サイバニックマスタシステムに搭載するための 3D ビジュアルフィードバックシステムの開発*

平松 宏介^{*1}, 山海 嘉之^{*1}

Development of 3D Visual Feedback System for Cybernic Master System

Kousuke HIRAMATSU ^{*1} and Yoshiyuki SANKAI

^{*1} Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, 305-8573, Japan

In this paper, to improve operability of the operator, we developed the 3D visual feedback system for Cybernic master system. This Cybernic master system is a master-slave system for manipulations and consists of master-slave robot arm and visual feedback system. To reap full advantage of the system, not only feedback to somatosensory system such as force and impedance control but also optimal visual feedback is an important factor in transmitting information to an operator. To achieve visual feedback, it is installed stereoscopic vision and operation assist system using Augmented Reality. The stereoscopic vision is controlled by our active control method of a convergence angle depending on the distance to objects. The operation assist system can show stereoscopic images that is overlaid the virtual objects. We conducted experiments to verify that the operator can view parallax image stereoscopically at the leaching range that is near to an arm. Our system in short distance was effective compared with normal parallax method. Then, we conducted operation test to ensure that it is possible to perform the area protection with the virtual object. At the result, protection areas were formed, and we ensured that slave arm could not invade those areas. In addition, the operation assists such as not only protection of crash but also the tracing movement and operation instruction by the virtual objects is possible. To achieve the interaction between the object of the virtual space and an object of the reality space has improved the operability of the master-slave system.

Key Words : Robot Suit HAL, Master-Slave, Augmented Reality, Virtual Reality, Man-Machine Interface, Tele-Robotics, Manipulator

1. 緒 言

高レベル放射性物質の取り扱いや、原子力発電所の解体といった危険な作業がある。このような高レベル放射線環境下での長時間におよぶ作業を人間が直接行うことは非常に危険である。そこで人間の代わりに現場で働くロボットの開発が急務となっている。しかし、これらの作業における具体的な作業内容は予め決められている訳ではなく、その場の状況に応じて刻一刻と変化する可能性がある。そのため、臨機応変な対応が難しい自律ロボットだけの作業は困難を極める。そこでこの問題を解決するためには、システムに人間を組み込んだマスタスレーブ型マニピュレーションシステムを用いることが有効であると考えられる。

現在まで、マスタスレーブ型マニピュレーションシステムに関する研究は、ロボット工学やバーチャルリアリティの分野において様々な形態で行われている。その代表的な例として、マスタ側のオペレータの技能的な操作をスレーブ側のロボットアームといった機械に伝達し、あたかもオペレータが遠隔地にいるような高度な臨場感をもってスレーブシステムを操作するレイグジスタンスに関する研究が挙げられる^{(1)~(4)}。このマスタスレーブ

* 原稿受付 2012 年 10 月 20 日

^{*1} 正員, 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail: hiramatsu@golem.kz.tsukuba.ac.jp

型マニピュレーションシステムには、オペレータが遠隔地で直接作業を行っているような操作感覚を得ながら、自分の思い通りにスレーブアームを動かせることが求められる。さらにこのような作業現場においては、ボルトを緩める、固着したピンを引き抜くといった柔軟で巧みな操作が求められる作業も多い。そのため、スレーブアームの手先を硬く・柔らかくするというようなインピーダンス特性を随意に調節できることや、操作対象が未知の物体であっても臨機応変に対応できるということが必要であると考えられる。しかし、従来のシステムではスレーブアームのインピーダンスをオペレータが随意に操作することは難しく、巧みな操作が要求される作業を行うことは難しい。そこで我々は、生体電位信号を用いて人間の腕の感覚・運動生理特性をロボットアームに随意に反映させることの出来るサイバニックマスタシステムを開発してきた⁶⁾。このシステムを用いることでオペレータが随意にスレーブアームのインピーダンスを調節できるようになるため、未知物体の操作や予備動作、素早い対応が必要な場面での利用も期待できる。図 1 にサイバニックマスタシステムの概念図を示す。

遠隔地での操作に加え、材質、形状などが事前に分からないような未知の物体を対象としたとき、アームの状態を制御するためにはオペレータの認知予測能力も重要となる。したがってオペレータへの情報伝達は、力覚提示やインピーダンスの再現といった体性感覚へのフィードバックだけではなく、的確なビジュアルフィードバックも重要な要素であると考えられる。このビジュアルフィードバックにおいて、平面的な色や輝度情報に加え、特にアームのリーチング操作を行う場合には深度情報の伝達が不可欠である。また実作業を行う上で、人間の誤認識によるミスオペレーションの誘発も十分に考えられるため、ミスオペレーションを未然に防ぐ、またはミスオペレーションが発生してもスレーブアームや操作対象への接触による故障や損傷などを防止できる作業環境の提供や操作支援が望まれる。そこで本研究では、現在まで開発してきたサイバニックマスタシステムに搭載するための 3D ビジュアルフィードバックシステムの開発と操作支援の実現を行い、作業効率の比較によってシステムの有効性を確認する。

Fig. 1 This image is final concept of master-slave manipulation system. An operator manipulates a slave arm in work space with Cybemic master system.

2. システム構成と制御手法

本研究で開発する 3D ビジュアルフィードバックシステムは、作業空間の視覚情報を得るためのモーション 3D カメラシステムと、オペレータへの視覚情報の提示および誤認識によるミスを防ぐ、オペレーションアシストシステムと 3D モニタから構成されている。サイバニックマスタシステムおよびスレーブシステムは 3D ビジュアルフィードバックシステムに接続され、制御される構造となっている。図 2 に 3D ビジュアルフィードバックシステムの構成を示す。

2・1 モーション 3D カメラシステム

遠隔地にあるスレーブアームを 3 軸方向に操作するためには、深度情報の認識をどのように行うかが重要な点となる。単純に単眼カメラを用いてスレーブアームの操作を行おうとした場合、以下のような問題点が考えられる。

- ・ 1 台では深度情報が得られないためアングルの異なる複数台のカメラが必要。
- ・ 複数台のカメラ画像をモニタで確認しなければならずミスオペレーションに繋がる。

- ・ 個々のカメラオペレーションが必要となり、作業効率の低下を招いてしまう。

そこで、これらの問題を解決するためにモーション 3D カメラシステムでは、以下のような構成を有するものとする。

- ・ ステレオカメラ（平行／交差法）を用いた視差映像（深度情報）の取得を行う。
- ・ 輻輳角アクティブコントロールによるアームリーチング範囲への適応。
- ・ 3 軸モーションプラットフォームおよびヘッドトラッキングを用いたカメラコントロールを行う。

ステレオカメラによる立体視およびモーションプラットフォームを用いることで、単眼カメラを用いる場合と比較して効率的に作業空間の認識が行えるようになると考えられる。また、人間の腕に近いリーチング範囲のマニピュレーションを行う場合、従来の平行法のみステレオカメラ立体視では輻輳角の影響が大きくなり、立体視できないことが予想される。そこで、本システムでは輻輳角を調節する自由度をカメラに設け、対象物までの距離に応じてアクティブにカメラ輻輳角度を調節する機構を導入した。図 3 に左目用カメラと右目用カメラにおける輻輳角を、注視する物体までの距離に応じて 1 つのアクチュエータで調節するための機構を示す。

カメラから注視物体までの距離が計測されたとき、カメラの輻輳角 $\alpha[\text{rad}]$ は以下の式で表される。

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2a}{d} \quad (1)$$

$a[\text{mm}]$ は注視物体までの距離、 $d[\text{mm}]$ は左右カメラの基線長を表す。人間の目の基線長は一般的な男性で 58[mm]~72[mm] であり、平均は 65[mm] と言われている⁽⁶⁾。そこで、本システムにおけるカメラの基線長は 65[mm] とした。この輻輳角 $\alpha[\text{rad}]$ を用いて、A 点の x , y 座標は以下の式で表される。

$$x = \frac{d}{2} + b \cos \alpha \quad (2)$$

$$y = f - b \sin \alpha \quad (3)$$

$b[\text{mm}]$ および $f[\text{mm}]$ はそれぞれリンク長である。また、この座標は B 点を原点として表したものである。次にアクチュエータの動作角度 $\theta[\text{rad}]$ は以下の式で表される。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 + e^2 - c^2}{2e\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right\} \quad (4)$$

$e[\text{mm}]$ および $c[\text{mm}]$ はそれぞれリンク長である。アクチュエータはリンク E を回転させることでカメラの輻輳角を調節する。

使用したカメラはレンズ前およそ 100[mm] からのピント調節が可能となっている。注視物体に合わせて人間の目と同じように動的に輻輳角を調節することで、腕のリーチング範囲、およそカメラ前 1000[mm] までの近い距離においても立体視を実現する。加えて、このステレオカメラシステムをオペレータのヘッドモーションでコントロールするための 3 軸モーションプラットフォームを開発する。これにより、カメラの姿勢コントロールをハンズフリーで行う。カメラの姿勢コントロールにボタンや特別なコンソールが必要なくなるため、操作時間の削減による作業効率が向上するだけでなく、両手を使う作業の場合においてもメリットは大きい。

図 4 にモーション 3D カメラシステムの外観を示す。ロール、ピッチ、ヨーの 3 軸の自由度を有するモーションプラットフォームの上に、輻輳角を動的に調節可能なステレオカメラシステムが設置される構造とする。ステレオカメラシステムのレンズ面には注視物体までの距離を計測するためのセンサを組み込み、注視物体に対して左右のカメラの輻輳角度を 1[kHz] のサンプリングで調節する。距離計測用センサには Position Sensitive Detector (PSD) センサを使用する。図 5 にシステムの情報の流れを示す。オペレータのヘッドモーションは、オペレータに装着した絶対角度センサを用いて推定し、その情報を 3 軸モーションプラットフォームへ送信する。絶対角度センサと姿勢推定制御用コントロールソフトウェアは Bluetooth で接続する。このソフトウェアはセンサからの情報を元にオペレータの頭の動きや姿勢を推定した後、3 軸モーションプラットフォームに姿勢情報を送信する。こ

の通信には UDP プロトコルを用いている。3 軸モーションプラットフォームは送られてくる姿勢情報に合わせて各軸に取り付けられたアクチュエータを制御し、カメラの姿勢がオペレータの頭の姿勢と同期するようにコントロールする。このアクチュエータにはサーボモータ（苺 PRS-S40M, Pirkus, Inc.）を使用しており最大でおよそ $9.5[\text{rad/s}]$, $4[\text{Nm}]$ での動作が可能となっている。この動作範囲内においてオペレータの頭の姿勢とカメラ姿勢の同期が実現される。

Fig. 2 The configuration of 3D visual feedback system.

Fig. 3 The mechanism of the convergence angle control.

Fig. 4 The overview of motion 3D camera system.

Fig. 5 The information flow of Motion 3D Camera System.

2・2 オペレーションアシストシステム

2・2・1 システム概要

実作業を行う上で作業効率を上げるためには、ミスオペレーションの削減や操作対象への誘導が有効であると考えられる。さらに、作業空間は隔離されている場合が多いため、スレーブアームや操作対象への衝突などによる事故は避けなければならない。これらの問題を解決するためには、オペレータへのフィードバック情報として作業空間の立体映像を提示するだけでなく、3D Computer Graphics (3DCG)による拡張現実感 (AR: Augmented Reality) を利用したオペレーションアシスト情報を提示することも有効であると考えられる。この AR 技術を用いることで、実作業空間に存在しないバーチャルオブジェクトをあたかも現実存在しているオブジェクトのように取り扱うことが可能となる。また、バーチャルオブジェクトであるため隔離されている作業空間にオブジェクトを直接設置するというような必要性が無いように、その場の状況に応じた臨機応変な対応がコンピュータ内で行えることも利点である。そこで本研究では、オペレーションアシストを実現するために、3DCG による AR 技術を導入したオペレーションアシストシステムの開発を目的とする。具体的には以下のような機能を有するソフトウェアを開発する。

- ・カメラシステムからの視差映像データを HDMI1.4a 規格によって取得し、バーチャルオブジェクトをオーバーレイした後、サイドバイサイドの立体映像をリアルタイム生成し、3D 表示デバイスに出力する。
- ・モーション 3D カメラシステムと仮想空間カメラ間におけるモーションの同期を行う。

・ 仮想空間におけるバーチャルオブジェクトと現実空間のスレーブアームにおいて相互物理干渉機能によるインタラクションを実現し、それを用いてオペレーションアシストを行う。

図 6 に開発するオペレーションアシストシステムの構成を示す。オペレーションアシストシステムはモーション 3D カメラシステムから送られてくるカメラ姿勢情報と視差映像を受信する。受信したカメラ姿勢情報を元にバーチャルオブジェクトをレンダリングし、視差映像にオーバーレイした後、3D 表示デバイスへ出力する。オペレータは 3D 表示デバイスに表示される立体映像を見ながらマスタシステムを操作する。同時に、マスタシステムは手先位置やインピーダンス情報などをオペレーションアシストシステムへ送信する。この情報を元に、オペレーションアシストシステム内のバーチャルオブジェクトの位置を同期させ、スレーブシステムへ補正した手先位置情報などを送信する。

Fig. 6 The information flow of Operation Assist System.

2・2・2 相互インタラクション手法

次に、オペレーションアシストシステムにおける相互物理干渉機能によるインタラクション手法を説明する。仮想空間のオブジェクトが現実空間のオブジェクトに直接物理干渉することは不可能である。またその逆も同じである。そこで、本研究ではそのインタラクションを実現するために、現実空間のオブジェクトのコピーを仮想空間のオブジェクトとして作成し、現実空間のオブジェクトと同期をとるという方法を用いた。つまり、あらかじめオペレーションアシストシステムにおける仮想空間内にスレーブアームの CG モデルを配置しておき、現実空間のスレーブアームの動きと同期して仮想空間のスレーブアームオブジェクトを動かすということである。さらに仮想空間内のスレーブアームオブジェクトは仮想空間内のバーチャルオブジェクトに対して衝突判定を行う。両空間のスレーブアームの動きは同期しているため、仮想空間内のスレーブアームオブジェクトがバーチャルオブジェクトに接触すると、現実空間のスレーブアームもあたかも現実空間に存在するオブジェクトに接触したような感触およびビジュアルフィードバックがなされる。このシステムより、オペレータは現実空間の映像にオーバーレイされたバーチャルオブジェクトを見るだけでなく触ることもできるようになる。また、その逆で、仮想空間にあるバーチャルオブジェクトに対して現実空間にあるスレーブアームを用いて操作することも可能となる。この方法を用いることで、現実空間のオブジェクトと仮想空間のオブジェクトがインタラクションできるようになる。

バーチャルオブジェクトにおける衝突判定には Axis Aligned Bounding Box (AABB) 手法⁽⁷⁾を用いた。仮想空間内のバーチャルオブジェクトを Bounding Box で囲うことで衝突の検知を行っている。また、バーチャルオブジェクトに予め質量特性、バネ特性、ダンパ特性を設定しておき、衝突時における挙動をシミュレートする。スレーブアームがバーチャルオブジェクトに接触した場合にはシミュレーションにより得られた手先位置や仮想反力情報などをスレーブシステムとマスタシステムに送信する。マスタシステムはこの情報を元にオペレータへの力覚フィードバックを行う。本システムでは、マスタスレーブ間におけるデータ通信における更新は 200[Hz]の周期で行い、マスタスレーブシステムの制御および相互インタラクションにおける衝突判定も同じ周期にて行う。マスタシステムから送信された手先位置データは、オペレーションアシストシステム内において衝突判定の結果を

反映した後、スレーブシステムへ送信される。また同時に、スレーブシステムから送信された力情報と衝突判定で得られた衝突時の仮想反力情報を加算しマスタシステムへ送信する。衝突判定における仮想反力情報は、バーチャルオブジェクトの力学特性および衝突時の速度から予測される食い込み量を基に算出される 2 物体間の衝突力とする。食い込みが発生している間は衝突力も発生し続ける。この仮想反力情報はマスタシステムの力覚フィードバックだけでなく、外力としてスレーブシステムの仮想インピーダンスモデル⁽⁵⁾に入力することでスレーブアームの手先挙動が決定され、衝突判定の結果を反映したスレーブシステムへの送信データとして利用される。さらに、バーチャルオブジェクトの衝突後の挙動シミュレーションに利用する。一方、スレーブアームが現実空間のオブジェクトと接触した場合は従来通りの制御を行うこととなる。オペレータへの提示画面はシミュレーションデータを基に別スレッドにて 60[fps]で生成する。

2・2・3 オペレーションアシスト手法

相互インタラクション手法を利用し、オペレータへのオペレーションアシストを以下のように行う。

1) 保護領域オブジェクトによる接触、衝突の回避

接触や衝突を避けなければならない保護対象において仮想空間内に保護領域オブジェクトを作成し、その対象を取り囲む。これにより、仮想空間で先に衝突を検知し、現実空間にあるスレーブアームおよび保護対象の破損等を未然に防ぐ。

2) 仮想壁オブジェクトによる操作の誘導

仮想空間内に仮想壁オブジェクトを作成し、仮想壁に区切られた空間においてその仮想壁をなぞる操作により操作対象まで誘導する。

3) バーチャルオブジェクトによる操作シミュレーション

現実空間のオブジェクトを操作する前に、現実空間に投影されたバーチャルオブジェクトによってオペレーションテストを行うことで、オペレータに操作イメージを獲得させる。

3. 実験

開発した 3D ビジュアルフィードバックシステムを用いて動作実験を行った。図 7 に実験環境の外観を示す。実験環境は、スレーブシステム、サイバニックマスタシステム、3D ビジュアルフィードバックシステムおよび操作対象となるオブジェクトを用いて構成した。オペレータはスレーブアームなどが配置されている場所とは異なる別の場所にてサイバニックマスタシステムの操作を行った。3D ビジュアルフィードバックシステムにおけるカメラの位置は、スレーブアームの隣にオペレータの目線と同じくらいになるような配置で固定した。以下に確認項目および実験内容を示す。

3・1 モーション 3D カメラシステムの動作確認

モーション 3D カメラシステムの動作を確認するために以下の動作実験を行った。

1) カメラ姿勢とオペレータの頭部姿勢の同期動作を確認

オペレータの頭部にヘッドモーション検出用の絶対角度センサを取り付ける。センサとコントロール用コンピュータは Bluetooth を用いて接続する。また、コンピュータとモーション 3D カメラシステムは LAN を用いて接続する。オペレータの顔が正面を向いた状態でセンサのキャリブレーションを行った後、自由に頭を動かしてもらい。その時、オペレータの頭の姿勢とカメラの姿勢が同期しているかを確認する。

2) カメラの輻輳角制御を確認

カメラの前に注視用のオブジェクトをかざす。そのとき、カメラの輻輳角が注視用のオブジェクトの距離に応じて変化するかを確認する。

3・2 動的な輻輳角制御の有効性の検証

スレーブアームを操作するにあたり、オペレータが立体映像から深度感覚を得ることは重要である。特に、様々な作業を前提とした場合には、アームリーチング範囲である 1000[mm]以下という至近距離までの広いレンジで立

体視の可否を検証する必要がある。そこで、11 名の実験協力者に開発したシステムを使用してもらい、以下の項目の検証を行った。

1) 立体視可能距離の比較

カメラの輻輳角を平行状態で固定した平行法と、注視するオブジェクトまでの距離に応じて輻輳角を動的に変化させる提案手法を用いた 2 手法を開発したシステムに実装し、それぞれの手法における立体視可能距離の比較を行った。注視するオブジェクトはカメラ前 100[mm]の距離から 1000[mm]の距離まで、100[mm]単位でランダムに移動させ、その位置で立体視が可能かどうかを確認した。なお、実験協力者にはヘッドマウントディスプレイを装着してもらい立体映像を提示した。また、平行法および提案手法の切り替え中やオブジェクトの移動中は立体映像の提示を停止させ、実験協力者にはどちらの手法によるものかが分からないようにした。

2) 立体視の容易さの比較

立体視可能範囲の比較実験と同様の手順で、それぞれの手法における立体視の容易さの比較実験を行った。この実験における立体視の容易さとは、立体視が実現するまでにかかる時間を指すものとする。つまり立体視が実現するまでにかかる時間が短いと感じた方を立体視が容易であるということとする。100[mm]から 1000[mm]の範囲で注視オブジェクトを移動させ、実験協力者にはそれぞれの手法のうち立体視が容易な方へ投票してもらった。

3・3 オペレーションアシストの検証

作業効率を向上させるためには、オペレーションのアシストは重要であると考えられる。特に、ミスオペレーションの削減や衝突によるシステムなどの故障、破損を防ぐことが、作業効率の向上に繋がる。この検証実験におけるオペレータへの提示画面は図 8 のようになっている。左目用の映像と右目用の映像がオペレータの左右の目に提示されるようになっている。オペレータはこの映像をヘッドマウントディスプレイにより立体視しながら、マスタスレーブシステムの操作を行った。開発したシステムを用いてオペレーションアシストが可能かどうか、またオペレーションアシストによる作業効率向上への寄与を検証するために以下の実験を行った。

1) 保護領域を用いた接触・衝突の回避

接触や衝突を避けなければならない保護対象において仮想空間内に保護領域オブジェクトを作成し、その対象を取り囲む。これにより、仮想空間で先に衝突を検知し、現実空間にあるスレーブアームおよび保護対象の破損等を未然に防ぐことが出来るか実験を行った。図 7 のようにスレーブアームの前にテーブルを設置し、その上に保護対象となるオブジェクト 1 とオブジェクト 2 を配置した。またカメラシステムはオペレータの視点と同じくらの位置となるように設置した。その後、オペレーションアシストシステム内において、保護領域オブジェクトの CG モデルを作成し、保護対象となるオブジェクト 1、オブジェクト 2 およびテーブルを内包するように配置した。図 9 に保護領域オブジェクトと保護対象を示す。このとき、現実空間におけるスレーブアームやカメラ、保護対象オブジェクトまでの距離、位置関係などは予め計測し与えられているものとした。

オペレータはオペレーションアシストシステムによって生成される立体映像を、ヘッドマウントディスプレイを用いて確認しながらマスタスレーブシステムを操作した。そして、スレーブアームのエンドエフェクタを用いて保護領域内にアプローチし、現実空間の保護対象オブジェクトとの接触を未然に回避可能かを確認した。

2) 仮想壁を用いた操作誘導

仮想空間内に仮想壁オブジェクトを作成し、仮想壁に区切られた空間においてその仮想壁をなぞる操作により現実空間の他のオブジェクトと接触せずに操作対象までスレーブアームのエンドエフェクタを移動できるか実験を行った。図 10 のように操作対象のオブジェクトまでの移動ルートを囲むように仮想壁オブジェクトを配置する。仮想壁オブジェクト作成時における手法は保護領域を用いた接触・衝突の回避実験と同じ手順をとった。オペレータはマスタスレーブシステムを操作し、仮想壁がなぞれるか、また、仮想壁外の現実空間のオブジェクトに接触せずに操作対象まで移動できるかを確認した。

3) バーチャルオブジェクトによる操作シミュレーション

現実空間に投影された仮想空間内のバーチャルオブジェクトを現実空間のスレーブアームで操作できるか実験を行った。図 11 のようにバーチャルオブジェクトを生成、配置する。オペレータがマスタスレーブシステムを操作することで、このオブジェクトを現実空間にあるスレーブアームのエンドエフェクタを用いて前後左右に移動できるかを確認した。

4) オペレーションアシストの有無による作業効率の比較

保護領域および仮想壁を用いたオペレーションアシストを行う場合と、行わない場合において、単位時間あたりのタスク達成度を用いて作業効率の比較を行った。図 12 のようにスレーブアームの前に設置されたテーブル上面に、オブジェクト 1、オブジェクト 2、オブジェクト A、オブジェクト B、壁、ステージを配置する。オブジェクト A およびオブジェクト B を交互にステージへ移動させるというタスクを設定した。オペレーションアシストを行う場合、オブジェクト 1、オブジェクト 2、テーブルには保護領域オブジェクトを配置、また壁を取り囲むように仮想壁を配置し、接触の回避および操作の誘導を行う。オペレーションアシストを行わない場合、オペレータにはステレオ映像のみの提示を行う。加えて、オブジェクト 1、オブジェクト 2、壁、ステージに接触した場合は、スレーブアームをスタートポジションに移動させた後、再びタスクを遂行することとした。

このタスクにおいて 5 分間の単位時間あたりに移動されたオブジェクト数をカウントしタスク達成度のスコアとした。両手法で得られたスコア間において t 検定を実施し、有意差は有意水準 5[%]で確認する。さらに、タスク終了後に 5 ポイントスケール法によるアンケート調査を行い、各問における有意差は Wilcoxon の順位和検定を用いて有意水準 5[%]で確認する。アンケート項目を以下に示す。

Q1：作業は難しかったか？ Q2：アームの接触は気になったか？ Q3：注意力を要したか？ Q4：アーム周囲のオブジェクトは気になったか？ Q5：安心して作業できなかったか？

なお、十分に操作訓練を積んだ被験者 6 名で実験を行った。

Fig. 7 This image shows the appearance of the tests.

Fig. 8 The screen of operation assist system in the operation.

Fig. 9 This image shows the protection area and objects.

Fig. 10 This image shows the virtual walls and the target object.

Fig. 11 This image shows the virtual object in the real space.

Fig. 12 This image shows the overview of comparative experiments about work efficiency.

4. 結果

4・1 モーション 3D カメラシステムの動作確認

1) カメラ姿勢とオペレータの頭部姿勢の同期動作を確認

図 13 に同期動作の結果を示す. オペレータの頭の姿勢に合わせてカメラの姿勢も同じように変化していることが分かる. これにより, カメラの姿勢コントロールをハンズフリーで行えることが確認できた.

2) カメラの輻輳角制御を確認

図 14 にカメラの輻輳角制御結果を示す. カメラから注視オブジェクト間での距離に合わせて輻輳角度が変化していることが分かる. これにより, 注視オブジェクトまでの距離に応じた動的な輻輳角制御が行えることが確認できた.

Fig. 13 This image shows the result of the operation about the camera posture. The camera posture was moved in synchronization by the operator's head motion.

Fig. 14 The overview of the convergence angle control. When gaze object approach the camera, it is possible to control the convergence angle depending on the distance to the object.

4・2 動的な輻輳角制御の有効性の検証

1) 立体視可能距離の比較

図 15 に立体視可能距離の比較実験結果を示す。図 15 におけるライン *A* は従来の平行法を用いた場合、ライン *B* は提案手法を用いた場合の結果である。この結果より、600[mm]~700[mm]以下の距離において提案手法の方が立体視可能である人数が多いことが分かる。さらに、100[mm]~200[mm]においては平行法では立体視が難しいが提案手法では多くの被験者において可能であることが分かる。これにより、立体視可能距離は提案手法を用いた場合の方が従来の平行法を用いた場合よりも広範囲であることが確認できる。

2) 立体視の容易さの比較

図 16 に立体視の容易さの比較実験結果を示す。図 16 におけるライン *A* は従来の平行法を用いた場合、ライン *B* は提案手法を用いた場合の結果である。実験協力者により立体視の容易さは変化するものの、100[mm]~1000[mm]の全域において従来の平行法より提案手法の方が立体視を容易に行えるということが確認できる。

Fig. 15 This chart shows the number of subjects that can view the stereoscopic. Line *A* is result of normal parallel method and line *B* is result of our cross method based on active control of convergence angle.

Fig. 16 This chart shows the number of subjects that can view the stereoscopic vision faster. Line *A* is result of normal parallel method and line *B* is result of our cross method based on active control of convergence angle.

4・3 オペレーションアシストの検証

1) 保護領域を用いた接触・衝突の回避

図 17 に保護対象オブジェクトの周りに保護領域を設定したときのスレーブアームのエンドエフェクタの軌跡を示す。軌跡は保護領域の周りに沿うような形で形成されていることが分かる。また、保護領域の内部には軌跡は侵入しておらず、保護対象オブジェクトと接触していないことが分かる。つまり、現実空間のスレーブアームのエンドエフェクタは仮想空間のオブジェクトと接触することで、移動の制限を受ける。しかし、現実空間の接触とは違い、仮想空間内の接触シミュレーションが行われているだけなので、スレーブアームには物理的な破損は発生しない。さらに、現実空間の保護オブジェクトは、仮想空間の保護領域オブジェクトによって守られる。この結果より、保護領域は正しく形成されスレーブアームとの接触や衝突を未然に回避できることが確認できる。

2) 仮想壁を用いた操作誘導

図 18 に仮想壁およびなぞり動作時のスレーブアームのエンドエフェクタの軌跡を示す。スレーブアームのエンドエフェクタの軌跡が仮想壁の側面に沿うような形で形成されていることが分かる。また、仮想壁の外側に軌跡は露出しておらず、仮想壁外のオブジェクトとの接触を避けられていることが分かる。さらに、仮想壁内は自由に動け操作対象のオブジェクトまでアプローチできるルートが確認できる。この結果より、仮想壁は正しく形成され、仮想壁外の現実空間のオブジェクトに接触せずに仮想壁に沿いながら操作対象まで移動できることが確認できる。

3) バーチャルオブジェクトによる操作シミュレーション

図 19 に現実空間に投影された仮想空間内のバーチャルオブジェクトを現実空間のスレーブアームで操作した様子を示す。オペレータがマスタスレーブシステムを操作することで、現実空間にあるスレーブアームのエンドエフェクタを移動し、それによって仮想空間にあるバーチャルオブジェクトが前後左右に移動されていることが確認できる。オペレータはこの機能を用いることにより事前に操作イメージを習得できる。

4) オペレーションアシストの有無による作業効率の比較

図 20 にオペレーションアシストを行った場合と行わなかった場合におけるタスクのスコアを示す。アシストを行った場合におけるスコアは平均 12.5 個となったが、行わなかった場合は平均 6.3 個となった。また、アシストを行った場合におけるオブジェクト等への接触回数は 0 回であるのに対し、アシストを行わなかった場合は平均 11.2 回という結果が得られた。両手法におけるスコアを検定した結果、有意水準 5[%]を満たし有意差が認められた。また、アンケート調査における結果を図 21 に示す。値が大きいくほど作業性が良いことを表す。各間における検定の結果、すべてにおいて有意水準 5[%]を満たし有意差が認められた。これらの結果より、オペレーションアシストが作業効率の向上に寄与することが示された。

5. 考察

マスタスレーブシステムを用いたマニピュレーションにおいて、オペレータへのビジュアルフィードバックは重要な要素である。そこで、本研究ではオペレータの能力を最大限発揮させるために、3D ビジュアルフィードバックシステムを開発した。動的な輻輳角制御の有効性の検証実験において、提案手法を用いた場合の方が従来の平行法を用いた場合よりも立体視可能距離が広く、容易に立体視が可能であることが確認できた。この結果より、提案手法の方が立体視可能距離、立体視の容易さという点において従来手法よりも有効であるということが確認できた。従来の平行法において、基線長が 65[mm]ということもあり、カメラに近い領域では特に輻輳角の影響が大きくなるため視差が大きくなりすぎ、立体視が難しくなったものと考えられる。それに対して、提案手法では基線長は 65[mm]であっても輻輳角を調節可能であるため、視差が大きくなる。つまり、人間が近くの見視対象オブジェクトを見る場合と同じように視差映像を得られたためと考えられる。提案手法のような交差法を用いた場合、キーストーン歪みのようなアーチファクトが現れる場合があるが、今回のシステムでは特に画面中央でのみの操作となったため大きな影響は結果に表れなかった。しかし、潜在的なアーチファクトであることには変わらないため、輻輳角度に応じたパースペクティブなどの補正を入れるべきであると考えられる。また、実用上、長時間の作業における疲労度なども今後検証して行く必要がある。

オペレーションアシストの検証実験において、保護領域オブジェクト、仮想壁、バーチャルオブジェクトを用いたオペレーションアシストが行え、作業効率の向上に寄与できることを確認した。保護領域オブジェクトを用

いることで、現実空間におけるスレーブアームやオブジェクトとの接触、衝突を低減させることができるようになり、作業効率が向上したと考えられる。また、スレーブアームは遠隔地や隔離空間にある場合が多く、簡単に修理できない場合が多い。そこで衝突によるスレーブアームの故障が回避できることは非常に重要な意味を持つと考えられる。加えて、仮想壁を用いることで、複雑な作業現場でもスレーブアームが周りのオブジェクトに接触すること無く操作できる。さらに、操作対象の場所までこの壁をなぞりながらスレーブアームを操作することで、オペレータの入力外乱を低減させ操作効率の向上が見込める。比較実験において被験者から「オペレーションアシストが有ることで、安心して作業に集中できる」といったコメントも得られ、オペレーションアシストを用いた安心な作業環境の提供により、物理的なアシストだけでなく精神的側面からのアシストも実現できる可能性が考えられる。また、バーチャルオブジェクトを用いることで、事前にオペレーションのプランニング、シミュレーションが行えるようになるため、オペレータの操作イメージの形成だけではなく、習熟度の向上、訓練にも役立つと期待できる。

AR 技術やプロジェクションマッピングを用い、現実空間のオブジェクトにバーチャルイメージを投影することで操作などのナビゲーションを実現するシステムは、医療現場における手術ナビゲーション⁽⁸⁾やカーナビゲーション（サイバーナビ、PIONEER CORPORATION）、またその他作業ナビゲーション^{(9)~(11)}として実用化が進んでいる。しかし、このような AR 技術を用いた多くのシステムでは視覚情報によるフィードバックは行われるが、力覚へのフィードバックは行われていない。そのため、現実空間に投影されるイメージに触れたとしても空を切ってしまう、物理的なインタラクションにおけるナビゲーションは困難である。本研究において提案したオペレーションアシスト手法およびサイバニックマスタシステムを用いたシステムでは、視覚へのフィードバックだけでなく、視覚と協調した力覚へのフィードバックも行うため、物理的なインタラクションを通したナビゲーションを実現できる。したがって、マスタスレーブシステムにおいて物体との接触が想定されるような作業の場合に、大きなアドバンテージが得られると考えられる。

Fig. 17 This image shows the trajectory of slave arm end effector when the bounding boxes were placed to surround the protected objects.

Fig. 18 This image shows the virtual walls and the trajectory of slave arm end effector in the tracing movement.

Fig. 19 The overview of the virtual object operation.

Fig. 20 This chart shows the score about the operation assist experiments.
“p” is the result of t-test.

Fig. 21 This chart shows the result of the questionnaire about operation assist.

6. 結 語

遠隔地での操作に加え、臨機応変な対応や未知の物体へのアプローチを対象としたとき、アームの状態を制御するためにはオペレータの認知予測能力も重要となる。そこで、オペレータへの的確なビジュアルフィードバックが実現できれば、オペレータの能力を十分にロボットに反映することが可能となり、作業効率向上といったマスタスレーブシステムを用いた遠隔作業における可能性が大きく広がる。本研究では、そのような認知予測能力を発揮できるような的確なビジュアルフィードバックを目指して、現在まで開発してきたサイバニックマスタシステムに搭載するための 3D ビジュアルフィードバックシステムと操作支援システムの開発を行った。実験により、開発したシステムの動作確認および動的な幅角制御における有効性を確認できた。また、仮想空間におけるオブジェクトと現実空間のスレーブアームのインタラクションを用いたオペレーションのアシストを実現し、比較実験を通して作業効率の向上に寄与できることが確認できた。以上の結果より、3D ビジュアルフィードバックシステムの有効性が示された。

本研究で開発したシステムを用い、サイバニックマスタシステムを全身感覚フィードバックインタフェースと捉えることで、仮想空間のオブジェクトと現実空間のオブジェクトの相互インタラクションが実現できた点は非常に有意義であると考えられる。

謝 辞

本研究は、内閣府最先端研究開発支援プログラム「健康長寿社会を支える最先端人支援技術研究プログラム」の支援により行われた。

文 献

- (1) Tachi, S., Sakaki, T., Arai, H., Nishizawa, S., and Pelaez-Polo, J., “Impedance control of a direct-drive manipulator without using force sensors”, *Advanced Robotics*, Vol. 5, No. 2 (1990), pp. 183-205.
- (2) 舘日章, 榊泰輔, “インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (I) —基本原理と伝送遅れへの応用—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 3 (1990), pp. 241-252.
- (3) Tadakuma, R., Asahara, Y., Kajimoto, H., Kawakami, N., and Tachi, S., “Development of Anthropomorphic Multi-D.O.F. Master-Slave Arm for Mutual Telexistence”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, No. 6 (2005), pp. 626-636.
- (4) Yamano, I., Takemura, K., Endo, K., and Maeno, T., “Method for Controlling Master-Slave Robots using Switching and Elastic Elements”, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1717-1722.
- (5) 平松宏介, 山海嘉之, “サイバニックマスタアームによる生体電位可変インピーダンス制御型マニピュレーションシステムの提案”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 784 (2011), pp. 330-239.
- (6) Thompson, P., “Eyes wide apart: Overestimating inter-pupillary distance”, *Perception*, Vol. 31, No. 6 (2002), pp. 651-656.
- (7) Jiménez, P., Thomas, F., and Torras, C., “3D collision detection: a survey”, *Computers and Graphics*, Vol. 25, No. 2 (2001), pp. 269-285.
- (8) Sugimoto, M., Yasuda, H., Koda, K., Suzuki, M., Yamazaki, M., Tezuka, T., Kosugi, C., Higuchi, R., Watayo, Y., Yagawa, Y., Uemura, S., Tsuchiya, H., and Azuma, T., “Image overlay navigation by markerless surface registration in gastrointestinal, hepatobiliary and pancreatic surgery”, *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences*, Vol. 17, No. 5 (2010), pp. 629-636.
- (9) Henderson, S., and Feiner, S., “Augmented Reality in the Psychomotor Phase of a Procedural Task”, *Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (2011), pp. 191-200.
- (10) Henderson, S., and Feiner, S., “Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 10 (2011), pp. 1355-1368.
- (11) Henderson, S., and Feiner, S., “Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret”, *Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (2009), pp. 135-144.