

遠隔施工支援のための3次元計測表示システムの開発 —ニューマチックケーソン工事への適用—

3D Sensor and Graphic Display System for Remote Control Construction —An Application for a Caisson Construction Site—

内 村 裕 松 永 義 憲 松 井 信 行¹⁾

要 約

ニューマチックケーソン工法等、遠隔操作によって施工機械を運転する作業の支援を目的に、掘削地盤の3次元形状を自動的に計測し、遠隔操作室のモニター画面に掘削地盤面の状況を表示するシステムを開発した。掘削状況を表す3次元グラフィックスは、視点や拡大縮小を任意に行えるため、オペレータが掘削面の状況を把握する際に有用な情報を提供する。本システムは、広範囲にわたる掘削面全域の出来型計測としても利用可能なため、掘削計画の策定、現場の施工管理のためツールとしても活用可能である。

目 次

- I. はじめに
- II. システムの概要
- III. 計測性能
- IV. 工事適用例
- V. おわりに

I. はじめに

橋梁基礎等の建設工事では地下水圧の高い地盤を掘削するため、ケーソン内部に圧縮空気を送って浸水を防ぎながらケーソンを沈設するニューマチックケーソン工法(潜函工法)が採用されることが多い。しかしながら、従来のニューマチックケーソン工法では作業者が函内で直接掘削を行うため、施工が確実で信頼性は高い反面作業者の負担が大きくなり、安全や労務管理が重要となる。

このため、最近では函内の重機を地上の操作室から遠隔操作するシステムも開発されているが、作業者が直接掘削しないため掘削形状の把握が課題となる。特に、ケーソン躯体の刃口部の掘削は沈設に直接影響するため、注意深く行われる必要がある。

こうした遠隔操作では、複数のTVカメラの画像による限られた範囲の2次元的情報しか得られなかったため、機械の操作はオペレータの経験によるところが大きかった。また、立体的な画像を得るためにステレオカメラ等も試行されたが、画面のちらつきによる疲労感が大きいなどの課題があった。

今回開発したシステムは、岩盤を対象としたケーソンの遠隔操作および自動運転時の操作支援を対象に開発したもので、刃口部近辺を中心とした掘削地盤の3次元形状を自動的に計測し、操作室のモニター画面に最新の掘削地盤面の状況を表示するものである。操作室では掘削状況を表す3次元グラフィックスの視点や大きさを自由

に変えて見ることができるため、遠隔操作で掘削する際の支援データとして有用であるとともに、現場の施工管理のための有効な情報を提供することが可能となった。

II. システムの概要

1. 要求仕様

ニューマチックケーソン工法のような遠隔施工における施工品質を確保するためには、オペレータへの掘削状況の情報提示が非常に重要である。特に、掘削面の状況把握は最重要課題であり、TVカメラの映像(2次元の画像情報)を越える立体的な情報の提供が必要である。

また、広範囲の掘削面を対象とする場合、カメラの画角の制約から全体像を把握することは困難なため、掘削計画の策定、および出来型管理上の有効な情報の提供が望まれる。

こうした現状を鑑み、本システムでは以下のような機能を要求仕様とした。

- a. 掘削地盤の形状を精度良く3次元計測する。
- b. 計測データを3次元グラフィックで表示し、VR(仮想現実)的にオペレータが任意の視点(角度)から状況を把握可能とする。
- c. 施工の計画、管理に活用するため、出来型の全体像が把握可能な情報を提供する。
- d. 日々の計測データを蓄積し、過去の掘削出来型を閲覧可能とする。

2. システム構成

システム構成の概要をFig.1に示す。

システムを構成する主要要素は、以下のとおりである。

- (1) 計測台車

1) 土木技術本部

キーワード：3次元測量、情報化施工、ニューマチックケーソン、遠隔操作、施工管理

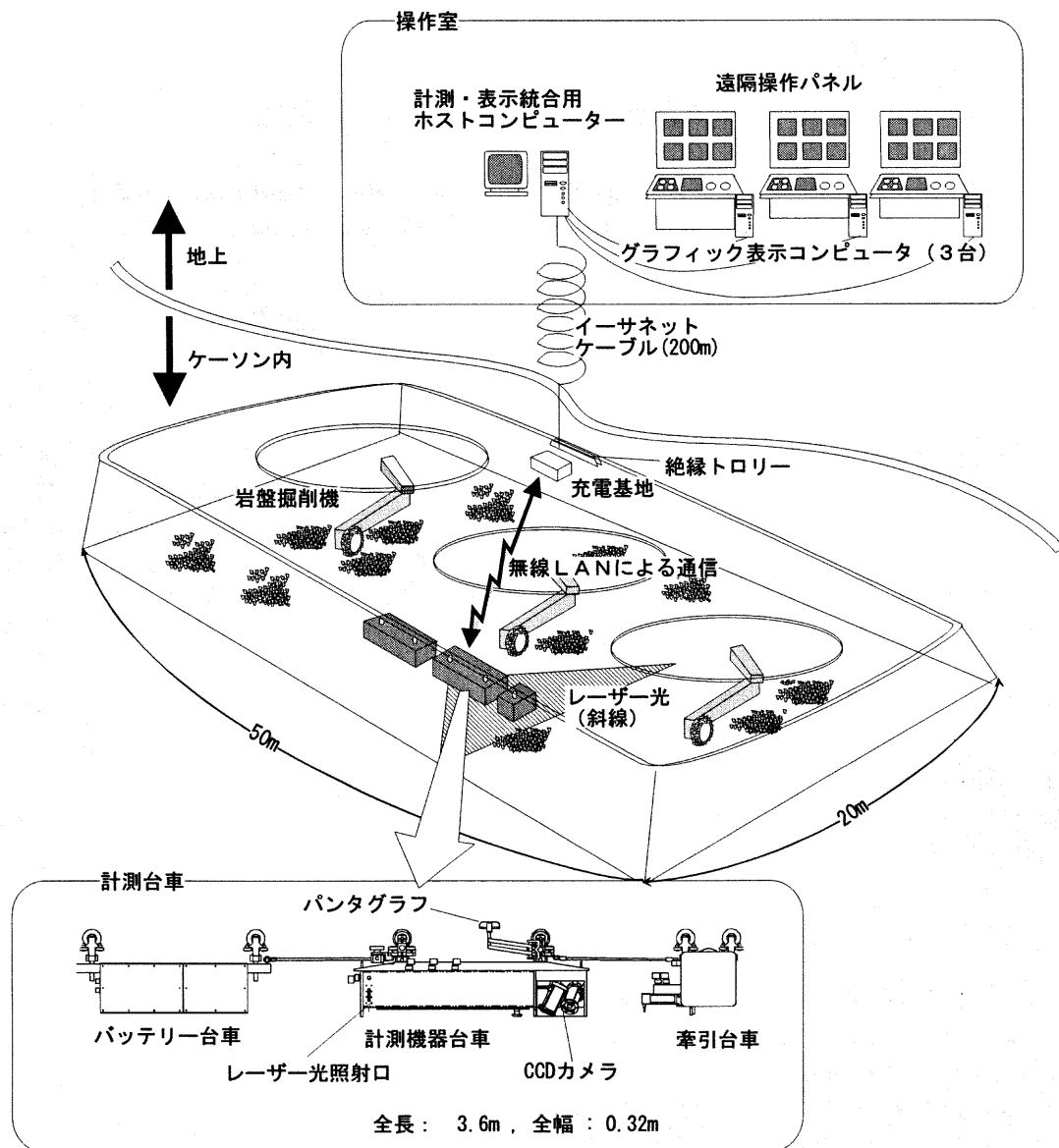


Fig.1 システム構成図
(System Components)

計測台車は、図に示すように牽引台車、計測機器台車、バッテリー台車からなる3両編成で、ケーソン天井に設置したレールにぶら下がり、懸垂式モノレールのように走行する。

計測機器台車は、

- a. レーザー光照射装置
- b. CCDカメラ
- c. 画像取り込み装置
- d. 画像計測処理用コンピュータ
- e. 無線LAN装置

を搭載しており、走行しながら画像計測処理を行い、処理結果を無線LANおよびイーサネットケーブルを通じて操作室に転送する。

(2) 充電基地

1周の計測を終了した計測台車は、充電基地に設置した絶縁ト

ロリーから受電し、バッテリーを充電する。

(3) 操作室

計測データは、イーサネットケーブルを通じて計測、表示統合用ホストコンピュータが受信する。計測、表示統合用ホストコンピュータは、データの後処理を行い3台のグラフィック表示コンピュータに転送する。

計測台車の画像計測処理用コンピュータおよび計測、表示統合用ホストコンピュータのOSには、Unix系のOSであるLinuxを、3次元グラフィック表示用コンピュータのOSにはMicrosoft WindowsNT4.0を使用し、ネットワークはTCP/IPをプロトコルとするイーサネット接続とした。

なお、機器およびソフトウェアの製作は米国カーネギーメロン大学の学内ベンチャー企業であるNREC社(The National Robotics Engineering Consortium)に委託した。

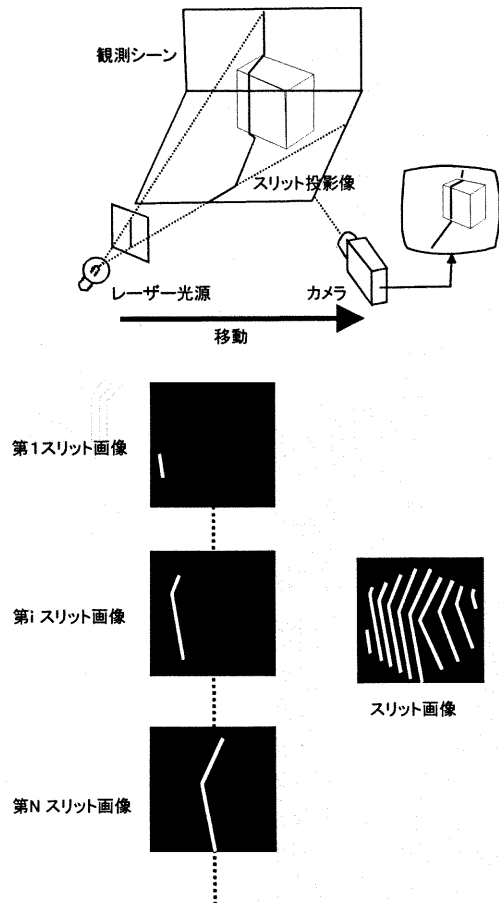


Fig.2 光切断法の概念図

(Conceptual Figure of the Slit Projection Method)

3. 計測原理

計測システムは近赤外レーザー光を用いた光切断法を使用している。光切断法の概念図を Fig.2 に示す。図に示すように、光源から扇状に広がるレーザー光(スリットレーザー光)を対象物に照射し、これをレーザー光の波長近傍のみを透過するフィルターを装着した CCD カメラによって撮影すると、レーザー光の当たった場所が折れ線状に浮かび上がる。

こうして得られた折れ線を構成する CCD カメラ上の、ある 1 画素と、対象物およびレーザー光源が成す平面上の位置関係を Fig.3 に示す。

レーザー光源とカメラを結ぶ基線の距離、基線とレーザー光源、カメラが成す角度は既知であるため、三角測量の原理から式(1)により対象物までの距離が算出できる。

$$D = L \tan \theta_0 \tan \theta_1 / (\tan \theta_0 + \tan \theta_1) \quad (1)$$

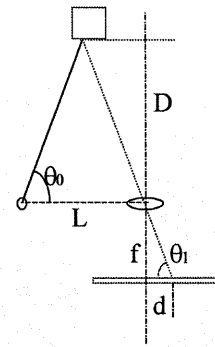
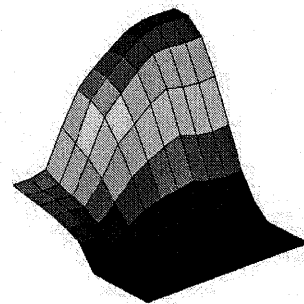
$$\theta_1 = \text{atan}(f/d)$$

D: 対象物までの鉛直距離, d: CCD 画素上の位置, f: 焦点距離

θ_0 : レーザーの照射角度, θ_1 : 受光角度, L: 基線長

上記の処理を、折れ線を構成する全ての画素について行い、さらに、Fig.2 に示すようにレーザー照射器およびカメラを移動しながらスリット画像に対して順次計測処理を行えば、対象物全体の三次元形状が計測できる。

4. 計測処理の流れ

Fig.3 計測原理
(Measurement Principal)Fig.4 ワイヤフレームへのサーフェスマッピング
(Surface Mapping on the Wire-Frame Model)

地盤形状の計測からオペレータに提示するグラフィック表示までは以下のような手順で行っている。

■ 計測台車における処理

- (1) スリットレーザー光を地盤に照射する。
- (2) レーザー光の波長近傍のみを透過するフィルターを通じて CCD カメラで地盤を撮影する。
- (3) 得られた画像を処理し、水平ラインごとの輝度データを求める。
- (4) 輝度データおよび計測台車の絶対位置を充電基地の無線ネットワーク装置を介し、操作室に転送する。

■ 操作室のホストコンピュータにおける処理

- (5) 輝度データおよび計測台車の絶対位置を受け取り、地盤表面の 3 次元データを計算する。
- (6) 3 次元データを蓄積し、ノイズ除去、平滑化などの処理を行う。
- (7) 掘削機のアームの回転角度データを掘削機制御システムから受信する。
- (8) 3 次元計測データを、計測時刻をインデックスとしてハードディスクに保存する。

■ グラフィック表示用のコンピュータにおける処理

- (9) 得られたデータからワイヤフレームモデルを作成し、ワイヤフレームのメッシュ高低差に準じた色を割り当てたサーフェスをマッピングする。(Fig.4 参照)
- (10) ケーソン本体の壁面、掘削機等のモデルと併合し、ディスプレイに表示する。

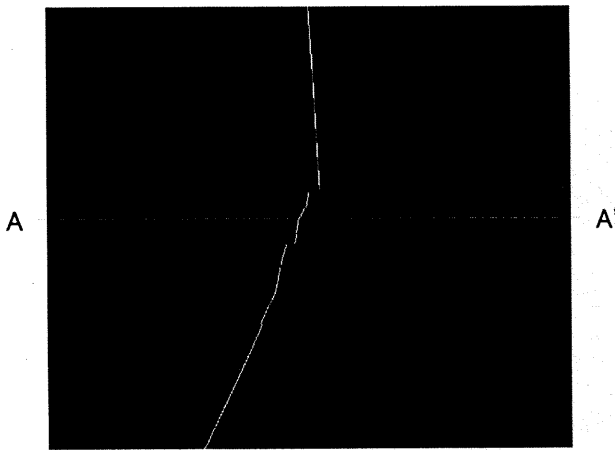


Fig.5 レーザー光を照射した地盤を撮影した画像
(An Image of the Laser Projected Ground)

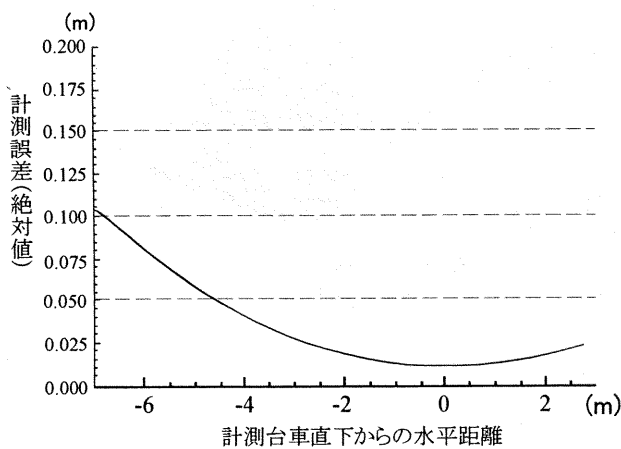


Fig.7 量子化誤差に伴う計測誤差
(Measurement Errors due to the Digitization)

5. ネットワーク構成とタスクスケジューリング

計測処理装置を搭載した台車、充電基地、操作室のホストコンピュータ、グラフィック表示用のコンピュータ（3台）は、全てイーサネットによるネットワークを介して通信を行っている。各機器間のネットワーク構成は以下のとおりである。

- 計測台車と充電基地：2Mbps、無線
- 充電基地と操作室のホストコンピュータ：10Mbps、10BaseT
- 操作室のホストコンピュータとグラフィック表示用のコンピュータ：100Mbps、100BaseT

このうち、充電基地と操作室のホストコンピュータ間は、100mケーブル2本で接続しており、中間点にリピーターハブを設置している。

各装置間には、それぞれ異なる処理を分散して行っているため、個々の装置がデータ要求、処理終了などのメッセージを発効し、ホストコンピュータ上の待ち行列（キュー）によるタスクスケジューリングによって管理を行っている。例として、グラフィック表示用のコンピュータから、ホストコンピュータ上に蓄積された計測データを要求するためのメッセージが発効した場合を想定する。この時、計測台車が計測データをホストコンピュータに転送する要求メッセージを発効すると、グラフィック表示用のコンピュータにデータを

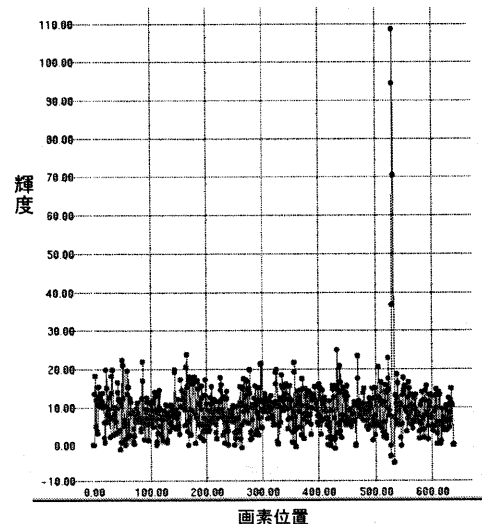


Fig.6 輝度分布のヒストグラム
(A Histogram of Luminosity)

転送する処理を中断し、台車からの計測データを受け付ける処理に切り替える。

6. 計測台車の運行

計測台車への給電方式としては、電源ケーブルによる直接給電も検討したが、1周の走行距離が長く、台車が掘削機の給電ケーブルと極めて近接した空間を走行するため余剰スペースが限られる等の理由から、バッテリーを搭載した自律走行式を採用した。

走行速度は、計測点の間隔（5cm）と1画面あたりの処理速度、曲線部における走行安定性を考慮し、1周走行時間 7.5 分（秒速約 0.3m）とした。

1周の走行を終えた台車は、充電基地に停車し、停車を確認した後、通電を開始し 7.5 分の充電を行う。バッテリーの容量としてはさらに長時間の連続走行も可能ではあるが、長時間の充電時間が必要となり、その間計測データが得られなくなるため毎回充電の方式とした。

なお、以上の運行計画は標準設定であり、状況に応じて計測サイクル、充電時間とも任意の設定変更が可能である。

Ⅲ. 計測性能

1. 計測精度

レーザー光を照射した地盤を撮影すると、Fig.5 のようにレーザー光の当たった場所が線状に浮かび上がった画像として得られる。この画像において A-A'ライン上の輝度値を走査すると、Fig.6 のような輝度分布が得られる。

CCDカメラで撮影した画像の画素数は、水平方向、垂直方向とも有限個であるので、この輝度分布において最高輝度の画素を計測値とすると、最大±1/2画素分の量子化誤差を含むことになる。

画素上の量子化誤差による誤差は、レーザー光照射器とカメラを結ぶ基線から計測対象までの距離に依存する計測誤差となり、対象までの距離が長くなれば精度が低下する。例として、Fig.7 に、最悪量子化誤差（1/2画素）に伴う計測誤差を、計測台車直下（鉛直方向・2.5m）地点からの水平距離を横軸として示す。ケーソン刃口（計

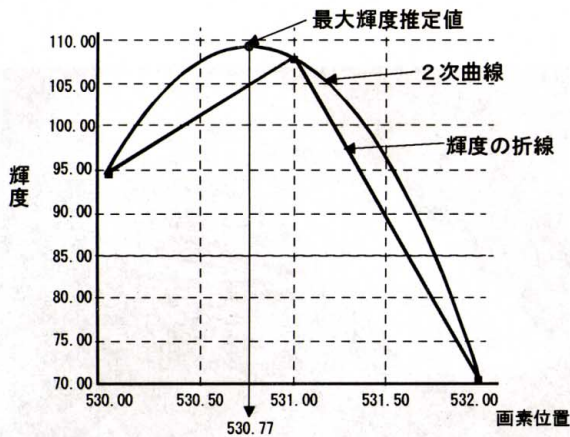


Fig.8 最大輝度値の推定

(Estimation of the Maximum Luminosity)

測台車直下からの水平距離が 1.0m 付近)における最悪誤差(絶対値)は 0.02m 程度である。

2. 輝度の補完による計測精度向上

量子化誤差に伴う計測誤差を軽減するため、輝度分布ヒストグラムに上の輝度最高値とこれに隣接する画素の輝度値から、輝度の補完より最大輝度推定値における最尤画素位置を推定した。

Fig.8に最尤値推定の方法を示す。Fig.6よりヒストグラム上の輝度最高値は、画素位置 531 における 107 である。そこで、隣接する画素位置 530 における輝度値 95 と、画素位置 532 における輝度値 70 を結ぶ放物線を求めると式(2)が得られる。

$$y = -27.5x^2 + 29193x - 7.7472 \times 10^6 \quad (2)$$

ここで、y は輝度値、x は画素位置である。式(2)の変曲点を最大輝度値として推定し、これに対応する画素位置 530.77 を最尤画素位置として計測処理を行う。本手法の適用により、量子化誤差による影響が改善され、計測精度の向上が達成された。

IV. 現場適用例

1. 適用現場の概要

本システムをニューマチックケーソンによる橋梁基礎工事現場に適用したので、以下で適用結果について述べる。

現場概要

工事名：長崎港（女神地区）橋梁（2P）基礎工事

所在地：長崎市木鉢町地先

主な工法：ニューマチックケーソン工法による橋梁基礎部の構築

女神大橋は、長崎港を横断する位置に計画された、橋長 880m、中央径間 480m の 3 径間連続鋼斜張橋で、完成すると主塔の高さは 175m、その基礎の深さは 39.6m に達する。本現場ではニューマチックケーソン工法において、岩盤掘削機による遠隔施工システム等を適用している。

2. 計測システム設置状況

Photo 1 にケーソン内に設置した計測台車を、Photo 2 に操作室内のオペレータパネルに設置したグラフィック表示の外観を示す。

グラフィック表示画面は、掘削機運転用の TV モニター画面や運転状況表示パネルと並べて設置しており、オペレータは状況に応じて必要なモニターを見ながら掘削機の操作を行う

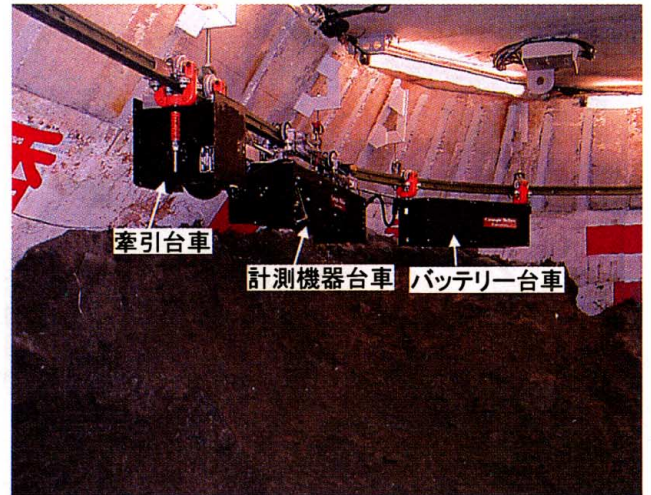


Photo 1 計測台車
(The Sensor Carriage)



Photo 2 オペレータパネルに設置したグラフィック表示
(The Graphic Display on Operator Panels)

3. グラフィック表示結果

Fig.9 に VR（仮想現実）表示例、Fig.10 に計測生データの 3D 俯瞰表示の例を示す。オペレータは表示結果として、いずれかを選択可能である。

Fig.9 においては、掘削地盤の高低差を色相の変化で表現している。つまり赤が高い場所、青が低い場所を示し、グラデーションにより傾斜の度合いを確認できる。なお、黒い部分は掘削機やケーブルの死角となって計測不能だった箇所を示している。また、VR 表示の下半部には、左半面に計測台車の位置および掘削機のアームの位置、角度を、右半面に視点の移動やズーム、画面印刷等の操作系の GUI（グラフィカルインターフェース）を配置した。オペレータは、マウスによって GUI を操作する。

Fig.11 は、VR 表示用データによるケーソン下面掘削地盤の全景表示である。掘削の進捗の全体像が一目でわかるようになっており、掘削計画の策定、出来型管理を支援するツールとして有効である。

4. イン트라ネットによるリモートメンテナンス

適用現場である女神大橋工事現場が技術研究所から遠方である事情を勘案し、社内イントラネットを介してリモートメンテナンスを

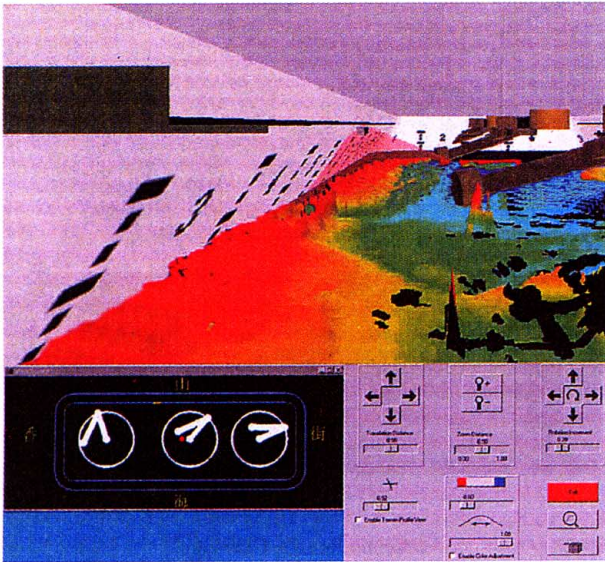


Fig.9 VR表示例
(An Example of the Virtual Reality Display)

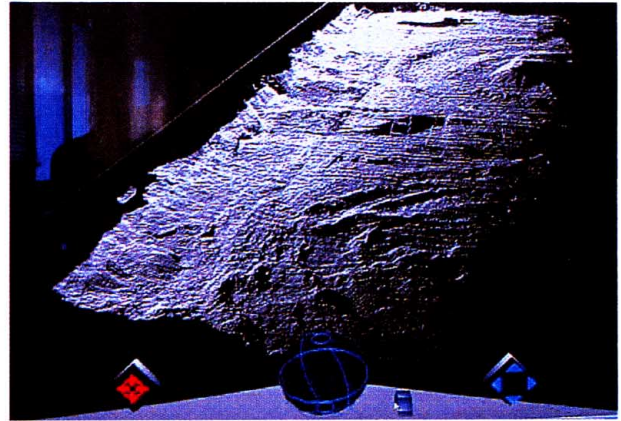


Fig.10 計測生データの3D俯瞰表示
(A Bird's-Eye View of Raw Data)

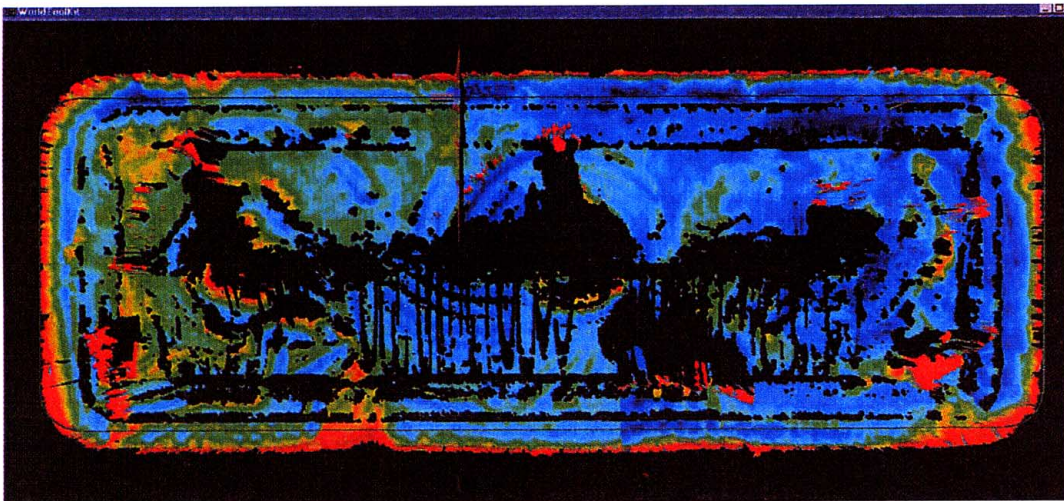


Fig.11 掘削地盤の全景表示
(A Whole View of the Dug surface)

行うためのシステムを構築した。

計測台車の画像計測処理用コンピュータ、計測、表示統合用ホストコンピュータに Unix 系の OS (Linux) を採用し、リモートログインによるシステムの稼働状況のチェック、計測データの転送、計測生データの3D俯瞰表示、ソフトウェアのアップデートなどを、社内イントラネットを経由して行うことを可能とした。

V. おわりに

本システムの開発により、遠隔操作施工を支援する非常に有効な情報の提供が可能となった。特に、従来のTVカメラによる2次元情報のみでは状況判断の難しい箇所の施工や、掘削面全体の施工管理において効果的であった。

また、施工地盤の掘削地盤面の3次元形状が数値データとして得られたことから、今後は掘削パターンの最適化システムや、遠隔オペレータの関与を少なくするための自律機能の構築に向けて、さら

なる展開を図りたい。

大深度地下に構造物を構築する施工においては、過酷な環境下での施工が予想されるため、遠隔施工の必要性が高まると予想される。この際には、遠隔施工を支援するシステムの高度化が要求されると考えられるため、今後も本システムを建設工事の遠隔化・自動化のためのツールとして適用を推進する予定である。

参考文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介; 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 2) 内村, 廣瀬, 中澤, 緒田原; 運動物体の認識とハンドリング, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 ROBOMECH'94 講演論文集, (1994), pp.889-894.