

遠隔監視システムを用いた災害地情報収集のための 非等方性全方位視覚系

近藤 一晃^{*1} 向川 康博^{*1} 鈴木 俊哉^{*2} 八木 康史^{*1}

Anisotropic Omnidirectional Imaging System for Remote Surveillance of Devastated Area

Kazuaki Kondo^{*1} Yasuhiro Mukaigawa^{*1} Toshiya Suzuki^{*2} Yasushi Yagi^{*1}

Abstract – The Horizontal fixed viewpoints Biconical Paraboloidal:HBP mirror is an anisotropic convex mirror that has inhomogeneous angular resolution about azimuth angle. In this paper, we propose a remote surveillance system with a specially designed HBP mirror system for collecting information of devastated areas. We used a virtual remote surveillance environment for investigating effectiveness of the HBP mirror system compared with conventional omnidirectional imaging systems. From results of object searching experiments, we confirmed that objects can be detected early and with certainty by the HBP mirror system. We also developed a real remote surveillance system for actual surveillance experiments. Through those two types of experiments, we got the results that the HBP mirror system effectively works for remote surveillance.

Keywords : Anisotropic Omnidirectional Imaging System, Remote Surveillance

1 はじめに

現在、全方位視覚系と呼ばれる自己の周囲360度の観測を目的としたカメラシステムが様々に開発され、幅広い分野にわたって利用されている。中でもカメラと凸型反射鏡を組み合わせた構成の全方位視覚系は、コンパクトな大きさと全周囲を一度に撮像できることから、種々の提案がなされてきた[1, 2, 3]。従来の全方位視覚系はフォーカスなどの光学特性や単一視点の幾何特性などに注目していたが、昨今では使用目的に応じた特殊な反射鏡を用いた全方位視覚系が新たに提案されつつある。空間に対して均一な分解能特性を持つ全方位視覚系の提案[4, 5, 6, 7, 8]や、目的の射影特性を満たす反射鏡の設計手法の提案[9, 10]などがその例である。また、これまでに提案された全方位視覚系のほとんどが方位によらず均一な観測を行っていたのに対し、我々は方位によって空間分解能が変化する非等方性全方位視覚系:HBP(Horizontal fixed viewpoints Biconical Paraboloidal)ミラー系を提案している[11]。HBPミラー系は前後と左右など直交する方位で異なる分解能を持つため、方位によって観測密度の重要性が異なるタスクに対して有効に働くと考えられる。

しかし、論文[11]中で行われたのは、基本的な設計に基づいたHBPミラー系の試作と視覚系単体につい

ての特性評価であり、実際のタスクを想定したシステム全体の提案・作成およびその性能評価はなされていない。そこで本稿では、実タスクを想定したHBPミラー系を設計し、実験を通してそれを用いたシステム全体の性能評価を行う。

具体的に想定するタスクはHBPミラー系を搭載した遠隔走行ロボットによる大規模災害現場の情報収集とする。これは[12, 13]などの研究で取り上げられているように、現在高い注目を集めているタスクの1つである。評価は計算機内に仮想的に構築した遠隔監視システムを使用して行う。仮想環境を利用すれば複数の異なる視覚系を容易に実装することができ、またこれらの設計値や実験条件を自由に変えて繰り返し実験を行うことができる。そこで、仮想遠隔監視システムを用いた実験では、HBPミラー系を用いた遠隔監視システムを従来の全方位視覚系を用いた場合と比べ、どのような性能の違いが現れるのかを検証する。本稿ではまず遠隔ロボットによる災害地情報収集を想定した遠隔監視システムの構成、および災害地情報収集タスクに基づいて設計したHBPミラー系の詳細について述べる。続いて仮想遠隔監視システムを用いた性能比較実験を行い、最後に提案システムに基づいて開発した実遠隔監視システムについて紹介する。

2 HBPミラー系を用いた遠隔監視システム

2.1 全方位視覚系を用いた遠隔監視の構成

災害現場における情報収集は、探索範囲や探索の細かさの指標から、(a) 空中からの俯瞰観測による広域

^{*1}大阪大学 産業科学研究所

^{*2}株式会社 映蔵

^{*1}The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.

^{*2}Eizoh Co., LTD.

的な情報収集, (b) 路上を走行しながら探索を行う中域的な情報収集, (c) 建物内・トンネル・瓦礫内などに進入する局所的な情報収集, の大きく3段階に分類することができる. (a) は飛行機やヘリコプター型のロボット, (c) は蜘蛛型の脚や蛇型の匍匐機構を持ったロボットなどが得意とする探索である. 本稿で想定するのは地上を走行する遠隔ロボットによる (b) のような情報収集である. この場合, 災害状況は全ての方位にありうるため全方位視覚系の利用が適している.

全方位視覚系は, 複数カメラ系・カメラをパンチルトさせる回転雲台系・凸型ミラーを用いた全方位視覚系の3つに大別される. 複数カメラ系では全周に渡る詳細な画像が得られるが, データ量が多いため遠隔監視のように通信容量が制限されている場合には適していない. また回転雲台系は, 注目した方向の詳細な画像が得られる反面, 回転に伴う時間遅れが発生する. それに対し, 凸型ミラーを利用した全方位視覚系は, 自己の周囲360°を一度に撮像できるため, 回転に伴った時間遅れなしに任意の方向を遠隔監視できる [14]. 加えて, 全周囲の同時観測ができていることから, 複数の監視者に異なる方向の画像を同時に提示するといった遠隔監視も可能である. 監視においては走行しながら周囲状況を把握する必要があるため, 全周囲映像の中でも特に前方から側方にかけてが重要な観測範囲となる. そこでHBPミラー系により前方・側方・後方の各々で異なる分解能および観測範囲を実現させ, 従来の全方位視覚系に比べより有効に働く遠隔監視システムを提案する.

一般に全方位視覚系を用いた遠隔ロボットが災害地を走行しながら行う視覚情報収集は図1のように構成される. 全方位視覚を搭載した遠隔ロボットは災害現場を遠隔操縦により走行しながら被災状況の収集を行い, 得られた映像を無線通信により遠隔監視室へ送信する. 遠隔監視室で受信された映像は, 視野の大きさと方向に基づいて切り取られ, ゆがみ補正を施された後に, ロボットの遠隔操縦者や監視者に提示される. 得られた情報は災害状況の把握を経て復旧活動や救出活動の計画などに役立てられる. このような構成で遠隔監視システムを構成する.

2.2 非等方性全方位視覚:HBPミラー系 [11]

一般に凸型ミラーを用いた全方位視覚系は上向きカメラの前に凸型ミラーが配置された構成である. 従来提案されてきた全方位視覚系では, ミラー曲面がカメラ光軸を軸とした回転対称である場合が多く, 同一方位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角度分解能を持つ等方な性質であった. それに対し, HBPミラーは画像面という限られたリソース

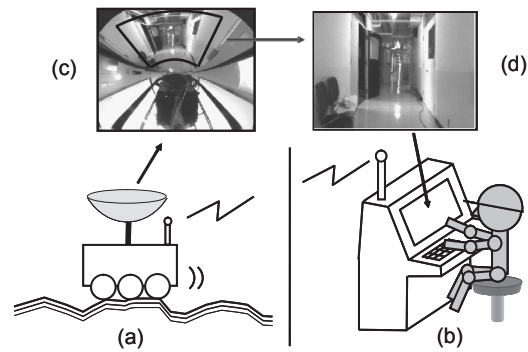


図1 遠隔監視のモデル. (a) 全方位視覚系を搭載した移動ロボット. (b) 遠隔地での監視. (c) 入力画像. (d) 提示画像.

Fig.1 Outline of a remote surveillance.

を, 重要とされる前方に多く割り当てて有効に利用している. (1) 式にHBPミラーの形状およびミラー座標系からカメラ座標系への射影式を示す.

$$\begin{cases} X = t \cos \theta \\ Y = t \sin \theta \\ Z = \frac{2D(\theta)-a}{2L(\theta)^2} t^2 - \frac{D(\theta)-a}{L(\theta)} t - \frac{a}{2} \\ L(\theta) = ab \sqrt{\frac{t \tan^2 \theta + 1}{a^2 \tan^2 \theta + b^2}} \\ D(\theta) = ab \sqrt{\frac{a^2 t \tan^2 \theta + b^2}{a^4 t \tan^2 \theta + b^4}} \end{cases} \begin{cases} x = K_x X \\ y = K_y Y \end{cases} \quad (1)$$

ここでXYZは水平面XYと鉛直軸Zからなる直交座標系, t, θ はXY平面の極座標表現, xy はカメラ座標系を示す. a, b は $Z=0$ におけるミラー水平断面形状を決定する楕円パラメータであり, 同時に非等方の度合いも決定する. $a=b$ の場合にはミラーは変形されず, 等方な全方位視覚系を示す. 一般的なカメラは撮像素子が4:3や16:9などの長方形に配置されているため, 楕円に似た横長のHBPミラーは入力画像面を効率よく使用できる. 結果として同一のカメラを使った場合, 表1に示すように, 側方の分解能を損なうことなく前方の分解能を向上させることができる.

(1) 式にて定義されるHBPミラーは2つの制御パラメータ a, b を持つが, 式の性質からX軸を対象軸として異なるパラメータを与えることができる. 具体的には, $Y > 0$ と $Y < 0$ の象限で各々異なる a を設定することで, 両者の間に分解能の違いを与えられる. またHBPミラー系は並行投影カメラに基づいて設計されているため, カメラ位置をミラーに対して並行移動させても射影関係が損なわれない. そのため観察範囲を広く取りたい方位に画像面を多く割り当てることが可能である. 上記の性質を利用して, 遠隔監視に適したHBPミラー系の設計と試作を行った. HBPミラーの設計では $a = 28\text{mm}$ ($Y > 0$: 前方), 30mm ($Y < 0$: 後方), $b = 38\text{mm}$ (側方)の制御パラメータを用い, さらに

表 1 各視覚系における分解能
Table 1 Resolution for each imaging system

視覚系	通常カメラ	等方な全方位	HBP ミラー系
前方	高	低	中
側方	なし	低	低

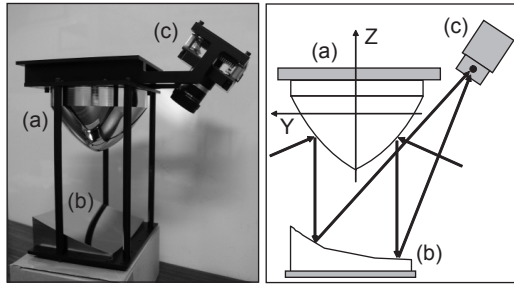


図 2 HBP ミラー系の試作機とその幾何モデル．シーンからの光線は HBP ミラー (a) によって反射され、さらに下部の放物面ミラー (b) に反射された後にカメラ (c) で撮像される．

Fig. 2 Prototype of the HBP mirror system and its geometry model.

画像中心をミラー中心に対して Y 軸正方向に $5.4mm$ ずらす構成とした．このように設計した HBP ミラー系は広垂直画角の前方視野を高分解能で観測し、側方は観測する垂直画角を保ったまま低分解能で観測する．また後方は側方ほどではないが前方よりは重要度が低いので、やや狭い垂直画角視野を前方と側方の中間の分解能で観測する．図 2 に試作機の概観図を示す．通常のカメらは透視投影の射影幾何であるため、それを並行投影に変換する追加の反射鏡を HBP ミラーと併せて用いている．また図 3 に $1392 \times 1040pixel$ の入力画像を持つカメラでの撮像例を示す．同じ奥行きにおいた同じ大きさの HBP という文字が方位によって異なる大きさに射影されていることから、分解能の違いが見取れる．

3 仮想遠隔監視システムの開発

3.1 仮想的な遠隔監視システムの必要性

続いて、HBP ミラー系を用いた遠隔監視システム (2 章) がどのような性能を持っているかを、従来の全方位視覚系との比較実験を通して評価する．本稿では計算機内に構築されたシーンと全方位視覚系を用いて仮想遠隔監視システムを開発し、比較実験を行う．仮想的な実験環境を用いることで、分解能特性や機構の異なる全方位視覚系の比較を容易に行うことができる．また同じ条件下で実験を繰り返し行えるため多数の被験者による評価ができる．視覚系の設計値や条件設定を変化させた実験を簡単に行えるため、効率的に繰り返



図 3 図 2 で示した試作機による入力画像例．視覚系から同距離に配置した同じ大きさの文字“HBP”が方位によって異なる大きさに射影される．

Fig. 3 An example of input image taken by the prototype HBP mirror system shown in Fig.1.

返し性能評価を行うことができる、など仮想的な評価環境の利用には多くの利点がある．開発した仮想遠隔監視システムは図 4 のように構成される．以下にシステムの詳細について述べる．

3.2 タスク設定と 3D シーン構成 (図 4(A))

実験環境として、被災地を走行する車両型のロボットで遠隔監視を行う状況を想定する．監視対象である被災地シーンは、道とそれに沿った建物群から成る 3D モデルで構成し、実際の被災現場の画像を利用して臨場感のある被災地を再現した．さらにシーン中に火災 (災害の情報)、被災者 (要救助者の情報)、路面上の穴 (走行の障害) を配置し、これらを発見することを実験のタスクと設定した．上記発見対象物以外にも車両・ポスト・ブロックなどのダミー物体も配置した．使用した対象物の詳細は図 5 に示した通りである．上記手法で構築した仮想被災地シーンを図 6(a) に示す．このようにして実シーンの代わりとなる被災地の 3D モデルを作成した．

3.3 視覚系の入力画像生成 (図 4(B))

次に作成した被災地モデル内に視覚系を配置した場合の、その入力画像を得る手法について述べる．反射鏡を利用した全方位視覚系は射影が非線形であるため、系を正確に模擬するには CG 技術のレイトレーシングが効果的である．我々は、レイトレーシングで幾何学的な性質を正確に模擬して画像を生成するソフトウェア POV-Ray を用いて全方位視覚系の入力画像を生成した．本稿では集光や収差などは厳密には考慮せず、ほぼ理想的な光学特性下で画像生成を行った．すなわち実視覚系が十分な光学特性を満たしている場合を模擬している．図 6(b) に HBP ミラー系を配置した場合の入力画像生成例を示す．生成画像は非等方性全方位視覚系のような複雑な視覚系も正確に再現している．

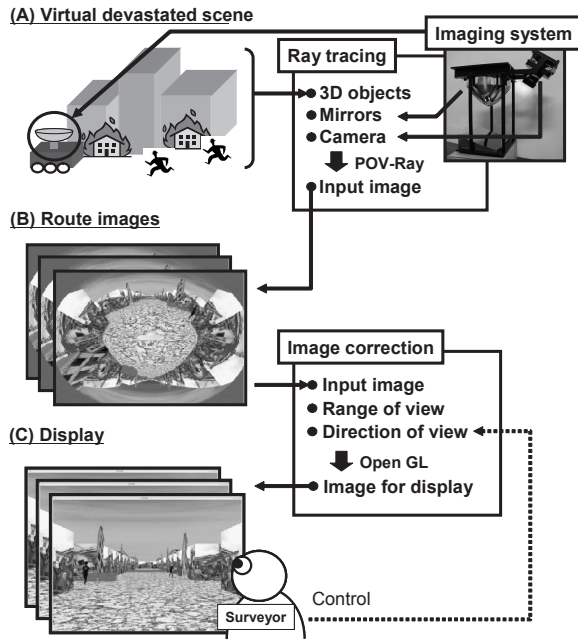


図4 開発した仮想遠隔監視システムの概要図．
(A)3Dシーンと視覚系の構成．(B)入力画像の生成．(C)画像提示．

Fig. 4 The virtual surveillance system.
(A)Construction of a 3D scene and an imaging system. (B)Creation of route images. (C)Image display.

一方、回転雲台系では、仮想シーン中に通常の透視投影カメラを配置して画像生成を行うことで一枚の入力画像を得る。回転による各方位の撮影は、カメラの向きを変化させながら画像生成を行うことで実現する。またシーンを走行しながらの遠隔監視を実現させるために、視覚系の配置位置を経路に沿って動かしながら画像生成を行い、事前にルート画像列を作成した。

3.4 画像提示(図4(C))

全方位視覚系の入力画像は図6(b)に示すように円状に歪んでいるため、歪み補正を行った上で人物に提示する。このときの歪み補正は使用した全方位視覚系の射影特性に基づいて行われる。また、どの方位のどれくらいの大きさの視野を提示するかによって、全方位画像中のどの部分を切り出して提示するかが決定される。提案システムにおける全方位画像からの切り出しや歪み補正は、OpenGLによるテクスチャマッピングを利用して行う。提示する方位や視野の大きさは目的によって様々であるが、本稿では以下の二種を扱う。1つは限られた大きさの視野を監視者が自由にその方向を操作できる提示法である(自由視野提示)。この場合監視者により指定された方位が全方位画像から切り出されて提示される。もう1つは広い視野のパノラマ画像を固定して提示する手法である(パノラマ提示)。どちらも遠隔操縦および広域監視に広く用いられている提示法であり、次章に続く実験では評価対象に応じ

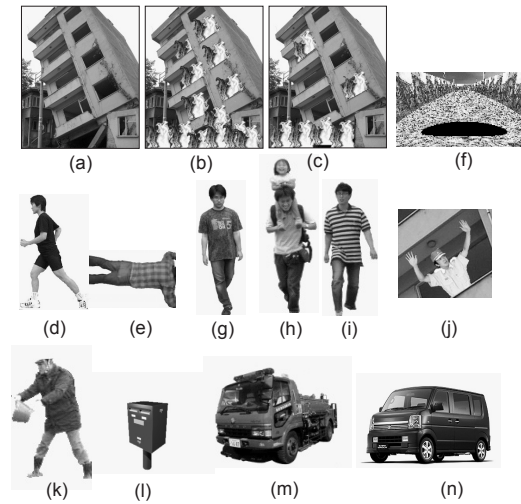


図5 仮想災害地シーンに使用した対象物．(a) 火災のない建物．(b) 大規模火災．(c) 小規模火災．(d),(e),(g)-(j) 被災者．(f) 路上の穴．(k)-(n) ダミー例．

Fig. 5 Objects placed in the virtual devastated scene.

て上記手法を選択して用いた。回転雲台系は、その構成上、自ずと自由視野提示となる。この場合、監視者が指定した方位に対応する画像を、事前に生成しておいた画像列の中から選択して提示する。図7に各々の視覚系での提示画像例を示す。(a)は回転雲台系による提示画像例、(b)は等方な全方位視覚系による提示画像例である。これらは方位によらず一定の解像度を持つ。一方HBPミラー系は方位により解像度が異なる。そのためHBPミラー系の高解像度方位で撮影した場合の提示画像(c)と低解像度方位で撮像した場合(d)の両者を図7に示している。視覚系や観測方位の違いによる解像度の違いが正しく表されていることがわかる。

上記画像提示を単一の画像ではなく先に作成しておいたルート画像列を用いることで、シーン中を走行しながらの遠隔監視を実現させる。提示画像を時間経過に従って順に更新していくことで、監視者はあたかも仮想的な被災地の中を走行しているかのようにシーンを監視することができる。

4 仮想遠隔監視システムを用いた比較実験

4.1 実験の目的

HBPミラー系の性能評価のために、等方な全方位視覚系および回転雲台系との比較実験を行った。被験者に与えたタスクは災害地現場を監視し災害状況や被災者などの対象物を発見することである。まず、HBPミラー系と等方な全方位視覚系の各々で、前方を中心とした視野の提示で監視実験を行い、HBPミラーにより得られる高分解能な画像が対象物の発見に与える



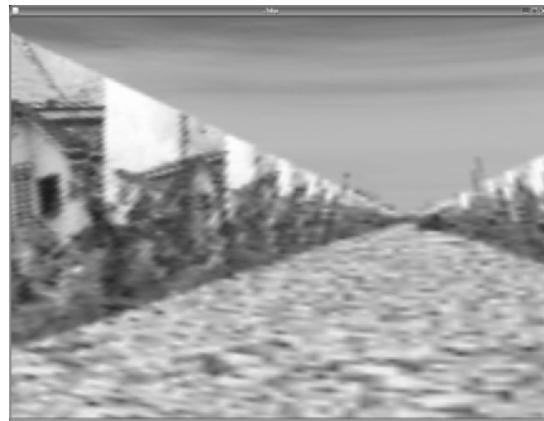
(a) Pan-tilting camera



(b) Isotropic omnidirectional mirror system



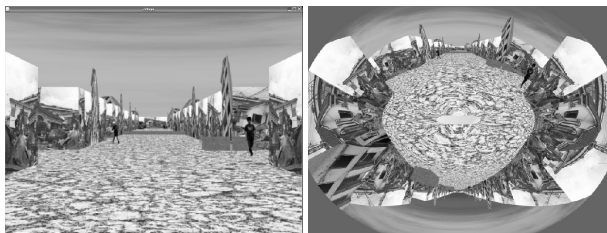
(c) HBP mirror system (high resolution direction)



(d) HBP mirror system (low resolution direction)

図7 各視覚系における提示画像例．回転雲台系 (a) や等方な全方位視覚系 (b) では方位によらず等しい分解能の画像となる．HBP ミラーを用いた場合は進行方位の画像 (c) が側方の画像 (d) よりも高分解能となる．

Fig. 7 Examples of the displayed images for each imaging system and direction.



(a)

(b)

図6 計算機内に構築された仮想災害地例．(a) シーンの様子．(b) HBP ミラー系の生成された入力画像．

Fig. 6 An example of virtually constructed devastated scene.

影響の度合いを評価した．次に，全方位に渡る影響を評価するために，同様の比較実験を前方から側方にわたる広視野の提示で行った．また最後に，回転雲台系との比較を行うことで，HBP ミラー系による全体的

な解像度の低下と，回転雲台による時間遅れの相互影響を比較評価した．

4.2 実験内容

実験では，興味物体をどれだけ早く確実に発見できるかを評価し，遠隔監視における各視覚系の有効性を検証した．発見の早さ・確実さは，以下の手順で興味物体の発見距離を計測して評価した．被験者は仮想被災地を走行していく画像を監視しながら，被災者や火事などの発見すべき物体（興味物体：事前に告知）を探し，見つけた場合それを報告する．このときの報告が正解であったときのみ，その時に提示されていた画像のフレーム番号を記録した．画像提示には事前に作成したルート画像列を使用しているため，記録したフレーム番号から自己位置を知ることができる．さらに興味物体の配置位置は既知であるため，二者間の距離を算出することができる．これを興味物体の発見距離

とした．発見距離は値が大きいほど早期に発見したことを示す．一方，発見すべき物体であるにもかかわらず気づかず通り過ぎてしまったケースは，見落としと記録した．

本章で報告する実験全てに共通する条件設定は以下の通りである．仮想的な実験環境ではカメラや通信手段などの各種設定を自由に決められることができるが，現実に即した妥当な条件を公平に設定することが重要である．カメラに関しては，ロボットビジョンの分野で一般的に使用されている解像度のものから選択し，比較する2つの視覚系で同じカメラを使用した．また遠隔監視は，大きく分けて視覚系と提示系の2つで構成されるが，本稿では視覚系の性能を評価することが目的であるため，提示手法は比較する両視覚系で統一した．実際に設定したカメラの解像度や提示手法に関しては，各実験の項で詳細に述べる．通信速度に関しては，一般的な無線LAN規格であるIEEE802.11gの屋外使用での実効値を想定し，経験的に10Mbpsとした．遠隔監視実験に用いた計算機のスペックは，CPU:Xeon 3.0GHz, ビデオチップ:GeForce6800GT 256MB, OS:Vine Linux 3.2である．画像提示にはSXGA(1280×1024pixel)の液晶モニタを用いた．

4.3 等方な全方位視覚系との比較：前方中心視野

まず，HBPミラー系の前方高解像な画像による対象物発見精度への影響を評価する実験を行った．比較対象はHBPミラー系における設計パラメータ $a = b$ とした等方な全方位視覚系である．カメラの画像解像度，すなわちPOV-Rayによる生成画像の大きさは，ロボットビジョンの分野で一般的に用いられているXGAの解像度とした．この解像度は，等方な全方位視覚系とHBPミラー系で統一した．また，画像解像度を最大に利用して全体的に最も高解像になるように全方位ミラーを配置した．発見すべき物体としては，火災・逃げている人物・負傷して倒れている人物・路面に開いた穴の4種を用意し，図8に示す経路上に配置した．実験は8人の被験者に対して自由視野提示で行った．視野方向をユーザーによって操作可能としたのは，なるべく実際の監視タスクに近づけるためである．各々の被験者には，等方な全方位視覚系 ($a = b = 35mm$) とHBPミラー系 ($a = 35mm, b = 50mm$) を用いた一回ずつ計二回の監視実験をしてもらった．学習効果を考慮すると，一回目の探索よりも二回目の探索時の方が早く発見される傾向にある．しかし二回の探索で全く異なるシーンを使用したのでは不公平が生じる．そこでルート構成や物体の配置が同じシーンを用いつつその学習効果を弱めるために，表2に示すとおり，用いる視覚系の順序を逆にする，経路を逆順に辿る，左右反転の画像を提示するなど，経路と視覚系の関係

をランダムに組み合わせて実験を行った．提示の組み合わせは被験者によって異なるため，用いたシーンは同じであるが，感覚刺激の順序(興味物体の現れ方など)は各被験者・各探索によって異なる．

結果と考察

a) 対象物の見落とし

被験者全体の結果には見落としが火災Aで2件見られた．火災Aは火災Bに比べ小規模な火災状況を再現しており，そのために見落としが発生したと考えられる．これらの見落としは等方な全方位視覚系を用いた場合のみ発生し，HBPミラー系での見落としはなかった．等方な全方位視覚系では分解能が足りず，小さい対象物を見落としてしまう場合があるのに対し，HBPミラー系では前方がより高分解能となっているので結果として見落としがなかったと考えられる．

b) 対象物の発見距離

対象物の発見距離から定量的な評価を行う．表3に興味物体の発見距離例を，図9に全被験者・全興味物体における発見距離を示す．表3では数値の大きい視覚系の方が他方より早期に発見したことを示す．また図9では実線よりも上側に位置する点がHBPミラー系により早期に発見できた事例を示す．両視覚系による発見距離の平均と標準偏差を算出したところ，等方な全方位視覚系系で平均9.06m，標準偏差6.80mであったのに対し，HBPミラー系では平均12.1m，標準偏差9.51mであった．HBPミラー系はばらつきにおいて多少下回っているものの，平均の差がそれを十分に補っていると考える．

また被験者によって対象物の認識指標が異なるため，視覚系による発見距離の違いを次式にて正規化した値で評価した．

$$D_{i,ratio} = \frac{D_{i,hbp}}{D_{i,paraboloidal}} \quad (2)$$

ただし， $D_{i,paraboloidal}$ は被験者 i の等方な全方位視覚系を用いた場合の発見距離， $D_{i,hbp}$ はHBPミラー系を用いた場合の発見距離を示す．(2)式で定義した発見距離比 $D_{i,ratio}$ が1より大きいとき，HBPミラー系を用いた場合でより早く発見できたことを示す．図10は，こうして求めたHBPミラー系の優位性の評価値を被験者毎とその単純平均値で示している．被験者によっては見逃した対象物が存在するが，それに関しては評価値は計算せず平均値の算出にも用いなかった．部分的には評価値が1を下回っている箇所も見られるが，ほぼ全体で1より大きな評価値となっており，被験者で平均した値はどの対象物に対してもHBPミラー系の優位性が示されている．図10の結果を対象物の種類ごとに示すと図11のようになる．路面上の穴

表2 学習効果を考慮した各被験者への提示方法. 表中“HBP”はHBPミラー系，“ISO”は等方な全方位視覚系を示す.

Table 2 Image display methods for each subject taking into account learning effect. “HBP” and “ISO” describe the HBP mirror system and the isotropic omnidirectional imaging system for comparison, respectively.

Subject Number		1	2	3	4	5	6	7	8
1st	Imaging system	HBP	HBP	HBP	HBP	ISO	ISO	ISO	ISO
	Moving direction	Forward	Forward	Backward	Backward	Forward	Forward	Backward	Backward
	Vertical flip	No flip	Flip	No flip	Flip	No flip	Flip	No flip	Flip
2nd	Imaging system	ISO	ISO	ISO	ISO	HBP	HBP	HBP	HBP
	Moving direction	Backward	Backward	Forward	Forward	Backward	Backward	Forward	Forward
	Vertical flip	Flip	No flip	Flip	No flip	Flip	No flip	Flip	No flip

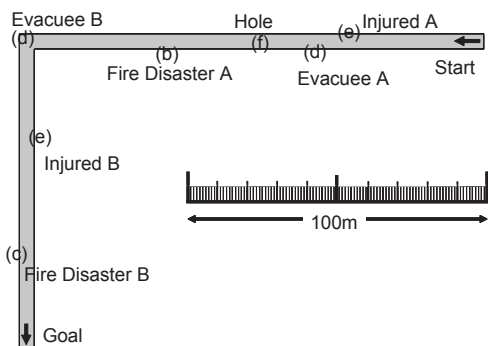


図8 前方中心視野実験で使用した仮想災害地ルートの上面図. 配置記号は図5中の対象物と対応する.

Fig. 8 Virtually constructed route used in the experiment mentioned in 4.3.

や火災などは視覚系による差はあまり現れず，人物の発見にはHBPミラー系が有利に働いたことがわかる．路面上の穴や火災は背景に対して色彩の違いが顕著であったため，解像度による違いがあまり現れなかった．負傷者や避難者などの人物は背景に溶け込んでいて色からは判別しにくく，テクスチャや形状を元に発見が行われるため大きな違いが現れたと言える．

発見距離の比ではなくどちらが先に発見したかの割合を図12に示す．全ての対象物において，HBPミラー系で先に発見される割合が高い結果となった．特に負傷者と避難者でHBPミラー系の優位性が顕著に現れているのは，先ほどと同様の理由からと思われる．

4.4 等方な全方位視覚系との比較：全方位視野

本節では前方から側方にかけて連続したパノラマ提示でHBPミラー系の全方位に関する評価を行う．そのため，図13に示すように主道に対して側道を新たに追加したシーンを作成し，主道・側道の両方に発見すべき対象物を配置した．視覚系の設定は前節と同様で，被験者は10人である．学習効果を弱めるために，表2で示した進行方向と左右の逆転に加え，表4に示すように，HBPミラー系と等方な全方位視覚系が時系列で交互に切り替わるようにした．このときの視覚系の切り替わりは，提示に使用するルート画像列を切

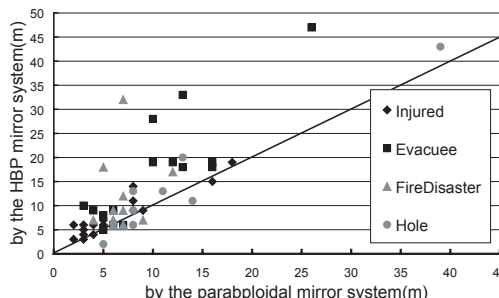


図9 両視覚系による発見距離の分布.
Fig. 9 Distribution of detected distance.

表4 学習効果を考慮した提示切り替え例. 各被験者で下記の切り替え方を変化させて行った. 表中“HBP”および“ISO”は表2中と同義.

Table 4 Switching of image display for the experiment in 4.4.

	Start				Goal	
1st	HBP	HBP	ISO	ISO	HBP	HBP
2nd	ISO	ISO	HBP	HBP	ISO	ISO

り替えることに相当する．なお，切り替え時には発見すべき対象物が視野内に現れないよう，その配置を工夫した．各被験者にはその切り替え方を逆にした実験をもう一度，計二回行ってもらい，2つの視覚系で同一のシーンを見せつつ一方だけに有利な条件とならないようにした．

結果と考察

a) 対象物の見落とし

パノラマ提示を用いた実験では，比較的視野が狭い自由視野提示に比べ被験者の注視状態が結果に大きな影響を与えると考えられる．そのため対象物の種類毎の評価ではなく，配置の違い(主道上か側道上か)で分類して評価した．見落としに関する結果を表5に示す．側道上に配置された対象物，つまり全方位視覚系の側方部分視野ではほとんど同程度の発見率である．

表 3 ある被験者の実験結果例．表内の値 (単位 m) は対象物の発見距離を示す．
Table 3 An example of experimental results.

対象物	InjuredA	EvacueeA	Hole	FireDisasterA	EvacueeB	InjuredB	FireDisasterB
放物面ミラー系	3	10	13	6	13	5	10
HBP ミラー系	5	19	20	7	18	6	12

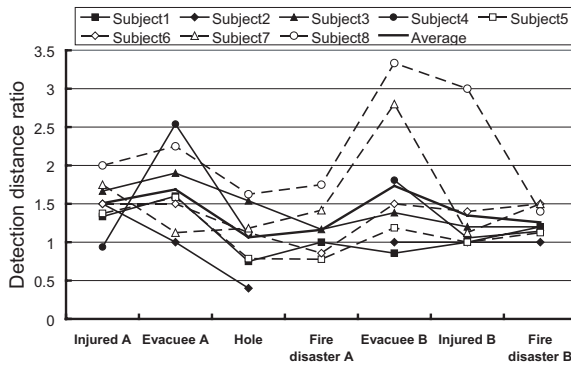


図 10 各被験者および対象物ごとの D_{ratio} 値． D_{ratio} が 1 より大きいとき，HBP ミラー系を用いた場合で早期発見したことを示す．マーカーが各被験者を，黒太線は被験者で平均した値を示す．

Fig. 10 D_{ratio} values for each subject and objects.

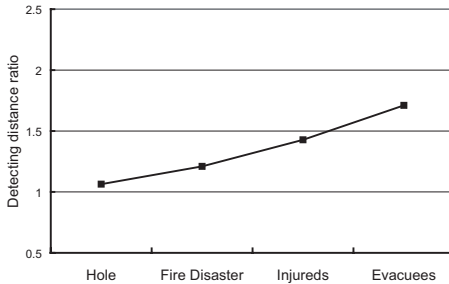


図 11 図 10 で示した結果を各対象物ごとに平均した結果．
Fig. 11 Average value of the each object type in Fig. 9.

一方，主道上に配置された対象物の発見では 204 件から 234 件と 15% 程度の発見率向上が見られる．また全体的な見落とし件数では側道上で少なく主道上で多い．主道上の対象物体は長時間に渡って視野内に存在しているが，シーンの見かけ上の変化が少ないため気付きにくい場面が多かったと考える．前方に現れる対象物の見落としを減らすためにも，解像度の高い画像提示がより重要である．

b) 対象物の発見距離

発見距離の分布をヒストグラムで表した結果，および両視野における平均と標準偏差を図 14 に示す．図中，横軸は発見距離，縦軸はその距離で発見された対象物の件数を表している．負の発見距離は通り過ぎて

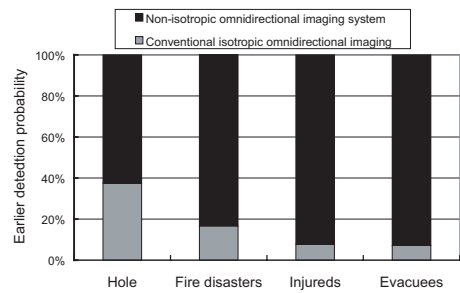


図 12 比較した放物面ミラー系と HBP ミラー系のどちらで早期発見されたかを示す割合．火災を例にとると，放物面ミラー系での早期発見率が 18%，HBP ミラー系での早期発見率は 82% である．そのため HBP ミラー系を用いれば約 4.5 倍の確率で早期発見可能といえる．

Fig. 12 Earlier detection probability.

表 5 全方位視野提示実験における見落とし結果．
Table 5 Overlookings results in the panoramic display.

	見落とし数	放物面ミラー系での発見数	HBP ミラー系での発見数
側道配置	5	128	127
主道配置	63	204	234

からの発見を表す．側道上の対象物 (a) では，両視覚系間で分布の違いはほとんど見られず同程度の発見能力である．平均と標準偏差もほぼ同じであった．一方，主道上の対象物 (b) では分布の違いが見られる．発見件数の最大値を見ると，等方な全方位視覚系では距離 5-10m の区分であるのに対し HBP ミラー系では 10-15m の区分であった．また 25m 以上での発見件数は，HBP ミラー系で圧倒的に多い．HBP ミラー系は側方での発見能力を損なうことなく，前方で発見能力の向上を実現していることが確認された．

4.5 回転雲台系との比較

回転雲台系は HBP ミラー系よりも高解像な画像を得ることができる反面，視野方向の変更が機械的な回転によるため時間がかかる．また視野方向が変化した画像は一定の遅延時間後に取得されるため，応答性が落ちる傾向にある．このように HBP ミラー系と回転雲台系の間には「解像度の違い」と「応答性の違い」が存在するので，それらが対象物発見タスクに与える影響を評価した．

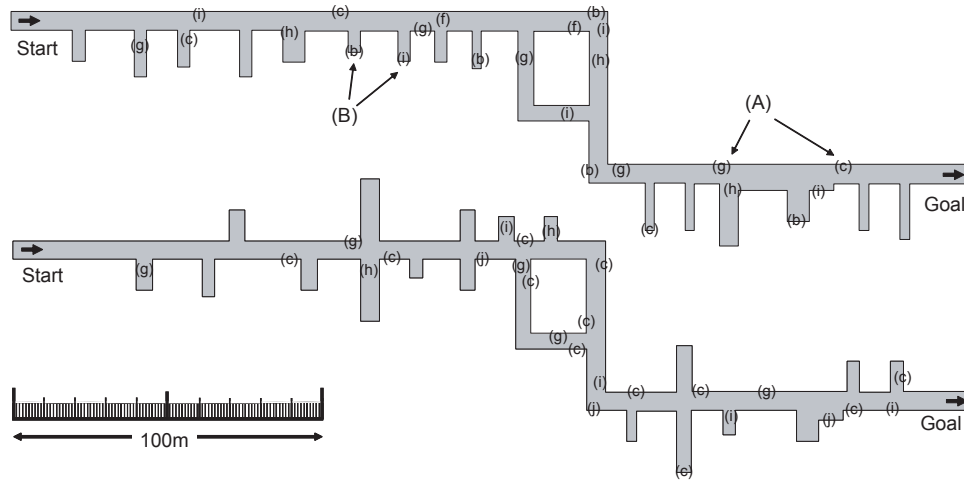


図 13 (上)4.4 節で用いた仮想災害地ルートの上面図．(A) 主道上に配置された対象物．(B) 側道上に配置された対象物．(下)4.5 節で用いた仮想災害地ルートの上面図．配置記号は図 5 中の対象物と対応する．

Fig. 13 A virtually constructed route used in the experiment with a fixed panoramic view.

比較対象となる回転雲台系は、コンピュータビジョンの分野で一般に利用されているものを想定し、画像解像度を VGA、縦横画角を $30^\circ \times 40^\circ$ 、カメラ回転速度上限を $60^\circ/sec$ とした。HBP ミラー系と上記回転雲台系で同じカメラを用いた設定とするために、HBP ミラー系での生成入力画像の解像度は同じ VGA とした。また、提示手法も回転雲台系で用いられている自由視野提示に合わせるために、生成入力画像から縦横 $30^\circ \times 40^\circ$ を切り出して監視者に提示した。一般に、全方位視覚系では全周画像を得ているため、視野を回転させる際に視覚系との通信を必要としない。そのため、視野の回転要求に対して高速に対応できる。一方回転雲台系では、カメラ回転命令送受信 回転 撮像

画像送受信 提示のステップを踏むため、要求してから実際に視野が回転した画像が表示されるまでに遅延が生じる。我々は、上記通信ステップに基づいて回転雲台系における視野回転の遅延時間を $0.4sec$ 設けた¹。またカメラの回転による遅延に関しては、最大視野回転角度を上記の $60^\circ/sec$ に制限することで実装した。使用したシーンに関しては、前節と同様に主道と側道からなるシーンを用意しそのどちらにも発見対象物を配置した(図 13)。

上記の設定で、被験者 10 人に 2 つの視覚系で 1 度ずつ計 2 回の探索実験を行ってもらった。学習効果への対策には 4.3 節と同様の手法を用いた。今回の実験では実験中での経過時間が大きな意味を持つ。そこで

¹VGA($640 \times 480pixel$) の RGB カラー画像を可逆圧縮である PNG 形式で扱った場合、本実験で使用したシーンでは 1 枚でおよそ 560Kbyte であった。すなわち、10Mbps の通信速度では画像送信におよそ $0.4sec$ の時間を要する。視野回転命令の送受信とシーンの撮像に必要な時間は無視できるとし、結果として一連の応答遅延を $0.4sec$ とした。

対象物の発見・見落としに加え、発見した時刻および実験に要した総時間も併せて記録した。

結果と考察

図 15 は、探索に要した時間と見落とし率の分布、およびその平均と標準偏差を示した図である。横軸は実験に要した時間、縦軸は対象物の見落とし率を示す。できるだけ少ない見落としで、早期に対象物を発見していくことが効率的な探索に繋がる。すなわち図中で左下に近いほど良い性能であると言え、おおよそ HBP ミラー系が回転雲台系よりも良い結果を出している。また HBP ミラー系の結果の分布が小さいことも特徴として挙げられる。回転雲台系では、例えば 10% 程度の見落とし率を期待すると、被験者によっては $500sec$ 以上もの時間がかかってしまったり、逆に $300sec$ 程度の制限時間を設けると 30% 近い見落としを起こしてしまう場合がある。それに対し HBP ミラー系では全体的に低見落とし率、短時間の結果となっている。また平均値および標準偏差の値からも HBP ミラー系の低見落とし率・探索時間の短縮が読み取れる。これらの結果より、HBP ミラー系の利用はユーザーに比較的依存しない安定した探索結果に繋がり、探索計画の効率化などに優位であると考えられる。

5 実遠隔監視システム

仮想遠隔監視システムを用いた評価実験では HBP ミラー系による遠隔監視の有効性が確認された。本章では我々が実際に作成した実遠隔監視系を紹介する。図 1 の構成に基づき、試作 HBP ミラー系と電動カートを用いて遠隔監視系の画像取得部分を構築した(図

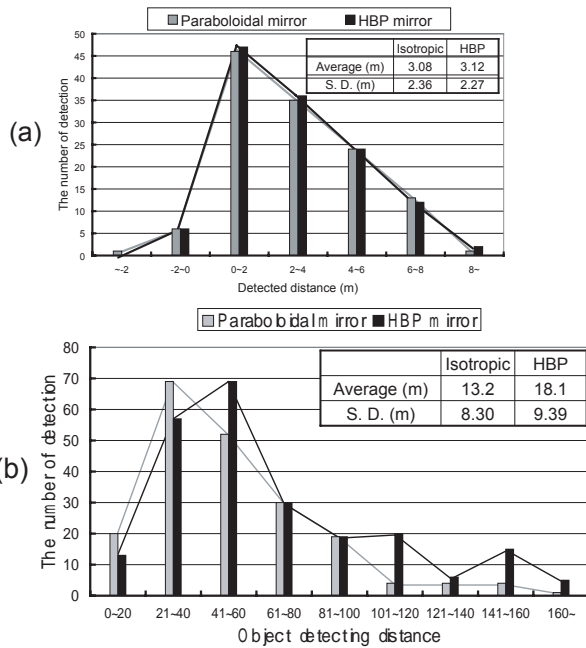


図 14 発見距離のヒストグラム。(a) 側道に配置した対象物。(b) 主道上に配置した対象物。

Fig. 14 Histograms of the detection distances.

16(a)). HBP ミラー系は電動カートのハンドル前方部分に、ミラーの高分解能方位がカートの前面方向に一致するように設置されている。テスト走行では HBP ミラー系を搭載した電動カートで廊下と部屋からなるシーンを走行した。撮像された全方位画像は無線で送信され、遠隔地で自由視野提示される。カートの速度は約 2.0km/h 、走行距離は約 70m であった。また画像提示は 20fps のフレームレートで行った。結果、図 17 に示す例のような入力画像および提示画像を得た。

6 まとめ

本稿では方位によって異なる分解能特性でシーンを観測できる HBP ミラー系を用いて、災害地の情報収集を行う遠隔監視システムを提案し、その性能および有効性を評価した。我々は異なる視覚系による比較実験を行うために計算機上に仮想遠隔監視システムを構築し、従来の全方位視覚系との比較実験に用いた。実験の結果、HBP ミラー系は等方な全方位視覚系に比べ、側方で同程度かつ前方でより確実に早く対象物を発見できることが確認された。さらに通常カメラを回転雲台で首振りする系との比較も併せて行った。また電動カートと実 HBP ミラー系を用いて遠隔監視システムを実際に構築した。

現段階では画像は監視のためだけに提示されており、ロボットの操縦には用いていない。全方位視覚系

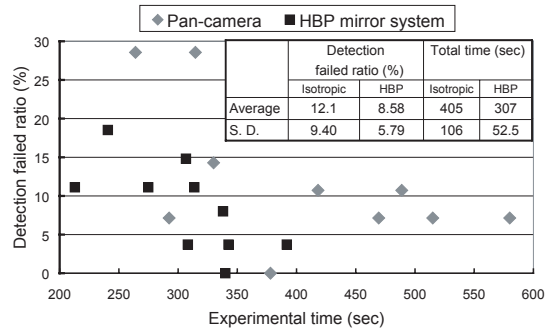


図 15 各被験者による遠隔監視結果の分布。効率的な遠隔監視は短い時間内で低い見落とし率を実現することであるため、図中原点に近い点ほど良い結果を示す。

Fig. 15 Distribution of searching scores.

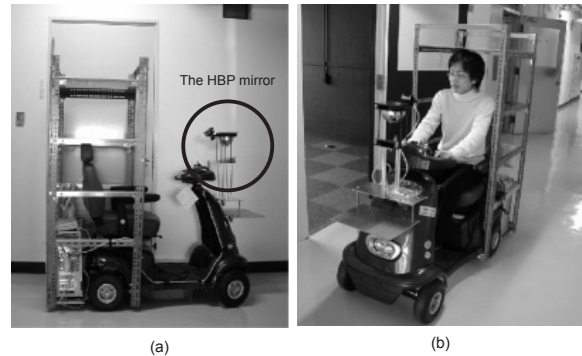


図 16 実遠隔監視に用いた HBP ミラー系を搭載した電動カート。(a) 概観図。HBP ミラー系は電動カートのハンドルを回しても動かない場所に固定されており、いつもカートの進行方向を向いている。(b) 走行時の様子。

Fig. 16 The HBP mirror system mounted on an electric cart for remote surveillance.

で得た広視野画像の提示が安定した操縦に繋がることは長原らによって示されている [15]。前方で高分解能な HBP ミラー系を使用することでさらに安定した遠隔操縦を実現できると考えている。将来はこのような監視以外のタスクを想定した仮想環境を作成し、各タスクにおける有効性の評価を行いたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、戦略的情報通信研究開発推進制度から「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に関する研究開発」の研究助成による。

参考文献

- [1] Y. Yagi and S. Kawato, "Panorama scene analysis with conic projection", Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems, pp. 181-187, 1990.

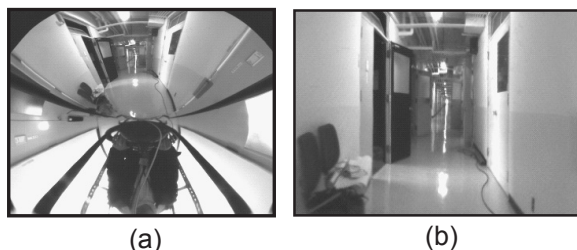


図 17 (a) 実遠隔監視システムによって撮影されたシーンの一例。(b) 提示画像例。

Fig. 17 (a) An input image captured by the real remote surveillance system. (b) An example of displayed image.

- [2] Shree K. Nayar, "Catadioptric Omnidirectional Camera", in Proc. of CVPR, pp. 482-488, 1997.
- [3] K. Yamazawa, Y. Yagi, and M. Yachida, "Visual Navigation with Omnidirectional Image Sensor HyperOmni Vision", in IEICE Vol. J79 No. 5, pp. 698-707, May 1996.
- [4] T. Nakamura and H. Ishiguro, "Automatic 2D map construction using a special catadioptric sensor", Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 196-201, 2002.
- [5] R. A. Hicks and R. Bajcsy, "Catadioptric sensors that approximate wide-angle perspective projections", Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 545-551, 2000.
- [6] J. Gasper, C. Decco, J. Okamoto and J. S. Victor, "Constant Resolution Omnidirectional Cameras", Proc. of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS), pp. 27-34, 2002.
- [7] T. L. Conroy and J. B. Moore, "Resolution Invariant Surfaces for Panoramic Vision Systems", Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV), Vol. 1, pp. 392-397, 1999.
- [8] R. A. Hicks and R. K. Perline, "Equi-areal Catadioptric sensors", Proc. of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS), pp. 13-19, 2002.
- [9] R. Swaminathan, S. K. Nayar, and M. D. Grossberg, "Designing of Mirrors for catadioptric systems that minimize image error", In Proc. of IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS). IEEE Computer Society, 2004.
- [10] R. A. Hicks, "Designing a mirror to realize a given projection", Jarnal of Optical Society of America, Vol. 22, No. 2, pp. 323-329, 2005.
- [11] 近藤一晃, 八木康史, 谷内田正彦, "知能作業ロボットのための非等方性全方位視覚", 電子情報通信学会論文誌 DII, Vol. J88-D-II No. 8 pp. 1521-1529, 2005.8.
- [12] 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, 4. レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発", 平成 14 年度, 平成 15 年度成果報告書, 特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構, 独立行政法人防災科学技術研究所, 文部科学省研究開発局, 2003, 2004
- [13] 吉田和哉, 清川清, 八木康史, 足立忠司, 齋藤浩明, 田中紘幸, 大野浩之, "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)", 第 10 回ロボティクスシンポジウム, 2005.
- [14] Y. Onoe, K. Yamazawa, H. Takemura, and

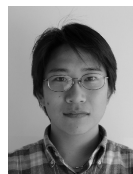
N. Yokoya, "Telepresence by real-time view-dependent image generation from omnidirectional video streams", Computer Vision and Image Understanding, Vol. 71, No. 2, pp. 154-165, Aug. 1998.

- [15] H. Nagahara, Y. Yagi and M. Yachida, "Super Wide Viewing for Tele-operation", WSEAS TRANSACTION on CIRCUITS and SYSTEMS, Issue3, vol3, pp.693-698, 2004.

(2006 年 12 月 26 日受付)

[著者紹介]

近藤 一晃



2007 年大阪大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士後期課程修了。同大学産業科学研究所特任研究員となり現在に至る。反射屈折光学系、知能ロボットに関する研究に従事。博士(情報科学)。情報処理学会, IEEE 各会員。

向川 康博 (正会員)



1997 年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年~2002 年岡山大学助手。2003 年~2004 年 10 月筑波大学講師。大阪大学助教授を経て 2007 年 4 月より同大学准教授。コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。博士(工学)。情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。

鈴木 俊哉



1983 年岩手大学大学院工学研究科修士課程終了。1984 年大日本電線(現三菱電線工業)株式会社入社。光ファイバ, 発光ダイオード, リチウムイオン電池等の研究開発に従事。2004 年株式会社映蔵入社, 全方位視覚センサの研究開発に従事。現在に至る。

八木 康史



1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985 年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990 年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム工学科講師, 同大学院助教授を経て, 2003 年より同大学産業科学研究所教授。1995 年~1996 年英オックスフォード大学客員研究員, 2002 年仏ピカルディー大学招聘助教授, 全方位視覚センシング, 画像理解, 知能ロボットに関する研究に従事。1996 年度電子情報通信学会論文賞, 2003 年 ACM VRST2003 Honorable Mention Award, IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本ロボット学会各会員。博士(工学)。