

マイクロドームシステムによる直観的遠隔操作

佐野 明人*¹ 藤本 英雄*¹ 梶野 英紀*²

Intuitive Teleoperation through Micro Dome System

Akihito Sano*¹, Hideo Fujimoto*¹ and Hidenori Kajino*²

Master-slave system takes advantage of human cognitive and sensorimotor skills. However, in conventional system, the operator's visual and haptic frames of reference are widely separated. This lack of registration of sensory information causes a mental burden and contributes to a long learning curve in acquiring skills. Therefore, an intuitive teleoperation based on a natural and instinctive manner is strongly desired. In this study, keeping medical applications in mind, the master console with a compact spherical stereoscopic display, named *Micro Dome*, is developed and the accurate visual/haptic registration is realized based on the framework of a mixed reality. The operator looks like a fortuneteller viewing a crystal ball and can use his full set of daily experiences. The validity of proposed system is demonstrated by experiments of teleoperation.

Key Words: Master-Slave System, Visual/Haptic Registration, Intuitive Teleoperation, Spherical Stereoscopic Display, Mixed Reality, Medical Application

1. はじめに

現在、遠隔手術支援ロボットの開発は、その重要性和社会に与えるインパクトから本格的に推進されている [1]。医療現場では、あくまでも医師が手術の重要な担い手となる。遠隔システムの中で、マスタスレーブ方式は操作者の動作指令に従うことが基本である。したがって、これは遠隔外科手術を支援する医師主体のシステムとして有効である。もちろん、異スケール環境下での作業にも適している。最近、米国 Intuitive Surgical 社の開発した daVinci が、画期的な手術支援システムとして実際に臨床応用され話題を呼んでいる [2]。このシステムの技術的背景には、かつて SRI で開発された Telepresence Surgery System がある [3]。

これまでの手術支援システムでは、映像情報を提示するディスプレイは、比較的に見やすい位置に置かれるものの、手元の操作系とは離れた位置（オフセット）にあり、そのずれを操作者自らが補正し操作を行う必要があった。しかしそれでもなお、触っている場所を見ている、その場所からは実際の触っている感覚は得られないといった視覚、体性感覚情報の矛盾が生じてしまう。したがって、このような視覚系と力覚系（操作系）が空間上一致していない状況では、操作性を損なうばかりでなく大

きな精神的負担を強いられるものであり、さらにスキル習得に時間を要し、獲得したスキルがこれ以外に活かさない可能性もある。ここで、空間上の一致を図ることをレジストレーション（Registration）と呼ぶ。この問題は重要であるにもかかわらず、これまで詳細な議論があまりなされてこなかった。

DaVinci では、ミラーを使った光学的重ね合わせで、操作卓に座った術者の手指に手術サイトの映像を投影し、EndoWrist と呼ばれるマニピュレータ先端部の直観的な操作を可能としている [2]。また、術者用コンソールに顔を埋める形で中を覗き込む没入型の操作環境が提供されている。また、一般的な微細作業の分野では、Sato ら [4] が、力の高応答性を目的として開発したペン形のマスタマニピュレータを、水平に置かれた平面ディスプレイに直接押し当て、映し出された対象を操作している。人間の微細作業スタイルに注目し、直接的な操作インタフェースを構築した先駆的な研究である。一方、バーチャルリアリティの分野では、視覚系および力覚系の正確なレジストレーションについて活発に議論がなされている [5] [6]。例えば、横小路ら [5] は、WYSIWYF (What You can See Is What You can Feel) ディスプレイを提案している。

今後、正確なレジストレーションを実現するインタフェースあるいはデバイスの検討、開発がますます重要となる。HMD は、重量、拘束感、視野角、着脱の煩雑さ、さらに映像の提示部位などの観点から、数時間に及ぶ手術などでは現実的ではない。また、Immersive Projection Technology を使ったプロジェクション型没入ディスプレイ [7] は、スクリーンで取り囲んだ構造となっており、装置全体が大きくならざるを得ないといった

原稿受付 2001 年 7 月 30 日

*¹名古屋工業大学

*²トヨタ自動車（株）

*¹Nagoya Institute of Technology

*²Toyota Motor Corporation

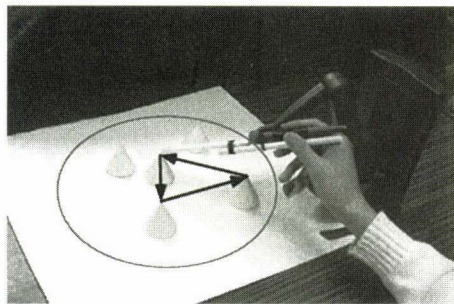
構造上の問題がある。手術支援システムのインタフェースとしては、既存の手術室への導入の観点から、コンパクト性及可搬性が要求される。また、手術などの微細作業は、基本的に操作対象を周りから眺めることが多い[8]。プロジェクション型没入ディスプレイでは、デジタルモックアップなどの応用例がこれに当たる。しかし、このような場合、必ずしも仮想世界の中に身を置くような没入感は必要ないのではと考えられる。

本研究では、医療応用を念頭に置いた微細作業を支援する遠隔操作システムの開発を目的とする。本論文では、手元で行う作業に適したインタフェースを独自に開発し、人間の自然な作業動作に則した直視的操作が可能な新しい操作環境を提案する。2章では、本研究で考えている直視的遠隔操作系について、その基本コンセプトと特徴を示し、球面立体視ディスプレイを核としたマスタコンソールについて述べる。3章では、頭部運動を考慮した立体映像提示に関して、実装方法を示した上で、モデルならびに関係式の導出について詳細に述べる。4章では、実際に提示された立体映像をもとに、視覚/力覚のレジストレーションに関して考察を行う。5章では、操作性の観点から、提案する直視的遠隔操作システムの有効性を実験的に検証する。

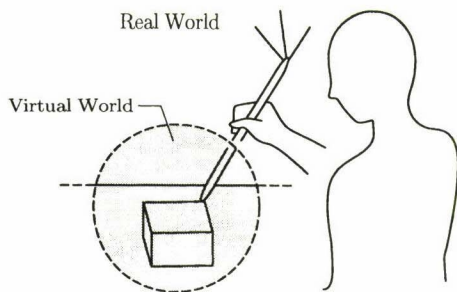
2. マイクロドームを介した遠隔操作環境

2.1 直視的遠隔操作系

Fig. 1(a) に一つの日常的な操作環境を示す。至極あたりまえのことであるが、操作対象とそれが置かれている環境を直視的に理解でき、見たものを触ることができる。本研究では、このような環境、操作スタイルを理想状態とする遠隔操作系を構築する。具体的には、Fig. 1(b) に示すように、ローカルの現実世界の一部にリモートの実世界（一種の仮想世界）を（拡大）再現し、その仮想世界と向かい合う形での操作スタイルを考える。



(a) Daily operation in real world



(b) Teleoperation based on mixed reality

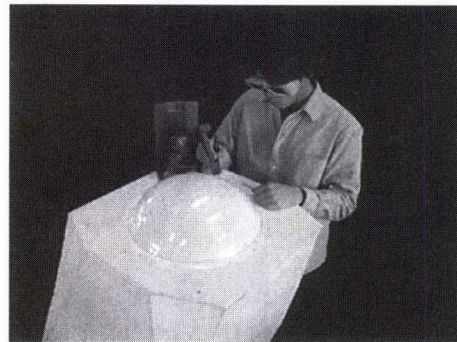
Fig. 1 Intuitive teleoperation

さらに、現実と仮想の世界を視覚/力覚の観点からシームレスにつなぐ複合現実感 (Mixed Reality) を実現する [9]。すなわち、操作者が直接握っているグリッパ (マスタツール) と仮想世界内に見える先端部 (スレーブツール) が、一つのツールとして認識、操作できるようにする。このとき、操作者は遠隔操作 (作業) をしているという意識を持つ必要がなく、Fig. 1(a) に近い直視的な操作が可能となる。

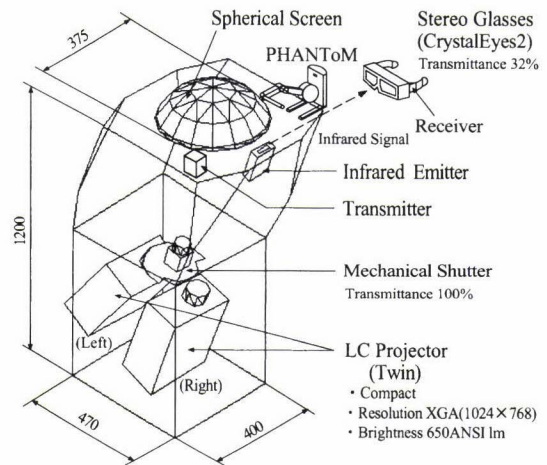
2.2 マスタコンソール

Fig. 2(a) に開発したマスタコンソールとそれに正対した立位姿勢の操作者を示す。ちょうど水晶玉を覗き込む占師のようなスタイルである。マスタコンソールは、半球ドーム状の球面ディスプレイ (マイクロドームと名付けた) 内に操作環境を立体提示する [10]。提示可能な映像は、CG で構築した仮想世界 (シミュレーション・訓練用) および実世界のライブ映像 (遠隔操作作用) である。Sato らのシステムに対して、本システムは対象物を回り込んで眺めるような動作が、頭部運動を考慮した立体映像提示により可能となり、さらに平面ではなく球面スクリーンであることから連続的な提示が可能となる。これにより、操作性の向上が期待できる。

ディスプレイに関しては、ホログラフィや亀山ら [11] の開発した空間走査型ディスプレイが、三次元画像を生成し自然な立体視を提供する。しかし、ホログラフィはリアルタイムでの表



(a) Master console and operation style



(b) Spherical stereoscopic display of rear-projection type

Fig. 2 Micro dome system

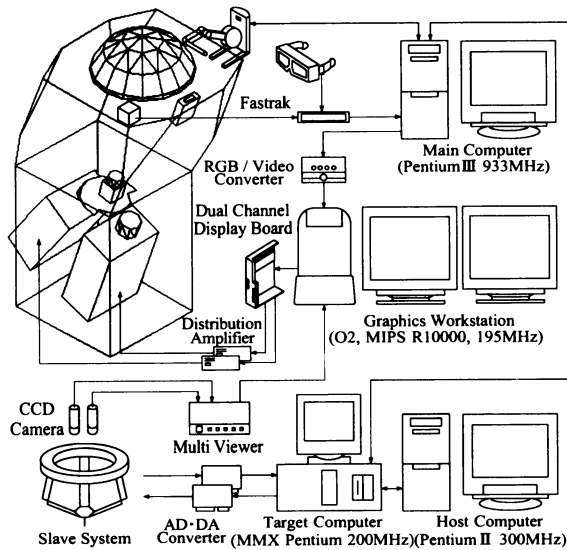


Fig. 3 System configuration

示が困難であり、空間走査型は低解像度である。そこで、本研究では、バーチャルリアリティの分野で重要な技術として普及している、両眼視差を利用した立体映像提示方式（2眼式）を採用する。ただし、三次元画像における自然な立体視に近づけるために、対象を連続的に見たい位置・方向から捉えられるように、頭部運動を考慮した球面スクリーンにおける立体映像提示を行う。

マイクロドーム用に試作した背面投射型球面ディスプレイを Fig. 2 (b) に示す。本システムでは、入手が容易でコンパクトな液晶プロジェクタ (EPSON, ELP-7100) による背面投射 (XGA: 1,024 × 768) を採用した。時分割方式による立体視を実現するために、立体視に必要な左右眼用の画像を2台の液晶プロジェクタで独立に投影し、プロジェクタ前面に配置したメカニカルシャッターと液晶シャッター式メガネ (Stereo Graphics, CrystalEyes2) との同期を図る。すなわち、各プロジェクタは常に投影を行い、メカニカルシャッターを介して左右の映像が球面スクリーン上に交互に表示される。また、頭部の位置・姿勢計測用に磁気センサ (Polhemus Inc., Fastrak) を用いる。Fastrak のトランスミッタをドーム左脇に固定し、レシーバを液晶メガネの左サイドに固定した。

操作系として、マスタデバイス (SensAble Technologies, PHANToM Desktop) をドーム右脇に配置した。本研究では、手術器具などを想定したツールを使った操作を想定している。操作者が握っている PHANToM のグリップ (15 [cm]) の先に仮想のツール先端部 ($\phi 1 \times 16$ [cm]) を取り付けられた形になっている (Fig. 1 (a) 参照)。PHANToM では、ペン型グリップの先端ジンバル部に絶対座標系で定義された3軸力が発生可能である。また、力覚提示に関しては、ライブラリ GHOST を用いる。GHOST は、幾何オブジェクトと空間効果の階層的集合体として、haptic 環境を表現する C++ オブジェクト指向ツールキットである。また、力覚提示と視覚提示の処理を別のスレッドに分けて並列に実行する。特に、力覚提示の処理を 1 [kHz] の周期で呼び出す機能を提供する。

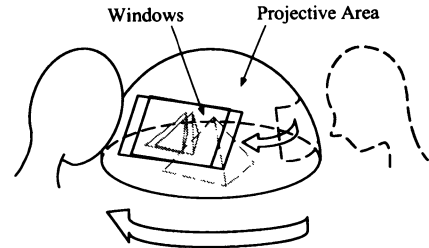


Fig. 4 Window control based on head tracking

Fig. 3 にシステム構成図を示す。全体システムとしては、分散システムを構築した。トレーニング用の仮想環境系と遠隔操作の実環境系を有している。OpenGL を使った仮想環境の構築、頭部の位置・姿勢計測および PHANToM の制御などには、Windows NT が稼働する PC (Pentium III, 933 [MHz]) を用いる。一方、3章で述べる立体映像提示処理にはグラフィックワークステーション O2 (MIPS R10000, 195 [MHz]) を使用する。PC 上で生成した仮想世界の左右画像 (1 フレーム) は、RGB / ビデオ信号変換器 (I・O DATA, TVC-XGA) を介して、O2 のビデオ入力端子から取り込む。一方、2台の CCD カメラ (ELMO, UN411) によって撮影された実映像は、2チャンネルのビデオ信号としてマルチビューワ (朋栄, MV-10D) に送られて、1チャンネルのビデオ信号に圧縮された後 O2 に取り込む。ここで、O2 にはデュアルチャンネル・ディスプレイ・オプションボードが搭載されており、作業領域 (1,024 × 768) が2倍に拡張されたことで2台のプロジェクタに接続されている。

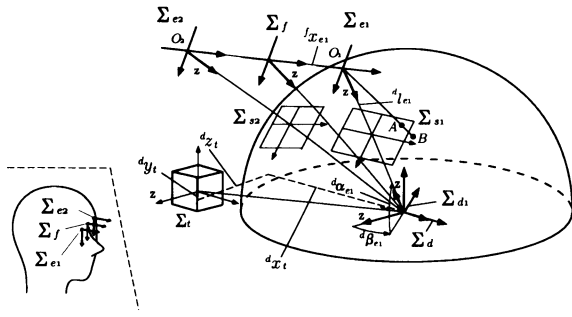
3. 頭部運動を考慮した立体映像提示

3.1 映像提示方式

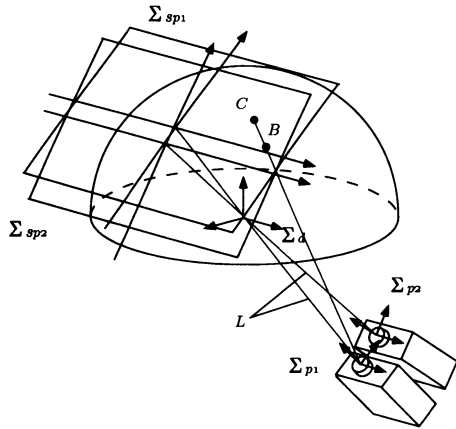
本研究では、Fig. 4 に示すように、球面スクリーン上の投影エリア内に適当なサイズのウィンドウを開いて操作対象を観察する。さらに、視点変更に合わせてこのウィンドウを移動させる。すなわち、プロジェクタを機械的には回転させていない。また、望ましい画角と処理速度の観点から 21.6 × 16.2 [cm] のサイズのウィンドウを開くことにした。なお、通常の場合として、ドームからの距離が 10 ~ 50 [cm]、左右 90° 程度、ほぼ真上からの立体視が可能である。

さて、ウィンドウへの映像提示に関しては、OpenGL のテクスチャマッピングに基づく手法を用いる。2.2 節で述べたように、仮想環境、実環境のいずれもビデオ信号として O2 内に取り込まれる。その際、左右の原画像 (各 512 × 256 [pixels]) はビデオ・ライブラリおよび DM バッファの機能を用いて、OpenGL のテクスチャと互換性を持つ形式でメモリ上にストアされる。この原画像のテクスチャデータを格子状に縦横 11 分割した上で、それぞれの格子点に対応する点を求め、隣接する 4 点ごとにテクスチャをマッピングするためのポリゴンを形成する。さらに、これら形成されたポリゴンから成るウィンドウを、拡張された O2 の左右の画像表示領域に描画し、分割した原画像を対応するポリゴンにそれぞれマッピングすることで映像提示を行う。

ここで、球面スクリーンへ投影することからポリゴンに対して歪補正を施す必要がある。もちろん、特殊レンズなど光学系



(a) Dome, face, viewpoint, transmitter and screen



(b) Dome, projector and screen

Fig. 5 Model and coordinate frames

の設計を駆使することが考えられるが、ノウハウや開発コストの点から容易なことではない。そこで、本研究では、ソフトによる歪補正を採用する。球面スクリーンに対して両眼視差を利用した立体映像提示（2眼式）を行うために、次のような二つの変換を考える必要がある。

- (1) まず、左右眼用の原画像がドーム表面に設定した二つの仮想スクリーンに見かけ上投影されているように、球面スクリーンに画像を実際に投影する (Fig. 5(a) 参照)。
- (2) 次に、この原画像に対応した画像が球面スクリーンに投影されるように、ドーム表面に設定した二つのプロジェクタ対応スクリーンに生成画像を見かけ上投影する (Fig. 5(b) 参照)。

具体的には、仮想スクリーン上のポリゴンを形成する格子点 A (視点座標系) に対応したドーム (球面スクリーン) 上の点 B を算出し、さらに点 B をプロジェクタ対応スクリーン上の点 C に変換する式を導出する。この変換を各格子点ごとに行うことで、最終的に原画テクスチャをマッピングするポリゴンを算出する。なお、3.2 節および 3.3 節において、具体的な変換式を導出する [12]。

3.2 視点パラメータ

本研究では、Fig. 5 に示すようなドーム系、フェイス系、視点系、プロジェクタ系およびスクリーン系などから構成される座標系を設定した。各座標系は以下のとおり定義されている。

Σ_d : ドーム座標系 (基準座標系)

Table 1 Values of parameters

| | | | | |
|----------------|----------------|----------------|--------------------|------------------|
| ${}^d x_t$ [m] | ${}^d y_t$ [m] | ${}^d z_t$ [m] | ${}^f l_{e_x}$ [m] | - |
| 0.204 | 0.099 | 0.215 | 0.031 | - |
| r [m] | L [m] | H [m] | ω_1 [deg] | ω_2 [deg] |
| 0.2 | 0.9 | 0.39 | 76.0 | 55.5 |

Σ_f : フェイス座標系

Σ_{e_i} : フェイス座標系に固定され視点座標系

($i = 1, 2$: $i = 1$ は右眼, $i = 2$ は左眼に対応)

Σ_{d_i} : 視点座標系と連動するドーム座標系

Σ_{s_i} : 仮想スクリーン座標系

Σ_{p_i} : プロジェクタ座標系

Σ_{s_{p_i}} : プロジェクタ対応スクリーン座標系

Σ_t : トランスミッタ座標系

まず、簡単化のために、Σ_{e_i} の z 軸に固定された視線が常にドーム中心に向かうものとする。次に、Σ_t を介在させることで、Σ_d から Σ_f への同次変換行列 ${}^d T_f$ は、次のように導出できる。

$${}^d T_f = {}^d T_t {}^t T_f \quad (1)$$

ここで、

$${}^d T_t = \text{Trans}({}^d x_t, {}^d y_t, {}^d z_t) \quad (2)$$

$${}^t T_f = \text{Trans}({}^t x_f, {}^t y_f, {}^t z_f) \text{Rot}(z, {}^t \phi_f) \\ \times \text{Rot}(y, {}^t \theta_f) \text{Rot}(x, {}^t \psi_f) \quad (3)$$

ただし、 ${}^d x_t$ 、 ${}^d y_t$ および ${}^d z_t$ は、ドーム中心からのトランスミッタのオフセット量である。各パラメータの値を Table 1 に示しておく。また、 ${}^t x_f$ 、 ${}^t y_f$ 、 ${}^t z_f$ 、 ${}^t \phi_f$ 、 ${}^t \theta_f$ および ${}^t \psi_f$ は、Σ_t 座標系における Σ_f 座標系の位置・姿勢を表したものである。

次に、Σ_f 座標系で記述された右眼座標は、 ${}^d T_f$ を導入することで Σ_d 座標系で次のように表される。

$${}^d \mathbf{X}_{e_1} = {}^d T_f {}^f \mathbf{X}_{e_1} \quad (4)$$

ここで、

$${}^d \mathbf{X}_{e_1} = [{}^d x_{e_1} \quad {}^d y_{e_1} \quad {}^d z_{e_1} \quad 1]^T \quad (5)$$

$${}^f \mathbf{X}_{e_1} = [{}^f l_{e_x} \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (6)$$

${}^f l_{e_x}$ はフェイス座標系 Σ_f からの眼のオフセットである。さらに、Σ_d は極座標を採用しているので、 ${}^d \mathbf{X}_{e_1}$ から右眼の極座標 (${}^d \alpha_{e_1}$, ${}^d \beta_{e_1}$, ${}^d l_{e_1}$) が計算できる。

3.3 映像提示式

仮想スクリーン上の格子点 A (${}^{e_1} x_{s_1}$, ${}^{e_1} y_{s_1}$, ${}^{e_1} l_{e_1} - r$) は、ドーム (球面スクリーン) 上の位置 (${}^{e_1} x_d$, ${}^{e_1} y_d$, ${}^{e_1} z_d$) にある点 B の像が、次のような関係で透視投影されたものである。

$$\begin{bmatrix} {}^{e_1} x_{s_1} \\ {}^{e_1} y_{s_1} \end{bmatrix} = \frac{{}^d l_{e_1} - r}{{}^{e_1} z_d} \begin{bmatrix} {}^{e_1} x_d \\ {}^{e_1} y_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、 r はドーム半径である。Σ_{d₁} 座標系で記述されたドーム上の点 B を Σ_{e₁} 座標系で表すと次のようになる。なお、Σ_{d₁} は、ドーム中心を原点とし z 軸が右眼方向となる座標系であり、

Σ_d を y 軸周りに ${}^d\beta_{e_1}$, x 軸周りに $-{}^d\alpha_{e_1}$ だけ回転した座標系である.

$${}^{e_1}\mathbf{X}_d = {}^{e_1}T_{d_1} {}^{d_1}\mathbf{X}_d \quad (8)$$

ここで,

$${}^{e_1}\mathbf{X}_d = [{}^{e_1}x_d \quad {}^{e_1}y_d \quad {}^{e_1}z_d \quad 1]^T \quad (9)$$

$${}^{d_1}\mathbf{X}_d = [r \cos \phi \cos \theta \quad r \cos \phi \sin \theta \quad r \sin \phi \quad 1]^T \quad (10)$$

$${}^{e_1}T_{d_1} = \text{Trans}(0, 0, {}^d l_{e_1}) \text{Rot}(x, \pi) \quad (11)$$

${}^{e_1}T_{d_1}$ は Σ_{d_1} から Σ_{e_1} への同次変換行列である.

これより, 以下の式が得られる.

$$\tan \theta = -\frac{{}^{e_1}y_{s_1}}{{}^{e_1}x_{s_1}} \quad (12)$$

$$\sin \phi = \frac{{}^d l_{e_1} d_2^2 + ({}^d l_{e_1} - r) \sqrt{r^2 d_1^2 - {}^d l_{e_1}^2 d_2^2}}{r d_1^2} \quad (13)$$

ここで, $d_1 = \sqrt{x_{s_1}^2 + y_{s_1}^2 + ({}^d l_{e_1} - r)^2}$, $d_2 = \sqrt{x_{s_1}^2 + y_{s_1}^2}$ であり, それぞれ Σ_{e_1} の原点あるいは Σ_{s_1} の原点と A 点間の距離を表している.

次に, ドーム上の点 B を Σ_{p_1} 座標系で表すと次のようになる.

$${}^{p_1}\mathbf{X}_d = {}^{p_1}T_{d_1} {}^{d_1}\mathbf{X}_d \quad (14)$$

ここで,

$${}^{p_1}\mathbf{X}_d = [{}^{p_1}x_d \quad {}^{p_1}y_d \quad {}^{p_1}z_d \quad 1]^T \quad (15)$$

$$\begin{aligned} {}^{p_1}T_{d_1} &= \text{Trans}(0, dH, L - r) \text{Rot}(x, \omega_1) \\ &\quad \times \text{Rot}(y, {}^d\beta_{e_1}) \text{Rot}(x, -{}^d\alpha_{e_1}) \end{aligned} \quad (16)$$

${}^{p_1}T_{d_1}$ は Σ_{d_1} から Σ_{p_1} への同次変換行列である. なお, dH は, H を投影画面の縦方向の長さとする, $dH = H(L - r)/2L$ となる (投影方式による). L は右眼用のプロジェクタと対応する右スクリーン p_1 との距離である. また, ω_1 は, Σ_{d_1} と Σ_{p_1} の z 軸同士のなす角度である.

ドーム上の位置 $({}^{p_1}x_d, {}^{p_1}y_d, {}^{p_1}z_d)$ にある点 B の像は, 次のようにプロジェクタ対応スクリーン上の点に映る点 $C({}^{p_1}x_{p_1}, {}^{p_1}y_{p_1}, L)$ に投影される.

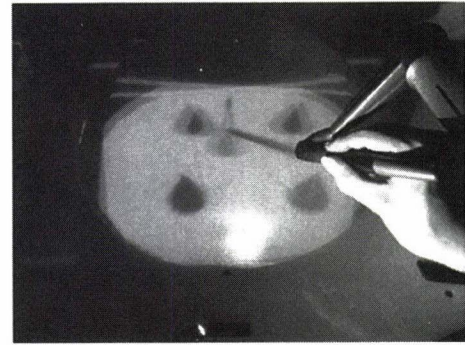
$$\begin{bmatrix} {}^{p_1}x_{p_1} \\ {}^{p_1}y_{p_1} \end{bmatrix} = \frac{L}{{}^{p_1}z_d} \begin{bmatrix} {}^{p_1}x_d \\ {}^{p_1}y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{H}{2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

なお, 左眼に関する定式化も同様に行われる.

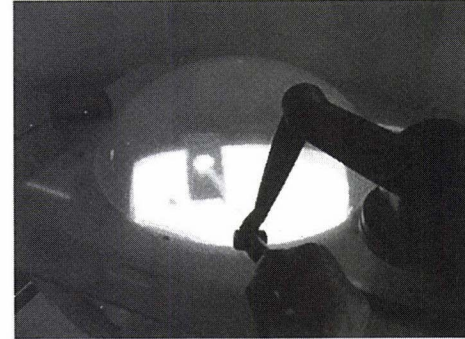
4. レジストレーション

4.1 視覚/力覚のレジストレーション

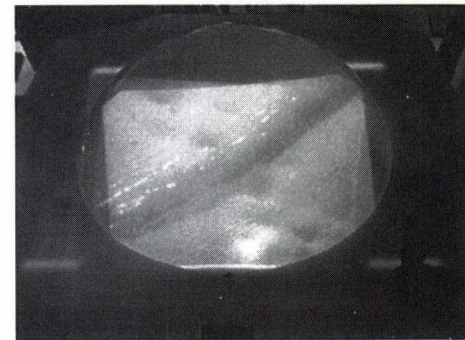
Fig. 6 は, マイクロドームで実際に提示された映像を操作者の視点からデジタルカメラにて撮影したものである. 左右眼用



(a) CG cones and tool



(b) CG box with hole

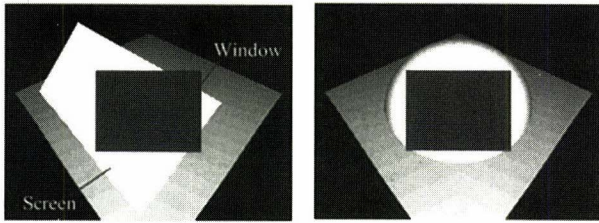


(c) Actual blood vessel

Fig. 6 Visual/haptic registration

の映像が提示されており, 液晶シャッター式メガネを掛けることで立体視できる. Fig. 6 (a) は, Fig. 1 (a) と同じ五つのコーンを仮想環境として構築したものである. また, Fig. 6 (b) は, 仮想環境内のボックスを正面から右側へ周って眺めていき, 穴が直視しやすい位置での映像である. さらに, Fig. 6 (c) は, 2 [mm] 程の擬似血管を 2 台の CCD カメラでステレオ視し, 拡大提示したものである.

実験では, 実際の投影画像を観察しながら, 観察者が最も立体的にはっきり見えるように, 3 章で示したモデルならびに変換式の確認, 物理パラメータの同定, メカニカルシャッターと液晶シャッター式メガネとの同期調整などを行った. その結果, 観察者にとって違和感のない立体映像の提示を実現した. ドームを持ち上げるとそこに対象物が実際にあるのだと操作者に感じさせる. また, Fig. 6 (a) から分かるように, 操作者が握っているツールグリップがドーム内のツール先端へとつながり, あた



(a) Flat screen (flame out) (b) Spherical screen

Fig. 7 Screen and window (viewpoint: 45[deg])

かも一つのツールのように感じられる。さらに、中央のコーンに触った状態であり、見たものに触ることができる（図では反力がベクトルとしても表示されている）。以上のことから、視覚／力覚のレジストレーションが適切に図られている。

Fig. 6 (b) に示すように、球面スクリーンでは連続的な表示面を確保することができ、平面スクリーンを組み合わせた場合に生じる映像の継ぎ目の問題が回避できる [13]。したがって、自然な形で周囲から眺めることができ、その物体を一方向から捉えたときよりもリアリティが増した。ここで、マイクロドームのような球面スクリーンと一般的な平面スクリーンに関して考察しておく。まず、液晶シャッター式メガネによる立体視の多くは、CRT モニタのような平面ディスプレイでの利用が一般的であり、あくまでも正面からの観察を前提としている。平面スクリーン 1 面のみでは、見る角度によりウィンドウがフレームアウトする。例えば、ドーム直径と同じ平面スクリーンを想定すると、Fig. 7(a) に示すように、およそ 45° の角度以上でフレームアウトが生じる。この問題を回避するには、平面スクリーンを組み合わせる必要がある。一方、球面スクリーンでは、Fig. 7(b) に示すように、フレームアウトを生じない。

4.2 動的レジストレーション

マスタツールである PHANToM の位置・姿勢計測のタイミングから最終的に表示系での描画が終了するまでの遅れ時間 (End-to-end system delay) が 0.1 [sec] 程度になっている。したがって、マスタツールを 12 [cm/sec] くらい素早く動かすと操作したマスタツールとドーム内のスレーブの映像のずれが生じる。すなわち、時系列上での一致が図られていない動的レジストレーションエラーが生じることになる [14]。そこで、本研究では、拡張カルマンフィルタを用いた運動予測によりエラー低減を図る [15]。

まず、仮想スレーブツールの位置・姿勢およびそれらの速度で構成される十二次元ベクトルを状態変数ベクトル \mathbf{x}_k 、また、実際に計測されるスレーブの位置・姿勢で構成される六次元ベクトルを観測ベクトル $\tilde{\mathbf{y}}_k$ とすると、操作系の状態方程式（離散時間系）は、次のように導出される。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}(\mathbf{x}_k)\mathbf{w}_{pk} \quad (18)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (19)$$

上式では、システムノイズ \mathbf{w}_{pk} および観測ノイズ \mathbf{v}_k を考慮している。

ここで、状態変数まわりで線形化することにより、次式のよような拡張カルマンフィルタを得る。

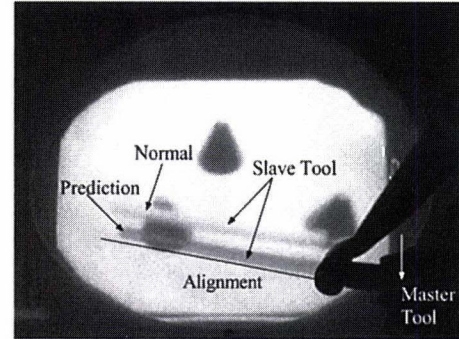


Fig. 8 Dynamic registration

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k[\tilde{\mathbf{y}}_k - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})] \quad (20)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k|k} \quad (21)$$

$$\mathbf{K}_k = \hat{\Sigma}_{k|k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\hat{\Sigma}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \Sigma_{v_k})^{-1} \quad (22)$$

$$\hat{\Sigma}_{k|k} = \hat{\Sigma}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}\hat{\Sigma}_{k|k-1} \quad (23)$$

$$\hat{\Sigma}_{k+1|k} = \mathbf{F}\hat{\Sigma}_{k|k}\mathbf{F}^T + \hat{\mathbf{G}}\Sigma_{w_k}\hat{\mathbf{G}}^T \quad (24)$$

ただし、 $\hat{\mathbf{G}}$ は $\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k})$ で定義される。また、 \mathbf{K}_k は離散時刻 k におけるカルマンゲインであり、 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ および $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$ は、 \mathbf{x}_k の最適推定値、 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ に基づく \mathbf{x}_{k+1} の推定値である。さらに、 $\hat{\Sigma}_{k|k}$ 、 $\hat{\Sigma}_{k+1|k}$ 、 Σ_{w_k} および Σ_{v_k} は共分散行列である。

実験では、約 8 [cm] の幅を 1 [Hz] 程度の周期でマスタツールを振ってみた。なお、推定値の更新周期は 0.08 [sec] とした。Fig. 8 は、マスタツールを手前に動かした際の通常の描画と運動予測に基づいた描画の両者を表示させたものである。図から分かるように、通常の描画では、表示されたスレーブツールがマスタツールに追従できていない。一方、運動予測に基づいた描画では、マスタとスレーブが一直線に合うように映像提示されている。

5. 操作性の検証

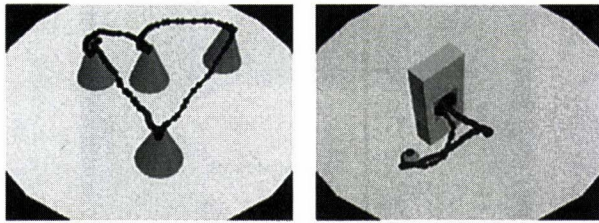
5.1 評価技法

本章では、操作性の検証を行う [12]。実験タスクとして次の 2 通りを考え、その実行時間を調べる。

タスク A タスク A では、Fig. 1 (a) に示すような実環境下での操作を理想状態とし、提案したシステムを介した遠隔操作が、どの程度の直視的な操作性を実現しているかを作業実行時間により評価する。また、立体視および視覚系と力覚系（操作系）の空間上一致した状況が、操作性にどの程度関与しているかを検証するために、五つのケースでの実験を行う。

Fig. 9 (a) に示すような、作業領域内に配置された四つのコーンの各頂点を順に触っていく実験タスクである（図中に軌跡の一例が示してある）。コーンは、下面の直径 5 [cm]、上面の直径 1 [cm]、高さ 5 [cm] である。まず、本番とは異なる配置での練習を行う。その後、中央のコーンからスタートするが、本番のコーンはスタートの合図とともに提示される。また、各頂点では約 1 秒間保持するように指示してある。

Table 2 に示す五つの組み合わせで実験を行う。ここで、A-1 および A-3 のレジストレーションが取れていない場合は、PHAN-



(a) Task A (b) Task B
Fig. 9 Experimental environment of tasks

Table 2 Experimental conditions

| | Task A (Touch) | | | | Task B (Insert) | | |
|--------------|----------------|---|---|---|-----------------|------------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 |
| Interface | Micro Dome | | | | - | Micro Dome | |
| Environment | Virtual | | | | Real | Virtual | |
| Registration | × | ○ | × | ○ | ○ | ○ | |
| Stereo | × | × | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Viewpoint | Fix | | | | Variable | | |

ToM が右側に 10 [cm], 手前に 10 [cm] だけオフセットしている。また、A-5 の実環境とは、球面スクリーンを外し、そこにまったく同じ模型の作業環境を配置したものである。さらに、操作者には、Fig. 9 (a) に示すような形で環境が見える位置で姿勢を保持し、頭部を動かさないで操作するように指示してある。

タスク B 人間は日常の経験から作業を的確に行うために視点を適切に移動している。そこで、タスク B では、頭部運動を考慮した映像提示の有効性を検証する。

Fig. 9 (b) に示すような、斜め 45° に配置されたボックスに空けられた穴へツールを挿入し、奥の面に当てる実験タスクである。ボックスは高さ 10 [cm], 幅 5 [cm], 厚み 2 [cm] であり、穴は直径 3 [cm] である。左下のスタートポイントから始め、挿入完了後再びスタートポイントに戻る。もし、穴以外の部分に触れた場合はもう一度スタートポイントに戻りやり直す。練習は行わない。また、Table 2 に示す二つの組み合わせで実験を行う。すなわち、Fig. 9 (b) に示す正面の位置に視点が拘束されている場合と自由に変えられる場合である。

本実験では、タスク A, B に対してそれぞれ成人男子 14 名を被験者に選定し、すべての被験者にすべての実験パターンを行わせる (Within-subject)。タスク A は、A-1 から A-5 の順で、またタスク B は、B-1, B-2 の順で実験を行った。各実験ごとに 7 回の試行データをサンプリングした。ここで、人間を対象とした評価実験では慣れが問題となり、同じ方法・環境では後に行った実験ほどよい成績が記録される恐れがある [16]。そこで、各実験を 1 日ごとに実施することで慣れの影響を抑えた。

5.2 実験結果と考察

Fig. 10 は、各実験ごとの全被験者の実行時間の平均値と標準偏差を示す。平均値を比較すると、A-1 から A-4 の順で成績が良くなっていることから、個人差はあるものの、タスク A には立体視が重要であり、次いでレジストレーションが効果的であることが分かる。立体視により、四つのコーンの位置関係がよく分かり、対象とそれが置かれている環境を身体座標系で直観的に理解できる。また、レジストレーションが取れていると、4 章で示したように、マスタスレーブ系があたかも一つのツール

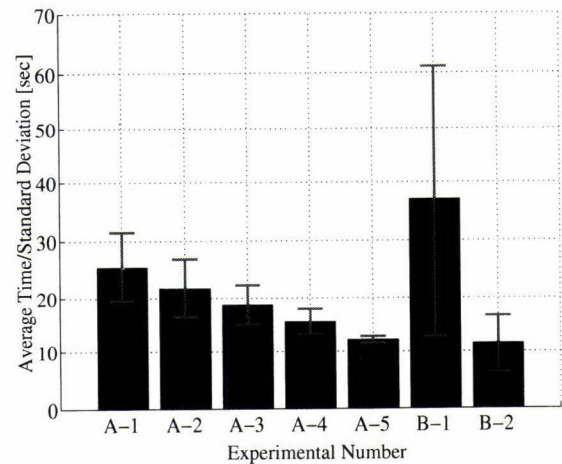


Fig. 10 Average time and standard deviation

のように感じられ、さらに見たものに触ることができる。したがって、操作者にとっては日常の経験に則した直観的なツール操作が可能となる。このことは、A-4 と A-5 の比較から、提案するシステムが実環境下での操作に近いレベルを達成していることからもいえる。また、標準偏差を比較すると、同じく A-1 から A-4 の順で小さくなっており、操作にばらつきが生じず安定してタスクが実行できている。

B-1 と B-2 の比較から、視点変更を許すことで、各被験者ごとに適切な位置へ視点を移し (Fig. 6 (b) 参照)、確実に挿入できるパスを選んだ上で、的確に挿入作業を行っている。したがって、失敗の回数が減り実行時間ならびに標準偏差ともに大幅に小さくなっている。さらに、このとき、継ぎ目のない連続的な表示の有効性が実感できる。このことから、頭部運動を考慮した球面スクリーンにおける立体映像提示が極めて有効であるといえる。

6. 結 論

本研究は、医療応用を念頭に置いた遠隔微細作業システムの開発を目的とし、人間の自然な作業動作に則した直観的操作が可能な新しい操作環境を構築した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 球面立体視ディスプレイを核とした新しいインタフェースの開発を行った。球面スクリーンに対して両眼視差を利用した立体映像提示 (2 眼式) を行うために、ポリゴンウィンドウに対して歪補正を施した。最終的に、観察者にとって違和感のない立体映像提示を実現した。さらに、視点座標系で立体映像提示モデルを構築したことで、対象を連続的に見たい位置・方向から捉えられる。特に、自然な形で周囲から眺めることができ、物体を一方向から捉えたときよりもリアリティが増した。
- (2) 現実世界と仮想世界をドームを介して明確に分けているものの、視覚系と力覚系 (操作系) を空間上一致させ、本来独立したマスタとスレーブに対して両世界をつなぐ一つのツールとしての動きを実現させた。これにより、見たものに触ることができるといった視覚と体性感覚情報の合致を

実現した。さらに拡張カルマンフィルタを用いた運動予測により時系列上での動的整合性も実現した。

- (3) 操作者にとっては日常の経験に則した直視的なツール操作が可能となった。また、操作にばらつきが生じず安定してタスクが実行できた。実感として実環境下での操作に近いといえる。さらに、視点変更を許すことで、与えられたタスクを的確に実行することが可能となった。

今後、NASA-TLX などの主観的作業負荷評価尺度を使った負担軽減の評価、とっさのときに適切な対応を取ることができかなどの評価を定量的に行っていく予定である。さらに、遠隔地からの操作を含めた実環境への展開 [17]、微細作業におけるスケールリング問題 [18] [19]。さらに仮想手術トレーニングの観点から、生体組織などの柔軟物の変形・操作の実現などが、今後の課題として挙げられる。

謝辞 最後に、医療現場の立場からご助言頂きました名古屋大学医学部形成外科の鳥居修平教授ならびに医局の方々に深く感謝致します。また、本研究は、文部省科学研究費補助金平成 8 年度奨励研究 (A) (課題番号:08750312) および平成 10 年度萌芽的研究 (課題番号:10875056) の援助を受けており、ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 特集：21 世紀の医療とロボティクス, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.1-52, 2000.
- [2] G.S. Guthart and J.K. Salisbury: "The Intuitive™ Telesurgery System: Overview and Application," Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.618-621, 2000.
- [3] P.S. Green, J.W. Hill, J.F. Jensen and A. Shah: "Telepresence Surgery," IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol.14, no.3, pp.324-329, 1995.
- [4] T. Sato, J. Ichikawa, M. Mitsuishi and Y. Hatamura: "Micro Teleoperation System Concentrating Visual and Force Information at Operator's Hand," Proc. of the 3rd Int. Symposium

- on Experimental Robotics, pp.353-365, 1993.
- [5] 横小路泰義, ラルフ ホリス, 金出武雄: "仮想環境への視覚/力覚インタフェース: WYSIWYF ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.2, no.2, pp.17-26, 1997.
- [6] 山田俊郎, 小木哲朗, 壺内大輔, 齋藤允, 広田光一, 廣瀬通孝: "触力覚提示装置のための傾斜 3 面ディスプレイの開発", 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, pp.287-290, 2000.
- [7] 特集: プロジェクション型没入ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.4, no.3, pp.477-554, 1999.
- [8] 光石衛, 渡辺拓郎, 中西泰文, 浅井亮介, 渡辺博義: "テレ・マイクロ・サージェリ・システムの試み", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, vol.B, pp.1408-1411, 1995.
- [9] 田村秀行: "複合現実: 現実世界と仮想世界の融合", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.6, pp.759-762, 1998.
- [10] 佐野明人, 藤本英雄, 関谷友孝, 梶野英紀: "テレマイクロオペレーションのためのマイクロドームシステムの開発", 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp.411-412, 1999.
- [11] 大富浩一, 亀山研一: "VR 用三次元ディスプレイの開発", PIXEL, no.132, pp.54-56, 1993.
- [12] 佐野明人, 藤本英雄, 梶野英紀, 磯部玄, 竹内博良: "マイクロドームシステムによる直視的遠隔操作", 第 6 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.81-86, 2001.
- [13] 岩田洋夫, 橋本渉: "背面投射球面ディスプレイ", Human Interface N & R, vol.12, no.2, pp.119-124, 1997.
- [14] R.T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality," Presence, vol.6, no.4, pp.355-385, 1997.
- [15] 横小路泰義, 菅原嘉彦, 吉川恒夫: "画像と加速度計を用いた HMD 上での映像の正確な重ね合わせ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.4, no.4, pp.589-598, 1999.
- [16] 田村博 編: ヒューマンインタフェース. オーム社, pp.2-8, 1998.
- [17] 藤本英雄, 佐野明人, 岡本啓史: "インターネットを介した力帰還型バイラテラル遠隔操作", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.713-720, 2000.
- [18] A. Sano, H. Fujimoto, and T. Takai: "Network-Based Micro Teleoperation," Proc. of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation, pp.13044(1)-(2), 2000.
- [19] 藤本英雄, 山川聡子, 真鍋紳: "マスタースレーブにおける弁別閾を考慮した力のスケールリング", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.3, pp.402-407, 2001.



佐野明人 (Akihiro Sano)

1963 年 2 月 8 日生。1987 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。現在、名古屋工業大学助教授。テレロボティクス、人間-機械系の研究に従事。日本機械学会賞研究奨励賞受賞、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門賞 (業績賞) 受賞。2000 年 Japan-USA Flexible Automation Symposium 最優秀論文賞受賞。第 6 回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞受賞。2001・2002 年度本学会評議員。日本機械学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会等の会員。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1947 年 7 月 7 日生。1970 年名古屋大学工学部機械工学科卒業。現在、名古屋工業大学教授。生産システム、ロボットなどの知能化、バーチャルリアリティ・感性の工学などに興味を持つ。2000 年 Japan-USA Flexible Automation Symposium 最優秀論文賞受賞。第 6 回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞受賞。ASME 1998 Japan-USA Flexible Automation Symposium プログラム委員長。1997, 1998 年 SICE 常務理事部門協議会議長。1997, 1998 年日本機械学会評議員。1991, 1992 年本学会誌編集委員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)



梶野英紀 (Hidenori Kajino)

1976 年 6 月 30 日生。1999 年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。2001 年同大学大学院工学研究科生産システム工学専攻博士前期課程修了。同年トヨタ自動車 (株) 入社。