

没入型三次元動力学シミュレータにおける力覚提示の研究

Research of a Force Display in An Immersion-Type 3D Dynamic Simulator

伊藤 寿典[†], 大西 正輝^{††}, 平野 慎也^{†††}, 羅 志偉^{††††}, 加藤 厚生^{†††††}

Toshinori ITO, Masaki ONISHI, Shinya HIRANO, Zhiwei LUO, Atsuo KATO

Abstract : In RIKEN BMC, a human interactive soft robot “RI-MAN” was developed and applied to care of human subjects. However, it’s still dangerous for the human subject to interact with RI-MAN during the experimental period. In such a case, it’s common to eliminate danger by run a simulation beforehand. Conventional simulator couldn’t interact between human subject and robot in a simulator. In this research, an immersion-type 3D dynamic simulator and the force display in an immersion-type 3D dynamic simulator was developed. Force display is mounted on elbow and human subject was made not to be regulated in the simulator. Confirm the effectiveness of the developed force display, the virtual obstacle was placed into the simulator and it experimented on the virtual obstacle by non-contact and contact. These experiments showed that the force display was effective.

1. はじめに

1.1 研究の背景

人と接する環境で力作業するロボットの開発を目的として、独立行政法人理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター（以下理研 BMC と呼ぶ）では、介護補助ロボット“RI-MAN”が開発された[1]。人と接する作業ロボットの開発現場では、ロボットと人の間で大きな力のやりとりが行われる。理研 BMC でも、タスクの検証として、人の抱き上げなどの実験を行っている。しかし、ロボットと人の間で大きな力の相互作用が生じる場合、人にとって危険となることがある。そのような場合には、予めシミュレーションをすることで危険性を排除するのが一般的である。

これまでもロボットの開発を前提としたシミュレータとして、中村らによる OpenHRP[2]や Khatib らによる Dynamic Simulation が提案されている。OpenHRP は、開

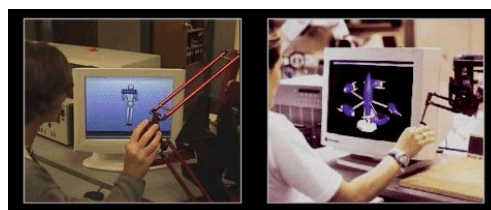


図 1.1 Dynamic Simulation

発者に共通の開発基盤を提供することを主な目的としており、ロボットの開発には GUI ベースの統合化シミュレーション環境を用いる。そのため、OpenHRP は、シミュレータ内に人を登場させることはできない。一方、Dynamic Simulation では、図 1.1 のようなデバイスを用いることで、人がシミュレータ内のロボットに力を与えたり、逆にロボットからの力を感じたりすることができる。

しかし、ディスプレイを見て操作するため、自然な力のやりとりとは言えない。さらには、ロボットの設計という視点で見ると、ディスプレイに映るロボットを見ても、実際のロボットと大きさが異なり、平面的でもあるため、ロボットの形や色に関して主観的評価を得るのが難しいという問題もあった。

そのような問題を解決するために、平成 17 年度から 18 年度にかけて“人と接するロボットの没入型三次元動力学シミュレータの開発”および“人と接するソフトロボットの没入型三次元動力学シミュレータの開発”を行

[†] 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻（豊田市）

^{††} 産業技術総合研究所情報技術研究部門（筑波市）

^{†††} 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール
研究センター運動系システム制御理論研究チーム（名古屋市）

^{††††} 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール
研究センター環境適応ロボットシステム研究チーム（名古屋市）

^{†††††} 愛知工業大学工学部機械学科知能機械工学専攻（豊田市）

った[3][4]。その結果，没入型三次元動力学シミュレータ内で，被験者は映像のロボットに力を与えられるようになった。しかし，動力学演算を行なっていなかったため，厳密な力のやり取りはできていなかった。また，被験者に力覚を提示する装置が無かったため，被験者はシミュレータ内のロボットから力を感じることができなかった。そのため，被験者はロボットに力を与えることで視覚的に変位を観測できるものの，ロボットから力を受けることはできないという，感覚的に矛盾したものとなっていた。

1. 2 従来の研究

従来の力覚提示装置としては，図 1.2 の SPIDAR や，図 1.3 の PHANToM などが開発されている。SPIDAR は佐藤らによって提案されたもので，4 本の糸に加える張力で被験者の指に力を与えることができる。PHANToM は米国 SensAble 社で開発されたもので，指先に 3 軸方向の力を与えることができる。この様な力覚提示装置を没入型三次元動力学シミュレータにおいて使用する場合，SPIDAR は糸を用いるため，被験者の動作を規制してしまう。その結果，被験者の受ける没入感を損ねる恐れがある。また PHANToM は据え置き型であるため，これも被験者の動作を規制してしまう。

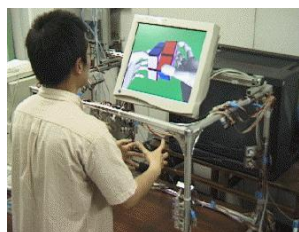


図 1.2 SPIDAR-8



図 1.3 PHANToM Omni

1. 3 研究の目的

本研究では，従来の没入型三次元動力学シミュレータに，三次元動力学演算システムを実装することで，ロボットの各リンクの干渉チェックや位置・姿勢の計算を可能にするとともに，被験者に力覚情報の提示を行うことを目的とした。そのため，三次元動力学演算システムおよび，力覚提示装置の開発を行う。提案するシミュレータの構成は，被験者に視聴覚情報を提示すると同時に，被験者の位置・姿勢測定を行う没入型三次元表示システムと，干渉チェックを含めた動力学演算を行う三次元動力学演算システムからなる。本シミュレータに登場させるロボットは RI-MAN をモデルとし，登場させた RI-MAN を仮想 RI-MAN，被験者を三次元動力学演算シ

ステム内に登場させたものを仮想被験者と呼ぶ。

シミュレータ内で被験者に与える没入感を損なうことなく力覚提示を行うために，装着型の力覚提示装置を開発する。力覚提示装置は，没入型三次元動力学シミュレータにおける力覚提示の基礎研究のために，2 リンク 1 自由度の簡単な機構にする。力覚提示装置は，仮想被験者の肘角度を目標角度として PID 制御する。そして，開発した力覚提示装置について，力覚提示装置の応答性・追従性の実験と，仮想障害物へ非接触・接触の比較実験を行い，力覚提示装置の有効性を検証する。

2. 没入型三次元動力学シミュレータの構成

没入型動力学シミュレータは，図 2.1 に示すように大きく分けて，没入型三次元表示システムと，三次元動力学演算システムで構成される[5]。

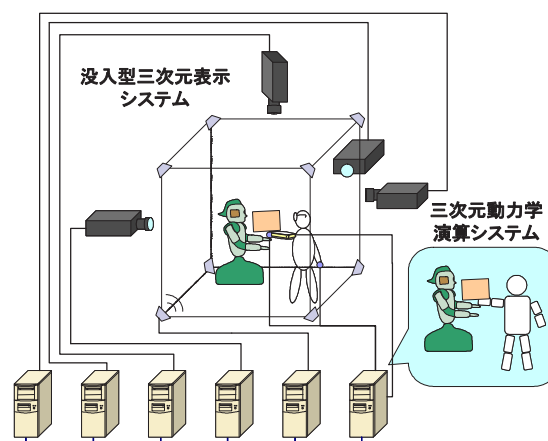


図 2.1 没入型三次元動力学シミュレータ

2. 1 没入型三次元表示システム

被験者に実在感のある原寸大の仮想ロボットを体感させるのが没入型三次元表示システムである。被験者には視覚情報と聴覚情報の提示が行われる。また同時に，仮想被験者を制御するために，被験者の身体に装着した磁気センサによって各部の位置・姿勢測定も行われる。

2. 1. 1 視覚情報の提示

大型スクリーンで被験者を囲み，立体映像を提示する映像表示装置に IPT(Immersive Projection Tecnology)がある。IPT は，被験者を囲むように複数のスクリーンを配置し，プロジェクタによって映像を投影する技術で，高い解像度と広い視野角によって被験者に高い没入感を与えることができる。IPT の代表的なものに，4 面（前右左下面）をスクリーンで囲む CAVE や，5 面，6 面をスク

リーンで囲む CABIN, COSMOS などが提案されている。本研究では、4 面をスクリーンで囲む CAVE を採用している。

従来の IPT 装置は、高価なスーパーコンピュータを用いてシステムを構築していた為、コストが大きいという問題があった。それに対して、本研究では複数台の PC/AT 互換機を用いた分散処理を行うことで比較的安価な 4 面スクリーンをもつ CAVE システムを構築している。使用した PC の CPU は Intel 社の XEON 2GHz で 2GByte のメモリをもつ。また、ビデオカードには 3Dlabs 社の WildcatIII を使用しており、2.4[m] 四方のスクリーンに投影した映像を液晶シャッター眼鏡を通して見ることで、立体視が可能になっている。PC/AT 機の計算能力は大型計算機に劣るが、4 台のマシンで分散処理を行うことで表示遅れの問題への対処が可能であることは確認済みであり、PC の計算・描画能力の発展が期待されることや、保守の容易さ、費用対効果を考慮すると十分使用に耐えるシステムとなっている。本研究では、PC で構成した CAVE (以下、PC-CAVE と呼ぶ) を用いて被験者に視覚情報を与えることで、高い実在感を伴う仮想ロボットの映像を提供する。

2.1.2 聴覚情報の提示

聴覚情報の提示は Lake Technology 社製の Huron を用いて構成する。Huron は複数台の音源をリアルタイムにコントロールし、擬似的な音空間を生成できるパーティクルリアリティ技術である。本研究では 8 台のスピーカ(上四隅と下四隅)で構成されたスピーカアレーを用いて様々な位置からの音を生成することで、被験者に臨場感の高い音響効果を提供する。ロボットから発せられる音の種類としては、音声合成によって作り出したロボットの発話や、モータ音、ロボットの足音・転倒音などの衝突音が挙げられる。また、Huron では室内での反響音なども計算によって再現することができる。

2.1.3 力覚情報の提示

力覚情報の提示には図 2.2 に示す力覚提示装置を用いて、被験者の肘周りに力覚を提示する。力覚提示装置は、2 リンク 1 自由度で被験者の前腕・上腕に添う形で装着する。重量は約 860g (制御用コントローラを含まない) で、被験者の腕形状に合わせたプラスチックガイドを持つことで、良好な装着感が得られる。三次元動力学演算システム (2.2 に後述) で計算される仮想被験者の肘角度を力覚提示装置の目標角度として PID 制御を行う。

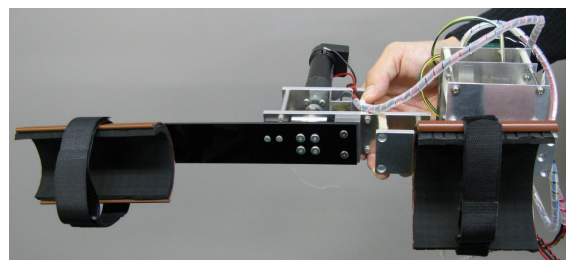


図 2.2 力覚提示装置

2.1.4 被験者の位置・姿勢測定

CAVE 内の被験者の動作を仮想ロボットの動作に反映させるためには、三次元動力学システムに被験者の動きを伝える必要があるため、没入型三次元表示システムでは被験者に情報提示を行うと同時に、被験者の位置・姿勢を計測する。正確なシミュレーションを行うためには、被験者の詳細な位置・姿勢を計測することが望ましいが、センサ数の増加は計測システムの物理的・計算量的な大型化を招き、被験者の受ける没入感を損なうという問題を招く。そのためここでは、使用するセンサを位置と姿勢が計測可能な磁気センサを四つに限定して被験者を計測する。PC-CAVE 内の被験者は、図 2.3 (a) のように頭・両手首・腰に磁気センサを付ける。頭につけたセンサによって目の位置を検出することで PC-CAVE に投影する視覚情報を更新し、両手首と腰につけた三つのセンサを用いて両前腕と胴部の位置・姿勢を測定する。磁気センサには Ascension Technology 社の Flock of Birds を用いており、36Hz で位置・姿勢を測定している。そして、これらの位置・姿勢測定結果は三次元動力学演算システム部へと送信する。



(a) 被験者 (b) 仮想被験者

図 2.3 被験者と仮想被験者

2.1.5 システム内での操作

被験者は図 2.4 の WANDA と呼ばれるコントローラを利用して、装置内での操作を行う。WANDA は、3 つのボタンと、1 つのジョイスティックから構成され、PC-CAVE 中のライブラリ群である CAVELib を用いることで、ボタンとジョイスティックの状態を知ることができる。



図 2.4 WANDA

2.2 三次元動力学演算システム

PC-CAVE 内の被験者をモデル化した仮想被験者と仮想ロボットの動力学を実時間で計算するのが三次元動力学演算システムである。仮想被験者は 2.1.4 で測定した位置・姿勢結果をもとに制御され、仮想ロボットは動作生成プログラムによって生成された関節角度を目標角度として制御される。三次元動力学演算システムは Critical Mass Labs 社 Vortex を用いて開発した。Vortex は、リンク間の衝突干渉チェックを含めた動力学演算を高速に行うためのライブラリ群である。

2.2.1 仮想被験者の制御

仮想ロボットと被験者の力学的な相互作用を行うために、PC-CAVE 内の被験者をモデル化する。被験者はこの仮想被験者を介して仮想空間内の物体に力を加える。被験者とロボットのインタラクションは、図 2.3 (b) のように被験者の上半身に限るものとして、胴部（頭部を含む）・左右上腕・左右前腕の 5 リンクの人間モデルを用意し、それぞれのリンクをボールソケットジョイントで連結した。より正確なシミュレーションを行うためには、人間と同じ自由度を持つモデルを構築し、これを被験者の各関節角度や関節トルクなどをもとに制御する必要があるが、2.1.4 で述べたように用いるセンサ数が限定されているため、ここでは胴部と前腕のみをセンサ情報を基に制御する。つまり、仮想被験者の位置および姿勢は、胴部と前腕の位置・姿勢を制御することで決定される。各部位は前述の被験者に取り付けられた対応する部位の磁気センサに追従するが、その制御則には PD 制御を用いている。また、上腕に関しては胴部と前腕との幾何的な拘束によってその位置と姿勢を計算している。なお、被験者の腕や胴などの長さは既知であるとしてパラメータとして入力する。

2.2.2 仮想ロボットの制御

PC-CAVE 内に登場させる仮想ロボットには RI-MAN

をモデルにする。将来考えているアクチュエータの特性を考慮して仮想ロボットの関節の制御を行うことで、実機を製作する際のアクチュエータの選定支援が行える。更に、各関節のトルクや任意な場所にかかる力などの計測を行うことができること、また、視点を任意の場所に設定できるため、実際のロボットでは計測が困難な情報なども容易に取得することができ、想定するロボットを多角的に評価することが可能となっている。

3. 力覚提示装置の構造と制御

3.1 力覚提示装置のシステム構成

力覚提示装置の制御則は角度制御であり、三次元動力学演算システム (Vortex) で計算される仮想被験者の肘角度を目標角度として制御する。仮想被験者の肘角度は、被験者に装着した磁気センサから得られる位置・姿勢を基に Vortex 内で計算する。計算された肘角度は、PC の EIA-232-D から C-CHIP の UART モジュールへ送信される。C-CHIP では受信した目標角度を DA モジュールから、dsPIC 基板の AD コンバータへと送信する。dsPIC 基板では、受信した目標角度と、力覚提示装置のポテンシオメータから得られる現在角度から PID 制御を行い、モータドライバへの出力を得る。

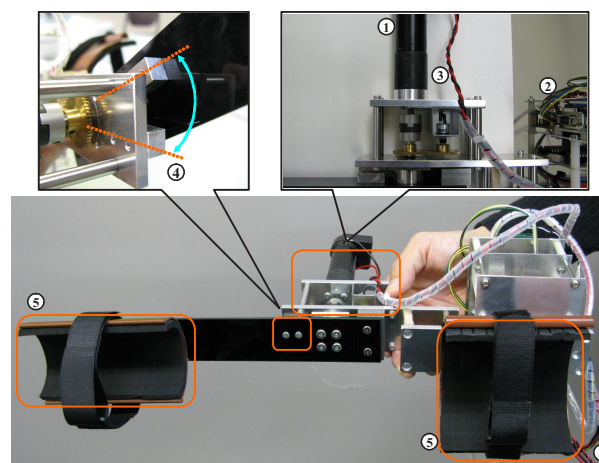


図 3.1 力覚提示装置

3.2 力覚提示装置の構造

力覚提示装置は、2 リンク 1 自由度で被験者の前腕および上腕に装着するものとした。本装置の外観を図 3.1 に、特徴を以下に示す。

- ①20W の DC モータを 1 個使用
- ②PID 制御によるモータ制御
- ③安全確保のための小さいギア比 (10 : 1)

- ④安全確保のために人間の肘関節より動作しないセルフロック機構
- ⑤腕形状に合わせたプラスチックガイドを持つことで良好な装着感
- ⑥有線通信で PC から目標角度を受信

3.3 制御用コントローラ

制御用コントローラとして C-CHIP, dsPIC 基板, MD を使用した. C-CHIP は PC からの目標角度を受信し, dsPIC 基板へ送信を行う. dsPIC 基板では目標角度と現在角度から PID 制御を行い, 電圧値でモータドライバに入力する. モータドライバは入力された電圧によって, モータに供給する電流を決定する.

3.3.1 C-CHIP

C-CHIP は, 愛知工業大学工学部機械学科知能機械工学専攻環境適応ロボット研究室 (旧 工学部電子工学科生体工学研究室) と理研 BMC で共同開発された, 超小型汎用コントローラである [6]. 図 3.2 に外観を示す. C-CHIP は, CPU モジュール, AD 変換モジュール, DA 変換モジュール, UART モジュールなどの機能に分かれた機能分散型のコントローラであり, ユーザーは必要なモジュールのみを選択することが可能である.

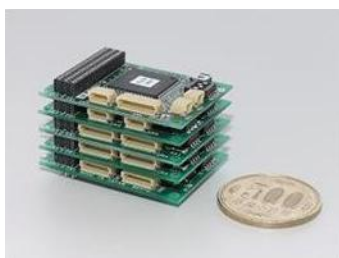


図 3.2 C-CHIP

本研究では, CPU モジュール, DA 変換モジュール, UART モジュールを組み合わせ, PC から dsPIC 基板へ力覚提示装置の目標角度を送信するために用いた. まず, PC の EIA-232-D から送信されてくる目標角度を C-CHIP の UART モジュールで受信する. そして, C-CHIP の H8 モジュールで, 受信した目標角度を角度から電圧へ変換の後, DA 変換モジュールから目標角度に伴った電圧を出力する.

なお, 角度を DA 変換する際の角度から電圧への変換式は以下の通りである.

$$V = (1/26) \times Ang$$

但し, V は電圧 [V], Ang は角度 [deg] を表す.

3.3.2 dsPIC 基板

Microchip 社の dsPIC マイコンを用いて, 力覚提示装置のモータ制御用として本研究用に設計・製作した. dsPIC マイコンはマイクロコントローラ (MCU) とデジタル信号処理に強いデジタルシグナルプロセッサ (DSP) を併せ持ったものである. その中でもモータ制御シリーズである dsPIC30F4011 を使用した. 外観を図 3.4 に, 仕様を表 3.1 に示す. C-CHIP から出力される電圧を AD 変換によって取得し, その電圧を目標角度へ変換する.

なお, 角度を DA 変換する際の角度から電圧への変換式は以下の通りである.

$$Ang = 26 \times V$$

但し, Ang は角度 [deg], V は電圧 [V] を表す.

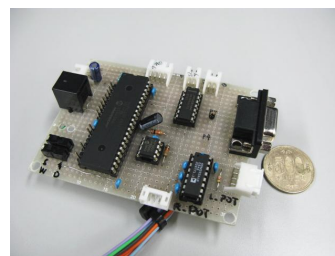


図 3.3 dsPIC 基板

表 3.1 dsPIC 基板の仕様

項目	仕様
制御 MCU	dsPIC30F4011
電源電圧	5[V]
AD コンバータ	4[ch]
DA コンバータ	2[ch]
シリアルインターフェース	1[ch]
外形寸法	95×72×20[mm]

3.3.3 MD

モータドライバには有限会社 図工の Advanced Motor Driver type-S を使用した. Advanced Motor Driver type-S は, 小型・軽量・高効率で 5 種類の入力方式が選択できるモータドライバである. 5 種類のうち, 使用した入力方式のみ説明する. また外観を図 3.4 に示す.

<入力方式: モード A0>

0.0~5.0[V] の入力信号でモータの制御を行う. 2.5[V] を中点とし, 0~2.5[V]/2.5~5.0[V] の指令値でモータの正転逆転を行う. 電流制御では 0.0~5.0[V] の指令値は-10[A]~+10[A]に対応する.

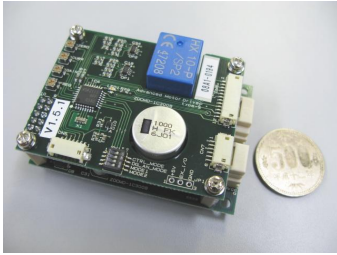


図 3.4 Advanced Motor Driver type-S

3.4 PID 制御

力覚提示装置の制御則は PID 制御を用いた. 図 4.6 のように構成したものが PID 制御の基本形である. PID 調節器の伝達関数 $G_c(s)$ は, 次のようになる.

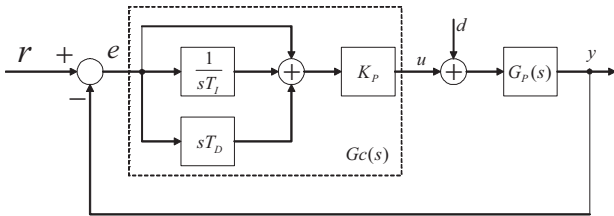


図 3.5 PID 制御の基本形

$$G_c(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$

$$= K_p \left(1 + \frac{1}{sT_I} + T_D s \right)$$

$$K_I \equiv K_p / T_I, \quad K_D \equiv K_p T_D$$

K_p, K_I, K_D は定数で, K_p は比例ゲイン, T_I は積分時間, T_D は微分時間を表す. 力覚提示装置で用いる PID 調節器の定数はチューニングによって求めた.

4. 実験と考察

4.1 力覚提示装置の応答性・追従性

4.1.1 実験方法

PC から振幅 60° , 周期 $2.67[s]$ の正弦波を PID 調節器 (dsPIC 基板) に入力する. そのときの目標角度と測定角度を比較する. C-CHIP の DA ポートから目標角度が電圧に変換され PID 調節器に送られているため, この電圧に変換式を使えば, 目標角度が求まることになる. 測定角度は力覚提示装置に実装されている角度検出用ポテンショメータの電圧を同じように変換式を使って求めることができる. 両者の電圧はオシロスコープで測定した.

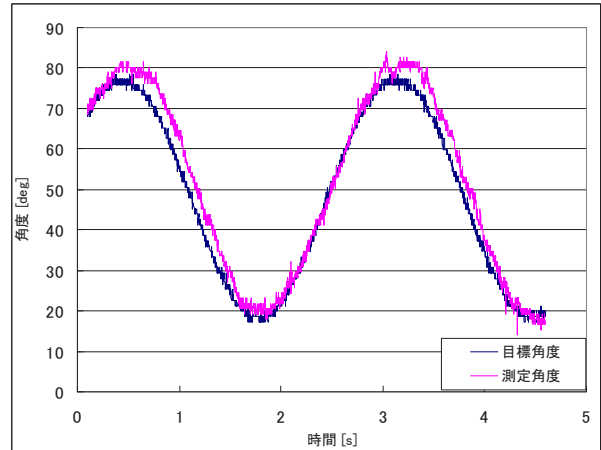


図 4.1 力覚提示装置の応答性・追従性

4.1.2 実験結果

実験結果を図 4.1 に示す. 角度がマイナス方向に変移するとき, 応答性・追従性が悪くなっているが, 応答性は $0.3[s]$ 以内, 追従性についても $3.8[\%]$ 以内に収まっており, 良好な結果と言える.

4.1.3 考察

角度がプラス方向からマイナス方向へ変位するとき, 応答性・追従性に差が出ている. プラス方向からマイナス方向へ変位するときのみ, 応答性・追従性が悪くなるのは不明であるが, 誤差の発生する原因としては PID 調節器のパラメータのチューニング不足や, モータドライバが不感帯を持つためだと考えられる.

4.2 仮想障害物へ非接触・接触の実験

4.2.1 実験方法

仮想被験者の腕が, 仮想障害物と非接触と接触で力覚提示装置の動作を比較する. このときの力覚提示装置は, 仮想被験者の肘角度に追従するように動作させた. この実験では, 被験者が力覚提示装置を装着しても, 図で伝えるのは難しいため, 力覚提示装置を装着しないで動作させた.

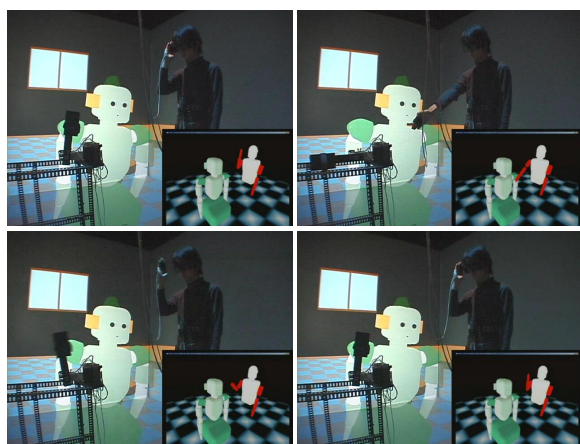
4.2.2 実験結果

シミュレータ検証の結果を図 4.2 に示す.

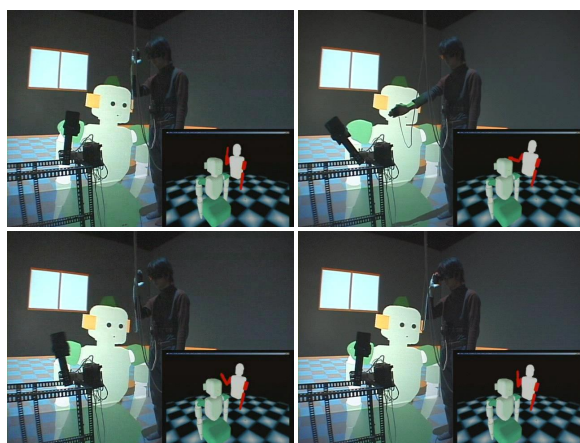
4.2.3 考察

図 4.2(a) の非接触の場合は, 被験者と仮想被験者の肘角度は同じであり, 力覚提示装置も仮想被験者と同じ角度になっている. 図 4.2(b) の接触の場合は, 被験者の肘が真っ直ぐな場合においても, 仮想被験者の腕が仮想障

害物に接触して肘がそれ以上動かなくなると、力覚提示装置もそれ以上動かなくなった。すなわち、力覚提示装置を被験者に装着することで、被験者に力覚情報の提示が可能になることが分かる。



(a) 非接触の場合



(b) 接触の場合

図 4.2 仮想障害物へ非接触・接触の実験

5. まとめ

本研究では、没入型三次元動力学シミュレータにおける力覚提示の研究を行った。その中で、三次元動力学演算システムおよび、力覚提示装置を開発した。そして力覚提示装置の応答性・追従性と仮想障害物へ非接触・接触の実験を通して、有効性を実証した。力覚提示装置の応答性・追従性の実験では、力覚提示装置を正弦波で動作させたときの応答性と追従性を計測し、それぞれ 0.3[s], 3.8[%]となった。これは良好な結果と言える。

仮想障害物へ非接触・接触の実験では、仮想被験者の腕が仮想障害物に接触した場合、仮想被験者の肘がそれ以上動かなくなり、力覚提示装置もそれ以上動かなくな

った。つまり、実空間とシミュレータ間で力のやり取りが可能になったことを実証した。

現段階では、力覚提示装置を被験者に装着して、被験者がどのような力を感じるか、という実験を行っていない。そのため今後の課題としては、シミュレータ内での力覚提示装置の与える力覚を定量的に求めることが挙げられる。

参考文献

- [1] 小田島正, 田原健二, 高木賢太郎, 平野慎也, 大西正輝, 浅野文彦, 加藤陽, 中島弘道, 小林 祐一, 向井 利春, 羅 志偉, 細江 繁幸, “人と接するロボットに求められる機能とは”, 第6回 SICE システムインテグレーション部門 講演会論文集, pp.213-214, Dec. 2005.
- [2] 金広文男, 藤原清司, 梶田秀司, 横井一仁, 金子健二, 比留川博久, 中村仁彦, 山根 克 “ヒューマノイドロボットソフトウェアプラットフォーム OpenHRP”, 日本ロボット学会誌, vol.21, no.7, pp.785-793, Oct. 2003.
- [3] 伊藤寿典, “人と接するロボットの没入型三次元動力学シミュレータの開発”, 愛知工業大学工学部電子工学科卒業論文, Feb. 2006.
- [4] 伊藤寿典, 大西正輝, 小田島正, 羅 志偉, 加藤厚生, “人と接するソフトロボット RI-MAN の没入型三次元動力学シミュレータの開発”, 第7回 SICE システムインテグレーション部門 講演会論文集, pp.1164-1165, Dec. 2006.
- [5] 大西正輝, 小田島正, 羅 志偉, 細江繁幸, “人間と接するロボット開発のための没入型三次元動力学シミュレーション環境”, 電子情報通信学会論文誌(D-II), vol. J88-D-II, no.2, pp.368-377, Feb. 2005.
- [6] 平野慎也, “オープンアーキテクチャによる分散型汎用ロボットコントローラの開発”, 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士論文, Feb. 2002

(受理 平成20年3月19日)