

NAIST-IS-MT9951130

修士論文

全方位画像センサを用いたテレプレゼンスによる
移動ロボットの遠隔操縦

米田 美里

2001年2月9日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

米田 美里

審査委員： 横矢 直和 教授
小笠原 司 教授
竹村 治雄 助教授

全方位画像センサを用いたテレプレゼンスによる 移動ロボットの遠隔操縦*

米田 美里

内容梗概

テレプレゼンスの研究において，遠隔地に存在する移動ロボットを操縦する場合に，ロボットから送られた情報を基に臨場感のある画像を提示することにより操作性を向上させる研究が行なわれている．ステレオカメラや全方位画像センサを用いた提示手法が提案されているが，前者は見回しに機械的遅延が生じ，後者は一般的に得ることのできる画像は単眼画像であり，ステレオ動画像生成手法が提案されているが，生成された画像には一定時間の遅れがあるなどの問題がある．そのため，テレプレゼンスの条件である奥行き知覚及びリアルタイムでの周囲360度の自由な見回しを共に満たすのは困難である．

本研究では，全方位画像センサ HyperOmni Vision を一台搭載した移動ロボットを用い，ロボットの移動時には任意視線方向の単眼動画像を，ロボットが静止した場合には周囲360度のステレオ画像を蓄積した後，任意視線方向のステレオ画像を生成し提示することにより，操作者の頭の向きに時間遅延なく追従した自由な見回しと，奥行き知覚を可能とした画像提示手法を提案する．さらに，遠隔操縦システムにおいて操作を支援するため，超音波センサによる障害物検知及びCGによる進行方向等を提示する機能を提案する．

提案手法を用いた遠隔操縦システムを評価するために，通信遅延のほとんどない環境で，障害物を避けながら予め指定した経路を移動させる，遠隔地の人間と

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9951130, 2001年2月9日.

コミュニケーションを行なうという2種類のタスクに対し，被験者実験を行い提案手法の有効性の検証と遠隔操縦システムの評価を行なった．

キーワード

移動ロボット，遠隔操縦，テレプレゼンス，全方位画像センサ，HyperOmni Vision

Teleoperation of a Mobile Robot by Telepresence with an Omnidirectional Sensor*

Misato Yoneda

Abstract

Recently, research of telepresence, which improves the efficiency of teleoperating remote robots, is getting popular. A stereoscopic camera realizes telepresence for teleoperation. However, when an operator looks around, there is time delay in acquisition of an image in that direction. In this paper, a new method to realize a telepresence for teleoperation without such time delay is proposed. In this method, an omnidirectional image sensor is placed on a mobile robot, in order to present monocular images when the robot is moving and present binocular stereo images generated from a sequence of omnidirectional images when the robot stands still. Using the proposed method, a user can look around the scene with depth perception without significant time delay. A teleoperation system based on the proposal method is built for proving the feasibility. In the system, ultrasonic sensors are also used to avoid obstacles and an arrow is superimposed on the real scene image around the robot to indicate the moving direction. Experiments have been carried out in an indoor environment for evaluating the proposed method.

Keywords:

mobile robot, teleoperation, telepresence, omnidirectional image sensor, binocular stereo, HyperOmni Vision

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9951130, February 9, 2001.

目次

1. はじめに	1
1.1 移動ロボットの遠隔操縦と応用分野	1
1.2 遠隔操縦のための臨場感提示技術	2
1.3 本研究の位置付けと概要	5
2. 移動ロボットの操作状態に応じたテレプレゼンス手法	7
2.1 全方位画像センサ HyperOmni Vision	7
2.1.1 HyperOmni Vision の特徴	7
2.1.2 全方位画像と透視投影画像	10
2.2 移動状態における画像提示手法	10
2.3 注視状態における画像提示手法	11
3. 遠隔操縦システムの概要と操作支援のための機能の提案	13
3.1 システムの概要と使用したロボット	13
3.2 操作支援のための機能	16
3.2.1 進行方向への矢印	17
3.2.2 移動経路表示	18
4. 構築した遠隔操縦システムによる操作実験	20
4.1 予備実験	20
4.1.1 実験の概要	20
4.1.2 実験結果	23
4.1.3 考察：画像取得のタイミングによって生じるステレオ画像 への影響	26
4.2 操作実験の概要	26
4.3 実験結果及び考察	28
4.3.1 タスク 1 の結果：操作者への提示画像の結果	28
4.3.2 タスク 2 の結果：コミュニケーションの感想	30
4.3.3 アンケート調査の結果及び考察	30

5. おわりに	35
謝辞	37
参考文献	38

目 次

1	remote reality:移動ロボットと提案された表示インターフェース . . .	4
2	mobile robot:球面ミラーからの全方位画像と球面に投影後の画像 . . .	5
3	HyperOmni Vision	8
4	全方位画像と透視投影画像	11
5	円周上の全方位画像	12
6	円周上の左右の視点位置とその全方位画像の視線方向	13
7	移動ロボットの遠隔操縦システムの概要	14
8	Nomad200 の外観と超音波センサ	15
9	超音波センサによる障害物検知と速度調整	16
10	遠隔操作システムでのロボットの座標系と操作者の座標系	17
11	視線方向とロボットの進行方向	18
12	移動経路の表示	19
13	CG によるロボットの進行方向及び移動経路の表示	19
14	実装した遠隔操縦システム (予備実験)	22
15	画像取得間隔及び左右の視点位置	22
16	実験室概要 (予備実験)	23
17	場所 1 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)	24
18	場所 2 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)	24
19	場所 3 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)	25
20	場所 4 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)	25
21	実装した遠隔操縦システム (操作実験)	27
22	実験環境	29
23	被験者 d の移動ルート	30
24	被験者 d の操縦の様子	31

25	コミュニケーションの様子	32
26	ロボットの移動経路	34

表 目 次

1	HyperOmni Vision(1) パラメータ値	9
2	HyperOmni Vision(2) パラメータ値	9
3	予備実験に使用した機器	21
4	操作実験に使用した機器	27
5	操作時間及び注視状態回数	28
6	アンケート結果	32

1. はじめに

本論文では，移動ロボットの遠隔操縦のためのテレプレゼンス手法として，一台の全方位画像センサを用いて，奥行き知覚及び周囲 360 度の見回しが可能となる画像提示手法を提案する．以下に移動ロボットの遠隔操縦についての従来研究と提案手法の位置づけを述べる．

1.1 移動ロボットの遠隔操縦と応用分野

従来，移動ロボットを遠隔地から操縦するシステムについて多く研究されてきた [1]．移動ロボットを人間の立ち入ることのできない極限環境内や，遠く離れている場所などに配置し，ネットワークを通じて遠隔操縦することで，遠隔地の情報を取得したり作業することができる．遠隔操縦ロボットの応用としては，原子力発電所内等における危険箇所の保全作業や，海洋，宇宙空間等の人間の数や作業時間に制限のある環境における探索作業，地下や災害現場などでの防災ロボット，建設ロボットなどによる支援作業があげられる．

移動ロボットの遠隔操縦の具体的な応用例には，遠隔地にある実際の美術館に画像センサを搭載した移動ロボットを配置し，ロボットを遠隔操縦して周囲を動き回させ，送られてきた画像を通して美術品を見学することのできる遠隔鑑賞ロボット [2] や，一台の CCD カメラを頭部に搭載し，遠隔地での作業が可能である人間型ロボットを PHS 回線を利用して遠隔操作を行なう TMSUK[3]，ステレオカメラを搭載した小型ロボットを，WWW のように広く標準化された規格を用いて遠隔操縦するポータブルネットワークロボット [4] などがある．これらの場合，ロボットには画像センサだけでなくマイクロフォンなどの人間の機能の代わりをする機器が備え付けられている．

このように移動ロボットの遠隔操縦には，人間が持つ「自由に回りを見る」，「話す」，「聞く」，「触る」などの機能が要求される．その中でも「自由に回りを見る」機能はロボットが移動する場合において非常に重要となる．さらに，操作者が時間と空間を隔てた遠隔環境に存在するような臨場感を与えることにより，周囲を知覚しやすくなり，遠隔地での作業が効率良く行なうことが可能となる．

そこで，臨場感を提示する技術として，テレプレゼンス又はテレイグジスタンスが研究されている．次節に遠隔操縦のための臨場感提示技術について述べる．

1.2 遠隔操縦のための臨場感提示技術

テレプレゼンスとは空間的あるいは時間的に離れた実世界に自分があたかも居るかのような没入感を得ることである [5]．テレイグジスタンスはその類似したものとして考えられており，没入した仮想環境内での操作も含まれる．テレプレゼンスは操作者に臨場感を与える仮想現実感技術であり，関係する様々な研究が行われている [6]．テレプレゼンスには以下の条件を満たす事が望まれる．

- 奥行きを知覚

ロボットを遠隔操縦する際には，ロボットと周囲の障害物との距離を知る必要がある．単眼の画像を表示されていても人間は運動視差や周囲のテクスチャ，あるいは床と障害物が接している位置等によりある程度の障害物までの距離を知覚することができる．しかし，それらは常に得られる情報ではない．そのため，画像提示の際には遠隔地の奥行き情報を提示し，操作者が奥行きを知覚できるようにしなければならない．

- 周囲 360 度の自由な見回し

遠隔地にあるロボットの周囲に障害物が存在する場合，ある一方向の画像だけでは障害物全てを見ることができない．操作者の視線方向に対応した画像を提示すれば，操作者は首を左右に回すことにより，広範囲を見渡すことができる．さらに上半身を回すことで周囲 360 度全てを見ることが可能である．

従来，移動ロボットのためのテレプレゼンスの一般的な手法としては，カメラの方向が制御できる回転台に眼間距離だけ離れたステレオカメラをロボットに設置し，頭の向きに追従させて回転台を制御する手法が用いられている [7]．ステレオカメラを搭載したロボットの例として，東大の *telesar* に代表されるテレイグジスタンス視覚システムがある [8]．この手法では，操作者の頭の向きの動きを

追ってカメラを回転させることで，自由な見回しと奥行き知覚を可能としており，高解像度のステレオ画像が得られ，ロボットの周囲が動的環境であっても対応が可能であるが，装置が複雑となることや，速い頭の回転に対して機械的な遅延が生じるなどの問題がある．

又，単眼のカメラを回転させ周囲 360 度の画像を蓄積し提示する手法がある．Virtual Dome [9] では，カメラを常時回転させて全周囲の画像を生成し，その画像から視線方向の画像を切り出して提示する．この方法ではカメラを常時回転させることにより全方位動画像を取得することができるが，カメラの回転に時間を要し，更新レートが低い．また，鏡をカメラの前で回転させる方法 [10] も提案されている．この方法を用いると，カメラ自体を回転させる方法より更新レートを上げることができるが，回転速度を上げるとモーションブラーが生じるために更新レートには限界がある．

そこで周囲 360 度全てを蓄積せず，一定の蓄積した画像群から任意視点位置の画像を生成する手法として，蓄積画像をワーピングやモーフィングにより変換し，画像を生成する手法が提案されている [11, 12, 13]．しかし，これらの手法では蓄積された画像間で各点の対応をとる必要があるため，高速に任意視点のステレオ画像を生成することは困難である．

以上の手法に対し，周囲 360 度を一度に取得できる全方位画像センサを用いると，解像度が低いが頭の回転による機械的な遅延がなくなるため，テレプレゼンスには有効である．全方位画像センサを搭載した移動ロボットの遠隔操縦システムとして以下の研究が挙げられる．

【 remote reality 】 [14]

放物面ミラーによる全方位画像センサを搭載した小型のリモコンカーを用いている．ロボットからの画像を透視投影画像に変換し，操作者の HMD に投影している．又，表示インターフェースとして図 1 の Hand Held TV Recorder のような，透視投影画像に変換しない元画像で表示する機器を提案している．放物面ミラーを用いるため，平行投影カメラからの映像となる．

【 mobile robot 】 [15]

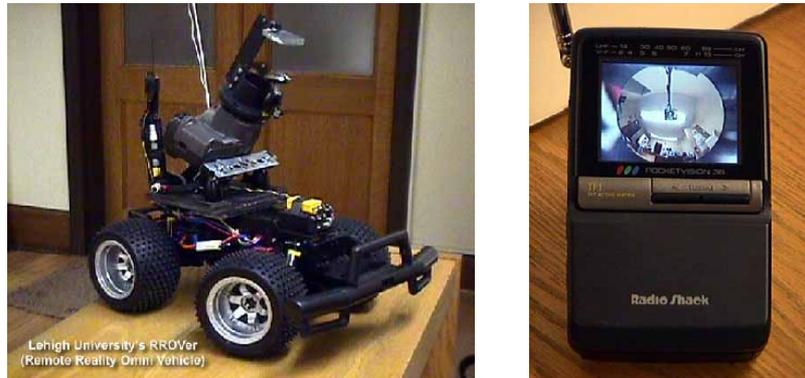


図 1 remote reality:移動ロボットと提案された表示インターフェース

球面ミラーを用いた全方位画像センサからの画像を，球面に再投影し表示している(図2)．図2の投影後の画像は，人間の視野角よりも広い画像が生成されている．球面ミラーを用いるため歪みが大きく，透視投影画像を生成することができない．

以上に挙げた両者ともが全方位画像がもつ広画角という特徴を活かしている．しかし，表示画像は単眼画像であるため，奥行きを知覚することはできない．また，球面ミラーを用いている全方位画像センサでは，カメラ自身の像や床面を画像に多く含み，側方の解像度が低いという欠点を持つ．

そこで，全方位画像を用いて周囲 360 度のステレオ画像を作成する手法が山口らによって提案されている [16]．この手法は全方位画像センサとして HyperOmni Vision[17] を用い，画像センサを移動させながら静的環境を撮影した全方位動画から視線情報を用いて利用者の視線方向の両眼ステレオ画像を疑似的に生成・提示する手法である．HyperOmni Vision を用いることで周囲 360 度の透視投影画像を取得でき，かつ頭の向きに対する遅延なく見回しが可能である．しかし，ロボットが常に一定速度で移動することを仮定しているため，常に操作者の視点位置が現在のロボットの視点位置に比べて一定時間だけ遅延するなどの制約を持つため，直接移動ロボットの操縦には応用することが難しいという問題点がある．

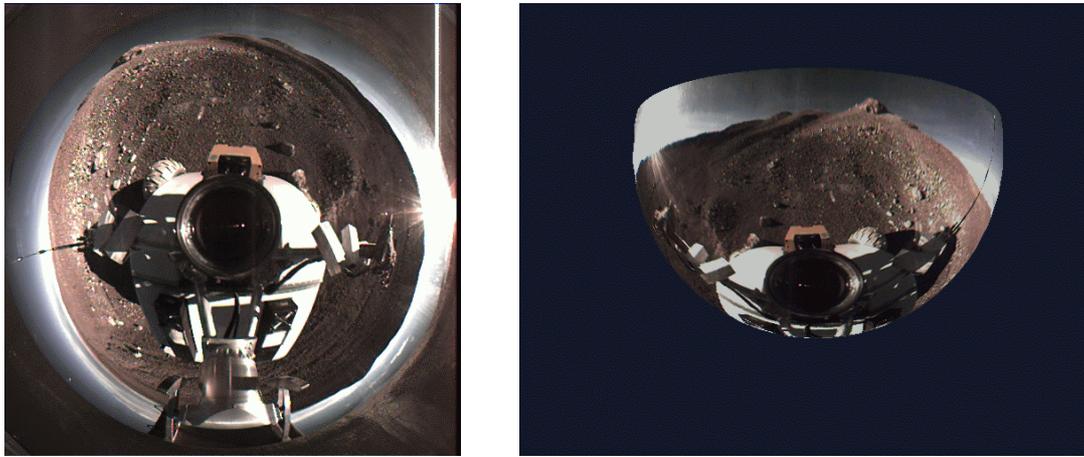


図 2 mobile robot:球面ミラーからの全方位画像と球面に投影後の画像

1.3 本研究の位置付けと概要

従来手法では、移動ロボットの遠隔操縦システムにおいてテレプレゼンスの2つの条件を共に満たすことが困難であった。そこで本論文では、移動ロボットの遠隔操縦に適したテレプレゼンス手法を提案する [18][19]。移動ロボット上部には回転中心から少しずらした位置に1台の全方位画像センサを搭載する。

移動ロボットの操作状態を、ロボットを移動させている状態(移動状態)とロボットを静止させ周囲を注視している状態(注視状態)の2種類にわけ、移動状態では運動視により奥行き知覚が可能であるので単眼の画像を、注視状態では両眼立体視可能な見回し画像を操作者に提示することで、移動ロボットのテレプレゼンスを実現する。

さらに、提案した画像提示手法を用いて遠隔操縦システムを構築し、提案手法が有効であることを示す。ここで、遠隔地からの操作を支援するため、超音波センサによる障害物検知及びCGによる進行方向等を提示する機能を実装した。これらの機能により、操作者は直感的で負担の少ない操作を行うことが可能となる。

以上の提案手法により、操作者は常に奥行きの知覚が可能となり、同時に周囲360度を頭の向きに対する時間遅延なく見回すことができる。すなわち、操作者は常に臨場感を感じることで移動ロボットを自分の代理身体として扱うことがで

き，遠隔地をすばやく知覚できるため操作性が向上すると考えられる．

そこで，提案手法を用いて構築した遠隔操縦システムを評価するために，通信遅延のほとんどない環境で，障害物を避けながら予め指定した経路を移動させる，遠隔地の人間とコミュニケーションを行なうという2種類のタスクに対し，被験者実験を行い提案手法の有効性の検証と遠隔操縦システムの評価を行なった．

本論文では，まず2章で提案手法であるテレプレゼンス手法を説明したあと，3章で提案手法を用いて構築した遠隔操縦システムと，提示画像にCGを重畳表示することによる操作支援について述べる．最後に4章では遠隔操縦システムを用いて行った予備実験及びアンケートによる評価実験を述べ，提案手法及び遠隔操縦システムの有効性を示す．

2. 移動ロボットの操作状態に応じたテレプレゼンス手法

本論文では全方位画像センサ HyperOmni Vision を一台搭載した移動ロボットを用いて，操作者の頭の向きに時間遅延なく追従した自由な見回しと，奥行き知覚を可能とした画像提示手法を提案する．提案手法は，操作者が遠隔地の移動ロボットを操縦する状態によって提示画像を変えるものである．ロボットを移動させている時には任意視線方向の単眼動画像を，ロボットを静止させた場合には周囲 360 度のステレオ画像を蓄積した後，任意視線方向のステレオ画像を生成し操作者へ提示する．ここで，ロボットを操作者が移動させている状態を移動状態，ロボットを動かさず周囲を注視する場合を注視状態と呼ぶことにする．以下に使用した HyperOmni Vision についての説明と，提案手法の詳細としてそれぞれの状態における画像提示手法を述べる．

2.1 全方位画像センサ HyperOmni Vision

周囲 360 度の画像を同時に取得できるさまざまな全方位画像センサが提案されているが本研究では HyperOmni Vision を採用した．その理由として，HyperOmni Vision は双曲面鏡を用いた全方位画像センサであるため他の多くの全方位画像センサとは異なり光学系の特性が透視投影である．よって得られる全方位画像から通常の平面透視投影画像をリアルタイムで生成できるという特徴を持つ [20]．

2.1.1 HyperOmni Vision の特徴

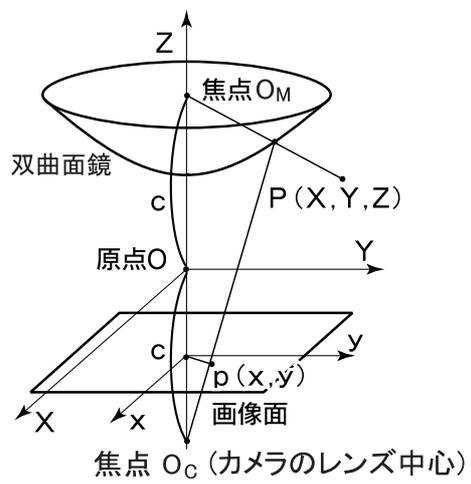
本論文では，2 種類の HyperOmni Vision を使用した．それぞれ HyperOmni Vision(1)，HyperOmni Vision(2) とする．HyperOmni Vision の外観と光学系の構成を図 3 に示す．図 3(a) や (b) に示すように，鉛直下向きに設置した双曲面鏡に写り込んだ鏡像を，鉛直上向きに設置したビデオカメラで撮影するものである．以下に HyperOmni Vision(1) の構造を述べるが，HyperOmni Vision(2) も同様の構造を持っている．双曲面には回転 2 葉双曲面を用いており，図 3(c) のように 2 焦点 O_m ， O_c を持っている．鏡の焦点とカメラのレンズ中心は，それぞれ O_m ， O_c に位置している．ここで図 3(c) に示すように Z 軸を鉛直軸とする 3 次元ワー



(a) HyperOmni Vision(1) 外観



(b) HyperOmni Vision(2) 外観



(c) 光学系の構成

図 3 HyperOmni Vision

表 1 HyperOmni Vision(1) パラメータ値

a	42.1 mm
b	42.7 mm
c	59.1 mm
鏡の直径	150 mm
カメラの焦点距離 f	5.4–64.8 mm
撮像素子	1/3" IT CCD
センサ視野	水平より上方視野 20 度，下方視野 90 度

表 2 HyperOmni Vision(2) パラメータ値

a	25.09 mm
b	42.08 mm
c	59.1 mm
鏡の直径	62 mm
カメラの焦点距離 f	5.4–64.8 mm
撮像素子	1/3" IT CCD
センサ視野	水平より上方視野 30 度，下方視野 90 度

ルド座標系 ($X Y Z$) を考えると，双曲面鏡の面，双曲面鏡の焦点 O_m ，ならびにカメラのレンズ中心 O_c は式 (1) で表せる．本研究で使用した HyperOmni Vision の仕様を表 1 及び 2 に示す．

$$\begin{aligned}
 \text{鏡面} & : \frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \\
 & \quad (Z > 0) \\
 \text{鏡の焦点 } O_M & : (0 \ 0 \ , +c) \\
 & \quad (c = \sqrt{a^2 + b^2}) \\
 \text{カメラレンズ中心 } O_C & : (0 \ 0 \ , -c) \\
 \text{ただし } a \ b \ c & : \text{ 双曲面鏡のパラメータ}
 \end{aligned} \tag{1}$$

内側の焦点 O_M に集まる像は双曲面鏡を介して、外側の焦点 O_C に集まる。従って、 O_C にレンズ中心を置いたカメラで、双曲面鏡の焦点 O_M への全方位の双曲面中心投影像 (の鏡像) を撮影することができる。

双曲面鏡の焦点 O_M とカメラのレンズ中心 O_C との位置関係ならびに双曲面の特性により、3次元環境中の点 $P(X Y Z)$ と全方位画像上の写像点 $p(x y)$ の間には式 (2) の関係が成立する (図 3(c) 参照)。

$$x = \frac{Xf(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}}$$

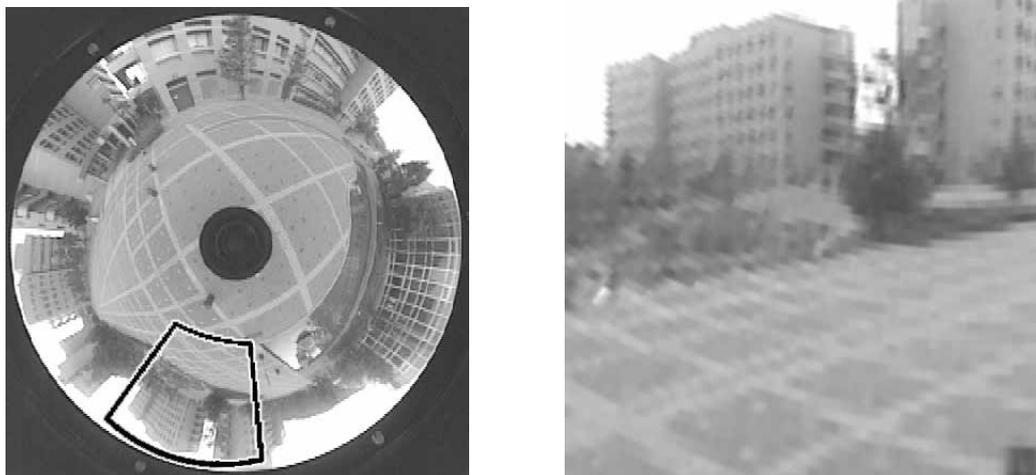
$$y = \frac{Yf(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \quad (2)$$

2.1.2 全方位画像と透視投影画像

HyperOmni Vision により得られる全方位画像の例を図 4(a) に示す。同図のように、双曲面鏡の焦点 O_M を中心として周囲 360 度の画像が一度に取得できる。全方位画像は双曲面鏡の焦点 O_M を投影中心とした双曲面上への 1 点中心投影像であるため、その一部を通常の平面透視投影像に変換することができる。図 4(a) の一部を変換して通常の平面透視投影画像を生成した例を図 4(b) に示す。この透視投影画像は、図 4(a) の全方位画像上の実線の枠と対応している。この変換は透視投影画像のすべての画素に対応する全方位画像上の対応点の位置を求めることにより行った。図 4(a) の全方位画像では周囲 360 度すべての情報を含むため画像が歪んだものとなるが、図 4(b) の透視投影画像では歪みのない画像となっていることが分かる。

2.2 移動状態における画像提示手法

移動状態では、操作者は運動視差によって奥行きを感じることができるため、単眼の透視投影画像のみで奥行きを知覚することが可能である。そこで全方位画像センサから送られてくる全方位画像から操作者の視線方向の画像を切りだし、



(a) 全方位画像

(b) 透視投影画像

図 4 全方位画像と透視投影画像

透視投影画像に変換して操作者に提示する。

使用した全方位画像センサ HyperOmni Vision は、全方位画像から透視投影画像への変換処理は実時間で行なうことが出来るため [20]、操作者は時間遅延を感じることなく視線方向を変えることができる。全方位画像センサは下方視野が 90 度であるため、パンだけでなくチルト方向への視線移動が可能である。

2.3 注視状態における画像提示手法

注視状態においては、遠隔地のロボットが静止しているため、操作者は運動視差による奥行き知覚ができない。そこで、ロボットをその場で一周回転させ、画像センサが通る軌跡上に各々視点を持つ複数の全方位画像を蓄積し、操作者の頭の向きによって決まる左右の視点位置に最も近い全方位画像を使用して両眼ステレオ画像を作成する。ただしここでロボットの周囲の状況は移動物体が存在しない静的環境であるとする。

まず、ロボットを停止位置で一周回転させる。画像センサの中心とロボットの回転中心がずれているため、図 5 のような円周上の各点に視点が存在する全方位

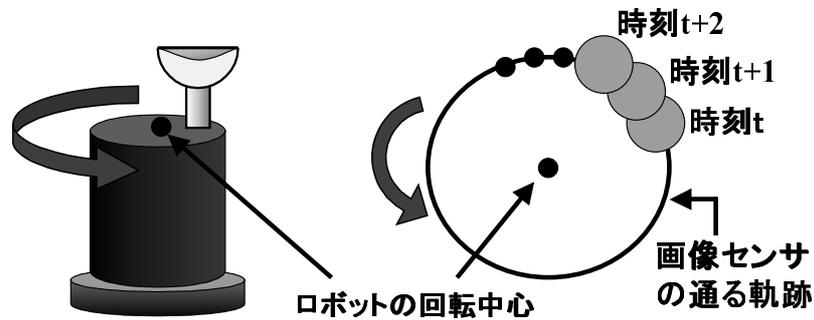


図 5 円周上の全方位画像

画像が蓄積される。

次に、図 6 に示すように、蓄積した画像から操作者の頭の向きによって決まる左右の視点位置にある全方位画像を使用し、視線方向の透視投影画像を作成する。ただし、全方位画像は円周上に離散的に存在するため、視点位置に全方位画像が存在しない場合は、視点位置に最も近い全方位画像を用いる。本手法の場合は、全方位画像センサだけでなく、広角の通常のカメラでもステレオ画像を作成することができる。通常のカメラを使用すればより高解像度のステレオ画像が得られるが、全方位画像センサを用いることにより、操作者は下向き(チルト方向)にも頭を傾けることができ、自分が操作しているロボット自身を見ることができる。ロボット自身を見ることで、障害物とロボット間の相対的な距離を知ることができ操作性が向上すると考えられる。又、通常のカメラを使用する際には、移動状態と注視状態で全方位画像センサと通常のカメラの切り替えが必要となるが、全方位画像センサを回転させることでその切り替えも不要である。

以上の提案手法による画像提示手法が移動ロボットの遠隔操縦に適しているかを評価するため提案手法を用いた遠隔操縦システムを構築し実験を行なった。遠隔操縦システムの概要を次章に述べる。

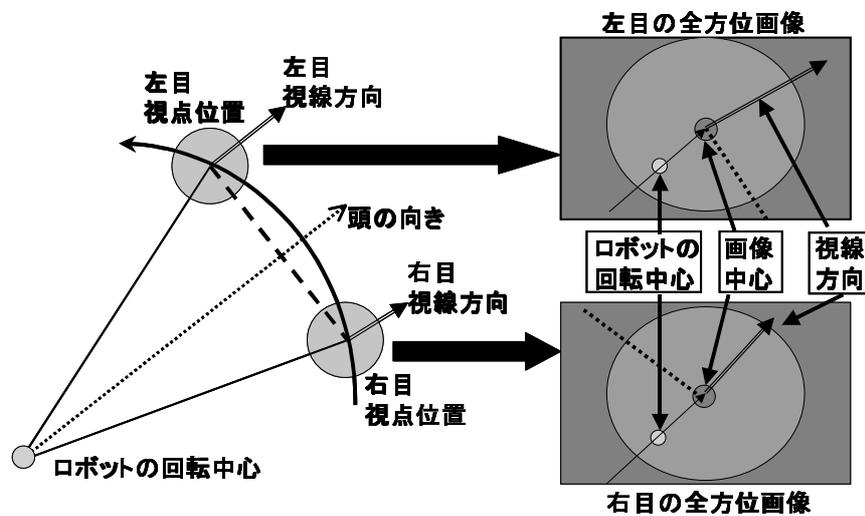


図 6 円周上の左右の視点位置とその全方位画像の視線方向

3. 遠隔操縦システムの概要と操作支援のための機能の提案

提案した画像提示手法を用いた遠隔操縦システムの概要を以下に述べる．このシステムにより提案手法が遠隔操縦に対して有効であることを検証する．ここで，遠隔地からの操作を支援するため，CGによる進行方向等を提示する機能を提案した．これらの機能により，操作者は直感的で負担の少ない操作を行うことが可能となる．遠隔操縦システムの概要を 3.1 に，操作支援のための機能を 3.2 に述べる．

3.1 システムの概要と使用したロボット

構築した遠隔操縦システムの概要を図 7 に示す．操作者側ではジョイスティックによりロボットの遠隔操縦を行なう．操作の種類は，移動方向の指示及び移動状態と注視状態のモード切替の 2 種類とする．移動方向は前進及び後退と左右への方向転換の組み合わせを仮定する．操作の命令は，ノート PC を介して計算機

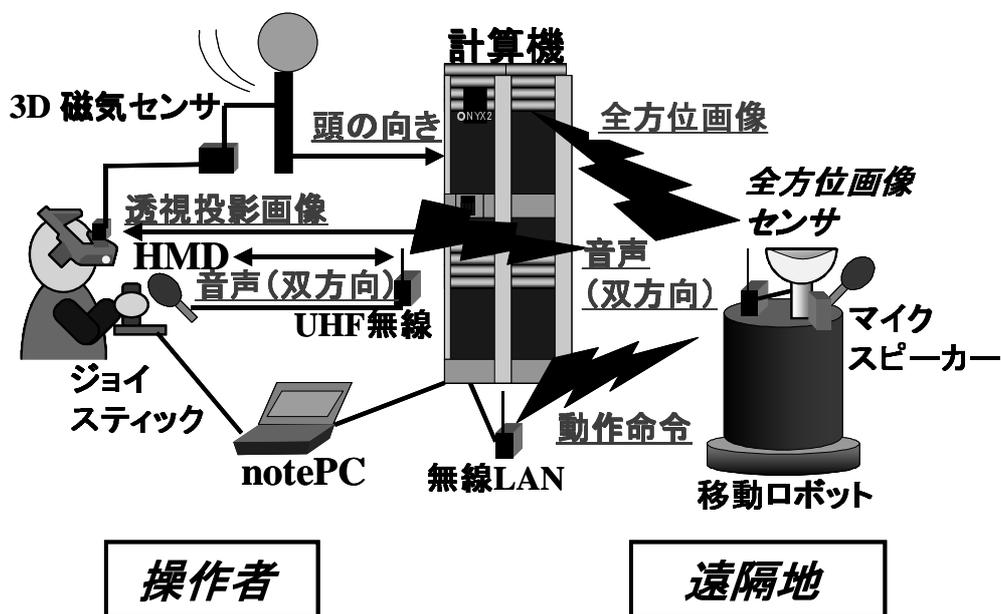


図 7 移動ロボットの遠隔操縦システムの概要

に送られる．計算機に送られた命令は，無線 LAN によって遠隔接続された移動ロボットに送られ，ロボットは命令を実行する．操作者への画像提示は HMD によって行なう．移動ロボット上部に搭載された全方位画像センサからの画像は，画像送信機により UHF 無線で計算機に送信される．HMD 上部の 3D 磁気センサによって得られた操作者の頭の向きは計算機に送られ，ロボットから送られた全方位画像を頭の向きに応じた透視投影画像に変換し，HMD に表示させる．

遠隔操縦システムには図 8(a) の Nomad200 を使用した．Nomad200 は前進後退及び方向転換が可能である．操作者はジョイスティックの傾けた方向により，前進後退及び方向転換しながら前進後退の命令をロボットに送り，ジョイスティックの傾きの度合いによりロボットの移動速度を調節できる．さらにロボットの最高移動速度は図 8(b) に示すように周囲 360 度，高さ 74cm の位置に設置されている 16 個の超音波センサの値によっても調節する．すなわちロボットの最高移動速度を障害物とロボットの距離により変化させることで，操作者が意図しなくても障害物付近では速度を落とすことが可能となる．

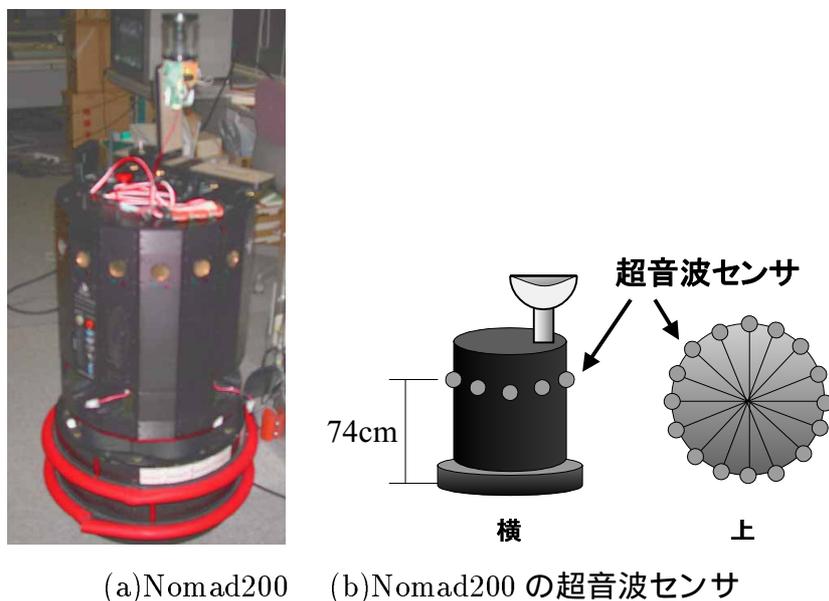


図 8 Nomad200 の外観と超音波センサ

以下に障害物を考慮した最高移動速度を求める方法について述べる．ロボットは前進又は後退する速度と回転する速度の 2 種類を与えることにより移動が可能となる．例えば図 9(a) の状態で前進する場合，進行方向及び進行方向を中心に左右それぞれ 2 つの合計 5 つのセンサ値を取得する．センサの値は障害物までの距離をあらわしているため，左右 2 つのセンサ値を中央の進行方向のラインへ投影し，進行方向のセンサ値も含めた 5 つのセンサ値のうち最も近い障害物までの距離を求める．あらかじめ障害物までの最大距離と最小距離の閾値とそれに応じたロボットの最高移動速度を設けておき，最大距離より障害物が遠い場合は最高速度で，最小距離より近い場合は速度を 0 に，最大距離と最小距離の間であれば障害物との距離に比例して速度を落としていく．

後退する場合も同様で，進行方向に対してちょうど後ろのセンサを中心に左右それぞれ 2 つのセンサの値を取得し，前進と同様に最高速度を計算する．しかし，操作者の視点位置がロボットの中心に比べて少し前方にあるため，閾値を少し遠く設定する．

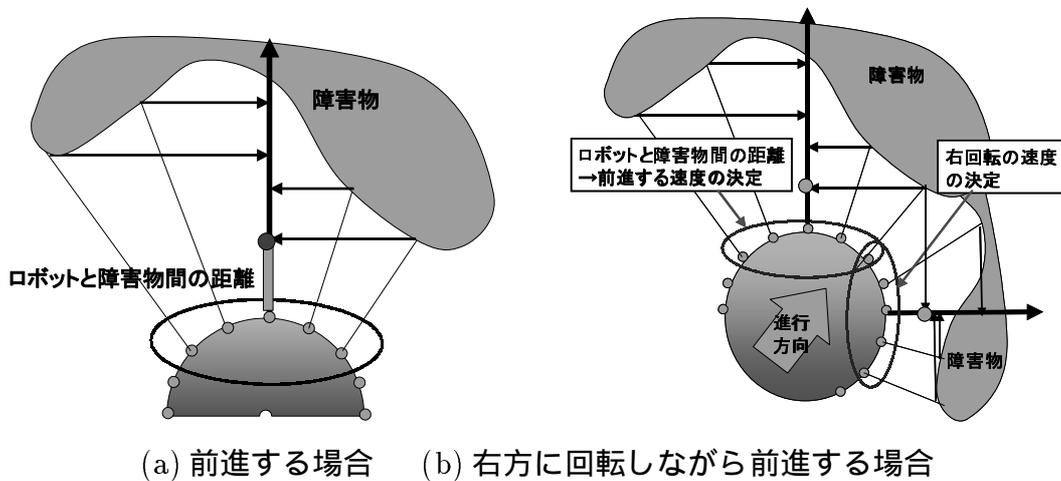


図 9 超音波センサによる障害物検知と速度調整

方向転換しながら移動する場合は、転換する方向の障害物も調べる必要がある。例えば図 9(b) のように右前方に移動する場合、前進する速度は、前進のみの場合と同様に求める。ロボットを回転させる速度は、進行方向から右に 90 度の位置にある超音波センサを中心に左右それぞれ 2 つのセンサの値より、前述の方法で回転速度を求める。左に回転しながら前進する場合も同様に、前方のセンサと共に左側のセンサ値も考慮する。

3.2 操作支援のための機能

遠隔地からの操縦を支援するために、遠隔操縦に必要な情報を CG として提示する。提示する情報としてロボットの進行方向とロボットの移動経路の 2 種類とする。しかしこれらの情報は、操作者が操縦に慣れることで、提示されなくても知覚することが可能である。そのため CG を提示するかしないかは操作者が選択可能とした。

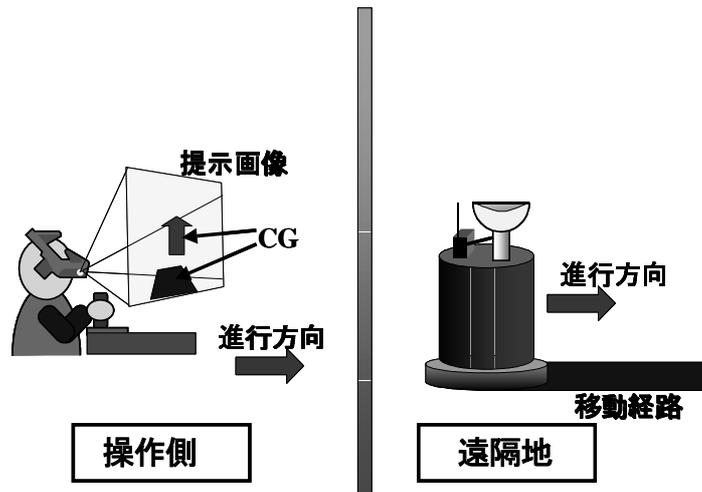


図 10 遠隔操作システムでのロボットの座標系と操作者の座標系

3.2.1 進行方向への矢印

提案手法では、操作者は没入感を得ることができるために、前方(ロボットの進行方向)を直感的に理解することが困難になると考えられる。さらに Nomad は円柱形であるため、操作者がロボット自身を見ても正確な進行方向を知ることができない。そこで、HMD に表示する画像に進行方向を示す矢印を重畳表示する機能を追加する。

図 10 に示すようにジョイスティックを台に固定し、ジョイスティックでいう前方が常にロボットの前方と一致させる。操作者に提示する画像にロボットの進行方向を示す矢印を重畳表示する。操作者は自由に見回すことができるので、矢印を常に進行方向を向くように移動させる。矢印の表示位置を決めるために、視点位置を中心とした球を考えると、図 11(a) のように視点位置から視線方向を向く曲線 E とロボットの進行方向を示す曲線 R が決められる。視線方向に仮想のイメージプレーンを考え、曲線 R を 11(b) のようにイメージプレーンに投影する。矢印の位置はイメージプレーンの縦方向に対して中央であると限定し、矢印の傾きは投影された曲線 R によって求める。

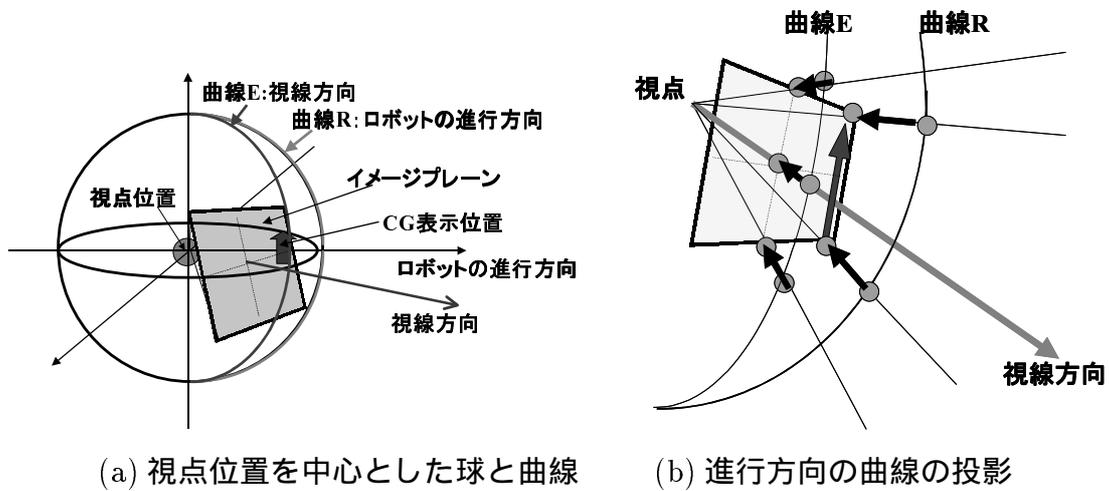


図 11 視線方向とロボットの進行方向

3.2.2 移動経路表示

移動ロボットを遠隔操縦する場合，ロボットの大きさがわからないと操縦することができない．2.3節で述べたように，提案手法では自分が操作しているロボット自身を見ることができ，障害物とロボット間の相対的な距離を知ることができる．しかし，操作者は操作に慣れるとロボットの大きさを記憶するため，ロボットと障害物の両方を見て相対的な距離を確かめることなく操作できが，慣れるまではロボットの大きさを記憶しておらず，さらに狭いHMDの画角では全ての障害物とロボットとの相対距離を測ることができない．そこでCGによってロボットの移動経路を表示することで，慣れていない操作者でも直感的に遠隔地の環境とロボットとの相対距離を知覚させることにする．

図 12に示してあるように，ロボットから一定距離離れた位置まで直線を2本引くことでロボットの幅をあらわす．ロボットの高さ及び幅は既知である．又，得られた全方位画像内におけるロボットの進行方向は常に同じ向きである．

直線のCGが視点を中心とするイメージプレーン上のどの位置に投影されるかは，実際に2本の直線をイメージプレーンに投影して確かめ，実際の直線に重なるようにCGを3次元空間内に置く．図 13に全方位画像から得た透視投影画像上に重畳表示したCGの結果を示す．

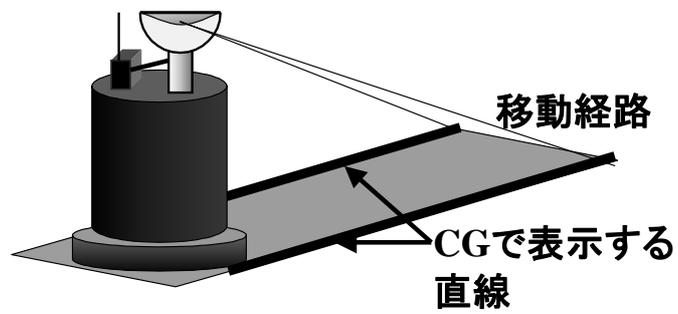


図 12 移動経路の表示



図 13 CG によるロボットの進行方向及び移動経路の表示

4. 構築した遠隔操縦システムによる操作実験

提案した画像提示手法を用いた遠隔操縦システムを構築したが、実際に遠隔操縦してもらい操作性の評価及び検討を行なう。まず、提案した画像提示手法により遠隔操縦において両眼ステレオ画像が生成できるかを調べるために画像提示のみを取り上げた予備実験を行なう。次に操作実験として、数人の被験者に構築した遠隔操縦システムを実際に操作してもらいアンケートによる評価をしてもらう。以下の節では、予備実験及び操作実験の概要及び実験結果を述べる。

4.1 予備実験

予備実験では、注視状態でステレオ画像が生成できているかを確認する。提案した画像提示手法により両眼ステレオ画像が生成できるかの確認であるため、CGの重畳表示を行わず、得られた透視投影画像のみにより移動ロボットの遠隔操縦を行なう。

4.1.1 実験の概要

予備実験に使用した機器を表 3 に、ロボットの操作の様子を図 14 に示す。全方位画像センサは HyperOmni Vision(1) を用いた。

図 14 左の操作者は手元のジョイスティックにより、図 14 右の全方位画像センサを搭載した移動ロボットを操作することができる。図ではロボットは操作者の側に在るが、本来は遠隔地のロボットを操作する。移動ロボット上部にはロボットの回転中心から 10cm 離れた場所に全方位画像センサ HyperOmni Vision を設置している。

移動状態では、ロボットは最高 12.5cm/秒で移動し、最高 20 度/秒で方向転換ができる。表示画像は、解像度 720 × 486 画素の全方位画像から、水平画角 50 度、720 × 486 画素の透視投影画像を作成する。注視状態になると、ロボットは 45 度/秒で回転する。加速時間を考慮し、2 周回転させることにする。その間に 1 周分の画像を 0.1 秒間隔 (合計 80 枚) を取得する。すなわち、図 15 に示す間隔で画像を取得することとなる。

表 3 予備実験に使用した機器

全方位画像センサ	HyperOmni Vision(1)
移動ロボット	Nomad-200
計算機	SGI Onyx2 IR2 (MIPS R10000 195MHz , 16CPU)
磁気トラッカー	POLHEMUS 3SPACE FASTRAK
HMD	OLYMPUS Mediamask
無線 LAN	RangeLAN2 (1.6Mbps)
画像無線送受信機	Premier Wireless CS-200

画像取得中は、注視状態になって最初に取得した全方位画像より、操作者の視線方向の単眼透視投影画像を作成し HMD に表示する。80 枚取得後、両眼ステレオ画像を表示する。操作者の頭の向きによって左右の視点位置を決定し、円周上で取得した全方位画像群から左右 2 つの全方位画像を選択し、視線方向の透視投影画像を作成する。得られた全方位画像群では、ロボットの回転中心は常に同じ位置に映るので、予め回転中心方向の角度を求めておくことができる。又、眼間距離は 6.5cm とする。

障害物検知における、ロボットから障害物までの最大距離を 101cm(40inch)、最小距離を 15.2cm(6inch) とする。その理由として操作者が見ることのできる床の範囲がロボットの周囲 101cm(40inch) 以上であり、センサの取得値の下限が 15.2cm(6inch) であるためである。遠隔操縦システムには、計算機に SGI onyx2 IR2(16CPU) を使用した。

予備実験は、広さ 920cm × 920cm の屋内実験室で行なった。ここで実験環境は移動物体の存在しない静的環境とする。実験室の様子を図 16 に示す。ロボットは自由に部屋内を移動できるが、実験室内の障害物領域には入ることができない。今回の実験では、操作者は移動ロボットと同じ部屋内で操縦する。静的環境を想定しているため、ロボットから操作者を見ることができないようにしておく。



図 14 実装した遠隔操縦システム (予備実験)

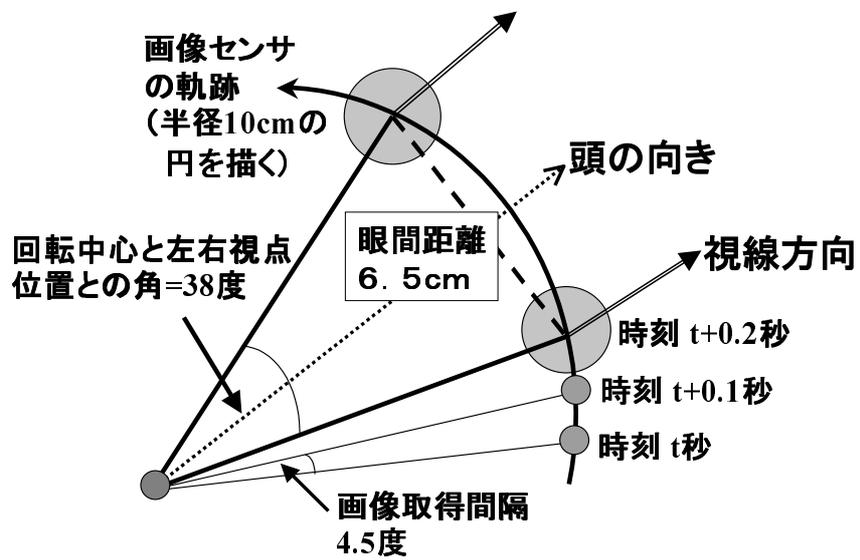


図 15 画像取得間隔及び左右の視点位置

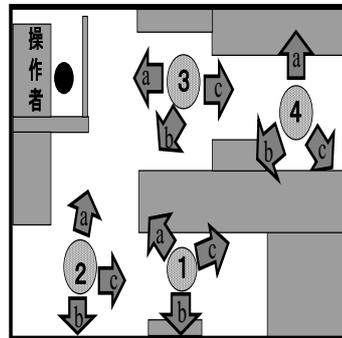


図 16 実験室概要 (予備実験)

4.1.2 実験結果

実験では，図 16 の 1 から 4 の 4 箇所で見視状態になり両眼視を行なった．図 17～図 20 に生成したステレオ画像の一例を示す．各視点において，図 16 中 a, b, c は視線方向を表し，図 17～図 20 の a, b, c (上段から a, b, c, 左側は左目画像，右側は右目画像) と対応する．左右の画像を比較すると，視差があることが確認できる．又，これらの画像は HMD で提示され，両眼ステレオにより立体視を行なうことが可能であった．

画像表示についての時間遅延は，移動状態と注視状態では異なる．移動状態では，全方位画像から視線方向の単眼透視投影画像を作成する処理はビデオレートで行なえる．今回の遠隔操縦システムにおいても，1 枚の画像を取得するのに平均 $1/30(0.033)$ 秒，1 枚の透視投影画像を生成するのに約 0.016 秒，HMD の画像更新間隔は平均 $1/30(0.033)$ 秒であった．頭の向きに追従した画像を表示するまでの時間遅延は，頭を回転させてからその向きの画像が表示されるまで最大約 0.1 秒の遅延であり，違和感のない自由な見回しが可能なことが確認できた．又，画像更新レートがビデオレートで行なえることから，ロボット移動時には操作者が運動視差により違和感のない奥行き知覚が可能であることがわかった．

注視状態においては，画像蓄積中は，画像取得処理と画像表示処理を同時に行なうため，移動状態と同様の遅延を生じる．しかし，一旦画像を蓄積してしまうと画像取得処理を行なわないため，ステレオ画像表示時は画像を生成する約 0.016 秒に表示する時間 0.033 秒を合わせた分の遅延となる．



図 17 場所 1 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)



図 18 場所 2 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像, 右:右目画像, 視線方向:上段から a, b, c)

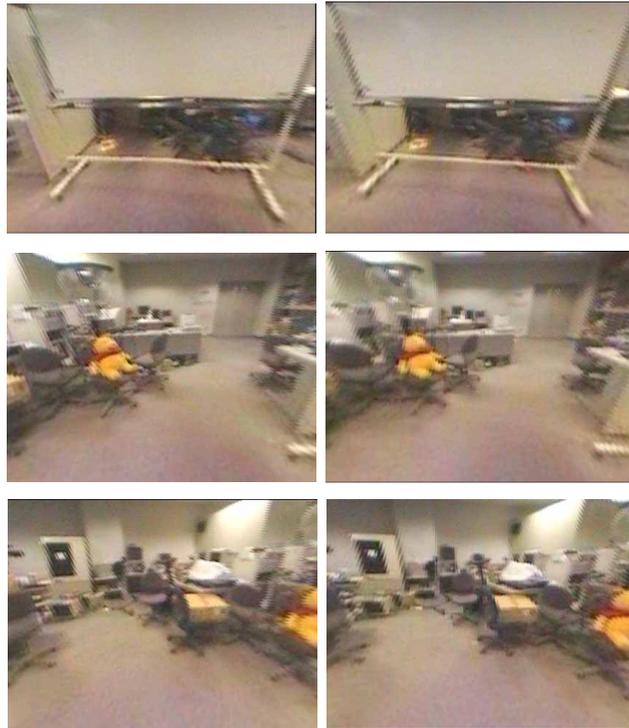


図 19 場所 3 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像 , 右:右目画像 , 視線方向:上段から a , b , c)



図 20 場所 4 での両眼ステレオ画像 (左:左目画像 , 右:右目画像 , 視線方向:上段から a , b , c)

4.1.3 考察：画像取得のタイミングによって生じるステレオ画像への影響

ロボットを回転させ全方位画像を蓄積する時，取得画像は予め設定したタイミングで得られた画像と仮定している．取得のタイミングに関する修正を行っていないため，画像伝送遅延等によってタイミングがずれると正確な視点位置でない可能性がある．

遠隔操縦システムでは，0.1 秒毎に画像を取得したが，取得のタイミングが最高 40 ミリ秒ずれていた．原因として，画像取得及び HMD に表示する画像生成の時間だけ遅延が生じたと考えられる．これは視点位置が約 0.31cm ずれることとなる．しかし，視点位置 0.31cm のずれは，作成した画像で考えると，1 画素程度のずれに収まるため，ステレオ画像に大きな影響を与えないものと考えられる．操作の際，HMD に表示すると両眼立体視が可能であった．

4.2 操作実験の概要

予備実験で提案手法により注視状態でステレオ画像が生成できることが確認できた．そこで，実際に被験者に遠隔操縦してもらい，遠隔操縦システムの操作性を評価する．実装した遠隔操縦システム及び，実験に使用した機器を図 21 及び表 4 に示す．全方位画像センサは HyperOmni Vision(2) を用いた．

実験環境は，通信に遅延が生じない遠隔地という仮定で，予め決められたルートを移動する(タスク 1)と自由に動き回り遠隔地の人間とコミュニケーションを行なう(タスク 2)を行なう．タスク 1 の実験環境を図 22 に示す．タスク 1 の移動ルートとして，スタート地点から移動し，障害物を右回りあるいは左回りのいずれかにより一周まわりゴール地点に戻るものとする．ルートはロボットが十分に通れるだけの幅を持っている．条件としてできるだけ障害物に衝突しないように移動することとした．タスク 2 では，遠隔地を自由に動き回り，双方向にコミュニケーションがとれるように設置したマイク及びスピーカーを利用して遠隔地の人と会話をしてもらった．

実験では，8 人の被験者によって操作を行なった．8 人は遠隔操縦に関しては未経験者であるが，ロボットを移動させる場所は既知であり，又日頃 HMD を使用しており，HMD による知覚に慣れている．被験者 8 人のうち 4 人はタスク 1 を，

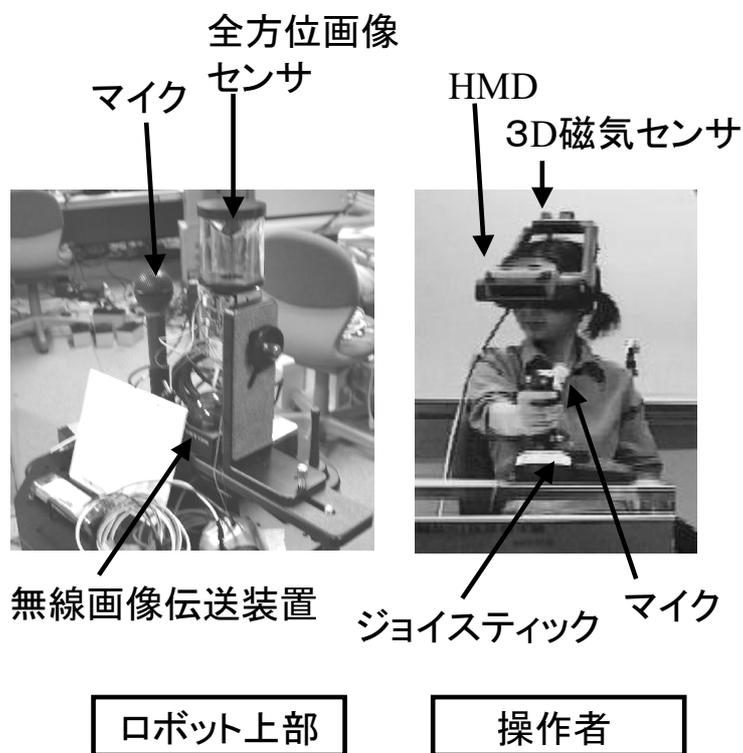


図 21 実装した遠隔操縦システム (操作実験)

表 4 操作実験に使用した機器

全方位画像センサ	HyperOmni Vision(2)
移動ロボット	Nomad-200
計算機	SGI Onyx2 IR2 (MIPS R10000 195MHz , 16CPU)
磁気トラッカー	POLHEMUS 3SPACE FASTRAK
HMD	OLYMPUS Mediamask
無線 LAN	RangeLAN2 (1.6Mbps)
画像無線送受信機	RF SYSTEM lab . MICROWAVE LINK(BS-120GR)

表 5 操作時間及び注視状態回数

名前	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
操作時間	4'01"	4'50"	5'40"	6'57"
注視状態回数 (回)	2	2	2	2

残り 4 人はタスク 2 を行なった。操作中は操作者の視線方向，注視状態になった回数，超音波センサ値を随時取得し，操作後アンケートにより画像提示及び操作性を，さらにタスク 2 ではコミュニケーションの感想を主観評価してもらった。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 タスク 1 の結果：操作者への提示画像の結果

4 人の被験者 (*a* ~ *d*) による操作結果を示す。操作の様子として，図 23 に示す地点での操作者，全方位画像，遠隔地の画像，提示画像を図 24 に示す。図 23 にあるように，(A)(B)(C)(G) は移動状態，(D)(H)(I) は注視状態（画像蓄積中），(E)(F)(J) は注視状態（ステレオ画像提示）である。操作者前方及び全方位画像の中心から下向きが常にロボットの進行方向を向いている。ロボットの進行方向には CG による矢印及び移動経路を示す 2 本の直線が表示されていることがわかる。又，被験者 4 人の操作時間及び注視状態の回数を表 5 に示す。この表から被験者 4 人は，ほぼ同じ時間でタスクを完了したことがわかる。

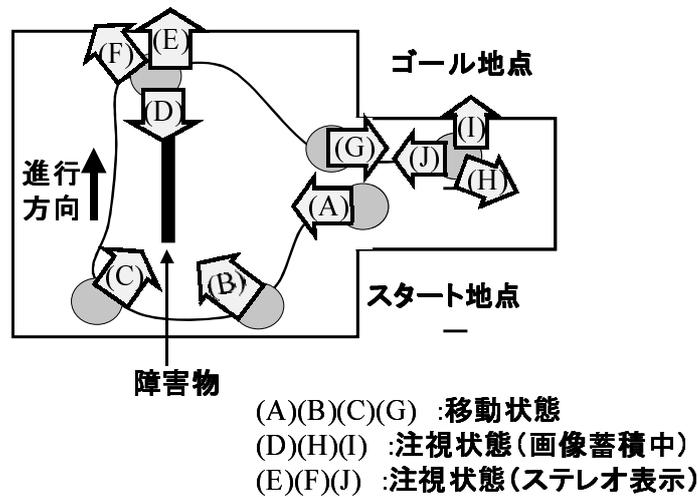


図 23 被験者 d の移動ルート

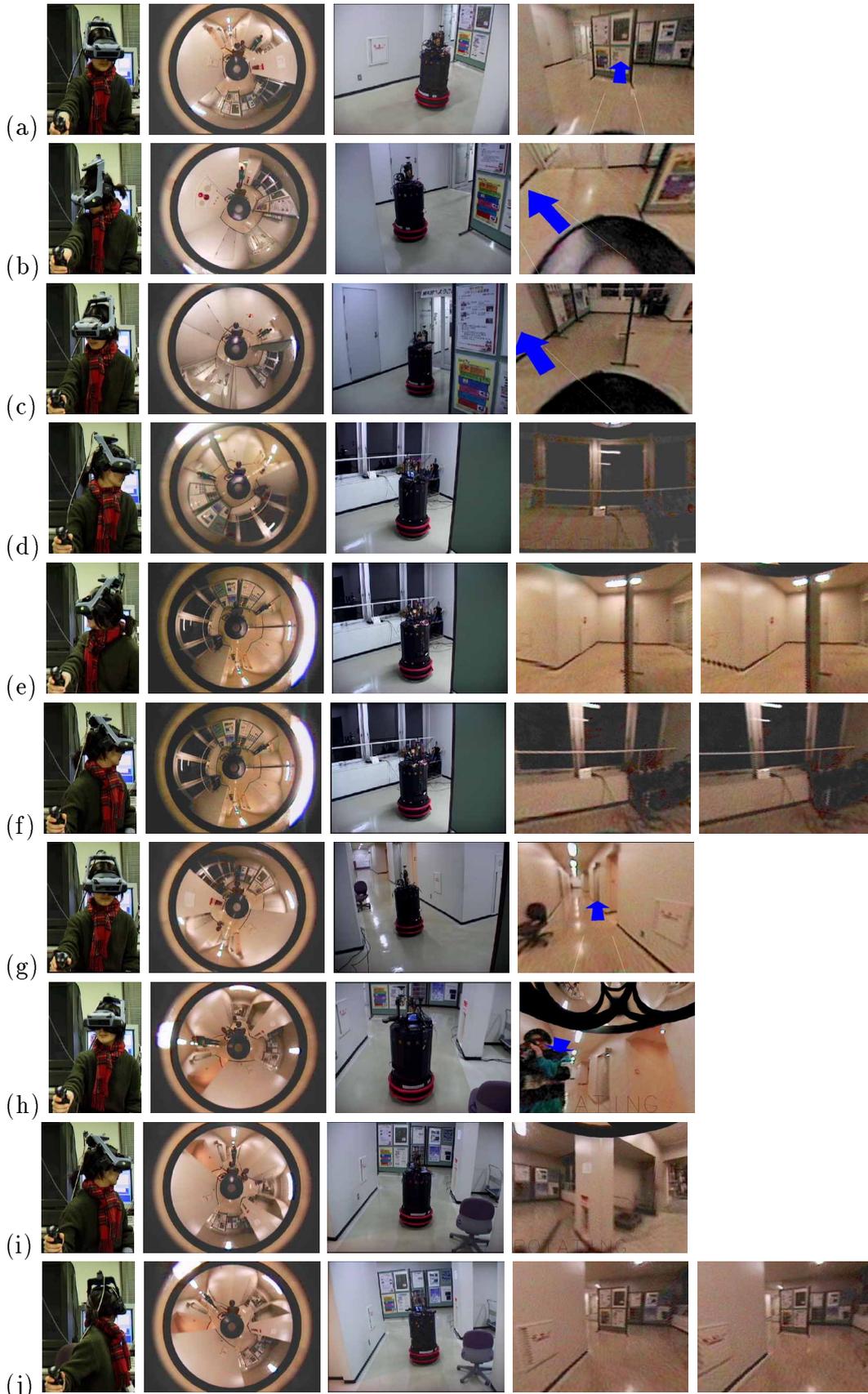
4.3.2 タスク 2 の結果：コミュニケーションの感想

タスク 2 の様子を図 25 に示す。今回はコミュニケーション用のツールとして双方向に会話ができるようにマイク及びスピーカーをつけた。被験者 4 名の主観評価では、会話を行なうことは可能であるが、十分なコミュニケーションを行なうには困難であるという意見が多かった。その理由として、被験者からはロボットからの映像と音声が見たり聞いたりできるが、操作者側の動作が遠隔地に伝わらないためであると考えられる。又遠隔地側も、会話はできるが操作者がどこを向いているのかわからないので話しかけづらいという意見があった。以上から、違和感なくコミュニケーションを行なうには操作者の動きをロボットに反映する方法が必要がある。

4.3.3 アンケート調査の結果及び考察

表 6 に、被験者 8 名 (a ~ h) に対して実施したアンケート結果を示す。アンケートは各設問に対して 1 ~ 5 点の点数で表したものである。

(設問に対して「非常にそう思う」が 5 点、「やや思う」が 4 点、「どちらでもない」が 3 点、「あまり思わない」が 2 点、「全然思わない」が 1 点とする)



(a) 操作者 (b) 全方位画像 (c) 遠隔地の画像 (d) 提示画像 (注視状態では left, right)

図 24 被験者 *d* の操縦の様子



図 25 コミュニケーションの様子

表 6 アンケート結果

設問	仮説	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	平均	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	平均
(1)	移動状態では奥行きを知覚できた	4	4	3	4	3.75	3	5	4	4	4.0
(2)	注視状態では奥行きを知覚できた	3	2	4	5	3.5	1	1	3	5	2.5
(3)	実際の環境と操縦時に得た距離感が同じ	4	3	4	2	3.25	3	3	2	2	3.0
(4)	見回時の画像表示の遅延を感じなかった	4	2	4	4	3.5	5	5	4	4	4.5
(5)	ジョイスティックを使うと操作しやすい	4	1	5	3	3.25	4	2	4	4	3.5
(6)	CGの重畳表示を利用した	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5.0

- 画像提示について

アンケートの設問(1)及び(2)より、移動状態では奥行き知覚が可能であるという結果が得られたが注視状態では平均点が低かった。その原因として、画像蓄積中にノイズがのって両眼ステレオ視ができなかったために被験者2人が不可能であると答えたからであり、ノイズのない状況でステレオ視を行なった被験者からは可能であるという答えが得られた。これは、ノイズの画像を検出して蓄積した画像から除去し、除去した部分の画像を補完することにより解決できると考えられる。

又、設問(4)から同様に見回しの遅延を感じることはないということができ、提案した画像提示手法は奥行き知覚及び時間遅延のない見回しが可能であるという結果が得られた。

操作者が得る距離感については、設問(3)の結果からは操作中に得られた距離感と現実環境で得られる距離感と同じとは言えない。そこで、被験者の1人に「通路の中央を走行する」というタスクを与えた。その時の移動ロボットが走行した結果を図26に示す。この図では、ロボットは通路のほぼ中央を走行している。これらからCGによる移動経路の直線を重畳表示することで、HMDの画像から得られた距離感が現実環境と同じでなくてもある程度の操縦が可能であると言える。又、狭い通路などを走行するときはこの直線が役立つという意見も得られた。自分自身の大きさは操作に慣れることで自然に知覚することができるが、操作に慣れるまでの間はCGによる重畳表示が非常に役立つことがわかる。

- ロボットの操作

ジョイスティックの操作に関してもアンケートの設問(5)から良いという結果が得られた。しかしジョイスティックを操作してからロボットが動くまでに遅延が生じるという意見が多数あった。遅延は、通信混雑時に時々起こる現象であり、今後対策を考えていく予定である。さらに設問(6)から、構築した遠隔操縦システムにおける操作支援のためのCGによる情報提示は全てが良いと答えた。

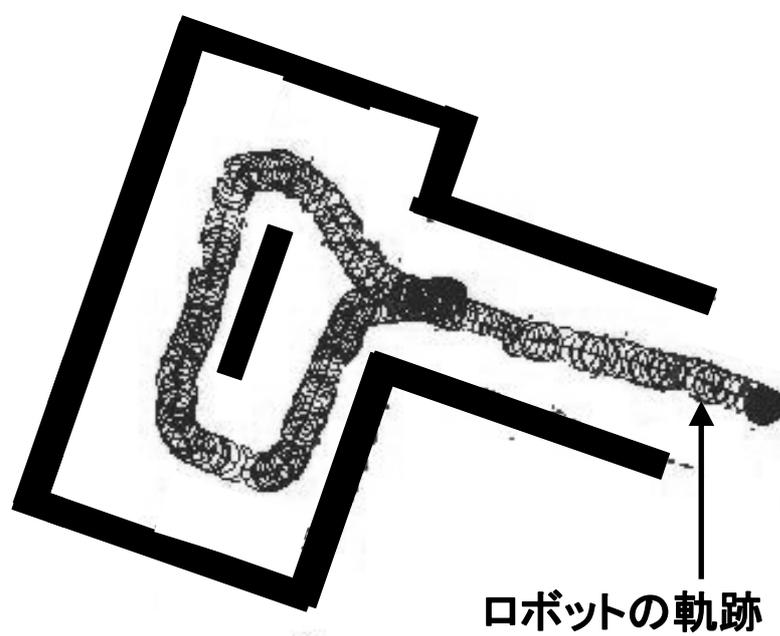


図 26 ロボットの移動経路

5. おわりに

本研究では，全方位画像センサを用いた移動ロボットの遠隔操縦システムについて操作性を向上するための画像提示手法を検討した．画像提示においては，テレプレゼンスにより操作性が向上するように，全方位画像センサ HyperOmni Vision を一台搭載した移動ロボットを用い，ロボットの移動時には任意視線方向の単眼動画像を，ロボットが静止した場合には周囲 360 度のステレオ画像を蓄積後に任意視線方向のステレオ画像を生成し提示することで，操作者へ頭の向きに時間遅延なく追従した自由な見回しと，奥行き知覚を可能とした画像提示手法を提案した．

又提案手法を用いた遠隔操縦システムを構築し，操作実験を行なった．ここでは，遠隔操縦に必要な情報としてロボットの進行方向及び移動経路を CG によって提示画像に重畳表示する機能をつけた．以上のシステムを評価するため，予備実験として提案手法を確認したあと，8 人の被験者で操作実験を行い，アンケート調査により周囲 360 度の自由な見回しと奥行き知覚が可能であること確認した．本研究で構築した遠隔操縦システムでは，以下の機能を備えている．

- 遠隔操縦に適したテレプレゼンスが一台の全方位画像センサで実現可能
- 操縦に慣れていない人のために CG によるロボットの情報提示の機能がある
- 超音波センサにより障害物を回避する

しかし，以下に示す 3 つの問題があり今後検討していく必要がある．

[注視状態の高速化，画像の更新，ノイズの除去]

提案手法は画像蓄積型のため，動的環境では正しいステレオ画像を生成できない．又，注視状態では，80 枚の画像を取得するのに 8 秒かかっている．今回使用したロボットの最高回転速度が一周回転するのに 8 秒かかるためであるので，高速に回転する回転台の使用により画像蓄積時間を短縮することが可能である．取得時間の短縮と共に蓄積画像を更新することで，動的環境にも対応できると考えられる．その場合モーションブレンダーによる画

像劣化を考慮しなければいけない。また、ノイズがステレオ視に大きな影響を与えるため対策を検討する必要がある。

[時間遅延による影響の検討]

今回の実験では、遠隔地への通信遅延がないものと仮定した。しかし、実際に遠隔操縦する場合は多くの場合通信遅延が生じるものであるが、提案手法では通信遅延が生じる環境で実験を行っていない。遅延が生じる環境では操作性などの評価が異なってくるため、遅延の生じる遠隔地における評価実験を行う必要がある。

[コミュニケーションについての検討]

遠隔地にいる人間とのコミュニケーションのためにマイク及びスピーカーを設置したが、十分なコミュニケーションを行なうには至らなかった。特に遠隔地の人が移動ロボットに話しかけるのは非常に抵抗がある。理由として相手の顔が見えない等の問題のためである。コミュニケーションに関する研究は数多くされており [21, 22, 4, 23] ，今後はそれらの研究を参考に操作者と遠隔地の人が違和感なくコミュニケーションを可能とするように検討する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始暖かく御指導を頂いたソフトウェア基礎講座 横矢 直和 教授に厚く感謝の意を表します．また，本学での研究におけるあらゆる面で，多大な御助言，御協力を賜りましたことを深く感謝致します．

副指導教官として有益な御助言を頂いたロボティクス講座 小笠原 司 教授，ならびにソフトウェア基礎講座 竹村 治雄 助教授に厚く御礼申し上げます．

本研究への御助言，研究環境の整備に御協力を頂いたソフトウェア基礎講座 山澤 一誠 助手ならびに元ソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦 助手に深く感謝致します．

あらゆる面において，多大なる御指導，御助言を頂いたソフトウェア基礎講座 佐藤 哲 氏，神原 誠之 氏，松宮 雅俊 氏，町田 貴史氏に深く感謝致します．

本研究の遂行に御助言をくださり，実験等に御協力して頂きました市川 徹氏，岡本 隆資氏，河合 裕文氏，佐藤 智和氏，棚瀬 篤史氏，寺沢 征彦氏，中北 賢二氏，森本 龍太郎氏，さらに一年という短い間ではありましたが，本研究に対してアドバイスを頂きました寺田 智裕氏他お世話になった後輩方に心より感謝申し上げます．

又，お忙しい中被験者として協力していただきました方々に深く感謝致します．

日々の研究活動を支えてくださった元ソフトウェア基礎講座 事務補佐員 福永 博美女史及びソフトウェア基礎講座 事務補佐員 北川 知代女史に感謝いたします．

最後に，終始暖かく見守っていただきました両親に厚く感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 横小路：“テレロボティクス” (1998).
- [2] 前山, 油田, 原田：“移動ロボットを代理身体に用いた遠隔鑑賞システム”, 第5回ロボティクスシンポジア, pp. 445-450 (2000).
- [3] “ヒューマノイド型超遠隔操作型ロボットテムザック”,
”<http://www.tmsuk.co.jp/>”.
- [4] 宅間, 中, 星野, 加賀美, 稲葉, 井上：“ポータブルネットワークロボットの開発とそれをを用いた遠隔対話システム”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, pp. 2P1-35-047 (2000).
- [5] 横矢：“実写に基づく3次元パノラマ画像合成”, 画像ラボ, vol . 11, no . 11, pp. 6-10 (2000).
- [6] E. Saied Moezzi: “Special issue on immersive telepresence”, IEEE MultiMedia, vol . 4, no . 1, pp. 17-56 (1997).
- [7] K. Pahlavan and J. Eklundh: “Heads,eyes and head-eye systems”, ACTIVE ROBOT VISION, pp. 33-49 (1993).
- [8] 柳田：“アールキューブ”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol . 4, no . 1, pp. 64-67 (1999).
- [9] M. Hirose, K. Yokoyama and S. Sato: “Transmission of realistic sensation: Development of a virtual dome”, Proc . of Virtual Realty Annual Int . Symposium, pp. 23-28 (1992).
- [10] 中尾, 柏谷, 兼吉：“回転鏡を用いた広視野カメラの試作”, 情処研報, CVIM115-16, (1999).
- [11] S. E. Chen and L. Williams: “View interpolation for image synthesis”, Proc. SIGGRAPH'93, pp. 279-288 (1993).

- [12] M. Kato and H. Noyama: “International visual simulation in a quasi-three-dimensional world based on the structuralization of images”, Proc . Int . Conf . on Artificial Reality and Tele-Existence, pp. 101–110 (1995).
- [13] S. M. Seitz and C. R. Dyer: “View morphing”, Proc . SIGGRAPH’96, pp. 21–30 (1996).
- [14] C. Power and T. E. .Boult: “Evaluation of omnidirectional vision sensor for teleoperated target detection and identification”, Proc . Workshop on Vehicle Teleoperation Interfaces, pp. 299–306 (2000).
- [15] G. Thomas: “Real-time panospheric image dewarping and presentation for remote mobile robot control”, Journal of Robotics and Autonomous Systems (2000).
- [16] 山口, 山澤, 竹村, 横矢: “全方位動画像を用いた任意方向両眼ステレオ画像の実時間生成と提示”, 信学技報, PRMU99-159, (1999).
- [17] 山澤, 八木, 谷内田: “移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ hyperomni vision の提案”, 信学論, vol . J79-D-II, no . 5, pp. 698–707 (1996).
- [18] 米田, 山澤, 竹村, 横矢: “移動ロボットの遠隔操作のための全方位画像提示手法”, 2000 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, pp. D-12-53, 240 (2000).
- [19] 米田, 山澤, 竹村, 横矢: “全方位画像センサによる移動ロボットの遠隔操縦”, 信学研報, PRMU00-170, (2000).
- [20] 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, 2, pp. 154–165 (1998).
- [21] H.Kuzuoka, S.Oyama, K.Yamazaki, K.Suzuki and M.Mitsuishi: “Gesture-man:a mobile robot that embodies a remote instructor’s actions”, Proc . CSCW’2000, pp. 299–306 (1999).

- [22] E.Paulos and J.Cannly: “Designing personal tele-embodiment”, Proc .IEEE Int . Con . on Robotics and Automation, pp. 3173-3178 (1998).
- [23] 渡辺, 大久保, 小川, 堀井: “身体的インタラクションロボット interrobot によるコミュニケーション”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, pp. 1P1-77-118 (2000).