

遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究 (遠隔移動ロボットおよび視覚・提示系の開発)

東北大学 吉田和哉, 大阪大学 清川清, 八木康史
IHIエアロスペース 足立忠司, 齋藤浩明, 映蔵 田中紘幸
情報通信研究機構 大野浩之

Multimedia Information Search by Teleoperated Robot Network in a Disaster Site Development of a Robot Test Bed, Vision, and VR Display Systems

Kazuya YOSHIDA, Tohoku Univ., Kiyoshi KIYOKAWA, Yasushi YAGI, Osaka Univ.,
Tadashi ADACHI, Hiroaki SAITOH, IHI Aerospace,
Hiroyuki TANAKA, Eizoh, Hiroyuki OHNO, NICT

Abstract—In this paper, a new project of multimedia information search by teleoperated robot network in a disaster site is introduced. In this project, multiple robots are coordinately operated through ad-hoc wireless communication network, including satellite-based IP communication link, for the search and investigation tasks. The robot system consists of a large-scale outdoor robot to serve as a carrier of small robots and a fleet of small robots to be distributed inside a building. Omnidirectional vision is used for real time remote operation and construction of detailed map data. The data will be displayed in a remote site making most of advanced VR technology. This paper presents the design and development of a robot test bed, vision, and VR display systems

Key Words: Disaster-Fighting and Rescue-Oriented Robot System, Satellite-Based IP Communication, Ad-hoc Networking, Teleoperation, Omnidirectional Vision, Virtual Reality

1. まえがき

1995年1月に発生した阪神淡路大地震を契機に、大規模震災時にレスキュー活動を行うロボットシステムの研究が活発に進められている¹⁾。2004年10月に発生した新潟中越地震ではがけ崩れにより孤立する地域が多発し、電話や防災無線などの地上設備に依存する従来の情報通信網はほとんど機能せず、最初の地震発生翌朝を迎えて明るくなるまで、災害の全容がなかなか把握できないという問題に直面した。筆者らのグループは情報通信の観点から、平成15年度より遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究を進めている。本研究では、地震の影響を受けない衛星通信を用いて、災害発生直後の初動情報収集活動を効率的に行う技術の開発を目指している。以下に、本研究で取り組む3つの重要項目を挙げる。

1. 大規模震災等の広域災害において適切な情報収集を行うため、使用可能なさまざまな有線・無線の通信システムを有機的に結合してネットワークを形成する危機対応通信管理技術を開発する。
(災害時におけるアドホックネットワークの構築と活用)
2. ヘリによって現場展開が可能な遠隔操縦型情報収集ロボットを開発し、さらにロボットによって収集された画像情報等を再構成し的確な状況把握を可能にするための拡張現実感の技術を開発する。
(移動探査ロボットの開発とその遠隔操縦技術の確立、および拡張現実感を用いた臨場感の高いデー

タ表示技術の開発)

3. 打ち上げが予定されている日本の技術試験衛星VIII型(ETS-VIII)通信実験衛星を用い、以上の技術を統合した実証実験を行う。
(衛星通信を用いた実用化試験)

本稿では、上記項目2.の移動探査ロボットの開発とその遠隔操縦技術の確立、および拡張現実感を用いた臨場感の高いデータ表示技術の開発について、基本コンセプトおよび試作・開発の成果を示す。

2. 想定するシナリオと開発するロボットの概念

本研究では、広域自然災害(主に地震災害)の被災地における初動情報収集活動を行うシステムの開発を目指す。具体的には都市部での大規模震災を想定する。建物は主にコンクリート建造物であり、震災によりその何割かは倒壊、あるいは半壊の状況にあるものとする。また、舗装道路の地割れ、車両の放置などにより地上交通は混乱し、通常の消防車等によるアクセスが困難な状況を想定する。

このような震災発生直後の初動時において効果的な情報収集を可能にする探査ロボットシステムとして、ヘリ空輸等による現地展開が可能であり、コンクリート等の瓦礫上を走破して倒壊建物に接近し、かつ上層階へもアプローチすることによって倒壊建物内の人命捜索が可能なシステムを開発する。この全てのミッションを単一のロボットで実施することは困難ある。そこ

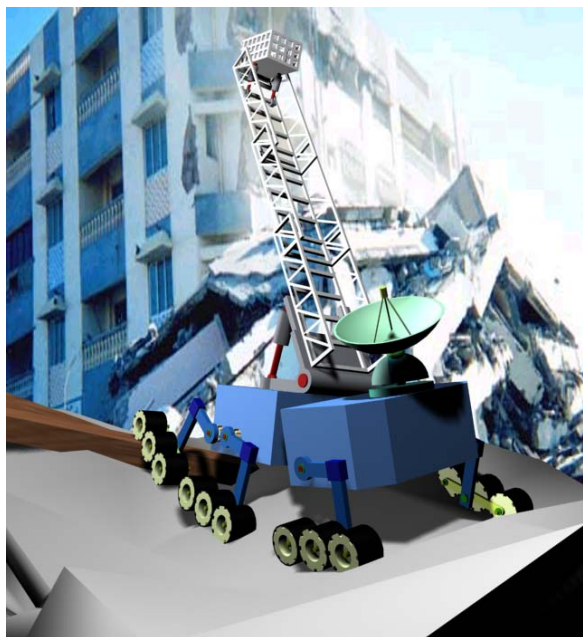


Fig.1 大型瓦礫移動ロボットの基本構想図

で、大型の瓦礫移動ロボットとそれに搭載される小型の屋内探索ロボットのように、複数のロボットで構成されるシステムを構築し、それらを有機的に協調させることを考える。

公衆通信回線は、地上インフラの被災や通話殺到により使用不能であり、その場に持ち込まれる仮設の無線通信局および衛星通信を経て、インターネットとの接続が可能な状況を想定する。探索ロボットによって得られた画像情報は、無線/衛星通信を介して被災現場外に置かれる災害対策本部（オペレーションセンター）に送られ、そこで効果的に再構成提示され、捜索・救援活動の立案・指揮に用いられる。また、ロボットシステムはオペレーションセンターの拡張現実感端末から無線/衛星通信を介して遠隔操縦されるものとする。

3. 遠隔移動ロボット

3.1 ロボットの基本設計

上述の大型移動ロボットについては、瓦礫上を移動する高い踏破能力が求められ、また急傾斜地を安定的に登る能力も求められる。災害現場へはヘリコプターを用いた展開も想定し、一般的なヘリの可搬重量を越えないことを考え 500kg 以下であることを要件とする。ヘリによって投入された地点から 100m 単位の不整地移動が可能でなければならない。瓦礫のような不整地を移動するための足回りとして、火星探査ローバーにおいて有効性が示されているロッカーボギーサスペンション方式と、建設機械等によく見られるクローラ（無限軌道）走行方式を組み合わせた機構を検討中である。Fig. 1 に大型瓦礫移動ロボットの基本構想図を示す。

同ロボットの任務は、倒壊建物の概観画像を撮影することおよび建物内の探索を行う小型ロボットを搭載・運搬することである。1 機当り 10kg 以下程度の小型の屋内探査ロボットを複数台搭載し、はしごを伸展する

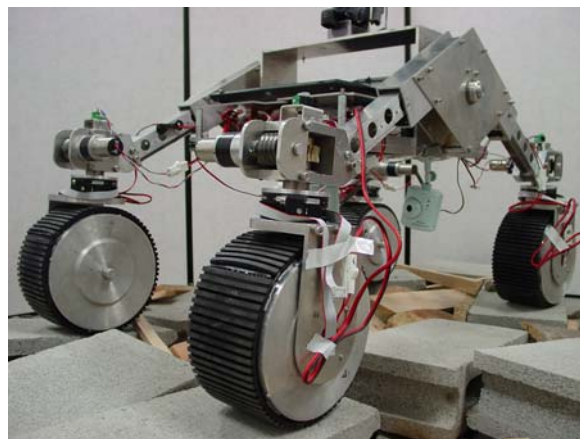


Fig.2 4 輪テストベッドの概観

ことによりそれらを中層階まで持ち上げ、窓などの開口部から建物内に展開する能力を持つことを要件とする。

3.2 ロボットテストベッドの開発

上記の大型・小型ロボットの製作に先立ち、走行制御系、通信系、遠隔操縦系、視覚系、情報提示系などの各要素技術の試験を簡便に行える研究用プラットフォームとして、重量約 20kg のテストベッドを開発した。Fig. 2 にテストベッドの概観を示す。テストベッドは 4 つの車輪を持ち、片側 2 輪をリンクで結び本体から左右に伸ばした耳軸のまわりに回転する。本体の姿勢が、常に左右リンクの回転角の 1/2 となるような差動機構を用い、いわゆるロッカーリンク・サスペンションシステム²⁾を構成している。この構成は、単純ながら非常に不整地適応性が高い³⁾。

Fig.3 にロボット搭載制御系の概念図を示す。搭載制御系は、可能な限り汎用的なラップトップ PC およびその周辺機器をもって構成することを考え、制御機器のインターフェースは USB 接続に統一した。この分野では、USB 対応の製品が増えつつあるが、ここではイクシスリサーチ社の超小型 USB 接続 4ch モータコントローラおよび対応するモータドライバを使用した。視覚関係は、全方位ミラー + USB カメラや IEEE1394 インターフェースを持つ Bumblebee など、必要に応じて様々な視覚系を搭載して実験を行うことを想定している。

また、通信系にはワイヤレスイーサネット (IEEE802.11b/g) を使用して、操縦卓のホスト PC とロボット搭載のリモート PC との間の通信を行う。ワイヤレスイーサネットに関しては、屋内で無線 LAN を構築するための機器が数多く販売されている。また、専用アンテナを用いて最大 20 km での高速無線 LAN を可能とするブリッジシステムも実用化されており、これは屋外大型移動ロボットに対して有効である。更に、今後予定している ETS-VIII を用いた衛星通信実験では、重量約 10 kg の専用のターミナルアダプタを用いることにより、衛星経由の無線 LAN (イーサネット) が構築可能である。

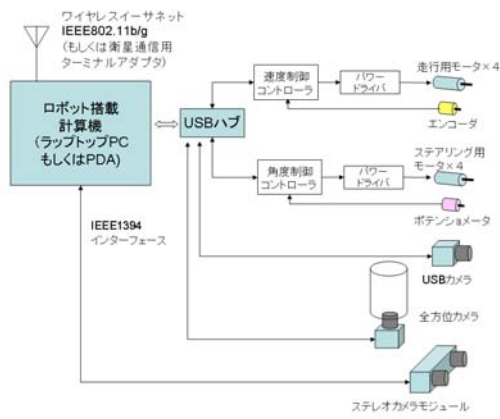


Fig.3 ロボット搭載系の概念図

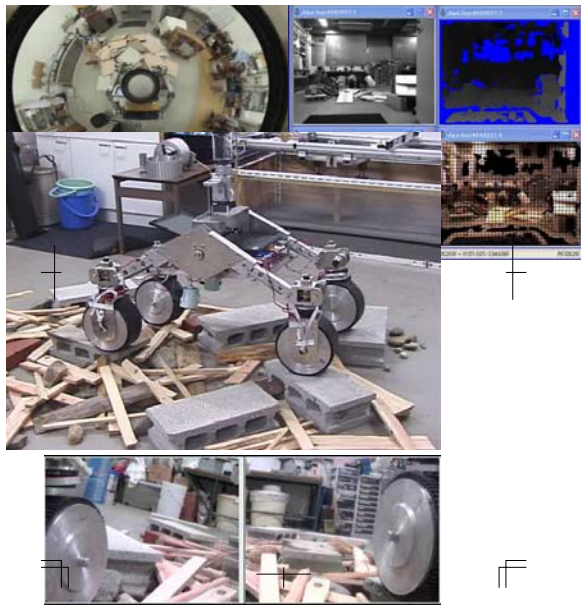


Fig.4 テストベッド走行実験の様子

3.3 ロボットテストベッド走行実験

ワイヤレスイーサネットを介して、操縦者用ホストPCおよびロボット搭載リモートPCのそれぞれの上で動作するプロセス間をソケット通信によって結び、データ通信を行うことによりロボットを遠隔制御するシステムを開発した。操縦者はホストPCの画面を見ながらジョイスティックによって入力を与えればよい。なお、遠隔操縦系のソフトについては今後JAVAテクノロジーを使って、汎用性の高いものへと発展させていく予定である。

Fig.4に屋内環境でテストベッドの走行実験を行った様子を示す。同図には、ロボットの走行中の写真に加えて、全方位映像(左上)、Bumblebeeによるステレオ視処理画像(右上)、およびロボット本体下部に取り付けた障害物検知用のUSBカメラ画像(下)を示している。

本実験では、等方的な全方位ミラーを使用した。全方位視覚は周囲全体の状況を把握するのに有用である

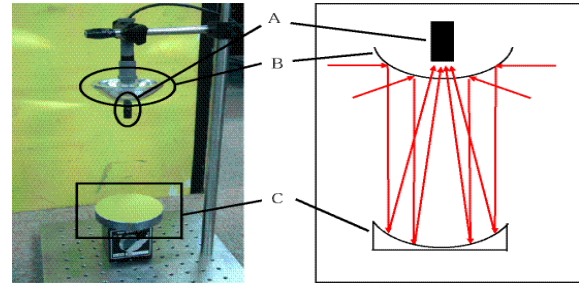


Fig.5 試作 HBP ミラー系の概観図(左)と入射光線のレイトランスモデル(右)。(A) 通常透視投影カメラ (B) 視覚 HBP ミラー (C) 平行線を一点に集光させるための放物面ミラー

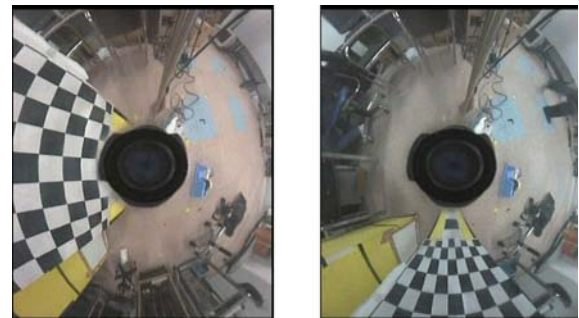


Fig.6 試作 HBP ミラー系の入力画像例。(左) 格子パターンをミラー短径方位(ロボットの進行軸方位)においた場合。(右) ミラー長径方位においた場合

が、移動ロボットにおいては特に進行方向に高い解像度が必要である。この点について、非等方的性全方位視覚を用いて改善する方法を次章で述べる。また、不整地走行時には、足回りを注視する専用カメラ画像を合わせて参照することも重要である。

4. 視覚情報の収集技術

4.1 非等方性全方位視覚

本プロジェクトでは、上述のように、ロボットの遠隔操縦技術ならびに災害地の画像データ収集を挙げている。両目標とも視覚機能が必要となるが、各々を実現するための要求仕様は必ずしも同じではない。すなわち、走行のための遠隔操縦においては、ロボットの進行方向を中心とした半球状の視野領域が重要となるのに対し、災害地の画像データ収集では、周囲360度パノラマ状の視野獲得がデータ収集において有利となる。また、一般にロボットが災害地で作業等を行う場合、局所的な観察でよいが高精細な画像が獲得できることが望ましい。

本研究では、これらの異なる仕様を満たす新たなカメラとして、非等方性全方位視覚を提案する⁴⁾。

4.2 HBP ミラー系の設計と性能評価

従来提案されてきた全方位視覚では、ミラー曲面がカメラ光軸を軸とした回転対称の形状であり、同一の方位方向に位置する点は入力画像上で画像中心から放

射状に伸びる直線として射影される。すなわち方位に関して均一な分解能を持つ（等方性）。

これに対し我々は従来型ミラーを特殊に扁平させた非等方な光学系を設計することで、分解能の分布に偏りを持たせた。扁平化したことで、4:3 や 16:9 といった通常の撮像素子の有効利用も合わせて実現できている。具体的に、ミラー面を定義する曲線を放物線とした Horizontal Fixed Viewpoint Biconical Parabolic Mirror (HBP ミラー) 系を開発した (Fig.5)。

HBP ミラー系では、シーン水平断面（同一高）の観測（シーンを水平面で輪切りにした部分の観測）を実現するために、各方位におけるミラーの視点位置が同一水平面内に収まるよう、方位により放射断面でのミラー形状の定義式を変化させている。ミラー形状は具体的には次式で示される。

$$X = t \cos \theta$$

$$Y = t \sin \theta$$

$$Z = \frac{2D - a}{2L^2} t^2 - \frac{D - a}{L} t - \frac{a}{2}$$

$$L = ab \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + 1}{b^2 \tan^2 \theta + a^2}}$$

$$D = ab \sqrt{\frac{b^2 \tan^2 \theta + a^2}{b^4 \tan^2 \theta + a^4}}$$

X, Y, Z は Z をカメラ光軸とした直交座標系、 t, θ は XY 面を長さとして方位で表した極座標を示す。前述の放射断面は tZ 面であり式で第三項にて断面におけるミラー形状が定義される。 a および b は $Z = 0$ における水平断面（楕円）を決定する定数で、方位による分解能の偏り具合を決定する。

Fig.6 に試作 HBP ミラー系の入力画像例を示す。方位による分解能の違いを視覚的に直感できるように、同じ大きさの格子パターンを同距離に配置した。ミラーの短径方位で高分解能となっているため、この方位にロボットの進行軸を合わせて搭載することで有効に利用できると思われる。

提案する HBP ミラー系を用いた場合、方位方向による分解能変化は Fig.7 に示されるような分布となる。経度・緯度方向両者とも 0 degree 付近の方位で高分解能であるため他の方位に比べ高い空間分解能を持つ。

5. 複合現実感技術を用いた遠隔情報の獲得と提示

5.1 遠隔実環境の高精細 3 次元形状モデルの獲得

複合現実感技術を用いて遠隔被災地の情景を臨場感豊かに再現する前段階として、実環境の高精細な 3 次元モデルを獲得するための手法について示す。3 次元形状モデル取得のためには、ステレオカメラと回転台を用いる手法が考えられるが、遠距離の実環境を正確に再現できないという問題があったため、レーザーレンジセンサとカメラを回転台に搭載する方式を開発した⁵⁾。同様の機構による全周レンジセンサはすでに多数商品化されているが、我々の手法は 1) 典型的な製品に比べ

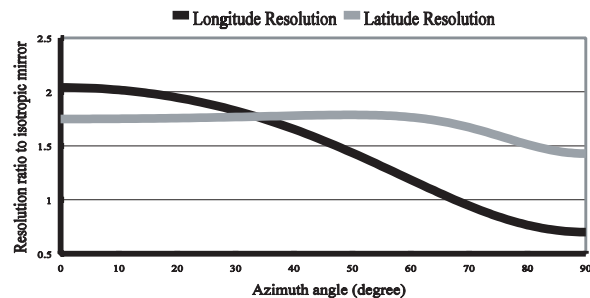


Fig.7 方位方向の変化による経度方向・緯度方向分解能の変化。0 degree, 90 degree が各々ミラーの短径軸方位・長径軸方位に対応する。

大幅に安価であり、2) 要求に応じて計測範囲を限定し迅速な計測を行うことができる利点がある。

計測地側では、回転台（中央精機 QT-CM2 と ARS-136-HP）に搭載されたラインレーザーレンジセンサ（SICK 社 LMS291）によって実環境の距離情報を計測し、全方位映像とともに提示地に送信する。提示地側の計算機では、受信した距離情報と画像から 3 次元モデルを再現し、没入型ディスプレイ（松下電工 Cyber-

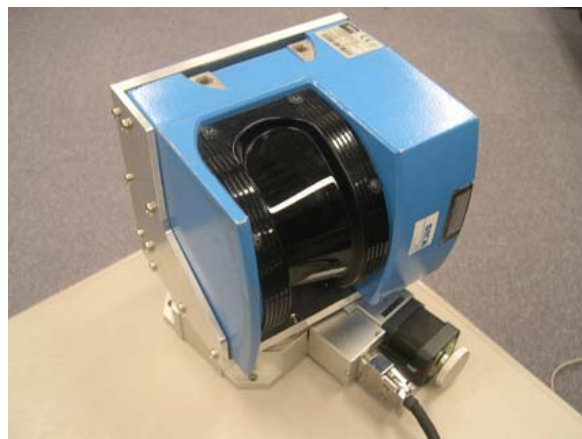


Fig.8 回転ステージ上に取り付けられたレンジセンサ



Fig.9 レンジセンサによる計測を行った環境

Table 1 提案手法と従来手法の比較

使用データ	画像のみ	3次元モデルのみ		提案手法
		低精度モデル	高精度モデル	
写実性	高い	低い	高い	高い
実時間データ取得	可能	可能	困難	可能
視点移動	困難	可能	可能	可能

Dome、水平視野角約 140 °) に提示する。レーザレンジセンサは 1 ライン上の距離情報を取得するものであり、計測ラインを回転させることによって連続した距離情報を取得し、それらを統合することで 3 次元再構築を実現する。Fig. 8 に、レーザレンジセンサを試作した回転台に取り付けた様子を示す。例として、Fig. 10 に計測に用いた実環境の写真を、また、Fig. 9 に開発したシステムを用いて再構築した 3 次元モデルを示す。この例では、回転台を 0.1 °間隔で動かして 901 ラインを計測し、レンジセンサは 1 ラインにつき 0.5 °間隔で 361 点を、合計約 2 分間で計測している。

なお、対称型全方位カメラの場合カメラを回転させる必要はないが、上述の HBP ミラーを用いる場合、0

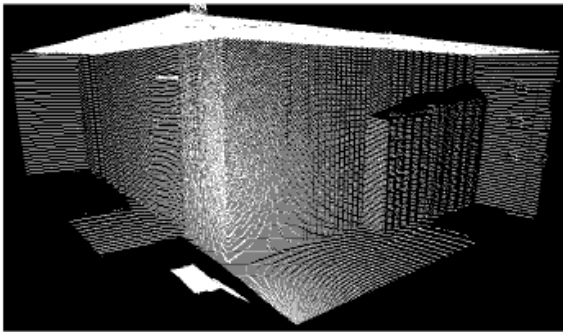


Fig.10 レンジセンサにより獲得された 3 次元モデル



Fig.11 テクスチャマッピングにより再現された 3 次元環境

および 180 degree の方向に高い空間分解能を持つ特性があるので、レンジセンサと同一の回転台に載せて回転させ、0 degree 前後の画像をテクスチャとして取得することが有効である。

5.2 画像ベースとモデルベースの利点を併せ持つテレプレゼンス

被災地の映像が実時間で得られれば、火煙や人物などの動物体の存在や急激な天候の変化などに、迅速・確実に注意を向けるといったことが可能となる。このような異常検知の目的には、正確な 3 次元幾何形状は必ずしも必要ではない。一方、高精細な幾何形状モデルの獲得は現在のところ実時間では不可能であるが、高精細な画像は実時間で取得できる。そこで、こうした目的に適合したテレプレゼンス手法を開発した⁶⁾。本手法は、実環境の 3 次元形状モデルの概形は短時間のうちには大きく変化しないという仮定を置き、画像のみを用いるテレプレゼンス手法と静的な 3 次元モデルのみを用いるテレプレゼンス手法の利点を併せ持つ (Table 1 参照)。

具体的には、現地の作業員や移動ロボットに装着したカメラの位置と姿勢を計測し、予め獲得した 3 次元形状モデルに対して、カメラにより取得した画像の各画素の色情報を、それに対応するモデル表面上に実時間で割り当てていく。実装に際しては、単純に膨大な交点計算を CPU で行えば実時間での描画が不可能になるため、GPU を用いた高速な投影テクスチャマッピングを 2 段階で適用するマルチパスレンダリングアルゴリズムを新たに開発して、実時間での描画を達成した。Fig. 11 に、Fig. 10 の 3 次元ワイヤフレームモデル上にテクスチャマッピングを行った様子を示す。

これにより、最新の撮影対象は実時間で観察でき、かつカメラの移動に伴って徐々に高精細なテクスチャが 3 次元モデル全体に貼り付けられ、さらに、観察者が自由に視点移動可能な、テレプレゼンスが実現できた。なお、試作システムでは、屋内高精度 3 次元センサ (3rdTech 社 HiBall-3100) を用いてカメラの位置・姿勢を測定したが、屋外環境での高精度な位置・姿勢測定は今後検討する必要がある。

6. 計測とナビゲーションのシーケンス

第 3, 4, 5 節で述べた要素実験の結果を統合すると、実際のミッションでは以下のような “Stop and Go” シーケンスに従って計測とナビゲーションを行うことが現実的であるとの方針が導かれる。

- ロボットが停止している状態で，全周のレンジデータ，テクスチャデータの計測を行い，提示・操縦地へ送信する．この計測には現在約2分間を要する．得られたレンジおよびテクスチャの情報に基づき，ロボットが移動すべき方向・経路を決定する．
- ロボットが走行移動している最中は，レンジデータ計測を行う必要は無い．ロボットの移動に従ってテレプレゼンスの視点を移動させることにより，操縦者へは違和感の無い映像を提示することができる．同時に，操縦者は，車輪まわりの障害物認識用のカメラ画像を注視すべきである．障害物検知カメラの画像はとりたてて高解像である必要は無いが，送信レートを高く取りリアルタイム性を重視する必要がある．また，全方位カメラ画像の取得も間歇的であり，移動に伴ってテクスチャ情報が追加されれば，テレプレゼンスの精細度が向上する．
- ロボットの連続移動距離は1回あたりのレンジデータの計測範囲に依存するが，現時点ではおよそ10mを目安とする．

7. あとがき

遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術の研究と題した本研究では，地震の影響を受けない衛星通信を用いて，災害発生直後の初動情報収集活動を効率的に行うための，ネットワーク技術，ロボット技術，視覚情報収集と提示 (VR) 技術の開発を進めている．本稿では，移動探査ロボットの開発とその遠隔操縦技術の確立，および拡張現実感を用いた臨場感の高いデータ表示技術の開発について，基本コンセプトおよび試作・開発の成果を示した．

移動ロボット技術については，ロッカーサスペンションを持つ車輪走行ロボットのテストベッドを製作し，市販のラップトップ PC を搭載コンピュータとし，USB 接続機器，無線 LAN など汎用性の高い要素製品を組み合わせて，遠隔操縦を実現した．視覚情報の取得については，ロボットの進行方向（およびそれと反対方向）に高い解像度を持つ非等方性全方位ミラー (HBP ミラー) を開発し，その有効性について論じた．遠隔情報の提示については，全方位画像取得と同時にラインレーザーレンジセンサによる測距を行うことにより3次元モデルを生成し，その上に画像をテクスチャマッピングする技術を開発し，その有効性を論じた．

今後は，これらの技術を搭載した屋外用大型ロボット，屋内探索用小型ロボットなどの複数のロボットを開発し，これら一群のロボットが協調的に情報収集活動を行うアドホックネットワークの技術開発へと進んでいく予定である．

8. 謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 SCOPE-R プロジェクトして実施中のものである．また，大川情報通信基金およびカシオ科学振興財団の支援もいただいた．

参考文献

- 1) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト，III 被害者救助等の災害対応戦略の最適化，平成 14 年度成果報告書 (2003)
- 2) http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/spacecraft_rover_wheels.html
- 3) 吉田，渡辺，水野，石上，月・惑星探査ローバーストベッド「TheDuneExplorer」の開発，第 21 回日本ロボット学会学術講演会，3G13，(2003)，CD-ROM.
- 4) 近藤一晃，八木康史，谷内田雅彦，“ロボットナビゲーションのための非等方性全方位視覚”，Meeting on Image Recognition and Understanding 2004，pp. 1493-498，2004.7.23
- 5) 河合克哉，中澤篤志，清川清，竹村治雄，“レーザスキャナと回転台を用いた遠隔地の 3 次元環境伝送システム”，日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会，pp.51-52，2004.
- 6) 足立智章，小川剛史，清川清，竹村治雄，“装着型カメラによるビデオモザイクを用いたテレプレゼンスシステムの実現”，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004，pp.943-948，2004.