

パノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムの開発

THE DEVELOPMENT OF A TV INSPECTION SYSTEM WITH PANORAMA SENSOR FOR SEWER PIPE

大坂昂資*・東郷喜一郎**・沼尾信二***・張本紀行***・林 智成***・稲田義克****

Takayoshi OOSAKA, Kiichiro TOUGOU, Shinji NUMAO, Noriyuki HARIMOTO, Tomonari HAYASHI and Yoshikatsu INADA

Inspection of sewer pipelines by tele-camera provides important basic information for pipeline maintenance. Various measures involving tele-cameras are employed. Sewer managers grasp the condition of the sewer-pipeline from images provided by the monitoring tele-camera and then execute repairs as required. But conventional tele-camera systems have low precision and are inefficient. To respond to this social demand, we have developed three technologies that can revolutionize sewer inspection, the processing of collected information, and the storage of processed results. In this report, we introduce the new inspection system consisting of these techniques.

Key Words : sewer pipe, tele-camera system, image conversion-system, inspection system, efficient

1. はじめに

下水道管渠の維持管理は、日常的な巡視・点検および管渠内調査結果を基本として行われる。昭和57年以後、管渠内調査のうち、人が直接入ることの出来ない小口径管渠の場合には、もっぱらテレビカメラ調査が行われている。

しかし、現状の下水道管渠TVカメラ調査システムが次のような問題点がある。

- ① 通常の光学レンズを使用しているため、直視調査時に、テレビカメラは管渠壁面と斜めになった角度から撮影することとなり、カメラシステムのオペレーターによる管渠壁面上の亀裂などの発見を困難にしている。
- ② カメラ自走車の進行時に、側部に生じた異状を撮影することが困難である。このため、カメラ自走車を止め、カメラヘッドの撮影方向を変えて異状部を撮影する必要があり、現場の調査期間が長期化する。
- ③ オペレーターの資質による調査結果の判定バラツキがある。

これらの問題点を解決するために、東京都下水道サービス株式会社および東京電子工業株式会社とパノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムの共同開発を行うとともに、実業務への試用を図った。

さらに、同システムで撮影した画像に対して、管渠内面展開図の制作および管渠内検査診断を支援するシステムを開発した。開発の概要は以下の通りである。

① パノラマセンサ搭載TVカメラ調査システム

TVカメラ調査車が直進しながら、側視撮影に相当する管壁に正対する画像を撮影することができるパノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムを開発し、調査精度の向上を実現した。

② 管渠内面展開図の制作システム

撮影した画像に自走車の位置情報などの重畳処理を行うことで、展開処理の効率化を図った。

③ 管渠内検査診断支援システム

管渠内を撮影したビデオ画像および展開図により、管渠の異状診断を実施する。その結果、展開図情報をベースにした管渠の異状診断の効率化を図った。

本稿では、その開発の経緯と成果を報告する。

2. パノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムの開発

(1) パノラマセンサの開発

管渠の調査精度を向上させるため、管渠内撮影に適したレンズの選定を行った。

通常の光学レンズでは、画角の増加に伴い、写し出される画面の大きさが変わらなければ、写されている情報の分解能が低くなる。このため、広角レンズを使用しても、調査精度の向上には限度がある。

一方、通常のパノラマレンズを使用した場合、正対した管壁の画像を撮影することは可能であるが、管渠の前方画像を撮影することできない。

このため、オペレーターがTVカメラシステムの進行方向の画像を見ることが可能な図-1に示すような、側方画像と前方画像を同時に撮影できるパノラマセンサの開発を行った。

* 東京都下水道サービス株式会社 技術部 技術開発課

** 東京電子工業株式会社 映像機器技術部

*** 日本工営株式会社 中央研究所

**** 日本工営株式会社 首都圏事業部

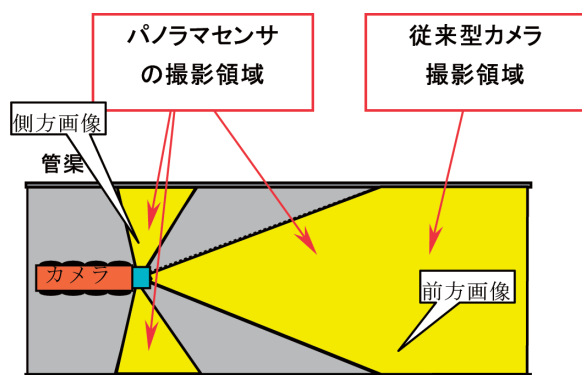


図-1 パノラマセンサの撮影領域

今回開発したパノラマセンサの構造は図-2のように、管壁画像は2枚のミラーに反射され、CCD受像部に結像し、前方画像は副鏡の中央に取り付けられたレンズを通り、CCD受像部の中央に結像することを可能なものとした。

本パノラマセンサを採用することにより、現場のTVカメラシステムのオペレーターは、図-2の前方画像を利用して、現場の調査作業を迅速に行うことができる。

一方、管渠の検査診断および展開図の制作作業には、側方画像を利用することで、調査精度の向上が図れる。

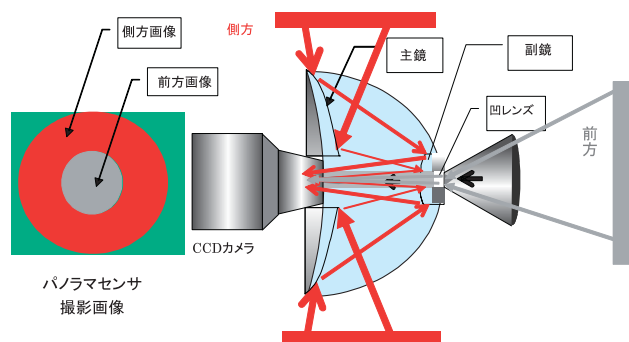


図-2 パノラマセンサの概略図

図-3に今回新しく開発したパノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムで撮影した画像の実例を示す。

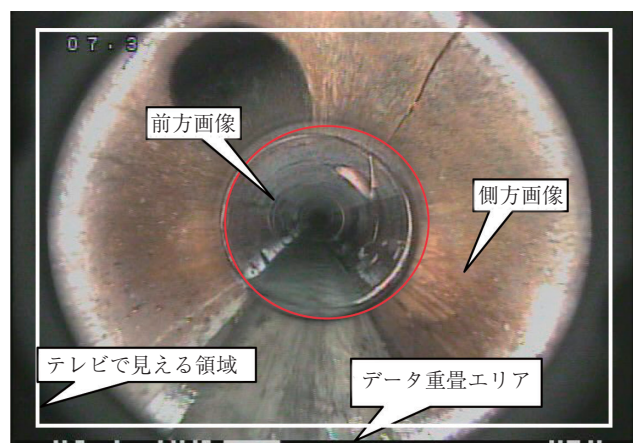


図-3 パノラマセンサの撮影画像の例

(2) TVカメラ調査システムの改良開発

パノラマセンサ搭載TVカメラシステムの開発は、

- ① 既存のTVカメラ調査システムに新開発のカメラを接続できる互換性を有すること。
- ② デジタル式下水道用テレビカメラ調査システムの開発の成果¹⁾である調査距離データなどの画面上の重畳機能（図-3）などを継承すること。

を基本方針として行った。

1) TVカメラシステムに搭載するパノラマセンサの設計

画像の分解能は撮影する被写体の面積およびそれを写し出す画面の面積に依存する。例えば画素数が同じであるとすれば、撮影する被写体の範囲を小さくすることにより分解能を高くすることができる。

パノラマセンサ搭載TVカメラによって撮影された管渠内画像は、管渠中心を軸として管渠内周の各部分はテレビのディスプレイ上に同心円状に表示される。このため、テレビのディスプレイの解像度が一定であるため、パノラマセンサの円周方向の分解能を変更することはできない。

一方、パノラマセンサの管渠方向の分解能は側方画像の撮影幅に依存する。図-2に示すように、2枚のミラーの曲率を変更することにより、側方画像の撮影幅を変えることができる。撮影幅を狭くすることにより、管壁の画像は拡大され、分解能を向上させることができるが、1枚のビデオ画像に写し出される管渠の幅は狭くなり、診断効率も低下する。

本システムでは、調査効率と調査精度がトレードオフの関係にあることを考慮して、側方画像内の横縦比をほぼ1に設定し、ミラーの曲率を設計した。

2) デジタル情報の画像上の重畳

デジタル式TVカメラ調査システムの開発の成果¹⁾を適用し、ケーブルの送り出し部に設置してあるエンコーダで取得したケーブル長の情報、および、TVカメラ自走車に搭載した重力センサで取得したカメラ自走車の左右方向の回転情報をビデオ画像上に重畳する装置を開発した（データ重畳エリアの図-3）。

3) 照明の改良

従来型のカメラシステムではキセノンランプやハロゲンランプを数灯使用していた。しかし、フィラメントタイプの電球であるという構造上、以下の問題点がある。

- ・常に予備電球の準備が必要であり、球切れの際には一旦作業を中断してランプの交換作業が必要である。
- ・衝撃（特に連続点灯後の電球高熱時）に弱く、これが寿命にも大きく影響する。

また、従来型のカメラシステムでは、側方の撮影をしないので、側方に照明を当てることは行っていない。

これらの問題を根本的に改良する目的で、今回の超高輝

度LEDを照明光源として採用し、側方と前方の照明に、それぞれ12のLED照明光源を搭載した。LEDの特長を把握した上で、放熱構造およびカメラ視野（直視・側視）に合わせた最適な照射配置を特に重視して設計検討を行った。

図-4は、今回開発したカメラ自走車の写真である。

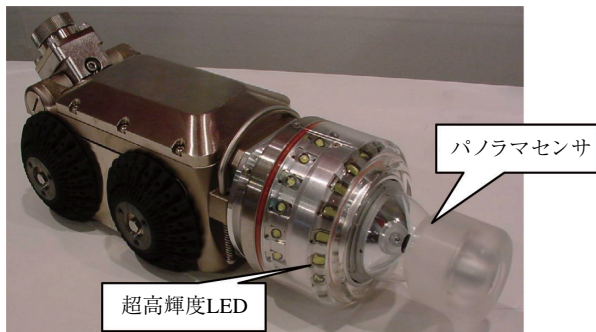


図-4 パノラマセンサ搭載カメラ自走車写真

(3) 試験結果

新規開発のカメラ自走車の検証のため、実管路にて現場試験を実施し、以下の事項を確認した。

- ・現場での撮影時間を約5割短縮することができた。
- ・従来型のカメラの管渠内撮影ビデオ画像の直視画像に比べ、パノラマセンサ搭載TVカメラによる管渠内撮影ビデオ画像の方が管渠壁面の状況が鮮明であった。
- ・図-6に示すように、従来型のカメラ方式では写らない異状個所をパノラマセンサ搭載TVカメラにより新たに発見することができた。

また、室内実験した結果、管渠内の側視画像については、 $\phi 450$ 以下の管渠に対しては、パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムによって得られる画像が2mm以上の分解能を有することを確認した。

3. パノラマセンサ画像用の管渠内面展開図制作システムの開発

(1) 従来型の管渠内面展開図制作システム

管渠内面展開図の制作原理を以下に簡単に説明する。

展開図は、調査ビデオ上の管渠壁面画像を帯状に座標変換し、ビデオの前進速度に合わせて接続して制作される。その概要を図-7に示す。



図-5 現行カメラの撮影画像

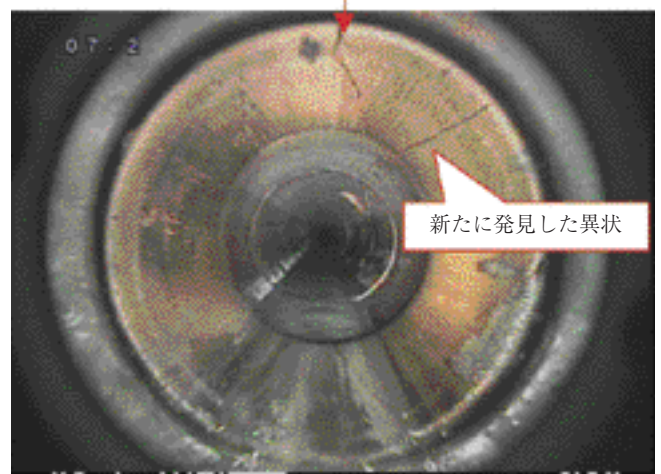


図-6 パノラマセンサ搭載カメラの撮影画像

表-1 パノラマセンサ方式の管渠方向分解能

管渠径	$\phi 200$	$\phi 400$	$\phi 800$
標準レンズ	6.0mm	12.0mm	22.0mm
広角方レンズ	2.0mm	5.0mm	10.0mm
パノラマセンサ	0.9mm	1.8mm	3.0mm

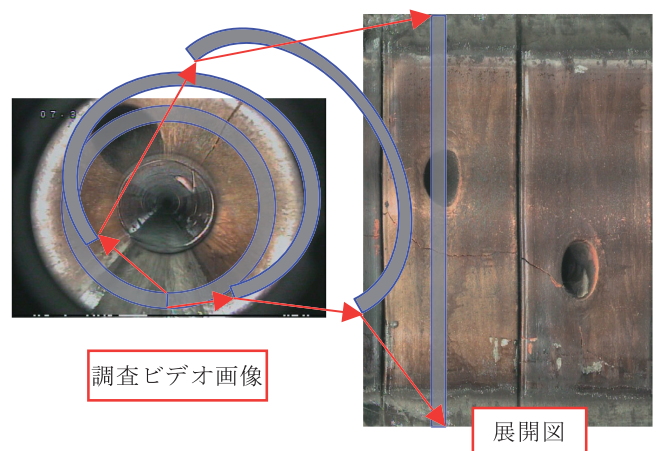


図-7 管渠内ビデオ画像と展開図の例

(2) パノラマセンサ搭載TVカメラシステムを用いた管渠内面展開図制作システム

パノラマセンサ搭載TVカメラシステムで撮影した画像は従来型のカメラシステムと比べ、管軸方向の拡大した画像を撮影しているため、管渠内面展開図制作システムに実装されている管渠方向の補正が重要となり、それに合わせて処理方法の変更を行った。

さらに、パノラマセンサ搭載TVカメラシステムはインタレースビデオカメラで記録されているため、インタレース補正を追加した。

インタレース撮影方式では、各フレームは異なる時刻で記録された奇数・偶数の2フィールド画像からなる。奇数・偶数のフィールドの撮影タイミングは17msの時間差がある(図-8)。

そして、管渠内調査時は、カメラ自走車は移動しているため、走行速度が5m/分の場合、このずれ量は約1.4mmになる。この結果、管渠に正対した画像の奇数・偶数のフィールドは、自走車の17msの移動距離分の撮影画像に微妙なずれが生じ、線分や領域の境界などに楕形状の画像を呈する部分が見れる。

パノラマセンサ搭載TVカメラ調査システムの導入で、展開図の精度は飛躍的に向上したが、上記のズレ量への対応としてインタレース補正処理を行った。

通常のインタレース補正処理では、奇数あるいは偶数フィールドのどちらかの画像のみを使用する。しかし、この方法では、画像の縦方向の実質画素数が半減することになる。

そこで、縦方向の実質画素数の減少を避けるため、本システムではカメラ自走車の走行速度から、ビデオ画像の奇数フィールドと偶数フィールド間の撮影距離の差を求め、その差を考慮して展開図化処理を行う制作法を開発した。

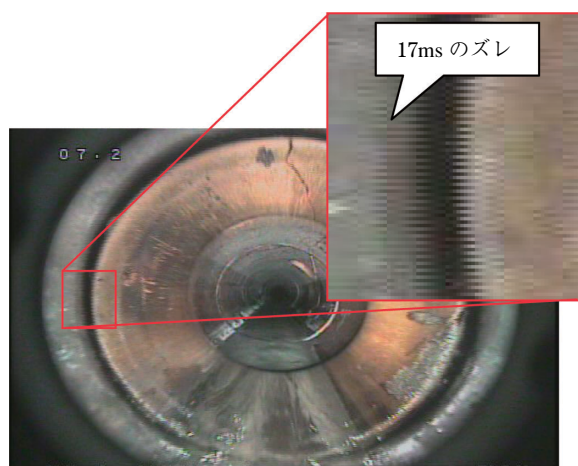


図-8 インタレースによるズレの状況

処理手順を以下に示す。

1) 奇・偶のフィールドの撮影位置ズレの算出

処理対象画像の前後画像の位置情報を基に、カメラ自走車の走行速度を計算し、奇数・偶数のフィールドの撮影位置のズレを算出する。

2) 展開図上画像に対応画像の奇数・偶数のフィールドの座標の設定

展開図上の画像の座標および奇数・偶数のフィールドのそれぞれの撮影位置から、展開図上画像の対応画像の奇数・偶数のフィールドのそれぞれの座標を求める。

3) 最適画像の作成

奇数・偶数のフィールドのそれぞれの座標から、誤差の最小の点を求め、それに対応する画像を展開図上の画像として座標変換する。

図-9にインタレース補正を行った展開図を示す。補正なしの画像では、楕形状を呈している部分があるが、補正ありの画像では、奇数フィールドと偶数フィールドのズレ量が補正され、領域の境界が明瞭になっていることが分かる。



図-9 展開図のインタレース補正有無の比較

図-10、11にはパノラマセンサ搭載TVカメラシステムで撮影したビデオ画像および展開図の一例を示す。

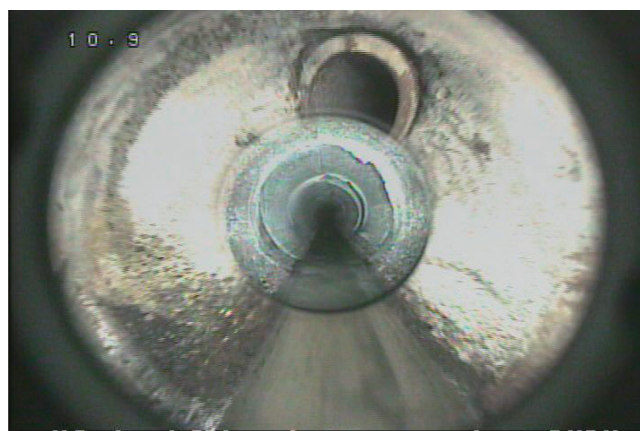


図-10 撮影ビデオ画像

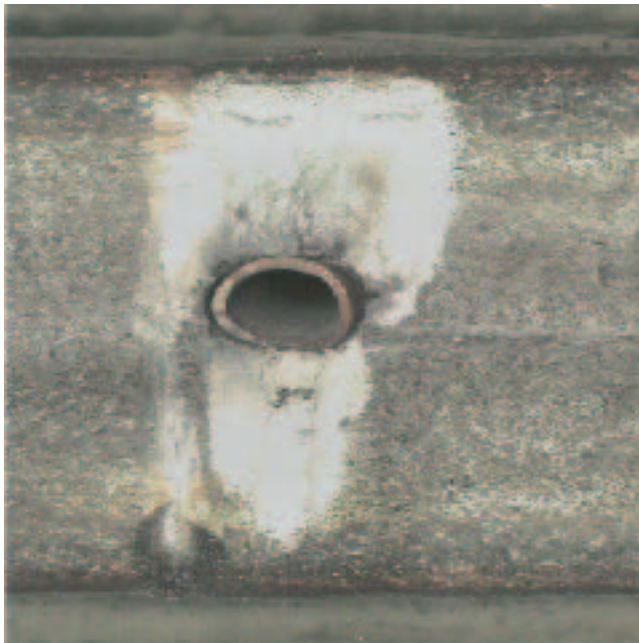


図-11 展開図画像

4. 管渠内検査診断作業支援システムの開発

(1) 開発の背景

従来型のテレビカメラシステムでは、現場のオペレーターが管渠の異常診断の判定を行っていた。このため、オペレーターの個人差により調査結果の判定にバラツキを生じる。

今回共同研究開発を行ったパノラマセンサ搭載TVカメラシステムを使用することにより、事務所などの室内において専門技術者による管渠診断が可能になる。

しかし、テレビ画面上にパノラマセンサ搭載テレビカメラシステムの画像のみをそのまま表示するだけでは、管渠の検査診断作業を行うことが困難である。このため、作業を支援するシステムの開発を行う必要があった。

(2) 検査診断作業支援システムのハードウェア構成

管渠内検査診断作業支援システムは図-12に示すように、検査診断処理用パソコン、データ入出力用外部保存装置、データ印刷用プリンタから構成される。

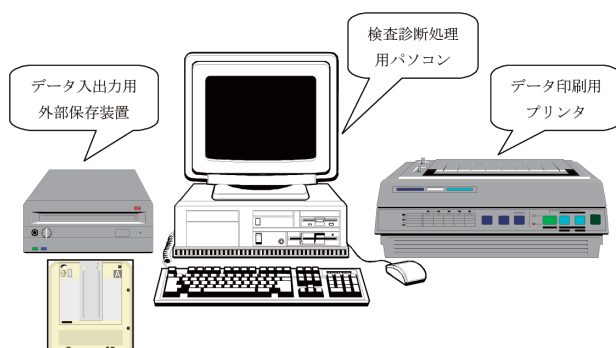


図-12 管渠内検査診断作業支援システムの構成

検査診断処理用パソコンとして、WINDOWSマシンを使用し、画像の表示速度などを考慮して、CPUにはPentiumⅢ以上を使用する。

データ入出力用外部保存装置は、ホットラインでの装着(パソコンの電源を落とさないで装置の接続ができる)、データのアクセスを考慮し、IEEE1394インターフェースを備えたハードディスクを使用する。将来的にはDVD-RAMのアクセス速度・容量の向上に伴い、DVD-RAMドライブを使用することが考えられる。

(3) 検査診断作業支援システムのソフトウェア構成

室内での専門技術者による管渠の検査診断作業を効率的に行えるようにするため、管渠内検査診断作業支援システムには次のような基本機能を持たせた。

1) 診断したい位置の迅速な表示

管渠内調査ビデオ画像を表示する際、ビデオデッキと同様に再生・スロー再生・早送りなどの基本機能を持たせているほか、指定した情報(例えば、管渠距離、異常箇所など)を基に、画像のランダムアクセスを行うことができるようにした。

同様に、展開図の拡大図を表示する時にも再生やスクロール動作により検査したい位置の迅速な表示を可能にした。

さらに、展開図の拡大図とビデオ画像と連動させることにより、同時に両方の画像を使用して検査診断することも可能とした(図-13)。

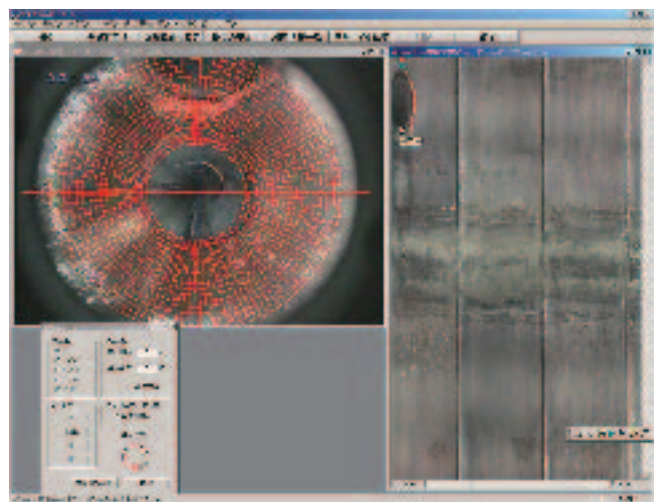


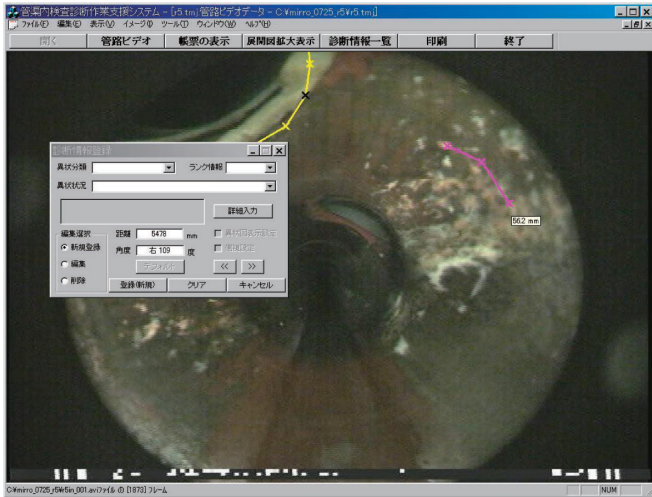
図-13 ビデオ画像と展開図拡大図の表示画面

2) スケールの表示

図-13のように、判定作業の効率化を目的とし、管渠ビデオ画像上に管渠の直径に対応したスケールの表示や、マウスのクリックした間の幅を表示するなどの機能を実装した。

3) マウス操作による診断結果の登録

管渠ビデオ画像ウィンドウ、展開図拡大図ウィンドウ上で異状状況を確認しながら、マウスの操作のみで、管渠の診断結果を登録できるようにした。



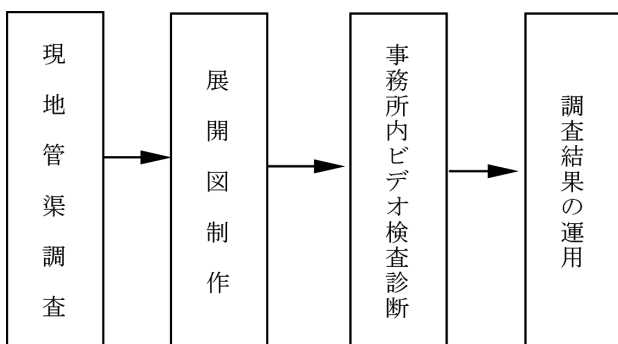
図－14 診断結果の登録

(4) 管渠内検査診断支援システムによる管渠内検査診断作業

管渠内検査診断支援システムを使用することにより、パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムによって撮影した管渠内画像をパソコンの画面に表示して検査診断業務を行うことができる。この場合の下水道管渠調査業務の流れは、図－15に示すとおりになる。

管渠内検査診断支援システムを使用する効果として次のようなことを上げることができる。

- ・現場の調査時期に合わせて現場に出向かなくても、パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムで撮影した管渠内画像により、後日検査診断作業を行うことができる。
- ・下水道施設の技術者が管渠の検査診断を行うので的確な判定結果が得られ、判定結果に欠陥やバラツキがなくなる。



図－15 下水道管渠調査業務の流れ

- ・システムの支援を受けながら検査診断作業を行えるので、支援システムの各機能を利用して検査診断作業を効率的に行うことができる。また、作業の中断や途中からの継続も可能であり、効率的な検査診断作業を行うことができる。

5. まとめ

本研究における成果をまとめると以下のとおりになる。

- ① パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムを使用することにより、従来型のテレビカメラシステムを使用した場合に行っていた側視作業を省くことができ、現場の調査時間を短縮し、現場における調査作業を容易かつ効率的に実施することができる。
- ② 管渠内の側視画像については、 $\phi 450$ 以下の管渠に対しては、パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムによって得られる画像が2mm（数年の内に措置が必要なものの判断基準であるBランク）以上の分解能を有することを確認することができた。また、単一線であれば、 $\phi 600$ 以下の管渠に対して1mm幅まで識別することができる。
- ③ パノラマセンサの副鏡部中央から、前方被写体の像を取り込むことにより、テレビカメラシステムのオペレーターがカメラ自走車の操作時に必要とする画像領域を確保した。現地試験によりこの直視用画像領域内の前方画像だけでテレビカメラシステムの走行操作が可能であることを確認した。
- ④ 従来型のテレビカメラシステムと比較して、パノラマセンサ搭載テレビカメラシステムにより撮影した画像では、管渠方向の分解能が向上し、そのうえ、距離などの情報をビデオ画像上に重畳することができるため、接続処理の精度が向上する。
- ⑤ 管渠内検査診断支援システムの支援を受けることにより、管渠の専門技術者が事務所などの室内において管渠の検査、診断を行えるようになったと同時に、管渠の検査診断作業効率の向上を図ることができる。

今後、ますますパソコン、記録媒体をはじめとするマルチメディア関連機器の性能が向上していくものと予想される。これに伴い、画像処理の解像度や処理速度も向上していくものと考えられ、下水道事業の分野においてもこれらの新しい技術を積極的に活用することによって、下水道管渠の維持管理コスト縮減にも貢献できると考えている。

参考文献

- 1) 「下水道管渠内面展開図関連システムの開発」
こうえいフォーラム 2003.1