

3次元画像表示を用いた遠隔操作システム

内田 晃司, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

Tele-manipulation system using stereoscopic 3-D imaging systems

Koji UCHIDA and Kunio SAKAMOTO

*Department of Mathematics and Computer Science,
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Abstract

A remote control system is required to control effectively and to be used easily. Since traditional remote operating system is constituted of a manipulation board and a 2-D monitor, it is hard for human operator to control the operating tasks effectively. And so the authors propose a manipulation system using a 3-D display. The trial system consists of a 3-D information display system and tele-operating system of the robot arms. In this system, an operator perceives 3-D information using an additional 3-D display and so it is easy to control the robot arms with merit that traditional operating systems have no need to remodel.

1. ま え が き

近年, バーチャルリアリティ(仮想現実感)の研究が盛んになり, 医療, 教育, CAD/CAM など様々な分野へ, 3次元画像技術が応用されるようになってきた. これら各分野への応用を視野にいれて, 様々な方式の3次元画像表示装置が提案されている. これらの表示装置のうち, メガネを必要とする表示装置はメガネを着用するという煩わしさを伴うが, 容易に大画面表示を行うことができ, 観察者は没入感や臨場感を伴った立体像を観察することができるため多くのバーチャルリアリティシステムで採用されている. このようなメガネ型の立体表示装置は, 両眼視差を利用した2眼立体視が一般的であり, 様々な方式が提案されている¹⁾. 従来は, プロジェクタとスクリーンを組み合わせて大画面表示を行い, 観察者は液晶シャッタなどを備えた特殊なメガネを着用することにより, 立体視を行うものが一般的であったが, 近年では, 表示デバイスやレンズ光学系などの小型, 軽量化により, 表示系をメガネ部分に組み込んだ立体ヘッドマウントディスプレイ(HMD)装置の開発や応用研究が主流になってきている.

現在のバーチャルリアリティのシステムでは, 観察者の両眼に表示系を用意することにより, 両眼立体視を利用した立体像の表示を行う立体HMD装置を仮想世界の環境提示に, さらにレンズ光学系にシースルーの機構を

組み込んだシースルー型の立体HMD装置を用いて, 仮想世界と実世界を融合した環境の提示を行っている. このような立体HMD装置を使用して, 遠隔操作システムに用いるコンピュータなどの制御用端末に表示される情報に加えて, 3次元画像による制御情報などを実空間へ融合して表示を行うようなシステムの構築には, 次のような方法が考えられる.

- (1) シースルーの機能を備えた立体HMD装置を用いて, 実空間に存在する制御用端末に表示される情報と仮想空間上に表示された3次元画像による制御情報の融合表示を行う.
- (2) 実空間に存在する制御用端末に表示される必要な情報のみを, 立体HMD装置を使用して表示できるようにコンピュータなどを用いて加工処理を行い, 3次元画像による制御情報に加えて仮想空間上に表示を行う.

後者の手法は, 遠隔操作システムとして理想的なものであるが, 新規の制御システムを導入する必要が伴うため, 既存システムの資産を有効に利用するには, 前者の手法を用いるのが望ましい. このシースルー機能の実現方法としては, 仮想空間の映像を実空間へ容易に合成する手法として, ハーフミラーなどの映像融合素子を用いて仮想空間上に表示された画像を実空間に合成して表示を行う方法が考えられる. しかし, 従来の両眼立体視による立体表示法を採用したシースルー型立体HMD装置を利

用した場合、立体視において焦点調節と輻輳が一致しないために、観察者（遠隔操作システムにおいては操作者）が長時間観察（あるいは作業）を行った場合、遠隔操作に立体表示を利用すると疲労が伴うことが問題となり、制御用端末の操作性を損なう恐れがあった。このような問題を解決するため、筆者らは両眼立体視において単眼での焦点調節が可能な単眼ステレオ立体視を利用することにより、3次元空間情報の表示を行うヘッドマウント型の立体情報ディスプレイ装置を実現するため、単眼ステレオ立体視方式による立体映像表示システムの試作を行ってきた²⁾。この表示装置では、観察者の単眼内に2眼の視差を作り出すことが可能なため、両眼に用いて両眼立体視を行った場合、単眼での焦点調節が可能になり、自然な3次元画像表示に必要な両眼視差、焦点調節、輻輳の条件を満たした立体表示を行うことができる。長時間の使用による疲労がなくなるため、制御システムの操作性を損なうことなく3次元画像を用いた制御情報の提示を行うシステムの構築が可能となる。そこで、先に提案した単眼ステレオ立体視方式3次元画像表示システムを用いて遠隔操作システムの構築を行ったので報告する。

本論文の構成は次の通りである。まず、第2章において、単眼ステレオ立体視と単眼立体像入出力装置について簡単に説明し、第3章において、光ファイバを用いた波長多重光通信による3次元画像伝送について述べ、第4章では、単眼ステレオ立体視方式3次元画像表示システムを用いた遠隔操作システムの試作について述べる。

2. 単眼ステレオ方式3次元画像表示システム

本章では、単眼ステレオ立体視の原理と、単眼ステレオ立体視方式により立体像表示を行う単眼立体像入出力装置について述べる。

2.1 単眼ステレオ方式による立体像表示

図1は、ステレオグラムを利用した立体像表示の原理を示したものである。図1(a)は両眼視差を利用した通常のステレオグラムの原理を示したもので、空間上に像点 P を表示する場合、左眼から見た視差像 P_L と右眼から見た視差像 P_R を表示面に表示することにより、観察者は空間上に像点 P があるように知覚することができる。一方、単眼ステレオ方式では図1(b)に示すように空間上に像点 P を表示するため、単眼で複数の視差像 P_{R1} 、 P_{R2} を観察する。この場合、観察者は複数の視差像が重ね合わさった網膜上の光量分布を映像として知覚することになるが、眼球の焦点調節を空間上の像点位置 P にあわせた場合に、網膜上に投影される像は最も自然な状態となる。このため、この焦点調節が整合した生理的に自然な状態で、安定して立体像の観察を行うことができる³⁾。

2.2 単眼ステレオ立体像表示装置

単眼ステレオ立体視の原理を用いた立体像表示装置で

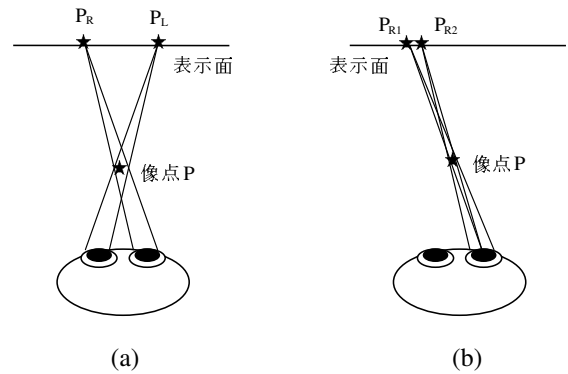


図1 ステレオグラムによる立体視の原理

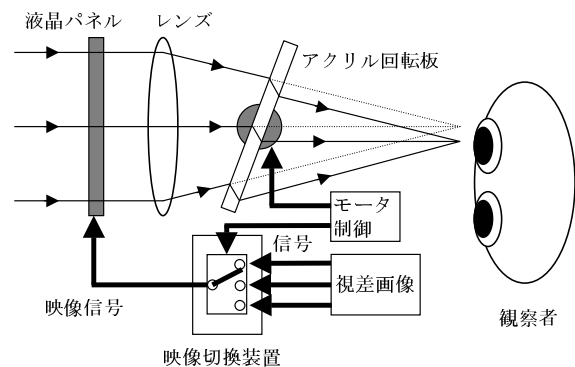


図2 単眼ステレオ方式立体像表示装置の基本構成

は、図2に示すように表示面に液晶パネルを利用して複数の視差像を提示し、観察者が単眼で複数の視差を知覚できる立体像の表示を行う。図2は、単眼ステレオ方式による立体像表示装置の基本原理を示したもので、表示装置は、視差像の表示に用いる液晶パネルのほか、視差映像のシフトに用いるアクリル板、光学レンズなどから構成されている。レンズの収斂作用により瞳に入射する光束が生成されるため、液晶パネルに表示された視差画像はレンズの焦点位置でのみ観察することができる。本装置では、このような視差画像に適した視差を観察者に与えるため、アクリル板による光の屈折作用を利用して、視差（観察位置のずれ）を生じさせている。小型軽量なアクリル板を傾けて配置した光軸シフト光学系を用いて適切な視差が与えられた視差画像を、観察者が単眼で複数同時に観察することにより、焦点調節の整合した立体像を知覚することができる。

試作した表示装置では、視差画像の表示に用いる液晶パネルとして市販の入手可能なものを利用するため、立体像はモノクロ表示とした。また、光軸シフト光学系からの制御信号を基に、映像切換回路を用いて複数の視差画像を時分割表示することにより、単眼ステレオ方式による立体像表示を実現している。

本論文で述べる遠隔操作システムにおいては、本節で述べた単眼ステレオ立体像表示装置を、左眼、右眼のそれぞれに使用して、次節で述べる単眼ステレオ画像入力

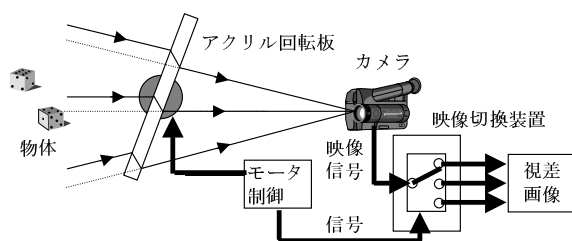


図3 単眼視差画像入力装置の基本構成

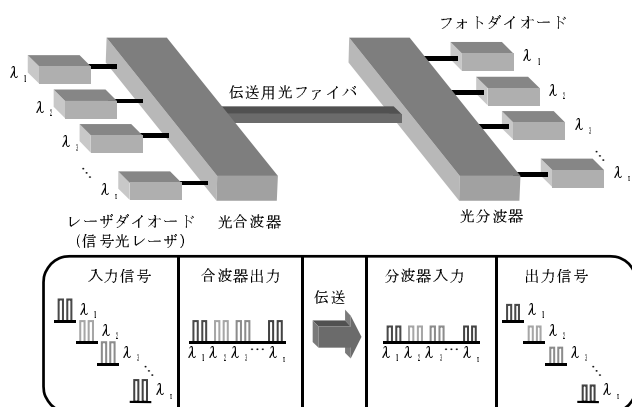


図4 波長多重伝送方式

カメラからの視差画像の表示を行うことにより、遠隔地の作業空間の3次元情報表示を行っている。

2.3 単眼ステレオ画像入力カメラ

単眼ステレオ方式の立体表示装置に用いる視差画像の撮影を行うには、カメラの間隔を単眼視差の間隔に等しくなるように配置する必要がある。しかし、一般には市販の画像入力カメラを瞳孔径(5mm)以下の間隔で複数配置することは困難であるため、時間的にカメラ位置を変更する必要がある。そこで、単眼内に生じる視差の間隔で視差画像の撮影を行うため、アクリル板による光の屈折作用を利用し、撮影位置のずれを生じさせる。試作した装置では、単眼ステレオ立体像表示装置で用いた光軸シフト光学系を利用して時間的にカメラ位置を変更することと等価な状態で複数の画像を撮影し、単眼立体視に必要な単眼視差画像のカメラ入力を行っている。図3は、この単眼視差画像入力カメラの基本原理を示したもので、単眼視差画像入力カメラ装置は、視差画像の撮影に用いる画像カメラのほか、光軸のシフトに用いるアクリル板などから構成されている。また、視差画像の撮影に用いる入力カメラとして市販の入手可能な画像カメラを利用するため撮影された映像はフルカラーであるが、単眼ステレオ立体像表示装置で表示できる立体像はモノクロであるため、時分割で撮影された複数の視差画像は、画像シフト光学系からの制御信号を基に、映像切換回路を用いてモノクロの視差画像として出力を行っている⁴⁾。

本論文で述べる遠隔操作システムにおいては、本節で述べた単眼ステレオ画像入力カメラを二組使用して、

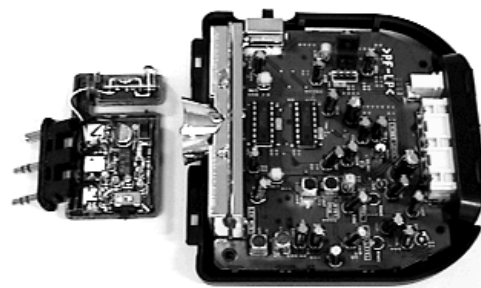


図5 E/O および O/E コンバータの外観

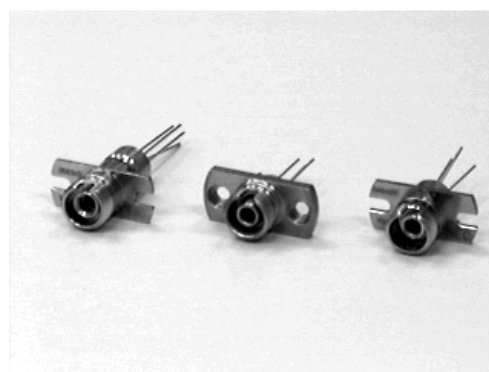


図6 半導体光素子モジュールの外観

それぞれ左眼用、右眼用の単眼視差画像の取得を行っている。

3. 波長多重光通信を利用した3次元画像伝送

本章では、1本の光ファイバの中に多数の波長の異なる光信号を伝送することにより、従来の光ファイバ網を利用して大容量化・高速化を行うことができる波長多重伝送技術と、波長多重光通信を利用した3次元画像伝送について述べる。

3.1 波長多重伝送技術

図4に示すように波長多重伝送方式は、波長の異なる複数の光信号を1本の光ファイバを用いて伝送する方式であり、すでに1.3 μm 帯や1.55 μm 帯での光通信が実用化されている。波長多重は波長軸上に多重化して大容量伝送を実現するため、波長の数に比例して伝送データの大容量化が可能となり、広い波長域にわたる光ファイバの低損失性を有効に利用して、従来の光ファイバ網の大容量化・高速化を容易に行うことができる。

当初、マルチモードファイバで0.85 μm 帯や1.3 μm 帯での波長多重伝送や、シングルモードファイバで1.3 μm 帯と1.55 μm 帯での波長多重伝送が実用化されたが、信号光の波長間隔が広いと波長多重度は2波長から4波長程度と少なかった。しかし、近年では半導体レーザなどの光部品類の発展により波長多重度は増し、信号光の波長間隔も狭いシステムが実用化されるようになった

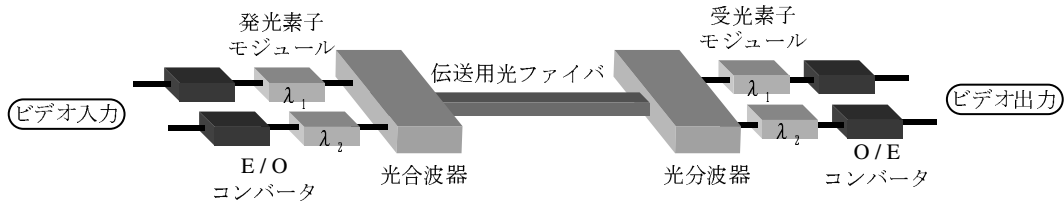


図 7 波長多重光通信による画像伝送

表 1 E/O および O/E コンバータの仕様

	送信機	受信機
基板型式	SONY IFV-FX1	SONY IFT-R20
半導体素子モジュール	NEC OD-8340 レーザダイオード (LD)	NEC OD-8465 InGaAs-PIN- フォトダイオード
光信号波長	1310nm	
適合光ファイバ	石英系グレーデッドインデックス型	
適合光コネクタ	JIS F01(FC) 形	
入出力映像信号	NTSC コンポジット信号 1.0V _{P-P} 75Ω 不平衡	
チャンネル数	1 チャンネル	

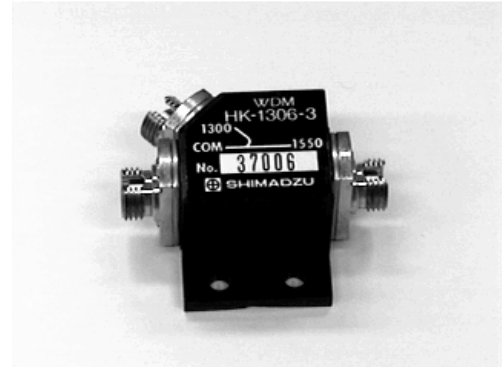


図 8 光合波分波器の外観

め、情報通信の急速な需要の拡大に伴い、波長多重伝送方式が広く導入されるようになってきており、多チャンネルの信号伝送が必要な 3 次元画像伝送にも、充分利用することが可能な環境が整ってきている。

3.2 ビデオ信号の光ファイバリンク

一般に、ビデオカメラやモニタなどの映像機器の入出力信号は電気信号であるため、光ファイバを伝送路として映像信号の伝送を行うためには、送信側で電気信号から光信号への変換を、受信側で光信号から電気信号への変換を行う必要がある。光信号を利用して映像の送受信を行う装置として、家庭用の AV 機器間の接続を自由空間光通信で行う装置が、赤外線ワイヤレス伝送装置として市販されている。ビデオ信号の光ファイバリンクを行うために、図 5* に示すような市販の赤外線ワイヤレス伝送装置の回路基板を利用して、映像の送信および受信側で用いる電気 / 光信号変換装置 (E/O コンバータ) と光 / 電気信号変換装置 (O/E コンバータ) の試作を行った。1.3 μm 帯を利用した光ファイバリンクに用いる E/O コンバータおよび O/E コンバータの試作機の仕様を表 1 に示す。

試作した E/O コンバータおよび O/E コンバータでは、光ファイバを使用して信号伝送が可能なように、容易に入手が可能な光ファイバを接続するコネクタ付の発光素子および受光素子モジュールを光通信に用いる半導体光素子として使用した。これら発光・受光素子モジュールの外観を図 6** に示す。波長多重光通信により映像信号

の 2 チャンネル伝送を行うために、1.3 μm 帯を利用したコンバータ以外に、ワイヤレス伝送装置の送信側および受信側の半導体光素子を 1.55 μm 帯発光・受光素子モジュールに交換して、1.55 μm 帯を利用した光ファイバリンクに用いるコンバータを同様に試作した。

本論文で述べる遠隔操作システムでは、容易に入手が可能な 1.3 μm 帯と 1.55 μm 帯を利用した波長多重伝送システムを利用して画像情報の伝送を行っているが、これについては次節で述べる。

3.3 波長多重光通信による画像伝送

3 次元画像表示システムを用いた遠隔操作システムにおいて、遠隔地に設置された 3 次元画像カメラからの映像信号の伝送には 2 チャンネルの NTSC 映像信号伝送路が必要になるため、図 7 に示すような波長多重伝送システムを利用して 1 本の伝送路により画像情報の伝送を行う。この波長多重伝送システムでは、送信側と受信側の接続には光ファイバを用いるため、前節で述べた 1.3 μm 帯と 1.55 μm 帯を利用したビデオ信号光ファイバリンクを映像信号の伝送に使用した。1.3 μm 帯と 1.55 μm 帯を使用した映像光信号を 1 本の光ファイバ伝送路により伝送を行うため、1.3 μm 帯および 1.55 μm 帯の光信号の合波・分波には、図 8 に示すような光合波分波器を用いた。この光合波分波器は、光信号の合波・分波の両方に用いることができるタイプで、その仕様を表 2 に示す。これら光合波分波器間および各コンバータ (発光素子および受光素子モジュール) と光合波分波器間の光リンクには、伝送用光ファイバ (石英系グレーデッドインデックス型ファイバ) をそれぞれ使用した。

* 図 5 の左側が赤外線ワイヤレス伝送装置の送信側の回路基板、右側の回路基板は受信側基板である。

** 図 6 の左側より、1.3 μm 帯および 1.55 μm 帯発光素子モジュール、右側のモジュールは両波長に受光感度を持つ受光素子モジュールである。各モジュールは、JIS F01(FC) 形光コネクタが接続可能なレセプタクルタイプとなっている。

表 2 光合波分波器の仕様

型式	SHIMADZU HK-1306
使用波長	1300 / 1550nm
挿入損失	LED 使用時 3.5dB 以下 LD 使用時 2.5dB 以下
アイソレーション	LED 使用時 28dB 以上 LD 使用時 45dB 以上

表 3 アームロボットの仕様

制御方式	5 関節 5 モータ制御
可動範囲	ベースの旋回:350° 肩の曲がり:120° ひじの曲がり:135° 手首の回転:340° 指の開閉:0~50mm
機体寸法	最大旋回半径 360mm 最大高 510mm 基台部 180(W) × 180(D)mm

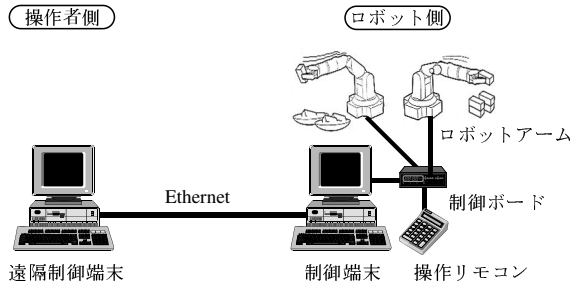


図 9 アームロボットの遠隔操作システム

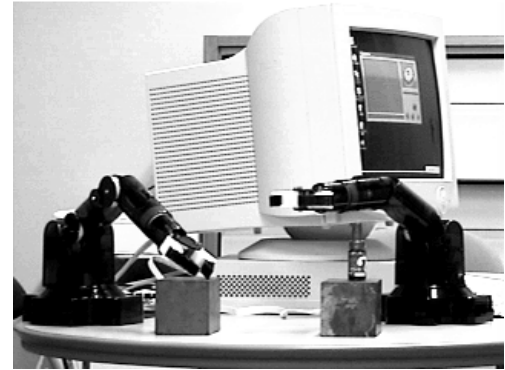


図 10 アームロボット側システムの外観

4. 3次元映像を用いた遠隔操作システム

本章では、単眼ステレオ立体視方式 3次元映像システムを用いたアームロボットの遠隔操作システムの試作について述べる。

4.1 アームロボットの遠隔操作システム

遠隔操作システムで使用するアームロボットとして、市販の 5 関節制御方式のものを利用した。このアームロボットは、図 9 に示すようにアームロボットに接続されたりモコンを利用して直接操作を行う以外に、コンピュータの RS232C 通信ポート（COM ポート）に接続された制御ボードを介して、マウス等を利用した直接操作やプログラム制御が可能構成になっている。このアームロボットの遠隔操作を実現するために、遠隔地の操作者側にもコンピュータ制御端末を準備し、操作者側とロボット側のコンピュータ間を Ethernet により接続を行った。操作者側とロボット側のコンピュータ間で TCP/IP プロトコルを用いた COM ポートの共有サービスを実現し、ロボット側のコンピュータを COM ポートのサーバ、操作者側のコンピュータをクライアントとすることにより、操作者側からもネットワークを介して、ロボット側のコンピュータの COM ポートに接続されたアームロボットの制御ボードを利用できるようにした。このように COM ポートの共有サービスを行うことにより、ロボット側のコンピュータ上で使用していたロボット制御用のプログラムを、操作者側のコンピュータでも修正することなく利用することができ、容易に遠隔操作システムを構築することができる。この遠隔操作システムで使用するアームロボットの仕様を表 3 に、ロボット側のシステムの外観を図 10 に示す。

4.2 3次元映像システムを用いた遠隔操作

図 11 に 3次元映像を用いた遠隔操作システムの構成図を示す。前節で述べた Ethernet を用いたアームロボッ

トの遠隔操作システムに、ロボット側に設置された 3次元画像カメラからの映像信号を操作者側に伝送するシステムを組み合わせることにより、図 11 のようなシステムを構築することができる。この遠隔操作システムにおいては、従来から用いられているカメラ画像による映像情報を提示する代わりに、先に提案した単眼ステレオ立体像表示装置を用いた立体情報ディスプレイ装置および単眼ステレオ画像入力カメラを用いて構築した 3次元画像表示システムを利用して、3次元画像を用いた制御情報の提示を行っている。3次元画像表示システムでは、3視差のモノクロ視差画像を伝送し表示を行っているため、NTSC 映像信号を 2チャンネル使用して 3次元画像の伝送を行う。そこで、3章で述べた波長多重伝送技術を用いて、左右両眼 3次元画像表示用の単眼 3視差モノクロ視差画像の伝送を 1.3 μ m 帯と 1.55 μ m 帯を利用した光通信により行っている。表 4 に、この光通信による NTSC 映像信号のチャンネル利用状態を示す。合波器により合波された映像信号は操作者側の光分波器により分波され、左眼、右眼それぞれの立体情報ディスプレイ装置に NTSC 映像信号として入力される。立体情報ディスプレイ装置に入力された NTSC 映像信号は、画像入力カメラから出力された 3次元画像信号として処理され、3視差のモノクロ視差画像による立体像の表示を行い、遠隔操作システムにおいて 3次元画像を用いた制御情報表示を実現している。

5. む す び

本論文では、3次元映像を用いた遠隔操作システムの構築について述べた。先に提案した単眼ステレオ立体表

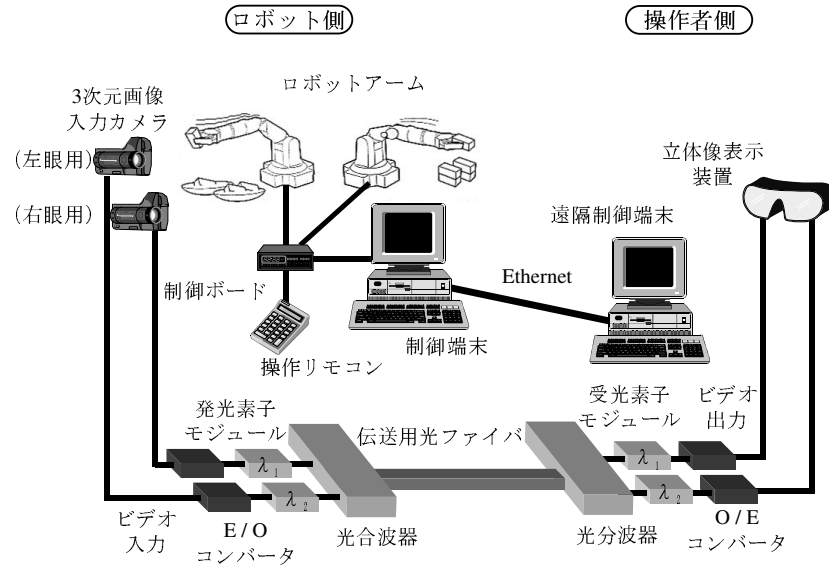


図 11 3次元映像を用いた遠隔操作システムの構成

表 4 NTSC 映像信号のチャンネル構成

NTSC チャンネル 1 (左眼用)	モノクロ視差画像信号 1 (R 成分)
	モノクロ視差画像信号 2 (G 成分)
	モノクロ視差画像信号 3 (B 成分)
NTSC チャンネル 2 (右眼用)	モノクロ視差画像信号 1 (R 成分)
	モノクロ視差画像信号 2 (G 成分)
	モノクロ視差画像信号 3 (B 成分)

〔参考文献〕

- 1) 大越孝敬：“三次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 阪本，猿田，武田：“単眼ステレオ立体視ディスプレイの試作”，映情学誌，54，3，pp. 388-393（2000）
- 3) 梶木，吉川，本田：“集束化光源列（FLA）による超多眼式立体ディスプレイ”，3次元画像コンファレンス'96 講演論文集，pp. 108-113（1996）
- 4) 阪本，猿田，武田：“単眼ステレオ立体視方式 3次元画像カメラシステム”，2000 信学ソ大（情報・システム），D-11-76（2000）

示装置を用いた立体情報ディスプレイ装置および実物体の立体映像の入力を行う単眼ステレオ立体視方式 3次元カメラシステムで構成される単眼ステレオ立体視方式 3次元画像表示システムを利用することにより，従来のビデオ映像の代わりに，3次元映像を用いた制御情報の提示を行う機能を遠隔操作システムに加えることができた．また，3次元映像は単眼ステレオ立体表示装置を両眼に使用して提示されるため，焦点調節と輻輳が矛盾することなく 3次元映像を用いた制御情報が表示され，従来の両眼視差方式の立体 HMD 装置のように長時間の使用で疲労が伴うという問題が改善され，遠隔操作システムの操作性を損なわずに 3次元映像を用いた制御情報の提示を，立体情報ディスプレイにより実現することができた．なお，試作した立体情報ディスプレイ装置をヘッドマウント型ディスプレイとして使用するためには，今後更なる小型・軽量化が求められるため，単眼ステレオ立体表示装置の最適設計を検討する必要があると考えている．また，本論文で述べた遠隔操作システムの画像情報の伝送には，光ファイバによる波長多重伝送技術を用いたため，NTSC 映像信号として伝送が可能であった．しかし，Ethernet と光ファイバの 2 種類の通信路を用いた遠隔操作システムの構築を行えない場合が考えられ，3次元画像情報の圧縮伝送により通信路として Ethernet のみを利用したシステムの構築を行う必要もあるため，今後の課題として検討を行う予定である．