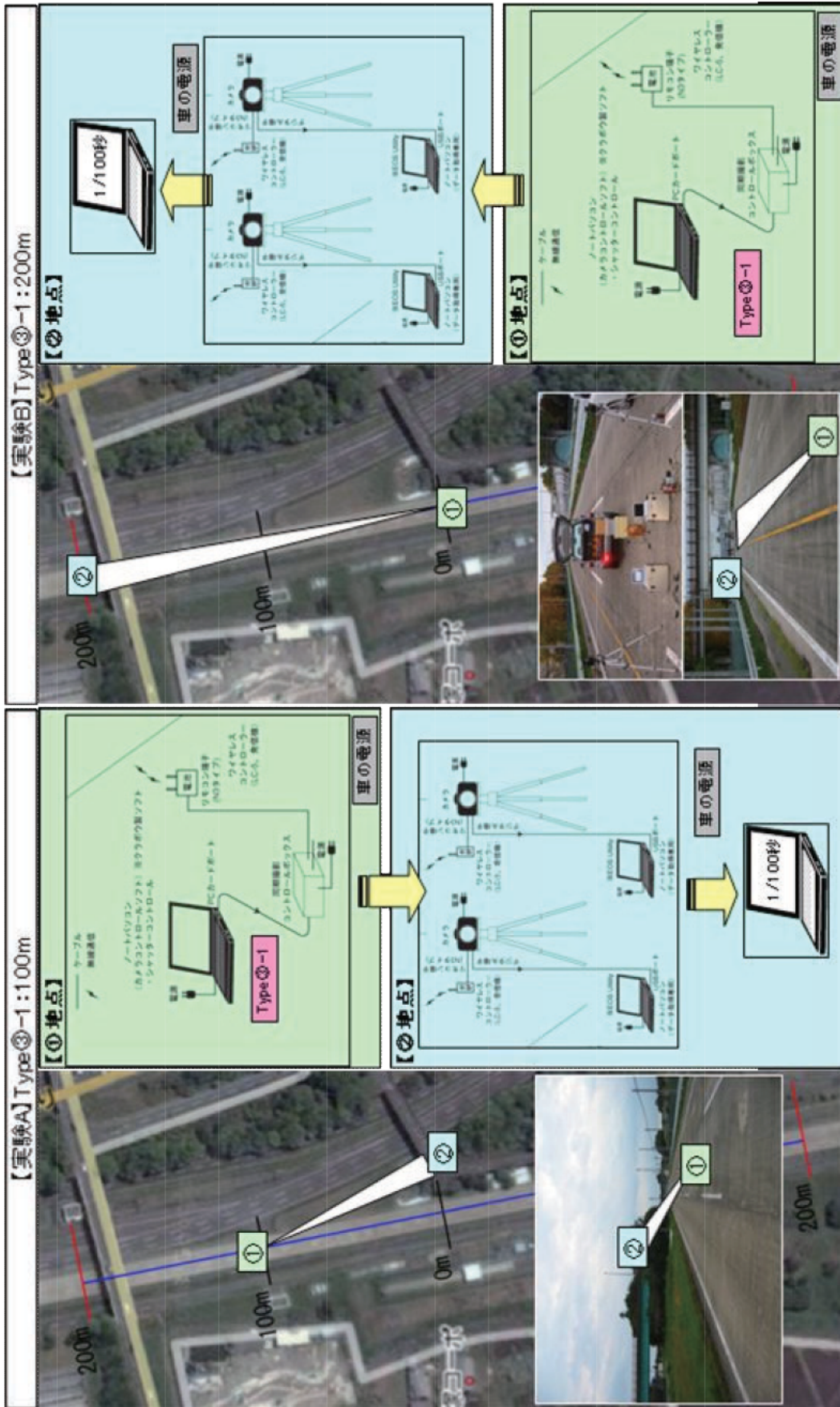


図 2.5.10 連写性能と同期性能の検証実験状況 (実験 A・B)

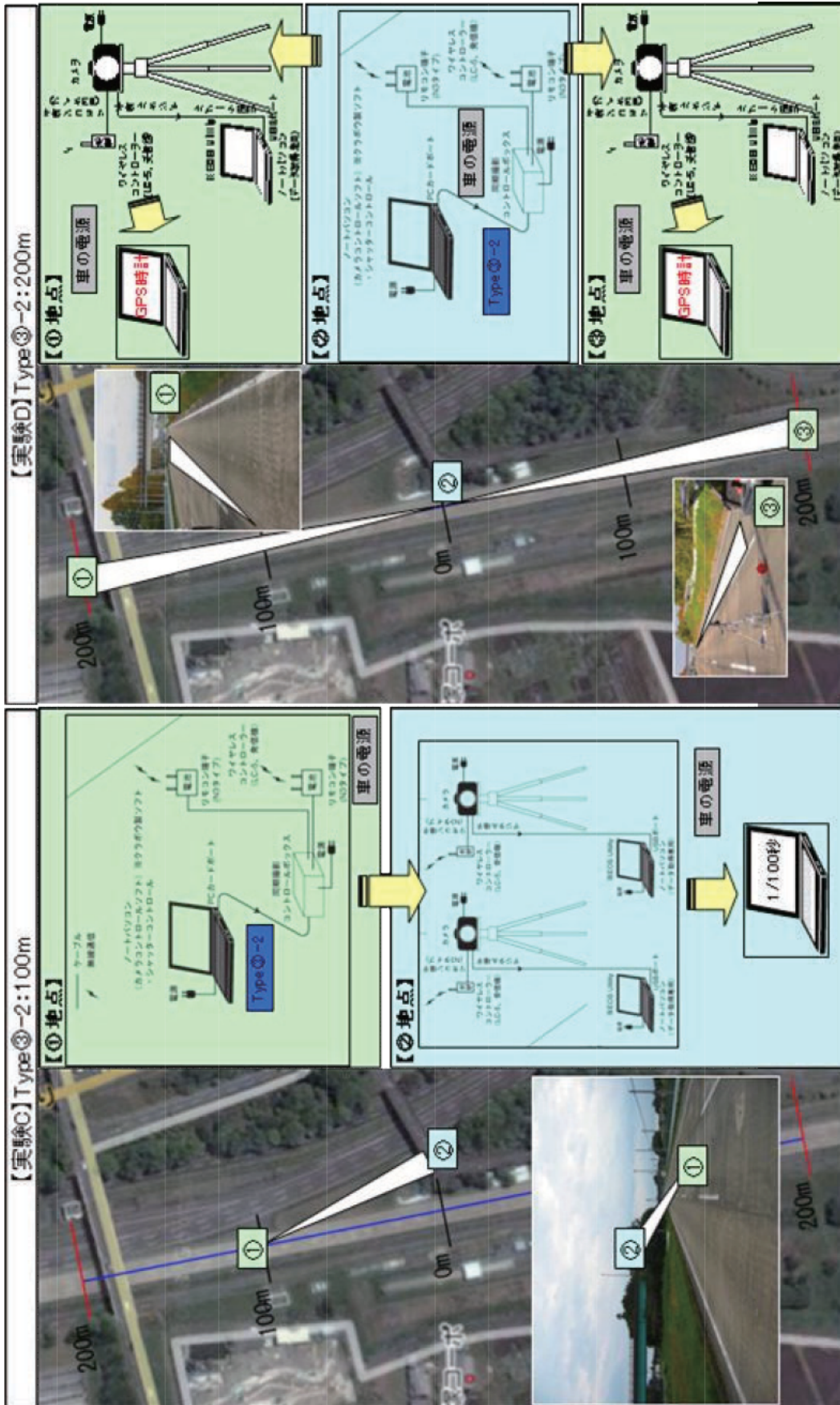


図 2.5.11 連写性能と同期性能の検証実験状況（実験 C・D）

【検証結果】

表 2.5.8 に検証結果の一覧を示すとともに、①連写性能と②同期性能についてそれぞれ整理する。

表 2.5.8 連写性能と同期性能の検証結果一覧

実験パターン		Type.③ 1				Type.③ 2			
		実験A 100m:新CF		実験B 200m:新CF		実験C 100m:新CF		実験D 200m:新CF	
		L	R	L	R	L	R	L	R
カメラ 連写 速度 検証	実撮影枚数	572	572	595	592	--	--	595	587
	欠撮	30	30	41	44	--	--	36	44
	平均連写速度(秒)	1.05	1.05	1.06	1.05	--	--	1.06	1.05
	標準偏差	0.044	0.052	0.089	0.047	--	--	0.122	0.066
	最大値(2秒以上は棄却)	1.29	1.26	1.98	1.2	--	--	1.99	1.31
	最小値	0.82	0.84	0.88	0.9	--	--	0.58	0.84
システム 連写 速度 検証	a.全体数(時間換算)	602		636		--		631	
	b.撮影指示回数	確認漏れ		605		--		600	
	平均連写速度(秒)=a/b	--		1.05		--		1.05	
同期 検証	標準偏差	0.047		0.078		--		0.115	
	相関係数R	0.95		0.86		--		0.83	
	同期ズレの出現傾向	バラツキあり		バラツキ大		--		バラツキ大	

①連写性能検証結果

コントロールシステムでの撮影間隔設定値“1コマ/秒”に対し、実験 A~D(Cは除外)において2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より連写性能を検証した。

図 2.5.12 に連写速度を整理したグラフを示すとともに結果を以下に整理する。

- ・平均連写速度はカメラLが1.05~1.06秒、カメラRは1.05秒であった(表 2.5.8)。
- ・実験 A(③ 1:100m)は 1.05 秒を中心として正規分布している。一方、実験 B(③ 1:200m)と実験 D(③ 2:200m)では連写速度のバラツキ度合いが大きい。
- ・実験 D のカメラLではピークが 1.03 秒付近にあり、1.2 秒を超過する割合も多い特徴が見られた。
- ・実験 B と実験 D におけるシステム連写速度(「全体数(撮影時間換算)」と「撮影指示回数」)を確認したところ、平均連写速度は 1.05 秒であり、コントロール BOX の撮影指示回数が遅延している。
- ・したがって、1.00 秒に設定したコントロール BOX の撮影指示速度における実際の連写速度は、1.05 秒であると考えられる。

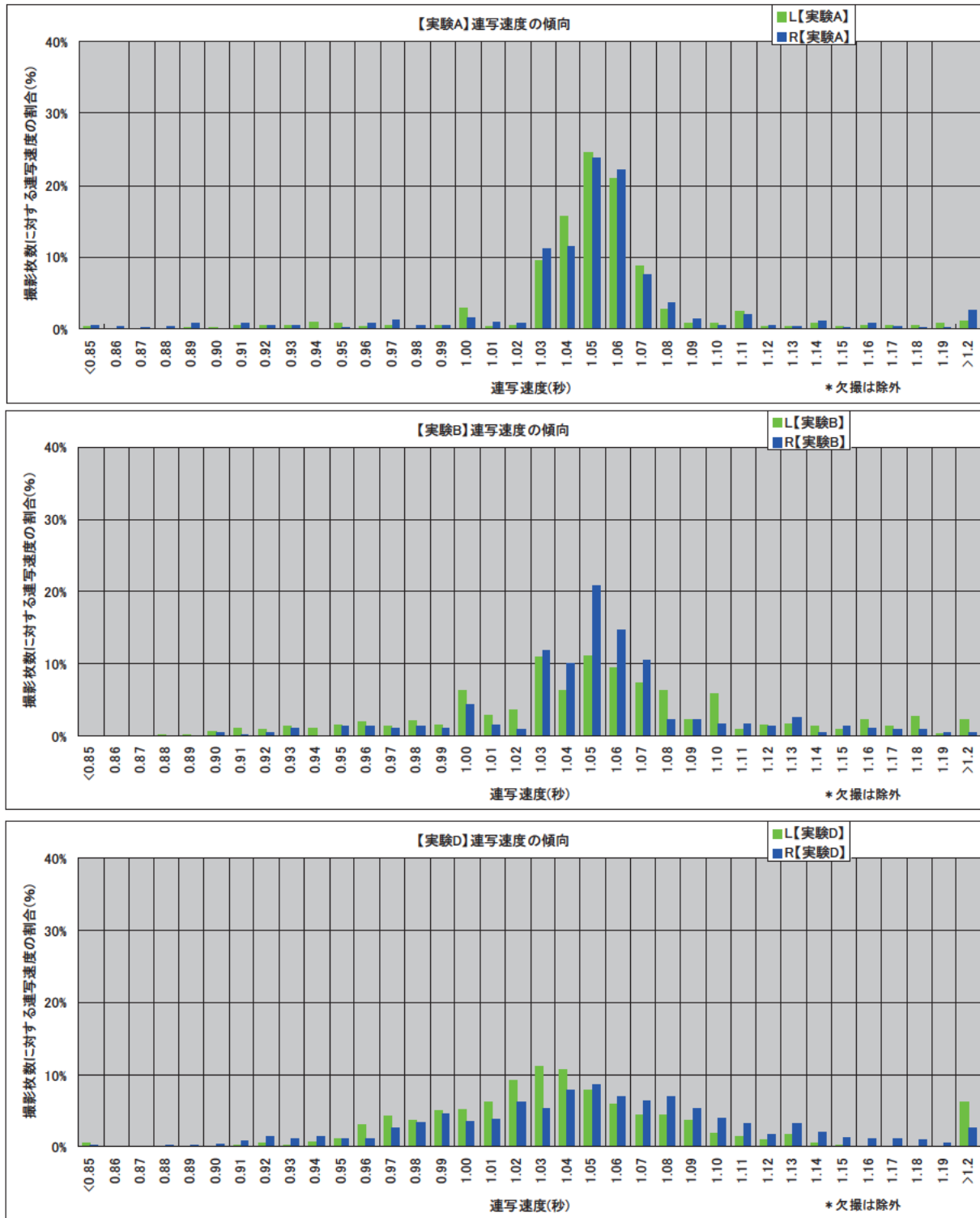


図 2.5.12 平均連写速度の検証

②同期性能の検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より、同期性能を検証した。

図2.5.13と図2.5.14、表2.5.9に実験結果を示すとともに結果を以下に整理する。

- Type②システム(有線)の検証結果と同様に、同期ズレに出現傾向はなくバラつく傾向が見られた。
- 実験A(③ 1:100m)に比べ、実験B(③ 1:200m)と実験D(③ 2:200m)は、同期ズレ量が大きく、かつバラツキ度合いも大きい傾向が見られた。
- 特に実験Bは撮影開始から100秒までの時間帯はほとんど同期していない結果となった。
- 実験Dでは全体的にほとんど同期しておらず、著しくバラツキが大きい傾向が見られた。
- 実験A(③ 1:100m)は65%が同期し、同期ズレ量0.03秒以内に80%が収まっている。
- 実験B(③ 1:200m)と実験D(③ 2:200m)の同期の割合は、それぞれ19%と3%であり極めて悪い。また0.1秒以上の同期ズレの割合が多く、特に実験Dではこの傾向が顕著であった。

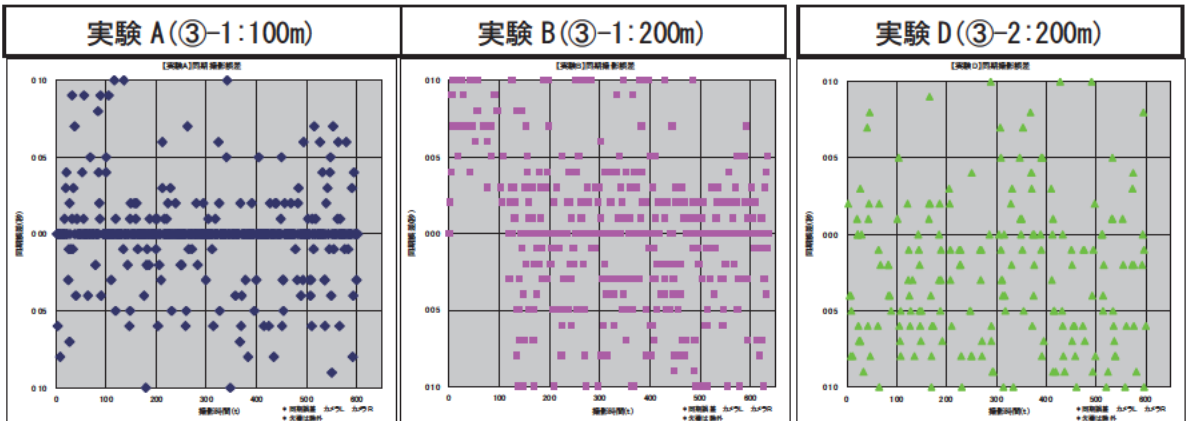
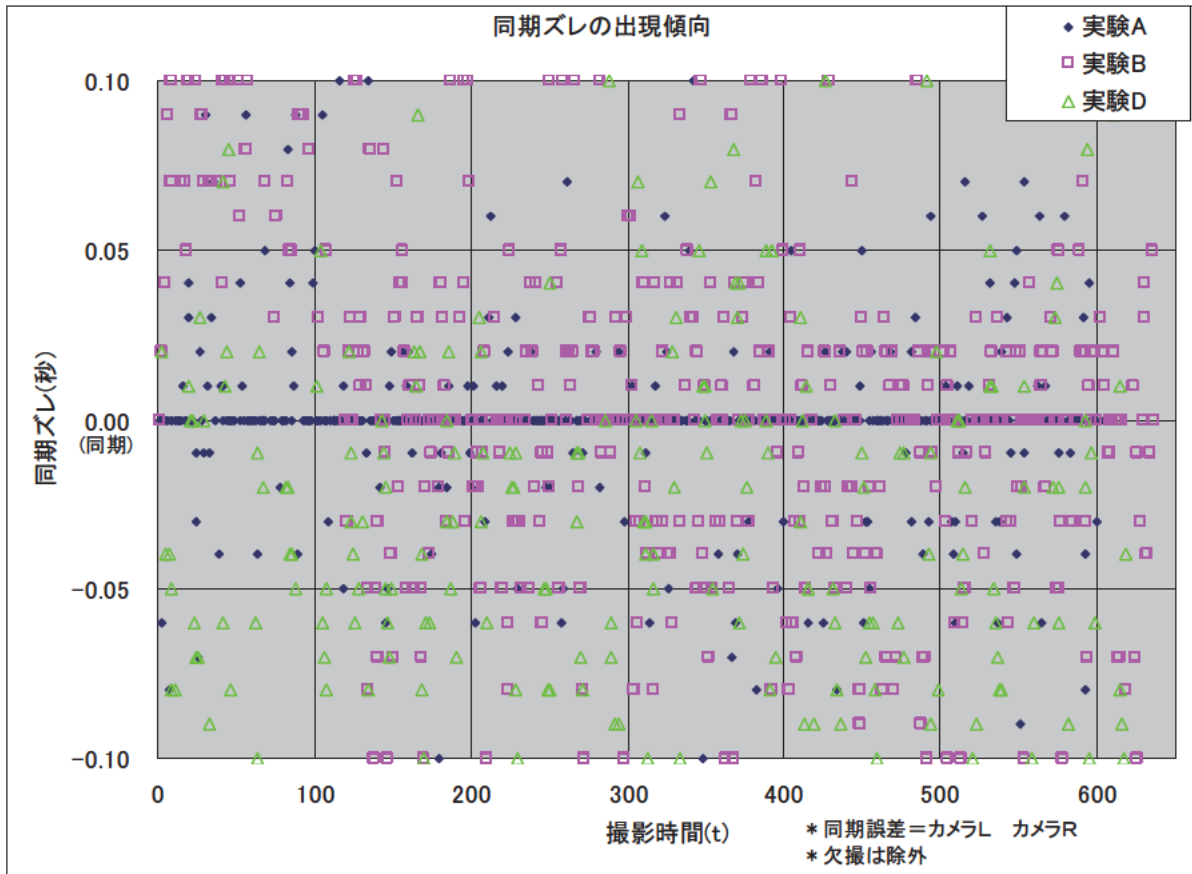


図 2.5.13 同期ズレの出現傾向 (同期ズレと撮影時系列との関係)

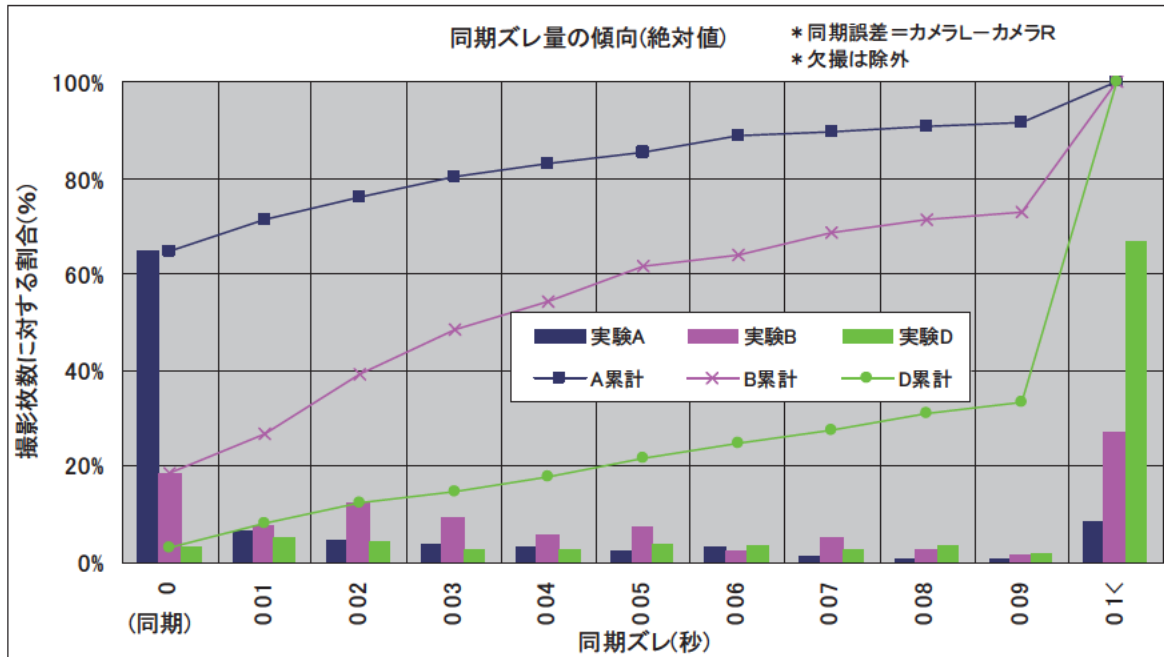
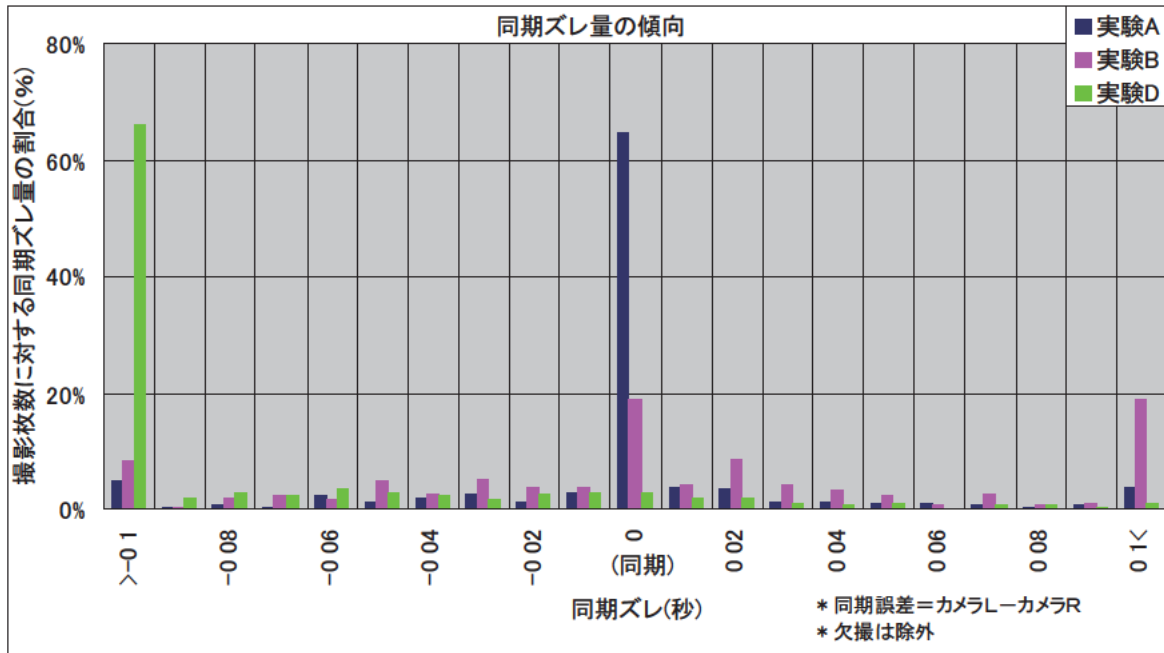


図 2.5.14 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

表 2.5.9 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

同期ズレ量(秒)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1<
実験A (③-1 : 100m)	65% (65%)	7% (71%)	5% (76%)	4% (80%)	3% (83%)	2% (85%)	3% (89%)	1% (90%)	1% (91%)	1% (91%)	9% (100%)
実験B (③-1 : 200m)	19% (19%)	8% (27%)	12% (39%)	9% (49%)	6% (54%)	7% (62%)	2% (64%)	5% (69%)	3% (71%)	1% (73%)	27% (100%)
実験D (③-2 : 200m)	3% (3%)	5% (8%)	4% (12%)	3% (15%)	3% (18%)	4% (22%)	3% (25%)	3% (28%)	4% (31%)	2% (33%)	67% (100%)

(累計)

(2) CF転送速度の違いによる撮影システムへの影響についての検証結果

Type③ 1 コントロールシステムを用いて、200m 離れた条件下で撮影間隔を 1 コマ／秒に設定し、性能の異なる 2 種類の CF(新・旧:詳細は表 2.5.6 参照)を入れ替えて、それぞれ 10 分間の撮影実験(B・E)を行い、CFの転送速度の違いによる連写性能と同期性能を検証した。

表 2.5.10 に実験パターンと目的を整理し、図 2.5.15 に実験状況を示す。

表 2.5.10 実験パターンと目的

実験パターン			目的
実験名	Type	撮影条件	
実験B	③-1	200mの遠隔コントロール 新CFを使用	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験E		200mの遠隔コントロール 旧CFを使用	CF転送速度の違いによる影響(実験BのCFだけ交換)

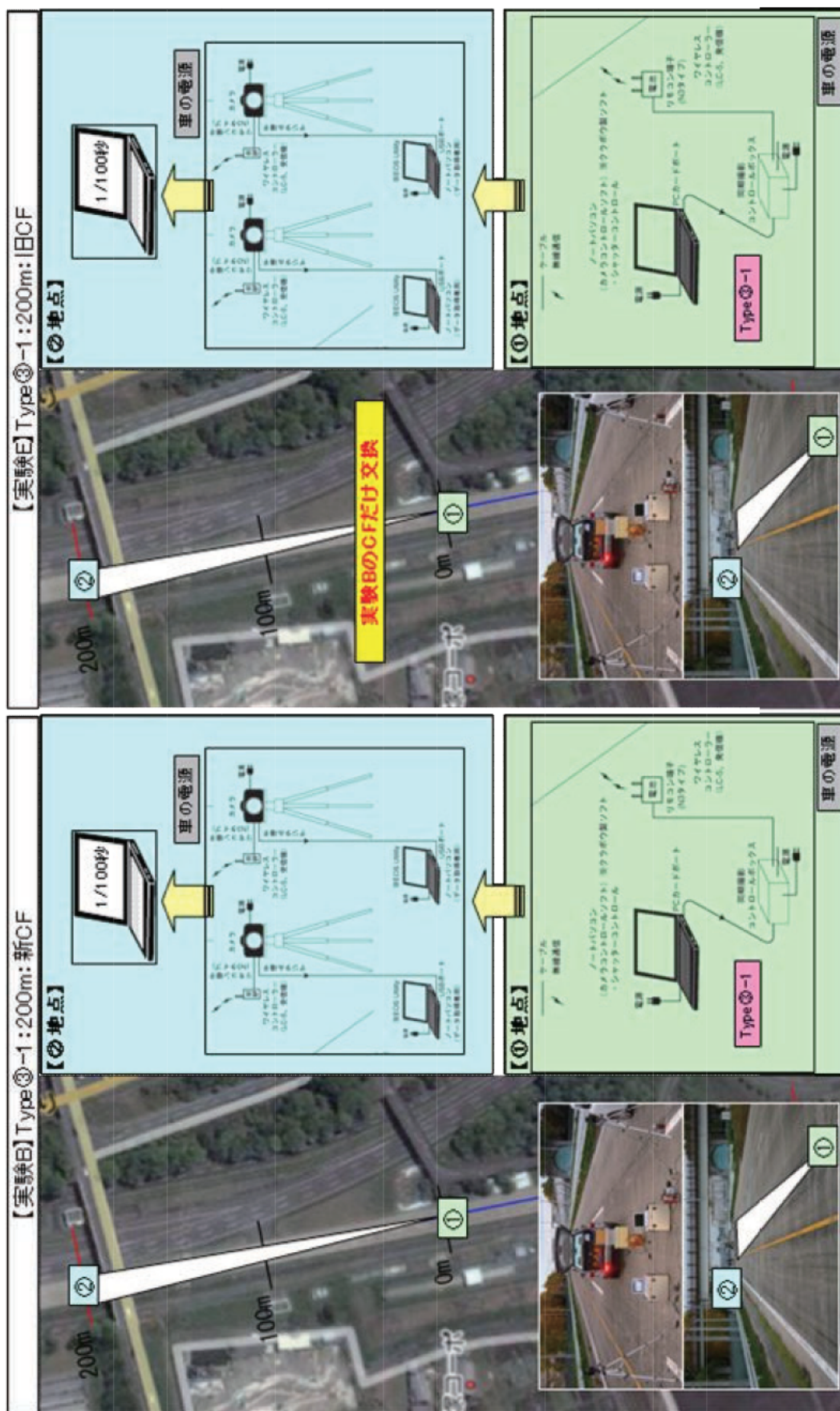


図 2.5.15 CF の転送速度の違いによる影響の検証実験状況

【検証結果】

表 2.5.11 に検証結果の一覧を示すとともに、①連写性能と②同期性能についてそれぞれ整理する。

表 2.5.11. CF の転送速度の違いによる影響の検証結果一覧

実験パターン		Type.③-1			
		実験B 200m:新CF		実験E 200m:旧CF	
		L	R	L	R
カメラ 連写 速度 検証	実撮影枚数	595	592	601	598
	欠撮	41	44	35	38
	平均連写速度(秒)	1.06	1.05	1.05	1.05
	標準偏差	0.089	0.047	0.052	0.047
	最大値(2秒以上は棄却)	1.98	1.2	1.22	1.26
	最小値	0.88	0.9	0.8	0.86
システム 連写 速度 検証	a.全体数(時間換算)	636		636	
	b.撮影指示回数	605		605	
	平均連写速度(秒)=a/b	1.05		1.05	
同期 検証	標準偏差	0.078		0.054	
	相関係数R	0.86		0.91	
	同期ズレの出現傾向	バラツキ大		バラツキ大	

①連写性能検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より、連写性能を検証した。図 2.5.16 に連写速度を整理したグラフを示す。

この結果、CF性能に勝る実験B(新CF)の方が、欠撮が多く平均連写速度も僅かに遅く(カメラL)、バラツキ度合いも大きい結果となった。

したがって、CF転送速度の違いによる連写性能への影響は少ないと評価される。

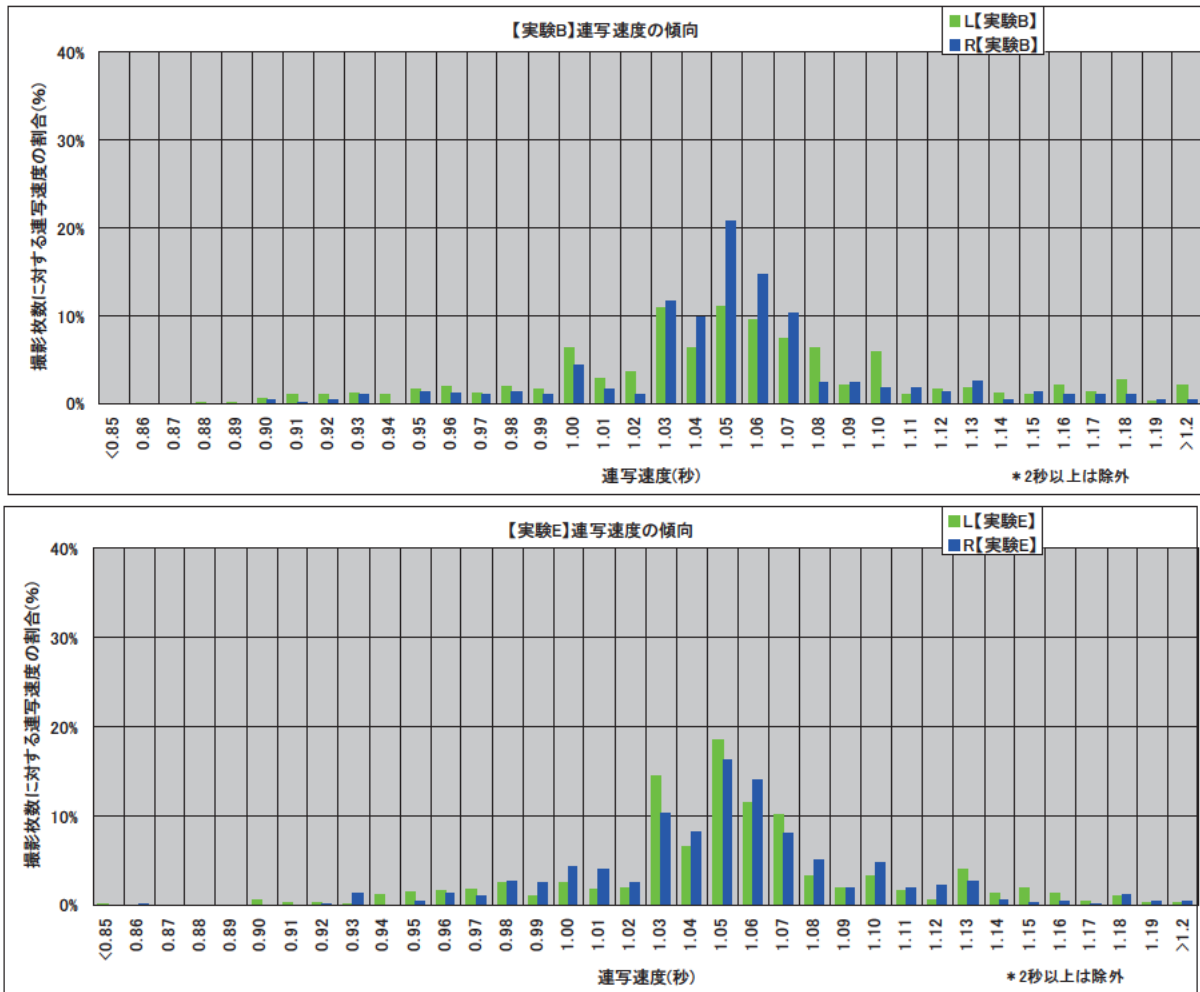


図 2.5.16 平均連写速度の検証

②同期性能の検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より、同期性能を検証した。図2.5.17と図2.5.18に検証結果を整理したグラフ(参考指標値として実験A(③ 1:100m)の結果もプロット)を、また表2.5.12に同期ズレの出現傾向を示すとともに結果を以下に整理する。

- ・CF性能に勝る実験B(新CF)の方が、バラツキ度合いが大きい傾向が見られ、撮影開始から100秒までの時間帯はほとんど同期していない。
- ・同期の割合は実験B(新CF)が19%、実験E(旧CF)が30%であり、実験A(65%)に比べ極めて悪い。
- ・またCF性能に勝る実験B(新CF)の方が実験E(旧CF)に比べ、同期の割合が悪く、かつ0.1秒以上の同期ズレ割合も多い傾向が見られた。
- ・したがって、CF転送速度の違いによる同期性能への影響は少ないと評価される。

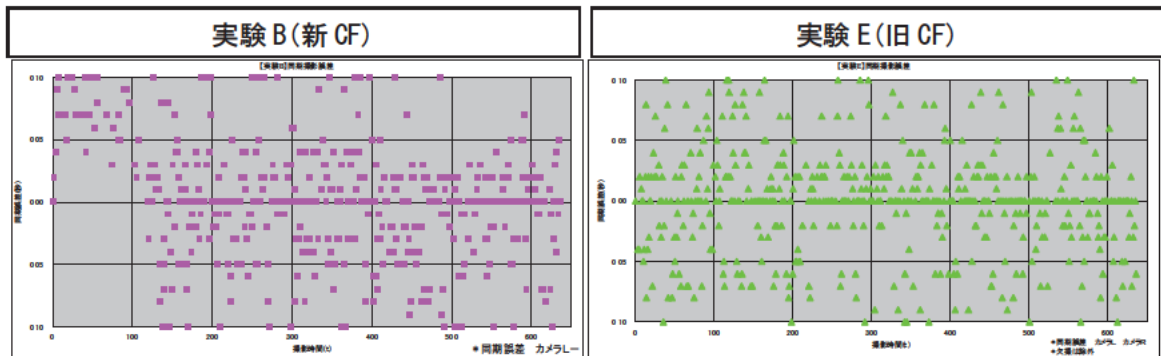
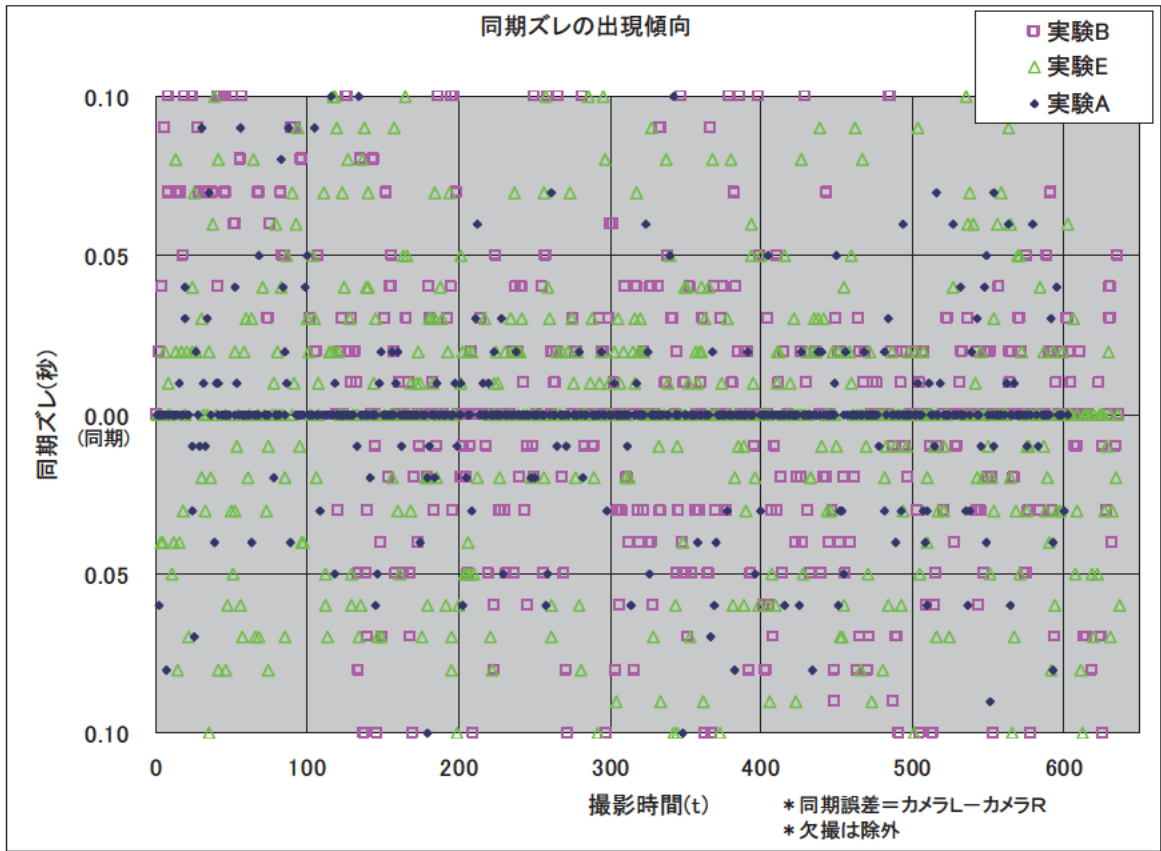


図 2.5.17 同期ズレの出現傾向 (同期ズレと撮影時系列との関係)

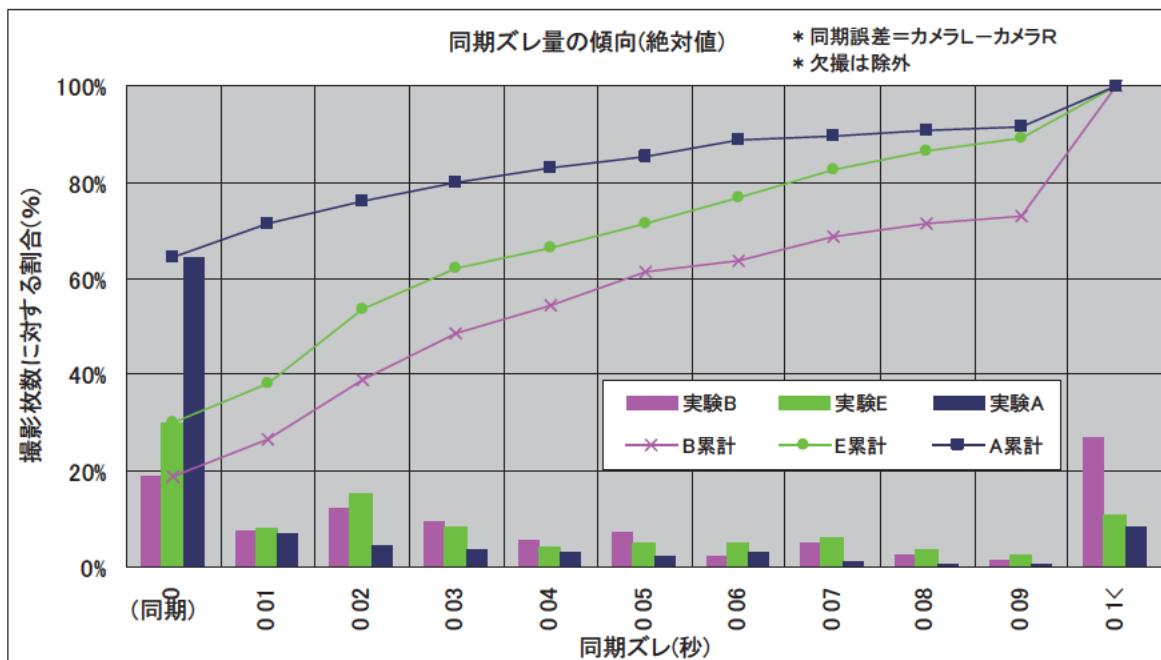
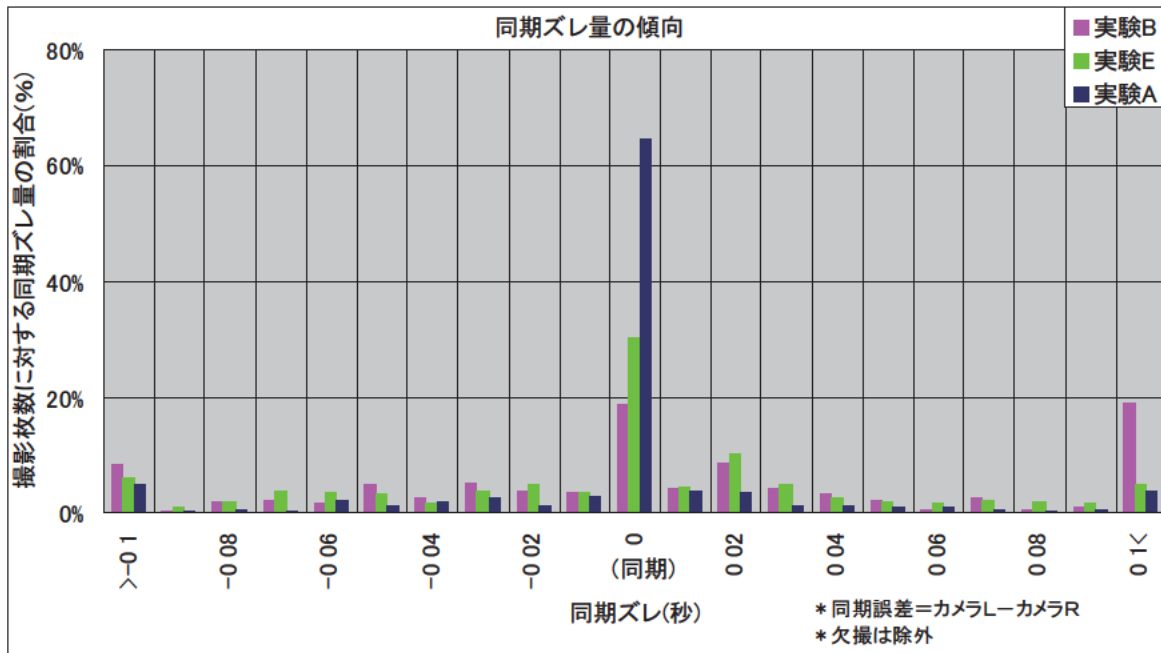


図 2.5.18 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

表 2.5.12 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

同期ズレ量(秒)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1<
実験B	19%	8%	12%	9%	6%	7%	2%	5%	3%	1%	27%
(新CF : ③-1 : 200m)	(19%)	(27%)	(39%)	(49%)	(54%)	(62%)	(64%)	(69%)	(71%)	(73%)	(100%)
実験E	30%	8%	15%	9%	4%	5%	5%	6%	4%	3%	11%
(旧CF : ③-1 : 200m)	(30%)	(38%)	(54%)	(62%)	(66%)	(72%)	(77%)	(83%)	(86%)	(89%)	(100%)
実験A	65%	7%	5%	4%	3%	2%	3%	1%	1%	1%	9%
(新CF : ③-1 : 100m)	(65%)	(71%)	(76%)	(80%)	(83%)	(85%)	(89%)	(90%)	(91%)	(91%)	(100%)

(3) 同一条件下で複数回実験を行った場合の同期性能と連写性能の検証結果

Type③ 2 コントロールシステムを用いて、200m 離れた条件下で撮影間隔を 1 コマ／秒に設定し、10 分間の撮影実験を複数回(ここでは実験 D と実験 F の 2 回)行い、同期性能と連写性能を検証した。

表 2.5.13 に実験パターンと目的を整理し、図 2.5.19 に実験状況を示す。

表 2.5.13 実験パターンと目的

実験パターン			目的
実験名	Type	撮影条件	
実験D	③-2	200mの遠隔コントロール 新CFを使用	200m離れた条件下での同期ズレと連写速度
実験F			同一条件下で再度連続撮影実験を行った場合の同期ズレと連写速度(実験Dと同条件)

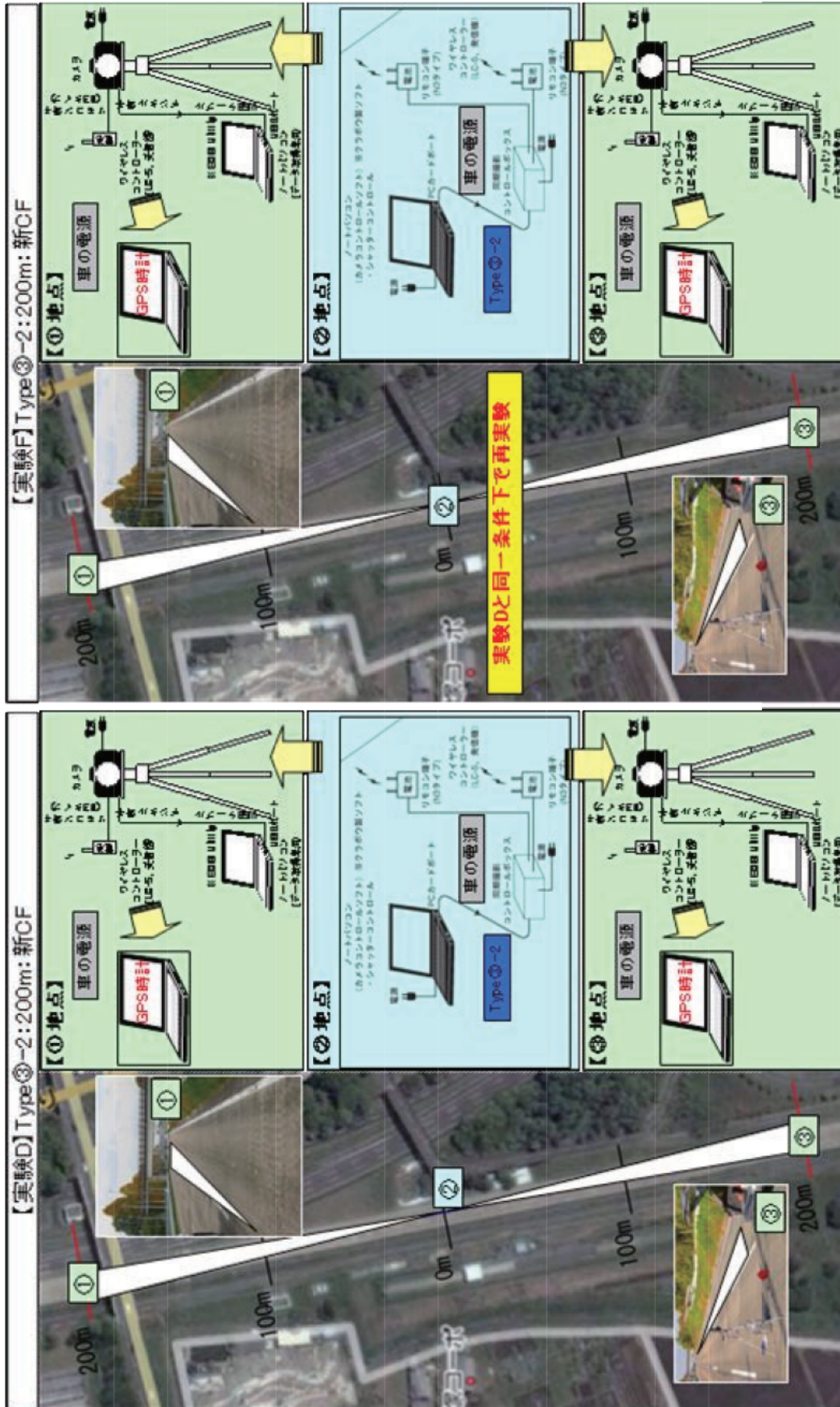


図 2.5.19 CF の転送速度の違いによる影響の検証実験状況

【検証結果】

表 2.5.14 に検証結果の一覧を示すとともに、①連写性能と②同期性能についてそれぞれ整理する。

表 2.5.14 同一条件下で複数回実験を行った場合の検証結果一覧

実験パターン		Type.③ 2			
		実験D 200m:新CF		実験F 200m:新CF	
		L	R	L	R
カメラ 連写 速度 検証	実撮影枚数	595	587	587	564
	欠撮	36	44	44	67
	平均連写速度(秒)	1.06	1.05	1.05	1.05
	標準偏差	0.122	0.066	0.125	0.061
	最大値(2秒以上は棄却)	1.99	1.31	1.99	1.26
	最小値	0.58	0.84	0.52	0.84
システム 連写 速度 検証	a.全体数(時間換算)	631		631	
	b.撮影指示回数	600		600	
	平均連写速度(秒)=a/b	1.05		1.05	
同期 検証	標準偏差	0.115		0.122	
	相関係数R	0.83		0.74	
	同期ズレの出現傾向	バラツキ大		バラツキ大	

①連写性能検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より連写性能を検証した。図 2.5.20 に連写速度を整理したグラフを示すとともに結果を以下に整理する。

- ・この結果、実験 D(1回目)と実験 F(2回目)では僅かながら結果が異なっている。
- ・欠撮は、2回目の方が多いが、平均連写速度は実験 D(1回目のカメラL)が僅かに遅い。
- ・なお、いずれの実験も、カメラLの平均ピークは1.03秒であり、1.2秒以上の割合が多い特徴が見られた。

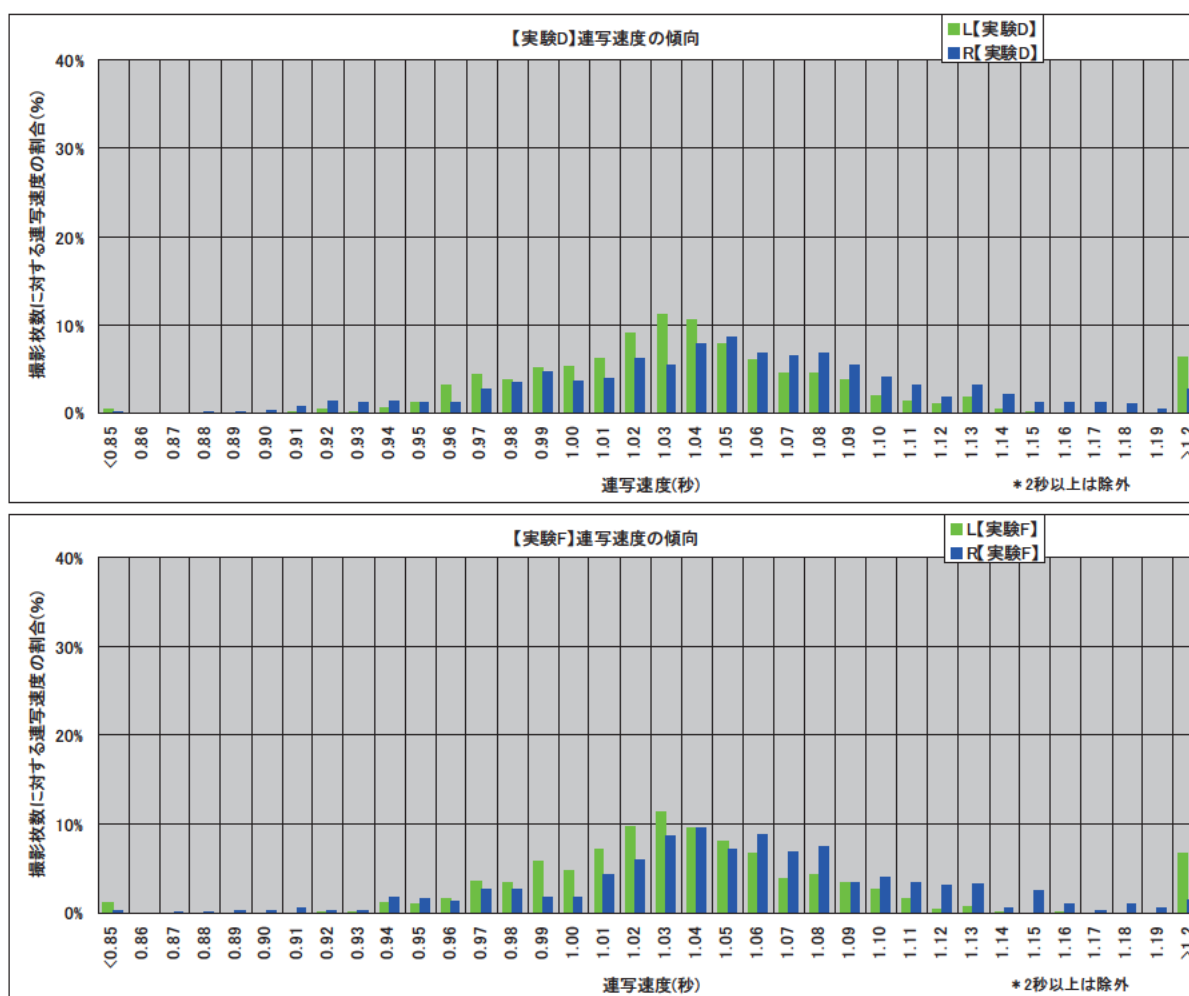


図 2.5.20 平均連写速度の検証

②同期性能の検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示される1/100秒時計の読み値より、同期性能を検証した。図2.5.21と図2.5.22に同期ズレを整理したグラフ(参考指標値として実験A(③1:100m)の結果もプロット)を、また表2.5.15に同期ズレの出現傾向を示すとともに結果を以下に整理する。

- ・同期の割合は実験D(1回目)が3%、実験F(2回目)が2%であり、実験A(65%)に比べ極めて悪い結果であった。
- ・同期ズレに出現傾向はなくバラツキが大きい。
- ・同期ズレ>0.1秒以上の占める割合も顕著であり、カメラLの連写速度が早い傾向が伺える。
- ・実験D(1回目)と実験F(2回目)を比べると、実験F(2回目)の方が、ごく僅かながらバラツキ度合いが大きく、同期の割合が悪い。また、0.1秒以上の同期ズレ割合も多い傾向が見られた。

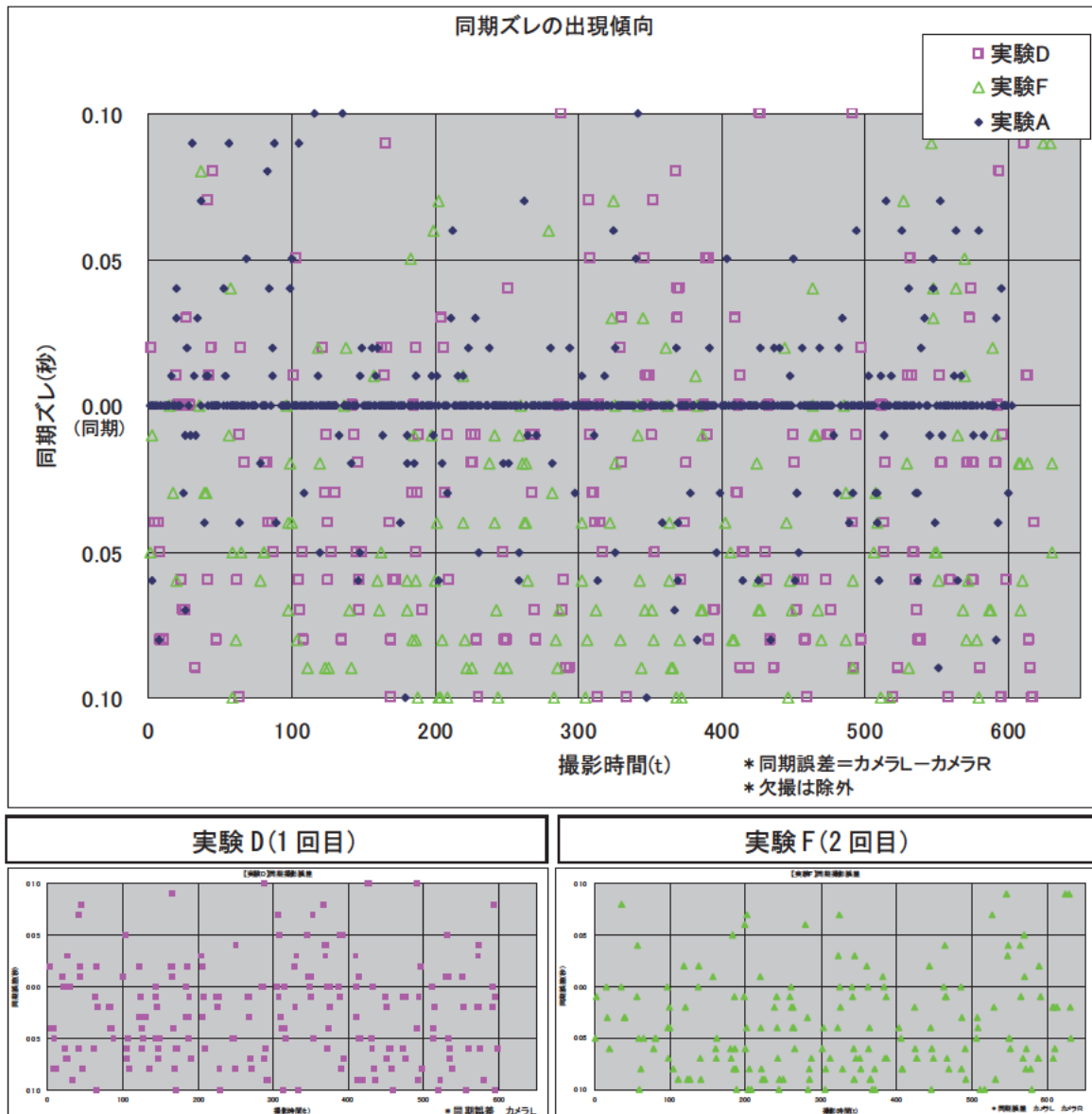


図 2.5.21 同期ズレの出現傾向 (同期ズレと撮影時系列との関係)

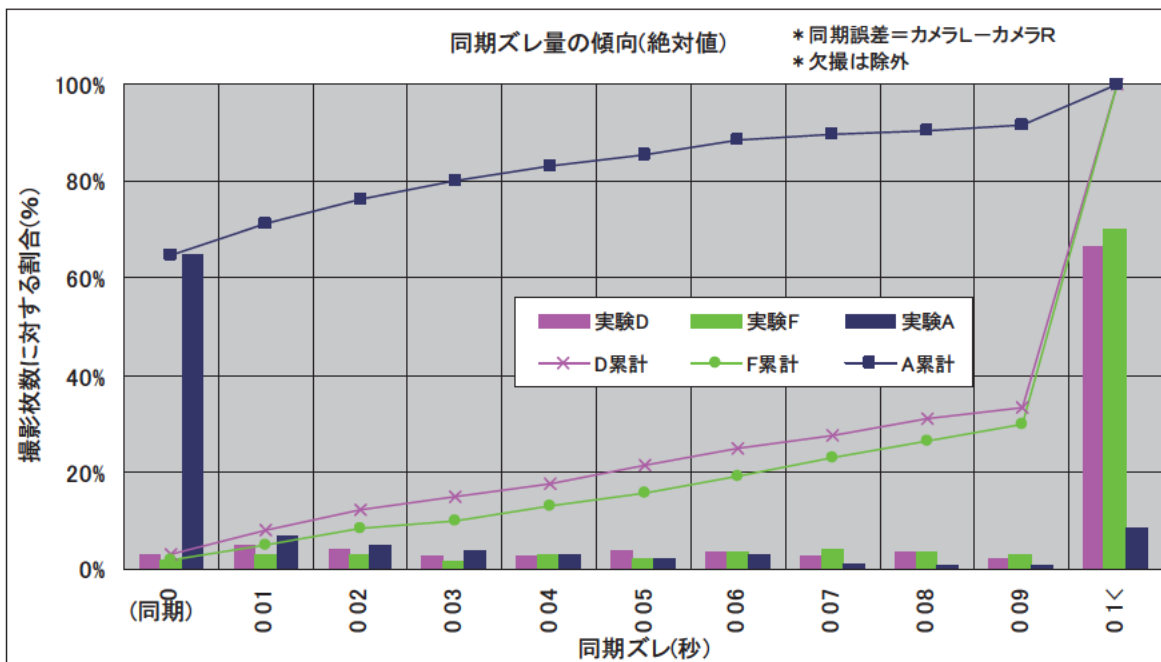
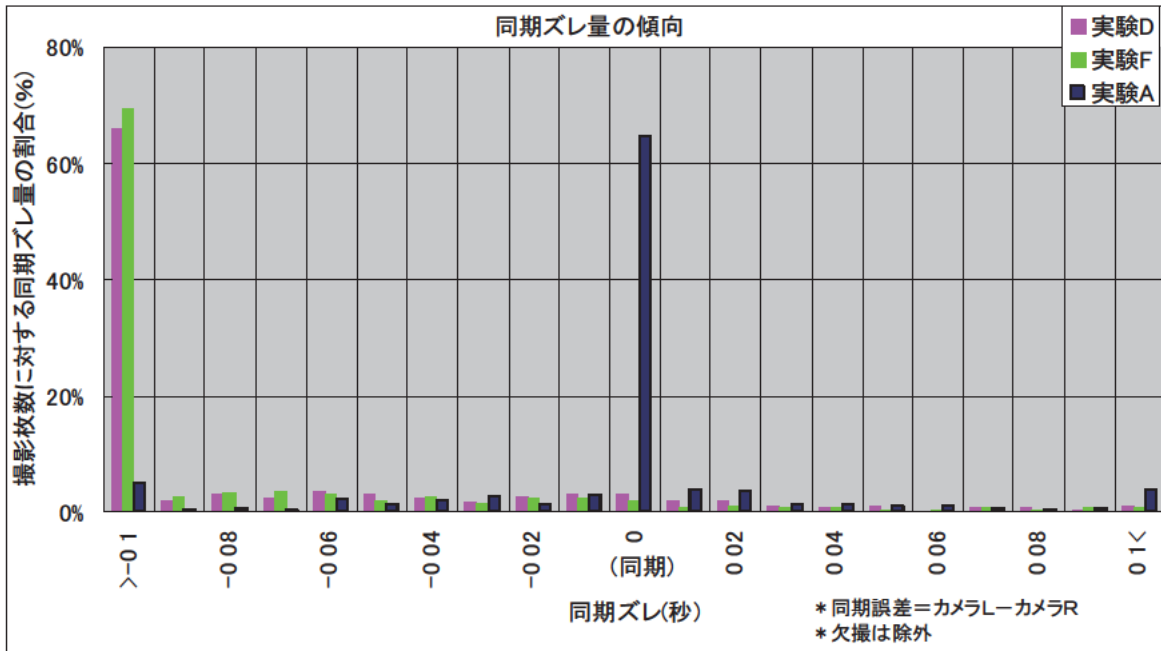


図 2.5.22 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

表 2.5.15 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

同期ズレ量(秒)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1<
実験D (1回目: ③-2: 200m)	3% (3%)	5% (8%)	4% (12%)	3% (15%)	3% (18%)	4% (22%)	3% (25%)	3% (28%)	4% (31%)	2% (33%)	67% (100%)
実験F (2回目: ③-2: 200m)	2% (2%)	3% (5%)	3% (8%)	2% (10%)	3% (13%)	2% (16%)	3% (19%)	4% (23%)	3% (26%)	3% (30%)	70% (100%)
実験A (③-1: 100m)	65% (65%)	7% (71%)	5% (76%)	4% (80%)	3% (83%)	2% (85%)	3% (89%)	1% (90%)	1% (91%)	1% (91%)	9% (100%)

(4) Type③ 1 および Type③ 2 の通信可能範囲の検証結果

(1) 項で述べたように、Type③ 2 ではワイヤレスコントローラーの光パルスが混ざり合い、うまく作動しないことがある。したがって、本システムの運用に際しては、混信しないような機材配置にする必要があることから、Type③ 1 および Type③ 2 での通信可能範囲を検証した。

表 2.5.16 に実験パターンと目的を整理し、図 2.5.23 に実験状況を示す。

表 2.5.16. 実験パターンと目的

実験パターン		撮影条件	目的
実験名	Type		
実験G	③-1	コントローラー(発信機)とカメラ(受信機)の角度を変化	1台のコントローラーで光パルスの混信が生じない範囲(角度)の限界
実験H	③-2		2台のコントローラーで光パルスの混信が生じない範囲(角度)の限界

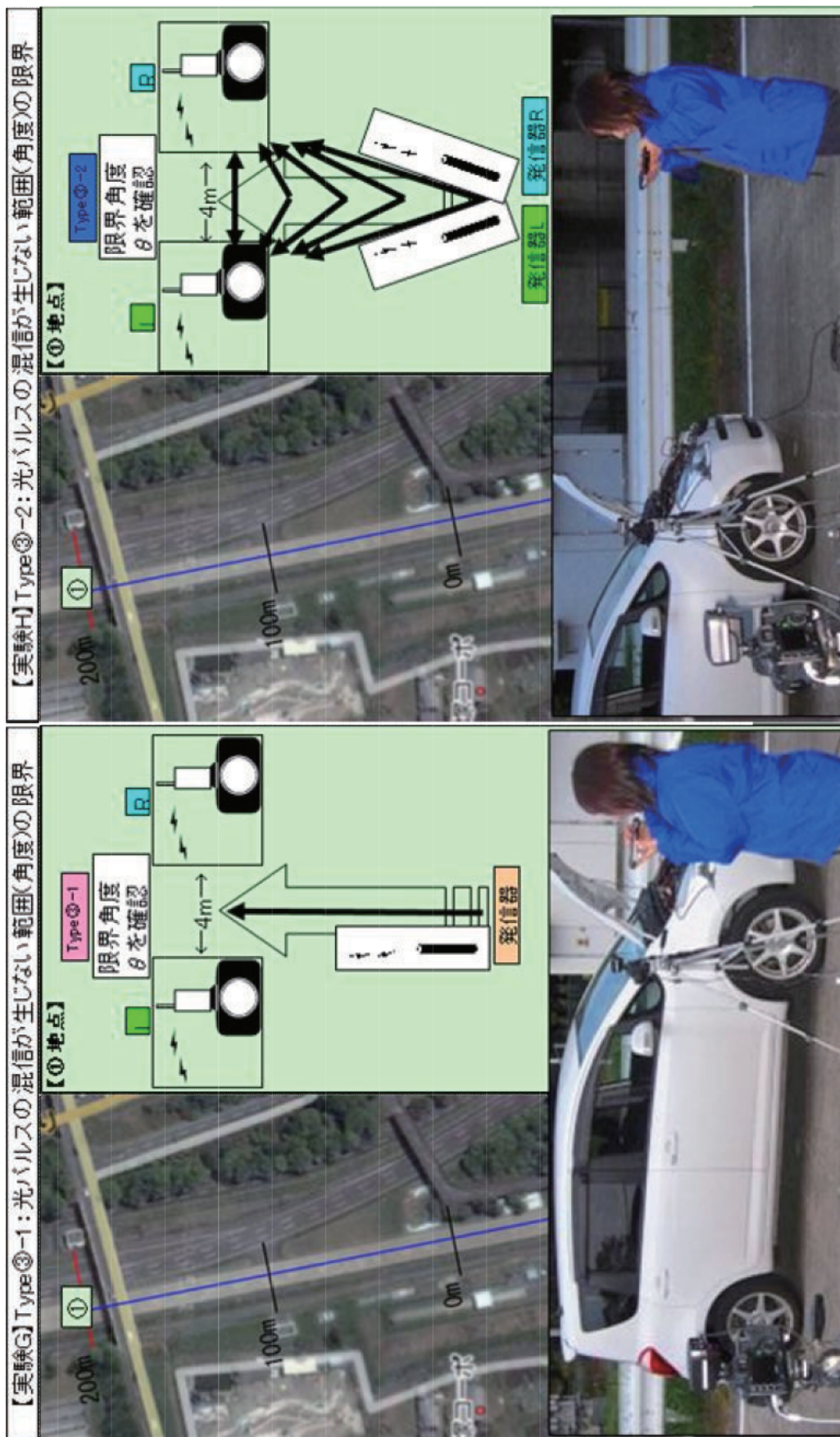


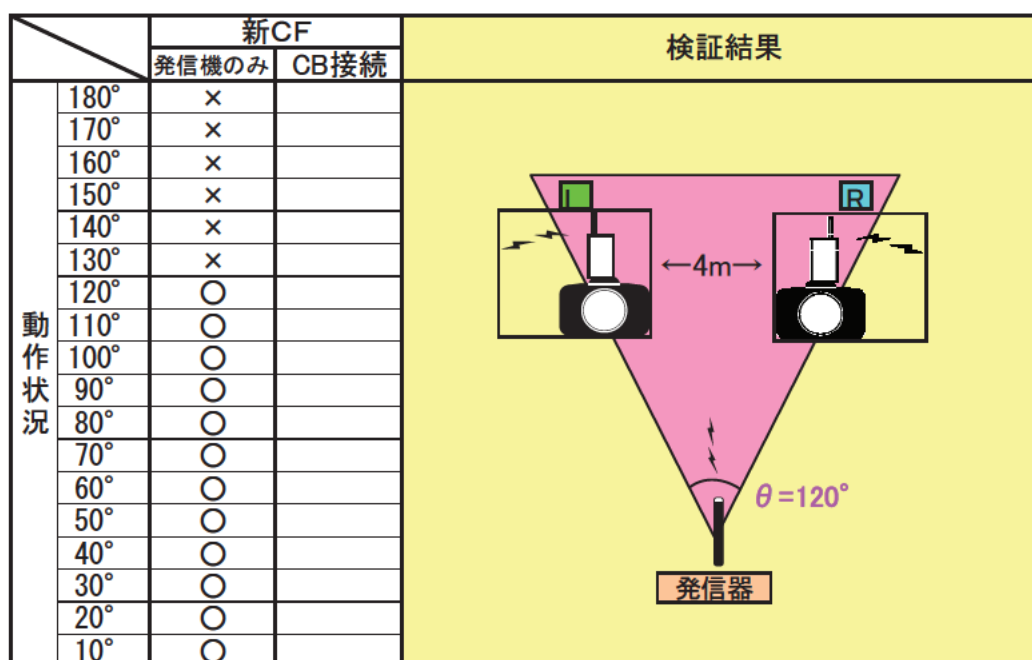
図 2.5.23 通信可能範囲の検証実験状況 (左 : Type 3-1 (1 台のコントローラー) 右 : Type 3-2 (2 台のコントローラー))

【検証結果】

Type③ 1 と Type③ 2 における光パルス通信の混信が生じない範囲(角度)の限界についてそれぞれ検証した。

1) Type③ 1 通信可能範囲の検証結果

図 2.5.24 に検証結果を示す。この結果、120° を越える角度では通信不能となった。したがって、1 台の発信器でカバーできる通信可能範囲(角度)は 120° 以下と評価される。



※CB：コントロールボックス

※カメラの受信機とほぼ同じ高さのH=135cmから発信機で操作（下図参照）

受信機は、カメラの基線に対して垂直に、かつ受信機を平行にして通信を行った。

受信機より低い位置から上記の状態で行ったが、通信できなかった。

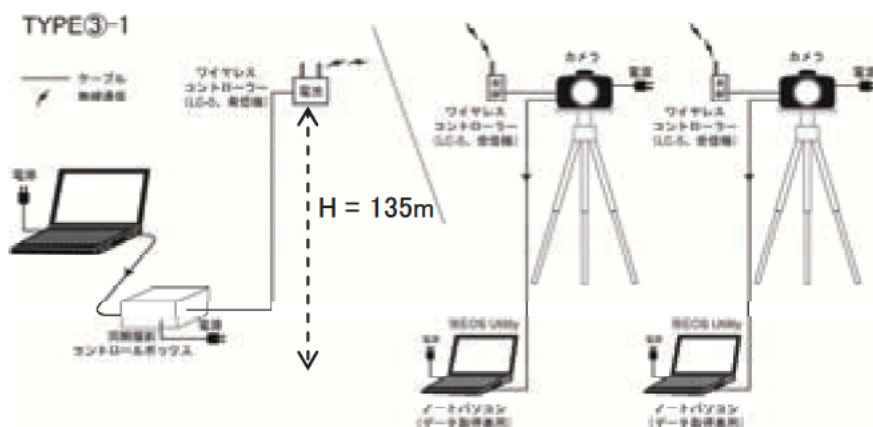
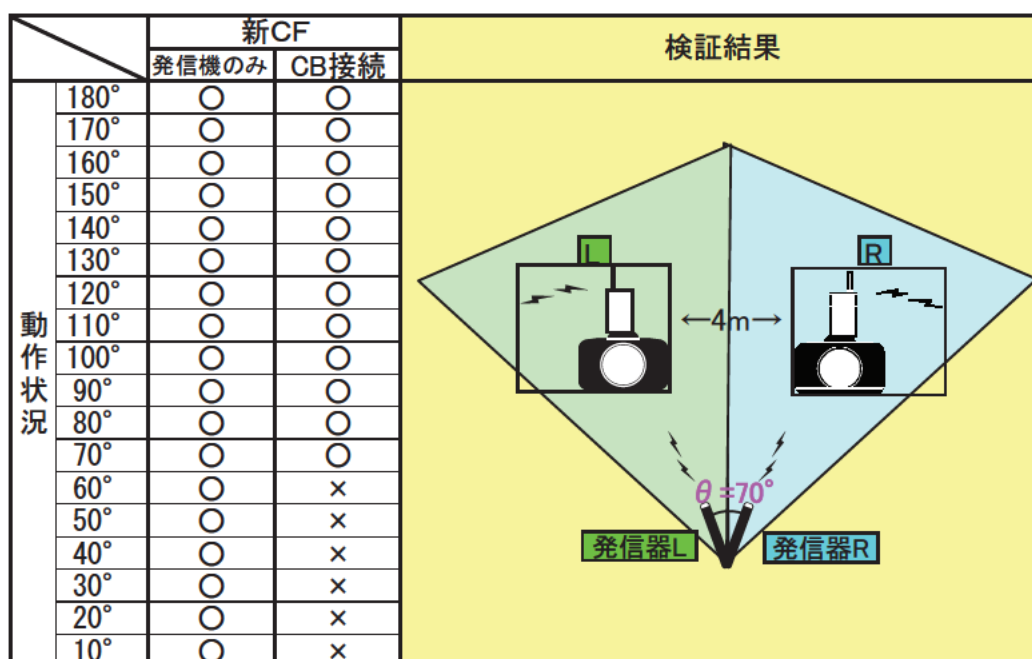


図 2.5.24 Type③-1 (1 台のコントローラー) の通信可能範囲

2) Type③ 2 通信可能範囲の検証結果

図 2.5.25 に検証結果を示す。この結果、ワイヤレスコントローラー(発信機側)のボタンを直接手押しした場合には、いずれも支障なく作動したものの、コントロールボックスを用いた場合には、70° 未満の角度でどちらか片方のカメラが作動しなかった。

したがって、2 台の発信器の光パルスが干渉しない通信範囲(角度)は 70° 以上と評価される。



※CB：コントロールボックス

※カメラの受信機とほぼ同じ高さのH=135cmから発信機で操作（下図参照）
 受信機は、カメラの基線に対して垂直に、かつ受信機を平行にして通信を行った。
 受信機より低い位置から上記の状態で行ったが、通信できなかった。

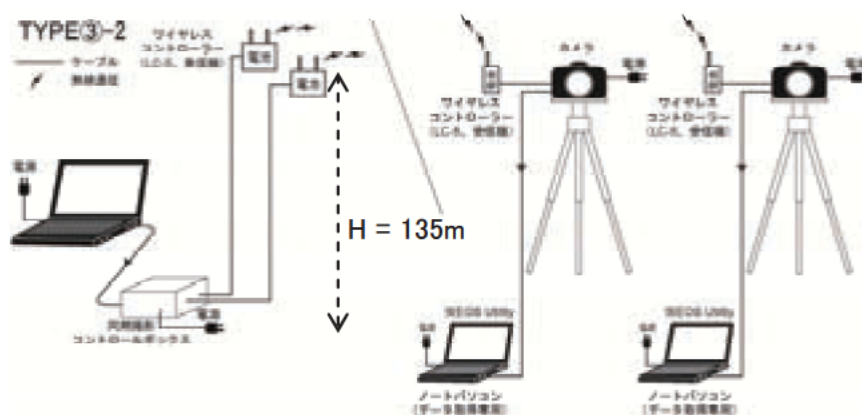


図 2.5.25 Type③-2 (2 台のコントローラー)の通信可能範囲

(5) 検証結果の総括

【平均連写速度と同期ズレ】 [実験 A~D]

- ・ 1.00 秒に設定したコントロール BOX の撮影指示速度に対し、実際の連写速度は 1.05 秒であると考えられる。
- ・ Type③ 1 では、実験 A(100m)に比べ実験 B(200m)の方が欠撮が多く、同期の割合も悪い。したがって、通信距離が離れるほど撮影システムに悪影響を及ぼすと考えられる。
- ・ 無線システムでは、Type③ 1 の 100m(実験 A)が比較的安定的に撮影でき、同期ズレも少ない。したがって、無線システムを用いる際は、Type③ 1 の 100m が推奨される。
- ・ なお、有線システム(Type②)と無線システムを比べると、有線の方が安定的に撮影でき、また同期ズレも少ない。したがって、有線システムを推奨する。

【CF 転送速度の違いによる影響】 [実験 B(新 CF)・実験 E(旧 CF)]

- ・ CF 性能に勝る実験 B(新 CF)の方が、欠撮が多く、バラツキ度合いも大きい結果となった。
- ・ CF 性能による大きな違いは見られないことから、同期性能への影響は少ないと評価される。

【同一条件下で複数回実験を行った場合の影響】 [実験 D(1回目)・実験 F(2回目)]

- ・ 1回目(実験 D)と2回目(実験 F)では、僅かながら結果が異なっていた。2回目の方が欠撮が多く、またごく僅かではあるがバラツキ度合いも大きい傾向が見られた。この原因については定かではないが、撮影データの蓄積により、PC 処理速度が低下したことなどが考えられる。

【通信可能範囲の検証】 [実験 G(③ 1)・実験 H(③ 2)]

- ・ Type③ 1 の 1 台のコントローラーでカバーできる通信可能範囲(角度)は 120° 以下である。
- ・ Type③ 2 の 2 台のコントローラーの光パルスが干渉しない通信可能範囲(角度)は 70° 以上である。

2.5.3 有線・無線併用撮影システム(Type④)の検証結果

有線(Type②)・無線(Type③)システムを併用した Type④システム(図 2.5.26)を用いて、連写性能と同期性能を検証した。

【開発目標】

- ・ 連写性能：撮影間隔 1 コマ/秒で撮影
- ・ 同期性能：2 台のカメラを同時に撮影(同期ズレなく撮影)

【システム構成】

撮影地の条件によってはカメラコントロールボックスとカメラの距離が遠く、かつ見通しが悪い場合が考えられる。Type③までは、有線と無線とを分けたシステムであるが、Type④はこれらを併用化したものである。

具体的には、片方のカメラを有線でコントロールし、もう片方のカメラは無線でコントロールすることを狙ったものである。

検証実験で用いる PC・CF の性能などの一覧を表 2.5.17 に示す。また、Type④の構成を図 2.5.26 に示す。

表 2.5.17 カメラ・CF・PCの基本構成

使用カメラ		カメラL (撮影対象物に向かって左側)	カメラR (撮影対象物に向かって右側)
新CF	製品	SanDisk Extreme	SanDisk Extreme
	容量	8GB	8GB
	転送速度	45MB/sec	45MB/sec
	書込速度	45MB/sec	45MB/sec
旧CF	製品	Sandisk Ultra II	CANON FC 512MSH
	容量	1GB	512MB
	転送速度	10MB/sec	7MB/sec程度
	書込速度	9MB/sec	* キヤノンに確認したところ廃盤で詳細不明とのこと
受信機モード	1SR	1SR	
撮影間隔 (ms)	1,000	1,000	
データ取込み	EU	EU	
PCスペック	【CF R2】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 900MHz 248MB RAM USB2.0ポート		【CF R3】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 1.10GHz 248MB RAM USB2.0ポート

Type④

改良型システム (有線・無線コントロール)

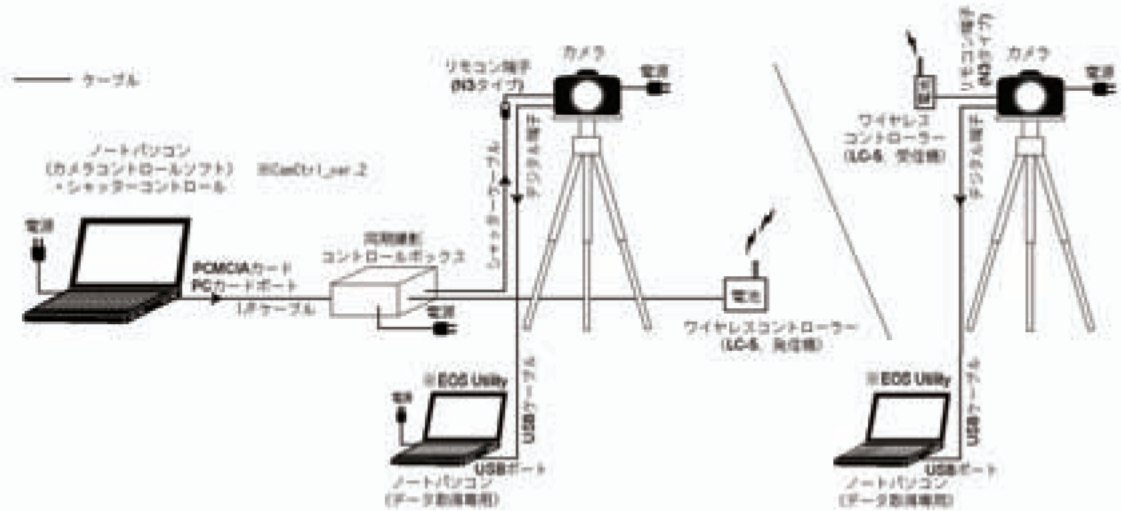


図 2.5.26 Type④ 改良型システム (有線・無線併用コントロール化) (再掲)

(1) 連写性能と同期性能の検証

図 2.5.27 のような撮影条件を想定し、カメラ R (有線) は 5m 程度、カメラ L (無線) は中継コントローラーを介して発信機→受信機への直接通信を遮断したうえで 200m 離れた撮影環境下で、撮影間隔を 1 コマ/秒に設定し 10 分間の撮影実験 (実験 D) を行い、動作状況ならびに連写性能と同期性能を検証した。

図 2.5.28 に実験状況を示す。

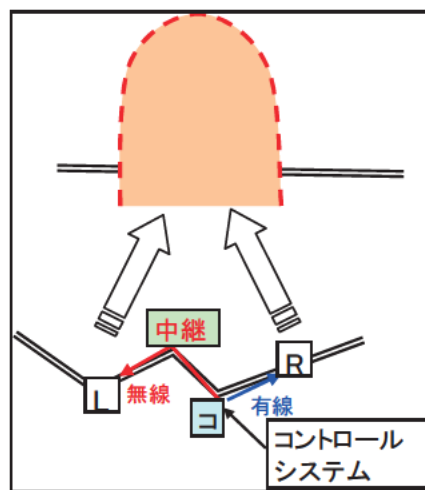


図 2.5.27 現場状況の例

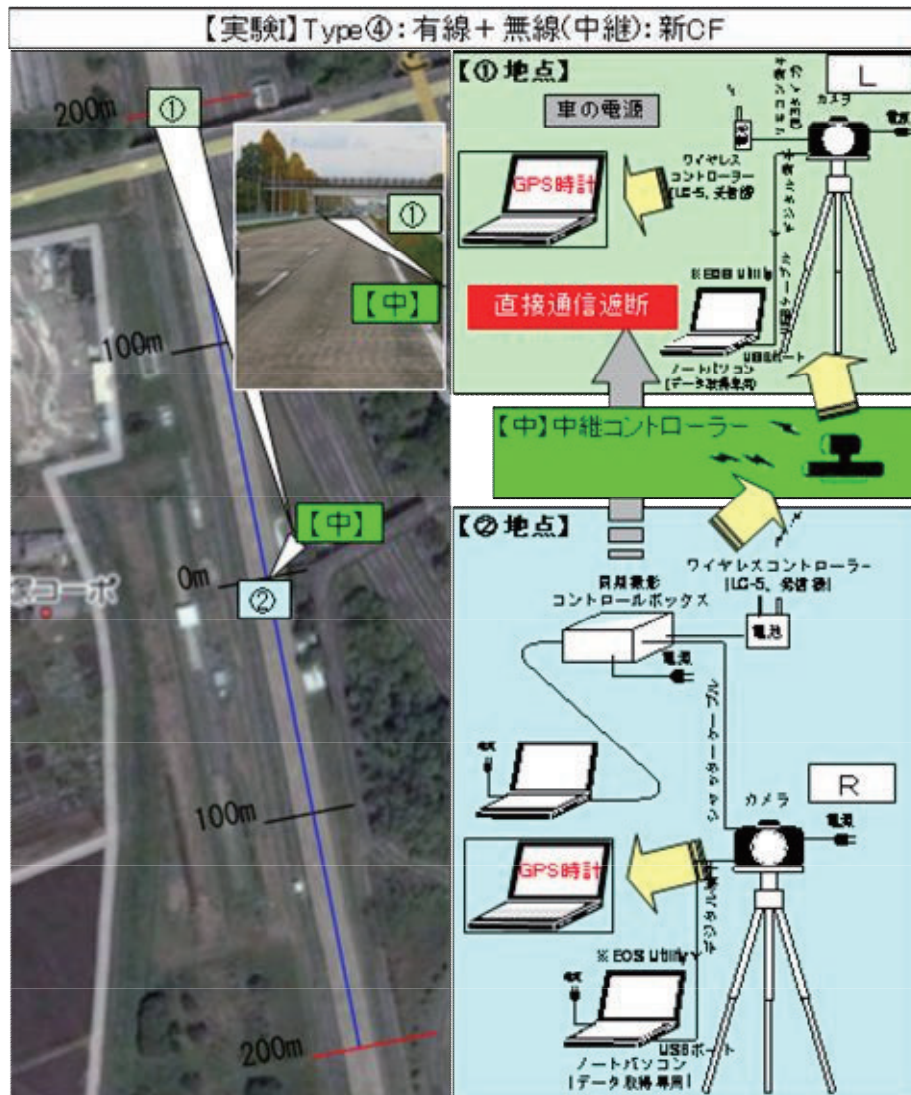


図 2.5.28 Type④(有線＋無線(中継))の同期性能と連写性能の検証実験状況

【検証結果】

表 2.5.18 に検証結果の一覧を示すとともに、①連写性能と②同期性能についてそれぞれ整理する。

表 2.5.18 Type④の同期性能と連写性能の検証結果一覧

実験パターン		新Type.④		Type.③ 1						Type.③ 2			
		実験I		実験A		実験B		実験E		実験D		実験F	
		無線(中継)+有線:新CF		100m:新CF		200m:新CF		200m:旧CF		200m:新CF		200m:新CF	
		L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R
カメラ 連写 速度 検証	実撮影枚数	563	587	572	572	595	592	601	598	595	587	587	564
	欠撮	68	44	30	30	41	44	35	38	36	44	44	67
	平均連写速度(秒)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.05	1.05	1.05	1.06	1.05	1.05	1.05
	標準偏差	0.116	0.023	0.044	0.052	0.089	0.047	0.052	0.047	0.122	0.066	0.125	0.061
	最大値(2秒以上は棄却)	1.53	1.15	1.29	1.26	1.98	1.2	1.22	1.26	1.99	1.31	1.99	1.26
	最小値	0.55	0.95	0.82	0.84	0.88	0.9	0.8	0.86	0.58	0.84	0.52	0.84
システム 連写 速度 検証	a.全体数(時間換算)	631		602		636		636		631		631	
	b.撮影指示回数	600		確認漏れ		605		605		600		600	
	平均連写速度(秒)=a/b	1.05		—		1.05		1.05		1.05		1.05	
同期 検証	標準偏差	0.111		0.047		0.078		0.054		0.115		0.122	
	相関係数R	0.71		0.95		0.86		0.91		0.83		0.74	
	同期ズレの出現傾向	バラツキ大		バラツキあり		バラツキ大		バラツキ大		バラツキ大		バラツキ大	

*参考として、Type③-1 と Type③-2 の結果を併記。

①連写性能検証結果

コントロールシステムでの撮影間隔設定値“1 コマ/秒”に対し、2 台のカメラで撮影した PC に表示される GPS 時計(1/100 秒)の読み値より連写性能を検証した。

図 2.5.29 に連写速度を整理したグラフを示すとともに結果を以下に整理する。

- ・平均連写速度はカメラ R(有線)・カメラ L(無線)ともに 1.05 秒であった。
- ・カメラ R(有線)は 1.05 秒を中心として正規分布しておりバラツキは少ない。
- ・一方、カメラ L(無線)では連写速度のバラツキが大きく、またピークが 1.02 秒付近にあり、1.2 秒を超過する割合も多い特徴が見られた。
- ・カメラ R(有線)の方が、安定して撮影できていると評価される。

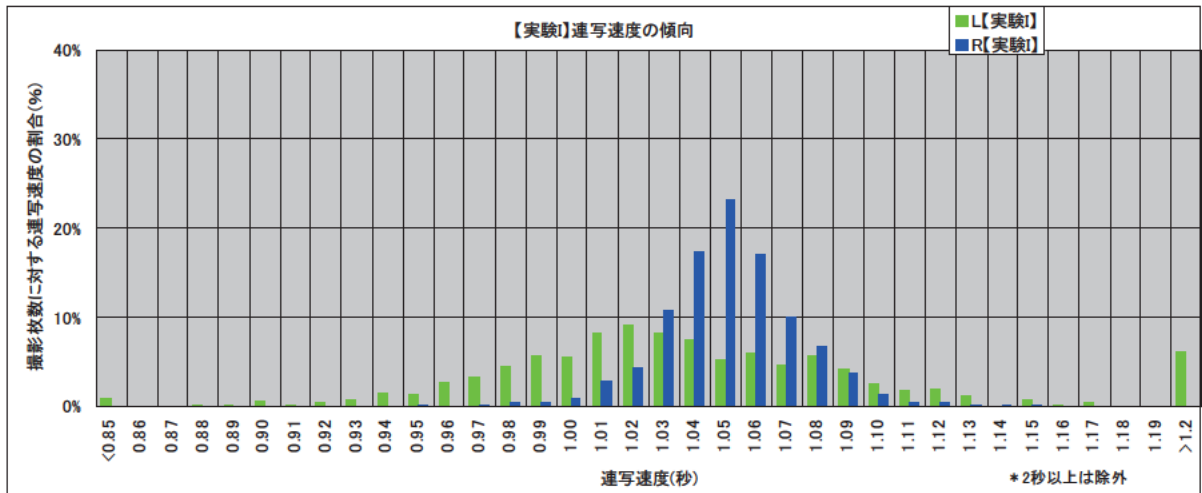


図 2.5.29 平均連写速度の検証

②同期性能の検証結果

2台のカメラで撮影したPCに表示されるGPS時計(1/100秒)の読み値より、同期性能を検証した。図2.5.30と図2.5.31に同期ズレを整理したグラフ(参考指標値として実験A(③ 1:100m)の結果もプロット)を、また表2.5.19に同期ズレの出現傾向を示すとともに結果を以下に整理する。

- ・実験I(Type④)の同期率は4%であり、かつ0.1秒以上の同期ズレ割合も多い。
- ・この原因は、有線(カメラR)は比較的安定して連写できているが、一方の無線(カメラL)の連写撮影の性能が悪いことから、同期ズレが多い結果となったと考えられる。

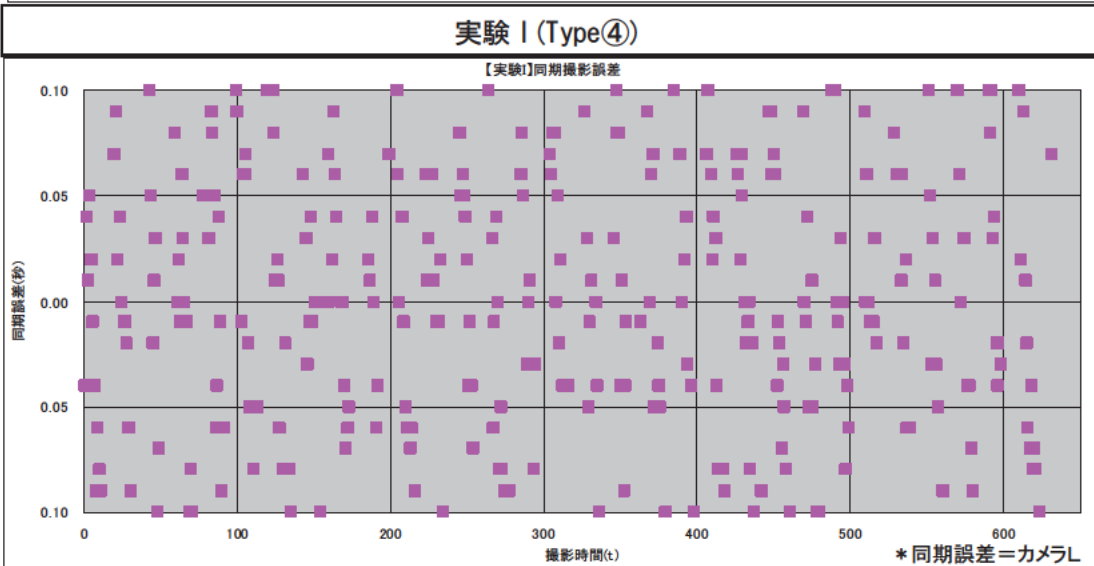
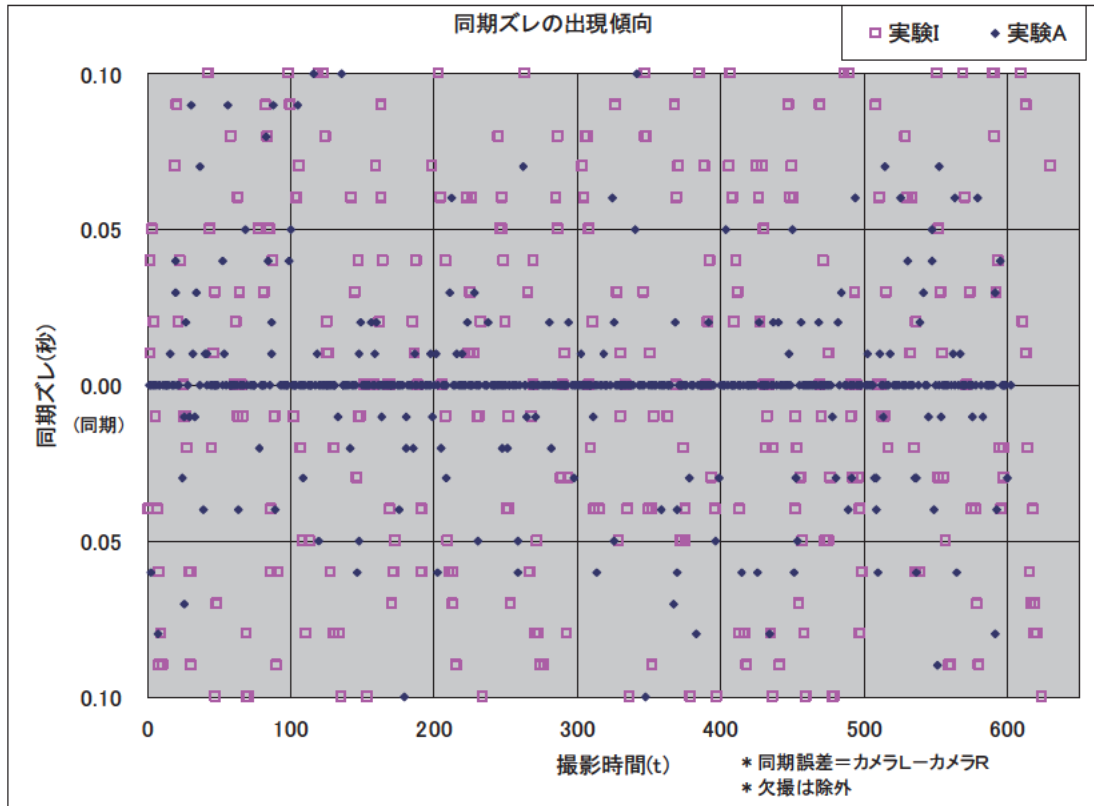


図 2.5.30 同期ズレの出現傾向

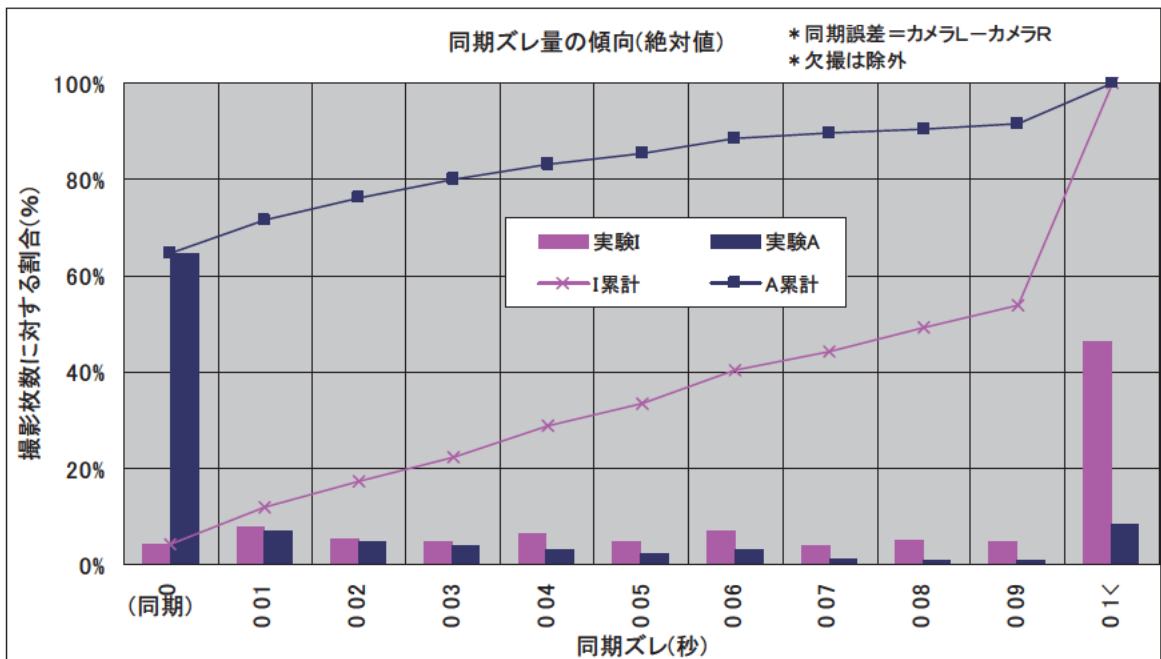
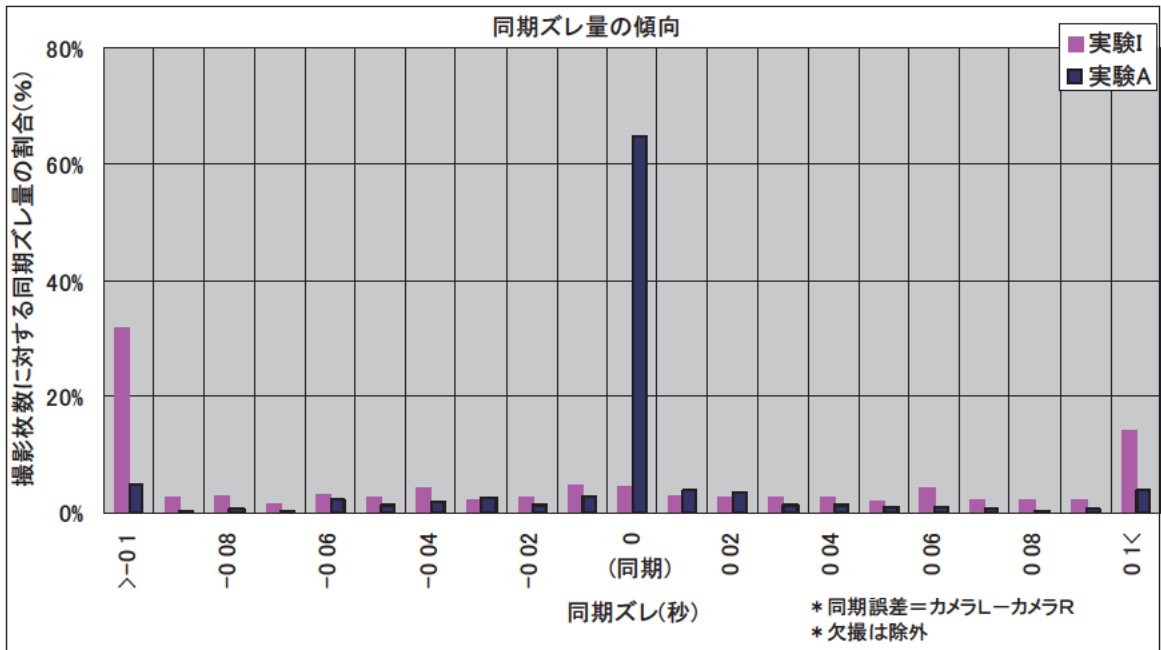


図 2.5.31 同期ズレ量(秒)の出現傾向

表 2.5.19 同期ズレ量(秒)の出現傾向(撮影枚数に対する同期ズレ量の割合(%))

同期ズレ量(秒)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1<
実験I (新④)	4% (4%)	8% (12%)	5% (17%)	5% (22%)	7% (29%)	5% (33%)	7% (40%)	4% (44%)	5% (49%)	5% (54%)	46% (100%)
実験A (③ 1)	65% (65%)	7% (71%)	5% (76%)	4% (80%)	3% (83%)	2% (85%)	3% (89%)	1% (90%)	1% (91%)	1% (91%)	9% (100%)

(3) 検証結果の総括

- ・平均連写速度は有線(カメラR)・無線(カメラL)ともに 1.05 秒であった。
- ・有線(カメラR)は比較的安定して連写できているが、一方の無線(カメラL)の連写撮影の性能が悪いことから、同期の割合も著しく悪い結果となった。
- ・Type④は有線システム(Type②)に比べると性能が劣るため、有線システムを推奨する。

2.6 カメラコントロールソフトの再改良 (CamCtrl ver. 3)

2.6.1 再改良ポイントの抽出

カメラコントロールソフト (CamCtrl ver.2) を用いたこれまでの各種実験の結果(2.5節 参照)、コントロールBOXの撮影指示速度 1コマ/秒に対し、実際は平均1コマ/1.05秒程度の連写速度であることが判明した。この0.05秒の遅延の原因としては、①PC処理性能、②カメラ性能などの他、③カメラコントロールソフトの撮影間隔の精度、④ソフトウェアの設定値などによる影響が考えられる。

①および②については、別途検討が必要な事項であるため、ここでは、③と④のソフトウェアに関する事項を検討し、撮影指示設定どおりに安定して同期連続撮影できるシステムに再改良する。

2.6.2 再改良したカメラコントロールソフトの概要

同期連続撮影性能を改善するため、カメラコントロールソフト (CamCtrl ver.2) の撮影間隔の精度を従来の 1s \Rightarrow 1ms(写真 2.6.1)に再改良した(以下、再改良したカメラコントロールソフトを「CamCtrl ver.3」とする)。

また、電気信号がカメラに適切に伝わらず、ランダムにシャッターが切れていない可能性も考えられるため、電気信号を制御するシャッターパルス時間と半押しパルス時間を 50ms(従来値) \sim 300msに変更し(図 2.6.1)、最適な設定値を検討した。

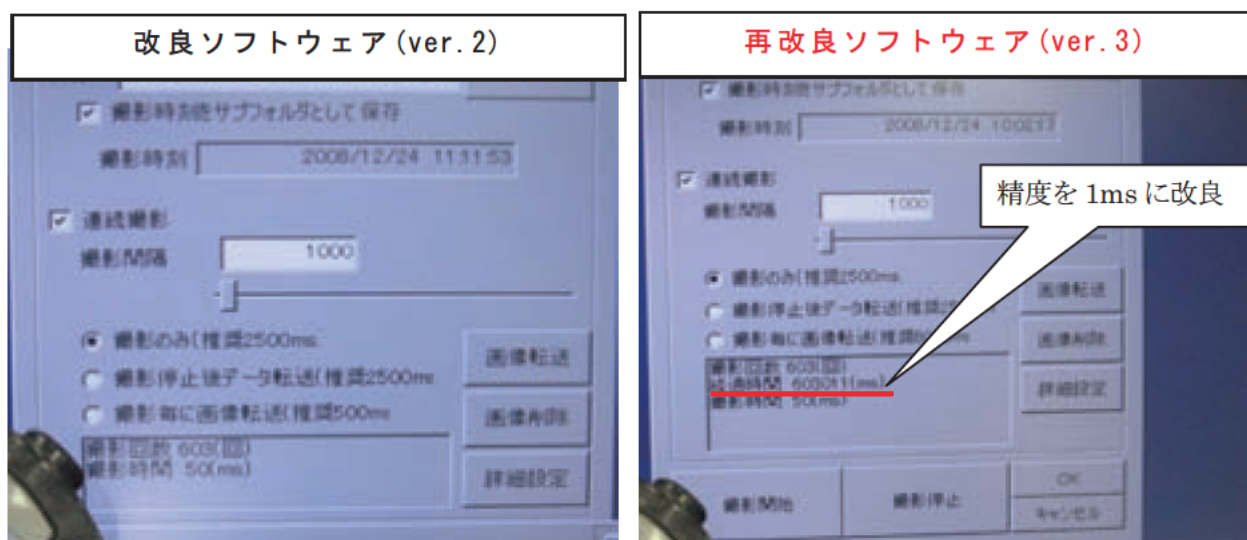


写真 2.6.1 ソフトウェアの改良点

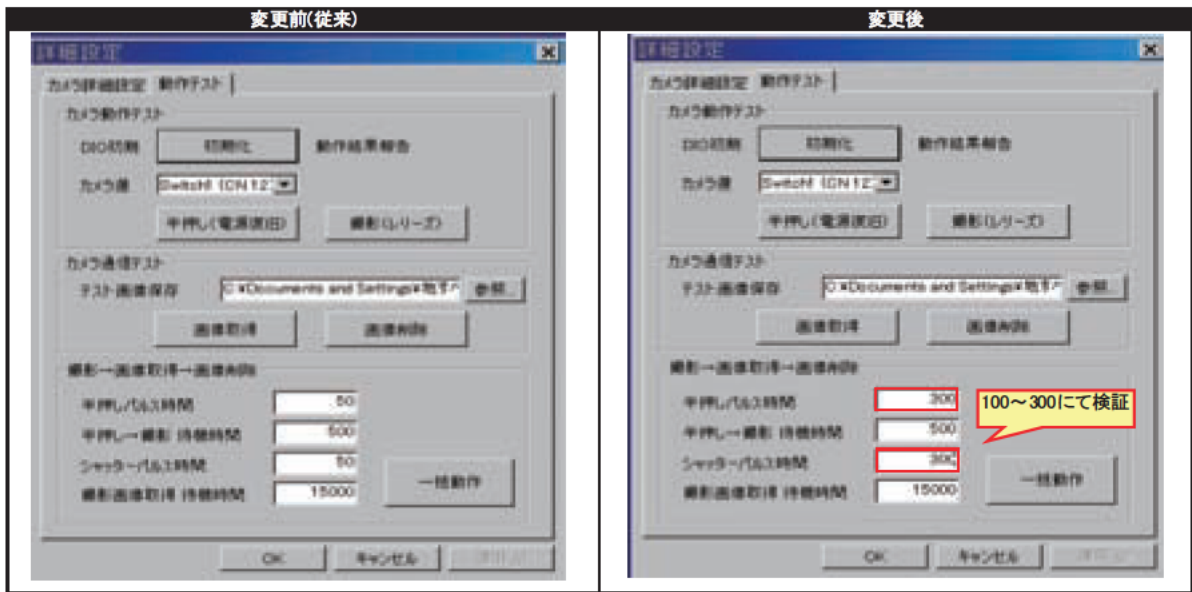


図 2.6.1 シャッターパルス時間と半押しパルス時間の設定例 (300ms)

2.6.3 再改良したソフトの性能評価

CamCtrl ver.3 を用いて、(1)最適なパルス設定時間、(2)同期連続撮影性能、(3)2コマ/秒での撮影可能時間を検証した。検証実験の内容を表 2.6.1 に示す。

なお、実験に使用した同期撮影システムは、画像転送が最も安定している有線撮影システム(Type ②)を採用した。

表 2.6.1 検証実験の内容

実験名	ソフトウェア設定値				撮影時間 (s)	目的	
	撮影間隔 (ms)	ソフト	パルス時間設定(ms)				
			半押し	シャッタ			
実験a	1,000	ver.3	50	50	603.0	パルス時間50 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無	(1) パルス時間の検証
実験b	1,000	"	100	100	603.0	パルス時間100 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無	
実験c	1,000	"	200	200	603.0	パルス時間200 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無	
実験d	1,000	"	300	300	603.0	パルス時間300 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無 1コマ/1.0秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証	(2) 欠撮しない連写速度の検証
実験e	900	"	300	300	623.7	1コマ/0.9秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証	
実験f	800	"	300	300	603.2	1コマ/0.8秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証	
実験g	700	"	300	300	603.4	1コマ/0.7秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証	
実験h	500	"	300	300	60.5	2コマ/1.0秒で約60秒撮影した場合の欠撮の有無	(3) 1.0秒2コマでの撮影可能時間の検証
実験i	500	"	300	300	40.5	2コマ/1.0秒で約40秒撮影した場合の欠撮の有無	
実験j	500	"	300	300	35.5	2コマ/1.0秒で約35秒撮影した場合の欠撮の有無	
実験k	500	"	300	300	30.5	2コマ/1.0秒で約30秒撮影した場合の欠撮の有無	

【システム構成】

検証実験で用いた CF・PC の性能などの一覧を表 2.6.2 に、カメラの設定を表 2.6.3 に示すとともに、図 2.6.2 実験概要図を示す。

表 2.6.2 カメラ・CF・PC の基本構成

使用カメラ		カメラL	カメラR
新CF	製品	SanDisk Extreme	SanDisk Extreme
	容量	8GB	8GB
	転送速度	45MB/sec	45MB/sec
	書込速度	45MB/sec	45MB/sec
受信機モード		1SR	1SR
撮影間隔 (ms)		500~2000	500~2000
データ取込み		EU	EU
PCスペック		【CF R2】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 900MHz 248MB RAM USB2.0ポート	【CF R3】 WindowsXP CPU Intel® Pentium® M processor 1.10GHz 248MB RAM USB2.0ポート

表 2.6.3 カメラの設定

設定	カメラL	カメラR
画像情報	4368 x 2912 ドット 24 ビット	4368 x 2912 ドット 24 ビット
露出時間 (秒)	1/200	1/200
F値	3.5	3.5
露出プログラム	マニュアル露出	マニュアル露出
ISO感度	400	400
シャッター スピード (秒)	1/197	1/197
レンズ絞り値 (F)	3.51	3.51
焦点距離 (mm)	50	50
圧縮率	Fine	Fine
フォーカスモード	マニュアルフォーカス	マニュアルフォーカス
画像サイズ	Large	Large
ホワイトバランス	蛍光灯	蛍光灯
カメラシリアル番号	A199 42792	A78F 34136



Type②

改良型システム(高速処理化、有線コントロール)

カメラ間隔 数m~10m
※シャッターケーブル5m×2本のため

【ケーブル長：15m】
(エクステンションコード(10m)を使用。)

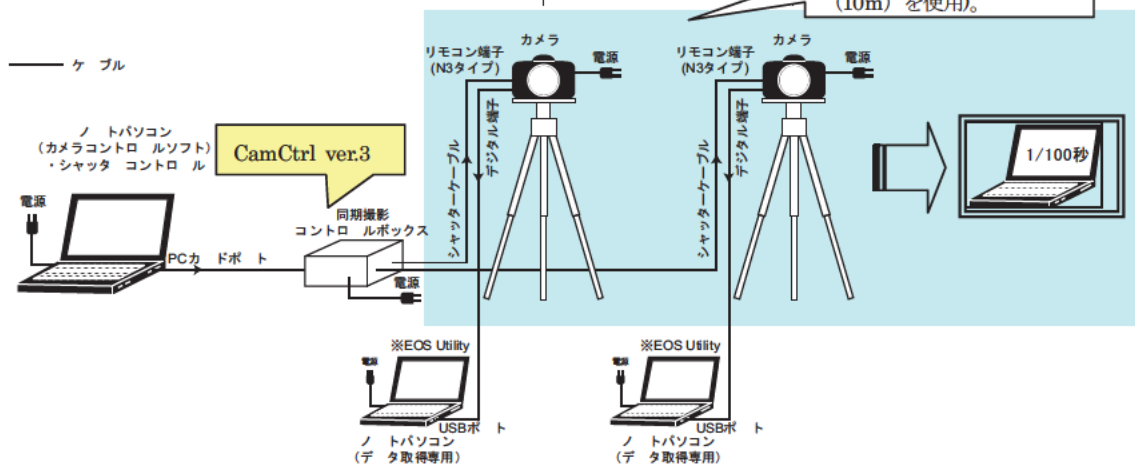


図 2.6.2 実験概要図

(1) パルス時間の検証

CamCtrl ver.3 を用いて、シャッターパルス時間と半押しパルス時間の設定を変えた条件下での撮影実験を行い、欠撮の有無(撮影回数 取得データ数)を確認することで、最適な設定値を検討した。

表 2.6.4 に実験内容を示す。

表 2.6.4 実験内容

実験名	ソフトウェア設定値				撮影時間 (s)	目的
	撮影間隔 (ms)	ソフト	パルス時間設定(ms)			
			半押し	シャッター		
実験a	1,000	ver.3	50	50	603.0	パルス時間50 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無
実験b	1,000	"	100	100	603.0	パルス時間100 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無
実験c	1,000	"	200	200	603.0	パルス時間200 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無
実験d	1,000	"	300	300	603.0	パルス時間300 (ms)で撮影した場合の欠撮の有無

【検証結果】

表 2.6.5 に検証結果の一覧を示すとともに、結果を以下に整理する。

表 2.6.5 パルス時間の検証結果一覧

実験パターン	実験名	実験a		実験b		実験c		実験d	
	ソフト	ver.3		ver.3		ver.3		ver.3	
	インターバルタイマ	1000 (ms)		1000 (ms)		1000 (ms)		1000 (ms)	
	半押しパルス時間	50 (ms)		100 (ms)		200 (ms)		300 (ms)	
	シャッターパルス時間	50 (ms)		100 (ms)		200 (ms)		300 (ms)	
システム設定上の撮影結果	撮影時間(s)	603.0		603.0		603.0		603.0	
	撮影回数	603		603		603		603	
	経過時間(ms)	603000		603001		603000		603001	
	平均連写速度(秒)	1.00		1.00		1.00		1.00	
実際の撮影結果	カメラ	L	R	L	R	L	R	L	R
	実撮影枚数	592	585	594	591	603	602	603	603
	欠撮	11	18	9	12	0	1	0	0
	ファイル全容量(GB)	2.12	2.09	2.05	2.01	2.09	2.05	2.09	2.06
	欠撮割合	1.8%	3.0%	1.5%	2.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%

*赤字は欠撮

- ・パルス時間 50ms(実験 a)・100ms (実験 b)・200ms(実験 c)のケースでは、欠撮を生じているが、パルス時間 300ms(実験 d)では欠撮は見られない。
- ・したがって、パルス時間の設定値としては **300ms** が推奨される。

(2) 同期連続撮影性能の検証

CamCtrl ver.3 を用いて、シャッターパルス時間と半押しパルス時間の設定を 300ms とした条件下で 1 コマ/1.0~0.7 秒までの撮影実験を行い、同期連続撮影性能を検証した。

表 2.6.6 に実験内容を示す。

表 2.6.6 実験内容

実験名	ソフトウェア設定値				撮影時間 (s)	目的
	撮影間隔 (ms)	ソフト	パルス時間設定(ms)			
			半押し	シャッター		
実験d	1,000	ver.3	300	300	603.0	1コマ/1.0秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証
実験e	900	"	300	300	623.7	1コマ/0.9秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証
実験f	800	"	300	300	603.2	1コマ/0.8秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証
実験g	700	"	300	300	603.4	1コマ/0.7秒で撮影した場合の連写性能・同期性能の検証

【検証結果】

2 台のカメラで撮影した PC に表示される 1/100 秒時計の読み値より、連写性能と同期性能を検証した。

表 2.6.7 に検証結果の一覧を示すとともに、①連写性能と②同期性能についてそれぞれ整理する。

表 2.6.7 連写性能と同期性能の検証結果一覧

項目		実験d		実験e		実験f		実験g	
		カメラL	カメラR	カメラL	カメラR	カメラL	カメラR	カメラL	カメラR
実験パターン	ソフト	ver.3		ver.3		ver.3		ver.3	
	インターバルタイマ	1000 (ms)		900 (ms)		800 (ms)		700 (ms)	
	半押しパルス時間	300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)	
	シャッターパルス時間	300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)	
システム連写速度検証	撮影時間(s)	603.0		623.7		603.2		603.4	
	撮影回数	603		693		754		862	
	経過時間(ms)	603001		623701		603200		603401	
	平均連写速度(秒)	1.00		0.90		0.80		0.70	
撮影写真による連写速度検証	実撮影枚数	603	603	693	693	754	754	844	862
	欠撮	0	0	0.0	0	0	0	18	0
	平均連写速度(秒)	1.00	1.00	0.90	0.90	0.80	0.80	0.71	0.70
	標準偏差	0.026	0.026	0.033	0.025	0.012	0.017	0.104	0.020
	最大値	1.18	1.15	1.07	1.03	0.9	0.92	1.7	0.84
	最小値	0.82	0.85	0.73	0.72	0.68	0.68	0.42	0.55
同期検証	最大差	0.18		0.23		0.14		0.30	
	標準偏差	0.032		0.036		0.025		0.037	
	相関係数R	1.000		0.992		1.000		0.979	

* 赤字は欠撮

①連写性能検証結果

図 2.6.3 に連写速度を整理したグラフを示すとともに結果を以下に整理する。

- 1 コマ／0.8 秒以上の設定(実験 d～f)では、両カメラともに欠撮は生じていない。また、それぞれの連写速度の設定値に対して概ね正規分布しており、連写速度のバラツキ度合いも小さい。したがって、設定速度に対して大きな誤差を生じることなく安定して連続撮影できると評価される。
- 一方、1 コマ／0.7 秒(実験 g)では、カメラ L で 18 枚の欠撮を生じており、連写速度のバラツキ度合いも大きい。
- したがって、両カメラともに欠撮しない連写速度は、1 コマ／0.8 秒以上と評価される。

②同期性能の検証結果

図 2.6.4 に同期ズレを整理したグラフを示すとともに結果を以下に述べる。

- 実験 d～g の結果、72%以上が同期し、同期ズレ量 0.05 秒以内に 87%以上が収まっている。
- 1 コマ／0.7 秒の設定(実験 g)では、欠撮の影響もあり、1 コマ／0.8 秒以上の設定(実験 d～f)に比べ相関係数が低い。

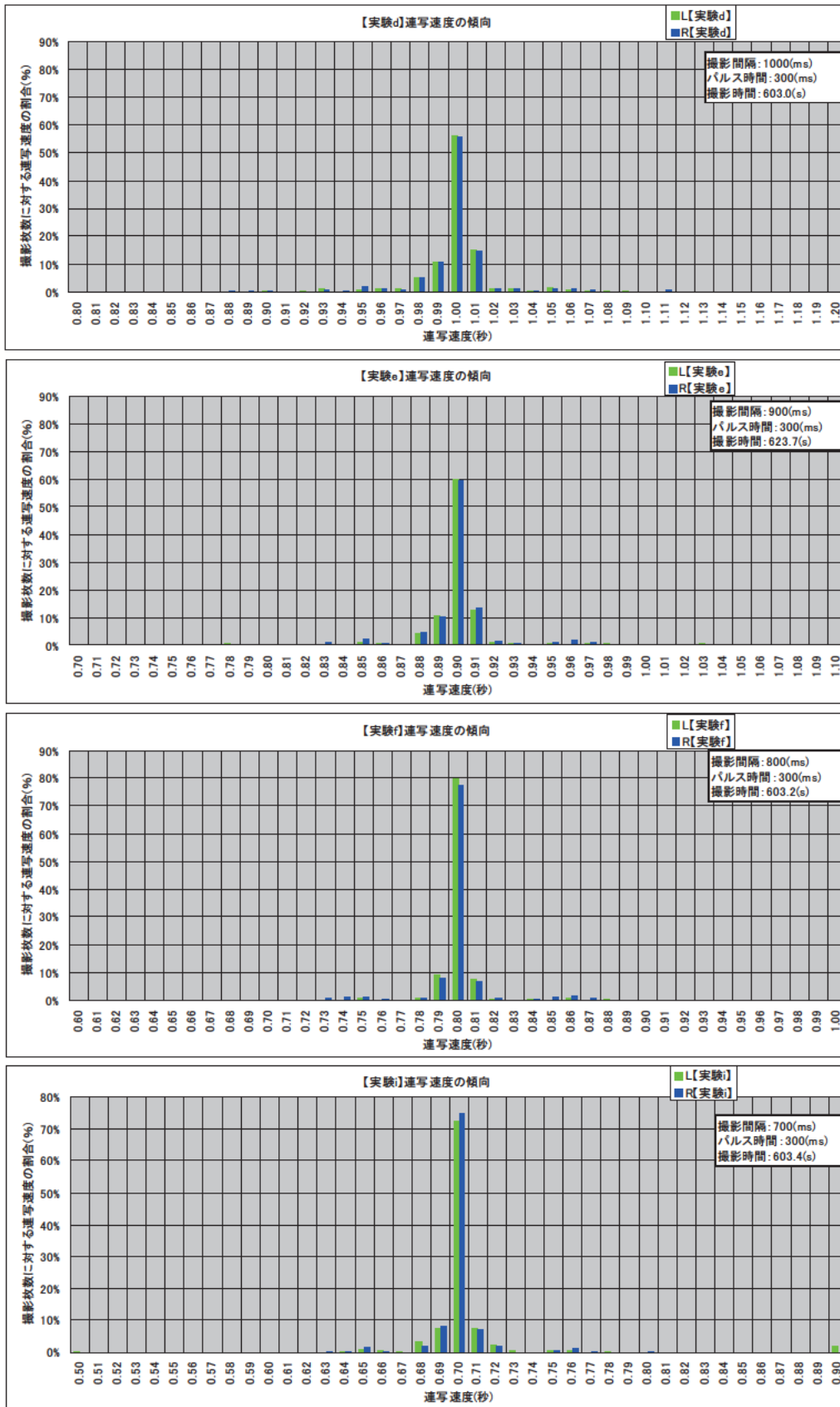


図 2. 6. 3 連写性能の検証

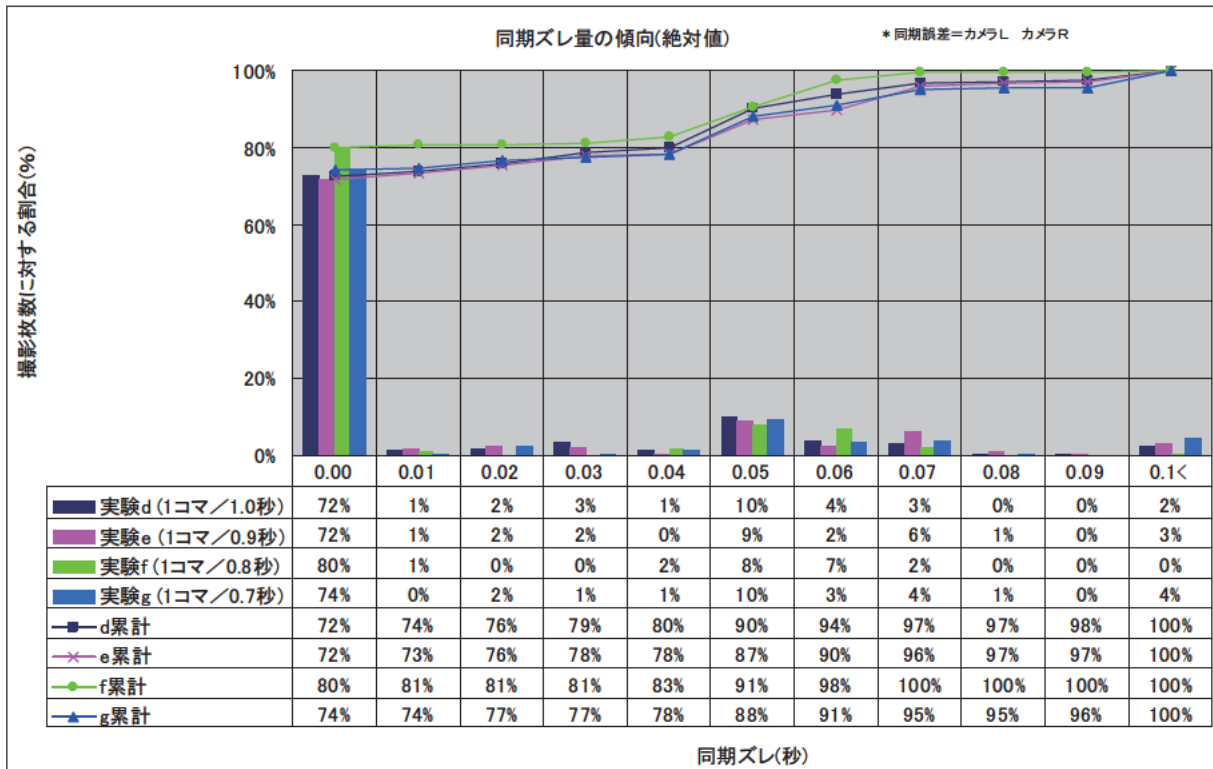
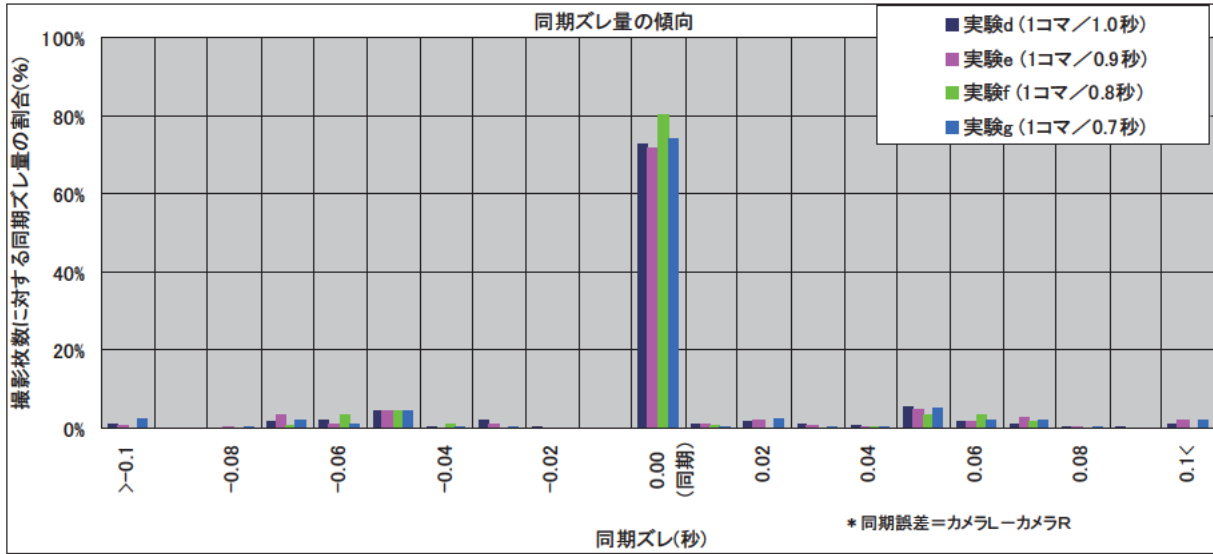


図 2.6.4 同期性能の検証

(3) 2コマ/秒での撮影可能時間の検証

CamCtrl ver.3 を用いて、シャッターパルス時間と半押しパルス時間の設定を 300ms とした条件下で 2 コマ/秒での撮影実験を行い、欠撮の有無(撮影回数 取得データ数)を確認することで 2 コマ/秒での撮影可能時間を検証した。

表 2.6.8 に実験内容を示す。

表 2.6.8 実験内容

実験名	ソフトウェア設定値				撮影時間 (s)	目的
	撮影間隔 (ms)	ソフト	パルス時間設定(ms)			
			半押し	シャッター		
実験h	500	ver.3	300	300	60.5	2コマ/1.0秒で約60秒撮影した場合の欠撮の有無
実験i	500	"	300	300	40.5	2コマ/1.0秒で約40秒撮影した場合の欠撮の有無
実験j	500	"	300	300	35.5	2コマ/1.0秒で約35秒撮影した場合の欠撮の有無
実験k	500	"	300	300	30.5	2コマ/1.0秒で約30秒撮影した場合の欠撮の有無

【検証結果】

表 2.6.9 に検証結果の一覧を示すとともに、結果を以下に整理する。

表 2.6.9 2コマ/秒での撮影可能時間の検証結果一覧

実験パターン	実験名	実験h		実験i		実験j		実験k	
	ソフト	ver.3		ver.3		ver.3		ver.3	
カメラ 連写速度 検証	インターバルタイム	500 (ms)		500 (ms)		500 (ms)		500 (ms)	
	半押しパルス時間	300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)	
	シャッターパルス時間	300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)		300 (ms)	
	実撮影枚数	92	94	78	80	71	71	61	61
システム 連写速度 検証	欠撮	29	27	3	1	0	0	0	0
	ファイル全容量 (GB)	0.326	0.328	0.277	0.28	0.252	0.249	0.217	0.214
	欠撮割合 (%)	23.97	22.31	3.70	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00
	撮影時間(s)	60.5		40.5		35.5		30.5	
システム 連写速度 検証	撮影回数	121		81		71		61	
	経過時間(ms)	60501		40500		35500		30501	
	平均連写速度 (秒)	0.50		0.50		0.50		0.50	

*赤字は欠撮

- ・ 撮影時間約 60 秒(実験 h)・約 40 秒(実験 i)のケースでは、欠撮を生じている。
- ・ 撮影時間約 35 秒(実験 j)・約 30 秒(実験 k) のケースでは、欠撮は見られない。
- ・ したがって、本システム構成における 2 コマ/秒での撮影可能時間は **35 秒程度** と評価される。

(4) 検証結果の総括

- ・パルス時間の設定値は 300ms が推奨される。
- ・両カメラともに欠撮しない連写速度は、1 コマ／0.8 秒以上である。
- ・1 コマ／0.8 秒以上の連写性能は、コントロール BOX の設定速度に対してほとんど誤差を生じることなく安定して連続撮影できると評価される。
- ・1 コマ／0.8 秒以上の同期性能は、同期率 72% 以上で、同期ズレ量 0.05 秒以内に 87% 以上が収まっており、概ね安定して同期撮影できると評価される。
- ・1 コマ／秒以上の撮影においては実用上問題のないものと判断される。
- ・2 コマ／秒での撮影可能時間は 35 秒程度と評価される。

2.7 今後の課題

開発した同期撮影システムで安定して同期連続撮影ができる撮影間隔は、1 コマ/秒程度である。この値は、開発目標値の2 コマ/秒には達していないため、何らかの改良が必要と考える。

しかしながら、この状況を解決するためには、使用する PC やカメラ本体のスペック向上というハード的な検討内容が主と考えられ、本共同研究での達成は難しいと考える。

そこで、この課題については、現場での本システムの適用性を検証した後に別途検討することとする。

【参考文献】

- 1) 藤澤和範・小原嬢子：画像解析からみた東横山地すべりの活動履歴，地すべり研究（第 51 集），2007

【用語解説】

- ※1 API (Application Programming Interface) : アプリケーションから利用できるオペレーティングシステムやプログラミング言語で用意されたライブラリなどの機能の入り口となるものである。主にファイル制御、ウィンドウ制御、画像処理、文字制御などのための関数として提供されることが多い。簡単に言えば、アプリケーションをプログラムするにあたって、プログラムの手間を省くため、もっと簡潔にプログラムできるように設定されたインターフェースの事である。
- ※2 有効画素数 : 撮影された画像（写真）を表現する画素^{※5}（ピクセル、色情報をもった点）の総数である。画素数^{※6}については、有効画素数に対して総画素数というものがあるが、これは撮像素子をもつ画素の総数のことである。一般的には、撮像素子の縁部分の受光素子はノイズが多くなるなどの理由から画像（写真）データには使われない。そのため、一般的には有効画素数のほうが少し小さい値となる。
- ※3 撮像素子 : 撮像素子とは受光素子の集合体である。受光素子を線的あるいは面的に配置することで、ライン型あるいはエリア型の撮像素子を構成する。デジタルカメラではエリア型の撮像素子が使用される。受光素子が発生した電荷を出力するための転送機能として、CCD (Charge Coupled Device Image Sensor) あるいは CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) が使用され、それぞれ CCD センサー、CMOS センサーと呼ばれる。これの大きさを画面サイズ^{※7}と呼ぶことがある。
- ※4 受光素子 : 受光素子（フォトダイオード）とは半導体の一種で、光を電気信号に変換する電子部品である。光の強弱を感知して電荷の形で蓄積する。
- ※5 画素 : 画素とはデジタル画像を構成する単位でピクセルともいわれる。デジタル画像は、通常正方形の画素を 2 次元的に配置することで一枚の画像を表現する。撮像素子で得られた電荷が

画素の階調に置き換えられて記録される。この大きさを画素サイズ^{※8}という。

- ※6 画素数：画素数とはデジタル画像を構成する画素の数で、総数を意味する総画素数と、周辺部等の領域を除外し、実際に画像として使用する範囲の画素数を意味する有効画素数がある。現在では 2000 万画素（5600×3700）を超えるデジタルカメラが販売されている。
- ※7 画面サイズ：画面サイズとは撮像素子の大きさで、フィルムの大きさに相当するものである。現在では従来の 35mm フィルム（24×36mm）に匹敵する撮像素子を持つデジタルカメラが市販されている。
- ※8 画素サイズ：画素サイズとは通常、受光素子の大きさに相当し、数 μm から数十 μm の正方形だが、まれに長方形のものもある。

3. 3次元モデル化手法の検討

3.1 3次元ステレオ計測

デジタルカメラの普及に伴い、手軽にデジタルデータを取得することが可能となり、撮像能力の向上も著しい。一方、コンピュータの処理能力の向上により、画像相関等を用いた自動処理が高速で実施できるようになったことから、デジタル画像を用いた自動3次元計測を行うことが可能となってきた。本章では、地すべり地の3次元モデル化を行うことを前提に、数種のソフトウェアを用いて実証実験を行い、最適な撮影手法やソフトウェアについて検討した。

3.1.1 ステレオ写真解析ツールの検討

(1) ステレオ解析の原理

写真測量における位置計測の基本的条件は共線条件式である。これは地上の対象物が理想的なレンズを通してフィルムあるいは撮像素子上に写された場合、地上対象物とレンズ中心および写像点（ここでは P O_1 p_1 および P O_2 p_2 ）が直線となるという条件である。焦点距離等のカメラの内部標定要素と撮影されたときの位置と姿勢すなわち外部標定要素が既知であれば、写真画像上の p_1 および p_2 が計測されれば、空間ベクトル p_1P および p_2P が決定され、誤差がなければこの交点座標が対象物 P の座標値として算出される。このように2枚の画像上に共通の地物が撮影され、その位置が特定できれば3次元計測が可能となる。

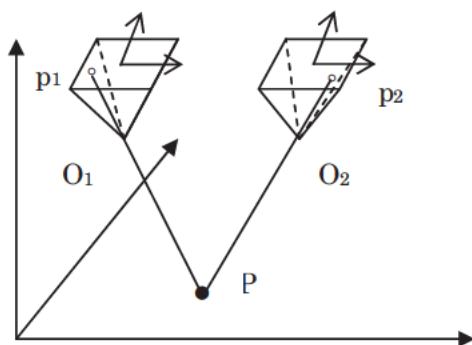


図 3.1 ステレオ解析の原理

(2) 基線高度比

通常、写真測量では平面位置の測定精度は撮影縮尺に反比例する。また、高さの精度は平面の精度と基線高度比によって決定される。以下に平面の測定精度と基線高度比の関係を示す。なお、ここでいう平面は水平面を意味し、高さの精度とは標高精度を意味する。地すべり地等の立面を撮影する場合には奥行き方向が高さの精度に相当する。

ここでは、中心投影の航空カメラにより上空より並行撮影がなされたと仮定する。地上点 P_1 および P_2 がそれぞれ画像上に移る点を p_1 、 p_2 とし、カメラの焦点距離を c とする。また、それぞれの長さを、

$$p_1 a_1 = la_1 \quad \text{式3.1}$$

$$p_2 a_2 = la_2 \quad \text{式3.2}$$

$$p_1 b_1 = lb_1 \quad \text{式3.3}$$

$$p_2 b_2 = lb_2 \quad \text{式3.4}$$

とする。さらに、

$$B = Ba_1 + Ba_2 = Bb_1 + Bb_2 \quad \text{式3.5}$$

$$H_a : c = Ba_1 : la_1 = Ba_2 : la_2 \quad \text{式3.6}$$

$$c \cdot Ba_1 = H_a \cdot la_1 \quad \text{式3.7}$$

$$c \cdot Ba_2 = H_a \cdot la_2 \quad \text{式3.8}$$

$$c(Ba_1 + Ba_2) = cB = H_a(la_1 + la_2) \quad \text{式3.9}$$

$$H_a = \frac{Bc}{(la_1 + la_2)} \quad \text{式3.10}$$

$$H_b = \frac{Bc}{(lb_1 + lb_2)} \quad \text{式3.11}$$

$$la_1 + la_2 = pa, \quad lb_1 + lb_2 = pb \quad \text{式3.12}$$

とする。ここで、 pa, pb は横視差である。

$$H_a = \frac{Bc}{(la_1 + la_2)} = \frac{Bc}{pa} \quad \text{式 3.13}$$

$$H_b = \frac{Bc}{(lb_1 + lb_2)} = \frac{Bc}{pb} \quad \text{式 3.14}$$

一般に、

$$H = \frac{Bc}{p} \quad \text{式 3.15}$$

これにより、基線長と焦点距離が既知で、横視差が観測できれば高さが計算できることがわかる。

ここで、横視差の微小変化 Δp が高さに与える影響を ΔH とする。 ΔH が微小であると仮定して、

$$H_A = H_B = H \quad \text{式 3.16}$$

とする。

$$\Delta H = -\frac{Bc}{p^2} \Delta p \quad \text{式 3.17}$$

ここで、

$$\Delta p = pb - pa = lb_1 + lb_2 - (la_1 - la_2) = (lb_1 - la_1) + (lb_2 - la_2) \quad \text{式 3.18}$$

であり、これを視差差という。

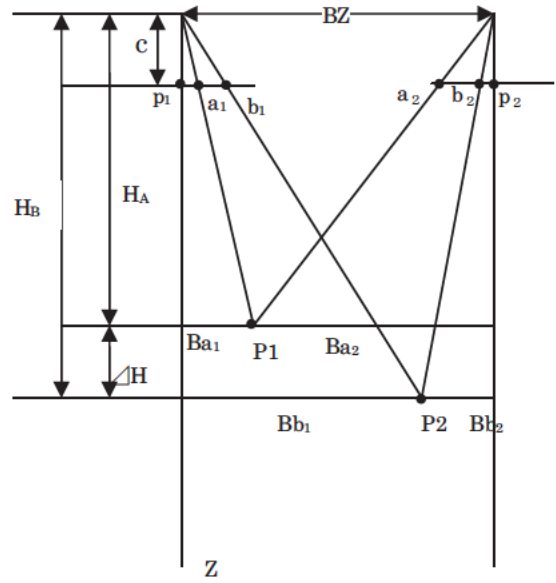


図 3.2 基線高度比

$$p = \frac{Bc}{H} \quad \text{式 3.19}$$

なので、

$$\Delta H = \frac{H^2}{Bc} \Delta p \quad \text{式 3.20}$$

撮影の縮尺分母を s とすれば、

$$H = sc \quad \text{式 3.21}$$

$$\Delta H = \frac{H^2}{Bc} \Delta p = \frac{Hsc}{Bc} \Delta p = \frac{H}{B} s \Delta p \quad \text{式 3.22}$$

これにより、標高の精度は横視差の観測精度と基線高度比（H/B）と縮尺分母に比例することがわかる。

(3) 市販ソフト

現在、様々なデジタル写真測量システムが販売されている。

これらの多くは地図作成を基本概念とした一般的な写真測量システムで、数値地形モデルを抽出し正射画像等を作成する目的で使用される。一方、Kuraves、PI3000 等に代表される土木あるいは建築で行われる立面や斜面の計測に特化させたシステムも販売されている。現在市販されている主なソフトウェアを表 3.1 にまとめた。

表 3.1 主な市販ソフトウェア

ソフトウェア名	販売元	備考
Kuraves	クラブウ	土木研究所所有 斜面計測等が可能 http://www.kurabo.co.jp/el/3d/kuraves_01.html
ATLAS	KLT	http://www.kltassoc.com/index.shtml
ImageStation	Intergraph	http://www.intergraph.jp/istationsw/default.asp
図化名入	アジア航測	http://www.ajiko.co.jp/service/system/03_geoplotter.html
LPS	LEICA GEOSYSTEMS	http://www.esri.com/products/lps/index.shtml
MATCH T	INPHO	http://www.nikon.trimble.co.jp/products/software/inpho.html
PI3000	トプコン	斜面計測等が可能 http://www.topcon.co.jp/positioning/d_image/analysis.html#pi_3000
RealScape	NEC システムテクノロジー	http://www.necst.co.jp/product/rs/summary/index.html
SOCET SET	BAE SYSTEMS	http://www.socetgxp.com/content_products/socetset/index.htm
VirtuoZo	Supre Soft	http://www.supresoft.com.cn/english/products/virtuozo/virtuozo.htm

本検証では、地すべりチームが所有するクラブウ社製の Kuraves と、一般的な写真測量シス

テムである KLT 社製の ATLAS、NEC システムテクノロジー(株)社製の RealScape および LEICA GEOSYSTEMS 社製の LPS 比較することにより、ソフトウェアの特性や精度を検証した。

3.1.2 ダムにおける実験

市販のデジタルカメラによるステレオ撮影画像から、3次元地形モデルがどのような精度で作成できるかを検討するために、ダム貯水池内の地すべり斜面を対象にデジタル画像の撮影及び検証点等の現地測量を実施した。さらに写真測量による精度をより厳密に実施するため、撮影位置および撮影方向についても計測することとした。

(1) 実験概要

本実験は、ダム貯水池内の地すべり斜面(図 3.3、写真 3.1)にて、平成 19 年 6 月 12 日～13 日に実施した。図 3.4 に示す作業手順に従って、前章で選定した市販のデジタルカメラ等を用いて試験を行った(表 3.2)。



図 3.3 対象地域平面図



写真 3.1 対象地域全景写真

表 3.2 使用機器

種 別	機器名	台数	目 的
デジタルカメラ	Canon EOS 5D	1 台	デジタル撮影
	レンズ 28mm	1 台	
	レンズ 50mm	1 台	
	レンズ 100mm	1 台	
トータルステーション	LeicaTPRC1201	1 台	撮影位置決定、座標測定、 検証測量
	SokiasET3	1 台	
雑具	脚立、測量紙、標識、ハンマー、 木杭、セーフティコーン		

図 3.4 作業手順フロー

(2) 作業内容

①既存基準点の確認

管理者より、撮影地点近傍の基準点座標を入手したのち、現地確認により、基準点の損傷等がないことを確認した。本点は地すべり監視用にも常時利用する基準点で精度的な問題がないと判断した。なお、使用した点は T15 および T16 である。

表 3.3 座標リスト (IX系 単位 m)

点名	X	Y	Z
T15	5106.443	85022.722	576.976
T16	5075.263	84869.377	577.912

②撮影地点の位置決定

3 種類のレンズについて、撮影基準面に対し平行撮影した場合、崩壊地のステレオ撮影が可能な位置を、現地状況と計画図(図 3.5)を基に選点し、当該位置の道路上に紙を設置した(写真 3.2)。



写真 3.1 撮影位置の明示

③撮影地点の位置観測

既存基準点より、撮影地点の位置をトータルステーションで観測し、位置を算出した（写真3.3）。算出された座標リストは章末に添付した。



写真 3.2 観測状況写真

④テスト撮影

カメラ位置、撮影方向を正確に算出するため、撮影地点にトータルステーションを設置し、機器頂部にデジタルカメラを固定した（写真3.4）。この際、トータルステーションとカメラの視準軸を一致させるため、遠方の電柱等で視準を確認しながら設置した。さらに、鉞からカメラまでの高さを計測した。この後、撮影基準面に対して直角方向からのステレオ撮影を実施した。撮影を実施した組合せは、図3.5計画図上に示す位置①②、③④、⑤⑥の3組である。



写真 3.3 カメラの設置状況



写真 3.4 ステレオ撮影画像例 (③-④ 50mm)

⑤標識設置位置の検討及び設置

ステレオ写真解析の精度を向上させるため、崩壊地周辺（写真 3.6 に楕円で示す範囲）を対象に標識を設置することとし、設置位置を検討した。この際、使用するレンズに応じて画郭が異なることを考慮し、広域・狭域ともに対応可能となるよう設置した。また、画像の解像度（対象距離）に応じた標識のサイズを検討し、図 3.6 の構造の標識を設置した。写真上で桃色で記した点が、標識（8 点）、青色で記した点が刺針点（標識を設置しないが、特徴等で位置が特定できる点。13 点）、赤色で記した点が検証点兼用刺針点（20 点）である。

（写真 3.6）。



写真 3.5 標識設置候補地

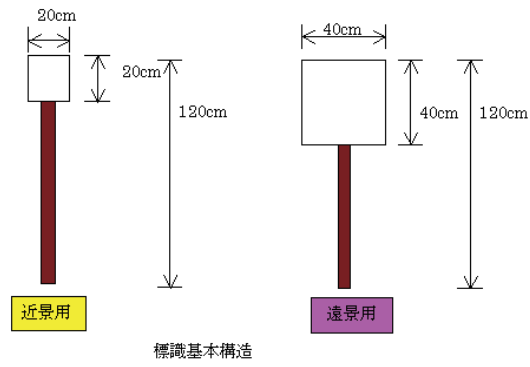


图 3.6 標識基本構造



写真 3.6 標識、刺針点位置

⑦デジタル画像撮影

各撮影位置よりデジタルカメラのレンズ3種類（表3.4）それぞれについて撮影を行った。

表3.4 撮影諸元

諸元項目	28mm レンズ	50mm レンズ	100mm レンズ
焦点距離 mm	28	50	100
画素サイズ mm	0.0082	0.0082	0.0082
撮影距離 m	450	450	450
有効画素数	1280 万画素 (4368×2912)	1280 万画素 (4368×2912)	1280 万画素 (4368×2912)
撮影縮尺分母	16071.43	9000	4500
撮影範囲 m	527.14	295.2	147.6
地上解像度 m	0.13	0.07	0.04
基線 60% m	210.86	118.08	59.04
基線高度比	0.47	0.26	0.13
基線高度比逆数	2.13	3.81	7.62

撮影では図3.7に示す平行撮影および収斂^{しゅうれん}撮影を採用し、各地点から、平行方向を含め5°刻みで収斂角を設けた方向で36通りの組合せ（表3.5）で実施した。撮影した画像例を巻末資料に示す。

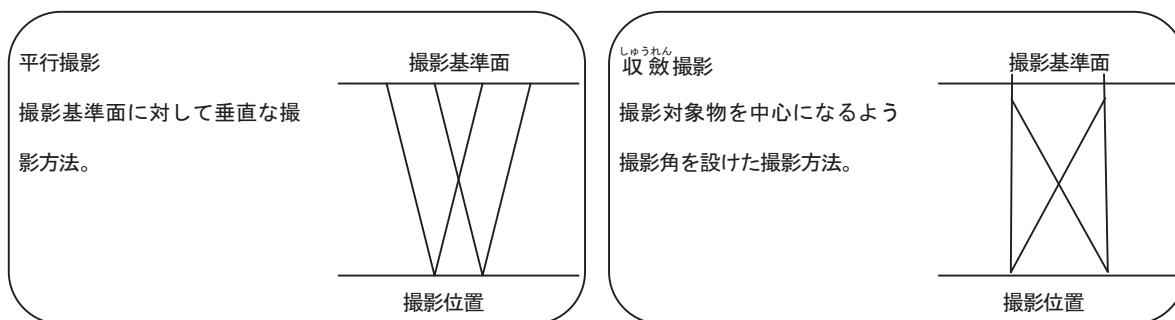


















図3.7 撮影方法











表 3.5 撮影の組合せ











撮影地点	レンズ	90°	収斂撮影		
			95°	100°	105°
①②	28mm	○	○	○	○
	50mm	○	○	○	○
	100mm	○	○	○	○
③④	28mm	○	○	○	○
	50mm	○	○	○	○
	100mm	○	○	○	○
⑤⑥	28mm	○	○	○	○
	50mm	○	○	○	○
	100mm	○	○	○	○






(1/8)











撮影地点		①	②
28 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		
	収斂角 100°		











	収斂角 105°		
50 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		
	収斂角 100°		
	収斂角 105°		

100 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		
	収斂角 100°		
	収斂角 105°		
撮影地点		③	④
28 mm	収斂角 90°		

	収斂角 95°		
	収斂角 100°		
	収斂角 105°		
50 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		

	收斂角 100°		
	收斂角 105°		
100 mm	收斂角 90°		
	收斂角 95°		
	收斂角 100°		

	収斂角 105°		
撮影地点		⑤	⑥
28 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		
	収斂角 100°		
	収斂角 105°		

50 mm	収斂角 90°		
	収斂角 95°		
	収斂角 100°		
	収斂角 105°		
100 mm	収斂角 90°		

収斂角 95°		
収斂角 100°		
収斂角 105°		

<サムネイル>



<解像度比較>

写真 3.7 レンズ毎の撮影画像

⑧ 検証点の観測

崩壊斜面内の計測結果を検証する比較対照資料として、地上型レーザ計測器を用いて直接地形を測量することを試みたが、対岸からの距離が遠く実現には至らなかった。このため、標識設置時に同時取得した、刺針点、検証点のほか、3次元地形モデル検証用に、崩壊斜面内にランダムに119点の検証点を配置（図3.8）し、観測を行った。配置を図3.8に示す。

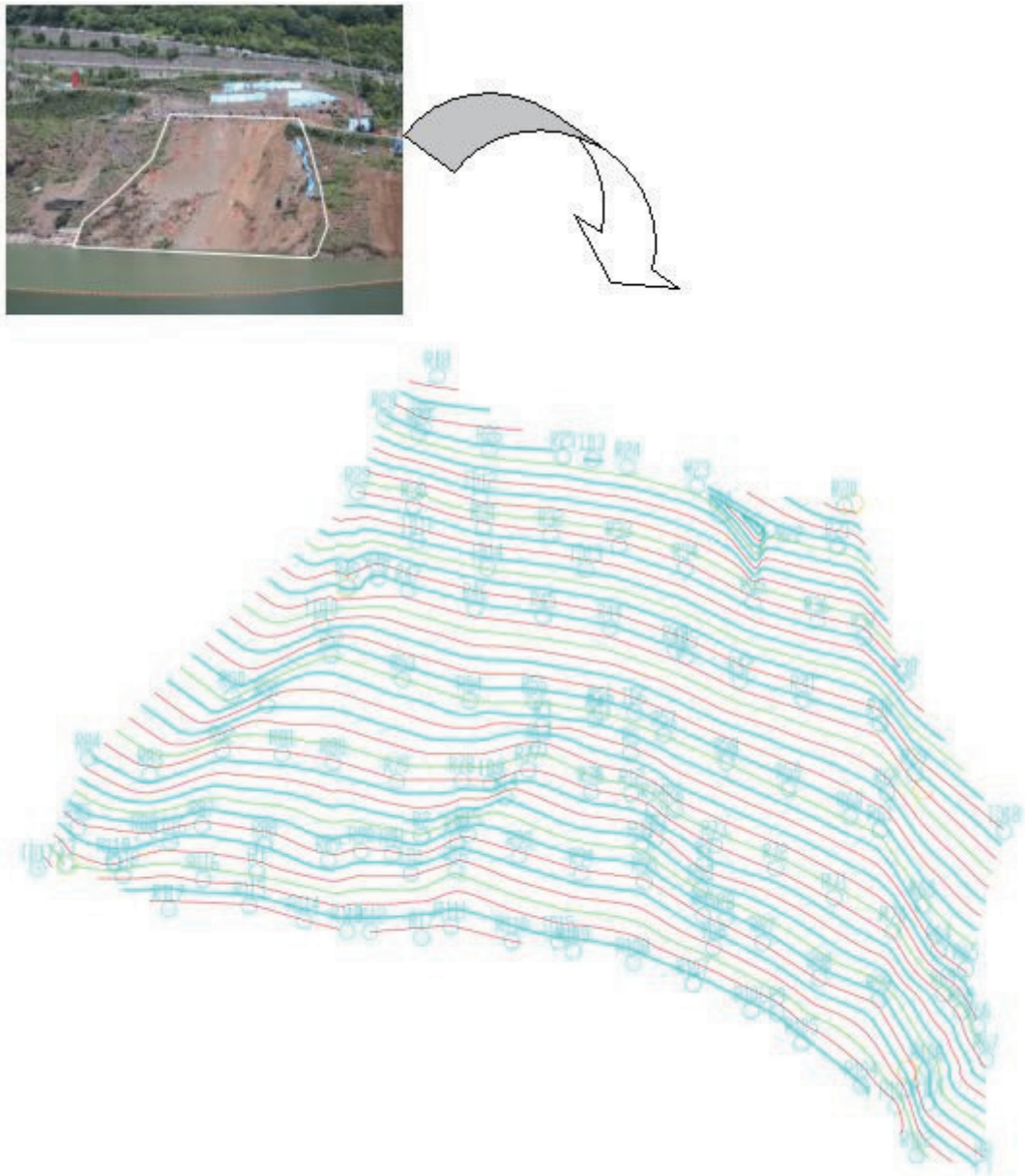


図 3.8 崩壊斜面用検証点位置

⑨観測結果の整理

観測した各測点は、国家座標系（世界測地系IX系）にて計算処理されるが、作業の効率化を図るため、今回の検証地域に最適な写真座標系を任意に設定することとした（写真 3.10）。具体的には、撮影ポイント 28 1 の位置座標を X 1000, Y 1000、28 2 を X 1000, Y 1172.394 となる XY 平面上の変換を実施したのち、画像解析時の高さ方向を Z 軸とするため Y 軸を中心に 90° 回転させた。

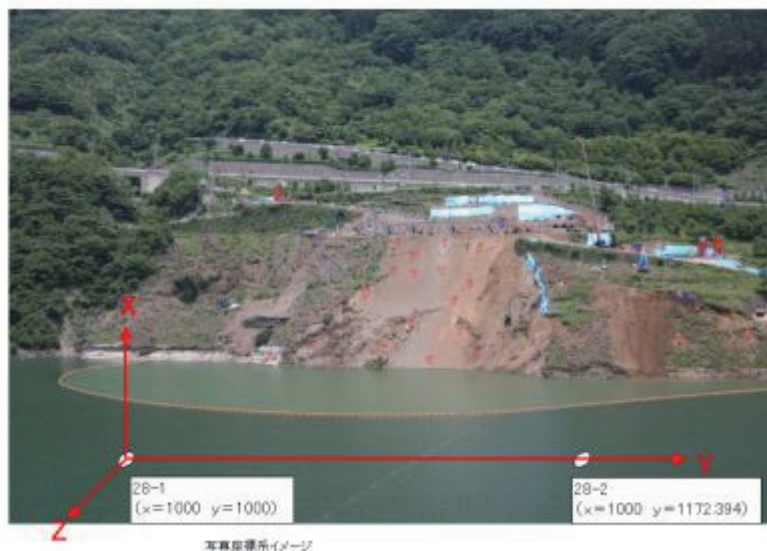


写真 3.8 写真座標系

本計算に使用したパラメータと結果を表 3.6 に示す。

表 3.6 計算諸元表

変換前の基準座標				
28 1	x1	-5101.726	y1	-85018.516
28 2	x2	-5073.215	y2	-84848.496
	Δx	28.51009985	Δy	170.0200938
28 1⇒28 2の方位角	a1	80.48082599	距離 l	172.3939038

$$\Delta x = x2 - x1$$

$$a1 = \text{TAN}^{-1}(\Delta y / \Delta x)$$

$$\Delta y = y2 - y1$$

$$\text{距離} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

変換後の基準座標				
28 1	X1	1000.000	Y1	1000.000
28 2	X2	1000.000	Y2	1172.394
	ΔX	0	ΔY	172.3939038
28 1⇒28 2の方位角	A1	0	距離 L	172.3939038

	係数值	備考
回転角	80.48082599	回転角 A1 a1
伸縮率	1.000000	伸縮率 L/l
COS回転角	0.165377657	
SIN回転角	0.986230313	

$$\text{新X} = X1 + (\text{COS } H \times \text{距離}l)$$

$$\text{新Y} = Y1 + (\text{SIN } H \times \text{距離}l)$$

計算結果は章末の座標リストに取りまとめた。

3.1.3 画像解析結果の精度比較

前節で撮影された画像と検証点を用いて精度検証を行った。以下に画像解析の結果と精度の比較についてまとめる。

(1) 解析の概要

重複撮影されたステレオペア写真から3次元データを取得する手法は多様である。本検討では、マニュアル観測による写真測量図化法に準拠した手法と、画像相関を用いた自動ステレオマッチング法の精度検証を行った。自動ステレオマッチングでは、垂直写真を想定した地形抽出ソフトウェア、垂直写真も対象とできる地形抽出ソフトウェア、崩壊地等の地形を抽出するために特化されたソフトウェアを使用して比較を行った。

(2) 解析作業の流れ

解析作業は図3.9に示すフローで実施した。マニュアル観測による写真測量図化法ではKLT社製のWinATLAS/DSP、ステレオマッチング法ではNECシステムテクノロジー社製のReal Space、LEICA GEOSYSTEMS社製のLPS（解析にはGIP社製のBINGO）、クラブウ社製のKuravesを使用して検証を行った。

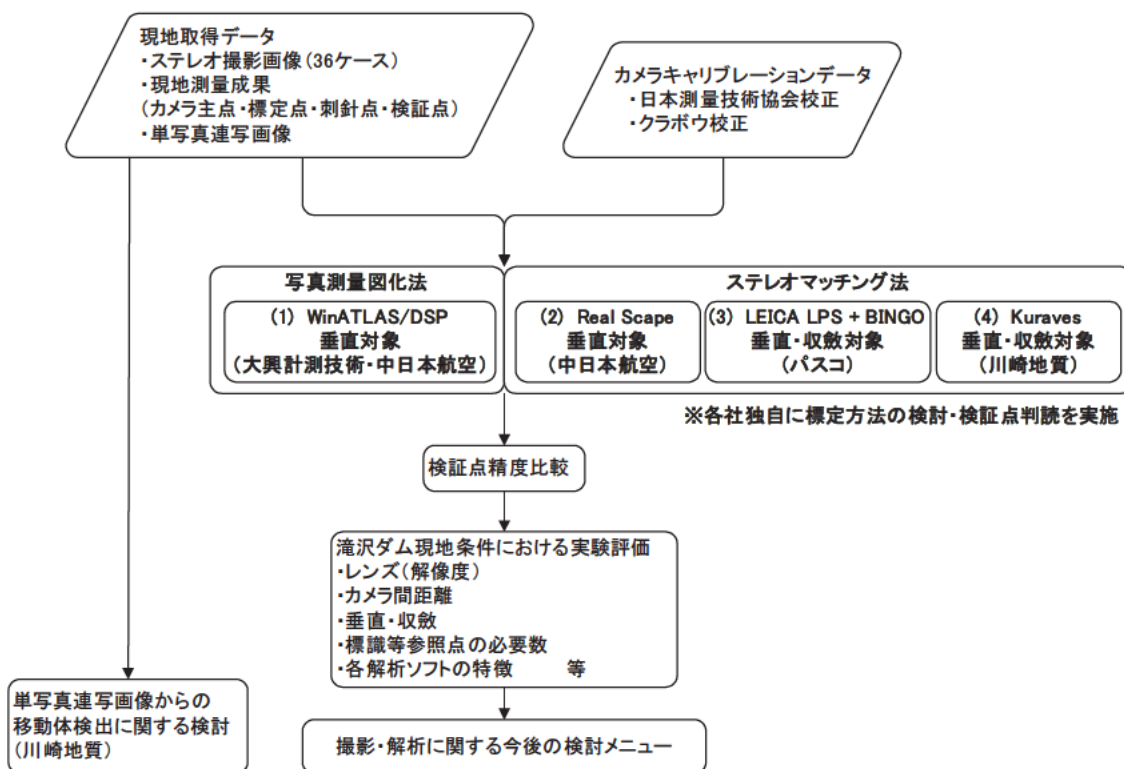


図3.9 解析作業の流れ

(3) カメラキャリブレーション

撮影に用いたカメラ (Canon EOS 5D)

は、日本測量協会においてレンズのキャリブレーションが実施されており、焦点距離、主点位

置ずれ、ラディアルディストーション（放射方向歪み）、タンジエンシャルディストーション（接線方向歪み）が算出されている。（http://www.jsurvey.jp/GIS_inst/calibration.html 参照）
 図 3.10 に各レンズのラディアルディストーション値を示す。なお、50mm レンズのキャリブレーションは2回実施されている。

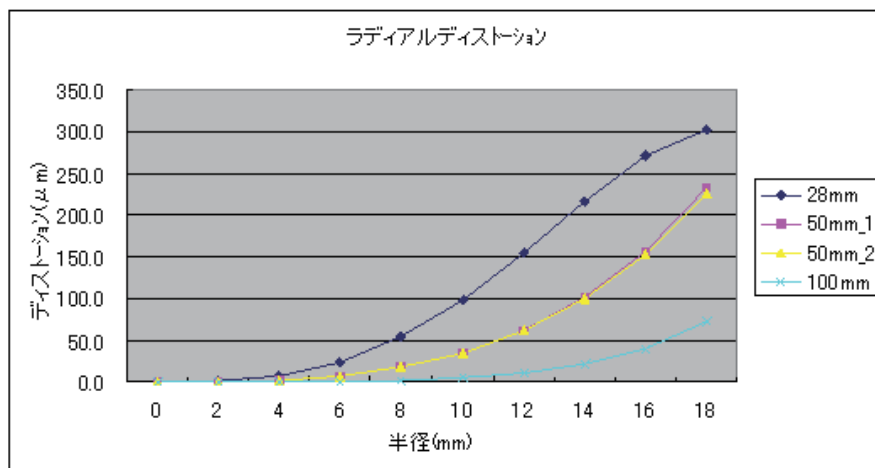


図 3.10 ラディアルディストーション

(4) 解析に用いた写真の組合せ

使用するソフトウェアにはそれぞれ特徴があり、良好な結果が得られると考えられる組合せを各々選択し、精度検証を実施することとした。解析に使用した画像と各担当、使用したソフトウェアを表 3.7 に、撮影位置と撮影範囲の概観を図 3.11 に示す。

表 3.7 解析に使用した組合せ

撮影地点	レンズ	垂直撮影			収斂撮影		
		90°			95°	100°	105°
①②	28mm	■	■				
	50mm	■	■	※	※	※	
	100mm				※		
③④	28mm	■	■				
	50mm	■	■	※	※		
	100mm						
⑤⑥	28mm	■	■				
	50mm	■	■				
	100mm	■	■				

※ 複数モデル解析を実施

担当	使用ソフト
大興計測	(1) WinATLAS/DSP ver 1.7.017 (KLT Associates)
中日本	(2) Real Scape(NEC)
パスコ	(3) LEICA LPS + BINGO
川崎地質	(4) Kuraves

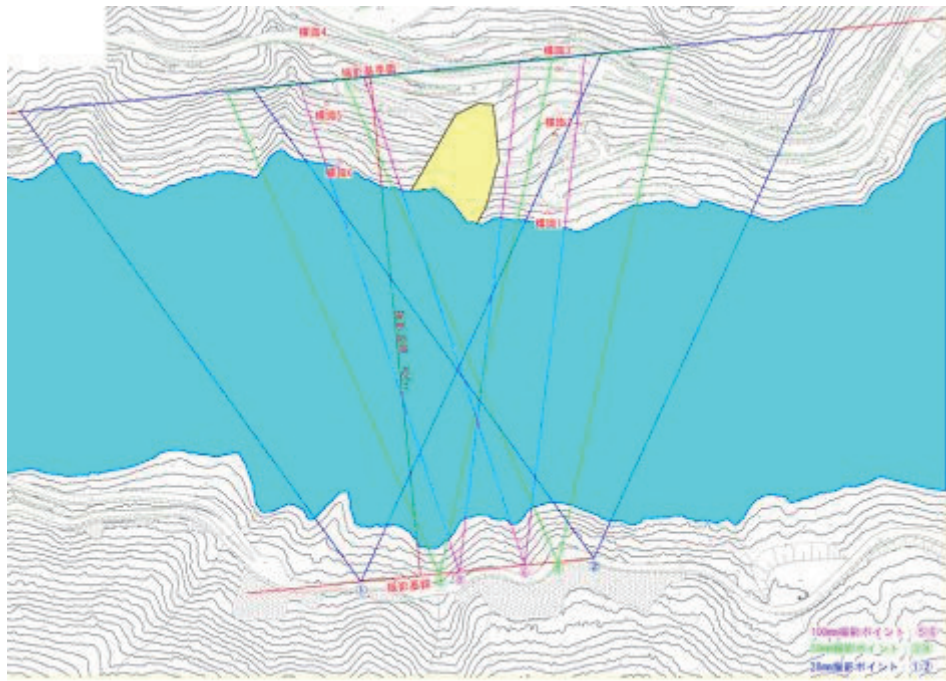


図 3.11 撮影位置と撮影範囲（平行撮影の場合）

3.1.4 精度検証

以下に各手法で実施された精度検証結果をまとめる。

(1)写真測量図化法による解析 (WinATLAS/DSP)

ソフトウェア「WinATLAS/DSP」を用いて、航空写真測量で一般的に行われているマニュアル観測による計測作業を実施し、精度を検証した。

①調整計算

基準点とステレオペア画像から、カメラ位置を算出した。ステレオペア画像は、右写真と左写真を立体的に見えるよう調整する。調整されたステレオペア画像は、写真空間上の座標で管理されているため、基準点を用いて実空間座標への整合を行う。実空間座標へ整合した結果、撮影したカメラ位置及び傾きが算出される。

②調整計算の点検

調整計算では、計算に用いた基準点へ最適に整合するように回転、伸縮される。そこで、算出されたカメラ位置を用いて、調整計算に使用した基準点を再読定することで調整計算の良否を確認することができる。このため基準点残差の確認を実施した。結果を表 3.8 と図 3.12 に示す。なお、表中のパターンの P12 28 90 1 は最初の 12 が撮影地点 1 と 2 を示し、28 が焦点距離 28mm レンズ、90 が 90 度方向の撮影（並行撮影）を示している。

表 3.8 基準点残差表

パター		p(m)	h(m)	点数	備考
P12 28 90 1	標準偏差	1.259	1.061	14	
	最大値	2.135	1.723	14	
P12 50 90 1	標準偏差	0.277	0.195	5	
	最大値	0.440	0.420	5	
P12 100 90 1	標準偏差				外部標定要素なし
	最大値				
P34 28 90 1	標準偏差	0.944	0.805	14	
	最大値	1.623	1.410	14	
P34 50 90 1	標準偏差	0.380	0.332	14	
	最大値	0.627	0.619	14	
P34 100 90 1	標準偏差				外部標定要素なし
	最大値				
P56 28 90 1	標準偏差	0.191	0.400	15	
	最大値	0.441	1.014	15	
P56 50 90 1	標準偏差	0.404	0.261	15	
	最大値	0.837	0.498	15	
P56 100 90 1	標準偏差	0.771	0.493	6	
	最大値	1.013	1.027	6	

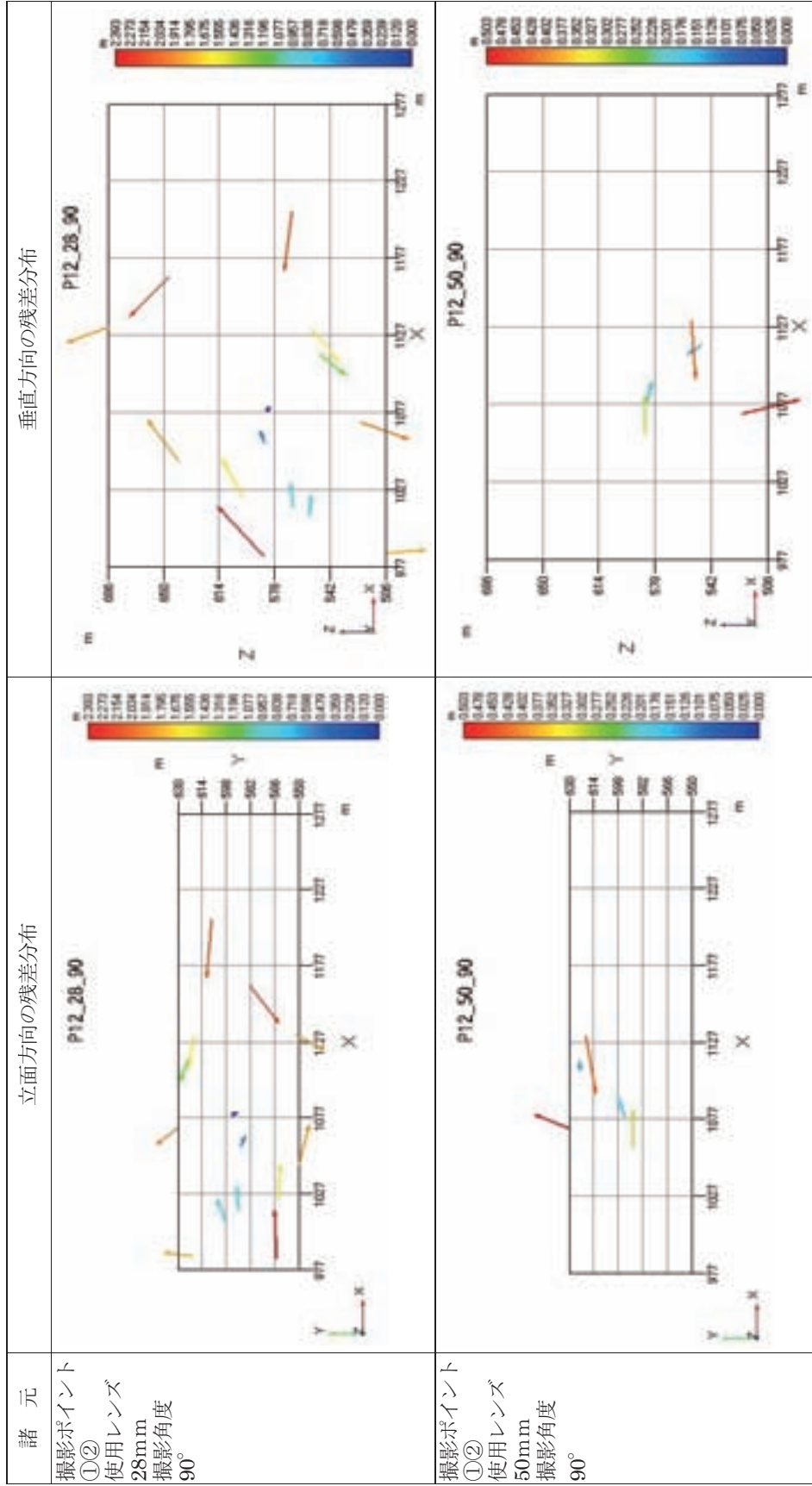


図 3. 12 基準点残差分布図 (1/4)

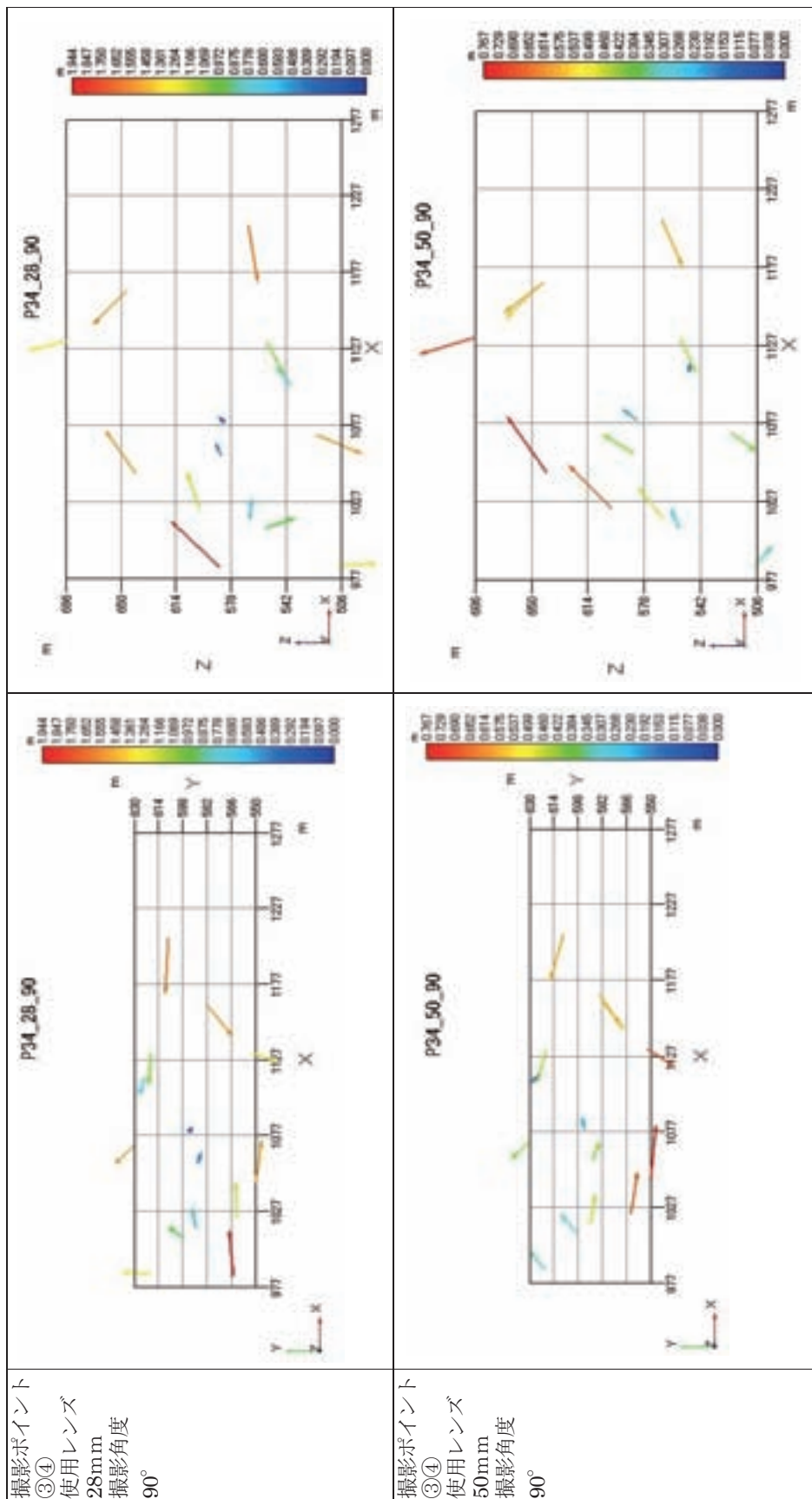


图 3.13 基準点残差分布图(2/4)

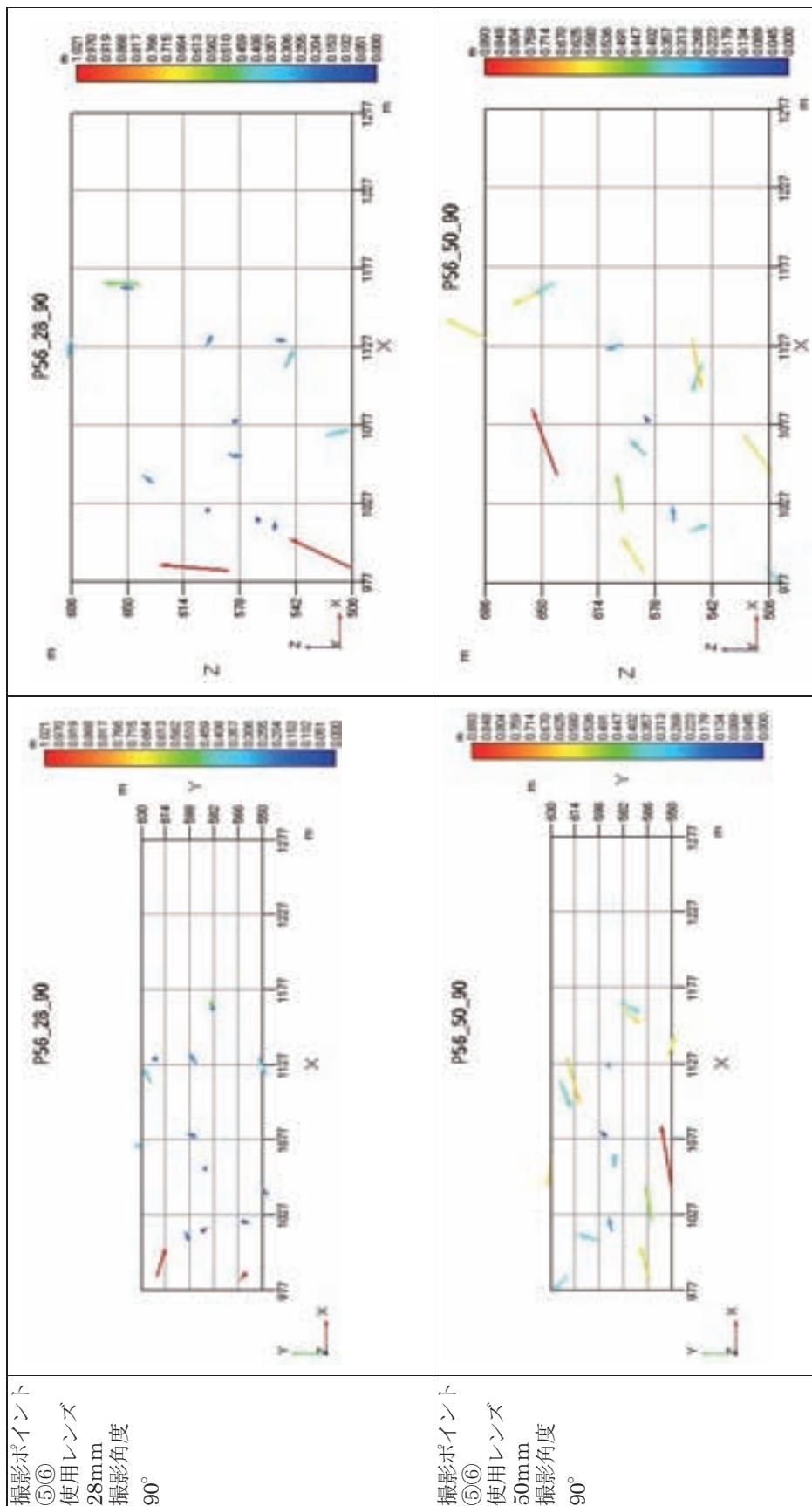


図 3.14 基準点残差分布図 (3/4)

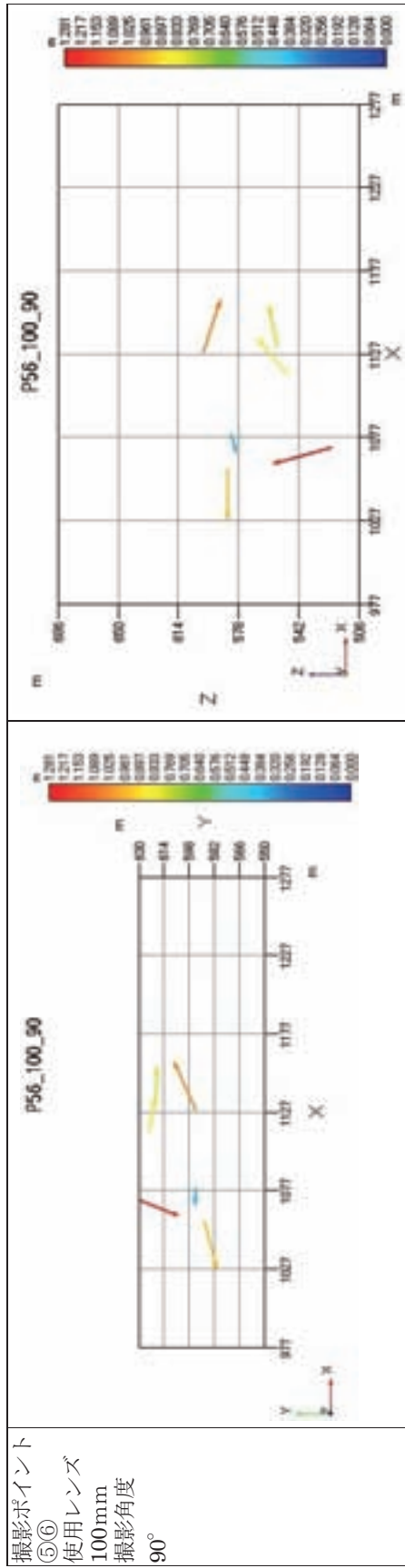


图 3.15 基準点残差分布図 (4/4)

この結果、残差が大きい位置は、奥行き方向の距離が長い道路法面やガードレール上の基準点であり、撮影基準面よりも遠くなれば精度が悪くなる傾向が確認できた。また、画像中心部の残差は小さく、周辺部の残差は大きいことも確認できた。計測対象エリアの周辺には基準点を配点し、精度を上げる必要があると考えられる。

③精度検証結果とまとめ

観測された検証点（ID 点）20 点について測定を行い、トータルステーションにより測定された座標値との較差により写真測量図化法の精度検証を実施した（表 3.9）。較差は標準偏差及び最大値により集計し評価している。

表 3.9 検証点較差表

パタ ン		h(m)	点数	備考
P12 28 90 1	標準偏差	0.770	18	
	最大値	1.278	18	
P12 50 90 1	標準偏差	0.351	15	
	最大値	0.509	15	
P12 100 90 1	標準偏差			外部標定要素なし
	最大値			
P34 28 90 1	標準偏差	0.704	18	
	最大値	1.079	18	
P34 50 90 1	標準偏差	1.720	15	
	最大値	2.731	15	
P34 100 90 1	標準偏差			外部標定要素なし
	最大値			
P56 28 90 1	標準偏差	0.205	18	
	最大値	0.399	18	
P56 50 90 1	標準偏差	0.144	15	
	最大値	0.450	15	
P56 100 90 1	標準偏差	0.141	15	
	最大値	0.266	16	

一般的に写真測量では、撮影位置間隔と撮影対象地までの距離によって精度が左右される。

本検討では、検証点による精度検証の結果、撮影間隔が短く、右写真と左写真のラップ率が高いパターンにおいて精度が高いことがわかる。これは写真測量の原理とは異なる結果である。今回の場合、撮影対象地が撮影方向へ傾斜し、奥行き距離が長いため、検証に用いた図化ソフトウェアではオペレータの人的誤差も誤差要因に含まれる。撮影間隔が短い場合、奥行き感が強調され、撮影間隔が長い場合は奥行き感が低調となる。この関係から、撮影間隔が狭い P56 パターンで精度が向上していると考えられる。

(2)ステレオマッチング法による解析 その1 (Real Space)

ソフトウェア「RealScape」を用いて、ステレオペア画像と前述 3.1.4 (1) ①で作成した調整計算結果の外部標定要素を使用し、全画素ステレオマッチング処理により DSM データを作成した。ここで作成された DSM データと基準点、ID 検証点、現地のランダム検証点および 5mDTM データの組合せて精度の検証を行った。解析パターンは航空写真測量手法との比較を前提として平行撮影について実施した。

①ステレオマッチング処理

ステレオペア画像 (写真 3.11)、パラメータ (カメラ情報・画像情報) 情報 (図 3.16)、前述 3.1.4 (1) ①で作成した調整計算結果の外部標定要素をセットして、全画素ステレオマッチング処理手法により DSM データを作成した (図 3.17)。



写真 3.9 ステレオペア画像 (レンズ 28mm、撮影地点 5-6、撮影角度 90°)

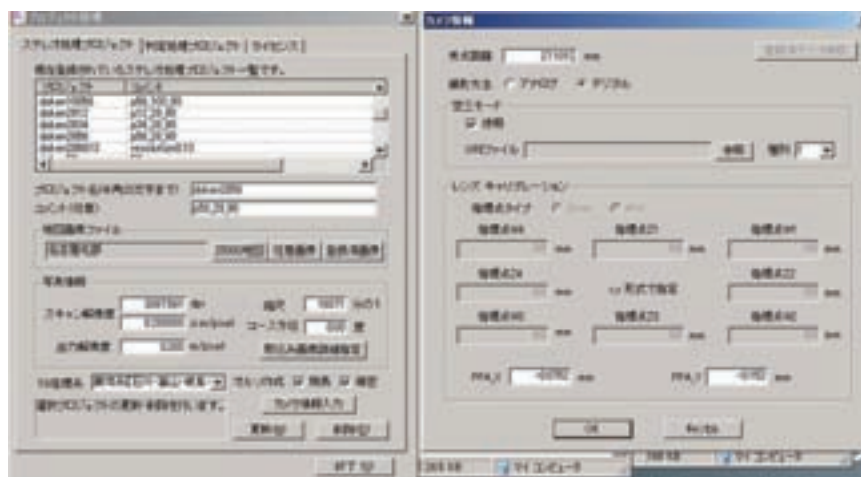


図 3.16 設定したパラメータ

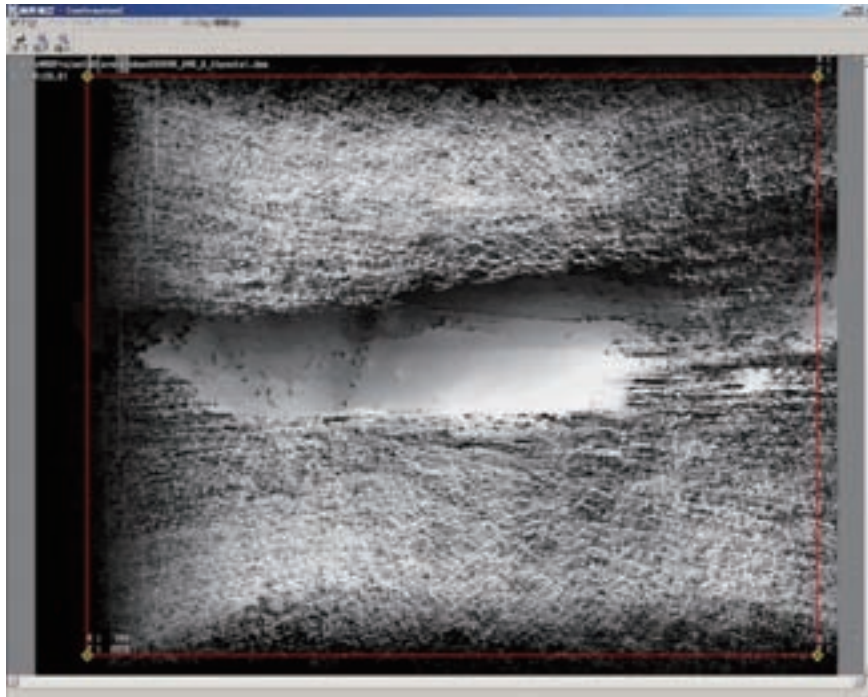


図 3.17 ステレオ処理結果の確認画面 (DSM 画像)

②ステレオマッチング処理の結果

ステレオマッチングを行った結果、P56 28 90 1のパターン以外はマッチング処理に問題が生じた (表 3.10)。問題が生じたパターンの例を図 3.18、図 3.19 に示す。

表 3.10 ステレオマッチング結果表

パターン	ステレオ処理	DMS作成	備考
P12_28_90_1	×		縦視差が発生しているためマッチングが不可能
P12_50_90_1	×		視差が大きくパラメータを適切に設定する必要がある
P12_100_90_1	-		外部標定要素なし
P34_28_90_1	×		縦視差が発生しているためマッチングが不可能
P34_50_90_1	×		視差が大きくパラメータを適切に設定する必要がある
P34_100_90_1	-		外部標定要素なし
P56_28_90_1	○	○	0.13mでDSMを作成
P56_50_90_1	△		一部分に大視差ノイズが発生している
P56_100_90_1	△		一部分に大視差ノイズが発生している



図 3.18 縦視差が発生したためにマッチングが不可能であった P 12 28 90 1 パターン



図 3.19 一部に大視差ノイズが発生のためにマッチングが不可能であった P 56 50 90 1 パターン

RealScape は航空写真測量用カメラ専用のステレオ処理ソフトウェアである。このため地上写真での問題が未解決である可能性が高いことや、標高差が 1 モデル内で大きく（崖と水部の境界付近は 630m、道路壁面 530m、山の中腹 430m）、視差の探索範囲を適切に設定する必要があると考えられるがその設定が不明であり、今回はデフォルトパラメータで処理をしたことなどが原因として考えられる。図 3.20～図 3.23 にマッチングが成功した事例を示す。

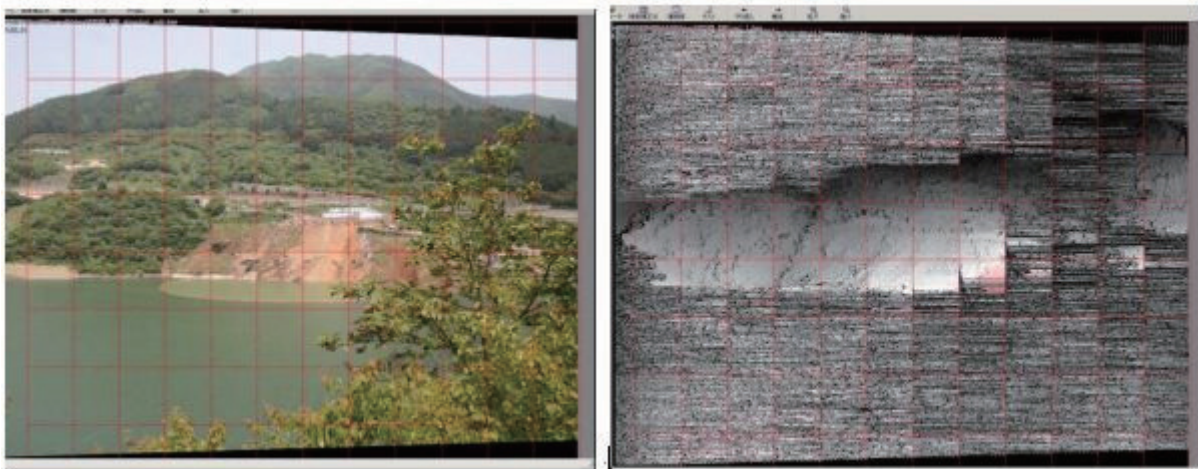


図 3.20 成功したステレオ処理の DSM 画像、使用した写真画像（左） P 56 28 90 1 パターン

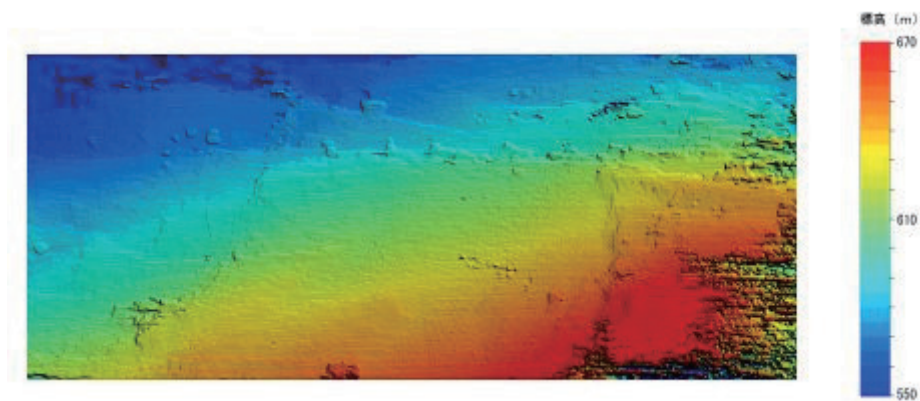


図 3.21 DSM データ (0.13m 分解能) の段彩図表示 (P56 28 90 1 パターン)

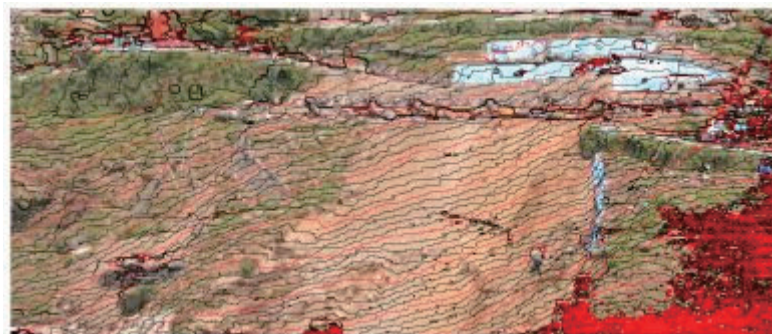


図 3.22 DSM データを使ったオルソコンター図表示 (P56 28 90 1 パターン)

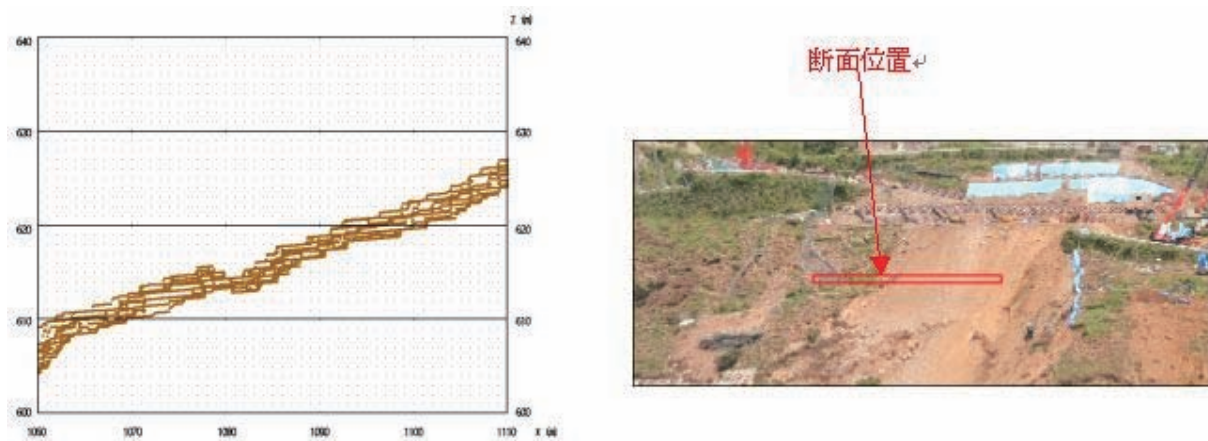


図 3.23 DSM データを使った断面図表示 (P56 28 90 1 パターン)

③精度検証

精度検証は、DSM データと表 3.11 に示す検証データの組合せで、標高値の残差を確認することにより行った。

表 3.11 精度検証対象表

	RealScapeDSMデータ (0.13m分解能)	備考
①基準点	○	基準点として設置した20点
②ID検証点	○	検証用に設置した17点
③現地のランダム検証点	○	検証用にTS観測で120点を設置
④5mDTMデータ	○	ソフトウェアはWinATLAS/DSPを使用 観測モデルはP56_28_90_1を使用 オペレータによる対話観測で5m×5mのグリッド作成

1)基準点の結果

基準点を用いて実施した精度検証結果を表 3.12 に示す。

表 3.12 精度検証結果 基準点

点名	与件座標(m)			dh標高格差(DSM 検証点)	dH	dH2
	X	Y	H			
H5	1016.171	589.847	566.021	-1.831	1.831	3.353
H6	1058.065	588.504	584.698	-0.198	0.198	0.039
S3	1045.433	550.169	640.256	-0.937	0.937	0.878
S4	1022.565	563.186	598.502	-1.981	1.981	3.924
S7	1079.174	593.929	582.606	0.204	0.204	0.042
S8	1049.510	590.039	578.836	-1.005	1.005	1.010
						9.246
標準偏差				1.241		
最大値				1.981		

2) ID 検証点の結果

ID 検証点を用いて実施した精度検証結果を表 3.13 に示す。

表 3.13 精度検証結果 ID 検証点

点名	与件座標(m)			dh標高格差(DSM- 検証点)	dH	dH2
	X	Y	H			
ID1	1079.759	551.205	646.988	-1.158	1.158	1.341
ID2	1088.490	586.513	602.435	0.658	0.658	0.433
ID3	1104.893	586.112	608.558	0.390	0.390	0.152
ID4	1116.733	584.290	616.327	1.716	1.716	2.945
ID5	1110.899	571.560	629.855	2.130	2.130	4.537
ID6	1104.813	565.839	634.633	0.867	0.867	0.752
ID7	1104.809	556.535	647.626	1.564	1.564	2.446
ID8	1108.790	550.839	659.465	1.092	1.092	1.192
ID9	1089.292	558.736	639.435	-1.196	1.196	1.430
ID10	1074.980	568.740	620.538	-0.788	0.788	0.621
ID11	1085.900	575.966	613.834	0.909	0.909	0.826
ID12	1093.006	581.467	610.520	1.040	1.040	1.082
ID13	1102.364	576.170	619.506	1.005	1.005	1.010
ID14	1092.554	575.128	617.694	1.306	1.306	1.706
ID15	1093.379	547.766	656.243	0.567	0.567	0.321
ID16	1056.205	551.605	639.789	-0.336	0.336	0.113
ID17	1042.548	547.913	640.261	1.214	1.214	1.474
						22.381
標準偏差				1.147		
最大値				2.130		

3) 現地のランダム検証点の結果

現地のランダム検証点を用いて実施した精度検証結果を表 3.14 に示す。

表 3.14 精度検証結果 現地のランダム検証点

R44	1103.79	571.68	625.79	1.712	1.712	2.931
R45	1097.33	571.67	623.46	1.703	1.703	2.900
R46	1090.65	571.66	621.51	1.357	1.357	1.841
R47	1084.27	571.64	618.54	1.964	1.964	3.857
R48	1081.38	571.63	616.87	1.186	1.186	1.407
R49	1078.19	572.21	617.26	-0.879	0.879	0.773
R50	1064.85	565.44	626.21	-0.904	0.904	0.817
R51	1068.17	562.12	627.71	-0.019	0.019	0.000
R52	1075.50	564.94	623.86	1.450	1.450	2.103
R53	1082.19	565.01	627.44	1.314	1.314	1.727
R54	1088.57	565.07	630.69	0.820	0.820	0.672
R55	1095.01	565.05	631.81	1.500	1.500	2.250
R56	1101.50	565.06	633.96	0.636	0.636	0.404
R57	1107.41	565.13	637.39	1.687	1.687	2.846
R58	1113.19	565.19	641.14	0.509	0.509	0.259
R72	1116.33	559.11	652.57	1.754	1.754	3.077
R73	1110.60	559.03	649.25	1.626	1.626	2.644
R74	1105.16	558.88	644.48	2.547	2.547	6.487
R75	1099.14	558.83	641.83	1.620	1.620	2.624
R76	1099.15	558.82	641.83	1.666	1.666	2.776
R77	1093.22	558.74	638.57	2.069	2.069	4.281
R78	1086.40	558.83	638.54	0.812	0.812	0.659
R79	1079.91	558.87	637.54	0.591	0.591	0.349
R80	1073.82	558.79	634.64	1.116	1.116	1.245
R81	1068.88	558.75	632.87	1.009	1.009	1.018
R82	1062.96	558.73	631.47	0.589	0.589	0.347
R83	1055.34	558.87	632.70	-1.257	1.257	1.580
R84	1049.41	557.75	630.06	0.880	0.880	0.774
R85	1047.20	552.69	636.82	0.092	0.092	0.008
R86	1053.66	552.54	639.04	-1.100	1.100	1.210
R87	1059.68	552.64	638.64	0.422	0.422	0.178
R88	1065.58	552.00	641.66	0.904	0.904	0.817
R89	1071.72	552.84	644.25	-0.307	0.307	0.094
R90	1075.13	552.77	643.90	0.687	0.687	0.472
R91	1078.22	552.78	644.70	-0.184	0.184	0.034
R92	1084.92	552.65	644.52	-0.130	0.130	0.017
R93	1090.91	552.71	647.01	1.491	1.491	2.223
R94	1096.82	552.79	649.83	0.818	0.818	0.669
R95	1102.98	552.80	651.70	1.060	1.060	1.124
R96	1108.28	552.98	656.14	0.877	0.877	0.769
R97	1113.77	553.10	659.81	1.029	1.029	1.059
R105	1115.99	547.53	670.52	1.793	1.793	3.215
R106	1111.47	547.33	666.46	2.076	2.076	4.310
R107	1106.13	547.17	662.77	1.962	1.962	3.849
R108	1100.51	547.06	659.64	1.297	1.297	1.682
R109	1094.68	547.02	657.48	1.214	1.214	1.474
R110	1088.70	547.00	655.45	1.316	1.316	1.732
R111	1082.86	546.92	652.96	1.376	1.376	1.893
R114	1068.28	546.94	649.94	1.088	1.088	1.184
R115	1063.07	546.82	647.49	1.158	1.158	1.341
R116	1058.89	549.26	644.06	-0.565	0.565	0.319
R118	1050.91	549.37	642.36	-0.598	0.598	0.358
R119	1050.20	551.43	640.88	-1.939	1.939	3.760
						192.500
標準偏差				1.317		
最大値				3.263		

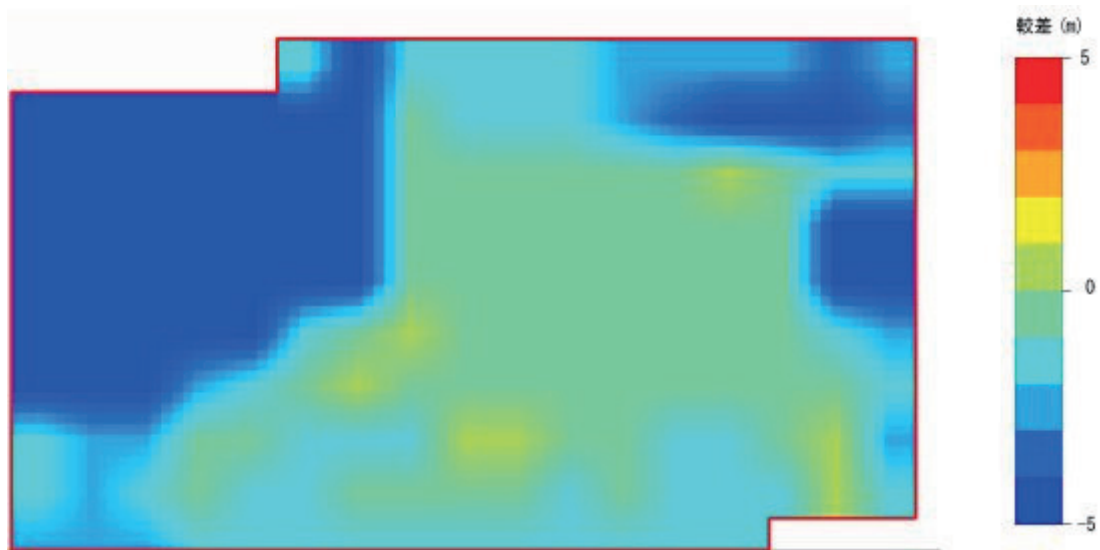


図 3.24 標高差段彩図表示

4) 5mDTM の結果

5mDTM を用いて実施した精度検証結果を表 3.15 に示す。

標準偏差 (m)	2.354
最大値 (m)	9.593
点数	221

表 3.15 精度検証結果 現地の 5mDTM



図 3.25 5mDTM データから作成したオルソコンター図表示

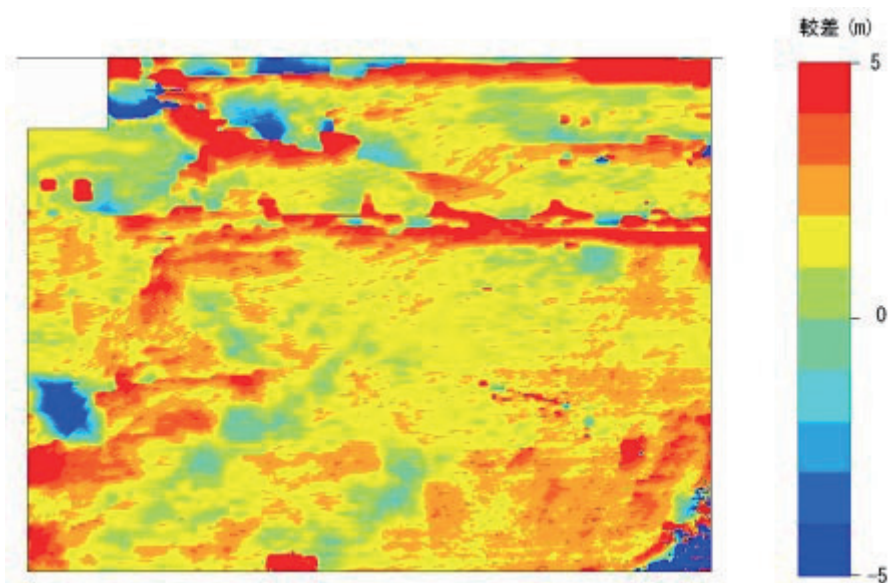


図 3.26 標高差段彩図表示

5)精度検証のまとめ

RealScape を使ったステレオマッチング手法による DSM データの取得は、9 パターンの内、P56 28 90 1 の 1 パターンしか出来なかった。この原因としては、RealScape は航測カメラ専用のステレオ処理ソフトウェアであるため、地上写真を使った条件下での問題点が解決されていない可能性が高い。また、地上写真を使ったモデルは、航測写真を使ったモデルに比べ標高差（奥行き方向）が大きいいため、視差の探索範囲を適切に設定する必要がある。しかし、その設定が不明であるため、今回は航測用のデフォルトパラメータで処理をしたことが影響していると考えられる。

P56 28 90 1 の 1 パターンで取得された DSM データは 1 モデルの部分的（崩壊地）な狭い範囲でしか作成できなかった。また、その標高精度は、写真測量図化法等他の手法と比べ 1 桁オーダーで劣っていた。

以上から本手法は現状のまま利用することは困難であり、利用するためには地上写真を考慮した改良が必要であると思われる。

(3) ステレオマッチング法による解析 その2 (LPS)

ソフトウェア「LPS」を用いて、画像の自動処理によるステレオマッチングの精度検証を行った。LPSは基本的には一般的な地形データを自動抽出し、オルソ画像等を作成するためのソフトウェアであり、衛星画像、航空写真のほか、地上で取得された写真画像のモデル構築をサポートしている。ここでは、画像の解像度と撮影範囲を考慮して、最も使用される可能性の高い50mmレンズを用いて撮影された画像を基に精度検証を行った。検証の流れとしては、最適な組合せの検討、最適な組合せによる精度検証、ステレオマッチングによる精度検証の3段階で実施した。

①カメラのキャリブレーションデータ

本検証では日本測量協会によるキャリブレーションで算出された焦点距離、主点位置のずれ量およびラディアルディストーション量を使用した。タンジェンシャルディストーションは影響が小さく、処理ソフトウェアに直接入力できないことから使用していない。

②座標系

3.1.2 (5) ⑨で定義された座標系を処理ソフトウェアに適合させるため、入れ替え作業を行った。概略の座標軸と画像を図3.27に示す。

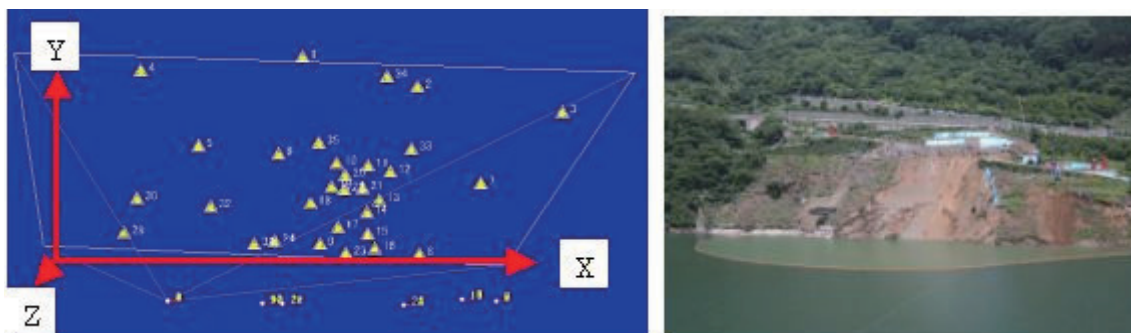


図 3.27 座標系定義と対象地域画像

③最適な組合せの検討

今回の実証実験では、50mmレンズを用いて6箇所からそれぞれ4方向の画像24枚が取得されている。平均の撮影縮尺は1/7,600から1/7,800であり、1画素の地上実寸は6cm程度である。この24枚の画像の組合せのうち、どの組合せが最適なものであるか検討を行った。

撮影された画像上で標識点、指針点を観測し、このうちの4点を基準点として拘束し、残りの点を検証点として残差を確認した。なお、同時に計測されたカメラ位置も計算に使用している。図3.28から図3.39に各組合せにおける撮影範囲と残差を示す。図中の各検証点から放射状に伸びるベクトルがXY平面上の残差、上下方向のベクトルがZ軸方向（奥行き方向）の残差を示す。

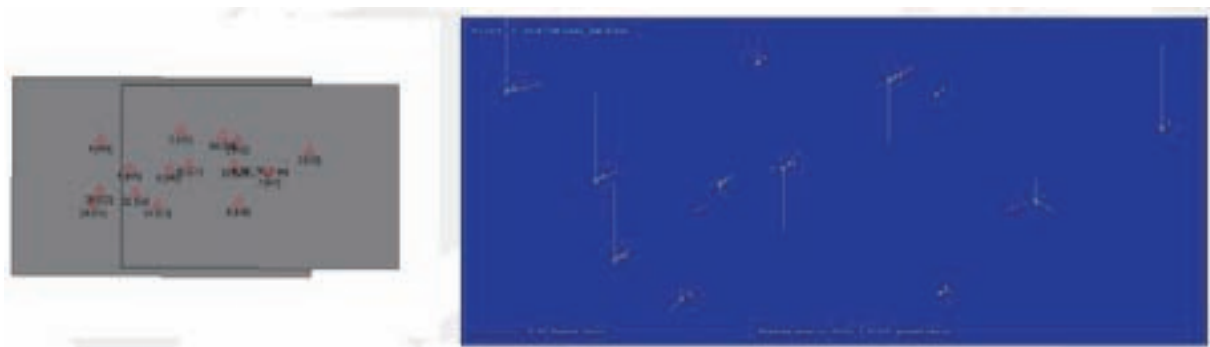


図 3.28 撮影地点 3-4 撮影角度 90 度

この組合せは 60%のオーバーラップを持つ一般的な平行撮影である。外周部の Z 軸方向の残差が若干大きい。

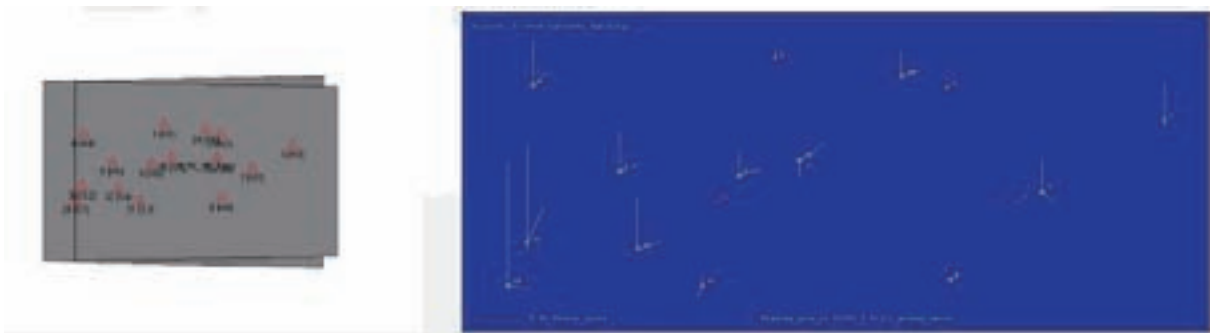


図 3.29 撮影地点 3-4 撮影角度 95 度

収斂撮影でほぼ 2 枚の画像の撮影領域が重なっている。外周部の Z 軸方向の残差が若干大きい。

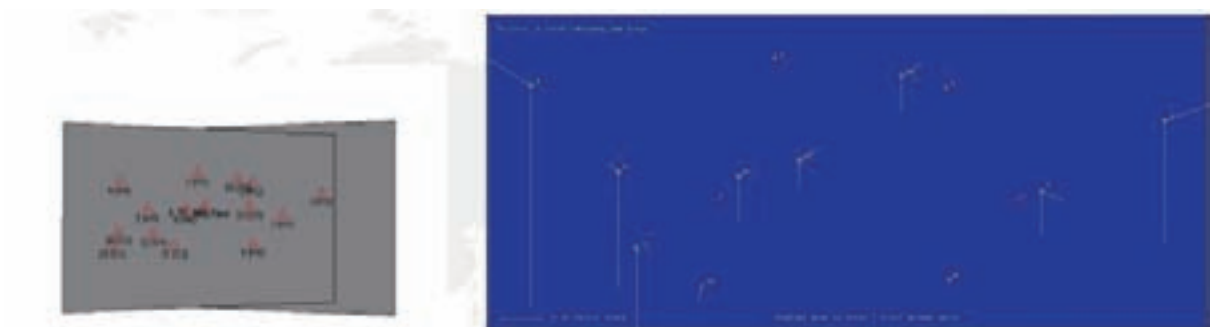


図 3.30 撮影地点 3-4 撮影角度 100 度

収斂撮影であるが、収斂角が大きすぎるため重複領域が少なくなっている。外周部の Z 方向の残差が顕著になっている。

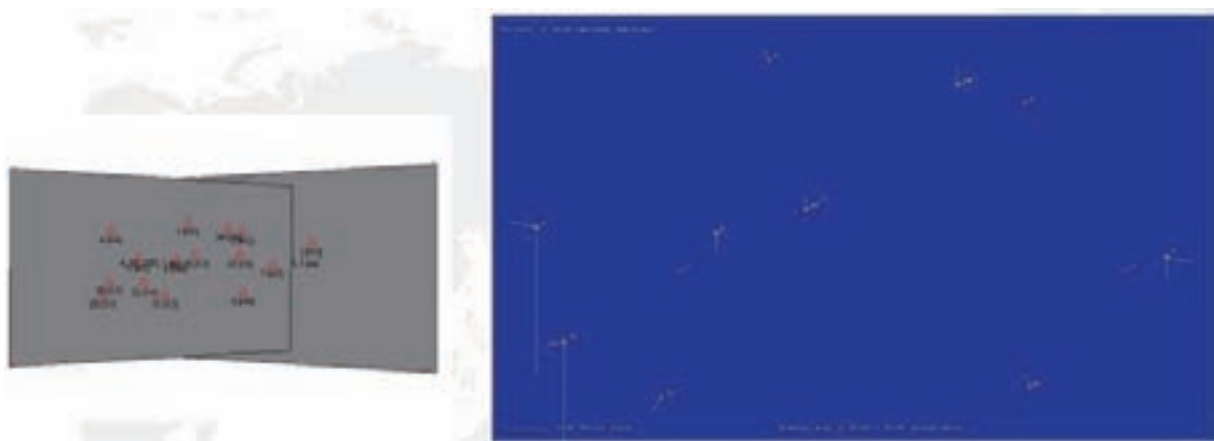


図 3.31 撮影地点 3-4 撮影角度 105 度

さらに収斂角が大きくなり重複領域が 50%以下となっている。



図 3.32 撮影地点 1-2 撮影角度 90 度

平行撮影であるが、基線が長すぎるため重複領域が少ない。

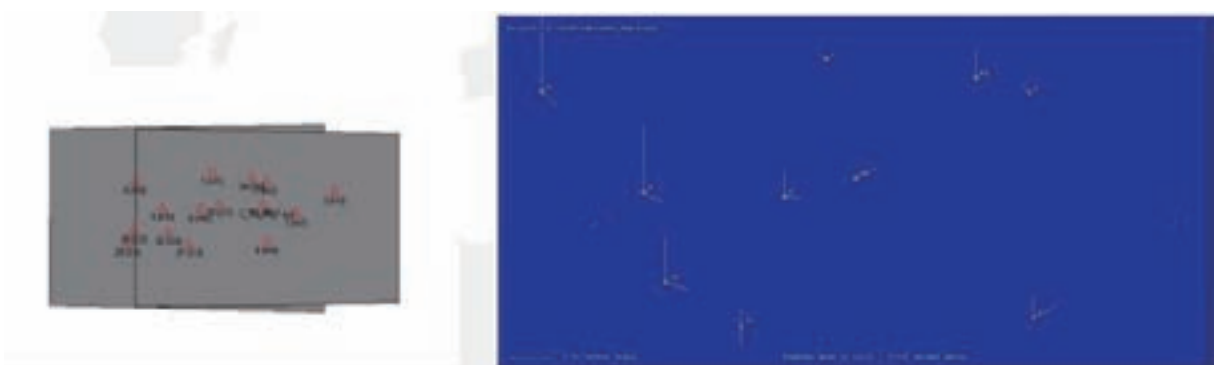


図 3.33 撮影地点 1-2 撮影角度 95 度

収斂撮影で 60%程度の重複領域を持つ。外周部の Z 軸方向の残差が若干大きい。

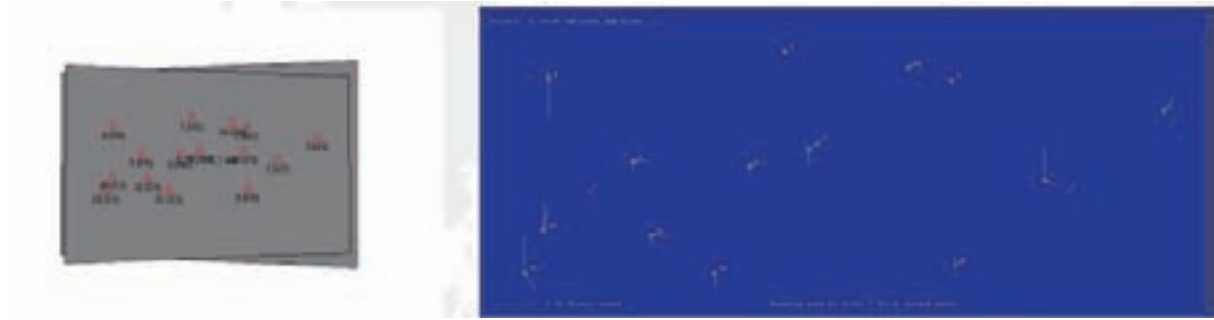


図 3.34 撮影地点 1-2 撮影角度 100 度

収斂撮影でほぼ 100%の重複領域を持つ。精度的にも安定している。

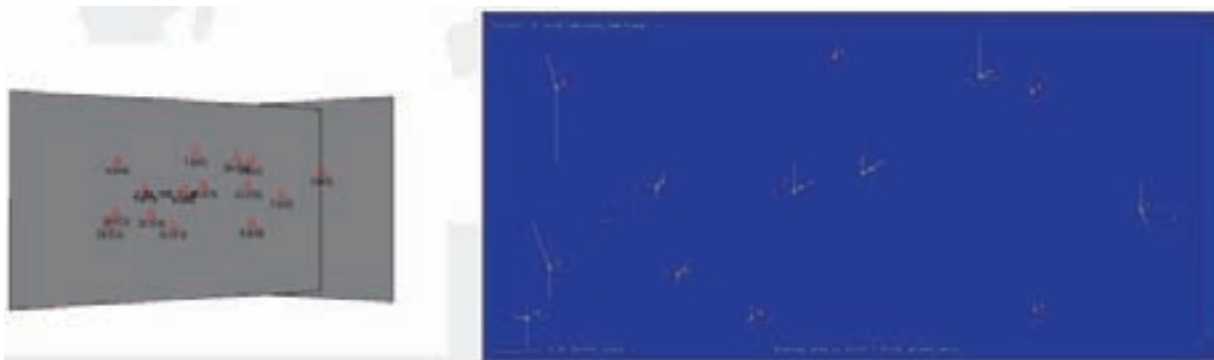


図 3.35 撮影地点 1-2 撮影角度 105 度

収斂撮影であるが、収斂角が大きすぎるため重複領域が少なくなっている。外周部の残差が若干大きくなっている。



図 3.36 撮影地点 5-6 撮影角度 90 度

平行撮影で 80%以上の重複領域を持つ。Z 軸方向の残差が大きい。基線高度比の影響と考えられる。

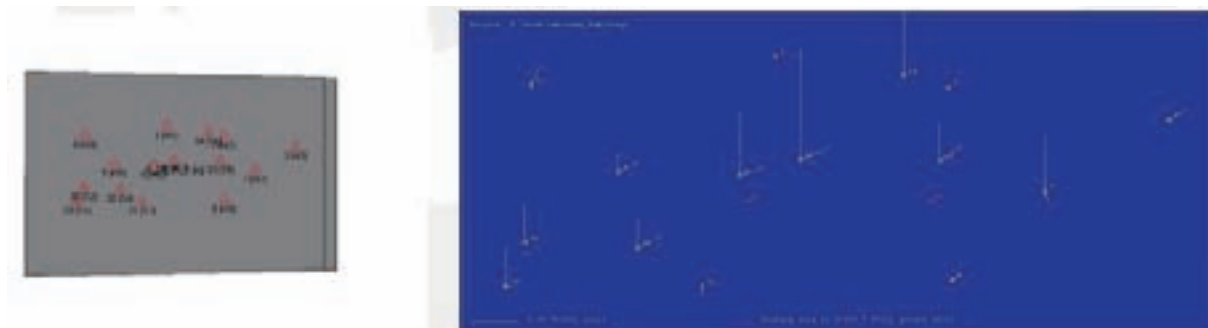


図 3.37 撮影地点 5-6 撮影角度 95 度

収斂撮影で 100%の重複領域を持つ。精度的には安定していると考えられる。

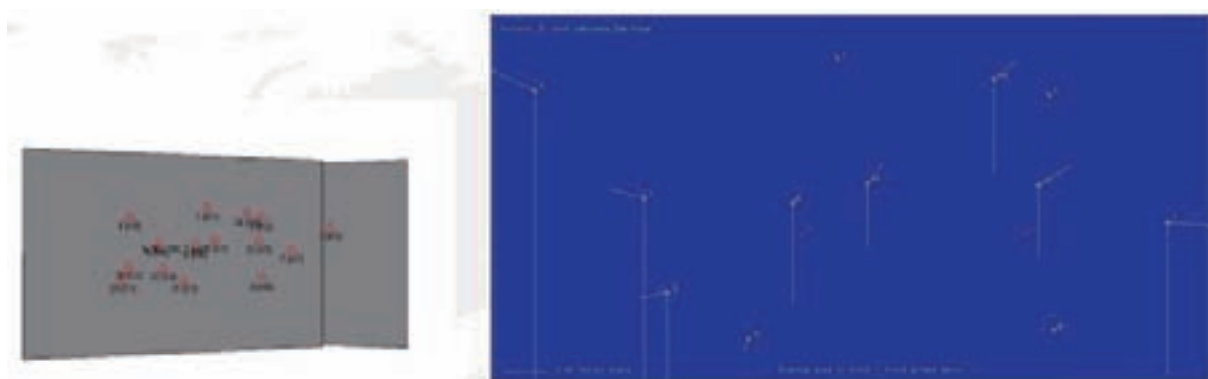


図 3.38 撮影地点 5-6 撮影角度 100 度

収斂撮影であるが、収斂角が大きすぎるため重複領域が少なくなっている。外周部の残差が大きく劣化している。

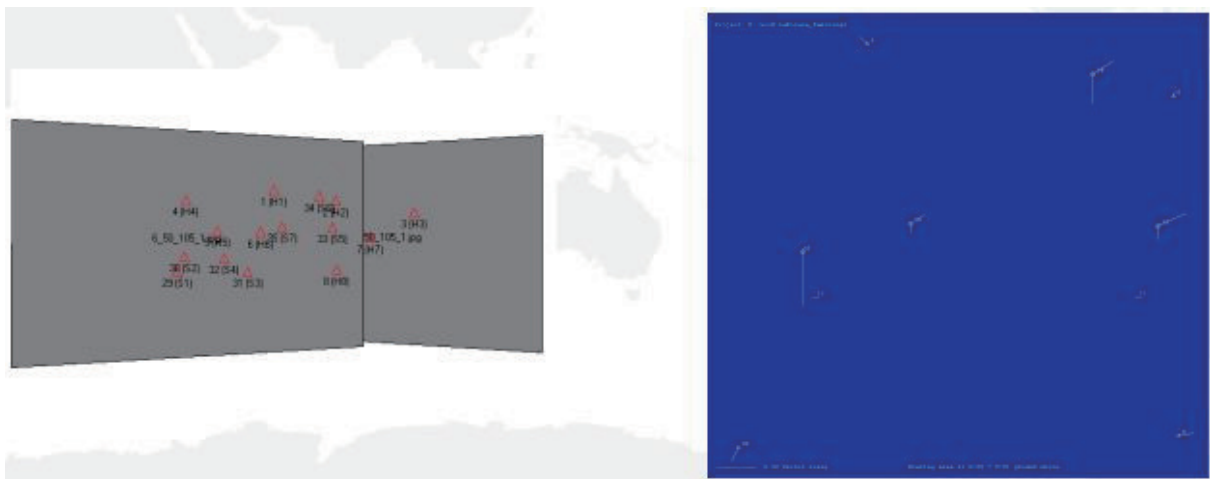


図 3.39 撮影地点 5-6 撮影角度 105 度

収斂撮影であるが、収斂角が大きすぎるため重複領域がさらに少なくなっている。

④最適な組合せの検討結果

以上の結果から以下の点が確認できた。

- ・平行撮影よりも収斂撮影の方が若干精度が高い。
- ・重複率 100%がよいと考えられる。
- ・基線が短くなると基線高度比の関係から Z 軸（奥行き方向）の精度が劣化する。

この結果から 3 4 の 90 度、95 度、1 2 の 100 度の組合せと、さらにこれらを組合せたマルチ画像による多重観測を想定した場合の精度を検証することとした。

⑤最適な組合せの精度検証

前節の検討結果を踏まえ、下記の組合せについて精度検証を行った。

- ・ステレオペア（2 画像）：3 4 90 度、3 4 95 度、1 2 100 度 の 3 パターン
- ・マルチペア（4 画像）：3 4 90 度と 1 2 100 度の組合せ、3 4 95 度と 1 2 100 度 の組合せの 2 パターン

検証には観測できるすべての標識点、指針点を画像上で観測し、H1、H2、S3、H8 の 4 点を基準点として拘束し、残りの点を検証点として残差を求めた。なお、検証測量時に計測されたカメラ位置も既知の値として計算に使用している。各組合せの基線高度比は 1 2 で 1/2.3、3 4 で 1/3.8 程度である。

図 3.40 から図 3.44 および表 3.16 に各パターンの残差と残差の集計結果を示す。

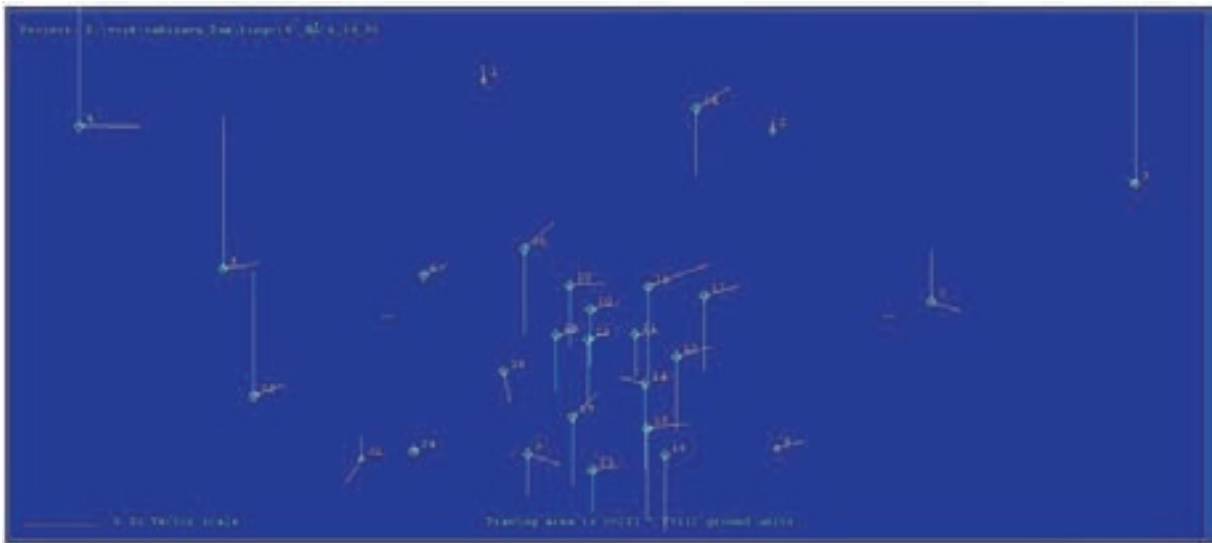


图 3.40 摄影地点 3-4 摄影角度 90 度

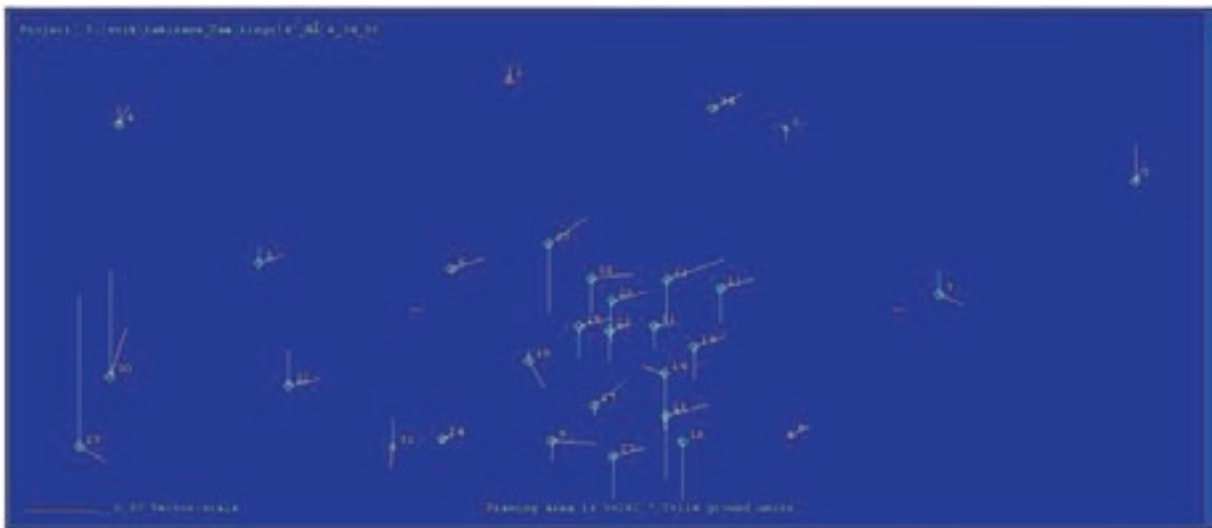


图 3.41 摄影地点 3-4 摄影角度 95 度

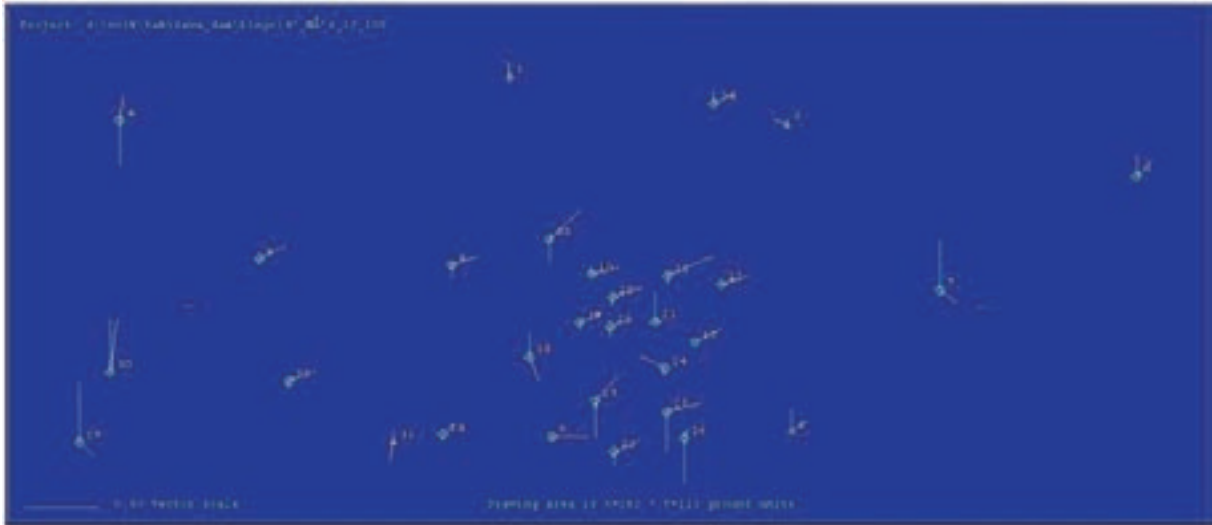


图 3.42 摄影地点 1-2 摄影角度 100 度

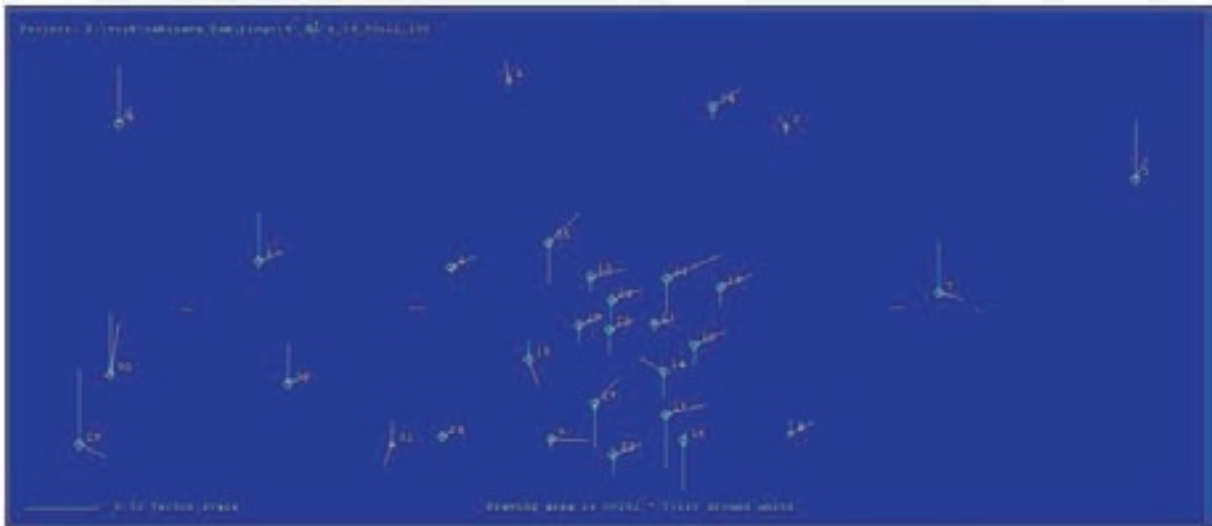


图 3.44 摄影地点 3-4 摄影角度 90 度 & 摄影地点 1-2 摄影角度 100 度

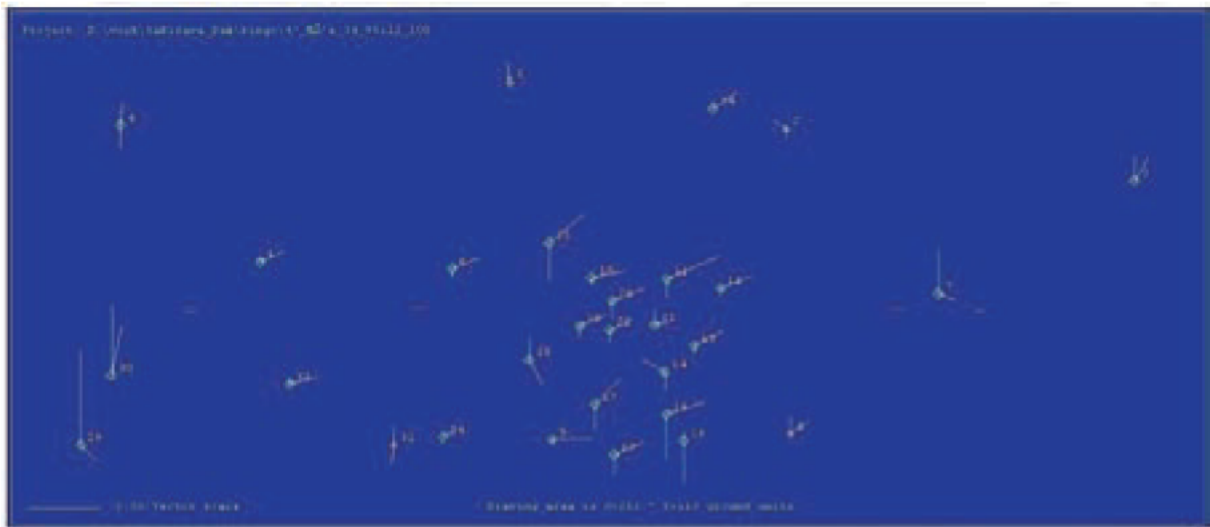


図 3.45 撮影地点 3-4 撮影角度 95 度 & 撮影地点 1-2 撮影角度 100 度

表 3.16 残差集計表

4 点固定	σ_0 (μm)	内的精度			外的精度		
		SX	SY	SZ	DX	DY	DZ
3 4 90	6.2	0.07	0.07	0.28	0.21	0.09	0.66
3 4 95	3.0	0.06	0.06	0.15	0.20	0.11	0.33
1 2 100	3.3	0.06	0.06	0.11	0.16	0.11	0.18
3 4 90&1 2 100	6.5	0.06	0.07	0.17	0.18	0.12	0.25
3 4 95&1 2 100	3.8	0.05	0.05	0.11	0.18	0.12	0.21

⑥最適な組合せの精度検証結果

表 3.16 の残差集計表において σ_0 は画像観測の精度を測る指標である。内的精度は各点の理論的な精度であり、外的精度が実際の検証点残差である。ここでは、全検証点の平均二乗誤差を外的精度として記述している。この結果、以下の点が確認できた。

- ・ 検証点残差では 1 2 の 100 度ステレオが最も良好な結果である。
- ・ 理論精度を見ると収斂撮影の 4 枚の組合せが最も精度が高い。
- ・ 理論精度は平面で画素の 1~1.6 倍、奥行き方向で画素の 2~4.7 倍に相当する。
- ・ 検証点残差では平面で画素の 3.2~3.8 倍、奥行き方向で画素の 3~11 倍に相当する。

⑦ステレオマッチングによる精度検証

前節で精度検証を実施した組合せで、ステレオマッチングによる精度検証を実施した。使用したソフトウェアは LEICA GEOSYSTEMS 社製の LPS である。LPS の処理では観測可能な標識点、指針点をすべて基準点として拘束し、調整計算を実施した。カメラ位置も使用している。調整計算後、自動数値地形モデル抽出機能を用いて 25cm×25cm のグリッドデータを作成

した。通常地形モデルを作成する際は、地形の特徴に応じてフィルタリングを施し平滑化を行うが、今回の検証ではこの処理を行わず、算出された値をそのまま解析することとした。また、数値地形モデルの評価は、検証点の平面位置における標高値の残差を確認することにより行った（表 3.17）。なお、明らかに異常な点（表中の網掛け表示）は集計から除いた。

表 3.17 数値地形モデル標高残差集計表

	3 4 90 度	3 4 95 度	1 2 100 度	3 4 90 度 & 1 2 100 度	3 4 95 度 & 1 2 100 度
ID1	0.22	0.21	0.02	0.24	0.05
ID2	0.51	0.00	0.17	0.11	0.13
ID3	0.40	0.20	0.04	0.09	0.16
ID4	0.24	0.12	0.06	0.27	0.04
ID5	0.02	0.04	0.15	0.09	0.06
ID6	0.33	0.31	0.17	0.04	0.11
ID7	0.15	0.01	0.11	0.10	0.10
ID8	0.18	0.20	0.10	0.18	0.08
ID9	0.07	0.05	0.09	0.06	0.14
ID10	0.03	0.04	0.15	0.07	0.07
ID11	0.12	0.42	0.24	0.10	0.09
ID12	0.12	0.06	0.17	0.17	0.06
ID13	0.03	0.09	0.24	0.29	0.09
ID14	0.31	0.07	0.12	0.41	0.12
ID15	0.40	0.12	0.22	0.52	0.07
ID16	0.24	0.18	0.01	0.05	0.04
ID17	0.43	0.28	0.07	0.04	0.04
標準偏差	0.24	0.17	0.11	0.22	0.09
平均二乗誤差	0.26	0.19	0.15	0.22	0.09
最大残差	0.51	0.42	0.24	0.52	0.16

*網掛け表示の点は集計から除外している

⑧ステレオマッチングによる精度検証結果

この結果から以下の点が確認できた。

- ・3 4 95 度 & 1 2 100 度（6 ペア）が最良である。
- ・1 画素に近い Z 軸（奥行き）方向の精度を得ている。この結果は、想定精度よりもよい結果である。

- ・ 1 2 100 度も比較的近い値を得ている。

⑨数値地形モデルの検証

画像相関法による自動マッチングで抽出された数値地形モデルを用いて等高線を生成し、実際の地形と視覚的に比較した（図 3.45）。

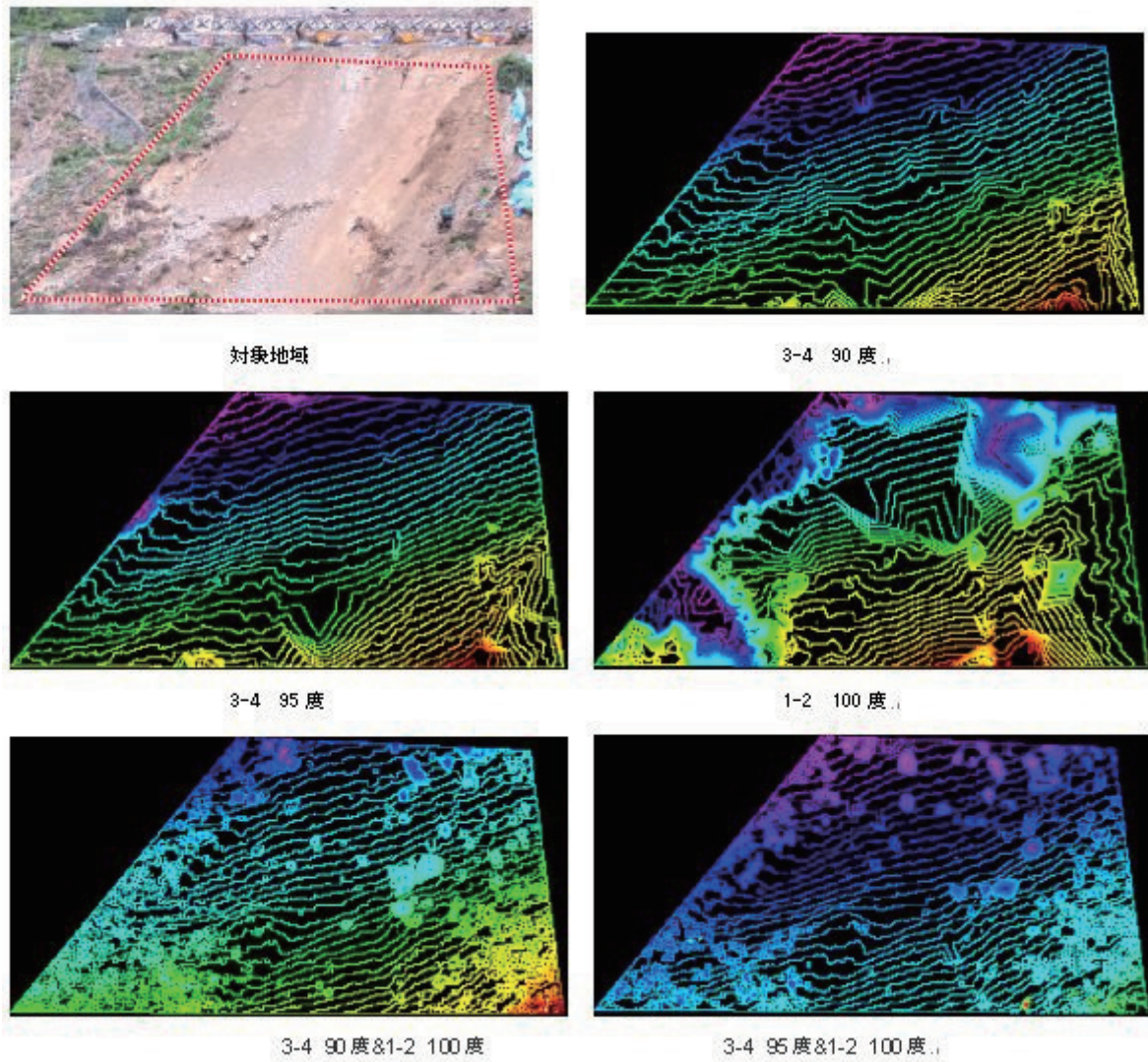


図 3.45 数値地形モデルから生成した等高線図

数値地形モデルのマッチング状況をマッチング時の相関係数を比較することにより確認した。図 3.46 に相関係数の分布図を示す。図中の黄緑色の領域相関係数 0.85 以上、緑色領域が 0.75 以上で黄色領域が 0.5 以上を示す。オレンジ色、赤領域は補間領域で、精度的に問題があるとされる領域である。

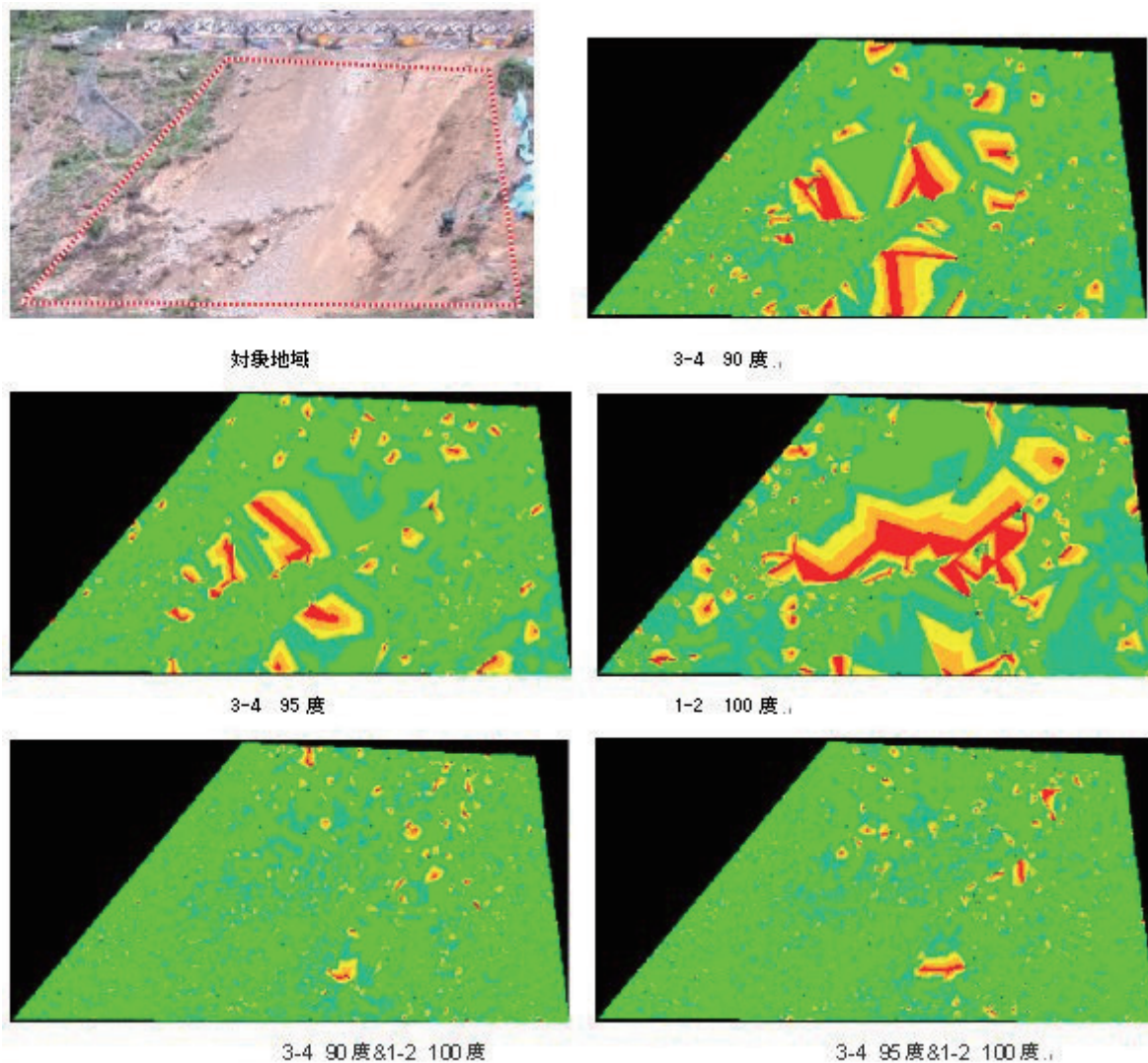


図 3.46 マッチング時の相関係数分布図

マッチング処理で抽出された標高点を図 3.47 に示す。

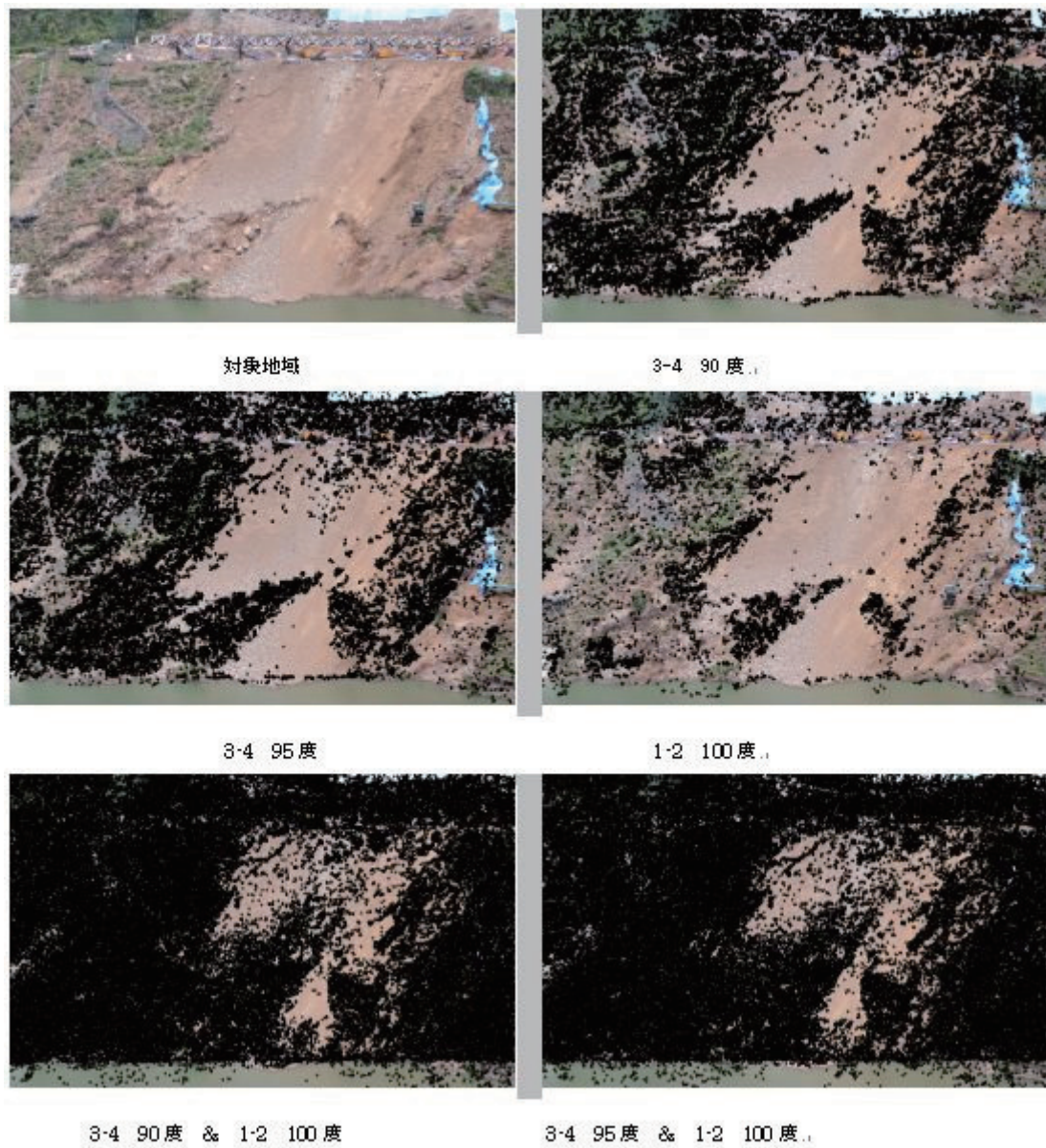


図 3.47 マッチング処理で抽出された標高点分図

⑩数値地形モデルの検証

上述の結果から、平行撮影のステレオでもマッチングがかからないエリアが存在していることがわかる。一方、マルチ画像の組合せでは抽出点が多く、精度向上が見られた。

図 3.48 に、マルチ画像で使用された組合せ個々の抽出結果を示す。

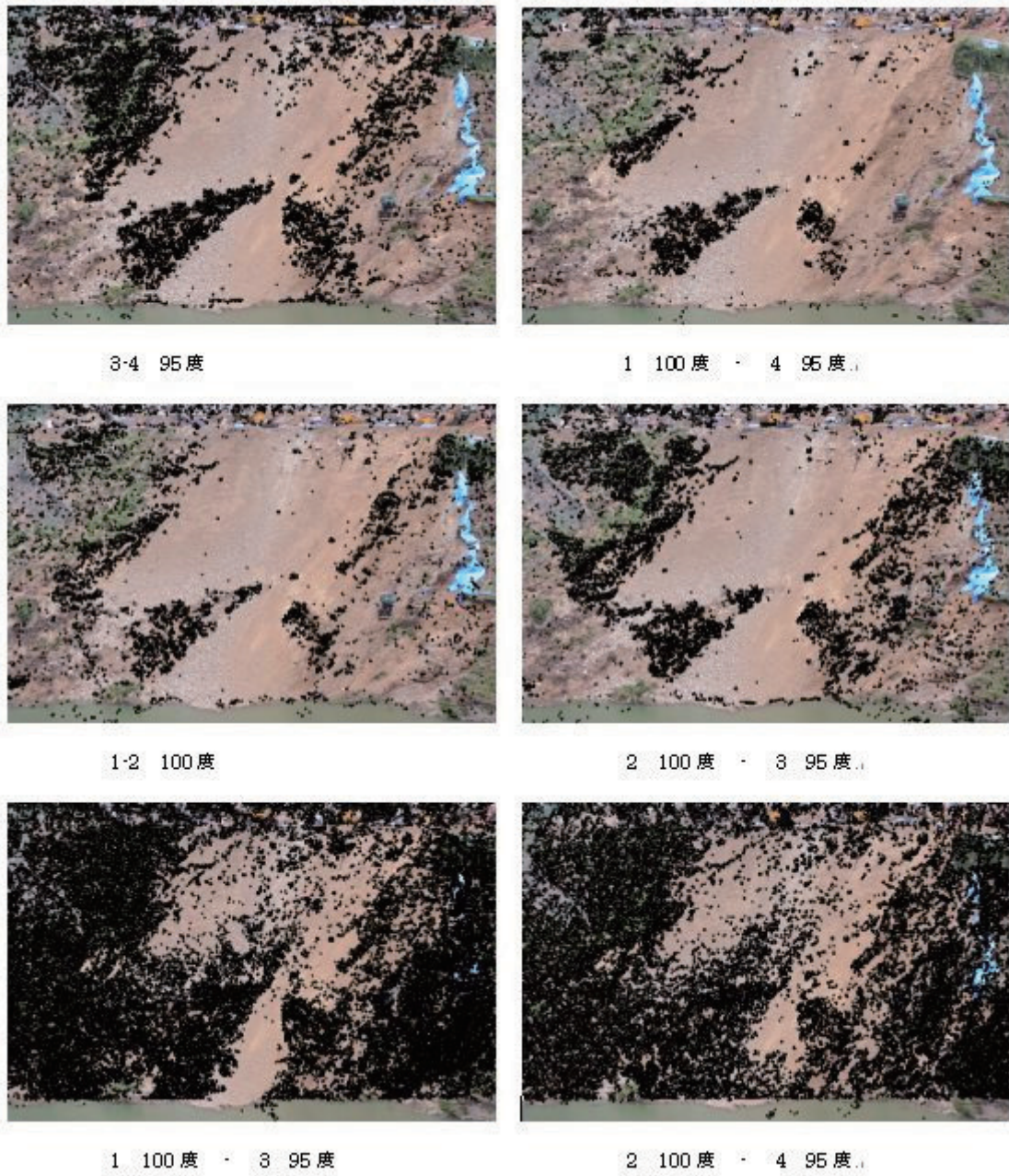


図 3.48 マッチング処理で抽出された標高点分図（単独ペア）

以上から、同一方向のペアでマッチング率が向上していることが確認できた。しかしながら同一方向の組合せの場合は、基線が短く精度自体は低いことが考えられる。

⑪精度検証結果のまとめ

本検証の結果以下のことが確認できた。

- ・自動処理による標高抽出精度で1画素に相当する精度を得た（ただし、これは理論精度よりも高い）。
- ・並行撮影よりも収斂撮影の方が精度が高い。
- ・自動処理を前提とした場合、多重撮影は精度向上に寄与する。

最終的な撮影手法を決定する際には、下記の事項が必要である。

- ・最適収斂角・基線長の検証
- ・対象地域のテクスチャーを考慮したマッチング手法の検討

(4)ステレオマッチング法による解析 その3 (Kuraves)

ソフトウェア「Kuraves」を用いた解析を実施し、ここでは特に基準点数による精度に関し検証を行った。

①作業フロー

作業は図 3.49 に示すフローに添って実施した。

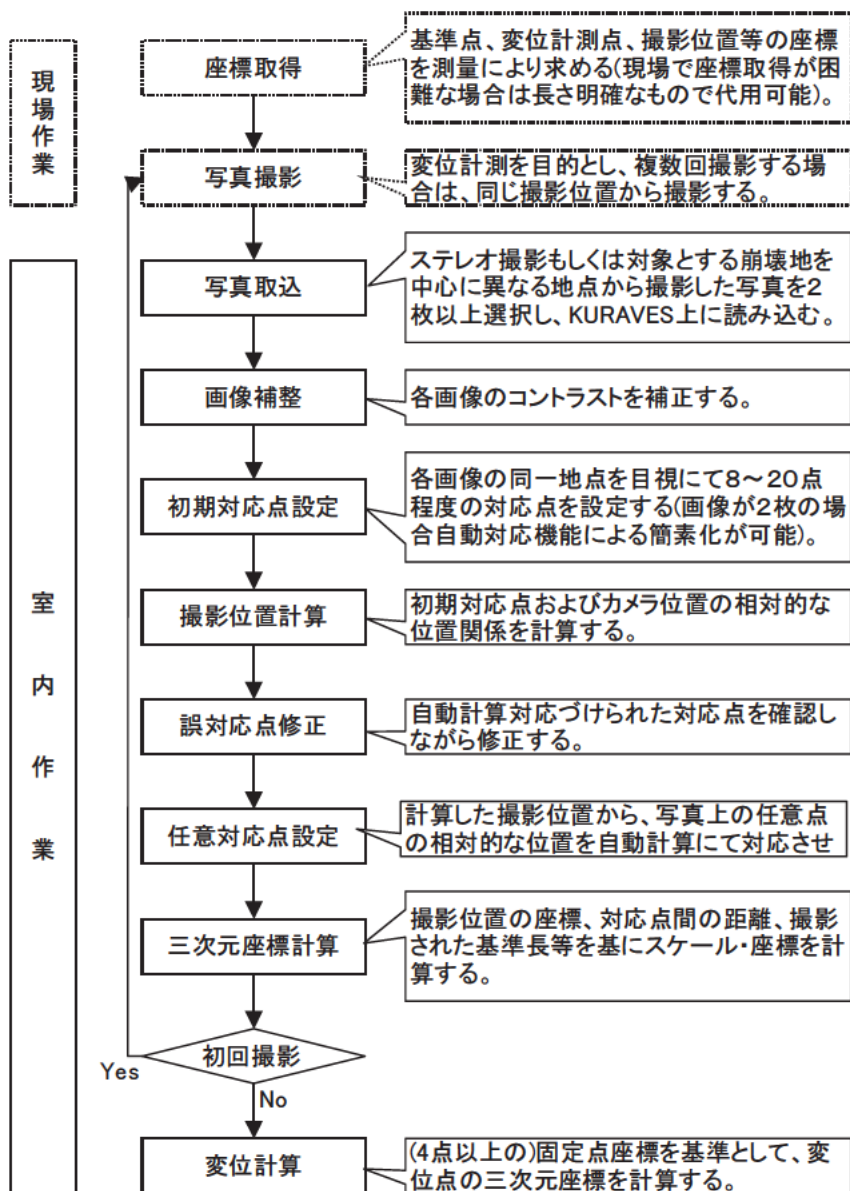


図 3.49 作業フロー

②解析パターン

解析に使用した組合せ及び基準点数を表 3.18 に示す。

表 3.18 解析に使用した組合せ

撮影パターン	撮影位置	レンズ	撮影方向	撮影回数	画像ファイル名	カメラ座標のみ使用	H5点使用	H8点使用	H,S使用
垂直撮影	1	50	90	1	1_50_90_1.JPG	○	○	○	○
	2	50	90	1	2_50_90_1.JPG				
	4	50	90	1	4_50_90_1.JPG				
収斂撮影	1	50	105	1	1_50_105_1.JPG	○	○	○	○
	2	50	100	1	2_50_100_1.JPG				
	5	50	95	1	5_50_95_1.JPG				
収斂撮影	1	100	105	1	1_100_105_1.JPG	○	○	-	○
	2	100	100	1	2_100_100_1.JPG				
	5	100	95	1	5_100_95_1.JPG				

③作業内容

主な工程の作業内容、問題点等を表 3.19 から表 3.24 に示す。

表 3.19 作業内容 作業番号 1


作業番号	作業名
1.	座標取得
作業写真・画面	
	
作業内容	<p>GPS・トータルステーションなどにより、写真撮影位置や特徴点の座標を取得する。マーカー・ターゲットが設置でき、かつ測量が簡易に可能な場合は、それらの座標も計測する。</p> <p>後述する対応点設定作業時に、どこを対象点として設定するか明確にする必要があるため、座標取得時に合わせて測量箇所の拡大写真撮影とスケッチを採るようにする。</p> <p>今回の現場では、ノンプリズムトータルステーションにより座標取得を行った。距離が遠いため、レーザーの散乱があり、正確な測定位置を確定するのは困難であった。</p>
課題・問題点	<p>実際に、崩壊地や崩壊危険箇所の写真計測を実施する場合、崩壊地付近の座標取得は困難な場合が多い。</p> <p>また、山間部では、GPSにより座標が取得できない場合や、撮影箇所が限られ、トータルステーションの機材を持って回るのも大変苦勞する場合がある。</p> <p>上記のような場合を想定し、撮影位置・撮影位置間距離、もしくは基準長（鉛直スタッフ等）しか得られないようなときの計測精度について検討する必要がある。</p>

表 3.20 作業内容 作業番号 2

作業番号	作業名
2.	写真撮影
作業写真・画面	
	
作業内容	<p>デジタルカメラにより、対象点が3~4点以上、60%程度の重複があるよう複数箇所から撮影を実施する。</p> <p>撮影する際は、ピントを無限遠とし最大画素数で撮影する。写真撮影する対象を中心とし、撮影する角度、高さに留意する。さらに、複数箇所からの撮影中に、日照条件等あまり変化がないように速やか撮影を行う。</p> <p>今回の現場では、撮影基準面に対して直角となるような方向で撮影する方法と、一定の角度(95°、100°、105°)を与えて撮影する方法を採っている。</p> <p>なお、撮影に用いたデジタルカメラ・レンズについては、ひずみ補正を実施する。</p>
課題・問題点	<p>理論上は撮影する角度が90°のときであるが、対象の写り方が大きく異なり、後に画面上で対象点を取りにくくなる。また、撮影する角度が10°未満となるような場合は計測精度が悪くなるため、適切な撮影角度を検討する必要がある。</p> <p>実際には、遠方からの撮影が困難であったり、正面からの撮影が困難である場合もあり、その際の撮影手法についても、検討を要する。</p>

表 3.21 作業内容 作業番号 3

作業番号	作業名
3.	写真取込および画像補整
作業写真・画面	 <p>The screenshot displays a software interface with four panels, each showing an aerial photograph of a construction site. A central dialog box is open, titled '写真取込' (Image Import), with fields for '枚数' (Number of images) set to 2, '最大枚数' (Maximum number of images) set to 4, and '初期枚数' (Initial number of images) set to 1. The dialog box has buttons for '一括取り込み' (Batch import), 'キャンセル' (Cancel), and 'OK'.</p>
作業内容	<p>撮影した写真をソフトウェア(KURAVES)上に読み込む。異なる地点から撮影した写真のうち、計測対象となる箇所および対象点(固定点)が画角に入っており、写りの良いものを2~4枚選択する。</p> <p>厚い雲に覆われた日は、全体的に暗い画像になり、晴天日はハイコントラストな画像であることが多い。また、同じ日でも撮影時間によって天候などの状況が変化し、コントラストの異なる写真になる場合もある。このような場合、解析作業・処理時間に影響を及ぼすため、読み込んだ写真が同等のコントラストとなるよう補正する。</p>
課題・問題点	-

表 3.22 作業内容 作業番号 4

作業番号	作業名
4,	初期対応点設定
<p>作業写真・画面</p> 	
作業内容	<p>読み込んだ各写真の同一地点を目視にて探しだし、8～20点程度の対応点の設定を実施する。 マーカー・ターゲットもしくは特徴点の座標を取得している場合は、それぞれの箇所の写真・メモ・スケッチ等を参考に、可能な限り正確にプロットする。</p>
課題・問題点	<p>人為的な誤差やミスが生じる作業であり、作業時間・効率などの個人差が大きい部分である。</p>

表 3.23 作業内容 作業番号 5

作業番号	作業名
5.	撮影位置計算・誤対応点修正
<p>作業写真・画面</p> 	
作業内容	<p>対応点から撮影位置の計算を行う。これにより、撮影位置と対応点の三次元的な位置関係が計算出来るようになる。</p> <p>計算の結果得られた各対応点の三次元座標を投影した点(投影点)と、対応点の誤差(単位はピクセル)が、全ての点で 0.2~0.4 程度になるよう、前述の 4、初期対応点設定に戻り、微調整の上、再度計算する作業を繰り返す。</p>
課題・問題点	<p>現時点では、全ての点の計算誤差が 0.2~0.4 程度となるまで、対応点の微調整を行うこととしているが、精度等を考慮した基準を検討する必要がある。</p> <p>また、対応点の位置が間違っていたり、対応点の分布範囲が十分でない場合、うまく計算できない場合がある。偏って特徴点が見出せない場合等は写真を撮影する画角を工夫したりする必要がある。</p>

表 3.24 作業内容 作業番号 6

作業番号	作業名																																
6.	任意対応点設定および三次元座標計算																																
作業写真・画面																																	
 <table border="1" data-bbox="1050 667 1193 801"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>X(m)</th> <th>Y(m)</th> <th>Z(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>11</td><td>-4418.724</td><td>-8621.682</td><td>229.166</td></tr> <tr><td>12</td><td>-4446.889</td><td>-8646.757</td><td>255.114</td></tr> <tr><td>13</td><td>-4442.737</td><td>-8646.827</td><td>267.712</td></tr> <tr><td>14</td><td>-4471.724</td><td>-8714.529</td><td>476.889</td></tr> <tr><td>15</td><td>-4471.048</td><td>-8674.226</td><td>388.627</td></tr> <tr><td>16</td><td>-4422.529</td><td>-8725.163</td><td>388.524</td></tr> <tr><td>17</td><td>-4372.727</td><td>-8648.222</td><td>382.298</td></tr> </tbody> </table>		No.	X(m)	Y(m)	Z(m)	11	-4418.724	-8621.682	229.166	12	-4446.889	-8646.757	255.114	13	-4442.737	-8646.827	267.712	14	-4471.724	-8714.529	476.889	15	-4471.048	-8674.226	388.627	16	-4422.529	-8725.163	388.524	17	-4372.727	-8648.222	382.298
No.	X(m)	Y(m)	Z(m)																														
11	-4418.724	-8621.682	229.166																														
12	-4446.889	-8646.757	255.114																														
13	-4442.737	-8646.827	267.712																														
14	-4471.724	-8714.529	476.889																														
15	-4471.048	-8674.226	388.627																														
16	-4422.529	-8725.163	388.524																														
17	-4372.727	-8648.222	382.298																														
作業内容	<p>座標のほしい箇所を1枚の写真上で選択する。自動対応機能により他の写真上に投影できる。</p> <p>カメラ位置や基準点に座標値を与えるか、鉛直の基準長を与えるかすると各対応点の座標(スケール)を計算する。</p>																																
課題・問題点	<p>ほぼ自動的に作業が実施できる。</p> <p>算出された値の検証方法には様々であり、画一化された手法がない。</p>																																

④解析結果

解析結果を図 3.50～図 3.52、表 3.25～表 3.27 に示す。各図の左は最大誤差、右は平均誤差を示したものである。

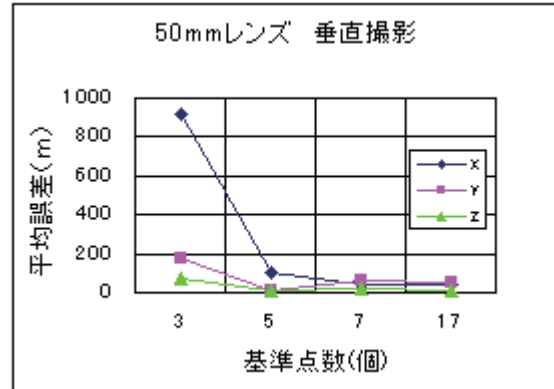
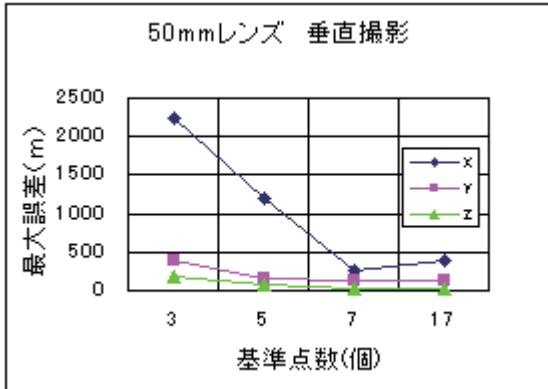


図 3.50 解析結果 50mm レンズ並行撮影

表 3.25 解析結果 50mm レンズ並行撮影

基準点数	X	Y	Z
3	2231.405	398.772	191.227
5	1195.702	144.653	73.825
7	266.556	123.753	32.965
17	379.466	137.067	22.941

基準点数	X	Y	Z
3	915.290	171.235	70.756
5	99.724	11.080	6.133
7	40.584	59.925	19.420
17	37.608	49.474	11.525

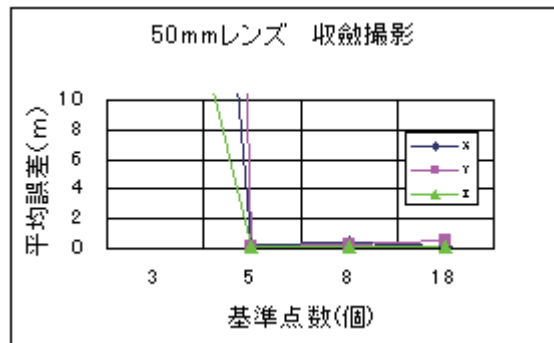
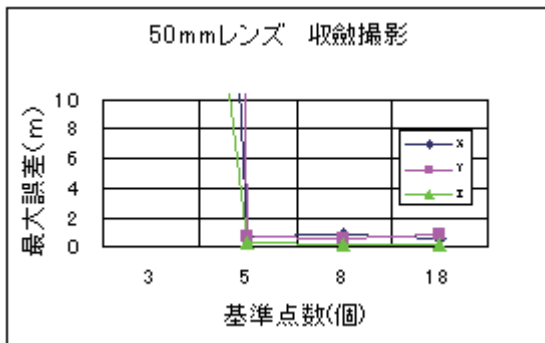


図 3.51 解析結果 50mm レンズ収斂撮影

表 3.26 解析結果 50mm レンズ収斂撮影

基準点数	X	Y	Z
3	125.998	353.670	54.933
5	0.709	0.723	0.344
8	0.884	0.597	0.198
18	0.486	0.894	0.199

基準点数	X	Y	Z
3	73.841	224.314	26.557
5	0.294	0.150	0.133
8	0.432	0.256	0.084
18	0.136	0.519	0.075

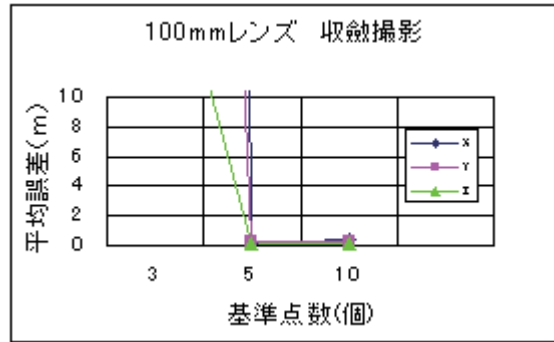
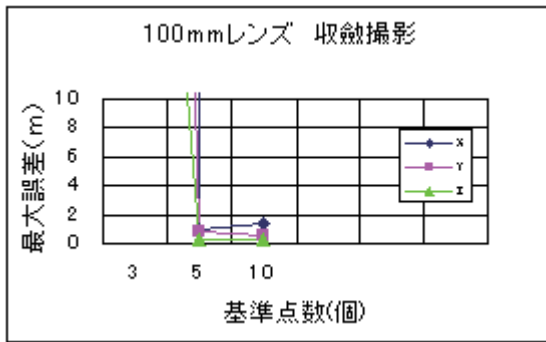


図 3.52 解析結果 100mm レンズ収斂撮影

表 3.27 解析結果 100mm レンズ収斂撮影

基準点数	X	Y	Z
3	706.626	151.920	54.351
5	0.996	0.784	0.285
10	1.408	0.499	0.225

基準点数	X	Y	Z
3	660.291	141.976	24.290
5	0.181	0.252	0.072
10	0.408	0.205	0.098

⑤解析結果のまとめ

本検証から以下の点が確認できた。

- 平行撮影ではうまくマッチングできない。(約 100m の誤差)
- 収斂撮影した場合の精度は 1m 以下であり、撮影距離に対する精度としては十分である。
- カメラ位置を入力する方法より、逆算する方法の方が精度が良い。
- 解析対象地域を包含するように 5 点以上の基準点配置が必要である。
- 5 点以上の基準点を配置しても、精度に大きな寄与は無い。

また、地すべり地において Kuraves を使用する際の留意点として、以下が挙げられる。

- 計測範囲に均等に基準点を配置する。
- 地すべり地内への立ち入りが危険な場合、対象地を取り囲む様に基準点を配置する。
- 基準点を 5 点以上確保する。

3.1.5 画像解析結果のまとめ

ステレオペア写真から、3次元データを取得する3つの手法により精度検証を実施した。マニュアル観測においては、50mm レンズ、100mm レンズによる並行撮影で15cm程度の標高精度を得た。一般的な写真測量用ソフトウェアによるステレオマッチングでは、一部適用できない事例もあったが、50mm レンズの収斂撮影でマニュアル観測と同等の15cm程度の標高精度を得た。また、並行撮影よりも収斂撮影の方が精度が向上し、ステレオペアの組合せに複数枚の画像を追加することにより10cm程度まで精度が向上することが確認できた。

地すべり地形に対応したKuravesでは、収斂撮影のステレオペアで50mm、100mm レンズとも10cm程度の標高精度を達成しており、十分な精度を得られることが確認できた。

3.1.6 3次元モデル化ソフトウェアのまとめ

前節の精度検証結果を踏まえ、今回使用した各ソフトウェアの精度検証の結果、特徴を表 3.28 にまとめた。

表 3.28 ソフトウェア比較総括表

ソフト名称	(1)OSP 平行 3D取得方法 レンズ歪み補正 ソフト価格	(2)RealScarp 平行 ステレオマッチング 測量協会 1000万	(3)LPS 平行・収数(応用的利用) ステレオマッチング 測量協会 500万	(4)Kuraves 収数 ステレオマッチング ソフト内 200万																																																																																																																																																																																																																																																																
解析実施パターン ※は複数の写真を用いた複合処理による	<table border="1"> <tr> <th>撮影地点</th> <th>レンズ</th> <th>写真撮影</th> <th>90°</th> <th>95°</th> <th>100°</th> <th>105°</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">①②</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">③④</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">⑤⑥</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°	①②	28mm	×					50mm	×					100mm	×					③④	28mm	×					50mm	×					100mm	×					⑤⑥	28mm	×					50mm	×					100mm	×					<table border="1"> <tr> <th>撮影地点</th> <th>レンズ</th> <th>写真撮影</th> <th>90°</th> <th>95°</th> <th>100°</th> <th>105°</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">①②</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">③④</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">⑤⑥</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°	①②	28mm	×					50mm	×					100mm	×					③④	28mm	×					50mm	×					100mm	×					⑤⑥	28mm	×					50mm	×					100mm	×					<table border="1"> <tr> <th>撮影地点</th> <th>レンズ</th> <th>写真撮影</th> <th>90°</th> <th>95°</th> <th>100°</th> <th>105°</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">①②</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">③④</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">⑤⑥</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°	①②	28mm	×					50mm	×					100mm	×					③④	28mm	×					50mm	×					100mm	×					⑤⑥	28mm	×					50mm	×					100mm	×					<table border="1"> <tr> <th>撮影地点</th> <th>レンズ</th> <th>写真撮影</th> <th>90°</th> <th>95°</th> <th>100°</th> <th>105°</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">①②</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">③④</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">⑤⑥</td> <td>28mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>100mm</td> <td>×</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°	①②	28mm	×					50mm	×					100mm	×					③④	28mm	×					50mm	×					100mm	×					⑤⑥	28mm	×					50mm	×					100mm	×				
撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°																																																																																																																																																																																																																																																														
①②	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
③④	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
⑤⑥	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°																																																																																																																																																																																																																																																														
①②	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
③④	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
⑤⑥	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°																																																																																																																																																																																																																																																														
①②	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
③④	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
⑤⑥	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
撮影地点	レンズ	写真撮影	90°	95°	100°	105°																																																																																																																																																																																																																																																														
①②	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
③④	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
⑤⑥	28mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	50mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
	100mm	×																																																																																																																																																																																																																																																																		
高さ精度 (写真座標系における)	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">使用レンズ</th> </tr> <tr> <td>28mm</td> <td>50mm 100mm</td> </tr> <tr> <td>P12</td> <td>0.770 0.351</td> </tr> <tr> <td>P34</td> <td>0.704 0.467</td> </tr> <tr> <td>P56</td> <td>0.205 0.144 0.141</td> </tr> </table>	使用レンズ		28mm	50mm 100mm	P12	0.770 0.351	P34	0.704 0.467	P56	0.205 0.144 0.141	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">使用レンズ</th> </tr> <tr> <td colspan="2">28mm</td> </tr> <tr> <td>撮影間隔</td> <td>0.94m</td> </tr> <tr> <td>撮像位置</td> <td>P56 (63m)</td> </tr> </table>	使用レンズ		28mm		撮影間隔	0.94m	撮像位置	P56 (63m)	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">使用レンズ</th> </tr> <tr> <td colspan="2">50mm</td> </tr> <tr> <td>撮影角度</td> <td>90度 0.26m 95度 0.19m 100度 0.15m</td> </tr> </table>	使用レンズ		50mm		撮影角度	90度 0.26m 95度 0.19m 100度 0.15m	<table border="1"> <tr> <th colspan="2">使用レンズ</th> </tr> <tr> <td colspan="2">50mm 100mm</td> </tr> <tr> <td>固定基準点</td> <td>標識 0.10m 標識+刺針 0.09m 0.11m 刺針 0.25m</td> </tr> </table>	使用レンズ		50mm 100mm		固定基準点	標識 0.10m 標識+刺針 0.09m 0.11m 刺針 0.25m																																																																																																																																																																																																																																		
使用レンズ																																																																																																																																																																																																																																																																				
28mm	50mm 100mm																																																																																																																																																																																																																																																																			
P12	0.770 0.351																																																																																																																																																																																																																																																																			
P34	0.704 0.467																																																																																																																																																																																																																																																																			
P56	0.205 0.144 0.141																																																																																																																																																																																																																																																																			
使用レンズ																																																																																																																																																																																																																																																																				
28mm																																																																																																																																																																																																																																																																				
撮影間隔	0.94m																																																																																																																																																																																																																																																																			
撮像位置	P56 (63m)																																																																																																																																																																																																																																																																			
使用レンズ																																																																																																																																																																																																																																																																				
50mm																																																																																																																																																																																																																																																																				
撮影角度	90度 0.26m 95度 0.19m 100度 0.15m																																																																																																																																																																																																																																																																			
使用レンズ																																																																																																																																																																																																																																																																				
50mm 100mm																																																																																																																																																																																																																																																																				
固定基準点	標識 0.10m 標識+刺針 0.09m 0.11m 刺針 0.25m																																																																																																																																																																																																																																																																			
解析精度の傾向																																																																																																																																																																																																																																																																				
解析処理の操作性	<ul style="list-style-type: none"> 写真測量に精通した知識が必要であり、オペレータの技量による精度のムラがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 写真撮影位置の算出、解析結果の整理について他ソフトで行う必要があり、全工程を速く処理することができない。 	<ul style="list-style-type: none"> GUIにより比較的容易に処理を行える。 自動のステレオマッチングを使用することで自由度の高い解析が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 写真測量を意識することなく3次元データの取得が可能。 連の作業を本ソフトのみで完結できる。 																																																																																																																																																																																																																																																																
精度に関する事項	<ul style="list-style-type: none"> 28mmより50mmレンズで精度良好。100mmについては、ラップ不足で1ヶ所のみの結果だが、同傾向にある。 撮影間隔が短いほど精度が向上する傾向は、写真測量強化時の一般的傾向とは異なる結果。 	<ul style="list-style-type: none"> 撮影間隔、レンズに制限があり、データ取得できる範囲に制限が生じる。 ピクセルあたりに高精度を取得できるためデータ取得が成功した部分の等高線はリアルに表現可。(他ソフトに比べ相対的に精度劣る) 	<ul style="list-style-type: none"> 平行より収数撮影が若干精度がよい。 重複率は100%がよい。 マルチ画像による多重観測で精度向上を確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 撮影に伴う制限は少ない。ステレオマッチングに必要となる基準点が尠る程度とれば、比較的高い精度が見込める。 今回検討したソフト中最も高精度な結果を得た。 																																																																																																																																																																																																																																																																
撮影の自由度	<ul style="list-style-type: none"> 人間による実測により3Dデータ作成を行うため、撮影は平行撮影のみとなり、カメラ位置・撮像方向の計測等撮影時の作業・制限は多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 航空写真測量で使用されているステレオマッチング技術を採用しているため、平行撮影のみとなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 航空写真や衛星画像を想定した自動地形抽出アルゴリズム。収数画像使用可能。 複数バッチの写真を組み合わせることが可能。 精度向上にはカメラ位置の計測は必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的自由的な撮影が可能。 複数バッチの写真を組み合わせることが可能。 																																																																																																																																																																																																																																																																
まとめ及び本研究における実用性	<ul style="list-style-type: none"> 今回の結果から長焦点距離レンズが精度向上に大きく寄与することから、地上分解能(写真解像度)と精度の関係は整理しやすい。 ⇒早見表へ展開 撮影間隔の違いは、 撮影間隔 > 短 > 奥行き感が低調 撮影間隔 > 長 > 奥行き感が強調 の通り、オペレータの判断時に影響を与えるものである。奥行き感が強調され判断上有利なケースで今回は精度が良い結果となった。これは、撮影範囲の比高差が特に大きい現場で、過高感が強くなりすぎること、オペレータの視覚的な錯覚が発生した可能性が高い。この現象は対象前面に対しより垂直に撮影することで緩和可能だが、撮影ポイントの選定が難しいケースが多いと考えられる。 地すべり地を対象とした撮影では、平行撮影を行える条件が少ないことが想定される。 ⇒同じソフトの応用的利用で、収数への対応をLSPで検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 9ヶ所の内、1ヶ所のみの解析しか出来なかった。航測カメラ専用のステレオ処理ソフトであるため、地上写真を用いた条件下での課題に未対応である可能性が高い。 原因は、航測写真を使ったモデルに比べ標高差(奥行き方向)が大きいため、視差の探索範囲の違いが影響したと考えられる。 標高差が小さくなるような細分化したモデルで解析を試みたが、処理時間、各バッチ間の高さ調整に要する時間が膨大になり、実用的ではない。 解析できたケースでも標高精度は、写真測量強化と比べ1桁オマで劣っていた。 作業の効率性に期待したが、地上写真への対応には、アルゴリズムの改良にまで踏み込む必要があると考えられ、本研究への適用は断念する。 	<ul style="list-style-type: none"> 図化ソフトにおいても、収数撮影からマッチング処理で平行撮影より高精度な解析を確認した。 しかし、クラベスの精度に近づけるためには、 撮影間隔 > 長 > 収数 > 標高精度向上 撮影間隔 > 短 > 平行 > マッチング率向上 を両立する必要がある。(当ソフトは崩壊地のような地面の特性に応じたマッチングアルゴリズムとはなっていないと考えられる。) マルチ画像を用いた処理で精度を上げるためには撮影機材への投資が増え、実用面での懸念もある。 	<ul style="list-style-type: none"> ラップ率が高く、座標のある基準点が写真内にある程度写ってれば、他の手法より良い精度で計測を行うことができる。 今回の検証では、概ね8点以上の基準点があれば、比較的良好な精度での計測となった。 写真の撮影方法に大きな制約はない。さらに連の作業を本ソフト内で完結することができ、直感的な操作でコンタクトや断面図まで作成できる。 技術者がソフトに取り込んだデジタル写真上で参照点(基準点)の他、複数の写真に写った同の点)を入力していただく、写真の解像度や、カメラ位置のスケッチなど参照点に関する記録の有無により精度が左右される。 ⇒精度に寄与する基準点数は確認できたが、画像上の基準点判読を確実に実施するための撮影方法を検討する必要がある。 また、収数角とマッチング率・精度の関係も事前に整理しておくことで現地撮影時の対応もスムーズになる。 																																																																																																																																																																																																																																																																
総合評価																																																																																																																																																																																																																																																																				

前節で述べた通り、マニュアル観測や一般的な写真測量ソフトウェアでも設定により、専用ソフトウェアに近い精度を得られることが確認できた。しかし、地すべり地のように地形が局所的に大きく変化し、かつ良好な撮影条件が得られない場合は、通常の中空写真測量を前提とした地形抽出ソフトウェアでは限界を生じることが考えられる。特に対象地域内の比高差が撮影距離に比して大きく、かつ収斂撮影などの影響による被写体の写り方が大きく異なるような場合には、平行撮影を前提としたマッチングアルゴリズムでは対応しきれない。一方、3次元の構造物や自然対象物を計測することを前提として設計された **Kuraves** は、自然地形の収斂撮影でも安定した精度を得られることが確認できた。従って、実際の解析では **Kuraves** 等、専用ソフトウェアを使用することが最適であると考えられる。

座標リスト

(1/3)

	国家座標系				写真座標系			
	点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
基準点	T15	-5106.443	-85022.722	576.976	T15	576.976	995.072	1003.957
	T16	-5075.263	-84869.377	577.912	T16	577.912	1151.462	998.566
カメラ設置	28-1	-5101.726	-85018.516	577.307	28 1	577.307	1000.000	1000.000
	50-3	-5104.608	-84967.724	578.215	50 3	578.215	1049.617	1011.242
	100-5	-5101.494	-84957.544	578.169	100 5	578.169	1060.171	1009.855
	28-2	-5073.215	-84848.496	577.834	28 2	577.834	1172.394	1000.000
	50-4	-5073.880	-84866.521	577.914	50 4	577.914	1154.507	997.674
	100-6	-5095.965	-84893.955	577.695	100 6	577.695	1123.799	1014.919
刺針点	S1	-4713.475	-85106.900	550.064	S1	550.064	977.041	602.479
	S2	-4695.156	-85103.072	564.870	S2	564.870	983.846	585.045
	S3	-4739.422	-85033.202	550.169	S3	550.169	1045.433	640.256
	S4	-4702.024	-85062.661	563.186	S4	563.186	1022.565	598.502
	S5	-4685.276	-84958.770	593.498	S5	593.498	1127.795	599.165
	S6	-4637.569	-84979.703	623.451	S6	623.451	1115.040	548.654
	S7	-4676.986	-85009.460	593.929	S7	593.929	1079.174	582.606
	S8	-4678.173	-85039.339	590.039	S8	590.039	1049.510	578.836
	S9	-4661.805	-85082.256	598.735	S9	598.735	1009.891	555.596
	S10	-4721.413	-84913.010	583.601	S10	583.601	1166.949	642.373
	S11	-4738.021	-84844.929	564.298	S11	564.298	1231.346	670.011
	S12	-4631.165	-84824.440	608.395	S12	608.395	1269.224	568.014
	S13	-4640.591	-84865.058	605.733	S13	605.733	1227.607	570.594
標識	H1	-4618.726	-85027.608	629.506	H1	629.506	1070.911	522.148
	H2	-4640.889	-84962.737	619.161	H2	619.161	1131.223	554.734
	H3	-4640.151	-84885.817	607.712	H3	607.712	1207.206	566.726
	H4	-4617.674	-85114.029	619.883	H4	619.883	985.854	506.818
	H5	-4671.048	-85074.338	589.847	H5	589.847	1016.171	566.021
	H6	-4682.539	-85029.933	588.504	H6	588.504	1058.065	584.698
	H7	-4726.059	-84914.911	583.147	H7	583.147	1164.305	646.640
	H8	-4770.172	-84940.233	552.295	H8	552.295	1132.037	685.958
検証点 (特異点)	ID1	-4740.384	-84998.236	551.205	ID1	551.205	1079.759	646.988
	ID2	-4695.001	-84996.993	586.513	ID2	586.513	1088.490	602.435
	ID3	-4698.326	-84979.804	586.112	ID3	586.112	1104.893	608.558
	ID4	-4704.030	-84966.841	584.290	ID4	584.290	1116.733	616.327
	ID5	-4718.337	-84970.358	571.560	ID5	571.560	1110.899	629.855
	ID6	-4724.056	-84975.570	565.839	ID6	565.839	1104.813	634.633
	ID7	-4736.870	-84973.426	556.535	ID7	556.535	1104.809	647.626
	ID8	-4747.888	-84967.541	550.839	ID8	550.839	1108.790	659.465
	ID9	-4731.358	-84990.083	558.736	ID9	558.736	1089.292	639.435
	ID10	-4715.089	-85007.323	568.740	ID10	568.740	1074.980	620.538
	ID11	-4706.671	-84997.662	575.966	ID11	575.966	1085.900	613.834
	ID12	-4702.227	-84991.202	581.467	ID12	581.467	1093.006	610.520
	ID13	-4709.542	-84980.487	576.170	ID13	576.170	1102.364	619.506
	ID14	-4709.377	-84990.461	575.128	ID14	575.128	1092.554	617.694
	ID15	-4747.259	-84983.273	547.766	ID15	547.766	1093.379	656.243
	ID16	-4737.180	-85022.656	551.605	ID16	551.605	1056.205	639.789
	ID17	-4739.904	-85036.047	547.913	ID17	547.913	1042.548	640.261
	ID18	-4736.056	-84938.049	572.946	ID18	572.946	1139.832	652.673
	ID19	-4767.059	-84887.015	556.909	ID19	556.909	1185.037	691.690
	ID20	-4766.403	-84906.868	555.526	ID20	555.526	1165.566	687.758
検証点 (ランダム)	R1	-4740.212	-85013.859	550.309	R1	550.309	1064.379	644.235
	R2	-4736.590	-84997.182	554.932	R2	554.932	1081.425	643.420
	R3	-4725.351	-84984.886	563.190	R3	563.190	1095.411	634.369
	R4	-4724.729	-84979.575	564.321	R4	564.321	1100.752	634.634
	R5	-4728.220	-84975.960	562.450	R5	562.450	1103.739	638.675
	R6	-4733.910	-84971.460	560.288	R6	560.288	1107.237	645.032
	R7	-4739.376	-84968.402	557.639	R7	557.639	1109.348	650.928
	R8	-4744.929	-84966.314	553.524	R8	553.524	1110.490	656.750

R9	-4754.506	-84961.104	548.127	R9	548.127	1114.044	667.056
R10	-4741.966	-84968.831	555.082	R10	555.082	1108.498	653.411
R11	-4737.602	-84974.906	555.183	R11	555.183	1103.228	648.102
R12	-4732.256	-84975.881	559.215	R12	559.215	1103.150	642.669
R13	-4727.758	-84985.281	560.199	R13	560.199	1094.624	636.679
R14	-4732.619	-84988.623	556.058	R14	556.058	1090.523	640.919
R15	-4736.396	-84992.449	553.172	R15	553.172	1086.126	644.012
R16	-4740.119	-84993.690	550.044	R16	550.044	1084.286	647.478
R17	-4746.881	-84997.162	546.187	R17	546.187	1079.743	653.573
R18	-4689.914	-84995.539	589.637	R18	589.637	1090.765	597.659
R19	-4705.281	-84962.685	589.406	R19	589.406	1120.626	618.247
R20	-4703.024	-84954.286	589.526	R20	589.526	1129.282	617.410
R21	-4707.132	-84954.985	585.633	R21	585.633	1127.914	621.346
R22	-4705.415	-84961.945	585.644	R22	585.644	1121.333	618.502
R23	-4701.039	-84969.224	585.697	R23	585.697	1114.878	612.982
R24	-4699.115	-84976.237	585.719	R24	585.719	1108.280	609.925
R25	-4698.039	-84982.794	585.730	R25	585.730	1101.991	607.780
R26	-4697.457	-84990.259	585.734	R26	585.734	1094.725	605.971
R27	-4695.659	-84997.442	585.755	R27	585.755	1087.938	603.010
R28	-4694.074	-85000.957	585.779	R28	585.779	1084.734	600.866
R29	-4701.682	-85003.632	578.986	R29	578.986	1080.837	607.926
R30	-4703.125	-84997.972	578.579	R30	578.579	1086.181	610.285
R31	-4705.350	-84990.899	578.578	R31	578.578	1092.788	613.650
R32	-4705.984	-84984.039	578.576	R32	578.576	1099.449	615.409
R33	-4707.147	-84977.128	578.578	R33	578.578	1106.072	617.699
R34	-4709.366	-84970.364	578.578	R34	578.578	1112.377	621.006
R35	-4712.821	-84963.548	578.580	R35	578.580	1118.528	625.541
R36	-4714.767	-84957.048	578.576	R36	578.576	1124.617	628.535
R37	-4716.430	-84952.298	578.009	R37	578.009	1129.026	630.961
R38	-4721.095	-84948.129	577.962	R38	577.962	1132.366	636.251
R39	-4730.223	-84947.186	571.603	R39	571.603	1131.786	645.409
R40	-4725.157	-84950.683	571.773	R40	571.773	1129.175	639.834
R41	-4722.710	-84958.458	571.755	R41	571.755	1121.912	636.136
R42	-4720.807	-84964.823	571.739	R42	571.739	1115.949	633.206
R43	-4717.751	-84971.401	571.704	R43	571.704	1109.967	629.105
R44	-4715.503	-84978.046	571.679	R44	571.679	1103.785	625.789
R45	-4714.276	-84984.798	571.668	R45	571.668	1097.329	623.462
R46	-4713.455	-84991.704	571.663	R46	571.663	1090.655	621.510
R47	-4711.578	-84998.491	571.640	R47	571.640	1084.271	618.536
R48	-4710.416	-85001.613	571.629	R48	571.629	1081.384	616.874
R49	-4711.324	-85004.700	572.209	R49	572.209	1078.190	617.259
R50	-4722.362	-85016.380	565.440	R50	565.440	1064.845	626.214
R51	-4723.288	-85012.858	562.116	R51	562.116	1068.165	627.709
R52	-4718.283	-85006.265	564.940	R52	564.940	1075.495	623.863
R53	-4720.705	-84999.072	565.012	R53	565.012	1082.189	627.442
R54	-4722.858	-84992.242	565.072	R54	565.072	1088.569	630.695
R55	-4722.893	-84985.706	565.051	R55	565.051	1095.009	631.810
R56	-4723.936	-84978.946	565.061	R56	565.061	1101.503	633.956
R57	-4726.345	-84972.554	565.125	R57	565.125	1107.409	637.390
R58	-4729.091	-84966.231	565.186	R58	565.186	1113.190	641.143
R59	-4731.734	-84959.906	565.250	R59	565.250	1118.992	644.796
R60	-4734.570	-84953.712	565.303	R60	565.303	1124.631	648.617
R61	-4735.948	-84950.659	565.336	R61	565.336	1127.414	650.481
R62	-4732.179	-84949.922	568.093	R62	568.093	1128.765	646.886
R63	-4743.597	-84946.365	564.533	R63	564.533	1130.384	658.735
R64	-4748.146	-84944.707	563.202	R64	563.202	1131.267	663.496
R65	-4750.077	-84941.943	563.254	R65	563.254	1133.673	665.857
R66	-4755.934	-84940.719	560.652	R66	560.652	1133.912	671.835
R67	-4759.261	-84939.902	559.493	R67	559.493	1134.168	675.252

R68	-4754.389	-84942.416	559.266	R68	559.266	1132.494	670.031
R69	-4752.613	-84944.226	559.194	R69	559.194	1131.002	667.981
R70	-4746.214	-84949.358	559.319	R70	559.319	1126.999	660.821
R71	-4742.819	-84955.278	559.203	R71	559.203	1121.723	656.494
R72	-4739.839	-84961.246	559.107	R72	559.107	1116.330	652.567
R73	-4737.518	-84967.440	559.034	R73	559.034	1110.605	649.254
R74	-4733.712	-84973.602	558.880	R74	558.880	1105.157	644.481
R75	-4732.093	-84979.975	558.833	R75	558.833	1099.140	641.831
R76	-4732.088	-84979.967	558.823	R76	558.823	1099.148	641.827
R77	-4729.855	-84986.349	558.744	R77	558.744	1093.224	638.569
R78	-4730.957	-84993.085	558.834	R78	558.834	1086.398	638.542
R79	-4731.040	-84999.647	558.870	R79	558.870	1079.913	637.539
R80	-4729.185	-85006.139	558.787	R80	558.787	1073.816	634.636
R81	-4728.261	-85011.302	558.748	R81	558.748	1068.878	632.871
R82	-4727.860	-85017.374	558.734	R82	558.734	1062.956	631.471
R83	-4730.329	-85024.686	558.866	R83	558.866	1055.336	632.697
R84	-4728.709	-85030.970	557.753	R84	557.753	1049.406	630.060
R85	-4735.741	-85032.029	552.689	R85	552.689	1047.199	636.820
R86	-4736.862	-85025.292	552.542	R86	552.542	1053.658	639.040
R87	-4735.470	-85019.422	552.645	R87	552.645	1059.677	638.638
R88	-4737.475	-85013.104	552.002	R88	552.002	1065.577	641.660
R89	-4739.011	-85006.618	552.842	R89	552.842	1071.720	644.247
R90	-4738.099	-85003.311	552.767	R90	552.767	1075.132	643.895
R91	-4738.377	-85000.134	552.775	R91	552.775	1078.219	644.695
R92	-4737.096	-84993.553	552.650	R92	552.650	1084.921	644.520
R93	-4738.563	-84987.233	552.714	R93	552.714	1090.911	647.011
R94	-4740.362	-84980.943	552.795	R94	552.795	1096.818	649.826
R95	-4741.187	-84974.553	552.796	R95	552.796	1102.983	651.696
R96	-4744.690	-84968.595	552.984	R96	552.984	1108.279	656.136
R97	-4747.403	-84962.568	553.102	R97	553.102	1113.775	659.809
R98	-4750.985	-84956.789	553.275	R98	553.275	1118.882	664.298
R99	-4753.169	-84950.775	553.348	R99	553.348	1124.452	667.446
R100	-4760.226	-84945.917	553.759	R100	553.759	1128.076	675.209
R101	-4763.669	-84945.763	553.994	R101	553.994	1127.658	678.630
R102	-4768.993	-84946.960	549.495	R102	549.495	1125.597	683.683
R103	-4763.969	-84949.012	548.676	R103	548.676	1124.404	678.389
R104	-4761.922	-84952.558	547.806	R104	547.806	1121.246	675.784
R105	-4757.599	-84958.608	547.534	R105	547.534	1115.994	670.519
R106	-4754.343	-84963.738	547.327	R106	547.327	1111.473	666.460
R107	-4751.591	-84969.617	547.169	R107	547.169	1106.130	662.773
R108	-4749.433	-84975.679	547.056	R108	547.056	1100.509	659.643
R109	-4748.260	-84981.784	547.021	R109	547.021	1094.682	657.476
R110	-4747.247	-84988.015	546.996	R110	546.996	1088.705	655.447
R111	-4745.766	-84994.192	546.915	R111	546.915	1082.857	652.964
R112	-4746.280	-85002.402	547.011	R112	547.011	1074.675	652.113
R113	-4746.237	-85004.703	547.014	R113	547.014	1072.413	651.691
R114	-4745.192	-85009.071	546.939	R114	546.939	1068.278	649.938
R115	-4743.637	-85014.611	546.821	R115	546.821	1063.072	647.488
R116	-4740.952	-85019.299	549.263	R116	549.263	1058.892	644.065
R117	-4743.995	-85022.805	546.264	R117	546.264	1054.931	646.486
R118	-4740.589	-85027.455	549.368	R118	549.368	1050.908	642.358
R119	-4739.247	-85028.396	551.427	R119	551.427	1050.202	640.879

3.2 撮影条件による解析精度の検証

3.1 節の実験結果より、地すべり地形をより高精度に計測するには Kuraves が適することを確認した。Kuraves は航空写真測量用のソフトと異なり、平行撮影を前提としない自由度の高い撮影が許容される。地すべり現場においては、撮影場所までのアクセス、カメラの設置場所、植生、天候条件等の制約が多くなるため、自由度の高い撮影は好都合となる。

ここでは、地すべり斜面に見立てた斜面に対して、距離・収斂角・カメラの傾き・高度を変化させた自由度の高い撮影を擬似的に再現し、画像解析に与える影響を確認した。

また、気象条件の異なる画像による解析精度への影響を簡易的手法で検討し、今後必要となる実験の方向性を検討した。

3.2.1 試験走路における撮影実験

(1) 実験概要

実験は、土木研究所内の試験走路にて、平成 19 年 10 月 1 日に実施した。模擬斜面として用いた試験走路のバンク（写真 3.12）は、アスファルト舗装により色目の特徴が少ないことから、手動でマッチングを行った。また、基礎実験を目的とするため、撮影距離・収斂角・傾きなどのパラメータを正確に把握した。図 3.51 に示す作業手順に従って、表 3.29 に示す機材を用いて実験を行った。



写真 3.12 斜面を模擬したバンク

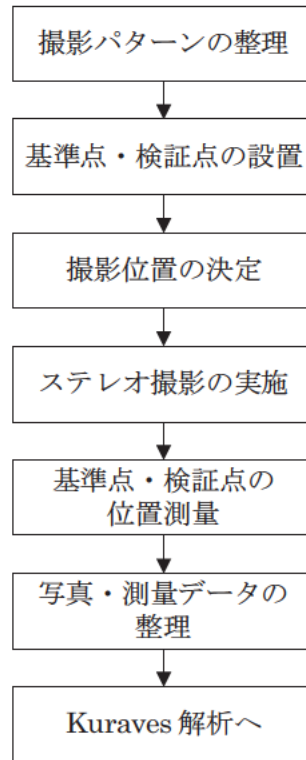


図 3.51 実験フロー

表 3.29 使用機器

種別	機器名	台数	目的
デジタルカメラ	Canon EOS 5D	2台	ステレオ撮影
	レンズ 28mm	2台	
	三脚	2台	
トータルステーション	SokisSET3	1台	撮影位置決定、基準点・ 検証点測量
	三脚	1台	
雑具	ターゲット、巻尺、脚立、分度器 等	1式	

実験条件・方法撮影パターン

撮影条件の厳しい地すべり現場で想定されるステレオ撮影ケースを表 3.30 に整理する。これらの条件より、本実験では図 3.52 に示す位置にカメラを設置して撮影を行い、ステレオ写真の組合せを変えることで、各パラメータの検証を行った。

表 3.30 想定される撮影ケース

No.	検討すべきパラメータ	現場条件
1	収斂角	植生等の影響で収斂角を自由に設定できない場合 等
2	撮影距離	河川幅の影響で撮影対象までの距離を自由に設定できない場合 等
3	撮影角	斜面を正対する位置にカメラを設置できない場合 等
4	距離差	カメラを設置する斜面对岸の道路が大きくカーブしている場合 等
5	カメラ角度	撮影準備に時間が取れず、カメラ設置をミスした場合 等
6	撮影高度	カメラを設置する斜面对岸の道路縦断勾配が急な場合 等

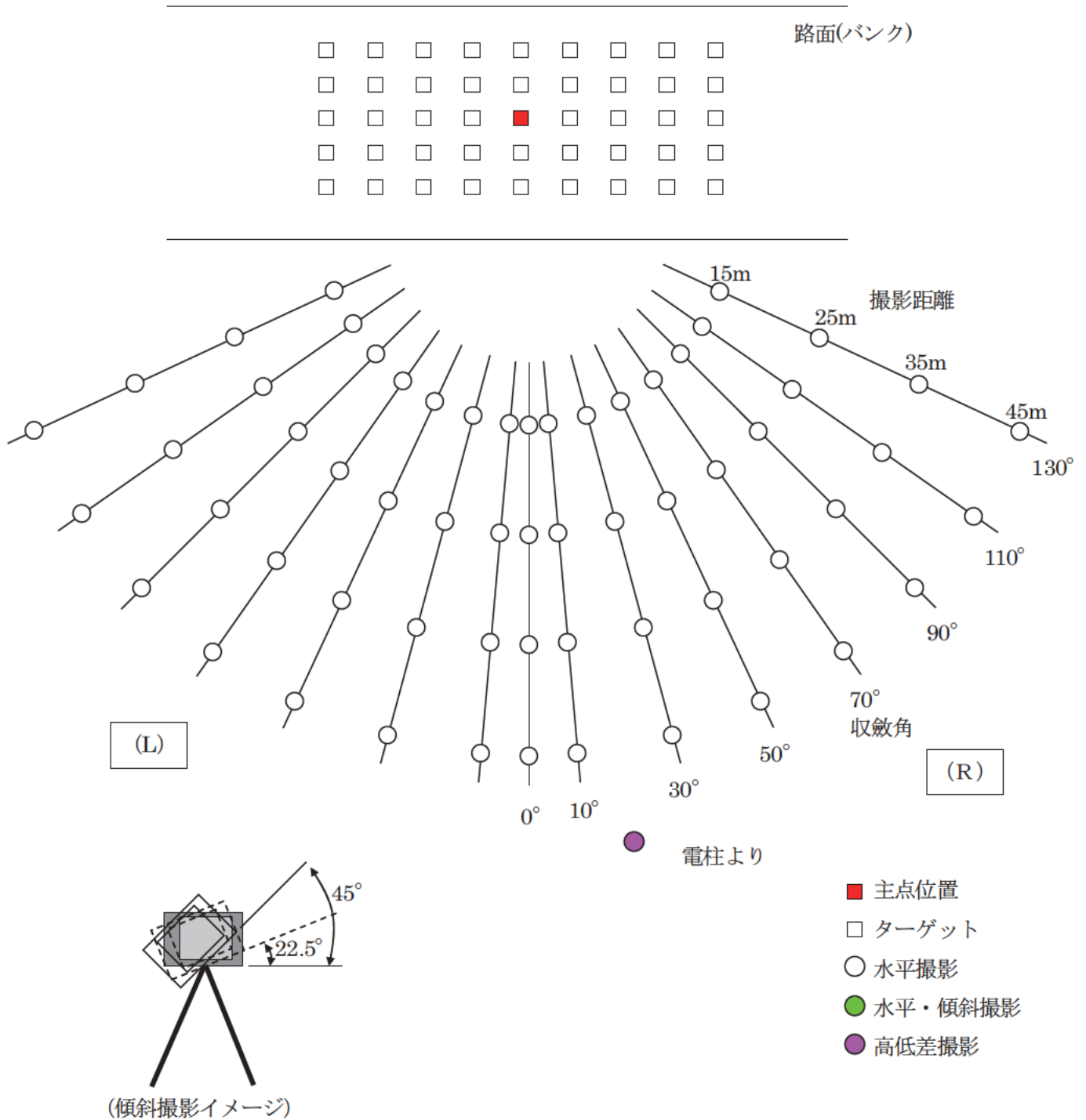


図 3.52 撮影パターン図

① 基準点・検証点

精度検証を行うための基準点と検証点は、解析時に各点を容易に認識できるように以下に配慮して設置した (写真 3.13)。

- ・ アスファルト路面が撮影対象となるためターゲットは白色を採用

- ・ ターゲットサイズは、最遠撮影ポイントからでも 4×4 ピクセル以上で写ることを基準に 5cm×5cm を採用
- ・ ターゲットは格子状及びランダムに配置し、それぞれの配置パターンが画像上で識別できるよう路面上にマーキング
- ・ 横断勾配が緩いバンク下端部では、ターゲットに支えを設けて正方形に近い形で撮影できるように設置



<緩勾配部の設置>



<格子点>



<ランダム点>

写真 3.13 ターゲット

② 撮影位置

カメラの設置位置は、図 3.52 に示す主点（撮影中心点）にトータルステーションを設置し、収斂角に応じた方向を出し、主点から巻尺で距離を計り位置を決定した（写真 3.14）。



<方向出し>



<撮影ポイントマーク>

写真 3.14 撮影位置出し作業

③ ステレオ撮影

撮影ポイントマーク地点にカメラを設置（写真 3.15）し、左右一対となる収斂角と撮影距離毎にステレオ撮影を行った。本実験では同期撮影システムを使用せず、合図と同時に左右のカメラのシャッターを切る方法で撮影した。



写真 3.15 カメラ設置状況



写真 3.16 ステレオ撮影風景

④ 基準点・検証点等の位置測量

トータルステーションを用いて、バンク上の各ターゲットの座標の測量を行った。座標系は、座標値から各点の位置関係が直感的にイメージできるように、対象斜面にほぼ直交するように仮座標系で設定しトラバー点を3点設置した（図 3.53）。

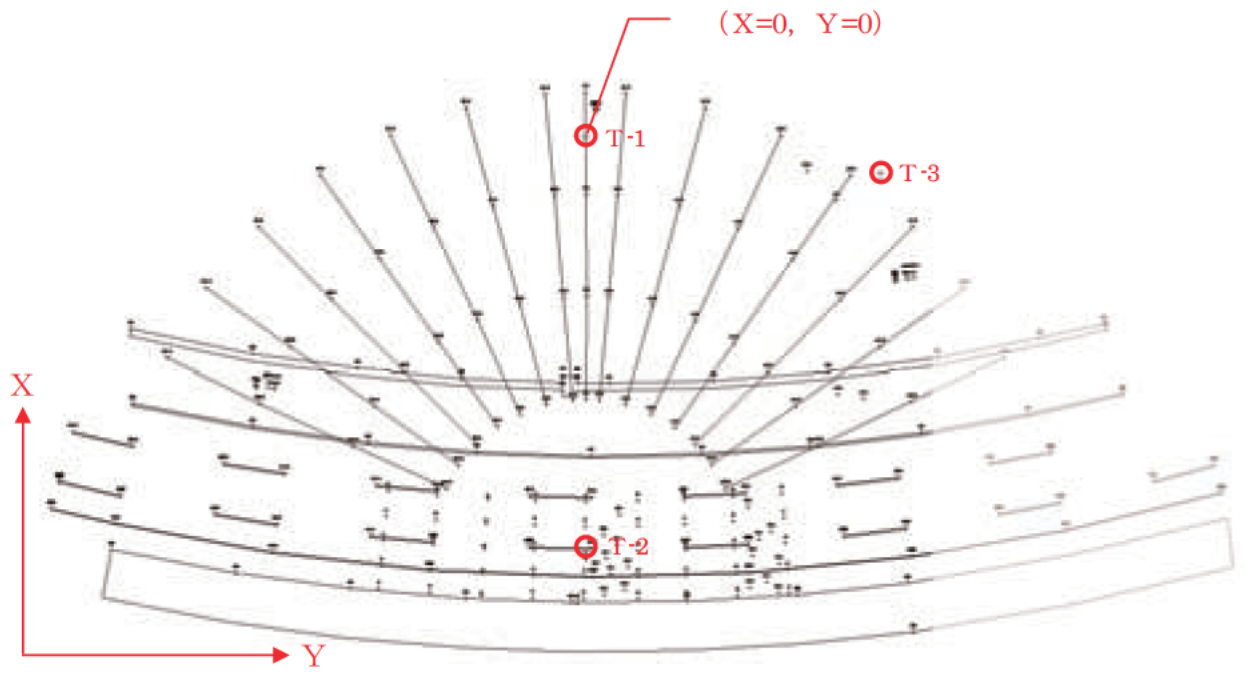


图 3.53 测量点平面图



写真 3.17 测量風景

⑤ 写真・測量データ

撮影した写真は以下の規則に従いファイル名を整理した (表 3.31)。

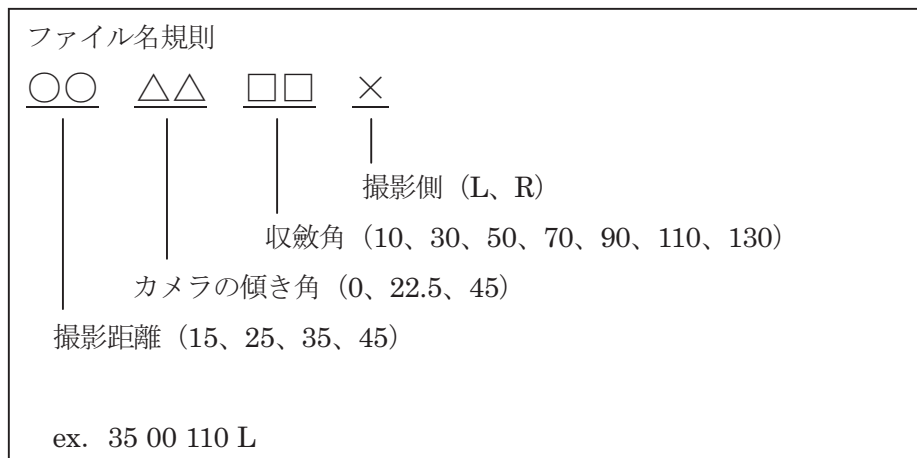


表 3.31 撮影写真一覧

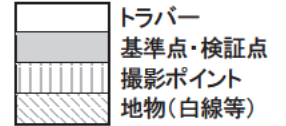
距離(m) ゆがみゆがみ 向き (°)	45			35			25			15		
	0	22.5	45	0	22.5	45	0	22.5	45	0	22.5	45
0	45-00-000-C			35-00-000-C			25-00-000-C			15-00-000-C		
	D-00-000-H1	D-00-000-H2										
10	45-00-010-L	45-22.5-010-L	45-45-010-L	35-00-010-L	35-22.5-010-L	35-45-010-L	25-00-010-L	25-22.5-010-L	25-45-010-L	15-00-010-L	15-22.5-010-L	15-45-010-L
	45-00-010-R	45-22.5-010-R	45-45-010-R	35-00-010-R	35-22.5-010-R	35-45-010-R	25-00-010-R	25-22.5-010-R	25-45-010-R	15-00-010-R	15-22.5-010-R	15-45-010-R
30	45-00-030-L	45-22.5-030-L	45-45-030-L	35-00-030-L	35-22.5-030-L	35-45-030-L	25-00-030-L	25-22.5-030-L	25-45-030-L	15-00-030-L	15-22.5-030-L	15-45-030-L
	45-00-030-R	45-22.5-R	45-45-030-R	35-00-030-R	35-22.5-030-R	35-45-030-R	25-00-030-R	25-22.5-030-R	25-45-030-R	15-00-030-R	15-22.5-030-R	15-45-030-R
50	45-00-050-L	45-22.5-050-L	45-45-050-L	35-00-050-L	35-22.5-050-L	35-45-050-L	25-00-050-L	25-22.5-050-L	25-45-050-L	15-00-050-L	15-22.5-050-L	15-45-050-L
	45-00-050-R	45-22.5-050-R	45-45-050-R	35-00-050-R	35-22.5-050-R	35-45-050-R	25-00-050-R	25-22.5-050-R	25-45-050-R	15-00-050-R	15-22.5-050-R	15-45-050-R
70	45-00-070-L	45-22.5-070-L	45-45-070-L	35-00-070-L	35-22.5-070-L	35-45-070-L	25-00-070-L	25-22.5-070-L	25-45-070-L	15-00-070-L	15-22.5-070-L	15-45-070-L
	45-00-070-R	45-22.5-070-R	45-45-070-R	35-00-070-R	35-22.5-070-R	35-45-070-R	25-00-070-R	25-22.5-070-R	25-45-070-R	15-00-070-R	15-22.5-070-R	15-45-070-R
90	45-00-090-L	45-22.5-090-L	45-45-090-L	35-00-090-L	35-22.5-090-L	35-45-090-L	25-00-090-L	25-22.5-090-L	25-45-090-L	15-00-090-L	15-22.5-090-L	15-45-090-L
	45-00-090-R	45-22.5-090-R	45-45-090-R	35-00-090-R	35-22.5-090-R	35-45-090-R	25-00-090-R	25-22.5-090-R	25-45-090-R	15-00-090-R	15-22.5-090-R	15-45-090-R
110	45-00-110-L	45-22.5-110-L	45-45-110-L	35-00-110-L	35-22.5-110-L	35-45-110-L	25-00-110-L	25-22.5-110-L	25-45-110-L	15-00-110-L	15-22.5-110-L	15-45-110-L
	45-00-110-R	45-22.5-110-R	45-45-110-R	35-00-110-R	35-22.5-110-R	35-45-110-R	25-00-110-R	25-22.5-110-R	25-45-110-R	15-00-110-R	15-22.5-110-R	15-45-110-R
130	45-00-130-L	45-22.5-130-L	45-45-130-L	35-00-130-L	35-22.5-130-L	35-45-130-L	25-00-130-L	25-22.5-130-L	25-45-130-L	15-00-130-L	15-22.5-130-L	15-45-130-L
	45-00-130-R	45-22.5-130-R	45-45-130-R	35-00-130-R	35-22.5-130-R	35-45-130-R	25-00-130-R	25-22.5-130-R	25-45-130-R	15-00-130-R	15-22.5-130-R	15-45-130-R

各測量点の座標は表 3.32 の通りである。

表 3.32 測量座標一覧

(1/5)

ID	点名	X	Y	Z
1	T 1	0.00000000	0.00000000	0.00000000
2	T 2	40.00000000	0.00000000	1.38100000
3	A1	43.87039672	19.80824365	3.74939875
4	A2	41.58461545	19.63476322	2.35175987
5	A3	39.02314731	19.43496845	1.30884686
6	A4	36.53653417	19.27258507	0.73098457
7	A5	34.16098519	19.08975589	0.37169037
8	B1	44.14009204	14.81191263	3.69651078
9	B2	41.93993089	14.68030728	2.36632300
10	B3	39.39604726	14.47757730	1.32194342
11	B4	36.86655963	14.37778919	0.72826477
12	B5	34.45257395	14.35102199	0.36327252
13	C1	44.38041840	9.82987278	3.70051165
14	C2	42.15223027	9.81128554	2.35277291
15	C3	39.64256112	9.72084546	1.32920490
16	C4	37.17894587	9.63051505	0.74555056
17	C5	34.70814988	9.58375611	0.38031561
18	D1	44.44971001	5.11461917	3.67814471
19	D2	42.26068747	5.12242075	2.35849469
20	D3	39.73776230	5.07877625	1.33906287
21	D4	37.32791041	5.11697506	0.76790123
22	D5	34.86198307	5.08581332	0.38268941
23	E1	44.41768241	0.16796834	3.64679830
24	E2	42.29684411	0.11483438	2.37722598
25	E3	40.18399957	0.00584453	1.47317080
26	E4	37.37198243	0.03623691	0.76610990
27	E5	34.98599984	0.00339234	0.40022973
28	F1	44.34464075	5.16135378	3.66449569
29	F2	42.16611212	5.07984543	2.34812755
30	F3	39.63599476	5.01499987	1.32578451
31	F4	37.21232809	4.93397228	0.75764854
32	F5	34.87075194	4.85422583	0.39535898
33	G1	44.14591783	10.13779877	3.67270897
34	G2	41.95631990	10.01045334	2.34763098
35	G3	39.55065720	9.84683090	1.36295991
36	G4	37.06534947	9.67399183	0.76591723
37	G5	34.71018940	9.50467759	0.40358658
38	H1	43.82263253	15.13926596	3.66900079
39	H2	41.64709474	15.02353407	2.35222167
40	H3	39.15846615	14.78590469	1.34662371
41	H4	36.73197450	14.54527754	0.76006449
42	H5	34.35558559	14.43000027	0.39752399
43	I1	43.44718178	20.10865536	3.71369148
44	I2	41.21741479	19.85875682	2.35598425
45	I3	38.75533226	19.64280587	1.35352845
46	I4	36.38708927	19.41982902	0.78207553
47	I5	33.87428683	19.22589898	0.38616259
48	KA1 1	43.83081522	18.78842678	3.67236634
49	KA1 2	43.33713435	16.00462403	3.21226570



(2/5)

50	KA1 3	42.81147182	17.62619314	2.94190141
51	KA2 1	40.97733077	18.85709487	2.03468474
52	KA2 2	40.21822231	16.26055828	1.65442424
53	KA3 1	38.62010724	16.87270998	1.14776780
54	KA3 2	37.86203864	18.09307599	0.98424194
55	KA4 1	35.44558424	15.83289610	0.52900932
56	KD1 1	44.04448728	1.81820355	3.39448874
57	KD1 2	43.54853727	3.82276837	3.08320253
58	KD2 1	42.03409018	2.47683506	2.24641745
59	KD2 2	41.57159987	0.97363937	2.01861319
60	KD2 3	41.34993740	4.11310021	1.93358515
61	KD2 4	40.52021051	2.00933827	1.59738386
62	KD3 1	39.17295928	3.05622727	1.17340014
63	KD3 2	38.21440025	1.78357772	0.93935047
64	KD4 1	36.21298692	3.28855932	0.57803275
65	CL1	44.82074888	0.80625927	5.94055979
66	CL2	44.81394411	0.79527019	4.92140330
67	G001	47.69105651	31.90294677	3.82122782
68	G002	42.90824471	31.34024188	3.87473066
69	G003	44.05567751	20.61895835	3.87808848
70	G004	44.68649197	9.89539267	3.89770677
71	G005	44.80355891	1.38626606	3.88790477
72	G006	44.42838365	11.63254924	3.88555629
73	G007	43.46064905	22.84692504	3.88835109
74	G008	41.93552932	34.01598727	3.88633839
75	G009	39.62942193	46.11413803	3.90169520
76	G010	25.38919577	44.05919812	0.08589254
77	G011	27.62670010	32.39438325	0.08619544
78	G012	29.18699158	21.13217165	0.10216846
79	G013	30.09229563	10.57093983	0.08892585
80	G014	30.49319889	0.54113363	0.09217538
81	G015	30.25124345	11.30044771	0.09618627
82	G016	29.54379733	21.89896492	0.09319922
83	G017	28.23839094	32.68244393	0.10142152
84	G018	26.42270291	43.03827105	0.08364220
85	G019	24.38546326	52.22867088	0.09055115
86	G020	24.57440408	52.26272255	0.09119154
87	G021	18.27142883	50.63527871	0.18079905
88	G022	17.67458409	50.43149609	0.18808356
89	G023	19.05998844	44.19191068	0.19433230
90	G024	20.96186188	34.25882245	0.17470491
91	G025	22.35759402	23.60578655	0.17258727
92	G026	23.19121046	12.46108688	0.18818256
93	G027	23.42465810	2.30712745	0.16658220
94	G028	23.38122853	0.83124499	0.16525202
95	G029	22.75219105	0.82103077	0.16423913
96	G030	22.71337414	2.18260372	0.16514898
97	G031	23.35733890	2.21363129	0.17663806
98	G032	24.07385246	2.23090944	0.16124545
99	G033	22.96658724	12.07619867	0.17694242
10	G034	22.00094804	22.17872596	0.18058936
10	G035	20.59062070	32.38312777	0.18406165
10	G036	18.18187971	44.20376069	0.20292687
10	D1 1	23.57339319	32.19912995	1.48649803
10	D1 2	23.57530534	31.99300016	1.66935485
10	D1 3	23.75512506	31.93452104	1.84337161
10	HAKO1 1	23.23950089	30.88656678	1.81867754

10	HAKO1 2	23.35280343	30.12434278	1.80605298
10	HAKO1 3	23.97924459	30.20611391	1.81036034
10	D2 1	3.34941056	0.87176253	1.76530000
11	D2 2	3.20067259	1.08008285	0.90440000
11	D2 3	3.33115155	1.21262291	1.67610000
11	D3 1	13.54772439	30.14896305	1.55096672
11	D3 2	13.33417055	30.05485478	1.55039639
11	D3 3	13.21614107	30.19865744	1.53150000
11	HAKO2 1	12.67383043	31.22925281	1.88320000
11	HAKO2 2	12.58094808	31.97495999	1.89180000
11	HAKO2 3	13.29508787	31.29173437	1.88710000
11	M 60	5.59491930	24.36897386	0.00040000
11	M 60 2	2.71751842	21.52816050	0.03480000
12	M 60 3	24.92051329	27.05606537	0.13960000
12	M 60 4	24.49060737	24.58816314	0.14500000
12	HAKU 1	30.21853657	45.32030327	0.31987168
12	HAKU 2	30.08623836	45.28342909	0.31655123
12	HAKU 3	31.20034244	39.35719512	0.30456715
12	HAKU 4	32.60114141	30.48686281	0.30311090
12	HAKU 5	33.33497424	24.50688410	0.30474895
12	HAKU 6	34.06603018	15.58066711	0.30292886
12	HAKU 7	34.37985177	9.57387781	0.31223931
12	HAKU 8	34.49959773	0.61055824	0.30283569
13	HAKU 9	34.37563859	5.43090004	0.30573592
13	HAKU 10	33.86947413	14.38836764	0.30695642
13	HAKU 11	33.34985331	20.37237551	0.31105968
13	HAKU 12	32.19714323	29.27432705	0.30594203
13	HAKU 13	31.24038695	35.21095578	0.30804346
13	HAKU 14	29.50093365	44.01255661	0.31435637
13	HAKU 15	28.14361062	49.88464049	0.31169389
13	DEN1 1	3.28567971	0.89830789	4.40930000
13	DEN1 2	3.30072000	0.89651984	6.11850000
13	L130 15	33.66681640	13.60738279	0.23775080
14	R130 15	33.68077182	13.51568553	0.27843574
14	L130 25	29.47995562	22.68653158	0.08476573
14	R130 25	29.54225924	22.60959042	0.06266717
14	L130 35	25.20609555	31.72964658	0.13270001
14	R130 35	25.39842312	31.70965236	0.12870041
14	L130 45	21.00124201	40.78942515	0.16323845
14	R130 45	20.99089441	40.70846458	0.14605536
14	L110 45	14.18612605	36.86222885	0.10439262
14	R110 45	14.16352450	36.91354470	0.19746511
14	L110 35	19.92367757	28.67195985	0.14243437
15	R110 35	19.91212100	28.73588067	0.18447476
15	L110 25	25.63645697	20.46676935	0.13346459
15	R110 25	25.63766877	20.54331516	0.13870920
15	L110 15	31.33450985	12.24374454	0.02929958
15	R110 15	31.38340358	12.34777369	0.00459485
15	L90 15	29.40479066	10.62504419	0.09760800
15	R90 15	29.36983980	10.56030066	0.09096922
15	L90 25	22.37201005	17.74976694	0.17273191
15	R90 25	22.30652573	17.63352966	0.17619360
15	L90 35	15.30145248	24.81858066	0.08871497
16	R90 35	15.25483093	24.72118710	0.17979109
16	L90 45	8.19125469	31.83651579	0.03009852
16	R90 45	8.19362988	31.80637012	0.20603121
16	L70 45	3.13367553	25.81674203	0.03754140

16	L70 35	11.38898325	20.17869771	0.05263120
16	L70 25	19.57976098	14.43308264	0.13973456
16	L70 15	27.76805644	8.68386767	0.12452032
16	L50 15	26.42931133	6.37624067	0.13384057
16	L50 25	17.38035489	10.67482079	0.12328052
16	L50 35	8.31046588	14.87257420	0.02836572
17	L50 45	0.78001056	19.04733104	0.07905426
17	L30 45	3.46713581	11.66053688	0.09023054
17	L30 35	6.19041644	9.08912315	0.01160761
17	L30 25	15.84870214	6.51652028	0.10883171
17	L30 15	25.49782534	3.91374131	0.15592792
17	L10 15	25.04083032	1.35042310	0.15266877
17	L10 25	15.07932604	2.26065002	0.11582616
17	L10 35	5.11870437	3.12500500	0.02944036
17	L10 45	4.85105796	3.91957699	0.06084475
17	0 45	4.98699868	0.01090516	0.03156989
18	0 35	4.99701485	0.03224287	0.04179851
18	0 25	14.99016095	0.08972621	0.11326918
18	0 15	24.98804956	0.03857348	0.14982893
18	R10 15	25.05552952	1.21771840	0.14817006
18	R10 25	15.09741289	2.12395956	0.10656178
18	R10 35	5.14164221	3.02076364	0.05104017
18	R10 45	4.81979566	3.92122402	0.00121986
18	R30 45	3.48147768	11.64178973	0.07005102
18	R30 35	6.16567722	9.00437370	0.08856830
18	R30 25	15.81998310	6.39741563	0.12449314
19	R30 15	25.48121663	3.80065698	0.14459867
19	R50 15	26.42564674	6.37314283	0.13653810
19	R50 25	17.31970646	10.51447982	0.14274398
19	R50 35	8.25917736	14.74856528	0.12863495
19	R50 45	0.79397224	18.99846915	0.13281275
19	R70 45	3.10236224	25.81734721	0.18069611
19	R70 35	11.26695088	20.04652372	0.15856904
19	R70 25	19.45374611	14.30218889	0.16239190
19	R70 15	27.62922494	8.57125570	0.12635491
19	HAKU16	33.09222986	51.20314053	1.26285340
20	HAKU17	32.95487784	51.17230969	1.22308674
20	HAKU18	34.36189367	45.21180820	1.21876587
20	HAKU19	36.17297996	36.05848081	1.22254506
20	HAKU20	37.14774128	30.03386724	1.22516756
20	HAKU21	38.30543245	20.93452769	1.22963551
20	HAKU22	38.84991579	14.85253902	1.22383707
20	HAKU23	39.37283785	5.47620413	1.21824562
20	HAKU24	39.49145541	0.62144300	1.21893014
20	HAKU25	39.35736187	9.74683745	1.21315165
20	HAKU26	39.06418422	15.84238457	1.21918341
21	HAKU27	38.27377231	25.12376618	1.20580861
21	HAKU28	37.54102823	31.18620764	1.20617023
21	HAKU29	36.15465146	40.22160265	1.21617493
21	HAKU30	34.99565655	46.21182609	1.20718285
21	HAKU31	32.94483584	55.26549063	1.20814610
21	HAKU32	31.37236619	61.17359541	1.21210625
21	HAKU33	34.15275718	61.88939308	2.35145952
21	HAKU34	34.06960779	61.87243962	2.30630686
21	HAKU35	37.72250644	46.75256022	2.30474286
21	HAKU36	40.27699769	31.74079136	2.30280016
22	HAKU37	41.83815591	15.95445965	2.30987171

(5/5)

22	HAKU38	42.28232494	0.68533339	2.32850825
22	HAKU39	41.61192678	15.18769966	2.31346566
22	HAKU40	39.89818524	30.43582970	2.32446791
22	HAKU41	37.10462925	45.70237701	2.31745007
22	HAKU42	35.63384849	51.96489801	2.31940606
22	T 3	3.58974496	28.70066849	0.03080000

3.2.2 異なるパラメータによる解析結果

(1) 検討内容

表 3.33 に示す 8 種類のパラメータが解析精度に及ぼす影響を検討した。

表 3.33 パラメータと検討内容

パラメータ	内 容
①収斂角	収斂角を 10° ~130° の範囲で変化させた解析を実施し、収斂角が解析精度に及ぼす影響について検討する。
②撮影距離	撮影距離 15m~45m の範囲で変化させ、撮影距離の違いが解析精度に及ぼす影響について検討する。
③撮影角度	撮影角度を変化させ、撮影角度の違いが解析精度に及ぼす影響について検討する。
④撮影距離差	ステレオ撮影する 2 台カメラと対象地の距離を不等距離にした場合の解析精度の検証を行う。
⑤カメラ傾斜角度差	撮影する写真の片側（または両側）を回転させ、撮影対象箇所における”ゆがみ”をつくり、写真のゆがみが解析精度におよぼす影響について検討する。
⑥撮影高度差	撮影高さを変えた写真を取り込み解析に用いることで、解析精度におよぼす影響について検討する。
⑦人為的誤差	同一ケースの解析を数人で実施し、解析精度のバラツキを検証する。
⑧写真内の位置	一般的に写真の端ほどひずみが大きくなるため、写真内の位置が、解析精度におよぼす影響について検証する。今回の検討では Y 軸値（左右方向）を基準とした誤差分布の表示により検証を行った。

パラメータ (①~⑥) の参考図を図 3.54 に示す。また、検討に用いた解析ケース（写真の組み合わせ）を、表 3.34 に示す。

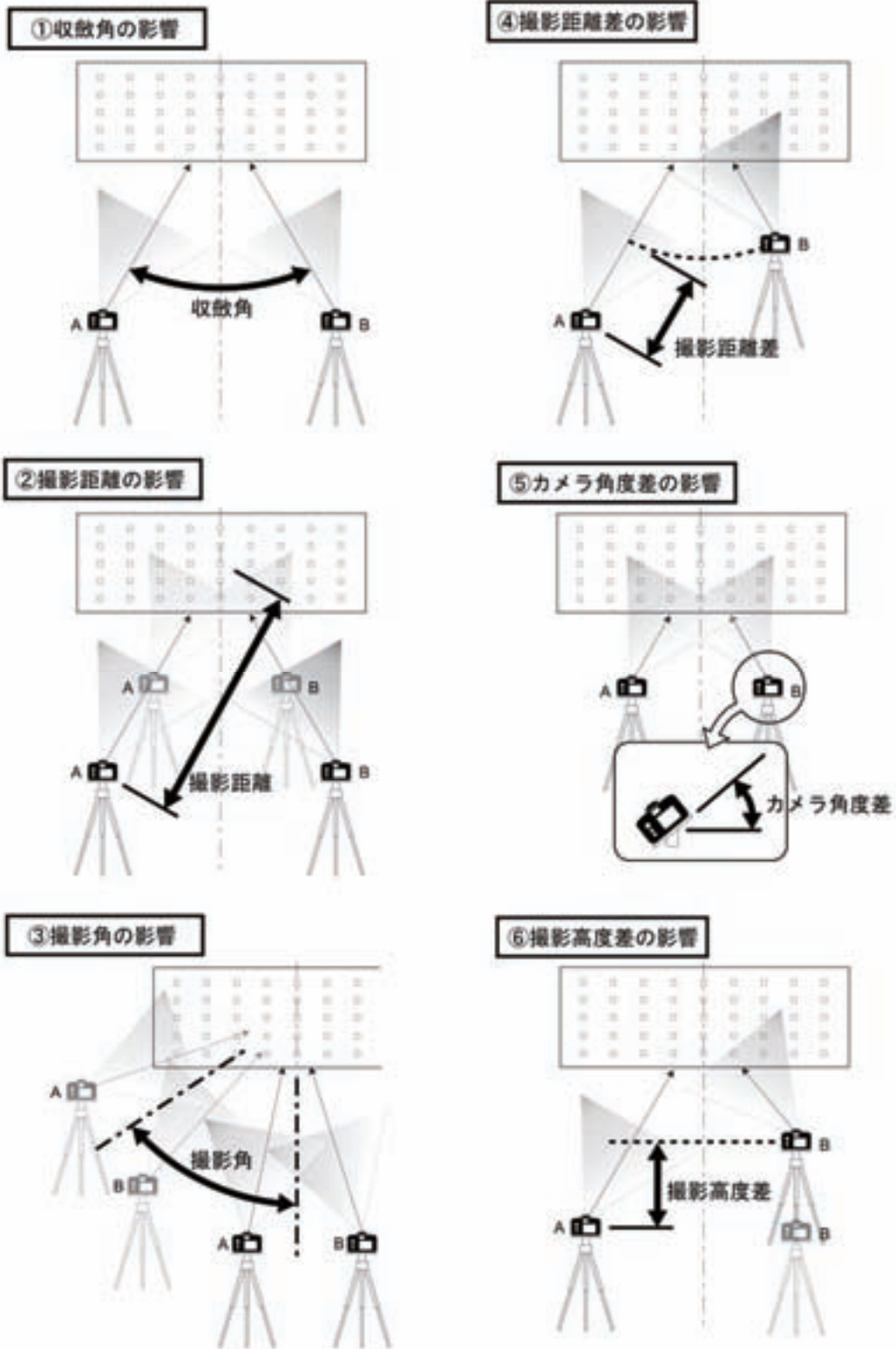


図 3.54 検討項目の模式図

表 3.34 解析ケース一覧表

撮影距離	収斂角	その他撮影条件等	ケース	写真-1	写真-2	写真-3	解析実施の有無		検討内容								備考		
							土研	川崎	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧			
45m	10°	撮影角0°	1	45-00-010-L	45-00-010-R			○	○	●	●	●							
	30°		2	45-00-030-L	45-00-030-R			○	○	●	●	●	●	●					
	50°		3	45-00-050-L	45-00-050-R			○	○	●	●	●	●	●					
	70°		4	45-00-070-L	45-00-070-R			○	○	●	●	●	●	●					
	90°		5	45-00-090-L	45-00-090-R			○	○	●	●	●	●	●					
	110°		6	45-00-110-L	45-00-110-R			○	○	●	●	●	●	●					
	130°		7	45-00-130-L	45-00-130-R			○	○	●	●	●	●	●					
	30°		9	45-00-030-L	45-00-030-R	45-00-000-C			○	○					●			写真3枚	
			16	45-00-030-L	45-00-030-R	D-00-000-H1			○	○					●			写真3枚	
			23	45-00-030-L	45-00-030-R	D-00-000-H2-2			○	○					●			写真3枚	
			29	35-00-010-L	35-00-010-R				○	○	●	●							
	35m		10°	30	35-00-030-L	35-00-030-R			○	○	●	●							
			30°	31	35-00-050-L	35-00-050-R			○	○	●	●							
			50°	32	35-00-070-L	35-00-070-R			○	○	●	●							
			70°	33	35-00-090-L	35-00-090-R			○	○	●	●							
			90°	34	35-00-110-L	35-00-110-R			○	○	●	●							
110°		35	35-00-130-L	35-00-130-R			○	○	●	●									
130°		43	25-00-010-L	25-00-010-R			○	○	●	●									
25m		10°	44	25-00-030-L	25-00-030-R			○	○	●	●								
		30°	45	25-00-050-L	25-00-050-R			○	○	●	●								
		50°	46	25-00-070-L	25-00-070-R			○	○	●	●								
		70°	47	25-00-090-L	25-00-090-R			○	○	●	●								
	90°	48	25-00-110-L	25-00-110-R			○	○	●	●									
	110°	49	25-00-130-L	25-00-130-R			○	○	●	●									
	130°	57	15-00-010-L	15-00-010-R			○	○	●	●									
	15m	10°	58	15-00-030-L	15-00-030-R			○	○	●	●								
		30°	59	15-00-050-L	15-00-050-R			○	○	●	●								
50°		60	15-00-070-L	15-00-070-R			○	○	●	●									
70°		61	15-00-090-L	15-00-090-R			○	○	●	●									
90°		62	15-00-110-L	15-00-110-R			○	○	●	●									
110°		63	15-00-130-L	15-00-130-R			○	○	●	●									
130°		71	45-00-130-L	45-00-110-L			○	○			●								
45m	10°	撮影角60°	72	45-00-110-L	45-00-90-L			○	○			●							
			73	45-00-90-L	45-00-70-L			○	○			●							
			74	45-00-70-L	45-00-50-L			○	○			●							
			75	45-00-50-L	45-00-30-L			○	○			●							
			76	45-00-30-L	45-00-10-L			○	○			●							
			77	45-00-10-L	45-00-10-L			○	○			●							
	30°	撮影角50°	84	45-00-130-L	45-00-70-L			○	○			●							
			85	45-00-110-L	45-00-50-L			○	○			●							
			86	45-00-90-L	45-00-30-L			○	○			●							
			87	45-00-70-L	45-00-10-L			○	○			●							
			88	45-00-50-L	45-00-10-R			○	○			●							
			89	45-00-30-L	45-00-30-L			○	○			●							
	50°	撮影角40°	95	45-00-130-L	45-00-30-L			○	○			●							
			96	45-00-110-L	45-00-10-L			○	○			●							
			97	45-00-90-L	45-00-10-R			○	○			●							
			98	45-00-70-L	45-00-30-R			○	○			●							
			99	45-00-50-L	45-00-10-R			○	○			●							
			100	45-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●							
	70°	撮影角30°	104	45-00-130-L	45-00-10-R			○	○			●							
			105	45-00-110-L	45-00-30-R			○	○			●							
			106	45-00-90-L	45-00-50-R			○	○			●							
			107	45-00-70-L	45-00-30-R			○	○			●							
			108	45-00-50-L	45-00-10-R			○	○			●							
			109	45-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●							
90°	撮影角20°	111	45-00-130-L	45-00-50-R			○	○			●								
		112	45-00-110-L	45-00-70-R			○	○			●								
		113	45-00-90-L	45-00-10-R			○	○			●								
		114	45-00-70-L	45-00-30-R			○	○			●								
		115	45-00-50-L	45-00-10-R			○	○			●								
		116	45-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●								
最長撮影距離 45m	30°	対撮影距離35m	171	45-00-110-L	35-00-50-L			○	○								撮影距離差10m		
			172	35-00-110-L	45-00-50-L			○	○										
		対撮影距離35m	175	45-00-70-L	35-00-10-L			○	○										
			176	35-00-70-L	45-00-10-L			○	○										
		対撮影距離35m	179	45-00-30-L	35-00-30-R			○	○			●							
			180	35-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●							
		対撮影距離25m 撮影角0°	191	45-00-30-L	25-00-30-R			○	○			●						撮影距離差20m	
			195	45-00-110-L	15-00-50-L			○	○			●						撮影距離差30m	
		対撮影距離15m	196	15-00-110-L	45-00-50-L			○	○			●							
			199	45-00-70-L	15-00-10-L			○	○			●							
		対撮影距離15m	200	15-00-70-L	45-00-10-L			○	○			●							
			203	45-00-30-L	15-00-30-R			○	○			●							
		対撮影距離15m	204	15-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●							
			204	15-00-30-L	45-00-30-R			○	○			●							
45m	30°	基準カメラ傾斜0°	231	45-00-30-L	45-22.5-30-R			○	○					●			傾斜差22.5°		
			232	45-00-30-L	45-45-30-R			○	○					●			傾斜差45°		
			233	45-22.5-30-L	45-22.5-30-R			○	○					●			傾斜差45°		
			234	45-22.5-30-L	45-45-30-R			○	○					●			傾斜差67.5°		
			235	45-45-30-L	45-45-30-R			○	○					●			傾斜差90°		
45m	35°	撮影角17.5°	276	45-00-70-L	45-00-000-C			○	○					●			同高さ		
			277	45-00-70-L	D-00-000-H1-2			○	○					●			センターH1		
			278	45-00-70-L	D-00-000-H2-2			○	○					●			センターH2		
			282	45-00-000-C	D-00-000-H1-2			○	○										
			283	45-00-000-C	D-00-000-H2-2			○	○										

- ① 収斂角の影響
- ② 撮影距離の影響
- ③ 撮影角の影響
- ④ 撮影距離差の影響
- ⑤ カメラ傾斜角度差の影響
- ⑥ 撮影高度差の影響
- ⑦ 人為的誤差の影響
- ⑧ 写真内の位置による影響

(2) 解析方法

3.2.1 で撮影した画像について、表 3.34 に示すケース毎に Kuraves 解析を行い、Kuraves 解析と測量から得られた検証点の三次元座標の値を比較して、画像解析による誤差を求めた(図 3.55)。測点(初期対応点・検証点)の平面位置を図 3.56 に示す。

初期対応点(カメラ位置計算点 座標付与点)の設定は、対応点入力表の点番 1~20(図 3.57 のグレー範囲)とし、入力は表 3.35 の対応点入力のルールに沿った。例えば、全ての点が写っている写真であれば、1=E1、2=E3、3=E5、4=A1、5=A3、6=A5、7=I1、8=I3、9=I5 ということになる。

Kuraves 解析の際の「撮影位置の計算」における誤差調節は、土木研究所が 0.03、川崎地質が 0.00 として解析を行った。

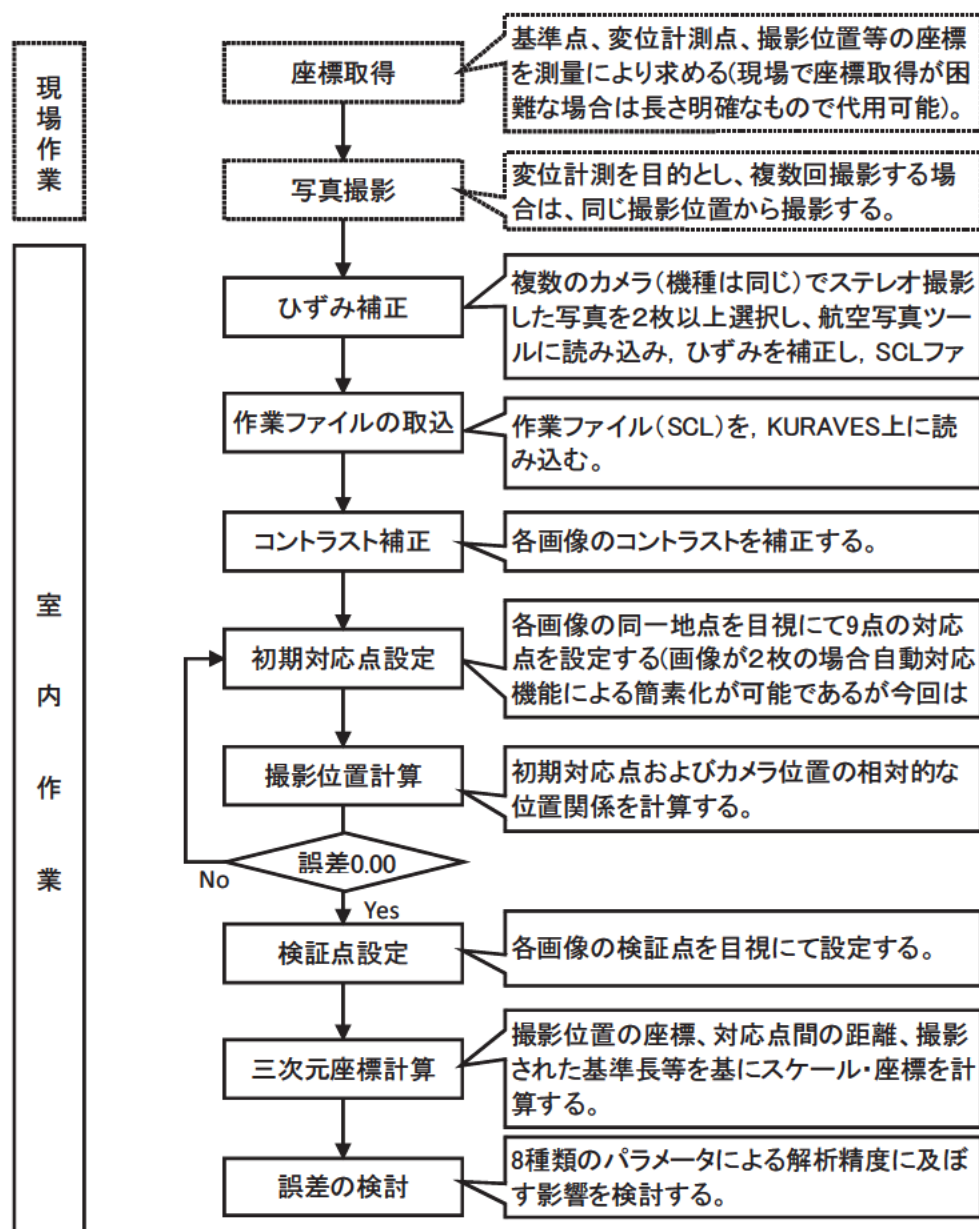
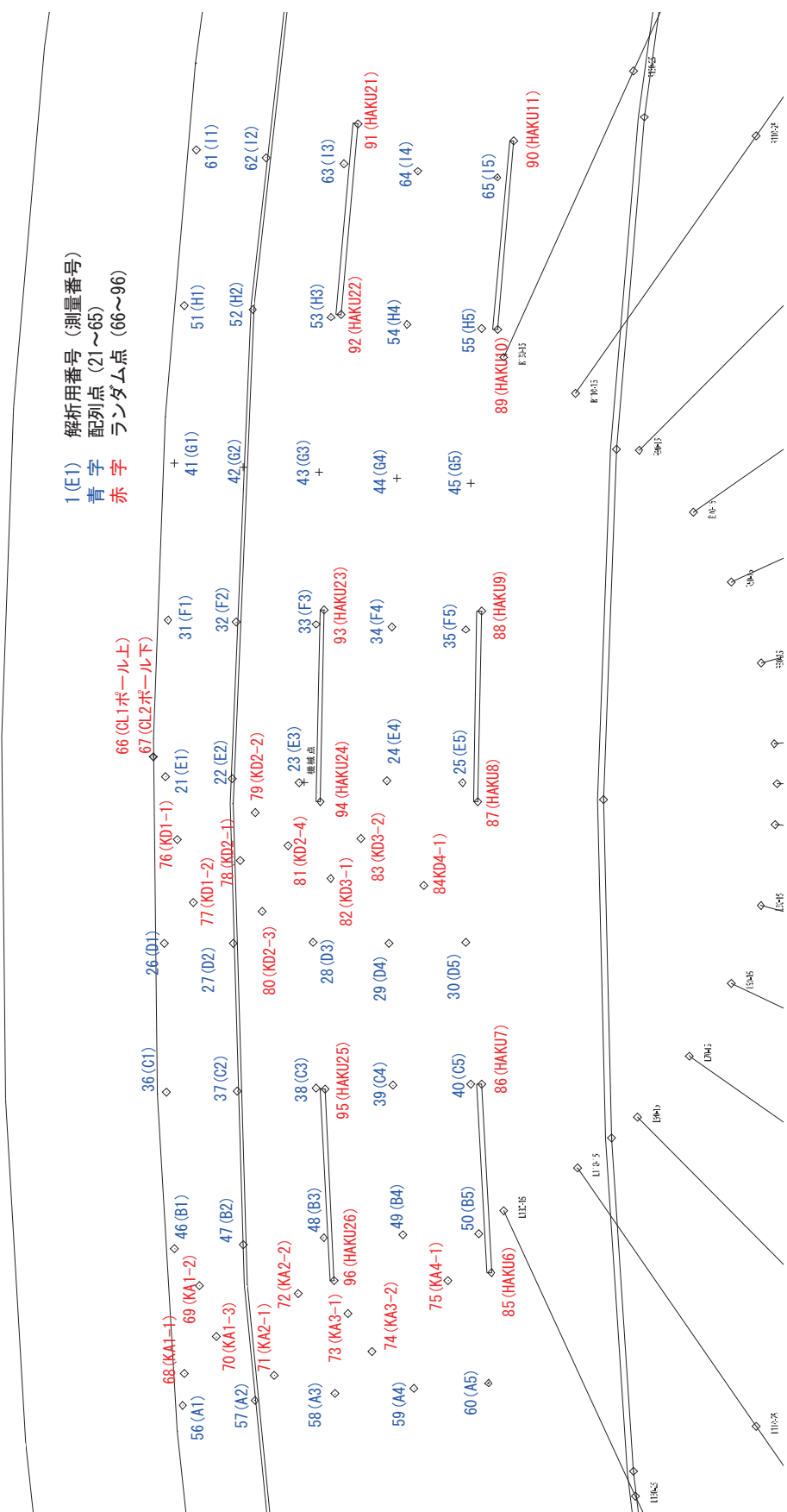


図 3.55 解析のフロー



1 (E1) 解析用番号 (測量番号)
 青字 配列点 (21~65)
 赤字 ランダム点 (66~96)

図 3.56 実験場平面図

撮影位置の計算

撮影位置の計算

追加 挿入 全削除
削除 不要点番削除

点番	状態	数	誤差	再計算	点
1	○	2	0.03	○	
2	○	2	0.03	○	
3	○	2	0.02	○	
4	○	2	0.01	○	
5	○	2	0.00	○	
6	○	2	0.01	○	
7	○	2	0.01	○	
8	○	2	0.00	○	
9	○	2	0.01	○	
10	○	2	0.03	○	
11	○	2	0.00	○	
12	×	0		○	
13	×	0		○	
14	×	0		○	
15	×	0		○	
16	×	0		○	
17	×	0		○	
18	×	0		○	
19	×	0		○	
20	×	0		○	
21	○	2	0.00	×	
22	○	2	0.00	×	
23	○	2	0.01	×	
24	○	2	0.03	×	
25	○	2	0.01	×	
26	○	2	0.02	×	
27	○	2	0.00	×	
28	○	2	0.03	×	
29	○	2	0.01	×	
30	○	2	0.02	×	
31	○	2	0.00	×	
32	○	2	0.06	×	
33	○	2	0.03	×	

図 3.57 対応点入力表

表 3.35 対応点入力の

	点番	入力点
初期対応点専用テーブル	1	E1
	2	E3
	3	E5
	4	左端列 1 段目
	5	左端列 3 段目
	6	左端列 5 段目
	7	右端列 1 段目
	8	右端列 3 段目
	9	右端列 5 段目
	10	追加用
	11	追加用
	12	追加用
	13	追加用
	14	追加用
	15	追加用
	16	追加用
	17	追加用
	18	追加用
	19	追加用
	20	追加用
検証点入力範囲	21	対応点 (配列点)
	↓	対応点 (配列点)
	66	対応点 (ランダム点)
	↓	対応点 (ランダム点)
	96	対応点 (ランダム点)

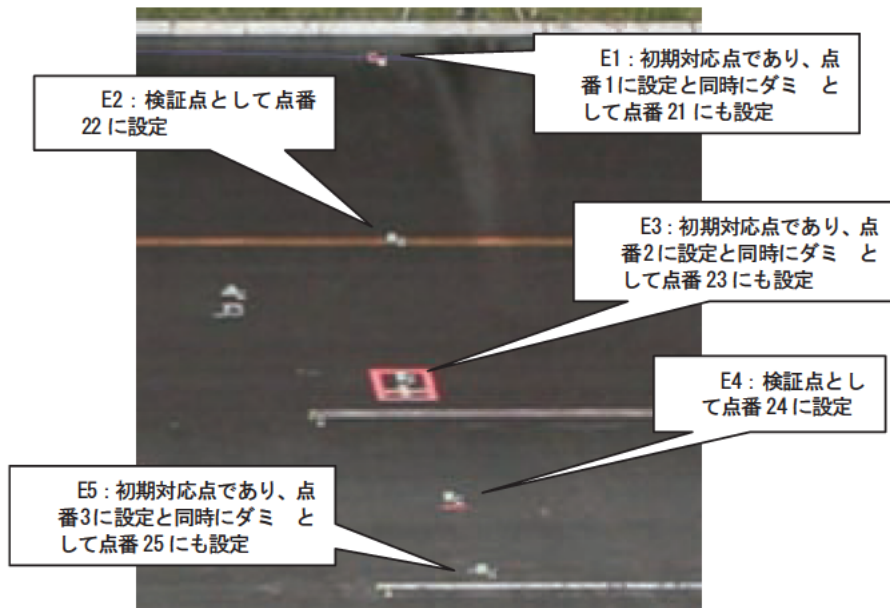


図 3.58 ダミー対応点の設定

検証点の設定では、点番 21 以降の対応点番号と同じ箇所へ設定した。その際、初期対応点と重なって設定する点があるが、ダミー対応点として初期対応点に重ねて設定した。例えば、E1 は初期対応点として点番 1 に設定されると同時に点番 21 にも設定される (図 3.58)。その際、初期対応点は精度評価を行わないため、点番 21 など重複して設定した点は評価から除いた。解析結果の整理では、各測点における誤差について整理を行った。

(3) 解析結果

ここでは、全解析結果のうち代表的な図を示し、その内容を説明する。

①収斂角の影響 (図 3.59)

- X 軸誤差 (ΔX) は収斂角 10° において最も大きく、収斂角が大きくなるにつれて小さくなる。
- Y 軸誤差 (ΔY) は収斂角 $30^\circ \sim 70^\circ$ 付近で小さくなり、それ以外の収斂角では大きくなる。
- Z 軸誤差 (ΔZ) は、小さく一定である。

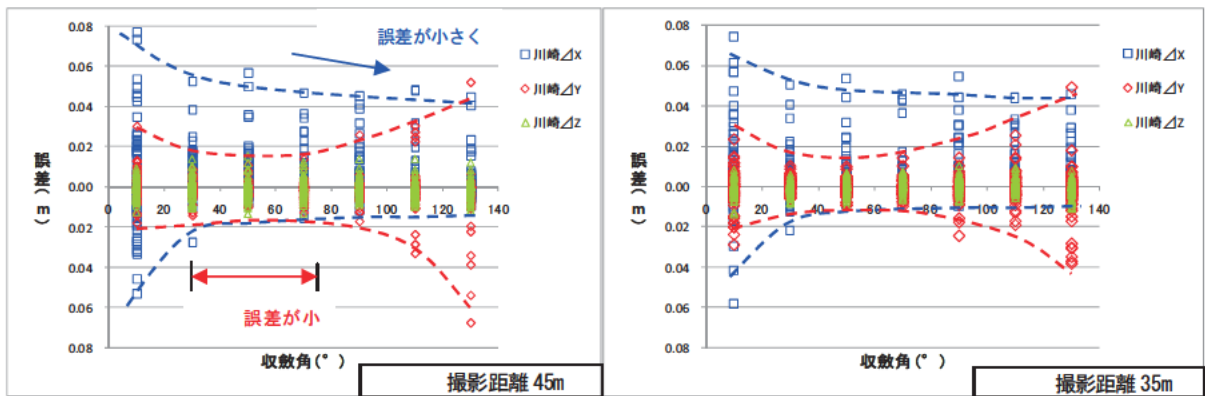


図 3.59 収斂角と誤差の関係

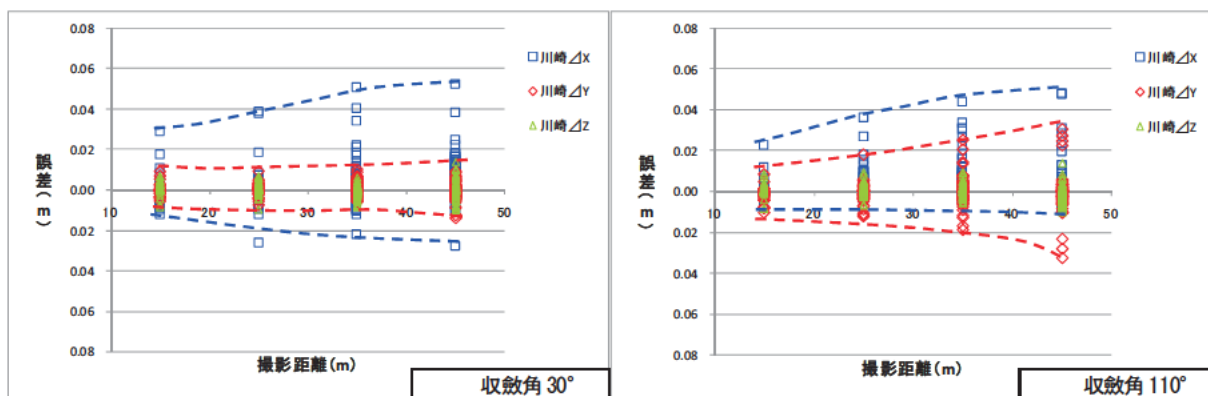


図 3.60 撮影距離と誤差の関係

③撮影角の影響 (図 3.61)

- X 軸誤差 (ΔX) は、Y 軸 Z 軸と比較して大きくほぼ一定である。
- Y 軸誤差 (ΔY) は、撮影角度が大きくなるにつれて、大きくなる傾向が見られる (収斂角 10°)。しかし、収斂角 30° 以上では、誤差は小さくほぼ一定となる。
- Z 軸誤差 (ΔZ) は小さく一定である。

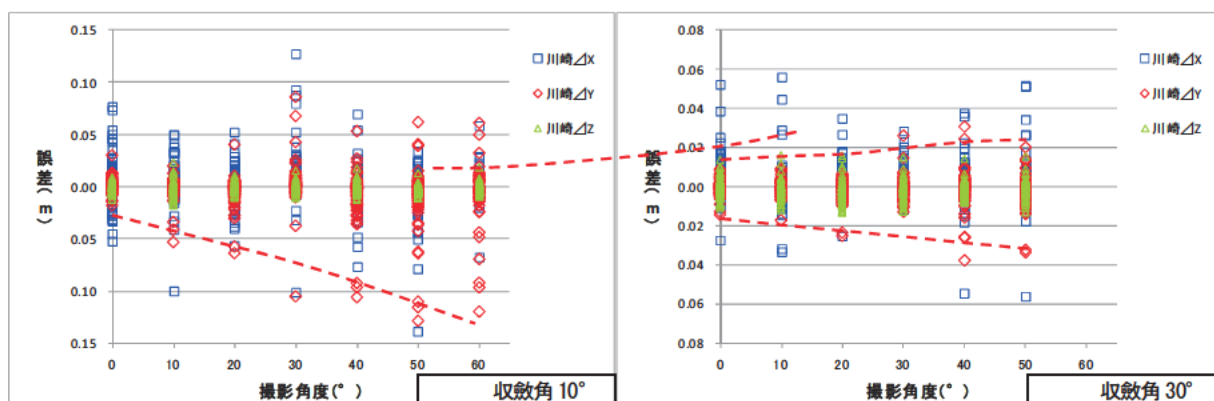


図 3.61 撮影角と誤差の関係

④撮影距離差の影響 (図 3.62)

- X 軸誤差 (ΔX) は大きいものの、撮影距離差による影響は見られない。
- Y、Z 軸誤差 ($\Delta Y, Z$) は小さく (0.02~0.02)、ほぼ一定である。

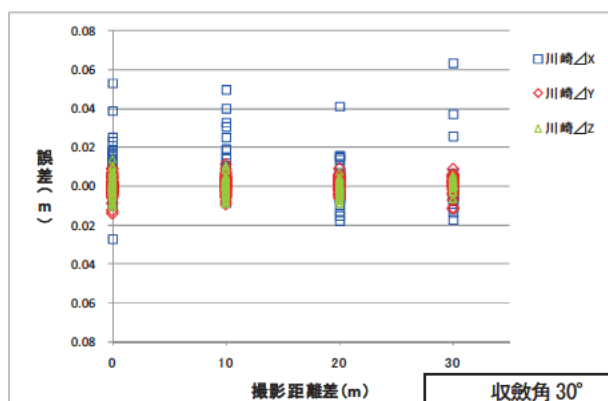


図 3.62 撮影距離差と誤差の関係

⑤カメラ傾斜角度差の影響 (図 3.63)

- X 軸誤差 (ΔX) は 0.04 ~ 0.03 に分布し、カメラ傾斜角度差が 45° を超えると誤差のバラツキが大きくなる。
- Y、Z 軸 ($\Delta Y, Z$) は誤差が小さく、ほぼ一定 (0.02 ~ 0.02) である。

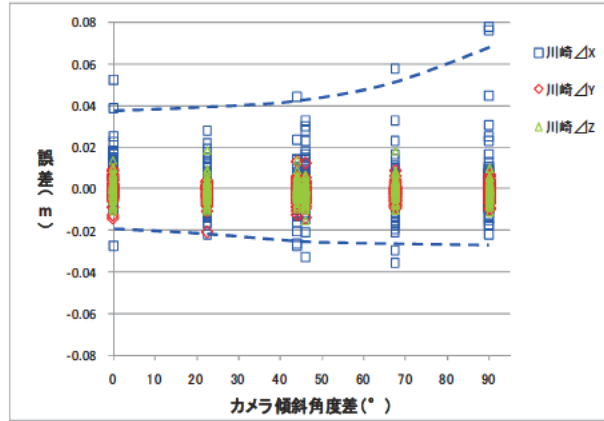


図 3.63 カメラ傾斜角度差と誤差の関係
(収斂角 30° 、撮影距離 45m)

⑥撮影高度差の影響 (図 3.64、3.65)

- 各軸 ($\Delta X, Y, Z$) の誤差は、ほぼ一定で大きな傾向は見られない。

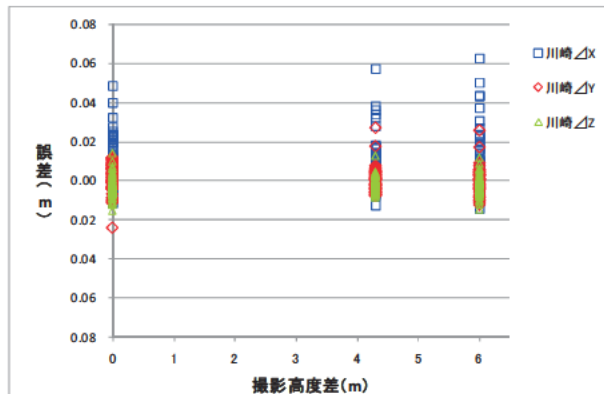


図 3.64 撮影高度差と誤差の関係 (写真 2 枚)
(収斂角 35° 、撮影距離 45m、撮影角 17.5°)

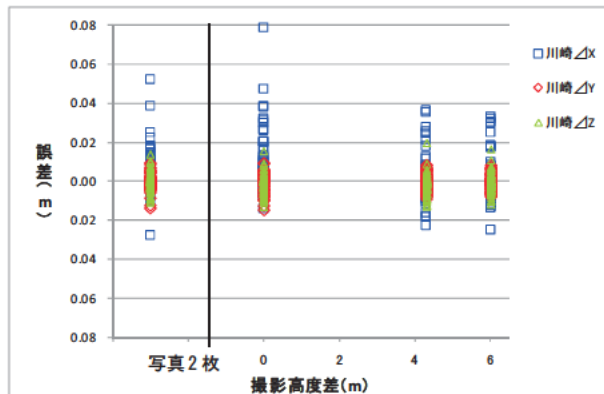


図 3.65 撮影高度差と誤差の関係 (写真 3 枚)
(収斂角 30° 、撮影距離 45m、撮影角 0°)

⑦人為的誤差 (図 3.66、3.67)

異なる解析者により同一のケースを解析した結果を用いて人為的誤差の検討を行った。

- 人為的誤差が最も大きいのは収斂角 $10^\circ \sim 30^\circ$, 撮影距離が 45m のケースで、3 倍近くの差がある。
- 各パラメータ (収斂角, 距離) の変化に伴う誤差の発生傾向は類似している。
- X 軸の誤差は両者ともにほぼ同じであるが、Y 軸については土研の誤差が大きく表れている。
- Z 軸は両者ともに誤差が小さく一定である。

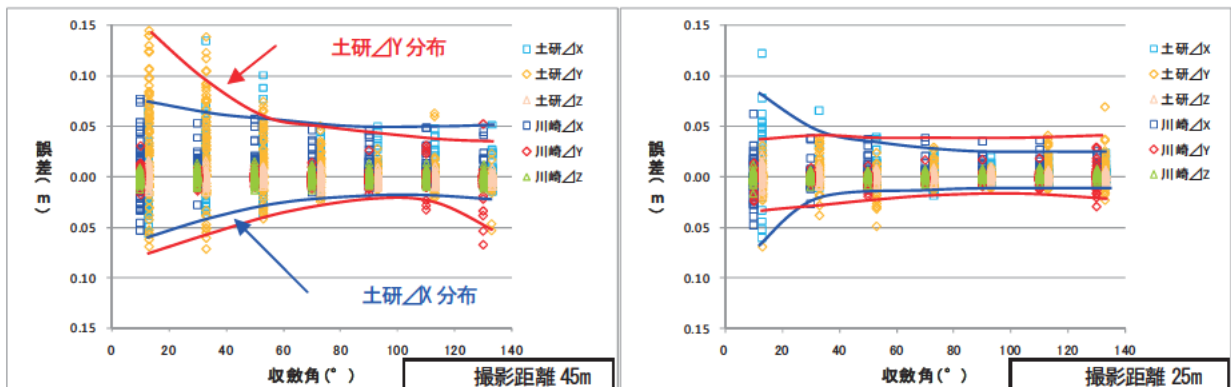


図 3.66 収斂角と誤差の関係 (人為的誤差)

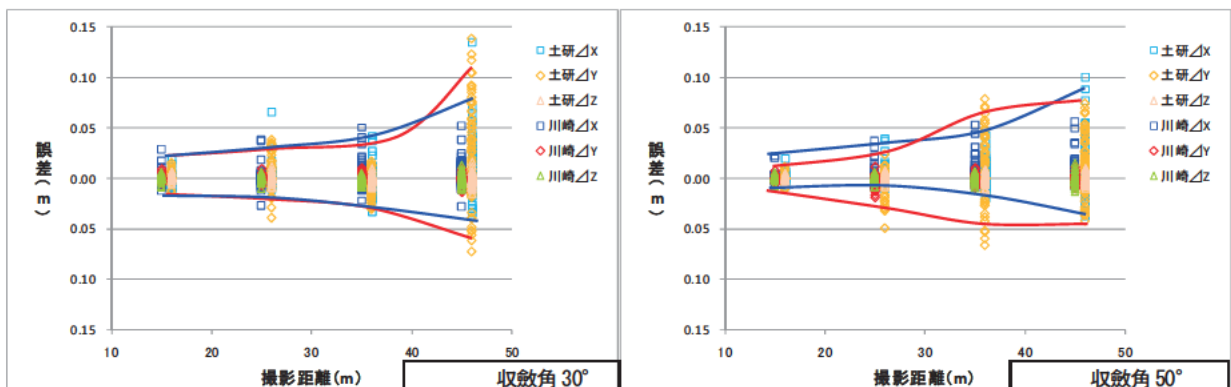


図 3.67 撮影距離と誤差の関係 (人為的誤差)

⑧写真内の位置による影響 (図 3.68, 3.69)

- 撮影角度が 0° で収斂角の違いによる、写真内の異なる位置での誤差の分布に傾向は見られない。
- X、Y 軸は撮影角度が大きいケースほど、カメラ位置からより遠い測点における誤差が大きくなる傾向がある。
- Z 軸はどのケースにおいても誤差は一定である。

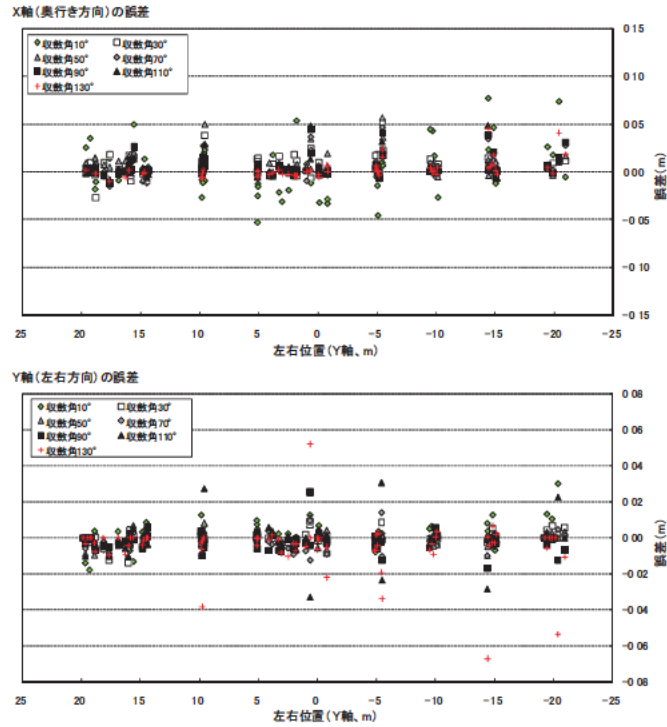


図 3.68 Y 軸値を基準とした誤差分布
(撮影距離 45m、撮影角度 0°)

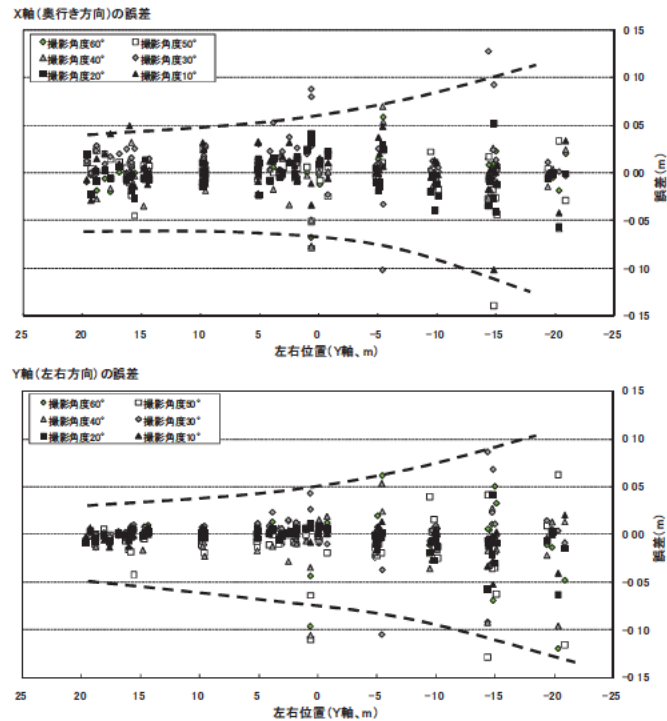


図 3.69 Y 軸値を基準とした誤差分布
(収斂角 10°、撮影距離 45m)

(4) まとめ

解析結果から明らかとなった内容を表 3.36 にまとめた。

表 3.36 検討結果

検討項目	結果
①収斂角の影響	収斂角 30° ～ 70° が最も誤差が小さい。
②撮影距離の影響	全体に撮影距離が短くなるほど誤差が小さくなるが、収斂角が大きくなるほどその傾向が顕著に現れる。
③撮影角の影響	収斂角 30° 以上では誤差はほぼ一定となり、大きな傾向は見られない。
④撮影距離差の影響	誤差は一定で、大きな傾向は見られない。
⑤カメラ傾斜角度差の影響	カメラ傾斜角度差が 45° より大きくなると、誤差が大きくなる傾向が見られる。
⑥撮影高度差の影響	誤差は一定で、大きな傾向は見られない。
⑦人為的誤差の影響	全体として誤差分布の傾向は似ている。 個人誤差は、最大誤差で 3 倍近くの差がある。
⑧写真内の位置による影響	ひずみによると考えられる影響はほとんど見られない。 撮影角度が大きいケースほど、カメラ位置からより遠い測点における誤差が大きくなる傾向がある。

(5) 撮影位置の選定方法についての提案

検討結果から、実際の現場において解析精度が高くなるような撮影位置を選定する方法は、以下のとおりである

- ・ターゲット（特徴点）が明瞭に見える位置。
- ・収斂角 30° ～ 70° で撮影が可能な位置。ただし、対象物の凹凸が激しい場合は収斂角 30° 程度で撮影が可能な位置。
- ・対象物のできるだけ正面で撮影が可能な位置（撮影角を小さくする）。

3.2.3 気象条件の異なる撮影による画像解析について

3.1 節の撮影実験は「晴れ」、試験走路内の撮影実験は「曇り」模様で実施されたが、実験目的の違いから、撮影対象、条件が大きく異なるため両実験データの比較から、気象条件の違いが解析に与える影響を確認することはできない。気象条件の異なる実験を同一地点で実施する場合、天候見合いで関係者の日程・機材・作業員等を拘束することになり、調整が困難となった。

そこで、簡易的に気象の異なる条件下で撮影を行い、その画像解析結果から気象条件の異なる撮影をした場合の画像解析への影響を検証した。

(1) 実験概要

本実験は、株式会社中日本航空の豊山ビル周辺の建物（写真 3.18）を撮影対象として、気象条件が晴れ・曇り・雨の時と朝・昼・夕の時間帯に撮影を行った。なお、撮影対象の建物は、地すべり地に多く見られる色に配慮し、壁面の色が茶・ベージュ・白を含むものを対象とした。撮影はビルの3階からステレオで行った（写真 3.19）。



写真 3.18 撮影箇所周辺状況



写真 3.19 ステレオ撮影イメージ

(2) 撮影ケースと画像

表 3.37 に示す 6 ケースについて撮影を行い、取得した画像を写真 3.20 に示す。

表 3.37 撮影ケース

時間帯		朝	昼	夕
モード		AF	AF	AF
撮影日	1月7日	曇	小雨	小雨
	1月8日	晴	晴	晴

(3) 解析方法

撮影した画像は、検証対象とする建物とカメラの間に電線が横断しており、解析時のエラー部として除去する必要がある部分が比較的多い。また、建物に基準点・検証点等の設置や測量を実施していない等の理由から、簡易な解析を行うこととした。

画像解析は、撮影した画像の陰影部の有無やノイズの有無等の影響を確認するため、写真 3.20 に赤枠で囲む 3 ケースで行った。解析手順としては、ステレオ画像で対応点を設定し、カメラ位置をもとめ、マッチング処理用のメッシュを設定した。その後、マッチング処理を 1 回行い、明らかに誤対応と思われる点を除去して、解析精度の検証を行った。ここでは、表 3.38 に示すケース 1 の解析結果を基準に、他ケースの精度に関する傾向を比較した。



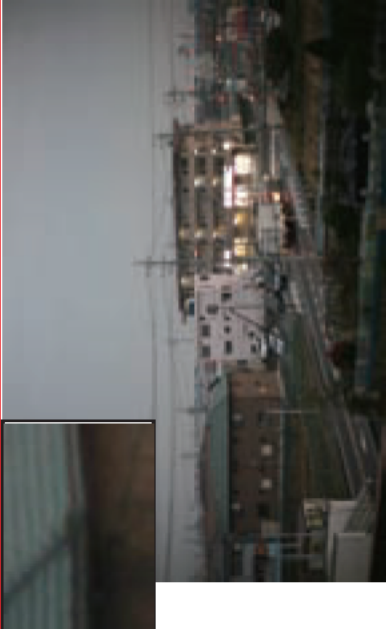
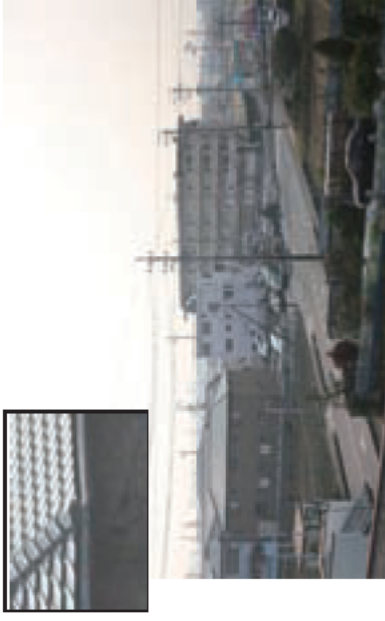

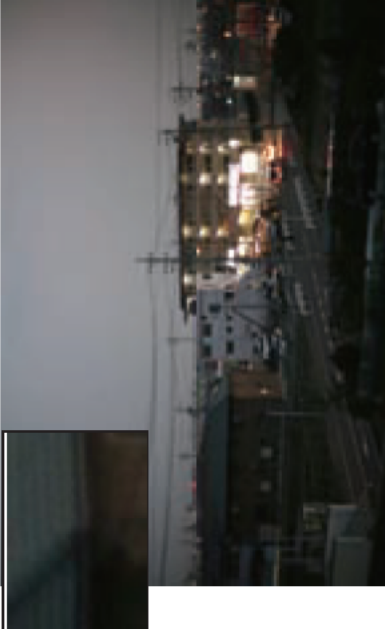





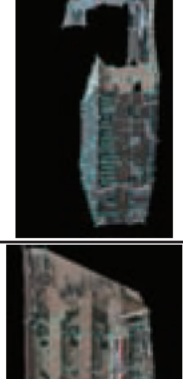


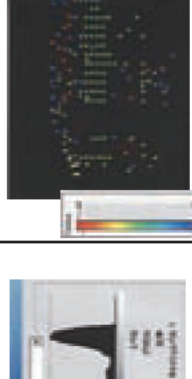
 <p>星<少雨>に似た画像</p>	 <p>影の影響小</p>	 <p>ノイズ少</p>
 <p>白っぽい画像</p>	 <p>影の影響大</p>	 <p>ノイズ多</p>
<p>1月7日 朝 <曇></p>	<p>1月7日 星 <少雨></p>	<p>1月7日 夕 <少雨></p>
<p>1月8日 朝 <晴></p>	<p>1月8日 星 <晴></p>	<p>1月8日 夕 <晴></p>

写真 3.20 条件に応じた撮影画像（ステレオ撮影した右側の画像）

表 3.38 解析結果

項目	ケース 1 (少雨 昼)	ケース 2 (晴 昼)	ケース 3 (少雨 夕)
マッチング状況 (手前電線類はノイズとして除去)			
3次元モデル イメージ			
モデル間誤差 (ケース 1 基準) 及び 画像輝度分布			
自動マッチング数	1,110	540	1,031
3次元モデルの再 現状況	<p>① 屋根・正面壁のマッチング良好、右側壁は劣る⇒撮 影方向に対する側壁方向の交差角が薄く外壁タイ ルのパターン認識困難</p> <p>② 再現性は比較的良好</p> <p>③ 再現性は比較的良好、側壁は電柱の影響で再現でき ず</p>	<p>マッチング数はケース 1 と同程度</p> <p>① モデルの再現性は高く正面壁の計測精度も高⇒輝度 が強調されていることが有利</p> <p>② 再現性は劣る</p> <p>③ 再現性は劣る</p>	<p>マッチング数はケース 1 と同程度</p> <p>① 屋根のマッチングが少ない・壁面のマッチングは良好だ が、エラー点の点在が目立つ⇒ノイズの影響</p> <p>② 再現性は劣る</p> <p>③ ノイズを含む画像であるが比較的再現性は良好⇒照明に より特徴点を多く抽出</p>
全体考察	<p>曇天時で比較的良好的な解析結果となる。マッチング率に輝度分布幅が狭い方が有利。⇒輝度編集後の画像解析で精度向上の可能性あり。</p> <p>晴天時のマッチング率は低いですが、エッジの認識などでは有利。</p> <p>夕暮時の撮影ではノイズの影響は否めない。⇒夜間撮影の検討要。</p>		

(4) 解析結果

各ケースの解析結果、および精度の比較検証結果を表 3.38 に示す。

簡易的な撮影実験から、輝度の違いが解析精度に影響を及ぼすことが確認できたが、現地検証等もなく、解析精度を詳細に把握するには至っていない。今後は、地すべり現場における悪条件下撮影実験と併せて、解析に利用する画像の前処理（輝度調整、RGB 各要素の特徴検討）対応による、解析精度を向上させる方法の検討も必要と考える（写真 3.21）。

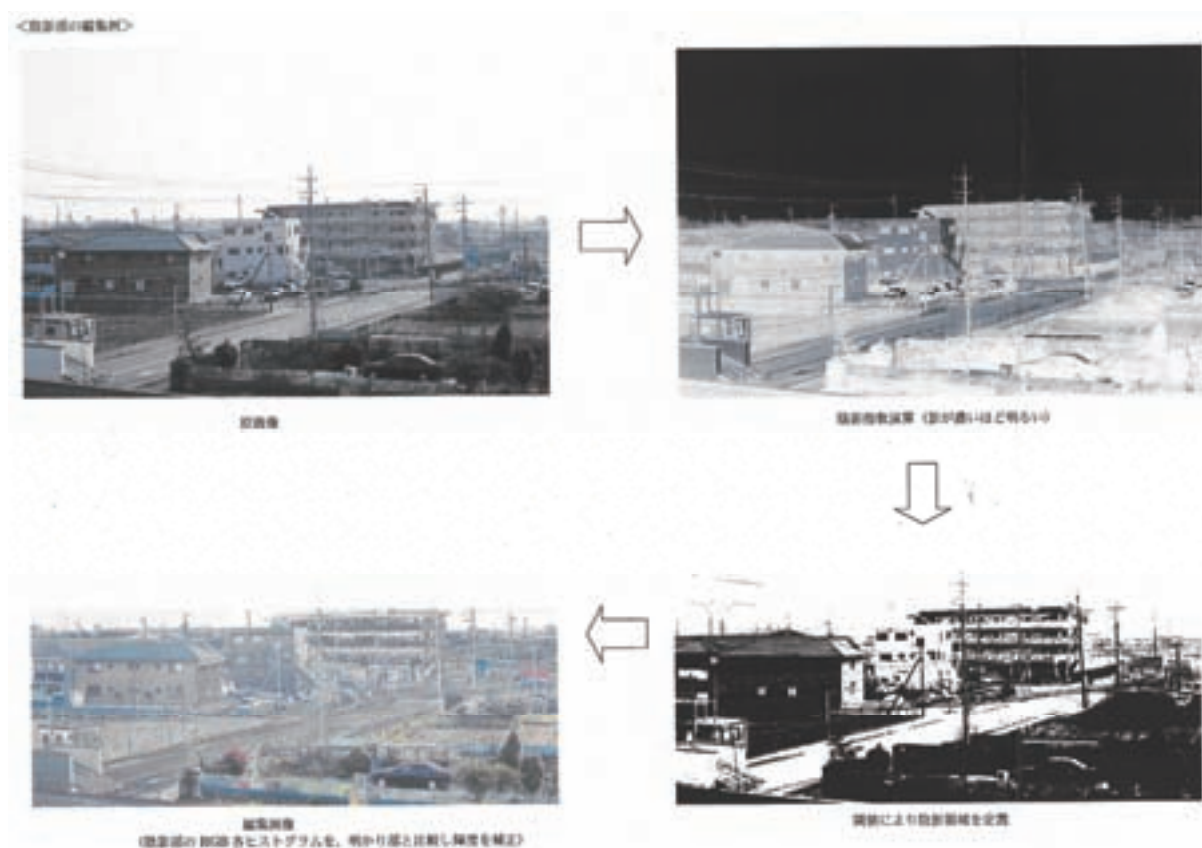


写真 3.21 陰影部補正事例

3.3 マッチング率の検証

3次元地形モデルを効率的に作成するには、ステレオ画像を用いた自動マッチング処理の比率を向上させる必要がある。ここでは、実際に斜面の撮影を行い Kuraves の自動マッチング機能により地形モデルを作成し、現場で測量した結果と比較を行うことでマッチング率の検証を行った。

3.3.1 実験概要

本実験は、岩盤が露頭する自然斜面（図 3.70、写真 3.22）にて、平成 20 年 6 月 3 日（午後、曇り）に実施した。実験は、地すべり地にも見られる岩盤や土、砂、植生（樹木・草）を含む箇所を撮影を行い、図 3.71 に示す作業手順に従って行った。なお、解析精度への影響が大きい収斂角を変えたケースで実験を行った。

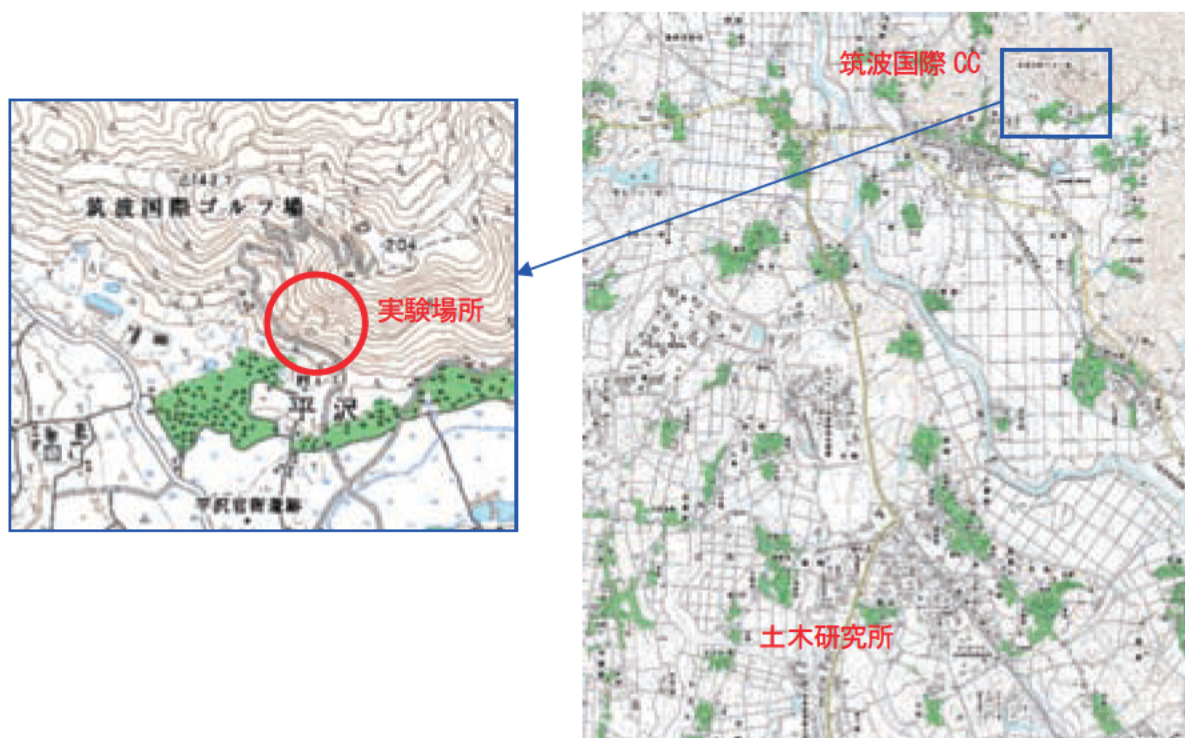


図 3.70 位置図



写真 3.22 撮影対象斜面（左：露岩部； 右：碎石部）

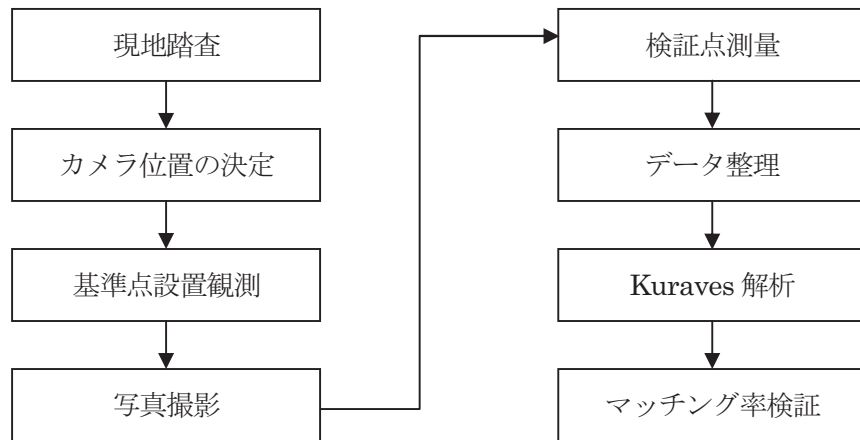


図 3.71 作業フロー

3.3.2 写真撮影

現地の自然斜面のうち、2カ所を撮影対象とした。選定理由として、①岩盤斜面には植生や凹凸による陰影部が含まれ変化に富んでいるのに対し、②碎石は色目も単調で変化に乏しいことから、対照的な2ケースを比較することで、マッチング率に与える影響を明確にすることとした。

撮影は、高い解析精度が期待される収斂角の範囲内で、10° と 30° の2ケースとした(表 3.39)。また、画像解析により求めた検証点の3次元座標の精度を検討するため、本実験では、トータルステーションや地上式レーザー計測器等を用いた計測を行った(表 3.40)。

表 3.39 撮影ケース一覧

	収斂角		備 考
	10°	30°	
①岩盤露頭+植生 (遠景)	○	○	
②碎石 (近景)	○	○	

表 3.40 使用機材一覧

種 別	機器名	台数	備考
デジタルカメラ	Canon Eos 5D	2台	50mm
トータルステーション	LeicaTPRC1201	1台	撮影位置決定、座標測定、検証測量
	SokiasET3	1台	
地上式レーザー計測	リーグル社 LMS Z210	1台	検証測量
雑具	脚立、測量鋏、標識、ハンマー、木杭、セーフティコーン、リフレクタ等		

Kuraves 解析で使用する初期対応点を、解析対象の岩盤 6箇所(図 3.72)に設置し、ノンプリズム型トータルステーション測量(以下、「TS 測量」と略す)により座標付けを行った。



図 3.72 岩盤部

表 3.41 座標リスト

ID	名称	X 座標	Y 座標	H 座標
1	H1	2065.6829m	2009.9411m	120.644m
2	H2	2068.3943m	2010.3497m	121.448m
3	H3	2065.4248m	2014.6132m	116.078m
4	H4	2065.6457m	2005.4425m	116.455m
5	H5	2063.9079m	2000.3578m	116.903m
6	H6	2065.0056m	2002.6835m	123.112m

碎石部については、標定点測量を実施したが、撮影時の露出オーバーにより標定点の判読ができなかったため、標定図は作成していない。

岩盤斜面と碎石部の撮影画像を写真 3.23 と写真 3.24 に示す。なお、碎石部の画像は露出補正を適切に設定せず撮影したため、解析には画像補正したものを使用した。

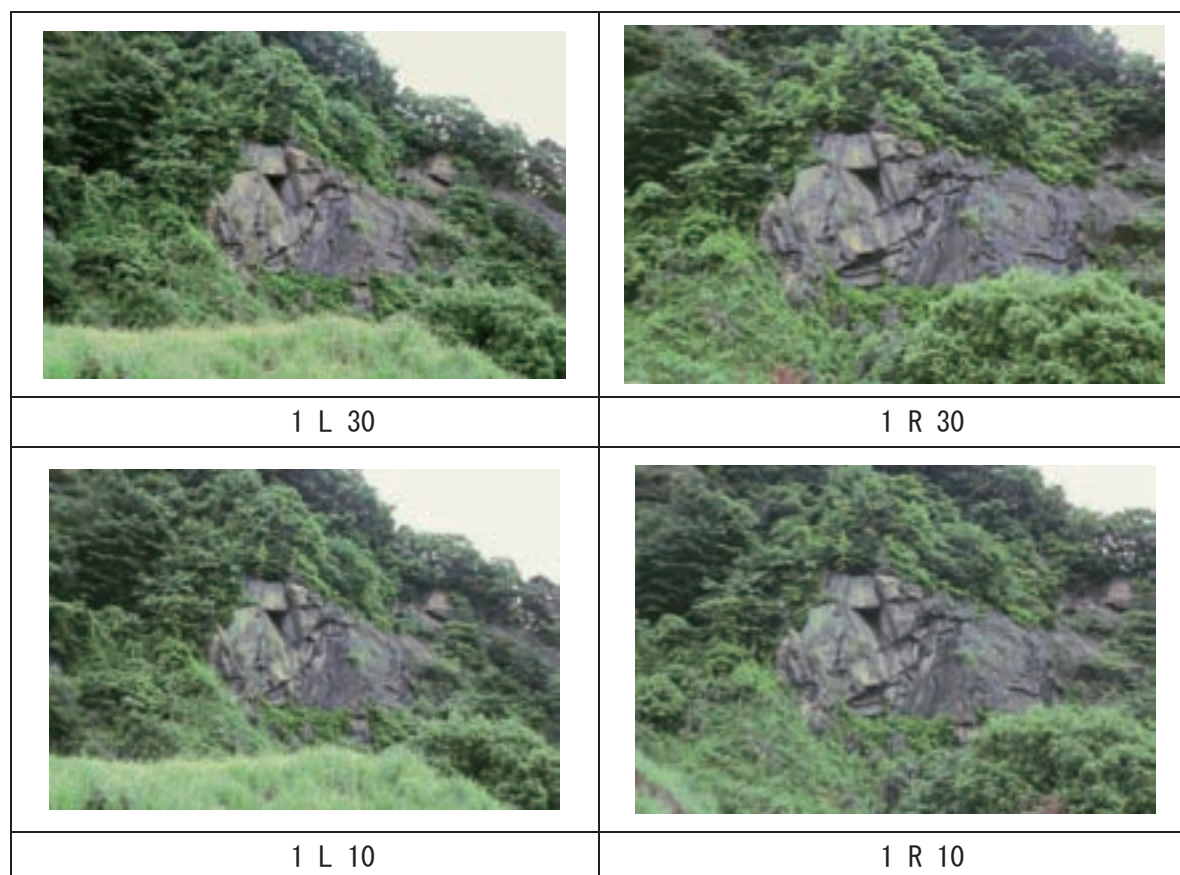


写真 3.23 露岩部



写真 3.24 碎石部

3.3.3 検証測量

マッチング状況を面的に評価するため、地上レーザ測量により、斜面の高密度計測を実施した。図 3.73、図 3.74 に、地上レーザ測量データによる三次元地形モデルを示す。

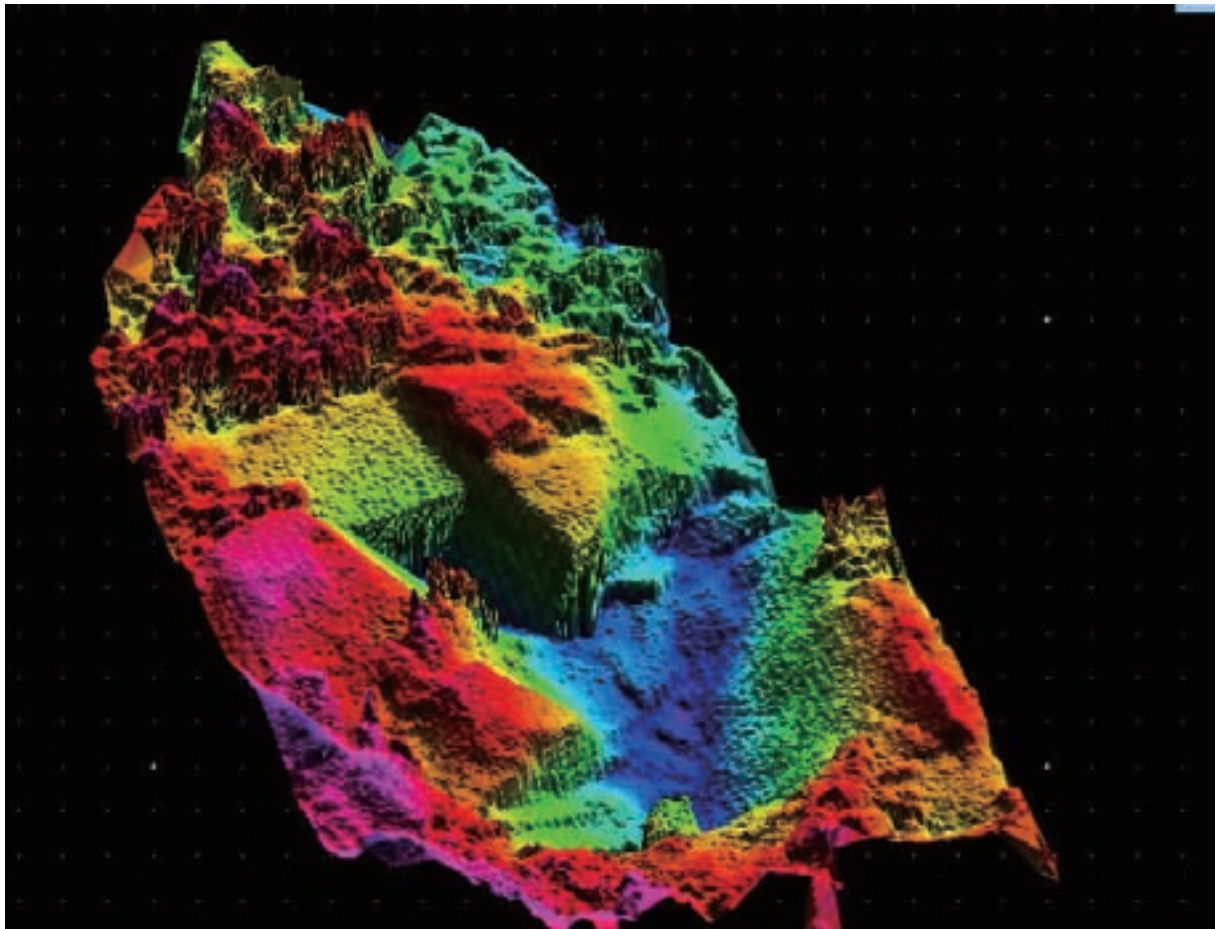


図 3.73 露岩部

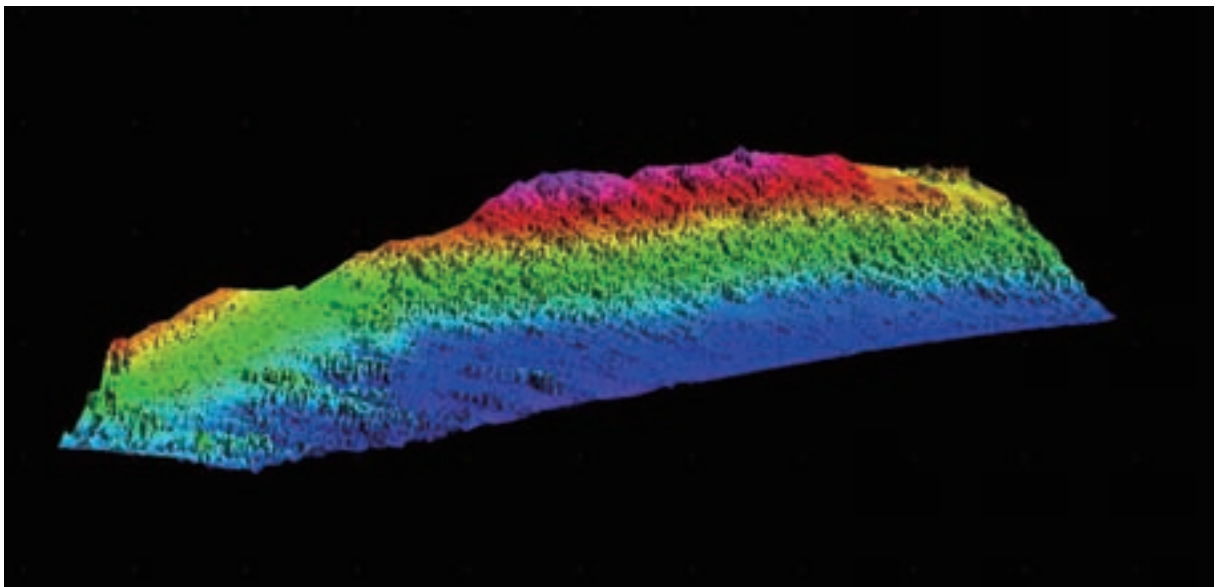


図 3.74 採石部

3.3.4 筑波CC露岩部でのKuraves解析精度の検証

(1) 解析方針

解析精度の検証は、以下の2つの方法により行った。

- ・ 点の検証：標定点の座標について、測量値とKuravesの画像解析結果との比較
- ・ 面の検証：地上レーザ測量の結果とKuravesの三次元化解析結果との比較

点の検証では、表 3.42 のように測量により座標が求められている5つの標定点を用いて検証を行った。具体的には、Kuravesにおいて本標定点を初期対応点の一部として設定し、そのうち3点については基準座标点として測量座標値をKuravesに読み込んだ。その上で、残りの3点の測量座標とKuravesでの解析座標値を比較し精度の検証を行った。

面の検証では、地上レーザ測量の結果とKuravesの三次元化解析結果との比較をおこなって、解析誤差にどのような傾向があるのかについての検証を行った。

表 3.42 Kuraves解析の種類

解析種類名	撮影条件	初期対応点	基座標入力点数 (点番)	検 討 内 容
露岩部30 01	収斂角30°	6点+14点	3点 (H3,H5,H6)	H1,H2,H4番の座標算出
露岩部30 02		6点+14点	5点 (H2,H3,H4,H5,H6)	検証測量との比較
露岩部10 01	収斂角10°	6点+14点	3点 (H3,H5,H6)	H1,H2,H4番の座標算出
露岩部10 02		6点+14点	5点 (H2,H3,H4,H5,H6)	検証測量との比較

初期対応点：TS測量を実施した6点と地形上の特徴から14点を選定

検証測量：地上レーザ測量による座標取得測量のこと

(2) 解析手順

① 写真のゆがみ補正 (図3.75 参照)

検証のために使用した写真のオリジナル版を「3.3.2 写真撮影 (5) 写真撮影写真3.22、写真3.23」に示したが、Kuraves解析にあたっては写真のゆがみ補正を実施する必要がある。

Kuravesの「航空写真ツール」を起動し、補正すべき写真とカメラパラメータをそれぞれ読み込んでゆがみ補正を実施し、SCLファイル (Kuravesファイル) 形式で保存した (写真3.24)。



図 3.75 被補正写真とカメラパラメータの読み込み画面



L_30 (左撮影、収斂角度 : 30°)



R_30 (右撮影、収斂角度 : 30°)



L_10 (左撮影、収斂角度 : 10°)



R_10 (右撮影、収斂角度 : 10°)

写真 3.24 解析に使用した写真画

② 初期対応点の入力

Kuravesを起動して、ゆがみ補正後のSCLファイルを入力した。

カメラ位置算出のために必要となる初期対応点は、現地でTS測量によって座標を取得した点H1～H6と、任意の特徴点を14点選定し、計20点とした。

③ 撮影位置の計算（図3.76 参照）

右側・左側の写真、それぞれに初期対応点を入力した後、撮影位置の計算を実施した。

撮影位置の計算時に出力される対応点誤差は0.02以下とした。

なお、対応点誤差を修正する際には、修正ごとに撮影位置の再計算を実施した。

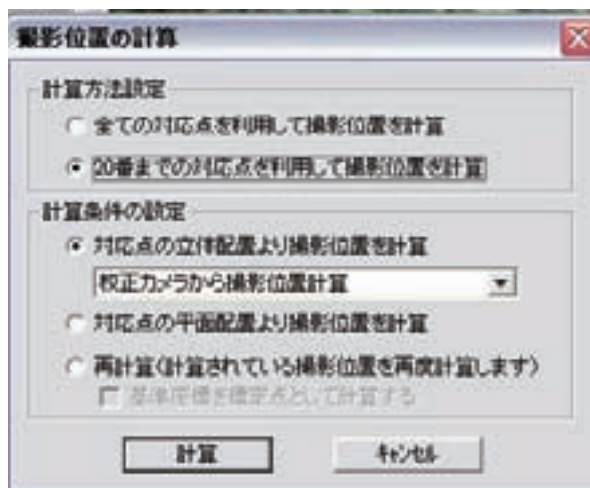


図 3.76 撮影位置計算ダイアログ

④ 任意対応点の設定

ここで設定する任意対応点とは、後述するメッシュ作成により任意対応点を自動対応で取得する際の範囲設定に用いる指標であるが、手動で設定する必要がある。

本検討ではNo.21～No.34の計14点を設定した。

手動で設定した任意対応点を、巻末資料に示した。



図 3.77 初期対応点（赤○）と手動設定の任意対応点（青○）

⑤ 基準座標の設定（図3.78 参照）

2次元の写真座標系から3次元の測量座標系に変換するために、初期対応点の一部に座標値の入力を行う必要がある。



図 3.78 基準座標設定状況（最低3点以上必要）

解析種類の「露岩部30 01」と「露岩部10 01」では、TS測量によって座標値が得られているH3、H5、H6の3点に対して基準座標を入力して、H1、H2、H4の3点の座標値を計算した。

同じく、「露岩部30 02」と「露岩部10 02」では、TS測量によって座標値が得られている5点に対して基準座標を入力して、地上レーザ測量との比較検証を実施した。

⑥ 自動メッシュ作成および対応点との自動対応処理 (図 3.79 参照)

対応点を生成するために、右側で撮影された写真 (R) に対して約25cmのメッシュを作成した。

メッシュは「④ 任意対応点の設定」で設定したNo.21~34の任意点を結ぶように領域を作成した。完全なフィットは不可能なので、写真を拡大してできるだけ正確に手動で設定した。

本検証解析では、メッシュ分割数を75×50と設定した。

なお、領域の境界上に対応点を取ると、対応点が重なって後の処理が困難となるため、境界上に対応点を取らないように留意した。



図 3.79 R写真上に設定したメッシュ (75列×50行、境界上に点を配置しない)

「Kuravesの自動対応機能」を使用して、右側の写真 (R) 上に設定したメッシュを左側の写真 (L) に対応付けた。

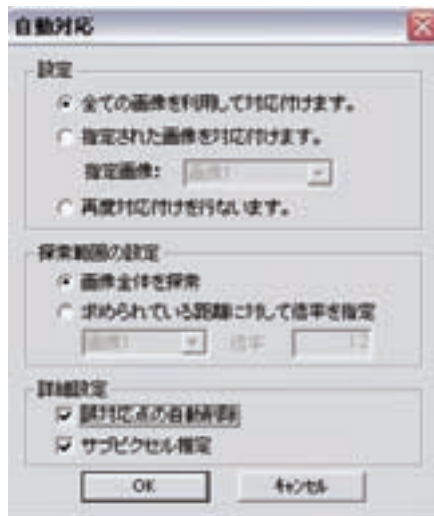


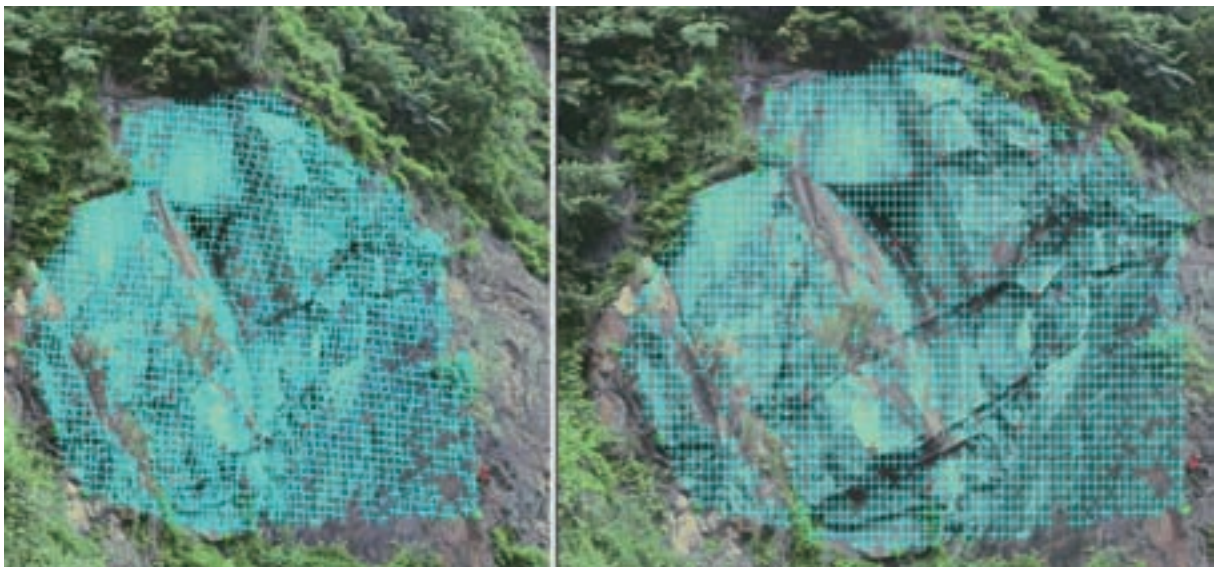
図 3.80 自動対応の設定

⑦ 誤対応点の削除

自動対応により生成した対応点には、誤って対応処理された結果が多く含まれていたため、Kuravesの3D処理機能を利用して誤対応点を削除した。

誤対応点を削除した後の対応点の配置状況を図 3.81 に示した。

今回の検証解析結果では、平坦面での誤対応が多い傾向が見られた。



Kuravesの自動対応機能で生成されたメッシュ (写真L)

当初発生メッシュ (写真R)

図 3.81 誤対応点削除後のメッシュの配置状況

⑧ 面の設定（三角網の作成）（図 3.82 参照）

全ての対応点群を囲む領域を設定して、三角網（TIN）を完成した。

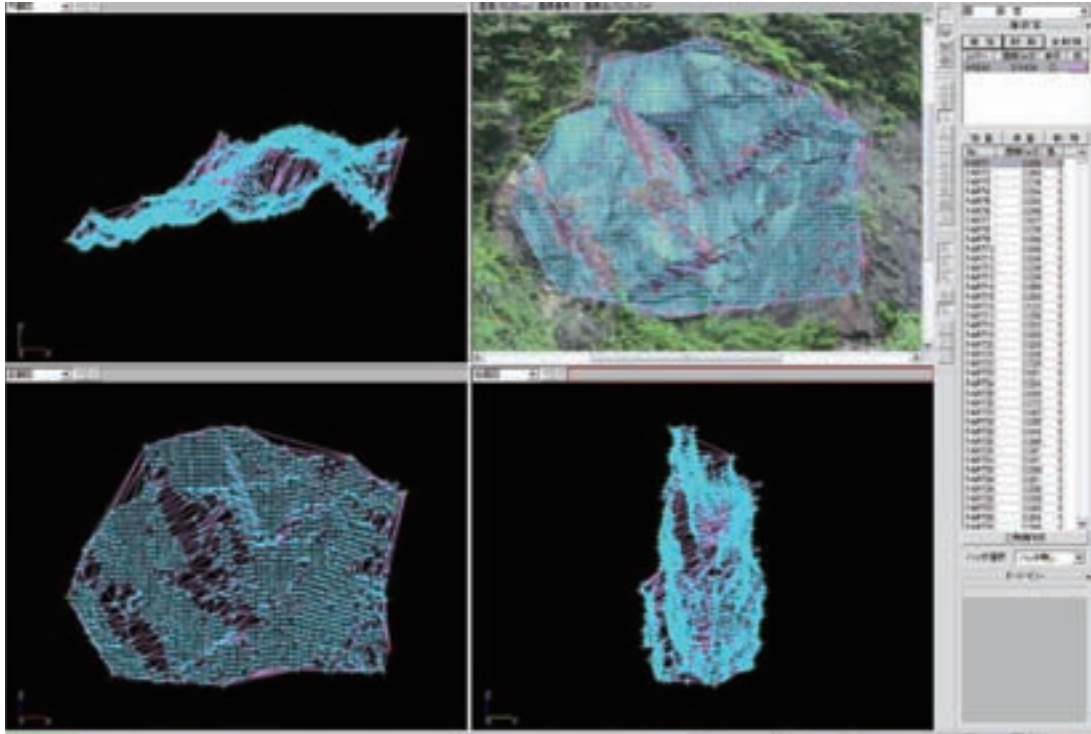


図3.82 三角網作成状況（誤対応点削除後）

この段階でも、Kuravesの3D処理機能を用いた誤対応点の削除が可能であるが、誤対応点を削除するごとに面（三角網）の削除と再設定が必要となるため、処理上現実的ではない。

⑨ データ出力

マッチング率の検証等を実施するために、各対応点の座標データをKuravesのエクスポート機能を用いてCSV出力した。

(3) 点の検証結果（評定点の座標）

① TS測量結果と写真測量結果の対比

それぞれの測量から、評定点H2とH4の座表を求めた結果を表 3.43及び表 3.44に示す。

表 3.43 点の検証結果（解析種類：露岩部10 01、収斂角：10°）

計測点	測量成果			写真解析結果			誤差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	$ \delta X $	$ \delta Y $	$ \delta Z $
H1	2065.683	2009.941	120.644	2065.351	2007.422	124.380	0.332	2.519	3.736
H2	2068.394	2010.350	121.448	2068.486	2010.510	121.652	0.092	0.159	0.204
H3	2065.425	2014.613	116.078	2065.425	2014.613	116.078	-	-	-
H4	2065.646	2005.443	116.455	2065.635	2005.403	116.466	0.011	0.040	0.011
H5	2063.908	2000.358	116.903	2063.908	2000.358	116.903	-	-	-
H6	2065.006	2002.684	123.112	2065.006	2002.684	123.112	-	-	-

$|\delta Y|$ ：左右方向、 $|\delta X|$ ：奥行方向、 $|\delta Z|$ ：上下方向

収斂角10°（露岩部10 01）においては、計測点H1の誤差が、

$|\delta Y|$ （左右方向）で約2.5m

$|\delta X|$ （奥行方向）で約0.3m

$|\delta Z|$ （上下方向）では約3.7m

と際だって大きい結果が得られた。

一方、計測点H2では最大でも0.2mであり、計測点H4では、概ね0.04m以下と最も誤差が少ない結果が得られた。

表 3.44 点の検証結果（解析種類：露岩部30 01、収斂角：30°）

計測点	測量成果			写真解析結果			誤差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	δX	δY	δZ
H1	2065.683	2009.941	120.64	2065.397	2007.33	124.239	0.286	2.606	3.595
H2	2068.394	2010.350	121.44	2068.057	2010.23	121.248	0.337	0.112	0.200
H3	2065.425	2014.613	116.07	2065.425	2014.61	116.078	-	-	-
H4	2065.646	2005.443	116.45	2065.601	2005.45	116.442	0.045	0.007	0.013
H5	2063.908	2000.358	116.90	2063.908	2000.35	116.903	-	-	-
H6	2065.006	2002.684	123.11	2065.006	2002.68	123.112	-	-	-

| δY |：左右方向、| δX |：奥行方向、| δZ |：上下方向

収斂角30°（露岩部30 01）においては、計測点H1の誤差が、

| δY |（左右方向）で約2.6m

| δX |（奥行方向）で約0.3m

| δZ |（上下方向）では約3.6m

と際だって大きい結果が得られた。

一方、計測点H2では最大でも0.32mであり、計測点H4では、概ね0.05m以下と最も誤差が少ない結果が得られた。

② 考察

収斂角10°と収斂角30°を比較すると、前者の方が概ね誤差と誤対応が少ない傾向が認められた。

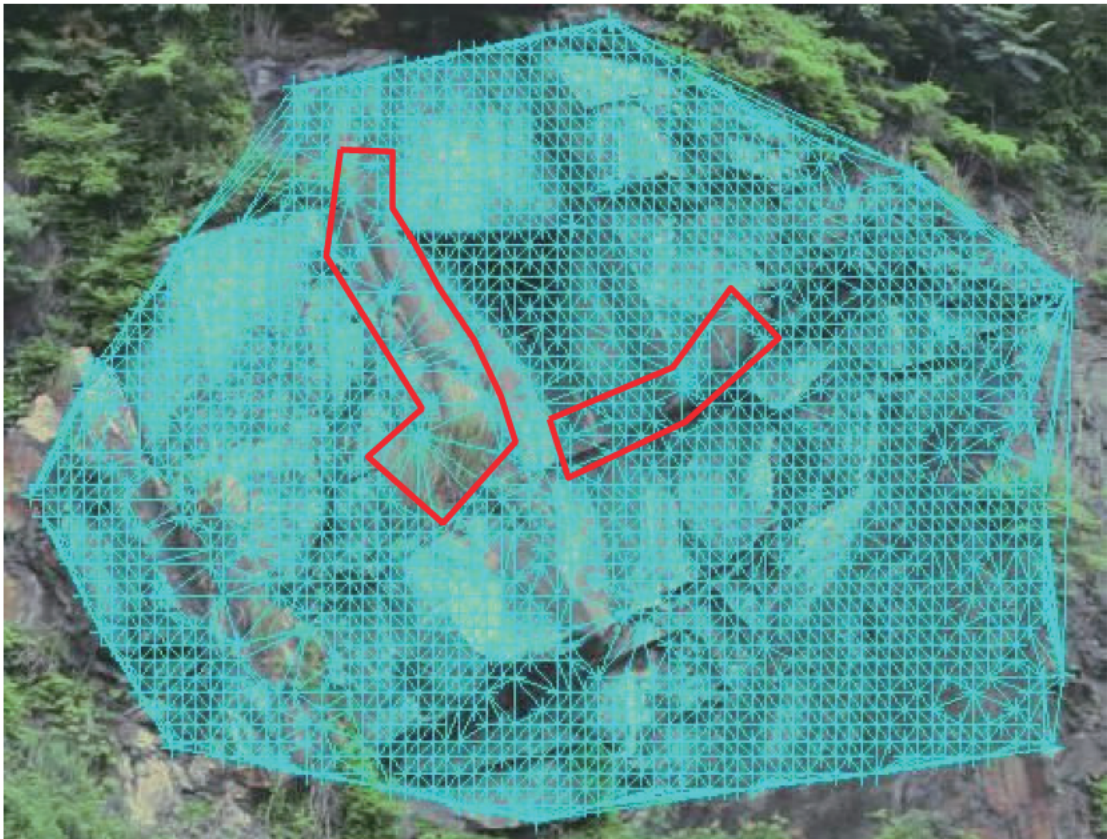
図 3.83 は、誤対応が多かった場所であって、その特徴を以下にまとめた。

- ・三角網を作成した際に、滑らかなそうに見えた面でも「細かな凹凸を持つような形状」で表現される部分があるため、表面の色調などが微妙に変化したことによる誤対応などが発生した。
- ・正面に向かって開いているV字状の谷地形のため、光が届かない陰となっているため、地形上の特徴点や色調などの判別が困難になり、結果的に誤差や誤対応点が発生した。

3.2.2項の実験結果(表 3.36)では、「収斂角が30°～70°で最も誤差が小さい」評価されて

おり、今回の実験結果と明らかに矛盾している。3.2.2項の実験では、全ての対象斜面（走行車路）がステレオ写真として良好に撮影されているのに対し、今回の実験の対象となった露岩は凹凸が激しいため、大きな収斂角では左右の写真の明るさの差やコントラストの差などが大きくなり、結果的にKuraves解析が困難となったことによるものと考えられる。

また、凹部の底の部分などでは凸部の陰となって片方の写真にしか撮影されない、というケースも想定され、この場合ではステレオ写真解析すなわちKuraves解析そのものが成立しない。



(□は誤対応点が多く除去後に網が粗となった箇所)

図 3.83 誤対応点削除後の三角網

(4) 面の検証結果（地上レーザ測量との対比）

① 地上レーザ測量および写真測量の結果

地上レーザ測量によって得られた結果を図 3.84 に示す。

写真解析により作成したモデル鳥瞰図を図 3.85 および図 3.86 に示す。

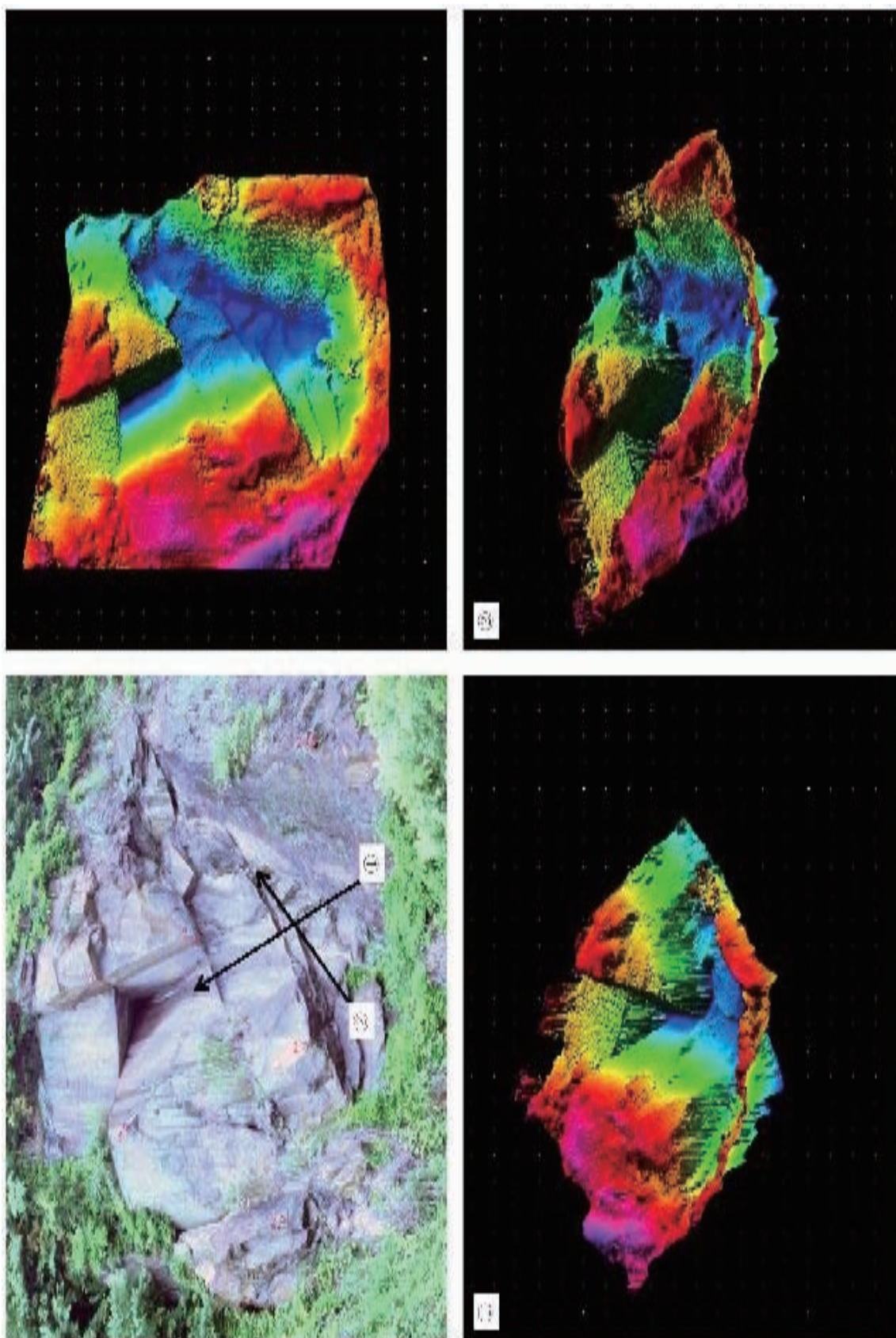


図 3.84 地上レーザー測量による計測結果

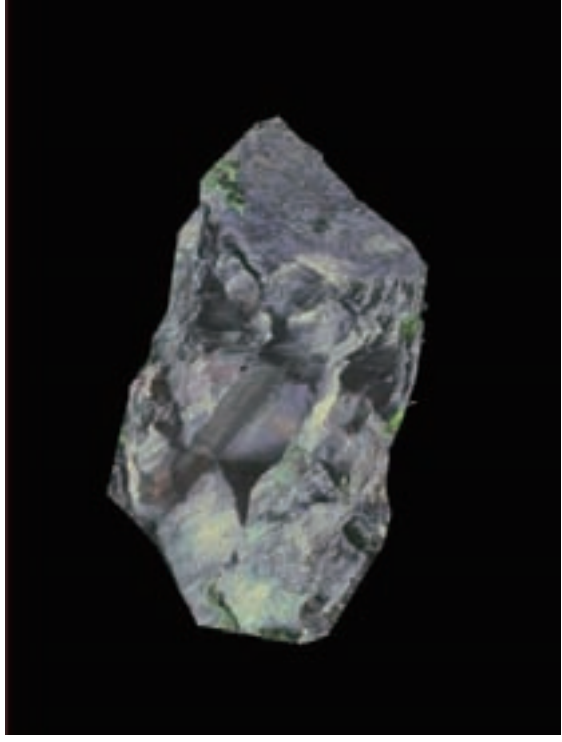
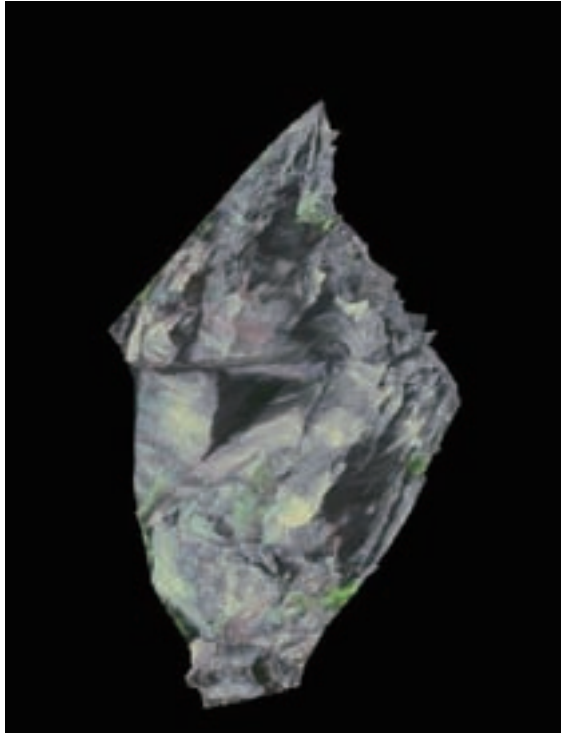
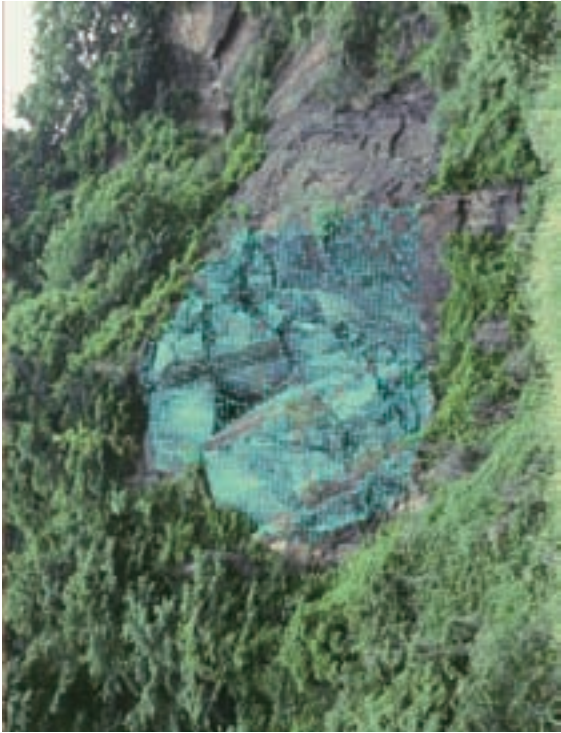


図 3.85 Kuravesiによる写真計測結果（露岩部、収斂角：10°）

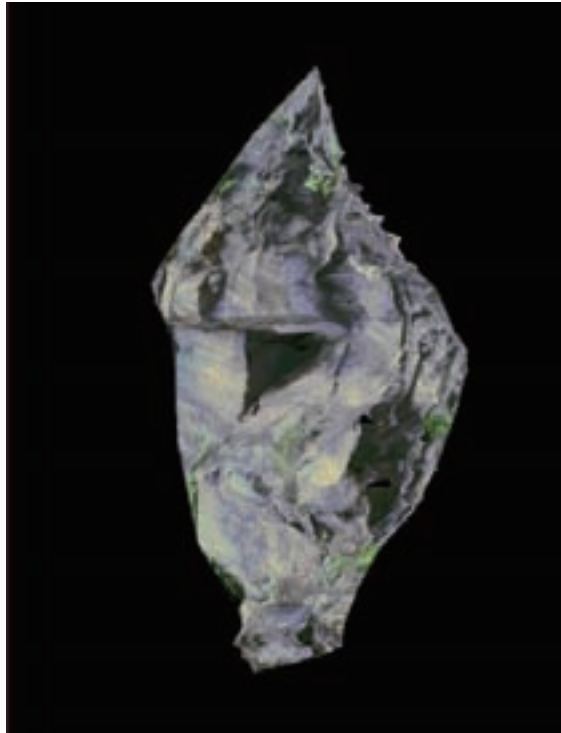
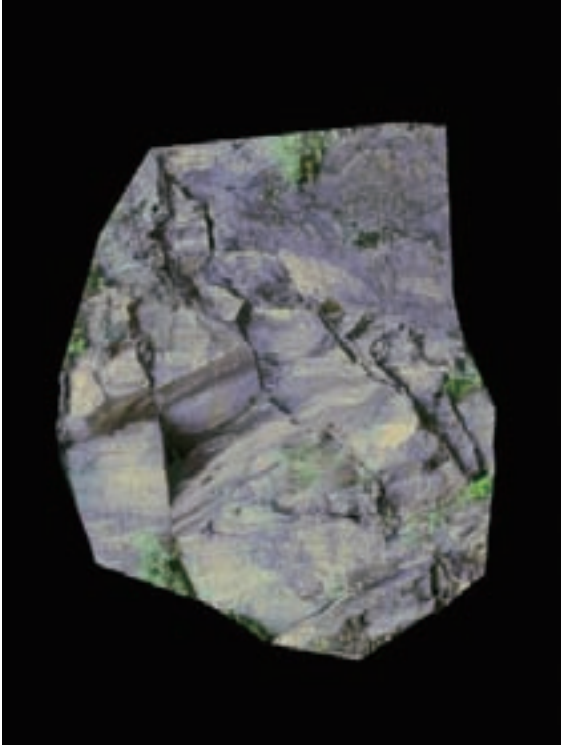
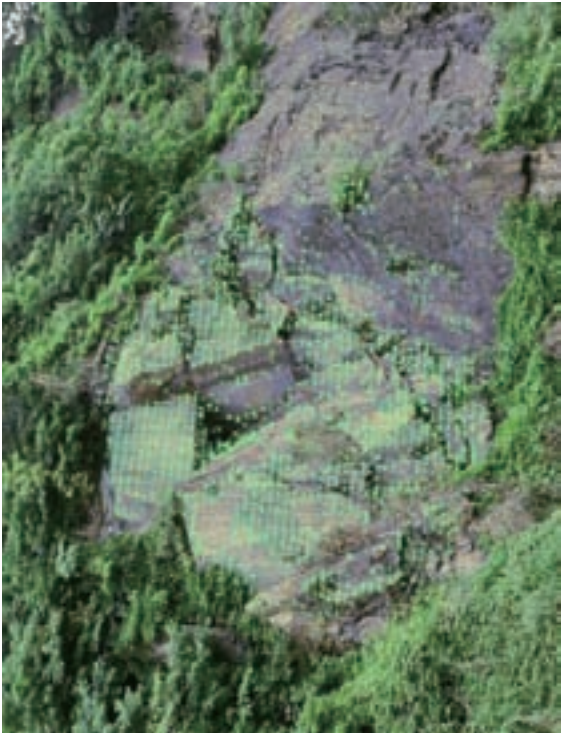


図 3.86 Kuravesによる写真計測結果（露岩部、収斂角：30°）

② 座標系の置換え

今回実施した計測対象物は、垂直に切り立った露岩部であることから、解析精度の評価は、撮影位置からの「奥行き方向による差分解析」とした。

定量的な評価をするため、標高値と奥行き座標（X座標）を作為的に入れ替えた（図3.87参照）。

座標系の関係	
測量座標系	写真座標系
X (水平)	h (奥行)
Y (水平)	y (水平)
H (高さ)	x (水平)

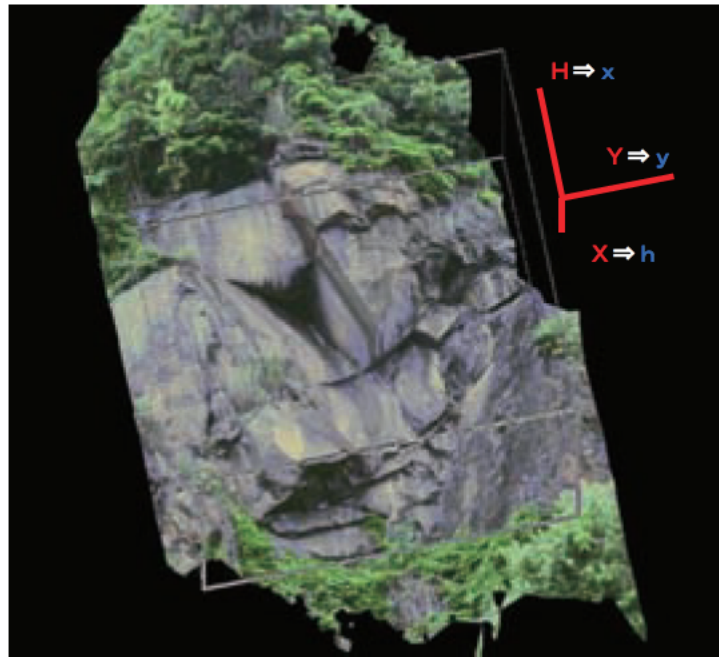


図 3.87 座標系の置き換え（イメージ）

② 差分解析

今回実施した実験では、地上レーザ計測を同時に実施した。差分解析には、地上レーザ測量による三次元モデル（TIN）と写真解析により取得した3次元データにより解析を行った（図3.88および図3.89参照）。

地上レーザ計測による取得密度は、10cm×10cm／1点程度であった。

一方、写真解析による取得密度は、場所によって粗密が生じているが、概ね30cm×30cm/1点程度であった。

両方の手法によって取得した3次元データは、全く同一の水平位置ではないため、地上レーザ測量データから三次元モデル（TIN）を生成して差分解析を行った。

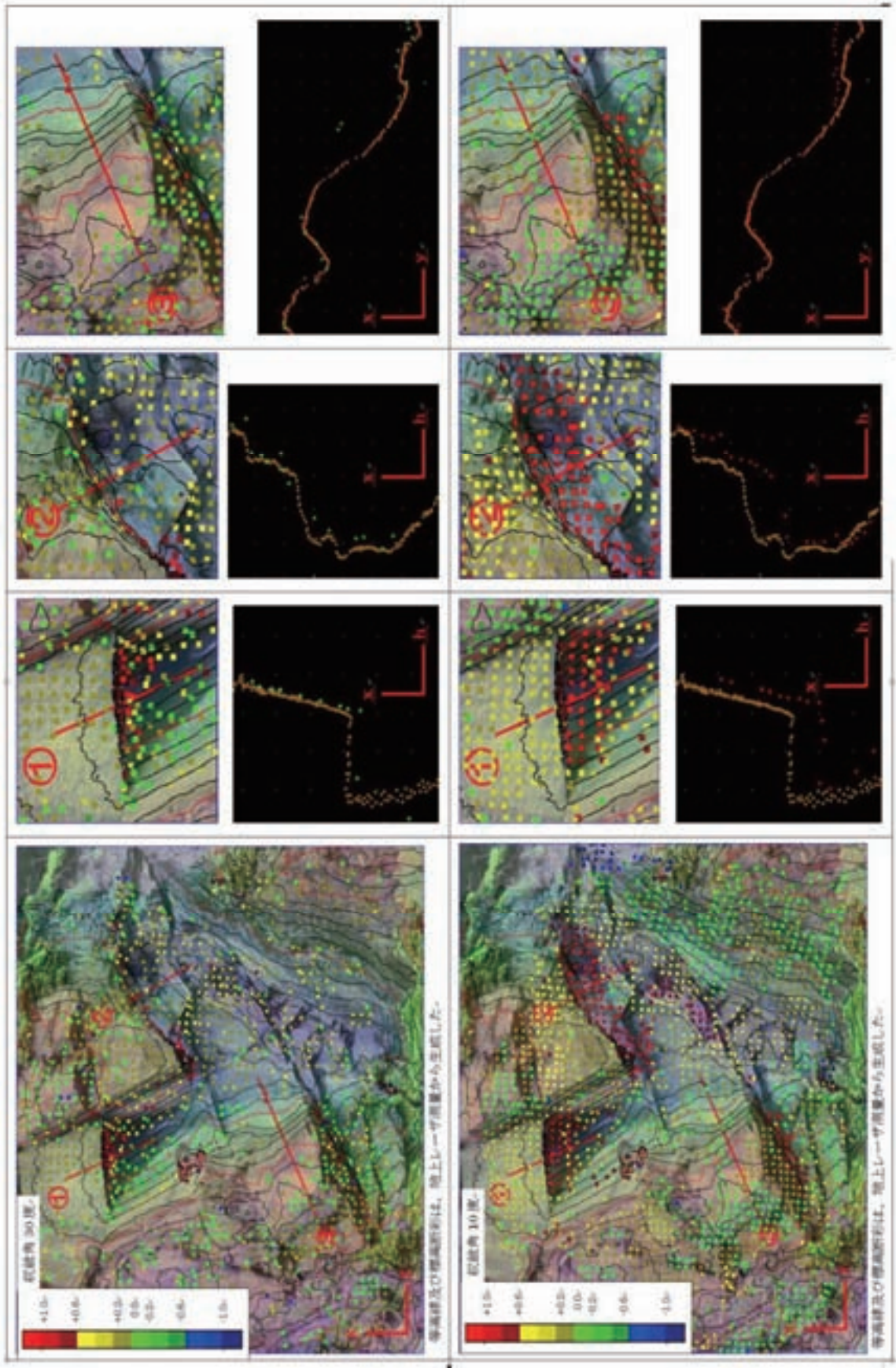
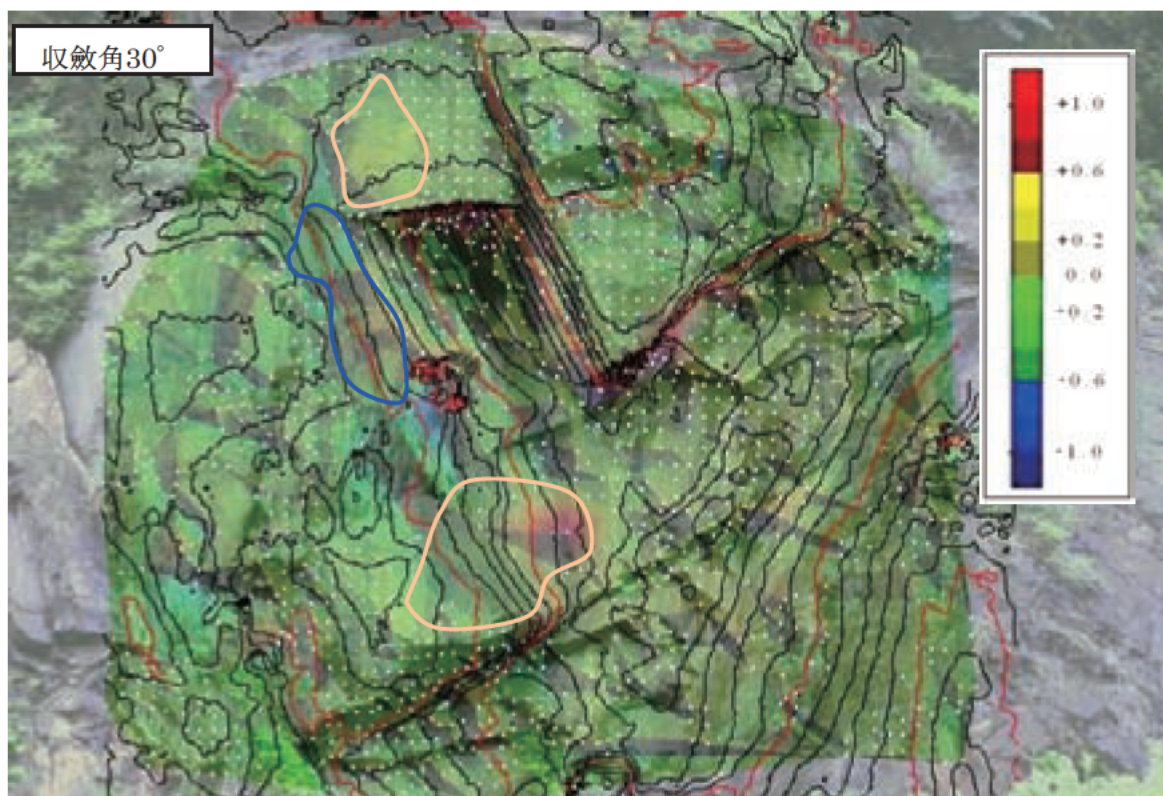
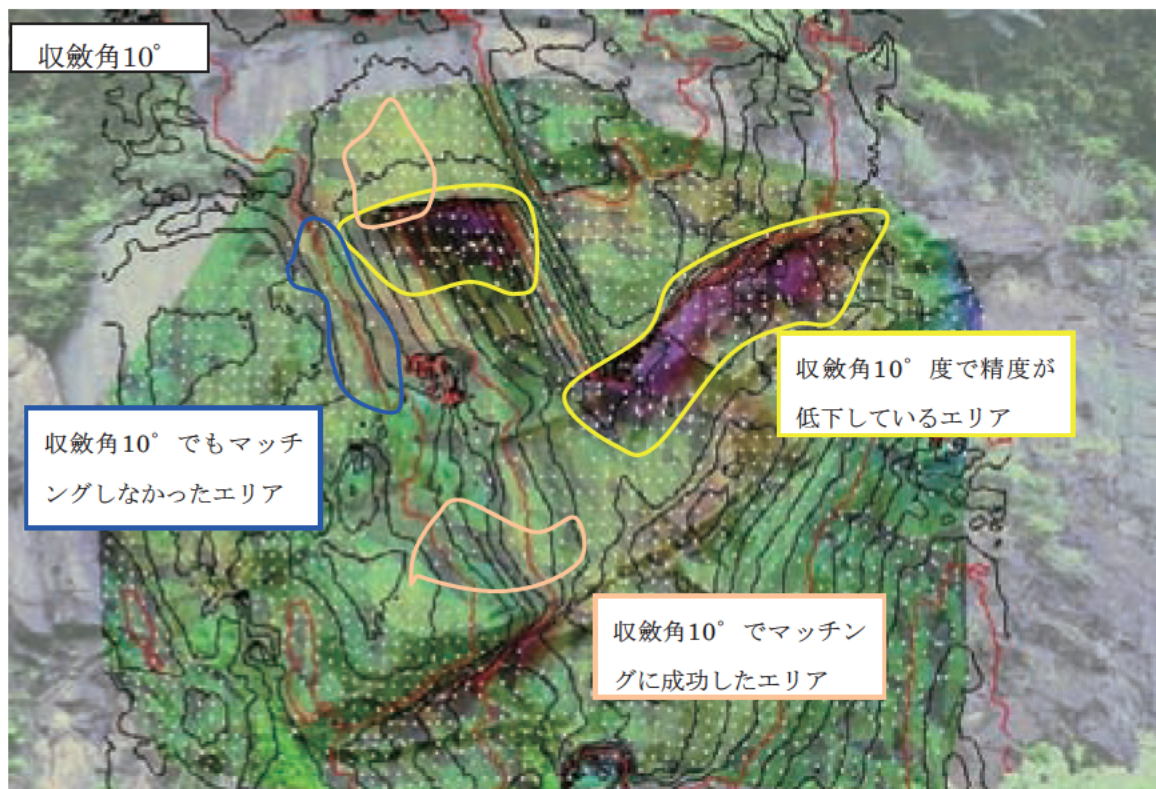


図 3.88 地上レーザー測量結果とKuraves解析結果の対比（その1）



等高線は、地上レーザ測量結果から生成。段彩は、較差を面的に表現した

図 3.89 地上レーザ測量結果とKuraves解析結果の対比 (その2)

③ 解析結果

差分結果のまとめを表3.45に、統計量を図3.90及び図3.91に示す。

A：取得密度

- ・地上レーザ計測：10cm×10cm/1点程度
- ・写真解析：30cm×30cm/1点程度

B：差分計算

差分 地上レーザ結果 写真解析結果

表 3.45 差分解析結果

	収斂角10度	収斂角30度	備考
マッチング成功数	2,219点	1,386点	()内は誤抽出点と 思われる較差1m以 上の点を除いた結 果
平均較差	0.12m (0.08m)	0.15m (0.11m)	
標準偏差	0.45m (0.30m)	0.41m (0.26m)	
最小値	1.84m	2.37m	
最大値	2.50m	2.78m	

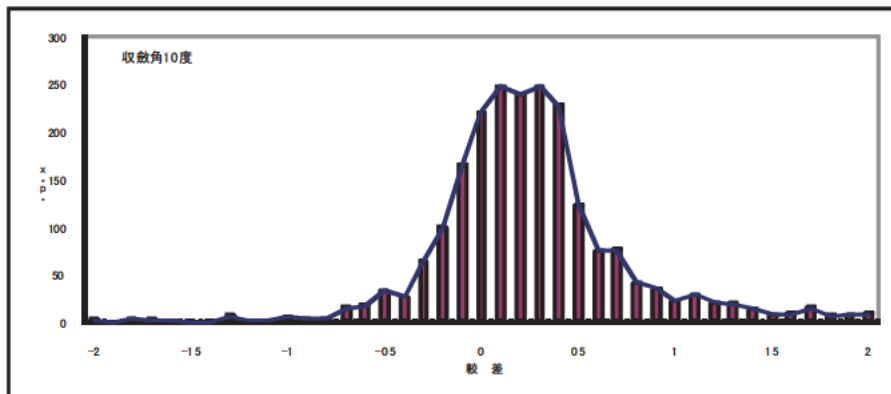


図 3.90 収斂角10°における較差分布

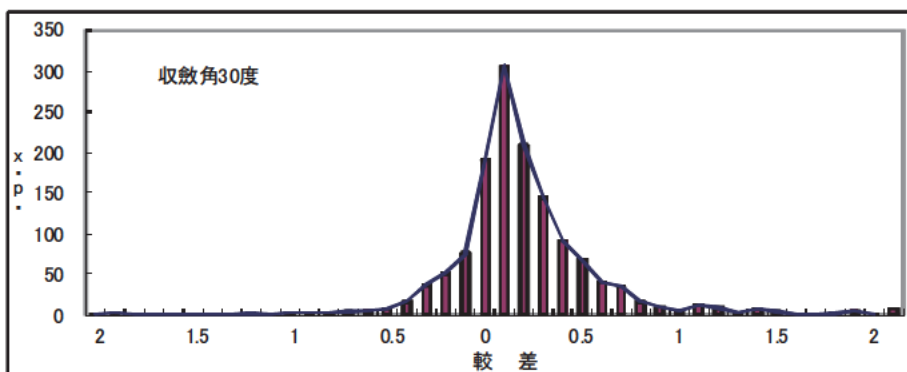


図 3.91 収斂角30°における較差分布

(7) マッチング成功率の評価

マッチング成功率とマッチング正解率の定義を以下に示す。

- ・マッチング成功率：Kuraves解析で、当初設定したメッシュ数に対する「自動対応点が成立したメッシュ数」の百分比
- ・マッチング正解率：同じく、当初設定したメッシュ数に対する「地上レーザ測量との較差計算結果で標準偏差内に収まる数」の百分比

本実験で得られたマッチング成功率とマッチング正解率を表 3.46 に示す。

表 3.46 マッチング成功率とマッチング正解率

	母数	マッチング成功率	標準偏差	マッチング正解率
収斂角10度	3,750点	2,219点/59%	12cm±45cm	1,645点/43%
収斂角30度	3,750点	1,386点/36%	15cm±41cm	1,145点/30%

当初設定したメッシュ数：縦50×横75 3,750点

表 3.46 によると、左右2枚のステレオ画像の撮影間隔が狭い（収斂角10度）ほど、マッチング成功率とマッチング正解率のいずれもが大きくなることが判明した。

これは、凹凸の激しい対象物を大きな収斂角で撮影すると、2枚の写真に共通して撮影される場所が少なくなり、結果的に解析が不可能となるためである。

(8) 今後の課題と対策方法

① 誤差・誤対応点による課題と対策方法

課題：露岩表面の凹凸などにより、表面の色調などが微妙に変化している場所や、陰によって特徴点や色調の判別が困難になっている場所では誤差や誤対応が多く発生した。

誤差を小さくする対策：ノンプリズム型TS測量によって基準点を設ける際には、レーザ光の拡散を考慮して、できるだけ凹凸の少ない箇所の特徴点を抽出すること。また、基準点はできるだけ多く、かつ全体に配置すること。

誤対応点を少なくする対策：対応点を作成する際には、自動対応機能のみで作成しないこと。特に、「(3) 点の検証結果（評定点の座標）、(2) 考察」に示したような誤対応点の多くなる場所では、色調の変化が明瞭な特徴点を手動で選択し対応点を設定すること。

凹凸の激しい地形を対象とする場合では、大きな収斂角を採用すると左右の写真にアンバランス（明るさやコントラストなど）が発生してマッチング成功率が悪化するため、可能な限り収斂角を狭くするとよい。ただし、凹凸の少ない斜面では、収斂角30°～70°で最も誤差が少ない、という実験結果が得られており、対象斜面の凹凸の状況を確認して、最も適切な収斂角を採用する必要がある。

② 自動化に向けての課題

今回の解析では、できるだけ現地の状況に近い形となるまで、誤対応点の除去を実施したが、以下のような課題点が明らかになった。

課題： 本実験の対象である露岩部のように凹凸の激しい箇所では、凹部に多くの誤対応点が存在するため、距離や範囲などの「単純な数値」によって、誤対応点を自動的に削除することは不可能であった。

対策： 移動体を補足する目的で、同期撮影した写真を使用して自動的に解析・処理するためには、誤対応点を適切に除去する手法や、カメラ位置や照明などを適切に設定することによって、2枚のステレオ写真の何れもが凹部の内部を明るくかつハイコントラストに撮影できるような方法を確立する必要がある。

3.3.5 筑波 CC 採石部における Kuraves 解析精度の検証

(1) 解析方針

解析精度の検証は、以下の2つの方法により行った。

- ・点の検証：標定点の座標について、測量値と Kuraves の画像解析結果との比較
- ・面の検証：地上レーザ測量の結果と Kuraves の三次元化解析結果との比較

点の検証では、図 3.92 のように測量により座標が求められている5つの標定点を用いて検証を行った。具体的には、Kuraves において本標定点を初期対応点の一部として設定し、そのうち3点については基準座標点として測量座標値を Kuraves に読み込んだ。その上で、残りの2点の測量座標と Kuraves での解析座標値を比較し精度の検証を行った。

面の検証では、地上レーザ測量の結果と Kuraves の三次元化解析結果との比較をおこなって、解析誤差にどのような傾向があるのか、検証を行った。

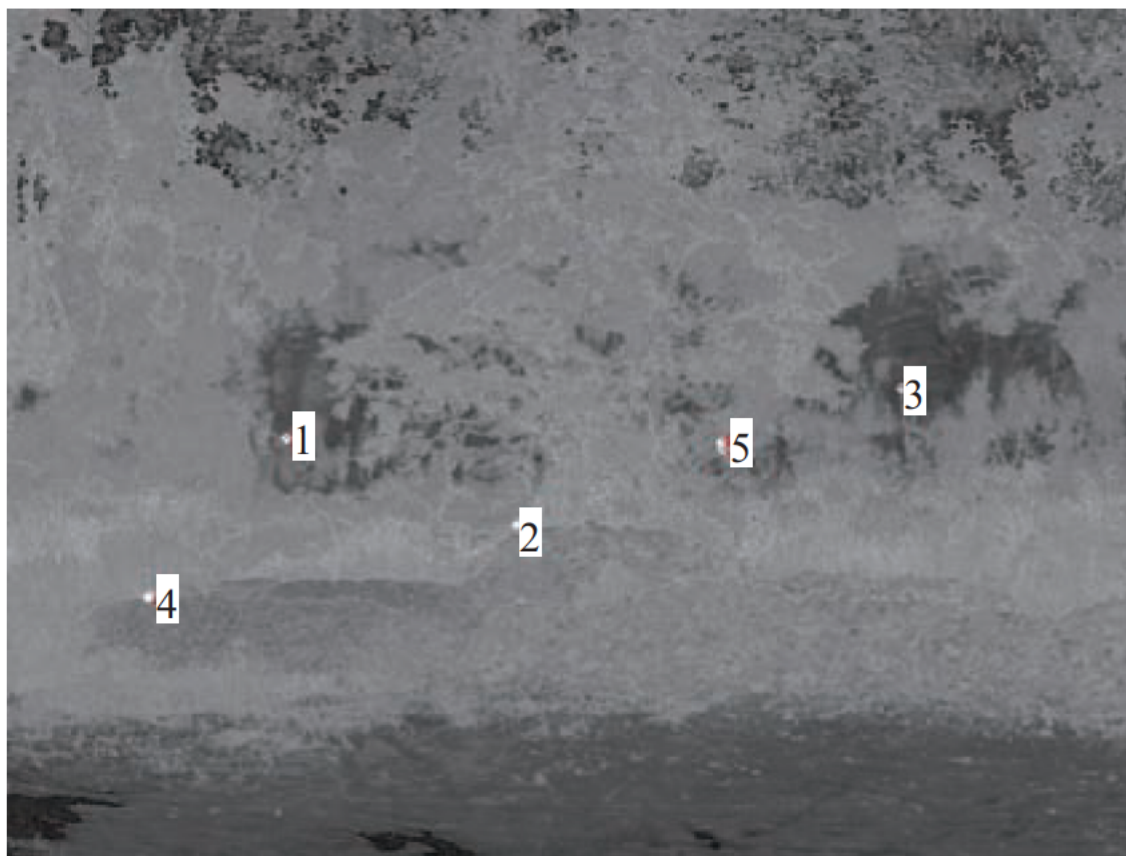


図 3.92 採石部分における標定点の位置

(2) 解析手順

「3.3.4 露岩部分における Kuraves 解析精度の検証」と共通する解析手順については省略した。

① 初期対応点の設定

設定した初期対応点の全体位置を図 3.93 に示し、標定点の測量座標を表 3.47 に示す。



図 3.93 初期対応点の配置図（上；L，下；R）

表 3.47 測量座標値

点番	X	Y	Z
1	1990.164	1929.680	111.210
2	1997.255	1939.275	109.246
3	2004.731	1927.908	112.900
4	1994.457	1945.752	108.338
5	2000.367	1928.227	111.413

② 基準座標の設定

指定した初期対応点に TS 測量で求めた座標値を読み込んだ。

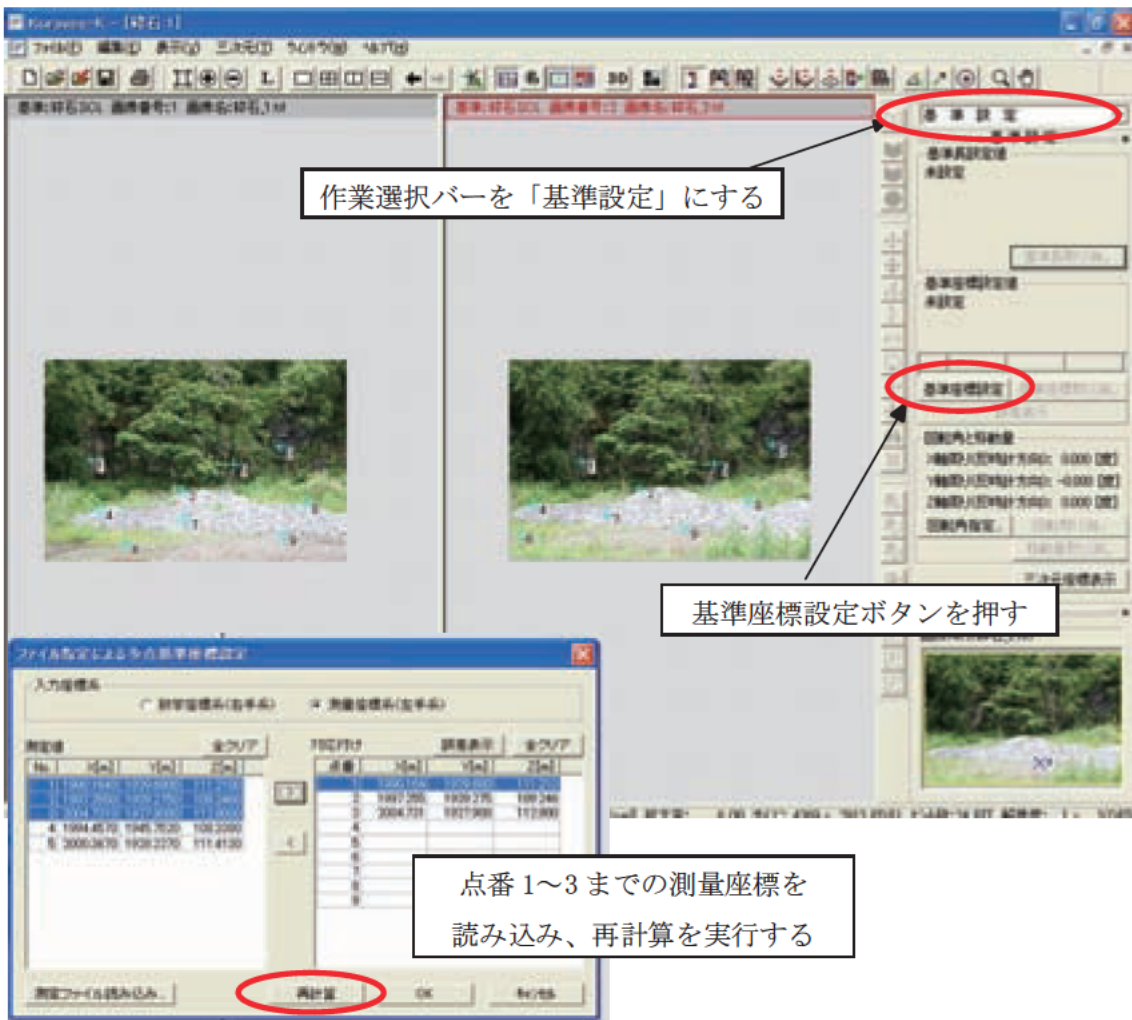


図 3.94 基準座標の設定画面

③ 自動メッシュ作成および対応点との自動対応処理

全ての碎石が含まれるようにメッシュの領域を設定した。

メッシュの分割数は横 100×縦 20 とした (図 3.95 参照)。

なお、領域の境界上に対応点を取ると事後の処理が困難となるため、通常は対応点は設定しないが、本解析の対象である採石部分は、背後の草地や立ち木との距離が離れていることから、解析は比較的容易と考えて境界上にも対応点を 60pixel 間隔で設定した。

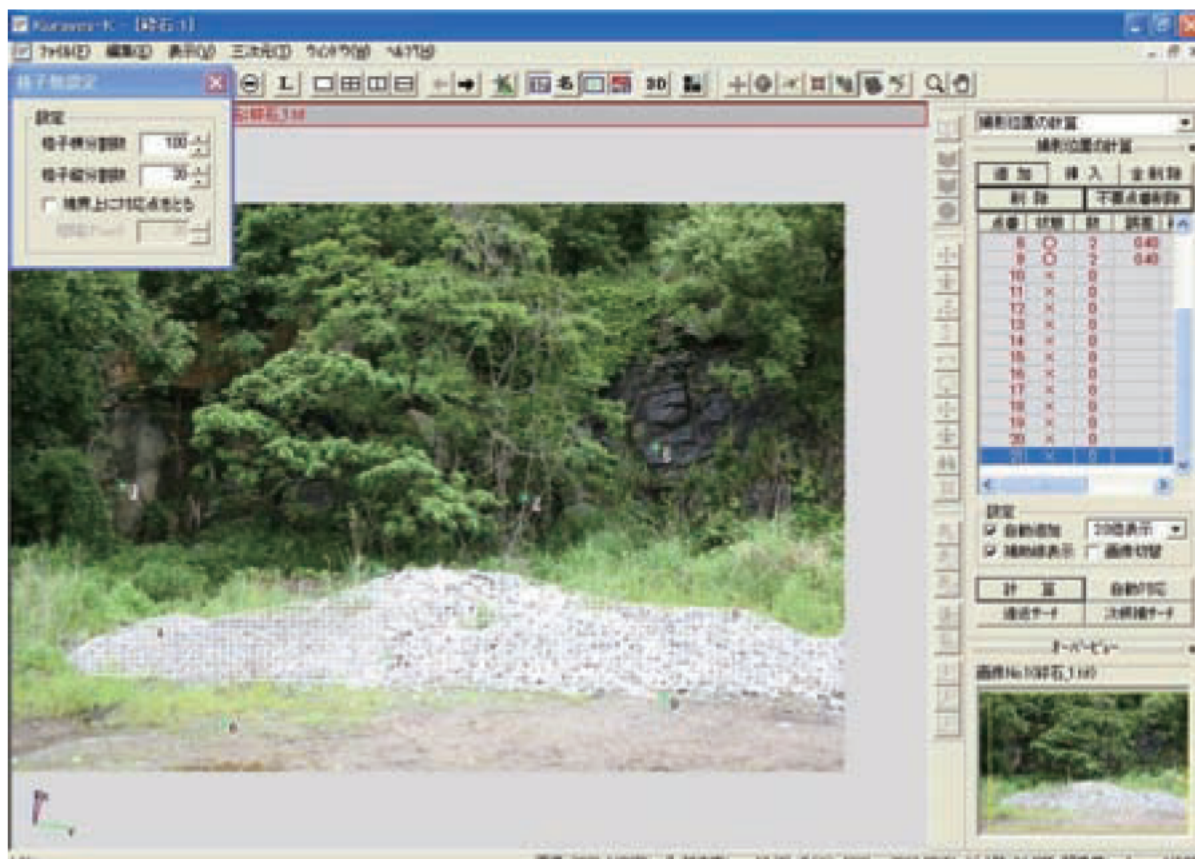


図 3.95 メッシュの設定状況



図 3.96 領域の境界上に設定した対応点(例, 点番 21)

「Kuraves の自動対応機能」を使用して、左側の写真 (L) 上に設定したメッシュを右側の写真 (R) に対応付けた。

④ 誤対応点の削除

Kuraves の 3D 処理機能を使用して誤対応点を削除した。結果を図 3.97 に示す。



当初発生メッシュ (写真 L) Kuraves の自動対応機能で生成されたメッシュ (写真 R)

図 3.97 誤対応点削除後のメッシュの配置状況

⑤ 面の設定(三角網の作成)

全ての対応点群を囲む領域を設定して、三角網を完成した。結果を図 3.98 に示す。

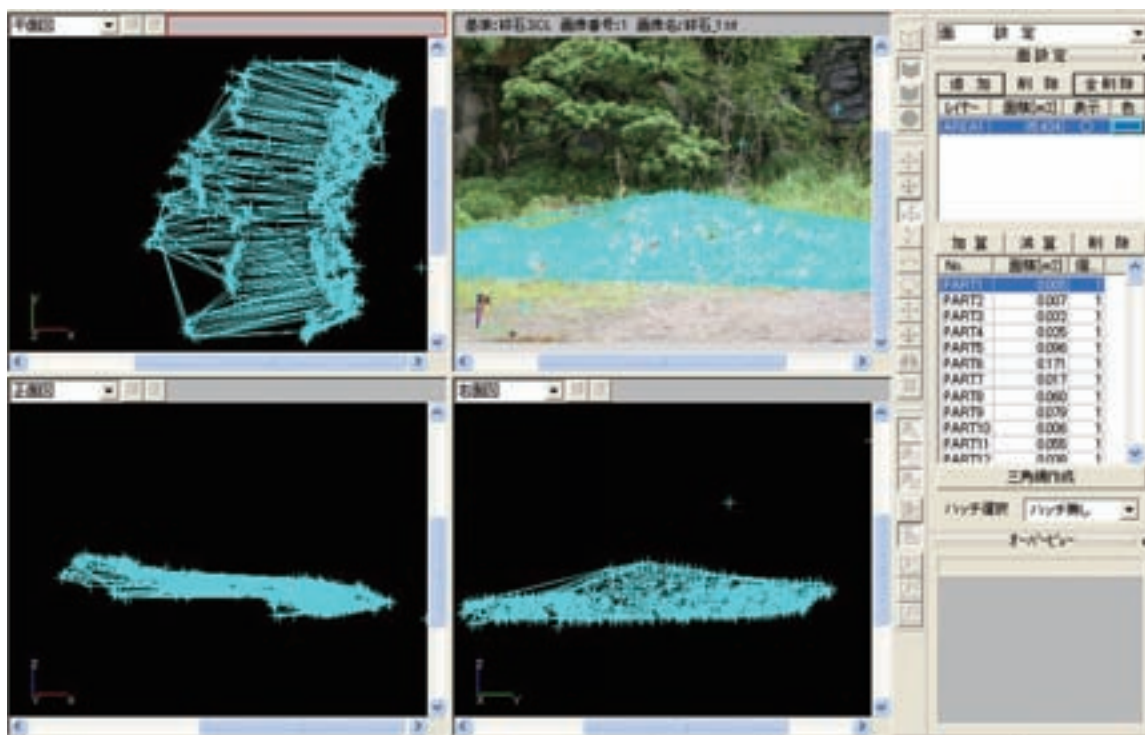


図 3.98 三角網 (TIN) 作成状況 (誤対応点削除後)

⑥ データ出力

検証のための各対応点の座標データを、Kuraves のエクスポート機能を用いて出力した。

(2) Kuraves 解析結果

① 点の検証結果 (標定点の座標)

標定点座標の検証結果を 表 3.48 に示す。点番 1~3 が初期対応点として設定した評定点であって、解析座標は測量座標をそのまま使用している。

点番 4 と 5 が点の検証に使用した評定点であって、測量結果と解析結果との誤差を検証した。

- ・ $|\delta X|$ (左右方向) : 概ね 30cm 前後
- ・ $|\delta Y|$ (奥行方向) : 点番 5 で約 3.8m、ただし点番 4 では約 50cm
- ・ $|\delta Z|$ (高さ方向) : 点番 5 で約 30cm、ただし点番 4 では約 3cm

誤差が大きくなった要因として、初期対応点として指定した 5 つの標定点は、いずれも不明瞭な点であったため、カメラ位置の計算精度が良くなかったことが考えられる。

表 3.48 点の検証結果

点番	測量成果			解析結果			誤差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	$ \delta X $	$ \delta Y $	$ \delta Z $
1	1990.164	1929.680	111.210	1990.164	1929.680	111.210	-	-	-
2	1997.255	1939.275	109.246	1997.255	1939.275	109.246	-	-	-
3	2004.731	1927.908	112.900	2004.731	1927.908	112.900	-	-	-
4	1994.457	1945.752	108.338	1994.102	1945.228	108.366	0.355	0.524	0.028
5	2000.367	1928.227	111.413	2000.653	1931.988	111.134	0.286	3.761	0.280

② 面の検証結果（地上レーザ測量との対比）

地上レーザ計測により取得された座標との差分解析を実施した。結果を図 3.99 及び図 3.100 に示す。

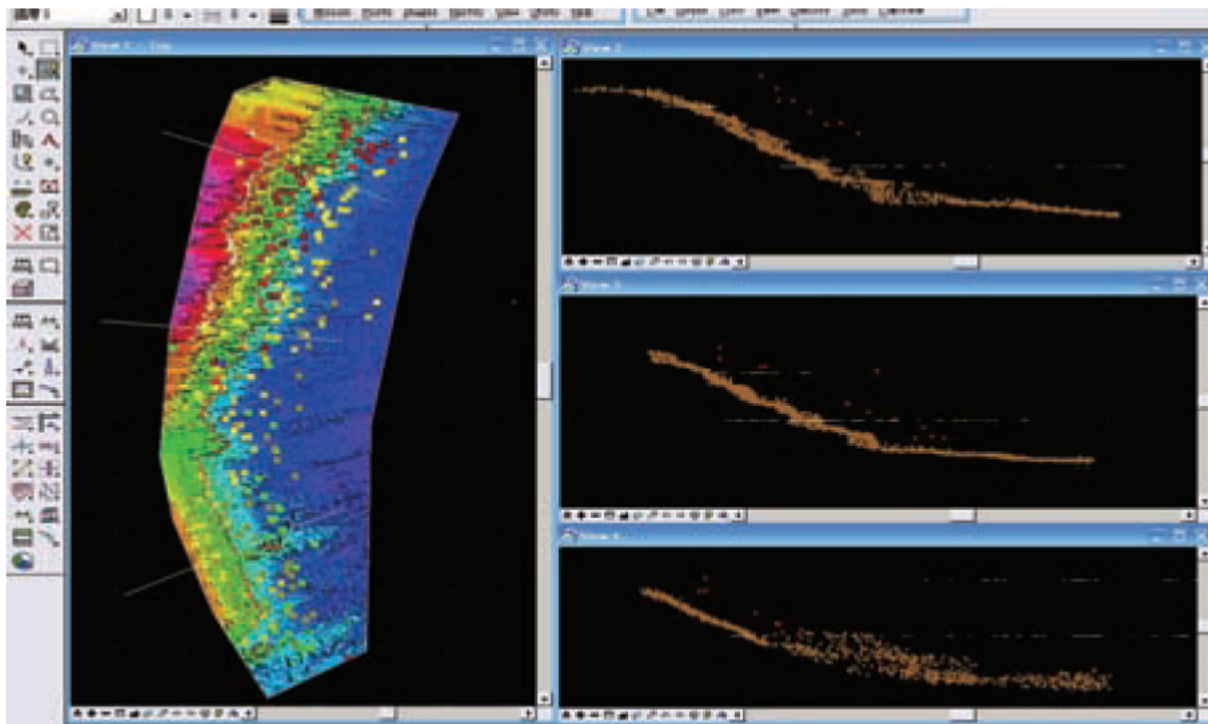


図 3.99 面の検証（差分処理実施中）

母数	平均較差	標準偏差	最大値	最小値
527点	0.22m	0.12m	0.64m	0.31m

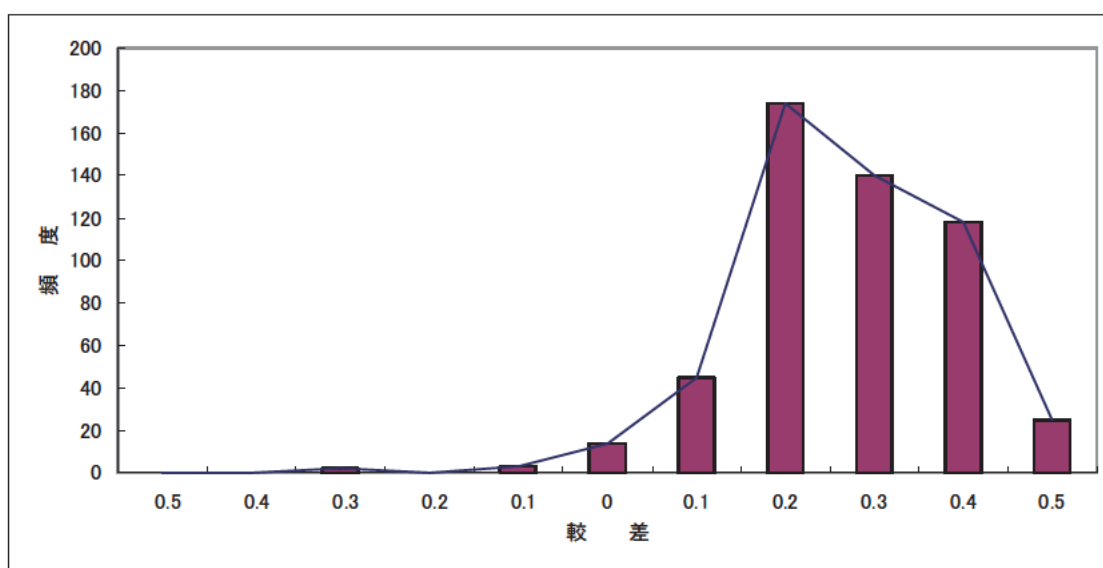


図 3.100 面の検証結果（差分解析）

(3) 今後の課題と対策方法

今回の撮影～解析の結果から判明した課題は、以下の2点に集約される。

① 写真画像上で不明瞭な評定点

課題：TS 測量によって座標が既知である標定点が、写真画像上では不明瞭であることによる誤差の発生。初期対応点の設定段階で、発生した可能性がある。

対策：写真上で明瞭な場所を標定点とすること。ただし、ノンプリズム方式によるTS 測量の場合、標定点の凹凸が激しい場合では測量誤差が大きくなる可能性が高いので、なるべく平坦な場所で「特徴的な点を選択」する必要がある。

② 露出過多（オーバー）で撮影された写真画像

課題：解析対象となる砕石部分において白飛び（露出過多でデジタル値が飽和している状態）が発生したことにより、誤対応点が多く生じた【誤対応点率約 44%（対応点設定時 1,379 点 → 誤対応点削除後 768 点）】。

対策：予め露出計を使用して最適な撮影条件を決定するか、撮影したデジタル画像を直ちに確認して、露出オーバーや露出アンダーが生じていないことを確認する。

3.4 今後の課題

3次元モデル化の検討において Kuraves の優位性は明らかになったが、今後、以下の検討を更に進める必要がある。

(1) 撮影準備作業の迅速化

今回の撮影実験では基礎データの収集を目的としており、カメラの設置位置・撮影対象までの距離・撮影角度・初期対応点の位置などを、時間をかけて正確に測量している。これらの各諸元は Kuraves 解析精度の向上に寄与することとなったが、実際の地すべり現場で十分な測量を行うことは困難である。撮影の難しい現場に対応するため、適切な位置へのカメラ設置、初期対応点の見際などを短時間で行い、必要最低限の測量を迅速に実施するためのケーススタディが必要である。また今回の実験では、シャッター速度・ISO・絞り等の設定に失敗したため、補正画像による解析を余儀なくされる場面もあった。確実に撮影を実施するためのマニュアル作成も合わせて検討しなければならない。

(2) 人為的誤差の軽減

様々な位置から撮影した画像を Kuraves で解析したことで、系統的に発生する誤差特性は概ね把握できたが、人為的な理由で発生する偶発誤差の影響が大きいことも明らかになった。特に初期対応点の判読については、後続作業に与える影響も大きくオペレーター間で判読ルールを統一することが重要となる。

(3) マッチングに関する検証

今回の検討では、自動マッチング収斂角を小さくして撮影した方が、マッチング率、計測精度ともに良好な結果となることを確認した。複雑な地形を考慮した場合、斜面により正対した撮影が求められる。10°以下の収斂角について、検証しておくことも必要である。

(4) 撮影条件の違いに関する検証

撮影時間帯や気象条件などを考慮した実験から、所要の解析に耐えうる撮影環境を検討するためには、数多くの撮影、解析を伴うことになる。検証の対象とする時間帯・気象条件を絞りこむため、単写真のテスト撮影を行い、画像のデータレベルを分析してパターン分類するなどの事前準備が必要と考える。

4. 取得データの活用方法

4.1 地すべり体の挙動把握の検討

前章までで述べた、同期撮影システム、Kuraves の検証は、静止した状態の地物を対象に行っているが、実際の地すべりの撮影では、変形しながら移動する土塊を追跡する必要がある。ここでは、変形しながら移動する対象としてスライムを使用し、撮影からアニメーション作成までの一連の実験を行い、課題の抽出を行った。

4.2 スライム撮影実験

(1) 実験方針

- ・ 1 コマ/秒の間隔で撮影を行い 10 コマ以上の撮影とする。
- ・ 移動速度を変化させるため斜面勾配に変化をつける。
- ・ 解析結果から得られたアニメーションは、同時撮影するビデオ画像と比較し評価する。

(2) 実験日時・場所

日時：平成 20 年 6 月 4 日（火） PM

場所：土木研究所 会議室

(3) 作業手順

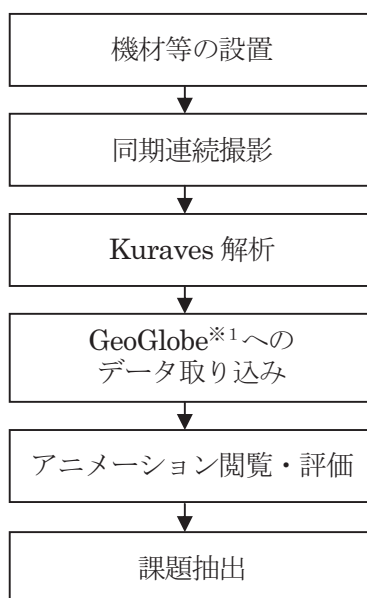


図 4.1 作業フロー

※1 GeoGlobe とは、株式会社ビジュアル・システムズが開発した 3 次元 GIS であり、3 次元的に表現された地形を自由な視点から閲覧できるシステムである。

(4) 機材等の設置

以下の通り撮影準備を実施した。



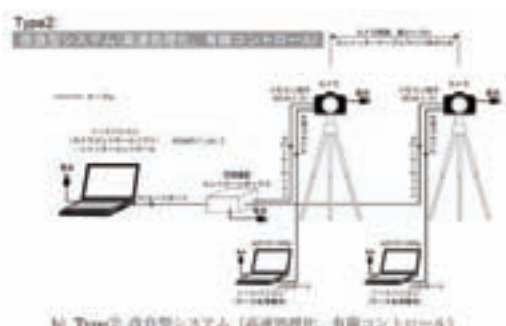
スライム作成



斜面設置



機材設置



(システム構成はType②+ビデオカメラ)



実験施設全景

写真 4.1 準備状況






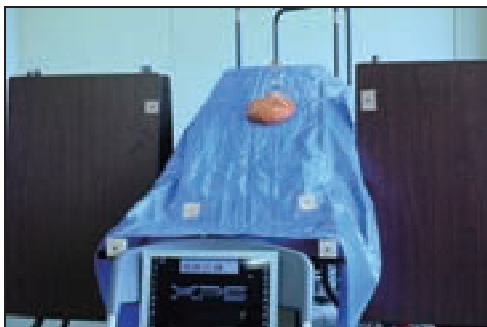
(5) 同期撮影

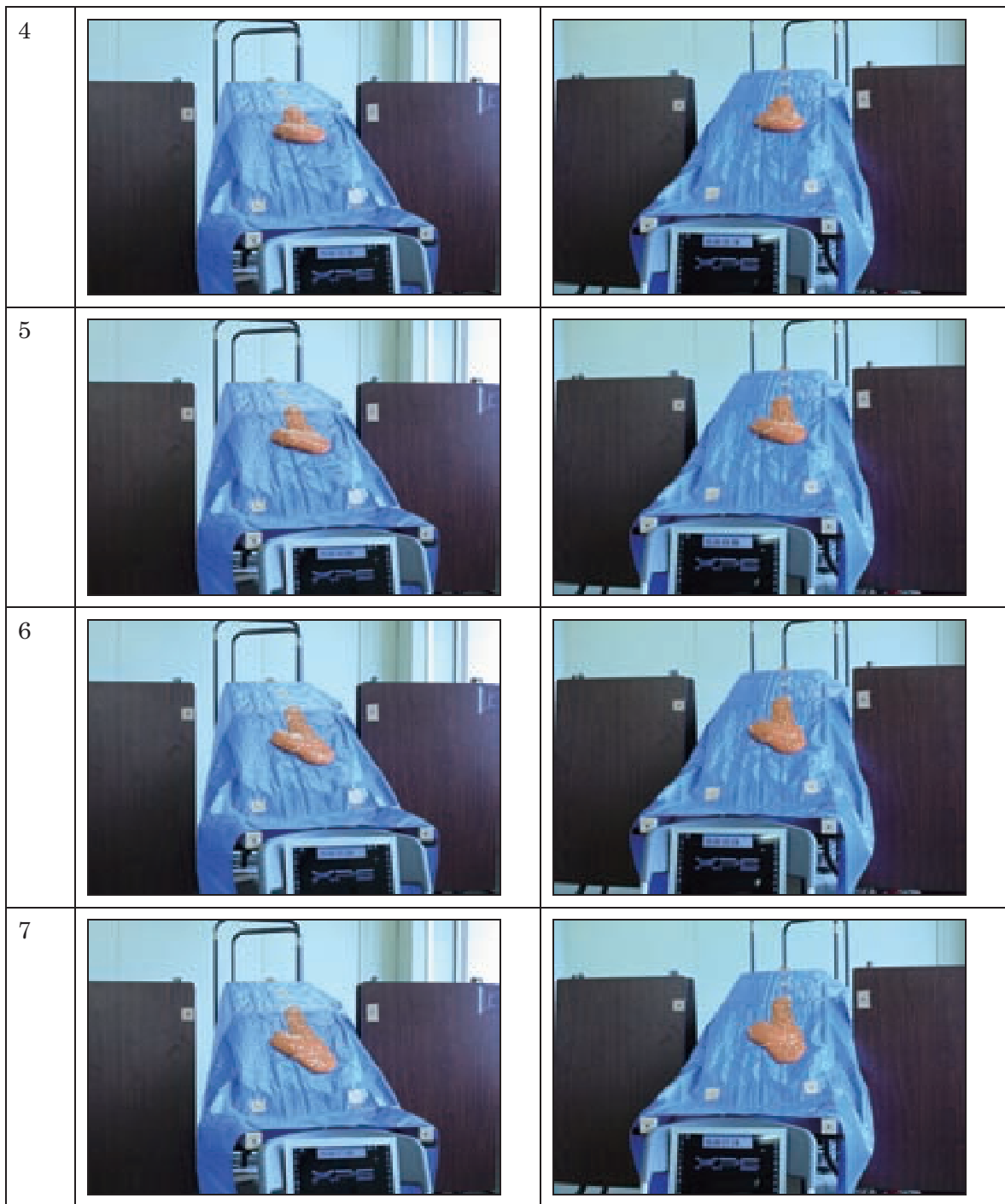
撮影諸元は表 4.1 の通り。

表 4.1 撮影諸元

項 目	採用値
焦点距離 (mm)	50
ピクセルサイズ (mm)	0.0082
撮影距離 (m)	5
有効画素数	4368×2912
撮影範囲 横 (m)	3.582
撮影範囲 縦 (m)	2.388
地上解像度 (m)	0.0008
撮影縮尺	100
収斂撮影角 (°)	10
撮影間隔 (コマ/秒)	1

表 4.2 撮影画像一覧

	左	右
1		
2		
3		



上記の結果より、欠撮、同期ズレのないことを確認した。

(6) Kuraves 解析の結果

Kuraves 解析を行うことにより、移動体を効率的に抽出する手順とその結果例について記述する。

1) 撮影位置の計算

① 初期対応点(全9点)の設定 (図 4.2 参照)

- ・ マーカー位置を初期対応点として撮影位置の計算を行った。
- ・ 計算誤差は、 $\delta = 0.00 \sim 0.05$ とした。

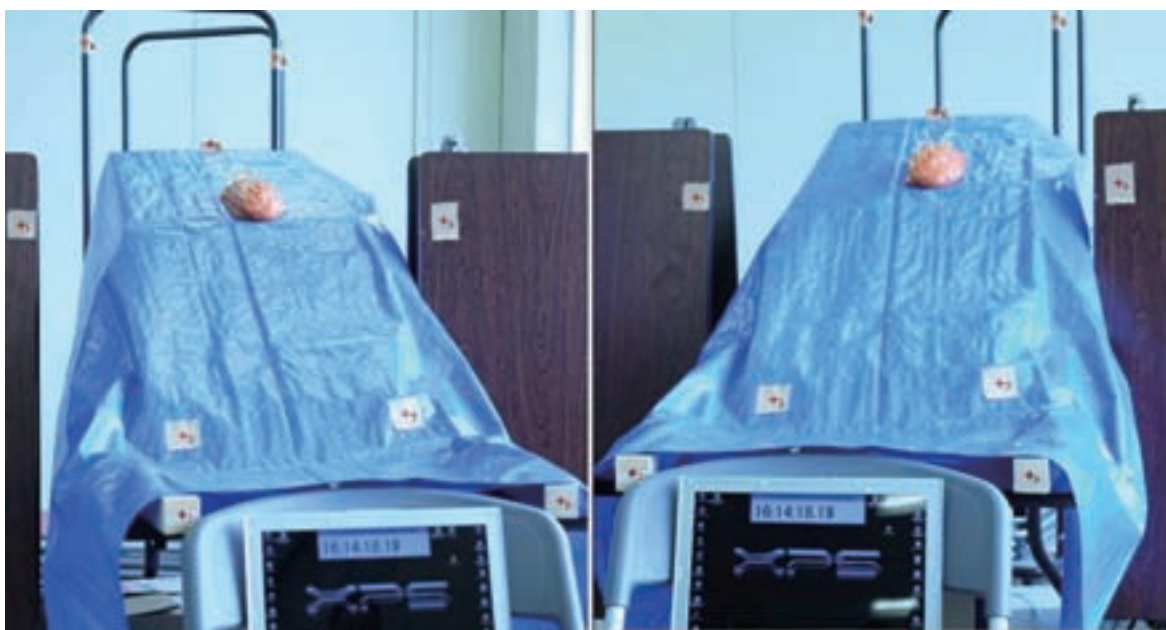


図 4.2 初期対応点設定状況

撮影位置の計算

計算方法設定

- 全ての対応点を利用して撮影位置を計算
- 20番までの対応点を利用して撮影位置を計算

計算条件の設定

- 対応点の立体配置より撮影位置を計算
- 対応点の平面配置より撮影位置を計算
- 再計算(計算されている撮影位置を再度計算します)

基準座標を楕定点として計算する

計算 キャンセル

点番	状態	数	誤差
1	○	2	0.00
2	○	2	0.00
3	○	2	0.00
4	○	2	0.00
5	○	2	0.00
6	○	2	0.00
7	○	2	0.00
8	○	2	0.00
9	○	2	0.00
10	×	0	
11	×	0	
12	×	0	
13	×	0	
14	×	0	
15	×	0	
16	×	0	
17	×	0	
18	×	0	
19	×	0	
20	×	0	

図 4.3 撮影位置の計算

② 斜面部における任意対応点の設定 (図 4.4 参照)

- ・斜面部の特徴点を任意対応点として、手動で各斜面に設定した。
- ・設定後撮影位置の再計算を実施した。
- ・計算誤差 δ は、 $\delta=0.00\sim0.05$ とした。

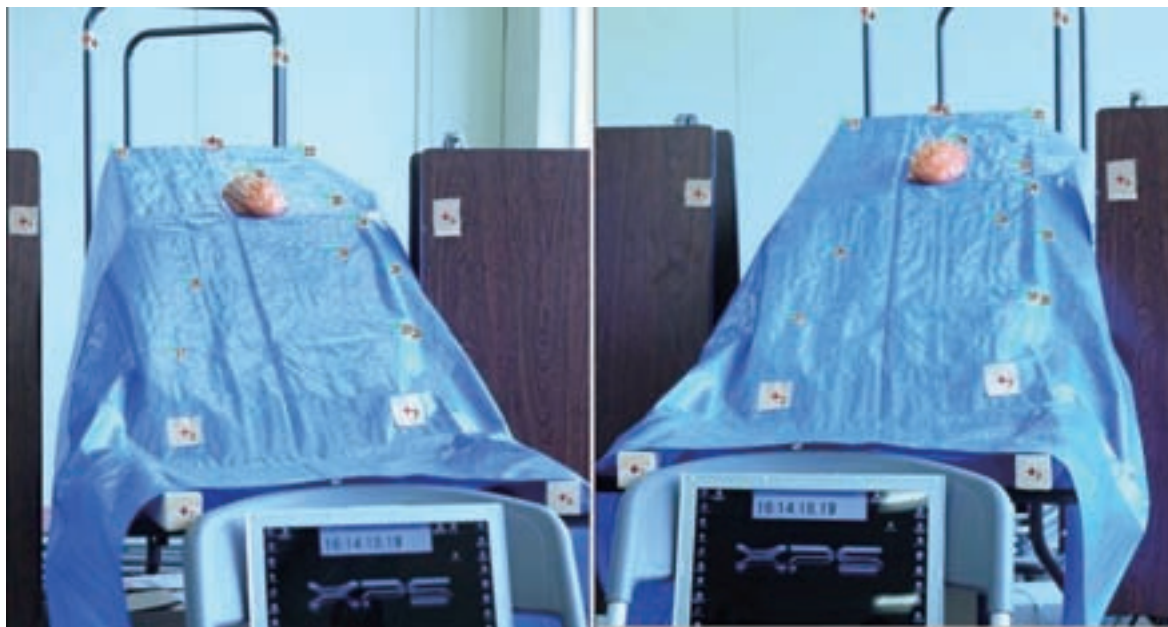


図 4.4 任意対応点(特徴点)の設定状況

③ 斜面部任意対応点の追加

初期対応点は9点であるが、この9点という数量では後に作成する三角網 (TIN) が粗くなって、斜面の傾斜変化などを反映することが困難となるため、任意対応点を追加する必要があった。

ただし、多く作成しすぎると誤対応点の削除などの作業量が増加するので、今回は傾斜変化がある程度捉えられると想定された 30~60cm の間隔で任意点を追加した。

作成に当たっては「Kuraves の対応点を格子状に指定機能」や「Kuraves の領域内を格子状に指定機能」を適宜用いて、対応点の不足している領域に対応点を指定し、自動対応と手動対応を使い分けながら作成した。

誤対応点が多く発生したが、写真上の斜面から明らかにはみ出した箇所を除去すると共に、図 4.5 のように、三次元表示で真横から見た状態で斜面から外れた箇所を除去することで、ほぼ誤対応点の削除は可能であった。

誤対応点削除後の追加状況の例を、図 4.6 に示す。

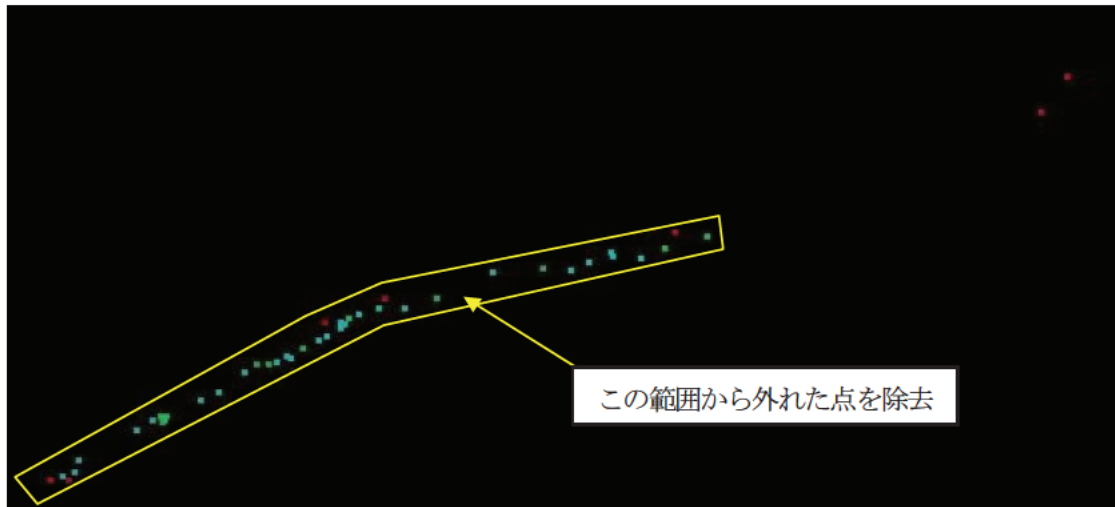


図 4.5 誤対応点の削除状況

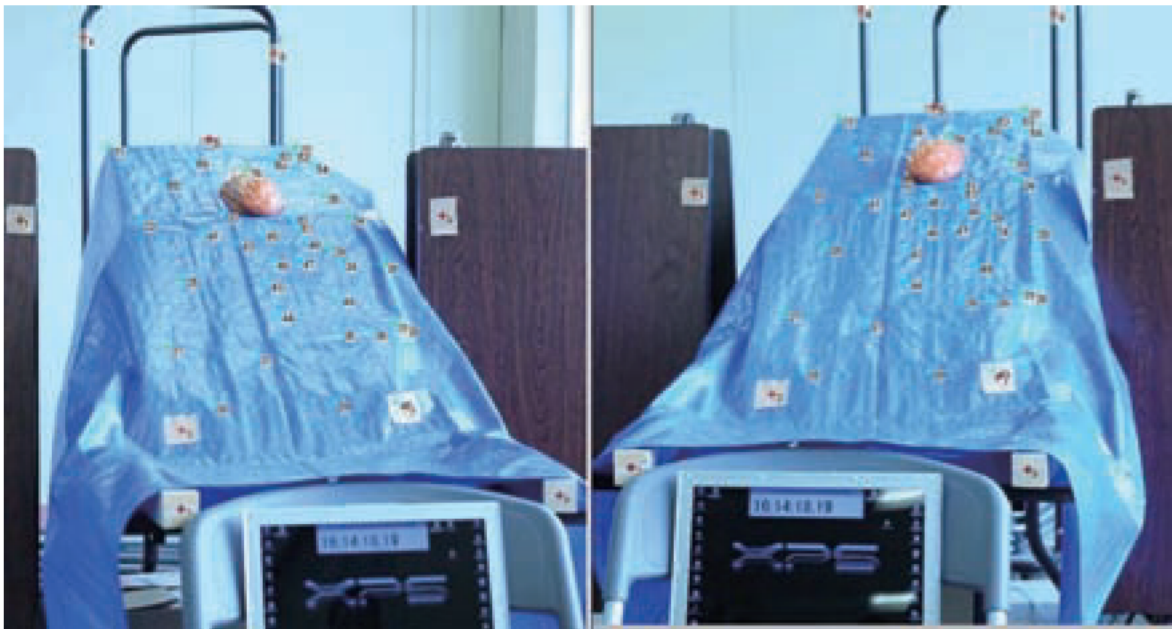


図 4.6 任意対応点の追加状況(誤対応点削除後)

④ スライム上に位置する対応点の作成 (図 4.7 参照)

スライム上に配置した棒やビーズなどの特徴点を手動で設定したほか、「Kuraves の対応点を格子状に指定機能」や「Kuraves の領域内を格子状に指定機能」を用いて、スライム上の対応点を作成・設定した。

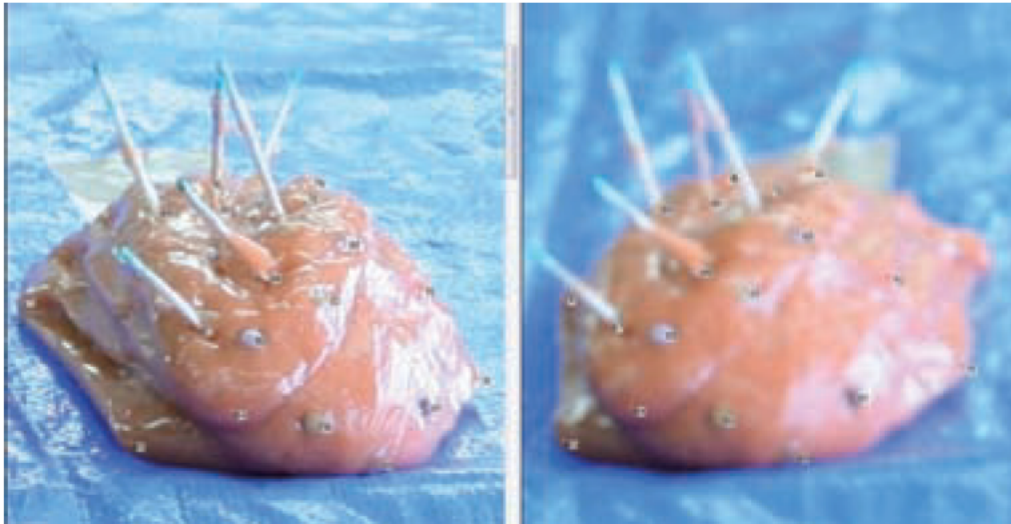


図 4.7 スライム上の対応点設定状況

2) 点属性の設定 (表 4.3、図 4.8 参照)

「④ スライム上に位置する対応点の作成」で作成した対応点に、それぞれの点属性(レイヤ)を設定した。

表 4.3 点属性(レイヤ)の設定

対 応 点	対 象	レイヤ名	色
①初期対応点	斜面部	Initial	赤
②任意対応点	斜面部	Plot	緑
③任意対応点(追加分)	斜面部	Other	水色
④スライム上の対応点	スライム	Slime	オレンジ

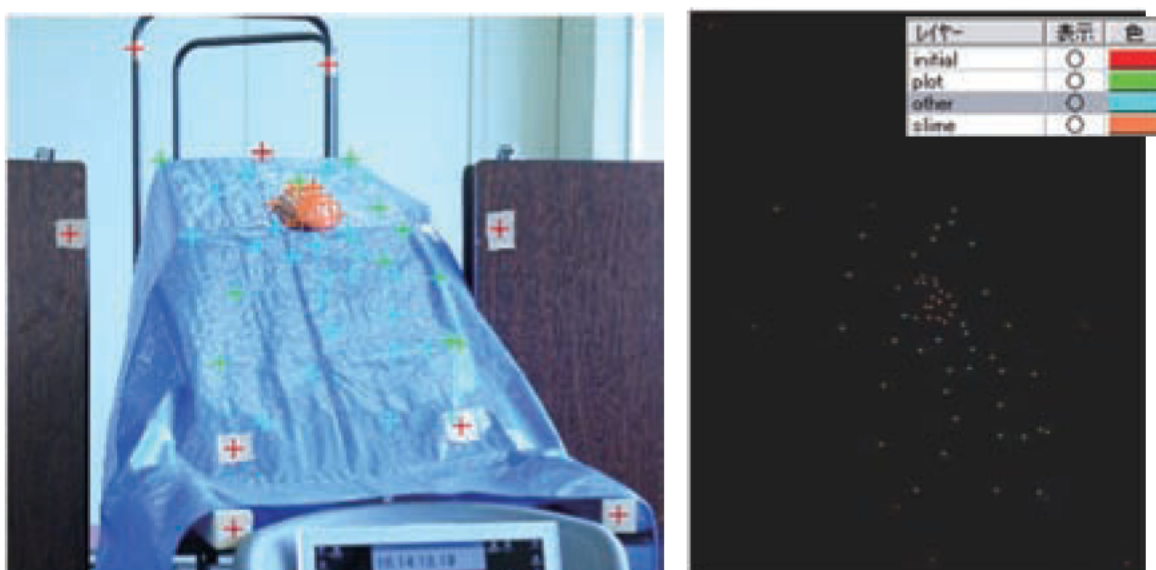


図 4.8 点属性(レイヤ)設定状況

3) 面の設定

三角網(TIN)を作成して面の設定を行った。

面の設定は、斜面部とスライムで別々に実施し、それぞれ属性(レイヤ)の設定を行った。

① 斜面部の面設定 (図 4.9 参照)

まず、「点属性設定」で、スライム上の対応点(レイヤ名:slime)を非表示にする。

その後、「Kuravesの領域内の三角網作成機能」を選択し、斜面上の対応点を囲って面の設定を行った。

作成した面のレイヤ名は「slope」とした。

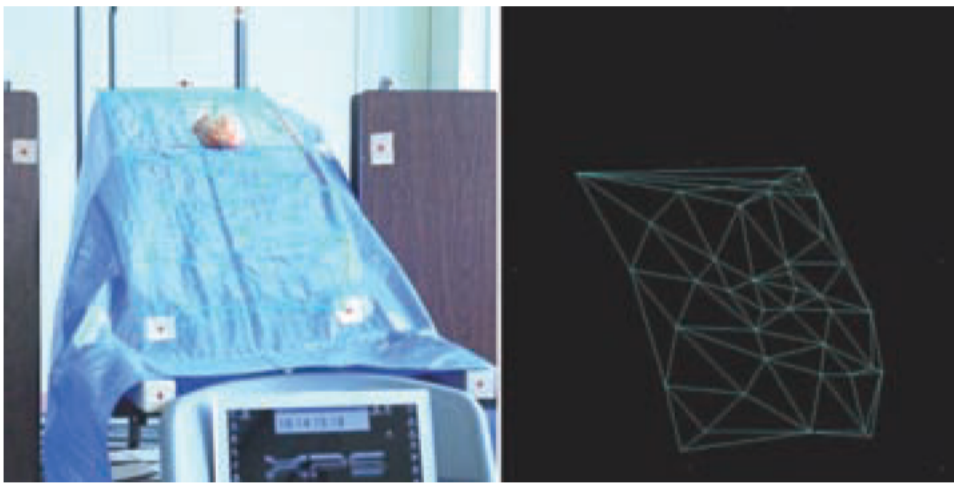


図 4.9 斜面部の三角網設定状況

② スライム上の面の設定 (図 4.10、図 4.11 参照)

レイヤを追加し、レイヤ名を「slime」とした。

次に、スライム上の対応点以外(レイヤ名:initial、plot、other)については、点属性の設定で非表示とし、「① 斜面部の面設定」と同様にスライム上の面設定を行った。

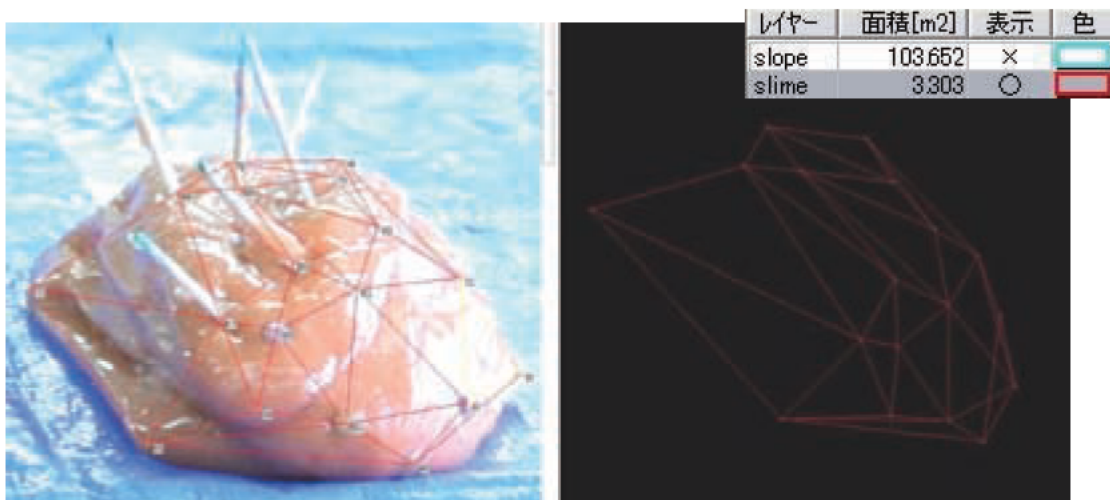


図 4.10 スライム上の三角網設定状況(スライム後方は2枚の写真に写らず設定不可)

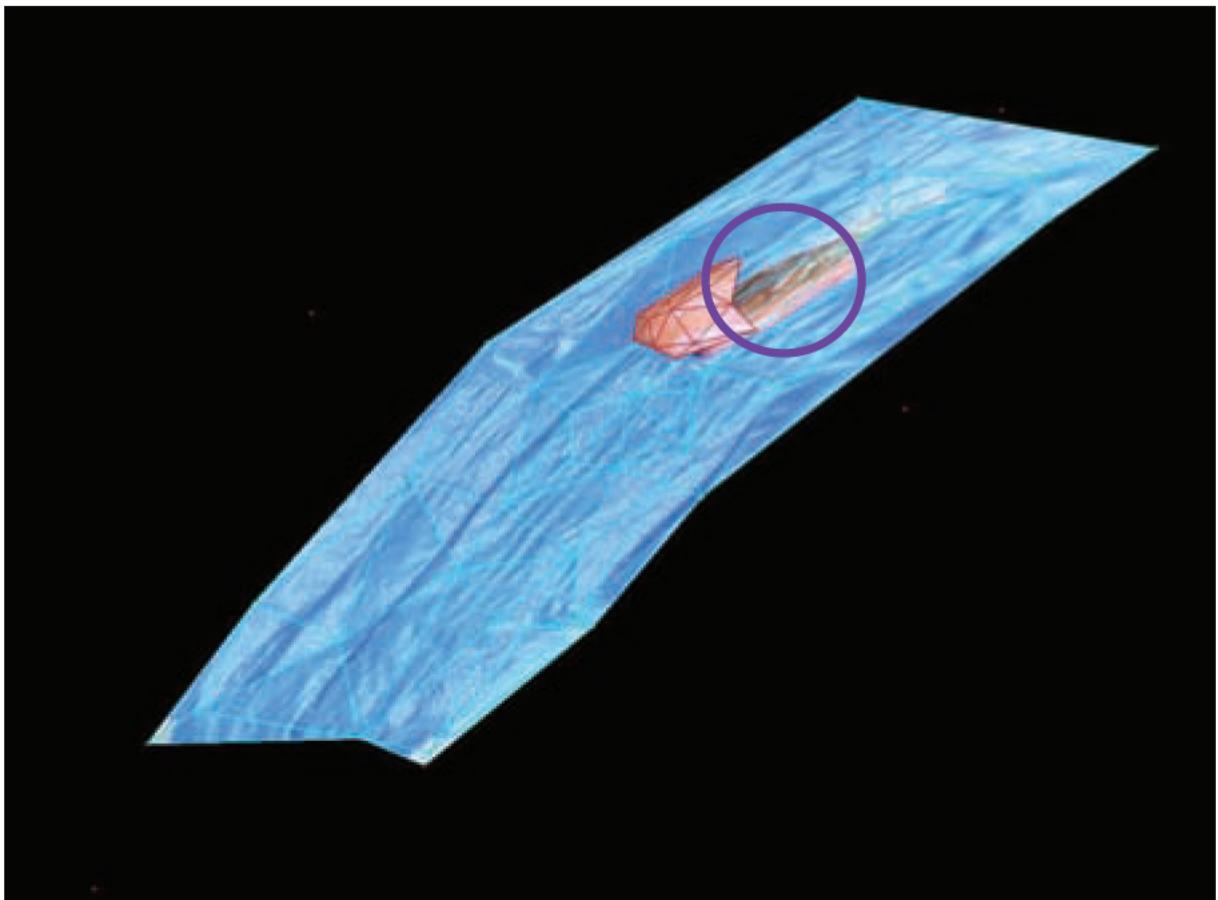
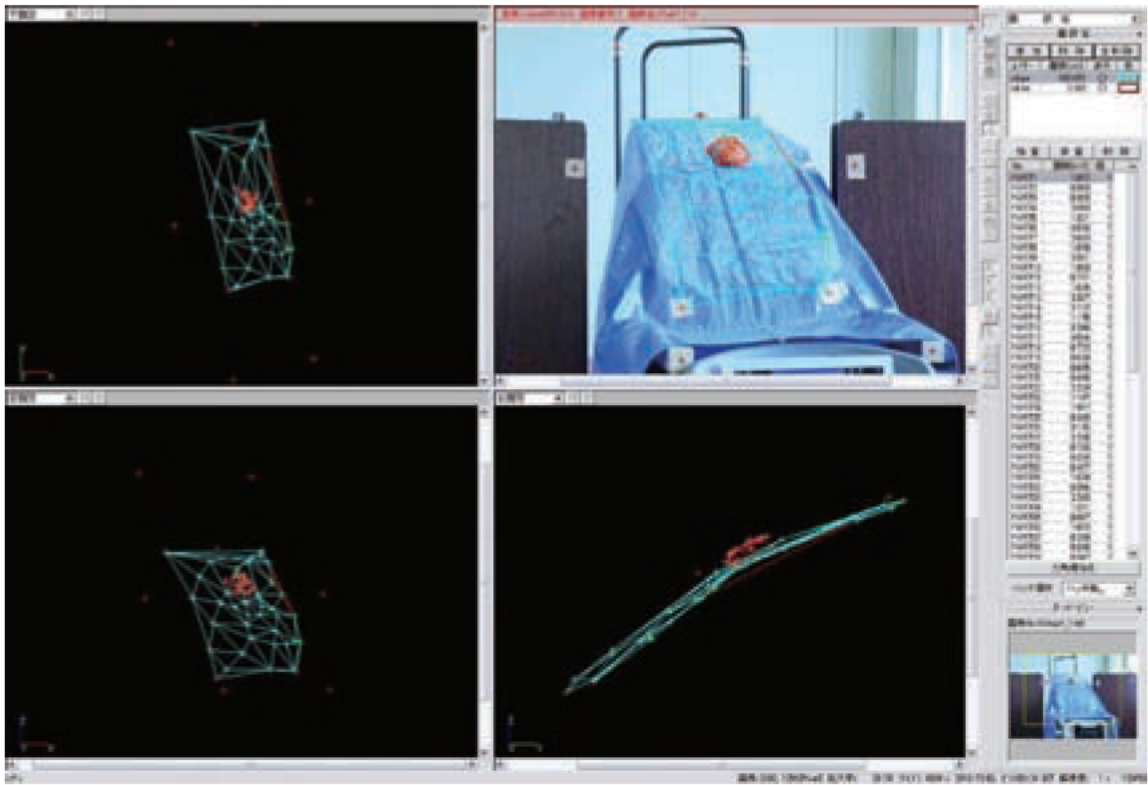


図 4.11 完成したモデル(スライム後方が欠けている)

4) 次の時間ステップで撮影された写真画像の解析

以上の Kuraves 処理は、ある任意時間における瞬間的な画像処理である。

よって、移動体を連続的に把握するためには、次々と撮影される写真画像に対して、同様の Kuraves 処理を迅速に実施する必要がある。

今回の実験の特徴から、斜面部の解析結果(モデル)は固定されており移動しないため、この部分のデータは全ステップで共通して使用し、スライムの移動のみ追従する方法を採用した。

① 画像の入れ替え

「Kuraves の ファイル 画像データを入れ替え機能」を使用して、図 4.12 に示すダイアログを表示し、上記「1)」～「3)」の各処理で使用した画像に対応する次ステップの写真画像と入れ替えた。なお、入れ替え写真画像は、事前に「Kuraves の航空写真ツール」でひずみ補正を行う必要がある。結果例を図 4.13 に示す。



図 4.12 画像の入れ替え状況



図 4.13 画像入れ替え後の画面

② 前ステップのスライムモデル削除 (図 4.14、図 4.15 参照)

前項 (図 4.13) で示したように、写真画像を入れ替えるとスライムが移動し、スライム上の三角網及び対応点もずれてしまうため、写真画像の入れ替え前のモデルを削除する必要がある。

三角網の削除は、「Kuraves の面設定」においてレイヤを削除する。

対応点の削除は、「Kuraves の点属性設定」で「レイヤ : slime」以外を非表示にしてから、「Kuraves の撮影位置の計算 対応点削除機能」を選択し、スライム周辺を囲うようにして対応点を削除する。

「Kuraves の 3D 表示機能」では、他の属性の点は全く表示されないため、併用すると効率的である。

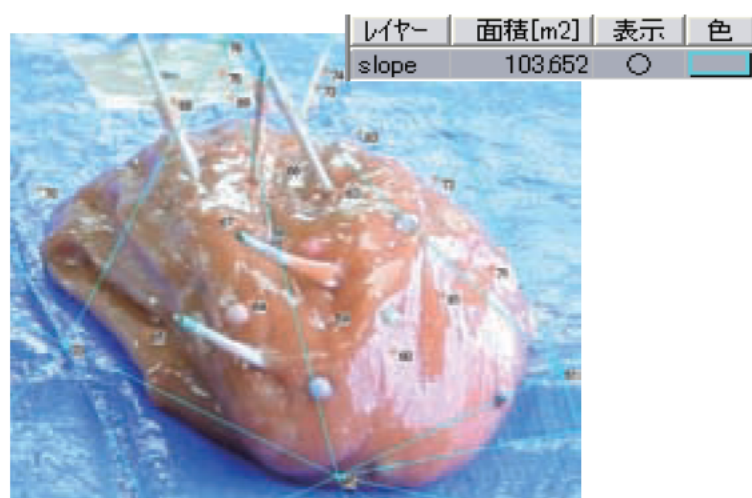


図 4.14 三角網の削除(レイヤを削除)



図 4.15 対応点の削除(点のみ削除 レイヤは削除しない)

③ 移動後のスライム上対応点の作成 (図 4.16 参照)

「1)」～「3)」の処理と同様に、特徴点を手動で設定するほか、「Kuraves の対応点を格子状に指定機能」や「Kuraves の領域内を格子状に指定機能」を用いて、スライム上の対応点を作成・設定を行った。



図 4.16 移動したスライム上の対応点設定状況

④ 移動後のスライム上の面設定 (図 4.17 参照)

「② 前ステップのスライムモデル削除」で削除したレイヤと同じレイヤ(レイヤ名: slime)を追加設定し、「3) 面の設定」に記載した処理と同様にスライム上の面設定を行う。

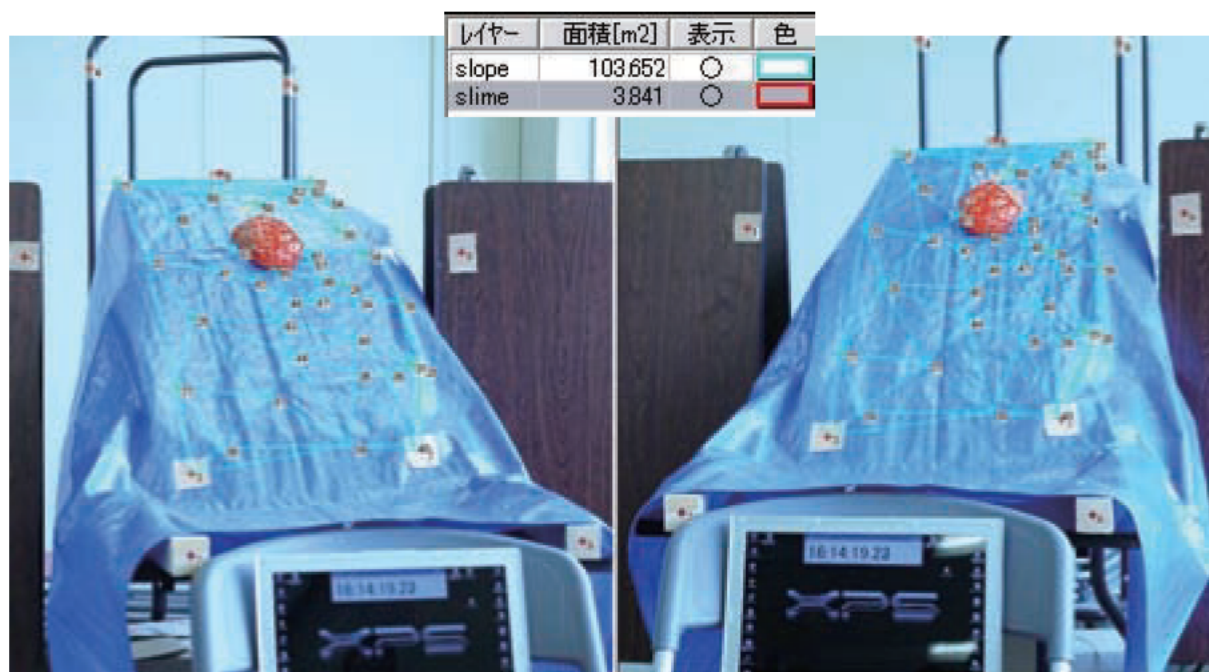


図 4.17 移動したスライム上の三角網設定状況(スライム後方は2枚の写真に写らず設定不可)

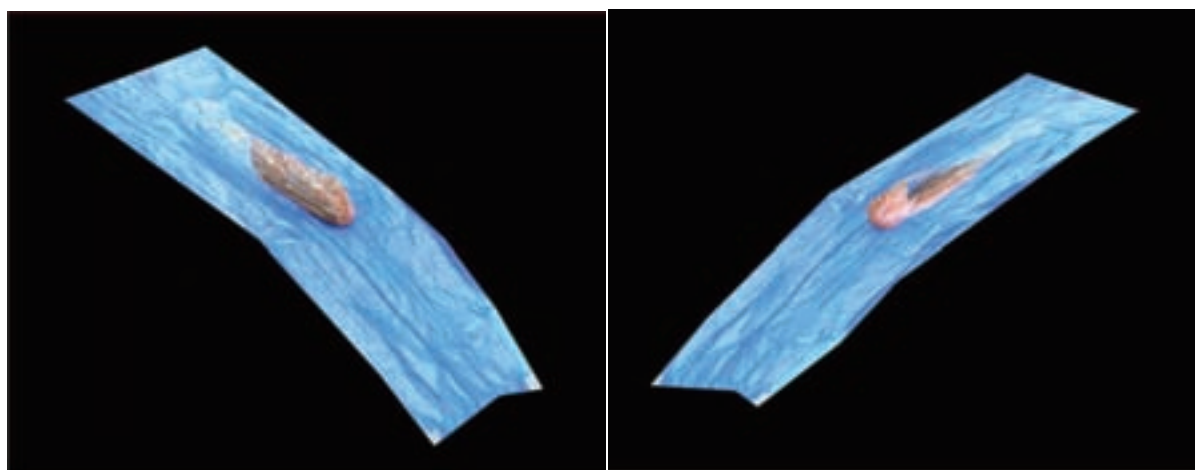
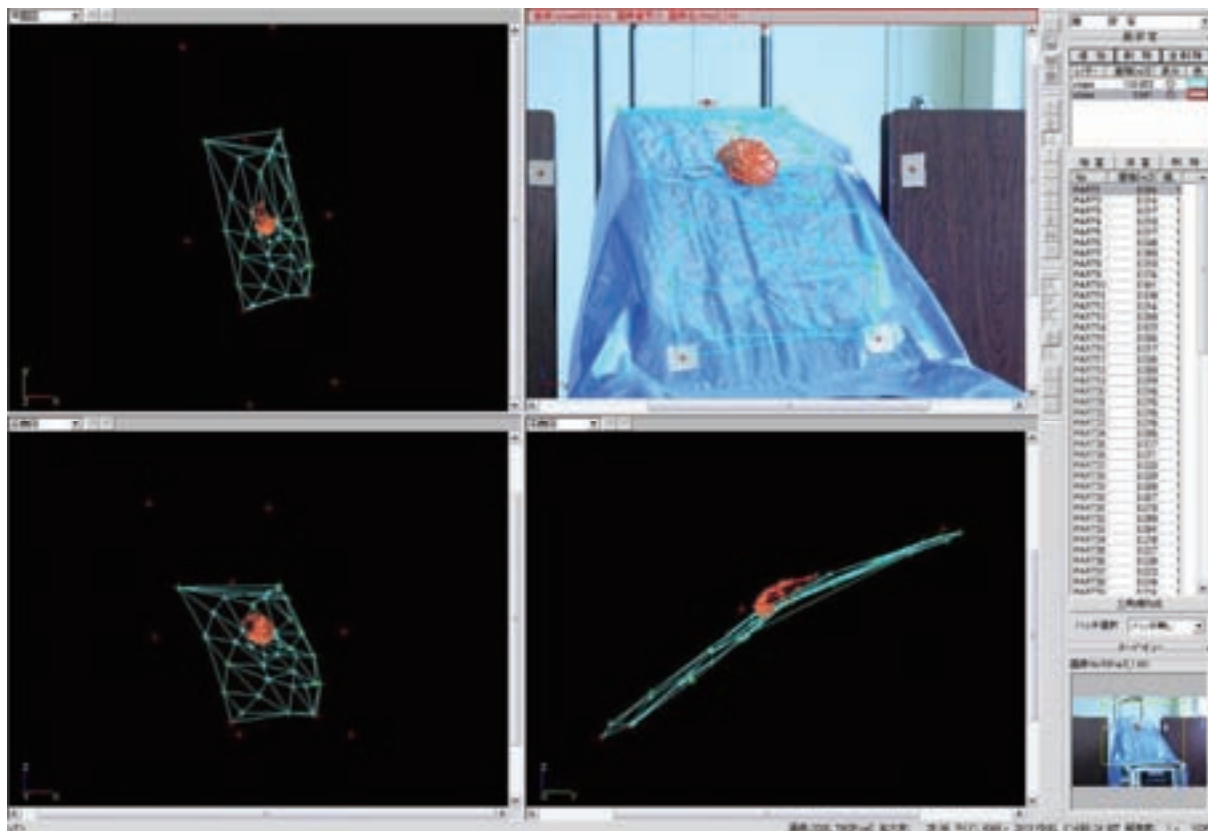


図 4.18 完成した移動後のモデル(スライム後方が欠けている)

5) 次々の時間ステップで撮影された写真画像の解析

以降は、事前までの作業ファイルを基に、画像の入れ替えを行い、4)の手順を繰り返し実施する。

6) 解析結果

「Kuraves のファイルの置き換え機能」や「Kuraves のレイヤ機能」を用いることによって、スライムとブルーシート上の点や標定点とを容易に分離でき、同一の空間座標で解析することができた。

スライム上の対応点は「当初 30 点以上」として解析したが、実験の後半であった No.8~12 ケースの自動対応が比較的良好であったため、90 点以上の対応点を得ることが可能であった。

実験後半の自動対応が比較的良好であった理由としては、

- ・光源とスライムの位置関係から、光によって白く塗りつぶされる範囲が小さくなったこと
- ・スライムがカメラに近くなってスライム部分の画素数が多くなったこと

などが考えられる。

また、自動対応でうまく対応点が取れなかった箇所については、手動対応により大きな空白をなくすようにして精度の向上に努めた。

7) 課題

① 土塊モデルであるスライムの後方部分は写真に写っていないため、2 枚のステレオ写真で対応点を取ることができず、モデル自体の作成そのものが不可能であった。よって、スライム後方部分の数値モデルを手動で補間すれば、スライムの 3D モデルを作成することは可能ではあるが、見えない部分をモデル化すること自体に意義があるかどうかや、手動で対応した部分を如何にモデル化するかが大きな課題となる。

② ①の課題は、地すべりそのものが地表面だけの移動である場合には、あまり問題にならないと思われるが、土塊状となっている場合は、①に示した課題を解決する必要がある。

4.3 3次元CGモデル作成アプリケーションの検討・開発

Kuraves を用いて取得した移動体の時系列 3 次元データを用い、3 次元 GIS ソフトウェア「GeoGlobe」のエンジンをベースとした、3 次元 CG アニメーションの作成を行うにあたり、必要と思われる機能の検討・開発を行った。

(1) 使用アプリケーションに関して

3 次元 GIS ソフトウェア「GeoGlobe」のエンジンをベースに、3 次元 CG モデル作成アプリケーションの開発を行う。主な機能として、3 次元地形モデルの自由な視点からの表示、TIN データの読み込み、動画映像の作成があり、本研究における 3 次元 CG アニメーション化において必要機能を組み込んだアプリケーションの開発を行う (図 4.19)。

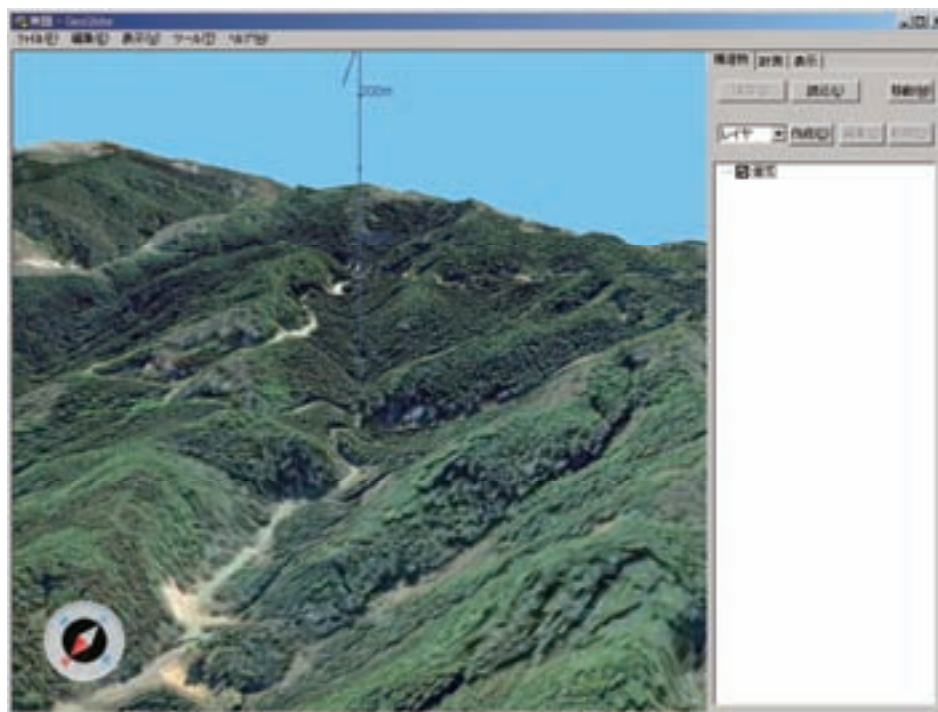


図 4.19 GeoGlobe ユーザーインターフェイス

(2) 3次元CGアニメーション化に必要な開発項目

新たに必要な開発項目として以下が考えられる。

- ・ 3 次元 CG モデル自動作成機能
- ・ 時系列データの 3 次元 CG モデル一括自動作成
- ・ 時系列 3 次元 CG モデルの連続切り替え表示機能

(3) 設計

第1段階として、3次元CGモデルの自動作成機能の開発を行う。仕様は以下とする。

- ・ Kuraves からエクスポートされたデータを用いる。
- ・ データフォーマットは地形データをランダム点またはメッシュのXYZデータ (CSV形式)、画像データをTIFF形式 (ワールドファイル付) とする。
- ・ データ入力の際、地形データ、測地系のフォーマット入力を行う。

(4) 3次元地形データの作成手法

① TINの発生

XYZの座標値を読み込み、TINを発生させる。TINデータの発生には、高さ成分は考慮しない2次元平面上での「ドロネー(Delaunay)三角形分割」を使用している (図4.20)。

② 地形データのタイリング処理

描画の高速化の為、発生させたTINモデルをタイル状に分割、細分化し、GeoGlobeの地形データフォーマット (拡張子GLD) の3次元地形データとして作成を行った (図4.20)。

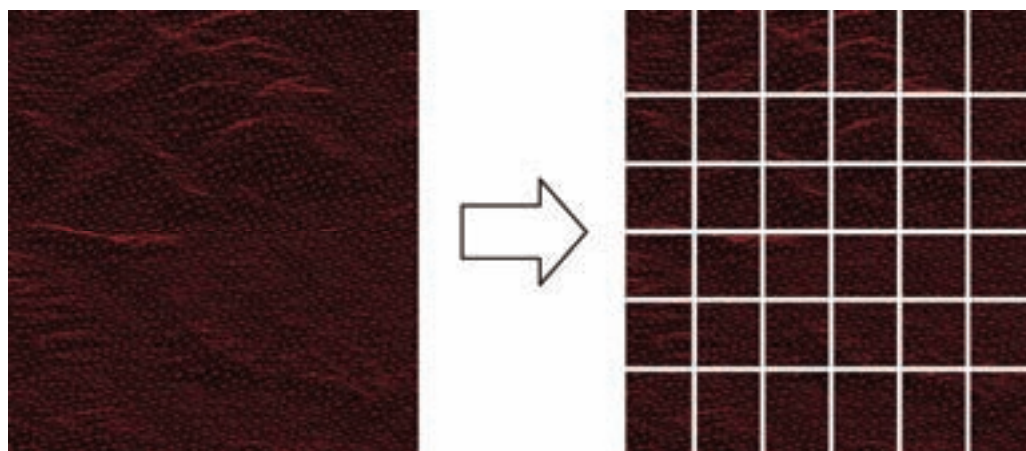


図4.20 TINの発生とタイリング処理

③ 地形データへのテクスチャマッピング処理

地形データにテクスチャマッピング処理を行う（図 4.21）。画像の位置を座標にあわせ 3D データを作成し、地形データごとに画像を切り出す。

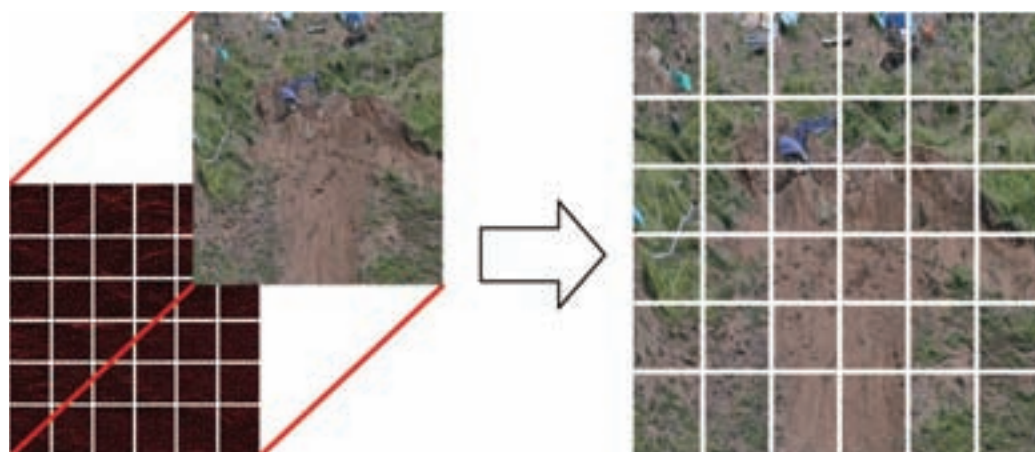


図 4.21 テクスチャマッピング処理

④ 階層データの作成

作成された 3 次元地形モデルより階層データを作成する（図 4.22）。これは描画を高速化するためのデータで、画面解像度にあわせたテクスチャ処理を行なうものである。これにより高速かつシームレスな描画を可能とする。

現段階では階層データを持たせているが、データ容量等を検討した上で描画データの構造を策定すべきと考える。

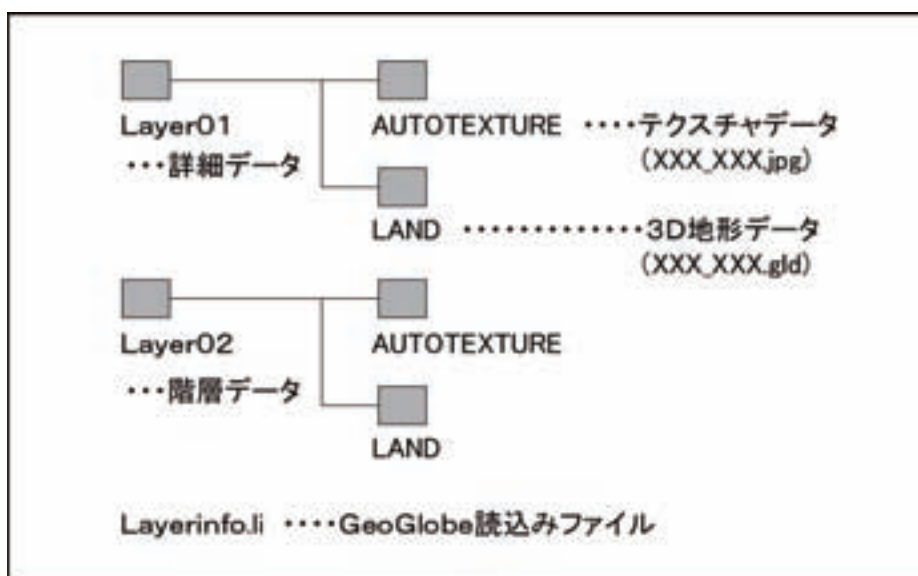


図 4.22 階層データ図

- (5) 3次元CGモデル作成フロー
作成手順は図 4.23 の通り。

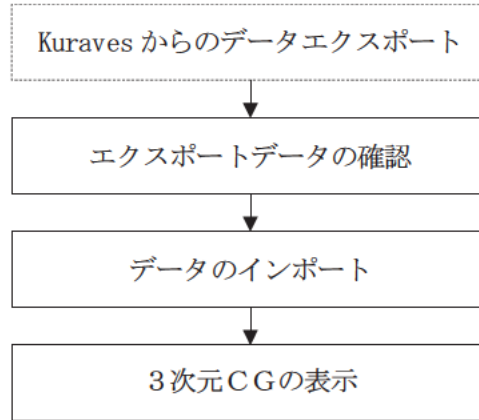


図 4.23 作成フロー

- ① Kuraves からのエクスポートデータ確認
画像データに関してはワールドファイル付きの TIFF とする。CSV データは表 4.4 のとおり。

表 4.4 Kuraves 地形データフォーマット

ID	X	Y	Z
1	-4707.74	-85001.4	574.0379
2	-4694.88	-84999.5	585.82
3	-4731.7	-84989.7	558.5582
4	-4698.38	-84979.9	586.05
5	-4733.17	-84975.7	558.7362
6	-4755.37	-84962	547.5575
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

② データのインポート

入力画面に各種の情報（入力フォーマット、測地系、出力レイヤー等）を入力することで 3次元 CG モデルを作成できるように、アプリケーションの開発を行った（図 4.24）。

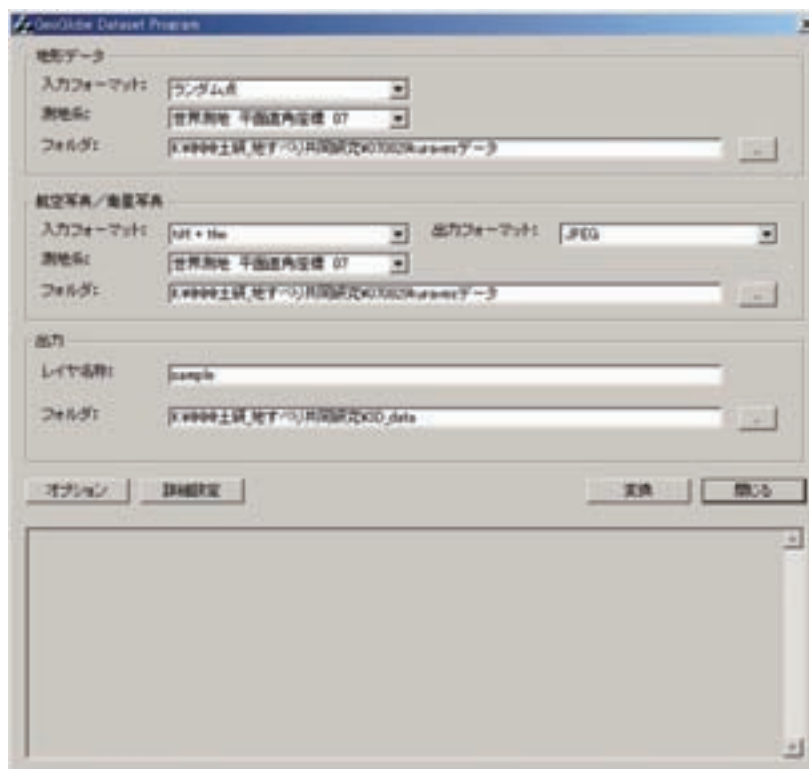


図 4.24 自動変換ツールのユーザーインターフェイス

③ 3次元CGによる表示

作成された3次元CGモデルをビューワーで表示をした。あらゆる角度からのビューイングを可能とする(図4.25)。

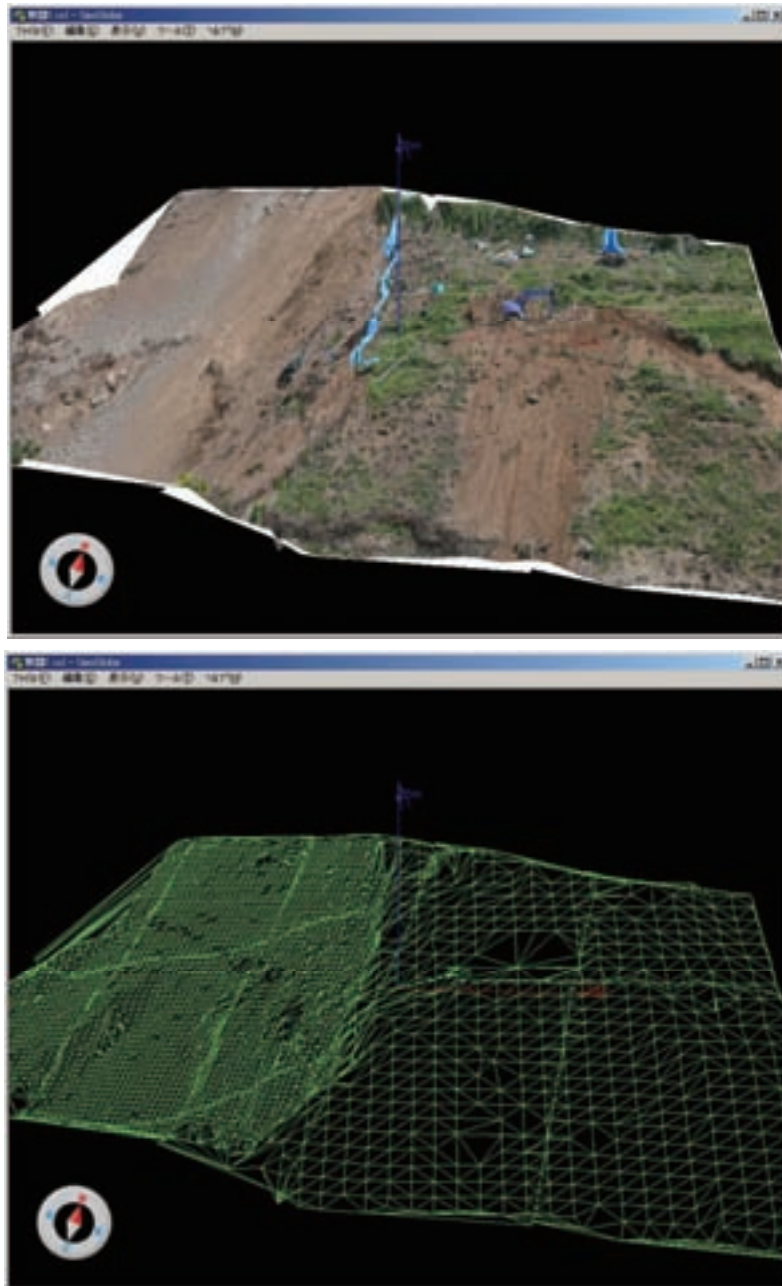


図 4.25 ビューワーによる3次元CGモデルの表示

(6) 3次元CGアニメーション作成検証

実際に Kuraves からエクスポートされたスライム解析データを用い、3次元CGの作成、検証を行った。

① Kuraves データからのデータ作成

Kuraves からエクスポートされた3次元データ(20秒間の20モデル)を使用し、時系列毎に3次元CGを作成、同一視点での画像を書き出したものを接合し、アニメーションの作成を行った(図4.26)。



図 4.26 アニメーションの作成

しかし、スライムの移動詳細の表現が不十分で、3次元アニメーションでの再現性が低かった。問題点として以下の要因が挙げられる。

- ・ Kuraves で解析したデータの点数が少なかった為、スロープとスライムの形状の再現性が低く、移動詳細の表現が不十分であった(1モデルあたりの平均標高点数 52.7点)(図4.27)。

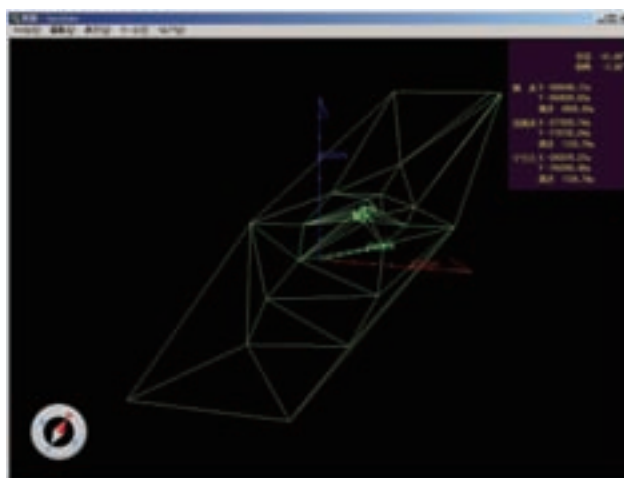


図 4.27 作成した3次元CG

- Kuraves とジオグローブでの TIN 作成のアルゴリズムが異なる為、表示結果が異なる場合が考えられる (Kuraves は物体を正面方向から見て TIN を作成するのに対し、ジオグローブは航空写真と同様に物体を上からみた状態で TIN を作成している) (図 4.28、図 4.29)。

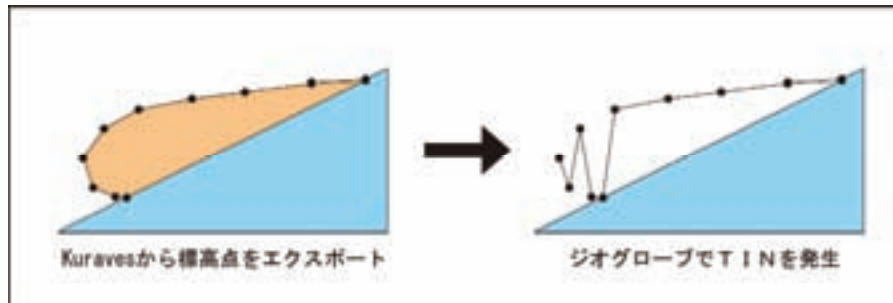


図 4.28 TIN 発生のイメージ



図 4.29 意図していない TIN 形状

- 地形データの着色が標高値での着色であったため、変化した箇所の把握が分かりづらかった。アプリケーション化での着色設定の検討が必要である。
- ② スロープデータとスライムデータとを分けてのデータ作成
- ① の結果を踏まえ、以下のとおりデータを作成した。
- Kuraves 解析にて標高点数を増やし(スライム 1 モデルあたりの平均標高点数 149.1 点)、さらにスロープとスライムとを別々に解析・作成されたデータを用いて 3 次元 CG を作成した。また、ビューワー上でスロープとスライムをレイヤー分けし、スライムをオレンジ、スロープを青にそれぞれ着色をした。
 - Kuraves データの XYZ を入れ替え、3 次元データを 90 度回転させることで、Kuraves で作成する TIN に近い形での 3 次元 CG の作成を行った (表 4.5、図 4.30~32)。

表 4.5 座標データの変換

元データ	変換後
X	X
Y	Z
Z	Y

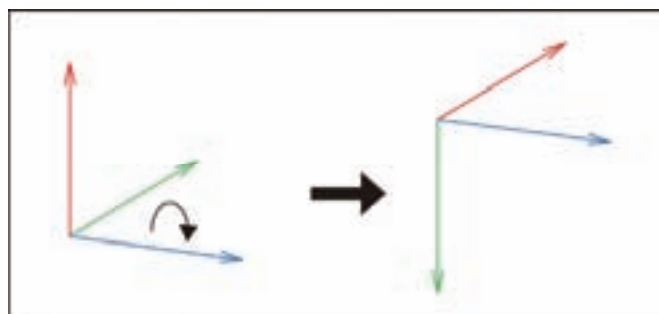


図 4.30 座標データを 90 度回転

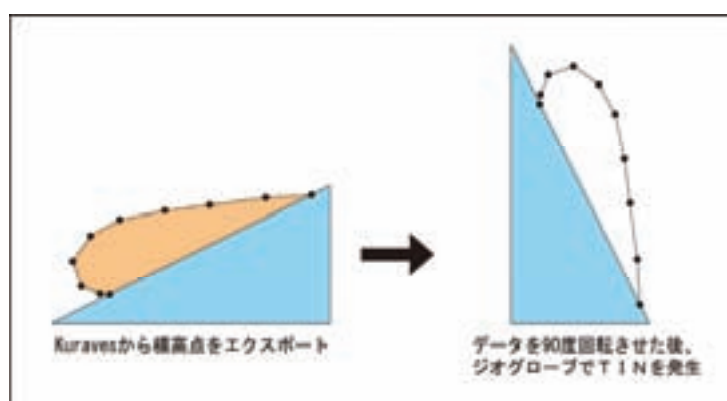


図 4.31 座標データを回転させて TIN を発生

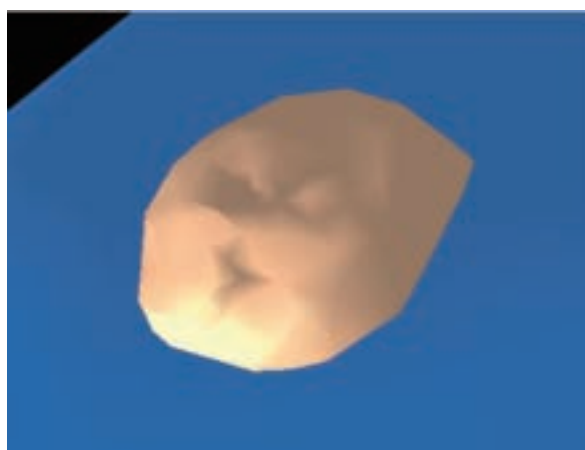


図 4.32 作成された 3 次元 CG データ

上記データをを用いて 3 次元 CG アニメーションを作成した。スライムの動きが再現され、移動体の把握がしやすいデータが作成された (図 4.33)。

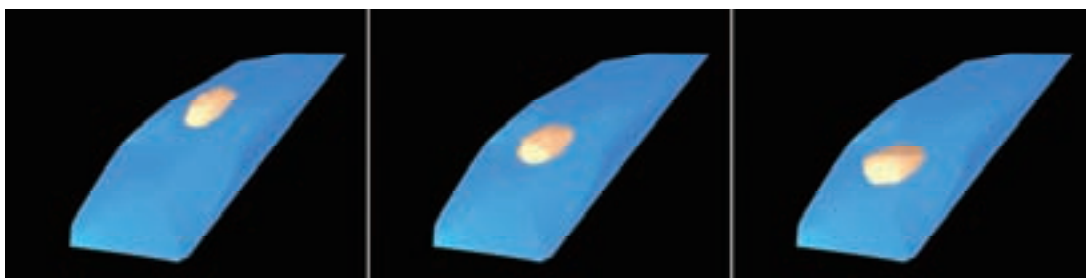


図 4.33 アニメーションの作成

また、ビデオ撮影されたスライムと比較、検証を行った結果、スライムの動きが再現されていることが確認された (図 4.34)。

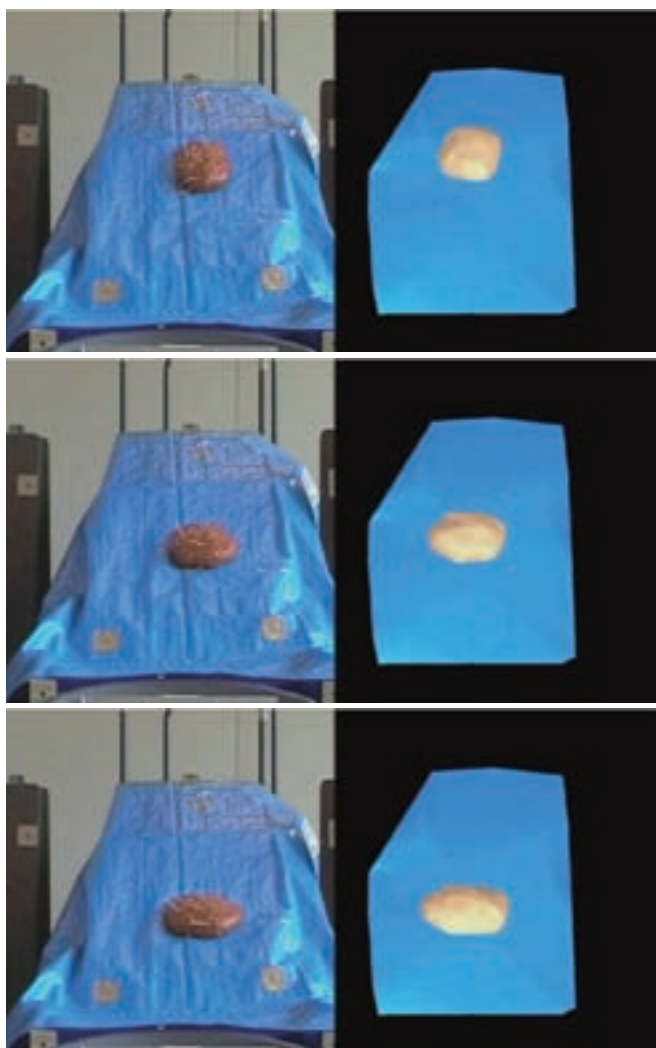


図 4.34 画像比較 (左: ビデオ、右: アニメーション)

③ テクスチャ処理の検討

オルソ画像を用いて、3次元CGにテクスチャ処理を行った。テクスチャ処理を行うことで、状況把握をより視覚的にすることを目的とする。

- ・ 1時系列の3次元CGモデルについてテクスチャ処理を行った。Kuravesにて解析された3次元データ及び左右のペア画像を用いて作成されたオルソ画像のテクスチャ登録を行い（図4.35）、処理は自動変換ツールを使用した。



図 4.35 使用したオルソ画像

- ・ スライムの3次元CGモデルに対してテクスチャ処理を行った（図4.36）

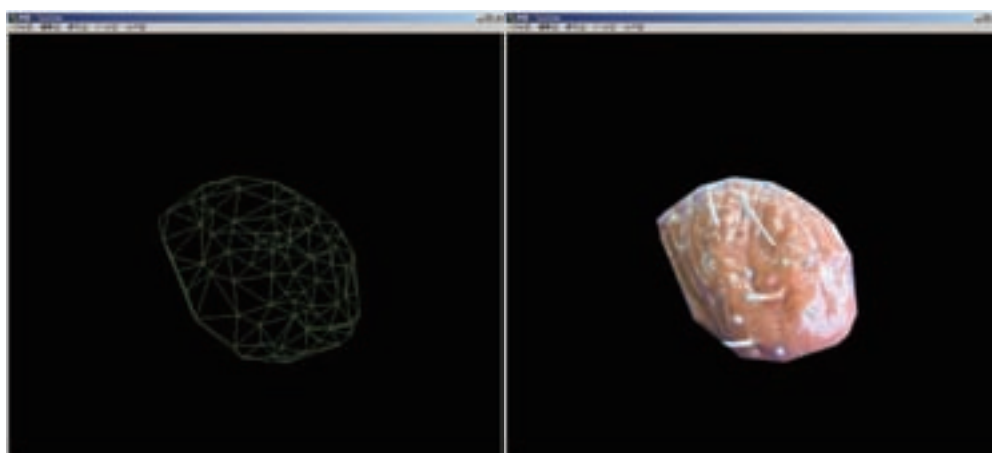


図 4.36 スライム3次元モデル（左）にテクスチャ処理（右）

- ・ スロープの3次元CGモデルに対してテクスチャ処理を行った。スロープにスライムの画像がテクスチャとして表示されているが、後でその上にスライム3次元CGモデルを重ねて表示するため、とくに問題はない(図4.37)。

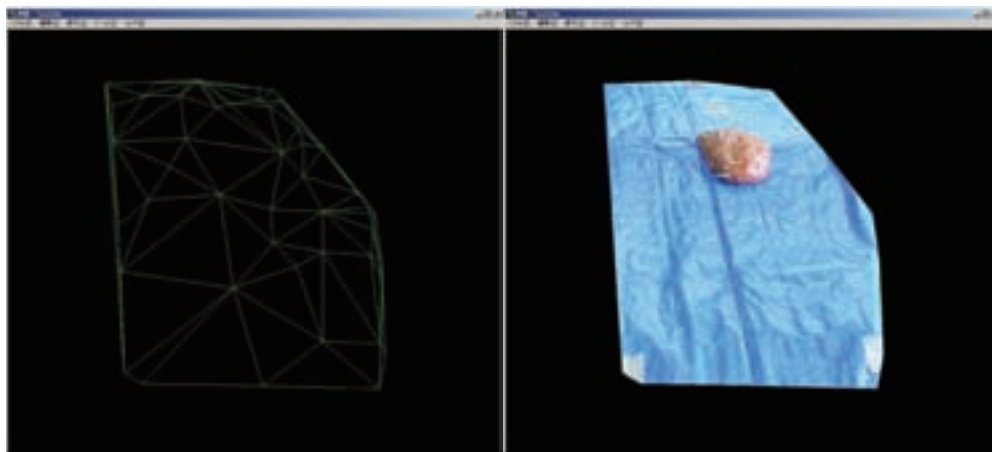


図 4.37 スロープ3次元モデル(左)にテクスチャ処理(右)

- ・ スライムとスロープの3次元CGモデルをレイヤー分けし重ねて表示を行った。テクスチャ処理を行うことで、よりリアルな表現が可能となった(図4.38)。

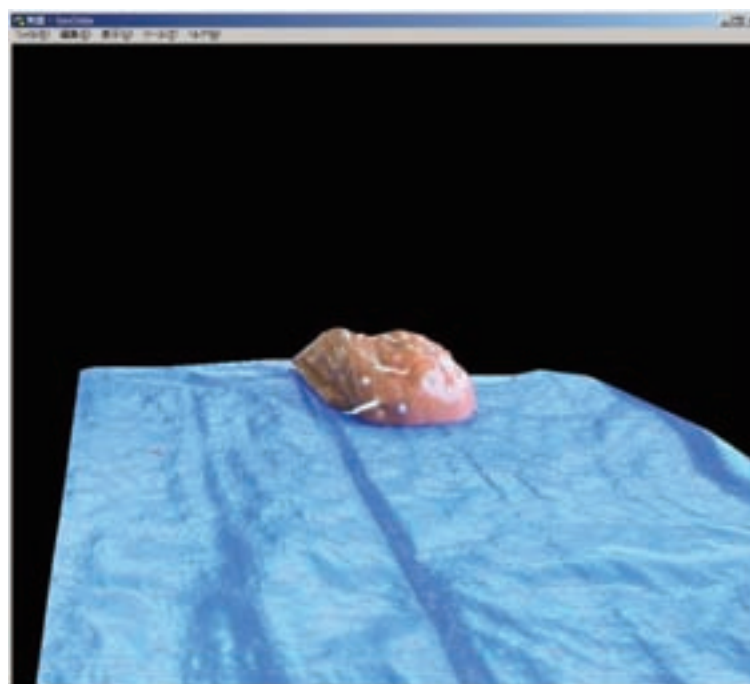


図 4.38 スライムとスロープの3次元CGモデルを重ねて表示

(7) 3次元CGアニメーション化アプリケーションの開発

Kuraves からエクスポートされた時系列データから、3次元CGモデルの一括自動作成及び3次元CGアニメーション化アプリケーション開発を行った。

- ① Kuraves からエクスポートされた時系列データを任意のフォルダに格納し、一括自動作成アプリケーションでそのフォルダを指定、実行することで、3次元CGモデルの作成を行う。その際、3次元CGアニメーション化アプリケーションのプロジェクトファイルが作成される仕様とする。また、作成された3次元CGモデルは時系列ごとにフォルダに格納され、任意の時系列データのみの閲覧も可能とする (図 4.39)。

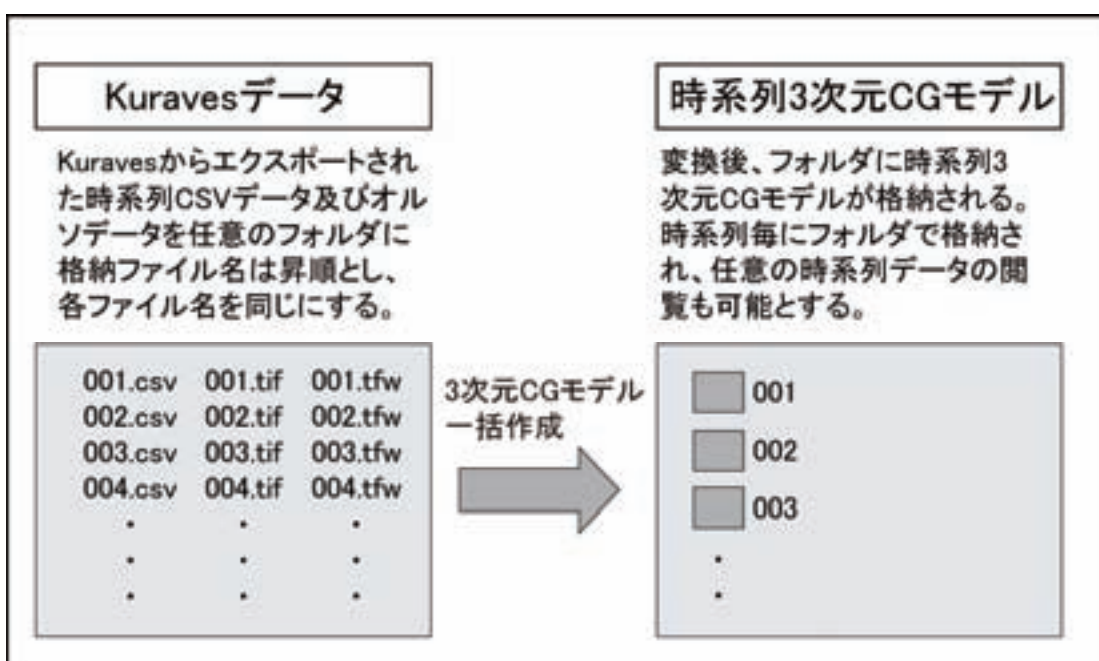


図 4.39 一括自動作成アプリケーションでのデータ作成フロー

- ② タイマー機能を持たせた3次元CGアニメーション化アプリケーションの開発を行った。1秒間隔での作成を前提としているため、デフォルトでは1フレーム/秒とするが、設定項目により任意のフレーム数を設定できる仕様とする。

4.4 取得画像による地すべり体の挙動解析

土砂災害防止対策を検討する際には、地すべりの発生、崩壊メカニズムを解明し、地すべり対策工の設計において、合理的な設計を目的とする地すべりの滑動形態をイメージして対策工の設計や配置計画を行うことが重要である。崩壊の発生から終了に至る一連の運動形態及び機構を把握することで、より高度な数値計算手法の開発や効率的な防止対策の検討が可能になると考えられる。しかしながら、崩落する地すべり体の挙動を実用的かつ定量的に把握する手法は確立されていないのが現状である。

崩落に向かう地すべり体は、その変位速度が大きいと、レーザスキャナ等の直接計測システムを用いて、時々刻々と変化する地すべり体の滑動形態を測定することは困難である。一方、近年のデジタルカメラ技術、デジタル写真測量技術及び画像解析技術の目覚ましい発展により、遠距離でも高速運動物体の詳細な観測及び精密解析が可能となってきた。デジタルカメラの連続観測画像を用いて地すべり体の滑動形態を捉えることができれば、地すべり現象に対するより一層の理解やすべり面形状の推定、及び警戒避難システムの構築が可能となり、さらには数値解析手法の高度化等に貢献するデータが得られる。

前節までに取得データの活用方法として、変形、移動する対象物に対する視覚化に関する検討およびシステム開発について述べたが、本節では、連続撮影された2次元画像を用いた解析手法、およびステレオ撮影された連続2次元画像による3次元解析手法を用いた地すべり体の挙動解析について述べる。

4.4.1 2次元動画による地すべり体の挙動解析

(1) 概要

崩落する地すべり体の挙動把握には、2次元の画像から解析する方法と3次元のモデリングから解析する手法がある。3次元モデリング解析手法は、地すべり体の滑動形態を異なる角度から同期撮影した画像を用い、デジタル写真測量技術によって画像マッチング及び3次元のモデリングを行い、時系列的に地すべり体の3次元モデルを求めて表現することができる。これに対して、2次元画像解析方法は、デジタルカメラやビデオで観測された地すべり体の動画を画像解析を行い、崩壊の発生から終了に至る一連の運動を面的に把握することを目的としている。2次元画像の取得は、撮影環境・条件の面で、比較的容易である。近年、地すべり滑動を画像として捉えたものとしては、奈良県五條市（旧大塔村）宇井地区で平成16年8月10日に発生した地すべりや、岐阜県揖斐川町東横山地区で平成18年5月12日から13日にかけて発生した地すべりがある。この画像を解析することによって、地すべりが発生するまでの過程や運動特性を明らかにすることは、今後の地すべり対策や危機管理の上で重要である¹⁾。

2次元動画の解析には、画像間の差分に基づく方法と速度ベクトルの検出手法がある。画像間の差分に基づく方法は、現画像と背景画像、若しくは連続フレーム間の2枚の画像の画素間の階調値の差を求める。この手法は、画像中の移動物体及び変化範囲の抽出に大変有効であり、地すべり

範囲、時刻毎の地すべり体の動き等の情報を簡単に得ることができる。これに対して、速度ベクトルの検出手法は、隣接するフレーム間の対応点を濃度相関で決定し、フレーム中の各画素の速度ベクトルを求める。移動物体の各部分が実際どのような方向に、どのような速度で動いているかを求めることができるため、崩落する地すべり体の各部分の移動速度、移動方向等の詳細情報を得ることができる。速度ベクトル検出の代表的な手法としては、2次元流れ解析手法 PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) がある。PIV 手法は、画像解析によって流体の流れを見る方法であり、河川等の分野では、デジタル画像を用いた PIV 流速計測技術が既に実用化段階に入っている。また、時系列の衛星画像中に検出される黄砂の流れを PIV 手法で計測することで移流の実態をより定量的に解析する試みや、PIV 手法の崩壊現場への適用に関する研究もあった^{2) 3)}。

本研究では、地すべりの経時変化を面的に把握することを目的として、実際の崩壊現象のビデオ撮影事例である岐阜県揖斐川町東横山地区及び奈良県五條市(旧大塔村)宇井地区で発生した地すべりの画像を利用して、2次元流れ解析手法 PIV を用いて画像解析を行う。これにより崩壊発生から終了までの一連の運動方向、速度分布等を定量的に計測して、地すべり体が崩壊する際の現象や、崩落状況を分析し、その面的な挙動の定量的な把握の可能性を検討する。また、PIV 手法を解析手法として地すべり解析に適用する条件及び今後の改善すべき課題を整理する。

(2) PIV 手法の原理

PIV 手法は、ビデオカメラ等で撮影した動画像を一定の時間間隔で静止画像として分解した後に、画像内に見られる小さな粒子または輝度の分布パターンが一定時間内に移動する状況を追跡し、対象領域内における速度ベクトルを同時に多点で面的に計測する手法である。PIV 法のアルゴリズムは、パターンマッチングを採用し、テンプレート領域の輝度差累積値(各画素の輝度差の絶対値の総和)が最小となる位置を探索して速度ベクトルを計測する(図 4.40)。画像による速度算出の具体的な方法には、以下に述べる輝度差累積値による画像の追跡手法及び逐次棄却法による画像追跡の高速化手法を用いる^{5) 6)}。

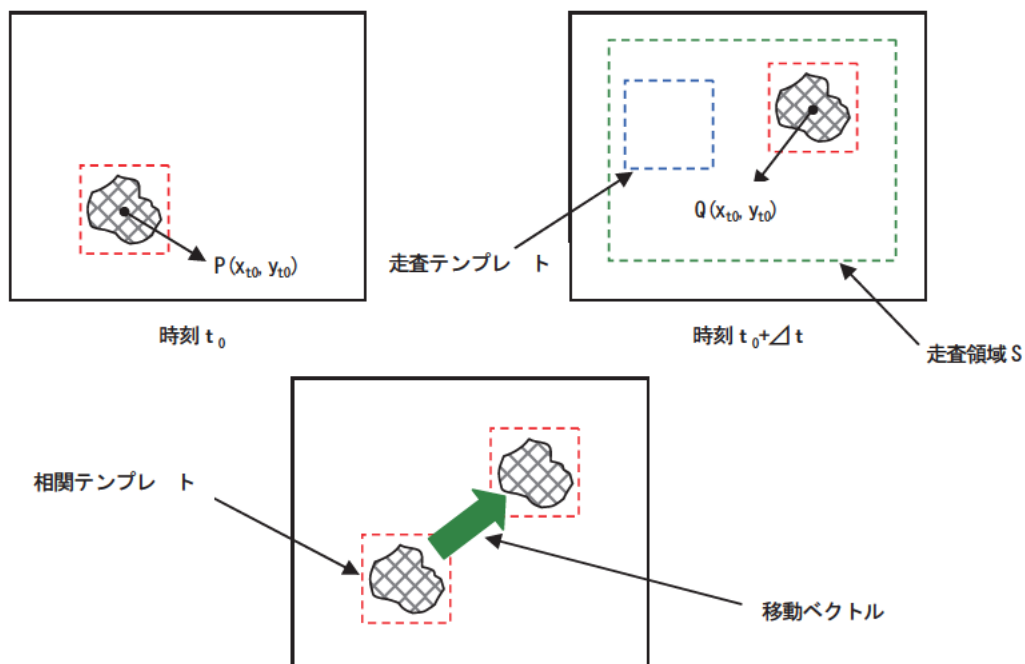


図 4.40 PIV 手法の原理

①輝度差累積値による画像の追跡

時刻 $t=t_0$ の画像上に、点 $P(x_{t_0}, y_{t_0})$ を中心とする $n \times n$ 画素の小領域 P を設定する。この小領域 P を相関テンプレートと呼ぶ。この相関テンプレートに類似した小領域 Q (点 $Q(x_{t_0+\Delta t}, y_{t_0+\Delta t})$ を中心とする $n \times n$ の小領域) を、時刻 $t=t_0+\Delta t$ の画像上で求める。

時刻 $t=t_0+\Delta t$ の画像上に走査領域 S ($m \times m$ 画素、ただし $m > n$) を設定し、走査領域 S の内部に、相関テンプレートと同じ大きさの小領域 R (点 $R(x, y)$ を中心とする $n \times n$ の小領域) を設定する。この小領域 R を走査テンプレートと呼ぶ。走査テンプレートを、走査領域 S の内部で 1 画素ずつ移動させながら、相関テンプレートとの輝度差累積値を算出していく。輝度差累積値は、以下のような方法で算出する。

相関テンプレート内の輝度成分を $p_{i,j}$ 、走査テンプレート内の輝度成分を $r_{i,j}$ として、両テンプレート上の対応画素成分の輝度差の絶対値を式 (1) と表すと、

$$d_{i,j} = |p_{i,j} - r_{i,j}| \quad (1)$$

両テンプレート間の輝度差累積値 D_{pr} は、以下の式で求めることができる。

$$D_{pr}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{i,j} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |p_{i,j} - r_{i,j}| \quad (2)$$

式 (2) を用いて、走査領域 S 内のすべての輝度差累積値を求め、最小値を取る小領域 R を、求める小領域 Q として採用する。

②逐次棄却法による画像追跡の高速化

式 (2) の輝度差累積値の計算を、画像の 1 行毎に行う。 K 行目までの輝度差累積値の部分 and を D_k とすると、式 (3) となる。

$$D_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n d_{i,j} = D_{k-1} + \sum_{i=1}^n |p_{i,k} - r_{i,k}| \quad (3)$$

走査領域 S 内のすべての走査テンプレートに関して D_k を求め、その最小値 $D_{k, \min}$ にパラメータ α_k を与え、式 (4) を満たす走査テンプレートには、小領域 P との類似性がないと判断して、以降の輝度差累積値の計算を打ち切る。

$$D_k > \alpha_k D_{k, \min} \quad (4)$$

計算途中では、1 つの走査テンプレートを残して、他のすべての走査テンプレートの計算が打ち切られれば、その走査テンプレートを小領域 P と類似する小領域 Q として採用する。

計算が終了した時点で、複数の走査テンプレートが残っていた場合は、その中で輝度差累積値が最小のものを小領域 Q として採用する。

また、計算途中ですべての走査テンプレートの計算が打ち切られた場合には、小領域 Q の検索に失敗したこととする。

PIV 手法では、最初にテンプレートを対象領域内部に設定する。次に、テンプレート内部の輝度パターンを基準に、次の時刻の画像内において最も類似する輝度パターンを探索し、探索した輝度パターンを含むテンプレートの位置と前の時刻のテンプレートの位置とのずれの量を速度ベクトルとする。テンプレートの移動量を L (画素)、次の画像の時刻を $t_0 + \Delta t$ (秒) とすると、速度 v (画素/秒) は $v = L / \Delta t$ と表すことができる。

年5月12日12時～13日10時の間の地すべり画像について、断続的に発生した崩壊から以下に示す比較的規模の大きい崩壊を抽出し、画像解析を行った。

(ア) 5月12日20時02分頃に発生した崩壊(図4.42)【1回目の崩壊】

崩壊前に小規模な落石が続き、5月12日20時02分頃に崩壊規模約1,000 m³の崩壊が発生した。崩壊範囲は図4.42の赤丸で示した範囲である。



図4.42 5月12日20時02分ごろに発生した崩壊

(イ) 5月12日22時40分頃に発生した崩壊 (図4.43) 【2回目の崩壊】

崩壊前に崩壊斜面周辺で落石・小崩壊が頻発するようになり、5月12日22時40分頃に規模約10,000 m³の大規模崩壊が発生した。崩壊範囲は図4.43の赤丸で示した範囲である。



図4.43 5月12日22時40分ごろに発生した崩壊

(ウ) 5月13日7時59分頃に発生した崩壊 (図 4.44) 【3回目の崩壊】

7時40分頃から斜面中段～下段で落石・小崩壊が発生し始め、7時59分頃に崩壊規模約40,000 m³の崩壊が発生した。崩壊範囲は図 4.44 の樹木のない斜面である。



図 4.44 5月13日7時59分ごろに発生した崩壊

②解析手法

(a) 解析の流れ

本研究では、ビデオテープに記録された崩壊映像を、ビデオキャプチャソフトを用いて毎秒30枚の静止画像としてコンピュータに取り込み、PIV解析ソフトウェアで解析を行った。図 4.45 に、本研究における解析の流れを示す。

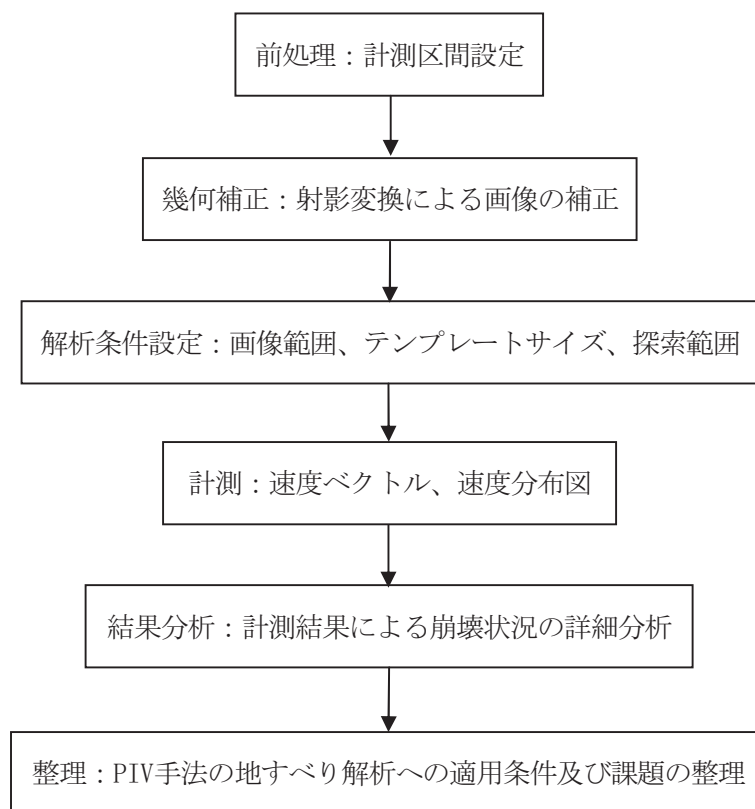


図 4.45 解析の流れ説明

東横山地すべりのビデオ画像に対して行った PIV 手法による計測手順は、主に①画像計測区間の設定を行う前処理過程、②画像の射影変換を行う幾何補正過程、③PIV の各種計測条件設定を行う解析条件設定過程、④速度ベクトル計測及び速度分布図の生成を行う計測過程の四段階に大きく分けられる。各過程の概要を以下に述べる。

(ア) 前処理

ビデオテープに記録された映像をコンピュータへ取り込んだ後、その中から解析対象とする崩壊の計測対象区間を選定して、PIV 解析ソフトウェアで処理可能な動画画像形式に変換し、解析の準備を行った。

(イ) 幾何補正

本研究で使用したビデオ画像は、計測対象に向かって左斜め前方から撮影されたものである。このような場合は、正確な速度計測を行うために、計測対象に正対するように射影変換によって幾何補正を行う必要がある。通常は、崩壊前または崩壊後の現地計測で特徴的な構造物や場所等、画像上で識別可能な位置を GCP (Ground Control Point) として複数箇所選定し、その位置を計測する。今回は、GCP が入手できなかったため、画像の幾何補正を実施せずに解析を行った。なお、ビデオ画像と地形図との対応付けを行い、射影変換によって幾何補正を行う方法も考えられるが、今回の地す

べり箇所の周辺は殆ど樹木に覆われており、この方法で GCP を取得することも容易ではない。

(ウ) 解析条件設定

本研究では、異なる時間帯に発生した規模の異なる 3 回の崩壊に対して適切な計測を行うために、下記のように設定値を検討して計測条件の設定を行った。

- ・ 計測領域

画像計測領域は、基本的には、崩壊の範囲を対象とする長方形に設定する。本研究では、3 回の崩壊の範囲がそれぞれ異なるため、崩壊の範囲に従って計測領域をそれぞれ 234×222、436×366、308×332 画素に設定した。また、計測領域内の速度ベクトルを計測するためのポイント数の設定は、基本的に計測対象(植生、土砂等)、計測環境(距離、照明等)を考慮して、横縦をほぼ同じ間隔に設定する。本研究では、3 回の崩壊に対して、それぞれ 10×10、20×15、20×20 ポイントに設定した。

- ・ テンプレートサイズ

PIV 計測のテンプレートサイズは、速度ベクトルを算出するための計測点の移動先を見つけるために行うパターンマッチング 1 回分の領域サイズである。テンプレート内部の輝度パターンの移動を追跡するため、対象とする輝度パターンの大きさを把握した上で、輝度パターン全体が確実にテンプレートの範囲に含まれるようテンプレートの大きさを設定する必要がある³⁾。また、テンプレートサイズを大きくすると、パターンマッチングの精度は高くなるが、処理速度が低下する。本研究では、計測対象および計測環境を考慮して、テンプレート内に輝度パターンが確実に入るよう 16×16 画素の初期値から大きさを変えながら試行錯誤した。その結果に基づき、3 回の崩壊に対するテンプレートサイズを、それぞれ 16×16、32×32、16×16 画素に設定した。

- ・ 探索範囲

探索範囲の設定は、設定した広さの領域の内部でテンプレートを移動させて、計測点の移動先を見つけることを目的とする。探索範囲のサイズが、狭すぎても広すぎても、正しい移動先の検出に失敗する可能性は高くなる。大きすぎる場合は、無関係な場所に出現する類似パターンを移動先として誤判定する可能性が高まる。逆に小さすぎると、移動先が探索範囲外に出てしまい、計測が不可能となる。従って、移動体の移動量に合わせて探索範囲のサイズを設定する必要がある。本研究では、既存研究により推定された崩壊の速度を考慮して、探索範囲をテンプレートサイズの 2 倍程度の大きさとし、3 回の崩壊に対して、探索範囲のサイズをそれぞれ 32×32、64×64、32×32 画素に設定した。なお、探索範囲の画素数をより細かく設定するためには、前提条件として、崩落の速度を予め把握する必

要がある。崩落速度からフレーム間の移動量を計算し、画像上の画素数に換算できる。地すべり体の崩落形態及び速度は様々であるため、今後解析事例の蓄積が必要である。

- ・ スケール

スケールの設定は、計測した速度ベクトルを実測値に換算するための設定である。基本的には、識別可能で特徴的な構造物を画像上で選定し、実寸を入力して行う。スケールの設定により、1画素あたりの実距離を算出でき、より正確な速度を計測することが可能となる。本研究では、3回の崩壊画像から、特徴的な構造物として法枠工、車両を選定し、スケールの設定を行った。

- ・ フレームレート

フレームレートは、計測コマの時間間隔を表す指標である。PIV手法を用いて移動体の速度を計測する際には、輝度パターンの連続性を確保することが必要である。輝度パターンの移動量に比べて計測間隔が長すぎると、移動体の追跡ができなくなり、速度計測は困難となる。本研究では、毎秒30枚のビデオ画像をそのまま利用して速度計測を行ったが、デジタルカメラで撮影した画像を利用する場合は、輝度パターンの連続性を確保するために、適切なフレームレートを検討する必要がある。

(エ) 計測

PIV手法の解析条件を設定した後、崩壊の画像計測領域に対し、速度、速度方向の計測を行い、速度分布図を生成する。また、各計測点の速度値、速度方向値は画像毎にテキストファイルへ出力、保存される。




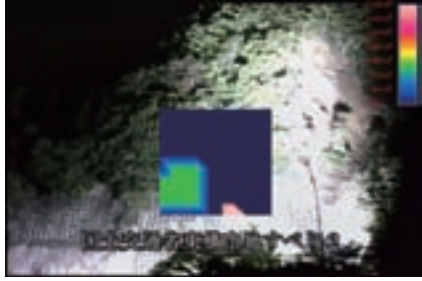

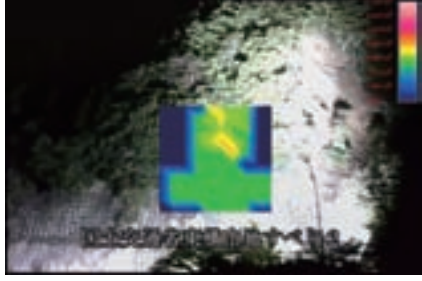

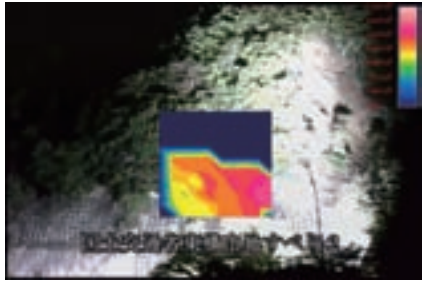

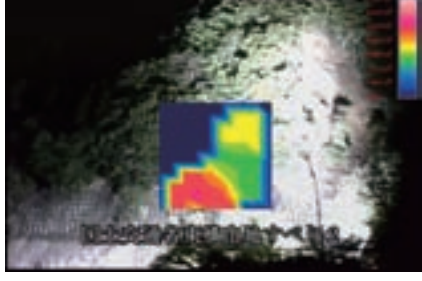
③崩壊の動画画像解析結果

(a) 1回目の崩壊の計測結果

1回目の崩壊は、比較的規模の小さい崩壊であり、撮影画面のやや下部の法枠工の一部が崩壊した。夜間に撮影された画像にも関わらず、照明が崩壊場所をよく照らしていたため、崩壊の過程が良く判読できる。ただし、通常の昼間に撮影された画像に比べて、画質の劣化は明確である。本研究では、この崩壊開始から終了までの約13秒間に記録された400コマの画像を計測対象とした。目視で判読した崩壊範囲より234×222画素の領域を画像計測範囲として設定した。この計測範囲の中に、崩壊斜面の上下方向、横断方向についてそれぞれ10×10測線を設定し、測線の交点に計測点をそれぞれ配置して、全計測点速度分布を計測した。また、計測した崩壊の速度は、スケール設定により、実速度に変換した。なお、計測時のテンプレートサイズは16×16画素、探索範囲は32×32画素である。

表 4.6 1 回目の崩壊の計測結果

(1/2)

ステージ	速度ベクトル図	速度分布図
崩壊発生		
1.57 秒経過		
4.9 秒経過		
6.9 秒経過 加速落下		
7.8 秒経過		


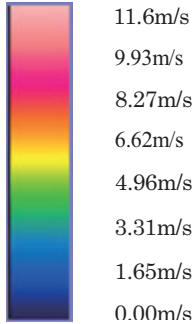
12 秒経過 崩壊終息		
凡例		

表 4.6 に、計測結果である速度ベクトル及び速度分布図の面的変化を、上から経過時刻順に示す。左側の図には速度ベクトルを表示する。図中の三角矢印の向きは計測点における移動ベクトルの方向を、その色は相対的な速度（凡例に示す通り、青から赤に向かって速度が大きくなる）をそれぞれ示す。右側の図は、等速度線で色分けした速度分布図である。

画像計測の結果から、崩壊の経過及び形態について、以下の点が判読できた。

- 崩壊の最初に、計測対象領域の左下側の縁辺部、法枠工のすぐ上の部分を発生源として、表層の土砂が落ち始めた。崩壊から 1.57 秒経過時の速度ベクトル及び速度分布図を表 4.6 に示す。
- 崩壊から約 2.9 秒後、計測対象領域上部の樹木の動きが見え始め、その後すぐ、その下の法枠工斜面が崩れ始め、全体崩壊となった。表 4.6 に示されているように、崩壊は最初比較的低速であり、崩壊から 4.9 秒経過時の崩壊斜面の速度はほぼ一様に 3.7m/秒である。速度分布図の上部の比較的速い速度の分布は、樹木の落下によるものである。
- その後、崩壊斜面が高速で落下し始める。崩壊から 6.9 秒経過時の速度は 6~9m/秒である。その直後、計測対象領域の上部、崩壊斜面頭部の縁辺部で、土塊や樹木の落下が発生した。崩壊から 7.8 秒経過時の速度ベクトル及び速度分布図を表 4.6 に示す。
- 崩壊の開始から約 12 秒後、崩壊は終息した。

今回の崩壊は比較的小規模で局部的なものであった。特徴は、崩壊初期の変状では、主に崩壊斜面の縁辺部で落石や崩壊が発生し、その後、斜面が崩れ始め、全体崩壊となった点である。また、夜間に撮影されたこれらの画像からは、画質劣化の影響があるにも関わらず、


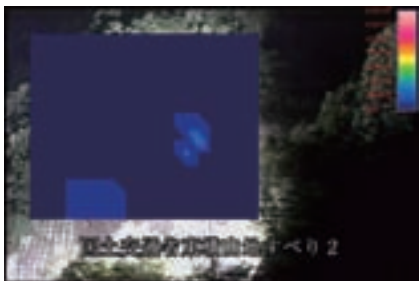




速度計測をほぼ実施できた。











(b) 2 回目の崩壊の計測結果

2 回目の崩壊は、比較的規模の大きい崩壊であり、撮影画像に写る崩壊斜面の全体が崩壊した。1 回目の崩壊と同様、5 月 12 日の夜間に撮影された画像であり、照明が崩壊場所をよく照らしていたため、崩壊の過程が判読できる。しかし、斜面全体が崩壊する際、ビデオカメラの撮影倍率が人為的に変更され、加えて土埃による画質劣化を伴っていたため、崩壊終了までの解析には至っていない。本研究では、この崩壊開始から約 73 秒間に記録された 2193 コマの画像を計測対象とした。目視で判読した崩壊範囲より 436×366 画素の領域を画像計測範囲として設定した。この計測範囲の中に、崩壊斜面の上下方向、横断方向に対してそれぞれ 20×15 測線を設定し、測線の交点に計測点をそれぞれ配置して、全計測点速度分布を計測した。また、計測した崩壊の速度は、スケール設定により、実速度に変換した。なお、計測時のテンプレートサイズは 32×32 画素、探索範囲は 64×64 画素である。

表 4.7 2 回目の崩壊の計測結果

(1/3)

ステージ	速度ベクトル図	速度分布図
崩壊直前 66.67 秒		
崩壊前 64.4 秒		
崩壊前 41.17 秒		

崩壊前 37.1 秒	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>
崩壊前 17.17 秒	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>
崩壊前 7.93 秒	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>
崩壊前 5.6 秒	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>
崩壊から 4.5 秒	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>	 <p>富士宮町町道崩壊 4<0.2</p>


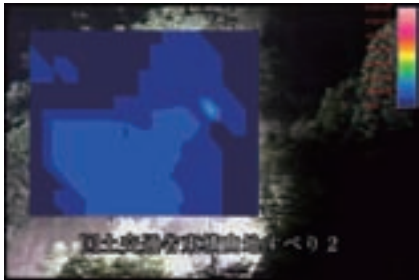

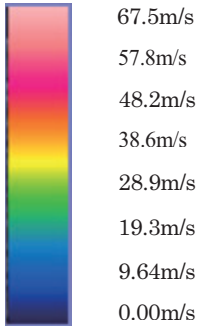
崩壊から 5.07 秒		
撮影倍率 変更後の画像		
凡例		

表 4.7 に、2 回目の崩壊の計測結果である速度ベクトル及び速度分布図の面的変化を上から経過時刻順に示す。表 4.6 と同様に、左側の図は速度ベクトル、右側の図は等速度線で色分けした速度分布図をそれぞれ示す。

画像計測の結果から、崩壊の経過及び形態について、以下の点が判読できた。

- 崩壊発生前、最初に、画像左側にある前回崩壊場所の縁辺部で、落石が発生し始めた。表 4.7 に、崩壊前 66.67 秒の速度ベクトル及び速度分布図を示す。
- 崩壊前 65.87 秒、画像左側にある前回崩壊場所の上部の樹木の動きが見え始め、小崩壊が発生した。表 4.7 に、崩壊前 64.4 秒の速度ベクトル及び速度分布図を示す。
- その後、落石はあるものの、しばらく沈静化し、崩壊前約 48.2 秒、斜面の右上部にある以前の崩壊場所の縁辺部から落石が発生し始め、しばらく続いた。それと同時に、崩壊前約 41.67 秒、画像左側にある前回崩壊場所の上部の縁辺部で、落石が発生し、崩壊前約 40.17 秒、小規模局部崩壊へと発展した。その後、局部崩壊は前回崩壊場所の周辺に拡大し、法枠工を含める左側下部の斜面が崩れた。表 4.7 に、崩壊前 37.1 秒の速度ベクトル及び速度分布図を示す。

- 引き続き、上記画像左側及び右側の崩壊場所の縁辺部数箇所において落石が発生し、崩壊前約 20.33 秒、右側にある以前の崩壊場所の上部が動き始め、小崩壊となった。表 4.7 に、崩壊前 17.17 秒の速度ベクトル及び速度分布図を示す。
- 更に、上記画像左側及び右側の崩壊場所の縁辺部周辺で小規模崩壊が連続発生し、崩壊範囲は次々と拡大した。表 4.7 に、崩壊前 7.93 秒の右側上部と左側下部の崩壊、また、崩壊前 5.6 秒の右側上部と斜面下部の崩壊拡大の様子を示す。
- 斜面全体崩壊の発生は、まず斜面の中心が動き始め、最初は非常にゆっくりとした速度で中心から周辺に発散する形で拡大し、やがて斜面全体が動き始めた。表 4.7 では、崩壊から 4.5 秒経過時の斜面全体の動きが分かる。斜面全体は約 2~3m/秒の比較的低速で動くことに対し、斜面の中心及び下側は約 5~6m/秒のやや速い速度で動いていたことが分かった。
- 表 4.7 に、崩壊から 5.07 秒経過時の崩壊の様子を示す。斜面の崩壊は加速し、斜面の上部は前回崩壊場所の右下方向へ動き、斜面の中部は前回崩壊場所左下へ動いていることが分かった。また、斜面の上部と比べて、斜面の中下部は 7~8m/秒とやや速い速度で落下していることが分かった。その後、ビデオカメラの撮影倍率の変更があり、崩壊の解析を続けることが困難となった。


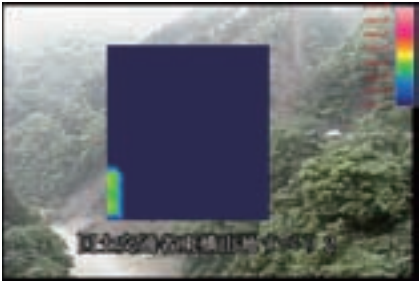



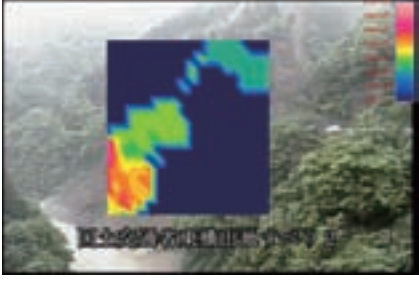



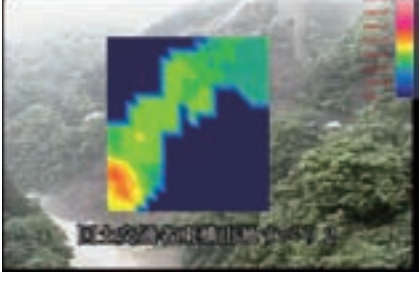
今回の崩壊は、比較的規模の大きいものであった。崩壊初期の変状として、主に前回崩壊場所周辺の縁辺部、斜面の右上、左下側で落石・小規模局部崩壊が交互に発生した。地すべり滑動の応力が下方の土塊に伝達されて、崩壊範囲が次々と拡大し、遂には斜面全体が崩れ始め、全体崩壊となった。また、崩壊前半の画像は、画質劣化の影響があるにも関わらず、速度計測をほぼ実施できた。ただし、斜面全体が崩壊する際に撮影倍率の変更があったため、崩壊後半の地すべり体の全体の滑動形態を最後まで捉えられなかった。

(c) 3 回目の崩壊の計測結果

3 回目の崩壊は、東横山地すべりの一連の崩壊の中で、最も大規模な崩壊である。今回の崩壊によって斜面全体が崩壊し、最終的な地すべり地形形状を形成した。また、1 回目と 2 回目の崩壊が夜間に発生したのに対して、今回の崩壊は 5 月 13 日の朝に発生したため、崩壊の過程が撮影された画像から良く判読できる。本研究では、ビデオで撮影された崩壊直前から崩壊終了まで約 45 秒間に記録された 1350 コマの画像を計測対象とした。画像計測範囲として目視で判読した崩壊範囲を 308×332 画素の領域を設定した。この計測範囲の中に、崩壊斜面の上下方向、横断方向に対してそれぞれ 20×20 測線を設定し、測線の交点に計測点をそれぞれ配置して、全計測点速度分布を計測した。また、計測した崩壊の速度は、スケール設定により実速度に変換した。なお、計測時のテンプレートサイズは 16×16 画素、探索範囲は 32×32 画素である。

表 4.8 5月13日7時59分頃に発生した崩壊の計測結果

(1/2)

ステージ	速度ベクトル図	速度分布図
崩壊前 6.17 秒		
崩壊から 1.83 秒		
崩壊から 7.33 秒		
崩壊から 7.83 秒		
崩壊から 8.83 秒		


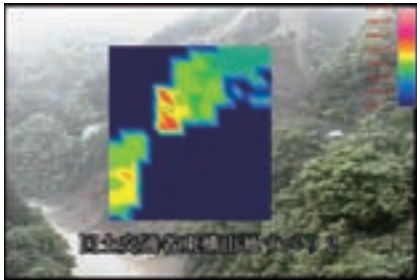

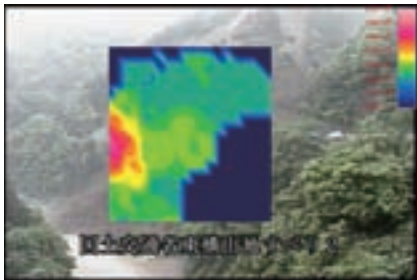

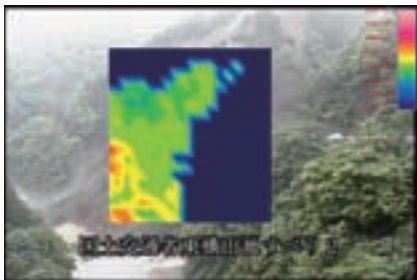


崩壊から 9.4 秒		
崩壊から 13.83 秒		
崩壊から 17.83 秒		
崩壊から 28.33 秒		
凡例	 <p>9.32m/s 7.99m/s 6.66m/s 5.33m/s 3.99m/s 2.66m/s 1.33m/s 0.00m/s</p>	

表 4.8 に、3 回目の崩壊の計測結果である速度ベクトル及び速度分布図の面的変化を上から経過時刻順に示す。表 4.6 及び表 4.7 と同様に、左側の図には速度ベクトル、右側には等速度線で色分けした速度分布図をそれぞれ示す。

画像計測の結果から、崩壊の経過及び形態について、以下の点が判読できた。

- 崩壊発生前、斜面左下側の前回崩壊場所で、落石が発生し始めた。その様子を表 4.8 の崩壊前 6.17 秒の速度ベクトル及び速度分布図に示す。その後、斜面右上側からも落石が発生した。
- 斜面崩壊の直前に、斜面全体に渡って落石が発生し、地すべり頭部が非常にゆっくり動き始めたことが画像判読から分かった。崩壊の最初は、斜面左中部の、前回の崩壊で形成された滑落崖から始まった。表 4.8 には崩壊から 1.83 秒の様子を示す。
- 斜面左中部の崩壊進行とともに地すべり本体の動きがやや加速したように見えたが、実際は約 2.7m/秒の低速で動いていたことが計測結果から分かった。これに対して、斜面左中部の崩壊は約 5~6m/秒のやや速い速度で動いていることが分かった。表 4.8 に、崩壊から 7.33 秒の地すべり頭部の動き及び斜面左中部の崩壊の様子を示す。
- その後、地すべり本体は依然としてゆっくり動き、斜面頭部から中腹部にかけて表層部崩壊が進行・拡大し、複数の段差を伴った地形の盛り上がりを確認できた¹⁾。表 4.8 に、崩壊から 7.83 秒及び 8.83 秒の斜面頭部から中腹部の崩壊の様子を示す。
- 地すべり体の頭部から中腹部にかけて表層部崩壊がさらに進行し、崩土が破碎され、落下した。表 4.8 の崩壊から約 9.4 秒の画像では、土砂移動範囲の中央付近に速度約 4~6m/秒以上の比較的速い速度領域が出現する。この部分は、崩壊の頭部から崩落している土塊であることが判読から分かった。
- その後、地すべり体全体が崩れ、土砂の移動範囲は広がり、崩壊土砂の落下も更に加速し、斜面下方を覆うようになった。斜面の中下部に比べて、上部は依然低速で移動していることを崩壊から 13.83 秒の画像より判読した。
- 引き続き、斜面頭部の移動速度がやや加速し、土砂の移動範囲が下方へ移行していることを、崩壊から 17.83 秒の画像より判読した。
- 崩壊から約 28.33 秒後、終息となった。その後、落石・小崩壊はあるものの、地形を大きく変える崩壊は発生せず、ほぼ現在の地形形状となった。

今回の崩壊は、東横山地すべりの一連の崩壊の中で、最も大規模なものである。その特徴は、地すべり初期の変状として、主に地すべりの縁辺部で落石や崩壊が発生している点である。これは、前回崩壊場所の滑落崖の下方に落ち残っていた土塊に亀裂が形成され、そこから崩壊が発生したことによる。その後、崩壊は地すべり頭部から動き始め、地すべり本体は非常にゆっくり滑動したことが計測結果から分かった。また、崩壊の進行とともに、地すべり斜面頭部から中腹部にかけて表層部崩壊が進行・拡大し、複数の段差を伴う地形の盛り上がりを確認できた。その後、時間の経過とともに、地すべり体全体が崩れ、土砂の移動範囲

は広がり、崩壊土砂の落下も加速し、斜面下方を覆うようになった。今回の崩壊画像は5月13日の朝に撮影されたものであり、地すべり本体の動き及び崩壊の詳細過程を良く判読・計測できた。また、撮影の際、崩壊発生から終了までの撮影倍率が保持されたため、地すべり体の滑動形態を最後まで捉えることができた。

④考察

以上のように、東横山地区で断続的に発生した一連の崩壊の中でも比較的規模の大きい3回の崩壊に対して解析を行うことにより、以下のことを把握できた。

崩壊は最初に小規模かつ局部的に発生する。その発生源として、地すべりの応力の影響が現れ易い、比較的脆弱な場所と考えられる地すべり縁辺部で、崩壊が発生する。1回目の崩壊は、地すべり末端の道路上側法砕工の周辺部分で発生したことが分かる。

崩壊の進行の特徴としては、崩壊部分から落石や小崩壊が頻発し、崩壊部分が次々と拡大していき、大きな崩壊を引き起こすことが考えられる。2回目の崩壊の前に、前回崩壊した位置周辺の落石や小崩壊により崩壊範囲が拡大していることが分かる。

大きな崩壊が発生する前の変状として、時間の経過とともに落石や小崩壊の発生頻度が増し、発生場所は転移していくことがわかる。3回目の崩壊の前には、地すべり斜面の数箇所から落石が発生していることがわかる。

崩壊は、地すべり頭部から発生し、地すべり本体の滑動に伴って、表層部の破壊が進行し、土塊が破砕され、崩積土化して斜面下方全体を覆うようになる。3回目の崩壊では、地すべり本体の滑動とともに地すべり表層部で崩壊が発生していることがわかる。

また、地すべりの滑動に伴う応力が、下方へ伝達されていくことにより、地すべり面が下方に拡大されていく。2回目及び3回目の崩壊では、応力の伝達によって地すべり面が下方に拡大されたことと推測できる。

⑤まとめと今後の課題

本研究では、実際の東横山地すべりのビデオ撮影画像に対して、2次元流れ解析手法 PIV を適用し、崩壊発生から終了までの一連の運動方向及び速度分布を定量的に計測し、地すべりの経時変化をある程度面的に把握することができた。また、崩壊の現象や、崩壊の進行過程及び地すべり体の滑動形態等を解析し、その発生機構を分析することによって、崩壊の複雑な現象をより詳細に表現することができた^{7) 8)}。この研究は、将来の更なる解析に繋がっていくと考えられる。

ビデオ画像の取得は、撮影環境・条件の面で、比較的容易であるため、今後多くの画像取得が期待でき、地すべりの解析に役立つと考えられる。ただし実用化の際には、撮影画像の取得及び PIV 手法での解析について、以下の課題を検討する必要がある。

(a) 撮影角度について

今回の解析に使用した画像は、崩壊斜面の対岸から左斜めに撮影した画像である。今後、動画画像解析を目的に新たに地すべり画像を撮影する場合は、できる限り崩壊斜面に正対して撮影することが計測精度の向上に繋がる。

(b) 撮影倍率について

撮影倍率は、崩壊現象の全体を取得できるように、撮影距離と画像解像度を考慮し、適切に設定する必要がある。また、崩壊を撮影している間は、撮影倍率を一定とすることが後の解析に役立つ。

(c) 撮影手法について

撮影する際には、確実にカメラを固定し、ぶれを防ぐ措置を取る必要がある。また、PIV手法で計測する場合は、実測値に変換するためのスケール設定が必要であるため、スケールとして利用できる物体を画面に映し込む。

(d) 夜間撮影について

今回の解析は、夜間と昼間両方の画像を対象として解析を行った。夜間の撮影画像は、速度計測はほぼ実施できたものの、画像の場所によって、詳細が捉えられないところがあり、画質の劣化が崩壊現象の判読及び速度計測に影響を与えた。今後、夜間撮影を行う場合は、撮影距離、撮影倍率、照明の角度と照度を考慮し、適切に調整することが必要である。

(e) 画像の幾何補正について

PIV手法で画像解析をする際には、より正確に速度計測を行うため、計測対象に正対するように射影変換によって幾何補正を行う必要がある。特に、斜めに撮影する場合、または、地すべり場所の周辺環境により画像と地形図との対応付けが困難な場合は、崩壊前または崩壊後の現地計測によって特徴的な構造物や場所など、画像上で識別可能な位置をGCPとして複数箇所選定し、その位置を計測することが必要である。

(f) フレームレートについて

崩壊の速度は速いため、高い撮影フレームレートが要求される。本研究ではビデオ画像を利用して速度計測を行ったが、通常のデジタルカメラで撮影する場合は、計測対象の連続追跡を確保するために、適切な撮影フレームレートの検討を行う必要がある。

(4) 奈良県五條市(旧大塔村)地すべりの動画画像解析

以下に、奈良県五條市(旧大塔村)地すべりの動画画像解析事例を示す。

①地すべり解析対象及び使用画像

(a) 概要

平成16年8月10日午前0時15分、国道168号(奈良県管理)の奈良県五條市(旧大塔村)宇井地先において、地すべりによる崩落が発生し、道路部分も崩落した。現地において監視を行っていた近畿地方整備局所有の衛星通信車搭載のカメラが、この地すべり

による崩落発生の瞬間を撮影した。本研究は、この地すべりの動画像を用いて、2次元流れ解析手法 PIV (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) で解析を行うこととした。

(b) 使用画像

地すべりの解析に使用した画像は、ビデオカメラによって崩壊斜面の側面から崩壊を1分1秒にわたり撮影したものである。撮影フレームレートは29.97フレーム/秒であるため、全体画像数は1834シーンである。計測範囲は図4.46の赤枠で示した範囲である。



図 4.46 地すべり画像計測範囲

②解析手法

本解析は、岐阜県東横山地すべりの解析と同じように、PIV手法を用いて、速度ベクトルを同時に多点で面的に計測した。

③解析の流れ

本解析の流れは、主にビデオ画像のデータフォーマット変換、計測区間及び解析条件の設定、PIVによる速度計測、及び計測結果分析から構成する。

④解析条件設定

本解析では、今回の崩壊に対して適切な計測を行うために、下記のように設定値を検討して計測条件の設定を行った。

(a) 計測区間

本解析では、1分1秒にわたり撮影された崩壊画像 1834 シーンのうち、崩壊が始まった時点、すなわち、801 シーン目からの画像を使用した。また、崩壊の後半は、画像に映っている樹木の移動は崩壊の移動ではなく、樹木の倒れこみであるため、その部分は解析の対象としないので、計測区間は 801 から 1176 シーンとなっている。

(b) 計測領域

本解析では、計測領域を 333×339 画素に設定した。また、速度ベクトルを計測するためのポイント数の設定は、横縦をほぼ同じ間隔に設定し、15×15 ポイントに設定した。

(c) テンプレートサイズ

本解析では、計測対象および計測環境を考慮して、テンプレート内に輝度パターンが確実に入るよう大きさを変えながら試行錯誤を行った。その結果に基づき、テンプレートサイズを 16×16 画素に設定した。

(d) 探索範囲

本解析では、既存研究により推定された崩壊の速度を考慮して、探索範囲をテンプレートサイズの 2 倍程度の大きさとし、探索範囲のサイズを 32×32 画素に設定した。

(e) スケール

本解析では、図 4.47 に示す画像から、特徴的な構造物を選定し、スケールの設定を行った(図 4.47 に選定した構造物のスケールは 2 m である)。











図 4.47 スケールの設定

⑤地すべり動画画像解析結果

奈良県旧大塔村の地すべり画像は、崩壊斜面の側面から撮影されたものであり、地すべり斜面が見えないものの、樹木の動きを計測することにより、崩壊の進行が推定できる。本解析では、崩壊開始から約 12.5 秒間に記録された 375 コマの画像を用いて速度計測を行った。

表 4.9 崩壊の計測結果 (1/3)

ステージ	速度ベクトル図
崩壊発生	
0.23 秒経過	
1.23 秒経過	
4.17 秒経過	

5.7 秒経過	 A night-time photograph of a road intersection with a white railing. A vector field of arrows is overlaid on the scene, showing flow patterns. A vertical color scale legend is on the right side of the image.
7.1 秒経過	 A night-time photograph of a road intersection with a white railing. A vector field of arrows is overlaid on the scene, showing flow patterns. A vertical color scale legend is on the right side of the image.
8.43 秒経過	 A night-time photograph of a road intersection with a white railing. A vector field of arrows is overlaid on the scene, showing flow patterns. A vertical color scale legend is on the right side of the image.
10.6 秒経過	 A night-time photograph of a road intersection with a white railing. A vector field of arrows is overlaid on the scene, showing flow patterns. A vertical color scale legend is on the right side of the image.
11.43 秒経過	 A night-time photograph of a road intersection with a white railing. A vector field of arrows is overlaid on the scene, showing flow patterns. A vertical color scale legend is on the right side of the image.

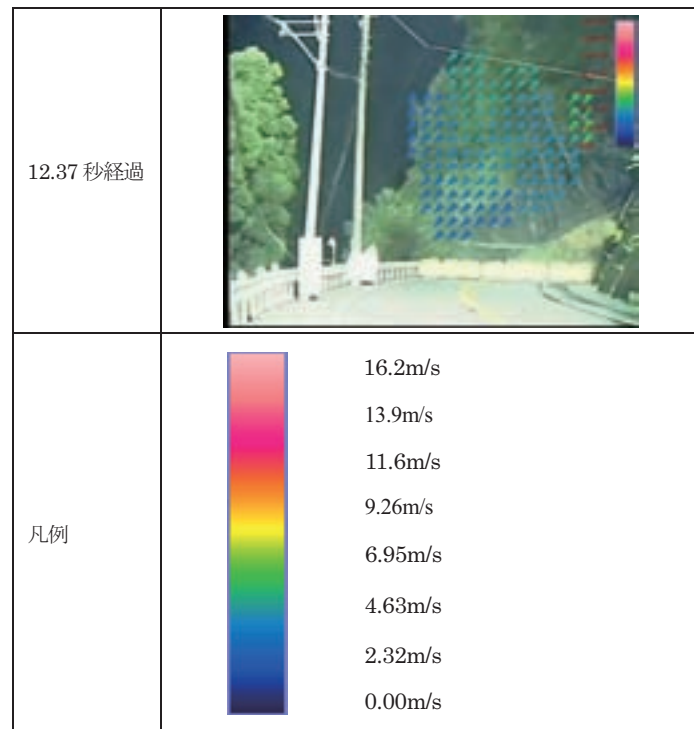


表 4.9 に、計測結果である速度の面的変化を、上から経過時刻順に示す。図中の三角矢印の向きは計測点における移動ベクトルの方向を、その色は相対的な速度（凡例に示す通り、青から赤に向かって速度が大きくなる）をそれぞれ示す。

画像計測の結果から、以下の点が判読できた。

- 崩壊発生時に、計測対象領域の電柱や樹木が非常にゆっくり左下側へ動き始めた。崩壊から 0.23 秒経過時の速度は 1.2 m/秒である。
- その後、比較的低速で動き続けた。崩壊から 1.23 秒経過時の速度は 1.6 m/秒である。
- ウ) このまま低速での動きがしばらく続いていたが、崩壊から 4.17 秒ごろ、落下速度がやや加速していく傾向が見え始めた。崩壊から 4.17 秒経過時の速度は 3.3 m/秒である。
- エ) その後、落下が加速して、崩壊から 5.7 秒経過時の速度は 4.9 m/秒である。
- オ) 引き続き、加速傾向が続き、崩壊から 7.1 秒経過時の速度は 6 m/秒位、また、崩壊から 8.43 秒経過時の速度は 6.3 m/秒に達した。
- カ) その後、減速傾向が現れ始め、崩壊から 10.6 秒経過時の速度は 4.9～5.3 m/秒位となった。
- キ) 更に、減速傾向が続き、崩壊から 11.43 秒経過時の速度は 3.3～4.9 m/秒位、崩壊から 12.37 秒経過時の速度は 3.3～4.2 m/秒位まで落ちた。
- ク) 崩壊の開始から約 12.5 秒後、計測対象領域の樹木の動きは崩壊の落下ではなく、樹木の倒れこみであると判断し、計測を終了した。

上記各経過時刻の速度は、全計測点の代表値（一番数の多い速度値）を採用している。崩壊開始から計測終了までのおおよその速度変化図 4.48 に示す。

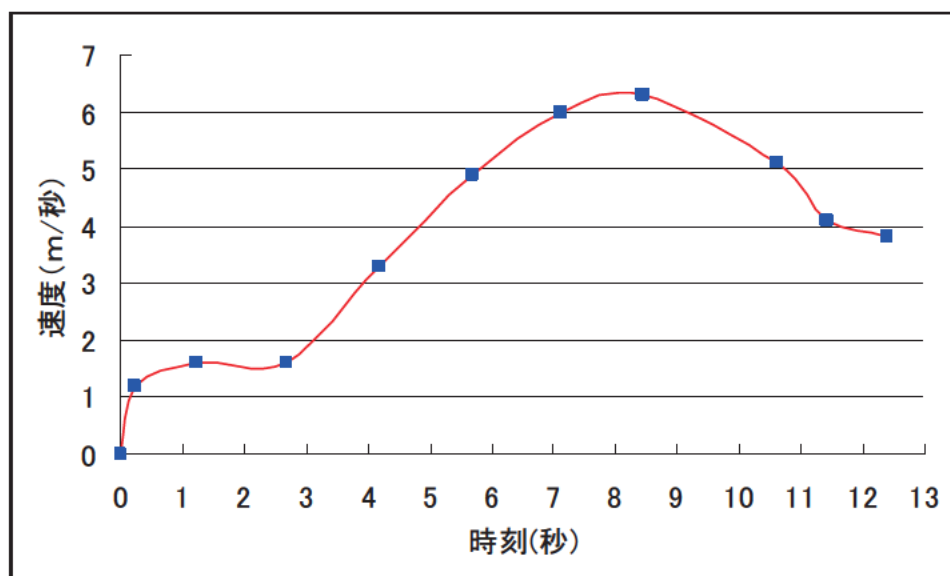


図 4.48 経過時刻の速度変化

この速度変化より、地すべり運動は、初動のクリープ運動から、重力に支配された加速度運動を示し、減速した後に停止するという過程を経たことが分かる。

今回の崩壊は、時間的に短いものであり、ビデオカメラの撮影は、崩壊斜面の正面ではなく、側面から撮影されたものであるため、地すべり斜面の動きを直接計測できない。しかしながら、樹木の動きを計測することにより、崩壊の進行をある程度推定できると考える。また、今回のビデオ撮影画像では、図 4.49 に示す画像上半部の赤丸で示した部分について、計測開始の数シーンから、ノイズの影響による誤検出速度ベクトルが見られたものの、全体的には、速度計測をほぼ良好に実施できた。



図 4.49 画像のノイズ

⑥まとめ

本解析では、実際の奈良県五條市（旧大塔村）地すべりのビデオ画像に対して、2次元流れ解析手法 PIV を適用し、崩壊発生からの一連の運動方向及び速度分布を定量的に計測し、地すべりの経時変化をある程度把握することができた。また、今回の地すべり解析に使用した画像は、ビデオカメラによって崩壊斜面の側面から撮影された画像にも関わらず、解析条件の設定を適切に行うことにより、解析を行うことができることを実証した^{9) 10)}。

(5) 動画画像解析の連写速度の検討

①概要

岐阜県東横山地すべり及び奈良県旧大塔村地すべりのビデオ画像の解析では、2次元流れ解析手法 PIV を適用し、崩壊発生から終了までの一連の運動方向及び速度分布を定量的に計測し、地すべりの経時変化をある程度面的に把握することができた。崩壊の速度は速いため、高い撮影フレームレートが要求される。これまでの解析では30コマ/秒のビデオ画像を利用して速度計測を行ったが、通常のデジタルカメラで撮影する場合は、計測対象の連続追跡を確保するために、適切な撮影フレームレートの検討を行う必要がある。本研究では、シミュレーションとして、既存の東横山地すべりのビデオ画像を用いて、地すべり体の挙動解析に必要な連写速度の検討を行う。

②解析手法

(a) シミュレーション動画画像の作成

シミュレーション動画画像は、岐阜県揖斐川町東横山地区で平成18年5月13日7時59分頃に発生した崩壊に対して、崩壊直前から崩壊終了まで約45秒間にビデオカメラにより記録された1350コマの画像に基づいて作成する。具体的に、Nコマ/秒のシミュレーション動画画像を作成するために、既存の30コマ/秒のビデオ画像から、 $30/N$ コマごとに1コマを抽出する。図4.50に、既存の30コマ/秒の東横山地すべりのビデオ画像から、一定の間隔でコマを抽出し、15コマ/秒、10コマ/秒、5コマ/秒、3コマ/秒、2コマ/秒、1コマ/秒のシミュレーション動画画像を作成するイメージを示す。表4.10は本研究における7つの解析ケースのシミュレーション動画画像の全体コマ数を示す。

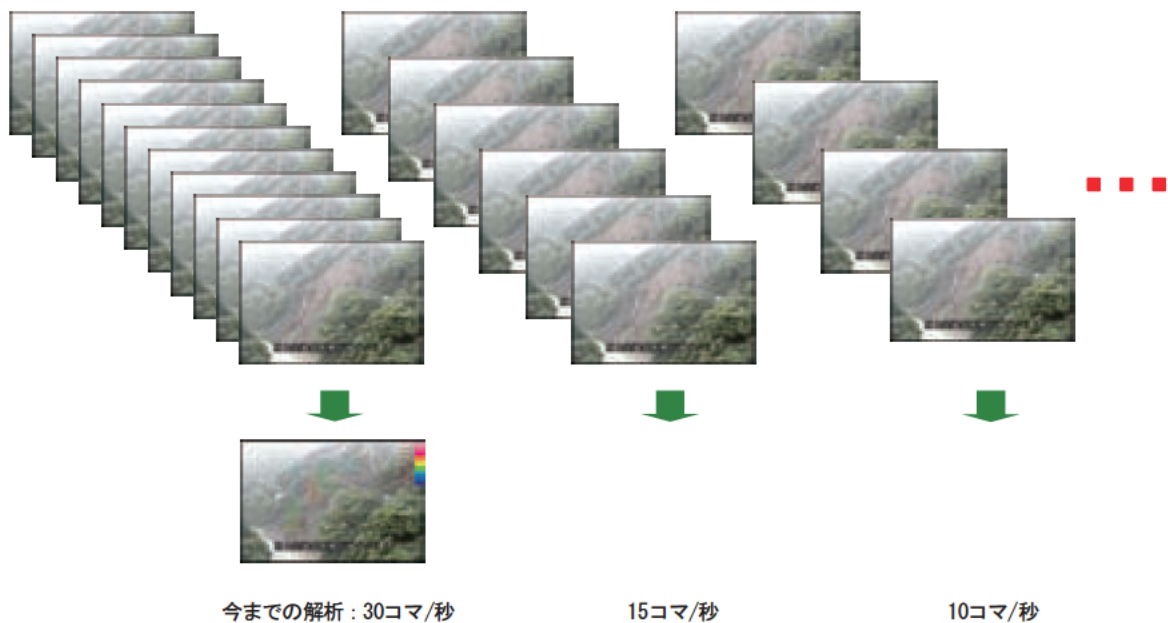


図 4.50 低い撮影フレームレートのシミュレーション動画像の作成

表 4.10 解析ケース

解析ケース	フレームレート (コマ/秒)	全体コマ数
1	30	1350
2	15	675
3	10	450
4	5	225
5	3	135
6	2	90
7	1	45

(b) PIV 計測

作成したシミュレーション動画像の計測には、岐阜県東横山地すべり及び奈良県旧大塔村地すべりの解析と同じように、PIV 手法を適用した。

本解析では、異なるフレームレートのシミュレーション動画像に対して適切な計測を行うために、下記のように設定値を検討して計測条件の設定を行った。

(ア) 計測区間

既存の 30 コマ/秒の東横山地すべりビデオ画像では、45 秒にわたり撮影した画像の計測

区間を0から1350枚目とする。作成したフレームレート15コマ/秒、10コマ/秒、5コマ/秒、3コマ/秒、2コマ/秒、1コマ/秒のシミュレーション動画像の計測区間はそれぞれ0から675枚目、0から450枚目、0から225枚目、0から135枚目、0から90枚目、0から45枚目となる。

(イ) 計測領域

本解析では、すべてのケースにおいて、計測領域を308×332画素に設定した。また、計測領域内の速度ベクトルを計測するためのポイント数の設定は、横縦を同じ間隔に設定し、20×20ポイントに設定した。

(ウ) テンプレートサイズ

本解析では、既存の30コマ/秒のビデオ画像とフレームレート15コマ/秒、10コマ/秒、5コマ/秒、3コマ/秒、2コマ/秒、1コマ/秒のすべてのシミュレーション動画像に対して、テンプレートサイズを16×16画素に設定した。

(エ) 探索範囲

本解析では、既存研究により推定された崩壊の速度及びシミュレーション動画像のフレームレートを考慮して、30コマ/秒のビデオ画像とフレームレート15コマ/秒、10コマ/秒のシミュレーション動画像に対して探索範囲のサイズを32×32画素に設定し、フレームレートが5コマ/秒、3コマ/秒、2コマ/秒、1コマ/秒のシミュレーション動画像に対して、それぞれ48×48、64×64、96×96、160×160画素に設定した。

(オ) スケール

本解析では、東横山地すべり動画像の解析と同じように、崩壊画像から特徴的な構造物を選定し、スケールの設定を行った。

③結果分析

各フレームレートのシミュレーション動画像の計測結果から、1秒間隔でそれぞれ45コマを抽出し、既存の30コマ/秒の動画像の計測結果を基準として比較を行った。表4.11には、30コマ/秒の東横山地すべり動画像の720枚目、780枚目、810枚目の速度計測結果と、これらの画像に対応する15コマ/秒及び10コマ/秒のシミュレーション画像の計測結果を示す。

表 4.11 異なるフレームレートの動画計測結果の比較

30コマ/秒	15コマ/秒	10コマ/秒

PIV 手法による速度計測では、パターンマッチングを採用するため、画像内に見られる小さな粒子または輝度の分布パターンの移動状況をうまく追跡できない場合に mismatching が発生する。図 4.51 に、mismatching の説明図を示す。

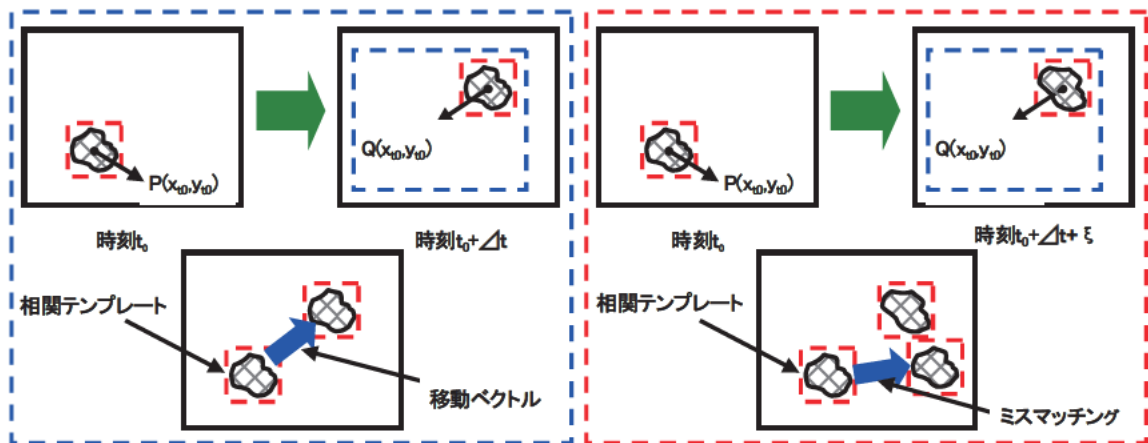


図 4.51 mismatching の説明

表 4.12 正しいマッチングとミスマッチングの実例

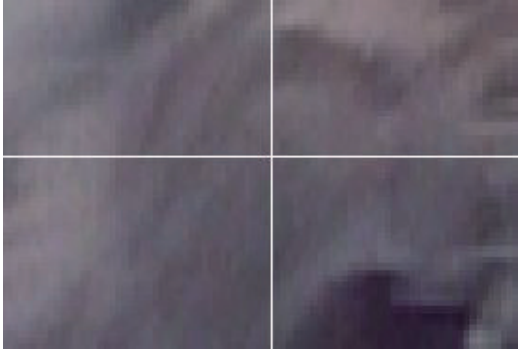
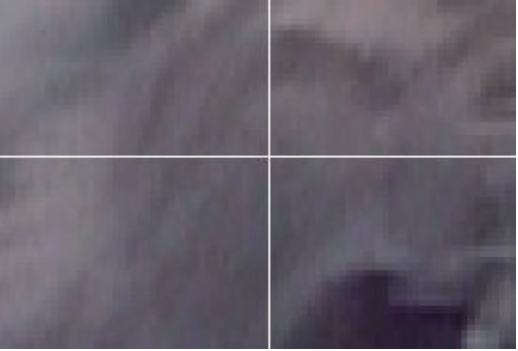
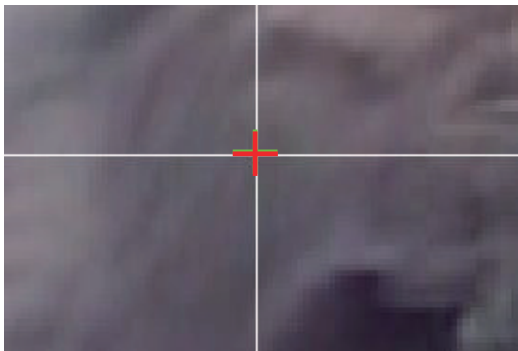

	正しいマッチングの例	ミスマッチングの例
使用動画像	既存の 30 コマ/秒の画像	10コマ/秒のシミュレーション画像
	 (960 枚目)	 (320 枚目)
	 (961 枚目)	 (321 枚目)
計測位置	X=197.0, Y=327.0	X=197.0, Y=327.0
マッチング位置 (緑)	X=195.7, Y=328.6	X=190.0, Y=337.8

表 4.12 に、正しいマッチングとミスマッチングの実例を示す。撮影フレームレートが低い場合は、フレーム間の時間間隔が大きくなり、崩土等の変形も大きくなるため、パターンマッチングを行う際にミスマッチングを発生する。異なるフレームレートの画像を用いて解析した結果、10 コマ/秒、5 コマ/秒、3 コマ/秒、2 コマ/秒、1 コマ/秒のシミュレーション動画像を用いて PIV 計測を行う場合は、ミスマッチングが多くなる。フレームレートが 15 コマ/秒以上であれば、ミスマッチングは比較的少なく、速度計測がほぼ正確にできることが分かった。

④まとめ

本研究では、既存の 30 コマ/秒の東横山地すべりのビデオ画像を用いて低い撮影フレームレートのシミュレーション動画画像を作成し、異なるフレームレートの 7 つの解析ケースに対して、PIV 計測を適用し、地すべりの 2 次元解析に必要な連写速度の検討を行った。その結果、下記 2 つの結論を得た。

- (a) PIV 手法を用いて地すべり計測対象の連続追跡を確保するためには、15 コマ/秒以上の連写速度が必要である。
- (b) 崩壊の速度よりも、崩土等の変形が計測結果に影響を与える決定的な要素となる。

4.4.2 連続ステレオ撮影写真による地すべり体の挙動解析

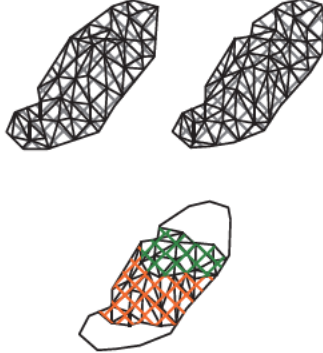
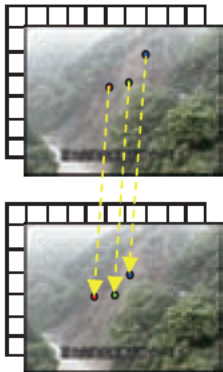
(1)概要

前項で述べた2次元動画画像解析手法では、地すべり移動体の挙動を面的に把握するのに対して、連続ステレオ撮影写真による3次元解析では、地表面凸凹変化量の抽出や3次元変位ベクトルの追跡等、崩壊の発生から終了に至る一連の運動を立体的に把握することができる。

3次元解析には、3次元メッシュデータ間の差分に基づく変化検出手法と、画像追跡に基づく3次元変位ベクトル計測手法がある。3次元メッシュデータ間の差分に基づく変化検出手法は、現在のデータと背景データ、もしくは連続した2つの3次元メッシュデータ間の差を求める。この手法は、地すべり体の表面凹凸変化量等の形状変化抽出に有効であり、地すべりの範囲、時刻毎の地すべり体の動き等の情報を簡単に得ることができる。これに対して、画像追跡に基づく3次元変位ベクトル計測手法は、隣接する画像間の対応点を濃度相関で決定し、時間的に連続した画像上で計測対象を追跡し、移動量を算出して2次元変位ベクトルを求め、3次元化することにより3次元変位ベクトルを求める。移動物体の各部分が、実際にどのような方向へどのような場所に移動したかを求めることができるため、地すべり移動体の各部分の3次元移動状況等の詳細情報を得ることができる。表4.13は、3次元解析手法及び抽出できる情報をまとめたものである。

本研究では、地すべり体の挙動を3次元的に把握することを目的として、実際の連続ステレオ撮影実験で取得した移動体の画像を利用し、画像追跡及びステレオ計測を行い、移動体の各部分の3次元変位ベクトルを求め、移動体の3次元的な移動状況を定量的に把握する可能性を検討する。また、3次元解析手法の適用条件及び今後の課題について整理する。

表 4.13 3次元解析手法及び抽出できる情報

	各手法の特徴	各手法のイメージ図	解析から抽出できる情報
3次元メッシュデータ間の差分に基づく変化検出手法	<p>2つの3次元メッシュデータ間の差を求める。地すべり体の表面凹凸変化量等の形状変化抽出に有効。</p> <p>①背景データとの差分を求める手法</p> <p>②連続した2つの3次元メッシュデータ間の差分を求める手法</p>		<p>時刻毎の地すべり範囲、地すべり体の表面凹凸変化量、地すべり移動体の動き等の情報を得ることができる。</p> <p>①背景データとの差分解析：地すべり範囲及び進行過程</p> <p>②連続した2つのデータ間の差分解析：地すべり体の詳細な動き</p>
画像追跡に基づく3次元変位ベクトル計測手法	<p>隣接する画像間の対応点を濃度相関で決定し、追跡対象の3次元変位ベクトルを求める。</p> <p>移動物体の各部分が、実際にどのような方向にどのような場所に移動したかを求める。</p>		<p>地すべり体の各部分の移動方向、移動場所、移動ルート、移動時間等の詳細情報を得ることができる。</p>

(2)解析手法

連続ステレオ撮影写真による3次元解析には、3次元メッシュデータと正射画像を統合した3次元モデルデータを利用し、正射画像上において計測対象の画像追跡を自動的に行い、2次元変位ベクトルを求め、更に3次元メッシュデータを用いて2次元変位ベクトル3次元化することにより、3次元変位ベクトルを求める3次元モデルデータによる解析手法と、連続ステレオ撮影により取得されるステレオペアの片方の画像を利用し、画像上において計測対象の画像追跡を自動的に行い、2次元変位ベクトルを求め、更にもう片方の画像を利用してステレオ計測を行って2次元変位ベクトル3次元化することにより、3次元変位ベクトルを求める画像計測による解析手法がある。以下に、3次元モデルデータによる解析手法及び画像計測による解析手法について、それぞれ説明する。

①3次元モデルデータによる解析手法

(a) 3次元モデルデータの定義

3次元モデルデータとは、ステレオ撮影画像から、作成される3次元メッシュデータ（一定の位置間隔で計測対象の水平、奥行き、高さの座標情報を表示するデータ）と正射画像（3次元メッシュデータに基づき撮影画像を正射投影に変換した画像）の組合せである。連続ステレオ撮影により、時系列3次元モデルデータが作成できる。3次元モデルデータは、計測

対象の3次元座標情報と2次元画像情報の両方を持つため、移動体の3次元的な挙動解析及び必要な情報抽出を効果的に行うことができる。連続ステレオ撮影による時系列3次元モデルデータ作成のイメージを図4.52に示す。

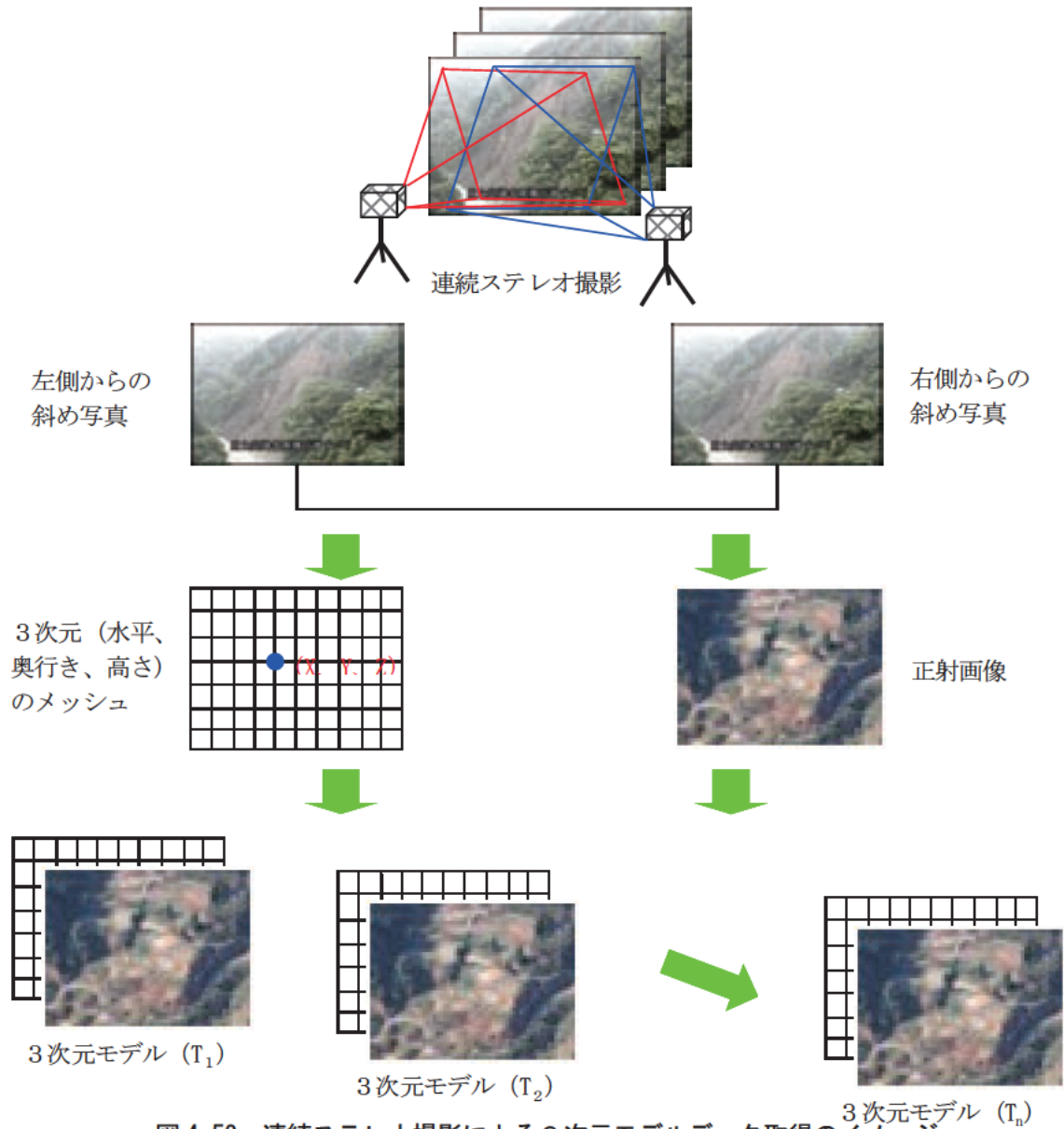


図4.52 連続ステレオ撮影による3次元モデルデータ取得のイメージ

(b) 3次元モデルデータを用いた3次元変位ベクトル取得

3次元モデルデータを用いて3次元変位ベクトルを求める処理過程は、3次元メッシュデータ及び正射画像作成の3次元モデルデータ作成過程、正射画像を用いて計測対象の追跡を行う2次元画像追跡過程、及び画像追跡で取得した2次元変位ベクトルを3次元に換算する2次元変位ベクトルの3次元化過程の三段階に大きく分けられる。各過程の概要を以下に述べる。

(ア) 3次元モデルデータ作成

連続ステレオ撮影により取得されるステレオペアの画像を利用し、一定の位置間隔で計測対象の水平、奥行き、高さの座標情報を表示する3次元メッシュデータ作成する。また、作成した3次元メッシュデータに基づき、撮影画像に対して正射投影変換を施すことにより、正射画像を作成する。3次元モデルデータは、3次元メッシュデータと正射投影画像を統合したものであり、計測対象の3次元座標情報と2次元画像情報の両方を持つ。

(イ) 2次元画像追跡

2次元画像追跡では、作成時系列正射画像を用い、画像上で指定された複数の追跡対象を個々に追跡し、2次元変位ベクトルを求める。画像追跡のアルゴリズムとして、パターンマッチングを採用し、隣接する正射画像間の対応点を濃度相関で決定し、それぞれの対象物が持っている輝度分布パターンが、次の画像上のどの部分に類似しているかを判断して追跡する。

(ウ) 2次元変位ベクトルの3次元化

3次元メッシュデータを用いて、画像追跡により取得された2次元変位ベクトルを3次元化することにより3次元変位ベクトルを求める。移動体の各部分が、実際にどのような方向へどのような場所に移動したかを求めることができるため、その3次元的な移動状況等を定量的に把握することが可能である。

図 4.53 に、3次元モデルデータを用いて画像追跡から3次元変位ベクトルを取得するイメージを示す。

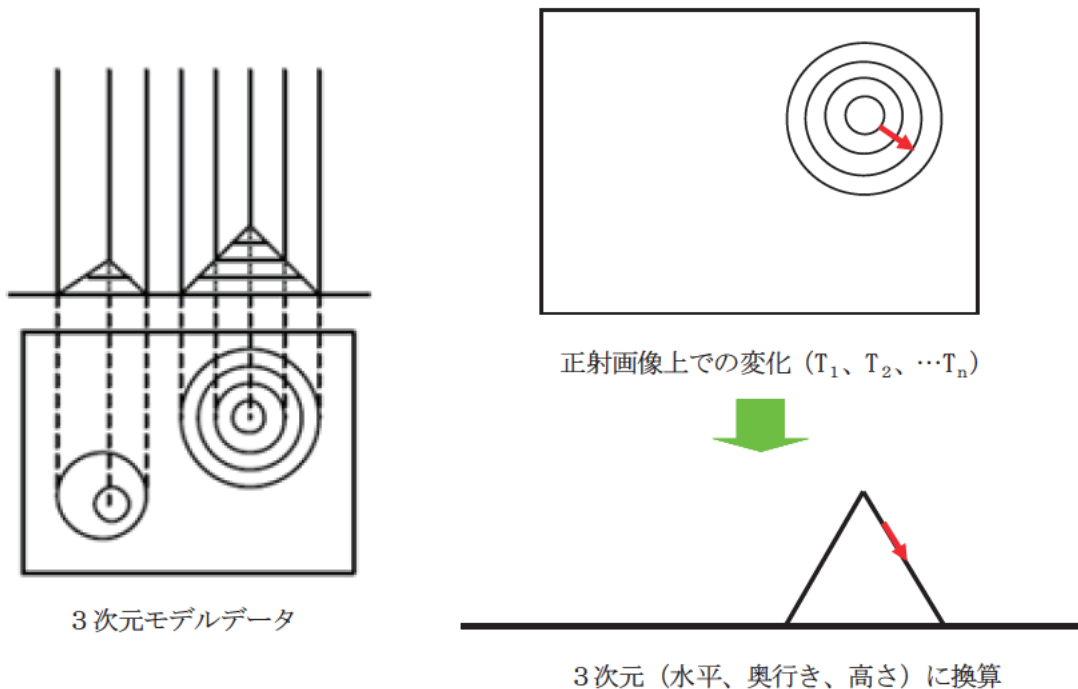


図 4.53 画像追跡から3次元変位ベクトルの取得イメージ

②画像計測による解析手法

3次元モデルデータの利用のほかに、連続ステレオ撮影により取得されるステレオペアの片方の時系列画像を利用し、画像上において移動体の画像追跡を自動的に行い、2次元変位ベクトルを求め、更にもう片方の画像を利用してステレオ計測を行い、2次元変位ベクトル3次元化することにより、3次元変位ベクトルを求める手法がある。

画像計測による解析手法を用いて3次元変位ベクトルを求める処理過程は、主に計測対象の追跡を行う2次元画像追跡過程、及び画像追跡で取得した2次元変位ベクトルをステレオ計測で3次元変位ベクトルを求める3次元化過程の二段階に分けられる。各過程の概要を以下に述べる。

(a) 2次元画像追跡

連続ステレオ撮影により取得されるステレオペアの片方の時系列画像を用い、画像上で指定された複数の追跡対象を個々に追跡し、2次元変位ベクトルを取得する。画像追跡のアルゴリズムとして、パターンマッチングを採用し、隣接する正射画像間の対応点を濃度相関で決定、それぞれの対象物が持っている輝度分布パターンが、次の画像上のどの部分に類似しているかを判断して追跡する。図4.54に、片方の時系列画像を用いて、画像追跡から2次元変位ベクトルを取得するイメージを示す。

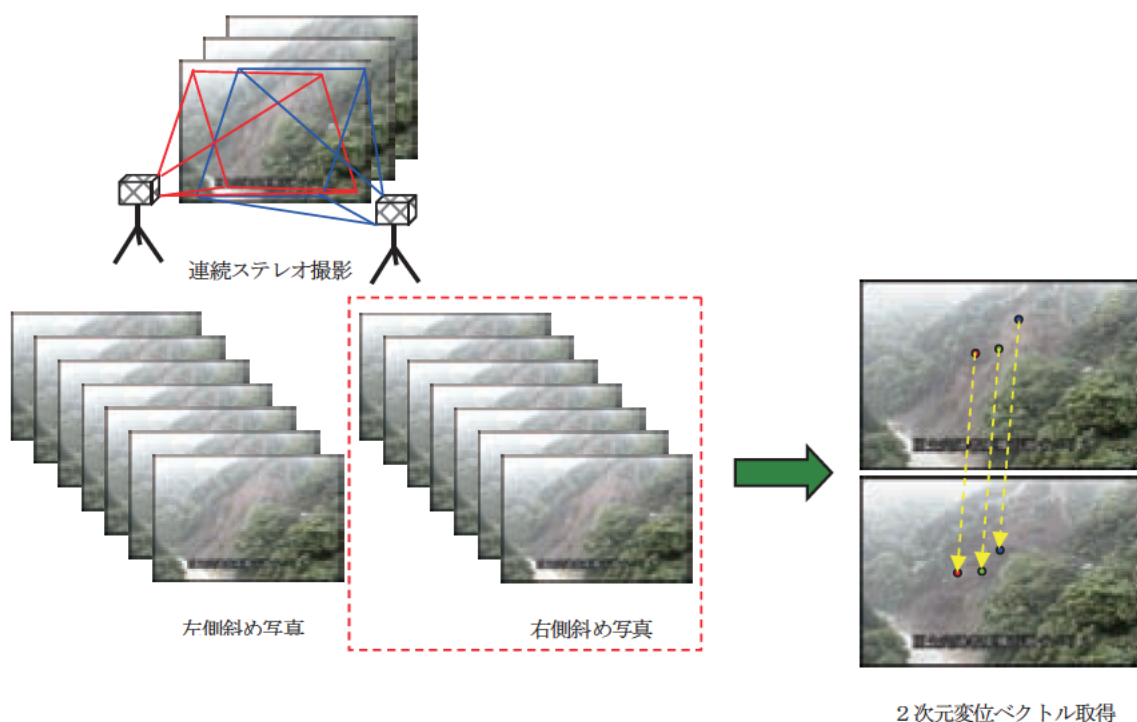


図 4.54 片方の時系列画像による2次元変位ベクトル取得

(b) 2次元変位ベクトルの3次元化

連続ステレオ撮影により取得されるステレオペアのもう片方の画像を用いて、ステレオ計

測を行い、画像追跡により取得された2次元変位ベクトルを3次元化することにより3次元変位ベクトルを求める。移動体の各部分が、実際にどのような方向へどのような場所に移動したかを求めることができるため、その3次元的な移動状況等を定量的に把握することが可能である。図4.55に、ステレオ計測を行い、画像追跡で取得した2次元変位ベクトルを3次元化するイメージを示す。

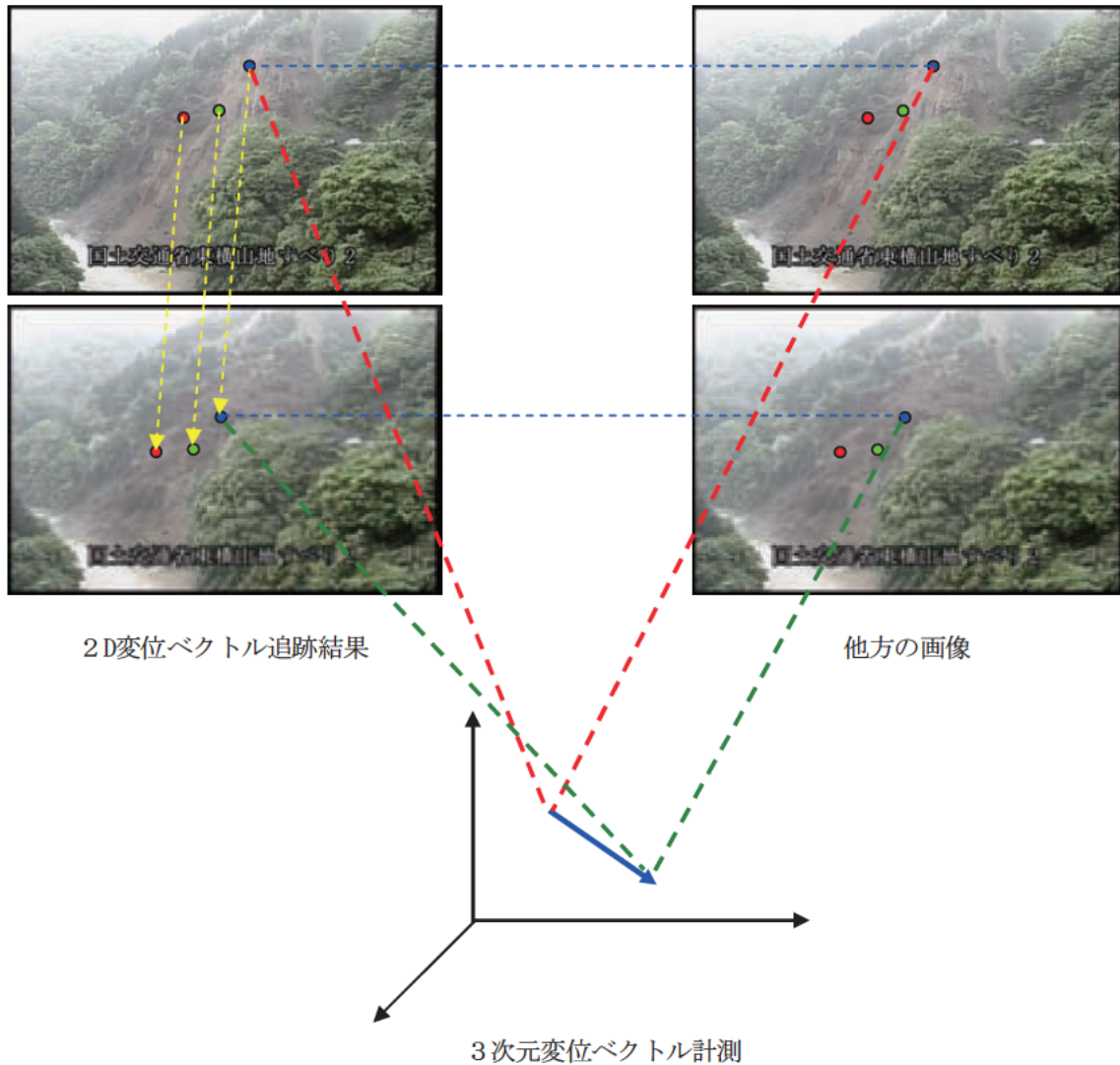


図4.55 画像追跡結果による3次元変位ベクトル計測

③2次元画像追跡手法

2次元画像上で特定の位置を自動追跡する場合の代表的な手法の1つとして、イメージトラッカー解析手法PTV (Particle Tracer Velocimetry : 粒子速度計測法) がある。PTV手法を用いた画像解析を行い、その結果を3次元変位ベクトルに換算することで、移動体の各部分の3次元移動状況等の詳細情報を得ることができ、移動体の挙動を3次元的に把握することが可

能である。以下に、PTV 手法による移動体の2次元画像追跡の原理、フロー、解析条件について説明する。

(a) PTV 手法の原理

PTV 解析とは、デジタルカメラやビデオ等で撮影した連続画像を用いて複数の対象物を個々に追跡し、計測する手法である。PTV 解析のアルゴリズムとしては、パターンマッチングを採用しており、時間的に連続した2つの画像上の複数の対象物を指定し、それぞれの対象物が持っている輝度分布パターンが、次の画像上のどの部分に類似しているかを判断して追跡する。図 4.56 に PTV 手法による画像追跡の原理を示す。

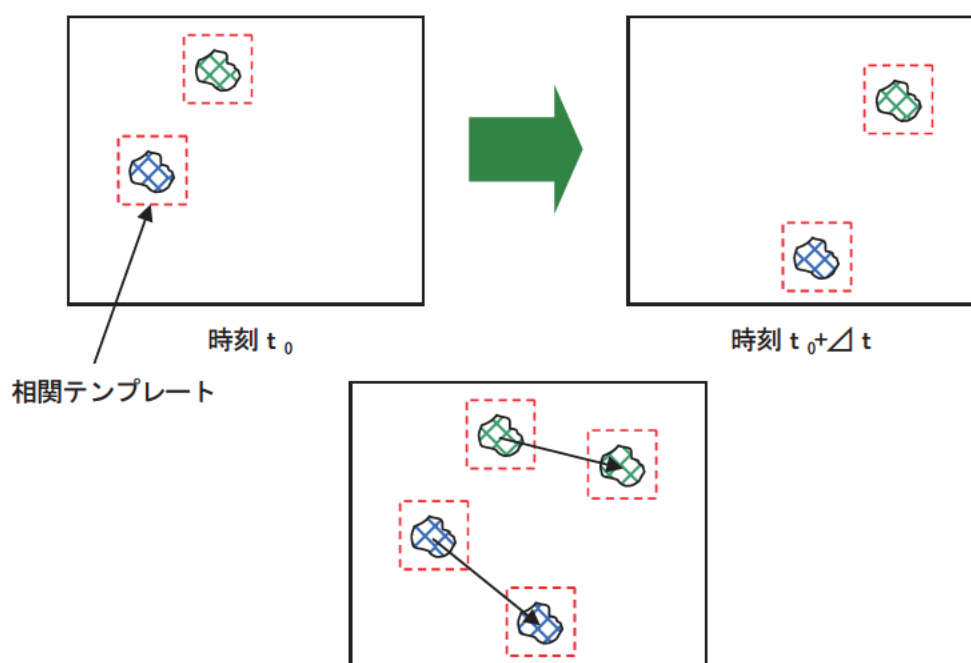


図 4.56 PTV 手法の原理説明

(b) PTV 解析の流れ

移動体の時系列画像に対する PTV 手法による解析処理過程は、主に正射画像作成等の画像準備過程、画像形式変換を行う前処理過程、PTV の各種計測条件設定を行う解析条件設定過程、追跡対象の移動量、速度、角度等の計測を行う計測過程、計測結果から2次元変位ベクトルを生成する過程、及び移動体の移動状況の詳細分析を行う結果分析の六段階に分けられる。各過程の概要を以下に述べる。また、図 4.57 に、PTV 解析の流れを示す。

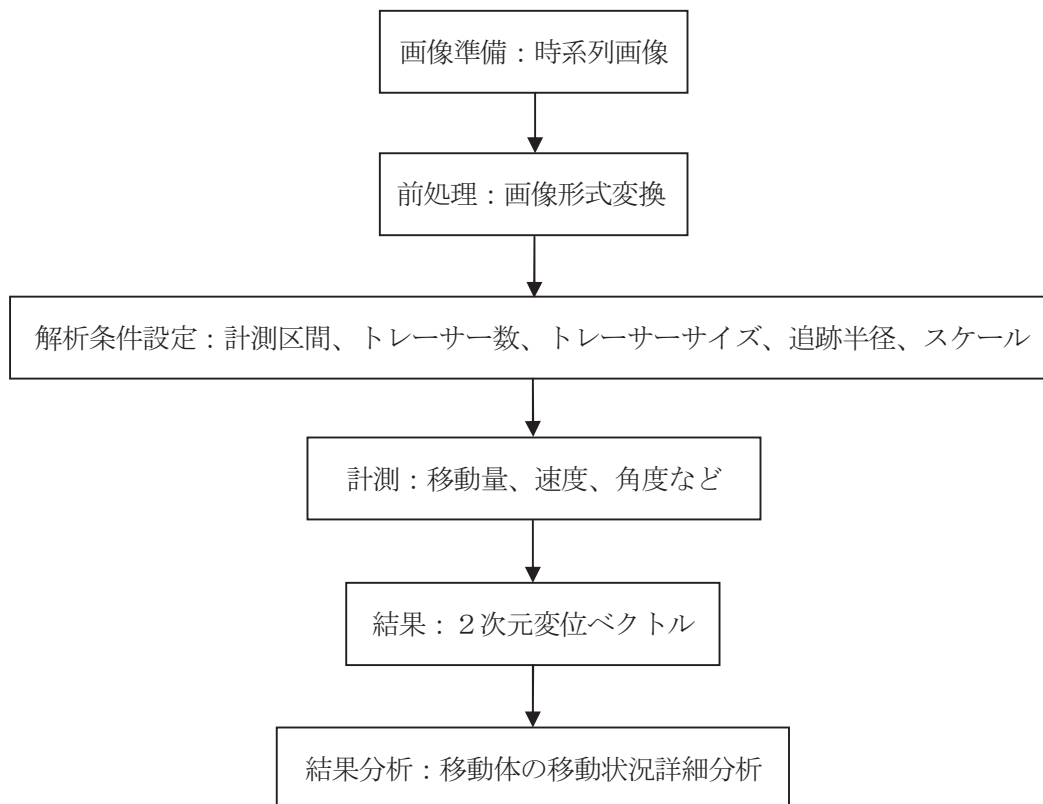


図 4.57 解析の流れ

(ア) 画像準備

連続ステレオ撮影により取得されるステレオペア画像のうち、片方の画像を使用する。もしくは、連続ステレオ撮影により取得されるステレオペア画像から、3次元メッシュデータを作成し、それに基づいて正射投影変換した画像を作成する。

(イ) 前処理

画像を PTV 解析ソフトウェアの処理可能な形式に変換し、解析の準備を行う（使用する PTV 解析ソフトウェアによって処理可能な画像形式が異なるため、使用するソフトウェアのマニュアルを参照して行う）。

(ウ) 解析条件設定

異なる画像に対して適切な計測を行うために、下記のように計測条件の設定を行う必要がある。

- 計測区間
入力した全フレームの画像から、解析対象とする画像を選定して計測対象区間を設定する。
- トレーサー数
トレーサーの数を設定し、画像上で複数の追跡対象物を指定する。図 4.58 に、複

数の追跡対象を表示する画面を示す。

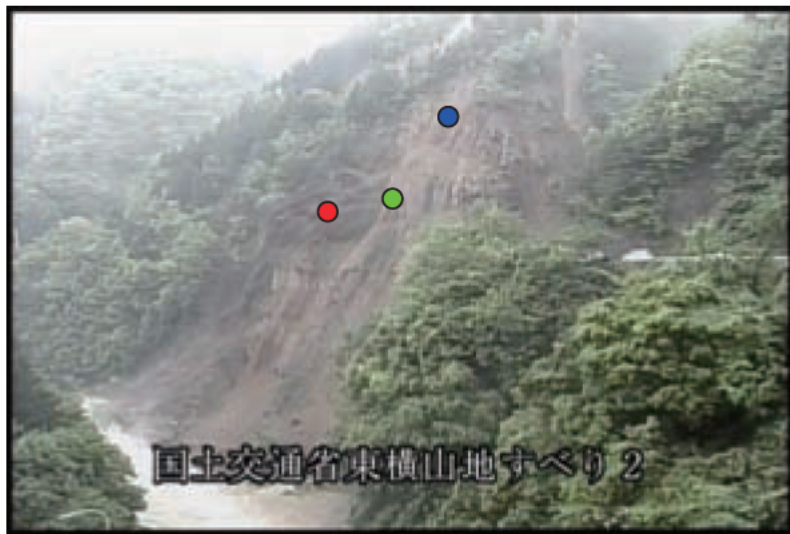


図 4.58 複数の追跡対象

- トレーサーサイズ

PTV 計測のトレーサーサイズは、追跡対象の移動先を見つけるためのパターンマッチングの領域サイズである。トレーサー内部の輝度パターンの移動を追跡するために、対象となる輝度パターンの大きさを把握した上で、輝度パターン全体が確実にテンプレートの範囲に含まれるようトレーサーの大きさを設定する必要がある。

- 追跡半径

追跡半径の設定は、設定した領域の中でトレーサーを移動させて、追跡対象の移動先を見つけることを目的とする。追跡半径の設定が、狭すぎても広すぎても、正しい移動先の検出に失敗する可能性は高くなる。大きすぎる場合は、無関係な場所に出現する類似パターンを移動先として誤判定する可能性が高まる。逆に小さすぎると、移動先が設定領域外に出てしまい、追跡が不可能となる。従って、追跡対象の移動量に合わせて追跡半径を設定する必要がある。図 4.59 に、トレーサーサイズと追跡半径設定の画面を示す。



図 4.59 トレーサーサイズと追跡半径の設定

- スケール

スケールの設定は、計測した移動量、速度等を実測値に換算するための設定である。正射画像の場合は、正射投影が施され、空間座標を持っているため、スケールの設定は必要がない。

(エ) 計測

PTV 手法の解析条件を設定した後、画像上で計測対象に対して追跡を行い、追跡対象の移動量、速度、角度等を計測する。また、各追跡対象の計測結果を画像毎にテキストファイルへ出力、保存する。図 4.60 に複数の追跡対象の軌跡を示す。



図 4.60 複数の追跡対象の軌跡

(オ) 2次元変位ベクトルの取得

計測結果から2次元変位ベクトルを生成する。図 4.61 に、複数の追跡対象の2次元変位ベクトル取得の例を示す。



図 4.61 複数の追跡対象の2次元変位ベクトル取得

(カ) 結果分析

計測終了後、計測結果による移動体の移動状況の分析を行い、移動体の各部分の移動方向、移動場所、移動ルート、移動時間等の詳細情報を取得する。

(3)移動体の3次元解析

本研究では、実際の連続ステレオ撮影実験で取得した移動体の画像を利用して、画像追跡によって2次元変位ベクトルを取得し、ステレオ計測で移動体の各部分の3次元変位ベクトルを求めた。さらに、移動体の連続撮影実験の画像ならびに東横山と旧大塔村地すべりの撮影画像を用いた2D変位ベクトル追跡の結果と、3D変位ベクトル計測への画像計測による解析手法の適応性について検討した。また、3次元解析手法の適用条件及び今後の課題について整理した。なお、移動体の3次元解析は、当初は3次元モデルデータによる解析を予定していたが、自動追跡実験における3次元解析での誤差が大きく、オルソ画像の作成が困難であったことから、オルソ画像を必要としない画像計測による解析を行った。

①自動追跡実験

自動追跡実験とは、移動体を同期撮影して得られる画像から、実際にどれだけの位置精度で画像解析が可能であるかを検証する目的で実施したものである。以下に実験の概要を示す。

(a) 実験のイメージ及び手順

実験は（独）土木研究所内の実験走路で行い、実験のイメージは図 4.62 の通りである。



図 4.62 実験イメージ

実験の流れを、図 4.63 に示す。

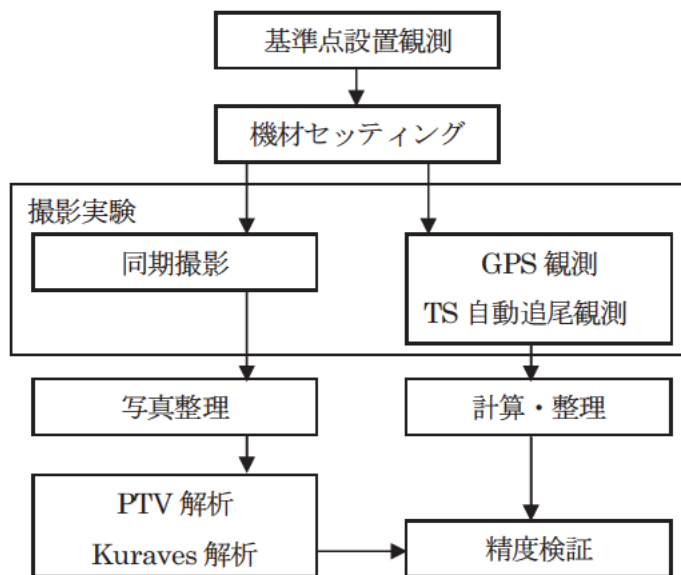


図 4.63 実験フロー

(ア) 基準点設置観測

TS 観測の基準とする基準点を跨道橋上に設置し、座標観測を RTK GPS により実施した。RTK GPS により得た各測点座標を、表 4.14 に示す。

表 4.14 基準点座標一覧

観測点名称	X	Y	Z	楕円体高
T1	12215.463	21663.070	35.846	76.035
T2	12241.172	21724.816	34.315	74.505

*世界測地系座標 第9系による

(イ) 機材セッティング

同期撮影システムは TYPE②を採用し、走路全体が見渡せるよう設置した。また、同期ズレの有無の確認と TS 自動追尾観測時刻と撮影時刻の同期を図るため、GPS 時計 (PC) も写真内に収まる位置に設置した。

TS 観測は、同期撮影によるステレオマッチングにより取得された位置座標の精度確認が目的となる。そこで、図 4.64 に示すように、同期撮影でされた時刻と TS 観測した時刻を同じ時系列で取得できるように GPS 時計を基準とした観測システムを構築した。

GPS 時計を基準に同期させる理由については、今までの実験と異なり時計を二台用いて実験することになるため、それぞれの 1/100 秒時計を高精度に同期させることは難しい。よって、各パソコンには極めて誤差の小さい GPS 時間を表示することとした。

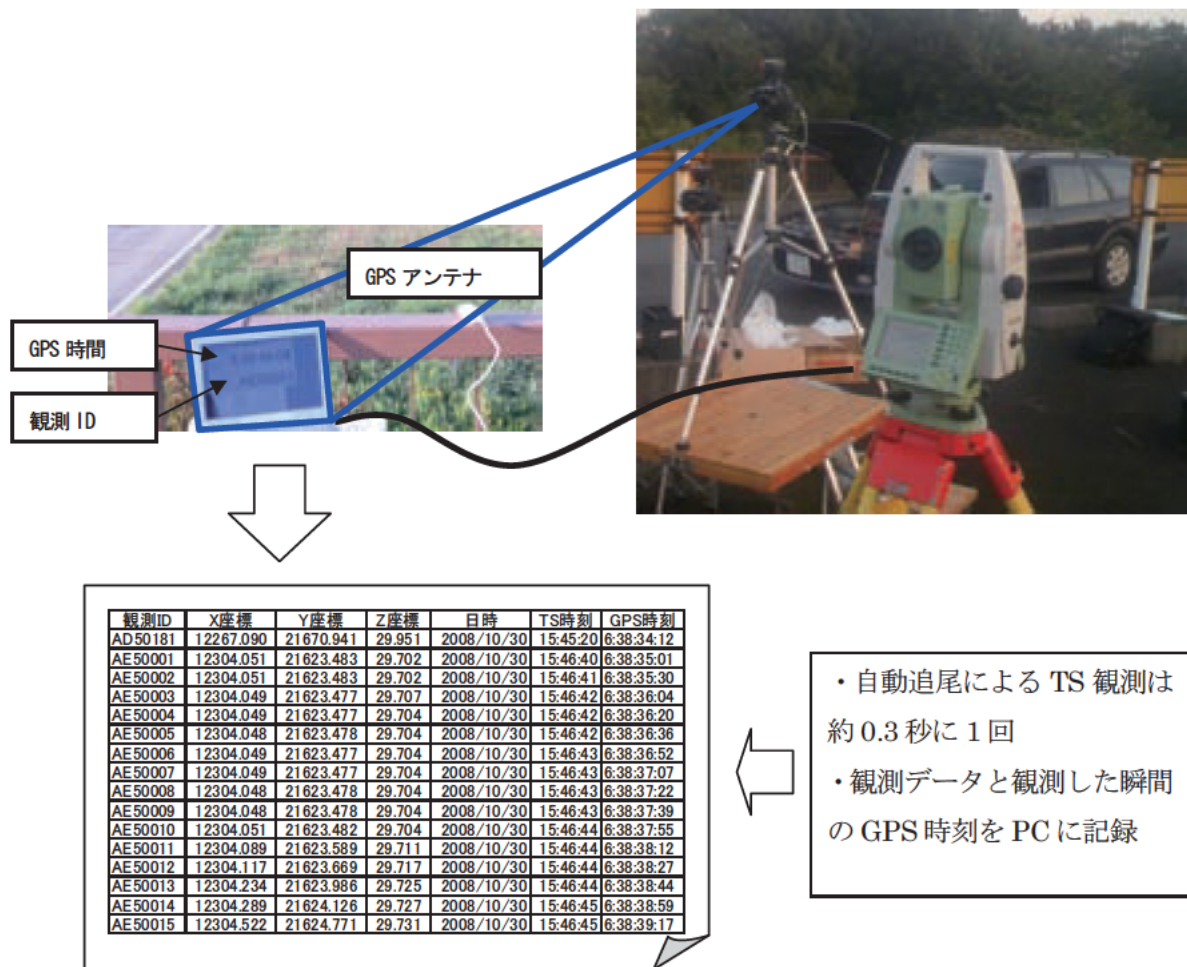


図 4.64 時刻同期のイメージ

(ウ) 撮影実験

撮影実験では、図 4.62 に示す 4 コース (B・C・D・E) について、1 秒間隔の同期撮影と TS 自動追尾観測を実施したが、最終的には E コースのみを検証の対象とした。

(エ) 計算・整理

同期撮影は 1 秒間隔であるのに対し、TS 自動追尾は約 0.3 秒間隔の観測となるため、TS 観測結果に基づき、同期撮影した瞬間の車両の位座標を計算する必要がある。

そこで、図 4.65 に示すように、TS 観測した 2 箇所の (観測位置 1、観測位置 2) の時刻と座標値を用いて撮影位置の XYZ を線形補間により求めた。

時刻差に伴う、撮影位置の算出は TS 観測時刻と撮影時刻の時刻差を比例配分することで求められるため、式 (5) ~ (7) に従い算出した。

$t = t_p / (t_2 - t_1) \dots$ 式(5)

TS 時刻と撮影時刻の比

$\begin{bmatrix} dX & dY & dZ \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_2 & Y_2 & Z_2 \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \end{bmatrix}^T \dots$ 式(6)

TS 観測位置の移動量

$\begin{bmatrix} X_p & Y_p & Z_p \end{bmatrix}^T = t \cdot E \begin{bmatrix} dX & dY & dZ \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \end{bmatrix}^T \dots$ 式(7) 撮影位置の座標値

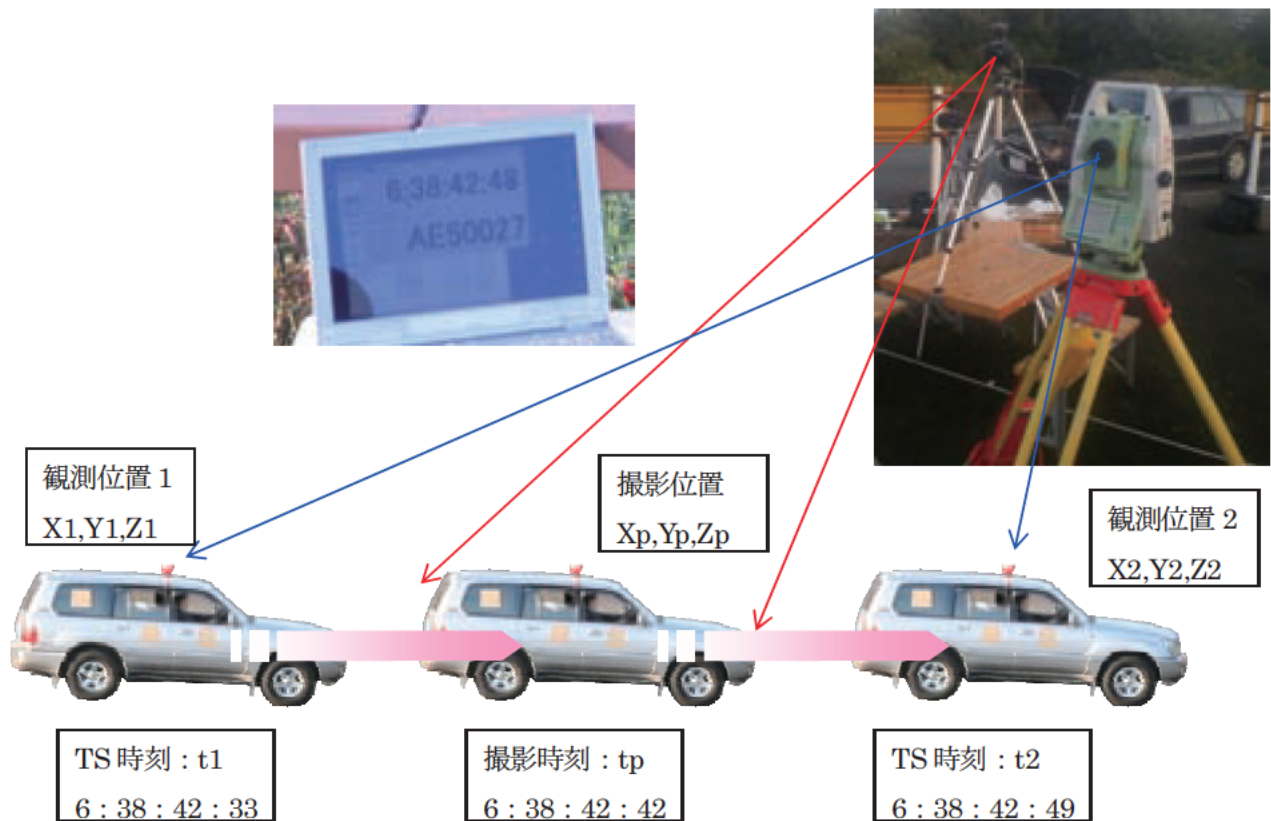


図 4.65 観測時間差イメージ

(b) PTV 解析

本研究では、連続ステレオ撮影により取得したステレオペア画像の片方の画像を用いて、市販の PTV 解析ソフトウェアで PTV 解析を実施した。

(c) PTV 解析による移動体の画像追跡結果

実際の移動体連続ステレオ撮影実験で取得した画像を利用して、PTV 手法による画像追跡を行った。図 4.66 に移動体上に 3 つのトレーサーを設定し、同時に画像追跡を行う画面を示す。



図 4.66 複数の追跡対象に対する画像追跡

Microsoft Excel - 11.csv

MSRソフト

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	子番号	経緯時刻	X座標(m)	Y座標(m)	V座標	移動距離	移動速度	移動加速度	移動距離向	傾角	角速度	角加速度		
2	0	0	125.273	1237.00	1221.273	1237.00	119.527	30.479	0	1.525				
3	1	1	1340.758	1233.948	1340.758	1233.948	119.527	150.006	13.925	119.527	1.024	-0.308	0.308	-1.027
4	2	2	1430.687	1229.048	1430.687	1229.048	150.006	163.961	4.07	269.533	1.066	-0.146	-0.146	1.906
5	3	3	1654.636	1225.94	1654.636	1225.94	163.961	160.051	-1.528	433.514	2.244	1.158	1.158	-1.757
6	4	4	1822.591	1219.391	1822.591	1219.391	166.351	160.224	-8.241	631.566	1.644	-0.599	-0.599	-0.05
7	5	5	1988.718	1214.591	1988.718	1214.591	166.224	157.863	0.814	787.789	0.885	-0.649	-0.649	0.885
8	6	6	2146.576	1211.848	2146.576	1211.848	157.863	158.686	4.077	925.673	1.331	-0.336	0.336	-1.122
9	7	7	2305.231	1208.162	2305.231	1208.162	158.686	162.774	3.732	1084.379	0.544	-0.396	-0.396	0.819
10	8	8	2467.866	1206.616	2467.866	1206.616	162.774	166.506	11.313	1247.145	0.377	-0.167	-0.167	-1.081
11	9	9	2634.5	1205.519	2634.5	1205.519	166.506	177.819	-1.608	1413.651	-0.08	-1.258	-1.258	1.195
12	10	10	2812.286	1208.251	2812.286	1208.251	177.819	176.211	-31.684	1591.47	-0.943	-0.063	-0.063	0.273
13	11	11	2988.485	1211.152	2988.485	1211.152	176.211	144.527	-8.512	1787.691	-0.729	0.21	0.21	-0.308
14	12	12	3133	1213	3133	1213	144.527	135.015	6.493	1912.208	-0.649	-0.116	-0.116	0.158
15	13	13	3266	1215	3266	1215	135.015	141.507	9.305	2047.222	-0.81	0.039	0.039	-0.427
16	14	14	3438.483	1217	3438.483	1217	141.507	153.812	-36.699	2186.73	-1.197	-0.388	-0.388	2.538
17	15	15	3560.273	1220.152	3560.273	1220.152	153.812	111.114	-69.324	2339.542	0.825	2.152	2.152	-5.183
18	16	16	3675.371	1218.3	3675.371	1218.3	111.114	25.79	-18.68	2450.656	-2.077	-0.021	-0.021	12.209
19	17	17	3893.147	1219.09	3893.147	1219.09	21.79	311	-2.859	2472.446	7.083	3.169	3.169	-125.381
20	18	18	3696.233	1218.706	3696.233	1218.706	311	0.251		2475.556	-10.088	-116.181	-116.181	
21	19	19	3695.966	1218.788	3695.966	1218.788	0.251			2475.807				
22														
23	最小値		125.273	1205.519	1221.273	1205.519	0.251	0.251	-69.324	0	-109.089	-116.181	-116.181	-125.381
24	最大値		3696.233	1237.00	3696.233	1237.00	177.819	177.819	30.479	2475.807	7.083	3.169	3.169	12.209
25	合計値		53001.234	24351.432	53001.234	24351.432	2475.806	2475.806	-119.277	2894.087	-96.95	-110.813	-110.813	-116.481
26	平均値		2850.062	1217.757	2850.062	1217.757	130.306	130.306	-6.626	1429.204	-5.103	-6.146	-6.146	-6.852
27	標準偏差													
28	変位													
29	変位													
30														
31														
32														
33														
34														
35														
36														

図 4.67 画像追跡で取得した計測結果の例

また、画像追跡で取得した各追跡対象の移動量、速度、角度等の計測結果は画像毎にテキストファイルへ出力、保存される。図 4.67 に計測結果の例を示す。

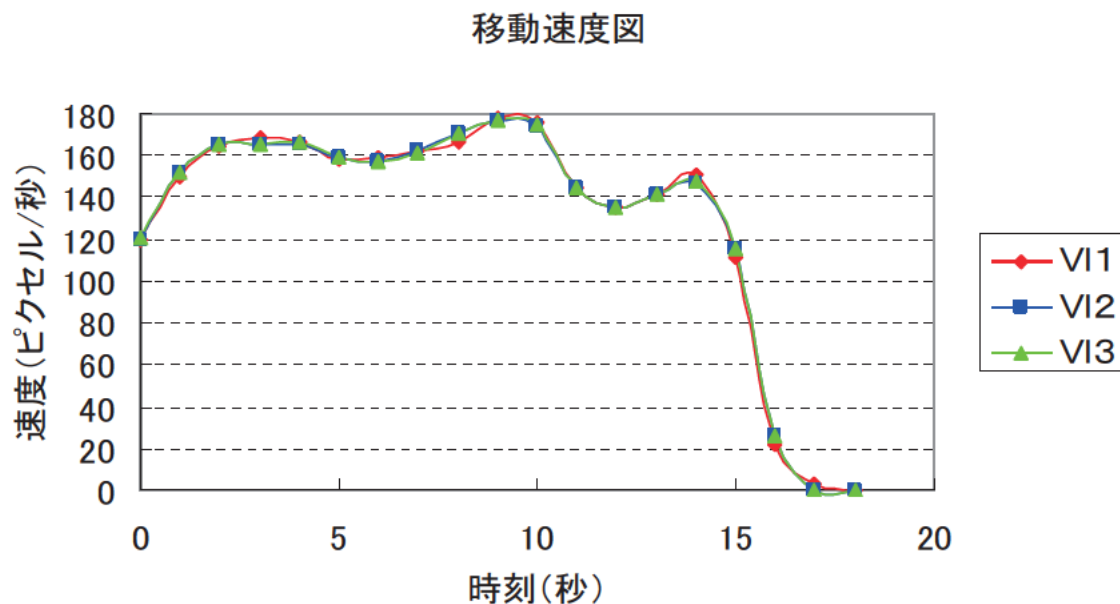


図 4.68 左側画像の移動速度図

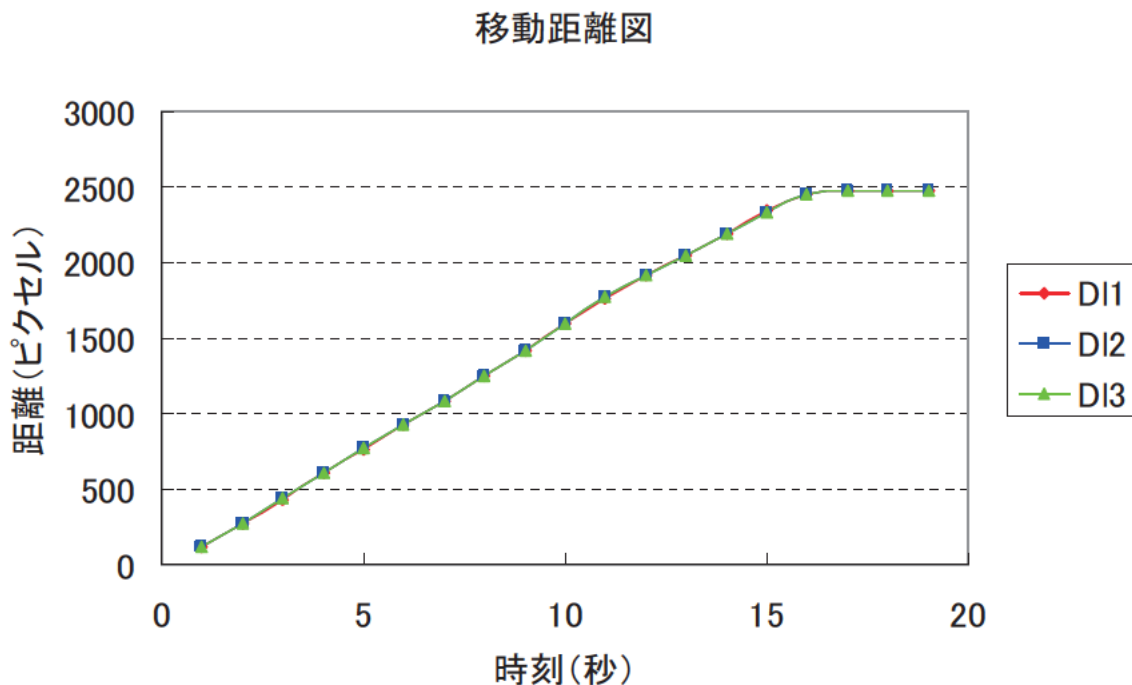


図 4.69 左側画像の移動距離図

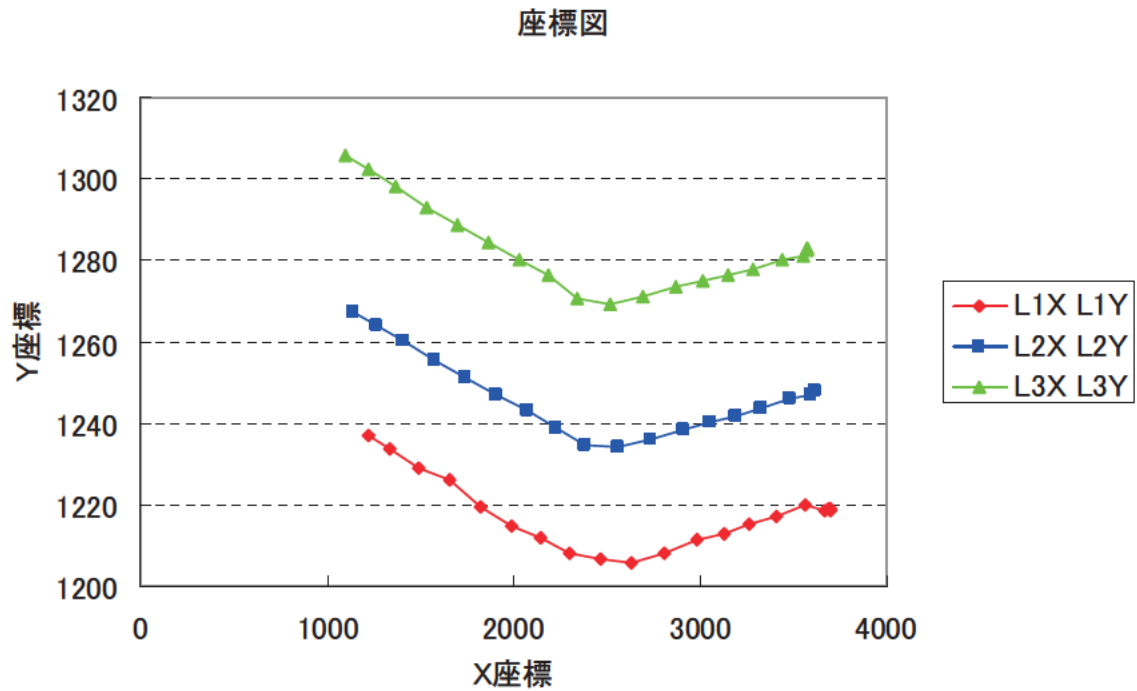


図 4.70 左側画像の座標図

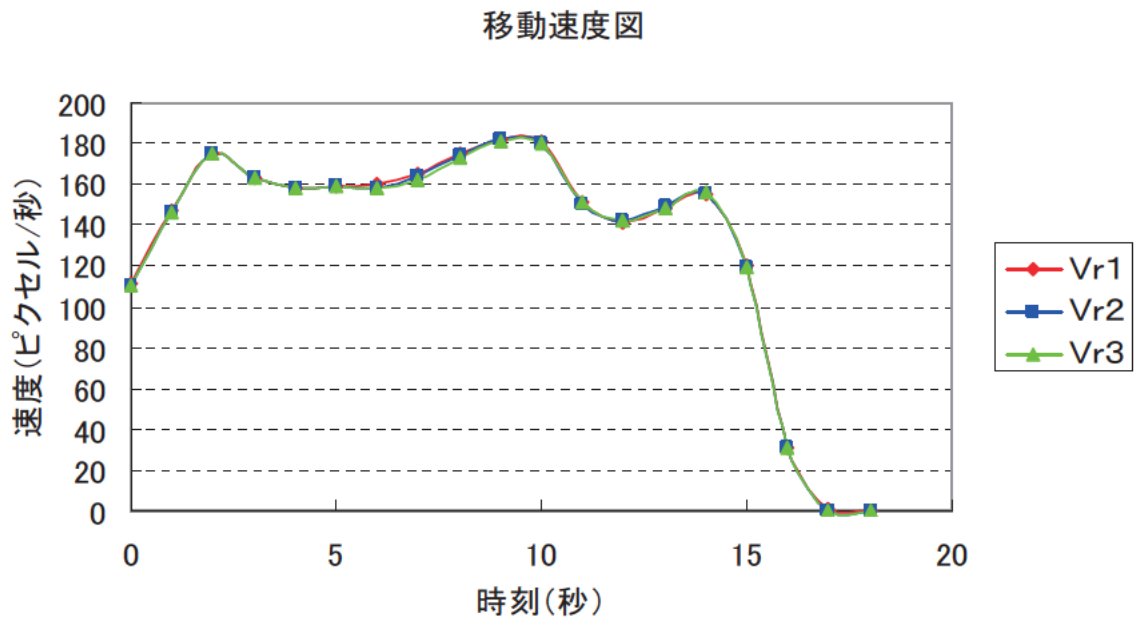


図 4.71 右側画像の移動速度図

移動距離図

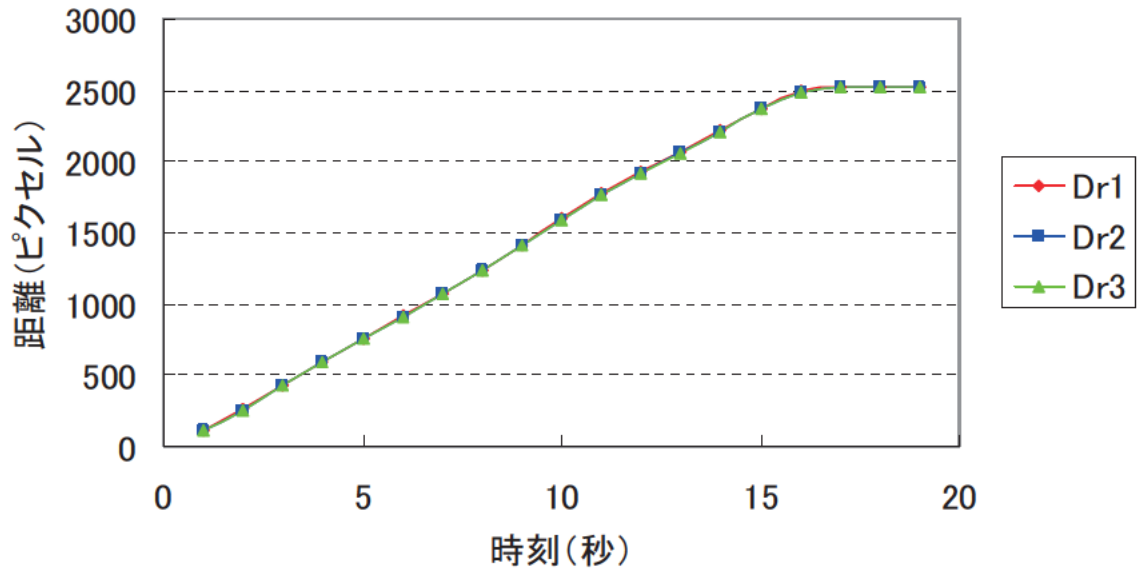


図 4.72 右側画像の移動距離図

座標図

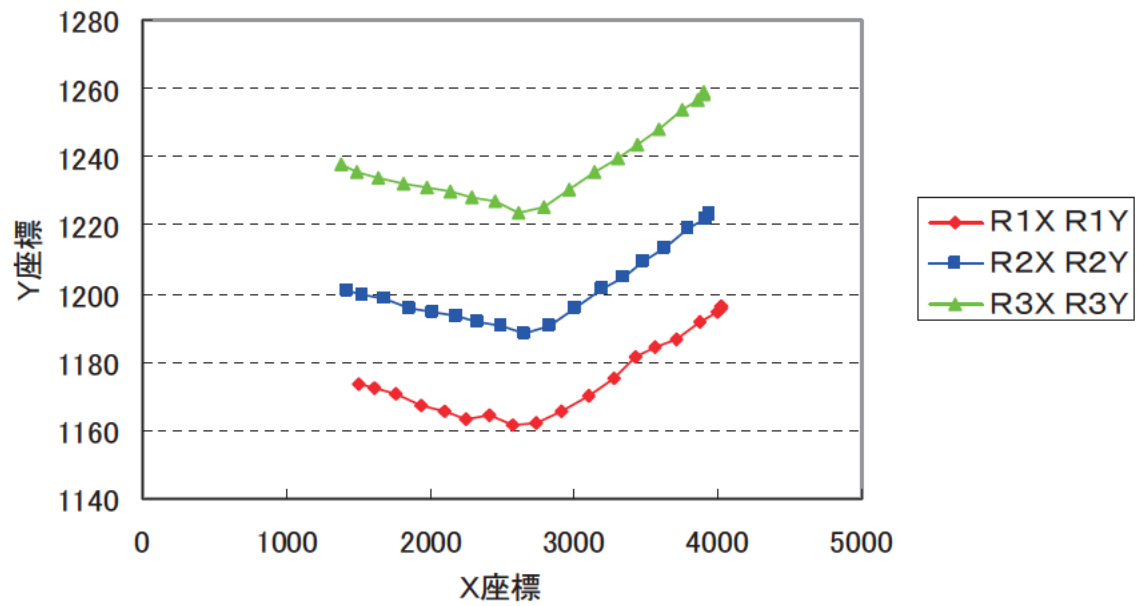


図 4.73 右側画像の座標図

画像追跡で取得した各追跡対象の計測結果から、全追跡過程における移動速度、移動距離及び2次元座標の時刻毎の変化をグラフに示す。図 4. 68、図 4. 69、図 4. 70 は、左側から撮影された片方の画像における3つの追跡対象の移動速度図、移動距離図及び座標図である。図 4. 71、図 4. 72、図 4. 73 は、右側から撮影された片方の画像における3つの追跡対象の移動速度図、移動距離図及び座標図である。

計測結果について、ステレオ画像の左側と右側の画像のどちらにおいても、3つの追跡対象の移動速度と移動距離はほぼ一緒であることが確認できた。また、3つの追跡対象の時刻毎の座標変化も同じ傾向を示すことが分かった。以上の結果は、移動体の画像追跡は正常に行うことができ、計測結果が良好であることを示している。

② 3次元変位ベクトル精度検証

PTV 手法による2次元画像追跡のカメラLとカメラRの結果を用いて画像マッチングを行い、3次元座標を取得した。また、取得した3次元座標とトータルステーションで計測した移動体の座標を比較し、3次元変位ベクトル計測の精度を検証した。表 4. 15 に、アンテナ、ガラス、および、テールの三つの追跡対象に対する3次元計測結果を示す。また、図 4. 74 に、3次元計測結果のプロット図を示す。三つの追跡対象の軌跡は、ほとんど同じ傾向で変化していることが分かる。

表 4. 16 に、追跡対象であるアンテナの3次元計測結果、および、トータルステーションで計測した3次元座標を示す。3次元ステレオ計測による座標とトータルステーション座標の誤差の傾向として、Z方向に5m程度の系統誤差が見られる。

表 4. 17 に、三つの追跡対象の相対較差を示す。3次元ステレオ計測を行った三つの追跡対象間の誤差は小さく、標準偏差で最大でもZ方向の30cm程度である。

表 4.15 三つの追跡対象の3次元計測結果

ID	L1,R1 アンテナ			L2,R2 ガラス			L3,R3 テール		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
AE50012	21,622.401	12,315.360	37.617	21,621.122	12,314.928	37.405	21,620.395	12,314.352	37.116
AE50016	21,624.296	12,315.367	38.004	21,623.074	12,314.909	37.993	21,622.411	12,314.332	37.988
AE50020	21,626.585	12,315.452	37.710	21,625.420	12,314.954	38.043	21,624.775	12,314.381	38.066
AE50024	21,628.955	12,315.726	35.465	21,627.737	12,315.246	35.571	21,627.095	12,314.645	35.752
AE50027	21,631.622	12,315.770	35.699	21,630.360	12,315.309	35.508	21,629.697	12,314.711	35.561
AE50031	21,634.268	12,315.742	36.619	21,633.021	12,315.273	36.356	21,632.363	12,314.681	36.450
AE50035	21,636.742	12,315.786	36.387	21,635.490	12,315.354	36.135	21,634.852	12,314.776	36.162
AE50039	21,639.226	12,315.875	36.133	21,637.975	12,315.405	36.078	21,637.316	12,314.843	35.955
AE50042	21,641.801	12,315.911	35.824	21,640.527	12,315.489	35.722	21,639.858	12,314.919	35.740
AE50046	21,644.488	12,315.992	35.039	21,643.228	12,315.519	35.570	21,642.558	12,314.954	35.570
AE50051	21,647.328	12,315.951	35.051	21,646.044	12,315.481	35.372	21,645.382	12,314.953	35.217
AE50054	21,650.136	12,315.906	35.047	21,648.848	12,315.445	35.193	21,648.180	12,314.904	35.124
AE50058	21,652.478	12,315.864	34.908	21,651.172	12,315.440	35.029	21,650.505	12,314.877	35.039
AE50062	21,654.675	12,315.853	34.730	21,653.373	12,315.409	34.872	21,652.710	12,314.873	34.763
AE50066	21,656.951	12,315.818	34.756	21,655.692	12,315.394	34.609	21,655.018	12,314.857	34.621
AE50069	21,659.262	12,315.718	35.304	21,658.087	12,315.364	34.531	21,657.448	12,314.832	34.336
AE50073	21,661.132	12,315.742	34.990	21,659.883	12,315.316	34.857	21,659.217	12,314.764	34.850
AE50077	21,661.729	12,315.812	34.200	21,660.449	12,315.362	34.208	21,659.781	12,314.789	34.227

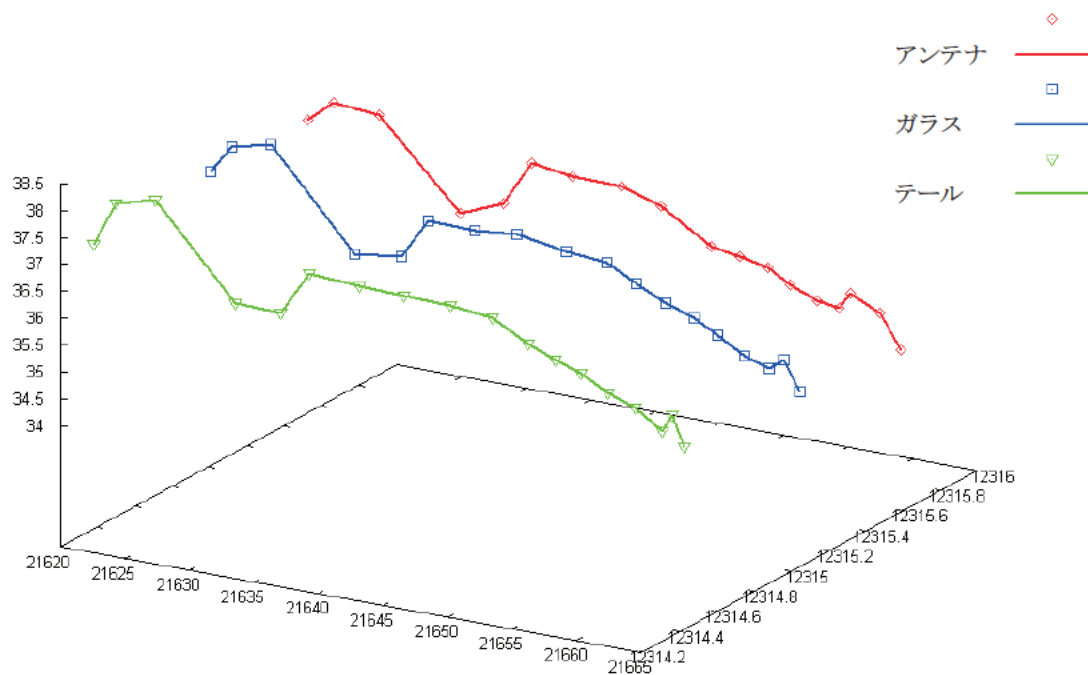


図 4.74 三つの追跡対象の3次元計測結果のプロット図

表 4.16 3次元ステレオ計測結果とトータルステーション計測結果の比較

ID	ステレオ計測			TS (補正值)			較差			
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
AE50012	21,622.401	12,315.360	37.617	21622.069	12315.356	29.720	0.332	0.004	7.897	
AE50016	21,624.296	12,315.367	38.004	21623.414	12315.393	29.741	0.882	0.026	8.263	
AE50020	21,626.585	12,315.452	37.710	21625.339	12315.438	29.771	1.246	0.014	7.939	
AE50024	21,628.955	12,315.726	35.465	21627.828	12315.496	29.813	1.127	0.230	5.652	
AE50027	21,631.622	12,315.770	35.699	21630.258	12315.560	29.846	1.364	0.210	5.853	
AE50031	21,634.268	12,315.742	36.619	21632.769	12315.613	29.887	1.499	0.129	6.732	
AE50035	21,636.742	12,315.786	36.387	21635.561	12315.672	29.922	1.181	0.114	6.465	
AE50039	21,639.226	12,315.875	36.133	21638.058	12315.712	29.968	1.168	0.163	6.165	
AE50042	21,641.801	12,315.911	35.824	21639.722	12315.747	29.994	2.079	0.164	5.830	
AE50046	21,644.488	12,315.992	35.039	21642.333	12315.792	30.010	2.155	0.200	5.029	
AE50051	21,647.328	12,315.951	35.051	21646.251	12315.832	29.935	1.077	0.119	5.116	
AE50054	21,650.136	12,315.906	35.047	21647.536	12315.852	29.917	2.600	0.054	5.130	
AE50058	21,652.478	12,315.864	34.908	21650.678	12315.868	29.849	1.800	0.004	5.059	
AE50062	21,654.675	12,315.853	34.730	21652.989	12315.869	29.803	1.686	0.016	4.927	
AE50066	21,656.951	12,315.818	34.756	21655.233	12315.863	29.757	1.718	0.045	4.999	
AE50069	21,659.262	12,315.718	35.304	21656.793	12315.863	29.726	2.469	0.145	5.578	
AE50073	21,661.132	12,315.742	34.990	21659.486	12315.849	29.662	1.646	0.107	5.328	
AE50077	21,661.729	12,315.812	34.200	21661.370	12315.825	29.633	0.359	0.013	4.567	
							1.466	0.058	5.918	平均
							0.630	0.112	1.125	標準偏差

表 4.17 追跡対象の相対較差

較差 (ガラス アンテナ)			較差 (テ ル アンテナ)			較差 (テ ル ガラス)			
dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	
1.279	0.432	0.212	2.006	1.008	0.501	0.727	0.576	0.289	
1.222	0.458	0.011	1.885	1.035	0.016	0.663	0.577	0.005	
1.165	0.498	0.333	1.810	1.071	0.356	0.645	0.573	0.023	
1.218	0.480	0.106	1.860	1.081	0.287	0.642	0.601	0.181	
1.262	0.461	0.191	1.925	1.059	0.138	0.663	0.598	0.053	
1.247	0.469	0.263	1.905	1.061	0.169	0.658	0.592	0.094	
1.252	0.432	0.252	1.890	1.010	0.225	0.638	0.578	0.027	
1.251	0.470	0.055	1.910	1.032	0.178	0.659	0.562	0.123	
1.274	0.422	0.102	1.943	0.992	0.084	0.669	0.570	0.018	
1.260	0.473	0.531	1.930	1.038	0.531	0.670	0.565	0.000	
1.284	0.470	0.321	1.946	0.998	0.166	0.662	0.528	0.155	
1.288	0.461	0.146	1.956	1.002	0.077	0.668	0.541	0.069	
1.306	0.424	0.121	1.973	0.987	0.131	0.667	0.563	0.010	
1.302	0.444	0.142	1.965	0.980	0.033	0.663	0.536	0.109	
1.259	0.424	0.147	1.933	0.961	0.135	0.674	0.537	0.012	
1.175	0.354	0.773	1.814	0.886	0.968	0.639	0.532	0.195	
1.249	0.426	0.133	1.915	0.978	0.140	0.666	0.552	0.007	
1.280	0.450	0.008	1.948	1.023	0.027	0.668	0.573	0.019	
1.254	0.447	0.024	1.917	1.011	0.053	0.663	0.564	0.029	平均
0.039	0.032	0.289	0.052	0.046	0.330	0.019	0.022	0.111	標準偏差

以上の結果より、3次元ステレオ計測の結果とトータルステーションの計測結果の誤差の傾向として、系統誤差が大きいことが分かった。また、3次元ステレオ計測を行った3つの追跡対象間の誤差は、標準偏差で最大でも30cm程度と小さいことから、相対精度は比較的良いと評価される。

なお、トータルステーションの計測結果は正確であると考えられることから、誤差の要因は同期撮影に伴う標定誤差に起因するものと考えられる。

③実画像への適用実験

東横山と大塔村地すべりのビデオ撮影画像を用いて、PTVによる実際の地すべり画像追跡の適応性についても検討した。図4.75と図4.76はそれぞれ東横山と旧大塔村地すべりの画像追跡結果を示す。東横山地すべりの画像追跡においては、7つのトレーサーを設定して追跡を行った。これらの追跡対象のうち、5つは最初から最後まで正常に追跡できた。その他の2つは、追跡対象の変形などにより、自動追跡は途中でうまく行かなくなったものの、手動修正によって最後まで追跡できた。旧大塔村地すべり画像においては、全5つの対象をすべて正常に追跡できた。

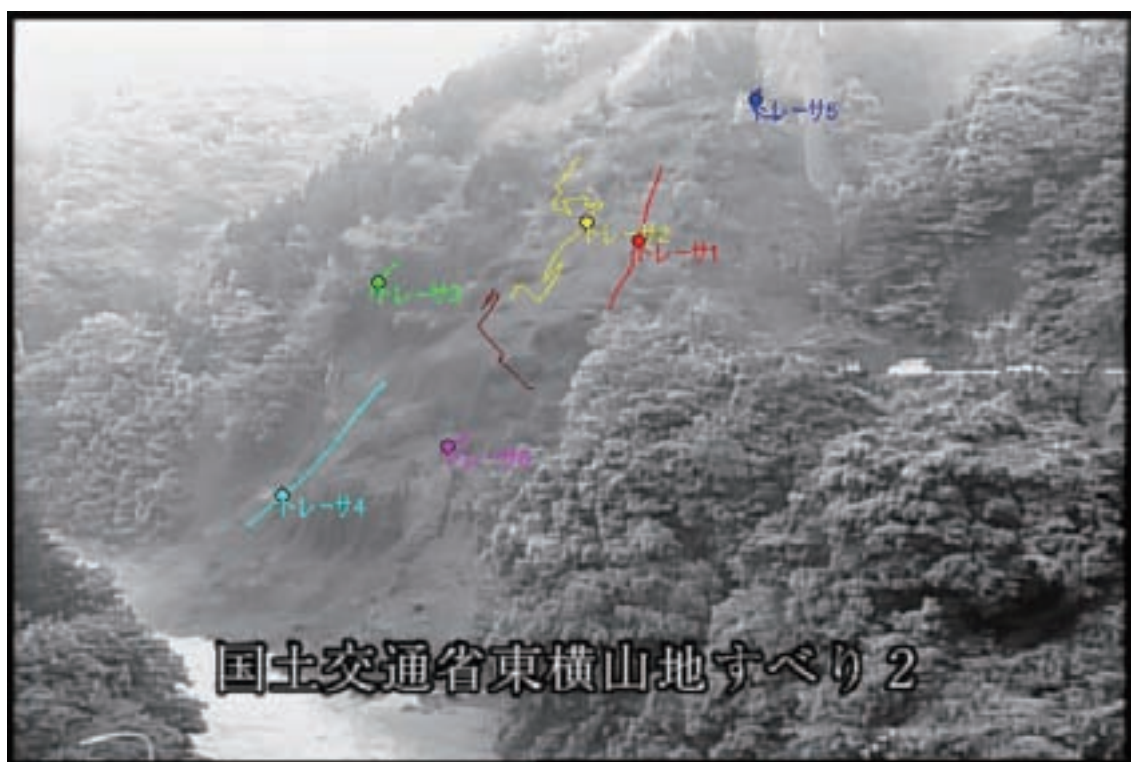


図 4.75 東横山地すべり画像の追跡結果



図 4.76 大塔村地すべり画像の追跡結果

(4)連続ステレオ写真による地すべり体の挙動解析のまとめ

地すべり体の経時変化を3次的に把握する際には、画像追跡に基づく3次元変位ベクトル計測手法を用いることが有効である。3次元変位ベクトルを求める手法として、3次元モデルデータによる解析と画像計測による解析の2つがある。3次元モデルデータによる解析手法の特徴は、正射画像上において計測対象の画像追跡を自動的に行い、2次元変位ベクトルを求め、次に3次元メッシュデータを用いて2次元変位ベクトルを3次元化することにより、3次元変位ベクトルを求めることである。この手法では、PTV手法で画像追跡を行う際に正射画像を使用するため、より正確に計測を行うためには、その正射画像を正確に作成する必要がある。正射画像の作成には、高精度、高密度の3次元メッシュデータが要求されるため、ステレオ撮影角度等の画像取得条件の考慮や、正確な画像マッチングを行うための工夫等が重要である。一方、画像計測による解析手法では、連続ステレオ撮影で取得されるステレオペアの片方の画像上において画像追跡を自動的に行い、2次元変位ベクトルを求め、次にもう片方の画像を利用してステレオ計測を行い、3次元変位ベクトルを求める。この手法では、PTV手法による画像追跡を行う際に、正射画像ではなく、そのまま撮影画像を使用する。また、3次元変位ベクトルの取得は、一般的な写真測量手法を用いて直接計測を行うため、比較的簡単にできる。

本研究では、移動体の連続撮影実験で取得した画像ならびに東横山と旧大塔村地すべりのビデオ画像を用いて、PTV手法による2次元画像追跡の適応性について検討した。移動体の連続撮影実験画像についての解析結果より、2次元変位ベクトルの追跡は誤差が少なく精度も比較的良いと判断できる。また、実際の地すべり画像の追跡について、旧大塔村の画像では比較的良好な結果が得られた。東横山の画像では追跡点7点のうち2点が追跡途中でズレを生じたが、手動修正によって最後まで追跡できた。移動体の連続撮影実験の画像及び実際の東横山と旧大塔村地すべりのビデオ画像の解析結果は、画像追跡によって2次元変位ベクトルを取得できることを示している。

3次元変位ベクトルの自動取得によって、地すべり体の3次元的な挙動解析に必要な情報の抽出をより効果的に行うことができる。本研究で提案した手法は、地すべり発生から終了までの地すべり体各部分の3次元移動状況等を定量的に把握することが可能であり、地すべりの現象や状況の分析、及び地すべり機構の解明に寄与する。

4.4.3 今後の課題

これまで実施した連続ステレオ撮影による地すべり体の挙動把握の検討により、今後、実用化の際に、撮影システムの性能向上や、3次元モデルデータの作成アルゴリズムの改善などに関する課題を引き続き検討する必要があることが示された。

(1) ステレオ撮影システムの性能向上について

撮影フレームレートは、ステレオ連続撮影の時間間隔を表す指標である。PTV手法を用いて計測対象を追跡する際に、輝度パターンの連続性を確保することが必要である。輝度パターンの移動量に比べて計測間隔が長すぎると、計測対象の変形などにより、追跡ができなくなり、計測は困難となる。地すべり崩壊の速度は速いため、高い撮影フレームレートが要求される。一般的なビデオ画像のフレームレートは30枚/秒であるため、そのまま利用して計測を行うのには問題がないが、通常デジタルカメラで撮影した画像を利用する場合は、地すべり計測対象の連続追跡を確保するために、現在使用している撮影システムのフレームレートより、さらに高いフレームレートが要求される。

(2) 3次元モデルデータの作成アルゴリズムの改善について

3次元モデルデータを用いてPTV手法で画像解析を行う際に、正射画像を使用する。このため、より正確に計測を行うために、正射画像を正確に作成する必要がある。また、正射画像の作成には、高精度、高密度の3次元メッシュデータが要求されるため、より正確な画像マッチングを行うための工夫やアルゴリズムの改善等が重要である。

4.5 今後の課題

本章では移動、変形する対象物、すなわち地すべり体に対する取得データの活用方法に関し、地すべり体の挙動把握のための視覚化や2次元、3次元的な挙動解析について検討した。アニメーションの作成システムが構築され、挙動解析においては、連続2次元画像にPIV法を適用することにより、自動で地すべり体の移動速度、方向を定量化できることが確認できた。また、連続2次元画像上でPTV手法により追尾された複数の特徴点を、ステレオ計測することにより、地すべり体の3次元位置変動を定量化できることが示された。これらの手法はシステムの自動化に大きく寄与するものである。現在、デジタルカメラ、ビデオ、レーザ計測機器等のデジタルセンサの性能は急速に上がっている。これらのセンサにより、より高精細かつ高精度な連続画像や位置情報を取得することが可能となる。このようなデータを用いた、より高度な地すべり体の挙動解析手法の開発が求められる。また、地すべり体の自動変動計測システム等を含むモニタリングシステム等の開発が求められる。

5. まとめ

本共同研究においては、崩落に向かう地すべりの3次元的な滑動状態を定量的に把握するための自動データ取得・処理システムの開発をめざし、複数のデジタルカメラを用いてステレオ画像の連続撮影を行い、地すべり体の3次元モデルを作成するシステムを構築した。そして、本システムにより生成される3次元モデルを用いたデータ処理・解析手法の検討を行った。

具体的には、2007～2008年度（平成19～20年度）にかけて、(1)連続ステレオ写真撮影手法の検討、(2)3次元モデル化手法の検討、(3)3次元モデルデータの活用方法の検討（地すべり体の挙動把握）、の3項目について、以下に詳述するような成果と課題を得た。

今後の課題としては、主に、(1)高速移動する地すべり挙動を高解像度で捉えるためのステレオ撮影システムの性能向上（フレームレートの向上）、(2)高精度・高密度の3次元モデルデータを得るための画像マッチング精度の向上とアルゴリズムの改善、が挙げられる。

(1) 連続ステレオ写真撮影手法の検討

- ✚ 既往の同期撮影システムの連写速度や画像読み取り速度を高速度化する場合、有線・無線コントロールを使用する場合について、システムの構成を変えることにより有線コントロールで1コマ/秒、無線コントロールで1コマ/2秒の連続撮影が可能であることを確認した。
- ✚ 本共同研究期間中の検討においては、本研究で目標とする2コマ/秒の連続撮影を達成できていないため、カメラ本体のスペック向上など、ハード面の開発動向を注視しながら、目標を達成する同期撮影システムの構築が必要である。
- ✚ コントロールボックスとワイヤレスコントローラーの組合せ実験や有線コントロールにおける最大通信距離の検討を行い、高速かつ多様な現場条件に対応できる連続撮影システムを構築することが課題である。

(2) 3次元モデル化手法の検討

- ✚ ダム貯水池内の地すべり斜面における撮影実験から得られたステレオペア写真を、航空写真測量を前提とした地形抽出ソフトと地すべり地形に対応した写真測量ソフトで解析を行った。その結果、画像上で局所的に地形の変化が大きい地すべり地の場合は、収斂撮影によるステレオペア写真を用いる写真測量ソフトが解析に適しており、10cm程度の標高精度を得られることが確認された。
- ✚ 土木研究所構内で行った撮影実験により、カメラの設置場所が画像解析に与える影響を検討した。その結果、実際の現場で撮影する際は極力対象物の正面からの撮影を行うこと、ターゲット（特徴点）が明確に見える位置にカメラを設

置すること、また収斂角を 30° ～ 70° の範囲内におさめ、特に対象物の凹凸が激しい場合は収斂角 30° 程度の位置にカメラを設置することが適当であることが確認された。

- ✚ 撮影時の気象条件の違いが画像解析に与える影響を検討するため、建物を撮影対象として気象条件の異なる日に撮影した画像を解析した。その結果、画像の輝度の違いが解析精度に影響を与えていることが確認されたため、画像の輝度調整などの前処理を行うことにより、解析精度の向上を図ることについて検討することが課題である。
- ✚ 実斜面の撮影を行い Kuraves の自動マッチング機能により地形モデルを作成し、現場で測量した結果と比較を行うことでマッチング率の検証を行った。凹凸の大きい斜面では、ステレオ画像の撮影位置間隔が狭いほどマッチング成功率とマッチング正解率が向上した。一方、凹凸の少ない斜面では、評定点を写真画像上で明瞭とすること、露出オーバーや露出アンダーを避ける必要があることが確認された。
- ✚ 実際の地すべり現場に本システムを適用するためには、撮影準備作業の迅速化や、画像解析時の人為的誤差の軽減、自動マッチングによる 3 次元モデル化について検討する必要がある。

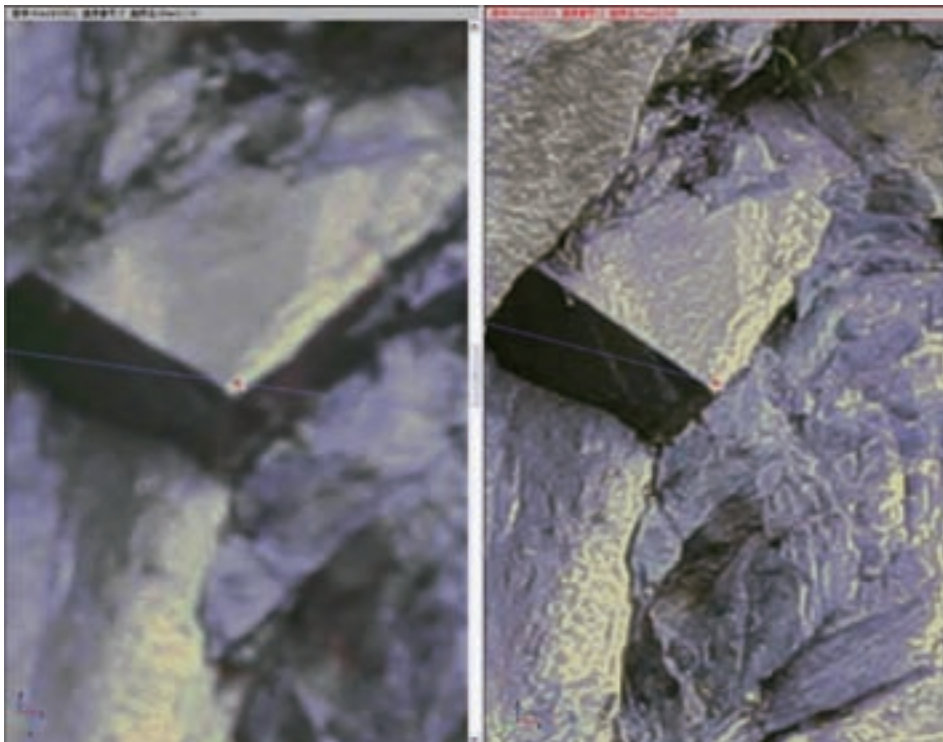
(3) 3 次元モデルデータの活用方法の検討（地すべり体の挙動把握）

- ✚ 3 次元 CG アニメーションを作成するために必要な、3 次元 GIS ソフトの 3 次元 CG モデル自動作成機能の開発を行った結果、画像解析ソフトのデータをインポートし、3 次元 CG による表示が可能になった。今後、3 次元 CG アニメーションを作成するために、時系列データの 3 次元 CG モデルの一括自動作成機能や時系列 3 次元 CG モデルの連続切り替え表示を行うタイマー機能を検討し、開発を行うことが課題である。
- ✚ 変形しながら移動する対象としてスライムを使用し、撮影からアニメーション作成までの一連の実験を行い、課題の抽出を行った。土塊モデルであるスライムの後方部分は撮影できない陰の部分であることからモデルの作成が不可能であったが、前面部分については、ステレオ撮影画像の良好な自動対応が実施できた。前項で得られた移動体の時系列 3 次元データを用い、CG アニメーションの作成を行った。標高点数を多く取ることにより、3 次元 CG の再現性を高めた。
- ✚ 2 次元動画画像から速度ベクトル検出を行う 2 次元流れ解析手法 PIV を行い、地すべり崩落における一連の運動方向や速度分布を面的に計測し、地すべりの挙動を把握できることが確認された。また、崩壊の現象や、崩壊の進行過程及び地すべり体の滑動形態等を解析し、その発生機構を分析することによって、崩壊の複雑な現象をより詳細に表現することができた。

- ✚ イメージトラッカー解析手法 PTV (Particle Tracer Velocimetry : 粒子速度計測法) を用いた画像解析を行い、3次元変位ベクトル計測の精度を検証した3次元ステレオ計測の結果とトータルステーションの計測結果の誤差の傾向として、系統誤差が大きいことが分かった。誤差の要因は同期撮影に伴う標定誤差に起因するものと考えられる。3次元ステレオ計測を行った3つの追跡対象間の誤差は、標準偏差で最大でも30cm程度と小さいことから、相対精度は比較的良いと評価される。



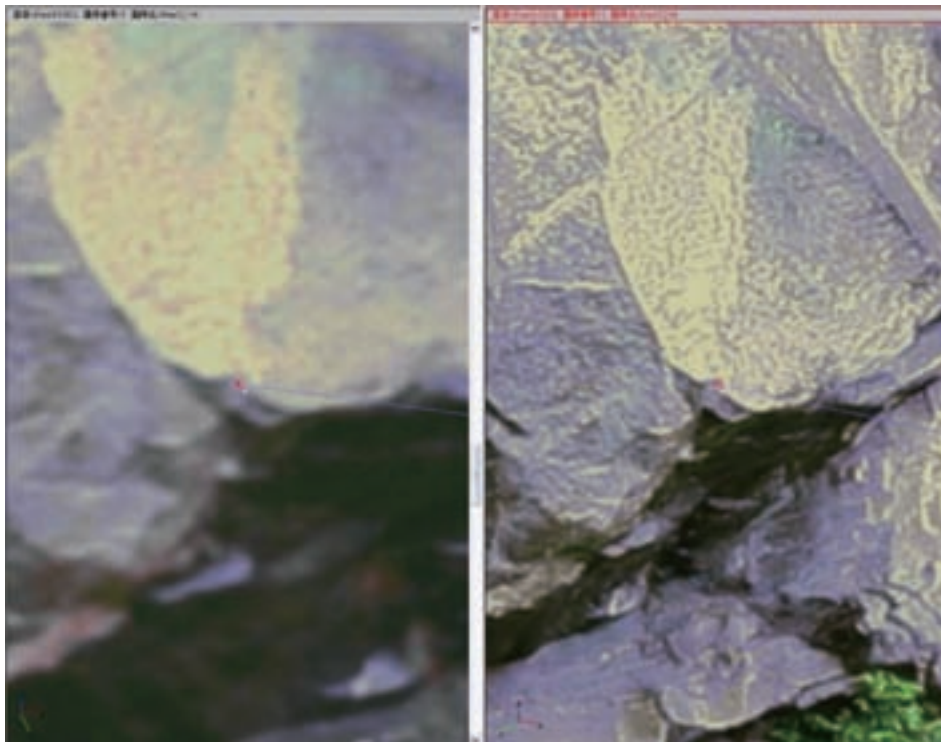
露頭部 30 H-1 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



露頭部 30 H-2 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



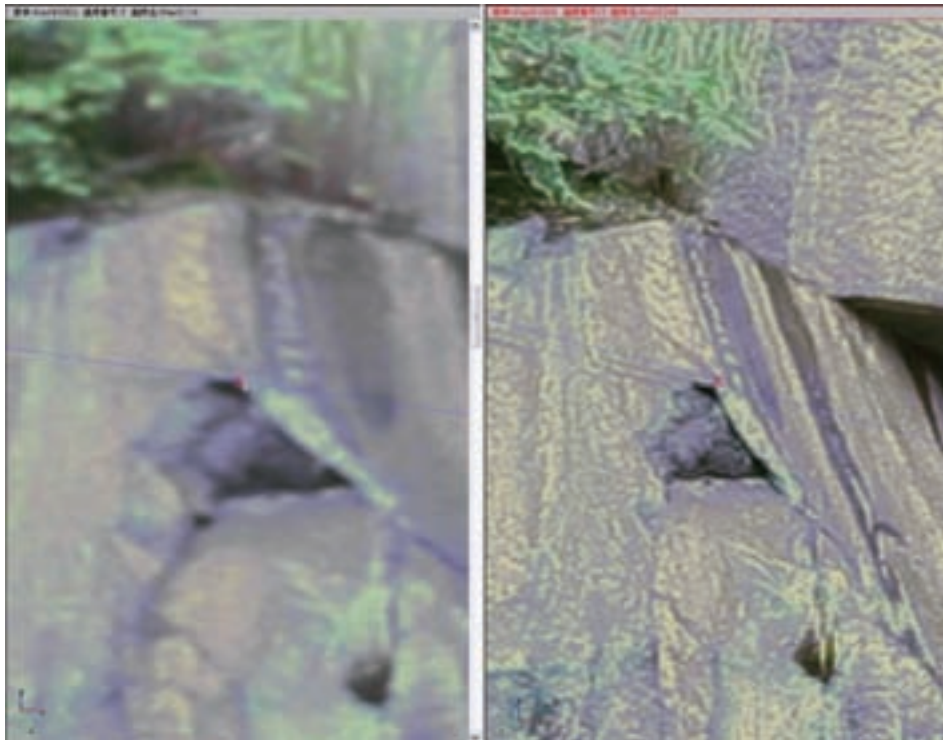
露頭部 30 H-3 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



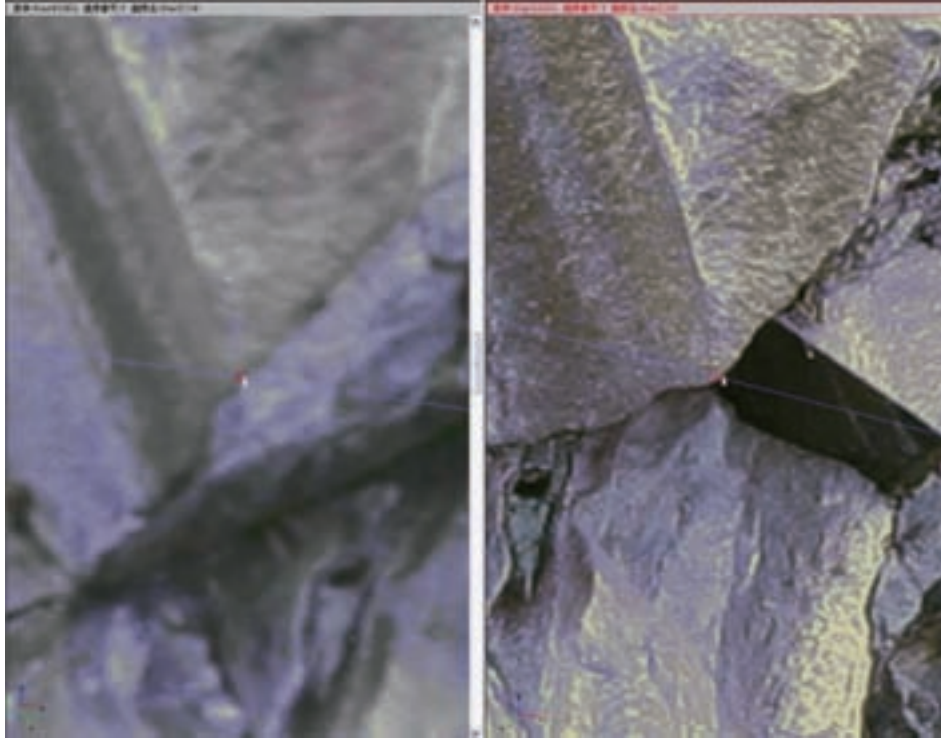
露頭部 30 H-4 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



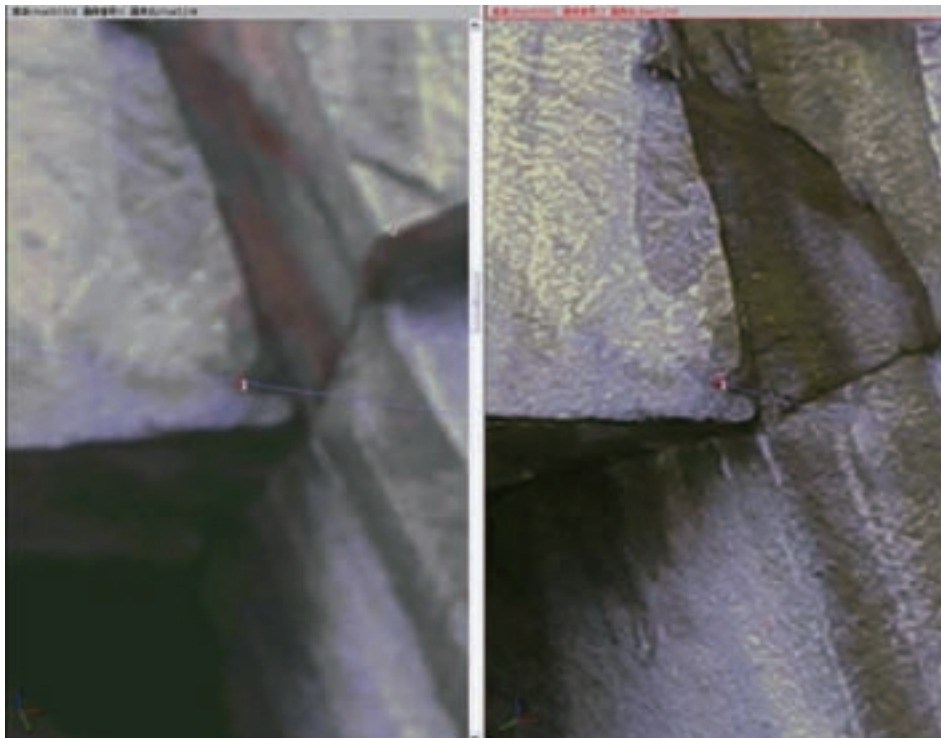
露頭部 30 H-5 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



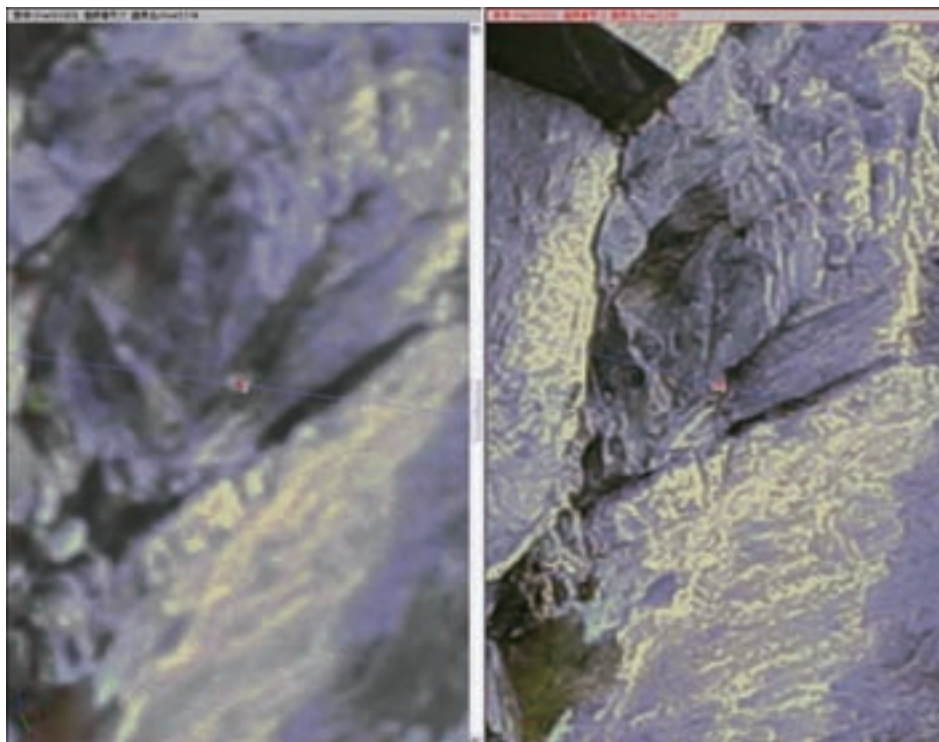
露頭部 30 H-6 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



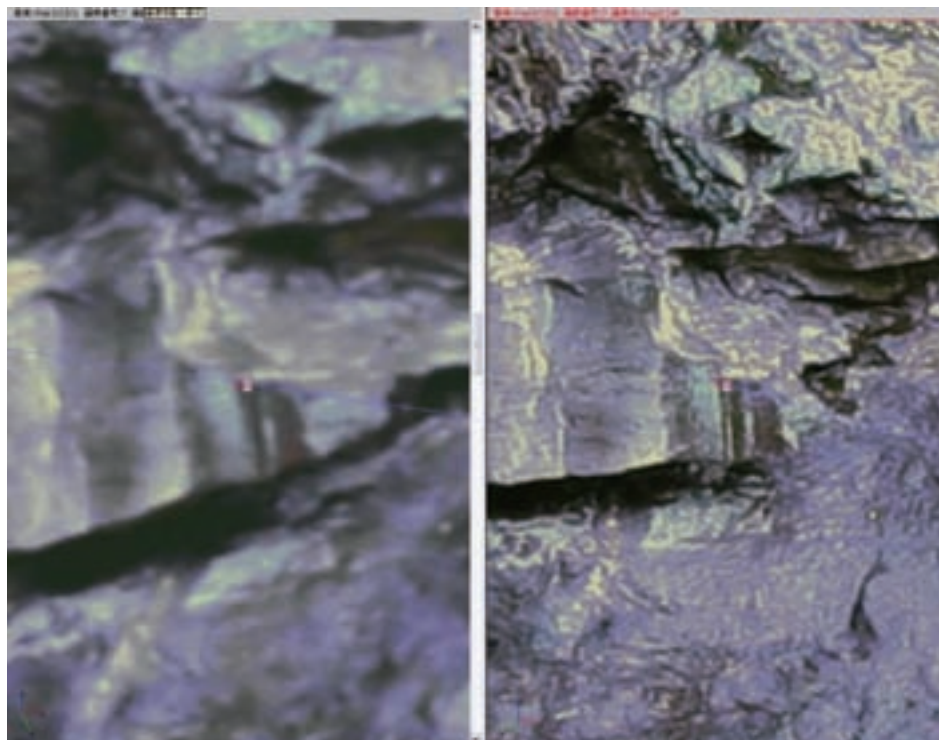
露頭部 30 H-7 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



露頭部 30 H-8 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



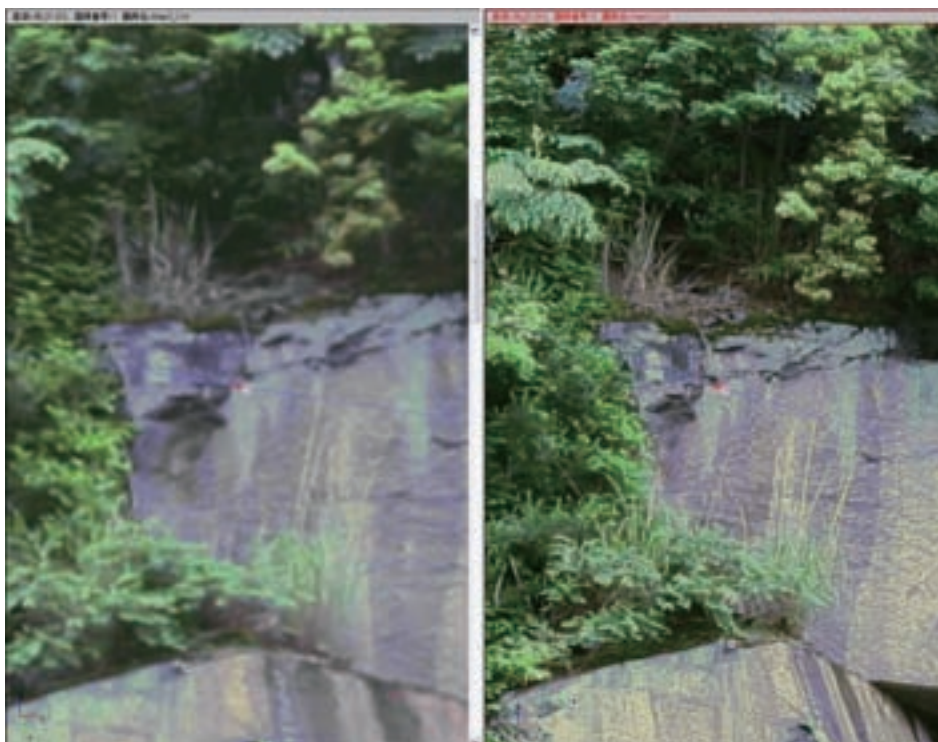
露頭部 30 H-9 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



露頭部 30 H-10 (1 R 30 補正 : 左写真, 1 L 30 : 右写真)



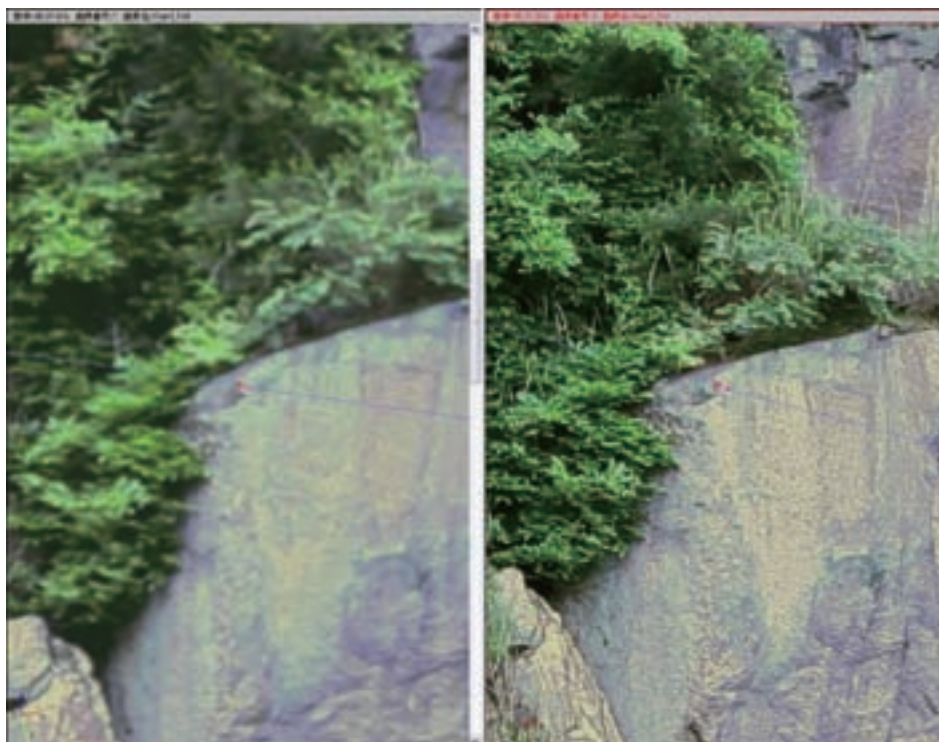
No.21



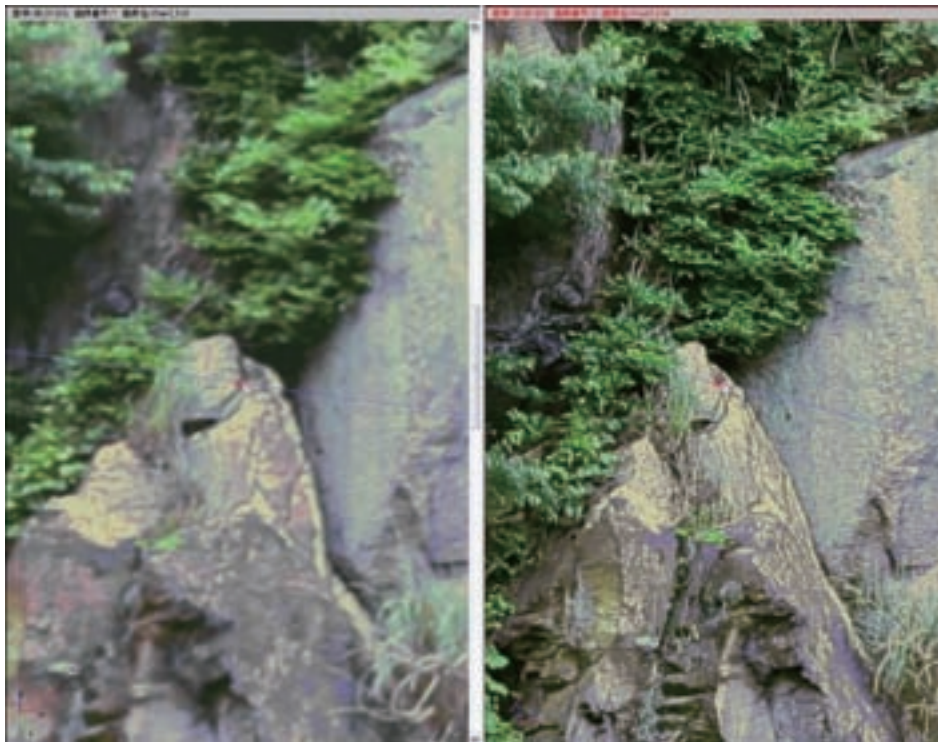
No.22



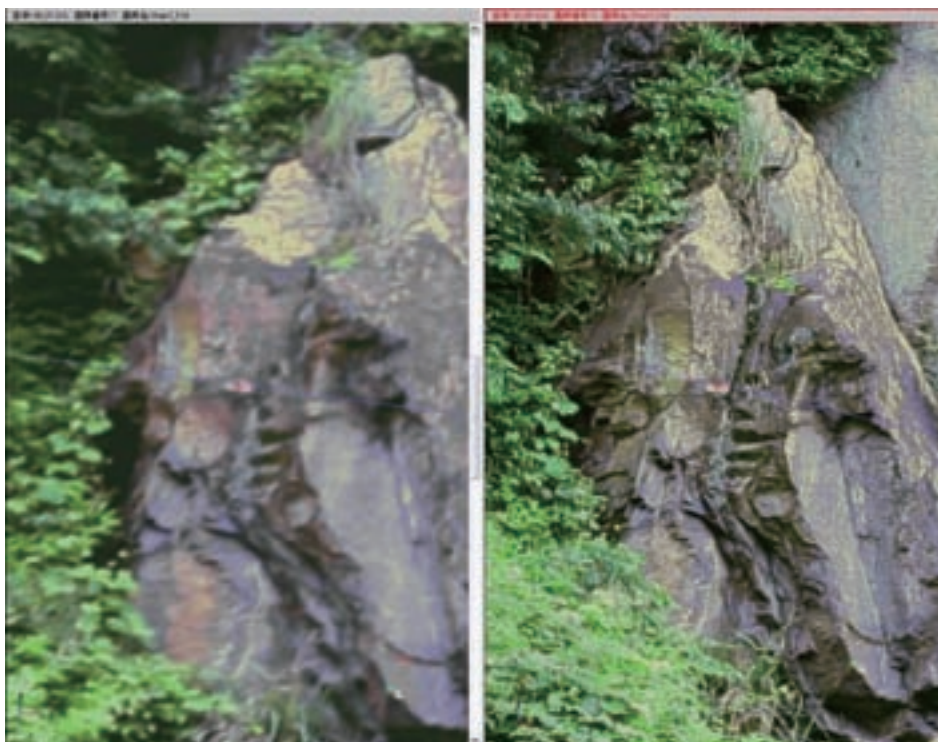
No.23



No.24



No.25



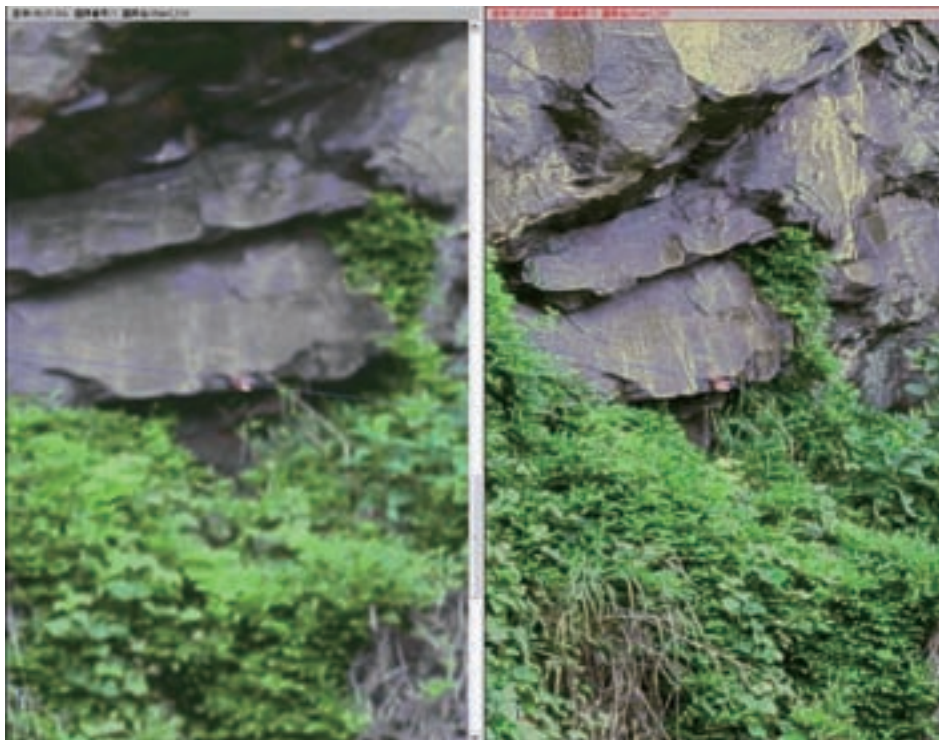
No.26



No.27



No.28



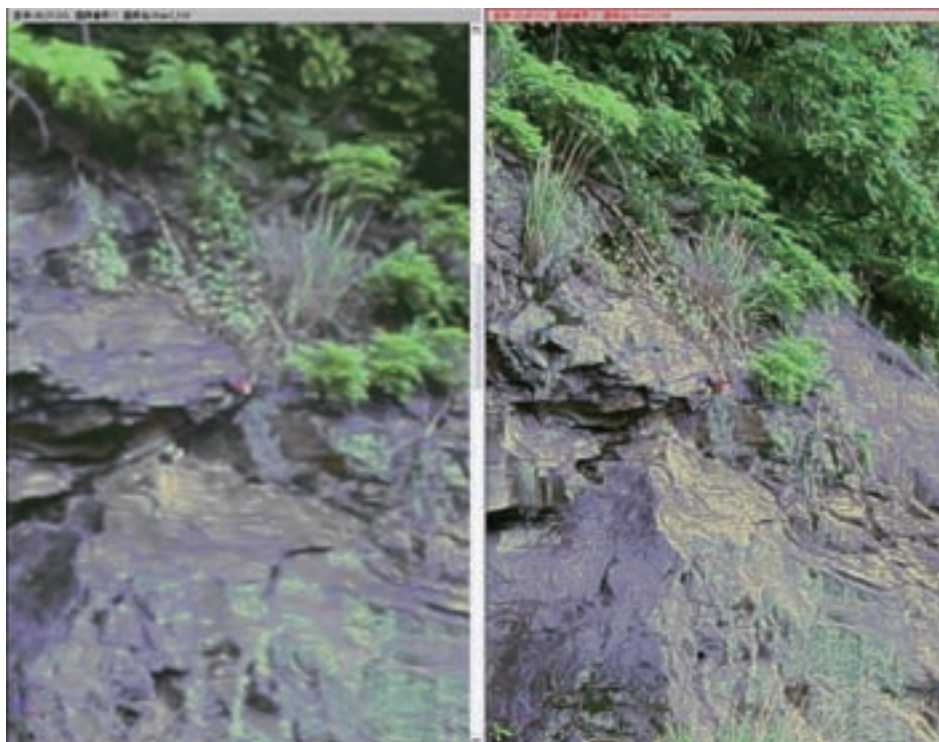
No.29



No.30



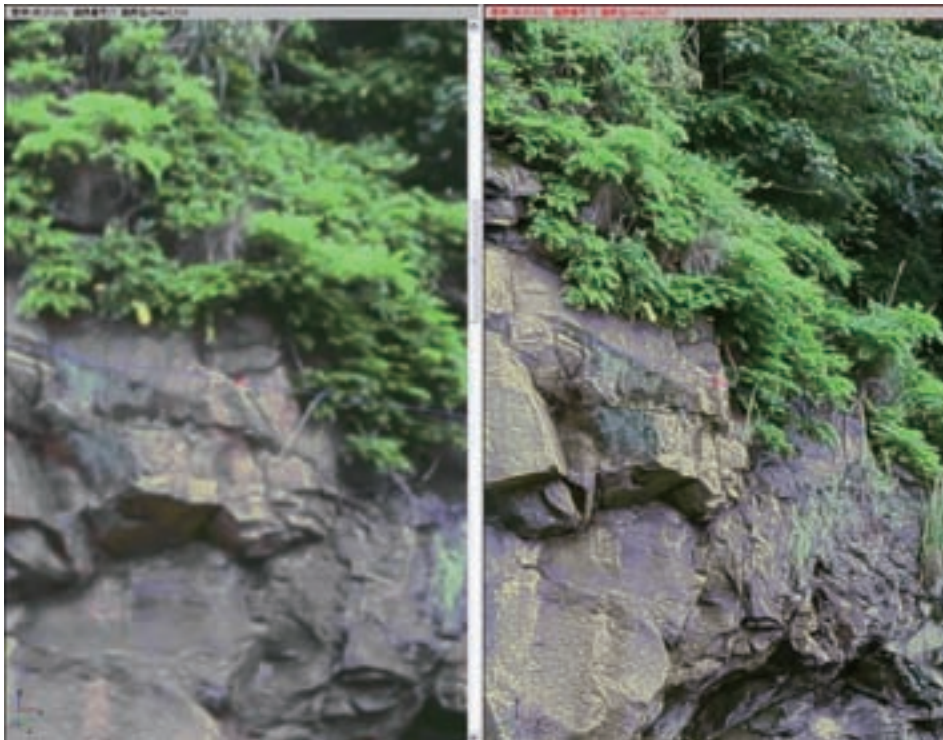
No.31



No.32



No.33



No.34

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.431 Jan. 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754