

遠隔操縦探索における非等方性全方位視覚の性能評価

近藤 一晃[†] 向川 康博[†] 鈴木 俊哉^{††} 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

^{††} 株式会社映蔵 〒 661-0002 兵庫県尼崎市塚口町 6-41-8

E-mail: †{kondo,mukaigawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††suzuki@eizoh.co.jp

あらまし 方位により異なる角度分解能を持つ Horizontal fixed viewpoints Biconical Paraboloidal:HBP ミラーを用いた視覚系が提案されている。しかし、実タスクにおけるその有効性は明らかにされていなかった。そこで本稿では、被災地を遠隔走行させるロボットの視覚系として HBP ミラー系を用い、探索タスクでの有効性を検証する。探索実験では HBP ミラー系と電動カートからなる移動視覚系を使用し、実環境内を走行しながら獲得した画像を、離れた地点で監視することで遠隔探索の評価を行った。また、従来の等方な全方位視覚系を対象とした定量的な比較実験を公平な条件下で行うために、3Dモデルとレイトレースレンダリングを用いて上記移動視覚系を計算機上に作成した。評価実験では HBP ミラー系で早く確実に対象物を発見できることが確認された。

キーワード 非等方性全方位視覚, 被災地探索

Evaluation of anisotropic omnidirectional imaging system for remote surveillance

Kazuaki KONDO[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Toshiya SUZUKI^{††}, and Yasushi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN

^{††} Eizoh Co., LTD 内 Tsukaguchi 6-41-8, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-0002, JAPAN

E-mail: †{kondo,mukaigawa,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp, ††suzuki@eizoh.co.jp

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 investigate the effectiveness of the HBP mirror system for remote surveillance. We developed a real remote surveillance system constructed by an electric cart and the HBP mirror system for surveillance experiments. In the experiments, operators survey an experimental scene with the images transmitted from the cart. We also constructed a virtual remote surveillance environment for quantitative evaluation under fair experimental conditions. We used 3D model of devastated scene and ray trace rendering technique in order to simulate non-linear projection. Through object searching experiments, we confirmed that objects can be detected early and with certainty by the HBP mirror system.

Key words Anisotropic omnidirectional imaging system, surveillance in disaster area

1. はじめに

近年、ロボットが人間の代わりに被災地の探索を行い、その情報を基にして救出・復旧活動の計画を立てることが注目されている [1]。これは、ロボットは人間が取得できない情報を得ることができると同時に、二次災害を防ぐという利点を合わせ持つ。このような被災地探索ロボットではその場に即した判断が重要であるため、自律制御とすることが難しく専ら人間による画像を利用した遠隔操縦系である場合が多い。

画像提示に基づいたロボットの遠隔操縦においては、自己の

前方だけでなく周囲の画像も合わせて提示することが安定した操縦に繋がることが長原らによって示されている [5]。自己の周囲を観測する視覚系は様々に提案されているが、複数カメラ系ではデータ量増大による通信速度の問題、回転ステージを用いる系では系の大きさ・重さや回転ステージの制御に関する問題が探索タスクに関して大きなデメリットである。それに対し、凸型ミラーを用いた全方位視覚系 [2]~[4] は小型軽量のサイズで自己の周囲 360°をカメラの回転なしに一度で撮像できる。操縦者は周りの環境をいち早く把握することが可能なため、安定で高速な走行に繋がると考えられる。だが凸型ミラーを用い

表 1 各視覚系での方位による観測密度の違い。

視覚系	通常カメラ	等方性全方位視覚系	非等方性全方位視覚系
前方	全て	中	高
側方	なし	中	低

た全方位視覚系は角度分解能（空間分解能）が低いという欠点を持つ。

上記のような要求に対して、近藤らは非等方性全方位視覚を提案している [6]。彼らは方位によって観測密度の重要性が違うことに注目し、角度分解能が連続的に変化する特殊形状の HBP ミラーを開発した。論文 [6] 中では HBP ミラーの幾何学的特性、解像度分布、自己運動に対するオプティカルフローの感度、多視点分布の影響などについて述べられているが、実タスクでの有効性は示されていない。そこで本稿では、遠隔操縦ロボットで探索を行うタスクを設定し HBP ミラー系の評価を行う。我々は HBP ミラー系と電動カートで構成される遠隔操縦系を作成し探索実験を行った。さらに、従来の等方な全方位視覚との定量的な比較を行うため、仮想的な遠隔探索環境を計算機上に実装し対象物の発見能力を評価対象として実験を行った。

2. 非等方性全方位視覚 [6]

まず HBP ミラー系の特性について述べておく。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。これまでにされてきた全方位視覚系では、専らミラー曲面がカメラ光軸を軸とした回転対称であるため、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。一方 HBP ミラー系は、高分解能としたい方位に多くの画像面積を割り当て、それに直交する方位には少ない画像面積を割り当てている (表 1)。式 (1) 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。

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

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、従来の等方な全方位視覚系を示すことになる。一般的なカメラは撮像素子が 4:3 や 16:9 などの長方形の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することができる。

図 1 に $a = 28\text{mm}, b = 38\text{mm}$ としたときの試作 HBP ミラー系の概観図を、図 2 に $1392\text{pixel} \times 1040\text{pixel}$ の入力画像を持つカメラでの撮像例を示す。同じ大きさで同じ奥行きにお

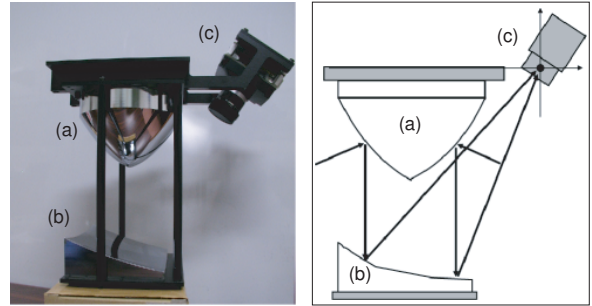


図 1 試作 HBP ミラー系の概観および幾何学モデル。シーン中の点からの入射光線は HBP ミラー (a) で反射され、カメラ視点に集めるために放物面ミラー (b) で反射される。



図 2 図 1 の視覚系で撮像した入力画像例。2つの同じ大きさの馬のぬいぐるみを同じ奥行き (200mm) に配置しているにもかかわらず、方位により違った大きさに射影される。

いた対象物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、分解能の違いが見て取れる。

3. HBP ミラー系を用いた遠隔操縦監視系

3.1 遠隔操縦ロボットの視覚系としての HBP ミラー系

ロボットの遠隔操縦による探索は全方位視覚系の特性を活かしたタスクの 1 つであり、図 3 に示されるように構成される。遠隔操縦の移動ロボットに搭載された全方位視覚系は全周囲画像を獲得し、無線で送信する。送信された画像は安全な遠隔地で受信され、オペレーターに提示される。このようにして得られた全方位画像はシーン全体を撮像しているため、オペレーターは見たい方向を瞬時に見ることができる。

全方位視覚系として HBP ミラー系を、その高分解能方位をロボットの進行方位に合わせて使うことで、操縦者は前方に高解像な画像を得ることができ、遠隔操縦および探索で有効に働くと思われる。なぜならば、回避すべき障害物は圧倒的に進行方向に現れやすく、視野も進行方向から更新されてくることが多いため興味物体も前方に現れる確率が高いからである。しかし、進行方向以外が全く見えないことも問題であるので、全方位が見えることも必要である。高分解能方位を進行軸に一致させた HBP ミラー系は、上記のような「進行方位で密な観測」と「全方位の観測」を同時に満たしている。

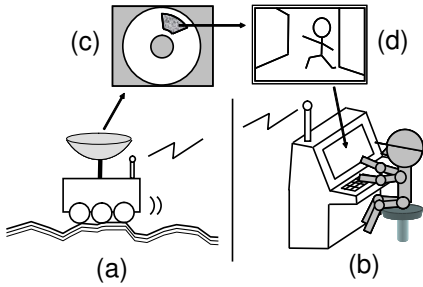


図 3 遠隔操縦監視系のモデル。(a) 全方位視覚系を搭載した移動ロボット (b) 遠隔地での監視 (c) 入力画像 (d) 提示画像

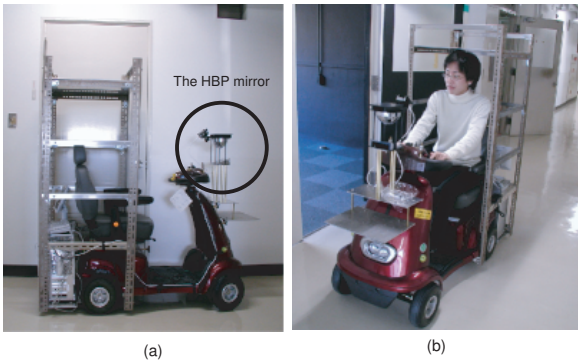


図 4 電動カートに搭載された HBP ミラー系。(a) 概観図。HBP ミラー系はハンドルの前に固定されており、ハンドルを回しても HBP ミラー系は動かない。(b) 画像取得のための運転の様子

そこで我々は図 3 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操縦探索系を構築した(図 4(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 X 軸方位すなわち高解像度方位が電動カートの前方方向に一致するよう設置されている。設置部はハンドルとは独立した構造になっており、ハンドルを回してもミラー系は固定されたままである。

3.2 探索実験

前節で構築した系を使用して実シーンにおける探索実験を行った。電動カートは図 5 に示すようなシーン中を走行しながら全方位画像を獲得・送信し、遠隔地ではオペレーターが視野方向を自由に変えながら、そのシーンの様子を監視・不審物がないか探索を行う。本実験では、安全にカートを走行させるため、図 4(b) のように実際に人が乗り込んで運転を行った。カートの平均走行速度は約 2.0km/h、走行距離は約 70m であった。探索中のオペレータの視線方向変化を図 5 に合わせて示す。オペレータは基本的にカートの走行に合わせて前方を中心とした視野を見ており、障害物が多く散乱している部屋 C 内を走行しているときや、開いた扉の前を通過しているときなどはそれらに興味を持ち注視していた。このように、前方視野を基本とし何かあれば視野を変えるという探索行動に対し、HBP ミラー系の解像度分布は適しており有効に働くと考えられる。

4. 仮想的な遠隔探索環境の開発

4.1 仮想的な遠隔探索環境の必要性

前章において、遠隔操縦探索に対して HBP ミラー系が実際

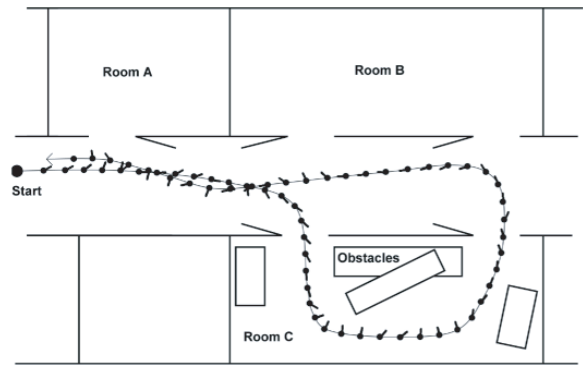


図 5 走行マップと各地点における被験者の視線方向。実験シーンは通路とそれに沿った部屋で構成されており、部屋 A,B,C の扉は開いていて中を覗くことができる。電動カートは図中左端からスタートし、障害物や瓦礫のある部屋 c を通り、スタート地点に戻る軌跡を通った。軌跡上の短い黒線は各地点における被験者の視線方向を示す。

に有効に働くことが確認された。しかし、従来の全方位視覚系に比べどのくらい有効に働くかが定量的に評価されていない。実シーンでの比較実験では複数回にわたって全く同じ経路を走行することは事実上不可能であり、照明条件などが時間とともに変化してしまうことなども考えられる。そこで、計算機上に仮想的な遠隔探索系を作り完全に同じ条件を再現できるような環境で比較実験を行った。以下に作成した遠隔探索系について述べる。

4.2 タスク設定と 3D シーン構成

仮想的な遠隔操縦探索では 3. 章と同様に被災地を遠隔操縦で走行する車両型のロボットを想定した。探索対象とする被災地シーンは、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テクスチャとして利用して臨場感のある被災地を再現した。さらにその中に火災(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。また、シーン中には上記発見対象物以外にも車両・ポスト・ブロックなどの物体を発見対象と似た色で作成・配置し、ダミーとした。これら対象物にも実画像をテクスチャとして用い臨場感を向上させている。図 6(a) に構築した被災地シーンの例を示す。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。

4.3 全方位視覚系の入力画像生成

次に作成した被災地モデル内に全方位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。仮想的な全方位視覚系は、やはり実際の全方位視覚系をできるだけ忠実に再現していることが望ましい。本論で扱ってい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、系を完全に模擬するにはシーンからカメラへのレイトレースを行うことが効果的と思われる。そこで我々は、レイトレースを行い幾何学的な性質を正確に模擬した上で画像を生成するソフトウェア POV-Ray を利用して全方位視覚系の入力画像を生成した。POV-Ray は集光などの光学的な特性は厳密には再現できないが、実視覚系

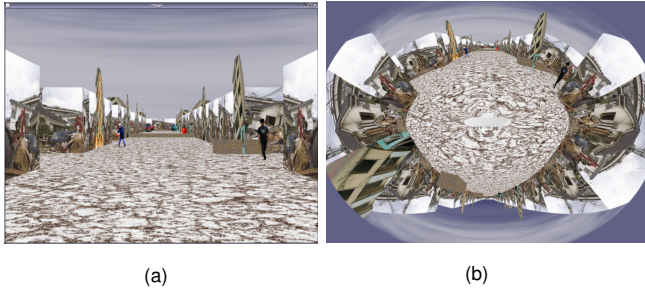


図 6 計算機上に構築された仮想的な被災地。(a)被災地の様子 (b)HBP ミラー系で被災地を撮影したときの入力画像生成例

が十分な集光を実現しているならばほぼ同等の結果を得ることができる。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、図 7 に生成された入力画像にゆがみを補正をかけた提示画像例を示す。このようにして得られた入力画像は非等方性全方位視覚系のような非常に複雑な視覚系も完全に再現している。

ロボットがシーンを走行していく様子は、全方位視覚系を配置する位置を経路に沿って動かして生成した時系列画像を順に提示していくことで再現した。被験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探索することができる。

4.4 画像提示手法

遠隔探索系における画像提示にはいくつかの手法があるが、本論ではその中の 2 種を扱う。1 つは限られた大きさの視野をオペレータ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)。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、以下に続く実験では評価対象に応じて上記手法を選択して用いた。

5. 仮想遠隔探索環境を用いた比較実験

5.1 前方中心視野の比較

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。比較対象の等方全方位視覚系としては、ミラー形状以外の条件を揃えるために放物面ミラー系 (HBP ミラー系において設計パラメータ $a = b$) を選択した。発見すべき対象としては、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。これら発見対象は被験者に対して事前に発見・認識すべき対象物として告知している。被災地シーンは一本道で構成されているため、経路を進むにしたがって対象物は前方から接近する。そのため前方を中心とした解像度の違いが発見精度に大きく影響を与えられられる。実験では被験者 8 人に視野方向を自由に変わってもらいながら発見すべき対象物がないか探索してもらった (自由視野提示)。視野方向をユーザーが操作可能としたのは、なるべく実際の探索タスクに近づけるためである。各々の被験者には、放物面ミラー系 ($a = b = 35mm$) と HBP ミラー系 ($a = 35mm, b = 50mm$) を用いた一回ずつの探索をしてもらい、そのときの対象物の発見・認識の早さを比較した。このとき正しい発見・認識が行わ

れた場合にのみロボットと対象物の距離を発見距離として記録した。対象物を発見できず通り過ぎてしまった場合は、“見落とし”とした。

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ため、用いる視覚系の順序を逆にする、経路を逆順に辿る、左右反転の経路を使用するなど、経路とミラーの関係ランダムに組み合わせるべく学習効果が現れないような条件で実験を行った。

5.1.1 対象物の見落とし

被験者全体の結果には対象物の見落としが火災 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、そのため見落としが発生したと考えられる。これらの見落としは放物面ミラー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。放物面ミラー系では解像度が足りず、小さい対象物を見落としてしまう場合があるのに対して、HBP ミラー系では前方がより高解像度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。

5.1.2 対象物の発見距離

数値的な評価では対象物の発見距離を対象とする。ある被験者の対象物発見距離を表 2 に示す。大きな値ほど対象物を早期に発見できたことを表している。被験者の違い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正規化して評価する。すなわち、放物面ミラー系を用いた場合の発見距離 $D_{i,paraboloidal}$ に対する HBP ミラー系を用いた場合の発見距離 $D_{i,hbp}$ の比で被験者 i に関する評価値を定義する。

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

式 2 のように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 9 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関しても HBP ミラー系の優位性が示されている。図 9 の結果を対象物の種類ごとに示すと図 10 のようになる。路面上の穴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。これは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と思われる。それらに対し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。

5.2 全方位視野の比較

前節の実験では主に前方視野に注目して実験・評価を行った。本節では前方から側方にかけて連続したパノラマ提示により、HBP ミラー系の全方位に関する評価を行う。そのため、図 11 に示すように主道に対して側道を新たに作成したシーンを用意し、主道・側道の両方に発見すべき対象物を配置した。被験者

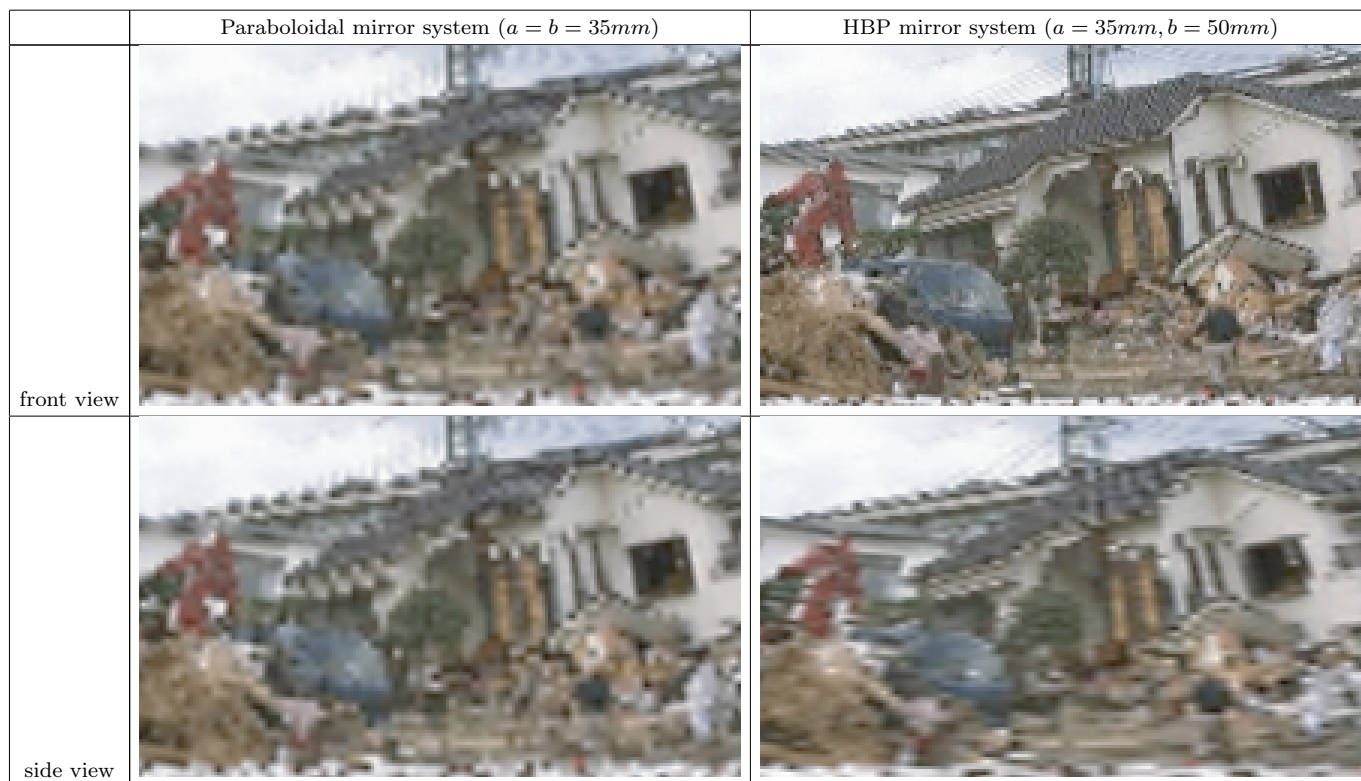


図 7 各視覚系，各方位での提示画像例．放物面ミラー系の場合，方位によらず同じ解像度となっているのに対し，HBP ミラー系の前方画像は明らかに解像度が高いことが分かる．

表 2 実験結果の一例．数値は対象物の発見距離を示す．

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

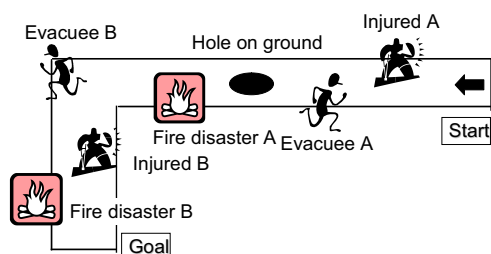


図 8 自由視野提示を用いた実験での被災地モデル．

は 10 人の学生で同様に二回ずつ実験を行った．ただし学習効果を弱めるため，一連の実験内で視覚系を時系列で切り替えるようにし，さらに二回目の実験では切り替え方を逆にして行った．これにより 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．

5.2.1 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らる．そのため対象物の種類毎の厳密な評価は避け，配置の違い（主道上か側道上か）のみで分類して評価した．見落としに関する結果を表 3 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

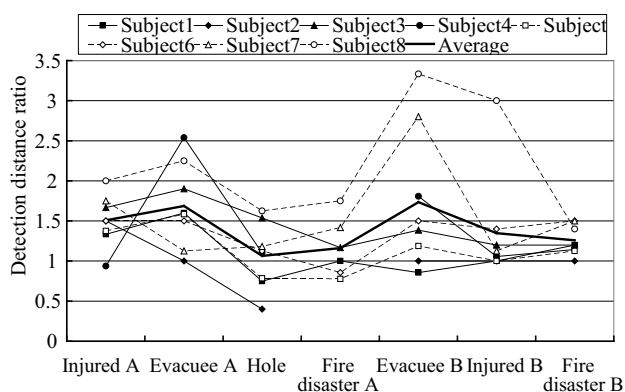


図 9 発見距離比 ($D_{i,ratio}$ の値) の結果．マーカーつきの細線は各被験者毎の結果を，太線は被験者で平均した結果を示す．図中にて 1 を超える値が HBP ミラー系による早期発見に対応する．

るといえる．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非常に少なく主道上で多い．これは側道のシーンは交差点に差し掛かったときに急に視野内に入ってくるためによく注視された結果と思われる．逆に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

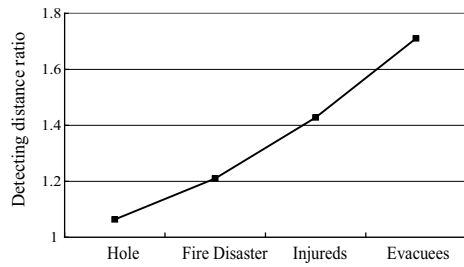


図 10 図 9 の結果を発見対象物の種類で集計した結果。

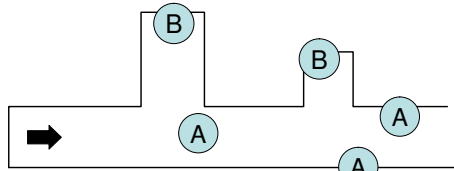


図 11 パノラマ提示を用いた実験での被災地シーンモデル例。(A) 主道上に配置された対象物。全方位視覚系の前方向部分で観測される。(B) 側道上に配置された対象物。側方部分で観測される。

表 3 全方位視野にわたる比較実験での対象物見落とし結果。

	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

の見かけ上の変化が少ないため気づきにくい場面があったと考える。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といえる。

5.2.2 対象物の発見距離

前項で述べたように、発見距離にも注視遅れの要因が含まれるため分布で評価する。発見距離の分布をヒストグラムで表した結果を図 12 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からの発見を表す。(a) で示されている側道上の対象物では、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といえる。一方 (b) で示された主道上の対象物では分布の違いが見られる。発見件数の最大値を見ると、放物面ミラー系では距離 21-40 の区分であるのに対し HBP ミラー系では 41-60 の区分にきている。また発見距離 101 以上の発見件数は、HBP ミラー系で圧倒的に多い結果となった。これらより 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顕著な向上を実現していることが確認された。

6. まとめ

本稿では非等方性全方位視覚系である HBP ミラー系の遠隔操縦探索における有効性を検証した。我々は電動カートと実 HBP ミラー系を用いて遠隔操縦系を作成し評価実験を行った。実験からは前方高解像な HBP ミラー系の解像度分布は被験者の視野の使い方に上手く適合しているという結果を得た。また同一の実験環境を再現するために計算機上で仮想的な遠隔操

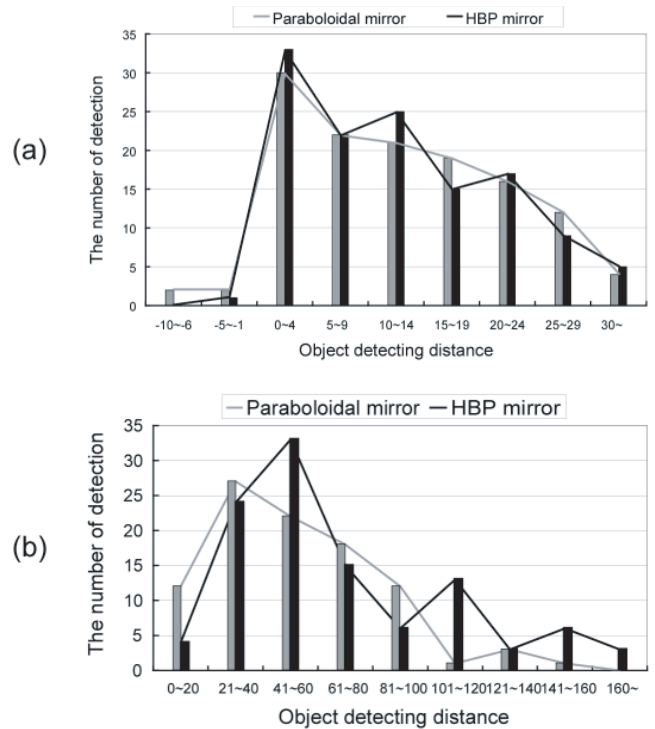


図 12 対象物発見距離のヒストグラム。(a) 側道上に配置した対象物の発見距離 (b) 主道上に配置した対象物の発見距離

縦系を構築し、定量的な比較評価実験を行った。実験の結果、HBP ミラー系は従来の等方性全方位視覚系である放物面ミラー系に比べ、側方で同程度の能力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。

本論では、比較対象として等方性全方位視覚系を選択したが、それ以外の、例えばズーム可能なカメラを回転雲台で方向を変える系、などとの比較も必要である。また、現段階では全方位視覚系で撮像された画像は探索のためだけに提示されており、移動ロボットの操縦には用いられていない。将来はこのような探索以外のタスクに対する有効性の評価も行いたいと考えている。

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, 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
- [2] 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.
- [3] Shree K. Nayer, ”Catadioptric Omnidirectional Camera”, in Proc. of CVPR, pp. 482-488, 1997.
- [4] K. Yamazawa, Y. Yagi, M. Yachida, ”Visual Navigation with Omnidirectional Image Sensor HyperOmni Vision”, in IEICE Vol. J79 No. 5, pp. 698-707, May 1996.
- [5] 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.
- [6] 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, vol. J88-D-II, no.8, Aug., 2005.