

# 歩行装置と没入型ディスプレイを用いた 移動ロボットのネットワーク遠隔操縦

## Remote Control of a Networked Mobile Robot Using a Treadmill and an Immersive Display

峠田 正樹† 山澤 一誠† 横矢 直和†  
Masaki Tawada Kazumasa Yamazawa Naokazu Yokoya

### 1. はじめに

近年、移動ロボットの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、極限環境における作業や、時間的に移動することが困難な遠隔地に代理身体として配置するなど、操縦者の第二身体としての作業、行動を行わせることが挙げられる。

遠隔操縦において最低限必要なものは、遠隔地の周囲の情報と、操縦デバイスである。

従来から遠隔操縦に関する研究は様々行われていた。その中でも特に移動ロボットの遠隔操縦に限り、さらに移動ロボットを直接目視できない状態での遠隔操縦が可能な従来研究をいくつか取り上げる。

・移動操縦にペダルを用いる手法[1]

tmsuk[1]では移動ロボットの頭部に一眼カメラを搭載し、周囲の映像情報を獲得する。データの伝送には PHS 回線を用いて遠隔操縦を行う。移動操縦には専用のペダルを用いている。

・移動操縦にジョイスティックを用いる手法[2]

米田らは移動ロボットの上部に全方位画像センサを設置し、周囲 360° の映像情報を獲得し、ヘッドマウントディスプレイを介して透視投影変換後の映像を操縦者に提示した[2]。この方法では操縦デバイスにジョイスティックを用いている。

・マウスを用いる方法[3]

ポータブルネットワークロボット H3[3]では移動ロボットの頭部にステレオカメラを装備し、Java アプレットで作成されたウインドウ内に映像を表示する。操縦者はその映像を見ながら同じウインドウ内のボタンをマウスクリックすることで遠隔操縦を行う。

このように、移動ロボットの周囲情報としてカメラによる映像情報を、操縦デバイスとしてジョイスティックやペダル、マウスなどが挙げられる。しかし操縦デバイスに着目すると、それらは普段人間が行う動作とは異なるために熟練を要する。

本研究では、操縦デバイスとして歩行装置を用い、歩行動作を検出して操縦することとする。歩行動作は普段我々が行っている動作であるので、これにより操縦者の歩行により移動ロボットが移動するという直感的にわかりやすい操縦が可能となる。映像提示には没入型投影ディスプレイを用い、人間の視野よりも広い角度で映像を提示することにより操縦者に高い臨場感を与える。操縦者は映像を見、歩行することで遠隔地にある移動ロボットを操縦することができる。

次章より構築したシステムを詳細に述べる。

†奈良先端科学技術大学院大学, NAIST

### 2. システムの構成

提案するシステムの概要を図 1 に示す。操縦者は遠隔地に存在する移動ロボットを操縦するために歩行装置上で歩行動作を行う。その情報は歩行装置制御用計算機に送られ、歩行装置を制御すると同時にネットワークを介しその情報を移動ロボット側に伝送する。移動ロボット側では移動ロボット制御用計算機により、その情報をもとに移動ロボットを移動させると同時に、全方位画像センサによって獲得された周囲の映像情報をネットワークを介し操縦者側に伝送する。映像情報は映像受信用計算機から DV デッキを介して映像表示用計算機に送られ、そこで適切な形に変換し、没入型投影ディスプレイに表示する。以上の過程を繰り返すことで移動ロボットの遠隔操縦が可能となる。

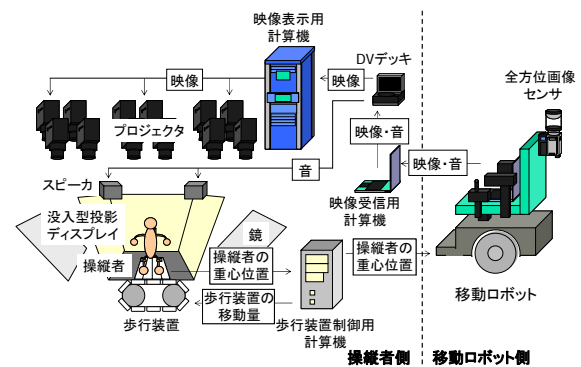


図 1 : システムの概要

本研究で作成したシステムの機器構成を以下に示す。

#### 移動ロボット (ミサワホーム : M-Smart)

移動ロボットの母体としてミサワホーム M-smart を用いた。M-smart は右アームレスト付近にあるジョイスティックによって操縦を行う電動車椅子である。この車椅子を改良して搭載されたジョイスティックからの入力ではなく、ラップトップ PC からのデジタル入力で操縦可能な移動ロボットとした。図 2 に外観を示す。この移動ロボットは前進後退と左右の回転を行うことで平坦な床面上を自由に移動することができる。

#### 全方位画像センサ (HyperOmni Vision)

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、水平より上 30° まで、ロボットの周囲 360° の映像を獲得する。カメラ部にはプログレッシブ撮影が可能な SONY DCR-TRV900 を用いた。この全方位カメラは 1 点中心投影の光学特性を持っており、入力全方位画像を人間への提示に適した平面透視投影画像やパノラマ画像に容易に変換することができる[4]。

**移動ロボット制御用計算機 (SONY : PCG-R505FR-D)**

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 (SOLIDRAY : WalkMaster)**

磁気センサの情報から操縦者の歩行動作を検出する。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**

磁気センサの情報から歩行装置を制御すると同時に、移動ロボット側へ磁気センサの情報を伝送する。

**没入型投影ディスプレイ (SOLIDRAY : VisualValley)**

大型傾斜型 3 面ディスプレイ (図 3) であり、移動ロボットからの映像を表示する。

**映像表示用計算機 (SGI : ONYX3800)**

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。

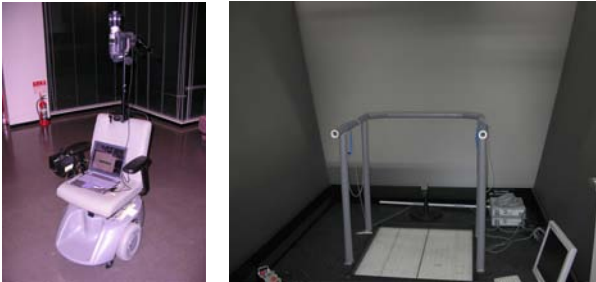


図 2 : 移動ロボット 図 3 : 没入型投影ディスプレイ

**3. 歩行動作の検出**

本システムで用いた歩行装置 WalkMaster は、構成しているベルトが前方後方、左右に移動可能な構造となっている。そのため操縦者は前後左右の 2 次元平面上を自由に歩行が可能である。操縦者は両足の膝に磁気センサを装着し、歩行を行った際の両足の位置情報を磁気センサによって獲得する。その位置情報から仮想的に重心位置を求め、その重心位置を歩行装置の中心に戻すようにベルトを制御する。これにより操縦者は常に定位置で歩行動作を行うことができる[5]。この無限平面上での歩行動作によって得られた仮想的な重心位置はベルトの制御に使用されると同時にネットワークを介して遠隔地にある移動ロボット側に送信される。



図 4 : 全方位画像と 12 個のプロジェクタにより投影されるバックミラー付き画像

**4. ネットワーク伝送処理**

本システムでは映像伝送と操縦命令伝送の大きく分けて 2 つのネットワークによる情報伝送がある。映像伝送は移動ロボット側を送信側、操縦者側を受信側とし、操縦命令では操縦者側を送信側、移動ロボット側を受信側として情報伝送を行っている。本システムでは学内 LAN ネットワークを用いて有線 100Mbps、無線 54Mbps の帯域幅で伝送を行う。

**4.1 映像情報伝送時の処理**

本システムでは映像伝送時に Fatware 社の DVcommXP というソフトウェアを用いて全方位動画像をネットワークを介して伝送する。DVcommXP は Digital Video Transport System (DVTS) [6] を基本ウェアとし、様々な機能を付加したソフトウェアである。DVTS はネットワークを介して伝送できるシステムあり、デジタルビデオデータを約 30Mbps の帯域幅を利用して高品質な動画像(720x480,30fps) を伝送することが可能である。但し本システムでは無線 LAN の実質的な帯域幅の制約を考慮し 10frame/sec で映像伝送を行う。送信側では移動ロボットの上部視点位置に設置された全方位画像センサからの全方位動画像を DVcommXP を用いて送信する。受信側では得られた全方位画像を DV デッキを介して映像を映像表示用計算機に送り、そこで平面透視投影画像を作成し、没入型投影ディスプレイに表示する。

**4.2 作成上の注意**

操縦者が歩行装置上で行った歩行動作は両足の膝に取り付けてある磁気センサによって検出され、その情報は TCP/IP を用いたソケット通信によりネットワークを介して受信側の移動ロボットに搭載された移動ロボット制御用の計算機に伝送される。移動ロボット側では得られた情報をロボットの移動に適切な情報に変換し移動ロボットを制御する。これにより移動ロボットの操縦が可能となる。

移動ロボットは前進後退、左右の回転を行うことで自由に空間を動き回ることができる。そこで操縦者の前進後退を移動ロボットの前進後退に、操縦者の左右への移動を移動ロボットの左右の回転に割り当てる。

**5. 映像提示**

本システムでは映像提示に没入型投影ディスプレイを用いている。この没入型ディスプレイは前方と左右の 3 つのスクリーンからなり、それぞれのスクリーンは傾斜型で平面形状をしている。このスクリーン 1 つに対し映像を投影するプロジェクタは 4 台存在している。4 つのプロジェクタから投影される映像は互いに重なりあう領域が存在するため、

それを考慮した映像提示を行う。まず、移動ロボット側からネットワークを介して伝送されてきた全方位画像を映像表示用計算機において文献[7]の手法を用いてリアルタイムで平面透視投影画像をプロジェクタの数と同数の 12 枚作成する。そしてそれぞれの画像を適切なプロジェクタより没入型投影ディスプレイに表示する。後方の情報も確保するために、さらに 2 枚の平面透視投影画像を作成し、前方のスクリーン上部にバックミラーとして提示する ( 図 4 ) 。

## 6. 移動ロボットの遠隔操縦実験

### 6.1 動作実験

#### 6.1.1 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。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操縦を行う。情報棟一階ロビーとベンチャービジネスラボラト리는 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ない。映像の更新頻度は DVcommXP の設定を変更し 10frame/sec とした。これは映像提示される映像が 10frame/sec 以上であれば妥当とされていることを考慮したためである。図 5、図 6 に実験の様子を示す。

#### 6.1.2 実験の結果と考察

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 1sec 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 1sec 程度であった。この移動開始にかかる遅延はネッ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 0.5msec 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。現状では操縦者はある程度空間を映像から把握し、この遅延を考慮した操縦が必要であると考える。

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速度を早くす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。



図 5：移動ロボット側の実験風景

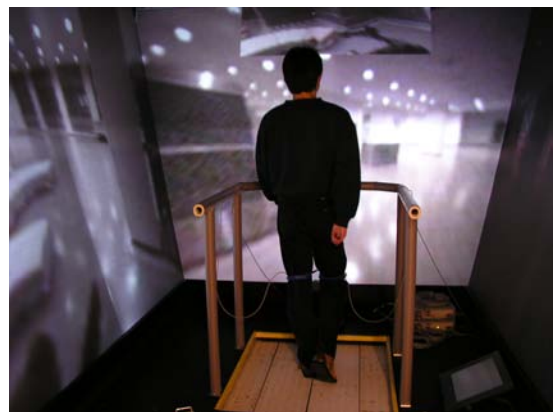


図 6：操縦者側の実験風景

## 6.2 評価実験

### 6.2.1 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した。

#### タスク 1：前方にある障害物手前で停止する実験

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

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 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、障害物を回避する必要があるため、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。

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 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。

## 6.2.2 実験の結果と考察

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 1 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。結果には 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ることがわかる。

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 1 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かった。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つてくることが可能であるからだと考えられる。

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 1 に示し, 移動ロボットの軌跡を図 7 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。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 1 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。

## 7. まとめ

本稿では歩行動作と没入型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を提案し, 実際に作成したシステムの動作実験を行った。

今後の展望として, 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自律的に障害物を回避もしくは手前で静止する, 映像提示側には CG で歩行動作によって移動ロボットが現在存在していると思われる位置を表示することなどが挙げられる。

## 参考文献

- [1] tmsuk, <http://www.tmsuk.co.jp>
- [2] 米田, 山澤, 竹村, 横矢, “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,” 信学技報, PRMU2000-107, Nov.2000.
- [3] 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.
- [4] 山澤, 八木, 谷内田, “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.
- [5] H. Iwata, “Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor,” Proc. IEEE Virtual Reality '99, pp.286-293, 1999.
- [6] A. Ogawa, K. Kobayashi, O. Nakamura, and J. Murai, “Design and Implementation of DV Stream Over Internet,” Proc. IWS Internet Workshop, No. 99EX385, 1999.
- [7] 山澤, 尾上, 横矢, 竹村, “全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス,” 信学論, Vol. J81-D-II, No.5, pp.880-887, 1998.

表 1: タスク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

タスク	操縦者	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	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	-
2	目標達成時間(sec)	23	18	22	19	35	42	26	43	26	21	-
3	目標達成時間(sec)	41	93	91	70	130	132	50	50	71	-	30

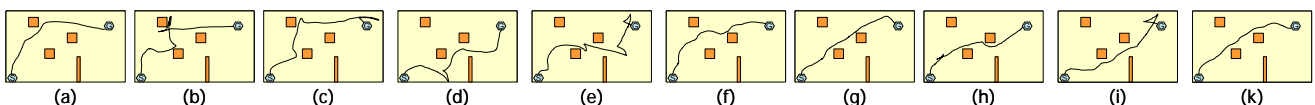


図 7: タスク 3 の遠隔操縦実験における移動ロボットの軌跡