

NAIST-IS-MT0251068

修士論文

歩行装置と没入型投影ディスプレイを利用した 移動ロボットの遠隔操縦

峠田 正樹

2004年2月6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。

峠田 正樹

審査委員： 横矢 直和 教授
小笠原 司 教授
山澤 一誠 助教授

歩行装置と没入型投影ディスプレイを利用した 移動ロボットの遠隔操縦 *

峠田 正樹

内容梗概

近年，移動ロボットの遠隔操縦に関する研究が盛んである．移動ロボットを人間が立ち入ることが難しい極限環境や，遠く離れた場所に配置して遠隔操縦することで，移動ロボットを操縦者の第二身体として扱うことができる．遠隔地にある移動ロボットを操縦するにはロボットの周囲情報と操縦デバイスが必要である．操縦デバイスとして一般にジョイスティックやペダルを用いるものが多いが，これらは普段人間が行っている動作とは異なるために熟練を要する．そこで本研究では歩行動作を用いて移動ロボットの操縦を行う．歩行動作は人間が普段行っている動作であり，直感的に分かりやすい操縦方法だといえる．操縦デバイスと同様に移動ロボットの周囲情報の獲得も遠隔操縦において重要な要素である．本研究では移動ロボットの上部に全方位画像センサ HyperOmni Vision を搭載し，全周囲の画像を一度に獲得し，ネットワークを介して操縦者に提示することとする．これにより通常のカメラによる全周囲画像獲得時の，カメラの回転による機械的な時間遅延などは生じることはない．そして獲得された全周囲画像を没入型投影ディスプレイに提示することで，操縦者に高い臨場感を与える．

本研究では実際に作成したシステムを用いて実験を行い，その有用性を検討した．

キーワード

遠隔操縦，歩行装置，没入型投影ディスプレイ，移動ロボット，全方位画像センサ

* 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-MT0251068, 2004年2月6日.

Remote Control of a Mobile Robot Using a Treadmill and an Immersive Projection Display*

Masaki Tawada

Abstract

Recently, remote control of a mobile robot is becoming popular. An operator can use a mobile robot at a remote site as the second body. The system with which an operator controls a mobile robot needs an operating device and information surrounding the mobile robot. Joysticks and pedals are popular operating devices for controlling a mobile robot. However, in such cases, the operator needs training because they are rarely used in daily life. Therefore, in this research, the operator uses a treadmill as the operating device. User's walking behavior on the treadmill provides an intuitive interface for operating the robot. Acquiring visual information surrounding the mobile robot is an important factor as well as the operating device. In this research, an omnidirectional sensor is placed on the mobile robot and acquires visual information surrounding it. A networked prototype system has been implemented integrating a locomotion interface and an interactive image generation on an immersive projection display. The system provides the operator with rich presence in the remote site. We have evaluated the usability of the system by experiments.

Keywords:

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0251068, February 6, 2004.

remote control, treadmill, immersive projection display, mobile robot, omnidirectional image sensor

目次

1. はじめに	1
1.1 移動ロボットの遠隔操縦に関する従来研究	1
1.2 本研究の概要	5
2. ネットワークを介した移動ロボットの遠隔操縦システム	6
2.1 システムの設計方針	6
2.2 システムの概要	7
2.3 遠隔環境の映像の取得と提示	10
2.3.1 移動ロボットにおける全方位画像の取得と伝送	10
2.3.2 没入型投影ディスプレイへのインタラクティブ映像提示	14
2.4 歩行動作に基づく遠隔操縦	17
2.4.1 歩行動作の計測	17
2.4.2 歩行装置の制御	21
2.4.3 移動ロボットの制御	21
3. 移動ロボットの遠隔操縦実験	24
3.1 動作実験	24
3.1.1 実験の概要	24
3.1.2 実験結果	24
3.1.3 考察	28
3.2 評価実験	28
3.2.1 実験の概要	28
3.2.2 実験結果	30
3.2.3 考察	39
4. おわりに	42
謝辞	43
参考文献	44

目 次

1	テムザック [2]	2
2	テレプレゼンス技術を用いた遠隔操縦 [3]	3
3	ポータブルネットワークロボット H3[4]	4
4	遠隔鑑賞ロボット kapros[5]	4
5	移動ロボットの遠隔操縦の概要	8
6	全方位画像と平面透視投影画像	11
7	HyperOmni Vision の外観	11
8	HyperOmni Vision の光学系	11
9	DVcommXP の概要	14
10	トータルステーションによるスクリーン上の計測点の3次元位置測定	16
11	スクリーン上の任意点の位置決定	16
12	入力全方位画像	17
13	左方スクリーンに表示する画像	18
14	前方スクリーンに表示する画像	18
15	右方スクリーンに表示する画像	19
16	歩行装置と没入型投影ディスプレイ	20
17	歩行装置の制御	22
18	移動ロボット	23
19	動作実験の様子	25
20	動作実験の環境	26
21	遠隔操縦の様子	27
22	タスク 1 の実験の様子	31
23	タスク 2 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡	32
24	タスク 2 の実験の様子	33
25	タスク 3 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡	35
26	タスク 3 の実験の様子	36
27	タスク 4 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡	37
28	タスク 4 の実験の様子	38

表 目 次

1	動作実験における遠隔操縦システムの機器構成	25
2	タスク 1 における目標達成時間と停止地点から障害物までの距離	34
3	タスク 2 における目標達成時間	34
4	タスク 3 における目標達成時間	34
5	タスク 4 における目標達成時間	37
6	アンケート結果	39

1. はじめに

近年，遠隔操縦に関する研究が盛んに行われている．その目的として，人間が行くことが困難である遠隔地に第二身体としてロボットを配して人間の代わりとする，もしくは人間が行うには危険を伴う作業をロボットにさせるなどが挙げられる．

本研究では直接ロボットを目視できない遠隔地で移動ロボットを歩行動作により遠隔操縦することを目的とする．

従来より行われている研究では操縦にジョイスティックやペダルを用いるものがほとんどであったが，それらは普段人間が行っている動作とは異なるため操縦に熟練が必要となる．そこで本研究ではより人間が直感的に分かりやすい歩行動作を操縦に用いることとした．これにより操縦者は熟練を要することなく移動ロボットの操縦が可能となる．

また，人間が操縦する際に最も重要な要素である遠隔地にあるロボットの周囲の情報の獲得についてであるが，人間は一般に周囲の情報の80%以上を視覚により確保しているといわれている [1]．さらに，周囲情報の10%程度は聴覚によるといわれており，視覚に次いで大きな割合を占めている．そこで遠隔地の周囲情報には移動ロボットに搭載したカメラからの映像とマイクによる音声を操縦者に提示することで遠隔操縦を行うこととした．

1.1 移動ロボットの遠隔操縦に関する従来研究

従来，移動ロボットを遠隔操縦する研究は様々行われてきた．以下に移動ロボットの遠隔操縦に関する従来研究の一部を紹介する．

- 移動操縦にペダルを用いる手法

テムザック [2] はヒューマノイド型のロボットの頭部に一台の CCD カメラを設置して PHS 回線を用いて専用のペダルにより遠隔移動操縦を行うロボットである．目的として，急に遠くの場所に移動しなければならなくなった場合の代理や，人の入れない危険な場所や災害場所

などでの作業代行など，さまざまな利用分野での使用が挙げられている．操縦者はモニタに表示された映像を見ながら遠隔操縦を行う．図1にテムザックの外観と移動操縦用のペダルを示す．



(a) 外観



(b) 移動操縦用ペダル

図1 テムザック [2]

- 移動操縦にジョイスティックを用いる手法

米田らが提案した臨場感提示技術テレプレゼンスを用いた遠隔操縦手法 [3] では，移動操縦にジョイスティックを用いている．この手法では移動ロボットの上部に全方位画像センサを搭載し，映像をアナログ無線で飛ばして遠隔操縦を行っており，操縦者はヘッドマウントディスプレイで全方位画像を透視投影変換された映像を見ながら操縦する．図2に操縦の様子を示す．図中左上が移動ロボットの様子，右上が入

力全方位画像，左下が操縦の様子，右下が操縦者に提示される画像である．

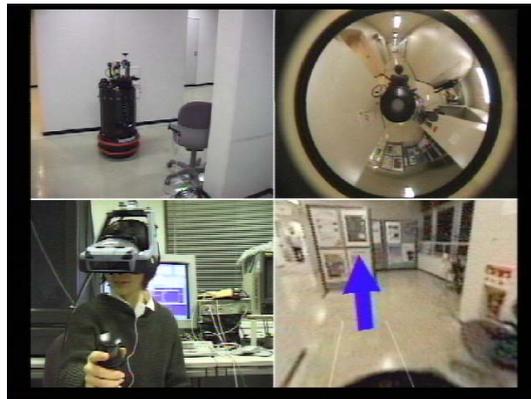


図 2 テレプレゼンス技術を用いた遠隔操縦 [3]

- 移動操縦にマウスクリックを用いる手法

ポータブルネットワークロボット H3[4]は WWW のように広く標準化された規格を用いて遠隔操縦を行えるようシステム構築された移動ロボットであり，操縦者は Java アプレットで作成されたインターフェースを用いて映像を見ながらマウスクリックにより遠隔操縦を行う．図 3 に H3 の外観と操縦用ウィンドウを示す．また，遠隔鑑賞ロボット kapros[5] は美術館に移動ロボットを配し，ロボットを遠隔操縦して鑑賞を行うものである．ロボットには鑑賞用のパンチルトカメラとは別に操縦用の全方位視覚センサを搭載している．操縦者はアプレット化されたウィンドウ内の 180 °のパノラマ画像上で床面上をマウスクリックすることでおおまかな操縦を，ウィンドウ内のアイコンをクリックすることで細かな操縦を行う．図 4 に kapros の外観と操縦用ウィンドウを示す．



(a) 外観 (b) 操縦用ウインドウ

図 3 ポータブルネットワークロボット H3[4]



(a) 外観 (b) 操縦用ウインドウ

図 4 遠隔鑑賞ロボット kapros[5]

それぞれ目的は異なり，その目的に応じてシステムの機器構成は異なる．しかしながら，操縦者への映像情報の提示と操縦用のインターフェースは必須であり，これらが遠隔操縦に大きなウェイトを占めていることがわかる．特に，操縦用のインターフェースにおいては，ジョイスティック，ペダル，マウスクリックなど，操縦する上で直感的でないものを使用している場合がほとんどである．

1.2 本研究の概要

本研究では人間が直感的に分かりやすい人間の歩行動作を移動ロボットの移動操縦に用いる手法を提案する [6]．また，映像提示には遠隔地にあたかも存在しているかのように感じさせるテレプレゼンス技術を用いる．歩行動作は通常人間が行っている基本動作であり，特別な訓練無く操縦が可能であると考えられる．また，テレプレゼンス技術を用いて操縦者が遠隔地にあたかも存在しているように感じさせることで，操作性が向上すると考えられる．使用する装置として，歩行動作には無限平面をもつ歩行装置を用い，映像提示には没入型投影ディスプレイを用いる．2章では作成したシステムの機器構成を，3章では作成したシステムの動作実験，評価実験について述べる．

2. ネットワークを介した移動ロボットの遠隔操縦システム

この章では構築した移動ロボットの遠隔操縦システムの機器構成と、用いた手法について述べる。

2.1 システムの設計方針

まず、基本方針について述べる。操縦に必要な映像提示部では、臨場感を増すため操縦者に提示する遠隔地の映像が人間の視野角よりも広範囲となるようにする。それには映像提示デバイスと獲得映像がともに人間の視野角よりも広くなければならない。映像提示デバイスとしては通常のモニターやヘッドマウントディスプレイなどが挙げられるが、これらは人間の視野角よりも狭いため、人間の視野角よりも広い没入型ディスプレイを用いる。また、獲得映像は視野角より広いだけでなく、移動ロボットの周囲情報の確認のために周囲 360°の映像が必要である。周囲 360°の映像情報を獲得する為には、通常のビデオカメラを方向の制御が可能な回転台の上に載せ、頭の向きに応じて映像を提示する方法などがあるが、それらの方法はカメラを回転させる際の機械的遅延が発生する為適切でない。そこで本研究における全方位画像の取得には全方位の画像を同時に取得可能な全方位画像センサを用いることとする。そして、操縦者が移動ロボットの視点で操縦を行えるようにするために、操縦者と移動ロボットの視点位置の整合性が合うように、移動ロボットに搭載する全方位画像センサを人間の視点位置と同じ高さに設置する。また、操縦用インターフェースは人間が普段行っている歩行動作を検出するためのセンサと、定点で繰り返し歩行動作を行うことが可能な歩行装置を用いる。そして、映像や移動ロボットへの移動命令を伝達するためのインフラとしては、すでに世界中に広がっているネットワークを用いることとする。

2.2 システムの概要

本システムは、遠隔地における映像の獲得と操縦者への映像情報の提示、そして歩行動作に基づく遠隔操縦という大きく2つの機能からなる。

映像の獲得には周囲 360° の情報を獲得することのできる全方位画像センサ HyperOmni Vision を用いて広範囲の情報を獲得する。これにより遠隔操縦において重要な視覚による周囲の情報の獲得を一度に行うことができる。映像伝送にはネットワークを用いる。ネットワークは広く世界に広がっており、ネットワークの繋がるのであれば、例えば日本の操縦者がアメリカにある移動ロボットの映像を獲得することができる。映像の提示には前面と左右 270° を覆う形の没入型投影ディスプレイを用いる。人間の視野角以上の範囲を提示することのできるこのディスプレイにより操縦者は高い没入感を得ることができる。歩行動作には無限平面を持つ歩行装置を用いて、歩行装置上を操縦者が歩行することで、歩行動作を検出する。歩行動作によって得られたデータは映像伝送と同様、ネットワークを用いて伝送する。移動ロボットは得られたデータを基に移動ロボットの移動に必要なデータに変換して移動を行う。

図5に遠隔操縦システムの概要を示す。操縦者が歩行装置上で歩行動作を行い、その情報は歩行装置制御用計算機からネットワークを介して移動ロボット制御用の計算機に送られる。その情報を基に移動ロボットは平面上を自由に移動する。同時に上部に搭載された全方位画像センサによって獲得された映像とマイクにより獲得された音声は、ネットワークを介し映像受信用の計算機に送られ、DV デッキで映像と音声を分離して、映像は映像表示用計算機へ、音声は没入型投影ディスプレイ上部のスピーカから出力される。映像表示用計算機では受け取った映像を平面透視投影画像に変換してプロジェクタを介して没入型投影ディスプレイに表示する。

本システムで使用した機器は以下のとおりである。

- 移動ロボット

歩行装置制御用計算機から磁気センサのデジタル情報を受け、平面上を自由に動き回ることが可能な移動ロボット。その周囲情報の獲得のために全方位カメラを上部に搭載する。

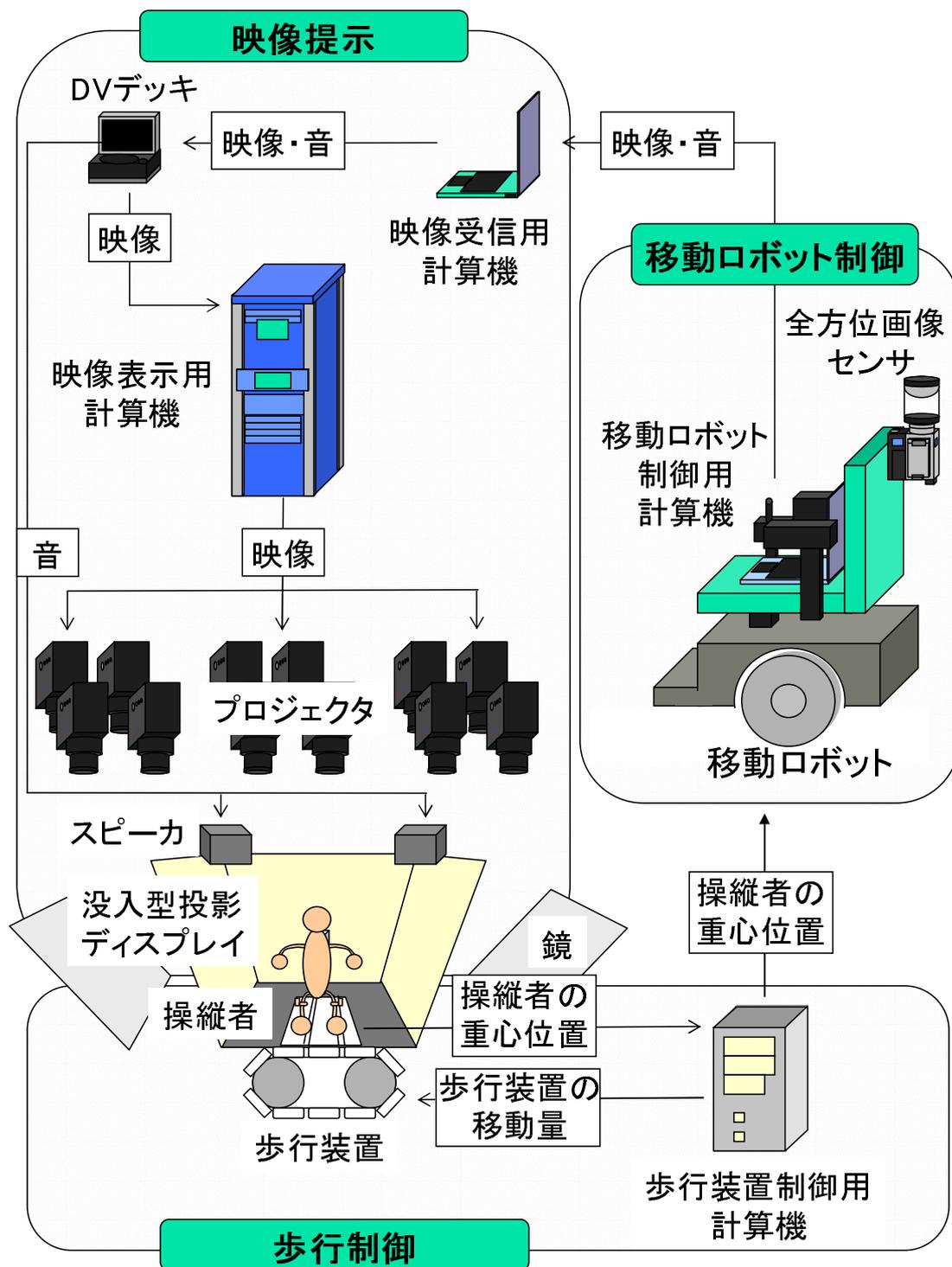


図 5 移動ロボットの遠隔操縦の概要

- 全方位画像センサ

移動ロボット上部に，人間の視点位置とほぼ同様の高さ（160cm 程度）になるように設置し，ロボットの周囲 360 °の映像を獲得する．得られた入力全方位画像は映像表示用計算機で人間への提示に適した平面透視投影画像に変換する．

- 移動ロボット制御用計算機

移動ロボットに搭載し，ネットワークを介して受け取った操縦者の歩行情報からロボットの制御を行い，同時に獲得した全方位動画像をネットワークを介して操縦者側へ送信する．

- 歩行装置

磁気センサを操縦者の膝に取り付け，操縦者の歩行時の位置情報を検出することで操縦者の歩行動作を検出する．磁気センサによって検出された位置情報を歩行装置にフィードバックすることで，操縦者は歩行装置上で定点位置で歩行可能である．

- 歩行装置制御用計算機

磁気センサによって検出された操縦者の位置情報から歩行装置を制御すると同時に，移動ロボット側へ操縦者の位置情報を伝送する．

- 没入型投影ディスプレイ

大型傾斜型 3 面ディスプレイであり，操縦者の視野角より広い周囲 270 °の映像提示部分を持つ．移動ロボット側の全方位画像から操縦者の視点位置に幾何学的に合わせた平面透視投影画像を作成し，操縦者に表示する．

- 映像表示用計算機

DV デッキから送られてきた全方位画像を平面透視投影画像に変換する．

- 映像受信用計算機

ネットワークを介して送られてきた映像を受信し DV デッキに送る．

- DV デッキ

得られた映像情報を映像表示用計算機へ，音声情報を没入型投影ディスプレイ上部のステレオスピーカに出力する．

2.3 遠隔環境の映像の取得と提示

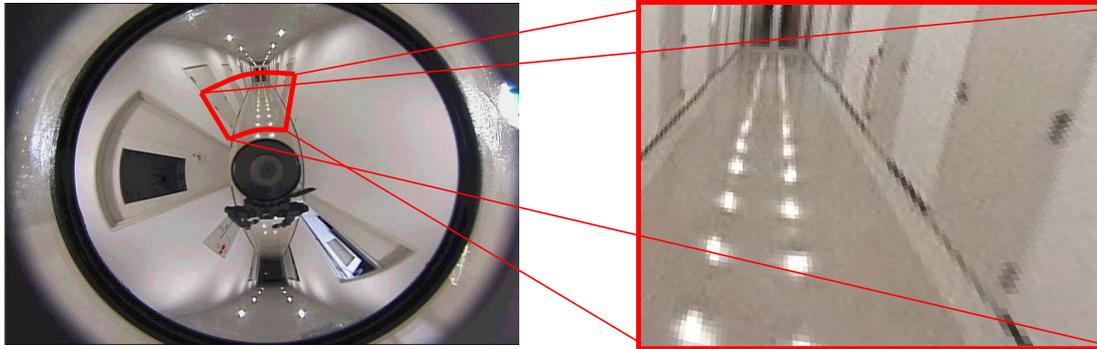
移動ロボットの遠隔操縦を行う上で操縦者にとって重要な要素の1つである移動ロボットの周囲情報として映像情報と音声情報を用いているが，特に映像情報の取得と提示について本節で述べることとする．

2.3.1 移動ロボットにおける全方位画像の取得と伝送

本システムでは移動ロボットの周囲 360° の映像情報を獲得する為に全方位画像センサを用いる．さまざまな全方位画像センサが提案されているが，遠隔操縦を行うためには全方位画像センサにより得られた全方位画像から通常我々が現実環境を見ているような平面透視投影画像をリアルタイムで生成する必要がある．そこで，HyperOmni Vision[7]を用いることとした．HyperOmni Vision は周囲 360° を取得するために反射鏡をカメラ上部に設置し，鉛直上向きに設置したビデオカメラによって反射鏡を介して周囲 360° の情報を獲得するものであるが，その反射鏡の形状が双曲面であるため，多くの全方位画像センサと異なり光学系の特性が一点透視投影であるという特徴を持っている．これによりリアルタイムで平面透視投影画像を生成することが可能である．HyperOmni Vision により獲得された全方位画像と作成される平面透視投影画像を図 6 に示す．

本研究で使用した HyperOmni Vision の外観を図 7 に示し，光学系の構成を図 8 に示す．図 8 に示すように HyperOmni Vision は鉛直下向きに設置した双曲面鏡に写りこんだ周囲 360° の鏡像を，鉛直上向きに設置したビデオカメラにより撮影するというものである．以下に HyperOmni Vision の構造を示す．

双曲面には回転 2 葉双曲面を用いており，図 8 のように 2 焦点 O_M, O_C が存在する．鏡の焦点は O_M にあり，ビデオカメラのレンズ中心が O_C となるように取り付ける．図に示すように Z 軸を鉛直軸とする 3 次元ワールド座標系を考えると，



全方位画像

平面透視投影画像

図 6 全方位画像と平面透視投影画像



図 7 HyperOmni Vision の外観

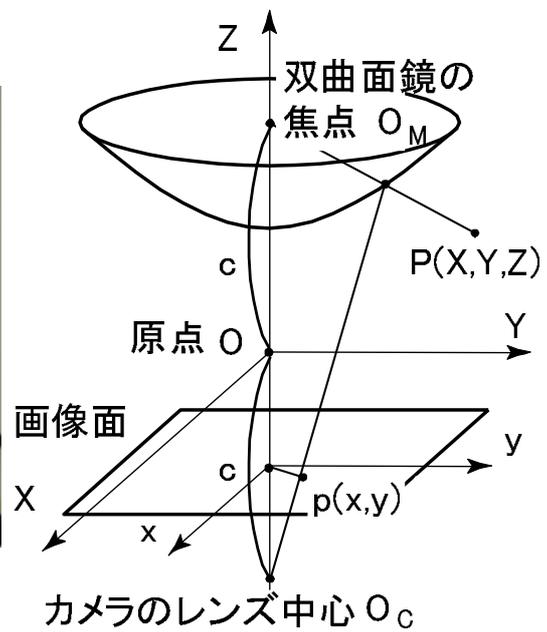


図 8 HyperOmni Vision の光学系

双曲面鏡の面，双曲面鏡の焦点 O_M ，ビデオカメラのレンズ中心 O_C は式 1 のように表現できる．

$$\begin{aligned}
 \text{鏡面} & : \frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \\
 & (Z > 0) \\
 \text{鏡の焦点 } O_M & : (0, 0, +c) \\
 & (c = \sqrt{a^2 + b^2}) \\
 \text{カメラのレンズ中心 } O_C & : (0, 0, -c)
 \end{aligned} \tag{1}$$

但し a, b, c は双曲面鏡のパラメータ

内側の焦点 O_M に集まる像は双曲面鏡に反射して外側の焦点 O_C に集まる．ここで， O_C がレンズ中心となるように取り付けられたビデオカメラで全方位画像を取得すると，3次元環境中の任意の点 $P(X, Y, Z)$ に対する全方位画像上での写像点を $p(x, y)$ とした場合，式 2 のような関係が成り立つ．

$$\begin{aligned}
 x & = X \times f \times \frac{(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}} \\
 y & = Y \times f \times \frac{(b^2 - c^2)}{(b^2 + c^2)(Z - c) - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - c)^2}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

このような特性をもつ HyperOmni Vision を移動ロボットの上部に鏡面部が人間の視点位置と同等の高さになるよう取り付ける．人間の視点位置の高さは 160cm 程度とした．これにより人間の視点位置とほぼ同じ高さを全方位画像センサの焦点とした全方位画像を獲得している事となる．

次に映像の伝送に関して述べる．本システムでは映像の伝送に学内有線，無線 LAN を用いる．世界中に広がっているネットワークを用いることにより，この遠隔操縦システムはネットワークに接続可能な場所であれば，どれほど離れていようとも使用が可能であるといえる．有線 LAN は 100Base-T，無線 LAN は IEEE802.11a, 11g の 2 つの規格を使用する．有線 LAN は最大通信速度 100Mbps，無線 LAN は最大通信速度 54Mbps である．全方位動画の伝送には Fatware 社の DVcommXP[8] というソフトウェアを用いた．このソフトウェアは DVTS(Digital

Video Transport System)[9] を基本システムとし，様々な機能を付加したものである．以下に DVcommXP の主要な特徴を示す．

- 約 30Mbps の帯域幅を使用して，高品質な動画像 (720×480pixels, 30fps) を伝送することが可能．
- DV デッキを用いて画像データからデジタルビデオデータへ圧縮，およびデジタルビデオデータから画像データへの展開が可能．
- 動画像と同時にそれに対応した音声情報も伝送することが可能．
- 音声冗長機能により音声情報の欠落を補正することが可能．
- マルチキャスト送受信が可能．
- 1frame/sec から 30frame/sec の間でフレームレートを変更可能であり，この機能を用いて使用帯域幅の調整が可能．
- ICMP(Internet Control Message Protocol) ,RTCP(Real-time Transport Control Protocol) により，相手側のパケットロスなどのネットワークに関連した情報の把握が可能．
- ネットワークを介してどこにでもデジタルビデオデータを伝送することが可能．

本研究では映像獲得に使用する HyperOmni Vision を構成するデジタルビデオカメラにより全方位動画像をデジタルビデオデータへ圧縮，計算機による DVcommXP を用いたデジタルビデオデータの伝送を行う．受信側では DV デッキを用いてデジタルビデオデータを展開して，映像表示用の計算機に全方位画像を入力する．

これにより映像表示に使用する計算機で映像を展開する必要が無いため，計算における負荷が軽減できる．また，デジタルビデオデータに含まれている音声情報は DV デッキで展開された後，没入型スクリーン上部のステレオスピーカから音声として出力される．

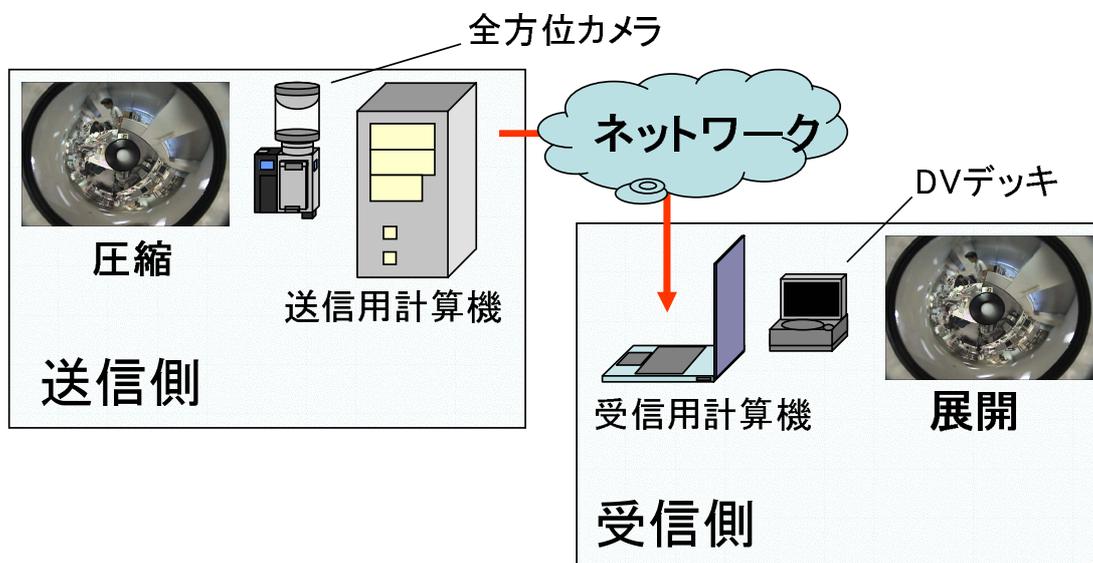


図 9 DVcommXP の概要

2.3.2 没入型投影ディスプレイへのインタラクティブ映像提示

操縦者側では移動ロボット側から送られてきたデジタルビデオデータを受信用計算機で DVcommXP を用いて受け取り，DV デッキで展開する．こうして得られた全方位動画を映像提示用計算機に送る．映像提示用計算機では得られた全方位画像から平面透視投影画像を作成するが，遠隔操縦では，それは時間遅延無くリアルタイムで変換することが望ましい．遠隔操縦を行う際には処理にかかる時間が長くなればなるほど，操縦時に提示される映像の時間的遅延が大きくなり，さらに映像の変化のない時間が長くなり，操縦がより困難になる．2.3.1 節で説明したような全方位画像から平面透視投影画像への幾何学的変換を，3 面ディスプレイで操縦者に提示する画像に対応した全ての画素で変換計算を行うと計算量が膨大になりシステムのリアルタイム性が失われてしまう．そこで本システムでは尾上ら [10] の手法を用い，生成する透視投影画像を格子状に分割し，その格子点に対応する全方位画像上の点のみを正確に対応計算する．各格子点内部の画素に関しては，ハードウェアのテクスチャマッピング機能を利用して線形補間を行うことで近似的に不自然ではない平面透視投影画像を作成する．格子は計算量

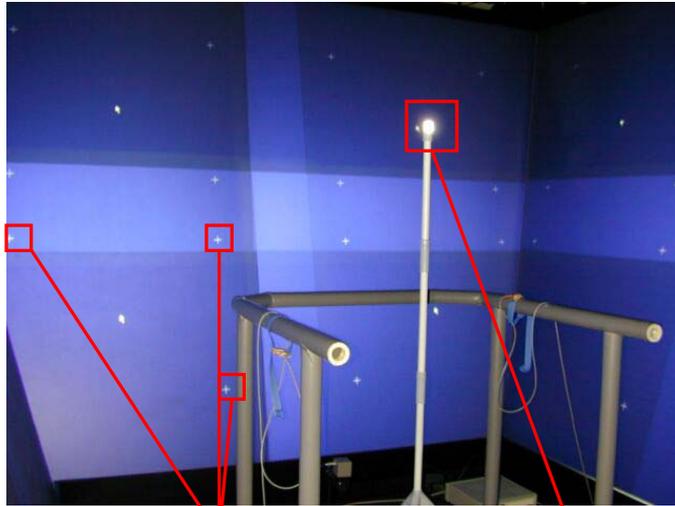
が少なく，変換した透視投影画像に歪みを感じない程度の数に設定する．格子の数は 16×12 とした．これは変換した透視投影画像に歪みを感じない程度の中で最も計算量の少ない格子の数である [10]．映像の提示には没入型投影ディスプレイを用いる．このディスプレイは 3 面のスクリーンから構成されており，1 つのスクリーンには 4 台のプロジェクタが対応し，合計 12 台のプロジェクタから映像が出力される．この 12 台のプロジェクタは操縦者側の部屋の天井部に設置しており，プロジェクタから鏡を介して平面透視投影画像を後方よりスクリーンに投影する．

幾何学的に整合性の取れた映像を操縦者に提示するためには，投影される映像がスクリーン上でどの位置に投影されているかを把握する必要がある．12 台のプロジェクタにより投影される映像それぞれを幾何学的に正確な位置に提示するために，まずプロジェクタから画像上で x, y 座標が既知の 3 点を映像としてスクリーンに投影する．投影されたこの 3 点の空間的な位置をトータルステーションで測定する．トータルステーションは測量に用いられる機械であり，レーザを飛ばして反射して返ってくるまでの時間とレーザを飛ばす方向により 3 次元位置を決定するものである．また，歩行装置上で操縦者が歩行動作を行う際の操縦者の視点位置を決定し，その 3 次元位置も同様に測定する．図 10 に測定の様子とトータルステーションの外観を示す．

この視点位置と 3 点の空間的な位置関係が分かれば，視点位置を原点としたスクリーン上の各点の 3 次元位置がわかる．視点位置を O ，3 点をそれぞれ A, B, C とし， A, B, C の画像上の x, y 座標での $A(A_x, A_y)$ ， $B(B_x, B_y)$ ， $C(C_x, C_y)$ を A_x, B_x は値が同一， A_y, C_y は値が同一とすると，視点位置からスクリーン上の任意の点 P へのベクトルは P の画像上の座標 (P_x, P_y) を用いて以下の式 3 のように表せる．

$$\begin{aligned} \vec{OP} &= \vec{OA} + a(\vec{OB} - \vec{OA}) + b(\vec{OC} - \vec{OA}) \\ a &= \frac{P_x - A_x}{B_x - A_x}, b = \frac{P_y - A_y}{C_y - A_y} \end{aligned} \quad (3)$$

任意の点 P の 3 次元位置がわかれば 2.3.1 節で述べた様に，その 3 次元位置に対応した全方位画像上の写像点が決定できる．これにより，操縦者の視点位置を全方位カメラの焦点とした映像を作成することが可能となり，操縦者は遠隔地にある移動ロボットの位置に立っているのと同様の視覚情報を得ていることとなる．



スクリーン上の計測点

仮想視点



トータルステーション

図 10 トータルステーションによるスクリーン上の計測点の3次元位置測定

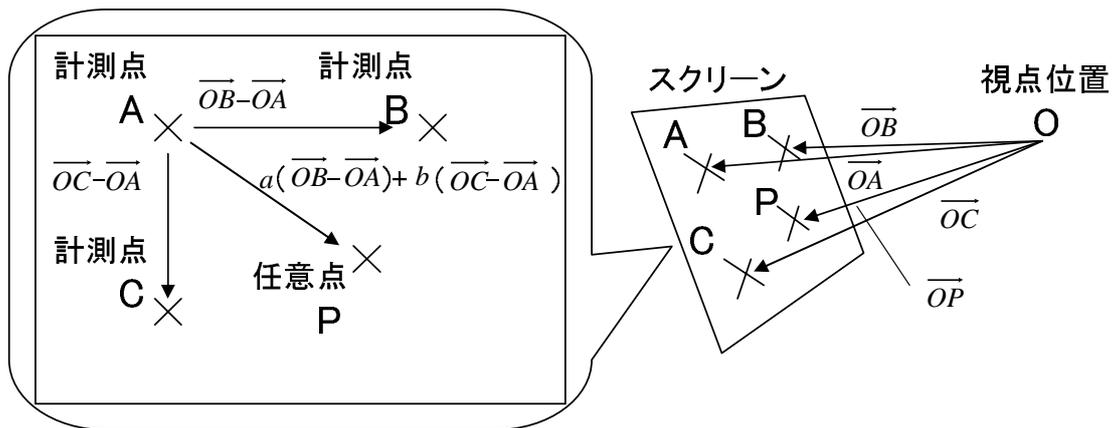


図 11 スクリーン上の任意点の位置決定

これらの作業を 12 回繰り返すことにより，12 台のプロジェクタからスクリーンに映像を幾何学的に正確な位置に表示することができる．図 12，13，14，15 に入力する全方位画像とそれぞれのスクリーンに表示される画像の一例を示す．

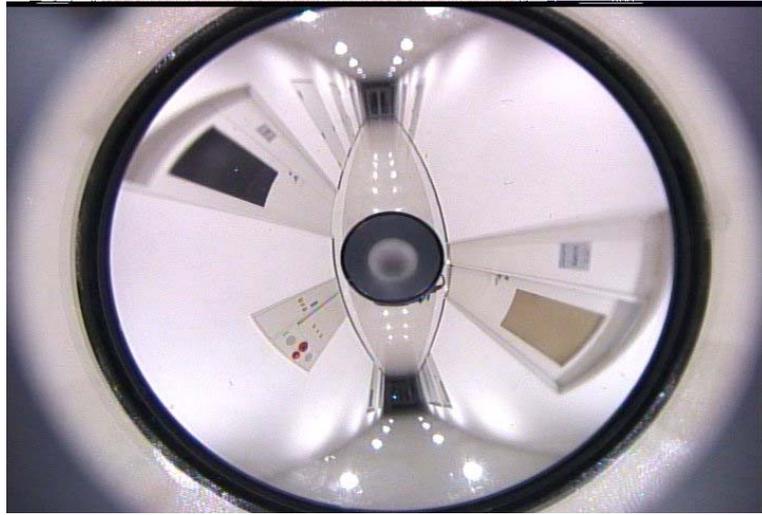


図 12 入力全方位画像

2.4 歩行動作に基づく遠隔操縦

遠隔操縦システムにおける重要な要素の 1 つである操縦デバイスとして，本研究では歩行装置を用いている．本節では歩行装置による歩行動作の検出から移動ロボットの制御までを述べる．

2.4.1 歩行動作の計測

本研究では人間が普段行っている歩行動作によって移動ロボットを遠隔操縦する．歩行動作の検出には SOLIDLAY WalkMaster を用いた．WalkMaster は歩行装置と位置検出用の磁気センサ，歩行機制御用計算機から構成される．歩行装置は複数枚のベルトで構成されており，一枚一枚のベルトは前後方向へ回転を行う



図 13 左方スクリーンに表示する画像

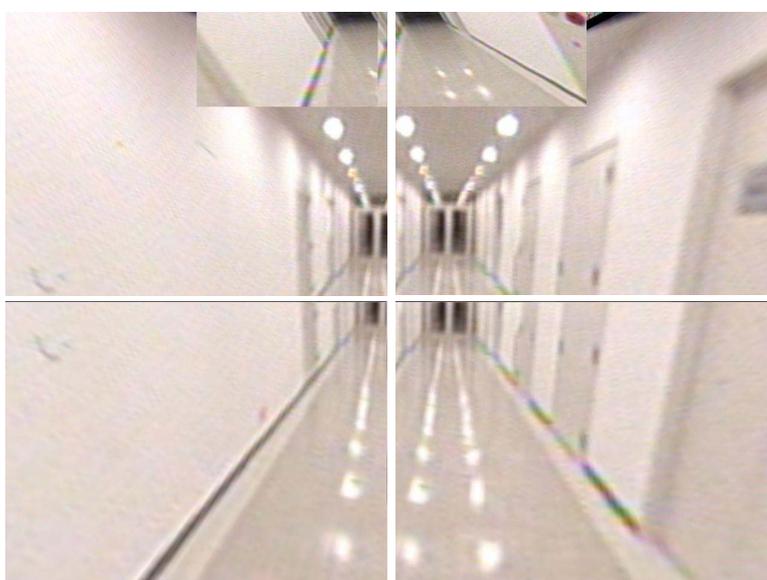


図 14 前方スクリーンに表示する画像



図 15 右方スクリーンに表示する画像

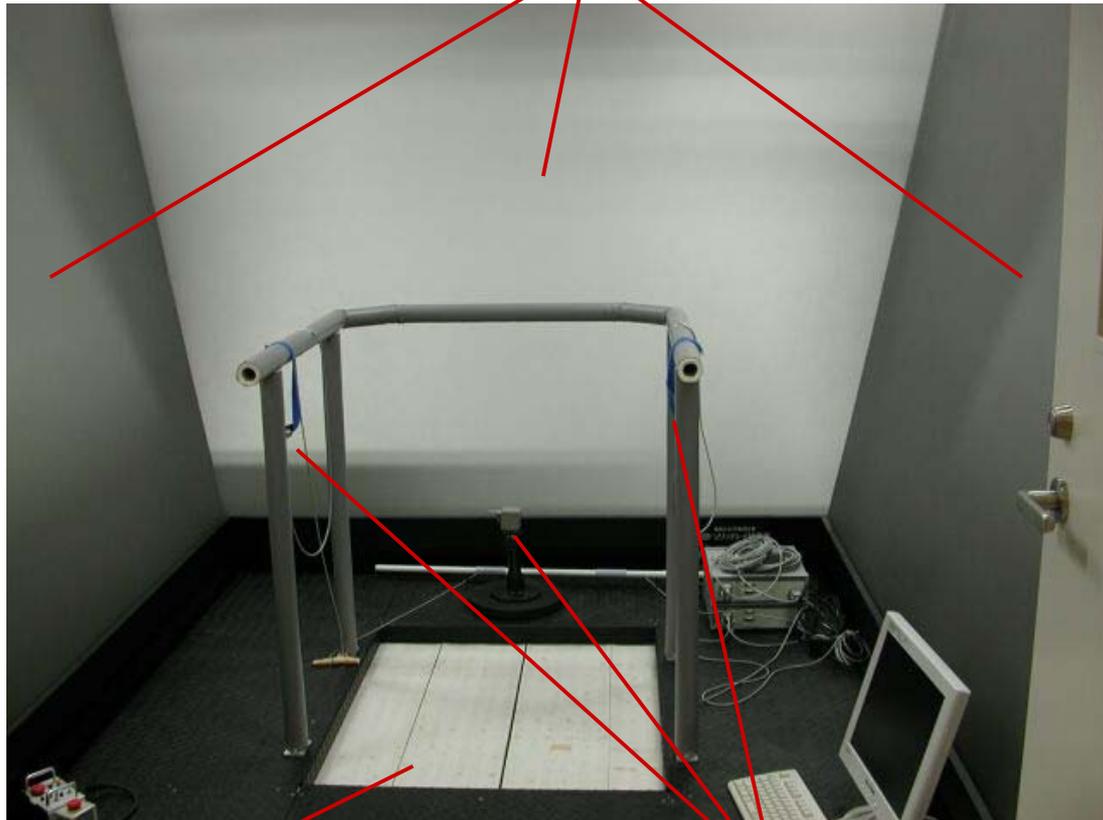
ことができる．そしてこのベルトが複数枚横に並んでおり，その複数枚のベルトが1つのベルトを構成している．この複数枚で構成されているベルトが左右へ回転を行うことで，この歩行装置上で操縦者は前後左右に自由に移動可能となっている．

歩行動作の検出には磁気センサ POLHEMUS 社 3SPACE FASTRAK を用いる．この磁気センサは磁場を発生させるソースと磁気情報を受け取るレシーバからなり，3個のソースコイルから時分割で発生する磁場を3個のレシーバで計測し，その計測結果からレシーバの位置と姿勢に関する6自由度の情報を得るものである．その計測精度は位置0.8mm，姿勢0.15°であり，計測範囲はソースコイルから半径1.5m以内である．

今回構成しているシステムでは，歩行装置上で操縦者が歩行動作を行う際，操縦者の両足にレシーバを取り付け，その2つのレシーバから計測された位置情報からその中心点を求め，その点を重心位置とする方法を用いる．歩行装置は平面であるので，位置のうち2自由度のみを用いて操縦者の重心位置を求める．実際には歩行装置前方にソースを配置して，操縦者の両膝部分にレシーバを取り付け

た状態で無限平面上を歩行してもらい、位置情報の計測を行う。図 16 に歩行装置と没入型投影ディスプレイの外観を示す。

没入型投影ディスプレイ



歩行装置

磁気センサ

図 16 歩行装置と没入型投影ディスプレイ

2.4.2 歩行装置の制御

操縦者が歩行装置上で歩行動作を行うには操縦者が定点位置で繰り返し歩行動作ができるよう歩行装置を制御する必要がある。そのために 2.4.1 節で計測した重心位置を使用する。操縦者はまず歩行装置上で静止する。そしてその状態で膝に取り付けてある磁気センサからの位置情報を原点位置として保持しておく。そして歩行状態に入ると、操縦者の重心位置と原点位置に差が生じる。この差分をベクトル情報として、歩行装置を構成している前後方向と左右方向のモータ部の電圧を変化させる。その際、歩行装置のベルトは操縦者が常に定点位置で歩行が可能なようにそのベクトル情報と逆方向の回転を行うように電圧を変化させる。それにより操縦者は常に定点位置で前後左右に歩行動作を繰り返し行うことができる [11]。図 17 に操縦者が前進した際の歩行装置の制御を示す。

2.4.3 移動ロボットの制御

移動ロボットに母体として用いたミサワホーム社の電動車椅子 M-smart は、右手肘掛前方に設置されてあるジョイスティックの操作により平面上を自由に動くことのできる車椅子である。このジョイスティックからの入力の部分を、作成した D/A 変換機により計算機からの入力で操縦可能な移動ロボットに改良した。この移動ロボットは前進後退、左右回転により平面上を自由に動くことができ、定点での回転も可能である。図 18 に移動ロボットの外観を示す。

前節で述べた操縦者の重心位置と原点位置との差分ベクトル情報は、歩行装置制御用計算機から TCP/IP プロトコルを用いたパケット伝送により、ネットワークを介して移動ロボット側に送られる。得られた差分ベクトル情報は前後方向への移動ベクトル、左右方向への移動ベクトルであるので、その情報を移動ロボットの前進後退と左右の回転に割り当てる。これにより移動ロボットは遠隔地に存在する操縦者の歩行動作によって平面上を自由に動き回ることができる。また、映像情報と操縦に用いる差分ベクトル情報はともにネットワークにより伝送されるので、ネットワークのある場所であれば特殊なインフラを必要とせず遠隔操縦が可能である。

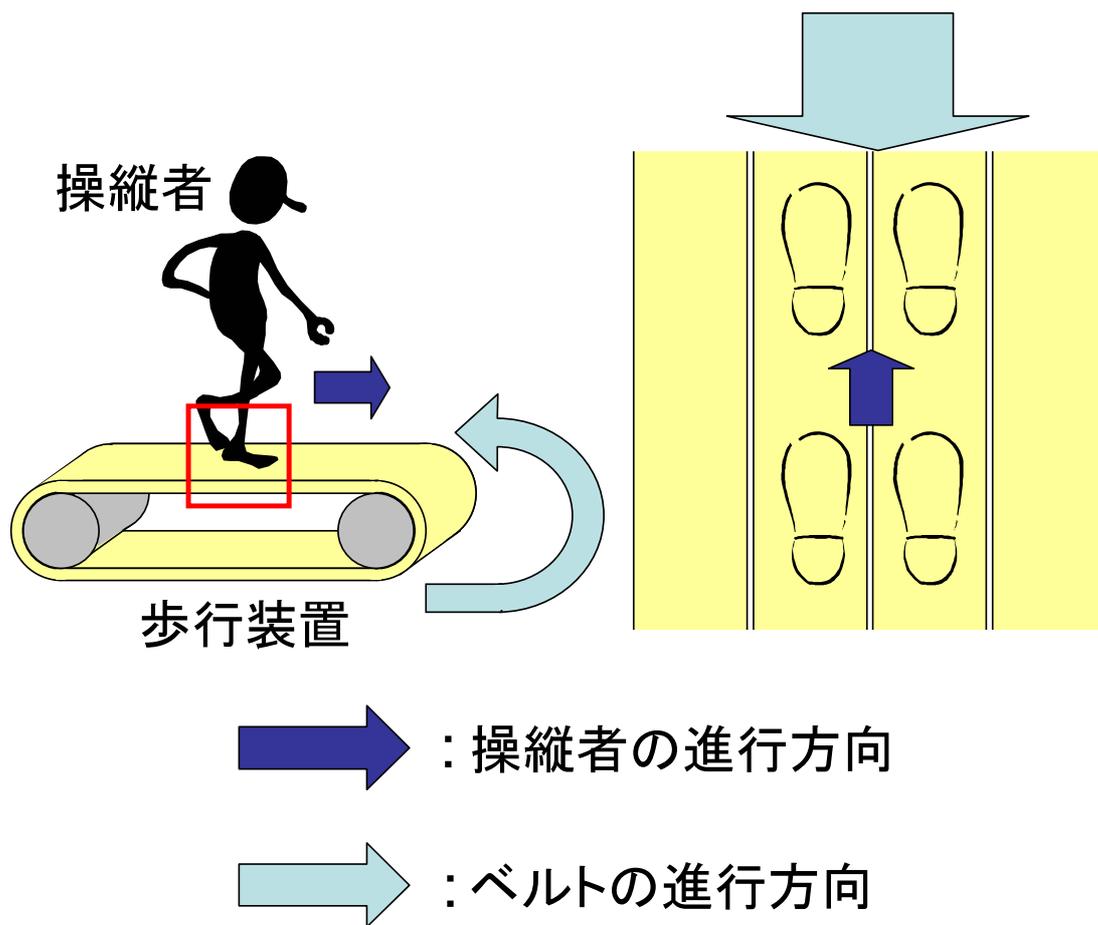


図 17 歩行装置の制御



図 18 移動ロボット

3. 移動ロボットの遠隔操縦実験

前章で述べた移動ロボットの遠隔操縦システムを用いて遠隔操縦実験を行った。実験は動作実験と評価実験を行っており、それぞれの概要、結果、考察について本章で述べる。

3.1 動作実験

3.1.1 実験の概要

本研究で作成したシステムを用いて実際に動作実験を行った。本実験で使用した機器を表 1 に示す。操縦者は本学ベンチャービジネスラボラトリの一室にて膝に磁気センサを装着し、本学情報棟一階ロビーに配した移動ロボット側の映像を見ながら歩行動作を行う。それにより移動ロボットは移動を開始し、連動して獲得される映像も変化する。その映像はネットワークを介し操縦者へと提示される。情報棟一階ロビーとベンチャービジネスラボラトリは 200m 程度離れており、操縦者から移動ロボットは直接目視することはできない。この 2 地点間を有線、無線のネットワークを介して DVcommXP を用いた映像伝送、TCP/IP を用いたパケット伝送による操縦命令伝送を行うことにより、移動ロボットの遠隔操縦を実現する。移動ロボットは最高速度を 2km/h 程度に設定した。また、映像の更新頻度は 10frame/sec とした。これはネットワークの帯域幅を考慮したためである。実験の様子を図 19 に示す。実験では移動ロボットは図 20 に示すようにロビーにある柱、案内板の周囲を遠隔操縦により一周した。図 20 中の番号 1 から 6 の地点での移動ロボットの様子と、同時刻での操縦者の様子を図 21 に示す。

3.1.2 実験結果

本実験により操縦者の歩行動作により移動ロボットの遠隔操縦が可能であることを確認した。移動ロボット側よりネットワークを介して映像を没入型ディスプレイに提示するまでにかかる時間は約 1 秒程度、歩行動作から移動ロボットが移動を始めるまでの時間は約 1 秒程度であった。この移動開始にかかる遅延はネッ

表 1 動作実験における遠隔操縦システムの機器構成

全方位画像センサ	HyperOmni Vision
移動ロボット	ミサワホーム M-smart
移動ロボット制御用計算機	sony PCG-R505FR/D CPU: intel Pentium3 850MHz
歩行装置	SOLIDRAY WalkMaster
歩行装置制御用計算機	CPU:intel Pentium4 2.4GHz
没入型投影ディスプレイ	SOLIDRAY VisualValley
映像表示用計算機	SGI Onyx3800 CPU: MIPS R14000 500MHz,16CPU(1CPU 使用)
受信用計算機	victor MP-XP7220 CPU: intel Pentium3 866MHz
DV デッキ	sony GV-D900



(a) 操縦者側



(b) 移動ロボット側

図 19 動作実験の様子

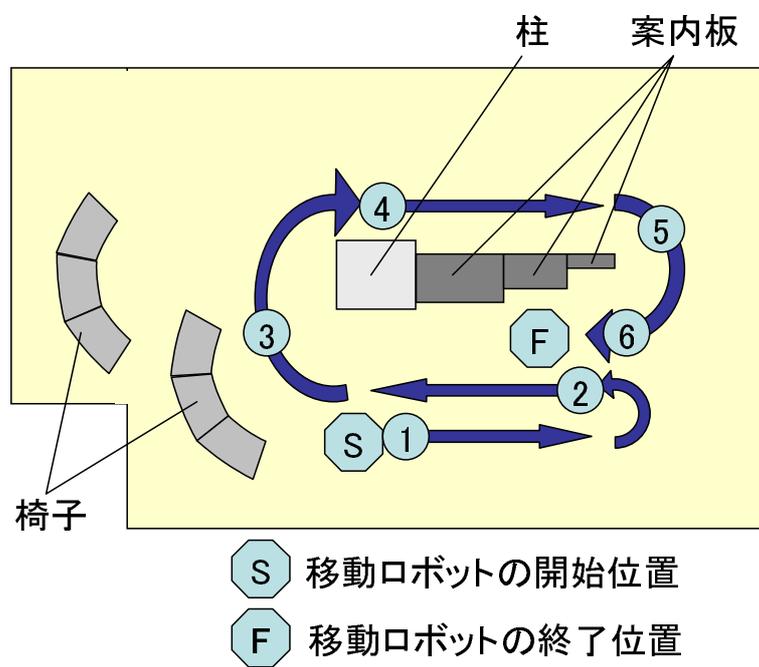


図 20 動作実験の環境



操縦者

移動ロボット

図 21 遠隔操縦の様子

トワーク遅延だけでなく，移動ロボットを制御しているモータが稼動状態に切り替わる際の機械的遅延に起因すると考えられる．稼動状態での速度変化に関してはモータの切り替えが無く電圧が滑らかに変化するだけなので大半がネットワークによる遅延の影響である．そのため速度変化に関しては0.5秒程度で変化が現れる．また，移動命令と映像の双方の遅延により歩行動作を開始して映像に変化が現れるまで最大約2秒の遅延が発生している．

3.1.3 考察

現状では操縦者はある程度空間を映像から把握し，遅延を考慮した操縦が必要であると考えられる．また，実験環境内で無線LANの送受信状況が悪化する場所では10frame/secよりも映像の更新頻度が減少した．これは今後無線LANの基地局を増やすことにより無線の受信状況が向上すれば問題はないと考える．また，無線LANの帯域幅の増大と映像提示に用いている計算機の性能が向上すれば映像の更新頻度を向上させることができると考える．さらに帯域幅の増大と高解像度のカメラを用いることで，解像度の高い映像を操縦者に提示することが可能であると考えられる．

3.2 評価実験

3.2.1 実験の概要

評価実験では，複数の被験者が遠隔操縦を行い，目標達成時間等を計測するとともにアンケート形式で主観評価を行った．その際実験に使用した機器の構成は動作実験時の機器構成と同じである．実験は4つのタスクを被験者に課した．タスクはそれぞれ以下のとおりである．

- タスク1:前方にある障害物手前で停止する実験

実験環境は動作実験時と同じくベンチャービジネスラボラトリと情報棟ロビーで行った．前方にある障害物に可能な限り近づいて停止するというものであり，前方直進を行うだけである．障害物と移動ロボットの初期位置の

間の直線距離は 4m25cm である。目的として、移動ロボットの遠隔操縦における遅延がどの程度操縦に影響を及ぼしているかを距離感の把握によって確認する。

- タスク 2:目標地点に到達する実験

タスク 2 においても実験環境は動作実験時と同じくベンチャービジネスラボラトリと情報棟ロビーで行った。直進のみでは目標地点に到達できない初期位置設定で、途中に障害物のない環境内で目標地点までを自由な経路で移動し、到達するというものであり、初期状態で操縦者はスクリーンを介して目標地点が目視できている。目標地点までの直線距離は 5m60cm である。目標地点は前方では無いため、回転を行いながら前進する必要がある。本システムがどれだけ直感的であるかを検討するための実験である。

- タスク 3:障害物を回避して目標地点に到達する実験

タスク 1, タスク 2 同様実験環境は動作実験時と同じくベンチャービジネスラボラトリと情報棟ロビーで行った。タスク 3 では複数の障害物を配した空間の中を障害物を回避しながら目標地点に到達するという実験である。目標地点までの直線距離は 6m70cm であるが、障害物を回避するため、実際にはより長い距離を操縦する必要がある。また、初期状態で操縦者はスクリーンを介して目標地点が目視できている。タスク 3 では障害物に衝突しないように移動することが重要である。この実験で本システムの操縦性の検討をする。

- タスク 4:ゲームパッドとモニタを用いた遠隔操縦システムによる比較検討実験

タスク 4 では本学情報棟 3 階の実験室と情報棟 1 階ロビーとの間で遠隔操縦を行った。目標地点、障害物の配置等はタスク 3 と全く同様とし、操縦にゲームパッド、映像提示にモニタを用いる。移動ロボットには全方位画像センサを搭載せず、通常のカメラを搭載し撮影された映像をモニタに表示する。そのため初期状態では目標地点が目視できないが、この実験ではタスク 3 と同様の位置に目標地点が存在していることは操縦者にあらかじめ

示している．タスク 3 と同様の環境で実験を行うことで本システムとの全体的な比較を行うことを目的とする．

また，すべてのタスクにおいて移動ロボットの形状は前知識として持っており，タスク 1，タスク 2，タスク 3 においては歩行装置上での前進後退が移動ロボットの前進後退，操縦者の左右の移動が移動ロボットの回転に割り当てられているという前知識を被験者が持っている．そしてタスク 4 ではゲームパッドの十字カーソルの上下が移動ロボットの前進後退，左右が移動ロボットの左右への回転であるという知識を持っている．

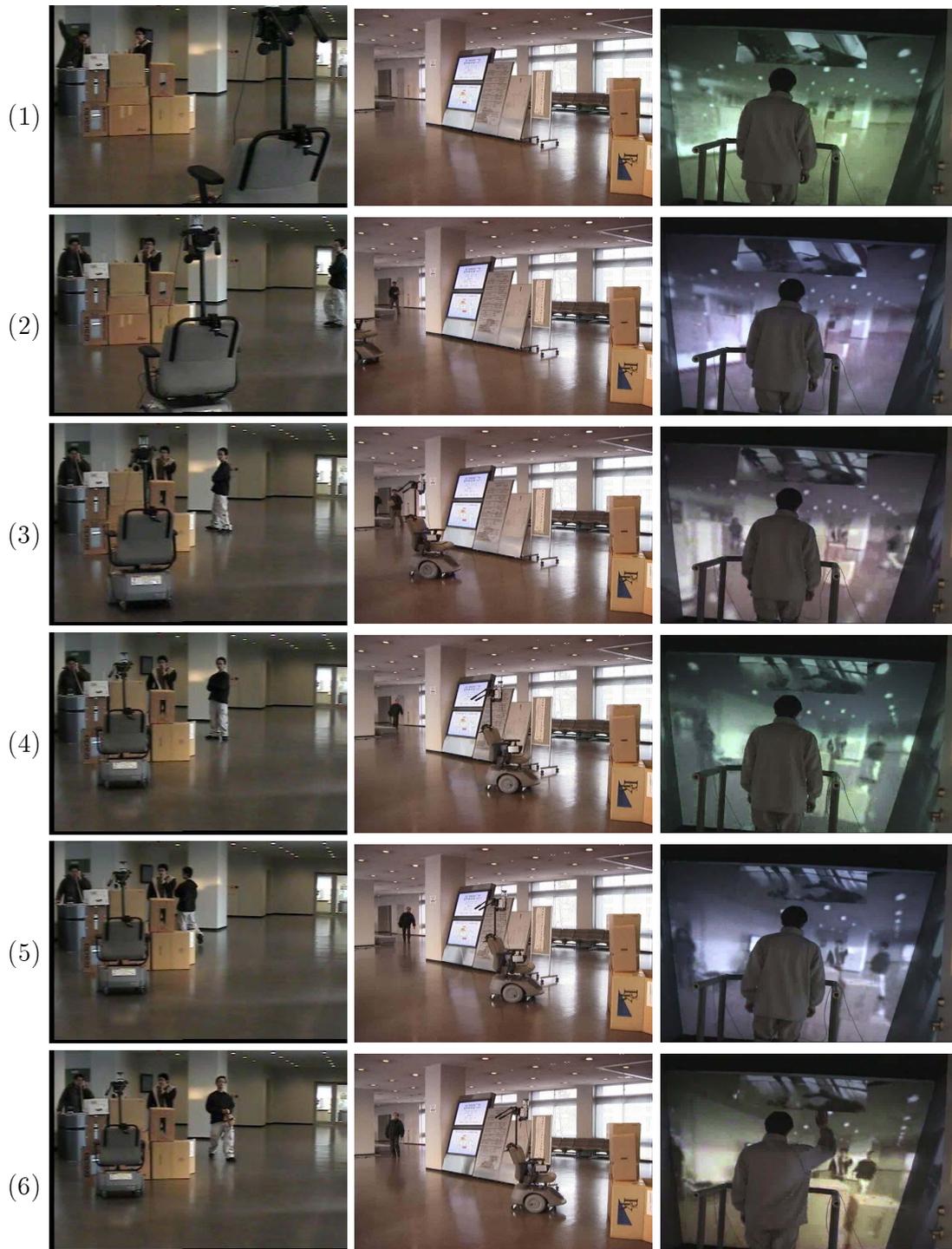
実験はタスク 1，タスク 2，タスク 3 は被験者数は 10 人であり，タスク 4 に関しては被験者数は 9 人である．但し，タスク 3 ではタスク 1，2 を行った被験者 a から j のうち被験者 j が別の被験者 k と入れ替わっており，タスク 4 ではタスク 3 を行った被験者のうちの 9 人が実験を行っている．また，被験者 k を除く 10 人は本システムで遠隔操縦を行うのは初めてである．タスク 4 ではゲームパッドを用いているが，操縦者全員がゲームパッドの経験者であり，内 6 名は熟練者である．

タスク 1 では停止までの時間と停止した移動ロボットから障害物までの距離を，タスク 2，タスク 3，タスク 4 では目標地点到達までの時間と道程を記録した．

3.2.2 実験結果

まず，タスク 1 における結果について述べる．タスク 1 での障害物と移動ロボットが停止した地点までの距離，停止までの時間を表 2 に示す．距離がマイナスの値を取ったものは障害物と衝突後さらに停止まで移動した距離を示している．タスク 1 では操縦における時間，障害物と移動ロボットが停止した地点までの距離に多少のばらつきが見られる．障害物に衝突した被験者も 3 人いた．図 22 にタスク 1 の実験における遠隔操縦の様子を示す．

次にタスク 2 における結果について述べる．タスク 2 での目標地点到達にかかった時間を表 3 に示し，移動ロボットの軌跡を図 23 に示す．タスク 2 では目標地点到達にかかった時間にばらつきはあるものの，軌跡にはさほど大きな差異は見受けられない．図 24 にタスク 2 の実験における遠隔操縦の様子を示す．



移動ロボット側 A

移動ロボット側 B

操縦側

図 22 タスク 1 の実験の様子

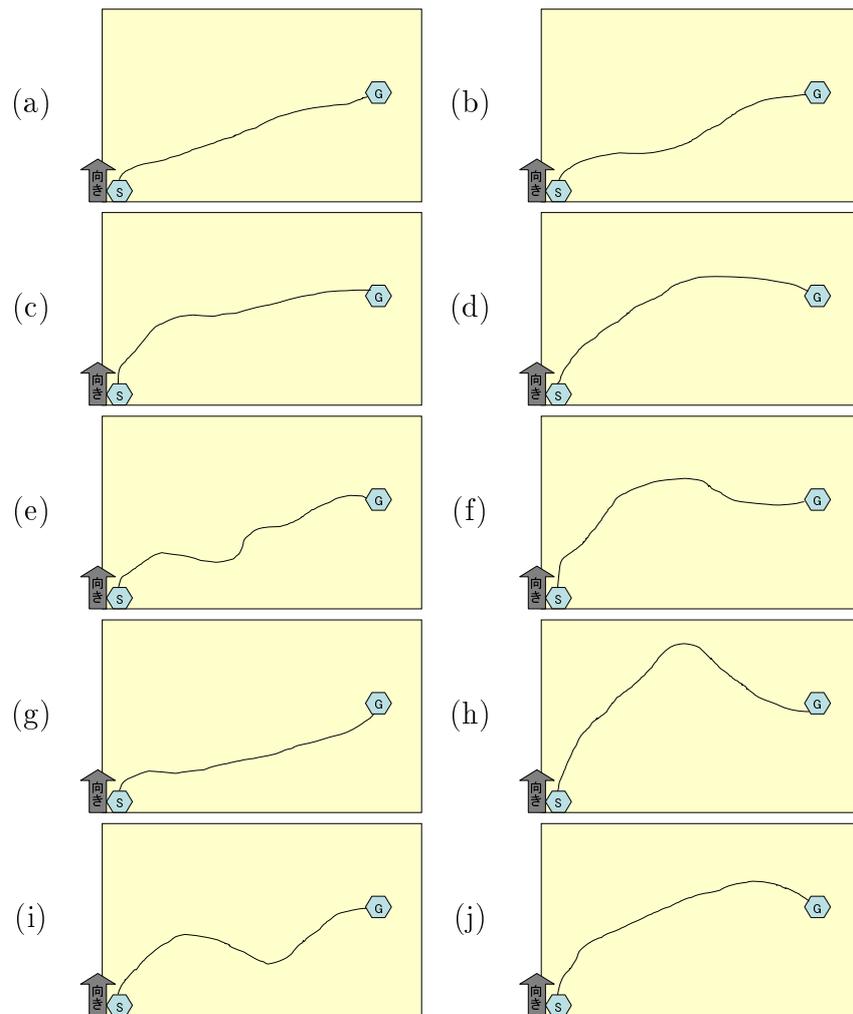
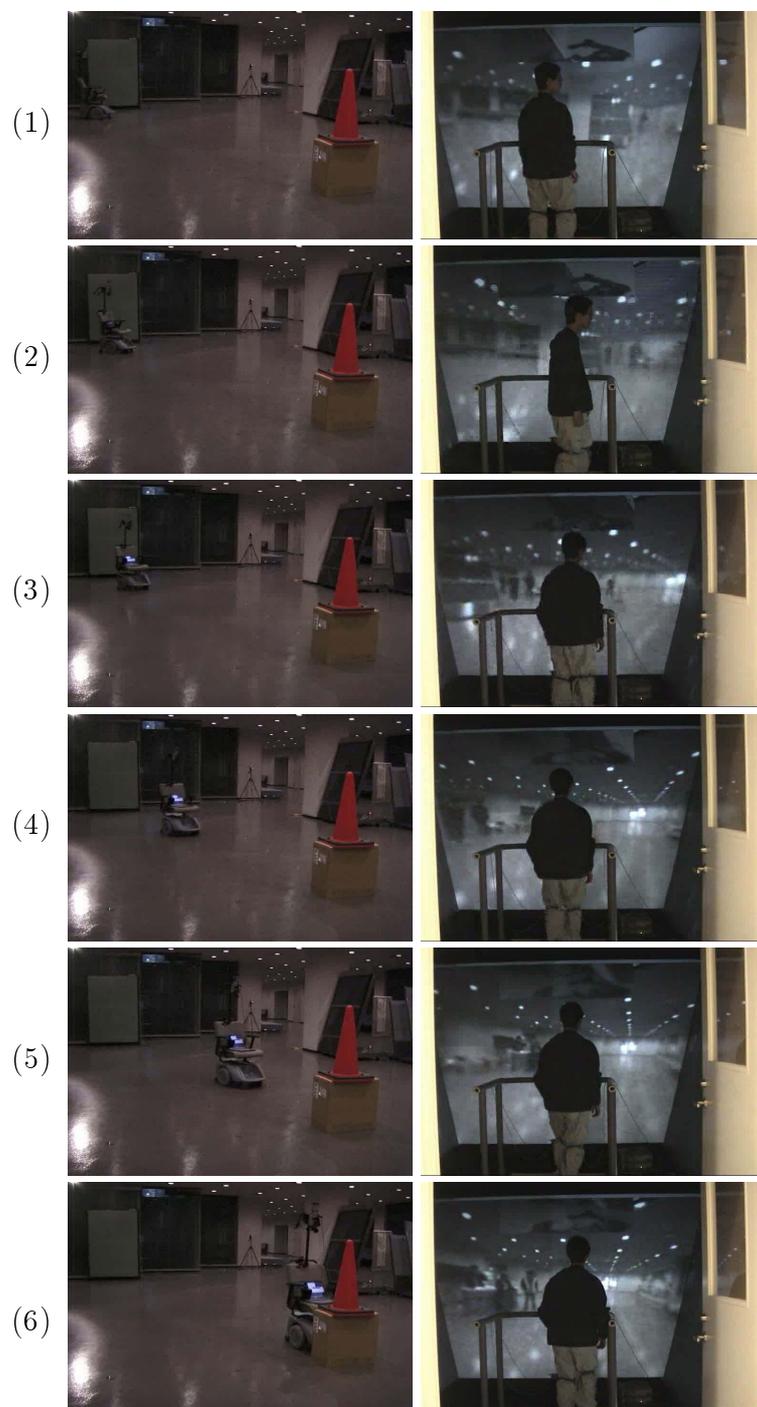


図 23 タスク 2 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡



移動ロボット側

操縦者側

図 24 タスク 2 の実験の様子

表 2 タスク 1 における目標達成時間と停止地点から障害物までの距離

操縦者	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
目標達成時間 (sec)	14	16	12	22	17	12	13	22	15	11
停止地点から障害物 までの距離 (cm)	1	-35	40	-5	70	35	100	-10	10	90

表 3 タスク 2 における目標達成時間

操縦者	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
目標達成時間 (sec)	23	18	22	19	35	42	26	43	26	21

続いてタスク 3 における結果について述べる。タスク 3 での目標地点到達にかかった時間を表 4 に示し、移動ロボットの軌跡を図 25 に示す。目標地点到達にかかった時間および軌跡にばらつきが見受けられる。図 26 にタスク 2 の実験における遠隔操縦の様子を示す。

表 4 タスク 3 における目標達成時間

操縦者	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k
目標達成時間 (sec)	41	93	91	70	130	132	50	50	71	30

さらにタスク 4 における結果について述べる。タスク 4 での目標地点到達にかかった時間を表 5 に示し、移動ロボットの軌跡を図 27 に示す。目標地点到達にかかった時間に関しては全体的に短いですが、障害物をよけきれず衝突しながら進んだ被験者が 6 人いた。図 28 にタスク 4 の実験における遠隔操縦の様子を示す。

最後にアンケート結果について述べる。アンケートでは被験者 11 名の内 10 名が記入した。アンケートは 5 段階でいくつかの設問に答えるものである。5 段階の評価値はそれぞれ、1. そうは思わない-2. あまり思わない-3. どちらでもない-4.

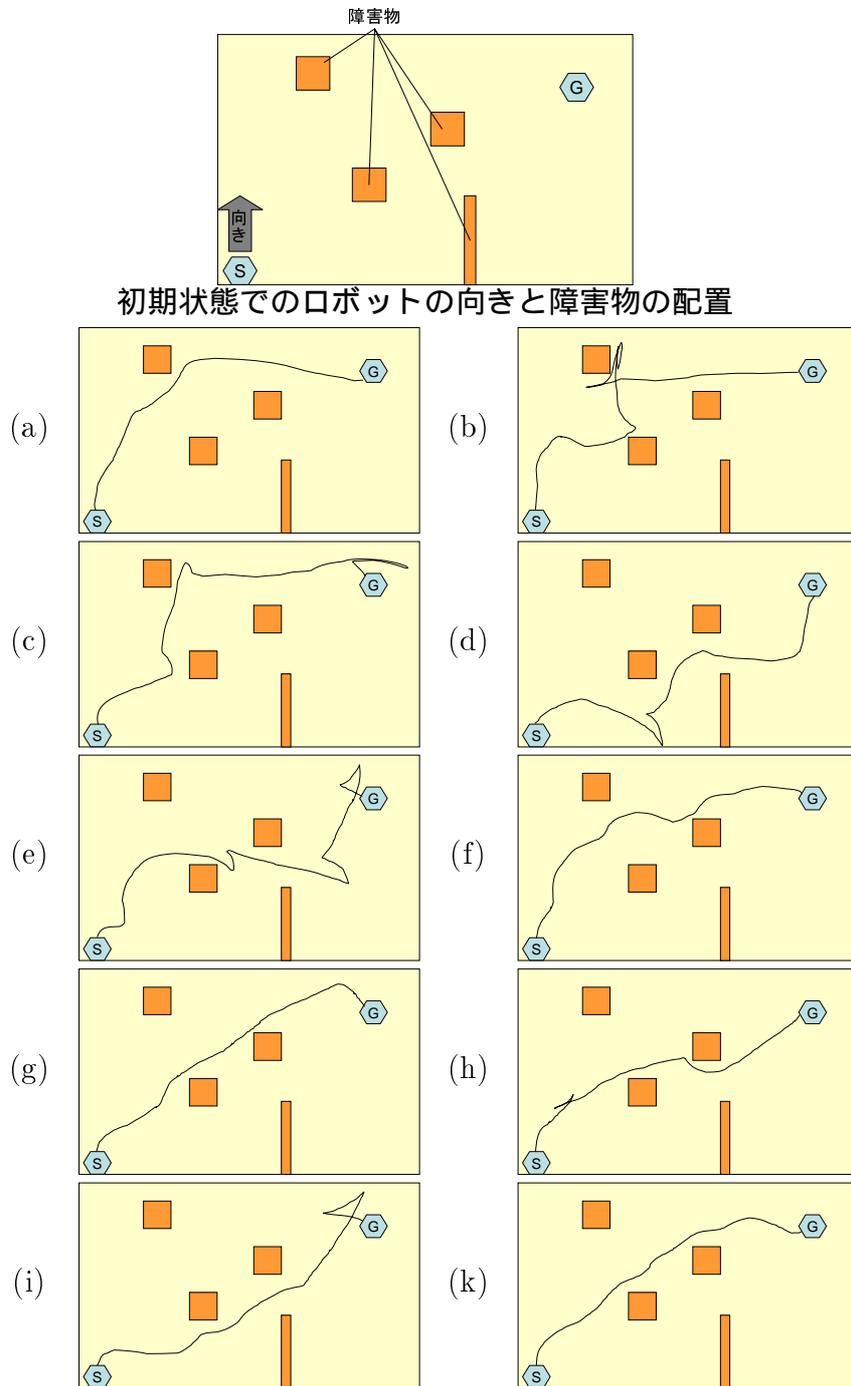
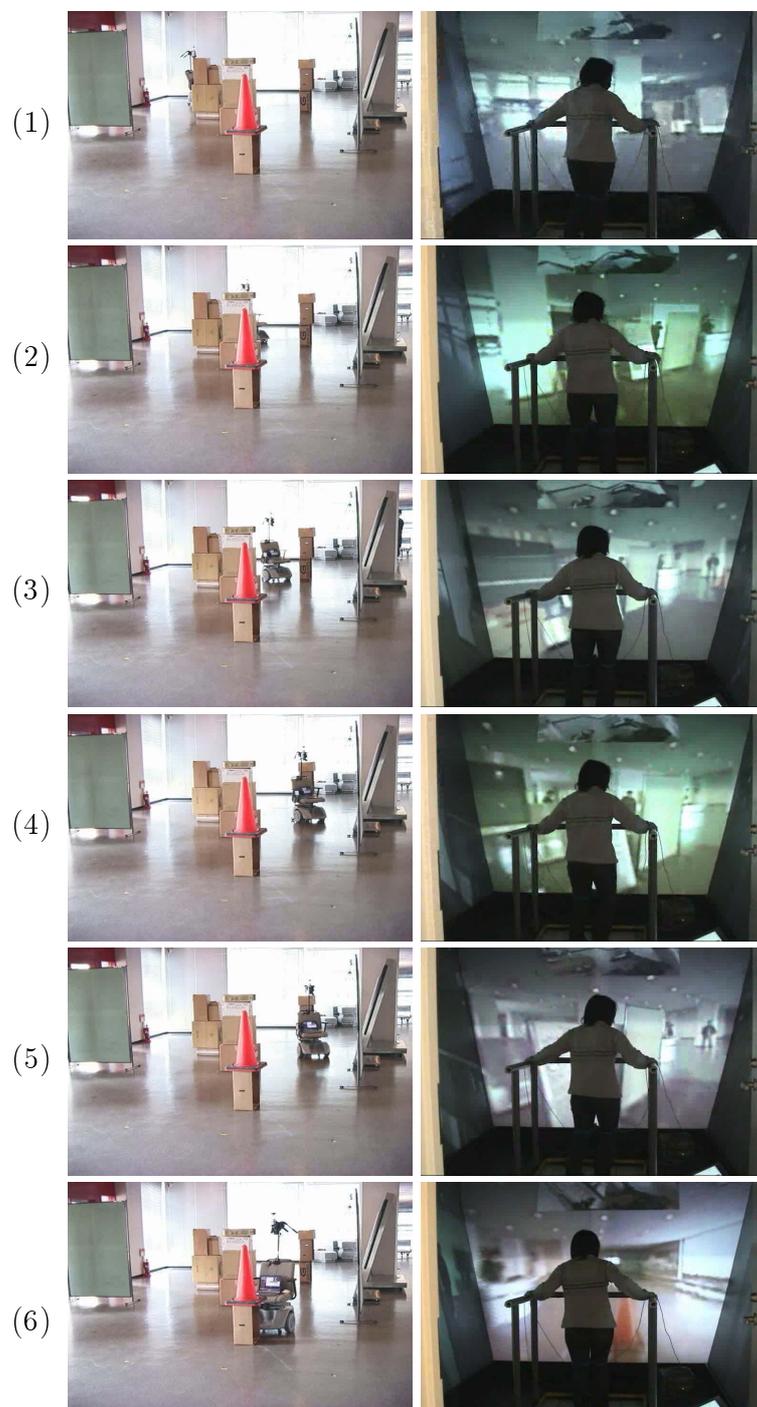


図 25 タスク 3 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡



移動ロボット側

操縦者側

図 26 タスク 3 の実験の様子

表 5 タスク 4 における目標達成時間

操縦者	a	b	d	e	f	g	h	i	k
目標達成時間 (sec)	120	61	31	48	58	33	34	26	32

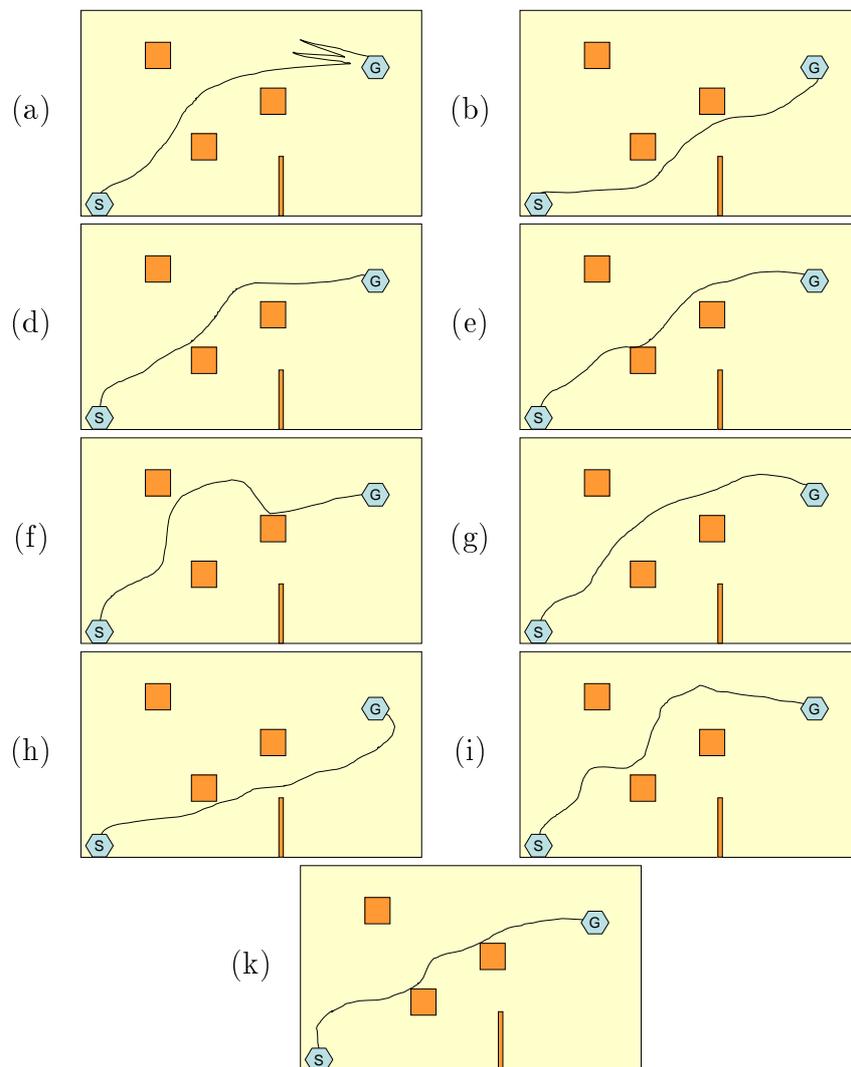
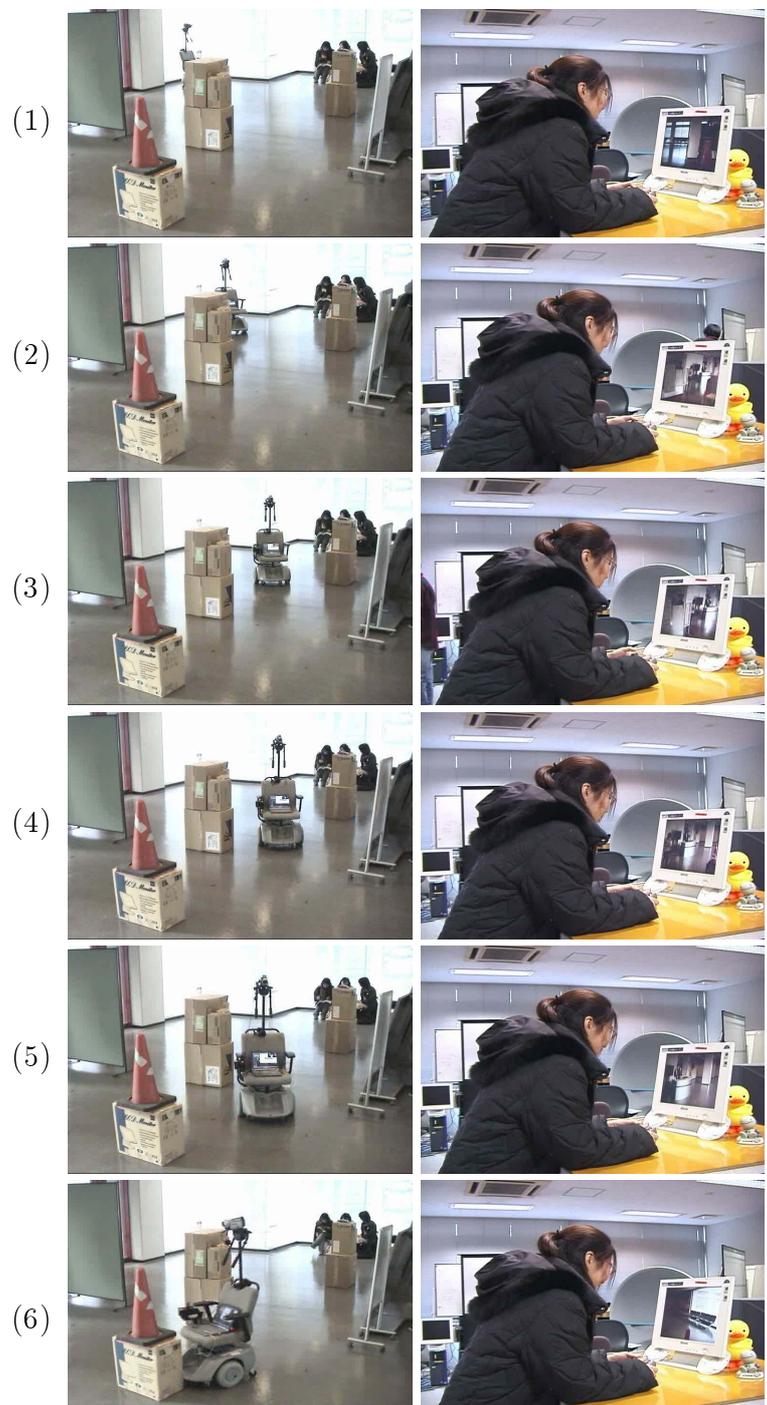


図 27 タスク 4 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡



移動ロボット側

操縦者側

図 28 タスク 4 の実験の様子

多少そう思う-5. そう思う である . 表 6 に結果を示す .

表 6 アンケート結果

設問	仮説	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	平均
1	映像提示にかかる遅延を感じない	2	4	2	2	2	2	3	1	2	2	2.2
2	実際の環境と操縦時の距離感が同じ	2	1	2	1	1	2	2	1	2	3	1.7
3	歩行装置で行う歩行に違和感がない	3	2	2	3	1	3	3	2	3	4	2.6
4	歩行動作による操縦は直感的である	3	2	2	2	1	3	4	4	4	4	2.9

3.2.3 考察

評価実験により得られたデータを基に考察を行う . まずタスク 1 について考察する . タスク 1 では操縦者が操縦を行う際にどの程度本システムでの遅延の影響を受けるかを検証するための実験であるが , 表 2 から分かるように , 1m から -35cm の範囲でばらつきがあった . 遅延の影響が約 2 秒であることを考えると , 時速 2km で走行した場合 , 2 秒で 1m 程度の差が生じるため , 妥当な範囲であるといえる . 目標達成時間にはさほど差はでていないが , やはり時間をかけて操縦した人のほうが遅延時間内に進む距離が少ないためにより結果がでていいることがわかる .

次にタスク 2 について考察する . タスク 2 では , 被験者は回転を伴った前進を行って目標地点に到達する , もしくは回転して目標地点を正面に向けてから前進を行うことにより目標地点に到達することができる . 本実験では多くの被験者が回転を伴いながら前進する方法をとった . これは目標地点までの距離があるため , 走行しながら方向を何度も変化させて正面に目標地点を持ってこることが可能であるからだと考えられる . 事実 , 目標地点を正面にもってくればあとは前進するだけなので簡単であるという意見があった . しかし表 3 に示すように , 遅延により目標地点を正面に持つてくることに苦勞し , 目標達成に時間のかかった被験者もいた .

次にタスク3について考察する。タスク3では障害物を回避するために正確な操縦を行う技術が問われる。表4から分かるように、目標を達成するのに時間のかかった人が見受けられた。これは障害物を避ける段階で切り返しを繰り返し行う、または速度を落として確実に回避したためである。そして多くの被験者は障害物を回避するこのタスクは困難であるといっており、理由として、ロボット周辺環境からのフィードバックが無いこと、映像の解像度が低いこと、距離感が掴み辛いことなどを挙げていたが、やはり一番大きな要因として遅延を挙げていた。

続いてタスク4について考察する。タスク4ではタスク3と同様の環境でゲームパッドと通常のモニタで遠隔操縦を行った。表5に示すように、歩行装置を使った場合に比べて全体的に短い時間で目標地点に到達している。しかしながら、操縦者の内6人は障害物に衝突しながら目標地点に到達しており、歩行装置の時のように慎重に確実に回避を行っていない結果であることが分かる。理由としては、ゲームパッドは操縦者全員が以前使用したことがあり、操作に慣れているためにこのような結果になったと考えられる。また、映像提示部分が移動ロボット前方の情報のみを提示する通常のモニタであったため、死角部分が多く周囲情報の把握が困難であったために障害物に衝突したことに気づきにくかったことも挙げられる。

歩行装置と没入型ディスプレイを用いた遠隔操縦手法と比較して、周囲情報の確認が難しいこと、没入感に乏しいこと、ゲームパッドの十字カーソルを押している時間と進む距離の把握が難しい点が挙げられる。

最後にアンケート結果について考察する。

設問1の結果から映像に歩行動作の影響が及ぶまでの遅延時間が操縦者には大きなものであるといえる。実際映像を見ながら歩行動作を行った際に移動ロボットが現在どこの位置にいるかが分かりにくい。遠隔操縦において遅延は必ず発生するものであるが、歩行装置上で歩行動作を行った情報を直接映像表示用計算機に渡し、移動ロボットの移動量を推測してスクリーン上に現在移動ロボットが存在していると思われる位置にCGの移動ロボットを重畳表示するという方法である程度緩和できると考えられる。

また設問2により実際の環境で距離感と操縦時の距離感は異なるという結論と

なった．これは人間の歩行速度が約 4km/h であるのに対し本システムでは移動ロボットの速度を 2km/h と設定したこと，また映像の解像度が低いことや，歩行装置中央部からスクリーンまでの約 1m 程度の範囲が死角となって移動ロボット近傍の情報が得られないことに起因すると考えられる．

設問 3 では今回提案したシステムにおける歩行装置上での歩行が通常行っている歩行とは異なり多少違和感があるという結論となった．この歩行装置は膝につけたセンサからの情報のみにより定点で連続歩行動作が可能であるという拘束の少ないものであるが，その制御方法による歩行装置の動き自体に戸惑ったのだと考えられる．

次に設問 4 であるが，結果から本システムは現状のままでは直感的であるというには少し問題があるように見受けられるが，これは設問 3 の，歩行装置での歩行に多少違和感が存在しているためであることに起因しているためであると考えられる．

4. おわりに

本研究では歩行動作と没入型投影ディスプレイを用いたネットワークを介した移動ロボットの遠隔操縦システムの構築と動作実験，評価実験について述べた．映像提示では人間の視野角を越える範囲の映像を提示可能な没入型投影ディスプレイを用い，幾何学的に整合性のとれた位置に移動ロボット側の映像をネットワークを介して提示した．歩行動作を用いた操縦面では操縦者の重心位置を磁気センサからの情報を用いて求め，その情報を移動ロボットにネットワーク伝送により与えてロボットを制御した．そして作成したシステムの動作実験と評価実験を行った．実験の結果から本システムはゲームパッドと通常のモニタを用いたシステムと比較して没入感の高いシステムとなっている．また歩行動作を用いているために，分かりやすい操縦が可能となっている．

今後の展望として，より直感的に分かりやすいシステムを作成するために歩行装置を用いた研究 [12][13]などを参考に移動ロボットの遠隔操縦における歩行装置の制御方法などの検討を行うことが必要である．

また，ネットワークによる遅延を考慮し，移動ロボットにセンサ類を装着して移動ロボットがセンサ類の情報から障害物を検出することで，自律的に障害物を回避もしくは障害物手前で停止することや，映像提示において歩行動作によって得られる操縦者の重心位置の変化情報を映像表示用計算機に送り，移動ロボットが現在存在していると思われる位置を推測して，ディスプレイ上にCGで移動ロボットが現在遠隔地でどの位置に存在しているかを表示するなどの，操縦に関する遅延による影響を緩和する方法を用いることにより，より操縦しやすいシステムを作成する必要がある．

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始暖かく御指導，御鞭撻頂いた視覚情報メディア講座 横矢 直和教授に心より感謝申し上げます．

また，副指導教官として御指導，御鞭撻頂いたロボティクス講座 小笠原 司教授，ならびに本研究を進めるにあたり御助言頂いた視覚情報メディア講座 山澤 一誠助教授に厚く御礼申し上げます．

さらに，公私にわたり大変御世話になった視覚情報メディア講座 神原 誠之助手，的確な御助言を頂いた視覚情報メディア講座 佐藤 智和助手に深く感謝致します．

そして，本研究を進める上で数多くの御助言，公私に渡り支えて頂いた視覚情報メディア講座 天目 隆平氏，池田 聖氏に大いに感謝致します．ならびに二年間苦楽を共に過ごしてきた牧田 孝嗣氏，浅井 俊弘氏に感謝致します．また，一年間ではありますが，本研究の指針を立てる上で多くの御助言を頂いた先輩方，研究における実験や機材の手伝いなど，様々な面で支えて頂いた後輩方に感謝の意を表します．さらに，研究室での生活を支えて頂いた視覚情報メディア講座 事務補佐員 守屋智代女史に感謝致します．

最後に，両親をはじめ私の二年間の研究生活に関わった全ての方々に厚く感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 大武 信之, 小川 靖彦, 米沢 義道: “アクセシビリティ向上化システム-視覚障害者のためのコミュニケーション環境-”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79-A, No.2 pp.302-309, 1996.
- [2] テムザック, <http://www.tmsuk.co.jp/>
- [3] 米田 美里, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和: “全方位動画像からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2000-107, Nov. 2000.
- [4] 宅間 信介, 中 健, 星野 由紀子, 加賀美 聡, 稲葉 雅幸, 井上 博允: “ポータブルネットワークロボットの開発とそれ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 講演会講演論文集, pp.2P1-35-047, 2000.
- [5] S. Maeyama, S. Yuta, A. Harada: “Mobile Robots in Art Museum for Remote Appreciation via Internet”, Proceedings of 2002 International Conference on Intelligent Robots and Systems Workshop WS9 “Robots in Exhibitions”, pp.23-28, 2002.
- [6] 峠田 正樹, 山澤 一誠, 横矢 直和: “歩行動作を利用したネットワークを介した移動ロボットの遠隔操縦”, 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集, Vol.3, No.K-016, Sep. 2003.
- [7] 山澤 一誠, 八木 康史, 谷内田 正彦: “移動ロボット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.
- [8] DVcommXP, <http://www.isid.co.jp/DVcommXP/>
- [9] A. Ogawa, K. Kobayashi, O. Nakamura, and J. Murai: “Design and Implementation of DV Stream Over Internet”, Proc. IWS Internet Workshop, No. 99EX385, 1999.

- [10] 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.
- [11] H. Iwata: “Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor”, *Proc. IEEE Virtual Reality '99*, pp.286-293, 1999.
- [12] T.Miyasato: “Tele-Nursing System with Realistic Sensations using Virtual Locomotion Interface”, *ERCIM Workshop*, 2000.
- [13] 中泉 文隆, 矢野 博明, 岩田 洋夫: “没入映像と歩行感覚の統合提示環境の構築”, *電子情報通信学会技術研究報告*, MVE2003-69, Nov. 2003.