

# 最近のリモートセンシング技術による土木計測と拡張現実(AR:Augmented Reality)システム

山口大学 近久 博志  
復建調査設計(株) 来山 尚義

## 1. はじめに

近年、ネットワーク通信による情報・知識の共有化が進められた情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) は、ノートパソコンの小型化、携帯電話・PHS、携帯端末の高機能化とタブレット型パソコンの出現により、次第に、市場として統合される様相を見せ始めている。一方、ネットワーク、特にインターネットをベースとしたコンピュータの利用形態であるクラウドコンピューティング (Cloud computing) の普及により、ICT 技術の拡大はますます加速されるようになって来ている。

こうした中で、筆者は、これまで建設現場における技術職員の生産性の向上につながる ICT の研究開発に取り組んできた<sup>1)</sup>。建設現場での ICT 技術は、通信や作図や整理分析などデータの受発信や加工技術には目を見張るものがあり、設計図書としての図表や計算書は格段に美しく、分かり易いものになった。反面、事務所仕事が多くなり、現場職員が作業現場に出る時間が少なくなってきた。なかには、不慣れなパソコン作業に悲鳴を上げている職員も出始めており、ICT 化が必ずしも現場職員の生産性の向上に直接役立っているのではなく、新しい職種が増えたと割り切って対応している関係者も多い。このような現場でも、職員は、通常の業務や生活の中で、普通にメールをやり取りし、ネット検索やネットショッピングを楽しみ、サイバー空間にある ICT の技術を違和感なく活用しているのである。これは、いわゆる ICT のハードの操作がキーボードからマウスやタッチパネルの操作などなり、ユーザフレンドリーになってきていることも要因の一つであろう。このような環境下にある建設現場での”あまり ICT 化に積極的でない施工現場でも欲しがる ICT 技術とは何か”というこの問いかけの中で辿り着いた技術の一つが、写真測量やレーザ測距などのリモートセンシング技術を活用した測量システムと拡張現実 (AR: Augmented Reality) 技術を活用した丁張りシステムである。二人で行っていた作業を一人で、時間が掛かっていた作業を短時間に、測量学の知識を持った技術者が実施してきた作業を専門的な知識がなくてもできるように、面倒で間違い易い作業を簡単に行うことが出来ることを目的に研究開発に取り組んできた。今回、ここでは、これまで取り組んできたリモートセンシング技術や AR システムを紹介し、今後の可能性について論じる。

## 2. リモートセンシング技術

### 2-1 リモートセンシング技術の概要<sup>2)</sup>

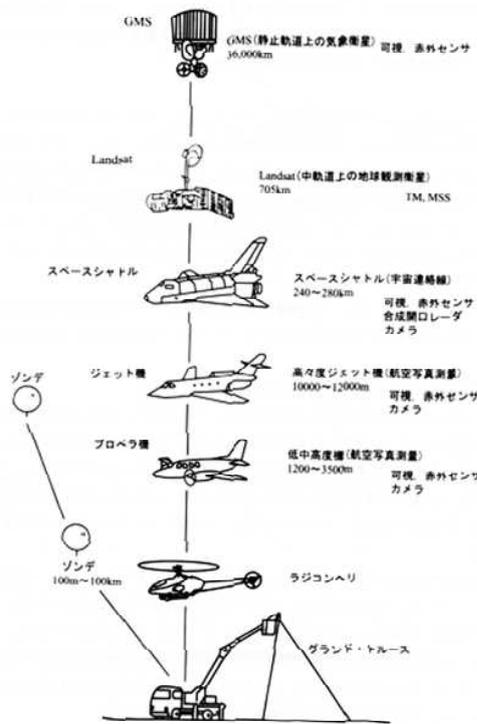
日本リモートセンシング研究会では、リモートセンシングとは、離れたところから直接触れないで対象物を同定あるいは計測して、その性質を分析する技術であるとしている。そして、対象物からの情報収集には、対象物からの反射または放射される電磁波が主として用いられる。対象物から反射または放射される電磁波などを受ける装置をリモートセンサといい、カメラやスキャナなどがこれに当たる。これらセンサを搭載する移動物体をプラットフォーム(図-1)と呼び、飛行機や人工衛星などが使われてきたが、近年、より近距離となる地上測定やハングプレーンの活用も多くなってきている。リモートセンシングによって電磁波の観測から、地上の対象物や減少を判読・解析できるのは、”全ての物体は、種類および環境条件が異なれば、異なる電磁波の反射又は放射の特性を有する”という物体の電磁波特性に基づいている。つまり、リモートセンシングとは、物体から反射または放射される電磁波の固有性に着目し、電磁波を観測して、物体の識別やそれが置かれてる環境条件を把握する技術であるともいえる。

### 2-2 リモートセンシング衛星<sup>2)</sup>

気象衛星以外の初の地球観測衛星としては、米国が 1972 年に打ち上げた LANDSAT(EARTS)が、最初となる。この観測能力が広く評価され、その後の人工衛星によるリモートセンシングの飛躍的な発展のきっかけを作ったとされている。LANDSAT シリーズは、7 号まで続き、1999 年 4 月 15 日に打ち上げられた 7 号は、現在、世界で広く利用されている。また、米国以外、フランスの SPOT シリーズ、イ

ンドの IRS シリーズ, カナダの RADARSAT シリーズ等があげられる.

日本で初めて打上げられた地球観測衛星は, 1977年7月14日に米国のデルタロケットによって打上げられた気象衛星ひまわりである. 一方, 気象衛星以外としては, 1987年2月19日にN-IIロケットにより種子島宇宙センターから打上げられた"もも1号"が日本初の地球観測衛星と言われている. その後, "もも1号b" (MOS-1b, 1990/2/7 打ち上げ, 海洋観測衛星), "ふよう1号" (ERS-1, 1992/2/11 打ち上げ, リモートセンシング衛星), "だいち" (ALOS, 2006/1/24 打ち上げ, 陸域観測技術衛星)と続いている. このうち, 2011/5/12に交信不能のために運用を終了した"だいち"は, 全世界を観測し, 5年間で650万シーンを撮像した. そして四川省地震(2008/5/12), 阪神・淡路大震災(1995/1/17), 東日本大震災(2011/3/11)を始めとして, 年間約100件の大規模災害を観測し, 国内外への関係諸機関への情報提供を行った.



プラットフォーム	高 度	目的・用途	その他
静止衛星	36,000km	定点地球観測	気象衛星
円軌道衛星 (地球観測衛星)	500km~ 1,000km	定期地球観測	Landsat, SPOT, NOAA等による観測
スペースシャトル (宇宙連絡船)	240km~ 350km	不定期地球観測 宇宙実験	
ソ ン デ	100m~ 100km	各種調査 (気象, その他)	
高高度ジェット機	10,000~ 20,000m	偵察 広域調査	
低中高度飛行機	500~ 8,000m	各種調査 航空写真測量	
飛 行 船	500~ 3,000m	空中偵察 各種調査	
ヘリコプター	100~ 2,000m	各種調査 写真測量	
ラジコン機	500m以下	各種調査 写真測量	飛行機, ヘリコプター
ハングブレーン	50~ 500m	各種調査 写真測量	ハンググライダー パラグライダー
係留気球	800m以下	各種調査	
索 道	10~40m	遺跡調査	
クレーン車	5~50m	近接写真測量	
地上測定車	0~30m	グラントルース	チェリーピッカー

図-1 いろいろなプラットフォームと高度と目的

## 2-3 地球観測衛星"だいち(ALOS)"に搭載されたセンサ (PARSAR) による地盤変動解析

### (1) 地球観測衛星"だいち(ALOS)"の概要<sup>3)</sup>

図-2 と表-1 に示した"だいち"は, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が地図作成, 地域観測, 災害状況把握, 資源調査等を目的として運用している. "だいち"には, PRISM (パナクロマチック立体視センサ), AVNIR-2 (高性能可視近赤外放射計2型) および PALSAR (フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ) の3種類のセンサが搭載され, 691.65kmの高度から回帰日数46日で観測を行ってきた. 3種類のセンサのうち, 表-2 に示した PALSAR による合成開口レーダは, マイクロ波を地面に照射し, その後, 方散乱波の位相および強度を受信することによりデータを取得する能動型リモートセンシング方式で, 得られた時期の異なる1組の位相情報を利用(干渉処理:位相の差を取る)することで, 地殻変動, 地盤沈下, 地滑り等の地盤変動調査が可能となる. 表-3 に示した PALSAR の合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)の応用として, 干渉合成開口レーダー(InSAR: Interferometric SAR)がある<sup>4)</sup>. これは, 2カ所または2時期に観測された同じ時点のデータを解析処理することによって, 地表の変動量を得ようとするものである. 現在では地震による地殻変動の観測などに使われており, 今後様々な分野への応用が期待されている.

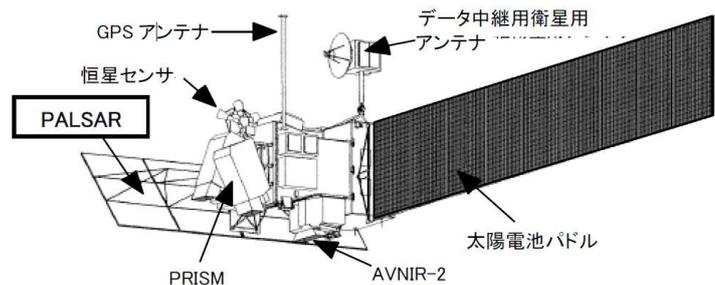


図-2 ALOS/PALSARの外観図

表-1 ALOS の主要緒元

	項目	諸元
打ち上げ	ロケット	H-IIAロケット8号機
	時期	平成18年1月24日10時33分 (日本時間)
	射場	種子島宇宙センター
軌道	軌道種類	太陽同期準回帰軌道
	降交点通過地方時	午前10:30 ± 15分
	軌道高度	691.65km(赤道上)
	軌道傾斜角	98.16度
	軌道周期	98.7分
	周回数	14+27/46周/日
	回帰日数	46日
	隣接軌道間距離	59.7 km(赤道上)
軌道回帰精度	+/-2.5km(赤道上)	

表-2 ALOS/PALSAR の概要

モード	高分解能		広観測域	多偏波 (実験モード)
中間周波数	1270MHz (L-band)			
バンド幅	28 MHz	14 MHz	14.28 MHz	14 MHz
偏波	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV+VH+VV
入射角範囲	8~60°	8~60°	18~43°	8~30°
地上分解能	7~44m	14~88m	100m (multi Look)	24~89m
観測域	40~70km	40~70km	250~350km	20~65km
量子化ビット	5 bits	5 bits	5 bits	3 or 5 bits
DataRate	240Mbps	240Mbps	120, 240Mbps	240Mbps
雑音等価後方攪乱係数(観測幅)	-23dB以下(70km) -25dB以下(60km)		-25dB以下	-29dB以下
信号対アンビギュイティ比(S/A)	16dB以上(70km) 21dB以上(60km)		-1dB以上	19dB以上
ラジオトリック精度	1シーン無いで1dB, 1軌道内で1.5dB			
アンテナサイズ	アジマス方向:8.9m×エレベーション方向:3.1m			

表-4 InSAR(干渉合成開口レーダ)の長所と短所

メリット	デメリット
①地上観測点が必要無いため非常に高い空間分解能の取得が可能(GPSとの違い)	①衛星が地上の同じ場所を照射するまでに最低数十日かかる(時間分解能が低い)
②人間が到達しにくい場所(山地、砂漠、極地、僻地)も観測可能	②水蒸気遅延の影響を受ける
③衛星から能動的に電波を照射するために昼夜や天候を問わず観測可能	

InSAR の長所と短所を表-4 に示す。最大の特徴は、被観測地に受信機や基準点を設置することなく、また、現地作業を伴うことなく、広範囲で、面的な地盤の変位量が得られるところにある。しかし、InSAR は、人工衛星が繰り返して同じ軌道を飛ぶ 2 時期の観測データを用いる必要がある。このため、連続した観測が不可能

であり、地上の同じ場所を観測するまで最低数十日の間隔が必要となる。また、2 時期の観測データを使用して、その 2 時期の地表位置の相対変動量として求められるため、絶対変動量は、変位がないと仮定される場所からの相対変動量として求めたり、他の観測データを使用する必要がある。

## (2) 地球観測衛星"だいち"の InSAR による空港造成時の地盤変動調査

2006年3月に開港した北九州空港は、航路浚渫土砂処分場跡地に建設された。航路浚渫はドラグサクシオン浚渫船、ポンプ浚渫船等を用いて行っており、含水比200%前後の超軟弱地盤上に建設されている。空港整備に当たっては、供用開始後の残留沈下量(一次圧密分)を10cm以下にするという目標が設定されている<sup>5)</sup>。これに対して、開港後の2008年7月と2009年9月に得られた「だいち」の合成開口レーダの観測データを用いて干渉解析を行い、空港全体の地表沈下の状況を調べた。図-3 に干渉解析結果を示す。両者を比べると、図面下側部分は空港用地ではなくデータ取得当時は荒地となっていたところであり、地表面沈下だけでなく、地盤の盛り切りによる地形改変の状況を表している。一方、図面上部の誘導路付近に数cm程度の沈下と考えられる干渉縞が見られる。この付近は、滑走路としては最も遅く浚渫土埋立および土地造成が行われており、空港内では沈下が生じやすいと考えられる場所である。このように、InSAR を適用すれば空港のように広大な土地の地盤変動状況の把握に利用できる。

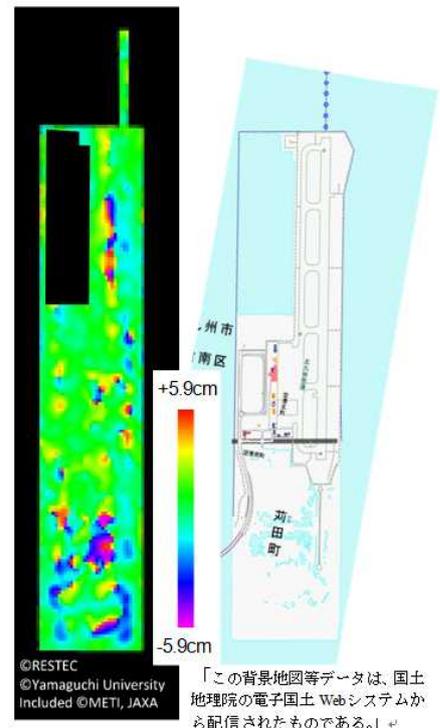


図-3 InSAR (干渉開口レーダ) に地表面沈下

## 3. 精密写真測量システム

### 3-1 精密写真測量システムの概要

ここで説明する写真測量は、航空測量などで良く知られている技術<sup>6)</sup>であり、図-4 に示したように

数十m離れた位置から撮影したステレオ・ペアな写真(図-5)から、撮影された対象物の3次元座標(形状や大きさ)を算定しようとするものである。多くの場面でいろいろな活用がなされているにもかかわらず、測量や計測に係わる技術者が自らの技術として認識することは少ないようである。これは写真測量が特殊な技術であり、特殊なカメラと技術が必要であるため、自らが使える技術ではないと思いつているためであろう。また、ユーザ・フレンドリにするために、理論や手法を単純化したために、実用的な解析精度が得られないようになってきていることも一因であると考えられる。しかし、最近、著しい発展を遂げた画像処理技術が、これまで特殊とされてきた写真測量を極めて安価で手軽な技術の実現を可能にした。本システムの活用により、特殊な機器や設備を必要としないで、撮影位置や撮影条件に制約を加えることなく精密写真測量が実施できるようになってきている。

本文では、開発してきた精密写真測量システム<sup>8)</sup>の特長と概要を説明した後に、建設現場におけるいくつかを適用事例について報告する。撮影位置を変えて撮られた複数枚の写真は、そのまま重ねてもうまく重ねることができない。この視差の違いから生じるずれをうまく補正して、対象物の形状や大きさを算定することになる。これは、幾何学的な知識があれば、理論的には理解される場所であるが、現実の問題に適用する場合には、

- ① 撮影位置(カメラの投影中心座標と傾き)
- ② カメラの焦点距離、主点位置のズレやレンズの歪曲収差
- ③ 写真座標の読み取り

などに関していろいろな誤差が生じることになり、精度の良い写真測量を実施することは難しい。通常用いられている測量用のカメラは、カメラやレンズの系統的ひずみが正確で、内部評定要素と呼ばれるレンズの曲面式やイメージセンサとの距離や位置関係などが既知である。また、解析精度を上げるために写真撮影する際のカメラ位置や傾きに制約を設ける。

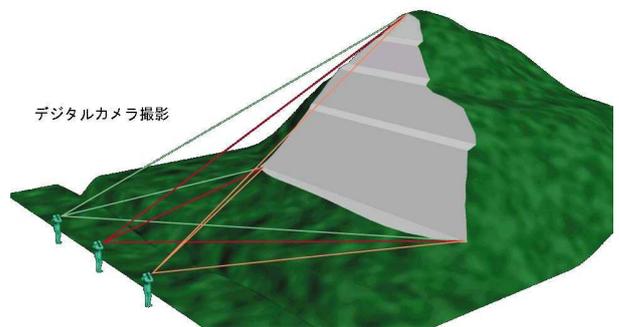


図-4 写真撮影の概要図



図-5 精密写真測量の解析データとして用いる現地のステレオ写真

これに対し、開発した精密写真測量システムでは、対象物を異なる位置から撮影した複数枚の(ステレオ・ペアな)写真から、内部評定要素と撮影位置やカメラの傾きをパソコンによって同時に算定する。この時必要なものは、市販されている通常のデジタルカメラとパソコンと解析ソフトだけである。

### 3-2 Self Calibration 法によるステレオ・ペアな画像の評定問題

平行投影原理によって3次元の被写体空間を2次元の写真空間に写像することを考える。図-6は、2枚のステレオ・ペアな写真画像を撮影した時の被写体(PM)とカメラ(O<sub>i</sub>)と取得画像(P<sub>ci</sub>)の位置関係を示したものである。

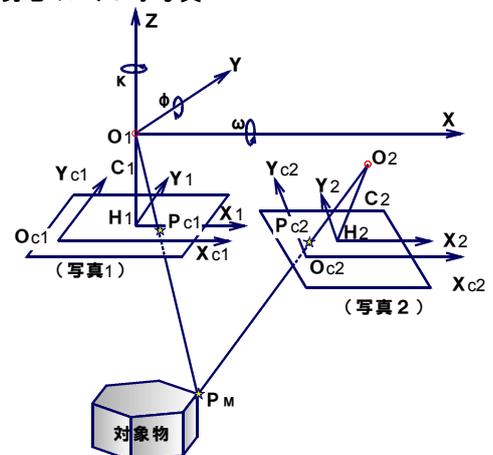


図-6 被写体空間上の点と写真画像上の点の共線条件

この図から明らかなように、被写体上の点  $P_M$  は、その写真画像上の点  $P_{ci}$  とカメラの投影中心  $O_i$  は、その直線上に存在しなければならない。この条件のことを、被写体空間の点と画像上の2つの点(写真画像上の点とカメラの投影中心)の共線条件と呼ぶ。座標が、 $(X_j, Y_j, Z_j)$ であるような点  $j$  の写真  $i$  における写真座標  $(x_{ij}, y_{ij})$ は、外的評定要素  $(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}$  : カメラ投影中心の座標,  $\omega_i, \phi_i, \kappa_i$  : カメラの傾き)を有するものであり、式-1と式-2のような共線条件式で表される。なお、 $c_i$  は、写真  $i$  の焦点距離である。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= -c_i \frac{a_{11i}(X_j - X_{0i}) + a_{12i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{13i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \\ y_{ij} &= -c_i \frac{a_{21i}(X_j - X_{0i}) + a_{22i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{23i}(Z_j - Z_{0i})}{a_{31i}(X_j - X_{0i}) + a_{32i}(Y_j - Y_{0i}) + a_{33i}(Z_j - Z_{0i})} \end{aligned} \quad (\text{式-1})$$

$$\begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & a_{13i} \\ a_{21i} & a_{22i} & a_{23i} \\ a_{31i} & a_{32i} & a_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa_i & -\sin\kappa_i & 0 \\ \sin\kappa_i & \cos\kappa_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_i & -\sin\omega_i \\ 0 & -\sin\omega_i & \cos\omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_i & 0 & -\sin\phi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi_i & 0 & \cos\phi_i \end{bmatrix} \quad (\text{式-2})$$

本式が、航空写真などで一般的によく実施されている測量用のカメラを用いて行われる写真測量に用いられる座標の算定式である。ここでは、写真の主点位置やレンズ中心と写真座標との距離(画面距離)が正確に較正されており、歪曲収差などの系統的ひずみが正確な測量用のカメラが用いられる。これに対して、市販されている非測量用カメラを用いて写真測量をする場合には、まず、カメラレンズの歪曲収差の影響を考慮する必要がある。Brown<sup>6)</sup>によれば、被写体  $P_M$  の写真座標  $(x_{ij}, y_{ij})$ は、座標読み取り装置(コンパレータ)で取得された写真座標(測定座標:  $x_{cij}, y_{cij}$ )と、主点位置のズレ(写真座標:  $x_{hi}, y_{hi}$ )やカメラレンズの歪曲収差( $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ )によって式-3のように表される。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= x_{cij} - x_{hi} - \Delta x_{ij} \\ y_{ij} &= y_{cij} - y_{hi} - \Delta y_{ij} \\ \Delta x_{ij} &= x_{ij}(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) \\ &\quad + p_{1i}(r_{ij}^2 + 2x_{ij}^2) + 2p_{2i}x_{ij}y_{ij} \\ \Delta y_{ij} &= y_{ij}(k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6) \\ &\quad + 2p_{1i}x_{ij}y_{ij} + p_{2i}(r_{ij}^2 + 2y_{ij}^2) \\ r_{ij}^2 &= x_{ij}^2 + y_{ij}^2 \end{aligned} \quad (\text{式-3})$$

ここで、 $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$  は、レンズの歪曲収差に関する係数を表す。式-2と式-3とを解くことによって、被写体空間の構造体の3次元座標が求められることになる。本式には、互いに独立な14個の未知数が含まれており、実用上は、被写体空間の基準点が7個以上のあれば、最小二乗法等によって一義的に求めることが出来る。

市販されているカメラによって取得された写真画像から被写体空間の座標に変換するには、カメラ本体構造やレンズに係わる物理的な誤差や光学的なアナログ画像をデジタル画像に変換する際の信号変換に係わる誤差を補正する必要がある。これに対して、今回開発した解析システムは、ユーザーがこうした複雑な誤差を意識することなく、

- ・ 外部評定要素: カメラの撮影位置や方向
- ・ 内部評定要素: レンズの歪曲収差, カメラの主点位置や画面距離など

として自動的にキャリブレーションすることができる。そして、市販されているデジタルカメラを用いても精度の良い写真測量が実施できるということを確認している。しかしながら、写真測量では、取得される画像データの画素数、写真撮影の方法や枚数、長さ情報や基準点の設置などが、取得精度に大きく影響を与えることになる。また、精度を上げるためには、それに比例して作業が増えることになり、手軽さという写真測量の長所が消えてしまうことになる。このため、事前に測量の目的と要求精度を明確にしておくことが重要であり、それに応じてつぎの項目を検討して、効率よく写真測量ができるように計画しなければならない。

- ① 撮影方法(焦点距離, 撮影方向, 撮影角度など)と撮影枚数
- ② 長さ情報の数と設置方法
- ③ 評点の設置(種類や大きさや設置方法)

さらに、要求精度が高く、これらの項目だけでは対応できないような場合には、解析システムの中に組

み込まれていないカメラの物理的な誤差や信号変換に係わる誤差などの影響も考慮できるように解析機能の追加をする必要がある。また、使用するカメラが、精密写真測量という光学的に高い精度を求められることを想定して製造されていないため、カメラ特有のひずみやデータ変換などが解析精度に大きく影響を与えることにもなりかねない。このため、使用するカメラは、事前にキャリブレーションを行っておくことが望ましく、場合によってはそのカメラ特有の内部評定要素を設けたり、補正したりする必要が生じてくる。

### 3-3 精密写真測量システムの適用

#### (1) 精密写真測量によるキーブロックの抽出

高山祭ミュージアム<sup>7)</sup>は、常時、不特定多数の一般人が多数入場することができる土被り 30m の比較的浅いところに施工された掘削径 40.5m の国内最初の岩盤空洞である。空洞周辺の地質は、白亜紀後期、古第三紀の濃飛流紋岩と呼ばれる火成岩のうち、火砕流起源の溶結凝灰岩から成り、一軸圧縮強度約 200MPa、弾性波速度 4.2 ~ 4.8 km/sec の割れ目が多い硬岩地山である。事前調査によって見つけられた岩盤の割れ目に関しては、DDA などの解析手法によって、地震時も含めて、岩盤空洞の安定性を確保できるような補強を組み込んだ設計がなされている。しかし、事前の調査でも把握しきれない現地における実際の岩盤の割れ目に関しては、施工中の掘削面に出現する割れ目を調査して、その結果に基づいた補強をする必要があった。このため、この構造物の掘削工事では、**図-7** に示すように掘削によって出現する不安定なキーブロックを如何に効果的に、かつ、経済的に補強するかが重要になった。掘削後すぐに吹き付けコンクリートによってシールされる掘削面の割れ目の方向と角度を、施工の妨げとならないように素早く、調査する必要があった。これに対して、開発してきた写真測量システムを活用することとした<sup>8)</sup>。本システムは、掘削後、現地の作業としては、いくつかの座標が分かっている既知の基準点が入るように写真撮影するだけである。**写真-1** は、精密写真測量解析の精度確認のために撮影した 3 枚の掘削面の写真と抽出した 5 面の割れ目を示している。精密写真測量解析結果を表-5 に示す<sup>8)</sup>。撮影角度の関係から、写真に写り込みにくい平面-4 以外の平面の走行傾斜以外は、非常に精度良く解析されていることがよく分かる。こうした写真測量を実施して、展示ドーム部で撮影された写真画像から抽出された不安定なキーブロックとロックボルトによる補強状況を**図-8** に示す。

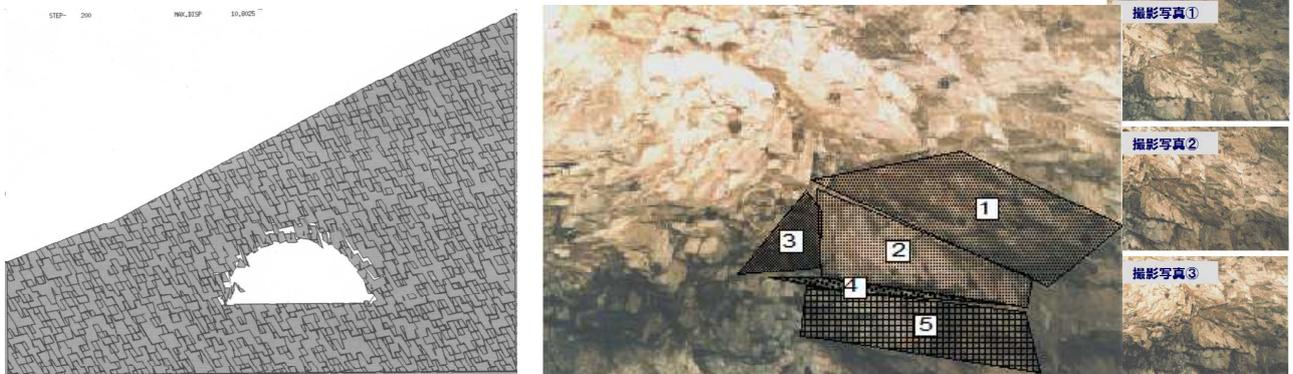


図-7 掘削によって形成されるキーブロックによる緩み 写真-1 写真測量解析の精度確認のために用いた写真と抽出した岩盤の割れ目

表-5 写真測量解析によって得られた割れ目の走行と傾斜

平面 番号	クリノメータによる 調査結果 (°)		写真測量による 解析結果 (°)	
	傾斜方位角	傾斜角	傾斜方位角	傾斜角
1	130	15	124.2	18.6
2	313	78	312.0	77.4
3	165	77	167.2	76.0
4	269	7	195.4	14.3
5	144	61	145.2	61.5

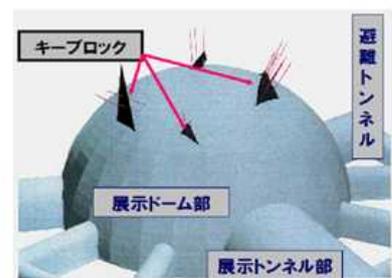


図-8 展示ドーム部に形成されたキーブロックとロックボルトによる補強状況

#### (2) 精密写真測量による法面の挙動監視

図-9 のような法面 (延長 160m, 高さ 35m, 6 段法面) において、開発してきた精密写真測量システ

ムを適用した<sup>1)</sup>。本現場では、写真座標の読み取り精度を上げることを目的に、小段には20cm角の測点を6m間隔に設けた。また、撮影ブロックは、図-9に示したように30×25mを標準に設定した。ここで用いたカメラは、ミノルタRD-3000(275万画素)であり、50～70m離れた対岸から1ブロック当たり3方向から撮影した。梅雨期を挟んで2回実施した写真測量結果から、座標の差異から地山の変位量を計算し、写真-2のように等高線として示した。そして、今回実施した精密写真測量と光波測量の結果を図-10に示す。本図から、写真測量結果は法面の変位挙動の傾向を良く示していることが分かる。このように、写真測量を実施すると、法面全体の面的な変位挙動だけでなく、法面に現れるせん断帯の発達状況やブロックの滑落などの位置や規模が容易に把握できることになり、法面の全体の面的挙動の検討が可能になる。一方、定量的には、法面の中央付近の地盤変位が、光波測量では4mm程度であるのに対して精密写真測量の方が10mm程度になっており、写真測量の方が大きな値を示している。しかしながら、法面の変位挙動の監視として活用するには、実用的なオーダーの計測値が得られていると考えている。また、更に解析精度を高める必要がある場合には、1ブロック当たりの撮影枚数を増やし、焦点距離を大きくさせることによって十分に対応できる。

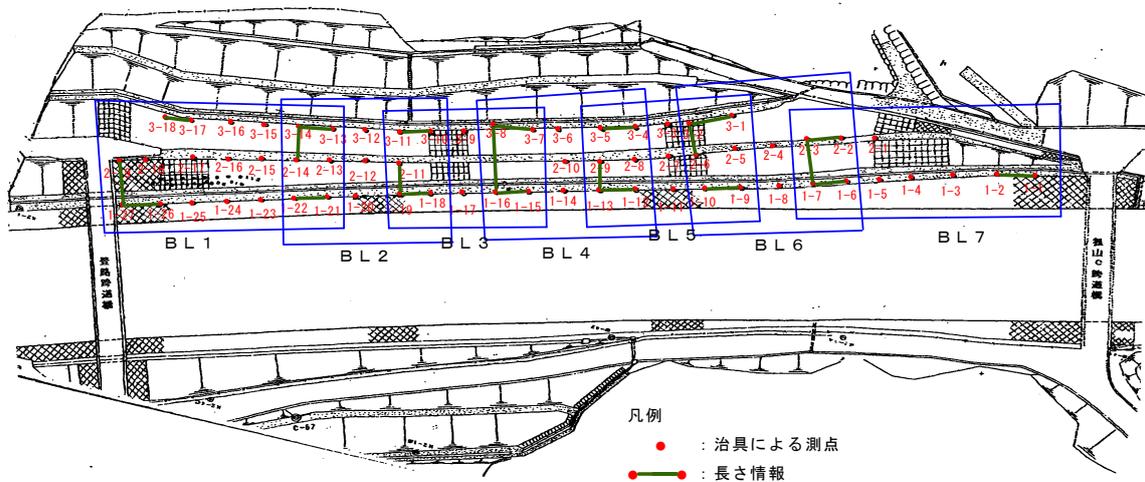


図-9 挙動監視の対象法面

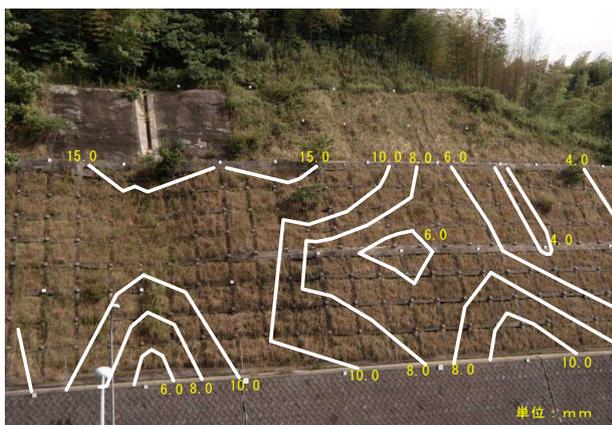


写真-2 写真測量によって得られた法面の変位挙動

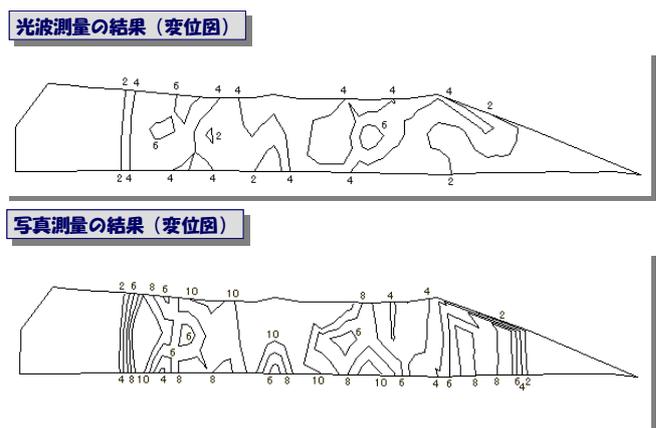


図-10 写真測量によって得られた法面の変位挙動

#### 4. 建設工事へ適用するために開発した拡張現実 (AR: Augmented Reality) システム

##### 4-1 拡張現実 (AR) システムの概要

被験者にコンピュータによって構築された空間の中に存在しているような体験をさせる技術は、通常、体験する空間に対して現実空間を活用するかしないかによって、拡張現実 (AR: Augmented Reality)<sup>9)</sup> と仮想現実 (VR: Virtual Reality)<sup>10)</sup> とに分類されている。このうち、AR を構築するシステムは、光

学シースルー方式とビデオ・シースルー方式とがある。前者が、仮想空間が映っている透過型のディスプレイ・メガネ（HMD：Head Mounted Display）などを透して周辺の現実空間を見るのに対して、後者は、被験者が見るべき現実空間をやカメラ機能付きのタブレット型コンピュータやビデオ・カメラで映像化し、その映像に重畳された仮想空間を見ることになる。通常、前者は対象とする現実空間の位置における実時間の体験に適しているのに対して、後者は対象とする空間から離れた地点や違った時間における体験、例えば、システムの遠隔操作や体験のシミュレーションに適していると言われている。しかし、近年のタブレット型コンピュータの出現で、両者の差異は少なくなってきた。

### (1) ビデオ・シースルー方式の AR システムの概要

一例として、図-11 に CCD カメラを装着したノートパソコンによる AR システムの構成を示す。このシステムの位置出しは、次のように 2 段階に分けて座標計算が行われる。

- ① 基準点測量：対象領域に RGB 情報を基にした画像処理が容易な基準点を設定し、前述の精密写真測量等によって座標を計算する。
- ② AR：CCD カメラによって映し出された基準点からカメラの位置と方向、レンズの歪曲収差を算定する。つぎに、それらの座標データを使って、そのカメラの画像に対象構造物の CG 画像もしくは設計時の CAD データを重ね合わせる。

取得された画像に写された基準点の位置座標を算定する方法としては、現地の状況に応じて、通常の幾何学的方法と、反射標点やジャイロ加速度センサが取り付けられ、位置座標や方向が既知であるノートパソコンに取り付けられた CCD カメラによって映し出された画像データから算定する方法とがある。いずれかの方法によって位置座標が既知になった基準点が配置された対象領域を、パソコンに取り付けられている CCD カメラによって撮影し、その画像に映し出されたいくつかの基準点から、モデル空間におけるカメラの位置座標やレンズの歪曲収差などを計算する。そして、この座標を基にして計算された対象構造物の CG 画像を、カメラ画像に重ね合わせることになる。

カメラによって写された基準点は、画像内の RGB 情報を基にして自動認識が行われる。そして、カメラの座標と方向は、前述の精密写真測量の解析技術を活用して自動的に算定されることになる<sup>11)</sup>。この例のように、AR とは、現実空間にはないものをその場所に存在するかのように見せようとする技術である。このため、建設現場では、計画段階や施工の途中段階で、将来出来上がるであろう構造物を現地に実際と同じスケールで見せることが可能であり、様々な活用が考えられることになるが、当面、次のような適用が考えられる。



図-11 ビデオ・シースルー方式による AR システムの構成

この例のように、AR とは、現実空間にはないものをその場所に存在するかのように見せようとする技術である。このため、建設現場では、計画段階や施工の途中段階で、将来出来上がるであろう構造物を現地に実際と同じスケールで見せることが可能であり、様々な活用が考えられることになるが、当面、次のような適用が考えられる。

- ① 未着工の建設現場・・・完成予想の体験やプレゼンテーション
- ② 施工中の建設現場・・・複雑な構造物の型枠や配筋や杭の位置出しなどの測量や丁張り作業の補助、目視できない埋設物や空洞などの位置や形状の把握
- ③ 完成後の建設現場・・・出来型検査など
- ④ 構造物の変位状況

つぎに、AR システムのいくつかの適用例を紹介する。

### (2) 重力式ダムの施工現場での適用例

重力式ダムの施工現場で、高欄や越流ゲートなどの構造物の施工に差し掛かった段階になると、配筋や型枠工や埋設工が急に複雑になってくる。このとき、現場での段取りが急に変化したり、これまでにない工種が始まり、現場での作業が輻輳し、段取り不足や手戻りが生じやすくなる。このような段階では、経験豊富な技術者が注意深く、現場での工程や段取りを立てていく必要がある。そして、入念に練

り上げた計画や作業手順を、多工種に渡る多数の技術者や作業員に説明し、理解して貰うことになる。この段階ではいろいろ難しい問題点が生じてくることになるが、これらはつぎのようなことに起因している。

- ① 3次元的に複雑に入り込んだ構造物を、2次元表示が基本である図面で表現し難い
- ② 一つの実構造物を表現するために、多くの図面が必要
- ③ 複数の図面から、その集合体となる一つの実構造物を想像し難い
- ④ 2次元の図面から3次元の実構造物を直接的に結び付け難い
- ⑤ 平面的にスケールを変えて表現された図面から現地における実際のスケール感を理解し難い

大型のコンクリート構造物や大規模な土工事の現場では、打設によって作業環境や領域が絶えず変化することになる。このため、現地では技術者も作業員も絶対座標というものを見失い、座標やレベルの勘違いが生じ易い。それまで日常的に見慣れていたものがなくなり、見たことがないようなものができ始める。特に、最終の形状が理解し難い施工の途中段階では、空間の認識上、奇妙な錯覚が生じやすい。このような錯覚をなくすためにも現場におけるAR技術は非常に有用な情報を与えてくれることになる。



写真-3 重力式ダム現場におけるARシステムの適用例

### (3) ARによる補強が必要なキープロックの視覚化

前述の高山祭りミュージアムの直径40.5mの展示ドーム部で、世界で初めてAR技術が実際の施工現場に適用された。特に、3章で示したように精密写真測量解析を用いて抽出された不安定なキープロックをロックボルトによって補強する場合、吹き付けコンクリートの施工後に、施工位置を決定する必要があった。このとき、現地の作業空間が、施工段階に応じて三次元的に変化するため、従来の丁張り作業に、時間が掛かり、非常に効率が悪くなる。これを解消させるために、AR技術を活用することとした。図-12は、吹き付けコンクリート施工後に、展示ドームのアーチ部に出現したキープロックをARで可視化した画像の一つである。写真中のオレンジ色で示された三角形が、不安定だと判断され、ロックボルトによって補強すべきキープロックである。



図-12 ARによって表現された展示ドーム部に出現するキープロック(オレンジ色の三角形)

### (4) ARによるトンネル交差部における支保部材の視覚化<sup>11)</sup>

2本のトンネルの交差部では、鋼製支保工やロックボルトやコンクリートによる補強梁などの施工位置が錯綜することになるため、現地の作業員が施工部材の施工位置や施工順序などを理解し難いため、施工の手戻りが起こりやすい。また、構造物の測量や丁張りも複雑になり、現地での作業が非常に手間の掛かるものとなる。これに対して、ARを用いることで、こうした間違いを減少させる可能性が高い。

設計された構造物の補強工の CAD データを座標変換して、施工現場に持ち込んだ CCD カメラを取り付けたノートパソコンに映った現地の画像に重ね合わせた例を図-13 を示す。現場では、この AR 画像を用いて、施工手順や施工方法を打ち合わせる。このとき、施工手順に応じて現地がどのように変化するかを CAD データで再現することによって、細分化された作業員間の情報伝達が容易にできるようになる。また、現地での測量や丁張りは、持ち込んだノートパソコンに取り付けた CCD カメラの座標や傾きが自動的に計算されるため、補強部材の CAD データと重ねることが容易になり、現地での測量作業が極端に簡単になるなどのメリットを有することになる。



図-13 AR 技術によって可視化されたトンネル交差部の支保構造と支保部材

#### (5) AR によるトンネル掘削工の削孔パターンの可視化

断面や線形が急激に変化するトンネル工事では、切羽での削孔パターンや支保工の建て込みなどに対しては、施工のサイクルの妨げにならないように、いかに早期に丁張りを出すかが重要なテーマとなっている。例えば、切羽での削孔パターンなどは、ブン回しと呼ばれる定規を使って切羽に直接マーキングを出したり、切羽にレーザー光で削孔位置を映し出したりしている。しかしながら、「①マーキングに時間が掛かる、②狭い切羽付近の不測の場所で大型の施工機械が動き回っている、③掘削された切羽位置が正確でなく、凹凸が激しい」などの問題から、タイムリーな丁張りができないのが現状である。こうした現場で、AR を適用すると、図-14 のように施工サイクルに影響を与えない丁張りが可能となる。

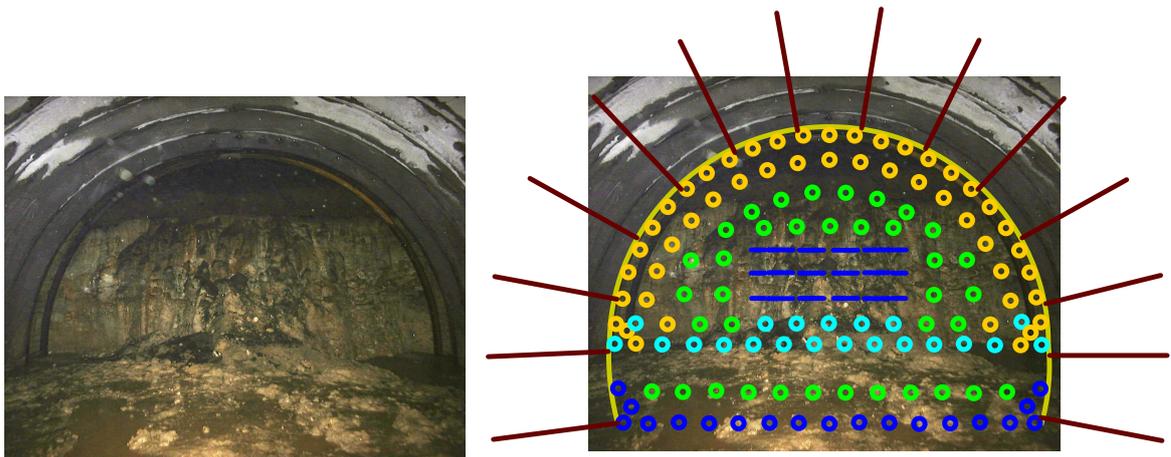


図-14 AR によって可視化されたトンネル切羽での削孔パターンや支保部材の施工位置

#### (6) 史跡石城山神籠石の保全管理のための変状石罫の可視化

##### 1) 史跡石城山神籠石の概要

「神籠石」は、7 世紀頃、山を取り囲むように鉢巻き状に構築された石積み遺跡であり、九州や瀬戸内海地域に点在し、9 箇所が国指定史跡になっている。このうち、1909 年に山口県光市で発見された

「石城山神籠石」は、列石線延長が約 2,553 m であり、1935 年 6 月 7 日に国史跡に指定された。列石線が谷間を横切る場所には、高い石累とその中央部に水門を設けてあり、これまでに北水門・東水門・南水門・西水門が確認されている。近年、一部の石累に変状が著しくなっており、今後の保全方法が、重要な課題となってきている。このため、見学者の安全を確保し、保存工事計画を立案するための計測管理計画を立案した<sup>12)</sup>。ここでは、この計測管理計画の中で活用されているレーザ・プロファイラ測量と画像解析を併せて実施している変状石累の可視化と AR への適用について述べる。

## 2) 石累の縁のベクトル化

対象構造物は、不連続挙動を示す石累構造物であるため、点状や線状の計測ではなく、面状の計測を実施して、個々の石累を抽出し、それぞれの石累の変位挙動を監視する必要がある。石累の抽出方法は、さまざまな研究がなされているが、ここでは、画像解析手法として良く用いられているエッジ処理を活用した例<sup>13)</sup>を紹介する。まず、撮影された画像にエッジ処理を施して、石累の縁取りを行った結果を図-15 に示す。本図は、石累の縁に相当する画素の色 (RGB) 情報が、黒色に近い色で表現されている。この石累の縁部分を点と線からなる折れ線列に変換する。この処理は、図面ベクトル化と呼ばれ、画像データを CAD (ComputerAided Design) システムや地理情報システム (GIS; Geographic Information System) のデータとして取り扱う場合に良く用いられている。ベクトル化を施した結果を図-16 に示す。この段階では、石累の縁部分を点と線からなる折れ線 (写真座標系) として表現されている。



図-15 抽出された石累のベクトル化(写真座標)

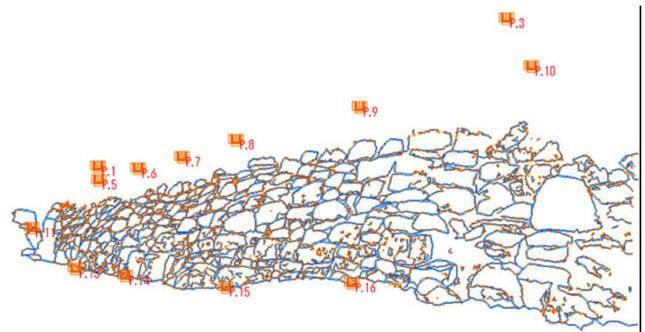


図-16 取得した画像のエッジ処理

## 3) 石累の縁の正射投影写真と平面図面化

撮影位置は、写真毎に精密写真測量解析によって算定されることになる。つぎに、ここでは、写真座標によって得られている石累の縁 (ベクトル) を実空間座標 (モデル座標) に一般化するために、LP 測量結果を内装する手法によってモデル座標に変換する。図-17(上図)に、モデル座標に変換した結果を正射投影図として表す。ここで得られたデータは、モデル空間での石累の縁取りベクトル

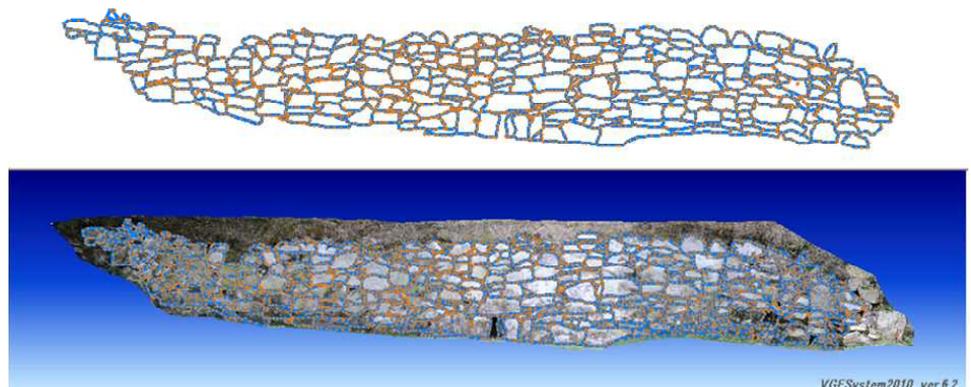


図-17 ベクトル化された石累のエッジの平面図と正射投影写真(モデル座標)

(折れ線) であるため、このデータは、平面図だけでなく平面写真 (図-17, 下図) の作成、構造物の寸法や面積も容易に算定できるため、個別の神籠石の認識や石累の位置関係 (神籠石の積み重ね順序) を事前に調べるときにも活用されることになる。

## 4) AR による石累の縁の変動量の可視化<sup>14)</sup>

以前に撮影された写真から算定された石塁の縁のベクトル(モデル座標系)を、違った時期に現地に持ち込まれた、タブレット型コンピュータで映っている画像とその画像から算定された石塁の縁ベクトル(モデル座標系)を重ねると図-18 のようになる。こうした作業を経時的に繰り返すことによって、移動した石塁の状況が可視化されるだけでなく、移動量や移動状況の理解にも非常に役立つことになる。また、石塁が崩壊した後も、崩壊した石の元の位置が特定することもできるようになる。



図-18 ARによって可視化された石塁の移動(出カイメージ図)

## 5. おわりに

ここで紹介したリモートセンシング技術とARシステムは、当初、建設現場への適用を図る目的で整備し始めたが、筆者の意図や目的とは離れたところで活用ニーズが上がってきていることに驚かされている。また、そのニーズは常に筆者が想定する適用範囲を超えたものであることが多く、戸惑うことも多くある。しかし、筆者らがこれまで取り組んできた数値解析技術が、新たな分野のニーズを生み出していることは、この上ない喜びであり、こうした社会的ニーズに関して出来る限り答えていくことも重要なことであると考えている。この意味で、紹介した技術は、まだまだ未完成な技術で、まだまだ発展していくものである。そして、今後の技術の方向性や目標は、社会つまり皆様からのニーズにあり、このニーズに応えていくことが重要であると考えている。

## 参考文献

- 1) 近久博志: デジタル画像処理技術を用いた測量システム,第36回名古屋工業大学共同研究センター講演会,pp.49-58,2001.
- 2) 日本リモートセンシング研究会編, 改訂版リモートセンシング, (社)日本測量協会, 2004
- 3) PALSAR データ利用ガイド(第3版), (財)資源・環境観測解析センター, 2006
- 4) 国土地理院の干渉 SAR の HP (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism05.html>)
- 5) 近久博志, 古田竜一, 阪口和之, 岡本良徳, 来山尚義:合成開口レーダ, 航空レーザおよび地上レーザによる地盤変位計測の特徴と精度, 第32回西日本岩盤工学シンポジウム講演論文集, pp.5-10, 2011
- 6) Brown, D.C, Close-Range Camera Calibration, Photogrammetric Engineering, Vol.37-8, pp.855-866, 1971
- 7) Chikahisa,H.,K.Kobayashi,K.Matsumoto,H.Nakahara,M.Tsutsui: Building a Museum in a Large Rock Cavern, Tunnel & Tunneling International,pp.25-27,1999.
- 8) 近久博志, 中原博隆, 筒井雅行, 大西有三, 岡本厚: 岩盤空洞の不連続面分布調査に対する精密写真測量の適用, システム総合研究所, 第一回岩盤シンポジウム, pp.45-46, 1996
- 9) 例えば, 田村秀行, 大田友一: 複合現実感, 映像メディア学会誌, Vol.52-3, pp.266-272, 1998
- 10) Milgram, P. and Kishino, F.: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display, IEICE, Trans. Inf. & Sys., Vol.E77-D, No.12, pp.1321-1329, 1994.
- 11) Tsutsui, M., Chikahisa, H., Kobayashi, K., Abo, T.: Stereo Vision-based Mixed Reality System and its Application to Construction Sites, the 3rd Asian Rock Mechanics Symposium, pp.223-228, 2004.
- 12) 近久博志, 太田隆一, 河原剛, 来山尚義, 岡本良徳, 佐々木杏奈:史跡「石城山神籠石」の保全のための計測管理手法, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.121-126, 2011
- 13) 近久博志, 来山尚義, 太田隆一, 河原剛他: 史跡「石城山神籠石」保存のための石塁のエッジ処理と変位計測管理, 土木学会第66回年次学術講演会概要集III--385, pp.769-770, 2011
- 14) Chikahisa, H. R. Ohta, T. Kawahara, N. Kitayama, Y.Okamoto: Image analysis system for areal measurement to preserve historic masonry wall, the 11th International Congress on Rock Mechanics, p.408,Beijing, 2011.